

水を用いたアスファルト混合物の
分別再資源化技術と品質管理手法の開発

赤津 憲吾

目次

第1章 序論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 本研究の目的	4
1. 3 本論文の構成	6
【第1章の参考文献】	10
第2章 加熱アスファルト混合物の現状と高温高圧水 の特性	12
2. 1 概説	12
2. 2 加熱アスファルト混合物の現状	13
2. 2. 1 加熱アスファルト混合物の需要と供給	13
2. 2. 2 アスファルトの需要と供給	17
2. 2. 3 骨材およびフィラーの需要と供給	23
2. 2. 4 発生材の再生利用	26
2. 3 再生混合物の繰返し利用	32
2. 3. 1 再生混合物繰返し利用への課題	32
2. 3. 2 再生混合物の繰返し利用に関する研究	39
2. 4 高温高圧水	46
2. 4. 1 高温高圧水の特性	46
2. 4. 2 高温高圧水を用いた既往研究	50
2. 5 まとめ	64
【第2章の参考文献】	68
第3章 亜臨界水を用いたアスファルト抽出試験法 の提案	74

3. 1	概説	74
3. 2	既往研究の課題	76
3. 3	各工程における精度向上のための検討	78
3. 3. 1	冷却工程に対する改善検討	78
3. 3. 2	加熱・抽出工程に対する改善検討	84
3. 3. 3	回収工程に対する検討	86
3. 4	各種の新規混合物に対する精度の確認	92
3. 4. 1	試験概要	92
3. 4. 2	試験結果	93
3. 5	再生骨材に対する試験精度の確認	96
3. 5. 1	試験概要	96
3. 5. 2	試験結果および考察	98
3. 6	まとめ	103
	【第3章の参考文献】	105

第4章 アスファルト舗装発生材に対する分別再資源化

	技術の開発	106
4. 1	概説	106
4. 2	熱水すりもみ法により回収した骨材の評価	112
4. 2. 1	実験概要	112
4. 2. 2	回収した粒径5-13mmの骨材の評価	114
4. 2. 3	回収した粒径1-5mmの骨材の評価	118
4. 3	回収した粒径5-13mmの骨材を配合した混合物の評価	123
4. 3. 1	実験概要	123
4. 3. 2	回収した骨材を配合した混合物の評価	124
4. 4	高温高圧水によるアスファルトの性状回復	125
4. 4. 1	実験概要	125

4. 4. 2	回復したアスファルトの性状	128
4. 5	まとめ	132
	【第4章の参考文献】	134
第5章 劣化アスファルトに対する水熱分解法の		
 回復効果の検討		
5. 1	概説	136
5. 2	水熱分解法	139
5. 3	試験概要	140
5. 3. 1	試料条件	140
5. 3. 2	試験条件	142
5. 4	試験結果	145
5. 4. 1	物理的性状	145
5. 4. 2	化学的性状	149
5. 4. 3	動的粘弾性状	155
5. 5	まとめ	165
	【第5章の参考文献】	167
第6章 結論		
6. 1	結論	169
6. 2	今後の課題と展望	174
	謝辞	176

Study on Development of Separation and Recycling Technology and Quality Control Method for Asphalt Mixture Using Water

Kengo Akatsu

In Japan, reclaimed asphalt pavement (RAP) has been recycled 99%. However, the current recycling method has a problem in use to a recycled asphalt mixture because the quality of RAP is lowered by repeated deterioration and regeneration. In addition, the quality of RAP varies due to the increased RAP that had repeated deterioration and regeneration and the use of various recycled materials. This is because to effect by deteriorated asphalt attached to the aggregate contained in RAP. Therefore, extraction test method of asphalt from asphalt mixture is necessary for strict quality control, but the solvent has been changed to a solvent that has little effect on the people and the environment, there are problems in applying to RAP. From the above, the development of sustainable RAP recycling technology and the development of environmentally-friendly extraction test method of asphalt applied to RAP are urgently needed.

Therefore, this study is proposed extraction test method of asphalt using subcritical water, separation recycling technology of RAP by the hot water rubbing method, and development of technology to recover the properties of deteriorated asphalt by high-temperature and high-pressure water, by focusing on the performance of separating and decomposing asphalt from an asphalt mixture of high-temperature and high-pressure water.

As a result, it was confirmed that extraction test method of asphalt using subcritical water was applied to RAP by improving the test equipment and test method. In addition, it was confirmed that separate and collect high-quality aggregates from various RAP using hot water at 80 to 90 °C. Furthermore, the properties of deteriorated asphalt can be greatly recovered by high-temperature and high-pressure water, and it's suggested the possibility of use in recycling asphalt mixture.

第 1 章 序 論

1. 1 研究の背景

わが国の道路整備は戦後の国土復興のため、1950年代中期に本格的に発足した。この時代に始まったモータリゼーションの進展はめざましく、自動車保有台数の著しい伸びに対応すべく、道路整備も精力的に進められてきた¹⁾。そのため、一般国道の簡易舗装を除く舗装済み延長の整備率は1955年には13.6%であったのに対し、15年後の1970年に71.4%と急激に上昇し、2017年には93.0%に達している²⁾。また、道路舗装は施工性や走り心地の良さなどからおよそ95%を加熱アスファルト混合物（以下、混合物）で占めている²⁾。

一方で、国土復興に伴い、大量生産・大量消費型の経済構造が発展するに伴い、高度経済成長期以降、建設廃材の不法な投棄などが社会問題となり、1970年に「廃棄物の処理および清掃に関する法律」が制定³⁾された。この法律により、舗装工事により発生する既設のアスファルト舗装材（以下、発生材）は産業廃棄物に指定され、処分に制約が生じることとなった。また、1973年の第一次オイルショックが契機となり、省資源、省エネルギーが社会的趨勢となってきた⁴⁾。これらを背景に、1970年代中期頃から発生材の再生利用に関する研究は始まり、1980~1990年代には舗装の再資源化技術に関する指針類の整備^{5)~9)}や新たな法律の施行^{10),11)}により本格的な再生利用が行われるようになった^{12)~15)}。

現在、発生材の再資源化率は99%を上回っており、約6割がアスファルト・コンクリート再生骨材（以下、再生骨材）と

して再資源化され，所要の品質が得られるよう再生用添加剤および新規素材を加えて加熱混合した再生加熱アスファルト混合物（以下，再生混合物）へと再利用され，残りの約 4 割が再生砕石へと再資源化され，主に再生路盤材として再利用されている¹⁶⁾。

現行の再生骨材への再資源化技術は，発生材を機械破碎および分級により粒状化することで，量的に高水準な再資源化を実現している。再生混合物への再生利用技術の普及に伴い，混合物の全出荷量に占める再生混合物の割合は，1980 年の 0.6%から年々増加し，1998 年に 50%に達した後，2018 年には 74.9%に達している¹⁷⁾。また，再生混合物中に占める再生骨材配合率の全国の平均率は，統計の存在する 1994 年の 29.9%から年々増加し，2018 年には 51.4%に達している¹⁷⁾。他方で，再生混合物の製造量の増加や，原油の需要の軽質化に応じた白油化技術の発展に伴い，新規アスファルトの供給量は低下しており，また，粗・細骨材産地の保全とそれに伴う規制により，良質な骨材の生産が困難になるなどの背景から，混合物に使用する新規素材の供給力の低下が懸念されている。これらより，劣化と再生を複数回繰返した再生骨材は，今後増えることが予測されるとともに，再生骨材の需要はますます増加すると考えられる。

劣化と再生を複数回繰返した再生骨材の利用に関して，再生混合物への利用は懸念されており，既に室内試験により劣化と再生を 3 回以上繰返した旧アスファルトは酸化劣化を蓄積し，再生混合物はひび割れ抵抗性が低下する可能性が指摘されている^{18),19)}。以上から，今後，混合物の持続的な循環利用を目的とした，質的に高水準な再資源化技術の開発が急務

となっている。

また，混合物の製造における品質管理項目である，アスファルト量，粒度は，アスファルト抽出法により確認することができる。アスファルト抽出法には常圧式ソックスレー抽出法などあるが，使用される溶剤は1995年末に1,1,1-トリクロロ・エタンがオゾン層破壊物質として廃止されて以降，人体や環境に対する安全性への配慮からナフテン系やリモネン系の溶剤が代替され，それに応じた抽出装置の開発も行われている^{20),21)}。しかし，代替溶剤や抽出装置は，改質アスファルトや再生混合物に対する溶解性能，試験時間に課題を残している。一方で，再生混合物は繰り返し利用に伴い，再生骨材が劣化を蓄積する傾向が見受けられ，再生骨材に付着しているアスファルト量，粒度のばらつきが懸念されている。そのため，再生混合物は製造後に厳密な品質管理を行うことが求められる。以上から，今後，作業環境の安全性を担保し，かつ，多様な混合物に適用したアスファルト抽出試験法の開発が急務となっている。

1. 2 本研究の目的

本論文は、既往研究より、混合物からアスファルトと骨材を分離する性能を確認している高温高压水に着目し、まず、亜臨界水を用いた、多様なアスファルト混合物に適用したアスファルト抽出試験の開発、次に、常圧の熱水（80°C~90°C）を用いた、多様な発生材に適用した熱水すりもみ法による分別再資源化技術の検討、および亜臨界域の高温高压水を用いた、劣化したアスファルトの性状回復技術の検討を目的として、以下の事項について検討を実施した成果を取りまとめたものである。

- ① 既往研究において、実用化の可能性のある亜臨界水を抽出溶媒としたアスファルト抽出試験方法の確立のため、多種のアスファルト混合物に対応した、亜臨界水抽出装置および抽出方法の改良を行い、回収後の試料のアスファルト量、粒度により、試験精度を確認した。
- ② 著者らの提案している、発生材から骨材を分別回収する熱水すりもみ法のポリマー改質アスファルト含有発生材への適用を確認するために、熱水すりもみ法により、ポリマー改質アスファルト含有発生材から回収した骨材の評価、および混合物への適用性を検討した。また、高温高压水による劣化したアスファルトの性状回復の基礎検討を行った。
- ③ 熱水すりもみ法により分別回収した濃縮された旧アスファルトを含有する微粒分（粒径 0-1mm）の再生利用方法に対して、高温高压水反応後のアスファルトが軟質化する反応を確認したことにより着想を得た、水熱分解法による劣化

アスファルトの回復技術の可能性を確認するために、水熱分解法の基礎検討として、ストレートアスファルト(60・80)を強制劣化させた劣化アスファルトへの回復効果を物理的性状、化学的性状、動的粘弾性状により検討した。

1. 3 本論文の構成

本論文は図-1.1に示す通り，6つの章より構成されている．各章の内容を以下に示す．

第1章 序論

本章では，アスファルト舗装発生材の再生利用について，わが国におけるこれまでの経緯を整理した上で，「研究の背景」および「研究の目的」を示すとともに，「論文の構成」について概説した．

第2章 加熱アスファルト混合物の現状と高温高压水 の特性

本章では，わが国の混合物の需要と供給について説明することで，アスファルト舗装の現状と新規材料の供給の課題，発生材の再生利用の現状を示した．次に，再生混合物の繰返し利用について説明することで，現行の再生利用技術の課題を整理した．次に，高温高压水の特性の説明，および高温高压水を用い，アスファルト混合物から骨材とアスファルトを分離する既往研究を整理することで，高温高压水のアスファルト抽出法や，分別再資源化技術への応用の可能性と課題を整理した．

第3章 亜臨界水を用いたアスファルト抽出試験法の 提案

本章では，有機溶剤を一切用いない，亜臨界水によるアスファルト抽出試験の多様な混合物への適用を目的とし，2章で示した既往研究における課題について，試験装置および試

験方法の改良を行った。改良後の試験方法を用いて、2章で示した既往研究で適用できなかったストレートアスファルトを配合した混合物、また、再生混合物への適用をアスファルト量、粒度により確認した。

第4章 アスファルト舗装発生材に対する分別再資源化技術の開発

本章では、実用化を視座した、発生材から良質な骨材を分別回収する技術として、高温高压水と比較して、環境負荷や処理コストの低減に繋げられる常圧の熱水(80~90°C)を用いた熱水すりもみ法を提案し、旧ポリマー改質アスファルトを含有した発生材への適用を、回収した骨材の性状、および回収した骨材を配合した混合物の曲げ強度により確認した。また、高温高压水による劣化したアスファルトの性状回復について、基礎検討を行った。

第5章 劣化アスファルトに対する水熱分解法の回復効果の検討

本章では、4章で基礎検討を行った、高温高压水によるアスファルトの回復技術を水熱分解法と定義し、既往研究と異なる劣化したストレートアスファルト(60-80)を回復させ、多様なストレートアスファルトへの適用について確認した。また、物理的性状、化学的性状、動的粘弾性状を確認することで回復後の試料の混合物への利用の可能性を把握した。

第6章 結論

本章では、各章で得られた成果を総括し、本研究の意義を

明確にするとともに，今後の結果と展望を提示した．

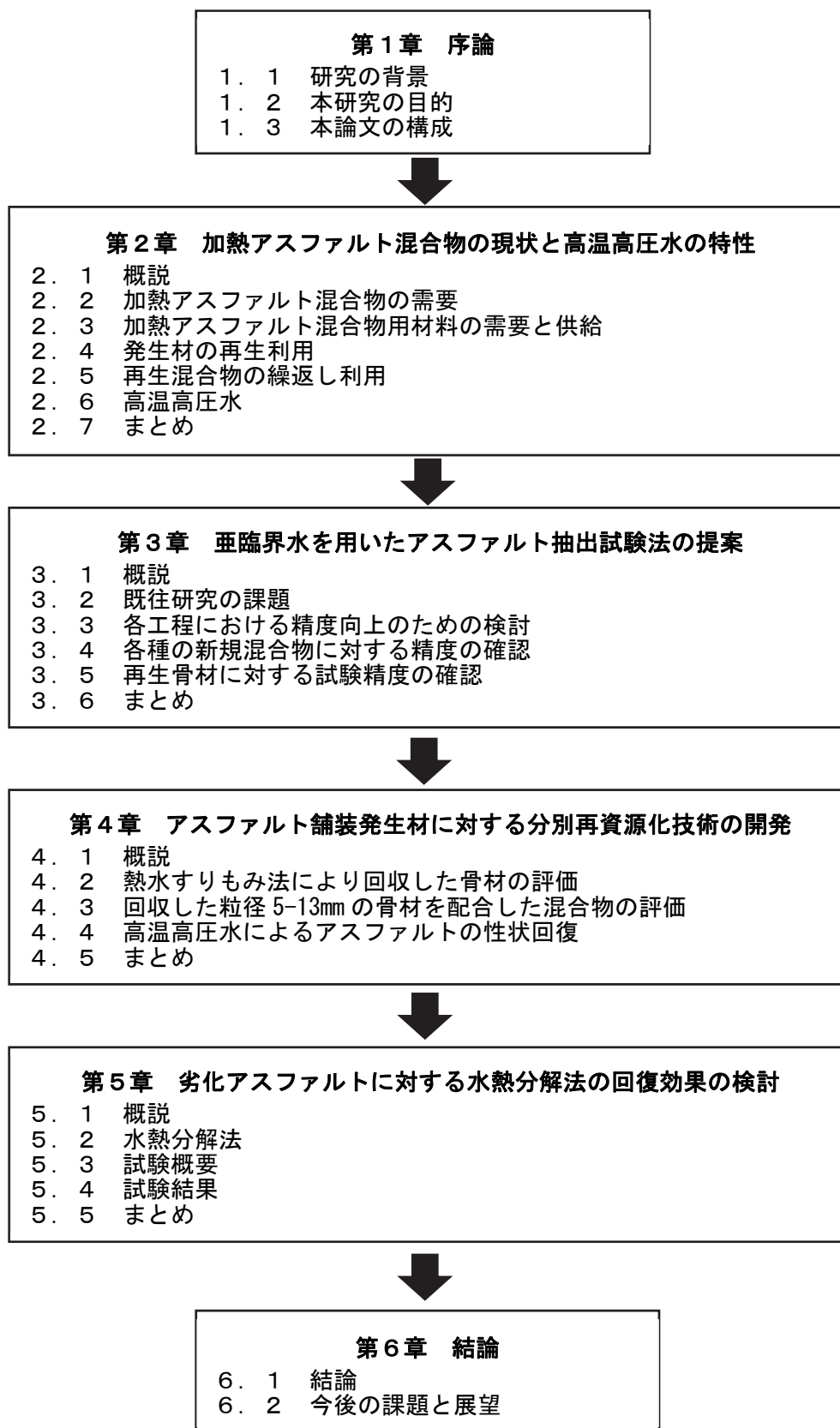


図-1.1 本論文の構成

【第1章の参考文献】

- 1) 稲垣竜興，中村俊行，稲垣竜興，小梁川雅：大学土木道路工学改訂3版，2015.
- 2) 国土交通省：道路統計年報2018，2018.
- 3) 環境省：日本の廃棄物処理の歴史と現状.
- 4) 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，1988巻，390号，pp.23~34，1998.
- 5) (社)日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針(案)，1984.
- 6) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針(案)，1984.
- 7) (社)日本道路協会：路上再生路盤工法技術指針(案)，1987.
- 8) (社)日本道路協会：路上表層再生工法技術指針(案)，1988.
- 9) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，1992.
- 10) 資源の有効な利用の促進に関する法律，1991.
- 11) 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律，2000.
- 12) 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，1984巻，348号，pp.51~60，1984.
- 13) 多田宏行：アスファルト舗装に関する研究の動向，土木学会論文集，第378号，pp.15~20，1987年2月.
- 14) 山下幸男，高屋嘉昭：道路廃材の再利用，環境技術，18巻4号，pp.215~216，1989年.
- 15) 株式会社オージーロード：道路廃材の総合的再生利用，環境技術，19巻6号，pp.381~383，1990年
- 16) 国土交通省：平成24年度建設副産物実態調査結果，2013.
- 17) (一社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報（各年度版）
- 18) 加納孝志，秋葉正一，加納陽輔，湯川誠二郎，田湯文将：

再生用添加剤の組成の違いが繰り返し再生された混合物とアスファルトの性状に与える影響，土木学会論文集 E1(舗装工学)，71 卷 3 号，pp.I_73~I_78，2015.

19) 川上篤史，川島陽子，新田弘之，寺田剛，藪雅行：繰り返し劣化・再生されたアスファルトおよびアスファルト混合物の性状変化に関する一検討，土木学会論文集 E1(舗装工学)，73 卷 3 号，pp.I_155~I_161，2017.

20) 山之口浩，荒井孝雄：アスファルト抽出試験の新しい溶剤の検討，道路建設，No. 547，pp.63~68，1993.3.

21) 白浜幸則，奥平真誠：塩素系溶剤を用いない抽出試験に関する一検討，道路建設，No. 552，pp. 58~64，1994.1.

第 2 章 加熱アスファルト混合物の現状と高温高圧水の特 性

2. 1 概 説

本章では，高温高圧水を用いたアスファルト混合物の分別再資源化技術と品質管理手法の開発に至った経緯を解説した。まず，加熱アスファルト混合物の需要と供給をアスファルト舗装要綱の変遷および加熱アスファルト混合物の需要の推移により，アスファルトの需要と供給をアスファルトの構造およびアスファルトの需要の推移と供給の現状により，骨材およびフィラーの需要と供給をそれぞれの需要と供給の現状により，また，発生材の再生利用を発生材の再資源化率の推移，発生材の再生混合物としての再生方法，再生混合物の製造量の推移および再生骨材配合率の推移により説明することで，加熱アスファルト混合物の現状を整理した。つぎに，混合物の繰返し利用の課題を再生回数の推計，旧アスファルトの針入度および品質管理への課題により，また，再生混合物の繰返し利用に関する研究について説明することで，現行の再生混合物の繰返し利用の課題を整理した。つぎに，高温高圧水の特 性について，また，高温高圧水によるアスファルトの舗装発生材からの骨材分離回収および高温高圧水を用いたアスファルト抽出試験方法の開発を説明することで，環境に配慮し，かつ持続的な循環利用を目的とした，高温高圧水による混合物の分別再資源化技術への適用，および品質管理試験への応用の可能性を示した。

2. 2 加熱アスファルト混合物の現状

2. 2. 1 加熱アスファルト混合物の需要と供給

(1) アスファルト舗装要綱の変遷

わが国のアスファルト舗装の技術進歩は、日本道路協会により発刊されてきたアスファルト舗装関係のマニュアル類の変遷といっても過言ではなく、その第1歩は、舗装の先進国であるアメリカのアスファルト協会（The Asphalt Institute）のマニュアルを参考として1950年に発刊された「アスファルト舗装要綱」である¹⁾。その後、1961年に、わが国の舗装の実態と経験に基づいて要綱の見直しが行われ、アスファルト混合物の配合設計にはマーシャル安定度試験、構造設計にはCBR法を用いたアスファルト舗装要綱が発刊された¹⁾。1962年にアメリカのイリノイ州で行われたAASHO（American Association of State Highway Official）による先駆的道路試験の結果が公表されたことを機に、1967年に現在の舗装構造設計に通じるCBR-T_A法を記した「アスファルト舗装要綱」の改訂版が発刊された^{1),2)}。さらに、2001年には、「道路構造令」が改正され、これに規定された舗装の技術基準の解説書として「舗装の構造に関する技術基準・同解説」³⁾、技術基準の基本とする考え方を設計、施工の実務に反映させるガイドラインとして「舗装設計施工指針」⁴⁾および、実績のある舗装用材料の性状および施工方法などを示したものとして「舗装施工便覧」⁵⁾がそれぞれ新たに刊行され、材料、工法、機械、施工方法などの選択において大幅な自由が認められるようになった。アスファルト舗装要綱の変遷について表-2.1に示す。

表-2.1 アスファルト舗装要綱の変遷 1), 4), 5), 6), 7)

西暦(年)	設計法	備考
1950	道路工法叢書6集 として作製	・AIのハンドブックを参考にアレンジした もの(アメリカ合衆国アスファルト協会)
1961	アスファルト舗装要綱 第1回改訂版	・設計CBR法による構造設計 ・マーシャル試験の採用
1967	アスファルト舗装要綱 第2回改訂版	・AASHO道路試験結果より T_A の概念を導入 ・設計CBR試験法の簡略化 ・ひび割れ発生への配慮(アスファルト量を多くする)
1975	アスファルト舗装要綱 第3回改訂版	・交通量区分の増加(L交通) ・アスファルト混合物の種類を増加
1978	アスファルト舗装要綱 第4回改訂版	・路床の石灰やセメント安定処理 ・配合設計時の耐流動対策(付き固め回数75回)
1988	アスファルト舗装要綱 第5回改訂版	・多層弾性計算の概念導入
1992	アスファルト舗装要綱 平成4年版	・ライフサイクルコスト概念導入 ・多層弾性理論を用いた設計法導入
2001	舗装の構造に関する技術 基準・同解説	・舗装の構造に関する技術基準が省令され、同書 が刊行された
	舗装設計施工指針	・技術基準を適切な実施を支援する実務的なガイド ラインとして刊行された
	舗装施工法便覧	・「アスファルト舗装要綱」, 「セメントコンクリ ート舗装要綱」, 「簡易舗装要綱」をまとめた ・実績のある舗装用材料の性状および施工方法など
2006	舗装設計施工指針 (平成18年版)	・舗装設計交通量の細分化 ・ライフサイクルコストの算定方法, 信頼性の導入
	舗装施工法便覧 (平成18年版)	・新材料, 新工法の記述の充実 ・環境保全関連の施工技術の充実

(2) 加熱アスファルト混合物の需要の推移

わが国の舗装は、高度経済成長期の自動車の著しい普及に対応すべく、現在に至るまで舗装整備も精力的に進められてきた²⁾(図-2.1参照)。一方で、高度経済成長期に安価に大量の石油が入手でき、副産物としてアスファルトを消費せざるを得ない状況にあったこと、国土復興のため、簡易舗装から予算を段階的に投じて中級～高級舗装へと施工する *stage construction* の形態を採用したことから、アスファルト舗装はわが国に最も適した舗装として広く用いられるようになった⁸⁾。

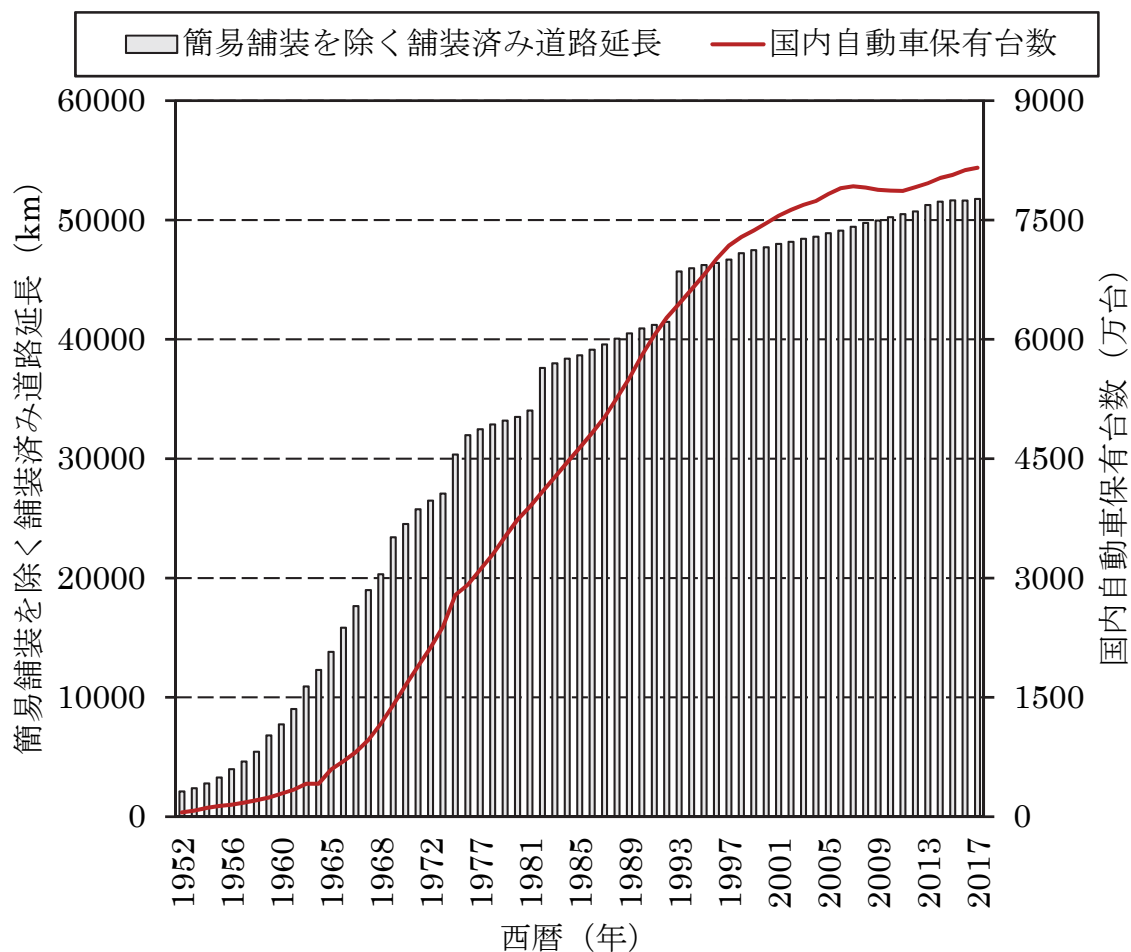


図-2.1 舗装延長と自動車保有台数の関係 9),10), 11),12)

また，コンクリート舗装と比較して，初期の建設費が安いこと，急速な施工に適し，即日交通解放が可能であること，舗装後の補修も簡便であることから⁸⁾，図-2.2に示すように，未舗装を除く路面別延長比率はアスファルト舗装が大部分を占めるようになってきており，1975年の時点で90%を上回り，2017年では95%程度となっている¹³⁾。

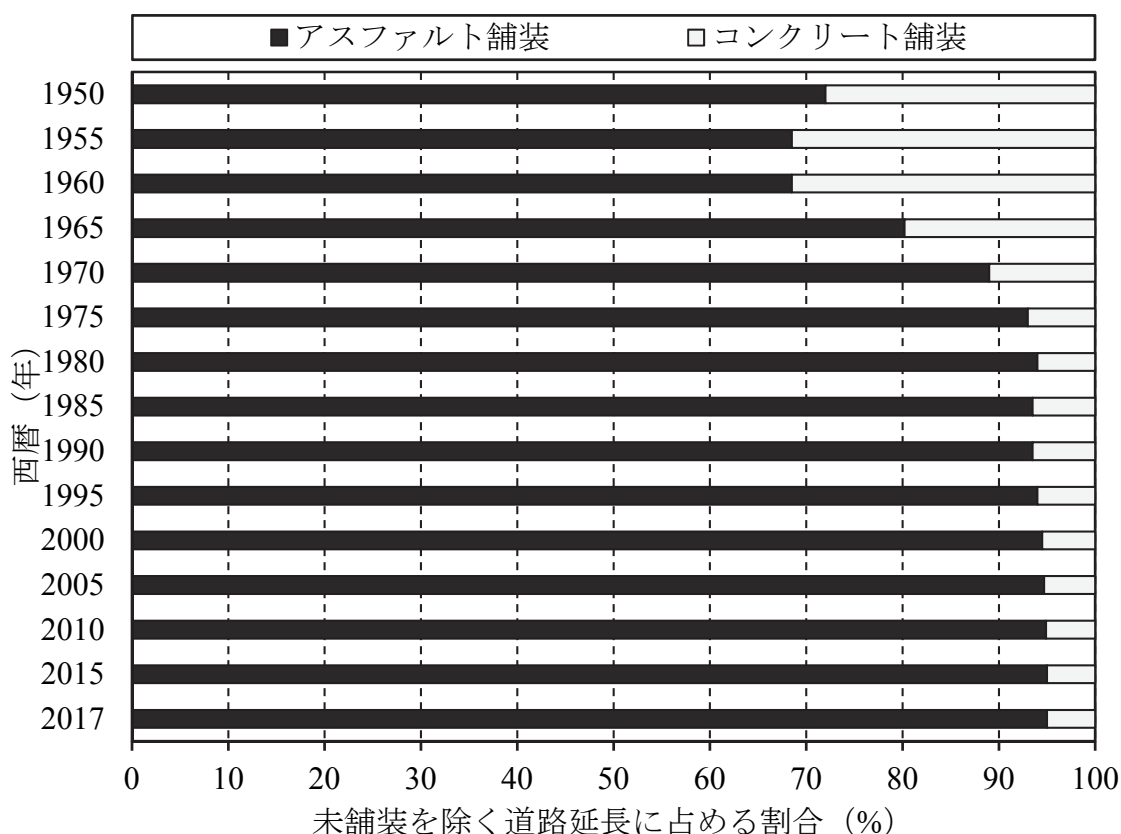


図-2.2 アスファルト舗装，コンクリート舗装の比率の推移

13)

以上，述べたように，わが国におけるアスファルト舗装は高度成長期以降，全国で広く用いられており，アスファルト舗装要綱の変遷とともにアスファルト舗装の信頼性が向上していることから，アスファルト舗装に用いる加熱アスファルト混合物の需要についても今後も維持されていくものと考えられる．なお，後述でも詳述するが，加熱アスファルト混合物として使用される再生混合物の割合は，2005年以降，全出荷量の70%以上となっている．

2. 2. 2 アスファルトの需要と供給

(1) アスファルトの構造

アスファルト舗装に用いる混合物の素材は、アスファルト、骨材、フィラーである。この内、アスファルトは混合物の 5~6% を占めており、骨材およびフィラーらを凝固または結合させる役割を持つ。

アスファルトは、非常に多くの化学物質の集合体であり、構成される化学物質それぞれを特定することは難しい。このため、古くから類似する性質ごとにグループ分けして分析する手法が用いられている。わが国においては、石油学会法¹⁴⁾が、広く一般に用いられている。この方法は、アスファルトを **図-2.3**¹⁵⁾に示す「飽和分」、「芳香族分」、「レジン分」、「アスファルテン分」の 4 つの成分に分けるものである。それぞれの成分の概要を **表-2.2**¹⁶⁾に示す。

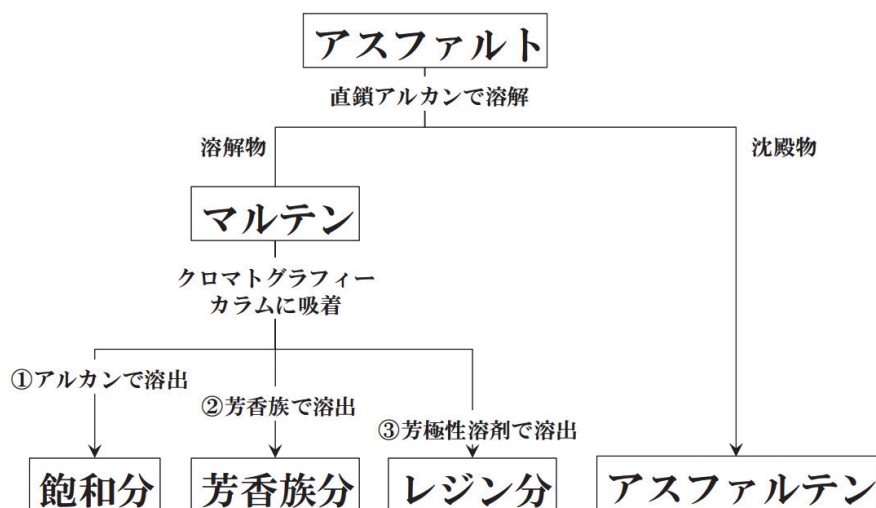


図-2.3 アスファルトの 4 成分分析の概略¹⁵⁾

表-2.2 アスファルトを構成する各成分の概要 ¹⁶⁾

成分	概要
アスファルテン分	黒色～褐色の芳香環を有する化合物の集合体
レジン分	ダークブラウンの個体・半固体で、極性を帯びており、強力に結合している アスファルト中に媒体として分散し、アスファルテンを解膠（かいこう）させている
芳香族分	ダークブラウンの粘性体で、ナフテン系芳香族分子の小さい分子量のもの アスファルテンを解膠（かいこう）させる媒体として大きな役割を果たしている
飽和分	二重結合を持たない炭化水素 薄い黄色あるいは無色の非極性の粘性オイル アスファルトに5~20%含まれる

また、アスファルトの構造は古くからコロイド構造であると考えられており、図-2.4¹⁶⁾のような模式図で説明されている。

ゾル型では、オイル成分である飽和分の連続層中にアスファルテンを核にレジン分（高分子量芳香族成分，低分子量芳香族成分）が集まった集合体（ミセル）が分散したものとなっており流動性に富む性状を示す。またゲル型は、ミセルが連続して結合してネットワークを形成した状態となっており非常に硬くなる。

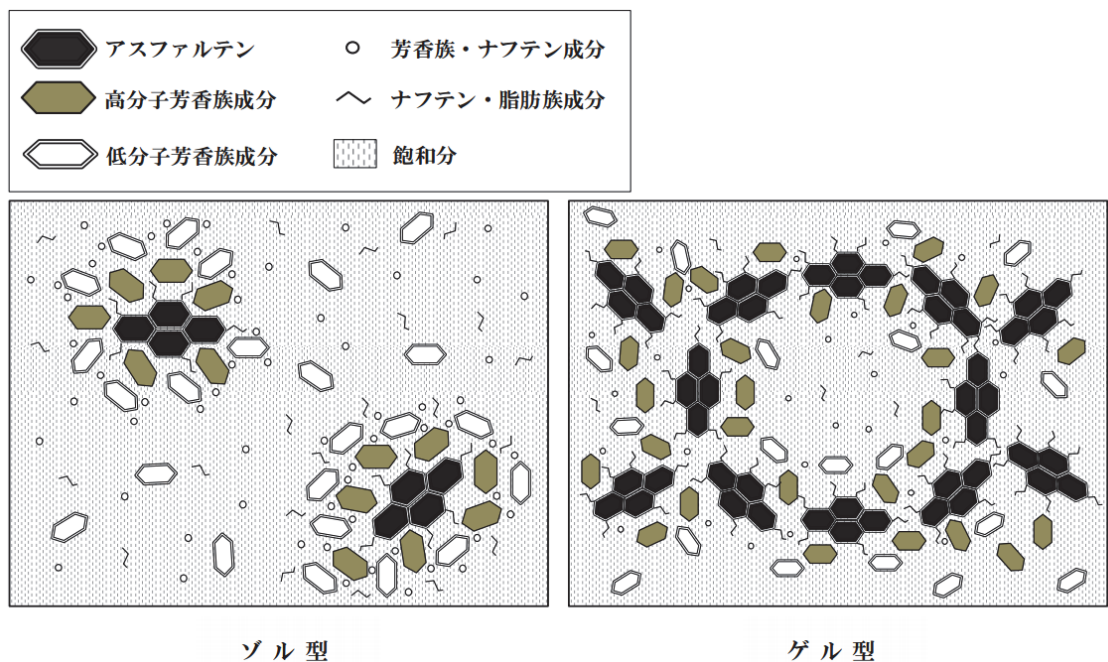


図-2.4 アスファルトの構造の概念¹⁶⁾

(2) アスファルトの需要と供給

わが国のアスファルトの大半は道路用アスファルトとして用いられており、道路用アスファルトの需要とアスファルトの供給は密接な関係にある。まず、わが国における道路用アスファルトの推定需要量を図-2.5¹⁷⁾に示す。

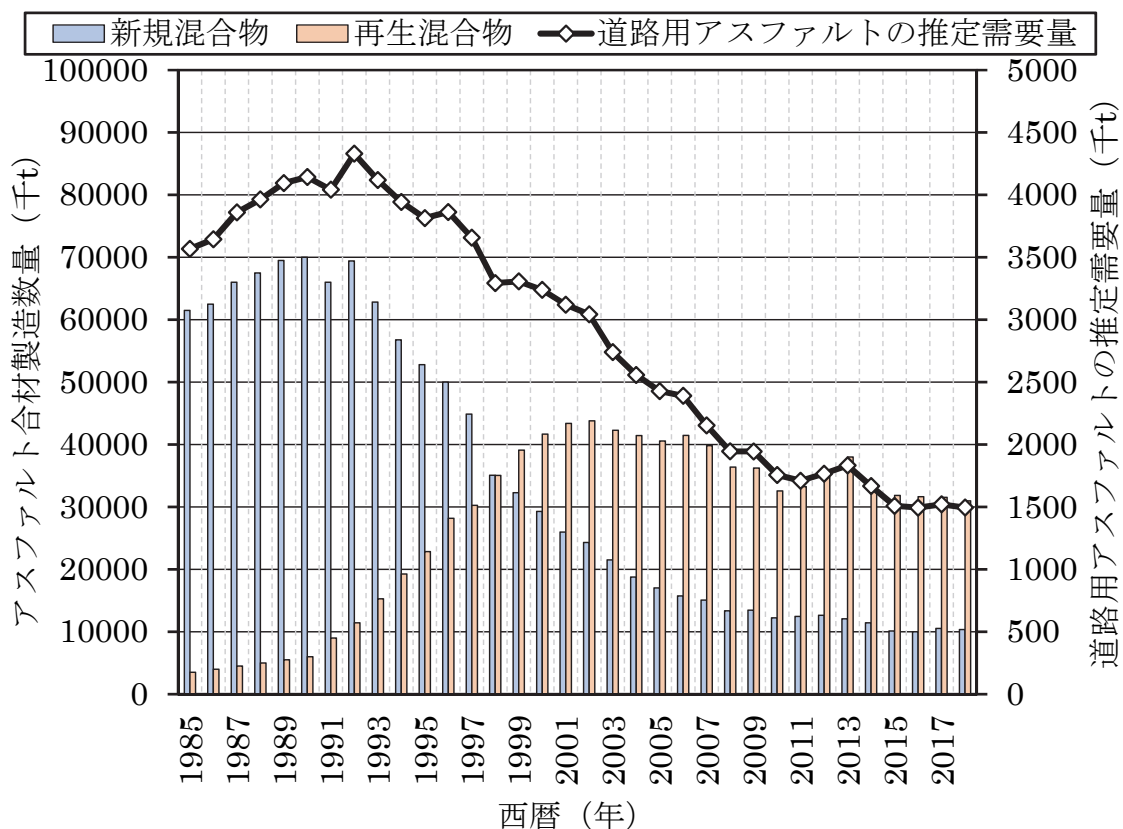


図-2.5 アスファルト合材の製造量と道路用アスファルトの推定需要量¹⁷⁾

道路用アスファルトの推定需要量の試算は、新規混合物および再生混合物の製造量に対するアスファルトの使用量から算出した。なお、算出方法は佐々木¹⁷⁾らのものを参考とし、混合物のアスファルト配合割合は5.9%、再生骨材中の有効な旧アスファルトの割合は4.5%、再生用添加剤の添加割合は旧アスファルトに対して10%とした。また、再生混合物中の再生骨材混入率はアスファルト合材統計年報の記録を参考とした。

その結果、千tあたりの新規混合物に含有する新規アスファルトは56tであるのに対し、千tあたりの再生混合物に含有する新規アスファルトは、再生骨材が旧アスファルトを含

有しているため、近年では 30t と新規混合物の半分である。そのため、再生混合物の製造量が増加すれば、新規混合物の製造量が減少するので、道路用アスファルトの推定需要量は減少している。

つぎに、わが国のアスファルトの供給体制について現状を述べる。現在わが国でアスファルトといえ一般的に石油アスファルトのことをいう¹⁸⁾。したがって、ここでは石油アスファルトをアスファルトと呼ぶ。アスファルトは、石油製品事情との深い関係がある。石油は輸入品であるため、世界の情勢により価格が大きく変動する。石油業界では、景気の後退や省エネを背景とした石油製品の需要が減少しており、特にアスファルトは前述したように需要量が低下していることから、製造能力の縮小の流れを受けている。それに伴い、アスファルト生産事業から撤退する企業もあり、アスファルトを製造する企業は 3 社のみとなっている¹⁹⁾。また、エネルギー供給構造高度化法（エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用および化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律）の施行や経済産業省から行政指導を受け、メーカー企業は、重質油分解装置の新設や増設、または常圧蒸留装置の削減で対応する白油化を進めている¹⁹⁾。このため、国内のアスファルト製造余力は更に低下しており、例えば、アスファルト製造拠点は東日本で 12 製油所（1997 年）から 3 製油所（2011 年）と大幅に減少している。これらを背景に、近年では、地域によってアスファルトの不足による舗装工事の入札価格が落札の上限である予定価格を上回る、いわゆる「不落」の発生も報告されている¹⁹⁾。その一方で、震災復興や景気回復による需要増加の予測もあり、アスファルトなど

の調達難が懸念されている¹⁹⁾。そのため、近年では、旧アスファルトの持続的利用についての検討やアスファルトの代替資材としての研究などが進められている¹⁹⁾。

2. 2. 3 骨材およびフィラーの需要と供給

(1) 骨材

混合物に用いる骨材は、混合物の約 90%を占めており、粗骨材と細骨材に分けることができる。粗骨材としては一般に、碎石、砂利、玉石など、細骨材としては、川砂、山砂、海砂、スクリーニングス（碎石製造過程で得られる）などの天然骨材が用いられる²⁾。しかし、図-2.6²⁰⁾の骨材供給量に示すように、河川や海から採取できる骨材は、建築資材として膨大な量を必要とするため、急激な資源の枯渇化や著しい環境の悪化、また、橋梁、護岸、根固めなどの基礎のむき出しなどの問題を背景に²¹⁾、1968年に粒径 300mm 以内の砂利の採取計画の認可と規制を施行する、砂利採取法²²⁾が制定され、供給量が大幅に減少した。これに伴い、近年、良質な天然骨材の枯渇が憂慮され²³⁾、また、混合物の大半を占める碎石の資源が多く分布する地域は主として山岳地帯で消費地から遠いこと、多くの場合公園法や森林法などにより開発が規制されていることなどの諸条件から実際に採掘して利用できる地域はきわめて少ない²¹⁾。そのため、再生利用の増進や副産物の活用などの検討が進められている²⁴⁾。

