

アスファルト

239

第66巻 第239号 令和5年12月発行

石油アスファルト需給動向と将来展望について

コスモ石油マーケティング株式会社 1

特集・カーボンニュートラル関連技術

植物由来原料を使用したアスファルト再生用添加剤の開発

高山遼太郎・川島陽子 5

常温施工可能な防水層用補修材

畠山慶吾・川上篤史 10

埋設ジョイントに適用できる特殊改質アスファルト混合物について

梅田泰裕 16

高精度な自動運転を実現する道路施設『磁気マーカ』

山本道治・安藤孝幸 23

ミニ特集・海外展開

わが国の合材製造技術等のアジア地区への展開

貫井 武 31

アスファルト舗装に発生する低温ひび割れの対策事例

ーモンゴル国でのJICA技術協力プロジェクトの検討事例からー

遠藤 桂 39

アスファルトゼミナール講演紹介

【アスゼミ報告】アスファルト乳剤の変遷と最新の技術動向

(一社)日本アスファルト乳剤協会 46

【アスゼミ報告】ポリマー改質アスファルト技術の進歩について

(一社)日本改質アスファルト協会 50

<アスファルト舗装技術研究グループ・第71回報告>

54

海外のレビュー論文から読み解くアスファルト混合物へ適用される材料への期待

55

若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告

ーアスファルトの歴史・舗装の維持修繕・多様化する舗装ー

76

<連載>アスファルト・舗装研究 vol.12

金沢工業大学工学部 環境土木工学科 101

<統計資料>石油アスファルト需給実績

105

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



第101回 アスファルトゼミナール開催のご案内

一般社団法人 日本アスファルト協会

拝啓 時下ますますご清栄の段、お慶び申し上げます。

当協会主催の「アスファルトゼミナール」を下記要領にて開催致します。

皆様、お誘い合わせの上ご参加くださいます様お願い申し上げます。

敬 具

記

- | | |
|------------|--|
| 1. 主 催 | 一般社団法人 日本アスファルト協会 |
| 2. 協 賛 | 一般社団法人 日本道路建設業協会、一般社団法人 日本アスファルト乳剤協会 一般社団法人 日本改質アスファルト協会、一般社団法人 日本アスファルト合材協会 |
| 3. 後 援 | 国土交通省 |
| 4. 開 催 日 時 | 2024年1月24日(水) 10:00~16:50 |
| 5. 開 催 形 式 | 対面とオンラインのハイブリッド形式を予定 【会 場】ENEOS株式会社 2階講堂 〒100-8162 東京都千代田区大手町一丁目1番2号 ☎0120-56-8704 【オンライン】Zoom ウェビナー |



▲会場はこちら

※会場定員は100名とさせていただきます(先着順、ただし1社最大4名まで)。

※会場では新型コロナウイルス感染対策のため、できる限りマスク着用の上でご参加いただきますようお願いいたします。

※会場での紙資料の配布は行いませんので、会場参加者は各自、必要に応じて資料を印刷してお持ちいただくようお願いいたします。

- | | |
|-------------|---|
| 6. 内 容 | 裏面「プログラム」をご覧ください。 |
| 7. 申 込 方 法 | 2023年12月15日(金)より下記ホームページの申し込みフォームにてお申し込み下さい。(申込締め切り:2024年1月17日(水)) http://www.askyo.jp/zemi/ 折返しE-mailにて参加受講券または視聴URLをお送りいたします。 ※会場参加のお申込みは、定員になり次第終了させていただきます キュービシシステム株式会社 アスゼミ担当 村井まで ☎03-5577-7199 E-mail: asphalt@qbs.co.jp |
| 8. 申 込 問 合 | ENEOS株式会社 産業エネルギー部 丸谷、金子まで ☎03-6257-7231 |
| 9. 内 容 問 合 | |
| 10. 参 加 費 | 無料 |
| 11. 参 加 人 数 | 会場(100名予定) / オンライン(300名) |
| 12. CPD 認 定 | 公益社団法人土木学会の継続教育(CPD)プログラム 認定番号: JSCE23-1593 単位数: 5.4単位 ※全講演の聴講と100文字以上のレポート提出が必要となります。 |
| 13. そ の 他 | 当日の参加受付はできませんので、 <u>必ず上記方法でお申し込み下さい。</u> |



▲申し込みフォーム
はこちら

プログラム

ーサステナブルを目指す舗装技術ー

2024年1月24日(水) 10:00～16:50

(敬称略)

- | | |
|---|-------------|
| 1. 挨拶 | 10:00～10:05 |
| 一般社団法人日本アスファルト協会 代表理事 | 小 川 誠 一 |
| 2. 来賓挨拶 | 10:05～10:10 |
| 国土交通省 道路局長 | 丹 羽 克 彦 |
| 3. 挨拶 | 10:10～10:15 |
| 一般社団法人日本アスファルト協会 舗装技術分科会 委員長 | 三 浦 真 紀 |
| 4. 道路行政をめぐる最近の話題について(仮題) | 10:15～11:00 |
| 国土交通省 道路局 企画課 道路経済調査室長 | 四 童 子 隆 |
| 5. 次世代の舗装マネジメント (xROAD) | 11:00～11:45 |
| 国土交通省 道路局 国道・技術課 道路メンテナンス企画室長 | 和 田 賢 哉 |
| (休憩 11:45～12:45) | |
| 6. 舗装再生便覧の改定に当たって | 12:45～13:25 |
| 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ長 | 新 田 弘 之 |
| 7. エネルギー基本計画における化石燃料と今後の需給見通し | 13:25～14:05 |
| 経済産業省 資源エネルギー庁 資源・燃料部 燃料供給基盤整備課 課長補佐 | 吉 川 信 彦 |
| 8. 舗装用アスファルトの供給体制 | 14:05～14:30 |
| 一般社団法人日本アスファルト協会 事務局 | 丸 谷 聡 |
| (休憩 14:30～14:50) | |
| 9. 中温化技術(フォームド)について | 14:50～15:10 |
| 一般社団法人日本アスファルト合材協会 中温化WG グループ長 | 江 向 俊 文 |
| 10. サステナブル社会に貢献するポリマー改質アスファルト | 15:10～15:30 |
| 一般社団法人日本改質アスファルト協会 技術委員 | 平 松 真 |
| 11. 持続可能なアスファルト乳剤工法 | 15:30～15:50 |
| 一般社団法人日本アスファルト乳剤協会 技術委員 | 高 橋 知 |
| 12. 海外の舗装事情と次世代の主流、環境への取り組み | 15:50～16:50 |
| ヨーゼフ・レッテンマイヤー&ゾーネ社道路舗装事業部責任者 | ホースト エルドレン |

※内容については変更の可能性があります

石油アスファルト需給動向と将来展望について

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

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

近年、石油産業を巡る環境はOPEC プラス一部産油国の減産表明、中国の需要回復などの価格上昇要因と、インフレ対策としての米欧中央銀行の利上げに伴った経済活動減退リスクといった価格下落要因の中、価格は変動の大きい状況が続くことが予想されている。今回、このような変化に伴うアスファルトの需給や価格に及ぼす影響について述べさせていただきたい。

1. 石油産業を取り巻く環境

1.1 原油価格の動向

前提として、原油価格は、石油製品のコスト、ひいては様々な製品価格に大きく影響を与えるものである。道路舗装に用いられるストレートアスファルト（以下「ストアス」）も原油精製により生産される石油製品のひとつであるため、原油価格の動向はアスファルト関係者にとっても大いに関心をひくものである。

2023年はコロナウイルス（COVID-19）が感染症第5類に移行されたことを受けて、国内の経済・消費活動が活性化している一方で、冒頭記載のとおり、様々な理由が背景にあり、アスファルト価格も変動が激しい状況となっている。

前号でも記載をさせていただいたが、原油価格の決定要素は多岐にわたる。大きくは下記のとおり、①需給バランス、②特殊要因、③投機的要素にわけられる。

原油価格決定要素

項目例

①需給バランス

- ・中長期的な原油需給動向、在庫状況
- ・各地域の原油生産コスト
- ・原油在庫水準やOPEC 余剰生産量規模
- ・OPEC／非OPEC の生産動向等

②特殊要因

地政学リスク（戦争、政情不安、天災／異常気象等）

③投機的要素

米国株価や米原油在庫発表等

①②③の要素が複雑に影響され、原油価格は決定するが、原油価格の動向を見通すことは非常に難しい。一方、①需給バランスが中長期的な価格を決定するベースであることから、原油価格推移は需給バランス

から概ね読み解くことができる。

2020年春先のコロナショックによって、急激に需要が減退し、価格が急落したため、OPECなどの産油国は、原油の生産量の抑制（減産）することで需給バランスを調整し、価格のコントロールを図った。その後、主要国の移動制限緩和などにより、経済活動が段階的に回復、それに応じて原油需要が増加したものの、産油国の生産量拡大に時間を要したこともあり、原油価格は大幅に上昇した。更には2022年のロシアによるウクライナ侵攻でエネルギー供給不安が一気に高まり、価格は急騰した。加えてアメリカをはじめとするインフレの進行も、価格高騰している要因となり、2022年6月には一時120 \$ 台の価格となった。

その後の産油国の増産などにより緊張が緩和し、2023年9月現在、WTI原油は80-90 \$ を推移しているが、インフレに伴う経済減速不安と原油需給の間で非常に不安定な状況が続いている。

今後の見通しについても同様で、対ロシア制裁の影響や中国の経済活動回復などの不透明感は強く、価格が下落傾向となった際にはOPEC プラス一部産油国の減産表明が想定される等、今後さらに原油価格が押し上げられる材料がいくつも存在し、予測は非常に難しいものである。引き続き原油価格に大きく影響を与える3要素を踏まえながら、価格動向を注視していく必要がある。

1.2 石油製品需給にかかる動向

石油連盟発行の「今日の石油産業2022」によると、石油製品需給は1999年度のピーク時に比べ、2021年度は38%減となっている。（2021年度の石油需要は燃料油合計で前年度比1.2%増の1億5,349万KL）

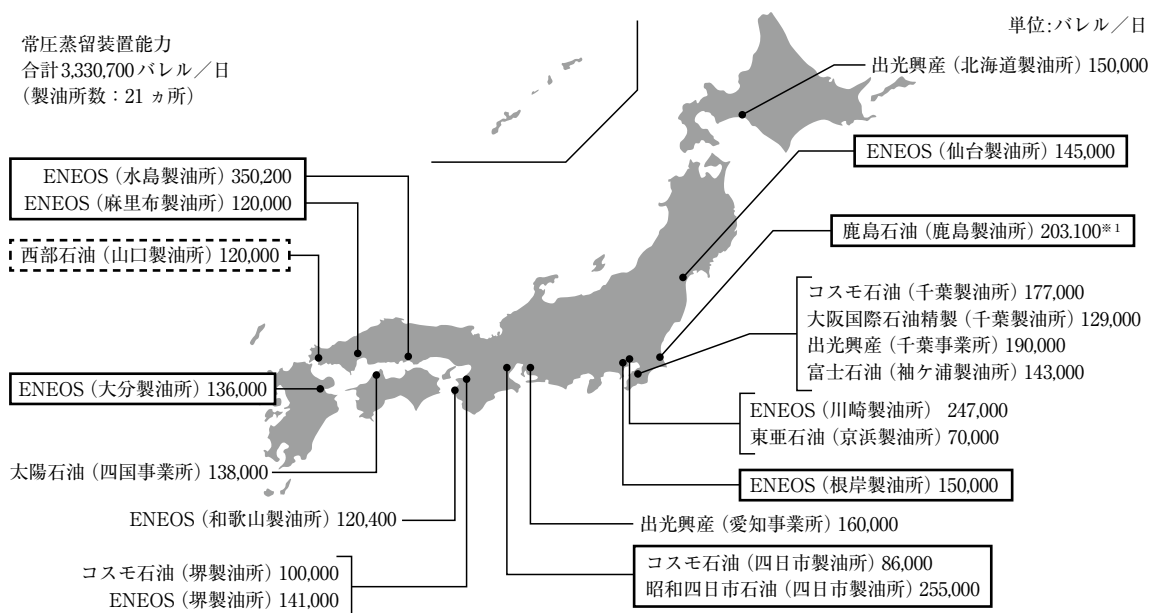
要因としては、少子高齢化や人口減少といった社会構造に変化が生じたこと、カーボンニュートラルによ

る脱炭素を目指した産業、電気自動車など民生用の燃料転換の進展が進んだことが主に挙げられる。この流れは引き続き継続すると見込んでいる。

石油製品の需要が減少することで、各石油メーカーは製品の生産量を需要に合わせて少なくすることとなる。現に石油産業全体で生産設備、流通設備、販売施設等を含め、石油製品の生産・供給にかかる大きな合理化を進めてきた。その中では生産量の減少に伴った、製油所の廃止も含まれ、アスファルトの生産拠点は減少している。

下記図は各製油所の所在地と原油処理能力（2022年10月末現在）をまとめたものである（図－1、図－2）。

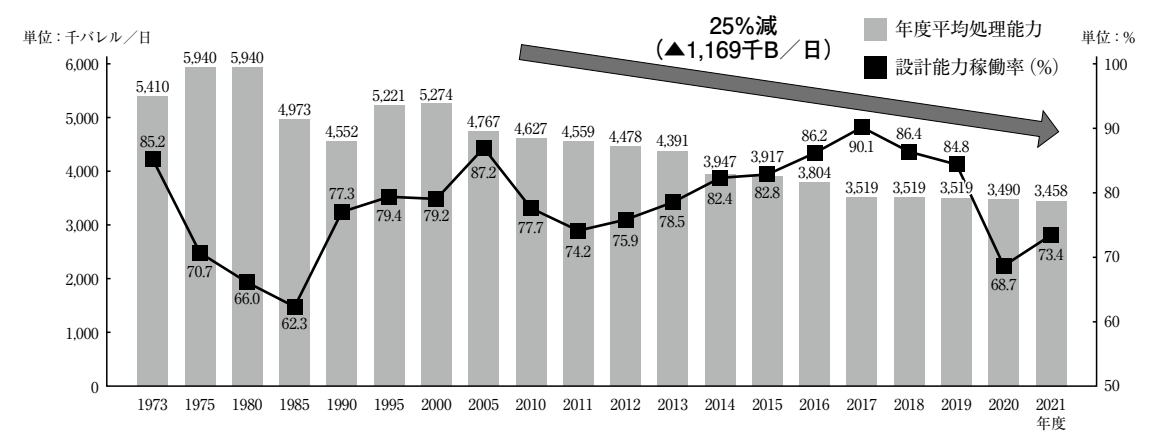
製油所数はピークであった1999年の39カ所から、21カ所に半減しており、アスファルトを製造しているのは現在9カ所となる。また、合理化の一環で、化石エネルギー原料の有効利用を促進するための措置として「エネルギー供給構造高度化法」が2009年7月に制定され、各石油メーカーは上記告知に基づいて各対応を行った結果、過去10年で原油処理能力は約25%削減されている。



※1 鹿島石油 (鹿島製油所) の数値には、コンデンセートスプリッターの処理能力を含む

出典：石油連盟統計資料を一部加工

図－1 製油所の所在地と原油処理能力（2022年10月末現在）



出所：経済産業省「資源・エネルギー統計」、石油連盟

図－2 原油処理能力と設計能力稼働率の推移

2. アスファルトの需給動向

2.1 需要

ストレートアスファルト（以下ストアス）は、主にアスファルト合材の原料として使用されている。1992年度に約80,838千トンあったアスファルト合材の製造量は、2022年度は38,800千トンと約48%にまで減少している。一方で、近年の減少ペースは鈍化しており、ストアスの需要は約147万トンとなっている（図－3）。これは、老朽化した道路から撤去した骨材を利用する再生合材の製造比率が増加しており、新しいストアスの添加量を抑えることができるためである。図－4に示すとおり再生合材の製造比率は、2010年度で73%に上り、2022年度は75%となっている。2010以降の再生合材製造比率は横ばいであることから、今後も極端に増えることはないを見込んでいる。

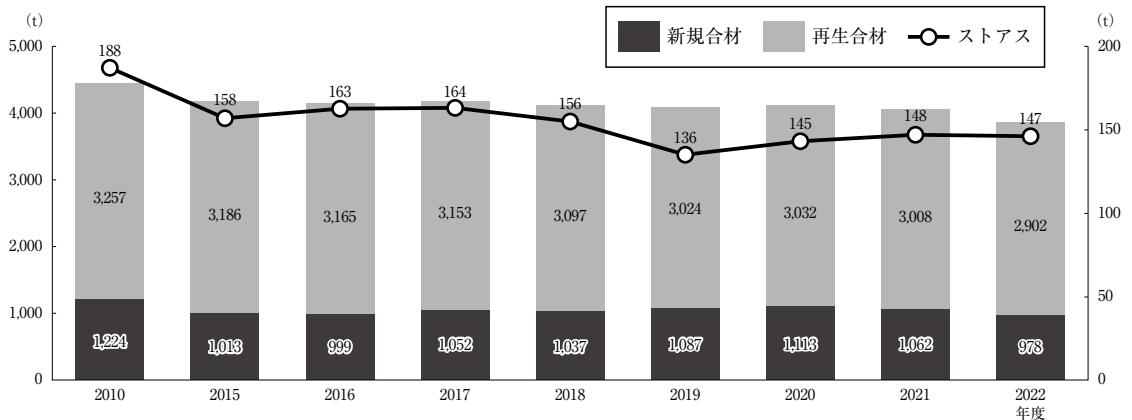
今後のストアスの需要について、国土交通省で進め

ている国土強靱化計画が継続することから、2025年度までは底堅い需要が想定される。

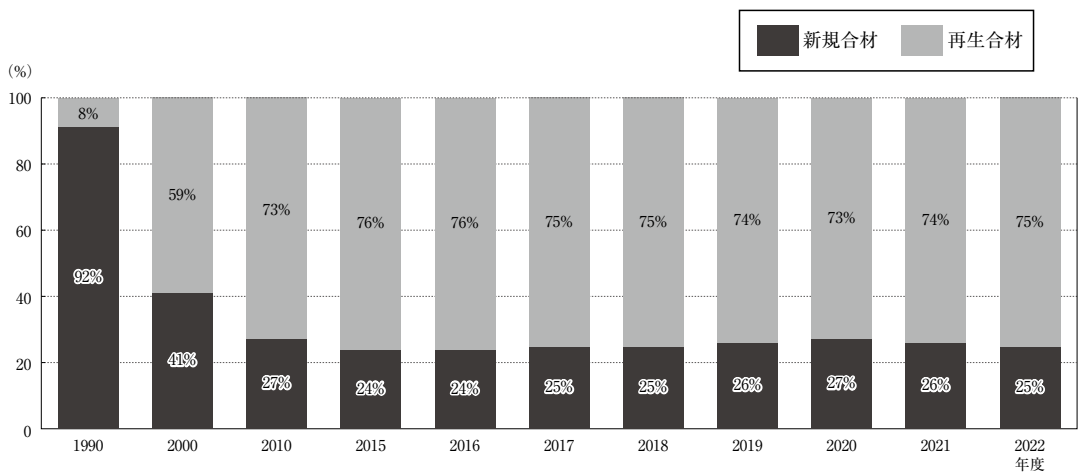
2.2 生産

2.1 需要で述べたとおり、石油製品全体の需要減少およびストアスの需要の減少によって、石油メーカーの生産数量も減少している。加えて、「エネルギー供給構造高度化法」による原油精製の最適化（重質油分解能力の向上を促すため、同装置への減圧残渣油の通油量増加）により、ストアスの生産量を落とし、ガソリンなどの生産にシフトすることが可能な状況となっている。

その中、各石油メーカーは、目的生産物としてストアスの安定的生産・供給を行う姿勢に変わりはなく、今後も同様の供給体制を継続するものと見込んでいる。ただし、各石油メーカーの製油所、出荷基地における維持コスト等や、輸送会社のストアス運搬費用の



図－3 アスファルト合材製造量と道路用アスファルト需要



図－4 新規合材・再生合材比率

上昇等、流通における各種対応は各石油メーカーのみで対応できる問題ではなく、需要家・消費者の理解も必要となっているのが現状である。

現在のアスファルト供給における課題は大きく下記(表－１)のとおりである。

供給体制維持のためには、各種設備維持コストや運送会社の事業継続可能なコストの回収に加え、労働者の労務環境の更なる改善など、サプライチェーン全体を通して、アスファルトユーザー全員が共通認識を持ち、協力をいただく必要がある。

2.3 輸入

ストアスの輸入は、これまでと同様に主に韓国から行っているが、新型コロナウイルスによる韓国国内での製油所稼働減少、IMO規制に対応したストアス留分分解装置の新設、他国の輸入増加による日本国内への輸血量減少と課題があり、日本国内の流通においてメインとして考えることには課題がある。

3. まとめ

石油製品の需給、価格は今後も様々な要素の影響を受けて、不規則に変化していくものと予想される。ただし、世界的なカーボンニュートラルへの潮流は変わることなく、ストアスの供給においても不安要素は付きまとう。一方で国土交通省による国土強靱化計画等、ストアスの安定供給に関わる社会的意義は今後も変わらない。一方で、2.2 生産でも記載のとおり、「調達⇒精製⇒輸送⇒基地管理⇒輸送⇒販売⇒舗装」とつながるサプライチェーンは、アスファルトユーザー全員で課題を認識することが必要となる。

課題の改善にあたり、日本国内における経済発展のため、政府、各石油メーカー、日本アスファルト協会、消費者である道路会社や建材メーカーなどが一体となって、ストアス安定供給への課題解決に努めていくことが必要である。

表－１ アスファルト供給における課題

| 課題項目 | 影 響 | 内 容 |
|-------------|----------|---|
| 供給における課題 | ①設備 | ・設備老朽化に伴う補修費増による設備維持コスト増 ・原油価格上昇に伴う加熱用ボイラー燃料コスト増 |
| | ②船舶 | ・老朽化によるリブレース船の鋼材価格上昇 ・ストアス製造拠点の減少に伴う、二次基地向け転送件数の増加と長距離化 ・船員の高齢化、人員確保の難しさ ・燃料コスト増 |
| | ③タンクローリー | ・燃料コスト増 ・ローリーの老朽化 ・ドライバー高齢化、人材確保の難しさ ・ローリー会社の廃業 |
| 働き方改革における課題 | ①海上輸送 | ・船員法改正による船員の労務管理の適正化 |
| | ②陸上輸送 | ・ドライバーに年間960時間を上限とする残業規制が2024年4月より施行(2024年問題) |

植物由来原料を使用したアスファルト再生用添加剤の開発

(The Development of New Asphalt Biomass-Rejuvenator)

高山 遼太郎*・川島 陽子**

環境負荷低減を目的としたカーボンニュートラルへの取り組みのひとつとして、植物由来の原料を使用した再生用添加剤を開発し、再生用添加剤としての性状及び繰り返し再生試験による劣化したアスファルトの再生性能の評価を行った。その結果、植物系再生用添加剤の液物性は再生用添加剤の標準性状を満たし、石油系の再生用添加剤と同等程度の再生効果を示すことが分かった。また、これを用いた再生アスファルト混合物の性状も石油系の再生アスファルト混合物と同等性状であることが分かった。

1. まえがき

持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, SDGs）は、21世紀の世界的な課題に対処し、持続可能な未来を築くための枠組みとして2015年に国連で採択され、我が国においても様々な産業分野で取り組みが進められている。アスファルト舗装分野ではリサイクル技術の開発が盛んに取り組みられ、1970年代にはアスファルト混合物の再生利用がはじまっており、現在では出荷量の7割以上を再生アスファルト混合物が占めるまでになっている¹⁾。

近年ではカーボンニュートラルへの取り組みとして非石油由来の原料を活用した各種添加剤やアスファルト代替材料の研究・開発が行われている。しかし、植物由来の原料を使用した舗装材料の適用性について、国内外において実用化した例²⁾が限られていることから、知見が少ないのが現状である。

そこで、ハリマ化成と土木研究所では共同研究を実施し、植物由来の原料を使用した新たな再生用添加剤の開発を行った。具体的には、開発した再生用添加剤の液物性が標準性状を満足するかを確認し、繰り返し劣化・再生試験により劣化したアスファルトの再生性能を評価した。また、再生アスファルト混合物を作製し、その性状についても評価を実施したので報告する。

2. 実験手順

2.1 再生用添加剤の液物性試験

本研究で新規に開発した再生用添加剤は、原料として非可食性の植物由来原料を使用している。開発した植物系再生用添加剤（以下、植物系）の性状試験として、引火点、動粘度、薄膜加熱質量変化率、薄膜加熱後の粘度比、密度をそれぞれ測定した。また、TLC-FID法による成分分析を行った。各試験は基本的に試験法便覧³⁾に記載があるものはそれに従って実施し、成分分析においては石油学会規格JPI-5S-77-2019⁴⁾に準拠して試験を実施した。

2.2 アスファルトの繰り返し劣化・再生試験

室内での促進劣化試験によるアスファルトの劣化と再生用添加剤を加えてアスファルトを再生する操

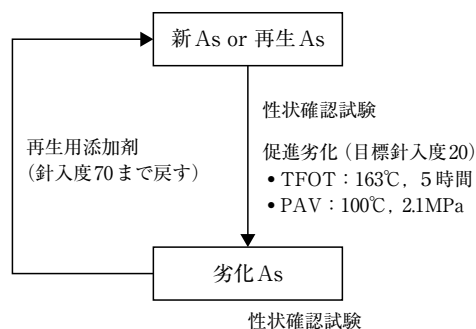


図-1 実験手順

*たかやま りょうたろう ハリマ化成株式会社 研究開発カンパニー研究開発センターパインケミカル開発室

**かわしま ようこ 国立研究開発法人土木研究所 主任研究員

作を繰り返し、劣化・再生の各段階における各種性状を測定した。図－1に実験手順を示す。新規ストレートアスファルト60/80を薄膜加熱試験(TFOT)および加圧劣化試験(PAV)によって劣化させた。なお、目標針入度が20となるように、PAVの時間を調整した。この劣化アスファルトに対して再生用添加剤を加えて目標針入度70として再生した。以後、同様に劣化と再生を繰り返し行い、性状測定を行った。性状測定は針入度試験、軟化点試験、および伸び試験を行った。各試験は試験法便覧³⁾に従って実施した。また、比較のため、組成の異なる2種類の石油系再生用添加剤(以下石油系A、B)による繰り返し再生試験および性状試験も併せて行った。繰り返し劣化・再生回数は最大で5回とした。

2.3 再生アスファルト混合物の作製

再生アスファルト混合物を作製するにあたり、実供用したアスファルト舗装材から製造した再生骨材を使用した。旧アスファルト針入度は16であった。再生骨材配合率60%として再生アスファルト混合物を作製した。混合物の基本配合を表－1に示す。最大粒径13mmの密粒度アスファルト混合物で、アスファルト量は5.0%とした。また、再生用添加剤の添加量はアスファルトの繰り返し劣化・再生試験の再生1回目の添加量とした。作製した供試体は性状を確認するため、各種物性試験(密度試験、マーシャル安定度試験)、圧裂試験、および高温でのカンタブロ試験(以下、高温カンタブロ試験)を行った。高温カンタブロ試験は高温時のひび割れ抵抗性を評価できる可能性が既往の研究⁵⁾により示唆されており、今回植物系の再生用添加剤により再生された混合物の品質を確認するために試験を実施した。

各試験は試験法便覧³⁾に従って実施した。圧裂試験の試験温度は低温：0℃、常温：25℃、高温60℃とし、25℃の圧裂強度、圧裂変位、圧裂係数および0℃と60℃の圧裂強度から圧裂強度比を算出し、混合物性状を評価した。また、高温カンタブロ試験は表－2の試験条件で行った。

3. 実験結果

3.1 再生用添加剤の液物性試験

各再生用添加剤の引火点、動粘度、薄膜加熱質量変化率、薄膜加熱後の粘度比、密度の測定結果を表－3に示す。植物系は、再生便覧⁶⁾に記載されている再生用添加剤の標準的性状を概ね満足していた。また、

TLC-FID法による成分分析結果を表－4に示す。石油系Aは組成分のうち、芳香族分が多く、石油系Bは飽和分の多い再生用添加剤である。これに対して、植物系は芳香族分が比較的多く、さらに、石油系A、Bと比較してレジン分の含有量も多いことが明らかとなった。

表－1 配合設計

| アスファルト量 (%) | | 5.0 |
|-----------------------|---------|-------|
| 骨材粒度 (ふるい通過重量百分率%) | 19.0mm | 100.0 |
| | 13.2mm | 97.7 |
| | 4.75mm | 67.1 |
| | 2.36mm | 42.2 |
| | 0.600mm | 27.2 |
| | 0.300mm | 19.3 |
| | 0.150mm | 11.4 |
| | 0.075mm | 7.2 |

表－2 高温カンタブロ試験条件

| | |
|-----------------|--------------|
| 供試体温度(℃) | 60 |
| ロサンゼルス試験機内温度(℃) | 30 |
| ドラム回転数 | 毎分30回転で300回転 |

表－3 再生用添加剤の液物性結果

| 測定項目 | 標準的性状 | 植物系 | 石油系A | 石油系B |
|------------------------------|-------------|-------|------|-------|
| 引火点(℃) | 250以上 | 258 | 312 | 264 |
| 動粘度(mm ² /s, 60℃) | 80-1,000 | 84 | 465 | 86.5 |
| 薄膜加熱質量変化率(%) | ±3以内 | -0.39 | 0.02 | -0.67 |
| 薄膜加熱後の粘度比(60℃) | 2以下 | 1.19 | 1.2 | 1.07 |
| 密度(g/cm ³ , 15℃) | 0.95以上が好ましい | 0.94 | 0.97 | 0.91 |

表－4 再生用添加剤の各成分の割合

| | 組成(%) | | | |
|------|-------|------|------|----------|
| | 飽和分 | 芳香族分 | レジン分 | アスファルテン分 |
| 植物系 | 0 | 76.2 | 23.2 | 0.6 |
| 石油系A | 6.5 | 84 | 9.5 | 0 |
| 石油系B | 78.7 | 14.8 | 5 | 0.9 |

3.2 繰り返し劣化および再生後のアスファルトの性状

3.2.1 繰り返し劣化・再生時の針入度および再生用添加剤の添加量

表－5に針入度70まで繰り返し再生させた際の再生用添加剤の添加量を示す。添加量は植物系が最も少なく、石油系B、石油系Aの順に添加量が増加した。また、いずれの再生用添加剤もアスファルトの再生回数が増える毎に添加量が増大した。

図－2に繰り返し試験時の針入度の変化を示す。針入度20を目標として促進劣化させたが、繰り返し回数が増すごとに、針入度が下がらず、硬くなりにくくなる傾向がみられたが、再生用添加剤の種類による差異は見られなかった。

3.2.2 軟化点

図－3に劣化・再生アスファルトの軟化点を示す。いずれの再生用添加剤の場合でも、劣化により軟化点が大きく増加し、再生することで軟化点が低下するが、劣化・再生回数が増えると軟化点が増加する傾向がみられた。また、石油系Bは劣化3回目で顕著に軟化点が増加した。石油系Aと植物系は概ね同等の結果であり、植物系は石油系Aと同様に軟化点の回復効果が高いことが示された。

3.2.3 伸度

図－4に劣化・再生アスファルトの伸度を示す。石油系Aは再生1回目で伸度が100cmまで回復するが、石油系Bは回復効果が低かった。一方で、植物系は、石油系Aほどのではないが石油系Bよりも伸度の回復効果があることが確認された。なお、再生1回目で伸度が100cmまで回復しなかったのは、新アスファルトを加えず、再生用添加剤のみで再生した影響によるものである。

各試験の結果から、植物系再生用添加剤は芳香族分の多い再生用添加剤と同等程度の再生性能を有していることがわかった。

3.3 再生アスファルト混合物の性状

3.3.1 性状試験

表－6に再生アスファルト混合物の性状試験結果を示す。植物系再生用添加剤を使用して作製した再生アスファルト混合物は、いずれの基準値も満足することを確認した。

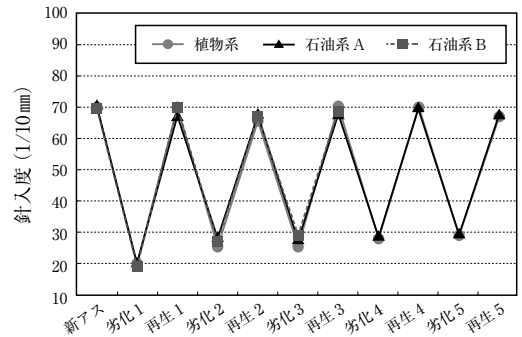
3.3.2 圧裂試験

(1) 常温下での圧裂試験結果

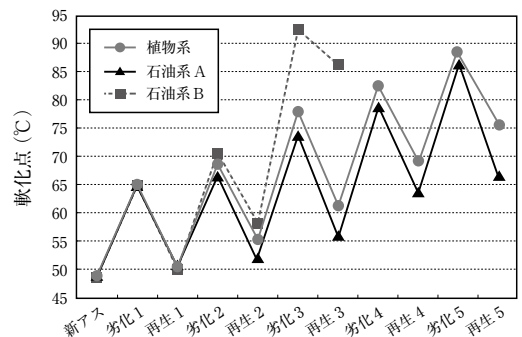
25℃における圧裂試験結果を図－5に示す。植物系は、圧裂強度が石油系Aと同等程度だった。また、圧

表－5 繰り返し再生時の各再生用添加剤の添加量

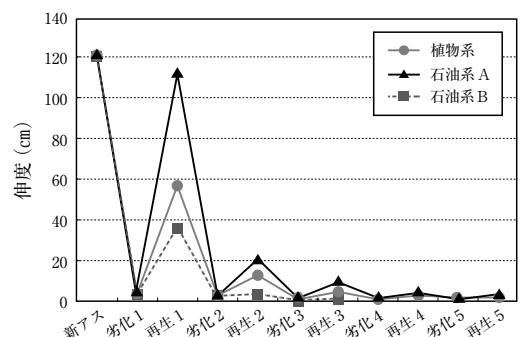
| | 添加率 (%) | | | | |
|------|---------|------|------|------|------|
| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 |
| 植物系 | 10.9 | 10 | 12.7 | 14.8 | 15 |
| 石油系A | 15.8 | 14 | 13.5 | 15.7 | 17.7 |
| 石油系B | 14 | 14.4 | 16.2 | － | － |



図－2 繰り返し試験時の針入度



図－3 繰り返し試験時の軟化点

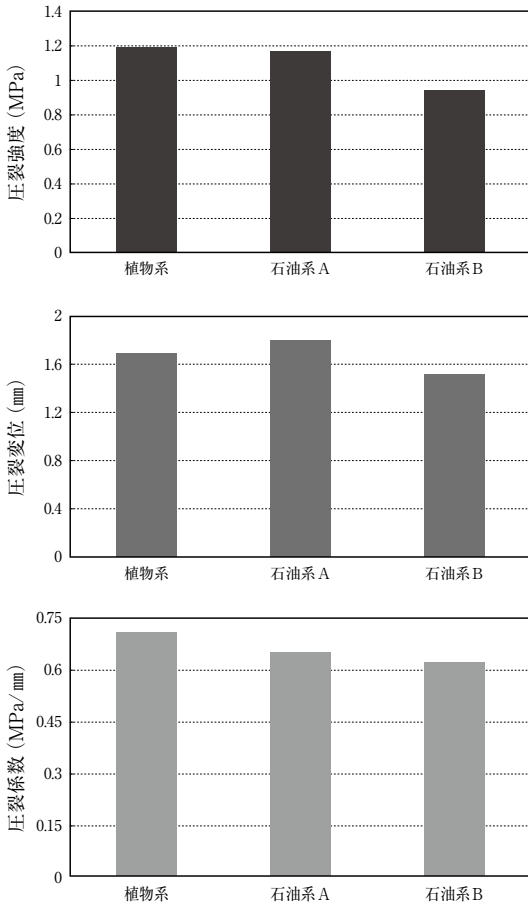


図－4 繰り返し試験時の伸度

裂変位は石油系A＞植物系＞石油系Bの傾向となり、圧裂係数は植物系が石油系A、Bに比べやや高くなったものの、同等程度の性状だった。

表－6 再生アスファルト混合物の性状試験結果

| | 密度平均 (g/cm ³) | 空隙率 (%) | 飽和度 (%) | マーシャル 安定度 (kN) | フロー値 (1/100cm) | 水浸マーシャル 安定度 (kN) | 残留安定度 |
|--------------------------|------------------------------|---------|---------|-------------------|-------------------|---------------------|-------|
| 基準値 | － | 3～6 | 70～85 | 4.9 | 20～40 | － | － |
| 植物系使用 再生アスファルト 混合物 | 2.378 | 4.1 | 73.8 | 14.4 | 27 | 12.6 | 87.7 |



図－5 圧裂試験結果（上：圧裂強度,中央:圧裂変位, 下：圧裂係数）

(2) 圧裂強度比

圧裂強度比（0℃の圧裂強度を60℃の圧裂強度で除したもの）の結果を表－7に示す。圧裂強度比は、値が小さいとひび割れが発生しやすいとされており、過去の報告^{7, 8)}より、圧裂強度比が20程度まで低下すると多くの舗装でひび割れが発生すると考えられている。

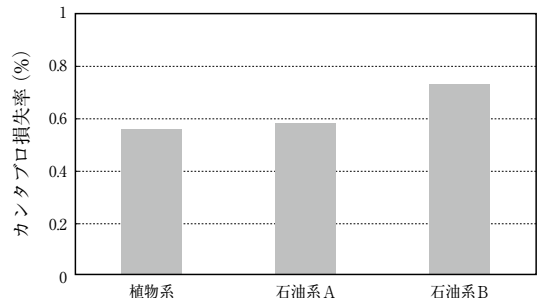
表－7 圧裂強度比

| | 植物系 | 石油系 A | 石油系 B |
|-------|------|-------|-------|
| 圧裂強度比 | 26.0 | 24.8 | 23.5 |

試験結果より、植物系の圧裂強度比は石油系と同様に20以上の値を示しており、性状に問題ないことがわかった。本結果から植物系再生用添加剤を使用した再生アスファルト混合物は、従来の石油系再生用添加剤を用いて作製した再生アスファルト混合物と同等以上の性状を有することがわかり、植物系再生用添加剤の適用性を見出した。

3.3.3 高温カンタブロ試験

高温カンタブロ損失率を図－6に示す。植物系の損失率は1%以下と非常に小さく、石油系 A, B と同等程度の損失率だった。この結果から、植物系で再生した場合でも再生アスファルト混合物の品質は石油系再生用添加剤を用いた場合と同等の性状を有することが分かった。



図－6 高温カンタブロ損失率

4. まとめ

植物由来原料を使用した再生用添加剤を開発し、液物性評価および劣化したアスファルトの繰り返し再生試験による再生性能の評価を行った。その結果、植物系再生用添加剤の液体性は標準性状を満たし、芳香族分の多い再生用添加剤を使用したときと同等程度の再生効果を示すことが分かった。また、植物系再生用添加剤を使用した再生アスファルト混合物の性状についても、十分な物理性状を有することが明らかになった。今後も検討を継続し、植物系再生用添加剤の性能把握、開発に努めていきたい。

— 参考文献 —

- 1) 一般社団法人 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報,2022.
- 2) Amir Tabaković, “Is this the end of the road for bio - inspired road construction materials?”, RILEM Technical Letters, Vol7, 79-87, 2022.
- 3) 公益社団法人日本道路協会,「舗装調査・試験法便覧」, 2019.
- 4) 石油学会規格,「JPI-5S-77-2019 TLC/FID 法によるアスファルト組成分析試験方法」
- 5) 新田弘之, 田湯文将, 川島陽子, 川上篤史,「再生アスファルト混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価方法」, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol.77, No.2 (舗装工学論文集第26巻), I _11- I _19, 2021.
- 6) 公益社団法人日本道路協会,「舗装再生便覧 (平成22年版)」, 2010.
- 7) 建設省関東技術事務所,「昭和56年度試験道路における試験調査報告書」, 建設省, 1982.
- 8) 川上篤史, 新田弘之, 藪雅行, 掛札さくら, 川島陽子,「繰り返し再生したアスファルト混合物への再生用添加剤と再生骨材配合率の影響」, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol.76, No.2 (舗装工学論文集第25巻), I _251- I _259, 2020.

常温施工可能な防水層用補修材

(Asphalt Repair Material for Waterproof Layers that can be Applied at Cold Temperature)

畠 山 慶 吾*・川 上 篤 史**

我が国の舗装ストックは現在100万 km を超える膨大な量に達しており、効率的な維持管理が求められている。現在、橋面舗装の防水層の補修では、グースアスファルト混合物や防水工を施した後に基層の加熱アスファルト混合物を施工しているが、補修費用や養生時間を考慮すると小規模施工では不向きな点がある。そこで、低コストで簡易に施工可能な防水層用補修材を開発した。本報では、開発した補修材の概要、室内および試験施工での評価結果ならびに施工事例を紹介する。

1. はじめに

我が国の舗装ストック量は現在100万 km を超える膨大な量に達している。これらの舗装ストックを適正に維持管理していかなければならないが、近年の舗装事業費は1990年代をピークに減少傾向であり、大幅な増加は期待できない。そのため、限られた予算で維持管理していかなければならず、効率的な維持管理手法の確立は業界全体の課題となっている。舗装の効率的な維持管理手法のひとつに補修材の高度化が挙げられる。補修材は一般的に使い勝手が良いものの、耐久性に関しては加熱アスファルト混合物にくらべて劣るものが多く、仮復旧材として使用されている。補修材の耐久性を向上させ本復旧材として使用することができれば、効率的な維持管理手法のひとつになると考える。

補修材の高度化が望まれるもののひとつに橋面舗装防水層の補修が挙げられる。橋面舗装では防水性の確保が重要となるが、防水機能を有する補修材はなく、グースアスファルト混合物（以下、グース混合物）による補修や防水工を施した後に基層の加熱アスファルト混合物を用いて施工が行われている。しかし、グース混合物で補修する場合、材料を運搬・施工するにはクッカーが必要となるため、小規模補修では施工コストが著しく増加する。また、防水工の施工では養生時間が長いことから規制時間の限られた補修工事には不向きである。そこで、低コストで簡易に施工可能な防水層用の補修材を開発した。

開発した補修材は、単粒度碎石の隙間にバインダを流し込み施工することにより水密性に優れた防水層を構築するものであり、鋼床版だけでなくコンクリート床版にも適用できる。コンクリート床版においては、これまで防水工を施した後に加熱アスファルト混合物が施工されてきたが、近年コンクリート床版が路面からの水の浸入により劣化が促進され土砂化する損傷が見られており¹⁾、コンクリート床版に適用可能なグース混合物が施工され始めている。本材料はこのような箇所の補修にも有効であり、さらに現在加熱アスファルト混合物で補修されている箇所についても水密性を上げることで補修後の耐久性の向上が期待できる。

本報では、開発した防水層用補修材の概要、室内および試験施工での評価結果、ならびに施工事例について紹介する。

2. 開発品の概要

2.1 開発コンセプト

本材料の開発にあたってのコンセプトは以下のとおりである。

- ① 常温で施工可能かつ長期保存が可能であり、小規模施工に適用できる。
- ② グース混合物と同等の防水性能を有する。
- ③ 耐久性を高めたグース混合物（以下、改質グース混合物）と同等の耐久性を有する。
- ④ 床版との接着性を確保できる。

*はたけやま けいご 前田道路株式会社 技術研究所

**かわかみ あつし 国立研究開発法人 土木研究所

⑤鋼床版とコンクリート床版の両方に適用できる。

⑥特別な施工機械を必要としない。

以上の条件を満足する橋面舗装防水層の常温補修材の開発を行った。

2.2 適用技術

本材料は化学反応硬化型のバインダと単粒度碎石（通常5号碎石を使用）を主材料とする常温補修材であり、水添加により早期に強度発現するアスファルト混合物の技術²⁾）を適用・応用した。

本材料は単粒度碎石の間にバインダを充填することで、バインダと碎石が一体となり硬化して水密性に優れた防水層を形成する。施工では、流し込み直前にバインダに硬化材および水を添加混合することで充填に必要な可使時間を確保するとともに、充填後には化学反応により増粘して1時間程度の養生で表層施工が可能となる。硬化前のバインダ粘度は表-1に示すとおりであり、0℃で486mPa・sであるため0～30℃の範囲で十分な流動性が確保できており、振動を加えることなく表面よりバインダを流し込むだけで、骨材間に隙間なく充填できる（写真-1、写真-2）。また、バインダ、硬化材は容器に密閉保管することで現在まで1年の長期保存が可能であることが確認できている。

3. 混合物性状

本材料は母体の骨材として5号碎石もしくは6号碎石を施工厚さに応じて使い分けて使用する。一般的な施工厚さでは5号碎石を使用するため、ここでは5号碎石を使用した検討結果を示す。なお、本材料はバインダ充填後直ちに強度発現を開始し、施工7日で最終強度の約90%に達するため、ここでは主に7日養生したときの性状を示す。

3.1 基本性状

本材料の基本性状は表-2に示すとおりである。本

材料は、一般的なグース混合物の規格値を満足する性状を有するとともに、透水係数も不透水である。また、近年施工されているコンクリート床版への適用を考慮した新しいグースアスファルト混合物（Bridge Levelling Guss Asphalt）の規格も満足し、改質グース

表-1 バインダ粘度

| バインダ温度 ℃ | 0 | 10 | 20 | 30 |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| 粘度 mPa・s | 486 | 386 | 272 | 152 |



写真-1 流し込み状況

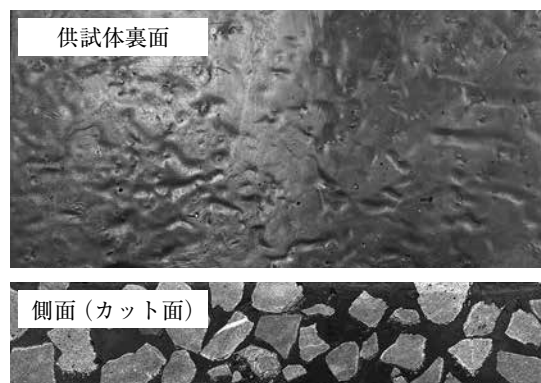


写真-2 充填状況

表-2 基本性状例および規格値

| 項目 | 結果 | | 規格値 | 改質グース混合物の一般的な性状 |
|-----------------------------------|----------------------------------|-------|----------------------|-----------------|
| 動的安定度 (60℃) 回/mm | 1hr養生*1 | 1,550 | 500以上*2 1,000以上*3 | 800～2,100 |
| | 7日養生 | 2,010 | | |
| 貫入量 (40℃) mm | 1.3 | | 1～6*2 | 1.4～2.5 |
| 曲げ破断ひずみ (-10℃) × 10 ⁻³ | 15.2 | | 8.0以上*2 | 10.4～14.3 |
| 透水係数 cm/s | 1 × 10 ⁻⁷ 以下 (不透水) | | — | — |

注) *1 常温(20℃)の本材料を用いて供試体作製直後に60℃の恒温室で1hr養生して試験を実施

*2 規格値はNEXCO設計要領第一集舗装建設編(令和2年7月)を参照

*3 中日本高速道路(株)設計・施工管理要領 設計施工マニュアル(令和2年7月)BLGの概要を参照

混合物と比較しても同程度の塑性変形抵抗性とたわみ追従性を有している。

また、1 hr 養生時の動的安定度は1,550回／mmであり、1 hr 程度養生すれば交通開放可能な強度に達することがわかる。

3.2 ひび割れ抵抗性

本材料のひび割れ抵抗性を評価するために、試験温度0℃で繰り返し曲げ試験を行った。結果を図－1に示す。

本材料の破壊回数は通常のグース混合物よりも大きく、改質グース混合物と同程度であった。このことから、本材料は高いひび割れ抵抗性を有していることがわかる。

4. 接着性

本材料は常温で施工するため、熱溶解で接着するアスファルト系接着剤を用いた場合には十分な接着性が得られないことがある。そのため2液硬化型の樹脂系接着剤の適用を検討した。試験結果は表－3に示すとおりであり、樹脂系の接着剤を使用することで規格値を満足する接着性が得られることが確認できた。

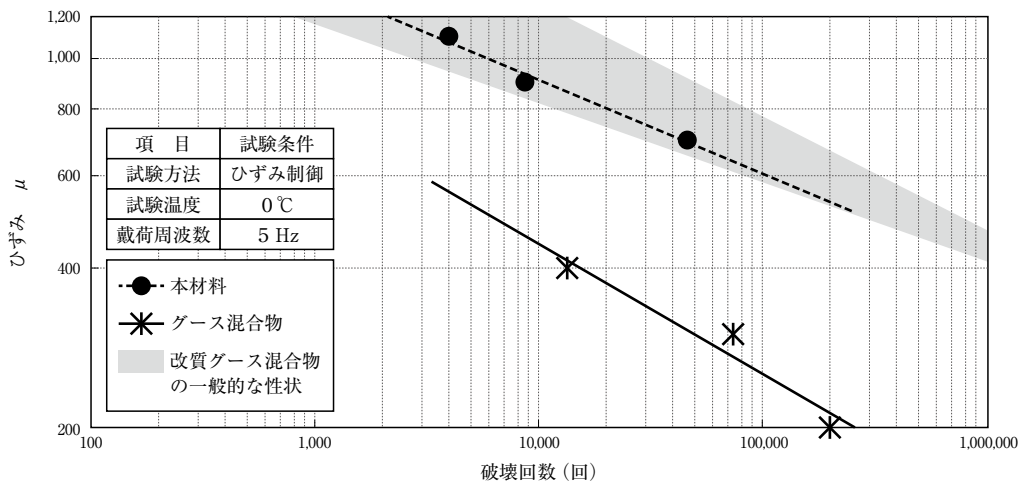
5. コンクリート床版への適用性

コンクリート床版は鋼床版とは異なり床版の水分を完全に除去することは困難であり、残存する水分の量によっては、接着強度に影響を与えることがある。そこで、コンクリート床版を模したコンクリート平板を用意し、その含水状態を変化させて、その時の接着性を引張試験で検証した。供試体は、乾燥・湿潤・表乾状態にしたコンクリート平板に、鋼床版と同様の樹脂系接着剤を塗布して本材料を打ち継ぎ作製した。

表－4に引張試験結果を示す。コンクリート平板が湿潤状態の場合には引張強度が低く、規格値を満足することができないが、表乾状態であれば規格値を満足することから、表面が濡れている場合にはウエス等で水分を拭き取り表乾状態とすることで接着性を確保できることがわかった。また、コンクリート平板の含水状態に関わらず本材料の打ち継ぎ時にプリスタリングの発生は見られなかった。

6. 試験施工による評価

本材料の耐久性を評価するために（国研）土木研究所舗装走行実験場に模擬コンクリート床版を設け、試験施工を行った。



図－1 繰り返し曲げ試験結果

表－3 接着性の評価

| 試験温度 | 引張強度 (N/mm ²) | | せん断強度 (N/mm ²) | |
|------|---------------------------|-------|----------------------------|--------|
| | 試験値 | 規格値* | 試験値 | 規格値* |
| 23℃ | 0.90 | 0.6以上 | 0.26 | 0.15以上 |
| -10℃ | 1.45 | 1.2以上 | 1.10 | 0.8以上 |

注) * 道路橋床版防水便覧 (2007.3)

表－4 引張試験結果

| 項 目 | | コンクリート平板の含水状態 | | | |
|------------------------------|------|---------------|------|------|--------|
| | | 乾燥状態 | 湿潤状態 | 表乾状態 | 規格値* |
| 引張強度 (N/mm ²) | 23℃ | 0.93 | 0.21 | 0.81 | 0.6 以上 |
| | -10℃ | 1.64 | 0.19 | 1.32 | 1.2 以上 |

注) * 道路橋床版防水便覧 (2007.3)

6.1 施工概要

本試験施工は、(国研) 土木研究所との共同研究によるものであり、コンクリート床版上に施工した改質アスファルト舗装の補修材としての適用性を評価したものである。本試験施工では基層の改質アスファルト舗装の一部を本材料で打ち換え、表層施工後に荷重車を走行させて本材料の耐久性を検証した。

試験施工の概要を表-5に、本材料の施工直後の仕上がり状況を写真-3に示す。本材料は、骨材に5号碎石および6号碎石をそれぞれ使用した工区を設け、①延長1 m×幅1 m (輪通過部)、②延長1 m×幅5 m (全幅員) に切り出した区画内を4 cm厚さで施工した。

