

# アスファルト

# 236

第63巻 第236号 令和3年5月発行

特集・最近のアスファルト事情

アスファルトの需給動向について	前田裕貴	1
アスファルト舗装の調査結果に基づく早期劣化メカニズムの推定	若林由弥・渡邊一弘	5
アスファルト乳剤を用いた表面処理工法による表層機能保持	佐々木巖・新田弘之	13
ポリマー改質アスファルトの劣化指標と性能規格化に関する共同研究について	飯高裕之・青木康素・菅野勝一	20
アスファルト混合物の耐水性と新たな評価方法の提案	呉悦樵・野口健太郎・瀬尾彰	26
路面が道路交通騒音に及ぼす影響を評価する方法 (CPX法) について	小池博	33
熱帯諸国の流動わだち掘れ対策の進展-「JICA舗装ハンドブック」の改訂	古木守靖・古川聡哉	38
モンゴル・ミャンマーにおける浸透式マカダム舗装	小黒幸市	46
縄文時代の天然アスファルトを求めて	土居貞幸	55
東京湾要塞第一海堡調査から考察する明治期のアスファルト防水技術	永原篤・平戸利明・野口孝俊	60

<出版物紹介>

「舗装の長期保証制度に関するガイドブック」について	桑原正明	69
<アスファルト舗装技術研究グループ・第68回報告>		72
SDGsに貢献できるアスファルト技術 ～ ISAPアスファルト舗装国際会議から～		73
FWDの変遷とアンケートから読み解く現況		95
<連載>アスファルト・舗装研究 vol.9	日進化成株式会社 技術研究所	111
<統計資料>石油アスファルト需給実績		116

## 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

# アスファルトの需給動向について

(Asphalt Supply and Demand Trends)

前田 裕 貴\*

新型コロナウイルスの感染拡大は世界における生活を様変わりさせている。更に石油および舗装業界では高度化法やIMO規制など目まぐるしく環境が変化しており、トレンドの把握が難しくなっている。今回はこれらがアスファルトの需給に及ぼす影響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2020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、2020年の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。

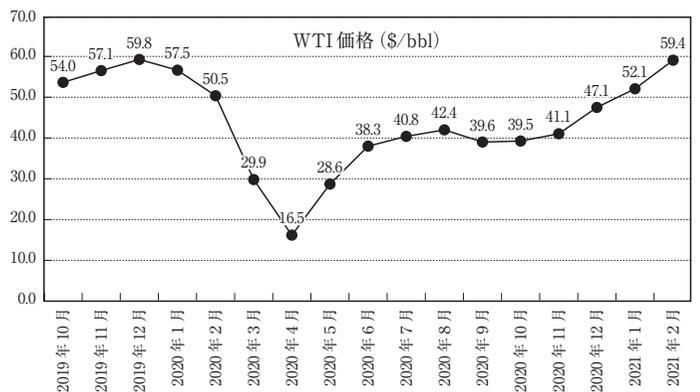
2019年12月に中国・武漢で発生した新型コロナウイルスは瞬く間に世界へ拡大し、世界経済に打撃を与える事となった。そして経済低迷により消費活動が抑えられ、原油需要が抑えられる結果となった。表-1をみると2020年1Qは前年から590

万BD、2Qは1,690万BD需要が落ちている事が分かる。一方で供給については2019年1月よりOPEC+による協調減産が始まっているものの、2020年3月はロシアが反発し決裂したため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。ここでWTI原油価格を図-1に示す。供給過剰となった4月は更

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1Q	20年2Q	20年3Q	20年4Q	20年
世界需要		100.0	94.1	83.1	93.0	94.5	91.2
世界供給	非OPEC	65.6	66.7	61.3	61.9	62.2	63.0
	OPEC	34.9	33.6	30.8	29.2	30.1	30.9
	供給計	100.6	100.4	92.1	91.1	92.3	94.0
需給バランス (供給-需要)		0.6	6.2	9.0	-1.8	-2.2	2.8

※国際エネルギー機関 (IEA) の2021年1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

\*まえだ ひろき 出光興産株式会社 機能舗装材事業部 営業企画課

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。

## 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2019』によると、石油製品需要はピークの1999年度に比べ2018年度は32%減となっており、更に2023年度には36%減の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、車の燃費向上や若者の自動車離れといった影響によって起こっており、減少傾向が続いている。

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ある。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、それぞれの内容は次のとおりである。

- 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）

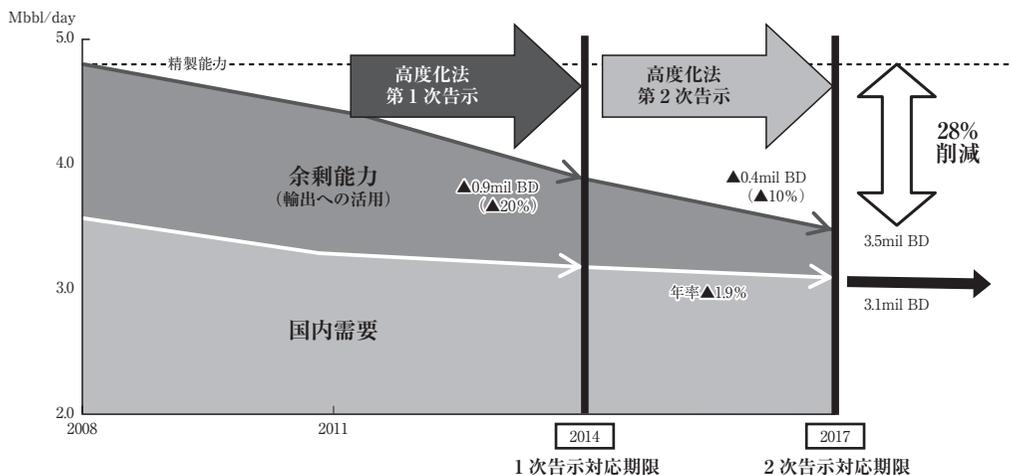
第1次勧告より分解装置の対象を広げ45%（2014年3月末）から50%（2017年3月末）まで引き上げることを義務付け。

- 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、



※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

図-3に示すとおり2020年の製油所稼働率（公称能力に対する稼働率）は過去3年間と比較して圧倒的低水準となった。また製油所稼働率を最も需要の落ち込みの激しいジェット燃料に合わせた事でそれ以外の石油製品は不足する事となった。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2018年度には4,100万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

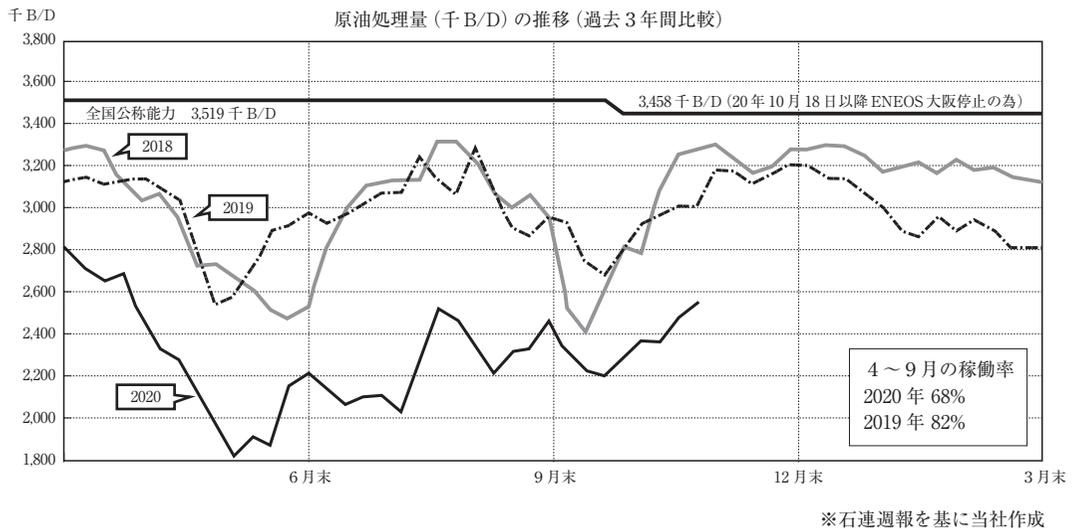


図-3 国内の原油処理量と製油所稼働率

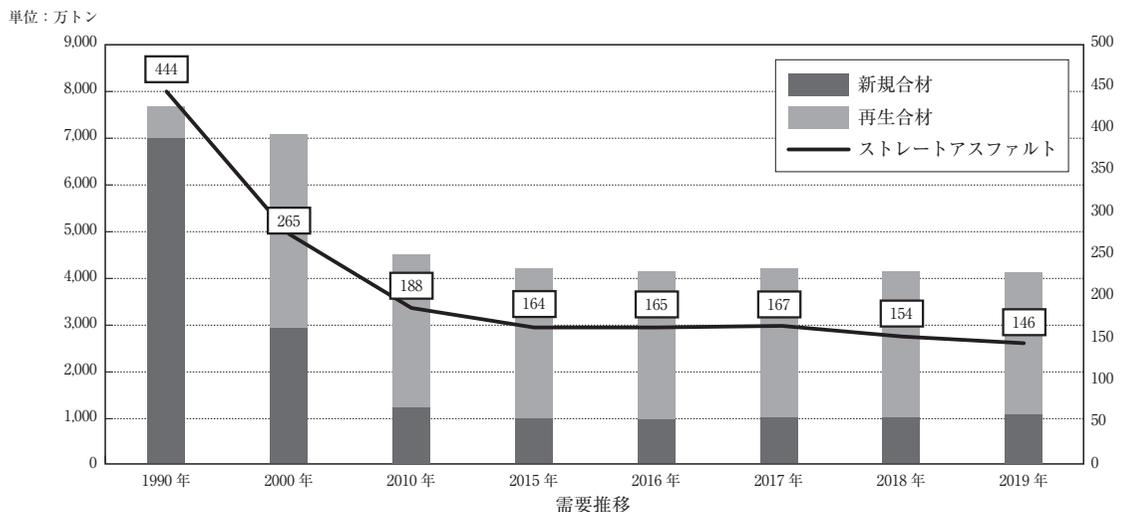


図-4 合材需要とアスファルト需要の推移

は全合材における再生合材の比率は8%程度であったが、2019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。

## 2.2 今後のアスファルト供給環境

日本は国内需要の3割にあたる約45万トンのアスファルトを韓国からの輸入に頼っており、アスファルトの供給環境を考える上では国内生産量と輸入量も考慮しなければならない。

2021年の国内生産量は以下2つの観点から絞られる事となる。1つ目は1章でも述べたとおり、新型コロナウイルスの影響だ。2020年よりは回復すると見られるが、IEA2020年12月報によると2021年度の国内石油需要は2019年度比92%程度とされており、国内製油所の稼働率は2019年度比では下がることからアスファルトの生産量は絞られる事となる。2つ目はスポット的な話ではあるが国内でアスファルトを生産している各製油所における定期修理工事（以下、定修）や生産停止である。日本全国でアスファルトを生産可能な製油所は9か所あるが、そのうち3製油所で定修を予定しており、また1基は生産停止状態が続いている。以上のことから2021年の国内アスファルト生産量は2019年に比べ落ちる事が想定される。

次に輸入量であるが、アスファルトの輸入はその殆どを韓国から輸入しているため韓国のアスファルト生産量の動向を知る必要があり、それにはIMO規制が大きく関与している。

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%に引き下げたものである。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い。IMO対応油はHSC重油に比べ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。

では韓国国内での見通しはというと、アスファルト生産量は減り、輸出可能量が半減する可能性もあると見られている。その理由は韓国において大型の重質油分解装置が導入されたことである。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るものと思われる。以上より、韓国からのアスファルト輸入量は2019年度比で大きく下がる事が見込まれる。

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、2019年度比で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。

# アスファルト舗装の調査結果に基づく 早期劣化メカニズムの推定

(Estimating the Early Deterioration Mechanism of Asphalt Pavement Based on the Survey Results)

若林由弥\*・渡邊一弘\*\*

膨大なストック量の道路舗装を効率よく管理していくためには、供用の目標年数よりも早く劣化が起る「早期劣化区間」をいかに減らしていくかが重要である。しかし、舗装の早期劣化メカニズムについては明らかになっていない部分が多く、道路管理者が早期劣化が発生した際の措置を判断するのは難しい状況にある。そこで、直轄国道において実際に早期劣化したアスファルト舗装を対象に開削調査等の構造調査を実施したところ、アスファルト混合物層内の滞水および層間剥離が確認され、これらが早期劣化の一般的な要因の1つであることがわかった。

## 1. はじめに

高度経済成長期に集中的に整備されてきた道路構造物の老朽化が進む一方、道路構造物を管理する国や地方自治体等では人口減少や少子高齢化に伴う技術者不足や財政難が深刻化している。特に道路舗装は更新周期が短いうえストック量が膨大であり、メンテナンスサイクルを確立し、長寿命化によるライフサイクルコスト削減を目指すことが喫緊の課題である。

こうした中、舗装の更新年数を意識した維持管理を行うことで舗装の長寿命化を図ることを目的に、2016年10月に国土交通省道路局より「舗装点検要領」<sup>1)</sup>が策定された。この要領において、道路管理者は、損傷の進行が早い道路等のアスファルト舗装について、表面の層を供用し続ける期間として使用目標年数を設定し、この期間よりも早期に劣化した区間（以下、「早期劣化区間」という）について、詳細調査を実施し適切な修繕設計を行うことが示された。図-1に使用目標年数を用いた舗装管理のイメージを示す。早期劣化が生じた際、対策を講じずに通常どおりの修繕を行った場合、再度早期劣化が生じるおそれがある。このため、早期劣化が生じた際に詳細調査を実施し、その要因について検討し対策を講じることによって再度の早期劣化を防ぐという考え方である。

図-2に従来の構造設計で想定されてきたアスファルト舗装の疲労破壊の考え方を示す。舗装は複数の層

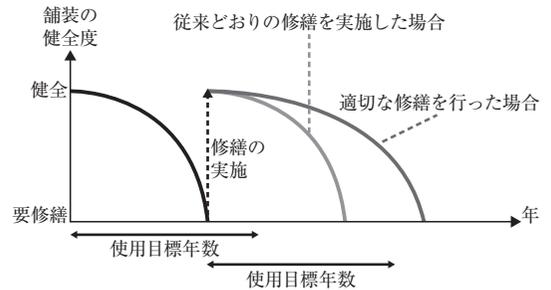


図-1 使用目標年数を用いた舗装管理のイメージ

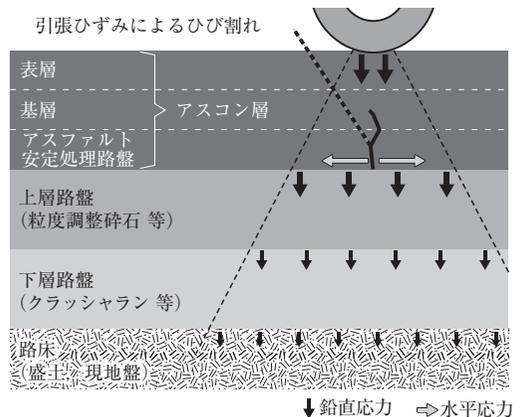


図-2 アスファルト舗装の構造設計における疲労破壊

\*わかばやし ゆうや 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部

\*\*わたなべ かずひろ 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部

が積み重なり、交通荷重を各層で分散し、路床で受け持つ構造となっており、表層や基層、瀝青安定処理路盤等からなるアスファルト混合物（以下、「アスコン」という）層の下面に生じる引張ひずみにより下部から上部にかけて疲労ひび割れが発生する。ここでひび割れや施工継目などを通じて雨水等が浸入すると、アスコン層下部の粒状路盤が脆弱化し、荷重分散効果が弱まるため、アスコン層のひび割れが生じやすくなる。このため、従来より早期劣化の主な要因は粒状路盤の脆弱化であると考えられてきた。

しかし、アスファルト舗装の早期劣化メカニズムについては、実際に早期劣化区間について調査した報告が少なく、明らかにされていない部分が多い。そこで、本研究では実際に早期劣化した直轄国道のアスファルト舗装を対象に開削調査等の構造調査を実施した。表-1に調査の概要を示す。調査は3箇年で合計12箇所を対象に実施した。調査の結果、アスコン層内部の滯水と層間剥離の発生が確認され、これらが早期劣化の一般的な要因の1つであることがわかったため、本稿にて報告する。

表-1 実施した調査の概要

調査年度	調査区間	区間の概要	調査内容
2017	A, B, C	同一路線内における、修繕後の早期劣化区間	開削調査、コア観察
2018	D, E, F, G, H, I	複数の路線内における、修繕後の早期劣化区間	コア観察
2019	J, K, L	同一路線内における、新設後の早期劣化区間	コア観察

表-2 2017年度調査実施区間の概要

項目		区間A	区間B	区間C
調査概要	調査日	2018.1.30(夜間)	2018.1.15(昼間)	2018.2.7(昼間)
	車線	第2車線	第1車線	第1車線
直近の降雨	降雨日	2018.1.29	2018.1.9	2018.2.2
	降雨量	6.0mm	1.0mm	3.5mm
基本諸元	舗装構成(最新修繕時)	アスコン層 { 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 50mm 瀝青安定処理 : 80mm 上層路盤(M40) : 150mm 下層路盤(RC40) : 150mm		
	表層材料	ポーラス	密粒	密粒
	最新修繕年	2007	2008	2003
	最新修繕内容	切削オーバーレイ(2層)		
最新路面調査	調査年	2014		
	経年数	7年	6年	11年
	ひび割れ率	55.40%	33.80%	36.90%
使用目標年数		13年		

## 2. 2017年度調査(区間A~C)

### (1) 調査区間の概要

表-2に2017年度に調査を実施した区間の概要を示す。調査区間は、交通量区分N7の直轄国道1路線内で舗装修繕を予定している工事区間より、最新の路面調査において最近の修繕から13年以内にひび割れ率が30%に達した区間を抽出した。ここで、13年は道路管理者が設定した使用目標年数である。

また、区間Aは調査の前日に6.0mm、区間Bは6日前に1.0mm、区間Cについては5日前に3.5mmの降雨が観測されており、その後調査まで降雨はなかった。

図-3に各区間の路面状況を示す。区間Aでは、外側車輪通過部(以下、「OWP」という)に亀甲状のひび割れが発生した結果、パッチングによる補修が施されていた。区間BではOWPにおいて亀甲状ひび割れの発生が著しく、路面の沈下も発生していた。区間CではOWPにおいて線状ひび割れが発生していたほか、内側車輪通過部(以下、「IWP」という)において亀甲状のひび割れが発生していた。



図-3 2017年度調査区間の路面状況

(2) 調査の概要

上記の区間において、幅3m長さ2mの範囲を0.5m×0.5mに分割し、アスコン層を撤去して開削した。なお、切断時には舗装内の滞水状況を把握するためにドライカッターを使用するとともに、切断したアスコン層は、既設路盤面を乱さないように吊り上げて撤去した。その後、撤去したアスコン層に着色水を浸水させ滞水状況を確認した。さらに開削箇所付近の損傷が大きい箇所から採取したコアを観察し、層間剥離の発生状況を確認した。

(3) 調査結果

a) 開削後の観察結果

表-3に開削調査実施箇所のアスコン層断面と路盤上面の観察結果について示す。

開削調査を実施した箇所においてアスコン層の断面を観察した結果、区間Aおよび区間Bではひび割れがアスコン層を貫通しており、アスコン層内の滞水も確認された。また、区間Aでは上層路盤上面まで水が浸透しており、OWPにおいて路盤の沈下が発生していた。区間Cでは、一部を除きひび割れは下層まで貫通しておらず上層路盤も健全であったが、アスコン層内における滞水が確認された。区間BとCでは調査前5～6日間降雨がなかったため、アスコン層内に滞留した水は少なくとも5日は残留し続けたと考えられる。

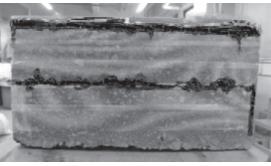
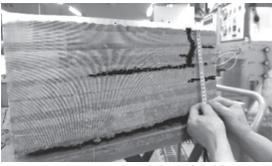
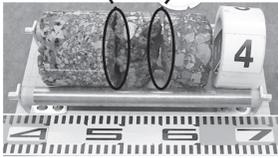
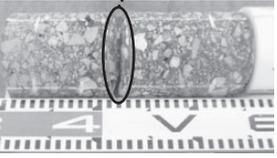
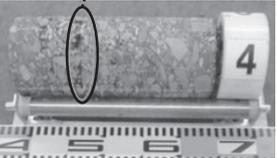
b) アスコン層の室内観察結果

表-4に、現場で撤去したアスコン層に着色水を浸水させた結果および現場で採取したコアの観察結果

表-3 開削後のアスコン層断面および路盤の状況

	区間A	区間B	区間C
開削後のアスコン層断面			
路盤上面の損傷状況			

表-4 着色水による浸水の確認および切取コアの観察結果

	区間A	区間B	区間C																																				
着色水による浸水の確認	吊り上げの際にアスコン層が崩壊してしまったため未確認																																						
切取コアの観察結果	<p>アスコン層の構成 (mm)</p> <table border="1"> <tr> <th>1層目</th> <th>2層目</th> <th>3層目</th> <th>4層目</th> <th>5層目</th> <th>計</th> </tr> <tr> <td>39</td> <td>51</td> <td>12</td> <td>53</td> <td>60</td> <td>215</td> </tr> </table> 	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計	39	51	12	53	60	215	<p>アスコン層の構成 (mm)</p> <table border="1"> <tr> <th>1層目</th> <th>2層目</th> <th>3層目</th> <th>4層目</th> <th>5層目</th> <th>計</th> </tr> <tr> <td>50</td> <td>50</td> <td>15</td> <td>47</td> <td>78</td> <td>240</td> </tr> </table> 	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計	50	50	15	47	78	240	<p>アスコン層の構成 (mm)</p> <table border="1"> <tr> <th>1層目</th> <th>2層目</th> <th>3層目</th> <th>4層目</th> <th>5層目</th> <th>計</th> </tr> <tr> <td>40</td> <td>40</td> <td>15</td> <td>55</td> <td>95</td> <td>245</td> </tr> </table> 	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計	40	40	15	55	95	245
1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計																																		
39	51	12	53	60	215																																		
1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計																																		
50	50	15	47	78	240																																		
1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計																																		
40	40	15	55	95	245																																		

結果を示す。

区間Aのアスコン層については吊り上げの際に崩壊してしまったため、着色水による確認を行うことが出来なかった。区間Bおよび区間Cでのアスコン層に着色水を浸透させた結果、舗装表面下100mmの層間から着色水の染み出しが確認された。舗装表面からひび割れを通じて層間に滞水したと考えられる。

また、コアを確認したところ、全ての区間において設計上4層のアスコン層が5層存在し、3層目に厚さ15mm以下の薄いアスコン層があることが分かった。調査区間では前回修繕時に2層の切削オーバーレイを実施しており、この薄層部は切削した際に残存した既設のアスコン層と考えられる。また、区間Aでは2～3層目および4～5層目で、区間Bでは3～4層目の間で層間剥離が発生していた。比較的健全な区間Cにおいても3層目の上部において連続した空隙が確認された。

続いて、図-4にアスコン層の層間接着強度試験結果を示す。試験は(一社)日本アスファルト乳剤協会規格の試験方法「JEAAT-5 タックコート層を有した円筒状供試体の引張接着試験方法」に基づき実施した。各区間のそれぞれの層について、現場で撤去したアスコン層から採取した3供試体に対し試験を実施した。図中の数値は、既に層間剥離が生じて試験を実施できなかった供試体を除いた層間接着強度の平均を示している。また図中において、層の中間で破壊が生じた供試体については「混合物破壊」、層間で破壊が生じた供試体については「界面破壊」と表現した。なお、破壊の形態は、試験を実施した同区間・同じ層間の供試体で全て同じ結果であった。混合物破壊が生じた供試体については層間の接着強度がアスコン層の引張強度よりも高く、良好な接着強度を有していると考えられる。

区間Aはほとんどの層間で既に剥離が生じており、3～4層目

においても接着強度が低かった。区間Bは3～4層目の層間で既に剥離が生じており、2～3層目の層間の接着強度も低かった。区間Cの多くの層間は概ね良好な接着強度を有していたが、2～3層目の層間接着強度が低下していた。

以上の結果から、3層目の上下、特に2～3層目の間で層間剥離が進行したと考えられる。この位置は着色水の染み出しが確認された箇所と概ね一致しており、切削オーバーレイ時の既設アスコン層の上部に水が長期間滞水し、層間剥離につながったと推察される。

(4) 調査結果に基づく早期劣化メカニズムの考察

前節の調査結果で確認された損傷形態は、アスコン層の下面からひび割れが生じるという従来の設計の考え方とは異なるものであった。図-5に、調査結果から推察される、本調査区間における劣化メカニズムを示す。具体的には、次ページのとおりと考えられる。

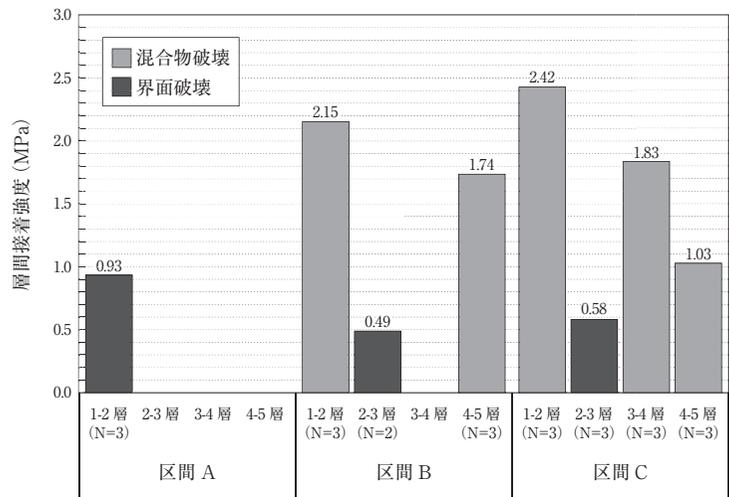


図-4 層間接着強度試験結果

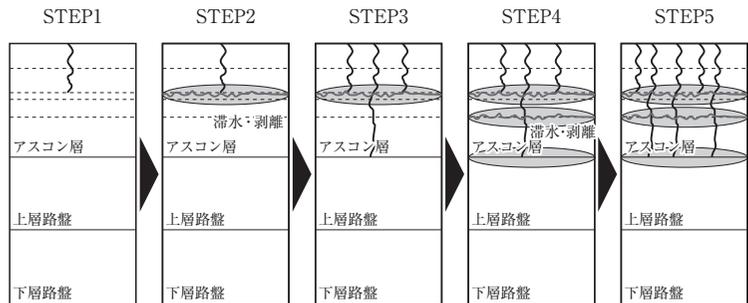


図-5 層間剥離に伴う早期劣化メカニズム

- 施工継目の開きやアスファルトの劣化・老化により路面から入ったひび割れなどを通じてアスコン層内に水が浸入する。(STEP1)
- アスコン層の内部に水が滞留し、層間剥離が発生する。(STEP2)
- 層間剥離によりアスコン層の支持力が低下した結果、アスファルト安定処理層および粒状路盤までひび割れが進行する。(STEP3)
- アスファルト安定処理層や粒状路盤内への浸水・滞水により、これらの層が砂利化などにより劣化する。(STEP4)
- 舗装全体の支持力不足により、アスコン層のひび割れが急速に拡大する。(STEP5)

### 3. 2018年度調査 (区間D～I)

2017年度の調査から推察した劣化メカニズムが一般的なものか検証するため、2018年度は2017年度の路線とそれぞれ異なる6路線における早期劣化区間を抽出し、調査を実施した。

### (1) 調査区間の概要

表-5に2018年度に調査を実施した区間の概要を示す。調査区間は舗装種別、交通量、気候条件、および沿道条件等の条件を考慮し、2017年度調査と同様の考え方で、最近の修繕から路面調査まで13年未満にひび割れ率が30%以上となった区間を複数の路線から抽出し、現地踏査で路面の状況を確認して決定した。なお、区間Dについては、最近の路面調査実施時にはひび割れ率が30%に達していなかったが、現地踏査によりひび割れ率30%を大きく上回っていることが確認されたため、調査区間として追加した。

これらの区間の、ひび割れ発生箇所および比較的健全であるその近傍において、ドライカッターを用いてコアを採取した。ただし、区間Hおよび区間Iは現場条件等によりドライカッターを使用できなかったため、通常のコア採取同様に路面に散水しながら採取した。その後、コアの観察およびコア採取後の採取孔観察により、ひび割れや層間剥離、滞水の発生状況について確認した。

表-5 2018年度調査箇所の概要

項目	区間D	区間E	区間F	区間G	区間H	区間I		
調査概要	調査日	2019.12.24 (夜間)	2018.12.20 (昼間)	2018.12.19 (夜間)	2018.12.20 (昼間)	2018.12.17 (夜間)	2018.12.17 (夜間)	
	コア採取数	早期劣化区間 : 4 早期劣化区間近傍 : 3	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍 : 4	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍 : 3	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍 (ポーラス) : 3 早期劣化区間近傍 (密粒) : 4	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍 : 3	早期劣化区間 (2008修繕) : 3 早期劣化区間 (2009修繕) : 3 早期劣化区間近傍 : 3	
直近の降雨	降雨日	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.12	
	降雨量	5.0mm	7.0mm	6.5mm	13.0mm	4.5mm	12.0mm	
基本諸元	舗装構成 (最新修繕時)	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 70mm 上層路盤 : 110mm 下層路盤 : 250mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 80mm 上層路盤 : 200mm 下層路盤 : 350mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 100mm 上層路盤 : 150mm 下層路盤 : 250mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 瀝青安定処理 : 80mm 上層路盤 : 250mm 下層路盤 : 400mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 80mm 上層路盤 : 200mm 下層路盤 : 350mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 1 : 50mm 基層 2 : 30mm 基層 3 : 50mm 上層路盤 : 100mm 下層路盤 : 250mm	
	表層材料	密粒	ポーラス	ポーラス	ポーラス/密粒	ポーラス	密粒	
	上層路盤材	再生瀝青安定処理	粒度調整砕石	不明	再生切込砕石 粒度調整砕石	粒度調整砕石	粒度調整砕石	
	交通量区分	N7	N6	N6	N6	N6	N7	
	一般・雪寒	一般	一般	一般	雪寒	雪寒	雪寒	
	沿道条件	平地・山地	DID・市街地	平地・山地	平地・山地	平地・山地	平地・山地	
	最新修繕年	2005	2005	2009	2006	2009	2008	
	最新修繕内容	不明	切削オーバーレイ (2層)	切削オーバーレイ (2層)	切削オーバーレイ (1層)	切削オーバーレイ (2層)	切削オーバーレイ (2層)	
	最新調査面	調査年	2014	2014	2014	2013	2014	2014
		経年数	9年	9年	5年	7年	5年	6年
ひび割れ率		11.0%	82.0%	63.1%	39.9%	33.4%	39.2%	
使用目標年数	13年							

(2) 調査結果

表-6に採取したコアの損傷状況を、表-7に層間剥離が発生したコアおよびコア採取後の採取孔の状況を示す。区間D~Gではドライカッターを使用してコアを採取したことによって、コアだけでなく採取孔からも正確な滞水状況を把握することができた。

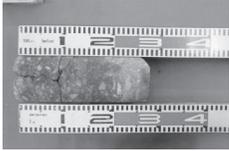
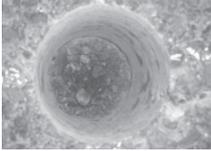
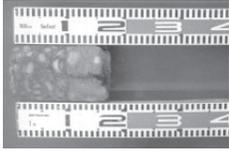
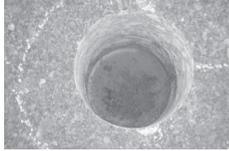
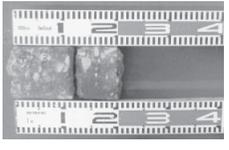
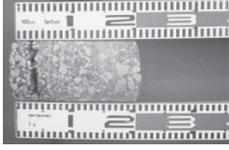
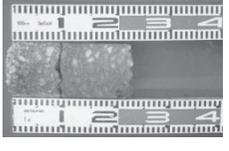
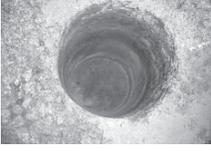
ひび割れ箇所では採取したコアの数は早期劣化区間と

その近傍で合わせて20試料であるが、このうち5試料はアスコン層が崩壊していた。残りの15試料のうち、アスコン全層にわたってひび割れが貫通しているコアは3試料で、路面とアスコン層内にひび割れが生じているコアが9試料、アスコン層内とアスコン下面の間にひび割れが生じているコアが3試料であった。また、いずれの早期劣化区間においてもアスコン層の

表-6 採取したコアの損傷状況 (2018年度)

調査箇所		調査数	ひび割れ					層間剥離	滞水
			全層崩壊	貫通	路面から	路盤から	小計		
区間D	早期劣化区間	4	1		2		3	2	4
	早期劣化区間近傍	3						2	3
区間E	早期劣化区間	3		1	1		2	1	3
	早期劣化区間近傍	4	1				1		1
区間F	早期劣化区間	3			2		2	1	3
	早期劣化区間近傍	3							2
区間G	早期劣化区間	3		1		1	2	1	3
	早期劣化区間近傍 (ポーラス)	3							2
	早期劣化区間近傍 (密粒)	4	1	1			2		3
区間H	早期劣化区間	3	2				2	2	-
	早期劣化区間近傍	3						1	-
区間I	早期劣化区間 (H20 修繕)	3			2		2		-
	早期劣化区間 (H21 修繕)	3			2	1	3	1	-
	早期劣化区間近傍	3				1	1	1	-
計	早期劣化区間	22	3	2	9	2	16	8	13
	早期劣化区間近傍	23	2	1	0	1	4	4	11

表-7 コアおよびコア採取孔の状況 (2018年度)

区間	採取したコアの状況	コア採取の状況	区間	採取したコアの状況	コア採取の状況
D			G		
E			H		—
F			I		—

内部で層間剥離が発生しているコアが存在した。

一方、ひび割れがほとんど発生していない早期劣化区間の近傍においても、多くの箇所において滞水や層間剥離の発生が確認された。これより、早期劣化区間でひび割れを通じて浸透した水が横方向に進行し、滞水および層間剥離が発生したと考えられる。

層間剥離が確認されたコアの採取孔では、滞水状況を確認出来なかった区間Hおよび区間Iを除く全ての区間でアスコン層内の滞水が確認された。また、区間Eおよび区間Gでは路盤上面における滞水も確認された。

上記の調査結果より、2018年に調査を実施した区間についても2017年度調査の結果から推察した劣化メカニズムと同様に劣化が進行したと考えられる。

#### 4. 2019年度調査 (区間J～L)

2017年度および2018年度の調査では、長期供用された路線の、修繕後に早期劣化が生じた区間を対象に調査を行った。2019年度は、新設後に早期劣化が生じた区間を対象に調査を行った。

##### (1) 調査区間の概要

調査区間は、供用後6年が経過した積雪寒冷地の自動車専用道路における3区間である。表-8にそれぞれの区間の路面に生じたひび割れの状況を示す。これらの区間は同一IC間であり、交通量や気象条件などの各種条件はほぼ同一であるにも関わらず、路面性状、特にひび割れの発生について明確な差が生じており、特に区間Jでは部分的ではあるが路面に比較的多くのひび割れが発生していた。

上記の3区間についてドライカッターによるコア採取を実施し、採取したコアとコアを採取した後の採取孔の観察を行った。なお、調査は夜間に実施し、調査日の前日には降水量0.5mm以下の降雨があったものの、調査時点では路面は乾燥していた。

##### (2) 調査結果

表-9に調査区間において採取したコアおよびコアを採取した後の採取孔の状況を示す。ひび割れが最も多く発生していた区間Jから採取したコアでは、アスコン層内に連続した空隙が

生じていた。また、コア採取孔の側面から水の染み出しが確認された。その後も継続して採取孔を観察した結果、図-6(次ページ)のように時間の経過に伴い水が染み出した箇所の面積が増大していることが確認された。このことより、区間Jの層間部分に滞水が生じていること、さらにその滞水量は少なくなく、降雨後も長期に渡りアスコン層内に残存していたことがわかった。ひび割れが次に多く確認された区間Lにおいても、アスコン層内に連続した空隙が発生しており、滞水も生じていたことが確認された。一方、ひび割れ

表-8 2019年調査区間における路面の損傷状況

区間	路面の状況 (白線がひび割れ)
J	
K	
L	

表-9 コアおよびコア採取孔の状況 (2019年度)

区間	採取したコアの状況	コア採取の状況
J		
K		
L		



図-6 コア採取孔における水の染み出し(区間J)(左:コア採取直後,右:コア採取30分後)

がほとんど生じていなかった区間Kでは、アスコン層内に連続した空隙や滞水は確認されなかった。

以上の結果より、新設後に早期劣化が生じた区間においても、アスファルト混合物層内の滞水が劣化を促進させたものと考えられ、2017年調査の結果から推察された劣化メカニズムの初期段階にあるものと考えられる。特にアスコン層内に連続した空隙が確認された区間Jや区間Lでは、今後層間剥離に進展し、その後路面のひび割れが加速的に進行していく可能性が高いと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、アスファルト舗装の早期劣化メカニズムを確認するため、実際に早期劣化が生じた複数の区間を対象に、開削調査やコア観察等の調査を実施した。2017年度の調査では、劣化の進行度合いが異なる同一路線内の3つの早期劣化区間を対象に開削調査等を実施し、アスコン層内の滞水や層間剥離が生じていることを確認し、それらに起因する劣化のメカニズムを推察した。続いて2018年度の調査では、複数の路線の早期劣化区間やその近傍で採取したコアの観察により、ひび割れが生じていないコアにも滞水や層間剥離が確認されたことから、ひび割れを通じて浸透した水が横方向に進行し、滞水および層間剥離につながったことを確認した。さらに、2019年度の調査では新設後に早期劣化が生じた区間を対象にコア観察を行い、劣化メカニズムの初期段階

にあることを確認した。

本研究で調査を実施したいくつかの工区でも確認されたとおり、アスコン層の劣化が進行すると最終的には粒状路盤への浸水により粒状路盤が劣化し、路盤以下の支持力が低下してしまい、一層早期劣化が生じやすい状態となってしまうことが危惧される。そのため、早期劣化が発生した際はアスコン層内の滞水や層間剥離の発生状況を確認し、修繕時には、それらが発生している箇所より深く切削して切削オーバーレイを実施するなど、発生箇所を残さないようにすることが重要である。そのための確認手段として、今回実施したようなドライカッターを使用したコア採取が有効であると考えられる。

一方、こうした劣化が発生しないようにするためには、アスコン層内に水が浸入しないよう、ひび割れが発生した早期の段階でひび割れ注入などの維持工法を実施することも重要である。また、水が浸入した状況でも層間に空隙が生じないように、施工時の層間の接着性を向上させるため材料の開発や接着性の評価手法の確立も必要である。

今後も早期劣化事例の調査を実施し、その発生メカニズムや適切な調査方法、対策工法の確立に向けて検討を進めていく予定である。

## — 参考文献 —

- 1) 国土交通省道路局：舗装点検要領，2016。

# アスファルト乳剤を用いた表面処理工法による 表層機能保持

(Maintenance of Pavement Surface Functions by Surface Treatment using Asphalt Emulsion)

佐々木 巖\*・新田 弘之\*\*  
(一社)日本アスファルト乳剤協会技術委員会

舗装点検要領にもとづく路盤以下の構造健全性を重要視した予防保全型の維持管理において、表層機能保持段階の措置が求められている。表層の維持修繕として、 Fogシール、チップシール、薄層表面処理等の、表層破損の予防保全が可能となる工法の活用が期待されるが、延命効果や適用条件が明確になっていない。その課題解決のために実施している共同研究の調査から、損傷状態や交通条件が異なる箇所での試験施工における供用数年後までの結果をもとにした延命効果等の適用性評価結果を報告する。

## 1. はじめに

舗装点検要領<sup>1)</sup>が平成28年に策定され、路盤以下の構造健全性を重要視した維持管理が進められ、点検体系の構築と、表層機能保持段階の措置が求められ、指針類<sup>2)</sup>も策定されている。路盤が損傷するとその対策は費用と期間とも増大し、社会的影響はさらに大きくなる。たとえば舗装路面に生じたひび割れ等の損傷を放置すると、雨水が浸透して路盤の支持力が低下し、舗装構造全体の損傷につながる。

舗装表層に損傷が発生した場合の措置としては、クラックシールやパッチングが行われている。舗装全体の健全性を損なう前に表層の保護機能のある程度回復させようとする、予防的な保全措置である。しかし、これらの方法は表層の破損についていえば事後的な措置に過ぎず、ひび割れ範囲の拡大や新たに生じるひび割れ等の変状を防止できるものではない。また、ひび割れ発生後速やかに措置できるとは限らず、シール等の措置実施までの間に下層損傷は進行してゆく。

舗装の表面処理工法は、舗装表面を薄層で保護することにより路面を平滑化し、騒音や振動の低減、快適性向上や景観上の更新効果が得られる。さらに、表層および下層の破損に対する保全効果も期待する工法で、舗装点検必携等<sup>3,4)</sup>にも示されている措置のひとつである。し

かしながら、どのような交通や環境条件、損傷段階で適用すれば延命につながるのかは明らかになっていない。

本報では、これらの工法の適用方法の確立を目的に土木研究所と日本アスファルト乳剤協会で行っている共同研究の概要紹介として、試験施工による効果検証<sup>5)</sup>の経過と一部結果を報告する。

## 2. 表面機能保持のための舗装の予防的修繕

### 2.1 アスファルト舗装の損傷

アスファルトは結合材としては安価な材料で、快適な舗装路面を迅速に作る事ができる特徴を持つ一方、日照や雨水等の気象作用により劣化が進行する。材料劣化に伴い舗装表面でひび割れや骨材飛散等が一旦発生すると、水分が下層に浸透して進行拡大し構造的な破損につながる。

路盤以下の構造的破壊に到る前に表層の機能を維持するのが予防保全型の維持管理の基本的な考え方である。とくに、舗装厚が薄い生活道路をはじめとした軽交通道路では、交通荷重による疲労等よりも気象作用による劣化が主因となることが多く、表層の維持がより重要になる。したがって、舗装表面のアスファルトの劣化予防や遮水性の向上による予防保全対策の有効性が高いと考えられる。

\* ささき いわお 国立研究開発法人土木研究所 iMaRRC

\*\* につた ひろゆき 国立研究開発法人土木研究所 iMaRRC

## 2.2 表層機能の低下と対策

舗装の表層機能は、安全かつ快適な路面となる適度に平滑な表面を提供することが第一義である。これに加えて、平坦な路面を実現するための荷重分散機能とともに、路盤をはじめとした下層の保護がある。前述のとおり下層損傷の主要因は浸透水であることがわかっており、表層全面にわたる遮水性が重要となる。

表層の遮水性を確保するためには、締固め度が高く空隙が少ない施工を行うとともに、施工目地等の不連続部の適切な処置、ひび割れ等の供用中の破損の抑制が必要である。舗装の設計では表層のひび割れがなるべく生じないように配慮するものの、曲げ疲労ひび割れ（主にボトムアップひび割れ）、または材料劣化による柔軟性低下で生じる表面ひび割れ（主にトップダウンひび割れ）や骨材飛散などが供用に伴い進行する。いずれも、表層を貫通するひび割れに到れば水分が浸透し舗装構造が加速度的に損傷してゆくことになる。

ひび割れ等の路面損傷の保全対策としては、ひび割れ幅が大きくなった場合にはクラックシールなどが、また、微細なひび割れや予防的な措置としては表面処理工法がある。

## 2.3 表面処理工法

舗装の表面処理工法は、平滑で快適な路面を道路利用者に提供するとともに、遮水等により下層を含めた舗装全体の延命をはかることを目的とする工法である。既存の路面にひび割れ発生抑制や封止のための保護層を兼ねた新たな被膜を形成することにより、路面の更新をはかる。使用材料や骨材等により、フォグシール、チップシール、薄層表面処理などの様々な工法がある。

### (1) フォグシール

アスファルト乳剤を薄く散布する最も簡便で安価な表面処理工法で、ひび割れや表面の空隙を充填し、路面を若返らせることを期待する。

### (2) チップシール

アスファルト乳剤で骨材を単層あるいは複層に仕上げる表面処理工法であり、予防的保全措置として1 cm弱の厚さをもった保護層を散布により形成することが多い。

### (3) 薄層表面処理

アスファルト乳剤等を用いたスラリー状の混合物を薄層で敷きならすもので、面荒れした既設舗装のきめ深さの改善と、ひび割れの

発生抑制をはかるものである。重交通路線向けのマイクロサーフェシング工法の材料や施工法を改良したものとして平成10年代に開発され、生活道路から重交通路線まで広く適用できる。

## 3. 試験施工による評価

本研究ではアスファルト舗装への表面処理工法に着目し、室内試験および試験舗装によりその効果の検証と適用条件の評価を行っている。

### 3.1 試験施工箇所と既設舗装の状態

適用可能な交通条件の把握とともに、延命効果の検証を比較的短期間に行うために、軽交通から重交通路線までを対象に試験施工で評価を行った。既設舗装の損傷に関する適用範囲の調査として、ひび割れ状態や下層の健全性が異なる路線を含むように、つくば市内の道路舗装から試験箇所の選定を行った。試験箇所の概要を表-1に示す。表面処理工法は構造的な保全措置にはならないため与条件として下層状態の把握は重要であり、その目安となるひび割れの進行方向を推定した。ひび割れの進行方向は採取コアの観察から、下層の損傷状態はFWD試験のD<sub>0</sub>たわみ量とその評価指標<sup>4)</sup>ならびに箇所ごとの補修履歴等から判断した。

### 3.2 表面処理工法と材料

試験施工に用いた表面処理工法とその使用材料を表-2（次ページ）に示す。各工法の延長を10mとし、薄層表面処理工法では試験箇所①と②にて、クラックシールとの併用工区も設定した。

### 3.3 現道での試験施工と追跡調査

試験施工箇所における施工状況の例を写真-1（次ページ）に示すように、施工性に問題はなく良好な仕上がりが得られた。施工前と施工5日後以降に路面性状調査を行い、さらに供用期間に応じて追跡調査を継

表-1 表面処理工法の試験施工箇所

No.	交通量	下層状態* D <sub>0</sub> たわみ(μ)	表層供用期間 (施工時)	ひび割れ率*	テクスチャ きめ深さ
①	重	損傷-大 505	< 5年	2.2% (路盤から進行)	0.46mm
②	重	損傷-中 491		7.5 (路盤から進行)	粗い、0.88mm
③	重	損傷-中 395	15年<	14.2	0.54mm
④	中	損傷-小 421	15年<	2.8 (表面から進行)	粗い、0.72mm
⑤	軽	健全 210	10-15年	0.1	0.58mm
⑥	軽	健全 542	< 5年	0.2	細かい、0.35mm

\*下層状態とひび割れ方向は、たわみ量およびコア観察からの推定

表-2 試験施工に用いた表面処理工法

工法名	主な結合材料	骨材	塗布量 kg/m <sup>2</sup>
フォグシールA	改質アスファルト乳剤 (汎用グレードPKM-T)	-	0.6~1.0
フォグシールB	ポリマー改質アスファルト乳剤	-	0.4~0.8
チップシールA	改質アスファルト乳剤	碎石7号	7.4
チップシールB	改質アスファルト乳剤	単粒碎石 5-8mm	10.3~10.8
薄層表面処理A	改質アスファルト乳剤	細骨材	1.8~2.3
薄層表面処理B	弾力性改質アスファルト乳剤	珪砂	0.6~0.9
薄層表面処理C	アスファルト乳剤およびセメント	細骨材	1.9~2.6



写真-1 薄層表面処理の施工状況 (薄層表面処理A)

続して行っている。

調査項目は、基本的な路面性状としてのひび割れ率と形状、わだちと平坦性の評価としての縦横断の路面プロファイルのほか、舗装の構造劣化ならびに路面の機能性を評価している。構造評価については、下層の支持力変化をFWDによるたわみ量から調べているほか、その要因となる下層への水の浸透状況について、調査方法の提案を含めて検討している。路面性能としては、すべり摩擦と表面きめ深さについて、機器による精密な測定とともに、簡易な方法の適用性について比較検討した。

### 3.4 舗装損傷と路面機能の調査結果

#### 3.4.1 表層のひび割れ

表面処理工法の効果は、表層アスファルトの材料劣化防止と遮水性の付与であるが、紫外線遮蔽による材料劣化については室内試験や長期供用後の評価を待つ必要がある。ここでは、水の浸入抑制効果に直結するひび割れ封止と再劣化の調査結果を示す。

##### (1) ひび割れ状況の変化

表面処理工の施工前から供用数年までのひび割れ状況の変化例を図-1に示す。まず、交通量が多い試験箇所②での試験施工前のひび割れ状況は、

測点30-40mのOWPである程度ひび割れが進行し、それ以外ではひび割れが発生しはじめている段階であった。薄層表面処理の施工区間では、0.5年経過後まではひび割れは完全に封止され、その後の再発も限定的であることがわかる。一方、無処理の現状区間では、ひび割れ密度が増えているとともに、ひび割れ範囲が拡大し連続していることがわかる。舗装構造、気象環境、交通条件、損傷段階が同じである区間に対して、表面処理工によりひび割れの進展(範囲の拡大)を抑制できていることを示す事例である。

交通量が中程度で下層支持状態が良好である試験箇所④では、初期ひび割れが散在していた無処理区間ではひび割れの進行拡大がみられているのに対して、フォグシールでは2.2年後に初期ひび割れの発生がみられ、チップシールでは現状路面にひび割れがあった部位を含めてひび割れは全く生じていない。図には示していないが、薄層表面処理工区ではいずれも有意なひび割れは見られていない。交通条件や損傷段階によっては、これらの簡易な措置により損傷進行を少なくとも数年程度は抑制できることが示唆される。

既設路面のひび割れが進行した段階の重交通路線で表面処理を行った試験箇所③では、供用に応じて既存のひび割れがその密度と範囲とも拡大し、新たな初期ひび割れも一部生じている。フォグシールは、施工直後に既存ひび割れに沿ってひび割れが再発しているが、ひび割れ密度と範囲の拡大が無処理と同様であるかについては今後の追跡調査が必要である。一方、薄層表面処理は連続したひび割れのある区間に施工しているが、2.2年後までのひび割れの再発はその一部にとどまっている。



(下層状態とひび割れ方向は、たわみ量およびコア観察からの推定)

図-1 試験施工区間におけるひび割れ状況の変化例

## (2) ひび割れ率の推移

これらの変化をひび割れ率として図示したのが図-2である。薄層表面処理の施工により路面は一新されるが、供用年数とともに全体としてひび割れが進行してゆくことがわかる。交通量が多くひび割れが進行している条件での適用である図-2(a)では、前述のひび割れ図からもわかるように Fog シールではその損傷を修復することは困難で、薄層表面処理でもその効果は数年程度であるとみられる。下層が損傷している場合でも遮水性の向上による延命の期待ができるものの、ひび割れの進行状況と表面処理層のひび割れ追従性など検討すべき項目が多いと考えられる。

一方、交通量が少ない箇所の結果である図-2(b)ではこれとはやや異なり、Fog シールでは短期間であるが、チップシールでは2.2年後もひび割れの再発は生じていない。施工前のひび割れ率が異なるため単純比較はできないものの、薄層表面処理でもひび割れ率は低く維持できて

いる。下層の状態が比較的健全で交通量が多くなければ適用性が高いことが示唆される。

図-2(c), (d)は、重交通区間でクラックシールと薄層表面処理を併用した場合の結果であるが、ひび割れが一年以内に再発するか否かが両箇所で大きく異なる。試験箇所①では、0.5年後には施工前のひび割れ率に戻り、さらに施工前よりも損傷が進行しつつある傾向がうかがえる。この箇所は下層損傷が大きい状態で表層のみを切削OLした区間であり、舗装表面の封止のみでは延命効果が得られなかったものとみられる。一方、試験箇所②では、比較工区のひび割れ率が増加傾向にあるが、薄層表面処理すると一定期間ひび割れの再発を抑制でき、2.2年後でも施工前よりはひび割れ率の小さな状態を維持できている。表面処理の効果は舗装の構造的健全性に大きく影響を受けることが確認できる。