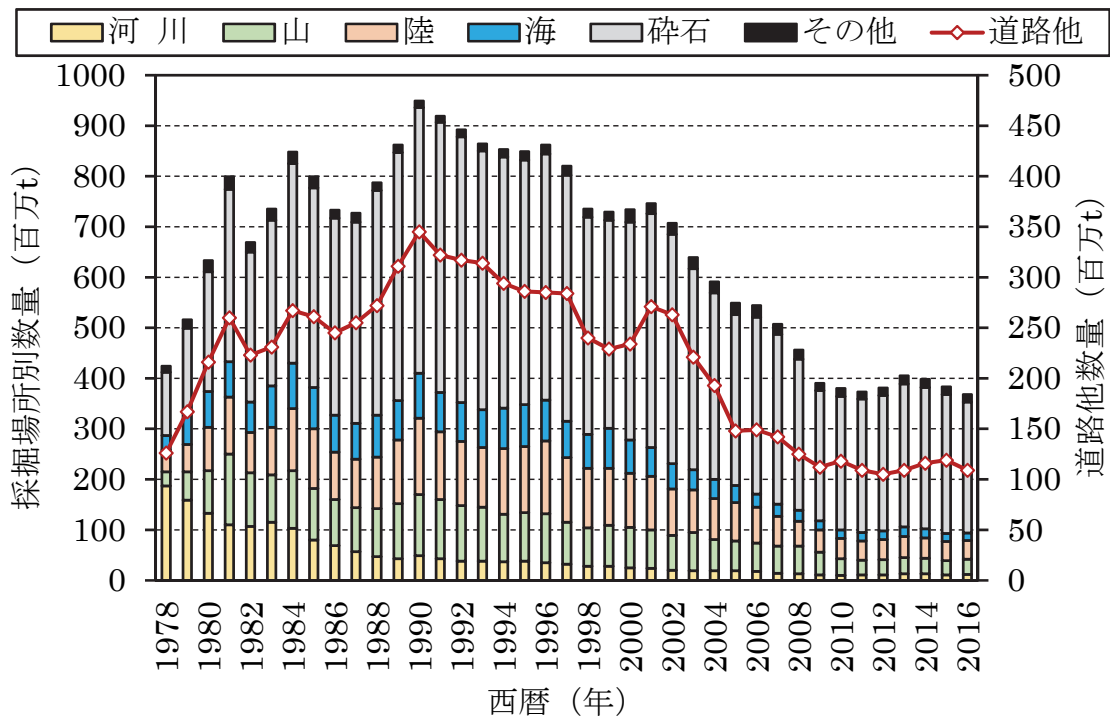


図-2.6 骨材供給量の推移²⁰⁾

(2) フィラー

フィラーはアスファルトの見かけの粘度を高め、かつ骨材として混合物の空隙を充填する働きがあり、主に石灰岩を粉末にした石粉が用いられている²⁾。道路用石灰石の出荷量と全石灰石の生産量との関係を図-2.7²⁵⁾に示す。図のように道路用石灰はアスファルトと同様の減少傾向を示している。これは、アスファルトと同様に再生混合物の増加によるものと思われる。アスファルト混合物に用いるフィラーの需要は減少していると考えられる。一方で、全石灰生産量は大幅な減少は見られない。石灰岩はわが国の数少ない資源であり²⁶⁾、このことから、近い将来でのフィラーの供給の問題はないものと考えられる。

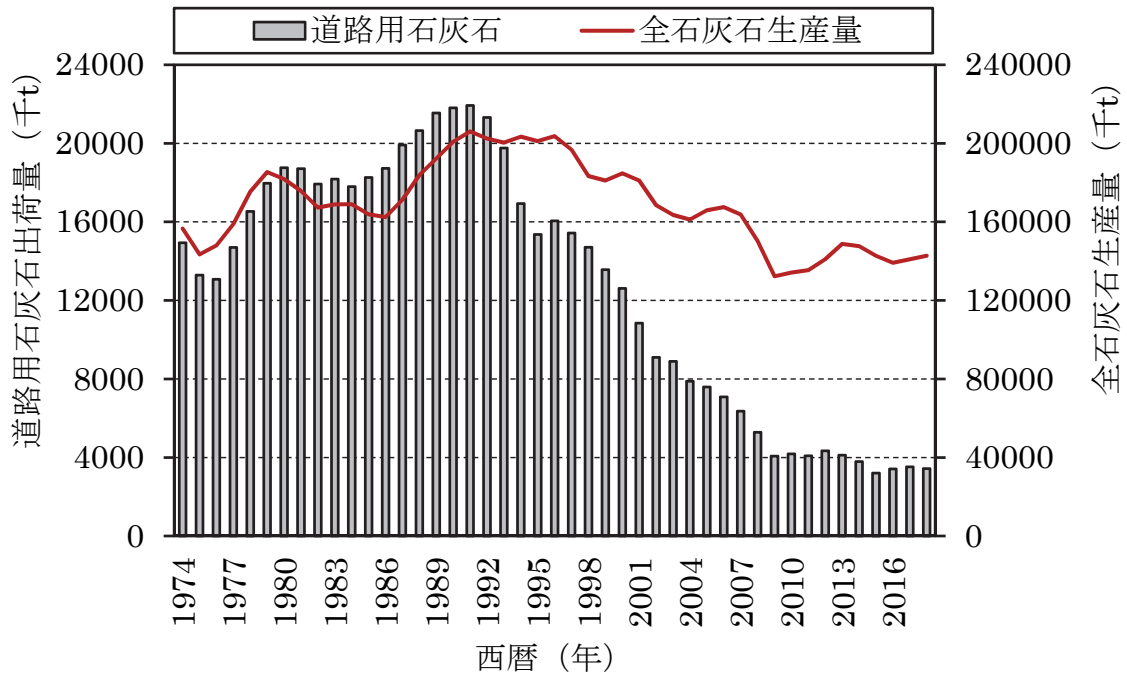


図-2.7 石灰石供給の推移²⁵⁾

以上，述べたように，混合物の材料のうち，アスファルトおよび，骨材は今後の供給に懸念があることから，発生材の持続的な循環利用が望まれる。

2. 2. 4 発生材の再生利用

(1) 発生材の再資源化率の推移

「1章 1. 1」でも述べたように、わが国では1970年代に発生材の再生利用に関する研究が開始され^{27)~31)}、1980年代以降に技術図書類^{32)~36)}と法律^{37),38)}などが整備され、発生材の再生利用技術が普及した。

その結果、発生材の再資源化率は2000年以降、98%以上を維持している(図-2.8 参照)³⁹⁾。なお、図の再資源化率は、発生材を再生路盤材料、および再生混合物として再利用した合計値となっている。本論文は混合物の持続的な循環利用を目的としているため、以降は、再生混合物への再利用技術について解説する。

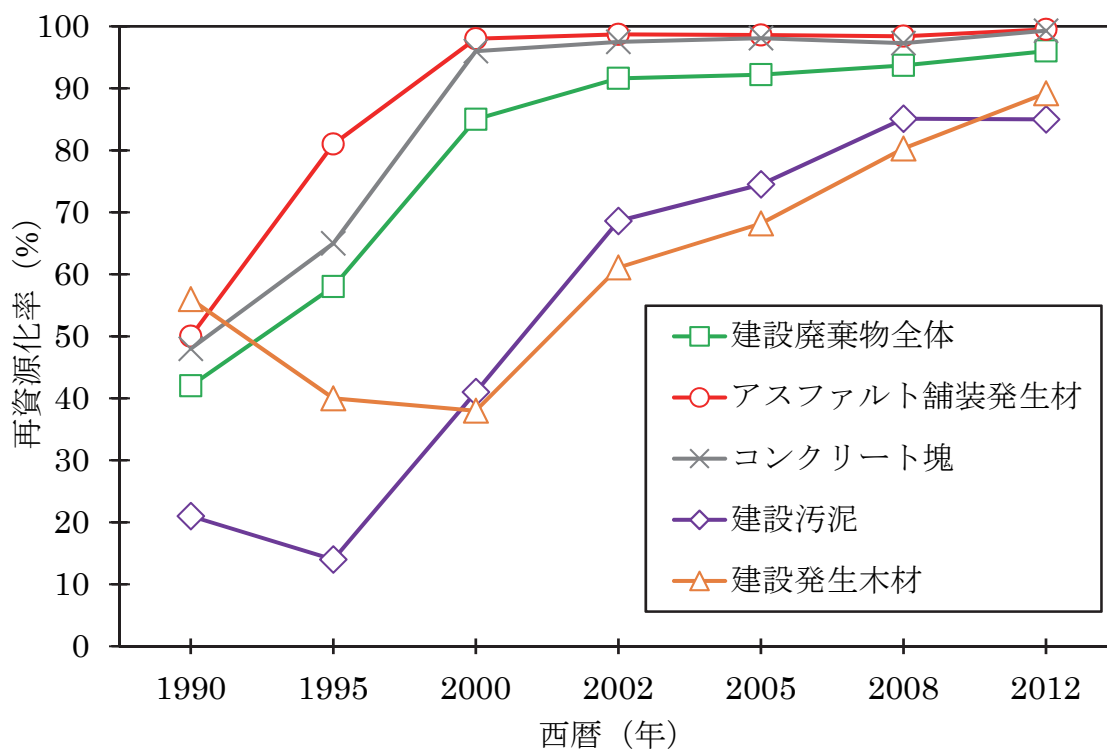


図-2.8 発生材の再資源化率³⁹⁾

(2) 発生材の再生混合物としての再生方法

現在，わが国での発生材の再生方法は，「プラント再生舗装工法」と「路上表層再生工法」に大別される。

「プラント再生舗装工法」は，発生材を再資源化施設にて再生骨材として処理し，適切に品質などを管理することができる常設の再生混合所で再生骨材を再生混合物として加熱・混合して再生利用を図る工法であり，**図-2.9**～**図-2.11**に示す3種類に大別される⁴⁰⁾。平成30年度において，仮設を除く常設の再生混合所は全国で1050基であり¹⁷⁾，各地域・各県に限らず設置されている。

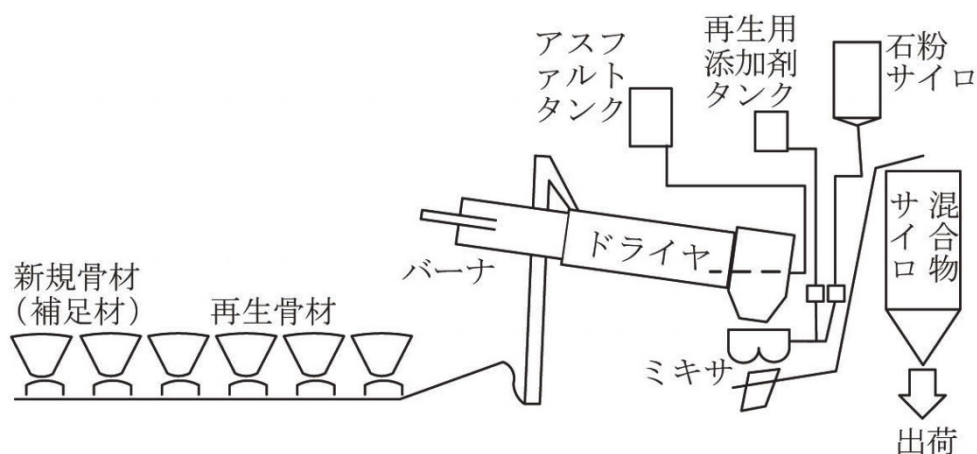


図-2.9 ドラムドライヤ混合方法の例⁴⁰⁾

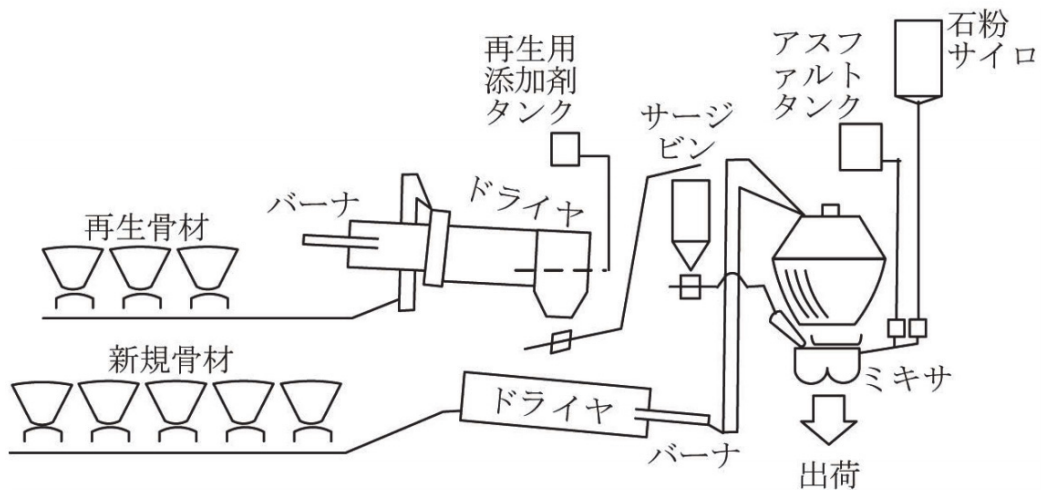


図-2.10 併設加熱混合方式の例 40)

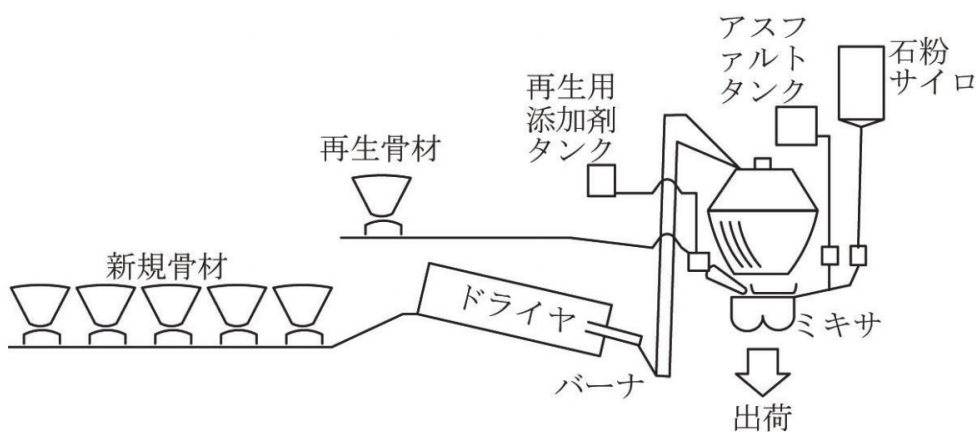


図-2.11 間接加熱混合方法の例 40)

また、「路上表層再生工法」は、現地において既設アスファルト混合物層の加熱、かきほぐし、混合（攪拌）、敷きならし、締固めなどの作業を連続して行い、新しい混合物層として再生する工法であり、図-2.12⁴¹⁾に占めるよう機械編成で施工する⁴⁰⁾。近年では、住宅地域に近い場合での施工の困難性や再生混合物の地方部への普及などにより施工実績が減少し⁴²⁾、2014年度の施工実績は15,000m²程度となっている。ただし、

その内訳は路上表層再生工法を参考としつつ編成機械を簡略化した路面維持工法が全てであり，平成 25 年度以降は路上表層再生工法の実績はない⁴³⁾。

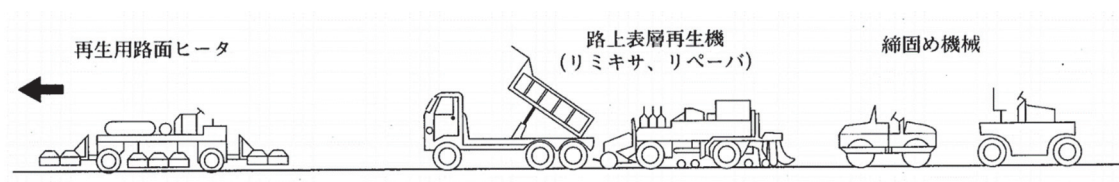


図-2.12 路上表層再生工法の機械編成⁴¹⁾

以降では「プラント再生舗装工法」に関する事象について，その現状について述べる。

(3) 再生混合物の製造量の推移

合材工場から出荷された混合物に占める再生混合物の割合を図-2.13に示す^{44),17)}。1976年に初めて再生混合物が4000t出荷され⁴⁴⁾，その後，再生混合物の出荷量は穏やかに増加していたが，1991年の「資源の有効な利用の促進に関する法律」の施行により急激に増加し始め，1998年に50%に達した後，2018年には74.9%に達している。

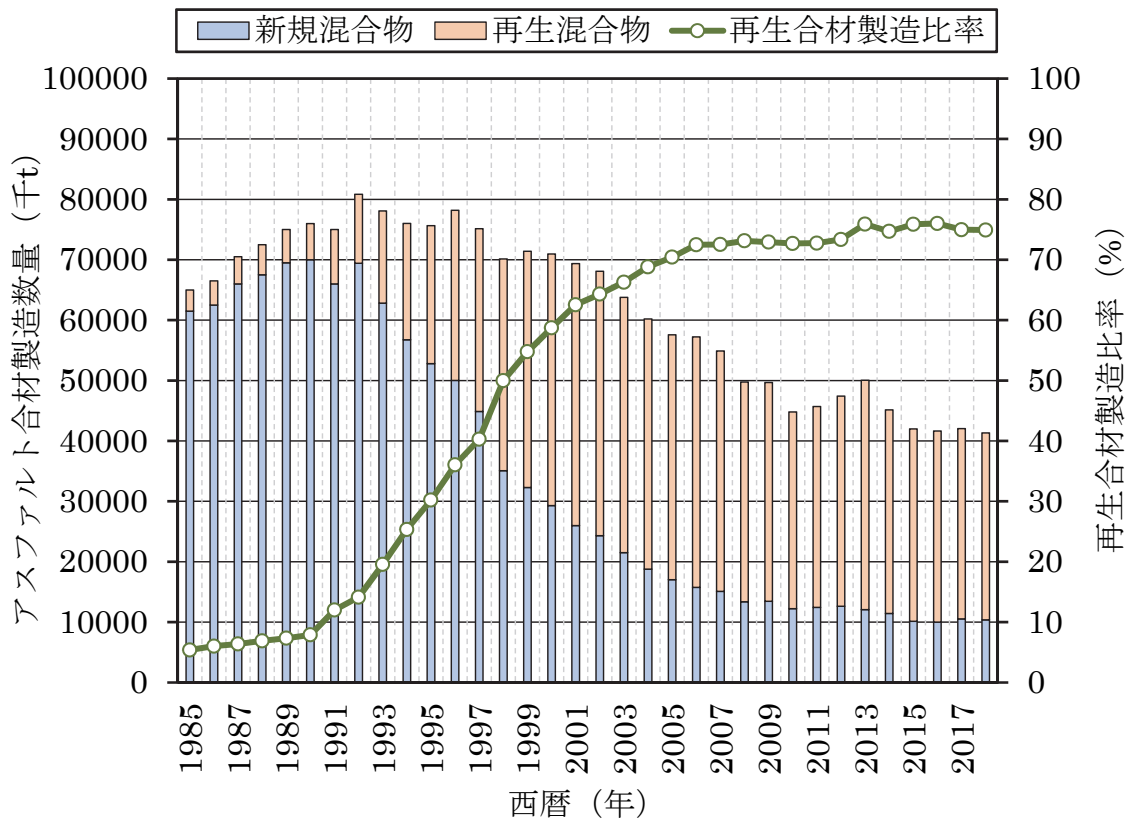


図-2.13 混合物の出荷量と再生混合物の製造比率の推移

(44), 17)

(4) 再生骨材配合率の推移

発生材の再生利用の普及に伴い，再生混合物中の再生骨材配合率は増加している。

図-2.14¹⁷⁾には，全国および各地域の再生骨材配合率の平均値の推移を示すが，再生骨材配合率は地域によって差があるものの，統計のある1994年から現在まで増加する傾向があり，2018年の再生骨材配合率の平均値は51.4%に達している。このことから，今後の発生材は，比較的高い再生骨材配合率で再生されたものとなる。

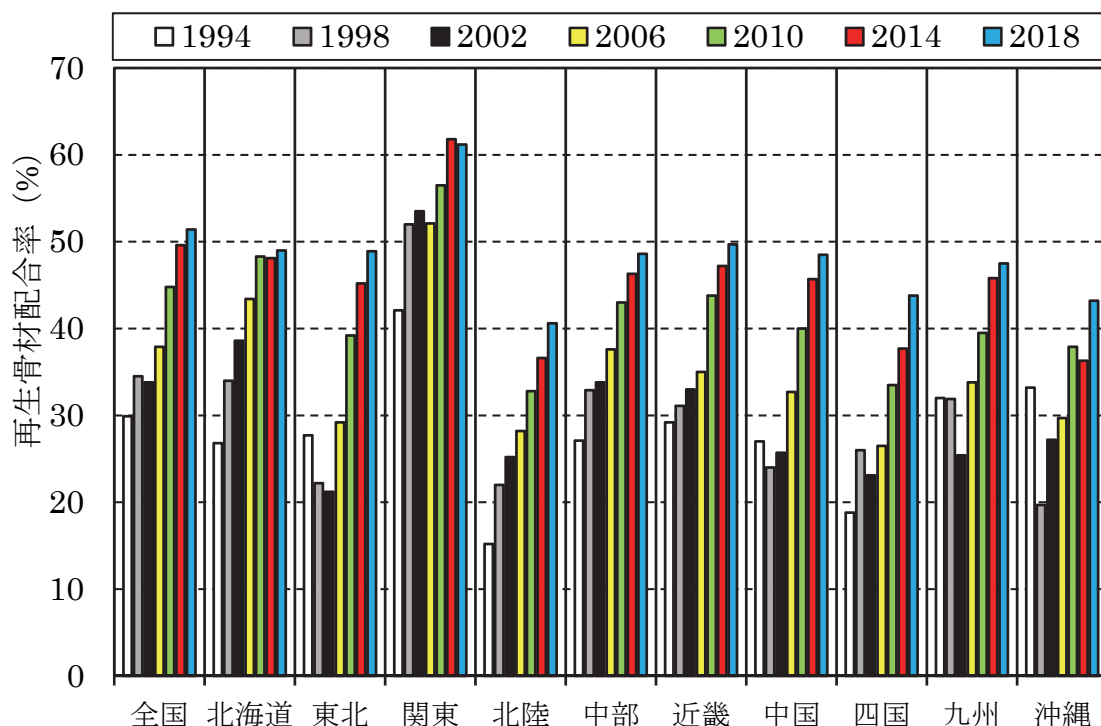


図-2.14 地域別での再生骨材配合率 17)

以上、述べたように、現在の発生材のそのほとんどは「プラント再生舗装工法」によって再生利用されており、再資源化率 98%を上回り、再生混合物の比率は 75%程度、再生骨材の配合率は 50%を上回っており、今後も再生混合物による舗装は増加するものと考えられる。

2. 3 再生混合物の繰返し利用

2. 3. 1 再生混合物の繰返し利用への課題

(1) 再生回数の推計

これまでのアスファルト合材統計年報¹⁷⁾から、複数回の再生を経た再生混合物が出荷される全混合物に占める割合について試算を試みた。

試算は加納の算出方法を参考とし⁴⁵⁾、再生混合物の出荷比率が50%となった1998年を再生1回目の再生混合物が出荷された起算年とし、アスファルト混合物層の打換え周期を15年として行った。また、再生混合物の出荷比率は、1998年と2013年は、統計データの数値を使用し、2028年以降は、現在の再生混合物の出荷比率75%が維持されるものとした。さらに出荷される再生混合物に使用される再生骨材は各再生回数のもものが均等に使用されるものと仮定した。

試算結果を図-2.15に示すが、2028年には、2回以上再生された再生混合物は、出荷される全混合物の50%に達し、2043年には56.3%、2058年には60%に達するものと推計された。

このことから、現状において発生材は、すでに複数回再生されている段階にあり、今後はより再生された回数の多い再生骨材が含まれる再生混合物が出荷されることとなる。

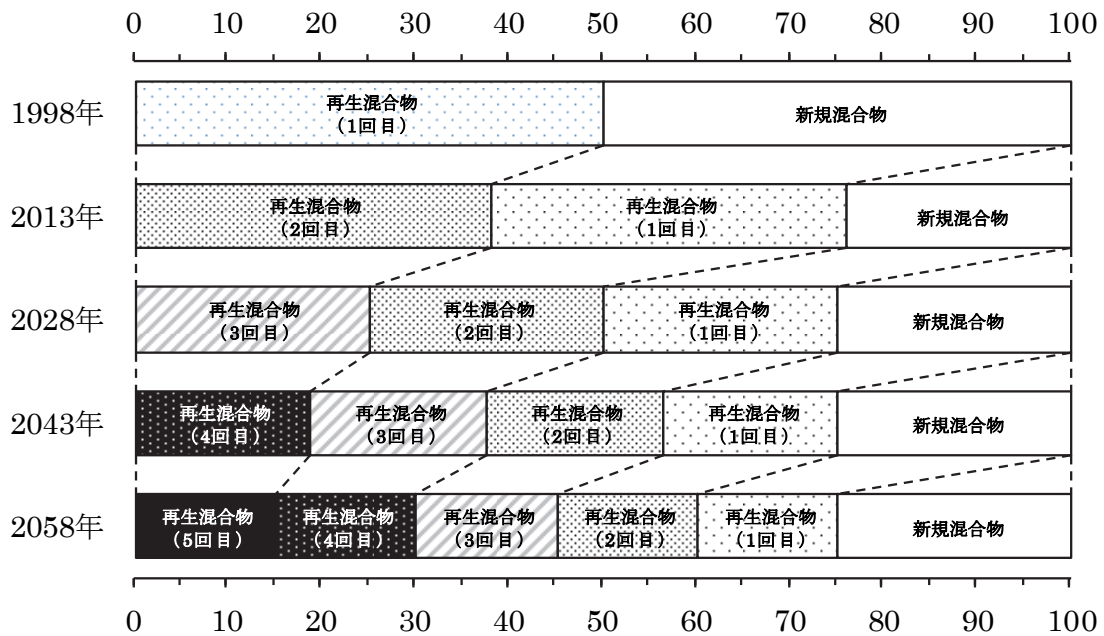


図-2.15 再生骨材の再生回数と再生混合物の出荷比率⁴⁵⁾

(2) 旧アスファルトの針入度

1982~1983年と2004~2007年にかけて、日本各地の再生骨材の製造施設より採取した再生骨材の旧アスファルトの針入度を調査した結果を図-2.16⁴⁶⁾に示す。図から、1980年代の調査に比べ2000年代の旧アスファルトの針入度は低下していることが確認できる。これは、ポリマー改質アスファルトが使用された発生材の増加も要因の一つとして考えられるが⁴⁶⁾、「2章 2.3.1 (1)」のとおり、再生利用の普及により複数回繰返して再生利用された再生骨材が増加しているためと考えられ、今後もこの傾向が進展する可能性がある。

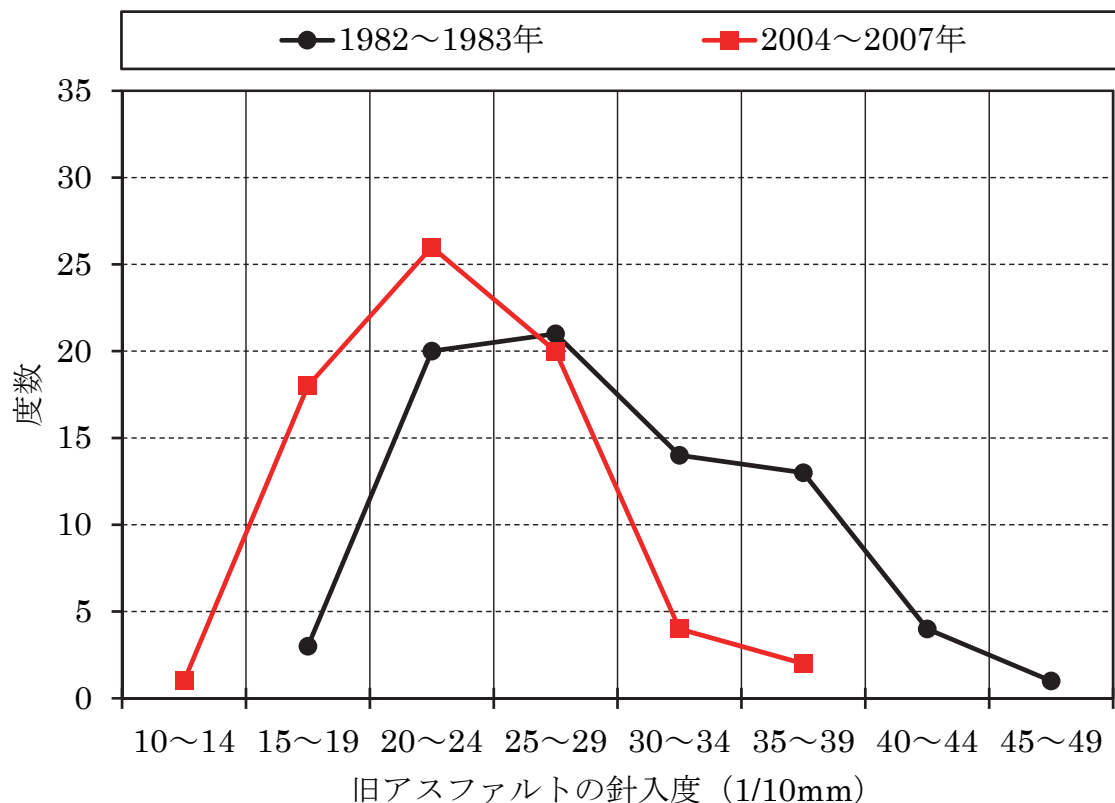


図-2.16 旧アスファルトの針入度の変化⁴⁶⁾

(3) 品質管理への課題

一般に、加熱アスファルト混合物のアスファルトプラントにおける製造の品質は、配合設計通りに混合されているかをアスファルト量、粒度により管理している⁴⁷⁾。管理方法は、アスファルトプラントでの加熱アスファルト混合物の製造時にアスファルト、粗骨材、細骨材、フィラーの配合量を計量および記録することで、アスファルト量、粒度を管理する印字記録を用いた品質管理、製造後の加熱アスファルト混合物に対してアスファルト抽出試験を行い、アスファルト量、粒度を把握するアスファルト抽出試験を用いた品質管理の2つである⁴⁷⁾。特に、アスファルト抽出試験は、製造後の混合物の

アスファルト量と粒度を把握できるため、プラントでの混合時の計量値に依存する印字記録による品質管理と比較して品質の管理方法としての信憑性が高い。そのため、新規混合物に対しては、常時管理の行うことが可能な、印字記録を用いた品質管理と併用することにより、厳密な品質管理を行っている⁴⁷⁾。

現行のアスファルト抽出試験方法には、ソックスレー抽出法などがあるが、使用される装置および溶剤は、機関によってさまざまである。特に溶剤に関しては1995年末に1,1,1-トリクロロエタンがオゾン層破壊物質として廃止(表-2.3⁴⁸⁾参照)されて以降、人体や環境に対する安全性への配慮からナフテン系やリモネン系の溶剤(表-2.4⁴⁸⁾参照)が代替されている^{49), 50)}。また、これらの代替溶剤の検討と並行して、抽出器の自動化が図られたこともあり、アスファルト抽出試験は近年、日常的な品質管理試験として安全性と効率性が改善されつつある。しかしながら、各種溶剤を用いる試験法に関しては、溶剤の発がん性や生殖毒性、廃液・乾燥方法をはじめ、抽出装置・溶剤のコストおよび改質アスファルトに対する溶解性能、試験時間の課題を残しており、今後も作業環境の安全性を担保する更なる改善検討を要する。

表-2.3 アスファルトの抽出に使用されてきた溶剤（2019年1月末時点）48)

溶剤名称	①1.1.1-トリクロロエタン(三塩化エタン)	②トリクロロエチレン(三塩化エチレン, トリクレン)	③メチレンクロライド(二塩化メチレン)	④1.1.2.2-テトラクロロエチレン(パークレン, パークロエチレン)	④四塩化炭素(テトラクロロメタン)	⑥ベンゼン	⑦トルエン	
化学式	C ₂ H ₃ Cl ₃	C ₂ HCl ₃	CH ₂ Cl ₂	C ₂ Cl ₄	CCl ₄	C ₆ H ₆	C ₆ H ₅ CH ₃	
臭い	クロロホルム臭	クロロホルム臭	クロロホルム臭	クロロホルム臭	エーテル臭	芳香族臭気	芳香族臭気	
沸点 °C	74.0	87.1	39.8	121.2	76.8	80.1	110.4	
引火点 °C	なし	なし	なし	なし	なし	-11.1	4	
発火点 °C	500	420	662	なし	なし	538	480	
KB値	124	130	136	90	—	107	105	
有害値	LD50 (経口) mg/kg	ラット 10,300	ラット 5,400	ラット 2,100	ラット 13,000	ラット 2,350	ラット 810	ラット 4,800
	LD50 (経皮) mg/kg	ウサギ 116,000	ウサギ 29,000	知見無し	マウス 5,000	マウス 5,070	ラット 8,200	ウサギ 14,100
日本産業衛生学会許容値 (ppm)	200	25	50	検討中	5	1	50	
ACGIH TLV TWA (ppm)	350	50	50	25	5	0.5	20	
ACGIH TLV STEL (ppm)	450	100	—	100	10	2.5	150	
OSHA PEL TWA (ppm)	350	100	125	100	100	10	150	
オゾン層破壊係数 (ODP)	0.12	0.005	0.007	0.005	1.1	—	—	
適用法規	労働安全衛生法第2種有機溶剤	労働安全衛生法特定化学物質(第2類物質)	労働安全衛生法特定化学物質(第2類物質)	労働安全衛生法特定化学物質(第2類物質)	労働安全衛生法特定化学物質(第2類物質)	労働安全衛生特定化学物質(第2類物質)	労働安全衛生法第2種有機溶剤	
発がん性 (IRAC)	グループ1 (人に対する発がん性がある)	グループ2A (ヒトに対しておそらく発がん性を示す)	グループ2B (ヒトに対して発がん性を示す可能性がある)	グループ2A (ヒトに対しておそらく発がん性を示す)	グループ2B (ヒトに対して発がん性を示す可能性がある)	グループ1 (人に対する発がん性がある)	記載なし	
モニタリング規定書	該当 (BグループIII)	該当せず		該当せず	該当 (BグループIII)	該当せず	該当せず	

表-2.4 代替可能な溶剤とその性状例（2019年1月末時点）⁴⁸⁾

		1-プロモプロパン	d-リモネン	ナフテン系炭化水素	1,2,3,4-テトラヒドロナフテン
臭い		甘い香り	柑橘系芳香臭	微石油臭	特異な臭気
沸点 °C		71	175~179	194~220	207
引火点 °C		-10	48	71	71
発火点 °C		490	237	—	384
KB値 g/cm ³		1.35	0.844 (20°C)	0.83	0.968 (20°C)
人体への影響	皮膚への刺激	刺激性	刺激性少ない	刺激性少ない	わずかに刺激がある
	長時間接触または繰り返し接触した場合	乾燥, ひびわれ	手荒れ	手荒れ	手荒れ
	蒸気吸引の場合	刺激性あり	問題なし	知見無し	知見無し
有害値	LD50 (経口) mg/kg	ラット 2,000	ラット 5,000	ラット 5,000	ラット 2,900
	LD50 (経皮) mg/kg	ラット 2,000	ウサギ 5,000	ラット 9,510	ウサギ 17,000
特性および劇物取締法		該当せず	—	該当せず	該当せず
発癌性: IARC (国際癌研究機関)		記載なし	Gr.3	記載なし	記載なし
変異原性	復帰突然変異試験	陰性	知見無し	陰性	陰性
	染色変異試験	弱い陰性	知見無し	知見無し	知見無し
	小核試験	陰性	知見無し	知見無し	知見無し
オゾン層破壊係数 (ODP)		—	0	—	0
労働安全衛生法 (有機溶剤中毒予防規制)		該当せず	該当せず	該当せず	該当せず
化学物質排出把握管理促進法		第1種指定化学物質	該当せず	該当せず	該当せず
消防法		第四類第一石油類	第四類第二石油類	第四類第三石油類	第四類第三石油類
許容濃度 ppm		0.5	設定されていない	設定されていない	設定されていない
日本産業衛生学会 mg/m ³		2.5	設定されていない	設定されていない	設定されていない
管理濃度 (労働安全衛生法作業環境評価基準)		設定されていない	設定されていない	設定されていない	設定されていない
モンリオール認定書		該当せず	該当せず	該当せず	該当せず

一方、再生混合物は旧アスファルトを含有しているため、現在使用できる溶剤を用いて、アスファルトを抽出するためには多くの時間を要するなどの課題を残している。このため、現在、再生混合物のアスファルトプラントにおける製造の品質は、印字記録による品質の合否判定値を設けることで管理を行っている⁵¹⁾。しかしながら、前述したように、再生混合

物の繰返し利用に伴い、再生骨材の品質の低下や、多様化の傾向がある。これらを背景に、再生骨材に付着しているアスファルト量、粒度のばらつきが懸念されており、また、再生混合物の排出量や配合量も増加していることから、今まで以上に、厳密な品質管理が求められる。そのため、再生混合物の製造後の厳密なアスファルト量、粒度を把握することの可能なアスファルト抽出試験の開発が望まれる。

以上、述べたように、2028年には複数回繰返した再生混合物の出荷比率が全出荷量の50%に上ることが予想され、また、再生混合物中に含有する旧アスファルトの品質は低下していることから劣化と再生を繰返した再生混合物の品質への不安を残している。また、再生骨材の需要が増すことにより、再生骨材の品質管理試験であるアスファルト抽出試験の需要も高まり、今後、人体への影響の少ない代替溶剤の検討を含む、作業環境を担保した試験方法の開発を行う必要がある。

2. 3. 2 再生混合物の繰返し利用に関する研究

わが国における発生材の再生利用（再生混合物）の研究は、当初は合材工場での再生骨材の製造・加熱方法と再生混合物の製造プロセス，使用する再生用添加剤および再生混合物の性状・供用性を確認することを主眼とした試験製造，試験施工が行われた^{27)~31),52)~54)}。これらの試験では，再生骨材配合率が30~100%の再生混合物の供用性が確認されたが，製造上の大きな問題や早期に破損した事例などの報告はなく，新規アスファルト混合物（以下，新規混合物）と同等の供用性が確認された。

一方，繰返し再生されたアスファルトおよび再生混合物のわが国における研究は，1980年代から行われている。建設省道路局国道第一課（当時）と建設省土木研究所（当時）³¹⁾は，室内でアスファルトの促進劣化と再生を繰返し，アスファルトの物理的性状や組成から再生の可能な回数を検討している。その結果，アスファルトに類似した組成の再生用添加剤（以下，添加剤）を用いれば，3回程度までの再生が可能であることを確認している。

また，添加剤に関しては，舗装再生法便覧（平成22年度版）により組成の分析方法が規定され，その分析方法でのデータを蓄積し，望ましい添加剤の組成を明らかにするなどの措置が取られている。しかし，現在，さまざまな性状の添加剤が再生混合物に用いられており，繰返し利用に懸念を残している。

加納ら⁵⁵⁾は，組成の異なる添加剤を用いて複数回再生された再生混合物や再生アスファルトの性状の変化について検討した。なお，再生用添加剤の組成を表-2.5に，実験手順を図-2.17に示す。

表-2.5 再生用添加剤の組成 55)

材料	密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	組成分析			
			アスファルト テン分	レシ ン分	飽和分	芳香 族分
再生用添加剤④	0.966	—	—	6.3	67.1	26.6
ストレートアス ファルト 150/200	1.025	192	—	—	—	—
高針入度アス ファルト 300/400	1.015	395	12.3	21.6	7.3	58.8

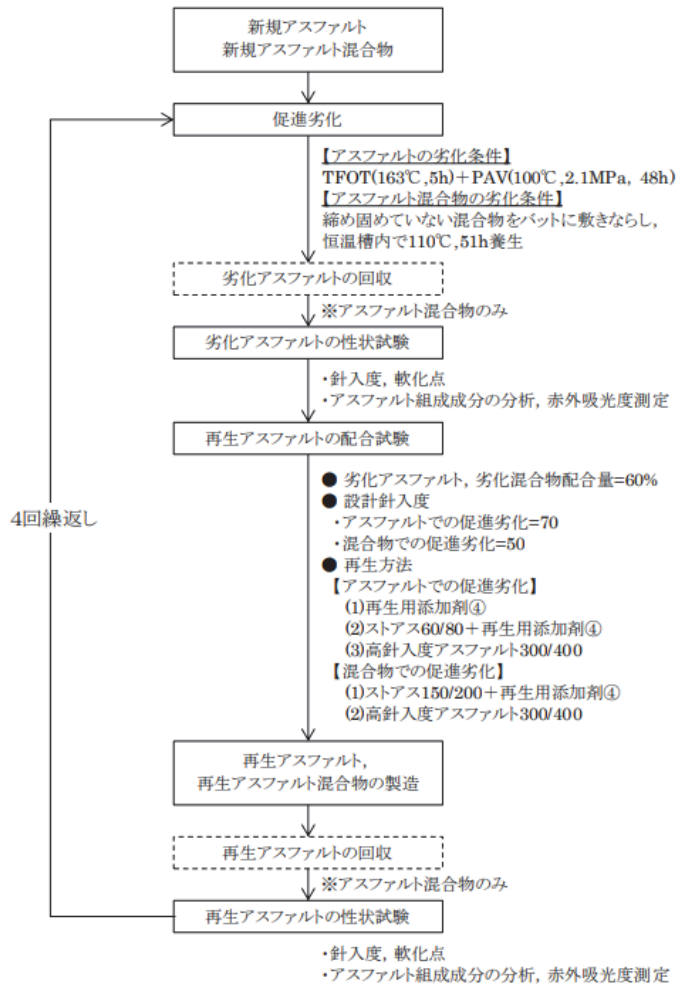


図-2.17 繰り返し検討実験手順 55)

その結果，再生混合物は再生回数が多くなるにしたがって，軟化点が高くなり（図-2.18 参照），感温性が低下する傾向，伸度が低下し（図-2.19 参照），延性に影響を及ぼす傾向，圧裂係数が大きくなり（図-2.20 参照），疲労抵抗性が低下する傾向を確認した．また，飽和分が多く芳香族分の少ない添加剤ではその傾向が大きいことから，劣化と再生を繰り返した再生混合物と再生アスファルトの性状は，添加剤の組成により変化する可能性があることを確認している．

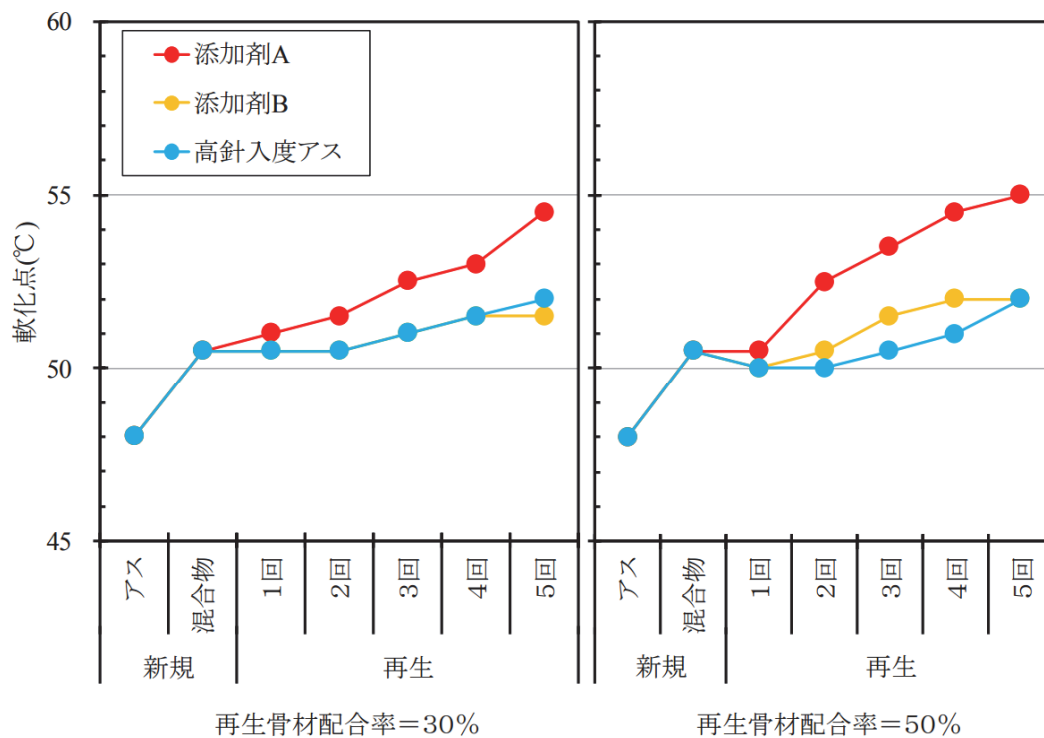


図-2.18 軟化点試験結果 55)