また、本材料は小規模施工への適用および施工に必要な数量管理の容易さを考慮して0.5㎡を施工できる量を1セットに小分けして、補修面積と厚さから必要量を準備した。使用材料および施工フローは図-2に示すとおりである。床版面に接着剤を塗布した後に碎石を敷きならしてバインダを注入する。本材料の施工後には1 hr養生し、表面が十分強度発現していることを確認した後に表層の改質アスファルト混合物を施工した。なお、本材料のバインダ攪拌には一般的なハンドマゼラを用い、その他特殊な施工機械は用いず施工を行った。

表-5 試験施工の概要

| | |
|-------|--|
| 施工場所 | (国研) 土木研究所 舗装走行実験場 |
| 実験場概要 | 半径100mの円形、幅員5 m、横断勾配7 % |
| 舗装構成 | 表層・基層：改質アスファルト混合物 基層の部分補修：本材料 (5号碎石または6号碎石を使用) |
| 補修規模 | ①延長1 m×幅1 m (輪通過部) ②延長1 m×幅5 m (全幅員) |

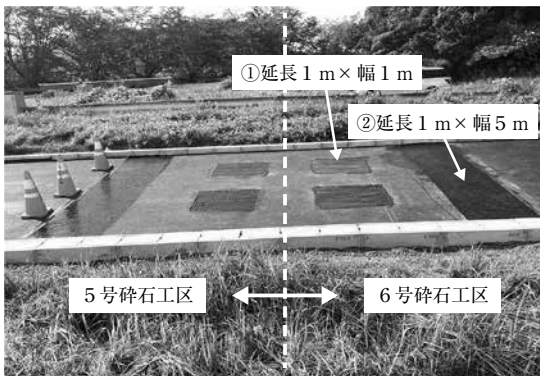


写真-3 本材料の仕上がり状況

6.2 供用性

本試験施工工区にて荷重車を走行させ、供用性の検証を行った。供用性はわだち掘れ量で評価した。49kN換算輪数で55万輪 (N5交通量区分の約5年分) の走行完了時の路面状況を写真-4に、路面の横断形状の測定結果の一例を図-3に示す。なお、わだち掘れ量は所定の走行輪数毎に横断形状をMRPで測定して初期値から差し引くことで求めた。

横断形状の測定の結果、各工区とも最初の5万輪通過時に2～3 mmのわだち掘れが発生しているが、それ以降のわだち掘れの進行は少なく、55万輪走行時点では3～5 mm程度のわだち掘れ量であり、問題ないレベルであると判断できる。計測したわだち掘れ量は、表

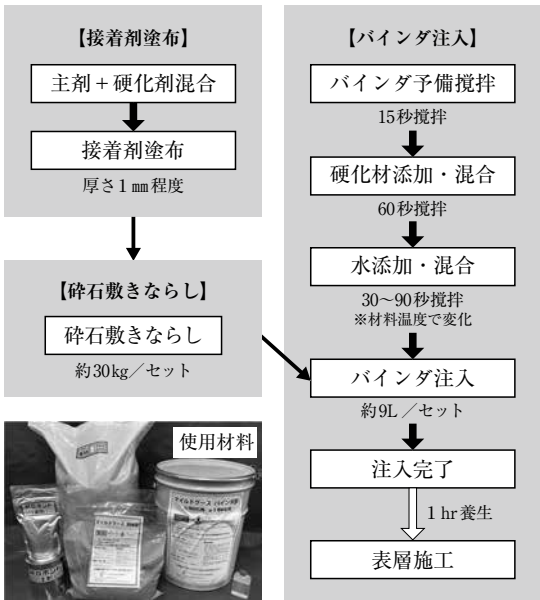


図-2 使用材料・施工フロー

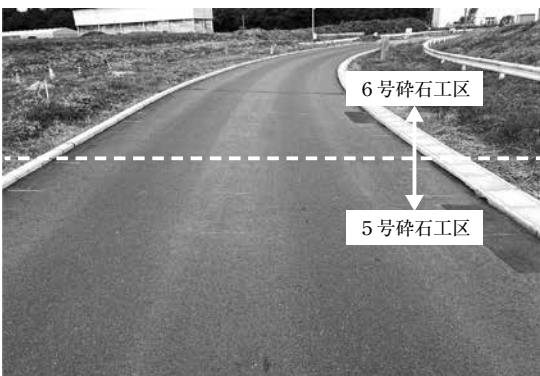


写真-4 供用状況

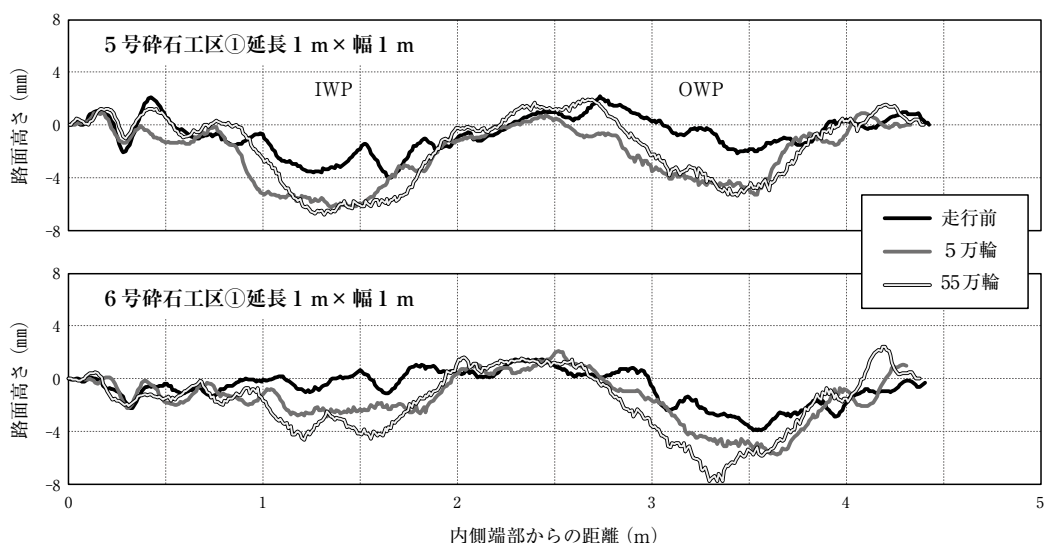


図-3 路面の横断形状測定結果

層混合物も含めたわだち掘れの合計のため、表層の改質アスファルト混合物も数ミリ程度わだち掘れが発生する考えると、本材料で補修した基層部のわだち掘れ量は更に小さくなると推測できる。また、ひび割れや骨材飛散などもなく良好な路面状況であった。

試験施工の結果、良好な状態を維持していることが確認でき、本材料の床版基層部の補修材としての有効性を確認することができた。



写真-5 施工前の破損状況

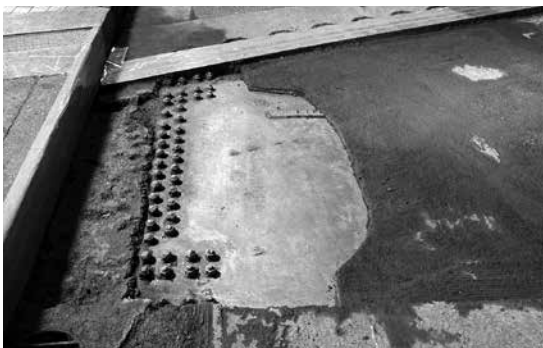


写真-6 損傷箇所（混合物）撤去後の状況

7. 施工事例

本材料は、これまでの検討で良好な結果が得られ、現在実用化に至っている。以下に、橋梁部（鋼床版）における施工事例を示す。

(1) 既設舗装の損傷状況

補修箇所は神奈川県横須賀市内の道路橋であり、隣に路線バスの営業所があるバス路線のため、頻繁に大型バスの往来が確認された。既設舗装の状態は写真-5に示すように舗装の寄りによって輪通過部の舗装の厚さが薄くなっており、亀甲状のひび割れからは細粒分の吹出も確認された。

(2) 施工状況

表層および基層の損傷箇所を撤去し（写真-6）、本材料の施工を行った。施工の概要は表-6に示すとおりである。

本材料の接着剤塗布からバインダ充填までの1セットの施工時間は5～10分程度であった。また、バインダ充填時の下流へのダレはほとんど見られず、問題な

表-6 施工の概要

| 項目 | 内容 |
|--------|--------------------------|
| 施工年月 | 令和4年6月23日 |
| 本材料施工量 | 延長1.6m×幅1.0m (t=30～40mm) |
| 本材料使用量 | 3セット |

く仕上げる事ができた。養生1hr後には表層の加熱アスファルト混合物の施工を行った。

（3）供用状況

供用6ヶ月の状況を写真-7に示す。施工から一夏を過ぎたが、夏場に懸念される流動による破損、その他本材料に起因する路面性状の変化は見られず良好な状態を維持していることが確認できた。



写真-7 供用6ヶ月後の状況

8. 環境保全効果・コスト

本材料は小規模補修に適しているため、グース混合物を用いて補修した場合と比較して材料ロスが少なく、CO₂排出量削減効果にも期待が持てる。表-7はポットホールの補修に本材料とグース混合物を用いた場合の材料の製造・運搬におけるCO₂排出量の試算例を示している。1回の施工で合計1㎡のポットホールを補修する場合、本材料を用いることで約1,100kgのCO₂排出量を削減することができる。これは杉の木80本分の年間吸収量（杉の木1本当りの吸収量：14kg-CO₂と

して算出）に相当し、補修面積が大きくなれば削減量は低下するものの、高いCO₂排出量削減効果があると言える。また、本材料の材料コスト（製造・運搬費を含む）は、通常グース混合物と比較した場合、現場の条件により異なるが、3㎡以下の施工量であれば本材料を使用した方が経済的に優位となる。

9. おわりに

橋面舗装防水層への補修材として本技術を適用することにより、小規模補修においてはグース混合物に比べて環境面および材料コストで優位であることを確認した。これまで、補修コストの増大などの問題から適切な補修を行えなかった箇所において、本材料は低コストで耐久性を確保できる材料であり、膨大な社会資本ストックを抱える我が国にとって、効率的な維持管理の一助になり得ると考える。

今後は、長期供用性を検証するとともに、さらなる品質の向上およびコスト縮減を図り、維持管理の合理化・効率化に寄与していきたいと考える。

— 参考文献 —

- 1) 寺田ほか：床版損傷が発生した橋面舗装の実態調査、舗装工学論文集75巻2号、pp.I-201-I.207、2019.12
- 2) 畠山ほか：小規模補修工事に対応したスラリー状常温アスファルト混合物の開発、道路建設 No.766、pp76-82、2018.3
- 3) 公益社団法人日本道路協会：舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック（2014）

表-7 CO₂排出量試算例

| 項 目 | 本材料 | グース混合物 |
|------------------|---|--|
| 1㎡当りの使用量 | 2セット | 3t（最小製造ロット） |
| 材料（上流スコープ3） | 9.96kg-CO ₂ /㎡ | 152.28kg-CO ₂ /㎡ |
| 製造燃料・動力（スコープ1・2） | 1.38kg-CO ₂ /㎡ | 99.21kg-CO ₂ /㎡ |
| クッキング運搬（下流スコープ3） | 無し | 879.9kg-CO ₂ /㎡ |
| 合 計 | 約11kg-CO ₂ /㎡ | 約1,130kg-CO ₂ /㎡ |
| 試算条件 | 材料（バインダ+粗骨材）： 4.98kg-CO ₂ /セット ³⁾ 製造電力：0.69kg-CO ₂ /セット 製造条件：恒温槽5hr、使用量3.2kw （1回当たり10セット製造） 電力の原単位：0.433kg-CO ₂ /kwh | 材料：運搬距離45～155km（材料毎） ³⁾ バインダの原単位：StAsで代用 ³⁾ 製造温度：200℃製造 温度上昇に伴う燃費：通常+2L/t燃費上昇 クッキング運搬時間：5hr クッカ車燃費：42L/h 軽油原単位：4.19kg-CO ₂ /L ³⁾ |

注）＊本材料に使用する添加材は弊社による聞き取り調査結果を含む

埋設ジョイントに適用できる 特殊改質アスファルト混合物について

(Special Polymer Modified Asphalt Mixture Applicable to Buried Joint)

梅 田 泰 裕*

ポリマー改質アスファルトは、重交通路線や長大橋などの特異性のある箇所のアスファルト混合物に使用されており、設計期間中における車両の走行安全性の確保に大きく貢献している。道路橋伸縮装置のひとつである埋設ジョイントとして、特殊改質アスファルト混合物を用いた工法がある。この工法は、走行安全性に加え、車両通行時の振動、衝撃および騒音が抑制できる。本報では、埋設ジョイントと使用されている特殊改質アスファルト混合物（ファルコン）の特徴および施工事例について紹介する。

1. はじめに

アスファルトは、防水材、制振材、防音材、接着剤、塗料、燃料、絶縁材など、多くの用途に使用されている。その中で最も使用されているのが道路舗装であり、アスファルト舗装の上層を担うアスファルト混合物（アスファルト+骨材）、舗装の層間接着材とするためのアスファルト乳剤および道路橋床版の防水材などに用いられている。

アスファルト混合物には、ストレートアスファルト（以下、ストアス）が使用されることが多いが、重交通路線や長大橋などの特異性のある箇所において、ストアスに改質材を添加し、塑性変形抵抗性や摩耗抵抗性、たわみ追従性などを向上させたポリマー改質アスファルト（以下、改質アスファルト）が使用されている。ここで、道路橋伸縮装置のひとつである埋設ジョイントとして、特殊な改質アスファルトを用いたアスファルト混合物（以下、特殊改質アスファルト混合物）を用いた工法が開発されており、全国の橋梁で施工実績を増やしている。

本報では、埋設ジョイントに求められる性能を解説するとともに、特殊改質アスファルト混合物（ファルコン）の特徴および施工事例について紹介する。

2. 道路橋伸縮装置と埋設ジョイントの概要

道路橋伸縮装置（以下、ジョイント）は、道路の土工部と橋梁の境界部や隣接する橋梁上部構造同士の

継目部に設けられるものである。ジョイントには、温度変化やコンクリートの乾燥収縮およびクリープ、活荷重などによって上部構造端部に変位が生じた場合、その変位に追従し、境界部や継面部の平坦性を確保するという役割がある。

ジョイントの分類を図-1に示す。ジョイントは、その構造により床版遊間部で輪荷重を支持する荷重支持型と支持しない突合せ型、特殊混合物を使用して舗装が連続になる埋設型（以下、埋設ジョイント）の3種類に分類される¹⁾。

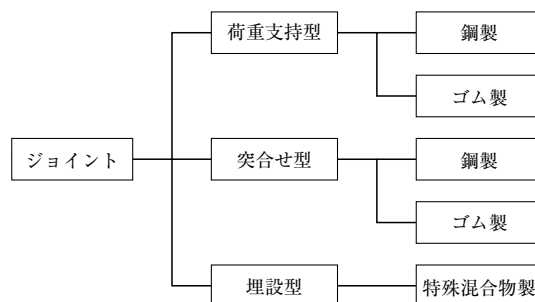


図-1 ジョイントの分類

一般に伸縮量が多い橋梁の場合、床版遊間も大きくなるため荷重支持型、伸縮量が比較的小さい中小規模の橋梁には突合せ型や埋設ジョイントが使用される場合が多い。

*うめだ やすひろ ヒートロック工業株式会社 開発事業部製品開発課



写真-1 荷重支持型のジョイント



写真-2 突合せ型のジョイント



写真-3 埋設ジョイント

埋設ジョイントは、床版遊間部をシール材などで止水処理し、特殊改質アスファルト混合物を表層もしくは基層まで設置して、橋梁の上部構造端部の伸縮および変位を吸収・分散する構造としている。鋼材やゴムが路面に露出せず、路面の連続性が確保できるため、車両通行時に振動や衝撃、騒音が抑制されることから、橋梁の近隣住民による騒音振動クレームの対策として使用されている。埋設ジョイントの構造は、主に特殊改質アスファルト混合物と遊間上に設置するジョイントフレームもしくは遊間プレート等を組み合わせたものとなっている。

3. ファルコンの特徴

ファルコンは、埋設ジョイントにおいて床版遊間部の表層および基層に用いる特殊改質アスファルト混合物であり、以下に示す特徴がある。

- ①グースアスファルトと同等以上の水密性・たわみ追従性を有する。
- ②低温特性に優れる改質アスファルトを使用している。
- ③特殊改質アスファルト混合物を2～5cm程度の塊

状で袋詰めしているため、簡易的に溶融して施工できる。

- ④転圧を必要とせず、グースアスファルトと同様の流し込み施工ができる。

埋設ジョイントで使用するファルコンの種類を表-1に示す。SJ-LE, SJ-HE, SJ-FEの3種類を、橋梁の条件によって使い分けている。

表-1 ファルコンの種類と用途

| 種 類 | 用 途 |
|-------|---------------|
| SJ-LE | 東日本・伸縮量の大きい箇所 |
| SJ-HE | 西日本・伸縮量の小さい箇所 |
| SJ-FE | 交通量の多い箇所 |

4. ファルコンの構成材料

4.1 バインダ

ファルコンに使用している特殊改質アスファルトのバインダ性状を表-2に示す。このバインダには、ストアスに熱可塑性エラストマーなどを高濃度で添加しており、ポリマー改質Ⅱ型アスファルト（以下、改質Ⅱ型）より軟化点が高く、脆化点が低いという特性が

ある。また、交通量の多い箇所で使用しているSJ-FEのバインダは塑性変形抵抗性を高めるため、より多くの改質材を添加しており、SJ-LEやSJ-HEのバインダと比べると軟化点が高く曲げ仕事量が大いことを特徴としている。

4.2 骨材

ファルコンに用いる骨材の合成粒度の一例を表-3に、粒度曲線を図-2に示す。なお、ファルコンの配合は、伸縮性能を高めるため、意図的にアスファルト量を多く設定している。

表-2 バインダ性状

| 項目 | | SJ-LE SJ-HE | SJ-FE | 改質 Ⅱ型 |
|----------|----------|----------------|-------|----------|
| 針入度 | 1/10mm | 62 | 41 | 55 |
| 軟化点 | ℃ | 102.0 | 112.5 | 60.5 |
| 曲げ仕事量 | kPa -20℃ | 305 | 452 | 45 |
| 曲げスティフネス | MPa -20℃ | 4 | 8 | 418 |

表-3 合成粒度の例

| ふるい目 | SJ-LE | SJ-HE | SJ-FE |
|-------------|-------------|-------|-------|
| | 通過質量百分率 (%) | | |
| 19.0mm | 100 | 100 | 100 |
| 13.2mm | 100 | 100 | 100 |
| 4.75mm | 61.7 | 65.5 | 63.8 |
| 2.36mm | 42.6 | 44.2 | 31.6 |
| 0.6mm | 31.8 | 32.6 | 17.7 |
| 0.3mm | 16.3 | 20.8 | 12.0 |
| 0.15mm | 7.1 | 12.7 | 7.4 |
| 0.075mm | 5.4 | 9.9 | 6.0 |
| アスファルト量 (%) | 14.5 | 10.7 | 13.0 |

5. ファルコンの性能

5.1 混合物の性状

ファルコンの混合物性状を表-4に示す。比較としてストアス、改質Ⅱ型の密粒度アスファルト混合物(13)の試験結果を併記した。ファルコンは、アスファルト量を多めに設定しているため、ストアスや改質Ⅱ型より塑性変形抵抗性には劣るものの、曲げ脆化点が30℃程度も低く、曲げ破断ひずみが大いため、ひび割れ抵抗性に優れる。また、不透水(透水係数0)であることから、水密性に優れる混合物である。

5.2 伸縮耐久性

一日の気温の変化によって生じる桁の伸縮に対する変形追従性を評価するため、実際に施工するサイズを想定した実物大供試体を作製し、横目地に対する伸縮耐久性試験を実施している。

(1) 評価方法

伸縮耐久性試験機には自社製のジョイントテスターを使用した。ジョイントテスターの外観を写真-4に、

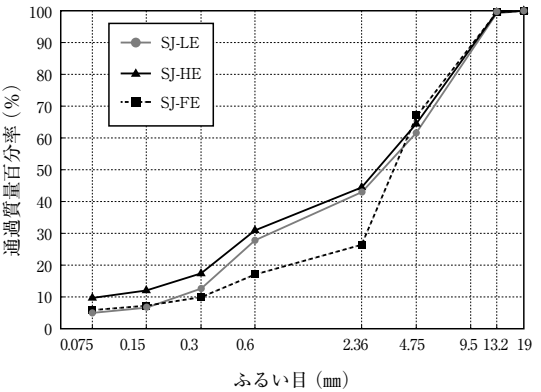


図-2 粒度曲線

表-4 混合物の性状

| 種類 | | SJ-LE | SJ-HE | SJ-FE | 密粒度アスファルト 混合物 (13) ①※ ¹ | 密粒度アスファルト 混合物 (13) ②※ ² | |
|--------------|---------|--------------------|-------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| 混合物 | 密度 | g/cm ³ | 2.100 | 2.260 | 2.120 | 2.354 | 2.357 |
| | アスファルト量 | % | 14.5 | 10.7 | 13.0 | 5.5 | 5.5 |
| | 空隙率 | % | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 4.0 | 4.2 |
| マーシャル試験 | 安定度 | kN | 2.1 | 5.6 | 9.5 | 8.5 | 9.2 |
| | フロー値 | 1/100cm | 146 | 140 | 144 | 30 | 29 |
| ホイールトラッキング試験 | 動的安定度 | 回/mm | 150 | 240 | 1100 | 600 | 5000 |
| ラベリング試験 | すり減り量 | cm ³ | 0.042 | 0.064 | 0.054 | 1.30 | 0.64 |
| 曲げ試験 | 曲げ破断ひずみ | × 10 ⁻³ | 67.9 | 54.5 | 127.1 | 3.3 | 4.3 |
| | 曲げ脆化点 | ℃ | -30 | -25 | -35 | 5 | 0 |
| 加圧透水試験 | 透水係数 | cm/s | 0 | 0 | 0 | 7.5 × 10 ⁻⁶ | 3.4 × 10 ⁻⁶ |

※1 ストレートアスファルト 60-80を使用 ※2 ポリマー改質アスファルトⅡ型を使用

仕様を表-5に示す。この試験機は、供試体を油圧シリンダにて移動量およびポンプ油圧・繰り返し回数を設定値まで往復させ、その時の油圧シリンダの圧力の変化を記録することができる。

①供試体の作製方法

供試体(400×500×120mm)は「NEXCO 試験方法 437-2011埋設ジョイントの実物大供試体試験方法」に準拠して作製した。

②試験条件

伸縮耐久性試験の条件を表-6、試験状況を写真-5に示す。伸縮量は、1日の変位量を参考に任意に設定して試験を行った。伸縮回数は、対応年数を15年とし、6000回(15年×365日÷6000回)²⁾とした。



写真-4 ジョイントテスターの外観

表-5 ジョイントテスターの仕様

| | |
|------------|------------------|
| 試験機サイズ | 3350×1300×1570mm |
| 駆動 | 油圧シリンダ |
| 電源 | 三相200V |
| 水平移動の最大速度 | 120mm/min |
| 伸縮量の調整範囲 | 0～200mm |
| 垂直移動の最大速度 | 20mm/s |
| 垂直移動量の調整範囲 | 0～70mm |

表-6 伸縮耐久性の試験条件

| | |
|-------|---------------|
| 項目 | 試験条件 |
| 供試体寸法 | 400×500×120mm |
| 試験温度 | 15±5℃ |
| 試験速度 | 90mm/min |
| 伸縮回数 | 6,000回 |
| 伸縮量 | ±10mm (SJ-LE) |
| | ±6mm (SJ-HE) |
| | ±6mm (SJ-HE) |

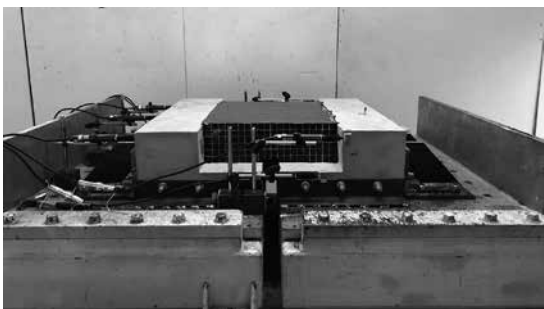


写真-5 伸縮耐久性の試験状況

(2) 評価結果

各ファルコンの結果を表-7に示す。改質Ⅱ型混合物は伸縮回数1回でコンクリート床版との界面に剥離が見られたが、ファルコンはすべての種類において6,000回でもコンクリート床版との界面の剥離やクラック等の損傷は認められなかった。この結果は、ファルコンの優れた伸縮耐久性を示すものである。

表-7 試験後の供試体状況

| 種類 | 試験後の供試体状況 |
|--------------------|--------------|
| SJ-LE | 界面剥離やクラック等なし |
| SJ-HE | 界面剥離やクラック等なし |
| SJ-FE | 界面剥離やクラック等なし |
| 改質Ⅱ型混合物 (密粒度13) | 伸縮回数1回で界面剥離 |

5.3 せん断耐久性

ジョイントは通常、横目地部に設置されるが、床版取替工事等を行った場合、縦目地が設けられることがある。縦目地部には、桁のたわみによる上下せん断力が作用する。隣接する桁のたわみの差によるせん断耐久性を評価するため、実物大供試体により、せん断耐久性試験を実施している。

(1) 評価方法

①供試体の作製方法

供試体(400×500×120mm)は伸縮耐久性試験と同様、「NEXCO 試験方法 437-2011 埋設ジョイントの実物大供試体試験方法」に準拠して作製した。

②試験条件

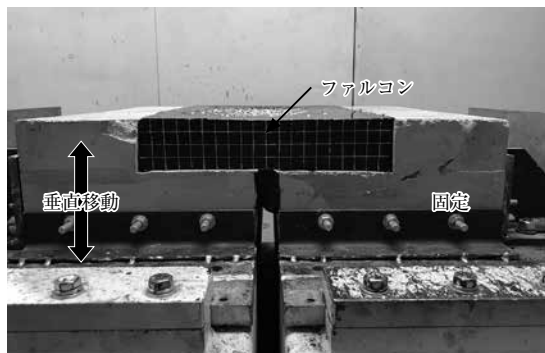
実物大供試体によるせん断耐久性試験の条件を表-8、試験状況を写真-6に示す。

(2) 評価結果

各ファルコンの結果を表-9に示す。改質Ⅱ型混合物は垂直移動回数2回でコンクリート床版との界面に剥離が認められたが、ファルコンは種類によらず、移

表－8 セン断耐久性の試験条件

| 項目 | 試験条件 |
|--------|-------------------|
| 供試体寸法 | 400 × 500 × 120mm |
| 試験温度 | 15 ± 5℃ |
| 試験速度 | 1.5mm/s |
| 垂直移動回数 | 1,000回 |
| 移動量 | 20mm |



写真－6 セン断耐久性の試験状況

表－9 試験後の供試体状況

| 種類 | 試験後の供試体状況 |
|--------------------|---------------|
| SJ-LE | 界面剥離やクラック等なし |
| SJ-HE | 界面剥離やクラック等なし |
| SJ-FE | 界面剥離やクラック等なし |
| 改質Ⅱ型混合物 (密粒度13) | 垂直移動回数2回で界面剥離 |

動量20mm、垂直移動回数1,000回でコンクリート床版との界面の剥離やクラック等は認められず、セン断に対する耐久性が確保されていた。この結果から、ファルコンは、セン断耐久性にも優れた混合物であることが伺える。

5.4 止水性

供用時の止水性を評価するため、実物大供試体を用いて水張り試験を実施している。

(1) 評価方法

止水性は5.2および5.3で行った試験後の供試体の上に堰を設置し、その中に水を張り、試験中の損傷や24時間後の漏水の有無を評価した。

①供試体の作製方法

5.2および5.3で行った試験後の供試体に10mmの引張を行った状態で上に堰を設置し、10cmの水張りを行った。堰は「NEXCO 試験方法 437-2011 埋設ジョイントの実物大供試体試験方法」の水張り試験

に準拠して作製した。

②試験条件

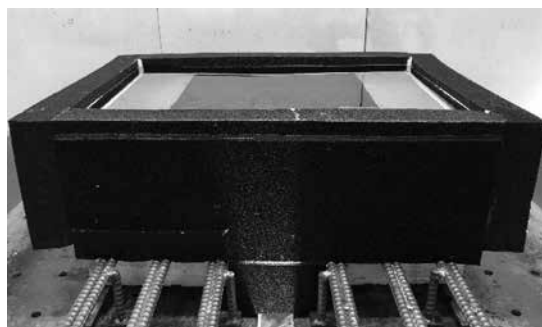
実物大供試体による止水試験の条件を表－10、試験状況を写真－7に示す。

(2) 評価結果

ファルコンは、すべての種類において、引張量10mm、24時間後において損傷が認められず、試験後の漏水もないことから、止水性にも優れた混合物といえる。

表－10 止水試験の条件

| 項目 | 試験条件 |
|-------|-------------------|
| 供試体寸法 | 400 × 500 × 120mm |
| 試験温度 | 15 ± 5℃ |
| 試験時間 | 24h |
| 引張量 | 10mm |



写真－7 止水試験の状況

6. 施工方法

ファルコンを使用した埋設ジョイントの施工方法を下記に示す。施工状況は写真－8～13に示すとおりである。

①はつり・清掃

- 施工部をはつり、清掃を行う。ワイヤーブラシ等でプライマーを塗布する面のゴミ、ほこり、粉塵を除去する。

②二次止水材の設置

- 遊間部に二次止水材を設置する。

③専用プライマーの塗布

- 専用プライマーを0.5L/㎡となるように塗布する。

④ファルコンの溶融

- ファルコンを専用の溶融機FCクッカーで溶融する。

⑤舗設

- ファルコンを舗設部に投入し、バーナーコテで表面を均す。



写真-8 清掃状況



写真-9 二次止水材の設置状況



写真-10 プライマーの塗布状況



写真-11 溶融状況



写真-12 舗設状況



写真-13 ならし状況

7. 施工事例

重交通箇所や縦目地箇所でファルコンを用いた埋設ジョイントを適用した事例とその供用状況を以下に紹介する。

7.1 重交通路線への適用事例

福岡県内の国道で大型車交通量（一方向）が10,000台／日以上のある区間である。ファルコンSJ-HEを使用し、施工15年経過した状況を写真-14に示す。界面剥離や流動等はなく、良好な状態を維持している。

7.2 縦目地部への適用事例

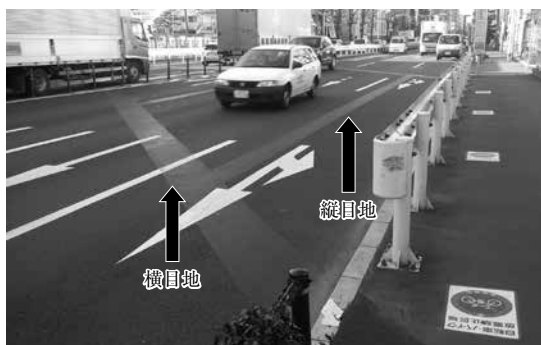
東京都内の都道で、大型車交通量（一方向）が6,000台／日以上のある区間である。横目地だけでなく縦目地がある箇所であり、ファルコンSJ-HEを使用した。施工から9年経過した状況を写真-15、16に示す。界面剥離や流動などもなく、良好な状態を維持している。

7.3 縦横交差目地部への適用事例

福岡県内の県道（大型車交通量（一方向）が400台／日程度）で、横目地と縦目地が交差する箇所に



写真－14 施工15年後の状況



写真－15 施工直後の状況



写真－16 施工9年後の状況

ファルコンSJ-LEを施工した。施工から5年後の状況を、写真－17, 18に示す。界面剥離や流動なども生じておらず、良好な状態を維持している。

8. おわりに

本報では、ファルコンの特徴および施工事例を紹介した。ファルコンは、これまで埋設ジョイントが使用できなかった箇所での振動・騒音の抑制が可能となることから、施工実績が増えている。

近年、橋梁長寿命化が進められており、より耐久性の高いジョイントが求められていることから、ファルコンに使用しているバインダや混合物の配合などを見直して更なる性能向上を図り、道路利用者の安全・安心の向上に貢献したいと考えている。

—— 参考文献 ——

- 1) (一社) 日本道路ジョイント協会, 伸縮装置の設計ガイドライン p8 令和3年6月
- 2) 東・中・西日本高速道路株式会社, NEXCO 試験法第4編 構造関係試験方法 p70 令和元年7月



写真－17 施工直後の状況



写真－18 施工5年後の状況

高精度な自動運転を実現する道路施設『磁気マーカ』

(Magnetic Markers as a Road Infrastructure Bring High Precision Autonomous Driving)

山 本 道 治*・安 藤 孝 幸**

2014年に、米国Googleが発表した自動運転車は世界に衝撃を与えたが、その後すぐにも実現すると目された無人運転は、いまだ広く使用できるレベルには至っていない。このような状況で、Google車のような車載機器のみによる自律航法ではなく、道路とのインフラ協調が改めて注目されている。インフラ協調型の自動運転システムにおいては、高精度な自動運行補助施設（路面施設）が必要で、そのひとつに磁気マーカの活用がある。路面に設置された磁気マーカは、自車位置推定に必要な情報を車両側に提供することで、より安定した自動運転走行を可能にする。本稿では、近年の技術革新で小型化に成功した磁気マーカのシステム概要と、道路への敷設の実際を報告する。

1. はじめに

1.1 磁気マーカ概要

1.1.1 原理と開発の歴史

磁気マーカシステムとは、自動運転において、車両のレーン内位置を検知するため、永久磁石と磁気センサを活用した位置センシング技術である。通常レーン中央に一定のパターンで磁石（磁気マーカと呼ぶ）が敷設され、車両下部に設置した磁気センサがマーカの磁気を検知する（図-1）。こうして得られた路上の位置を手掛かりに、目標とする走行軌跡を描くよう操舵が制御される。図-1にシステムの概要を示す。

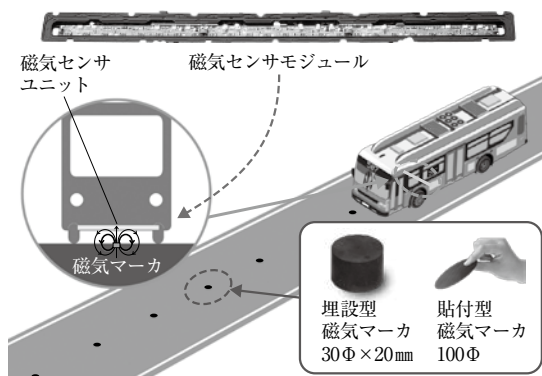


図-1 磁気マーカシステム

このシステムのコンセプトは比較的古く、1990年代に精力的に研究されてきたが¹⁾、当時のセンサ技術が未熟だったため、コストを含めた現実への適用が難しく研究は継続されなかった。

2016年に愛知製鋼株式会社が、過去のシステムに比して3桁低い磁場領域で検出を可能とする技術開発に成功し、位置検出において±5mmという著しい高精度のシステムを提供することが可能となった²⁾。

さらに、近年安価で世界中に普及してきたRFIDチップ（無線タグ）を磁気マーカそのものに付帯することにより、道路の座標情報などとの連携が可能になった。この技術により、磁気マーカシステムは1990年代に提案された磁気マーカシステムから、一歩飛躍したIoT時代の磁気マーカシステムへと進化を遂げた。本システムはGMPS（Global Magnetic Positioning System）の名称で実用化が取り組まれている。

2. 磁気マーカシステムを活用した自動運転技術

2.1 車両制御の概要

磁気マーカは、あくまでマーカ上を通過した時の位置（座標）を与えるのみであるので、車両の基本的な制御システムは別に準備する必要がある。この車両制

*やまもと みちはる 愛知製鋼株式会社

**あんど う たかゆき 愛知製鋼株式会社

御部に正確な位置を引き渡すのが、磁気マーカシステムの役割である。概略の処理を図-2のフローに示す。

磁気マーカの座標から、実際の車両の位置を算出するには、図-3に示すような変換を施す。

2.2 磁気マーカシステムが実現する位置推定精度

自律航法による自動運転で用いられる自転車位置の推定は、GNSS（いわゆるGPS）やLiDARで得る周辺の3次元情報による生成地図によるものが一般的であるが、これらはいずれも位置を与える元となる情報源が非常に遠方にある。これに比して、自転車の真下に信号源を持つ磁気マーカの位置精度がより高くなることは、直観的にも感得されるであろう（図-4）。

実際に、時速60kmでの、高速度カメラで観測した車両幅方向中心軸と、磁気マーカによる推定位置精度の一致度合いを図-5に示す。両者は5mm以内で一致しており、道路や車両のスケールと比較すれば著しい高精度であるといえる。

3. 実証実験の実績

磁気マーカは、自動運転に高精度で安定した性能をもたらすことが特長である。これまで実施された30以上の実証実験の一覧を表-1に示す（次ページ）。日本各地の実証実験においても、特に悪天候やGNSS信号の得難い地域で採用され高い評価を得ている。

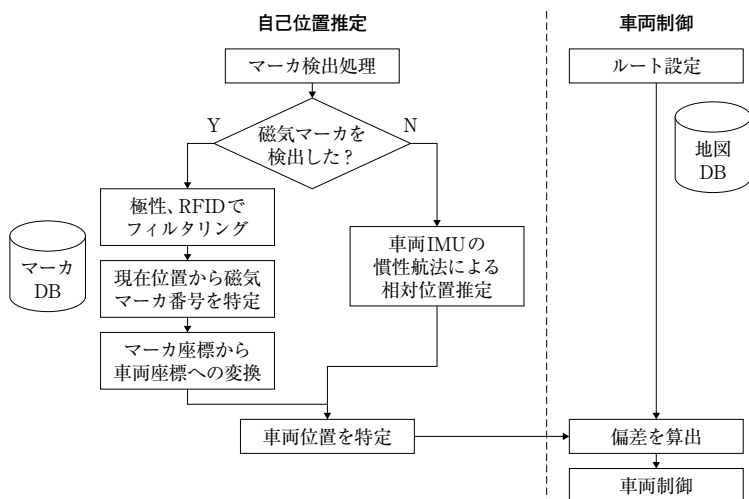
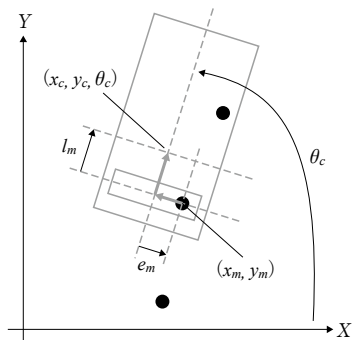


図-2 自動運転の制御フロー



$$x_c = x_m - e_m \sin(\theta_c) + l_m \cos(\theta_c)$$

$$y_c = y_m - e_m \cos(\theta_c) + l_m \sin(\theta_c)$$

x_c : 車両の座標基準点のX座標

x_m : 磁気マーカ座標のX座標

l_m : GMPSセンサ中心から座標基準点への前後オフセット

e_m : GMPSセンサ中心から磁気マーカへの横変位

なお、車両の方位角 θ_c は別途与える

図-3 磁気マーカ座標から車両座標への算出

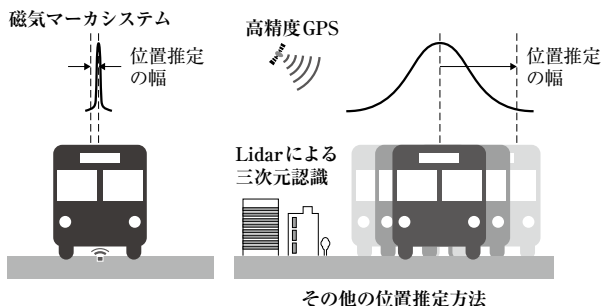


図-4 位置推定精度の比較（概念図であり、図の寸法比率は正確ではありません）

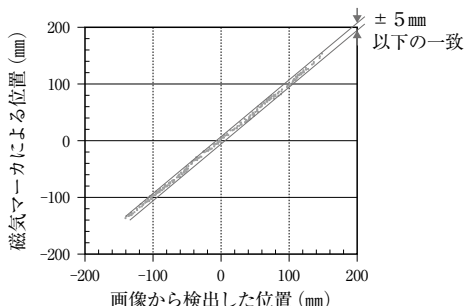


図-5 磁気マーカシステムの位置推定精度

表－１ 磁気マーカシステムを活用した自動運転実証実験

| 時 期 | 地 域 | 場 所 | 主 催 | 特 長 |
|-----------|--------------|-------------------------|----------------|---|
| 2017年11月 | 滋賀県東近江市 | 道の駅「奥永源寺溪流の里」 | 国土交通省 | GPS電波が届かない山間部を走行 |
| 2017年12月 | 沖縄県宜野湾市／北中城村 | | 内閣府 | バス停に正確に幅寄せして停める「正着制御」を実施 |
| 2017年12月 | 北海道大樹町 | 道の駅「コスモール大樹」 | 国土交通省 | 車載カメラの信頼性が十分でない積雪下で走行 |
| 2018年 2月 | 長野県伊那市 | 道の駅「南アルプスむら長谷」 | 国土交通省 | GPS電波が届かないトンネルや道幅4.5mの狭隘クラंकを走行 |
| 2018年 4月 | 福岡県北九州市 | 北九州学術研究都市 | 北九州市 | 最高速度40km/hの安定走行、交差点左折時の制御調整を実施 |
| 2018年10月 | 茨城県日立市 | ひたちBRT 一部路線 | 国土交通省 経済産業省 | 廃線敷利用のバス専用道と公道を走行 |
| 2018年11月 | 長野県伊那市 | 道の駅「南アルプスむら長谷」 | 国土交通省 | GPS電波が届かないトンネルや道幅4.5mの狭隘クラंकを走行 |
| 2019年 1月 | 岩手県陸前高田市 | 大船渡線BRT 竹駒駅周辺 | JR 東日本 | バス専用道での対向車両との交互通行、正着制御を実施 |
| 2019年 1月 | 空港制限区域内 | 羽田空港含む4 空港 | 国土交通省 | 空港制限区域内でGPSが届かないボードブリッジ下を走行 |
| 2019年 2月 | 東京都多摩市 | 多摩ニュータウン | 東京都 | GPSが届かない陸橋下や街路樹に囲まれた公道を走行 |
| 2019年 6月 | 北海道大樹町 | 道の駅「コスモール大樹」 | 国土交通省 | 車載カメラの信頼性が十分でない積雪下で走行 |
| 2019年11月 | 宮城県女川町 | | 宮城県 | シェアリング用の超小型電気自動車を無人走行でステーションに返却 |
| 2019年12月 | 群馬県渋川市 | | 群馬大学 | 路面に設置した磁気マーカからの信号情報などを車が受信する路車間通信を実施しながら走行 |
| 2020年 2月 | 宮城県登米市 | 気仙沼線BRT 柳津－陸前横山 | JR 東日本 | 大型バスが最高速度60km/hで安定走行 |
| 2020年 6月～ | 千葉県柏市 | 東京大学柏キャンパス－TX 柏の葉キャンパス駅 | 柏ITS推進協議会 | 長期間の実施による実用運行を想定した検証 |
| 2020年 7月 | 兵庫県三田市 | | 経済産業省 | 郊外住宅地における生活の質の向上に向けた地域内交通の確保 |
| 2020年 7月 | 滋賀県大津市 | | 経済産業省 | 都市拠点における新たな交通軸、賑わい創出 |
| 2020年 8月 | 東京都大田区 | 羽田空港周辺 | 内閣府 | 正着制御、車線変更、左右折を実施しながら、最高速度60km/hの安定走行 |
| 2020年10月 | 愛知県常滑市 | 中部国際空港 | 愛知県 | GPS不達領域を走行 |
| 2020年11月 | 福岡県北九州市 | | 経済産業省 | 空港と鉄道駅間でGPSが届きにくい高架道路下（約1.3km）を走行 |
| 2020年12月 | 茨城県日立市 | | 経済産業省 | BRT路線における自動運転バスの社会実装 |
| 2020年12月 | 愛知県常滑市 | 中部国際空港 | 愛知県 | 制限エリアをレベル4 走行 |
| 2021年 2月 | 静岡県浜松市／森町 | 新東名 浜松SA、遠州森町PA | 経済産業省 | 高速道路SA/PAとランプウェイでのトラック後続無人隊列走行 |
| 2021年 2月 | 宮城県登米市 | 気仙沼線BRT 柳津－陸前横山 | JR 東日本 | バス専用道で60km/hの走行 |
| 2021年 2月 | 神奈川県横浜市 | | 経済産業省 | 首都圏丘陵地の郊外住宅地における持続的な交通サービス |
| 2021年 9月 | 宮城県登米市 | 気仙沼線BRT 柳津－陸前横山 | JR 東日本 | バス専用道で大型バスがすれ違い走行 |
| 2021年11月 | 愛知県常滑市 | 中部国際空港 | 愛知県 | 直線部で磁気マーカを10m間隔で設置して走行 |
| 2021年11月 | 山形県高畠町 | 公立高畠病院周辺 | 国土交通省 | カートタイプ車両で低速走行 |
| 2022年 1月 | 北海道南富良野町 | 落合駐車帯 | 北海道開発局 | 積雪環境、除雪車での磁気マーカ検知確認 |
| 2022年 8月 | 高知県四万十市 | 予土線江川崎駅－道の駅よつて西土佐 | 国土交通省 | GMPS（センサモジュール1本）とIMUのみで±100mm以内の高精度な自動走行を実現 |
| 2022年10月 | 愛知県常滑市 | イオン常滑－中部国際空港 | 愛知県 | 日本で初めて有料自動車専用道で走行 |
| 2022年12月 | 宮城県登米市 | 気仙沼線BRT 柳津－陸前横山 | JR 東日本 | 日本で初めての社会実装 |
| 2023年 1月 | 山形県高畠町 | 高畠町役場周辺 | 国土交通省 | カートタイプ車両で雪道の低速走行 |

4. 道路に敷設する磁気マーカの詳細

4.1 磁気マーカ

道路には、用途に応じて複数タイプの磁気マーカのうち適切なものを選定して設置する。大きく分けて、貼付型、埋設型がある。また、現在新たに塗布型を開発中である。

貼付型を図-6(1)に示す。材質として、樹脂マトリックス内にフェライト磁粉を分散したいわゆる「ゴム磁石」を使用している。着磁方向は厚さ方向で、一面にN極、反対面にS極が現れるように着磁してある。

道路の表面より僅かに下に埋められる埋設型としては、図-6(2)の円筒形の磁石が用意されている。このタイプは、舗装に埋設することで磁気マーカが保護されるため、交通量の多い道路など高耐久舗装が求められる箇所でも有効である。また、降雪地での使用を考慮して、除雪車のブレードにより機械的にマーカが剥がれることを防止する。

これらの磁気マーカの材質は、既存の安価なフェライトボンド磁石で構成される。表面タイプも埋め込みタイプも、車両側で検知する磁気信号は同一となるよう磁氣的に設計されている。塗布型は、磁粉を樹脂塗料内に分散させるもので、現在開発中である。

磁気マーカの製造には特別な技術は必要なく、冷蔵庫マグネットや行先表示板マグネットシートの製造技術で問題なく量産可能である。機能的には、周りに作る磁場の大きさが基準を満たせば、実物の寸法などはある程度自由に設計可能である。磁気マーカの仕様例として、2020年に羽田空港への設置を目的とし、国交省の航空局が提示した際の磁気マーカの仕様を表-2、表-3に示す。

表-2 磁気マーカ材料の磁気特性

| 項 目 | 基 準 |
|------------------|-------------------------|
| 最大エネルギー積 (BHmax) | 5.0kJ/m ³ 以上 |
| 残留磁束密度 (Br) | 150mT 以上 |
| 保磁力 (iHc) | 150kA/m 以上 |

表-3 磁気マーカの発生磁場特性

| | |
|-------|--------------------------------------|
| ①磁場強度 | 磁気マーカ直上、路面から200mmの位置で磁力が40μT 以上であること |
| ②磁化方向 | 磁石のN-S方向は路面に鉛直方向とする |

4.2 RFID 付加による磁気マーカの情報化

前項の磁気マーカに内蔵する形で、RFID (radio frequency identification) タグを内蔵させた新しい磁

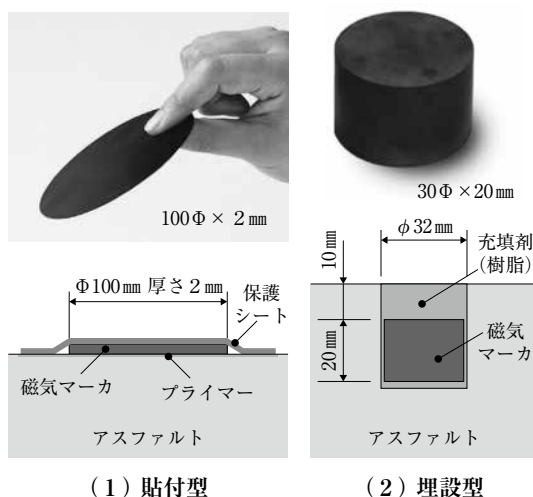


図-6 磁気マーカのタイプ

気マーカが開発された。RFID タグは、近年商品管理や交通系の乗車券カードなどに広く使用されている微小な半導体チップで、無給電で動作し、リーダー側から、タグのメモリに書き込まれたデータを読み出すことができる。これにより個々の磁気マーカに固有の番号を与えることができ、絶対位置を特定することが可能となった。

4.3 磁気マーカの施工

4.3.1 施工ルート設計

施工にあたっては、まず各マーカを道路のどこに設置するかを決める必要がある。これについては、想定される車両の走行軌跡の幅方向の中心に沿って、所定のルール（例えば10m間隔）で設置されるのが通常である。しかし、従来の道路施設敷設の常識と異なり、事前の図面上での位置決定は必ずしも必要なく、なりゆきで想定車両コース上に配置していった実用上問題ない性能が得られることがわかっている。

もちろん、道路図面が完備していれば、図面上で狙いの磁気マーカ位置を決定して、現地で測量によりその目標位置に設置することも可能であるが、このやり方は手間がかかりコスト高になることが多い。むしろ、前述のように大体の車両走行軌跡を想定して、そこに設置してしまい、あとでその位置を測量するのが容易で低コストである。車両は、前項で説明したように、検知された特定の磁気マーカの座標と、車両位置との関係を割り出して制御をおこなう。したがって必ずしも走行軌跡上に厳密にマーカを設置する必要はない。マーカ設置位置が走行軌跡からずれていたなら、ずれ

たなりの座標を正確に得ておけば、制御には問題がない。このような設置上のアバウトさも磁気マーカの大きな利点である。工事で特別な技術・材料は不要であることから、新興国など技術が未熟な場所でも適用が十分可能である。

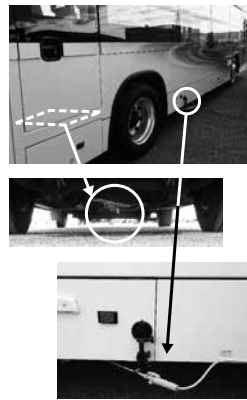
4.3.2 道路上の施工ルート描画

路上に設定する走行軌跡については、狭い道路なら道幅の中央となることが多い。あるいは、実際の車両を使って、車両本体から食紅など色付きの液体を噴霧しながら走らせて、直接走行軌跡を路上に描き、その上に磁気マーカを設置することも行われる。図-7に食紅噴霧による路面上への軌跡描きの様子を示す。

4.3.3 磁気マーカ敷設

軌跡がきまれば、実際の敷設施工となる。貼付型、埋設型のそれぞれについて、現時点で行っているマニュアル作業の手順を図-8、図-9に示す。ただし、ここに示す手作業は実験用など敷設距離が比較的小さい場合に限られる。磁気マーカの本格普及のためには、道路建設時に同時に施工する方法や、連続的に自動で設置を行っていくような設備の開発が必須であると考

a) 噴霧器取り付け



b) 食紅噴霧の軌跡



磁気センサモジュール中心部付近を基準として噴霧実施

図-7 実際の車両による走行軌跡の作成

えられ、道路建設の専門家の知見に基づいた今後の開発が期待される。

4.3.4 磁気マーカの施工コスト

施工コストは、道路インフラ関連の工事としては価格に安価である。初期建設費と耐用年数を見越したコストは、白線（レーンマーク）の施工よりも低くなることが十分期待される（図-10）。これは、工事自体



