ISSN 0912－0793

アスファルト 235

第62巻 第235号 令和元年12月発行

特集・最近のアスファルト事情

石油アスファルト需給動向と将来展望について　JXTGエネルギー株式会社　1

速分解型アスファルト乳剤の協会規格（案）の策定について　6
一般社団法人 日本アスファルト乳剤協会技術委員会

舗装再生技術の変遷と再生加熱アスファルト混合物の性能向上に関する一提案
瀬尾　彰・佐野昌洋・野口　健太郎　11

アスファルトヒューム暴露量の安全性評価　川島陽子・新田弘之　17

新しい橋面舗装材料の開発状況の紹介　寺田　剛・渡邉真一・藪　雅行　23

表層舗設直後のアスファルト混合物層間のせん断強度の計測事例　30
坪川将丈・河村直哉・伊豆　太

アスファルト舗装のコールドジョイント処理材の評価方法に関する検討　33
馬場弘毅・内海正徳・竹林宏樹

<出版物紹介>

舗装に関する技術図書のお知らせ『長寿命舗装の作り方』　高橋茂樹　41

『舗装調査・試験法便覧（平成31年版）』の概要　吉中　保　43

『Handbook for Asphalt Pavement 2019』の発刊　坂本康文　46

<アスファルト舗装技術研究グループ・第67回報告>　49

アスファルト舗装技術のDSR試験に関する新しいアプローチについて　50
～RILEM技術員会252 CMBシンポジウムより～

若手技術者によるアスファルト舗装に関する質問コーナー　68

<連載>アスファルト・舗装研究 vol.8　加納陽輔　84

<統計資料>石油アスファルト需給統計資料　90

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

土木学会認定CPDプログラム

第97回　アスファルトゼミナール開催のご案内

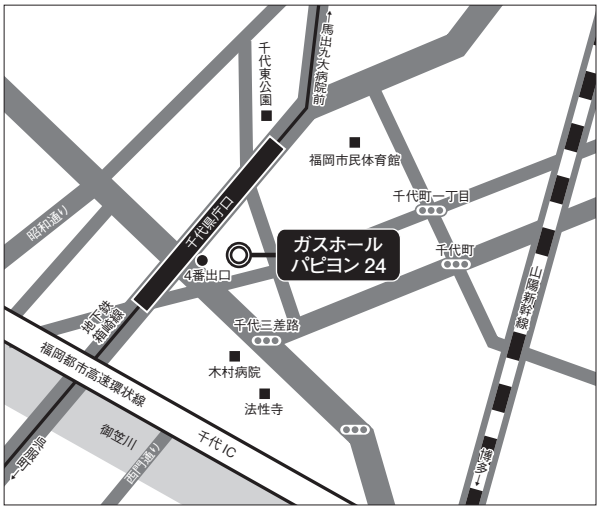
一般社団法人　日本アスファルト協会

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

敬　具

記

1．主　　催	一般社団法人 日本アスファルト協会
2．協　　賛	一般社団法人 日本道路建設業協会、一般社団法人 日本アスファルト乳剤協会 一般社団法人 日本改質アスファルト協会、一般社団法人 日本アスファルト合材協会
3．後　　援	国土交通省
4．開催月日	2020年2月20日（木）～2月21日（金）
5．開催場所	ガスホール「パピヨン24」 〒812－0044　福岡市博多区千代1-17-1　☎092－633－2222
6．内　　容	裏面「プログラム」をご覧下さい。
7．申込方法	2020年2月12日（水）までに、下記ホームページの申し込みフォームよりお申し込み下さい。（http://www.askyo.jp/zemi/index.html） 折返し（3日程度）E-mailにて参加受講券をお送りいたします。
8．申込問合せ	キュービシステム株式会社　アスゼミ担当　村井まで ☎03－5577－7199　　E-mail: asphalt@qbs.co.jp
9．内容問合せ	出光興産株式会社 技術商品・事業開発部アスファルト課　関根・前田まで　☎03－5531－5765
10．参加費	無料
11．参加人数	300名（締切日以前でも定員になり次第締め切らせていただきます。）
12．CPD認定	公益社団法人土木学会の継続教育（CPD）プログラムとして認定されました。 認定番号　JSCE19-1482　7.0単位 ※単位取得には2日間の参加が必須となりますのでご注意ください。
13．その他	当日の参加受付はできませんので、必ず上記方法でお申し込み下さい。



開催日
2020年2月20日（木）～2月21日（金）

開催場所
ガスホール「パピヨン24」
〒812－0044　福岡市博多区千代1-17-1
☎092－633－2222

■会場アクセス

- 電　車：福岡市営地下鉄箱崎線「千代県庁口」・4番出口と直結
  福岡空港・博多駅方面からは「中洲川端」で乗り換え。
  貝塚行き（箱崎線）にご乗車下さい。
  天神方面からは貝塚行き（箱崎線）にご乗車下さい。
- バ　ス：西鉄バス停「千代町」前すぐ
  博多駅からはセンタービル前E番乗り場より
  天神からは大和証券前14番乗り場より
- タクシー：博多駅から8分程度

プログラム

ー環境・持続可能性を追求した舗装ー

第１日目 2020年２月20日（木）　13：00～17：45　　（敬称略）

１．挨拶　13：00 ～ 13：05
一般社団法人日本アスファルト協会　ゼミナール委員長　太　田　　亨

２．挨拶　13：05 ～ 13：20
一般社団法人日本アスファルト協会　顧問　矢　野　善　章

３．舗装用アスファルト供給体制について　13：20 ～ 13：50
一般社団法人日本アスファルト協会　前　田　裕　貴

４．持続可能な舗装を目指して　13：50 ～ 14：40
東日本高速道路株式会社　技術本部専任役　七五三野　　茂

（休憩　14：40 ～ 14：55）

５．公共工事における働き方改革・生産性向上の取り組みについて　14：55 ～ 15：45
国土交通省大臣官房　技術調査課　建設技術調整室長　和　田　　卓

６．アスファルト乳剤技術のトピックス　15：45 ～ 16：15
一般社団法人日本アスファルト乳剤協会　金　澤　裕　貴

（休憩　16：15 ～ 16：25）

７．環境・持続可能性を追求したポリマー改質アスファルト　16：25 ～ 16：55
一般社団法人日本改質アスファルト協会　浅　井　和　明

８．土木・建築分野での竹バイオマス利活用
ー福岡発、竹材の新規用途開発とネットワーク構築・竹イノベーション研究会の取り組みー　16：55 ～ 17：45
福岡大学　工学部社会デザイン工学科　教授　佐　藤　研　一

第２日目 2020年２月21日（金）　9：30～12：20

10. 道路行政をめぐる最近の話題について　9：30 ～ 10：30
国土交通省　道路局　企画課道路経済調査室長　田　村　　央

（休憩　10：30 ～ 10：40）

11. 観光の現状と観光地域づくり　10：40 ～ 11：30
観光庁　観光地域振興課長　富　樫　篤　英

12. 新時代の舗装技術に挑戦　11：30 ～ 12：20
公益社団法人日本道路協会　舗装委員長　三　浦　真　紀

※講師は都合により変更になる場合があります

石油アスファルト需給動向と将来展望について

(The Lateset Trend and Future View)

JXTGエネルギー株式会社　産業エネルギー部　産業エネルギー総括グループ

石油アスファルト安定供給の継続にむけて，留意すべき国内外の動向を石油元売の立場からまとめた。

1．石油産業を取り巻く環境

1.1　原油価格の動向

原油価格は石油産業のコストに与える影響が大きく，常にその動向を注視する必要がある。道路舗装用ストレートアスファルト（以下,「ストアス」）も原油精製による生産品であり，原油価格変動の影響を受ける製品の一つである。この度，首題の件を述べるにあたって，まず「原油価格とは」を簡単に説明し，後に「足元の原油価格動向」ついて説明したい。

原油価格は根本的に，原油の需要と供給のバランスが影響するものである。原油が供給過多になれば原油は売れ残りその価格は下落する，逆に需要が供給を上回ればその価値が上昇し原油価格を押し上げる。おそらく，需給だけが変動要因であれば，変動頻度および変動幅は限定的となり，原油価格動向に悩まされることも少なくなるであろう。しかしながら，原油価格は需給影響のほかに，産油国の政策，地政学的リスク，さらには投機資金，先物市場変動にも左右されるため，非常に予測が困難で，石油に携わる人々を悩ましている。

足元の原油価格動向について，2019年は前年末の供給過剰懸念及び世界経済停滞懸念から50＄／バレルを割り込んだ状態からスタートしたが，OPECの協調減産効果への期待や米中貿易摩擦の改善期待からすぐに60＄／バレル前後まで上昇した。イランとベネズエラに対する米国の制裁影響による供給懸念と産油国による協調減産が維持されたことでさらに上昇し，５月には一時70＄／バレルに達した。しかし，その後は米中貿易摩擦長期化による世界経済減速懸念により，60＄／バレルを推移していた。９月にサウジアラビア石油施設への無人機攻撃により70＄／バレルまで急騰するも，同国の生産量が早期に復旧したため，市況は攻撃前のレベルまで落ち込んだ。10月以降は米中貿易協議の「第一段階」合意期待やOPEC主導の協調減産延長見込みにより，市況は再び上昇傾向となっている。

今後の原油価格動向について，先に述べた通り，予測することは困難であるが,「需要」「供給」「産油国の政策」「地政学的リスク」「投機資金，先物市場動向」といった複数の要因を受けて，変動するものと想定しており，当該要因を特に注視する必要がある。

○上方圧力（強要因）

・制裁影響によるベネズエラ原油供給減少【供給】

・OPEC協調減産の動き【産油国の政策】

・対イラン制裁強化の動き【地政学的リスク】

○下方圧力（弱要因）：

・OPECの協調減産の方向転換【産油国の政策】

・米中貿易摩擦【地政学的リスク】

・世界的な原油・製品在庫高【供給】

1.2　石油元売の動向

近年の石油元売の動向に欠かせない要素は，2009年７月に成立したエネルギー供給構造高度化法（以下,「高度化法」）である。これは毎年述べているが，石油元売などのエネルギー供給業者に対して，①非化石エネルギー源の利用拡大②化石エネルギー原料の有効利用を促進すること，を目的としている。特に②については，過去２回，経済産業省から設備改善等の基準が示されており，2017年３月までかけて，元売はこの目標を達成してきた。（詳細は**表－１**，**表－２**を参照）

この結果，日本国内の原油処理能力は，2008年度には489万バレル／日（以下，BD (barrel per day)）であったものが，2019年現在では，351万8,800BD（製油所数：22か所）と28％減少した（**図－１**，**図－２**を参照）。国内石油需要が減少を続ける状況下，国内製油所の稼働率を上昇させることで，元売は経営基盤の強化を図り，持続可能な安定供給を目指していたが，2018年は再び稼働率が悪化したため，元売は次の判断を迫られる可能性もある。

表－１　高度化法一次告示の結果

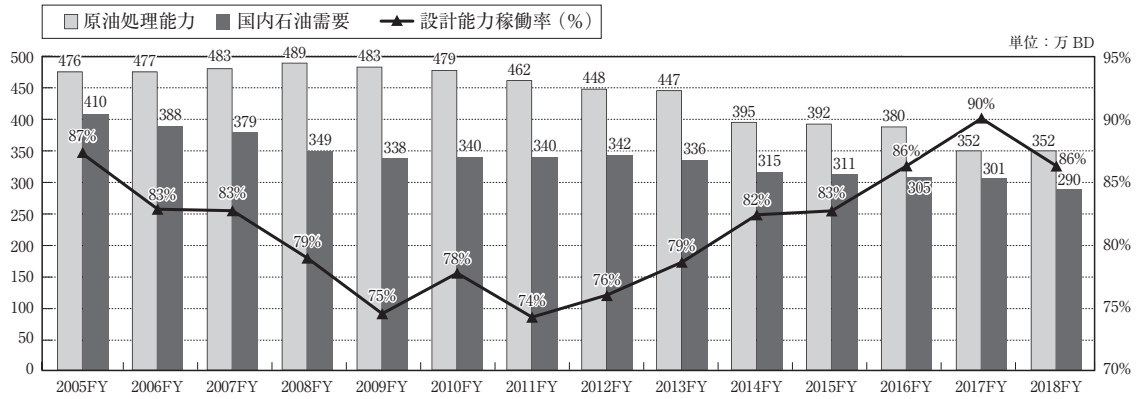
企業名	内容	当初装備率	装備率改善目標	具体的処置	改善結果
旧JXエネルギー	重質油分解装置の装備率向上	10%	30%以上	・常圧蒸留装置（以下トッパー）削減 水島Ａ 第２，根岸 第２，大分 第１，富山，室蘭	31%
旧東燃ゼネラル石油		4%	45%以上	・トッパー削減：川崎 第１，和歌山 第２ ・重質油分解装置新設：川崎 H-OIL	46%
出光興産		13%	15%以上	・トッパー削減：徳山	15%
昭和シェル石油		17%	15%以上	・トッパー削減：川崎 扇町地区	16%
コスモ石油		４％	45%以上	・トッパー削減：坂出　　・トッパー公称能力削減（暫定）	45%
富士石油		16%	15%以上	・トッパー削減：袖ヶ浦　第１	34%
極東石油		19%	15%以上	・トッパー公称能力削減（暫定）	15%
太陽石油		21%	15%以上	・トッパー公称能力削減　　・重質油分解装置増強	18%

※経済産業省の資料を基に当社作成

表－２　高度化法二次告示の結果

企業名	内容	当初装備率	改善率目標	具体的処置	改善結果
旧JXエネルギー	残油処理装置の装備率向上	46%	11%以上	・トッパー公称能力削減：水島，麻里布，鹿島	11%以上
旧東燃ゼネラル石油		36%	13%以上	・トッパー公称能力削減：川崎，千葉，堺，和歌山	13%以上
出光興産		52%	11%以上	・トッパー公称能力削減：千葉，北海道，愛知	11%以上
昭和シェル石油		59%	９％以上	・コスモ石油との連携：四日市	9%以上
コスモ石油		43%	13%以上	・トッパー削減：四日市（一部昭和シェルへ計上）	13%以上
富士石油		48%	11%以上	・残油処理装置増強	特例措置
太陽石油		25%	13%以上	・トッパー能力増強　　・残油処理装置増強	特例措置

※経済産業省の資料を基に当社作成

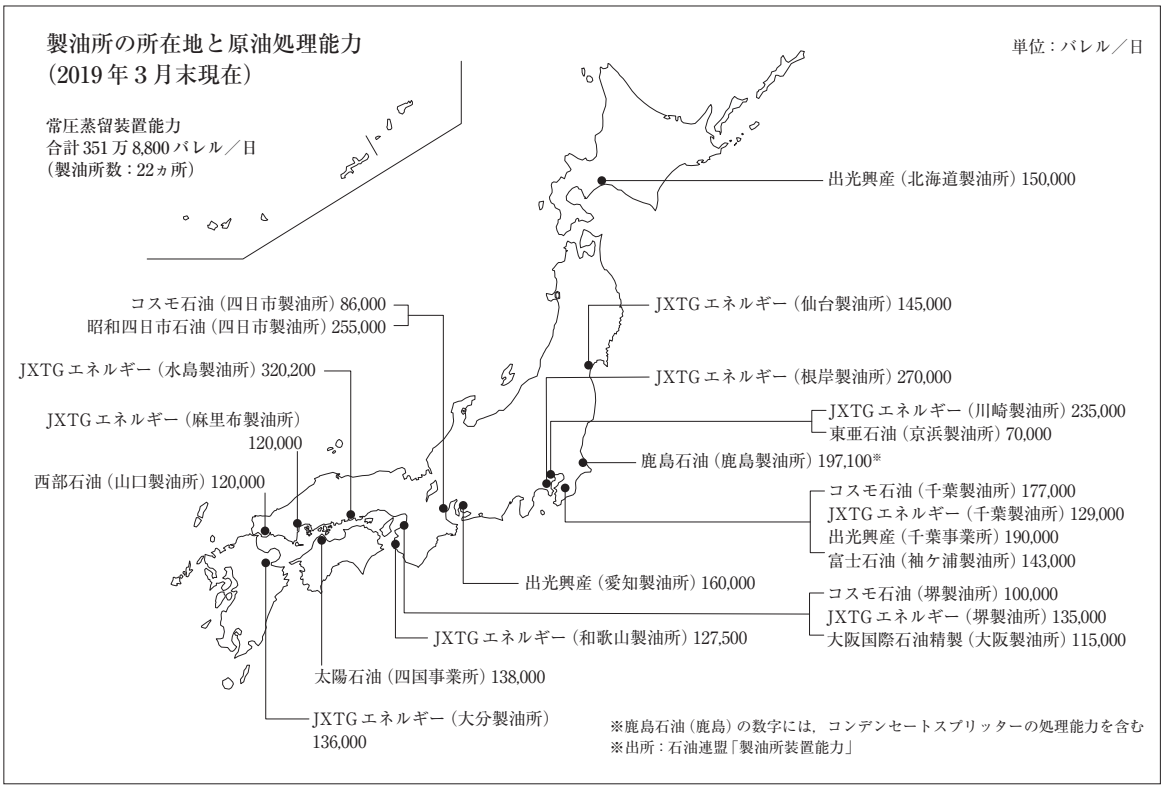


図－１　国内原油処理能力と設計能力稼働率の推移

※経済産業省「石油製品需要見通し」「資源・エネルギー統計」，各社公表情報を元に当社作成

次に経済産業省より方向性が提示されている，高度化法三次告示について説明する。基本的な考え方としては，「国際競争力強化」の観点から，さらなる重質油の分解が求められるとの認識が示され，具体的には，重質油分解装置（流動接触分解装置（FCC），残油流動接触分解装置（RFCC），残油水素化分解装置（H-oil），重質油熱分解装置（コーカー），直接脱硫装置）の有効活用，重質油分解能力の向上を促すため，2021年度までに同装置への減圧残渣油（以下，「ストアス留分」）の通油量を増加させることを目標とする。各元売が2021年度に達成すべき目標値は2014～2016年度のストアス留分処理実績に応じて，通油増加率が設定されている。（**表－３**を参照）

本告示のポイントとして以下２点が挙げられる。第１は過去の告示と異なり，重質油や残油という大きな分類ではなく，ストアス留分を指定して通油量の増



図－２　原油処理能力（2018年６月末現在）

加を促しており，三次告示の対応において，ストアス留分の分解量が増加することは不可避である。第２は原油処理能力の削減による目標達成ができない点で，今までのように，高度化法に対応するための原油処理の削減は発生しないこととなる。

ここまで高度化法要素を中心に石油元売の動きを述べてきたが，加えてもう一つの要素として，国際海事機構（以下，「IMO」）が決定した，2020年１月から実施される船舶用燃料油の硫黄分濃度規制強化（以下，「IMO規制」）について述べたい。

IMO規制は，船舶用に利用されている燃料油の硫黄分濃度上限を現在の3.5％から0.5％に引き下げるもので，海洋汚染防止を目的としている。これに伴い現在船舶用に多く利用されている重油JIS3種１号（以下，「HSC」），および重油JIS1種２号（以下，「HSA」）などが規制対象となり，硫黄分0.5％以下のIMO規制対応油（以下，「適合油」）を利用することとなる（ただし，船舶へ排気ガス洗浄装置を設置することでHSCの継続利用は可能）。HSCの製造においては，多くのストアス留分が利用されており，IMO規制影響によりストアス留分が余剰となる。元売は重質油分解装置の増設などで対応する必要が出てくる。日本向けストアスの主な輸出国である韓国では，SKが４万BDの能力を持った減圧残渣油脱硫設備（VRDS）を建設中であり，2020年４月に稼働開始の予定である。同装置は，ストアス留分を分解脱硫し，適合油や軽油，ナフサなどの高付加価値製品を製造する装置である。公表されている情報から月間20万kℓの通油量を持っていることが判明しており，相当量のストアス留分を分解できるものと想定され，アスファルトの供給量は減少する見通しである。SKの最大の輸出先は中国であるが，日本向けの供給への影響についても今後注視が必要である。

IMO規制のポイントとして以下２点が挙げられる。

表－３　高度化法三次告示の内容

＜減圧蒸留残渣油処理率の増加目標＞

2014年～2016年度の平均処理率	2021年度における減圧蒸留残渣油通油量の増加率
7.5％未満	5.0％以上
7.5％以上14.7％未満	3.5％以上
14.7％以上	2.0％以上

第１は余剰となるストアス留分がストアス供給余力に直結しない点で，三次告示の対応内容によっては製造能力が低下する虞がある。第２は限られた設備・製油所にて元売は適合油，HSC，ストアスの３油種の安定供給を継続する必要がある点であり，安定供給維持に向けた設備投資，管理油種毎の数量減に伴う，単価コスト増が想定される。

今後元売は，継続する国内石油需要の減少とともに，高度化法への対応，IMO規制への対応が必要となる。長期的な未来を見据えて，どのように経営基盤の強化，長期的な安定供給を実現するかが，今後の課題となる。

２．道路舗装用アスファルトの需要

ストアスは，主にアスファルト合材（以下，「合材」と記載）や改質アスファルトの原料として使用されている。

2000年度に7,096万トンあった合材製造量は，公共事業の見直しや，道路予算における橋やトンネルなどの道路設備の老朽化対策への重点配分により，道路舗装が徐々に減少し，2018年度には3,930万トン（2000年度比55％）となっている。また，ストアスの需要は，2000年度の383万トンに対して，2018年度は148万トン（2000年度比39％）と４割以下となっており，合材よりも減少幅が大きい。これは合材製造に占める再生合材の比率が増加していることが主因であり，2000年度の再生合材比率59％と比較すると，2018年度は76％と17％も比率が増加している（**図－３**参照）。

2019年度に目を向けると，上期の合材製造量は前年比約103％となっており，前年を大きく上回っている。４～６月は前年を下回っていたものの，７月参院選後の工事発注増，増税前の駆け込み需要が要因と想定している。下期の前年比については昨年暖冬影響で冬場に工事の前倒しが発生したことの反動により上期対比悪化するものと想定しており，年度計では前年並または若干下回ると当社は見込んでいる。今後の長期的な見通しについても，再生合材比率の更なる増加や，道路予算における橋梁・トンネル補修への重点配分の継続等により，特殊要因がない限りストアス需要は漸減していくものと予想している。

石油元売として，長期的なストアス需要の縮小傾向は避けられないものと認識している。元売の重要な役割はそれに耐えうる製造・供給体制を構築すべく，前例にとらわれずコスト構造の改善等に取り組み，ストアスの安定供給を継続していくことだと考えている。

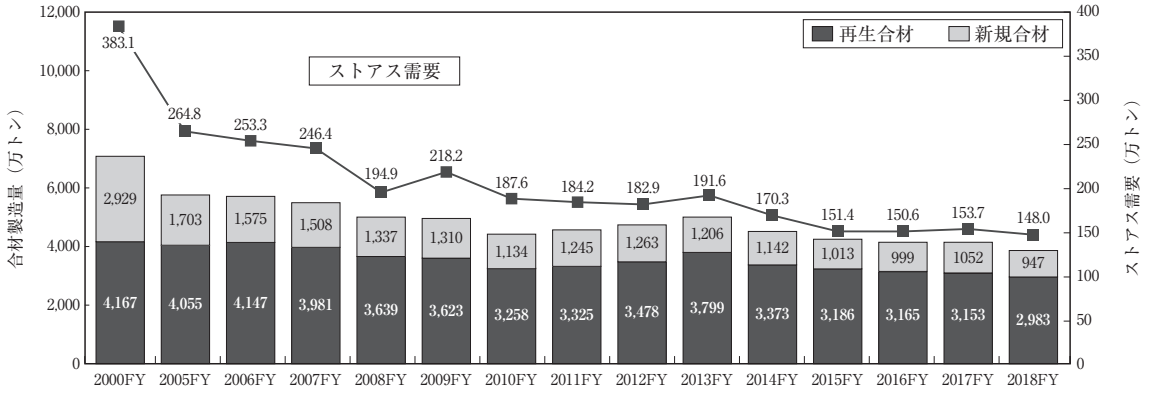
３．アスファルトの供給体制の動向

3.1　生産

先に述べた通り高度化法対応で原油処理能力が2008年度対比28％減少した。加えて，重質油分解装置の装備率も上昇しているため，装置の最適稼働を実施した場合，ストアス生産能力の減少率は原油処理能力のそれを上回る。

一方で，現在当社は，目的生産品としてストアスの生産を位置付けているため，一部重質油分解装置の稼働を調整してでもストアスの生産数量を確保している。

当社はこれからも安定供給，および国内需要への生産確保を第一に考えていくことに変わりはないが，老朽化した油槽所・輸送船などの維持経費・補修費増加，需要減に伴う供給設備の固定費単価上昇等による，単位あたりのコスト増が課題となっている。



図－３　合材およびストアス需要推移

※石油連盟，日本アスファルト合材協会の統計資料を元に当社作成

表－４　供給方法別　道路用ストアス需要推移

（千トン）	2000FY	2010FY	2011FY	2012FY	2013FY	2014FY	2015FY	2016FY	2017FY	2018FY
元売販売	3,613	1,672	1,588	1,485	1,415	1,266	1,165	1,137	1,070	1,065
（構成比）	（94％）	（89％）	（86％）	（81％）	（74％）	（74％）	（77％）	（76％）	（70％）	（72％）
商社輸入	218	204	254	344	501	438	348	368	467	415
（構成比）	（6％）	（11％）	（14％）	（19％）	（26％）	（26％）	（23％）	（24％）	（30％）	（28％）
合計	3,831	1,876	1,842	1,829	1,916	1,703	1,514	1,506	1,537	1,480
（構成比）	（100％）	（100％）	（100％）	（100％）	（100％）	（100％）	（100％）	（100％）	（100％）	（100％）

※経済産業省，石油連盟，財務省のデータを元に当社作成

3.2　輸入

ストアスの総需要に占める輸入品の割合は，2000年度では６％程度であったものが，商社がタンク新設や輸入船新造を実施するなど，輸入数量を増加させていった結果，2018年度には28％となった。（**表－４**参照）ただし，輸入品コストが日本市況に比べて割高になった2014年度には，輸入品の増加が頭打ちとなるなど，国際市況と日本市況の価格差によって輸入構成比は変動する可能性がある。

また，先に述べた通り，IMO規制影響により，韓国ではストアス留分を処理できる新装置への投資が実施されており，ストアス供給量への影響が懸念される。

3.3　物流

前述の油槽所等の供給設備の老朽化に加え，ストアス需要減退に伴う輸送量の減少や，市況悪化に伴う運賃削減などによる収益悪化により，運送会社の廃業が散見されはじめている。一部の地域では，多数のアスファルトローリーを所有する運送会社が立て続けに廃業を表明し，その対応に追われたことを思い出される読者もいることだろう。

今後，ローリーの所有台数削減もしくは廃業を選択する運送会社が増えていく可能性は否定できず，需要期の配送に支障が出るなど，消費サイド（道路会社），供給サイド（石油元売・販売業者）双方にとって大きな問題になりかねない。また，運転手不足，高齢化も大きな問題となっており，ローリーはあっても運転手がいない，という状況が現実的な問題となりつつある。

特に近年は政府主導の「働き方改革」押し進められており，運転手不足解消には労働環境の改善が重要な要素である。これは，ストアス業界全体の問題として共有し，確定オーダーの推進，受入時間指定の緩和，夜間荷卸しの削減等に協力して取り組んでいく必要があると考えている。

４．おわりに

今後も新設・補修などの道路舗装需要はなくなることはなく，我々石油元売は，国内安定供給を第一に，将来に亘ってストアス供給体制を維持していく意思があることを述べてきた。また，維持のためにはいくつかの課題があることも述べた。繰り返しになるが，ストアス供給体制の維持のためには，生産・流通・消費の三位一体での更なる協力体制構築が必要であることを改めて主張したい。

最後に，我々石油元売は，今後もストアス供給という社会的責任および役割を全うし，日本が道路先進国であり続けられるよう貢献していきたい。

速分解型アスファルト乳剤の協会規格（案）の策定について

(Formulation of Japan Emulsified Asphalt Association Standard (JEAAS)-Draft- for Quick-Braking Asphalt Emulsion)

一般社団法人　日本アスファルト乳剤協会技術委員会

（一社）日本アスファルト乳剤協会では，近年出荷実績が増加傾向にある『速分解型アスファルト乳剤』を新たに日本アスファルト乳剤協会規格（JEAAS）として定めた。これまでに規格策定の要望が多く挙げられていたため，2018年４月に本規格策定のためのワーキンググループを設立して共通試験を実施した。その結果から，速分解型アスファルト乳剤の分解性能を評価できる試験方法とその基準値を定めた。本報告では，アスファルト乳剤の概要説明をもとに速分解型アスファルト乳剤の性能および策定した規格について紹介する。

１．はじめに

（一社）日本アスファルト乳剤協会（以下，当協会）では，近年タックコート用アスファルト乳剤として運用実績が増加傾向にある，『速分解型アスファルト乳剤』を新たに日本アスファルト乳剤協会規格（以下，JEAAS）として定めた。日本では，**表－１，２**に示す日本工業規格（JIS）およびJEAAS$_{2011}$において計16種のアスファルト乳剤が規定されている。

これらのうち，速分解型アスファルト乳剤は，タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤（以下，PKM-T）の基本性状に分解促進性能を付与したものであり，その試験方法はJEAAS技術資料（2019年10月発行）で示されている。本誌234号においては，『最近のアスファルト乳剤の技術的動向』[1)]として速分解型アスファルト乳剤のJEAAS策定に向けた共通試験の一部を掲載しているが，本号では，その後の規格策定に至るまでの経緯や試験方法および結果について紹介する。

表－１　日本工業規格で定めるアスファルト乳剤種類

種類			記号	用途
カチオン乳剤	浸透用	１号	PK-1	温暖期浸透用，表面処理用
		２号	PK-2	寒冷期浸透用，表面処理用
		３号	PK-3	プライムコート セメント安定処理層養生用
		４号	PK-4	タックコート用
	混合用	１号	MK-1	粗粒度骨材混合用
		２号	MK-2	密粒度骨材混合用
		３号	MK-3	土混り骨材混合用
ノニオン乳剤	混合用	１号	MN-1	セメント・アスファルト乳剤 安定処理混合用

表－２　JEAAS$_{2011}$で定めるアスファルト乳剤の種類

種類	記号	代表的な用途
高浸透性アスファルト乳剤	PK-P	プライムコート
高濃度アスファルト乳剤	PK-H	浸透用，表面処理用
カットバックアスファルト乳剤	MK-C	常温混合物用
タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤	PKM-T	タックコート用
ゴム入りアスファルト乳剤	PKR-T	タックコート用（ポーラス他）
	PKR-S-1	浸透用，表面処理用（温暖）
	PKR-S-2	浸透用，表面処理用（寒冷）
マイクロサーフェシング乳剤	MS-1	マイクロサーフェシング用

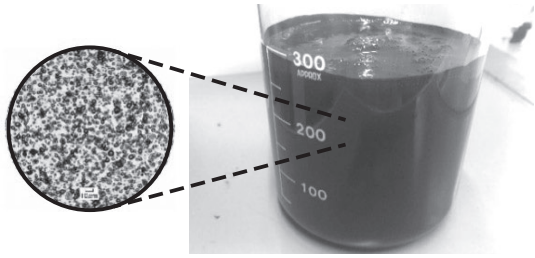
２．アスファルト乳剤の分解と速分解型アスファルト乳剤の概要

2.1　アスファルト乳剤の分解

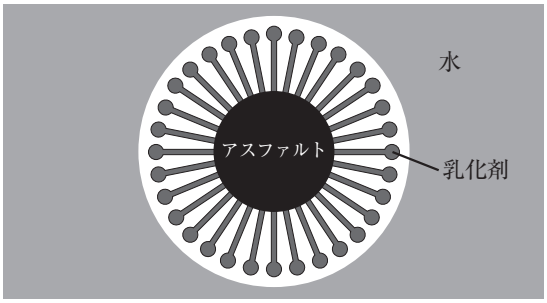
アスファルト乳剤は，アスファルトと水，乳化剤から構成され，**写真－１**や**図－１**に示すようにアスファルト粒子が水の中に分散した状態で製造後，工場タンクやドラム缶などに保管される。アスファルト粒子が水中に均一分散しているため，加熱を必要とせずに使用できる。

タックコート用としては，一般的にPK-4やPKM-Tなどのアスファルト乳剤が用いられる。これらの乳剤は，**図－２**に示す機構により，乳剤中の水分の蒸発やアスファルト粒子

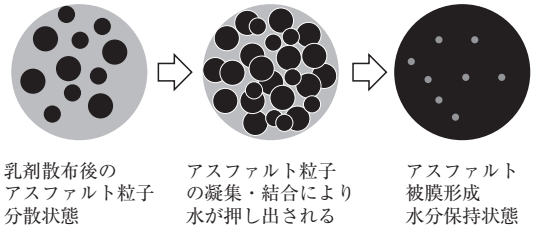
の凝集に伴い，水分が押し出されることで，粒子分散状態から面状のアスファルト膜となる。このとき水分は膜表面部に保持された状態であり，このようにアスファルト粒子が結合し，再分散が不可能な状態になることを“分解”という。



写真－１　アスファルト乳剤とアスファルト粒子の分散状態



図－１　水中のアスファルト粒子



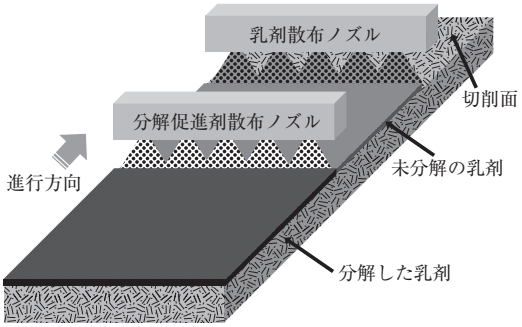
図－２　アスファルト乳剤の分解機構の説明

通常，この分解状態に至るには，アスファルト乳剤散布後，所定の養生時間が必要である。空港や高速道路，都市部の修繕工事など限られた工事時間では，養生時間を確保することが困難であることが多い。特に施工時の環境温度が低い冬季では，粒子の分散状態が安定的であるために水分の蒸発が遅く，散布後の養生時間を長く必要とする。そのため，冬季施工においては，路面ヒータを事前に入れるなど施工現場における手間や負担が生じるほか，待機時間が長くなるといった問題があった。

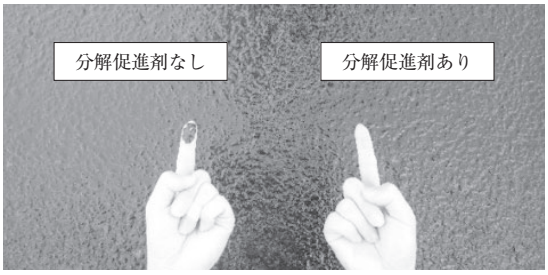
2.2　速分解型アスファルト乳剤の概要

速分解型アスファルト乳剤は，上記問題を解決するために開発された技術である。速分解型アスファルト乳剤の概念図を**図－３**に，分解性能の比較を**写真－２**に示す。速分解型アスファルト乳剤の分解機構は水分の蒸発ではなく，ベースとなるアスファルト乳剤と強制的にアスファルト乳剤を分解させる分解促進剤を所定の割合で同時散布することによって実現させた化学的分解機構を持つ。この化学的分解機構により，速分解型アスファルト乳剤は施工時の環境温度にほとんど依存することなく，施工効率に大きく影響する養生時間を大幅に短縮することが可能となる。

また，速分解型アスファルト乳剤は，PKM-T の規格を満足するベースアスファルト乳剤を使用するため，分解性能に加えて，優れた層間接着性能やタイヤ付着抑制性能を有している。



図－３　速分解型アスファルト乳剤の概念図



写真－２　速分解型アスファルト乳剤の分解性能

３．速分解型アスファルト乳剤の規格策定経緯

2018年４月の段階で，当協会に加盟する会員のうち３社で速分解型アスファルト乳剤が運用されていた（その後，会員６社で運用開始）。特に，低温時における優れた分解性能と，それに伴う施工効率の改善効果（養生時間の短縮）が大きいことからアスファルト乳剤ユーザーに支持され，その認知度を広げていた。

適用場所の中でも，アスファルト乳剤の散布後，養生時間の確保が極めて困難である空港の修繕工事等において，採用事例が増加していたほか，施工効率の向上を目的に，設計書に記載されるタックコート材の代替として，施工者側からの提案によって速分解型アスファルト乳剤が採用されるケースも増えている状況であった。

その一方で，速分解型アスファルト乳剤の規格や試験方法が統一されていないため，設計に反映できないとの意見が発注者や施工者から寄せられていた。

このような背景から，当協会では速分解型アスファルト乳剤の規格を策定するため，ワーキンググループ（以下，WG）を設立した。

3.1　各名称の決定について

3.1.1　乳剤の名称

WG設立時，速分解機構を有する各社運用中のアスファルト乳剤の名称は様々であり，当協会会員各社のアンケート結果より『速分解型アスファルト乳剤』と定めた。

3.1.2　記号

JEAASに記載されるアスファルト乳剤は，簡易表記のため用途に応じて記号で示される。例えば，ゴム入りアスファルト乳剤（PKR-T）は，以下のように記号化される。

P：Penetrating emulsion（浸透用乳剤）
K：Kation(=Cation)　　（カチオン乳剤）
R：Rubberized　　（ゴム入り）
T：Tack-coat　　（タックコート用）

速分解型アスファルト乳剤は，タックコート用アスファルト乳剤であるPKM-Tの規格を満足すること，また，散布後の分解が短いことから，『Quick』の頭文字Qを採用し『PKM-T-Q』とした。

3.1.3　試験方法の名称

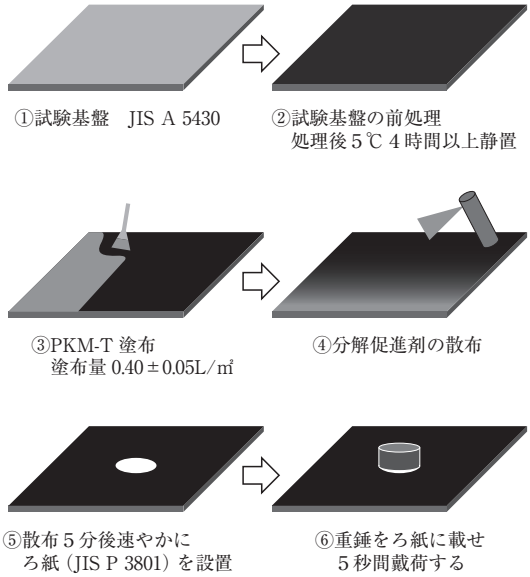
実道における分解の程度は，手やタイヤなどへのアスファルト乳剤の付着度合いから判断することができる。そこで，散布したアスファルト乳剤の付着度合いを所定の条件下で分解性能として定量的に評価する試験名称が望ましいとの判断から，試験方法の名称を『速分解型アスファルト乳剤の分解性能試験方法』とした。また，本試験から得られる結果を『アスファルト付着率』とした。

3.2　試験方法に関する検討

3.2.1　共通試験方法の選定

これまで日本工業規格（JIS）やJEAASが定めた乳剤品質規格には，アスファルト乳剤散布後の分解性能を適切に評価する試験方法は無く，速分解型アスファルト乳剤を運用していたメーカーの独自試験により管理されていた。そこで当協会では，速分解型アスファルト乳剤を製造する工場での品質管理試験を想定し，WG設立時に運用されていた各社試験方法をベースとした。さらに，簡便性，汎用性，定量性，再現性，そして精度の観点から共通試験を通じて試験方法の改善を行い，統一試験方法である『速分解型アスファルト乳剤の分解性能試験方法』を定めた[2, 3]。

WGによって定めた試験方法を**図－4**に示す。



図－4　試験の流れ

3.2.2　試験の解説

(1)　試験温度

一般に分解性能が低下するのは，前述したように冬季の低温環境であることから５℃を試験温度と定めた。そのため，低温恒温槽もしくは，低温恒温室を用いて養生および試験を行う。

(2)　①②試験基盤と試験前処理

試験基盤には，「JIS A 5430繊維強化セメント板」で規定されるスレート板を用いる。ただし，スレート板は吸水性が高いためアスファルト乳剤の水分を吸収してしまい分解促進剤を使用した分解機構を適切

に評価することができない。そのため本試験においては，事前に試験に使用するPKM-T0.40 ± 0.05L/㎡をスレート板に塗布し，吸水性を無効にした試験基盤を準備する。試験基盤は，5℃で4時間以上静置する。

⑶　③④**アスファルト乳剤の塗布**

5℃で養生した試験基盤を恒温槽から取り出し，PKM-Tを0.40 ± 0.05L/㎡塗布する。塗布後，速やかに分解促進剤を規定量散布する。その後，速やかに5℃の恒温槽へ戻し，5分間養生する。

※分解促進剤の散布量は，メーカーの仕様により異なるため特に規定しない。

※試験結果への影響（温度変化等）を無くすため，共通試験で得た知見によりPKM-T塗布から分解促進剤散布までの時間を3分以内と規定した。

⑷　⑤⑥**分解性能の評価**

分解促進剤を散布してから5分静置後，「JIS P 3801ろ紙」に規定される直径10㎝のろ紙を散布面に置き，1.0～1.2kgの重錘をろ紙上に載せて5秒間載荷する。5秒後，ろ紙が破損しないようにゆっくりと剥がす。

剥がしたろ紙には，未分解のPKM-Tや水分，分解促進剤などが付着しているため，乾燥機に入れ質量変化がなくなるまで乾燥，放冷，計量を繰り返し行う。

⑸　**試験結果の整理**

式⑴に試験で使用したPKM-Tの固形分量，準備したろ紙の質量と試験後に乾燥させたろ紙の質量を代入し，アスファルト付着率を算出する。

$$A_r = \frac{M_a - M_o}{0.007854 \times Ec} \times 100 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここに，

A_r　：アスファルト付着率（質量％）

M_a　：試験後のろ紙質量　（g）

M_0　：試験前のろ紙質量　（g）

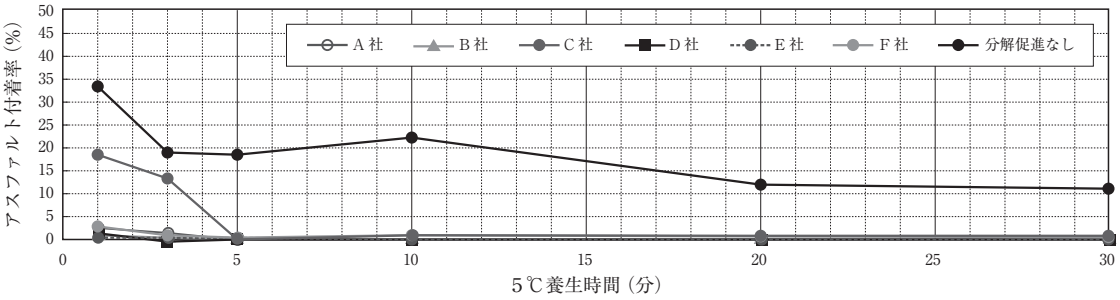
E_C　：乳剤固形分塗布量　（g/㎡）

※ろ紙面積を0.007854㎡と規定した。

3. 2. 3　共通試験の結果

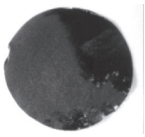
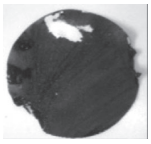
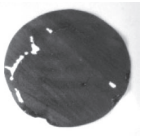
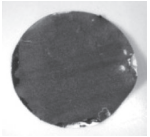
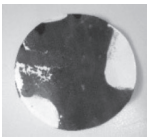
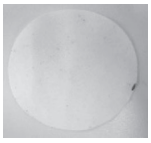
本共通試験の結果を**図－5**および**表－3**に示す。