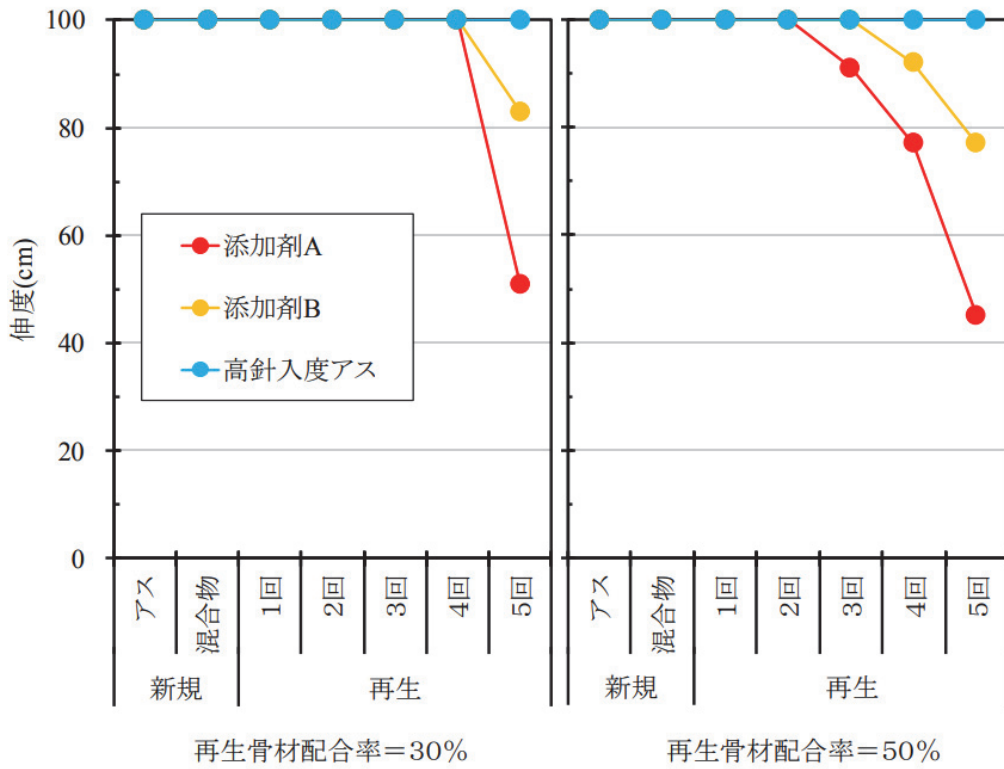


図-2.19 伸度試験結果⁵⁵⁾

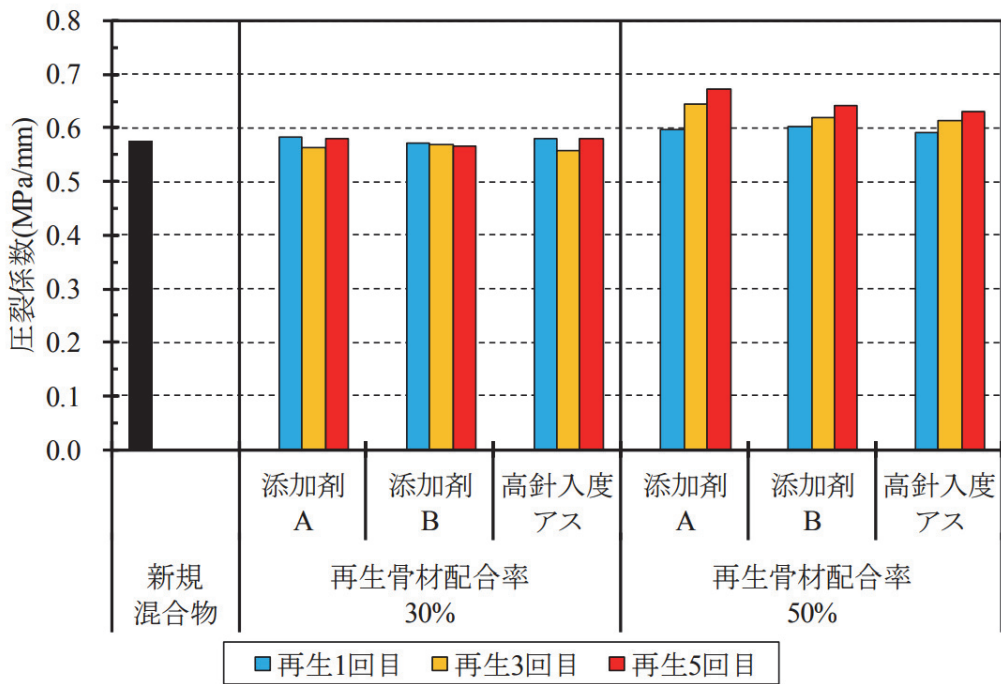


図-2.20 圧裂試験結果⁵⁵⁾

また，川上ら⁵⁶⁾は芳香族分の多い添加剤を用い（表-2.6 参照），図-2.21 に示す手順で検討した。

表-2.6 添加剤の組成⁵⁶⁾

密度 (g/cm ³)	組 成 (%)			
	アスファル テン分	レジ ン 分	芳香 族分	飽和分
0.975	0.1	4.0	70.5	25.4

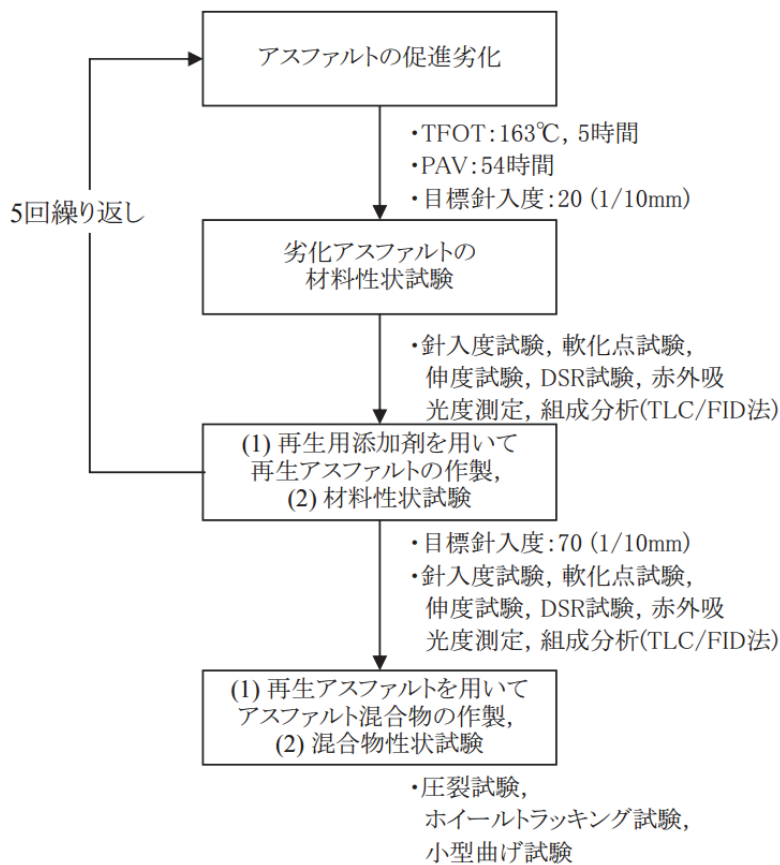


図-2.21 実験手順⁵⁶⁾

その結果，アスファルトの酸化劣化の指標となるカルボニル指数は，再生アスファルトが劣化と再生を繰り返す毎に徐々に

に増加し，その増加傾向は一定の値に収束する傾向が見られた（図-2.22⁵⁶⁾参照）．また，混合物を用いた小型曲げ試験より，劣化と再生を繰り返すことにより，脆性領域が低温側にシフトし，常温域での曲げ応力が低下する傾向を示し（図-2.23⁵⁶⁾参照），添加剤を繰り返し使用することによる混合物への品質の低下を確認した．

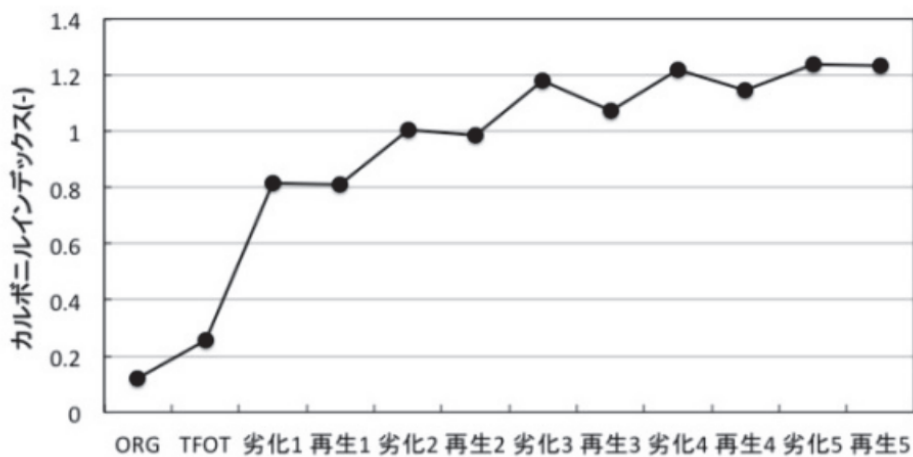


図-2.22 カルボニルインデックス⁵⁶⁾

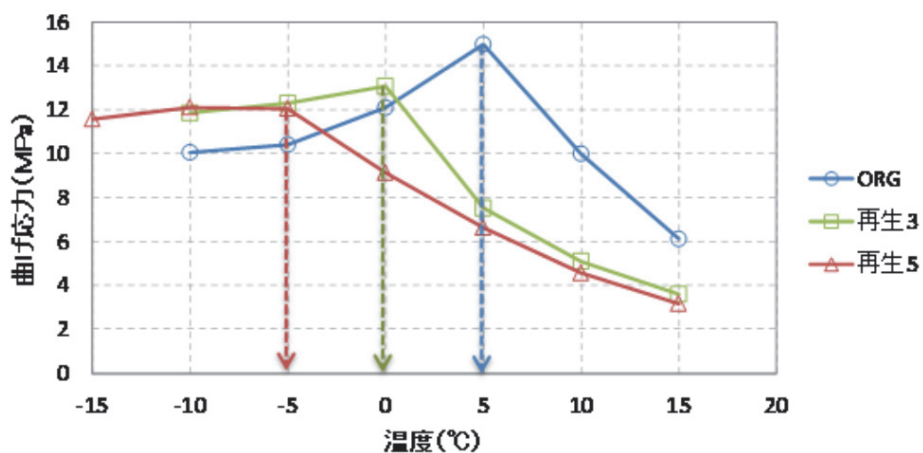


図-2.23 曲げ応力⁵⁶⁾

以上より，劣化と再生を繰返した再生混合物に含有する再生アスファルトは，添加剤の種類により，品質に差異が出ること，特に，飽和分を多く含有した添加剤を用いた再生アスファルトは他の添加剤と比較して，劣化と再生を繰返す毎に品質が大きく低下する傾向を確認している．また，劣化と再生の繰返しによる品質の低下が比較的小さい，芳香族分を多く含有した添加剤においても，劣化と再生を繰返すたびに，酸化を蓄積する傾向，また，劣化と再生を繰返した再生混合物の品質が低下する傾向を確認した．

これらより，劣化と再生を繰返した再生混合物は，品質が低下している可能性があり，持続的な循環利用の確立のためには，従来方法による繰返し利用の継続的検討に加え，新たな再生技術を開発するなど，持続可能な再資源化技術が望まれる．

2.4 高温高压水

2.4.1 高温高压水の特性

水は、温度や圧力に関係した分子間相互作用と運動エネルギーの兼ね合いから、図-2.24⁵⁷⁾のように状態が変化し、気液共存線の終点である臨界点を超えると気液界面のない流体となって常温の水と全く異なる特性を発揮する。

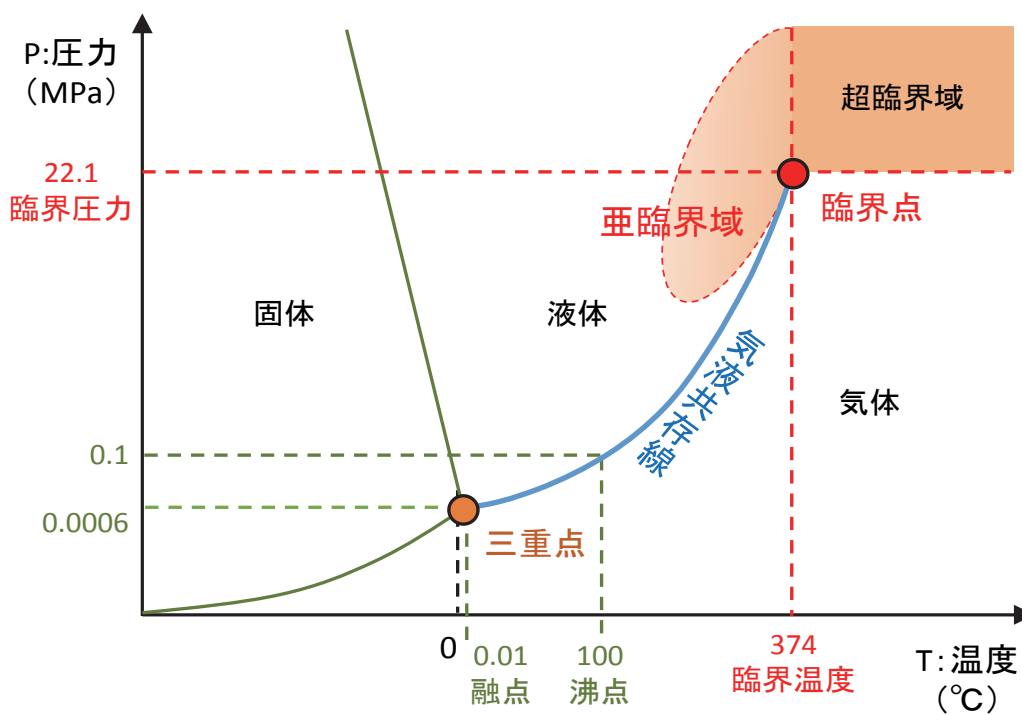


図-2.24 水の相図 (P-T 線図) ⁵⁷⁾

高温高压水の溶媒特性は、極性を表す比誘電率と加水分解能を表すイオン積を指標として、図-2.25⁵⁷⁾の温度変化に伴う挙動から概略理解される。

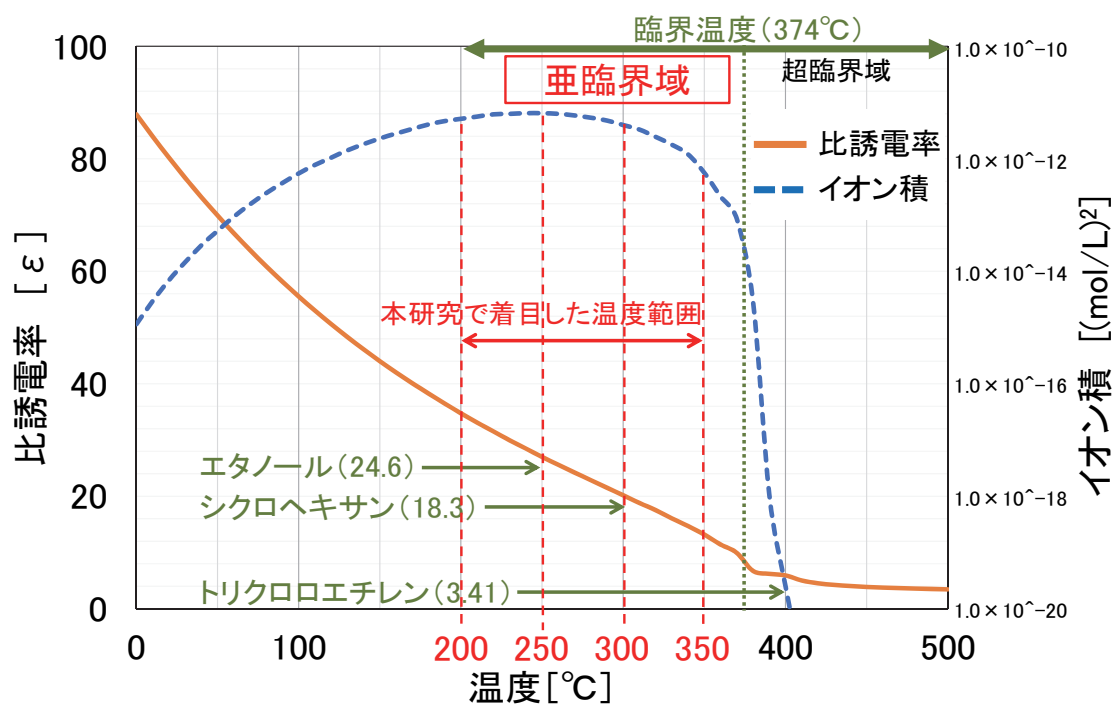


図-2.25 水の比誘電率とイオン積 57)

周知のとおり常温の水は、極性の小さい多くの有機物質をほとんど溶解せず、いわゆる「水と油の状態」を示す。ところが図のように、極性を表す比誘電率は、温度の上昇とともに減少する。また、水素イオン・水酸化イオン濃度の程度を表すイオン積は、250°C付近で増大し、臨界温度を境に急激に減少する。ここで、亜臨界域に着目すると、比誘電率は臨界点付近になるにつれアスファルトに用いる有機溶媒に匹敵する値となる。また、高温により有機物質は分解反応（熱分解）が起きると考えられている^{58),59)}。さらに、水素イオンおよび水酸化イオン濃度の積であるイオン積は、常温では 1.0×10^{-14} 程度であるのに対し、亜臨界域では 1.0×10^{-11} 程度まで増大するので、有機物の加水分解が促進するといわれている^{58),59)}。

高温高圧水の特性を活かした研究や開発は既に、多分野で行われており、代表的なものとして、オイルサンドビチューメ

ンの改質プロセス（図-2.26 参照）への応用⁶⁰⁾，プラスチック廃棄物からの高発熱量の複合燃料の生成などの有機物のグレードアップ技術（図-2.27 参照）⁶¹⁾がある。

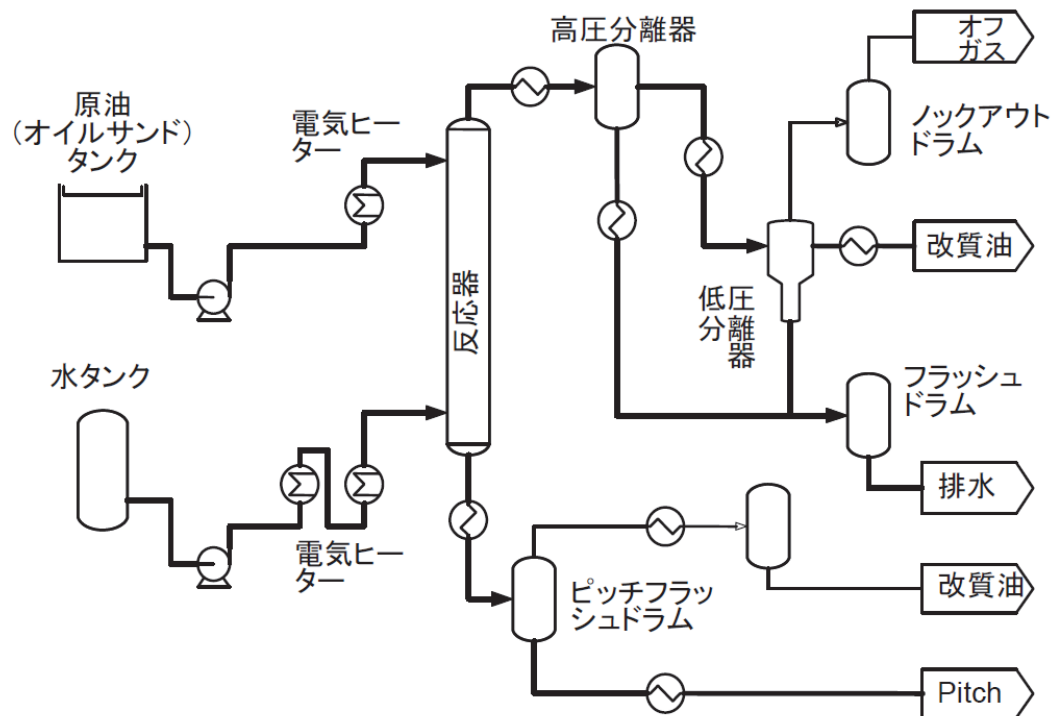


図-2.26 オイルサンドビチューメン改質のパイロット装置の概略フロー図⁶⁰⁾

[粉末燃料化]

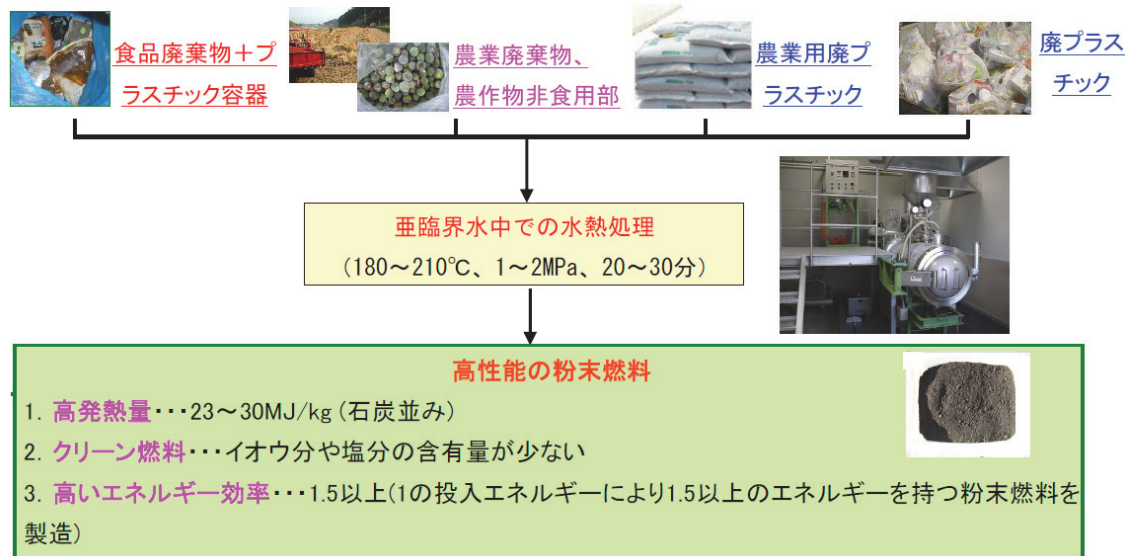


図-2.27 プラスチック廃棄物からの高発熱量の複合燃料の生成の概略フロー図⁶¹⁾

以上、述べたように、高温高圧水は、有機物に対して溶媒、熱分解、加水分解などの作用を有しており、既に多分野で研究が進められている。そのため、高温高圧水はアスファルトを溶解、分解する性能を有している可能性が考えられる。

2. 4. 2 高温高压水を用いた既往研究

(1) 高温高压水によるアスファルト舗装発生材からの骨材分離回収

加納^{62),63)}らは、発生材の持続的な循環利用のシステム構築を目的として、簡便性および環境や人体に対する安全性などを考慮し、高温高压水により発生材から骨材とアスファルトを分離・回収する新たな再資源化技術を提案し、その基礎検討を試みている。本検討では、アスファルトの被膜した骨材を高温高压水に反応させ、反応後の骨材の品質を確認している。高温高压水反应用密閉容器を図-2.28⁶⁴⁾に、高温高压水試験用加熱槽の外觀および概要を図-2.29⁶⁴⁾に示す。

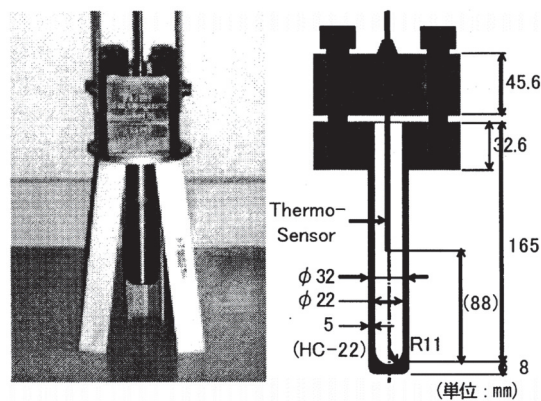


図-2.28 高温高压水反応密閉容器⁶⁴⁾

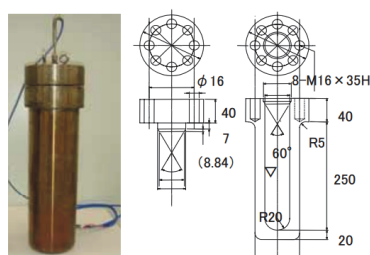
外形寸法	W550 × D550 × H850mm (液槽部590+攪拌部260mm)
槽内寸法	W200 × D200 × H450mm
温度範囲	+300~+600°C
温度安定度	±0.5°C
温度調節	デジタル式温度指示調節器 PID制御方式
ヒーター	シースイヤー式4kW
攪拌機	縦型攪拌方式 スピードコントロールモータ 100W (タイマー付き)
定格電源	AC200V 単相50/60Hz
定格電流	21A
重量	約81kg

図-2.29 高温高压水試験用加熱槽⁶⁴⁾

試験手順は内容積 60cc の密閉容器に 50g の試料（骨材分）および溶媒（水）を入れ加熱および反応を行う。反応時間経過後、容器から内容物を回収し、ろ過（ガラス繊維ろ紙：粒子保持能 1.6 μ m）を行う。なお、分離されたアスファルト分は、溶媒水面に油膜状となって存在するため、これを十分に除去した後、純水を用いて内容物を丁寧に濯ぎ出している。ろ過が完了した後、ろ過残留分を質量が一定となるまで炉乾燥（110 $^{\circ}$ C）させ、デシケータ内で室温まで放冷して計量する。

その結果、反応温度 300~450 $^{\circ}$ C の高温高压水によりストレートアスファルトおよび改質 II 型アスファルトを被膜した混合物、また、発生材において優れたアスファルトの除去性能を確認している。

秋葉⁶⁵⁾らは図-2.30⁶⁵⁾に示すように、900cc の密閉容器を用い、回収した骨材の品質を評価し、また、回収した骨材のポラスアスファルト混合物への利用を試みている。



(a) 超臨界試験用密閉容器



(b) 超臨界試験用加熱槽

図-2.30 超臨界試験装置の外観⁶⁵⁾

試験手順は、ストレートアスファルトの被膜した骨材に対し、加納らの検討を参考とし、密閉容器に目標圧力となる仕込量の水と供試体を入れ、目標の温度・圧力に到達するまで加熱する。所定時間（180sec）保温した後、容器内部が常温・常圧になるまで冷却して内容物を回収する。回収した試料をろ過して残留分を炉乾燥し骨材の品質を確認している。なお、高温高压水の温度・圧力条件は分離性能を考慮した超臨界域（400°C・25.0MPa）、超臨界域と比較して扱いの容易な亜臨界域（350°C・16.5MPa）としている。また、繰返し循環利用への適用を確認するために、回収した骨材に再びアスファルトを被膜させ、2回目の高温高压水への反応を行い、1回目と2回目の品質を比較している。

その結果、図-2.31～33⁶⁵⁾に示すように、回収した粗骨材の品質は、密度、吸水率およびすり減り減量が新規骨材と同程度であり、また、舗装用骨材の品質目標値⁶²⁾を満足することを確認している。

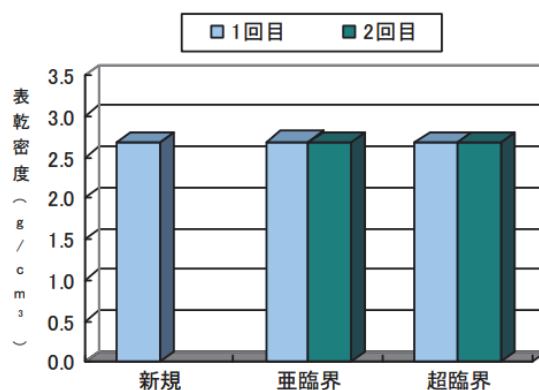


図-2.31 繰返し分別回収された粗骨材の密度⁶⁵⁾

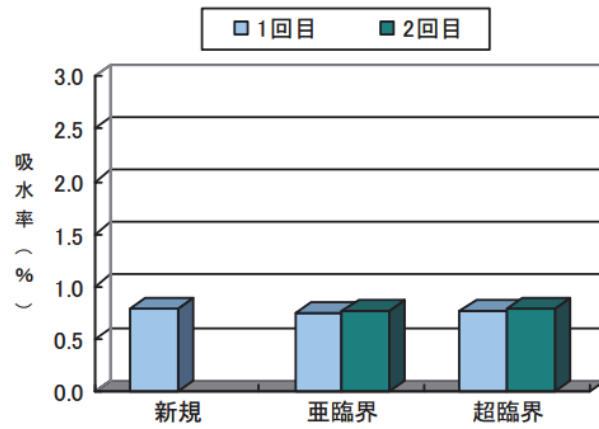


図-2.32 繰返し分別回収された粗骨材の吸水率⁶⁵⁾

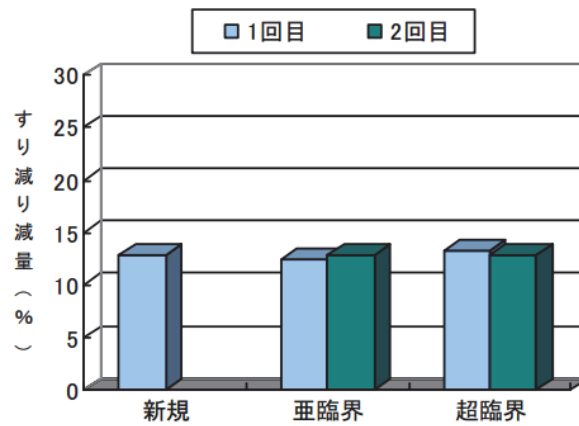


図-2.33 繰返し分別回収された粗骨材のすり減り減量⁶⁵⁾

また、回収した細骨材の品質は、図-2.34⁶⁵⁾、2.35⁶⁵⁾に示すように、吸水率の超臨界水反応後の結果において、多少の差異があるものの、舗装用骨材の品質目標値⁶⁶⁾を満足することを確認している。

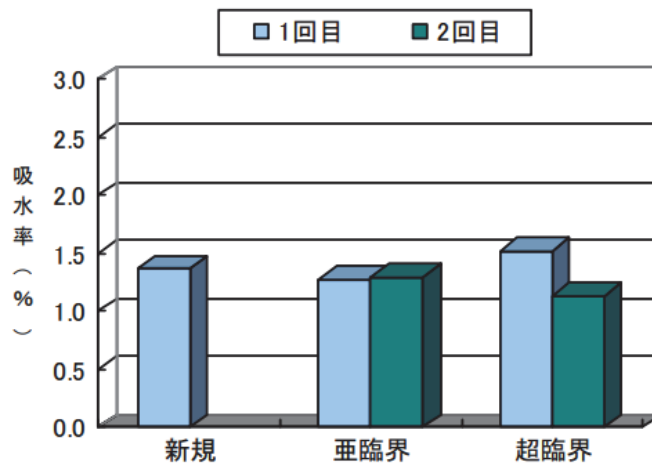


図-2.34 繰返し分別回収された細骨材の密度⁶⁵⁾

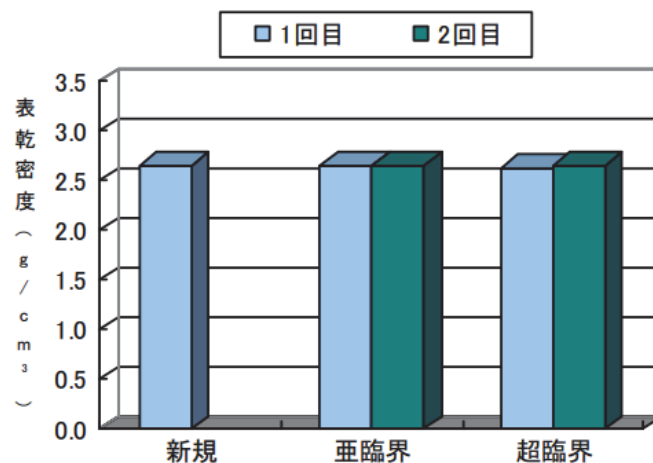


図-2.35 繰返し分別回収された細骨材の吸水率⁶⁵⁾

つぎに、ポーラスアスファルト混合物の配合を表-2.7⁶⁵⁾に、標準カンタブロ試験、低温カンタブロ試験、水浸カンタブロ試験の結果をそれぞれ図-2.36⁶⁵⁾、37⁶⁵⁾、38⁶⁵⁾に、圧裂強度の結果を図-2.39⁶⁵⁾、40⁶⁵⁾に示す。その結果、回収骨材から作製したポーラスアスファルト混合物は、骨材飛散抵抗性、ひび割れ抵抗性ともに新規ポーラスアスファルト混合物と同程度となり、回収骨材は新規骨材と同様の取扱いが可能と考えられた。

表-2.7 混合物の配合と物性値⁶⁵⁾

		新100	再20 新80	再40 新60	回100
骨材 配合比 (%)	6号碎石	77.0	66.0	55.0	77.0
	7号碎石	11.0	8.0	5.0	11.0
	砕砂	7.0	2.0	—	7.0
	粗砂	—	—	—	—
	再生骨材13~0	—	20.0	40.0	—
	石粉	5.0	4.0	—	5.0
通過 質量 百分率 (%)	19.0mm	100.0	100.0	100.0	100.0
	13.2mm	100.0	100.0	100.0	100.0
	9.5mm	70.0	71.3	72.6	70.0
	4.75mm	23.3	23.2	23.1	23.0
	2.36mm	12.0	12.2	12.3	12.0
	0.60mm	7.9	9.3	8.9	8.0
	0.30mm	6.7	7.9	6.8	6.5
	0.15mm	5.7	6.1	4.0	5.5
	0.075mm	4.6	5.0	2.8	4.5
設計アスファルト量	(%)	4.5	4.2	4.3	4.4
密度	(g/cm ³)	1.948	1.975	1.988	1.970
空隙率	(%)	21.9	20.1	20.4	21.9
飽和度	(%)	28.1	28.7	29.1	27.9

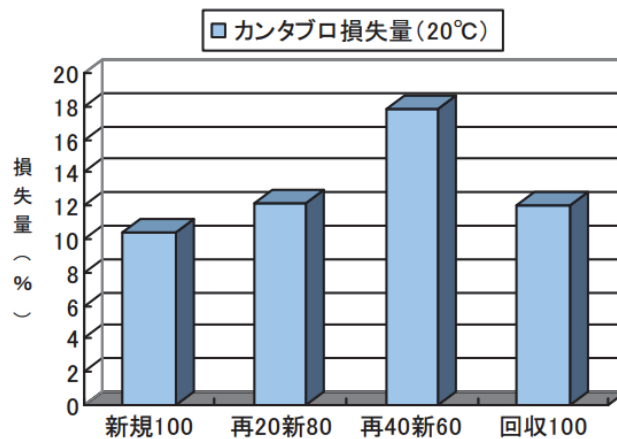


図-2.36 標準カンタブロ損失量 (20°C)⁶⁵⁾

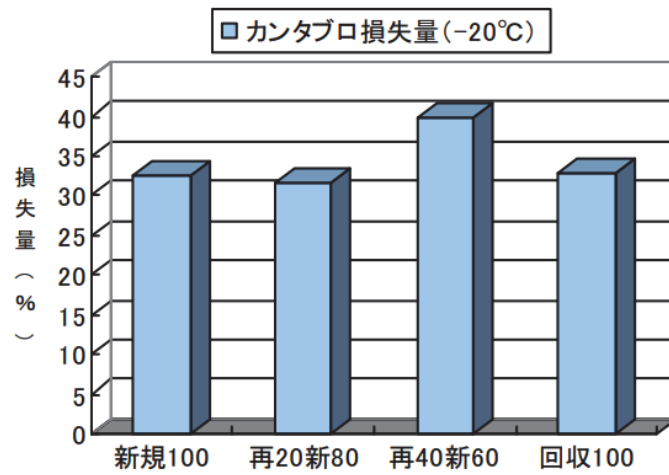


図-2.37 標準カンタブロ損失量 (-20°C) ⁶⁵⁾

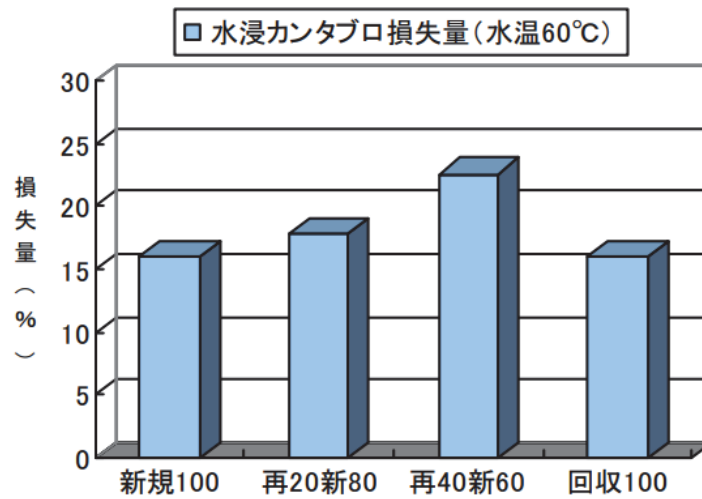


図-2.38 標準カンタブロ損失量 (60°C) ⁶⁵⁾

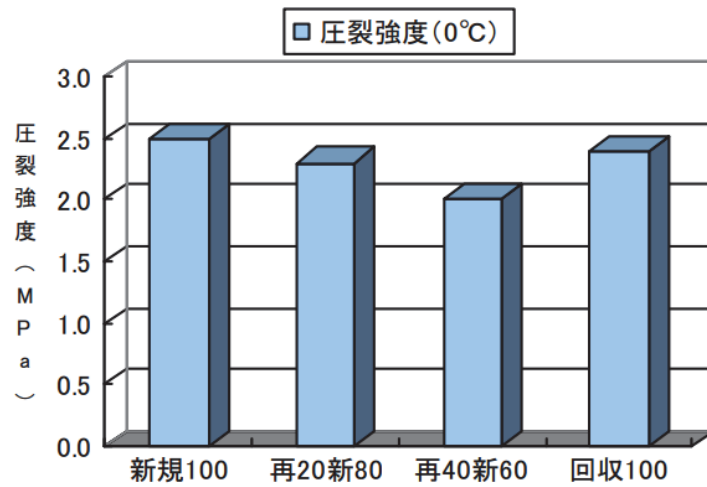


図-2.39 圧裂試験 (0°C) ⁶⁵⁾

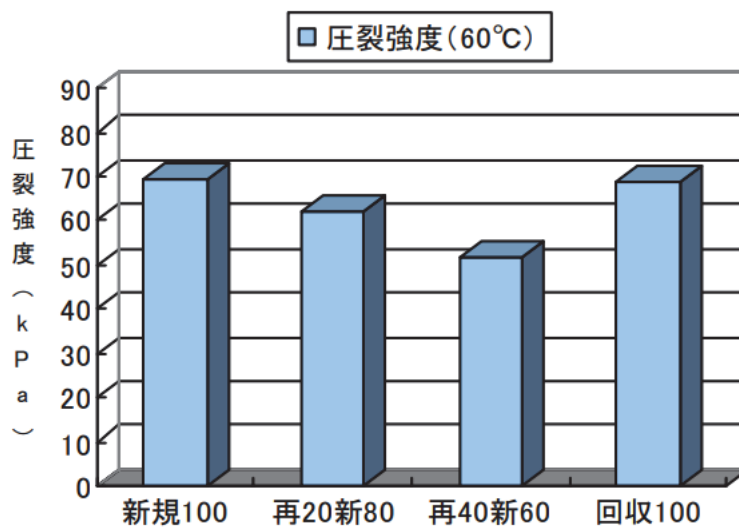


図-2.40 圧裂試験 (60°C) ⁶⁵⁾

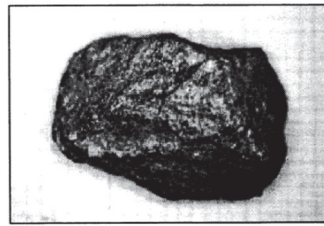
以上より，高温高压水は発生材の分別再資源化技術として利用できる可能性があると考えられた．しかしながら，発生材の排出量は年間 2500 万トン以上 ³⁹⁾と膨大であり，発生材の需要に対応した高温高压水反応プラントを各合材工場などに設置するには莫大なコストを必要とするため現実的でないこと，また，本検討では分別されたアスファルトの利用方法

は確立されておらず，完全な循環利用に至っていないことなどの課題がある．

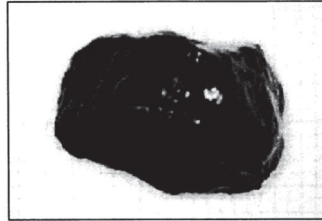
(2) 高温高圧水を用いたアスファルト抽出試験方法の開発

加納⁶⁶⁾らは，前述の高温高圧水を用いたアスファルト混合物の再材料化技術の応用として，高温高圧水によるアスファルトと骨材の分離性能に着目し，安全性・簡便性・経済性の向上をはじめ，所要時間の短縮や改質アスファルトへの適用を目標としたアスファルト抽出試験方法の開発を検討している．本検討では，超臨界水を用いた抽出試験に関する基礎検討を試みている．なお，検討に用いる試験機は図-2.28⁶⁶⁾および図-2.29⁶⁶⁾とし，試験手順は前述した，「2章 2.4.2 (1)」における，加納らの検討と同様の方法を用いた．

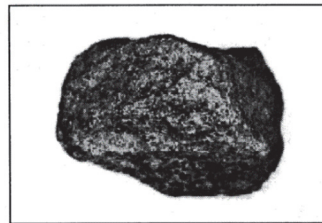
その結果，反応温度 375°C，反応時間 180sec において，外観は図-2.41⁶⁶⁾および図-2.42⁶⁶⁾に示すように粗骨材，微細骨材どちらにおいてもアスファルトが十分に除去されることを確認し，アスファルト抽出試験への適用性，およびその有意性を十分に示唆している．しかし，本検討は 60cc と小さな容器を用いており，一度に測定可能な混合物は 50g 程度である．これは，通常のアスファルト抽出試験の 20 分の 1 の量であることから，測定結果への信頼性に関する課題がある．



a) 被膜前

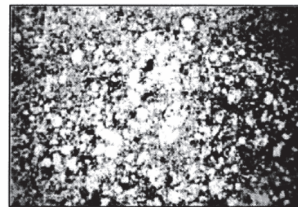


b) 被膜後

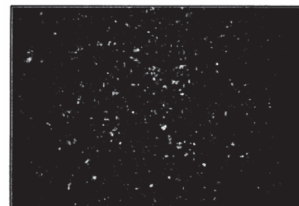


c) 反応後

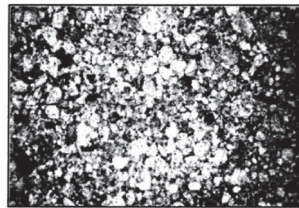
図-2.41 供試体表面の変化（粗骨材）⁶⁶⁾



a) 混合前



b) 混合後



c) 反応後

図-2.42 供試体の表面の変化（細骨材+石粉）⁶⁶⁾

そこで，秋葉⁶⁷⁾らは，実用化を視野に入れ，超臨界水に比べて温度および圧力が低く，技術的，更には経済的な課題を回避できると考える亜臨界水に着目し，容器容量も1000mlに大型化した耐圧容器を用いアスファルト抽出試験への適応の検討を行った．亜臨界水実験用耐圧容器の外観を図-2.43⁶⁷⁾に示す．