図-8 埋設型磁気マーカのマニュアル施工



図-9 貼付型磁気マーカのマニュアル施工

| | | 単位 | 建設費(百万円) | 耐用年数 |
|-----------|------------|-------|----------|-------------|
| マーカー敷設コスト | | kmあたり | 4 | 10 |
| 消耗部分 | アスファルト(舗装) | kmあたり | 12 | 10 |
| | 白線(レーンマーク) | kmあたり | 3 | 2 |
| 躯体部分 | 土工部 | kmあたり | 5,000 | 70 |
| | 橋梁部 | kmあたり | 19,000 | 60(コンクリート橋) |
| | トンネル部 | kmあたり | 42,500 | 75 |
| 付帯設備 | 料金所 | 箇所あたり | 400 | 45 |
| | パーキングエリア | 箇所あたり | 1,800 | 最大60 |

図-10 道路インフラ建設におけるコスト比較(当社調べ、数値は前提条件に伴って変化する可能性があります)

が高度な専門性を必要とせず、特別な材料や手順が不要であることからくる。ここでのコストは、既設の道路への後付けについて示したもののだが、新設の道路で、道路建設時に磁気マーカー敷設を行えば、非常に低いコストで磁気マーカーを備えた道路を準備できると考えられ、ここでも道路建設の専門家の知見が生かされると思われる。

4.3.5 磁気マーカーの耐久性と廃棄

磁気マーカーが道のなかでどれぐらいの期間保つのかは関心の持たれるところである。もともと貼付型は一時的・実験的な使用を主目的としているので、本項では埋設型について述べる。

まず機能をもたらす磁力であるが、永久磁石の発生する磁場は、通常の道路環境下では、文字どおり半永久と言えるため、少なくともアスファルト舗装の打換え期間よりは十分長いと考えられる。

次に耐摩耗性であるが、もともと磁気マーカーは道幅の中央に設置され、自動車タイヤが常時踏みつけるわけではないため、比較的条件としては厳しくないことが予測される。実際に回転ラベリング試験などを実施しており、十分な耐摩耗性を確認しているが、今後様々な道路環境や条件に合わせて、さらに試験を行っていくことが望ましいと考えられる。

アスファルト舗装の中長期的な変形・流動の影響であるが、これによって磁気マーカーの設置位置が多少ずれたり、傾いたりすることも考えられる。このため、磁気マーカーシステムを備えた検査車両を準備し、磁気プロファイルを定期的にチェックして、あまりに変動が激

しい個体は設置しなおすことが考えられる。将来的にはこのようなメンテナンス体制も整備する必要があるだろう。

また、いつでも磁気マーカー上を正確に車両が通行すると、路面にわだちを形成して危険ではないかという指摘があるが、物理的なレールと違い、磁気マーカーと車両の相対位置は、常時車両幅中心が磁気マーカー上になる必要はなく、運転時に調整が可能である。走行する車両ごと、走行チャンスごとにある程度の幅を持たせて走行すれば、わだち形成を避けることが可能と思われる。また、バス停前で固定した磁気マーカー列をたどる際に、センサモジュールの検出幅の範囲内で路肩側に寄せて走行する正着制御も可能となる。

アスファルト舗装の打換え時の処分方法については、通常の再生処理で問題ない。磁気マーカー自体が、道路材料のマスに対してごく微小であることを考えると、再生処理に追加の負担を強いることはないといえる。以上の耐久性・処分方法については、今後道路建設の専門家によるさらなる試験・評価を期待したいところである。

5. Q & A

これまでに、磁気マーカーに関して当社に寄せられた典型的な疑問と、その回答を以下にQ & Aの形で示す。

5.1 法的よりどころについて

❶：道路法上の位置づけは？

❶：2020年5月の道路法改正において、『自動運行補助施設』などが新設され³⁾、道路上の自転車位置情報を提供する磁気マーカーは、道路附属物に

位置付けられた。道路管理者が公的機関でない場合は道路専有物となる。

5.2 設計に関するQ & A

Q2：マーカ種類をどう選定すればよいか？

A2：「埋める」「貼る」の選択について、貼るタイプは、最終的に原状復帰の必要な実証試験などで一時的に設置したい場合に使われている。埋めるタイプは恒久的に使用し、ルート変更もないことが想定される場面で使用する。施工の際のN面、S面のどちらを上にするか、RFID付・無しのどちらを選択するか、などについては、これまでの実証実験の経験を踏まえ、著者らが概略の施工ルールを提供しており、これを参考にして自動運転の実施主体となる機関が最終的に決定する。

Q3：マーカ設置間隔は？

A3：初期の実証実験においては、2m間隔の設置が多かった。これは、常に車両の下に1個はマーカがある状態を確保することと、車両側にも2m間隔で2本磁気センサモジュールをつけると、同タイミングで車両の前後での位置検出ができ、車両の回頭角がわかるメリットがあるためである。最近では車両側の制御ニーズに合わせて、直線の高速走行部では10m間隔なども実績がある。車両制御に対するマーカ間隔の影響も研究されており⁴⁾、今後の技術蓄積により最適なマーカ間隔が選定できるようになると考えられる。なお、マーカ施工後、実際に自動走行を行って、足りないかと判断すれば、既設マーカの間に新たに足して追加施工することが可能である。

5.3 耐環境に関するQ & A

Q4：雪が積もっても使えるのか？

A4：磁気に対しては、水も氷も物理的に影響がない（非磁性なので存在しないのと同じ）。したがって、磁気マーカの性能は不変である。車両が機械的に走行可能な程度の積雪なら、磁気マーカは全く問題なく機能する。国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所では、除雪車の自車位置を正確に測位し、車線内を走行させるための車線走行支援技術の実証実験⁵⁾を行っており、磁気マーカシステムが機能することが確認された。

Q5：豪雨の影響は？

A5：前問にあるように、磁気は影響を受けないが、RFID読出しはラジオ波を使用するため、特定の量の水没でRFIDの読出しが難しくなるケー

スがある。このため、システムとしてRFIDは全数読出しを期待しない設計にしてある。また、日本で特別な認可が不要で利用できるRFIDの発信電波強度レベルが、国際的に主流である1W程度に引き上げられれば、路面上の雨水層をとおしても十分信号が読み出せることを確認しており、法的な対応が望まれるところである。

Q6：道路内に既設の鉄板、鉄筋がある場合の影響は？

A6：磁気マーカ上面全体を鉄などの磁性体が覆ってしまえば発生磁場が妨げられるが、磁気マーカより下に鉄の構造物がある場合は発生磁場に大きな影響はなく問題ない。走路上にマンホールがある場合は、それを10cm程度避けて設置すればよい。

5.4 車両側の準備に関するQ & A

Q7：どんな車両にも取り付け可能か？

A7：通常、車両の取付け候補位置のノイズ磁場などを確認し、磁気マーカ信号が取れることを確認するための作業が必要である。また、車両側から車速パルス信号を取り出してセンサモジュールに入力する必要がある。

Q8：車両側のセンサモジュールの数は？

A8：前項で述べたように、初期は道路側の磁気マーカの間隔に合せて前後2つのセンサモジュールを取り付けるのが標準であった。これが有用であることに変わりはないが、車両側のニーズに合わせて、1本のセンサモジュールでも機能することが確認されている⁶⁾。

Q9：車両側のセンサモジュールの取付けはどのように行っているのか？

A9：できるだけ固定車輪軸（通常は後輪）近くの車底に、適切なブラケットを取付け、これに磁気センサモジュールを固定することが行われている。

Q10：磁気マーカシステムを取り付ければ、すぐ自動運転ができるか？

A10：磁気マーカシステムはあくまで「自車位置の特定」のための位置情報を与えるものであり、障害物を検知しながら、車両の目標走行ルートに沿って車両の制御を行うシステムは別途必要である。

5.5 安全に関するQ & A

Q11：路面の磁気マーカから発する磁気の、人体への影響は？

- A11：磁気の人体影響に関しては、WHOと連携する国際非電離放射線防護委員会がガイドラインを出しており⁷⁾、磁気マーカの発する磁場はこれを十分下回る。具体的には、車椅子乗車時に磁気マーカ真上で埋込医用機器が受ける磁力は0.01mT程度、歩行時に磁気マーカ真上で埋込医用機器が受ける磁力は0.0003mT程度であり、それらの値は地磁気よりも小さく、埋込医用機器が磁気の影響を受けないとされる0.5mT以下を十分満たしている。
- Q12：道に磁気マーカ以外の磁性体があったら、車両が誤導されないか？同様に、悪意あるものが本来のルートを逸れるような磁気マーカを後付けしたら車両の誤導がないか？
- A12：対策として、単体の磁気マーカによる位置検出のみではなく、直近の複数の磁気マーカ検出履歴（たとえば過去100個のデータ）から、次に検出すべきマーカの座標を予測しながら、新たな検出値をチェックすることができる。もし異常な位置検出が行われた時はそのデータを無視し、それが連続するようなら車両を停止させるなどの処理を行うことが可能である。

6. 磁気マーカシステムの今後

日本では人口減少や高齢化によるドライバー不足への対策として、公共交通への自動運転応用が注目されている。特にバスは路線が固定されることから、磁気マーカ応用に適している。また、完全無人に至らないでも、磁気マーカをつかったステアリングアシストによるドライバーの負担軽減は有用であると考えられ、このようなアシスト適用は、バス以外にも除雪車への適用が取り組まれている。これは、積雪で見えなくなった路肩ぎりぎりを走行する際に自車位置を正しく与えて、熟練運転者でなくとも安全を確保するものである。

さらに、磁気マーカシステムを備えた小型バンや低速モビリティが比較的低コストで実用化されれば、今後の日本の大きな課題である、中山間部の交通弱者を支援する有効な手段となろう。

筆者らは、公道への適用に先立って、比較的条件の整った工場内物流などにも取組んでおり、今後磁気マーカシステムは幅広い用途に広がっていくことが期待される。

—— 参考文献 ——

- 1) Tan, H., F. Bu, S. Johnston, B. Bougler, W. B. Zhang, S. Sun (2009). Field Demonstration and Tests of Lane Assist/Guidance and Precision Docking Technology, California PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-2009-12, ISSN 1055-1425.
- 2) M. Yamamoto, T. Nagao, and H. Aoyama, "Ultra-Low field magnetic guidance system," Proc. 23rd ITS World Congress, Australia (2016)
- 3) 国土交通省ホームページ, https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_001381.html
- 4) Ando et.al. "Localization Using Global Magnetic Positioning System for Automated Driving Bus and Intervals for Magnetic Markers", IEEE Trans. Intelligent Vehicles, Vol.8, No.1, pp878-887, 2023
- 5) 佐藤昌哉, 宗広一徳, 中村直久, 片野浩司, 山口洋士, 新保貴広, 長尾知彦, 中田正明, 武石英人, 西山大三, 齊藤行貴, 坂本優太, 小林拳斗：自動運転技術の活用による除雪車の運転支援及び道路構造・管理に関する共同研究報告書, 共同研究報告書第523号, 2021年1月
- 6) 安藤孝幸他, 愛知製鋼技報, Vol.39, pp27-36, 2022
- 7) 国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) ガイドライン (<https://www.jeic-emf.jp/academic/international/icnirp/>)

わが国の合材製造技術等のアジア地区への展開

(Development of Asphalt Mixture Manufacturing Technology in Japan Towards the Asian Region)

貫井 武*

本報告は、アジア地区のタイ王国、中華人民共和国、インドネシア共和国およびアメリカ合衆国での新規合材に関する技術的な項目について記述したものである。

海外へ技術を展開する場合は、わが国は明治時代に外国人技術者から習得した知見で技術基準類が整備されたことを念頭に必要があることを示唆していることを紹介している。

新規合材製造技術についてわが国とアジア地区を比較すると、考え方やシステムが大きく異なることが多くその対応に留意が必要であり、マーシャル特性値については名称が同じでも、わが国の算出方法が独特であることが浮き彫りになった。

現在、アジア地区で検討されている再生合材の技術基準類にわが国の再生合材製造技術を反映させるための課題について私見を述べている。

1. まえがき

加熱アスファルト混合物（以下、合材）とは、骨材（粗骨材、細骨材）と必要に応じフィラーをアスファルトと所定の割合で混合した材料である。合材は、「複合材料」または「混合材料」の中2文字を取り命名したとされ、新規合材、再生合材および常温合材がある。

公表されたデータが存在する地区での合材量（2021年度）は、欧州で約291百万t（欧州アスファルト協会調べ）、全米で約392百万t（全米アスファルト協会調べ）である。これら地区では、製造技術や管理方法は確立されていると考えられる。ちなみに、わが国では約41百万t（日本アスファルト合材協会調べ）である。

わが国を除くアジア地区では、合材量を調査する機関が存在していないためか、その量を把握するのは困難である。新規合材の配合設定手順を含む製造技術について発注者が規格化している国がほとんどであると考ええる。

本報文では、アジア地区のタイ王国、中華人民共和国、インドネシア共和国（以下、対象国）およびアメリカ合衆国（以下、対象国等）での新規合材に関する技術的な対応についての知見を記述している。

2. わが国における道路技術の進展の経緯

曾根氏の文献¹⁾を要約すると、相手国の発展状況とそれに相応した技術とは何かを求めるためには、わが国での技術基準類の変遷を知ることが必要と指摘している。

○外国人技術者の時代：19世紀末（明治時代）

事業の技術監督や大学等の教授として雇い入れた外国人技術者から技術を学んだ。道路に係る技術基準は牛馬車を主な対象としていた。

○技術者の第一世代の時代：20世紀初期（大正～昭和初期）

官費留学制度（1870年～1940年）で留学し帰国した日本人技術者が研究・提案を集積し、馬車と自動車の混合交通を想定した道路構造令等を作成した。

○直営技術者の時代：20世紀半ば（戦後～1960年代）

政府が直営方式で行っていた道路整備の必要性が増し、少数の専門技術者が道路構造令に則り作成した標準設計書を現場技術者がコピーして活用した。道路構造令が、舗装に関する規定の新設を主として改正が行われた。

○請負（外注）施工の時代：20世紀後期（1970年代～1990年代）

道路整備は大量かつ迅速な必要性から請負方式に移行したため、民間業者との技術力向上のため、公益法人等が指針や参考図書および資格制度を整備した。技

*ぬくい たけし 貫井技術士事務所 代表 技術士（建設部門）

術者各人が理論に基づいた設計を行う方式に変化していった。

○民間企業の技術者の発展：20世紀末

民間業者の技術力が向上したことやニーズの多様化、社会経済状況の変化により地域の裁量に基づいた道路構造令の弾力的運用へ転換した。道路整備には交通事故・公害・自然破壊・環境（リサイクル）の対応が強く求められた。

○現在

道路整備から道路維持管理に移行し、技術基準類は点検ガイドラインの発刊に移った。その技術の保持も政府直営から民間企業へとなり、政府の役割は性能が基準を満たしているのかを確認する役割へと移行した。

3. 対象国での合材製造技術等の事例

対象国での新規合材の製造技術については、わが国と同様な内容の技術基準類が制定されており、わが国の新規合材の製造技術を必要とすることは少ないと考える。その内容は、合材の製造に係る考え方、定義あるいは算出方法についてわが国と対象国とでは大きく異なる点が存在する。

3.1 管理と検査の違い

舗装施工便覧²⁾では、その完成物が設計図書の基準を満たすように受注者が管理（基準試験、出来形・品質管理）を行い、その成果の判定のために発注者が検査（出来形・品質検査）を行うとされ、その実施主体が明確になっている（図－1）。

| 管理および検査の実施フロー | 主たる実施者 | |
|---------------------------------------|--------|-----|
| | 発注者 | 受注者 |
| 基準試験 ・試験の実施 ・試験成績書 | | ○ |
| 基準試験結果の確認 | ○ | |
| 作業標準の設定 | | ○ |
| 施工 | | ○ |
| 出来形・品質管理 ・試験・測定の実施 ・作業標準によるチェック | | ○ |
| 検査 | ○ | |

図－1 管理と検査の実施フローと実施主体

合材事業者は顧客が要求する品質の合材を製造し、かつその合材について現場で引き渡すまで品質を保証する責務があるため、合材を製造するアスファルトプラントでは工事単位の管理ではなく、作業標準書に基づいた工場単位の自主管理が行われている。

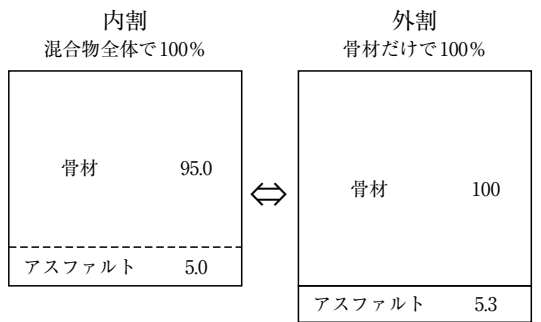
作業標準書は、顧客要求事項を満たす製品を提供することを目的とし、製造管理および品質管理に関する事項を定めており、アスファルト事前審査制度³⁾による立会審査・立入調査（第三者機関）で作業標準書の内容が適正であるか、また、その作業標準書に基づき品質管理が実施され、管理記録が保管されているかを確認される。

対象国のあるアスファルトプラントでは、管理と検査を分けて解釈せずに、検査に重点を置いた試験を工事毎に行っている。その国では、配合試験や日々管理試験を公的あるいは民間の試験機関に外部委託しているケースもあり、自ら管理を行わずに完結できるようであり、特徴的なわが国の自主管理手法の理解を得るのは極めて困難と考えられる。

3.2 アスファルト量の算出方法

わが国で合材のアスファルト量（％）とは、アスファルト質量を合材の質量で除した比率で求められ⁴⁾、この比率は内割である（図－2の左側）。一方、対象国では外割（図－2の右側）または内割・外割の併記が混在しており、アスファルト量の見方には特に留意が必要である。

例えば、中華人民共和国では「油石比」（外割）が基本である。最近では「瀝青用量（内割）も併記されることもあり、タイ王国では「by weight of total aggregate（by agg.）」（外割）の表記が基本である。なお、現場配合では内割を用いるので注意が必要である。



外割 AS 量，％＝（内割 AS 量 ÷（100－内割 AS 量））×100

図－2 任意のアスファルト量での「内割」「外割」の算出方法

一方、インドネシア共和国では、わが国と同様に「by weight of total mix(by mix)」(内割)の表記である。

3.3 アスファルトプラントの設備および計量プログラミング

対象国では、日本製、自国製および外国製のアスファルトプラント(以下、AP)が用いられており、両者では設備や操作盤は大きな相違はないが、品質管理の考え方や価値観に違いがあることも事実であり、設備や計量プログラミングへの留意が必要である。

3.3.1 ホットビンの試料採取

ホットビンでの試料採取は、粒度、スクリーンの状態およびドライヤーバーナの燃焼状態を確認するため日常管理を容易かつ迅速にするために不可欠であり、日本製APにはホットビンの採取口が設けられている(写真-1)。

一方、外国メーカAPでは、この採取口を有していない機種が多く存在し適切な品質管理のため日本人技術者は、ホットビンと計量槽との蛇腹部分の隙間(写真-2左側)あるいは点検口(写真-2右側)から、スコップを用いての試料採取を行った。

3.3.2 バッチ当たりの計量値

合材の積荷量が能力の倍数でない場合、具体的には能力2t/バッチのAPで新規合材を9トン製造する場合、①のケースでは計量値の管理は容易であるが、②のケース(コンピューターが自動で設定する)は計量値の管理が極めて困難である。

【計量値のイメージ】

$$\textcircled{1} 2.0\text{t} \times 4\text{バッチ} + 1.0\text{t} \times 1\text{バッチ} = 9\text{t}$$

$$\textcircled{2} 2.0\text{t} + 1.7\text{t} + 1.8\text{t} + 1.6\text{t} + 1.9\text{t} = 9\text{t}$$

※計量値のイメージ

また、APのミキサー内に定量の改質剤や添加剤を投入する場合、ダンプトラックの積み荷を能力の倍数とする等の配慮が必要である。このケースはわが国で

も想定される事例であると考えられる。

3.3.3 操作盤での計量値

APは、構造自体は大きく変わっていないが燃焼温度、骨材流量および計量については自動化が進んでおり、適切な設計値や制御条件を入力すれば品質の安定した合材が自動運転で製造できるようになっている。

対象国での外国製APを視察した筆者は、自動運転で合材製造している際の計量値の変動幅が大きいことを確認した(表-1)。確かに30バッチで平均値は設定値とほぼ同じであるが筆者は、落差補正の設定に問題があると考え、手動で運転するように要請し変動幅を小さくすることができた(表-1)。

筆者がバッチ毎で設定値に近い計量値とすべきと考えるのに対して、この対象国の技術者がユニット毎での平均値で考える、筆者は価値観の相違として志向すべきがどうか思案したものである。

その後、外国製APのエンジニアがホットビンの落



写真-1 対象国にある日本製APでの
ホットビン採取口



写真-2 対象国にある外国製APでの
ホットビン試料採取

表-1 APでの計量値の変動幅

| 操作 | 名称 | 累加計量値 kg | | | | 計量値 kg | |
|--------------|-----|----------|--------|--------|--------|--------|------|
| | | ホットビン1 | ホットビン2 | ホットビン3 | ホットビン4 | アスファルト | % |
| | 設定値 | 383 | 517 | 670 | 957 | 43.0 | 4.5 |
| 自動 N = 30 | 平均 | 406 | 506 | 663 | 964 | 43.4 | 4.50 |
| | 最大 | 524 | 690 | 784 | 1051 | 48.3 | 4.82 |
| | 最小 | 300 | 439 | 616 | 928 | 37.0 | 3.90 |
| 手動 N = 39 | 平均 | 373 | 534 | 659 | 960 | 42.9 | 4.47 |
| | 最大 | 415 | 566 | 686 | 1013 | 44.8 | 4.60 |
| | 最小 | 336 | 507 | 631 | 930 | 41.8 | 4.33 |

注) アスファルト量%は外割

差補正についてのプログラムを改善したことにより、変動幅が小さくなり自動運転とすることができた。

3.4 マーシャル特性値の算出方法

わが国で合材の配合設計は、原則としてマーシャル安定度試験によって行われ、設計アスファルト量は、密度・安定度、フロー値および計算で算出する空隙率・飽和度・骨材間隙率・その他特性値（以下、マーシャル特性値）をもとに求められる²⁾。

空隙率 (Air Voids), %

$$= (1 - \text{マーシャル密度} \div \text{理論密度}) \times 100$$

飽和度 (VFB), %

$$= (\text{アスファルト容積率} \div \text{骨材間隙率}) \times 100$$

骨材間隙率 (VMA), %

$$= \text{アスファルト容積率} + \text{空隙率}$$

アスファルト容積率 (PVA), %

$$= (\text{アスファルト量} \times \text{マーシャル密度}) \div \text{アスファルト密度}$$

ここでは、対象国等およびわが国のマーシャル特性値の算出方法についての調査に加え、その値を同一配合の新規合材で試算した。なお、対象国においてもマーシャル供試体の作製方法はわが国と同様である。

3.4.1 新規合材の組成

新規合材の組成は、骨材、アスファルトおよび空気からなっている（図-3）。

わが国がアスファルトの量すべてが有効と考えるのに対して、対象国等では骨材に吸収されるアスファルト (Asphalt

Absorption) を控除したものを有効なアスファルトとして取り扱って骨材間隙率 (VMA) を求めている。これを図で説明したものが図-4である。

3.4.2 対象国等でのマーシャル特性値の算出方法

算出方法の比較は表-2および表-3に示すとおりで、その結果は以下のようである。

- ①対象国での算出方法は、全米アスファルト舗装協会 (NAPA) の技術書を基本として、必要に応じてその国での知見を加え規格として運用している。
- ②理論最大密度での骨材密度は、わが国では原則として見掛け密度を用いるが、対象国等では骨材に吸収されるアスファルト量を考慮した有効密度から算出する。
- ③わが国の方法は、対象国等に比べて特異な算出の仕方である。

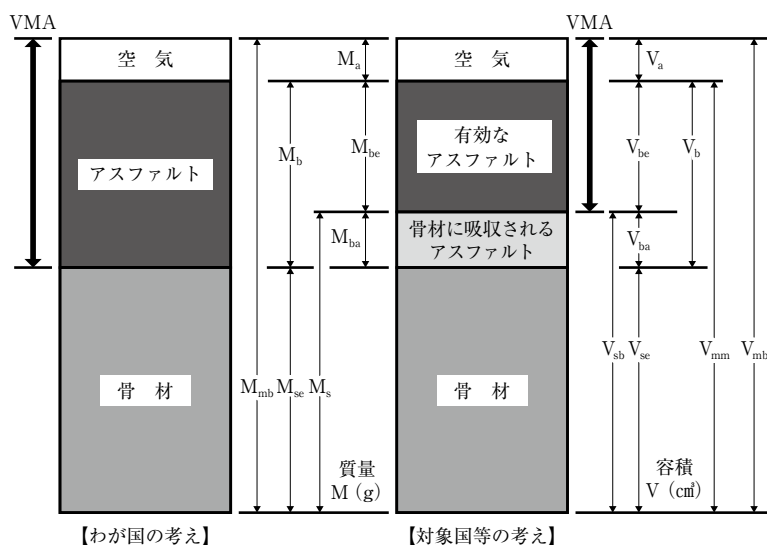


図-3 新規合材の組成

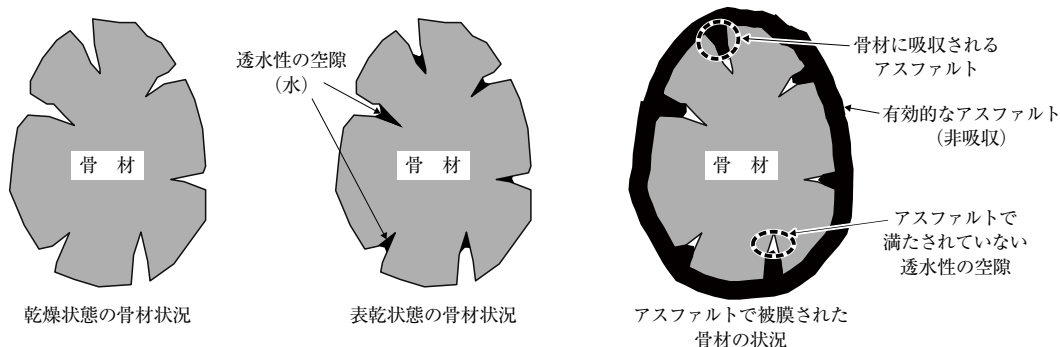


図-4 有効なアスファルト

表-2 マーシャル特性値の算出方法

| | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--|--|---|---|
| 性状項目 | 日 本 (舗表施工便覧2006年2月) | タイ王国 (DHS-08/2532) Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt | 中華人民共和国 (公路沥青路面設計規範) | インドネシア共和国 (RSNI M-01-2003) Metode pengujian campuran beraspal panas dengan alat Marshall | アメリカ合衆国 (MS-2 Asphalt Mix Design Methods) |
| 骨材の 合成かさ密度 | 算出しない | $G_{ag} = \frac{M_{se}}{V_{se} \text{ (Bulk)}} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$ <p>ここに、 G_{ag} : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) M_{se} : 骨材の質量 (g) $V_{se} \text{ (Bulk)}$: 骨材のかさ容積 (cm³) P_1, P_2, P_n : 骨材1.2 ～ nの配合割合 (%) G_1, G_2, G_n : 骨材1.2 ～ nのかさ密度 (g/cm³)</p> | $\gamma_{ab} = \frac{M_{se}}{V_{se} \text{ (Bulk)}} = \frac{100}{\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{P_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{P_n}{\gamma_n}}$ <p>ここに、 γ_{ab} : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) M_{se} : 骨材の質量 (g) $V_{se} \text{ (Bulk)}$: 骨材のかさ容積 (cm³) P_1, P_2, P_n : 骨材1.2 ～ nの配合割合 (%) [計100%] $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_n$: 骨材1.2 ～ nのかさ密度 (g/cm³)</p> | $G_{ab} = \frac{M_{se}}{V_{se} \text{ (Bulk)}} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$ <p>ここに、 G_{ab} : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) M_{se} : 骨材の質量 (g) $V_{se} \text{ (Bulk)}$: 骨材のかさ容積 (cm³) P_1, P_2, P_n : 骨材1.2 ～ nの配合割合 (%) G_1, G_2, G_n : 骨材1.2 ～ nのかさ密度 (g/cm³)</p> | $G_{ab} = \frac{M_{se}}{V_{se} \text{ (Bulk)}} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$ <p>ここに、 G_{ab} : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) M_{se} : 骨材の質量 (g) $V_{se} \text{ (Bulk)}$: 骨材のかさ容積 (cm³) P_1, P_2, P_n : 骨材1.2 ～ nの配合割合 (%) G_1, G_2, G_n : 骨材1.2 ～ nのかさ密度 (g/cm³)</p> |
| | 骨材の 合成見掛け密度 | 算出しない | $\gamma_m = \frac{M_{se}}{V_{se} \text{ (Appe)}} = \frac{100}{\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{P_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{P_n}{\gamma_n}}$ <p>ここに、 γ_m : 骨材の合成見掛け密度 (g/cm³) M_{se} : 骨材の質量 (g) $V_{se} \text{ (Appe)}$: 骨材の見掛け容積 (cm³) P_1, P_2, P_n : 骨材1.2 ～ nの配合割合 (%) [計100%] $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_n$: 骨材1.2 ～ nの見掛け密度 (g/cm³)</p> | 算出しない | 算出しない |
| 骨材に吸収される アスファルトの 質量割合 | 算出しない | $A_{ac} = 100 \times \frac{M_{bs}}{M_s} = 100 \times \frac{(G_{sc} - G_{ag})}{(G_{sc} \times G_{ag})} \times G_{sc}$ <p>ここに、 A_{ac} : 骨材吸収アスファルトの質量割合 (%) M_{bs} : 吸収アスファルトの質量 (g) M_s : 骨材の質量 (g) G_{sc} : 骨材の有効密度 (g/cm³) G_{ag} : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) G_{sc} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> | $P_{bs} = 100 \times \frac{M_{bs}}{M_s} = 100 \times \frac{(G_{sc} - \gamma_{ab})}{(G_{sc} \times \gamma_{ab})} \times G_{sc}$ <p>ここに、 P_{bs} : 骨材吸収アスファルトの質量割合 (%) M_{bs} : 吸収アスファルトの質量 (g) M_s : 骨材の質量 (g) γ_{ab} : 骨材の有効密度 (g/cm³) G_{sc} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> | $P_{bs} = 100 \times \frac{M_{bs}}{M_s} = 100 \times \frac{(G_{sc} - G_{ab})}{(G_{sc} \times G_{ab})} \times G_{sc}$ <p>ここに、 P_{bs} : 骨材吸収アスファルトの質量割合 (%) M_{bs} : 吸収アスファルトの質量 (g) M_s : 骨材の質量 (g) G_{sc} : 骨材の有効密度 (g/cm³) G_{ab} : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) G_{sc} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> | $P_{bs} = 100 \times \frac{M_{bs}}{M_s} = 100 \times \frac{(G_{sc} - G_{ab})}{(G_{sc} \times G_{ab})} \times G_{sc}$ <p>ここに、 P_{bs} : 骨材吸収アスファルトの質量割合 (%) M_{bs} : 吸収アスファルトの質量 (g) M_s : 骨材の質量 (g) G_{sc} : 骨材の有効密度 (g/cm³) G_{ab} : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) G_{sc} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> |
| | 有効 アスファルト量 | 算出しない | $E_{ac} = 100 \times \frac{M_{se}}{M_{mb}} = P_b - \frac{A_{ac} \times P_s}{100}$ <p>ここに、 E_{ac} : 有効アスファルト量 (%) M_{se} : 有効なアスファルトの質量 (g) M_{mb} : 混合物の質量 (g) P_s : アスファルト量 [内割り] (%) A_{ac} : 骨材吸収アスファルトの質量割合 (%) P_b : 骨材の配合割合 (%)</p> | $P_{be} = 100 \times \frac{M_{se}}{M_{mb}} = P_b - \frac{P_s \times P_{bs}}{100}$ <p>ここに、 P_{be} : 有効アスファルト量 (%) M_{se} : 有効なアスファルトの質量 (g) M_{mb} : 混合物の質量 (g) P_s : アスファルト量 [内割り] (%) P_{bs} : 骨材吸収アスファルトの質量割合 (%) P_b : 骨材の配合割合 (%)</p> | $P_{be} = 100 \times \frac{M_{se}}{M_{mb}} = P_b - \frac{P_s \times P_{bs}}{100}$ <p>ここに、 P_{be} : 有効アスファルト量 (%) M_{se} : 有効なアスファルトの質量 (g) M_{mb} : 混合物の質量 (g) P_s : アスファルト量 [内割り] (%) P_{bs} : 骨材吸収アスファルトの質量割合 (%) P_b : 骨材の配合割合 (%)</p> |
| 骨材の有効密度 | 算出しない | $G_{se} = \frac{M_s}{V_{ab}} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_{ac}}}$ <p>ここに、 G_{se} : 骨材の有効密度 (g/cm³) M_s : 骨材と吸収アスファルトの質量 (g) V_{ab} : 骨材と吸収アスファルトの容積 (cm³) C : 骨材の配合割合 (%) P_s : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) G_{mm} : 混合物の最大密度試験値 (g/cm³) G_{ac} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> | $G_{se} = \frac{M_s}{V_{ab}} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_{ab}}}$ <p>ここに、 G_{se} : 骨材の有効密度 (g/cm³) M_s : 骨材と吸収アスファルトの質量 (g) V_{ab} : 骨材と吸収アスファルトの容積 (cm³) C : 骨材の配合割合 (%) P_s : 骨材の合成かさ密度 (g/cm³) G_{mm} : 混合物の最大密度試験値 (g/cm³) G_{ab} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> | $G_{se} = \frac{M_s}{V_{ab}} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_{ab}}}$ <p>ここに、 G_{se} : 骨材の有効密度 (g/cm³) M_s : 骨材と吸収アスファルトの質量 (g) V_{ab} : 骨材と吸収アスファルトの容積 (cm³) C : 骨材の配合割合 (%) P_s : アスファルト量 [内割り] (%) G_{mm} : 混合物の最大密度試験値 (g/cm³) G_{ab} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> | $G_{se} = \frac{M_s}{V_{ab}} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_{ab}}}$ <p>ここに、 G_{se} : 骨材の有効密度 (g/cm³) M_s : 骨材と吸収アスファルトの質量 (g) V_{ab} : 骨材と吸収アスファルトの容積 (cm³) C : 骨材の配合割合 (%) P_s : アスファルト量 [内割り] (%) G_{mm} : 混合物の最大密度試験値 (g/cm³) G_{ab} : アスファルトの密度 (g/cm³)</p> |

表-3 マーシャル特性値の算出方法

| 性状項目 | 日 本 (舗装施工便覧 2006年2月) | タイ王国 (DH-S 408/2532) Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt | 中華人民共和国 (公路沥青路面设计规范) | インドネシア共和国 (RSNI M.01-2003) Metode pengujian campuran beraspal panas dengan alat marshall | アメリカ合衆国 (MS-2 Asphalt Mix Design Methods) |
|-----------|---|---|---|--|--|
| アスファルト容積率 | $A_v = \frac{V_b}{V_{mb}} \times 100 = \frac{W_s \times D_m}{D_s}$ ここに、 A _v : アスファルト容積率 (%) V _b : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) W _s : アスファルト量 [内測り] (%) D _s : 混合物のかさ密度 (g/cm) D _m : アスファルトの密度 (g/cm) | $A_v = \frac{V_b}{V_{mb}} \times 100 = \frac{E_a \times G_b}{G_c}$ ここに、 A _v : アスファルト容積率 (%) V _b : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) E _a : アスファルト量 [内測り] (%) G _b : 混合物のかさ密度 (g/cm) G _c : アスファルトの密度 (g/cm) | 算出しない | 算出しない | 算出しない |
| 骨材容積率 | 算出しない | $A_g = \frac{V_{ag}}{V_{mb}} \times 100 = \frac{(100 - P_g) \times G_b}{G_{ag}}$ ここに、 A _g : 骨材容積率 (%) V _{ag} : 骨材の容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) P _g : アスファルト量 [内測り] (%) G _b : 混合物のかさ密度 (g/cm) G _{ag} : 骨材の合成かさ密度 (cm) | 算出しない | 算出しない | 算出しない |
| 理論最大密度 | $D = \frac{M_{mb}}{V_{mb}} = \frac{M_s}{G_b} + \frac{M_f}{G_1} + \frac{M_2}{G_2} + \dots + \frac{M_n}{G_n}$ ここに、 D : 理論最大密度 (g/cm) M _{mb} : 総混合体質量 (g) V _{mb} : 混合体の容積 (cm) M _s 、M _f 、M ₂ 、M _n : 配合率 (%) [計100%] G _b 、G ₁ 、G ₂ 、G _n : 骨材の目出し密度 (g/cm) (注: 配合率の合計を100と見做す。目出し密度は、図1-17を参照せよ。) | $M_{mb} = \frac{100 + P_a}{\frac{100}{G_m} + \frac{P_a}{G_b}}$ ここに、 M _{mb} : 理論最大密度 (g/cm) G _m : 総混合体質量 (g) V _{mb} : 骨材とアスファルトの容積 (cm) P _a : アスファルト量 [内測り] (%) G _b : 骨材の有効密度 (g/cm) G _m : アスファルトの密度 (g/cm) | $G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_a}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$ ここに、 G _{mm} : 理論最大密度 (g/cm) G _{se} : 総混合体質量 (g) V _{mb} : 骨材とアスファルトの容積 (cm) P _a : アスファルト量 [内測り] (%) P _b : アスファルト量 [内測り] (%) G _b : 骨材の有効密度 (g/cm) G _m : アスファルトの密度 (g/cm) | $G_{mm} = \frac{M_{mb}}{V_{mb}} = \frac{100}{\frac{P_a}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$ ここに、 G _{mm} : 理論最大密度 (g/cm) M _{mb} : 総混合体質量 (g) V _{mb} : 骨材とアスファルトの容積 (cm) P _a : アスファルト量 [内測り] (%) P _b : アスファルト量 [内測り] (%) G _{se} : 骨材の有効密度 (g/cm) G _b : アスファルトの密度 (g/cm) | $G_{mm} = \frac{M_{mb}}{V_{mb}} = \frac{100}{\frac{P_a}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$ ここに、 G _{mm} : 理論最大密度 (g/cm) M _{mb} : 総混合体質量 (g) V _{mb} : 骨材とアスファルトの容積 (cm) P _a : アスファルト量 [内測り] (%) P _b : アスファルト量 [内測り] (%) G _{se} : 骨材の有効密度 (g/cm) G _b : アスファルトの密度 (g/cm) |
| 骨材間隙率 | $V_v = \frac{V_s}{V_{mb}} \times 100 = V_v + \frac{W_s \times D_m}{D_s}$ ここに、 V _v : 骨材間隙率 (%) V _s : 混合体中の空気の容積 (cm) V _b : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) W _s : 空隙率 (%) D _s : アスファルト量 [内測り] (%) D _m : 混合物のかさ密度 (g/cm) D _s : アスファルトの密度 (g/cm) | $VMA = \frac{V_s + V_{bc}}{V_{mb}} \times 100 = \left[1 - \frac{V_f}{V_a} \times \frac{100 - P_g}{100} \right] \times 100$ ここに、VMA : 骨材間隙率 (%) V _s : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) V _f : 混合物の有効アスファルト容積 (cm) V _a : 混合物のかさ密度 (g/cm) P _g : アスファルト量 [内測り] (%) | $VMA = \frac{V_s + V_{bc}}{V_{mb}} \times 100 = \left[1 - \frac{V_f}{V_a} \times \frac{100 - P_g}{100} \right] \times 100$ ここに、VMA : 骨材間隙率 (%) V _s : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) V _f : 混合物の有効アスファルト容積 (cm) V _a : 混合物のかさ密度 (g/cm) P _g : アスファルト量 [内測り] (%) | $VMA = \frac{V_s + V_{bc}}{V_{mb}} \times 100 = 100 - \frac{G_{mb} \times P_g}{G_b}$ ここに、VMA : 骨材間隙率 (%) V _s : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) G _{mb} : 混合物の有効アスファルト容積 (cm) G _b : 混合物のかさ密度 (g/cm) P _g : 骨材の配合割合 (%) G _s : 骨材の合成かさ密度 (g/cm) | $VMA = \frac{V_s + V_{bc}}{V_{mb}} \times 100 = 100 - \frac{G_{mb} \times P_g}{G_b}$ ここに、VMA : 骨材間隙率 (%) V _s : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) G _{mb} : 混合物の有効アスファルト容積 (cm) G _b : 混合物のかさ密度 (g/cm) P _g : 骨材の配合割合 (%) G _s : 骨材の合成かさ密度 (g/cm) |
| 空隙率 | $V_v = \frac{V_a}{V_{mb}} \times 100 = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] \times 100$ ここに、 V _v : 空隙率 (%) V _a : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) G _{mb} : 理論最大密度 (g/cm) G _{mm} : 混合物のかさ密度 (g/cm) | $VV = \frac{V_a}{V_{mb}} \times 100 = \left[1 - \frac{V_f}{V_a} \right] \times 100$ ここに、 VV : 空隙率 (%) V _a : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) V _f : 混合物の有効アスファルト容積 (cm) V _a : 混合物のかさ密度 (g/cm) V _f : 理論最大密度 (g/cm) | $VIM = \frac{V_a}{V_{mb}} \times 100 = 100 - \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$ ここに、 VIM : 空隙率 (%) V _a : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) G _{mm} : 理論最大密度 (g/cm) G _{mb} : 混合物のかさ密度 (g/cm) | $P_a = \frac{V_a}{V_{mb}} \times 100 = 100 - \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$ ここに、 P _a : 空隙率 (%) V _a : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) G _{mm} : 理論最大密度 (g/cm) G _{mb} : 混合物のかさ密度 (g/cm) | $P_a = \frac{V_a}{V_{mb}} \times 100 = 100 - \frac{100 - G_{mb}}{G_{mm}}$ ここに、 P _a : 空隙率 (%) V _a : 混合体中の空気の容積 (cm) V _{mb} : 混合物の総容積 (cm) G _{mm} : 理論最大密度 (g/cm) G _{mb} : 混合物のかさ密度 (g/cm) |
| 飽和度 | $V_u = 100 \times \frac{V_b}{V_b + V_a} = 100 \times \frac{A_v}{A_v + V_v}$ ここに、 V _u : 飽和度 (%) V _b : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _a : 混合体中の空気の容積 (cm) A _v : アスファルト容積率 (%) V _v : 空隙率 (%) | $VFA = 100 \times \frac{V_{bc}}{V_b + V_a} = 100 \times \frac{A_g}{VMA}$ ここに、 VFA : 飽和度 (%) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _b : 混合体中の空気の容積 (cm) A _g : アスファルト容積率 (%) VMA : 骨材間隙率 (%) | $VFA = 100 \times \frac{V_{bc}}{V_b + V_a} = 100 \times \frac{VMA - VIM}{VMA}$ ここに、 VFA : 飽和度 (%) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _b : 混合体中の空気の容積 (cm) V _a : 骨材間隙率 (%) VMA : 骨材間隙率 (%) VIM : 空隙率 (%) | $VFA = 100 \times \frac{V_{bc}}{V_b + V_a} = 100 \times \frac{VMA - P_a}{VMA}$ ここに、 VFA : 飽和度 (%) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _b : 混合体中の空気の容積 (cm) V _a : 骨材間隙率 (%) VMA : 骨材間隙率 (%) P _a : 空隙率 (%) | $VFA = 100 \times \frac{V_{bc}}{V_b + V_a} = 100 \times \frac{VMA - P_a}{VMA}$ ここに、 VFA : 飽和度 (%) V _{bc} : 混合物のアスファルト容積 (cm) V _b : 混合体中の空気の容積 (cm) V _a : 骨材間隙率 (%) VMA : 骨材間隙率 (%) P _a : 空隙率 (%) |

3. 4. 3 対象国等でのマーシャル特性値の試算

表－4に示す配合（配合、骨材・アスファルト性状）の新規合材について、対象国等での算出方法（表－2および表－3）を用いて、マーシャル特性値を試算した。

新規合材の配合設計方法およびマーシャル特性の名称は、わが国と対象国等ではほぼ同じであるが、マーシャル特性値は算出方法が異なり値に相違が生じる（表－5）。

同一配合・材料の新規合材であっても空隙率は、わが国では4.8％、タイ王国および算出方法が同一のインドネシア共和国とアメリカ合衆国では4.0％、中華人民共和国では4.7％と評価されることになる。骨材間隙率については、わが国よりも対象国等の方が約2％も小さく評価される。

海外文献等でマーシャル特性値を評価する場合は、この点に留意が必要である。

4. あとがき

わが国の新規合材の製造技術の中で配合試験については、対象国において技術基準類が整備されており展開する技術的な項目がないと考える。

しかしながら、再生合材の配合試験においては骨材に吸収されるアスファルトの量をどのように考えるか等、マーシャル特性値の算出方法の検討が必要と考える。

再生合材の規格化の気運（改訂も含む）が高まると想定されるアジア地区においては、合材事業者がわが国の優れた再生合材の製造や技術を活用して事業参画し、その国に社会貢献できることができる。

これを推進させるためには、①わが国の新規合材のマーシャル特性値の算出方法等が「ガラパゴス化」している、②技術基準理類が対象国等で「行政文書」に対してわが国は「参考書」の扱いが多い等の課題について取り組む必要がある。

表－4 試算に用いたデータ

| 骨材名 | | 骨材 1 | 骨材 2 | 骨材 3 | 骨材 4 | 合計 |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 配合割合 | % | 50.0 | 20.0 | 22.0 | 8.0 | 100.0 |
| かさ密度 | g/cm ³ | 2.711 | 2.632 | 2.64 | 2.662 | － |
| 見掛け密度 | g/cm ³ | 2.768 | 2.672 | 2.674 | 2.688 | － |
| 吸水率 | % | 1.20 | 0.92 | 0.79 | 0.58 | － |
| アスファルト量〔外割〕 | % | 5.20 | | | | |
| アスファルト量〔内割〕 | % | 4.94 | | | | |
| アスファルトの密度 | g/cm ³ | 1.042 | | | | |
| アスファルト混合物のかさ密度 | g/cm ³ | 2.399 | | | | |
| アスファルト混合物の最大密度試験値 | g/cm ³ | 2.499 | | | | |

表－5 マーシャル特性値等の試算結果

| 性状項目 | 日本 | タイ王国 | 中華人民 共和国 | インドネシア 共和国 | アメリカ 合衆国 |
|------------------------------|-------|-------|-------------|---------------|-------------|
| 骨材の合成かさ密度 g/cm ³ | 算出しない | 2.675 | 2.675 | 2.675 | 2.675 |
| 骨材の合成見掛け密度 g/cm ³ | 算出しない | 算出しない | 2.721 | 算出しない | 算出しない |
| 骨材に吸収された アスファルトの質量割合 % | 算出しない | 0.29 | 0.62 | 0.29 | 0.29 |
| 有効アスファルト量 % | 算出しない | 4.66 | 4.35 | 4.66 | 4.66 |
| 骨材の有効密度 g/cm ³ | 算出しない | 2.695 | 2.718 | 2.696 | 2.695 |
| アスファルト容積率 % | 11.4 | 10.7 | 算出しない | 算出しない | 算出しない |
| 骨材容積率 % | 算出しない | 85.3 | 算出しない | 算出しない | 算出しない |
| 理論最大密度 g/cm ³ | 2.520 | 算出しない | 2.518 | 2.499 | 2.499 |
| 骨材間隙率 % | 16.2 | 14.7 | 14.7 | 14.3 | 14.3 |
| 空隙率 % | 4.8 | 4.0 | 4.7 | 4.0 | 4.0 |
| 飽和度 % | 70.4 | 72.8 | 68.0 | 72.0 | 72.0 |

そこで筆者は、「わが国の再生合材製造技術のアジア地区の展開」を図る上で不可欠と考える取り組みについて思慮した。それは以下に示すとおりである。

- ①舗装再生便覧⁵⁾等の図書を行政文書化して、信頼度を更に向上させる。
- ②その図書の英語版を発刊し、関連文献とともに海外へ積極的に発信する。
- ③国の支援事業を活用することにより、効果的な展開を図る。
- ④対象国の保有技術に、わが国の優れた再生合材の技術を融合させる。
- ⑤母国語以外の言語を習得し、コミュニケーション力の向上を図る。

最後に対象国等では、Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) による新規合材の配合設計も試みられているが、再生合材の配合設計方法として適用できるかの見極めも必要である。

謝辞

執筆の機会をいただいた(一社)日本アスファルト協会編集委員会の皆様ならびに資料の提供を頂いた大田氏、陳氏、シータンヤー氏、トミー氏に対して紙面をお借りし、ここに厚く御礼申し上げます。

—— 参考文献 ——

- 1) 曾根真理：日本の技術の国際展開（道路分野の例）、国土技術政策総合研究所 <http://www.nilim.go.jp>
- 2) (公社) 日本道路協会：舗装施工便覧（平成18年度版），2006,2 p247,p102
- 3) (一社) 日本道路建設業協会：アスファルト混合物事前審査制度
<http://www.dohkenkyo.or.jp/kyokai/index.htm>
- 4) (公社) 日本道路協会：舗装調査試験法便覧，2007,6 第4分冊p238
- 5) (公社) 日本道路協会：舗装再生便覧（平成22年版），2010,11

アスファルト舗装に発生する低温ひび割れの対策事例 —モンゴル国でのJICA技術協力プロジェクトの検討事例から—

(A Case Study of Countermeasures Against the Low Temperature Cracking in Asphalt Pavement
- From a Case Study of the JICA Technical Cooperation Project in Mongolia)

遠 藤 桂*

モンゴルの気候は非常に厳しく冬は氷点下40℃になることもある。このような気候条件下では、アスファルト舗装が収縮して横断方向に低温ひび割れが発生するため、モンゴルの舗装を管理する上で重要な課題となっている。モンゴル国はJICAの技術協力プロジェクトと共同でこの課題に取り組み、現地で試験舗装を行うなどした結果、施工後にカット目地を設けること、その間隔を10m程度にすることで、低温ひび割れの発生を抑制できることを確認した。

1. はじめに

モンゴルは、およそ北緯42度から52度に位置する1,57百万km²の国土面積を有する国である(図-1)。西部には標高4,300mのアルタイ山脈や標高4,000mのハンガイ山脈、東部には標高1,000～1,500m程度の高原が広がり、そして南部には標高1,000mを超える広大なゴビ砂漠がある。このようなモンゴルの気候は、大陸性気候に分類され、首都ウランバートルの1月の平均日最高気温が氷点下15℃程度であるなど、長い冬の気候は極めて厳しい。気温は氷点下40℃に達することもある。

モンゴル国は、2020年時点で111,926.7kmの道路網を管理している。内訳は、10,151kmの舗装道路、1,207.89kmの砂利舗装道路、604.9kmの改良済み道路、そして、99,952.93kmの未舗装道路である。舗装道路には、4,299.2kmのアジアンハイウェイが含まれる。舗装道路の多くはアスファルト舗装であり、冬期の厳しい気候条件下では、アスファルト舗装が収縮して横断方向にひび割れる低温ひび割れ(以下、LTC)が全国的に発生している(写真-1)。モンゴルの道路運輸開発省は、LTCを含む舗装の損傷に対して限られた予算で対策し、道路網を適切に維持・管理していく必要があり、国際協力機構(JICA)の技術協力プロジェクトとこれらの課題に取り組むことにした。

