ISSN 0912－0793

アスファルト 237

第64巻 第237号 令和３年12月発行

石油アスファルト需給動向と将来展望について　浅野一哉　1

特集・カーボンニュートラル

アスファルト舗装に関する二酸化炭素排出量について　新田弘之　5

石油産業のカーボンニュートラルへの取組み事例ー出光興産グループの取組みー　吉田雄亮　9

東京都における中温化技術の実用化に向けた検討　橋本喜正　15

アスファルト合材工場におけるCO_2排出量削減の取組み　山下晋仁　21

再生可能資源を利用した舗装材料の開発と実用例　曲　慧・平戸利明　25

アスファルトの一部をクラフトリグニンで置換した“バイオアスファルト混合物”の開発　岡島穂高・青木政樹・辻　志穂・宮脇正一　32

低燃費舗装のライフサイクルCO_2分析について　川上篤史　38

道路空間のカーボンニュートラルに向けた太陽光発電舗装の開発　鍛治哲理・吉中　保　44

特集・最近の技術動向

再生用ポリマー改質アスファルトの変遷と今後の展望　上野貞治　50

電磁誘導加熱によるアスファルト舗装の長寿命化技術に関する検討　岡島穂高・青木政樹・青木　涼・中村聖二　54

アスファルト舗装の層間接着力の新たな評価手法について　竹林宏樹・馬場弘毅　59

<アスファルト舗装技術研究グループ・第69回報告>　65

新時代に向けた舗装材料の海外研究動向～舗装の更なる強靭化とリサイクルを目指して～　66

若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告～舗装点検技術の変遷と発展～　88

<連載>アスファルト・舗装研究 vol.10　福岡大学工学部社会デザイン工学科道路・土質研究室　104

<統計資料>石油アスファルト需給実績　109

ASPHALT
一般社団法人 日本アスファルト協会
THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION

平素は当協会並びに機関紙「アスファルト」をご愛顧賜りまして誠にありがとうございます。
当協会は「アスファルト利用技術の向上に関する事業を行い，アスファルトに関連する産業の健全な発展に寄与する事」を目的とし，その観点から**「投稿原稿」**を募集しております。研究者の皆様，技術者の皆様に限らず幅広い方からの投稿を賜り，アスファルト利用技術の深化を側面から支援して参りたいと存じますので，よろしくお願い申し上げます。
なお，ご投稿頂ける場合は巻末に記載の問い合わせ先までご一報頂ければ幸甚でございます。

一般社団法人日本アスファルト協会

土木学会認定CPDプログラム

第99回　アスファルトゼミナール開催のご案内

一般社団法人　日本アスファルト協会

拝啓　時下ますますご清栄の段、お慶び申し上げます。
当協会主催の「アスファルトゼミナール」を下記要領にて開催致します。
皆様、お誘い合わせの上ご参加くださいます様お願い申し上げます。

敬　具

記

1．主　　催	一般社団法人 日本アスファルト協会
2．協　　賛	一般社団法人 日本道路建設業協会、一般社団法人 日本アスファルト乳剤協会 一般社団法人 日本改質アスファルト協会、一般社団法人 日本アスファルト合材協会
3．後　　援	国土交通省
4．開催月日	2022年２月25日（金）
5．開催形式	オンラインと実開催のハイブリッド形式 【実開催会場】国立オリンピック記念青少年総合センター センター棟417（セミナーホール） 〒151-0052 東京都渋谷区代々木神園町３－１ ☎03－3469－2525 ▲アクセスはこちら

※会場定員は100名（予定）とさせていただきます（先着順）
※新型コロナウイルス感染症の拡大状況によっては、オンライン形式のみとさせて頂く場合がございます。その場合は、実会場参加にお申込み頂いた方宛にメールにてご連絡させていただきます。

6．内　　容	裏面「プログラム」をご覧下さい。
7．申込方法	2021年12月20日（月）より下記ホームページの申し込みフォームにてお申し込み下さい。（申込締め切り：2022年２月18日（金）） **http://www.askyo.jp/zemi/** 折返しE-mailにて参加受講券または視聴URLをお送りいたします。 ※実会場参加のお申込みは、定員になり次第終了させていただきます ▲申し込みフォームはこちら
8．申込問合	キュービシステム株式会社　アスゼミ担当　村井まで ☎03－5577－7199　　E-mail: asphalt@qbs.co.jp
9．内容問合	コスモ石油マーケティング株式会社　販売部　伊藤まで　☎03－3798－3131
10．参加費	無料
11．参加人数	会場（100名予定）／オンライン（300名）
12．CPD認定	公益社団法人土木学会の継続教育（CPD）プログラムとして認定されました。 認定番号　JSCE21-1490　5.9単位 ※オンライン参加者の単位取得には感想文の提出が必須となりますのでご注意ください。
13．その他	当日の参加受付はできませんので、必ず上記方法でお申し込み下さい。

プログラム

ー舗装に関わるカーボンニュートラルの取組みー

2022年2月25日（金）　10：00～17：15　　（敬称略）

1．挨拶　10：00～10：05
一般社団法人日本アスファルト協会　代表理事　三　船　善　和

2．挨拶　10：05～10：10
一般社団法人日本アスファルト協会
舗装技術分科会　委員長　三　浦　真　紀

3．アスファルトの供給体制について　10：10～10：40
一般社団法人日本アスファルト協会　伊　藤　健太郎

4．道路行政をめぐる最近の話題について　10：40～11：25
国土交通省道路局企画課　道路経済調査室長　渡　邊　良　一

5．道路行政におけるカーボンニュートラル施策　11：25～12：00
国土交通省道路局環境安全・防災課　交通安全政策分析官　真　田　晃　宏

（休憩　12：00～13：00）

6．走行中のワイヤレス給電に対応したEV開発について　13：00～13：40
東京大学　大学院新領域創成科学研究科
先般エネルギー工学専攻教授　藤　本　博　志

7．アスファルトのリサイクル技術　13：40～14：20
国立研究開発法人土木研究所
先端材料資源研究センター　上席研究員　新　田　弘　之

8．アスファルト混合物製造時におけるCO_2削減策　14：20～15：00
一般社団法人日本道路建設業協会　委員　坂　本　康　文

（休憩　15：00～15：15）

9．植物由来の舗装技術　15：15～15：55
東亜道路工業株式会社　技術部技術研究所　主任研究員　曲　　慧

10. 低炭素舗装の実現に貢献するアスファルト乳剤技術　15：55～16：35
日本アスファルト乳剤協会技術委員　永　原　　篤

11. 脱炭素社会に寄与するポリマー改質アスファルトについて　16：35～17：15
日本改質アスファルト協会技術委員　鷹　本　丈　裕

※内容については変更の可能性がございます

石油アスファルト需給動向と将来展望について

(Supply and Demand Trends and Future Outlook for Petroleum Asphalt)

出光興産株式会社　機能舗装材事業部　営業企画課　浅野一哉

近年，石油製品を取り巻く環境は，新型コロナウイルスの感染拡大による需要減やカーボンニュートラル宣言など，目まぐるしく変化している。今回，これらがアスファルトの需給に及ぼす影響・可能性について言及させていただきたい。

1．石油産業を取り巻く環境

1.1　原油価格動向

原油価格が石油産業のコストに与える影響は非常に大きい。アスファルトも原油精製による生産品であることからアスファルトに携わる者は原油価格動向を注視する必要がある。ここでは2019年から足元までの原油価格動向について説明を行う。

原油価格を左右する要因は大きく３つに分けられる。地政学リスク，経済・金融環境，そして需給バランスである。この中でもとりわけ重要な要素となるのは需給バランスであり，原油価格推移は需給バランスから読み解く事が出来る。**表－１**に世界の原油需給バランス見通しを示した。この需給バランスに大きな影響を与えているのは新型コロナウイルスの感染拡大とOPEC+（OPEC加盟国と非加盟の主要産油国で構成）の協調減産だ。これらを順に説明する。

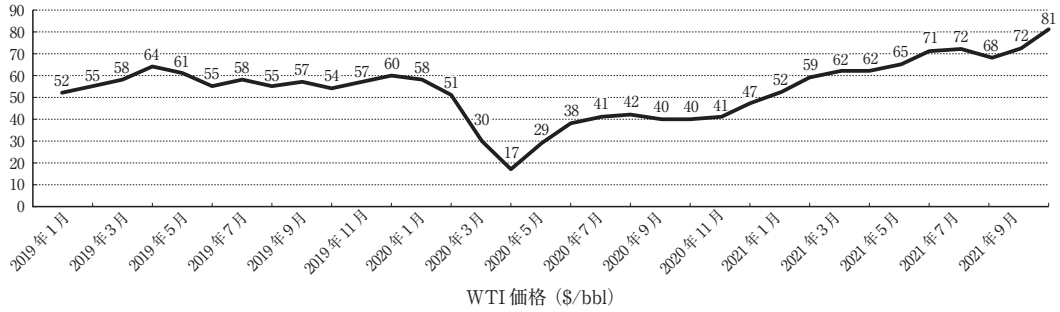
2020年は新型コロナウイルスの拡大と，世界経済の低迷により消費活動が抑えられ，原油需要が抑えられる結果となった。**表－１**をみると2020年は前年から880万BD需要が落ちた一方で，供給の削減は600万BDとなり供給が需要を大きく上回り，原油価格を押し下げる事となった。2021年は，新型コロナワクチン普及による経済回復の影響もあり，需要は2020年から530万BDまで回復する一方で，供給はOPEC+の協調減産による影響もあり需要を賄うほど増えていない。そのため，2021年は需要が供給を上回り，原油価格を押し上げる事となった。

ここでWTI原油価格を**図－１**に示す。供給過剰と

表－１　世界の原油需給バランス見通し

単位：百万BD		19年	20年	21年1Q	21年2Q	21年3Q	21年4Q	21年	22年
世界需要		99.7	90.9	93.4	95.1	97.2	98.8	96.2	99.4
世界供給	非OPEC	65.1	63.1	61.9	63.5	64.1	65.3	63.7	66.7
	OPEC	34.9	30.9	30.4	30.8	32.8	33.6	32.0	35.3
	供給計	100.0	94.0	92.3	94.3	96.9	98.9	95.7	102.0
需給バランス（供給-需要）		0.3	3.1	**-1.1**	**-0.8**	**-0.3**	0.1	**-0.5**	2.6

※国際エネルギー機関（IEA）の2021年９月報を基に当社作成



※各種公表データを基に当社作成

図－１　WTI原油価格

なった2020年４月は更に価格が下落し，４月20日にはWTI原油先物において史上初となるマイナス価格が観測されるという事態にもなった。その後OPEC+は最大で970万BDの協調減産で合意し，供給過剰状態が収まり40ドル前後で推移すると，2020年10月以降は需給バランスのタイト感が浸透することにより再び原油価格が上昇に転じている。この傾向は2021年以降も続いている。

1.2　国内石油製品の需給

石油連盟発行の『今日の石油産業2020』によると，石油製品需要はピークの1999年度に比べ2019年度は34%減となっている。また，経済産業省の調査会がまとめた2025年度までの石油製品需要は，2019年度から更に10%減になる見通しとなっている。これらは少子高齢化や人口減といった社会構造的な変化に加え，カーボンニュートラルによる電力や産業部門での脱炭素化の加速や電気自動車や燃料電池自動車の普及によるガソリン自動車の減少といった影響によって起こっており，今後も減少傾向が続くと想定される。

石油製品需要が減れば，当然ながら石油メーカーは原油処理量を減少させる，つまりは石油製品の製造量を絞ることになる。そして一定量以上製品需要が減れば，製油所の安定的な稼働が困難となり，製造拠点を集約する必要が出てくる。こういった流れを促したのが2009年７月に成立したエネルギー供給構造高度化法（以下,「高度化法」）である。高度化法はエネルギー供給事業者による①非化石エネルギー源の利用②化石エネルギー原料の有効な利用，の２点を目的としている。現在，第１～３次告示までなされており，それぞれの内容は以下のとおりである。

●第１次告示（2010. 4～2014. 3）
　常圧蒸留装置に対する重質油分解装置の装備率を10%（2010年当時)から13%に引き上げるよう義務付け。

●第２次告示（2014. 4～2017. 3）
　第１次勧告より分解装置の対象を広げ45%（2014年３月末）から50%（2017年３月末）まで引き上げることを義務付け。

●第３次告示（2017. 4～2022. 3）
　重質油分解装置の有効活用，重質油分解能力の向上を促すため，2017～2021年度の５年間で，同装置への減圧残渣油の通油量の増加を図る。

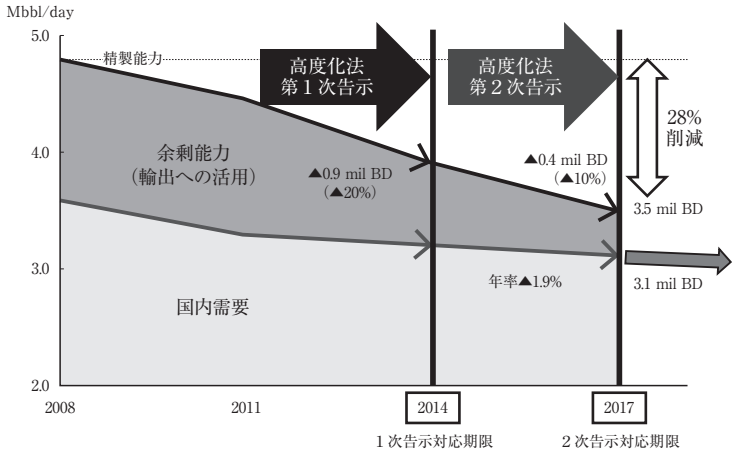
第１，２次告示では分解装置の装備率引き上げが求められた事で，事実上設備の廃棄が求められたのと同義であった。**図－２**に示すとおり，結果として第１次告示への対応では常圧蒸留装置能力の20%にあたる90万BDが削減され，更に第２次告示への対応では10%にあたる40万BDが削減された。これらによって2008年比で2017年の原油精製能力は28%減の350万BDまで削減された。このようにして石油メーカーは製油所の稼働率を向上させ，石油製品の安定供給に努めた。

しかしながら2020年は新型コロナウイルスによる需要減，特にジェット燃料の需要の落ち込みが激しく，石油メーカーは需要が減少したジェット燃料の生産に合わせた製油所の稼働を余儀なくされた。その結果，**図－３**に示すとおり2020年以降の国内の製油所での原油処理量は新型コロナウイルス前の2019年度を比較して圧倒的な低水準となっている。2021年度は2020年度ほどの処理量の低下とはなっていないが，2019年度比約79%と低い水準となっている。次の章ではその中でも特にアスファルトの需給にスポットを当てる事とする。

２．アスファルトの供給体制

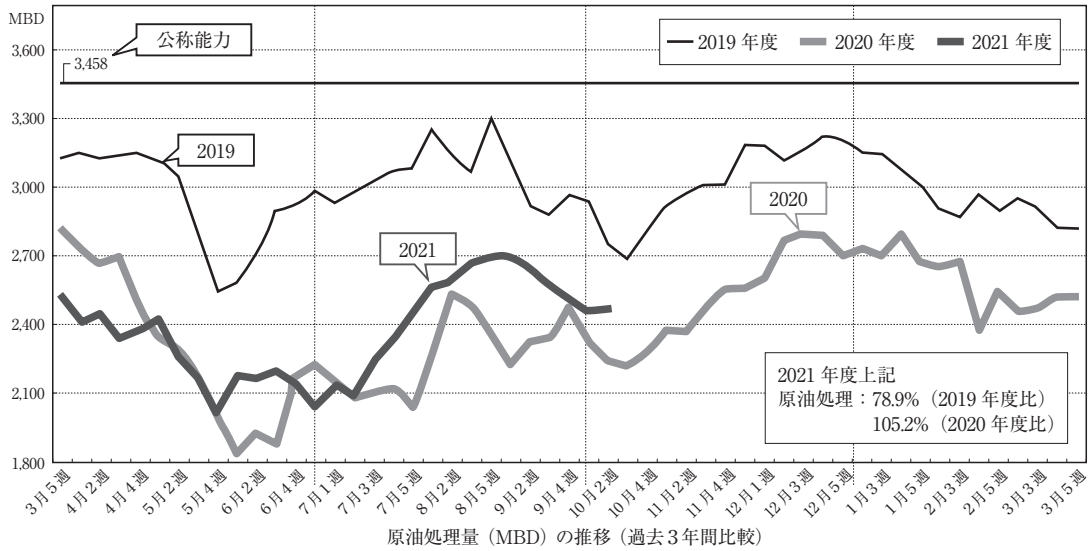
2.1　国内におけるアスファルトの需要

道路舗装に用いられるストレートアスファルトは主にアスファルト合材の原料として使用されている。**図－４**の左側に1990年以降の合材需要，右側にアス



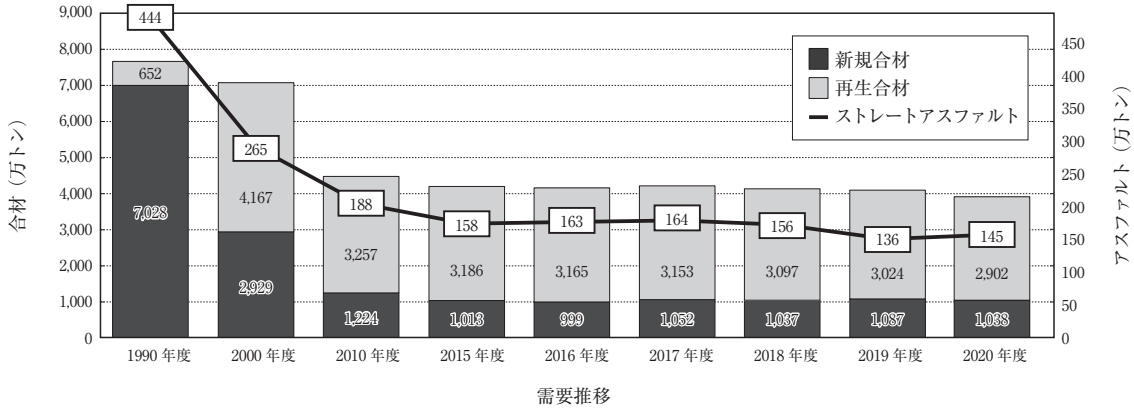
※各種公表データを基に当社作成

図－２　第１次・第２次告示対応における常圧蒸留装置能力削減量



※石連週報を基に当社作成

図－３　国内の原油処理量と製油所稼働率



出典：一般社団法人アスファルト合材協会HP，他各種資料を元に当社作成

図－４　合材需要とアスファルト需要の推移

ファルト需要を示す。1990年度に7,700万トンあった合材製造量は2020年度には3,900万トンと約半分となっている。一方でアスファルトの需要は1990年度比で1/3となっており合材よりも減少幅が大きい。これは環境負荷低減などを目的とした再生合材の活用が進んでいる事に起因している。つまり再生骨材に付着しているアスファルトを有効活用することで新アスファルトの使用量を低減出来ているわけである。1990年度では全合材における再生合材の比率は８％程度であったが，2020年度では74%に上っており，ここ30年で飛躍的に再生合材の使用割合が増えている。

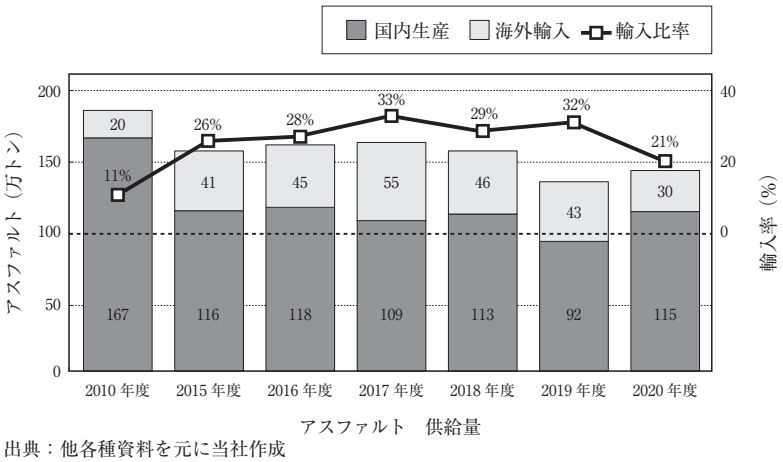
今後のアスファルト需要としては，既に十分活用が進んでいる再生合材の割合は極端に増える事は無いものの，国土交通省の発表している道路関係予算は増加傾向にあり，底堅い需要が想定される。また，2020年度に閣議決定された「防災・減災、国土強靱化のための５か年加速化対策」により，2025年度までは特に底堅い需要が想定される。

2.2　今後のアスファルト供給環境

2020年度の国内ストレートアスファルトの需要は2019年度比107%の約145万トンであった。先に述べたとおり，国内の2020年度の原油処理量は2019年度比79%と低稼働の中，**図－５**に示すとおり国内生産量は2019年度比125%と国内石油メーカーはアスファル

トの安定供給に努めてきた。国内生産量が需要以上に増えた要因としては，輸入量が減ったことである。ここ数年日本は国内需要の約30％を韓国からの輸入に頼っていたが，2020年度は輸入量が減り約20％となった。

韓国からの輸入が減った背景としては，新型コロナウイルスの拡大による原油処理量の減少，IMO規制対応に伴う大型の重質油分解装置導入および需要の多い中国等への輸出シフトが考えられる。新型コロナウイルスの影響に関しては国内石油製品需要で触れているため割愛させていただき，IMO規制および東アジアのアスファルト需給に関して，触れさせていただきたい。



出典：他各種資料を元に当社作成

図－５　アスファルト供給量の推移

IMO規制は国際海事機関が決定した，海洋汚染防止を目的に船舶用に利用されている燃料油の硫黄分濃度上限を3.5％から0.5％に引き下げるものである。これによりHSC重油とHSA重油が規制対象となり，2020年１月１日以降はIMO規制対応油を使用しなければならなくなっている。IMO対応油はHSC重油に比べストアス留分が低いため，IMO規制はアスファルト生産量を増やす要因と捉えがちだが，必ずしもそうとは限らない。何故なら１章で説明した高度化法の第3次告示により分解装置への通油量を増やす事が求められており，これはアスファルト生産量が減る要因となるからである。

韓国では，上記IMO規制に対応するため大型の重質油分解装置が導入された。韓国大手石油メーカーが2020年より稼働開始した分解装置は年間200万KL以上もの通油量を誇り，相当量のアスファルト留分が処理されているものと思われる。そのため，韓国のアスファルト生産量は2019年度と比較して減少していると考えられる。また，韓国は日本以外にも中国・オーストラリア等へアスファルトを輸出しており，需要が旺盛で販売価格の高い中国等へシフトしていることも考えられる。そのため，アスファルトに関しても，今後は原油価格動向以外にも，東アジアを中心とした国際市況の影響も考慮していく必要性が出てくる可能性がある。なお，今後の石油製品需要動向や国際市況・国内市況の価格差等により変化していくため引き続き注視していく必要がある。

以上から国内における2021年の需給は，需要は底堅く見込まれるものの供給においては国内生産減少および韓国からの輸入量減少の可能性があり，2020年同様引き続き供給ショートとなる事が見込まれる。しかしながらアスファルトは交通インフラを支える極めて重要な資材であり，生産・流通・消費のそれぞれの立場のものが安定供給という使命に向け一致団結していく必要がある。特に，既に流通ではアスファルトローリーを所有する運送会社の廃業が散見されているが，事業継続性が無ければ安定供給を全うする事が非常に困難であることは明白である。今後更にそれぞれが継続性のある事業となるよう健全な経営基盤を確保するとともに労働環境の改善を図り，設備のメンテナンスや人材の確保に力を入れていく必要がある。

３．おわりに

新型コロナウイルスにより人々の暮らしは様変わりしており，石油産業においても製油所稼働率が激減するなど大きな変化が起きている。しかしながら今後も道路舗装の需要が無くなる事はなく，暮らしや日本の経済を支える道路舗装用材料としてアスファルト合材や舗装用アスファルトの重要性は不変である。こういった変化の局面だからこそ，業界関係者はお互いの立場を理解しつつ相互に協力し合い，アスファルトの安定供給体制構築に取り組んでいきたい。

また最後に，我々石油メーカーは今後もアスファルトの安定供給という社会的責任および役割を全うし，日本の経済発展に貢献していきたい。

アスファルト舗装に関する二酸化炭素排出量について

(Carbon Dioxide Emissions from Asphalt Pavement)

新　田　弘　之*

我が国は，2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする，2050年カーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言している。舗装分野においても，当然カーボンニュートラルに向けた取り組みを急いで進める必要がある。この検討を進めるにあたり，アスファルト舗装に関する二酸化炭素排出について正しい知識が必要である。しかし，二酸化炭素排出は直接的な排出だけでなく，間接的な排出もあり，正しい排出量は感覚ではわかりにくい。そこで，ここでは，アスファルト舗装と二酸化炭素の排出の関係について試算した例などを紹介し，現在の状況を理解するとともに，試算結果に基づいてカーボンニュートラルに向けた技術の方向性などについて考察する。

1．はじめに

我が国は，2020年10月に，2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする，すなわち2050年カーボンニュートラル，脱炭素社会の実現を目指すことを宣言している。この中間的目標として，2030年度に温室効果ガスを2013年度から46％削減することを目指すことも表明している。これらは非常に高い目標であり，現在，目標の達成のために様々な分野で対応策の検討が進められている。

舗装分野においても，当然カーボンニュートラルに向けた取り組みを急いで進める必要がある。特に，アスファルト舗装は，加熱したアスファルト混合物を施工しているところを街中で見たり，またアスファルトが石油由来であることから，一般の方から二酸化炭素（以下，CO_2）を多く排出するイメージを持たれることもある。このため，アスファルト舗装に関するCO_2排出について正しい知識が必要である。しかし，CO_2排出は直接的な排出だけでなく，間接的な排出もあり，正しい排出量はなかなか感覚ではわからない。一方，これまでに舗装のCO_2排出量について，計算方法や原単位の例[1]が示されており，計算に利用できる統計データも公表され，目的に応じて試算もできるようになっている。

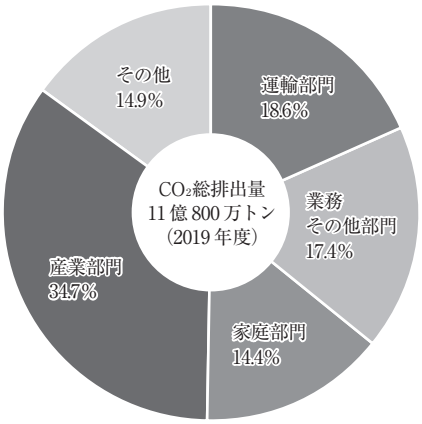
そこで，ここでは，アスファルト舗装とCO_2の排出の関係について試算した例などを紹介し，現在の状況を理解するとともに，試算結果に基づいてカーボンニュートラルに向けた技術の方向性などについて考察する。

2．日本のCO_2排出量と道路分野での取組み

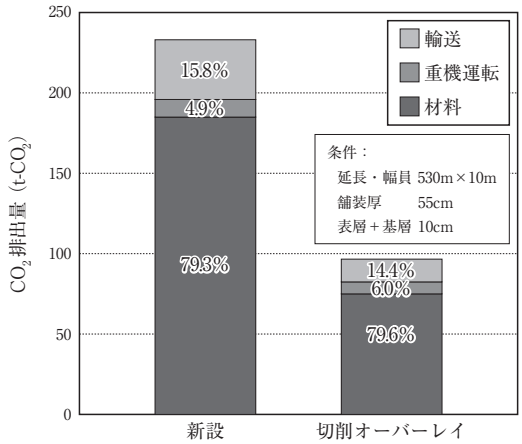
日本の2019年度の温室効果ガスの総排出量はCO_2換算で12億1300万トン（CO_2のみの排出量は11億800万トン）であり，これは2013年度の総排出量の14億1000万トンと比べて14％の減少となっている[2]。また，2019年度のCO_2排出の内訳につては国土交通省の資料[3,4]より**図－1**に示すとおりとなっている。18.6％が運輸部門からの排出となっており，その86％の1億7700万t-CO_2／年が自動車に起因している。また，道路照明などの電力消費で約140万t-CO_2／年，生コンクリート製造に関する排出で約180万t-CO_2／年，道路工事にかかる排出が約300万t-CO_2／年と試算されている。

このため，国土交通省からは，カーボンニュートラルに向けた道路分野の取組として，電動車普及に向けた環境整備やスマート交通・グリーン物流の推進，道路インフラの省エネ化・グリーン化，グリーンインフラの整備などが示されている[3,4]。

*にった　ひろゆき　国立研究開発法人　土木研究所　先端材料資源研究センター　上席研究員



図－1　二酸化炭素排出の内訳（2019年度）[4)]



図－2　アスファルト舗装工事に関するCO_2排出量の試算例
（文献1）のデータを基に作図）

3．アスファルト舗装工事に関するCO_2排出

舗装に関するCO_2排出量については，日本道路協会より「舗装の環境負荷低減に関するガイドブック」[1)]が出版されており，ここに計算方法が示されていくつかの試算例が掲載されている。延長530m，幅員10m，舗装厚55㎝，アスコン層10㎝のアスファルト舗装道路を新設した場合と，10㎝を切削オーバーレイした場合の二酸化炭素排出量を**図－2**に示す。ここでの二酸化炭素排出量は，舗装材料の製造や道路工事から直接的に排出されるものに加えて，原料を採掘して加工し，運搬する際の排出や，その際の事務所等での排出など，間接的な排出も含めたものとなっている。

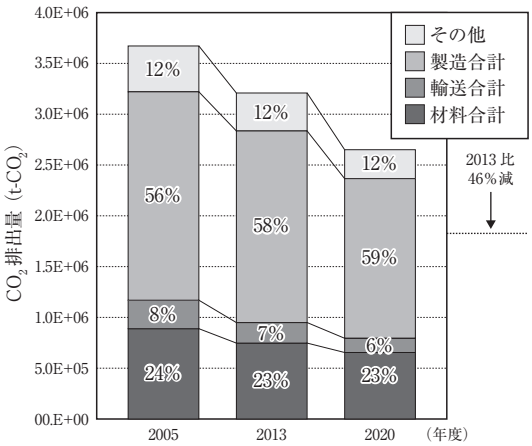
新設した場合，延長530mで約230tのCO_2が排出されると試算されている。また，切削オーバーレイで10㎝のアスコン層を打換えた場合，約100tのCO_2排出となる。図では資機材の輸送，現場での重機の運転，材料製造に係るCO_2排出を分けているが，新設でも切削オーバーレイでも約80%を材料関係からのCO_2排出が占めているのが分かる。したがって，アスファルト舗装工事に関するCO_2排出量を抑えるには材料関連の排出を抑える方法を開発すると効果的であるといえる。

4．アスファルト混合物製造に関するCO_2排出

4.1　アスファルト混合物製造に関する総CO_2排出量

アスファルト混合物製造に関するCO_2排出量については，（一社）日本アスファルト合材協会より，各材料の年間使用量[5)]や各プラントからの製造に関するCO_2排出量[6)]が公表されていることから，これらのデータと「舗装の環境負荷低減に関するガイドブック」[1)]の材料のCO_2排出原単位を用いることで概ね推計できる。2005～2020年度の排出量を推計した結果を**図－3**に示す。2005年度に約360万t-CO_2の排出量であったが，2020年度では約270万t-CO_2と15年で約25%減少している。減少の要因としては，生産量が減少したことの影響が最も大きい。

2050カーボンニュートラルに向けて，2030年には2013年の46%減を目標としていることから，**図－3**には46%（約170万t-CO_2）減の値を点線で示した。もしも製造量がこの15年（2005年から2020年）と同じように減少していくと仮定すると，2030年は単純計算で225万t-CO_2程度の排出量となり，これは2013年度



図－3　アスファルト混合物製造に関する総CO_2排出量
（文献1，5，6）のデータ等を基に試算）

と比較して28%減程度であり，46%減の目標を大幅に下回ると予想される。したがって，生産量減少だけのCO_2排出削減では厳しい状況であり，新たなCO_2削減技術に取り組まなければならないと考えられる。

図－3では排出の内訳をアスファルト合材プラントでの製造に伴う排出を製造合計，骨材やアスファルトの輸送に伴う排出を輸送合計，骨材やアスファルトの原料採掘から製造に伴う排出を材料合計，として示している。年度によって排出量は異なるが，それぞれの割合は大きな変動はなく，プラントでの製造に伴うCO_2排出量が6割近くを占めていることが分かる。したがって，製造に伴うCO_2排出を抑える技術を開発していくことが最も効果的ということが分かる。

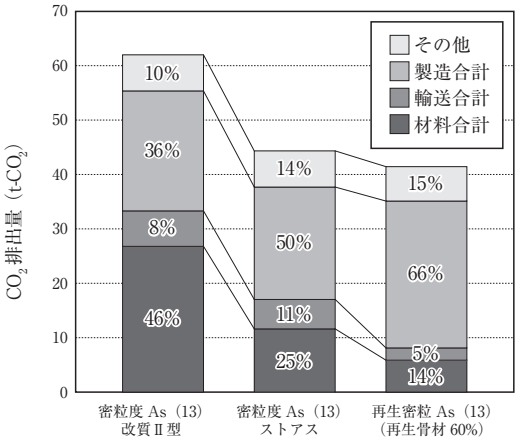
4.2　新規アスファルト混合物，再生アスファルト混合物のCO_2排出量

⑴　アスファルト混合物種類による排出量の違い

アスファルト混合物の種類によるCO_2排出量の違いについて**図－4**に示す。ここではすべて密粒度アスファルト混合物（以下，密粒度As）とし，新規アスファルト混合物として改質アスファルトⅡ型（以下，改質Ⅱ型）およびストレートアスファルト（以下，ストアス）を用いたもの，それに再生アスファルト混合物（以下，再生As）で，再生骨材配合率60%のものについて示す。

まず，密粒度As（ストアス）と再生密粒Asを比較すると，再生密粒Asの方が約10%排出量が少なくなっている。内訳をみると再生密粒Asは製造によるCO_2排出量が66%と非常に高い割合を示しているが，材料によるCO_2排出は14%と低い。これは，再生では，骨材ドライヤが２機（新規用と再生用）ついた併設加熱型のプラントについて計算していることや，再生混合物の方が加熱温度が少し高いことによるものと考えられる。また、材料由来のCO_2排出が少なくなっているのは，原料であるアスファルト塊が比較的プラントの近くで発生し，輸送距離が新規骨材と比べて短いこと，破砕のエネルギーも新規骨材と比べて小さいことなどが要因と考えられる。したがって，CO_2排出抑制に再生を進めることは役立つものと考えられる。しかし，すでに再生アスファルト混合物が全アスファルト混合物生産の75%を超える状況にあり，これ以上再生アスファルト混合物の割合を増やすことは難しいものと考えられる。再生では製造に関するCO_2排出割合が高いことから，製造方法のより一層の工夫が必要と考えられる。

また，改質Ⅱ型とストアスを比較すると改質Ⅱ型はストアスより4割程度排出量が多くなっている。これ



図－4　アスファルト混合物種類によるCO_2排出量の違い（800t製造当たり）
（文献１）のデータを基に一部独自の計算を加えて作図）

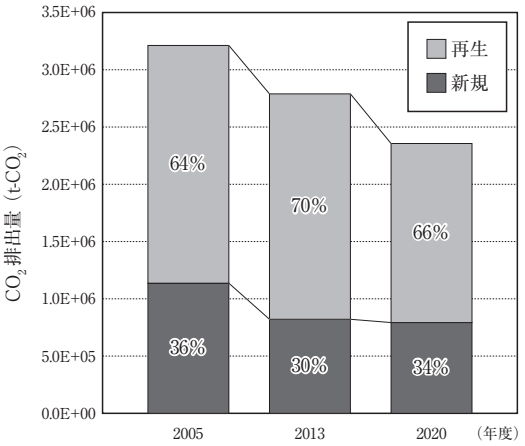
はすべて改質アスファルトとストレートアスファルトの差によるもので，改質アスファルトに添加する改質剤のCO_2排出原単位が大きいことによる。新規アスファルト混合物の出荷割合は25%程度であることから，全体に対しての影響は再生ほどではないものの，新規アスファルト混合物のほとんどが改質アスファルトを使用していることから，CO_2排出量削減には，よりCO_2排出量が少ない改質剤の検討も必要であると考えられる。

⑵　生産量を考慮した総CO_2排出量

アスファルト混合物の種類による排出量は新規よりも再生の方が少ないものの，それぞれの生産量は違うので，生産量を考慮したCO_2の総排出量を試算した結果を**図－5**に示す。年度によって排出量が違うが，概ね再生が7割，新規が3割程度を占めているのがわかる。再生混合物の割合が年々上昇してきていることを考えると，再生と新規の比率が年度によって大きな変動がないのは，新規混合物はより改質アスファルトの使用割合が上昇してきていることが影響していると考えられる。したがって，⑴で述べたとおり，再生混合物の製造におけるCO_2排出抑制対策の推進とCO_2排出原単位が小さい改質剤の選択などが総CO_2排出量削減に効果的と考えられる。

なお，試算は文献１）のアスファルト混合物のCO_2排出原単位と文献５）のアスファルト混合物製造量を用いて行った。文献１）にはすべての混合物種が網羅されていないので，必要に応じて独自に原単位を作成

した。また，製造に伴うCO_2排出量は，プラント設備の違いや材料の状態，季節などにより異なるが，あくまでも文献１）で例示されている排出量を用いた。さらに，常温合材については参考になる計算方法が見当たらなかったため，計算から除外した。このため，**図－３**で示した総CO_2排出量と異なり，概ね１割低い値となっている。



図－５　新規および再生アスファルト混合物製造に関する総CO_2排出量
（文献１）のデータを基に一部独自の計算を加えて作図）

5. おわりに

2050年カーボンニュートラルが宣言されてからは，これに向けた行動の方向性について各方面で議論が活発化している。舗装関係では，日本道路建設業協会新技術開発部会の中間報告として公表されている[7]。ここでは脱酸素社会に役立つ舗装関連の技術・工法が一覧としてまとめられており，混合物では中温化アスファルト混合物や常温アスファルト混合物が取り上げられている。またアスファルトプラントでは都市ガス，バイオマス燃料，エマルジョン燃料など燃料の代替技術，施工機械では電化，ハイブリッド化などが取り上げられている。さらに，プラントメーカーからは骨材加熱用に水素燃料，アンモニア燃料，電化などの技術ロードマップが示されるなど，舗装分野での取り組みや将来像などが紹介されている[8]。

本稿では，CO_2排出について，国内総排出量や舗装分野からの排出量などを紹介するとともにCO_2排出削減効果が高い技術部分について考察した。その結果，アスファルトプラントにおける二酸化炭素削減の技術開発が最も効果的であり，特に再生技術に関するものが効果的とした。また，ポリマー改質アスファルトのようにCO_2排出原単位の大きい素材を用いるものでは，素材の排出量も考慮すると効果の高い対策が取れるものと考えられた。しかし，カーボンニュートラルは極めて高い目標であり，ここに挙げた工程や材料だけを低炭素化しても到達することはできず，あらゆる角度から低炭素化の検討を進める必要があるのは言うまでもない。

なお，CO_2排出量の試算にあたっては，文献１）の原単位を用いたが，年度による原単位の違いを考慮していない。このため，排出量の算出において不正確な部分があることはご容赦いただきたい。データを見るにあたっては，全体的な変動や比率に重点をおいて見ていただければ幸いである。

―― 参考文献 ――

１）日本道路協会舗装委員会：舗装の環境負荷低減に関するガイドブック，（公社）日本道路協会，2014.1

２）環境省：2019年度（令和元年度）の温室効果ガス排出量（速報値）についてhttps://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/material/sokuhou_all_2019.pdf

３）国土交通省社会資本整備審議会道路分科会第75回基本政策部会資料：カーボンニュートラルに向けた道路分野の貢献について，http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001387167.pdf

４）山本浩之：カーボンニュートラルに向けた道路分野の貢献について，道路建設，pp.24-28，2021.9

５）日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報【平成17年度】【平成25年度】【令和２年度】，（一社）日本アスファルト合材協会，2006.8，2014.8，2021.8

６）日本アスファルト合材協会：合材製造業におけるBaU二酸化炭素排出量推計調査概要，（一社）日本アスファルト合材協会，http://www.jam-a.or.jp/images/activity/act07_BaU202108.pdf

７）日本道路建設業協会：舗装分野におけるカーボンニュートラル，道路建設，pp.47-52，2021.9

８）川村克裕：アスファルトプラントにおける低炭素化への取組，道路建設，pp.53-57，2021.9

石油産業のカーボンニュートラルへの取組み事例 ー出光興産グループの取組みー

(Action for Carbon Neutral in Petroleum Industry
~Idemitsu group's Challenge to Carbon Neutral Transformation~)

吉　田　雄　亮*

2015年のパリ協定締結を契機に世界の主要国が脱炭素に向けて本格的に始動し，国内でも2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」が宣言されました。人々の暮らしや産業に欠かせないエネルギー・素材の供給を担ってきた出光グループも，2050年のカーボンニュートラル実現を目指していきます。

この達成に向け，2050年に向けてエネルギー・マテリアルトランジションを通じた事業ポートフォリオ転換を推進するとともに，製油所・事業所のCNXセンター化をはじめとした様々な打ち手に積極的に取り組んでいきます。

1．はじめに

2021年10月現在，新型コロナウイルス感染症の世界的拡大により，当社の主力の燃料油事業は大幅な需要減少に見舞われております。また，後に述べる世界的な気候変動対応の気運により，世界各国がグリーンリカバリーを志向し，これまで以上に脱炭素化が加速することが想定されます。一方で国内外のエネルギー需要は，新型コロナウイルスの影響により足元は大きく低迷しておりますが，中期的には安定することも見込まれ，当面，化石燃料を安定供給することが当社の責務のひとつと考えます。

他方，地球環境問題に目を移しますと，2015年のパリ協定締結（COP21）を契機に，世界的な気候変動問題への対応について国際的な枠組みが形成されました。主要国が脱炭素にむけて本格的に始動したと言えます。その後，2018年のIPCCによる「1.5℃特別報告書」等を踏まえて，各国がカーボンニュートラルの実現をコミットするなか，2020年10月，当時の菅義偉首相の所信表明演説において，日本でも「2050年カーボンニュートラル」が宣言されました。

化石燃料をベースに100年超にわたって人々の暮らしや産業に不可欠なエネルギーの安定供給という社会的使命を果たし，様々な国や地域の人々とともに成長を遂げてきた当社にとって，世界的な気候変動問題は必ずや解決しなければならない社会課題ととらえています。

2．出光グループのカーボンニュートラル

2.1　2050年カーボンニュートラルへの挑戦

CO_2排出量削減は，化石燃料ビジネスを主体とする当社においても最重要課題と認識しています。かかる状況を踏まえ，当社は2050年までに，自社操業に伴う排出量（Scope1+2）のカーボンニュートラル（＝CO_2排出量ネットゼロ）を目指します。（なお，出光ではカーボンニュートラルに向けての変革を「CNX」と呼んでおり，これはCarbon Neutral Transformationの略語になります。）

また，自社操業に伴うCO_2排出量削減はもちろんのこと，顧客ニーズを的確に把握しながら，バリューチェーン全体でのCO_2排出量（Scope3）削減にも取り組んでまいります。SDGsの7番目の項目である「エネルギーをみんなに，クリーンに」という難題へ正面から挑戦していきます。

自社操業に伴うCO_2排出量（Scope1+2：2019年度で12.9百万トン）削減の具体的方策ですが，当社グループのCO_2の主たる排出源である，製油所・事業所・工場等からの排出量削減の活動を中心に対応していきます。省エネ活動の更なる推進の他，石炭ボイラーで

*よしだ　ゆうすけ　出光興産株式会社　技術・CNX戦略部CNX戦略室

のバイオマス燃料やアンモニアの混焼，事業所・事務所で利用している電力のゼロエミッション化を積極的に推進してまいります。こうして排出量を極限まで低減しながら，それでも残余してしまう排出量については，植林，CCS等を含めた，いわゆるネガティブエミッション技術／手法を用いて除去することで，CO_2ネットゼロの実現を目指します。

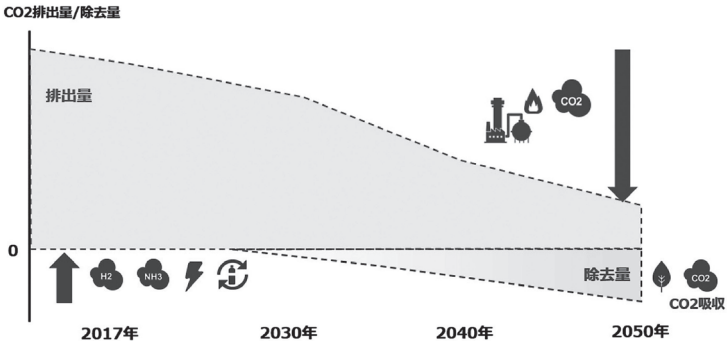
当社グループは，製油所・事業所・工場等からの直接排出（Scope1）や，購入電力などが由来の排出量（Scope2）と比較して，製品の消費段階などでの排出（Scope3：2019年度で117.7百万トン）が圧倒的に大きいこともあり，Scope3の排出量削減は極めて重要な取組領域と位置付けております。自社のCO_2削減と並行して，バリューチェーン全体でのCO_2削減を通じて，カーボンニュートラル社会の実現に貢献していきたいと考えています。具体的取組としては，低炭素燃料（バイオマス燃料やアンモニア・水素等）供給拡大，再生可能エネルギー発電の拡大，お客様の化石燃料使用量低減を可能とする環境配慮型商品・サービスの提供等が挙げられます。当社グループ事業に関連するバリューチェーンは多岐にわたり，チェーン全体でCO_2の削減に貢献可能な領域は数多く残されていることから，当社グループは，それらの領域での活動強化を通じて，CO_2削減に寄与していきます。

2.2　将来に向けたポートフォリオ転換

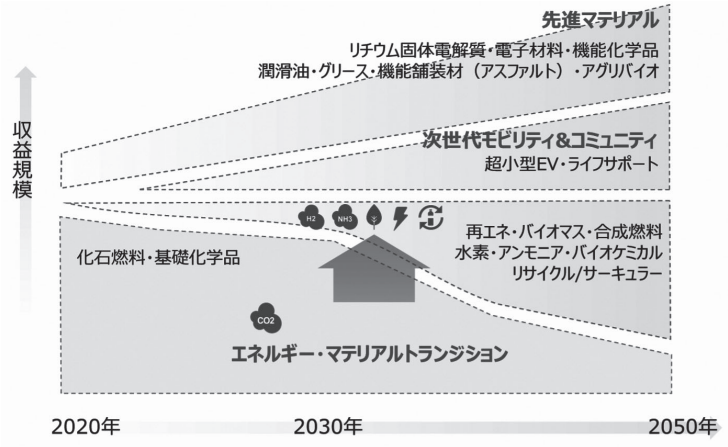
当社は2050年カーボンニュートラル実現に向けて，事業ポートフォリオの転換を進めてまいります。エネルギー・マテリアルトランジションにより，化石燃料・基礎化学品事業は，次世代燃料・マテリアル，サーキュラービジネスに置き換えていきます。石油製品や石油化学製品を供給していた製油所・事業所では，再エネやバイオマス・水素・アンモニアなどの低炭素燃料の供給や，廃プラスチックのリサイクルなどのサーキュラービジネス拠点に転換していく「CNXセンター化」に取り組みます。

次世代モビリティ＆コミュニティ分野では，現在取り組んでいる超小型EVやライフサポートなど，サービスステーションの業態転換を通じ，事業を成長させていきます。燃料油の販売拠点であるサービスステーションでは，高齢化社会を見据え，全国で約6,300か所のネットワークを「スマートよろずや」と称して超小型EVを軸とした新たなモビリティビジネスや物流拠点としての活用など地域固有の課題を解決するエコシステムのプラットフォームとして再構築していきます。

先進マテリアル分野では，リチウム固体電解質・電子材料・機能化学品・潤滑油・グリース・機能舗装材（アスファルト）・アグリバイオ等の領域で開発・拡大をしてまいります。



図－１　出光の2050年カーボンニュートラル実現への挑戦



図－２　出光のポートフォリオ転換イメージ

３．出光の具体的な取組

2050年カーボンニュートラル実現に向け，当社はバイオマス燃料（固体・液体），アンモニア／水素，バイオ化学品，合成燃料（e-fuel）などの革新的技術や，炭酸塩，廃プラスチックリサイクルなどの循環型技術の社会実装に重点的に取り組んでいきます。

様々な取組を具体的に検討していく中で，例えば以下のような領域は当社グループの強みと認識しています。

○高い技術力と安全・安定操業を基盤とした製油所・事業所

○豊富なメニューを有する再生可能エネルギー発電（太陽光，地熱，バイオマス，風力）

○次世代蓄電池，全固体リチウム二次電池のキーマテリアルである固体電解質の開発

○既存エネルギーの供給・物流インフラやノウハウを活用した，低炭素エネルギーの供給（例：産油国とのパートナーシップ，国内外でのタンカーによる物流，国内貯蔵施設等）

これらを最大限に活用することを想定し，次に挙げるような取組を行っております。

3.1　CNXセンター化コンセプト

カーボンニュートラルの実現に向けてカギとなるのは，コンビナート全体でのCNXセンター化です。つまり，エネルギー製造拠点として長年操業してきた製油所・事業所を，カーボンニュートラル実現のための拠点に生まれ変わらせるということです。

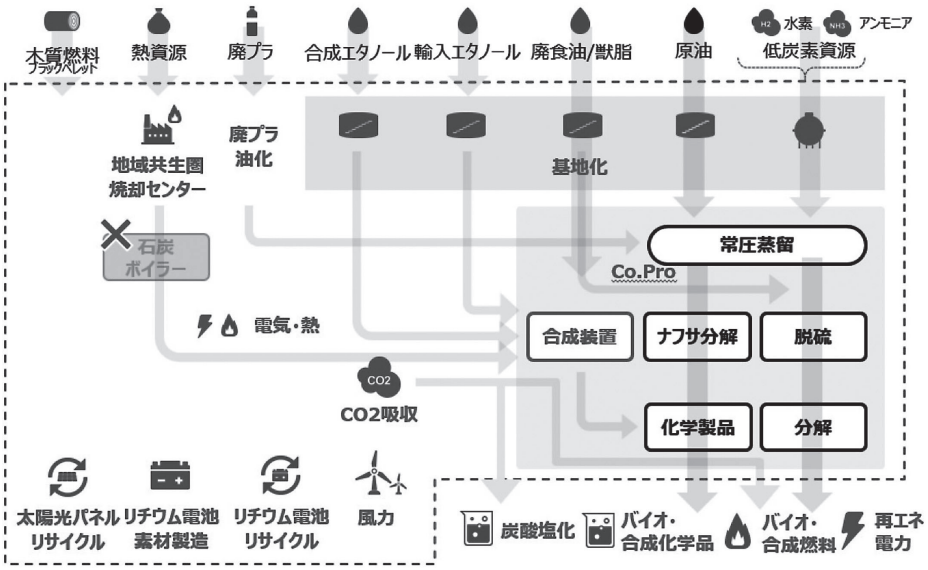
出光グループの製油所・事業所は，高い技術力と安全・安定操業のノウハウを持ち，危険物取扱いのプロフェッショナルとして長年，地域の人々とともに歩んできました。また，製油所・事業所の広大な敷地，大型船が着桟できる桟橋，タンク群などのユーティリティーは，バイオ燃料基地，水素・アンモニアの製造・貯蔵基地，廃プラスチックのリサイクル等，CNXセンターとして生まれ変わるポテンシャルを有しています。更には，リチウム電池材料の製造基地，太陽光パネルのリサイクル基地としての活用も見込まれます。この強みを再認識しながら，コンビナート全体でのCNXセンター化を進めます。

2050年に向けて，脱炭素化していく世の中をイメージしながら，コンビナートを起点としたCNXを推進し，エネルギー・マテリアルトランジションを進めていきます。

3.2　SAFビジネスの実装

国際民間航空機関（ICAO）は2016年の総会にて「CORCIA」という枠組みを設け，2021年以降，航空各社にCO_2の削減（ベースラインより増加した排出量のオフセット）を義務付けています。航空業界における世界的なCO_2削減に向けた流れを受け，エアライン各社ではSAF[1)]の本格導入に向けてサプライチェーンの構築を進めています。

2021年10月現在，国産のSAFはまだ商用化されておらず，海外でもごく限られた企業での商用生産にとどまっています。当社は，こうした代替航空燃料の供給を重要な責務ととらえており，2025年時点でSAFを10万kL供給開始することを目標として設定しています。国内初の商業規模の製造事業を展開し，顧客へ供給していきたいと考えております。SAF製造にあ



図－3　CNXセンター化コンセプト

たっては，主にはバイオマスを原料として想定しており，既存のインフラを活用する想定です。併せて，バイオ化学品への展開も視野に入れた検討を行っています。

3.3　廃プラスチックリサイクルチェーンの構築

これまで先進国のプラごみを受け入れてきたアジア新興諸国の輸入規制など外部環境の変化や，SDGs，ESG投資などで拡大するリサイクルプラスチックの利用ニーズに応えていくために，廃プラスチックの資源価値を高めることで経済的な資源循環を達成することが必要です。廃プラスチックは，分解度の違いによりガス化，油化等，様々な形でリサイクル可能です。熱分解や油化処理を行ったうえで，当社の製油所の装置にフィードすることもできます。廃プラスチックリサイクルは，社会的ニーズが強く，付加価値創出とCO_2排出削減が期待される技術です。

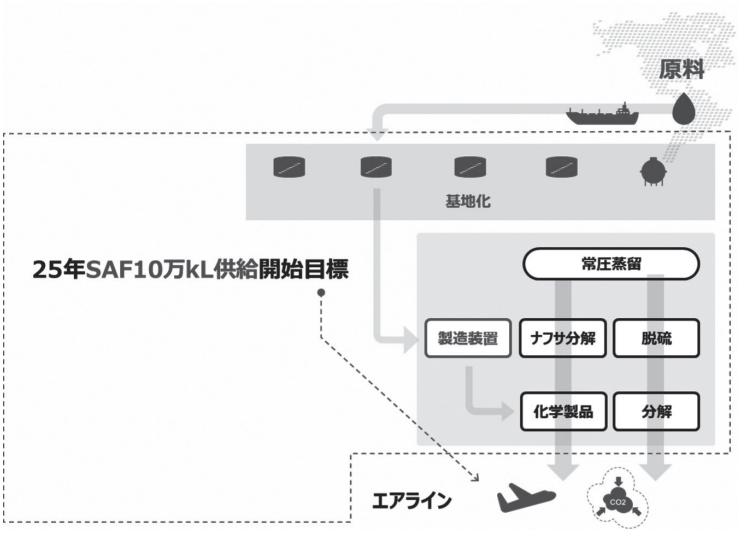
当社は，環境エネルギー㈱と，当社千葉事業所における廃プラスチックリサイクル事業の実証検討を行っています。環境エネルギー社の廃プラスチック分解技術と千葉事業所の石油精製・石油化学装置を活用し，従来の技術では再生困難だった混合プラスチックのリサイクルを目指します。あわせて国内初の廃プラスチックのリサイクルチェーン構築を推進します。

原油精製からプラスチック製造までを一貫して行っている当社は，その強みを活かし，先進的な廃プラスチック油化によるリサイクルを実現することで，大きな社会課題の解決に積極的に取り組んでいきます。

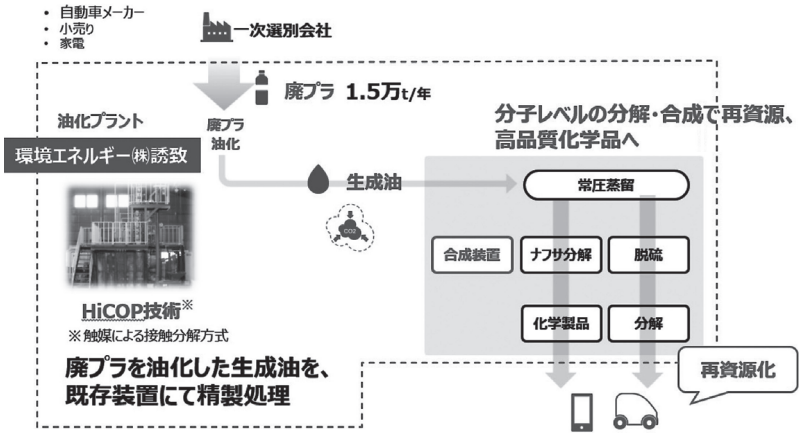
3.4　発電・産業部門へのCO_2フリーアンモニアサプライチェーンの構築

日本政府が2050年カーボンニュートラルの実現を宣言するなか，その具体策のひとつとして，水素・アンモニアに関する官民による取組が加速しています。当社は昨年度，国土交通省のカーボンニュートラルポート検討会に徳山事業所や愛知製油所，グループ製油所が参画するなど，水素・アンモニアサプライチェーン構築に向けた検討を進めるとともに，海外からのブルー・グリーンアンモニア調達に向けた他社との協業を検討してきました。