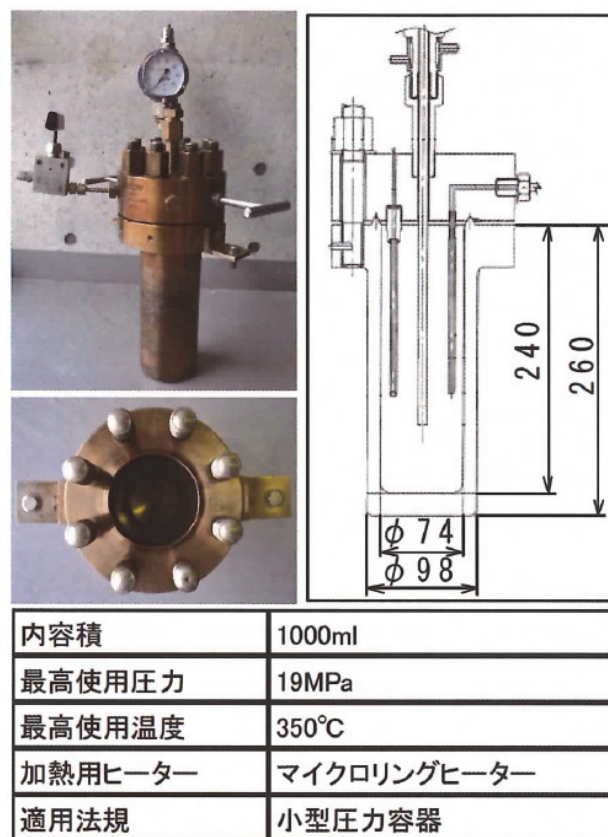


図-2.43 亜臨界水実験用耐圧容器⁶⁷⁾

試験手順の概略は，まず，抽出条件となるようアスファルト混合物を500g，水を469.9g容器内に投入し，図-2.44⁶⁷⁾に示す工程（以下，分離工程）に従い，容器温度を変化させる．なお，加熱・冷却に際しては，容器内部の温度センサーによっ

て計測・制御し，圧力計によって容器内に発生する水蒸気圧を確認できる．本検討では， $350^{\circ}\text{C} \cdot 16\text{MPa}$ の亜臨界水を溶媒とした抽出法を提案しているが，この過程で，亜臨界水（ $300^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ ）によるアスファルトの抽出は 15 分程度で完了し，温度と圧力の上昇に伴って抽出性能が向上することを確認したことから， 350°C を適用することとしている．つぎに，抽出工程終了後の容器内は，アスファルト，水，骨材に分離しており，このうち，アスファルトは写真-2.1⁶⁷⁾に示すように，水面に存在する膜状のアスファルトと，骨材上部に堆積して存在する粒状のアスファルトとなっている．膜状のアスファルトは容易に回収することができるが，粒状のアスファルトは容易に回収することが難しい．そこで，写真-2.2⁶⁷⁾に示すように，冷却・減圧時の沸騰蒸気泡を活用した浮上法（気泡連行法）の効果を予備実験により確認し，図-2.44⁶⁷⁾に示す冷却工程において，既報研究で確認した保温時間（ $180^{\circ}\text{C} \cdot 15$ 分）を設けることで，全てのアスファルトを膜状で回収することを検討している．

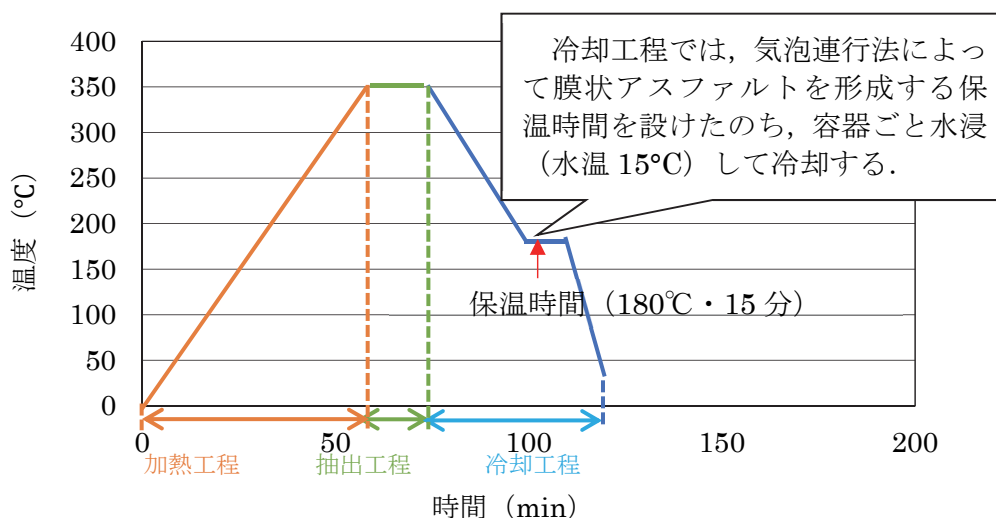


図-2.44 分離工程における温度と時間⁶⁷⁾

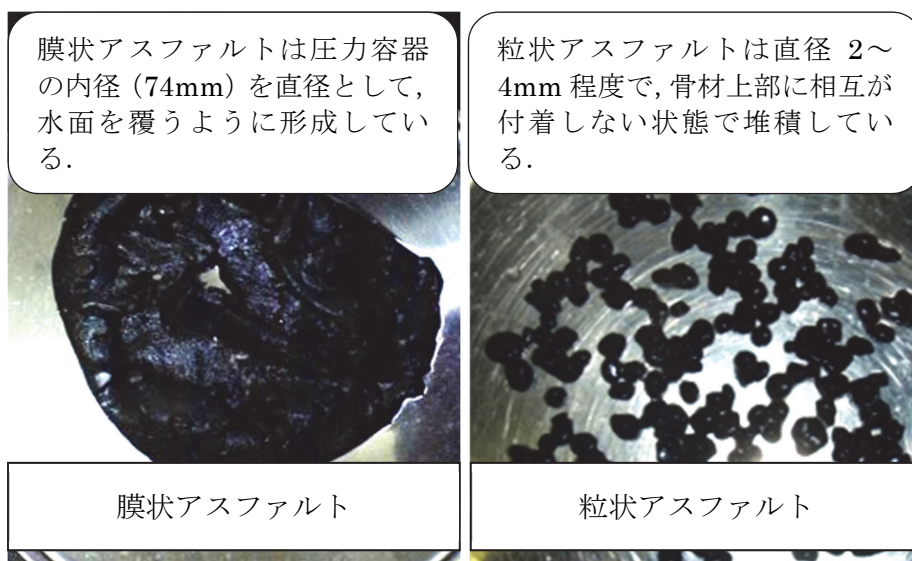


写真-2.1 抽出後に回収したアスファルトの状態⁶⁷⁾



写真-2.2 気泡連行法による粒状アスファルトの浮上実験

67)

以上の抽出試験方法に従い、表-2.8⁶⁷⁾に示す密粒度アスファルト混合物(13)500gを試料とし、確認試験を実施している。なお、アスファルトはポリマー改質アスファルト H 型である。その結果、アスファルト量は 5.8%となり、ソックスレーを用

いたアスファルト混合物の抽出試験（以下，ソックスレー法）による結果と同等の精度であることが確認できている．また，試験時間はソックスレー法を用いた場合が 22.5 時間であったのに対し，本試験法を適用した場合が 2.0 時間程度と極めて短時間で終了できる有効な手法であることが示されている．

しかしながら，表-2.8⁶⁷⁾に示す密粒度アスファルト混合物において，ストレートアスファルト(60-80)を用いた検討を行った結果，分離したアスファルトの全てを膜状のアスファルトで回収することができず，配合アスファルト量 6%に対し，膜状で回収されたアスファルト量は，概ね 3%であった．なお，膜状のアスファルト以外は，写真-2.1⁶⁷⁾で示した粒状のアスファルトであることを確認している．

表-2.8 供試体（密粒度アスファルト混合物(13)）の配合

67)

	6号碎石	7号碎石	砕砂	粗砂	石粉	アスファルト
配合比 (%)	36.0	21.0	33.0	5.0	5.0	6.0
骨材量 (g)	180.0	105.0	165.0	25.0	25.0	32.0

2. 5 まとめ

本章では，わが国におけるアスファルト混合物の需要および既往の再生技術の概要を解説し，既往の再生利用技術および品質確認試験への課題を示した．一方で，高温高圧水の特性と混合物の分別再資源化技術としての適用とアスファルト抽出試験方法への応用の可能性およびそれぞれの課題を示した．

まず，アスファルト混合物の現状と課題は以下のような状況にある．

- ① わが国の舗装は，安価で大量に入手できた石油の副産物であるアスファルトを消費する必要があったこと，アスファルト舗装は国土復興に適していたことなどを背景に，アスファルト舗装が全舗装の 95% を占めるほど広く普及した．
- ② 混合物は大きくアスファルト，骨材，フィラーに分けることができ，特に，アスファルトおよび骨材は今後，供給が困難になることが予測されており，発生材の持続的な循環利用が望まれる．
- ③ わが国の混合物の再生利用は 1970 年代の建設廃棄物の処分の枯渇とオイルショックなどを背景に，各所で研究開発が行われるようになった．2018 年には 74.9% に達しており，再生混合物中に占める再生骨材配合率の全国の平均率は，2018 年には 51.4% に達している．しかし，劣化と再生を複数回繰返した発生材の針入度が低下していることなどの課題を抱えている．また，再生骨材の重要性が増す中，品質管理試験であるアスファルト抽出試験方法は，環境や人体への影響を考慮した代替溶剤が求められている．

④加納ら，川上らの既往研究では，再生混合物は繰返し劣化と再生を行うたびに再生アスファルトの性状，混合物の性状が劣化していくこと，そのため，再生骨材配合率を比較的高い水準で維持するためには，添加剤の組成を考慮した再生利用を行う必要があることを確認した．また，繰返し劣化と再生を行うことで，再生アスファルトは一定値まで酸化を蓄積することを確認した．

これらのことから，現在の発生材は，そのほとんどが再利用され，劣化が蓄積されやすい状況にあり，このまま発生材の再生利用を繰返した場合，再生混合物の耐久性の低下などが懸念される．したがって，今後も発生材を繰返し再生利用するためには，新たな循環的な再生利用技術の確立が求められる．

他方で，水を密閉容器内で加熱することで高温・高圧状態とした高温高圧水は有機物に対して溶媒，熱分解，加水分解などの性能を有しており，既に多分野で研究が進められている．

高温高圧水の混合物への利用の検討は既に進められており，以下のような結果と課題を整理した．

①高温高圧水によるアスファルト舗装発生材からの骨材分離回収の検討を試みた既往研究では，発生材の分別再資源化技術への適用の可能性を示唆する成果が得られている．しかし，発生材の年間排出量は膨大であり，高温高圧水反応プラントの各工場への配置はコスト面で現実的でないという課題がある．

②①の開発におけるアスファルトと骨材の分離に着想を得て，実用化の可能性のある高温高圧水によるアスファルト抽出

試験の開発を試みた既往研究では、改質 II 型アスファルト被膜した混合物に対して亜臨界水によるアスファルト抽出試験方法の適用を可能とする成果が得られている。しかし、本手法ではストレートアスファルト（60-80）を被膜した混合物からアスファルトを抽出しきることが困難であり、多種のアスファルトへの適用に課題を残している。

これらの結果から、3 章ではまず、既往研究において、実用化の可能性のある亜臨界水を抽出溶媒としたアスファルト抽出試験方法の確立を行った。本研究では、抽出方法の課題を克服するとともに、多種のアスファルトへの適用性を検討した。

一方で、4 章では、発生材の分別再資源化の実用化のために、高温高压水と比較してプラント設置にかかるコストが現実的と考えられる常圧の熱水（70~90°C）を用いた、「熱水すりもみ法」による骨材の分別回収を提案した。本研究では、ポリマー改質アスファルト含有発生材に対して高品質な粗骨材分（5-13mm）、細骨材分（1-5mm）の分別回収を確認することで多様な混合物への適用性を検討した。また、熱水すりもみ法により分別回収した濃縮された旧アスファルトを含有する微粒分（0-1mm）の再生利用方法に対して、3 章の亜臨界水を抽出溶媒としたアスファルト抽出試験方法の検討の中で、高温高压水反応後のアスファルトが軟質化する反応を確認したことにより着想を得た、高温高压水によるアスファルトの性状回復の基礎検討を行い、その可能性を確認した。

また、5 章では、高温高压水による劣化したアスファルトの性状回復技術を「水熱分解法」を称し、新規ストレートアスファルト（60-80）を強制劣化させた劣化アスファルトへの回

復効果と，回復後のアスファルトの混合物への利用の可能性を確認した．

【第2章の参考文献】

- 1) 多田宏行：アスファルト舗装に関する研究の動向，土木学会論文集，第378号，pp.15~20，1987.
- 2) 稲垣竜興，中村俊行，小梁川雅：大学土木道路工学改訂3版.
- 3) (社)日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，2001.
- 4) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針（平成18年版），2006.
- 5) (社)日本道路協会：舗装施工法便覧，2001.
- 6) (社)日本道路協会：舗装施工法便覧（平成18年版），2006.
- 7) 辻本明人：技術レポート2「舗装技術の変遷」，(一社)北海道道路管理センター「北の交差点®」，Vol.5，pp.32~35，1999.
- 8) 榎戸源則：コンクリート舗装とアスファルト舗装とでは，どちらが有利なのですか？，日本コンクリート工学会，19巻，1号，pp.87，1981.
- 9) 国土交通省：道路統計年報2017，2017.
- 10) (一社)自動車検査登録情報協会：自動車保有台数推移表，2018年，2018.
- 11) 国土交通省：運輸白書（各年度版）
- 12) 総務省統計局ホームページ：車種別保有自動車数
- 13) 国土交通省：舗装の長寿命化・LCC縮減に向けて～コンクリート舗装の特徴を活かした活用がカギ～
- 14) (公社)石油学会：TLC/FID法によるアスファルト組成分析試験方法，JPI-5S-70-2010，2010.
- 15) 新田弘之：アスファルト材料について，アスファルト，

- No.226, pp.23~30, 2010.
- 16) Sell Bitumen : The Shell Bitumen Handbook sixth edition, 2015
 - 17) (一社) 日本アスファルト合材協会 : アスファルト合材統計年報 (各年度版)
 - 18) 土居貞幸, 高木清美, 室賀五郎, 東国夫, 江口英顕 : 天然アスファルトと石油アスファルト, アスファルト, No.191, pp.1~33, 1997.
 - 19) 久保和幸, 寺田剛, 川上篤史, 平川一成, 西崎到, 佐々木巖 : 未利用アスファルト資源の舗装への適用に関する研究, 国立研究開発法人土木研究所
 - 20) (一社) 日本砕石協会 : 砕石骨材需要表, 2016.
 - 21) 五十嵐俊雄 : 日本の骨材資源—とくに砕石資源について—, 地質ニュース, No.368, 1985.
 - 22) 竹島敏正 : 砂利, 砂, コンクリート工学, 34巻, 7号, pp.13-17, 1996.
 - 23) 小林正利, 帆苅浩三, 久保和幸 : アスファルト混合物特性における細骨材形状の効果, 舗装工学論文集, 1巻, pp.241~248, 1996.
 - 24) 山田優 : 舗装用骨材資源の有効利用について, 骨材資源, No.163, 2009.
 - 25) 石灰石鉱業協会 : 石灰石の需給推移, 2018.
 - 26) 盛岡実 : 石灰石微粉末, コンクリート工学, 52巻, 5号, pp.405~408, 2014.
 - 27) 日本舗道(株) : 昭和51年度建設技術研究補助金による研究報告「アスファルト舗装の再生利用技術に関する研究報告」, 1977.

- 28) 黒田宏，乾節男，徳田弘毅：アスファルト混合物再生利用の一例，舗装，Vol.11，No.10，pp.30~35，1976.
- 29) 建設省道路局国道第一課，建設省土木研究所：舗装廃材の再生利用に関する研究，第36回建設省技術研究報告（昭和57年度），pp.265~329，1983.
- 30) 建設省道路局国道第一課，建設省土木研究所：舗装廃材33の再生利用に関する研究，第37回建設省技術研究報告（昭和58年度），pp.267~335，1984.
- 31) 建設省道路局国道第一課，建設省土木研究所：舗装廃材の再生利用に関する研究，第38回建設省技術研究報告（昭和59年度），pp.383~466，1985.
- 32) （社）日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針（案），1984.
- 33) （社）日本道路協会：プラント再生舗装技術指針（案），1984.
- 34) （社）日本道路協会：路上再生路盤工法技術指針（案），1987.
- 35) （社）日本道路協会：路上表層再生工法技術指針（案），1988.
- 36) （社）日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，1992.
- 37) 資源の有効な利用の促進に関する法律，1991.
- 38) 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律，2000.
- 39) 国土交通省：建設副産物実態調査結果，（平成7年～平成24年）
- 40) （公社）日本道路協会：舗装再生便覧（平成22年度版），2010
- 41) 川原忠司：路上表層再生工法，アスファルト，No.184，

- pp.9~14, 1995.
- 42) 中村俊行：舗装の再生利用の現状と課題，アスファルト，
Vol.38, No.184, pp.2~3, 1995.
- 43) SR 工法技術振興会：路上表層再生工法 平成 26 年度（平
成 26 年 4 月～平成 24 年 3 月）施工実績，2015.
- 44) 福田紀道：道路建設業と「舗装廃材のリサイクリング」，
道路技術シンポジウム舗装廃材のリサイクリング，
pp.87~100, (社) 道路建設業協会，1981.
- 45) 加納孝志：繰返し再生利用を考慮したアスファルト混合
物に関する研究，日本大学，2016.
- 46) T. Kanou, H. Nitta, I. Sasaki, A. Kawakami, & K.
Kubo : Highly-aged and highly-modified asphalt
concrete recycling in Japan, 11th International
Conference on Asphalt Pavements 2010 (ISAP Nagoya
2010), 2010.
- 47) (公社) 日本道路協会：舗装設計施工指針(平成 18 年版)，
pp.261~267, 2006.
- 48) (公社) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成 31
年版），第 4 冊分，pp.318~334, 2019.
- 49) 山之口浩，荒井孝雄：アスファルト抽出試験の新しい溶
剤の検討，道路建設，No.547, pp.63~68, 1993.
- 50) 白浜幸則，奥平真誠：塩素系溶剤を用いない抽出試験に
関する一検討，道路建設，No.552, pp.58~64, 1994.
- 51) (公社) 日本道路協会：舗装再生法便覧(平成 22 年度版)，
pp.234~242, 2010.
- 52) 竹内敬夫：アスファルト舗装の混合物再利用，舗装，
Vol.11, No.11, pp.31~34, 1976.

- 53) 桐山 荏, 大谷 弘 : 再生アスファルト混合物による試験工事, 舗装, Vol.12, No.11, pp.3~9, 1977.
- 54) 田中 康之 : 「舗装廃材のリサイクリング」機械, 道路技術シンポジウム 舗装廃材のリサイクリング, pp.43~73, (社) 道路建設業協会, 1981.
- 55) 加納 孝志, 秋葉 正一, 加納 陽輔, 湯川 誠二郎, 田湯 文将 : 再生用添加剤の組成の違いが繰返し再生された混合物とアスファルトの性状に与える影響, 土木学会論文集 E1(舗装工学), 71 卷 3 号, pp.I_73~I_78, 2015.
- 56) 川上 篤史, 川島 陽子, 新田 弘之, 寺田 剛, 藪 雅行 : 繰返し劣化・再生されたアスファルトおよびアスファルト混合物の性状変化に関する一検討, 土木学会論文集 E1(舗装工学), 73 卷 3 号, pp.I_155~I_161, 2017.
- 57) 日本機械学会 : 蒸気表, 1999.
- 58) 佐藤 伸明, 大門 裕之, 藤江 幸一 : 再資源化技術として的高温高压水反応の利用, 廃棄物学会論文誌, Vol.13, No.1, pp.1~11, 1999.
- 59) 後藤 元信 : 亜臨界・超臨界流体を用いた食品関連物質の抽出ならびに微粒子化, 日本食品工学会誌, Vol.19, No.1, pp.1~8, 2018.
- 60) 青山 尚登, 粥川 智生, 三好 啓介, 荒井 博久 : 超臨界水による重質原油改質技術, 石油学会 年会・秋季大会講演要旨集, 第 60 回年会 (第 66 回研究発表会), 2017.
- 61) 岡島 いづみ, 河瀬 信彦, 清水 達祥, 田村 克浩, 菅野 尚子, 川尻 聡, 佐古 猛 : 亜臨界水を用いる食品およびプラスチック廃棄物からの高発熱量の複合燃料の生成, 日本エネルギー学会誌, 91 卷, 10 号, pp.998~1006, 2012.

- 62) 加納陽輔, 秋葉正一, 栗谷川裕造, 河合糺茲: 高温・高圧水によるアスファルト混合物のバインダー除去, 石油学会, 48巻, 6号, pp.358~364, 2005.
- 63) 加納陽輔, 秋葉正一, 栗谷川裕造: 高温・高圧水によるアスファルト舗装廃材からの骨材分離回収, 石油学会, 49巻, 5号, pp.231~239, 2006.
- 64) 加納陽輔, 秋葉正一, 栗谷川裕造, 河合糺茲: 超臨界水を用いたアスファルト抽出試験に関する基礎検討, 土木学会舗装工学論文集, 10巻, pp.249~256, 2005.
- 65) 秋葉正一, 加納陽輔, 栗谷川裕造: 高温・高圧水によって分別回収されたアスファルト混合物骨材の性状と品質について, 土木学会舗装工学論文集, 12巻, pp.149~156, 2007.
- 66) (公社)日本道路協会: 舗装設計施工指針(平成18年版), pp.227, 2006.
- 67) 秋葉正一, 加納陽輔: 亜臨界水を用いた環境調和型アスファルト抽出試験に関する実験的検討, 土木学会舗装工学論文集, 15巻, pp.23~29, 2010.

第3章 亜臨界水を用いたアスファルト抽出試験法の提案¹⁾

3.1 概説

道路舗装の表層および基層に用いられるアスファルト混合物や上層路盤に用いるアスファルト安定処理混合物などに関しては、新材，再生材を問わず，品質・出来形管理のためのアスファルト量と骨材合成粒度の規格値が設けられている²⁾。「2章 2.3.1 (3)」で述べたように，現在，アスファルト混合物の製造における品質管理項目であるアスファルト量と骨材合成粒度は，印字記録による合否判定を基準としたアスファルト混合所での適切な品質管理に一存するのが一般的であるが¹⁾，再生混合物の繰返し利用に伴い，再生骨材に被膜する旧アスファルトの品質のばらつきは大きくなり，再生混合物の品質の安定および性能の確保が容易でなくなる。したがって，今後の再生混合物の需要増加に伴い，アスファルト抽出試験は再生混合物の製造・管理上，実施することが望ましい試験として位置付けられている。

現行の抽出試験方法には，常圧式ソックスレー抽出法などがあるが，使用される装置および溶剤は，機関によってさまざまである。特に溶剤に関しては1995年末に1,1,1-トリクロロ・エタンがオゾン層破壊物質として廃止されて以降，人体や環境に対する安全性への配慮からナフテン系やリモネン系の溶剤が代替されている^{2), 3)}。また，これらの代替溶剤の検討と並行して，抽出器の自動化が図られたこともあり，アスファルト抽出試験は近年，日常的な品質管理試験として安全

性と効率性が改善されつつある⁴⁾。しかしながら、各種溶剤を用いる試験法に関しては、溶剤の発がん性や生殖毒性、廃液・乾燥方法をはじめ、抽出装置・溶剤のコストおよび改質アスファルトに対する溶解性能、試験時間の課題を残しており、今後も作業環境の安全性を担保する更なる改善検討を要している。

「2章 2.4.2 (2)」でも述べたように、加納らは、有機溶剤などを一切用いることなく、水を溶媒とした環境調和型アスファルト抽出試験の開発に取り組んでおり、既報研究から高温高圧水のアスファルト抽出溶媒としての応用の可能性を明らかにしている⁵⁾。また、秋葉らは、実用を勘案した検討のなかで、超臨界域に比べて取り扱いが容易な亜臨界域に焦点を絞り、 $350^{\circ}\text{C} \cdot 16\text{MPa}$ の亜臨界水を溶媒とした抽出試験法を提案している⁶⁾。ただし、上述の既往研究における課題で述べたように、ストレートアスファルト(60-80)を被膜した混合物からアスファルトを抽出しきることが困難であり、多種のアスファルトへの適用に課題を残している。

本章では、ストレートアスファルト(60-80)を被膜した混合物、再生混合物に対する課題を克服した抽出試験機、試験方法の改良を行い、多種のアスファルトへ適用したアスファルト抽出試験方法の確立を行った。

3. 2 既往研究の課題

既報研究において，ポリマー改質アスファルトを用いた検証を実施したのは，改質系のアスファルトの溶剤による抽出が比較的難しいためである．その意味において，本試験法はソックスレー法と比較して簡便に，かつ同等の測定精度が得られることを示した．しかしながら，種々のアスファルトやアスファルト混合物に適用できるか否かの検証がなされていない⁶⁾．

そこで，表-3.1に示す密粒度アスファルト混合物において，バインダーとしてストレートアスファルト(60-80)を用いた場合について，本試験法による抽出試験を実施した．その結果，同一試料について複数回実施したが，分離したアスファルトの全てを膜状のアスファルトで回収することができず，配合アスファルト量6%に対し，膜状で回収されたアスファルト量は，概ね3%であった．なお，膜状のアスファルト以外は，2章で示した粒状のアスファルトであることを確認した⁶⁾．

表-3.1 供試体（密粒度アスファルト混合物(13)）の配合

	6号碎石	7号碎石	砕砂	粗砂	石粉	アスファルト
配合比 (%)	36.0	21.0	33.0	5.0	5.0	6.0
骨材量 (g)	180.0	105.0	165.0	25.0	25.0	32.0

以上の検証結果より，既報研究における手法では，多様なアスファルトやそれらを用いた混合物への適応が困難であり，試験方法や装置の改良が必要不可欠であることがわかった⁵⁾．

本試験法において要求される基本事項は，抽出工程終了後のアスファルトを全て回収することである．これまで述べたとおり，分離工程終了後のアスファルトは膜状のものと粒状のものに分離している．ストレートアスファルトを用いた混合物の結果から，アスファルトの種類によっては，全てのアスファルトを膜状で回収することが困難であるケースも考えられる．そこで，全てのアスファルトの回収のために，以下の検討項目を設定し，検討することとした．

[1] 混合物中のアスファルトをできるだけ膜状にして回収することが精度向上に繋がると考えられる．したがって，**図-3.1**に示すように蓋底面に水冷管を取り付けた容器を用いて，より多くの膜状アスファルトを得るために分離工程における改善検討を行う．

[2] 粒状アスファルトを完全に解消し，全てを膜状アスファルトの状態に回収することが不可能であるとした場合，抽出工程終了後に粒状のアスファルトの回収手法を検討する．

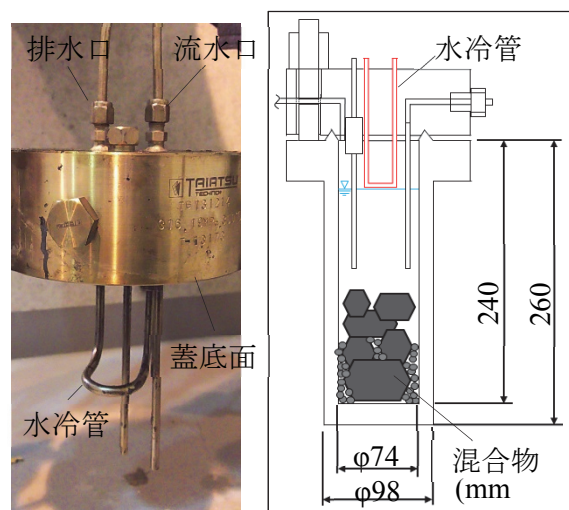


図-3.1 本研究のアスファルト抽出用圧力容器の形状と特徴

3. 3 各工程における精度向上のための検討

ここでは、分離工程および分離工程終了後に粒状アスファルトを回収するための工程（以下、回収工程）について、測定精度向上のための検討を実施した結果を述べる。

なお、検討に当たっては、目標精度の指標を設ける必要がある。ここで、アスファルトプラントにおける抽出試験精度の規格値は測定誤差が $\pm 0.9\%$ ⁷⁾であるが、研究レベルでの混合物評価などにおいて、混合物中のアスファルト量をより正確に要求するケースでは、 $\pm 0.9\%$ の誤差は大きいといえる。また、ソックスレー法で慎重に抽出を実施すれば、ストレートアスファルトを用いた新規混合物では $\pm 0.1\%$ 以内、その他の改質アスファルトなどでは最大 $\pm 0.5\%$ 以内が一般的と考えられる。これを参考に、本試験法ではアスファルトの種類に影響されず、かつ再生骨材の品質的なバラツキを含めた統一の目標精度を $\pm 0.3\%$ と定めて、本試験法の改善検討を実施した。

3. 3. 1 冷却工程に対する改善検討

(1) 検討手法

亜臨界水中で溶解・加水分解されたアスファルトは、冷却による水の物性変化に伴ってコロイド状から元の状態へと凝集していく。容器の側面および底面はヒーターで覆われているので、容器上部ほど冷却されやすい。また、冷却過程において容器内は急速に減圧し、気液界面の活発な蒸発・蒸留を促してアスファルトを膜状に凝集するようになる。これは、気泡連行とともに、例えば湯葉ができるように水面からの蒸発によって溶媒中のアスファルト分を膜状に濃縮するラムスデン現象のような効果が発現するものと考えられ、水冷管によ

る上部からの冷却は膜状アスファルトを固化し，安定化させる役割を果たす．一方，粒状アスファルトは，抽出後の骨材上面に球状となって堆積することから，冷却過程が不十分なため膜状アスファルトの一部が垂れ落ちて形成したものと考えられ，水冷管による冷却の効率性を検討する必要がある．

そこで，**図-3.2**に示すとおり冷却工程を目的と方法により冷却 I，冷却 II に区分した．冷却 I では，蓋底面に取り付けた水冷管（**図-3.3**），高さ（**5.3cm**，**8.3cm**）によって，容器上部の急速な減圧と，気液界面の活発な蒸発・蒸留を促し，アスファルトをより効率的に膜状に凝集することを目的とした．なお，今回用いた水冷管は，気相部を中心に冷却する短い水冷管（**5.3cm**）と膜状アスファルトにより近接して冷却する長い水冷管（**8.3cm**）の 2 種類であり，冷却工程（**図-3.2**）に沿って冷却効果を比較した．ここで，冷却 II では，既往方法と同様に容器全体を水浸（水温 **15°C**・流量 **50L/min** の循環槽）して冷却し，容器内部が大気圧となったら膜状アスファルト，骨材および水を回収する．

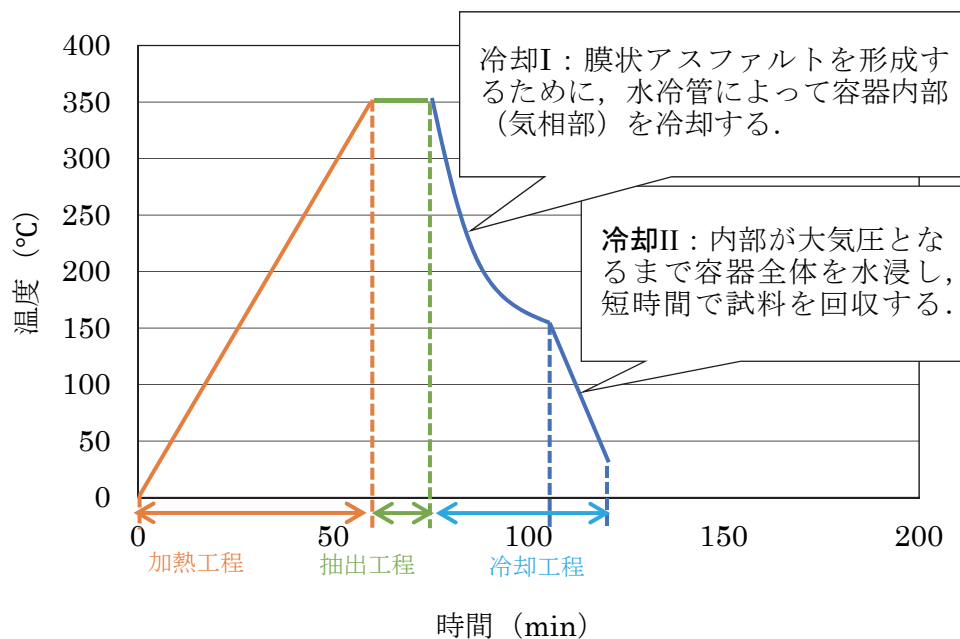


図-3.2 冷却工程（冷却 I・II）の目的と手順

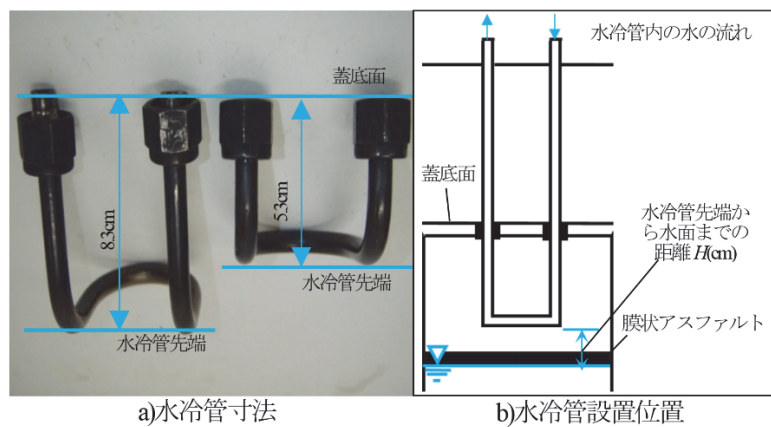


図-3.3 水冷管の寸法と設置位置

このような水冷管による膜状アスファルトの形成を検討するにあたり，冷却 I から冷却 II へ移行する温度は，既往方法の保温条件（180°C）を参考に，短い水冷管（5.3cm）を用いた確認実験より膜状アスファルトの形成を確認した 100～200°C で検討することとした。

その後、冷却 I において水冷管を適用し、長さの異なる 2 種類の水冷管によるアスファルト回収効果を検討した。ここで、水冷管が水面に没すると、容器内の液相部が急激に冷却され、激しい沸騰が生ずる可能性があり、水面以上の高さでアスファルト膜を効率的に冷却することを条件に、水冷管先端から水面までの距離（以下、距離 H (cm)）の違いによる回収効果を知るために、水の仕込み量を 3 種類に変化させた。

(2) 検討結果

図-3.4 に、冷却 I で水冷管によって冷却した到達温度と測定誤差の関係を示す。ここで、測定誤差は本試験法によって測定したアスファルト量 (%) から供試体作製時のアスファルト量 6.0% を差し引いた値である。これより、水冷管によって水面に近接した位置から 150°C 以下に冷却することで、測定誤差が減少する傾向が見て取れる。

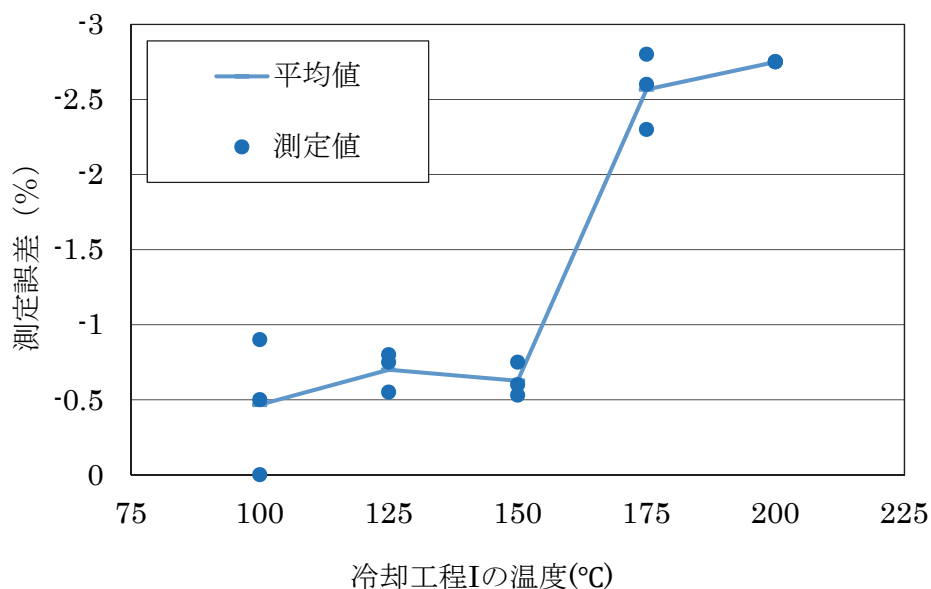


図-3.4 冷却 I の到達温度と測定誤差の関係

表-3.2は、図-3.4の結果から測定誤差が小さく、かつ測定値のバラツキの小さい到達温度 150°C および 125°C に関して、仕込み水量を変化させて水冷管先端から水面までの距離と測定誤差の関係を確認した結果である。なお、結果は図-3.4同様に膜状アスファルトのみを取り除いた各3回の測定値の平均である。これより、配合アスファルト量6%のうち約3%が粒状となった既往方法に対し、冷却管を用いた全ての条件でアスファルトの大部分が膜状で回収される効果が認められる。また、特に仕込み水量を362gとし、長い水冷管(8.3cm)を水面からの3cmに設定する条件が粒状アスファルトの抑制、ならびに測定精度の向上に効果的であることを確認した。これは、水冷管が長い分、冷却面積が大きいこと、また骨材上面から水面までの距離が冷却による膜状アスファルトの形成に適していたためと考える。

表-3.2 水冷管先端から水面までの距離と測定誤差
水冷管(5.3cm)

冷却温度(°C)	150°C			125°C		
仕込み水量(g)	448	362	235	488	362	235
距離H(cm)	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0
測定誤差(%)	-0.66	-0.51	-1.00	-0.72	-0.50	-0.84
結果	粒As.無	粒As.無	粒As.有	粒As.無	粒As.無	粒As.有

水冷管(8.3cm)

冷却温度(°C)	150°C			125°C		
仕込み水量(g)	448	362	235	488	362	235
距離H(cm)	0.0	3.0	6.0	0.0	3.0	6.0
測定誤差(%)	-1.43	-0.45	-0.20	1.13	-0.48	-0.34
結果	粒As.有	粒As.無	粒As.有	粒As.有	粒As.無	粒As.有

ただし、長い水冷管では、150°C、120°Cともに水冷管先端から水面までの距離 H が 3cm 以上の条件で測定誤差が小さ

いものの、距離 H が 6cm では粒状アスファルトがみられた。また、粒状アスファルトが確認されなかった条件においても目標精度とした $\pm 0.3\%$ を満足しておらず、この原因を確認するために、膜状アスファルト回収後の骨材試料を分級して観察した。その結果、水面から 3cm の条件で回収した骨材にアスファルトの付着は見られなかったが、骨材中に写真-3.1に示す微細で微量のアスファルト（以下、アスファルト片）が混在していた。

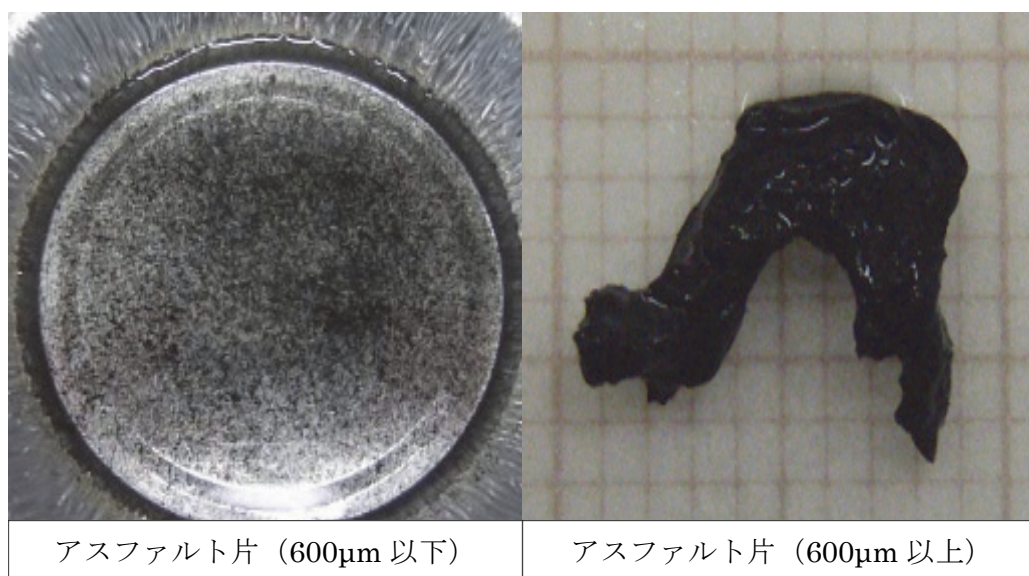


写真-3.1 抽出後の骨材中に混在するアスファルト片

3. 3. 2 加熱・抽出工程に対する改善検討

(1) 検討手法

前節で確認したアスファルト片は、微細な薄膜状となって骨材間隙に混在することから、アスファルトが混合物から抽出され、亜臨界水にコロイド状に分散し、冷却工程で凝集される過程で生じた可能性がある。具体的には、冷却過程で骨材間隙に停留した小さな沸騰蒸気泡が微細な気液境界面、つまり骨材間隙に水面を生み、膜状アスファルトと同様のプロセスでアスファルト片が形成したと考える。なお、沸騰蒸気泡は加熱が不均一な場合に多く発生する可能性があり、このような偶発的な誤差は試験の再現性に影響を及ぼすものと考えられる。




以上のことから、加熱装置がアスファルト片の発生と試験の再現性に及ぼす影響を確認するため、これまで使用してきたマイクロリングヒーターに加え、より均一な加熱が期待できるバンドヒーターとアルミブロックヒーターを比較した。なお、冷却工程は前節の結果から、水冷管の高さ 8.3cm、水面までの距離 3cm、冷却 I の到達温度 150°C を条件とし、前節と同様にストレートアスファルトによる密粒度アスファルト混合物 (13) を供した。

(2) 検討結果

表-3.3 は、ヒーターの種類が異なる条件で 7 回の測定結果から平均値および標準偏差を示したものである。これより、アルミブロックヒーターを用いた場合、測定誤差が他のヒーターと比べて小さいことを確認した。要因としては、電熱部が等間隔に 6 本設置されていること、さらに電熱部からアル

ミブロックを介して加熱されることから，均一な加熱が可能であったためと考えられる．

表-3.3 ヒーターの種類・形状と測定誤差の比較

ヒーター名	マイクロリング	バンド	アルミブロック
測定誤差(%)	-0.45	-0.45	-0.37
標準偏差	6.1×10^{-2}	6.9×10^{-2}	4.5×10^{-2}
装置形状			

以上より，均一な加熱を行うことで試験精度の向上が期待できるが，試験後の骨材中にはアスファルト片の残存が見られ，アスファルト片の発生を完全に抑えることは難しい．また，冷却時の沸騰蒸気泡がアスファルト片の発生に起因することも考えられるが，冷却工程における沸騰現象は気泡連行による膜状アスファルトの形成に欠くことのできない作用であり，試験後の試料からアスファルト片を除去する必要を確認した．