本稿では、このようなアスファルト舗装に発生するLTCの対策案を現地の試験舗装で採用し、その効果に

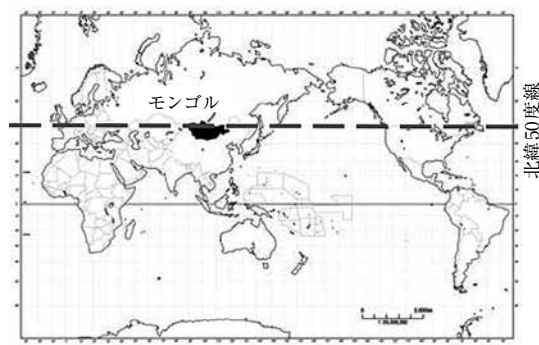


図-1 モンゴルの位置



写真-1 モンゴル国内の低温ひび割れの例

*えんどう かつら 日本道路株式会社 技術研究所

について確認した結果を紹介する。

また、その過程で、日本国内ではあまり見られない路盤のひび割れが観察されたので、その考察とともに紹介する。

2. LTC 対策の検討

2.1 モンゴルの一般的なアスファルト舗装

モンゴルの一般的なアスファルト舗装構成は、都市部を除き、粒状路盤上にアスファルト混合物層を5 cm 厚で1層施工したものである。アスファルト混合物の製造にあたっては、針入度90/130のストレートアスファルトが広く用いられている。

2.2 LTC 対策案

LTC 対策案として真っ先に取り上げられるのは、使用するバインダを変更することである。例えば、SuperpaveのPG58-40のようなバインダを用いると一定の効果がある¹⁾と考えられる。しかしながら、改質バインダはモンゴル国内ではまだ研究段階であり、実用化には様々な課題があった。

LTC は、一般に、舗装構造、温度条件、アスファルト混合物性状、バインダ性状などに影響を受ける²⁾。そこで、過去の文献を参考に、当時のモンゴルで入手可能あるいは実施可能と考えられた技術を用い、以下の着眼点による提案を行った。

- ①表層の種類による影響
- ②アスファルト混合物層の厚さによる影響
- ③カット目地の採用^{3, 4)}と目地間隔による影響

JICAの技術協力プロジェクトは、2019年3月に始まり、COVID-19の影響で約1年の延長を経ながら、関係各者の積極的な協力により、これらの提案を確認するためのパイロットプロジェクト工事が、2021年9月と2022年6月に実施できた。

3. パイロットプロジェクト工事の概要

3.1 共通項目

2.2に挙げた①～③を2件のパイロットプロジェクト工事で実施した。いずれも既設アスファルト舗装の補修工事として施工した。アスファルト混合物には、LTC対策を意図して針入度100/130のストレートアスファルトを用いた。比較のため、モンゴルで一般的に使用されている表層材料の工区も設けた。

3.2 2021年のパイロットプロジェクト工事

2021年のパイロットプロジェクト工事は、モンゴルでCOVID-19対策の緩和がなされて、外国からの入国が許可された直後に実施したため、結果として現地の施工者との意思疎通が十分でなく、一部当初計画と相違が生じたが、図-2の断面で施工できた。施工後の状況例を写真-2に示す。

(1) 表層の種類による影響

日本での粒度範囲を満足する密粒度アスファルト混合物(20)(以下、密粒度1)、北海道で表層として採用実績のある細密粒度ギャップアスファルト混合物



写真-2 2021年のパイロットプロジェクト工区

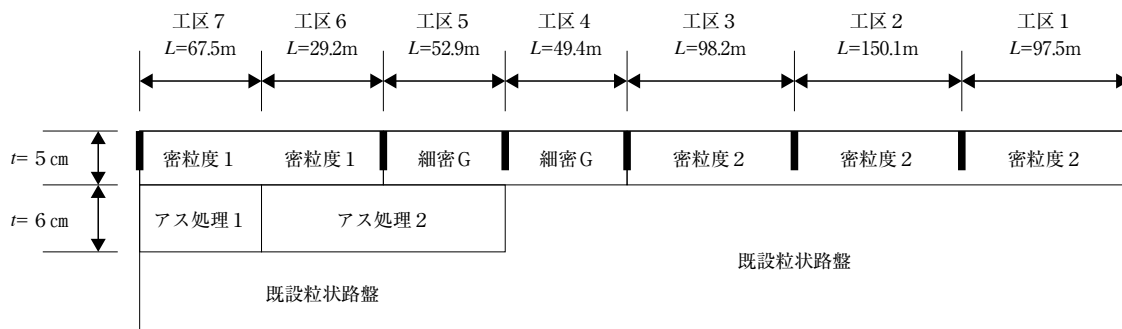


図-2 2021年のパイロットプロジェクト施工断面

(20) (以下、細密G), そして、モンゴルで一般的に使用されている混合物 (以下、密粒度2) を厚さ5 cmで表層に用いた。

(2) アスファルト混合物層の厚さによる影響

一部の工区で表層下に厚さ6 cmの日本の粒度範囲を満足するアスファルト安定処理層 (以下、アス処理1) と、モンゴルで用いられているアスファルト安定処理 (以下、アス処理2) を設けた。

(3) カッタ目地の採用と目地間隔による影響

一部の工区で、アスファルト混合物施工後に横断方向にカッタ目地を施工し、その目地間隔を変化させた。目地間隔は、アスファルトの線膨張係数からセメントコンクリート舗装の目地間隔よりは長くてよいと考え、工区1では10m間隔、工区2では30m間隔、そして工区3の中間位置に1本設けて50m間隔とした。各工区の施工目地もカッタ目地 (図-2中の太い縦線) としており、表層の種類が異なるが目地間隔100mの工区とみなすことができる。すべてのカッタ目地には、加熱アスファルトを流し込んで目地を保護している。

3.3 2022年のパイロットプロジェクト工事

2022年のパイロットプロジェクト工事では、各工区延長が100mまたは150mで表層には密粒1を用いて、工区8は比較用に密粒2の工区とした。工区9には6 cm厚のアス処理1を設けた。工区10は10mごと、工区11は30mごと、そして、各工区境にカッタ目地を設けた (図-3)。

4. パイロットプロジェクト工事の結果から見た各LTC対策の効果

JICAの技術協力プロジェクトは、2023年3月で終了したため、2022年のパイロットプロジェクト工事で一冬越えた後のLTC発生状況等は確認できていない。

したがって、2021年施工の結果についてのみ結果を示して考察する。

一冬経過後の2022年4月に現地を訪れてLTCの発生状況を観察したところ、写真-3に示すようなLTCが発生していた。しかし、ひび割れ幅は狭く、通行車両によってOWPやIWPのひび割れがつぶれるような現象はまだ起きていなかった。

舗装の全幅員は7 mである。発生したLTCを見ると、全幅にわたって横断ひび割れとなっているLTC (以下、FLWのLTC) があれば、幅員の一部分のみがひび割れている場合もあった。

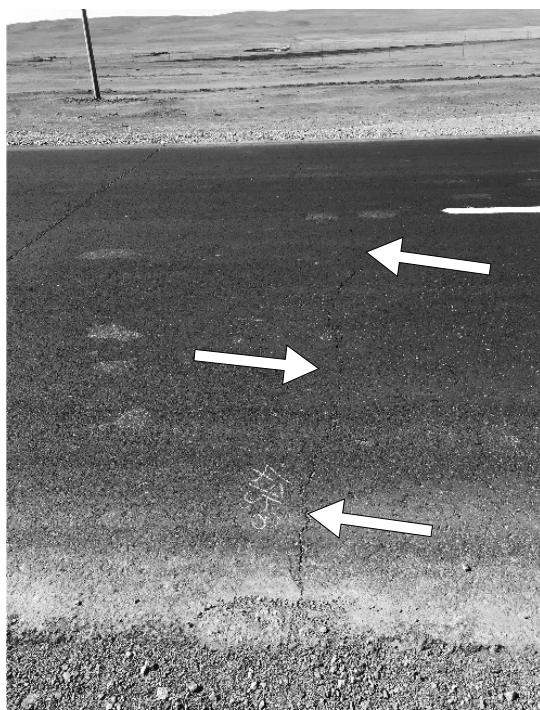


写真-3 一冬経過後発生したLTCの例

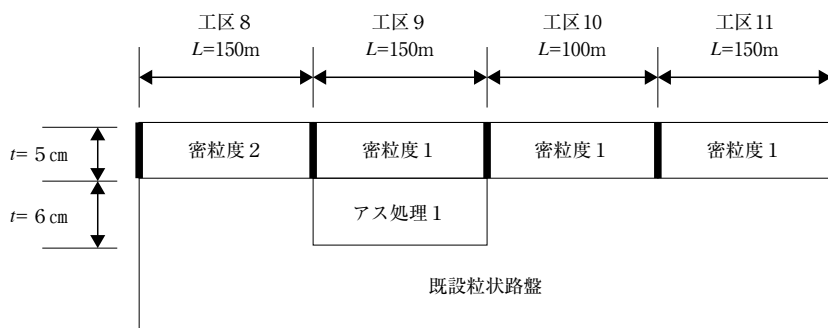


図-3 2022年のパイロットプロジェクト施工断面

各工区に発生しているLTCの数は図-4のとおりであった。一見すると工区6のLTC発生数が少なく見えるが、各工区の延長が異なる。そこで、延長100mあたりのLTC数に換算して比較したところ図-5と図-6のようになった。前者はアスファルト層数別、後者は表層種類別で整理している。

統計的に十分な数のデータが得られたわけではないことを承知の上で考察すると、アスファルト混合層の厚さと種類については、明確な特徴は観察されていない。

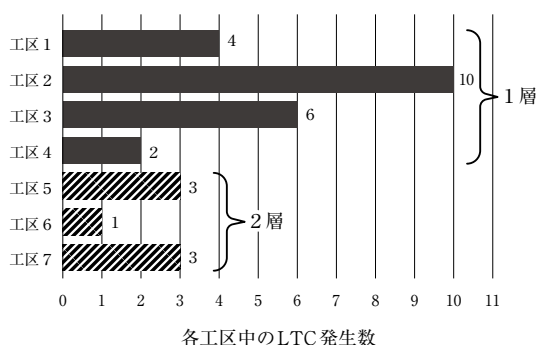


図-4 一冬経過後のLTCの工区別発生数

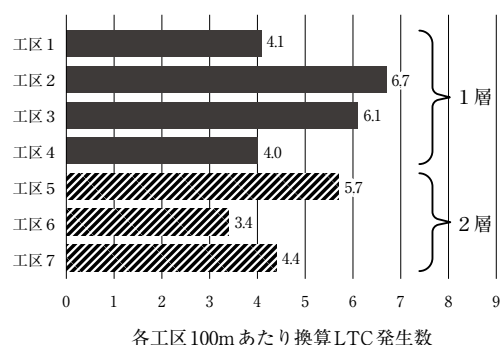


図-5 一冬越えた後のLTCの工区別発生数

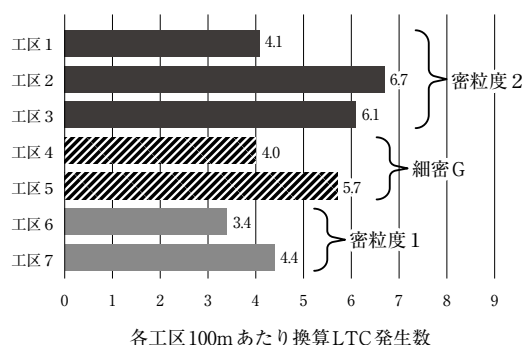


図-6 一冬越えた後のLTCの工区別発生数

一方、この結果をカット目地間隔で整理すると図-7のようになる。カット目地の間隔が短いほど、100mあたりのLTC発生数が少ない傾向を示した。図中に▲で示した2層工区の工区6も、カット目地間隔との関係として示すと、他のデータと同様の傾向を示しているのがわかる。図-8には、これらのLTCのうちFLWのLTCのみを抽出して示している。カット目地間隔が短いほど、FLWのLTC発生数が少なくなる傾向にある。

カット目地は、横断方向の収縮ひび割れをあらかじめ物理的に発生させたものと同義であるため、このような結果が出るのは当然である。むしろ、カット目地間隔が10mでも完全にLTCを防ぐことができないことは、モンゴルの冬期の気候が極めて厳しく、アスファルト舗装がセメントコンクリート舗装並みに収縮することを示唆していると言える。一方で、この結果は、表層の種類など他の因子も関与していることから、カット目地間隔を30m以下にすることで、一冬後のLTC数をゼロにできる可能性があるとも見ることできる。

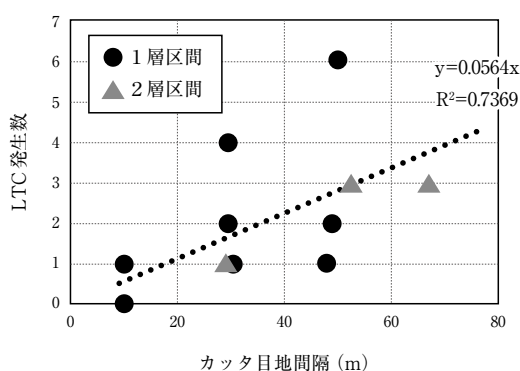


図-7 カット目地間隔で整理したLTC発生数

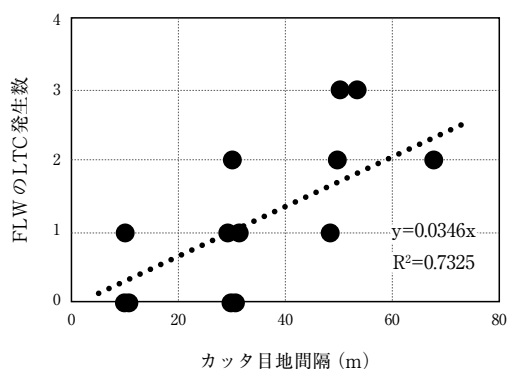


図-8 カット目地間隔で整理したFLWのLTC発生数

5. アスファルト舗装のLTC対策としてのカット目地の妥当性

コンクリート舗装と同様にアスファルト舗装にも施工後に横断方向のカット目地を設けると、目地間隔が短いほど、その後のLTCの発生を抑制できることがわかった。しかし、本試験舗装で採用した10mや30m間隔が最適であるかどうかは、経済性の観点などからさらなる検討の余地がある。

供用後のLTCの維持作業のことを考えれば、

- LTC発生後のどのタイミングでクラックシールを施すのか判断が難しい
- 発生しているLTCのひび割れの幅が一定でないため、シール材としての加熱アスファルトが十分に入らず、封かんとしての十分な機能が得られない可能性が高い
- その結果、路面に盛り上がったシール材が、通行車両へ振動を与えたり、タイヤに付着してシール材はがれたりすることにつながる可能性が高い

などの課題をカット目地は解決してくれて、将来のLTC対策維持作業に係る手間や費用を軽減できる可能性が高い。また、カット目地は自然発生するLTCと異なり、横断方向に一直線に同一幅かつ一定間隔で施工することから、クラックシール材が入りやすく、見た目もよいという利点がある。

一方で、カット目地を施工する手間と費用が、アス

ファルト舗装工事に追加で発生することは事実であり、工事期間が長くなるなど、舗装の建設費用は上昇する。また、モンゴルの厳しい気候条件下では、本試験舗装で得た10m間隔では完全にLTCを防ぐことが難しく、仮にさらに短い間隔にすると、これに合わせてコストは上昇する。

このように、カット目地を採用するにしても、目地間隔とLTCの発生予防効果、建設コスト、維持コストなどを総合的に勘案して、最適なカット目地間隔を求めることが望ましい。

6. 粒状路盤上に発生するLTC

6.1 概要

2021年のパイロットプロジェクト工事区間に発生しているLTCを観察したとき、写真-4や写真-5に示したような、路肩部分の粒状路盤にも横断方向のひび割れが発生していた。この横断ひび割れは、アスファルト混合物に発生しているLTCにつながっているものがあれば、独立して発生しているものもあった。また、両外側路盤に発生しているものがあれば、どちらか片側一方だけのものもあった。全工区合計で12本観察されたが、工区による特徴的な差は見られない。

6.2 発生原因の考察

一般に、寒冷地の粒状路盤や路床で懸念されるのは、水分が凍結することにより体積が増大して周囲を持ち

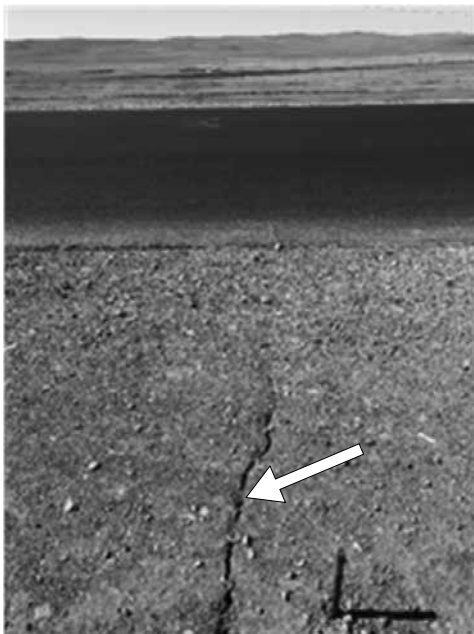


写真-4 路盤に発生したひび割れの例



写真-5 路盤に発生したひび割れの例

上げる、いわゆる凍上である。しかし、路肩部分にはもちろんのこと、アスファルト舗装部分にも凍上の痕跡は一切見られない。

モンゴルの年間降水量は50～400mm程度で、日本の平均年間降水量である約1,700mmと比べるとかなり降水量は少ない。そして、モンゴルの降雨は6月から9月に集中し、その他の月は数mm程度でLTCが発生する冬期は乾燥している。

図-9は、不飽和粘性土の飽和度と凍結時の体積変化率との関係を参考文献⁵⁾から引用したものである。この図から、不飽和粘性土は、ある一定の飽和度以下では、凍結時に膨張ではなく収縮することがわかる。当該路盤の土質の分類を行っておらず、このデータは粘性土のものであるが、当該路盤でも同様の現象、つまり、乾燥した路盤中の水分の凍結によって路盤が収縮したものと推察できる。この仮説が正しければ、この路盤に発生した横断方向のひび割れもLTCであると言える。

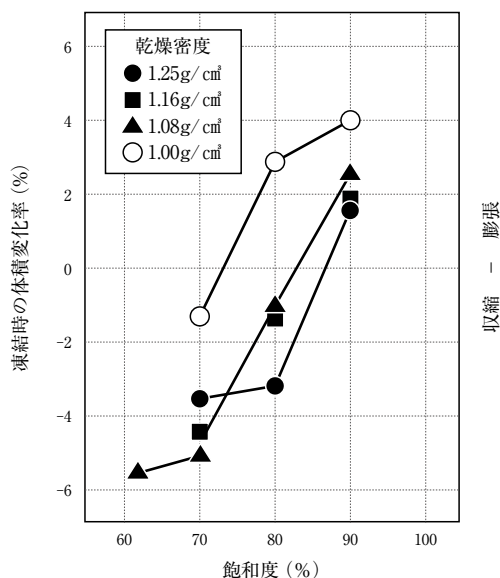


図-9 飽和度と体積変化率の関係⁵⁾
(参考文献5の24ページより引用)

7. LTCの季節変化

7.1 春期から夏期の変化

上記のLTCの観察から2か月後の2022年6月に再び現地を訪問して、LTCの経過観察を行った。すると、元々ひび割れ幅が極めて狭かった表層上のLTCの数本が目に見えない程度に閉じるなど、全体に幅が狭くなっていった。

路盤部分の12本のLTCは、2本を除いて消失していた。風などにより砂やほこりのような細粒分がLTC部分に入り込んだ可能性があると思い、丁寧に表面部分を取り除いてみたが、LTC自体が閉じて消えたものと判断した。これは、暖かい季節になって、冬期の収縮状態から体積変化が元に戻ったものと考えられる。

7.2 秋期から冬期の変化

モンゴルでも記録的な寒波が襲った2023年1月にも現地を訪れたところ、アスファルト舗装部分のLTCは、写真-6のように雪が入り込むほどに幅がかなり広がっていた。同様に、路肩部分のLTCも写真-7のように幅が広がっていた。

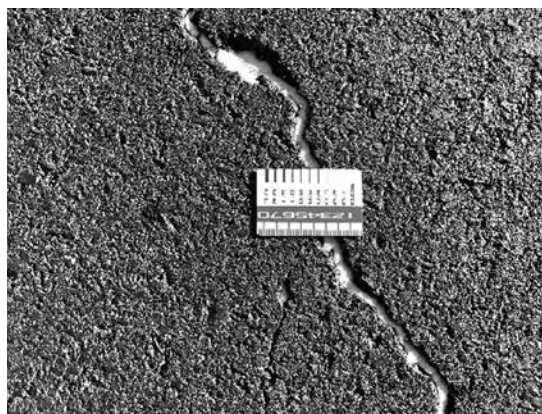


写真-6 ひび割れ幅が広がったLTC

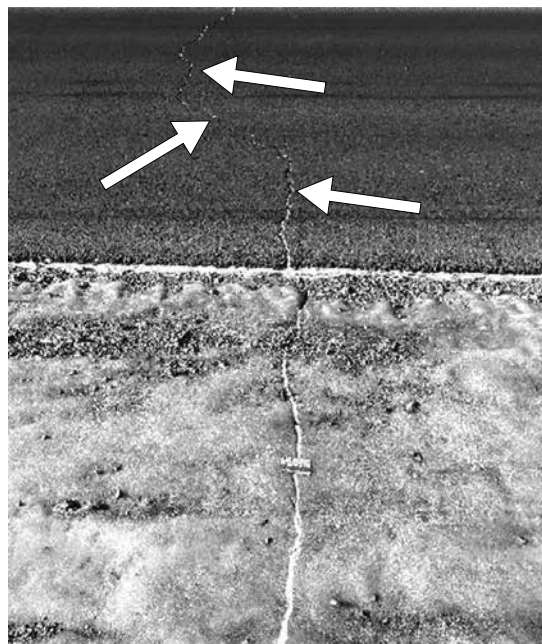


写真-7 ひび割れ幅が広がったLTC

7.3 LTCの季節変化

以上の状況からLTCについて考察すると、春期～秋期に施工されたアスファルト舗装は、最初に迎える冬期の過酷な気温変化により舗装が収縮して、まず幅の狭いLTCが舗装表面に現れる。来る春期～夏期には収縮による体積変化が元に戻り、LTCの幅が狭まるか一部は消失することもある。そして、次の冬期に再び舗装が収縮して、すでに発生しているLTCのひび割れ幅は、以前よりも広がるといった、収縮と復元あるいは膨張のプロセスの繰り返しが累積して、いつか補修が必要になるほどにLTCの幅が広がるものと考えられる。

8. 最後に

以上、モンゴルのアスファルト舗装で課題となっている低温ひび割れへの対策案を検証するための、JICAの技術協力プロジェクトによる試験舗装とカット目地の効果に関する考察を述べた。また、地域条件により路盤や舗装は凍上するのではなく、収縮して低温ひび割れとなる場合があること、季節ごとにこれらの低温ひび割れの様態が変化していくことなどについて考察した。

本稿は、JICAの技術協力プロジェクト「モンゴル

の気候条件に適した道路舗装技術能力向上プロジェクト」の成果の一部をとりまとめたものである。また、北海道大学の石川達也教授には路盤のひび割れ現象について貴重な助言をいただいた。各位には心より感謝申し上げます。

—— 参考文献 ——

- 1) NCHRP: Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, p.14, 1994
- 2) Colorado DOT: Investigation of Low Temperature Thermal Cracking in Hot Mix Asphalt, p.2, February 1995
- 3) Minnesota DOT: Sawing and Sealing Joints in Bituminous Pavements to Control Cracking – Final Report, p.35, March 1996
- 4) Liu J. et al.: Evaluation of Precut Transverse Cracks for an Asphalt Concrete Pavement in Interior Alaska (Moose Creek –Richardson Highway), p.42, August 2015
- 5) 小川, 西村, 和田: 三次元的凍結-融解を受けた不飽和粘性土の体積変化および強度定数, 土木学会論文集No.430/III-15, pp.21-28, 1991年6月

アスファルト乳剤の変遷と最新の技術動向

(History of Asphalt Emulsion in Japan, and The Latest Technological Trends)

(一社) 日本アスファルト乳剤協会

今回は100回目となる記念大会であり、(一社) 日本アスファルト乳剤協会は、表題に示すとおり、大正時代から始まったアスファルト乳剤の今日までの変遷を辿るとともに、最新の技術動向について紹介した。本稿ではその一部を抜粋して記載する。

1. アスファルト乳剤の変遷について

1.1 アスファルト乳剤の始まり

アスファルト乳剤とは、常温で半固体のアスファルトをエマルジョンにすることで取り扱い易くしたもので、主にアスファルト舗装で使用される。

アスファルト乳剤は、1906年に米国のカールマンが特許を取得したことが始まりとされている。その後、ドイツやイギリスで砂利道の砂塵防止や、構造物の防水などを目的として製造がはじまり、日本でもビチュマルスという製品を輸入して用いられるようになった。当初の散布式乳剤舗装を写真-1に示す。乳剤の散布はジョウロで行い、その上に固着させる碎石はふるいで散布されていた。

日本では、1926年に東京市（現在の東京都）が研究を開始したことがアスファルト乳剤の歴史の始まりとされている。その後、製造方法が確立したことを皮切りに、民間でも次々に製造されている。

終戦を迎えると、日本の復興をいち早く推し進めよ

うと1945年に（一社）日本道路建設業協会が設立され、1947年に（公社）日本道路協会が設立した年に、復興の一翼を担うべく当協会も発足している。

1.2 カチオン乳剤の登場

アスファルト乳剤の最大の転換期は、カチオン乳剤の登場である。

戦前のアスファルト乳剤は、電荷が-を示すアニオン乳剤が主流であり、濡れると表面が-の電荷を示す碎石と反発して付着が悪く、雨が降ると流れ出す課題が指摘されていた。

1957年に米国で電荷が+を示すカチオン乳剤が開発されたことを聞きつけ、日本でも研究が開始されて2年後にはすでに製品化されている。このカチオン乳剤は、濡れた碎石にも電氣的に付着が強く、雨でも流れ出ることが大幅に減少した。現在ではタックコートや散布式表面処理に用いられる浸透用乳剤は、すべてこのカチオン乳剤に集約されている。

カチオン乳剤の高い付着性を表す事例を写真-2に示す。水中において、右のアニオン乳剤は骨材から剥



写真-1 ジョウロによる乳剤の散布



写真-2 水中における骨材への付着状況

がれているのに対し、左のカチオン乳剤は骨材の表面から剥がれずに安定していることが伺える。

1.3 アスファルト乳剤の出荷量

戦後の復興から、高度経済成長期に至る日本経済の急速な進展の中で、その大動脈となる道路の建設は追い付かず、特に地方道の建設が急務であった。そのような時代の要請の中で、1964年に「特殊改良第四種事業」が発出され、簡易舗装でまず舗装率を上げようとする動きが加速された。これとカチオン乳剤の台頭が合わさり、図-1に示すようにアスファルト乳剤の出荷量は右肩上がりに加速度的に増えていった。

1970年にはピークの70万tに達したが、それ以降は加熱アスファルト混合物が主流となったため出荷が減少を続け、現在では15万t程度で推移している。

今後は、加熱アスファルト混合物一辺倒で進んできた時代を見直す時期に来ていると思われる。二酸化炭素の排出抑制などの時代の要請を踏まえ、アスファルト乳剤を用いた舗装技術の進展も含めて、環境へ配慮した社会資本整備が進展していくことが期待される。

1.4 各種アスファルト乳剤の変遷

アスファルト乳剤は、タックコート、プライムコートや表面処理に用いられる浸透用と、常温混合物やセメント・アスファルト乳剤安定処理路盤工法に用いられる混合用に大別される。ここでは、その中から代表して、タックコートの変遷について紹介する。

タックコートは、新たに舗設するアスファルト混合物層とその下層の瀝青安定処理層、中間層、基層との

接着や、舗装の継ぎ目部や構造物との付着を高めるために散布する浸透用乳剤である。一般用のPK-4、接着を高めるためのゴム入り乳剤であるPKR-T、施工機械のタイヤへの付着を抑制するPKM-T、低温期でも速く分解するPKM-T-Qが規格化されている。これらの開発経緯を表-1に示す。

表-1 各種タックコートの開発経緯

| | ニーズ・時代背景 | 対応乳剤 |
|-------|------------------|---------|
| 昭和～後期 | ・加熱アスファルトの普及拡大 | PK-4 |
| 平成初期 | ・ポーラスアスファルト舗装の普及 | PKR-T |
| | ・舗設時のタイヤへの付着抑制 | PKM-T |
| 平成後期 | ・舗設時の施工時間短縮 | PKM-T-Q |

(1) PKR-T (ゴム入りアスファルト乳剤)

アスファルト乳剤にSBRなどのラテックスを加えることでバインダの凝集力を高め、接着力を向上したタックコートである。ポーラスアスファルト舗装は、密粒度アスファルト舗装に比べて裏面の接着面積が小さいため、より大きな接着力が求められ、PKR-Tが用いられるようになった。

(2) PKM-T (タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤)

バインダを改質することで、針入度を小さく、軟化点を高くし、高温時に舗設機械のタイヤへの付着を抑制したタックコートである。

夏季の高温時では、アスファルトが軟化し、合材

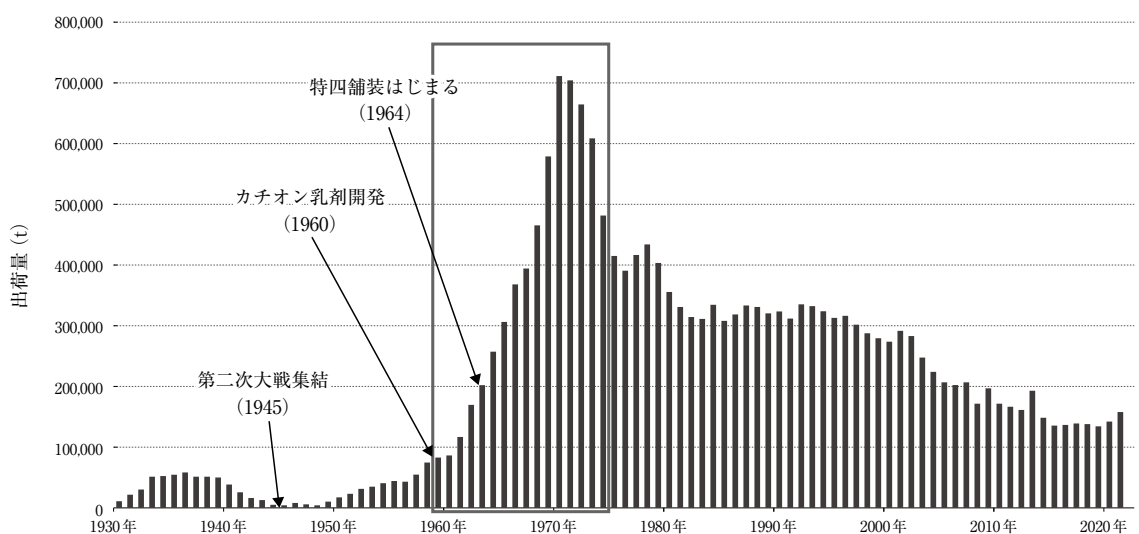


図-1 アスファルト乳剤出荷量の推移

ダンプなどが載った時にタックコートが剥がれてタイヤに付着することがある。PKM-Tは上述した改質乳剤であるため、夏季高温時の施工機械のタイヤへのべたつきが大幅に改善される。

(3) PKM-T-Q (速分解型アスファルト乳剤)

冬季の現場では、タックコートの分解が遅いために養生を待つ必要があり、次工程まで長い時間を要していた。PKM-T-Qは、季節によらず数分で分解し、短時間の養生で次工程に移ることができる。

写真-3は、冬季の夜間で気温5℃の条件でPKM-TとPKM-T-Qを散布して5分後の状況である。PKM-Tが未分解であるのに対し、PKM-T-Qは分解して透明な水が出ている状況が分かる。

都市部や空港舗装など、施工時間の制約が大きい工事での採用が拡大している。

2. 最新の技術動向について

2.1 (国研) 土木研究所と当協会による表面処理工法の共同研究の成果

(国研) 土木研究所の先端材料資源研究センター(iMaRRC)と当協会では、2018年から5年間の期間で、加熱アスファルト舗装より安価に維持管理できる工法として、表面処理工法の利活用の促進を目指し、既設舗装の延命効果を検証するための共同研究を行った。

主な研究内容は、各種表面処理工法について既設アスファルト舗装の劣化抑制効果を検証することであり、室内における促進耐候性試験、およびつくば市内における試験舗装で供用調査による効果の検証を行っている。

対象工法は、① Fog Seal、② 薄層表面処理工法、③ チップシールの3種であり、試験舗装では軽交通から重交通を選定し、交通量などの対象路線の選定も含めた調査を継続している。

2018年に全6路線で試験施工を行い、1年ごとに一般の路面性状(ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性)に加え、きめ深さやすべり抵抗性、およびたわみ量などを調査し、表面処理工法の効果を最大3.5年まで調査し解析してきた。

その結果、図-2に示すように表面処理工法を行うことで、ひび割れ率の増加速度が遅くなっており、特にひび割れ率が10%以上あった既設舗装においては半分程度の

増加速度となっていることが確認された。今後も引き続き調査を続け、舗装の延命効果を検証していきたい。

2.2 アスファルト乳剤を用いた工法のCO₂削減効果の事例

建設分野は、資材の製造や運搬、施工機械の燃料など、CO₂の排出に及ぼす影響が大きい産業であり、各工程でCO₂削減に向けた研究開発が進められているところである。

アスファルト乳剤は、加熱して使用するアスファルトを常温で扱えるようにエマルジョンにした材料であり、CO₂排出抑制には極めて有効な素材といえる。

そこで、構造的損傷により路盤から修繕しなければならない事例について、(公社)日本道路協会から発刊されている「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック」に示されている条件を元に、① 舗装打換え工法、② 路上路盤再生工法(セメント・アスファルト乳剤安定処理路盤)について、工事全体におけるCO₂排

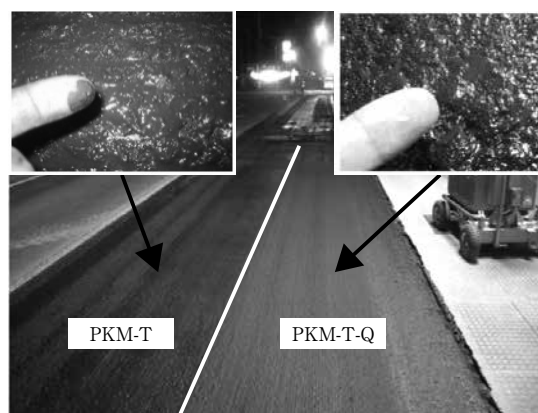


写真-3 散布5分後の乳剤の分解状況

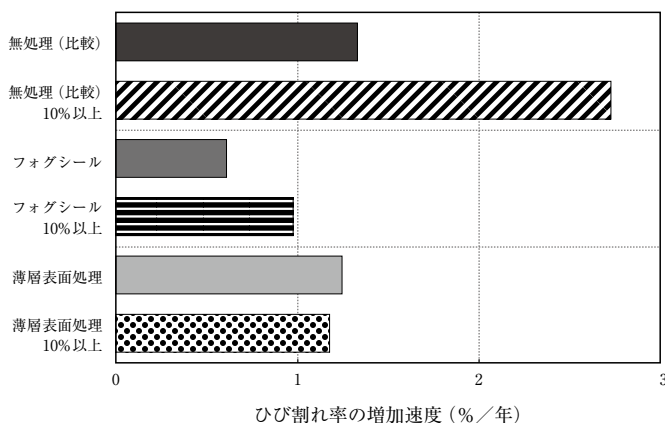


図-2 既設舗装のひび割れ率の増加速度

出量の比較を行った。

既設舗装材撤去・運搬、各層の構築、資材・機材運搬など工事全体から発生したCO₂排出量を積み上げたものを図-3に示す。

舗装打換え工法と比較し、路上路盤再生工法は工事全体でCO₂排出量を約48%削減できると試算された。この中で特に大きい工程は、既設材の排出と資材の搬入であり、現位置で再生できることがCO₂の排出抑制に大きく寄与していることが判明した。

また、常温で扱えるアスファルト乳剤の効果は、5cm厚の加熱アスファルト混合物と、15cm厚のセメント・アスファルト乳剤安定処理がほぼ同等のCO₂排出量であることから、今後、表層や基層用の乳剤混合物が確立できれば、より多くのCO₂排出量の削減にも寄与できるものと期待できる。

おわりに

高度経済成長期以降から今日まで出荷量が減少しているアスファルト乳剤ではあるが、昨今のCO₂排出抑制など環境への配慮が重要視される中で

は、最も時代に即した舗装用材料といっても過言ではないと言える。

しかし、表層や基層用混合物としては加熱アスファルト混合物と比較して強度が小さいことは否めない事実であり、現状は適材適所での運用を図ることが望ましい。

当協会は、今後、時代の要請に応じた製品や工法を提供すべく研究開発を行っていくことで、引き続き社会に貢献していきたい。

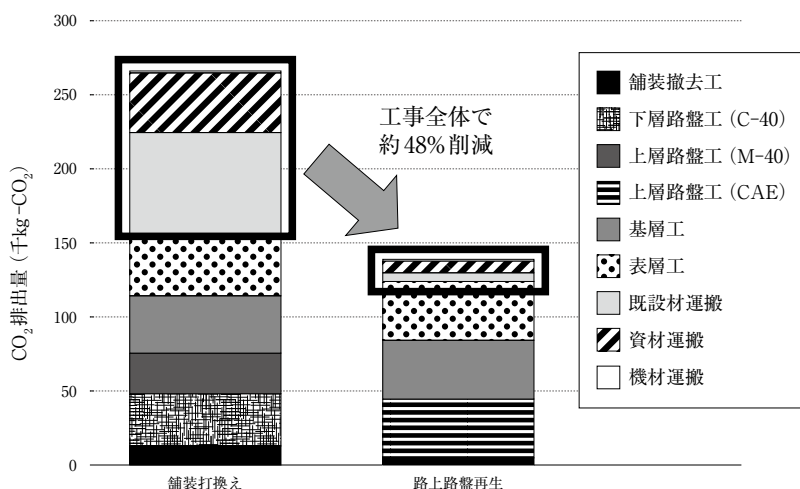


図-3 各修繕工法のCO₂排出量

ポリマー改質アスファルト技術の進歩について

(Technological Advances in Polymer Modified Asphalt)

(一社) 日本改質アスファルト協会

ポリマー改質アスファルト（以下、PMA）の研究は1897年にフランスでの検討に始まり、日本では1952年から始まった。それ以来PMAは70年以上にわたり、時代とともに変化するアスファルト舗装への要求性能に応じながら適用され続けている。第100回アスファルトゼミナールにおいて、(一社) 日本改質アスファルト協会はPMAの歴史を年代ごとにおける課題を交えながら報告し、今後求められると考えられる技術についても示した。本稿ではその一部を抜粋して紹介する。

1. はじめに

我が国の道路舗装のうち、アスファルト舗装が占める割合は90%以上と高く、アスファルトは現在の日本の道路において欠かせない材料である。アスファルトの中でもPMAは、道路舗装の耐久性を向上させ、長寿命化が期待できることから大型車の交通量が多い道路舗装を中心に多く使用されてきた。

本文では、PMAについて紹介したあと、その歴史を大きく6つの年代に分けて変遷を述べるとともに、近年推進されている「低炭素社会」に対してPMAができる貢献について記載する。

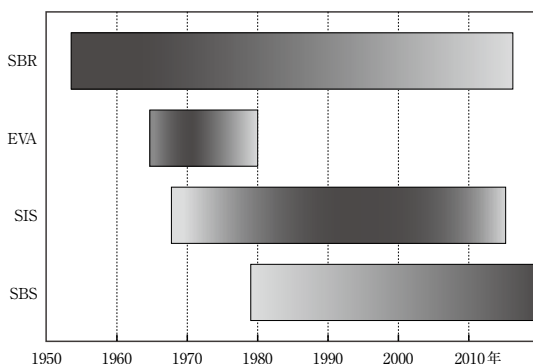


図-1 改質材の変遷

2. PMAとは

PMAはストレートアスファルトに、ポリマーである改質材や、その他添加剤を混合して製造されるアスファルトである。ストレートアスファルトと比較して軟化点が上昇していることに加え、接着力や低温における脆さが改善されており、アスファルト混合物（以下、混合物）に塑性変形やひび割れ、骨材飛散に対する抵抗性を付与できる。

改質材の変遷を図-1に示す。古くはゴムであるSBR（スチレン・ブタジエン・ランダム共重合体）や樹脂であるEVA（エチレン・酢酸ビニル）が使用されたが、現在は主に熱可塑性エラストマーであるSBS（スチレン・ブタジエン・スチレンブロック共重合体）が使用されている。SBSは常温では加硫ゴム並みのゴム特性を有し、熱可塑性樹脂と同様に高温では流動特性を持つことから、高温状態で製造し、常温で供用する加熱混合物とは特に相性が優れている。

PMAの基本的なグレードと適用箇所の対応を表-1に、現在の品質規格を表-2に示す。密粒度系の舗装に適用される改質Ⅰ型からⅢ型は、数字が大きい程、改質材の添加量が増加し、耐久性も向上する。また、改質Ⅲ型よりも改質材を多く含む改質H型は、ポーラス混合物に使用されている。W、Fといった付加記号は、それぞれ耐水性、可とう性を意味している。例えば、水の影響を受けやすく、交通荷重によりたわみやすい鋼床版上の橋面舗装では改質Ⅲ型-WFが使用される。

3. PMAの変遷

日本におけるPMAの歴史は、その規模や改質材の種類、社会情勢に伴う舗装の要求性能の変化によって6期に大別される。文献を元にPMAの変遷年表を次ページ表-3に示す^{1, 2, 3, 4, 5)}。

PMAの技術開発は2000年代初頭まで（～第Ⅴ期）

表-1 PMAの主要グレードと適用箇所

| 種類 | | Ⅰ 型 | Ⅱ 型 | Ⅲ 型 | | H 型 | | |
|--------------------------|------|-----------------------|-----|-----|-----|--------------|----|---|
| | 付加記号 | | | -W | -WF | | -F | |
| 適用混合物 主な適用箇所 | | 密粒度，細粒度，粗粒度等の混合物に用いる。 | | | | ポーラス混合物に用いる。 | | |
| 一般的な箇所 | | ◎ | | | | | | |
| 大型車交通量が多い箇所 | | | ◎ | | | ◎ | ◎ | |
| 大型車交通量が著しく多い箇所 および交差点 | | | | ◎ | ○ | ○ | ○ | |
| 積雪寒冷地域 | | ◎ | ◎ | ○ | ○ | ○ | | |
| | | | | | | | ○ | ◎ |
| 橋面（コンクリート床版） | | | ○ | ○ | ◎ | | | |
| 橋面（鋼床版） | たわみ小 | | ○ | ○ | | ◎ | | |
| | たわみ大 | | | | | ◎ | | |
| 排水性舗装 | | | | | | | ◎ | ◎ |

表-2 現在のPMAの品質規格

| 項目 | 種類 | | Ⅰ 型 | Ⅱ 型 | Ⅲ 型 | | | H 型 | | |
|-----------------|--------|----|-------------------|--------|--------|-------|------|--------|-------|--------|
| | 付加記号 | | | | | -W | -WF | | -F | |
| 軟化点 | | | ℃ | 50 以上 | 56 以上 | 70 以上 | | | 80 以上 | |
| 伸 度 | 7℃ | cm | 30 以上 | — | — | | | — | — | |
| | 15℃ | cm | — | 30 以上 | 50 以上 | | | 50 以上 | — | |
| タフネス (25℃) | | | N・m | 5.0 以上 | 8.0 以上 | 16 以上 | | | 20 以上 | — |
| テナシティ (25℃) | | | N・m | 2.5 以上 | 4.0 以上 | — | | | — | — |
| 粗骨材の剥離面積率 | | | % | — | — | — | 5 以下 | | — | — |
| フラス脆化点 | | | ℃ | — | — | — | — | -12 以下 | — | -12 以下 |
| 曲げ仕事量 (-20℃) | | | kPa | — | — | — | — | — | — | 400 以上 |
| 曲げスティフネス (-20℃) | | | MPa | — | — | — | — | — | — | 100 以下 |
| 針入度 (25℃) | | | 1/10mm | 40 以上 | | | | | | |
| 薄膜加熱後 | 質量変化率 | % | 0.6 以下 | | | | | | | |
| | 針入度残留率 | % | 65 以上 | | | | | | | |
| 引火点 | | | ℃ | 260 以上 | | | | | | |
| 密 度 | | | g/cm ³ | 試験表に記載 | | | | | | |
| 最適混合温度 | | | ℃ | 試験表に記載 | | | | | | |
| 最適締固め温度 | | | ℃ | 試験表に記載 | | | | | | |

付加記号 W: 耐水性 (Water Resistance), F: 可とう性 (Flexibility)

は道路舗装の品質を特に重視し、供用性に焦点を当てた研究がなされてきた。しかし徐々に世界中で二酸化炭素（以下、CO₂）をはじめとした温室効果ガスによる地球温暖化の問題が表面化するにつれ、供用性に加え環境に配慮した低炭素技術を付加価値として取り入れた研究が多くなされるようになった。特に現在までの代表的な成果としては、中温化PMAと再生用PMAがある。

中温化PMAは、従来のPMAと比べて、性能を変えずに、混合物製造および施工時の温度を約30℃低減

できるPMAのことである。これにより、主に混合物製造時の使用燃料の削減によりCO₂の排出を抑制できる。

再生用PMAは、再生用添加剤と改質材がブレミックスされたアスファルトであり、再生骨材を用いた改質混合物（以下、再生改質混合物）を製造することを目的に使用される。再生改質混合物は新規の改質混合物と比較して、使用するアスファルト量が少ないため、材料製造に伴うCO₂排出量の削減が期待される。

表-3 PMAの変遷と関連事項

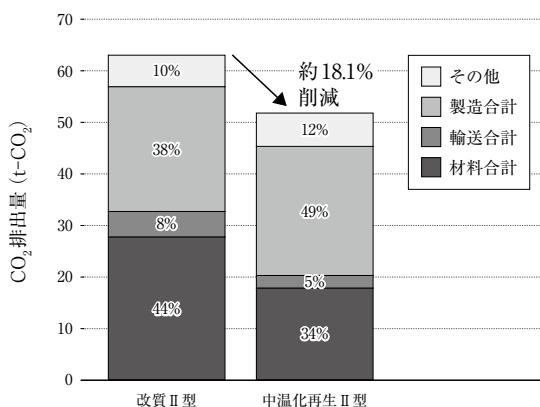
| | |
|--|--|
| 第0期：日本導入前 | |
| 1897 | 仏国でゴム添加の試み |
| 1930 | 英国で改質材にゴムを試用、以後、蘭、米国で検討 |
| 第Ⅰ期：小規模試験施工 | |
| 背景：未発達な舗装技術による荒れやひび割れの解消 | |
| 成果：骨材把握力を高めたゴム入り改質アスファルトの開発 | |
| 1952 | 東京都で天然ゴム粉末、神戸で屑ゴムを試用、北海道開発局にて天然ゴム粉末を使用し、試験舗装 |
| 1954 | 北海道大学でゴム入りアスファルト混合物の本格的な研究を開始 |
| 第Ⅱ期：積雪寒冷地を中心とした大規模な試験施工開始 | |
| 背景：寒冷地におけるタイヤチェーンによる摩耗損傷の軽減 | |
| 成果：品質が安定したSBRを使用したゴム入り改質アスファルトの実用化 | |
| 1960 | 天然ゴム入りアスファルトの市販開始 |
| 1961 | アスファルト舗装要綱発刊 |
| 1966 | 北海道開発局が輸入SBRラテックスを使用して国道36号線で試験施工を実施 アスファルト改質用国産SBRの市販開始 |
| 第Ⅲ期：建設省と北海道開発局による本格的な試験施工実施 | |
| 背景：高度経済成長による交通量増加に伴うわだち掘れ対策 | |
| 成果：硬く塑性も高い樹脂系改質アスファルトの開発 | |
| 1967 | 北海道開発局が国産SBRラテックスを使用したプラントミックス混合物の製造方法の実用化 アスファルト舗装要綱改訂 (ゴム入りアスファルトが特殊材料として記述) |
| 1969 | 東名高速道路でゴム入りアスファルトを使用 |
| 1971 | 樹脂系アスファルト改質材の市販が開始 北海道開発局がゴム入りアスファルトの使用認定、東京都がゴム入りアスファルトの大規模試験舗装 |
| 1975 | アスファルト舗装要綱改訂 |
| 第Ⅳ期：官民を挙げた共同研究成果による標準化と普及 | |
| 背景：道路舗装への要求性能の高度化(耐久性、排水性舗装の登場) | |
| 成果：ひび割れ、わだち掘れ、摩耗のすべてを対策したアスファルトの開発 排水性舗装に適したアスファルトの開発 | |
| 1978 | ゴムアスファルト懇話会発足 アスファルト舗装要綱改訂(ゴム入りアスファルトの標準的性状が設定) |
| 1979 | ゴムアスファルト懇話会が日本ゴムアスファルト協会に名称変更 |
| 1981 | 建設省土木研究所、東京都土木センター、日本ゴムアスファルト協会が共同研究を開始 |
| 1983 | 共同研究の成果としてゴム入りアスファルト「筑波1号」を発表 |
| 1984 | 「筑波1号」を土木研究所構内で試験施工 |
| 1986 | 「筑波1号」の現場試験施工18か所実施 アスファルト舗装要綱改訂 |
| 1987 | 排水性舗装が低騒音を目的に東京都環状線で施工 |
| 1988 | アスファルト舗装要綱改訂 (改質アスファルトが一般材料とされる) |
| 第Ⅴ期：多様化する舗装需要への対応 | |
| 背景：特殊な条件における道路(橋面舗装、超重交通、極寒冷地等)に対する専用グレードの需要増大 | |
| 成果：PMA規格の近代化、上記専用グレードの拡充 | |
| 1992 | アスファルト舗装要綱改訂 (現行の改質Ⅰ型と改質Ⅱ型相当の規格が掲載) |
| 1996 | 排水性舗装技術指針(案)の発行 日本道路公団の設計要領において、高機能舗装が新規に追加、高粘度改質アスファルトの使用を原則 |
| 2001 | 舗装設計施工指針の発行 超重交通用(現Ⅲ型)、付着性改善型(現Ⅲ型-W)、高粘度(現H型)の標準的性状が記載 |
| 第Ⅵ期：環境へ配慮したPMA技術への取組み | |
| 背景：持続可能な社会への要請(低炭素技術) | |
| 成果：中温化PMA、再生用PMAの開発 | |
| 2005 | 再生アスファルト混合物の割合が混合物全体の出荷量の7割を超えるようになる |
| 2010 | グリーン購入法に基づく特定調達品目に「中温化アスファルト混合物」が指定 |
| 2012 | 道路建設業協会「中温化(低炭素)アスファルト舗装の手引き」発行 |
| 2015 | 国連において「持続可能な開発目標(SDGs)採択 |
| 2020 | カーボンニュートラル宣言(2050年までに) |

4. 低炭素社会に貢献するPMA技術

今後、環境配慮に対する社会的要請はますます強まることが予想される。そこでこれからのアスファルト舗装に貢献できる技術を二つ紹介する。

4.1 中温化再生用PMA

中温化再生用PMAは、中温化PMAと再生用PMAの組み合わせである。一般的な改質Ⅱ型と中温化再生用改質Ⅱ型の製造から施工までにおけるCO₂排出量の比較を図-2に示す⁶⁾。再生骨材を使用し、中温化することでCO₂排出量を18.1%削減が可能であると試算される。

図-2 中温化再生用PMAのCO₂削減効果

4.2 植物由来の材料の利用

循環資源である植物由来の材料の道路舗装への利用が検討されている。特に改質材として植物由来の熱可塑性樹脂を、改質Ⅱ型に20%添加したアスファルト(以下、植物系PMA)を使用した場合は、混合物に高い塑性変形抵抗性と耐油性を付与できることが報告されている⁷⁾。植物系PMAを使用した混合物と種々の混合物におけるホイールトラッキング試験結果の比較を図-3に示す。植物系PMAを使用した混合物の塑性変形抵抗性は半たわみ性舗装に匹敵するほど高いことが見て取れる。

耐油性の試験状況を図-4に示す。一般的な改質Ⅱ型では、舗装が激しく損傷する条件であっても、植物系PMAを使用した場合には健全性を保っていることがわかる。このように、植物系改質材を利用することで、一般的なPMAでは適用が困難な箇所へ使用できる可能性がある。