また，当社は㈱IHIと，徳山事業所においてアンモニアサプライチェーン構築に向けた検討に共同で取り組んでいます。徳山事業所の貯蔵施設・石油化学装置などの既存設備を活用し，同事業所のアンモニア輸入基地化，既設ナフサ分解炉等でのアンモニア混焼実証を検討しています。また，今後，海外からのブルー・



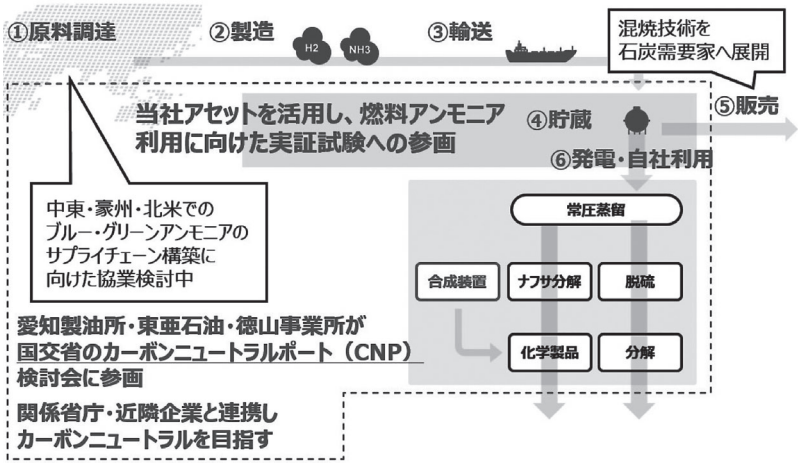
図－4　SAF供給のイメージ



図－5　廃プラスチックリサイクルチェーンのイメージ

グリーンアンモニアの輸入，コンビナート他近隣事業所へのアンモニア供給を検討します。両社の強みを活かして，世界的にも先進的なアンモニアサプライチェーンを早期に実現することで，カーボンニュートラル社会の実現に貢献してまいります。

アンモニア調達は中東・豪州・北米を中心に，ブルー・グリーン限らず，選択肢の幅を広げ調達することを考えています。製油所の既存インフラを活用して，輸入基地化，近隣コンビナート・他所転送等により，国内サプライチェーンを構築してまいります。

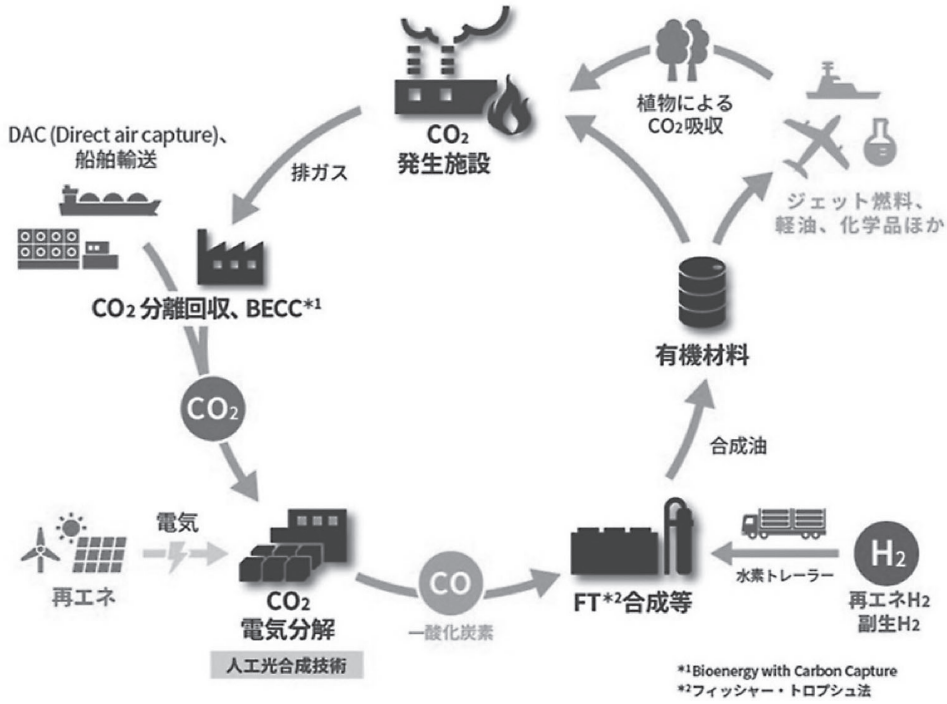


図－６　アンモニアサプライチェーンのイメージ

3.5　環境省委託事業「炭素循環社会モデル構築」

当社，東芝エネルギーシステムズ㈱，東洋エンジニアリング㈱，㈱東芝，日本CCS調査㈱，全日本空輸㈱の６社は連携して，「持続可能な航空燃料（SAF）」を製造する，P2C[2)]による炭素循環ビジネスモデルを検討してきました。

この取組が2021年８月，環境省の委託事業に採択され，今後６社は地域のインフラや特徴を活かしてカーボンリサイクルを地域内で実現させ，脱炭素化の促進と地域振興を両立させる検討を行います。具体的には，各社が持つ知見・技術や関連するプラント設備等を活かし，CO_2の分離回収からSAF製造，消費までの全工程について検討し，得られたデータ・知見を，地域における炭素循環社会モデルに反映させ，事業成立性を



図－７　炭素循環社会のイメージ

評価します。6社は本実証事業を通し，炭素循環に基づくSAFサプライチェーンの商業化や，地域の活性化の促進に貢献して参ります。当社は，SAFの認証制度・規格調査，SAF混合設備および品質管理の基本計画作成の役割を担っています。

3.6　ブラックペレットの製造・供給

再生可能エネルギー発電と同様に，当社グループはより低炭素なエネルギー供給を目指す上でバイオマス燃料への取組を進めています。具体的には，石炭火力発電所において，石炭と混焼することでCO_2排出削減が可能なバイオマス燃料であるブラックペレットの開発に取り組んでいます。

ブラックペレットとは，木材を粉砕・乾燥して焙煎処理し半炭化したもので，従来のホワイトペレットに比べて耐水性・粉砕性などに優れ，石炭と同様に取り扱うことができます。そのため，既存設備を改造せずに石炭の使用量を減らし，再生可能エネルギーの使用を増やすことができます。

2021年には徳山事業所に続き，千葉事業所でもボイラーで石炭との混焼試験を実施しました。現在，2022年商業生産の開始に向け準備を進めています。

2030年200万トンのブラックペレット供給を目指し，ベトナム，マレーシア，インドネシア，タイなど東南アジアを中心に製造拠点拡大を進めていく予定です。

写真－1　ブラックペレット

4．カーボンニュートラルに向けた課題と出光の方針

ここまで述べてきたような各種の低炭素エネルギーを世の中に安定供給していくにあたり，最も大きな課題のひとつとして，コストが挙げられます。再生可能エネルギーやバイオマス燃料は，やはり化石資源由来のエネルギーと比較して高価です。また，例えば水素は，燃料用途の他にも合成燃料の原料，燃料電池用の燃料，そしてエネルギーキャリアとしての利用等，用途が幅広く有用なアイテムと言えます。一方，グリーン水素[3)]を製造する際には再生可能エネルギー由来の電気等を用いて水の電気分解を行う必要がありますので，化石燃料由来のグレー水素[4)]と比較してコストが高くなることは明らかです。

出光グループとしては，業界を超えた連携などによる事業規模拡大，低炭素エネルギーバリューチェーンの上流から下流までの適切なパートナー戦略，行政との議論などを通じたインセンティブ創出，そして社内外問わず広くイノベーティブな技術を開発／獲得することを通じ，低炭素エネルギー実装に向けて取り組んでいきます。

当社は2030年ビジョンで「責任ある変革者」を掲げております。当社にはエネルギーの安定供給とともに，社会課題の解決に取り組む責務があると認識しており，気候変動という大きな課題に対して正面から向き合っています。

―― 注　釈 ――

1）**SAF**：Sustainable Aviation Fuelの略で，原材料の生産・収集から燃焼までの過程で，CO_2の排出量が少ない持続可能な供給源から製造されるジェット燃料を指します。

2）**P2C**：CCU／カーボンリサイクル技術のひとつであるPower to Chemicals（P2C）は，再エネや再エネ水素等を用いてCO_2を環境価値の高い有価物に再利用する技術であり，CO_2の排出削減だけでなく，再エネの普及拡大にも大きく貢献します。

3）**グリーン水素**：水を再生可能エネルギー由来の電気を用いて電気分解することで生産される水素のことです。電気分解を実現するためには電気が必要ですが，グリーン水素を作るためのプロセスとして，風力や太陽光などの再生可能エネルギーを利用することで，副産物としての二酸化炭素を排出させることなく水素を製造することができます。

4）**グレー水素**：天然ガスや石炭等の化石燃料を原料にして生産された水素です。この過程で発生する二酸化炭素は大気中に放出されます。

東京都における中温化技術の実用化に向けた検討

(Examination for Practical Use of Asphalt Temperature Reduction Technology in Tokyo Metropolitan Government)

橋　本　喜　正*

東京都では，平均気温の上昇を1.5℃に抑えることを追求し，2050年までに，CO_2排出実質ゼロに貢献する「ゼロエミッション東京」の実現を目指し，都内温室効果ガス排出量を2030年までに50％削減（2000年比）することなどを目標とする「カーボンハーフ」の取組を強化させている。

本稿は，東京都における舗装工事面からの二酸化炭素排出量実質ゼロに資する取組として，平成22年度から東京都建設局で取組んできている中温化技術の実用化に向けた検討について，検討の経緯や現時点の状況，今後の課題や展開などについて紹介するものである。

1．はじめに

東京都では，世界の大都市の責務として，平均気温の上昇を1.5℃に抑えることを追求し，2050年までに二酸化炭素排出量を実質ゼロにすることを目指す戦略「ゼロエミッション東京戦略」を2019年12月に発表した。

この2050年CO_2排出実質ゼロに向け，都は行動の加速を後押しするマイルストーンとして，都内温室効果ガス排出量を2030年までに50％削減（2000年比）すること，再生可能エネルギーによる電力利用割合を50％程度まで高めるなどの「ゼロエミッション東京戦略2020 Update & Report」を2021年３月に策定し，「カーボンハーフ」の取組を強化させている。

また，東京都建設局ではCO_2排出抑制技術として加熱アスファルト混合物の中温化技術に注目し，道路管理部と土木技術支援・人材育成センターを中心に平成22年度から実用化に向けた検討を実施してきている。上記カーボンハーフの趣旨を踏まえ，この中温化技術の早期実用化に向け，取組を進めている。本稿では，この検討の経緯や現時点の状況，今後の課題や展開などについて紹介する。

2．検討の経緯

この中温化技術は，加熱アスファルト混合物の締固め性を向上させることで混合物の製造温度を低減させても通常混合物と同程度の締固め度を確保でき，結果としてCO_2排出量の抑制が見込めるものである。

中温化技術を活用したアスファルト混合物（以下，中温化混合物）の製造方式には大きく分けて「中温化剤方式」と「機械式フォームド方式」の２つがある。中温化剤方式は，プラントにて特殊添加剤を添加，混合しアスファルトの粘度を一時的に低下させたりするものである。一方，機械式フォームド方式は，アスファルトプラントに設置したフォームドアスファルト発生装置によりアスファルトを発泡させ，微細泡のベアリング作用により粘度を低下させるものである。

この中温化剤方式に関しては，主に発泡系，滑剤系，粘弾性調整系といった複数の技術的手法が存在しており[1)]，アスファルトプレミックスタイプやプラントミックスタイプなど様々な材料が製造メーカーから販売されている（**表－１**）。

表－１　中温化混合物の製造方式

方　式	種　類	適用範囲
中温化剤方式	発泡系	ほぼ全てのプラントで対応可
	粘弾性調整系	
	滑剤系	
機械式フォームド方式（発泡系）		発生装置設置プラントのみ

*はしもと　よしまさ　東京都土木技術支援・人材育成センター技術支援課

中温化技術を実用化するにあたり，舗装の耐久性にかかわる品質が通常混合物と比較して同程度であり，都の定める品質規格値を満足することが求められる。しかし，この検証対象となる中温化混合物であるが，一概に中温化混合物と言っても中温化の方式・種類別，密粒度アスファルト混合物，粗粒度アスファルト混合物，ポーラスアスファルト混合物といった混合物の種類別，ストレートアスファルトやポリマー改質アスファルトのようなアスファルトの種類別，さらにはバージン混合物，再生混合物の別といったように，混合物の種類は数多く存在している。

このため，代表的な中温化混合物を中心に複数年にわたって網羅的に室内試験による品質の確認を行ってきた[2, 3, 4, 5]。この内容については以下，「３．室内試験による様々な中温化混合物の基礎的性状の把握」で述べる。

これらの性状の確認の結果を総括すると，概ね東京都の規格値を満足する混合物を製造可能であることが明らかとなった[6]。

また，この室内試験における検討結果を踏まえ，次のステップとして現道における試験施工によって最終的な技術検証を行うこととした。この内容については以下，「４．試験施工による技術的検証」で述べる。

３．室内試験による様々な中温化混合物の基礎的性状の把握

3.1　室内試験実施内容

中温化混合物の基礎的な性状の確認を行うため，平成22年度から平成30年度にわたり室内試験を中心に継続して調査を行った。

対象の混合物種類と中温化方式，室内試験項目を**表－２**に一覧する。

先に述べたように，この室内試験における主な目的は中温化混合物と通常混合物との比較，および中温化混合物の種類別比較を主眼に，東京都の品質基準を満足するのか，中温化混合物と通常混合物は同等かといった観点で実施した。

混合物の作製方法として，室内混合とプラント混合の２種類を，混合物の種類として，新規と再生材，密粒度，粗粒度，ポーラスの組合わせで８種類を，中温化方式として，機械式フォームド方式と中温化剤方式，またプラントミックス，プレミックスの違い，製造メーカーの違いなどで23種類を対象として検討を実施した。

表－２　検討対象混合物と試験項目一覧

年度（平成）			22	23	24	25	26	27	28	29	30
●混合物の製造方法別											
		室内混合	◎	◎				◎			
		プラント混合			◎	◎	◎		◎	◎	
		対象工場数			1	5	2	7	2	3	
●混合物の種類（新規・再生別）											
新規		密粒度AS（60/80）						◎			
		密粒度AS（40/60）		◎				◎	◎		
		密粒度AS（改質Ⅱ型）	◎	◎				◎	◎		
		粗粒度AS（40/60）		◎							
		粗粒度AS（改質Ⅱ型）	◎	◎	◎						◎
		ポーラスAS（改質Ⅱ型）	◎							◎	
再生		再生粗粒度AS（40/60）	◎	◎	◎	◎	◎				◎
		再生粗粒度AS（40/80）		◎							
		再生粗粒度AS（80/100）				◎					
●中温化方式別											
機械式フォームド方式		D社f品							◎		
中温化剤方式	プラントミックス	A社e品	◎	◎		◎		◎			
		B社e品	◎	◎							
		C社e品	◎	◎						◎	
		D社w品	◎	◎							
		E社m品		◎							
		F社b品		◎	◎	◎	◎	◎	◎		◎
		G社s品		◎		◎		◎		◎	
		H社f品		◎							
		I社r品				◎					
		D社a品					◎			◎	
		G社f品						◎			
		J社a品							◎	◎	
	プレミックス	K社c1品	◎	◎				◎			
		L社a品		◎							
		C社h品		◎							
		M社e品		◎							
		D社s品		◎							
		C社l1品		◎							
		C社l2品				◎					
		N社p品						◎			
		N社1品						◎	◎		
		K社c2品						◎			
●室内混合における試験種類											
マーシャル試験		密度	◎	◎				◎			
		安定度	◎	◎				◎			
圧裂試験　0℃			◎	◎				◎			
圧裂試験　20℃（再生）				◎							
圧裂試験　60℃				◎				◎			
ホイールトラッキング試験			◎								
カンタブロ試験（20℃）			◎								
●プラント混合における試験種類											
マーシャル試験		密度			◎	◎	◎		◎	◎	
		安定度			◎	◎	◎		◎	◎	
圧裂試験　0℃					◎	◎	◎			◎	
圧裂試験　20℃（再生）					◎	◎	◎				
圧裂試験　60℃					◎	◎	◎			◎	
ホイールトラッキング試験					◎						
●製造した混合物から回収したアスファルトの試験種類											
アスファルト量							◎				
粒度							◎				
回収アスファルトの性状試験		針入度							◎	◎	◎
		軟化点							◎	◎	◎
		伸度							◎	◎	◎
		引火点								◎	
		加熱質量変化率								◎	
		針入度残留率								◎	
		密度							◎	◎	
		60℃粘度								◎	
		加熱後60℃粘度								◎	
		粘度比								◎	
		高温粘度120～180							◎		
		タフネス							◎	◎	
		テナシティ							◎	◎	

ここで，中温化混合物の目標混合（製造）温度と目標締固め温度は，比較対象の通常混合物に対し平均マイナス30℃を目途として実施した。

これらの品質検討の総括として，検討した中温化混合物は，密度（または空隙率）やマーシャル安定度，動的安定度，圧裂強度比などの点から，混合物の製造方法，混合物の種類，中温化方式の種類や添加方法などに関わらず，都の混合物の品質規格を満足し，概ね通常混合物と同等の性状であることを確認した。さらに，中温化混合物から回収したアスファルトの性状についても，試験対象すべてにおいて通常混合物と比較して劣化度合いが低いことを確認した。

これら試験の詳細については，参考文献[2, 3, 4, 5, 6]を参照されたい。

3.2　実施方針の整理

室内試験における検討結果を踏まえ，次のステップとして現道における試験施工によって最終的な技術検証を行うこととした。ただし，試験施工による検証は，室内試験と異なり一度に複数の混合物や中温化方式の検討を行えないため，優先順位を定めて実施することとした。

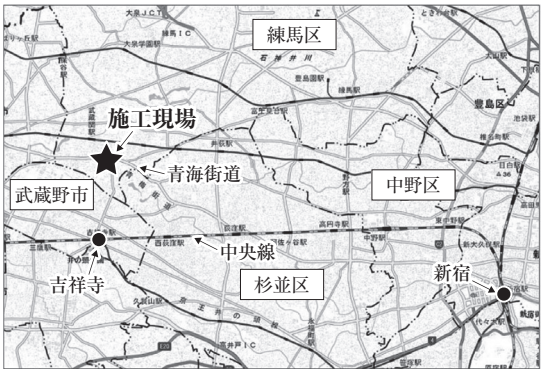
中温化方式であるが，装置が設置されていないプラントでは製造できないものの，製造コスト面で優位なこと，中温化剤方式よりCO_2排出量が抑制できること，添加する材料が水のみであり，品質の安定性が期待できることなどの理由から，機械式フォームド方式を優先して検証することとした。

4．試験施工による技術的検証

4.1　試験施工の概要

現道における試験施工として，機械式フォームド方式で，また再生材よりも技術的に確立している新規混合物を対象として実施した。

試験施工は，主要地方道東京所沢線（青梅街道）関町南三丁目地内にて，上り・追越し車線を切削オーバーレイにより，10㎝切削，表層，基層各５㎝厚で実施した（**図－１，２**）。



出典：国土地理院ウェブサイト MAPを加工して作成

図－１　試験施工箇所位置図

図－２　試験施工箇所

試験施工で用いた混合物は，**表－３**に示す３種類である。

区分のうち，「標準」は比較対象で，中温化技術を用いていない通常混合物である。「施工性改善」は，製造温度は標準と同じであるが，フォームド技術を用いて製造した混合物で，施工性改善を図ったものである。「中温化」は，フォームド技術を用いて，温度を標準より20℃下げて製造した混合物である。この３種類の混合物を用いて隣接する３工区にて各80m程度の延長

表－３　試験施工に適用した混合物種類

区　分	グラフ名称	層	混合物の種類	中温化製造	製造・施工温度
標準	標準	表層	ポーラスAs混合物（H型，13）	－	通常温度
		基層	粗粒度As混合物（改質Ⅱ型，20）		
施工性改善	改善	表層	ポーラスAs混合物（H型，13）	機械式フォームド	通常温度
		基層	粗粒度As混合物（改質Ⅱ型，20）		
中温化	中温	表層	ポーラスAs混合物（H型，13）	機械式フォームド	通常温度 -20℃
		基層	粗粒度As混合物（改質Ⅱ型，20）		

で施工し，製造した混合物と現場における舗装にて比較検証を行った。

なお，施工時期は，基層が2020年９月８日～10日，表層が同年９月29日～10月１日であった。

4.2　実施した試験

実施した試験項目を**表－４**に示す。

現場試験は施工の３か月後に実施し，各試験は外側車輪通過部（以下OWP），内側車輪通過部（以下IWP），中間部（以下BWP）の３か所で実施した。

室内試験は，試験施工において区分ごとに練り落とし混合物を採取し，通常混合物および施工性改善混合物は現場における締固め推奨温度で，中温化混合物はこの温度から20℃低減で供試体を作製し，試験を実施した。

表－４　試験項目

試験区分	試験名
現場試験	現場透水量試験
	すべり抵抗試験
室内試験	ホイールトラッキング試験
	カンタブロ試験
	標準マーシャル安定度試験
	水浸マーシャル安定度試験
	圧裂試験
	曲げ試験
	曲げ疲労試験

4.3　試験結果

試験結果については，紙面の都合上，都の基準値が存在するものや，すべり抵抗等安全性に関連するもの，わだち掘れやひび割れといった舗装の耐久性に関連の高い主要な試験のみ抜粋して掲載する。他の試験など詳細については，令和３年度発行の土木技術支援・人材育成センター年報[7]を参照されたい。

4.3.1　現場試験結果

⑴　現場透水試験

現場透水試験結果は**図－３**のとおりである。各区分における現場透水量であるが，すべての区分で基準値の1,000mℓ/15sec以上を満足しており，ほぼ同等の値となった。

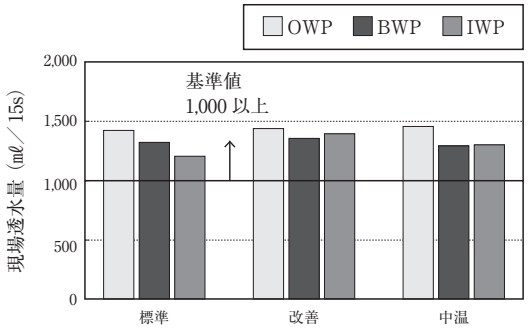
⑵　すべり抵抗試験（DFT 60km/h）

すべり抵抗試験（DFT 60km/h）結果は**図－４**のとおりであるが，動的摩擦係数は，ほぼ同等と考えられるレベルであった。なお，40, 50km/hでも，また振り子式スキッドレジスタンステスタによるBPNもほぼ同様の傾向であった。

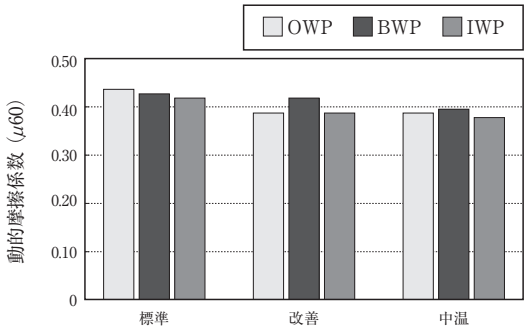
4.3.2　室内試験結果

⑴　ホイールトラッキング試験（t＝50㎜）

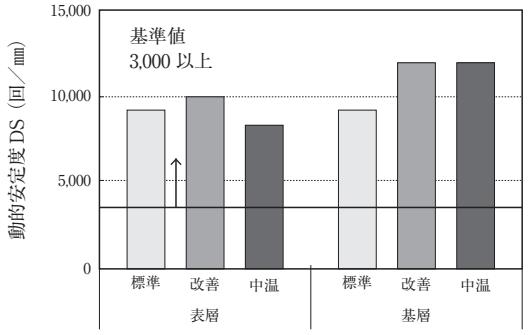
ホイールトラッキング試験結果は**図－５**のとおりである。動的安定度DSは，表層・基層ともすべての混合物が基準値の3,000回/㎜以上を満足し，6,000回/㎜を超える結果であった。動的安定度は6,000回/㎜以上の場合，測定誤差や読み取り誤差を考慮すると1.5倍程度の差がある場合でなければ明確な有意差は得られにくいといわれており[8]，表層と基層で傾向が異なるものの，中温化は，標準と比較し，耐流動性に大きな差がないと考えられる。



図－３　現場透水試験結果



図－４　すべり抵抗試験（DFT 60km/h）結果

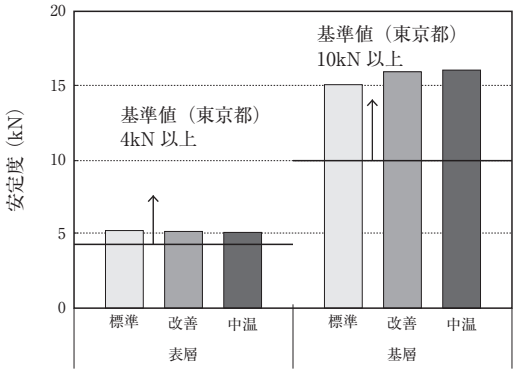


図－５　ホイールトラッキング試験結果

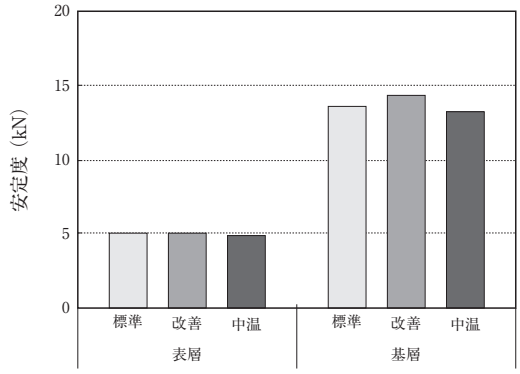
⑵　**マーシャル安定度試験**

標準マーシャル安定度の試験を**図－６**に，水浸マーシャル試験結果を**図－７**に，残留安定度を**図－８**に示す。

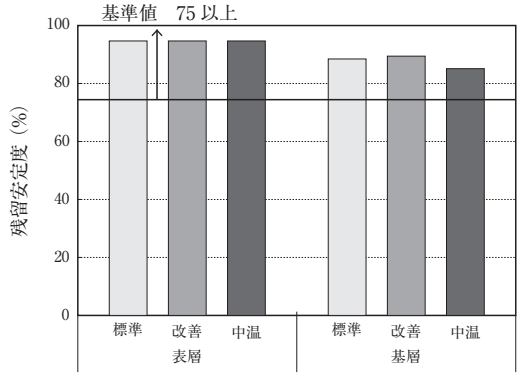
表層混合物のマーシャル安定度は，すべての混合物で約5kNと，ほぼ同程度の値であった。ポーラスアスファルト混合物の基準値である4kN以上を満足する結果であり，中温化は，標準と同程度の安定度であると考えられる。



図－６　マーシャル安定度試験結果



図－７　水浸マーシャル安定度試験結果



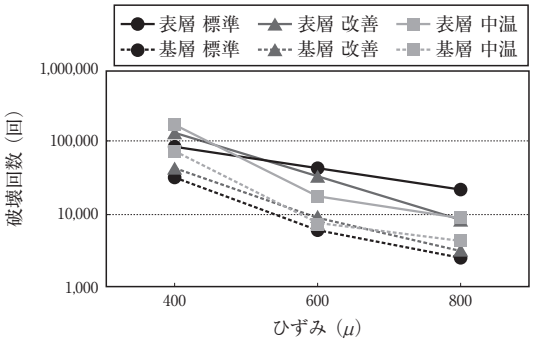
図－８　残留安定度結果

基層混合物のマーシャル安定度においても，すべての混合物で約13～15kNと，ほぼ同程度の値かつ，粗粒度混合物の基準値である10kN以上を大きく満足する結果であり，中温化物は，標準と同程度の安定度であると考えられる。

残留安定度は，基層の中温化混合物の残留安定度が若干低いものの，表層・基層すべての混合物が基準値の75%を上回っており，概ね同等と判断できる結果であった。

⑶　**曲げ疲労試験**

曲げ疲労試験結果は**図－９**のとおりである。表層混合物では，標準と中温化を比べると，400μのひずみの条件では中温化が最も破壊時の回数が多いが，600μ，800μの条件下では逆に，標準混合物が最も多い結果であった。



図－９　曲げ疲労試験結果

基層混合物では，400μのひずみの条件では中温化が最も破壊時の回数が多いが，600μ，800μの条件下では逆に，標準が最も多い結果であった。

このように，試験条件のひずみの増加に伴う混合物の破壊回数の傾向は，一様ではなくバラツキがみられた。破壊位置の判別が難しかったことが，試験結果にバラツキが生じた一因と考えられ，バラツキを考慮して評価すると，中温化は，標準と同程度の疲労抵抗性を有していると推察される。

4. 3. 3　試験施工結果総括

本検討では，バージン混合物を用いた機械式フォームド方式の検証を行ったが，一部今後のデータの蓄積による検証が必要な部分もあったものの，中温化，施工性改善ともに標準混合物と品質上大きな差異はなく，都の品質基準値のある試験については全て基準値を満足していた。

このため，今回検証を行ったバージン混合物を用い

た機械式フォームド方式による混合物は，全体としては標準混合物と概ね同等の品質が確保でき，標準的な適用が見込める混合物であると考えられる。

試験施工箇所については，引き続き，現場の路面性状追跡調査により供用性の把握を継続していく予定である。

なお，本試験施工での結果は，東京都と日本アスファルト合材協会の共同研究にて行った成果をとりまとめたものである。

5．今後の検討課題

本検討では，バージン混合物を用いた試験施工を対象として検証を実施したが，今後は使用ボリュームの多い再生混合物についても試験施工を実施し，品質を検証する予定である。

また，品質の検証はもちろんのこと，現場での運用が円滑に進むよう，中温化混合物の製造・施工の方法や，材料の品質等を基準化することが今後の課題である。

このほか，中温化混合物の製造面の効率化，実効性の向上の課題がある。

現在の都における舗装工事で用いられるアスファルト混合物は，ほぼアスファルト事前審査制度の審査対象混合物が使用されている。中温化混合物は現在審査対象混合物としての認定を受けておらず，使用する場合には工事ごとに基準試験や試験練り等の確認が必要となり，現場の監督員や施工会社の負担が大きくなるとともに，この活動分のCO_2排出量も増加する。

このため，本成果を踏まえ，この効率化や実効性の向上が期待できるアスファルト事前審査制度の審査対象混合物として適用できるよう検討を進めていく予定である。

6．おわりに

2050年までの「ゼロエミッション東京」の実現と「カーボンハーフ」への取組にあたり，この中温化混合物の実用化は，舗装工事面からのアプローチとして大きな期待を担っていると考える。

先に述べたように，まだまだクリアすべき課題はあるが，ひとつひとつ着実に検討を重ね，早期の実用化に向けて進めていく予定である。

── 参考文献 ──

1）井原務，中温化（低炭素）アスファルト舗装のCO_2削減効果，建設の施工企画，2011, p20

2）峰岸順一，上野慎一郎：中温化混合物の品質に関する検討，平23 都土木技術支援・人材育成センター年報，2011, p37.

3）峰岸順一，上野慎一郎，橋本喜正：各種中温化混合物の室内試験による品質検証，平24 都土木技術支援・人材育成センター年報，2012, p73.

4）峰岸順一，狭間博：中温化混合物の回収アスファルトの性状に関する一検討，平29 都土木技術支援・人材育成センター年報，2017, p47.

5）峰岸順一，狭間博：ポーラスアスファルト混合物への中温化技術の適用検討，平30 都土木技術支援・人材育成センター年報，2018, p41.

6）橋本喜正，関根淳：中温化混合物の適用性に関する調査報告，令元 都土木技術支援・人材育成センター年報，2019, p47.

7）橋本喜正，安藤哲明：機械式フォームド方式を用いた中温化アスファルト混合物の試験施工による技術検証，令3 都土木技術支援・人材育成センター年報，2021, p15.

8）（公社）日本道路協会：B003　ホイールトラッキング試験方法，舗装調査・試験法便覧（平成31年版），[3]-44.

アスファルト合材工場におけるCO_2排出量削減の取組み

(Approaches to Reduce CO_2 Emissions in Hot Mix Asphalt Plants)

山　下　晋　仁*

わが国における温室効果ガス排出量の削減目標は，2030年度に2013年度比で46％減とする中期的な目標が設定された。これを受けてアスファルト合材工場においても，加熱アスファルト混合物の製造にともなうCO_2排出量の削減を推進していく必要がある。

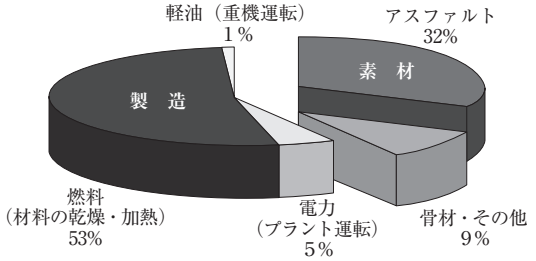
本文では，加熱アスファルト混合物製造時の化石燃料消費量を削減する取組みとして，製造温度を低減する中温化技術，CO_2原単位の小さい代替燃料の活用，より低燃費な機材への転換，乾燥・加熱する骨材の含水比の低減などについて，その概要と導入効果を紹介する。

1．はじめに

2021年３月に閣議決定された「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案」では，2050年度までに温室効果ガスの排出実績ゼロ（カーボンニュートラル）の目標が掲げられ，2021年４月には，2030年度に2013年度比で46％減とする中期的な目標が設定された。

道路舗装業界では，加熱アスファルト混合物（以下，加熱混合物）を主要材料として大量に使用している。わが国における2020年度の加熱混合物の製造数量は41,449千t[1]であり，加熱混合物の製造にともない1,558.5千t[2]のCO_2を排出している。当面は2030年度に2013年度比で46％のCO_2排出量削減に向けて，加熱混合物の製造にともなうCO_2排出量の削減を推進していく必要がある。

また，**図－１**は一般的な加熱混合物のCO_2原単位の内訳を素材と製造の視点から示したものである。製造時におけるCO_2排出量が全体の約60％を占めており，その大部分が骨材の乾燥・加熱に使用する化石燃料によるものである。



図－１　加熱アスファルト混合物のCO_2原単位の内訳

そこで，本文では，CO_2排出量の削減の余地が最も大きい加熱混合物製造時の化石燃料消費量を削減するための当社における取組みについて紹介する。

加熱混合物製造時の化石燃料消費量を削減する技術には，製造温度を低減する中温化技術，CO_2原単位の小さい代替燃料の活用，より低燃費な機材への転換，乾燥・加熱する骨材の含水比の低減などがある。

以下，これらの技術の概要とアスファルト合材工場に導入した場合の効果について述べる。

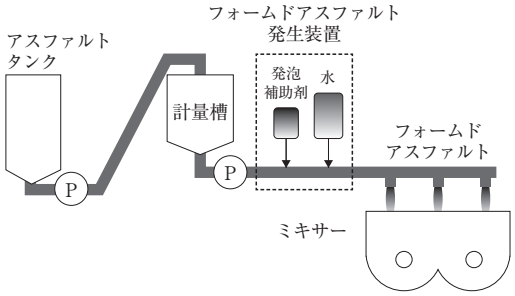
2．機械式フォームドアスファルトによる中温化技術

本技術は，高温のアスファルトに水を１～３％程度添加・混合することで，アスファルトをフォームド（泡）化させ，見掛けの粘性を下げ，通常よりも製造温度を低減することが可能な技術である。フォームドアスファルト発生装置の概略図を**図－２**に示す。アスファルトに水と合わせて発泡補助剤を添加・混合することで，泡同士の結合・肥大化を防ぎ，アスファルト中に微細泡を多量に残存させ，長時間に渡りベアリング効果が発揮できるように改良している。

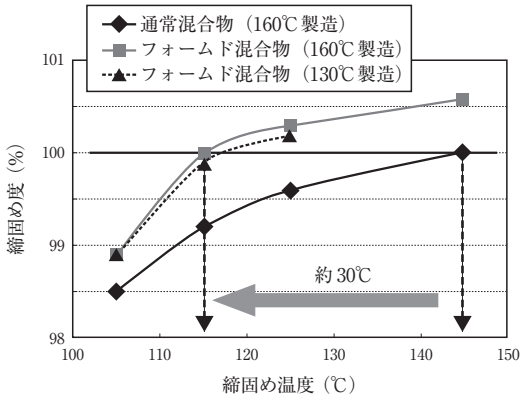
図－３は密粒度アスファルト混合物（13）（ストレー

*やました　くにひと　前田道路株式会社　機材部

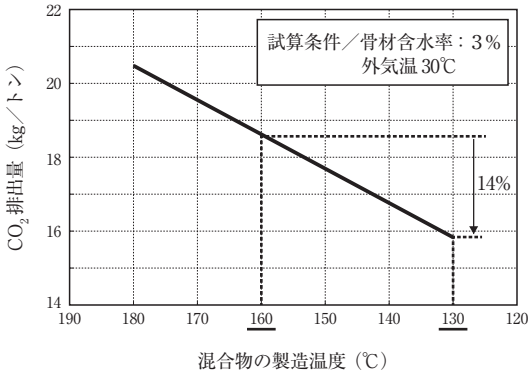
トアスファルト60～80）の締固め温度と締固め度の関係を示したものである。フォームドアスファルトを用いた混合物は，通常混合物に比べて締固め温度を約30℃低減させても，通常混合物と同等の締固め度を確保することができることから，製造温度を約30℃低減することが可能である。製造温度を約30℃低減した場合のCO_2排出量は，**図－４**[3)]に示すように約14％削減できる。



図－２　フォームドアスファルト発生装置の概略図



図－３　締固め温度と締固め度の関係



図－４　混合物の製造温度とCO_2排出量の関係[3)]

３．代替燃料の活用

3.1　A重油代替燃料

本技術は，骨材乾燥・加熱燃料であるA重油の代替燃料として，CO_2原単位の小さい木質タール，廃グリセリンおよびストレートベジタブルオイル（以下，SVO）などのバイオマス燃料を活用するものである。

木質タールは，主に森林の間伐材，剪定材などを原料とした木質バイオマスコージェネレーションから副産物として生成される。廃グリセリンは，使用済みの植物性油脂などからバイオディーゼル燃料（BDF）を製造する過程で副産物として発生する。SVOは，使用済みの植物性油脂から不純物と水分だけを取り除いたものである。これらのバイオマス燃料は，化石資源と比べ短いサイクルで再生可能な資源であり，「カーボンニュートラル」の概念に基づいた場合，CO_2排出量を削減できる有用な燃料となる。ただし，バイオマス燃料は，発生場所が限定されるため，導入できるアスファルト合材工場も限定される。

表－１は，木質タール，廃グリセリンおよびSVOの物理性状例をA重油とともに示したものである。木質タール，廃グリセリンおよびSVOは，A重油と比較して同一温度における粘度が非常に高くなっている。また，これらは製造装置や材料等の影響で性状が変動するため安定的な燃料ではない。そのため，これらを燃料としてポンプで定量供給し，バーナへ送り燃焼させる際には，従来の化石燃料と同じ方法では燃焼が不安定になる。

表－１　A重油代替燃料の物理性状例

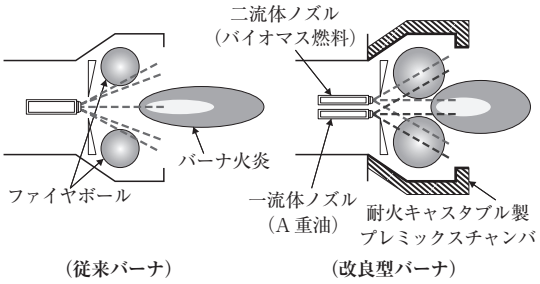
項　目	密　度（15℃）（g/cm³）	動粘度（50℃）（mm²/s）	真発熱量（MJ/ℓ）	CO_2原単位（kg-CO_2/ℓ）
木質タール	1.127	36.4	31.13	0.00※
廃グリセリン	1.006	33.9	24.95	0.00※
SVO	0.915	36.1	34.18	0.00※
A重油	0.842	2.1	36.04	2.71

※カーボンニュートラルの概念に基づく値

そこで，**図－５**に示す改良型バーナを導入し，この燃焼システムでバイオマス燃料を活用している。改良型バーナは，バイオマス燃料の気化を促進させるため，火種であるファイヤボールを大きく高温にするとともに，バイオマス燃料を安定供給できるよう二流体ノズル方式を採用している。

表－２は，燃料として木質タールとA重油を30：70の割合，廃グリセリンとA重油を30：70の割合，SVO

とＡ重油を30：70の割合で，それぞれ使用して加熱混合物を製造した場合のCO_2排出量を，Ａ重油100％で加熱混合物を製造した場合と比較したものである。木質タールの場合は約26％，廃グリセリンの場合は約25％，SVOの場合は約28％のCO_2排出量の削減効果が期待できる。



図－５　改良型ドライヤバーナ

表－２　Ａ重油代替燃料のCO_2排出量削減効果

燃料の種類	CO_2排出量（kg-CO_2/t）	CO_2排出量削減率（％）
Ａ重油100％	25.91	－
木質タール30％＋Ａ重油70％	19.20	25.9
廃グリセリン30％＋Ａ重油70％	19.46	24.9
SVO30％＋Ａ重油70％	18.54	28.4

3.2　都市ガス

本技術は，骨材乾燥・加熱燃料をＡ重油から都市ガスに転換するもので，専用の燃焼装置などの設備投資を要するが比較的容易に導入可能である。代表的なガス燃料である都市ガスは，CO_2排出量が熱量換算でＡ重油の2.71t-CO_2に対して1.95t-CO_2であり，約28％のCO_2排出量が削減できる。

ただし，導入可能なアスファルト合材工場が都市ガスの供給可能な地域に限定されるという制約がある。

４．蓄熱燃焼式脱臭炉への転換

本技術は，アスファルト合材工場の設備である直接燃焼式脱臭炉を蓄熱燃焼式脱臭炉に転換し，燃料消費量を削減するものである。

脱臭炉は，都市部のアスファルト合材工場において，アスファルト再生骨材および新規骨材をドライヤで加熱する際に排出される排ガス中の臭気成分を，脱臭バーナで燃焼させ脱臭する装置である。そのため，稼働に伴い多量に燃料を消費する。

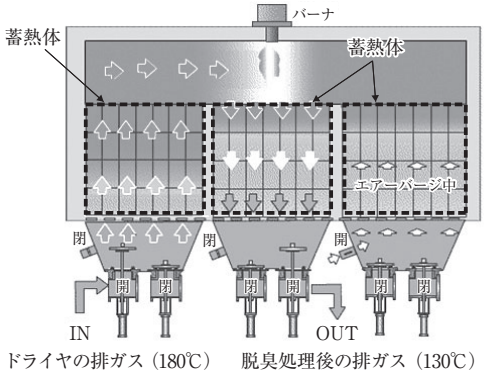
これまで一般的に採用されてきた直接燃焼式脱臭炉は，700～750℃程度の高温で臭気成分を燃焼し，脱臭処理後の排ガスの熱を熱交換器で一部回収しているものの，350℃程度の高温状態の排ガスが無効な熱として大気中に放出される。

一方，蓄熱燃焼式脱臭炉は，800℃以上の高温で臭気成分を燃焼し，脱臭処理後の高温の排ガスが持っている熱エネルギーを蓄熱体に蓄え，順次熱交換を行うことで，大気中に放出される排ガス温度が130℃程度に低減される。

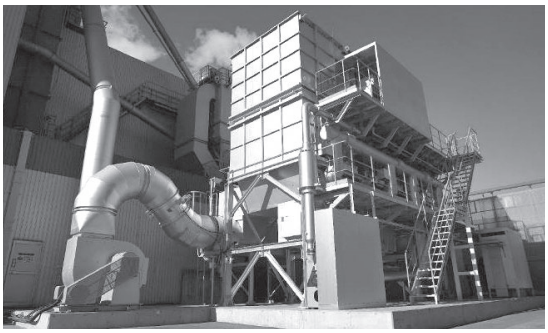
表－３に直接燃焼式脱臭炉と蓄熱燃焼式脱臭炉の仕様，**図－６**に蓄熱燃焼式脱臭炉の概略図，**写真－１**に蓄熱燃焼式脱臭炉の外観を示す。

表－３　脱臭炉の仕様

項　目	直接燃焼式	蓄熱燃焼式
静圧制御	１系統	２系統
ドライヤ排ガス温度（℃）	180	180
炉内温度（運転前）（℃）	25（常温）	800
炉内温度（運転中）（℃）	750	830
昇温温度（℃）	725	30
排気温度（℃）	350	130
廃熱回収率（％）	47	82



図－６　蓄熱燃焼式脱臭炉の概略図



写真－１　蓄熱燃焼式脱臭炉の外観

直接燃焼式脱臭炉は，稼働時に炉内温度を25℃から750℃まで昇温するため多量の燃料を必要としていた。蓄熱燃焼式脱臭炉は，炉内に配置した蓄熱体の働きにより炉内温度が800℃に保たれているため，昇温温度が30℃程度で済み廃熱回収率も82％と高いことから燃料消費量を大幅に削減することができる。

表－４は，蓄熱燃焼式脱臭炉による臭気低減効果を示したものである。脱臭後の臭気指数は，アスファルト合材工場を設置している県の規制値33を十分に満足している。

表－５は，蓄熱燃焼式脱臭炉と直接燃焼式脱臭炉の燃費を比較したものである。燃費は加熱混合物の製造１t当たりのA重油消費量を示している。蓄熱燃焼式脱臭炉は，直接燃焼式脱臭炉に比べて燃費を1/6程度に削減できる。

表－４　臭気低減効果

排ガスの種類	臭気指数		
	脱臭前	脱臭後	減少値
再生ドライヤ	40	26	−14
新規ドライヤ	30	25	−5

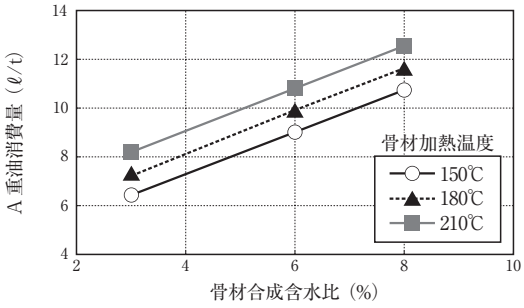
表－５　脱臭炉の燃費

脱臭方式	燃費（ℓ/t）
蓄熱燃焼式	0.5
直接燃焼式	3.0

５．骨材含水比の低減

本技術は，骨材の含水比を加熱前の貯蔵中に低減させ，乾燥・加熱時の燃費を下げるものである。

図－７は，骨材合成含水比とA重油消費量の関係例を示したものである。骨材合成含水比が高くなるとA重油消費量が多くなる傾向にあり，骨材の中でも入荷時に含水比が高い細骨材の含水比を低減することで，骨材合成含水比を低減できA重油消費量を削減できる。



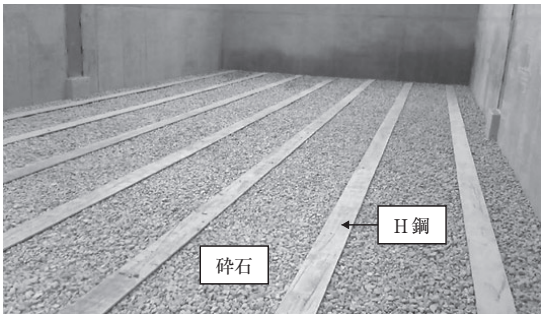
図－７　骨材合成含水比とA重油消費量の関係例

表－６は，骨材ストックヤードで含水比を低減させるための対策例を示したものである。なお，**写真－２**にストックヤード底部の暗渠排水の例を示す。

これらの対策により，加熱混合物に使用する骨材の合成含水比が１％低減した場合，A重油換算で0.8ℓ/tの燃料消費量が削減できる。

表－６　ストックヤードでの細骨材含水比の低減対策例

含水比の低減対策
①屋根材の透明化
②雨天時のシート掛け
③山積み材料の上部から使用
④細骨材１種類に対して２箇所のヤードを確保し，乾いた方から使用
⑤底部に暗渠排水（砕石敷詰）設備を設置
⑥底部に排水勾配を設置



写真－２　ストックヤード底部の暗渠排水の例

６．おわりに

アスファルト合材工場では，2030年度に2013年度比でCO_2排出量を46％削減する中期的な目標に向けて，既存の低炭素化技術を有効活用するとともに，新たな低炭素化技術も積極的に導入していく必要がある。さらに，2050年度のカーボンニュートラルに向けて，化石燃料から水素などのCO_2を排出しない燃料や再生可能エネルギーへの転換を進めていく必要がある。

―― 参考文献 ――

1）（一社）日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報【令和２年度】，2021年８月

2）（一社）日本アスファルト合材協会：合材製造業におけるBaU二酸化炭素排出量推計調査概要，2021年８月

3）（一社）日本道路建設業協会ホームページ：http://www.dohkenkyo.net/pavement/meisyo/tyuon.html

再生可能資源を利用した舗装材料の開発と実用例

(Development and Plactice of Pavement Materials Utilizing Renewable Resources Deriving from Plants)

曲　慧*・平　戸　利　明**

2050年カーボンニュートラルの目標を実現するため，自動車産業，エネルギー産業，化学産業など各産業にて再生可能資源へのシフトが着実に進められている。舗装分野においても，低炭素社会を実現するための舗装材料，舗装工法の開発が進められている[1)]。その取り組みのひとつとして，道路舗装材料への持続可能な材料の適用がある。本報では，持続可能な材料として植物由来の材料で製造するバインダを開発し，さらに開発したバインダの特性を活用し舗装の耐久性向上を図ることで，素材と長寿命化の両面から低炭素舗装を実現した事例について紹介する。

1．はじめに

カーボンニュートラルに向けた民間企業に期待される役割として，商用ベースとした持続可能な材料の開発がある。こうした材料を公共構造物に活用するためには，既存の材料・工法との費用対効果，持続可能性の検証結果などが要求される。カーボンニュートラルの工程表では，「開発フェーズ」，「実証フェーズ」，「導入拡大・コスト低減フェーズ」，「自立商用フェーズ」が設定されており[2)]，道路舗装は，供用期間が数十年と長いため，従来技術であるアスファルト舗装と比較検証するためには，長期間が必要となる。

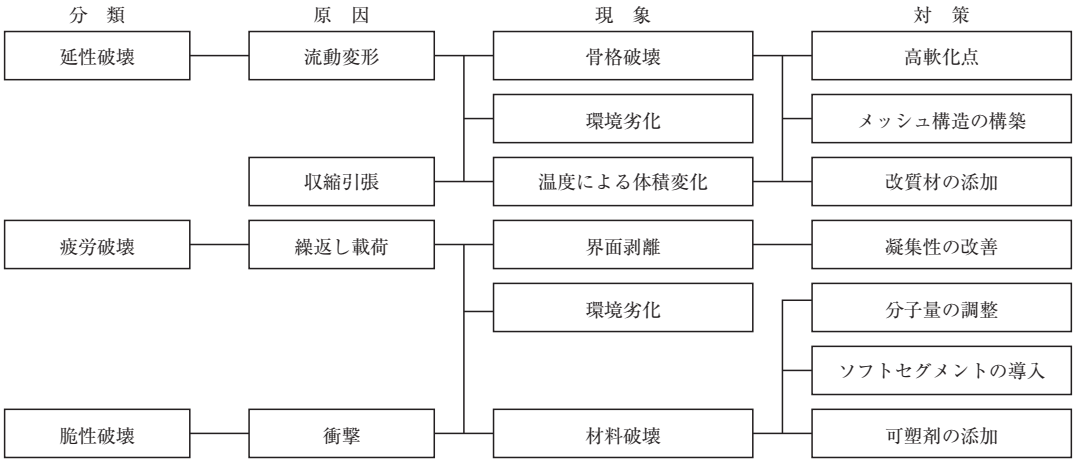
上記の問題を解決するために，著者らはアスファルトの代替材料として舗装に適用可能な植物由来の材料を用いたバインダ（以下，開発品）を開発し[3, 4)]，アスファルトと組み合わせて供用性能を評価することで，舗装としての耐久性を評価する手法を試みた。開発品は，アスファルト混合物のように容易に製造・施工が可能であるが，アスファルト混合物とは異なり，供用温度領域において感温性が低い。また，植物由来の材料は一般的に水に対する耐性が低いことあるいは加水分解や生分解性などの化学反応が生じやすいなどの課題があるが，開発品は水および油に対する耐性が，アスファルトよりも著しく高く，骨材に非常に強く結合する。これらの特性を活かし，交通量の多い道路や港湾施設の道路で実用性を検証し，10年以上の供用実績により，アスファルト舗装と同程度の耐候性や耐久性があることを実証した。本稿では，舗装材料として植物由来材料の開発経緯，適用状況，導入拡大に向けた新たな利用方法やアスファルトを使用しない舗装材料の開発状況について述べる。

2．植物由来材料の設計方法

アスファルト舗装に用いられるアスファルトは，舗装材料として欠かせない性能である長い延長でもひび割れず，支持基盤が変形してもひび割れることなく追従することができる。このような舗装に適した材料であるためには，アスファルトの特性である応力緩和性能が重要と考えられる。

図－1に舗装の破壊モードと材料設計による対策を示す。このフローに基づき舗装の破壊形態を想定することにより植物由来材料をいくつか選定し，化学組成や物理性状の改良など試行錯誤の末，舗装に適した特性を有するものを得た。さらに，この材料について後述する利用方法として適切な性能を付与させるために，分子量，分子構造，粘度および軟化点を調整し**表－1**に示す3グレードを開発した。開発品はすべてバイオマス度が80%以上である。開発品はアスファルトほどの応力緩和性能を有していないが，アスファルトと組み合わせて舗装として許容される程度に応力緩和性能を付与させるとともに，分子構造および舗装構造的にも延性破壊しないように設計している。

*きょく　けい　東亜道路工業株式会社　技術研究所　主任研究員
**ひらと　としあき　東亜道路工業株式会社　技術研究所　第二研究室室長



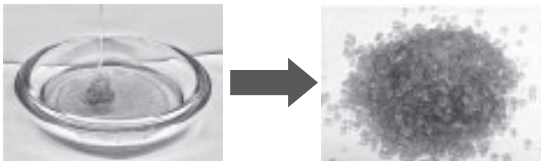
図－１　舗装の破壊モードに対応する設計方法

表－１　開発品のグレード

項　目	A	B	C
適用方法	アスファルトと組み合わせ	単独	単独
利用方法	混合物用バインダ	床版の接着防水材	混合物用バインダ
バイオマス度	80％以上		

３．植物由来の材料の特長

図－２に開発品の合成イメージを示す。開発品は，骨材との接着強度が著しく高い特徴がある。さらに，開発品は，分子間相互作用として水素結合を有しており，他の石油樹脂と比べ，比較的に低軟化点でありながら，変形抵抗性が著しく高い。このことから，転圧して密度を確保するアスファルト舗装と同様の温度域で問題なく施工可能となり，供用温度付近では非常に高い強度を発現することができる。さらに，原材料としての植物は広く入手可能で，容易に調達することができる。



植物由来材料　＋　添加材　➡　開発品

図－２　開発品の合成イメージ

４．開発品の材料特性と材料物性

表－２に開発品とアスファルトの材料特性の比較を示す。開発品はアスファルトと比較して，温度による強度変化が少なく，耐水性や耐油性にも非常に高い抵抗性を示す。また，開発品は単独としても利用可能であるが，アスファルトと混合して利用することも可能である。熱可塑性という観点から，リサイクル可能と考えられる。

表－３に開発品の代表物性を示す。一般的なポリマー改質アスファルトの針入度や軟化点とは異なるが，薄膜加熱試験ではアスファルトと同程度の熱安定性を有している。さらに，開発品をアスファルトと混合したものあるいは単独で使用するバインダは，改質Ⅱ型と180℃粘度が同程度となるように設計しているため，一般的な改質アスファルト混合物と同様な温度域で混合物の製造および施工が可能である。