施工前と供用後のひび割れ率に着目すると、無処理の比較工区や Fog シールでわかるように、

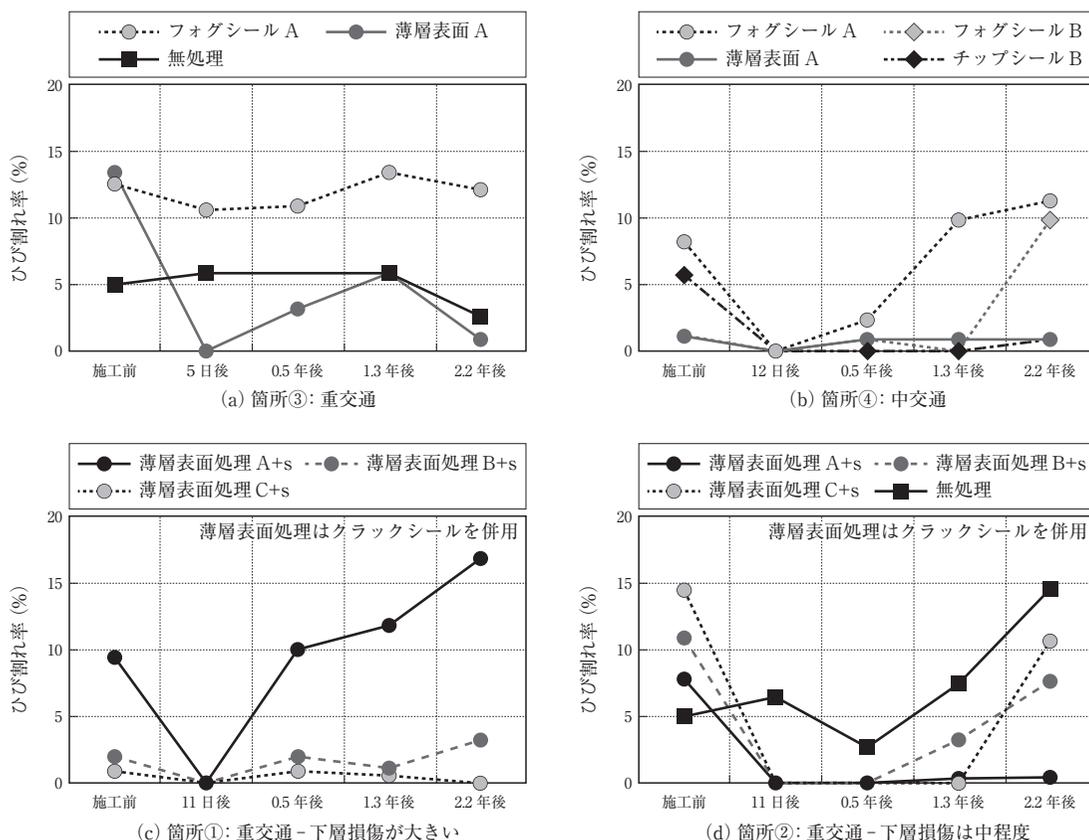


図-2 表面処理工法施工前後のひび割れ率の推移

供用期間を経るとひび割れ率は上昇している。その中で、表面処理工法によりひび割れを一定期間抑制できることは舗装の延命に有効であることが示唆される。ただし、損傷進行の抑制がどの程度であればライフサイクルを通じた適用効果が得られるのか、費用便益等を検討し判断することが求められる。なお、表面処理されている場合には、路面上にひび割れが見られていても塗布材料がひび割れ内部に浸透し遮水効果を有している可能性もあることから、実際の遮水性を面的に評価することも有意義である。

### 3.4.2 遮水性評価の試行

ひび割れや締固め不良箇所等があると、それが微細なものであっても雨水が下層に浸透し舗装全体の破損につながる。表面処理の遮水性の評価として、ひび割れ部からの水の浸透状況の評価を試みた。図-3の例に示す測点で透水試験を行って水分浸透の有無を調べた。図中の薄層表面処理Aでは、供用2.5年後に塗膜の消耗やひび割れの再発があっても、水が浸透しなかった。その一方、隣接した無処理の比較工区では、ひび割れ箇所から数ℓ/hr以上の水の浸透が観察された。今後、定量的な調査方法を定め、調査結果を重ねて遮水による延命効果を把握する必要がある。

### 3.4.3 路面機能と表面処理工法による改善効果

舗装表面の粗さ（テクスチャ）が変化すると、走行車両による振動や騒音、すべり抵抗等が変化する。損傷が進みつつある既設舗装の耐久性向上

とともに、路面粗さをはじめとした表面機能の回復は、表面処理工法の主目的のひとつである。

レーザセンサ（CTメータ）による路面粗さの調査結果を図-4に示す。図-4(a)からわかるように、表面処理の施工により路面のきめ深さは平滑化し、適度なテクスチャとなっている。既存路面が荒れきめが深くなっていた場合には、工法の特徴から薄層表面処理の改善効果ははっきりとわかり、既存路面に $\sigma 1\text{mm}$ 程度の荒れがあっても0.5mm程度の平滑面に整生できることがわかる。

図-4(b)に示す無処理の比較工区の供用前後の変化では、きめ深さ0.5mm以下の現状路面を継続使用した箇所の全てで面荒れが進行していることがわかる。一方、表面処理すると、施工直後の路面状態を供用後

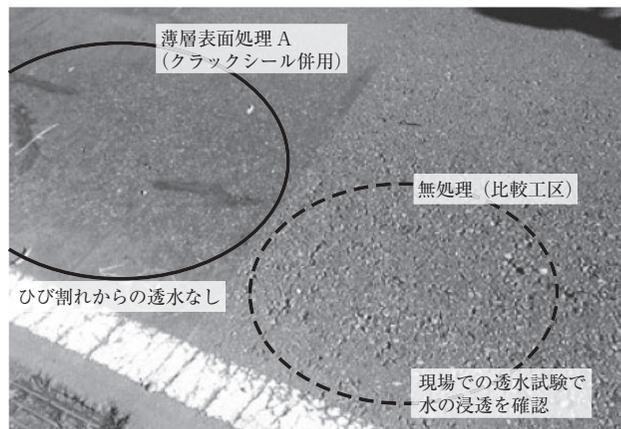
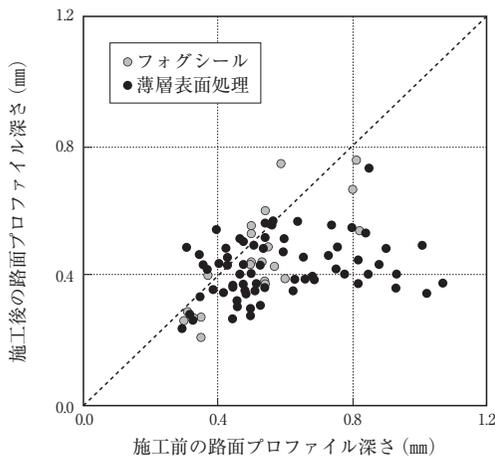
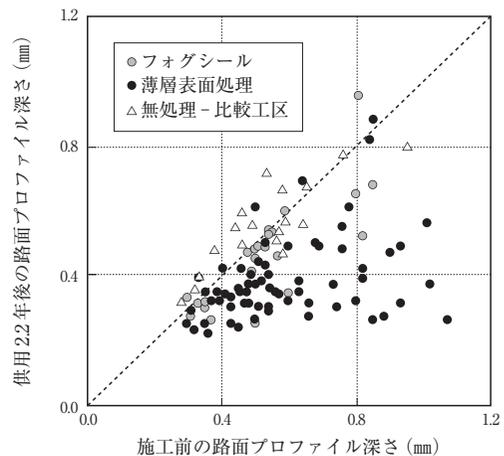


図-3 ひび割れ部から下層への浸透水調査測点の例



(a) 施工直後/施工前



(b) 供用2.2年後/施工前

図-4 舗装表面処理工による路面粗さの変化

もおおむね維持している。これは、塗布した処理材が既存路面の谷部に残り機能を発揮しているためと考えられ、路面の状態が異なることは図-3からもわかる。ひび割れ部や谷部の処理材は容易に劣化や脱落するものではなく、ひび割れが進展した場合には交通荷重等により再充填される可能性も期待されるため、前述の遮水性を含めて改善効果を検証する予定である。

#### 4. まとめ

舗装の劣化損傷に対する最適な措置技術の確立として、土木研究所と日本アスファルト乳剤協会では表層機能保持のための共同研究を行っている。予防保全が可能となる表面処理工法に着目した試験施工調査の結果をまとめると次のとおりとなる。

- ひび割れ率が数%以内または交通量が多くなければ、下層の損傷程度に応じてひび割れの再発や進展の抑制等による延命効果が期待できる
  - 下層の損傷が大きい場合は表面処理工法による延命効果が限定的であり、適用にあたり構造健全性の評価が必要である
  - 表面処理による平滑な路面は数年後も維持され、さらに遮水効果も保持している可能性が高い
- 表面処理工法の種類によって保護膜自体の耐久性や舗装表層の延命効果には差がみられた。フォグシールと薄層表面処理では施工単価や補修サイクルも異なっ

てくる。ひび割れ抑制をはじめとした損傷防止による舗装の延命効果を定量的に把握し、ライフサイクルを分析して大規模修繕にいたる前の表面機能の維持管理方法として集約整理する必要がある。また、遮水性やアスファルト劣化防止の効果について、試験評価法と判定指標をあわせて策定することにより、これら工法の適用の目安を示すため、引き続き試験調査を続ける予定である。

#### 謝 辞

試験施工による検証は、茨城県土浦土木事務所ならびにつくば市役所道路維持課をはじめ多くの方々にご便宜ご協力を頂いていることに感謝いたします。

#### — 参考文献 —

- 1) 国土交通省道路局：舗装点検要領，平成28年10月
- 2) (公社)日本道路協会：舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針，平成30年9月
- 3) (公社)日本道路協会：舗装点検必携，平成29年4月
- 4) (公社)日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック2013，平成25年11月
- 5) (一社)日本アスファルト乳剤協会：最近のアスファルト乳剤の技術的動向，アスファルト，pp.16-20，平成30年12月

# ポリマー改質アスファルトの劣化指標と性能規格化に関する共同研究について

## 高耐久型ポリマー改質アスファルトの性能規格値案と設定根拠の紹介

(Joint Research on Deterioration Index and Performance Standardization of Polymer Modified Asphalt)

飯高裕之\*・青木康素\*\*・菅野勝一\*\*\*

ポーラスアスファルト混合物の劣化を考慮した高耐久型ポリマー改質アスファルトH型およびそれを用いた混合物の性能規格案を設定することを主目的として、阪神高速道路株式会社、株式会社高速道路総合技術研究所および一般社団法人日本改質アスファルト協会の三社で共同研究を行った。

本稿では、この共同研究の成果として得られた高耐久型ポリマー改質アスファルトH型のバインダ性能規格値(案)について設定根拠を合わせて紹介する。

### 1. はじめに

本共同研究は、平成28年2月から令和元年7月の期間で阪神高速道路株式会社/株式会社高速道路総合技術研究所/一般社団法人日本改質アスファルト協会により、ポーラスアスファルト混合物の劣化を考慮した高耐久型ポリマー改質アスファルトH型およびそれを用いた混合物の性能規格案を設定することを目的に実施された。

本共同研究では、高耐久型ポリマー改質アスファルトに関して、バインダおよび混合物の性能規格値案の提案や回転式舗装試験による耐久性の検証およびライフサイクルコストを考慮した目標耐用年数の設定など多岐にわたる検討がなされた<sup>1)</sup>。

本報では、共同研究の成果として得られた高耐久型ポリマー改質H型のバインダ性能規格案および設定根拠に焦点を絞って紹介する。

### 2. 背景

ポーラスアスファルト舗装に用いるポーラスアスファルト混合物(以下、ポーラス混合物)は、高い耐流動性や剥離抵抗性を有しているが、長期供用中にポットホールや剥離、わだち掘れ、ひび割れ、ずれ等の損

傷が顕在化し、補修が必要となっている現状がある。

これらの損傷を低減するため、一般的にポーラス混合物のバインダとして使用するポリマー改質アスファルトH型(以下、改質H型)の耐久性を高めた高耐久型ポリマー改質アスファルトH型(以下、高耐久H型)が開発され、阪神高速道路では、設計基準<sup>2)</sup>に長期耐久性が望まれる場合に高耐久H型を使用することが選択肢として記述されている。しかし、その品質規格は、関連図書にも一切定められていないのが現状である。

また、改質H型と高耐久H型の耐久性の比較を目的に実施された試験施工において、現場切取り供試体の疲労試験を室内で実施したところ、疲労破壊回数は高耐久H型の方が大きいものの、未劣化混合物の疲労破壊回数と8年供用後の疲労破壊回数の低下度合いは、改質H型と比較し高耐久H型が約30倍大きい結果となった<sup>3)</sup>。この結果から、長期間供用した場合、両者の疲労抵抗性が経年劣化により逆転することが懸念された。

これらを踏まえ、バインダの劣化を考慮した高耐久H型およびそれを用いた混合物の性能規格案を設定することを目的に、日本改質アスファルト協会(以下、協会)会員で改質H型および高耐久H型を対象に、バインダおよび混合物の共通試験を実施した。

\*いいたか ひろゆき 一般社団法人日本改質アスファルト協会 技術委員

\*\*あおき やすもと 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室

\*\*\*かんの しょういち 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 舗装研究室

### 3. 性能規格の決定における留意点

高耐久H型のバインダ性能規格を決定するにあたって、留意した点を以下に示す。

- ①ポーラス混合物に求められる性能と高い相関がある指標である。
- ②規格値により、改質H型を用いたポーラス混合物と明確な差別化ができる。
- ③バインダが供用により劣化した場合においても、ポーラス混合物の耐久性を担保できる。

### 4. 評価材料

#### 4.1 バインダの概要

バインダは、協会各社の改質H型（A～F）および高耐久H型（G～L）を評価対象とした。表-1に評価したバインダの代表性状を示す。

各社の改質H型と高耐久H型の性状を比較すると、全体的に高耐久H型は粘度が高い傾向にある。これは、高耐久H型は改質H型に比べて骨材把握力や剥離抵抗性を高めるため、SBSなどの高分子材料が多く配合されているためである。

#### 4.2 混合物の概要

ポーラスアスファルト混合物（13）<sup>4)</sup>を評価混合物とし、骨材には株式会社高速道路総合技術研究所から提供された6号砕石、砕砂、石粉を用いた。

表-2に混合物の概要を示す。

### 5. 評価項目

本共同研究では、多岐にわたるバインダおよび混合物性状の評価を実施したが、本報ではバインダの性能規格値案の設定に関連した

評価項目のみを抜粋して以下に示す。

#### 5.1 バインダの評価試験方法と評価指標

バインダに関しては、針入度、軟化点および伸度に加え、アスファルト混合物性状と相関が高いと考えられる以下のバインダ性状試験についても評価指標とした。

表-2 評価した混合物の概要

項目		決定配合		粒度範囲および基準値 <sup>4)</sup>
室内決定配合	6号砕石		80.7	
	砕砂		9.5	
	石粉		4.8	
	改質H型		5.0	
合成粒度	19mm	%	100	100
	13.2	%	96.8	92～100
	9.5	%	77.6	62～81
	4.75	%	24.4	10～31
	2.36	%	14.7	10～21
	1.18	%	11.0	-
	0.6	%	8.8	4～17
	0.3	%	7.3	3～12
	0.15	%	5.6	3～8
0.075	%	4.5	2～7	
マーシャル特性	理論密度	g/cm <sup>3</sup>	2.485	-
	基準密度	g/cm <sup>3</sup>	1.995	-
	アスファルト容積率	%	9.6	-
	空隙率	%	19.7	20程度
	骨材間隙率	%	29.3	-
	飽和度	%	32.8	-
	安定度	kN	5.25	4.9以上
	フロー値	1/100cm	35.3	20～40
	残留安定度	%	90.1	75以上
動的安定度	回/mm	6,300	3,000以上	
透水係数	cm/sec	3.55 × 10 <sup>-1</sup>	1.0 × 10 <sup>-1</sup> 以上	
カンタプロ損失率（20℃）	%	7.1	20以下	

表-1 バインダの種類とその代表性状

項目			ポリマー改質アスファルトH型						高耐久ポリマー改質アスファルトH型				
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L
針入度	1/10mm	25℃	60	61	52	55	51	49	52	57	51	58	42
軟化点	℃	-	103.0	101.0	97.0	89.5	98.0	99.0	101.5	91.0	92.0	97.5	93.0
粘度	mPa・s	120℃	18200	13325	15150	6290	9000	6200	15750	10800	12800	11860	18300
		150℃	3325	3063	1457	1280	1565	1800	3900	2720	1805	2050	3250
		180℃	625	970	433	420	550	400	1200	920	583	658	1050
伸度	cm	7℃	43	81	35	71	60	43	55	79	63	61	60
		15℃	91	102	99	98	111	100	93	83	79	79	86

### (1) ポリマー改質アスファルトの曲げ試験

(以下、バインダ曲げ試験)

ポーラス混合物の骨材飛散抵抗性の指標であるカンタプロ損失率と高い相関のある曲げ仕事量および曲げスティフネス<sup>5)</sup>に加え、同じ試験より得られる最大曲げ応力および最大曲げひずみを評価指標とした。

### (2) エラスティックリカバリー試験

バインダの劣化度合いを評価できるとされている弾性回復率を評価指標とした<sup>6)</sup>。

### (3) ダイナミックシアレオメータ試験 (DSR 試験)

アスファルト混合物の疲労ひび割れ抵抗性と高い相関がある動的粘弾性状である損失せん断弾性率<sup>7)</sup>に加え、同じ試験より得られる複素せん断弾性率を評価指標とした。

表-3 にバインダの評価試験方法と評価指標を示す。

## 5.2 ポーラス混合物の評価試験方法と評価指標

混合物に関しては、ポーラス混合物のひび割れ抵抗性の評価方法として曲げ試験を、骨材飛散抵抗性の評価方法としてカンタプロ試験を選定した。

ポーラス混合物の評価指標と評価試験方法を表-4 に示す。

表-3 バインダの評価試験方法と評価指標

評価試験方法	評価指標
針入度試験	針入度 (25℃)
軟化点試験	軟化点
伸度試験	伸度 (7℃, 15℃)
エラスティックリカバリー試験	弾性回復率 (5℃, 10℃, 15℃)
バインダ曲げ試験 (-20℃)	最大曲げ応力
	最大曲げひずみ
	曲げ仕事量
	曲げスティフネス
ダイナミックシアレオメータ (DSR) 試験 <sup>*1</sup>	損失せん断弾性率 (5℃, 10℃, 20℃)
	複素せん断弾性率 (5℃, 10℃, 20℃)

\*1 パラレルプレート：φ 8 mm, 試料厚さ：2 mm, 周波数：0.1Hz・1Hz・10Hz

表-4 ポーラス混合物の評価試験方法と評価指標

評価試験方法	評価指標
曲げ試験 (-10℃)	破断時の曲げ強度
	破断時の曲げひずみ
	曲げ仕事量
カンタプロ試験 (-20℃, 20℃)	カンタプロ損失率 (20℃)
	カンタプロ損失率 (-20℃)

## 6. 促進劣化方法の検討

本研究では、バインダの劣化を考慮した高耐久H型の性能規格を決定することが目的である。したがって、劣化前後のバインダおよびそれを用いた混合物性状を把握する必要がある。

バインダの促進劣化は、舗装調査・試験法便覧に準拠し、薄膜加熱試験 (以下、TFOT 試験) および加圧劣化試験 (以下、PAV 試験) により実施した。TFOT 試験は、アスファルトプラントでアスファルト混合物を製造する際にバインダが受ける加熱劣化を再現する試験である。また、PAV 試験は、TFOT 試験後の試験体に20時間実施することで、供用5~10年後のアスファルトの劣化状態を再現できるとされている試験である。

そこで、劣化の定義を供用期間10年に設定し、それに相当するバインダの劣化を再現できる促進劣化方法について検討を行った。

### 6.1 現場採取試料のバインダ性状

バインダの促進劣化条件を決定するため、阪神高速道路において平成8年 (供用約20年) および平成19年 (供用約10年) に施工されたポーラス混合物を現場から採取し、その試料から抽出した改質H型の性状試験を行った。現地試料の性状試験結果を表-5 に示す。

供用初期の性状は定かではないが、供用年数が長いほど現地試料の針入度は小さく、軟化点が高い値を示した。

表-1 のようにバージンの改質H型の針入度は50~60程度が一般的であることから、10年間の供用により針入度が20~30 (1/10mm) に低下することが推定された。

表-5 現地試料の性状試験結果

試験項目		現地試料	
		平成8年施工	平成19年施工
針入度 (25℃)	1/10mm	11	21
軟化点	℃	83.0	80.5

### 6.2 促進劣化条件の設定

改質H型の針入度が20~30 (1/10mm) になる促進劣化方法を決定するため、TFOT 試験後のPAV 試験の時間と針入度の関係を確認した。

未劣化、TFOT 後およびPAV 試験による促進劣化後の針入度の変化を図-1 に示す。ここで、改質H型および高耐久H型は、複数社のバインダを同じ凡例で示している。

TFOT 試験およびPAV 試験により改質H型および高耐久H型の針入度が小さくなる変化の度合いに差異は認められなかった。そして、両者の針入度を平均的に見た場合、針入度が20～30 (1/10mm)となるPAV試験の時間は概ね48時間となった。

以上の結果より、本検討では、供用期間10年に相当

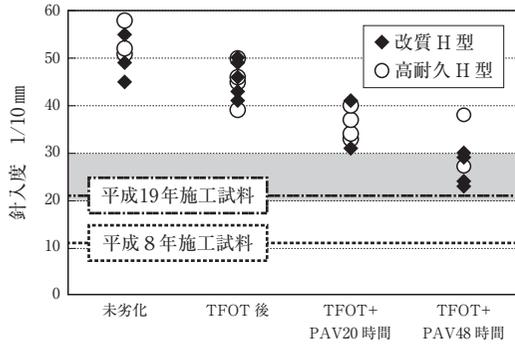


図-1 TFOTおよびPAV後の針入度

する劣化を再現する方法として、TFOT 試験後に48時間PAV試験による促進劣化加える条件を設定した。設定したバインダの促進劣化フローを図-2に示す。

## 7. バインダの性能規格に関する検討

### 7.1 バインダと混合物性状の相関性

改質H型と高耐久H型のそれぞれのバインダ性状とポーラス混合物性状の相関を表-6に示す。なお相関のまとめ方については既往の文献を参考とした<sup>8)</sup>。

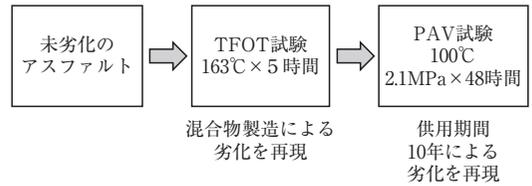


図-2 バインダの促進劣化フロー

表-6 バインダ性状と混合物性状の相関

バインダ性状 混合物性状		針入度 1/10mm	軟化点 ℃	伸度 cm		弾性回復率 %			最大曲げ強度 MPa	最大曲げひずみ -	曲げ仕事量 kPa	曲げ スティフネス MPa
				7℃	15℃	5℃	10℃	15℃				
		25℃	-	7℃	15℃	5℃	10℃	15℃				
破断時の曲げ強度	MPa							★		★		
破断時の曲げひずみ	-								★★	★★★★		
曲げ仕事量	kPa								★★	★★★★	★	
カンタプロ損失率(20℃)	%						★★	★★				
カンタプロ損失率(-20℃)	%										★	

バインダ性状 混合物性状		損失せん断弾性率 G''								
		5℃			10℃			20℃		
		0.1Hz	0.1Hz	0.1Hz	1Hz	1Hz	1Hz	10Hz	10Hz	10Hz
破断時の曲げ強度	MPa								★	★
破断時の曲げひずみ	-	★★	★★		★★★★	★★★★		★★★★	★★★★	
曲げ仕事量	kPa	★★	★★		★★	★★★★		★★★★	★★★★	
カンタプロ損失率(20℃)	%	★★	★		★★	★★				
カンタプロ損失率(-20℃)	%									

バインダ性状 混合物性状		複素せん断弾性率  G*									相関係数 (r)	評価
		5℃			10℃			20℃				
		0.1Hz	0.1Hz	0.1Hz	1Hz	1Hz	1Hz	10Hz	10Hz	10Hz		
破断時の曲げ強度	MPa								★	★	0.5 < r ≤ 0.6	★
破断時の曲げひずみ	-	★★	★★		★★★★	★★★★		★★★★	★★★★		0.6 < r ≤ 0.7	★★
曲げ仕事量	kPa	★★	★		★★	★★★★		★★	★★★★		0.7 < r ≤ 0.8	★★★★
カンタプロ損失率(20℃)	%	★			★★	★					0.8 < r ≤ 0.9	★★★★★
カンタプロ損失率(-20℃)	%							★	★		0.9 < r ≤ 1.0	★★★★★

ここで、相関係数 $r$ が0.7より大きいバイнда性状と混合物性状の組み合わせは以下の3つであった。

- ①バイндаの曲げ仕事量と混合物破断時の曲げひずみ（以下、混合物曲げひずみ）および曲げ仕事量
- ②損失せん断弾性率と混合物曲げひずみおよび曲げ仕事量
- ③複素せん断弾性率と混合物曲げひずみおよび曲げ仕事量

混合物曲げひずみは、疲労抵抗性の指標であり、大きいほど疲労によるひび割れが生じにくいことが知られている<sup>9)</sup>。

以上の結果から、試験の簡便性や汎用性を考慮し、バイнда曲げ試験により得られる曲げ仕事量を、劣化を考慮した混合物の疲労抵抗性の評価指標として選定し、高耐久H型の性能規格を検討した。

## 7.2 促進劣化によるバイнда曲げ特性

改質H型と高耐久H型について、促進劣化によるバイнда曲げ性状の変化を確認した。図-3～6に促進劣化させた際のバイндаの曲げ性状の変化を示す。なお、ここでの試験結果は、改質H型については所有

メーカー5社、高耐久H型については所有メーカー4社のバイндаの平均値である。

- ①改質H型および高耐久H型ともに、促進劣化による最大曲げ応力の変化は小さかった。
  - ②改質H型および高耐久H型ともに、促進劣化により、最大曲げひずみと曲げ仕事量は小さくなり、曲げスティフネスは大きくなった。
  - ③促進劣化後の高耐久H型の曲げ性状を改質H型と比較すると、曲げ応力は1.2倍、最大ひずみは4.0倍、仕事量は2.4倍、スティフネスは1.7倍であった。
- これらの結果より、促進劣化後の高耐久H型の曲げ仕事量や曲げ最大ひずみは、未劣化の改質H型と同等以上であることを確認した。

次に、鋼床版部など高い疲労抵抗性が求められる混合物の規格にも採用されている<sup>10)</sup>混合物の曲げひずみと、市販品のポリマー改質アスファルトのバイнда曲げ仕事量の関係を図-7に示す。

なお、この試験結果は、再度、協会を代表して試験を担当した数社の平均値である。

ここで、未劣化のバイндаを用いたポーラス混合

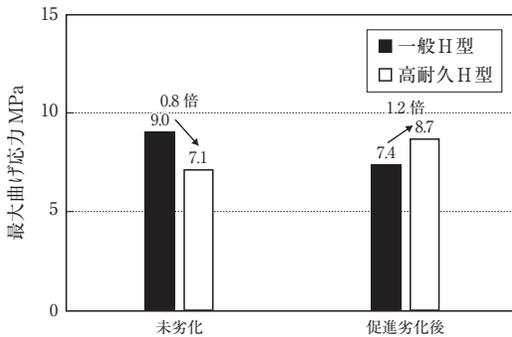


図-3 促進劣化による最大曲げ応力の変化

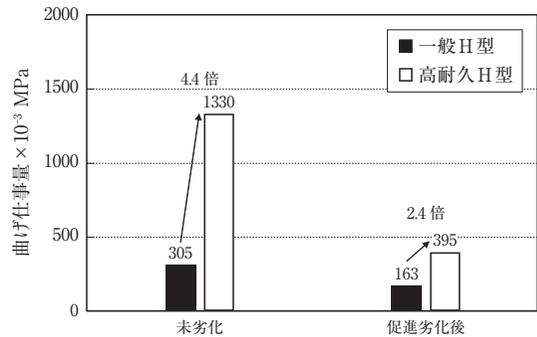


図-5 促進劣化による曲げ仕事量の変化

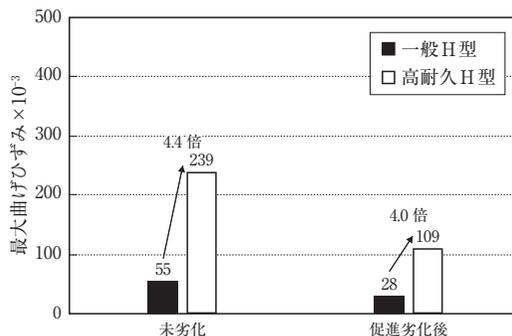


図-4 促進劣化による最大曲げひずみの変化

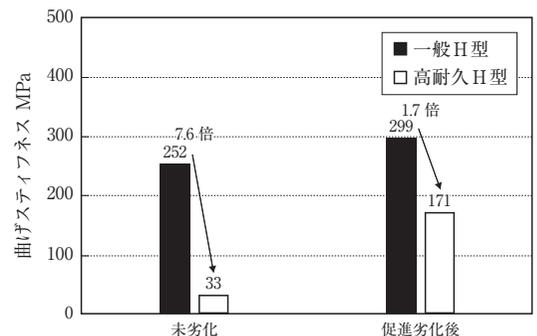


図-6 促進劣化による曲げスティフネスの変化

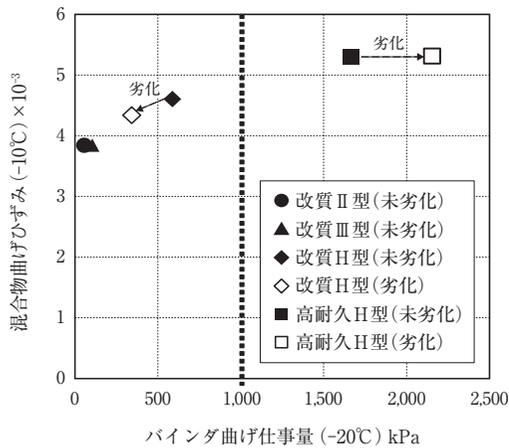


図-7 バインダ曲げ仕事量と混合物破断時の曲げひずみの関係

物の曲げひずみは、高耐久H型が最も大きく、改質H型と明確に区別できるバインダ曲げ仕事量の閾値は、1,000kPa程度であると考えられる。

この値については、既往の文献においても低温時における脆性破壊の抑制といった観点からの妥当性が示されている<sup>11)</sup>。

また、高耐久H型のバインダ曲げ仕事量は、劣化後においても1,000kPa以上であり、高い疲労抵抗性を長期間維持できることが期待される。

## 8. まとめ

- ①高耐久H型は改質H型と比較し、劣化後においても改質H型と同等以上の曲げ仕事量を有しており、それをを用いた混合物においても高い疲労抵抗性が期待できる。
- ②混合物の曲げひずみと高い相関があり、改質H型と明確な差別化ができる、バインダ曲げ仕事量1,000kPa以上を、劣化を考慮した高耐久H型の性能規格値として提案する。

また、バインダ曲げ仕事量が1,000kPa以上のバインダの特徴として、曲げスティフネスが100MPa以下であったことも考慮し、最終的に本研究で提案した高耐久H型の性能規格値案は表-7に示すとおりである。

## 9. おわりに

本共同研究では、劣化前および劣化後の混合物の疲労抵抗性に関して、高耐久H型の優位性を確認し、その性能を考慮したバインダの性能規格値等を提示した。

表-7 高耐久H型におけるバインダの規格値(案)

評価項目		規格値(案)
針入度(25℃)	1/10mm	40以上
軟化点	℃	80以上
フラース脆化点	℃	-12以下
引火点	℃	260以上
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
粗骨材の剥離面積率	%	5以下
バインダ曲げ仕事量(-20℃)	kPa	1,000以上
バインダ曲げスティフネス(-20℃)	MPa	100以下

今後は、舗装の長寿命化によるライフサイクルコストの低減を目指すべく、本検討で得られた知見や性能規格値を運用し、現場の供用性との関係からその妥当性を検証していきたいと考えている。

## — 参考文献 —

- 1) 平松, 青木, 菅野: ポリマー改質アスファルトの劣化指標と性能規格化に関する共同研究その1, 改質アスファルト第56号, 2021
- 2) 阪神高速道路株式会社: 設計基準第3部, 2016
- 3) 岡本信也, 石井亜也加, 木下孝樹: 供用劣化を受けたポーラスアスファルト混合物の力学特性評価, 第31回日本道路会議論文集, 2015
- 4) 阪神高速道路株式会社: 土木工事共通仕様書, 2015.10
- 5) 田中, 高橋, 羽入, 改質アスファルトの評価方法に関する一検討, 第23回日本道路会議一般論文集, 1999.10
- 6) 樫野, 山本, 村山, エラスティックリカバリー試験の有効性検討, 土木学会第61回年次学術講演会, 2006
- 7) David A Anderson, Development of SHRP Binder Specification, AAPT, vol.62.1993
- 8) FEHRL, BitVal final report - Analysis of Available Data for Validation of bitumen tests
- 9) 舗装工学ライブラリー8 アスファルト遮水壁工「5.2.3 アスファルト混合物の力学的性状」, 土木学会, pp272~273, 2014.9
- 10) 阪神高速道路株式会社: 土木工事共通仕様書, 2018.7
- 11) 峰岸, 小林, 二層式低騒音舗装の破損実態とアスファルト性状の関係, 都土木技術支援・人材育成センター年報, pp43~54, 2009

# アスファルト混合物の耐水性と新たな評価方法の提案

(Stripping in Asphalt Mixture and a Proposal for an Alternate Evaluation Method)

呉 悦 樵\*・野 口 健 太 郎\*\*・瀬 尾 彰\*\*\*

アスファルト舗装は、砕石、砂やフィラー等の骨材を、アスファルトを用いて結合させアスファルト混合物とし、所望の性能を発現させている。またアスファルト舗装は供用中の交通荷重による変形や、水、紫外線等が相互に作用することで、わだち掘れやひび割れといった経年劣化が生じる。わが国では、経年劣化を予想する室内試験方法として、交通荷重による塑性変形を測定するホイールトラッキング試験、さらに水の浸入による骨材からアスファルトが剥離することに起因する舗装の損傷を測定する水浸ホイールトラッキング試験が運用されているが、これらによって上述の複数の劣化要因の関連性を見出すことは難しい。

本稿では、アスファルト混合物における剥離現象を、アスファルトと骨材との相互作用の一形態と捉え、特に接着剤としてのアスファルトの機能に着目して考察した。さらにアスファルト混合物中の評価方法として、米国 AASHTO 規格や、BS EN 規格で規定されるダブルホイールトラッキング試験を用いることで、舗装の経年劣化における塑性変形と剥離の相互作用を明らかにすることを試み、加えて接着剤としてのアスファルトの機能の在り方を考察した。

## 1. はじめに

アスファルト舗装は、供用中の交通荷重による変形や、水、紫外線等が相互に作用することで、わだち掘れやひび割れといった経年劣化が生じる。近年では、弾性率向上や剥離防止を目的とした、様々な改質剤を添加された改質アスファルトバインダの使用によって、舗装の耐流動性が改善され、舗装寿命の延長が図られている。

一方、空港滑走路のような高荷重がかかる舗装では、わだち掘れは改善されたものの、ポットホールの発生が課題となっている<sup>1)</sup>。すなわち、河村らによれば、雨水の浸透により基層以深のアスファルト混合物が骨材とアスファルトの剥離により土砂化し、表層にポットホールなどの損傷として現れることが考えられている。

高速道路においては、高橋らによって開削調査が

行われ<sup>2)</sup>、国内の高速道路計7路線12か所の調査を通じ、舗装内部の供用中の変化について詳細な検診が行われた<sup>3)</sup>。その結果として、主に見られる損傷形態を、①疲労ひび割れ、②剥離・土砂化、③層間接着力の消失、④アスベースの脆弱化、⑤路盤の湿潤化と永久変形、という5つのパターンにまとめられた。これらはいずれも、繰り返し荷重に加え、水の存在による影響を無視できない。すなわち、特に基層以深で起きる剥離によって路盤までが脆弱化し、表面に向かってひび割れが成長し、新設の基層、表層の早期損壊を引き起こしているという舗装損傷の進行過程が示された。さらに、高速道路での調査によれば、表層における損傷は目視や装置による調査より検知可能で表層のみの修繕、打替えも可能であるが、舗装底面から発生するひび割れなどの損傷は、表面に到達するまで探知できない上に、表面まで進行してしまう

\*う ゆえちやお 出光興産株式会社 機能舗装材事業部 アスファルト技術課

\*\*のぐち けんたろう 出光興産株式会社 機能舗装材事業部 営業企画課

\*\*\*せお あきら 出光興産株式会社 機能舗装材事業部 アスファルト技術課 課長

と舗装全層の打替えとなりかねないことの危機感も訴えている。

このように、水の影響で生じる劣化は、現象として認知されつつあるが、剥離の発現メカニズムおよび、劣化進行過程において他の劣化要因との関連性は未だに究明されていない。

空港や高速道路などでの舗装損壊は、多大なる社会損失に繋がるため、安全で長寿命な舗装を実現するには、舗装の劣化過程における水とその他の要素との相互作用を解明することは大きな意味を持つ。

そこで本稿では、アスファルト混合物における剥離現象を、アスファルトと骨材との相互作用の一形態と捉え、特に接着剤としてのアスファルトの機能に着目して検証した。具体的には、舗装損壊の主たる要因として水存在下における車輪走行による繰り返し载荷に着目し、塑性変形と水との相互作用、すなわち剥離の解明を試みた。これらを踏まえ、接着剤としてのアスファルトの機能の在り方を考察した。

## 2. 接着剤としてのアスファルトの機能

アスファルトは古くから接着剤として利用されてきたが、ここではアスファルト混合物中における、アスファルトの接着剤としての機能を改めて考察したい。なお接着にかかわる用語を、JIS K 6900-1994 (ISO 472:1988)「プラスチック-用語」に則り確認しておく。

**接着：**二つの表面が接着剤の助けをかりて、化学的又は物理的力又は双方によってつなぎ合わされている状態

**接着剤：**接着によって材料をつなぎ合わせることを

できる物質。

**被着材：**接着剤によって他の物体に固定され、又は固定されようとしている物体。

**ホット-メルト接着剤：**溶融状態で塗布し、固体状態への冷却中に結合を形成する熱可塑性接着剤

**接着破壊：**割れ目が接着剤と被着材の界面にあることが目に見える接着剤結合の破壊。

**凝集破壊：**割れ目が接着剤又は被着材の中にあると目に見える結合たい積物の破壊。

以降、アスファルトを接着剤、もしくは熱可塑性接着剤、骨材を被着材として、それらの相互作用を考察する。

### 2.1 接着の原理 (3要素)

接着の原理は諸説あるが、通常、図-1に示す3種類に分類される。また実際の接着ではこれらの結合が総合的に作用し、接着の条件によりその割合は異なると考えられており、次のように説明される。

a) 投錨効果 (アンカー効果) による結合：

被着材表面の凹凸に、接着剤が入り込み、抜けなくなることによる、機械的な結合。

b) 分子の相互拡散による結合：

接着剤と被着材が、それぞれの分子レベルで相互に拡散し、結合する。

c) 分子間の相互作用による結合：

接着剤と被着材を構成する分子同士が、極性(電気的なプラスやマイナス)等により結合する。構成する分子や、接着剤と被着材の境界面(界面)の条件により、次の3種類の形態をとり得る。

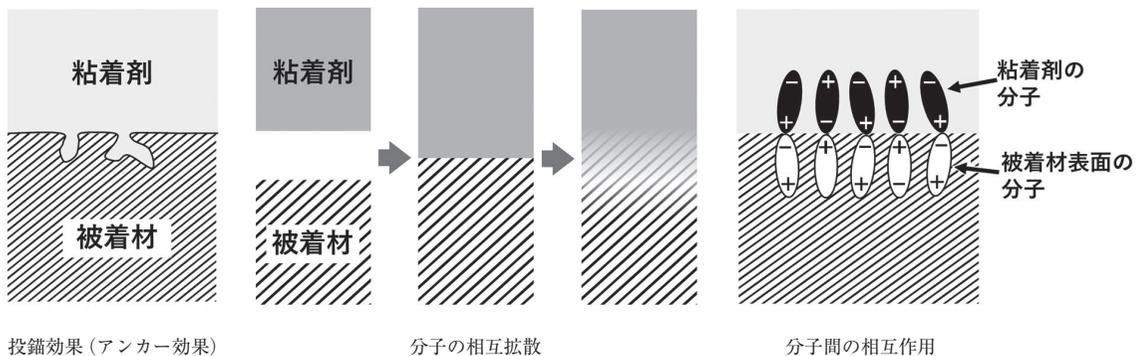


図-1 接着における結合の種類

### i) ファンデルワールス力による結合

接着剤と被着材を構成する分子内に生ずる局所的な（電気的な）プラスやマイナスによる弱い結合。接着剤と被着材表面の分子が、極めて近くに接近しているときにのみ作用する。オランダの物理学者 Johannes D. van der Waals が発見したことによる命名。

### ii) 水素結合による結合

接着剤と被着材を構成する分子内に定常的に存在する、電気的なプラスやマイナスの引き合いによる強い結合。ファンデルワールス力の約10～30倍の強さ。

### iii) 共有結合による結合

接着剤と被着材を構成する分子同士が、化学的に結合することで生ずる強い結合。ファンデルワールス力の約500倍の強さ。

## 2.2 アスファルト混合物中の接着

アスファルト混合物中において、アスファルトと骨材は、前節で示した a) 投錨効果（アンカー効果）および c) 分子間の相互作用による結合によって接着していると考えられる。（アスファルトと骨材が、分子レベルで相互に拡散し結合しているとは考えにくい。）そこで、これらの結合を大きくする方法を明らかにし、アスファルトが骨材と強く接着する、すなわち剥離抵抗性を向上させる条件や方法を具体的に考察したい。

### 2.2.1 投錨効果（アンカー効果）による結合を大きくする条件、方策

接着剤が被着材の凹凸に十分に入り込み、かつ剥がれようとした際に「抜けにくい」「千切れない」ことが必要である。

このため接着剤であるアスファルトは、被着材である骨材と混合される温度域において、骨材表面の凹凸に追従し、十分に入り込む程度に粘度が低いことが好ましい。また供用温度域では、抜けにくい程度の弾性率、千切れない程度の引張強度を有することが好ましい。なおアスファルトの粘度や弾性率の好ましい閾値は、現在のところ明らかにされていない。

たとえば改質アスファルトの適用は、供用時の弾性率上昇、もしくは「千切れない」ことを目的としていられると考えられる。しかし改質アスファルトは混合温度域での粘度が高いため、投錨効果による剥離抵抗性を向上させるためには、混合温度域でのアスファルトの粘度を下げる、もしくは混合温度を上げる等に留意し「凹凸に十分入り込ませる」ことが必要である。なお中

温化等を目的として混合温度を下げる際には、通常の混合温度に比べ投錨効果が小さくなる可能性があることに留意する必要がある。

また骨材表面には、適度な凹凸があるほうが投錨効果による結合を向上させやすい。骨材産地により表面の状態は異なるので、留意する必要がある。

### 2.2.2 分子間の相互作用による結合を大きくする条件、方策

骨材とストレートアスファルトのみによるアスファルト混合物は、上述の投錨効果と、ファンデルワールス力で接着していると考えられる。

また骨材からアスファルトが剥離する主要因と考えられる水（水分、 $H_2O$ ）は、骨材表面に水素結合により結合する。ここでアスファルト混合物の周辺に水が存在する場合、水は、アスファルトと骨材の界面に入り込み、（弱いファンデルワールス力で接着している）アスファルトの代わりに、（強い水素結合で）骨材表面に結合する。このため投錨効果が十分でない場合、アスファルトが骨材表面から剥離する可能性がある。

したがってアスファルトと骨材を強く接着させ、剥離抵抗性を向上させるためには、十分な投錨効果に加え、アスファルトと骨材を水素結合以上の分子間の相互作用で結合させることが有効である。

いわゆる剥離防止剤と呼ばれる薬剤は、アスファルトに溶解させておくことで、混合の際にアスファルトと骨材との間に水素結合を形成させることを意図して開発されている。ただし薬剤の分子構造や種類により、得られる水素結合の大きさが異なり（剥離防止効果の大きさが異なり）、場合によっては水と骨材の水素結合よりも弱い結合しかえられず、十分な剥離防止効果が得られない場合があるため留意が必要である。

またアスファルトと骨材の結合として、水素結合よりもはるかに強い、共有結合を形成させる方法も考えられる。これについては次章以降で可能性を例示したい。

なお分子間の相互作用による結合の大きさは、アスファルト混合物の製造（混合）から供用に至る温度範囲において、通常変わることはない。（混合時に蒸発や分解する薬剤を選択した場合などは、剥離防止効果を期待できない。）

## 3. アスファルト混合物の室内評価による塑性変形と剥離の相互作用の検証

前章では、アスファルト混合物中のアスファルトと骨材との相互作用を、特に接着剤としてのアスファル

トの機能に着目して考察し、アスファルトが骨材と強く接着する、すなわち剥離抵抗性を向上させる条件や方法を考察した。

本章では、アスファルト混合物の室内評価を通して、舗装の経年劣化における塑性変形と剥離との相互作用を明らかにすることを試み、さらに接着剤としてアスファルトの機能の在り方を考察する。

### 3.1 検討方針

わが国では、経年劣化を再現する室内試験方法として、交通荷重による塑性変形(わだち掘れ)を測定するホイールトラッキング試験(WT試験)や、水の浸入による舗装の破壊を測定する水浸ホイールトラッキング試験(水浸WT試験)が提案され、運用されている。



写真-1 DWT試験機

WT試験は気中において混合物の耐流動性を評価し、供試体中央に確認される塑性変形量のみを測定する。また改質アスファルト混合物の評価においては、規定走行回数(1260回)では供試体の破壊に至らず、劣化破壊の解析に必ずしもつながらない恐れがある。

水浸WT試験は、タイヤが供試体全面をトラバース走行するため、破壊に対する塑性変形の寄与が少ないと考えられる。なお、水浸WT試験において、6時間以内に供試体上部が破壊してしまう場合があるが、これはトラバース走行によって供試体表面から剥離したアスファルトモルタルが車輪に堆積したことが原因であり、試験結果には特に影響を与えないこととなっている。すなわち、水浸WT試験は試験後供試体の断面の剥離面積率について評価がなされ、それに至るまでの破壊過程や、供試体の内部の塑性変形等の変化に関

する検討は行われない。

アスファルト混合物の評価試験は、実際の道路の供用状況がある程度再現することが肝要であり、例えば試験温度は路面温度に合わせられ、載荷重についても車両走行における輪荷重を想定している。その点において、WT試験はわだち掘れの生成状態を再現しており、水浸WT試験は上面あるいは下面からの水の浸透を再現できている。ところがいずれの試験によっても、実際の道路舗装で発生している舗装底面からのひび割れ、ポットホールやポンピング現象を再現できていない。

以上より筆者らは、WT試験と水浸WT試験を別々で行っても、舗装破壊に至る、荷重ならびに水の存在をはじめとする複数の劣化要因の関連性を見出すことは難しいと考え、これら2つの試験を複合させた試験、すなわち、条件①供試体を水に浸漬した状態で車輪走行させ、条件②破壊に至るまでの塑性変形を追跡する、試験装置および方法を検討した。

その結果、AASHTO規格やBS EN規格で規定されるダブルホイールトラッキング(DWT)試験が、条件①および②を実施可能であることを見出し、これらを用いることで、舗装劣化における塑性変形と水による骨材とアスファルトの剥離との相互作用を明らかにすることを試みた。

### 3.2 評価条件

DWT試験は、AASHTO T324やBS EN 12697-22に規定される試験で、 $400 \times 300 \times 50$ mm(想定される舗装の実厚)の直方体供試体を用い、700Nを載荷したゴム車輪(WT試験と同様な硬さ)を60℃の水中に浸漬した状態(あるいは空气中)で、10000往復(20000回)通過させ、走行領域に形成されるわだちの形成過程を追跡する試験である。なお本検討では、従来のWT試験と同様の $300 \times 300 \times 50$ mmの供試体を用いた評価も実施した。

具体的な試験条件を表-1に示す。

### 3.3 評価結果および考察

#### 3.3.1 DWT試験における検討

##### 3.3.1.1 DWT試験における塑性変形と損傷

アスファルトとして、ストレートアスファルト60~80(以降、ストアス60/80)、ポリマー改質アスファルトII型(以降、II型)、およびポリマー改質アスファルトIII型(以降、III型)を用いて作製した密粒度混合物(13)供試体( $400 \times 300 \times 50$ mm)について、水浸漬によるDWT試験を実施した結果を図-2に示す。

表-1 DWT試験条件

混合物種類	密粒度混合物
供試体サイズ (cm)	40×30×5 30×30×5
載荷重量 (N)	700
走行往復 (回)	10000
走行速度 (回/分)	26.5
試験温度 (℃)	60
走行車輪	ゴム輪
養生条件	60℃水中に2時間浸漬後、 そのまま試験開始
水位	供試体が完全に冠水

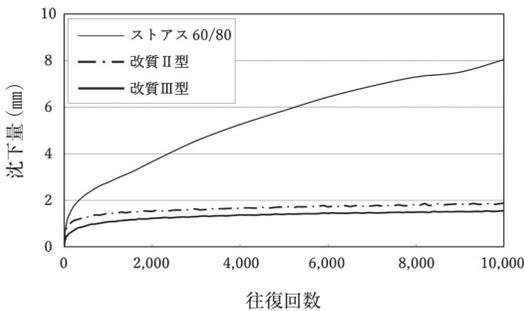


図-2 DWT試験の沈下量変化

9000往復走行したところ、ストアス60/80混合物の供試体からは剥離変曲点 (SIP: Stripping Inflection Point) が確認された。すなわち、供試体は耐久性を保てなくなり、それ以降沈下量が急激に増加した。本試験の場合、その原因は水による剥離によって内部の混合物組成に変化が生じたことであると推測される。これに対して、II型、III型混合物はいずれも変曲点が見られず、剥離に起因する顕著な破壊が発生していないと考えられる。

また、ストアス60/80供試体の表面走行部では、塑性変形とともに、骨材飛散や土砂化が発生し、実際の道路表面に起きているポットホール等の舗装損傷に似た現象が認められた。これらはDWT試験においては供試体に荷重と水が同時に作用した結果、発生したと考えられる。

### 3.3.1.2 DWT試験における剥離

供試体の裏面を観察すると(写真-2)、II、III型混合物の供試体は不織布への付着を認めなかったのに対し、ストアス60/80混合物では、不織布に大量のアスファルトが浸透していた(写真-2右下)。この浸透は車輪走行の中心部(供試体中央)に当たる部分から

周囲に向かって放射状に分布している様子が確認でき、さらに不織布自体も波紋状となっていたことから、表面からの荷重が裏面に伝わる過程では、中心に最も負担がかかり、周囲に分散されていたと考えられる。なお不織布を除去すると、アスファルトが剥離した骨材が剥き出しとなっており、裏面における土砂化、ないし骨材飛散が確認できた(写真-3上)。また、不織布を使用しないストアス60/80対照実験では、裏面中心部にアスファルトの遊離と凝集が確認できた(写真-3下)。

これらの結果より、ストアス60/80混合物において

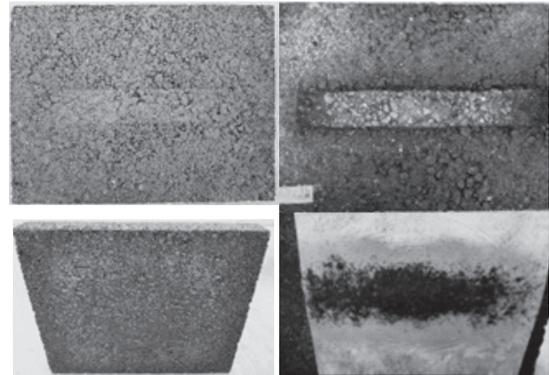


写真-2 左上) 改質III型供試体の表面  
左下) 改質III型供試体の裏面  
右上) ストアス60/80供試体の表面  
右下) ストアス60/80供試体の裏面

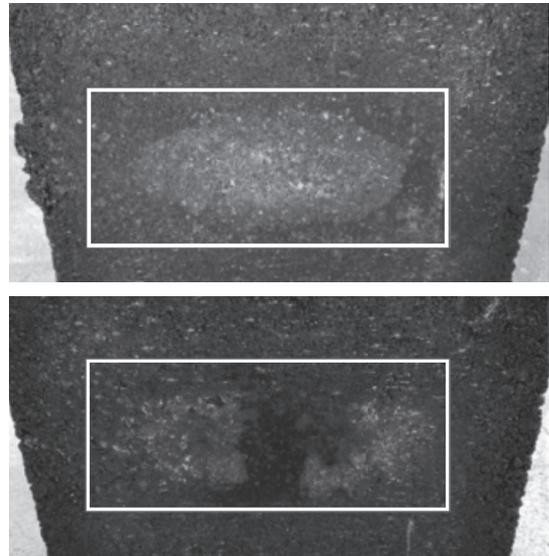


写真-3 上) 不織布を撤去後の裏面  
下) 不織布なし供試体の裏面

は、走行部では、裏面およびタイヤ接触表面のみならず、内部にも骨材からのアスファルトの剥離が生じ、遊離していたと考えられる。このため所定の混合物組成が維持できなくなり、塑性変形が生じ、さらにアスファルトの遊離と混合物組成の変化が加速し、変曲点の出現に至ったと推測される。

また、II, III型混合物の供試体は不織布へのアスファルト付着を認めなかったことから、骨材からのアスファルトの剥離が発生していなかったと推測される。これはII, III型混合物に用いたアスファルトは弾性率を高めてあることから投錨効果が有効に機能したこと、さらに水素結合を期待する剥離防止剤を配合しており剥離が抑制されていたことによると考えられる。これら混合物は、DWT試験において骨材からアスファルトが剥離することがなかったため、試験終了まで所定の混合物組成を維持することが出来たと推測される。

### 3.3.1.3 修正DWT試験における検討

DWT試験は400×300×50mm供試体を使用するが、実際に車輪が走行する距離は300mm未満である。したがって、国内で運用されているWT試験と同じ300×300×50mmの供試体を用いてDWT試験を行った。

ここではストアス60/80混合物に加え、アスファルトが骨材から剥離することを防ぐ目的で、骨材と水素結合の形成を期待する剥離防止剤A、および骨材と共有結合の形成を期待する剥離防止剤Bを添加したストアス60/80を用いた供試体も作製し、比較評価を行った。それぞれのバインダ性状を表-2に示す。

剥離防止剤AもしくはBを添加したストアス60/80は、ポリマー改質アスファルトのような粘度上昇は認められない。このため混合温度を上げることなくストアス60/60を使用した際と同等の投錨効果を期待することができることから、分子間の相互作用の大きさの違いを確認することができ、さらにこれらの剥離防止効果を確認することができる。

DWT試験後の供試体を写真-4に示す。300×300×50mmのストアス60/80混合物(写真-4左)は、400×300×50mmの混合物(写真-2右上)と比較し、大きな損傷が認められた。すなわち、大量な砂分の流失が確認され、砂にはアスファルトの被膜が存在せず、水による剥離が著しく発生したことを意味している。走行部には、粗粒度骨材とアスファルト被膜との剥離によって骨材が飛散し、同様なポットホールに似た現象が発生した。また、供試体表面全体にわたって「アリの巣」のような砂や泥水の噴出による空孔が発生していた。実際の道路における「ポンピング」現象に類似する損傷が再現されたと予想される。走行部の沈下に伴い走行部両側部分が隆起し、上向きに力が作用する。その力によって、供試体内部に侵入していた水がアスファルトを骨材から剥離させ、細粒分が水とともに噴出し、空隙を形成したと考えられる。すなわち、砂や泥水の噴出による空孔の発生といった損傷も、荷重と剥

表-2 剥離防止剤添加前後の性状

	ストアス 60/80	剥離防止剤A 水素結合を期待	剥離防止剤B 共有結合を期待
針入度 (1/10mm)	67	71	59
軟化点 (°C)	46.5	45.5	51.5
粘度 (180°C, mPa.s)	68	56	63

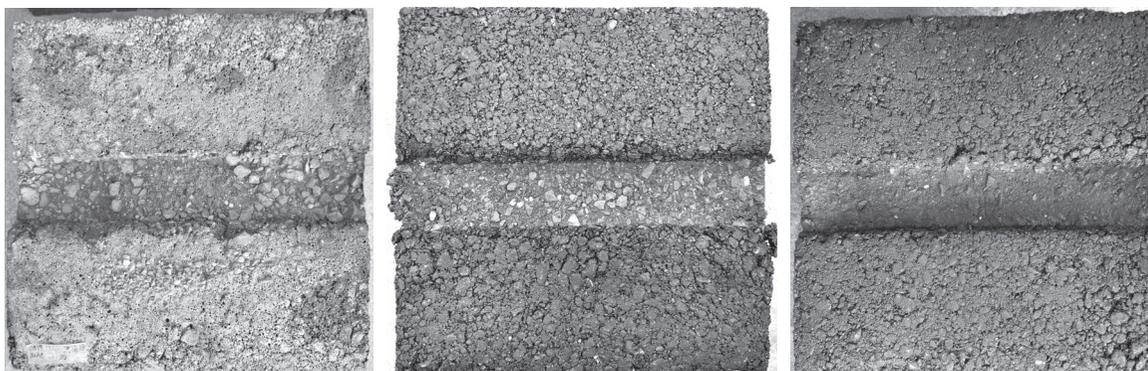


写真-4 剥離防止剤添加後のDWT試験後の様子  
左：ストアス60/80, 中：剥離防止剤A (水素結合を期待), 右：剥離防止剤B (共有結合を期待)

離の相互作用によるものであると考えられる。

一方、剥離防止剤AもしくはBを添加したストアス60/80を用いた混合物の場合、沈下量はストアス60/80混合物と変わらないものの、「ポンピング」に類似する砂や泥水の噴出による空孔の発生は確認されなかった。

ここで剥離防止剤Aを用いた供試体は、車輪走行部分においてアスファルトの骨材からの剥離が確認され、さらに当該箇所の骨材は飛散寸前であったことから、試験時間の延長により顕著なアスファルトの骨材からの剥離が予想された。これに対し剥離防止剤Bを用いた供試体は、車輪走行部分においてもアスファルトの骨材からの剥離は確認されず、あたかも気中のWT試験後の供試体のように健全な状況であった。

これらの結果より、アスファルト混合物中において、アスファルトが骨材から剥離することを抑制するためには、水素結合による結合の形成が一定の効果を有することを確認した。さらに共有結合による結合の形成が実現できれば大幅な剥離抑制効果を発現することも確認した。

これまで、アスファルト混合物の剥離抵抗性の改善には、ポリマー改質アスファルトの適用など、粘度を高める手段を専ら採用されてきたが、本結果は、粘度がストアス60/80と同等であっても、アスファルトと骨材との間に適切な結合を形成することが出来れば、剥離抵抗性を大幅に改善することが可能であることを示した事例といえる。

#### 4. まとめ

本検討では、実際の舗装に発生する損傷について、その発生メカニズムを解明するために、耐流動性と耐水性（剥離抵抗性）との関連性に着目し、検討および考察を行った。前提としてアスファルト混合物における剥離現象を、アスファルトと骨材との相互作用の一形態と捉え、特に接着剤としてのアスファルトの機能に着目して考察した。

アスファルト混合物の評価方法として、従来のWT試験および水浸WT試験と比較して、走行回数が多く、

供試体への水侵入の影響が大きい試験法（DWT試験）を用いて、沈下量の推移を追跡するとともに、供試体に生じる変化を特に骨材からのアスファルトの剥離に着目して観測した。その結果、ポットホール、ポンピングや下層からの土砂化など、いくつかの損傷を室内試験で再現する試験条件を見出すことが出来た。

これらの結果より、アスファルト混合物中において、アスファルトが骨材から剥離することを抑制するためには、水素結合による結合の形成が一定の効果を有することを確認した。さらに共有結合による結合の形成が実現できれば大幅な剥離抑制効果を発現することも確認した。

これまで、アスファルト混合物の剥離抵抗性の改善には、ポリマー改質アスファルトの適用など、粘度を高める手段が専ら採用されてきたが、適切な分子間の結合を形成することが出来れば、剥離抵抗性を大幅に改善することが可能であることを明らかにした。

以上より、舗装の長寿命化を実現させるためには、耐流動性の向上、対策だけでは不十分であり、今後はアスファルトと骨材の剥離抵抗性（耐水性）も高める検討や対策が必要であると考ええる。また検討の際には、アスファルトの弾性率や粘度などの物性性状に加え、骨材との化学結合の形成のしやすさなどの化学的な、ミクロな視点を取り入れることも重要と考ええる。

#### — 参考文献 —

- 1) 河村直哉, 伊豆太, 坪川将文: 空港舗装の既設アスファルト混合物に対するはく離抵抗性評価方法の適用検討, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol.72, No.3 (舗装工学論文集第21巻), I\_87-I\_93 (2016).
- 2) 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol.71, No.3 (舗装工学論文集第20巻), I\_93-I\_101 (2015).
- 3) 株式会社高速道路総合技術研究所: 長寿命舗装の作り方 (2019).