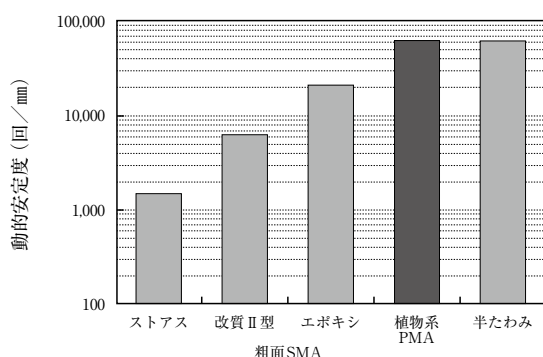


図-3 植物系PMAを使用したアスファルト混合物のホイールトラッキング試験結果

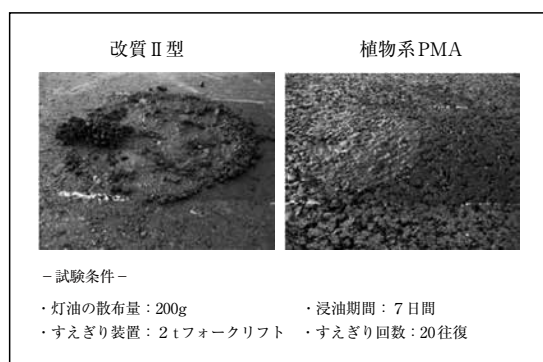


図-4 耐油性試験状況

5. まとめ

本文ではPMAの技術開発の歴史を、改質材の変遷や社会要請の観点から説明した。さらに、今後の社会に求められる技術としてCO₂排出量削減効果の高い中温化再生や循環資源である植物由来の改質材についても紹介した。両技術は、今後を目指す低炭素社会において必要な技術となると考えられる。今後も多くの社会的課題の解決に対してPMA技術が一助となることを期待する。

参考文献

- 1) 栗谷川 祐造：改質アスファルトと舗装技術，改質アスファルト，第6号，pp.8-15 (1995)
- 2) 塩尻 謙太郎：改質アスファルトの需要/流通状況等について，改質アスファルト，第19号，pp.19-32 (2002)
- 3) (一社) 日本改質アスファルト協会：改質アスファルト技術基準の変遷，改質アスファルト，第3号，pp.19-21 (1994)
- 4) (一社) 日本改質アスファルト協会：ポリマー改質アスファルトの歴史，改質アスファルト，第50号，pp.10-11 (2018)
- 5) 深代 勝弘：ポリマー改質アスファルトの変遷と標準的性状の変更を踏まえた今後の展開について，舗装，42巻，pp.21-26 (2007)
- 6) 鷹本 丈裕：脱炭素社会に寄与するポリマー改質アスファルトについて，改質アスファルト，第59号，pp.10-15 (2019)
- 7) 曲 慧，平戸 利明：再生可能資源を利用した舗装材料の開発と実用例，アスファルト，VOL. 164, NO. 237, pp.25 (2021)

「海外のレビュー論文から読み解くアスファルト混合物へ適用される材料への期待」

「若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告 —アスファルトの歴史・舗装の維持修繕・多様化する舗装—」

アスファルト舗装技術研究グループは、アスファルト舗装に関わる様々な機関に所属する若手技術者や研究者で構成されています。入社2、3年目の比較的若い技術者が入会することが多く、研究グループで活動し始めの頃は、他のメンバーとのディスカッションに不慣れでも、数年活動していると積極的に発言するようになります。研究グループでの活動を通じて、メンバー自身の人脈作りや情報収集による知識向上だけでなく、得た知識を発信する技術の向上も目指しています。

さて今回は、海外動向に関する報告としてリサイクル材や廃材活用に関するレビュー論文を紹介します。

国内でもカーボンニュートラル実現の観点から、様々な材料をアスファルト混合物へ適用する技術に注目が集まっていることもあり、4つのレビュー論文の紹介を通じて、海外の動向を紐解きます。また、素朴な疑問を追求する報告として、アスファルトの歴史、舗装の維持修繕工法、様々な気候に対応した舗装技術について報告します。テーマを1つ絞らずに、自分たちが知りたいと思うことに向き合った結果、テーマが多岐に渡ることになりましたが、初学者にわかりやすいものとなるよう心がけて取りまとめております。

(研究グループ代表幹事：川島 陽子)

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

川島 陽子 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ

安藤 秀行 出光興産(株)アスファルト技術課
安藤 良樹 ニチレキ(株)技術研究所
金澤 裕貴 日進化成(株)技術研究所
木村 航 日本道路(株)技術研究所
熊坂 理紗* 大成ロテック(株)技術研究所
黒田 祐平 鹿島道路(株)技術研究所
小池千絵美 世紀東急工業(株)製造管理部関東製品試験所
古谷野 拡 大林道路(株)技術研究所
小早川尚之 ENEOS(株)中央技術研究所
小林 翔汰 前田道路(株)技術研究所
近藤 浩紀 ニチレキ(株)技術研究所
佐藤 慎輔 (株)高速道路総合技術研究所道路研究部
澤山 拓 出光興産(株)アスファルト技術課
新堀 詩織 (国研) 土木研究所道路技術研究グループ

園田 涼 東亜道路工業(株)技術研究所
滝井 陵太 大林道路(株)技術研究所
竹内 海歩 世紀東急工業(株)技術研究所
徳松 大雅 鹿島道路(株)技術研究所
濱野 悠弥 日本道路(株)技術研究所
平松 大銘 日本道路(株)技術研究所
福田 嘉子* (一社) 日本道路建設業協会道路試験所
細野 裕貴 昭和澀青工業(株)技術センター
ミミ サン 世紀東急工業(株)技術研究所
武藤 朱音 鹿島道路(株)技術研究所
室井 和也 (株)NIPPO 総合技術部技術研究所
好見 絵里 鹿島道路(株)技術開発本部環境事業部
綿谷 成恭 出光興産(株)アスファルト技術課

*) 班長 (2023年10月現在)

海外のレビュー論文から読み解く アスファルト混合物へ適用される材料への期待

熊坂理紗 安藤秀行 木村航 小池千絵美 小早川尚之
小林翔汰 近藤浩紀 新堀詩織 濱野悠弥 平松大銘
好見絵里 綿谷成恭

はじめに

本研究グループでは、海外のアスファルト技術のニーズや最新技術の動向を調査する目的で、国際会議などで報告された研究成果について紹介を行っている。今年度は、ここ数年で報告されたオープンアクセスのアスファルトに関するレビュー論文に着目した。特に今後も国内の舗装技術にとって必要となってくる、廃材利用やリサイクルの観点から、各種材料を再生用添加剤やアスファルト改質材として利用したアスファルト混合物に関するレビュー論文を4編選定し、紹介する。

1. 紹介レビューの概要

今回紹介するレビュー4編を表-1に示す。1の論文はイエメンのThamar大学のAdham Mohammed Alnadish氏らが2023年に雑誌polymersで報告したレビューである。これはアスファルト混合物の性能を改善したり、劣化程度を低減し、長寿命化を目指すために、アスファルト混合物へ合成繊維や天然繊維、廃繊維などの総計21種類の繊維材料の適用性を検討した結果をまとめている。

2の論文はスウェーデンのKTH Royal Institute of

TechnologyのAbolhasan Ameri氏らが、2023年に雑誌Energy & Fuelsで報告したレビューである。これはバイオオイルがアスファルトの物理的劣化や化学的劣化、水分による損傷に対して与える影響を調べた既往研究の包括的な分析を行っている。

3の論文は中国のZhengzhou大学のYaofei Luo氏らが、2023年に雑誌materialsで報告したレビューである。これはアスファルトに対し、再生用添加剤として廃食油を添加した論文をまとめ、一般的な混合物性能とレオロジー特性を解析している。

4の文献は中国のNanjing Forestry大学のFengchi Xu氏らが2022年に雑誌materialsで報告したレビューである。これはアスファルト改質材としての適用が検討されている各種廃プラスチック（LDPE, HDPE, PP, 塩ビ, PET, EVA, PS, ABS等）の特性や混合方法をレビューし、課題を抽出している。

2. 国内におけるアスファルト混合物への各種材料添加に関する動向

海外の動向を紹介する前に、日本におけるアスファルト混合物への材料添加の動向を紹介する。筆者が所

表-1 レビュー論文

| | 論文名 | 論文和訳名 | 著者名 | 発行元 |
|---|--|--|---|--|
| 1 | Applications of Synthetic, Natural, and Waste Fibers in Asphalt Mixtures: A Citation-Based Review | アスファルト混合物への合成繊維、天然繊維、廃繊維の適用 | Adham Mohammed Alnadish Narinderjit Singh Sawaran Singh Aawag Mohsen Alawag | 雑誌名：polymers 発行元：MDPI |
| 2 | Future Directions for Applications of Bio-Oils in the Asphalt Industry: A Step to Sequester Carbon in Roadway Infrastructure | アスファルト業界におけるバイオオイルの応用に対する将来の方向性：道路インフラストラクチャーで炭素分離をするための一歩 | Abolhasan Ameri Hamzeh F. Haghshenas, Elham H. Fini* | 雑誌名：energy & fuels 発行元：ACS Publications |
| 3 | Review on Performance of Asphalt and Asphalt Mixture with Waste Cooking Oil | アスファルトと廃食油とのアスファルト混合物の性能に関するレビュー | Yaofei Luo Ke Zhang | 雑誌名：materials 発行元：MDPI |
| 4 | Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review | アスファルト改質材としての廃プラスチック利用：レビュー | Fengchi Xu Yao Zhao Kangjian Li | 雑誌名：materials 発行元：MDPI |

属する会社の文献を調べたところ、ここ2～3年ではポリエステルやウレタンなどのプラスチックを適用する研究が報告されていた。例えば、2022年にポリエステル樹脂を北海道型SMA舗装への適用が検討された¹⁾。これはプラントミックス用添加剤で、従来使われている添加剤のセルローズに比べ、同等以上のアスファルトモルタルの材料分離の抑制効果を有するだけでなく、きめが深く、空隙率の低い緻密な舗装を構築できる可能性が示唆された。

また廃ペットや熱源にされていたクラフトリグニン²⁾などリサイクルや環境に配慮した研究も報告されていた。2023年に廃プラスチックを利用した報告³⁾では、高耐久型アスファルト混合物に使用されるポリエステル樹脂をベースに、廃プラスチックから抽出した廃PET樹脂へ40%程度置き換え化学処理を行い、アスファルト改質樹脂に変性させたものをアスファルト混合物へ適用するものであった。これは適用箇所に応じて3タイプあり、どのタイプもアスファルト混合物の性能を向上させることが可能とのことであった。

自然由来の材料を利用した研究としては、竹チップとアスファルト乳剤を用いた竹チップ系舗装の報告が挙げられる。

気候変動や地球温暖化などの問題が深刻化する中、アスファルト混合物に関しても、CO₂排出削減や環境負荷低減などを目指した研究が散見された。今後もアスファルトへの添加や混合による性能改善や環境に配慮された材料利用の研究は加速すると感じた。一方、海外ではバイオオイルや廃食油などの利用が検討されているが、ここ2～3年の国内での報告では、見つけることができなかった。国ごとの背景もあるが、今後日本でも廃食油やバイオオイルなどのアスファルト混合物への適用検討がなされるか注目したい。

参考文献

- 1) 橋本良一ら：ポリエステル樹脂の北海道型SMA舗装への適用検討，舗装，Vol.57，No.11，2022
- 2) 日本製紙グループHP：https://www.nipponpapergroup.com/news/year/2020/news201028004780.html（参照日：2023年10月12日）
- 3) 美馬孝之：廃ペットボトルを利用した環境配慮型アスファルト混合物の混合物特性と適用事例，アスファルト合材，No.145，2023

3. 文献紹介

3.1 繊維の利用

アスファルト混合物への合成繊維，天然繊維，廃繊維の適用

原題：Applications of Synthetic, Natural, and Waste Fibers in Asphalt Mixtures: A Citation-Based Review

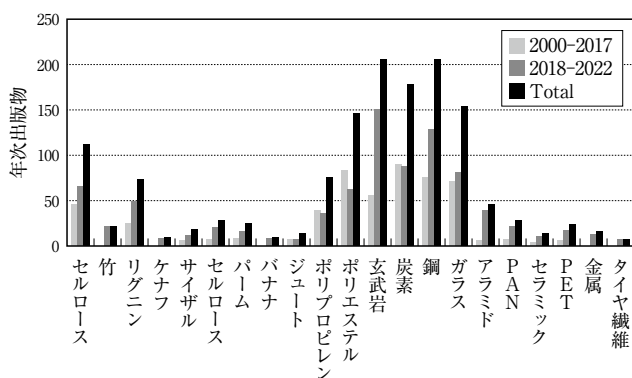
キーワード：アスファルト，天然繊維，合成繊維，密粒度アスファルト，砕石マスチックアスファルト，開粒度アスファルト混合物，生分解性

(1) はじめに

本論文では、アスファルト混合物へ繊維の混合に関する引用に基づくレビューを紹介している。引用分析は、引用数を通じて特定の分野で最も影響力のある研究を特定するために使用され、引用数が多いほど研究の影響力が高いことを示す。

アスファルト混合物の機械的性質を改善する繊維（合成繊維や天然繊維，廃繊維）の利用は増加しており、また、アスファルト混合物への繊維の混合は、環境の持続可能性やコストメリットに貢献する。

図－1はアスファルト混合物への繊維の混合に関する年次出版物の数を示している。アスファルト混合物で多く利用されている繊維は合成繊維の玄武岩，ポリエステル，炭素，銅，ガラス，ポリプロピレン，天然繊維のリグニン，セルローズであった。2000年から2017年までの合成繊維である玄武岩繊維に着目すると、2018年から2022年の利用と比較し約186%増加していた。更に、天然繊維の竹，ケナフ，ココナッツ，パーム，バナナ，ジュート，合成繊維のアラミド，ポリエチレンテレフタレート（PET），ポリアクリロニトリル（PAN），



図－1 年次出版物

廃繊維の金属、タイヤは過去5年間で増えており、合成繊維以外の天然繊維や廃繊維を組み込むことへの関心も高まっている。本論文では、合成繊維9種類、天然繊維9種類、廃繊維3種類の計21種類の繊維が紹介されており、次項から、各繊維を紹介していく。

(2) 合成繊維

本論文では合成繊維として、ポリプロピレン繊維、ポリエステル繊維、玄武岩繊維、ガラス繊維、銅繊維、炭素繊維、アラミド繊維、ポリアクリロニトリル(PAN)繊維、セラミックファイバーが紹介されている。

以下、各合成繊維について、紹介する。

①ポリプロピレン繊維



写真-1 ポリプロピレン繊維¹⁾

ポリプロピレン繊維は密度が低く、融点が165℃であるため、アスファルト改質材として安定性があり、広く使用されている。

ポリプロピレン繊維の含有量は増加するにつれて、アスファルト混合物の引張強度比が向上した。また、ポリプロピレン繊維とガラス繊維を使用した研究では、アスファルト混合物の耐水性が向上したことが確認できた。

②ポリエステル繊維



写真-2 ポリエステル繊維²⁾

ポリエステル繊維は石油から製造されており、低密度でかつ適した融点の繊維であり、引張強度が高

く、弾性率も高いなどの特性があり、アスファルトの改質材として広く使用される。

アスファルト混合物に0.3%のポリエステル繊維を添加すると、アスファルト混合物の安定性、引張強度比(TSR)、動的安定性、ひび割れ抵抗性、耐水性、わだち掘れ抵抗性が向上する結果が得られた。

鉄鋼スラグ骨材や石炭脈石粉末を含んだアスファルト混合物や、常温アスファルト混合物におけるポリエステル繊維の性能の向上も確認されている。

長さ8mmのポリエステル繊維を混合物重量の0.25%の含有量で添加すると、アスファルト混合物の耐久性が大幅に向上された結果が報告されている。

③玄武岩繊維



写真-3 玄武岩繊維³⁾

玄武岩繊維は玄武岩が溶けてできたものである。

玄武岩繊維を含むアスファルト混合物は、引張強度と凍結融解サイクルに対する耐性が向上した。また、廃ゴムを含むアスファルト混合物に骨材重量の0.3%の玄武岩繊維を添加するとマーシャル安定度と振動を吸収する性能が向上することが確認された。

SMAに玄武岩繊維を添加すると、ひび割れ抵抗性とすべり抵抗性が向上した。しかし、高温での性能や耐水性に悪影響を及ぼした。また、SMAにおけるリグニン繊維と玄武岩繊維の組み合わせでは、ひび割れ抵抗性とわだち掘れ抵抗性が向上することが確認された。

開粒度アスファルト混合物に0.4%の玄武岩繊維を添加すると、引張強度、わだち掘れ耐性、安定性が向上し、凍結融解の影響が軽減されることを実証した。

常温アスファルト混合物に0.3%の玄武岩繊維を添加すると、強度とひび割れ抵抗性が著しく向上したことが報告されている。

④ ガラス繊維



c. Glass-Hybrid Fiber (GLST)

写真-4 ガラス繊維⁴⁾

ガラス繊維は、強い引張強度を持つ合成繊維であり、アスファルト混合物に添加することで、高い機械的特性により安定性、耐久性が向上する効果がある。さらにひび割れ抵抗性の向上効果などがある。

添加量0.5%の割合で長さ6mmのガラス繊維を添加したアスファルト混合物の低温性能が大幅に改善された。

ガラス繊維を使用した常温アスファルト混合物や再生骨材率100%の再生アスファルト混合物において、性能を向上させることができることが確認できた。

長さ12mmのガラス繊維とリグニン繊維を使用したアスファルト混合物の研究では、アスファルト混合物重量で0.3%の量を添加すると、耐湿性と低温ひび割れ抵抗性が向上した結果が報告されている。

⑤ 鋼繊維

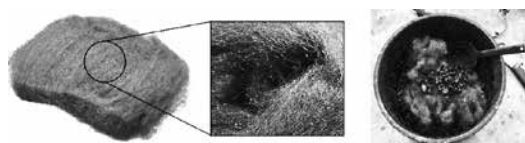


写真-5 鋼繊維⁵⁾

鋼繊維の研究では、異なる種類から構成され金属廃棄物、スチールウール繊維、スチールの削りくずなどの鋼繊維をアスファルト混合物に添加した研究が紹介されている。

アスファルトの体積に対して、6%のスチールウール繊維を添加すると、アスファルト混合物の間接引張強度と引張強度比が改善されることが確認できた。

アスファルト重量で2%のスチールウール繊維と30%の粗い鉄鋼スラグ骨材を使用すると、アスファルト混合物の自己修復効率が大幅に向上した。

アスファルト混合物にスチール繊維を利用すると、

スチールウール繊維と炭素繊維を含む改質アスファルト混合物よりも破壊挙動、耐湿性、ひび割れ修復効率が向上し、凍結融解サイクルに対する劣化が抑えられる結果が報告された。

スチールウール繊維とスチールスラグ骨材の組み合わせが、スチールウール繊維と花崗岩骨材からなる混合物よりも高い自己修復効率を率示す結果が確認できた。

スチールウール繊維で強化されたアスファルト混合物を再生アスファルト混合物として使用すると、経年劣化と酸化により性能が低下したことが確認された。

⑥ 炭素繊維

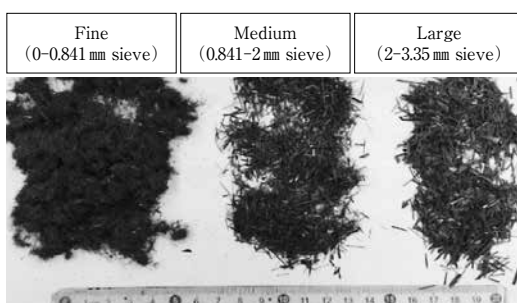


写真-6 炭素繊維⁶⁾

炭素繊維の成分はPAN90%、レーヨン10%の割合で製造された繊維である。

アスファルト混合物を混合体積の1%の含有量で長さ6mmの炭素繊維で改質すると、改質アスファルト混合物よりもひび割れ抵抗性、浸透に対する抵抗性、および耐湿性が向上すると述べられている。

炭素繊維とグラファイトナノファイバーで改質されたアスファルト混合物の研究では、0.5%の割合で繊維を組み込むと自己修復効率が大幅に向上した。

混合物重量の0.05%の硬化炭素繊維を開粒度アスファルト混合物に添加すると、間接引張強度とわだち掘れ抵抗性が大幅に改善された。さらに、最適な繊維含有量0.15%では、アスファルト混合物の透水係数が約20%、空隙率が約7%減少した。炭素繊維の添加量が増加すると、ひび割れ抵抗性が向上した。アスファルト重量で1%の炭素繊維と16%のスチールウール繊維を混合すると修復効率が大幅に改善されたと結論付けられた。

アスファルト混合物中に混合物重量で0.2~0.4%の炭素繊維を組み込むと、アスファルト混合物の導電性と性能が著しく向上したと述べられている。

⑦アラミド繊維



a. Aramid fiber (AR) b. Aramid Pulp (ARPL)

写真-7 アラミド繊維⁷⁾

アラミド繊維は、芳香族ポリアラミドから製造される。

混合物重量に対しての0.05%の容量で長さ19mmのアラミド繊維を添加すると弾性率、引張強度、疲労抵抗性、わだち掘れ抵抗性、ひび割れ抵抗性が大幅に改善されることを示した。

開粒度アスファルト混合物を長さ12mmのアラミド繊維を添加すると、アスファルト混合物の引張強度、耐水性、ひび割れ抵抗性が著しく向上すると述べた。

アスファルト重量の2%の割合で長さ2mmのアラミド繊維で改質すると、高温および低温でのレオロジー特性および物理的特性が改善されることを確認した。

⑧ポリアクリロニトリル (PAN) 繊維



写真-8 ポリアクリロニトリル (PAN) 繊維⁸⁾

ポリアクリロニトリル (PAN) 繊維は、いくつかのポリマーを含むアクリル樹脂系の合成樹脂である。

混合物重量に対しての0.3%の容量で長さ6mmのPAN繊維でアスファルト混合物を改質すると、疲労抵抗性向上することを示した。

再生アスファルト混合物に長さ6mmのPAN繊維を混合物重量で0.3%添加すると、再生用添加剤を使用せずにアスファルト混合物の機械的性能が最大

50%向上することを確認した。

PAN繊維1%とSBS1%で改質されたアスファルトは、わだち掘れ抵抗性、ひび割れ抵抗性、動的弾性率が大幅に向上することを確認した。

⑨セラミック繊維



写真-9 セラミック繊維⁹⁾

セラミック繊維とは、アルミナとシリカを主成分とした繊維である。

アスファルト混合物にセラミック繊維を添加すると、わだち掘れ抵抗性、耐水性、凍結融解分解性が向上した。低温ではアスファルト混合物のひび割れ抵抗性の向上が確認できた。

(3) 天然繊維

環境負荷の小さい材料としてあらゆる産業で注目されている「バイオマス」のうち、工業化が進む天然繊維は森林資源から精製されることからグリーンインフラ構築に寄与すると考えられ、舗装分野においても様々な材料の研究が進められている。本論文では、9種類の天然繊維を取り上げ、各種繊維が混合物性状へもたらす影響について紹介をする。

①セルロース繊維



写真-10 セルロース繊維を用いた木質ペレット¹⁰⁾

セルロース繊維とは、植物を構成する主要成分のひとつであるセルロースから成る繊維で、主に木材および製紙産業の副産物から得ることができる。また、セルロース自体が親水性であるため、セルロー

ス繊維も吸水性や吸湿性が高い特徴を持っている。

SMAにおける骨材総重量の3.25%のセルロース繊維を添加することで、耐流動性および疲労破壊抵抗性が大幅に向上することがわかっている。

一方で、セルロース繊維は経年劣化に弱く、劣化の過程で酸化および分解が起こり、従来の特性と高温性能が低下するとされている。

②リグニン繊維

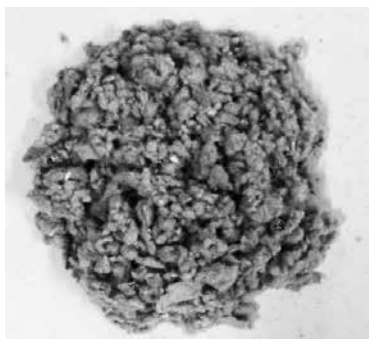


写真-11 リグニン繊維¹¹⁾

前述したセルロースと同様に、リグニンは植物を構成する主要成分である。リグニン繊維は、主に木材パルプおよび製紙産業の副産物から得ることができる。

鉄鋼スラグ混入アスファルト混合物において、混合物重量に対しての0.23%のリグニン繊維を添加することで、耐水性を改善することが可能である。

また、SMAにおいて、0.3%のリグニン繊維を添加した場合、ひび割れ抵抗性および耐流動性を向上することが確認できている。

③竹繊維



写真-12 竹繊維¹¹⁾

竹繊維を用いた研究によると、SMAに0.4%の竹繊維を添加すると、前述したリグニン繊維を添加した混合物よりも優れた性能が得られると結論付けた。

また、竹繊維を添加することにより、凍結融解抵抗性が向上することが期待できる。

④パーム繊維



写真-13 パーム繊維¹²⁾

パーム繊維はパームヤシ果実からパーム油を抽出する際に生成される副産物および残留物である。強靱な繊維であり強度を高める方法として様々な分野で使用されている。

SMAにパーム油繊維を混合すると、耐湿性、骨材飛散抵抗性、耐流動性およびSMAの排水性能が向上する。なお、パーム繊維の最適な含有量は、混合物重量の0.3%であると報告されている。

アスファルト重量で0.75%のパーム繊維で改質すると、バインダーの物理的特性が向上することを示した。

⑤バナナ繊維

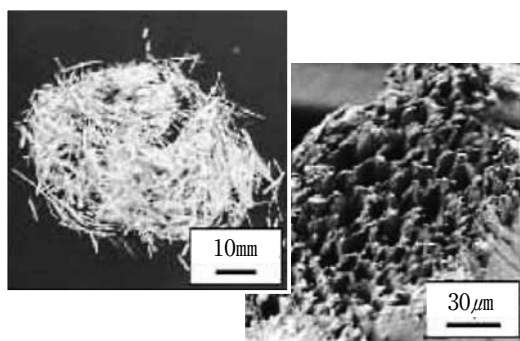


写真-14 バナナ繊維SEM画像¹³⁾

バナナ繊維は、収穫後残留物から得られ、バナナ植物の偽茎から抽出された繊維は耐久性があり、さまざまな目的に使用されている。

SMAにおいて、長さ20mmのバナナ繊維を混合物重量の0.3%添加すると、マーシャル安定度、耐水性、ひび割れ抵抗性、および骨材飛散抵抗性が向上することが確認された。

⑥ココナツ繊維

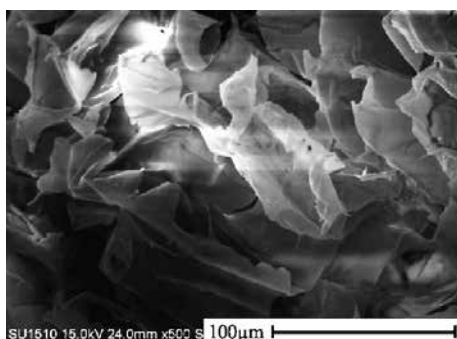


写真-15 ココナツ繊維SEM画像¹⁴⁾

近年、アスファルト混合物におけるココナツ繊維の使用が増加傾向にある。

ココナツ繊維を骨材重量の0.4%添加すると、前述したバナナ繊維を添加した場合と同様の性能が向上することに加えて、アスファルト混合物の安定性が向上する結果が得られている。さらに、ココナツ繊維を添加するとアスファルト混合物の締固め特性に大きな影響を与えることが示唆されており、詳細な研究が進められている。

⑦サイザル繊維

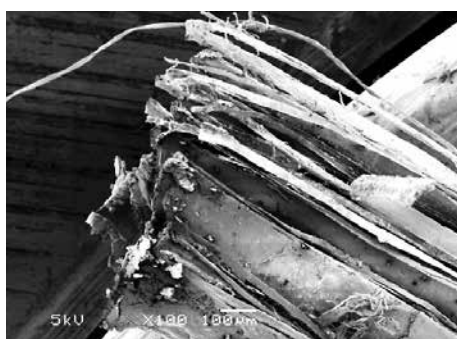


写真-16 サイザル繊維SEM画像¹⁵⁾

天然繊維の中でもサイザル繊維は剛性に優れ、軽量な材料であるため、様々な分野で研究開発が進められている。

サイザル繊維をSMAに0.3%添加すると、アスファルト混合物のマーシャル安定度および塑性変形抵抗性が向上することが確認された。

⑧ケナフ繊維

ケナフ繊維は、様々な複合材料添加剤として使用されており、ガラス繊維の代替になることが期待されている。

SMAに長さ8mmのケナフ繊維を0.3%添加すると、

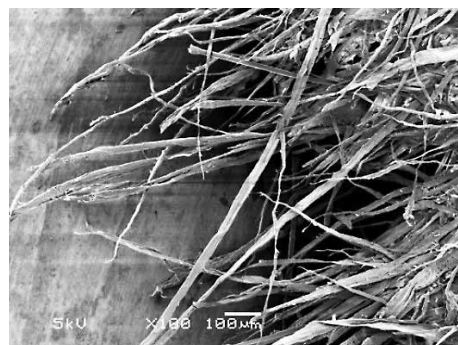


写真-17 ケナフ繊維SEM画像¹⁵⁾

混合物の低温ひび割れ抵抗性が向上することが明らかになっている。また、長さ30mmのケナフ繊維を0.2%添加することで、混合物のマーシャル安定度および動的安定度が向上することが明らかになっている。

⑨ジュート繊維

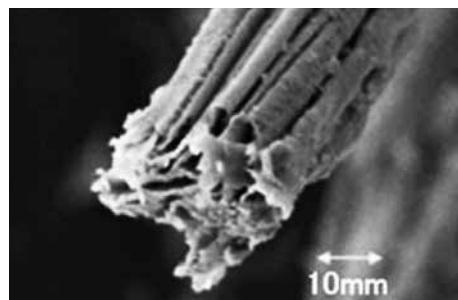


写真-18 ジュート繊維SEM画像¹⁶⁾

ジュート繊維は、主に農業用・工業用の麻袋などに使用されており、近年では都市型防災品などにも使用されている繊維である。

SMAに長さ14mmのジュート繊維を0.35%添加することで、混合物の塑性変形抵抗性および引張強度が大幅に改善されることが報告されている。

(4) 廃繊維

本論文の廃繊維では、ポリエチレンテレフタレート(PET)繊維、タイヤ繊維、金属繊維が紹介されている。

①ポリエチレンテレフタレート(PET)繊維

ポリエチレンテレフタレート(PET)繊維(以下PET繊維)は、廃ペットボトルから製造される。ペットボトルの廃棄物が世界的に増加したことで科学者や技術者は土木工学に利用するようになった。近年、アスファルト混合物におけるPET繊維の使用は、特に過去20年間で著しく増加した。

PET繊維を0.5%添加すると、わだち掘れ抵抗性と

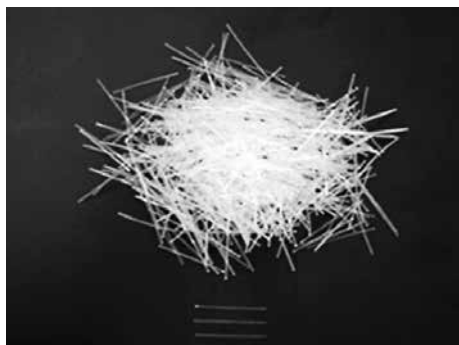


写真-19 ポリエチレンテレフタレート (PET) 繊維¹⁷⁾

弾性率に関して良好な性能を示すことが確認できた。

アスファルト重量 2 %～10%の容量で 30～50mm の長さの PET 繊維で改質するとアスファルト性状が向上した。

長さ 4mm の黒色 PET 繊維を混合物重量で 0.6% の含有量で SMA に添加すると、SMA の剛性弾性率と間接引張強度が大幅に向上することを示した。

②タイヤ繊維



写真-20 タイヤ繊維¹⁸⁾

タイヤ繊維は、使用済みタイヤの重量を 10～15% を占めている。使用済みタイヤは、毎年絶えず増加しているため、重大な環境問題となっている。アスファルト混合物の補強材としてタイヤ繊維を利用することは、使用済みタイヤの量を減らすという点で、地球環境へ貢献できる取り組みのひとつである。

ポーラスアスファルト混合物に 0.3% のタイヤ繊維を添加すると、アスファルト舗装の疲労寿命が大幅に改善されたことが確認できた。

アスファルト混合物重量で 0.3% の含有量で長さ 1～2.5mm のタイヤ繊維で改質すると疲労ひび割れ抵抗性が向上した。しかし、改質アスファルト混合物の弾性率と間接引張強度は、タイヤ繊維で改善し

ていないアスファルト混合物とほとんど同じであった。改質アスファルト混合物の圧縮強度が低下するため、2% の添加剤を追加する必要があると述べた。

アスファルト重量で 2～8% の様々な割合でタイヤ繊維を使用した研究を行った。2% および 5% の割合で追加すると、アスファルト混合物の常温と低温での弾性率、ひび割れ抵抗性が大幅に向上したが、必要な密度を達成するためには、より高圧縮な繊維が必要であると述べた。

0.5% のタイヤ繊維を添加すると、アスファルトの永久変形率が減少することを確認した。さらに低温でアスファルトの性能に悪影響がないことを確認した。

③金属繊維

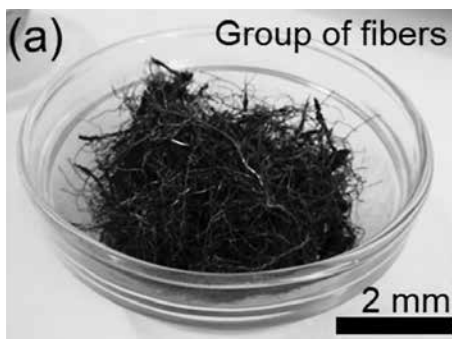


写真-21 金属繊維¹⁹⁾

金属繊維は廃タイヤから発生する一般的な廃棄物である。近年、SDGs の貢献として、アスファルト混合物における金属繊維の利用が増加している。

再生アスファルト混合物に金属繊維を添加すると混合物の剛性係数と引張強度が増加し、金属繊維がマイクロ波の加熱によるひび割れを改善した。また、金属繊維を添加すると、空隙率と熱伝導率が増加する一方で、繊維の分散は均一でないことが確認された。

(5) まとめ

本論文では、アスファルト混合物中の合成繊維、天然繊維、廃繊維を使用した最も影響力のある研究のレビューを行った。その結果、アスファルトを玄武岩、炭素、ポリエステル、セルロース、リグニン、PAN、ポリプロピレン、パーム、ココナッツで改質すると、ベースアスファルトの物理的特性とレオロジー特性が大幅に向上した。またアスファルト混合物への繊維の組み込みは、アスファルト混合物の低温および高温性能を著しく改善した。一方で、長期劣化を受けた繊維強化

アスファルト混合物の性能の情報の不足や、天然繊維の生分解性とアスファルト混合物への影響については触れられていないなどの課題もあり、性能評価や天然繊維の分解期間を特定するなどの推奨事項を提案している。

— 引用文献 —

- 1) 鹿島建設株式会社HP : <https://www.kajima.co.jp/tech/material/longlife/degradation/> (参照日 : 2023年10月11日)
- 2) 三晶株式会社HP : <https://sansho.co.jp/product/polyester/> (参照日 : 2023年10月11日)
- 3) Wang, W.; Cheng, Y.; Tan, G. Design Optimization of SBS-Modified Asphalt Mixture Reinforced with Eco-Friendly Basalt Fiber Based on Response Surface Methodology. *Materials* 2018, 11, 1311.
- 4) Gupta, A.; Castro-Fresno, D.; Lastra-Gonzalez, P.; Rodriguez-Hernandez, J. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. *Constr. Build. Mater.* 2021, 266, 121198.
- 5) Tabaković, A.; O'Prey, D.; McKenna, D.; Woodward, D. Microwave self-healing technology as airfield porous asphalt friction course repair and maintenance system. *Case Stud. Constr. Mater.* 2019, 10, e00233
- 6) Zhang, K.; Lim, J.; Nassiri, S.; Englund, K.; Li, H. Reuse of Carbon Fiber Composite Materials in Porous Hot Mix Asphalt to Enhance Strength and Durability. *Case Stud. Constr. Mater.* 2019, 11, e00260.
- 7) Gupta, A.; Castro-Fresno, D.; Lastra-Gonzalez, P.; Rodriguez-Hernandez, J. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. *Constr. Build. Mater.* 2021, 266, 121198
- 8) Slebi-Acevedo, C.J.; Lastra-González, P.; Castro-Fresno, D. Vega-Zamanillo, Á. Experimental evaluation and recyclability potential of asphalt concrete mixtures with polyacrylonitrile fibers. *Constr. Build. Mater.* 2022, 317, 125829.
- 9) Wang, X.; Zhou, H.; Hu, X.; Shen, S.; Dong, B. Investigation of the Performance of Ceramic Fiber Modified Asphalt Mixture. *Adv. Civ. Eng.* 2021, 2021, 8833468
- 10) 橋本良一ら：ポリエステル樹脂の北海道型SMA舗装への適用検討, 舗装, Vol.57, No.11, 2022
- 11) 橋本良一ら：ポリエステル樹脂の北海道型SMA舗装への適用検討, 舗装, Vol.57, No.11, 2022
- 12) Yaro, N.S.A.; Bin Napih, M.; Sutanto, M.H.; Usman, A.; Saeed, S.M. Performance Evaluation of Waste Palm Oil Fiber Reinforced Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Traditional and Sequential Mixing Processes. *Case Stud. Constr. Mater.* 2021, 15, e00783.
- 13) 安田健, 梶山哲人, 成瀬雅公, 村田清, 村上雅人：バナナ繊維／ポリブチレンサクシネート複合体の機械特性, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 第6号, 2011年
- 14) 緒方文彦, 植松勇伍, 中村武浩, 川崎直人：水環境の保全・改善を目指したココヤシファイバーによるメチレンブルーの吸着能, Vol.140, No.12 YAKUGAKU ZASSHI 140, 1463-1470 (2020)
- 15) 上越教育大学研究プロジェクト (平成14-15年度) 「自然観察教育における走査型電子顕微鏡データの活用の試み」
https://www.juen.ac.jp/soogoo/seminar/iokawa/sem_web/CD02/title.html
- 16) 赤坂春風, 小澤満津雄, Sirjana Subedi Parajuli, 杉野雄亮：リング拘束供試体加熱試験による天然繊維を混入した高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, 2018
- 17) 東亜建設工業株式会社HP : <https://www.toaconst.co.jp/company/release/2004/040224.html> (参照日 : 2023年10月11日)
- 18) Bocci, E.; Prosperi, E. Recycling of reclaimed fibers from end-of-life tires in hot mix asphalt. *J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.)* 2020, 7, 678-687
- 19) González, A.; Norambuena-Contreras, J.; Poulikakos, L.; Varela, M.J.; Valderrama, J.; Flisch, A.; Arraigada, M. Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Metallic Fibers from Recycled Tire to Promote Crack-Healing. *Materials* 2020, 13, 5731.

3.2 バイオオイルの利用

アスファルト業界におけるバイオオイルの応用に対する将来の方向性：道路インフラストラクチャーで炭素離れをするための一歩

原題：Future Directions for Applications of Bio-Oils in the Asphalt Industry: A Step to Sequester Carbon in Roadway Infrastructure
キーワード：バイオオイル, 再生用添加剤, 改質材

(1) はじめに

本論文は、バイオオイルをアスファルト改質材・再生添加剤として利用した研究に関するレビュー論文である。本論文では、アスファルトの劣化メカニズムやバイオオイルのアスファルトへの性能向上・性状回復効果について紹介されている。

翻訳者らは、論文中で示されている、アスファルトの劣化メカニズムに着目し、バイオオイルの特性を活かしたアスファルトの性能向上・性状回復を検討に興味を持った。そこで本文では、これらに関する記述を抜粋し、要約することにした。

現在、車両数の増加と世界の石油埋蔵量の枯渇が相まって、持続可能性とカーボンニュートラルが重視されている。道路建設では、アスファルトを完全または部分的に置き換えるためにバイオオイルの使用が注目されている。アスファルトには、水を通しにくく、粘着性が高く、軟化点が高いなどの舗装材料として重要な特性がある。

一方でアスファルトは供用によって劣化し、舗装体としての性能が低下し、早期のひび割れに繋がる可能性がある。

アスファルト舗装の劣化は、2段階で起こることが広く知られている。1段階目は、アスファルト混合物製造時にアスファルトが硬化することで発生する短期的な劣化である。2段階目は、交通荷重、温度、降雨、紫外線などの供用中の環境条件に起因する長期的な劣化である。

短期的劣化で生じるアスファルトの硬化は、物理的劣化、化学的劣化、揮発性化合物の損失の3つが要因とされている。表-1に硬化プロセスの概要を示す。

このため、アスファルトの特性を改善し、物理的劣化と化学的劣化、および水による劣化を防ぐ改質材や添加剤の開発と適用に関する多くの研究が行われた。

表-1 硬化プロセスの概要

| 硬化プロセス | 要因 | 特徴 |
|----------|--------------------------|----------------|
| 物理的劣化 | アスファルト中のワックス成分の結晶化 | 可逆的、化学組成に影響しない |
| 化学的劣化 | 高温での製造、輸送、敷きならしによる酸化 | 不可逆的、複雑なプロセス |
| 揮発性物質の損失 | 高温での製造、輸送、敷きならしによる軽成分の蒸発 | 不可逆的、150℃以上で加速 |

その中でバイオオイルは、アスファルトに添加することで物理的、化学的、熱的、およびレオロジー特性の改善が期待される。また、バイオオイルは石油由来の改質材と異なり持続可能な代替品であり、環境に害がなく、費用対効果が高く、農業廃棄物または産業廃棄物から生産が可能であるという特徴がある。

本論文では、アスファルトの物理的劣化や、アスファルトの化学的劣化、およびアスファルト混合物の水による劣化の3つに焦点を当てバイオオイルが与える影響について説明する。この研究に関連する論文の文献数の結果は、図-1のようになった。図-1に示されているように、調査された論文は、バイオオイルの供給源と組成、物理的劣化に対するバイオオイルの効果、化学的劣化に対するバイオオイルの効果、水による劣化に対するバイオオイルの効果の4つのカテゴリに分類できる。

関連論文を調査した結果、各バイオオイルにCO₂削減証書を発行するとともに炭素隔離、資源保護、持続可能性を促進することで、アスファルト市場でのバイオオイルの広範な適用を促進できる。

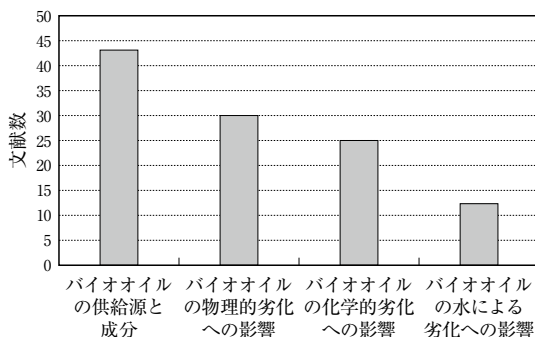


図-1 4つのカテゴリごとの論文の文献数

(2) バイオオイルについて

バイオオイルは、クリーンで費用対効果の高い再生可能エネルギー材料として注目されており、生産に廃棄物を使用することで、環境と材料のライフサイクルに貢献が期待されている。

① バイオマス源

表-2に主なバイオオイルの分類を示す。バイオマスは、一般的に植物、木材、動物、農業、産業廃棄物に分類され、多岐にわたって製造されている。本論文では、人の活動によって廃棄された物もバイオオイルとして紹介している。

表-2 バイオオイルの分類

| 分 類 | 例 |
|-------|---------------------|
| 植物 | 菜種油、ひまし油 |
| 木材 | ブナ、カパノキ、針葉樹、広葉樹、松樹皮 |
| 農業 | 野菜、大豆 |
| 動物 | 豚糞尿、魚 |
| 産業廃棄物 | 廃プラスチックフィルム、都市固形産廃 |

② バイオオイルの製造方法

バイオオイルは、生化学的プロセス（発酵、嫌気性消化、堆肥化など）または熱化学的プロセス（燃焼、ガス化、液化、熱分解、炭化、超臨界水酸化など）によってバイオマスから生成する。液化は、物理的および化学的反応を用いて行われている。液化プロセスの例を図-2¹⁾に示す。触媒や熱エネルギーを使用することで高分子の分解を促進し、脱水、加水分解などの反応を用いて高分子から低分子へ変換する。熱分解は、通常、流動床反応器で行われ、バイオマス分子は熱吸収によってより小さな分子に変換または分解される。

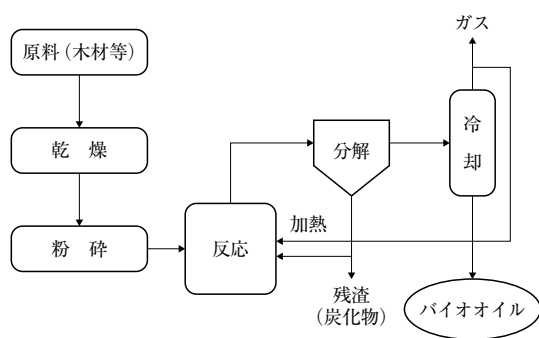


図-2 バイオオイルの液化プロセス

③ バイオオイルの組成

バイオオイルを構成する主な分子は、アルコール、アルデヒド、エステル、酸、フェノール、ケトン、フラン、およびリグニン由来のオリゴマーである。これらの組成は、生成されるバイオオイルの物理化学的特性に直接影響する。

④ バイオオイルの活用方法

舗装分野におけるバイオオイルの適用は、アスファルトの添加材（10wt%未満）やアスファルトの部分代替、完全代替が検討されている。バイオオイルで改質アスファルトの一部またはすべてを置換することで、必要なアスファルト量が減少し、石油資源の代替が可能となる。

バイオオイルはアスファルトと相溶性があり、添加することで、アスファルトの混合と転圧に必要なエネルギーを削減できる。藻類、動物の排泄物、植物油由来のオイルは、劣化したアスファルトの再生剤としての効果も確認されている。また、オーク材のバイオオイルは、ポリマーやゴムで改質することができ、耐熱性に優れるため、アスファルト混合物の材料コスト低下、混合時間の短縮、劣化の進行抑制が期待される。

バイオオイルは低温および常温では、上記のようなプラスの効果をもたらす。一方で、高温では塑性変形抵抗性の低下などのマイナスの効果もあり、バイオオイルにポリマーを添加する対策が必要となる。

(3) 物理的劣化に対するバイオオイルの効果

物理的劣化は、主にマルテンワックスの結晶化によって引き起こされる。化学的劣化と揮発性化合物の損失の2つと比較して、アスファルトの化学組成に影響を与えない可逆的なプロセスである。物理的劣化の程度は、ガラス転移温度Tgより低い温度と高い温度のアスファルト結晶化部分の量、および形成された鎖の長さに依存する。

① 問題点

アスファルトに含まれるワックスの結晶化により粘度の増加や、クリープ剛性の増加、針入度の低下が生じる。剛性の増加とともに脆化が生じることで、アスファルト舗装に深刻なひび割れを発生させる。

同じワックス成分でも、アスファルト固有のものとワックス添加剤で異なる。表-3にそれぞれの特徴を示す。ワックスの結晶化は、多くの場合、マイ

表-3 ワックスの特徴

| | アスファルト中のワックス成分 | ワックス添加剤 |
|------|---|---|
| 構成成分 | ○パラフィンワックス ○マイクロクリスタリンワックス ○極性官能基を持った香族化合物やその他の分子 | ○フィッシャー・トロプシュ法由来の合成ワックス ○モンタンワックスおよび変性モンタンワックス ○官能化ワックス |
| 融点 | 20℃～40℃ | 70℃～145℃ |

クロクリスタリンワックスであるワックススペースの添加剤に起因する。アスファルトに固有のワックスは、一般に微結晶性または非晶質であり、ヘテロ原子を含む分岐状、脂環式および芳香族成分を含む可能性があり、結晶化しにくいと考えられている。

②バイオオイルの適用による効果

アスファルトへのバイオオイル添加による物理的劣化への影響は、さまざまなバイオマス由来のバイオオイルで研究されている。表-4に各バイオオイルによる剛性と粘度への影響を示す。バイオオイルを添加した際のアスファルトの剛性と粘度は、ほとんどすべてが低下傾向にある。バイオオイルにはそれぞれ異なるパラメータがあるため、どのバイオオイルが最も影響を与えるかは議論できないが、廃食用油、豚糞尿、海藻、木材、およびススキを含む改質アスファルトは、物理的劣化に対して良好な結果を示した。

(4) 化学的劣化に対するバイオオイルの効果

アスファルトの化学的劣化現象は、アスファルトが酸素を吸収し、アスファルテンとレジン分が増加することで、アスファルトの弾性を低下させ、硬度を増す現象である。この変化は、酸化後に官能基が生成し、アスファルトの分子間結合が強くなることに起因する。

①化学的劣化の要因

化学的劣化による変化は、分子量と軟化点を増加させ、針入度、延性、および分散性を低下させる。劣化の程度は、アスファルト混合物によって異なり、アスファルト、および使用される骨材は、アスファルトの劣化において非常に重要な要素である。実際、分子の種類とアスファルトの化学組成は、アスファルトの特徴を強調してい

表-4 バイオオイル添加による物理的劣化への影響

| バイオオイル源 | 組 成 | スティフネス | 粘 度 |
|-----------------|--|--|----------|
| ナラ | N/A | N/A | 減少 |
| 木、 木質ペレット | エステル | 浸透：198.05%増加 回復率：29%増加 複素弾性率：87.5%減少 | 減少：62.5% |
| 廃木材 | N/A | 間接引張強度：16.7%減少 | N/A |
| 松 | N/A | 浸透：360%増加 | 減少：53% |
| 竹炭 | エタノン、フェノール、1-(2-フラニル)-、フラン-2-カルボニルクロリドなど | 複素弾性率：65.6%減少 | N/A |
| 菜種 | 脂肪酸メチル | わだち掘れパラメータ：17.9%減少 間接引張強度：31.4%減少 | 減少：70% |
| パーム油 | アミド基(-NH)、カルバメート基(-CN)、ウレタンカルボニル基 | N/A | 減少 |
| ひまし油 | N/A | 複素弾性率：90%減少 剛性係数：87.5%減少 | N/A |
| スイッチグラス | p-ヒドロキシフェニル、グアイアコール、シリングル | N/A | 減少 |
| 薬 | N/A | 剛性係数：36.0%減少 | N/A |
| ススキ、 ススキペレット | N/A | 複素弾性率：130%減少 回復率：103.2%増加 | N/A |
| コーン ストーバー | N/A | 回復率：25.8%増加 複素弾性率：122.2%減少 | N/A |
| 大豆 | 飽和脂肪酸、エーテル、アルコール | 複素弾性率：85%減少 剛性係数：29.6%減少 | N/A |
| 海藻 | N/A | 軟化点：42℃上昇 | N/A |
| 魚 | エチルエステル | 動的せん断：16.27%減少 | N/A |
| 野菜、廃野菜 | N/A | 剛性係数：54.3%減少 浸透：18.2%増加 複素弾性率：85%減少 | 減少：18.2% |
| 廃食用油 | 飽和炭化水素、不飽和炭化水素、スルフィニル化合物、アミド、エステル | 曲げクリープ合成：1.033.3%減少 輻ぼれ係数：90%減少 疲労係数：28.6%減少 針入度：22.22%増加 | 減少：64% |
| 廃モーター オイル | N/A | 動的剛性係数：12%減少 | N/A |
| 廃プラスチック フィルム | アルキル脂肪族、芳香族、フェノール、アルコール、アミノ酸 | 複素弾性率：67%減少 | N/A |
| 都市固形廃棄物 | 複素環、ベンゼン系、長鎖脂肪酸、ケトン、エステル | N/A | 減少：44% |
| 豚糞尿 | ヘキサデカンアミド、ヘキサデカン酸など | BBR クリープ剛性：5%減少 剛性：33.5%減少 位相角：3.4%減少 回復率：116.1%増加 輻ぼれ抵抗：17.9%減少 | 減少：81% |

る。許容範囲を超えた交通負荷、高熱環境、およびアスファルトの酸化により、アスファルトの耐用年数中に劣化現象が激しくなる。高温でアスファルトを輸送、骨材と混合、転圧すると、初期劣化を引き起こ