表－２　開発品とアスファルトの比較

項　目	アスファルト	開発品
強度	△	○（調整可能）
耐候性	○	○
耐水性	○	○
耐油性	×	○
リサイクル性	可	可

表－３　開発品Ａ，Ｂ，Ｃの代表物性

試験項目		開発品
軟化点	℃	80～100
針入度（25℃）	1/10㎜	0～20
薄膜加熱質量変化率	%	0.6以下
薄膜加熱針入度残留率	%	65以上
引火点	℃	260以上
密度	g/㎤	0.9程度

5．舗装における植物由来材料の適用事例

ここでは，開発品を用いた舗装材料の概要，材料構成と特性および適用事例について述べる。

5.1　高安定性アスファルト混合物

5.1.1　概要

ポリマー改質アスファルトにはⅠ型からⅢ型まであり，重交通路線の程度に応じて適用しているが，駐車場やヤード舗装では，ポリマー改質アスファルトでも塑性変形抵抗性が不足するため，半たわみ性舗装や樹脂系舗装が利用されている。アスファルトをポリマーにより改質することで混合物の高温時の変形抵抗性を高めることができるが，半たわみ性舗装まで剛性を上げるためにポリマーの添加量をさらに多くする必要があり，施工性を両立させることが難しい。そこで，開発品Ａとポリマー改質アスファルトを混合しハイブリッド化することで供用温度域の剛性を高めた高安定性アスファルト混合物（以下，高安定性アスコン）を開発した[3)]。

5.1.2　材料構成

ハイブリッドバインダは開発品Ａとポリマー改質アスファルトを1：4の比率で混合したものである。**表－4**にハイブリッドバインダの性状，**写真－1**にハイブリッドバインダの蛍光顕微鏡による観察写真を示す。開発品Ａはアスファルトに溶解しないため，バインダ中で小さな球状で分散した状態として観察される。

高安定性アスコンは，プラントにおいてアスファルト混合物を製造する際に，ミキサ内に開発品Ａを投入しプラントミックスして製造する。この時，開発品Ａは骨材と熱交換することによって溶融し，混合物中でアスファルトと混合する。

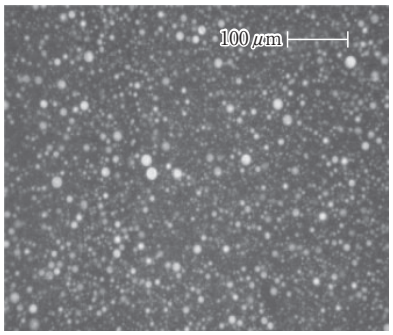
5.1.3　高安定性アスコンの特性

図－3に示すように，高安定性アスコンは半たわみ性混合物に匹敵する動的安定度を示す。ただし，高安定性アスコンと半たわみ性混合物は，試験の変位計測限界値（0.01㎜）に達しており，エポキシアスファルトも含めて当該試験では正確には評価できてないが，優れた塑性変形抵抗性を有することが伺える。

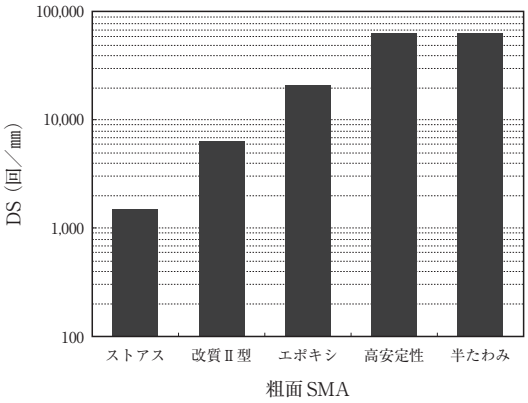
また，**写真－2**に高安定性アスコンとポリマー改質アスファルトⅡ型混合物（以下，改質Ⅱ型混合物）をソックスレー抽出した後の骨材を示す。改質Ⅱ型混合物は原型を留めないが，高安定性アスコンは原型をしっかり留めている。可撓性樹脂である開発品Ａは，分子末端に骨材のシリカ（SIO_2）成分と結合しやすい官能基を持つため，骨材表面に吸着し，骨材の接点を

表－4　ハイブリッドバインダの代表性状

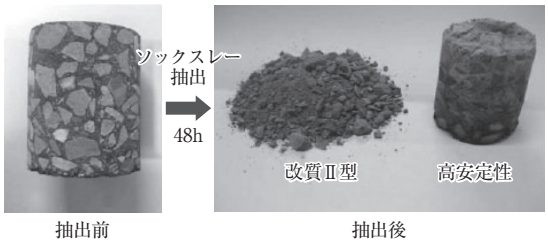
試験項目		ハイブリッドバインダ
軟化点	℃	75.5
伸度（15℃）	cm	54
針入度（25℃）	1/10㎜	35
タフネス（25℃）	N・m	25.1
薄膜加熱質量変化率	%	0.08
薄膜加熱針入度残留率	%	82.9
引火点	℃	325
密度	g/cm³	1.02



写真－1　ハイブリッドバインダの顕微鏡写真



図－3　ホイールトラッキング試験結果



写真－2　ソックスレー抽出した供試体

繋ぎ止めると考えられる。また，開発品Ａは抽出溶剤にも溶けないため，形が残ったものと推察される。混合物中では，開発品Ａは改質アスファルトによりさらに骨材骨格が安定化される。

5.1.4　施工事例

高安定性アスコンは，アスファルト混合物と比較して，流動変形抵抗性が著しく高いため，大型車両の駐車場，バスロータリー，物流センターの舗装あるいはコンテナヤードなど重荷重のかかる場所で利用することができる。**写真－３**に高安定性アスコンの舗装場所の状況を示す。これまでにすでに50万㎡以上施工しており，バインダを5.5%と想定し，さらにバイオマス度を考慮すると500t以上の植物由来の材料を使用したことになる。これまでの施工実績によりハイブリッドバインダは加水分解や生分解などが生じないことを確認している。

写真－３　高安定性アスコンの使用状況

5.2　高剛性アスファルト舗装

5.2.1　概要

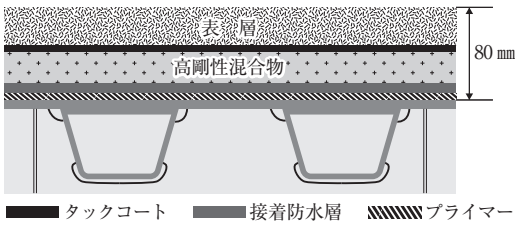
道路橋における鋼床版上の一般的なアスファルト舗装は，基層にグースアスファルト混合物，表層に密粒度アスファルト混合物が使用される。特に夏期の気温が高い時期では，グースアスファルト混合物が軟化し，荷重支持性能が低下するため，鋼床版に大きなひずみが生じる。ひずみ軽減を目的に，鋼床版舗装の基層部に鋼繊維補強セメントコンクリート（以下，SFRC）が構築されるケースがある[5)]。しかしながら，SFRCの施工はコンクリートの打設と養生で昼夜連続規制などの長時間に及ぶ交通規制が必要となり，疲労損傷が課題となる重交通路線での施工が困難となっている。そこで，交通規制時間が短くかつ気温の高い夏期においても剛性の低下が従来のアスファルト舗装より少ない，高剛性アスファルト舗装を構築することで，交通荷重により鋼床版に生じるひずみを低減する鋼床版補強工法を開発した[6, 7)]。この工法では，開発品Ｂを床版と舗装の接着防水材，さらに開発品Ａをアスファルト混合物に用いることで，鋼床版と舗装を一体化させた高剛性アスファルト舗装を実現した。

5.2.2　舗装構成

高剛性アスファルト舗装の舗装構成は，基層部に高い剛性を有する高剛性アスファルト混合物（以下，高剛性混合物）を用いて，鋼床版と強固に接着させることを特徴とする。表層用混合物に，高剛性混合物でも使用可能であるが，要求される走行性能に応じて混合物を選定できる。**表－５**に高剛性アスファルト舗装の使用材料，**図－４**に舗装構成を示す。鋼床版とアスファルト混合物

表－５　高剛性アスファルト舗装の使用材料

項　目	内　容
プライマー	エポキシ系プライマー：0.25kg/㎡＋硅砂：0.75kg/㎡
接着防水材	開発品Ｂ：２kg/㎡
基層	高剛性混合物（バインダに対して開発品Ａが45%）
タックコート	PKM-T：0.4L/㎡
表層	一般的なアスファルト混合物



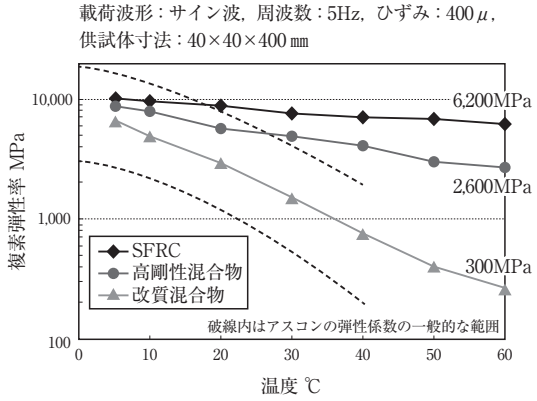
図－４　高剛性アスファルト舗装の舗装構成

の接着材として一般的にアスファルト系プライマーが使用されるが，高温になると接着力が低下し，混合物と鋼床版の界面ですべりが生じる可能性がある。そこで，高剛性アスファルト舗装では，プライマーから基層部の全てに高温でも剛性の高い材料を選定し，鋼床版に強固に接着させることで，鋼床版補強を図っている。

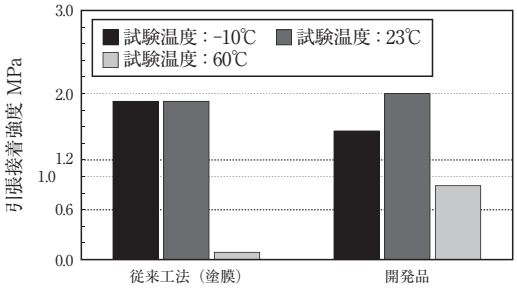
5.2.3　材料と混合物特性

開発品Ａの配合量を増やすほど剛性が高くなるが，樹脂としての性質が高くなり，温度収縮膨張が顕著となる。鋼床版補強を目的とした場合，高安定性アスコンより，さらに剛性を上げる必要があるため，配合可能な最大量を検討した結果，開発品Ａの添加量をバインダ量に対し45％に設定した。この高剛性混合物の供用温度における剛性を把握するため，曲げ疲労試験により各温度における複素弾性率を計測した。**図－５**に示すとおり，通常のアスファルト混合物が20℃の時に示す複素弾性率と60℃の時に高剛性アスファルト混合物が示す複素弾性率が同程度となる。

さらに，開発品Ｂを鋼床版と高剛性アスファルト混合物の接着材とすることで低温から高温まで高強度で接着させている（**図－６**参照）。



図－５　複素弾性率の測定結果

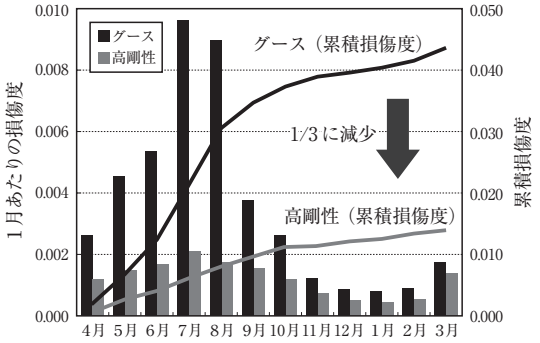


図－６　引張接着試験の結果

5.2.4　鋼床版の補強効果

大型車交通量，実橋の路面温度データ，室内での載荷試験結果を基にFEM解析して推定した各混合物の弾性係数および輪荷重走行試験と実交通路線での疲労損傷度が等価となるように算出した等価軸数を用いて累積損傷度を算出した。疲労寿命の定義は，疲労き裂が部材を貫通するまでの寿命とした。詳細については既報を参照されたい。**図－７**にこれらの弾性係数を用いた累積損傷度の計算結果を示す。荷重モデルの設定条件により疲労寿命は大きく異なるが，デッキプレート貫通き裂の評価位置に着目すると，高剛性混合物を基層に用いることで，一般的なグースアスファルト混合物と比較して3.1倍の寿命比となる[6]。

開発品の特長を最大限に活用し，アスファルトでは達成できない高剛性な材料により鋼床版の補強効果が得られる舗装材料となる。



図－７　各月の累積損傷度の計算結果

5.2.5　適用事例

「常磐自動車道山元～岩沼間舗装工事」における阿武隈大橋Ⅱ期線の鋼床版に高剛性アスファルト舗装を施工した[8]。**表－６**に施工概要，**写真－４**に施工状況を示す。本工事では接着防水材として，アスファルトではなく植物由来の材料（開発品Ｂ）を使用した。

今後は，高剛性アスファルト舗装による鋼床版の補強効果を含め，舗装としての耐久性を調査する予定である。

表－６　施工概要

項　目	内　容
工事名	常磐自動車道阿武隈大橋Ⅱ期線
計画交通量	25,272台／日・方向（大型車混入率23.65%）
舗装	アスファルト舗装 t=75㎜
舗装施工日	2020年９月７～19日
施工規模	橋長：534.3m，面積：5,200㎡

写真－４　施工状況

5.3　植物由来の舗装材料

5.3.1　概要

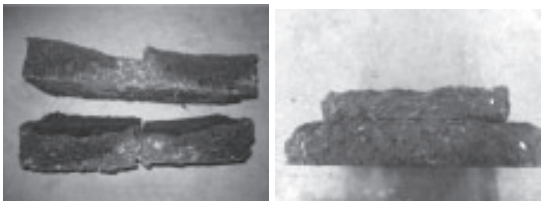
これまでは，植物由来のバインダをアスファルトと混合した適用例について紹介したが，ここではアスファルトを使用しない開発品Ｃを用いた舗装材料の適用事例について述べる[9)]。

5.3.2　材料と混合物特性

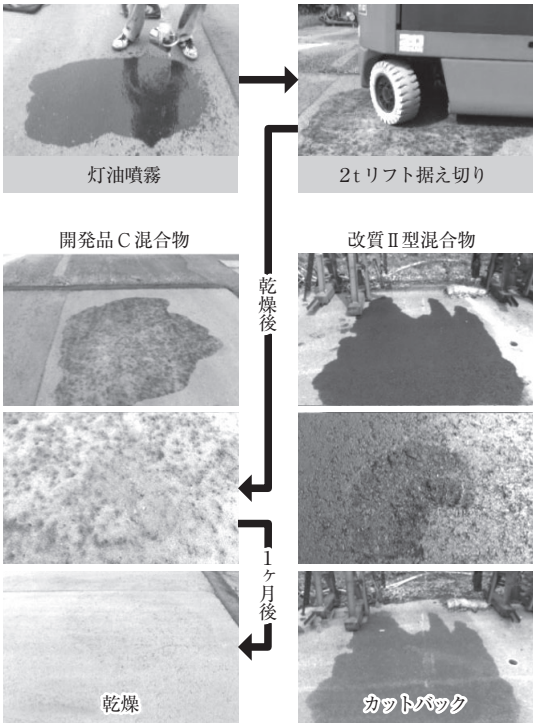
開発品Ｃは，開発品ＡやＢよりも低温可撓性を大きく改善しており低温でも脆性破壊しにくい。

高安定性アスコンでも示したとおり，開発品Ｃを用いた混合物は，塑性変形抵抗性に優れているため，通常のホイールトラッキング試験における動的安定度が最大値に達する。また，**写真－５**に開発品Ｃと改質Ⅱ型をそれぞれ使用した混合物を水浸ホイールトラッキング試験により比較した結果を示す。改質Ⅱ型でも剥離するような骨材を用いても，開発品Ｃは剥離を生じないことから，耐水性も非常に高いことが分かる。

写真－６に開発品Ｃと改質Ⅱ型をそれぞれ用いた舗装に2Lの灯油を噴霧した後，直ちに２ｔフォークリフトのタイヤで２回往復させて，混合物の耐油性を評価した結果を示す。改質Ⅱ型混合物は灯油でアスファルトがカットバックされ，骨材飛散が見られたが，開発品Ｃ混合物は灯油にカットバックされず，灯油が乾燥した後は元の状態に戻る。



写真－５　開発品Ｃの耐水性評価結果

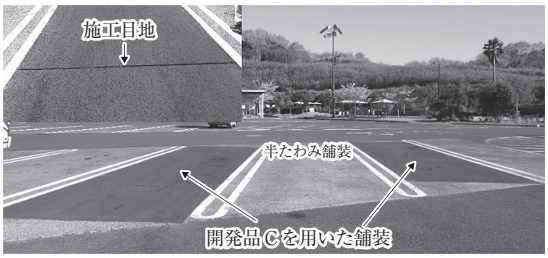


写真－６　開発品Ｃの耐油性評価結果

5.3.3　施工事例

本開発品Ｃを用いた密粒度混合物（13）を高速道路サービスエリアの大型車駐車場にて試験施工を行い，実路における長期耐久性等を評価した。

開発品Ｃは，セメントコンクリートのように一定間隔に目地を設置することで，応力緩和を図る必要がある。試験施工では，舗設後に施工延長方向中央部にカッター目地を挿入し，アスファルト系注入目地材を注入した。**写真－７**に施工目地の設置と施工完成状況を示す。施工２年後の追跡調査では，わだち掘れと表面粗さの測定を行った結果，わだち掘れによる変形および油漏れによる表面粗さはほぼ観察されなかった。施工１年半後から，基層で観察されたひび割れ部と同じ位置でリフレクションクラックが見られた。剛性の



写真－7　施工目地の設置状況と施工完成状況

高いセメントコンクリート舗装では，版厚により荷重支持性能を確保しているため，開発品についてもこのような構造設計方法を検討する必要がある。

6．おわりに

これまでの検討により，すでに植物由来の材料を実際の舗装材料として実証フェーズを終え，導入拡大を図っている。今後も様々な植物由来材料が舗装材料として研究開発されていくと考えられるが，今回紹介した材料は，汎用性が高く，骨材との高い接着性を有していること，さらに従来のアスファルト舗装と比較し高い耐久性を有していることから，植物由来の材料の利用だけではなく付加価値を高めた素材として有効性が高いものと考えられる。また，CO_2の固定化の観点からも重要と考えられる。ただし，本開発品をアスファルトの100%代替として適用する方法あるいはリサイクル方法といった課題が残されているため，今後はこれらの課題の解決に取り組む所存である。

参考文献

1）久保和幸，寺田剛，川上篤史，平川一成：7.2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価技術に関する研究①，国立研究開発法人土木研究所，平成27年度プロジェクト研究・重点研究報告書，2015.

2）経済産業省等：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略，2021.6.18.

3）T. HIRATO, M. MURAYAMA, H. SASAKI: DEVELOPMENT OF HIGH STABILITY HOT MIX ASPHALT CONCRETE WITH HYBRID BINDER, ISAP2012 International Symposium, 2012, 12-115.

4）平戸利明，幸坂優一，村山雅人：ハイブリットバインダーによる耐流動性に優れた高安定性アスファルト混合物の開発，第17回舗装技術に関する懸賞論文，pp.76-82, 2011.12.

5）三木千壽，鈴木啓悟，加納隆史，佐々木栄一，石田稔，高森博之：鋼床版の疲労へのSFRC舗装による予防補強とその健全性モニタリング，土木学会論文集，Vol.62, No.4, pp.95, 2006.12.

6）佐々木亮太，平戸利明，村山雅人，高橋茂樹，稲荷優太郎：高剛性アスファルト混合物による鋼床版補強工法の開発，第21回舗装技術に関する懸賞論文，pp.1-8, 2019.12.

7）和田吉憲，小野秀一，松本政徳：新材料による鋼床版補強に関する研究，第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.177-180, 2016.11.

8）麻上淳平，大林正和，久保寛仁：阿武隈大橋における鋼床版補強用アスファルト混合物の施工事例，日本道路会議，2021.11.

9）T. HIRATO, Hui. Qu, F. KATO, S. TAKAHASHI：Development and evaluation of pavement materials utilizing renewable resources deriving from plants, Proceedings of the 7th Eurasphalt & Eurobitume Congress v1.1, 2021.6.

アスファルトの一部をクラフトリグニンで置換した“バイオアスファルト混合物”の開発

(The Development of the Bio-Asphalt Mixture Utilizing Kraft Lignin Derivatives to Replace a Portion of the Asphalt Binder)

岡島穂高*・青木政樹**・辻　志穂***・宮脇正一****

わが国は，令和２年10月に「2050年までにカーボンニュートラル，脱炭素社会の実現を目指す」ことが内閣総理大臣により宣言された。このことを受け，あらゆる産業分野において脱炭素社会の実現に向けた技術開発が活発化している。われわれは舗装分野の一員として目標達成に貢献することを目指し，石油アスファルトの一部を植物由来のクラフトリグニンで置換する混合物『バイオアスファルト混合物』の開発を行っている。これまでに筆者らは，バイオアスファルト混合物の動的安定度や疲労ひび割れ抵抗性が一般的なアスファルト混合物と同等であることを確認しており，今後は，より置換率を高めてアスファルト混合物のカーボンニュートラル化を目指す所存である。

１．はじめに

わが国では，2020年10月の第203回臨時国会において2050年までに温室効果ガスの排出を国全体としてゼロにする「2050年にカーボンニュートラル，脱炭素社会の実現を目指すこと」が宣言された。これを受け各省庁からは，カーボンニュートラル・脱炭素社会の実現のための様々な施策が打ち出されている[1)]。

道路建設分野に関係する取り組みとしては，インフラ長寿命化による省CO_2の推進，省CO_2に資する材料等の活用促進・技術開発，建設施工分野におけるICT施工の推進，革新的建設機械の導入拡大，道路のインフラサービスの省エネ化（道路照明のLED化），質を重視する建設リサイクルの推進などの取り組みが国土交通省から打ち出されている[2)]。

筆者らは，「省CO_2に資する材料等の活用促進・技術開発」に対応する技術として，アスファルト混合物に使用する舗装用石油アスファルトを植物由来の樹脂である「リグニン」で置換する技術の開発を実施している。本稿では，アスファルトの一部をリグニンで置換したアスファルト混合物（以下，バイオアスコン）の性状を確認した結果とバイオアスコンのCO_2排出原単位の試算結果を報告する。

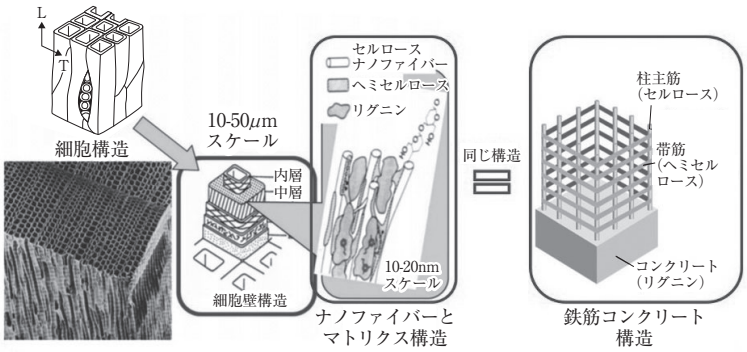
２．リグニンの概要

2.1　リグニンの概要[3)]

リグニンは，セルロースやヘミセルロースとともに木材の細胞壁を構成する成分のひとつであり，木材の質量の２～３割程度を占めている。細胞壁において，セルロースは結晶化することで微細な繊維を形成し，ヘミセルロースはこの繊維を架橋する役割を果たしている。リグニンはセルロースとヘミセルロースの隙間を充填しつつ結合させ，細胞壁を強固にする働きをしていると考えられている（**図－１**参照）。

またリグニンは，フェニルプロパン単位がランダムに酸化重合してできた芳香族系高分子化合物であり，地球上でセルロースに次ぎ２番目に多量に存在する有

*おかじま　ほだか　大成ロテック㈱　技術研究所　生産技術開発室　主任
**あおき　まさしげ　大成ロテック㈱　技術研究所　生産技術開発室　室長
***つじ　しほ　日本製紙㈱　基盤技術研究所　木質素材研究室Ⅱ　主任
****みやわき　しょういち　日本製紙㈱　基盤技術研究所　木質素材研究室Ⅱ　主席



図－1　細胞壁の構造の概念[4)]

機化合物であると言われている[5)]。しかし，構造が複雑で多様であることなどからマテリアル利用は十分に行われていない[5)]。

2.2　製紙工程で排出されるクラフトリグニン

リグニンは紫外線により茶褐色に変色する性質がある。このためリグニンは，製紙工程でパルプを抽出する際に黒液として分離された後，黒液に含まれる薬液などから分離され副産物として排出される。この工程では水酸化ナトリウムと硫化ナトリウムなどで高温高圧処理を行う“クラフト法”が広く用いられており，クラフト法由来のリグニンを“クラフトリグニン”と呼ぶ。

図－2に示すようにクラフトリグニンは，クラフト法で排出される黒液に含まれており，燃焼することで熱エネルギーとして回収されるのが一般的である。

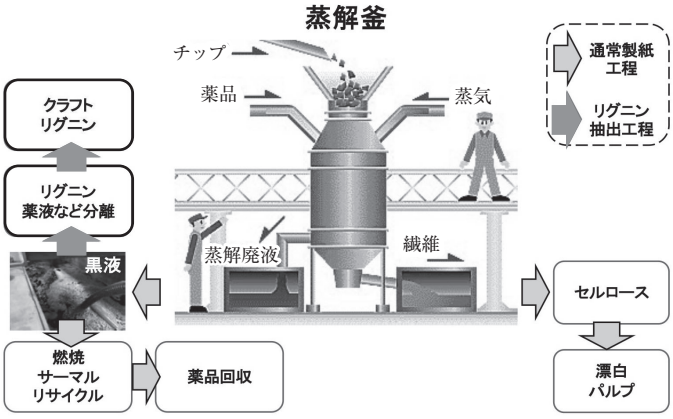
製紙工程で排出されるクラフトリグニンのほとんどはサーマルリサイクルに用いられているが，より付加価値のある利用法が求められている。クラフト法ではクラフトリグニンの分解反応や縮合反応などが生じるが，クラフトリグニンは一般に天然リグニンに比べ分子量が小さく，フェノール性水酸基を多く含んでいるなどの特徴を有する（**図－3**）。

なお，製紙工程で排出されるCO_2は，製品である紙に付与される。そのためクラフトリグニンの製造工程のCO_2排出原単位は，クラフトリグニン抽出工程（黒液からリグニンを抽出）で排出される77.0kg-CO_2/t（原油換算：29.4リットル／t×2.619kg-CO_2／リットル）のみとなる。一方で，クラフトリグニンには炭素が約60%含まれており[8)]，クラフトリグニン1tは2,200kgのCO_2を吸収して炭素として固定していると考えられる（1t×60%×44/12※=2,200kg）。（※CO_2/Cの分子量＝44/12）

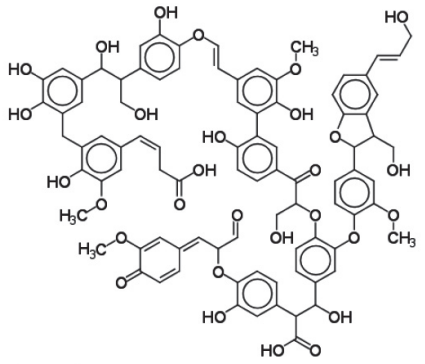
2.3　海外でのアスファルト舗装へのリグニンの適用事例

海外においては，アスファルト混合物に使用されるアスファルトとの置換やアスファルト混合物の性状向上などの目的でリグニンを用いる研究開発が行われている。

オランダのHolding de Vier Ambachten社とWageningen大学は，リグニンを用いたアスファルトビチューメンに関する研究を実施しており[9)]，クラフトリグニンでアスファルトビチューメンの半分を置換したアスファルト混合物で歩道や車道を施工している[10)]。また，カナダのFPInnovations社でも同様に，アスファルトの一部をクラフトリグニンで置換したアスファルト混合物の実用化に向けた研究を行っている[11)]。



図－2　クラフト法を用いた製紙工程の簡略図[6)]を元に作図



図－3　針葉樹由来のクラフトリグニンのモデル構造[7)]

実験室レベルでは，アスファルトの一部を各種単離リグニンで置換したバインダの研究が行われている。Vanら（2016）は，オルガノソルブ蒸解法[12]により単離したリグニンをより高配合にするために，リグニンに豊富に含まれる水酸基にフェニルグリシジルエーテルやエチルヘキシルグリシジルエーテルを反応させ疎水性を向上させ，アスファルトとの親和性を向上させる試みを行っている[13]。また，Xuら（2017）は，アスファルトにウッドリグニン（Sigma-Aldrich製）を添加することで，$G^*/\sin\delta$が向上することや，回転薄膜加熱試験や加圧劣化試験によるカルボニル基の増加が抑制されることを報告している[14]。

これらの研究では，CO_2排出原単位の削減に限らずアスファルト混合物の性能向上が検討されており，クラフトリグニンを利用することでアスファルト混合物の耐久性が向上し，ライフサイクルにおけるCO_2排出量（$LCCO_2$）を削減できる可能性がある。

3．研究概要

3.1　概要

筆者らは，黒液から精製したクラフトリグニンをアスファルトの一部と置換したバイオアスコンの開発を行っている。

以下では，室内および合材工場で製造したバイオアスコンの性状を確認した結果を示す。

3.2　使用材料および配合，製造手順

(1)　使用材料

バイオアスコンに使用した骨材およびアスファルトの性状を**表－1，2**に示す。

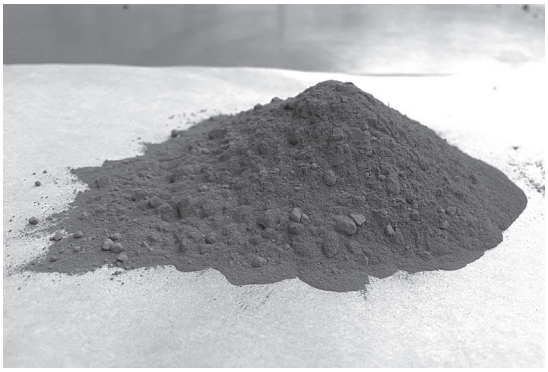
バイオアスコンに使用したクラフトリグニンは，針葉樹の木材チップから抽出されたもので，**写真－1**に示すように常温で茶褐色の粉体である。なお，アスファルトには施工性改善型のポリマー改質アスファルトⅡ型（以下，改質Ⅱ型）を使用した。

表－1　使用骨材

呼び名		5号砕石	6号砕石	7号砕石	粗目砂	細目砂	石　粉
材　質		安山岩	安山岩	安山岩	山　砂	丘　砂	石灰岩
見掛密度（g/cm³）		2.822	2.838	2.843	2.688	2.675	2.699
ふるい目の開き（mm）	26.5	100.0					
	19.0	83.9	100.0				
	13.2	9.0	89.0	100.0	100.0		
	9.5	0.7	50.0	100.0	100.0		
	4.75		2.5	86.0	99.4	100.0	
	2.36		0.3	11.7	95.3	99.3	
	0.600			0.7	55.0	82.0	
	0.300				15.5	55.0	100.0
	0.150				1.9	13.5	99.5
	0.075				0.2	1.0	88.2

表－2　使用した改質Ⅱ型の性状

項　　目		測定値
軟化点	（℃）	63
伸度（15℃）	（cm）	100+
タフネス（25℃）	（N・m）	21.2
テナシティ（25℃）	（N・m）	14.5
針入度（25℃）	（1/10mm）	48
薄膜加熱質量変化率	（%）	−0.10
薄膜加熱後の針入度残留率	（%）	72.9
引火点	（℃）	346



写真－1　本稿で用いたクラフトリグニン

⑵　**配合**

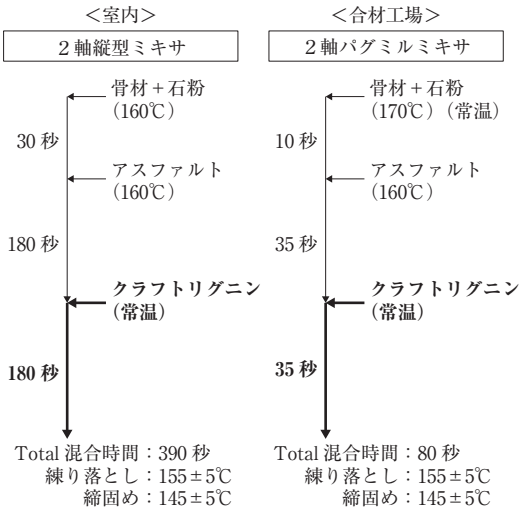
基本としたアスファルト混合物は，改質Ⅱ型を使用した最大粒径20㎜の密粒度アスファルト混合物（以下，改質Ⅱ型アスコン）とした。また，バイオアスコンは改質Ⅱ型アスコン中の改質Ⅱ型の容積に対してクラフトリグニンを５，10％置換した２種類とした。改質Ⅱ型アスコンとバイオアスコンの合成粒度と配合を**表－３**に示す。

⑶　**混合物の製造手順**

混合物の製造手順を**図－４**に示す。図中の太字部分は通常の改質Ⅱ型アスコンの製造手順に追加した工程である。なお，筆者らの事前検討において，クラフトリグニンは140℃程度から部分的に軟化し，180℃以上で一部が固化（変性）する現象が見られた。このことから，バイオアスコンの混合温度は160℃，締固め温度は145℃に設定した。

表－３　合成粒度と配合

ふるい目（㎜）		合成粒度					粒度範囲
		室　内			合材工場		
通過質量百分率（%）	26.5	100.0			100.0		100
	19.0	98.9			98.8		100～95
	13.2	82.8			83.0		90～75
	4.75	54.9			54.6		65～45
	2.36	40.9			40.6		50～35
	0.600	26.2			26.6		30～18
	0.300	15.0			15.2		21～10
	0.150	7.7			8.3		16～6
	0.075	5.6			5.9		8～4
リグニン置換率（vol%）		0	5	10	0	10	－
アスファルト量（wt%）		5.20	4.94	4.68	4.90	4.40	－
リグニン量（wt%）		0.00	0.34	0.68	0.00	0.64	－



図－４　バイオアスコンの製造手順

3.3　評価項目

バイオアスコンと改質Ⅱ型アスコンは，**表－４**に示す項目についてその性状を確認した。

表－４　評価項目と試験方法

評価項目	試験方法	備考
耐水性	マーシャル安定度試験 水浸マーシャル安定度試験	試験法便覧B001
耐流動性	ホイールトラッキング試験	試験法便覧B003
疲労抵抗性	曲げ疲労試験	試験法便覧B018T ・試験温度：０℃ ・載荷周波数：5Hz ・ひずみ：400μm
低温時のたわみ性	曲げ試験（-10℃）	試験法便覧B005

４．試験結果

4.1　室内試験

室内で製造したそれぞれの混合物の性状試験結果を**表－５，６**に示す。**表－５**より，クラフトリグニン置換率が高くなるほど空隙率は大きく，飽和度が小さくなったが，残留安定度はいずれの置換率においても90％以上となった。また，クラフトリグニン置換率が高くなるほど，動的安定度は大きく，曲げ疲労試験での破壊回数は多くなる傾向が見られた。このことから，クラフトリグニンはアスファルトに溶解してアスファルトを改質した可能性があると考えられた。

一方，筆者らは本実験とは別に実施したアスファルト単体とクラフトリグニンの混合実験において，クラ

表－５　マーシャル性状値

リグニン置換率（vol%）	空隙率（%）	飽和度（%）	安定度（kN）	フロー値（1/10㎜）	残留安定度（%）
0	3.8	76.4	11.6	32	96.3
5	3.9	75.6	10.1	31	91.9
10	4.2	74.1	10.9	30	99.9

表－６　混合物性状試験結果

リグニン置換率（vol%）	動的安定度（回／㎜）	曲げ疲労試験※ 破壊回数（回）
0	1,190	27,243
5	2,390	34,941
10	2,570	35,060

※試験温度０℃，載荷周波数5Hz，ひずみ400μm

フトリグニンが溶解せず粉体の状態でアスファルト中に残留していたことを確認している。

これらのことから，アスファルト混合物中のクラフトリグニンは，一部が溶解してアスファルトを改質するものの，細骨材として残留している可能性があると考えられた。

4.2　合材工場での製造実験

合材工場で製造したバイオアスコンと改質Ⅱ型アスコンの性状を確認した。性状試験結果を**表－7**に示す。

表より，合材工場で製造したそれぞれの混合物の性状は，室内で製造した場合と同等であることを確認した。

以上のことから，アスファルトのリグニン置換率が10%のバイオアスコンは，比較した改質Ⅱ型アスコンと同等の性能を有するものであり，アスファルト合材工場での製造が可能と判断した。

表－7　プラント製造時の混合物性状試験結果

リグニン置換率（vol%）	動的安定度（回／㎜）	曲げ疲労試験破壊回数（回）	曲げ強度（MPa）	曲げ破断ひずみ
0	1,800	30,950	10.10	0.039
10	2,080	37,815	10.17	0.038

5．バイオアスコンのCO_2排出原単位の試算

舗装性能評価法別冊[15]を参考に，クラフトリグニンをアスファルトの容積に対して0，5，10%，更にはほぼカーボンニュートラルとなる35%置換した場合のCO_2排出量を試算した。CO_2排出量の試算では，**表－8**に示す材料とその使用量，CO_2原単位を使用した。

なお，クラフトリグニンのCO_2排出原単位は，製紙工程において黒液からクラフトリグニンを抽出する際に排出されるCO_2（77.0kg-CO_2/t）と，クラフトリグニンを合材工場へ輸送する際に排出されるCO_2（21.37kg-CO_2/t）の合計（98.37kg-CO_2/t）とした。また，クラフトリグニンはその質量の60%が大気中のCO_2由来の炭素と考えられていることから[8]，クラフトリグニンに固定されているCO_2は−2,200kg-CO_2/tとした。

改質アスファルトをクラフトリグニンで0～35%容積置換した場合の混合物のCO_2排出量の算出結果を**表－9**に示す。

表より，それぞれの混合物を1t製造した場合のCO_2排出量は，改質Ⅱ型アスコンが60.2kg-CO_2/t，容積置換率5%のバイオアス

表－8　CO_2排出量の算出に用いた数値[15]を元に作成

分　類	品　目	使用量 混合物800tあたり				投入単位	CO_2原単位（kg-CO_2／投入単位）
配　合	リグニン置換（vol%）	0	5	10	35	−	−
素　材	改質Ⅱ型アス	41.6	39.5	37.4	26.9	t	472.62
	5号砕石	125.1	125.0	124.9	124.5	t	4.26
	6号砕石	212.4	212.2	212.0	211.2	t	4.26
	7号砕石	113.8	113.7	113.6	113.1	t	4.26
	粗目砂	193.4	193.2	193.1	192.3	t	3.56
	細目砂	68.3	68.2	68.2	67.9	t	3.56
	石粉	45.5	45.5	45.4	45.3	t	4.22
	リグニン	0.0	2.7	5.4	18.8	t	98.37
製　造	電力	3280.0				kWh	0.555
	A重油	8630.9				L	2.710
	軽油	80.0				L	2.619
生産量		800t／日					−
リグニン（リグニンによるCO_2固定量）		0.0	2.7	5.4	18.8	t	−2,200=−(1,000kg × 60% × 44/12)

表－9　CO_2排出量の算出結果（混合物製造1tあたり）

種類	リグニン置換（vol%）	アス量（wt%）	リグニン（wt%）	CO_2排出量（kg-CO_2）	CO_2削減率（%）
改質Ⅱ型	0	5.2	0.0	60.2	0%
バイオアスコン	5	4.9	0.3	51.8	13.9%
	10	4.7	0.7	43.5	27.7%
	35	3.4	2.3	2.1	96.6%

コンが51.8kg（CO_2排出量削減率13.9%），容積置換率10%が43.5kg-CO_2/t（CO_2排出量削減率27.7%），容積置換率35%が2.1kg-CO_2/t（CO_2排出量削減率96.6%）となった。

6．まとめ

本研究で得られた知見を整理して以下に示す。

①アスファルトの一部をクラフトリグニンで置換したバイオアスコンは，耐水性，耐流動性および疲労抵抗性が改質Ⅱ型アスコンと同等以上であった。

②クラフトリグニンは，混合物製造時にアスファルトに溶解してアスファルトを改質するが，一部は粉体として混合物中に存在していると考えられる。

③アスファルトに対して容積率で５%，10%，35%をクラフトリグニンで置換したバイオアスコンのCO_2排出原単位は，改質Ⅱ型アスコンに比べそれぞれ13.9%，27.7%，96.6%削減できると試算された。

7．おわりに

上述のとおり，筆者らはアスファルトをクラフトリグニンで10%容積置換した場合に通常のアスファルト混合物と同等の性能であることを確認しているが，アスファルト混合物をカーボンニュートラル・カーボンネガティブなものとするためには，更なる置換率の向上が必要である。

また本稿では，アスファルト混合物の製造過程までのCO_2排出量の削減量を試算しており，アスファルト混合物の運搬過程と施工過程のCO_2排出量は加味されていない。

今後は，クラフトリグニンの置換率を高めて舗装材料としてのカーボンネガティブ化を目指すとともに，アスファルト舗装工事全体としてカーボンニュートラル・カーボンネガティブを可能とする様々な技術の開発を行う所存である。なお，アスファルトとクラフトリグニンの置換率を高める研究に関しては，2020年度よりNEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラムの助成事業を開始している。

── 参考文献 ──

1）経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略，https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf，2021年６月18日

2）“カーボンニュートラルに向けた道路分野の貢献について”，赤羽国土交通大臣提出資料（2020），https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001387167.pdf（2021.9.22閲覧）

3）高野俊幸．“リグニンの利用に向けて．”ネットワークポリマー 31.5 (2010): 213-223.

4）秀建設株式会社HP：Vol.3「木」は，なぜそんなに強いのか？，https://hidekensetsu.com/gallery/Blog/Vol.3.php

5）農林水産技術会議事務局：木質リグニンからの材料製造技術の開発，574号，p.1-66, (2017)

6）https://www.nipponpapergroup.com/knowledge/chip/factory2.html（2021.10.21閲覧）

7）Kun, Dávid, and Béla Pukánszky. "Polymer/lignin blends: Interactions, properties, applications." European Polymer Journal 93 (2017): 618-641.

8）Gellerstedt, Göran. "Softwood kraft lignin: Raw material for the future." Industrial Crops and Products 77 (2015): 845-854.

9）P.A. Landa, R.J.A Gosselink, “Lignin-based bio-asphalt”, patent number:WO2019092278 (2019)

10）https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2019/9/the-many-applications-of-lignin-bio-asphalt（2021.9.22閲覧）

11）https://web.fpinnovations.ca/lignin-from-canadian-forests-the-secret-ingredient-for-greener-roads/（2021.9.22閲覧）

12）コトバンク：「木材成分分離」化学事典 第２版「木材成分分離」の解説，https://kotobank.jp/word/%E6%9C%A8%E6%9D%90%E6%88%90%E5%88%86%E5%88%86%E9%9B%A2-2123743

13）Van Vliet, Dave, et al. "Lignin as a green alternative for bitumen." Proceedings of the 6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech. 2016.

14）Xu, Guangji, Hao Wang, and Hongzhou Zhu. “Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin.” Construction and Building Materials 151 (2017): 801-808.

15）（社）日本道路協会：舗装性能評価法　別冊，P.186付表-1.9.9e，2008年３月

低燃費舗装のライフサイクルCO_2分析について

(Life Cycle CO_2 Analysis of Fuel Efficient Pavement)

川　上　篤　史*

舗装路面の転がり抵抗を減少させることは自動車の燃料効率を改善し，排気ガス中のCO_2排出量を減少させることにつながると考えられる。実際に，筆者らは，舗装路面の転がり抵抗を低減させたアスファルト舗装（低燃費舗装）を開発し，走行実験を行うことによって車両のCO_2排出量を約１～３％削減することを確認した。一方，舗装技術のCO_2排出量を定量的に評価するためには，材料製造，材料輸送，施工，廃棄等のライフサイクルを通じた分析を行うことが重要である。

本稿は，低燃費舗装のCO_2削減効果を明らかにするため，通常のライフサイクル（材料製造，材料輸送，施工，廃棄（打換え））のCO_2排出量の評価だけでなく，低燃費舗装の供用時における自動車のCO_2排出量低減効果を含めた，拡張ライフサイクルCO_2分析（ELC-CO_2）を行った。その結果，低燃費舗装は，通常の舗装（排水性舗装）に比べ，CO_2排出量を70％削減することができることが試算された。

１．はじめに

我が国の2019年度の二酸化炭素排出量は11億800万トンであり，運輸部門が18.6%，この運輸部門の86.1%（日本全体の16%）は自動車が占めている[1)]。また，2020年10月30日に行われた地球温暖化対策推進本部において，総理大臣より2050年カーボンニュートラル，脱炭素社会の実現に向けた各種取り組みを加速するよう指示された[2)]。このことから，舗装分野においても工事や維持修繕時，供用時におけるCO_2排出量の削減が求められている。

ここで，舗装分野におけるCO_2削減対策として，加熱アスファルト混合物の製造温度低下技術，常温製造技術，リサイクル技術，長寿命化技術が挙げられる[3)]。筆者らは，これら舗装技術のCO_2削減効果を定量的に評価するため，特にプラント再生および現位置再生，長寿命舗装，延命化技術，中温化技術に着目してライフサイクルCO_2分析を行った[4,5,6)]。

また，近年，舗装分野における新たなCO_2削減対策として，舗装の転がり抵抗が注目されている。舗装の転がり抵抗は，舗装表面のテクスチャと粗さを改善することによって，低減させることができる。そして，この転がり抵抗を低減させることは自動車の燃料効率を改善し，排気ガス中のCO_2排出量を減少させることにつながる。そこで筆者らは，転がり抵抗の低いアスファルト舗装（以下，低燃費舗装）の開発とそのメカニズム解明に向けた研究を行ってきた[7,8,9)]。その中で，自動車の走行実験によって車両のCO_2排出量を約１～３％削減することを確認した。この転がり抵抗を低減する舗装技術は，省エネルギー対策や温室効果ガス削減対策として期待できるとともに，国連が提唱している持続可能な開発目標（SDGs）の達成にも寄与すると期待している。

将来の持続可能な社会に向け，舗装技術のCO_2排出量を評価するためには，材料生産，材料輸送，施工，廃棄（打換え）等を含むライフサイクルを通じて行うことも重要である。

本稿では，低燃費舗装のCO_2削減効果を明らかにするため，低燃費舗装の材料製造，材料輸送，施工，廃棄（打換え）等のライフサイクルCO_2分析を行うとともに，低燃費舗装による自動車CO_2排出量低減効果を考慮に入れた拡張ライフサイクルCO_2分析結果[10)]について紹介する。

*かわかみ　あつし　国立研究開発法人土木研究所　舗装チーム

2．研究方法

2.1　ライフサイクルCO_2算出手法

アスファルト舗装のライフサイクルアセスメント（LCA）に関する研究は，Santero[11]，Harvey[12]，Ram[13]らによって世界中で行われている。また，LCAの試算をモデル化した，LCAツールもPaLATE，Athena Pavement LCA，VTTI/UCなど多く開発されている。しかし，LCA分析には消費される資源やエネルギー量，排出される環境影響物質量を算出することが必要となるが，これらは国や地域の経済状態や環境に対する取り組みによって異なるため，その国に適した環境負荷原単位を用いることが重要である。

日本における舗装のLCAに関する研究は，筆者らも日本でのエネルギー消費量や環境影響物質の排出量原単位を用いて試算してきた。評価対象となる環境影響物質として，消費エネルギー，CO_2，SO_X，NO_X，SPMを取り上げるとともに，それら各環境負荷項目を全てコスト換算して統合化にするLIME（Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）係数[14]を用いて検討を行った。このLIME係数は日本の実情を考慮に入れて設定されたものである。なお，舗装のライフサイクルCO_2評価の算出方法については，日本道路協会「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック」[15]により取りまとめられている。本ガイドブックのLCCO_2算出のためのCO_2排出量原単位は，産業連関法と積み上げ法の両方を用いるハイブリッド法を採用している。本研究においても，本ガイドブックによる試算方法を用い，アスファルト舗装の材料製造，材料輸送，施工，廃棄（路盤の打換え）の各段階のCO_2排出量を定評的に試算した。

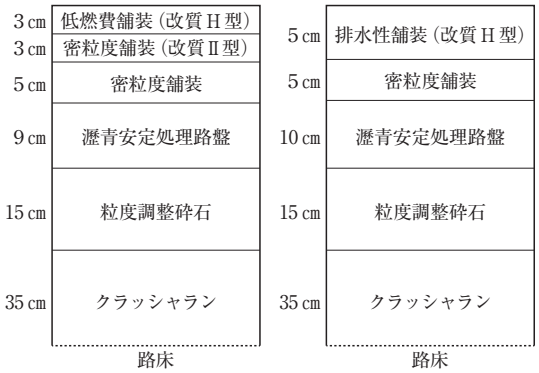
また，低燃費舗装のライフサイクルCO_2評価には，低燃費舗装の供用時における，自動車のCO_2排出量削減効果を試算に入れる必要があると考えた。道路のLCAに自動車のCO_2排出量を検討に入れることは，1998年に中村ら[16]によって拡張ライフサイクルCO_2評価（ELC-CO_2）として提案されている。したがって，本研究では，低燃費舗装の材料製造から輸送，施工，再生利用するまでのライフサイクルCO_2を算出し，低燃費舗装による自動車のCO_2低減率に関する実測データを用いることによって，低燃費舗装を一般国道に適用した際の自動車から排出されるCO_2排出量の低減効果を定量的に試算した。

2.2　低燃費舗装のライフサイクルCO_2の試算

低燃費舗装のライフサイクルCO_2の算出方法は，前述の道路協会「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック」に準拠して算出した。CO_2排出量は，材料製造，材料輸送，施工，廃棄（路盤の打換え）の各段階（ライフステージ）毎に整理した。

試算に用いた舗装構造は，舗装計画交通量区分のN6交通である。これは都市部の国道の一般的な交通量で，１日あたり１車線の大型車の交通量が1,000台以上3,000台未満である。舗装断面を**図－１**に示す。各舗装厚は，表層および基層としてアスファルト混合物層が10～11㎝，上層路盤層として瀝青安定処理路盤９～10㎝と粒度調整砕石が15㎝，下層路盤層としてクラッシャラン35㎝で構成されている。舗装のライフスパン（１サイクル）は，新設から10年で上層路盤および表層・基層を打換えることとした。

アスファルト舗装の材料や建設機械の燃料のCO_2排出量原単位を**表－１**に示す。低燃費舗装は，路面の変形を抑えるためポリマー改質アスファルトＨ型を用いている。また，比較対象として，同じポリマー改質アスファルトＨ側を用いる排水性舗装とした。



図－１　試算に用いた舗装の断面

表－１　CO_2排出量原単位

材　料	単　位	CO_2 emissions（kg-CO_2／単位）
骨材	t	7.98
砂	t	11.54
スクリーニングス	t	7.98
フィラー	t	5.41
アスファルト（60/80）	t	107.56
アスファルト乳剤	L	5.44
改質アスファルトⅡ型	t	488.82
改質アスファルトＨ型	t	670.40
電力	kWh	0.46
Ａ重油	L	2.91
軽油	L	4.19

輸送に関して，骨材等一般的な材料に関しては20kmで統一し，10トンダンプトラックで輸送することに統一した。建設機械の運搬距離も20kmである。ただし，アスファルトの関しては，日本における製油所の減少を考慮し，アスファルトローリー車240kmの輸送とした。

2.3　自動車からのCO_2排出量の試算

自動車からのCO_2排出量は，自動車の種類および交通量によって大きく異なる。本試算では，自動車のCO_2排出量原単位として，道路環境アセスメントに用いる２車種別のCO_2排出係数式（**式－1, 2**）[17] を用いた。対象とした道路は，首都圏内である茨城県の道路とし，平均旅行速度，交通量，平均車線数は，道路交通センサスより抽出した。道路種別として高規格幹線道路，一般国道，主要地方道，一般都道府県道に整理した（**表－2**）。

$$EF_L=1501.20185/V-2.40935 \times V+0.02115 \times V^2+174.47635 \quad \cdots\cdots(1)$$

$$EF_H=908.52069/V-23.49899 \times V+0.18396 \times V^2+1364.81344 \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，EF：CO_2排出係数（EF_Lは小型車，EF_Hは大型車類）[g-CO_2/km・台]，v：平均走行速度［km/h］

表－2　１日あたり・１車線あたり交通量（茨城県）

道路種別	昼夜12時間平均旅行速度（km/h）	24時間平均交通量（台／日）		平均車線数（加重平均）
		小型車	大型車	
高規格幹線道路	81.3	21,985	8,359	4.63
一般国道	37.2	13,797	3,651	2.85
主要地方道	37.5	7,128	1,124	2.34
一般都道府県道	36.8	4,686	636	2.14

自動車から排出されるCO_2量は，この排出係数に交通量，距離を乗ずることによって算出することができる。また，平均車線数により，道路種別毎の１日あたり・１車線あたりの自動車CO_2排出量を算出した。なお，後述の試算ではこの一般国道を対象とした。

2.4　低燃費舗装のCO_2削減効果の実測

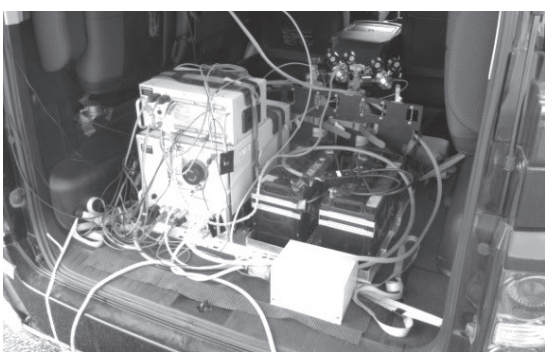
ライフサイクルCO_2分析において，低燃費舗装のCO_2削減効果を試算するため，過去に筆者らが実験を行った自動車からのCO_2排出量の実測値を用いた。

自動車からのCO_2排出量の実測には，**表－3**に示す，４種類の路面性状を有する舗装において，自動車を走行させて測定を行った。各舗装の延長は300mであった。実験は，試験路面上において，**写真－1**に示す試験車両を定速走行させ，**写真－2**および**表－4**に示す排気ガス計測システムを用いて排気ガス濃度を計測した。試験車両は，総排気量3,500CCのガソリン車で，燃料消費率は10･15モードで8.20［km/L］である。走行速度は，20, 40, 60, 80km/hの４条件とした。排気ガスは，CO，CO_2，THC，NOx等の排気ガス濃度について測定し，記録周期は10Hzである。

表－3　試験工区の路面性状

工　区	排水性舗装（13）	密粒度舗装（13）	低燃費舗装（5）	低燃費型排水性（5）
工区延長（m）	300	300	300	300
最大粒径（mm）	13	13	5	5
平たん性σ（mm）	0.87	0.75	0.58	0.55
平均プロファイル深さMPD（mm）	1.88	0.49	0.74	0.66

写真－1　排気ガス測定実験車両外観



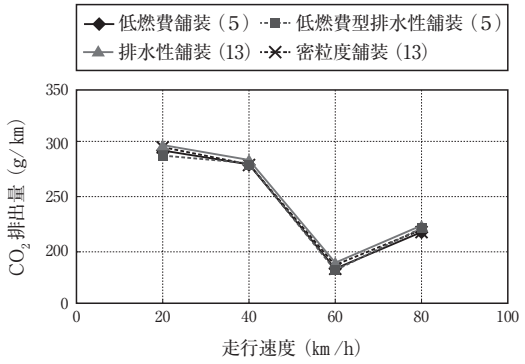
写真－2　排気ガス計測装置

表－4　排気ガス測定に係る装置

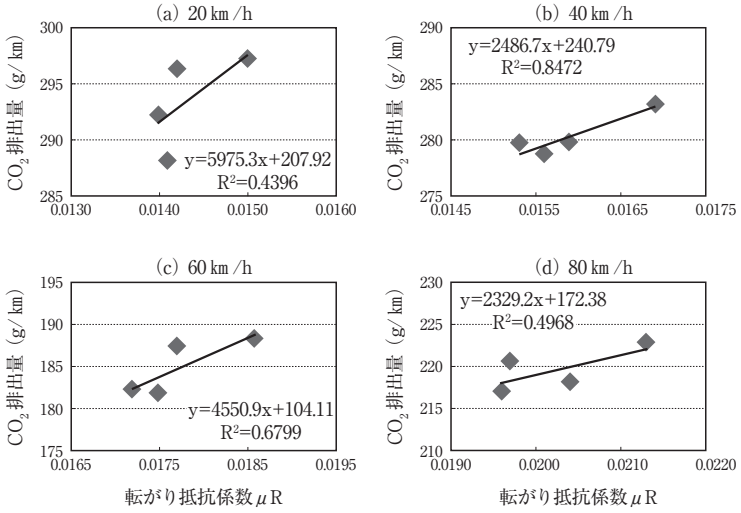
計測項目	計測装置	型　式
排気ガス	車載型排気ガス計測システム	OBS-2200
燃料消費量	燃料消費計	FC-9521
タイヤ温度	設置型非接触温度計	CS-30TAC
試験速度	GPS速度計	LC-8100
風向風速	風向風速計	WMT52