3. 3. 3 回収工程に対する検討

(1) 検討手法

これまでの検討から，分離されたアスファルトをできるだけ膜状アスファルトとして回収し精度向上を図ることができた．しかしながら，測定誤差を目標とする $\pm 0.3\%$ 内に納めることは難しい．これは，冷却工程において骨材間隙中に発現する微量のアスファルト片を，分離工程のみで回収することが困難と考えられたためである．そこで，膜状アスファルト回収後の骨材試料を用いて，アスファルト片および骨材を分別するための試行を実施した．その結果から，**図-3.6**に示す回収工程手順を設定し，これに基づいてアスファルト片および骨材を分別回収可能か否かと，測定精度の向上を検討した．

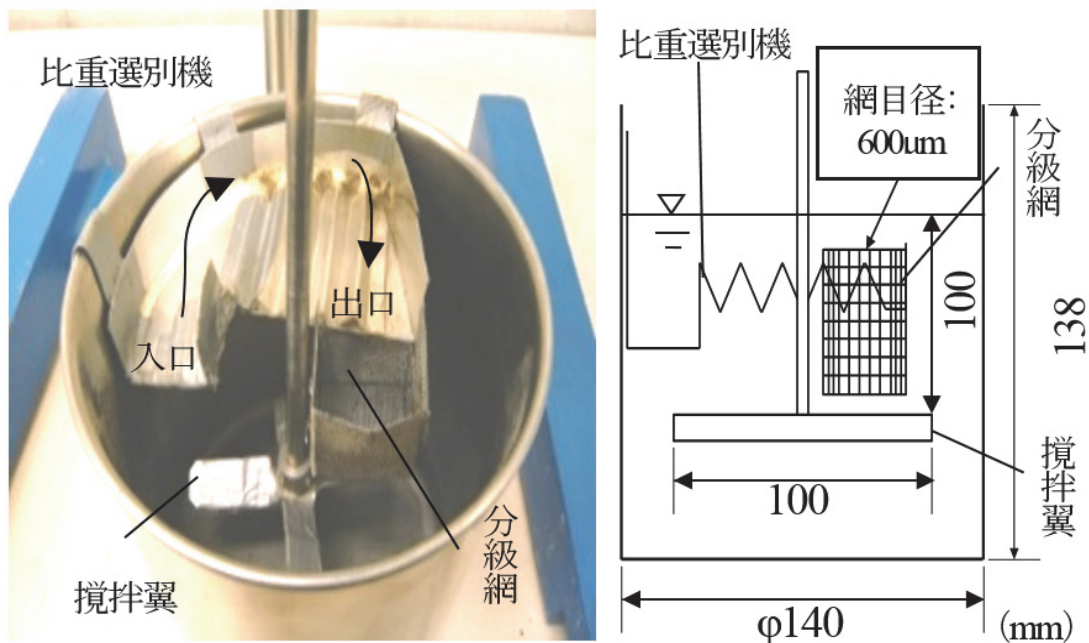


図-3.5 湿式比重選別装置の概略図

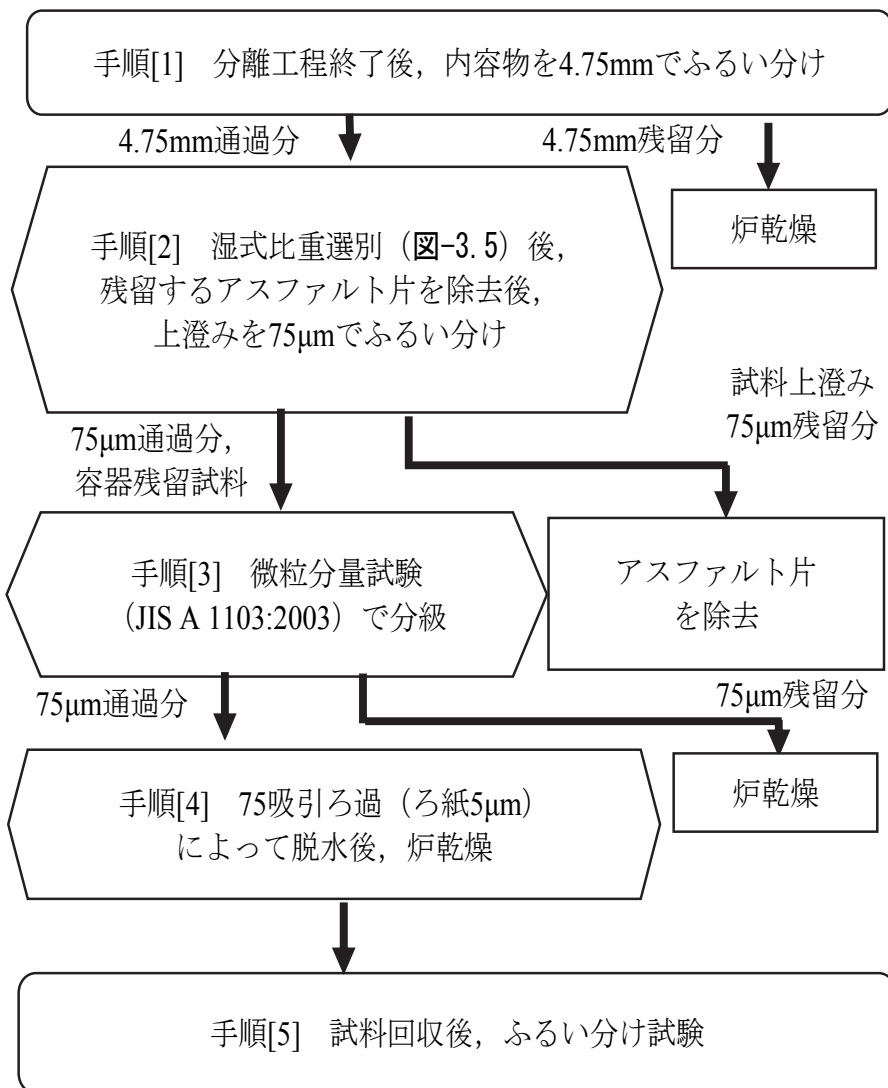


図-3.6 回収工程の手順

以上より、回収工程後の試料は、4.75mm残留分、4.75mm通過分、75 μ m残留分、75 μ m通過分に概ね脱水・分級された状態で炉乾燥されるため、精度向上とともに乾燥および粒度測定省力化を期待できる。ただし、上記の手順において、特に検討を要するのが、湿式比重選別である。すなわち、この選別において、攪拌速度および攪拌時間がどの程度測定精度に影響を与えるかである。そこで、手順[2]においては、湿式比

重選別の攪拌速度 350rpm, 400rpm, 450rpm, 攪拌時間 5min, 10min, 15min, 20min と 12 種類の条件での分別効果を検討した。

(2) 検討結果

図-3.7 は、攪拌速度あるいは攪拌時間の違いと測定誤差の関係である。なお、この検討結果は、手順[4]を実施せずにアスファルト量を求めたもので、同一条件で 3 回実施した測定誤差の平均値である。これより、表-3.3 の結果と比較すると、攪拌時間が 5 分程度ではアスファルト片の回収効果が発現していないといえるが、攪拌時間を長くすることで、回収効果が現れていく。ただし、攪拌速度 400rpm では 20min, 攪拌速度 450rpm では 10min 以上で、装置内の分取網に細骨材がアスファルト片とともに混在しているのが確認できた。特に、攪拌速度 450rpm における 15min 以上の攪拌では、細骨材がアスファルト片とともにアスファルト量として計算されてしまうため、測定誤差が+側となっている。よって、細骨材を巻き込まず、精度向上を期待できる攪拌速度および時間は、400rpm・15min が適当である。

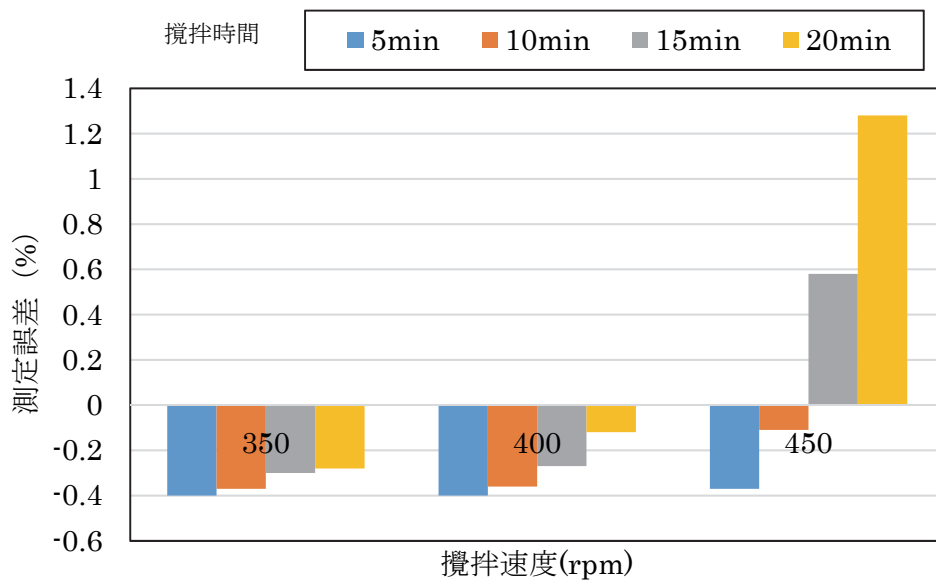


図-3.7 攪拌条件の違いと測定誤差の関係

表-3.4 は、手順[2]における攪拌速度および時間を 400rpm-15min とし、手順[1]～[5]を実施した場合の、アスファルト量の測定結果である。結果は、同一条件で 3 回実施した測定誤差の平均値である。なお、参考として回収工程を追加しない場合の結果およびソックスレー法による結果を併記した。これより、回収工程を伴わない分離工程のみのストレートアスファルト混合物に対する測定誤差は 0.39%であり、ソックスレー法と比較して同程度の精度であった。しかしながら、分離工程に回収工程を追加した場合、ストレートアスファルト混合物に対する測定誤差は 3 回の結果とも $\pm 0.1\%$ を下回り、高い測定精度を確認した。

表-3.4 各種試験法による測定誤差の比較

アスファルト種類	測定誤差(%)		
	試験方法		
	亜臨界水法 (回収工程あり)	亜臨界水法 (回収工程なし)	ソックスレー法
ストレート アスファルト	0.02	-0.39	0.40

図-3.8 は，本試験法およびソックスレー法により測定した骨材粒度と供試体作製時の骨材配合粒度（以下，配合粒度）を比較したものである．これより，本試験法による合成粒度結果と配合粒度との差異は見られない．

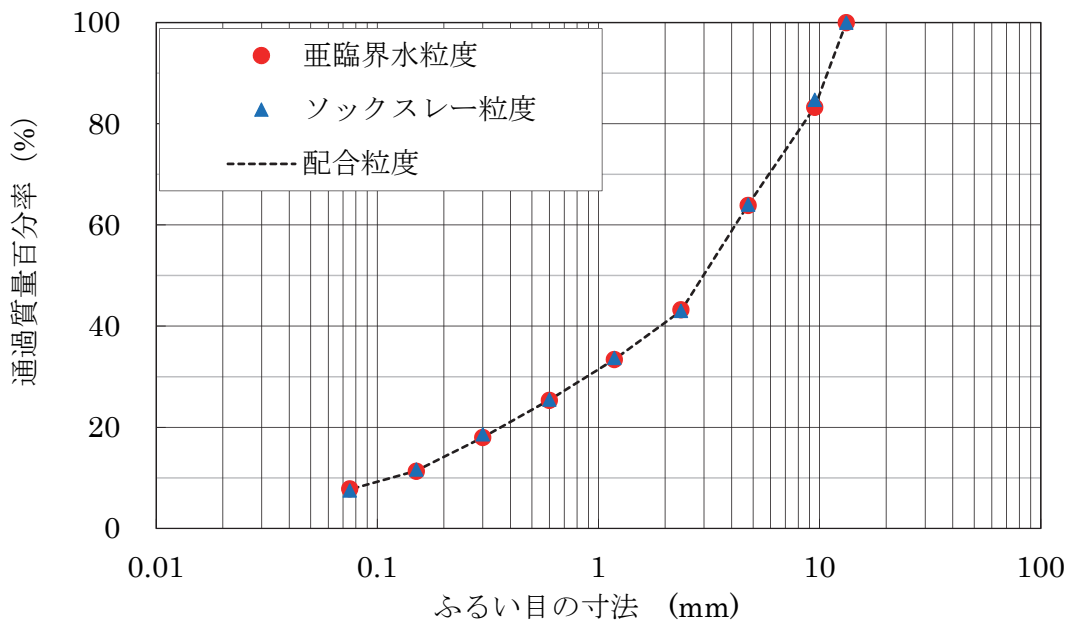


図-3.8 配合粒度と抽出試験による測定粒度との比較

本試験法およびソックスレー法によってアスファルトの抽出に要した時間（以下，抽出時間）と抽出終了後から骨材試料の回収完了までの時間（以下，回収時間）を図-3.9 に比較し

た．ここで，本試験法に関しては分離工程に要した時間を抽出時間として図示している．これより，本試験法による抽出時間は，アスファルトの種類に関係なく 15 分で完了するのに対し，ソックスレー法では抽出時間に 20.5 時間を要している．また，本試験法による回収工程に要する時間は，1 時間程度を要するが，粒度や微粒分量の測定が比較的短時間で完了することから全体としての効率化が期待できる．

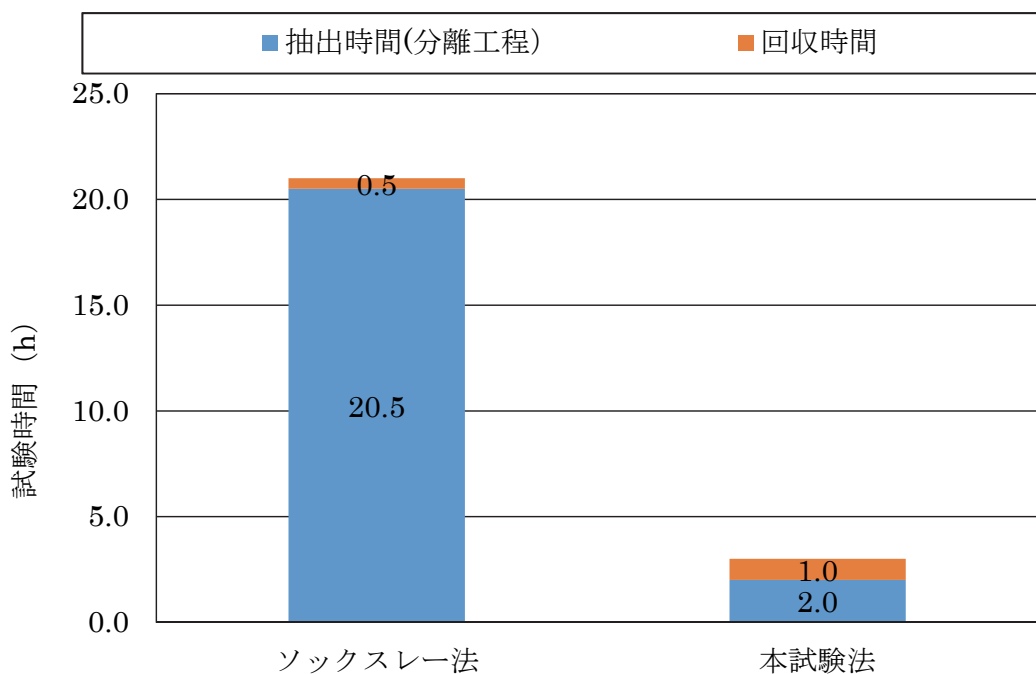


図-3.9 既往方法と本試験法による試験時間の比較

以上の結果から，本試験法は短時間で高精度のアスファルト量および骨材配合比を測定できる可能性を確認した．

3. 4 各種の新規混合物に対する精度の確認

ここでは、これまでの結果から良好な測定精度の得られた分離工程および回収工程を適用し、代表的なアスファルトおよび骨材配合に対する本試験方法の実用性を検証する。なお、分離工程と回収工程を加えた本試験手法を亜臨界水法と称することとする。

3. 4. 1 試験概要

供試体として使用した各種アスファルト混合物の配合を表-3.5に示す。代表的なアスファルトおよび骨材配合に対する亜臨界水法の実用性を検証するため、ストレートアスファルト 60-80 による細粒度アスファルト混合物(13F)および粗粒度アスファルト混合物(20)、ポリマー改質アスファルト H 型によるポーラスアスファルト混合物を加熱混合し、「3章 3.2」と同様に転圧しない状態で各 500g を試験に供した。

表-3.5 供試体とした各種混合物の配合

	骨材配合率 (%)						アスファルト量 (%)	使用アスファルト
	5号 砕石	6号 砕石	7号 砕石	砕砂	粗砂	石粉		
細粒度 アスファルト 混合物(13F)	0.0	16.0	12.0	27.0	26.0	19.0	7.0	ストレート アスファルト 60-80
細粒度 アスファルト 混合物(20)	21.0	33.5	17.5	19.5	2.5	6.0	5.3	ストレート アスファルト 60-80
ポーラス アスファルト 混合物(20)	26.0	52.5	6.5	4.9	2.8	7.3	5.0	ポリマー改質 アスファルト H型

3. 4. 2 試験結果

写真-3.2 にそれぞれ試験後試料の外観を a)~c)に，参考として混合前の試料を d)に示す．これより，亜臨界水法による試験後の粗骨材表面にアスファルトの付着などは見られず，加熱混合前の骨材と遜色がない．他方，細骨材に関しては加熱混合前の骨材に比べて微粒分に若干の変色が見られるが，アスファルトの付着などは確認されなかった．なお，微粒分の変色は吸引濾過時において，溶媒中に溶解した油分が付着したものと考えられる．

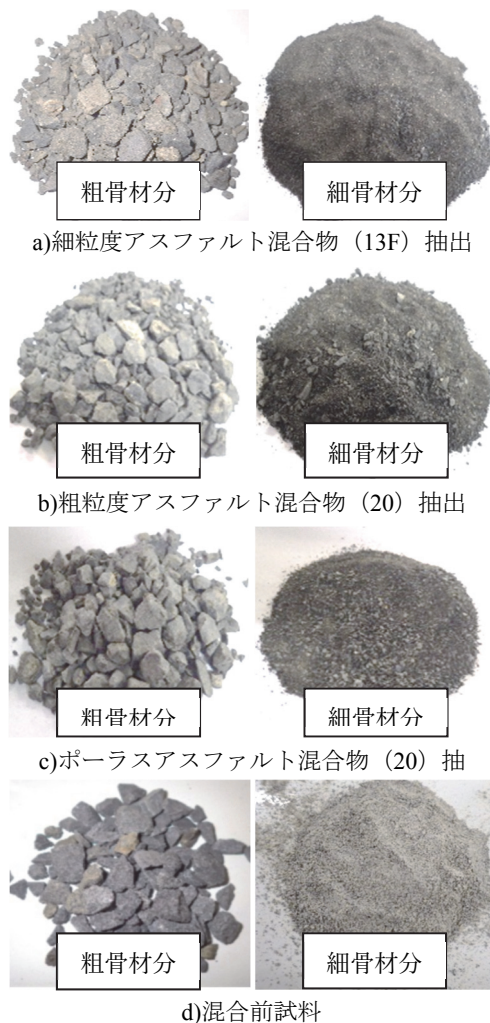


写真-3.2 試料の外観

各種混合物に対するアスファルト量の測定誤差を表-3.6に示す。結果は、同一条件で3回実施した測定誤差の平均値である。これより、アスファルトおよび混合物の種類の違いによる測定誤差への影響は見られず、各種混合物ともアスファルトプラントにおける抽出試験の規格値である±0.9%を満足するとともに、「3章 3.2」で示した本研究の目標精度である±0.3%が得られる結果となっている。

表-3.6 各種混合物に対する測定誤差

	細粒度 アスファルト 混合物 (13F)	粗粒度 アスファルト 混合物 (20)	ポーラス アスファルト 混合物 (20)
測定誤差 (%)	0.13	0.05	0.03

各種混合物の配合粒度と垂臨界水法によって測定した粒度を図-3.10に粒度曲線で示す。これより、各種混合物とも配合粒度との差異は見られず、粒度曲線は一致している。

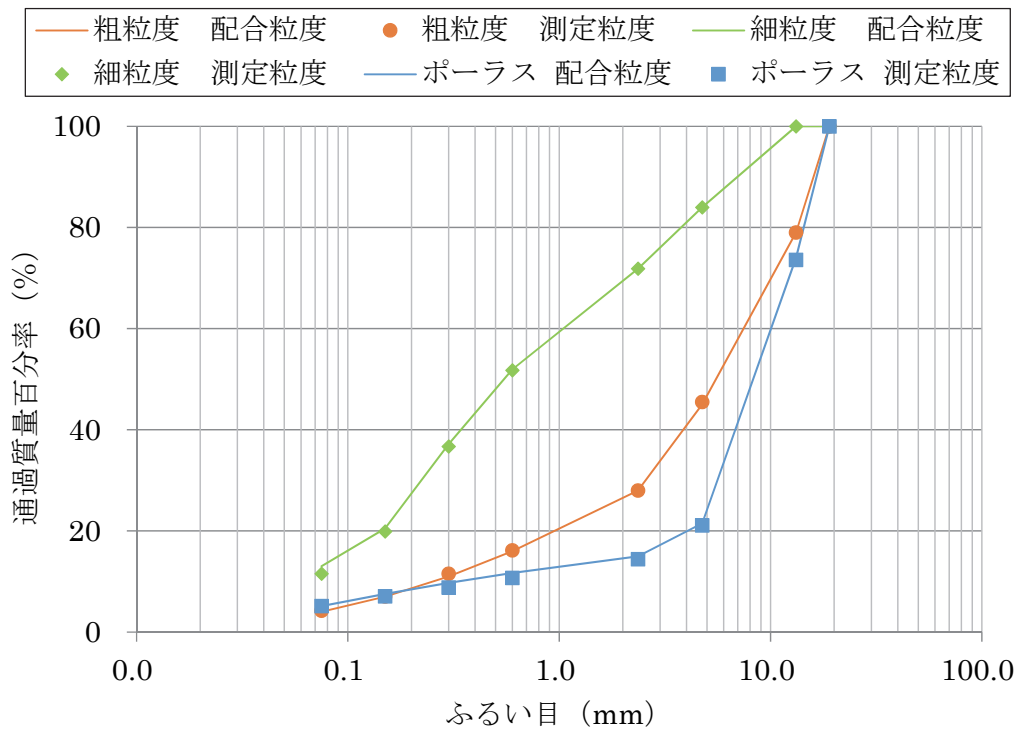


図-3.10 配合粒度と抽出試験による測定粒度との比較

以上の結果から，垂臨界水法はアスファルトや混合物の種類に左右されることなく，一定の試験時間と方法により高精度のアスファルト量および骨材配合比を迅速に測定できることを確認した。

3. 5 再生骨材に対する試験精度の確認

ここでは、3. 3において、各種混合物に対して適応性を確認した亜臨界水法のさらなる実用性を検証するため、再生骨材に対する試験精度を確認する。

3. 5. 1 試験概要

再生骨材の品質は表-3.7に示すとおりである。なお、表中の数値は、再生骨材購入時の試験成績表によるものであり、全試料から本実験に用いる再生骨材量 500g を取り出したものについて抽出試験を実施した場合、表の結果となるとは限らない。そこで、図-3.11に示すように、亜臨界水法によって抽出された骨材試料について、さらにソックスレー法を適用し、再生骨材中の正確なアスファルト量（亜臨界水法+ソックスレー法）および骨材粒度を求めた。

表-3.7 供試体とした再生骨材の品質

粒径(mm)	13-0
アスファルト含有量(%)	4.47
微粒分量(%)	1.34
推定針入度(1/10mm)	21
ふるい目呼び寸法(mm)	通過質量百分率(%)
13.2	100
9.5	84.4
4.75	55.9
2.36	32.5
1.18	20.7
0.6	12.5
0.3	6.5
0.15	2.5
0.075	1.1

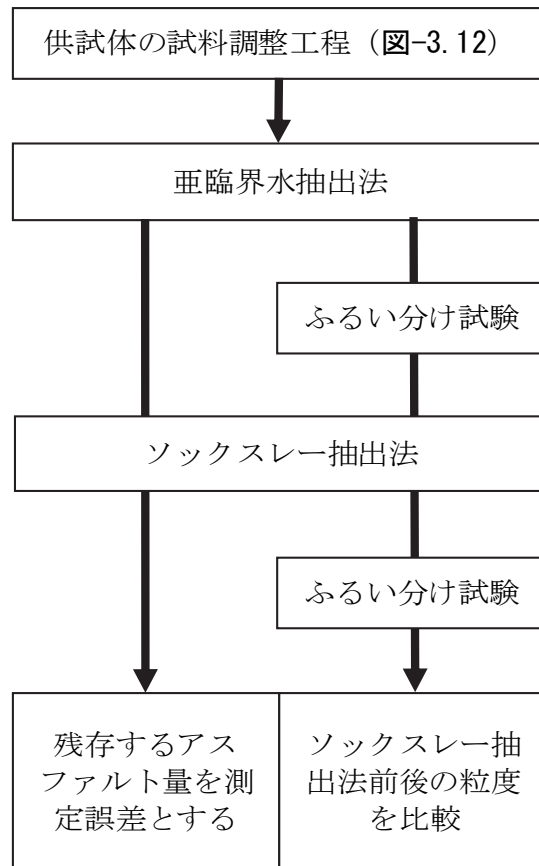


図-3.11 再生骨材に対する検討の手順

以上の結果から，亜臨界水法はアスファルトや混合物の種類に左右されることなく，一定の試験時間と方法により高精度のアスファルト量および骨材配合比を迅速に測定できることを確認した。

3. 5. 2 試験結果および考察

図-3.11 の手順に従い，測定誤差を求めたところ，-1.0%程度の誤差が生じた．特に，再生骨材を粒状のまま使用すると，圧力容器の底部に旧アスファルトおよび骨材の一部が付着し，試験後試料の回収が正確に行えない状態であった．このような誤差は，再生骨材は長期のエイジングによって，旧アスファルトが変質や骨材内部に含浸しているため，亜臨界水により全ての旧アスファルトを溶融・加水分解しづらいことが要因と思われる．さらに，変質した旧アスファルトにより，細粒分が粗骨材に強固に固着し団粒化していることも要因と考えられる．

そこで，図-3.12 に示すように，団粒化した再生骨材をほぐすような効果を期待し，再生骨材を試験前に炉乾燥で3時間の養生し，加熱混合，水中養生を行う試料調整を設け，亜臨界水法を実施することとした．さらに，亜臨界水による旧アスファルトの溶融・加水分解作用の促進を期待し，抽出時間について30分に延長した場合の効果を検討した．

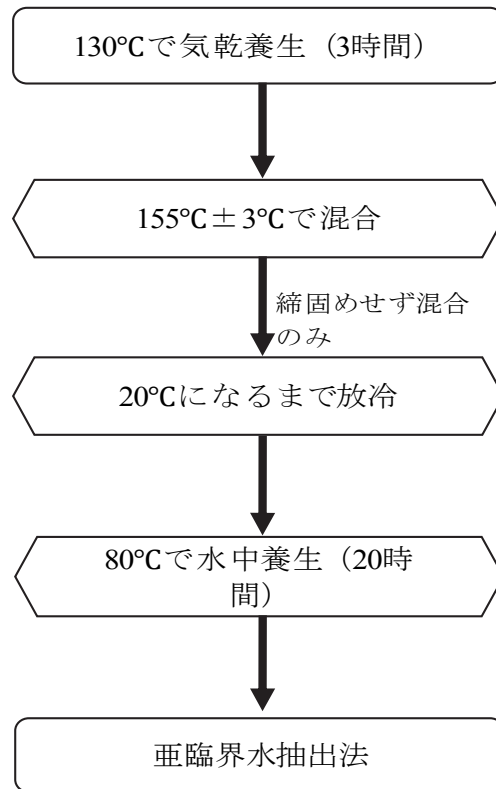
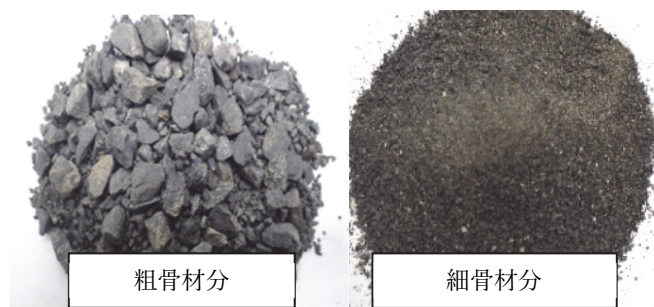
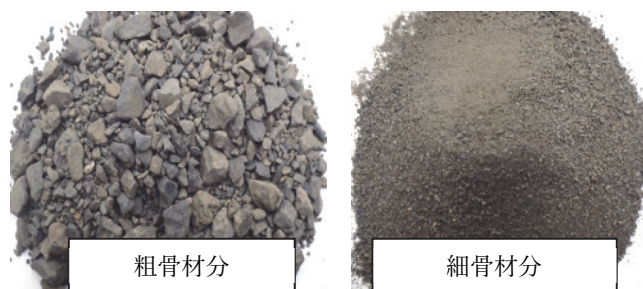


図-3.12 再生骨材に対する試料調整の手順

亜臨界水法による試験後試料の外観を写真-3.3に示す。これより、亜臨界水法による試験後の粗骨材表面には、抽出時間15分、30分ともに、アスファルトの付着などは見られなかった。一方、細骨材は抽出時間15分の方が若干黒く、抽出時間30分と比較して細骨材にアスファルトの残留分が認められる結果となった。



抽出時間 15 分（試料調整有）



抽出時間 30 分（試料調整有）

写真-3.3 試料調整の有無による試験後再生骨材の外観

再生骨材試料に対するアスファルト量の測定誤差を表-3.8に示す。結果は、同一条件で3回実施した測定誤差の平均値である。これより、抽出時間を通常より延ばすことにより測定誤差が減少すること、試料調整を設けることで測定誤差が減少することを確認した。

表-3.8 試料調整の有無による測定誤差の比較

	調整工程あり		調整工程なし	
抽出時間 (min)	15	30	15	30
測定誤差 (%)	0.78	0.21	0.87	0.63

再生骨材の粒度曲線を図-3.13 および 14 に示す。これより、抽出時間 15 分でソックスレー抽出後の粒度分布に比べ、亜臨界水抽出後の粒度分布に若干の差異が見られるが、抽出時間 30 分では大きな差異は見られなかった。

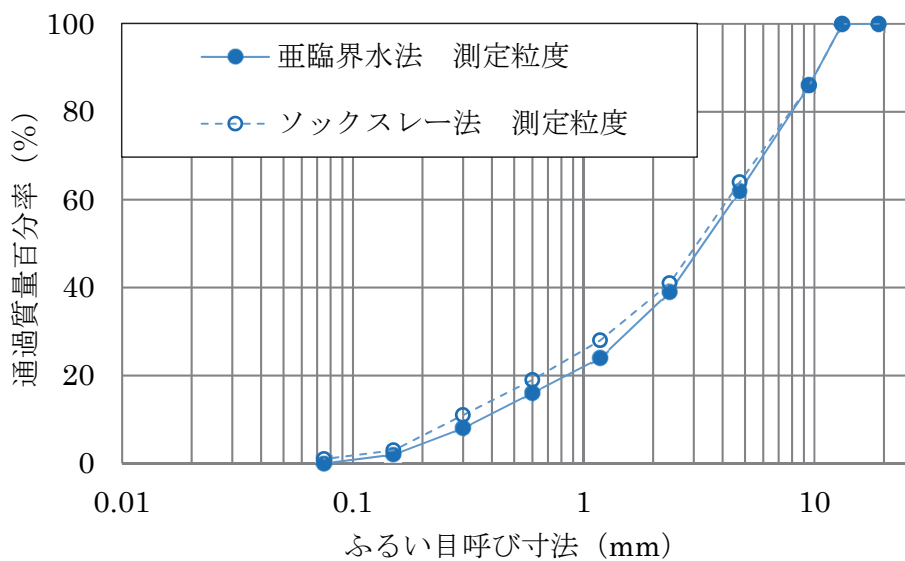


図-3.13 配合粒度と測定粒度との比較（抽出 15 分）

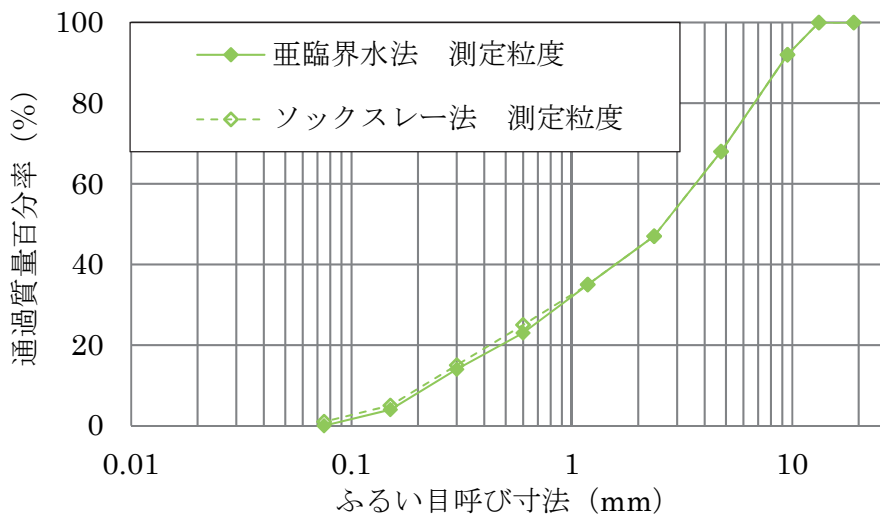


図-3.14 配合粒度と測定粒度との比較（抽出 30 分）

以上の結果から、亜臨界水抽出試験は、再生骨材に対して、骨材の性状に応じた準備を考慮する必要があり、供試体に熱処理を施した試料調整を行い、抽出時間を30分に延ばすことで十分な精度を得られることが確認できた。

3. 6 ま と め

本章では，亜臨界水法の開発に向けて，代表的なアスファルト混合物に対する適応性を確認し，測定精度を向上させるための試験装置，試験条件・方法について検討した．以下に本章で得られた知見をまとめる．

- ①アスファルトの種類によっては，既報研究で実施した亜臨界水を用いた分離工程のみで抽出が行えないことを明らかにした上で，冷却工程において，水冷管を用いて 150℃まで冷却し，その後容器を水浸させることで測定精度の向上が図れることを示した．
- ②分離工程のみで，目標とする目標精度±0.3%を得ることはできない．これは，骨材間隙中のアスファルト片によるものであったことから，分離工程終了後にアスファルト片の回収工程を加えることで，目標とする測定精度が得られることを確認した．
- ③アスファルトおよび骨材配合の異なる各種のアスファルト混合物を対象とした測定精度の確認を行った結果，アスファルト混合物が異なっても測定精度に影響を与えず，亜臨界水法は多様な混合物の抽出試験としての適用できる可能性を確認した．
- ④再生骨材を対象とした抽出試験の検討を行い，再生骨材に適用可能である試験条件・試験方法を確認した．その結果，再生骨材のみを対象とした抽出試験では，骨材を加熱処理する試料調整を加えることで，良好な精度を得られることを示した．

以上の結果から，亜臨界水法の多様な素材および混合物に対する試験精度を確認するとともに，品質管理試験としての適用の可能性を示唆する結果を確認できた．本研究による検討結果を踏まえ，**図-3.15**に亜臨界水法による抽出試験手順をまとめるとともに，試験法を提案する．

なお，再生骨材に適用可能な試験条件として試料調整を提案したが，時間を要することから，更なる簡略化が可能であれば，より効率的な再生骨材の抽出試験が可能である．

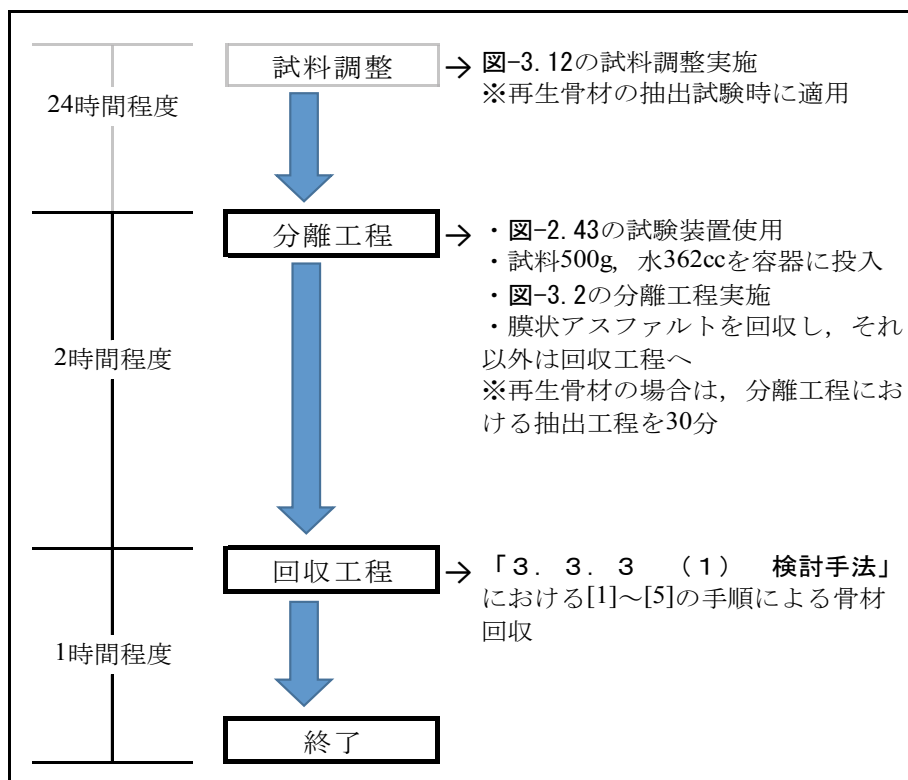


図-3.15 亜臨界水法による試験手順（分離・回収行程）

【第3章の参考文献】

- 1) 赤津憲吾，加納陽輔，秋葉正一，佐藤克己：亜臨界水を抽出溶媒としたアスファルト抽出試験法の提案，土木学会論文集 E1（舗装工学），72 巻，1 号，pp.31-41，2016.
- 2) 山之口浩，荒井孝雄：アスファルト抽出試験の新しい溶剤の検討，道路建設，No. 547，pp. 63-68，1993.
- 3) 白浜幸則，奥平真誠：塩素系溶剤を用いない抽出試験に関する一検討，道路建設，No. 552，pp. 58-64，1994.
- 4) 武田昭，加藤進，渡辺孝志，幡野彰一：炭化水素系溶剤を用いた自動アスファルト抽出試験の検討，舗装，No. 31，Vol. 2，pp. 19-24，1996.
- 5) 加納陽輔，秋葉正一，栗谷川裕造，河合糺茲：超臨界水を用いたアスファルト抽出試験に関する基礎検討，土木学会舗装工学論文集，第 10 巻，pp. 249-256，2005.
- 6) 秋葉正一，加納陽輔：亜臨界水を用いた環境調和型アスファルト抽出試験に関する実験的検討，土木学会舗装工学論文集，第 15 巻，pp. 23-29，2010.
- 7) （公社）日本道路協会：舗装設計施工指針，pp. 221-223，305，2006.

第4章 アスファルト舗装発生に対する分別再資源化技術の開発¹⁾

4.1 概説

「1章 1.1」で述べたように、わが国では1970年代から発生材（以下、RAP）の再生利用に関する本格的な開発が進められており²⁾、2000年以降、RAPは図-4.1に示すフローに従って再生利用され、99%以上が再生利用されている。しかし、1990年代以降、多様な改質剤、または他産業再生資材を含む混合物の普及（図-4.1, a) および b)), また、RAPの繰り返し再生利用に伴い、RAPの品質は多様化している。一方で、わが国では、スチレン-ブタジエン-スチレン（SBS）ブロック共重合体を7%前後添加した³⁾ポリマー改質アスファルトが広く用いられており、2009年には、ポリマー改質アスファルトを含有したアスファルト混合物の出荷量は全体の15%を占めている⁴⁾。特に、ポリマー改質アスファルトを含有したポーラスアスファルト混合物は、走行安全性の向上や交通騒音の低減などに効果を有していることから、高速道路をはじめ高規格道路に広く普及している。しかしながら、供用後のポリマー改質アスファルトを含有したRAP(以下、RAP_m)は、多様な改質材を含んでいること、劣化したポリマー剤は硬化が進行しており、団粒化したRAP_mの粒度の変動が大きいことから、再生混合物への利用に関して、品質管理や配合に課題を残している。近年、多くのポーラスアスファルト混合物が更新時期を迎えおり、RAP_mの再生利用方法の確立が急務となっている。

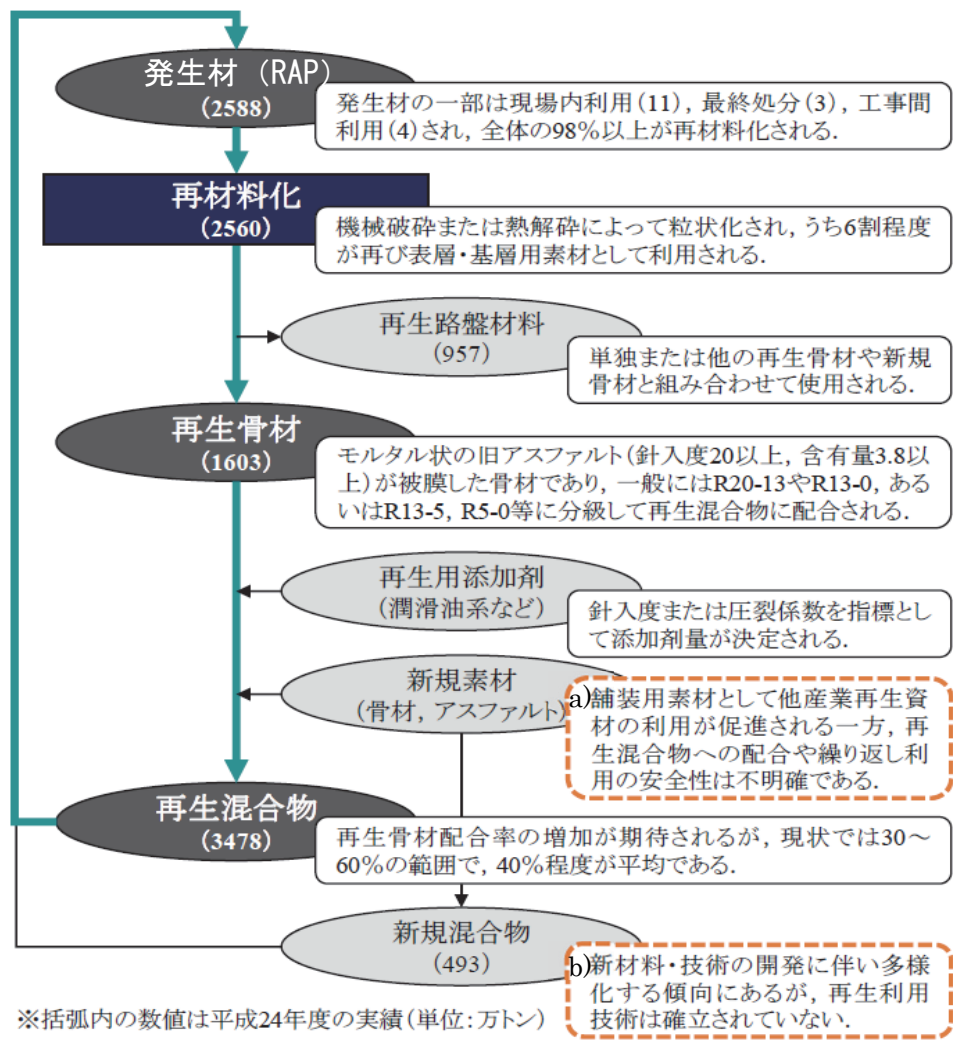


図-4.1 RAPのリサイクルフロー

「2章 2.4.2」で述べたように、既往研究において、水の溶媒性能に着目し、混合物からアスファルトと骨材を分離するさまざまな検討が進められてきた。また、加納らは、加圧熱水を用いたアスファルト混合物の剥離抵抗性評価試験の開発を行い、その過程で、150°Cの加圧熱水中で攪拌することにより、アスファルト混合物は、骨材とアスファルトに分離することを確認した⁵⁾。また、3章で示した、亜臨界水を用

いたアスファルト抽出試験の開発の過程で、高温高压水の反応により、アスファルトが分解する可能性があることを確認した。これらの知見に基づいて、筆者らは、混合物の分離および分解プロセスを一連のRAPの分別再資源化技術として適用することを試みた。ただし、本技術の実用化を視座とした場合、環境負荷や処理コストの低減に繋げるために、大気圧下で連続的かつ効率的に処理できる条件が望ましい。そこで、セメントコンクリート塊から良質な再生骨材を製造する「すりもみ法」⁶⁾に着想を得た常圧の熱水と攪拌によりRAPを解砕し、同時に骨材とアスファルトを分別しながら分級する熱水すりもみ法の開発を試みた。

熱水すりもみ法は常圧の熱水によりアスファルトを軟質化させ、ふるい上でRAPをすり合わせることにより、骨材から旧アスファルトを分離する技術であり、ふるい目4.75mmにより、5mm以上の骨材に分別回収する一次分別工程、4.75mm通過分をふるい目1.18mmにより、1-5mmの骨材に分別回収する二次分別工程で構成されている。既往研究⁷⁾において、再生骨材は、旧ストレートアスファルトを含有したRAP（以下、RAP_s）を使用し、RAP_sを密粒度アスファルト混合物（13）の中央粒度に沿って配合し、加熱転圧したホイールトラッキング供試体を現場RAPと見たて、このアスファルトコンクリート塊を分別再材料化する試みを行った。分別温度は、70~90°Cとし、一次分別工程により、回収した5-13mmの骨材（以下、SR5-13_s）と、同様の分別温度を用い、二次分別工程により、回収した1-5mmの骨材（以下、SR1-5_s）の性状を確認した。既往研究に用いた熱水すりもみ法のフローを図-4.2、熱水すりもみ法に用いる一次分別装置、および二次分別

装置の概略図を図-4.3, 4.4に示す.