し、化合物が蒸発して酸化する。

劣化の他の原因には、時間の経過に伴うアスファルト構造の変化、太陽光照射（特に紫外線照射）による重合、および縮合重合が含まれる。劣化はアスファルトの化学組成に影響を与える。アスファルトは、分散相のアスファルテンと呼ばれる大きな分子と飽和分、芳香族分、レジン分で構成されるコロイド混合物である。アスファルト中のレジン分とアスファルテンの比率は、アスファルトの特性を決定する。アスファルトの比率が純粋なマルテンに向かって低下する場合、液体的な挙動を示す。アスファルトの大部分がアスファルテンである場合はゼラチン状になる。

実験室で劣化をシミュレートする方法には、アスファルトのみの劣化と混合物の劣化がある。その具体的な試験方法としては回転式薄膜加熱試験（RTFO）、加圧劣化試験（PAV）、および紫外線（UV）照射の3つの方法がある。

② バイオオイルの適用による効果

化学的劣化に対して、豚糞尿、松樹皮、モミ、クルミの殻、ココナッツの殻、白樺、またはピーナッツの殻などのさまざまなバイオマス由来のバイオオイルの適用が検討された。表-5に関連する論文から抽出した解析の結果、バイオオイル中のフェノール成分が化学的劣化を抑制した。加えて、炭素質粒子は紫外線を吸着し、バイオオイルで改質されたアスファルトの劣化進行を遅らせることができることを確認した。また、バイオオイルを添加すると、再生アスファルト混合物の剛性を回復できることを発見した。この結果は凝集体構造の変動に起因すると考えられる。アスファルト中には「bee-like structure」と呼ばれる凝集体構造が存在することが報告されている。この構造体の長さは、アスファルトの劣化に伴い伸長し、バイオオイル系再生添加剤の添加によって縮小した。バイオオイルを添加した後、「bee-like structure」のサイズを元の状態に戻すことができた。この構造の長さは、さまざまなアスファルトパラメータにおいて重要な役割を果たしている。そのため、ある種のバイオオイルの添加は

この構造の縮小とともに、レオロジー的および機械的パラメータ（粘度、剛性など）に影響を与える。

上記のフェノール、炭素質粒子などの成分による紫外線吸収に加え、「bee like structure」の構造制御のメカニズムによって、表-5に示したようにバイオオイルの添加により化学的劣化を遅らせることが報告されている。

(5) アスファルト混合物の水による劣化に対するバイオオイルの効果

骨材とアスファルト間の接着は、物理吸着、化学吸着などの複合的な要因の影響を受ける一方で、接着剥離に伴う混合物の損傷に関しては水が主な要因であるとされている。アスファルト舗装の水による損傷は、多くの場合、アスファルトの分極性と高い酸含有量に関連している。

骨材剥離は、間隙圧、不完全なアスファルト被膜、舗装体の変形、浸透、乳化などさまざまなメカニズムによって発生する可能性がある。滯水状態での間隙圧は、骨材の周りのアスファルト層の破壊を引き起こし、水がアスファルトと骨材の間に浸透する原因となる。アスファルト被膜が不完全な場合は、薄い水層が骨材を覆い、骨材からアスファルトを分離する。変形現象では混合物の変形に伴いアスファルト被膜が物理的に骨材の表面から分離される。乳化では、舗装中の塩や

表-5 バイオオイル添加による化学的劣化への影響

| バイオオイル源 | 組 成 | 効 果 |
|----------|-----------------------------|---|
| コーンストーバー | 炭素質粒子 極性芳香環 | 蓄積応力の増大 紫外線による劣化の低減 |
| 木製パレット | エーテル成分 アルコール成分 炭素質粒子 | 蓄積応力の増大 紫外線による劣化の低減 改質ゴム（改質材）への付着向上 |
| 豚糞尿 | 芳香環を有するアスファル テン 炭素質粒子 | 剛性係数が減少 蓄積応力の増大 紫外線による劣化の低減 |
| ススキ | 芳香環を有するアスファル テン 極性芳香環 | 蓄積応力の増大 改質ゴム（改質材）への付着向上 |
| 松樹皮 | フェノール化合物 | 化学的劣化の減少 劣化進行の遅延 |
| モミ | フェノール化合物 | 化学的劣化の減少 |
| クルミの殻 | フェノール化合物 | 化学的劣化の減少 |
| ココナッツの殻 | フェノール化合物 | 化学的劣化の減少 |
| 白樺 | フェノール化合物 | 化学的劣化の減少 |
| ピーナッツの殻 | フェノール化合物 | 化学的劣化の減少 |
| ススキ | 炭素質粒子 | 紫外線による劣化の低減 劣化進行の遅延 |
| ひまし油 | 極性芳香環 フェノール化合物 | 改質ゴム（改質材）への付着向上 劣化進行の遅延 |

粘土化合物などの乳化剤の存在、および骨材への水滴の付着によって、アスファルトと骨材の内部接着が弱まる。これらの現象によってアスファルト混合物は水によって劣化する。

①問題点

アスファルトの表層に一定量の水分が含まれている場合、水はアスファルト混合物の中を流れる。また、舗装体表面の水は、表面に車両通行による負荷がかかる際、圧力を引き起こす。この圧力のかかった水は、アスファルトと骨材の間の界面に徐々に浸透する。それによりアスファルト構造が壊れ、被膜が骨材の表面から徐々に分離し、最終的にアスファルトと骨材の間の接着性が悪化する。接着不良により骨材の表面が露出する。水はポットホールの形成、アスファルトと骨材間の接着の剥離を介して舗装の耐久性を低下させる。また、アスファルトの剛性は、水にさらされると減少する。そのため水が浸透しやすい高い空隙を有する混合物は耐久性に悪影響を及ぼす。

②バイオオイルの適用による効果

一般的にこの水分への感受性による損傷問題に対して、ポリマー、硫黄、ゴム、剥離防止剤、ナノ粒子、酸化防止剤などの添加剤を適用して、アスファルトの接着特性を改善し、水分への感受性を低減するといった解決策が知られている。骨材の表面がこれらの材料で被膜されている場合、支配的な電荷が変化し、骨材の表面エネルギーが減少する。これによって水がアスファルト被膜と骨材の剥離を促進するのを防ぐことができる。

本論文ではこのメカニズムに基づき水による損傷のしやすさを改善したバイオオイルを紹介している

これらの論文ではバインダーの表面張力、骨材に対する接触角、MISTI（水分誘起せん断減粘指数）、水浸ホイールトラッキング試験などで評価を行っている。表-6にそのバイオオイル種と関連する性状を記載する。表面張力、接触角、MISTIはいずれも先述した骨材表面とバインダー間の親和性に関与する指標であるため水による損傷のしやすさの評価に適していると考えられる。紹介されている論文ごとに行っている実験が異なるため全てに共通しているとは言えないが、石油由来の油と比較して本論文で紹介されているバイオオイルという極性基を多く有する材料は、主に改質材もしくは再生添加剤として使用され、上記試験で評価される特性を向上させ、耐水性に寄与することが示されている。

表-6 水による劣化に対するバイオオイル添加の影響

| バイオオイル源 | 湿気による損傷 |
|---------|-------------------------------|
| トウモロコシ茎 | 表面張力：31dyn/cm |
| 木質ベレット | 表面張力：28dyn/cm |
| 豚糞尿 | 表面張力：38dyn/cm |
| ススキ | 表面張力：38dyn/cm |
| 菜種 | 接触角：24%減少 |
| 魚 | 接触角：28%減少 |
| 動植物由来 | 接触角：アミド系で37.5%減少、 酸系で16%減少 |
| 綿 | MISTI：6%減少 |
| 廃食用油 | MISTI：15%減少 |

(6) まとめ

バイオオイルは、化学的劣化、物理的劣化、および水による劣化に対して、劣化しづらいアスファルトを改質することができる。フェノール化合物などのバイオオイルの分子種は、酸化（化学的老化とも呼ばれる）を遅らせるフリーラジカル捕捉剤として機能する。バイオオイルは、混合物全体におけるワックスの溶解性を改善し、ワックスの結晶化（物理的老化とも呼ばれます）を防ぐ。骨材に対して高い親和性を有するバイオオイル分子は、骨材へのアスファルトの結合を増加させ、アスファルト-骨材界面への水の侵入を減らし、アスファルトの水による損傷に対する耐性を向上させる。

しかしながら、本論文で多くのバイオオイルに関連する論文が紹介されているなかで、これらの論文からバイオオイルに関連する課題として以下の4点が浮かび上がってきた。

①標準的な評価試験の欠如

アスファルトへの添加材としての標準的な評価試験法が確立していないため論文ごとで性状の評価項目が異なりバイオオイルの評価を横並びに比較できない。

②長期供用データの欠如

舗装材料としての信頼性を担保するには長期の供用時のデータが必要となるが、現時点でバイオオイルを用いた舗装の長期供用データは存在するもののサンプル数が少なく性能を担保するに足りない。

③原料が同じバイオオイル間での性能のばらつき

本論文で紹介されている論文の中でも同じバイオオイルを用いた評価結果が論文によって異なる場合がある。これらの結果はバイオオイルの供給源とオ

イルに変換するための処理方法に起因している可能性がある。

④工業用バイオオイルに関する正確な技術、経済分析の欠如

バイオオイルの生産には、バイオマスの乾燥、バイオマスが熱分解するまで加熱、熱分解反応時のバイオマスの分解の3つのステップでエネルギーが必要である。エネルギーコストの増加は生産コストの増加につながるため、実際にアスファルト市場に導入することを考えた際に課題となる。

—— 引用文献 ——

- 1) バイオオイルーバイオマスをエネルギーに変換ー本間千晶, 林産試だより, 2001年3月号

3.3 廃食油の利用

アスファルトと廃食油とのアスファルト混合物の性能に関するレビュー

原題: *Review on Performance of Asphalt and Asphalt Mixture with Waste Cooking Oil*

キーワード: 廃食油, 改質アスファルト, アスファルト再生用添加剤, 舗装性能, 劣化アスファルト

(1) はじめに

中国国家穀物油情報センターの統計によると、中国国内では2020年に3,545百万トンの食用油が消費されており、そのうち年間500～700百万トンが廃食油と

して生産された。廃食油はグリースやバイオディーゼル油、離型剤などの工業利用が主であるが、病原性物質、重金属類、アフラトキシン、ベンゾピレンなどを含むことがあるため、適切な処理が行われなければ食利用では人体への健康被害を引き起こし、工業利用では環境汚染を引き起こす。

舗装用途としては、廃食油の主成分である脂肪酸がアスファルト中の芳香族分のような挙動を示すことで再生用添加剤としての効果を期待されており、本論文では様々な種類の廃食油をアスファルトの再生用添加剤として利用した様々な論文をピックアップし、ストレートアスファルト、改質アスファルトおよびアスファルト混合物としての性状などがレビューされている。

本論文では地溝油、豚油および桐油と言った中国ならではの材料も紹介されていたが、本文では更に日本国内でも入手し評価する可能性がありそうな一般調理および食品製造の過程で生産される廃食用油に絞って、一般性状の違いや分画による軽質、中質、重質留分の特徴の把握、アスファルト混合物にした際の影響をまとめることとした。

(2) 廃食油の種類と製造方法

主な廃食油の種類、入手元および物理性状を表-1に示す。

(3) 廃食油の分画成分が及ぼす影響

本論文の中で、廃食油（以下、WCO）を沸点ごとに3成分に分留し、各留分がアスファルトに及ぼす影響について検討した論文を紹介する。

①廃食油の分留方法

廃油回収リサイクル会社から廃食油を入手後、食

表-1 様々な廃食油

| 材料名 | 製造方法 | 物理性状 | | |
|-----------|----------------------------|------------------------------|-------------------|---|
| | | 密度 | 粘度 | その他 |
| バイオアスファルト | 廃食用油から熱化学プロセスを経て製造 | 1.54 g/cm ³ | 139.5 mPa・s (60℃) | — |
| バイオオイル | レストランからの廃食油 | 0.90 g/cm ³ (15℃) | 146.3 mPa・s (25℃) | 黒色で粘着性のある無煙の液体 |
| バイオオイル | 廃食油によるバイオディーゼル精製時の副産物 | 0.95 g/cm ³ (15℃) | — | 黒色の油性液体: 3.1% |
| 廃食用残渣 | 廃食油を原料として生成されたバイオディーゼルの副産物 | 0.95 g/cm ³ (室温) | — | 酸価: 45～55mgKOH/g |
| 食用油 | 飲食店由来 | 0.913g/cm ³ (20℃) | — | 含水率: 0.18% 酸価: 15.4mgKOH/g |
| 食用油 | 揚げ物工場由来 | 0.93 g/cm ³ (15℃) | 0.18mPa・s (25℃) | 粘度: 0.18Pa・s (25℃) TFOT後の質量変化: 0.50% |
| 廃油 | 廃バイオ油の高温分解など | 0.92 g/cm ³ (15℃) | 88.6 mPa・s (60℃) | 酸価: 55.8mgKOH/g |
| 廃冷却油 | バイオディーゼル製造時の副産物 | 0.915g/cm ³ | 0.15mPa・s (60℃) | pH: 7.3 |

品残渣の影響を避けるために油水分離とろ過処理を行った。その後、石油精製プロセス(図-1(I))と同様の考え方(図-1(II))を用いて減圧蒸留(図-1(III))によりWCOを軽質留分(以下, LC), 中間留分(以下, IC), 重質留分(以下, HC)に分類した(図-1(IV))。

本検討で用いたWCOからLC, IC, HCを採取する際の温度および圧力はそれぞれ, 200℃/5,000Pa, 230℃/2,000Pa, 260℃/1,000Paであった。尚, 分離したWCOの各留分はアスファルトに対して水が与える影響を除くため, メタノールでエステル化し, 酸価を下げている。

②廃食油の特性評価

WCOの各留分をGC-MSスペクトルで評価した結果を図-2に示す。またそこから推定される主な物質と含有量を表-2に示す。

LC, ICは比較的単一に近く, LCは73.81%がパルミチン酸メチル, 16.22%がオレイン酸メチルであり, ICはオレイン酸メチルが80.11%でステアリン酸メチルが8.56%であった。その一方HCでは43種類の

物質が検出され, 最も高比率だったのはオレイン酸メチルであった。またTOF-MSを用いて分子量を測定した結果, LCが100~300, ICが300~500, HCが500~1,100程度であった(図-3)。

次にTGを用いて, 各留分の温度上昇に伴う質量減少について評価した(図-4)。

表-2 WCO中の主な構成物質とその含有量

| 成分 | ピーク番号 | 主な物質 | 存在比率(%) | 分子式 |
|----|-------|---------------------|---------|-------------------|
| LC | 1 | パルミチン酸メチル | 73.81 | $C_{17}H_{34}O_2$ |
| | 2 | オレイン酸メチル | 16.22 | $C_{19}H_{36}O_2$ |
| IC | 2 | ステアリン酸メチル | 8.56 | $C_{19}H_{38}O_2$ |
| | 3 | オレイン酸メチル | 80.11 | $C_{19}H_{36}O_2$ |
| HC | 2 | オレイン酸メチル | 18.28 | $C_{19}H_{38}O_2$ |
| | 3 | ステアリン酸メチル | 5.26 | $C_{19}H_{36}O_2$ |
| | 4 | cis-11 エイコサン酸メチル | 6.20 | $C_{21}H_{38}O_2$ |
| | 5 | アラキジン酸メチル | 5.58 | $C_{21}H_{42}O_2$ |
| | 6 | ベヘン酸メチル エステル | 5.40 | $C_{23}H_{46}O_2$ |
| | 7 | テレフタル酸ジオクチル | 12.97 | $C_{24}H_{38}O_4$ |

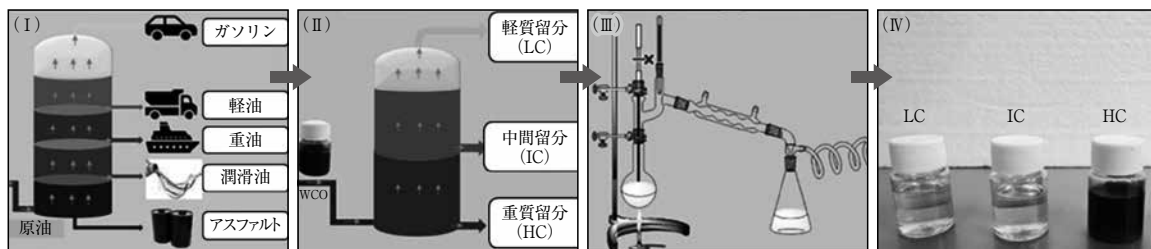


図-1 WCOの分留方法の模式図

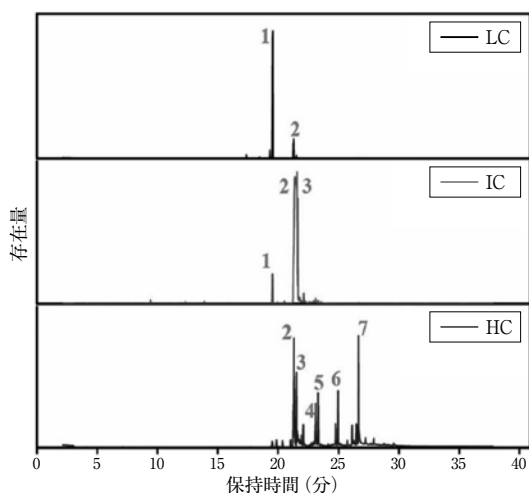


図-2 WCOの各留分に対するGC結果

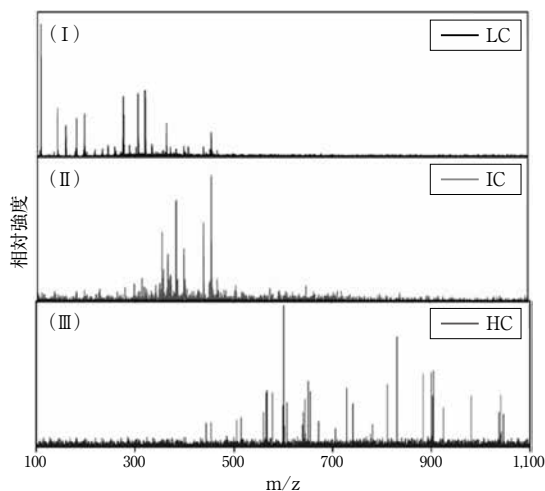


図-3 WCOの各留分に対するTOF-MS結果

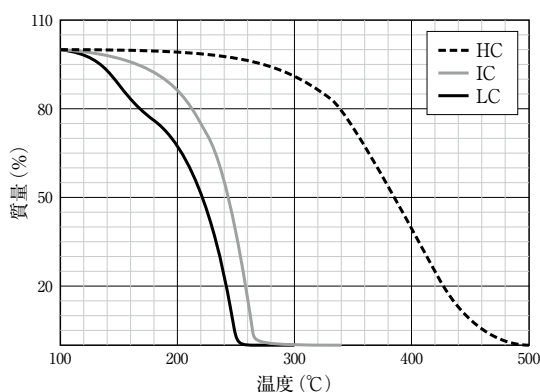


図-4 WCOの各留分の熱安定性

LCとICは110～120℃で約20%の質量減少があり、それぞれ248℃、263℃で完全に消失する。その一方、HCは490℃程度で完全に消失した。

③劣化アスファルトに添加した際の一般性状

次に各留分 (LC, IC, HC) について、新アスファルト (V: Virgin Asphalt) や劣化アスファルト (A: Aging Asphalt) との比較対象として、VとAの混

合品 (VA) に対して各留分を添加したもの (I) 動粘度, (II) 針入度, (III) 軟化点, (IV) 伸度を評価した (図-5)。

その結果、分子量の最も低いLCが軟化効果が高いはずだが、揮発により思うような効果が得られないこと、温度感応性が非常に高いことがわかった。

またその他各種分析 (FT-IR, GPC, SARA) により、LCがワックスのような温度感応性を示すことや軟化効果の低いHCは軟化効果の高いLCの安定性に寄与することを示している。そして著者は結論として結果的に軟化効果の高いLCを揮発させづらくするため、HCを分離し過ぎないことを推奨している。

(4) 廃食油が及ぼす影響

①廃食油を用いた改質アスファルトの性能に関する研究

改質アスファルトに廃食油を添加すると粘度、剛性、弾性性能、温度感受性、わだち掘れ耐性および疲労ひび割れ抵抗性が低下する。また改質アスファルトの性能は廃食油添加量の増加に伴って低下する。

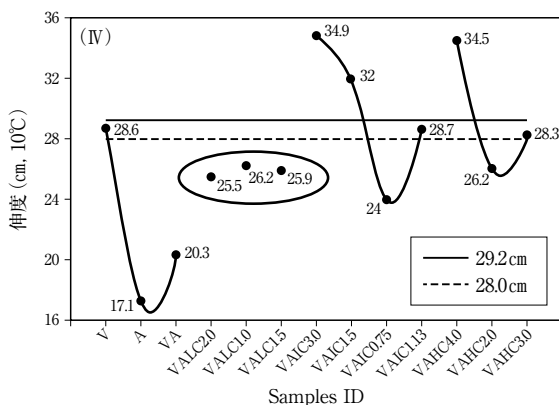
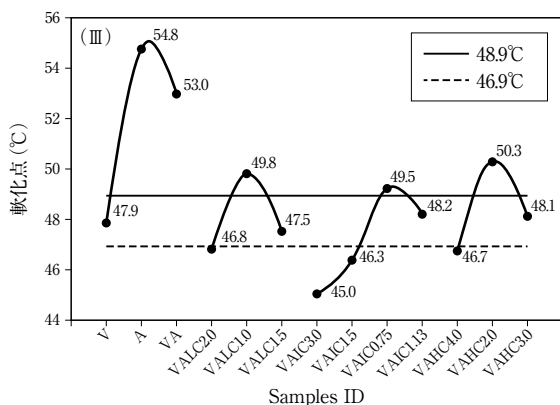
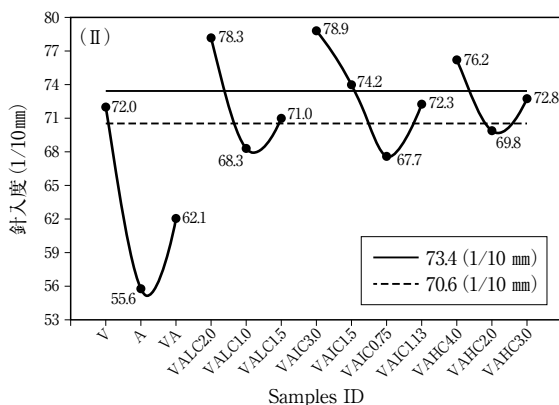
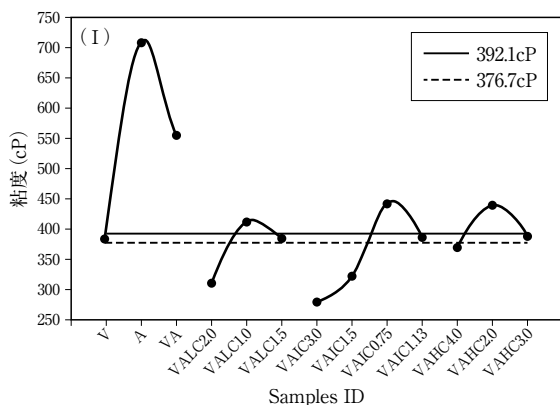


図-5 劣化アスファルトに対するWCO比率の影響

その一方で低温におけるひび割れ抵抗性、耐疲労性、自己修復率は向上する。

全体的な性能を考慮すると、石油アスファルトに添加される廃食油の添加量は10%未満が一般的である。廃食油の添加量が多すぎるとアスファルトの性能が損なわれる。

改質アスファルトと廃食油由来のバイオ油または廃食油由来のバイオアスファルトとの混合物はアスファルトの粘度低下によりアスファルト混合物の施工温度も低下する。廃食油を添加した改質アスファルト混合物の混合温度と締固め温度の関係を表－3に示す。

表－3 改質アスファルトと廃食油の混合温度と締固め温度

| 廃食油の 添加率 (%) | 混合温度 (℃) | | | 締固め温度 (℃) | | |
|-----------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 下限 | 上限 | 平均 | 下限 | 上限 | 平均 |
| 0 | 169.4 | 176.3 | 172.9 | 156.2 | 161.8 | 159.0 |
| 4 | 163.4 | 170.5 | 167.0 | 150.1 | 155.8 | 153.0 |
| 8 | 156.2 | 163.2 | 159.7 | 143.1 | 148.7 | 145.9 |
| 12 | 148.1 | 154.4 | 151.3 | 136.0 | 141.1 | 138.6 |
| 16 | 141.3 | 147.5 | 144.4 | 129.5 | 134.5 | 132.0 |

②再生アスファルトと廃食油の混合物の性能に関する研究

低粘度材料としての廃食油を使用して劣化したアスファルトを再生し、低温ひび割れ抵抗性、疲労性能、接着性、施工性を向上させる。廃食油の添加により劣化したアスファルトの伸度は増加し、粘度は低下する。

8%の廃食油を使用した再生アスファルトの低温性能が新アスファルトの低温性能と同等であることを見い出した。劣化アスファルトの伸度と粘度は廃食油の添加によって再生し、3%の廃食油を含む劣化したアスファルトの指標は表－4に示されている

表－4 アスファルトの伸度と粘度

| 種 類 | 伸 度 (10℃／cm) | 粘 度 (135℃／Pas) |
|-----------------------|-----------------|-------------------|
| ベースアスファルト | 33.1 | 0.503 |
| 劣化したアスファルト | 8.2 | 0.727 |
| 2%の廃食油を含む 混合アスファルト | 18.3 | 0.613 |
| 3%の廃食油を含む 混合アスファルト | 31.5 | 0.532 |
| 4%の廃食油を含む 混合アスファルト | 43.4 | 0.462 |

ようにベースアスファルトレベルの指標に近いことが指摘された。

また、廃食油を用いた再生アスファルトの低温での柔軟性と耐ひび割れ抵抗性が向上し、改善効果が表－5に記載されている廃潤滑油よりも優れている。

表－5 廃食油と廃潤滑油の比較

| 廃油の添加量 (%) | | 伸度 (15℃／cm) |
|------------|----|-------------|
| 廃食油 | 0 | 57 |
| | 3 | 190 |
| | 5 | 500 |
| | 7 | 500以上 |
| | 9 | 500以上 |
| 廃潤滑油 | 0 | 57 |
| | 5 | 124 |
| | 10 | 214 |
| | 15 | 280 |
| | 20 | 446 |

低温性能に対する廃食油の改質効果は廃食油の成分に関連しており、廃食油の軽質分は劣化したアスファルトの低温延性に対する再生効果が限られている。再生アスファルトの性能は廃食油の品質によって著しく影響を受け、特に再生アスファルトの粘度や延性などの性能とひび割れ抵抗性は廃食油の酸価と粘度が密接に関連している。廃食油の酸価と粘度が低いほど劣化したアスファルトの再生効果は良好である。

劣化したアスファルト混合物の低温ひび割れ抵抗性は廃食油含有量の増加とともに向上する。廃食油の添加量が増えると再生アスファルト混合物のマーシャル安定度、フロー値、間接引張強度および疲労寿命が低下し、永久変形抵抗、凍結融解分裂強度比および残留安定度は増加する。

(5) まとめ

廃食油を含むアスファルトの性能は、廃食油のアスファルトの種類、添加量および物理的特性に関連している。廃食油を含むアスファルトの低温ひび割れ抵抗性、耐疲労性、作業性、自己修復率は向上するが、高温性能は低下する。

劣化したアスファルトに使用される廃食油の再生効率は良好で廃食油を含む再生アスファルトの性能は石油ベースの再生用添加剤とほぼ同等である。石油ベースの再生用添加剤の消費量が減少し、持続可能な舗装技術の開発ができる可能性がある。ただし、廃食油が

再生アスファルトとアスファルト混合物に与える影響を考慮した上で、廃食油は粘度、密度など技術要件を満たす必要がある。

3.4 廃プラスチックの利用

アスファルト改質材としての 廃プラスチック利用：レビュー

原題：Using Waste Plastics as Asphalt Modifier:
A Review

キーワード：リサイクル廃プラスチック、アス
ファルト、アスファルト混合物、複
合改質、性能、適合性

(1) はじめに

本論文では、廃プラスチック（以下、廃プラ）をアスファルト改質材として添加したもの（以下、廃プラ改質アスファルト）を利用した研究について、1990年代から2021年までに発表された論文をピックアップし、紹介している。論文では、廃プラをアスファルトに混合する方法や、廃プラ種類によるアスファルト改質効果の違い、現場での施工事例、環境への影響等について取りまとめられている。また、廃プラ改質アスファルトの欠点である、低温性状や貯蔵安定性の低下について、改善方法を検討した結果も紹介されている。

翻訳者は、廃プラ種類によって使用方法やアスファルト改質効果が異なることと、廃プラ改質アスファルトの性能を改善した事例について、国内での報告が少ないと思い、興味を持った。そこで本文では、これらに関する記述を抜粋し、要約することにした。

(2) 廃プラ利用の背景

プラスチックの製造量は年々増加しており、2019年には全世界で3億6,800万トンが製造されている。プラスチック製品のうち約50%は使い捨てで、多くの廃プラは埋め立て処分もしくは焼却処分されている。これらの処分方法は、環境に負荷を与えるため、世界各国で使い捨てプラスチックの使用量削減やリサイクルに取り組んでいる。

このような状況を受けて、アスファルト改質材として廃プラを活用するための検討が進められている。ポリマー改質アスファルトの代わりに廃プラで改質したアスファルトを用いることで、廃プラのリサイクルが促進されるうえに、高耐久で比較的低コストなアスファルト混合物が製造できると期待されている。

(3) 廃プラの混合方法

廃プラは、その由来によって分子構造や密度、融点といった種々の物性が異なるため、種類に応じてアスファルトやアスファルト混合物への適した混合方法を選択する必要がある。一般的に、廃プラのアスファルト混合物への混合方法は、廃プラの融点に応じて、ウェット方式とドライ方式の2通りに大別される。

ウェット方式は、廃プラをアスファルトに直接添加し、改質材として利用する方法であり、融点が低い廃プラに適用される。ドライ方式よりもよく用いられる混合方法であり、アスファルトの性状をコントロールしやすいといった特長を有する。一方、デメリットとして混合場所での設備投資が必要となりコストがかかる点や、貯蔵時の長期安定性に欠け、アスファルトと廃プラが分離しやすい点が挙げられていた。混合時の添加量や混合温度、混合時間は廃プラの種類によって異なるが、添加量はアスファルトに対して2～8%、混合温度は140～190℃、混合時間は45～180分が一般的とされていた。

融点の高い廃プラには、混合物製造時に廃プラを添加して、廃プラを代替骨材やアスファルト改質材として使用するドライ方式が適用される。少ない設備投資で実施できる一方、事例の少なさや、耐水性などの混合物性能が低下したといった報告があり、ウェット方式よりも多くの課題が残っている。

(4) 廃プラ改質アスファルトの特徴

一般に、廃プラをアスファルトに添加すると、高温時の耐久性が向上するが、低温時のたわみ追従性等が低下する。ただし、廃プラの種類によって、化学組成や構造、分子量が異なるため、廃プラ改質アスファルトの性状も一様ではない。表-1に検討された廃プラの種類や特徴を示す。また、実験で明らかになった、各廃プラ改質アスファルトの特徴を以下に示す。

① 廃LDPE（低密度ポリエチレン）改質アスファルト

アスファルト内でLDPEが互いに結合し、網目状の3次元構造を形成する。HDPE（高密度ポリエチレン）よりも低分子量で分子量分布が広いいため、アスファルト改質材として適していると言われている。LDPEを10%含む改質アスファルトは、HDPEやクラムラバーで改質したアスファルトよりも優れた耐流動性を有するとの報告がある。

② 廃HDPE（高密度ポリエチレン）改質アスファルト

結晶化度がLDPEよりも高いため、HDPEはLDPEよりもアスファルトと混ざりにくい。HDPE

表－１ 検討された廃プラの種類および特徴

| プラスチックの種類 | 由 来 | 融 点 | 推奨される 混合方法 | アスファルトとの 混ざりやすさ (相溶性) |
|---------------------------------|--------------------------|-------------|---------------|-----------------------------|
| LDPE (低密度ポリエチレン) | ソフトドリンクや水のボトル | 110-120℃ | ウェット方式 | ○ |
| HDPE (高密度ポリエチレン) | プラスチック製のボトルや容器 | 130℃ | ウェット方式 | ○ |
| PP (ポリプロピレン) | ストローや家具、包装産業 | 145-165℃ | ウェット方式 | ○ |
| PVC (ポリ塩化ビニル) | 継手や配管用パイプ | 160-210℃ | ドライ方式 | － |
| PET (ポリエチレンテレフタレート) | ソフトドリンクや水のボトル | 260℃ | ドライ方式 | － |
| PS (ポリスチレン) | 使い捨ての食器、持ち運び用コンテナ、CD ケース | 210-249℃ | ドライ方式 | － |
| EVA (エチレン－酢酸ビニル共重合樹脂) | 靴底、薄層フィルム、ワイヤーケーブル | 65-80℃ | ウェット方式 | ○ |
| ABS (アクリルニトリル・ブタジエン・スチレンの共重合樹脂) | 電子機器 | 融点の 真値なし | － | ○ |
| PU (ポリウレタン) | 布張りの家具、マットレス、靴、車、医療機器、建材 | 融点の 真値なし | － | ○ |

改質アスファルトは、SBS改質アスファルトよりも耐久性が高いが、弾性とクリープ回復性が低いと報告されている。

③廃PP (ポリプロピレン) 改質アスファルト

PPをアスファルトに添加すると、高温時の耐久性が向上するが、伸度が低下し、ひび割れが発生しやすくなる。そのため、高温多湿地域での使用が推奨されているが、高粘度であるため粘度の調整が必要だと考察されている。

④廃PVC (ポリ塩化ビニル) 改質アスファルト

PVCをアスファルトに添加すると、耐久性や疲労抵抗性が向上するが、熱収縮によるき裂が発生しやすくなると報告されている。また、PVCは燃焼時に塩化水素を放出するため、注意が必要である。

⑤廃PET (ポリエチレンテレフタレート) 改質アスファルト

PETをアスファルトに添加すると、高温時の耐久性が向上するが、脆性が低下すると報告されている。

⑥廃PS (ポリスチレン) 改質アスファルト

PSをアスファルトに添加すると、耐久性が向上するが、低温時のひび割れ抵抗性が低下する。ドライ方式で製造したPE/PP改質アスファルトやゴムアスファルトよりも弾性が低いと報告されている。

⑦廃EVA (エチレン－酢酸ビニル共重合樹脂) 改質アスファルト

EVAはアスファルトとの相溶性が高いため、広く研究されている。アスファルトに添加したEVAは、ゴムのような役割を果たすと言われており、EVAをアスファルトに少量添加した場合は、高温時の耐

久性だけではなく、低温時のひび割れ抵抗性もある程度向上したと報告されている。

⑧廃ABS (アクリルニトリル・ブタジエン・スチレンの共重合樹脂) 改質アスファルト

ABSをアスファルトに添加すると、耐流動性が向上する。EVAやPEよりも改質性能は劣るが、貯蔵安定性に優れているうえに、低温性能はストレートアスファルトと同等であると報告されている。

⑨廃PU (ポリウレタン) 改質アスファルト

PUをアスファルトに添加すると、耐久性や耐水性が向上する。また、PU添加による、低温性状の大幅な低下は見られず、貯蔵安定性も良好であると報告されている。

(5) アスファルトへの廃プラ適用における課題と改善策

①廃プラ利用の課題

廃プラを利用したアスファルトの改質には、高温性能が大幅に向上するといった効果があるものの、貯蔵安定性の低下や、低温時のひび割れ抵抗性が小さくなるといった欠点がある。また、改質材として1種類の廃プラスチックを使用するのみでは、十分に性状を改善することは難しいといった課題も残っている。

②複合改質の効果

廃プラを用いた改質アスファルトの課題解決に向けて、最近では、複合改質の研究が増えている。廃プラとさまざまな材料を組み合わせることで、低温ひび割れなどが改善し性能が向上するといった報告がある。

廃プラと組み合わせる材料は、一般的なポリマー

をはじめ、モンモリロナイトや硫黄、ラジカル開始剤、グラフト剤などが挙げられる。これらを廃プラとともに添加すると相溶性が改善され、アスファルトとの適合性が向上（馴染む）する（表－2、表－3）。例えば、LDPEにグリシジルメタクリレートとエポキシ基をグラフト（元は園芸用語の接ぎ木という意味で、高分子鎖に別の高分子鎖を結合させることをグラフト重合という）すると、LDPEとアスファルトの間の反応が増加し、アスファルトの相溶性が向上するといった内容である。また、廃LDPEやHDPEとSBSを組み合わせて改質した場合、SBS単独で使用するよりも疲労抵抗性が改善したといった報告もある。

(6) まとめ

資源の活用や環境汚染の低減などの観点から、廃プラをアスファルト混合物へ適用する試みが増えている。廃プラは種類によって化学組成や物性が異なり、改質材としての効果やアスファルト混合物への適した配合

方法も異なる。また、PVCのように、加熱により有害物質を発生するプラスチックが存在するため、安全に取り扱うためにも発生源の把握は極めて必要である。

廃プラを用いて改質したアスファルト混合物の検討報告は多く、そのほとんどにおいて耐流動性の向上が確認されている一方で、廃プラの種類によっては低温での柔軟性やひび割れ抵抗性といった他の性能の低下が報告されている。また廃プラはアスファルト中で成分分離しやすく長期での貯蔵安定性に欠けるなど、実用化に向けては解決すべき課題が多く残っている。

近年は、廃プラを単一ではなく、SBSやゴムなど他のポリマー、また別種の廃プラとの併用により、低温性能やひび割れ抵抗性を低下させることなく、混合物性能の総合的な向上に成功した例が複数報告されている。また貯蔵安定性の改善については、無機物の添加剤との併用や、化学反応剤の使用、特定の官能基付与による廃プラとアスファルトの相溶性向上例が報告されている。

表－2 添加剤の効果

| 添加物名 | はたらき | 注意点 |
|-----------------|--|----------------------------------|
| リン酸 | ○改質アスファルトの流動性改善が向上した ○貯蔵温度での貯蔵安定性が向上した | ○燃焼するとリン酸化物などの有害なヒュームが生成される（SDS） |
| モンモリロナイト | ○改質アスファルトの貯蔵安定性が改善した ○高温時の流動性が保たれた | ○酸化アルミニウム、ケイ素酸化物（中国のSDS） |
| ナノクレイ（粘土鉱物ナノ粒子） | ○改質アスファルトの安定性が改善した | － |
| 疎水性粘土のミネラル | ○アスファルト－ポリマー間の密度の差が減少し、改質アスファルトの貯蔵安定性が改善した | － |
| カーボンブラック | ○アスファルト－ポリマー間の密度の差が減少し、改質アスファルトの貯蔵安定性が改善した | ○酸化剤との反応は禁忌としている（SDS） |
| 硫黄 | ○不飽和の損失によって二重結合に変わり、分子の異性化が起こる | ○加熱すると有毒ガスが生成される（SDS） |

表－3 官能基化の効果

| 手 法 | はたらき | 注意点 |
|-------------|--|---|
| コポリマー（共重合体） | ○改質アスファルトの適合性を向上させる（馴染みややすくする） | ○様々な種類があり、反応条件下によって使用する種類が異なる |
| 架橋剤（橋かけ剤） | ○アスファルトとポリマーを反応させ、両者を化学結合し、三次元網目構造を形成してアスファルトの適合性を改善させる（馴染みややすくする） | |
| ラジカル開始剤 | ○廃プラスチックパウダーと改質アスファルトの間の分子の共有結合を促進する | ○過酸化ベンゾイル：火災によって刺激性、有毒および（または）腐食性のガスを発生するおそれ（SDS） |
| 酸化防止剤 | ○酸化反応中にヒドロペルオキシドを分解する | ○様々な種類があり、反応条件下によって使用する種類が異なる |
| 官能基 | ○水素結合や化学結合を形成するなど、様々な方法でアスファルトの一部の成分と相互作用し、適合性のある程度向上させる | |
| グラフト剤 | ○無水マレイン酸（MAH）、メタクリル酸（MAA）とグリシジルメタクリレート（GMA）は、ポリマー改質の貯蔵安定性が改善されると報告があった | |

若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告 —アスファルトの歴史・舗装の維持修繕・多様化する舗装—

| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 福 田 嘉 子 | 安 藤 良 樹 | 金 澤 裕 貴 | 黒 田 祐 平 | 古谷野 弘 |
| 佐 藤 慎 輔 | 澤 山 拓 | 園 田 涼 | 滝 井 陵 太 | 竹 内 海 歩 |
| 徳 松 大 雅 | 細 野 裕 貴 | ミ ミ サ ン | 武 藤 朱 音 | 室 井 和 也 |

はじめに

アスファルト舗装は紀元前の時代から現在まで長きにわたり世界各国で用いられている。その長い歴史のなかでアスファルト舗装は時代、地域や目的などの要因により様々な種類が開発され供用されてきた。現在、碎石とアスファルトを混合したものを敷均すのみが舗装ではなく、耐水性、高耐久性や舗装の再生利用などが求められている時代となっている。

時代によって変化する舗装技術について、アスファルト舗装技術研究グループは近年さらに開発が進み、多様化している舗装について改めて整理し、その変遷を調査することにした。また、近年の舗装技術のうち重要な課題であるアスファルトの劣化や舗装の維持修繕といったテーマを加えることで、既存舗装の延命や維持修繕工法により新たな機能を付加した舗装なども紹介することとした。

本稿は4章構成であり、1章ではアスファルトとアスファルト舗装の歴史について当時の時代背景などを交えながら紹介する。2章では近年さらに需要が高まっている舗装再生技術の研究に欠かせないアスファルトの劣化に着目し、室内試験における劣化アスファルトの評価手法などを説明する。3章では舗装の維持修繕工法について、維持修繕費が減少している昨今において、適切な工法を選択するために、それぞれの維持修繕方法と適用箇所などを説明する。4章では近年増加している付加価値を持った舗装の例として、様々な気候に対応した舗装について説明する。猛暑、降雨や積雪など日本国内においても甚大化している気候変動について、これらの問題を舗装の観点から対策した技術は非常に有用であり、今後さらに普及してゆくと思われる。なお、本稿中の図表には紙面上で読みやすくするため引用元の図表を一部加工し文字を大きくしているものがある。

1. アスファルトの歴史

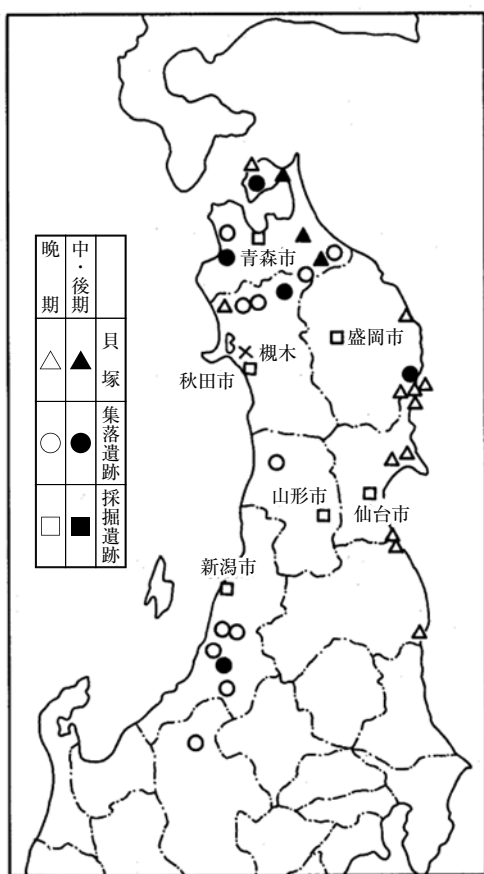
本章ではアスファルトの歴史について人類がアスファルトをどのように利用してきたか、また日本においてアスファルトの利用方法がどのように変化してきたかについて日本の社会情勢などを交えながら紹介する「アスファルト編」と、時代とともに求められるニーズに対応し変化してきたアスファルト舗装技術を紹介する「アスファルト混合物編」の2つのパートに分けて紹介する。アスファルトとアスファルト混合物の変遷は、当時の社会情勢などを反映したものとなっており、その動向は今後も続いてゆくだろう。

本章にて紹介する内容の一部は後章にて詳細な技術紹介をされることもあるが、本章では簡潔な概略にとどめ、あくまでアスファルトとアスファルト混合物の歴史において、その時代にどのような社会背景や使用方法があったかを紹介することにした。

1.1 アスファルト編

(1) 人類とアスファルトの歴史^{1, 2)}

アスファルトの歴史は古い。人類がアスファルトを利用したのは、紀元前3800年から2500年頃であると言われている。このアスファルトは天然アスファルトであり、古代バビロニア人がエジプトのナイル川とインドのインダス川の間に存在するアスファルト鉱床を開発したと言われている。そのアスファルトは装飾品、塗料や接着剤として活用され、煉瓦や骨材の接着剤として建築および舗床に利用された。一方、日本においてもほぼ同じ時期である紀元前3000年頃、縄文時代中期頃に、アスファルトを接着剤として利用していたという学説がある。現在の秋田県や青森県を中心に、当時のものと思われる縄文土器だけではなく、動植物や石などにもアスファルトがはっきりと付着しているものが出土していることから、そのように考えられている(図-1)。このように、アスファルトは人類に利



用されてから5000年以上の年月が経過している。そのアスファルトは現在、主に舗装材料として世界中で使用されている。

(2) 天然アスファルトの舗装への適用

古代バビロニア人や縄文人がかつて使用していたアスファルトは天然アスファルトとよばれ、自然に析出した原油のうちアスファルト分が岩や砂に付着したもの、アスファルト自体が湧き出たものを指す(写真-1に天然アスファルトであるオイルサンドを示す)。

古代バビロニア人が天然アスファルトを建築材や舗床に用いていた一方、日本の舗装史において天然アスファルトが使用されたのは近代になってからである。なお、日本で最初のアスファルト舗装は、1877年に私設の仮橋として昌平橋（しょうへいばし）架けられた。翌年、同橋に秋田産の天然アスファルトを施工した橋面舗装である²⁾（写真-2）。

天然アスファルトを精製して得られるアスファルトは「トリニダットレイクアスファルト（以下、TLA）」と呼ばれ、橋面舗装の鋼床版に用いられるグースアスファルト混合物用のアスファルトとして用いられている。なお、グースアスファルト混合物用のアスファルトとして使用する場合、TLAを単独で用いるのではなくStAs 20-40と混合して用いられている。

(5) 石油アスファルト

国産の石油アスファルトは、1912年（明治45年）に試掘が開始され、1914年には日産5.4kLが出油しアスファルトの国産化に成功した。1929年頃から展開された国産品の推奨運動の影響もあり、アスファルトの供給は国産品が輸入品を上回るほどであった。しかし、1939年に勃発した第二次世界大戦により原油は配給制となり、1941年には民需での使用が不可能となった。道路舗装用のアスファルトはなくなり、空港の滑走路用に使用された²⁾。

石油アスファルトの需要は、終戦後の1949年に連合軍総司令部（GHQ）から原油の輸入ならびに製油所の再開が許可された後に回復することとなった。戦後の復興需要もあり、1945年に1.1万tであったアスファルトの需要は1951年に10万t、1964年には100万tを超え1978年には500万tにも及んだ。膨大な量の原油が輸入、精製されアスファルトが製造される中で国産の石油アスファルトは徐々にその数量を減らしていった²⁾。

現在、日本のアスファルトはサウジアラビアやアラブ首長国連邦からの原油を輸入し、日本国内の製油所にて分留することで供給されている（図-3）。得られたストレートアスファルト（以下、StAs）は25℃における針入度（アスファルトの硬さ）ごとに分類され、日本では、北海道を除く地域においてはStAs 60-80が、北海道ではStAs 80-100が舗装用途で使用されている。なお、StAsでは耐久性に懸念がある箇所や排水機能を求められる舗装の一部には、アスファルトを「改質」したポリマー改質アスファルトが舗装用アスファルトとして使用されている。改質とは、StAsにスチレン-ブタジエン-スチレンブロック共重合体（SBS、写真-3）に代表される熱可塑エラストマーなどを添加することでアスファルトの性能を向上させることである。改質材の効果により舗装の耐流動性、耐水性やひび割れ抵抗性が向上する。この技術は日本国内では1950年頃から東京都や神戸市で試験的に行われ、1970年代から大幅に普及した。

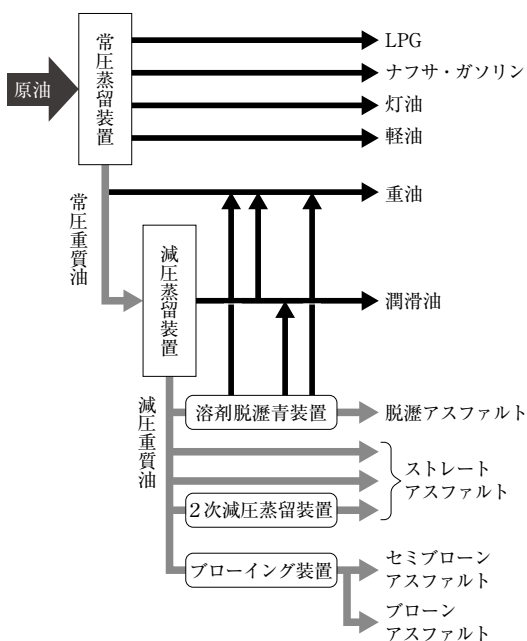


図-3 アスファルトの生産工程例³⁾



写真-3 SBSブロック共重合体

1.2 アスファルト混合物編

(1) 日本におけるアスファルト舗装の始まり

日本で初めてのアスファルト舗装は1878年に昌平橋に施工された橋面舗装であったが、以降アスファルト舗装は徐々に普及していった。1907年に僅か14台であった東京市内の自動車は1912年には279台へと増加してゆき、自動車の普及とともに道路の改良を求める声が高まったためである。東京市は木塊舗装、シートアスファルト舗装、瀝青コンクリート舗装の3種類で試験舗装工事を行い、この工事は1911年から1914年にかけて行われた。この試験舗装こそ本格的なアスファルト舗装の始まりだとされている^{2, 4)}。

(2) アスファルト舗装要綱と混合物の変遷

「アスファルト舗装要綱」は日本で最初に舗装技術基準をまとめたものであり、1950年に発刊されて以降、日本の舗装技術は大きく進歩した(写真-4)。1950年のアスファルト舗装要綱にはアスファルトコンクリート舗装と括られていたアスファルト混合物は、1961年の改定で粗粒度アスファルト混合物と密粒度アスファルト混合物に分けられ、1967年の改訂では両混合物に最大粒径が導入された。また、開粒度アスファルト混合物が初めて採用された。このように新たなアスファルト混合物の開発、基準化とその見直しが繰り返し行われてきた。しかし、アスファルト舗装要綱に記載されている混合物のみがアスファルト舗装として使用されてきたのではない。要綱に記載のない混合物についても道路会社や道路管理者らが研究開発を行い、ユーザーから求められる性能を満足する舗装を開発した結果、アスファルト混合物の種類は増加し多用途化した。現在、舗装構成を考える上で使用目的に応じてアスファルト混合物を使い分けることは非常に重要なこととなっている。



写真-4 アスファルト舗装要綱(昭和25年発刊)

(3) 1950～60年代の舗装

1950～60年代の舗装は、密粒度アスファルト混合物と粗粒度アスファルト混合物が多かった。密粒度アスファルト混合物は、混合物の内部が密であり舗装構成において表層に使用されることが多く、一方、粗粒度アスファルト混合物は密粒度アスファルト混合物と比較し、舗装内部に空隙が多く舗装構成においては基層に使用されることが多い。また、最大粒径は密粒度アスファルト混合物が20mm、13mmの2種類に対し、粗粒度アスファルト混合物は20mmのみである。

(4) 1960年代に登場した開粒度アスファルト混合物

開粒度アスファルト混合物は、水を通す構造になっており、舗装表面に水が溜まらない舗装となっている。粗く滑り止めを目的とした舗装に使用され歩道、公園の広場や軽交通の道路に適用されている(写真-5)。