自動車CO_2排出量の測定結果を**図－２**に示す。いずれの路面も車速が上昇するにつれて排出量が減少し，60km/hを超えると再び増加した。これは，エンジン回転数およびギヤ比に関連していると考えられる。このCO_2排出量と転がり抵抗係数の関係を**図－３**に示す。ばらつきがあるものの，両者には相関があり，転がり抵抗係数が小さな路面はCO_2排出量が少ないことが確認できた。また，排水性舗装からの低減率を**図－４**に示す。速度によって差があるものの，排水性舗装（13）に比べて，低燃費舗装で1.5～3.2%，低燃費型排水性舗装で1.0～3.4%の削減効果があることが分かった。

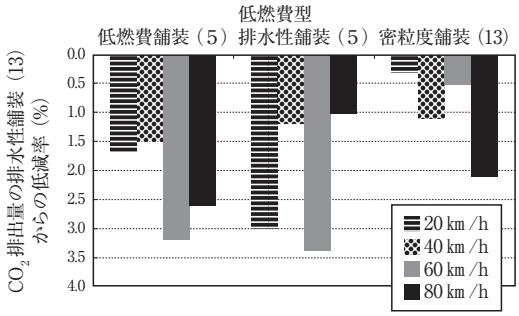
ここで，低燃費舗装は，供用時の転がり抵抗低減効果を持続させるため，路面テクスチャの変形を抑えるために骨材配合を工夫し，改質アスファルトH型を用いている。長期供用性については，現在実道において確認中であるが，経年効果が減少する場合もあることも想定する必要があると考えた。具体的には，低燃費舗装による自動車のCO_2削減効果は，実測では直線で約１～３％であったが，試算では低減率を１％および２％とした。



図－２　各舗装路面によるCO_2排出量



図－３　CO_2排出量と転がり抵抗係数の関係



図－４　CO_2削減効果

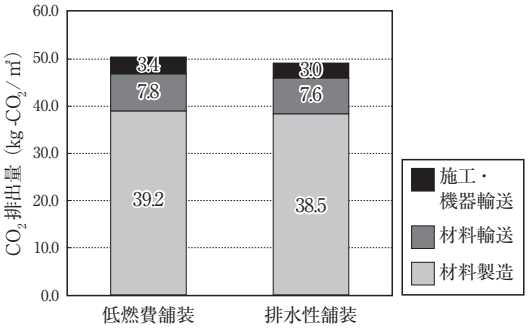
３．研究結果

3.1　アスファルト舗装のライフサイクルCO_2の試算

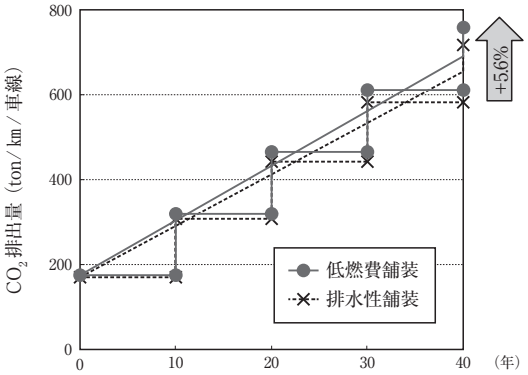
低燃費舗装および排水性舗装を新設する際のCO_2排出量を**図－５**に示す。両ケースとも材料製造が多くを占めており，施工等のCO_2は少ないことがわかる。これは過去の試算例にあるとおり，アスファルトの製造およびアスファルト混合物の加熱にエネルギーを消費しているためである。次に，新設時の全排出量の比較では，低燃費舗装が排水性舗装より2.5%CO_2排出量が多い結果となった。これは，低燃費舗装は最大粒径５㎜の骨材を用いているためアスファルト混合物層が１層多くなり舗設作業が１層分多くなること，13㎜Topの混合物よりアスファルト量が多いこと等によって，排水性舗装よりCO_2排出量も多くなった要因であると考えられる。

次に，低燃費舗装および排水性舗装を道路に施工し，10年ごとに路盤以上を打換え，40年経過した時のライフサイクルCO_2排出量を**図－６**に示す。なお，舗装の構造は**図－１**に示したとおりであり，道路の幅員は3.5m，距離は１㎞である。

その結果，低燃費舗装のライフサイクルCO_2は排水性舗装に比べて5.6%増加する結果となった。これは新設時および路盤以上の打換え時において，低燃費舗装のCO_2排出



図－５　低燃費舗装および排水性舗装の新設時のCO_2排出量

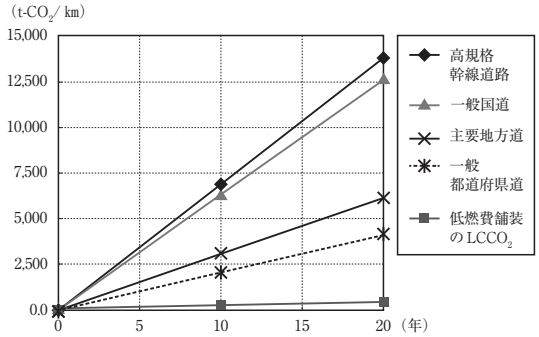


図－６　低燃費舗装および排水性舗装を新設する際のCO_2排出量

量が排水性舗装に比べて若干多いため，打換え回数毎に徐々に増加したものである。

3.2　自動車からのCO_2排出量

一方，自動車からのCO_2排出量の試算では，茨城県を対象として，実際の高規格幹線道路，一般国道，主要地方道，一般都道府県道の交通量から算出した。その結果を**図－７**に示す。なお，図には低燃費舗装のライフサイクルCO_2も追記してある。



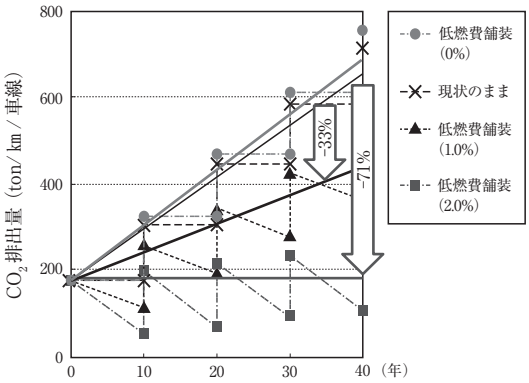
図－７　自動車からのCO_2排出量と低燃費舗装のLCCO$_2$

図を見てわかるとおり，自動車から排出されるCO_2量は，低燃費舗装のLCCO$_2$に比べて顕著に多いことが分かる。これは，交通量が多いほど単位道路延長あたりの自動車からのCO_2排出量が多くなることを示している。つまり，自動車からのCO_2排出量を１％でも減らすことができれば，道路全体のCO_2排出量は低燃費舗装を新たに施工しても効果があることが期待できる。

3.3　低燃費舗装の拡張ライフサイクルCO_2（ELC-CO_2）

低燃費舗装による自動車CO_2排出量低減効果を考慮に入れたライフサイクルCO_2分析においては，3.1で試算した低燃費舗装のライフサイクルを通じたCO_2排出量から，3.2で試算した自動車のCO_2排出量に燃費低減効果として低減率分（１％および２％）を差し引いた。なお，試算対象とした道路は一般国道とし，低燃費舗装を１㎞適用した際のCO_2排出量低減効果を試算した。その結果を**図－８**に示す。ここで，図中の凡例の「現状のまま」は，低燃費舗装を施工しないで，排水性舗装の施工であり，自動車からのCO_2排出量の低減がない状態でのライフサイクルCO_2である。また，「低燃費1.0％」および「低燃費2.0％」は，低燃費舗装を採用したことによる自動車からのCO_2排出量低減分を差し引いた結果である。

図より，低燃費舗装のCO_2改善効果が２％の場合，通常の排水性舗装のライフサイクルCO_2に対して，約70％のCO_2排出量を削減する効果があること定量的に示すことができた。低燃費舗装の燃費低減効果の実証実験では，最大3.4％低減できたことから，その効果はさらに大きなものとなると推察される。また，もし経年変化によって低燃費舗装のCO_2削減効果が減少した場合でも，低減効果が１％でもあれば約30％のCO_2削



図－８　低燃費舗装を適用した際の，自動車からのCO_2排出量低減分を考慮に入れたLCCO$_2$

減効果があることが試算できた。これにより，低燃費舗装を適用することによって，CO_2削減効果があることが定量的に示すことが出来た。

4．まとめ

(1) 自動車からのCO_2排出量は，アスファルト舗装のLCCO$_2$に比べて顕著に多く，高規格幹線道路や一般国道など交通量が多いほど１㎞あたりの自動車からのCO_2排出量が多くなる。これら道路に低燃費舗装を適用した際の効果は高くなると考えられる。

(2) 低燃費舗装によるCO_2改善効果が２％の場合，排水性舗装に比べて約70％のCO_2削減効果があった。また低減効果が１％であっても約30％のCO_2削減効果があったことから，低燃費舗装を適用することによってCO_2削減効果があることが定量的に示した。

以上より，低燃費舗装のライフサイクルCO_2に自動車からの排出されるCO_2排出量を組み入れた，拡張ライフサイクルCO_2分析（ELC-CO_2）を行うことによって，低燃費舗装のライフサイクルCO_2の削減効果を定量的に評価することが出来た。

── 参考文献 ──

1）国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量，国土交通省HP，令和３年４月27日，https://www. mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html.

2）首相官邸：第42回地球温暖化対策推進本部議事要旨，首相官邸HP，令和２年10月30日

3）日本道路協会：環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック，2009.6

4）川上篤史，新田弘之，加納孝志，久保和幸：舗装再生工法の環境負荷評価について，土木学会舗装工学論文集，第13巻，pp.71-78, 2008.

5）川上篤史，新田弘之，加納孝志，久保和幸：加熱アスファルト混合物製造に係るCO_2 排出量とその影響要因について，土木学会舗装工学論文集，第14巻，pp.67-75, 2009.

6）川上篤史，新田弘之，久保和幸：舗装の長寿命化・延命化によるCO_2排出量の抑制効果について，土木学会舗装工学論文集，第15巻，pp.107-114，2010.

7）石垣勉，川上篤史，久保和幸：自動車走行燃費の向上に寄与するタイヤ／路面転がり抵抗の小さい低燃費アスファルト舗装技術の開発，第30回日本道路会議論文集，2013.11.

8）白井悠，石垣勉，尾本志展，川上篤史，寺田剛，久保和幸，アスファルト舗装のタイヤ／路面転がり抵抗と自動車走行燃費の関係，土木学会論文集E1（舗装工学）Vol.72, No.3, 2016.

9）川上篤史，石垣勉，白井悠，寺田剛，藪雅行：タイヤ／路面接地応力分布による舗装路面の転がり抵抗評価に向けた一検討，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.72, No.3, pp.I_19-I_25, 2016.

10）久保和幸，寺田剛，川上篤史，平川一成：低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価技術に関する研究①，平成27年度プロジェクト研究報告書，https: //www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/ 2015/pdf/pro-7-2-1.pdf

11）Santero, N. and Harvey, J. (2010). Consideration of Time-Dependent Factors in the Environmental Assessment of Longer life Pavements, Proceedings, International Conference on Sustainable Concrete Pavements, Sacramento, CA.

12）Harvey, J., Kendall, A., Butt, A., Saboori, A., Lozano, M. and Ostovar, M. (2019). Supply Curves Using LCA and LCCA for Conceptual Evaluation of Proposed Policies to Improve the Environment, ISAP APE 2019, LNCE 48, pp.144–152.

13）Ram, P., Van Dam, T., Meijer, J. and Smith, K. (2011). Sustainable Recycled Materials for Concrete Pavements. Michigan Department of Transportation, Lansing, MI.

14）伊坪徳宏，稲葉敦：ライフサイクル環境影響評価手法―LIME-LCA，環境会計，環境効率のための評価手法・データベース，産業環境管理協会，2005年９月

15）日本道路協会：舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック－ CO_2排出量低減値および最大流出量比の算定－，2014

16）中村英樹，加藤博和，丸田浩史，二村達：都市間高速道路の横断面構成の相違によるCO_2排出量のライフサイクル評価，環境システム研究，Vol.26, 1998.10

17）土肥学，曽根真理，瀧本真理，小川智弘，並河良治：道路環境影響評価等に用いる自動車排出係数の算定根拠（平成22年度版），国土技術政策総合研究所資料，No.671, 2012年２月

道路空間のカーボンニュートラルに向けた太陽光発電舗装の開発

(Development of Photovoltaic Roads Toward Carbon Neutral in Road Space)

鍛　治　哲　理*・吉　中　保**

カーボンニュートラルへ向けて，世界的に意識が変化しており，道路舗装では欧州を筆頭に，各国で太陽光発電舗装の開発が進められている。筆者らが取り組んでいる太陽光発電舗装の研究開発では，舗装用太陽電池モジュールの開発，室内試験および試験施工による耐久性評価，道路空間特有の日照条件と発電特性等の検証を行い，車両供用に伴う課題の抽出や対策を図ってきた。

本稿では，当該舗装の開発状況やメガソーラー等と異なる道路舗装ならではの難しさ，将来への発展性などについて概説する。

1．はじめに

2050年以降を長期目標にした気候変動対策のパリ協定やSDGs等，カーボンニュートラルの実現に向けて世界的に意識が変化している。例えば，国連責任銀行原則の発足やESG投資といった，環境面の取り組みを投資の判断材料として捉える動きが拡大しつつある。事業の社会的意義や成長の持続性などが，様々な分野の戦略へ影響を与えている。

これまで，移動空間として技術的に発展を遂げてきた道路舗装の世界では，欧州を筆頭に再生可能エネルギーを生み出す太陽光発電舗装の研究開発が進められており，2017年には，世界道路協会（PIARC）機関誌『ROUTES/ROADS』の表紙にフランスの開発技術が紹介されている[1)]。完成域に達した技術はまだ無いものの，アメリカや中国を含め世界的に開発競争が繰り広げられている（**写真－1**）。

当社が開発を進めている太陽光発電舗装「e-Smart ROAD」は，既存の道路空間に，「再生可能エネルギーによる発電」という新たな価値を持たせようとする試みである。この技術が，道路舗装からカーボンニュートラルに貢献する一つの方法として成りえることを期待している。太陽光発電舗装は，電気通信分野との連携により，実用的な姿を現しつつあり，「道路空間から再生可能エネルギー」という目新しい組み合わせから，新規技術を導入できるフィールドとして，道路舗装が注目されている。

本稿では，当社の舗装用太陽電池モジュール（以下，モジュール）の開発状況や，メガソーラー等と異なる道路舗装ならではの難しさ，将来への発展性など，当該舗装が持つポテンシャルについて概説する。

写真－1　公道での施工例（フランス）

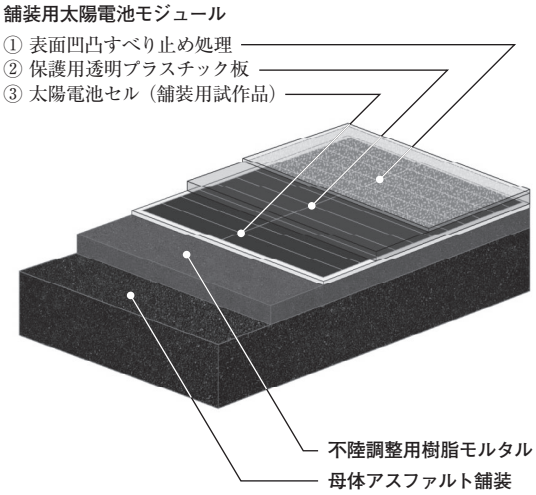
2．舗装用太陽電池モジュールの開発

2.1　概要

一般的に屋根やメガソーラーで使用されている太陽電池は，強化ガラスを基材に結晶系の発電素子を封止して作られている。一方で，舗装の場合は，人や車が

*かじ　てつり　（株）NIPPO　総合技術部　技術研究所　研究第一グループ　副主任研究員
**よしなか　たもつ　（株）NIPPO　総合技術部　技術研究所　研究第一課長

直接載るために常に路面には歪やたわみが生じており，使う素材としてはこれらの変形を許容し，破損しないように作る必要がある。開発中のモジュールは，たわみ変形を許容する材料を積層した構成とし，人や車の通行を許容した耐久性や，舗装として要求されるすべり抵抗などの安全性を確保している。太陽光発電舗装の構成例は，**図－１**に示すとおりである。



図－１　太陽光発電舗装 構成例

2.2　室内試験による検討

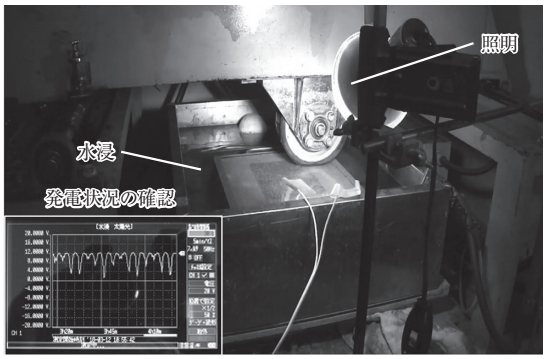
2.2.1　耐荷重性評価

実道を模擬した耐荷重検討として，水浸ホイールトラッキング（WT）試験の条件を参考に，載荷試験を実施した。試験条件および実施状況は，**表－１**，**写真－２**に示すとおりである。夏季の路面温度および降雨を想定し，雰囲気温度60℃で水浸させた供試体に照明を当て，発電状況を確認しながら載荷試験を実施した。載荷時間は，通常の水浸WT試験方法の３倍（18時間）に設定して，発電素子の短絡や積層したモジュール構造に剥がれがないことを確認している。

次に，モジュール下部の配線構造の検討として，モジュール直下に空間を作った供試体を用いて，繰返し

表－１　水浸WT試験　試験条件

雰囲気温度	60℃
供試体状況	水浸
荷重	686 ± 10N
試験時間	18時間 （水浸WTの３倍）

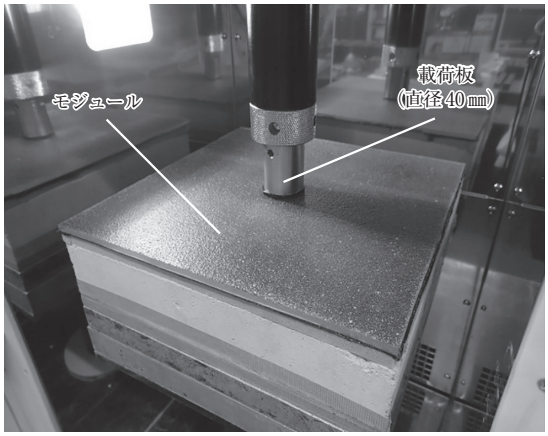


写真－２　WT試験　試験状況

圧縮載荷試験を実施した。試験条件および載荷状況は，**表－２**，**写真－３**に示すとおりである。荷重条件は，WT試験の２倍相当の圧力に設定し，耐荷重性評価する促進試験と位置付けた[2)]。モジュール直下に空間構造のある供試体は，載荷回数約45,000回の時点でモジュールの一部に破断が生じた。交通荷重のアスファルト舗装の破壊作用は輪荷重の４乗に比例する[3)]ことを参考にすると720,000回に相当し，交通量区分N4相当以下の交通量を許容するものと推定した。また，モジュール直下の空間に樹脂系材料を充填した場合は，載荷回数が100,000回（同上破壊作用1,600,00回に相当，交通量区

表－２　繰返し圧縮載荷試験　試験条件

試験温度	20℃
制御方法	荷重制御
載荷治具	直径40㎜
設定荷重	1.26MPa
載荷速度	120㎜/min



写真－３　繰返し圧縮載荷試験　試験状況

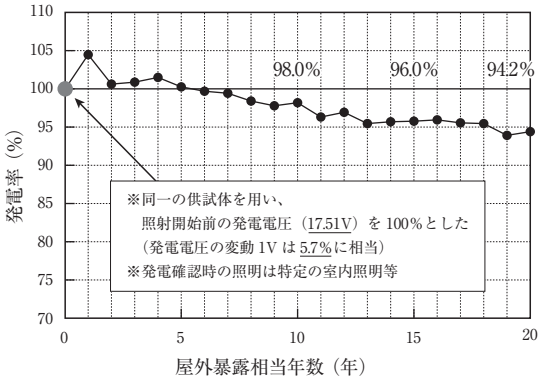
分N5相当）に達してもひび割れ等の破損が生じない事を確認した。このように，モジュール下部の配線構造を工夫することで，耐久性を改善できることを見出した。

2.2.2　耐候性評価

屋外暴露試験で劣化した太陽電池の発電効率は，1.14%／年で低下するとの報告[4)]がある。そこで，開発中モジュールの耐候性試験を実施し，屋外暴露年数と発電効率の関係を確認した。試験条件，測定結果は，**表－3**，**図－2**に示すとおりである。試験結果より，屋外暴露10年相当の経過時のモジュール発電率は98.0%，20年相当では94.2%であり，報告による1.14%/年よりも発電率の低下が抑えられていることを確認した。

表－3　耐候性試験　試験条件

試験機名		メタルハライドランプ式（耐候性試験機）
制御モード		自動調光制御
照度		150mW/㎡
運転モード		照射⇔休止
水噴射モード		休止前後
試験サイクル	照射	4.0時間
	休止	2.0時間
	水噴射	60秒



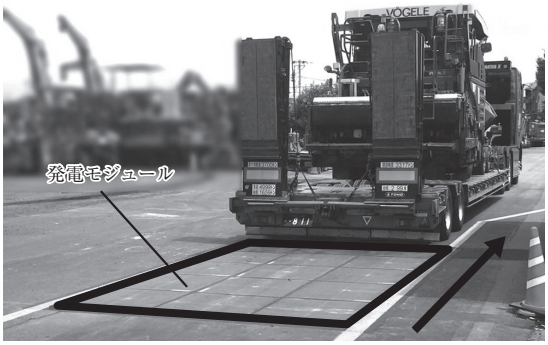
図－2　耐候性試験　試験結果

3．構内試験施工による検討

当社構内（埼玉県さいたま市）にて，車両が通行する箇所での試験施工を実施し[5)]，経過観察を継続している。**写真－4**に示す施工箇所（2018年11月施工）では，総重量6トン程度を含む車両を日々通行させ，舗装としての耐久性や太陽光発電としての発電特性を検討している。モジュールを構成する材料間の接着性に課題が見られたが，構造用接着剤やモジュール製造方法等の見直により，現在までにほぼ解決している。

また，大型車両が供用する通路での耐久性についても検証を進めており，2019年より大型トレーラーや舗装用大型建設機械が通行する当社モータープール（埼玉県さいたま市）の構内道路に試験施工を実施している（**写真－5**）。車両が直線で通過する場所と，曲線で右左折する場所を施工場所に選定しており，室内試験だけでは評価しきれない部分の確認を進めている。特に曲線箇所（**写真－5（b）**）では，大型車が後輪二軸のタイヤが横滑りしながら通過するため，垂直荷重に加

写真－4　構内試験施工箇所



（a）　直線部

（b）　曲線部

写真－5　大型車通行箇所

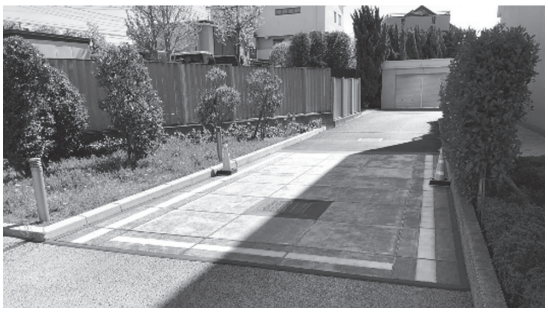
え，せん断方向の負荷も大きく働いている。太陽光発電舗装の層構造として，厳しい条件で検討を続けており，モジュール下部の配線構造を含めた課題の抽出および改良を進め，技術的な完成度を高めている。

4．発電特性

4.1　日向と日陰が混在する状況での発電性能

道路は屋根やメガソーラーと違い，日陰が起こりやすい環境である。太陽電池は部分的な日陰が生じると発電素子の損傷につながりやすいと言われており[6)]，電気的な損傷を防ぐため，発電素子の選択や電気回路を工夫し対処している。

写真－6に示す試験施工箇所は，日向と日陰が混在する建物の北側に設定しており，部分的な日陰が生じる条件下での検証実験を行っている。施工から約3年が経過したが，現在までに発電素子の損傷は生じておらず，良好に発電を持続している。



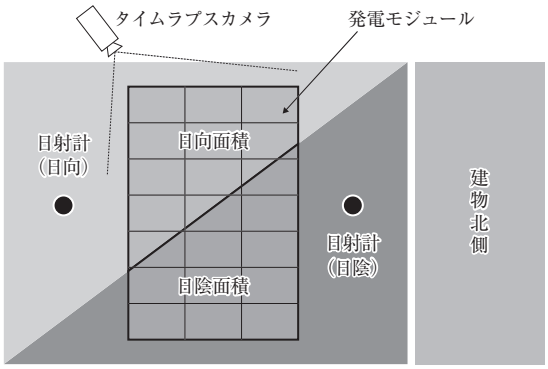
写真－6　日向と日陰が混在する状況

4.2　受光日射量と発電量の関係

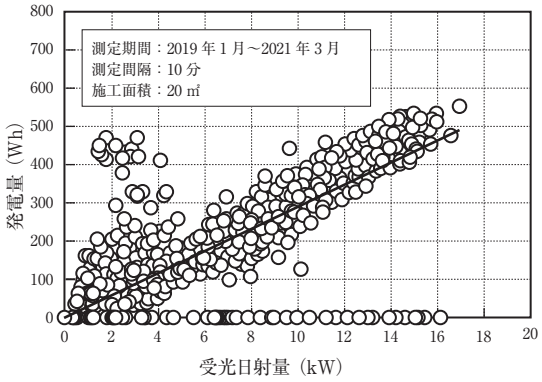
筆者らは，日陰が生じやすい道路環境下でも適切に発電特性を把握するため，モジュールの受光日射量の測定方法について考案している[7)]。**図－3**に計測概要のイメージを示す。日向と日陰の日射量を区別して計測し，日射量と照射面積を用いて受光日射量を算出した。**図－4**に受光日射量と発電量の関係を示す。日射量の増加に伴い発電量も変化しており，リニアな発電傾向を確認した。

4.3　表面凹凸処理の影響

モジュールの表面は，所定のすべり抵抗を確保するため，透明骨材を用いて凹凸処理を施している（**写真－7**）。未処理の平滑な太陽電池に比べ，表面凹凸処理が施されている場合には，発電性能の低下が懸念されるため，ソーラーシミュレータを用いた光源角度と太陽電池の

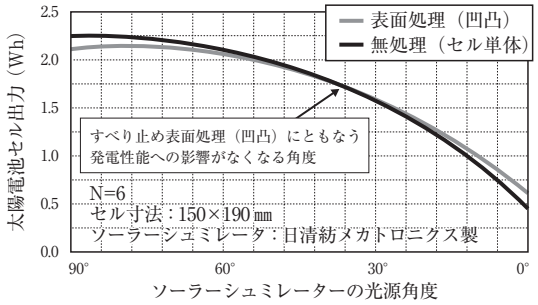


図－3　受光日射量の測定方法案



図－4　受光日射量と発電量の関係

写真－7　モジュールの表面凹凸処理



図－5　光源角度と太陽電池の発電出力の関係

発電出力の関係を確認した（**図－５**）。表面凹凸処理に透明骨材を用いたことで，太陽高度（モジュールへの入射角度）が低下しても，光の補足効果により，発電量が増加する傾向を示した。

次に，国立天文台が提供する太陽高度のデータから算出した，毎月１日の日中の太陽高度分布および表面凹凸処理の有無による太陽電池出力の比較を**表－４**に示す。1～4月，10～12月の期間では，表面凹凸処理によって，1日当たりの発電量が増加した。また，年間平均値においても，発電量の増加が試算できており，表面無処理の太陽電池と同程度の発電性能を確保できていることを確認した。

５．道路舗装としての課題

耐荷重性やすべり抵抗等の保持，冬季のタイヤチェーンなど打撃に対して壊れないことのほか，地表面に配置する上で感電防止対策を図ることが重要である。これらの開発を通じて，筆者らが考える舗装用太陽光発電モジュールに要求される主な特性の例は，**表－５**に示すとおりである。

舗装用太陽電池モジュールに使用する材料や配線類は，これまで道路舗装として使われたことがない素材であり，室内試験や試験施工を通じた検討の積み重ねが重要である。例えば，室内試験と実現場では，載荷条件や施工条件が異なることで，損傷形態が変化することを確認している。現時点で太陽光発電舗装の基本的な課

表－４　毎月１日の日中の太陽高度分布および表面凹凸処理の有無による太陽電池出力の比較

抽出年月日		2018年												計
		1月1日	2月1日	3月1日	4月1日	5月1日	6月1日	7月1日	8月1日	9月1日	10月1日	11月1日	12月1日	
日中の太陽高度※と日照時間（時間：分）	太陽高度 70°～						2：15	2：15	1：15					4：08
	〃 60～69°					3：15	1：45	2：00	2：30	1：45				
	〃 50～59°				3：45	1：45	2：00	1：30	1：45	2：30	1：15			
	〃 40～49°			3：30	2：00	2：00	1：30	2：00	1：45	2：00	3：15			
	〃 30～39°	1：45	4：00	2：30	1：30	1：30	1：30	1：30	1：15	1：30	2：00	4：30	2：15	8：01
	〃 20～29°	3：30	2：30	2：00	2：00	1：30	1：45	1：30	1：45	1：45	1：45	2：30	3：30	
	〃 10～19°	2：30	2：00	1：30	1：30	2：00	1：45	2：00	1：45	1：45	2：00	1：45	2：00	
	〃 0～ 9°	2：00	2：00	2：00	1：45	1：45	2：00	1：45	1：45	1：45	1：30	2：00	2：00	
太陽電池セル※出力試算比較（Wh）	表面処理（凹凸）	**13.14**	**14.86**	**17.26**	**19.85**	22.18	23.83	24.00	22.62	**20.89**	**18.20**	**15.42**	**13.38**	**18.80**
	無処理（セル単体）	12.38	14.19	16.85	19.78	**22.32**	**23.98**	**24.19**	**22.78**	**20.89**	17.94	14.75	12.66	18.56

※太陽高度の試算方法：国立天文台「こよみの計算」 https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi
※太陽高度の試算箇所：埼玉県さいたま市西区三橋 6-70 （東経 139.5867 度，北緯 35.9113 度）
※太陽電池セルの出力試算値は「太陽高度と日照時間」および「光源角度と太陽電池セル出力」（図-2）の関係から求めた。（セル寸法：150 × 190mm）

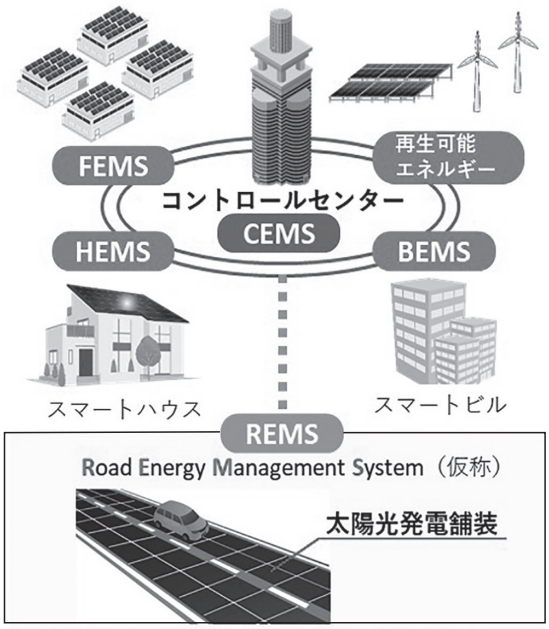
表－５　要求特性例

要求特性	すべり抵抗性	耐衝撃性	耐荷重性	耐水性	耐候性	耐日陰性
内　　容	降雨時に滑りにくいこと	衝撃荷重により，割れや破損が生じないこと	載荷時に剥がれや破断がなく，発電機能を保持すること	降雨時に発電機能を保持すること	反りや剥がれ，変色がないこと	部分的な日陰に対して，発電素子が損傷しないこと
試験方法の例	すべり抵抗測定（BPN）	ラベリング試験	水浸 WT 試験 繰返し載荷試験	水浸 WT 試験	促進耐候性試験	屋外における発電実証実験
評価判断の例	車道：BPN 60 以上 歩道：BPN 40 以上	モジュールに割れなど生じないこと	モジュールに割れ，太陽電池に短絡など生じないこと	太陽電池に短絡など生じないこと	モジュールに反りなどが生じないこと	太陽電池が故障しないこと
一般の太陽電池（強化ガラスなど）	×～○ 対策なし　対策あり	×	×～○ 対策なし　対策あり	×～○ 対策なし　対策あり	○ 反らない	× 故障しやすい
本開発技術	○ 基準を満たす	○ 破損しない	○ 大型車通行可	○ 破損しない	○ 反らない	○ 故障しない

題の多くは解決しつつあり，残された主な課題は，施工性や下部配線方法，発電効率の向上，コスト（量産規模にもよる），そして信頼性である。

６．将来への発展性

エネルギーシステムの改革に向けた動きの中で，その一つに，スマートコミュニティ構想がある[8)]。CEMS（Community Energy Management System）等のエネルギー管理システムの構築が検討されているが，道路空間を活用することは視野に入っていない。脱炭素へ向けた視点からすれば，太陽光発電舗装はREMS（Road Energy Management System，仮称）としても位置できる可能性があり，筆者らは道路舗装がカーボンニュートラルへ大きく貢献できることを期待している（**図－６**）。



図－６　カーボンニュートラルへの取り組み（イメージ）

７．おわりに

試験施工等を通じて，実用的な太陽光発電舗装の具現化して以降，筆者らは，石油などエネルギーインフラや自動車メーカー，複数の研究機関など各方面から見学を受け入れてきた。研究開発中にも関わらず，予想を超える反響を目の当たりにして，当該舗装の将来性への期待を受け止めるとともに，早期完成への重責を実感している。

―― 参考文献 ――

1）PIARC, ROUTES/ROADS 374,3rd quarter 2017.
2）吉中保，平塚利男，佐藤重宣，鍛治哲理，再生可能エネルギーを創出する太陽光発電舗装の実用化検討，第34回日本道路会議（2021）
3）阿部頼政，わが国の構造設計法に対する基本的考察，ASPHALT Vol.28 No.144，1985
4）崔 誠佑，佐藤梨都子，石井徹之，千葉恭男，増田 淳，屋外暴露された各種太陽電池モジュールの室内測定による劣化率の検討，AIST太陽光発電研究成果報告会2018
5）吉中保，鍛治哲理，平塚利男，佐藤重宣，車両通行が可能な太陽光発電舗装の開発検討，第33回日本道路会議（2019）
6）（一社）太陽光発電協会，太陽光発電システムの設計と施工，2015，9
7）鍛治哲理，平田茉安里，吉中保，実道に即した日照条件下での太陽光発電舗装の発電特性に関する一検討，土木学会第75回年次学術講演会（2019）
8）経済産業省，資源エネルギー庁，HP

再生用ポリマー改質アスファルトの変遷と今後の展望

(Transition and Future Prospects of Polymer-Modified Asphalt for Recycled Pavement)

上　野　貞　治*

再生用ポリマー改質アスファルト（以下，再生用改質アス）は，再生骨材が混入したアスファルト混合物（以下，混合物）を改質アスファルト混合物と同等の性能に再生させるために開発された改質アスファルト（以下，改質アス）である。

わが国の混合物のリサイクル率はほぼ100%とされており，今後もこの高いリサイクル率を維持するためには，本技術のさらなる活用が必要になると考えられる。

本稿では，再生用改質アスに関する技術の変遷を第Ⅰ期～第Ⅲ期に分け整理するとともに，今後の展望について述べる。

1．はじめに

わが国の混合物のリサイクル率は，ほぼ100%とされており，この高いリサイクル率を維持するため，繰り返し再生された舗装や改質アス由来の再生骨材に関する研究[1)]が行われている。

一方で，再生骨材が混入した混合物を改質アス混合物と同等の性能へ回復させる技術も研究が進められており，高いリサイクル率を維持するためには，この技術の積極的な活用が必要になると考えている。

本稿では，再生混合物に改質アス混合物と同等の性能を付与する技術の変遷を整理するとともに，今後の展望について提言する。

2．技術の変遷

再生用改質アスの変遷は，**表－1**に示すとおりであり，3つの期に大別できる。

第Ⅰ期は，密粒系舗装を対象に再生骨材混入率（以下，混入率）30～50%の混合物に改質Ⅱ型（以下，Ⅱ型）の性能を付与する技術が求められた。

第Ⅱ期は，ポーラス舗装を対象に混入率20～80%の混合物に改質H型（以下，H型）の性能を付与することが求められ，第Ⅰ期に比べると，開発の難易度は高まった。

そして，第Ⅲ期は，再生混合物にも製造温度を低減することが要求されるようになり，開発の難易度は更に高まっていった。

表－1　再生用改質アスの変遷

項　目	第Ⅰ期	第Ⅱ期	第Ⅲ期
年　代	1990年代	2000年代	2010年代
再生するグレード	改質Ⅱ型	改質H型	全般
再生骨材の混入率	30～50%	20～80%	30～50%
適用箇所	重交通路線の密粒系舗装	ポーラス舗装	中温化舗装
時代背景	プラント再生舗装技術指針の発刊（1992年）	ポーラス舗装の更新時期を迎える	「環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック」発刊（2009年）

2.1　第Ⅰ期（1990年代）

(1)　背景

第Ⅰ期は，「プラント再生舗装技術指針」（道路協会）が1992年に発刊され，N7交通の表層へも再生混合物が適用可能になった時期である。

これに伴い，再生混合物を重交通路線へ適用するため，Ⅱ型混合物の性能を付与する技術が必要となった。

(2)　Ⅱ型混合物の性能を付与する技術の考え方

図－1は，旧アスファルト（以下，旧アス）を既製品のⅡ型により再生を試みた例である[2)]。再生されたアスファルトの軟化点は，旧アスの割合が増加するのに伴い低下し，旧アスが50%になるとⅡ型規格の下限値へ近づく。

図－2は，再生用改質アスを用いてⅡ型混合物の性能へ回復させるイメージを示したものである。既製品のⅡ型を使用した場合，混合物の耐久性は混入率の増

*うえの　さだはる　ニチレキ株式会社　技術研究所　副所長

加に伴い低下し，目標のⅡ型混合物に比べ劣ってくると考えられる。したがって，再生骨材が混入することにより低下した性状を目標性能まで向上させる専用の再生用改質アスが必要となる。

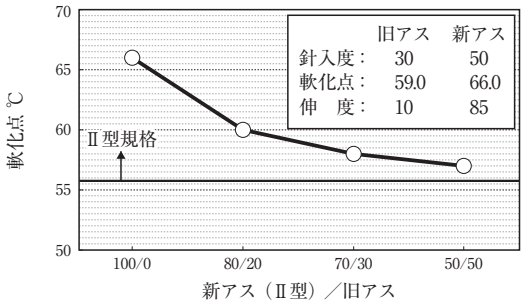
再生骨材に含まれる旧アスは，供用劣化によりアスファルトや改質材が変質しており，硬くて脆い性状となるのが通説である。そのため，再生用改質アスは，以下の３項目をコンセプトとした材料設計がなされている。

①柔軟性を回復させる。

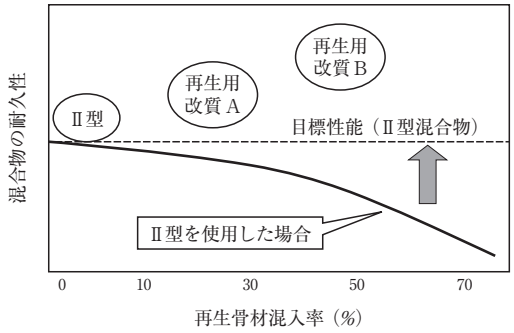
②旧アスと相溶しやすくする。

③不足する改質材を補う。

なお，混入率が多くなるほど旧アスの量も増えるため，混入率に応じて費用対効果を考慮した幾つかのグレード設定が望まれる。



図－１　旧アスの混入率と軟化点の関係



図－２　Ⅱ型混合物の性能へ回復させるイメージ

⑶　技術の現状

Ⅱ型混合物の性能を付与する再生用改質アスとして，混入率に応じたグレードが市販されている[3)]。**表－２**は，混入率０～30%用「改質アスＡ」と30～50%用「改質アスＢ」の諸性状をまとめたものである。

再生用改質アスは，旧アスと所定の比率で混合した性状がⅡ型と同等以上になるよう，一般的なⅡ型より針入度が大きく，軟化点が高い性状となっている。

所定の混入率における再生混合物の動的安定度は，新規のⅡ型混合物と同等以上となる。

2.2　第Ⅱ期（2000年代）

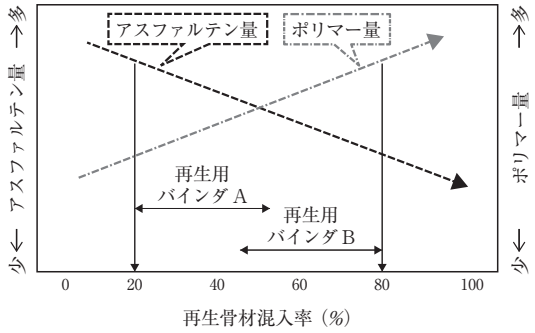
⑴　背景

第Ⅱ期は，1980年代後半から施工実績が増加していたポーラス舗装が更新時期を迎え，その再生技術が求められた時期である。

再生混合物をポーラス舗装へ適用するためには，再生用改質アスによってSBSネットワーク[4)]を形成しているＨ型グレードへ旧アスを回復させる高度な技術が必要となった。

⑵　Ｈ型の性能を付与する技術の考え方

新規のＨ型を用いたポーラス混合物と同等の性能を付与する再生用バインダは，化学組成（アスファルテン量）とポリマー量に着目し，材料設計がなされている[5)]。**図－３**は，ポーラス舗装由来の再生骨材の混



図－３　再生骨材混入率と再生用バインダに求められる化学組成およびポリマー量の関係

表－２　Ⅱ型相当へ再生する再生用改質アスの性状

試験項目	再生用 改質アスＡ	再生用 改質アスＢ	旧アス	改質Ａ：70% 旧アス：30%	改質Ｂ：50% 旧アス：50%	改質Ⅱ型代表値
針入度　1/10㎜	71	70	30	48	46	50
軟化点　℃	65.0	91.5	59.5	58.0	59.0	64.0
伸 度（15℃）　cm	95	100+	11	72	62	85
タフネス　N･m	14.7	23.9	－	15.0	17.5	18.0
動的安定度　回／㎜ （混入率）	5,120 （０%）	6,830 （０%）	－	4,430 （30%）	4,620 （50%）	4,520 （０%）

入率と，再生用バインダに求められる化学組成およびポリマー量の関係を示したものである。

混入率の増加に伴い，再生アスファルトには，劣化によりアスファルテンが増加しポリマーが減少した旧改質アスファルト（以下，旧改質アス）の割合が増えるため，再生混合物の性状は硬く脆くなる傾向を示す。したがって，新たに加える再生用バインダは，混入率が増加するほどアスファルテン量が少なく，ポリマー量の多いものが求められる。

例えば，ポーラス混合物のOACを５％と仮定すると，混入率80％のケースでは，わずか１％程度の新規バインダでH型の性能となるよう，アスファルテン量とポリマー量を設定する必要がある。

⑶　技術の現状

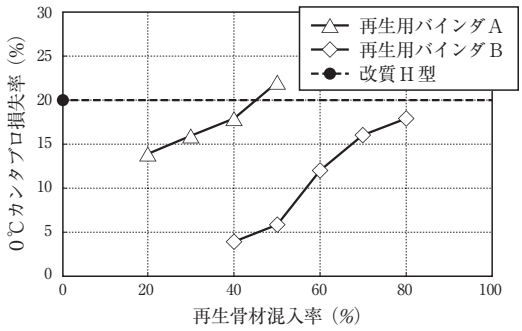
表－３は，開発された「再生用バインダA（混入率20～40％用）」と「再生用バインダB（混入率40～80％用）」の緒性状をまとめたものである。

混入率40～80％用のバインダBは，Aに比べポリマーが多く添加されているため，軟化点が高くフラース脆化は低い。また，アスファルテン量は，旧改質アスの組成バランスを考慮し，バインダAの1/2程度になっている。

また，**図－４**は，バインダAとBを用いて，混入率20～80％の範囲で作製した再生混合物の0℃におけるカンタブロ試験結果を示したものである。バインダAでは，混入率40％まで，バインダBでは混入率80％まで，新規のH型混合物の骨材飛散抵抗性と同等以上となる。

表－３　H型へ再生する改質アスの性状

試験項目		再生用バインダ A	再生用バインダ B	H型
針入度	1/10㎜	90	72	51
軟化点	℃	87.5	97.0	97.0
フラース脆化点	℃	-30	-35以下	-20
化学組成 %	アスファルテン	**16.1**	**8.6**	**16.9**
	レジン	19.5	65.4	24.9
	芳香族	61.9	20.1	55.6
	飽和分	2.5	5.9	2.6



図－４　0℃カンタブロ試験結果

2.3　第Ⅲ期（2010年代）

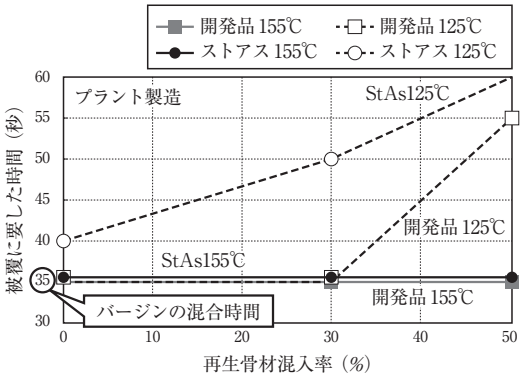
⑴　背景

第Ⅲ期は，舗装業界において中温化舗装や遮熱性舗装など環境に配慮した技術導入が進められた時期である。

舗装に関わる様々な技術分野において，環境負荷を低減することが求められたことから，再生混合物にも「中温化技術」の応用が試された。

⑵　中温化技術を応用するためのポイント

再生混合物を中温化するためには，**図－５**に示すように，再生用改質アスの骨材への「被覆性」が重要なポイントとなる[6]。



図－５　中温化再生用改質アスの被膜性

例えば，混入率30％の再生混合物を混合温度125℃にてプラント製造する場合，StAsでは被覆に要する時間は50秒と通常より長くなるのに対し，開発品であればバージンの混合時間と同じ35秒で被覆できる。

⑶　技術の現状

これらの知見を踏まえ，旧アスとの相溶性を高めた中温化タイプの再生用改質アスとしてStAsグレードとⅡ型グレードが市販されている[3]。

表－４（次ページ）は，StAsグレードの中温化再生用バインダの諸性状を示したものである[7]。混入率30％用と50％用があり，それぞれ舗装用石油アスファルトの針入度60/80あるいは80/100の規格（JIS）を満足している。

３．今後の展望

昨今，欧州において再生用添加剤に植物由来の素材を使用した例[7]が報告されており，化石燃料ではない

表－4　中温化再生用バインダ（StAsグレード）の諸性状

	開発品（30%用）		開発品（50%用）		ストアスJIS規格	
針入度グレード	60/80	80/100	60/80	80/100	60/80	80/100
針入度　1/10㎜	74	84	63	84	60を超え80以下	80を超え100以下
軟化点　℃	48.0	47.5	48.5	48.5	44～52	42～50
伸度（15℃）　㎝	100+	100+	100+	100+	100以上	100以上
引火点　℃	324	340	330	345	260以上	260以上
薄膜加熱質量変化率　%	0.03	0.05	0.03	0.06	0.6以下	0.6以下
薄膜加熱針入度残留率　%	70.3	75.0	71.4	69.0	55以上	55以上
蒸発後の針入度比　%	96	94	95	95	110以下	110以下

ため，石油系素材に比べ枯渇の懸念が少ない素材として注目されている。

また，日本においても植物系タールを再生用添加剤として使用した例が報告されている[8)]。バイオマス発電の副産物を有効活用できる点に加え，混合物の製造温度を低減できるため，CO_2の排出削減にも貢献できるとされている[9)]。

再生用改質アスの第Ⅳ期では，脱炭素社会の実現に向け，植物由来など石油系以外の素材の活用のほか，製造・施工時の更なるエネルギー削減を目指した常温化などが必要と言える。

4．おわりに

再生用改質アスは，舗装業界を取り巻くニーズや環境変化に応じて，第Ⅰ期の「Ⅱ型への再生」から第Ⅱ期の「H型への再生」そして第Ⅲ期の「中温化技術の応用」と進展してきた。

わが国のアスファルト舗装の高いリサイクル率を維持するためには，再生用改質アスが更に活用されることが必要であり，これら優れた技術の普及には，中温化（低炭素）技術へのインセンティブ付与など政策面の対応も重要と考える。

今後は「アスファルト資源の循環」だけでなく，「脱炭素社会の実現」にも貢献できる技術の確立を目指して，産官学が三位一体となり取組むべき時が来ている。

―― 参考文献 ――

1）川島陽子，新田弘之，川上篤史，田湯文将，再生用添加剤を用いた改質アスファルトの再生とその再生混合物の性状に関する基礎的検討，土木学会第75回年次学術講演会，V-462, 2020.08

2）羽入昭吉，西村利幸，山本忠彦，再生骨材を使用した重交通用舗装混合物に関する一考察，道路建設No.558, 1994.07, p.46

3）ポリマー改質アスファルトポケットガイド，日本改質アスファルト協会，付８会員市販ポリマー改質アスファルト，p.94

4）多田宏行，［新編］語り継ぐ舗装技術，鹿島出版会，p.74

5）西島克治，東　慈夫，綿谷　茂，羽入昭吉，稲　宗治，再生骨材混入率を高めたポーラスアスファルト舗装の再生技術に関する研究，土木学会舗装工学論文集　第12巻，2007.2

6）壁下俊介，吉田和也，細木　渉，再生用中温化アスファルトの開発，第30回日本道路会議，o.3020, 2013.11

7）丸山　陽，渡辺正典，大嶋麻奈未，細木　渉，プレミックスタイプ再生用中温化アスファルトの開発，舗装，vol.49, 2014.11

8）Porot Laurent, Gomes Vitor Kraton Chemical:Multi-recycling of asphalt mix with Reclaimed Asphalt and rejuvenator, 7thE&E, №358, 2021.06

9）坂田正宏，三田村文寛，藤井　弘，久野　弘，奥村武，武井幸久，小泉貞之：植物系タールを用いた舗装材料の研究，土木学会第63回年次学術講演会，05-055, 2008.09

電磁誘導加熱によるアスファルト舗装の長寿命化技術に関する検討

(Examination of Technology for Extending the Life of Asphalt Pavement by Electromagnetic Induction Heating)

岡島穂高*・青木政樹**・青木　涼***・中村聖二****

舗装に発生したひび割れを封かんすることは，舗装の構造的な健全度を維持して長寿命化を図るために重要である。筆者らは，海外で研究開発が行われている「Self-Healing Asphalt Pavement（自己治癒アスファルト舗装）」のわが国への導入を目指し研究を行っている。これまでの研究の結果，アスファルト混合物にスチールファイバーなどの導電性材料を含有させ，電磁誘導加熱によりアスファルト混合物を昇温させることで微細なひび割れが閉塞する可能性が示された。本文では，技術の概要を示すとともに，室内で行った試験結果について報告する。

1．はじめに

約128万㎞におよぶ膨大な道路ストックを効率的に維持管理しつつ，カーボンニュートラル・脱炭素社会の実現を達成するためには，舗装を長寿命化し，修繕の間隔を延ばす必要がある。舗装は供用中に繰り返し交通荷重が作用することで微細なひび割れが発生し，それが成長してひび割れやポットホールとなる[1)]。発生したひび割れから雨水が舗装体内に浸入すると，路盤以下の支持力が低下し舗装を早期に破壊させることとなる。そのため，発生したひび割れを早期に封かんし，雨水の浸透を抑制することは舗装の長寿命化を図るために重要である。

一方，舗装のひび割れは，一般的にクラックシールなどで封かんされる。舗装に発生するひび割れは，不規則であり，クラックシールは人力作業となる。しかし，路上での人力作業は危険を伴うこと，近年の労働力不足により作業員が不足していることを踏まえれば，舗装に発生したひび割れの封かんは省力化・省人化のために機械的に行われることが望ましい。

これらのことを踏まえ筆者らは，海外で研究が行われている“Self-Healing Asphalt Pavement”（自己治癒アスファルト舗装。以下，自己治癒アス）のわが国への導入を目指し研究を行っている。本文では，自己治癒アスの概要を示すとともに，室内で行った試験結果からその実現の可能性について考察した結果を報告する。

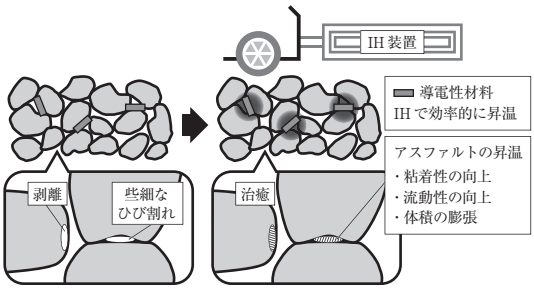
2．自己治癒アスの概要

2.1　海外での研究事例

アスファルト混合物を加熱することで微細なひび割れが閉塞することは古くから知られている[2)]。この現象は，加熱によりアスファルトの粘度が低下し流動しやすくなることや，アスファルトが加熱により膨張することにより起こると考えられている[3)]。

近年，この性質を利用し，アスファルト混合物に導電性材料を混合し，電磁誘導加熱（以下，IH）によって昇温させることで，発生した微細なひび割れを閉塞させる技術の研究が行われている（**図－1**参照）[4)]。例えば，欧州では，ポーラスアスファルト混合物にスチールファイバーなどのスチール系材料を添加してIHで昇温することで，ダメージを受けたポーラスアスファルト混合物の強度や疲労抵抗性が回復できることが示唆されており[5, 6)]，2010年にはオランダのhighway A58においてポーラスアスファルト混合物にこの技術が適用され，2014年に初のIHが行われている[7, 8)]。

*おかじま　ほだか　大成ロテック㈱　技術研究所　生産技術開発室　主任
**あおき　まさしげ　大成ロテック㈱　技術研究所　生産技術開発室　室長
***あおき　りょう　會澤高圧コンクリート㈱　常務取締役　アイザワ研究所　所長
****なかむら　せいじ　會澤高圧コンクリート㈱　アイザワ研究所　主席研究員



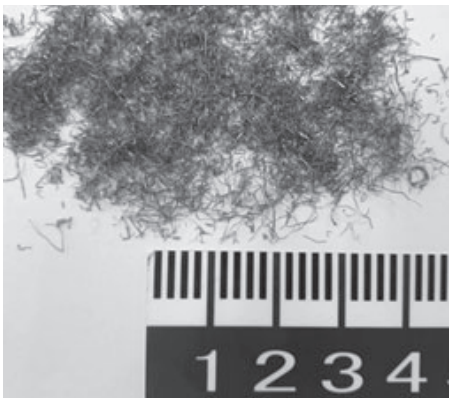
図－１　IHによる微細なひび割れの治癒効果の概念

2.2　わが国への導入を目指す自己治癒アスの概要

筆者らは，わが国で最も一般的である密粒度アスファルト混合物に代表される連続粒度のアスファルト混合物へ，当該技術を適用してその実用化へ向けた研究を行っている。

当該技術は，連続粒度のアスファルト混合物に直径約0.1㎜，長さ約８㎜以下のスチールファイバー（**写真－１**参照）を添加し分散させ，IHによりこのスチールファイバーが加熱され，その熱が周囲のアスファルトに伝搬することでアスファルト混合物中の微細なひび割れを閉塞させるものである。