ここで**図－5**および**表－3**は，**図－4**に示す④と⑤間の5℃における養生時間を1，3，5，10，20および30分と変えて実施した結果である。



図－5　養生時間毎のアスファルト付着率（共通試験）

表－3　アスファルト付着状況の経時変化の例（5℃）

養生時間	1分	3分	5分	10分	20分	30分
分解促進剤無						
分解促進剤有					―	―

共通試験の結果，会員６社の差はあるものの５分以内でアスファルト付着率がほぼ０％になることを確認した。また，**表－３**に示すように，分解促進剤の有無による差は明らかであり，分解促進剤を散布したものは５分経過時点で，アスファルトの付着が皆無となることが確認された。

４．速分解型アスファルト乳剤の協会規格

これまでに行った共通試験結果，試験実施状況から当協会では，速分解型アスファルト乳剤の品質基準となるアスファルト付着率を５％以下（５℃養生，分解促進剤散布後５分）と定めることとした。**表－４**に速分解型アスファルト乳剤の規格を示す。

表－４　速分解型アスファルト乳剤の規格

規格			JEAAS2011	規格（案）
項目		単位	PKM-T	PKM-T-Q
エングラー度（25℃）		－	1～15	
ふるい残留分（1.18㎜）		質量％	0.3以下	
付着度		－	2/3以上	
粒子の電荷		－	陽（+）	
蒸発残留分		質量％	50以上	
蒸発残留分	針入度（25℃）	1/10㎜	5を超え30以下	
	軟化点	℃	55.0以上	
貯蔵安定度（24hrs）		質量％	1以下	
タイヤ付着率（60℃）		質量％	10以下	
アスファルト付着率（５℃，分解促進剤散布５分後）		質量％	－	５以下

５．おわりに

速分解型アスファルト乳剤は，本来PKM-Tが有している優れた接着性能やタイヤ付着抑制性能を低下させること無く，アスファルト乳剤散布後の養生に要していた時間を大幅に短縮することが可能な新材料である。昨今，職場での働き方が見直されていく中で，労働時間削減や業務効率化の一助となることも期待される。

また，使用したベースのアスファルト乳剤は，速分解性能を特に必要とする適用箇所の関係からPKM-Tを使用するとしているが，その他JISやJEAAS2011で規定されるアスファルト乳剤においても同様に分解性能を評価する試験方法として適用が可能と考えられるため，PKM-T以外のアスファルト乳剤においても本試験方法を使用して評価できることとし，本試験を（案）として運用状況を見極めていくこととしている。

―― 参考文献 ――

１）（一社）日本アスファルト乳剤協会：最近のアスファルト乳剤の技術的動向，アスファルト，234号,pp.16-20，2018.12

２）（一社）日本アスファルト乳剤協会 技術委員会：速分解型アスファルト乳剤の協会規格（案）について，あすふぁるとにゅうざい，208号，pp.3-9，2019.8

３）（一社）日本アスファルト乳剤協会 技術委員会：速分解型アスファルト乳剤の協会規格（案），技術資料，2019.10発行

舗装再生技術の変遷と再生加熱アスファルト混合物の性能向上に関する一提案

(Chronicles of Japan's Change of Pavement Recycle Technology and Improvement Study of Performance of Recycled Asphalt Mixture)

瀬　尾　　彰*・佐　野　昌　洋**・野　口　健太郎***

日本の舗装再生技術は世界的に高く評価されており，今後も世界を牽引すべく発展させていく必要があると思われる。本稿では1980年初頭から現在に至るおよそ40年間の舗装再生技術の変遷を，舗装再生におけるアスファルトもしくは再生添加剤に関する知識の進化・深化として改めて振り返る。つづいて筆者らによる，再生混合物中の再生アスファルトの均一性に着目した検討を報告する。これらを併せ，今後の舗装再生技術のさらなる発展の礎としたい。

（本稿は，筆者既出報文（舗装，Vol.54, No.9, 2019）にその後の検討の一部を加筆したものである。）

キーワード　再生，リサイクル，繰り返し再生，再生添加剤，維持修繕，アスファルト，組成，均一性

はじめに

現在，日本国内で再生加熱アスファルト混合物（以降，再生混合物）は広く舗装に採用され，高い再資源化率を誇る日本の舗装再生技術は，NAPA（全米アスファルト舗装協会）による調査報告に示されるとおり，世界的に高く評価されている[1)]。今後も日本の舗装再生技術は，世界を牽引すべく発展させていく必要があると考えている。

近年，一度再生された混合物をさらに再利用する，いわゆる繰り返し再生が行われており，再生混合物の品質が一度低下すると，以後に製造される再生混合物の品質に影響を与えることが予見される。このため将来にわたって舗装の品質を維持し強靭化を図るためには，再生混合物の性能に影響を与える要因を理解し，設計，製造を行うことが肝要と考える。

そこで本稿は，これまでの舗装再生技術の進化・深化の歩みを改めて振り返り，特に舗装再生におけるアスファルトおよび再生添加剤に関する知識や理解の変遷をたどる。つづいて筆者らが実施した，再生混合物中の再生アスファルトの均一性およびその定量方法に関する検討を紹介する。これらをあわせ，次世代の舗装再生技術のさらなる発展に資する基礎情報を提供する。

1．舗装再生技術の変遷

国内の舗装再生に関する技術開発は，環境に関する法制定および舗装発生材の有効利用等を背景に1970年代から行われ，1980年代には試験施工結果を踏まえた技術指針案が発刊され標準化が図られてきた[2)]。本稿では主に1980年代以降の舗装再生にかかわる検討のうち，再生アスファルトに関する技術検討について整理して記す。なお以下に示す検討時期は，筆者が便宜的に設けたものである。

1. 1.　黎明期

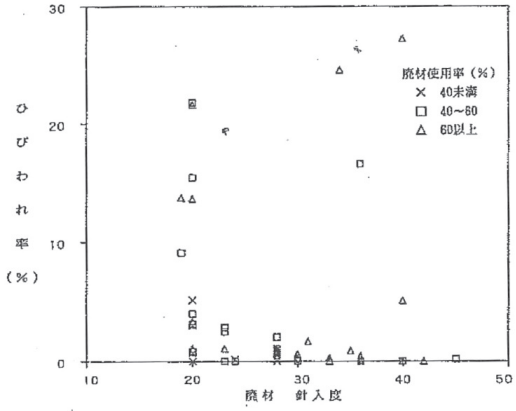
舗装再生に関する技術指針案が発刊された1980年代には，その基準の根拠や，再生混合物と新規混合物の性能差を考察した論文が提出されている。

安崎らは1989年に，1982年および83年に実施した再生舗装の試験施工の結果から，再生骨材の使用率および品質により供用性能（わだち掘れ量およびひび割れ率）に差異があることを報告している[3)]。特にひび割れ率について，累積大型車交通量300万台時の結果

*せお　あきら　出光興産株式会社　技術商品・事業開発部アスファルト研究課　課長
**さの　まさひろ　出光興産株式会社　技術商品・事業開発部アスファルト研究課
***のぐち　けんたろう　出光興産株式会社　技術商品・事業開発部アスファルト研究課

として，再生骨材の使用率が40%未満の試験箇所での発生が少ないこと，さらに**図－1**に示すとおり，再生骨材中のアスファルトの針入度が20程度に低下すると，ひび割れ率が高くなることを報告している（なお試験工区のうち針入度の小さい箇所は，粗粒ゴム入りの舗装が多かったことを併せて報告している。なお原論文では再生骨材中のアスファルトの針入度を廃材針入度としている。筆者注）。

また山田は1984年に，再生混合物が普及した際には，新規混合物と性質差が発生する要因として次の３点を挙げ，検証を行っている[4]。①骨材にすでに付いているアスファルト（いわゆる旧アスファルト，筆者注）は，新しいアスファルトや再生添加剤と完全に混合するとは限らない，②再生添加剤はアスファルトと性質が異なることがある，③廃材（原文のまま）の性質に変動が起きる。



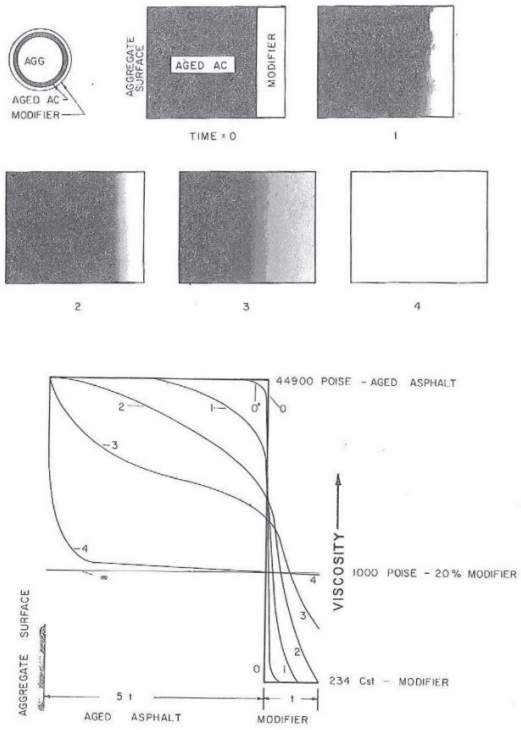
図－1　廃材針入度とひび割れ率の関係
（安崎ら，土木技術資料，1989）

ここで①で提起された再生アスファルトの不均一状態の検証について，Carpenterらの考察[5]を拡張した実験を行い，深さ方向に不均一である可能性があることを明らかにしている。**図－2**にCarpenterの考察による再生骨材表面の再生添加剤の浸透・拡散の模式図を示す。また②の再生添加剤の性質については，添加剤そのものの感温性，すなわち温度に伴う粘度の変化特性が重要であるとし，芳香族成分あるいはレジン成分の多い添加剤を用いると，再生アスファルトの性質を新規混合物の性状に近づける可能性があるとしている。

同じ1984年に坂本は，回収アスファルトの針入度として30～50程度の調査結果が多いとの見解を示し[6]，再生添加剤の役割として劣化アスファルトを均一に溶解することを求めている。また再生添加剤の組成として，米国の品質規定を例示し，回収アスファルトに添加された際の組成を新アスファルトの組成と同等に戻すことを期待している。さらに将来くり返し再生の時期を迎えた際にも，再生添加剤の機能について，組成の回復を期待している。

ここで坂本が参照したと思われるDunningらによる報告によれば，再生添加剤の要求性能として，劣化したアスファルト中で生成し増加したアスファルテンを分散させる能力を持つこと[7]としている。

またNoureldinらは1989年に，新アスファルトと，酸化劣化およびウェザリングによる劣化アスファルトの分子量分布の比較を報告している[8]。ここではアスファルトの分子量分布を低分子量，中分子量，高分子量の３種に分類し，それぞれの含有量を基準とした評価を行い，劣化アスファルトの分子量分布が新アスファルトに比べ，高分子量にシフトすることを明らかにしている。また再生添加剤としては，新アスファルトの中分子量に相当する成分を用いることが適切としている。

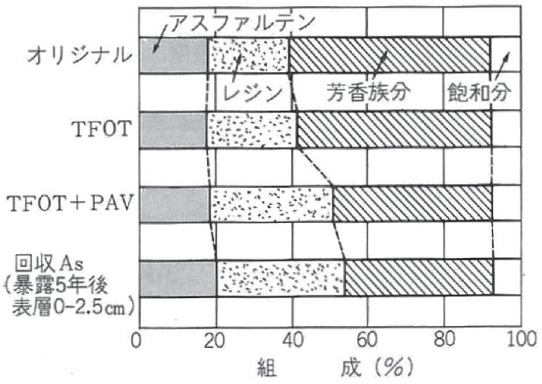


図－2　再生骨材表面の再生添加剤の混合と粘度の模式図（Carpenter et al., 1980）

1.2.　成長期

1990年代以降，国内の舗装再生は急速に成長した。90年代初頭には全混合物製造数量の10%程度であった再生混合物の製造数量が，95年には約30%，2000年には約60%へと増加した[9]。このため再生混合物の製造において再生添加剤の必要性が高まり，実際の舗設に好適な再生添加剤を模索・提案する論文が提出されている。またこの時期以降，米国の新道路研究計画（SHRP: Strategic Highway Research Program）で開発された加圧劣化試験（PAV: Pressure Aging Vessel），および粘弾性測定装置（DSR: Dynamic Shear Rheometer）を用いて，供用劣化を再現・評価することが試みられ，供用によるアスファルトの組成変化や再生添加剤の組成についての検討結果が報告されている。

遠西らは，アスファルトの供用後の劣化を再現し，促進劣化手法の確立を試み報告している[10]。ここでは舗設後5～5.5年経過した屋外暴露供試体から回収したアスファルトと，舗設に用いたアスファルトの室内促進劣化後（薄膜加熱試験TFOTに続き，加圧劣化試験PAVを行ったもの）のアスファルトの性状が，物理性状に加え化学組成についても類似することを明らかにした。当該検討におけるアスファルトの組成を**図－3**に示す。室内促進劣化(TFOT+PAV）の組成が，回収したアスファルト（回収As）と類似することを示している。



図－3　劣化アスファルトの組成分析結果
（遠西ら，1995）

また八谷らは，再生骨材の配合率40%の再生混合物を，組成の異なる3種類の再生添加剤を用いて作製しその物性を比較している[11]。その結果，使用する再生添加剤の組成により再生混合物の性能に差が生じることが認識できたとしている。また今後の課題として，より多くの種類の再生添加剤の評価を行い一般化すること，さらにより実際に即した方法によって評価することが必要としている。

新田らは，舗装発生材の再利用率の上昇により繰り返し再生されるケースが増加することを考慮し，室内での促進劣化試験を繰り返し実施することで模擬的に繰り返し再生を再現し，アスファルトの物理性状および化学組成の変化を検証している[12]。ここでは再生アスファルトの針入度を同じように再生を行っても，使用する再生添加剤の組成が異なることなどにより他の物性（特に軟化点）が異なることを明らかにし，今後の適正な再生方法の提案の基礎とすることを期待している。

1.3.　発展期～現在

2010年に「舗装再生便覧（平成22年版）」が改訂刊行された[13]。ここでは1980年代以降本格的に事業化された舗装再生についての技術知見の蓄積，さらに繰り返し再生や改質アスファルトの適用増加等の舗装再生を取り巻く環境の変化を基礎とし，新しい評価指標として「圧裂係数」の導入，「再生用添加剤の品質」の規定，および「新アスファルトの針入度等級の拡大」等を行っている。改訂の背景およびねらいは新田らの報告[14]に詳しい。

2010年代以降は，すでに実施され今後増加することが確実な，繰り返し再生における再生アスファルトの性状に着目した検討が行われ，報告されている。

加納らは，舗装再生が繰り返されることを前提として，室内で作製した新規混合物の複数回促進劣化を行い，混合物および混合物中のアスファルトの物理的性状ならびに化学的性状を検討している[15]。また再生骨材配合率を30%および60%とした再生混合物を調製し，その際に飽和成分の多い再生添加剤を使用している。その結果，再生骨材配合率の違いにより混合物のスチフネスおよび動的安定度に差が認められ，さらに抽出回収したアスファルトにおいても針入度，軟化点，組成，および分子量分布の変化に差が認められた。特に再生骨材配合率を60%とした場合においては促進劣化の回数を増やすにつれて，混合物中のアスファルトの性状変化が大きくなり，組成においては酸化劣化により生成したカルボン酸の増加，および分子量分布においては高分子量化が顕著となった。これらより繰り返し再生において飽和成分の多い再生添加剤を用いた

場合は，再生骨材配合率60%の場合は再生混合物の性状変化が起こる可能性があること，すなわち再生添加剤の組成に留意する必要があることを提言している。

2．再生アスファルトの均一性およびその定量方法に関する検討

筆者らは，1980年代に指摘されていた再生混合物中の再生アスファルトの均一性について着目した検討を行い，特に再生骨材表面の旧アスファルト（以下，旧アス）に再生添加剤を混合した際に，旧アスと再生添加剤の界面で起こる現象について考察し，均一性の定量方法の提案を試みた[16)]。

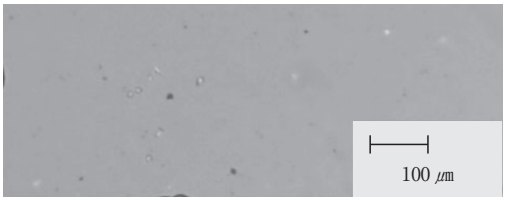
2.1. 旧アスファルトと添加剤の混合物の光学顕微鏡による確認

本検討では，東京都内で得られた再生骨材から抽出回収したアスファルト（旧アスファルト）を，市販の芳香族系再生添加剤および飽和系再生添加剤と混合し，光学顕微鏡で混合・分散状況を観察した。使用した旧アスファルト，および添加剤の性状を**表－1**に，光学顕微鏡による観察結果を**図－4**に示す。

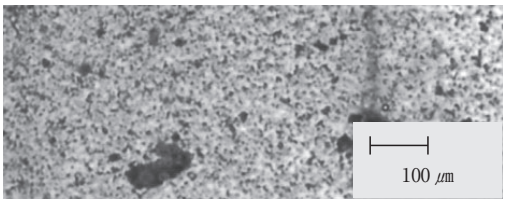
表－1　旧アスファルトおよび添加剤の性状

種類	旧アスファルト	芳香族系添加剤	飽和系添加剤
針入度（1/10㎜）	20	－	－
粘度（60℃，㎟/s）	－	192	161
TFOT後粘度比	－	1.1	1.0
4成分分析による芳香族分*（%）	－	70.1	28.6

* JPI-5S-70-2010



芳香族系添加剤



飽和系添加剤

図－4　再生添加剤と旧アスファルトの混合物の光学顕微鏡での観察結果

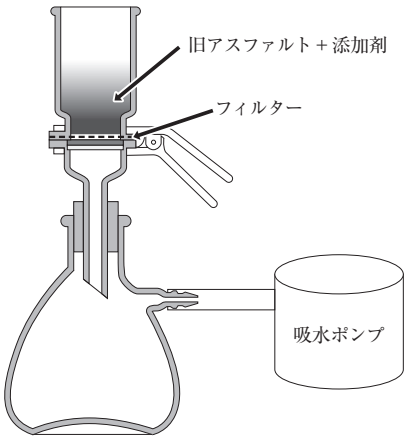
これらより，芳香族系添加剤は旧アスファルトと均一に分散・混合するのに対し，飽和系添加剤は均一に分散せず粒子状物質を生成することを確認した。なおストレートアスファルト60～80等の新アスファルトを同様に観察すると，粒子状物質は確認されず，均一な状態として観察される。

2.2. 粒子状物質の定量

顕微鏡観察において確認された粒子状物質の量を定量するため，石油製品中のスラッジ量を定量する試験（ISO 10307-1:2009 石油製品－残留燃料油の総沈積量－第一部：熱ろ過による定量）を応用したフィルターろ過試験を考案し，検討した。**表－2**の条件で旧アスファルトと添加剤を混合し，**図－5**の装置で吸引ろ過し分析した。ろ液温度は混合締め固め温度と試料の熱劣化を考慮し130℃とし，また旧アスファルトと添加剤の混合比は，ろ液が130℃でフィルターを通過できるよう添加剤を過剰とした。

表－2　フィルターろ過試験条件

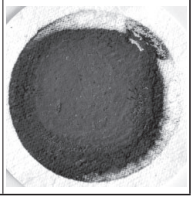
旧アスファルト量（g）	3.0	旧アスファルト：添加剤＝1：9
添加剤量　（g）	27.0	
旧アスファルト温度	130℃	
添加剤温度	常温	
混合条件	50㎖ビーカー中でスパチュラを用いて1分間攪拌	
混合後養生条件	130℃で1時間	
フィルター	ワットマンGF/A（目開き1.6㎛）	
試料（ろ液）温度	130℃	
ろ過器具温度	130℃	
ろ過方法	吸引ろ過（0.05 MPa）	
ろ液量	3.0g	



図－5　フィルターろ過試験装置の概略

フィルターろ過試験による，ろ液量に対する粒子状物質量の比率，およびフィルターの様子を**表－３**に示す。

表－３　粒子状物質の比率およびフィルターの様子

添加剤種類	芳香族系	飽和系
粒子状物質量の比率（%）	0.104	20.4
フィルターの様子		

旧アスファルトと芳香族系添加剤の組み合わせにおいては，フィルター上に捕捉された粒子状物質量が0.10%であったのに対し，飽和系添加剤を用いた場合は多量の粒子状物質を生成し，その量が20%を超えることを確認した。

2. 3.　再生アスファルトの均一性に関する今後の検討課題

旧アスファルトと再生添加剤を混合した際に，再生添加剤の組成の違いにより，再生アスファルト中に粒子状物質が生成せず均一な混合物となる組み合わせと，粒子状物質が生成し不均一な混合物となる組み合わせがあることを確認した。さらに粒子状物質の定量に適する方法の一例を提案した。

現在，再生アスファルトの均一性が再生混合物の性能に与える影響については，明らかにされていない。また運用されている再生舗装の設計方法は，旧アスファルトと再生添加剤の混合物である再生アスファルトについて，新アスファルトと同様に均一な状態であることを前提としている。

今後は，舗装工事の一部工程を考慮した検討[17]をもとに，再生混合物の製造，貯蔵，運搬および施工される状況において，混合物に作用する熱および応力を考慮した検証を行い，再生アスファルトの均一性が再生混合物の性能に与える影響を明らかにする予定である。

おわりに

本稿では1980年頃から現在に至るおよそ40年間の舗装再生技術の変遷を，特にアスファルトに着目し21世紀に生きる私達の視点で再確認を行った。技術の価値は社会的要求に照らし測られるため，本稿の記述が各論文提出時の意図・解釈と異なる箇所があると思うが，諒とされたい。

また繰り返し再生を想定した最近の研究・知見，ならびに筆者らによる再生混合物中の再生アスファルトの均一性に着目した検討は，既に先輩方が1980年代に再生混合物の性能に影響を与える要因として提起されていた再生添加剤の組成，および再生アスファルトの分散性・均一性に関する，実証的な解釈と捉えることができる。

本稿が読者に舗装再生技術の変遷を理解する助けとなり，もしくは原典を参照する契機となれば幸いである。それにより舗装再生技術に関する知識と理解を深め，次世代の舗装再生技術，配合設計技術の構築ならびに再生舗装の品質向上の一助となれば幸いである。

問合わせ先
〒243-0303　神奈川県愛甲郡愛川町中津4052-2
出光興産（株）技術商品・事業開発部
アスファルト研究課　瀬尾　彰
TEL：046-285-0829　　FAX：046-286-5364
E-mail：akira.seo.5250@idss.co.jp

―― 参考文献 ――

1）Randy C. West and Audrey Copeland: High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice - Lessons Learned, Information Series 139, National Asphalt Pavement Association, 2015.
2）河野宏，吉兼秀典：舗装廃材の再生利用の現状について，土木学会論文集，第390号/V-8, 1988, p23.
3）安崎裕，片倉弘美，高木信幸：再生加熱アスファルト混合物の供用性評価，土木技術資料，Vol.31-9, 1989, p48.
4）山田優：再生アスファルト混合物の性質と供用性に関する一研究，土木学会論文集，第348号/V-1, 1984, p51.
5）S. H. Carpenter et.al.,: Modifier Influence in the Characterization of Hot-Mix Recycled Material, Transportation Research Record 777, 1980, p15.
6）坂本浩行：再生用添加剤，アスファルト，Vol.27, No.141, 1984, p39.
7）Dunning, R. L. and Mendenhall, R. L.: Design of Recycling Asphalt Pavements and Selection

of Modifiers, L. E. Wood, Ed., Recycling of Bituminous Pavements, ASTM STP662, 1978, p35.
8）A. S. Noureldin and L. E. Wood, Variations in Molecular Size Distribution of Virgin and Recycled Asphalt Binders Associated with Aging, Transportation Research Record 1228, 1989, p191.
9）アスファルト合材製造数量推移（全国）：一般社団法人日本アスファルト合材協会
10）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の劣化試験方法に関する研究：舗装，No.30, vol.6, 1995, p3.
11）八谷好高，高橋修，松崎和博，坪川将丈，郝培文：再生用添加剤が再生アスファルトの性能に及ぼす影響に関する実験的研究，土木学会論文集，No.753/V-62, 2004, p127.
12）新田弘之，西崎到：繰り返し再生したアスファルトの性状，第26回日本道路会議論文集，2005, 12125.
13）舗装再生便覧（平成22年版），公益社団法人日本道路協会編，2010。
14）新田弘之，川上篤史，加納孝志：アスファルト混合物の持続的なリサイクルに向けて －舗装再生便覧の改訂とその背景－，アスファルト，Vol.54, No.227, 2012, p22.
15）加納孝志，新田弘之，佐々木巌，川上篤史：飽和成分の多い再生添加剤で繰り返し再生した再生混合物と再生アスファルトの性状に関する一検討，舗装工学論文集，Vol.71, No.3, 2015, p65.
16）佐野昌洋，瀬尾彰：再生混合物の性能向上に関する一検討，土木学会第72回年次学術講演会，2017, V-103.
17）瀬尾彰，佐野昌洋，野口健太郎：再生アスファルトの分散状態の違いが再生混合物の性状に与える影響の 一考察:：土木学会第74回年次学術講演会，2019, V-96.

アスファルトヒューム暴露量の安全性評価

(Evaluate the Safety of Asphalt Fume Exposure)

川　島　陽　子*・新　田　弘　之**

ストレートアスファルトのSDSにアスファルトヒュームの許容値が記載されるようになったことから、今後アスファルトヒューム濃度の測定機会が増えるものと思われる。そこで、本稿では、アスファルトヒュームの測定方法を紹介するとともに、アスファルトヒューム濃度の分析に用いる従来よりも安全かつ取扱い安い代替溶剤の検討結果を報告する。また、アスファルト混合物を取扱う現場でのアスファルトヒューム暴露量を把握するため、屋内の試験室や改質アスファルト工場、屋外の施工現場でのアスファルトヒューム発生量の測定例を紹介する。

1．はじめに

⑴　アスファルトヒュームとは

アスファルトは沸点が500℃を越える多様な炭化水素化合物の集合体であり，常温では安定な固体状物質である。しかし，アスファルトには少量の揮発性，半揮発性の有機化合物が残存しており，加熱して液体状になったアスファルトからは，微量の有機化合物がアスファルトヒューム（以下，ヒューム）として発生する。フランスのLCPC（現IFSTTAR）の分類[1)]によると，ヒュームは加熱した際に発生する物質全般を指し，粒子状物質ならびにガス状物質を含むとされている。

⑵　国内におけるヒューム許容濃度の規制と現状

2011年10月に国際がん研究機関により，ヒュームの発がん性の分類は，人に対して発がん性が疑われるグループ2Bに格上げされた。そのため，2018年７月より，ストレートアスファルトの安全データシート（以下，SDS）において，ACGIH（アメリカ合衆国産業衛生専門家会議）の勧告値であるTLV-TWA0.5mg/m³をヒュームの許容濃度として記載された。このため，リスクアセスメントの義務化により，アスファルト混合物の製造プラントやアスファルト舗装の施工現場でのヒューム暴露量の安全性評価が必要となる。しかし，現状では，ヒュームの採取や分析手法が十分に認知されていないことや，アスファルト混合物から発生するヒューム量や作業員の暴露量について十分な知見がないことが課題と考えられる。

⑶　本稿の内容

SDSではACGIHの勧告値が記載されており，これはNIOSH（アメリカ国立労働安全衛生研究所）の測定方法で行うことになっていることから，まずNIOSHの測定方法を紹介する。続いて，ヒューム量の測定時における安全性を向上させるために，抽出溶剤の検討状況について報告する。最後に，屋内外の作業時におけるヒューム暴露量を調べた結果について報告する。

2．ヒューム量の測定方法

NIOSHのヒューム測定条件の概要[2)]を**表－１**に示す。また，ヒュームの分析手順は，下記のとおりである。

①PTFEフィルタを事前に溶剤で洗浄，乾燥する
②ヒュームを吸引後，フィルタの質量を測定する
③フィルタを試験管内に移し，ベンゼン５㎖を入れて，試験管を20分間超音波処理する
④試験管内の溶剤を0.45㎛孔シリンジフィルタにてろ過する

表－１　NIOSHのヒューム測定条件

項目	条件
採取フィルタ	PTFE製φ37㎜フィルタ（孔径２㎛）
採取流量	１～４ℓ/min
採取時間	８時間
抽出溶剤	ベンゼン

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

⑤ろ過したものをアルミカップに移す
⑥40℃，7～27kPa下で真空吸引する
⑦アルミカップの質量を測定する

なお，NIOSHでは，手順③の溶媒量を3mℓとしているが，ここでは多環芳香族炭化水素（PAHs）分析を行っている既往研究[3]を参考にして，抽出溶剤の量を5mℓとしている。

手順②で得られる質量が全粒子状物質（TPM）量であり，ヒュームではない塵埃も含まれる。一方，⑦のアルミカップに残存したものが，TPM中のベンゼン可溶分であり，アスファルト由来と考えられる。NIOSHでは，フィルタ上に捕捉された物質量を基にヒューム量を定めており，ベンゼン可溶分からヒューム濃度を算出する。

3．ヒューム抽出のための溶剤検討

NIOSHの定める方法でヒュームを分析する場合，フィルタに捕捉されたTPMをベンゼンで抽出する必要がある。しかし，ベンゼンはグループ1の発がん性が認められる物質で，第2類特定化学物質に指定されているため，使用する際には十分な安全措置を講じる必要がある。そこで，ヒュームをより安全な方法で分析するために，ベンゼンの代替溶剤について検討されている[4,5]ので紹介する。

3.1　アスファルトによる検討[4]

(1)　概要

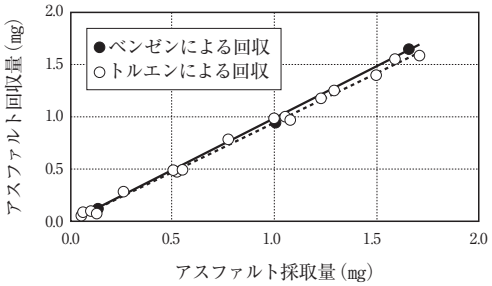
本検討では，PTFE製フィルタ上に秤量したアスファルトに対してベンゼンやトルエンを使用し，それぞれの溶剤による回収量を比較することにより，代替溶剤の検討が行われている。

(2)　試験方法

①フィルタ上に0.07mg～1.66mgのストレートアスファルトを秤量し，フィルタとともに溶剤（25mℓ）を三角フラスコ内に投入
②30分間超音波洗浄機でアスファルトを抽出
③エバポレータにて溶剤を減量し，80℃のホットプレートにて乾燥
④デシケータ内で試料を冷却し，3日間秤量を繰り返して恒量を確認

(3)　結果

アスファルトの採取量および回収量を**図－1**に示す。図中の実線および破線は，それぞれベンゼンおよびトルエンの近似線を表しており，決定係数は0.99以上であった。また，それぞれの採取量に対する回収量を**表－2**に示す。抽出溶剤をトルエンとした場合でも，測定値の差は5％以下であった。これより，トルエンはベンゼンと同等の抽出能力があるものと判断している。



図－1　抽出回収結果[4]

表－2　各溶剤の回収量

溶剤	採取量	回収量	回収率
ベンゼン	0.2mg	0.18mg	90%
	1.0mg	0.98mg	98%
トルエン	0.2mg	0.19mg	95%
	1.0mg	0.95mg	95%

3.2　アスファルト混合物から発生したヒューム量による検討[5]

(1)　概要

本検討は著者らが実施したものであり，実際にアスファルト混合物から発生するヒュームの分析から抽出溶剤の検討を行った。

(2)　ヒュームの採取

本試験では新規アスファルトおよび再生アスファルト混合物をパグミル内で混合する際に発生するヒュームを採取し[6]，これをもとにして分析試験を行った。

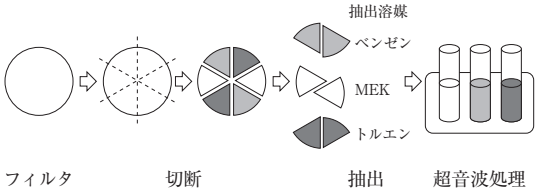
アスファルト混合物の作製には，ストレートアスファルト60/80を使用し，また，芳香族分が多い添加剤（以下，添加剤A）と飽和分が多い添加剤（以下，添加剤B）の2種類の再生用添加剤を使用した。アスファルト混合物は，新規・再生混合物ともに密粒度アスファルト混合物（13）とした。また，各混合物におけるアスファルト量は，新規混合物の最適アスファルト量である5.7%となるように統一した。旧アスファルトの再生に際して，舗装再生便覧に記載の方法に従って実施し，再生後の針入度が70となるように調整した。

(3)　抽出手順

ヒューム抽出には，ベンゼン，トルエンおよびメチルエチルケトン（以下，MEK）を使用した。トルエンはベンゼンと比較して取り扱いやすく，同程度にアスファ

ルトを溶解することが可能である。一方，MEKはコールタール成分の測定において，ベンゼンの代替として指定されているため[7]，代替溶剤として候補に挙げた。

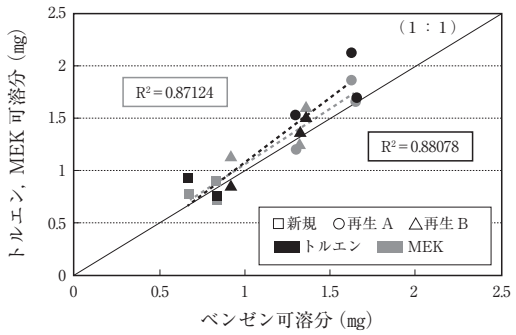
ヒュームを採取した後，フィルタに捕捉されたものを溶剤にて抽出した。代替溶剤を検討するために，１つのフィルタを分割し，それぞれのフィルタを３種類の溶剤にてヒュームを抽出し，どの程度の可溶分が得られるかを調べた。抽出手順を**図－２**に示す。抽出および分析は２章で示した方法で実施した。なお，ベンゼン以外の溶媒は，ベンゼンと同条件で揮発するとは限らないため，有機溶媒が十分に揮発するように，２時間の真空吸引後さらに80℃で30分間加熱した。



図－２　ヒューム抽出手順[5]

⑸　結果

３種類の溶剤によるヒューム可溶分の質量を測定した。なお，フィルタに付着したヒュームの質量は，フィルタを切断し，分割する際に若干差が生じるため，フィルタ分割による質量誤差を，ベンゼンを基準として補正を行った。それぞれの抽出溶媒により得られた可溶分の相関関係を**図－３**に示す。なお，図中の再生Ａおよび再生Ｂはそれぞれ再生用添加剤ＡおよびＢを用いた再生混合物を表す。トルエンとMEKでは，ベンゼンとの相関係数に違いはほとんどなかったが，45度線に近いトルエンの方が，ベンゼンに近いと考えられた。以上より，ヒューム抽出の代替溶媒としてトルエンが適していると判断した。



図－３　溶剤可溶分の相関関係[5]

3.3　抽出溶剤の検討結果

3.1および3.2ともに，ベンゼンの代替溶剤としてトルエンの有効性を示しており，ヒュームの分析をするにあたり，トルエンを使用することができるものと判断される。ただし，トルエンはベンゼンと比較すると揮発性が弱いので，残存しないように注意する必要がある。

４．屋内作業時のヒューム暴露量の安全性評価

前章で示したアスファルト混合物から発生したヒューム量は，発生量が多く見込まれる試験条件下によるものであり，アスファルト混合物を扱う作業現場を想定したものではない。そのため，実作業環境にてアスファルト混合物を扱う作業員のヒューム暴露量を検証する必要がある。本章では，屋内のヒューム暴露量として，改質アスファルト工場でのヒューム量の検証結果および，アスファルト混合物作製時の暴露量について報告する。

4.1　改質アスファルトプラントの暴露量[4]

改質アスファルトは，通常のストレートアスファルトよりも混合温度が高いため，作業員の暴露量の危険性が高いものと推察される。そこで，瀬尾ら[4]は自社の改質アスファルト工場にてヒューム量を測定した。その結果，時間荷重平均値（TWA値）８時間換算値は**表－３**のとおりであり，許容濃度以内に収まっていることが明らかとなった。

表－３　ヒューム暴露量のTWA８時間換算値[4]

抽出溶剤	TWA８時間換算値（mg/m³）
ベンゼン	0.06
トルエン	0.10

4.2　アスファルト混合物作製時の暴露量[5]

⑴　試験概要

著者らの既往研究から，再生アスファルト混合物から発生するヒューム量が多いことを報告している[6]。そこで，試験用の再生アスファルト混合物を作製している試験室内でヒュームを採取し，屋内作業でのヒューム暴露量の安全性評価を行った。

ヒューム発生量に対する温度の影響を検証するため，混合温度は165℃，150℃および135℃とした。採取対象の作業者には**写真－１（a）**に示すように，胸元近くにフィルタを取り付けてもらい，アスファルト混合物の供試体として，マーシャル供試体およびホイールトラッキング供試体作製中のヒュームを採取した。なお，

各作業者の作業内容は**表－４**に示すとおりである。また，アスファルトと骨材を混合するパグミルなどの試験機や供試体作製用の作業台近傍にもフィルタを設置し，作業環境のヒューム量を測定した。設置したフィルタの様子を**写真－１（b）**に示す。作業者および作業環境のヒュームを採取するのに使用したフィルタの種類も併せて**表－４**に示す。なお，各混合温度での作業時間はおおよそ５時間であり，ヒューム採取時のポンプ流量は４ℓ/minとした。

（a）作業者　　（b）作業環境

写真－１

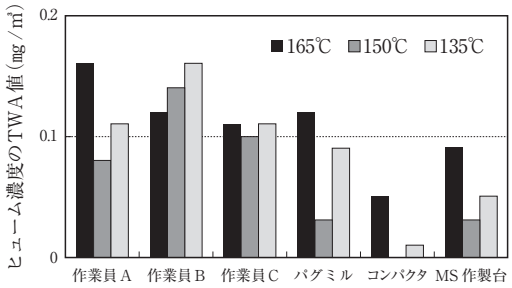
表－４　作業員Ａの作業内容について

対象		内容	フィルタ種類
作業者	作業員Ａ	アスファルト，添加剤投入 Ms作製　等	PTFEバインダーフィルタ（TF98）
	作業員Ｂ	骨材など投入 転圧　等	
	作業員Ｃ	骨材計量，運搬備品類の清掃　等	
作業環境	パグミル	アスファルト混合物の練り混ぜ	TF98/PTFEメンブレンフィルタ（孔径2.0㎛）
	コンパクタ	供試体の転圧	PTFEメンブレンフィルタ
	マーシャル（MS）作製台	MS供試体を作製する作業台	

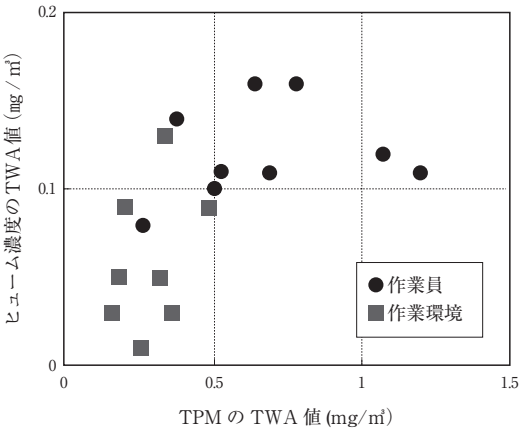
(2)　結果

ヒューム採取後，フィルタの質量からTPM量を算出し，フィルタに捕捉されたTPMの内，トルエンで抽出回収した分からヒューム濃度を算出した。**図－４**に各作業員および作業環境におけるヒューム濃度のTWA８時間換算値（以下，TWA値）を示す。混合温度の低減によるヒューム濃度の削減効果は認められなかった。作業環境のヒューム濃度については，パグミルや作業台近傍で可溶分が多く，混合物の練り混ぜに関わる作業においてヒューム濃度が高いものと推察された。なお，本試験のヒューム濃度はSDSに記載されている許容値と比べて1/3以下であり，安全上問題ないと判断された。

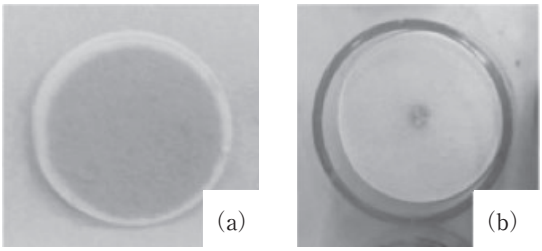
図－５にフィルタに捕捉されたTWA値に換算したTPM量とヒューム濃度の相関関係を示す。作業環境については，TPM量が増えるとヒューム濃度も増加する傾向にあった。一方，作業員については，TPM量が増えても，ヒューム濃度は横ばいに推移し，増加する傾向は見られなかった。**図－６**にヒューム採取後のフィルタを示す。**図－６（a）**は作業員Ｂのフィルタであり，**図－６（b）**は前章でパグミル混合機にて発生したヒュームを採取した際に得られたフィルタである。**図－６（b）**のフィルタは，フィルタが黄色く変色しており油分が多いものと思われる。一方，作業員のフィルタは褐色になっており，油っぽさはなかった。これは，骨材等の投入や道具類の洗浄などに起因するほこりが捕捉されていたことを表している。このため，TPM量が多いもののヒューム濃度は増加しなかったものと考えられた。したがって，作業内容によってはTPMの暴露量が多くなることがあるが，必ずしもヒューム濃度の増加にはつながらないことが示唆された。



図－４　各製造温度のヒューム濃度



図－５　TPMとヒューム濃度の相関関係



作業員Ｂのフィルタ　　図－２の試験で得られたフィルタ

図－６

５．屋外でのヒューム暴露量の検証

ヒューム暴露量について，屋内の場合は閉鎖的な空間内に空気が滞留することで，作業員がヒュームを吸引する可能性がある。一方で，屋外の場合ではアスファルト混合物と至近距離で作業する時間が長く，ヒューム暴露量が多くなる懸念がある。そこで，本章では屋外でのヒューム暴露量を検証するための試みについて報告する。