写真-5 開粒度アスファルト混合物⁵⁾

(5) 1970年代に登場したギャップアスファルト混合物

ギャップアスファルト混合物は混合物の粒度が不連続(階段状)となっている混合物であり、合成粒度における600 μ m～2.36mmまたは600 μ m～4.75mmの粒径部分が10%程度以内の不連続粒度になっているものである。密粒度ギャップアスファルト混合物の場合、通常の密粒度アスファルト混合物と比較してすべり抵抗性や耐摩耗性に優れる一方、耐流動性は劣る混合物である。

(6) 1980年から1990年代に登場したリサイクルや二酸化炭素の排出抑制を考慮した舗装—再生アスファルト混合物と中温化アスファルト混合物—

アスファルト舗装を再利用する研究は1965年頃から活発に行われており、増大する舗装発生材と不足する処分地対策として行われた。1984年「舗装廃材再生利用技術指針(案)」が発刊されると再生アスファルト合材の出荷量は増加にした。1998年以降は、日本において新規のアスファルト合材よりも再生アスファルト合材の出荷量が多く、2023年では出荷されたアスファルト合材のうち約75%を再生アスファルト合材が占めている⁶⁾(図-4)。

中温化アスファルト舗装は、アスファルト合材の製造温度を通常よりも30℃程度低減して製造しても所定の品質が確保できる舗装のことである。また、中温化アスファルトは製造温度を低減させることにより合

材作製時の燃料消費量が削減でき、二酸化炭素の排出量削減に貢献している。中温化の手法は製造方法により異なっており、プラントミックスタイプでは混合物の製造時に特殊添加剤を投入するものやフォームドラスファルトを使用するもの、プレミックスタイプではアスファルトと特殊添加剤を改質アスファルト工場などで均一にした中温化混合物用アスファルトを用いるものがある⁷⁾。

(7) 1990年代に登場したポーラスアスファルト混合物

1960年代に開粒度アスファルト混合物が登場したが、この舗装は重交通路線に対応するものではなく歩道や軽交通の路線に適用されてきた。ポーラスアスファルト混合物は、重交通路線にも対応した高い耐流動性を持つ混合物である。主に国道や自動車専用道路の表層に適用されている。雨水が舗装表面に溜まることを抑制し、走行性や視認性を向上させる効果がある。また、舗装内部の空隙が多い舗装のため騒音の低減効果もある(写真-6)。

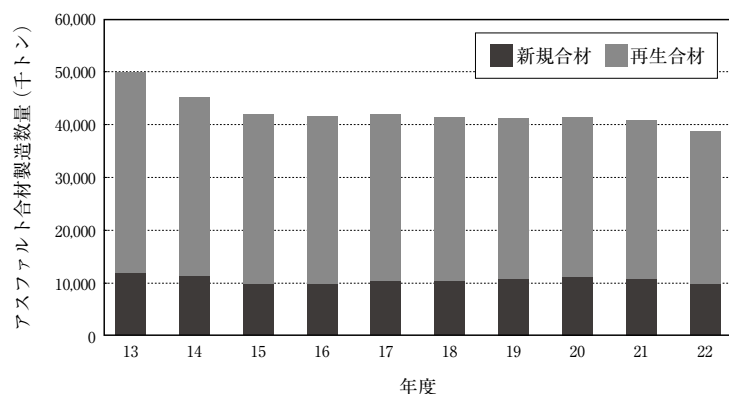


図-4 過去10年間のアスファルト合材製造数量⁶⁾



写真-6 排水性舗装の効果⁸⁾

(8) 地域特有の環境などに対応する舗装(2000年代以降の舗装)

近年開発された舗装の多くは地域特有の問題解決を図るものが多くあり、積雪寒冷地域特有の舗装損傷やヒートアイランド現象などの課題に対する舗装が登場してきた。この節では、積雪寒冷地の路面凍結対策として供用されている凍結抑制舗装、都市部においてヒートアイランド現象の対策として用いられている保水性舗装と遮熱性舗装について紹介する。

凍結抑制舗装は、積雪寒冷地域において路面温度-5℃程度までの路面の凍結を抑制することを目的とした舗装である。ゴムやウレタン樹脂といった弾性材料が舗装表面および内部に添加されているものや、氷雪の融解作用を持つ材料を舗装内部に添加してあるものが存在する⁹⁾(写真-7)。

保水性舗装は、開粒度アスファルト混合物または排水性舗装中の空隙を給水・保水機能を持つ保水材を充填したもので、保水材には、鉱質物や樹脂などのグラウト材や細粒材が用いられる。保水された水分が蒸発し気化熱が奪われることにより、路面温度の上昇を抑制する仕組みとなっている(写真-8)。

遮熱性舗装は、日射エネルギー量の約半分を占める近赤外線の再帰性能(太陽方向へ戻る)を高めた形で反射し、路面温度の上昇を抑制する舗装である。一般的なアスファルト舗装と比較して、遮熱性舗装は夏の路面温度上昇を10℃程度抑制する効果があり、ヒートアイランド現象の対策としても用いられる¹¹⁾(写真-9)。



写真-7 凍結抑制舗装⁹⁾



写真－８ 保水性舗装¹⁰⁾



写真－９ 遮熱性舗装¹²⁾

1.3 まとめ

本章では、アスファルトおよびアスファルト混合物の歴史を紹介した。特に2000年代以降の舗装技術は日進月歩であり、道路管理者や道路会社などにより多くの技術が開発されていることが調査を通じて分かった。本章では紹介しきれなかった舗装技術のうち、舗装の高耐久や長寿命化に対応した技術、バイオマス材料の舗装については近年多くの報文が発

表されており、将来アスファルトの歴史を語る際は重要なトピックとなるだろう。アスファルトの変遷についての調査はその歴史や背景だけでなく、最新の舗装技術についての理解を深めるよい機会であった。

—— 参考文献 ——

- 1) (社)日本アスファルト協会：アスファルト，Vol.30，No.154，pp. 26-31，1987.
- 2) 多田宏行：新編 語り継ぐ舗装技術，pp.3-5，2011
- 3) (社)日本アスファルト協会：アスファルトの利用技術，pp.5-8，1997.
- 4) 牧彦七：本邦道路技術の進歩の回顧と将来への進歩に対する待望，1940
- 5) (社)日本道路建設業協会ホームページ：開粒度アスファルト混合物
<http://www.dohkenkyo.net/pavement/meisyo/kairyudo.html>
(参照日：2023年9月26日)
- 6) (社)日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報，令和4年度－2022－，p3，2023

| 混合物の種類 | 1950年代 | 1960年代 | 1970年代 | 1980年代 | 1990年代 | 2000年代 | 現在 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| 密粒度アスファルト混合物 粗粒度アスファルト混合物 | | | | | | | |
| 開粒度アスファルト混合物 | | | | | | | |
| ギャップアスファルト混合物 | | | | | | | |
| 再生アスファルト混合物 | | | | | | | |
| ポーラスアスファルト混合物 | | | | | | | |
| 中温化アスファルト混合物 | | | | | | | |

図－５ 主要なアスファルト混合物の変遷

- 7) (社)日本道路建設業協会：中温化（低炭素）アスファルト舗装の手引き，pp.1-2，2012
- 8) 浜松市ホームページ：浜松市道路施設ユニバーサルデザイン指針 8
https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/dourokikaku/traffic/douro_ud/10.html
(参照日：2023年9月26日)
- 9) 凍結抑制舗装研究会：凍結抑制舗装ポケットブック，pp.2-11，2021
- 10) 路面温度上昇抑制舗装研究会ホームページ：保水性舗装とは？
<https://www.coolhosouken.com/retention/>
(参照日：2023年9月26日)
- 11) 路面温度上昇抑制舗装研究会：遮熱性舗装技術資料，pp.3-13，2011
- 12) 路面温度上昇抑制舗装研究会ホームページ：遮熱性舗装の適用事例
<https://www.coolhosouken.com/solarheat-blocking/example.html>
(参照日：2023年9月26日)

2. アスファルトの劣化について

現在、国内で出荷されるアスファルト合材の約75%は再生加熱アスファルト混合物である。省資源、省エネルギーの観点から舗装再生はさらに推進されると考えられる。しかし、繰り返しの再生によるアスファルト再生骨材の劣化が懸念されており、持続的な舗装再生技術にとって大きな問題となることが予想される。そのため、舗装再生技術の研究にとって、適切に劣化を評価することや、劣化のメカニズムとその影響を解明することが重要と考える。

アスファルトの劣化形態として、アスファルトの製造や貯蔵、運搬時の劣化と供用時の劣化の二つに大別される。前者のアスファルトの製造や貯蔵、運搬時の劣化を評価するものには、薄膜加熱試験、回転式薄膜加熱試験などがある。後者の供用時の劣化を評価するものには、加圧劣化試験などがある。本章では、製造・施工時から供用中に至るまでのアスファルトの劣化に関する種々の室内評価試験について紹介する。

2.1 アスファルトの劣化条件

アスファルトは製造・施工時と供用時とでは劣化条件が異なり、図-1に示すように製造・施工時にはプラントでの製造から舗設までアスファルトが高温で、かつ広範囲に空気と接触するため、急激な酸化反応が起こり、劣化が進行していく。また供用時は長期にわたる気象作用や車両による力学的疲労により劣化が進行する。

以上により、アスファルトの劣化条件を使用される場所や状況などによって整理すると表-1のようになる。

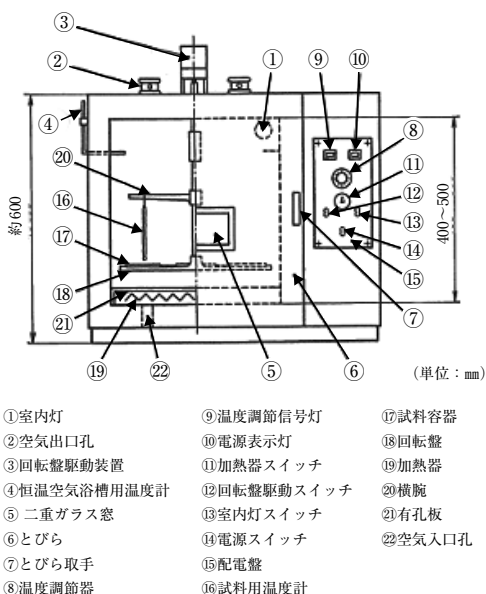
表-1 劣化の形態とその要因²⁾

| 形態 | 要因 |
|-----------|--------------------------------------|
| 製造・施工時の劣化 | ケトル貯蔵、プラント混合、運搬、舗設などの熱および空気(酸素) |
| 供用時の劣化 | 供用中の空気(酸素)による酸化、熱や光(紫外線)による重合および気象作用 |

2.2 製造・施工時の劣化評価

(1) 薄膜加熱試験の概要

薄膜加熱試験(以下、TFOT)とは、アスファルトの薄膜状態における加熱による劣化状態を再現するもので、針入度変化率等、加熱前後のアスファルトの性状変化を求めるものである。深さ9.5~10mmの試料皿に50gの試料を採取して試験機に設置し、163℃、5時間、5~6回/minで回転させながら加熱することで劣化させる。



- ①室内灯
- ②空気出口孔
- ③回転盤駆動装置
- ④恒温空気浴槽用温度計
- ⑤二重ガラス窓
- ⑥とびら
- ⑦とびら取手
- ⑧温度調節器
- ⑨温度調節信号灯
- ⑩電源表示灯
- ⑪加熱器スイッチ
- ⑫回転盤駆動スイッチ
- ⑬室内灯スイッチ
- ⑭電源スイッチ
- ⑮配電盤
- ⑯試料用温度計
- ⑰試料容器
- ⑱回転盤
- ⑲加熱器
- ⑳横腕
- ㉑有孔板
- ㉒空気入口孔

図-2 TFOT試験器の概略図³⁾

(2) 薄膜加熱試験によるアスファルトの劣化評価

TFOT導入以前には、蒸発試験が熱劣化を評価する試験として規格に取り入れられていた。表-2に蒸発試験とTFOTの相違を示す。両者で試験目的や試験手順はほぼ同様であるが、TFOTは、蒸発試験より試料の厚さが1/7程薄く苛酷な条件であり、加熱混合時の条件により近いと考えられる。蒸発試験は試料の膜厚が厚いため、実際の加熱混合時による劣化とほとんど関係がなく、加熱劣化の評価はTFOTを採用すべきとの考えから、現在では蒸発試験はほとんど用いられていない⁴⁾。

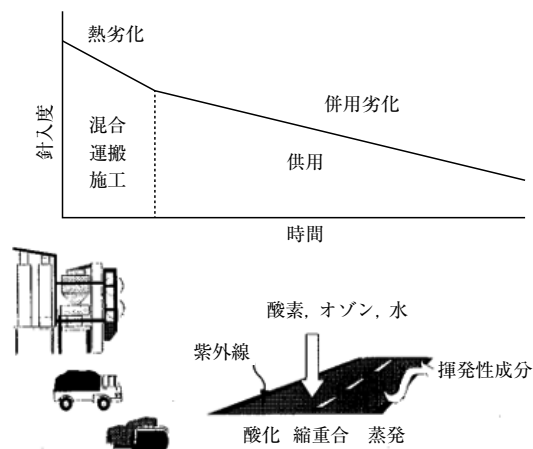


図-1 アスファルト舗装におけるアスファルトの劣化模式図¹⁾

表-2 蒸発試験と薄膜加熱試験の相違点⁵⁾

| | 蒸発試験 | 薄膜加熱試験 |
|--------|---------------------|----------------------|
| 容器の大きさ | 径 約55mm 深さ 約35mm | 径 約140mm 深さ 約10mm |
| 試料の厚さ | 約21mm | 約3mm |

実際にプラントで作製した混合物から回収したアスファルトとTFOTにより劣化させたアスファルトの性状比較を行った結果を図-3に示す。TFOTによる劣化は、プラントでの劣化と同程度かそれより厳しいことがわかる。プラント混合において通常の温度管理を行い、過度な加熱をしない限りTFOT以上に劣化することは考えにくい。以上より、TFOTはプラント混合時の劣化を評価するものとして有効であることがわかる。

(3) 回転式薄膜加熱試験の概要

回転式薄膜加熱試験（以下、RTFOT）は、TFOTと同様にアスファルトの加熱混合時における劣化状態を再現する試験であり、1962年にカリフォルニア州道路局で考案された。図-4に試験機の概略図を示す。試料容器として特殊なガラス容器（図-5）を用い、これを試験機に取り付け163℃で85分加熱する。その際、毎分15回の速度で回転させることで常に新しいアスファルト被膜が現れる状態とし、回転盤下部にあるノズルから4L/minで熱風を吹き込むことによって劣化を促進させる。そのため、TFOTに比べ大幅な試験時間の短縮が実現されている。

(4) 回転式薄膜加熱試験によるアスファルトの劣化評価

試験中のアスファルトの膜厚はTFOTで約3mmであるのに対し、RTFOTでは5～10 μ mと被膜が非常に薄いことから、より加熱混合時の条件に近いと考えられる。両試験後の針入度の相関と60℃粘度の相関をそれぞれ図-6、図-7に示す。針入度では両者に非常に良い相関が見られ、劣化程度もほぼ一致している。一方、60℃粘度では両者の相関係数は0.95と高い相関を示しているものの、粘度の大きなもののほどRTFOTのほうがやや厳しい劣化傾向を示している。若干の差異はあるものの、アスファルトの劣化程度を評価するだけであればどちらを用いてもよいと考えられる。しかし、TFOTの方が実験操作や容器の洗浄が容易であり、過去のデータも豊富である。このような背景からJIS 2207の石油アスファルト規格などにはTFOTが採用されている⁶⁾。

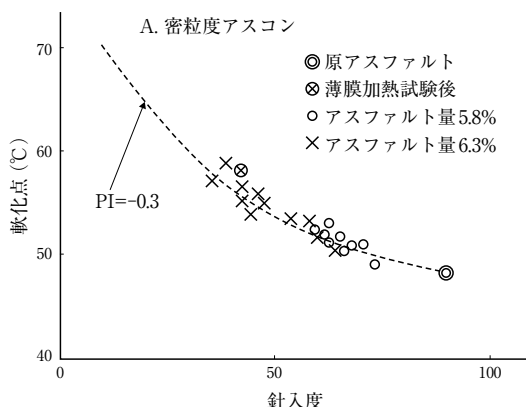


図-3 薄膜加熱試験とプラント混合時の劣化の関係⁴⁾

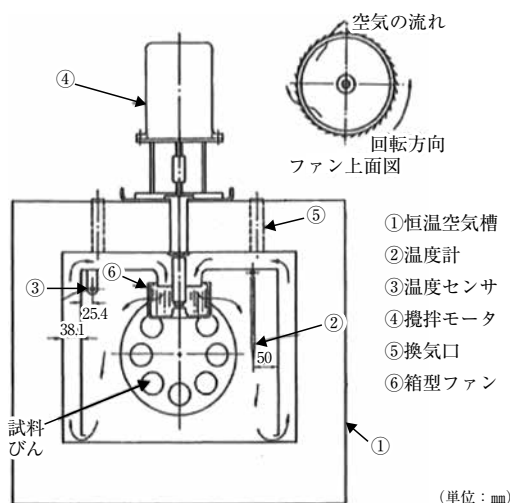


図-4 RTFOT試験機の概略図³⁾

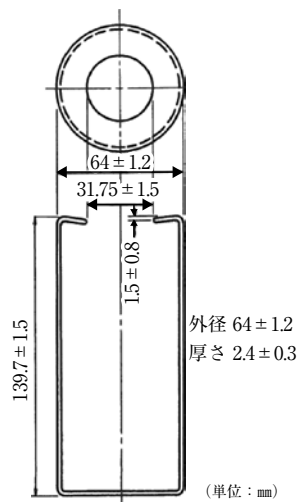


図-5 RTFOTに用いるガラス容器³⁾

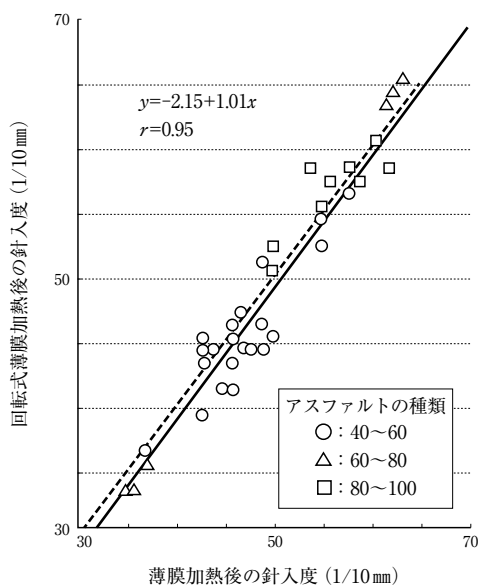


図-6 TFOTとRTFOT後の針入度の関係

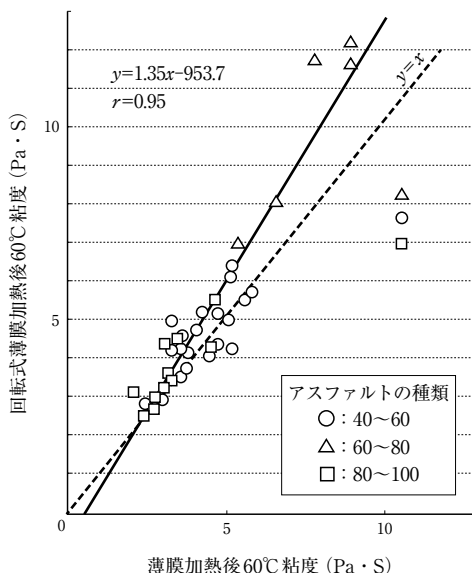


図-7 TFOTとRTFOT後の60℃粘度の関係³⁾

2.3 供用時の劣化評価試験

(1) 加圧劣化試験の概要

加圧劣化試験（以下、PAV）とは、舗設後の長期供用後の劣化状態を評価するため米国のSHRP（Strategic Highway Research Program）で開発された試験であり、供用5～10年に相当する評価が可能であることが報告されている¹⁾。TFOTまたは

RTFOTを行った後の試料を加圧・加熱した室内劣化試料を作製する目的で実施する。図-8にPAVの試験機の概略図を示す。前処理を施した試料50gをTFOT皿に採取して試験器の圧力容器中にセットし、2.1MPaの高圧下において90～110℃で20時間加圧劣化させる。

(2) 加圧劣化試験によるアスファルトの劣化評価

劣化試験方法に関する研究例によると、TFOTとPAVでは酸化や縮重合といった化学的な劣化機構が異なることが報告されている。図-9より、TFOT後

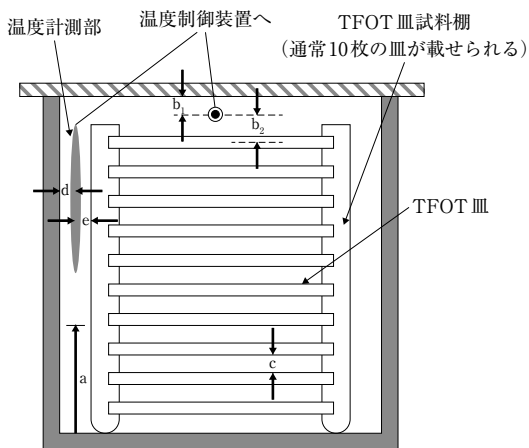


図-8 PAVの概略図³⁾

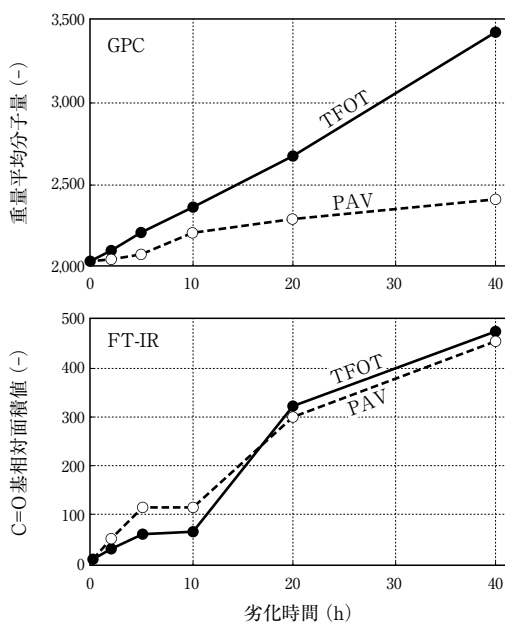


図-9 劣化試験による化学性状の経時変化¹⁾

のアスファルトの重量平均分子量は、時間の経過に伴って急激に増加するのに対し、PAV後では大きな変化はないことがわかる。一方、酸化度合いを示すカルボニル基 (C=O) に関しては、両者ではほぼ同様の増加傾向を示している。また、長期の供用によりアスファルトの飽和分と芳香族分が減少し、レジン分とアスファルテン分が増加することが知られているが、図-10に示した組成の経時変化の結果から、特にPAVによって急激に芳香族分が減少し、レジン分が増加することがわかる。

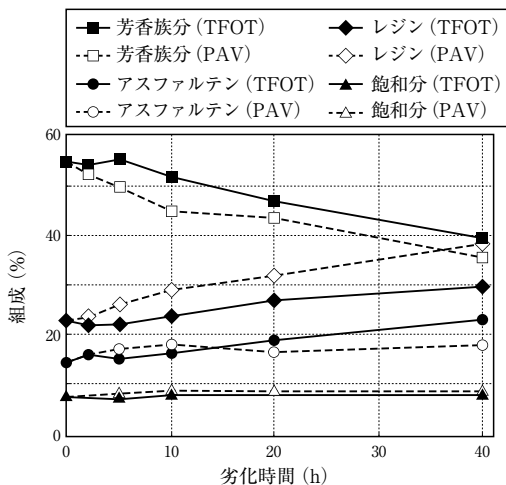


図-10 劣化試験による組成の経時変化¹⁾

以上より、プラントにおける混合物製造時の劣化評価にはTFOTを用い、長期供用における劣化評価にはTFOTとPAVを組み合わせる用いることが適当と考えられた。このことを検証するため、屋外に5～5.5年間暴露された供試体から回収したアスファルトとTFOT+PAV後のアスファルトの針入度を比較したところ、ほぼ等しい結果が得られた(図-11)。したがって、製造・施工時から供用中に至るまでのアスファルトの劣化を予測する室内劣化試験として、TFOT+PAVは有効と言える。

日本では高压ガス保安法による加圧試験運用上の制約等の理由により、規格への導入には至っていないものの、PAVは長期供用後のアスファルトの性状を模擬できる優れた試験であり、試験機関などで導入されている。圧力の低減や大気圧での試験が可能になれば運用が容易になると考えられることから、圧力を低減させたPAV試験の適用性評価が実施されている⁷⁾。

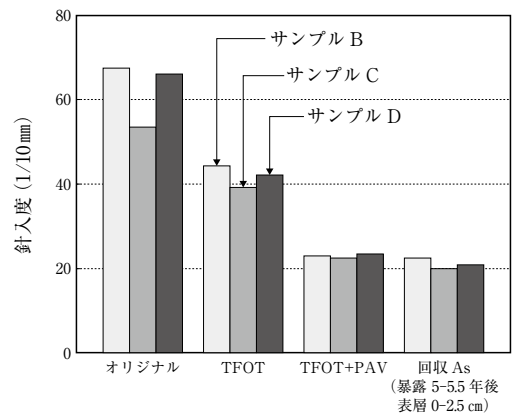


図-11 劣化アスファルトの針入度試験結果¹⁾

2.4 まとめ

アスファルトの劣化の程度を評価するための代表的な室内試験として、薄膜加熱試験、回転式薄膜加熱試験、および加圧劣化試験を取り上げ、試験方法の概要と試験が導入された背景、さらに各試験での劣化状態の差異や実際に回収されたアスファルトとの相関について解説した。

これらはアスファルトの劣化を評価する試験であり、混合物の状態での供用時の劣化を模した試験は一般的ではない。今後は、混合物の劣化試験を含めた、より劣化の実態に沿う評価方法の開発が期待される。

参考文献

- 1) 遠西智次, 新田弘之, 坂本浩行, 片脇清: アスファルトバインダーの劣化試験方法に関する研究, 舗装, 30-6, 1995.
- 2) 土木学会: 舗装工学ライブラリー13a アスファルトの特性と評価, pp.55-68.
- 3) 公益社団法人日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧(平成31年)第二冊
- 4) 小島逸平, 坂本浩行, 伊藤正秀: アスファルトの劣化評価試験, ASPHALT, Vol.29, No.148, 1986.
- 5) 松野三朗, 三浦裕二, 南雲貞夫, 山之口浩: アスファルト舗装に関する試験, 建設図書, pp.125-130, 157-166.
- 6) 森永教夫, 川野敏行: 舗装技術の質疑応答 第七巻(下), 建設図書, pp.156-160.
- 7) 佐々木巖, 西崎到: 供用劣化評価のための加圧劣化(PAV)試験の圧力条件とアスファルト性状, 土木学会第69回年次学術講演会, V-509, 2014.

3. 舗装の維持と修繕について

3.1 舗装の寿命と我が国の現状

舗装がどれだけの期間保つのかという寿命・耐用年数について、国内においては設計期間と呼ばれるものが定まっている。路面の設計期間は塑性変形抵抗性や平坦性などの性能が目標値以上であり続ける期間、舗装の設計期間は交通による繰り返し荷重による疲労ひび割れが生じるまでの期間を示し、舗装の設計期間は高速自動車国道で40年、一般国道で20年と設定される¹⁾。

舗装にひび割れなどの損傷が起きると、舗装の性能は舗設直後に比べ低下していく。路面・表層内に損傷の原因があり走行性や安全性・快適性を損なう路面の損傷から、損傷がその中でとどまらず路盤やその下の損傷である舗装構造の損傷へ進行し、舗装構造全体の耐久性に影響をもたらすようになる²⁾。そのため、適切な時期に適切な方法で効率的にその性能を回復させ、利用者や周辺住民の安全や快適な交通および構造の耐久性を確保するための作業が必要となる。これが舗装の維持修繕である。

我が国においては、舗装ストックは増加傾向にあるものの、財政制約により舗装の維持修繕費は近年減少している状況にあり、脱炭素社会実現に向けた舗装の長寿命化やライフサイクルコスト(LCC)、ライフサイクルCO₂(LCCO₂)の削減を目指すことが求められている³⁾。

また、2018年9月の道路法の改正により創設された「重要物流道路制度」による、国際海上コンテナ車等の超重交通量の増加への対応のためにも、合理的・効率的な舗装の管理をするうえでは適切な維持修繕を行うことが重要なことであると言える。

3.2 維持・修繕工法

維持工法は、計画的に反復して行う手入れまたは軽度な修理をいい、路面の性能を回復させることを目的に実施する。

修繕工法は、維持工法では不経済もしくは十分な回復効果が期待できない場合に、建設時の性能程度に回復することを目的に実施する⁴⁾。

図-1にある機能的対策に当たるものが維持工法であり、路面の損傷の時点で舗装表面を対象として措置する。一方で構造的対策に当たるものが修繕工法であり、構造の損傷にいたった舗装の荷重支持性能を回復させるため、舗装体の全層又は一部を対象として措置する対策である。

(1) 維持修繕の目的

舗装の維持修繕の目的は次の三つに大別できる²⁾。

- ①舗装の耐久性を確保し、舗装の構造機能を保つ。
- ②路面の走行性を確保し、交通の安全と快適性を保つ。
- ③舗装に起因する沿道環境の悪化を防ぐ。

(2) 維持修繕工法の選定について

効率的な維持修繕を行うためには、破損の実態を把握・評価し、破損の程度や原因等に応じて工法を選定する。維持修繕工法の選定手順を示す⁴⁾。

- ①破損の実態を把握するための路面調査・構造調査
- ②破損程度の評価および原因の推定
- ③評価結果に応じた維持修繕工法の選定

(3) 代表的な維持修繕工法⁴⁾

アスファルト舗装の維持修繕として図-1に示した対策工法の内、代表的な維持修繕工法について紹介する。

①代表的な維持工法

a) パッチング工法

ポットホール、段差、くぼみや亀甲状のひび割れなどに対して、パッチング材料を充填する工法である。パッチング材料には、加熱アスファルト混合物

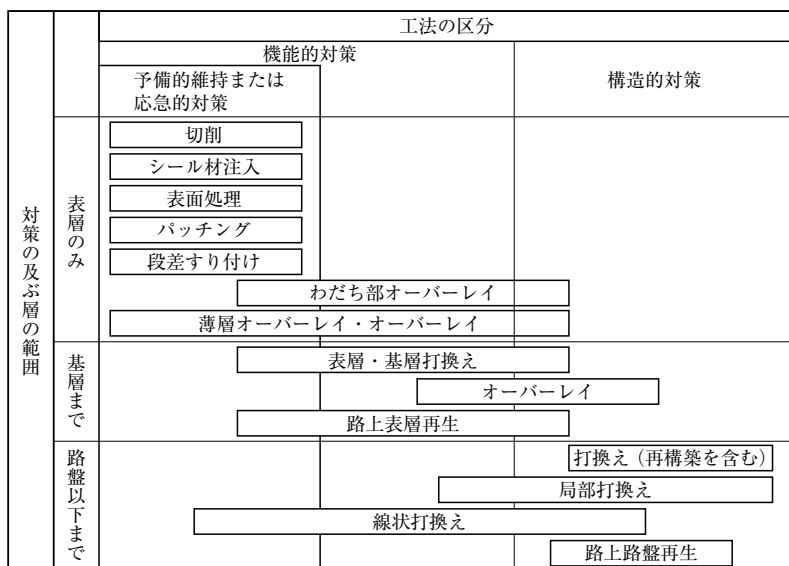


図-1 アスファルト舗装の主な維持・修繕工法⁵⁾

や瀝青系および樹脂系のバインダを用いた常温混合物などがあり、破損の規模や緊急性、交通条件など現場条件を考慮し選定を行う。加熱アスファルト混合物は安価で耐久性に優れており、一方で常温混合物は比較的取り扱いが容易であり、保存期間も数カ月程度のもが多く、携帯性に優れているため、緊急性を有する場合に採用することが多い。耐水性や接着性を強化することで、破損箇所が水が溜まっている場合や降雨時でも使用できるようになっているパッチング材料もある。



写真-1 パッチング工法による維持事例

b) シール材注入工法

舗装のひび割れに注入目地材を充填する工法であり、予防的維持工法として用いられることもある。シール材には、加熱アスファルト系やアスファルト乳剤系、樹脂系といった種類があり、ひび割れの損傷程度やひび割れ幅、可使時間などに応じて適用する材料を選定する。加熱アスファルト系のシール材は、接着性が高く、弾力性に優れているため膨張・



写真-2 シール材注入状況

収縮によく順応する。アスファルト乳剤系・樹脂系のシール材は常温施工が可能であり、樹脂系の材料は一般的に硬化が速く、柔軟性がありひび割れに追従しやすいため作業性に優れ迅速な施工が可能である。

c) 表面処理工法

アスファルト混合物の劣化・老化により発生したひび割れや、わだち掘れ、ポリッシング等が生じた場合に、図-2のように既設舗装の上に3 cm未満の封かん層を設ける工法である。予防的処置として用いる場合は、舗装の破損が軽微なうちに処置することで延命効果が期待できる。封かん層に乳剤系、加熱アスファルト混合物系、樹脂系材料を用いる工法がある。乳剤系材料を用いるfog seal工法およびchip seal工法は、微細なひび割れや表面の空隙を充填し、舗装面を若返らせる。樹脂系材料を用いた表面処理工法は、舗装面に樹脂を均一に塗布しその上に耐摩耗性の硬質骨材を散布し路面に固着させ、舗装の機能を回復・向上させる。

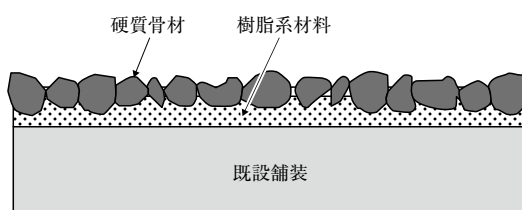


図-2 樹脂系表面処理工法の断面例

d) 薄層オーバーレイ工法

既設舗装の上に厚さ3 cm未満の加熱アスファルト混合物を舗設する工法である。適用に際しては、起終点、人孔等において段差が生じないように縦横断勾配を計画する必要がある。

e) わだち部オーバーレイ工法

わだち掘れしている部分にだけ加熱アスファルト混合物の舗設を行う工法である。積雪寒冷地のタイヤチェーンによる摩耗わだち掘れに適している。一方で、流動わだち掘れに対しては、起きてしまった流動を抑える効果は低いため適さない。また、路面全体をオーバーレイする前のレベリング工として行われる場合もある。端部の剥離を防ぐため、接着力の高いゴム入りの乳剤を塗布することが望ましい。

②代表的な修繕工法

a) オーバーレイ工法

既設の舗装の上にアスファルト混合物の層を重ねる工法であり、舗装全体に対して行う工法である。舗装面が施工前より高くなるため、路面の排水が行われにくくなることや、トンネル内部の高さが建築限界(4.5m以上)を下回ることで、構造物の高さが相対的に変わる可能性を十分検討する必要がある。構造物に対しては、かさ上げやオーバーレイで発生する段差のすり付けを行う。事前にパッチングやシール材の注入、リフレクションクラック対策を施しておくことで、既設舗装の破損がオーバーレイ層に影響することを極力避けられる。

b) 打換え工法

既設の舗装の内アスファルト混合物層全層から路盤や路盤の一部までを打換える工法。場合によっては路床の入れ替え、路床または路盤の安定処理を行うこともある。傷んでいる部分を丸々取り除き、改めて舗設するため、費用や時間がかかる一方で新品同様の状態になる。

既設舗装を取り除く際には、構造物や埋設物を傷つけないよう注意が必要である。

c) 切削オーバーレイ工法

既設の舗装を表層または基層まで打換える工法の内、既設の表層・基層を切削で取り除く場合に切削オーバーレイ工法と呼ばれる。図-3のように切削した高さと同じ高さの基層・表層を打ち換えることで打換え工法と同様に舗装面を元の高さに戻すことができる。

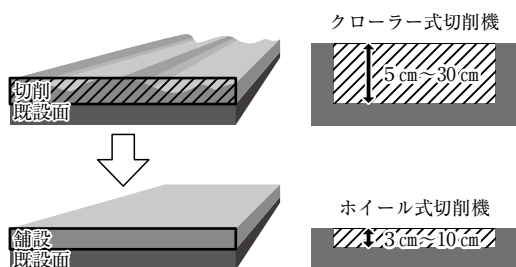


図-3 切削オーバーレイ工法の断面図⁶⁾

d) 路上路盤再生工法

既設アスファルト混合物層を路上で破碎すると同時にセメントやアスファルト乳剤を添加し、既設路盤材とともに混合し、締固めて安定処理路盤を構築

する工法。既設舗装をその場で路盤にするため、舗装発生材をリサイクルプラントに運ぶ手間や費用が省ける。アスファルト混合物層および既設路盤上部を合わせて再生路盤にすると、図-4のようにオーバーレイと同様に舗装面が施工前より高くなるため、図-5のように余剰となる分を取り除いてから路盤を安定処理する場合もある。

その他、現在では行われていないが、路上で既設アスファルト混合物の加熱、かきほぐしを行い、必要に応じて新規アスファルト混合物や再生用添加剤を加え、再生した表層を構築する路上表層再生工法などがある。

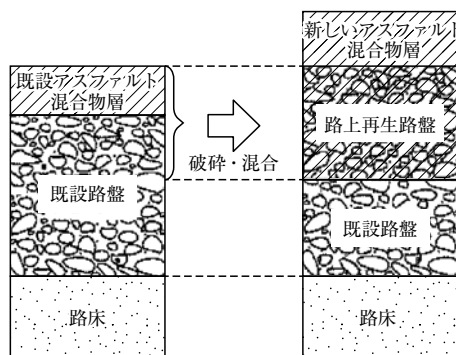


図-4 混合物層を全て使用する場合⁷⁾

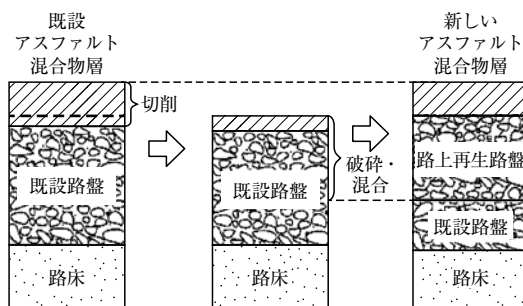


図-5 余剰分を除いてから施工する場合⁷⁾

3.2 まとめ

この章では、舗装の破損の段階と、それを回復させる各種維持・修繕工法について解説を行った。

破損が進むほど機能を回復させる為に必要な工法は大規模になり時間・費用共に掛かっていくこととなる。一方で過剰な維持・修繕工法は費用対効果が低いため、適切な時期に効率的に行える適切な方法を選んでいくことが重要だと考えられる。

- 1) (社) 日本道路協会：舗装設計便覧, 2006.2
- 2) (社) 日本道路協会：道路維持修繕要綱, 1978.7
- 3) 国土交通省：インフラ長寿命化基本計画
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_mn_000010.html
 (参照日：2023年9月25日)
- 4) (公社) 日本道路協会：道路の維持補修ガイドブック 2013, 2013.11
- 5) (社) 日本道路協会：舗装施工便覧 (平成18年度版), 2006.2
- 6) 全国路面切削連合会：切削工事とは
<http://zenrosetsu.com/about/>
 (参照日：2023年9月25日)
- 7) (社) 日本道路協会：舗装再生便覧 (平成22年度版), 2010.11

4. 様々な気候に対応した舗装技術

4.1 暑さに対応した舗装技術

近年我が国では毎年のように猛暑に見舞われている。過酷な暑さは我々人間だけではなく舗装にも様々な影響を与える。ここでは暑さに対応した舗装や暑さを活かした舗装技術を紹介する。

(1) 高温対策に適した舗装技術

①遮熱性舗装

遮熱性舗装とは、遮熱性特殊塗料を舗装体表面に塗布することにより、太陽光エネルギー中の可視光線および近赤外線を、通常のアスファルト舗装よりも多く反射することができる特殊舗装技術である。これにより、舗装体の温度上昇を抑制し、蓄熱量を軽減することができる。遮熱性舗装の特徴を以下に記す。

a) 路面温度低減効果

舗装の温度上昇を抑制する。

b) 歩行環境の改善

路面からの輻射熱や伝導熱が低下し、歩行者の暑さに対する不快感を低減する。

c) カラー化

周囲環境に合わせた熱反射性特殊顔料を選定することで、視認性や景観性のニーズに応じたカラー化が可能。

d) 舗装の耐久性向上

路面温度が低減することで耐流動性などアスファ

ルト舗装の耐久性の向上が得られる。

遮熱性舗装の種類としては、表-1に示すように舗装表面に遮熱性塗料を吹き付ける、あるいは塗布する「塗布型」、舗装表面に遮熱性材料を充填する「充填型」、表層用混合物に遮熱性材料を混合する「混合物型」に大別される。現在は塗布型が主流となっている。

②保水遮熱性舗装

輻射熱を緩和するためのものであり、遮熱性舗装および保水性舗装の2工法をポーラスアスファルト舗装に併用した工法(図-1)である。母体となるポーラスアスファルト舗装の空隙内部を保水性セメントミルクで満たし、舗装表面に遮熱性舗装と同様の遮熱材が塗布されている。なお、雨水浸透のための舗装表面の隙間は十分に確保されている。これにより、降雨時に雨水を舗装内部に貯留し、晴天時に蒸散させる保水性舗装としての効果と近赤外線の吸収を抑制する遮熱性舗装としての効果を同時に発揮することができる技術である。施工から1年後においても路面温度上昇抑制効果が持続していることは確認されているが、一般的な保水性舗装や遮熱性舗装の各々に対して施工コストが割高である点が課題となっている。

表-1 主な塗布型遮熱舗装の種類¹⁾

| 遮熱性舗装の種類 | 2液硬化型樹脂系 | エマルジョン型樹脂系 |
|------------------------------------|---|-------------------------------|
| 遮熱性材料のバインダー | MMA系樹脂 ウレタン樹脂 ウレア樹脂等 | アクリルエマルジョン等 |
| 主な熱反射性特殊材料 | 遮熱顔料 微細中空粒子 | 遮熱顔料 |
| 適用可能な舗装 | ポーラスアスファルト舗装 密粒度アスファルト舗装 コンクリート舗装 | |
| 遮熱材料塗布量(kg/m ²) (骨材除く) | 0.8～1.1 | 0.8～1.2 |
| 主な施工方法 | 吹付け (2液混合型スプレーガン) (リシンガン等) | 吹付け (リシンガン等), またはローラ刷毛等 |
| 養生時間 | 0.5～1時間 | 1～2時間 |

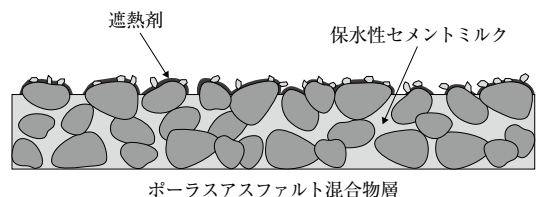


図-1 保水遮熱性舗装の構造²⁾

(2) 高温を生かした舗装技術

①熱エネルギーを利用した発電システム

熱電素子のゼーベック効果を利用して、熱電素子を道路舗装中に埋設し、素子上下面の地中深度方向の温度分布による温度差をエネルギー源として発電を行うシステムである。ゼーベック効果とは2種類の異なる金属で構成された接合回路に片方を加熱して、もう片方を冷却すると接合回路の端子間に開放電圧が生じる効果である。端子間に外部抵抗を接続すると電力を取り出すことができる。路面熱利用発電システムの機能として、発電により路面温度が低下し、舗装の耐久性向上も期待できる。

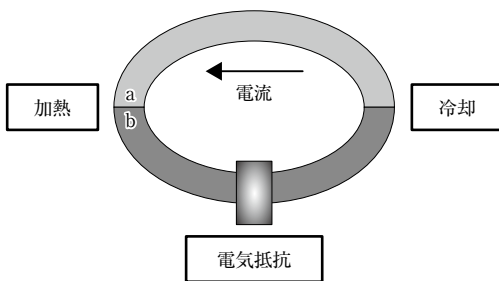


図-2 ゼーベック効果の概念³⁾

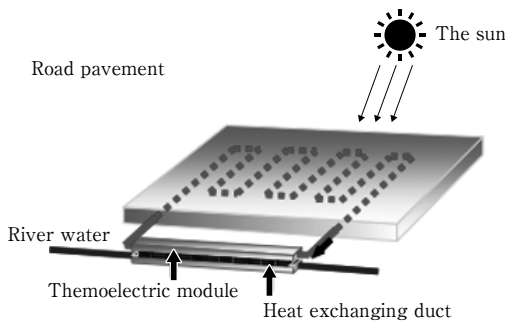


図-3 路面発電システム⁴⁾

②融雪技術

○パイプ・イン・パイル融雪工法（ソーラー・パイル方式）

基礎杭内に貯水し、貯水した水をポンプで循環させ、夏季に路面の熱を杭とその周囲に蓄熱する。杭相互の熱干渉で拡散せず、半年以上の蓄熱が可能である。その蓄熱を冬季の融雪に使用する。また、夏季には冷水を循環させることでヒートアイランド現象の対策もできる。

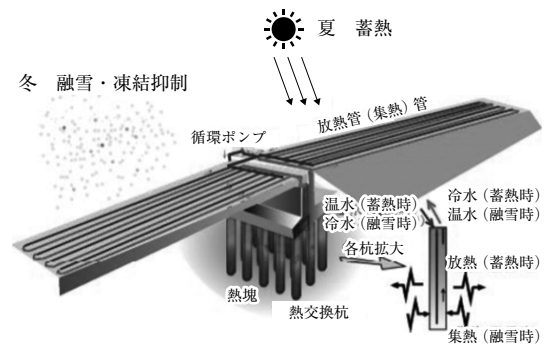


図-4 工法概要図⁵⁾

③太陽熱蓄熱方式融雪施設（浅層地中熱利用融雪システム）

夏季に舗装版を集熱器として太陽熱を集め、循環水より地中に蓄熱しておき、この熱を降雪期に取り出して放熱し、融雪および凍結防止を行う。

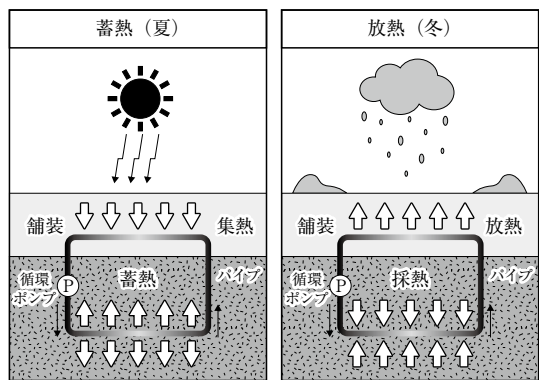


図-5 システム概要図⁶⁾

(3) 地球温暖化対策に関する舗装技術

①中温化アスファルト技術

中温化アスファルト技術は、アスファルトの粘度を低下させる特殊添加剤の効果によって、通常のアスファルト混合物の製造温度および施工温度を30℃程度低減させることのできる技術である。また、添加剤の代わりに装置内で水分を加えることでアスファルトの見かけの粘度を低下させるフォームドアスファルトも中温化アスファルト技術のひとつである。中温化アスファルト混合物は、通常のアスファルト混合物に比べて製造時の混合温度を下げることでCO₂の排出量を削減し、地球温暖化の防止に貢献できる。中温化アスファルト混合物に用いられる特殊添加剤には、発泡系、粘弾性調整系、潤滑系などがある。

②低燃費舗装

低燃費舗装は、タイヤ／路面転がり抵抗（転がり抵抗）を小さくすることで自動車の走行燃費を改善しCO₂排出量を低減する舗装である。自動車の走行燃費やCO₂排出量を変動させる主要因は、走行抵抗（＝転がり抵抗＋空気抵抗＋勾配抵抗＋加速抵抗）と考えられている。低燃費舗装は、骨材を小粒径化する

ることでネガティブテクスチャを形成するとともに、高い平坦性を確保することが特徴である。これにより、転動するタイヤのトレッド面とサイドウォールの変形を抑制し、タイヤに生じる損失エネルギーの発生を抑制することで、タイヤ／路面転がり抵抗の低減（＝走行抵抗の低減）を図るものである。

表－2 低燃費舗装の性能指標と性能評価⁷⁾

| 舗装の性能 | 性能指標 | 測定方法 | |
|---------------------------|--|---|---|
| | | 直接測定 | 間接測定 |
| ①タイヤ／路面転がり抵抗低減性 | 転がり抵抗係数 | すべり抵抗測定車による転がり抵抗測定方法 ³⁾ | 転がり抵抗係数算出式による測定方法 |
| | (定義) タイヤの転動方向の反対方向に作用する力を鉛直荷重で除した程度 | (測定方法) すべり抵抗測定車の試験輪に発生する牽引抵抗Rと荷重Fzを測定し、転がり抵抗係数($\mu R = R/Fz$)を算出。  | (測定方法) ラフネス (IRI) とテクスチャ (skewness) 指標および設定速度より、本文4.に記載した式－1より μR を算出。 |
| ②自動車走行燃費向上性 | 自動車走行燃費 | 燃料消費計による測定方法 ⁴⁾ | 燃費算定式による測定方法 ²⁾ |
| | (定義) 単位燃料量当りの自動車の走行距離を表す程度 | (測定方法) 試験車の燃料配管系統に燃料消費計を設置し、燃料消費量を測定、単位燃料量当りの走行距離を算出。  | (測定方法) 転がり抵抗係数と、走行抵抗におよぼす転がり抵抗の寄与率に基づいて、走行燃費を算出。 |
| ③自動車CO ₂ 排出低減性 | 自動車CO ₂ 排出量 | CO ₂ 排出量測定車による測定方法 | CO ₂ 原単位を用いた算定方法 ²⁾ |
| | (定義) 単位延長1 km当りの自動車が排出するCO ₂ の量を表す程度 | (測定方法) 試験車に搭載した排出ガス計測システムにより、マフラーより排出される単位延長当りのCO ₂ 排出量を測定。  | (測定方法) 自動車走行燃費、路線交通量、設定速度より、燃料消費量を算出し、燃料のCO ₂ 原単位を用いて、CO ₂ 排出量を算出。 |

表－3 低燃費舗装の性能評価結果⁷⁾

| 性能指標 | | 低燃費 (5) | 低燃費型排水性 (5) | 排水性 (13) | 密粒 (13) |
|---|---------------|------------|----------------|-------------|------------|
| 転がり抵抗係数 μR (直接測定) (-) | 40km/h | 0.0121 | 0.0123 | 0.0144 | 0.0125 |
| | 60km/h | 0.0142 | 0.0146 | 0.0165 | 0.0144 |
| | 80km/h | 0.0164 | 0.0169 | 0.0193 | 0.0168 |
| 自動車走行燃費 (直接測定) (km/L) | 40km/h | 12.37 | 12.16 | 11.98 | 12.23 |
| | 60km/h | 14.15 | 14.04 | 13.77 | 13.89 |
| | 80km/h | 12.04 | 11.87 | 11.72 | 11.92 |
| 自動車CO ₂ 排出量 (直接測定) (g/km) | 40km/h | 294.51 | 293.12 | 298.45 | 294.47 |
| | 60km/h | 193.97 | 197.50 | 202.16 | 199.98 |
| | 80km/h | 225.71 | 228.37 | 232.81 | 227.03 |
| すべり抵抗値 μ_{TF} (-) | 40km/h | 0.49 | 0.44 | 0.42 | 0.71 |
| | 60km/h | 0.38 | 0.36 | 0.31 | 0.58 |
| | 80km/h | 0.34 | 0.34 | 0.27 | 0.48 |
| 騒音値 $L_{AeqNST} \rightarrow L_{AeqRS}$ (dB) | | 87.5 | 87.7 | 88.9 | - |
| 平坦性 | IRI (m/km) | 0.87 | 0.97 | 1.26 | 1.17 |
| | σ (mm) | 0.55 | 0.58 | 0.87 | 0.75 |
| 浸透水量 (ml/15s) | | 1192 | 1316 | 1369 | - |
| 歪度 skewness (-) | | -1.42 | -1.40 | -1.28 | -2.22 |