将来的には，IH機能を搭載した車両を走行させることでアスファルト舗装に発生したひび割れを閉塞させることを目指している（**図－２**参照）。



写真－１　スチールファイバー

図－２　舗装上でのIH作業のイメージ[9)]

３．実験概要と試験結果

筆者らは，室内で製造した自己治癒アス供試体を用いて，自己治癒アスの基本的な性状，疲労試験とIHによる加熱を繰り返し行って自己治癒アスの実現の可能性について検討した。

3.1　混合物の配合と基本諸的性状

ポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた密粒度アスファルト混合物（13）（以下，改質密粒）と改質密粒にスチールファイバーを含有させた自己治癒アスを用いた。改質密粒および自己治癒アスは密粒度アスファルト混合物（13）の中央粒度付近とした。自己治癒アスへのスチールファイバーの添加量はアスファルト容積に対して３％とし，アスファルト量は空隙率と飽和度が改質密粒と同程度になるように調整した。

実施した試験と試験条件を**表－１**に，試験結果を**表－２**に示す。

3.2　IH装置の概要

(1)　概要

IH装置は，**写真－２**に示す小型の装置を用いた。IH装置の諸元を**表－３**に示す。

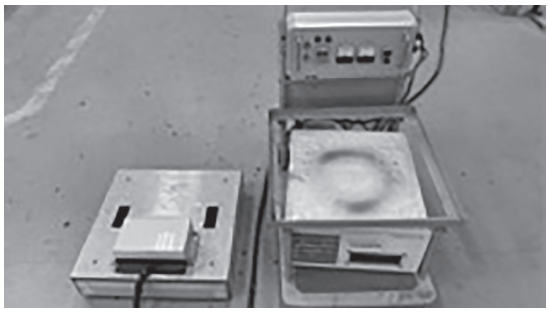
表－１　実施した試験

評価項目	試験不法
耐水性	水浸マーシャル安定度試験※
流動抵抗性	ホイールトラッキング試験※
疲労抵抗性	繰返し曲げ疲労試験 ・両端固定２点載荷　・スパン長：300㎜ ・試験温度：0℃　・ひずみ：400μ ・載荷波形：正弦波　・周波数：5Hz

※舗装調査・試験法便覧に準拠

表－２　試験結果

	アスファルト量（%）	空隙率（%）	飽和度（%）	安定度（kN）	残留安定度（%）	動的安定度（回／㎜）	破壊回数（回）
改質密粒	5.2	4.2	74.3	18.52	77.5	15,750	37,934
自己治癒	5.5	4.2	75.1	17.44	76.6	12,250	33,761



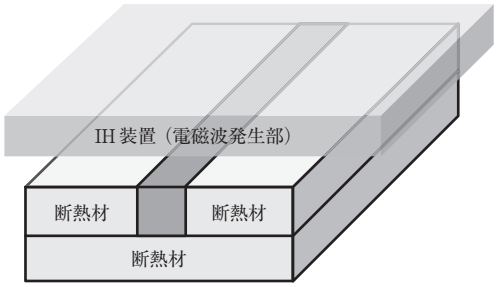
写真－２　IH装置の外観（左：電磁波発生部，右：制御部）

表－３　IH装置の諸元

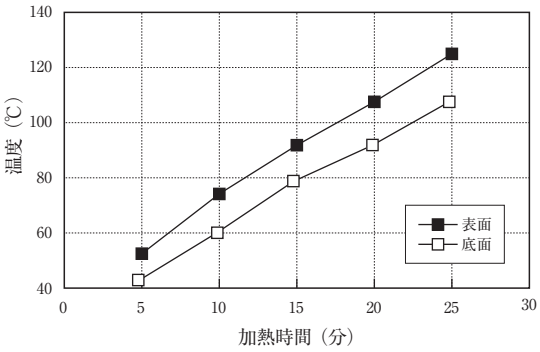
出力	5kW
周波数	40kHz
加熱コイル	φ480×21ターン　ループコイル
共振コンデンサ	0.5μF×2P×2S （コンデンサBOX内 0.5μF×2P×2S）

(2)　供試体の加熱方法

繰り返しひずみを与えられた供試体は，**図－３**に示すように断熱材を用い，IH装置を用いて昇温した。**図－４**にIHによる加熱時間と自己治癒アスの供試体の表面および底面の温度の関係を示す。



図－３　IHによる加熱方法



図－４　IH加熱時間と供試体温度の関係

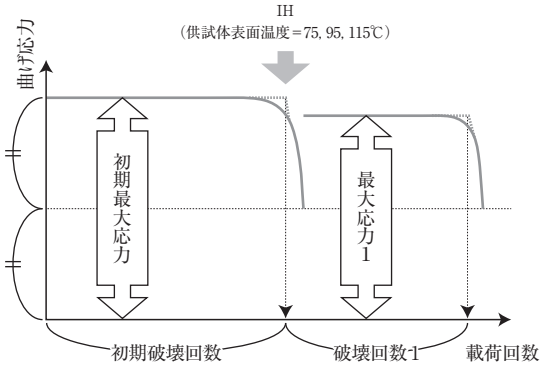
3.3　IHによる加熱温度と疲労抵抗性の回復効果

(1)　実験概要

本実験では，**表－１**に示す条件で繰り返し曲げ疲労試験を行い，供試体内部に発生する応力が初期の1/2となった時点で試験を停止した。その後，IHにより供試体の表面温度が75，95，115℃となるまで加熱し，再び繰返し曲げ疲労試験を行って供試体内部に発生する応力を測定した。

疲労抵抗性の回復効果は，初期およびIHによる加熱後の繰返し曲げ疲労試験での最大応力と破壊回数から，式(1)，式(2)を用いて最大応力と破壊回数のそれぞれについての回復効果を評価した。

試験の概念を**図－５**に，回復効果の算出式を式(1)，式(2)に示す。



図－５　試験の概念

加熱１回目の応力回復効果（%）

$$= \frac{\text{最大応力}1}{\text{初期最大応力}} \times 100\ (\%) \cdots\cdots (1)$$

加熱１回目の破壊回数回復効果（%）

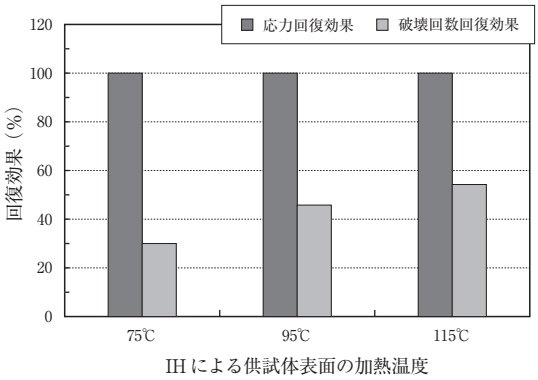
$$= \frac{\text{破壊回数}1}{\text{初期破壊回数}} \times 100\ (\%) \cdots\cdots (2)$$

(2)　試験結果

IHによる加熱温度ごとの応力回復効果と破壊回数回復効果の測定結果を**図－６**に示す。

図より，試体表面温度が75～115℃での応力回復効果は100%となった。また破壊回数の回復効果は，加熱温度が高いほど効果が高く，供試体表面温度が115℃の場合で50%となった。なお，改質密粒についてもIHによる加熱を行ったが，改質密粒はスチールファイバーが配合されていないため供試体の温度が上昇せず応力および破壊回数の回復効果が見られなかった。

これらのことから，自己治癒アスは，繰返し曲げ試験によって内部に発生したひび割れの一部がIHにより閉塞したと考えられた。

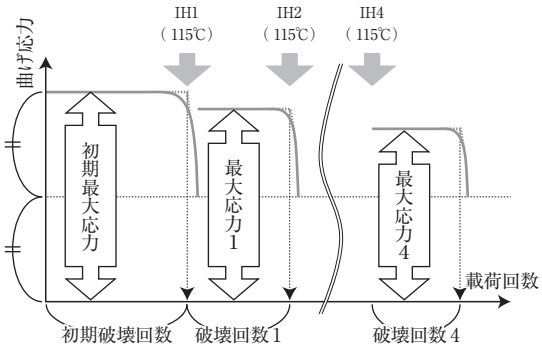


図－６　IHによる加熱温度と応力と破壊回数の回復効果

3.4　繰返しのIH回数と回復効果の関係

(1)　実験概要

本実験では，前述の**3.3**と同様に**表－1**に示す条件で繰返し曲げ疲労試験を行い，供試体内部に発生する応力が初期の1/2となった時点で試験を停止した。その後，IHにより供試体の表面温度が115℃となるまで加熱し，再び繰返し曲げ疲労試験を行うサイクルを４回繰り返した。**図－７**に概念を，回復効果の算出式を式(3)，式(4)に示す。



図－７　試験の概念

加熱ｎ回目の応力回復効果（%）

$$= \frac{\text{最大応力 n}}{\text{初期最大応力}} \times 100\ (\%) \cdots\cdots (3)$$

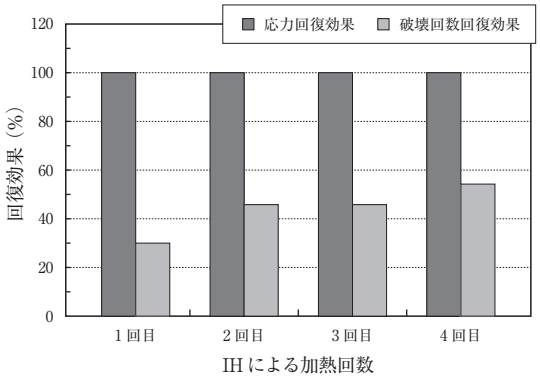
加熱ｎ回目の破壊回数回復効果（%）

$$= \frac{\text{破壊回数 n}}{\text{初期破壊回数}} \times 100\ (\%) \cdots\cdots (4)$$

(2)　試験結果

IHによる加熱回数と応力および破壊回数の回復効果の関係を**図－８**に示す。図より，治癒４回目までの応力回復効果は97～103%となった。また，破壊回数回復効果は，曲げ疲労と加熱を繰り返すごとに低下する傾向を示した。

以上の結果から，曲げ疲労試験の開始時に発生した初期発生応力が1/2となるまでひずみを与えた後にIHによる加熱を繰り返し行った場合は，徐々にひび割れが閉塞されにくくなり，破壊回数回復効果が低下すると考えられる。

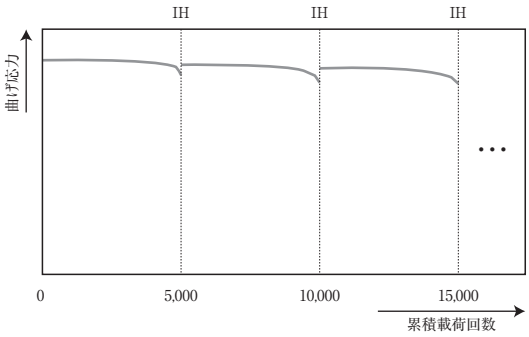


図－８　IHによる加熱回数と応力・破壊回数の回復効果

3.5　短い周期でのIHと内部発生応力の関係

(1)　実験概要

短い周期でIHによる加熱を繰り返し行った場合に疲労抵抗性が維持できる可能性について検証した。具体的には，曲げ疲労試験機により供試体にひずみを繰り返し作用させ，載荷回数5,000回ごとにIHによる加熱を行って，累積の載荷回数と供試体内部に発生する応力の関係を確認した。**図－９**に試験方法の概念を示す。

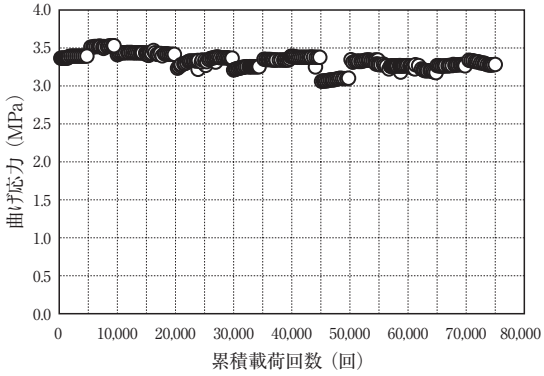


図－９　試験方法の概念

(2) 試験結果

曲げ疲労回数5,000回ごとにIHによる治癒を繰り返し行った場合の累積載荷回数と発生応力の関係を**図－10**に示す。

図より，累積載荷回数が増加した場合でも発生応力はほとんど変化しなかった。前述の実験結果（**図－6**）では，自己治癒アスの曲げ疲労試験の破壊回数が36,463回であったことを踏まえれば，内部に微細なひび割れが発生する前もしくはより微細なひび割れの状態でIHすることで，アスファルト舗装の疲労寿命が2倍程度以上に延長できる可能性があること示していると考えられる。



図－10　累積載荷回数と発生応力の関係

4．まとめ

筆者らがこれまでに実施した実験から得られた知見を整理して示す。

①スチールファイバーを添加した自己治癒アスの混合物性状は，スチールファイバーを添加していない混合物と同等である。

②曲げ疲労試験機を用いて繰り返しひずみを与えた自己治癒アスをIHすることで，供試体内部に発生した微細なひび割れが閉塞して疲労抵抗性が回復する可能性がある。

③曲げ疲労試験機を用いてダメージを与えた自己治癒アスを比較的短い間隔でIHすることで，自己治癒アスの疲労に対する寿命を延長できる可能性がある。

5．おわりに

本稿ではスチールファイバーを用いた自己治癒アスの混合物性状や特定の条件下での自己治癒効果を評価した結果を報告した。今後は，IHによる治癒のメカニズムの解明やIHの仕様および最適なIHのタイミングなどについて検討し，当該技術の社会実装をできるだけ早期に目指す所存である。

―― 参考文献 ――

1）Di Benedetto, H., et al. "Fatigue of bituminous mixtures." Materials and structures 37.3 (2004): 202-216.

2）Bazin, P., and J. Saunier. "Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes." Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmts. 1967.

3）Gómez-Meijide, Breixo, et al. "Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating." Construction and Building Materials 126 (2016): 957-966.

4）Liu, Quantao, Erik Schlangen, and Martin Van De Ven. "Induction healing of porous asphalt." Transportation research record 2305.1 (2012): 95-101.

5）Liu, Quantao, et al. "Research on the mechanical, thermal, induction heating and healing properties of steel slag/steel fibers composite asphalt mixture." Applied sciences 7.10 (2017): 1088.

6）Liu, Quantao, et al. "Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test." Construction and Building Materials 29 (2012): 403-409.

7）Liu, Q., H. E. J. G. Schlangen, and G. Van Bochove. "The first engineered self-healing asphalt road: How is it performing?." ICSHM 2013: Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing Materials, Ghent, Belgium, June 16-20, 2013. Ghent University; Delft University of Technology, 2013.

8）Xu, Shi, et al. "Self - Healing Asphalt Review: From Idea to Practice." Advanced Materials Interfaces 5.17 (2018): 1800536.

9）會澤高圧コンクリート㈱：プレスリリース資料，https://www.aizawa-group.co.jp/home/wp-content/uploads/2018/07/180712_epion.pdf（20210928閲覧）

アスファルト舗装の層間接着力の新たな評価手法について

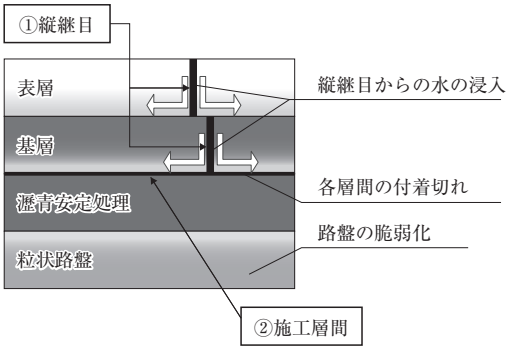
(New Evaluating Method for Interlayer Bonding Properties of Asphalt Pavement)

竹　林　宏　樹*・馬　場　弘　毅**

アスファルト舗装の長寿命化を図る上で，層間接着力を高めることは重要であり，かつ最もシンプルな対策方法である。アスファルト舗装の各層間に用いられる層間接着剤には，タックコートが一般的に使用されている。そして，その接着力の評価には，引張接着試験など混合物に引張力を与えるなど層間接着剤に間接的に力を与える試験が用いられることが多いが，実道における長期的な接着力の評価が適切に行えているか懸念が残る。そのため，筆者らは水による付着切れを再現する試験方法として，間隙水圧負荷試験を開発した。本稿では，この試験方法を紹介するとともに，４種類の層間接着剤の違いによる試験結果を紹介する。従来の評価方法では，非評価層である供試体の凝集破壊により層間接着力の違いを評価することが困難であったが，この試験方法では層間接着剤の違いによる層間接着力の違いを確認した。

１．はじめに

アスファルト舗装の施工継目は，走行方向に生じる縦継目（**図－１**の①）と施工層間（**図－１**の②）に大別される。縦継目は供用年数が進むにつれて隙間が広がる傾向にある。この隙間から浸入した水が，アスファルト混合物の層間接着の低下や路盤の脆弱化を引き起こす事例が現地で確認されている[1]（**図－１**）。



図－１　舗装体内への水の浸入経路（横断図）

この縦継目の止水対策として，アスファルト混合物の打継ぎ時にアスファルト乳剤の塗布，またはクラック補修材の注入による措置が行われてきたが，各種材料について評価試験を行い得られた知見[2]から，接着性と止水性に優れる加熱型注入材の品質の標準[3]に適合する成型目地材の適用を，東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社（以下，NEXCO）では令和２年７月に技術基準化した[4]。

また，アスファルト混合物の施工層間の接着方法としては，一般的にアスファルト乳剤（以下，As乳剤）であるタックコートが用いられている。しかし，路面にひび割れなどの損傷が発生した箇所で実施した開削調査では，わだち部で施工層間の付着切れが発生している事象（**写真－１**）が各地で見られた[1]。

写真－１　施工層間の付着切れの発生例[1]

*たけばやし　ひろき　株式会社高速道路総合技術研究所　舗装研究室　主任研究員
**ばんば　こうき　ニチレキ株式会社　技術研究所　副所長

なお，ここでの付着切れとは，「表層と基層あるいは基層と瀝青安定処理路盤など，アスファルト舗装の層間の接着効果が消失し，界面で水平方向に分断された状態」と定義する。各層間で付着切れが生じると，版厚効果の低下による早期変状が想定される。

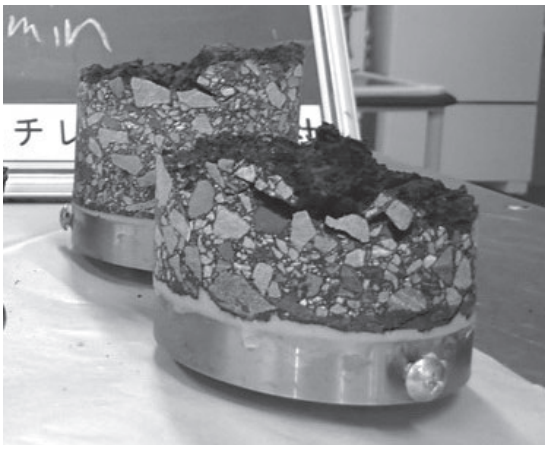
アスファルト舗装の長寿命化を図る上で，施工層間の層間接着力を向上させることは非常にシンプルな対策であり，かつ重要である。しかし，現在の層間接着力の評価方法は，現場で見られた水による付着切れを再現した方法とはなっていない。そのため，筆者らは水の影響に着目した新たな評価方法「間隙水圧負荷試験」を開発し，接着性能の評価が可能であることを確認した[2)]。

本稿では，この間隙水圧負荷試験の概要とこれまで行った試験結果の一部を紹介する。

2．間隙水圧負荷試験

2.1.　既存評価方法の課題

アスファルト舗装の層間の接着性評価には，引張接着試験やせん断試験など，混合物に引張力やせん断力を与えるなど施工層間で用いられる材料（以下，層間接着剤）に間接的に力を与える試験方法が用いられることが多い。しかし，軟化点の低いバインダを用いた混合物では，試験温度が高い場合，層間接着剤より先にアスファルト混合物自体が凝集破壊（**写真－２**）してしまうため，層間接着剤の接着力を適切に評価できないという課題があった。



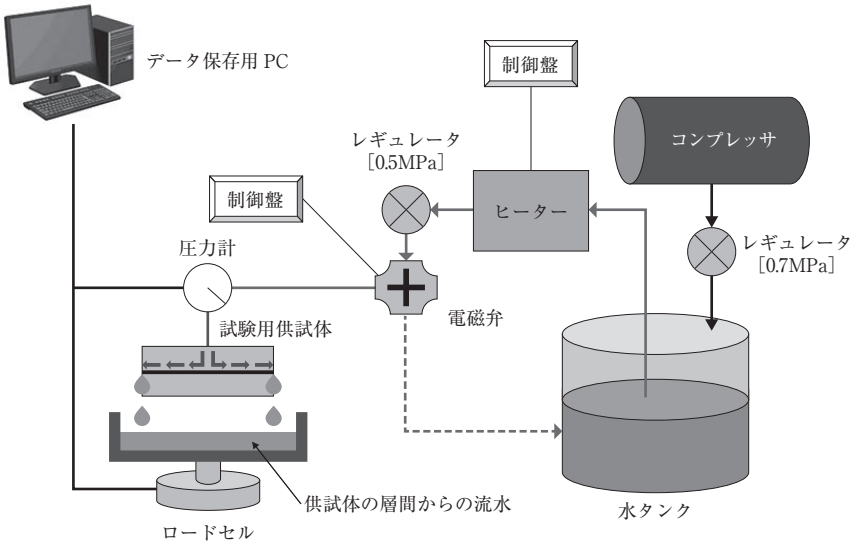
写真－２　非評価層の凝集破壊状況

さらに，実道において層間剥離が生じている箇所では，路面から浸透した雨水の痕跡と，わだち部に付着切れが集中発生しているという特徴が明らかになっており[1)]，この事実を踏まえると，水圧が加わった条件下での付着切れに対する抵抗性を評価すべきであるが，その有用な評価方法はまだ確立されていない。

そこで，アスファルト混合物の層間に繰り返し水圧を加え，付着切れを再現する試験装置を開発し，アスファルト混合物の施工層間に求められる接着性を評価する「間隙水圧負荷試験」を考案した。

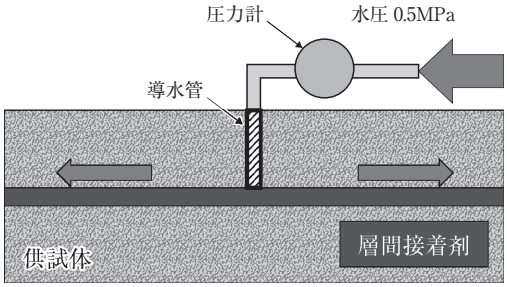
2.2.　試験機の概要

間隙水圧負荷試験に用いる試験機の概要を**図－２**に示す。



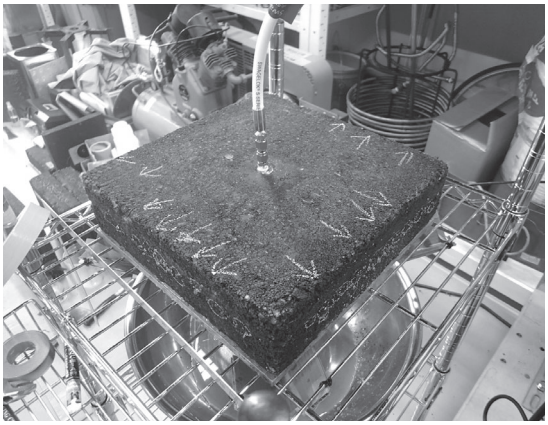
図－２　試験機の概要

この試験機は，加圧水を電磁弁の開閉により，供試体の層間へ断続的に圧入することで，間隙水圧を発生させる構造となっている。試験に用いる供試体の概要と設置状況を**図－３**および**写真－３**にそれぞれ示す。供試体に用いるアスファルト混合物の層間へ水を断続的に圧入すると，徐々に層間接着剤が破壊され，いずれは供試体の側面から漏水する構造となっている。試験機の仕様を**表－１**に示す。



圧力と流水量を計測

図－３　供試体概要



写真－３　試験時の供試体設置状況

表－１　試験機の主な仕様

項　　目	仕　　様
水圧	0～0.6MPa
水タンク容量	30L
水温	23～60℃
漏水量の計量範囲	0.001～10kg

なお，間隙水圧負荷試験の試験手順は以下のとおりである。

- 試験体，試験室内および試験水の温度を試験条件に設定する。
- 供試体を所定の位置に設置する。
- 試験水タンク内の圧力を供試体に与える圧力よりも高くする。これは，所定の水圧を供試体に安定して与えるためである。
- 各制御盤を起動し，各種条件（水圧，加圧サイクル等）を試験条件に設定する。
- 電磁弁の制御盤を起動し，試験を開始する。

2.3　供試体作製方法

間隙水圧負荷試験に用いる供試体は，厚さ40㎜のアスファルト混合物に層間のみに圧力をかけるための導水管を設置し，**図－３**のように評価する層間接着剤を塗布し，さらにアスファルト混合物を舗設して作製する．詳細な作製方法を以下に述べる。

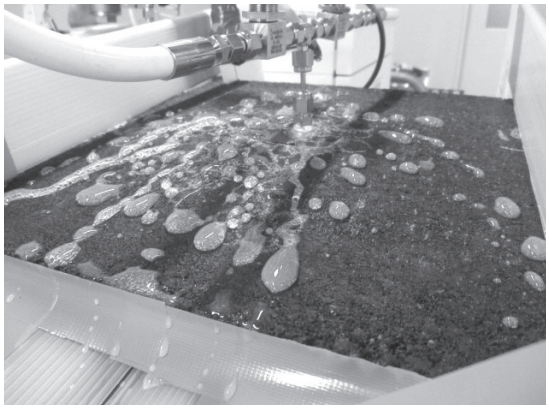
- 300㎜×300㎜×厚さ40㎜の上層のアスファルト混合物（以下，混合物）を舗装調査・試験法便覧（以下，試験便覧）「B003ホイールトラッキング試験方法」[5]に準拠して作製する。
- 作製した供試体に，水を圧入するための導水管（内径15㎜）を供試体中央に設置する。
- 混合物を打ち重ねる面に，評価対象の層間接着剤を塗布する。
- この面に試験時に下層となる厚さ40㎜の混合物を舗設する。

供試体に用いるアスファルト混合物の配合粒度は，混合物の密実性の高いNEXCOの表層用混合物（寒冷地域用密粒度混合物の上限粒度）[4]とした。また，供試体の混合物に用いるバインダには，試験中に供試体に変状が生じないようにするために，港湾の舗装などで重荷重を受ける箇所で使用される塑性変形抵抗性の高い超重荷重用改質アスファルト（以下，超重荷重用）を使用する。超重荷重用の試験値を，**表－２**に示す。

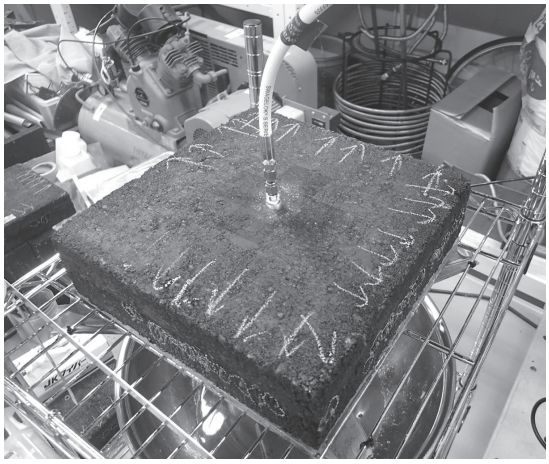
表－２　供試体に使用したバインダの試験値

試験項目	単　位	試験値
針入度（25℃）	1/10㎜	47
軟化点	℃	97.0
引火点	℃	340
薄膜加熱質量変化率	%	-0.03
薄膜加熱後の針入度残留率	%	83
タフネス（25℃）	N・m	28.8
フラース脆化点	℃	-15
粗骨材の剥離面積率	%	0
$G^*/\sin\delta$	kPa	1.628

なお，一般的に用いられるポリマー改質アスファルトⅡ型（以下，改質Ⅱ型）を用いて試験した際に，供試体に発生した変状状況の一例を**写真－４**に示す。写真から分かるように水圧による供試体上面へのひび割れが発生し，供試体によってはひび割れから変形へと進展し，ひび割れからの漏水に至る供試体も見受けられた。この対策として，注水圧力を下げることで供試体の変形を抑える方法が考えられるが，改質Ⅱ型を用いた試験結果から材料の違いによる性能の違いが確認できたことや，注水圧力を下げることで付着切れに要するまでの試験時間が長くなることを考慮し，塑性変形抵抗性に優れる超重荷重用を用いることにした。超重荷重用を用いることで**写真－４**のように非評価層である供試体には変状を発生させることなく試験を実施することができた（**写真－５**）。



写真－４　供試体の変状発生状況
（使用バインダ：改質Ⅱ型の場合）



写真－５　試験状況
（使用バインダ：超重荷重用の場合）

2.4　試験条件

2.4.1　負荷条件

間隙水圧負荷試験で与える水圧の負荷条件を**表－３**に示す。

表－３　負荷条件

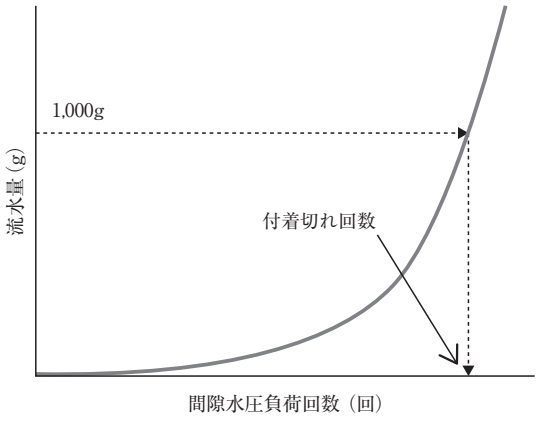
項　　目	条　　件
圧力	0.5MPa
加圧サイクル	1.0秒 （加圧0.3秒→非加圧0.7秒）

水圧は，道路橋床版防水便覧[6]の防水性試験Ⅱの条件として大型トラックの接地圧から決められた0.5MPaとした。水圧の負荷を与える時間は，実現象を再現するために可能な限り短い時間で，かつ0.5MPaを安定して与えられる時間として0.3秒とした。なお，これはダンプトラックが50km/hで走行した際に前輪が通過してから後輪が通過するまでの時間に相当する。また，加圧するサイクルは，１サイクルが1.0秒となるように非加圧時間として0.7秒を設定した。

2.4.2　評価方法

間隙水圧負荷試験による評価方法としては，試験後の供試体を引張接着試験やせん断試験により評価する方法も考えられるが，付着切れが生じた場合には層間の接着力が消失し，試験が行えない。そのため，以下に述べる「付着切れ回数」を算出し，評価を試みた。

間隙水圧負荷試験で得られる層間からの流水量と間隙水圧負荷回数の関係を**図－４**に示す。試験は，層間から漏水がない時間帯から始まり，層間から漏水が始まると緩やかな漏水が継続し，やがて大量の漏水へと進展する。これまでの検討で，層間からの流水量が



図－４　流水量と間隙水圧負荷回数の関係

1,000gに到達した時点で，付着切れによって大量の漏水が確認された。そのため，流水量が1,000gに到達した時の水圧による負荷回数を「付着切れ回数」と定義し，付着切れ回数の違いにより，施工層間の付着切れに対する抵抗性の評価を行った。

2.4.3　評価対象とした層間接着剤

今回紹介する試験結果に用いた層間接着剤の種類と塗布量を**表－4**に示す。

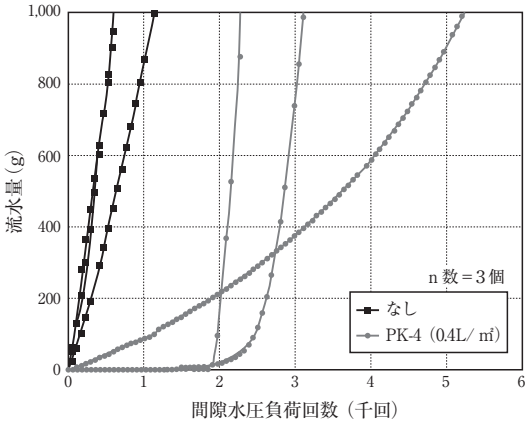
表－4　評価対象とした層間接着剤

種　類	なし	PK-4	PKM-T	PKM-T-Q
塗布量（L/㎡）	－	0.4	0.4	0.8

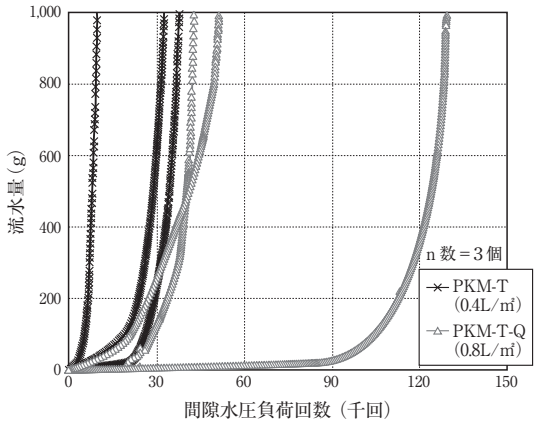
一般的に用いられているタックコートを3種類と，タックコートを使用しない場合の4条件について試験を行った。塗布量については，PKM-Tの一般的な塗布量である0.4L/㎡をPK-4，PKM-Tに適用し，PKM-T-Qは0.8L/㎡とした。これは，表層がポーラスアスファルト混合物の場合のサグ部において，滞水によるバインダの剥離を抑制する目的で採用された実績のある塗布量である。PKM-T-Qは，基本性状はPKM-Tと同様[7]であるが，施工時間が短いため厚膜施工に適していると考えたためである。

3．試験結果

流水量と間隙水圧負荷試験の関係を**図－5**および**図－6**に示す。層間接着剤を用いない場合およびPK-4は，いずれの供試体も試験開始後2,000回の水圧を与えるころには層間からの漏水が始まり，その後急激に流水量が増加した。一方で，PKM-Tは最も漏水が早い供試体でも約2,000回の水圧を与えるまで漏水せず，流水量1,000gに要した負荷回数も9,000回以上であった。厚膜で施工したPKM-T-Qは，さらに多い40,000回以上で流水量1,000gに達した。

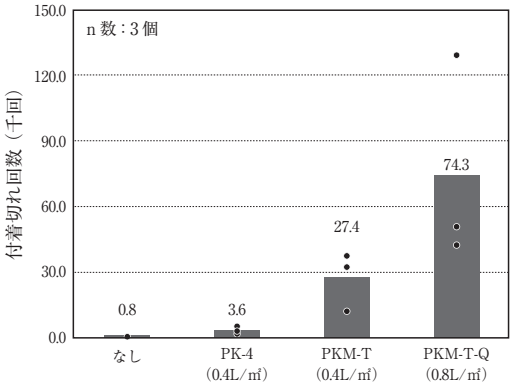


図－5　流水量と間隙水圧負荷試験の関係（なし，PK-4）



図－6　流水量と間隙水圧負荷試験の関係（PKM-T，PKM-T-Q）

付着切れ回数を算出した結果を**図－7**に示す。図中の棒グラフが平均値，●が供試体ごとの結果を表している。付着切れ回数は，層間接着剤なしが最も小さく，次にPK-4，PKM-Tの順に長くなり，PKM-T-Qが最も大きい結果となった。PKM-TやPKM-T-Qは接着力が高く，現行の引張接着試験では混合物内で凝集破壊し，タックコートの層間接着力を評価することができない[8]が，本装置および試験方法を用いることで，層間接着剤の種類による接着性の違いを確認することができた。



図－7　付着切れ回数

４．まとめ

実際に現地で発生しているアスファルト舗装における施工層間の水による付着切れを再現するため，試験装置と試験方法を新たに考案し，施工層間に用いられているタックコートの接着性について評価した。

今回考案した間隙水圧負荷試験では，塑性変形抵抗性の高いバインダを供試体のアスファルト混合物に使用し，0.5MPaの水圧を繰り返し作用させることで，非評価層の供試体に変状が生じることなく，試験を行うことができた。また，いくつかの層間接着剤において試験を行い，流水量と水圧を与えた回数の関係から求めた付着切れ回数の結果から，水による付着切れに対する接着性の違いを確認することができた。

ただし，**図－７**を見てもわかるように試験結果にバラつきが大きいという課題があるため，試験方法の改善を図る必要がある。また，試験温度，層間接着剤の塗布量の違いおよび塗布する混合物表面のきめ深さなど条件を変えて評価を行い，最適な材料選定や塗布量を検証する予定である。また，当該試験は，今回紹介した試験で用いたアスファルト乳剤に限らず，水による付着切れに対する抵抗性を評価できるため，アスファルト乳剤以外の層間接着剤についても検証していく予定である。

アスファルト舗装の長寿命化を図るために，層間接着力を高めることは大変重要であり，かつ最も簡単で効果的な改善方法である。引き続き，層間接着力に求められる性能を明らかにし，それらを考慮した最適な方法を検討していきたい。

―― 参考文献 ――

１）（株）高速道路総合技術研究所：長寿命舗装の作り方，令和元年５月

２）竹林宏樹，馬場弘毅，近松稔之，高橋茂樹：施工継目および施工層間の接着力に関する評価方法の検討，舗装工学論文集第25巻，VOL.76，NO.2，PP. I -217-225

３）（社）日本道路協会：舗装施工便覧，平成18年２月

４）東日本高速道路（株）・中日本高速道路（株）・西日本高速道路（株）：設計要領第一集 舗装保全編 令和２年７月版，2020

５）（社）日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，平成31年３月

６）（社）日本道路協会：道路橋床版防水便覧，平成19年３月

７）（社）日本アスファルト乳剤協会：日本アスファルト乳剤協会規格JEAAS，2020

８）平岡富雄，飯高裕之，澤智之：タイヤ付着抑制性能を有した速分解型タックコートの性能と施工事例，あすふぁるとにゅうざい，No.205，2018年８月

新時代に向けた舗装材料の海外研究動向
～舗装の更なる強靭化とリサイクルを目指して～

若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告
～舗装点検技術の変遷と発展～

アスファルト舗装技術研究グループは，アスファルト舗装に関わる様々な機関に所属する若手技術者や研究者で構成されています。昨年度に引き続き，今年度はコロナ渦での活動だったため，定期的なオンライン会議を通じて海外文献の輪読や舗装技術の基礎知識について，情報共有や議論を重ねてきました。また，輪読や調査によって学んだことは，調査報告として整理し，本誌で公表しています。

研究グループに所属するメンバーは，舗装業界に入って間もない者もいれば，ある程度経験を積んだ者まで様々です。私自身は，社会人になったと同時に研究グループに参加し，今年で８年目となりました。まだまだ学ぶべきことの多い若輩者のつもりでいましたが，この度代表幹事に就任することになりました。研究グループでの活動は知識の習得だけでなく，異なる業務経験を持つ技術者・研究者との人脈を築けることも，大きな特徴だと思っております。40年以上続く研究グループを，これからも活発な議論の場として継続していけるよう努めていきますので，引き続きよろしくお願い致します。

本稿での海外文献の輪読に関する報告は、第７回E&E国際会議の公表論文を題材としました。概要把握を経て，特に関心の高かった３つのテーマに沿った論文を選定し，精読して抄訳整理を行ったものをひとつの報文としてまとめました。

若手技術者が抱く素朴な疑問に関する調査報告として，舗装点検技術をテーマとしました。基本的な点検指標だけでなく，近年AIや画像処理技術の活用が目覚ましい点検手法の変遷について資料調査し，点検技術がどのように発展したのかということに着目してまとめました。

（研究グループ代表幹事：川島　陽子）

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

川島　陽子　（国研）土木研究所材料資源研究グループ

青木　優佳　世紀東急工業㈱関東製品試験所
安藤　秀行　出光興産㈱アスファルト技術課
掛札さくら　（国研）土木研究所道路技術研究グループ
熊坂　理紗　大成ロテック㈱技術研究所
古瀬　佑馬　㈱高速道路総合技術研究所道路研究部
小早川尚之　ENEOS㈱中央技術研究所
小林　靖明　大林道路㈱技術研究所
佐藤　慎輔　㈱高速道路総合技術研究所道路研究部
齋藤　夏実　ニチレキ㈱技術研究所
新堀　詩織*　大林道路㈱技術研究所
園田　　涼　東亜道路工業㈱技術研究所
高橋　伸武　日進化成㈱技術研究所
塚本　康雄　（一社）日本道路建設業協会道路試験所
根元　　孝　（一社）日本道路建設業協会道路試験所
野本　真兵　（国研）土木研究所材料資源研究グループ
硲　　真悠　ニチレキ㈱道路エンジニアリング部
廣田　哲人　世紀東急工業㈱技術研究所
福山　菜美　前田道路㈱技術研究所
藤井　洋志*　日本道路㈱技術研究所
細野　裕貴　昭和瀝青工業㈱技術センター
松本　祥平　日本道路㈱技術研究所
室井　和也　（国研）土木研究所道路技術研究グループ

＊）班長　　（2021年11月現在）

新時代に向けた舗装材料の海外研究動向
～舗装の更なる強靭化とリサイクルを目指して～

藤井洋志　安藤秀行　小早川尚之　小林靖明
齋藤夏実　園田　涼　高橋伸武　塚本康雄
野本真兵　廣田哲人　松本祥平

1．はじめに

アスファルト舗装技術研究グループでは，舗装業界に携わる若手技術者が中心となり，海外のアスファルト舗装に関する最新の研究動向を調査している。研究グループ内で調査した内容についての情報共有・意見交換を通じて，参加している若手技術者の知識や情報整理・発信スキルの向上を目指している。今年度は，2021年6月にオンライン形式で開催された7th E&E国際会議（Eurasphalt & Eurobitume Congress）の公表論文の273報を輪読し，特に調査班の関心が高かった3つのテーマに関連した論文10報を精読し，要点を整理した。これらの論文は，アスファルトの製造から施工，資源循環の可能性において，SDGs（持続可能な開発目標）に関係が深く，これから先の舗装技術にとって「新時代」的な研究報告だと考え，本稿にて紹介する。

2．紹介論文の概要

今回紹介する論文10報は，「アスファルトの精製・改質・再生」，「低環境負荷なアスファルト混合物」，「舗装材料における資源活用技術」の3つのテーマに分類した。各テーマで紹介する論文の概要を**表－1**に示す。また，各テーマの概要は以下のとおりである。

2.1　アスファルトの精製・改質・再生

アスファルト舗装では，適用箇所に応じてポリマー改質アスファルト（以下，PmB）が用いられる。最も一般的に用いられる改質材のSBSは，アスファルトの分離や熱劣化などの課題があり，これらはベースとなるストレートアスファルトの性質にも依存する。また，アスファルト舗装の再生に目を向けると，PmBの普及による，再生アスファルト混合物への影響は，無視できない状況である。この先も舗装再生を継続するためには，従来にない新しい切り口で，アスファルトへの理解を深めていく必要がある。そこで本テーマでは，「精製プロセス」や「改質手法」によるアスファルトへの影響や，「旧アスファルトの化学分析」に関する論文を紹介する。これらは，性状の安定したPmBの供給や舗装再生の深化に資するものと考える。

2.2　低環境負荷なアスファルト混合物

道路工事において重機の排出する排気ガスや，工事規制により起こる交通渋滞で発生するCO_2のほかに，アスファルト混合物の製造や施工時に発生するCO_2排出量なども削減することが課題となっている。そこで，近年では従来よりも低い温度でアスファルト混合物を製造する事のできる「中温化技術」や，省資源，省エネルギーで施工時間や工期の短縮も可能な「薄層舗装」が注目されている。本テーマでは，中温化剤を用いたアスファルト混合物の性状確認の結果や，常温施工が可能な薄層舗装，特殊な施工機械や改質乳剤を用いた高性能超薄層アスファルト混合物についての論文を紹介する。

2.3　舗装材料における資源活用技術

あらゆる産業から発生する廃棄物や一般ごみを舗装材料として再資源化し，循環型社会の形成や環境負荷低減，自然環境・生態系保護に貢献し得る技術開発の動向を調査した。本テーマでは，「廃プラスチック」のアスファルト改質材としての利用や「コンクリート発生材」，「たばこの吸殻」を骨材として資源化する目的の論文を紹介する。これらの技術は，SDGsやマイクロプラスチックなど，国内でも関心の高い話題に関連する。

いずれの研究も国内外で注目度が高まっており，今後，ますます盛んに研究が行われることが予想される。若手技術者がこれら最新の海外動向を調査し，整理したので，各論文の紹介の最後に，翻訳・紹介担当者の気付きやコメントなどを記載している。なお，本文中に示す図や表は，原文から引用しており，翻訳のため一部改編している。

表－1　紹介する論文の一覧

テーマ	論文名（原題／訳題）	著　者
アスファルトの精製・改質・再生	New Type of Chemical Modification of Asphalt Binders to Enhance the Performance of Flexible pavements アスファルト舗装の柔軟性を向上させるためのバインダの新たな化学修飾方法	Nicolás Héctor Carreño Gómez ら
	Impact of the Production Process on the Thermorheological Properties of Pure and Polymer Modified Asphalt 製造プロセスがストレートアスファルトおよびポリマー改質アスファルトの熱的粘弾性特性に及ぼす影響	Frédéric Loup ら
	Toward a Better Understanding of the Chemical Changes of In-service Bitumen and the Chemistry of Recycled Asphalt Pavements (RAP). Recent Studies of RAP Chemistry After In-service Life of more than Ten Years 供用中のアスファルトの化学的変化および再生合材の化学的性質についてのより深い理解へ向けて ～供用10年を超えた再生合材に関する最近の研究～	Richard Taylor ら
低環境負荷なアスファルト混合物	Optimizing Warm Mix concepts with Combination Products 多面的な技術の組み合わせによる中温化アスファルト混合物の最適化	Butz Thorsten ら
	Enlargement of the Field of use of Asphalt Mixes with Ultra-thin Emulsion Asphalt Concrete 超薄層舗装用乳剤アスファルト混合物の適用範囲拡大について	Chahrazad Oukili ら
	High Performance Ultra-thin Asphalt Layer 高性能超薄層アスファルト混合物	Aida Garcia ら
舗装材料における資源活用技術	The Use of Reclaimed Polymers to Improve the Mechanical Performance of Bituminous Mixtures アスファルト混合物の性能向上のための再生ポリマーの活用	R. Tauste ら
	Recycled Plastics from Different Sources for Asphalt Pavement アスファルト舗装用の異なる起源の再生プラスチック	Marcela Balige ら
	Stripping Potential of Half-warm Mix Asphalt made with Recycled Concrete Aggregates 再生コンクリート骨材を使用したHWMAのはく離性	Ana María Rodríguez Pasandín, ら
	Possible Recycling of Cigarette Butts in Stone Mastic Asphalt 煙草の吸殻をリサイクルした砕石マスチックアスファルトの可能性	Md Tareq Rahman ら

3．論文紹介

3.1　アスファルトの精製・改質・再生

アスファルト舗装の柔軟性を向上させるためのアスファルトの新たな化学修飾方法

原題：***NEW TYPE OF CHEMICAL MODIFICATION OF ASPHALT BINDERS TO ENHANCE THE PERFORMANCE OF FLEXIBLE PAVEMENTS***

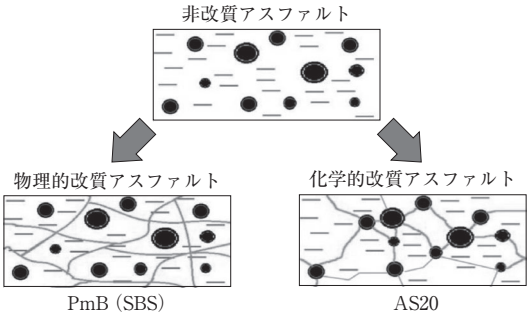
キーワード：改質アスファルト，ポリマーネットワーク

舗装の柔軟性を向上するために使用されているSBS（スチレン－ブタジエン－スチレンブロック共重合体）などのポリマーには相分離の問題がある。本研究では，アスファルト内部の化学構造を変えることで相分離しない添加剤を開発し，その効果をアスファルトのレオロジー試験，混合物試験および試験施工で調べた。

(1)　材料

SBSなどのポリマーはアスファルトの弾性を高める２相系をつくるが，貯蔵時の相分離問題がある。

本研究で使用した化学修飾添加剤AS20はBASF社が開発した熱硬化性反応性モノマーであり，黒色の反応性低粘度流体である。アスファルトの成分，特にアスファルテンや芳香族化合物と反応し，架橋を形成することによって内部構造を変化させる（**図－1**）。AS20は化学修飾であるため，これを用いた場合は１相系となる。形成されたネットワークは，アスファルトの弾性を高め，温度変化の影響を受けにくい。



図－1　AS20による化学的改質とポリマー改質アスファルト（PmB）との比較

⑵　レオロジー試験

A社とB社のアスファルトを使用し，AS20の改質性能を調べた。(**表－１**)。AS20によってアスファルトの粘度が高まるが，その程度はSBSによる改質（PmB）よりもはるかに低い（**表－２**）。

表－１　アスファルトの種類

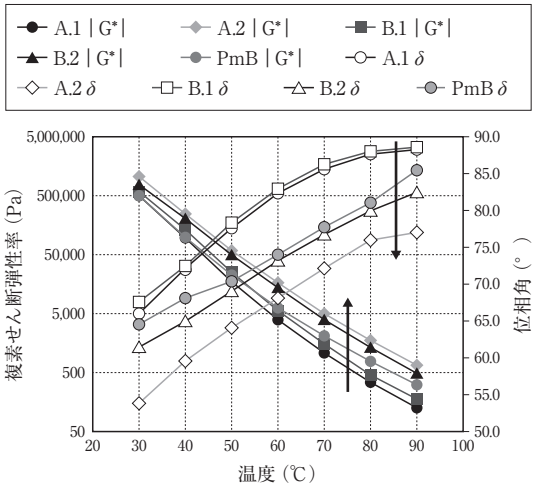
	軟化点（℃）	針入度（1/10㎜）	改質状態
A.1	51.8	42	非改質
A.2	66.0	20	2％AS20
B.1	50.4	44	非改質
B.2	63.0	26	2％AS20
PmB	63.7	41	PmB

表－２　動粘度試験

	動粘度（mPas）	
	135℃	150℃
B.1	4,800	240.0
B.2	1,250.0	550.0
PmB	2,430.0	1,210.0

これは，SBSを含むアスファルトと比較した場合，AS20を含むアスファルトは作業性に優れると同時に，アスファルト性能が向上することを意味する。

動的せん断レオメータの測定結果を**図－２**に示す。なお，図中の上昇曲線は位相角，下降曲線は複素せん断弾性率に対応している。AS20の添加により複素せん断弾性率は上に，位相角は下にシフトしており，アスファルト内のアスファルテンと芳香族化合物の間のネットワークの存在を示唆している。

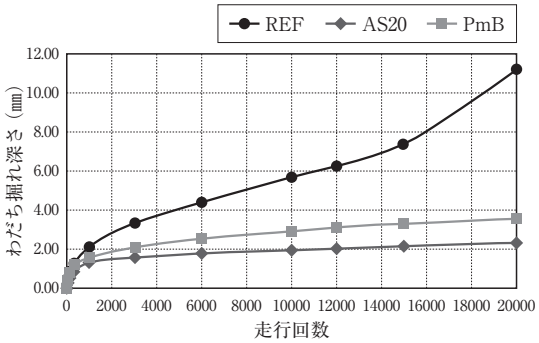


図－２　A，B，PmBの温度スイープ

これらの結果から，AS20はアスファルトの弾塑性範囲を拡張すると結論付けることができる。低温域ではあまり変わらないが，高温域では弾性的な挙動が見られることから，高荷重で，交通量の多い道路や，暖かい気候条件でも従来よりも弾性を維持するアスファルトである。

⑶　わだち掘れ

AS20改質アスファルトのホイールトラッキング試験（EN 12697-22，50℃）および一軸繰り返し圧縮試験（EN 12697-25，以下UCCT）を行った（**図－３**，**表－３**）。これらは，わだち掘れ耐性の評価法としてドイツでは標準的な試験であり，たわみ性舗装の表・基層のわだち掘れ耐性とよい相関がある。



図－３　ホイールトラッキング試験

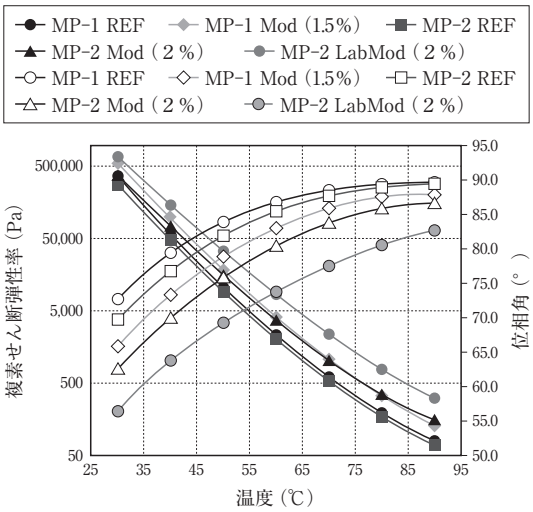
表－３　一軸繰り返し圧縮試験

	アスファルト	変曲点（回）	変形率（％）
REF	B.1	1,002	16.1
AS20	B.2	3,307	3.0
PmB	PmB	1,937	4.3

AS20で改質した表層は，わだち掘れに対してPmBよりもよい性能を示した。これは，アスファルトのレオロジー試験から得られた温度スイープの結果を支持する。UCCTでは，変曲点・変形率ともにPmBを用いたものよりもさらによい結果が得られた。

⑷　混合プラントでの改質

AS20はプラントミックスが可能であるため，プラントで混合した場合の性能を検討した。温度スイープ曲線の結果を**図－４**に示す。なお，図中のMP-1は1.5％，MP-2は2.0％のAS20を添加したアスファルトを意味する。AS20の添加によりアスファルトの弾性の増加を示した。室内での改質（LabMod）はプラントでの改質（Mod）よりもさらに効果的であるといえる。



図－4　プラント練り試料における温度スイープ

(5)　試験施工試料のアスファルト試験

試験施工後，アスファルト供試体を抜き取ってUCCT，一軸引張試験（以下，UTST）および熱応力抑制試料試験（EN 12697-46，以下TSRST）を行った。UTSTは低温の層の強度の評価，TSRSTはアスファルト道路の熱ひび割れを予測するための試験である。これらの試験から得られる２つの曲線の交点から，各層が破損する温度を予測できる。この結果は，わだち掘れ耐性の改善を示している（**表－４**）。破壊温度は依然としてPmBよりも低い一方，表層の疲労挙動はREFおよびPmBに匹敵する（**表－３**も参照）。

表－４　試験施工のコア供試体の試験

	UCCT		UTST + TSRST 破壊温度（℃）
	変曲点（回）	変形率（%）	
表層	1,424	9.07	－27.1
基層	1,542	2.37	－26.8

(6)　まとめ

本研究をまとめるとAS20について以下のことが言える。

①アスファルトのレオロジー試験によって，アスファルテンおよび芳香族化合物間のポリマーネットワークの存在を確認することができた。

②AS20改質アスファルトは，わだち掘れと疲労性能の向上させている。

③AS20による改質はプラントミックスが可能で，膨潤時間や高剪断ミキサーは不要である。

(7)　翻訳者コメント

紙面の都合で割愛したが，他にもいくつかの試験から添加剤AS20の評価を行っている。新しいアプローチによるアスファルトの改質は今後の発展が期待される。

製造プロセスがストレートアスファルトおよびポリマー改質アスファルトの熱的粘弾特性に及ぼす影響

原題：***IMPACT OF THE PRODUCTION PROCESS ON THE THERMORHEOLOGICAL PROPERTIES OF PURE AND POLYMER MODIFIED ASPHALT***

キーワード：精製プロセス，SBS

アスファルトの熱力学特性を改良するためにSBSを添加するが，性能はベースアスファルトの原油種や製油所の製造プロセスに依って異なる。本研究では，４種のアスファルトおよびそれぞれに５wt%のSBSを添加したPmBについて各種試験により，その特徴を把握した。