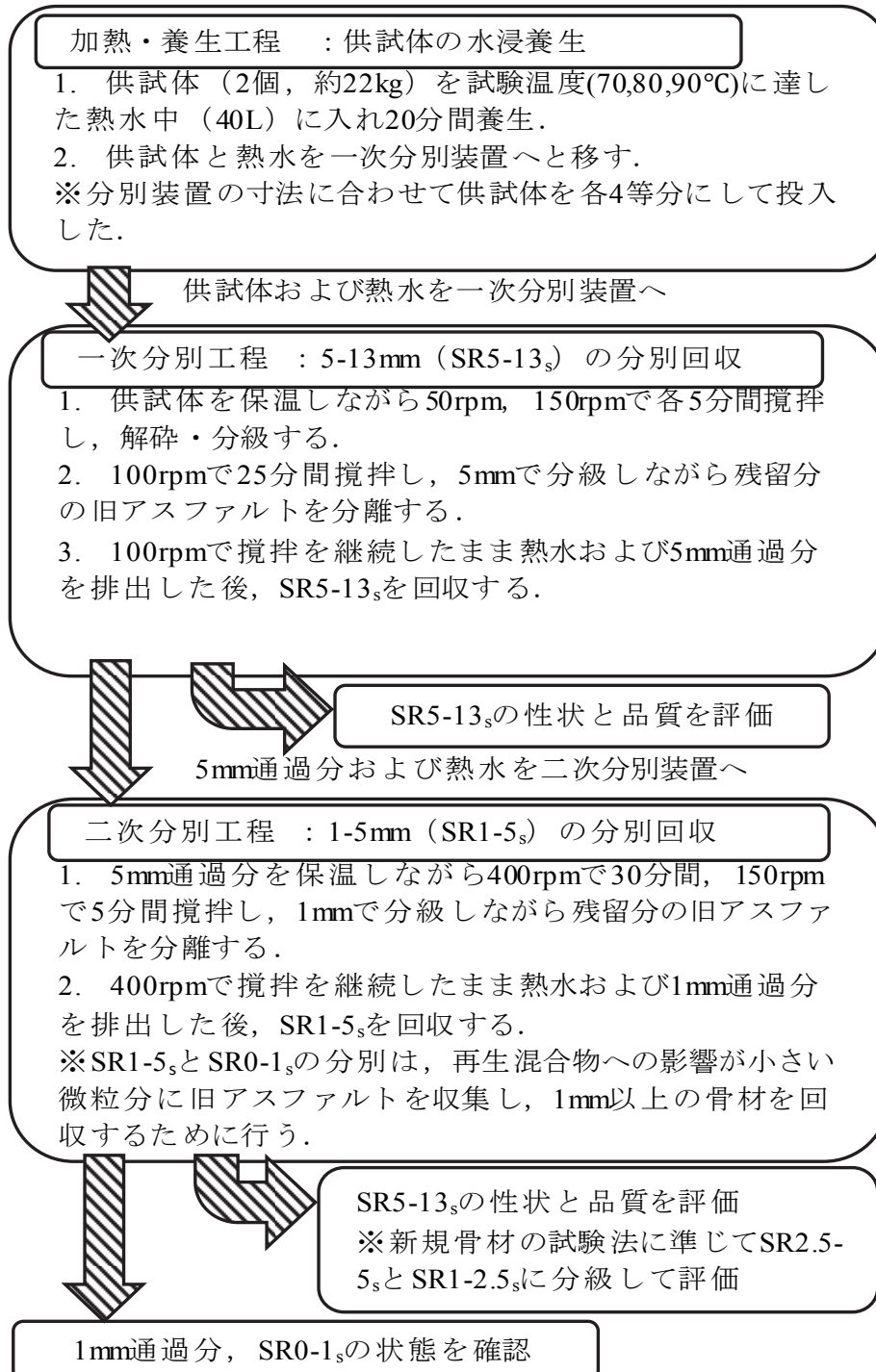


図-4.2 熱水すりもみ法のフロー7)

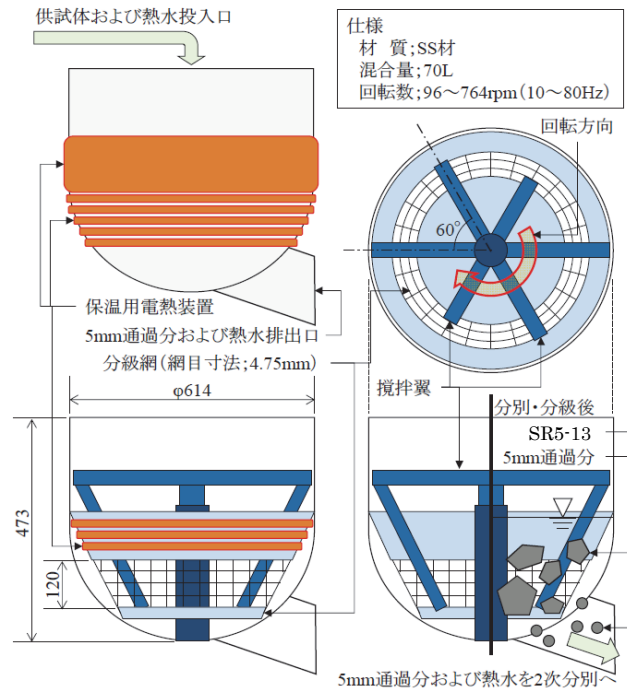


図-4.3 一次分別装置 7)

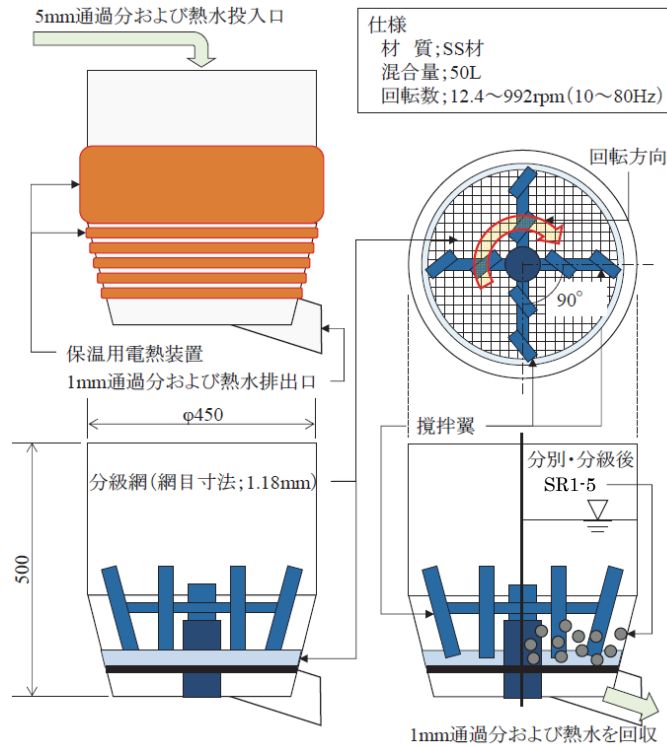


図-4.4 二次分別装置 7)

その結果，分別温度 80~90°C の熱水により，RAP_s から素材に近い状態まで復元した SR5-13_s，SR1-5_s を回収することに成功している⁷⁾。しかしながら，熱水すりもみ法は，多様な RAP への適用性を確認していない。また，旧アスファルトを濃縮して含有した 0-1mm 微粒分（以下，SR0-1_s）は劣化を蓄積しているため，持続的な循環利用に課題を残している。

本章では，RAP_m を含む発生材を熱水すりもみ法によって分別回収した骨材と，回収骨材を配合した加熱アスファルト混合物（以下，回収混合物）を評価し，RAP_m に対する熱水すりもみ法の適用性を確認した。また，亜臨界域の高温高压水による有機物への分解性能に着目し，高温高压水の温度と圧力が劣化したアスファルトの構成成分比率と物理的性状に及ぼす影響を確認した。

4. 2 熱水すりもみ法により回収した骨材の評価

4. 2. 1 実験概要

ここでは、熱水すりもみ法により、RAP_mから分別回収された骨材の性状と品質を評価した。熱水すりもみ法の手順および装置は図-4.2~4.4に示した、既往研究⁷⁾と同様の条件および装置とした。使用するRAP_mは多様なアスファルトによる熱水すりもみ法の適用を確認するため、供用により劣化した、ポリマー改質アスファルトH型を配合した表層とポリマー改質アスファルトII型を配合した基層を同時切削して得られた5-13mmの再生骨材（以下、R5-13_m）、および0-5mmの再生骨材（以下、R0-5_m）を既往研究と同様、密粒度アスファルト混合物（13）の中央粒度に沿って配合し、加熱転圧したホイールトラッキング試験用供試体を対象とした。R5-13_mおよびR0-5_mの性状を表-4.1に示す。分別温度は、既往研究のRAP_sに対する結果を踏まえて、80°Cと90°Cとし、一次分別工程により回収した5-13mmの骨材（以下、SR5-13_m）、および二次分別工程により回収した1-5mmの骨材（以下、SR1-5_m）をそれぞれ評価した。

表-4.1 R5-13_mおよび R0-5_mの性状

		R0-13 _m	R5-13 _m	R0-5 _m
旧アスファルト含有率 (%)		4.25	2.95	7.08
骨材の微粒分量 (%)		2.84	2.27	5.12
通過量百分率 (%)	13.2mm	100.0	100.0	100.0
	9.5mm	81.5	76.5	100.0
	4.75mm	38.1	18.1	100.0
	2.36mm	23.1	12.4	67.9
	1.18mm	16.7	10.6	46.9
	0.6mm	13.2	9.1	35.4
	0.3mm	9.7	7.2	26.0
	0.15mm	6.5	5.5	18.0
	0.075mm	4.8	4.1	13.4

4. 2. 2 回収した粒径 5-13mm の骨材の評価

(1) 性状

熱水すりもみ法により回収された SR5-13_m の性状に関しては、試料が一定の温度となる、1 時間放冷後の外観を観察した後、含水比、旧アスファルトの含有率、微粒分量および通過質量百分率を評価した。SR5-13_m の外観を図-4.5、性状を表-4.2、回収した骨材に僅かに残存している旧アスファルトをソックスレー法を用いて抽出した後の通過質量百分率（以下、通過質量百分率）による粒度分布を図-4.6 に示す。なお、含水比、旧アスファルトの含有率、微粒分量の結果は、比較試料として、既報研究により RAP_s から回収した SR5-13_s を併記し、アスファルトの違いによる影響を確認した。また、粒度分布は、比較試料として、現行の再生方法で製造した R5-13_m を併記した。

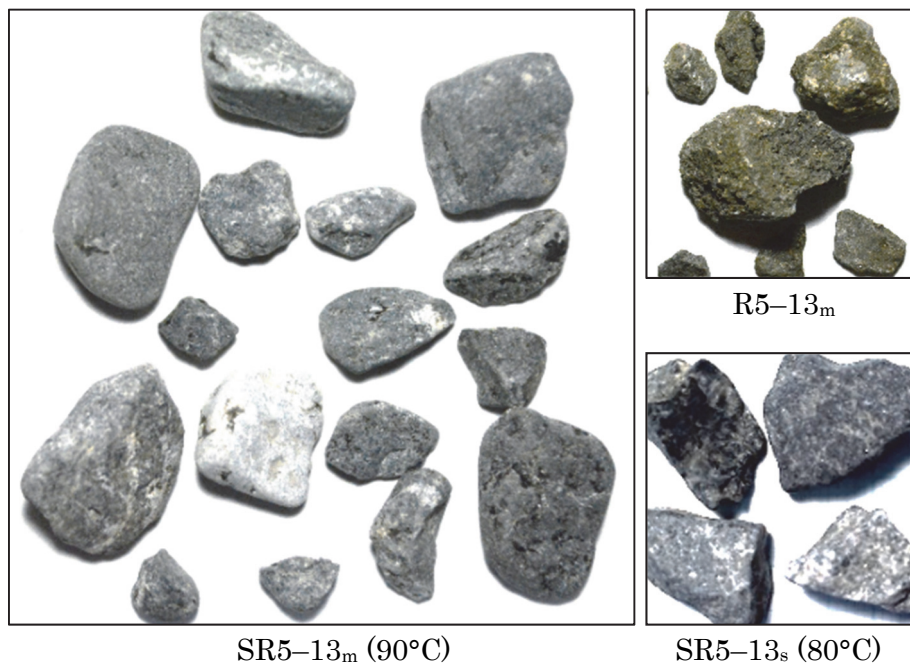


図-4.5 SR5-13_mの外観

表-4.2 SR5-13_mの性状

	SR5-13 _m		SR5-13 _s	
	80°C	90°C	80°C	90°C
含水比 (1時間放冷後) (%)	0.23	0.17	0.77	0.57
旧アスファルトの含有率 (%)	0.87	0.70	0.70	0.56
微粒分量 (%)	0.1	0.1	0.2	0.2

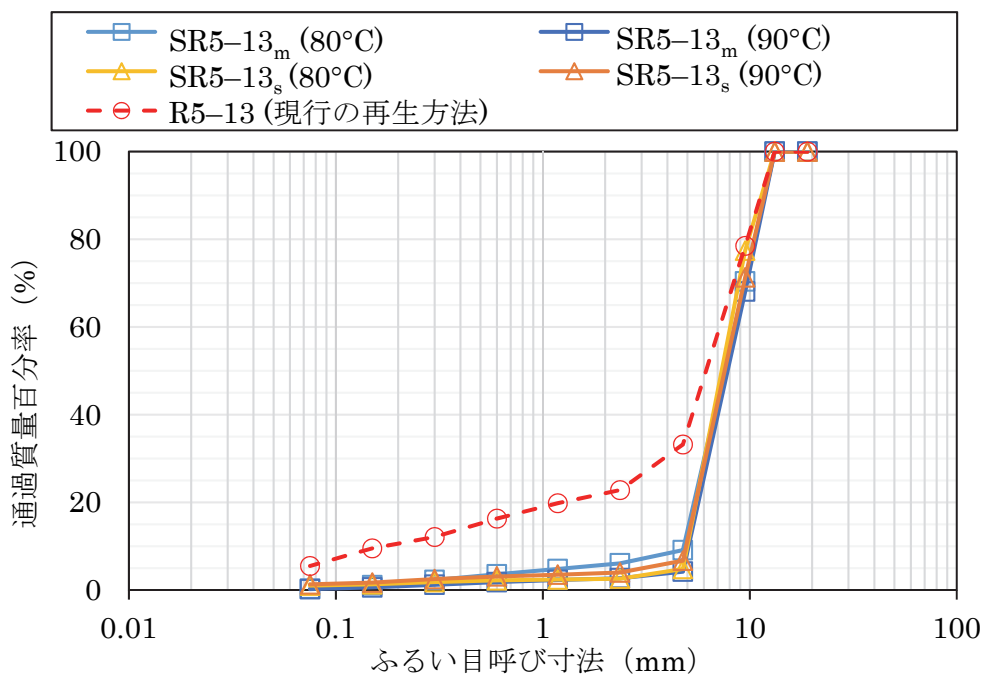


図-4.6 SR5-13_mの粒度分布

SR5-13_mの外観には、分別温度 80°C、90°C ともごく一部に旧アスファルトの付着が見受けられたが、目立った摩耗、破損などはなく、新規骨材や SR5-13_s と比べて遜色ない。含水比および旧アスファルトの含有率は、分別温度の上昇によって減少する傾向が見られ、微粒分量は分別温度 80°C、90°C とも新規骨材や SR5-13_s と同程度であり、分別温度による差異は見られなかった。粒度分布より、分別温度 80°C により回

収した SR5-13_m は、4.75mm 通過分が僅かに混在するものの、
 分別温度 80°C、90°C とともに現行の再生方法により製造した R5-
 13_m に比べて、骨材成分がより厳密に分級された。

(2) 品質

SR5-13_m の品質に関しては、旧アスファルトの含有率が比較
 的に少ない分別温度 90°C による回収骨材を対象とし、新規の
 粗骨材の品質目標値⁸⁾（密度 2.45g/cm³ 以上，吸水率 3.0%以
 下，すり減り減量 30%以下）と照査した。SR5-13_m の密度，
 吸水率を図-4.7 に，すり減り減量を図-4.8 に示す。なお，比
 較試料として，R5-13_m（アスファルト抽出後），および SR5-
 13_s の結果を併記した。

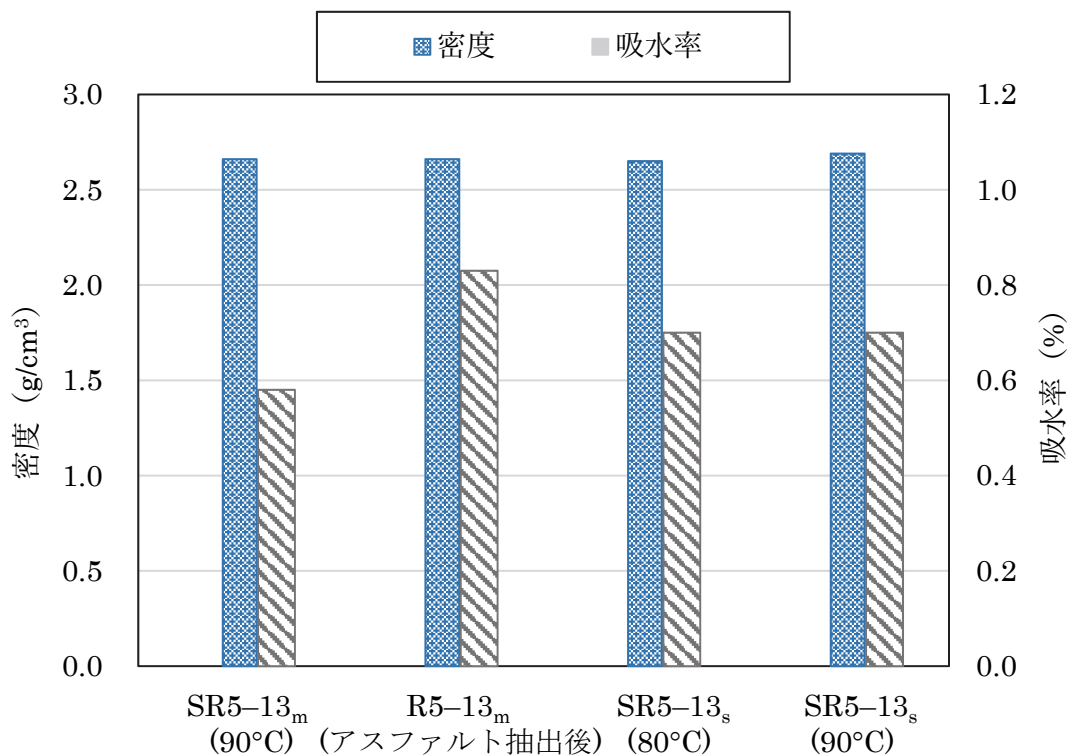


図-4.7 SR5-13_m の密度および吸水率

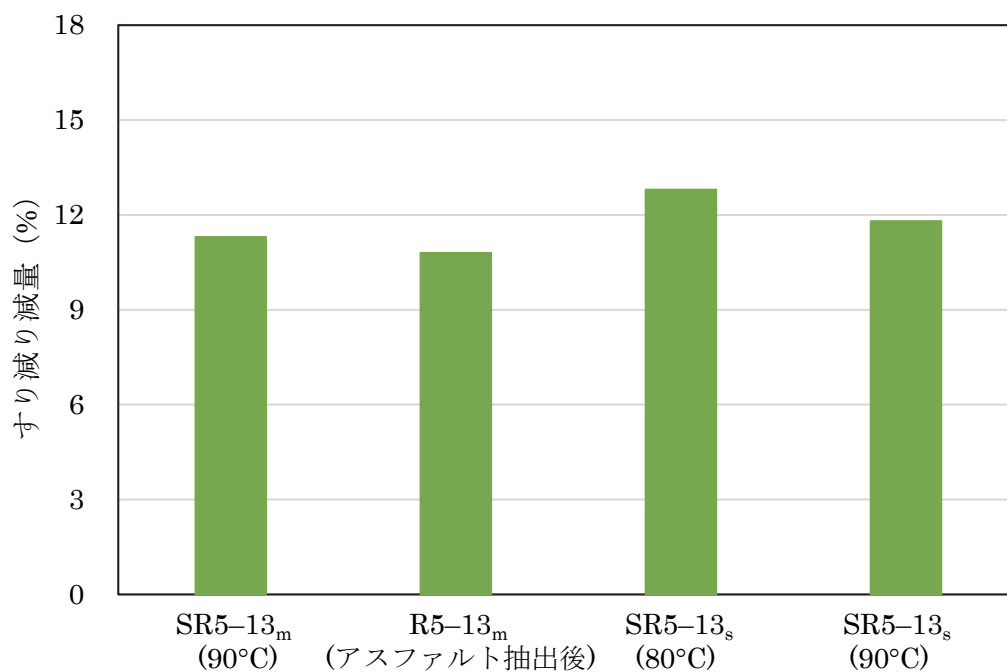


図-4.8 SR5-13_m のすり減り減量

SR5-13_m の密度は、アスファルト抽出後の R5-13_m の密度と同程度である一方、吸水率は R5-13_m に比べ減少した。これは、骨材内部に含浸した旧アスファルトが僅かに残存したためと考える。SR5-13_m のすり減り減量は、アスファルト抽出後の R5-13_m に比べて僅かに大きく、また、この傾向は RAP_s からの回収骨材にも見られた。これは、SR5-13_m の骨材表面に残存した旧アスファルトのすり減りまたは剥脱による影響と考える。ただし、各試験結果ともに目標値を十分に満足している結果が得られた⁷⁾。以上の結果から、RAP_m から分別回収した SR5-13_m は、RAP_s からの回収骨材と同様、素材状態に概ね復元され、新規骨材と同様の取り扱いが可能であることを確認した。

4. 2. 3 回収した粒径 1-5mm の骨材の評価

(1) 性状

熱水すりもみ法により回収された SR1-5_m の性状に関しては，SR5-13_m と同様の方法で評価した．SR1-5_m の外観を図-4.9，性状を表-4.3，粒度分布を図-4.10 に示す．なお，含水比，旧アスファルトの含有率，微粒分量の結果は，比較試料として，既往研究により RAP_s から回収した SR1-5_s を併記し，アスファルトの違いによる影響を確認するした．また，粒度分布は，比較試料として，現行の再生方法で製造した R1-5_m を併記した．

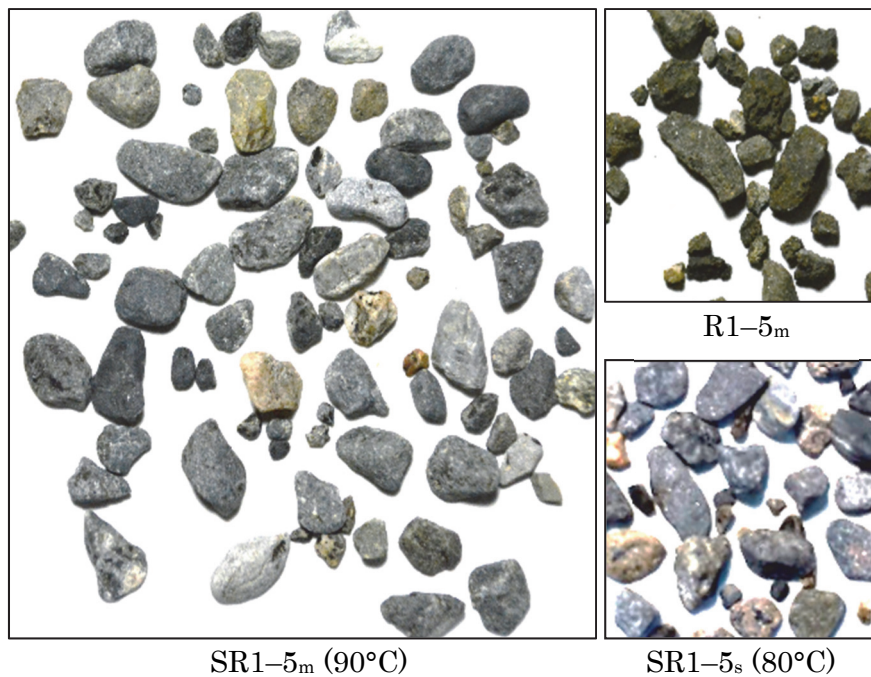


図-4.9 SR1-5_m の外観

表-4.3 SR1-5_m の性状

		SR1-5 _m		SR1-5 _s	
		80°C	90°C	80°C	90°C
含水比 (1時間放冷後)	(%)	2.50	1.97	1.08	1.04
旧アスファルトの含有率	(%)	0.07	0.01	0.57	0.44
微粒分量	(%)	0.2	0.3	0.2	0.2

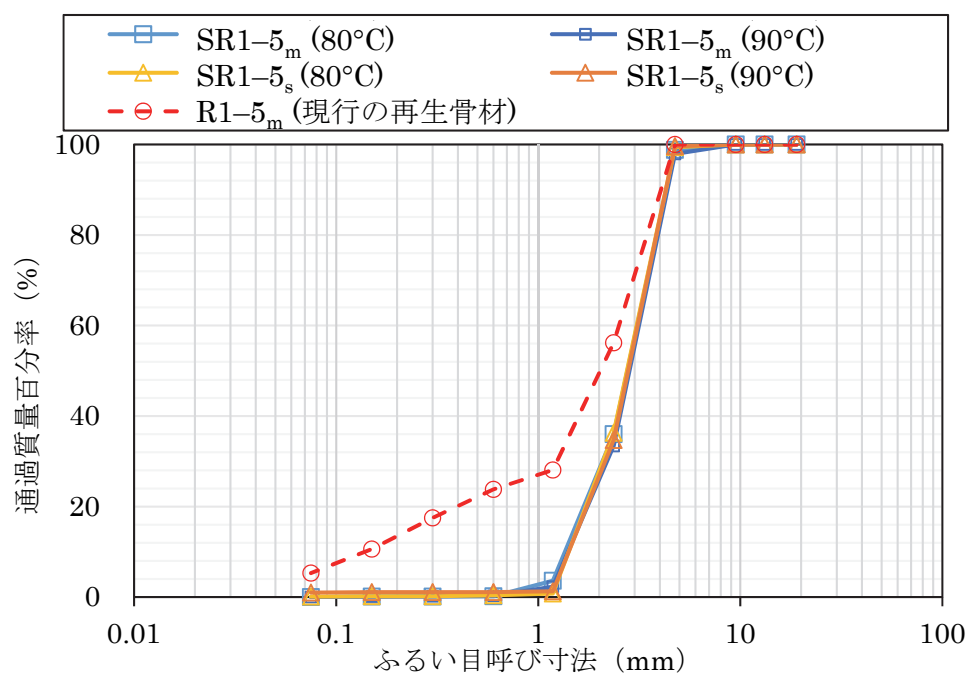


図-4.10 SR1-5_m の粒度分布

SR5-13_m の結果と同様に，SR1-5_m の外観には，分別温度 80°C，90°C ともごく一部に旧アスファルトの付着が見受けられたが，骨材の摩耗や破損は認められない．含水比は粒径の異なる SR5-13_m より高い（表-4.2 参照）ものの，旧アスファルトの含有率は分別温度 80°C，90°C とも SR5-13_m に比べて少なく，粒径の小さい SR1-5_m はすりもみ効率が良いことを示唆している．また，SR1-5_m の旧アスファルトの含有率は SR1-5_s より小さく，微粒分量は分別温度 80°C，90°C とも同程度

である。粒度分布より、SR1-5_mの骨材粒度は、分別温度による差異は少なく、いずれもR1-5_mに比べて、骨材成分のみが厳密に分級されていることがわかる。

(2) 品質

SR1-5_mの品質に関しては、旧アスファルトの含有率がより少ない分別温度90°Cによる回収骨材を対象とし、試験法に準じて2.5-5mmの回収骨材(以下、SR2.5-5_m)および1-2.5mmの回収骨材(以下、SR1-2.5_m)に分級し、粗骨材分であるSR2.5-5_mは密度、吸水率、すり減り減量を測定し、細骨材分であるSR1-2.5_mは密度、吸水率を測定し、品質目標値⁸⁾(密度2.45g/cm³以上、吸水率3.0%以下、すり減り減量30%以下)と照査した。SR2.5-5_m、SR1-2.5_mの密度および吸水率を図-4.11、図-4.12に、SR2.5-5_mのすり減り減量を図-4.13に示す。なお、SR5-13_mと同様、比較試料として、R2.5-5_m(アスファルト抽出後)、R1-2.5_m(アスファルト抽出後)、およびSR2.5-5_s、SR1-2.5_sの結果を併記した。

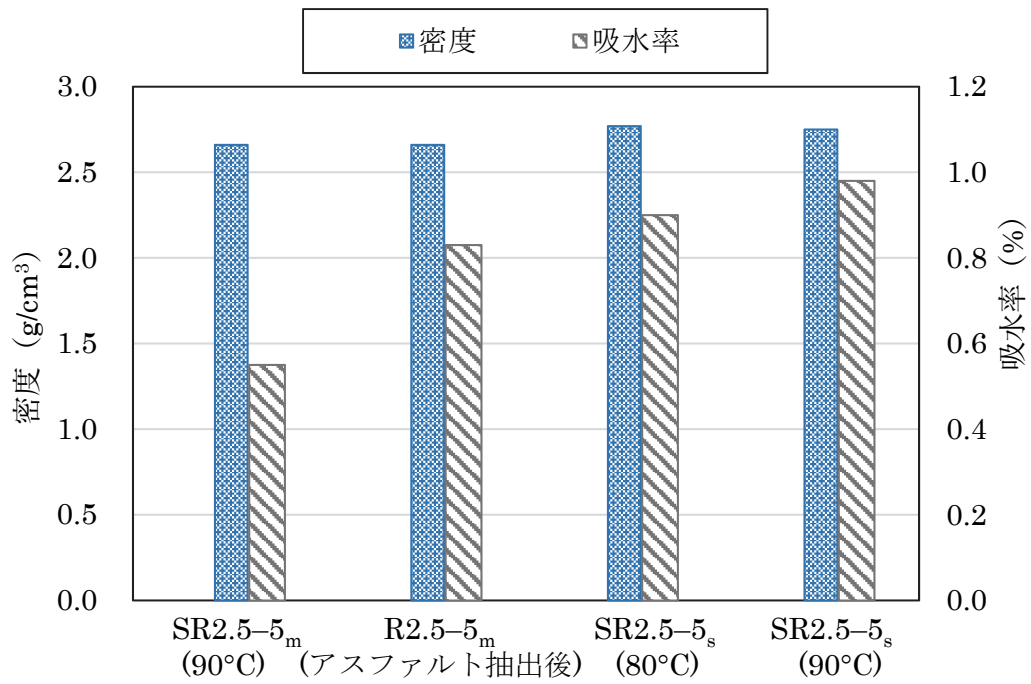


図-4.11 SR2.5-5_m の密度および吸水率

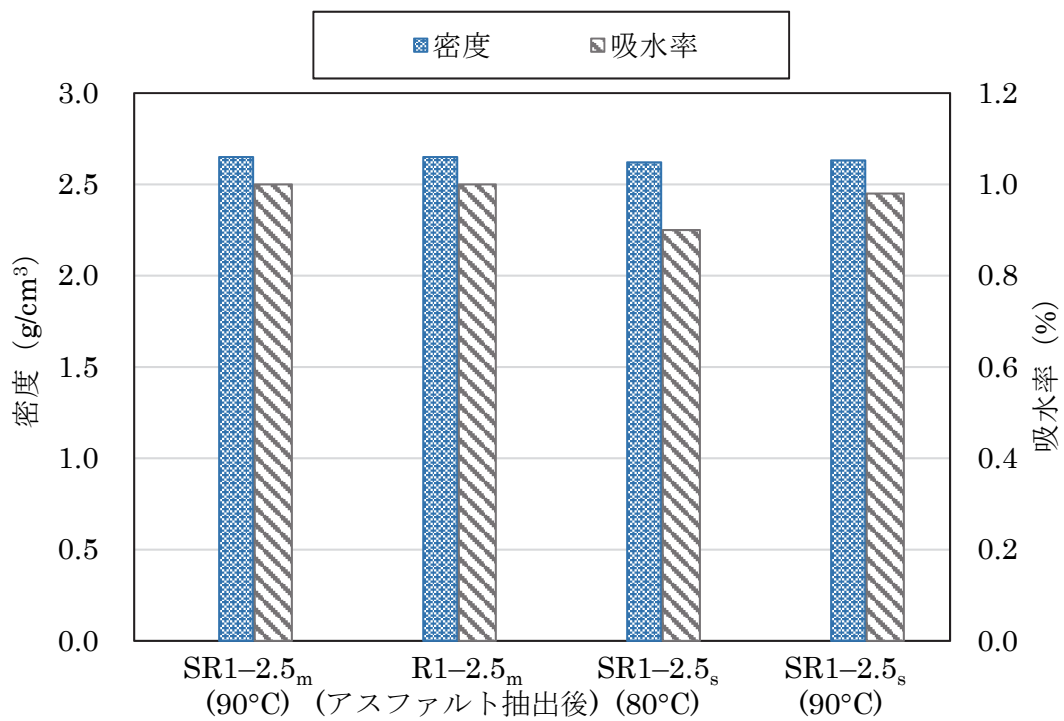


図-4.12 SR1-2.5_m の密度および吸水率

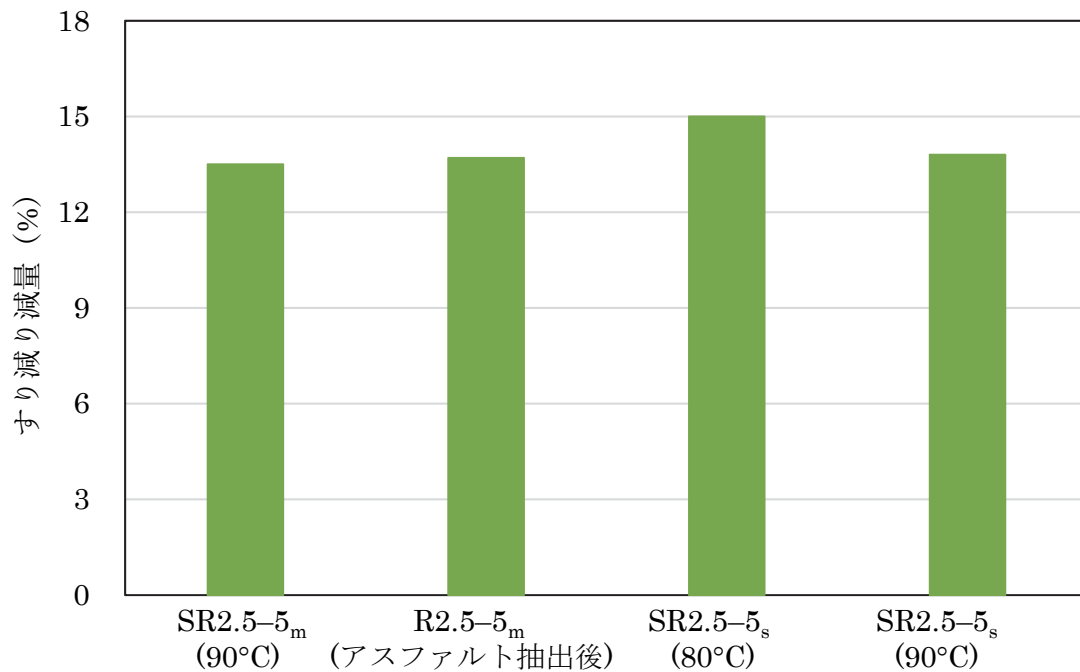


図-4.13 SR2.5-5_m のすり減り減量

SR2.5-5_m および SR1-2.5_m の密度は、それぞれアスファルト抽出後の R2.5-5_m および R1-2.5_m と同等である。SR1-2.5_m の吸水率は一方で、SR2.5-5_m の吸水率は、アスファルト抽出後の R2.5-5_m に比べて小さい。これは、SR5-13_m の結果と同様、骨材内部に含浸した旧アスファルトが僅かに残存したためと考える。また、SR2.5-5_m のすり減り減量は、アスファルト抽出後の R2.5-5_m と同程度である。なお、SR2.5-5_m および SR1-2.5_m のいずれにおいても、新規骨材の品質目標値を十分に満足している結果が得られた。

以上の結果から、熱水すりもみ法により RAP_m から分別回収した SR5-13_m、および SR1-5_m は、RAP_s からの回収した骨材と同様、素材状態に概ね復元され、新規骨材と同様の取り扱いが可能であることを確認した。

4.3 回収した粒径 5-13mm の骨材を配合した混合物の評価

4.3.1 実験概要

既往研究において，旧アスファルトの被膜した 5-13mm の再生骨材を配合した再生混合物は 0~10°C 近辺で脆弱性を示すことを確認している⁷⁾．そこで，SR5-13_m を配合した再生混合物の品質を評価し，RAP_m から回収した骨材の熱水すりもみ法による再利用を検討した．供試体は，SR5-13_m を 30% 配合した再生混合物（以下，SR5-13_m(30)），比較として R5-13_m を 30% 配合した再生混合物（以下，R5-13_m(30)），および新規混合物の 3 種類とした．各供試体の配合と名称を表-4.4 に示す．混合物の評価は，曲げ試験による温度と曲げ強度の関係により行った．試験温度は，-10，0，5，10，および 20°C で実施した．なお，回収骨材の配合設計の際，圧裂試験より，R5-13_m および SR5-13_m を配合した混合物には再生用添加剤は不要であることを確認した．

表-4.4 配合率

配合率 (%)		各供試体名称		
		SR5-13 _m (30)	R5-13 _m (30)	新規混合物
O.A.C.		5.1	4.8	5.0
粗骨材	5-13 mm	8.0	8.0	34.0
	2.5-5 mm	21.0	22.0	22.0
砕砂		23.5	26.0	30.5
粗砂		11.0	8.0	7.5
フィラー		6.5	6.0	6.0
SR5-13 _m		30.0		
R5-13 _m			30.0	

4. 3. 2 回収した骨材を配合した混合物の評価

温度と曲げ強度の関係を図-4.14に示す。既往研究⁷⁾と同様、旧ポリマー改質アスファルトを含有した再生骨材を配合しているR5-13_m(30)の曲げ強度は、0~10°Cで大幅に減少しており、混合物としての脆弱性を示した。一方、回収した骨材を配合したSR5-13_m(30)の曲げ強度は、-10~5°Cにおいて、新規混合物より少し小さいものの、0~10°Cにおいては、R5-13_m(30)より大きく、5-13mmの再生骨材を配合した再生混合物に見受けられる大幅な減少はなく、10~20°Cでは新規混合物と同程度の曲げ強度を確認した。

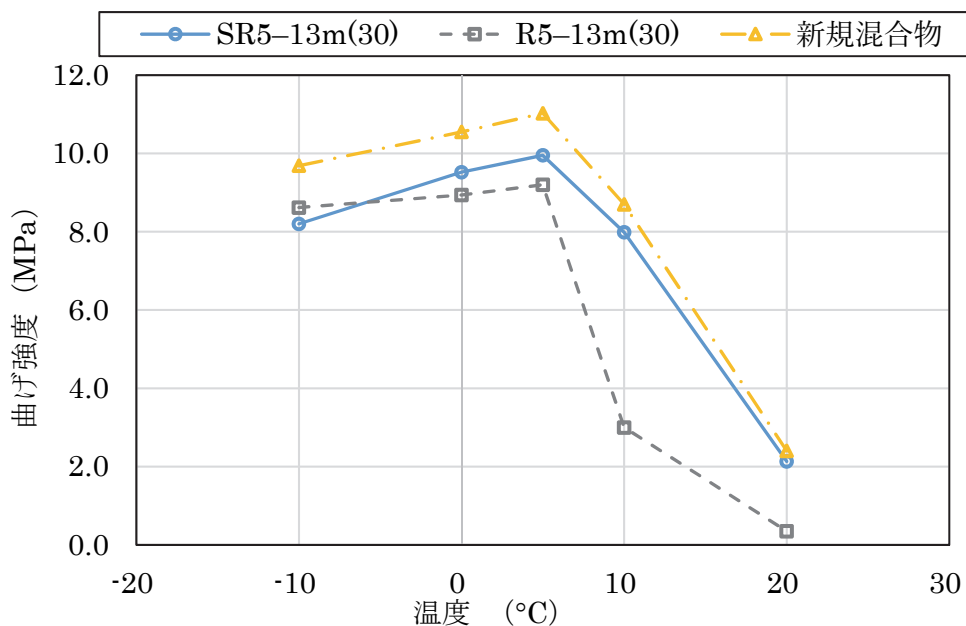


図-4.14 温度と曲げ強度の関係

以上より、熱水すりもみ法により回収した骨材を配合した再生混合物は、現行の再生方法による再生混合物と比較して、ひび割れへの抵抗が回復する可能性を示した。

4.4 高温高圧水によるアスファルトの性状回復

4.4.1 実験概要

水を媒体とした分別再材料化技術を開発するにあたり，二次分別後の旧アスファルトを含有した SR0-1 の利活用を検討する必要がある．既往研究において SR0-1 を再生混合物に直接配合する検討もなされているが⁹⁾，本章では，高温高圧水を用いて旧アスファルトの性状を元の状態に戻すことを試みた．参考として，RAP_s から分別回収された SR0-1_s の性状を表-4.8 に示す．

表-4.8 SR0-1_s の性状（分別温度 80°C）

旧アスファルトの含有率 (%)	13.4
針入度 (0.1 mm)	12

RAP が含有する旧アスファルトは，「2章 2.3」で述べたように供用に伴う劣化と再生用添加剤による変質を内在し，さらにこれらの状態は繰返し利用に関連して蓄積されている．また，多様な添加剤を含有している可能性もあることから，均質な性状の旧アスファルトによる性状回復の検討は困難であると考えられる．

そのため，本検討では，初期の性状を均質かつ明確とするために新規ストレートアスファルト（60-80）（以下，Virgin）を薄膜状態で針入度を 20 まで強制的に熱劣化させた試料（以下，Degraded）を使用した．熱劣化前後のアスファルトの特性を表-4.9 に示す．