# 路面が道路交通騒音に及ぼす影響を評価する方法 (CPX法) について

(A Method of Evaluating the Influence of Road Surfaces on Road Traffic Noise – CPX Method –)

小池 博\*

舗装の種類や路面状態等の違いが道路交通騒音に影響を及ぼすことは広く知られており、騒音低減を目的とした舗装も開発されている。道路交通騒音に及ぼす路面の影響を評価する方法として、CPX法 (Close-Proximity Method) がISOで規格化され、国際的に広く活用されている。本稿では、CPX法の概要を説明するとともに、(一財)日本自動車研究所が導入したCPX測定専用のトレーラ (CPXトレーラ) を紹介する。

## 1. はじめに

近年、ハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) 等の次世代車の普及が進んでいる。それにともない、今後は自動車の動力系の騒音が低減する傾向になることが見込まれる。しかし、動力系の騒音が低下してもタイヤ/路面騒音の低減は課題として残るため、今後の道路交通騒音低減において、タイヤ/路面騒音は、さらに重要になるものと考えられる。タイヤ/路面騒音には、タイヤの特性のみならず、路面の特性 (舗装種類や性状) が大きく影響する。例えば、二層式排水性舗装や多孔質弾性舗装などの低騒音舗装によって騒音低減が可能となる一方、路面の経時変化によって騒音レベルが上昇することなどが考えられる。

このようなことから、道路交通騒音に及ぼす路面の影響を正確に評価するためには、その評価手法が重要である。

本稿では、一般道に施工された路面が道路交通騒音に及ぼす影響を評価する方法のひとつとして、国際的に広く用いられているCPX法 (Close-Proximity Method)<sup>1)</sup> の概略を説明するとともに、(一財)日本自動車研究所で導入したCPX測定専用のトレーラ (CPXトレーラ) について紹介する。

## 2. 道路交通騒音に及ぼす路面の影響の評価について

### 2.1 国内で用いられている方法

道路交通騒音に及ぼす路面の影響を評価する方法として、国内では、舗装路面騒音測定車 (RAC車) を用

いた方法が規定されている<sup>2)</sup>。この方法では、トレッドに太い横溝と円形の孔を持つ特殊なタイヤを使用し、対象路面において走行する際にタイヤに近接した位置で走行時の発生騒音を測定し、その騒音レベルによって路面を評価するもので、排水性舗装や二層式排水性舗装など多孔質の舗装の騒音低減効果の評価に用いられてきた。平成13年度に技術基準類が定められた道路舗装に関する「性能規定発注方式」において、騒音に関する舗装路面の評価に用いられており、国内道路業界の標準的な評価方法となっている。さらに、測定用のRAC車の保有台数が限られているため、RAC車と相関がある結果が得られる簡易法も用いられている。

### 2.2 CPX法 (Close-Proximity Method, ISO 11819-2)

一方、国際的には、騒音に関する舗装の評価・等級付けや一般道における路面の道路交通騒音への影響評価などを目的として、SPB法 (Statistical Pass-By Method, ISO 11819-1)<sup>3)</sup> とCPX法 (Close-Proximity Method, ISO 11819-2) の2つがISOで規格化されている。ここでは、CPX法の概要について述べる。

CPX法は、規定のタイヤが対象路面上を転動する際のタイヤ/路面騒音をタイヤに近接する位置で測定することによって、路面の音響的な特性を評価する方法である。1990年代から欧州を中心に開発が行われ、2017年にISO規格として成立した。SPB法に比べて適用できる条件の幅が広く、かつ迅速に測定できることから、国際的に広く普及している。ISO 11819-2にはCPX法を実現する方法として、専用の測定用トレーラ (CPX

\*こいけ ひろし 一般財団法人日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部

トレーラー)を用いる方法と一般の小型車の後輪の近接位置にマイクロホンを設置する方法の二通りの方法が定められており、前者の方法が主流である。この規格では、CPX法の目的を以下のように記している。

- 舗装路面別の道路交通騒音への影響の把握
- 音響特性に関する路面のメンテナンスや損傷状態の確認
- 実際の路面の道路交通騒音への影響評価
- より静かな路面の開発およびタイヤと路面の相互作用の研究

測定位置は図-1に示す位置(接地部の斜め前後2カ所)が基本であるが、研究用のオプションとして他に4カ所が規定されている。測定に用いる基準タイヤとして、ISO/TS 11819-3<sup>4)</sup>に2種類のタイヤが規定されている。これらの基準タイヤのトレッドパターンと諸元を図-2に示す。タイヤP1は乗用車用タイヤ、タイヤH1は重量車用タイヤの放射騒音を代表するタイヤとして規定されている。CPX法では、これら2種類のタイヤの測定値に基づいて、自動車走行騒音に及ぼす路面の影響を評価する。測定における条件等を表-1に示す。試験タイヤは規定の荷重、空気圧に調整され、

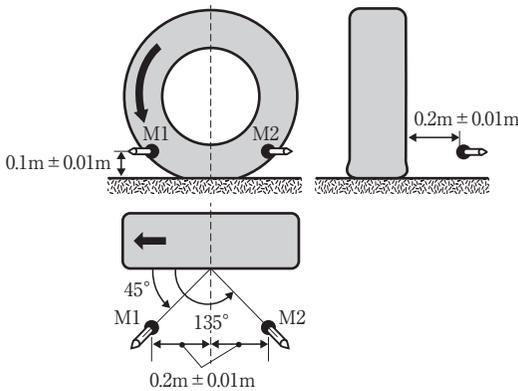


図-1 CPX法の測定位置



P1 SRTT (ASTM F2493) P225/60R16  
H1 AVON AV4 195R14C

図-2 基準タイヤ

規定された基準速度で測定が行われる。騒音測定の周波数範囲は1/3オクターブバンドで315Hz~5,000Hzである。対象道路の測定区間の長さは100m以上とすることが推奨されており、図-3に示すように測定対象区間全体を長さ20mの道路セグメントに分割し、道路セグメントを単位として測定が行われる。

測定結果の処理の流れを図-4に示す。測定は3.1節にて述べるように、左右のタイヤ近傍の前後2本のマイクロホンにより行われる。測定された1/3オクターブバンド周波数315Hz~5,000Hzのレベルを基に、まず、左右輪(左右トラック)それぞれについて前後のバンドレベルのエネルギー平均が求められ、次に、

表-1 測定条件の概要

項目	規定	
基準条件	基準タイヤ	P1, H1
	基準速度	50, 80, 110km/h
	基準気温	20℃
試験速度	平均試験速度	基準速度 ± 5%
	区分毎速度	基準速度 ± 20%
測定周波数範囲		315Hz - 5,000Hz
タイヤの設定	空気圧	200 ± 10kPa
	荷重	3,200 ± 200N
気象条件	風速	5m/s 以下
	気温	5℃ - 30℃



図-3 測定対象区間の設定

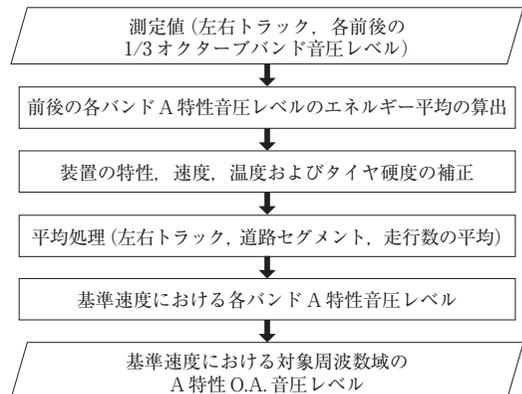


図-4 結果の算出フロー

道路セグメントごとに測定時の速度、気温およびタイヤのトレッド硬さによる補正と平均化処理が行われる。最終的に対象路面の基準速度におけるA特性音圧レベルが算出され、路面の評価に用いられる。

### 3. 導入したCPXトレーラについて

(一財)日本自動車研究所では、道路交通騒音の低減に向けた検討として、自動車自体から放射される騒音に着目した検討のほか、路面に着目した検討も行ってきた。その一環として導入したCPX測定用のトレーラ（CPXトレーラ）および計測システムの概要と機能確認の結果の一例を紹介する。

#### 3.1 CPXトレーラと計測システムの概要

CPXトレーラ本体および計測システムとして、各国への納入実績等を考慮して、M+P社（オランダ）の製品を計測システムと一括で導入した。CPXトレーラの主要諸元を表-2に、外観と内側の様子を図-5に示す。

表-2 CPXトレーラの主要諸元

設計・製作	M+P (オランダ)	
寸法	長さ	3.40 m (カブラー～後端)
	幅	2.00 m
	高さ	1.00 m
	輪距	1.50 m
車両総重量	730 kg	

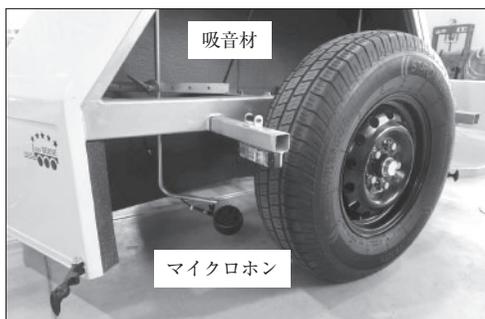


図-5 CPXトレーラの外観と内側

国内の公道で運用する場合の安全性等を考慮して、全幅を2.0mとしている（標準仕様の2.4mからカスタマイズ）。保安基準に適合しており、公道の走行が可能である。左右の試験タイヤは外側をエンクロージャで囲まれており、他の車両など周囲の騒音影響の低減が図られている。左右のタイヤは中央の隔壁によって独立した空間に分割され、エンクロージャ内壁には吸音材が設置されている。事前にエンクロージャ内部の音響特性の測定が行われ、その結果はISO 11819-2の規定への適合性のチェックに用いられるとともに、CPX測定結果の周波数特性の補正に用いられる。

図-6に計測システムの構成を示す。タイヤ近接位置に設置されたマイクロホンによる騒音に加え、走行速度、気流温度、路面温度などの測定条件とGPSによる位置情報が計測システムにより同時に収録される。これらの結果に基づいて後処理によりCPX測定の最終値が算出される。



図-6 計測システムの構成

### 3.2 検証実験

CPX法に基づく走行騒音に及ぼす路面の影響の評価が妥当であるためには、CPX法による測定値と車外騒音の間に十分な相関がある必要がある。このことを確認するため、テストコースにおける検証実験を行った。

#### 3.2.1 測定条件

##### (1) 試験路面

(一財)日本自動車研究所の城里テストセンター内

に敷設されている性状が異なる6種類の路面(図-7)を用いて検証実験を行った。これらの路面は自動車の振動・騒音試験のために施工された路面であり、平滑な路面から非常に粗い路面までが含まれている。

(2) 試験タイヤ

試験タイヤとして、図-8に示す3種類のタイヤ(CPX法の基準タイヤP1および市販の乗用車用タイヤ)を用いた。T1は転がり抵抗の低減を狙ったエコタイプのタイヤであり、国内の乗用車用タイヤとしては一般的なタイプである。T2は運動性能を重視したスポーツタイプのタイヤであり、トレッドゴムの硬度が高く、太い縦溝を有しており、横溝は少なめである。

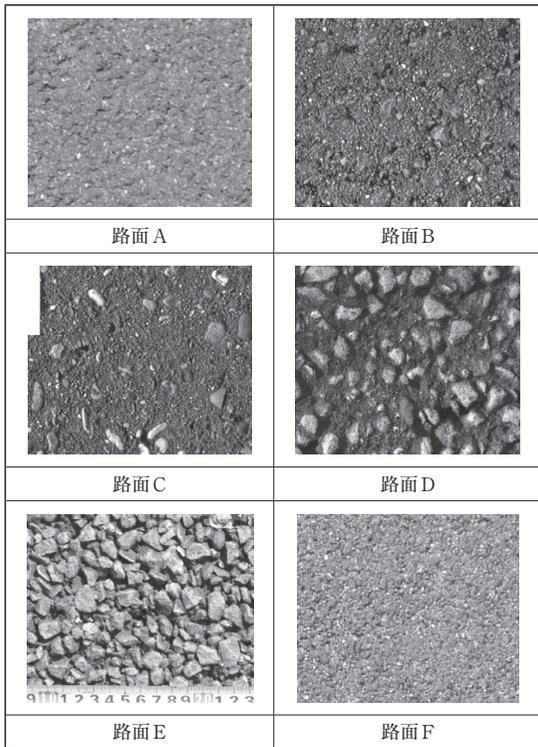


図-7 試験路面の外観



P1 (基準) SRTT (ASTM F2493) P225/60R16	T1 市販タイヤ (エコタイプ) 225/55R17 97W	T2 市販タイヤ (スポーツタイプ) 225/55R17 101Y
---	---	--

図-8 試験タイヤ

(3) 測定内容

CPX測定と車外騒音測定を行った。測定の状況を図-9に示す。車外騒音測定では、一般の乗用車を試験車として、その後輪にCPX測定に用いる2本の試験タイヤ、前輪に同一のトレッドパターンのタイヤ2本を装着した。その状態で、試験車を規定の速度で惰行(エンジンをオフにした状態で走行)させ、その際の走行騒音を走行ラインの左7.5m、高さ1.2m位置で測定した。走行速度はCPX測定、車外走行騒音測定とも40、50、60および80km/hとした。



(a) CPX測定

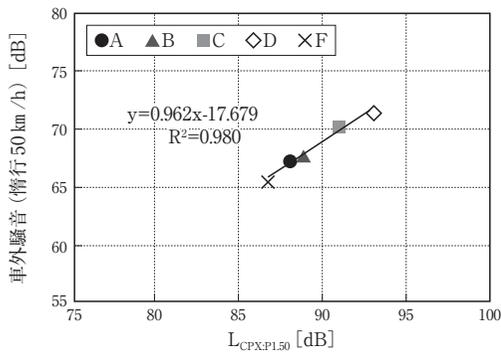


(b) 車外騒音測定

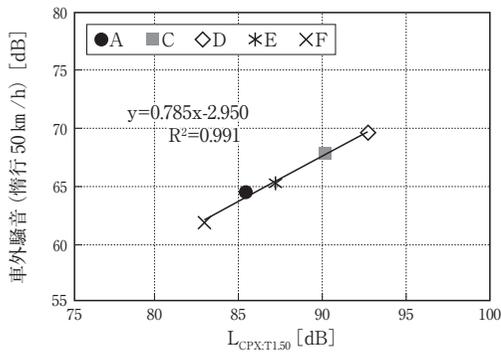
図-9 測定の状況

3.2.2 測定結果

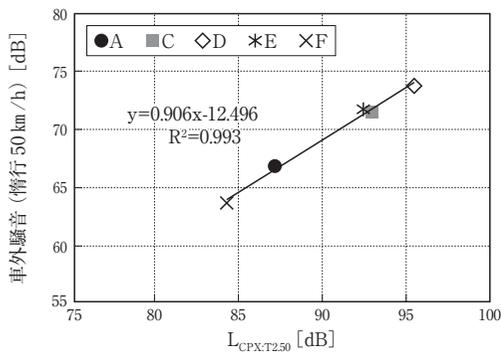
各試験タイヤにおけるCPX測定と車外騒音の関係(速度50km/h)を図-10(次ページ)に示す。いずれのタイヤの場合でもCPX法によるレベルと車外騒音の間には高い相関が見られることから、CPX法による測定結果が同一速度における車外騒音を評価できると考えられる。なお、タイヤT1およびT2では路面が異なる場合のCPX法によるレベルの幅が車外騒音の幅よりも大きくなっており、CPX測定の方がより路面の違



(a) タイヤP1



(b) タイヤT1



(c) タイヤT2

図-10 CPX測定と車外騒音の関係(速度50km/h)

※ CPX法の結果は、規定に基づき気温20℃の値に補正  
 車外騒音(惰行)は路面温度20℃相当の値に補正  
 (UN R117-02の補正係数を使用)

いに敏感となっている。タイヤ種類によるこのような違いは、タイヤによる騒音放射特性の違いに起因するものと考えられる。

次に、基準タイヤP1と2種類の市販タイヤのCPX測定の結果を比較した結果を図-11に示す。P1とT1およびP1とT2の間には高い相関が見られることから、今回用いた2種類の試験タイヤの範囲では、基準タイヤP1の結果により市販タイヤの騒音レベルを評価できる

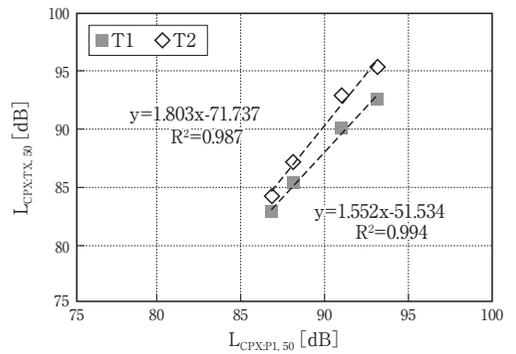


図-11 タイヤP1と市販タイヤ2種類のCPXレベルの関係(速度50km/h)

と言える。ただし、この結果では基準タイヤP1よりも2種類の市販タイヤの方が路面による変化の幅が大きい。これは、主に路面の違いによる騒音への影響の感度がタイヤによって異なることによるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本稿では、道路交通騒音に及ぼす路面の影響を評価する方法として国際的に広く活用されているCPX法について概要を説明した。また、(一財)日本自動車研究所で導入したCPXトレーラについて、装置の概要と計測結果の一部について紹介した。

本装置は、路面が自動車走行騒音に及ぼす影響や低騒音路面の性能評価等を行う際の有効なツールになると考えている。弊所では導入したCPXトレーラを以下のような目的で活用していく予定である。

- 一般道の路面による道路交通騒音への影響の検討
- 各種舗装とタイヤの組み合わせによるタイヤ/路面騒音への影響
- 低騒音舗装の性能に関する検討

#### 参考文献

- 1) ISO 11819-2 (2017): Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method
- 2) 日本道路協会, 舗装性能評価法(平成25年版)
- 3) ISO 11819-1:1997, Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical Pass-By method
- 4) ISO/TS 11819-3 (2017): Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 3: Reference tyres

# 熱帯諸国の流動わだち掘れ対策の進展 －「JICA舗装ハンドブック」の改訂

(Development of Anti-Rutting Technology for Tropical Regions – Revision of “JICA Pavement Handbook”)

古木 守靖\*・古川 聡 哉\*\*

現在途上国では道路整備が積極的に進められており、そこでは施工性などの理由からアスファルト舗装が卓越している。しかしながら、熱帯諸国では高温という自然環境の他、急激な経済成長に伴う物流の急増、大型トレーラーの普及などもあって流動わだち掘れが共通の課題となっている。本稿では、JICAにより進められている無償資金協力事業における舗装の損傷対策の概要、中でも流動わだち掘れ対策としての配合設計の目標設定方法など計画・設計段階の新たな手順および施工段階への示唆事項としてホイールトラッキング試験結果と耐流動性対策の詳細を紹介・解説する。

## 1. 背景と検討概要

### 1.1 路面損傷と構造損傷

舗装の損傷は、流動わだち掘れ等のアスファルト混合物層に限られる損傷と、路盤や路床の劣化などに起因する構造損傷に分けられる。表-1は、過去に損傷が報告されたJICA道路事業の路面損傷と構造損傷の例である<sup>1)</sup>。アフリカ地域における流動わだち掘れが顕著であることがわかる。実際、アフリカ諸国では改

質材の使用は一般的になっておらず、各国とも流動わだち掘れへの対応に頭を悩ませている(写真-1, 写真-2)。多くの国では、改質材を入手できても、合材プラントが連続式であるのが一般的であって、プラントミックスによる改質アスファルトの製造ができないこともネックとなっている。構造的な損傷については、まず舗装厚さの不足であるが、これは急激な経済成長と大型車の急増という状況と舗装設計のミスマッチと

表-1 JICA事業で見られた舗装損傷例

凡例：○は対応する損傷を表す

地域・事例・気候		路線	路面損傷		構造損傷			事例別注記
			流動わだち掘れ	アスファルト層のずれ	過大な交通/舗装厚不足	路盤排水不良	その他	
アジア	事例① 熱帯	国際幹線			○		○*	赤土のセメント安定処理の劣化
	事例② 内陸温暖	国際幹線		○*	○			セメント安定処理路盤上のAC層のすべり
アフリカ	事例③ 熱帯	国内幹線 (5,000台/日以下)	○*			○**		※ 急勾配・高温 ** サグ部および切り土部
	事例④ 熱帯多雨	都市内幹線 (40,000台/日以上)	○*		○			耐流動性不足の配合
	事例⑤ 熱帯多雨	都市内幹線 (25,000台/日)	○*					施工中の基層のわだち掘れ
	事例⑥ 内陸高地	都市内幹線 (12,200台/日以上)	○*					プラントの不適切な品質管理
	事例⑦ 熱帯多雨	国内幹線 (3,100台/日)				○*		サグ部の損傷

(注記) 流動わだち掘れはWT試験と改質材の導入などにより概ね防止可能であったが、当時は使用していなかった

\*ふるき もりやす 株式会社建設技研インターナショナル 特別技術顧問

\*\*ふるかわ としや 株式会社エイト日本技術開発 国際支社国土インフラ部



写真-1 急勾配（7～9%）、高温区間の流動わだち掘れ（エチオピア）

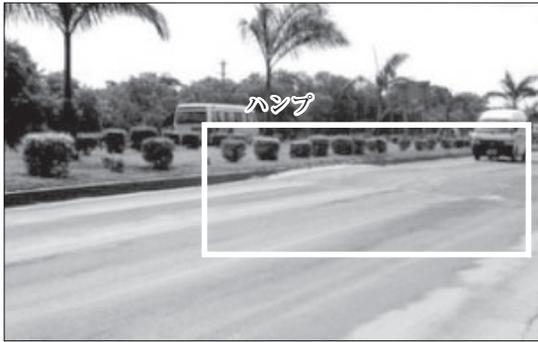


写真-2 ハンプ前後のわだち掘れ（タンザニア）

も言うべき例が見られた。もうひとつ特徴的なものは、路盤排水が不十分なために支持力が失われている例で、路盤以下の排水の重要性を指摘しておきたい。

このような状況から、2016年度にJICAでは対策のための参考書として「JICA無償資金協力事業 道路舗装ハンドブック（初版）」を作成したが、その後技術的知見の集積が進んだことから、2019年度に最重要課題である耐流動性に力点を置いた改訂作業が行われたものである。以下新たなデータも加えながら、このハンドブックの流動わだち掘れ対策を中心に解説と展望を述べる。

## 1.2 海外事業の特徴

JICA無償事業の道路工事は、国内事業とは異なるいくつかの特徴がある。

まずJICA無償事業では、国内事業とは異なって事業開始後の設計変更の際に国際間の取り決めまで遡って手続きを行わなければならない場合があり、そのことを考慮して業務の流れを組み立てている。具体的には、準備調査での設計を可能な限り精度高く行って、詳細設計段階あるいは施工段階における事業費が、日本と相手国とのE/N（交換公文）の額を上回ることが

ないように努めていることである。

また、JICAの道路事業では、舗装工事費の工事全体に占める割合が高く、アスファルト材料費の重要度が高いことである。国内では舗装工事費は概ね5%程度であるが、アフリカにおけるJICA事業の例では40～50%ほどと、国内事業に比して極めて高いことがわかる<sup>1)</sup>。これは、国内の道路事業では橋梁、カルバート、擁壁など構造物が多いために、これらの費用が大きな割合を占めているからであると考えられる。

さらに、大きな違いとしてコンサルタントの役割の違いである。日本国内では、多くの場合土木工事の施工監理（監理という用語は直接的な施工管理ではなく、監督指導という意味で使用する）は施主の任務となっている場合が多いが、JICA事業ではコンサルタントが詳細設計を実施し発注手続きにおいて発注者を支援し、施工段階では施工監理を担当している。このことは、設計や施工の瑕疵に関係する責任問題に微妙に影響している。この点は順次触れてゆきたい。

このうち最初に掲げた調査段階でのより正確な事業費推定の必要性は、以下に述べるアスファルト混合物（以下混合物）の耐流動性検討の手順を導入した動機となっている。つまり、先に述べたように、調査段階で改質材の必要性の有無を判断することが、工事費をより正確に推定するために必要になる訳である。また、このことは入札時に設計条件として明示されるので、入札時の競争条件の曖昧さを減じ、施工業者リスクの低減による入札価格の低下にもつながると考えられる。

## 2. 耐流動性向上のための調査と施工手順

### 2.1 耐流動性の水準決定概要

以上の背景の下、耐流動性の面から見た調査から施工に至る手順は図-1に示すとおりである。

コンサルタントは、まず気温、交通量、軸重といった舗装設計条件を調査する。次に混合物のタイプを決定する。JICAの現場の場合、耐久性、施工性などの点から密粒度タイプを採用するが多い。次に次節で述べる推計式（式(1)）を使って「推計DS（Dynamic Stability）値」を計算する。この式は国内のデータを基に求められたものであり、対象国においては、同時に周辺道路における配合設計、流動わだち掘れの有無等を調査して、推計DS値の妥当性を検討し、必要に応じて修正を加えたものを「目標DS値」として決定する。なお、JICA舗装ハンドブックでは事業費推計に当たっては、この「目標DS値」が1,500回/mmを超える場合

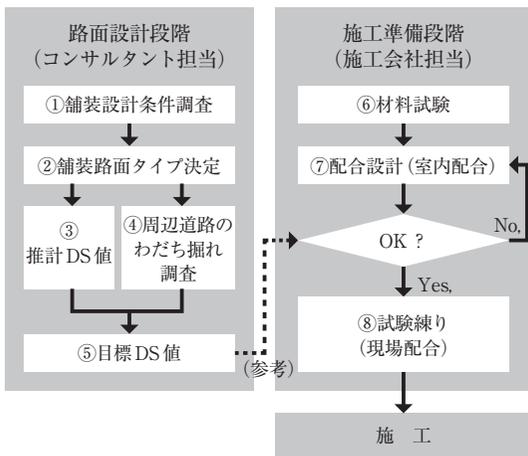


図-1 JICA無償事業で採用した配合設計の流れ

は改質材を使用するものとして積算するとしているがこれは国内での認識によっている<sup>2)</sup>。

施工業者は、この「目標DS値」を参考に、実際使用する骨材やプラントの性能等から判断して、適正な耐流動性確保の手順を施工計画に組み入れ、実際の骨材等を使用して配合設計を行うことになる。

## 2.2 耐流動性目標の設定

### 2.2.1 推計DS値

コンサルタントは、舗装のタイプ等を決定し、土木研究所が提案した式(1)に示す推計式によって当該道路に求められる理論上必要な動的安定度(推計DS値)を求める<sup>3)</sup>。この式の適用は、道路の交通量、勾配が類似した区間でそれぞれ推計する。また、一般に交差点の流入側やハンプの前後は特に走行速度が遅くわだち掘れができやすいので、一般部の目標DS値が小さかったとしても、走行速度のみを変えて推計DS値を計算するなどして、それが高いと判断されたならば(例えば1,500回/mmを超えるような場合)、改質材を使用する等の注意を払う必要がある。

$$DS = 0.679 \times (Y \times T \times W \times V \times Ct / D) \dots\dots (1)$$

ここに、

- DS：動的安定度(回/mm)
- D：許容わだち掘れ量(mm)
- Y：供用期間(日)
- T：大型車交通量(台/日)
- W：輪荷重補正係数 = 日5トン換算輪数((ESWL)/Y)<sup>\*</sup> / 大型車交通量(T)

V：走行速度補正係数(簡便法では一般部0.4、  
交差点部(流出部を含まず)0.9)

Ct：温度補正係数

※交通量の変化がある場合は、一日毎に計算されたものの平均値を取ることも考えられるが、分子のESWLが分母のTと強い相関があるので、Wは比較的安定していると想定し、設計期間の平均値同士の比率で考える。

式(1)は日本の舗装設計に使われる大型車交通量(T)を変数として使用しているが、輪荷重補正係数(W)の定義から、分母分子にYとTが存在するので消去されて、また5トン換算輪数(ESWL)は2.25倍することで18キロポンド換算軸数(ESAL)に換算できることから以下のように変換される。

$$DS = 0.302 \times (ESAL) \times V \times Ct / D \dots\dots\dots (2)$$

結局混合物が有するDS値は、許容わだち掘れ量(D)、18キロポンド換算軸数(ESAL)、走行速度補正係数(V)、および温度補正係数(Ct)の4個の変数によって説明される。

式(2)において、18キロポンド換算軸数(ESAL)はDS値と比例関係に、許容わだち掘れ量(D)は反比例の関係にあるとしているわけであるが、定性的には納得できる。このうちESAL値は広く世界で使用されているパラメータである。

一方、VおよびCtは対象道路の環境条件から求められる変数で、この式独特のものであることから以下に考察を加えておく。

### 2.2.2 走行速度補正係数(V)

速度補正係数(V)は、標準的ホイールトラッキング試験(以下WT試験)による動的安定度(DS<sub>0</sub>)と車両走行速度(S)に相当する動的安定度(DS<sub>V</sub>)との比、DS<sub>0</sub>/DS<sub>V</sub>で示される。そしてこの係数は、WT試験および高速道路のデータによりSを変数として式(3)、図-2のようになる。なお、標準的なWT試験の載荷時間を、日本の実際の車両・交通条件をもとに換算すると走行速度約7.08(km/h)と推定される。

$$\text{Log}(V) = \text{Log} \left( \frac{DS_0}{DS_V} \right) = (-3.022) / S^2 + 4.403 / S - 0.558 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

DS<sub>0</sub>：標準条件(60℃, 42回/分)での動的安定度(回/mm)

DS<sub>v</sub> : 走行速度Sにおける動的安定度 (回/mm)

S : 車両走行速度 (km/h)

これによると、Sがおおむね10km/h以下になると走行速度補正係数が急激に上昇し、それに伴い推計DS値も上昇することが分かる。このことから、極端な低速走行が見られる途上国の勾配区間やハンプ前後で流動わだち掘れが顕著に発達することが説明できる。

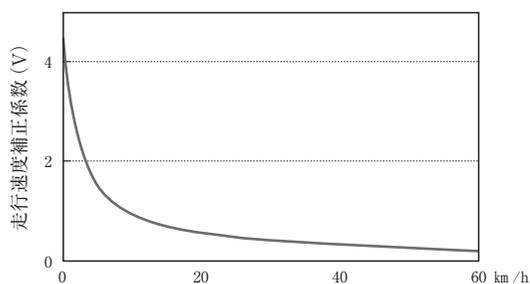


図-2 走行速度 (S) と走行速度補正係数 (V)

### 2.2.3 温度補正係数 (C<sub>t</sub>)

温度補正係数 (C<sub>t</sub>) は、標準的WT試験による動的安定度 (DS<sub>0</sub>) と舗装路面温度 (T℃) に相当する動的安定度 (DS<sub>t</sub>) の比、DS<sub>0</sub>/DS<sub>t</sub> で示される。これは、試験温度を変えたWT試験から求められた式(4)で表される。

$$\text{Log}(C_t) = \text{Log}(DS_0/DS_t) = 0.0003216T^2 + 0.01537T - 2.080 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

DS<sub>0</sub> : 標準条件 (60℃) での動的安定度 (回/mm)

DS<sub>t</sub> : 試験温度 T (℃) における動的安定度 (回/mm)

T : 舗装路面温度 (℃)

式(4)の出典資料では、時間ごとの実測データから使用する温度を設定することが提案されているが、入手できない場合は月平均気温を使用し、舗装設計便覧に示される式(5)から舗装路面温度を推定しても結果に大きな差はないことを確認している。

$$M_p = Ma \left[ 1 + \frac{2.54}{z+10.16} \right] - \frac{2.54}{9(z+10.16)} + \frac{10}{3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

M<sub>p</sub> : 月平均舗装温度

Ma : 月平均気温 (℃)

z : 温度を推定しようとしている点の表層上面からの深さ (cm)

舗装路面温度は z = 0 の場合であるので、これを M<sub>p0</sub> とすると式(6)のようになり、これが式(4)の舗装路面温度 T に相当する。

$$M_{p0} = 1.25Ma + 3.055 \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、この式によれば、月平均気温が仮に30℃と高温であっても、式(4)に代入する舗装路面温度は約40.5℃であって、直射日光を浴びた昼間の舗装路面温度 (60℃~70℃) ほど高温ではない。各地の温度補正係数の計算例を表-2に示す。

表-2 各地の温度補正係数の例

	国/地域	都市	年平均気温 (℃)	温度補正係数 (C <sub>t</sub> )
Japan	Fukushima	Koriyama	11.6	0.027
	Tokyo	Nerima	14.8	0.035
	Miyazaki	Saito	16.8	0.039
	Okinawa	Ohara (Iriomote)	23.1	0.060
Asia	Cambodia	Phnom Penh	28.2	0.097
	Myanmar	Naypyidaw	27.0	0.087
	Vietnam	Hanoi	24.0	0.068
	Vietnam	Ho chi minh	28.0	0.095
	Indonesia	Jakarta	28.4	0.098
	Bangladesh	Dhaka	26.1	0.081
	Tajikistan	Dushanbe	15.1	0.035
	Mongol	Ulan Bator	0.3	0.015
	Nepal	Katmandu	18.2	0.039
Africa	Kenya	Nairobi	17.7	0.033
	Uganda	Kampala	22.7	0.053
	Uganda	Jinja	22.0	0.049
	Tanzania	Dar es Salaam	25.8	0.074
	Ethiopia	Addis Ababa	16.3	0.029
	Ghana	Accra	27.1	0.085
	Guinea	Conakry	26.4	0.079
	Mozambique	Maputo	22.9	0.056
	Zambia	Lusaka	20.3	0.043
	Cote d'Ivoire	Abidjan	26.9	0.083
	South Sudan	Juba	28.0	0.095
	D. R. Congo	Kinshasa	25.5	0.071

### 2.3 施工業者の配合設計と施工

以上のような手順における関係者の責任を整理しておく。

ハンドブックでは、コンサルタントは目標DS値を提示するが、これは技術仕様ではなく、積算上の前提条件であり、また施工業者が行う配合設計のための参考情報であるとしている。それは、調査段階では路面温度等のデータも限られ、実際の骨材を使ったWT試験の実施が困難で改質材投入必要性等の最終判断ができないこと等から、配合設計は施工の一工程として、実際の材料や機械によって施工する施工業者が最終的な責任を有しているからである。なおこのような背景から、施工段階ではマーシャル試験による場合もWT試験が必須であって、工事の積算には反映されている。

施工業者としては、交差点、ランプ前後、勾配区間、渋滞区間なども考慮して改質材の採用などきめ細かい対策を講じておくことが必要となる。問題となるような流動わだち掘れは、供用後数ヶ月以内に発生する場合が多い。その場合は施工業者の責任で補修工事が行われる。なお、事業の瑕疵担保期間はほとんどの例で1年であり、一年後に瑕疵検査が行われる。

### 3. 耐流動性向上のための配合設計

ここでは、舗装の早期破損の主な形態である流動わだち掘れについて着目し、開発途上国の現地事情を鑑み、ストレートアスファルトを使用することを前提として、耐久性を確保しつつ、耐流動性向上を図るための材料選定と配合設計法について、JICAで実施した試験結果等について紹介する。

#### 3.1 試験概要

これまでの国内の知見に基づき、マーシャル安定度試験による配合試験およびホイールトラッキング試験を実施し、材料や配合の違いが耐流動性に与える影響を定量的に確認することを目的とした。

試験に用いた混合物の種類は、耐流動性に有利とされる最大粒径20mmの密粒度混合物（75回突き）とし、粒度は中央粒度、最適アスファルト量（以下OAC）は、密粒度混合物の各基準値を全て満たす共通範囲の中央値とした。

空隙率等の計算には、各材料の比重から計算する理論最大密度ではなく、海外において主流であり合理的であるRice法と呼ばれる最大密度試験（舗装調査・試験法便覧G027）による実測値を使用した。配合試験において、理論最大密度（計算法）を使用したときの空

隙率には、骨材内部の空隙（水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙）が含まれる（図-3）。この空隙は混合物としての容積構成に何ら寄与せず、無意味なものである。一方で、実測（Rice法）で求めた最大密度を使用すれば、骨材内部の空隙は除外される<sup>6)</sup>。その場合、最大密度は小さくなる傾向にあり、必要な空隙率を確保するためのアスファルト量が少なくなるため、OACは減少する傾向がある。

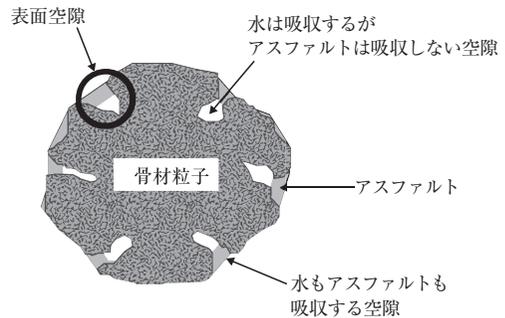


図-3 アスファルト混合物中の骨材の状態<sup>6)</sup>

耐流動性は、ホイールトラッキング試験による動的安定度（以下DS）により評価した。また、耐流動性以外の指標についても確認試験を実施した。

#### 3.2 試験結果

##### 3.2.1 原材料の違いによる影響

アスコンに使用する各原材料を複数組み合わせることで配合試験を行い、OACにおけるマーシャル安定度およびDSについて比較検討した。

- (1) 粗骨材：粒形の違いによる影響を比較するため、一次破碎（非売品）、三次破碎（標準品）、四次破碎（特注品）の3種類を使用した。
- (2) 細骨材：粒形の違いによる影響を比較するため、天然砂（川砂）、砕砂、混合砂（天然砂：砕砂＝50：50）の3種類を使用した。
- (3) フィラー：種類の違いによる影響を確認するため、石粉、セメント（普通ポルトランド）、回収ダストの3種類を使用した。
- (4) アスファルト：針入度の違いによる影響を確認するため、ストレートアスファルト40/60、60/80、80/100の3種類を使用した。

試験結果より、各パラメータがDS値の増減に与える影響とその影響の度合いを示した表を表-3に、針入度および細骨材の天然砂・人工砂比率とDSの関係を図-4に示す。

表-3 各パラメータの影響度

パラメータ	項目		影響度*	
	小	大		
粗骨材の粒形	丸い	角ばり	極小	
	扁平	方形	極大	
細骨材の種類	天然砂	混合砂	人工砂	大
フィラーの種類	ダスト	セメント	石砂	極大

※影響度：DS小とDS大の差を表す。目安は、極小 3%未満、大 10%~20%、極大 20%以上である

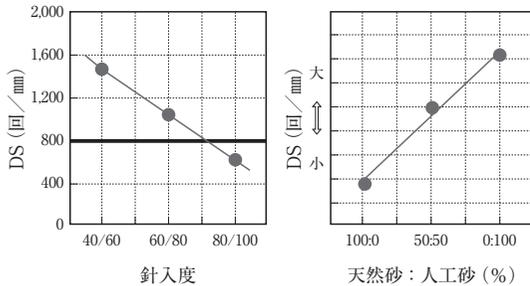


図-4 針入度、細骨材比率とDSの関係

### 3.2.2 配合の違いによる影響

次に、代表的な材料を用いて配合試験を行い、DSについて比較検討した。

- (1) アスファルト量：OACを基準に±0.5%増減した3点について比較した。
- (2) 粒度：粒度は、中央粒度を基準とし、2.36mm通過質量百分率（以下、2.36mm通過量）を±12%、±4%増減させた計5粒度について比較した。増減幅は、それぞれ国土交通省「土木工事管理基準および規格値」およびNEXCO「施工管理要領」を参考にした。

試験結果より、各パラメータとDSの関係を図-5に示す。

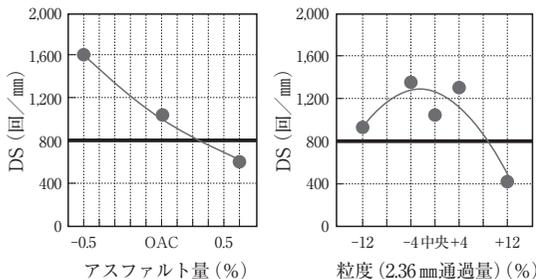


図-5 アスファルト量、粒度とDSの関係

### 3.2.3 SGC (Superpave Gyrotory Compactor) による縮固め試験

SGCは米国のSuperpave配合設計法に用いられている供試体作製の旋回式縮固め試験機である。施工時のローラ転圧および実際の交通による舗装のこね返し（ニーディング）効果を再現するのに適しているとされている。

縮固めに要する規定旋回数Nは、予定交通量によってN<sub>ini</sub>（初期旋回数）、N<sub>des</sub>（設計旋回数）、N<sub>max</sub>（最終旋回数）が定められる。N<sub>ini</sub>は、フィニッシャーで敷きならした直後（転圧前）の状態を示した旋回数であり、縮固め易さを評価している。N<sub>des</sub>は、目標密度に到達する旋回数で、供用期間半ばの縮固め状態を評価している。N<sub>max</sub>は、供用期間終了後の終局圧密状態を評価している<sup>7)</sup>。

今回は、便宜上それぞれの段階での空隙率をV<sub>ini</sub>（初期空隙率）、V<sub>des</sub>（設計空隙率）、V<sub>max</sub>（最終空隙率）と定義した。V<sub>ini</sub>は、初期の段階で縮固まり過ぎないように下限値が定められている。V<sub>des</sub>は設計As量を定めるものであり4%と定められている。V<sub>max</sub>は耐流動性の指標とされ、2%以上と定められている。

今回は、最重交通（ESAL ≥ 30 × 10<sup>6</sup>）を想定し、試験旋回数を設定した。N<sub>max</sub>終了後の供試体の最終空隙率V<sub>max</sub>とDSの関係を図-6に示す。図-6より、DS=800横ラインおよび最終空隙率（V<sub>max</sub>）2%の縦ラインを引き4つのブロックに区分けしてみると、V<sub>max</sub>2%以上であるとDS = 800回/mmを確保していることがわかる。

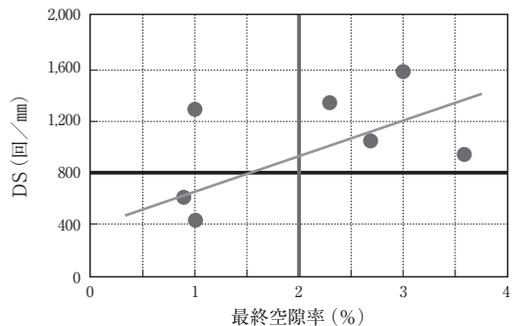


図-6 最終空隙率とDSの関係

### 3.2.4 その他の指標

混合物の性状を示す指標には、耐流動性のほかに、耐水性（水密性）、たわみ追従性、ひび割れ抵抗性などがある。それらは一般に、耐流動性と相反関係を示す。そこで、耐流動性以外の性状を確認する目的で、下記の試験を実施した。

#### <水浸WT試験>

水浸条件下での剥離抵抗性を確認するために実施した。今回の試験結果からは2.36mm通過量とアスファルト量の違いによる剥離抵抗性への影響は見られなかった。

#### <曲げ試験>

低温時におけるたわみ性を確認するために実施した。今回の試験結果からは2.36mm通過量とアスファルト量の違いによる曲げ強度や曲げひずみへの影響は見られなかった。

#### <圧裂試験>

混合物のひび割れ性状やDSとの相関を確認するため実施した。今回の試験結果からは、2.36mm通過量 $\pm 4\%$ 、OAC $\pm 0.5\%$ の範囲では、ひび割れ性状に影響は見られなかった。圧裂強度および圧裂強度比とDSとの相関関係は見られなかった。

### 3.3 耐流動性向上のための配合設計時の留意点

耐流動性を向上させる方法として、下記の事項が有効であることが示された。

- 理論最大密度ではなく、試験による実測の最大密度（Rice法）を適用すると、OACが小さくなりDS値は向上する。
- 粗骨材は、角張りが多く、扁平の少ないものを使用する。
- 天然砂より人工砂の比率を上げる。
- フィラーは石粉を使用する。ただし、対象国において石粉が入手困難である場合が多く、採用できないことがあるので留意する。
- アスファルトの針入度グレードを下げる（針入度40/60の採用）。
- アスファルト量を $-0.5\%$ の範囲で減じる。ただし、耐水性やひび割れ抵抗性など、ほかの耐久性の指標も併せて確認し、総合的に判断する必要がある。
- 粒度は2.36mm通過量が $\pm 4\%$ の範囲で調整するのはよいが、 $\pm 12\%$ では耐久性が著しく低下する可能性がある。
- SGC締固め試験において、最終空隙率 $2\%$ 以上確保すれば、DS値も一定レベル確保できる可能性が高い。

## 4. 品質向上に向けて今後の課題と展望

### 4.1 耐流動性向上に向けた技術的課題

3. で述べた耐流動性向上のための留意点は、国内では一般論として広く知られている知見である。今

回は、海外で問題となる粗骨材、細骨材の種類などの重要性を定量的に再確認することができた。これらの結果は、「JICA無償資金協力事業 道路舗装ハンドブック」(<https://libopac.jica.go.jp/images/report/P1000043701.html>)に反映され公開されている。

近年、米国をはじめとして諸外国ではジャイレトリリーコンパクトを用いたSuperpave配合法または類似の容積設計法が普及している。骨材骨格（骨材のかみ合わせ）に配慮した粒度、細骨材の形状、交通荷重による圧密完了後の終局空隙率などが規定されており、供用中の舗装の再現性や耐流動性を重視した配合法である。タンザニア等、一部のアフリカ諸国では従来のマーシャル法に代わってSuperpave法を配合設計法に採用する動きがある。対象国において、この配合法を採用することを求められる場合があるため、日頃から対応を念頭に置いておく必要がある。

一方、マーシャル法であっても、目標DS値の設定とWT試験によって、耐流動性を明確化することが可能となる。その際、骨材骨格に配慮した粒度、細骨材の形状などに留意して、ストレートアスファルトで最大限の耐流動性を発揮するよう努めて経済性を確保し、必要と想定されるDS値から判断して、ストレートアスファルトでの対応が困難なレベルの場合に改質材を使用するという手順が好ましいと考える。なお、配合設計に当たっては、実測による最大密度（Rice法）を適用することが強く推奨されている。

### 4.2 品質確保・向上に向けた検討課題

わだち掘れに関して、現場で発生しがちな責任論の解決策にふれる。課題は洪滞や過積載車両の存在もあって流動化以外の原因によるわだち掘れが発生し、発注者と許容限度を巡って論争となることである。施工直後から発生する流動わだち掘れは責任も明確であるが、構造的といえる圧縮変形によるわだち掘れについては施工者の責任限度は微妙である。なぜなら適正に施工された舗装であっても、交通荷重によって圧縮変形によるわだち掘れが一定程度発生するからである。

このため、舗装の計画年終了時において、例えば本邦幹線道路の舗装管理基準<sup>4)</sup>において修繕が必要とされるわだち掘れ量（40mm等）を目途とし、わだち掘れの予測式を使って、完成一年後にどの程度のわだち掘れが許容されるかの基準を設定することが考えられる。一例であるが、混合物層のわだち掘れの力学的予測式は式(7)で表される<sup>5)</sup>。

$$RD(T, N) = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \Delta w \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

RD (T, N) : わだち掘れ量

T : 温度 (華氏)

N : 通過輪数

$\Delta w$  : 一定の輪荷重 (5 t 輪荷重) に対応するアスファルト混合物層の圧縮量

$a_1, a_2, a_3$  : 定数

温度 (T) の条件が変わらないとし、また  $\Delta w$  は同一材料では同一と見なすと、式(7)は、通過輪数 N のみを変数とする式となり、また通過輪数を経年数 (Yr) で置き換えると、わだち掘れ量 (RD) は式(8)で表される。この式で表わされるわだち掘れの発達傾向は他の報告の傾向とも一致する<sup>8, 9)</sup>。ただし原式のパラメータに適用限界 (0.5 インチ) があるので、外挿となるがここでは近似式として扱うとする。また  $a_3$  は Shell の試験結果の 0.4<sup>5)</sup> とする。

$$RD \cong a Yr^{0.4} \dots\dots\dots (8)$$

例えば Yr = 10 (年) の時 RD = 40mm とすると定数  $a = 15.92$  であり、一年目すなわち Yr = 1 の時 RD = 16mm と推定できる。なお、この式は舗設直後の急激な圧縮も含むと考えられるので、わだち掘れの計測は舗設直後からの経年数によるものである。実際には更に安全率ないしは信頼度を考慮する必要がある。