(1)　材料

針入度グレードが50/70で精製プロセスが異なる直留系，熱分解系，脱れき系，ブローン系４種のアスファルトを用いた。PmBにはSibur社（ロシア，グレードDST-30-01）のスチレン-ブタジエン-スチレン（SBS）ブロック共重合体を用いた。

(2)　PmBの調整法

PmBは，Ultra Turrax T 50（ドイツ・IKA社）を用いて，アスファルトを160℃で加熱後，５分間撹拌。その後，165℃（最高温度）でさらに１時間30分撹拌し，最終的に163℃で200㎖の密閉容器に入れて保存した。

(3)　特性試験

①標準試験

針入度試験，軟化点試験，フラース脆化点試験は，それぞれNF EN 1426，NF EN 1427，NF EN 12593の欧州規格に準拠して実施した。

(4)　結果および考察

①組成およびモルフォロジー

組成分析はTLC/FID法（IATROSCAN®）で実施した（**表－５**）。直留系との比較結果に関する特記を以下に示す。

○脱れき系：アスファルテン分およびレジン分が40%程度減少した

○熱分解系：レジン分が20%程度減少した。

○ブローン系：飽和分90％程度上昇し，芳香族分が30％程度減少した。

コロイダルインデックス（以下，CI）（レジン分および芳香族分の和と飽和分およびアスファルテン分の和の比をとったもの）の観点では，脱れき系が最もポリマーとの相溶性が高く（低CI），ブローン系が最も相溶性が低い（高CI）と解釈できる。

②蛍光顕微鏡によるモルフォロジー観察

PmBの形態観察は蛍光顕微鏡で実施した。一滴のPmBを２枚のスライドガラスの間に置いて高圧水銀ランプHBO 50 L1（Zeiss社，カナダ）を装備したAxioscope（Zeiss社，カナダ）を用いて50倍に拡大して形態を観察した。**図－５**は，PmBを３％および５％添加した際のモルフォロジーを示しており，試験では大きく以下の２種類のモルフォロジーが観察できた。

○結節様（節が繋がっている）：直留系，脱れき系，ブローン系で観察された。ブローン系がわかりやすく，SBSの濃度が高いほど，ポリマーリッチな相が成長する様子が確認できる（明度の高い領域）。

○共連続相：熱分解系で観察された。SBSの濃度が高いほど，共連続相の分散がさらに細かくなった。

構造的な側面から見ると，この２つの形態の違いは，「相転移現象」に関連している可能性があり，熱分解系は他のアスファルトよりもポリマーとの相溶性が良いと解釈できる。

③15℃以上における特性

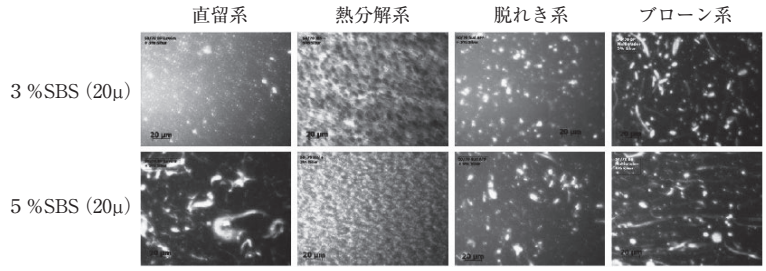
１）軟化点試験

５％までSBS添加量を変えて軟化点を測定した（**図－６**）。試験に用いた４種のアスファルトは50/70グレードであり，SBS無添加時にはほぼ同じ値である。SBS添加により，それぞれ以下の変化を示した。

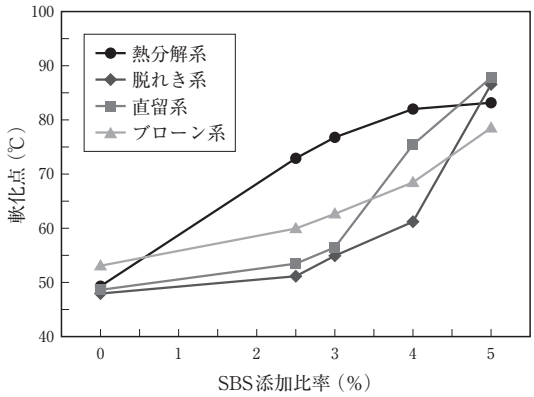
○熱分解系：SBS濃度が低い領域（2.5％）から軟化点が上昇し，４％添加で飽和しているように見える。

表－５　４種のアスファルトのSARA分画

アスファルト	飽和分	芳香族分	レジン分	アスファルテン分	コロイダルインデックス（Ic）
	%	%	%	%	－
50/70 直留系	9	45	23	24	0.49
50/70 熱分解系	8	48	18	26	0.52
50/70 脱れき系	4	67	16	14	0.22
50/70 ブローン系	17	32	26	25	0.72



図－５　SBS３％及び５％添加時のモルフォロジー



図－６　SBS2.5％～５％添加による軟化点の変化

○直留系および脱れき系：閾値を超えるまでは顕著な軟化点上昇が見られない。閾値は直留系が３％，脱れき系は４％であった。

○ブローン系：軟化点上昇は比較的少なく安定しており，SBS４％程度を閾値として上昇した。

上昇具合の違いについては，アスファルトの供給源を考慮する必要はあるものの，ポリマーがアスファルトの軽質留分（主に芳香族）で膨潤する能力の高低が影響を与えると推察する。

２）降伏応力を用いたアスファルトのレオロジー挙動の表現の可能性

DSR測定はMCR302（Anton Paar社）を使用し，15～60℃において0.01～100rad/sの範囲で周波数スイープを行い，ひずみは１％で実施した。

図－7（a），（b）は，脱れきおよび熱分解系の温度15～60℃における周波数スイープである。60℃付近では，測定した周波数範囲で準ニュートン的な挙動が見られ，温度が下がるにつれ，明らかなせん断減粘挙動が見られた。また，30℃以下では，複素粘度（η^*）がわずかに上昇することも確認された。

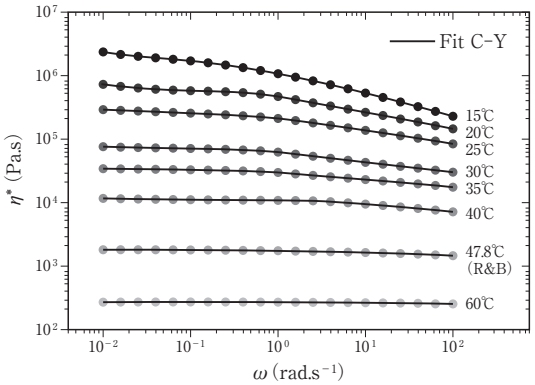
Carreau-Yasuda（C-Y）モデルを用いてレオロジー挙動のモデル化を試みた結果，アスファルトのレオロジー挙動を忠実に適合させることができた。この研究では，降伏応力を伴うCarreau-Yasuda法を用いて，せん断速度の範囲（ω）における複素粘度（η^*）を適合させた。この法則は次のように定義される。

$$\eta^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\omega} + \eta_0 . [1 + (\lambda . \omega)^a]^{\frac{m-1}{a}}$$

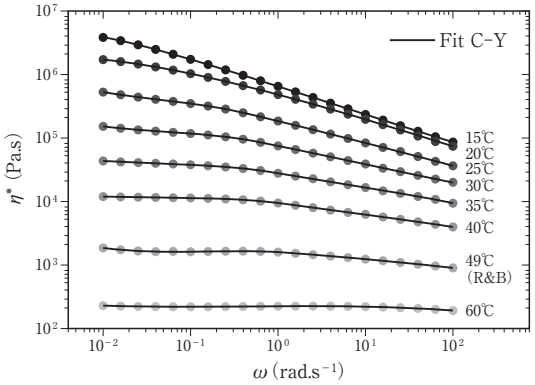
ここで，σ_0（Pa）は溶融降伏応力，η_0（Pa.s）はゼロせん断速度またはニュートン粘度，λ（s）は特性時間，"m"は冪乗則または剪断減粘度指数，そして"a"はYasudaパラメータである。なお，"a"は計算を簡単にするために，Carreauの法則と同様に２に設定した。**図－7（c）**に示すように，降伏応力パラメータ（σ_0）は，30℃以下の温度で観測され，温度が下がるにつれて指数関数的に増加する。また熱分解系では脱れき系よりも高い値を示した。ここで注目すべきは，σ_0は一般的に定義されている降伏応力には対応しておらず，この試験条件下でアスファルトが，「降伏応力のある流体のような」挙動を示したと解釈できる。

この現象の原因のひとつとして，**図－8**に模式的に示す温度によるコロイド構造の変化が考えられる。他研究においてレジン分は温度に応じて固体または液体の状態であることが示唆されている。アスファルテン分とレジン分の含有量に基づいて，冷却過程では２つのモデルが推定できる。ひとつは，レジン－アスファルテンミセルが粘弾性流体中に分散しているコロイド系である。もうひとつは，アスファルテンとレジンの量が充分に多い場合にレジンミセルの成長によるコンパクトな構造を形成する場合である。

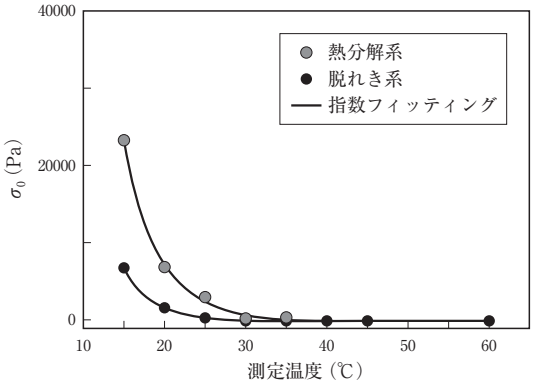
降伏応力を用いたC-Yモデルは，ポリマー－粘土ナノコンポジットの剥離状態の定量化に使用されたことがあり，粘土のネットワークが大きいほど降伏応力が高いことがわかった。同じ方法論をPmBに適用した場合，降伏応力の増加は材料の構造化に伴う状態の変化と何らかの関連があると考えられ，実際，熱処理したアスファルトはいずれも最も高いσ_0値を示した。**図－7（c）**では，精製プロセスやレオロジー特性が特徴的な脱れき系と熱分解系のσ_0値の変化を示した。



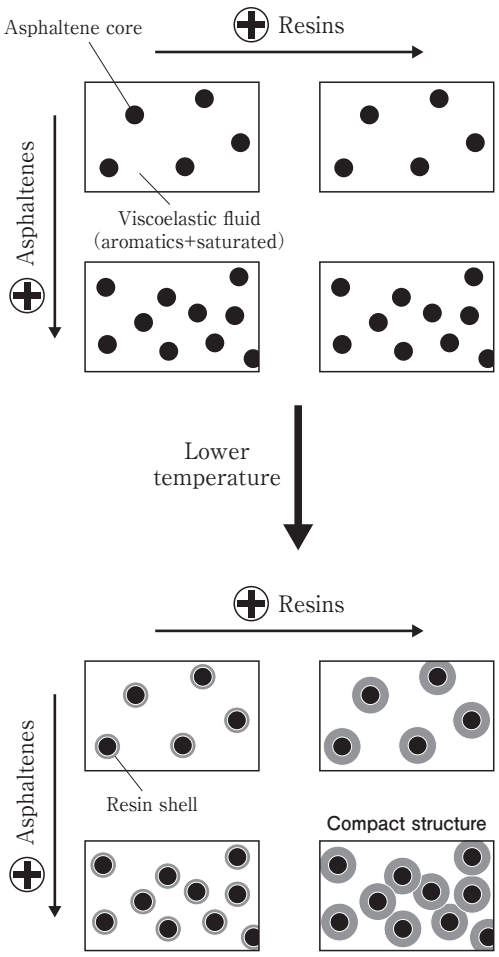
図－7（a）　15℃～60℃における周波数スイープ　脱れき



図－7（b）　15℃～60℃における周波数スイープ　熱分解系



図－7（c）　降伏応力σ_0の温度変化

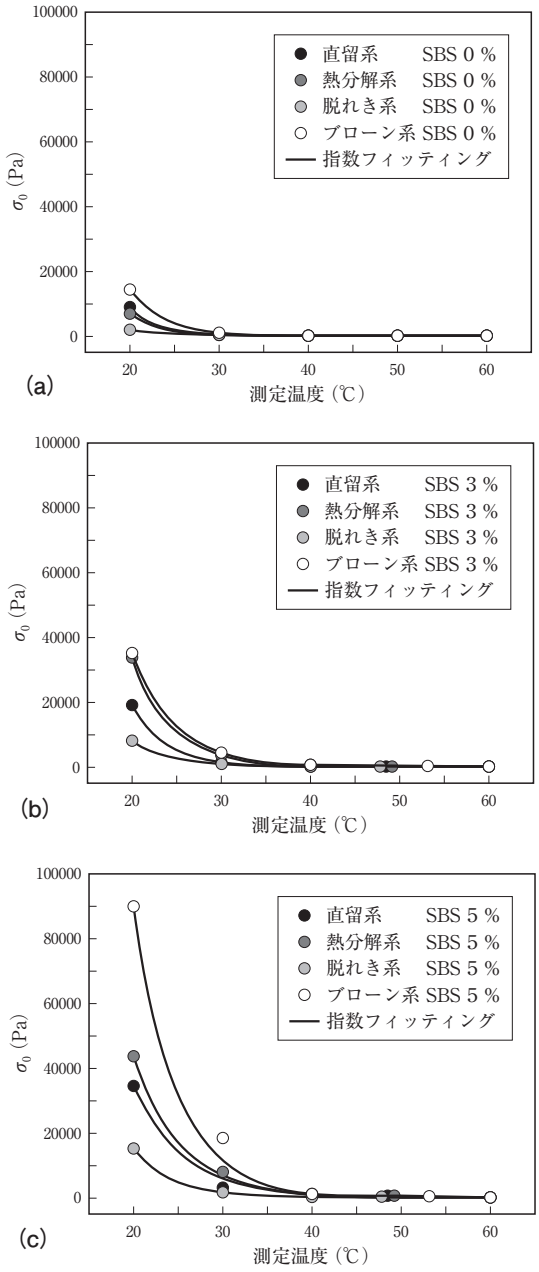


図－8　温度低下に伴うアスファルトのコロイド構造変化イメージ

図－9は，SBS含有量が3％と5％のストレートおよびPmBの降伏応力の変化を示す。SBSの含有量にかかわらず，ブローン系が最も高く，脱れき系が最も低かった。直留系と熱分解系は同じ範囲内であったが，現状のデータだけでは，この現象を物理化学的に解釈することができなかった。

④0℃以下の低温特性

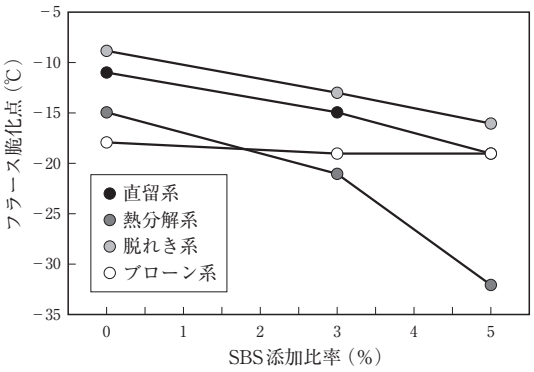
フラース脆化点試験による低温特性の評価結果を示す（**図－10**）。SBS濃度の増加に伴うフラース脆化温度の変化から，SBSの添加によりアスファルトの低温特性が向上したことが確認された。SBSの添加により最も低温特性が向上したのは熱分解系であり，脱れき系，直留系も低温特性の向上が確認された。唯一，ブローン系ではSBS添加による低温特性の向上は確認されなかった。



図－9　C-Yモデルによる降伏応力の評価
（a）SBS 0％，（b）SBS 3％，（c）SBS 5％添加

(6)　まとめ

4種の精製プロセス（減圧蒸留装置，プロパン脱れき装置，熱分解装置，ブローイング装置）から得られたアスファルトについて，SBS2.5～5％添加によるPmB製造時の影響を評価した。従来の規格試験（針入度・軟化点・フラース脆化点・組成分析などの一般性状）以外にも熱レオロジー特性や蛍光顕微鏡の観察結



図－10　SBS 3％および5％添加によるフラース脆化点向上

果やモルフォロジーを評価した。SBSによる改質効果が最も現れたのは熱分解系であり，最も効果が低かったのはブローン系であった。本研究結果よりアスファルトの工業的特性に対する精製プロセスの影響は明らかであり，いくつかのパラメータを用いて，どのような処理を行ったアスファルトであるかを識別できる。精製プロセスを特定することでPmBの性能もある程度予測できる可能性がある。

⑺　翻訳者コメント

まず，本研究で取り上げられた各プロセスについて，アスファルトを製造するという観点で比較する。直留系では減圧蒸留装置により沸点の違いを利用してアスファルト留分を分離する操作であるのに対して，脱れき系は溶剤に対する溶解度の違いを利用し分離された超硬質の残油（溶剤脱れきアスファルト）を軟質の減圧残油や重質潤滑油留分などによりカットバックして針入度を調整したものである。また熱分解系は減圧蒸留装置から得られた残油（アスファルト相当留分）を熱分解装置（残油の粘度や流動点を下げる目的）で処理し，得られた熱分解残油を沸点もしくは脱れき系と似たような方法にてカットバックしたもので，この装置から得られる熱分解残油留分を基材として用いたアスファルトをVisbreakingおよびVisbrokenと表現していると考えられる。ブローン系は主にルーフィング用や防水工事用に製造させるアスファルトであり，減圧蒸留装置から得られた残油に空気を吹き込み，高温のだれや低温脆性が改善されたアスファルトである。本論文では各装置にかける原料の原油種に関する記載は無かったため，定量的な比較としての解釈は難しいものの，精製プロセスの違いによる傾向を定性的に比較することができる有益な論文である。

供用中のアスファルトの化学的変化および再生合材の化学的性質についてのより深い理解へ向けて～供用10年を超えた再生合材に関する最近の研究～

原題：***TOWARD A BETTER UNDERSTANDING OF THE CHEMICAL CHANGES OF IN-SERVICE BITUMEN AND THE CHEMISTRY OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENTS (RAP). RECENT STUDIES OF RAP CHEMISTRY AFTER IN-SERVICE LIFE OF MORE THAN TEN YEARS.***

キーワード：舗装再生，4成分，劣化試験

本研究では，旧アスファルトの化学的組成に対する理解を深めることを目的とし，世界4カ所から切削した再生骨材より抽出回収した旧アスファルトについて，基本的な性状，組成分析，レオメータ（DSR）による粘弾性状評価，および元素分析を実施した。

⑴　試験材料・方法

再生骨材の性状を**表－6**に示す。アスファルトは，いずれも針入度グレード35/50のストレートアスファルト（以下，ストアス）が由来と推測している。実施した評価は以下のとおり。

○基本性状（針入度，軟化点，回転式薄膜加熱試験［Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT］）
○組成分析
○DSR測定（複素弾性率G*および位相角）
○元素分析（C, H, N：ASTM D5291，O：ASTM D5622，S：ASTM D5453に準拠）

表－6　再生骨材に関する情報

再生骨材	産　地	供用年数	最高気温（その月）	最低気温（その月）	年間平均降雨量（㎝）
RAP 1	インド サンバルプル	10	41℃（5月）	12℃（1月）	91
RAP 2	インド カラグプル	20	36℃（5月）	14℃（1月）	150
RAP 3	フランス	不明	26℃（6月）	0℃（1月）	36
RAP 4	イギリス（高速道路）	16	20℃（6月）	2℃（1月）	36

⑵　実験結果および考察

表－7に，旧アスの基本性状を示す。供用年数が長いほど針入度が低い傾向であるが，軟化点と供用年

表－7　旧アスの基本性状

	RAP 1	RAP 2	RAP 3	RAP 4
基本性状				
針入度（1/10㎜，25℃）	18	8	7	12
軟化点（℃）	63.4	59.8	78.4	73.2
針入度指数	－0.5	－2.3	0.2	0.4
RTFOT後				
軟化点（℃）	67.2	65.2	85.6	78.6
RTFOT適用による軟化点差	3.8	5.4	7.2	5.4
組成分析				
飽和分（%）	11.7	10.2	12.6	8.1
芳香族分（%）	47.3	40.9	36.4	42.6
レジン分（%）	24.5	28.5	28.4	24.1
アスファルテン分（%）	16.5	22.6	22.6	25.2

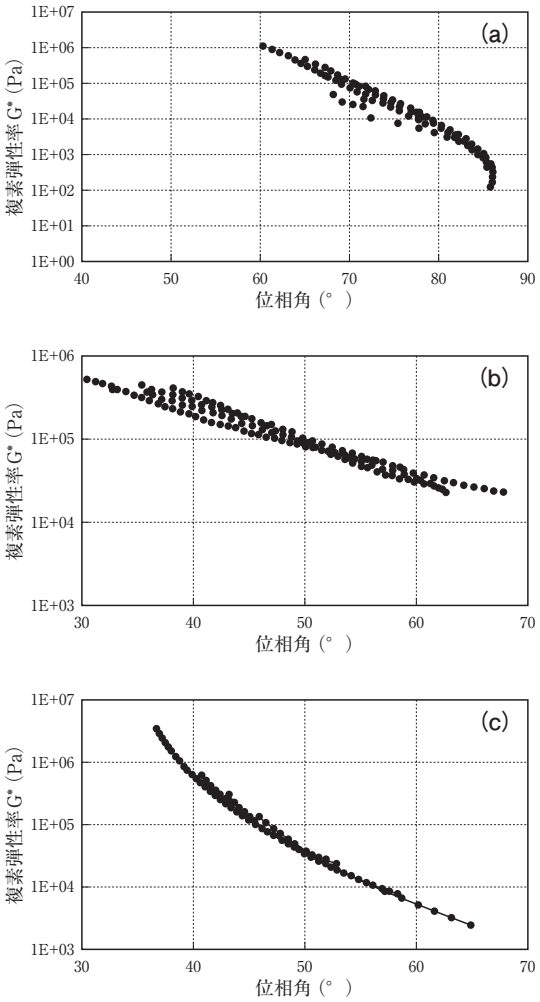
数との間には相関が見られない。またRTFOT後の軟化点に注目すると，いずれの旧アスも試験前と比較して軟化点が上昇していることから，劣化が進行する余地が残されていたと推測される。組成分析については，RAP 4のアスファルテン分が多いこと以外には，考察に値する情報を得られなかった。以上より，これらの基本的な性状から得られる情報には限界があると考える。

図－11に，(a) RAP 4，(b) ブローン，(c) ストアスに対するDSR測定の結果を示す。装置はAnton Paar社のMCR501を使用した。ブローンとストアスには針入度15の試料を使用し，RAP 4の針入度に近づけている。測定は0.1～100rad/sの周波数範囲で，25～100℃の温度範囲で行った。この時，ひずみは6％に固定し，試料が線形粘弾域であることを確認している。

図－11 (a)～(c) から，旧アスは，針入度が同等のストアスおよびブローンと比べ，位相角が大きい傾向にある。またG^*も，新アスと比べ，旧アスのほうが大きいこともわかる（**表－8**）。旧アスの曲線の形に着目すると，不連続であったり折れ曲がりが見られることから，旧アスは新アスと比べて複雑な粘弾性体であると推測される。

表－9に，アスファルテン分の元素分析結果を示す。アスファルテン分は，n-ヘプタンによって旧アスから分離している。旧アスのアスファルテン分の酸素量は，2.90～8.33％である。通常，新アスのアスファルテン分の酸素量は約1％であることから，旧アスのアスファルテン分の酸素量は新アスよりも高いことがわかる。

図－12に，新アスおよび新アスを促進劣化した後の，アスファルテン分およびマルテン中の酸素含有



図－11　DSR測定による粘弾性率
(a) RAP 4，(b) ブローン，(c) ストアス

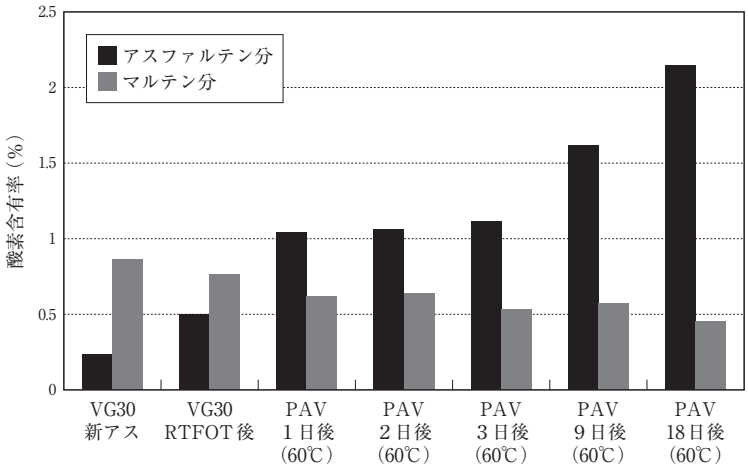
表－8　各サンプルの位相角60°におけるG^*

サンプル名	G^*（Pa，@60°）
RAP 4	1×10^6
ブローン	2×10^4
ストアス	7×10^3

表－9　旧アスからn-ヘプタンで分離したアスファルテン分の元素分析結果

	RAP 1	RAP 2	RAP 3	RAP 4
C元素（%）	82.56	81.92	82.39	70.98
H元素（%）	7.69	7.42	7.59	6.69
O元素（%）	2.90	4.55	3.64	8.33
N元素＋S元素	－	－	－	3
H/C元素比	1.11	1.08	1.10	1.12
O/C元素比	0.026	0.042	0.033	0.088

量を示す。サンプルにはVG30グレード（針入度50/70と同等）の新アスを使用している。左端から新アス，RTFOT後，加圧劣化試験（Pressure Aging Vessel, PAV）後の順に示されており，右へ行くほどPAVの適用時間が長い結果となっている。アスファルテン分の酸素含有量に着目すると，室内での促進劣化が進むにつれて増大が確認される。これより，アスファルテン中の酸素含有量が，アスファルトの劣化の指標となりうる可能性が示唆された。



図－12　長期室内劣化中のアスファルテンおよびマルテン中の酸素含有量

ここで，RTFOTおよびPAV適用後の酸素量に着目されたい。RTFOTとPAVは，長期供用後の劣化状態を室内で再現できる劣化試験として知られている。日本国内における研究では，RTFOT後，PAVを20時間適用することで，供用5～10年程度の劣化を再現できると言われている。**図－12**より，アスファルテン中の酸素含有量は，PAV-1日間では約1％，PAV-18日間でも2.2％程度である。PAV-20時間が供用5年に相当すると考えると，単純計算ではあるが，18日後では，供用100年程度に相当する。一方，**表－9**では，供用10～20年の旧アスのアスファルテン分の酸素含有量2.90～8.33％と，その全てがPAV-18日後の値（2.2％）を上回っている。したがって，アスファルテン分中の酸素含有量という指標では，室内試験による劣化と，実際の供用による劣化を定量的に比較することができない。

⑶　まとめ

長期供用後の舗装から回収した旧アスファルトに対し，各種性状評価を行った。元素分析により，“供用年数が長いほど，アスファルテン中の酸素含有量が多くなる”傾向を確認した。また新アスに対する室内劣化試験においても，劣化の進行に伴いアスファルテン中の酸素含有量が増大する傾向が見られた。以上より，アスファルトのアスファルテン分中の酸素含有量が，アスファルトの劣化を深く理解するための糸口になる可能性が示唆された。

⑷　翻訳者コメント

国内の舗装再生は1980年代から始まり，日本は世界的に見ても舗装再生が普及している国である。一方で，繰り返し再生や改質アスファルトの普及により，劣化度合いや旧アスの由来の多様化など，新たな課題が浮上してきている。こういった課題解決を目的に，舗装再生に関する研究が進められているが，海外においても同様の課題意識を持っているようである。今回紹介したような化学的な観点からの研究は，基礎研究の要素が強いものの，大変興味深い内容であった。国内外の業界関係者が，それぞれの強みを活かしながらこの課題に立ち向かうことで，舗装再生への理解が深まり，より安心なインフラの実現に繋がることを期待する。

3.2　低環境負荷なアスファルト混合物

多面的な技術の組み合わせによる中温化アスファルト混合物の最適化

原題：***OPTIMIZING WARM MIX CONCEPTS WITH COMBINATION PRODUCTS***

キーワード：中温化，温度低減

本研究では，中温化剤に石油ベースの成分および接着促進剤を添加した固形添加剤（改良FTワックス）を作製した。作製した添加剤をアスファルト混合物（SMA 8 S）に添加し，低温域での締固め性への影響と残留水分の影響をシミュレートした結果と混合物の性状試験結果について報告している。

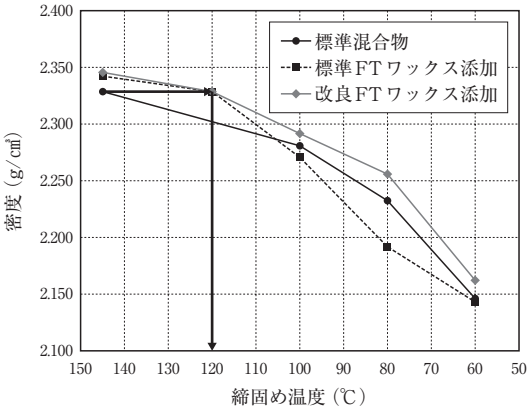
⑴　中温化技術適用における懸念

一般的に，アスファルト混合物を中温化させることで，製造におけるアスファルトの劣化抑制，混合プラントでのCO_2排出量の削減，および現場の労働者の健康の保護に重要な貢献をするとされている。その反

面，骨材の加熱温度を下げることになるため，骨材中に水分が残存しアスファルトの剥離を引き起こす可能性がある。さらに，製造した混合物の温度が低いと舗装現場での施工と締固めの作業可能時間も大幅に短くなり，締固め不足となる懸念があった。

⑵　締固め特性の評価

比較用に何も添加していない標準混合物と，標準的な中温化剤（FTワックス）・改良中温化剤（改良FTワックス）をそれぞれ添加した混合物の３種類を用いて，温度を変化させて締固め試験を実施した（**図－１**）。



図－１　締固め温度によるマーシャル密度の変化

改良中温化剤を添加した混合物では120℃で締固めた供試体が標準混合物の145℃締固めと同等の密度となった。FTワックスと改良FTワックスでは120℃以下の温度域で，改良FTワックスの方が締固め性がよい結果となった。

⑶　残留水分の影響に関する室内検討

アスファルト混合物を工場で製造する際，温度を下げて中温化させる場合は骨材加熱ドライヤの能力を下げるか，ドライヤ内の骨材の通過時間を短縮させる必要がある。しかし，温度と通過時間の組み合わせが適切でないと，骨材中に水分が残りやすい。実際の工場での工程では含水率の測定が難しいため，室内において下記の工程どおりに混合物の作製を行い，水の添加を行った。

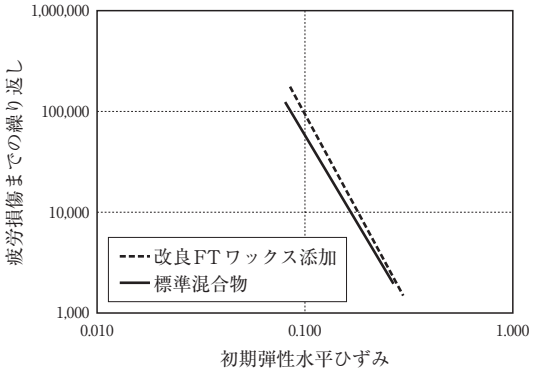
①骨材を乾燥させる
②骨材の計量を行う
③骨材を標準混合物より25℃低い温度で加熱する
④ドライミキシングを行う
⑤３質量パーセント濃度の水を添加する
⑥アスファルトを投入し，120℃で締固める

水はアスファルト投入前に添加する。ここで，添加された水の一部は自然に蒸発する。この直後にアスファルトを添加して混合を行う。したがって，混合時間は標準混合物と同じ時間となる。

145℃締固めの標準混合物と120℃締固め＋水添加＋改良ワックス添加混合物で作製した供試体密度はほぼ同等の値となった。したがって，中温化による残留水分はほとんどないものと考えられた。

⑷　modified fatigue tests（修正疲労試験）

上記⑶で作製した供試体よりコアを切り出し，ドイツ規格の修正疲労試験を実施するために，真空デシケータ内で40℃の水中に72時間保管した供試体を用いた。試験結果より，改良FTワックスを用いた混合物の方がわずかに疲労抵抗性が優れている結果となった（**図－２**）。



図－２　疲労結果の比較（水浸供試体）

⑸　まとめ

中温化に最適な改良FTワックスを添加することで145℃の締固め温度が25℃低減できることが分かった。残留水分の影響が懸念されるが，室内での実験において，水を添加した温度低減混合物も標準混合物と同等の密度が得られ，混合物性状に差が生じないことが分かった。

⑹　翻訳者コメント

日本国内でも各舗装会社が中温化技術について研究を行っているが，製造温度を低減させることによって混合物製造時の熱劣化を低減させる事や，工場におけるCO_2排出量の削減は世界共通なのだと改めて感じた。また，近年はアスファルトフュームの人体への影響も懸念されていることから，現場の労働者の健康の保護にも重要な貢献をする中温化技術がさらに普及されることを期待する。

超薄層舗装用乳剤アスファルト混合物の適用範囲拡大について

原題：*ENLARGEMENT OF THE FIELD OF USE OF ASPHALT MIXES WITH ULTRA-THIN EMULSION ASPHALT CONCRETE*

キーワード：薄層舗装，常温混合，環境負荷低減，低騒音化

2016年に公開されたフランス規格の精密検査法を考慮し，コラス社（フランスの道路建設会社）は，規格に定められた適用範囲を拡大するために，乳剤を使用した薄層アスファルト舗装の新しいコンセプトを開発した。本研究では，薄層舗装EUROMACの製造工程，敷設作業，ならび利点を報告する。

⑴　EUROMACの特徴

EUROMACは，フランスの交通網80％を占める低・中規格の道路に適用され，道路補修工事の表層として敷設される。薄層舗装は，薄層であるのため構造的な役割は果たさないが，道路表面をリフレッシュする効果がある。また，利用者に快適な乗り心地を提供し，交通による騒音を低減させることで沿道環境を改善する効率的な方法でもある。

⑵　製造工程

EUROMACは，骨材粒度０～６㎜または０～10㎜であり，平均舗装厚は1.5㎝である。これは，高いたわみ性が要求される舗装に適している。

混合物の製造工程は２つのステップに分かれる。

①砂を高温のアスファルトで被膜する

②砂（事前に被膜済み）と骨材をアスファルト乳剤と常温混合プラントで混合する

※1992年にこのダブルコーティングプロセスを開発し，特許を取得している

適切な品質を確保するためには，すべての砂・骨材はアスファルトで被膜されていなければならない。この被膜の評価として，水浸抵抗性はDuriez testで評価する。また，EUROMACはフランスの常温混合物の基準規格NF P 98-139には対応していないが，最小アスファルト量は5.0％，水浸抵抗値は75以上を満たす必要がある。

⑶　敷設作業

EUROMACは，外気温が15℃以上で晴れたときに製造・敷設される。敷設前に，ディストリビュータなどで散布量250～400g/㎡のタックコートが必要である。機械編成はペーバで敷きならし，非振動ローラで転圧（４～８回）する。薄層のためローラ転圧後は比較的早期に交通開放することができる。舗装表面は，平均キメ深さ0.6～0.9㎜であり，表面排水とすべり抵抗値が良好である。

⑷　技術の利点

①環境

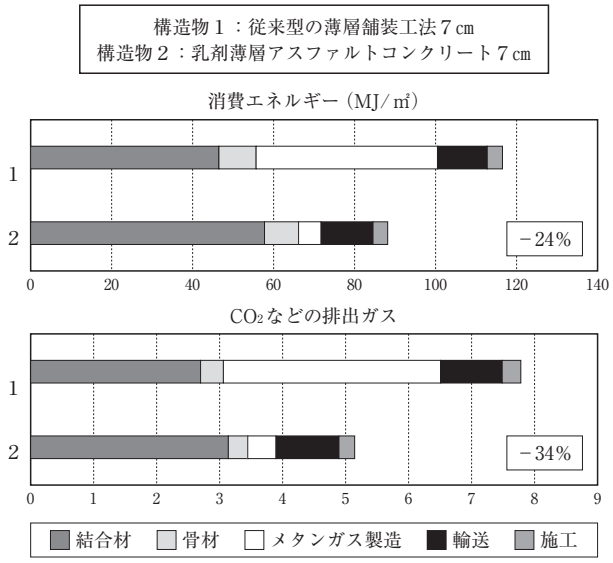
EUROMACは常温で製造を行うため，温室効果ガスの排出を抑制する。また，薄層舗装なので使用骨材やアスファルトが少なく，天然資源の保護に寄与する。さらに，材料運搬（ダンプやローリなど）時のCO_2排出も抑制する。CoTITA（輸送と計画の部門間技術会議）は，加熱アスファルト混合物と常温アスファルト混合物の製造時における消費エネルギー等の比較を行っている。

図－３に比較結果を示す。常温アスファルト混合物は，加熱アスファルト混合物よりも消費エネルギーが24％少なく，温室効果ガス排出量も34％少ない。

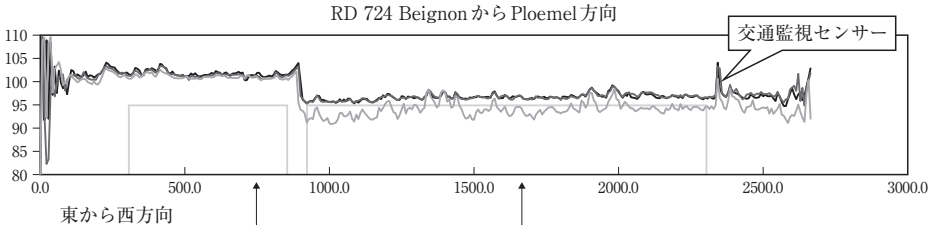
②騒音特性

ベニョン市内の道路（RD724）の２㎞間で2015年９月に騒音レベルを測定しており，90㎞/hの結果はISO = 96.7，LREP（dB）= 94.1であった。

図－４にEUROMACと表面処理（フォグシール）工法との騒音測定結果を示す。EUROMACは表面処理混合物よりも約３dB（A）低い。これは50％の騒音低減に相当する。



図－３　アスファルト混合物の製造方法による比較結果



90㎞/hの結果	ECF	Euromac
開始位置（m）	300	920
終了位置（m）	850	2300
前方設置マイクの騒音値 dB（A）	101.8	96.8
標準偏差	0.6	0.6
後方設置マイクの騒音値 dB（A）	101.3	96.7
標準偏差	0.6	0.7
平均値	101.6	96.7
タイヤ／路面騒音値 dB（A）	101.0	94.1
標準偏差	0.4	1.4

図－４　EUROMACと表面処理（フォグシール）工法との騒音測定結果

⑸　まとめ

EUROMACは，常温混合プラントでの混合前に砂分を事前にアスファルトで被膜する製造工程により，独創性を有している。また，騒音低減や労働改善などの利点もあり，環境面にも優れている。この工法は，現場の経過観察から良好な結果が得られており，今後の舗装メンテナンスの問題解決を提供していく。

⑹　翻訳者コメント

日本国内でも，LCC改善のため加熱アスファルト系表面処理工法は，各舗装会社が施工実績を伸ばしているが，常温混合物との併用はまだ少ないと思われる。環境負荷を低減させる技術はSDGsの目標達成に貢献できると考えるため，今回紹介した報文の事例などを参考にし，表面処理工法のさらなる開発や普及が盛んになれば幸いである。

高性能超薄層アスファルト混合物

原題：*HIGH PERFORMANCE ULTRA-THIN ASPHALT LAYER*

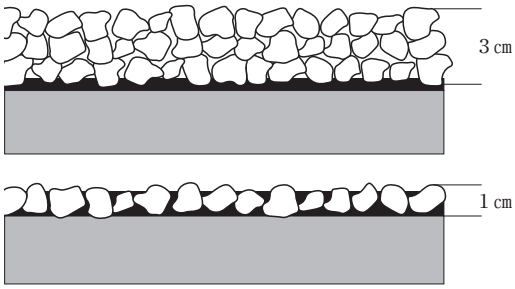
キーワード：超薄層，改質乳剤，摩耗層，路面性能

本研究では，施工方法や使用骨材，改質乳剤の工夫により薄層舗装の性能向上，工期短縮を実現している。舗装の最上層には，一般的に「摩耗層」が設けられ，その目的は既設舗装の劣化抑制や路面のすべり抵抗性・騒音低減などの機能付与である。しかし，従来の摩耗層は耐久性が低く，上記機能を長期間維持することができなかった。そこで，超薄層（１～1.5㎝）アスファルト混合物（以下，超薄層）を用いた摩耗層の高耐久化に関する成果を報告する。

⑴　超薄層のイメージ

図－５に従来の摩耗層と超薄層のイメージを示す。従来と比較した違いは以下のとおりである。

○骨材が単層構造となっている
○混合物中のアスファルト量が多い
○タックコートと混合物が一体化している

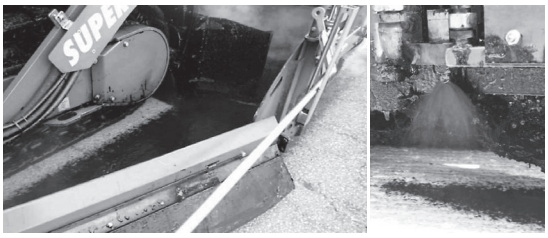


図－５　従来の摩耗層（上）と高性能超薄層（下）

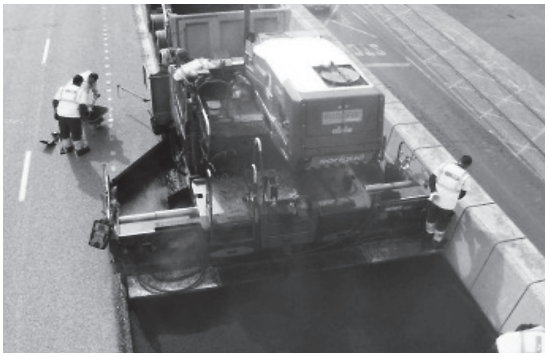
⑵　本技術の特徴

①施工方法

写真－１に施工機械によるアスファルト乳剤の散布状況を示す。フィニッシャには乳剤散布装置が備えられており，乳剤を噴霧後，直ちに加熱混合物を敷き均すことができる。これにより，養生時間の短縮とアスコン層－タックコート間の一体化に成功した。**写真－２**に施工状況，**写真－３**に施工後の路面を示す。先に散布した乳剤中の水分が加熱混合物の熱によって瞬時に蒸発するため，養生時間が不要となる。また，成膜したタックコートが熱で融解し，アスコン層とタックコートのさらなる一体化が可能となる。



写真－１　フィニッシャによる乳剤散布状況

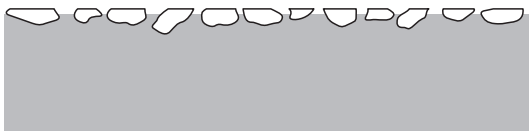


写真－２　施工状況

写真－３　施工後の状況

②骨材粒度

図－６に転圧後のテクスチャイメージを示す。使用した骨材は，最大粒径5/11㎜の立方骨材であるため，立方体の形状を有しており，転圧後の路面はネガティブテクスチャを形成する。また，超薄層は骨材１個分の厚さに敷きならされるため，締固め不足の心配がなく，常に安定した厚さに施工できる。

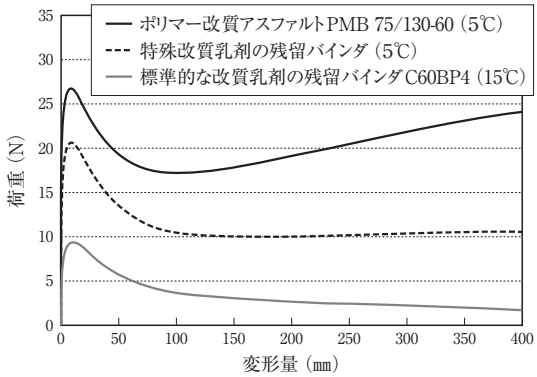


図－６　転圧後のテクスチャイメージ

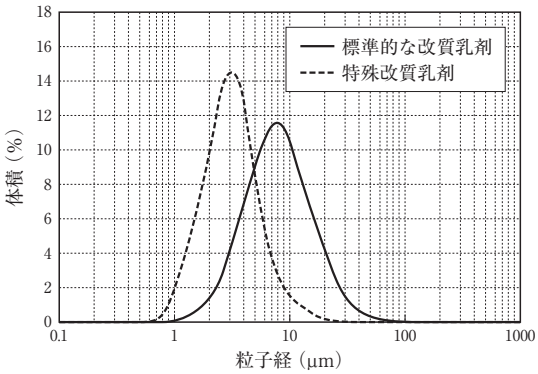
③改質乳剤

写真－４に成膜したタックコート，**図－７**に引張接着試験結果を示す。タックコートには，SBS合成樹脂をベースとした高改質アスファルト乳剤を使用することで，既設舗装との接着性を向上させることができた。また，**図－８**に乳剤の粒子径測定結果を示す。通常は乳化が困難な高粘度の改質アスファル

写真－４　成膜後のタックコート



図－７　引張接着試験結果



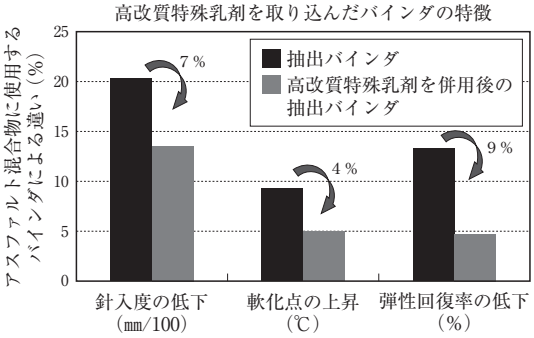
図－８　改質乳剤の粒子径分布

トを乳化することに成功し，一般的な改質乳剤よりも粒子径が小さい特徴がある。このことも，既設舗装および加熱アスファルトとの接着性が向上した要因と考えられる。

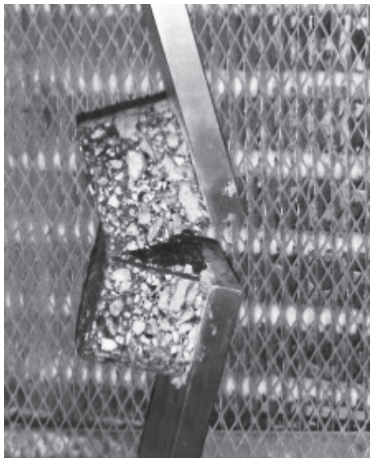
⑶　**超薄層の効果**

図－９に供用１年後における劣化抑制効果を示す。超薄層アスファルト混合物を施工することで，既設舗装のアスファルトにおいて，供用に伴う針入度の低下や軟化点の上昇，弾性回復率の低下を抑制できた。また，**写真－５**に示す混合物試験により，超薄層による耐亀裂性の向上や下層との良好な付着性を検証できた。これは，高改質アスファルト乳剤自体の性能に加え，乳剤と混合物層，下地の一体化によるものと考えられる。

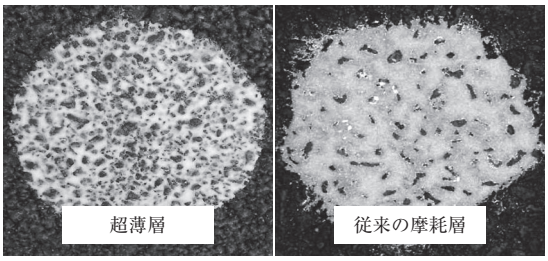
さらに，サンドパッチングを実施した結果，従来の摩耗層と比較してキメが保たれていた（**写真－６**）。この理由として，最大粒径5/11㎜の立方骨材を用いていること（**図－６**）や，使用する骨材が硬く，アスファルトの含有量が多いために，摩耗や交通荷重による骨材飛散が避けられたことが要因と考えられる。



図－９　劣化抑制効果



写真－５　耐亀裂性



写真－６　サンドパッチング状況

これらの結果から，本来の摩耗層としての機能である「騒音低減効果」や「表面排水」といった路面機能は，従来の方法よりも長期間，効果を発揮していることが報告されている。

⑷　**翻訳者コメント**

「超薄層」の定義は論文中に示されていないが，一般的に薄層混合物は「２～３㎝程度」とされていることから，本論文ではそれとの差を強調するために「ultra-thin」としていると考えられる。効果的に既設舗装を延命させる技術だと感じ，紹介した。

超薄層という特徴から，工期短縮とそれに伴う渋滞緩和，CO_2削減，材料が少ないため製造エネルギー（CO_2）の削減など，持続可能な舗装の維持管理に資する技術として期待される。

3.3　舗装材料における資源活用技術

アスファルト混合物の性能向上のための再生ポリマーの活用

原題：***THE USE OF RECLAIMED POLYMERS TO IMPROVE THE MECHANICAL PERFORMANCE OF BITUMINOUS MIXTURES***

キーワード：再生ポリマー，リサイクル，環境負荷低減

廃プラスチック材料の大量消費や処分方法については深刻な環境問題として取り上げられることが多い。そこで，この廃材をアスファルト改質材として再利用することで，環境問題の解決をはかる。本研究では，防水業界で使用される遮水シートをアスファルト改質材として再利用した改質アスファルト（以下，RGMB）を用いて，砕石マスチックアスファルト混合物（以下，SMA11）を作製し，性能を調査した。また，汎用的な改質アスファルトや繊維入りの高性能混合物と比較検討し，RGMBがそれらの代替品となり得るか調査した。

⑴　使用材用

本研究で使用した廃遮水シート（**写真－１**）は防水層にポリエチレン，補強層にポリエステル繊維で構成され，これを用いてRGMBを作製した。比較用のアスファルトとしてストレートアスファルト（以下，B50/70），PmB（以下，PMB45/80-65），アクリル繊維入りのPmB（以下，PMB45/80-65 0.3% Fibers）を使用した。**表－１**に各アスファルトの性状を示す。RGMBはB50/70と比較して針入度が低く，軟化点が高い。これは遮水シートのポリエチレンと繊維の影響により高いスティフネス持つことを示唆している。

写真－１　使用した廃遮水シート

表－１　アスファルトの特性

アスファルト種類	針入度（dmm）	軟化点（℃）
B50/70	50	52
PMB45/80-65	56	65
RGMB	23	62

⑵　混合物試験結果

①密度とマーシャル安定度

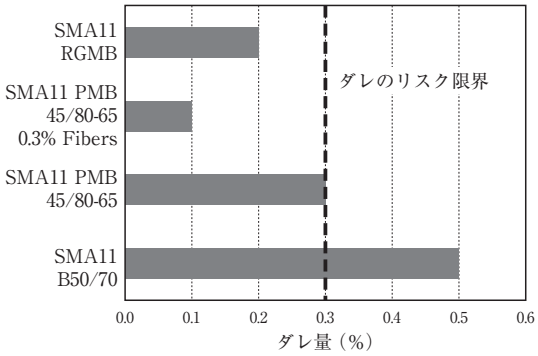
表－２にマーシャル供試体から得られた数値とマーシャル安定度試験結果を示す。SMA11 RGMBは他の混合物と比較して密度がわずかに高くなり，空隙率が低くなった。

②ダレ性能

図－１に混合物のダレ試験結果を示す。図中の赤い点線はダレのリスク限界を表す値（0.3%）である。SMA11 RGMBのダレ量は0.2%と優れた値を示した。これは，遮水シート中の繊維の影響によるものである。そのため，RGMB中の繊維だけで安定性が得られるため，新たな繊維を追加する必要がないと考えられる。

表－２　混合物性状

	SMA11 B50/70	SMA11 PMB 45/80-65	SMA11 PMB 45/80-65 0.3% Fibers	SMA11 RGMB
かさ密度（Mg/㎥）	2.697	2.674	2.687	2.717
空隙率（%）	3.7	4.8	3.9	2.8
骨材間隙率（%）	17.6	18.6	17.7	16.8
飽和度（%）	78.9	74.0	78.0	83.4
マーシャル安定度（kN）	8.094	11.703	12.727	10.495
マーシャルフロー値（㎜）	5.0	5.0	5.7	4.3



図－１　各混合物のダレ試験結果

③水分感受性

表－３に乾燥状態と湿潤状態の間接引張強度結果を示す。なお，引張強度比（TSR）は式⑴によって求めた。

$$TSR = \frac{ITS_W}{ITS_D} \times 100 \qquad 式⑴$$

ここに，ITSD：乾燥条件の間接引張強度（MPa）
ITSW：水浸条件の間接引張強度（MPa）

SMA11 RGMBの引張強度比は99.6%と最も高く，他の混合物より水に対よる損傷を受けにくい。

表－３　間接引張試験結果

アスファルト混合物	間接引張強度（kPa）		強度比（%）
	乾燥状態	湿潤状態	
SMA11 B50/70	1922.9	1574.9	81.9
SMA11 PMB45/80-65	1537.2	1415.3	92.1
SMA11 PMB45/80-65 0.3% Fibers	1914.2	1785.3	93.3
SMA11 RGMB	2481.7	2471.5	99.6

④スティフネスモジュラス

図－２に20℃におけるスティフネスモジュラス試験結果を示す。SMA11 RGMBは最も高いスティフネスモジュラスを示した。そのため，SMA11 RGMBの塑性変形に対する抵抗性は高いが，低温での疲労や温度によるひび割れを発生させる可能性があるものと考えられる。

⑤わだち掘れ抵抗

図－３にホイールトラッキング試験結果を示す。SMA11 RGMBはSMA11 B50/70と比較してわだち掘れ深さと変形勾配が低いことから，永久変形抵抗性を大幅に向上できる結果となった。また，SMA11 PMB45/80-65 0.3% Fibersの値も低いことから，繊維を用いることで塑性変形抵抗性を向上させることができる。

⑥温度感受性と疲労ひび割れ性能

図－４にUGR-FACT試験※結果を示す。温度に関係なくSMA11 PMB45/80-65 0.3% Fibersの疲労ひび割れ抵抗性が最も高い。SMA11 RGMBはSMA11 B50/70と比較すると，混合物性状を十分に改善したといえる。スティフネスの性能悪化が懸念される低温域においても，低温時における破損までのサイクル数が増加していたことから，SMA11 RGMBが過度に脆弱とはならないことを示している。

※実際の舗装による持続的な負荷をシミュレートすることで，疲労ひび割れを引き起こす試験。

(3) **まとめ**

SMA11 RGMBの性能を調査し，以下のことが示された。

①遮水シート中の繊維により，SMA11 PMB45/80-65 0.3% Fibersと同等までダレを抑制できる。

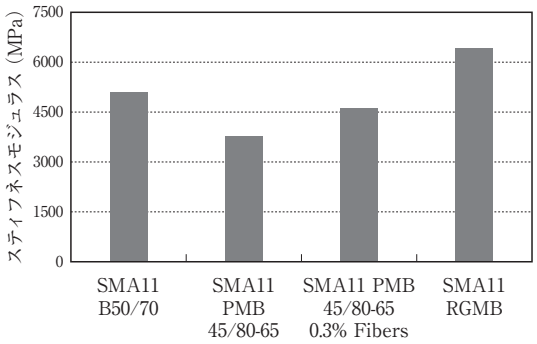
②間接引張強度において，乾燥状態と湿潤状態で同程度の強度を保持していることから，混合物の耐水性に優れている。

③SMA11 RGMBは繊維によりスティフネスが高くなり，ポリエチレンにより支持力と永久変形抵抗性が向上する可能性がある。

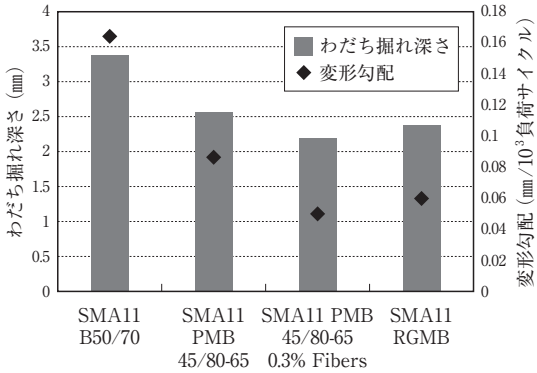
④SMA11 RGMBの高いスティフネスは十分なわだち掘れ抵抗性を示し，疲労破壊に大きな影響は与えなかった。