5.1　練り落としたアスファルト混合物からのヒューム発生量

⑴　概要

練り落とし直後のアスファルト混合物からのヒューム発生量を調査した。練り落としたアスファルト混合物の中心，および中心から1m，3m離れた位置にフィルタを設置しヒュームを採取した。また，作業者の呼吸位置を考慮して地上から1.5m高さ，および，混合物近傍として0.5m高さの位置にもフィルタを設置した。測定時の状況を**写真－２**に示す。試験には４種類のアスファルト混合物を使用し，中温化による温度の低減に伴うヒューム発生量の変化についても検証を試みた。使用材料の概要は**表－５**のとおりである。なお，

写真－２　測定状況

表－５　使用材料の概要

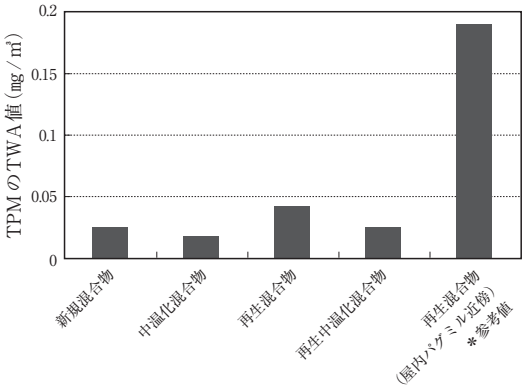
混合物の種類	アスファルトバインダ	再生骨材配合率	練り落とし直後の温度（実測値）
新規混合物	ストレートアスファルト60/80	－	163～166℃
中温化混合物			127～136℃
再生混合物		50%	171～173℃
再生中温化混合物			132～134℃

ヒュームの採取時間は，アスファルト混合物の練り落とし直後の30分間とし，これを１種類の混合物につき２度連続で練り落とし，計１時間とした。

⑵　結果

アスファルト混合物の種類によらず，ヒューム濃度は検出濃度以下であった。なお，フィルタにはTPMが捕捉されていたので，各地点におけるTPM量の平均値によるTWA値を算出した。結果を**図－７**に示す。参考値として，前章の屋内試験における再生混合物（165℃）で最も低いTPM量のTWA値も併せて示した。再生混合物がもっとも多く，中温化混合物がもっとも低く，混合温度の低減によりTPMが減少したものと考えられた。また，屋内作業と比較して，同程度の温度の再生混合物であっても，練り落とし直後のTPM量は非常に低い値であった。

今回，ヒュームは検出されず，TPM量も非常に低いことから，ヒューム量は規定値と比較して十分低いと言える。しかし，本試験は２ℓ/minで１時間しか吸引しておらず，採取流量が少なく，計測するのに十分にヒュームを採取できなかった可能性がある。練り落とし直後のアスファルト混合物からのヒューム発生量については，さらなる検証が必要である。



図－７　各混合物の平均TPM量から算出したTWA値

5. 2 アスファルト舗装施工時のヒューム暴露量

⑴　概要

施工中のヒューム暴露量の調査を行った。アスファルト舗装（W2.2m × L90m）を施工時に，レーキ作業員にフィルタを取り付け，ヒュームを採取した。なお，ポンプ流量は4.0ℓ/minとした。正味の施工時間は１時間程度であったが，作業員の待機時間中やアスファルト混合物の到着を待っている間もポンプは稼働しており，計３時間吸引し続けた。

⑵　結果

施工中の様子を**写真－３**に示す。測定の結果，TPM量は0.01mg程度と非常に小さく，このため，ヒューム濃度は検出濃度以下であった。今回の施工は，通常の舗装現場と比較すると規模が小さいとはいえ，アスファルト舗装施工時のヒューム暴露量は，かなり少ないものと考えられた。

写真－３　施工および測定状況

６．まとめ

本稿では，ヒューム暴露量の評価手法の安全性向上のため，NIOSHで規定されているベンゼンよりも取扱い易い溶剤として，トルエンの有効性を示した。また，屋内試験室やアスファルト工場，屋外作業時における作業員のヒューム暴露量が規定濃度以内に収まっている，いくつかの事例を示した。なお，事例はまだ少なく，施工規模の大きい現場での計測例などを集め，ヒューム発生量の特性を把握する必要がある。

今後は，各現場において同様の安全性評価を実施されることが見込まれる。本稿が，アスファルトの製造や施工現場のリスクアセスメントの一助となれば幸いである。

謝辞

本研究は（一社）日本アスファルト合材協会との共同研究により実施された。

── 参考文献 ──

1）Tepper A. L. et al : Acute Symptoms Associated with Asphalt Fume Exposure Among Road Pavers. Am. J. Ind. Med., 49, 2006.
2）NIOSH 5042: BENZENE-SOLUBLE FRACTION AND TATOAL PARTICULATE（ASPHALT FUME）, 1998
3）Authony J. Kriech, et al: Evaluation of Worker Exposure to Asphalt Paving Fumes Using Traditional and Nontraditional Techniques, AIHA Journal, 63, pp628-pp635, 2002.
4）瀬尾彰：アスファルト混合物を取扱う作業場の環境測定方法に関する検討結果報告，第33回日本道路会議，2019
5）川島陽子，田湯文将，新田弘之：アスファルトヒューム暴露量に対する安全性評価への取り組み，第33回日本道路会議，2019
6）田湯文将，新田弘之，川島陽子：再生加熱アスファルト混合物におけるアスファルトヒュームの発生量に関する調査，第74回土木学会年次学術講演会公演概要集，2019
7）日本作業環境測定協会，作業環境測定ガイドブック，pp.239-244

新しい橋面舗装材料の開発状況の紹介

(Development of New Bridge-Decks Pavement Material)

寺田　剛*・渡邉真一**・藪　雅行***

コンクリート床版では，床板の土砂化，床版防水層の接着不良や材料の劣化などによる床版上面への雨水の浸入を原因とした床版損傷が発生し，鋼床版では，施工時に発生する臭気，夏季における耐流動性の低下，およびブリスタリングの発生といった問題が生じている。このような課題を解決するために，土木研究所では，平成28年10月～令和２年３月まで「未利用アスファルト材料を用いた床版舗装の適用性に関する共同研究」を行っており，コンクリート床版および鋼床版へ適用できる新たな橋面舗装材料の開発を進めているので，その開発状況を紹介する。

１．はじめに

道路橋は厳しい交通環境や自然環境にさらされ，大型車の繰り返し走行による疲労に加え，塩害，アルカリ骨材反応などといった材料劣化を伴う複合的な損傷事例が見られている。これらの劣化の発生，促進には，路面からの雨水や凍結防止剤散布に由来する塩水の浸入が多大な影響を与えることから，床版の損傷を防ぐには橋面の防水対策は極めて重要となっている．橋面舗装は，交通車両の快適な走行を確保する役割とともに，交通荷重，雨水その他の気象条件などから道路橋床版を保護する役割を有している。道路橋床版はコンクリート床版と鋼床版に大別され，床版防水としては，コンクリート床版では，床版と舗装との間に床版防水層が，鋼床版では，床版上に水密性に優れたグースアスファルト混合物（以下，グース）が一般的に使用されている。しかしながら，コンクリート床版では，床版防水層の接着不良や材料の劣化などによる床版上面への雨水の浸入を原因とした床版損傷が発生している。また，鋼床版では，施工時に発生する臭気，夏季における耐流動性の低下，およびブリスタリングの発生といった問題が生じている。

このような課題を解決するために，土木研究所では，大成ロテック（株），東亜道路工業（株），日本道路（株），（株）NIPPOおよびJXエネルギー（株）と平成28年10月～令和２年３月まで「未利用アスファルト材料を用いた床版舗装の適用性に関する共同研究」を行っており，コンクリート床版および鋼床版へ適用できる新たな橋面舗装材料の開発を進めている[1,2,3,4]。本報では，本共同研究で進めている新しい橋面舗装材料の開発状況を紹介する。

２．開発した橋面舗装材料

2.1　従来の橋面舗装材料の概要

コンクリート床版上の舗装は，一般的に基層および表層の２層から構成（舗装厚さ：60～80㎜程度）され，床版と基層の間には床版防水層が設けられる。また，床版防水層としてはシート系防水層や，塗膜系防水層がある。一方，鋼床版はコンクリート床版に比べ合成が低くたわみが大きくなるため，たわみ追従性に優れ，水密性が高く，舗装体が防水層となるグースアスファルト混合物（以下，グース）が基層に用いられる。近年，たわみ追従性や水密性を考慮して，砕石マスチックアスファルト（SMA）を用いることがあるが，この場合，「舗装施工便覧（平成18年版）」[5]によれば別途防水層を設ける必要があるとしている。

グースは，骨材を結合させるためのアスファルトバインダ（以下，バインダ）の原料として，トリニダードトバゴのピッチ湖で湧出される天然アスファルトのト

*てらだ　まさる　（国研）土木研究所舗装チーム　総括主任研究員
**わたなべ　しんいち　（国研）土木研究所舗装チーム　交流研究員
***やぶ　まさゆき　（国研）土木研究所舗装チーム　上席研究員

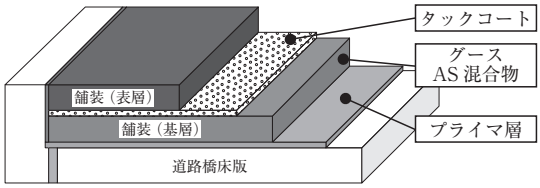
リニダードレイクアスファルト（以下，TLA）を使用している。TLAは硬質であるため，施工時にはグースを240℃程度の高温にすることで粘性を下げ施工性を確保している。そのため，コンクリート床版に適用した場合は，コンクリート床版内部の水分が蒸発しブリスタリングの発生が懸念される。これらの理由から，コンクリート床版へのグースの施工は一般的には行われていない。

2.2　開発した橋面舗装材料

本共同研究では，グースの課題である流動によるわだち掘れやTLA特有の臭気や煙による周辺環境への影響などの課題を解決するためおよびコンクリート床版へのグースの利用を行うことを目的に，未利用アスファルト材料を活用した新たな橋面舗装材料として，TLAを使用しないグースアスファルト混合物（以下，開発グース）4種と，特殊樹脂を用いた塗膜系床版防水層（以下，開発防水層）1種を開発した。開発にあたり室内での配合や混合物試験による混合物性状の確認と試験施工による施工性とわだち掘れ等の耐久性の確認を行った。開発した橋面舗装材料の特徴を以下に述べる。

2.2.1　開発したグースアスファルト混合物の特徴

今回開発した4種類のグースA，B，C，Dの構成を**図－1**に，室内試験による混合物性状試験の結果を**表－1**に示す。参考までに，従来用いられているグースの舗装施工便覧[5]に示される目標値を示す。開発グースは耐流動性，臭気，ブリスタリングの要因となる施工温度等の改善が図られるように，いずれの性状もグースの目標値を上回るように独自の開発目標値を設定した。



図－1　開発したグースの構成

⑴　**グースA**

グースAは，石油の精製過程で発生する副産物をバインダの原料として用いている[1]。本材料は，TLAに比べ臭気が低く，製造温度を20℃程度低減できるので鋼床版のみならずコンクリート床版への適用も可能である。さらに従来グースの動的安定度が300回／㎜であるのに対し，1,033回／㎜と耐流動性も向上している。また，従来のTLAグースに比べバインダの添加量を少なくすることができる。その他の性状も従来グースに比べ改善されている。

⑵　**グースB，C**

グースB，Cは，バインダに特殊な改質剤を添加したバインダーを開発している[2]。開発バインダはプレミックスタイプなので，アスファルトタンクへの貯蔵，ローリーでの直接供給が可能である。TLAに比べ臭気と煙を大幅に低減でき，施工時の温度を180℃程度まで下げることができるのでグースAと同様に，コンクリート床版への適用が可能である。耐流動性も向上しており，動的安定度はグースBは1,286回／㎜，グースCは1,872回／㎜である。その他の性状も従来グースに比べ改善されている。

⑶　**グースD**

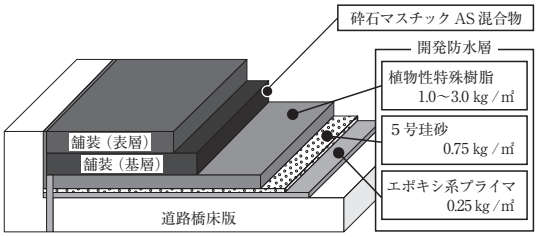
グースDは，インドネシアで産出される天然ロックアスファルトの「アスブトン」をバインダの原料としている[3]。アスブトンはTLAと同等の物理的性状を持ちながら臭気が少ない。また，TLAに比べ埋蔵量が多く，日本への輸送距離も短い等の経済的な利点もある。グースの性状としては，動的安定度が従来グースと同程度の417回／㎜である。それ以外の性状も従来グースと同程度である。

2.2.2　開発した塗膜系床版防水層の特徴

図－2に開発した塗膜系床版防水層（以下，開発防水層）の構成を示す。開発防水層は，熱可塑性の特殊植物性樹脂を原料とした防水材を用いている[4]。本防水材を，

表－1　開発グースの混合物性状

		適用箇所		バインダ原料	臭気レベル	舗設時温度（℃）	施工性	耐流動性	安定性	可撓性
		CON床版	鋼床版				リュエル流動性（秒）	動的安定度（回／㎜）	貫入度（㎜）	曲げ破断ひずみ（10^{-3}）
従来グース		－	○	天然AS（TLA）	約600	約240	3～20	300以上	1～6	8以上
開発グース	グースA	○	○	石油生成物	約400	約220	15	1,033	1.4	8.2
	グースB	○	○	ポリマー改質AS	約150	約185	15	1,286	1.3	7.7
	グースC	○	－	ポリマー改質AS	約300	約180	19	1,872	2.1	13.6
	グースD	－	○	天然AS（アスブトン）	約100	約240	10	417	－	9.5



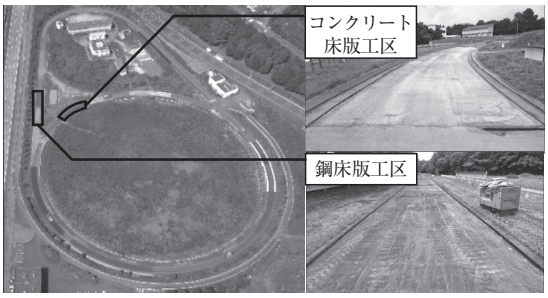
図－２　開発した塗膜系床版防水層の構成

塗布量1.0～3.0kg/㎡と大量に塗布することで，基層舗設時にアスファルト混合物の空隙へ浸透し，高い接着性能および防水性能が得られ，基層には一般的な橋面舗装用基層混合物である砕石マスチックアスファルト混合物（以下，SMA）を適用しながら，従来グースと同等の防水性能が期待できる。また通常のアスファルト混合物の舗設と同じ機械編成で，橋面基層を施工することができる。

３．試験施工

3.1　試験施工の概要

開発した開発グースと開発防水層の施工性および，防水性，耐久性等の確認を目的として，土木研究所舗装走行実験場内の模擬鋼床版および模擬コンクリート床版上に実物大の試験舗装を構築した。**写真－１**に試験舗装を構築した舗装走行実験場と試験工区を示す。構築後に荷重車による促進載荷試験を行い舗装の耐久性評価を行った。**図－３**にコンクリート床版工区，**図－４**に鋼床版工区の試験舗装の平面図と側面図を示す。なお，グースＢは，バインダの成分配合を試験的に変えた４種類のグースＢ①～Ｂ④を舗設した。

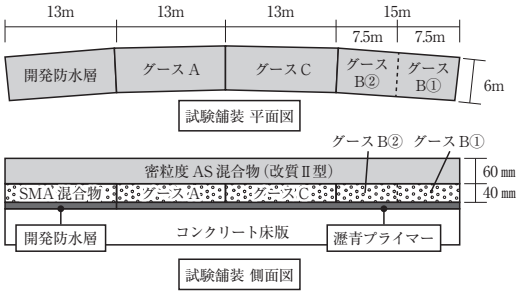


写真－１　舗装走行実験場

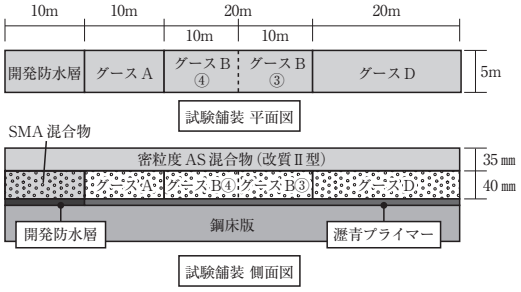
3.2　施工状況

3.2.1　開発グースの施工状況

写真－２に開発グースの施工機械を示す。開発グースの施工は特殊な機械を必要とせず，従来のグースと同じグースクッカー車およびグースフィニッシャで施工が可能である。施工性を確認するためのリュエル流動性試験と臭気の計測を行った。それぞれの測定状況を**写真－３**に示す。



図－３　コンクリート床版工区における試験舗装



図－４　鋼床版工区における試験舗装

a）クッカー車　　b）グースフィニッシャ

写真－２　グース施工機械

a）リュエル流動性試験　　b）臭気測定

写真－３　施工時材料性状確認状況

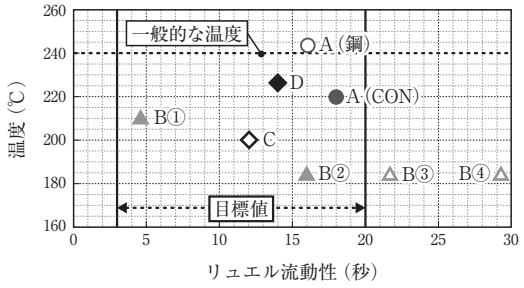
表－２　開発グース施工時の温度と流動性の測定値

グース種類	グースＡ	グースＡ	グースＢ①	グースＢ②	グースＢ③	グースＢ④	グースＣ	グースＤ
適用箇所	CON	鋼	CON	CON	鋼	鋼	CON	鋼
舗設時温度　（℃）	220	244	211	185	185	185	200	227
リュエル流動性　（秒）	18	16	4.7	16	22	29	12	14

表－２に測定したリュエル流動性の値とその時のグースの温度，**図－５**に温度と流動性の関係を示す。

なお，**図－５**中の目標値は舗装施工便覧[5)]に示されている一般的なグースの目標値である。グースＡの鋼床版工区の施工では，舗装時の目標温度の220℃でリュエル流動性を測定したところ粘度が高かったため240℃程度まで温度を上げて施工を行った。なお，コンクリート床版工区の施工時には220℃で良好な流動性が得られ施工性も問題なかった。また，グースＢ③および，Ｂ④については，開発グース中最も低い温度185℃で材料を排出したが，粘度が高くリュエル流動性は目標を下回る結果であった。その他のグースは概ね目標温度にて目標の流動性が確認された。

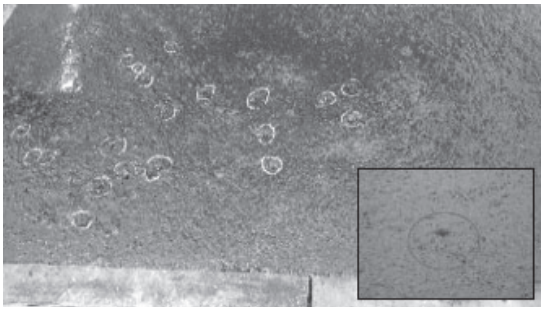
臭気の測定は，材料の排出口，敷ならし面で行なった。その結果，開発グースの臭気レベルは，従来よりも概ね低いことが確認された。しかし，測定値は風向きなどにより値が安定せず，屋外での定量的な評価方法については今後検討する必要がある。



図－５　開発グース施工時の温度と流動性の関係

写真－４に開発グースの施工状況を示す。鋼床版工区においては，概ね良好な施工性と仕上りが確認された。コンクリート床版工区においては，従来のグースの舗設温度より低減し施工を行ったものの，一部において**写真－５**に示す微小なブリスタリングが発生した。これは施工時における床版の含水比が高かったことが要因と考えられ，コンクリート床版への施工時においては，床版の含水比が適用範囲であるかの確認が必要である。

写真－４　開発グース施工状況



写真－５　発生した微小なブリスタリング

3. 2. 2　開発防水層の施工状況

写真－６に開発防水層の施工状況を示す。開発防水層は，プライマー塗布および珪砂散布後に防水材の塗布の順序にて施工される。防水材の塗布方法は，一般的なアスファルト系塗膜防水材と同様に，材料を専用の溶融釜にて高温に溶融しながらレーキによる塗布で行った。なお，防水材の塗布量は3.0kg/㎡とした。防

写真－６　開発防水層施工状況

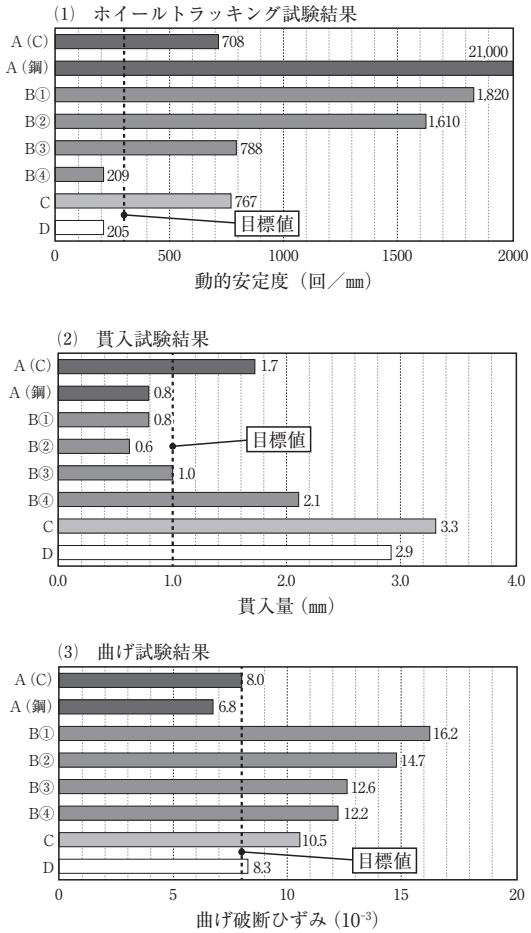
水材は，塗布後30分程度養生することで完全に固化し，固化後は，重機が走行しても損傷はみられなかった。

3.2　開発グースと開発防水層の試験結果

試験施工に用いた開発グースと開発防水層の性状を確認するため，**表－3**に示す混合物試験を実施した。試験に用いた供試体は，施工時に排出された材料を用いて現場で供試体を作製するとともに舗設後の切取りコアを採取して試験に供した。**図－6**に試験結果を示す。なお，**図－6**中の目標値は，舗装施工便覧[5]および床版防水便覧[6]に示されている一般的な材料の目標値である。

表－3　混合物試験

性状	試験	測定値	試験方法
耐流動性（グース）	ホイールトラッキング試験	動的安定度	舗装調査試験法便覧 B003
安定性（グース）	貫入試験	貫入量	舗装調査試験法便覧 C001
可撓性（グース）	曲げ試験	曲げ破断ひずみ	舗装調査試験法便覧 B005
防水性	加圧透水試験	透水係数	舗装調査試験法便覧 B017T



図－6　各種室内試験結果

(1)　ホイールトラッキング試験

鋼床版工区におけるグースAは，施工時に粘度が高くなっていることが確認されたが，動的安定度（以下，DS）についても著しく高い値を示している。グースBは，①～④と配合の違いによりDSも1,800程度から200程度まで異なる結果となった。グースB④とグースDのDSは目標値を下回る結果となったが，その他の開発グースのDSは全て目標値を大きく上回り700以上であった。

(2)　貫入試験

施工時の粘度の高くなっていた鋼床版工区のグースA，グースB①および，グースB②の貫入量は，目標値よりもやや小さい値となっている。その他の開発グースの貫入量は，目標値を満足する結果となっている。

(3)　曲げ試験

鋼床版工区のグースAは，貫入試験結果と同様に曲げ破断ひずみについても，目標値よりやや値が小さく，その他の開発グースの曲げ破断ひずみは，目標値を満足する結果となっている。

(4)　加圧透水試験

現場より採取した切取りコアを用いて加圧透水試験を実施した結果，測定した全ての材料について不透水という結果が得られた。

(5)　引張接着強度試験

引張接着強度試験については，コンクリート床版工区のものは切取りコア，鋼床版工区のものは現場採取試料より作成した供試体を用いて試験を行った。-10℃におけるグースB④，グースCおよび，グースDの試験結果は目標値を下回っていたが，その他の全ての引張接着強度は目標値を上回る値であった。

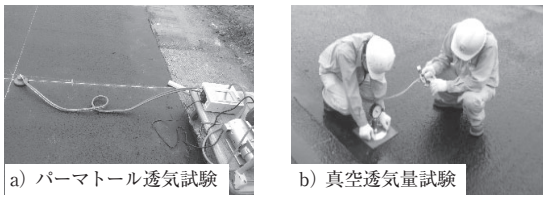
3.3　舗設後の現場試験結果

3.3.1 グースの透気試験

開発グース舗設後に，舗装体の遮水性を確認するための現場透気試験を行った。グースB①，グースB②についてはパーマトール透気試験にて透気係数を測定し，その他の開発グースは真空透気試験にて透気量を測定した。**写真－7**に透気試験状況，**表－4**に透気試験結果を示す。表より，いずれの舗装体も透気係数，透気量は十分に小さく，遮水性の高い舗装であることが確認された。

表－4　透気試験結果

グース種類	グースA	グースA	グースB①	グースB②	グースB③	グースB④	グースC	グースD	目標値
施工箇所	CON	鋼	CON	鋼	CON	鋼	CON	鋼	
透気係数　（㎡）	－	－	0.00	0.00	－	－	－	－	0.01
透気量（MPa／分）	0.002	0.002	－	－	0.002	0.002	0.000	0.000	0.003


a）パーマトール透気試験　b）真空透気量試験

写真－7　透気試験状況

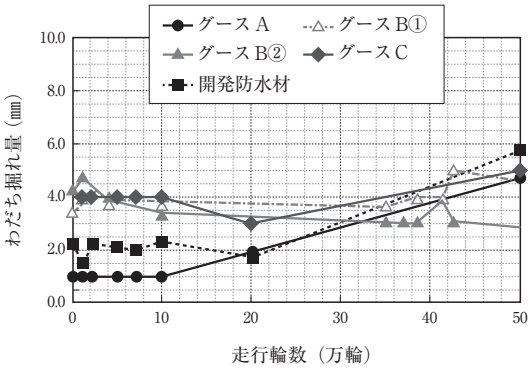
写真－8　荷重車による促進載荷状況

3.3.2　促進載荷試験

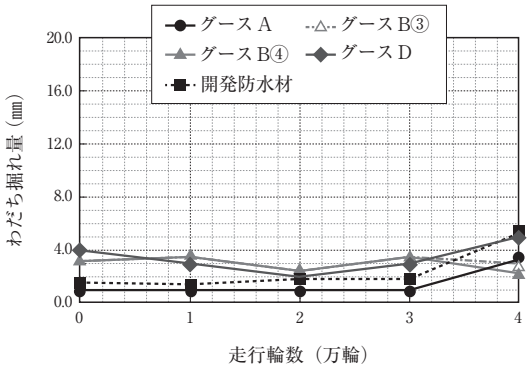
表層舗設後に，**写真－8**に示す荷重車を用いた耐久性試験を行った。測定項目はわだち掘れ量と，目視によるひび割れ率とし，所定の走行輪数ごとに測定を行った。なお，走行輪数は輪荷重49kN換算輪数としている。わだち掘れ量の測定は**写真－9**に示すマルチロードプロファイラを用いて行った。

図－7にコンクリート床版工区における走行輪数とわだち掘れ量の関係，**図－8**に鋼床版工区における走行輪数とわだち掘れ量の関係を示す。鋼床版は4万輪の結果であるが全ての材料で4㎜以下，コンクリート床板工区は50万輪までの結果は，全ての工区において概ね6㎜以下程度であり，夏季の走行も行ったがアスファルト混合物の流動はほとんど発生していなかった。また，ひび割れ率についても，全ての工区において0%であった。

写真－9　わだち掘れ量測定状況



図－7　走行輪数とわだち掘れ量の関係（CON床版工区）



図－8　走行輪数とわだち掘れ量の関係（鋼床版工区）

4．おわりに

開発した橋面舗装材料を用いた試験施工により，下記の結果が得られた。

⑴　**施工性について**

○従来のグースと同じ施工機械にて開発グースの施工を行い，良好な施工性と仕上がりが確認された。

○開発グースをコンクリート床版に適用する場合には，ブリスタリングの発生を抑制するため，床版の含水比を確認する必要がある。

○開発防水材は，一般的な塗膜系防水材と同等の施工性が確認された。

⑵　**材料の性状について**

○室内試験の結果，各材料の性状は，一般的なグースや床版防水層の目標値を概ね満足する結果が得られた。

○開発グースの耐流動性については，一部の混合物を除き，従来グースの目標値に対して２倍以上のDSが得られ，耐流動性の向上が確認された。

○舗設された開発グースの遮水性を現場にて直接測定した結果，高い遮水性が確認された。

⑶　**耐久性について**

○実際の供用を模擬した荷重車による促進載荷試験の結果，輪荷重49kN換算で数鋼床版は４万輪，コンクリート床板工区は50万輪までの結果，夏季の走行も行ったが全ての材料で４㎜と６㎜以下程度であり，ひび割れも発生していなかった。促進載荷試験はさらに継続していく予定であるが，上記の走行輪数までは，良好な耐久性が確認された。

以上の結果より，今回開発した各橋面舗装材料は，はじめに述べた従来の橋面舗装材料の問題点である耐流動性やグースの煙や臭気，コンクリート床版への適用に関して，優れた性能が期待できる。

各材料の一部の性状については，目標値を下回るものもあったが，バインダ成分の配合や施工時の混合時間や温度等を変えることにより改善できるものと考えている。

今後は，更に荷重車による促進載荷試験を継続し，耐久性の評価を行うとともに，得られた知見を踏まえ利用マニュアルを作成する等実用化に向けた検討を進める所存である。

―― 参考文献 ――

1）菊池玲児，中村好和，野地実：鋼床版用流動化アスファルト混合物の新規開発に関する一検討，第31回日本道道路会議，2015.10

2）立花徳啓，徳光克也，梶谷明宏，寺田剛，川上篤史，藪雅行：未利用アスファルト材料を用いたグースアスファルト混合物の開発，第32回日本道道路会議，2017.11

3）平川一成，湯川誠二郎，寺田剛，川上篤史：天然アスファルト「AsButon」を用いたグースアスファルト混合物の施工性，土木学会第73回年次学術講演会論文集，2018.8

4）高橋昌史，平戸利明，村山雅人，寺田剛，川上篤史：植物性樹脂を用いたグースアスファルト代替工法の開発，土木学会第73回年次学術講演会論文集，2018.8

5）日本道路協会：舗装施工便覧，丸善，2006

6）日本道路協会：道路橋床版防水便覧，丸善，2007

表層舗設直後のアスファルト混合物層間のせん断強度の計測事例

(Shear Strength between Asphalt Concrete Layers Immediately after Construction of Surface Course)

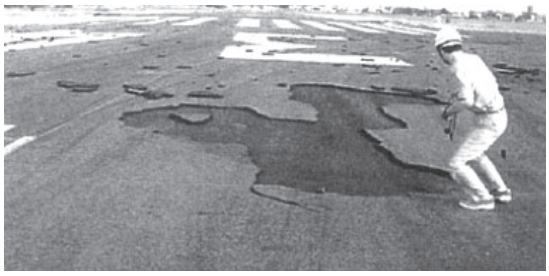
坪川将丈*・河村直哉**・伊豆　太***

空港におけるアスファルト舗装の切削打換え工事は，深夜から早朝に実施され，工事終了後の早朝から供用されることがほとんどである。仮に，舗設直後において表層－基層間の層間付着強度が十分に発現していない場合，舗設直後に航空機が走行することにより，層間の付着が失われる可能性がある。しかしながら，舗設直後の層間付着強度が計測された事例はない。

そこで，舗設直後の層間付着強度を確認することを目的とし，室内においてアスファルト乳剤の種類や供試体養生温度を変化させて作製したアスファルト混合物供試体に対し，せん断強度を計測した。

1．はじめに

空港の滑走路のアスファルト舗装では，層間剥離（アスファルト混合物の表層－基層間などの層間が接着していない状態）が確認される場合がある。**写真－1**は2000年7月2日に名古屋空港の滑走路において航空機が離陸走行を開始した直後に，おおむね幅4㎜，長さ8㎜の範囲の表層（厚さ5㎝）が破損した事例である。調査の結果[1]，この破損の原因はブリスタリングと考えられているが，ブリスタリングの原因である水蒸気圧[2]のみでアスファルト混合物層間の付着が切れるとは考えにくく，ブリスタリングに至る前に多数の層間剥離あるいは層間付着の低下が発生していたものと考えられる。



写真－1　名古屋空港における大規模破損

そのため，空港アスファルト舗装の施工に使用するタックコートとしては，付着性が高いPKM-T（日本アスファルト乳剤協会規格JEAAS-2011）を使用することが多い。層間剥離は経年劣化により発生する場合もあるが，切削打換え工事の施工直後に確認される場合もある。空港における切削打換え工事は，深夜から早朝に実施され，工事終了後の早朝から供用されることがほとんどであるが，仮に，舗設直後において表層－基層間の層間付着強度が十分に発現していない場合，舗設直後に航空機が走行することにより，層間の付着が失われる可能性がある。しかしながら，舗設直後の層間付着強度が計測された事例はない。

そこで，舗設直後（おおむね数時間後）の層間付着強度を確認することを目的とし，室内においてアスファルト乳剤の種類や供試体養生温度を変化させて作製したアスファルト混合物供試体に対し，せん断強度を計測したので報告する。

2．供試体作製方法および室内試験方法

層間付着強度の試験方法としては，引張試験やせん断試験が用いられることが多い。しかしながら，引張試験を実施するためには，治具をアスファルト混合物

*つぼかわ　ゆきとも　国土交通省　国土技術政策総合研究所　空港研究部空港施設研究室
**かわむら　なおや　国土交通省　国土技術政策総合研究所　空港研究部空港施設研究室
***いず　ふとし　（国研）海上・港湾・航空技術研究所　港湾空港技術研究所

に接着させるのに時間を要することから，舗設直後に試験を実施することは困難である。そのため，せん断試験により評価することとした。

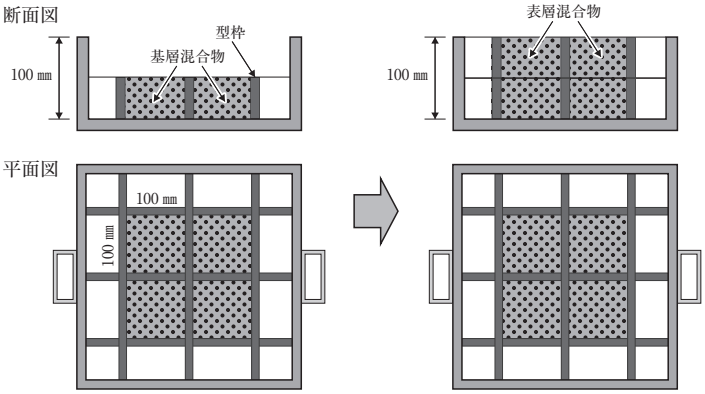
図－１に，基層と表層をアスファルト乳剤で接着させた二層供試体作製方法の概要を示す。

まず，基層ブロック（横幅100㎜，縦幅100㎜，高さ50㎜）を作製する。横幅300㎜，縦幅300㎜，高さ100㎜のホイールトラッキング試験用供試体作製用型枠（以下，WT型枠）の底部に，横幅100㎜，縦幅100㎜，高さ50㎜の格子が４つある型枠（以下，格子型枠）を置く。次に，格子型枠内に基層混合物を投入し，タンパとバイブレータで仮転圧を行った後，ローラコンパクタで締め固める。その後，室温まで冷却させた後，格子型枠から基層ブロックを取り出す。

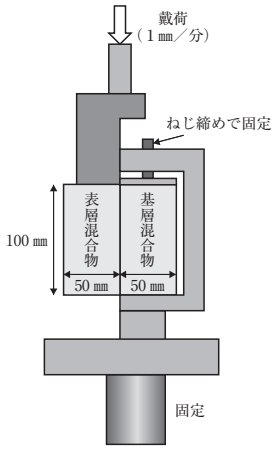
次に，基層ブロックの上に表層ブロック（横幅100㎜，縦幅100㎜，高さ50㎜）を作製する。WT型枠の底部に格子型枠（高さ50㎜）および作製済の基層ブロックを設置した後，その上に表層ブロック用の格子型枠（高さ50㎜）を置き，基層ブロック表面にアスファルト乳剤を塗布し，10～30分の養生を行う。その後，格子型枠内に表層混合物を投入し，タンパとバイブレータで仮転圧を行った後，ローラコンパクタで締め固めた。この手順により，**写真－２**のような二層供試体（横幅100㎜，縦幅100㎜，高さ100㎜）を作製した。

せん断試験は，**図－２**のように供試体の基層ブロック側を固定し，載荷速度1㎜／分により表層ブロック側を押すことにより実施した。

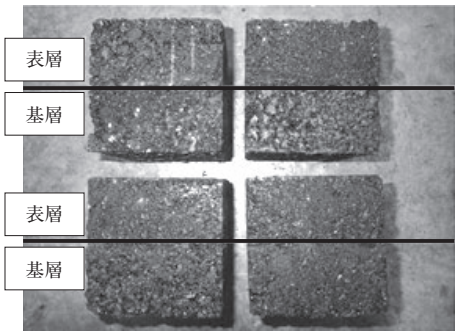
表－１に供試体作製条件を示す。例えば「供試体養生温度23℃」の場合は，作製した基層ブロックの温度が低下するまで23℃で養生した後，23℃の室内でアスファルト乳剤を塗布し，10～30分養生後，基層ブロック上に表層ブロックを作製した。なお，せん断試験は供試体養生温度によらず23℃で実施した。同一条件での供試体数は４個とした。アスファルトにはストレートアスファルトを使用し，混合物の骨材最大粒径は，基層（粗粒度），表層（密粒度）ともに20㎜とした。骨材粒度範囲の他，マーシャル安定度や締固め度等についても，空港土木工事共通仕様書の規定を満足することを確認している。アスファルト乳剤にはPK-4，PKM-T，PKM-T＋分解促進剤（以下，PKM-T分解促進）を使用した。



図－１　供試体作製方法



図－２　載荷方法



写真－２　作製した二層供試体

表－１　供試体作製条件

	供試体養生温度23℃	供試体養生温度５℃
基層舗設後の養生	23℃の室内	５℃の室内
基層表面への乳剤の塗布	60℃の乳剤を23℃の室内で0.4L/㎡塗布	60℃の乳剤を５℃の室内で0.4L/㎡塗布
乳剤塗布後の養生	23℃の室内	５℃の室内
	30分（PK-4，PKM-T），10分（PKM-T分解促進）	
表層舗設後の養生	23℃の室内	
表層舗設からせん断試験実施までの時間	３時間，６時間，24時間，72時間	

3．室内試験結果

図－3に，表層舗設から3時間後のせん断強度を示す。供試体養生温度が5℃の場合よりも23℃の方がせん断強度はやや高い。また，供試体養生温度によらず，PK-4を用いた場合よりもPKM-TおよびPKM-T分解促進を用いた場合の方が，せん断強度はやや高い。**図－4**に，表層舗設から6時間後のせん断強度を示すが，表層舗設から3時間後の結果とほぼ同様と言える。

図－5に，供試体養生温度5℃と23℃のせん断強度と表層舗設後の時間の関係を示す。ばらつきがあるものの，表層舗設からの時間が経過してもせん断強度に大きな変化はないと考えられる。また，全体を通してPKM-TおよびPKM-T分解促進を用いた方がPK-4を用いた場合よりもせん断強度がやや大きい。

以上のことから，せん断強度は，舗設直後の場合と，舗設から時間が経過した場合とで大差はないと考えられる。

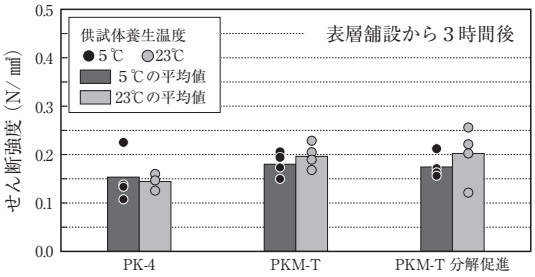
なお，**表－2**に，それぞれの試験条件（同一条件での供試体数は4個）において，接着界面で破壊した供試体個数を示す。PK-4を用いた場合は供試体作製条件によらず，全ての供試体が接着界面で破壊したものの，PKM-TとPKM-T分解促進の場合は，PK-4の場合よりも接着界面で破壊した供試体が少ないことがわかる。PK-4とPKM-Tの破壊形態の違いについては，過去に実施した引張試験[3]においても同様の傾向が確認されている。

―― 参考文献 ――

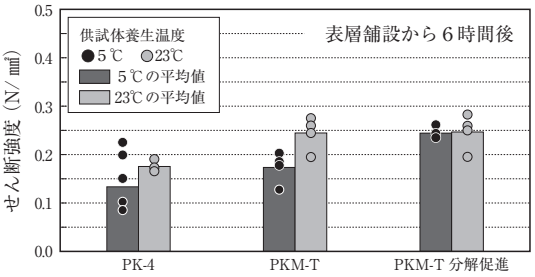
1）久保宏，八谷好高，長田雅人，平尾利文，浜昌志：最近の空港アスファルト舗装の損傷と改良工法について，土木学会舗装工学論文集，第9巻，2004，p.35.

2）安倍隆二，岳本秀人，久保宏，平尾利文：空港舗装のブリスタリング現象に関する一考察，土木学会舗装工学論文集，第10巻，2005，p.119.

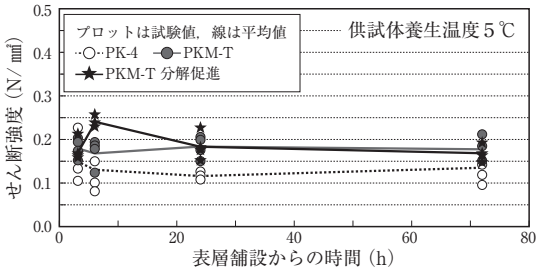
3）小林雄二，水上純一，坪川将丈，江崎徹：空港アスファルト舗装の層間付着に関する実験的検討，国土技術政策総合研究所資料，第469号，2008.