品質確保・向上の観点と責任の範囲を明確化してトラブルを予め避ける観点から、瑕疵担保期間の許容わだち掘れ量の設定を提唱しておきたい。

## 5. まとめ

熱帯諸国では高温という自然環境の他、急激な経済成長に伴う物流の急増、大型トレーラーの普及などもあって流動わだち掘れが共通の課題となっている。本稿では、JICA により進められている舗装の損傷対策の概要、中でも流動わだち掘れ対策としての配合設計の目標 DS 設定、改質材活用を目安、WT 試験の推奨など、JICA 事業の実態に即した舗装工事の計画・設計段階の新たな手順を紹介した。また、施工段階への示唆事項としてホイールトラッキング試験結果と耐流動

性対策の詳細を紹介した。

近年の海外の舗装技術の動向に着目すると、海外事業における経済的な施工のためにはストレートアスファルトで耐流動性を確保することが肝要であることを強調した。その際、最大密度試験に関しては、国内で使われる理論最大密度ではなく、海外において主流である Rice 法と呼ばれるによる実測値採用の必要性を述べている。

今後の課題として、マーシャル法による場合には WT 試験は不可欠であり、JICA でも積算の前提としていること、一方、国によっては Superpave 法などでジャイレトリーコンパクタも普及しており、対応が必要であることを紹介した。また、品質の確保・向上と瑕疵の論争をさけるため、瑕疵担保期間における許容わだち量を定めることを提案している。

なお本稿は、JICA 道路舗装ハンドブックの背景と内容を紹介・解説したものであるが、「4. 品質向上に向けて今後の課題と展望」の見解に関わる内容には筆者の個人的見解が含まれることをお断りしておく。

## — 参考文献 —

- 1) 高田心他：「JICA 道路舗装ハンドブックの改訂について」土木施工、2020年12月号、pp.90-93
- 2) 日本道路協会：「舗装の構造に関する技術基準・同解説」平成13年度版
- 3) 伊藤豪誠他：「アスファルト混合物の動的安定度の目標値設定手法の提案」土木技術資料31-1、pp. 30～35、1989.1
- 4) 国土交通省：舗装点検要領、平成29年
- 5) 土木学会舗装工学委員会：「舗装工学の基礎」平成24年、pp.74～78
- 6) 高橋 修：「実測法と計算法および加熱養生によるアスファルト混合物の理論最大密度の違い」土木学会舗装工学論文集 第14巻、2009年12月
- 7) Asphalt Institute：[MS-2 7thEdition Asphalt Mix Design Methods]
- 8) 阿部頼政：「わだち掘れ測定データの解析法に関する研究」土木学会論文集No. 478/V-21、pp. 117～123、1993年11月
- 9) 飯田章夫他：「高速道路における密粒度アスファルト舗装のわだち掘れ量の実態調査と耐流動性の評価」土木学会舗装工学論文集 第4巻、pp.173～177、1999年12月

# モンゴル・ミャンマーにおける浸透式マカダム舗装

(Penetration Macadam Pavement In Mongolia and Myanmar)

小 黒 幸 市\*

開発途上国では未だ舗装率は低く、物流や人の往来に欠かせない道路舗装の要望は高まる一方である。しかしこのような国々、特に地方部では当然のことながら舗装施工に必要な機械は種類や保有台数類も少ないのが実状である。近年日本では実施されることの少なくなった浸透式マカダム工法は、人力施工も可能であると同時に多くの機械を必要としないことから、モンゴルおよびミャンマーにおいてこの工法を表層とした簡易舗装の技術移転と基準づくりの側面支援をした。

## 1. はじめに

開発途上国では大都市内の道路や都市間を結ぶ幹線道路の舗装は大分進んでいる。しかしながら地方部では都市から村々を結ぶ道路や、集落内の生活道路は未舗装が多い。

これ等の道路を舗装する際の舗装技術基準は、今から10数年前には十分に確立されている国々は少なく、植民地時代の統治国や経済的な影響を受けている国の基準を準用することが多いように見受けられた。

一般に交通量が少ない道路が圧倒的に多いことから、それらを対象とした舗装技術基準作りの要請がモンゴルおよびミャンマーよりあった。

支援する費用は「JICA 草の根技術協力事業」を申請した。草の根技術協力事業の趣旨である生活環境改善が大きな目的であることから、地元住民参加型の舗装を実施することとなった。

これには浸透式マカダム工法を表層とした簡易舗装が適しており、試験舗装を実施して技術移転を図るとともに、その後の経過観察を行った結果を基に基準作りを側面的に支援した。

## 2. 浸透式マカダム舗装

### 2.1 マカダム舗装

マカダム工法は今より約200年前、スコットランド人の John Loudon MacAdam が発明したもので、その名が付けられている。

稜角に富んだ碎石を敷ならして噛み合わせ、さらに目

潰し材を用いることでより一層噛み合わせが良くなること等、当時としては画期的な工法であった。

その後、マカダム工法は様々改良され、路盤として水締めマカダム、砂締めマカダム、楔（くさび）石マカダムがある。また表層としては浸透式マカダムがあり、主骨材となる碎石を敷ならして締固める。その上に瀝青材（ストレートアスファルト、カットバックアスファルト、アスファルト乳剤等）を散布し、目潰し材となる碎石を散布する。これを何層か繰返す工法である<sup>1)</sup>。

### 2.2 日本における浸透式マカダム

建設省（昭和39年当時）は道路舗装は線形や幅員、舗装構造等を道路構造令に則り構築する「改良」が前提であった。

しかし舗装率が思うように伸びない中、舗装への要望は強まる一方であったことから、国は「改良」後の舗装とは別に、未改良のままでも舗装のできる新たな国庫補助事業を実施した。これは「特殊改良四種事業」（通称特改四種または特四舗装）といい、その後の地方自治体の主要地方道は一気に舗装率を伸ばしたのである。

この事業を実施するに当たり技術的マニュアルとして昭和39年（1964年）に「簡易舗装要綱」が発刊され、その後昭和54年（1978年）に改訂版が出された。

簡易舗装はアスファルト舗装要綱にならい簡易な構造の舗装であり、通常、表層および路盤から構成され、表層厚さは一般に3～4 cm程度の舗装である。

対象となる道路は大型車交通量が50台/日程度の比較的交通量の少ない箇所であり、大きな特徴は現道

\*おぐる こういち 東亜サーベイ株式会社 顧問

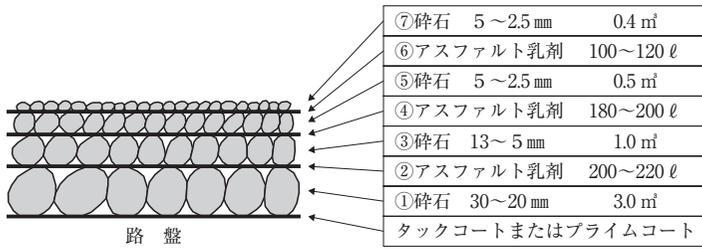


図-1 簡易舗装要綱の浸透式マカダム（アスファルト乳剤）厚3cmの仕様

（砂利道）の在来砂利層を路盤の一部として利用できることや、下層路盤材には良質な現地発生材の利用を奨めている。表層の工法のひとつが浸透式マカダム工法となっている。

この浸透式マカダム工法は特殊改良四種事業のほか、地方自治体の単独事業、特に市町村道には多く採用されたが、昭和40年代後半には急激に減少した。その大きな理由は舗装事業の増大に伴うアスファルトプラントの普及が進み、全国各地で容易にアスファルト混合物が手に入るようになってきたことによるものである<sup>1)</sup>

### 3. モンゴルにおける浸透式マカダム<sup>2, 3, 4)</sup>

#### 3.1 モンゴルプロジェクトの概要

モンゴルにおいては、このプロジェクトが開始された2002年当時の道路現況は国道・地方道が約49,000kmで、舗装延長は約1,800km、舗装率3.7%程度であり、殆どが未舗装であった。これとは別に車両が草原を走行することによって自然にできた道路（指定されていない自然道）は20万kmとも言われていた。

このような時期にモンゴル道路運輸観光省道路局長（当時）から、比較的交通量の少ない道路を対象としたモンゴル独自の舗装マニュアルを作成するための支援要請があった。

（一社）国際建設技術協会（以下国建協）がこれを受けてモンゴル簡易舗装委員会（委員長：矢野善章）を設置し、（公社）日本道路協会舗装委員会の側面的協力を受けながら、JICAの草の根技術協力事業を申請し、簡易舗装の技術移転を三度に渉り実施した。

Phase1はバガヌール地区での試験舗装、Phase2はウランバートル市内のチンゲルテイとウルジート地区、Phase3ではブルガン県、ドンドゴビ県、ゴビスンベル県で施工した。

なお、今回施工したすべての現場での作業員は、

「JICA草の根技術協力事業」の趣旨から地区の失業者を雇用することとし、その採用はホロ（日本より大きな自治会）長が面談して決めた。

#### 3.2 バガヌールでの試験舗装

##### 3.2.1 施工個所の選定

ウランバートルをはじめ大都市の旧市街地の周辺には、遊牧民をはじめ地方から移住する人たちが増え始めた。

彼らは当初はゲル（テント・遊牧民の移動住居）を主体に住居を構えたことから通称ゲル地区と呼ばれている。ウランバートル市から約120km東にある特別区バガヌールは炭鉱街でゲル地区も広い。そのゲル地区の幹線のひとつが試験舗装現場となった。



写真-1 試験舗装現場装

##### 3.2.2 試験舗装の舗装構成

試験舗装現場の交通量は当初は少なかったことから、舗装構成は図-2のような3工種とし、どの舗装構成が耐久性があるのかを比較した。モンゴルでは通常、CBR値の小さい路床は近隣の良質土で置換え、そ

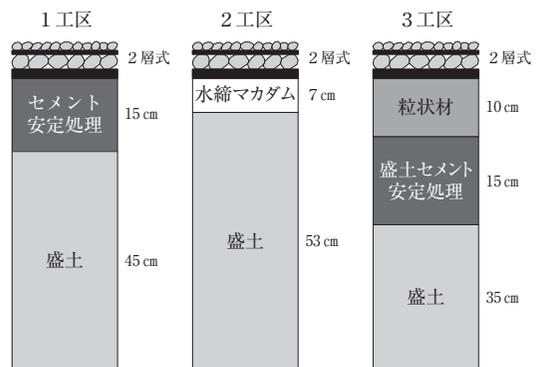


図-2 試験舗装工区と工種

の厚さは30～50cmである。セメント安定処理はモンゴル科学技術大学と足利工業大学が共同研究をなされていたので採り入れた。または失業対策事業として地元住民参加型が目的のひとつであったことから、人手が掛かる水締めマカダム工法も採用した。舗装表面は路盤上に散布式二層表面処理（DBST）を施した。

### 3.2.3 水締めマカダム路盤とセメント安定処理路盤

水締めマカダムの主骨材（80-60）は手並べで行い、目潰し材には切込碎石（20）を用いた。

セメント安定処理は混合に必要なスタビライザがないため、非常に粗っぽい手法であるがモーターグレーダのスカリファイアとブレードで攪拌混合を行った。

### 3.2.4 散布式表面処理（6，7号二層式）

モンゴルで使用されているアスファルトは90-130であり、これを灯油がないため軽油でカットバックした。事前に日本においてカットバック量を変化させた実験を行った結果、カットバック量は20%とし、散布はスプレーヤによる手散布で行った。適正な粘度で散布できるように簡易な粘度計（ニチレキ式ツワン粘度計）を

用いて散布粘度をコントロールした。

碎石は6号碎石（13-5）は入手できたもののその下は50mmなので、現場に大きな25mmのふるいを作り作業員が手ふるいをして7号碎石を準備した。

また碎石散布はスコップによる手散布を行ったが、モンゴルでは握り部のついたスコップがなく柄を切落とし握り部を取付け使用した。現在日本では手散布のできる技能者が少なくなっているが、モンゴルでは皆無であったことから毎夕散布の特訓を実施し、一週間もすると大部分の作業員たちは上手く撒けるようになった。

### 3.2.5 完成後一年経過時の状況

完成後一年の間に沿道には病院、郵便局、レストラン等が出来、街路灯も設置されていた。街を抜けるにはいろいろなルートがあるが、完成後はこの試験舗装道に集中して一気に交通量が増加し、当初の予想台数をはるかに超えることとなった。その結果、一年経過後一部に破損が生じたことから補修を行い、補修方法の技術移転も行った。



写真-2 カットバックアスファルトの温度粘度測定 碎石



写真-3 バインダと骨材散布



写真-4 完成直後の試験舗装現場



写真-5 施工後10年経過状況

試験舗装の結果として舗装面は表面処理でなく、簡易舗装の表層を実施することが望ましいと判断されたので、Phase2では表層（浸透式マカダム）を設けることとした。

尚、10年後に現地を訪問した時、5cmのオーバーレイがなされ歩道も設置されていた。支持力不足によるひびわれもあったが十分供用されており、感慨深かった。

### 3.3 チンゲルテイ、ウルジートにおける試験舗装

Phase2でウランバートルの北部に位置する大きなゲル地区チンゲルテイと西部のウルジートにおいて、図-3のように表層を浸透式マカダムとした舗装構成の試験舗装を行った。

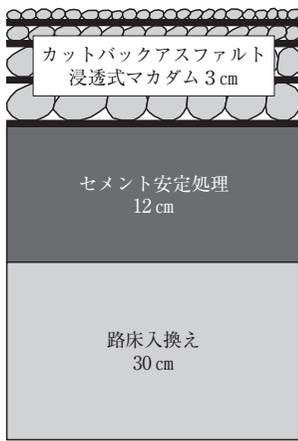


図-3 試験舗装の舗装構成

厚 3cmの場合

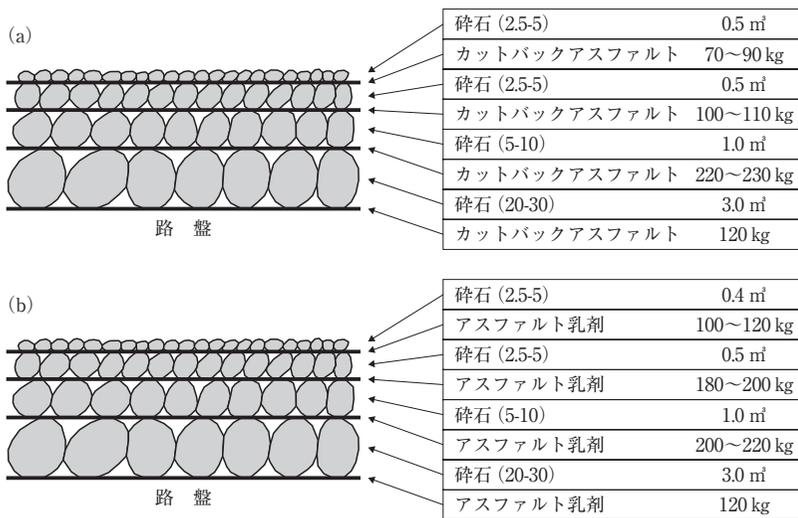


図-4 モンゴルの浸透式マカダムの仕様

チンゲルテイの現場は日本の援助で建てられた小中高一貫校の周りで、ウルジートの現場は小学校と幼稚園間の道路である。

#### 3.3.1 セメント安定処理路盤

セメントは一袋50kgの袋物を手撒きしたのち、バグヌール現場と同様にモーターグレーダのスカリファイヤで3往復程度の攪拌混合した。水も十分確保できたため、含水調整も十分行えた。



写真-6 セメント混合

#### 3.3.2 浸透式マカダム

バインダ散布量は一発勝負なので、当初は付きりで指導し感覚を身に付けてもらった。適量を一回で撒くのは大変難しい作業なので、ノズルから吐出する延長幅を半幅ずつ重ねることにより撒きむらを少なくし、均一に散布するには先ずスプレイバを腰の高さに平行

に保つことと、ノズルから吐出するバインダの散布角度を60°とするため、バインダを適正粘度で散布しなければならず、したがって温度管理が重要であることを理解させた。

主骨材となる4号砕石を始め、すべての骨材の散布量コントロールが中々上手でなかったため、若干少なめに散布し、後ろから少ない個所に補足する方法をとった。これにより骨材の散布ムラはなくなった。このバインダや骨材の散布量に関しては、日本においてもどの指針やマニュアルに記載されているのは単



写真-7 バインダ散布



写真-8 6号碎石散布

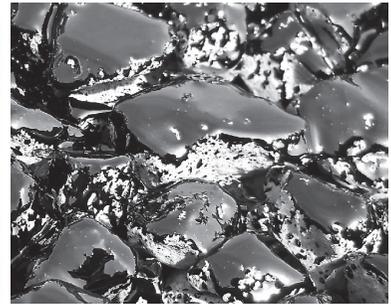
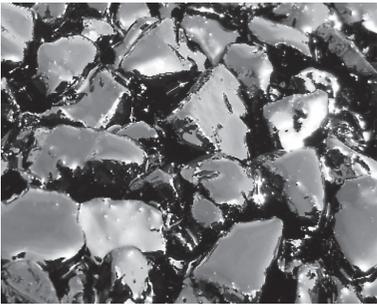


図-5 適正な散布面と過不足の散布面

位面積当たりの散布量である。理屈では分かるものの視覚でとらえて判断する施工従事者の判断資料としては乏しいと云わざるを得ない。どのような状態が適正なのかを理解してもらうために、後述の「簡易舗装の手引書」の中に写真で示した。スプレヤマンに事前に見せることにより散布ムラがなくなってきた。

また、碎石散布の作業員にも同様に見せ、決して多く散布しないようにすることと、手直し組には適正、過不足の写真を参考に、骨材の不足箇所にも補足してもらった。

締固めは各層ともマカダムローラ等のロードローラを用い、仕上げ転圧はタイヤローラを使用した。

どの地区でもわずか数百メートルに過ぎない舗装道路がゲル集落の中にできたことで、盛大な開通式が催された。道路運輸省道路局、JICAモンゴル事務所からも参加いただき、お祭りのような賑わいを見せた。ウランバートル市副市長の提案で、参加した作業員にはJICAモンゴル所長と国建協簡易舗装委員会委員長の連名で「研修修了書」を発行した。この「研修修了書」持っていると同様、周辺での同様の工事が発注されたときに優先的に採用してもらえるというものである。



写真-9 ウルジート着工前



写真-10 ウルジート完成後



写真-11 ウルジートでの開通式



写真-12 研修修了書授与者と

### 3.4 瀝青路面処理コミュニティ道路設計施工マニュアルおよび簡易舗装施工手引書

これらの試験舗装の結果を基に「瀝青路面処理コミュニティ道路設計施工マニュアル」および「簡易舗装施工手引書」が作成され、国建協簡易舗装委員会は側面支援を行った。マニュアル類はすべてモンゴル語で記され関係先に配布された。

その後、モンゴルの国家基準となり、日本の舗装技術基準が外国で初の国家基準となった。

このプロジェクトは2017年インドネシアのバリ島で開催されたアジア・オーストラレーシア道路技術協会 (REAAA) の第15回道路会議で「Mino Best Project Award」を受賞し、モンゴル道路局と国建協が表彰を受けてきた。

その後、日本道路協会とモンゴル道路協会共催での舗装講習会を2018、2019年開催し、現在もその関係は続いている。

## 4. ミャンマーにおける浸透式マカダム

### 4.1 ミャンマープロジェクトの概要<sup>5)</sup>

モンゴルでの事例を参考に、NPO法人国際インフラパートナーズ (以下JIP) がJICA 草の根技術協力事業として、ミャンマー連邦共和国への労働集約型舗装工事を提案して採択され、未舗装の砂利道上で浸透式マカダム工法の技術移転を実施した (2012.6～2014.9)。

ミャンマーの地方部における舗装工事はほとんどが公共事業庁 (PW, 現建設省MOC) の直営で行われている。市街地はコンクリート舗装で、郊外はミャンマー式の浸透式マカダム工法が多い。ミャンマーでは従来から浸透式マカダム工法を施工しており、工法自体には非常に慣れているが、日本と大きく異なる点が

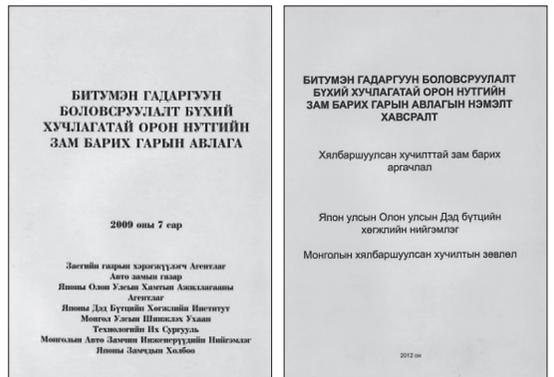


写真-13 瀝青路面処理コミュニティ道路設計施工マニュアルおよび簡易舗装施工手引書



写真-14 REAAAの授賞式

多い。現道 (砂利道) を路盤として用い、その上に必要であれば粒度調整碎石路盤を構築し浸透式マカダム工法を施工しているが、現道をそのまま上層路盤とする場合、平坦性は主骨材で調整するので幾層にも重なる箇所も多い。また主骨材はクラッシャーにより生産されたものもあるが、現場で大きな原石をハンマーで



写真-15 主骨材の手ならし

手割して使用することも多いようである。そのため仕様書の50～76.5mmより大きく100～150mmの碎石が多く見られる。バインダーにはストレートアスファルト(80-100)を用いているが、下撒き(プライムコート)は行っていない。そのため主骨材が交通荷重により動いてしまい破損の原因にもなっている。

試験舗装はヤンゴンの約120km西方のエーヤワディ地区のイレガレ村の中心部で実施した。

## 4.2 イレガレでの試験舗装

### 4.2.1 施工個所の選定

PWと協議の結果、試験舗装はエーヤワディ地区のモービンから車で一時間ほど西に走ったところのイレガレ村の中心を通る砂利道で、小学校に面した個所を選定した。

### 4.2.2 試験舗装の舗装構成

施工幅員は交通量により定められており3.7mになった。車両が交差する際に路肩にはみ出て舗装路側部の破損を心配し、日本の道路構造令にならい4mを提案したが認められなかった。一年経過後はやはり一部破損が生じていた。横断勾配はこれも4%と定められていたものを3%に変更してもらった。

### 4.2.3 浸透式マカダム

既設砂利道はよく締め固められているが、バスや大型トラック通過時にはかなりたむむ状態であった。粒度調整碎石の上層路盤を構築後、表層をして浸透式マカダムを施工した。

碎石は6号碎石が13-0、7号碎石が5-0と複粒でダストも多いため、5mmと2.5mmの簡易なフルイを作成し、現場でふるい分けを行い単粒碎石を準備した。

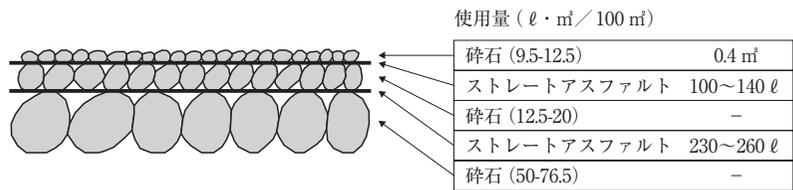


図-6 ミャンマーの浸透式マカダム工法の仕様

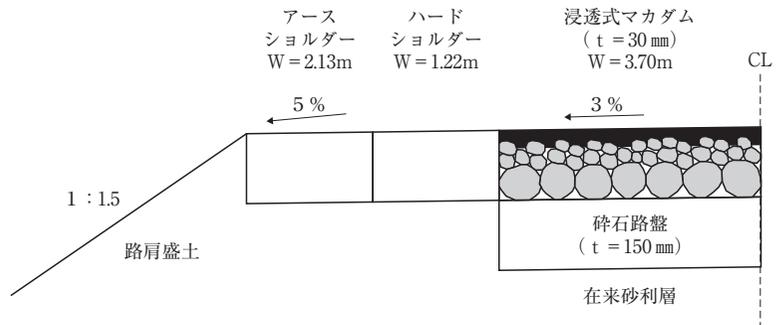


図-7 試験舗装の標準断面図

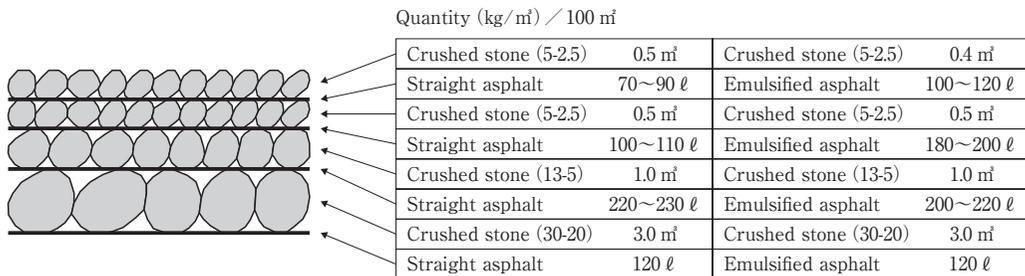


図-8 試験舗装の浸透式マカダムの仕様



写真-16 既設砂利道

バインダはストレートアスファルト80-100とアスファルト乳剤の二種類を試した。

アスファルト乳剤は直営の小さな乳化機で製造したものであるが、今後アスファルト乳剤は全国に広まると考えられるので、この現場で使用し後述のマニュアルにも載せた。

施工はモンゴルと同様の技術移転を行ったが、碎石散布は慣れている鉄鍋を使用してもらった。また、ミャンマーは竹が豊富で竹箒の入手は容易であることから、6号碎石には硬めの箒を、7号碎石や砂には穂先がたっぷりした箒を使い分ける技術を移転した。

浸透式マカダム工法で留意しなければならない点のひとつに、センタージョイント処理である。同一ラインでバインダや碎石が重なるとフラッシュや剥離の原因になりやすい。そこで写真-18のように、バインダ、碎石の散布を繰り返していく際、約5cmの幅にずらしながら施工し、反対車線はその逆を繰り返すことで解消できることを指導した。



写真-18 6号碎石散布



写真-17 6号碎石のふるい分け

#### 4.3 マニュアル作成とその後の経過

試験舗装の結果を基に準備工から表面処理(DBST)、浸透式マカダム表層工までのマニュアルがミャンマー語で作成された。

試験舗装現場の一年経過状況は、路側の破損が一部見られるものの、良い状態を保っている。PWは試験舗装後の一年間で、その延長の30kmを浸透式マカダム工法で施工し、実に良い出来形を示していた。

また、このプロジェクトとは別にJICA無償資金協力でミャンマーは道路建設機械を導入した。路床路盤構築に必要な機械の他に、表面処理や浸透式マカダムに必要なディストリビュータ、ダンプトラック、アグリゲートスプレッダ等である。

JICAの付帯条件の中に、前述のマニュアルを基に浸透式マカダムを、MOCの州の直轄部隊に200m程度の実施施工の中で技術移転することが含まれている。カレン州、ラカイン州、チン州、カチン州で現地指導を行った。



写真-19 ジョイント処理方法



写真-20 一年経過後の試験舗装現場

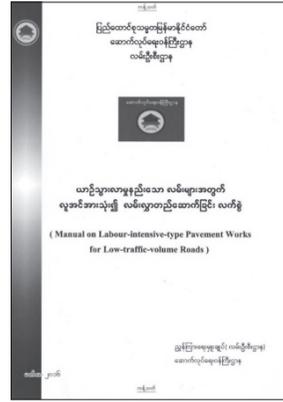


写真-21 マニュアル



写真-22 ディストリビュータ (カチン州)



写真-23 骨材スプレッダ (カチン州)

## 5. おわりに

浸透式マカダム工法はアスファルトプラントが行きわたっていない開発途上国では、大いに活用されてよい工法のひとつである。日本においても軽交通量の路線ではもっと採用されて良い工法のひとつと常々思うところである。

一番の特長はアスファルトが劣化しにくい点である。アスファルト混合物は混合時に劣化が始まり針入度は小さくなるが、浸透式マカダム工法では劣化する速度が遅く、10年後でもアスファルトのもつ軟らかさを保っている。

今後とも必要としている開発途上国での技術移転を行いたいと思っている。

この紙面をお借りしてこのプロジェクトにご協力いただいた(公社)日本道路協会、(一社)日本道路建設業協会に謝意を表します。

## — 参考文献 —

- 1) 多田宏行, マカダム工法の退場, 語り継ぐ舗装技術, p.70
- 2) 矢野善章, モンゴル道路舗装マニュアルとセミナー, 道路, 2007-3
- 3) 矢野善章, 日本のマニュアルもとにモンゴルが舗装基準認定, 道路, 2013-8
- 4) 小黒幸市, 小林耕平, モンゴルにおける労働集約型生活道路, 道路建設, 2013-11
- 5) 神長耕二, ミャンマーにおける労働集約型生活道路舗装工事の成果報告, 道路, 2015-8

# 縄文時代の天然アスファルトを求めて

(In Search of Natural Asphalt in the Jomon Period)

土居 貞幸\*

## 1. はじめに

わが国で天然アスファルトが使用され始めたのは、縄文中期から晩期（紀元前5000年～3000年）にかけてと見られ、国内（北海道、東北・北陸地方）に点在する縄文時代の遺跡から、修繕等を目的とした天然アスファルトが土器や石器に付着して見つかっており、所によっては天然アスファルトの塊や、それを加工したと思われる工房跡も見られたが、化学分析等を介しても、その採掘地については今のところ解明されていない。

そこで、天然アスファルトが盛んに採掘された最盛期である明治に記された文献等をもとに天然アスファルトの採掘地について推測を試みたいと思う。

## 2. 天然アスファルトの種類<sup>1, 2, 3)</sup>

一口に天然アスファルトといってもその生成過程の違いによって異なるので、本題に入る前に簡単に紹介しておくが、詳しくは「アスファルト誌154号<sup>3)</sup>」や「アスファルトの利用技術<sup>4)</sup>」を参照されたい。

天然アスファルトは、常温で液体のものから固体もしくは石や砂などに滲み込んだものと様々な形態をとり性状も異なるが、おおむね次に示す4種類に分類される。

### 2.1 レイクアスファルト

- ①地下より噴出した石油が地表の凹部に集積し、化学的変化をおこし個体となったもので、主な産出地はトリニダード・トバゴ（写真-1）。
- ②天然アスファルト流が蓄積したもので、主な産出地はアゼルバイジャンのバクーの南方。
- ③天然アスファルトの塊が時折湖面に浮かぶもので、産出地は死海。

### 2.2 ロックアスファルト

- ①岩層中の単層もしくは数層の岩石（石灰石、泥炭岩、白雲岩、砂岩等）が後世に発生した天然アスファルトに染鋳されたもので、産出地は主にスイ

ス、フランス、ドイツやアメリカ。

- ②湖沼等の低地において泥炭層の下層にある岩石より湧き出した石油がガスもしくは水の媒介によって上昇し地表付近もしくは地中において浸染し、変性作用を受けたもので産出地は秋田県豊川周辺。

### 2.3 オイルサンド

- ①流動性のない高粘度のタール状原油を含む砂岩層を指し、主な産出地はカナダのアルバータ州やベネズエラのオリノコ。
- ②天然アスファルトと砂が混ざって状態で存在するもので、我が国では秋田県の本荘市等。

### 2.4 アスファルタイト

地層の割れ目、とくに垂直のすきま鉱脈中に存在し、重合あるいは縮合作用をおこして石炭のような固い個体となったもの。

#### ①ギルソナイト

黒色でもろく硬いアスファルトで軟化点が高く、わが国には米国ユタ州の東部のギルソナイトが輸入されている。

#### ②グラハマイト

硬く、もろくギルソナイトより軟化点が高い。

#### ③グランピッチ

軟化点が180℃と他のものより高い。



写真-1 トリニダード・레이크アスファルト

\* どの さだゆき 元有限責任中間法人日本アスファルト協会 理事



写真-2 ギルソナイト

### 3. 我が国の天然アスファルト採掘地

我が国における明治時代の天然アスファルト採掘地については、山下孫三郎氏が「秋田石油アスファルト時報<sup>1)</sup>」第10号と12号に可能性のある場所も含めて紹介した記事を筆者なりに整理するとおおむね次のようになる。

#### 1) レイクアスファルト系

##### ①露出した天然アスファルト

- 秋田県金足村大字船橋, 大字高野, 大字草生土, 大字浦山 (現: 秋田市)
- 秋田県男鹿半島 (現: 男鹿市) の寒風山付近および船川燈臺付近 (燈臺付近のものは広く分布)
- 秋田県由利郡上郷村大字横岡地内 (現: にかほ市): 鳥海山麓の小字落の下
- 秋田県南秋田郡馬川村 (現: 五城目町) および上新城村 (現: 秋田市)
- 秋田県南秋田郡豊川村 (現: 潟上市), 横岡村 (現: 井川町)
- 青森県南津軽郡町居村 (現: 平川市) および吉

野田村 (現: 青森市)

##### ②天然アスファルト流

- 秋田県南秋田郡豊川村大字槻木小字真形尻の山地 (現: 潟上市)
- 山形県飽海郡日向村 (現: 酒田市)

#### 2) ロックアスファルト系

##### ①砂岩層

- 秋田県南秋田郡豊川村大字槻木小字嶋巻および真形尻の岡地, 大字浦山
- 北海道膽振国山越内村 (現: 二海郡八雲町)

##### ②泥岩層および泥炭層

- 秋田県南秋田郡豊川村大字龍毛および槻木 (現: 潟上市) より金足村大字岩瀬付近 (現: 秋田市)
- 秋田県金足村大字船橋, 大字高野, 大字草生土, 大字浦山
- 秋田県由利郡上郷村大字横岡地内: 鳥海山麓の小字落の下, 小字中谷地
- 秋田県山本郡富根村大字駒形 (現: 能代市)
- 青森県南津軽郡町居村および吉野田村
- 北海道北見国稚内村の海岸 (現: 稚内市) および膽振国山越内村

##### ③軽石層

- 秋田県山本郡富根村大字駒形

#### 3) アスファルタイト系

- 秋田県南秋田郡豊川村字保龍田 (現: 潟上市)

上記採掘地の主な場所を図-1に示したが、秋田県豊川周辺を中心とした近い地域に多種類の天然アスファルトが存在しているのは、おそらく世界でも我が国だけだと思うが、まさにベースとなったアスファルト基原油の賜物と言える。

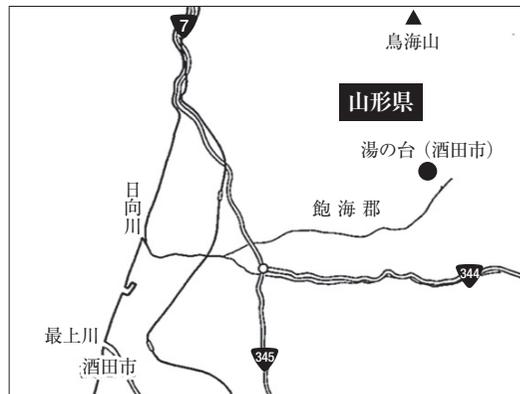
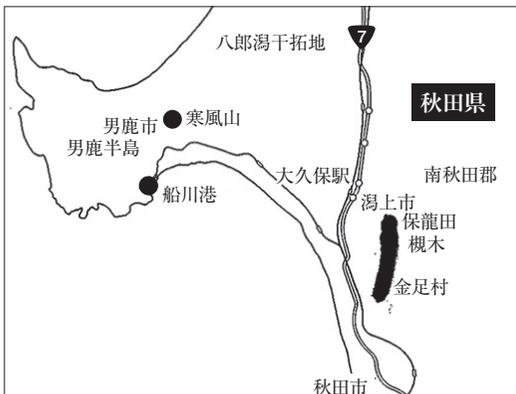


図-1 主な天然アスファルト原鉱の採取地

では、肝心の縄文時代における天然アスファルト採掘地については、おおよそ次のように推測している。

秋田県は、豊川周辺について秋田県立博物館が1976年に行った「秋田県南秋田郡昭和町槻木のナウマンゾウ化石産地調査報告<sup>6)</sup>」において…ゾウの化石は礫層に含まれていた。そして、この地域の礫層が原油を含んだ部分が調査時点でもぬるぬるしている状態でアスファルト化したところは固結していて、おそらくゾウがいた時代は礫層が噴出する原油に押し上げられて「ぬかるみ」となっていたことが想像される。…と報告しているの、縄文中期ころにもレイクアスファルト的な状態のところがあったと見ている。

山形県は、享保年間(1716年～1736年)に庄内藩が鳥海山の草津油田で石油を採取していた記録があるものの、天然アスファルトについては残念ながら古い時代の文献が見当たらず不明であった。

ただ、秋田から新潟にかけての油田地帯で採取される原油の大部分がアスファルト基原油であることから草津油田もアスファルト基原油であったと推察され、縄文時代もレイクアスファルト系の天然アスファルトがあったと考えている。また、「秋田石油アスファルト時報<sup>1)</sup>」で関根氏(寶田石油株)が山形産は秋田産よりも優れていると述べていることから後述の製造株の第一種上用品以上であった可能性もある。

なお、明治・大正時代を通して天然アスファルトの生産記録が残されているのは秋田・山形の2県に限られている。おそらく各地で採掘された原鉱を製品として加工、出荷する一連の工程を可能としたのが、秋田ないしは山形2県に限られたたのではないかと予測している。

しかし不思議なのは、採掘地として新潟県が含まれていないことで、「燃ゆる土」の献上地でもあったことから天然アスファルトの存在は知られていたと思うが、明治時代の文献には採掘の記載が見受けられない。ただ、新潟市文化財センターが行った新潟市秋葉区大沢谷内遺跡第14次調査<sup>5)</sup>で出土した板状・塊状のアスファルトについての採掘地を検討する際に新潟県の天然アスファルトについて調査を行い鎌倉新田、金津等(新潟市秋葉区)に散見されるとの報告があるので、今後の研究成果を待ちたいと思う。

#### 4. 天然アスファルト原鉱の精錬法<sup>2, 3)</sup>

ここまで文献等を参考に話を進めてきたが、そもそも明治時代に広く天然アスファルトが利用されるよう

になったのは、偏に、海外から精錬法がもたらされた事に起因している。原鉱の精錬は以下のとおりであるが、詳細は「アスファルト誌154号」又は「アスファルトの利用技術」を参照されたい。

- ①原鉱を天日乾燥をさせた後、前後にならべた釜の後釜に入れ余熱でさらに乾燥させる。
- ②前の釜でたき株で焚いて加熱溶解させるが、局部過熱を避け熔融を早くさせるため絶えず攪拌する。
- ③溶解して流動性ができれば、液面に浮いた夾雑物を取り除く。
- ④加熱を続けて所定の熔融点に達したところで加熱を止め、放冷し冷却固化させる。

なお、原鉱は採掘される場所によって山株、沼株または野地株と呼ばれ、用途は製造株、はたき、たき株の3種類に分類されていた。このうち精錬用には製造株が使用され、はたきは添加用に、たき株は精錬用燃料として使用された。また、製造株は表-1に示されているように2種類に分かれていた。

- ①第一種：夾雑物が少なく堅いものであるが、釜の中でかたんに溶解する。しかし、量はあまり採れなかった。
- ②第二種：夾雑物を多く含み、なかなか溶解しないうえ炭化しやすいために、瀝油または第一種を加えるので製品は柔らかく変形しやすかった。

表-1 秋田産天然アスファルト原鉱の性状

名 称		項 目	二硫化炭素 溶解分	有機 夾雑物	鉱物質 夾雑物
		製 造 株	第一種	上用品	87.41
中用品	50.81			12.04	38.15
下用品	70.17			15.32	14.51
第二種	上用品		45.29	12.14	12.37
	中用品		40.87	15.03	44.11
	たき株		30.52	11.03	58.45

この精錬方法によって得られた天然アスファルトは「萬代石」と呼ばれ、表-2に示されているように3種類に分けられていた。

この製法は、明治12～13年頃にドイツ人技師によって伝えられた技術書(筆者はおそらくロックアスファルトの精錬法だったと考えている)を基に試行錯誤を重ねた末に、生まれたもので、それまで我が国には原鉱を精錬する技術がなかった。明治10年に行われた「第一回内国勸業博覧会」で出品された天然アス

ファルトを用いて翌年に神田昌平橋で実際塗布された天然アスファルトは、精錬された物とは程遠く、粘土67%・水分10%・アスファルト分20～30%の土塊そのものだったと「秋田石油アスファルト時報<sup>1)</sup>」第310号で小村氏(日本アスファルト工業株)が述べている。

表-2 精錬された天然アスファルトの品質<sup>6)</sup>

	純良品	精製品	普通品
比重(摂氏15.5度)	1.10 - 1.25	1.25 - 1.40	1.40 - 1.50
光沢	光沢あり	鈍	鈍
柔軟点(摂氏)	50 - 80	80 - 95	80 - 95
臭	アスファルト臭	同左	同左
流動点(摂氏)	53 - 85	82 - 105	82 - 105
稠度(針入度)	0 - 10	0 - 5	0
蒸発減量 (摂氏163度5時間加熱 後の蒸発減量)	2.5 - 4.5	1.3 - 2.5	1.3 - 2.4
二硫化炭素可溶性瀝青分	60 - 80	50 - 60	40 - 50
無機不純物(灰分)	17 - 30	30 - 37	37 - 43
有機不純物	3 - 10	10 - 13	13 - 17
合計	100	100	100
固定炭素	12 - 14	13 - 18	13 - 18

柔軟点流動点はリチャードソン氏規定の方法により、稠度即ち針入度はダウ氏針入度試験機による

## 5. 縄文時代の天然アスファルトの採掘地について

縄文時代の遺跡から出土した天然アスファルトの塊は、どの遺跡でも不純物がほとんど入っていない状態で見つかっているが、一例としてアスファルト誌185号で阿部氏(南茅部町教育委員会)が紹介した北海道南茅部町の磨光B遺跡から出土した天然アスファルトの塊を写真-3に示す。

この写真-3と筆者が秋田県の昭和町歴史民俗資料館で撮った写真-4の天然アスファルト原鉱および

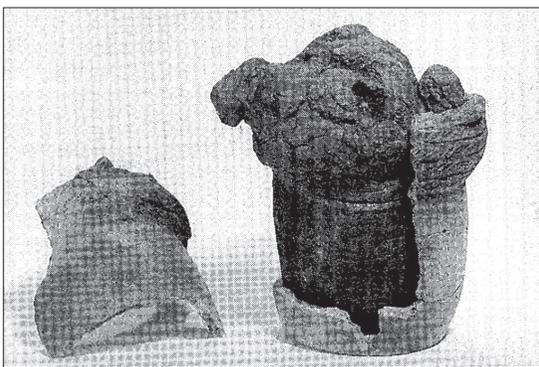


写真-3 遺跡より発見された天然アスファルトの塊<sup>7)</sup>



写真-4 天然アスファルト原鉱



写真-5 精錬された天然アスファルト

び写真-5の精錬された天然アスファルトを比較すると、遺跡からの出土物が精錬されたものに近いことが分かる。しかし、縄文時代にどのような天然アスファルトの精錬が行われていたかは、これまで遺跡が発見されておらず、実の所よく判っていない。

時代が縄文から弥生に移行する過程で生活様式が変化し、居住地や使用道具にも変化が現れ、不要になったのか弥生時代に入ると天然アスファルトの使用例はほとんど見受けられない。ただ弥生時代にも土器の使用は確認されており、修繕や防水を目的とする需要はあったと推測されるものの、天然アスファルトの使用は不思議と縄文時代の終わりとともに一旦途絶える。以降も、天智天皇7年(668年)に燃土として献上された記述が日本書紀に見られるが、寛政年間(1789～1801年)に油煙の製造に用いられるまで、積極的な利用の記録は残されていない。扱い方を知らないのだから無理もないが、その存在を知られながら天然アスファルトは、人々から持て余されていた事が窺える。

では、なぜ縄文時代の精錬技術が伝えられて来なかったか、弥生時代には天然アスファルトの使用例が無いのかという疑問が生じてくるが、これらについては次のように推測している。

- 縄文時代に採掘していた天然アスファルトが簡単な精錬もしくは精錬する必要がなく利用できた。
- 採掘していた天然アスファルトと当時もあったと思われる秋田豊川周辺に多量にある地中のロックアスファルトと同種とは思っていなかった。もしくは、地中のため発見できなかったので、枯渇とともに忘れられた（これは、筆者が秋田県昭和町で天然アスファルト原鉱を見たとき、土の塊にしか見えなかったことから伺える）。

従って、縄文時代は、元来混ざりものが少なく、比較的容易に加工しやすい“製造株の第一種”や“レイクアスファルト”に類する原鉱が採掘できるような環境、すなわち表層面に露出していたのではないかと推測される。

また、化学分析を介しても産出地の特定に至らなかったのは、天然アスファルトが生成過程の違いや地域によっても性状が異なるので、一度調査をすれば、多様なサンプルが求められる。しかしながらその多くは最盛期に採り尽くされ、現状では鉱床自体が枯渇し、確保が難しくなっている場所がほとんどと思われる。発展途上であった当時は、資源をいかに有効利用するかにかき目が置かれていたであろうから無理もないが、鉱床が掘り起こされずに残っていれば「縄文時代の天然アスファルトの産出地」の特定は思いのほか……少なくとも現状よりは、容易に叶ったかもしれない。

このような推論をもとに天然アスファルトの産出地を考察すると、“秋田県や山形県のレイクアスファルト系が採取されていた場所”が候補として挙がってくる。しかし、どちらであったか、または両方であったかについては現在の資料だけでは特定できない。

これは、函館市が行った「函館市縄文文化特別研究<sup>8)</sup>」において、北海道と青森から出土した天然アスファルト塊について化学分析が行ったところ“豊川と

駒形の天然アスファルトに近いもの”と“それ以外のもの”とに分けられたと報告しているので、秋田および山形の二カ所である可能性も出てきたためである。

## 6. おわりに

最後に、現時点で限られた文献等を参考に仮説を展開してきたが、秋田県にある秋田大学鉱業博物館を訪れ、隅々までまるで刷毛で塗られたかのように綺麗にアスファルトが付着した動物の化石を目にしたことが、我が国にもレイクアスファルトのような箇所があったのではないかと考え始めたきっかけだった。

願わくは、現時点で出土している天然アスファルトの塊を同一の基準で化学分析しておく事も忘れてはならない。

仮説に対する意見や批判があるかと思われるが、今後の調査や新たな遺跡の発掘に期待し、本文を締めくくりたいと思う。

## — 参考文献 —

- 1) 秋田石油アスファルト時報, 秋田鑛業時報社, 1910
- 2) アスファルトの歴史, アスファルト, Vol30, No.154号, 1987, p35～p41
- 3) アスファルトの利用技術, 社団法人日本アスファルト, 1997, p1～p5
- 4) 秋田県南秋田郡昭和町槻木のナウマンゾウ化石産地調査報告, 秋田県立博物館研究報告No1, 1976
- 5) アスファルト精製実験について, 新潟市文化財センター年報, 第2号, 2013年版, 2015, p73
- 6) 高桑藤代吉: 瀝青と舗道, No.5, 民友社, 1922
- 7) 阿部千春, 縄文時代のアスファルト, アスファルト Vol38, No.185号, 1995, p37
- 8) 函館市委託研究「函館市縄文文化特別研究」報告書, 弘前大学, 2013

# 東京湾要塞第一海堡調査から考察する 明治期のアスファルト防水技術

Asphalt Waterproofing Technology in the Meiji Era  
Considering from the Survey of No.1 SEA FORT OF TOKYO BAY

永原 篤\*・平戸 利明\*\*・野口 孝俊\*\*\*

東京湾要塞第一海堡は、明治初期に東京防衛を目的として東京湾口部に建設された海上砲台のひとつであり、千葉県富津岬の先端部に位置している。第一海堡は、軍事施設であるためその外観は、砂等で覆砂された地下構造物となっていた。この地下構造物には、コンクリートや煉瓦が用いられており、その外壁部には、防湿・防水を目的として黒色の粘稠状の材料が塗布されていた。本報告では、1881年（明治14）に着工し、1890年（明治23）に竣工した東京湾第一海堡の防水資材について構造物の現況調査や竣工から約130年が経過した防水材の化学分析を行うとともに建設当時の文献などから明治期の防水技術について考察を行っている。なお、本文で紹介する調査は、2019年に国土交通省関東地方整備局東京湾口航路事務所が第一海堡所有者の上陸許可を受けて実施したものである。

## 1. はじめに

東京湾要塞第一海堡（以下、第一海堡）は、明治初期に東京防衛を目的として東京湾口部に建設された海上要塞のひとつである。千葉県富津岬の先端に位置する第一海堡は、1881年（明治14）8月に着工した後、1890年（明治23）12月に竣工しており、その外観は、軍事施設であるため砂等で構造物は覆砂されていた。第一海堡の構造物は、コンクリートや煉瓦により構成されており、その外壁部には、黒色の粘稠材料（以下、防水材と称す）が塗布されていた。先に調査された第二海堡においても同様の防水材が構造物に塗布されており、その材料は、化学分析および文献調査の結果からアスファルトそのものやアスファルトとコールタールの混合物

であると考察されている<sup>1)</sup>。今回の調査では写真-1に示す覆砂が崩落し、構造物が直接確認できた5つの箇所において防水材が塗布されており、これら竣工から約130年が経過した防水材について現況調査や化学分析を行い、防水材を構成する材料判別や劣化状態について考察するとともに建設当時の文献などから明治期の防水技術について考察を行った。

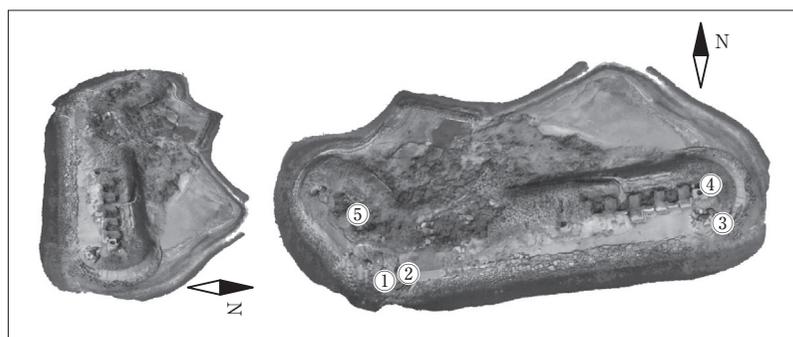


写真-1 第一海堡外観と防水材確認箇所<sup>2)</sup>

\*ながはら あつし 東亜道路工業株式会社 技術本部 技術研究所 第一研究室 室長

\*\*ひらと としあき 東亜道路工業株式会社 技術本部 技術研究所 第二研究室 室長

\*\*\*のぐち たかとし 国土交通省港湾局 海洋・環境課 海洋利用調査センター 所長

## 2. 東京湾要塞第一海堡調査概要について

### 2.1 東京湾要塞について

第一海堡は、先に述べたように千葉県富津岬の先端部に位置している。次いでその西約2,600mの位置に第二海堡は建設されている。海堡の位置図および諸元をそれぞれ図-1、表-1に示す。第一、第二海堡(写真-2)は、ともに『へ』の字型を呈した人工島であり、その内部の構造物は海上建築ということで、防湿を目的として砲台や燃料保管倉庫などには防水材が施されている。

### 2.2 防水材の外観調査と試料採取について

図-1に示した第一海堡の構造物には、写真-3、4に示すようにコンクリートや煉瓦が用いられ、目視できる外壁の防水材は1~15mm程度の厚みで残存している状況であった。壁面部に使用されている材料か



図-1 東京湾第一海堡の位置図  
(Google Mapより転載)

表-1 東京湾第一海堡の諸元<sup>3)</sup>

項目	第一海堡	第二海堡
工期	1881-1890	1889-1914
面積 (㎡)	約23,000	約41,000
職工人夫	約32万人	約50万人
総工費(当時)	38万円	79万円
総工費(現在価値)	17.5億円	50億円

※その他情報は、下記URLを参照いただきたい  
国土交通省関東地方整備局 東京湾口航路事務所 (mlit.go.jp)  
<https://daini-kaiho.jp/> 東京湾海堡ツーリズム機構



写真-2 東京湾第二海堡全景 (GoogleMapより転載)

らは、芳香系(タール様)の臭気がしていた。また、写真-6に示すように破断面には光沢や放射状の形を呈していることからアスファルトが使用されていると考えられた。アスファルトや石炭由来のコールタールは、温度(高温)や紫外線、酸素との接触により容易にその構成組成が変化すると予想されたため、材料の劣化状態や組成変化を確認する観点から極力外気との接触のない覆砂された箇所と砂が崩れて以降の



写真-3 第二砲台付近煉瓦構造物と防水材 (No.1, 2)

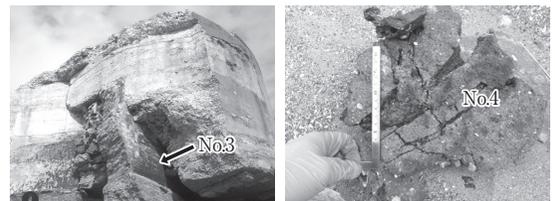


写真-4 右翼観測所の構造物と防水材  
(左: No.3, 右: No.4観測所下に落下していた防水材の塊状試料)



写真-5 内陸部構造物天端の防水材 (No.5)



写真-6 防水材 No.5の破断面 (光沢断面)

曝露期間は不明なもの構造物の防水材が外気に曝露されていた箇所それぞれ試料を採取し、種々の分析により比較評価した。

### 3. 防水材の分析

本調査で採取した試料には、構造物を覆い隠していた砂が混ざり込んでいたため、分析前処理として粘稠物質と固形物を分離する必要があった。また、温度影響により有機質材料が変質する可能性があったため、常温状態で分離する方法として図-2に示す流れで分離を行った。分離後、それぞれについて赤外分光分析、アスファルト成分分析、X線蛍光分析を実施した。