⑤SMA11 RGMBは，SMA11 B50/70と比較して，試験条件下における温度範囲において，疲労ひび割れ抵抗性が向上した。

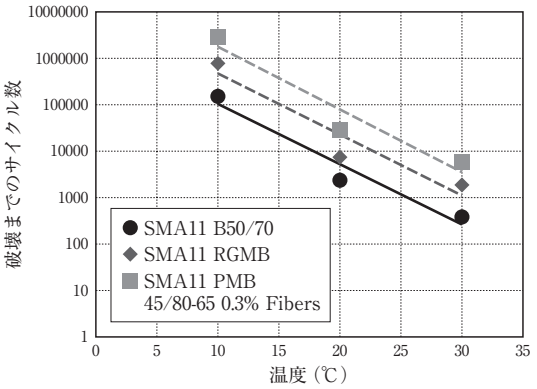
⑥SMA11 RGMBは良好な機械的特性が得られたことから，改質アスファルトの代替品として興味深く，今後さらなる研究を行う。



図－２　スティフネスモジュラス試験結果



図－３　ホイールトラッキング試験結果



図－４　UGR-FACT試験結果

(4) **翻訳者コメント**

プラスチック廃材として使用した廃遮水シートは改質材の代替品となる可能性を知ることができた。このように廃材を使用した研究が進み，アスファルトの観点から環境負荷低減の技術がさらに発展していくことを期待している。

アスファルト舗装用の異なる成分の再生プラスチック

原題：*RECYCLED PLASTICS FROM DIFFERENT SOURCES FOR ASPHALT PAVEMENT*

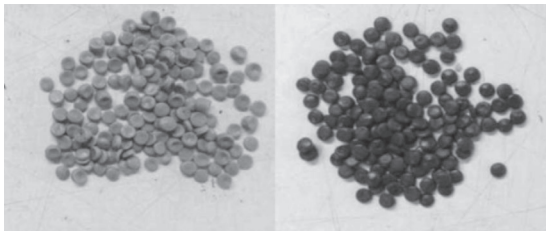
キーワード：リサイクル，再生プラスチック，環境負荷低減

持続可能な社会の実現にはプラスチックをごみにせず，資源として循環させることが喫緊の課題である。しかしながら，廃棄されたプラスチックのうち，わずかな量しかリサイクルされていないのが現状である。そのため，環境負荷低減の観点から，廃プラスチックを有効利用していくことが課題となる。本研究では，再生プラスチックをアスファルト混合物に添加することで，アスファルト舗装の性能向上に寄与するか評価したものである。

⑴　使用材料・添加方法

試験に使用した再生プラスチックを**写真－２**に示す。高密度ポリエチレンを主成分とするグリーンプラスチック（以下，PV）と，低密度および中密度ポリエチレンを主成分とするブラックプラスチック（以下，PN）の２種類を使用した。DSC測定を，１サンプルにつき３回サーマルスイープした結果を**図－５**に示す。PVが133℃，PNが109℃と126℃にそれぞれ吸熱ピークが見られた。

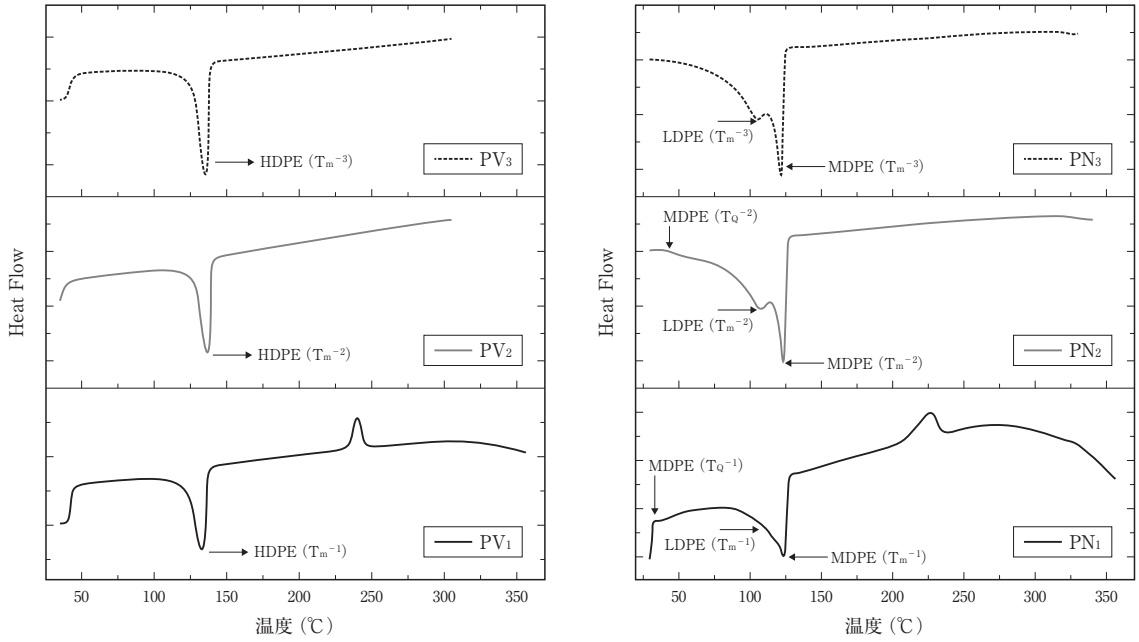
再生プラスチックをアスファルト混合物に添加する際には，プラントミックス（以下，VS）とプレミックス（以下，VH）の２種類の手法により添加し，アスファルト混合物を製造した。製造にはCA20アスファルトを使用し，再生プラスチック添加混合物との比較として，CA30アスファルトを併せて評価した。



写真－２　再生プラスチックの外観（左PV右PN）

⑵　混合物性状

表－４にアスファルト混合物の性状結果を示す。安定度／フロー値は，全配合で同等の結果となった。耐水性の評価として，間接引張強度によるTSRを算出した。TSRは，再生プラスチックの添加によって，非改質CA30と比較し大幅に性状が向上した。耐流動性の評価として，試験温度60℃，負荷サイクル数10,000回の条件でホイールトラッキング試験を実施した。**図－６**にPN添加，**図－７**にPV添加のホイールトラッキング試験結果を示す。わだち掘れ深さは，CA20-PN/VH



図－５　DSC測定の結果（左PV，右PN）

の組み合わせが最も変位が小さく良好な結果であった。

⑶　**試験施工**

室内試験と同様のプラスチック含有アスファルトを用いて，試験施工を実施した。舗装区間を**図－８**に示す。２種の再生プラスチック（PV，PN）を２種の添加方法（VS，VH）により製造したアスファルト混合物を舗装した４区間と，非改質CA30アスファルトを使用した比較区間の計５区間である。片側レーンについては，CA20-PN/VHで統一している。

追跡調査により，施工区間のきめ深さ（サンドパッチング）や，わだち掘れ深さを定期的に評価した結果，現段階ではCA20-PN/VHが最も良好な結果であった。

⑷　**まとめ**

再生プラスチックをアスファルト混合物に添加することで性能向上に寄与するかを調査し，以下の知見が得られた。

①耐水性は，再生プラスチックの添加によって，非改質アスファルトと比較し大幅に性状が向上した。

②耐流動性は，CA20-PN/VHの組み合わせが最も変位が小さく良好な結果であった。

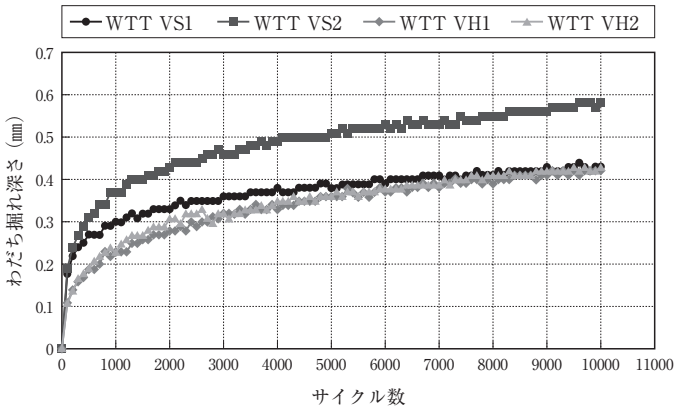
③試験施工では，施工区間のきめ深さや，わだち掘れ深さを評価すると，CA20-PN/VHが最も良好な結果であった。

⑸　**翻訳者コメント**

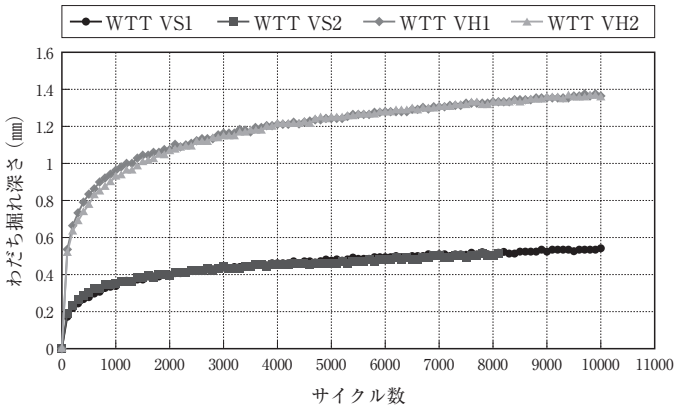
廃プラスチックを舗装に適用する目的が，単にごみ処理のためだけでなく，耐流動性や耐水性の向上に寄与することが興味深いと感じた。今後も，プラスチックの再利用に向けた研究報告を楽しみにしている。

表－４　混合物性状結果

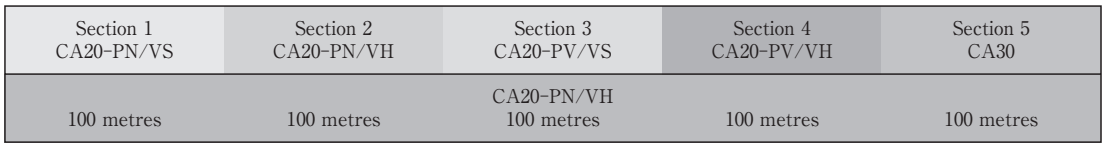
試験項目	CA20-PN/VS	CA20-PN/VH	CA20-PV/VS	CA20-PV/VH	CA30
密度（g/cm³）	2.325	2.447	2.300	2.426	2.414
理論最大密度（g/cm³）	2.443	2.540	2.465	2.557	2.562
空隙率（%）	4.8	3.7	6.7	5.1	5.8
骨材間隙率（%）	16.4	15.9	18.2	17.2	17.9
飽和度（%）	70.8	77.0	63.4	70.4	67.7
安定度（kN）	17.4	12.3	20.5	13.2	12.2
フロー（mm）	5.04	4.88	6.59	4.28	3.90
S/F（kN/mm）	3.5	2.5	3.1	3.1	3.1
TSR（%）	93.0	99.0	85.0	72.0	59.0



図－６　ホイールトラッキング試験結果（PN添加）



図－７　ホイールトラッキング試験結果（PV添加）



図－８　舗装区間のスキーム

再生コンクリート骨材を使用したHWMAのはく離性

原題：*STRIPPING POTENTIAL OF HALF-WARM MIX ASPHALT MADE WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES*

キーワード：コンクリート発生材，再生骨材，はく離抵抗性，資源保全

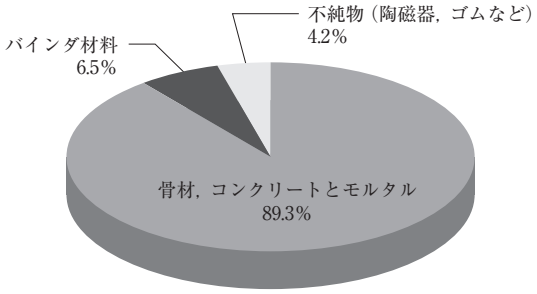
本研究では，建設および建造物解体などで発生するコンクリート発生材を，アスファルト混合物用の骨材として使用した際に懸念される，はく離性（耐水性）に関する検討を行っている。また，環境負荷や経済性などについて，試算した結果を報告している。

コンクリート再生骨材を使用した場合の混合物性状については，スペインにおけるアスファルト混合物の規格を満足するためのアスファルト量や間接引張強度の評価を行っている。また，環境負荷については，気候変動指数（CO_2重量換算）を用いて，経済性については，混合物製造における材料コストの観点から評価している。

(1) 使用材料

①再生コンクリート骨材

使用している再生コンクリート骨材（以下，RCA）は，ビルなどの解体で発生し，**図－9**のような成分で構成されたものを使用している。



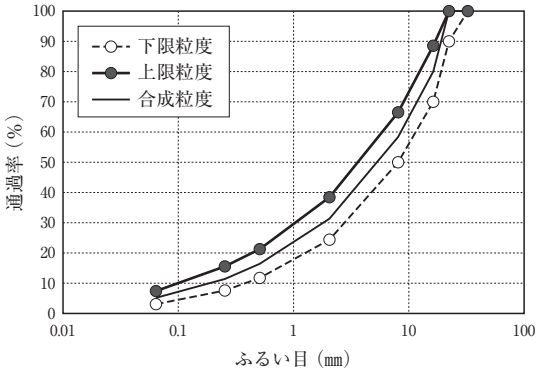
図－9　RCAの主成分

②アスファルト

アスファルトには，C60B4（一般的なカチオン性中硬化型アスファルト乳剤）を使用している。

③アスファルト混合物

検討に用いたアスファルト混合物種は，70～100℃の温度範囲で製造可能なHWMA（Half-Warm Mix Asphalt）として，**図－10**に示す粒度の混合物（スペインで基層として適用されるAC22binS）としている。なお，標準混合物（以下，RCA 0％）は粗骨材，細骨材ともに新規骨材を使用し，RCAの影響を検討するため，粗骨材のみをRCAに置き換えた混合物（以下，RCA55％）を使用している。



図－10　AC22binSの粒度曲線

(2) 結果と考察

①アスファルト量

RCA 0％とRCA55％のHWMAの空隙率を**表－5**に示す。RCA 0％では，アスファルト量4.1～4.5％の範囲で，RCA55％では6.5％の時に，スペインにおけるT4～T1（交通区分）の空隙率の基準に適合することが示されている。すなわち，RCAの配合量に伴ってアスファルト量は増加し，標準混合物に比べて58.5％程度増加する。これは，RCAのモルタ

表－5　空隙率

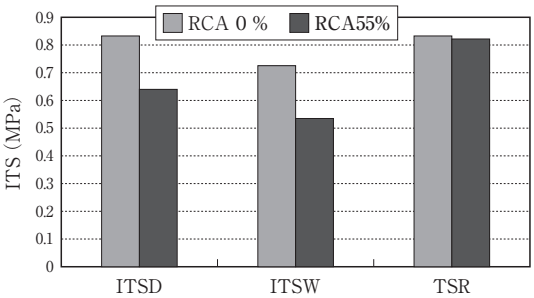
アスファルト量（%）	空隙率（%）				
	RCA 0％	RCA 55％	下限値		上限値
			T3とT4	T1とT2	T1，T2 T3，T4
3.7	8.4	－	4	5	7
3.9	8.2	－			
4.1	6.5	－			
4.3	5.0	13.1			
4.5	4.3	12.8			
4.8	－	12.3			
5.0	－	11.0			
5.2	－	10.7			
5.4	3.0	10.3			
5.7	－	10.0			
5.9	－	9.2			
6.1	－	8.4			
6.3	－	8.1			
6.5	－	6.8			

ルの影響（表面の粗さと吸水特性）によるものとされている。

②はく離性

はく離性を検討するため，間接引張強度試験を実施している。試験では，1）室温乾燥状態のサンプル，2）40℃の水中に3日間水浸させたサンプをそれぞれ，15℃で2時間静置して，引張強度比（TSR）を求めている。

試験結果を**図－11**に示す。TSRは，RCA 0％とRCA55％どちらも要求性能を満足している。ただし，ITSDとITSWの値は同様の傾向を示しているものの，RCA55％の方が小さい値を示した。



図－11　間接引張試験の結果

③経済性

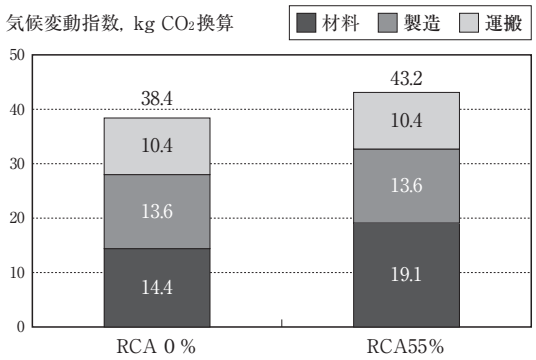
表－6にRCA 0％とRCA55％の製造コスト試算結果を示す。RCA55％は，アスファルト量の増加によってRCA 0％より35％ほど高くなることがわかる。ただし，骨材に係わるコストは小さくなることが示されている。

④環境負荷

Arno社が公開しているECCO 2を使用した，シミュレーションではRCA 0％よりRCA55％の方が，気候変動指数が24.1％ほど高くなった（**図－12**）。これは，RCA55％のアスファルト量が多くなることに起因する。

表－6　費用対効果の分析

材　料	コスト（€/t）	HWMA 1 t当たりのコスト	
		HWMA RCA 0％	HWMA RCA55％
		アスファルト量 4.1％	アスファルト量 6.5％
C60B4	360	24.60	39.00
骨材（堆積岩）	8.21	7.65	3.29
骨材（RCA）	2.50	0.00	1.23
合　計		32.25	43.52



図－12　ECCO 2で求めた気候変動指数

(3)　まとめ

コンクリート発生材を骨材とした乳剤を用いたHWMA（タイプAC22binS）は，軽交通路線への適用が可能であるが，以下の2点が課題である。

①間接引張強度が31.5％程度，低下する。

②アスファルト量が58.5％増加することで，環境負荷とコストが増加する。

(4)　翻訳者コメント

多くのコンクリート構造物が老朽化を迎え，更新の時期に迫った日本においても，資源循環や環境保全の観点から，コンクリート発生材の有効利用や路盤材以外の受容拡大は有意的な研究事例だと感じた。課題解決に向けた研究報告が楽しみである。

煙草の吸殻をリサイクルした砕石マスチックアスファルトの可能性

原題：***POSSIBLE RECYCLING OF CIGARETTE BUTTS IN STONE MASTIC ASPHALT***

キーワード：廃CB骨材，砕石マスチックアスファルト，煙草の吸殻

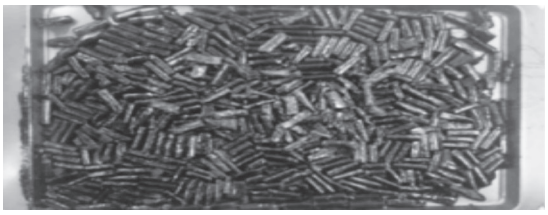
本研究では，アスファルトでカプセル化した煙草の吸殻（以下，廃CB※骨材）を粗骨材2％で置き換えた砕石マスチックアスファルトと，廃CB骨材を含まない標準混合物との比較試験をした。

※CBとはCigarette Buttsの略

(1)　吸殻の前処理とカプセル化

吸殻のカプセル化は，オーブンで乾燥させた吸殻を，高温の液体アスファルトで硬化させることで行われた。**写真－3**と**写真－4**はアスファルトでカプセル化前とカプセル化後の吸殻の状態を連続して示したものである。

写真－３　廃棄された吸殻（左），オーブンで乾燥・洗浄された吸殻（右）



写真－４　カプセル化された吸殻（廃CB骨材）

⑵　アスファルトサンプルの準備

サンプルはAustroadsおよびVicRoadsの規格に従って調製した。骨材の種類は花崗岩で，等級はVicRoadsのセクション404を参考にした。また，廃CB骨材は9.5㎜のふるいに留まる骨材を重量比で置き換えた。

⑶　試験

試験では，AS/NZS 2891.5.5に準拠し体積評価と，マーシャル安定度試験を行った。試験結果を**表－７**に示す。廃CB骨材を用いても，すべての規格を満足することが示された。

⑷　結果と考察

図－13は，廃CB骨材の添加量と安定度の変化を示している。このことから，混合物中の廃CB骨材の添加量増加に伴い，マーシャル安定度が向上することが分かり，またフロー値は８～16㎜の範囲内であることが分かった。

表－７　試験結果

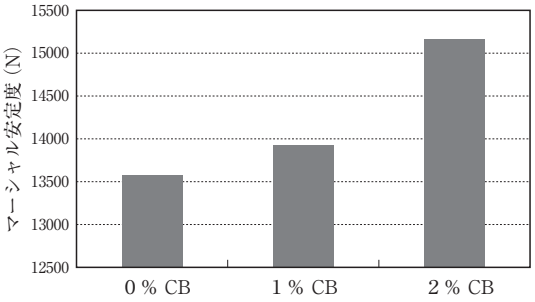
サンプルの種類	試験項目	試験結果	基準値の範囲
標準混合物	空隙率	５％	VicRoads and Austroads（4.8％～5.2％）
	骨材間隙率	19.1％	VicRoads and Austroads（13％～20％）
	飽和度	73.8％	VicRoads and Austroads（65％～80％）
	マーシャル安定度	13.6KN	VicRoads and Austroads（minimum 5.5KN）
	フロー	10.8㎜	Asphalt Institute（８㎜～16㎜）
Sample with 1% CBs	マーシャル安定度	13.9KN	VicRoads and Austroads（minimum 5.5KN）
	フロー	9.2㎜	Asphalt Institute（８㎜～16㎜）
Sample with 2% CBs	マーシャル安定度	15.1KN	VicRoads and Austroads（minimum 5.5KN）
	フロー	10㎜	Asphalt Institute（８㎜～16㎜）

⑸　まとめ

煙草の吸殻のアスファルト混合物への再利用に関する，研究結果を紹介した。その結果，アスファルトでカプセル化した煙草の吸殻をアスファルト混合物に混ぜることで，混合物の性能が向上することが分かった。また，この方法では，アスファルト混合物１㎡あたり，最大15kgの吸殻をリサイクルすることができる。

⑹　翻訳者コメント

日本ではアスファルト混合物に，廃棄物を利用するリサイクル技術はあるが，煙草の吸殻を利用した技術は皆無である。今回，紹介した煙草の吸殻の利用が，廃棄物の発生防止や削減，またリサイクル技術の発展に寄与することを期待している。



図－13　サンプルの安定度

４．おわりに

今回，2021年６月に開催された7th E&E 国際会議の公表論文から，「アスファルトの精製・改質・再生」，「低環境負荷なアスファルト混合物」，「舗装材料における資源活用技術」の３つのテーマに関連した論文10報を紹介した。研究報告の内容は多岐にわたるが，いずれの研究も国際的な課題として，国内においても有意なものであり，アスファルト舗装技術研究グループに参加している若手技術者にとっても興味の深い内容であった。一方で，国内では，馴染みの少ない分析装置や解析手法も多くあったので，今後，舗装技術者の知見のひとつとして，国内の舗装技術向上の一助となれば幸いである。

最後に，今年度のアスファルト舗装技術研究会の活動を行うにあたって，ご協力いただきました参画機関の関係者の皆様に謝意を示す。

若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告
～舗装点検技術の変遷と発展～

新堀詩織　青木優佳　掛札さくら
熊坂理紗　根元　孝　硲　真悠
福山菜美　細野裕貴　室井和也

はじめに

これまでアスファルト舗装技術研究グループでは，若手技術者による質問や舗装に関する技術の変遷，歴史等を取り上げてきました。今回は調査メンバー内で興味のある技術についてアンケートを取り，取り上げる題目を決めることにしました。アンケートの結果，AI（Artificial Intelligence）やスマートフォンを使用した最新の舗装点検技術への関心が高いと分かりました。また舗装点検技術がどのように発展していったのかを調査したいという声もあがりました。

そこで，2016年10月に制定された舗装点検要領[1)]に管理基準として取りあげられている「ひび割れ率，わだち掘れ量，IRI（International Roughness Index，国際ラフネス指数）」の３指標に焦点を当てて，測定技術がどのように発展したのかを調査することにしました。その結果を今後の展望を織り交ぜながら報告いたします。

本稿は３章構成です。１章ではひび割れ率の測定方法を紹介しています。測定者が路面のひび割れをスケッチしてひび割れ率を算出する「スケッチ法」や連続的に路面を撮影できる「路面性状測定車」を用いた方法，さらに「AI」を利用して画像から自動でひび割れを検出する方法を説明します。次に２章ではわだち掘れ量の測定方法を紹介しています。簡易的な測定方法（直線定規および水糸による測定）や横断プロフィルメータ，路面性状測定車および小型プロファイル測定装置による測定方法を舗装調査・試験法便覧の改訂を踏まえながら説明します。そして第３章ではIRIの測定方法を紹介しています。人力による縦断プロファイル測定やMMS（Mobile Mapping System，モービル・マッピング・システム），スマートフォンに内蔵の加速度計を利用した測定方法を説明します。なお本稿中の図表には，紙面上で読みやすくするために文字を大きくしているものがあります。

１．ひび割れ

1.1　ひび割れとは

アスファルト舗装におけるひび割れとは，舗装表面に亀裂が入る現象です。ひび割れの形態としては，線状（縦方向・横方向），亀甲状，さらにその両方があり，発生原因，メカニズム，発生位置は様々です。

線状ひび割れとは，線状に進行したひび割れです。施工継ぎ目の接着不良や施工時の新旧舗装の温度差，表層材料の劣化が原因で発生するなど，原因は様々です。特に，交通荷重の繰り返しによるアスファルト混合物層の下面から上方に進展したものを疲労ひび割れといいます。疲労ひび割れは，表層材料の劣化などにより路面から発生するひび割れとは区別されます。

亀甲状ひび割れとは，線状ひびわれが発展し，互いに接合し亀甲状に閉合状態になったひび割れです。路床路盤の支持力の低下や沈下などにより生じます。

1.2　ひび割れ率とは

アスファルト舗装のひび割れの評価は基本的にひび割れ率で行います。ひび割れ率とは，対象とする舗装に占めるひび割れが生じている路面の面積の割合を「%」で表したものです。式(1)にひび割れ率の計算式を示します。

$$\text{ひび割れ率（\%）} = \frac{\text{ひび割れ面積（㎡）}}{\text{調査対象区画面積（㎡）}} \quad \cdots(1)$$

1.2.1　ひび割れ率の求め方

式(1)中の「ひび割れ面積」は，下記の手順および定義から求められます。ここでは，「ひび割れ面積」の整理の一方法である「メッシュ法」について説明します。

（手順１）測定する路面に対して縦横0.5mを示すます目に区画割りをする。

（手順２）ひび割れが生じているます目を観察し，各

ます目のひび割れが生じているとされる面積を下記に従って求める。

○線状ひび割れが１本だけある場合は，0.15㎡のひび割れが生じているものとする。

○線状ひび割れが２本以上ある場合は，0.25㎡のひび割れが生じているものとする。

○パッチングによる補修が行われている場合は，ます目に占めるパッチング面積ごとにひび割れが生じている面積を求める。

- パッチング面積０％以上25％未満
  …… ひび割れ面積０㎡
- パッチング面積25％以上75％未満
  …… ひび割れ面積0.125㎡
- パッチング面積75％以上
  …… ひび割れ面積0.25㎡

○ひび割れとパッチングとが両方ある場合はひび割れのます目として数える。

（手順３）「ひび割れが生じているとした面積」と「そのます目数」の積を求め，全体の総和を「ひび割れ面積」とする。

1.2.2　ひび割れ率の算出例

図－１にひび割れが生じた舗装の一例を示します。これを対象としてひび割れ率を求めた場合の算出例を示します。

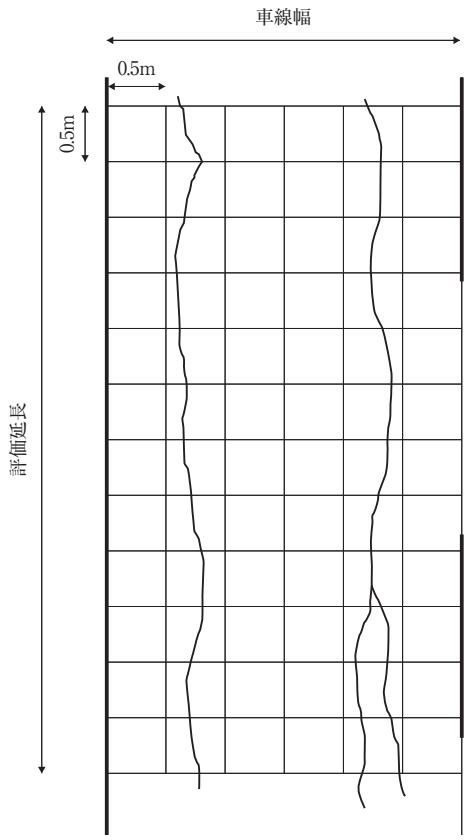
- 調査対象区画面積 …… ３ｍ×６ｍ＝18㎡
- 線状ひび割れが１本通過しているます目数 …20
- 線状ひび割れが２本以上通過しているます目数
  …… 4

上記の内容および式⑴から，ひび割れ率は式⑵に示すとおりとなり**図－１**のひび割れ率は，22.2％と算出されます。

$$\text{ひび割れ率（\%）} = \frac{(0.15\text{㎡} \times 20\text{ます}) + (0.25\text{㎡} \times 4\text{ます})}{18\text{㎡}} = 22.2\% \cdots\cdots (2)$$

1.3　ひび割れ測定方法のこれまで

舗装点検におけるひび割れの測定方法は，目視で路面に生じたひび割れをスケッチする「スケッチ法」，および路面性状測定車により走行しながら路面の画像を取得する「路面性状測定車による方法」があります。スケッチ法は，観測者が路面に生じたひび割れを写生するため，大規模な調査には適していませんが，詳細調査には適しています。一方，路面性状測定車は，数㎞以上の延長にわたって，大量の測定を行うことができます。



図－１　ひび割れの例[2)]

舗装調査・試験法便覧[3,4,5)]（以下，試験法便覧）の「舗装路面のひび割れ測定方法」には，スケッチ法および路面性状測定車の両方がひび割れの測定方法として記載されています。試験法便覧は昭和63年に刊行され，その後，平成19年，平成31年に改訂が行われました。**表－１**に昭和63年，平成19年，平成31年の試験法便覧に記されている「舗装路面のひび割れ測定方法」の大まかな内容と改訂による変更点を示します。スケッチ法は平成31年の改訂版まで変更点はありません。路面性状測定車による方法は，路面性状測定車の普及やカメラ・センサの高性能化，ソフトウェア技術の進歩など測定機の精度向上に伴って，変更・修正がされています。

試験法便覧に測定方法として載っているもの以外にも，近年では，スマートフォンやドライブレコーダなどを利用して路面静止画像を取得し，ひび割れ率を算出する方法など，様々な測定方法が開発されています。さらに，その画像をAIにより自動判断することでひび割れ率を算出することが可能な技術も実用化されています。

表－1　舗装調査・試験法便覧のひび割れ測定に関する変遷

測定法	舗装調査・試験法便覧　S029　舗装路面のひび割れ測定		
	昭和63年版	平成19年版	平成31年版
スケッチによる方法	ひび割れ測定方法の1種として，測定方法が記載。観測者が路面に生じたひび割れを写生し，ひび割れ率またはひび割れ度を算出する方法で，ひび割れについての詳細調査に用いられる。		
路面性状測定車による方法	ひび割れ測定方法の1種として，測定方法が記載。路面性状測定車は，舗装の維持修繕計画等に必要なデータを収集するため，数km以上の延長にわたって，高速かつ大量の測定を行う場合に用いられる。		
	「非常に高価な測定機であり台数も少ない」と記載。	「非常に高価な測定機であり台数も少ない」という記載がなくなっている。	－
	－	「近年，エレクトロニクス，メカトロニクス，ソフトウェア技術などの飛躍的な進歩に伴い，様々なデバイスを使用した装置が開発されている。」と記載。	「近年，センサ技術の飛躍的な進歩に伴い，様々なデバイスを使用した装置が開発されている。」に変更。
	路面性状測定車の代表的な測定方式として，3つが挙げられている。		
	「ⅰ）測定装置にストリークカメラ（通常のカメラのシャッターの代わりにスリットが設けられており，スリットを通った部分だけ線状に撮影されるカメラ）を使用し，測定車の走行速度とフィルムの送り速度を同調させる方式。」と記載。	「ⅰ）線撮影方式　線撮影方式はストリークカメラやラインセンサカメラ等により路面の横断方向の線画像を計測車の走行速度と同期させながら撮影し，路面の連続画像を得る方式。」に変更。	「ⅰ）ストリークカメラ」という記載がなくなっている。
	「ⅱ）測定装置に光センサおよびデータ記録装置を使用し，測定車の走行速度と同調させながら，路面に走査したレーザー光線の反射光を記録する方式。」と記載。	「ⅱ）点撮影方式　点撮影方式はレーザースポットを路面の横断方向に高速で走査し，反射光量の変化を光センサでとらえ，計測車の走行速度と同期させながらこれを連続的に行うことで路面の画像を得る方式。」に変更。	「ⅱ）平成19年版」から変更なし。
	「ⅲ）測定装置に通常の35㎜フィルム式のカメラを使用し，撮影範囲の端部が少しずつ重なり合うように走行速度と同調させながら，路面撮影を行う方式。」と記載。	「ⅲ）面撮影方式　面撮影方式はCCDカメラで路面の画像をオーバーラップさせながら一定面積毎に撮影する方式。」に変更。	「ⅲ）平成19年版」から変更なし。
	解説欄に，「路面性状測定車によって，路面のひび割れ形状を撮影した後の判読は，現在のところ人力で行っているが，レーザー光線を利用した測定方式では，撮影された画像について，ひび割れの有無による反射パターンの違いを認識させることにより，ひび割れの自動読取りシステムの開発研究が進められている。」と記載。	解説欄に，「路面性状測定車によって，路面のひび割れ形状を撮影した後の判読は，現在のところ主に人力で行っているが，ひび割れの自動読取りシステムの研究開発が進められている。」と記載。	解説欄に，「路面性状測定車による測定は，測定延長の長い箇所を対象としている。なお，路面のひび割れ形状を撮影した後のひび割れの判読を自動的に行う装置が増えてきている。」と記載。

次節から「スケッチ法」，「路面性状測定車」および，「AIを活用した測定」の3つを紹介します。

1.4　測定方法

1.4.1　スケッチ法

スケッチ法は，目視でひび割れを観察・スケッチし，ひび割れを評価する方法です。調査対象となる路面をセンターライン側レーンマークの内側から路肩側レーンマークの内側まで，路面上に0.5mごとのます目を想定し，各ます目のひび割れ状況を1車線ごとに記録し，1.2節で述べた方法でひび割れ率を算出します。

1.4.2　路面性状測定車による測定

前項で述べたスケッチ法は，現地にて徒歩および目視でひび割れを確認して，ひび割れをます目を入れた手元の紙に書き込み，ひび割れ率の算出をするという非常に手間がかかるものです。その手間を減らすため，現在のひび割れ率測定では，路面性状測定車が使用されています。路面性状測定車は，路面を撮影する装置を車両の速度に同期させることで連続的な路面画像を撮影できる車両であり，降車することなく現場のひび割れを確認することができます。画像の代表的な撮影方法として以下の3つが挙げられます。

①ラインセンサカメラによって路面横断方向の線画像を連続的に撮影することで路面の連続画像を得るもの

②レーザを路面横断方向に走査し，路面の凹凸によって強弱が変化した反射光をセンサで連続的に捉えることで路面の連続画像を得るもの

③通常のカメラのように面で撮影した路面画像をオーバーラップさせて連続画像を得るもの[5)]

路面性状測定車は，1970年代後半から開発が始められ，1984年度に建設技術評価制度の開発課題のひとつとして「路面性状自動測定装置の開発」が取り上げられました。わだち掘れと縦断凹凸測定における開発目標は，「通常の走行速度で計測可能であること」でした。一方，ひび割れ測定の開発目標は「時速10km以上での計測」でした。そのため3項目を計測するためには，わだち掘れ，縦断凹凸およびひび割れを1車両でまとめて時速10kmで測定するか，わだち掘れ・縦断凹凸とひび割れで車両を分けて測定する必要がありました。データ処理についても，わだち掘れ・縦断凹凸は計算処理を含めた電算化が行われていたのに対し，ひび割れの読み取りは作業員が目視で行っていました。加えて，測定機器によって認識可能なひび割れの幅の限界（目標は1㎜以上）に差がある，直接目視での観

察結果と異なるなど課題がありました。現在は，路面性状自動測定装置に対する性能確認試験が（一財）土木研究センターによって行われています。性能の認定を受けるためには，「ひび割れ測定性能：幅１㎜以上のひび割れが識別可能な精度であること。」を満足する必要があります[6]。

車両に関しては，開発当時は測定装置の大きさから，搭載する車両も必然的に大きいものでした。**写真－１**に1985年当時の測定装置を搭載した車両を示します。近年は，**図－２**のような乗用車サイズのコンパクトな路面性状測定車[7]も使用されています。車両の小型化により従来の計測車両では走行が困難であった幅員の狭い道路の調査が可能となりました。また，これらの車両とGPSを組み合わせることで，走行ルートの位置情報データを取得しながら路面画像を撮影するシステム[8]などもあります。

1.4.3　AIを活用した測定

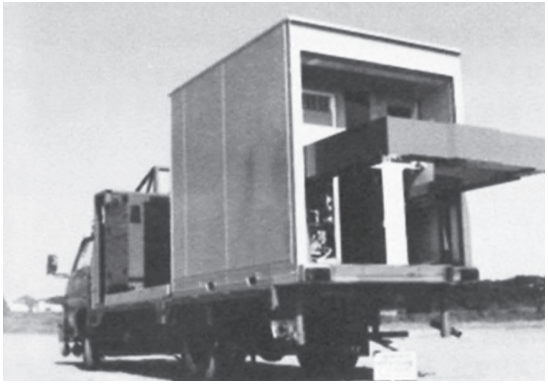
これまでひび割れ率を算出する方法は，路面性状測定車で取得した画像を専門技術者が目視で確認する方法が一般的でした。しかし，測定延長が長い場合や，測定路線が多い場合は，解析に多くの時間を要していました。

そこで近年注目されている技術が，AIを用いた画像解析による，ひび割れを検出する手法です。AIを用いることにより，短時間でひび割れ率を算出でき，点検作業の効率化を図ることができます。

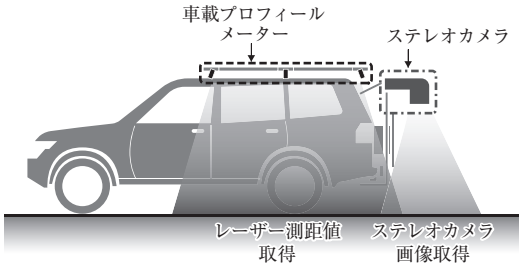
AIの手法のひとつである機械学習とは，人間の学習に相当する仕組みをコンピューター等で実現するものです。入力されたデータからパターンやルールを発見して新たなデータに当てはめることで，その新たなデータに関する識別や予測等ができます[10]。この技術を用いて路面の画像から解析を行い，ひび割れを検出します。**図－３**に機械学習の手法の一例を示します。

AIのひび割れを検出する方法も多様で，画像にメッシュで区分けし，メッシュ内のひび割れを検出する方法（**図－４**）やひび割れをトレースする方法，画像の輝度差を用いてひび割れを検出する方法などがあります。

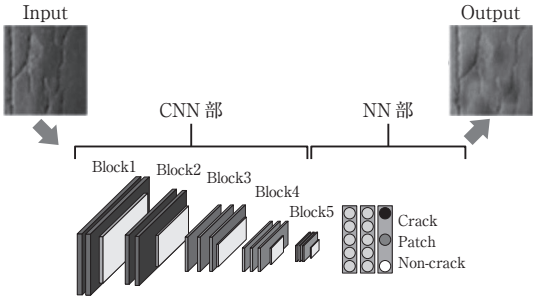
一方で，ひび割れではない舗装ジョイントを，ひび割れと検出するなど，精度に課題があります。しかし，機械学習を繰り返すことで精度の問題も解決されてきています。実際に阪神高速道路では，路面性状測定車「ドクターパト」にて，路面の撮影画像から，自動的にひび割れを検出し，検出箇所をひび割れが存在する可能性の高さに応じて色分け表示を行う技術が活用されています[12]。



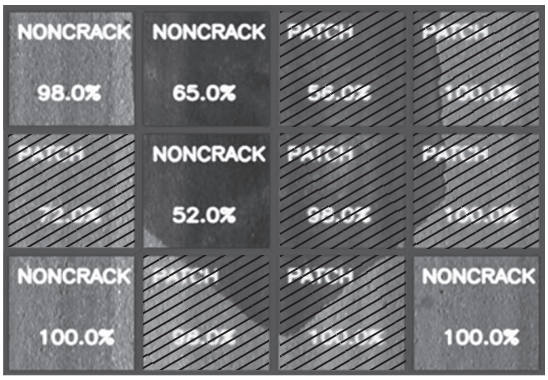
写真－１　1985年当時の測定装置および車両[9]



図－２　コンパクトな路面性状測定車の一例[7]



図－３　機械学習例[11]



図－４　ひび割れ検出例[11]

1.5　ひび割れ評価の課題

路面性状測定車による計測の普及，および画像取得・処理精度の向上，AIを活用した測定といった技術の進展もみられる一方で，ひび割れの測定方法や考え方などについて主に以下の課題が挙げられています[13)]。

- ひび割れを線としてのみとらえており，ひび割れの幅（開口幅）が考慮されていない。
- １区画にひび割れが２本以上ある場合，その本数に関わらず評価は変わらない。無数にひび割れの入った亀甲状クラックでも１区画内ではひび割れ２本と同等の評価となる。
- 自動でひび割れ図を描いても，各区画への分割，１区画内のひび割れ本数を集計する手間がかかる。特に，路面性状測定車を用いた計測は高速での画像取得が可能なので負担が大きい。
- 区画の設定位置によって，区画内のひび割れ本数の判読に差異が生じる。

こうした課題を踏まえ，ひび割れの形態・質に関する情報を含む新たな評価指標案（ひび割れ平均幅・単位面積あたりひび割れ延長・ひび割れ交点密度・ひび割れ縦横比）を設定することも考えられています[13)]。

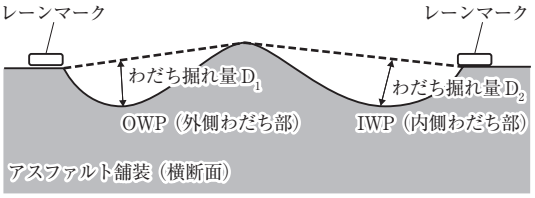
２．わだち掘れ

2.1　わだち掘れとは

わだち掘れとは，アスファルト混合物の塑性変形，摩耗または路床路盤の圧縮変形などが交通荷重により生じ，舗装の横断方向に凹凸ができる損傷です。**写真－２**にわだち掘れの例を示します。車輪通過位置（わだち部）に延長方向に連続した凹みが生じています。わだち掘れは，路面に水を溜めるためハイドロプレーニング現象や水しぶきを発生させます。

わだち掘れ量とは，舗装の横断形状を測定したときの凹み部の深さのことを指します。**図－５**にアスファルト舗装のわだち掘れ量の一例を示します。

写真－２　アスファルト舗装のわだち掘れ（例）[1)]



図－５　わだち掘れ量（例）

2.2　わだち掘れ量測定方法のこれまで

わだち掘れ量の測定方法について，本節では舗装調査・試験法便覧[3, 4, 5)]（以下，試験法便覧）に記載されている方法を紹介します。

試験法便覧は，昭和63年に刊行され，平成19年と平成31年に改訂が行われています。改訂により，維持・管理の時代に対応した現場の実務に必要と思われる項目が追加・整理されており，昭和63年版から測定方法が記載されているわだち掘れ量も，内容が変化している部分があります。**表－２**に昭和63年版，平成19年版，平成31年版のわだち掘れ量測定方法に関する大まかな内容，変更点および加筆点を示します。

試験法便覧のわだち掘れ量測定方法は，以下の５つです。

- 横断プロフィルメータによる方法
- 直線定規による方法
- 水糸による方法
- 路面性状測定車による方法
- 小型プロファイル測定装置による方法

横断プロフィルメータによる方法は，測定車輪によりわだち掘れ量を記録しますが，平成31年版には非接触の変位計による記録方法もあることが記載されています。

直線定規および，水糸による方法は他の測定方法と比べて簡易的であり，昭和63年版から平成31年版まで内容に変更点はありません。

路面性状測定車による方法は，昭和63年版では測定装置が高価であること・台数の少なさが述べられていましたが，平成19年版にはその記載がなくなっており，約20年間で路面性状測定車が普及したことが分かります。また，距離計の誤差が±１％から，±0.5%，±0.3%と変更されており，徐々に測定機の精度が向上していることが分かります。

小型プロファイル測定装置による方法は，平成31年版から他４つの測定方法と並んで記載されるようになりました。

表－２　舗装調査・試験法便覧のわだち掘れ量測定の変遷

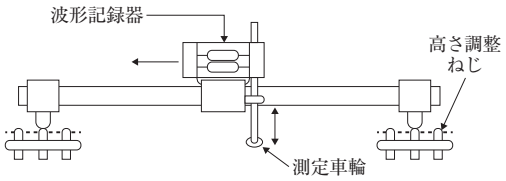
<table>
<tr><th rowspan="2">測定法</th><th colspan="3">舗装調査・試験法便覧　S030　舗装路面のわだち掘れ量測定方法</th></tr>
<tr><th>昭和63年版</th><th>平成19年版</th><th>平成31年版</th></tr>
<tr><td rowspan="2">横断
プロフィルメータ
による方法</td><td colspan="3">わだち掘れ量の測定方法の１種として，仕組みや測定方法が記載。
（舗装の出来高管理や路面調査でわだち掘れ量の詳細な調査を行うときに用いる）</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定部について測定車輪と非接触型の変位計があることを記載。</td><td>「測定部がレーザ計測方式とタイヤ計測方式のものがあり，舗装の骨材状態による計測値に違いが発生する可能性があるため留意が必要である」と記載。</td></tr>
<tr><td>直線定規による方法</td><td colspan="3">わだち掘れ量の測定方法の１種として，仕組みや測定方法が記載。（横断プロフィルメータほど精密な調査を必要としない場合に用いる）</td></tr>
<tr><td>水糸による方法</td><td colspan="3">わだち掘れ量の測定方法の１種として，仕組みや測定方法が記載。（路面形状を簡便に把握するために用いる）</td></tr>
<tr><td rowspan="5">路面性状測定車
による方法</td><td colspan="3">わだち掘れ量の測定方法の１種として，仕組みや測定方法が記載。
（舗装の維持修繕計画等に必要なデータを収集するため，数km以上の延長にわたり高速かつ大量の測定を行う場合に用いる）</td></tr>
<tr><td>「非常に高価な測定機であり台数も少ない」と記載。</td><td>「非常に高価な測定機であり台数も少ない」という記載がなくなっている。</td><td>－</td></tr>
<tr><td>「距離計の誤差は実距離に対して±１％以内」と記載。</td><td>「距離計の誤差は実距離に対して±0.5％以内」に変更。</td><td>「距離計の誤差は実距離に対して±0.3％以内」に変更。</td></tr>
<tr><td>測定器具として「車両の前方または後方に，路面に対して斜めまたは垂直方向から，光線。光点等を投影する投光機，路面に投影されたそれらの光の形状を撮影する機械を取り付けた車両。」と記載。</td><td>横断形状測定器を搭載した路面性状測定車に関して，「様々な原理の測定装置が開発されている」とされており，例として下記の３つが記載。
ⅰ）車両の前方または後方に，路面に対して斜めまたは垂直方向から，光線，光点等を投影する投光機，路面に投影されたそれらの光の形状を撮影する装置が取り付けられ，投影された光線や光点等を撮影する装置
ⅱ）レーザースリット光を路面に投影し，路面の凹凸によるスリット光の移動を検出するようになっている装置
ⅲ）複数のレーザー変位計によりセンサーと路面距離を計測する装置</td><td>測定器具について，平成19年版のⅰ）～ⅲ）に加えて，下記が加筆。
４）レーザスキャナによりセンサと路面間距離を計測する装置</td></tr>
<tr><td>路面性状測定車による路面の形状測定は光を路面に投影する方法のため，「測定は夜間に行うことになる」と記載。</td><td>「路面性状測定車は，光を路面に投影して路面形状を計測する方式を採用している装置が多く，夜間に測定を行う場合が多い」に変更。</td><td>「最近は路面性状をレーザで測定する装置が増えてきており，昼間でも測定が可能となってきた」に変更。（日本道路協会図書正誤表情報令和２年10月22日更新）</td></tr>
<tr><td>－</td><td>－</td><td>試験舗装の継続調査などの全く同一線上で繰り返し測定を行う場合には静止状態で測定を行う必要があるとし，その場合での路面性状測定車が有する機能に比較してかなり非効率な測定であることが記載。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">小型プロファイル
測定装置による方法</td><td rowspan="2">－</td><td rowspan="2">その他の測定方法例として測量機器（レベルやトータルステーション）を用いる方法とともに解説欄に記載。</td><td>横断プロフィルメータ，直線定規，水糸，路面性状測定車とともに５つ目の測定方法として仕組みや測定方法などが記載。</td></tr>
<tr><td>「より簡易にわだち掘れ量測定ができることを目的に様々な原理の測定装置が開発されている」と記載。</td></tr>
<tr><td>その他の測定方法</td><td>－</td><td>解説欄に，必要な測定精度が確保されていることを前提に，測量機器を用いる方法や小型プロファイル測定装置を用いる方法が紹介されている。</td><td>解説欄に，測量機器を用いる方法に加えて，地上レーザスキャナを用いた三次元点群測量の結果から，路面の縦断形状，横断形状を面的に測定するシステムが紹介されている。</td></tr>
</table>

次節から，これら５つの測定方法について説明します。

2.3　わだち掘れ量測定方法

2.3.1　横断プロフィルメータによる方法

横断プロフィルメータによるわだち掘れ量の測定方法は，主に出来高管理や舗装の路面性状調査で詳細な調査を行う場合に用いられます。**図－６**に横断プロフィルメータを示します。横断プロフィルメータは各車線の路肩側レーンマークの外側を基準として設置します。波形記録器には，測定車輪または非接触型の変位計が付いており，これが直線定規上を移動しながら路面の横断形状を記録します。得られた形状からわだち掘れ量を読み取ります。

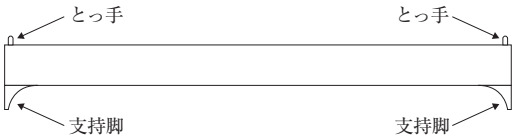


図－６　横断プロフィルメータ[5)]

横断プロフィルメータや後述の直線定規，水糸によるわだち掘れ量の測定は，小規模調査では経済的で原位置で横断形状が把握できるという利点がありますが，測定に時間を要し，交通規制が必要なため大規模調査に不向きという欠点があります。

2.3.2　直線定規による方法

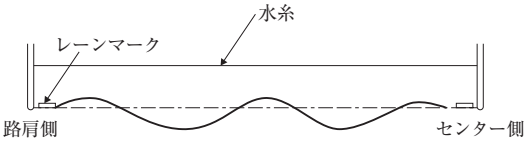
直線定規によるわだち掘れ量の測定方法は，精密な調査を必要としない場合に用います。**図－7**に直線定規を示します。使用する直線定規は少なくとも1車線をまたぐ長さを有するものを使用します。直線定規を各車線の路肩側レーンマークの外側を基準として設置し，横断方向に20cm間隔で，スケールで基準線から路面の距離を記録します。得られた深さの記録から，横断形状を描き，わだち掘れ量を読み取ります。



図－7　直線定規[5)]

2.3.3　水糸による方法

水糸によるわだち掘れ量の測定方法は，簡易に路面状況を把握する場合に用います。**図－8**に水糸によるわだち掘れ量の測定状況を示します。使用する水糸は基準となる丈夫な糸で，少なくとも1車線をまたぐことができる長さを有するものを使用します。水糸を各車線の路肩側レーンマークの外側を基準として設置し，横断方向に20cm間隔で，スケールで基準線から路面の距離を記録します。得られた深さの記録から，横断形状を描き，わだち掘れ量を読み取ります。



図－8　水糸によるわだち掘れ量の測定状況[5)]

2.3.4　路面性状測定車による方法

(1)　路面性状測定車の概要と測定原理

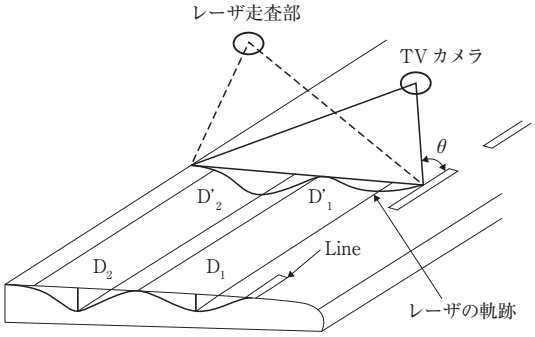
舗装の維持修繕計画のために必要なデータ収集などを目的として，長い区間についてわだち掘れの測定を行う場合には路面性状測定車を使用します（**写真－3**）。路面性状測定車は横断プロフィルメータや直線定規と比較して長い区間を高速で短時間に測定することができます。また，交通規制を必要としないため作業員の安全を確保するとともに，渋滞を発生させずに測定を行うことができます。路面性状測定車は1980年代中頃には実用化されていましたが，当時の点検時の車速は50～60km/h程度で，夜間測定に限られていました。現在は100km/hでの測定も可能になり，レーザで測定する装置が増えてきているので昼間の測定も可能になりました。なお，試験舗装の継続調査のように，同一測定線上での繰り返し測定を行う場合は，静止状態で測定を行う必要があり，路面性状測定車が本来有している機能と比較して，かなり非効率な測定となるため，横断プロフィルメータや直線定規を使用することが望ましいとされています。

路面性状測定車によるわだち掘れ測定原理を大別すると，以下の5種類に分類されます。

①光切断方式（その1）

光切断方式（その1）は，**図－9**に示すように，測定車上部からレーザスポットを路面の横断方向に走査させ，路面横断形状に対応したレーザの軌道を，測定車下部斜め位置にあるカメラによって撮影し，わだち掘れ量を測定します。

写真－3　路面性状測定車の例[14)]



図－9　光切断方式の原理（その1）[15)]

②光切断方式（その２）

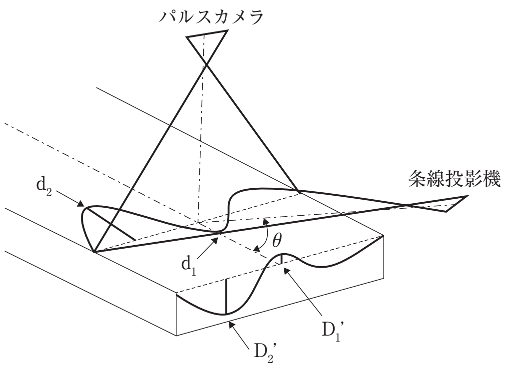
光切断方式（その２）は，**図－10**に示すように，測定車下部中央にある条線投影機により，路面に対してθの角度で直線増を横断方向に投影し，それを車両上部のパルスカメラで撮影し，横断凹凸に応じた歪曲した線像を得て，わだち掘れ量を測定します。

③レーザスリット多点計測方式[15)]

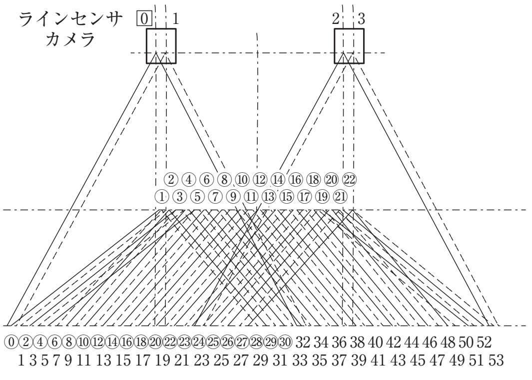
レーザスリット多点計測方式は，**図－11**に示すように，車両前部のレーザスリット投光器から横断方向に100㎜ピッチで，54本のスリット光を路面に対して斜めに投影します。スリット光は，路面の凹凸により投影位置が変化するため，その変化を車両上部のラインセンサカメラで検出し，わだち掘れ量を測定します。