高温高圧水を使用して Degraded の性状を回復する検討は，

図-4.15 に示す手順に従って実施した。なお、本試験では、「3章 3.2」で示した使用した亜臨界水抽出装置と同じ試験機を用いた。

表-4.9 熱劣化前後のアスファルトの性状

	Virgin	Degraded
針入度 (0.1 mm)	65.0	19.7
伸度 (cm)	+100	27.3
軟化点 (°C)	46.9	53.4

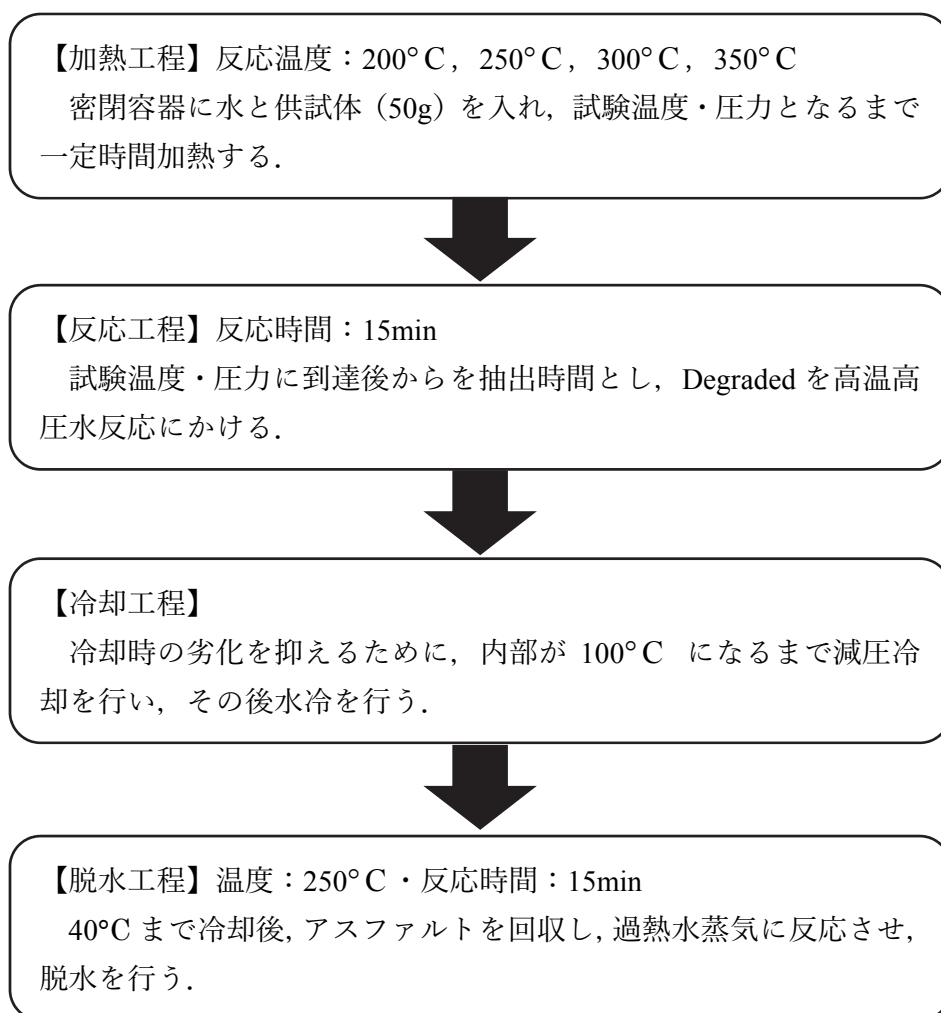


図-4.15 高温高圧水反応のフロー

高温高压水の温度と圧力は、予備実験からアスファルトの軽質化作用が期待できる 200°C 以上とし、臨界点以下の亜臨界水域である 350°C を上限として、各実験、それぞれの飽和水蒸気圧下で 200°C・1.55MPa, 250°C・3.98MPa, 300°C・8.59MPa, 350°C・16.5MPa の 4 通りに設定した。反応時間は、亜臨界水による予備実験から、改質効果が期待でき、かつ短時間である 10 分とした。なお、実験後の試料は、25%程度の水分を含んでいるため、図-4.15 の脱水工程では、過熱水蒸気によって酸化劣化を抑えながら迅速に乾燥させ、回収した試料を評価した。回収したアスファルトは、それぞれ 200°C, 250°C, 300°C, 350°C と称した。比較試験には、化学的性状として薄膜クロマトグラフ法 (TLC/FID 法) による構成成分比率、構成成分比率から算出したコロイダルインデックス (以下、Ic)、物理性状として、針入度試験、伸度試験を用い、各温度・圧力条件の高温高压水による Degraded の性状の回復効果を確認した。

4. 4. 2 回復したアスファルトの性状

(1) 化学的性状

構成成分比率を図-4.16に、式(1)によって算出した I_c を図-4.17に示す。構成成分比率は、Virgin と Degraded の比較から、熱劣化により芳香族分が大きく減少し、レジン分、アスファルテン分が増加する傾向を確認した。これに対し、250°C、300°C、350°C の構成成分比率は、Degraded に比べて芳香族分が増加し、アスファルテン分およびレジン分が減少する傾向を確認した。これらの傾向から、高温高圧水中での水熱分解反応によりアスファルトの高分子成分が減少する効果があると考えられる¹⁰⁾。

$$I_c = \frac{\text{飽和分} + \text{アスファルテン分}}{\text{芳香族分} + \text{レジン分}} \quad (1)$$

アスファルトの相溶性の評価の他に、変形追従性や靱性の評価としても有効である I_c は、Virgin と Degraded の比較から、熱劣化により増加する傾向を確認した。これに対し、高温高圧水により回復させた試料の I_c は、Degraded に比べて減少する傾向を確認した。

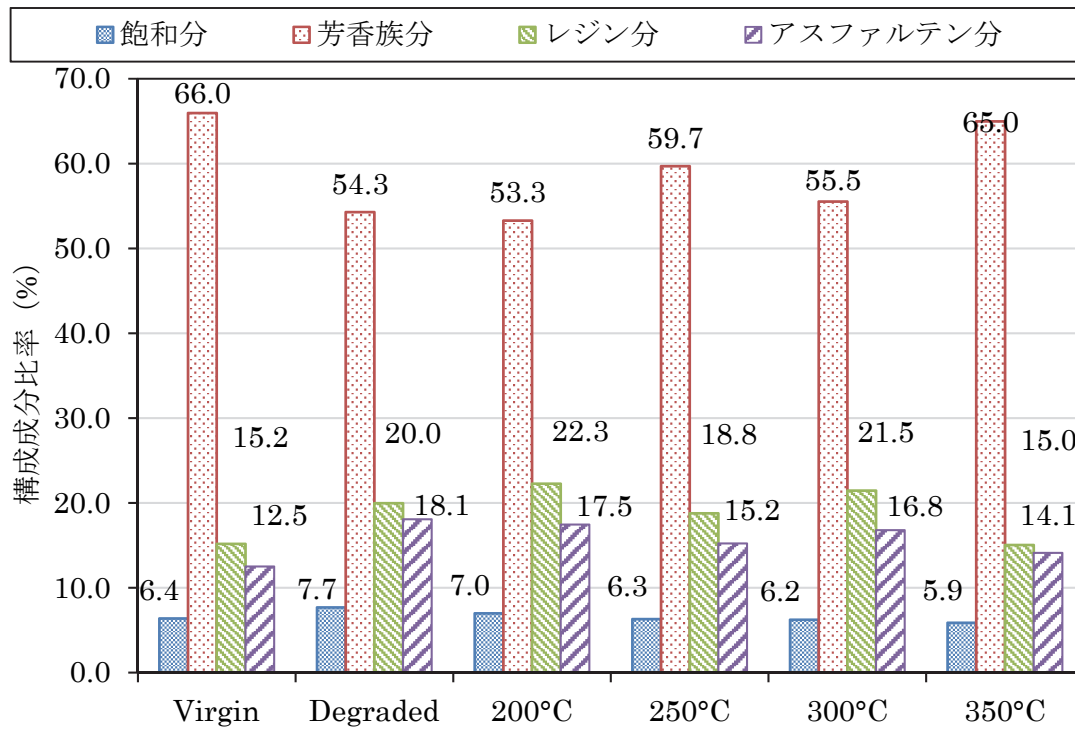


図-4.16 アスファルトの構成成分比率

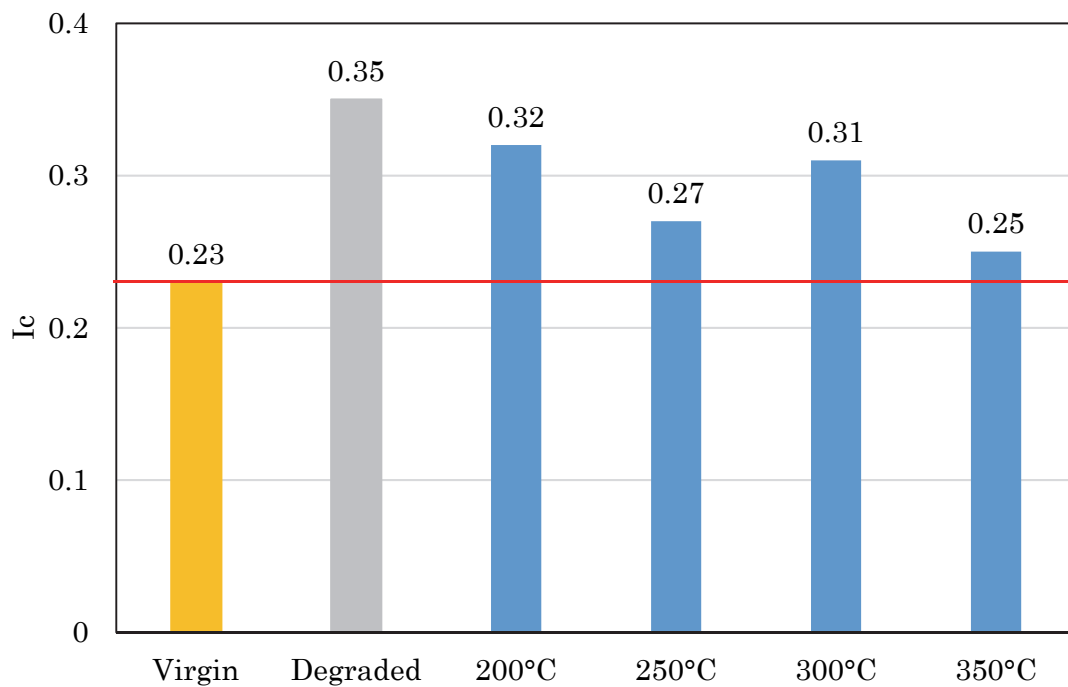


図-4.17 コロイダル・インデックス (Ic)

(2) 物理的性状

針入度を図-4.18に、伸度を図-4.19に示す。Degradedに対し、高温高圧水後の試料の針入度は温度上昇に伴って回復する傾向が見て取れる。また、針入度の最も回復した350°Cを用いて伸度試験を行った結果、新規ストレートアスファルト(60-80)の品質規格である100に近い95まで回復した。これにより、高温高圧水は、「2章 2.3.2」で示した、旧アスファルトの再生用添加剤を用いた繰返し利用による、延性の低下に対する課題を克服する技術である可能性を示唆した。

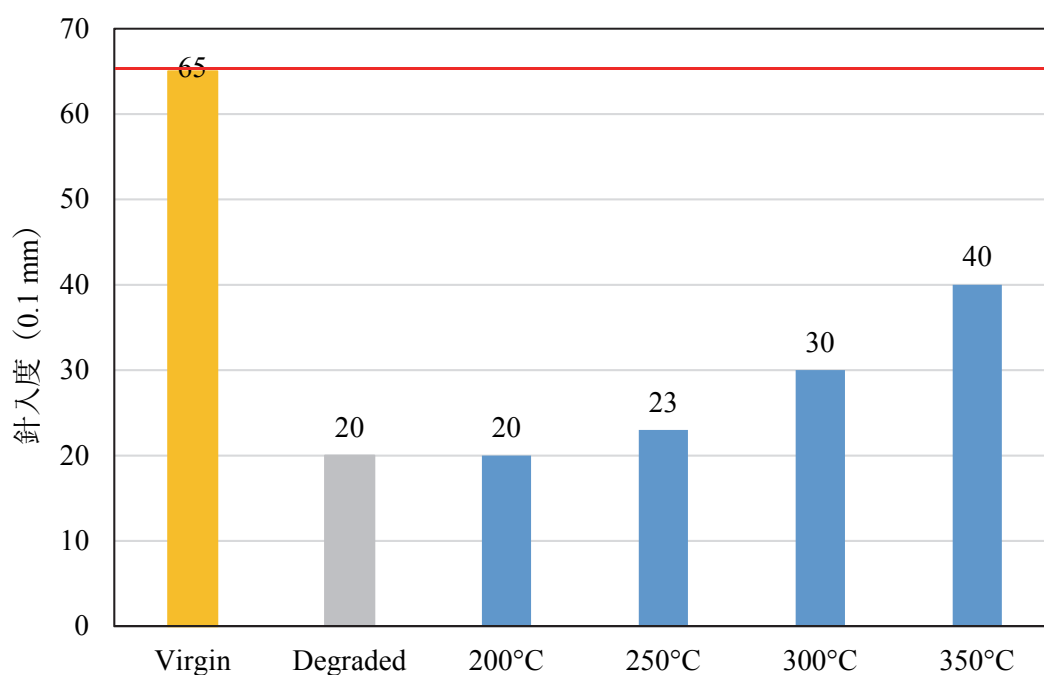


図-4.18 針入度

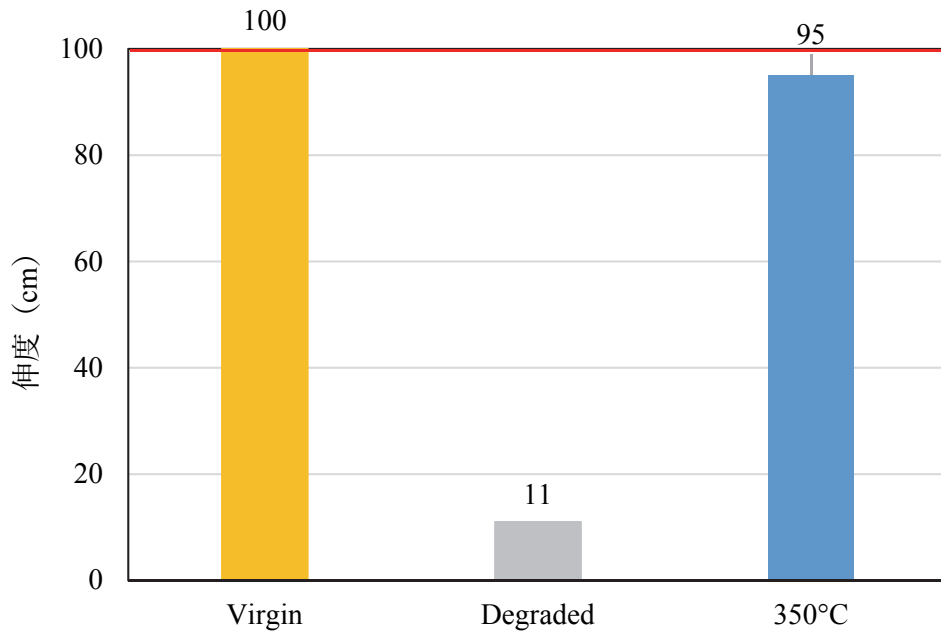


図-4.19 伸度

以上の結果から， 350°C の高温高压水反応のよって旧アスファルトの構成成分比率および I_c が概ね素材状態に復元すること，針入度，伸度においても回復の傾向が確認でき，劣化したアスファルトに対する性状回復技術への応用の可能性を確認した。

4.5 まとめ

本章では、RAPの持続的な循環利用を目的とした分別再資源化技術の開発に向けて、熱水すりもみ法の多様なRAPへの適用を確認するための、RAP_mから、骨材を分別回収し、回収した骨材の評価、回収した骨材を配合した混合物の評価を行った。また、熱水すりもみ法により分別回収した旧アスファルトの性状回復方法として、高温高压水による性状回復を提案し、その基礎検討を行った。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① RAP_mから80~90°Cの熱水すりもみ法によって分別回収した骨材は、旧アスファルトの含有率、微粒分量が大幅に減少し、各粒径に分別回収されており、また新規骨材の品質目標値を満足していることから、新規骨材と同様に厳密な品質管理の元、利用が可能であることを明らかにした。
- ② 回収した骨材を配合した混合物は現行の再生方法による再生混合物と比較して、ひび割れへの抵抗が大きい可能性を示唆した。
- ③ 350°Cの高温高压水反応を行うことにより、熱劣化によるアスファルトの構成成分比率およびI_cを新規アスファルトと同程度に復元できる可能性を示唆した。
- ④ 高温高压水の反応温度上昇に伴い、熱劣化したアスファルトの針入度が新規アスファルトに近似する傾向が確認でき、350°Cでは、伸度の大幅な回復も確認した。

以上より、筆者らの提案する分別再材料化技術は、多様なアスファルトを含有したRAPから、素材状態の13-1mm骨材

を回収することが可能である．また，1mm 通過分に濃縮して含有する旧アスファルトは高温高压水により，素材状態に復元する可能性があることを確認した．

【第4章の参考文献】

- 1) Kengo Akatsu, Yousuke Kanou, Shouichi Akiba :
SEPARATION RECYCLING TECHNOLOGY FOR
RESTORING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT ,
Journal of JSCE, 6 卷, 1 号, pp.110-117, 2018.
- 2) 国土交通省 : 建設副産物実態調査, 2012.
- 3) (一社)日本アスファルト協会 : ポリマー改質アスファルトの現状, アスファルト, Vol. 53, No. 226, pp.35-38, 2010.
- 4) (一社)日本アスファルト合材協会 : アスファルト合材統計年報 (各年度版).
- 5) 加納陽輔, 秋葉正一, 鎌田孝行, 菅野伸一, 佐藤克己 : 加圧熱水を用いたアスファルト混合物の剥離抵抗性評価試験の開発, 舗装工学論文集, 69 卷, 3 号, p. I_33-I_40, 2013.
- 6) 辻埜真人, 野口貴文, 北垣亮馬, 長井宏憲 : マイクロ波加熱を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリートに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 76 卷, 660 号, pp. 223-229, 2011.
- 7) 加納陽輔, 秋葉正一, 赤津憲吾 : アスファルト舗装発生材の分別再材料化技術に関する基礎的検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 72 卷, 3 号, p. I_61-I_68, 2016.
- 8) (公社)日本道路協会 : 舗装設計施工指針 (平成 18 年版), pp.227, 2006.
- 9) 赤津憲吾, 青柳佳祐, 加納陽輔, 秋葉正一 : 改質アスファルト含有発生材の分別再材料化に関する基礎的検討, 舗装, Vol. 54, No. 9, 2019.

- 10) 青山尚登, 粥川智生, 三好啓介, 新井博久: 超臨界水による重質原油改質技術, 第 60 回年会 (第 66 回研究発表会), A12, 2017.

第 5 章 劣化アスファルトに対する水熱分解法の回復効果の検討¹⁾

5. 1 概説

「4章 4. 5」で述べたように、80~90°Cの熱水を用いた熱水すりもみ法により、発生材から旧アスファルトの被膜を大幅に除去した1mm以上の骨材を回収できることを確認した。その一方で、旧アスファルトを濃縮して含有した1mm未満の微粒分は「2章 2. 3. 1 (2)」で述べたように、旧アスファルトの劣化が蓄積されており、持続的な循環利用に課題を残している。

そこで、筆者らは、亜臨界水域(200°Cから350°C)の高温高压水を用いた劣化アスファルトの再生を試みた。亜臨界水とは、「2章 2. 4. 1」で述べたように、超臨界水(374°C以上、22.1MPa以上)と比較して、温度と圧力の低い液体を示し、この高温高压水は有機化合物の分解や無害化の研究が進められている³⁾。著者らは、アスファルトの軟質化の可能性が期待でき、超臨界水より低温での取り扱いが容易な200°C、250°C、300°C、350°Cの高温高压水による“水を用いたアスファルトの再生”を検討した⁴⁾。供試体は、均質な試料による性状回復の評価を行うため、新規ストレートアスファルト(60-80)(以下、既報研究 St.As.)を強制的に劣化させたアスファルト(以下、劣化 As.)を用いた。高温高压水反応装置は、「3章 3. 2」で示した亜臨界水抽出装置と同じ試験機を用いた。また、反応時間は15分とした。各反応温度により回復した試料をそれぞれ、200(15)、250(15)、300(15)、

350(15)と称し，水熱分解法後の各試料の物理的性状を表-5.1に示す．その結果，劣化したアスファルトの性状は反応温度350°C・反応時間15分において，新規アスファルトの規格に近づくことを確認した．

表-5.1 既往研究における水熱分解法の効果（物理的性状）

4)

項目	既報研究 St.As.	劣化As.	200(15)	250(15)	300(15)	350(15)
針入度 (0.1mm)	既報研究 ORG	20.3	26.0	28.7	33.7	60.3
軟化点 (°C)	47.3	64.9	60.1	59.0	55.8	48.7
伸度 (cm)	100+	5.7	8.7	9.0	25.3	100+

しかしながら，反応温度350°C・反応時間15分が，劣化アスファルトを元の性状に回復させるのに最適な反応条件であるのか．ストレートアスファルトは原油の産地，採取時期や蒸留方法が異なれば，基本物理性状が同程度のストレートアスファルトでも化学的性状が異なることが知られており^{5),6)}，そのようなストレートアスファルトでも元の性状に回復させることが可能であるのか．現在，再生混合物に用いている再生用添加剤による劣化アスファルトの回復と比較して，高温高压水による回復の優位性はどのようなものなのか．仮に，高温高压水により回復させたアスファルトを混合物に適用した場合，混合物の評価として最も重要な疲労ひび割れ抵抗性や耐流動性については問題がないのか．以上のような課題が未解決であった．そこで，本研究では，既報研究⁴⁾で用いたス

トレートアスファルト（60-80）と異なる構成成分比率のスト
レートアスファルト（60-80）を劣化させ，前述した課題の検
討を実施した．

本章では，まず本研究で用いた高温高压水による水熱分解
法および実験概要について説明した．次に，水熱分解後のア
スファルトの針入度，軟化点，伸度による結果を示し，物理的
な性状を把握した．また，酸化劣化の評価に有効なデータの
得られる CI 値⁷⁾，構成成分比率，分子量分布による結果を示
し，化学的な性状を把握した．さらに，DSR 試験による動的
粘弾性状の結果を示し，混合物への利用の可能性を検討した．
なお，各性状とも新規アスファルト，劣化アスファルトに一
般的な再生用添加剤を添加したもの，市販の改質アスファル
トを比較試料として検討を実施した．

5. 2 水熱分解法

高温高压水の有する溶媒，熱分解，加水分解の相互作用は「2章 2.4.1」に示すとおりである．この特性を応用し，筆者らは，亜臨界域の高温高压水が劣化アスファルトを回復させる可能性が高いと考え，亜臨界域の高温高压水による劣化アスファルトの再生技術を水熱分解法と定義し，開発を試みた．以下に本研究で用いる水熱分解法を説明する．

水熱分解装置は既報研究⁴⁾と同様，「3章 3.2」で示した亜臨界水抽出装置と同じ試験機を用いた．水熱分解法はまず，1000mlの密閉容器内に試料（50g）と各反応温度の飽和水蒸気圧となる水量（水道水）を入れ，気泡のたまりがないことを確認した後に密閉する．密閉容器側面にアルミブロックヒーターを設置し，昇温速度 $3.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で各反応温度まで加熱する．各反応温度到達後からを保温時間とし，各反応時間まで保温する．試料の回収は高温で空気に触れることを避けるために，自然放冷（70～90分）により常温まで冷却した後，試料を容器から取り出す．なお，冷却後の試料は水分を含んでいるため，過熱水蒸気下（ $250^{\circ}\text{C}\cdot 5$ 分）で脱水・乾燥することで反応後の試料を回収した．

5.3 試験概要

5.3.1 試料条件

本研究で使用するストレートアスファルト（以下，ORG）を表-5.2に示す。また，劣化アスファルト（以下，AGI）は均質な試料とするため，既報研究と同様，舗装調査・試験法便覧（JIS K2207）を参考に，ORGを回転式薄膜加熱試験（RTFOT）で5時間，加圧劣化試験（PAV）で29時間反応させることよって針入度の目標値が20となるよう促進劣化した⁸⁾。なお，表-5.2に参考として既報研究⁴⁾によるストレートアスファルトの性状を併記した。これより，ORGは既報研究のストレートアスファルトと比較して，アスファルテン分，レジン分が多く，芳香族分が少ない特徴を有しており，物理的性状においても多少異なるアスファルトとなっている。

表-5.2 ストレートアスファルト（60-80）の性状

		本検討 (ORG)	既報研究 ⁴⁾	
針入度（25°C）	(1/10mm)	70	68	
軟化点	(°C)	46.0	47.0	
伸度（15°C）	(cm)	100(+)	100(+)	
トルエン可溶分	(%)	99.92	99.98	
引火点	(°C)	356	362	
薄膜加熱試験後の質量変化率	(%)	(-)0.02	(+)0.10	
薄膜加熱試験後の針入度比	(%)	63.2	70.0	
蒸発質量変化率試験後の針入度比	(%)	92	93	
密度	g/cm ³	1.037	1.035	
構成成分比率	飽和分	(%)	3.4	5.0
	芳香族分	(%)	64.6	66.0
	レジン分	(%)	17.2	16.3
	アスファルテン分	(%)	14.7	12.7

本章の水熱分解法の条件は既報研究⁴⁾を参考とし、反応温度を350°Cと、その近傍においてイオン積が低いが比誘電率が低く有機物の溶媒性能が高いと考えられる360°C、比誘電率が高いがイオン積が高く加水分解の性能が高いと考えられる340°Cとした。また、各反応温度での最適な反応速度を確認するために、反応時間は10・15・20分とした。比較試料として、ORG, AGI, AGIに再生用添加剤を用いて針入度60まで再生した再生アスファルト（以下、Pen60）、ポリマー剤（熱可塑性エラストマー）をストレートアスファルトに加熱混合し、軟化点や粘度を向上させた市販品のポリマー改質II型アスファルト（以下、Type 2）およびポリマー改質III型アスファルト（以下、Type 3）を用いた。なお、使用した再生用添加剤の性状は表-5.3に示す。

表-5.3 再生用添加剤の性状

動粘度 (60°C)	(mm ² /s)	1870	
引火点	(°C)	254	
薄膜加熱試験後の動的粘度比 (60°C)		1.3	
薄膜槓子試験後の質量変化率	(%)	-0.4	
密度 (15°C)	(g/cm ³)	1.0	
構成成分比率	飽和分	(%)	46.6
	芳香族分	(%)	48.2
	レジン分	(%)	5.2
	アスファルテン分	(%)	0.0

5. 3. 2 試験条件

各試料について、物理的性状、化学的性状、動的粘弾性状により確認した。

(1) 物理的性状

各試料の物理的性状に及ぼす影響を針入度、軟化点、伸度（15°C）より確認した。なお、各試験は舗装調査・試験法便覧（JIS K2207）に準拠した⁹⁾。

(2) 化学的性状

各試料の化学的性状に及ぼす影響を赤外吸光度、組成分析、分子量分布より確認した。

赤外吸光度は、フーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）を用いた全反射測定法（以下、ATR法）により測定した。ここでは、酸化劣化に伴う酸素含有官能基（カルボニル基）の増加に着目し⁷⁾、式（1）からカルボニル・インデックス（以下、CI）を求めて評価した。

$$CI = \frac{\log(I_{01}/I_1)}{\log(I_{02}/I_2)} \quad (1)$$

ここに、 I_1 および I_2 は、それぞれ 1700cm^{-1} 付近と 1600cm^{-1} 付近におけるピークスペクトルの透過率であり、 I_{01} および I_{02} は、それぞれ上記波数に対応するバックグラウンドの透過率である。

CI は、劣化に影響しない 1600cm^{-1} 付近（C=C 結合）のピーク高さと、劣化により増加する 1700cm^{-1} 付近（C=O 結合）のピーク高さとの比であり、酸化劣化の度合いを表す指標と

なる。なお、ピーク高さを算出するベースラインは、吸光度スペクトルの変曲点に設定した。

組成分析は、薄膜クロマトグラフ法（以下、TLC/FID法）（JPI-5S-70-2010）により構成成分比率を測定した¹⁰⁾。分子量分布は、ゲル浸透クロマトグラフィー（以下、GPC法）により相対的な分布の変化を評価した。GPC法の測定条件を表-5.4に示す。

表-5.4 ゲル浸透クロマトグラフィー法の測定条件

装置	LC-10ADvp（島津製作所）
検出器	屈折率検出器（島津製作所 RID-6A）
カラム	TSKgel GMH _{HR} -M（東ソー）
移動相	テトラヒドロフラン（THF）
移動相温度	40°C
移動相流量	1mL/min
濃度	1.1wt%
試料の量	20μL

なお、Type 2 および Type 3 は、含有するポリマー剤が試験機のカラムやロットに詰まる恐れがあるため、組成分析および分子量分布の測定は行っていない。

（3）動的粘弾性状

各試料の動的粘弾性状に及ぼす影響をダイナミックシアレオメータ試験（以下、DSR法）より確認した。なお、試験は舗装調査・試験法便覧（JIS K2207）に準拠した¹¹⁾。測定は、試験温度が 0～30°C では φ8mm の平行プレート、40～70°C では φ25mm の平行プレートを用い、試験条件として、角速度を 0.1～100rad/sec、ひずみを 10～70°C で 5%、0°C

で 2% に設定し実施した。測定後，複素弾性率 G^* ，位相角 δ ，疲労ひび割れ抵抗性の参考として $|G^*| \cdot \sin\delta$ ，耐流動性の参考として $|G^*|/\sin\delta$ を比較評価した¹²⁾。なお，動的粘弾性状は，各反応温度において，水熱分解法により針入度が最も回復したアスファルトを代表試料とし，比較試料とともに評価した。

5.4 試験結果

5.4.1 物理的性状

(1) 針入度

針入度の結果を図-5.1に示す。以降、各図表における反応後の試料の凡例は、反応温度に括弧書きで反応時間を付す(例えば、350°C・15分を350(15))。また、本研究で使用したストレートアスファルト(60-80)、改質II型アスファルトおよび改質III型アスファルトの基本性状に関する品質規格^{13),14)}を表-5.5に示す。これより、水熱分解後のアスファルトの針入度は、全ての反応条件においてAGIと比べ大幅に増加し、回復効果を確認できた。なお、Pen60に用いた再生用添加剤は、AGIを針入度60まで回復させている。一方、水熱分解後のアスファルトはORG, Pen60に及ばないものの、Type 2, Type 3と同程度の値となった。各反応条件における回復効果は、反応温度340°Cで反応時間20分、反応温度350°C, 360°Cで反応時間15分が最も効果があると認められた。ただし、反応温度340°Cにおいては、反応時間20分以降での針入度がさらに増加する可能性が考えられ、今後の検討課題である。

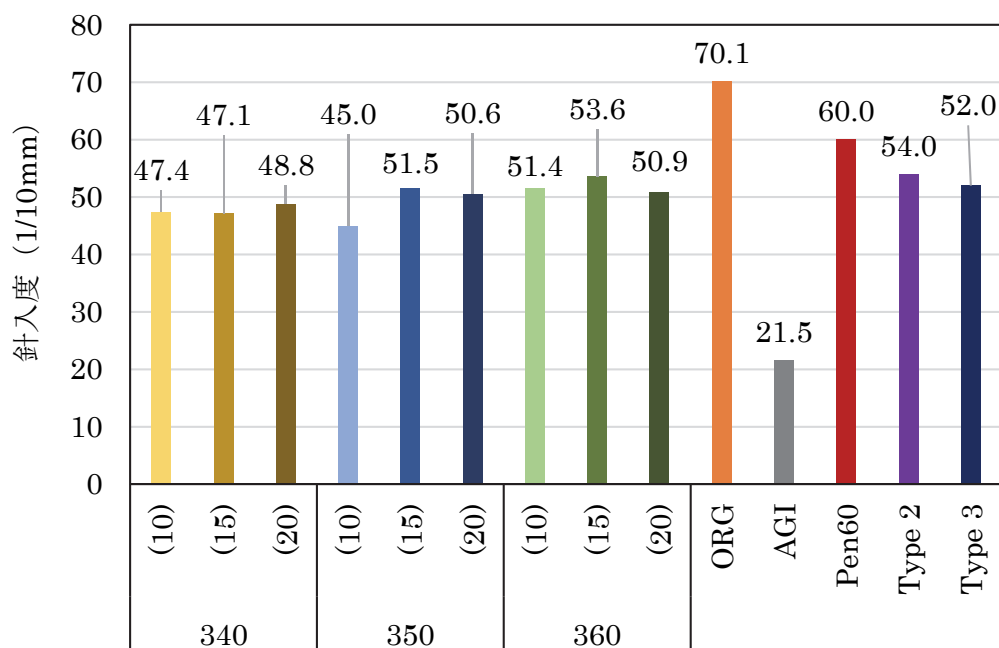


図-5.1 針入度

表-5.5 各アスファルトの品質規格

		ストレート アスファルト (60-80)	改質 アスファルト (Type 2)	改質 アスファルト (Type 3)
針入度 (25°C)	(1/10mm)	60~80	40~	40~
軟化点	(°C)	44.0~52.0	56.0~	70.0~
伸度 (15°C)	(cm)	100~	30~	50~

(2) 軟化点

軟化点の結果を図-5.2に示す。これより、水熱分解後のアスファルトの軟化点は、全ての反応条件においてAGIと比べ低下した。なお、Pen60に用いた再生用添加剤はAGIを軟化点49.5°Cまで回復させ、表-5.5に示すストレートアスファルトの規格値を満足させることを確認した。各反応条件における回復効果は、反応条件が異なってもあまり大きな差異が認められない結果となった。

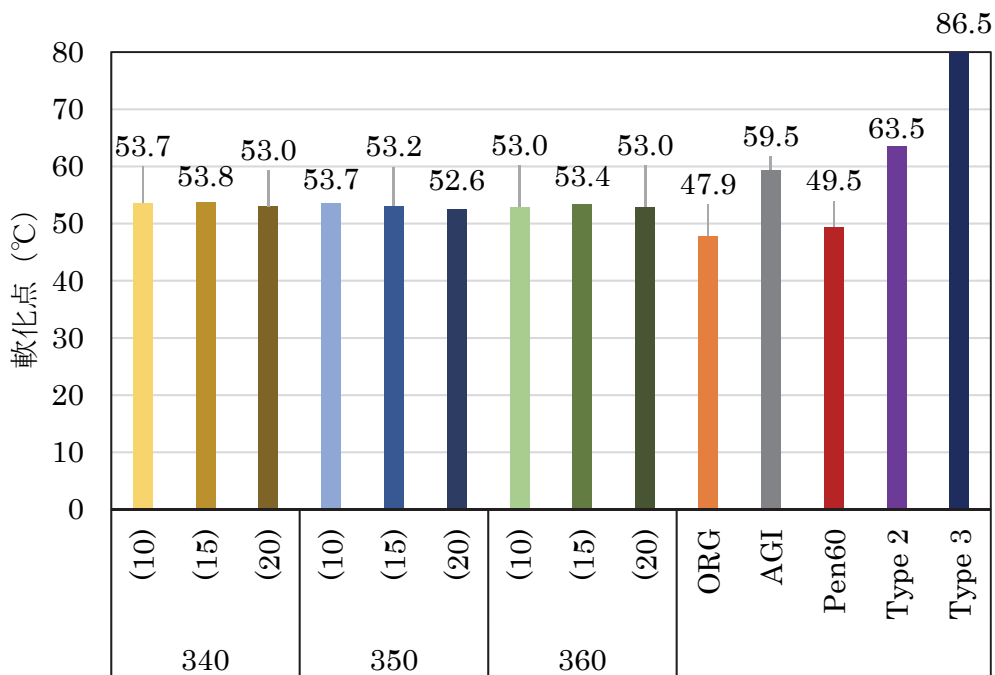


図-5.2 軟化点

(3) 伸度

伸度の結果を図-5.3に示す。これより、水熱分解後のアスファルトの伸度は、全ての反応条件においてAGIと比べ大幅に増加した。特に、340(20)は表-5.5に示すストレートアスファルトの規格値を満足する結果となり、水熱分解後のアスファルトは一部の条件において、ORG、Type 2、Type 3と同程度となった。一方、Pen60に用いた再生用添加剤は73となり、AGIより大幅に増加したものの、表-5.5に示すストレートアスファルトの規格値を満足する結果とはならなかった。各反応条件における回復効果は、反応温度340°C、350°Cで反応時間20分、反応温度360°Cで15分が最も効果があると認められた。ただし、反応温度340°C、350°Cにおいては、反応時間20分以降での伸度がさらに増加する可能性が考えられ、今後の検討課題である。

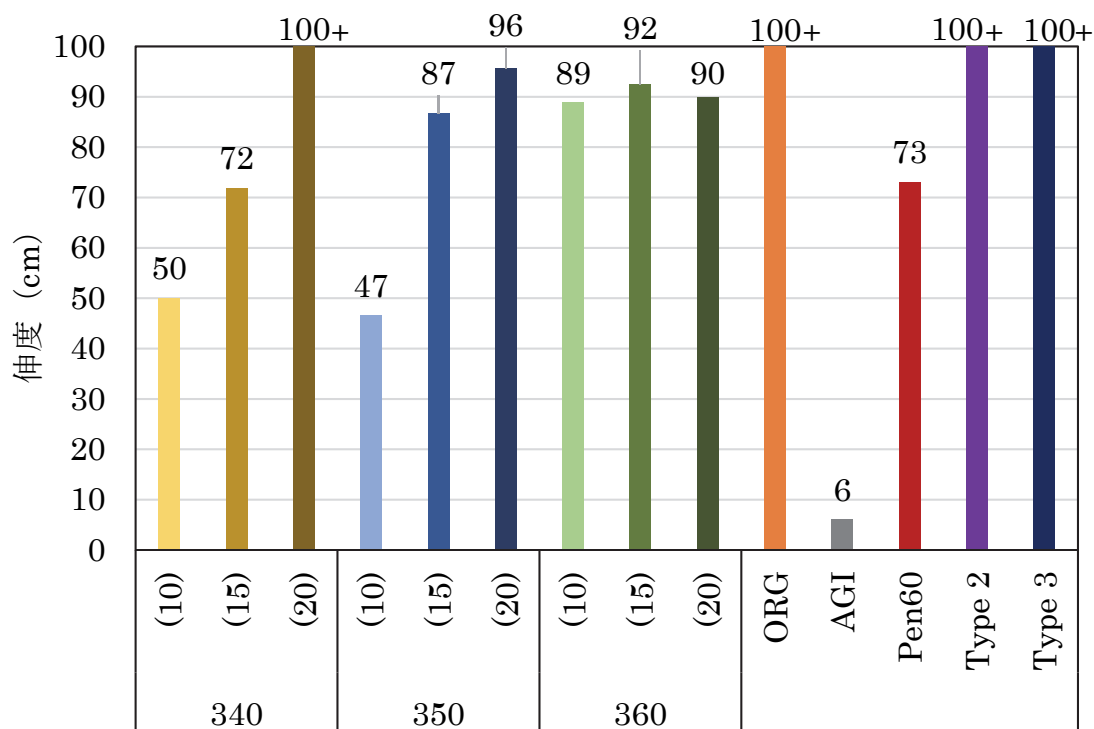


図-5.3 伸度

以上から，水熱分解後のアスファルトの物理的性状は，既報研究⁴⁾と異なるアスファルトを劣化させても大幅な回復傾向を示し，特に，針入度および伸度は改質アスファルトに近い結果となることを確認した．なお，既報研究の結果⁴⁾において，水熱分解法により回復したアスファルトの物理的性状は，新規ストレートアスファルト（60-80）の規格値を概ね満足するような結果が得られているのに対し，本実験ではそこまでの回復効果が得られていない．これは，原油の産地，採取時期や蒸留方法が異なれば，物理的性状が同程度のストレートアスファルトでも構成成分比率が異なるので，劣化過程が同じでも使用された元のストレートアスファルトが違えば回復効果が異なることを示した結果と考えられる．

5. 4. 2 化学的性状

(1) カルボニル・インデックス (CI)

酸化度合いを表す CI および参考として C=O 結合の量を表す波数 1700cm^{-1} のピーク高さを図-5.4 に示す。水熱分解後のアスファルトの CI は、全ての反応条件において AGI と比べ大幅に低下し、C=O 結合の量も CI と同様の傾向が見られた。これは、水熱分解法の有する溶媒、熱分解、加水分解の相互作用により、酸化還元反応が起こったために、アスファルトの酸化度合いが減少したものと考えられる。一方、Pen60 の CI は、AGI と大きな差異はない。これは、Pen60 は、再生用添加剤により AGI を軟質化させるが、アスファルトの劣化の原因の一つとされる酸化物の蓄積を減少させる効果がほとんどないことを示しており、これは繰り返し再生を行った場合に酸化物が蓄積する可能性があるという利用への課題となる。また、Type 2, Type 3 は、製造過程においてストレートアスファルトとポリマー剤を加熱混合する際に酸化劣化が生じ¹⁵⁾、CI が増加したものと考えられる。これより、水熱分解後のアスファルトは ORG と同程度まで回復しないものの、Type 2, Type 3 と同程度となった。各反応条件における回復効果は、反応温度 340°C , 350°C で反応時間 20 分、反応温度 360°C で反応時間 10 分が最も効果があると認められた。ただし、反応温度 340°C , 350°C においては、反応時間 20 分以降でも CI が低下する可能性が考えられ、今後の検討課題である。

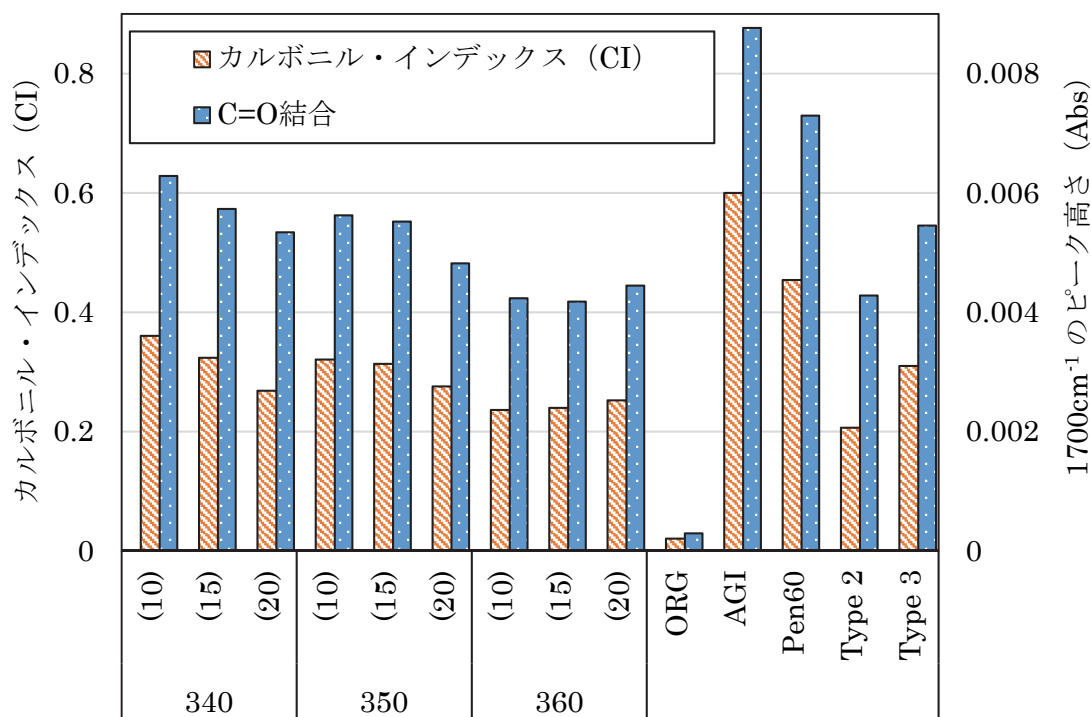


図-5.4 カルボニル・インデックス (CI)