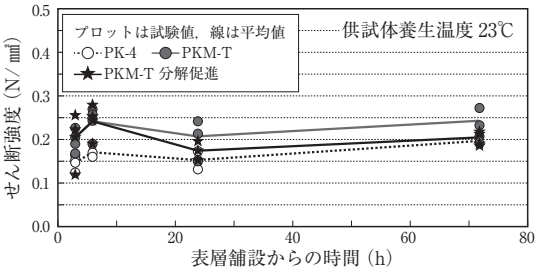


図－3　表層舗設から3時間後のせん断強度



図－4　表層舗設から6時間後のせん断強度





図－5　せん断強度と表層舗設からの時間の関係

表－2　接着界面で破壊した供試体数（同一条件での供試体数は4個）

供試体養生温度	表層舗設からの時間	PK-4	PKM-T	PKM-T 分解促進	供試体養生温度	表層舗設からの時間	PK-4	PKM-T	PKM-T 分解促進
5℃	3時間	4	2	3	23℃	3時間	4	0	1
	6時間	4	4	2		6時間	4	1	0
	24時間	4	0	1		24時間	4	0	0
	72時間	4	4	0		72時間	4	0	2

アスファルト舗装のコールドジョイント処理材の評価方法に関する検討

(Study on Evaluation Method of Material Applied on the Cold Joint of Asphalt Pavement)

馬 場 弘 毅*・内 海 正 徳**・竹 林 宏 樹***

アスファルト舗装のコールドジョイントから浸入した水は，アスファルト混合物の剥離や各層間の付着切れおよび路盤の湿潤化を招き，舗装の耐久性を低下させる原因となる。そのため，様々な継目処理材を用いてコールドジョイントの止水処理がなされているが，その効果や継目処理材に求められている性能は明らかになっていない。そこで，交通荷重によってコールドジョイントに発生するせん断応力に着目し，走行車両を模擬した負荷試験を行い，継目処理材の接着性と止水性を評価した。

その結果，せん断仕事量が大きく，高い伸び性能を有している成形目地材は，コールドジョイントに発生するせん断応力に追従し，長時間にわたって接着性と止水性を維持できる材料であることを検証した。なお，施工継目の垂直面に塗布するアスファルト乳剤や，開いた施工目地に注入するクラックシール材は，施工直後の止水性が徐々に低下していく傾向が認められた。

1．はじめに

アスファルト舗装のコールドジョイント（以下，施工継目）は，交通荷重によって生じるせん断応力や低温期における収縮ひずみの集中により，供用とともに徐々に隙間が広がる。

この隙間から浸入した水は，アスファルト混合物（以下，混合物）の剥離や各層間の付着切れ，および路盤の湿潤化を招き，舗装の耐久性を低下させる原因となる[1)]。施工継目の止水対策として，混合物の打継ぎ時は，アスファルト乳剤を塗布したり，成形目地材を貼り付けるなどの処置がなされている。また，供用後に施工継目が開いた場合には，クラックシール材を注入するなどの対策が講じられている。このように様々な材料を用いて施工継目は処理されているものの，その効果や継目処理材に求められる性能は明確になっていない。

そこで筆者らは，交通荷重により施工継目に発生するせん断応力に着目し，走行車両を模擬した負荷試験を行い，市販されている継目処理材の接着性および止水性を評価した。

本報告では，走行車両を模擬した負荷試験方法および継目処理材の評価結果について報告する。

2．施工継目からの水の浸入を抑制する方法

舗設時における施工継目の止水対策には，継目の垂直面にタックコートであるアスファルト乳剤を塗布し，既設舗装と新しい舗装の接着性を高める方法がある。また，継目部に生じるひずみやたわみを吸収することを目的にアスファルト系の成形目地材を貼付けることもある。このアスファルト系の成形目地材は，新しく舗設する混合物の熱で溶融して既設舗装と密着し，厚みがあることからアスファルト乳剤よりも止水性が期待できる。

一方，供用後に施工目地が開いた場合は，加熱アスファルト系やアスファルトエマルジョン系のクラックシール材を注入し，舗装内への雨水の浸入を抑制するなどの対策が講じられている。それぞれの施工状況を**写真－1～3**に示す。

*ばんば　こうき　ニチレキ株式会社　技術研究所
**うちうみ　まさのり　ニチレキ株式会社　北海道支店
***たけばやし　ひろき　株式会社高速道路総合技術研究所　道路研究部　舗装研究室

写真－１　アスファルト乳剤の塗布

写真－２　成形目地材の貼付け

写真－３　クラックシール材の注入

３．評価した継目処理材

本検討で評価した継目処理材は，市販されている材料の中から，タイプの異なる以下の４材料を検討対象とした。

①アスファルト乳剤

②成形目地材

③アスファルト系加熱注入材

④アスファルト系常温注入材

アスファルト乳剤は，接着力が高く，高速道路の舗装修繕工事で実績の多い，タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤[2)]（以下，PKM-T）で評価した。

成形目地材は，アスファルトにゴムやポリマーを添加しテープ状に成型したものである。本検討では，舗装設計施工指針[3)]の加熱施工式注入目地に適合し，形状が厚さ５㎜，幅40㎜のものを評価した。

クラックシール材は，ポリマー改質アスファルト系の加熱注入材（以下，As系加熱注入材）と，ゴム入りアスファルトエマルジョン系の常温注入材（以下，As系常温注入材）で評価した。

As系加熱注入材，As系常温注入材の性状を**表－１～２**に示す。

表－１　As系加熱注入材の性状

試験項目		試験値
針入度（25℃，円すい針）	1/10㎜	22
軟化点℃	℃	116.5
粘度（200℃）	mPa･s	867
曲げ仕事量（-10℃）	kPa	2,423
曲げスティフネス（-10℃）	MPa	24

表－２　As系常温注入材の性状

試験項目		試験値
針入度（25℃，円すい針）	1/10㎜	39
粘度	Pa･s	1.5
揮発分（70℃：24時間）	%	16.6
流れ（60℃：５時間）	㎜	0
引張量（-10℃）	㎜	4.4

４．走行車両の影響を模擬した負荷試験方法

4.1　供試体作製方法

4.1.1　アスファルト混合物の供試体作製

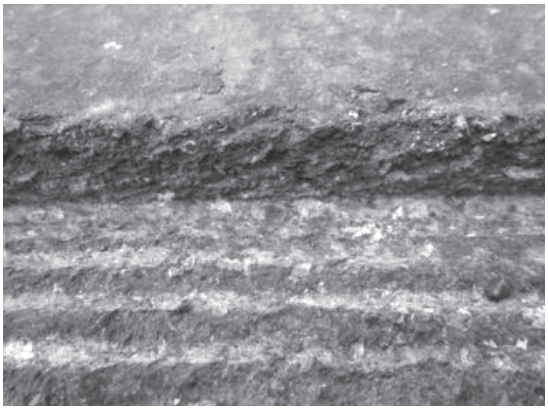
混合物は，骨材粒度を表層用混合物タイプB[4)]の上限粒度とし，バインダはポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた。

ホイールトラッキング試験（以下，WT試験）用供試体（300×300×40㎜）は，「舗装調査・試験法便覧B003ホイールトラッキング試験方法」に準じて締固め度が100±１％となるように作製した。

4.1.2　施工継目の成形方法

⑴　打ち継がれる垂直面の粗さ

一般的に，施工継目の打ち継がれる垂直面は，切削機によって削られるため**写真－４**に示すように凹凸に仕上がる。



写真－４　切削機で削られた縦施工継目の表面

そこで，構内に舗設した密粒度混合物を切削し，施工継目の垂直面をパテで型をとり，表面の粗さをレーザー・テクスチャ・スキャナ（以下，LTS）[5)]でテクスチャを測定した。その結果，切削された施工継目のMPD（Mean Profile Depth）は約１㎜であった。

⑵　**定置式切削機による供試体の切削**

本検討では，実際の現場における施工継目を再現するため，打ち継がれる供試体の垂直面を切削機により表面のきめ深さが１㎜になるように成形した。なお，切削機は，WT試験用の供試体を切削する専用の切削機（以下，定置式切削機）を使用した。

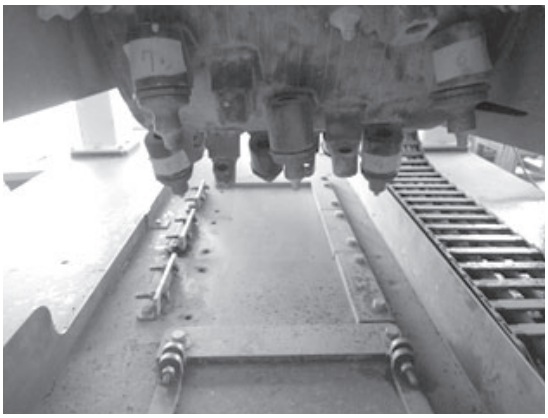
定置式切削機は，ビットの本数および切削速度を調整することで，WT試験用の供試体表面を任意のきめ深さに切削できる。また，切削ドラムには端部切削用のビットが取付けられるため，切削された施工継目を成形することができる。

定置式切削機の外観を**写真－５**，切削ドラムおよびビットを**写真－６**に，仕様を**表－３**に示す。

⑶　**定置式切削機で切削した供試体のきめ深さ**

定置式切削機の切削速度を変えた予備試験により，きめ深さが１㎜になる切削速度を90㎝/㎛に決定した。切削速度90㎝/㎛で切削した供試体を**写真－７**に示す。

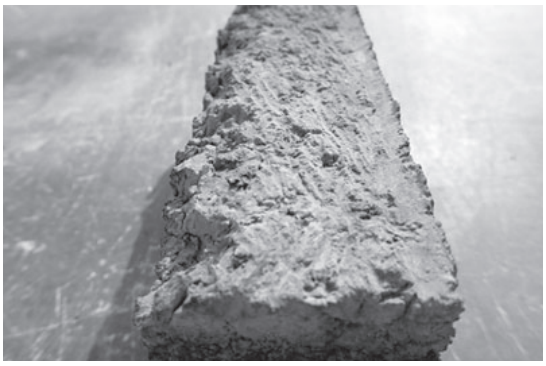
写真－５　定置式切削機の外観



写真－６　切削ドラムとビット

表－３　定置式切削機の仕様

形式	NTC350
切削幅	350㎜
切削深さ	0～60㎜
切削長さ	0～1200㎜
切削速度	0.2～1.0m/㎛
ドラム回転数	180･340rpm
ビット形状	コニカルビット
平面切削ビット数	大25本，小25本
ビットピッチ	12㎜，６㎜
端部切削ビット数	大４×両端
ドラム径	φ406㎜



写真－７　切削後の供試体

4.1.3　継目処理材の施工条件

評価対象とした継目処理材は，施工時に塗布または貼付するものと，供用後に注入する材料に分類される。供試体は，現場での施工を再現する方法で作製した。評価した材料の施工条件を**表－４**に示す。

表－４　継目処理材の施工条件

材料分類	施工方法	塗布量・寸法	プライマー
PKM-T	施工時に塗布	0.4 ℓ/㎡	なし
成形目地材	施工時に貼付	厚さ５㎜ 幅40㎜	0.2 ℓ/㎡
As系加熱注入材	供用後に注入	－	0.3 ℓ/㎡
As系常温注入材	供用後に注入	－	なし

4.1.4　施工時に継目処理材を設置する供試体の作製方法

施工時に継目処理材を設置する供試体の作製方法を以下に示す。

⑴　**継目処理材の塗布または貼付方法**

○定置式切削機でWT試験用供試体の半面を切削する。

○切削した供試体の側面に付着した余剰なダストをエアブローによって除去する。

○プライマーが必要な成形目地材は，事前に所定量のプライマーを刷毛で塗布する。

○継目処理材を塗布または貼付する。

⑵　**混合物の打継ぎ**

○継目処理材を塗布または貼付した面に，新規混合物を舗設する。

○新規混合物の締固め度は100 ± 1 %になるよう，あらかじめ計量しておいた量を型枠に入れ，転圧する。

供試体の作製手順を**図－1**に，作製状況を**写真－8**に示す。

4.1.5　供用後に継目処理材を設置する供試体の作製方法

供用後に継目処理材を設置する供試体の作製手順を以下に示す。

○定置式切削機でWT試験用供試体の半面を切削する。

○別のWT試験用供試体の中央をコンクリートカッターで切断する。

○切断した供試体は，型枠に接していた面に付着している剥離材を市販の中性洗剤で洗浄する。

○切削した混合物の切削面と，切断した混合物の型枠に接していた面を向かい合わせて5㎜の隙間を設けた状態で設置し，その隙間に継目処理材を注入する。

○プライマーが必要なアスファルト系加熱注入材は，事前に所定量のプライマーを刷毛で塗布し，十分に乾燥させた後に注入する。

供試体の作製手順を**図－2**に，作製状況を**写真－9**に示す。

5．走行車両の影響を模擬した負荷試験

施工継目に対して，目地の開き作用と水が影響するよう，水浸状態で供試体の半面にトラバース負荷を与える半断面ホイールトラッキング負荷（以下，半断面WT負荷）試験を実施した。

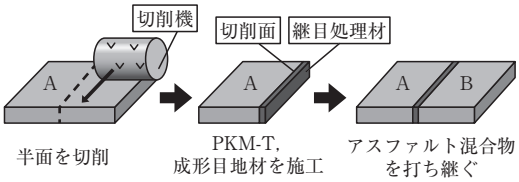
5.1　半断面WT負荷試験方法

⑴**供試体の設置方法**

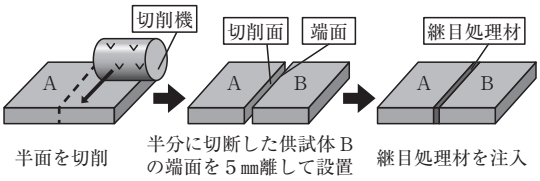
供試体の設置方法を以下に示す。

○打ち継いだ混合物の下面に厚さ15㎜，硬度30のゴム板を敷く。

○打ち継がれた混合物の下面に厚さ15㎜のアルミ板を敷く。



図－1　施工時に設置する供試体の作製手順



図－2　供用後に設置する供試体の作製手順

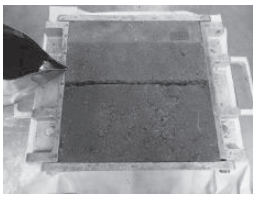
アスファルト乳剤の塗布

成形目地材の貼付け

完成した供試体

写真－8　供試体の作製状況

プライマーの塗布



注入材の注入

完成した供試体

写真－9　供試体の作製状況

○打ち継がれた混合物をアルミ板で２箇所固定し，供試体を拘束する。

○施工継目側の固定用アルミ板は，**写真－10**に示すように，施工継目から５㎜離れた位置に設置する。

○側枠は，**写真－11**に示すように供試体から５㎜離すことで，打ち継いだ混合物は拘束しない。

供試体の模式図を**図－３**に示す。

⑵　**負荷条件**

半断面WT負荷試験の条件を**表－５**，試験状況を**写真－12**に示す。

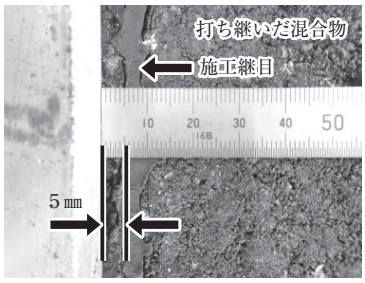
5.2　施工継目の破断時間

半断面WT負荷試験中の供試体をビデオカメラで撮影し，その映像から施工継目が破断した時間を判定した。施工継目が破断した時間を**図－４**に示す。

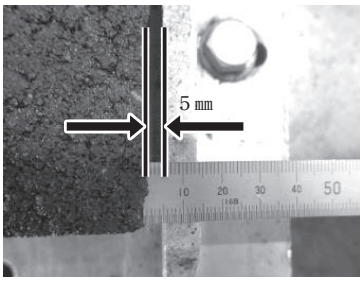
○PKM-Tと成形目地材は，180分の負荷でも破断しなかった。

○PKM-Tは，切削面と打ち継いだ混合物を強固に接着し，一体化していた。

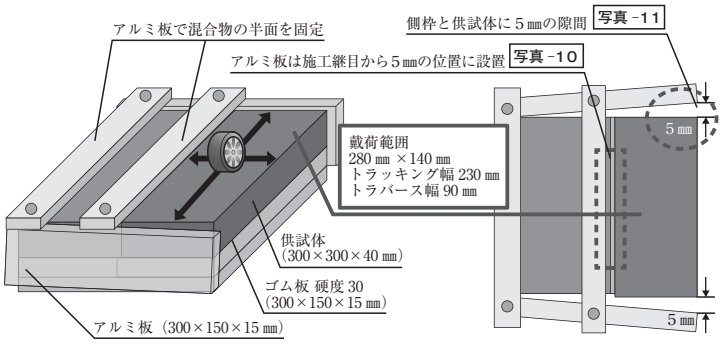
○成形目地材は，切削面および打ち継いだ混合物ともによく接着していた。成型目地材は，柔軟性が高く，施工継目に発生するたわみに追従すること



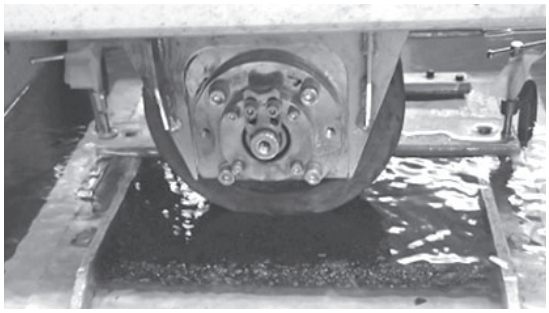
写真－10　アルミ板と施工継目の位置



写真－11　供試体と側枠の位置



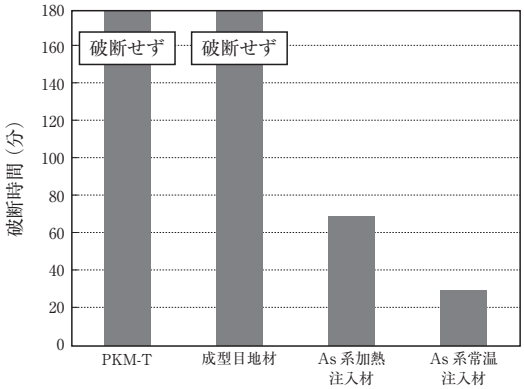
図－３　半断面WT負荷の模式図



写真－12　半断面WT負荷試験の状況

表－５　半断面WT負荷試験の条件

項目		内容
負荷温度		30℃
水位		供試体全没
養生時間	気中養生	５時間以上
	水中養生	１時間
負荷時間		20分，180分
ゴム板硬度		30°
ゴム板厚		15㎜
試験荷重		686N
タイヤ種類		ソリッドタイヤ
トラッキング	速度	42回／min
	幅	230㎜
トラバース	速度	100㎜/min
	幅	90㎜



図－４　半断面WT負荷試験による破断時間

ができたため，破断しなかったと想定される。

○As系加熱注入材は70分で破断した。As系加熱注入材は，打ち継いだ側の混合物が破壊していた。これは，プライマーに含まれている有機溶剤が混合物を溶解し，半断面WT負荷により発生した応力に耐えられなかったと推測される。

○As系常温注入材の破断時間は30分であった。破壊形態は，材料の凝集破壊および継目処理材と混合物の界面での破断であった。As系常温注入材は，目地の開き作用に対する材料の強度と接着性の不足が原因と考えられる。

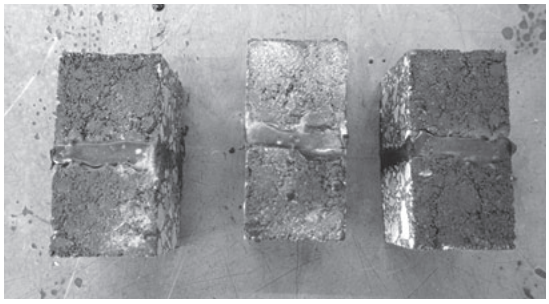
6．継目処理材の接着性および止水性

6.1　接着部せん断試験

半断面WT負荷試験の結果，PKM-Tと成形目地材の破断時間は180分以上，As系加熱注入材とAs系常温注入材の破壊時間は20分以上であることから，半断面WT負荷試験の試験時間が0分（負荷なし），20分，180分時点での接着性を評価した。

⑴　供試体の作製方法

半断面WT負荷試験の試験時間が0分（負荷なし），20分，180分の供試体から，コンクリートカッターを用いて施工継目を中心に接着部せん断試験用の供試体（40×40×80㎜）を3個切り出した。切出した供試体を**写真－13**に示す。



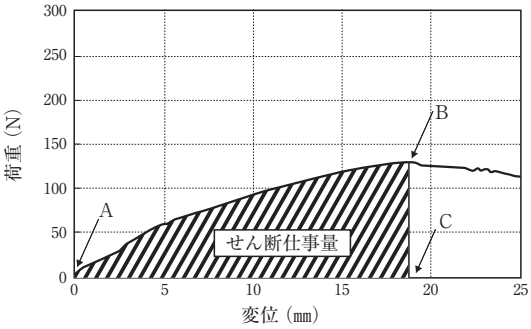
写真－13　切出した接着部せん断試験用の供試体

⑵　評価方法

接着部せん断試験による評価は，「道路橋床版防水便覧　せん断試験」[6]に準じて実施した。試験条件および評価項目を**表－6**に示す。また，**図－5**に示すとおり，変位－荷重曲線において，最大荷重までの面積（A，B，Cで囲まれた面積）をせん断仕事量とし，（N･㎜）として評価した。

表－6　試験条件および評価項目

項目	内容
試験温度	23℃
試験速度	1 ㎜／分
評価項目	せん断接着強度（N/㎟）
	せん断変位（㎜）
	せん断仕事量（N･㎜）



図－5　せん断仕事量の算出方法

6.2　加圧透水試験

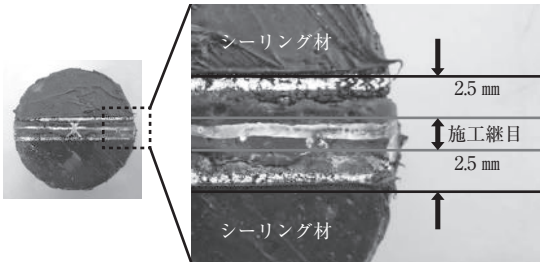
接着部せん断試験と同様に，半断面WT負荷試験の試験時間が0分（負荷なし），20分，180分時点での透水性を評価した。

⑴　供試体の作製方法

半断面WT負荷試験の試験時間が0分（負荷なし），20分，180分の供試体から，施工継目を中心に加圧透水試験用の供試体（φ100㎜）を2個切り出した。切り出した供試体は，上面の施工継目から両端2.5㎜までシーリング材でコーティングし，混合物の空隙からの透水を防止した。シーリングの位置を**写真－14**に示す。

⑵　評価方法

加圧透水試験よる評価方法は，「舗装調査・試験法便覧B017アスファルト混合物の加圧透水試験方法」[7]に準拠した。試験条件および評価項目を**表－7**に示す。



写真－14　シーリングの位置

表－７　試験条件および評価項目

項目	内容
圧力と加圧時間	供試体上面から150kPaで24時間加圧し，透水がない場合はさらに500kPaで24時間加圧する
測定項目	10分間の透水量（㎤）
評価項目	透水係数（cm/s）

７．評価結果

7.1　接着部せん断試験の結果

⑴　負荷時間とせん断強度の関係

半断面ＷＴ負荷試験による負荷時間とせん断強度の関係の結果を**図－６**に示す。なお，施工継目が破断した時間のせん断強度を０Ｎ／㎟にプロットした。

○すべての材料において，負荷時間の経過とともにせん断強度が低下する傾向にあった。

○せん断強度は，いずれの負荷時間においてもPKM-Tが最も高く，成形目地材，As系加熱注入材，As系常温注入材に大きな差はなかった。

⑵　負荷時間とせん断強度変位の関係

半断面ＷＴ負荷による負荷時間とせん断変位の関係の結果を**図－７**に示す。なお，施工継目が破断した時間のせん断変位を０㎜にプロットした。

○負荷時間180分で破断しなかったPKM-Tと成形目地材は，負荷時間が経過してもせん断変位に変化はなかった。

○負荷時間180分以下で破断したAs系加熱注入材とAs系常温注入材は，負荷時間とせん断変位に明確な傾向は見られなかった。

○せん断変位は，いずれの負荷時間においても，成形目地材が最も大きかった。

⑶　負荷時間とせん断仕事量の関係

半断面ＷＴ負荷による負荷時間とせん断仕事量の関係の結果を**図－８**に示す。なお，施工継目が破断した時間のせん断仕事量を０Ｎ･㎜にプロットした。

○すべての材料において，負荷時間の経過とともにせん断仕事量が低下する傾向にあった。

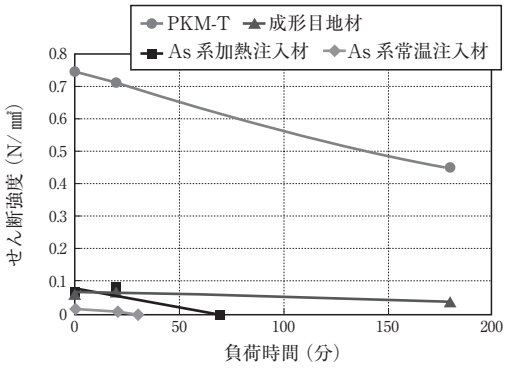
○負荷時間180分で破断しなかったPKM-Tと成形目地材は，As系常温注入材およびAs系加熱注入材と比較して，せん断仕事量が大きい傾向が見られた。

○せん断仕事量が大きい材料は，施工継目の開き作用に対する抵抗性が高いといえる。

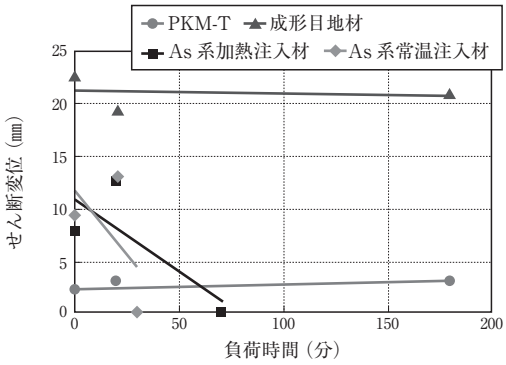
⑷　試験後の供試体破断面

最大強度の発現時における破壊形態を**表－８**に示す。

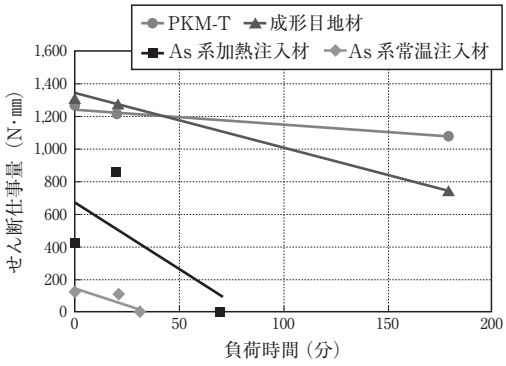
○PKM-Tの破断面は，打ち継いだ混合物の凝集破



図－６　半断面ＷＴ負荷時間とせん断強度の関係



図－７　半断面水浸ＷＴ負荷時間とせん断変位の関係



図－８　半断面水浸ＷＴ負荷時間とせん断仕事量の関係

表－８　最大強度発生時における破壊箇所

	PKM-T	成形目地材	As系加熱注入材	As系常温注入材
負荷なし	打ち継いだ混合物の凝集破壊	破壊せず	打ち継いだ混合物と継目処理材の界面破壊	
負荷時間20分				
負荷時間180分				

壊であり，切削面と打ち継いだ混合物は強固に接着し，一体化していた。

○成形目地材は，混合物との界面剥離や材料に破壊は見られず，高い接着性と伸び性能が確認できた。

○As系加熱注入材およびAs系常温注入材は，打ち継いだ混合物と継目処理材との界面破壊であった。

7.2　加圧透水試験の結果

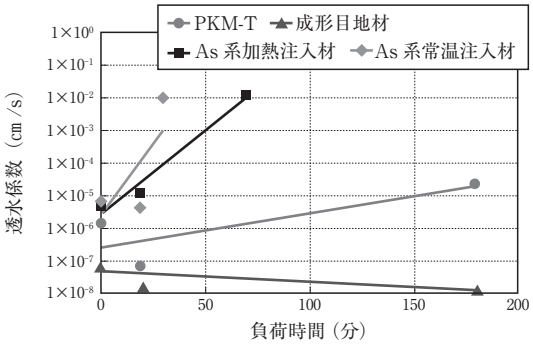
半断面WT負荷時間による負荷時間と透水係数の関係を**図－9**に示す。なお，施工継目が破断した時間の透水係数を1×10^{-2}cm/sでプロットした。

○PKM-T，As系加熱注入材，As系常温注入材は，負荷時間の経過にともない透水係数が増加する傾向にあった。

○PKM-Tの透水係数は，負荷時間20分では1×10^{-7}cm/s以下とほぼ不透水であったが，負荷時間180分では1×10^{-5}cm/s以上に増加した。負荷時間の経過に伴い，徐々に止水性が低下していることが分かる。

○成形目地材は，負荷時間180分でも透水係数が1×10^{-7}cm/s以下であり，十分な止水性を有していた。

○As系加熱注入材およびAs系常温注入材は，負荷時間20分までは透水係数が1×10^{-5}程度であり，施工直後は密粒度混合物と同等の止水性を有していた。



図－9　半断面水浸WT負荷時間と透水係数の関係

8．まとめ

継目処理材で施工継目を止水した供試体において，水浸状態で供試体の半面にトラバース負荷を与える半断面WT負荷試験を実施し，継目処理材の接着性と止水性を評価した。その結果を以下に示す。

○すべての材料において，負荷時間の経過とともにせん断仕事量が低下する傾向がある。

○せん断仕事量が大きい材料は，水浸状態において施工継目の開き作用に対する抵抗性が高い。

○成形目地材は，負荷時間180分でも透水係数が1×10^{-7}cm/s以下であり，十分な止水性を有している。

○PKM-Tは，負荷時間20分まではほぼ不透水であったが，徐々に止水性が低下する。

○As系加熱注入材およびAs系常温注入材は，施工直後は止水性を有しているが，短時間で止水性が失われる。

これらのことから，走行車両により継目部に生じるたわみを吸収する成型目地材は，接着性と止水性を両立できる材料と判断できる。

9．おわりに

本検討では，施工継目に作用するせん断応力に着目し，走行車両の影響を模擬した負荷試験を行い，市販されている継目処理材の接着性と止水性を評価した。その結果，成形目地材は，他の継目処理材よりも高い接着性と止水性を有していることが検証された。

施工継目は，走行車両によるせん断応力だけでなく，低温期における収縮ひずみの集中によっても広がると考えられる。今後は，施工継目に生じる収縮ひずみを再現して継目処理材を評価し，総合的に高い効果が得られる継目処理材を選定していきたい。

―― 参考文献 ――

1）（株）高速道路総合技術研究所，長寿命舗装の作り方，令和元年５月

2）（一社）日本アスファルト乳剤協会規格，JEEAS，2011

3）（社）日本道路協会，舗装設計施工指針，平成18年２月

4）東・中・西日本高速道路株式会社，設計要領　第一集　舗装，平成29年７月

5）李旭東，丸山陽，増山加奈子，レーザー・テクスチャ・スキャナ（LTS）を用いたきめ深さの測定方法に関する一検討，土木学会第72回年次学術講演会，V-054，2017.9

6）（社）日本道路協会，道路橋床版防水便覧，平成19年３月

7）（社）日本道路協会，舗装調査・試験法便覧　第３分冊，平成31年３月

出版物紹介

舗装に関する技術図書のお知らせ
『長寿命舗装の作り方』

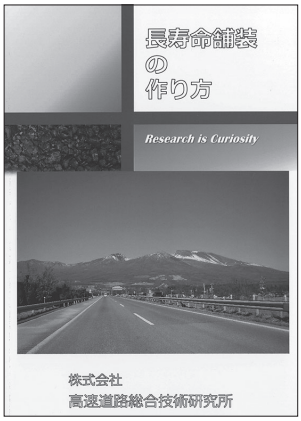
株式会社 高速道路総合技術研究所
道路研究部 舗装研究室長　高　橋　茂　樹

NEXCO総研では，今春より，『長寿命舗装の作り方』の出版販売を開始しております。

舗装に関係する方々の参考になる図書と考え，ここに紹介させて頂きますので，関係者に周知し，業務に活用していただければ幸いです。

なお，ご購入に際しては，弊社のホームページよりお申し込み下さい。

http://www.ri-nexco.co.jp/



（A5判　定価1,833円　税込み送料別）

本書の特色

⑴　耐久性の高い舗装を目指して

NEXCO総研では，この度，長寿命舗装の構築を目指して，アスファルト舗装の損傷要因や実効性の高い補修方法を分かり易く解説した技術図書を発刊しました。本書は，NEXCOが建設管理する高速道路における長年の現地調査を基に，実路で発生しているアスファルト舗装の損傷形態と原因について，図や写真を多用し分かりやすく解説するとともに，有効な対策や耐久性向上に寄与できる手法などを記述したものです。

⑵　なぜ舗装は壊れるのか？

近年，高速道路の舗装は，基層やアスベースからの打換えを余儀なくされる補修工事が増えています。また，せっかく補修を行っても早期に損傷が再発する場合もあり，現場が苦慮する実態を見てきました。

そこで，詳細な開削調査を全国的に行い，普段は見えない舗装内部に発生している損傷の実態を明らかにしました。その結果，これまであまり認識されてこなかったアスベースからの疲労ひび割れや層間はく離，路盤の脆弱化や永久変形などが，経年的に発生進行している実態を掴んだのです。本書では，これら各地で見られた舗装内部

はじめに
第１章　なぜ，舗装は壊れるのか？ ……［p.1］
第２章　『解体新書』プロジェクト ……［p.5］
第３章　こうして舗装は壊れる ……［p.13］
第４章　長寿命化への鍵 ……［p.51］
第５章　時代の変化と発想の転換 ……［p.75］
第６章　魅力的な研究開発 ……［p.81］
おわりに ……［p.89］

の損傷について，現地調査や試験結果を基に要因分析を行い，なぜ，どのように舗装が壊れていくのかを解説しています。

⑶　どのように補修すれば舗装の寿命を延ばせるのか？

原因を特定することは，これまで構築してきた舗装の弱点を炙り出す作業を意味します。それを踏まえ，本書の後半部分では，どのような補修方法が効果的かについて，提案を行っています。再補修を回避したり，補修サイクルを延ばすための具体策を提示し，また，舗装工事を行う際に留意点についても述べており，実務に活用できるヒントが満載です。

⑷　舗装技術者の参考書として

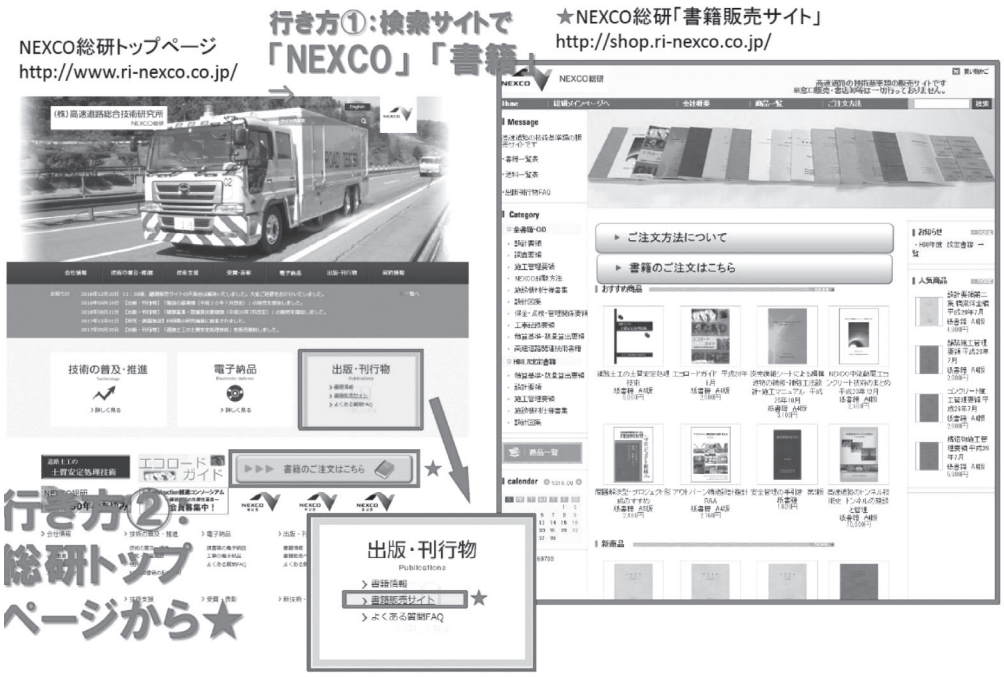
本書は，図や現場の写真をふんだんに取入れ，舗装の経験が少ない若手にも分かりやすく，平易な表現で解説しており，社員教育や若手の勉強にも最適な一冊です。

また，現地で舗装の調査や工事監理を行っている方々においては，損傷個所における着目点や補修工事を行う上での留意点も多数記載しており，有用な情報が多く含まれている実用書です。

これに加え，本書の後半では，舗装の長寿命化を考える上でのポイントや，将来目指すべき舗装の姿についても，その考え方を述べており，研究開発に携わる方々にとっては今後に向けたヒントにもなろうかと思います。

以上，我々の現場で得られた知見をまとめた一冊になります。本書が舗装に携わる方々の業務の参考に，また，舗装のライフサイクルコストの低減や補修頻度の低減に寄与し，今後の社会インフラの向上の一助となれば幸いです。

「長寿命舗装の作り方」などNEXCO技術基準類のご購入は…



出版物紹介

『舗装調査・試験法便覧（平成31年版）』の概要

公益社団法人 日本道路協会 舗装委員会 舗装性能評価小委員会
幹事長　吉　中　　保

日本道路協会舗装委員会は，約10年ぶりに「舗装調査・試験法便覧（平成31年版）」を全面改訂し，今年３月に発刊しました。本稿では改訂したポイントを中心に紹介します。

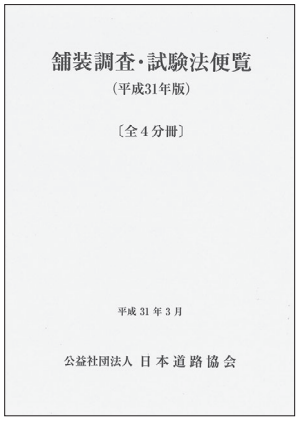
１．はじめに

適切な技術の評価や材料品質を管理するためには，試験法などが規格・標準化されている必要があり，我が国では日本工業規格（JIS）等が定められているほか，舗装に特化した独自の試験法も考案されています。当委員会では，舗装に関連する各種試験や調査方法，材料の品質規格等を集大成した「舗装試験法便覧」を昭和63年に刊行し，維持管理の時代に対応して調査方法を増補した『舗装調査・試験法便覧』を平成19年に改訂しました。

以降，平成25年に道路法が改正されて維持管理に関する技術基準等の整備が進められ，「舗装点検要領」が平成28年に策定されるなど，より一層，適切で効率的な維持管理が求められています。当委員会ではこうした社会的情勢等を踏まえ，従来の調査方法や試験方法（以下，試験法と称す）を最新の知見に基づいて全般的に見直し，新たに提案された試験法を精査して，今般，本便覧を改訂いたしました。

２．本便覧の位置付け

舗装に関する技術基準類の体系と本便覧の位置付けは**図－１**（次ページ）のとおりです。本便覧は，舗装の設計・施工・維持管理の各段階で実施する試験法をまとめたもので，舗装実務を支援する参考図書に位置付けられます。



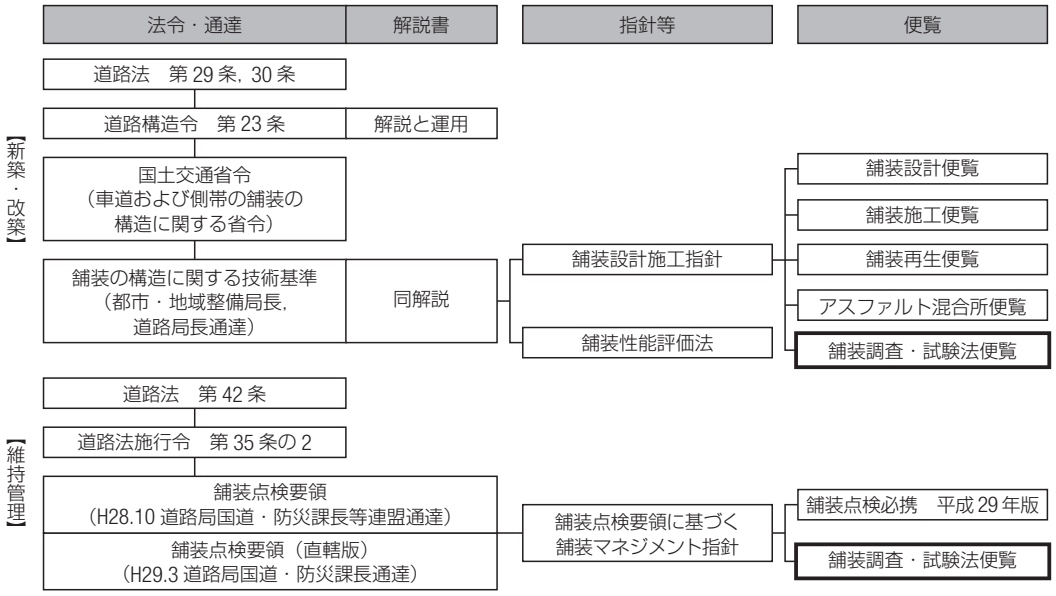
（A5判　本体価格25,000円）

３．構成および分冊

本便覧には281試験法を収録し，全４分冊（1,929ページ）で構成しています。

第１分冊	**第Ⅰ章**	総説，関連規格
	第Ⅱ章	調査編（路面の定量調査等）
第２分冊	**第Ⅲ章**	試験編（舗装用素材）
第３分冊	**第Ⅲ章**	試験編（表層・基層用材料，各種舗装材料）
第４分冊	**第Ⅲ章**	試験編（補修用材料，路盤材料，路床土，出来形・品質），付録

総説編では，本便覧を活用する際の留意事項や基礎知識などを収録しました。調査編では，舗装



図－1　本便覧の位置付け（上：新設・改築，下：維持管理）

の計画や設計，維持修繕の計画に必要な調査方法を収録しました。試験編では，舗装に使用する素材の評価，各種舗装用材料の配合の決定や性能評価に関する試験，施工後の品質管理に関する試験などを収録し，付録として各種材料の規格や基準類等を収録しました。

4．主な改訂ポイント

①付録の材料規格も含めた242の試験法を見直し，新たに35の試験法を追加しました。

②目的や適用範囲などをできるだけ統一した書式で編集し，関連する最新情報は解説等に記載しました。

③試験などで扱う化学物質が，厚生労働省で定める「特定化学物質障害予防規則」や「有機溶剤中毒予防規則」の対象物である場合は，関連各種法令を留意事項として記載しました。