④レーザセンサ多点計測方式

レーザセンサ多点計測方式は，**図－12**に示すように，車両前部に設置された鉛直下向きの変位計と斜め下向きに設置した変位計により，基準面からの高さを計測し，個々の路面高さを連続的につなげることにより路面のわだち掘れ量を算出します。



図－10　光切断方式の原理（その２）[15)]



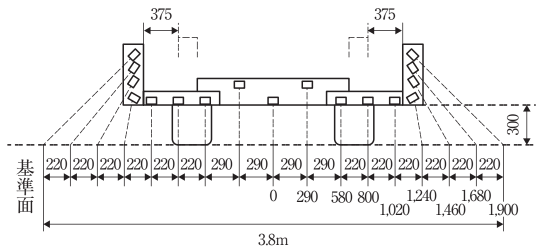
図－11　レーザスリット多点計測方式の原理[15)]

⑤ステレオカメラ撮影および距離画像処理方式

ステレオカメラとは，左右に並べられた２台のカメラの視差情報を利用して，前方の対象物の奥行情報が得られるカメラのことを指します。測定車両に搭載した複数のステレオカメラにより距離画像を取得し，幅員方向に距離画像を結合してわだち掘れ量を算出します（**写真－４**）。

⑵　路面性状測定車の測定精度

路面性状測定車によるわだち掘れの測定精度は，測定方法による差はありますが，いずれの測定方法においても測定機のキャリブレーションの状態に大きく依存します。そのため，走行距離計や撮影装置については定期的に検査を行い，年に１～２回程度は横断プロフィルメータの測定結果と比較を行うことが望ましいとされています[15)]。また，（一財）土木研究センターが行っている路面性状自動測定装置性能確認試験に合格するためには，「横断プロフィルメータによるわだち掘れ深さの測定値に対し，±３㎜以内」[6)]の精度を有する必要があります。なお，一般乗用車にレーザスキャナなどを搭載した簡易型路面性状測定車のなかには，性能確認試験合格レベルの精度は有していない測定車もありますが，安価で広範囲のデータ取得が可能なため舗装破損の進行速度が比較的遅い市町村道や生活道路の点検で活躍しています[7)]。



図－12　レーザセンサ多点計測方式の原理[15)]

写真－４　ステレオカメラを搭載した路面性状測定車両[16)]

2.3.5　小型プロファイル測定装置による方法

小型プロファイル測定装置は，路面の形状を高精度な傾斜計などを使用して計測できる装置です。測定データから，わだち掘れ量（横断形状）以外にも３ｍプロフィルメータによる平たん性σ_{3m}や，IRIなどもコンピュータ上で計算することができます。

小型プロファイル測定装置は長さ50～80㎝程度なので狭い歩道などでも使用することができます。2000年に施行された「高齢者，身体障碍者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律」から今後，歩道の管理はさらに重要になり，そのような視点からも小型プロファイル測定装置は路面形状測定装置として有用であると考えられます。また，従来の空港滑走路では横断プロフィルメータを横断方向に移動し，複数回測定しデータをつなぎ合わせることで，横断形状を求めていました。しかし小型プロファイル測定装置は，連続した１つのデータとして路面形状が得られるため，一度の測定で路面形状が得られます。

小型プロファイル測定装置の測定方式はいくつかありますが，ここでは，３つの測定方式について説明します。

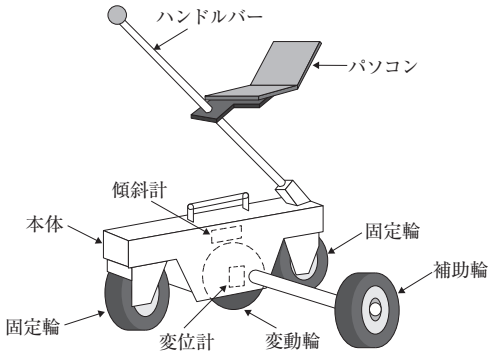
(1)　**測定方式（その１）**[17]

図－13および**図－14**に測定装置と測定原理を示します。両端に固定輪，中間に変動輪がついており，この変動輪の変位を読み取るものです。傾斜角を測定できるようにすることで，路面形状を再現できます。

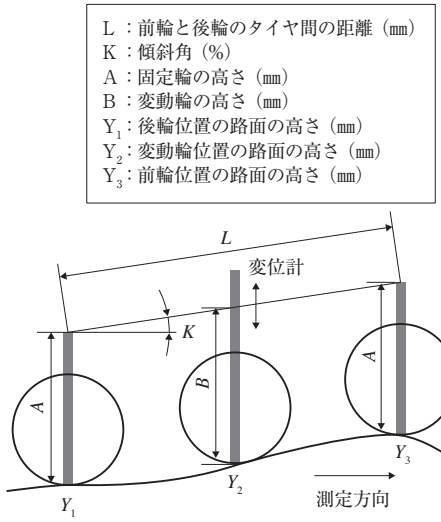
測定開始時において，傾斜計による装置の傾斜角（K）と計測開始点の路面の高さ（Y_1）から，変動輪位置の路面の高さ（Y_2），前輪位置の路面の高さ（Y_3）は式(3)，(4)で表されます。

$$Y_3=L\times K/100 \quad\cdots\cdots(3)$$

$$Y_2=(A-B)+(Y_1+Y_3)/2 \quad\cdots\cdots(4)$$



図－13　測定方式（その１）の測定装置[17]



図－14　測定方式（その1）の測定原理[17]

測定中は，装置がL/2だけ移動した（後輪がY_2の位置に達した）ときに前輪位置の路面の高さが式(5)で求められます。

$$Y_3=2(Y_2+B-A)-Y_1 \quad\cdots\cdots(5)$$

これらの式から路面形状を計測できるようになっています。

なお，この基本原理ではL/2の間隔でしか測定できず，精度の高い路面プロファイルが得られないため，傾斜角，変位量を細かい間隔で読み取り，これを内挿補間法により補正することで１㎝間隔の測定ができるようになっています。

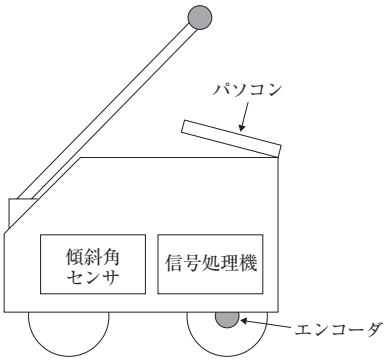
(2)　**測定方式（その２）**[18]

図－15および**図－16**に測定装置と測定原理を示します。この方式は傾斜角を測定する方式であり，**図－16**に示すように傾斜計で測定した傾斜角車輪間の測定ピッチより高さを連続的に求めるものです。路面の高さ（h）および水平距離（k）は，式(6)，(7)で表されます。

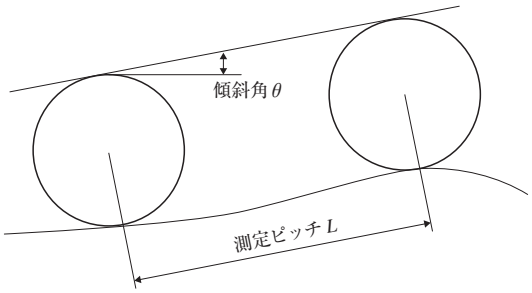
$$h=L\sin\theta \quad\cdots\cdots(6)$$

$$k=L\cos\theta \quad\cdots\cdots(7)$$

距離データは後輪の軸上にリンクしてエンコーダが設置されており，走行させることにより距離データと傾斜角データを演算して，スタートからの高低差を表せるようになっています。



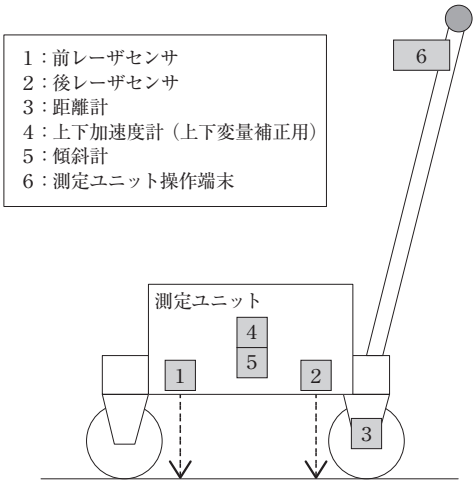
図－15　測定方式（その２）の測定装置[18)]



図－16　測定方式（その２）の測定原理[18)]

⑶　**測定方式（その３）**

図－17に測定概要を示します。この方式はレーザで路面の凹凸を測定する方式です。測定ユニットを距離計出力に同期させることで路面形状を得ることができます。レーザ変位計を２つ使用し，この変位計の出力差と本体に内蔵された傾斜計出力を合成して連続的な路面凹凸高さを出力します。これは，単なる凹凸ではなく，スタート地点からの相対的な高さデータを含む路面形状です。



図－17　測定方式（その３）の概要

2.4　わだち掘れ量測定の今後

前節では，試験法便覧に記載されている５つのわだち掘れ量測定方法について，測定装置や原理について紹介しました。紹介した測定方法の中には，路面性状測定車のステレオカメラ撮影および，距離画像処理方式のように測定精度の向上により実用化された技術もあります。これらの技術は，わだち掘れ量だけでなく，他の評価指標（路面のひび割れ，平たん性，IRI，路面のテクスチャなど）も同時に測定できるものもあります。また，測定車両もマイクロバスや中型トラックのような比較的大きな車両がベースとして使用されていましたが，装置の小型化によりワンボックスやSUV等の乗用車タイプも増え，市町村道などの幅員の狭い道路での測定も可能になっています。

一方，直線定規や水糸による測定方法は，特別な装置を必要とせず，原位置での測定が可能という利点を活かして，今後も測定手法として残っていくと思われます。「直線定規や水糸のような昔からの技術」および，「開発が進む路面性状測定車といった新しい技術」それぞれの特徴を活かしながら，舗装点検に活用されるものと考えられます。

３．IRI

3.1　IRIとは

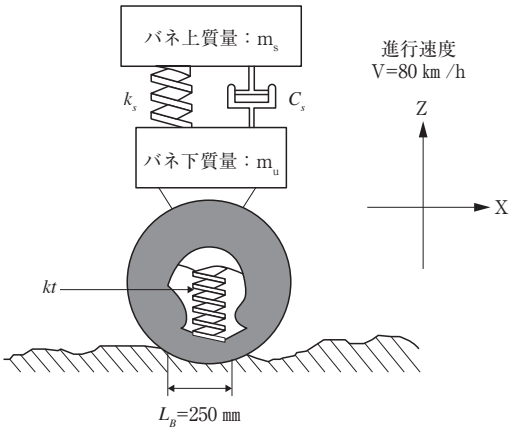
路面の縦断方向（車両の走行方向）の凹凸を評価する指標として，現在はIRI（International Roughness Index，国際ラフネス指数）が世界標準として広く用いられています。従来，路面の縦断凹凸の評価方法は，各国で様々な手法が考案され，利用されてきました。しかし，これらの指標同士は互換性に欠けるため，互いに比較することが困難でした。

この状況を受け，1970年代後半，アメリカNCHRP（National Cooperative Highway Research Program）は，1940年代より欧米でよく利用されていた応答型プロファイラで測定できる路面凹凸指標の研究を始めました。その後，研究を引き継いだ世界銀行により，1986年にIRIが提案されました。これは，世界銀行が発展途上国の直面する道路建設に関わる問題や費用を調査する目的で，世界共通の指標として提唱したものです[19)]。IRIは，車両の乗り心地との相関が強く，舗装の供用性能を評価できる手法として有効とされています。

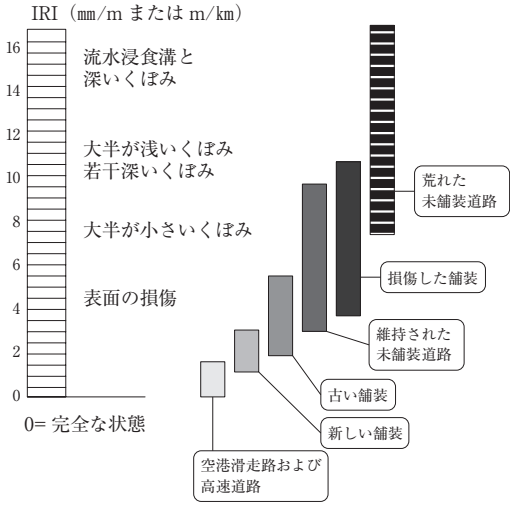
日本国内の縦断凹凸の評価では，3 mプロフィルメータによる平たん性$\sigma_{3\,m}$[5]，または8 mプロフィルメータによるPrI[20] などの指標が用いられてきました。これらは日本独自の評価方法であるため，海外へ日本の技術を発信する場合や，国際的なプロジェクトへの対応に際して，理解されにくいことがあります。そのため，国際的に認知度が高い指標として，IRIの活用が考えられました[21]。その後，2013年2月，国土交通省道路局が策定した「総点検実施要領（案）舗装編[22]」では，IRIを用いた縦断凹凸の評価が記載されました。ついで，2016年10月には「舗装点検要領[1]」が策定され，2017年4月に「舗装点検必携[23]」が改訂されるなど，日本国内においても従来の平たん性に代わりIRIを用いて点検を行う動きが広がっています。

IRIは，「2軸4輪の車両の1輪だけを取り出した仮想車両モデルをクォーターカー（Quarter Car，QC）と呼び，このQCを一定の速度で路面上を走行させたときの上下方向の変位の累積値［mm］と走行距離［m］の比（mm/m=m/km）をその路面のラフネスとする」と定義されています[5]（**図－18**）。QCの仮想想定速度は，80km/hが標準です。IRIの数値が大きいほど平たん性が悪く，乗り心地は低下します（**図－19**）。

国内では，これまで用いられてきた指標（σ，PrI）とIRIの間の整合性が検討されました。3 mプロフィルメータによる$\sigma_{3\,m}$と水準測量によるIRIの間には，強い相関が確認され，IRI=1.33 σ + 0.24という式で換算することが可能です[21, 22, 24]。一方で，PrIとIRIの間には明確な相関は認められていません。これは両者の測定において，路面凹凸に対する波長応答性が異なるためです。IRIの方が車両の走行挙動を反映した指標であることが報告されています[20]。



図－18　QCモデル[5]



図－19　IRIと路面性状の関係性[5]

3.2　IRIの測定クラス

IRIは，測定方法と算出方法によって4クラスに分類されています（**表－3**）。

クラス1～4は測定方法の違いであり，精度を表すものではありません。しかし一般的には，クラス4から

表－3　路面の凹凸などの測定方法とIRIの算出方法

クラス	路面の凹凸などの測定方法	IRIの算出方法	メリット	デメリット
1	水準測量	水準測量，またはディップスティックにより縦断凹凸を測定し，QCシミュレーションによりIRIを算出する	最も精度が高い測定が可能	測定に時間がかかり，交通規制を伴う場合が多い
2	任意の縦断凹凸測定装置	任意の縦断凹凸測定装置で縦断凹凸を測定し，QCシミュレーションによりIRIを算出する	車両を用いた高速での測定が可能	測定機器が比較的高価な場合が多い
3	RTRRMS（レスポンス型道路ラフネス測定システム）	RTRRMSで任意尺度のラフネス指数を測定し，相関式によりIRIに変換する	任意の装置・尺度で測定でき，車両を用いた高速での測定が可能	事前にIRIとの相関関係を検証する必要がある
4	パトロールカーなどに乗車した調査員の体感や目視	パトロールカーなどに乗車した調査員の体感や目視によりIRIを推測し数値化する	特別な器具が不要	調査員や測定条件で評価が異なる場合がある

舗装調査・試験法便覧[5]より引用し一部改変

１の順に精度は高くなっていくとされ，測定方法は目的によって適切なものを選定すると良いとされています。

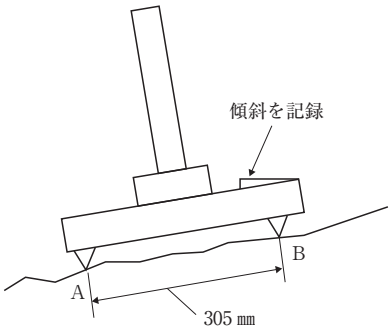
⑴　**クラス１**

水準測量（**写真－５**），またはディップスティック（**図－20**）を用いた測定方法です。精度は高いですが，時間がかかるため，延長の長い道路に適用するには不向きといえます。交通規制を伴った測定になることが多いため，通行車両の妨げになることもあります。また，多くの人手と費用を要します。

⑵　**クラス２**

人力の低速プロファイラで行う方法と測定車を用いた高速プロファイラで行う方法があります。低速プロファイラは，鉛直方向に対しての傾きを測る傾斜計や路面との高さを非接触で測定するレーザ変位計などで構成されています。高速プロファイラには，主に，MMSや路面性状測定車があり，路面との高さを非接触で測定するレーザ変位計や鉛直方向の上下運動を測定する加速度計などの装置で構成されています。測定車を用いる場合は，低速域や加減速が加わることによって，プロファイルの再現性が下がり，正確なIRIを求めることができない場合があるため注意が必要です。

写真－５　水準測量



図－20　ディップスティック[5)]

⑶　**クラス３**

路面性状測定車を用いた測定方法が主です。加速度計を用いて鉛直方向の上下運動を測定し，鉛直方向の上下運動の大きさを任意尺度で評価できるものであり，相関性からIRIに換算します。クラス２同様，測定車を用いる場合は，低速域や加減速に注意が必要です。

クラス２に比べ，比較的安価な測定方法が多く，スマートフォン等を利用した新しい技術も開発されています。大型の路面性状測定車以外の普通乗用車に設置できるタイプも多く，市町村道路等での普及が見込まれます。

⑷　**クラス４**

パトロールカーに乗った調査員の体感や目視による測定方法であり，調査員の違いで評価の相違が大きくなりやすいと言えます。そのため，同一のパトロールカーを使用し，写真を用いて判定目安を調査員に周知し，訓練する等の対策を講じるとよいとされています。

このように，クラス間で測定の差異があり，また，同クラスで測定原理が同一であったとしても，測定機器によって測定値に差異が生じることがあります。これは，測定精度が各メーカーに委ねられているのも要因のひとつです。NEXCOでは，出来形管理で用いる低速プロファイラについて，性能確認試験を行ったうえで測定に用いることが定められています[25)]。

3.3　IRIの測定方法

ここでは，代表的なIRIの測定方法について，人力による方法に始まり，専用車両を用いた効率的な測定，さらには最新の簡易な測定技術をご紹介します。

3.3.1　人力による縦断プロファイル測定

⑴　**ディップスティック**

ディップスティックによる測定（クラス１に相当）では，**図－20**に示す形状のディップスティックを用います。この機器に内蔵される傾斜計により，路面に接する２点A，B間（距離305㎜）の勾配を読み取ることができます。これをABの間隔ずつ動かし，累積の延長と相対高さデータを記録します。

⑵　**路面プロファイラ**

路面プロファイラによる測定（クラス２に相当）は，主に手押し式の測定器（**写真－６**）を用いて，搭載された加速度計やレーザ変位計から縦断プロファイルを測定します。

こうして得た縦断プロファイルデータから，QCモデルのシミュレーションによりIRIを算出します。これらの方法は，路面に接触させた機器を人力で動かし，

写真－6　路面プロファイラ

路面の凹凸に追従して形状を測定する手法であるため，測定区間の交通規制が必要です。

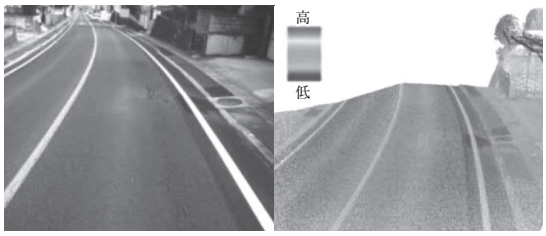
3.3.2　MMSや路面性状測定車による測定

交通規制が不要であり，路面性状調査などの広域な定期点検に用いられる主流のIRI測定技術として，路面性状調査用に特化した改良型MMS（Mobile Mapping System，モービル・マッピング・システム）や路面性状測定車などの専用車両が活用されています。これらは，GPS・レーザスキャナ・IMU（慣性計測装置）等を搭載した専用の測定車両であり，加えてMMSは，通常走行を行いながら車両周辺の高精度な三次元座標データや連続映像等を取得することも可能です。

近年では，路面性状のデータ取得に特化するのではなく，台帳作成等の他のデータ利活用を想定した標準的なMMSによるIRI測定の検討が行われています[26]。標準的なMMSの概要例を**図－21**に示します。

IRIについては，GPSによる位置情報を，IMU（慣性計測装置）で取得した車両の傾きの情報から高さデータを補正して縦断プロファイルを作成することが可能です。この縦断プロファイルデータから，QCモデルのシミュレーションによりIRI（クラス2）を算出します。また，画像データからひび割れ率やポットホールの解析，レーザデータからわだち掘れ量の解析を行い，道路状況を画的に可視化し，損傷箇所を把握しています。こうした専用車両により取得した画像やレーザデータは，路面性状調査の効率化のために活用されています。**図－22**に路面性状調査の例を示します。

図－21　MMSの概要例[26]



図－22　路面性状調査の例[26]

3.3.3　最新のIRI測定技術の取組み

(1)　IRI共通試験（TRUEプロジェクト）

①概要

現在国内では，多種多様なIRI測定機器が実用化されています。しかし，測定機器に要求される精度および検証方法は基準化されていないため，異なる測定機器から得られたIRI値を相互に比較するのは困難と考えられます。

この背景を踏まえて，NPO法人舗装診断研究会（PDRG）は，2014年に路面性状調査に関するTRUEプロジェクトを立ち上げ，多種多様なIRI測定機器の相互比較と調和を目的としたIRI共通試験を実施しています[27]。主に，国内で使用されているIRI測定機器を対象に，北海道内の実道で，2014年，2016年，2018年，2020年と現在までに計4回のIRI共通試験が実施されています。

②新たな機器分類[27, 28]

表－4に，IRI共通試験における機器分類および参加数を示します。**表－4**に示す機器分類は，近年，IRI測定の各クラス内においても，測定方法が多種多様になったことから，2018年のIRI共通試験で新たな機器分類が提案されています。

2020年の参加数から，非接触式プロファイル測定方法の低速測定装置や高速測定装置，そしてスマートフォンなどの汎用機器を用いた測定方法が多いことが伺えます。

(2)　汎用機器を活用した路面性状の簡易測定技術

IRI共通試験でもみられたように，近年，スマートフォンを代表とする汎用機器を活用した路面性状の簡易測定技術が開発されています。2017年には，国土交通省より「路面性状を簡易に把握可能な技術」に関す

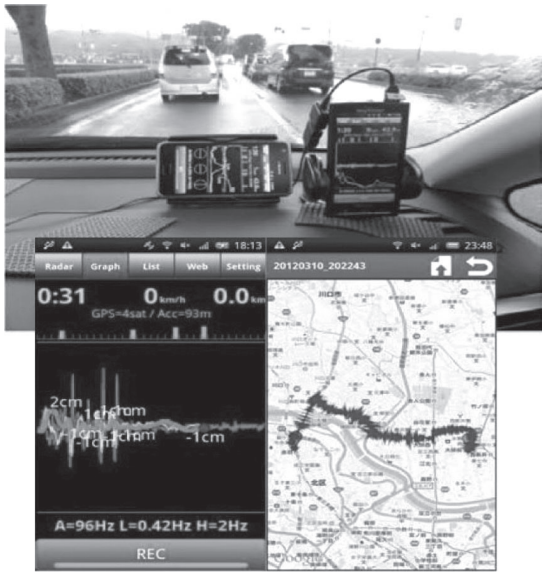
表－4　IRI共通試験における機器分類および参加数

<table>
<tr><th rowspan="2">クラス</th><th colspan="5" rowspan="2">要　件</th><th colspan="4">参加数</th></tr>
<tr><th>2014</th><th>2016</th><th>2018</th><th>2020</th></tr>
<tr><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">主観評価</td><td colspan="2">目視・体感</td><td colspan="2">走行点検</td><td rowspan="2">0</td><td rowspan="2">0</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td colspan="2">目　視</td><td colspan="2">歩行点検</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1</td><td rowspan="9">プロファイル測定方式
何らかの方法により路面プロファイルを測定し，得られたプロファイルデータにIRI計算のためのQCシミュレーションを適用する装置</td><td colspan="2" rowspan="2">静　的
計測機器を設置し静止した状態で計測値を記録</td><td colspan="2">直接測定
箱尺やプリズム等により高さを測定する機器</td><td rowspan="2">1</td><td rowspan="2">1</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td colspan="2">間接測定
傾斜計による２点間の角度等から高さを測定する機器</td><td>1</td><td>1</td></tr>
<tr><td rowspan="7">2</td><td rowspan="5">動　的
計測機器を移動させた状態で計測値を記録</td><td rowspan="3">低　速
機器利用者が歩行等で計測（交通規制が必要）</td><td colspan="2">非接触式
レーサ変位計に代表される測定と計測センサが非接触となる機器</td><td rowspan="3">14</td><td rowspan="3">13</td><td>9</td><td>8</td></tr>
<tr><td rowspan="2">接触式
車輪等に接触した点の高さを計測する機器</td><td>専用機器
IRI計測を目的として設置された加速度計等により計測する機器</td><td>4</td><td>2</td></tr>
<tr><td>汎用機器
スマートフォンの内蔵センサ等，IRI計測をあらかじめ想定していない機器</td><td>2</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="4">高　速
車両等を用いて計測（交通規制等は不要）</td><td colspan="2">非接触式</td><td rowspan="3">15</td><td rowspan="3">13</td><td>6</td><td>9</td></tr>
<tr><td rowspan="2">接触式</td><td>専用機器</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>汎用機器</td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">プロファイル非測定方式
換算式や相関式により任意の物理量からIRIを計測する機器</td><td colspan="2">非接触式</td><td rowspan="3">5</td><td rowspan="3">3</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">接触式</td><td>専用機器</td><td>0</td><td>1</td></tr>
<tr><td>汎用機器</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>該当なし</td><td colspan="5">その他</td><td>該当なし</td><td>該当なし</td><td>0</td><td>0</td></tr>
</table>

参考文献[28]より引用し一部改変

る公募が行なわれるなどの実用化が進んでいます[29]。

スマートフォンを活用した測定技術の一例としては，自動車のダッシュボード上などにスマートフォンを設置し，スマートフォンに内蔵された加速度センサとGPSの情報を用いて，路面縦断プロファイルを推定してIRI等を簡易に測定します[30, 31]。**図－23**は，スマートフォンを用いたIRIの簡易測定例です。また**表－5**に国内で実用化されているスマートフォンによる路面性状測定技術の事例を示します。



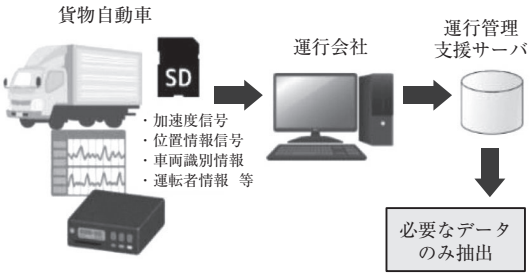
図－23　スマートフォンを用いたIRIの簡易測定例[31]

さらに，道路上を数多く走行している貨物自動車に着目し，それらに装備されている運行記録計から得られる加速度データを用いてIRIを推定する技術も検討が行われています[32]。車両総重量７ｔ以上の事業用貨物自動車は，運行記録計を装備し，走行速度や運行時間および運行距離を記録することが義務づけられています。近年の記録計は，GPS受信機を用いた位置情報や３軸加速度計を用いた車両の挙動を記録できるものが増えてきており，データはSDカードなどに記録さ

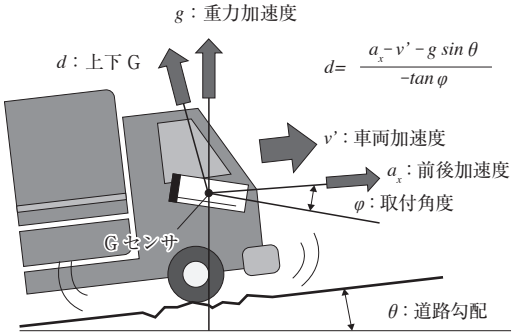
表－5　スマートフォンによる路面性状測定技術の事例[29]

技術名称	提供主体	技術概要
スマートフォンによる簡易路面性状評価システム『DRIMS』	JIPテクノサイエンス株式会社	加速度および角速度を用いて，IRIを算出する
スマホで路面性状計測『バンプレコーダー』	バンプレコーダー株式会社	加速度値を基にIRIを算出する
道路パトロール支援サービス	株式会社富士通交通・道路データサービス	加速度値および位置情報を基にIRIを算出する

れます。得られたデータの流れは**図－24**のとおりです。IRIの推定に必要なデータのみを抽出し，**図－25**のように車両に掛かる加速度や取付角度および道路勾配を考慮し，計算式を用いて車両に掛かる上下加速度を算出しています。



図－24　運行記録計が記録したデータの流れ[32)]



図－25　車両に掛かる加速度と上下加速度の関係[32)]

3.4　IRI測定の今後

IRIは，人力による測定方法に始まり，専用車両による測定，さらにはスマートフォンといった誰でも簡単に使用できる技術の開発・導入が進んでいます。特に，近年開発されているスマートフォンや貨物車等から得られるビッグデータを活用する方法は，専用の機器や車両，さらには専門の調査員を必要としないため，手軽に点検できる測定方法であると考えられます。

一方，測定方法や機器によって，精度に差が生じることが課題として挙げられます。異なる測定方法や機器から得られたIRIの値を比較することは困難です。そのため，IRI共通試験（TRUEプロジェクト）や国土交通省が実施した「路面性状を簡易に把握できる技術」についての比較試験による，各種測定方法の関連付けや調和を図る検討は，今後とも継続的に実施していく必要があると考えられます。

本章でご紹介したように，IRIは，多種多様な測定技術が開発されています。点検の目的や管理する道路の分類や特性によって，適切な測定方法を選定し，使い分けることが重要であると考えられます。

おわりに

今回は「ひび割れ率，わだち掘れ量，IRI」の3指標に焦点を当て，それらの測定技術がどのように発展したかを紹介しました。本調査は，調査メンバーにとって，普段業務で使っていない測定技術への理解を深める大変良い機会になったと思います。

簡便でかつ効率のよい測定技術は，道路舗装の老朽化対策や道路管理者の負担軽減に大きく寄与すると考えられます。今後の測定技術の発展を期待するとともに，本稿が若手技術者への測定技術に対する理解の一助となれば幸いです。またこの場を借りて，本稿の執筆にご協力いただいた皆様に謝意を表します。

参考文献

1）国土交通省道路局：舗装点検要領，2016.
2）国立研究開発法人土木研究所HP：研究成果・技術情報　10.4 舗装の管理目標設定手法に関する研究，https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2009/pdf/2009-10-4.pdf（参照日：2021年10月5日）
3）（社）日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，（社）日本道路協会，1998.
4）（社）日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，（社）日本道路協会，2007.
5）（公社）日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成31年版），（公社）日本道路協会，2019.
6）（一財）土木研究センターHP：路面性状自動測定装置性能確認試験，http://www.pwrc.or.jp/2021romensiken.html（参照日：2021年9月30日）
7）リコー株式会社HP：路面モニタリングサービス，https://www.ricoh.co.jp/service/road-monitoring-service（参照日：2021年10月7日）
8）舗装編集委員会：質疑応答20.最近の路面性状測定車，舗装，Vol.52，No.1，pp.30-31，2017.
9）深澤淳志：路面性状の自動測定，舗装，vol.20，No.8，pp.8-12，1985.
10）総務省HP：令和元年度 情報通信白書 AIに関する基本的な仕組み，https://www.soumu.

go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/html/nd113210.html（参照日：2021年10月12日）
11）インレレスウェ，城本政一，ダントゥエット：AIを用いたクラック検出方法の検討，第76回年次学術講演会，V-164，2021.
12）三宅寿英，松下裕明，清水晋作ら：画像認識を用いた道路保全技術の開発，Hitz技報，Vol.79，No.1，2018.
13）渡邊一弘，久保和幸：アスファルト舗装のひび割れに関する新たな性能指標の提案，土木技術資料，vol.52，No.11，pp32-35，2010.
14）ニチレキ株式会社HP：車両ラッピング施工例，https://www.nichireki.co.jp/product/products/prod_list09/prod09_02.html（参照日：2021年10月1日）
15）小野田光之：路面の評価　路面性状測定車（自動測定装置），舗装，Vol.36，No.10，pp.34-39，2001.
16）株式会社リコーHP：路面性状モニタリングシステムが土木研究センター性能確認試験に合格，https://jp.ricoh.com/release/2018/0910_1（参　照日：2021年10月1日）
17）秋本隆，鈴木康一，井上良和：ポータブル型路面プロファイル測定装置の開発，舗装，Vol.36，No.8，pp.3-7，2001.
18）新田弘之：質疑応答14.簡易な縦横断形状測定装置，舗装，Vol.42，No.1，pp.18-19，2007.
19）土木学会舗装工学委員会路面性状小委員会：舗装工学ライブラリー1路面のプロファイリング入門－安全で快適な路面をめざして－，（社）土木学会，pp.49-52，2003.
20）江口利幸，富山和也：建設工事の出来形基準におけるIRIの適用性，舗装，Vol.51，No.6，pp.9-16，2016.
21）（公社）日本道路協会：舗装性能評価法－必須および主要な性能指標編－（平成25年版），（公社）日本道路協会，2013.
22）国土交通省道路局：総点検実施要領（案）【舗装編】，2013.
23）（公社）日本道路協会：舗装点検必携，（公社）日本道路協会，2017.
24）久保和幸，寺田剛，綾部孝之：舗装路面の性能評価法に関する研究，日本道路公団試験所報告，Vol.42，pp.1117-1128，2005.
25）東・中・西日本高速道路株式会社：NEXCO試験方法　第2編　アスファルト舗装関係試験方法，pp.53-61，2020.
26）井上浩一，鈴木達朗，阿部亮吾，藤木三智成，西山哲：標準的な移動計測車両を用いた路面縦断プロファイル計測手法の検討，土木学会論文集E1，Vol. 73，No. 3，I_63-I_70，2017.
27）舗装診断研究会路面性状評価委員会，IRI共通試験2018の実施，舗装，Vol.54，No.1，pp.47-48，2019.
28）富山和也，中村博康，増戸洋幸：IRI共通試験における計測機器の変遷と調和，舗装，Vol.56，No.3，pp.31-36，2021.
29）国土交通省HP：『路面性状を簡易に把握可能な技術』の試験結果等を公表します～新技術の活用に向けて～，https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000532.html（参照日：2021年10月1日）
30）八木浩一：自動車のばね上観測加速度からの路面縦断プロファイルの推定とその精度検証，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.69，No.3（舗装工学論文集第18巻），pp.I_1～I_7，2013.
31）渡邉一弘，久保和幸：舗装路面の新たな点検手法の動向と土木研究所の取組み，土木技術資料，Vol.55，No.8，2013.
32）大浦正樹，丸山記美雄：貨物自動車の加速度計から路面平たん性を推定する技術の基礎的検討について，第63回北海道開発技術研究発表会論文，2019.

連載 Vol.10 アスファルト・舗装 研究

福岡大学工学部社会デザイン工学科 道路・土質研究室

福岡大学工学部社会デザイン工学科　助教　藤川　拓朗

私は，2017年9月から2018年8月までの1年間（当時39歳），カナダのウエスタン大学に客員教授としてお世話になりました。この度，縁あって本特集記事への執筆機会をいただきましたので，最初に私が所属する福岡大学工学部社会デザイン工学科 道路・土質研究室について紹介させていただき，その次に，留学を通じて学んだことやウエスタン大学で取り組んだ研究内容について紹介させていただきます。

1．福岡大学 道路・土質研究室について

“道路”と名のつく大学の研究室は，最近となっては珍しいのではないでしょうか？“土質”についても最近では，“地盤”と呼ぶ方が馴染み深い人も多いかもしれません。故 吉田信夫先生が1967年（昭和42年）に研究室を設立され，2004年（平成16年）に佐藤研一先生がその後を継ぎ，研究室は今年で創立55年を迎えます。今や研究室の卒業生は1,000名を優に超え，学科の中でも1, 2を争う伝統ある研究室となりました。読者の中には，古臭い研究室名だなぁと思われる方もおられるかもしれませんが，時代が移り変わっても本質的なことは忘れず，変化を続ける新しいものは積極的に取り入れていく，まさに「不易流行」を表している研究室名であり，私はとても気に入っています。来研される卒業生の方々の中にも，当時と研究室の名前が変わっていないので，とても懐かしく感じることができると喜ばれる事も多々あります。かくいう私もこの研究室の卒業生です。そんな伝統ある道路・土質研究室を現在，佐藤研一先生，古賀千佳嗣先生，私の教員3名で，大学院生7名，学部生11名を日々指導しています（**写真－1**）。

写真－1　研究室集合写真（令和3年度）
（前列右から古賀先生，著者，佐藤先生）

2．主な研究内容

研究室の名前のとおり，道路や土質を中心とした研究を行っており，国内外に広く研究成果を発信しています。最近の研究テーマは，大別して以下の4つに分類されます。

- 地盤材料・防災に関する研究
- 地盤環境・リサイクルに関する研究
- 地盤改良に関する研究
- 舗装に関する研究

紙面も限られていますので，ここでは舗装に関する研究について少し紹介させていただきます。現在，路盤にジオテキスタイルを敷設して支持力を向上させ，アスファルト舗装を長寿命化させる研究を行っています。また，アスファルトの劣化の主要因として雨水浸透による路盤支持力の低下が指摘されていることを踏まえ，路盤の雨水浸透による支持力低下挙動について検討し，路盤材の支持力改善に関する研究を行っ

ています。他にも，近年，繁殖力が強く他の植生を侵食するため厄介者とされている“竹”ですが，この竹の持つ吸水性や繊維質が有する引張効果に着目し，土系舗装材料として使用する研究を10年ほど前から行っています。竹をチップ状に粉砕させて混入した土系舗装（竹チップ舗装）は，ひび割れに強く雑草も生えない土系舗装として，施工実績も年々増加しています（**写真－2, 3**）。また，竹チップ舗装だけでなく，アスファルト乳剤と竹チップを混合し，機能を向上した新しいウッドチップ舗装材料の開発も行っています。最近では，石炭灰やスラグなどの循環資材や一般廃棄物焼却灰などの廃棄物を路盤材として有効利用する研究も行っています。特に焼却灰については，重金属等を含有しているため利用に際しては不溶化が必要ですが，炭酸化処理を施すことで路盤材として安全に利用できることが分かってきました。欧州では焼却灰を3～6ヶ月間，屋外に山積みし，降雨による洗浄や炭酸化による不溶化を行うエージング処理を行った後に路盤材として利用されています。焼却主灰にCO_2を吸収させて不溶化させ，路盤材として使用する技術は，カーボンニュートラルにも貢献できることから，研究成果にも期待が持たれています。

写真－2　施工した竹チップ舗装の一例（静岡）

写真－3　施工した竹チップ舗装の一例（大阪）

3．ウエスタン大学（カナダ・オンタリオ州）での留学を通じて学んだこと

私は2017年9月から2018年8月までの1年間，カナダのオンタリオ州ロンドン市にある“ウエスタン・オンタリオ大学”に妻と3人の子供とともに1年間客員教授として在籍させていただきました（**写真－4**）。“ロンドン”と聞くと，ついイギリスを連想しがちですが，カナダの“ロンドン”です（笑）。カナダはその昔イギリス領やフランス領であったことから，ロンドン市の周りにも，テムズ川やケンブリッジといったように英国にちなんだ名が至る所に存在します。ロンドン市は人口約37万人の都市（公用語は英語）であり，カナダ最大の都市であるトロントから車で西へ2時間（200㎞）ほど離れた場所に位置します。緑に囲まれた町で，「森のまちロンドン（Forest city）」とも呼ばれており，国際色豊かでフレンドリーな人たちが多く，治安も良くとても住みやすい街です。ここには日本と同じく四季があり，春には色鮮やかな花々が咲き，夏は意外にも30℃を越える日が続くため人々はプールや湖水浴を楽しみ，秋は紅葉が美しく見どころが満載です。しかしながら，やはり冬の寒さは厳しく最低気温-10℃以下を下回ることは当たり前で，特に寒いときは-20℃をさらに下回るという日もありました。それでも家や建物の中はセントラルヒーティングのおかげで常に暖かく，そこまで厚着をする必要もなく生活できるのは意外でした。九州に住む私にとっては，今までの人生でほとんど馴染みのない積雪での車の運転，自宅前や車の雪かきなども

写真－4　ウエスタン大学工学部前の風景

経験することができました（**写真－5**）。

ロンドンでの生活の1日の大まかな流れは，毎朝，子供たち（当時：小学6年生と小学3年生）を現地の小学校まで歩いて送っていき，それから大学に行って実験，データ整理，文献収集，打ち合わせ等を行い，夕方には帰宅するという規則正しい生活を送っていました。カナダはESL（English as a Second Language）という英会話プログラムが充実しており，英語を母国語としない人たちに向けた英会話教室が大学をはじめ，図書館や教会等にて無料で開講されており，私は週2日でESLに通い英会話の勉強に励みました。子供達に至っては全く英語が喋れない状況でカナダにやって来たため，カナダ人の通う現地の小学校で言葉も通じずうまくやっていけるのか登校初日は非常に心配でしたが，親の心配や不安をよそに「楽しかった～！！」と，二人とも元気よく帰ってきました。その後も学校に行きたくないと一度も言うことなく，1年間楽しく通ってくれました。子供達の順応性や適応力は素晴らしく，4～5ヶ月あたりから家の中でも少しずつ自発的に英語を話しはじめ，8ヶ月を過ぎたあたりからは周りの友達とも英語でかなりコミュニケーションを図ることが出来るようになりました。10ヶ月を過ぎたあたりから，英会話は完全に子供達に抜かされ親が理解できなかった周囲の英語に子供達の方が理解できていたということも多々ありました。これから，あるいは将来的に海外留学や海外勤務を希望される方々もおられると思いますが，子供を連れていくことに不安を感じる必要は全くありません。よく，“子供は大丈夫だから”という話を耳にしますが，私は心の中では，「いやいや，お宅のお子さんは大丈夫だったかもしれないけど，平凡な私の子供達は…」と，留学前はかなり疑心暗鬼で不安でしたが，実際に1年間を終えてみると本当にそのとおりでした。

折角なので，カナダの小学校のことについても少し紹介させていただきます。ロンドン市内の日本語学校は土曜日の午前中しか開校されていないため，平日は現地の子供たちが通う小学校に通わせました。現地の小学校でまず驚いたことは，“教科書”と“座席”が無いことでした。教科書の代わりに毎回授業に関連したプリントが配られ，座席は基本的に自由で，カーペットに座ったりランダムに配置された机と椅子に腰かけて授業を受けたりという感じです（**写真－6**）。そして，基本的に学校に持ってきては駄目なものという制約がありません。服装もヘアスタイルも自由。携帯電話，ゲーム機器，おもちゃ，何でも小学校に持っていけます。授業中にそれらをしなければ全てが認められており，日本の小学校と根本的に考えが違うことに驚かされました。他にも1日に2回のスナックタイムが設けてあり，子供たちは自宅からお菓子や果物を持参します。授業は1コマ30分と短いですが，その代わり9時限までの授業が組まれてあり，小学生の集中力の持続時間を考えると，30分という授業スタイルは良いように思いました。何事にも型に当てはめず，子供の気持ちや考えを尊重する教育や自由な校風がカナダにはあり，これこそ本当の意味でゆとりを持たせた教育ではないかと考えさせられました。日本とカナダ，どちらの教育方法が良いか一概には言えませんが，日本のように規律を重んじ統率された教育の中から個性や自由な発想を育むことは，なかなか難しいのではないかと感じました。また，基本的にカナダの人々はアフターファイブを楽しみ

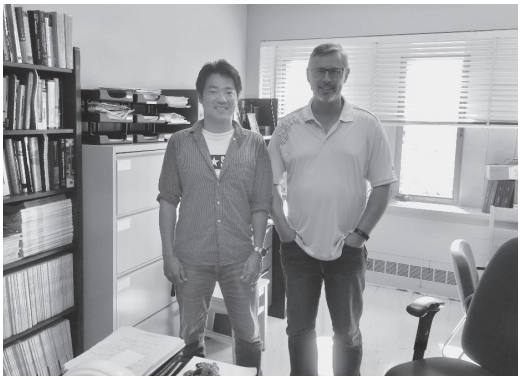
写真－5　自宅前の積雪の様子

写真－6　小学校の授業風景

にしており，よほどのことが無い限り残業はしないように思います。毎週金曜日の午後になるとみんないつも以上にソワソワしているのが伝わってくるのを面白く感じました。学内の事務やレストランも15時には閉まることも多々あり，営業時間も他の平日より短めに設定しているお店も多いようでした。そしてまた，ほとんどのカナダ人がそれぞれの季節に応じた楽しみ方を知っていて，時間の使い方が非常にうまいと感じました。だからといってカナダの社会の全てが良いという訳ではありません。もちろん弊害も存在します。実際，自宅前の道路の改修工事はいつまでたっても終わらず，不便な日々が続いたこともありました。中には，オーバーレイ前の状態でマンホールがすり付けせずに高さ調整されたまま交通解放している目を疑うような道路もあり，むき出しになったマンホールが障害物のように飛び出ており，運転中に少しでもよそ見すると車のタイヤがパンクしてしまうことに恐怖を感じたこともありました（**写真－7**）。基本的に建設工事は日本と比べて余裕を見越した工期が立てられているのだと思います。よほどの緊急性が無い限り，基本的に夜間工事はありません。そのため，労働者からすると工期に追われる心配はありませんが，利用者からすると不便を感じずにはいられず，一日でも早く整備して欲しいというジレンマに苛まれています。

写真－7　むき出しになったマンホール

最後に，研究の話を紹介すると，ウエスタン大学のティム（Tim Newson）先生（専門：地盤工学）の下で火星の土（レゴリス）の研究に携わらせてもらいました（**写真－8～13**）。これはカナダ政府や宇宙庁の支援を受けた共同プロジェクトの一環であり，ウエスタン大学の3学科（Department of Electrical and Computer Engineering・Centre for Planetary Science and Exploration・Department of Civil and Environmental Engineering（著者所属））が連携して火星の地盤を再現するプロジェクトです。その中で，火星の土を模擬した土の地盤工学的特性について一連の研究を行って明らかにすることが私に課されたミッションでした。実際，人類は未だ火星の土を持ち帰る技術が確立でき



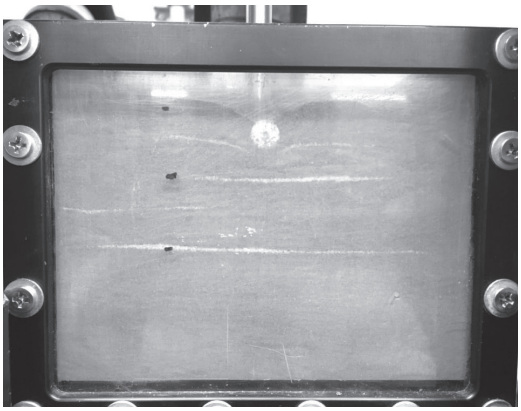
写真－8　お世話になったTim Newson先生

写真－9　ラボのメンバー達（左から2番目が著者）

写真－10　実験室の様子 その1

写真－11　実験室の様子 その2

写真－12　研究に用いた火星模擬土（MMS）



写真－13　火星模擬土の支持力試験

ていないため，火星の土に関しては分からないことだらけです。2003年にNASAが火星に送った探査車（スピリットやオポチュニティー）は，砂地の走破に大変苦労しました。これまでの火星軌道上の探査とは異なり，未知の大地に着陸して探査をするとなると，その大地を構成するレゴリスがどのように振る舞うのかを予測し，探査機器の設計や運用に活かしていくことがミッション達成のカギとなります。また，将来的に火星における様々な作業（盛土の構築，締固め，掘削，試料採取等）を遠隔で効率的に行うためには，地球上での事前シミュレーションが重要となります。そういった観点から火星表層地盤を模擬した適切な模擬土の開発が急務であり，火星の土の特性を把握し，適切に再現できるかどうかが今後の火星探査に多大な影響を及ぼします。そのような大変貴重な研究に参加させてもらえたことは，私自身にとって大変貴重な財産となり，帰国後も引き続き継続していく研究テーマのひとつとなりました。最近では，2030年までに火星の土を地球に持ち帰るサンプルリターン計画が進められている他，NASAに続き中国も宇宙産業に力を注いでおり，その成果は目覚ましいものがあります。近い将来，『宇宙地盤工学』や『宇宙舗装工学』などの新たな学問が創設されることも時間の問題のように思います。地球とは異なる低重力場においてどのようにインフラ整備を行っていくのか，舗装はうまく施工できるのか，そのためにはどのような施工機器が必要になるのかなど，あれこれと考えるだけでも夢があって楽しくなります。

4．おわりに

1年間の留学を通じて，新たな研究課題に着手できたことをはじめ，海外の研究者とネットワークを構築できたことにより，今後の研究成果の発展に大きな期待が持てるようになりました。近年，グローバル化やダイバーシティという言葉が当たり前のように浸透してきました。異なる年齢，価値観，文化を持った人々の中に身を投じ，積極的にその人たちと交流することで人生の視野角度は格段に広がります。英語が苦手だからと尻込みしているとチャンスはどんどん失われますので，思い切って挑戦することが大事だと思います。本記事を目にして，これから留学しようかと悩んでいる方の一助になれば幸いです。

最後になりますが，道路・土質研究室のアスファルト以外の研究内容につきましては，研究室のHPから参照できますので，是非，お立ち寄りください。

○URL: https://fukuoka-u.road-geotech.org/

＜統計資料＞

石油アスファルト需給実績

（単位：千ｔ）

項目 / 年度	供給					需要					
	期初在庫	生産	対前年度比	輸入	合計	販売（内需）	対前年度比	輸出	小計	期末在庫	合計
25　年　度	217	3,659	92.4	92	3,968	2,151	90.9	15	2,151	215	2,366
26　年　度	215	3,200	88.8	77	3,491	2,032	97.0	45	2,032	168	2,199
27　年　度	168	3,188	100.2	76	3,432	1,897	94.5	29	1,897	217	2,114
28　年　度	217	3,185	99.6	88	3,490	1,874	99.0	114	1,874	217	2,091
29　年　度	185	2,990	93.9	99	3,274	1,776	95.3	70	1,776	216	1,992
30　年　度	216	2,794	93.5	57	3,067	1,997	112.5	75	1,997	178	2,176
元　年　度	178	2,684	96.0	24	2,886	1,752	89.5	40	1,752	215	1,967
2.　4月	216	172	73.3	0	388	137	101.7	3	137	216	353
5月	216	162	76.9	1	380	138	102.6	0	138	171	310
6月	171	178	92.5	0	349	155	172.6	0	155	158	313
4～6月	216	513	80.3	1	729	430	119.8	3	430	158	588
7月	158	194	95.5	0	353	141	113.5	0	141	185	326
8月	185	175	67.0	0	359	140	105.7	0	140	205	345
9月	205	161	74.9	0	366	151	91.0	9	151	204	355
7～9月	158	530	78.0	0	688	432	102.2	9	432	204	636
10月	204	140	82.2	0	344	157	104.0	3	157	154	311
11月	154	203	102.2	1	358	173	100.6	3	173	157	330
12月	157	199	81.0	1	357	179	109.9	0	179	168	347
10～12月	204	542	88.2	2	748	508	104.8	6	508	168	676
1月	168	200	68.9	0	368	158	101.9	0	158	175	333
2月	175	211	97.0	0	386	176	111.0	0	176	166	342
3月	166	231	94.6	4	401	200	115.9	0	200	155	354
1　～　3　月	168	642	85.4	4	814	534	109.8	0	534	155	688
2　年　度	216	2,226	82.9	7	2,449	1,904	108.6	18	1,904	155	2,058
3.　4月	155	161	93.7	3	319	139	101.7	6	139	167	306
5月	167	101	62.4	1	270	110	79.3	6	110	150	259
6月	150	179	100.6	0	328	121	78.2	3	121	161	282
4～6月	155	441	86.2	4	600	370	86.0	15	370	161	531
7月	161	162	83.3	2	325	126	89.2	0	126	162	288
8月	162	182	104.3	2	346	120	86.0	0	120	198	319
9月	198	202	125.6	2	403	171	113.2	0	171	213	384
7～9月	161	546	103.1	6	714	417	96.5	0	417	213	630

出典：石油連盟（石油アスファルト統計月報）より引用

一般社団法人　日本アスファルト協会会員

社　　名	住　　所	電　　話

（令和３年３月１日現在）

［メーカー］

コスモ石油マーケティング株式会社	(105-8528) 港区芝浦1－1－1	03（3798）3131
ＥＮＥＯＳ株式会社	(100-8162) 千代田区大手町1－1－2	03（6257）7231
出光興産株式会社	(100-8321) 千代田区大手町1－2－1	03（6807）6577

［ディーラー］

● 東北

カメイ株式会社	(980-0803) 仙台市青葉区国分町3－1－18	022（264）6111

● 関東

株式会社アスカ	(106-0032) 港区六本木3－4－33	03（3587）1500
伊藤忠エネクス株式会社	(100-6027) 千代田区霞が関3－2－5	03（4233）8072
三菱商事エネルギー株式会社	(100-0004) 千代田区大手町1－1－3	03（4362）4200
コスモ石油販売株式会社 環境・エネルギーカンパニー	(104-0032) 中央区八丁堀4－7－1	03（6891）9922
株式会社ジェイエック	(103-0028) 中央区八重洲1－2－1	03（3272）3471
竹中産業株式会社	(101-0044) 千代田区鍛冶町1－5－5	03（3251）0185
東新エナジー株式会社	(104-0033) 中央区新川2－1－7	03（3537）3082
日東商事株式会社	(102-0083) 千代田区麹町1－7－2	03（6261）0150
富士興産株式会社	(101-0042) 千代田区神田東松下町13	03（6859）2050
丸紅エネルギー株式会社	(101-8322) 千代田区神田駿河台2－2	03（3293）4171
ユニ石油株式会社	(107-0051) 港区元赤坂1－7－8	03（3796）6616
出光エナジーソリューション株式会社	(162-0824) 東京都新宿区揚場町1－18	03（5206）7340

一般社団法人 日本アスファルト協会会員

社名	住所	電話
● 近畿・中国		
三徳商事株式会社	(532-0033) 大阪市淀川区新高4－4－10	06（6394）1551
昭和瀝青工業株式会社	(670-0935) 姫路市北条口4－26	079（226）2611
千代田瀝青株式会社	(530-0044) 大阪市北区東天満2－10－17	06（6358）5531
富士商株式会社	(756-8501) 山陽小野田市稲荷町10－23	0836（81）1111
横田瀝青興業株式会社	(672-8064) 姫路市飾磨区細江995	079（233）0555
● 四国・九州		
今別府産業株式会社	(890-0072) 鹿児島市新栄町15－7	099（256）4111
三協商事株式会社	(770-8518) 徳島市万代町5－8－3	088（653）5131
西岡商事株式会社	(764-0018) 仲多度郡多度津町東港町11－1	0877（33）1001
平和石油株式会社高松支店	(760-0065) 高松市朝日町4－17－1	087（811）6231

編集顧問

中村俊行

編集長

新田弘之

編集委員

委員長：太田亨

安藤政浩　泉秀俊　遠藤桂　加納孝志
高橋茂樹　竹井利公　永田佳文　橋本喜正
姫野賢治　町田功　山本富業　吉武美智男

アスファルト　第237号
令和３年12月発行
一般社団法人　日本アスファルト協会
〒105-8528　東京都港区芝浦１－１－１
コスモ石油マーケティング株式会社
販売部総括グループ
TEL 03-3798-3131

機関誌「アスファルト」に関するお問い合わせ
出光興産株式会社　機能舗装材事業部
関根 恵美
TEL 03-6807-6577

印刷所　キュービシステム株式会社
〒101-0062　東京都千代田区神田駿河台３－５
木原正三堂ビル2F　TEL 03-5577-7199

Vol.64　No.237　DECEMBER 2021
Published by **THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION**
一般社団法人 日本アスファルト協会　ホームページ　**http://www.askyo.jp/**