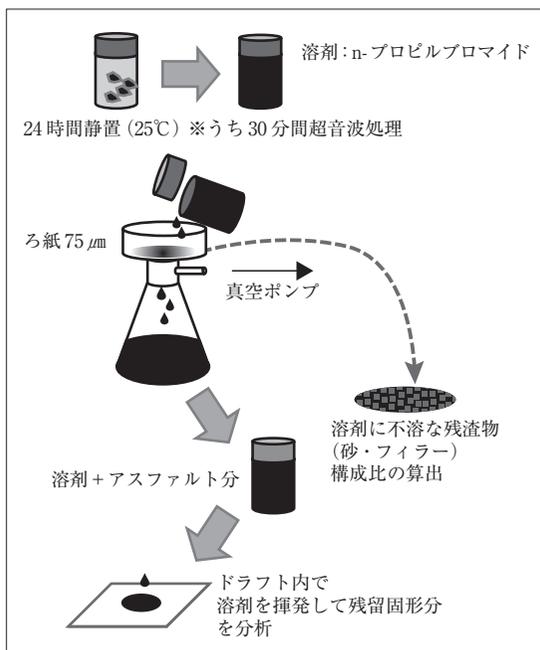


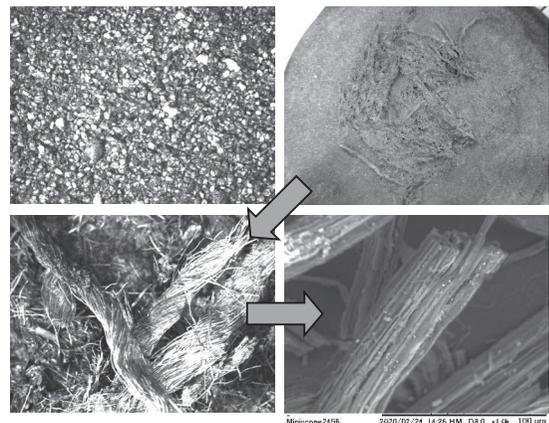
図-2 採取試料の抽出フロー

### 3.1 防水材の構成

採取した防水材から抽出した粘稠物質と固形残渣物の構成比率を上陸調査時の試料状態と合わせて表-2に示す。

#### 3.1.1 固形材について

前処理を行った結果から本調査で採取した防水材サンプルは大きく2種類に分けられた。ひとつは壁面に塗布された薄層のNo.1~4の防水材であり、砂が多く混入している状況であった。これは長きにわたり覆砂されていた影響が大きいと考えられるが、明治期の文献<sup>4)</sup>では、防水資材として砂や石粉の配合も記されており、防水資材の一部であった可能性も考えられる。もう一種は、構造物の天端に水平に設けられた防水材No.5で、こちらには写真-7下段左に示すような人為的に燃ったと思われる繊維(燃糸)が混入していた。この試料には全く砂分が認められなかったことか



上段左：No.3の残渣物(砂)、上段右：No.5の残渣物  
下段左：No.5の残渣物(燃糸形状)、下段右：燃糸顕微鏡観察

表-2 採取防水材の構成と上陸調査時の試料状態

No.	外 観	臭 気	試料状態	試料厚		防水材構成率		固形材料内容
				最小(mm)	最大(mm)	粘稠材(wt%)	固形(wt%)	
1	表面：光沢無 内部：光沢有(粘稠性)	タール臭	曝露	2	10	12.0	88.0	砂
2	表面：光沢無 内部：光沢有(粘稠性)	タール臭	覆砂	1	15	15.5	84.5	砂
3	表面：光沢無 内部：光沢有(粘稠性)	タール臭	曝露	1	10	15.8	84.2	砂
4	表面：光沢無 内部：光沢有(粘稠性)	タール臭	曝露	2	15	46.9	53.1	砂
5	表面：光沢無 内部：光沢有 ※貝殻状の破断面	無臭	曝露	10(一定)		91.7	8.3	繊維

ら人為的に作られた繊維材料を用いた防水技術であった可能性がある。写真-7下段右は、電子顕微鏡で繊維を拡大したものであり、空洞やその形状から天然の植物繊維質を呈していることがわかる。

### 3.1.2 粘糊材について

前処理によって分離した粘糊材について種々の分析を行いその構成や性状について評価を行った。

また、調査時に採取試料の臭気から仮定したタール系の材料混入について評価するため、ここでは現在入手可能なストレートアスファルト（以下、StAs）およびコールタール（図中、CTと記す）を比較試料として使用した。

#### (1) 赤外分光分析

赤外分光分析では、対象試料の分子構造（官能基）に応じた赤外光領域周波数の吸収帯から構造の推定を行った。比較試料として用意したStAs単体およびコールタール単体を加えた分析結果を図-3に示す。No.1～4の試料は、アスファルトの特長ピークである $2900\text{--}2700\text{cm}^{-1}$ 近辺の吸収が認められるのに加えてタール系材料の特長である多環芳香族を示すピーク群を含んでいることがわかる。これは、アスファルト中にコールタールの特徴的な成分が混入していることを示している。

一方、No.5の試料には多環芳香族を示すピークが認められないことや上陸調査時にNo.5のみタール

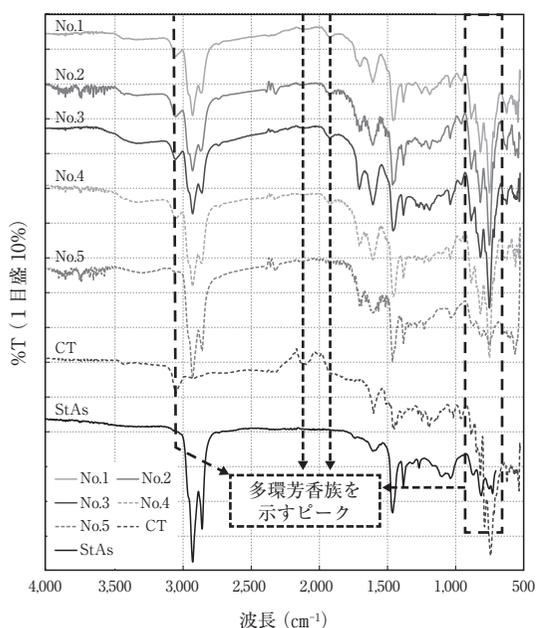


図-3 採取試料の赤外分光分析結果

臭がなく、硬い性状であったことからアスファルト単独で構成された防水材であることが窺える。

#### (2) アスファルト組成分析 (TLC/FID法)

アスファルトの構成組成は、大きく4つの成分に分けられ、劣化状態や材料構成などが評価できる。ここでは、TLC/FID法により分析を行った。結果を図-4に示す。

No.1～5全ての試料に飽和分が含まれており、タールの結果と比較するとアスファルトが含まれていると言える。No.1は、曝露部の試料採取であり、芳香族分が少なく、レジン・アスファルテン分が構成の80%以上を占めていることから長期間の曝露により劣化が進んでいることが窺える。No.5も同様にレジン・アスファルテン分が多く含まれることから劣化が進行している。また、飽和分が他の試料に比べ多く、比較のアスファルトと同程度比率で含まれていることからタール材の混入が無いと考えられる。

#### (3) エネルギー分散型蛍光X線分析

試料中に含まれる構成元素およびその含有率（原子量質量比）を求めた。本分析は、考古学、地質学分野において文化財に使用されていた素材判別や産地推定の方法としても使用されている<sup>5,6)</sup>。

ここでは、考古学分野においてアスファルトの原産地推定において考慮される硫黄（S）に着目し、分析を行った。結果を図-5に示す。

No.1～4の炭素-硫黄の割合はほぼ同じであり、同一の材料構成であると窺える。今回使用したコールタールは当時の材料では無いため、単純に比較はできないが同程度の硫黄分を含んでいる結果であった。No.5材料は、硫黄含有率が他の試料の4倍程度あり、明らかに別構成を持つ材料であることがわかった。

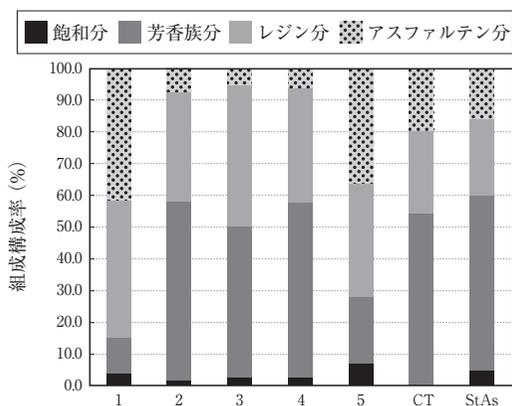


図-4 採取試料の組成分析結果

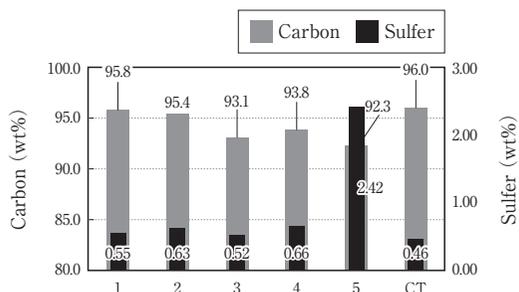


図-5 炭素-硫黄分析結果

### 3.3 明治期の防水材

上記分析結果より、第一海堡壁面に使用されていた防水材の粘稠材は、コールタールおよびアスファルトの混合材料であり、構造物天端に施工されていた防水材はアスファルトそのものであると考えられた。ここで、コールタールおよびアスファルトについて、第一海堡が建設されていた時代にどこから入手した材料であるのか文献調査や分析結果から考察を行った。

#### 3.3.1 タール

明治初期より、ガス灯事業の副産物であるコールタール（当時ガスタールと呼称されているため、以下ガスタールと称し、今回試験に用いたものは、コールタールと分けて称す）<sup>7)</sup> が生産されていた（表-3参照）。ガスタールは、当初扱いに困る厄介な副産物であったが、その後タールから石炭酸（フェノール）を製造する技術により1881年（明治14）頃に東京・横浜で蔓延していたコレラの消毒薬の原料として使用された他<sup>7)</sup>、1892年頃（明治25）には、和紙などにタールを浸み込ませた紙瓦（屋根防水材）<sup>8)</sup> などに使

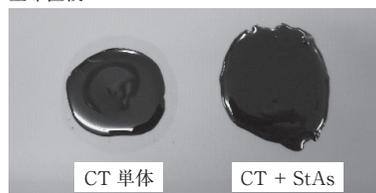
用されていたとある。現在、ガスタールを入手することは困難であるため先に分析で使用した現在入手可能なコールタールとStAsを用いて性状の確認を実施した。コールタール単体は流動性が高く、時間の経過とともに塗布形状の変化が生じる。一方StAs単体は、温度の低下とともに流動性が失われるため、塗布作業が困難となる。写真-8に示すようにコールタールとStAsの混合（ここでは1:1で試作）は、劣化の抑制、作業のしやすさ、塗布後のダレを防ぐ観点からも妥当な方法であったと考えられる。このようなコールタールとアスファルトの配合については、建築雑誌<sup>4)</sup> やアスファルト工業（明治44年発行）<sup>8)</sup> などで砂や石灰を配合した処方など数多くの防水材配合が紹介されている。

ガスタールは表-3から主にガス会社である横浜瓦斯社、東京瓦斯社において生産されていたことが記録されており、第一海堡建設後期にあたる1887年（明治20）には、200tを超える生産があったことや分析結果および第一海堡構造物壁面への塗布性や塗布後の膜厚

表-3 第一海堡建設時期のタール生産量<sup>7)</sup>

年 度	西暦	横浜	東京	大阪	合計 (t)
		瓦斯	瓦斯	舎密	
		ガスタール (t)		ピッチコークスタール (t)	
明治12年	1879	36			36
明治13年	1880	61			61
明治14年	1881	61			61
明治15年	1882	67			67
明治16年	1883	67			67
明治17年	1884	64			64
明治18年	1885	78	24		102
明治19年	1886	73	87		160
明治20年	1887	76	111		187
明治21年	1888	101	119		220
明治22年	1889	96	127		223
明治23年	1890	90	202		292
明治24年	1891	76	220		296
明治25年	1892	86	258		344
明治26年	1893	101	284		385
明治27年	1894	89	396		485
明治28年	1895	114	463		577
明治29年	1896	149	521		670
明治30年	1897	192	692		884
明治31年	1898	224	697	140	1061
明治32年	1899	214	1224	800	2238
明治33年	1900	248	1664	800	2712

塗布直後



塗布5分後

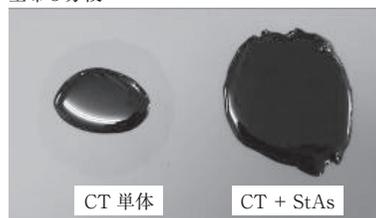


写真-8 コールタールの流動性

確保の観点からガスタールがアスファルトとともに混合利用されていた可能性が考えられる。

また当時、ガスの原料である石炭は、長崎県の高島炭鉱が使用されていたが、1885年(明治18)は採掘石炭量が少なくなったことから当時東京府において他産地の石炭の性状評価が実施され報告されている<sup>10)</sup>。他の産地としては、オーストラリア、三池、幌内、唐津の名が記されているが、第一海堡への適用があったとすれば、量的、運搬の観点から国内産の石炭から生成されたガスタールであった可能性が高いと考察する。

### 3.3.2 アスファルト

明治期におけるアスファルトの種類と出荷量<sup>10)</sup>を次ページ(表-4)に示す。第一海堡が建設されていた1881~1890年(明治14~23)は、秋田県産の土瀝青(アスファルト)が主生産地であったが、一部海外から輸入されていたアスファルトの生産量についても記録されている。輸入アスファルトの産地としては、トリニダット産やクラリッジ産、セーシェル産等があり、いずれも当時イギリス領であった国で産出していたものが輸入されていたと考えられる。輸入アスファルトの用途として、建築防水材料としての使用が主に記録されており、クラリッジ産やセーシェル産アスファルトは、日本銀行建築(1890-1896)に使用されていたと記述されている<sup>11)</sup>。

第一海堡で使用されていたアスファルトについては、生産量年表から国産天然アスファルトの生産量が主であることから第一海堡においては、秋田県産の土瀝青が適用されていた可能性が高いと考えられる。秋田県産の天然アスファルトが第一海堡や第二海堡へ使用されたという直接的な記録資料は残されていないが、同時期に建設されていた観音崎・猿島・富津砲臺へ秋田県豊川産の土瀝青が販売・利用された記録<sup>12)</sup>が残されていることから適用された可能性は高いと考えられる。

## 4. 秋田県豊川産の天然アスファルト

秋田県豊川産の土瀝青は、秋田県湯上市に位置する豊川油田で産出している天然アスファルトである。

ここでは、現在も若干の天然ガスが採取されており、油田操業の事務所には、豊川油田の歴

史や技術を伝える展示場が設置されている<sup>13)</sup>。写真-9は、現在も残る天然アスファルトの採掘場の跡地であり、沼地の水面には未だ黒ずんだ油膜が残っている。また、泥岩層にはアスファルトや瀝油<sup>14)</sup>が認められる。歴史の伝承活動、油田施設の維持管理を行っている『豊川油田の歴史を伝える会』のご協力のもと、展示施設で保管されている明治~大正期に油田産出製品として流通していた写真-10に示す『万代石』<sup>15)</sup>から試料を採取させていただき、第一海堡採取試料とともに分析を実施した。



上段：天然アスファルト採掘場跡地  
下段：泥岩層に含まれるアスファルト等

写真-9 秋田県豊川油田

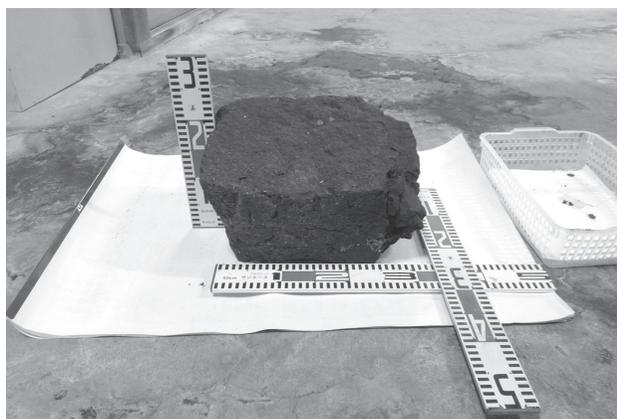
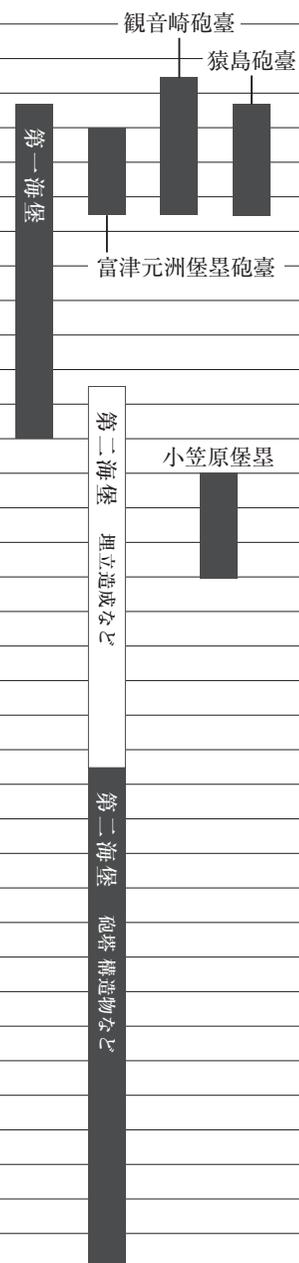


写真-10 保管展示されている万代石  
(明治末期製造)

表-4 アスファルト生産量<sup>10)</sup>

年度	西暦	天然アスファルト			アスファルト		合計 (t)	建築物 (建設時期)
		秋田	山形	計 (t)	輸入	石油製品		
明治7年	1874	0.6		0.6			0.6	
明治8年	1875	1		1			1	
明治9年	1876	1		1			1	
明治10年	1877	4		4			4	
明治11年	1878	5		5			5	
明治12年	1879	8	1	9			9	
明治13年	1880	831	29	860			860	
明治14年	1881	1474	20	1494			1494	
明治15年	1882	1684		1684	88		1772	
明治16年	1883	1744		1744	131		1875	
明治17年	1884	1024	27	1051	103		1154	
明治18年	1885	1077		1077	76		1153	
明治19年	1886	1117		1117	83		1200	
明治20年	1887	1063		1063	98		1161	
明治21年	1888	1165		1165	183		1348	
明治22年	1889	1173		1173	103		1276	
明治23年	1890	1309		1309	58		1367	
明治24年	1891	1212		1212	210		1422	
明治25年	1892			0	196		196	
明治26年	1893			0	198		198	
明治27年	1894			0	195		195	
明治28年	1895			0	251		251	
明治29年	1896			0	232		232	
明治30年	1897			0	198		198	
明治31年	1898			0	261		261	
明治32年	1899			0	176		176	
明治33年	1900			0	467		467	
明治34年	1901			0			0	
明治35年	1902			0	264		264	
明治36年	1903	356		356	287		643	
明治37年	1904	544		544	2275		2819	
明治38年	1905	103		103	5976		6079	
明治39年	1906	386		386	9481		9867	
明治40年	1907	584		584	6668		7252	
明治41年	1908	2404		2404	265		2669	
明治42年	1909	4186		4186	159		4345	
明治43年	1910	2979		2979	249		3228	
明治44年	1911	1261		1261	101		1362	
大正元年	1912	2906		2906	746		3652	
大正2年	1913	2260		2260	478		2738	
大正3年	1914	1849		1849	535	157	2541	
大正4年	1915	1717	38	1755	305	221	2281	
大正5年	1916	1316	120	1436	787	866	3089	



#### 4.1 分析試験による比較

第一海堡採取サンプルと同様に赤外分光分析、組成分析、蛍光X線分析により比較評価を行った。

##### (1) 赤外分光分析

第一海堡採取試料と万代石の分析結果を図-6に示す。万代石は、No.1～4試料にあるような多環芳香族を示すピークは含まれておらず、No.5の天端防水材と同様のピーク形状が認められた。

##### (2) アスファルト組成分析

図-7より万代石は、飽和分を多く含有している。他の構成成分も似た結果が得られているが両試料の曝露状態が異なるため、全くの一致とは言い切れないものの、第一海堡採取試料のうちNo.5の構造物天端に設置されていた防水材と似ていると言える。

##### (3) エネルギー分散型蛍光X線分析

図-8に炭素-硫黄分析結果を示す。万代石は炭素に対する硫黄分の存在比が高く、No.5と同じ傾向が認められる。ただ、単純に硫黄の含有率はNo.1～4と同程度であり、当時流通していたタールに含まれる硫黄分がどの程度含まれていたのかも不明であるため、同一材料であるかの判断には至っていない。

考古学分野においては、揮発しにくく残りやすい硫黄同位体 ( $\sigma 34S$ ) に着目した産地推定法<sup>16, 17</sup>が検討されているため、今後この硫黄同位体分析によって評価することで考察を深めていく予定である。

#### 5. おわりに

第一海堡の防水材料には、2種類の材料構成が認められ、海岸沿いの構造物壁面に塗布されていたタール（ガスタール）およびアスファルトの混合材料は、防湿防水効果の他、その物理的性状から塗布のしやすさ、ダレにくさなどを考慮した材料であったと考察する。2つ目に内陸部の構造物天端に塗布されていた防水材料は、内包する繊維やアスファルト単体であることから強度や耐候性に優れる性状を期待したものであったのではないかと考えられる。

このように用途に応じた材料配合の使い分けは、当時の建築雑誌などに多く記されており、

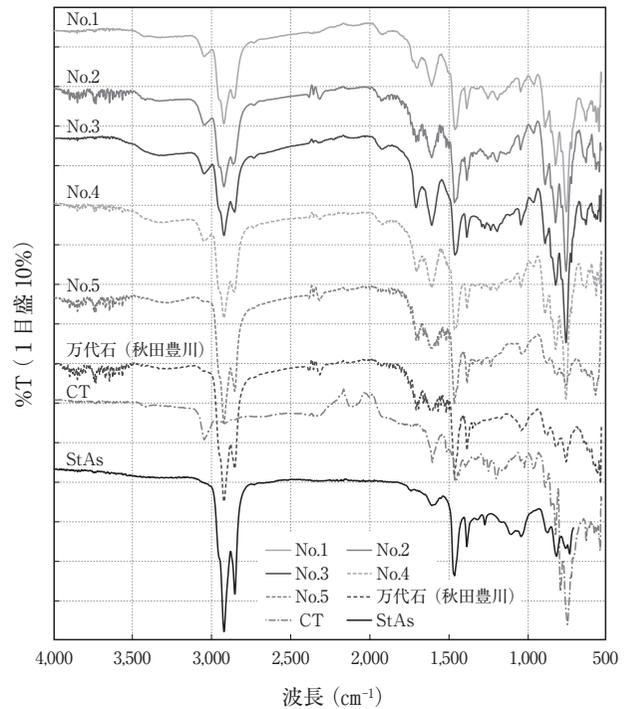


図-6 第一海堡採取試料と万代石の吸収帯比較

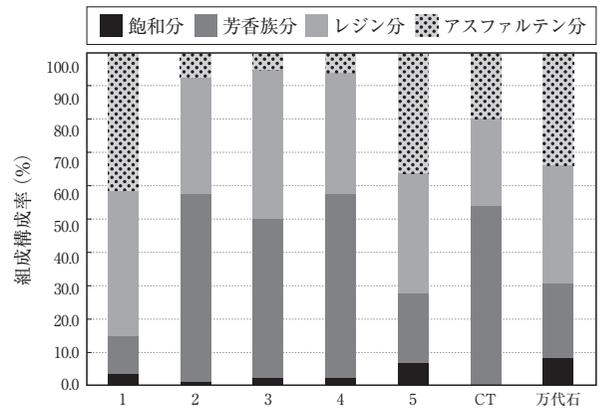


図-7 第一海堡採取試料と万代石の組成比較

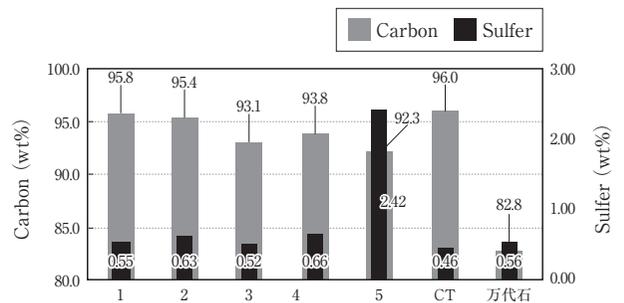


図-8 第一海堡採取試料と万代石の炭素-硫黄比較

特に海外からの情報や海外産材料の研究などを経て国内の防水技術が高度化されていった様子を窺い知ることができる。今回の調査では、第一海堡に使用された防水材の明確な産地特定はできていないが、国産材料を用いた有用なデータが得られているため、先に紹介

した硫黄同位体分析など実施することで材料産地を特定したい。

最後に、本調査において万代石をご提供いただいた豊川油田の歴史を伝える会の関係各位、ご助言いただいた佐々木榮一氏に感謝の意を示す。

#### — 参考文献 —

- 1) 村山雅人, 松井伸頼, 野口孝俊, 内田直洋: 東京湾第二海堡跡から考察した明治期地下構造物の防水技術 土木学会論文集D2 (土木史) Vol.71, No.1, 55-65, 2015
- 2) 永原篤, 平戸利明, 野口孝俊: 東京湾第一海堡調査から考察する明治期のアスファルト防水技術, 第75回土木学会年次講演会, VI-60, 2020
- 3) 国土交通省関東地方整備局 東京湾口航路事務所 HP (mlit.go.jp)
- 4) 三橋四郎: アスファルト (土瀝青) 建築雑誌 130号, pp.309-310, 1897.10
- 5) 例えば, 氏家良博: 有機地質学的分析を用いた縄文遺跡出土アスファルトの原産地推定 (科研費研究成果報告書) .2015.4
- 6) 上條信彦, 氏家良博: 東日本大震災に伴う弘道館記碑等の復旧事業報告書, 弘道館記碑のダボから検出した黒色物の分析, pp.103-109, 2015.3
- 7) 日本タール協會: タール工業五十年史, p.16, 1951.12
- 8) 田村健二: アスファルト工業 東京 日本舗塗料株式会社蔵版, 例えば p89, 1911.8
- 9) 内務省衛生局: 衛生試験彙報 第三號 燈用瓦斯試験成績 pp.25-39, 1888.3
- 10) (一社) 日本アスファルト協會: アスファルト統計史, pp.2-3, 1987.12
- 11) 三橋四郎: アスファルト (土瀝青) 建築雑誌 130号, p.311, 1897.10
- 12) 横井潔, 河合浩蔵: 土瀝青商店 建築雑誌 50号, p.40, 1891.2
- 13) 例えば, 秋田県観光総合ガイド <https://www.akitafan.com/archive/tourism/386>
- 14) 佐々木榮一: 豊川タールピット物語, pp.22-25, 2017.1
- 15) 佐々木榮一: 豊川タールピット物語, pp.61-62, 2017.1
- 16) 上條信彦, 南武志, 高橋和也: イオウ同位体比分析による出土アスファルトの原産地推定の試み 弘前大学「冷温帯地域における遺跡資源の保存活用促進プロジェクト」日本文化財科学学会大会研究発表要旨集, 33rd, pp.238-239, 2016.6
- 17) 上條信彦, 南武志, 高橋和也: イオウ同位体比分析による出土アスファルトの原産地推定 日本文化財科学学会大会研究発表要旨集, 36th, pp.134-135, 2019.6



# 「舗装の長期保証制度に関するガイドブック」 について

桑原 正明

道路協会舗装委員会舗装マネジメント小委員会幹事長

(国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路基盤研究室主任研究官)

## 1. はじめに

通常の道路工事においては、完成時に品質検査を行うことにより、供用後しばらくの期間においても一定以上の品質を確保できることを確認しています。しかし、道路施設は長期間供用されるものであり、完成時における品質のみを確認すれば長期間の供用中の品質まで保証できる、とは限りません。

そこで直轄国道における舗装工事においては、供用数年後の品質保証を受注者が付す仕組み、すなわち舗装の長期保証制度が、平成21年度から導入されてきたところです。

長期保証制度の概念を図-1にお示しします。工事完成一定期間後の劣化度合が一定の値（性能指標値）以下であるかどうかを確認することにより、目標とする年数まで供用が可能かどうかの見極めがより確実となります。

この制度が工事に適切に適用されることにより、将来にわたる品質確保、すなわち舗装の長寿命化が期待されます。

そこで、長期保証制度の考え方について、舗装関係者（道路管理者、舗装施工業者等）へ向け、理解を深めていただき適切な普及を図ることを目的とした技術図書として、（公社）日本道路協会は、「舗装の長期保証制度に関するガイドブック」（以下、「本書」という）を発刊しました。

なお本書においては、舗装関係者が制度を工事に適用したり、適用後にフォローアップをしたり、制度運用を改善したりする際の技術的な支援となることを意図した解説をしております。

## 2. 本書の位置づけ

本書は、舗装に係る技術基準類の体系において、図-2のとおり、「舗装の構造に関する技術基準」および（公社）日本道路協会の関連図書をふまえ、舗装工事に関して供用後の長期的な性能確保に関する検討や長期保証制度の運用の際の技術的な参考図書として位置づけられます。

現行の長期保証制度は、原則として新設工事のみに適用されていますが、修繕工事についても供用している舗装および路床以下の情報を十分に把握可能であれば適用も考えられ、平成30年度から一部地方整備局において試行が開始されています。

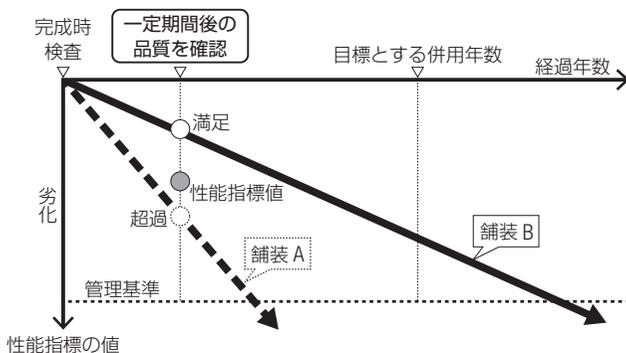


図-1 長期保証制度の概念図

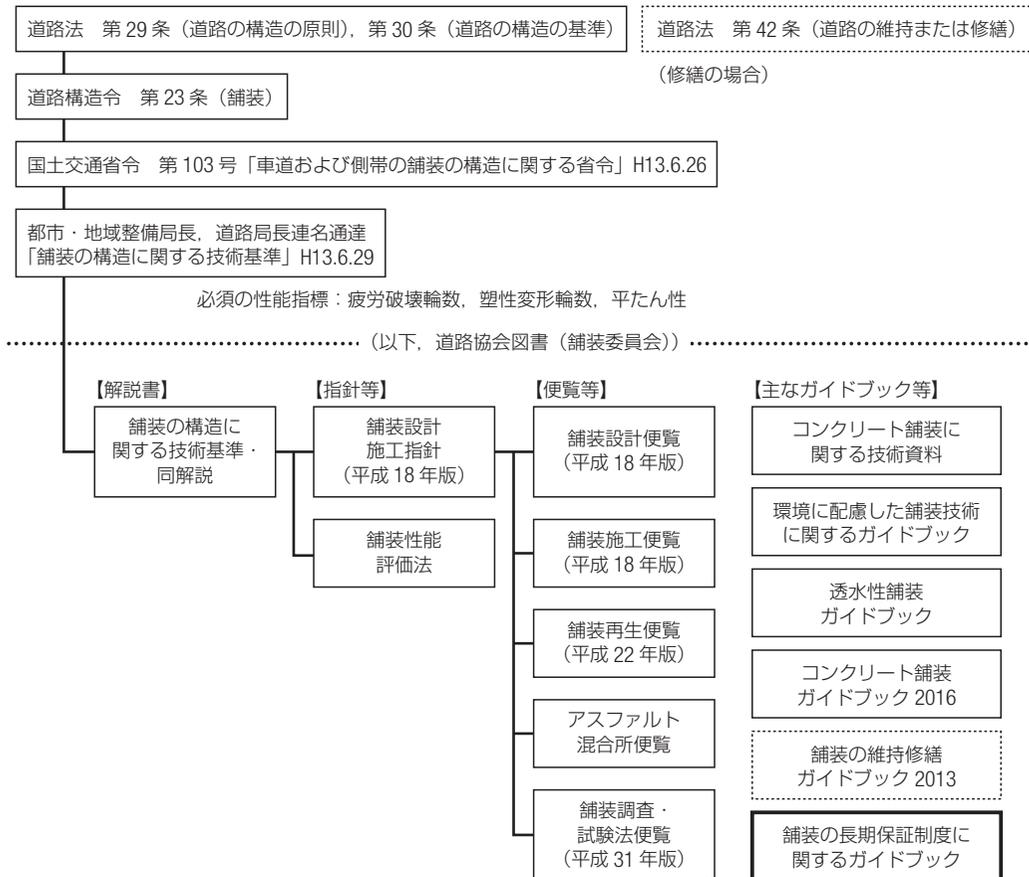


図-2 本書の位置づけ

### 3. 本書の概要

#### 3.1 全体概要

本書の全体構成(図-3)としては、まず舗装の長期保証制度について制定経緯や制度の目的、制度適用の効果について概説がなされたうえで、現行制度の運用の留意点等について時間軸に沿って説明を行っています。さらには、制度運用後の継続的に取り組むべき事項についても述べています。

#### 3.2 制度の運用(3~6章)

現行の長期保証制度においては、まずは道路管理者が、当該道路の管理ニーズ等をふまえ、制度適用区間、保証期間、性能指標項目、性能指標値を設定します。入札/契約の後、測定/評価方法、性能を満足しない場合の対応事項等を受発注者

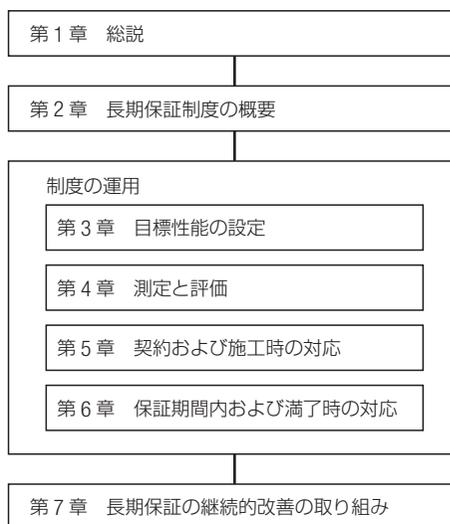


図-3 本書の全体説明

間で取り決めたくうで、施工がなされます。完工後は、取り決めた事項に従い、測定等の各種の措置が行われます。この一連の流れにおける留意事項については、図書に詳細に記載していますので、ご覧いただければと思います。

### 3.3 長期保証制度の継続的改善の取り組み (7章)

現状、制度が適用された工事に関わる当事者は、まずは制度を順守し契約を滞りなく完遂させることのみを考えていることも多いようです。また、保証内容を満足することが目的化し、それを確実に実現するために、受注者が、発注仕様を超過する高性能な材料や工法を用いてしまうこともあるようです。

制度の本来の趣旨は、受注者と発注者が共に舗装の長期的な性能確保を意識し、課題と解決策を探りながらその実現を目指すことにあります。性能指標値を超過することは、瑕疵などとは概念が全く異なるものであって、保証金は罰金ではなく、回復措置は修補とは異なるものです。

性能指標値を超過した際に、その原因を科学的につきとめ、適切な措置を講じることが重要です。その措置の実施、および措置検討等による知見の蓄積が、舗装技術の向上や、舗装の長寿命化をもたらすと考えられます。

さらに道路管理者は、制度運用の結果および過程を検証し、目的（管理道路における舗装の長寿命化）に対して有効に運用されていなかったのであれば、制度運用の仕組みを改善する必要があります。具体の改善事例および留意点については、

本稿7章に詳細に記載していますので、ご覧いただければと思います。

## 4. おわりに

長期保証制度の運用にあたっては、損傷原因の解明、さらには舗装の長寿命化の意識を持って臨むことが大事です。本図書がその意識醸成の一助となり、ゆくゆくは我が国の舗装の長寿命化へ貢献することを期待します。



### 舗装の長期保証制度に関するガイドブック

発行（売）元：日本道路協会

価 格：3,300 円（3,000 円＋税）

コ ー ド：2021031003

発行年月：2021 年 03 月

判 型：A4 判

頁 数：100



# 「SDGsに貢献できるアスファルト技術」 ～ISAPアスファルト舗装国際会議から～

## 「FWDの変遷とアンケートから読み解く現況」

アスファルト舗装技術研究グループは、若手技術者研究者が自発的に集う勉強会で、アスファルト協会ならびに参加者が所属する機関の理解と支援を受けつつ自主運営している組織です。海外文献の輪読や舗装技術の基礎学習を中心に、定期的に開催する勉強会にて議論を重ねています。

今年度は、感染症問題が社会のほとんどの活動に大きな影響を及ぼしました。研究グループの活動も変化しましたが、デメリットよりもむしろメリットをもたらす側面のほうが大きかったといえます。最大の変化は会議のオンライン化です。会議室確保の必要がなくなったことはもとより、所属地域が広域化し出席のための移動制約が大きくなっているほか、若手であるがゆえ本来業務において予定の調整をしにくい場合でも部分参加できるなど、以前より会議をしやすくなり

ました。また、参加者の4割以上が女性技術者になっているほか男性も育児参加する時代になり、育児中のメンバーが会議で議論に参加することもありました。

海外文献の輪読に関する今回の報告は、ISAPアスファルト舗装国際会議を題材に、近年注目されているSDGsからの視点で抄訳整理を行い、様々な材料等について一つの報文にまとめました。

2012年から若手技術者による質疑応答の形として続けていたものは、FWDに関する個別テーマの調査報告としました。これは、本誌175号(1993)の報文をうけその後の変遷を整理するとともに、道路会議報文の動向整理や、研究グループとしてアンケートを行うなどの新たな試みを取り入れてまとめています。

(研究グループ代表幹事：佐々木 巖)

### アスファルト舗装技術研究グループ名簿

佐々木 巖 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ

安藤 秀行 出光興産(株)アスファルト技術課  
 上地 俊孝 大林道路(株)技術研究所  
 及川 真依 東亜道路工業(株)製品事業本部  
 掛札さくら (国研) 土木研究所道路技術研究グループ  
 川島 陽子 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ  
 木谷 寛 世紀東急工業(株)技術研究所  
 熊坂 理紗 大成ロテック(株)技術研究所  
 小池千絵美 世紀東急工業(株)技術研究所  
 小早川尚之 ENEOS(株)中央技術研究所  
 齋藤 夏実 ニチレキ(株)技術研究所  
 櫻井 博章 日進化成(株)技術研究所  
 園田 涼 東亜道路工業(株)技術研究所

滝田 真世 昭和瀝青工業(株)技術センター  
 塚本 康雄 (一社) 日本道路建設業協会道路試験所  
 仲野 尚弘 日進化成(株)技術研究所  
 根元 孝 (一社) 日本道路建設業協会道路試験所  
 碓 真悠 ニチレキ(株)道路エンジニアリング部  
 福山 菜美 前田道路(株)技術研究所  
 藤井 洋志 日本道路(株)技術研究所  
 山原 詩織 大林道路(株)技術研究所  
 吉野広一郎 日本道路(株)技術研究所  
 好見 絵里 鹿島道路(株)技術研究所  
 渡邊 真一 (国研) 土木研究所道路技術研究グループ  
 (2020年12月現在)

# SDGsに貢献できるアスファルト技術 ～ISAPアスファルト舗装国際会議から～

川島陽子	安藤秀行	及川真依	小池千絵美
小早川尚之	櫻井博章	園田涼	滝田真世
仲野尚弘	福山菜美	山原詩織	

## はじめに

アスファルト舗装技術研究グループでは、海外のアスファルト技術に対するニーズや最新技術の動向を調査する目的で、国際会議で公表された論文の輪読を行っている。今年度は、2019年にイタリアで行われたISAP2019 (International Society for Asphalt pavements) の公表論文48報を読み込んだ。本稿では、近年、各産業界で取り組まれている「SDGsへの貢献」という観点に着目し、ISAP2019の公表論文の中でも、特にSDGsへの貢献が期待されるアスファルト技術や関連材料に関する研究論文について紹介する。

## 1. SDGsに対する取り組み

### 1.1 SDGsとは

SDGsとは「Sustainable Development Goals」(持続可能な開発目標)の略称であり、2015年9月の国連サミットにて全会一致で採択された、2030年を年限とする国際目標である<sup>1)</sup>。「誰ひとり取り残さない」という共通理念のもと、17の目標とそれらを達成するための169のターゲット(より具体的な目標)から構成されており(表-1)、全ての国々が解決すべき目標を網羅している。

### 1.2 SDGsに対する取り組み状況

日本でも、SDGsに対して国を挙げて取り組んでおり、特に質の高い教育(目標4)や産業と技術革新(目標9)の分野について概ね達成しているとされている<sup>2)</sup>。身近な取り組みでもSDGsに繋がっているものがある。例えば、2020年7月から始まったレジ袋有料化は、海洋プラスチックゴミの問題解決に対する取り組みのひとつだが、海の豊かさを

守るというSDGsの目標14に貢献できるものと言える。また、エネルギーや水の使用量を削減する、産業廃棄物の適切な処理を行うなど、どの産業でも取り組めることもあり、企業レベルでのSDGsへの貢献事例が今後増えていくことが予想される。

表-1 SDGsの掲げる17の目標および本報と関連したターゲット(抜粋)

目標1	貧困をなくそう
目標2	飢餓をゼロに
目標3	全ての人に健康と福祉を
目標4	質の高い教育をみんなに
目標5	ジェンダー平等を実現しよう
目標6	安全な水とトイレを世界中に
目標7	エネルギーをみんなにそしてクリーンに
目標8	働きがいも経済成長も
目標9	産業と技術革新の基盤をつくろう
ターゲット9.1	すべての人々に安価で公平なアクセスに重点を置いた経済発展と人間の福祉を支援するために、地域・越境インフラを含む質の高い、信頼でき、持続可能かつ強靱なインフラを開発する。
ターゲット9.4	2030年までに、資源利用効率の向上とクリーン技術および環境に配慮した技術・産業プロセス導入拡大を通じたインフラ改良や産業改善により、持続可能性を向上させる。すべての国々は各国の能力に応じた取り組みを行う。
目標10	人や国の不平等をなくそう
目標11	住み続けられるまちづくりを
目標12	つくる責任つかう責任
ターゲット12.5	2030年までに、廃棄物の発生防止、削減、再生利用および再利用により、廃棄物の発生を大幅に削減する。
目標13	気候変動に具体的な対策を
ターゲット13.1	すべての国々において、気候関連災害や自然災害に対する強靱性および適応力を強化する。
目標14	海の豊かさを守ろう
目標15	陸の豊かさを守ろう
目標16	平和と公正をすべての人に
目標17	パートナーシップで目標を達成しよう

## 2. SDGsに貢献し得るアスファルト舗装技術とISAP

### 紹介論文の概要

#### 2.1 紹介論文の選定における着眼点

本研究グループでは、ISAP2019（イタリア、パドバ開催）での発表論文の輪読を通じ、近年のアスファルト技術や材料がSDGsに貢献し得る可能性を探った。その中で、SDGs達成に貢献すると考えられたアスファルト技術や材料を5つのカテゴリに分類し、これに基づき論文を選定した（表-2）。いずれの研究もSDGsに貢献し得る技術に関するものであることはもちろん、今後の国内のアスファルト舗装技術の発展に寄与することが期待される。

次節からそれぞれのカテゴリと紹介論文の概要について述べる。

## 2.2 紹介論文のカテゴリおよび概要

### 2.2.1 アスファルトコンクリート発生材の使用率向上のための評価手法および利用技術

近年、再生アスファルト混合物（以下、再生混合物）は国内のアスファルト混合物の出荷量の約75%を占め、アスファルトコンクリート発生材（Reclaimed Asphalt Pavement, 以下、RAP）の再資源化率は99%に至っている。今後、環境負荷軽減や資源保護の観点から、再資源化率をキープするために、繰り返し再生技術の向上が求められる。また、RAPを効率的に再生混合物として利用することは、SDGsのターゲット9.4や12.5に貢献し得るものと考えられる。

ISAP2019の論文の中で、特に高RAP含有率の再生混合物の利用に関するものを選定した。本稿では再生

表-2 本稿で紹介する論文の一覧

カテゴリ	論文名(原題/訳題)	著者	関連するSDGs
アスファルトコンクリート発生材の使用率向上のための評価手法および利用技術	Effectiveness of Rejuvenators for Asphalt Mixtures with High Reclaimed Asphalt Pavement Content in Cold Climates 寒冷地における高RAP含有率のアスファルト舗装に向けた再生用添加剤の有効性	Marco Pasetto 他	目標9 (ターゲット9.4) 目標12 (ターゲット12.5)
	Sustainable Warm In-plant SMA Mixtures with 80% Recycling and Produced at 115°C 115°Cで製造可能なRAP含有率80%の中温化SMAの開発事例	Jian Qiu 他	
	100% Recycling of Low-Temp Asphalt for Minor Roads -Lab Compaction and Traffic Simulation 小規模の道路におけるRAP100%アスファルト舗装の室内締固め特性と交通シミュレーション結果	Christiane Raab 他	
非石油由来の製品利用によるアスファルトの再生	Micromechanical Surface Investigation of Bio-Modified RAP Binder 植物由来再生用添加剤を用いたアスファルトのマイクロメカニカル表面調査	Maria Chiara Cavalli Lily D. Poulikakos	目標9 (ターゲット9.4)
	Impacts of Recycling Agent on Superpave Mixture Containing RAP RAPを含むSuperpave混合物に対する再生用添加剤の影響	Sujit Kumar Pradhan Umesh Chandra Sahoo	
	Development of a Soybean Based Rejuvenator for Asphalt Mixtures Containing High Reclaimed Asphalt Pavement Content 再生骨材を高含有するアスファルト混合物のための大豆由来再生用添加剤の開発	Mohammad Reza Pouranian 他	
	New Fluxing Agent for the Road Industry -An Overview of Technical Performances and HSE Benefits 道路産業のための新たなフラックスオイル-技術的性能とHSEベネフィットの概要	Thomas Lebarbe 他	
	Non- petroleum- Based Binders for Paving Applications: Rheological and Chemical Investigation on Ageing Effects 舗装用添加剤としての非石油系バインダー-劣化によるレオロジーおよび化学的調査	Davide Dalmazzo 他	
アスファルト舗装への他産業再生資材の利活用	Experimental Study on Use of Recycled Polymer as Modifier in Mastic and Asphalt Mixture リサイクルされたポリマーを使用したバインダおよびアスファルト混合物の力学的特性	Francesco Mazzotta 他	目標12 (ターゲット12.5)
	Preliminary Study on the Mechanical Properties of an Asphalt Mixture Containing RAR Modifiers RARを添加したアスファルト混合物の機械的特性	Christina Plati 他	
	Long-Term Aging Behaviour of Asphalt Mixtures Modified with Crumb Rubber Using the Dry Process 廃タイヤチップをプラントミックスしたアスファルト混合物の長期劣化特性	Israel Rodriguez-Fernandez 他	
未活用素材によるアスファルトの機能付与および舗装性能の向上	Graphene-Enhanced Recycled Asphalt Pavements グラフェン強化改質材による再生アスファルト舗装	Loretta Venturini Fabrizio Monti	目標9 目標14 目標15
	Effect of Nano SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> and ZnO Modification to Rheological Properties of Neat and Polymer Modified Bitumen ストレートアスファルト、改質アスファルトへのナノ材料(SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZnO)添加が粘弾性状に与える効果	Rita Kleiziene 他	
	Impregnation of Lightweight Aggregate Particles with Phase Change Material for Its Use in Asphalt Mixtures 軽量骨材粒子への相転移物質(PCM)の含浸とアスファルト混合物への適用	Muhammad Rafiq Kakar 他	
アスファルト舗装の維持マネジメント技術	The BIM (Building Information Modeling)- Based Approach for Road Pavement Maintenance BIMを基にした道路舗装メンテナンス	Gaetano Bosurgi 他	目標8 目標9 (ターゲット9.1)
	Airport Pavement management System: An Open BIM Approach 空港舗装管理システム：オープンBIMアプローチ	Sara Guerra de Oliveira 他	目標13 (ターゲット13.1)

混合物の強度特性の評価に関する1報および新たなRAPの利用技術の開発に関する2報を紹介する。

### 2.2.2 非石油由来の製品利用によるアスファルトの再生

舗装用アスファルトや再生用添加剤として、一般的には石油由来の材料が使用されているが、人体や環境への悪影響が問題視されている。そこで近年では、人や環境に優しい非石油系材料（植物油、生物由来、廃棄物由来など）の開発が進められている。環境に配慮した技術改善は、SDGsのターゲット9.4に該当するものであるため、非石油系材料によるアスファルトの再生はSDGsの目標の達成に貢献できると考えられる。本稿では植物由来の再生用添加剤、生物由来のカットバック材および非石油系バインダに関する論文を紹介する。

### 2.2.3 アスファルト舗装への他産業再生資材の利活用

世界の廃棄物は増加の一途を辿っており、廃棄物の削減は喫緊の課題である。廃棄物を他産業再生資材としてアスファルト舗装へ適用した例はあり、廃棄物の削減や再生利用はSDGsの12.5に貢献するものであることから、今後アスファルト舗装への適用拡大が期待される。本稿ではISAP2019の論文から、廃プラスチックおよび廃タイヤ由来チップをアスファルト舗装へ利用するための論文を紹介する。

### 2.2.4 未活用素材によるアスファルトの機能付与および舗装性能の向上

他産業で利用されている様々な高分子材料やナノ材料等の中には、アスファルトへ適用することで性状改善が期待されるものもある。これらの材料の適用による技術革新は、SDGsの目標9に貢献する。また、アスファルトの機能付与に対して、新しい材料の適用性が拡大することで、用途によっては環境負荷の少ない材料（添加剤）を利用する選択肢が広がることが期待される。環境に配慮した材料の利用は、環境問題への貢献、つまりSDGsの目標14や目標15に貢献する可能性を秘めている。本稿では、グラフェン強化改質材、ナノ材料および潜熱蓄熱材の適用に関する論文を紹介する。

### 2.2.5 アスファルト舗装の維持マネジメント技術

アスファルト舗装の長寿命化やLCC縮減を目指す上で、舗装の維持管理、マネジメントが必要である。舗装を適切に管理し、インフラの信頼性を向上させることはSDGsの

ターゲット9.1に、また、災害時にも使えるように舗装を維持することはSDGsのターゲット13.1に貢献し得るものと考えられる。

本稿では、ビル建築や建築に関わる設備の分野で活用されているBuilding Information Modeling（以下、BIM）をアスファルト舗装の維持管理に適用した事例について紹介する。このBIMの活用は設計エラーの減少や業務効率の向上が期待できるものであり、作業者の負担を減らすことにつながる。そのため、SDGsの目標8にも貢献できる可能性がある。

## 3. アスファルトコンクリート発生材の使用率向上のための評価手法および利用技術

### 3.1 高RAP含有率の再生混合物の強度特性の評価手法

#### 寒冷地における高RAP含有率のアスファルト舗装に向けた再生用添加剤の有効性

原題：EFFECTIVENESS OF REJUVENATORS FOR ASPHALT MIXTURES WITH HIGH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT CONTENT IN COLD CLIMATES

キーワード：RAP、再生用添加剤、間接引張試験

この研究では、RAPの含有率が50%および70%の再生混合物に対し、化学的再生用添加剤、バイオ系再生用添加剤を使用した場合の混合物の評価手法として、間接引張試験を行った（図-1）。

間接引張試験では、RAPの含有率が高いほど、再

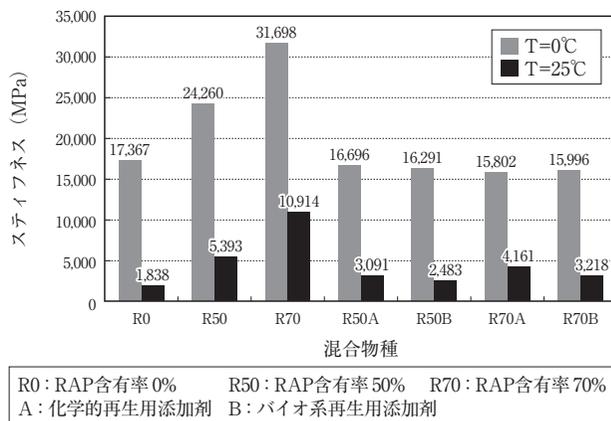


図-1 間接引張試験結果

生混合物のスティフネスが増加し、脆性が高くなることが示唆された。それに対し、再生用添加剤を用いた場合においては、再生用添加剤の種類によらず、スティフネスが増加せず、脆性の抑制効果が確認された。

また、凍結融解時などの水分による舗装への影響を評価するために、乾燥状態と凍結融解作用を経た供試体に対して間接引張試験を行った(図-2)。

再生用添加剤を用いない場合、RAP含有時、乾燥状態と凍結融解作用後の間接引張強度に差が生じたため、再生混合物の耐水性の低さが示された。それに対し、再生用添加剤を用いた場合では、凍結融解作用後においても乾燥状態と同等の間接引張強度であり、耐水性を保てることが示された。これらの結果より、寒冷地における高RAP含有率のアスファルト舗装を実現するためには、再生用添加剤の使用が重要となることが示された。

### 3.2 RAPを含有した中温化SMAの開発事例

#### 115°Cで製造可能なRAP含有率80%の中温化SMAの開発事例

原題：SUSTAINABLE WARM IN-PLANT SMA MIXTURES WITH 80% RECYCLING AND PRODUCED AT 115°C

キーワード：RAP, アスファルトモルタルの動的粘弾性, 中温化技術, SMA

この研究は、オランダにおけるRAPを含有した中温化SMAの開発事例について示したものである。

従来、SMAは優れた物性や15～20年のライフサイクルを持つために、オランダの地方道路の表層に広く普及しているが、品質の観点から100%新材で製造し、RAPの使用が許可されていない状況である。