④目次や試験法の記載順などを見直しました。試験法番号は，既存のものは平成19年版を継承し，新規に追加したものは空き番号を割り当てました。

⑤試験法タイトルの右肩に年号を付与しました。今回改訂したものは「2019年改訂」，新規追加は「2019年」として，識別できるようにしています。

⑥最新の試験法を示し，幅広く活用が図れるように解説しました。解説には，論文等で新たに紹介されたものを精査して記載しました。なお，未だ測定実績が少なく，改良の余地が残されていると判断した試験法については，試験法番号の後にT（Tentative：暫定試験法）の記号を付して識別し，あわせて平成19年版の精査も行っています。

5．アスファルトに関連する新規・修正した調査試験法の例

今回の改訂で，アスファルトに関連する新たに追加した試験法や，加筆修正した試験法のうち，代表的な例を**表－1**に示します。

6．おわりに

本便覧は，従来の試験法を最新の知見に基づいて全般的に見直すとともに，実務への適用が可能になった新たな試験法を追加しています。本便覧が現場での調査や試験に活用され，さらなる舗装技術の発展に寄与することを期待いたします。

最後に，本便覧の改訂に当たりご尽力いただいた関係諸氏に，深く感謝の意を表します。

表－1　アスファルトに関連する新規・修正した調査試験法の例

分冊	章	番号	試験法名称	摘要
2	Ⅲ	A055	組成分析試験方法	• B法として石油学会法「JPI-5S-70-10」TLC/FID法による組成分析方法を掲載
2	Ⅲ	A058T	ポリマー改質アスファルト中に含まれるSBRの定量試験方法	• 使用する二硫化炭素は劇物のため，使用しないATR法を併記
2	Ⅲ	A062	ダイナミックシアレオメータ試験方法	• 解説にMSCR（Multiple Stress Creep Recovery）試験を紹介（改質アスファルトの耐流動性をDSRを用いて評価）
2	Ⅲ	A064T	硅砂を用いたアスファルトの剥離抵抗性試験方法	• 新規試験法 • 硅砂とアスファルトからなるマーシャル供試体で水浸圧裂を行い剥離離抵抗を評価する
3	Ⅲ	B020	締め固めないアスファルト混合物の室内熱劣化試料の作製方法	• 新規試験法 • 米SHRP計画案より土木研究所とTPT（つくば舗装技術交流会）の結果を反映。アスファルト混合物を110℃の恒温室で養生後，アスファルトを回収する
3	Ⅲ	B021	ねじりによる骨材飛散試験方法	• 新規試験法 •「舗装性能評価法 別冊」に掲載されたもの
4	Ⅲ	D004T	ポットホール補修用常温混合物のホイールトラッキング試験による簡易耐久性試験方法	• 新規試験法 • TPTにて検討（つくば舗装技術交流会）。ポットホールに滞水がある場合の補修用常温混合物の耐久性を評価
4	Ⅲ	D005T	ポットホール補修用常温混合物のホイールトラッキング試験方法	• 新規試験法 • 常温混合物でWT供試体を作製し，20mm沈下回数で評価

『Handbook for Asphalt Pavement 2019』の発刊

公益社団法人 日本道路協会 舗装委員会 舗装設計施工小委員会
幹事長　坂　本　康　文

本書は，舗装事業の海外展開時に，舗装に関する日本の設計・施工方法等を相手国に紹介する際に活用していただく資料として，現在，（公社）日本道路協会から発刊されている舗装関係の指針・便覧等からアスファルト舗装に関連する事項を抽出し，英語版として取りまとめたものです。開発途上国での適用を考慮し，簡易舗装の設計・施工に関する記述を充実させるとともに，将来的に課題となるであろう舗装の再生技術（プラント再生，路上路盤再生）についても付録に詳しく記載しています。以下に，本書の概要を紹介します。

図書の目次構成と各章の主な内容

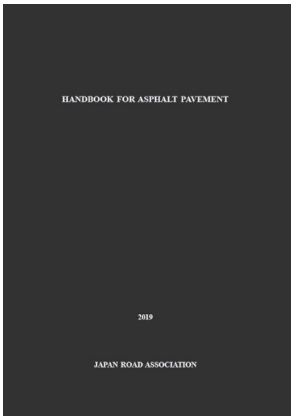
本書の目次構成は次ページに示すように，第１章から第８章と付録となっています。以下に各章の主な内容を示しますが，各章のボリュームをイメージしやすいように，図書の頁数も目次構成に付記しました。

⑴　第１章　総説（Chapter 1：Introduction）

第１章では，まず導入部としてわが国の地勢，気象，人口，経済についての現状を説明し，その後に，わが国の道路舗装の歴史と現況について道路に関する統計資料等を織り交ぜて解説しています。特に，日本の道路舗装の歴史では重交通対策としての改質アスファルトとホイールトラッキング試験の導入を，また現況説明では，アスファルト塊の高い再生率の達成や排水性舗装や遮熱性・保水性舗装などの環境舗装技術も紹介しています。

⑵　第２章　構造・設計
（Chapter 2：Structure and Design）

第２章では，わが国の舗装設計法の歴史を簡単に紹介し，経験的設計法と理論的設計法とに触れつつ，現在の性能規定に基づいた経験的設計法としての“T_A法”を主体に，要求性能の設定から信頼度に応じた設計方法まで，具体例を交えて解説しています。また，開発途上国での適用を考慮し，簡易舗装特有の簡易な構造設計法を「軽交通向けのアスファルト舗装の構造設計」という節を設けて記述することで内容の充実を図っています。



（A4判　本体価格6,500円）

⑶　第３章　材料（Chapter 3：Materials）

第３章では，わが国の舗装材料として使用されている瀝青材料，骨材，安定処理添加材料，樹脂系結合材料，路盤用材料等について，品質規格や標準的性状等を紹介しています。また，その他の材料として中温化添加剤等についても記しています。

⑷　第４章　施工機械
（Chapter 4：Construction equipment）

第４章では，わが国の路床工，路盤工，アスファルト舗装工で一般的に使用されている主要な機械を簡単に紹介しています。

⑸　第５章　施工（Chapter 5：Construction）

第５章では，路床工，路盤工，アスファルト舗装工について，施工計画，安定処理路盤材料やアスファルト混合物の配合設計方法，および施工方法や留意点等を詳細に解説しています。特に，開発途上国での適用を考慮して，わが国ではほとんど見られなくなった浸透式工法やマカダム工法による路盤の施工，また常温混合式工法，浸透式工法，瀝青処理工法による表層（表面処理）の施工について，使用材料や標準断面，作業手順等を詳しく解説しています。

⑹　第６章　施工管理および検査
（Chapter 6：Construction management and inspection）

第６章では，わが国で行われている舗装の出来形管理，品質管理，安全管理および環境対策の考え方や管理値の例等を示すとともに，それらに基づいた検査の考え方や合格判定値の例等を示しています。

⑺　第７章　特定箇所の舗装
（Chapter 7：Pavement for specific locations）

第７章では，歩行者系道路舗装，橋面舗装，トンネル内舗装，岩盤上舗装を取り上げ，設計の考え方，施工上の留意点，標準的な舗装断面等について解説しています。

第１章　総説［pp.1-14］
1－1　日本の概要
1－2　道路の歴史と現況
1－3　道路舗装
第２章　構造・設計［pp.15-37］
2－1　構造設計
2－2　軽交通向けアスファルト舗装の構造設計
第３章　材料［pp.38-62］
3－1　概説
3－2　瀝青材料
3－3　骨材
3－4　安定処理添加材料
3－5　樹脂系結合材料
3－6　路盤用材料
3－7　その他の材料
第４章　施工機械［pp.63-67］
4－1　概説
4－2　施工機械
4－3　アスファルト舗装の施工機械
第５章　施工［pp.68-133］
5－1　概説
5－2　施工計画
5－3　路床の施工
5－4　下層路盤の施工
5－5　上層路盤の施工
5－6　表層・基層の施工
第６章　施工管理および検査［pp.134-158］
6－1　概説
6－2　管理の概念
6－3　基準試験
6－4　出来形管理
6－5　品質管理
6－6　安全管理と環境対策
6－7　検査
第７章　特定箇所の舗装［pp.159-171］
7－1　概説
7－2　歩行者系道路舗装
7－3　橋面舗装
7－4　トンネル内舗装
7－5　岩盤上舗装
第８章　特殊な機能や構造をもつ舗装［pp.172-184］
8－1　概説
8－2　半たわみ性舗装
8－3　グースアスファルト舗装
8－4　排水性舗装
付録　舗装再生工法［pp.185-232］
1　概説
2　プラント再生舗装工法
3　路上路盤再生工法

Handbookの目次構成

⑻　特殊な機能や構造を持つ舗装
（Chapter 8：Pavement with special functions and structure）

第８章では，わが国での施工実績が多く開発途上国でも有用と考えられる，半たわみ性舗装，グースアスファルト舗装，排水性舗装を取り上げ，使用材料，配合，施工について，基本的な考え方や設計・施工上の留意点等を解説しています。特に，排水性舗装はアジア地域での適用への期待が大きく，ポリマー改質アスファルトH型の材料性状，標準的な粒度範囲や配合設計等については，海外での検討に役立つものと考えています。

⑼　付録；舗装再生工法
（APPENDIX：Pavement recycling methods）

付録では，排水性舗装等とともにアジア諸国に対する技術移転の関心が高い技術である舗装再生工法（プラント再生舗装工法，路上路盤再生工法）を取り上げ，使用材料，配合設計法，施工について，基本的な考え方から留意点までを具体例等を交えて詳しく解説しています。

【本書の出典（日本道路協会図書）】

①舗装の構造に関する技術基準・同解説（平成13年），②舗装設計施工指針（平成18年版），③舗装設計便覧（平成18年），④舗装施工便覧（平成18年版），⑤舗装再生便覧（平成22年版），⑥簡易舗装要綱（昭和54年版）

以上のように取りまとめた英語版の当該図書は，”Handbook for Asphalt Pavement 2019” として2019年３月に（公社）日本道路協会から発刊されました。本来意図した，わが国の舗装事業の海外展開時等での活用に資することはもとより，技術図書として日本語版の指針，便覧等と併用していただくことで，舗装技術者の英語力向上の一助となれれば幸いです。最後に，本書の執筆にあたってご尽力いただきました関係諸氏に深く感謝の意を表します。

「アスファルト舗装技術のDSR試験に関する新しいアプローチについて」～RILEM技術員会 252 CMBシンポジウムより～および「若手技術者によるアスファルト舗装に関する質問コーナー」

アスファルト舗装技術研究グループは，海外文献の輪読や舗装技術の基礎学習を中心に，二箇月に一回程度の勉強会に宿題を持ち寄って議論を重ねています。

今年度は，建設材料に関する研究者技術者の国際的な組織であるRILEMのシンポジウムの報告を読み進めたところ，DSR（動的せん断レオメータ）を，品質規格試験の域を超えて様々に活用している研究報告が多く見られました。そこでDSRを主題に分担して精読し，DSR試験から得られる知見や技術開発における可能性と展開について抄訳報文にまとめました。

若手技術者による質問コーナーでは，技術解説書や既存の質疑集では触れられない基礎的な知識にたちかえるとともに，舗装分野以外の技術情報等もとりあげて，知識集としてまとめてきています。結果として，舗装の専門的知識があまりなくても主題の技術分野を理解できる資料集になっていると考えています。

今回は，遮熱性舗装や保水性舗装をはじめとした機能性を有する舗装や，ICT等の最近の動向について整理した結果を報告します。

（研究グループ代表幹事：佐々木　厳）

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

佐々木厳　（国研）土木研究所材料資源研究グループ

上地俊孝　大林道路㈱技術研究所
及川真依　東亜道路工業㈱製品事業本部
掛札さくら　大林道路㈱技術研究所
川島陽子　（国研）土木研究所材料資源研究グループ
木屋　寛　世紀東急工業㈱技術研究所
曲　慧　東亜道路工業㈱技術研究所
熊坂理紗　大成ロテック㈱技術研究所
小池千絵美　世紀東急工業㈱製造管理部
小林亜湖　東亜道路工業㈱技術研究所
小林靖明　大林道路㈱技術研究所
齋藤夏美　ニチレキ㈱技術研究所
櫻井博章　日進化成㈱技術研究所
滝田真世　昭和瀝青工業㈱技術センター
塚本康雄　（一社）日本道路建設業協会道路試験所
仲野尚弘　日進化成㈱技術研究所
根元　孝　（一社）日本道路建設業協会道路試験所
野口健太郎　出光興産㈱アスファルト研究課
福山菜美　前田道路㈱技術研究所
藤井洋志　日本道路㈱技術研究所
山田翔平　日本道路㈱技術研究所
山原詩織　大林道路㈱技術研究所
吉野広一郎　日本道路㈱技術研究所
好見絵里　鹿島道路㈱技術研究所
渡邉真一　（国研）土木研究所道路技術研究グループ

（2019年11月現在）

若手技術者によるアスファルト舗装に関する質問コーナー

櫻井博章　川島陽子　熊坂理紗
滝田真世　塚本康雄　仲野尚弘
根元　孝　福山菜美　藤井洋志
山田翔平　吉野広一郎　好見絵里

はじめに

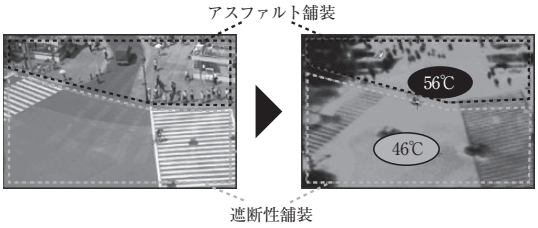
質問コーナーは，今回で第７回目を迎えます。ここでは若手技術者が普段の業務で感じた素朴な疑問について調査し，豆知識を織り交ぜながら解説していきます。今回の質問コーナーでは，来年2020年に行われる東京オリンピックの猛暑対策としてメディアに取り上げられた遮熱性舗装や保水性舗装，積雪寒冷地における舗装技術，舗装に関する試験方法，最近話題のICTの活用などといった，表に示す７つのテーマについて調査したので報告します。

表－１　調査テーマ

Q1	遮熱性舗装とは，どのような舗装ですか？
Q2	遮熱性舗装の塗膜に対するはがれ抵抗性試験（打撃）は，ラベリング試験をどのようにアレンジしているのでしょうか？
Q3	保水性舗装とは，どのような舗装ですか？
Q4	積雪寒冷地における舗装技術には，どのようなものがありますか？
Q5	土系（歩行者）舗装の特徴的な調査・試験方法には，どのようなものがありますか？
Q6	最近話題のICTやi-Constructionとはどのような技術で，具体的に舗装工事のどのような場面で活用されているのでしょうか？
Q7	IRI測定とはどのような技術で，どのように活用されているのでしょうか？

Q1：遮熱性舗装とは，どのような舗装ですか？

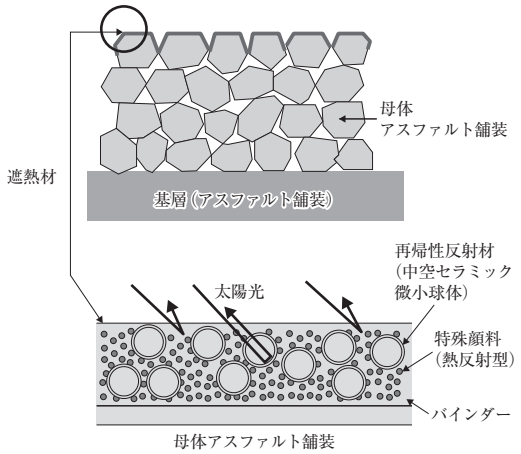
A1：遮熱性舗装とは，都市部におけるヒートアイランド現象の抑制に使用されている舗装です（**写真－１**参照）[1]。この舗装は，**図－１**のように，舗装表面に太陽光の吸収を抑制する遮熱材を塗布しています[1]。遮熱性舗装の特徴には，アスファルト舗装と比較すると，日中の路面温度の上昇を10℃ほど抑制でき，夜間の舗装からの放熱量を減らせることが挙げられます。この舗装は，歩行者空間の快適性，景観性の向上も期待できるため，公園や遊園地，商店街などにおいて施工されています。



写真－１　遮熱性舗装[1]

(1) 遮熱性舗装の路面温度上昇抑制効果

遮熱性舗装とは，**図－１**のように，母体アスファルト舗装上に遮熱材を塗布したものです。この遮熱材は，再帰性反射材である中空セラミック，熱反射型顔料，バ



図－１　遮熱性舗装概略図[1]

インダー（樹脂）から構成されています。再帰性反射材とは入射する光を入射方向にそのまま反射する材料のことであり，熱反射型顔料と併用することで，舗装の太陽光の吸収を抑制しています。太陽光には近赤外線といった日射エネルギーが含まれており，これらの吸収を抑制することで，路面温度の上昇抑制効果が得られます。日中，日射エネルギーの吸収率が高いアスファルト舗装の路面温度が60℃ほどとなった際には，遮熱性舗装は路面温度の上昇を10℃ほど抑制できます。

⑵ 遮熱性舗装の特徴

遮熱性舗装には以下の特徴があります。

①路面温度上昇抑制効果による舗装蓄熱量の減少

②夏季における道路環境の改善

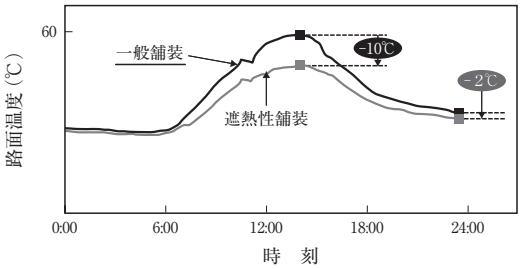
③ポーラスアスファルト舗装への施工時における温度上昇抑制効果，排水機能，騒音低減効果および表面保護効果による骨材飛散の低減

④路面温度の上昇抑制に伴う舗装体の塑性変形抵抗性の向上

⑤カラー化による景観舗装としての利用

⑶ 遮熱性舗装の路面温度上昇抑制効果の測定例

夏季における遮熱性舗装とアスファルト舗装の路面温度の測定結果の一例を**図－２**に示します[1)]。アスファルト舗装に対して，日中の路面温度の上昇を10℃，深夜０時では２℃抑制しています。



図－２　路面温度測定結果[1)]

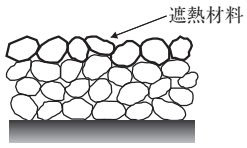
⑷ 遮熱性舗装の種類

遮熱性舗装においては，２種類の工法が実用化されており，２液硬化型樹脂系とエマルジョン樹脂系があります。２液硬化型樹脂系は，強度と耐久性に優れ，低臭型樹脂を使用することで周辺環境への配慮もできます。エマルジョン樹脂系は，非有機溶剤系であるため，環境への影響が少なく，施工も容易で，経済性に優れています。それぞれの工法における施工状況を**写真－２，３**に，特徴を**表－１**に示します[1,2)]。

写真－２　２液混合型樹脂系施工状況[2)]

写真－３　エマルジョン樹脂系施工状況[2)]

表－１　遮熱性舗装の特徴[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
遮熱材料のバインダー	MMA系樹脂 ウレタン樹脂 ウレア樹脂など	アクリル エマルジョンなど
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	排水性舗装など開粒度タイプ舗装 密粒舗装，コンクリート舗装	
遮熱材料塗布量（kg/㎡）（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），またはローラー刷毛等
養生時間	0.5～１時間	１～２時間
舗装断面（ポーラアスファルト舗装への適用例）		

―― 参考文献 ――

１）路面温度上昇抑制舗装研究会：遮熱性舗装 技術資料　http://www.coolhosouken.com/（参照日：2019年11月18日）

２）日進化成株式会社 HP：https://www.nissin-kasei.co.jp/construction/heat/　（参照日：2019年11月18日）

Q2：遮熱性舗装の塗膜に対するはがれ抵抗性試験（打撃）は，ラベリング試験をどのようにアレンジしているのでしょうか？

A2：遮熱性舗装は平成20年度に本格施工を開始してから，はがれ抵抗性などの評価法および基準値を設定し，耐久性の向上を目指してきました。しかし，設定した基準値を満たしていても，供用後の経年劣化により，はがれが目立つ箇所が発生しました。これは，以前のはがれ抵抗性試験が，ねじりに対する抵抗性を評価するものであり，走行時のタイヤが与える衝撃を評価できていないためと考えられました。そこで，新たにチェーンラベリング試験を用いた評価方法が東京都で平成26年に採用されました。この章では，積雪時のタイヤチェーンに対する摩耗抵抗性を評価するものではなく，遮熱性舗装の塗膜に対するはがれ抵抗性試験（打撃）としてのチェーンラベリング試験方法や条件について説明します。

⑴ 遮熱性舗装のはがれ抵抗性試験（打撃）試験方法

遮熱性舗装のはがれ抵抗性試験（打撃）の試験方法を**表－１**に示します。

表－１　はがれ抵抗性試験（打撃）試験条件

項目	条件
試験温度	20℃
養生時間	５時間
試験時間	180秒
チェーンの種類	クロスチェーン
チェーン数量	10コマ×12本
遮熱材の塗布量	標準
車両数量	１輪
車輪回転数	200回／分
供試体回転数	66往復／分
チェーン取付ボルトと供試体上面の間隔	10㎝
評価法	はがれ面積率

⑵ ラベリング試験と異なる項目

表－１のように，ラベリング試験の試験方法とは異なる項目があります。その条件に決定した理由を以下に示します[1)]。

①はがれ面積率による評価法

はがれ面積率の測定箇所については，チェーンの打撃による母体アスファルト舗装の損傷が著しくなる端部（端から2.5㎝）を除き，チェーンが供試体を常に打撃する範囲が中央5㎝程度であることを考慮した37.5㎝×５㎝が解析対象となります。解析対象を１辺5㎜のメッシュで分割した合計750メッシュにおいて，**表－２**に示すはがれ割合と換算係数を用いて，はがれ面積率が算出されます。はがれ面積率は，下記の式にて算出され，基準値は20％以下となります。

表－２　はがれ区分と換算係数

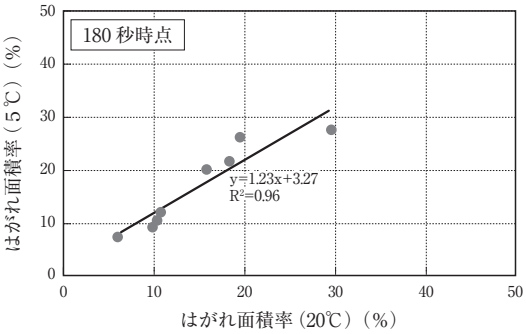
メッシュ内のはがれ割合	換算係数
50％以上	1
50～25％	0.5
25～１％	0.25
０％	0

はがれ面積率（％）＝（はがれた箇所の換算メッシュ数／750メッシュ）×100

このように，従来のねじれ法に加え，ラベリング試験を行うことにより，塗膜のはがれ抵抗性を評価しています。

②試験温度

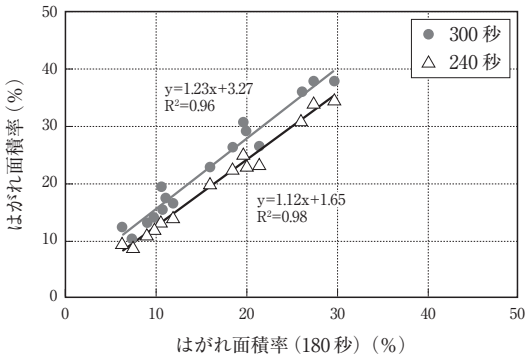
試験温度5，20，40℃において，はがれ面積率の評価が行われました。40℃では，塗膜が温められ，樹脂が柔らかくなり，打撃に対する抵抗性が高くなりました。それに対し，試験温度5，20℃におけるはがれ面積率には，**図－１**のように，決定係数が0.96と高い相関性が示されました。このことから，室温に近い20℃での試験において，低温時のはがれ抵抗性を推定できることから，試験温度は20℃となりました。



図－１　はがれ面積率（試験温度の比較）

③試験時間

試験法便覧の試験時間では，母体アスファルト舗装も破壊してしまうため，試験時間の調整が行われました。表面状態の観察結果より，180秒付近から骨材飛散，摩耗が始まり，300秒を超えると塗膜のはがれに加え，骨材飛散や摩耗による舗装の破壊が起こりました。これらのことを考慮し，試験時間180秒と240秒，180秒と300秒におけるはがれ面積率の比較が行われました（**図－２**参照）。240秒との決定係数は0.98，300秒では0.96と高い相関性が示されました。このことから，180秒での試験により，骨材飛散，摩耗による舗装の破壊が起こり始める時点までのはがれ抵抗性を確認できるため，試験時間は180秒となりました。



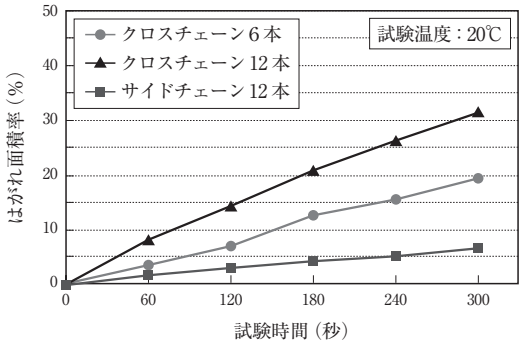
図－２　はがれ面積率（経時変化の比較）

④チェーンの種類

チェーンの種類にはクロスチェーンとサイドチェーンの２種類があり，どちらがはがれ面積率を測定するのに適しているのか検討されました。その結果を**図－３**に示します。クロスチェーンにおいては，チェーンの本数が多いほど，はがれ面積率が大きくなっています。一方，サイドチェーンにおいては試験時間300秒でも，はがれ面積率が低く，強制的にはがれた状態を作り，評価するには打撃エネルギーが不十分でした。したがって，クロスチェーンが採用されました。

⑤チェーンの本数

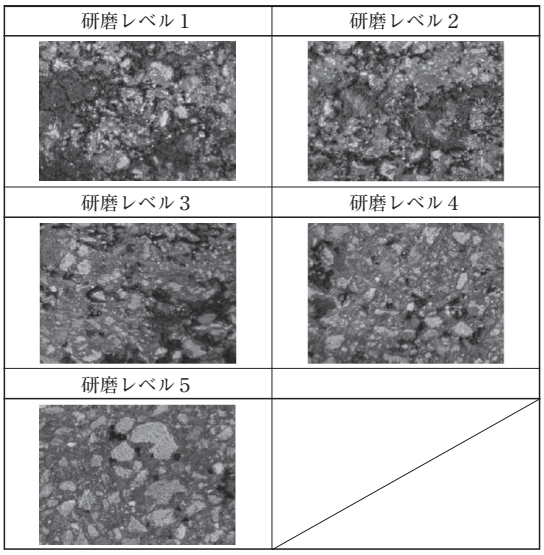
チェーンの本数が６本と12本におけるはがれ面積率の比較が行われました。６本に比べ12本では，３回の試験によるばらつきが少なく，ほぼ同程度の値になり，精度良く測定できたことにより，チェーンの本数は12本となりました。



図－３　はがれ面積率
（チェーンの種類および本数による比較）

(3) 遮熱性舗装の塗膜のはがれ対策

遮熱性舗装の塗膜のはがれ対策として，２液硬化型樹脂を使用して密粒度舗装へ施工する際には，母体アスファルト舗装が新設・既設を問わず，下地処理として研磨レベル３以上研磨しています[2)]。**写真－１**に母体アスファルト舗装の研磨レベルを示します[2)]。研磨することにより，被膜しているアスファルトとではなく，樹脂と骨材を接着させることにより，接着力が上がり，はがれ抵抗性が向上します。



写真－１　母体アスファルト舗装の研磨レベル[2)]

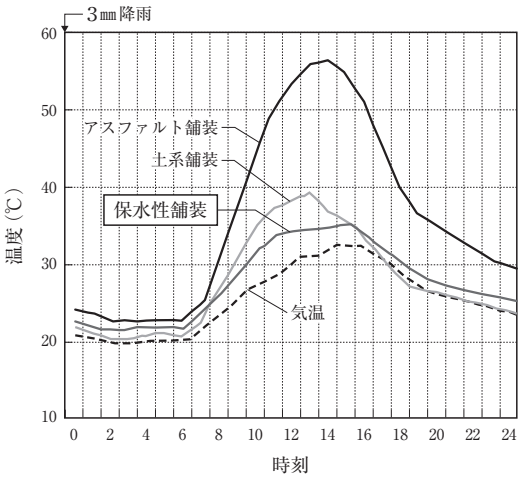
―― 参考文献 ――

１）上野慎一郎・橋本喜正・峰岸順一：遮熱性舗装のはがれ抵抗性に関する評価法の設定

２）クール舗装研究会：密粒度舗装へ適応する遮熱性舗装　施工要領

Q3：保水性舗装とは，どのような舗装ですか？

A3：保水性舗装とは，降雨や散水による舗装表面の水分の一部を舗装体内に保水する舗装です。晴天時には，舗装体内に保水された水分が徐々に蒸発する際の気化熱により，路面温度の上昇を抑制します[1)]。保水性舗装は，アスファルト舗装に比べ，夏季における路面温度の上昇を抑制するため，歩行者空間や沿道の熱負荷低減が期待されています（**図－1**参照）[2)]。



図－1　夏季における路面温度の比較[2)]

保水性舗装には，ブロック系保水性舗装とアスファルト舗装系保水性舗装があります。前者は吸水・保水能力を備えた保水性ブロックを用いた舗装であり，後者はポーラスアスファルト混合物の空隙に吸水・保水性を有する保水材を充填させた半たわみ性舗装タイプの混合物となります。

ブロック系保水性舗装に用いる保水性ブロックは，JIPEA（一般社団法人インターロッキングブロック舗装技術協会）により，品質性能規格およびその試験方法が規定されています。保水性ブロックの品質規格を**表－1**に，ブロック系保水性舗装の構造を**図－2**に示します[3)]。保水性ブロックは，保水性の機能を発揮するための性能値として保水量0.15g/㎤以上，吸い上げ高さ70%以上と定められています。

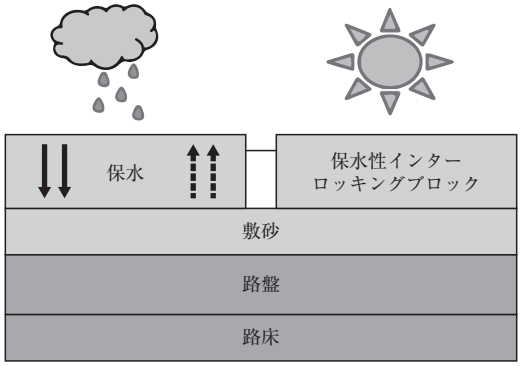
保水性ブロックは色調や寸法などのバリエーションが豊富なため，景観性に優れる舗装を構築することができます（**写真－1**参照）[2)]。

次に，アスファルト舗装系保水性舗装の舗装構成

表－1　保水性ブロックの品質

保水性	吸水性	すべり抵抗性（BPN）	曲げ強度（N/㎟）	寸法の許容差(㎜) 幅・長さ	寸法の許容差(㎜) 厚さ
保水量0.15g/㎤以上	30分後の吸い上げ高さ70%以上	歩道・歩行者系道路40以上	3.0以上（17.0以上）	± 2.5	+4 −1.0
		駐車場・車両乗り入れ部60以上	5.0以上（32.0以上）	± 2.5	± 2.5

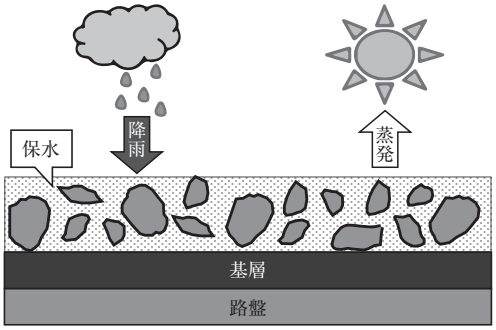
曲げ強度の（　）内は圧縮強度



図－2　ブロック系保水性舗装の舗装構成

写真－1　ブロック系保水性舗装[2)]

を**図－3**に，母体舗装層に用いるポーラスアスファルト混合物の物理性状例を**表－2**に，保水材の標準的な物理性状を**表－3**に示します[4,5)]。なお，舗装体内に水分を保持している状態にあるため，耐水性を考慮し，ポーラスアスファルト混合物のバインダには，車道に適用する場合はポリマー改質アスファルトH型を，歩道に適用する場合にはポリマー改質アスファルトⅡ型



表層（保水性機能層）（保水性アスファルト混合物：
ポーラスアスファルト混合物＋保水材）

図－３　保水性舗装の舗装構成

表－２　ポーラスアスファルト混合物の物理性状例[4)]

試験項目		標準値	備考
マーシャル試験	空隙率（%）	20～30	ノギス法
	安定度（kN）	3.43以上	
	フロー値（1/100cm）	20～40	
	残留安定度（%）	85以上	60℃，48時間水浸
透水係数（cm/sec）		10^{-2}以上	室内定水位
動的安定度（回／mm）	車道　舗装計画交通量3,000（台／日・方向）未満	1,500以上	
	車道　舗装計画交通量3,000（台／日・方向）以上	3,000以上	

表－３　保水材の標準的な物理性状例[5)]

項目	標準的性状
最大吸水率（%）	40以上
フロー値（Pロート）（秒）*	9～13
圧縮強度（N/mm²）**	0.5以上
曲げ強度（N/mm²）**	0.3以上

*施工厚さや充填率に応じて検討が必要
**試験材齢は，超速硬７日

写真－２　アスファルト舗装系保水性舗装[2)]

を用いることが推奨されています。保水材は，製造会社によって使用材料などが異なるため，品質や性能を製造会社に確認し選定を行う必要があります。

アスファルト舗装系保水性舗装は，明色バインダと自然色骨材や顔料を使用することで，景観に合わせた舗装を構築することもできます（**写真－２，３**参照）[2)]。

ブロック系とアスファルト舗装系の保水性舗装の路面温度上昇抑制効果の評価は，「室内照射試験」によって行うことができます[1)]。

ただし，保水性舗装の路面温度上昇抑制効果を持続して発揮させるためには，蒸発量に見合った水の供給が必要になります。自動給水させるシステムの適用，計画的な散水や打ち水など，地域との連携が必要となります。また，雨水や湧水などを利用するなどして環境改善を図ることも効果的です。

―― 参考文献 ――

1）一般社団法人日本道路建設業協会：保水性舗装 http://www.dohkenkyo.net/pavement/meisyo/hosui.html （参照日：2019年11月18日）

2）大成ロテック株式会社：クールロード／保水性舗装 http://www.taiseirotec.co.jp/technicalinfo/cool/（参照日：2019年11月18日）

3）本田隆：保水性舗装用インターロッキングブロックの性能試験について

4）路面温度上昇抑制舗装研究会：【保水性舗装】技術資料 http://www.coolhosouken.com/（参照日：2019年11月18日）

5）東京都　建設局道路管理部土木技術研究所：保水性舗装（車道）　設計・施工要領（案）

写真－３　景観に合わせたアスファルト舗装系保水性舗装[2)]

Q4：積雪寒冷地における舗装技術には，どのようなものがありますか？

A4：積雪寒冷地における舗装技術には，タイヤチェーンなどによる摩耗抵抗性を向上させたF付きアスファルト混合物や地域ごとに配合設計された特殊な混合物を用いる舗装，車をスリップしにくくするための凍結抑制舗装が挙げられます。この章では，積雪寒冷地の決定方法と使用される舗装技術について説明します。

⑴ 積雪寒冷地域区分の決定方法

積雪地域および寒冷地域は，積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法（雪寒法）により，定義されています。

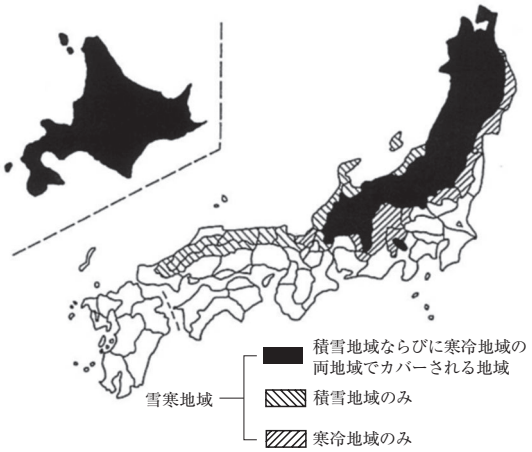
積雪地域は２月の積雪の深さの最大値の累年平均が50㎝以上の地域，寒冷地域は１月の平均気温の累年平均が０℃以下の地域とされています。

日本では，国土面積の約60％が積雪寒冷地域に属し，そこには全人口の約20％となる約2,800万人が暮らしています（**図－１**参照）[1]。雪寒法は，積雪寒冷の度合がはなはだしい地域における道路の交通を確保するため，当該地域内の道路につき，除雪，防雪および凍雪害の防止について特別の措置が定められたもので，国庫補助の特例などが定められています[1]。

⑵ 寒冷地と一般地域における混合物や配合設計法の違い

積雪寒冷地のアスファルト混合物に要求される性能を以下に示します[2]。

①タイヤチェーンなどによる摩耗抵抗性
②低温によるひび割れ抵抗性
③凍結融解抵抗性



図－１　積雪寒冷地域区分[1]

摩耗抵抗性の向上策には，一般地域よりもアスファルト量を多くした混合物の使用や摩耗層の設置があります。現在は，アスファルト量を多くする手法が一般的であり，摩耗層の設置はスパイクタイヤの禁止以降は設けられることが少なくなっています。

配合面での特徴としては，F付きまたはギャップ粒度の混合物の使用が挙げられます。F付き混合物とは，フィラーの量が多い混合物であり，フィラー／アスファルト（F/A）が指標となります。フィラー量が多いと混合物の耐摩耗性と安定度が向上する傾向が認められ，一般地域の表層用混合物で使用されるF/Aは概ね1.2～1.3程度であるのに対し，積雪寒冷地域では1.5～1.7程度とフィラー量が多くなっています。また，配合設計においては，ラベリング試験による耐摩耗性の確認試験が実施されることがあり，一般地域と異なっています。ギャップ粒度混合物は，合成粒度における600㎛～2.36㎜または600㎛～4.75㎜の粒径部分が10％以内の不連続粒度になっているものであり，耐摩耗性に優れ，路面のきめが粗くなるため，すべり抵抗性を持たせることができます[2]。

地域によって，一般的な混合物をベースに調整された特殊な混合物を認可している場合もあります。例として，東北地方のT付き混合物，北陸地方のH付き混合物や北海道の細密粒度ギャップ混合物（13F55）が挙げられます[3,4,5]。各混合物の粒度範囲，アスファルト量および空隙率を**表－１**に示します。北海道における細密粒度ギャップ混合物は，密粒度ギャップアスコンよりやや細粒分を多くした，細粒度ギャップアスコンと密粒度ギャップアスコンの中間の粒度（粗骨材量が約55％）に設定されています[5]。これは，密粒度ギャップアスコン並みまで粗骨材を増やすと（約60％），寒期の施工性，長期耐久性に問題が起きる可能性があると考えられているためです。

低温ひび割れ発生の対策としては，針入度の高いアスファルトが用いられます。一般地域ではストレートアスファルト（以下，StAs）40/60やStAs60/80が用いられますが，北海道地域ではStAs80/100が一般的に用いられています[2]。

凍結融解作用とは，舗装体内に滞留した水分が凍結と融解を繰り返し，舗装体内の空隙を増加させることで耐久性を低下させ，ポットホールの原因にもなる現

表－1　各混合物の性状[3, 4, 5]

※[　]内は豪雪地帯

		密粒（13）	密粒ギャップ（13）	密粒（13F）	密粒（13T）	密粒（13FH）	細密ギャップ（13F55）
通過質量百分率（%）	19.0㎜	100	100	100	100	100	100
	13.2㎜	95～100	95～100	95～100	95～100	95～100	95～100
	4.75㎜	55～70	35～55	52～72	55～70	50～70	52～72
	2.36㎜	35～50	30～45	40～60	35～50 [40～45]	35～55	35～55
	0.6㎜	18～30	20～40	25～45	18～33	20～40	32～50
	0.3㎜	10～21	15～30	16～33	10～23	15～30	20～40
	0.15㎜	6～16	5～15	8～21	6～16	10～20	10～25
	0.075㎜	4～8	4～10	6～11	5～8 [6.5～8]	6～15	8～13
アスファルト量（%）		5～7	4.5～6.5	6～8	5～7	4.5～6.5	概ね6.0～6.3程度
空隙率（%）		3～6	3～7	3～5	3～6	3～5	3～5

象です。アスファルト混合物による凍結融解作用への対策として，空隙率が３～４％の細粒度アスコンやＦ付きの密粒度アスコンが用いられます。これは，過去の研究事例から，初期の空隙率が4%以内と小さく，Ｆ付きである混合物は凍結融解作用の影響が小さいことがわかっているためです。しかし，地域によって，凍結融解の程度が異なるため，どの程度の対策が必要かは経験的に判断されているのが実情です[2]。

⑶ 凍結抑制舗装の種類と特徴

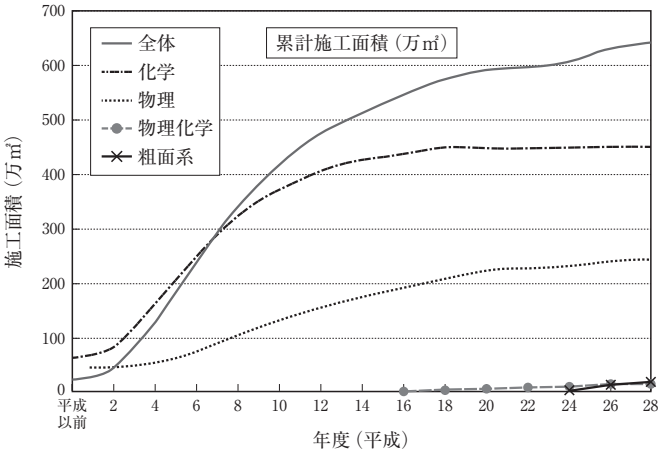
車をスリップしにくくする凍結抑制舗装には，物理系，化学系，物理・化学系および粗面系といった種類があります。

物理系は，アスファルト混合物中に弾性材料である廃タイヤを粉砕したゴムの粒子を添加したもの，排水性舗装の表面の空隙にウレタン樹脂などから構成される凍結防止材を充填したものがあります。これにより，舗装が弾力性を持ち，通過車両の荷重で表面の弾性材料が変形し，表面上に形成された氷板が破壊されることで凍結抑制効果が得られます。