※各工区の試験舗装延長は300m、各区間の縦断勾配は0 %

(4) 暑い国の舗装技術

海外の暑い国で採用されている舗装技術を紹介する。

①イラク

古いアスファルトコンクリートを再生利用する常温再生技術を持っている。古いアスファルトコンクリートを砕いて、セメントなどの添加剤を混ぜて、新しいアスファルトコンクリートとして舗装する方法がある。この技術は道路の強度や安定性を向上させるだけでなく環境にも優しい。舗装設計する際には、AASHTOやASTM, FHWAなどに準拠した試験を行っている。

②サウジアラビア

米国連邦高速道路局 (FHWA) によって開発された MEPDG という力学的経験的舗装設計指針のソフトウェアの使用を検討している¹⁾。この手法は、図-6に示すとおり舗装の物理的特性を数字モデルで表現し、実際の交通荷重や気象条件などの外部要因に基づいて、舗装の耐久性を予測することができる。

③シンガポール

遮熱性舗装の日射反射の強化や、材料の代替による熱抵抗の増加、浸透性、保水性および透水性を向上させて蒸発冷却熱抵抗の増加による冷却効果などの暑さ対策を行っている²⁾。また、アスファルト舗装における気候変動の高温対策について様々な

ケースで検討している。そこで、図-7に示すとおり将来の気候変動の影響に適応するアスファルト舗装の影響要因と対応を見直している。

また、高温対策として日本で一般的に使われている半たわみ性舗装および高耐久型の乳剤系常温補修材料などのアスファルト舗装技術も使用している。

④ミャンマー

ミャンマーでは浸透式マカダム工法がよく使われている³⁾。浸透式マカダム工法は表層工であり、施工は主骨材となる碎石を敷きならして締固める。その上に瀝青材を散布し、目潰し材となる碎石を散布

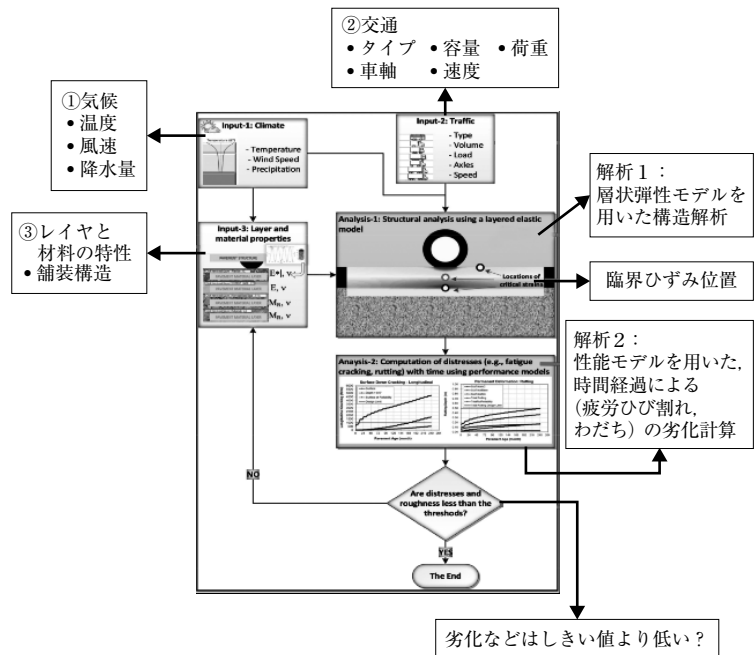


図-6 MEPDGのソフトウェアの概要

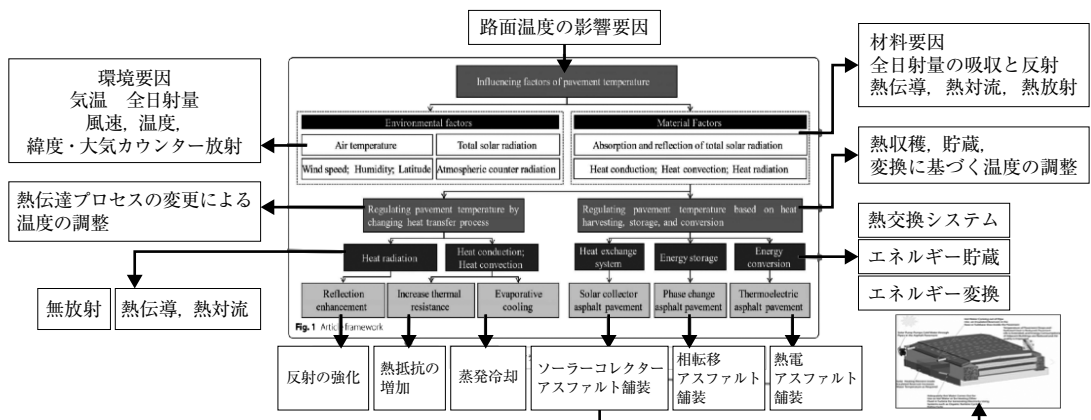


図-7 舗装温度の影響要因と対応

する。これを何層か繰り返す工法である。
また、この舗装は交通量の少ない道路に用
いられ、雨季にはしばしば冠水すること
もある。

4.2 寒さに対応した舗装技術

我が国では国土の約60%が積雪寒冷地と
され、総人口の約20%が豪雪地帯に住ん
でおり、雪害に悩まされている。特に積雪路
での立ち往生、道路の寸断が近年の社会問題
になっている。

本節では、はじめに積雪寒冷地において冬
期から春期にかけて、低温、降雪、積雪、融
解などの環境変化に起因する積雪寒冷地特
有の現象や舗装損傷について紹介する。次
に積雪寒冷地特有の供用条件や環境に適用
した舗装の北海道型SMAの効果等について
紹介する。最後に路面凍結に着目した事故
防止対策として凍結抑制機能や融雪機能を
付した舗装技術について紹介する。

(1) 寒さが舗装に及ぼす影響

①低温ひび割れ¹¹⁾

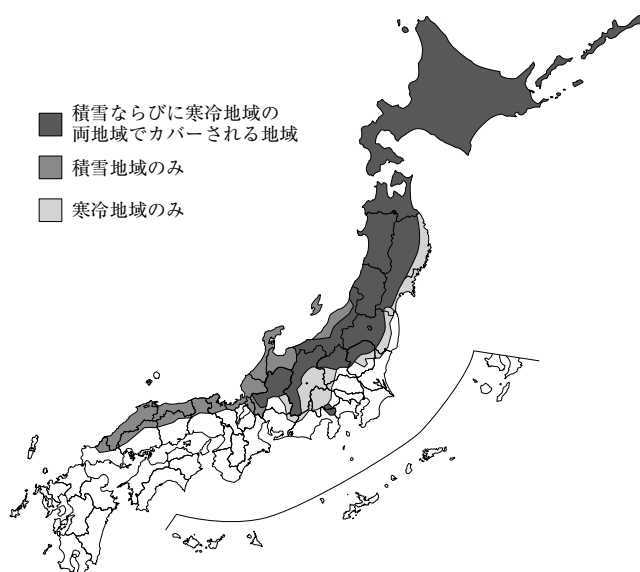
低温ひび割れは、写真－1に示すよう
な道路の横断方向に直線状にほぼ等間隔
で発生するひび割れである。低温ひび割
れの要因は、急激な温度の低下により、ア
スファルト混合物層に温度応力が発生し、
車両進行方向に引っ張られることで生じ
るものである。このひび割れは、経年的に
発生本数が増えるのが特徴で、アスファルト混合物
の厚さが薄いほど多く発生する傾向にある。

②凍上によるひびわれ^{11, 12)}

凍上は路床土が凍結する際に水分を主に下方
から吸い上げる形で氷晶（アイスレンズ）が発達して、
舗装を隆起させること（図－9）を指し、凍上によ
り舗装のひび割れや路面の波打ちが発生する。凍上
の要因としては、温度・水分・土質・荷重の4要素
があるが、そのうち直接的な要因である温度・水分・
土質の3つのうち1つでも解決できれば凍上は発生
しないとされている。

③摩耗わだち

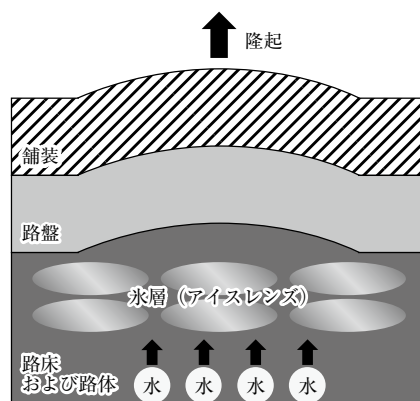
摩耗わだちは、除雪等により、路面が露出した箇
所において、スパイクタイヤやタイヤチェーンを装
着した車両が走行することにより生じるわだちであ
る。実道における摩耗わだちの損傷例を写真－2に



図－8 我が国の積雪地域・寒冷地域の分布¹⁰⁾



写真－1 低温ひび割れ（左：高速道路上、右：一般道路上¹¹⁾）



図－9 凍上による隆起

示す。摩耗わだちが進行することにより、ひび割れ
が生じる可能性もあるが、スパイクタイヤの規制使用
規制以降は、発生が減少している状況である。対策



写真-2 摩耗わだちの損傷事例

方法としては、耐摩耗性に優れる舗装材料の使用が効果的であり、摩耗わだちの発生が懸念される場合は、念頭に置いて設計に取り組む必要がある。

④ポットホール

ポットホールは積雪寒冷地以外でも見られる損傷ではあるが、積雪寒冷地では、融雪期に写真-3に示すようなポットホールの損傷が集中して発生する傾向がある。発生の要因としては複数の要因が関係していると考えられているが、主に考えられる主要な要因は以下の3つと考えられる。①融雪による水の存在、②温度変化による凍結融解効果、③交通荷重による効果、が挙げられる。ひび割れ等既存の損傷から水が侵入し、それが気温の変動等を受けて、凍結融解を繰り返すことで、発生するものとされる。対策方法としては、アスファルト舗装の新設および補修の際に、ひび割れ等を発生させないため、厳冬の施工を避け、合材温度の低下や、舗装端部の締固め不足にならないよう施工を行う必要がある。また、予防保全として、定期的に点検を実施し、ひび



写真-3 ポットホールの損傷事例

割れ等の予防・早期補修に取り組むことも効果的といえる。ポットホールの応急補修については、通行に支障をきたす場合には、早急に行う必要がある。しかしながら、積雪寒冷地では、冬期等プラントが稼働していない場合もあるため、加熱アスファルト混合物を手配出来ない可能性もある。その際には、常温アスファルト混合物を用いることも有効である。ポットホールの応急補修については、交通条件などの現場条件に合わせて適切な材料、施工方法を選定することが求められる。

(2) 寒冷地に適した舗装 ―北海道型SMAの開発^{13, 14, 15)}

①背景

高機能舗装とは表面に多孔質な高空隙構造をもち、表面の排水性に優れる舗装である。しかしながら、高機能舗装の整備が進むにつれ、面的もしくは部分的なラベリングやポットホール、骨材の飛散進行に伴う舗装厚の減少が深刻化してきた。損傷の原因としては、冬期における凍結融解作用や浸水によるアスファルトの剥離、およびスチールエッジを使用した除雪作業等、厳しい気象条件によるものが考えられる。これらの損傷により、高機能舗装の排水機能や乗り心地の悪化に伴うサービスレベルの低下、および舗装構造物自体の耐久性の低下に繋がった。早いところでは、施工後4～5年で補修が必要となることから、補修サイクルの短縮がライフサイクルコストの増大に繋がっている状況であった。これらの状況から、積雪寒冷地での過酷な供用条件に耐え、かつ高機能舗装と同程度の機能を有する新たなアスファルト舗装混合物の開発を行った。

②開発経緯

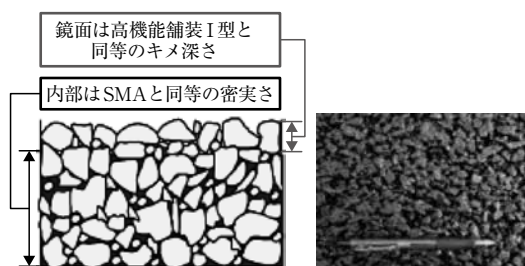
北海道の舗装技術の遷移として、平成11年ごろから高機能舗装Ⅰ型が主流であった。それ以前は、密粒度舗装が主流であった。その後、高機能舗装Ⅰ型に改良が加えられ高機能舗装Ⅱ型が誕生した。北海道の高速道路の全舗装の80%が高機能舗装Ⅱ型となり、現在の北海道型SMAとなっている。

合材種別毎に補修サイクルを整理する。密粒度舗装がおおよそ15年の補修サイクルで、損傷要因は主にわだち掘れである。高機能舗装Ⅰ型は10年弱の補修サイクルと密粒度舗装よりも短い。その損傷状況を写真-4に示す。主に凍結融解や除雪の影響と考えられる骨材飛散である。高機能舗装Ⅰ型の損傷は、早いもので5年程度で顕在化した。これを改善するためにハイブリッド舗装を参考にして高機能舗装

Ⅱ型を開発した。図－10にハイブリッド舗装の概念と表面性状を示す。ハイブリッド舗装は、高機能舗装Ⅰ型と同等のキメ深さを持ち、内部は碎石マシック舗装のような水密性を有している表層用混合物である。従来の高機能舗装Ⅰ型より、骨材飛散抵抗性に優れていた。



写真－4 高機能舗装Ⅰ型の損傷状況¹³⁾



図－10 ハイブリッド舗装の概念と表面性状¹³⁾

④北海道型SMAの事故対策効果

高機能舗装Ⅱ型（以下、高機能舗装北海道型と記載する）の湿潤時における事故対策効果を調査した内容を報告する。これまで、高機能舗装Ⅰ型の事故対策の要因は、図－11に示すように、雨水を浸透させる多孔質な高空隙構造により、表面に水膜が出来にくく、すべり抵抗が高いことが、一番大きな理由と考えられる。多孔質な高空隙構造を持たない高機能舗装北海道型は、内部が密実な構造で、舗装表面のきめで排水している。高機能舗装北海道型は従来型のような透水機能は無いものの、表面は従来型に類似したきめ深さを有することにより、スモーキングの低減や湿潤時の視認性の向上に寄与することで事故率の低減に繋がったと考えられる（写真－5、写真－6）。

| 舗装種別 | 高性能舗装Ⅰ型 | |
|------|-------------|-----------------|
| 概念図 | 舗装体内部を通じて排水 | 舗装表面のキメで排水 |
| | | |
| 構造特色 | 多孔質な高空隙構造 | 表面にキメ深さを持ち内部は密実 |

図－11 高性能舗装（Ⅰ型と北海道型）の概念図¹³⁾



写真－5 スモーキング状況
（同一日に同一IC間で撮影）¹⁴⁾



写真－6 湿潤時の視認性¹⁴⁾

(3) 凍結抑制への取り組み¹⁶⁾

寒冷地では路面凍結が頻繁に起こるが、前述したような舗装の破損と異なり、路面凍結はリアルタイムで交通事故に繋がり、人命にかかわる路面状況となる。この状況を抑制する凍結抑制舗装について紹介する。凍結抑制舗装は大きく分けて以下の4つに分類される。

①化学系凍結抑制舗装

化学系凍結抑制舗装は塩化ナトリウム、塩化カルシウムなどの有効成分を含有した材料をアスファルト混合物中に添加・混入することで凍結抑制効果を付与した舗装である。効果発現は有効成分が溶け出すことによる凝固点降下作用によるものである。現在、化学系凍結抑制舗装に該当する工法は無い。

②物理系凍結抑制舗装

物理系凍結抑制舗装は舗装表面、舗装内に添加された弾性材料が通行する車両の荷重により発生するたわみにより、舗装表面の雪水の剥離、破碎を促進し路面露出率を高めることで凍結抑制効果を発現させる。弾性材料としてゴム、廃タイヤゴム、ウレタン樹脂等が用いられる。弾性材料の添加方法については各会社で様々あり、アスファルト混合物中に混入、舗装表面に散布圧入などがある。例として2工法を紹介する。

例(i) : ギャップ型アスファルト混合物に廃タイヤを破碎したゴム粒子を混入させた舗装(図-12)。

特徴: ゴム粒子が舗装面に突出、交通荷重により氷板が破碎・除去される、タイヤ接触音の低減。粗骨材、アスファルト量が多く、耐摩耗性有。

適用箇所: 交差点、坂路、カーブ、踏切手前など

例(ii) : 砕石マスチック舗装(粗面型)(以下、SMA)に特殊ゴム粒子を混入、表面にも特殊ゴムを散布した舗装(図-13)。

特徴: 舗装表面および混合物中のゴム粒子による凍結抑制効果、舗装表面のきめ深さの確保による降雨時の路面水膜発生の抑制効果を有し、SMAと同様な骨材飛散抵抗性、耐流動性、耐水性を得られ基層剥離現象を抑制。路面騒音低減。表面凹部により凍結防止剤の残留効果がある。

適用箇所: 凍結抑制性能および雨天時の走行安全性が望まれる場所のうち、特に交通量が多い路線、除雪作業による骨材飛散が懸念される路線。

③物理化学系凍結抑制舗装

物理化学系凍結抑制舗装は、物理系と化学系の凍結抑制の効果を併せ持った舗装技術である。凍結抑制材をアスファルト混合物に混入する方法や、舗装表面にグルーピング溝を形成しそこに凍結抑制材を充填させる方法などがある。例として1工法を紹介する。

例(iii) : 舗装表面に成型したグルーピング溝にゴムチップおよび凍結防止剤を主材とする抑制材を充填した舗装(図-14)。抑制剤の凍結抑制効果により、降雪時における車両の安全走行を確保する。また、

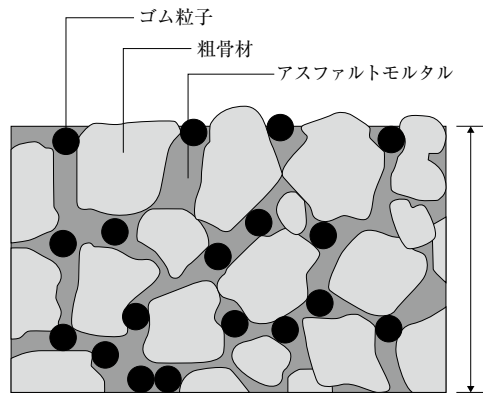


図-12 (i) 物理系凍結抑制舗装の概要図¹⁶⁾

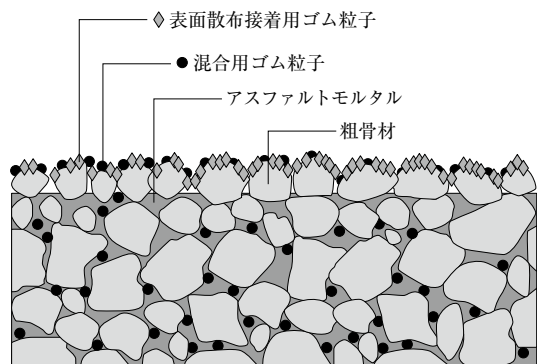


図-13 (ii) 物理系凍結抑制舗装の概要図¹⁶⁾

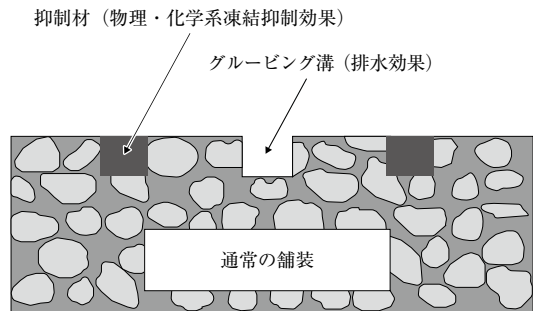


図-14 (iii) 物理化学系凍結抑制舗装の概要図¹⁶⁾

抑制材を充填しない溝を残すことで、降雨時にも同効果を確保可能。

適用箇所: 急なカーブ、橋梁部、交差点の手前等。

④粗面系凍結抑制舗装

粗面系凍結抑制舗装は舗装表面を粗くすることで冬期路面においても舗装表面のテクスチャ(路面凸部)を確保し、通行車両のタイヤの接触により路面

に張り付いている氷の摩耗を促進させ、すべり摩擦抵抗の改善が期待できる舗装である。また、冬季道路管理として散布された凍結防止剤が路面凹部に滞留し、効果の持続性向上による凍結防止剤散布頻度の軽減や、路面凹部に雨水等の水分が浸透するため密粒度タイプの舗装に比べて表面の浮き水が少ない。これによりブラックアイスバーンの抑制に期待が持てる。例として1工法を紹介する。

例 (iv)：混合物1層の中で表面付近の排水機能と下部の防水機能を併せ持つ、多機能型の排水性舗装 (図-15)。

路面が縦溝を含む粗面に仕上がリ、ブラックアイスバーンの抑制が可能となる。また、凍結防止材の残存率が高く、散布回数の低減が期待できる。さらに、縦溝粗面により走行時の視認性が向上し、スリップ事故低減等の事故対策にも適用できる。

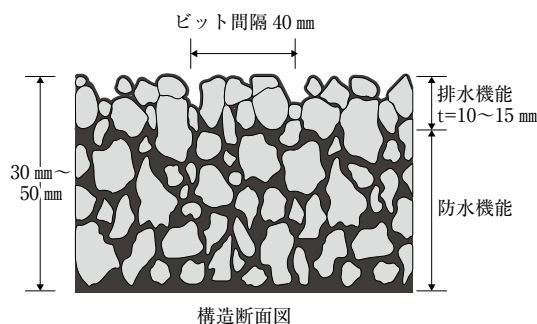


図-15 (iv) 粗面系凍結抑制舗装の概要図¹⁶⁾

(4) 融雪機能を持つ舗装技術

道路の凍結対策として、舗装そのものに融雪機能を持たせたものがある。このような舗装には様々な熱源が使用されており、使用環境に応じた十分な融雪能力が必要となる。北陸地方など比較的気温の高い地域では地下水を汲み上げて散水することで融雪する消雪パイプを使用している。道路の融雪としては昭和36年から新潟県長岡市で行われており、昭和38年の豪雪の際に融雪効果が注目され普及したといわれている。消雪パイプは山陰から東北にかけての平野部で多く見られるが、北海道や山間部など気温の低い地域では散水した水が凍結してしまうため使用されていない。最も普及している北陸地方や東北地方では地下水の汲み上げすぎによる地盤沈下が発生することもあり、現在は降雪センサーなどによって散水量の適切な管理が行われている。また、新潟県三条市では夏期の

熱中症対策として消雪パイプを使った打ち水が行われている。

前述のとおり、気温の低い北海道などでは路面凍結を誘発してしまうため使用されていない。このような地域では「ロードヒーティングシステム」による融雪が行われている箇所があり、これも使用する地域によって熱源や、必要な熱量に違いがあり総合的なコストを考慮した上で設計されている。

ロードヒーティングシステムは舗装の中に発熱体を埋設することで、放出される熱によって路面の凍結および積雪を融雪し道路機能を確保するシステムであり、交差点などの一時停止が必要な箇所や急こう配、急カーブなどの危険個所に使用されることが多い。ロードヒーティングに使用される発熱設備は電気、温水、ヒートパイプなどに大別され、熱源については省エネルギーなものとして温泉や地中熱などの自然エネルギー、施設の余剰熱などのローカルエネルギー、効率よく電気を制御するような新技術を利用した工法がある。スタッドレスタイヤや凍結防止剤の性能向上等によって、冬期路面管理の連続性、均一性、管理コストなどを考慮し、除排雪と凍結防止剤による路面管理への変更が行われている自治体もある。

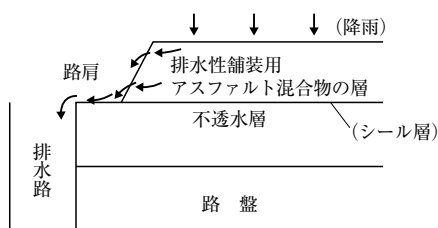
4.3 水の影響に対応した舗装技術

水は舗装に剥離などの機能的な影響を及ぼすだけでなく、車両の交通の安全性にも影響を及ぼす。その対策として、従来のアスファルト舗装と比べ、排水性など、より優れた性質を有する高機能舗装と呼ばれる舗装を普及することが挙げられる。また、水を利用することで舗装に付加価値を与えることができる。本節ではその中から、排水性舗装と保水性舗装と呼ばれる機能性を持たせた舗装について述べる。

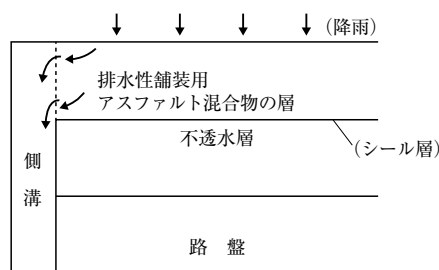
(1) 排水性舗装について

①特徴

排水性舗装とは、表層を透水層、基層を遮水層にすることで、路面の雨水を地面に透水させることなく、路肩の排水構造物に排水することができる舗装である。排水性舗装の構成を図-16、騒音低減の比較グラフを図-17に示す。排水性舗装は、水を浸透させるための空隙率が大きい排水機能層を有する。これにより、雨の日の水たまり、水はねやスモーク現象を抑制し、ハイドロプレーニング現象の防止に有効である。また、雨天時の車の走行安全性を高めるとともに、空隙による音の吸収作用で、走行騒音の低減効果を発揮する。しかしながら、ごみ



(a) 路肩排水の場合



(b) 側溝排水の場合

図-16 排水性舗装の構造¹⁷⁾

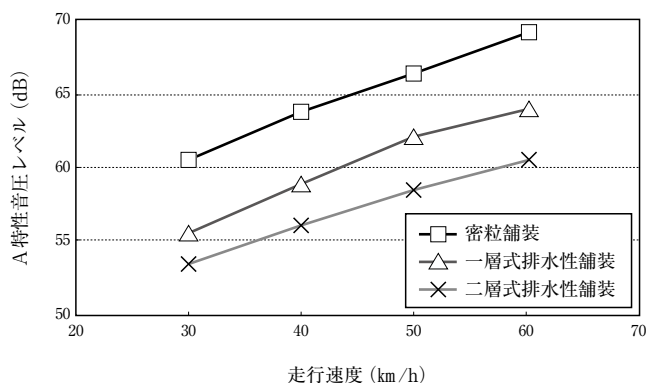


図-17 騒音低減比較¹⁸⁾

や土砂等による空隙づまりを起し、排水機能と騒音低減機能が低下する傾向にあり、機能の回復と維持が課題となっている。

②適用事例

車両の安全性が求められる幹線道路や高速道路、交通騒音や水はねが問題となる市街地道路等で使用されている。排水性舗装の表面を写真-7、密粒舗装

装の表面を写真-8、適用事例の降雨時の様子を写真-9に示す。

(2) 保水性舗装について

①特徴および効果

保水性舗装とは、開粒タイプのアスファルト混合物の空隙に吸水・保水性能をもつ材料を充填させることにより、舗装に保水性を持たせ、水分の蒸発時の気化熱により、路面温度の上昇を抑えることができる舗装である。保水性舗装のイメージ図を図-18に示す。保水性舗装は、前述のとおり保水性能を持たせることができるため、図-19に示すように夏場には打ち水効果による路面

温度低減効果が期待でき、ヒートアイランド現象への対策として有効な舗装である。

④適用事例

保水性舗装の適用事例を写真-10に示す。保水性舗装は、その効果から一般道路や駐車場、公園をはじめとした夏季の歩行空間の快適性が求められる箇所に多く適用されている。

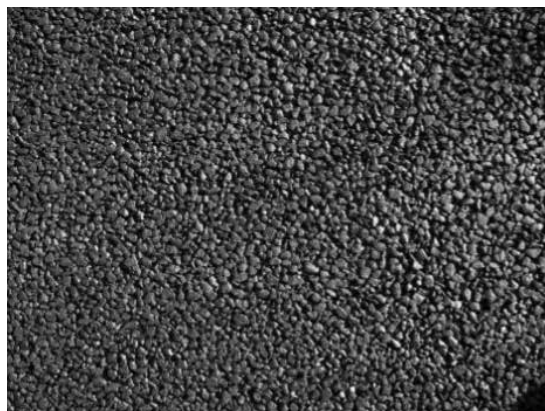


写真-7 排水性舗装の表面¹⁹⁾

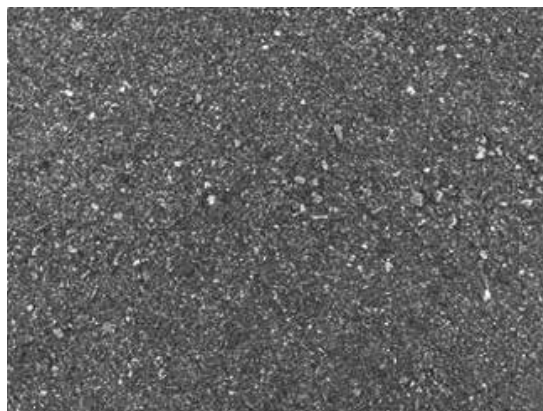


写真-8 密粒舗装の表面



写真-9 排水性舗装の適用事例¹⁹⁾

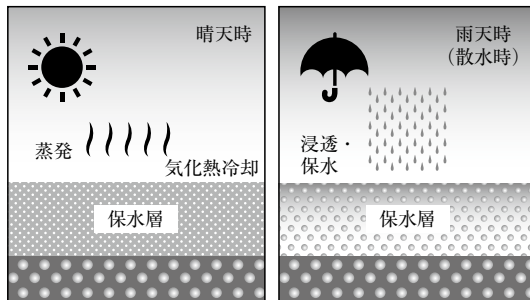


図-18 保水性舗装のイメージ図²⁰⁾



写真-10 施工事例²⁰⁾

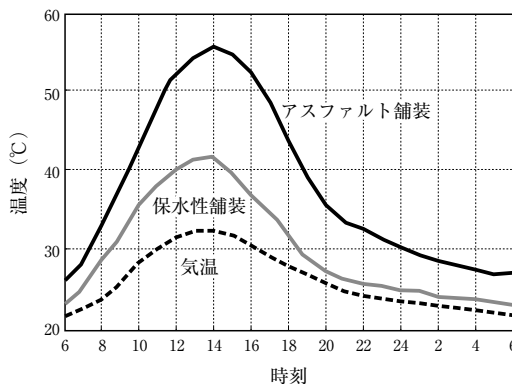


図-19 温度低減効果²¹⁾

4.4 まとめ

本章では様々な気候に対応する舗装技術として暑さ、寒さ、水に注目して取り上げた。各地域の気象環境に合わせて多種多様な工夫を取り入れており、その効果もこれまで確認されている。しかしながら年々猛暑や強い寒波、ゲリラ豪雨の襲来が多くなっており、現在の技術で対応できない可能性もある。今後そのような状況にも対応できる新たな技術が生み出されることを期待する。

参考文献

- 1) 小柴：環境対応技術No.19, 舗装, 2022, vol.57, No.1
- 2) 関伸明, 小柴朋広：保水遮熱性舗装の路面温度上昇抑制効果, 第31回日本道路会議, 2015
- 3) 土木研究 寒地道路保全チーム：積雪寒冷地における道路施設を利用した発電技術に関する研究, 土木研究所成果報告書, NO.40,2009
- 4) 川上優貴, 長谷部正基：熱電素子による道路舗装面の熱エネルギーを利用した発電システム, 土木学会第60回年次学術講演会, 2005
- 5) パイプ・イン・パイル融雪協会：季節間蓄熱工法, <http://www.pip-kyokai.jp/>, (参照2023年5月15日)
- 6) 株式会社興和：太陽熱蓄熱方式融雪施設, https://www.kowa-net.co.jp/disaster/snow-facility_tech/solar-heat, (参照2023年5月15日)
- 7) 石垣勉, 白井悠, 川上篤史, 久保和幸：低燃費舗装の性能指標とその評価に関する検討, 第31回日本道路会議, 2015
- 8) Application of Mechanistic Empirical Pavement Design Guide Software in Saudi Arabia
2) Review of regulation techniques of asphalt pavement high temperature for climate change

adaptation.

- 9) 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)
- 10) https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000064.html (参照2023年10月30日)
- 11) 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム：積雪寒冷地の道路舗装の損傷について、寒地土木研究所月報, No.714, pp.52-53, 2012.
- 12) (公社) 土木学会：舗装工学ライブラリー15 積雪寒冷地の舗装に関する諸問題と対策, 第1版, pp.130, 2016
- 13) 高速道路の積雪寒冷地に適した舗装導入について—導入後の路面性状報告— 東日本高速道路(株) 北海道支社
- 14) 高機能舗装損傷原因分析と新たな評価方法・表層混合物の導入提案について—北海道型の耐久性のある高機能舗装混合物を目指して— 東日本高速道路(株) 北海道支社
- 15) 北海道の高速道路における新たな舗装混合物の開発と施工状況について—北海道に適した表層混合物を目指して— 東日本高速道路(株) 北海道支社
- 16) 凍結抑制舗装研究会：凍結抑制舗装ポケットブック, pp.5-11, pp.21-28 2021
- 17) (社) 日本道路協会：アスファルト舗装施工要領,

pp.207,1992.

- 18) 数種の低騒音舗装とその他の諸課題, 騒音制御: vol.25, No.3 (2001) pp.117-121.
- 19) https://www.nippo-c.co.jp/tech_info/general/SG02001_g.html (参照2023年10月30日)
- 20) <https://www.coolhosouken.com/retention/> (参照2023年10月30日)
- 21) <https://www.coolhosouken.com/retention/features.html> (参照2023年10月30日)

おわりに

本稿では、アスファルトの歴史から時代や環境によって移り変わる様々な舗装やそれに伴う維持管理手法などについて調査を行った。高温、降雨、降雪などに対応する舗装技術がこれまでに多数生み出されており、また、長寿命化、脱炭素といった取り組みもこれからますます求められてくるだろう。さらに、これから頻発・激甚化していくと予想される自然災害に対応し、社会に貢献できるような舗装の開発が急務であり、今回調査を行ったような若手技術者がその一翼を担うことになるだろう。時代のニーズで求められる舗装が変わるよう、私たちもそれに応えるべく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う。これからの日本の舗装技術の発展に期待するとともに、本稿が若手技術者の一助となれば幸いである。



金沢工業大学工学部 環境土木工学科舗装研究室

金沢工業大学工学部 環境土木工学科 教授 高橋 茂樹

2022年度から石川県にある金沢工業大学において新たに開設された舗装研究室について、大学の特色を基にした設置理由を紹介するとともに、舗装研究室における活動内容や学生の様子、研究テーマなどを紹介させていただきます。

1. はじめに

本学の前身は、1957年に開校した北陸電波学校であり、1965年に大学として機械と電気の2学科からスタート、早くもその2年後には土木工学科が設置されました。以来、社会的な風当たりが強くなった時期においても学科の大きな名称変更は行わず、土木の名前を残したまま現在に至っており、昨年度入学した今の2年生からは学科の定員をこれまでの80名から100名に増員しています（大学全体では、4学部12学科で6千人強の在籍）。この大学は、大変ユニークな教育方針を掲げており、学生を社会に役立つ人材へと育てる手法が並外れて充実しています。その成果は、入学時の偏差値とは異なる様々な指標で、国内有数の高い評価を得ており、卒業生を受け入れている産業界からの評価も然りです。

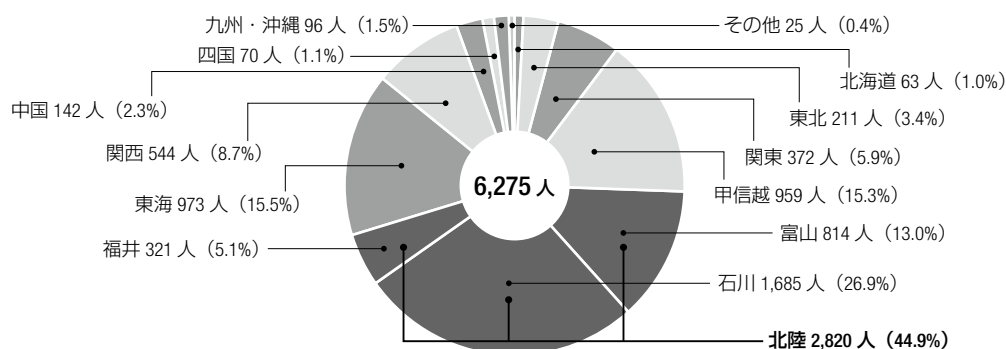
就職氷河期においても就職率100%を誇り、加えてメディアを通じた積極的な広報戦略もあり、地方大学としては珍しく全国から学生が集まっています（ここ数年はコロナ禍で近県からの入学者が多いが、通常は地元北陸3県の出身者は僅か1/4程度）。



写真-1 大学のメインキャンパス（野々市）



図-1 大学の学部学科構成



図－2 学生の出身県割合（令和4年度の学部在学学生）

また、教員に産業界からの転身者が多く、担当する授業には、その分野で活躍している外部の方を講師として招いたり、現場見学会を必ずセットしたりと、学生が将来の仕事イメージできるよう、カリキュラムに工夫が施されているのも特色かと思われます。加えて課外活動として、所属する学科や学年の垣根なしに、興味ある者たちが自由に集まり、様々な物作りを行う「夢工房」と名付けられた場も用意されており、ソーラーカーや人力飛行機の製作、近年ではロボットコンテストへの参加や福祉機器の開発などにも挑戦しているようです。

本学のキャンパスは、金沢市に隣接する野々市市にあります。10数年前から白山市の郊外に研究施設群を移した第2キャンパスを設け、本学科を含めた多くの学部・学科が、3年生までの授業を野々市の扇が丘キャンパスで行い、4年になると（院生も含め）この白山市にある八束穂キャンパスに移ります。舗装研究室もこの八束穂キャンパス内にあり、多くの教員は、普段こちらに勤務しながら、授業のある日は扇が丘キャンパスに出向くという形を取っています。

2. 舗装研究室の活動

金沢工大に舗装研究室が開設された理由は、舗装の仕事は土木分野で大きなシェアを占めており、これからも全国で多くの仕事がある分野なので、これを学ぶ人材を輩出できる場が必要とのことでした。実学重視の特徴が色濃く出た考え方であり、人材不足に悩む企業にも喜ばしい決断だと思われます。私自身、舗装を学んできた一人として、卒業後の大学界の状況を憂いて来ただけに大変ありがたい話でした。

本学では、3年生の後学期から各研究室に配属となり

ますが、新設の研究室であるため、昨年度の前学期に学生へのPRを兼ね、道路・舗装工学の授業を行ったところ、これまで当該分野に接する機会がほとんどなかったであろう環境下においては、意外なほど道路や舗装に興味を示す学生が多く、無事9名の希望者を令和5年度卒業予定の第1期生として迎えることが出来ました。

この1期生に対する活動の皮切りに、1泊2日で夏合宿を行い、箱根・富士方面へ向かい、有料道路の管理や研究施設、砕石場と骨材の破壊設備の見学等を行いました。その後、後学期が始まると、週1回行われる専門ゼミの中で、材料の勉強をした後にアスファルトプラントの見学、アスファルト舗装とコンクリート舗装の構造や施工方法の勉強をしたら舗設現場の見学といったように、座学と実地を織り交ぜながら舗装の勉強を行っていきました。年明けの時点で卒論テーマの候補を学生に提示し、各自の希望や就職先を踏まえた上で、それぞれの卒論テーマを決めます。

4月からも、毎週ゼミ形式で集まり、自分の研究テーマについて、文献調査等を通じた事前勉強を行い、皆の前でその内容を発表しあい、互いに理解を深めていきます。

具体的研究実施に当たっては、舗装の材料メーカーや道路会社とのタイアップによる共同研究をメインにしており、企業の研究所が有する試験機や機材を使わせて頂きながら、実験や現地調査を行っております。

これは、新設の研究室のため、アスファルトを手に触り実際に混合物を練ってみるといった体験実習を行う程度の実験室を準備するのが精一杯のところ、本格的な研究を行うための試験機器を購入配備することが困難な現実を踏まえた上での研究の実施方法ということになります。

表－1 環境土木工学科の研究室

木村研究室

トンネル工学_地下空間維持管理_リスクマネジメント

宮里研究室

構造物の長寿命化_維持管理_エコマテリアル

田中研究室

構造解析_耐震構造_非破壊検査

高橋研究室（舗装）

道路舗装_アスファルト_環境負荷軽減技術

有田研究室

海岸工学_海岸モニタリング_離岸流

高原研究室

地盤振動_土砂災害_降雨と地下水位_物理探査・地質

花岡研究室

建設材料_コンクリートメンテナンス_構造物の補修

鹿田研究室

地上レーザ計測_GNSSの有効活用_地理情報システム

徳永研究室

リモートセンシング_環境モニタリング_ドローン

片桐研究室

ランドスケープ計画_観光政策_地域文化資源

3. 舗装研究室の研究テーマ

本学における研究は、前述の協力企業との間で協議検討したテーマを中心に行っており、今年度の4年生が卒論として実施中の具体テーマは表－2のとおりです。

大学としては、地域連携している自治体に対する支援が望まれており、北陸地方を対象とした道路構造物の点検や維持管理の効率化を目指したSIPを活用した社会実装にも取り組みを始めたところです。

一方、学生の反応を見ると、低炭素社会の実現に寄与する新材料、太陽光発電や路車間給電といった新たな舗装技術に関心を寄せる者が多い印象があります。

表－2 今年度の研究テーマ

| 分 類 | 卒論課題 |
|--------|-------------------------|
| 室内試験 | 表層用混合物の骨材飛散抵抗性の評価方法 |
| | 基層混合物の剥離抵抗性評価方法の検討 |
| | アスファルト舗装の層間接着性の改善 |
| 新材料 | 新型レーンマークの耐久性評価 |
| 路面点検 | 簡易型路面点検手法の技術的課題の検討 |
| 現地調査 | 実道におけるアスファルト舗装の損傷調査 |
| アセット分析 | 一般有料道路におけるアセットマネジメントの実践 |



写真－2 夏合宿の様子



写真－3 舗設現場の見学状況



写真－4 舗装実験室の外観（八束穂キャンパス内）



写真－5 実験室の様子



写真-6 現場調査の様子

この他、本学はJICAが近年力を入れている途上国の道路インフラ維持管理能力の強化プログラムにおける活動の一環として挙げている長期留学生の受け入れも積極的に行っており、アジアやアフリカから多くの留学生が大学院に在籍しています。舗装に関しても来日して勉強したいという希望は多く、毎年インタビューを含めたセレクションを行い、先方の希望するテーマと受け入れ側の準備のマッチング状況を踏まえ検討しております。舗装研究室においては、今春から1名ネパールからの社会人留学生が来日し、アスファルト混合物の耐久性に関する実験準備を始めたところです。

4. 研究生の進路状況

本学は実学重視の教育と、社会に貢献できる学生の輩出を目指していることから、就職率が非常に高く、特に本学科は21年連続で就職率100%となっていますが、一方で大学院への進学率はさほど高くありません（15%程度）。学科全体を見ても、今の時代の学生には珍しく、現場で働きたいという者が多いという印象です。舗装研究室の1期生を見ても、来春

卒業予定の8名の内訳は、舗装会社4名（工事部）、コンサルタント2名（いずれも舗装関連部署）、ゼネコン1名、大学院進学者1名（舗装材料に興味あり）となっており、舗装に関心を抱き、そのまま舗装に関する仕事をしたいと希望する学生が殆どという状況です。

今夏には3年生が9名配属となり、彼らもこの秋から当研究室の専門ゼミで舗装の勉強を始めたところです。今後どうなるか分かりませんが、これからどのように育ってくれるか楽しみにしています。

5. おわりに

これまで全国で構築してきたインフラの老朽化という大きな課題は学生達にも理解浸透しており、将来土木の分野で仕事をしたいという者を本学では多く目にします。舗装についても、路面だけを直していれば何とかなるといった時代は過ぎ去り、高速道路では来年度から路盤からの打換事業が本格化しますし、国交省においても道路の強靱化は施策の大きな柱のひとつに掲げられています。これら今後予想される事業量を踏まえると人材育成は急務であり、社会に不可欠な舗装を学生が勉強できる場の貴重さや大切さを改めて認識しているところです。

大学に研究室がある限り、その分野を勉強し興味を持った学生が毎年社会に排出され続ける（研究室が無くなればその可能性はゼロになる）という単純な事実の持つ意味の重さを感じながら、一人でも多くの学生が舗装に興味を持ち、この分野の仕事に取り組んでくれることを期待し、出来る限りその活動を続けていきたいと思っています。

皆様からの引続きのご支援宜しくお願い申し上げます。

<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 |
| 27 年 度 | 168 | 3,188 | 100.2 | 76 | 3,432 | 1,897 | 94.5 | 29 | 1,897 | 217 | 2,114 |
| 28 年 度 | 217 | 3,185 | 99.6 | 88 | 3,490 | 1,874 | 99.0 | 114 | 1,874 | 217 | 2,091 |
| 29 年 度 | 185 | 2,990 | 93.9 | 99 | 3,274 | 1,776 | 95.3 | 70 | 1,776 | 216 | 1,992 |
| 30 年 度 | 216 | 2,794 | 93.5 | 57 | 3,067 | 1,997 | 112.5 | 75 | 1,997 | 178 | 2,176 |
| 元 年 度 | 178 | 2,684 | 96.0 | 24 | 2,886 | 1,752 | 89.5 | 40 | 1,752 | 215 | 1,967 |
| 2 年 度 | 216 | 2,226 | 82.9 | 7 | 2,449 | 1,904 | 108.6 | 18 | 1,904 | 155 | 2,058 |
| 3 年 度 | 155 | 2,197 | 98.7 | 18 | 2,370 | 1,745 | 91.2 | 15 | 1,745 | 192 | 1,937 |
| 4. 4 月 | 192 | 205 | 127.0 | 1 | 398 | 104 | 74.8 | 0 | 104 | 234 | 338 |
| 5 月 | 234 | 178 | 176.1 | 1 | 413 | 113 | 103.2 | 0 | 113 | 230 | 343 |
| 6 月 | 230 | 171 | 95.6 | 0 | 401 | 134 | 110.2 | 4 | 134 | 199 | 333 |
| 4～6 月 | 192 | 554 | 125.5 | 2 | 748 | 351 | 94.8 | 4 | 351 | 199 | 550 |
| 7 月 | 199 | 201 | 123.8 | 1 | 401 | 13 | 82.5 | 0 | 13 | 233 | 246 |
| 8 月 | 233 | 188 | 103.2 | 1 | 422 | 118 | 98.2 | 4 | 118 | 214 | 333 |
| 9 月 | 214 | 208 | 102.8 | 0 | 422 | 169 | 98.9 | 3 | 169 | 194 | 363 |
| 7～9 月 | 199 | 596 | 109.2 | 2 | 798 | 300 | 97.8 | 7 | 300 | 194 | 495 |
| 10 月 | 194 | 170 | 87.0 | 1 | 366 | 145 | 99.2 | 0 | 145 | 227 | 371 |
| 11 月 | 227 | 161 | 94.0 | 4 | 391 | 158 | 118.2 | 0 | 158 | 231 | 389 |
| 12 月 | 231 | 187 | 90.3 | 1 | 419 | 133 | 91.4 | 0 | 133 | 219 | 352 |
| 10～12 月 | 194 | 518 | 90.3 | 6 | 719 | 435 | 102.5 | 0 | 435 | 219 | 654 |
| 1 月 | 219 | 178 | 81.2 | 1 | 398 | 131 | 86.5 | 0 | 131 | 215 | 346 |
| 2 月 | 215 | 181 | 84.9 | 1 | 397 | 154 | 93.6 | 0 | 154 | 193 | 347 |
| 3 月 | 193 | 177 | 87.2 | 1 | 371 | 145 | 86.0 | 0 | 145 | 211 | 357 |
| 1～3 月 | 219 | 536 | 84.4 | 3 | 758 | 430 | 88.7 | 0 | 430 | 211 | 642 |
| 4 年 度 | 192 | 2,205 | 100.4 | 13 | 2,409 | 1,516 | 95.6 | 11 | 1,516 | 211 | 1,727 |
| 5. 4 月 | 193 | 177 | 87.2 | 1 | 371 | 145 | 86.0 | 0 | 145 | 211 | 357 |
| 5 月 | 218 | 115 | 64.2 | 1 | 334 | 80 | 70.6 | 0 | 80 | 229 | 309 |
| 6 月 | 229 | 104 | 60.7 | 1 | 334 | 114 | 85.6 | 0 | 114 | 214 | 328 |
| 4～6 月 | 193 | 396 | 71.6 | 3 | 592 | 340 | 81.7 | 0 | 340 | 214 | 553 |
| 7 月 | 214 | 165 | 82.2 | 1 | 379 | 128 | 123.2 | 0 | 128 | 177 | 305 |
| 8 月 | 177 | 176 | 93.6 | 1 | 354 | 124 | 105.0 | 0 | 124 | 183 | 308 |
| 9 月 | 183 | 190 | 91.2 | 1 | 374 | 129 | 76.6 | 0 | 129 | 170 | 299 |
| 7～9 月 | 214 | 530 | 88.9 | 3 | 747 | 381 | 97.6 | 0 | 381 | 170 | 551 |

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5年11月1日現在)

[メーカー]

| | | |
|-------------------|-------------------------|----------------|
| 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 |
| 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 |

[ディーラー] ※エリア毎に五十音順

● 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 |
| 出 光 エ ナ ジ ー ソリューション株式会社 | (101-0022) 千代田区神田練堀町3番地 ASKビル7階 | 03 (6867) 8151 |
| 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 |
| コ ス モ エ ネ ル ギ ー ソリューションズ株式会社 | (103-0007) 中央区日本橋浜町3-3-2 トルナーレ日本橋浜町9階 | 03 (5642) 8772 |
| 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 | (102-0071) 千代田区富士見1-8-19 (住友不動産千代田富士見ビル) | 03 (6261) 8820 |
| 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 |
| ユ ニ 石 油 株 式 会 社 | (107-0051) 港区元赤坂1-7-8 | 03 (3796) 6616 |

一般社団法人 日本アスファルト協会会員

| 社 名 | 住 所 | 電 話 |
|-----|-----|-----|
|-----|-----|-----|

● 近畿・中国

| | | |
|---------------------|----------------------------|----------------|
| 三 徳 商 事 株 式 会 社 | (532-0033) 大阪市淀川区新高4-4-10 | 06 (6394) 1551 |
| 昭 和 瀝 青 工 業 株 式 会 社 | (670-0935) 姫路市北条口4-26 | 079 (226) 2611 |
| 千 代 田 瀝 青 株 式 会 社 | (530-0044) 大阪市北区東天満2-10-17 | 06 (6358) 5531 |
| 富 士 商 株 式 会 社 | (756-8501) 山陽小野田市稲荷町10-23 | 0836 (81) 1111 |
| 横 田 瀝 青 興 業 株 式 会 社 | (672-8064) 姫路市飾磨区細江995 | 079 (233) 0555 |

● 四国・九州

| | | |
|-------------------|----------------------------|----------------|
| 今 別 府 産 業 株 式 会 社 | (890-0072) 鹿児島市新栄町15-7 | 099 (256) 4111 |
| 三 協 商 事 株 式 会 社 | (770-8518) 徳島市万代町5-8-3 | 088 (653) 5131 |
| 西 岡 商 事 株 式 会 社 | (764-0018) 仲多度郡多度津町東港町11-1 | 0877 (33) 1001 |
| 平和石油株式会社高松支店 | (760-0064) 高松市朝日町19-18 | 087 (811) 6231 |

| 編集顧問 | 編集委員 |
|---------|---------------------------------------|
| 中 村 俊 行 | 委 員 長 : 三 船 善 和 |
| 編集長 | 石 原 陽 介 泉 秀 俊 遠 藤 桂 加 納 孝 志 |
| 新 田 弘 之 | 橋 本 喜 正 人 見 信 男 町 田 功 松 本 大 二 郎 |
| | 山 本 富 業 吉 武 美 智 男 |

アスファルト 第239号

令和5年12月発行

一般社団法人 日本アスファルト協会

〒100-8162 東京都千代田区大手町1-1-2

ENEOS 株式会社

産業エネルギー部 コークス・アスファルトグループ

TEL 03-6257-7232

機関誌「アスファルト」に関するお問い合わせ

コスモ石油マーケティング株式会社

販売統括部販売企画グループ

アスファルト担当者

TEL 03-3798-3131

印刷所 キュービシステム株式会社

〒101-0052 東京都千代田区神田小川町1-7

神田小川町ハイツ 204 TEL 03-5577-7199

Vol.66 No.239 DECEMBER 2023

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/>