この研究では、新材と同等の品質を有するRAPを含有したSMAの開発にあたり、LE2AP (Low Emission 2 Asphalt Pavement, 図-3)の技術を用いている。

LE2APでは、ポーラスアスファルト混合物を写真-1に示す粗骨材とアスファルトモルタルに分離する。そして、分離したアスファルトモルタルを再生し、発泡化

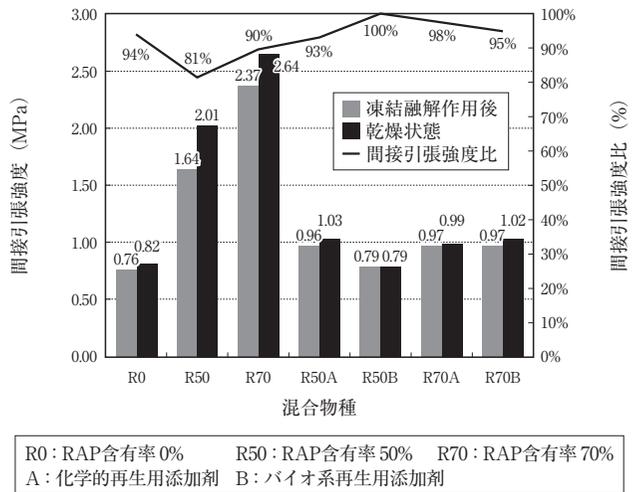


図-2 乾燥状態と凍結融解作用後における間接引張試験結果

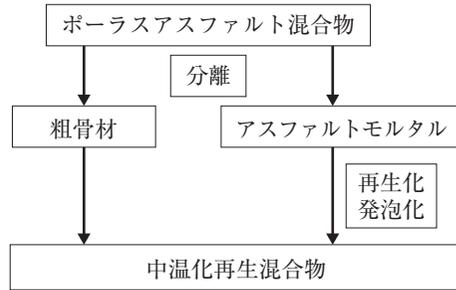


図-3 LE2APの概要

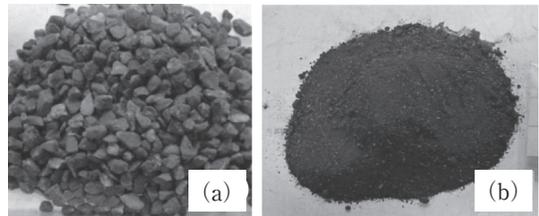


写真-1 LE2APにより得られる粗骨材(a)とアスファルトモルタル(b)

後、粗骨材と組み合わせることで、高品質な中温化再生混合物の製造を可能としている。

RAPを含有したSMAの開発にあたり、骨材剥離に影響を与えるモルタルの緩和特性をDSR試験機により評価している。供試体は写真-2に示す円柱状モルタル(直径6mm高さ20mmのものと直径9mm高さ30mmのもの)であり、緩和特性評価結果を図-4に示す。

図-4における緩和特性限界値とは、この限界値より小さい範囲では緩和特性が高く、冬期の供用が安全であることを示している。それに対し、限界値よりも大きい範囲は緩和特性が低く舗装の損傷が懸念されてしまう。LE2APで得られたモルタルは、 $-10^{\circ}\text{C}$ においても十分な緩和特性を持つことが示されている。

このように、LE2APによって得られた粗骨材と十分な緩和特性を持つモルタルに、2種類の中温化技術（バインダの発泡化技術とアスファルトモルタルを発泡化する技術）を適用することで、RAP含有率80%の中温化SMAの製造が可能となった。

オランダの2箇所の地方道路で合計4 kmの施工が行われ、5年間供用後の現在においても、比較用舗装と同等の性能を有していることが確認されている。

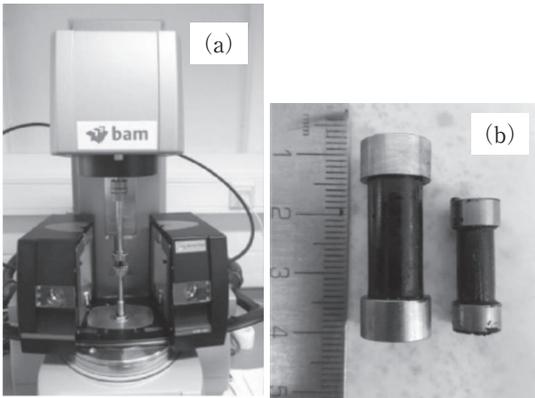


写真-2 緩和特性測定状況 (a) と供試体 (b)

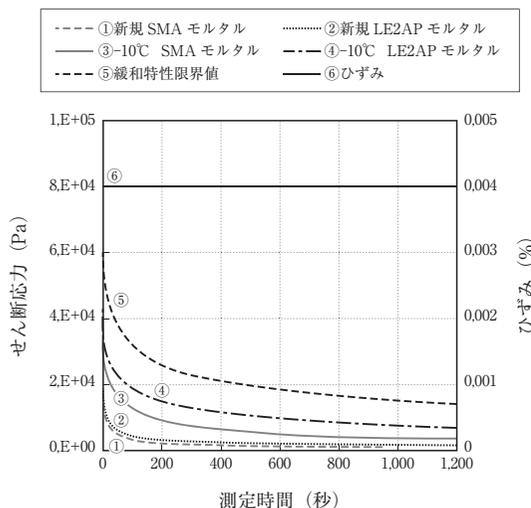


図-4 アスファルトモルタルの緩和特性評価結果

### 3.3 RAP100%再生混合物の室内評価事例

#### 小規模の道路における RAP100% アスファルト舗装の室内締固め特性と交通シミュレーション結果

原題：100% RECYCLING OF LOW-TEMP ASPHALT FOR MINOR ROADS – LAB COMPACTION AND TRAFFIC SIMULATION

キーワード：RAP, 締固め特性

この研究では、小規模の道路に対する国際プロジェクト「再生アスファルト舗装の最適な再利用方法 (Optimal recycling of reclaimed asphalt pavement, ORRAP)」に向け、RAP100%のアスファルト混合物の室内締固め特性と交通シミュレーション結果を示した。

スウェーデンにおいて、路盤用混合物にRAP100%の混合物が用いられた。その際は、常温では十分な転圧が得られるには6ヶ月間表層を舗設せず、その上を交通荷重により転圧する必要があり、実用が困難であった。この課題を解決するために、転圧温度を上げることが考えられた。室内締固め特性の評価において、転圧温度 $20^{\circ}\text{C}$ ではRAP100%の混合物は作製できなかったが、転圧温度 $60^{\circ}\text{C}$ では作製することができた (写真-3)。



20°C 転圧供試体



60°C 転圧供試体

写真-3 RAP100%混合物の転圧後の状態

60℃で転圧した供試体に対し、わだち掘れ抵抗性の評価が行われた(図-5)。評価方法は、European Standard EN 12697-22, 2003に準拠し、試験温度60℃、走行回数は30,000回である。

試験結果は、スイスの規格SN 640431.2014における交通量が多いカテゴリーHの規格「わだち掘れ量10%未満」を満たしていた。これらの結果より、ORRAPプロジェクトの目標であるRAP100%のアスファルト舗装の実用可能性が示された。

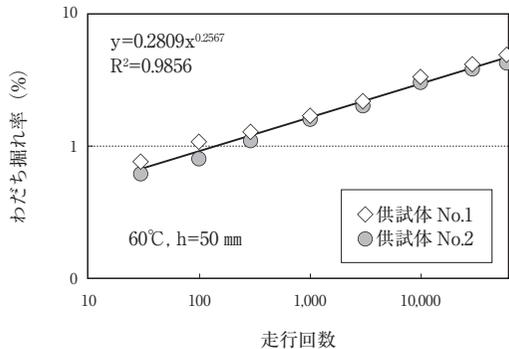


図-5 RAP100%混合物のわだち掘れ評価結果

### 3.4 まとめ

1報目では、寒冷地域における高RAP含有率の再生混合物の実現に向け、間接引張試験による混合物の脆性と耐水性の評価が行われ、再生用添加剤の有効性が示された。

2報目と3報目では、高RAP含有率の再生混合物の開発にあたり、アスファルト混合物の再生方法の開発事例とRAP100%の再生混合物の適用事例が示された。

### 3.5 翻訳者コメント

今回は高RAP含有率の再生混合物の評価方法と実用に向けた利用技術についての報文を紹介した。

高RAP含有率の再生混合物および再生混合物の繰り返し再生技術など、アスファルトの再生に関する技術向上はSDGsの実現のためにも重要であるため、今回紹介した報文の事例などを参考に、研究開発が盛んに行われれば幸いである。

## 4. 非石油由来の製品利用によるアスファルトの再生

### 4.1 植物由来の再生用添加剤

#### 植物由来再生用添加剤を用いたRAP由来アスファルトのマイクロメカニカル表面調査

原題: MICROMECHANICAL SURFACE INVESTIGATION OF BIO-MODIFIED RAP BINDER

キーワード: A: 天然種子油, B: カシューナッツの殻の油, C: トール油

この研究では、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, 以下AFM) を用いて、異なる3種の植物由来再生用添加剤を使用したRAP由来アスファルトについて分析を行った。使用した再生用添加剤は以下のとおりである。

A: 天然種子ベース再生用添加剤

B: カシューナッツの殻ベース再生用添加剤

C: トール油ベース再生用添加剤

なお、著者の既往研究 (Cavalli et al. 2018) に基づき、再生用添加剤の添加量は5%で決定している。

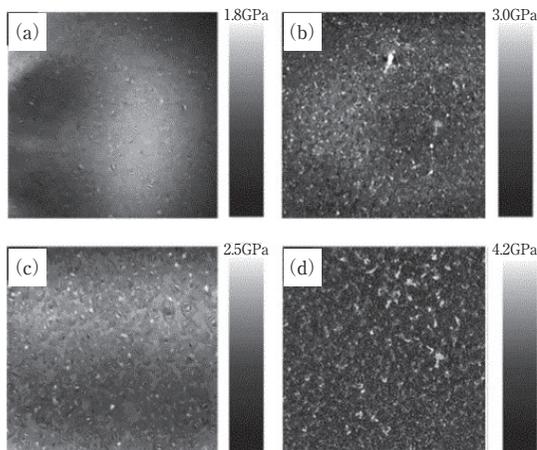
AFMは試料表面とカンチレバーの探針の間の原子間力を利用し、ナノレベルの試料表面の形状およびナノメカニカル性状に関する情報を取得できる。測定方法としてはタッピングモード (カンチレバーを振動させながら試料に近づけ、試料を軽く叩く) を使用している。タッピングモードを使用する事で、試料表面の弾性率などナノメカニカル性状に関する情報を取得できるQNM (Quantitative Nano-Mechanical Mapping) イメージ図が得られる。

図-1は、新規およびRAP由来アスファルトの劣化処理前後のQNMイメージ図であり、複素弾性率を併記している。新規およびRAP由来アスファルトとも、劣化処理前に比べて処理後では複素弾性率が増加した。

図-2はA~Cの再生用添加剤を用いたRAP由来アスファルトのQNMイメージ図 (劣化処理前後) と複素弾性率である。図-1 (b) と比較して、図-2のa, b, cは再生用添加剤の影響によりRAP由来アスファルトの表面に凹凸が見られ、また複素弾性率が低下している。劣化処理後は、全再生用添加剤とも複素弾性率は高くなるが、添加剤AとC (図-2のd, f) は劣化処理前と同様の凹凸が見られるのに対し、添加剤B (図-2のe) は図-1 (b) とイメージ図および、弾性

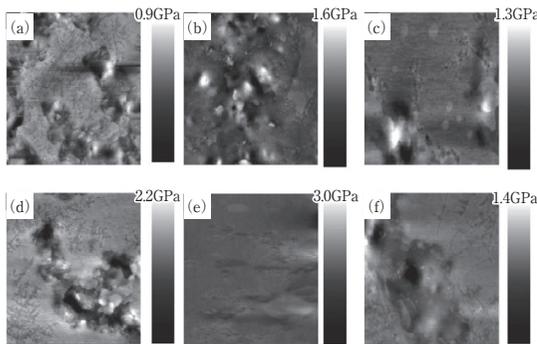
率も近い傾向となった。

この結果から、再生用添加剤 A および C は B と比較して、劣化処理後の RAP 由来アスファルトの剛性を緩和させる効果が高いことが示された。



上段：劣化処理前 (a：新規, b：RAP)  
下段：劣化処理後 (c：新規, d：RAP)

図-1 新規およびRAP由来アスファルトのQNM



上段：劣化処理前 (a：添加剤 A, b：添加剤 B, c：添加剤 C)  
下段：劣化処理後 (d：添加剤 A, e：添加剤 B, f：添加剤 C)

図-2 再生用添加剤を用いたRAP由来アスファルトのQNM

### RAPを含むSuperpave混合物に対する再生用添加剤の影響

原題：IMPACTS OF RECYCLING AGENT ON SUPERPAVE MIXTURE CONTAINING RAP

キーワード：ポンガミアオイル

この研究では、インドのオリッサ州で入手可能な非食用油のポンガミアオイルを再生用添加剤として使用した場合の、再生アスファルト混合物の性状について

評価を行った。ポンガミアオイルの性状を表-1に示す。

間接引張試験により、ポンガミアオイルを5%添加した、再生骨材配合率(図中RAP率)30, 40, 50, 60, 70%のアスファルト混合物の耐疲労性を評価した。比較用混合物に対し、ポンガミアオイルを添加した再生混合物は剛性を緩和させることで、疲労寿命が向上することを示した。しかし70%再生率では剛性が高くなり良好な結果が得られなかった。(図-3)

この結果から再生用添加剤にポンガミアオイルを使用することで、最大60%再生骨材配合率のアスファルト舗装を設計できると示唆した。

表-1 ポンガミアオイルの性状

性状	値	脂肪酸	割合
密度	0.924g/cm <sup>3</sup>	パルミチン酸	3.7-7.9%
比重	0.925	ステアリン酸	2.4-8.9%
粘度	40.2ml/sec	オレイン酸	44.5-71.3%
発火点	230℃	リノール酸	10.8-18.3%
引火点	225℃	リノレン酸	2.6%

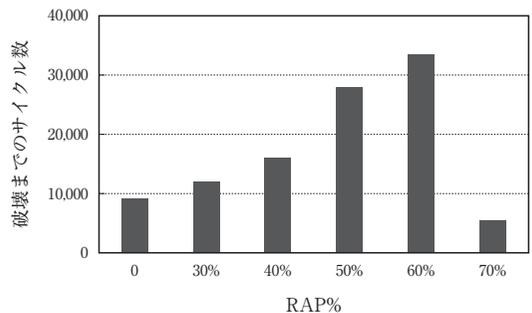


図-3 再生混合物の疲労寿命(再生用添加剤5%)

### 再生骨材を高含有するアスファルト混合物のための大豆由来再生用添加剤の開発

原題：DEVELOPMENT OF A SOYBEAN BASED REJUVENATOR FOR ASPHALT MIXTURES CONTAINING HIGH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT CONTENT

キーワード：酸性大豆ソープストック (soybean acidulated soapstock, 以下 SAS)

この研究で使用されるSAS再生用添加剤は、再生混合物中のアスファルトを効果的に軟化させ、性能を回

復させることが報告された。

SASを各1, 3%添加し, 再生骨材配合率25%, 45%, さらに劣化程度が異なるRAP 2種 (Type A, Type B) による再生混合物について, 複素弾性率の測定を行った。試験の結果より, RAPの劣化程度に関係なくSASを使用した混合物は複素弾性率 (図-4) および位相角 (図-5) が増加したことから, 剛性を高めつつ, ひび割れ抵抗性を高めるために必要な緩和能力が向上した。

また耐疲労性を評価するために, SCB (Semi-Circular Bend) 試験を行った。結果はSASの使用量が多いほど破壊エネルギー (Gf) と柔軟性指数 (FI) の値が高くなったことから, ひび割れ抵抗性を向上させることを示している。(図-6)

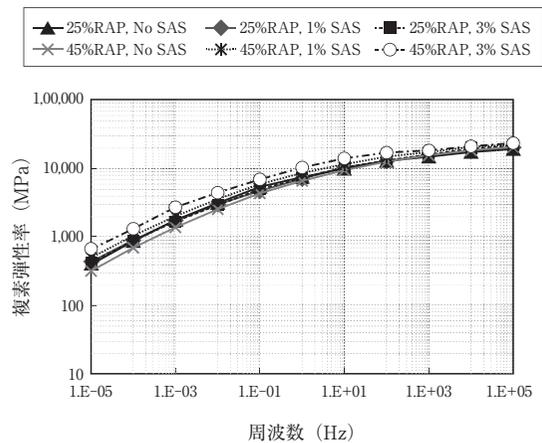


図-4 21°Cでの再生混合物の複素弾性率 (Type A)

## 4.2 生物由来のフラックス (溶剤) オイル

### 道路産業のための新たな フラックスオイル - 技術的機能と HSE ベネフィットの概要

原題: *NEW FLUXING AGENT FOR THE ROAD INDUSTRY - AN OVERVIEW OF TECHNICAL PERFORMANCES AND HSE BENEFITS*

キーワード: InnRoad Protect (以下 IRP),  
フラックスオイル, Health, Safety,  
Environment (以下, HSE)

IRPは化学メーカーのソルベイ社とEUROVIA (道路会社) が共同で開発した新たなフラックスオイルである。市販されているフラックスオイルは鉱物由来のもの、植物由来のものが主流である。鉱物由来のフラッ

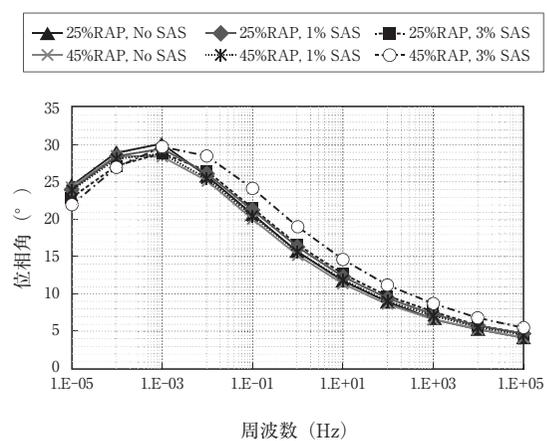


図-5 21°Cでの再生混合物の位相角 (Type A)

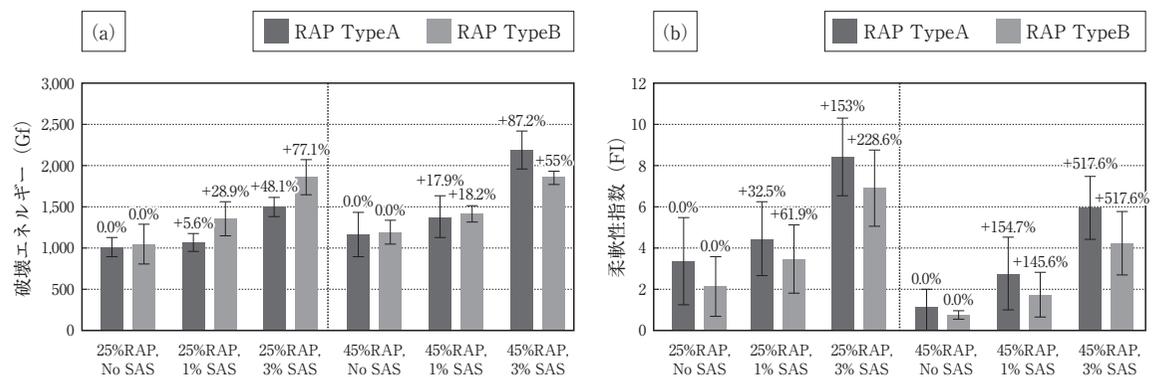


図-6 再生混合物のGf (a) とFI (b) の結果

クスオイル (Mineral Flux oil, 以下MF) は、強度発現が早い、人体や環境への悪影響が懸念されている。一方、植物由来のフラックスオイルは、人体や環境に優しいが、強度発現に時間がかかることが課題である。

IRPは成分の45%が生物由来のメチルエステル等で、完全に生分解性である。また、危険有害性物質として指定されておらず、HSEを満たす材料である。IRPは揮発成分の蒸発によって硬化するため強度発現が早い。

IRPを表面処理工法とマイクロサーフェシング工法に適用することを想定してMFと性能を比較した。

### (1) 表面処理工法への適用

フラックスオイルの溶剤としての性能を定量的に評価した。図-7にポリマー改質アスファルトにIRPとMFを添加した際の流出時間を示す(EN 12846-2)。同じ流出時間のときのフラックスオイルの添加量を比べると、IRPはMFより添加量を20~25%削減することができた。

表-2にIRPとMFを添加したポリマー改質アスファルトの、安定化後残留分の評価結果を示す。IRPはMFよりも軟化点が高く、針入度が低い。このことからIRPはMFよりも蒸発が早く、表面処理工法後の初期特性が向上することが分かった。

フラックスオイルを改質アスファルト乳剤に添加した。IRPはMFよりも添加量を25%削減できると分かった。

### (2) マイクロサーフェシング工法への適用

硬化速度を向上させることにおいて、乳剤の粘度を下げて凝集力を大きくすることは重要である。図-8にIRPの針入度回復効果の評価結果を示す。IRPを0.8%添加しただけで、針入度50/70のアスファルトが70/100になった。

ウェットトラック摩耗試験で摩耗量を評価した。早朝深夜や雨天時の施工を想定して、硬化条件は10℃、相対湿度100%とした。試験には一般的なアスファルト乳剤、アスファルト乳剤にIRP(0.8%)を添加した

もの、アスファルト乳剤にMF(1.5%)を添加したものを使用した。IRPを添加したものは、他の配合より摩耗量が少なかった。

### (3) まとめ

本検討からIRPの幅広い適用可能性(表面処理工法、マイクロサーフェシング工法、常温混合物など)が示唆された。

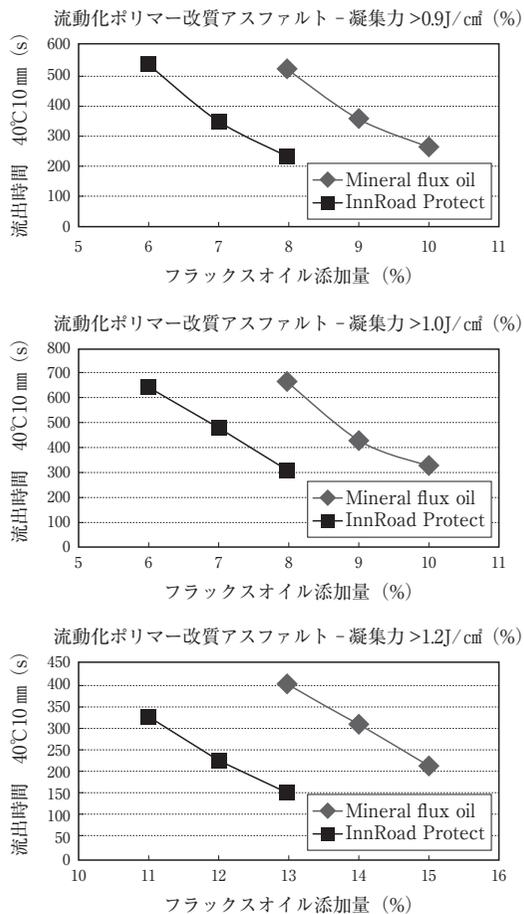


図-7 ポリマー改質アスファルトにIRPとMFを添加したときの流出時間 (凝集力が大きいほどポリマー含量が高い)

表-2 安定化後残留分の特性

フラックスオイル	流動化ポリマー改質アスファルト >0.9J/cm²		流動化ポリマー改質アスファルト >1.0J/cm²		流動化ポリマー改質アスファルト >1.2J/cm²	
	9% MF	7% IRP	10% MF	8% IRP	14% MF	11% IRP
フラックスオイル減量 (%)	63.5	78.6	64.2	81.2	64.4	85.4
針入度 (1/10mm) NF EN 1426	121	75	115	79	106	56
軟化点 (°C) NF EN 1427	44.4	49.2	46.4	50.0	52.2	60.2

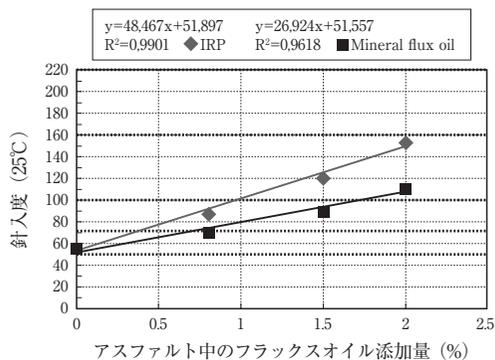


図-8 IRPとMFの添加量と針入度

### 4.3 バイオバインダ

#### 舗装用添加剤としての非石油系 バインダ-劣化によるレオロジー および化学的調査

原題：NON- PETROLEUM- BASED BINDERS  
FOR PAVING APPLICATIONS:  
RHEOLOGICAL AND CHEMICAL  
INVESTIGATION ON AGEING EFFECTS

キーワード：バイオバインダ(ピッチ[製紙業の副  
産物]+レジン+SBS), レオロジー

この20年ほど、アスファルトの代替品として考案され、バイオバインダとして知られる非石油由来バインダについて研究がなされてきた。バイオバインダで製造されたアスファルト混合物は、経年劣化により過度に硬化することが報告されており、劣化のメカニズムが一般的なアスファルトと異なる可能性がある。

この研究ではバイオバインダの劣化時のレオロジー特性と化学的性状について紹介している。

#### (1) 試料

バイオバインダとストレートアスファルト50/70(以下アスファルト)を以下の劣化条件で劣化させて試料を作製した。

##### ①未劣化[U]

##### ②短期劣化[R]

…回転式薄膜加熱試験(以下RTFOT)

##### ③長期劣化[P]

…RTFOT+加圧劣化試験(以下PAV)(AASHTO R28)

#### ④超長期劣化[PP]

…RTFOT+PAV+PAV

#### (2) バイオバインダのレオロジー

図-9にアスファルトとバイオバインダのブラックスペース(複素弾性率と位相角の平均値をプロットしたもの)を示す。アスファルトはガラス体から徐々に粘性体に遷移した。アスファルトの劣化条件を比較すると、劣化が進行すると複素弾性率が高く、位相角が小さくなった。さらに同じ周波数と温度では、ブラックスペースの全長がほとんど一定であったため、感温性は劣化による影響をあまり受けないと分かった。一方、バイオバインダは独立したいくつかのカーブを持っていた。バイオバインダは劣化が進行すると複素弾性率が低くなり、位相角が大きくなった。

図-10に複素粘性率で高温応答を評価した結果を示す。劣化が進行するとアスファルトの複素粘性率は上昇し、高周波数になるとわずかに減粘挙動を示した。バイオバインダは、劣化の進行にしたがって複素粘性率が減少した。バイオバインダはすべての劣化条件で強い減粘性を示したため、一定条件化でバイオバインダは粘弾性材料のように振舞うと分かった。

劣化の影響を劣化指数(Ageing Index, 以下AI)で評価した。AIは劣化後試料の複素弾性率、ひずみ $\delta$ (10rad/s)をそれぞれ未劣化試料の複素弾性率、ひずみ $\delta$ (10rad/s)で除して求めた。表-3にアスファルトとバイオバインダのAIを示す。AI<sub>G</sub>は高温での経年劣化を示し、AI<sub>δ</sub>は低温での変化を示した。劣化が進行するアスファルトのAI<sub>G</sub>は増加し、AI<sub>δ</sub>は減少した。一方バイオバインダのAI<sub>G</sub>は、低温では常に1より大きく、劣化の進行とともに増加した。高温ではAI<sub>G</sub>が1未満で劣化の進行にしたがって減少した。

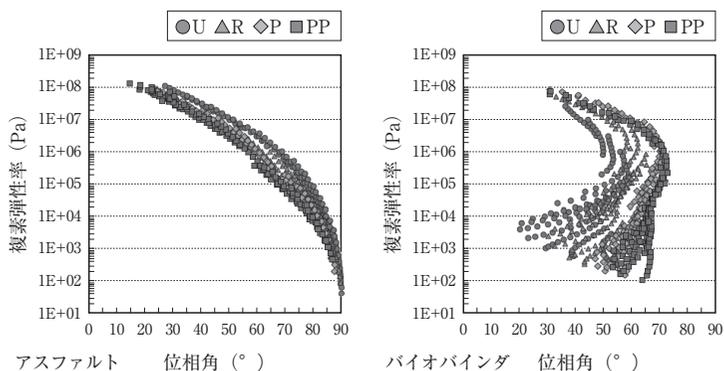


図-9 ブラックカーブ

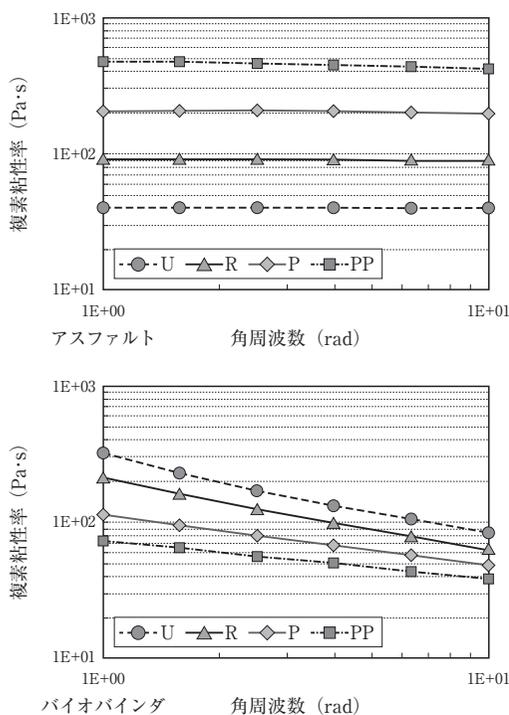


図-10 複素粘性率 (76°C)

表-3 劣化指数

T (°C)	アスファルト						バイオバイнда					
	$AI_{G1}$			$AI_{\delta}$			$AI_{G1}$			$AI_{\delta}$		
	R	P	PP	R	P	PP	R	P	PP	R	P	PP
4	1.1	1.5	1.7	0.82	0.71	0.60	2.0	3.3	3.3	1.07	1.13	0.99
28	2.4	4.7	7.6	0.81	0.76	0.66	1.0	1.3	1.3	1.08	1.22	1.30
52	2.5	6.0	14.3	0.94	0.86	0.80	0.9	0.4	0.5	1.28	1.57	1.69
76	2.2	4.9	10.6	0.98	0.96	0.92	0.8	0.6	0.5	1.08	1.20	1.33

### (3) 化学分析

薄層クロマトグラフィー(以下TLC)から、アスファルトは劣化が進行するにつれてアスファルテン分とレジン分の割合が上昇すると分かった。バイオバイндаには飽和分が含まれておらず、多くがレジン相当分で占められていた。劣化の進行によってレジン相当分の割合は上昇したことから、PAVによって内部構造が変化していることが示唆された。

表-4にフーリエ変換赤外分光光度計(以下FTIR)スペクトルより算出したスルホキシドインデックス(Is)とカルボニルインデックス(Ic)を示す。アスファルトは劣化の進行に従ってIsとIcが増加した。バイオバイндаは未劣化時からIsとIcが高く、劣化による変動がわずかであった。

表-4 FTIRスペクトルから算出したインデックス

劣化条件	アスファルト		バイオバイнда	
	Is (%)	Ic (%)	Is (%)	Ic (%)
U	2.28	1.39	4.49	13.72
R	2.25	1.85	4.47	12.61
P	2.60	1.76	4.27	13.66
PP	3.31	2.55	3.83	12.84

化学分析の結果からバイオバイндаは一般的なアスファルトとは全く異なる性状を示すことがわかった。

### (4) まとめ

バイオバイнда分野の調査のためには、評価方法の検討を進める必要がある。

### 4.4 翻訳者コメント

アスファルト性状の回復において、植物由来の再生用添加剤を使うことは有効であることがわかった。しかし、ベースの植物の種類によって回復効果に差が見られることから、再生用添加剤として使用するには、回復効果に差がある原因を明らかにすることが重要であると感じた。また、非石油由来の舗装材料の開発は進んでいるため、適切な試験方法の確立が必要だと感じた。

SDGsに貢献するためにも、環境負荷が小さいだけでなく、持続的にアスファルト混合物を再生利用できるような再生効果に優れた再生用添加剤の開発や材料評価方法の更なる発展を期待している。

## 5. アスファルト舗装への他産業再生資材の利活用

### 5.1 廃プラスチック由来材料の活用

#### リサイクルされたポリマーを使用したバイндаおよびアスファルト混合物の力学的特性

原題: *EXPERIMENTAL STUDY ON USE OF RECYCLED POLYMER AS MODIFIER IN MASTIC AND ASPHALT MIXTURE*

キーワード: 廃プラスチック, ITSM, MSCR

世界のプラスチックごみ量は年々増加しており、環境汚染の主な要因の1つとされている。その理由としてプラスチックが非生分解性物質であることが挙げられる。近年、その性質を利用し、廃プラスチックを舗装材として再利用する試みがなされている。本研究は、廃材由来のポリオレフィンを混合した熱可塑性ポリマー“PB25”をフィラーの代替として利用し、アスファ

ルト混合物および再生アスファルトマスチックを製、および評価をしたものである。

(1) 試験材料・方法

アスファルトには針入度50/70のストレートアスファルトを用いた。骨材の20%，フィラーの24%に舗装発生材を用いた。アスファルト混合物に対するPB25の添加量は表-1に示す4通りとした。マスチックに関しては、PB25添加量が異なる2つの試料を作製した。表-2に、作製したマスチックの組成を示す。

作製した混合物は、繰り返し間接引張試験（以下ITSM試験）および繰り返し負荷軸試験（以下RLAT試験）によって評価した。マスチックは、動的シアレオメータを用いた繰り返しクリープ試験（以下MSCR試験）によって評価した。

(2) スティフネス

図-1に、ITSM試験によって得られた混合物のスティフネスの温度依存性を示す。測定範囲内の全ての

表-1 混合物の試料名とPB25含有量

試料名	混合物1トン中におけるPB25の質量
PC0	0 kg
PC15	1.5 kg
PC25	2.5 kg
PC35	3.5 kg

表-2 マスチックの組成

物質名	PC0 (g)	PC35 (g)
ストレートアスファルト50/70	234.00	234.00
PB25	0	18.64
フィラー(新骨材)	238.70	128.77
フィラー(再生骨材)	191.00	191.00

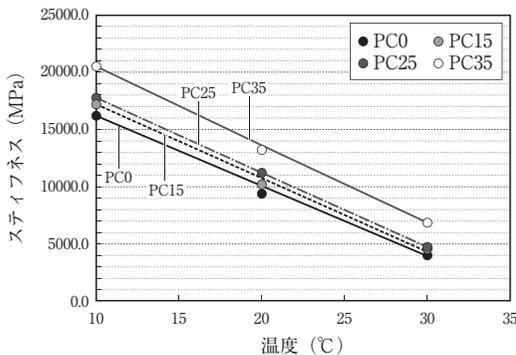


図-1 ITSM試験によって得られたスティフネスの温度依存性

温度において、PB25の増加に伴いスティフネスが増大した。また、全ての温度において、各スティフネス曲線がほとんど平行である。以上の結果より、PB25は混合物の感温性を変えることなく、混合物の耐荷力を向上させることができると考えられる。

(3) 永久変形特性

図-2(a)に、RLAT試験によって得られた混合物のクリープスティフネスのPB25依存性を示す。試験温度は40°Cである。クリープスティフネスは、PB25を含まないPC0が最も小さく(≒10MPa)、PB25の増加に伴い値は上昇し、PC35が最も大きくなった(≒19.6MPa)。

図-2(b)に、RLAT試験による累積ひずみのPB25依存性を示す。累積ひずみはPC0が最も大きく、PB25の増加に伴って減少する。これらの結果から、混合物の永久変形抵抗性はPB25の量によって異なり、PB25が多いほど永久変形抵抗性が大きくなると考えられる。

図-3に、MSCR試験によって得られたマスチックの $J_{nr}$ の結果を示す。試験温度は58°Cである。 $J_{nr}$ は非回復クリープコンプライアンスであり、以下の式で定義される。

$$J_{nr} = \frac{\epsilon_u}{\sigma}$$

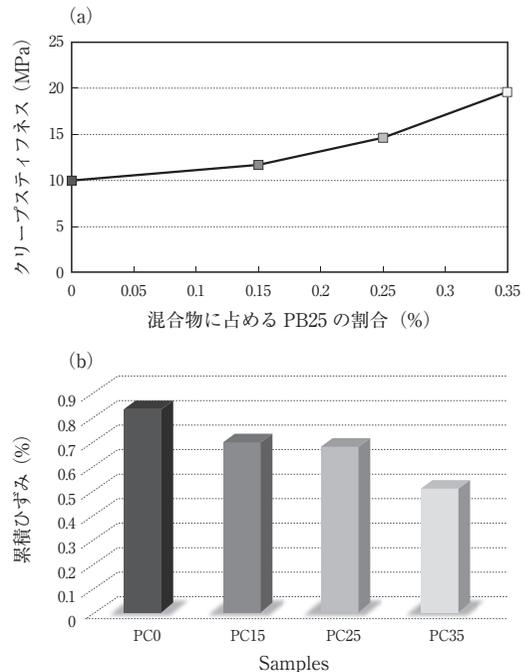


図-2 RLAT試験結果

(a) はクリープスティフネス、  
(b) は累積ひずみのPB25依存性を示す

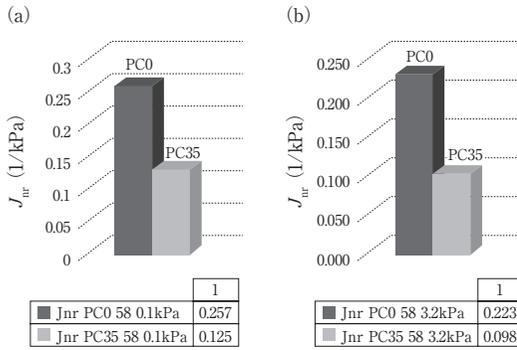


図-3 MSCRによって得られた $J_{nr}$  (a) はせん断応力が0.1 kPa, (b) は3.2 kPaの結果

ここで、 $\sigma$ はマスチックに与えるせん断応力、 $\epsilon_u$ は応力を除荷した後に残存したひずみ量であり、 $J_{nr}$ が小さいほど永久変形抵抗性は大きくなる。(a)は $\sigma=0.1\text{kPa}$ 、(b)は $\sigma=3.2\text{kPa}$ の結果に対応する。

$\sigma=0.1\text{kPa}$ および $3.2\text{kPa}$ のどちらにおいても、 $J_{nr}$ はPC35の方が大きくなった。この結果は、PB25を含むマスチックは、PB25を含まないマスチックよりも大きい永久変形抵抗性が高いことを示唆する。これはRLAT試験における混合物試験の結果と矛盾しない。

#### (4) まとめ

廃プラスチック由来ポリマー“PB25”をフィラーとして利用することで、アスファルト混合物およびアスファルトマスチックの力学的特性が向上した。特に高温における永久変形抵抗性の向上が顕著であった。アスファルト混合物の改質材としてのPB25の今後の研究が期待される。

## 5.2 廃タイヤ由来材料の活用

### RARを添加したアスファルト混合物の機械的特性

原題：*PRELIMINARY STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AN ASPHALT MIXTURE CONTAINING RAR MODIFIERS*

キーワード：RAR, 間接引張試験

RAR (reacted and activated rubber) は廃タイヤチップとストレートアスファルトおよび、AMBS (activated mineral binder stabilizer：主に砕石マスチックアス

ファルト混合物用のダレ防止剤として使用される添加剤) から構成される添加剤である。本研究はRARを添加したアスファルト混合物に関する基礎研究として、混合物の機械的特性を調査したものである。

#### (1) 試験材料・方法

RARを添加したアスファルト混合物供試体を作製し、間接引張試験によって評価した。RARはドライ混合時に添加し、添加量はアスファルト量の0、10、20、40%とした。また、試験は15、20、25、30℃の4温度で実施した。

#### (2) 試験結果・考察

図-4に間接引張試験結果を示す。これより、測定したすべての試験温度においてRARを添加した混合物のモジュラスが、添加していない混合物のモジュラスを上回ることが確認できた。また25、30℃ではRARの添加量に関わらずモジュラスが近い数値を示した。一方で15、20℃ではRAR添加量によりモジュラスの差が大きく、10%で最も高いモジュラスを示した。

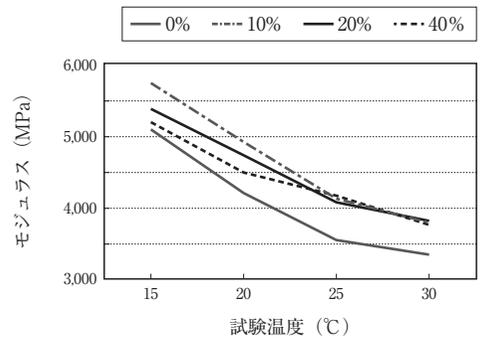


図-4 試験温度およびRAR添加量とモジュラスの関係

### 廃タイヤチップをプラントミックスしたアスファルト混合物の長期劣化特性

原題：*LONG-TERM AGING BEHAVIOUR OF ASPHALT MIXTURES MODIFIED WITH CRUMB RUBBER USING THE DRY PROCESS*

キーワード：廃タイヤチップ, 長期供用劣化

廃タイヤチップ (以下チップ) をアスファルト混合物に添加する方法として、チップをプレミックスで使用する方法和、プラントミックスによって添加する方法がある。プラントミックスでチップを添加した混合

物は、プレミックスのアスファルトを使用した混合物と比較してコスト面で優れる一方、混合物の性状で劣ると評価されてきた。しかし、近年の研究によって製法の見直しや技術の開発がなされ、性能が向上することが複数の論文にて報告されている。

本論文は、プラントミックスによって製造したチップ入りアスファルト混合物の更なる知見を得るため、長期劣化特性を調査し、評価したものである。

### (1) 試験材料・方法

試験に使用するチップは、チップを改質したもの(CR\_1)と、通常のチップ(CR\_2)の2種類である。また、比較対象としてポリマー改質アスファルトを使用した混合物供試体を作製した。加えて、通常作製分とは別に供用劣化後の混合物を想定した供試体として、通常作製後の供試体を85℃で120時間養生したものを作製した。作製した供試体はマーシャル安定度試験および、間接引張試験で性状を評価した。

### (2) 試験結果・考察

図-5にマーシャル安定度試験の結果を示す。すべてのサンプルにおいて、安定度は劣化後の供試体で増加した。一方で、フロー値はチップ添加の有無で差がみられた。チップ無添加の供試体では劣化後のフロー値が減少したが、チップを添加した供試体では増加した。これに伴い、チップ添加混合物の安定度/フロー値(MQ)は、劣化前後で変化がほとんど無かった。この結果からチップ添加混合物は劣化によるアスファルトの硬化に対して耐性があると推測できる。

間接引張試験は標準条件および水浸養生後の2条件で行い、スティフネスおよび、残留スティフネス(水浸養生後/標準条件×100%)を算出した。試験結果を図-6に示す。スティフネスはチップ添加の有無に関わらず、似た傾向を示した。しかし劣化前供試体において、スイスにおける残留スティフネスの規格値(70%)を満たしているのはチップ無添加の混合物だけであった。ただし、著しく数値が低いというわけではなく、配合を調整することで通常混合物と同等レベルまでは数値を上げられる可能性があることを著者は言及している。

### 5.3 翻訳者コメント

廃プラスチックや廃タイヤに由来する材料を使用した混合物に関する論文を3報紹介した。廃タイヤ由来チップをプラントミックスする技術は国内で既に弾性舗装や凍結

抑制舗装に利用されているが、廃プラスチックを利用した技術は広く浸透しているとは言えないが、今回紹介した廃材由来の改質材であるPB25は、ごみ排出量の削減と、舗装性能向上によるインフラの強靱化の2つ観点でSDGsに貢献しうる可能性がある。研究が進み、舗装業界における他産業再生資材の使用率が向上することで、SDGsの達成に貢献することを期待する。

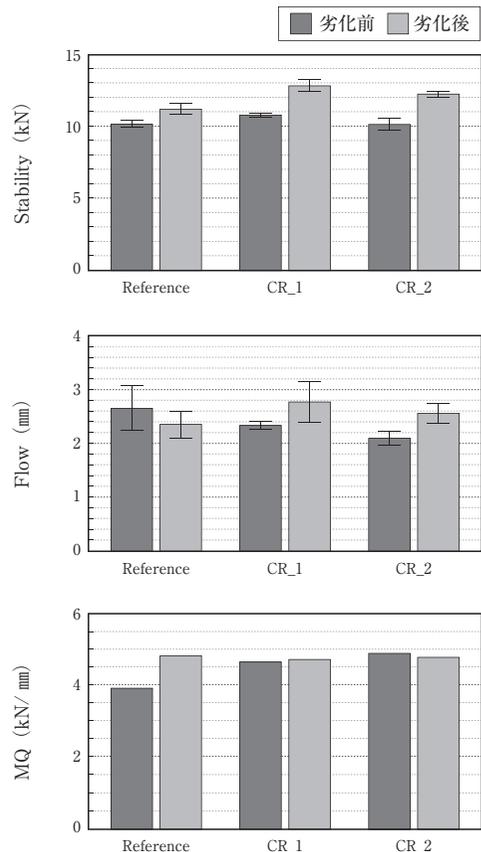


図-5 マーシャル安定度試験結果

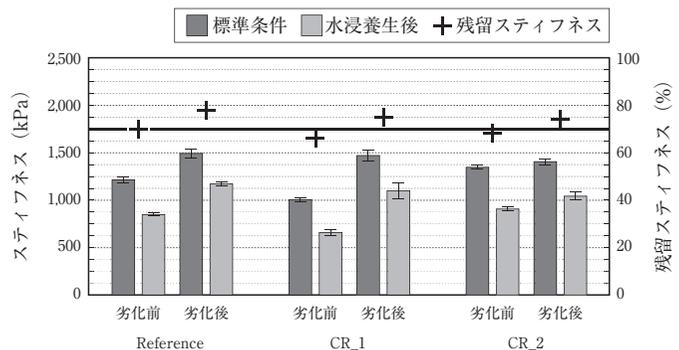


図-6 間接引張試験結果

## 6. 未活用素材によるアスファルトの機能付与および舗装性能の向上

### 6.1 グラフェン強化改質材

#### グラフェン強化改質材による再生アスファルト舗装

原題：**GRAPHENE-ENHANCED RECYCLED ASPHALT PAVEMENTS**

キーワード：グラフェン強化改質材, GESM, ITS, ITSM, HWD 試験

イタリアの Iterchimica Srl によって開発された新しいグラフェン強化改質材 (graphene-enhanced super-modifier, 以下 GESM) は、従来のポリマー改質アスファルトの製造技術の発展系であり、グラフェン系材料および廃棄物から生じるプラスチックからつくられる。本研究では、高効率かつ持続可能で革新的なシステムで製造された GESM を用いたアスファルト混合物性状を検証し、新しい改質材の開発を目的とした。

#### (1) 材料

GESM (図-1 (a)) は、環境負荷が低いことを特徴とする革新的なプロセスで製造された改質材であり、アスファルト混合物製造プラントにおいてドライ混合時に添加する。GESM の原材料であるナノプレートレット (図-1 (b)) は、純粋なグラフェン (カーボン原子の単層をハニカム構造に配列したもので構成されたグラフェン系材料である。なお、GESM は新しい材料として注目されており、電気やセンサなどの分野で産業を革命させる可能性を有するとされている (Graphene-info THE GRAPHENE EXPERTS)<sup>3)</sup>。GESM は、アスファルト混合物の間接引張強度およびスティフネスを向上させ、わだち掘れおよび疲労抵抗性を増加させる。

#### (2) 室内試験

GESM の効果を確認するため、新規骨材を用いて、GESM で改質したアスファルト混合物、ストレートア

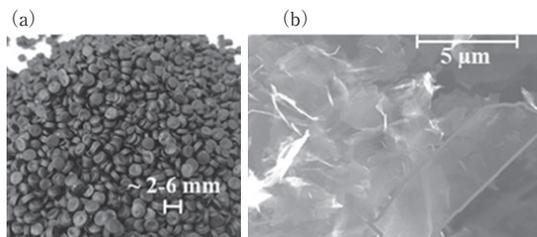


図-1 GESM (a) とナノプレートレット (b)

スファルト混合物およびプラストマーにより軟化改質したアスファルト混合物との比較検討を行った。GESM はアスファルト量に対して、5% 添加した。表-1 に間接引張試験の結果を示す。GESM を含むアスファルト混合物では、25℃での間接引張強度は、ストレートアスファルト混合物と比較し、+59.8% 増加した。同様に、GESM を含むアスファルト混合物のスティフネスは、5℃で+107.7%、40℃で+174.0% まで上昇する。表-2 より、わだち掘れの变形深さに関しては、およそ 69% 減少した。また、表-3 に示す疲労破壊抵抗性は、ストレートアスファルト混合物と比較して、+570.5% 増加することを示した。

#### (3) 試験施工

2018年9月、ローマ近郊で最初の試験舗装が実施された (図-2)。試験舗装では再生混合物が用いられた。HWD (Heavy Falling Weight Deflectometer) 試験によって解析を行った。施工経路は、長さ250mの4つの区間に分割された (図-3)。また、試験施工区間における添加剤や改質材の配合については表-4 および表-5 に示す。

表-1 間接引張強度とスティフネス

合 材	ITS (MPa)	ITSM (MPa)		
	T=25℃	T=5℃	T=20℃	T=40℃
無添加 AC (WA)	1.07	10,169	5,711	1,096
プラストマー	1.57	20,866	6,685	2,691
スーパーモディファイア AC (GESM)	1.71	21,124	7,809	3,003
可変率 GESM-WA	+59.8%	+107.7%	+36.7%	+174.0%

表-2 60℃での流動抵抗性 (mm)

合 材	5,000 サイクルでの凹み深さ (mm)	10,000 サイクルでの凹み深さ (mm)
無添加 AC (WA)	1.39	1.55
プラストマー	0.88	0.98
スーパーモディファイア AC (GESM)	0.43	0.48
可変率 GESM-WA	-69.1%	-69.0%

表-3 20℃および 2 Hz での疲労破壊抵抗性

合 材	破壊までの荷重回数
無添加 AC (WA)	157,639
プラストマー	473,167
スーパーモディファイア AC (GESM)	1,056,933
可変率 GESM-WA	+570.5%



図-2 試験舗装状況

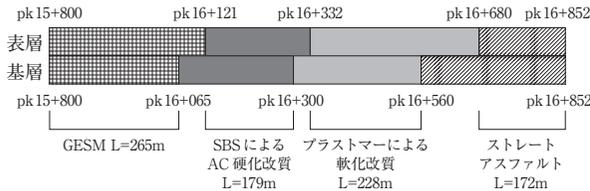


図-3 試験区間経路区分

表-4 基層用混合物の配合詳細

基層用混合物	RAP (%)	RAPに対する添加剤 (%)	総重量に対するアスファルト (%)	アスファルト量に対する改質材 (%)
ストレートアスファルト	40	0.2	4.40	0
GESM	40	0.2	4.40	5
SBSによるAC硬化改質	40	0.2	4.40	5
プラストマーによる軟化改質	40	0.2	4.40	3

表-5 表層用混合物の配合詳細

表層用混合物	RAP (%)	RAPに対する添加剤 (%)	総重量に対するアスファルト (%)	アスファルト量に対する改質材 (%)
ストレートアスファルト	30	0.2	5.75	0
GESM	30	0.2	5.75	5
SBSによるAC硬化改質	30	0.2	5.75	5
プラストマーによる軟化改質	30	0.2	5.75	3

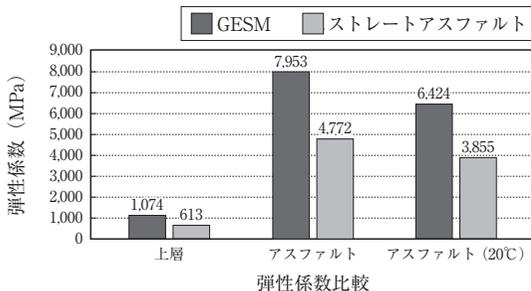


図-4 GESMと標準的なアスファルトのHWD試験比較

舗設1か月後の試験結果より、GESMを用いた工区がストレートアスファルトによる工区と比較して、67%~76%性能向上が增加することを示した(図-4)。試行区間を追跡調査するために、HWD試験が今後5年間既に計画されている。

試験舗装後に各種試験を行った。GESMを用いたアスファルト混合物の弾性係数は、ストレートアスファルト混合物と比較し1.7倍程度の値が得られ、間接引張強度は、20%~35%に増加した。

各種試験結果(図-5)では、スティフネス、わだち掘れ深さ、疲労抵抗性に関して性状が改善することが分かり、特に疲労抵抗性に関して、167~424%向上した。

(4) まとめ

舗装寿命を延ばすために開発された新しいグラフェン強化改質材(GESM)を用いた混合物は、新規混合物を用いて実験的な研究を行ったとこ

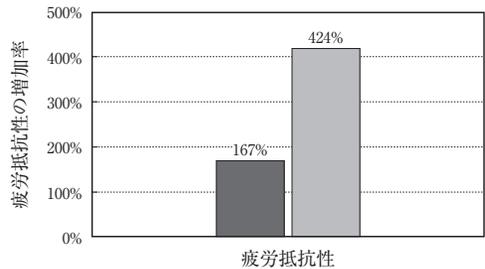
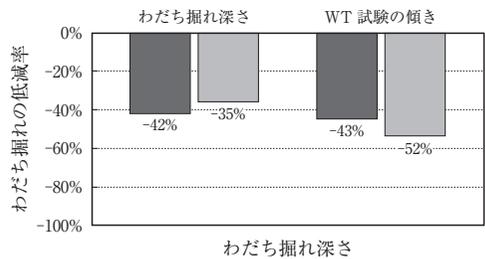
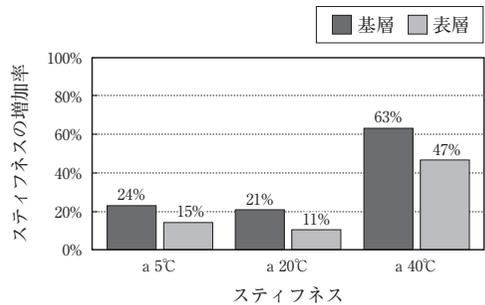