化学系は，舗装に塩化物や酢酸カリウムなどの凍結抑制剤を含ませ，それらの凝固点降下作用を利用して路面の凍結を抑制するものです。凍結抑制剤の混入方法として，塩化物を加えた特殊セメントを造粒・固化したものを６号および７号砕石と置換して使用するもの，顆粒状にした塩化物をスクリーニングスや砂と置換して使用するもの，半たわみ性舗装のセメントミルク表面付近に吸水性ポリマーを配置し，塩類を吸着させるものなどがあります。舗装内に含まれた塩化物などは，毛細管現象による染み出しや路面の摩耗による露出で舗装表面の水分に溶け出し，数％以下の水溶液ができます。この濃度の水溶液は，凝固点が0℃～－５℃まで降下するため，化学系はこの温度領域において効果があるとされています。

物理・化学系には，母体のSMAにゴムチップなどの弾性材料や凍結抑制材料を混合したもの，排水性舗装の空隙部分に弾性材料や凍結抑制剤を充填したものがあり，空隙を一部残すことで排水性能も持たせることができます。

粗面系は，舗装表面のきめを粗くし，タイヤの接触により舗装面に張り付いている氷膜を摩耗させることで，すべり抵抗の改善を図ったものです。凍結抑制舗装は，「スパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律」が平成２年に施行されて以降，急速に施工実績を増やし，平成30年３月末では約651万㎡の施工実績を有しています（**図－２**参照）[6]。しかし，年間施工面積を見ると最近では1990年代と比べると大きく縮



図－２　凍結抑制舗装の累計施工面積[6]

小しています。その理由として，路面の凍結状態は地理・気象・交通条件などの影響を受けて絶えず変動するため，評価条件を統一することが困難であると考えられ，凍結抑制効果を現地で定量的に評価する方法が確立されていないことが挙げられています[6,7]。

―― 参考文献 ――

1）社団法人 日本建設機械化協会，社団法人 雪センター：除雪・防雪ハンドブック 2005年，p1-3。

2）土木学会，舗装工学ライブラリー6：積雪寒冷地の舗装，丸善出版，2011年，p77-86。

3）北陸地方整備局：設計要領 道路編，2017年

4）東北地方整備局：土木工事共通特記仕様書，2019年

5）北海道開発局：道路設計要領 第1集 道路，2019年

6）凍結抑制舗装技術研究会：凍結抑制舗装ポケットブック，2018年

7）社団法人 日本道路協会：環境改善を目指した舗装技術 2004年版，2004年，p69-73。

Q5：土系（歩行者）舗装の特徴的な調査・試験方法には，どのようなものがありますか？

A5：土系舗装とは，天然材料の土あるいは砂などと結合材を混合した層で構成され，適度な弾力性，衝撃吸収性，保水性などの機能を有する舗装です。使用する結合材は開発者により異なりますが，主な結合材としてはセメント系，アスファルト系，石灰系や樹脂系などがあります。また使用する結合材によってその舗装材の性質も異なります[1)]。

土系舗装の主な特徴を下記に示します。

○自然環境と調和する景観性を持つ

○適切な保水性を有している

○適度な弾力性および衝撃吸収性により歩行しやすい

土系舗装は，公園などの自然環境との調和に優れています。また，保水性があるため，夏季における路面温度の上昇を抑制する効果があります（Q3，**図－1**参照）。そのため，ヒートアイランド現象の対策工法としても着目されています。さらに，適度な弾力により歩行しやすさを確保するだけでなく，歩行者の安全を守るために適度な衝撃吸収性も有しています。

「土系舗装ハンドブック」では，上記の性能を評価するために，性能目標が示されています[2)]。**表－1**に土系舗装の性能評価に関わる試験と土の透水性や保水性に関する試験方法を示します。

試験方法が舗装調査・試験法便覧やJIS規格以外のものもあり，この章では，普段聞き慣れない土系舗装に特徴的な調査・試験方法を紹介します。

(1) 土の保水性試験[3)]

土の保水性：土壌は，種々の大きさの孔隙からできているので，土壌の中の移動可能な水（自由水）は，潜在的エネルギー状態，すなわち，ポテンシャル・エネルギーにより土壌に保持されています。この土壌の水分特性を求めるのが保水性試験です。

土壌の水を保持するメカニズムとして毛管力があり，毛管力によって水は上昇し，重力と釣り合います。試料を自由水面から水理的に連続性を与え，ある高さhにおくと，試料中の土壌水は，重力のエネルギーによって吸引されます。この吸引力より低い毛管ポテンシャルの土壌水は，試料外へ流出し平衡が得られます。

この種々のポテンシャル値における土壌の保持水分量を，ポテンシャルの低い方から高い方へ測定し，それによって描かれる水分量の曲線から対象土壌の保持機能の特徴が明らかになります。水分量の曲線はpF値によって表されます。pFとは水柱の高さを表したものです。pF測定の原理を**図－1**に示します。例えば，水柱の高さが100㎝の場合，

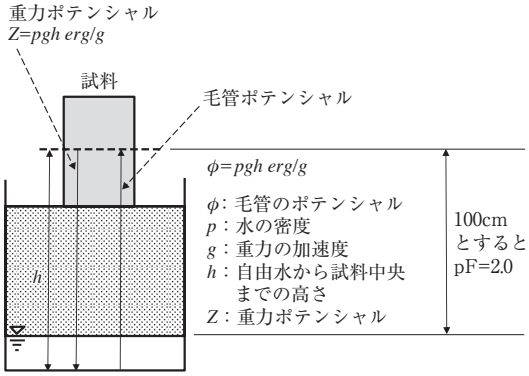
$$pF = log_{10}[\text{水柱の高さ}] = log_{10}(100) = 2.0$$

となります。pFを用いることにより，土壌構造や土性に関係なく，作物が利用する土壌水分利用の難易を表すことができます。大きい数値ほど土壌に吸着されている力が強く，作物根は利用し難くなります。一般に作物根はpF＝1.8～4.2の範囲にある毛管水を利用しています。

表－1　土系（歩行者）舗装の調査方法・試験方法・検査基準

評価項目	調査方法	試験方法	検査基準	
景観性	色彩色差計による測定	舗装調査・試験法便覧		
透水性	現場透水量試験	舗装調査・試験法便覧	300㎖/15sec以上	舗装性能評価法　別冊
	土の透水試験	JIS A 1218	1.0×10^{-2}㎝/sec以上	透水性舗装ハンドブック
保水性	土の保水性試験（pF値）	※1 JGS-0151		
弾力性	弾力性試験（GB，SB係数）	舗装調査・試験法便覧	GB係数　70％以下	土系舗装ハンドブック
衝撃吸収性	転倒時安全性試験（HIC試験）	ASTM	1,000以上	ASTM
耐久性	プロクターニードル貫入試験		60ポンド以上	土系舗装ハンドブック
	舗装路面の平たん性測定	舗装調査・試験法便覧	※2 3.5㎜以下	舗装性能評価法　別冊
	泥濘評価試験		30ポンド以上	土系舗装ハンドブック
	浮上レキ分および浮上砂分試験		目視観察	

※1 JGS：地盤工学会規格　※2 歩きやすさの目標値

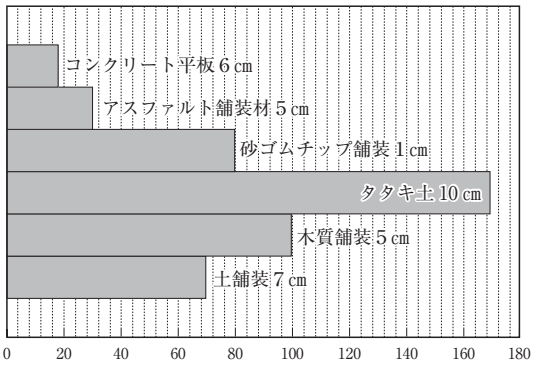


図－１　砂柱法によるpF測定の原理[3)]

⑵ **転倒時安全性試験（HIC試験）**[2, 4, 5)]

土系舗装の安全性を調査する方法として，歩行者が転倒時に身体に受ける衝撃を計測するための，転倒時安全性試験があります。この試験は，転倒転落事故や運動による頭部への衝撃の程度を表す指標である頭部障害基準HIC値（Head Injury Criterionの略）を求める試験であり，通称HIC試験と呼ばれています。この試験は，公園の遊具施設周りのクッション層について平成14年に国土交通省都市整備局から通達された「都市公園における遊具の安全確保に関する指針」の参考資料に記載されています。

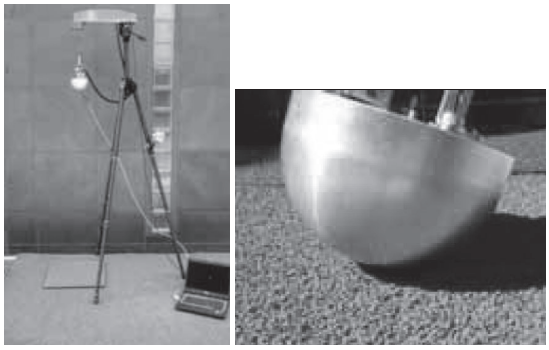
この試験では，任意の高さより，人間の頭部の重さを想定した錘（質量4.6kg，直径160㎜）を落下させ，路面衝突時の衝撃加速度からHIC値を算出します。HIC値が1,000以下であれば，頭部が重大な損傷を受ける可能性が少ないとされています。そのため，HIC値が1,000となる条件を満足する落下高さによって，転倒時の土系舗装の衝撃吸収性を評価しています。**図－２**および**写真－１**に現場で作製した供試体に対し，室内試験を行った一例を示しますが，HIC値が1,000となる高さが高いほど衝撃吸収性が高いことを示しており，アスファルト舗装と比較して土系舗装が衝撃吸収性に優れていることがわかります。



図－２　土系舗装の頭部損傷係数HIC値1,000となる重錘落下高さ（㎝）[2)]

⑶ **プロクターニードル貫入試験**[2)]

土系舗装の耐久性を評価する上で，歩行者の荷重，特にハイヒールによる荷重耐久性が重要になります。そこで，プロクターニードル貫入試験を行います。この試験は，一定の太さの金属棒を地面に貫入させた際の抵抗から土の硬さを判定する試験であり，プロクターニードルという試験器を用いています。**写真－２**および**写真－３**に，プロクターニードル貫入試験器と試験状況を示します。貫入針は径6.5㎜を使用し，地面に垂直に立て，徐々に1/2インチ（12.7㎜）まで押し込み，その際の荷重（抵抗値）をポンドで表します。ピンヒールタイプの場合，ハイヒールの直径をφ1.3㎝と想定すると，体重50kgであれば，載荷重は50×1.2（安全率）＝60kgとなります。プロクターニードルの直径φ



写真－１　表層面の衝撃吸収性－危険落下高さの測定器[4)]

写真－２　プロクターニードル貫入試験器

写真－３　プロクターニードル貫入試験状況

が6.5㎜であることから，プロクターニードルの値に換算すると約30ポンドとなります。ただし，検査基準値は，試験施工の結果を踏まえて60ポンド以上とされています。

⑷ **泥濘評価試験**[2)]

本試験は，土系舗装の水分影響度を評価するものであり，現場作製供試体を24時間水浸させた後，プロクターニードル貫入試験により評価します。先に示したハイヒールかつ50kg相当荷重を想定したプロクターニードルの換算値から，供試体を１日水浸させた後のプロクターニードル貫入抵抗値は30ポンド以上が目安となります。

⑸ **浮上レキ分および浮上砂分試験**[2)]

この試験は，表面の荒れを評価するものです。追跡調査の一項目とされており，現状では定量的な基準値は定まっていないものと考えられます。測定箇所に内寸法50㎝角の木製型枠を設置して，木製型枠内側の路面を剃毛はけで掃き取り，浮上している土粒子を収集します。収集した土粒子は乾燥炉（110℃）で24時間乾燥させ，乾燥質量（w1）を求めます。次に，乾燥した試料を75㎛ふるいで水洗いし，乾燥炉（110℃）で24時間乾燥させます。乾燥した試料は，２㎜ふるいでふるい分け，２㎜ふるい残留分の質量（w2）および２㎜ふるい残留分の質量（w3）を測定します。単位面積当たりの浮上レキ分と浮上砂分は，次式により計算します。

浮上レキ分（g/㎡）＝ w2（g）／ 0.25（㎡）

浮上砂分（g/㎡）＝ w3（g）／ 0.25（㎡）

―― 参考文献 ――

１）舗装技術，一般社団法人日本道路建設業協会HP

２）土系舗装ハンドブック，大成出版社，2009年８月

３）土の保水性試験，株式会社土木管理総合試験所

４）衝撃吸収性試験のご案内，カケンinformation，https://www.kaken.or.jp/topics/impact/（参照日：2019年11月18日）

５）舗装工学ライブラリー11 歩行者系舗装入門，土木学会，2014年11月

Q6：最近話題のICTやi-Constructionとはどのような技術で，具体的に舗装工事のどのような場面で活用されているのでしょうか？

A6：ICTとは，Information and Communication Technology（情報通信技術）の略で，様々なコンピュータによる情報処理技術に加えて，インターネットやワイヤレス通信技術によるコミュニケーションを活用することで，様々な産業の生産性向上が期待されています。2016年度より，国土交通省が建設現場へのICT活用を推進しており，その取り組みや新基準をi-Constructionと呼びます。i-Constructionの主な取り組みは下記の２つが挙げられます。

①調査，設計，施工，出来形管理，検査の一連プロセスへのICT導入により，作業の省力化や検査の効率化が図られ，生産性の向上が期待されます。

②設計データ（計画高さ座標情報など）の入力により，機械操作のコンピュータ制御が可能となることで，熟練したオペレータでなくても，品質の良い施工が可能になります。また，施工中の検測者などを必要としないため，機械と人の介在機会が減り，安全性の向上も期待できます。

このように，従来人力で行ってきた管理や作業の一部を，コンピュータや機械が担うことで，労働者１人１人の生産性を向上し，少子高齢化にともなう労働人口の減少を補うことが期待されます。内閣府は2025年度までに建設現場の生産性を２割向上させることを目標としています[1)]。また，i-Constructionの推進を通じて，いわゆる3K「きつい，危険，きたない」を脱却して新3K「給料，休暇，希望」が望めるような，労働者にとって魅力的な業界を目指す取り組みです。

⑴ 土工におけるi-Construction

具体的な活用として，2016年度からi-Constructionの取り組みを推進するため，国土交通省は次の３本柱を掲げています[1, 2)]。

○ICT技術の全面的な活用（土工）

○全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）

○施工時期の平準化

この中で，特に舗装工事と関係が深い施策は，「ICT技術の全面的な活用（土工）」です。土工は，レベルやトランシットなどを用いた測量や丁張りの設置など人力に頼るところが多く，他の工種に比べて多くの人員と施工日数を要します。そのため，生産性向上の観点からi-Constructionの活用によるメリットが大きいと考えられます。土工における起工測量から検査までの従来の方法とi-Constructionを活用した場合の対比を**表－１**に示します[3)]。

表－１　土工における従来方法とi-Constructionの対比

段階	従来	i-Construction
測量	○レベル，トランシットなど	○UVA，TLS（３次元測量）
設計・計画	○複数の２次元図面	○３次元データの契約図書
施工	○丁張りの設置 ○検測と修正のための施工	○設計データに基づく機械のコンピュータ制御
検査	○書類による	○各段階の３次元出来形の確認 ○PCでの検査

測量では，TLS（地上型レーザースキャナ）やUVA（無人航空機）などによって，短時間に面的な３次元点群データを取得することで，少人数でより多くの測量情報を取得することが出来ます[4)]。これは，起工測量から施工段階ごとの検測や出来形確認などに適用が可能です。

設計や計画段階では，３次元設計データをもとに自動で施工土量などの計算が可能であり，膨大な２次元図面を用いた従来の方法に比べて，大幅な省力化が期待できます。

施工時には，ICT対応の建設機械が位置情報や高さ情報を認識するため，従来のように丁張りや頻繁な検測・修正のための施工が不要になることで施工の省力化および工期短縮に加えて，人と機械の介在が減ることで安全性も向上します。さらに，仕上がり高さと位置情報，転圧機械の通過回数の記録（転圧回数）などのデータを集積することで，面的に施工管理基準と照合することができます。また，３次元設計データとの較差による評価をPC上で確認できるので書類の削減や検査の効率化なども図られます。

⑵ 舗装工事におけるi-Construction

土工でのICT活用が進む一方で，舗装工の場合，路床や下層，上層路盤工へのMachine Control（MC）モーターグレーダ（MCグレーダ）の導入やアスファ

ルト安定処理路盤や基層・中間層を施工する際にＭＣアスファルトフィニッシャを適用した事例があります（**写真－１**）。

写真－１　MCによる施工状況事例

出来形管理においてTLSを使用して，面的に出来形の検測を実施しています。施工前後の測量・検測結果（３次元座標）を比較することで，各層の厚さの算出，専用のソフトを用いた帳票の自動出力などが可能であり，検査書類の作成の手間を大幅に削減することが可能となります。

ICT舗装工は2017年度に約10件の発注がありました。そのうち，「発注者指定型」が１件，「施工者希望Ⅰ型」が２件，「施工者希望Ⅱ型」が７件となっています。それぞれの発注方式の概要を**表－２**に示します。

表－２　ICT舗装工の発注方式

発注方式	概要
発注者指定型	予定額３億円以上で10,000㎡以上の路盤工を含む工事
施工者希望Ⅰ型	予定額３億円未満で10,000㎡以上の路盤工を含む工事
施工者希望Ⅱ型	規模に関わらず，受注者の提案・協議による

ICT舗装工は，主に新設舗装工事が対象でしたが，ICT舗装工をより普及させるために，舗装補修工事の多くを占める切削オーバーレイ工事などへの導入・試行した事例が報告されています[5,6]。このような現場では，①３次元起工測量，②３次元設計データの作成，③ICT建設機械による施工，④３次元出来形管理が実施されており，技術の普及や課題の抽出などが試みられています。ICT舗装補修工事を試行した現場では，ICT建設機械と路肩に据え付けたトランシット（TS）との位置関係により，自動追尾がうまくいかず，ICT建設機械の制御が途切れるなどの課題が見られました。また，技術者のICT建設機械や情報通信機器などの仕組みや取り扱いの理解が深まることが求められます。ICT出来形管理ではLSで取得される点群データが正確な測点の高さデータでないため，従来の管理手法に比べてLSで計測した結果と設計値との差が大きくなるという報告もあります[6]。このようにICT舗装工を熟知した技術者の育成や専用解析ソフトの開発，専用帳票整備に関することに加え，ICT建設機械が充足されていないことによる機械のやり繰り・費用などに関する問題なども挙げられています。今後，これらの課題の解決や必要となる技術基準や積算基準が整備され，舗装工の生産性向上が期待されます。

── 参考文献 ──

１）国土交通省ホームページ：ICTの全面的な活用，平成28年，資料－2，http://www.mlit.go.jp/common/001118342.pdf（参照日：2019年11月18日）

２）中西健一郎：国土交通省におけるi-Construction拡大に向けた取り組み，建設マネジメント技術，５月号，2019，p.8-12.

３）久保恭伸：i-Construction普及加速事業におけるICT活用施工の効率化に向けた取組み，建設，第63巻，第１号，2019，p.8-11.

４）五道仁実：３次元データの活用とi-Constructionの「深化」，土木施工，Vol.60，No.1，2019，p.26-27.

５）南原道昭：自動車専用道路のICTを全面活用した舗装工事－国道56号片坂バイパス平成29-30年度橘川外舗装工事，土木施工，Vol.60，No.5，2019，p.72-75.

６）（一社）日本道路建設業協会：平成29年度ICT舗装工の施工事例集

Q7：IRI測定とはどのような技術で，どのように活用されているのでしょうか？

A7：IRI（International Roughness Index）とは，舗装路面と運転者の乗り心地を関連付けた国際ラフネス指数です。1986年（昭和61年）に世界銀行より，舗装路面の凹凸を評価する指数として提唱されました。日本では，「舗装路面の凹凸」に関する評価指数として，平成19年６月に舗装調査・試験法便覧に記載された後，平成25年２月に総点検実施要領（案）【舗装編】（国土交通省道路局）が作成された際に，路面の縦断凹凸評価指標として採用されました。

本来，運転者の乗り心地という官能評価を基にIRIは導き出されますが，現在では，様々なIRI測定用の簡易型装置が開発され，定量的な評価が可能となっています[1)]。

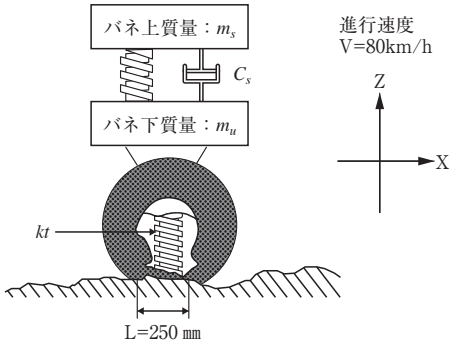
⑴ IRIの概要

IRIは，クォーターカーQC（２軸４輪の車両の１輪だけを取り出した仮想車両モデル）が一定速度で路面を走行したときに，車が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離の比（単位：m/kmまたは㎜/m）で表されます[2)]。**図－１**にクォーターカーモデルを示します。

IRIの利点は，世界共通の指標であるため各国間での比較に用いる事ができる点と測定装置が異なってもおおよそ共通の値が得られる点です[1)]。

⑵ IRI測定方法および各測定方法の特徴

IRIの測定方法は，測定装置による評価や体感評価など，4段階の評価方法があります。路面の凹凸などの測定方法とIRIの評価方法と特徴を**表－１**に示します。



図－１　クォーターカーモデル[2)]

クラス１およびクラス２はプロファイル方式，路面の縦断方向の凹凸を測定し，QCシミュレーションによりIRIを算出します。

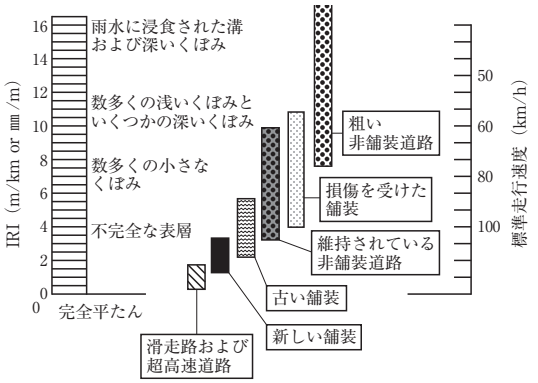
それに対し，クラス３のレスポンス方式は，RTRRMS（応答型道路ラフネス測定システム）が路面から受ける動的応答を主として加速度の形で測定するもので，任意尺度のラフネス指数を測定し，相関式によりIRIを変換します。クラス４の体感や目視による測定方法は，調査員の違いで評価が大きく異ならないよう，調査員の感覚をあらかじめ合わせることが大切です。

⑶ IRIによる路面の評価[2)]

図－２にIRIと路面状態の関係を示します。IRIを用いることで，未舗装道路から，非常に高い平たん性が要求される滑走路および超高速道路までの縦方向のラフネスを同一尺度で評価できます。IRIは数値が大

表－１　路面の凹凸等の測定方法とIRIの評価方法[2)]

クラス	路面の凹凸等の測定方法[2)]	IRIの算出方法[2)]	特徴
1	水準測量	水準測量，またはディップスティックにより縦断プロファイルを測定し，QCシミュレーションによりIRIを算出する。	最も精度の高い測定方法であるが，交通規制を行い測定するため，多くの路線に適用するのは難しい[3)]。
2	任意の縦断プロファイル測定装置	任意の縦断凹凸測定装置で縦断プロファイルを測定し，QCシミュレーションにより，IRIを算出する。	最も実用的な測定方法である。車両に測定機器を搭載することで，効率的に測定でき，最新の測定装置は精度が非常に高い。しかし，測定機器が高価であるため，測定に費用がかかる[3)]。
3	RTRRMS（応答型道路ラフネス測定システム）	レスポンス型の道路ラフネス測定システムで任意尺度のラフネス指数を測定し，相関式によりIRIに変換する。	測定効率は良いが，IRIを直接算出する方法ではないことから，クラス1・2と比べて測定精度は低下する。
4	パトロールカーに乗車した調査員の体感や目視	パトロールカーに乗車した調査員の体感，目視により，IRIを推測する。	最も簡易的な方法である。調査員の違いで評価が異ならないよう，感覚を合わせる訓練が必要と考えられる。



図－２　路面性状とラフネスの関係[2)]

きくなるほど，車輪が路面から受ける衝撃や振動を吸収し緩衝するサスペンションが大きく動くことを表し，平たん性が悪く乗り心地が悪いことを示します。また，評価延長を短くすることで鋭敏性の高い平たん性の評価が可能であり，平たん性不良箇所の抽出に利用できます。

舗装の施工管理にIRIを利用する場合は，使用する装置のクラスが同一でも，装置により反復性や再現性が異なることがあるため，利用目的に応じた要求精度の検証を考慮する必要があります。

⑷ 日本におけるIRI測定の取り組み状況

①IRI共通試験（TRUEプロジェクト）[4, 5, 6)]

現在国内では，多種多様なIRIの測定装置が実用化されていますが，測定装置に要求される精度および検証方法は基準化されていません。そのため，異なるIRI測定装置から得られた結果を相互に関連付けるのが困難です。この背景を踏まえ，2014年にNPO法人舗装診断研究会（PDRG）は路面性状調査に関するTRUEプロジェクトを立ち上げました。主に国内で使用されているIRI測定装置を対象に，北海道内の実道で2014年９月，2016年９月に測定精度の把握と各装置の相関を目的としたIRI共通試験を実施しました。このTRUEプロジェクトに参加したIRI測定装置は2014年に34台，2016年に28台でした。1998年に世界道路協会（PIARC）により実施された路面性状に関する共通試験（EVEN試験）では７台の装置の参加だったことから，近年のIRI測定に対する需要が高くなっていることがわかります。

②高速道路におけるIRIの管理基準[7)]

東日本高速道路㈱・中日本高速道路㈱・西日本高速道路㈱では，高速道路の路面管理基準としてIRIによる評価を，平成25年に総点検実施要領（案）【舗装編】（国土交通省道路局）が作成される以前の平成19年より導入しています。**表－２**にNEXCOで使用しているIRIの指標を示します。

表－２　NEXCOにおける平たん性の基準

項目	指標	要領
補修目標値	IRI　3.5㎜/m	H19.8　舗装施工管理要領改訂
出来型基準（建設工事）	IRI　≦1.6㎜/m（平均値） IRI　≦2.4㎜/m（最大値）	H27.7　舗装施工管理要領改訂
出来型基準（補修工事）	IRI　≦2.0㎜/m（平均値） IRI　≦3.0㎜/m（最大値） ※100m未満は3.5㎜/m以下	H29.7　舗装施工管理要領改訂

おわりに

今回は，東京オリンピックでメディアに取り上げられた遮熱性舗装を始めとした舗装の特徴や性能，舗装の試験方法，ICTなどの舗装技術について調査しました。調査結果より，舗装が持つ性能とその調査方法，ICTの土工への適用状況などを学ぶことができ，今後の技術開発に役立たせたいと思います。本稿が，これからの舗装業界を担う若手技術者の方々の一助になり，さらなる舗装技術の発展につながれば幸いです。

── 参考文献 ──

１）安藤和彦，倉持智明：路面のIRI（国際ラフネス指数）を測定する各種測定方法の精度比較，土木技術資料　56-10，2014

２）㈳日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，[第一分冊]，平成31年３月

３）https://sucra.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=16749&file_id=24&file_no=1（参照日：2019年11月18日）

４）中村博康，富山和也，城本誠一，増戸洋幸，渡辺一弘：IRI共通試験（TRUEプロジェクト）実施報告，アスファルト第57巻230号，2014

５）富山和也，中村博康，増戸洋幸，城本誠一，渡辺一弘：共通試験結果に基づく路面プロファイラの有効性とその検証方法，土木学会論文集E1，Vol71，No3（舗装工学論文集第20巻），2015

６）富山和也，増戸洋幸，中村博康，城本誠一，森石一志，亀山修一：IRI共通試験における基準プロファイルの測定方法，舗装　Vol.54 No.1，2019

７）滝友宏，高橋茂樹：補修工事の出来高基準に対するIRIの適用導入，舗装　Vol.54 No.1，2019

連載 Vol.8 アスファルト・舗装 研究

パルマ大学 工学部 道路建設材料研究ユニット

日本大学生産工学部土木工学科　准教授　加納　陽輔

私は本年3月から1年間，弊学の海外派遣研究員制度によりイタリア，エミリア・ロマーニャ州のパルマ大学にて客員教授としてお世話になっています。パルマ大学では，Dr. G. Tebaldiのご指導のもと，工学部の道路建設材料研究ユニットに所属し，他国からの客員教授や博士研究員らと交流を図りながら，アスファルト混合物のリサイクルに関する調査・研究に取り組んでいます。以下に，パルマとパルマ大学の概要とともに，当研究ユニットの活動を中心に欧州における再生アスファルト混合物の研究動向を紹介いたします。

1．パルマについて

パルマは，**図－1**のとおり北イタリアのエミリア・ロマーニャ州に所在するパルマ県の県都であり，ミラノから130㎞，フィレンツェから180㎞に位置する人口約19.5万人の程よく長閑な地方都市です。エミリア・ロマーニャ州は，一人当たりGDPがイタリア国内で3番目に高く，パルマのほか，州都のボローニャをはじめ，モデナ，フェラーラなどのルネサンス都市が所在する歴史深い地域で，フェラーリやランボルギーニなどが本社を置く自動車産業の中心地でもあります。

また，パルマは北海道の知床半島と同緯度にあって，北をイタリア最長のポー川，南をアペニン山脈に挟まれ，年間気温が仙台市と同程度で酪農や畜産に適した風土のようです。そのため，「美食の都」として食品産業が盛んであり，特産品（D.O.P：Denominazione di Origine Protetta）のパルミジャーノ・レッジャーノ（パルメザンチーズ）やプロシュット・ディ・パルマ（パルマハム）を通じて日本でも馴染みのある地名です。パルマは，かつて中田英寿選手が所属していたセリエA・パルマAC（現：パルマ・カルチョ1913）の本拠地でもあり，試合が行われる週末は一層賑わいを増します。

パルマの街は古代に起源を有し，既に青銅器時代には形作られていたようです。中世には自治都市として栄え，現在もパルマ大聖堂を中心に中世都市の面影が残ります。（**写真－1**）近世のパルマ公国は，フランス皇帝ナポレオン1世の皇后であるマリア・ルイーザ

図－1　エミリア・ロマーニャ州パルマ県

写真－1　パルマ大聖堂

女公によって統治され，フランス文化も垣間見える旧市街は「ピッコラ・パリージ（小さなパリ）」とも呼ばれています。旧市街を歩くと彼女が好んだ黄色の建物が多く，他の都市とは一風違った雰囲気が漂います。（**写真－2，3**）なお，イタリアでは多くの都市の旧市街にZ.T.L.（Zona Traffico Limitato）と呼ばれる一般車両進入禁止エリアが設けられており，エリア内の交通量が適度に制限されるため，観光者の安全・快適性とともに，歴史的景観と調和した自然石舗装が守られています。

2．パルマ大学について

旧市街に本部を置くパルマ大学は，962年に設立され，世界最古の大学のひとつといわれる州立大学です。既に11世紀頃には，リベラル・アーツ（自由七科）の教育が行われ，現在は化学・生物・環境学部，経済学部，工学・建築学部，食品・医薬品学部，人文・社会・産業学部，法学・政治・国際研究学部，数理・物理学部，医学部，獣医学部を擁し，約27,000人の学生が在籍しています。（**写真－4**）

私が通う理工系キャンパスは，旧市街から自転車で20分ほど離れた広大な敷地に快適な教室，地域に開かれたスポーツ施設，焼きたてのピザを提供する食堂，さらに高度な研究施設等で構成されています。どのキャンパスも終日多くの学生で賑わい，自習のための設備は常に満席で，黙々と学ぶ彼らの姿に主体性の高さを感じます。（**写真－5～8**）

イタリアの教育は，モンテッソーリ教育やレッジョ・エミリア・アプローチなどの幼児教育が日本でも注目されていますが，以降の教育段階は初等教育（小学校）5年と前期中等教育（中学校）3年，後期中等教育（高校等）5年，さらに高等教育（大学）が3～5年間に区分

写真－4　パルマ大学の旧市街キャンパス

写真－2　パルマの食料品店

写真－5　パルマ大学の理工系キャンパス

写真－3　旧市街の街並み（商店街）

写真－6　理工系キャンパスの学食（ピザ窯）

写真－7　工学部教室棟での学生たちの様子

写真－8　道路建設材料研究ユニットの実験棟

写真－9　道路建設材料ユニットのメンバー

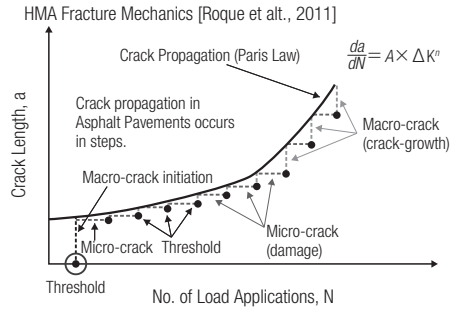
され，工学部では通常，学士・修士課程からなる5年が教育期間とされています。イタリアにおける大学進学率は日本と変わらず，少子高齢化とそれに伴う高等教育機関の状況も類似しています。しかし，両国の違いは大学退学率（中退率）に見られ，OECDのうちイタリアは最も高い約55%，日本は最も低い約10%です。つまり，入学し難く，卒業し易いといわれる日本とは逆傾向のようです。

このような教育段階・期間と学士の厳格な質保証（ANVURバンドA評価）を基盤として，特に工学系の大学院教育が充実していると感じます。パルマ大学工学部では，修士課程の全ての授業が英語で行われ，インターンシップや研究留学等による多様な実践学習の機会が整備されています。

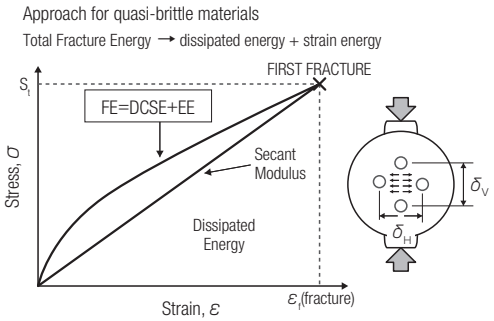
3．道路建設材料研究ユニットについて

パルマ大学工学部は，産業工学，建築，土木工学，情報工学の4コースからなり，約3,700名の在学生を130名の教員と30名の技術職員，100名程度の博士研究員等が支援しています。このうち，土木工学コースに属する「道路建設材料研究ユニット」は，現在，Dr. G. TebaldiとDr. E. Romeoを中心に4名の博士研究員と複数名の修士学生で構成されます。

Dr. G. Tebaldi（**写真－9**後列中央）は，これまで舗装材料の機械的性状を主眼にアスファルト混合物の設計・評価法や路盤材料の安定化技術等の開発に取り組まれ[1~4]，貴重な研究成果とともに多くの研究者を育成されてきました。中でもアスファルト混合物の破壊力学においては，破壊エネルギーの新たな概念を確立され，トップダウンクラッキングの挙動と補修効果を定量化しています[5, 6]。（**図－2**，**3**）また，恩師は研究



図－2　破壊メカニズム（ひび割れ進展）の概念

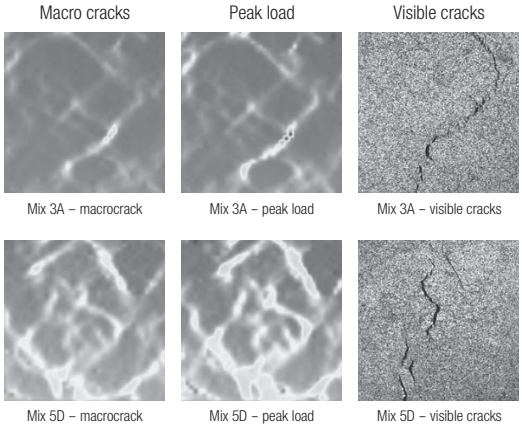


図－3　初期破壊と破壊エネルギー（FE）の概念

功績や人材育成のみならず，EAPA（European Asphalt Pavement Association）　やEATA（European Association of Asphalt Technologists）などの欧州学協会をはじめ，ISAP（International Society for Asphalt Pavements），RILEM（Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux）等の国際組織において要職を務められ，舗装技術の世界的発展にもご尽力されています[7, 8]。（**写真－10**）なお，2017年に東京で開催されたISAPシンポジウムでは，実行委員長としてDr. M.N. Partlとともに ISAP Lectureにてご登壇されました。

Dr. E. Romeo（**写真－9**前列右2人目）は，Dr. G. Tebaldiの最初の門下生であり，フロリダ大学との共同研究を通じて博士号を取得されました。恩師と同様，機械的性状を主眼として，アスファルト混合物の破壊メカニズムや間隙成分に着目したクラック進展挙動の解明に取り組まれています[9, 10]。また，同師は特に静的・動的な載荷試験と画像解析（DIC）を併用したひずみ分布測定法の先駆者であり，様々な載荷条件における舗装材料の変形・破壊挙動を解明されています[11, 12]。（**図－4**）

写真－10　ISAP APEシンポジウム2019



図－4　DICによるひずみ分布の把握

さらに，Mr. A. Roberto，Ms. B.C.S. Gouveia，Mr. F. Preti，Mr. S. Notoの4名の博士研究員は，パルマ大学を拠点に各々がアメリカ，イギリス，フランス等の研究機関と連携し，国際的視点から舗装材料の設計・評価法やリサイクルの研究に取り組んでいます[13, 14]。このほかにも，当ユニットには舗装材料の特性評価やモデリングを主体とするDr. A. Montepara やバインダーレオロジーを主体とするDr. F. Giulianiが所属されており，研究の設備・環境・人材とも大変充実した素晴らしいチームです。

4．再生アスファルト混合物の研究動向について

欧州においても舗装用素材の供給源が縮小する状況にあり，再生アスファルト混合物の利用とともに，再生骨材配合率を高める動きが活発化しています。そのなかで，工学的知見に基づいて再生骨材を最大限に活用し，高配合率の再生アスファルト混合物を対象とした設計・評価法を標準化しようとする取り組みが国際材料構造試験研究機関・専門家連合（RILEM）を中心に進められています。Dr. G. Tebaldiが委員長を務める技術委員会（TC 264-RAP）は，以前のRILEM TC（TC 206-ATB，TC 237-SIB，TC 241-MCD）の成果を資源に，以下の目的のもと2015年より活動しています。

○再生アスファルト混合物における再生骨材の役割と構成素材の相互作用を把握すること
○各国における共同・共通試験に基づいてベストプラクティスマニュアルを作成すること
○再生骨材および再生アスファルト混合物の適切な評価・管理法を標準化すること
○舗装材料のリサイクルによる経済的・環境的影響を包括したLCAツールを検討すること

これらを達成するために，この技術委員会には以下5つのタスクグループ（TG）が編成されており，イギリス，フランス，オランダ，スイス，アメリカ，日本等から多くの研究機関が参画しています。

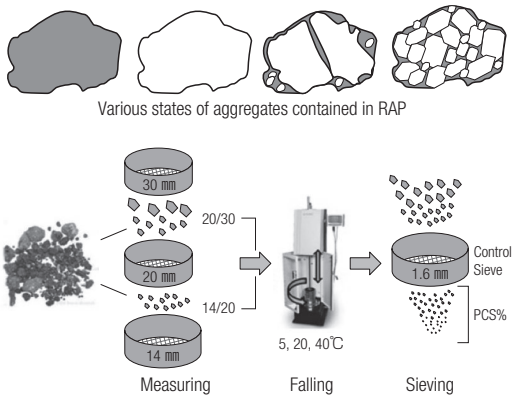
TG 1：Cold Recycling - with foam bitumen and with bituminous emulsion
TG 2：Hot and Warm Recycling
TG 3：Asphalt Binders and Additives for RA
TG 4：Life Cycle Assessment
TG 5：Degree of Binder Activation

各TGの活動は，実験室と現場の双方で実施され，技術の開発と普及のバランスに重点が置かれています。また，この活動では，特にTG5が着眼している再生骨材のブラックカーブとホワイトカーブ（アスファルト抽出前後の粒度曲線）の相違に見られる団粒化度合いや混合・施工・供用時における旧アスファルトの活性化度合い（例えば，DoB：Degree of Blending，DoA：Degree of Binder Activity，DoAv：Degree of Availability）が特徴的であり[15]，これらを定量化するFragmentation Test（断片性試験）やCohesion Test（凝集性試験）が提案されています[16, 17]。（**図－5**，**6**）さらに，欧州では石油だけでなく，植物油や廃油をベースとした様々な添加剤が実用化されており，それらの効果と適性を判断する指標や中温化再生技術に関連した研究（例えば，MURE project）が近年，活発化しています[18, 19]。

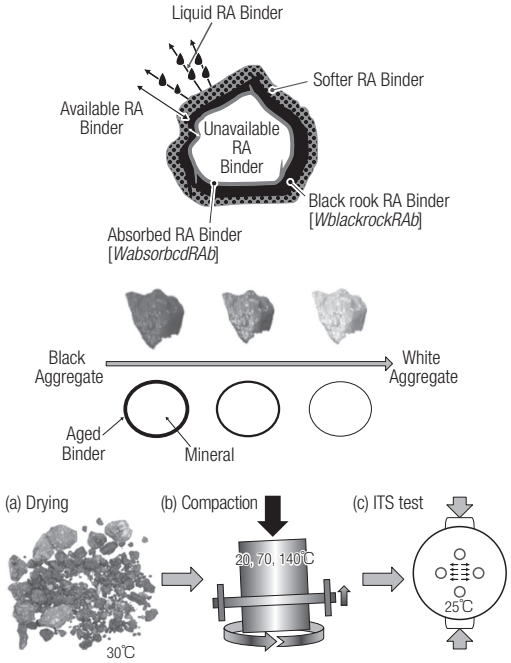
なお，RILEM TC 264の活動は最終年度を迎え，来年度開催予定の「RAP2020 conference」では，再生アスファルト混合物に関する様々な研究成果が発表される予定です。

5．おわりに

この度は，ユニットのメンバーにもご協力いただき，パルマとパルマ大学の概要，当ユニットの取り組みを中心とした再生アスファルト混合物の研究動向を紹介させていただきました。途中，イタリアの教育にも触れさせていただきましたが，私が最も感銘を受けたのは大学院生などの若手研究者を育成する組織的な取り組みです。複数の大学と学協会が連携して，若手研究者を主対象としたサマースクールやウィンタースクールを開催しており，第一線でご活躍される研究者や技術者を講師とした学びと交流の機会を提供しています。人口と舗装の高齢化や人的・物的資源の減少に共通点が見られますが，次世代を育成し，財産を継承する組織的な取り組みに関して，イタリアをはじめ，欧州から学ぶことが多くあります。私は，Dr. G. Tebaldiの温厚で親しみ易いお人柄の中に，研究や教育に対する強い情熱を感じながら，再び初心に返って様々な気付きを得ています。ここに，ご支援いただいた皆様に改めて深く感謝申し上げます。



図－5　再生骨材に対する断片性試験の概念



図－6　再生骨材に対する凝集性試験の概念

―― 参考文献 ――

1） G Tebaldi, A Apeagyei, D Jelagin, AC Falchetto : Advanced Measurement Systems For Crack Characterization, Mechanisms of Cracking and Debonding in Asphalt and Composite Pavements, p.155-227, 2018.