図-5 アスファルト混合物の各種性状に対するGESMを用いた混合物の性状の変化率

ろ、より大きな間接引張強度、スティフネス、耐流動性、疲労破壊抵抗性を示した。

再生混合物を用いた試験施工後に各種試験を行い、ストレートアスファルトと比較した結果、GESMの弾性係数は、1.7倍程度の値が得られ、間接引張強度は、20%～35%増加した。また、わだち掘れ深さは35%～40%減少し、疲労抵抗性は大幅に向上したことがわかった。

## 6.2 ナノ材料

### ストレートアスファルト、改質アスファルトへのナノ材料 (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO) 添加が粘弾性状に与える効果

原題：EFFECT OF NANO SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> AND ZNO MODIFICATION TO RHEOLOGICAL PROPERTIES OF NEAT AND POLYMER MODIFIED BITUMEN

キーワード：ナノ材料, LAS, MSCR

ナノ材料は直径100nm以下の粒子でシンプルな化学組成から出来た材料であり、粒子の比表面積や形状、化学組成の違いにより物理特性が従来材料と異なる。また、アスファルト添加時にはアスファルトの種類やナノ材料の種類、配合量、粒子径などが性能に影響を与える。そこで本研究では特にアスファルトの粘弾性状に対するナノ材料の影響を調査した。

#### (1) ナノ材料添加アスファルトの論文調査

過去論文から、以下の有望な3材料を選定した。アスファルトに対する影響は以下のとおりであった。

- ① nano-ZnO：劣化、永久変形、疲労に対する抵抗性を高める。耐劣化性に対する最適配合量は3%、長期の変形や疲労に対する最適配合量は7%。
- ② nano-SiO<sub>2</sub>：劣化、永久変形、温度ひび割れに対する抵抗性を高める。最適配合量は3～4%。
- ③ nano-TiO<sub>2</sub>：UVに対する抵抗性を高める。温度感応性を低下させ、凍結融解サイクルに対するアスファルト混合物の剛性を高める。最適配合量は5～10%。

#### (2) 試験材料

ベースアスファルト (表-6)

- ① ストレートアスファルト：70/100アスファルト (以下、70/100)

② 改質アスファルト：PMB45/80-55 (以下、PMB)

ナノ材料：TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZnO (表-7)

添加量は1%、3%の2水準で評価した。

#### (3) 試験結果解析

複素弾性率|G\*|の比較結果 (図-6) から70/100では|G\*|はnano-SiO<sub>2</sub> 1.3%添加, nano-TiO<sub>2</sub> 3%添加で増加した一方、PMBではnano-SiO<sub>2</sub>, nano-TiO<sub>2</sub>添加で|G\*|が増加し、nano-ZnOでは減少した。

線型振幅スイープ (LAS: Linear Amplitude Sweep) 試験による破損までの負荷サイクル数 (以下、Nf) の比較結果 (図-7) から、ひずみ2.5%では、nano-SiO<sub>2</sub>-3%添加アスファルト、nano-ZnO-1%添加アスファルトで70/100のNfはそれぞれ4.5%と3.2%増加した。しかし、ひずみ5%では、70/100のNfは大きく低下し、全てのナノ材料添加で疲労耐性に対して悪影響を与えた。一方で、PMBのNfに対してはnano-TiO<sub>2</sub>-1.3%添加アスファルトで、Nfはそれぞれ23%、19%増加した。nano-ZnO-1%添加アスファルトとnano-SiO<sub>2</sub>-3%添加アスファルトではNfがそれぞれ14%、13%低下し、悪影響を与えた。

様々な負荷レベル (0.1, 1.6, 3.2kPa) における70/100、PMBの非回復クリープコンプライアンス (以下、J<sub>nr</sub>) について60℃の繰り返しクリープ (MSCR: Multi Stress Creep Recovery) 試験で評価した。70/100へ

表-6 試験に用いたアスファルトの性状

特性	アスファルトの種類	
	70/100	PMB 45/80-55
針入度25℃	70-100	45-80
軟化点	43-51℃	≤ 55℃
薄膜加熱試験		
針入度残留率25℃	≥ 46%	≥ 50%
軟化点上昇	≤ 9℃	≤ 2℃
質量変化率	≤ 0.8%	≤ 0.5%
引火点	≥ 230℃	≥ 235℃

表-7 試験に用いたナノ材料の物理特性

物理特性	ナノ粒子タイプ		
	nZnO	nSiO <sub>2</sub>	Rutile nTiO <sub>2</sub>
外観	白色粉末	白色粉末	白色粉末
分子量	81.37	60.80	79.87
融点	1,975℃	>1,700℃	1,830℃
純度	99.5%	99.5%	99.5%
特徴的な粒子サイズ	30nm	1.5nm	25nm
融解性	溶解性なし	溶解性なし	溶解性なし

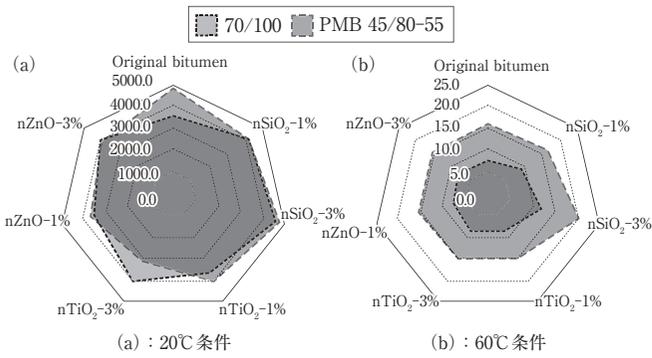


図-6 複素弾性率 $|G^*|$ の比較 (10Hz)

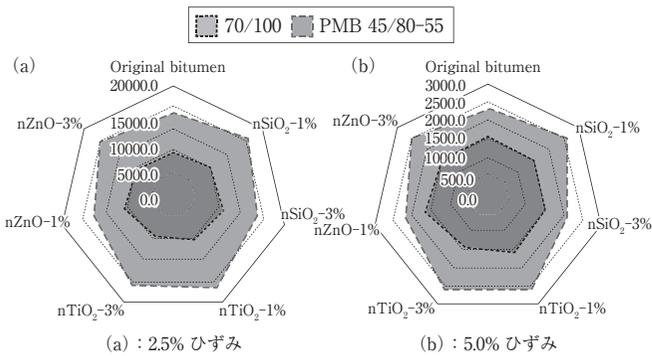


図-7 破損までの負荷サイクル数の比較 (20°C, 10Hz)

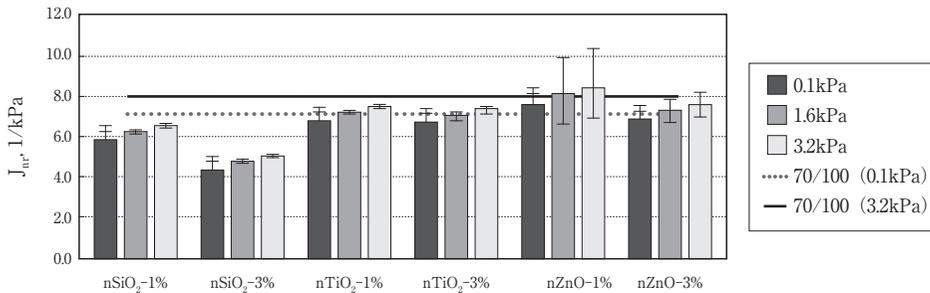


図-8 70/100へのナノ材料添加における非回復クリープコンプライアンス ( $J_{nr}$ ) の試験結果 (60°C)

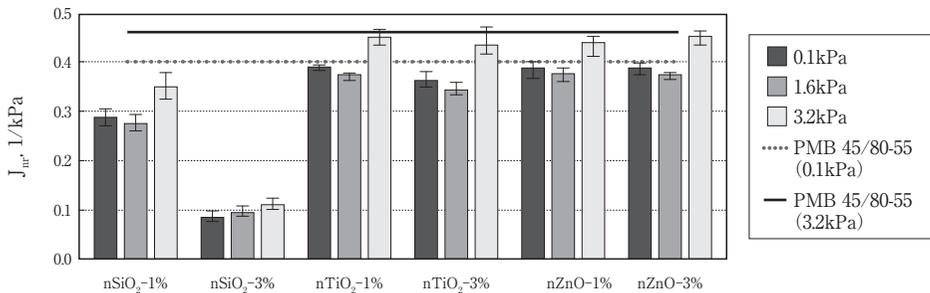


図-9 PMBへのナノ材料添加における非回復クリープコンプライアンス ( $J_{nr}$ ) の試験結果 (60°C)

の nano-ZnO-1% 添加アスファルトでは  $J_{nr}$  が上昇したが, nano-SiO<sub>2</sub>-3% 添加アスファルトでは低下した (図-8)。PMB への nano-SiO<sub>2</sub>-1.3% 添加アスファルトでは他の添加アスファルトと比較して  $J_{nr}$  がかなり低かった。(図-9) 70/100 と PMB の結果の違いは  $J_{nr}$  が負荷レベルだけではなく, アスファルト中のポリマーにも影響を受けると考えられる。

(4) まとめ

得られた結果について, ナノ材料ごとに表-8 にまとめた。材料によって向上する性状が異なるため, 目的に応じた材料の選定が必要と考えられる。

表-8 各材料の添加効果

ナノ材料名	添加効果まとめ
nano-SiO <sub>2</sub>	70/100, PMB で耐わだち掘れ性向上
nano-TiO <sub>2</sub>	PMB で疲労耐性向上
nano-ZnO	3% 以下の添加では力学的特性影響なし

### 6.3 相転移物質

#### 軽量骨材粒子への相転移物質 (PCM) の含浸とアスファルト混合物への適用

原題: *IMPREGNATION OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE PARTICLES WITH PHASE CHANGE MATERIAL FOR ITS USE IN ASPHALT MIXTURES*

キーワード: 相転移物質 (PCM), 軽量骨材, CT スキャン

アスファルトに25%の相転移物質(以下, PCM)を加える事で温度低下を緩和し, 低温力学特性を改善できる可能性があるという既報がある。本研究では蓄熱効果を増加させるため, 混合物中のアスファルトへの添加(5-6wt%)ではなく, 骨材粒子(94-95wt%)へのPCM添加効果を調査した。試験サンプルは軽量骨材粒子にPCMを含浸, 保護コーティングを行い, CTスキャン画像により有効性を評価した。

#### (1) 材料および試料作製方法

##### 担体

発泡ガラス凝集体(図-10a) … Misapor®社製  
焼成粘土ビーズ(図-10b) … 園芸目的の市販品

##### PCM

テトラデカン(純度99%, 液体)

##### コーティング剤(二重層)

エポキシ樹脂(SPI06)

ポルトランドセメント(以下, OPC)

##### 含浸およびコーティング方法(図-10~13)

以下にコーティング方法を記載する。

担体をPCMに含浸(室温15分) → 真空飽和(真空下40°C, 30分) → 静置(1分) → PCM結晶化(-10°C, 20分) → エポキシ樹脂でコーティング(第1層) → 全体にOPCを付着 → 乾燥(室温10時間) → エポキシ樹脂でコーティング(第2層) → 乾燥(室温10時間)

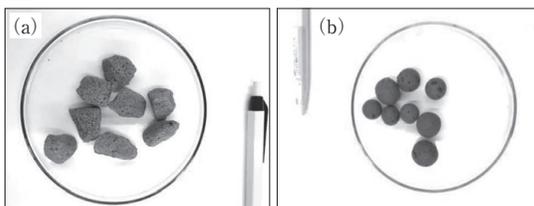


図-10 (a) 発泡ガラス凝集体 (b) 焼成粘土ビーズ

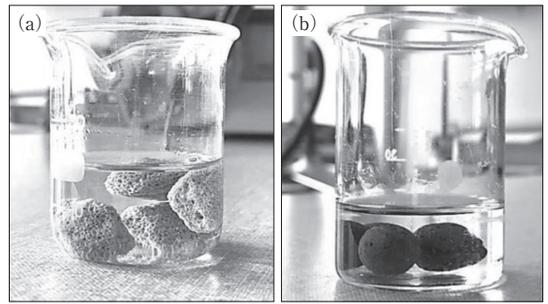


図-11 PCMに含浸中の担体

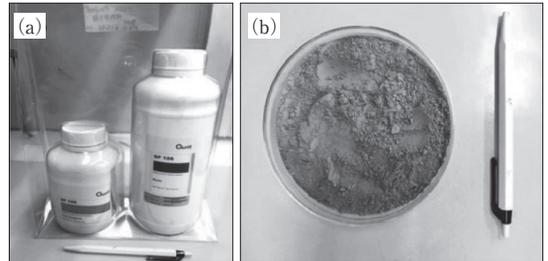


図-12 (a) エポキシ樹脂(SPI06)  
(b) ポルトランドセメント

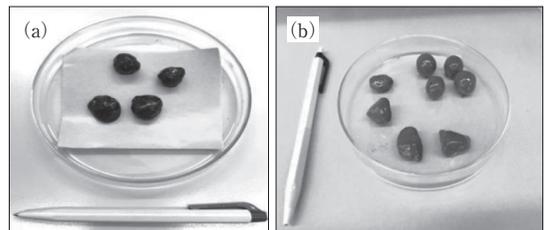


図-13 (a) コーティング済みPCM含浸骨材  
(b) コーティング済みPCMなし骨材

#### (2) 評価結果およびまとめ

加熱, 冷却プロセス中のテトラデカン(PCM)の溶解, 結晶化挙動を観察した。テトラデカン(PCM)の熱流と温度の関係を図-14に示す。熱流曲線は8.71°Cに融解ピーク, -1.03°Cに冷却ピークを示した。これによりPCMが加熱, 冷却の両サイクルで熱エネルギーを貯蔵, 放出する能力があることが示された。-1.03°Cでの結晶化ピーク積分により, 結晶化エンタルピー(結晶化プロセスによって生成される熱エネルギー)は225.3J/gで, 他の同等のPCMと比較して高い熱エネルギーを持つことがわかった。

図-15, 図-16の発泡ガラス凝集体, 焼成粘土ビーズのCTスキャン画像(PCM含浸あり, なし)により, コーティング層と多孔性の高いポイド構造, および

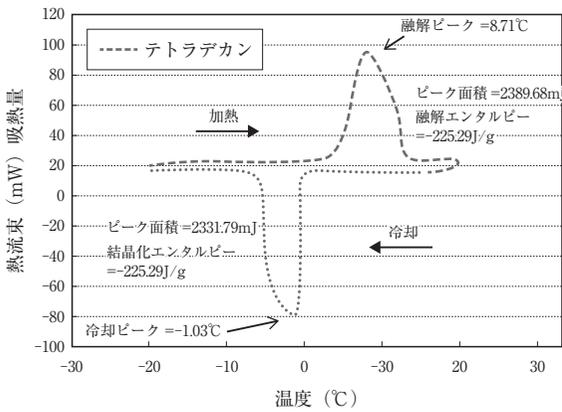


図-14 PCMの熱流曲線(昇降温速度:10°C/min)

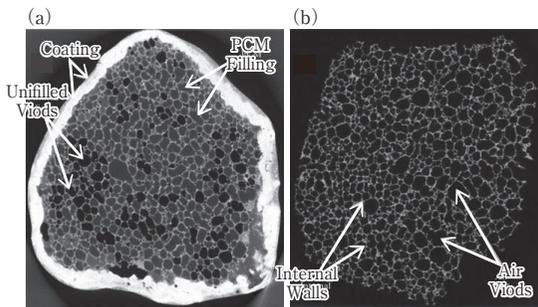


図-15 発泡ガラス凝集体のCTスキャン画  
(a) PCM含浸, コーティングあり,  
(b) PCM非含浸

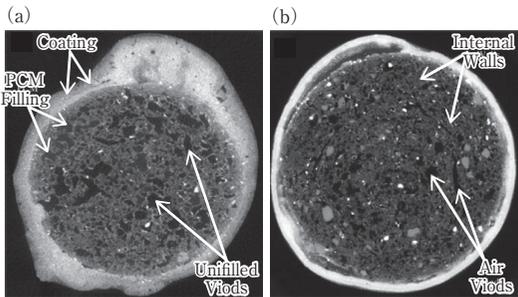


図-16 焼成粘土ビーズのCTスキャン画像  
(a) PCM含浸, コーティングあり,  
(b) PCM非含浸

PCM飽和, 不飽和のポイドが確認できた。質量差計算により孔の形状が規則的な発泡ガラス凝集体はPCM飽和度が高く(98%), 不規則な焼成粘土ビーズではPCM飽和度が低い(56wt%)ことがわかった。結果として、含浸特性の面では発泡ガラス凝集体の方が焼成粘土ビーズよりも有効なPCM担体であることがわかった。

## 6.4 翻訳者コメント

これまでアスファルト舗装技術に活用されてこなかった機能性材料を適用することは、持続可能な開発であるSDGsの目標に向かって社会的課題を解決すること、そして今後のアスファルト技術の発展に繋がっていくことを期待している。

## 7. アスファルト舗装の維持マネジメント技術

### 7.1 Building Information Modelingとは

Building Information Modeling (以下, BIM) は、3次元モデルを作成し、設計から施工, 維持管理に至るまでの建築ライフサイクル全体で蓄積された情報を活用するワークフローである<sup>4)</sup>。

BIMの主な原則と利点は以下のとおりである。  
(The BIM (Building Information Modeling) - Based Approach for Road Pavement Maintenanceより抜粋)

- リアルタイム相互運用性
- 知識の共有と協力的なアプローチ
- モデルのオンラインでの恒常的な更新と利用
- シミュレーションと解析
- 現実的で多次元の表現
- ライフサイクル管理

近年, BIMはビル建築や建築に関わる設備の分野で活用されているが, 自動車道や空港などのインフラ分野へのBIMの活用(以下, I-BIM)は満足に行われていない。しかし, I-BIMが適用されれば, ジオリアレンスや3Dモデルで形状や壁, 橋, 排水などの異なるインフラ部分を並行に操作できるようになる。設計や施工, 管理や修繕といった建築ライフサイクルを通して, 一貫したデータ管理ができるため, エラーの減少や業務効率の向上が期待できる。(The BIM (Building Information Modeling) - Based Approach for Road Pavement Maintenanceより抜粋)

イタリアでは, 2019年1月1日から入札価格が1億ユーロ以上の公共事業はBIMを含む革新的なプロセスを適用する義務があり, 2025年にはすべての公共事業でBIMに統合される。(Airport Pavement management System: An Open BIM Approachより抜粋)

日本では, 「CIM (Construction Information Modeling)」あるいは「BIM/CIM」という名称ですでに注目されており, 国土交通省でも2025年に全管轄事業で原則CIMを適用する方針を打ち出し, 2020年3月には「BIM/CIM基準要領」等を発表している<sup>5,6)</sup>。

## 7.2 BIMの維持修繕への適用

### BIMを基にした道路舗装メンテナンス

原題：THE BIM (BUILDING INFORMATION MODELING) – BASED APPROACH FOR ROAD PAVEMENT MAINTENANCE

キーワード：BIM, PMS, 道路メンテナンス

著者らは舗装マネジメントシステム（以下、PMS）を参照し、BIMでモデルやデータベースを含む構成に有効な手順を提案した。PMSへのBIMの導入は、以下の2点を要する。

- ①舗装状態調査の結果を図表で相互作用できる形で管理すること
- ②見つけた損傷の種類や程度に対するさまざまな修繕を図表などのリアルタイムで修正しやすい方法で表すこと

ひび割れや凹凸、ポットホールなどの表面の損傷の程度についても、BIMで統合できる。道路部分を視覚化し、見つかった調査対象についてのすべての情報を関連付けた。

図-1に、高性能舗装表面調査により処理されたひび割れを伴う舗装部分の3D画像を示す。オペレーターはBIMの調査データから導き出されたさまざまな指標について、舗装の3D画像を用いて特定の場所の損傷程度や施工データなどの管理、分類および共有、あるいは舗装設計をすることが可能である。

著者らは商業的ソフトウェアを用いてアプリケーションを設計し、特殊な調査から導き出されたさまざまな性能指標より分類される舗装部の視覚化を試みた。特にイタリアの高速道路（A20 Messina-Palermo）に沿って行われた詳細な調査結果を用いて、舗装の1つの特性についてBIMにて報告した。図-2に、選択

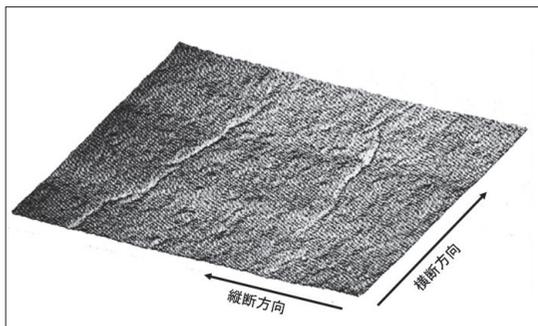


図-1 ひび割れを伴う舗装部分の3D画像

された特性に沿った舗装状態を示す。調査で得られたデータ解析によって、異なる品質で舗装画像が色分けされており、視覚的に品質を見分けることができる。

このように、BIMは品質に関連するすべての測定値を計算し、迅速に単純化することが可能である。それと同時にコストや他の変数をリアルタイムに定量化することができる。

PMSに準拠するBIMは、さまざまなメンテナンスや修繕の効果の比較し、効率や生産性を向上させる。

## 7.3 BIMの空港舗装への適用

### 空港舗装管理システム： オープンBIMアプローチ

原題：AIRPORT PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM: AN OPEN BIM APPROACH

キーワード：BIM, APMS, 空港舗装メンテナンス

空港において、建造物についてはBIMが適用されているが、舗装などのインフラについてはBIMが適用されておらず、空港舗装マネジメントシステム（以下、APMS）の確立もされていない。著者らは、設計・施工・運用に関わる各分野の間で自由な共同作業を可能にする「オープンBIM」でAPMSの確立をより適切に行うためのガイドラインを提案した。

空港は、一般区域と制限区域の2つのエリアに分けられる。制限区域の舗装には滑走路や誘導路、エプロンが含まれる。空港の制限区域の舗装の運用と維持の手順はAPMSに含まれるデータにより構築される。著者らは主に、APMSに接続した時に緻密なデータを持つ3Dモデルを実際の滑走路に反映し、変化を加えたモデルを設計することに焦点を当てている。滑走路モデルはBentley Systemsの道路設計専用ツールによ



図-2 選択された特性に沿った舗装状態

り作製した。図-3に、イタリアのLamezia Terme国際空港の制限区域モデルの全体像を示す。

BIMモデルの利点の1つに、画像ではない情報を統合できることがある。BIMモデルは現在の劣化の状況は勿論、これまでに行われた維持修繕、補修を含む情報について新しく仮想化して表現する。図-4に、滑走路モデルで示された箇所のレーザーグラムの情報を示す。これには、損傷が報告された舗装に関するすべてのデータが含まれる。例えば、亀甲状ひび割れや疲労ひび割れ、ブリージング、コルゲーション、沈下、レベリング、風化などである。表面状態は、通常の点検や環境条件、摩耗とひび割れ、ゴムの添加量などによって評価される。

建築分野などでのBIMモデルは、立体的な図形表現と属性情報を保有できるIndustry Foundation Classes (以下、IFC) ファイル形式を利用しているが、空港の滑走路などの線形の現場には、IFCを直接利用するには



図-3 制限区域モデルの全体像

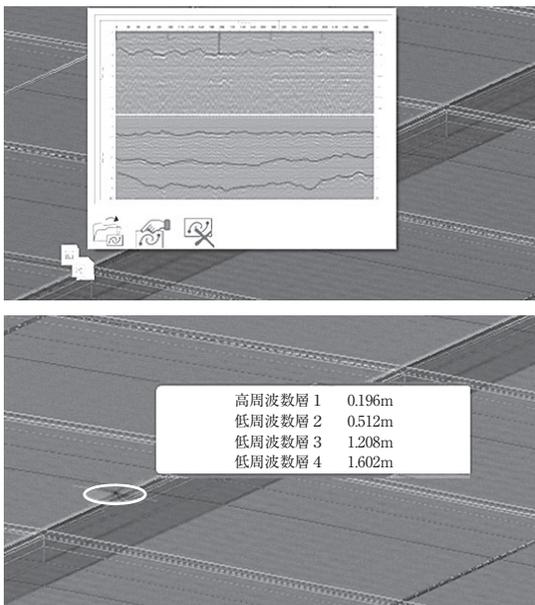


図-4 滑走路モデルで示された箇所の舗装断面の情報

まだ課題があり、一般データ規格を現在開発中である。

#### 7.4 翻訳者コメント

本章ではBIMを舗装に適用する2報を紹介した。日本でも、将来的にBIM/CIMを適用される予定になっている。BIMを用いれば、老朽化が進む国内舗装の修繕を効率よく行うことができ、高品質で信頼性のある舗装を維持し続けることができるだろうと期待している。

#### おわりに

本稿では、SDGsに貢献し得るアスファルト技術をテーマに、ISAP2019の公表論文の中から、特にSDGsへの貢献が期待されるアスファルト技術や関連材料に関する研究論文として、16報の論文を紹介した。これらの論文において、評価手法として間接引張試験やレオロジー試験等、共通して実施されているものについては、国内でも積極的な活用が期待される。また、再生用添加剤や未活用素材については、国内ではあまり取り扱われていないものが多く、様々な材料のアスファルト舗装への適用の可能性を感じた。これらの海外での最新技術等の動向が国内のアスファルト技術の発展、さらにはSDGsの達成という国際社会への貢献に繋がることを期待する。

最後に、この場を借りて、ISAP2019の公表論文を輪読するにあたり、ご協力頂いた土木研究所舗装チームに謝意を示す。

#### — 参考文献 —

- 1) 国際連合広報センター: [https://www.unic.or.jp/activities/economic\\_social\\_development/sustainable\\_development/2030agenda/](https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/) (参照日: 2020年12月17日)
- 2) 環境省「すべての企業が持続的に発展するために -持続可能な開発目標(SDGs)活用ガイド-資料編」
- 3) Graphene-info THE GRAPHENE EXPERTS <https://www.graphene-info.com/graphene-applications> (参照日: 2021年2月26日)
- 4) BIMナビ, CAD Japan.com, <https://www.cadjapan.com/special/bim-navi/know/difference.html> (参照日: 2020年9月10日)
- 5) 日経コンストラクション, 2020年6月22日号, 2020
- 6) [tec/tec\\_tk\\_000037.html](tec/tec_tk_000037.html) (参照日: 2020年10月23日)

# FWDの変遷とアンケートから読み解く現況

掛 札 さくら	渡 邊 真 一	上 地 俊 孝	木 谷 寛
熊 坂 理 紗	齋 藤 夏 実	塚 本 康 雄	根 元 孝
裕 真 悠	藤 井 洋 志	吉 野 広 一 郎	好 見 絵 里



FWD (2020年製 土木研究所 所有)

## 1. はじめに

アスファルト舗装技術研究グループでは、普段の業務で感じた素朴な疑問を研究グループの活動を通じて調査し、第67回報告<sup>1)</sup>のような若手技術者によるアスファルト舗装に関する質問コーナーとして直近7回にわたって報告してきました。今回は普段の業務でも肌身に感じるようになり、また調査メンバーの関心事として意見が集中した「道路ストック維持修繕の時代」をキーワードに調査を行いました。このようなキーワードが研究グループで頻繁に取り上げられるようになった背景には、2016年に国土交通省より「舗装点検要領」<sup>2)</sup>が通達されたことを筆頭に、舗装の維持修繕に関するガイドラインや基準類が整備され、若手技術者もそれに関連した業務に携わる機会が増えたことが要因のひとつとして考えられます。今回は、特に「舗装の構造診断」の重要性に着目し近年活用が進む Falling Weight Deflectometer (以下、FWD) に関して調査しました。

FWDは、重錘を舗装上に落下させて発生する衝撃荷重による舗装のたわみ量を測定する装置の総称

です。FWDの原型は1967年以フランス橋梁道路中央研究所 (LCPC) から報告されている Falling Ball Deflectometer であると言われており、その後、デンマークの国立道路研究所やオランダのシェル石油中央研究所で開発されたものが基本となり、開発が行われました<sup>3)</sup>。

FWDの一例を写真-1に、一般的な装置の構成とたわみ形状のイメージを図-1に示します<sup>4)</sup>。現在では、載荷点 (重錘落下位置) から概ね2 mの範囲内における舗装のたわみ量を瞬時に計測・記録することができます。そして、得られた測定値や解析結果は舗装



写真-1 車載型FWDの一例

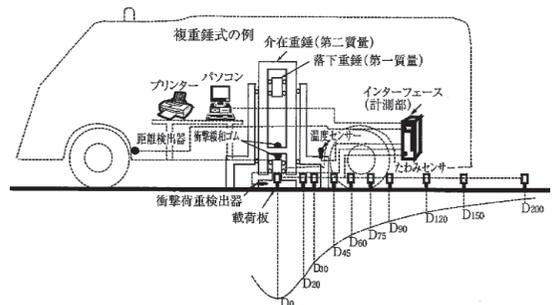


図-1 FWDおよびたわみ形状の概略<sup>4)</sup>

内部の多くの情報を反映します。例えば、舗装体（アスファルト混合物層や路盤、路床など）の支持力や残存等値換算厚、各層（材料）の弾性係数などといった情報を得ることができます<sup>5, 6, 7, 8, 9</sup>。そのため、舗装の損傷原因を究明することが可能だけでなく、道路管理者は舗装が損傷する前に非破壊で既設舗装の健全性や推定寿命を評価することができ、効率的な道路維持管理において一役買っています。このように、FWDは舗装の内部状態を評価できることに最大の特徴があるため、計画的・効率的な補修断面や工法の選定に活用されるほかに、耐久性を向上した新技術の研究開発にも活用されています。

本誌ではFWDが我が国に導入された1983年から10年経過した1993年にFWD特集を組んで装置や技術的な活用方法など当時のFWDに関する動向を紹介しています<sup>10</sup>。それから27年余りが経過し、平成・令和にかけた装置の進化、データ活用や解釈などに関する知見の蓄積について、改めて若手技術者が振り返って調査を行いました。

調査では、統計データや国内発表論文からみるFWDの変遷に関するまとめ、また、FWD業務の最前線で実際の業務に携わる技術者を対象としたアンケートを実施しました。本稿では、この調査結果ならびに、そこから筆者らが読み解くFWD業務の現況について報告します。なお、本稿の構成は表-1に示すとおりです。

表-1 本文の構成

章	内 容	
1	はじめに	
2	FWDの変遷	
節	2.1	FWD測定装置の変遷
	2.2	FWD検定および検定施設
	2.3	文献調査によるFWD関連の研究動向
3	アンケートでみるFWD	
節	3.1	回答者の属性
	3.2	発注者について
	3.3	評価指標について
	3.4	FWD併用試験について
	3.5	FWD調査時期の傾向について
	3.6	FWD調査場所の傾向について
	3.7	調査時のイレギュラー対応について
	3.8	FWDに関する革新技術について
	3.9	FWDに関する課題について
4	おわりに	

## 2. FWDの変遷

### 2.1 FWD測定装置の変遷

本節では、国内で稼働しているFWDの台数と、それらに用いられている重錘およびセンサの変遷について述べます。今回は1993年のデータと、2019年のデータを比較し、その変遷を整理しました。なお、1993年のデータはアスファルト誌175号から抜粋したものを、2019年のデータは、国立研究開発法人土木研究所でFWD検定を行った各機関が所有するFWDのデータを用いています。なお、FWD検定は受けていませんが、国内で稼働しているFWDとしては、空港等で所有されているもの等があります。FWD検定については次節で紹介します。

#### (1) 国内のFWDの稼働数

図-2は、1993年と2019年の国内におけるFWD稼働数の変遷を表したものです。この図より、1993年は稼働数が17台であったのに対して、2019年には42台に増加していることが分かります。これは、FWDの需要の増加および研究が進んだため、稼働数が増加したと考えられます。

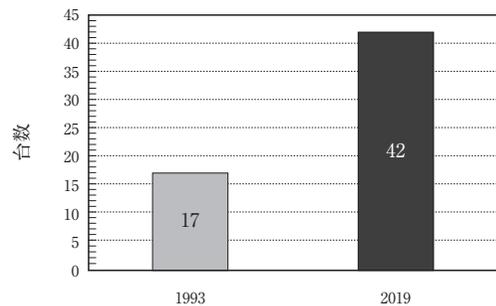


図-2 国内のFWD稼働数の変遷

#### (2) 重錘の変遷

FWDの荷重載荷方式は単重錘式と複重錘式の2種類があります(図-3, 図-4)。両者は落下重錘をフレームに沿って載荷板上に自由落下させ、スプリング系で衝撃を緩和しつつ路面に衝撃荷重を作用させる点では同じです。しかし、単重錘式は、落下重錘が載荷板上に直接落下するのに対し、複重錘式は、載荷板を押さえる介在重錘(第二質量)上に落下重錘(第一質量)が落下し、介在重錘を介して衝撃荷重を載荷板に伝えるという違いがあります。複重錘式では、単重錘式に比べ、実際の走行輪荷重に近い載荷波形を得ることができます。ただし、作用させる衝撃荷重が同一

であれば、単重錘式・複重錘式それぞれで得られるたわみに基本的に違いはないとされています<sup>11)</sup>。従って、最大たわみ量を用いた評価においては、載荷方式の違いによる影響は少ないと考えられます。また、1回の測定に要する時間は、構造がシンプルな単重錘式の方が短いとされています。

図-5に、1993年と2019年の国内のFWDで採用さ

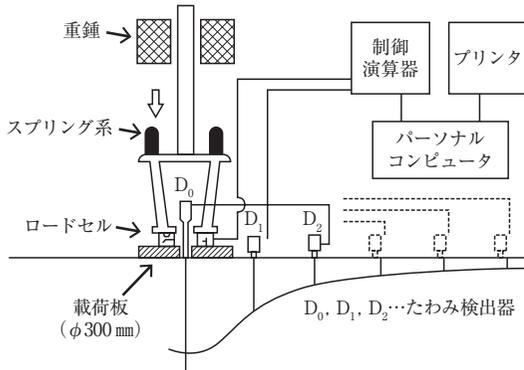


図-3 単重錘式測定装置<sup>5)</sup>

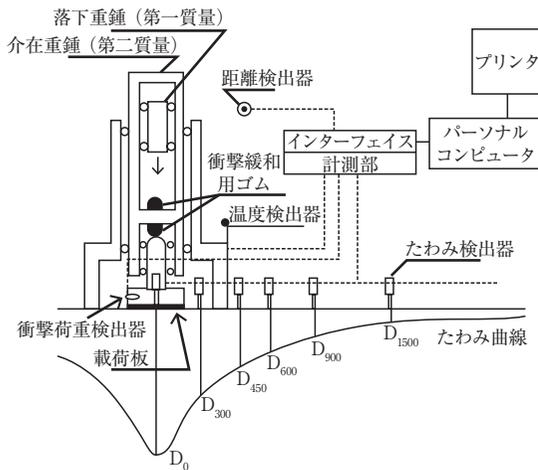


図-4 複重錘式測定装置<sup>5)</sup>

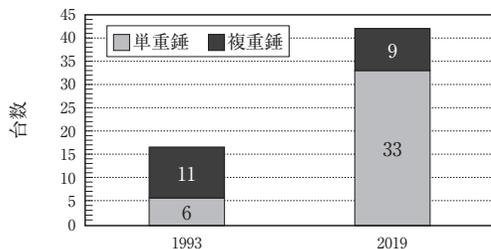


図-5 国内のFWD稼働数と採用されている重錘の変遷

れている重錘種別の集計結果を示します。この図より、1993年は、国内稼働数17台中、単重錘式は6台、複重錘式は11台で、複重錘式が過半数であったのに対して、2019年では単重錘式は33台、複重錘式は9台と、単重錘式が主流になっていることが分かります。単重錘式は、測定時間が複重錘式より短いという利点から多くの機関で採用されていると考えられます。

### (3) たわみ測定センサの変遷

現在、FWDのたわみ測定センサは、下記に示す3種類(図-6~図-8)が用いられています<sup>11)</sup>。

①LVDT (Linear Variable Differential Transformer) タイプ：路面がたわんだ時に慣性により静止している状態のおもりと、ロッドの相対変位(図-6中aとbの距離)を電気信号に変換してたわみ量を測定します。

②リニアゲージ：不動点(不変点)に配置されたリニアゲージで、直接、路面のたわみを測定します。リニアゲージロッドの端部(図-7中a)は、舗装がたわむ前後で位置が変化し、この変位を電気信号に変換してたわみ量を測定します。

③ジオフォン(速度計)：舗装がたわむ際の変位の速度を電気信号に変換して積分することでたわみを測定します(図-8)。

1993年と2019年の使用されているたわみ測定センサの変遷を図-9に示します。LVDTタイプは11台か

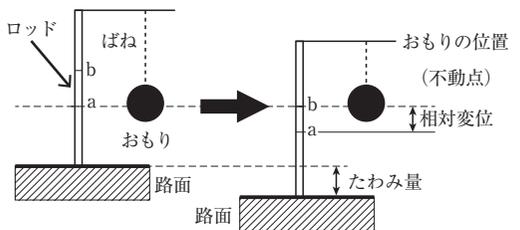


図-6 LVDTタイプ<sup>11)</sup>

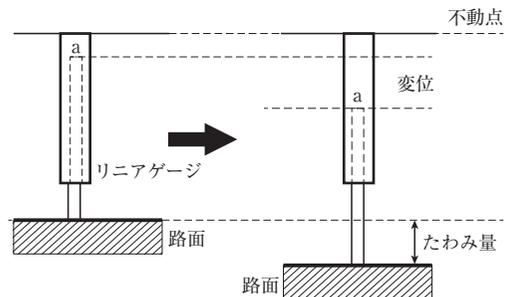


図-7 リニアゲージ<sup>11)</sup>

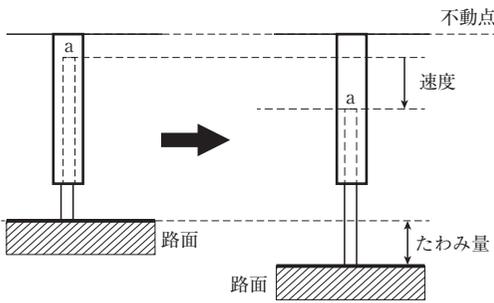


図-8 ジオフォン(速度計)<sup>11)</sup>

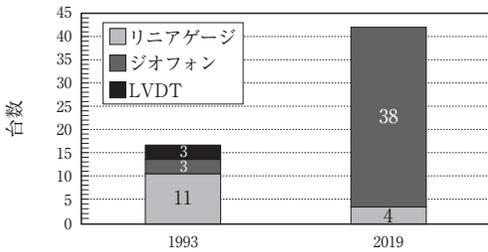


図-9 国内のFWDのセンサの変遷

ら4台に、リニアゲージは3台から0台、ジオフォンは3台から38台となっており、現在はジオフォンが主流であることが伺えます。なお、リニアゲージはFWD検定未実施の牽引式FWDで用いられています。

(4) まとめ

1993年から2019年にかけての国内におけるFWDの変遷を調査した結果、稼働数は17台から42台になり、載荷方式とたわみ測定センサの主流は複重錘から単重錘へ、LVDTタイプからジオフォンになったことが分かりました。

2.2 FWD検定および検定施設

本節では、FWD検定ができた経緯と、その施設の概要について紹介します。

(1) FWD検定ができた経緯

FWD検定ができる以前、FWDは、装置としての較正・検定をする共通の施設がなかったため、荷重計や変位計の検査は、製造業者あるいは所有者が独自に行っていました。このような状況の中、2001年に「舗装の構造に関する技術基準」<sup>12)</sup>において「疲労破壊輪数」が必須の性能指標と定められ、2006年にはFWDで測定したたわみ量から疲労破壊輪数を推定する方法が「舗装性能評価法」<sup>4)</sup>に示されました。以降、既設舗装の健全度評価に加え、舗装工事の

最終的な性能の確認にもFWDを使用できることから、装置としての測定精度を確認する較正・検定施設の運用が望まれるようになりました。

そこで、土木研究所が検定施設の建設を行い、2010年度からFWDの較正・検定を開始しました。共通の施設で較正・検定を実施することでFWD装置の信頼性の向上につながっています。

(2) FWD検定施設の概要<sup>13)</sup>

検定施設とその概要を写真-2に示します。この施設の大きさは、奥行約14.5m×幅約5.5m×高さ約5.5m、最大2台のFWDを同時に入れることができます。また、検定時の室内温度を20℃程度に保つ空調設備も備えられています。

施設内部の概要図を図-10に示します。荷重計検定用のロードセルが中央部にあり、それを挟んで変位計検定用のアスファルト舗装とコンクリート舗装があります。なお、変位計検定用舗装の構造は表-2に示すとおりです。

次に、荷重計の検定方法および変位計の検定方法の概要を図-11、図-12に示します。荷重計の検定は、容量50kNのロードセル3個と受圧板が一体となった装置の上にFWDの荷重を載荷し、ロードセルとFWDの荷重計の測定値を比較します。変位計の検定では、検定施設のギャップセンサとFWDの変位計の測定値を比較します。各検定用舗装の中央部には横方向に溝

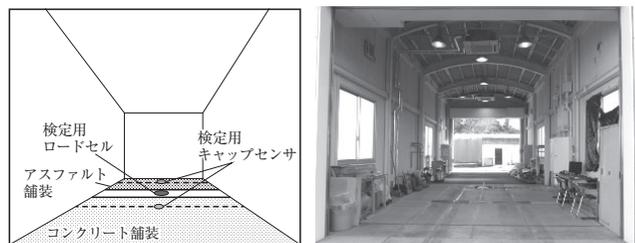


写真-2 FWD検定施設

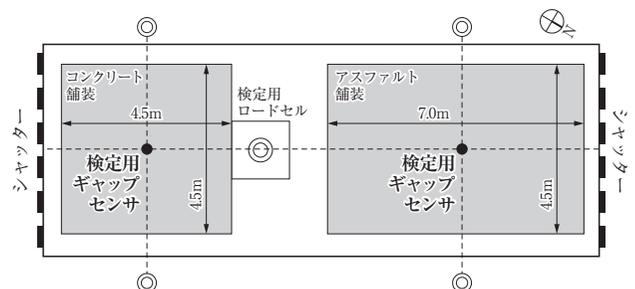


図-10 FWD検定施設の概要図<sup>14)</sup>

が設けられており、この溝の中にはPC鋼棒があります。このPC鋼棒は屋外の地中に打ち込んだ支持杭に両端を固定されており不動点となっています。ギャップ

表-2 変位計検定用舗装の構造<sup>14)</sup>

アスファルト舗装		コンクリート舗装	
層構成	厚さ (mm)	層構成	厚さ (mm)
表層	50	コンクリート版	180
基層	50	切込砕石	220
粒調砕石	150	砂層	600
切込砕石	250		
砂層	700		

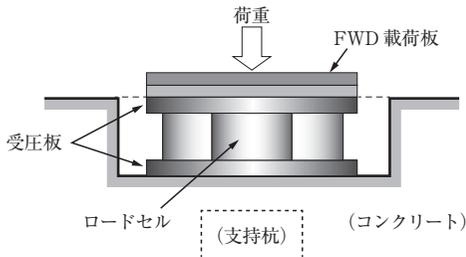


図-11 荷重計の検定方法<sup>14)</sup>

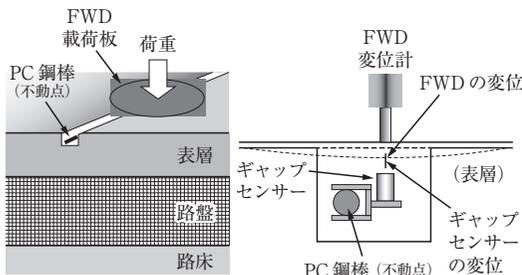


図-12 変位計の検定方法<sup>14)</sup>

センサはこのPC鋼棒に取り付けられています。

FWDで測定されたたわみとギャップセンサの変位の測定値は、原点をとる直線で近似できます。載荷荷重を3通り変化させてたわみを測定することで、図-13のような関係が得られ、これにより、各センサ固有の校正係数を得ています。この校正係数を実際の現場での測定に用いることで、たわみ量の測定精度が向上します。

### 2.3 文献調査によるFWD関連の研究動向

本節では、FWDの技術的な課題や適用方法の変遷を調べることを目的に、文献調査を行ったので、その結果を報告します。なお、文献調査対象は、過去の日本道路会議にて発表された論文のうち、少しでもFWDに言及しているものとしました。

該当論文の件数ならびに、論文内のトピック、FWDがどのような目的で使われているかを調べ、まとめた結果を以下に示します。

まず、論文件数の推移を図-14に示します。FWDに言及した論文がはじめて発表されたのは1979年で

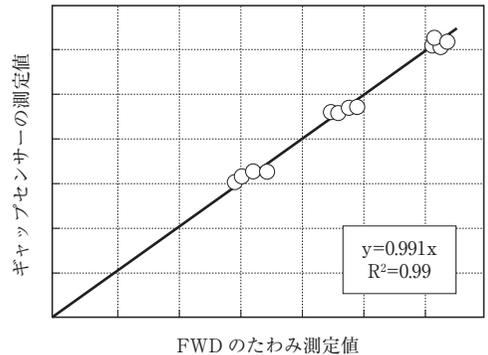


図-13 変位計検定結果の例<sup>15)</sup>

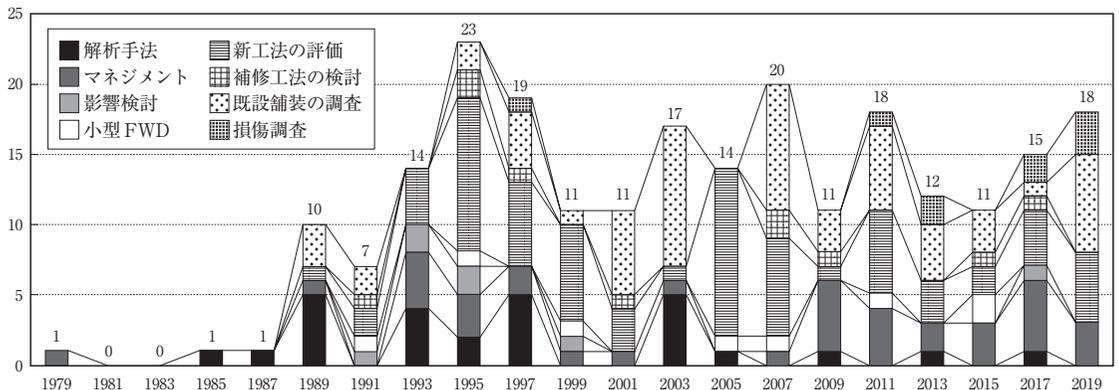


図-14 FWDに関する日本道路会議発表論文数の推移

した。この時発表された論文は、土木研究所によるもので、FWDの前身であるダイナフレクトを試作し、既設舗装の評価およびオーバーレイ厚の設計法への適用を検討する内容でした<sup>16)</sup>。その後、1983年に国内でFWDが運用され始めたのに追従して、1985年から再び論文が発表され始めています。さらに、1989年に10編の論文が発表されてからは、現在に至るまで毎回10～20編程度の論文が継続的に発表されています。

次に、研究テーマの変遷に着目するため、抽出した論文を、以下のとおり分類してみました。まず、論文を「①FWDの運用方法に関する研究」と「②FWDを評価に用いた研究」の2つに大別しました。さらに、論文中におけるFWDの用途から、この2つの大分類を表-3に示す8つの小分類に小別しています。そして、抽出した論文を主観的にこの分類へ当てはめました。

上記分類ごとの論文数の推移を図-14から見ていきます。大別した「①運用方法に関する研究」と「②評価に用いた研究」それぞれの論文数の推移に着目すると、初期の1980年代から1990年代初めまでは、運用方法に関する論文が多く、1990年代後半からは評価に用いた論文が多くなっています。このことから、1990年後半にはFWDを用いた評価方法が確立され、広く用いられていたことが示唆されます。

さらに、運用方法の小分類ごとの推移に注目してみます。1980年代から2000年代前半まではFWDの解析手法に関する研究が多いですが、近年では、設計や補修工法の選定といったマネジメント分野への適用に関する研究が多くなっています。マネジメント分野への適用に関する研究が増えてきた背景としては、FWDによる構造評価方法が確立され一般的になった他、舗装の構造的健全性に着目したマネジメントの重要性が高まっていることが考えられます。

### 3. アンケートでみるFWD

本章では、FWD調査の実務の実態に関するアンケート調査の結果について述べます。調査に用いたアンケート票の概略を表-4に示します。

本調査は、FWDが日本に導入されてから40年近く経過した現在、「どの機関が、どのような場面で、どういう用途で使用しているのか?」といったFWDの利用に関する最新の実態を把握する目的で実施しました。調査の対象はFWDの関連業務に携わっている担当者とし、アスファルト舗装技術研究グループのメンバーが所属する機関およびそれらの関連会社の対象者に協力を要請しました。調査の結果得られた回答数は49件で、回答先はコンサルティング会社3社と道路施工会社5社でした。このため、FWDの利用頻度が高いと推察される道路管理者からの回答は含まれておらず、今回の集計結果は施工会社とコンサルティング会社におけるFWDの実務実態を表しています。

なお、本章の構成と、対応するアンケートの質問番号は表-5に示すとおりです。

#### 3.1 回答者の属性

本アンケート回答者の属性を把握するため、「主な担当業務」、「FWD業務における担当作業」、「FWD業務への経験年数」について集計した結果を以下に記します。

回答者の主な業務の調査結果を図-15に示します。主な業務として最も多かったのは「現業支援」で65%、続いて「コンサルタント業務」で53%、「研究開発」で22%でした。

回答者が担当する主な作業の調査結果を図-16に示します。主な作業としては「報告書作成」が86%と最も多く、次いで「データ整理・解析」が84%、「調査の計画・現場」が76%、「発注者との打ち合わせ」が

表-3 FWD関連論文の研究テーマの分類

大分類	小分類	関連トピック
①FWDの運用方法に関する研究	解析・評価手法の検討	弾性係数推定, 逆解析, 路床・路盤支持力推定, 動的逆解析
	マネジメントへの適用	補修工法選定, 補修計画, TA, 長寿命化, 理論的設計法, LCC, 維持管理, メンテナンスサイクル
	測定への影響に関する検討	逆解析弾性係数, センサー位置, 舗装体温度, 測定誤差, ベッドロック
	小型FWDに関する研究	盛土, 施工管理, 変形係数, 歩行者系舗装, HIC
②FWDを評価手法として用いた研究	新工法・新材料の評価	施工後の構造調査, 弾性係数, たわみ量, 荷重伝達率, 改質アスファルト
	補修効果の検証	打換え, バーステッチ工法, クラックシール材, 支持力
	既設舗装の構造評価	追跡調査, コンクリート舗装, 軽交通路線, 透水性舗装, 半たわみ, 再生路盤, スラグ
	損傷調査	路面化空洞調査, 凍上, 早期劣化, 開削調査



69%で、実際の測定に関連する「運転・試験装置の操作」は51%と比較的低い結果でした。

回答者のFWDに関する業務経験年数の集計結果を図-17に示します。業務経験年数は「10年以上」が31%と最も多く、次いで「5～10年」が25%、「3～5年」が22%、「1～2年」が12%、「0～1年」が10%でした。

以上の結果から、今回の回答者は現業支援やコンサルタント業務に従事し、FWD業務の計画から報告を担当するベテラン技術者が多かったと言えます。

### 3.2 発注者について

本節では、回答者のFWD調査業務に関する「年間のFWD調査業務の受注件数」「FWD調査業務に関する発注者別の年間の受注数」FWDを用いる「主な業務内容」についてアンケートを集計した結果を以下に記します。

年間のFWD調査業務の受注件数に対する回答で最も多かったのは「6～10件」で32%、続いて「0～2件」で21%、「21件以上」で17%でした(図-18)。

●FWDに関する業務での担当する主な作業は？(複数回答可)

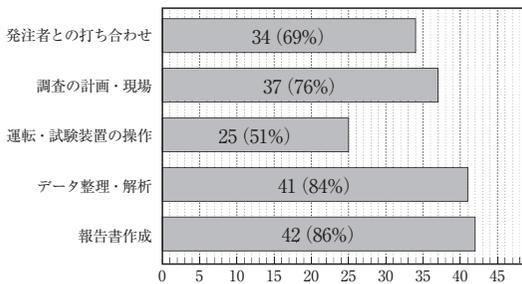


図-16 回答者のFWD業務における担当作業

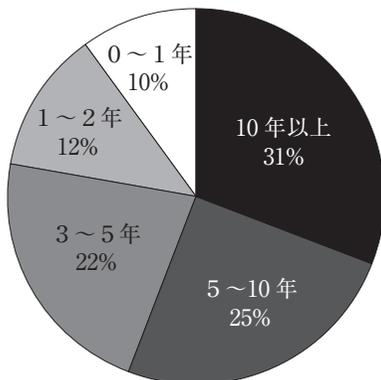


図-17 回答者のFWD業務への経験年数

発注者別の年間受注数に関する回答については、以下のように集計しました。「11件以上」は11pt、「6～10件」は8pt、「3～5件」は4pt、「1～2件」は1.5pt、「0～1件」は0.5pt、「0件」は0ptとして、発注者ごとに集計した結果を図-19に示します。

集計の結果、の多い順に、地方自治体(240pt)、国(94pt)、民間(56pt)、空港(47pt)、高速道路(44pt)、その他(2pt)となりました。

地方自治体が最も多かった理由としては、地方自治体が管理する道路は、高規格幹線道路や直轄国道と異なり、幹線道路から生活道路まで、多様な役割を有する道路である<sup>17)</sup>ことが考えられます。さらに、国から地方自治体への移管によって、管理延長が増加することも理由のひとつと考えます。