2） WG Buttlar, A Chabot, EV Dave, C Petit, G Tebaldi : Mechanisms of cracking and debonding in asphalt and composite pavements, Springer International Publishing 28, XXI, p.237, 2018.

3） MN Partl, L Porot, H Di Benedetto, F Canestrari, P

Marsac, G Tebaldi : Testing and Characterization of Sustainable Innovative Bituminous Materials and Systems: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 237-SIB, Springer, 2018.

4） E Romeo, G Betti, A Marradi, G Tebaldi : Effect of active fillers on cracking performance of bitumen-stabilised materials, Road Materials and Pavement Design 19 (7), p.1563-1574, 2018.

5） A Montepara, E Romeo, M Isola, G Tebaldi : The role of fillers on cracking behavior of mastics and asphalt mixtures, Asphalt paving technology, p.161-192, 2011.

6） Y Chen, G Tebaldi, R Roque, G Lopp, Y Su : Effects of interface condition characteristics on open-graded friction course top-down cracking performance, Road Materials and Pavement Design 13 (sup1), p.56-75, 2012.

7） JB Soares, G Tebaldi, FT Aragão, K Vasconcelos, E Romeo, EV Dave : 13th Conference of the International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Road Materials and Pavement Design 20 (sup2), S557-S557, 2019.

8） RILEM TC 264-RAP Asphalt Pavement Recycling : https://www.rilem.net/groupe/264-rap-asphalt-pavement-recycling-335

9） Y Yan, F Preti, E Romeo, G Lopp, G Tebaldi, R Roque : Fracture energy density of interstitial component of asphalt mixtures, Materials and Structures 51 (5), p.118, 2018.

10） S Musetti, M Isola, G Tebaldi, E Romeo, R Roque : Fracture Energy Evaluation of "Interstitial Asphalt Mixtures", 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding, 2016.

11） E Romeo, M Orazi, US Orazi, C Accardo, S Noto, G Tebaldi : Evaluation of "long-term behaviour under traffic" of cement treated mixture with RAP, Construction and Building Materials 208, p.421-426, 2019.

12） WG Buttlar, BC Hill, YR Kim, ME Kutay, A Millien, A Montepara, E Romeo et al.: Digital image correlation techniques to investigate strain fields and cracking phenomena in asphalt materials, Materials and structures 47 (8), p.1373-1390, 2014.

13） F Preti, BCS Gouveia, A Rahmanbeiki, E Romeo, A Carter, G Tebaldi : Application and validation of the cohesion test to characterise reclaimed asphalt pavement, Road Materials and Pavement Design 20 (sup1), S434-S445, 1, 2019.

14） A Roberto, E Romeo, A Montepara, R Roncella : Effect of fillers and their fractional voids on fundamental fracture properties of asphalt mixtures and mastics, Road Materials and Pavement Design, p.1-17, 2018.

15） 例えば, D Lo Presti, K Vasconcelos, M Orešković, GM Pires, S Bressi : On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents, Road Materials and Pavement Design, p.1-20, 2019.

16） G Tebaldi, E Dave, AC Falchetto, M Hugener, D Perraton, A Grilli et al.: Recommendation of RILEM TC237-SIB on fragmentation test for recycled asphalt, Materials and Structures 52 (4), p.82, 2019.

17） G Tebaldi, EV Dave, AC Falchetto, M Hugener, D Perraton, A Grilli et al.: Recommendation of RILEM TC237-SIB: protocol for characterization of recycled asphalt (RA) materials for pavement applications, Materials and Structures 51 (6), p.142, 2018.

18） 例えば, AC Falchetto, L Porot, C Riccardi, M Hugener, G Tebaldi, E Dave : Effects of Rejuvenator on Reclaimed Asphalt Binder: An Exploratory Study of the RILEM TC 264-RAP Task Group 3, RILEM 252-CMB-Symposium on Chemo Mechanical Characterization of Bituminous, 2018.

19） Projet National MURE : https://www.pnmure.fr/en/

アスファルト舗装技術のDSR試験に関する新しいアプローチについて ～ RILEM技術員会 252 CMBシンポジウムより ～

小林亜湖　上地俊孝　掛札さくら　小林靖明
山原詩織　渡邉真一　野口健太郎　齋藤夏実
木谷　寛　小池千絵美　曲　慧

1．はじめに

本研究グループは，国外の技術動向について把握，知見を深めるために，国際会議などで報告された研究成果について調査することを活動の一環としている。ここでは，RILEM（*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systémes de construction et ouvrages*）252 CMBシンポジウムの中から選出した10報について紹介を行う。

RILEM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）は，構造物に関する技術，産業の発展を目指し，1947年に設立され，現在，約80カ国，1000人以上の会員で構成されている。その活動は，建築材料や，土木構造物の材料や製造について紹介しており，その中でも，RILEM 252 CMBシンポジウムは2018年9月にドイツ

表－1　DSR試験を既存の方法で用いた報告

カテゴリ①既存の活用方法（左側上段：原題，左側下段：和題，右側：筆者）	
Short Term Aging - Influence of Mixing Time at Laboratory Specimen Production 短期劣化－室内供試体作製における混合時間の影響	Daniel Steiner 他
Viennese Aging Procedure - Behavior of Various Bitumen Provenances ウィーン劣化手法－異なる産地のアスファルトの挙動	Daniel Maschauer 他
A Rheological Study on Rejuvenated Binder Containing Very High Content of Aged Bitumen 劣化アスファルトを多く含有する再生アスファルトのDSR評価	Marco Pasetto 他

表－2　DSR試験を他の試験と組み合わせた報告

カテゴリ②他試験との組み合わせ（左側上段：原題，左側下段：和題，右側：筆者）	
Field Aging Evaluation of Asphalt Binders by Chemical and Rheological Characterization 化学的およびレオロジー的特徴によるアスファルトバインダの現場エイジングの評価	Marcia Midori Takahashi 他
On the Effect of Short Term Aging Temperature on Long Term Properties of Asphalt Binder 長期的なアスファルトの特性に及ぼす短期的な劣化温度の影響	Lily D. Poulikakos 他
Ageing Effect on Chemo-Mechanics of Bitumen 劣化がアスファルトの化学的－力学的性質に及ぼす影響	Ruxin Jing 他
Chemo-mechanical Characterization of Bitumen Binders with the Same Continuous PG-Grade 同パフォーマンスグレードであるアスファルトバインダの化学・機械的性質	Jean-Pascal Planche 他
A New Green Rejuvenator: Evaluation of Structual Changes of Aged and Recycled Bitumens by Means of Rheology and NMR 新規のグリーン再生用添加剤：レオロジー法と核磁気共鳴法による劣化アスファルトと再生アスファルトの構造変化の評価	Cesare Oliviero Rossi 他

表－3　DSR試験を新規の方法として活用した報告

カテゴリ③新規活用方法（左側上段：原題，左側下段：和題，右側：筆者）	
On the Use of a Novel Binder-Fast-Characterzation-Test バインダの新たな簡易特性評価方法	Johannes Schrader 他
Peat as an Example of a Natural Fiber in Bitumen アスファルトと混合する天然繊維の例としての泥炭	Hide Soenen 他

のブラウンシュヴァイクで開催された。RILEM技術委員会252 CMBは，2013年から2018年の5年間に亘って活動を行っており，アスファルト材料の複雑な材料特性の知見を深めるために，アスファルト材料の化学的，力学的な特性の評価を行うことを目的としている。特に，混合物の劣化特性や，アスファルトの短期劣化と長期劣化の技術的な関連性について着目している。

RILEM 252 CMBシンポジウムでは，アスファルトの技術に関して，劣化のメカニズムやその特性評価のほか，アスファルトの微細構造や，アスファルトの再生過程，各温度領域におけるアスファルトの挙動変化などの48報の論文が投稿されている。その中でも，近年広く普及してきたダイナミックシェアレオメーター（以下，DSR）試験の活用方法に着目し，下記の３つのカテゴリに分類して紹介する。

①DSR試験を既存の方法で用いた報告

②DSR試験を他の試験と組み合わせた報告

③DSR試験を新規の方法として活用した報告

表－１には，カテゴリ①のDSR試験を既存の方法で用いた論文を，**表－２**には，カテゴリ②のDSR試験と他の化学分析と組み合わせてアスファルトの評価に用いた論文を，**表－３**には，カテゴリ③のDSR試験の新規活用方法について紹介した論文を示す。今回紹介する論文は，主に劣化したアスファルトに対してDSR試験を行い，劣化の定量化を行っている他，フーリエ変換赤外分光試験や核磁気共鳴法などの化学的評価と組み合わせて報告されている。また，再生添加剤の評価や泥炭繊維の評価に，DSR試験が用いられた論文を紹介する。

DSR試験はアスファルト舗装の評価技術として，広く用いられている技術である。今回紹介する報文が，DSR試験の既知の活用方法だけでなく，今後の技術発展の一助となれば，幸いである。

２．Dynamic Shear Rheometer（DSR）について

2.1　DSRの概要

DSRは，米国におけるSHRP（Strategic Highway Research Program：新道路研究計画）の仕様であるSUPERPAVE（Superior Performing Asphalt Pavements）において，バインダ規格の一部で規定されたアスファルトの動的粘弾性状を評価することを目的に導入された装置である。

DSRの試験供試体としては，未劣化のアスファルト，回転式薄膜加熱試験後または薄膜加熱試験後および加圧劣化試験後のアスファルト，あるいはアスファルト混合物から回収されたアスファルトについて行うもので，研究所で実施する。

SUPERPAVEにおけるバインダ規格の一部を**表－１**に示す。バインダは全てPerformance Grade（以下，PG）と呼ばれるグレードを基にしており，供用される地域の舗装体の温度によって決定される。供用条件を重視するため，PGによって細かく試験温度を設定している。また，レオロジー的測定と劣化試験を組み合わせて，供用状態に近い状態で評価を行うことも大きな特徴である。これらの試験のおおよその流れを**図－１**に示す。それぞれのアスファルトの状態によって試験項目が異なり，DSRはアスファルト混合物の永久変形の評価，疲労ひび割れの評価に対する試験として用いられる。

DSRは，液体高分子材料では広く用いられてきた試験機である。動的粘弾性測定は，静的測定と比べて①試験時間が非常に短い，②流動状態でも弾性が測定できる，③振動載荷の条件が実際の供用条件から設定できるなどの特徴がある。

2.2　DSRの試験方法

DSRの試験概要は，**図－２**に示すとおり，２枚の平行円盤（プレート）の間にバインダを挟み，強制的に繰り返しねじりを与えて応答を測定するものである。PGでは，粘弾性のエネルギー理論に基づいて，永久変形に対する評価指標には$G^*/\sin\delta$，疲労ひび割れに対する評価指標としては$G^*\cdot\sin\delta$を用いる。なお，G^*は複素弾性率，δは位相角であり，DSRの載荷方式には，応力制御とひずみ制御がある。

ここで，試料に振幅γ_0の振動ひずみを与えたとき，試料に生じる応力σは，**図－３**に示すとおり，ひずみよりδだけ位相が進む。粘弾性物質の正弦的刺激による動的試験結果は，通常，複素弾性率G^*や損失正接$\tan\delta$で整理され，複素弾性率の絶対値が物質の硬さや変形抵抗性に相当し，損失正接が粘性的か弾性的かの判断指標になるものと考えられる。なお，完全粘性物質の場合，ひずみと応力に時間的ずれが生じ，その位相角δは90度となり，完全弾性物質の場合，ひずみと応力が同時に発生するので位相角δは0度になる。

また，DSRによる測定において，SUPERPAVEでは，載荷周波数を10rad/sとしているが，これは80～100km/hの走行速度を想定していると言われている。**図－４**に示すように，載荷周波数はアスファルトの粘弾性状に大きく影響する。そのため，供用状態に近い

状態の粘弾性状を知るには，走行速度の異なるところでは載荷周波数を変える必要があると考えられる。しかし，**図－4**にも示されているように載荷周波数を小さくする効果と温度を高くする効果には同様の効果があるため，走行速度の違いに対してSUPERPAVEでは試験温度を変えることで対応している。

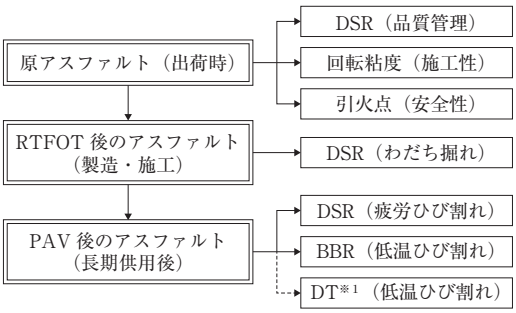
表－1　SUPERPAVEバインダ規格（一部）[1)]

パフォーマンスグレード	PG58					PG64					
	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
7日間平均舗装体設計最高温度　℃	＜58					＜64					
舗装体設計最低温度　℃	＞-16	＞-22	＞-28	＞-34	＞-40	＞-10	＞-16	＞-22	＞-28	＞-34	＞-40
原アスファルト											
引火点　最低温度℃	230										
粘度　≦3Pa・s	135										
ダイナミックシア G*/sinδ　≧1.00kPa 25㎜プレート，ギャップ1㎜ 周波数10rad/s，試験温度　℃	58					64					
回転薄膜加熱試験（RTFOT）残渣											
最大質量損失　%	1.00										
ダイナミックシア G*/sinδ　≧2.20kPa 25㎜プレート，ギャップ1㎜ 周波数10rad/s，試験温度　℃	58					64					
加圧劣化試験（PAV）残渣											
PAV試験温度　℃	100										
ダイナミックシア G*/sinδ　≦5,000kPa 8㎜プレート，ギャップ2㎜ 周波数10rad/s，試験温度　℃	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
クリープスティフネス S≦300MPa m-値　≧0.300 載荷時間60s，試験温度　℃	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
ダイレクトテンション 破断ひずみ　≧1.0% 載荷速度　1.0㎜/min 試験温度　℃	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

※1　G*/sinδ，G*sinδは，ダイナミックシアレオメータ（DSR）によって測定される動的粘弾性状を示す値の一種
※2　Sは，ペンディングビームレオメータ（BBR）によって測定されるクリープスティフネス
※3　m値はBBRによって測定されるSの傾き

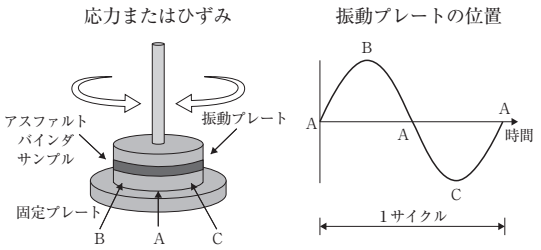
動的粘弾性状は，わだち掘れや疲労ひび割れと関係が深いといわれている。**図－5**に示すように，わだち掘れに対しては，国内でも多数の報告例があり，ホイールトラッキング試験から得られる動的安定度（以下，DS）と本試験から得られる|G*|/sinδの相関性はかなり高い。また，疲労ひび割れに対しては，**図－6**に示すように，海外の検討事例があり|G*|·sinδ（=G"）との関係が示されている。

また，DSR試験機を用いて異なる試験モードを行うMultiple Stress Creep and Recovery（以　下，MSCR）試験がある。このMSCR試験は，高いせん断力を繰り返し載荷し，アスファルトの破壊や変形を伴う非線形領域の粘弾性状を調べる手法である。そのため，累積損傷への抵抗性を効果的に測定することが可能である。試験から得られるパラメータは，非回復クリープコン

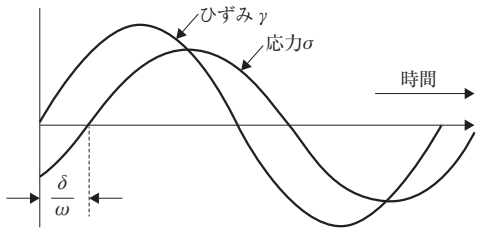


※1　BBRにおいて，m≧0.30，300MPa≦S≦600MPaの場合について行う。

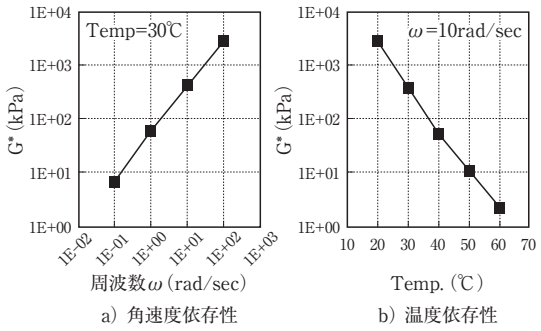
図－1　SHRP試験フロー[1)]
（括弧内は，関係が深いといわれている項目）



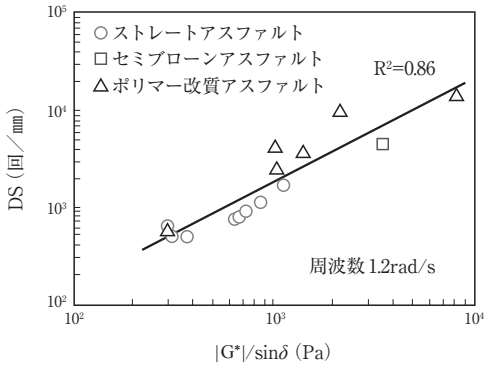
図－2　DSRの概念[2)]



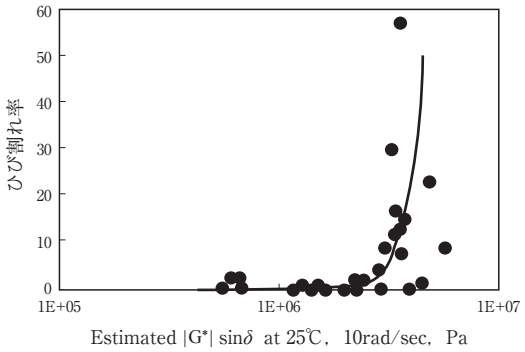
図－３　正弦的刺激によるひずみと応力の関係[1)]



図－４　ストレートアスファルトの周波数及び温度依存性（ストレートアスファルト60/80）[1)]



図－５　DSR試験結果と動的安定度（DS）の関係[1)]



図－６　DSR試験結果とひび割れ率の関係[1)]

プライアンスJ_{nr}で，応力依存性の高いポリマー改質アスファルトのJ_{nr}とわだち掘れ量に高い相関性があることが報告されている。

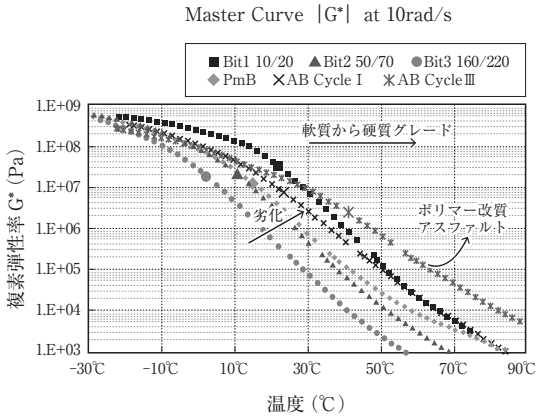
2.3　DSRの解析レビュー[3)]

DSRデータは，様々なアプローチとパラメータを用いて解析を行う。ここでは，DSRの解析において，複素弾性率，ブラックスペース，コールコール図のマスターカーブ，パフォーマンスグレード値，クロスオーバパラメータ，Glover - Roweパラメータなどの各種パラメータに着目したレビューを紹介する[3)]。対象としたバインダは，針入度の異なる軟質から硬質の３グレードのアスファルト，ポリマー改質アスファルト（以下，PmB），および，室内で劣化調整したアスファルト（AB Cycle Ⅰ：PAV 1サイクル，AB Cycle Ⅲ：PAV 3サイクル）とした。

以下にDSRの解析条件を示す。試験条件は，10rad/sの一定周波数とし，-30℃から+90℃の温度範囲（毎分６℃の温度上昇），プレート直径10㎜，試料厚（ギャップ）2.5㎜で実施した。なお，低温では応力制御，高温ではひずみ制御で測定を行った。

(1)　複素弾性率

複素弾性率|G*|は，アスファルトのような粘弾性材料に対し，荷重変形に対するひずみを応力で除した値を示している。複素弾性率|G*|または位相角/tanδのマスターカーブは，周波数や温度に対するグラフで示すことができる。**図－７**に各温度に対する複素弾性率|G*|の６種類のバインダデータを示す。弾性挙動から粘性挙動へ遷移するときの温度の変曲点に相当するクロスオーバ温度では，軟質から硬質のアスファルトになるにつれてクロスオーバ



図－７　６種類のバインダにおける複素弾性率[3)]

温度が上昇するが，複素弾性率はほとんど変化しない。しかし，同一温度においてはバインダが硬くなると複素弾性率が上昇し，硬質グレード（Bit10/20）のアスファルトは，高温で弾性を維持していることが示された。一方，PmBは，クロスオーバ温度が上昇し，弾性挙動から粘性挙動における弾性率の変曲点であるクロスオーバ複素弾性率が低下する傾向を示した。しかし，高温度領域では中間グレード（Bit50/70）よりも高い複素弾性率を保持していた。劣化による変化も同様に，曲線が緩やかになっていることから，劣化バインダが温度の影響を受けにくくなったことを示している。以上より，クロスオーバ温度はバインダのスティフネスに関連し，クロスオーバ複素弾性率はバインダの感温性に関連することが示唆された。

⑵　ブラックスペース

ブラックスペースは，位相角δ対複素弾性率|G*|をプロットした図である。温度についての表記はないが，高温側は左側に，低温側は右側に示されている。曲線の曲率は，弾性率とガラス弾性率間の位相差として，R値で示されている。また，アスファルト舗装のひび割れや耐久性に関連するパラメータであるGlover - Roweパラメータも解析した。**図－８**は６種類のアスファルトデータを示しており，点線はR値，一点鎖線はGlover - Roweパラメータのしきい値を示している。Glover - Roweパラメータのしきい値の左側は健全な舗装を示しており，しきい値の右側では，ひび割れが発生した舗装と関連すると言われている。

軟質から硬質グレードのアスファルトは，曲線がほとんど重なっているが，劣化したアスファルトでは曲線の曲率が小さくなり，温度依存性が小さくなる。一方，PmBはゴム弾性を有するため，位相角が小さくなり，70° の位相角を有するゴムのプラトーが示され，高温でも弾性を有することを示している。

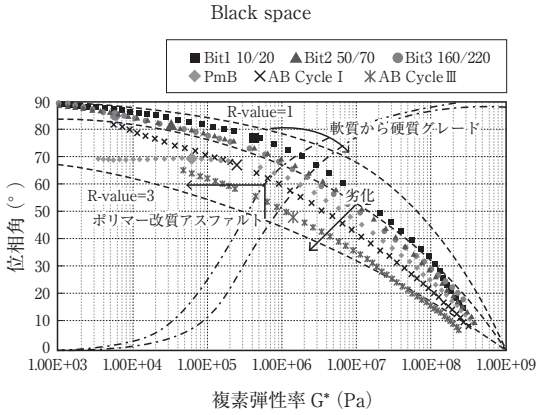
また，Glover - Roweパラメータは，アスファルトのスティフネスと相関が高いと言われている。バインダのグレードが硬くなるほどしきい値に近くなり，劣化したアスファルトの場合には，さらにGlover - Roweパラメータのしきい値に近い値を取る。

ブラックスペースでは，高い位相角で観察できるため，粘性挙動を示す高温度領域の傾向がより明確となることが特徴的である。

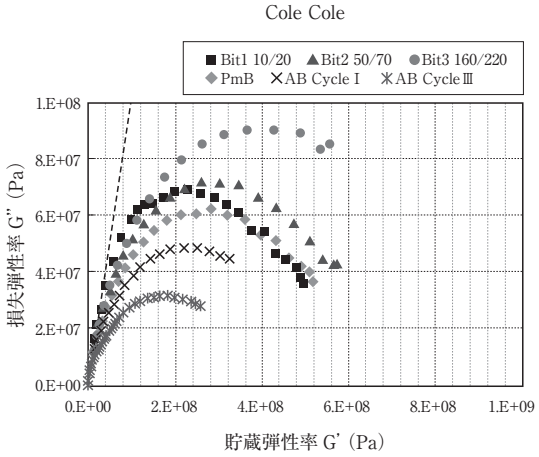
⑶　その他の解析

DSRデータはその他の解析にも用いられる。コール・コール図は，**図－９**に示すように，損失弾性率G”対貯蔵弾性率G’をプロットしたグラフである。損失弾性率は粘性挙動を示し，貯蔵弾性率は弾性挙動を示す。コールコール図は，低温度挙動の傾向が観察しやすいため，低温領域に着目した解析となる。グラフの形状は，G”の最大値をピークとしたベル曲線をとる。軟質なバインダほど緩やかな曲線を描き，損失弾性率G”が高くなるが，バインダが劣化することによりG”は小さくなる。

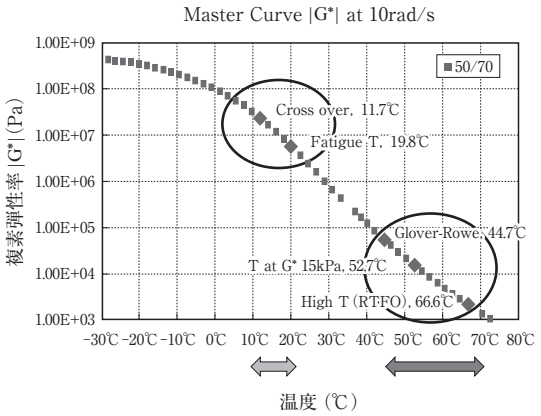
また，**図－10**に示す|G*|のマスターカーブは，50/70の中間グレード（Bit2 50/70）のアスファルトバインダにおける，種々のパラメータを示す。パラメータは全て同じデータに基づき示しているが，分析方法が異なっている。これより以下の２点が示された。



図－８　Glover-Roweパラメータを含む６種のバインダのブラックスペース[3)]



図－９　６種バインダのコールコール図[3)]



図－10　|G*|対温度図における種々のDSRパラメータ[3)]

○Glover - Roweパラメータを持つ高温度領域（40℃～70℃）では，高PGの温度や，|G*|が15kPaに等しくなる温度を有する

○中程度の温度領域（10℃～20℃）では，中程度のPG温度とクロスオーバ温度を有する

(4)　DSR解析の展望

DSRは，広範囲の温度条件や周波数条件下におけるアスファルトの挙動を観察するための方法の一つである。データの解析には，様々な方法があるが，複素弾性率のマスターカーブやブラックスペースは，そのうちの１つである。また，各種アスファルトバインダによって，データ解析のアプローチが異なり，高温度条件では，ブラックスペース，Glover - Roweおよび|G*|/sin δパラメータを用いる。一方，中程度の温度領域では，マスターカーブやクロスオーバパラメータを，低温度領域では，コールコール図を用いて対応する。このようにDSRは，様々な方法でデータを解釈し，それらを組み合わせることで，アスファルトバインダの挙動を広く観察することができると言える。

―― 参考文献 ――

1）（公社）日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成31年版）（第２分冊），第Ⅲ章試験編，pp.〔2〕-306-345，2019

2）質疑応答，舗装，vol.43-1，pp.29 - 31，2008

3）Laurent Porot 他：Rheology and Bituminous Binder, A Review of Different Analyses,Rilem 252-CMB Symposium，pp.50 - 55，2018

３．論文紹介

3.1　DSR試験を既存の方法で用いた報告

短期劣化－室内供試体作製における混合時間の影響

原題：***SHORT TERM AGING - INFLUENCE OF MIXING TIME AT LABORATORY SPECIMEN PRODUCTION***

キーワード：短期劣化，加熱アスファルト混合物，室内製造，DSR

目的：DSR試験を用いた室内製造の熱によるアスファルトの劣化評価

(1)　はじめに

加熱アスファルト混合物（以下，HMA）の粘弾性の挙動は，バインダの挙動に大きく影響する。その挙動は加熱アスファルト混合物製造時や，転圧時の熱などによる急速酸化の短期劣化（以下，STA）と，供用中の空気酸化などによる長期劣化（以下，LTA）が挙げられる。室内試験において，加熱アスファルト混合物の劣化では，HMA平板の室内製造などが行われているが，試料の作製は，材料の製造量が少なく，STAの影響を受けやすいと考えられる。

本研究では，DSR試験を用いて，HMAのミキサー内貯蔵時間を変化させ，室内にてHMA平板を製造した際のSTAの劣化過程を評価することを目的とした。

(2)　試験方法

①混合物製造条件

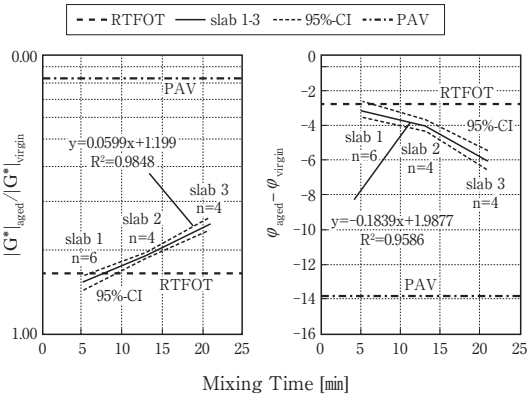
HMAのバインダは未劣化の針入度70/100（PG64-22，79Pen）のアスファルトを用いた。製造温度は170℃とし，混合時間は３種類検討した。スラブ１ではミキサーで混合し５㎜貯蔵，スラブ２では13㎜貯蔵，スラブ３では21㎜の貯蔵を行い製造した。

②DSR試験

試験後の試料からアスファルトを抽出し，DSR試験を用いて複素弾性率|G*|と位相角φの評価を行った。DSRの試験条件は，平行プレート直径25㎜，ギャップ１㎜，周波数を1.592Hz，試験温度条件を52℃から82℃で実施した。

(3)　分析結果

図－１に，試験温度64℃における混合時間の変化と，複素弾性率|G*|または位相角φの関係について



図－１　混合時間と複素弾性率|G*|または位相角ϕの関係

示す。複素弾性率は，未劣化バインダに対する各試験条件後の複素弾性率の相対変化について評価し，位相角ϕは，試験後のバインダから未劣化バインダの位相角を差し引いた変化量を示している。そのため，STAの劣化の割合が大きいほど，位相角が小さくなる。なお，図に示したデータは，４～６回の平均値とし，点線は95%信頼区間（95%-CI）を示している。また，図中には，劣化の比較として，標準的な回転式薄膜加熱試験（以下，RTFOT）の劣化レベルと，LTAの劣化レベルとして用いられるRTFOT+加圧劣化容器装置（以下，PAV）の劣化レベルについても示している。

結果より，混合時間の変化がバインダの力学的挙動にかなりの影響を与えることが観察されたが，混合時間が最も長い条件においても，LTAの劣化レベルまでは達していないことが観察された。また，混合時間に対する劣化の影響を評価するために，線形回帰を図中に示した。決定係数$R^2 = 0.95$以上で得られたことより，位相角あるいは複素弾性率と混合時間の間で相関が示唆された。

(4)　おわりに

本報告では，HMAの室内製造における短期劣化の影響を評価した。混合時間や貯蔵時間が長くなると，バインダの機械的挙動が変化し，位相角や複素弾性率と混合時間の間で相関が観察された。

本研究のように，劣化の影響についてバインダではその差を観察することはできるが，アスファルト混合物で有意な差が観察されるかが課題となる。そのため，バインダとHMAのスティフネスの両方の評価が必要となる。また，本論文で用いたアスファルトは，STAやLTAの劣化の影響を受けやすいアスファルトであったため，アスファルトのグレードや産地についても考慮する必要がある。

ウィーン劣化手法－異なる産地のアスファルトの挙動

原題：*VIENNESE AGING PROCEDURE - BEHAVIOR OF VARIOUS BITUMEN PROVENANCES*

キーワード：VAPro，長時間劣化，加熱アスファルト混合物，スティフネス，DSR

目的：アスファルトの新しい劣化手法の提案

(1)　はじめに

本研究では，アスファルトの新しい劣化手法としてウィーン劣化手法（以下，VAPro）を提案した。産地の異なるアスファルトを含有した混合物をVAPro劣化し，抽出後にDSR試験を行い評価した。

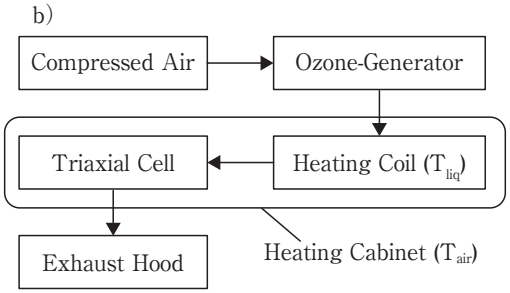
(2)　材料と試験方法

試料は，最大粒径11㎜，アスファルト量を5.2%のアスファルトコンクリートを用いた。**表－１**より，アスファルトには４種類の産地の異なるアスファルト70-100と，製造年数の異なる２種類のポリマー改質アスファルト（以下，PmB）を使用した。

表－１　使用バインダの種類と性状

アスファルト種類	No.	針入度（1/10㎜）	動的せん断係数MPa（1.59Hz，64℃）
70/100	A	88	1.34
70/100	B	79	1.09
70/100	C	64	1.77
70/100	D	55	1.57
PmB 45/80-65	A（2012）	67	5.58
PmB 45/80-65	A（2017）	65	4.97

図－２にVAPro劣化に使用する装置と概略を示す。VAPro劣化は60℃，0.3bar下で行い，劣化を促進させるためにオゾンと一酸化窒素で３日間かん流した。VAPro劣化によって劣化後，抽出と減圧蒸留によってアスファルトを回収した。DSR試験は，未劣化，RTFOT，RTFOT+PAV及びVAPro劣化による劣化アスファルト，スラブ残留物の５試料を測定した。測定は，-40℃～82℃の範囲内に６℃間隔で行い，周波数は0.1，0.3，1.0，1.59，3.0，5.0及び10.0Hzで実施した。



図－２　ウィーン劣化手法の写真（a）と概略（b）

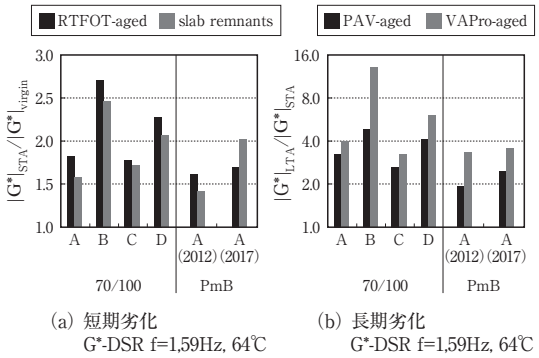
⑶　結果と考察

図－３に64℃，1.59Hzで測定した複素弾性率の相対変化を示す。製造・施工時の劣化（以下，STA）では，スラブ残留物は，劣化レベルが1.5～2.5となり，RTFOT後の劣化試料と類似している。このことから実際の劣化方法をよく表していると言える。長期供用時の劣化（以下，LTA）では，VAPro劣化による劣化レベルは３～13となり，劣化後の複素弾性率は未劣化の複素弾性率と関連する。PAVの劣化レベルはVAPro劣化より低く，その差はアスファルトBが最も大きかった。

図－４に64℃，1.59Hzで測定した位相差の変化を示す。STAでは，RTFOT後の試料はスラブ残留物と類似している。LTAでは，アスファルトの位相差の減少は複素弾性係数の増加と一致する。PmBのPAV後はほぼ位相角の減少がなかった。また，アスファルトBのPAV及びVAPro劣化後の劣化試料の差は顕著であった。これらのことから，PAV劣化手法は実際の劣化プロセスを再現するのに最適ではない可能性がある。

⑷　まとめ

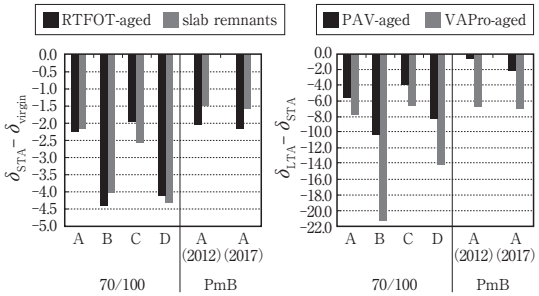
本論文では，VAPro劣化後のDSRを用いて種々のアスファルトを測定し，結果が明らかに違うことを確認した。また，VAPro劣化による試料の劣化レベルはRTFOT+PAVと比較して大幅に異なる。これは，



（a）短期劣化
G*-DSR f=1,59Hz, 64℃

（b）長期劣化
G*-DSR f=1,59Hz, 64℃

図－３　複素弾性係数G*



（a）短期劣化
δ-DSR f=1,59Hz, 64℃

（b）長期劣化
δ-DSR f=1,59Hz, 64℃

図－４　位相差σ

PAV方式では現場で発生する劣化過程を再現できていないことを示唆している。

劣化アスファルトを多く含有する再生アスファルトのDSR評価

原題：*A RHEOLOGICAL STUDY ON REJUVENATED BINDER CONTAINING VERY HIGH CONTENT OF AGED BITUMEN*

キーワード：劣化アスファルト，再生用添加剤

目的：DSR試験による劣化アスファルトの再生可能性に関する検討

⑴　はじめに

一般的に再生アスファルト混合物を利用する際に，骨材に付着して劣化し，硬くなったアスファルトを再利用するため，再生添加剤を使用している。本研究では，DSR試験を用いて，60％の劣化アスファルトを含むバインダに対して，市販の再生添加剤による再生回復の可能性を検証することを目的とした。

(2) 試験材料

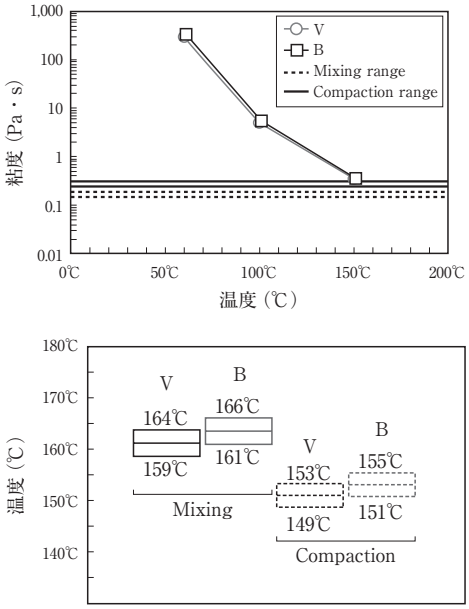
試料は，未劣化アスファルトV，短期間劣化Vs（85分間RTFOT）及び長期間劣化VL（325分間RTFOT）アスファルト，再生アスファルト合材の再生で得られるバインダとして，未劣化アスファルトVとVLのアスファルト重量の6％の再生添加剤を添加したブレンドBと，Bを短期間及び長期間劣化させたブレンドBs, BLを用意した。

(3) 評価方法

160℃に加熱したアスファルトに液体の再生添加剤を添加し，ミキサーで攪拌した。せん断粘度は60℃，100℃，150℃にて測定した。また，クリープコンプライアンスJ_{nr}の結果により，50℃～80℃の温度範囲において，応力は0.1および3.2kPaとし，繰り返しせん断クリープリカバリ試験（以下，MSCR）を行った。最後に，温度が10℃～80℃，ひずみが0.05％，周波数が0.1～10Hzの条件でDSRを行い，20℃の各材料の複素弾性率（G*）マスターカーブを得た。

(4) 結果と解析

図－5に示すように，ブレンドBは未劣化アスファルトVと比較して，混合温度や締め固め温度，せん断粘度に変化は見られなかった。これは，ブレンドBに劣化したアスファルトが60％含有するにも関わらず，再生添加剤を添加することで，未劣化アスファルトと同様の粘度まで回復することを示唆している。



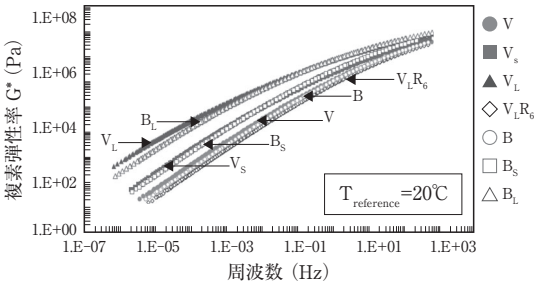
図－5　VとBのせん断粘度（a）および混合と締固め温度（b）

また，**表－2**にMSCRの試験結果（最低および最高試験温度での結果のみ）を示す。短期間劣化したアスファルトV_sおよびブレンドB_sは，クリープコンプライアンスJ_{nr}の値に差がほとんど見られなかったことから，ブレンドB_sは，V_sと同じグレードの性能を有することが分かった（AASHTO MP 19）。したがって，再生したブレンドBは未劣化アスファルトVと同程度の永久変形抵抗性を有することが予想された。

ウィリアムズ・ランデル・フェリーの式に従い，特定周波数の典型的な複素弾性率（G*）曲線を**図－6**に示す。通常，アスファルトはRTFOT等の方法により劣化させると硬くなりG*が増加する。6％再生添加剤を添加することで，V_LR_6のG*曲線は未劣化アスファルトVの下方に移動し，基本的な性状を効果的に回復させることを確認した。また，劣化ブレンド（B_S, B_L）は，対応する劣化アスファルト（V_S, V_L）の結果と非常に類似していることから，再生添加剤の有効性を証明している。長期的な経年劣化は，材料の脆性や疲労破壊につながる可能性が大きくなるが，同じ温度条件において，再生添加剤を添加したブレンドB_Lは，劣化アスファルトV_Lと同じ疲労性能であることを示している。

表－2　MSCR試験の結果

Material	V_s	V_s	V_s	V_s	B_s	B_s	B_s	B_s
T [℃]	50	50	80	80	50	50	80	80
τ [kPa]	0.1	3.2	0.1	3.2	0.1	3.2	0.1	3.2
J_{nr} [kPa^{-1}]	0.34	0.36	20.99	23.13	0.31	0.32	21.27	22.62
$J_{nr\text{-}diff}$ [%]	4.3		10.2		3.1		6.4	



図－6　劣化前後のアスファルトの複素弾性率

(5) 結論

劣化アスファルトに再生添加剤を添加することによって，せん断粘度，スティフネスおよび永久変形抵抗性では劣化前とほぼ同程度の性能を示し，レオロジー特性が回復することを確認した。すなわち，中温