一方、高速道路では、外注によらない独自のFWD調査が行われているため、今回のアンケート結果では、最も少なくなったものと推察されます。

受注した業務の主な内容として回答が最も多かったのが「補修断面の検討」、続いて「損傷箇所の詳細調査」。

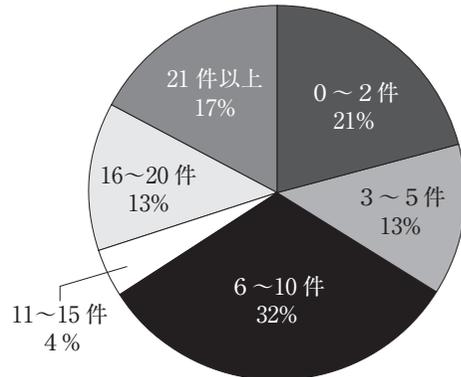


図-18 年間のFWD調査業務の受注件数

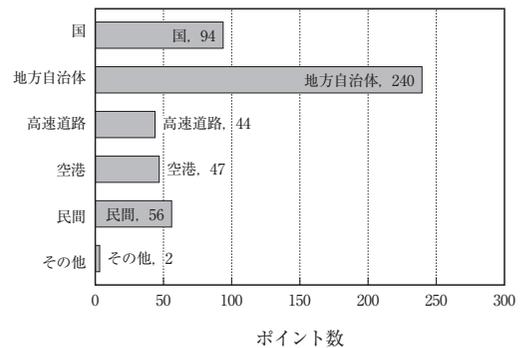


図-19 発注者別 年間受注数

「補修箇所を選定」となりました(図-20)。

このような結果になった理由としては、まず管理路線を適切に構造診断するために、FWDを用いて「詳細調査」、「補修箇所選定」を実施し、路面性状調査などで補修の決まった地点での補修断面の決定のための必要 $T_A$ 等の調査「補修断面の検討」を行い、必要に応じて開削などの各調査・試験を行うためだと考えられます。

なお、「詳細調査」は、表層の供用年数が使用目標年数に到達前に舗装の管理基準に到達(損傷レベル大に相当)するような早期劣化区間や、構造的に深刻な損傷が生じている区間において、適切な修繕設計の策定や損傷原因の特定のために行う調査であり、「補修箇所選定」は管理基準未済で実施されるひび割れ箇所へのシール材注入や、わだち部の切削など現状の舗装の機能を維持する箇所を選定することです。

### 3.3 評価指標について

FWDたわみデータを用いたアスファルト舗装の構造評価は大別して下記の3つがあります<sup>5)</sup>。

- ①たわみ特性によるアプローチ
- ②逆解析による理論設計法によるアプローチ
- ③逆解析から従来設計法に対応したアプローチ

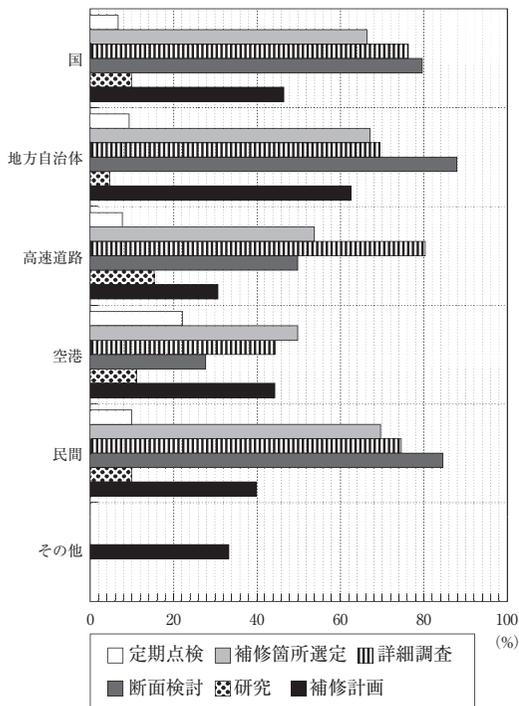


図-20 発注者別FWDの主な業務内容の割合

そこで、本節では、FWD調査から得られたたわみ量のデータ処理についてどのようなデータを用いて舗装の評価を行っているのか、使用する評価指標とその用途についてのアンケート結果を以下にまとめました。

#### (1) 解析に使用する評価指標について

FWD調査から得られるたわみ量からどのような解析を行っているか明らかにするため、まず各指標の使用頻度に関するアンケートを実施しました。アンケートでは、各評価指標の使用頻度を以下の選択肢、「よく使用する」「時々使用する」「1、2度使用した」「使用したことはない」から選択してもらいました。このアンケート結果を図-21に示します。

「よく使用する」と回答された割合の高い評価指標としては、たわみ量 $D_0$ 、残存等価換算厚 $T_{A0}$ 、CBR、アスコン層の弾性係数 $E_{as}$ が挙げられ、それぞれ57~74%の割合となっています。これらの指標は、複数のたわみ測定センサによるたわみ量やたわみ差を用いた指標であり、いずれもたわみ特性によるアプローチになります。たわみ量 $D_0$ は路床を含めた舗装全体の支持力の健全度を評価する目安となり、表-6に示すように交通量別の許容たわみ量が決められています<sup>18)</sup>。

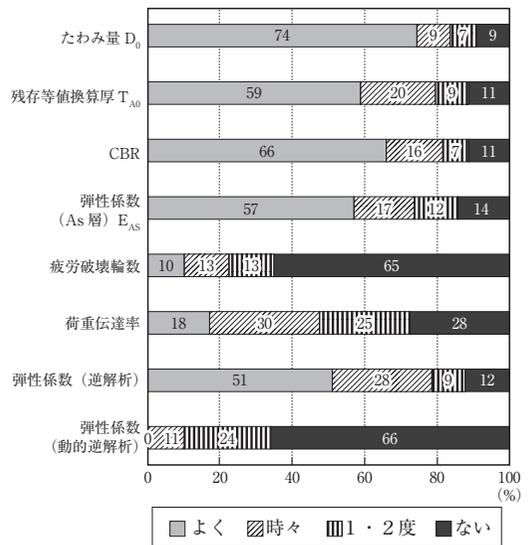


図-21 評価指標別使用頻度(複数回答可)

表-6 交通区分別許容たわみ量の目安

交通量区分	$N_3$	$N_3$	$N_3$	$N_3$	$N_3$
$D_0$ ( $\mu m$ )	1,300	900	600	400	300

$T_{A0}$ , CBR,  $E_{as}$ については、式(1)~式(3)よりそれぞれ求めることができます。

$$T_{A0} = -25.8 \log \left( \frac{D_0 - D_{150}}{10^3} \right) + 11.1 \quad \dots \quad (1)$$

$$\text{現状の CBR (\%)} = \frac{1000}{D_{150}} \quad \dots \quad (2)$$

$$E_{AS} = \frac{2352 \left( \frac{D_0 - D_{20}}{10^3} \right)^{-1.25}}{h_1} \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 $D_i$ ：載荷中心から  $i$ cm 位置のたわみ量 ( $\mu\text{m}$ )  
 $h_1$ ：アスファルト混合物の厚さ (cm)

次に、「逆解析による弾性係数」の集計結果を見ると、「よく使用する」と回答された割合が51%と、こちらも使用頻度が高い結果になっています。逆解析は、FWD試験により作用した衝撃荷重とそれにより生じた表面のたわみを静的荷重とたわみの関係とみなし、各層の弾性係数を求める手法です。逆解析を行う時の注意点としては、各層厚や測定たわみに含まれる誤差が逆解析結果に大きく影響することや、使用するソフトウェアによって逆解析結果にばらつきがあるため、どのソフトウェアが信頼できるかは利用者の判断に委ねられていることがあげられます<sup>7)</sup>。なお、動的逆解析については使用頻度は多くなかったが、弾性係数等の初期値の影響をほとんど受けないなどの利点が挙げられました。

その他、疲労破壊輪数やCo版目地部の荷重伝達率といった指標は、上記指標に比較すると使用頻度は少ない結果になりました。

### (2) 評価指標の用途について

評価指標の用途についてのアンケート結果を図-22に示します。

使用頻度の高かった4つの指標 ( $D_0$ ,  $T_{A0}$ , CBR,  $E_{as}$ )はいずれも、「補修断面の選定」「詳細調査」「断面検討」といった用途へ使用される割合が40%以上と高い結果になりました。これらの用途は最終的に補修計画を立案する時に必要となる情報であることから、高い頻度で用いられているものと考えられます。その他、FWDを用いることで、開削等の大がかりな調査を行うことなく非破壊で効率的にこれらの評価指標を得ることができることから割合は少ないですが、「舗装の定期点

検」や「研究」といった用途にも使用されているという結果になりました。

### 3.4 FWDの併用試験について

本節では、FWD調査と併用される調査・試験の内容と頻度についてアンケート集計した結果を以下に記します。

各調査・試験について「よく併用する」、「時々併用する」、「まれに併用する」のいずれかを回答してもらい、集計したところ、「よく併用する」という回答が最も多かったものが「As層コア抜き」、続いて「開削調査」、「路面性状調査」となりました(図-23)。

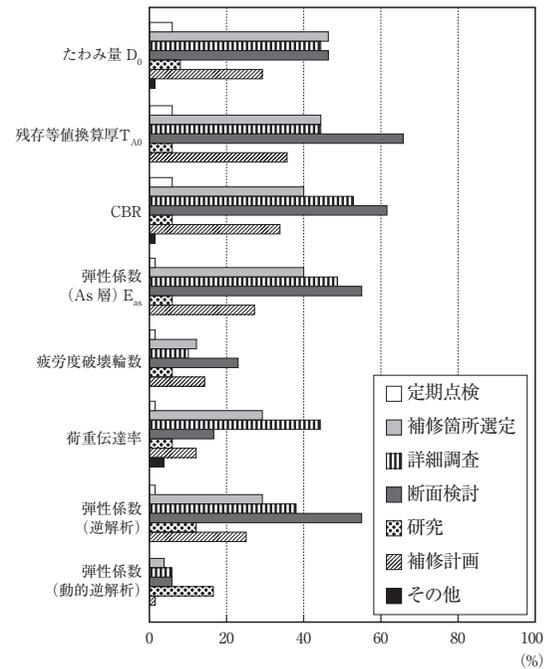


図-22 評価指標別使用用途

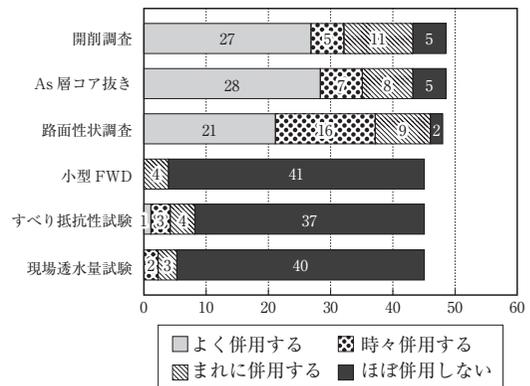


図-23 各調査・試験と併用する頻度

これらの試験，調査が頻繁に併用される理由を以下のように推察しました。

「開削調査」が併用される理由は，FWDで構造的診断を実施し問題が生じている箇所があれば，原因究明のために開削調査が実施されるためだと推察されます。開削調査により実際の内部状態（路床～舗装部）を確認することで，構造的に踏み込んだ評価が可能となるからです。

写真-3に示すコア（切取りコア）採取は，開削調査と比較すると局所的な調査であるため，原因究明が難しい場合がありますが，ひび割れの深さや舗装の状態（層間剝離・粒状化・劣化など）また，コンクリート舗装においては鉄筋（鉄網）の状態などを把握することができるため，併用されることが多くなったと推察されます。

写真-4に示す路面性状測定車を用いた路面性状調査は，広範囲なエリアを包括的に調査する際に利用されます。路面の変状を把握し，FWDによる構造的診断が必要な箇所を特定する目的で路面性状調査が併用されるものと考えられます。

また，別の路面機能としてすべり抵抗性や透水性があります。これは構造診断とはまた別の管理指標になるので，これらに関する試験の併用は少ない結果に



写真-3 開削調査，コア採取による評価<sup>20)</sup>



写真-4 路面性状測定車による路面性状調査<sup>21)</sup>

なったものと考えられます。

### 3.5 FWD 調査時期の傾向について

本節では，FWD 調査業務の発注される時期に偏りがあるか，それは調査に適したもしくは適さない季節や時間帯と関係あるのか，といった「調査時期の傾向」に関する自由記述式のアンケートを実施したので集計結果を以下に示します。

#### (1) 調査時期の傾向の有無

回答内容から，調査時期に関して「傾向がある」か「傾向はない」かについて整理した結果を図-24に示します。図に示すように，「傾向がある」という回答が25名（51%），「傾向はない」という回答が9名（18%），「未記入」が15名（31%）という結果になりました。

この結果によると，過半数の回答者が「傾向がある」と回答していることから，調査時期に関して何かしらの傾向があると考えられます。

また，今回のアンケート回答者には年間22現場以上受注しているベテラン技術者もいれば，年間受注が1～2件程度の経験が浅い技術者も含まれるなど，業務経験年数の開きがあることや，数10回の現場をこなしていなければ回答が難しいアンケート内容であることから，未記入者が31%という結果になったのだと考えられます。「傾向がある」とした回答者の経験年数および年間受注件数は図-25に示すとおりです。なお，「傾向がない」と回答した9名の内3名は，22現場以

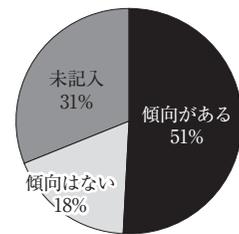


図-24 調査時期の傾向

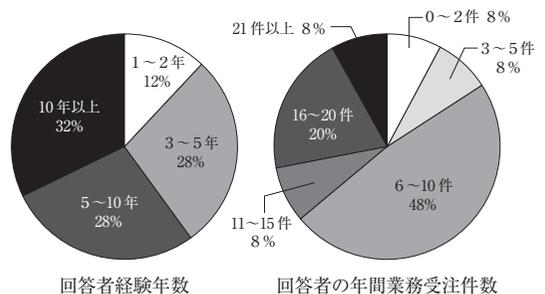


図-25 傾向があるとした回答者の内訳

上の受注したベテラン技術者も含まれており、「傾向がない」と回答した回答者は、経験が少ない回答者が多いというわけではありません。

## (2) 調査時期に傾向があるとした回答の内訳

次に、調査時期について「傾向がある」とした25名の回答をまとめたものが図-26となります(複数回答可)。「傾向がある」としてあげられた回答のうち最も多く挙げられた内容は、下半期に行く調査が多いというもので、特に年度末に多いという結果になりました。これは、来期工事に向け調査を行い、補修にかかる予算を計算する指標の1つになるからだと考えます。

また、夏季は舗装温度が上昇し、舗装表面にたわみが発生しやすくなります。そのため通常の測定値よりたわみ量の増えたデータを取得することになり、データの信頼度が落ちるため、気温が高い日中は避ける傾向にあります。気温の上昇に伴う舗装温度の上昇はFWDに搭載された温度センサの数値に影響を及ぼします<sup>22, 23)</sup>。一番良い測定時期は、春や秋などの気温が安定した同じ時期に測定を行うことが良いと考えられます。

なお、積雪時期を避けるとの回答は東北地方での意見になります。これは、積雪の影響や道路の硬化などにより、測定データの信頼度が落ちるからだと思います。

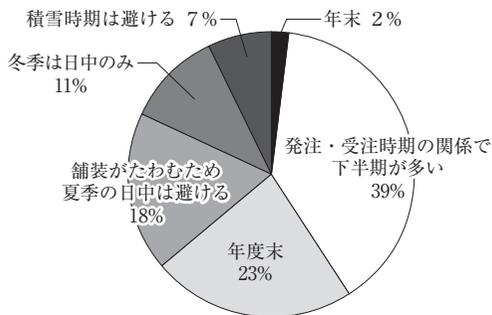


図-26 調査時期の傾向

## 3.6 FWD調査場所の傾向について

本節では、FWD調査がどのような地域、どのような路線で多く実施されているかを把握するために、FWD調査場所の傾向について自由記入で回答いただいた集計結果を示します。

### (1) 調査場所の傾向の有無

FWD調査場所の傾向を把握する前に、まずは調査場所に傾向があるか否かについて、回答内容から整理しました(図-27)。その結果、「傾向がある」という回答が15名(31%)、「傾向はない」という回答が18名

(37%)という結果となりました。なお、「無回答・わからない」は16名(33%)でした。

### (2) 調査場所の傾向

(1)で調査場所に「傾向がある」と回答した15名についてその回答内容を整理しました(図-28)。

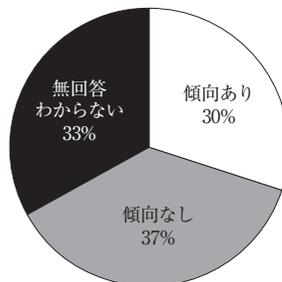


図-27 調査場所の傾向の有無

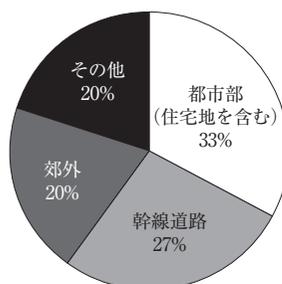


図-28 調査場所の傾向

傾向として最も多く挙げられた調査場所が「都市部(住宅地を含む)」(5名, 33%)でした。次に回答数が多かったのが「幹線道路」(4名, 27%)です。この幹線道路とは、都市部や住宅地を通る路線であり、意味合いとしては「都市部(住宅地を含む)」と同系統であると考えられます。つまり、回答の半数以上が、「交通量が多く地域で重要な路線」であることが想定されます。

3.2.3.3で整理したアンケート結果では、FWD調査の使用用途として、「補修箇所選定」「詳細調査」「断面検討」の3点が多く挙げられており、補修対象路線で調査を実施していることがわかります。補修対象として挙げられる路線は、損傷レベルの大きい路線であることが第一に考えられますが、財政上の制約がある中、そのすべてを補修することは困難な場合も多いと思います。そこで、優先されるのが重要度の高い路線です。

重要度の高い要素としては、交通量の多い路線や住民要望のある路線、緊急輸送道路など防災に関わる路線などが挙げられます。FWD調査場所の傾向につい

て、「都市部（住宅地を含む）」および「幹線道路」が多く挙げられたのは、こうした重要度が高く、補修対象として優先的に選定されやすい路線が多く存在するためだと考えられます。そのため、今回は回答数が少なかった「郊外」であっても、例えば、交通量が多い、住民要望があるなどの要素を持つことで、補修対象として選定されると、FWD調査の対象となると思います。実際に、図-28に示す「その他」に分類した回答の中には、「都市部、郊外問わず、路面性状データを保有している自治体からが多い」といった内容もありました。また、「(1)調査場所の傾向の有無」で「傾向はない」と回答した中にも、上述したように、都市部や郊外などに関わらず、補修対象路線が存在する様々な地域で調査が実施されるため、一定の傾向はないと回答したのもあるのではないかと思います。

以上の結果から、調査場所の傾向というよりは、補修対象として選定された路線について、FWD調査を実施していると考えられます。

### 3.7 調査時のイレギュラー対応について

先述の3.2および3.3のアンケート結果より、FWDの主な使用用途は補修に関する調査であることがわかりました。したがって、測定箇所にはひび割れやわだち掘れが発生している場合があります。また、急な天候の変化で調査中に降雨があることや、異常値などの測定エラーが発生することもあります。

このようなイレギュラーが発生した際、どのような対応をしているかアンケート調査を行いましたので、その集計結果を以下に記します。なお、本設問の回答は自由記述によるもので、回答件数はそれぞれ49件（不明・実績なしを含む）でした。

#### (1) 測点上にひび割れがあった場合

ひび割れ箇所ですら測定を行うと測定値に影響を及ぼす可能性があります。測点上にひび割れがある場合、どのような対応をしているのか、回答結果を図-29に示します。

測点上にひび割れが存在した場合、測点を「ずらして測定」の回答が最も多く、全体の約74%を占める結果となりました。また、ずらし方や判断は3回答に分かれる結果となりました。ずらす距離は1m～数mと様々であり、調査する会

社・部署により異なることがわかりました。

#### (2) 測点上にわだち掘れがあった場合

測点にわだち掘れが存在すると、荷重版が路面に正しく接地できず測定値に影響を及ぼします。測定に影響を及ぼすような大きなわだち掘れが測点上に存在した場合、どのような対応をしているのか、回答結果を図-30に示します。

測点上に大きなわだち掘れが存在した場合、測点を「ずらして測定」の回答が全体の約67%を占める結果となりました。ずらし方は3回答に分かれ、ずらして測定した場合は、報告書等に留意点として記載するという回答もありました。また、縦断方向にずらす場合とB.W.P. (Between Wheel Point) にずらす場合の2パターンが存在しており、会社や部署により対応が異なることがわかりました。わだち掘れの大きさについて言及している回答はなく、経験則による目視での判断が多いと予想されます。

#### (3) 測定中に雨が降ってきた場合

FWDはセンサを使用してたわみを検知しているため、降雨や水溜まりが存在すると測定に影響を及ぼす他、故障の原因になります。測定中に降雨があった場合、どのような対応をしているのか、回答結果を図-31に示します。

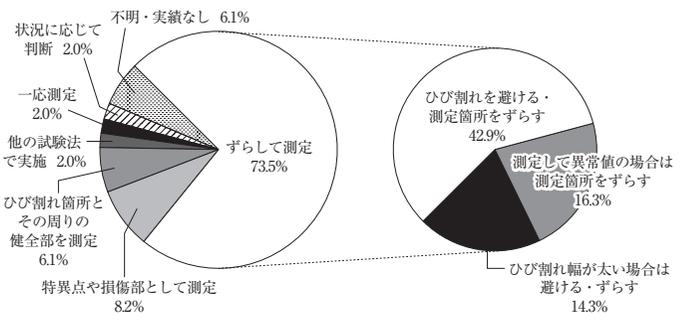


図-29 測点上にひび割れが存在する場合の対応

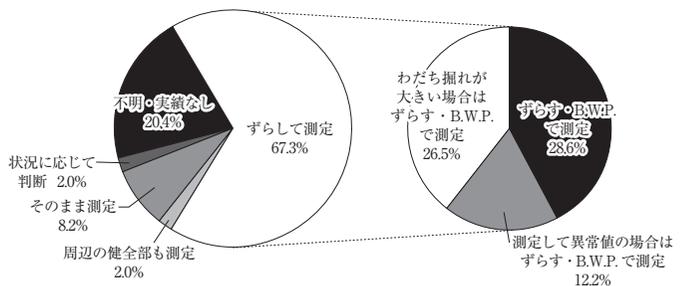


図-30 測点上にわだち掘れが存在する場合の対応

「小雨の場合は実行し、大雨もしくは水溜まりが存在する場合は中断or中止」の回答が最も多く、約55%を占めています。降雨量に関係なく「中断もしくは中止」の回答は約22%であり、中断・中止のキーワードでまとめると約78%と非常に高い割合となりました。

中断や中止の判断は各会社・各部署により異なりますが、「降雨量が○mm/hを超えたとき」等の明確な基準を設けている会社・部署がある他、経験則で判断する会社・部署も存在しています。

「続行」の回答には、センサが雨水にさらされないよう雨よけのカバーをつけるという対策をとっているという内容もあったため、所有しているFWD車種によって雨水の影響の有無が異なることがわかりました。

#### (4) 波形データに異常が出た場合

FWDはセンサを用いてデータを取得しているため、時として異常値やエラーが発生することがあります。波形データに異常が発生した場合、どのような対応をしているのか、回答結果を図-32に示します。

波形データに異常が発生した場合、「同一箇所を再測定」の回答が約29%で最も多く、次いで「同一箇所を再測定し、異常な場合は移動して再測定」「移動して再測定」の順となりました。いずれの回答も同程度の

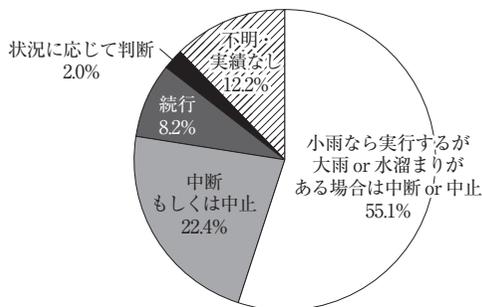


図-31 測点中に降雨があった場合の対応

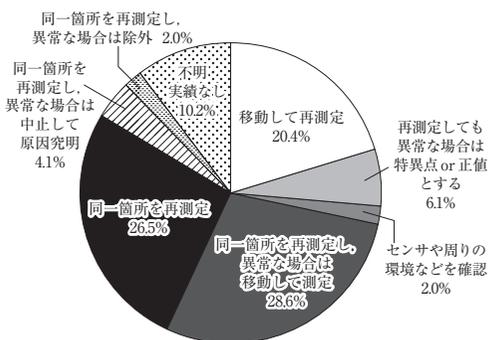


図-32 波形データに異常が発生した場合の対応

割合であり、再測定という内容が含まれていることから、各会社・各部署で同様の対応がとられていることがわかりました。

「再測定」の回答には、設計図書で埋設物の有無を確認するといった内容のほか、「○m程度移動して再測定」という明確な基準を設けている会社・部署も存在しました。

### 3.8 FWDの技術的革新について

本節では、アンケート回答者が近年感じたFWDの機能や性能に関する技術的な革新について取りまとめました。回答は自由記述によるもので、回答件数は12件でした。

表-7に回答の集計結果を示します。回答内容については、ハード面では測定機器のスペックに関すること、ソフト面では技術者の増員が挙げられました。

最も多く回答された内容は「測定速度の向上」に関するもので、約8割の回答者から挙げられています。測定速度の向上に関しては、平成初期から現在において次のような変遷が見られます。第2章FWDの変遷で紹介があったように、平成初期は、複重錘式が主流で、アウトリガを用いて車を固定し、たわみ測定用センサの振動が確実に止まるまで待機しなければならず、測定に多くの時間を要しておりました。一方、現在は、単重錘式が主流となり、アウトリガによる固定を必要とせず、たわみ測定用センサの振動が止まるのを待たずに測定が開始出来るようになりました。また、平成初期より錘の落下高さが低減され、加えて、錘を持ち上げるパワーも向上し、車自体のスペックも高くなりました。

表-7 FWDに関する技術的革新のアンケート回答内容

回答内容	記載件数
測定速度の向上 (センサ設置・錘の昇降の速度向上、計測機器の応答速度の飛躍的向上)	10
測定車両の小型化	2
バッテリー類やセンサ類の機能や信頼性の向上	2
GPS機能による測定位置の記録	1
作業の効率化 (載荷点が計測車の中央前方に移動したことによる、センサ取り付けの不要)	1
耐久性の向上	1
舗装マネジメントシステム (PMS: Pavement Management System) とリンク	1
重錘がスライドできる車両の開発	1
電磁波レーダやボアホールカメラ等の併用増加 (既設舗装の厚さを確認するため)	1
支店技術者の対応可能人数の増加 (以前は技術研究所が支店へ支援。近年は解析のマニュアル等が整備され、支店技術者でも対応可能に)	1

自由記入方式を採用した為、複数回答あり

た。平成初期から現在に至るまでに、測定機器の改良がなされた結果、測定速度が向上したと考えられます。

アンケートの回答では挙げられませんでした。近年では、移動しながら連続的に舗装のたわみを測定出来る「移動式たわみ計測装置（MWD：Moving Wheel Deflectometer）」<sup>24</sup>や、地盤剛性を面的に迅速かつ簡便で、高精度に解析・評価出来る「地盤剛性全自動評価システム（SFWD：Super Falling Weight Deflectometer）」<sup>25</sup>の開発も進められており、更なる発展を遂げています。

### 3.9 FWDに関する課題について

本節では、FWD調査に携わる担当者が感じている、現状の業務や装置における課題を自由記入で回答いただいた集計結果を示します。

得られた回答（回答内訳：7社、30名）の一覧を表-8に示します。回答の詳細について、(1)ハード面、(2)ソフト面に分けて以下にまとめました。

表-8 FWDに関する課題のアンケート回答内容

回答内容		回答件数	
(1)ハード面	①測定可能な環境条件	5	19
	②FWD調査の適用箇所	12	
	③作業環境	2	
(2)ソフト面	①温度補正係数の妥当性	8	16
	②解析条件のルール	8	

自由記入方式を採用した為、複数回答あり

#### (1) ハード面の課題

回答のうち、装置に関するものが約半数を占めていました。以下の3点に着目して整理します。

##### ①測定可能な環境条件

現在、「高温、滞水、坂道、亀甲状ひび割れ」等の条件では測定できない・測定値が正しく取れないという課題があり、現場での測定に影響を与えているとの声がありました。最も多かったのが、「高温での測定」で、3.5でも紹介したように「猛暑や昼間の測定を避ける傾向」がありました。

また、気温の高い日には作業環境も厳しいものになっていることがわかりました。

##### ②FWD調査の適用箇所

住宅地付近や交通量の多い箇所では、騒音や渋滞に困っているという声もあり、測定に悩むことも少なくないようです。また、空港での測定に際して、航空機などを想定した大きな荷重での測定を望む声もありました。こういった要望に応じた装置の改良によっ

て、適用箇所が一層広がっていくことが期待されます。

##### ③作業環境

車両によっては、バッテリー容量が小さいため、夏場でもエアコンをつけられないという回答がありました。これは、作業者の健康に加え、車両に積んだ精密機器への影響も懸念される重要事項です。

課題解決に向けては、発注者側からのルール整備が効果的ではないかと考えます。たとえば、発注者の特記仕様書等に安全対策として「バッテリー容量が一定以上の車両を使用すること」などの基準を設けることが挙げられます。

#### (2) ソフト面の課題

解析手法に関する回答は、装置の課題と同数程度ありました。解析結果は、舗装の修繕にあたって最適な材料・工法を検討するために使用されますが、解析条件によって大きく影響を受けます。統一性・妥当性のある結果が得られる解析条件を定めることは、大きな課題と言えるでしょう。

##### ①温度補正係数の妥当性

温度に関する回答の中で、「温度補正後のたわみ量が実際の現象に合っていない」という内容が多かったです。具体的な回答を以下に示します。

- 温度補正後にたわみ量が逆転 ( $D_{20} < D_{30}$ ) する。
- 温度補正後のたわみ量の値が小さくなりすぎる。
- 温度補正後の等値換算係数がコア抜き結果と一致しない。

これらの現象の一因として、混合物種やバインダ種の影響が考えられます。本来であれば、混合物種やバインダ種により温度がたわみ量におよぼす影響は異なるため、異なる補正係数が必要となります。しかし、現状では、混合物種やバインダ種に関わらず同じ温度補正係数を用いたたわみ量を求めています。今後は、混合物種やバインダ種による温度—たわみ量の違いを、室内評価などにより整理し、補正係数の精度を高めることが望まれます。

##### ②解析条件のルール

測定や解析には、熟練した現場経験や測定基準の判断が求められるため、技術の継承が難しく、深刻な技術者不足を課題に感じているという回答もありました。

解析条件は各社様々で、社内で定めている企業・担当者に一任されているという企業があります。

解析条件が結果に与える影響は大きく、顧客に提案すべき工法自体が変わってしまう場合もあります。例えば、既設舗装の等値換算係数を求める場合

に、たわみ差、逆解析、路面ひび割れのどれを用いるかによって値が異なるといった回答もありました。そのため、温度補正係数と同様、解析条件についてもルールの確立が求められます。

#### 4. おわりに

近年、ますます盛んに耳にするようになった「舗装の維持修繕」「構造診断」などをキーワードに、普段何気なく業務で接してきたFWDに関して、今回改めて調査を行いました。FWDの歴史的な変遷や文献調査をすることで、道路業界に携わる諸先輩方が現在まで

に築き上げられた技術について学ぶことができました。また、アンケートを実施したことで一部ではありますが、FWDの実態について課題を含め貴重な情報を知ることができました。これから調査を実施する際の情報として役立てていきたいと考えます。

今後より一層、FWDによるマネジメントの重要性が増すと考えられるため、継続的に情報収集に取り組み、技術開発に役立てたいと思います。この場を借りてアンケートにご協力いただいた皆様へ謝意を表するとともに、本稿が舗装業界の若手技術者の一助になり、FWD技術の発展につながれば幸いです。

#### — 参考文献 —

- 1) (社) 日本アスファルト協会：アスファルト、Vol.62, No.235, pp. 68-83, 2019.
- 2) 国土交通省道路局：舗装点検要領, 2016.10
- 3) (社) 日本アスファルト協会：アスファルト、Vol.51, No.224, pp. 45, 2008.
- 4) (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-平成25年版, 丸善出版, 2013
- 5) (社) 土木学会, 舗装工学ライブラリー2：FWDおよび小型FWD運用の手引き, 丸善出版, pp 2, 2002.
- 6) (社) 土木学会, 舗装工学ライブラリー3：多層弾性理論による舗装構造解析入門, 丸善出版, pp 51-68, 2005.
- 7) (社) 土木学会, 舗装工学ライブラリー14：非破壊試験による舗装のたわみ測定と構造評価, 丸善出版, pp 19-134, 2015.
- 8) 特定非営利活動法人舗装診断研究会：FWDによる舗装診断, pp 15-80.
- 9) 道路保全技術センター：FWD運用マニュアル(案), pp 12-22, 1996.
- 10) (社) 日本アスファルト協会：アスファルト, Vol.35, No.175, 1993.
- 11) 財団法人道路保全技術センターFWD実用化検討会：活用しよう！FWD, 2005.
- 12) (社) 日本道路協会, 舗装の構造に関する技術基準・同解説, 丸善出版, 2001.
- 13) NPO 法人舗装診断研究会ホームページ：FWDとは?, <http://pdrg.org/>(参照日：2020年10月25日)
- 14) 坂本康文：FWD(重錘落下式たわみ測定装置)検定施設, 土木技術資料, Vol.48, No.7, 2006.
- 15) 国立研究開発法人土木研究所道路技術研究グループ舗装チーム, 一般財団法人土木研究センター：舗装たわみ測定装置検定補助業務報告書, 2019.
- 16) 今井博：動的たわみ量による舗装の評価について, 第13回日本道路会議論文集, 1979.
- 17) (社) 日本道路協会, 舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針, 丸善出版, 2018.
- 18) (社) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013, 丸善出版, pp 41, 2013.
- 19) (社) 日本道路協会：舗装点検必携, 丸善出版, 2019.
- 20) 国土交通省道路局：総点検実施要領(案)【舗装編】, 2013.2.
- 21) NEXCO中日本株式会社HP：[https://www.c-nexco.co.jp/corporate/tech-solutions/product/detail\\_06.html](https://www.c-nexco.co.jp/corporate/tech-solutions/product/detail_06.html)
- 22) 雑賀義夫, 阿部長門, 姫野賢治, 丸山輝彦：FWDから得られる特性値の温度補正に関する検討, 舗装 Vol.30, No.8, 1995.
- 23) 林信也, 東滋夫, 金井利浩, 岡部俊幸：FWD試験における測定たわみの温度補正システムの開発, 舗装工学講演論文集, Vol.2, pp95-104, 1997.12.
- 24) 若林由弥, 寺田剛, 藪雅行, 竹内康：舗装の効率的評価のための新しい測定装置の開発～MWDの実用化に向けた取り組み～, 土木技術資料, Vol.58, No.8, 2016.
- 25) 川崎廣貴, 皿海章雄, 龍岡文夫, 平川大貴：地盤剛性全自動評価システムにおける地盤剛性計測法, 土木学会第59回年次学術講演会, 2004.



## 日進化成株式会社 技術研究所

Nissin Kasei Co.,LTD Research and Development Laboratory

日進化成(株)技術研究所は、改質アスファルトや樹脂系カラー舗装を中心とした研究開発を行っている機関です。研究所は埼玉県さいたま市に位置し、そこで日本全国の事業ネットワークの技術分野を担っています。ここでは、当事業所の概要を改質アスファルトと樹脂系カラー舗装の研究事例を交えながら紹介いたします。

### 1. 日進化成ってこんな会社

日進化成は昭和33年3月、兵庫県西宮市で創業しました。もともとは、油脂を鹸化する事業(石鹸を作っていました)を営んでいました。ところがある日、原料油脂の残渣を工場内にこぼしてしまい、足の踏み場もなくなってしまったそうです。やむを得ず、その上から碎石を撒いて帰宅し、翌朝出社すると碎石は非常に強固に固着されていたそうです。偶然の出来事だったので詳しい記録は残っていないのですが、乾性油のようなものだったのではないかと推察されます。この現象を「面白い」と感じた創業者は、舗装材料に使えないかと考え、アスファルトと混合し舗装材料として事業化したのが当社のルーツです<sup>1)</sup>。折しも、当時の日本は戦後の経済成長期を迎えたところであり、急速に社会が発展していました。しかし、道路延長も現在の10分の1程度しかなかったその当時、重要なインフラである道路舗装は、“防塵”を目的とした簡易舗装が主でした。その時流にも乗って会社の礎が形成されてゆきました。以降、カットバックアスファルトやアスファルト乳剤事業を展開してゆく中で、大阪万博の樹脂系カラー舗装を手掛けることになり、それ以降樹脂系カラー舗装事業も当社の柱となりました。そして時は流れ、舗装率の上昇に伴い加熱アスファルト混合物の需要が高まり、それに用いる改質アスファルト事業に着手し、1990年代の中頃には排水性舗装用高粘度改質アスファルトを発表いたしました。このように、当社は道路舗装のニーズの変化に対応しながら発展してゆきました。



図-1 研究所所在地



写真-1 研究所事務所棟外観とスタッフ

現在の日進成は、樹脂系カラー舗装材料の製造販売および施工、土木用樹脂接着剤の製造販売および施工、カットバックアスファルト、アスファルト乳剤、改質アスファルト、明色バインダの製造販売など、バラエティーに富んだ事業を展開しております。

## 2. 研究所紹介

会社設立当初は、創業地である兵庫県西宮市に研究所を構えておりましたが、本社東京移転に伴い関東に

も研究所を置きました。当時は、改質アスファルトやアスファルト乳剤などの研究を関東で、樹脂系カラー舗装などの研究を関西で行っておりました。その後、2000年1月には、2か所あった研究施設を現所在地である、さいたま市南区に統合いたしました。

スタッフ人数はさほど多くはありませんが、研究所内は3グループに分かれております。各グループの担当事業分野を表-1に示します。

表-1 技術研究所の研究内容(概略)

グループ名称	第一技術グループ	第二技術グループ	品質保証グループ
人 員	4名	4名	3名
研究内容	改質アスファルト、カットバックアスファルト、アスファルト乳剤、明色バインダ、加熱アスファルト混合物用添加剤	樹脂系カラー舗装、機能性樹脂舗装、コンクリート接着剤、樹脂系防水材、保水性舗装	生産管理・効率化、原料管理、ISO、樹脂などの法規制対応

## 3. 主な研究内容

### 3.1 改質アスファルトの研究事例

主たるアスファルト研究業務の中から、「施工性改善型ポリマー改質アスファルトの開発」について開発コンセプトと評価事例について紹介いたします<sup>2)</sup>。

#### 3.1.1 開発コンセプト

施工性改善型ポリマー改質アスファルトを開発するにあたり、通常のポリマー改質アスファルトⅡ型と比較して、施工時の混合物温度を30℃低減しても、所定の締固め度を満たすことができること、加えて低温施工時での、レーキ等を用いた人力作業における混合物の重量感を低減させることを目標としました。これらの問題の解決方法には、ポリマー改質アスファルトの持つ所定の強度を維持しつつ、その粘度を低下させる方法やアスファルト混合物間の摩擦を低減させる方法などがあります。これらの手法を用いることで、アスファルト混合物の施工可能温度範囲を低温側に広くとることが可能となり、施工の容易性と所定の締固め度を実現することができるようになります。

#### 3.1.2 ホイールトラッキング試験用供試体を用いた評価

開発品(以下D-EX)の施工性を室内試験で評価する方法として、二次転圧回数、締固め温度を変化させたホイールトラッキング(以下WT)試験用供試体を用いました。なお、室内での転圧状況は、現場を想定し

て一次転圧はコンパクター(金属部)で10回転圧し、二次転圧としてゴムマットをはさんで15回転圧することにしました。

作製した供試体の動的安定度を測定したところ、今回設定したいかなる条件下においても開発品と通常品に差異は見られませんでした。ところが、二次転圧の回数と圧密変形量( $d_0$ )の関係には特徴的な挙動が見られることを見出しました。一般的に $d_0$ は初期わだち掘れの発生と関係があると言われております。図-2に二次転圧回数と $d_0$ の関係を示します。この結果によれば、開発品は通常のポリマー改質アスファルトⅡ型

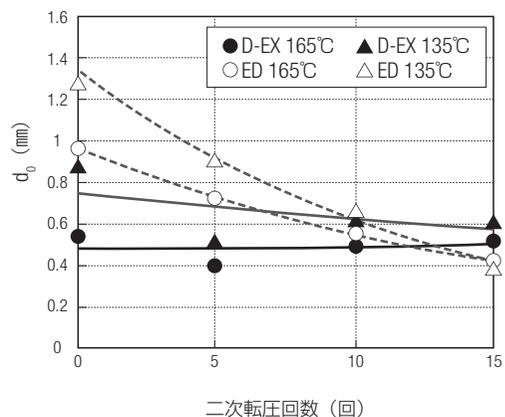


図-2 二次転圧回数と圧密変形量

(以下通常品、図中ED)と比較すると $d_0$ の値が二次転圧回数を変化させた場合でもほぼ一定となりました。これは、一次転圧の段階で初期の圧密が発生しない程度にまで緻密な舗装面が得られていることを示します。この傾向は、混合物温度を低下(135℃)させても変わりませんでした。これらのことより、厳しい施工条件下であっても、一定品質以上の仕上がりの舗装が得られることが分かりました。

### 3.1.3 マーシャル供試体を用いた評価

開発品の締固め性を評価するにあたり、マーシャル(以下MT)供試体を、締固め温度を変化させて作製しました。その結果を図-3に示します。この結果によれば、開発品は締固め温度を目標である30℃低減させた場合においても十分な締固め性能を有していました。そこで、WT試験における $d_0$ の挙動を勘案し、突固め回数を変化させてMT供試体を作製し、その飽和度の変化を観察することにしました。図-4に突固め回数を変化させて開発品135℃、通常品165℃で作製したMT供試体の飽和度を示します。開発品は、通常品両面75回突固めに相当する飽和度を約50回の突固めで達していました。これは、開発品は少ない突き固

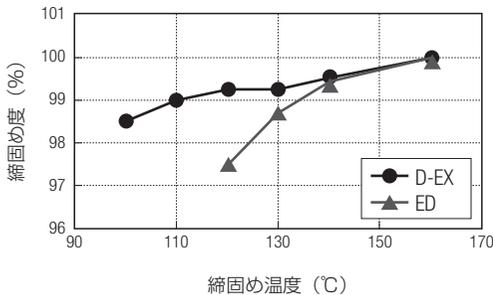


図-3 締固め温度と締固め度の変化

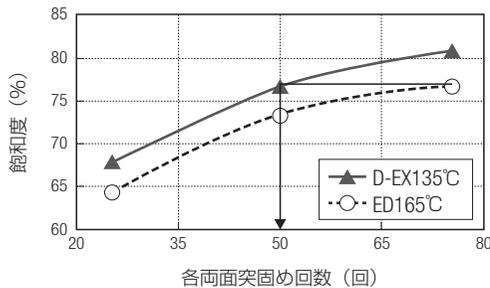


図-4 突固め回数と飽和度

め回数、すなわち少ないエネルギーで、骨材間隙中にバインダが充填されている状態であることを示唆しております。

### 3.2 樹脂系カラー舗装研究事例<sup>3)</sup>

遮熱性舗装の普及に従い、塗布式カラー舗装の「見え方」に関する捉え方も変化が生じてきています。例えば、今までであれば視認性向上という目的のもと、「色」「明るさ」「コントラスト」を中心に考えて設計していました。ところが、遮熱性舗装の登場により、「明度」「日射反射率」など、性能面に着目した評価方法も重要となってきました。しかし、これらの評価項目は、カラー舗装である以上「見え方」を評価していることに変わりありません。そこで、ここでは、塗布式カラー舗装の「色」と「塗料ベース樹脂」の2つの設計因子を変化させて、「見え方」に纏わる特性(「見え方」特性)について調査した結果を紹介いたします。

#### 3.2.1 評価方法

##### (1) 輝度比(特性: コントラスト)

輝度とは、観測者が対象を見たときの明るさを表す指標であり物体表面の輝きの程度を示します。測定対象面からくる光度を測定し、それを測定対象の面積(正射影面積)で割った値として得られるもので、単位はカンデラ毎平方メートル(cd/m<sup>2</sup>)で表されます。例えば、黄色い点字タイルを目立たせる場合に、周囲の舗装の輝度と対比し大きくなるように調整します。この対比を輝度比と呼んでおり、今回の調査では密粒度アスファルト舗装板との対比によって輝度比を求めました(写真-2)。

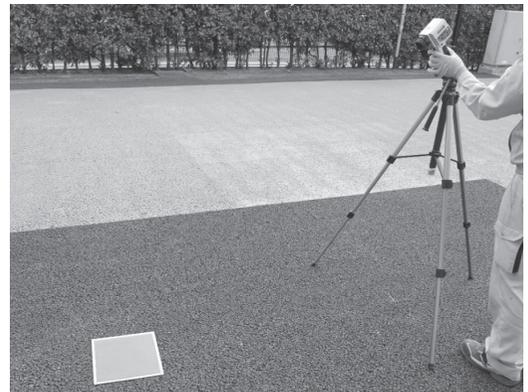


写真-2 輝度測定状況

## (2) 明度 (特性：明るさ)

色には、明るい色とか暗い色というように、「明るさ」の度合いがあります。たとえばレモンの黄色とグレープフルーツの黄色では、レモンの黄色のほうがより明るい色に見えます。このように色相（色合い）に関係なく比較できる「明るさ」の度合いを明度と呼んでいます（写真-3）。

## (3) 日射反射率 (特性：太陽光の反射)

色のついた塗膜は太陽より照らされる光を少なからず反射する性質があり、その光の波長ごとに反射する割合を測定したものを日射反射率と呼びます。ここでは、太陽光をどれだけ反射させるかを評価するために、可視光領域（300～780nm）の反射率に着目しました（写真-4）。

## (4) 光沢度 (特性：ツヤ)

日本工業規格（JIS）では、ツヤをあらわす尺度として「光沢度」を定めています。この規格では、可視光を $60^\circ$ で入射したときの鏡面反射率が10%となるような、屈折率1.567であるガラス面の光沢度を100と規定しています。今回の調査では、光沢度は基準面の鏡面反射率と供試体の鏡面反射率との対比で求めました（図-5）。



写真-3 明度測定状況



写真-4 日射反射計

### 3. 2. 2 共通の塗料ベース樹脂で色が違う場合

主に歩道などで使用されている水性塗料を例にとり、色のみを変化させた場合に、見え方に関する特性値がどのように変化するかを調査しました。供試体写真を写真-5に、調査結果を表-2に示します（次ページ）。

実際の塗膜を観察すると、光沢のないマットな仕上がりとなっているために、総じて光沢度は低くなっており、他の特性値との相関も認められませんでした。ところが、

それ以外の特性値間には相関が伺える結果となっています。図-6（次ページ）には、輝度比と明度の関係を示します。これによれば、明度と輝度比の間では99.6%と高い相関を示すことが確認できました。

### 3. 2. 3 色が同じで塗料ベース樹脂が異なる場合

前項では、光沢度のみ他の「見え方」特性とは相関がないという結果となっています。そこで、色を同

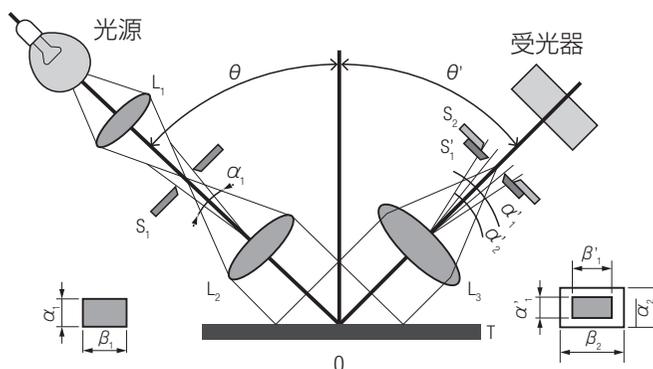


図-5 輝度測定状況

じにして塗料ベース樹脂を変えることによる「見え方」特性について調査を行いました。調査対象としては、グレー系遮熱塗料で、塗料ベース樹脂を、ポリウレア樹脂、ウレア樹脂、MMA樹脂、水性アクリル樹脂の4種類としました。「見え方」特性の調査結果を表-3（次ページ）に示します。この結果によれば、輝度比、明度、日射反射率は、あまり相関がありません

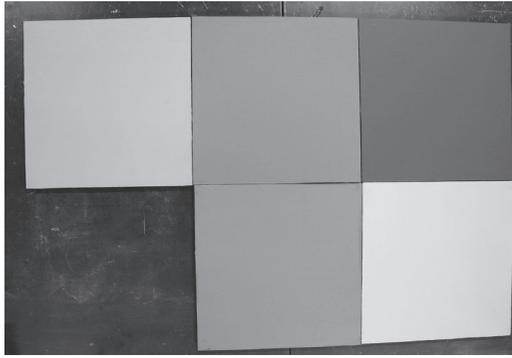


写真-5 共通の塗料ベース樹脂で色が違う供試体

表-2 共通塗料ベースでの各色の「見え方」特性値

	赤色	黄色	緑色	青色	灰色
輝度比	2.68	10.62	4.55	4.48	7.96
明 度	39.1	64.6	45.7	46.3	57.2
反射率	18.8	40.3	12.0	19.0	25.2
光沢度	2.5	3.3	2.5	3.1	3.0

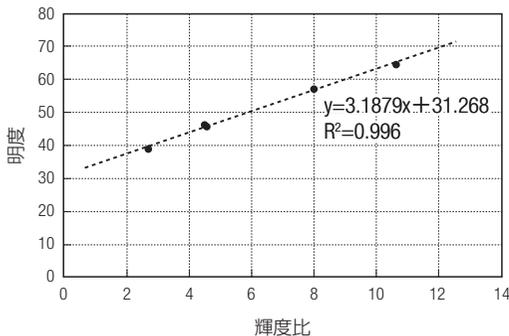


図-6 共通の塗料ベース樹脂での明度と輝度比の関係

表-3 塗料ベース樹脂の違いによる「見え方」特性値

	ポリウレア	ウレア	MMA	水性 アクリル
輝度比	4.52	4.49	4.23	4.12
明 度	45.8	45.7	44.6	44.1
反射率	22.2	24.7	20.5	18.6
光沢度	81.6	84.2	19.2	4.1

でした。しかし、光沢度に関しては塗料ベース樹脂の違いによる影響を大きく反映する結果となりました。これは、ポリウレア樹脂やウレア樹脂は塗料化前の樹脂もツヤがあり、そのまま塗料として仕上がったためです。一方、MMA樹脂は塗膜表面がWAX層となるために曇って仕上がり、水性アクリル樹脂は塗膜中の水分が抜ける際、表面に微細な凹凸が残存しマットに仕上がったことに起因しています。

#### 4. 目指すところ

ここで紹介したように、当研究所は舗装の中でもニッチな分野を研究しています。そのため、基礎的なデータの収集やそれを基にした研究開発を得意としております。若いスタッフが多く、経験不足の面も否めませんが、活気にあふれております。会社スローガン「技術の日進化成」に恥じぬよう、様々な形で舗装業界に貢献してゆきたいと考えております。

#### — 参考文献 —

- 1) 日進化成創立50周年記念「日進化成の歩み」, 2008年12月
- 2) 金澤 他: 施工性改善型ポリマー改質アスファルトⅡ型の開発とその特徴, 第14回北陸道路舗装会議 2018年6月
- 3) 焼山 他: 塗布式カラー舗装の「見え方」特性に関する一考察, 第32回日本道路会議, 2017年10月

<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
24 年度	200	3,960	100.5	99	4,259	2,366	95.3	59	2,366	217	2,583
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. 4 月	178	235	122.0	1	414	134	91.1	0	134	201	335
5 月	201	211	93.0	2	414	135	84.2	3	135	202	336
6 月	202	193	102.0	3	397	90	102.0	6	90	192	282
4～6 月	178	639	105.0	6	823	359	90.7	9	359	192	551
7 月	192	204	86.2	1	396	124	74.7	6	124	177	301
8 月	177	261	118.5	0	438	132	82.1	0	132	247	379
9 月	247	215	99.0	1	463	166	99.0	3	166	221	386
7～9 月	192	679	100.9	2	873	423	85.3	9	423	221	643
10 月	221	171	83.9	5	396	151	81.4	9	151	194	345
11 月	194	198	110.9	5	398	172	101.1	6	172	195	367
12 月	195	245	77.5	1	441	163	97.4	1	163	202	364
10～12 月	221	614	87.9	11	846	485	92.9	16	485	202	687
1 月	202	290	107.5	2	494	155	86.5	6	155	218	373
2 月	218	217	85.2	2	437	159	96.4	0	159	210	368
3 月	210	244	84.3	1	455	172	85.3	0	172	215	387
1～3 月	202	752	92.3	5	958	486	89.0	6	486	215	701
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

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
E N E O S 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) 千代田区麴町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
リ ー フ エ ナ ジ ー 株 式 会 社	(108-0073) 港区三田3-4-10	03 (6435) 4497

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	編集委員			
中村俊行	委員長：太田 亨			
編集長	安藤政浩	遠藤 桂	加納孝志	神谷恵三
	竹井利公	永田佳文	橋本喜正	濱田幸二
新田弘之	姫野賢治	吉武美智男	吉村啓之	綿谷 茂

アスファルト 第236号

令和3年5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.63 No.236 MAY 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/>