および高温における再生アスファルト混合物の加熱リサイクルは再生添加剤によって性能的観点から可能であることを実証した。

3.2　DSR試験と他試験とを組み合わせた報告

化学的およびレオロジー的特徴による アスファルトバインダの 現場エイジングの評価

原題：***FIELD AGING EVALUATION OF ASPHALT BINDERS BY CHEMICAL AND RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION***

キーワード：核磁気共鳴分光装置，フーリエ変換型赤外分光光度計，DSR

目的：アスファルトの現場での劣化を定量化

⑴　はじめに

本研究では，初期性状の異なる２種類のアスファルトを使用した舗装において現場劣化後のアスファルトを回収し，その劣化を定量化するために，化学的な手法とレオロジー的な手法で評価した。

実験の結果，化学・レオロジー両方の結果において，アスファルトの継続的な劣化を確認したが，大部分が施工後24ヶ月までであり，最大の劣化は製造時の混合で起こっていた。また，２種類のアスファルトが異なる現場劣化を経たとしても，36ヶ月後のパフォーマンスは同程度であることを示した。

⑵　材料

サンパウロ州の試験箇所（t = 4 ㎝）より舗設後0,12,24および36ヶ月に採取した混合物から劣化アスファルトを回収した。混合物のアスファルトはAC 30/45とAC 50/70であり，回収方法はASTM D217-Test MethodB（2017）とASTM D1856（2015）に従った。

⑶　評価方法

化学的評価では，アスファルトの構造変化を分析するため，核磁気共鳴法（以下，NMR）で芳香族炭素（C-ar），芳香族水素（H-ar），アルファ水素（H-alpha）量を測定した。また，減衰全反射（ATR）によるフーリエ変換赤外分光試験（以下，FTIR）では1,720～1,650cm^{-1}にあるカルボニル化合物のピーク面積と，1,480～1,410cm^{-1}にあるエチレン（CH_2）とメチル（CH_3）グループのピーク面積比からカルボニル指数を計算した。

レオロジー的評価では，平行プレート直径25㎜，ギャップ１㎜の条件でDSRを行った。試験は，周波数を１～100rad/sで0.01%のひずみ振幅，46～82℃（６℃毎）で行い，複素弾性係数|G*|を決定した。次にシフトファクタ法を用いて基準温度52℃でマスターカーブを描いた。アスファルトの永久変形抵抗性を評価するために，繰り返しせん断クリープリカバリ試験（以下，MSCR）も実施した（ASTM D7405 2010）。

⑷　結果と考察

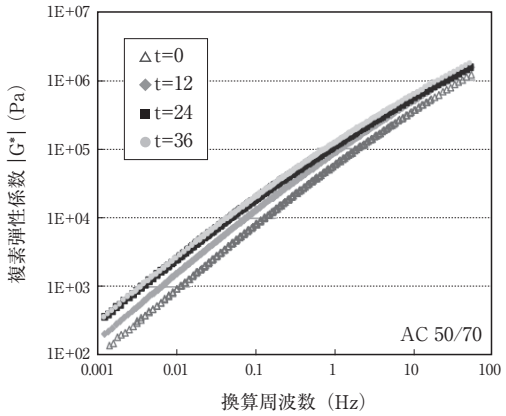
FTIR，NMRおよびMSCR試験の結果を**表－３**に示す。未劣化のアスファルトにはカルボニル化合物が観察されず，劣化後カルボニル指数は増加した。芳香族置換指数（以下，ASI）は，芳香環の縮合反応による劣化とともに増加した（AC 30/45の24ヶ月，AC 50/70の36ヶ月を除く）。H-alpha化合物は他の分子と反応して酸化を起こしアスファルトの酸化とともに減少する。24ヶ月後の結果はAc 30/45とAc 50/70で反対の傾向を示しており，同時に起こる他の反応によりこれらの結果が妨害された可能性がある。

MSCR試験は劣化時間t=0（混合・転圧後）とt=36ヶ月で実施した。結果は，t=0でAc 30/45が，より低いJ_{nr}（回復不能な反応）であった。これは，Ac 30/45の永久変形抵抗性がAc 50/70よりも良好なことを示す。一方，t=36ヶ月ではAc 30/45とAc 50/70のJ_{nr}は同程度であった。

図－１は４つの劣化時間におけるアスファルトの|G*|マスターカーブである。|G*|は経年変化とともに増加し，特にAC 50/70は12ヶ月後により硬くなった。AC 30/45，AC 50/70ともにt = 24とt = 36のマスターカーブが重なっていた。これは最も厳しい劣化が舗設後24ヶ月までに起こったことを示唆している。これを説明するためには，今後さらに試験が必要である。

表－３　劣化時間ごとのFTIR，NMR，MSCR試験結果

アスファルト種	劣化時間（ヶ月）	FTIR	NMR		MSCR	
		Ic=o（%）	ASI（%）	H-alpha（%）	$J_{nr3.2}$（kPa^{-1}）	J_{nrdiff}（%）
AC 30/45	未劣化	－	4,891	12.2	－	－
	0	5.8	5,411	11.8	0.23	8.75
	12	6.5	5,579	10.8	－	－
	24	8.5	4,781	12.0	－	－
	36	9.6	5,622	12.3	0.14	3.22
AC 50/70	未劣化	－	4,731	13.3	－	－
	0	6.6	5,448	13.4	0.52	7.67
	12	6.5	5,648	11.8	－	－
	24	9.8	5,768	13.0	－	－
	36	10.4	5,553	11.6	0.17	2.84



図－１　52℃の複素弾性係数|G*|（AC 50/70）

長期的なアスファルトの特性に及ぼす短期的な劣化温度の影響

原題：***ON THE EFFECT OF SHORT TERM AGING TEMPERATURE ON LONG TERM PROPERTIES OF ASPHALT BINDER***

キーワード：劣化，中温化アスファルト混合物，回転式薄膜加熱試験，加圧劣化試験

目的：室内試験における中温化混合物の短期劣化シミュレーション

⑴　はじめに

アスファルト混合物を通常の加熱アスファルト混合物（以下，HMA）よりも低い温度で製造することができる中温化技術は，環境に配慮した技術として注目されている。

本研究は，163℃における回転式薄膜加熱試験（以下，RTFOT）による，中温化アスファルト混合物（以下，WMA）の短期劣化シミュレーションを目的として実施した。

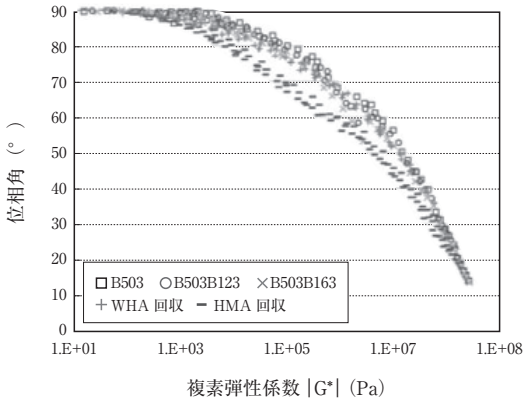
⑵　実験概要

アスファルトおよびアスファルト混合物の両方の性能を調べるため，それぞれから４種類のアスファルト（針入度70/100）を用いた。これらのアスファルトのひとつを用いて，HMAおよびWMAの両方を製造した。HMAは170℃で混合し，WMAは150℃のフォームドアスファルトを用いて110℃で混合した。製造後，これらを実験室で短期劣化させ，アスファルトを回収した。

また，劣化および評価には，いくつかの室内試験を組み合わせた。RTFOTによる劣化は，３つの異なる温度で実施し，その後，加圧劣化容器装置（以下，PAV）を用いて長期劣化を行った。環境制御型走査電子顕微鏡（以下，ESEM）による劣化は，123℃および163℃で実施した。評価は，針入度，軟化点，DSRによるレオロジー評価，フーリエ変換赤外分光法（以下，FTIR）による化学特性評価，ESEMによる微細構造特性評価とした。

⑶　結果と解析

図－２に，レオロジー評価の結果を示す。マスターカーブを用いたレオロジーデータは，全ての劣化条件で，材料に硬化が生じることを示した。また，RTFOTの温度が高いほどレオロジー特性の変化が大きかった。HMAから抽出したアスファルトの複素弾性率G*の変化は，他のアスファルトよりもさらに劇的な変化が見られた。

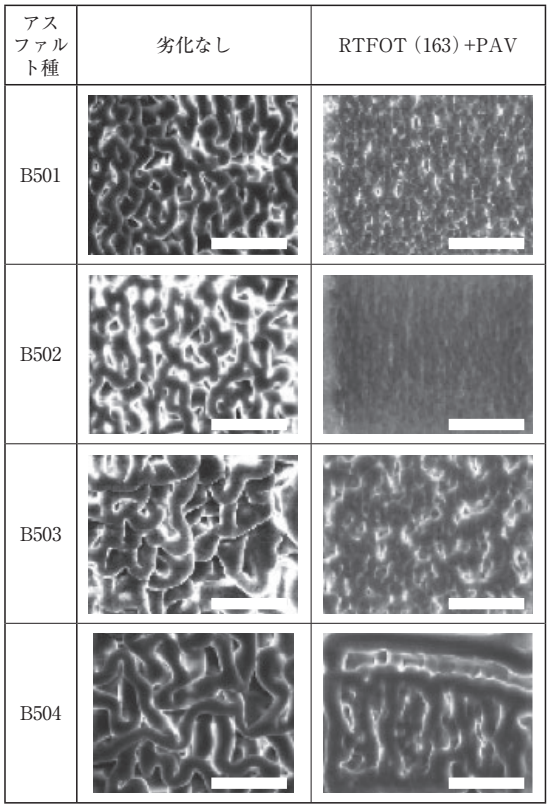


図－２　室内劣化させたアスファルトと，劣化WMAおよびHMAから抽出したアスファルトとの対比（B503：未劣化，B503B123,163：RTFOT劣化温度）

図－３に，微細構造特性評価の結果を示す。長時間にわたるアスファルトへの電子線の照射は，フィブリル構造を生成する傾向がある。全てのアスファルトから得られたフィブリル構造の画像は，全ての未劣化アスファルトがフィブリル構造を有し，これが種々の劣化の程度によって変化することを示す。123℃でのRTFOT劣化は，多くのフィブリル構造の発生を誘導しないが，163℃でのRTFOT劣化で組織はより密になる様子が観察された。

⑷　結論

DSRを用いたレオロジー評価により，従来の評価からの知見が確認された。レオロジー特性は，RTFOT温度が高いほど大きい変化を示した。また，ESEMによる微細構造特性評価により，劣化によりフィブリル構造がはるかに高密度になり，径が小さくなることを示した。



図－３　未劣化アスファルトおよび劣化アスファルトのESEM画像の例（スケールバー＝50㎛）

RILEM 252 CMBは適切な短期劣化温度の低減を推奨しており，今後さらにより広い試料について調査し，検証する必要がある。本研究における実験結果と試料の提供に関しては，Rilem 252 CMB技術委員会の貢献によるものである。

劣化がアスファルトの化学的－力学的性質に及ぼす影響

原題：***AGING EFFECT ON CHEMO - MECHANICS OF BITUMEN***

キーワード：劣化，DSR，フーリエ変換赤外分光分析

目的：劣化アスファルトの化学的性状および力学的性状の解明

⑴　はじめに

アスファルトの劣化は，舗装の摩耗等の損傷の要因と考えられている。劣化はアスファルトの化学的性状および，力学的な粘弾性を変化させることが知られている。本研究は，アスファルトの劣化に関する化学的指標および力学的指標を見出し，これらを関連付けることを目的としている。

⑵　劣化方法

試験に用いたアスファルトは，針入度70/100の一般的なストレートアスファルトを劣化させたものとした。また，劣化方法は**表－２**に示す13通りとした。

表－２　劣化方法

No	劣化方法	時間（時間）	温度（℃）	圧力（atm）
1	オーブン加熱	20	100	0
2		40		
3		80		
4		160		
5		320		
6		40	50	
7			150	
8	PAV	40	100	5
9				10
10				15
11				20
12	RTFO	1.25	163	0
13	RTFO（+PAV）	1.25（20）	163（100）	0（20）

⑶　分析方法

①化学的分析方法

フーリエ赤外分光計（以下，FTIR）にて劣化を表すカルボニル指数とスルホキシド指数を測定した。

②力学的分析方法

DSRにて周波数および試験温度を変えながら複素弾性係数および位相角を測定した。粘性から弾性へと遷移するとき（位相角=45°）の周波数（クロスオーバ周波数）および複素弾性係数（クロスオーバ弾性係数）を算出した。

⑷　分析結果

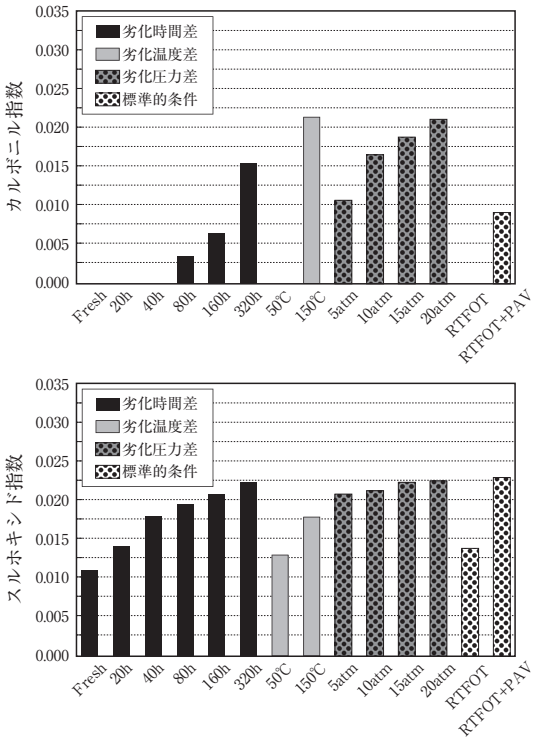
①化学的分析結果

分析結果を**図－４**に示す。**図－４**より，劣化時の時間，温度，圧力の増加に伴い，カルボニル指数，スルホキシド指数とも増加傾向が見られる。またスルホキシド指数の方が劣化に対して敏感に反応している。

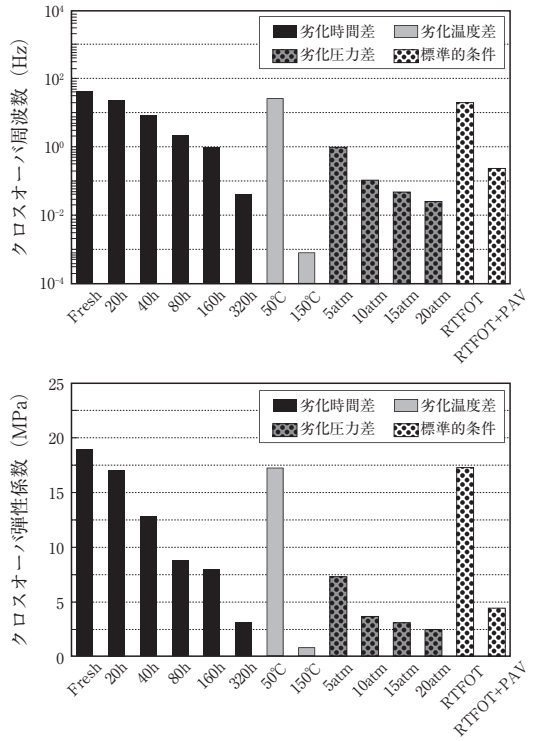
劣化の化学的変化を表すため，カルボニル指数とスルホキシド指数を足し合わせた複合劣化指数を用いることとした。

②力学的分析結果

分析結果を**図－５**に示す。**図－５**より，劣化が進むとクロスオーバ周波数の低下がみられる。これは



図－４　化学的分析（FTIR）結果

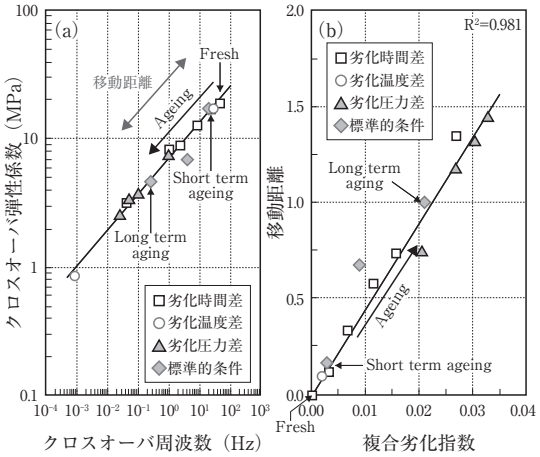


図－５　力学的分析（DSR）結果

劣化により分子量が増加していることを示している。また，劣化が進むとクロスオーバ弾性係数も低下している。これは，分子の分散が高まっていることを示している。

③劣化の化学的－力学的特性

図－６（a）にクロスオーバ周波数とクロスオーバ弾性係数の関係を示す。これらの関係には相関があり，劣化が進むにつれてプロットは直線上の左下へと移動する。この移動距離は劣化の程度を表すものと考えられる。**図－６**（b）に，この移動距離と，複合劣化指数の関係を示す。**図－６**（b）より，これらの２つのパラメータには良好な相関がみられる。またこれらの関係は劣化方法に依存しないことが明らかとなった。



図－６　化学的指標と力学的指標の関係

同パフォーマンスグレードであるアスファルトバインダの化学・力学的性質

原題：***CHEMO - MECHANICAL CHARACTERIZATION OF BITUMEN BINDERS WITH THE SAME CONTINUOUS PG-GRADE***

キーワード：アスファルトバインダ性状評価，化学分析，粘弾性状評価

目的：化学性状および粘弾性状の測定によるアスファルトの評価

(1)　はじめに

原油供給に関する要求の変化に対応するため，アスファルトの製造工程は大きく変更されており，その結

表－３　評価試料の性状

PGによるバインダのグレード分け，低温性状の評価結果					
サンプル名	PGの最高使用温度（℃）	PGの最低使用温度（℃）	PGの中間温度（℃）	PGの低温性状指標⊿Tc（℃）	PGグレード
C-PG 69-13（A）	69	−13	24.8	−0.6	PG 64H-10
C-PG 67-14（B）	67	−14	22.3	−3.7	PG 64H-10
C-PG 68-14（C）	68	−14	20.6	−11.2	PG 64S-10

ワックスの含有成分，結晶化度，粘弾性状測定結果						
サンプル名	低分子量ワックス（waxyA）含有量（%）	高分子量ワックス（waxyB）含有量（%）	waxyA+B	結晶化度（%）	J_{nr}（3.2）at 64℃（1/kPa）	J_{nr}（3.2）at 70℃（1/kPa）
C-PG 69-13（A）	12.2	1.6	13.8	0.60	1.95	4.69
C-PG 67-14（B）	9.3	0.9	10.2	1.02	1.84	4.63
C-PG 68-14（C）	45.3	10.3	55.6	1.65	2.30	5.42

果アスファルトの品質も，変化してきた。ほとんどの製油所では，アスファルトの出荷規格を満たすためだけに，処理条件を調整しているため，原油や製造工程の変更については，重要視されることはない。しかしながら，アスファルトバインダとして必要な性質については，出荷規格や既存の測定方法だけでは，評価することができない。本研究では，従来のパフォーマンスグレード（以下，PG）では評価することのできないバインダ特性，アスファルトに対するワックスブレンドの影響について，評価する。

⑵　評価試料の性状

評価試料（全３種）の性状について，**表－３**に示す。評価試料は，全て同程度のPGを有している。

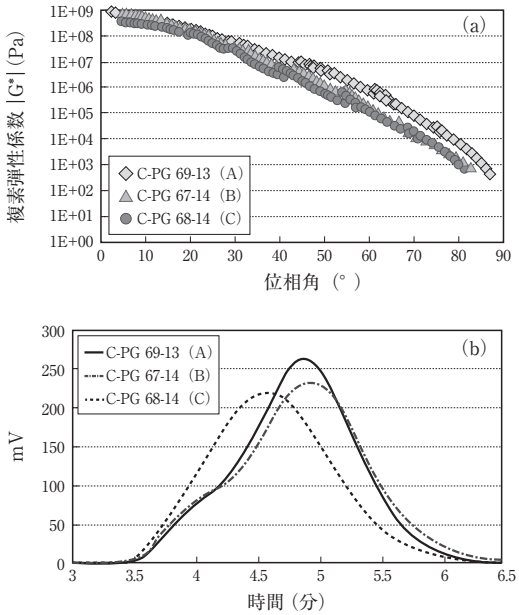
PG 68-13（A）およびPG 67-14（B）に比べ，PG 68-14（C）は，ワックスの含有率が高かった。また，同PGでも低温での緩和温度指数⊿Tc，ワックス含有成分（Waxphaltene Determinator結果），結晶化度，非回復クリープコンプライアンス（以下，J_{nr}）が異なることを確認した。さらには，Waxy A+Bは，J_{nr}と相関が見られた。

これら３種の評価試料について，詳細な分析を行うため，化学性状および粘弾性状の測定によるアスファルトの評価を行った。

⑶　評価結果

粘弾性状およびサイズ排除クロマトグラフィー（以下，SEC）による分子量分布の測定結果を**図－７**に示す。

粘弾性状測定結果より，ワックス含有率の高い試料Cは，位相角が低いと弾性的な挙動を示すことが分かった。また，SECの結果より，試料Cは，他の二つの試料より，大きい分子を有することが示唆された。



図－７　各アスファルトの粘弾性状（a）およびSECによる分子量分布の測定結果（b）

以上の結果より，同PGのアスファルトバインダでも，粘弾性状，ワックス含有量，分子量などが異なることを確認した。これらの性状の違いは，アスファルト混合物にバインダとして適用された場合，耐流動性などの混合物性状に影響することが懸念される。

新規のグリーン再生用添加剤：レオロジー法と核磁気共鳴法による劣化アスファルトと再生アスファルトの構造変化の評価

原題：*A NEW GREEN REJUVENATOR: EVALUATION OF STRUCTURAL CHANGES OF AGED AND RECYCLED BITUMENS BY MEANS OF RHEOLOGY AND NMR*

キーワード：アスファルト再生用添加剤，核磁気共鳴法（NMR）

目的：再生アスファルトの再生過程に及ぼす化学物質の主な影響を，DSRおよびNMRを用いて想定する

⑴　試料の調整

高せん断混合ホモジナイザーを用いて，下記の２種類の再生用添加剤をPAVアスファルトに2wt%混合し，試料Ａ～Ｄを調整した。

再生用添加剤１：植物フラックスオイル

再生用添加剤２：グリーン再生用添加剤

試料Ａ：未劣化のアスファルト

試料Ｂ：PAVアスファルト

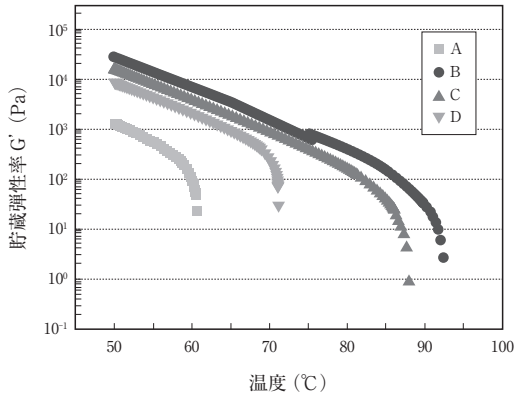
試料Ｃ：PAVアスファルト＋再生用添加剤１

試料Ｄ：PAVアスファルト＋再生用添加剤２

⑵　DSRによる粘弾性係数の測定

DSRを用いて，バインダの線形粘弾性領域内の温度（25℃～120℃）の範囲で各バインダの流動力学的挙動を調べた（温度上昇速度は１℃/min）。結果を**図－８**に示す。各プロットで直線から曲線に変わる温度が，バインダが粘弾性から液性へ転移する温度を示している。

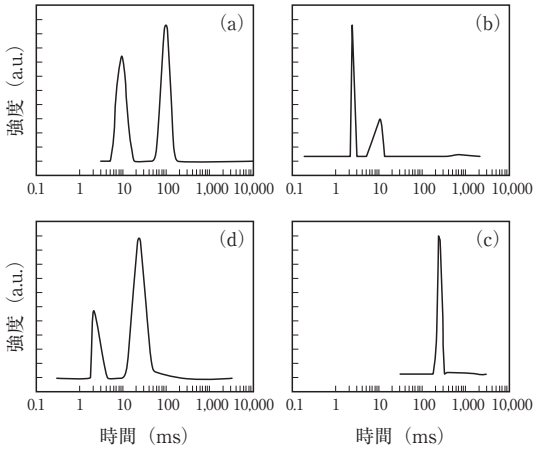
その転移温度は，試料Ａ＜Ｄ＜Ｃ＜Ｂの順番で高くなっている。試料Ｂが試料Ａよりもはるかに高い転移温度を示すのは，軟質不飽和有機分の酸化過程から生じるアスファルテンの増加によるものである。アスファルテンが増加すると，アスファルトの硬化や，内部で高い結合が引き起こる。一方，未劣化のアスファルトのアスファルテン領域はより小さく，低密度で弱い網状構造となっているため転移温度が低くなる。試料ＣとＤは試料Ｂよりも低い温度で粘弾性から液性へと転移しており，特に，試料Ｄはより強い再生効果が見られた。これは，界面活性剤である再生用添加剤２の存在が，アスファルテン粒子とマルテン間の相互作用を減少させ，その結果，コロイド網状構造を弱めたためだと考えられる。



図－８　各アスファルトの温度と複素弾性係数の関係

⑶　NMRによるT2緩和時間分布

核磁気共鳴法（以下，NMR）の逆ラプラス変換（以下，ILT）解析を用いて，T2緩和時間分布を得た。この技術は，試料内部の無関係な分子骨格の緩和時間に関連する確率密度関数分布を見出すことを可能にしている。試験温度は各試料の転移温度から15℃低い温度とした。結果を**図－９**に示す。各図の短時間側のピークはアスファルテンに対応し，長時間側のピークはマルテンに対応している。試料Ｂは，試料Ａよりも短時間側にピークを示す。これは，酸化のプロセスに伴って，バインダのスティフネスが徐々に増加することを示している。試料Ｃのピークは長時間側に移行しているが，これは単に，分布をより長時間側にシフトさせているためである。試料Ｄのピークは試料Ａに近いピークを示した。



図－９　NMRによるILT解析の緩和時間分布

⑷　まとめ

本研究は，グリーン再生材添加剤２種類が，アスファルトのレオロジー（DSR）および化学的特性（NMR）の両方を回復させる有効性を示した。このグリーン再生剤は，酸化したアスファルトの力学特性を回復させる傾向がある。

3.3　DSR試験を新規の方法として活用した報告

バインダの新たな簡易特性評価方法

原題：***ON THE USE OF A NOVEL BINDER - FAST - CHARACTERIZATION - TEST***

キーワード：ストレートアスファルト，ポリマー改質アスファルト，劣化アスファルト

目的：粘弾性状の測定によるアスファルトの高温特性評価

⑴　はじめに

改質アスファルトや再生アスファルトは，軟化点が等しいアスファルトでも異なる粘弾性状を示す場合がある。

そこで，本研究では，粘弾性状を含めたバインダ評価を行うために，DSRを用いた新たな評価方法「Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren法（以下，BTSV法）」を提案した。

⑵　評価方法

表－１の条件でアスファルトの粘弾性状を測定した。

試料を昇温させながら，温度T，複素弾性率|G*|，位相角δを記録した。|G*|= 15kPaとなる温度をT_{BTSV}，位相角をδ_{BTSV}と定義した。これは軟化点試験においてボールが落下するときの粘度を想定している。

表－１　測定条件

プレート直径	25mm
プレート間ギャップ	1 mm
せん断応力	500Pa
周波数	10rad/s
測定間隔	2.5秒毎

⑶　評価結果

①ポリマー改質および劣化アスファルトの特性評価

図－１にBTSV法によるストレートアスファルトとポリマー改質アスファルトの評価結果を示す。

ストレートアスファルトはT_{BTSV}が変化してもδ_{BTSV}は80°でほぼ一定であったが，ポリマー改質アスファルトのδ_{BTSV}は，ストレートアスファルトより小さかった。

図－２に劣化させたアスファルトの評価結果を示す。劣化アスファルトのT_{BTSV}およびδ_{BTSV}は劣化時間に従い線形的に変化した。この傾向は任意のアスファルトに当てはまった。

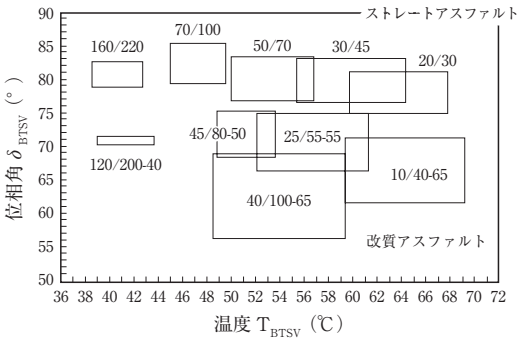
以上のことから，ポリマー改質および劣化によるバインダの粘弾特性の変化をBTSV法で評価できることが分かった。

②再生アスファルトの特性評価

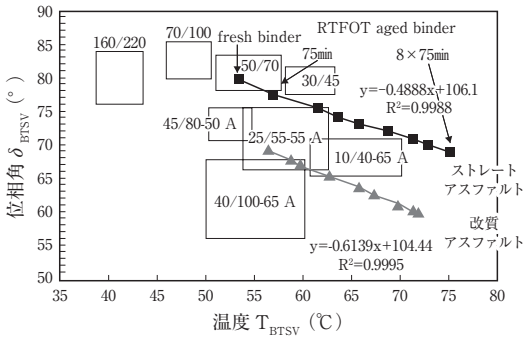
図－３に，再生骨材から抽出したアスファルトの評価結果を示す。

ストレートアスファルト160/220もしくは再生用添加剤を添加した再生アスファルトにおいて，得られた混合アスファルトのT_{BTSV}とδ_{BTSV}は，添加したアスファルトや再生用添加剤の量に応じて線形に変化した（点線）。

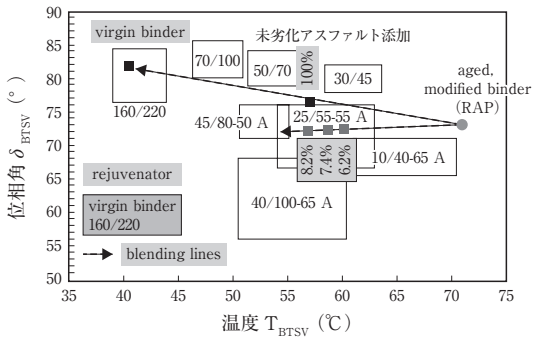
一方，再生用添加剤ではT_{BTSV}の水平シフトが観察され，再生用添加剤の添加によりアスファルトの粘弾性状は変わらず，硬度が低下するだけであることが分かった。



図－１　BTSV法によるポリマー改質アスファルトの特性評価



図－２　BTSV法による劣化アスファルトの特性評価



図－３　BTSV法による再生アスファルトの特性評価

未劣化のアスファルトを添加すると，T_{BTSV}およびδ_{BTSV}の両方が初期値に戻る様子が観察された。

(4)　おわりに

軟化点に代わるアスファルトの特性評価方法として，BTSV法を提案し，種々のアスファルトについて，この評価方法の有効性を検証した。

その結果，BTSV法をポリマー改質および劣化アスファルトの性状評価，再生用添加剤による再生アスファルトの性状評価に適用できることが分かった。

アスファルトと混合する天然繊維の例としての泥炭

原題：***PEAT AS AN EXAMPLE OF A NATURAL FIBER IN BITUMEN***

キーワード：SMA，泥炭繊維

目的：泥炭繊維のアスファルトへの添加剤としての適用性

(1)　はじめに

本研究では，泥炭繊維のアスファルトへの添加剤としての適用性を調べるために，泥炭繊維をアスファルトに添加したときの粘弾性状とSMAに泥炭繊維を添加したときの透水性を評価した。

(2)　材料

ベースバインダとして，ストレートアスファルト70/100（針入度27dmm，軟化点74℃）を用いた。泥炭繊維は**表－２**に示すものを用いた。泥炭繊維はアスファルトと混合前する前に110℃で２時間以上乾燥させた。

(3)　材料評価

泥炭繊維の材料評価を行った。溶解性試験により，泥炭繊維はアスファルトに溶解しないと分かった。

表－２　使用した泥炭繊維

	泥炭中の水分量		
泥炭繊維の長さ	０％	20%	50%
PM（８㎜未満）	PM	PM20	PM50
PL（８㎜以上16㎜未満）	PL	PL20	PL50
PEL（16㎜以上）	PEL	PEL20	PEL50

※PM：Peat Medium，PL：Peat Long，PEL：Peat Extra Long

フーリエ変換赤外分光光度計で泥炭繊維の構造解析を行ったところ，水分量や長さが異なっても，泥炭繊維自体の化学構造の差はないと確認できた。

(4)　レオロジー評価

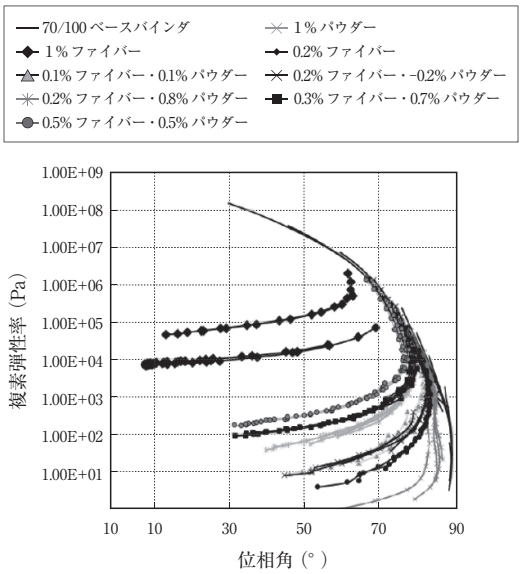
泥炭繊維を添加したアスファルトの粘弾性状をDSRで測定し，レオロジー評価を行った。

図－４に位相角に対する複素弾性率を，**図－５**に周波数に対する複素弾性率の結果を示す。

泥炭繊維はPEL20を用いた。PEL20は，キッチンブレンダで３分間すり潰して，パウダーとファイバーに分級し，アスファルトに0.1～1.0%の範囲で添加した。

なお，PEL20を添加したアスファルトのDSR試験温度は0～40℃，周波数は0.01～10Hzで実施した。また，ベースバインダは，0～40℃で試験をした。

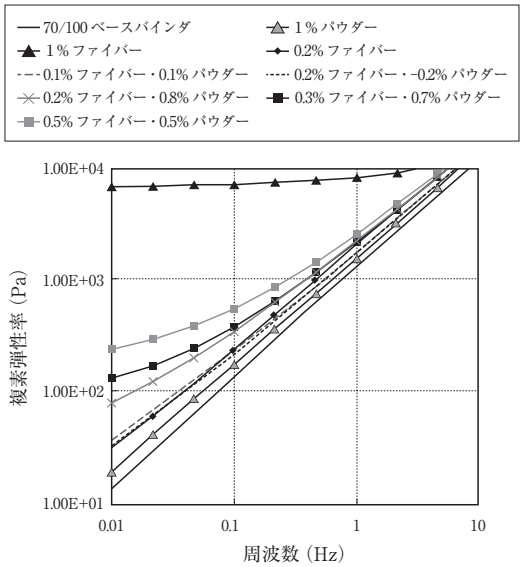
バインダ中のファイバーの割合が増加すると，弾性が高い位置で一定になり，ファイバーを１％添加した際は，温度や周波数を低下させても弾性率が高くなった。パウダーのみを１％添加した場合，ほとんどの温



図－４　各配合の複素弾性率と位相角の関係

度で，補強硬化にのみ寄与したが，高温時のみ，弾性が大きくなった。これは，パウダーによる充填効果と粒子の相互作用によるものだと考えられる。

図－５より，パウダーを添加したアスファルトは，パウダーがバインダの挙動を支配するため，高周波数時の再現性は高いが，低周波時の繰り返しの再現性が低下した。



図－５　各配合の複素弾性率と周波数の関係（60℃）

⑸　透水性評価

NBN EN12697 - 18（2017）に示す方法で，SMAに泥炭を0.5％添加した混合物の透水試験を行った。泥炭繊維は，PM，PL，PELを用いた。また，それぞれの長さの泥炭繊維をキッチンブレンダで３，４，５分間すり潰したものも用意した。透水係数はSMAで0.32％，泥炭繊維を添加したSMAはいずれの泥炭繊維においても0.03～0.07％であった。泥炭繊維の長さや形状の違いによる透水係数の差は確認されなかった。

⑹　おわりに

アスファルトに泥炭繊維を添加することで，バインダの挙動を支配できると分かった。また，SMAに泥炭繊維を添加することで透水係数を効果的に下げることができた。

４．おわりに

今回，DSRを用いるアスファルトの評価に関する論文を紹介した。その中で，DSR測定の基本知識や既存の測定方法から，種々な試験と組み合わせたDSRの活用方法，DSRの新規な活用方法まで，合わせて10報を紹介した。このように，従来の工業的な評価の他，DSRも利用することで，より正確且つ適切にアスファルトを評価することが可能となった。今後，様々な特性を有するアスファルトが開発されることに対し，性能評価の方法も多様化する必要があるため，DSRの更なる活躍を期待できる。

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	期末在庫	合計
23　年　度	199	3,939	90.0	256	4,394	2,482	94.5	0	200	2,682
24　年　度	200	3,960	100.5	99	4,259	2,366	95.3	59	217	2,583
25　年　度	217	3,659	92.4	92	3,968	2,151	90.9	15	215	2,366
26　年　度	215	3,200	88.8	77	3,491	2,032	97.0	45	168	2,199
27　年　度	168	3,188	100.2	76	3,432	1,897	94.5	29	217	2,114
28　年　度	217	3,185	99.6	88	3,490	1,874	99.0	114	217	2,091
29　年　度	185	2,990	93.9	99	3,274	1,776	95.3	70	216	1,992
30.　4月	216	193	83	1	410	143	112	3	226	369
5月	226	227	105	5	458	163	140	6	219	382
6月	219	188	85	1	408	129	115	9	216	345
4～6月	216	608	90.8	7	831	435	121.9	18	211	646
7月	211	236	97	1	448	166	115	6	215	381
8月	215	220	78	2	437	161	105	9	195	356
9月	195	217	78	1	413	168	109	18	211	379
7～9月	211	673	83.9	4	888	495	109.6	33	212	707
10月	212	203	99	3	418	185	122	9	211	396
11月	211	179	76	7	397	170	105	12	176	346
12月	176	316	100	9	501	167	93	3	214	380
10～12月	212	698	92.3	19	929	522	106.0	24	214	735
1月	214	270	100	19	502	179	149	0	200	379
2月	200	255	108	7	462	165	98	0	192	356
3月	192	290	113	1	483	202	108	0	178	380
1～3月	214	815	107.1	27	1,055	545	114.7	0	178	724
30　年　度	216	2,794	93.5	57	3,067	1,997	112.5	75	178	2,176
31.　4月	178	235	122	1	414	134	91	0	201	335
5月	201	211	93	2	414	135	84	3	202	336
6月	202	193	102	3	397	90	102	6	192	282
4～6月	178	639	105.0	6	823	359	90.7	9	192	551
7月	192	204	86	1	396	124	75	6	177	301
8月	177	261	119	0	438	132	82	0	247	379
9月	247	215	99	1	463	166	99	3	221	386
7～9月	192	679	100.9	2	873	423	85.3	9	221	643

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

（令和元年12月１日現在）

社名	住所	電話
［メーカー］		
コスモ石油株式会社	(105-8528) 港区芝浦1－1－1	03（3798）3159
JXTGエネルギー株式会社	(100-8162) 千代田区大手町1－1－2	03（6257）7231
出光興産株式会社	(135-8074) 港区台場2－3－2	03（5531）5765
［ディーラー］		
● 東北		
カメイ株式会社	(980-0803) 仙台市青葉区国分町3－1－18	022（264）6111
● 関東		
株式会社アスカ	(106-0032) 港区六本木3－4－33	03（3587）1500
伊藤忠エネクス株式会社	(100-6027) 千代田区霞が関3－2－5	03（4233）8072
三菱商事エネルギー株式会社	(100-0004) 千代田区大手町1－1－3	03（4362）4200
コスモ石油販売株式会社 環境・エネルギーカンパニー	(104-0032) 中央区八丁堀4－7－1	03（6891）9922
株式会社ジェイエック	(103-0028) 中央区八重洲1－2－1	03（3272）3471
竹中産業株式会社	(101-0044) 千代田区鍛冶町1－5－5	03（3251）0185
東新エナジー株式会社	(104-0033) 中央区新川2－1－7	03（3537）3082
日東商事株式会社	(170-0002) 豊島区巣鴨3－39－4	03（3915）7151
富士興産株式会社	(101-0042) 千代田区神田東松下町13	03（6859）2050
丸紅エネルギー株式会社	(101-8322) 千代田区神田駿河台2－2	03（3293）4171
ユニ石油株式会社	(107-0051) 港区元赤坂1－7－8	03（3796）6616
リーフエナジー株式会社	(108-0073) 港区三田3－4－10	03（6435）4497

一般社団法人　日本アスファルト協会会員

社　名	住　所	電　話
● 近畿・中国		
三徳商事株式会社	(532-0033) 大阪市淀川区新高4－4－10	06（6394）1551
昭和瀝青工業株式会社	(670-0935) 姫路市北条口4－26	079（226）2611
千代田瀝青株式会社	(530-0044) 大阪市北区東天満2－10－17	06（6358）5531
富士商株式会社	(756-8501) 山陽小野田市稲荷町10－23	0836（81）1111
横田瀝青興業株式会社	(672-8064) 姫路市飾磨区細江995	079（233）0555
● 四国・九州		
今別府産業株式会社	(890-0072) 鹿児島市新栄町15－7	099（256）4111
三協商事株式会社	(770-8518) 徳島市万代町5－8－3	088（653）5131
西岡商事株式会社	(764-0018) 仲多度郡多度津町東港町11－1	0877（33）1001
平和石油株式会社高松支店	(760-0065) 高松市朝日町4－17－1	087（811）6231

編集顧問

中村俊行

編集委員

委員長：岡島眞人

加納孝志　神谷恵三　竹井利公　徳光克也
永田佳文　新田弘之　濱田幸二　姫野賢治
吉村啓之　向後憲一　吉武美智男　綿谷茂

アスファルト　第235号
令和元年12月発行
一般社団法人　日本アスファルト協会
〒135-8074　東京都港区台場2－3－2
出光興産株式会社　技術商品・事業開発部
TEL 03-5531-5765

機関誌「アスファルト」に関するお問い合わせ
JXTGエネルギー株式会社　産業エネルギー部
剱持 博志
TEL 03-6551-9857

印刷所　キュービシステム株式会社
〒101-0041　東京都千代田区神田駿河台3－5
木原正三堂ビル2F　TEL 03-5577-7199

Vol.62　No.235　DECEMBER 2019
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/**