(2) 構成成分比率

構成成分比率を図-5.5に示す。まず、AGIはORGと比べ、芳香族分が8.8%減少し、レジン分が8.7%増加した。これは、劣化により高分子成分（酸化物）が増加したことを示している。これに対して、水熱分解後のアスファルトの構成成分比率は、全ての条件において芳香族分が増加、レジン分が減少する回復の傾向を示した。これは、水熱分解法の有する溶媒、熱分解、加水分解の相互作用により、高分子成分が低分子成分に分解したためと考えられる。一方、Pen60の構成成分比率は再生用添加剤により、表-5.3に示すように飽和分、芳香族分を多く含む再生用添加剤を用いているため、AGIの芳香族分を相対的に増加させ、レジン分を減少させているものと考えられる。また、各反応条件において、アスファルテン分の

増加が見られる。これは、試験後の容器内には朱色に懸濁した水が見られ、開閉時に臭気があることから AGI が水熱分解中に、低分子成分が水に溶解、または気化したため、または、再重合したためアスファルテン分が増加した可能性が考えられる。また、既報研究⁴⁾では、水熱分解後のアスファルテン分は減少する結果となっているが、本実験結果より、この現象は全てのストレートアスファルトに起こるわけではないと思われる。これより、各反応条件における回復効果は、反応条件が異なってもあまり大きな差異が認められない結果となったが、水熱分解後のアスファルトは ORG に近似しないものの、芳香族分とレジン分の割合は Pen60 と同程度となった。なお、水熱分解によるアスファルトの減少は 5% 未満である。

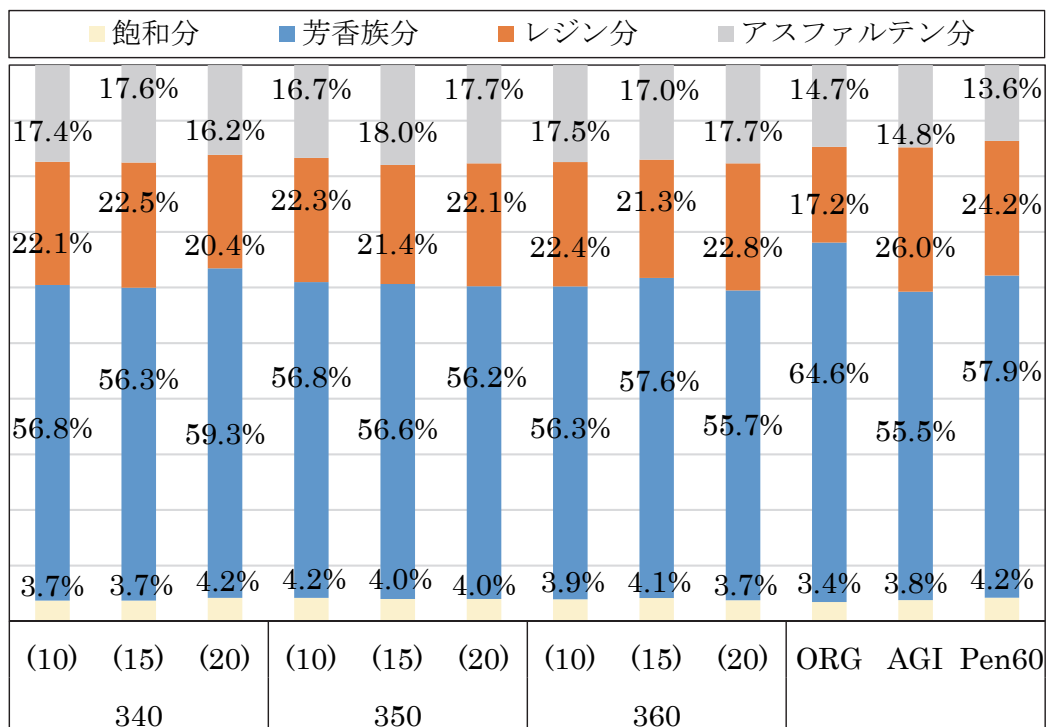


図-5.5 構成成分比率

(3) 分子量分布

各反応時間による分子量分布(MWD)の変化を図-5.6~8に示す。本試験による分子量の分布は500~100000の範囲にあるが、文献¹⁶⁾によれば、アスファルトの分子量は最大でも100000という結果が得られていることから、本試験結果は、概ねその範囲内にあり、妥当と考えられる。なお、各試料の特徴を明確にするため、分子量グラフのピーク付近を図中左上に、45000~100000の部分を図中右下にそれぞれ拡大して示した。まず、AGIはORGと比べて、ピークが低く、45000~100000の分子量が多く膨らみが認められる。これは、劣化により高分子成分が増加したことを示している。これに対して、水熱分解後のアスファルトの分子量分布のほとんどは、AGIに比べピークが高くなり、45000~100000の膨らみが減少し回復の傾向を示した。これは、水熱分解法の有する溶媒、熱分解、加水分解の相互作用により、高分子成分が低分子成分に分解したためと考えられる。一方、Pen60の分子量分布は、ピークが高いがORGと比べて右側にあり、45000~100000の膨らみはAGIに近いことを確認した。これは、AGIに再生用添加剤を混合すると、低分子が増加するが、劣化による酸化物の蓄積を減少させる効果がないことを示している。これより、水熱分解後のアスファルトの分子量分布はORGに近似しないものの、AGIおよびPen60に見られる高分子成分の増加が減少していることが確認できた。各反応条件における回復効果は、CIの結果と同様に反応温度340°C、350°Cで反応時間20分、反応温度360°Cで反応時間10分が最も回復した。

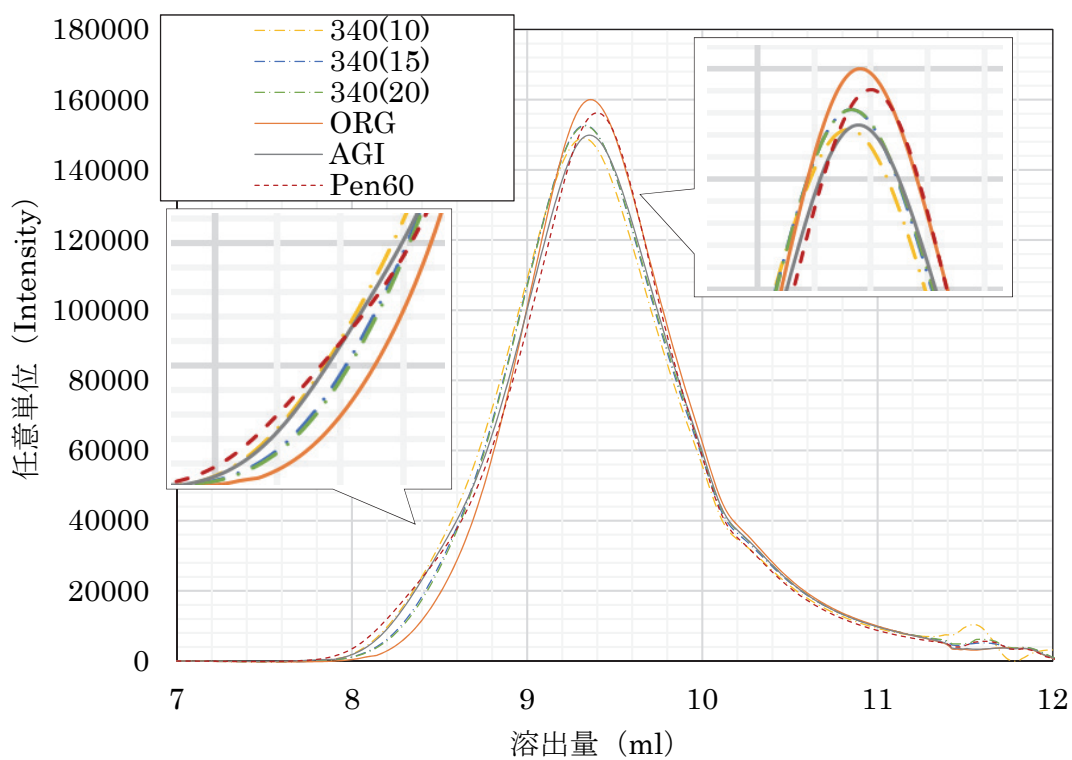


图-5.6 分子量分布 (340°C)

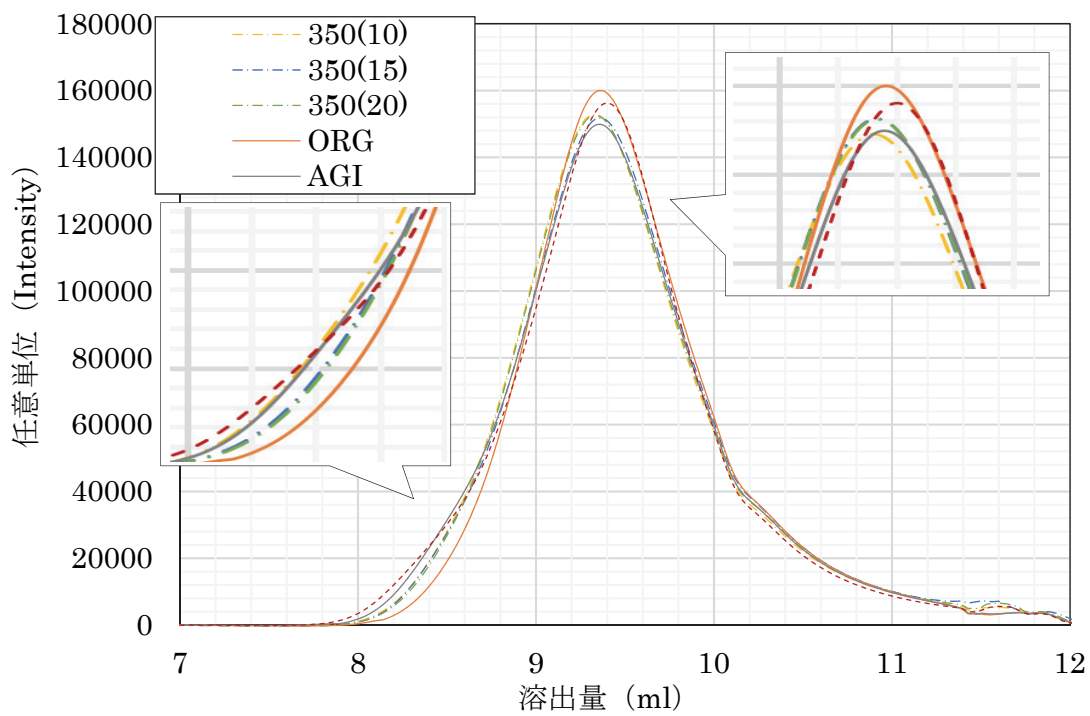


图-5.7 分子量分布 (350°C)

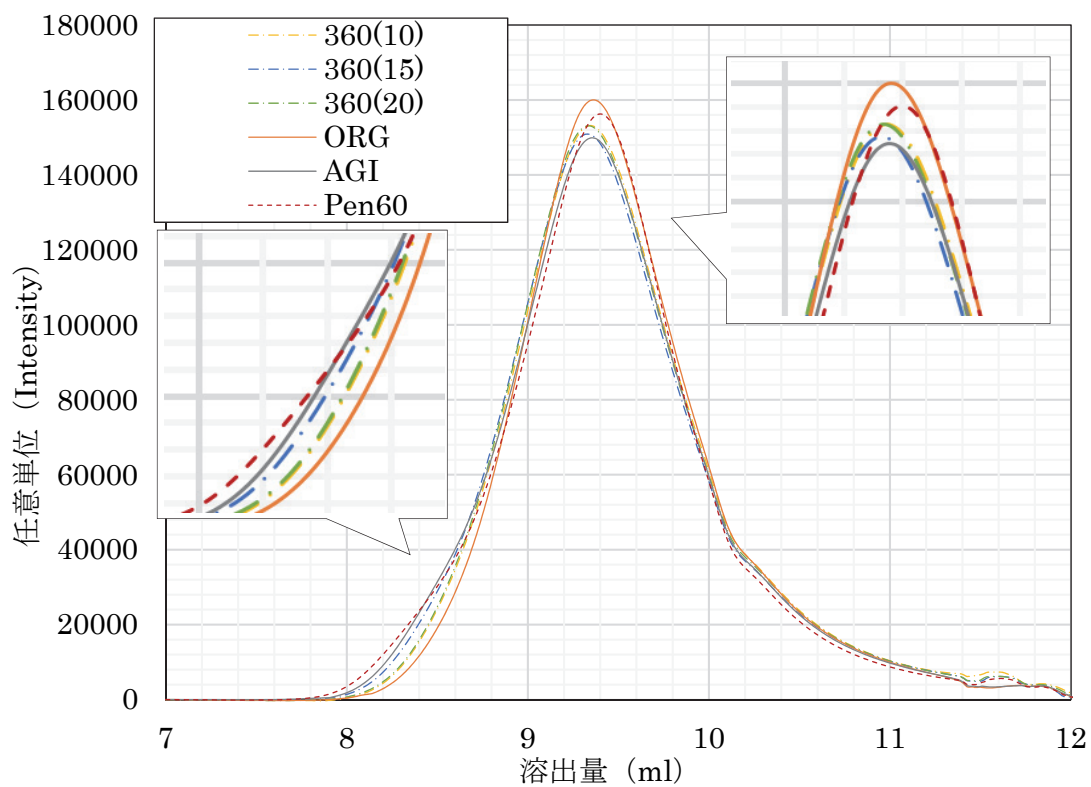
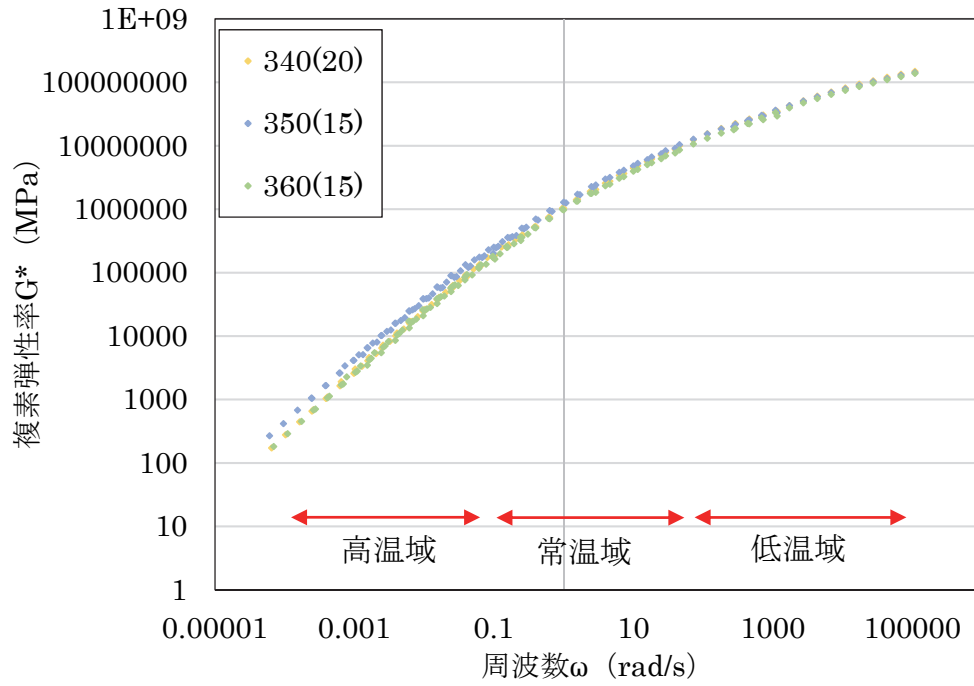


図-5.8 分子量分布 (360°C)

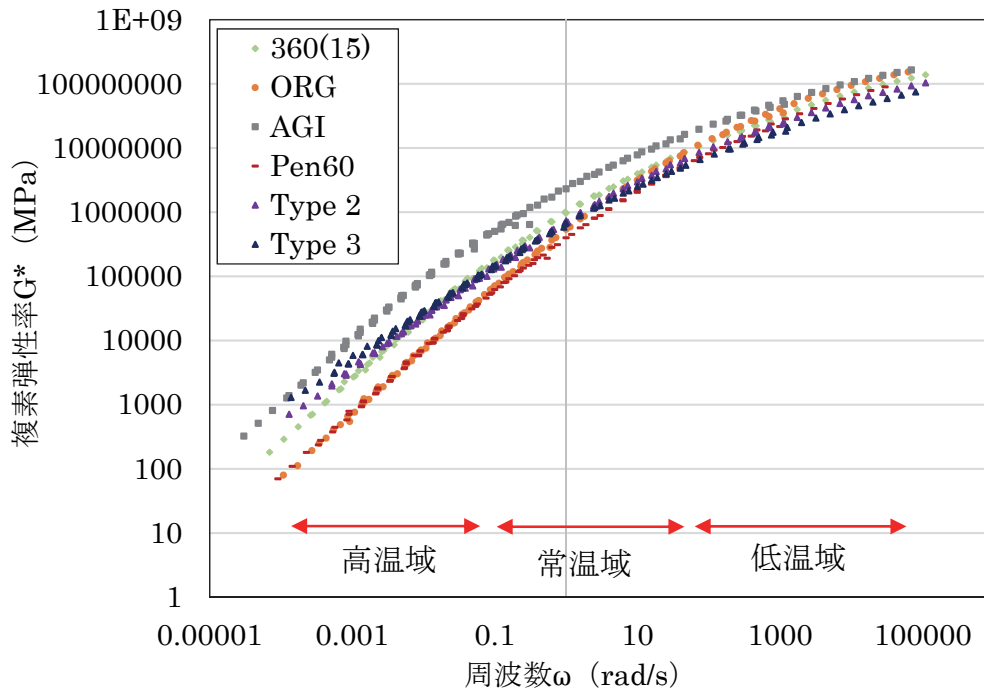
以上から、水熱分解後のアスファルトの化学的性状は、水熱分解法の有する溶媒、熱分解、加水分解の相互作用により、劣化により蓄積した高分子成分が低分子化することを確認した。一方、再生用添加剤により再生したアスファルトは低分子成分を添加して低分子化しているものの、再生後も酸化物を蓄積しており、持続的な循環利用に課題を残していることを確認した。

5. 4. 3 動的粘弾性状

時間温度変換則による複素弾性率のマスターカーブを図-5.9に、位相角のマスターカーブを図-5.10に、 $|G^*| \cdot \sin\delta$ のマスターカーブを図-5.11に、 $|G^*|/\sin\delta$ のマスターカーブを図-5.12に示す。なお、それぞれの図において、前述のとおり、水熱分解後のアスファルトは、各反応温度条件において、最も針入度が回復した340(20)、350(15)、360(15)を代表試料とし、水熱分解後のアスファルトの比較結果を(a)図、最も針入度の回復した360(15)を代表試料とし、各試料との比較結果を(b)図として示した。なお、各結果における、マスターカーブは20°Cを基準として、一つの曲線上となるよう、各試験温度による結果の周波数を左右にシフトさせることで作製しており、0.1~100rad/sより低周波数側が基準となる温度より比較的高温域の結果から得られた値、高周波数側が基準となる温度より比較的低温域の結果から得られた値となっている。そのため、本検討では、図に示すように低周波数域を高温域(およそ40~70°C)、中間周波数域を常温域(およそ20~40°C)、高周波数域を低温域(およそ0~20°C)と定義し、考察を試みた。

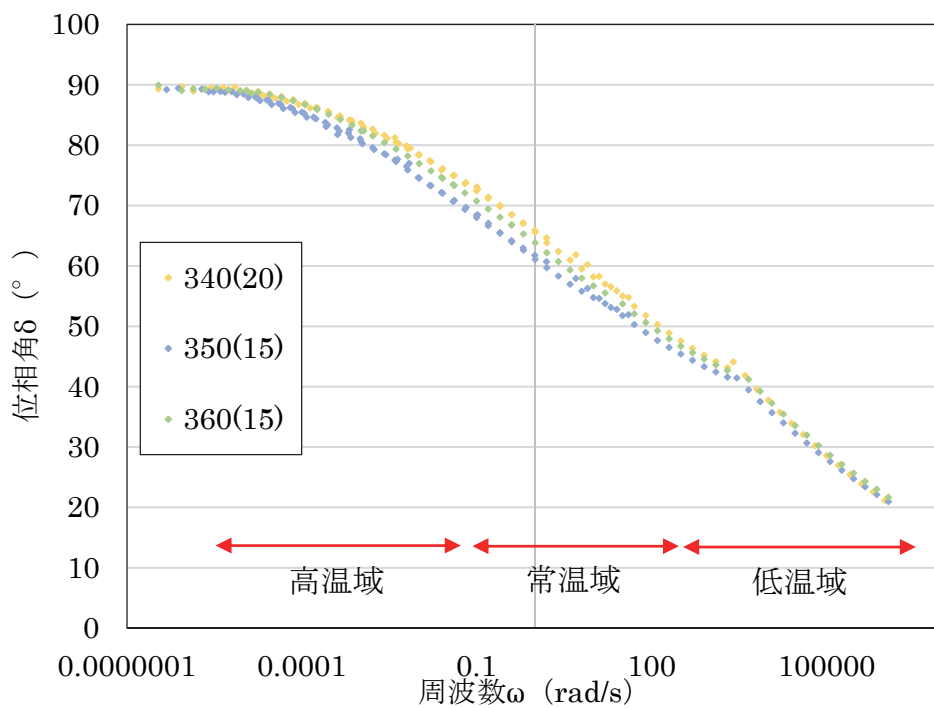


(a) 各反応温度で回復したアスファルトの比較

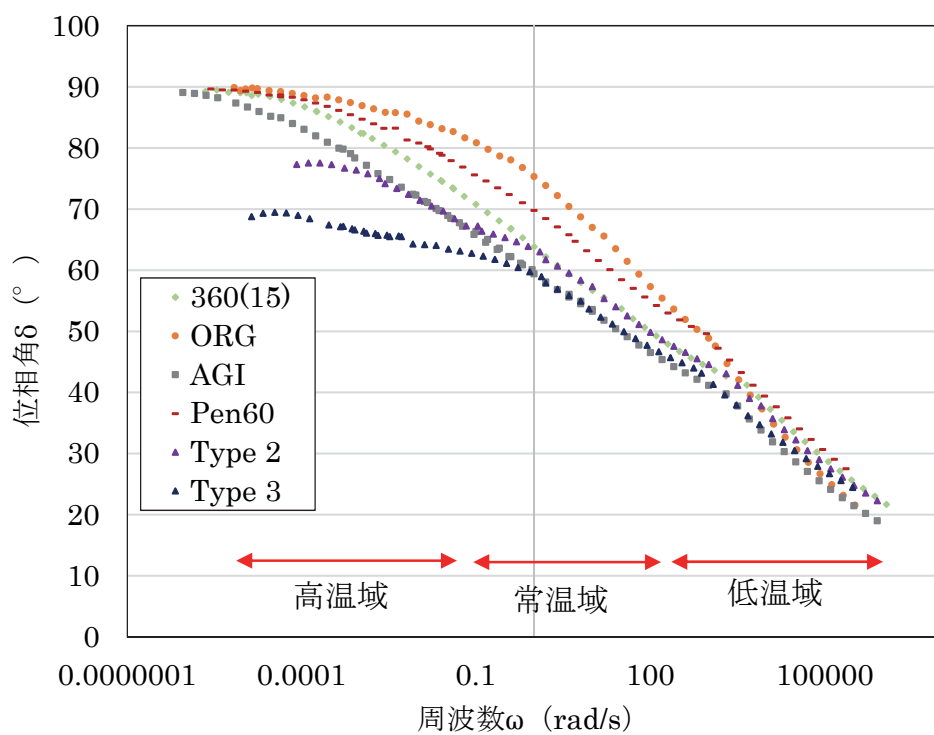


(b) 各種アスファルトの比較

図-5.9 複素弾性率 (G^*) のマスターカーブ

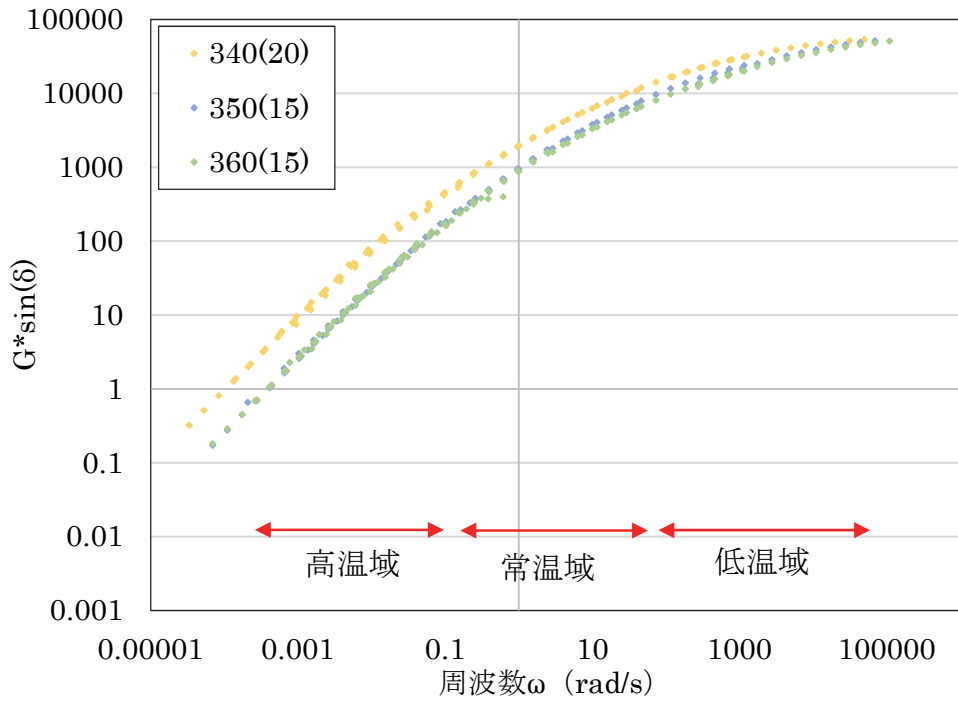


(a) 各反応温度で回復したアスファルトの比較

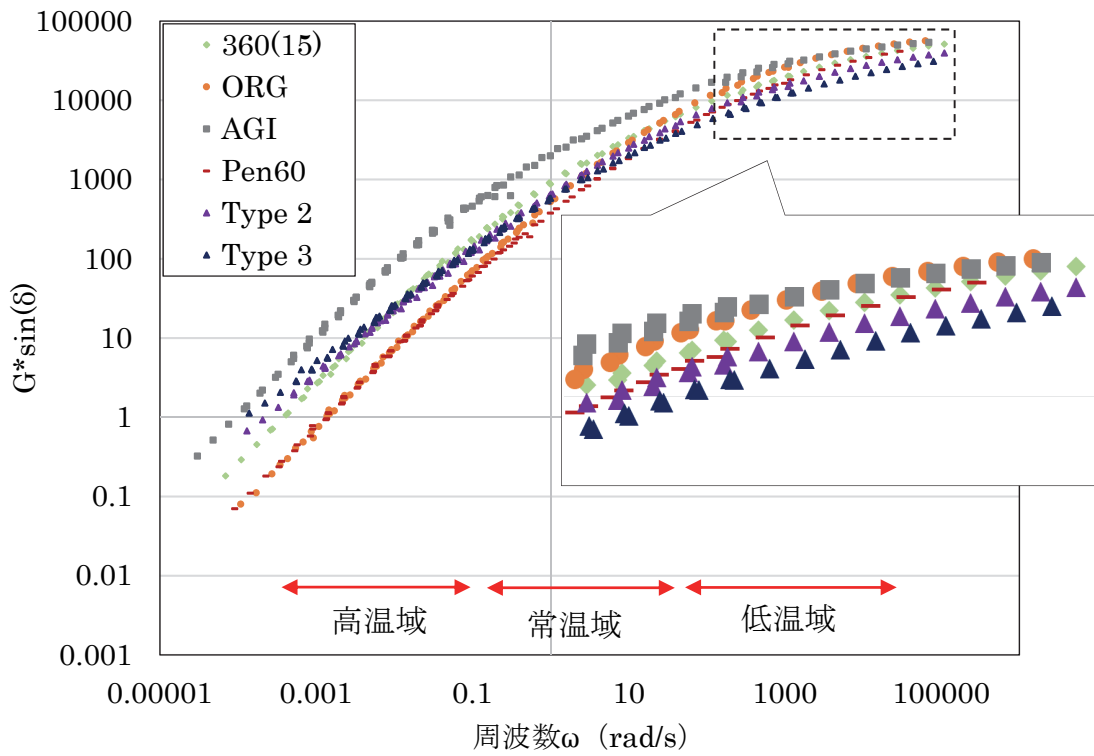


(b) 各種アスファルトの比較

図-5.10 位相角 (δ) のマスターカーブ

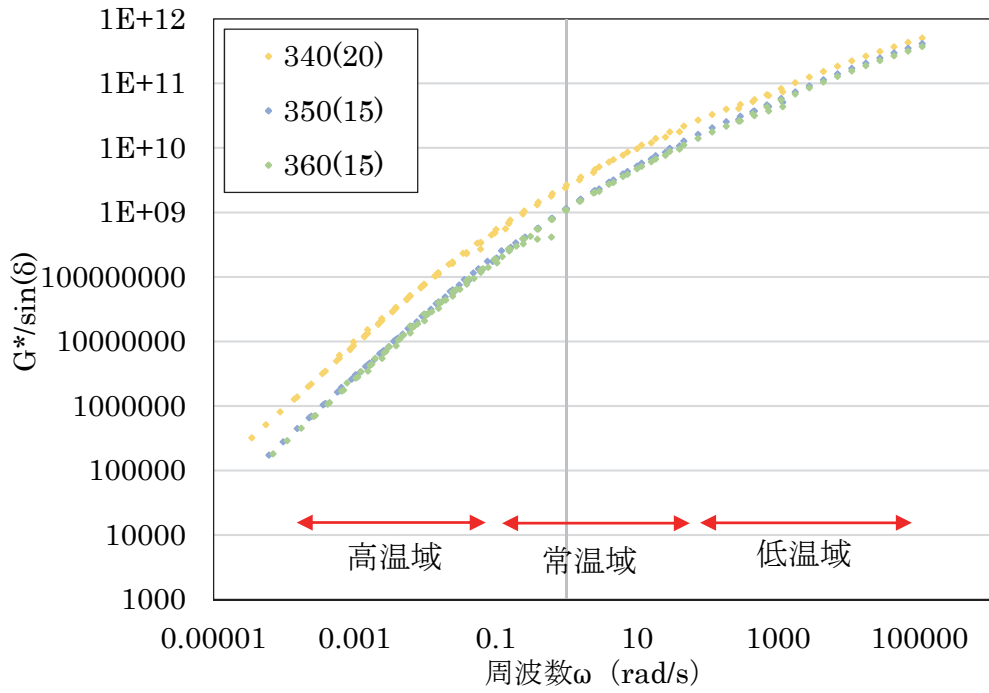


(a) 各反応温度で回復したアスファルトの比較

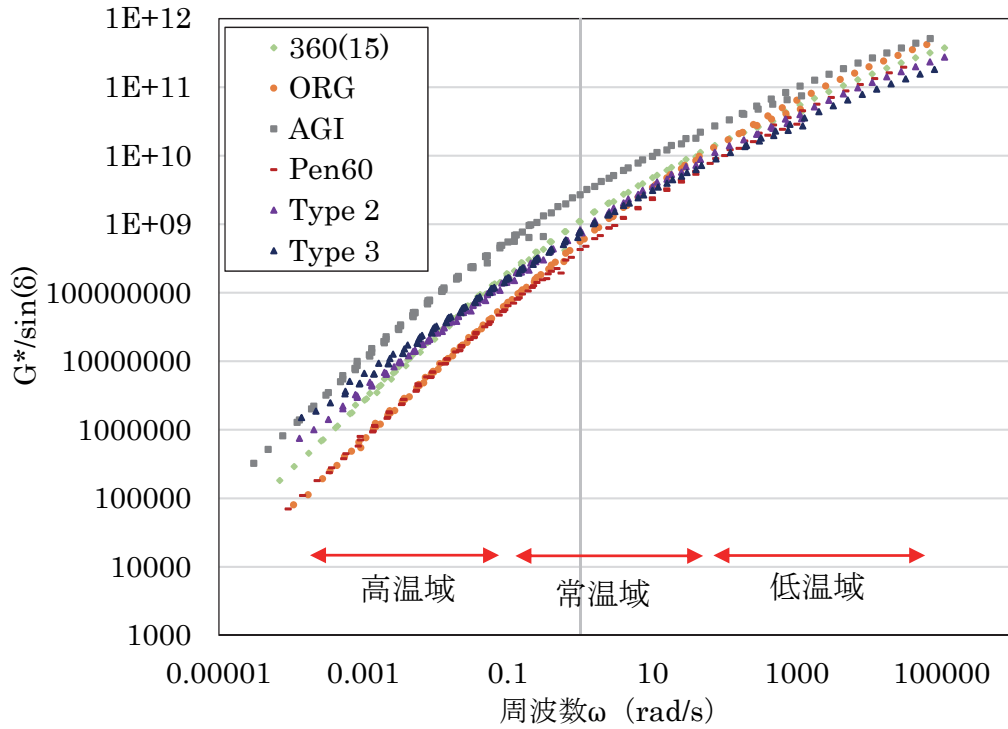


(b) 各種アスファルトの比較

図 -5.11 $|G^*| \cdot \sin \delta$ のマスターカーブ



(a) 各反応温度で回復したアスファルトの比較



(b) 各種アスファルトの比較

図-5.12 $|G^*|/\sin\delta$ のマスターカーブ

(1) 複素弾性率 (G^*)

図-5.9の複素弾性率の結果において、まず、(a)図より、高温域から低温域へと増加する傾向を確認した。これは、アスファルトが低温になるとともに硬化し、剛性が高くなることを示している。これより、同一周波数における各反応条件の剛性はあまり大きな差異が認められない結果となった。つぎに、(b)図より、AGIは全ての温度領域において同一周波数における剛性が他の試料と比べて大きい。ORGおよびPen60は全ての温度領域において剛性がほぼ等しく、高温域で同一周波数における剛性が他の試料の剛性と比べて小さい結果となっている。また、Type 2およびType 3は高温域ではORGとAGIの間の剛性を有しており、常温域および低温域ではORGとあまり差異のない剛性値となっている。そのため、Type 2およびType 3は高温域ではORGより硬く、常温域および低温域ではORGと同程度の剛性を有するアスファルトであるといえる。一方、水熱分解後のアスファルト360(15)は、全ての温度領域でType 2、Type 3と同程度の結果であった。

(2) 位相角 δ

図-5.10の位相角 δ の結果において、まず、(a)図より、位相角は高温域から低温域へと減少する傾向を示している。これは、高温域のアスファルトは粘性的性質が強く、低温になるとともに硬化し、弾性的性質が強くなることを示している。また、同一周波数における各反応条件の位相角は、常温域で多少の差が認められるものの、全体としてあまり大きな差異が認められない結果となった。つぎに、(b)図より、ORGおよびPen60の位相角は他の試料と比較し、全ての温度領域にお

いて、同一周波数で位相角が大きい。ただし、Pen60の常温域付近の位相角はORGより低くなっているが、これはPen60内に残存する劣化による酸化物が影響し弾性的性質を高めているものと考えられる。AGI, Type 2およびType 3は全ての温度領域において、他の試料より弾性的性質が強い。なお、Type 2およびType 3の高温域付近の位相角はAGIより低くなっているが、これは改質アスファルトに含有する熱可塑性エラストマーにより耐熱性が向上したため⁶⁾、高温域での弾性的性質が保たれ位相角を低下させたものと考えられる。一方、水熱分解後のアスファルト360(15)は、全ての温度領域において概ねPen60とAGIの間の位相角を示しており、水熱分解後のアスファルトはORGやPen60と比較して、弾性的性質の強いアスファルトであることを確認した。

(3) $|G^*| \cdot \sin \delta$

図-5.11の $|G^*| \cdot \sin \delta$ の結果において、 $|G^*| \cdot \sin \delta$ は混合物の疲労ひび割れ抵抗性と関連が深いものとして、Strategic Highway Research Program (SHRP, 米国戦略的高速道路プログラム)で提案している規格(SUPERPAVE)では、PAVによる劣化後のアスファルトに対し用い、混合物の供用による疲労ひび割れ抵抗性の評価を間接的に行っている¹¹⁾。本試験では各試料の劣化後のアスファルトの測定を行わず、水熱分解後の劣化アスファルトを再生させなければ混合物への利用が困難であるAGIおよび混合物への利用が既に行われているORG, Pen60, Type 2, Type 3と比較することで初期状態の疲労ひび割れ抵抗性を確認し、混合物の材料としての可能性を評価した。SHRPの試験結果によると、 $|G^*| \cdot \sin \delta$ が大

きいほど疲労ひび割れ抵抗性が低く，小さいほど疲労ひび割れ抵抗性が高いとしている¹¹⁾．なお，(b)図の図中には，混合物の疲労ひび割れ抵抗性と特に関連があるのは低温域であることから，低温域を拡大し，図中右下に示した．また，低温域の疲労ひび割れ抵抗性というのは，前述した通り，本研究では低温域 0~20°C としているので，SUPERPAVE のバインダー仕様を用いている BBR 試験による低温ひび割れ(-30~0°C)¹²⁾ではないので注意されたい．

これより，まず，(a)図より，各反応条件の $|G^*| \cdot \sin\delta$ について，全ての温度領域における 350(15)と 360(15)は，同一周波数での大きな差異が認められず，340(20)と比べて小さい．これより，350(15)と 360(15)は，340(20)より疲労ひび割れ抵抗性に影響する低温域での効果が高い結果となった．つぎに，(b)図より，AGI は全ての温度領域において，同一周波数における $|G^*| \cdot \sin\delta$ が高く，疲労ひび割れ抵抗性が他の試料と比べて低い結果となった．これは劣化により増加した酸化物が位相角を低下させたことから，延性が低下し，結果として AGI の疲労ひび割れ抵抗性を低下させたものと考えられる．ORG は高温域から常温域途中まで最も低い疲労ひび割れ抵抗性を有しており，低温域になるにつれ AGI と同程度の結果となっている．次に，Pen60 は，高温域から常温域で ORG と同程度の疲労ひび割れ抵抗性を有しており，低温域では AGI や ORG より疲労ひび割れ抵抗性の高い結果となっている．また，Type 2 および Type 3 は，常温域で ORG と Pen60 と同程度の疲労ひび割れ抵抗性を有しており，低温域になるほど疲労ひび割れ抵抗性が他の試料と比べてやや高くなる結果となっている．一方，水熱分解後のアスファルト 360(15)は，高温域から常温

域で Type 2, Type 3 と同程度の疲労ひび割れ抵抗性を有しており, 低温域では Pen60 と同程度の結果であった.

(4) $|G^*|/\sin\delta$

図-5.12 の $|G^*|/\sin\delta$ の結果において, $|G^*|/\sin\delta$ は $|G^*|\cdot\sin\delta$ と同様に, SHRP の規格に用いられ, 混合物の耐流動性との関連が深いとされている¹⁷⁾. こちらも, $|G^*|\cdot\sin\delta$ のように, 水熱分解後のアスファルトを各試料と比較することで初期状態の耐流動性を確認し, 混合物の材料としての可能性を評価した.

これより, $|G^*|/\sin\delta$ が大きいほど耐流動性が高く, 小さいほど耐流動性が低いとしている¹⁸⁾. まず, (a)図より, $|G^*|\cdot\sin\delta$ と同様, 全ての温度領域において 350(15)と 360(15)は, 同一周波数での大きな差異が認められず, 340(20)と比べて小さい. これより, 350(15)と 360(15)は, 340(20)より耐流動性に影響する高温域での効果が低い結果となった. つぎに, (b)図より, AGI は, 全ての温度領域において同一周波数における $|G^*|/\sin\delta$ が高く, 耐流動性が他の試料と比べて高い結果となった. これは劣化により増加した酸化物が位相角を低下させ, 結果として AGI の耐流動性を向上させたと考えられる. ORG および Pen60 は高温域において耐流動性がほぼ等しく, 同一周波数における耐流動性は, 他の試料と比べて低い結果となっている. また, Type 2 および Type 3 は高温域で ORG と AGI の間の耐流動性を有する結果となっている. 一方, 水熱分解後のアスファルト 360(15)は, 高温域で Type 2 および Type 3 と同程度の耐流動性状を有する結果であった.

以上から，水熱分解後のアスファルトの動的粘弾性状は，位相角こそ改質アスファルトに含まれる熱可塑性エラストマーの影響により高温域で大きく異なるものの，常温域から低温域において改質アスファルトと近い性状を有している．また，疲労ひび割れ抵抗性の参考となる $|G^*| \cdot \sin\delta$ は，常温域で改質アスファルトと同程度，低温域で **ORG** および **AGI** より低く，**Pen60** と同程度なり，耐流動性の参考となる $|G^*|/\sin\delta$ は，高温域において **ORG** より高く，改質アスファルトと同程度となった．結果として，水熱分解後のアスファルトは **ORG** より高い動的粘弾性状を有していることを確認した．

5. 5 まとめ

本章では，高温高圧水による有機物の分解性能を用いた，水熱分解法による劣化したアスファルトの性状回復技術の開発に向けて，既報研究と異なる新規ストレートアスファルト（60-80）を強制的に劣化させたアスファルトを用い，多様なストレートアスファルトへの適用について確認した．また，水熱分解法後の試料について，物理的性状，化学的性状，動的粘弾性状を用いて，新規ストレートアスファルト（60-80），強制的に劣化させたアスファルトに一般的な再生用添加剤を添加したもの，市販の改質アスファルトと比較することにより，その特性を把握した．以下に得られた知見を示す．

- ① 水熱分解後のアスファルトは，反応温度 $350\sim 360^{\circ}\text{C}$ ・反応時間 15 分程度で各性状とも大幅に回復することを明らかにした．ただし，反応温度 340°C でも，反応時間増加に伴う回復の増加傾向が認められたことから，この温度における 20 分以上での検討を行う必要がある．
- ② 新規ストレートアスファルトは，原油の産地，採取時期や蒸留方法が異なれば，基本的な物理的性状に大きな差異が無くても分子構造が異なるので，劣化過程が同じでも水熱分解法による回復効果に差異が生じる可能性があることを確認した．
- ③ 水熱分解後のアスファルトは，水熱分解法の有する溶媒，熱分解，加水分解および相互作用により，劣化により蓄積した高分子成分が低分子化し，酸化物が酸化還元することを確認した．一方，再生混合物に用いている再生用添加剤

は低分子成分を増やすことで劣化したアスファルトのしなやかさを取り戻しているが、劣化により蓄積した酸化物の解消ができない。したがって、水熱分解後のアスファルトの利用は、再生用添加剤を用いた劣化アスファルトの再生利用と比べ、繰り返し利用に対して優位であることを確認した。

- ④ 水熱分解後のアスファルトは、疲労ひび割れ抵抗性の参考となる $|G^*| \cdot \sin\delta$ の低温域において、ORG より低く、再生用添加剤を用いて回復したアスファルトと同程度の性状回復効果が認められ、また、耐流動性の参考となる $|G^*|/\sin\delta$ の高温域において、ORG より高く、改質アスファルトと同程度の性状回復効果が認められ、再生混合物へ利用できる可能性があることを示唆した。

以上から、水熱分解後のアスファルトは反応温度 $350\sim 360^\circ\text{C}$ 、反応時間 15 分程度の反応条件で基本的な物理的性状において回復が期待でき、また、従来の再生技術と比較して、化学的性状において優位性があることを確認した。また、水熱分解後のアスファルトは動的粘弾性状より、再生混合物への利用の可能性を示唆した。

【第5章の参考文献】

- 1) Kengo Akatsu, Yousuke Kanou, Shouichi Akiba :
Recovering effect of hydrothermal decomposition on aged bitumen, 石油学会, 掲載予定.
- 2) Kengo Akatsu, Yousuke Kanou, Shouichi Akiba :
SEPARATION RECYCLING TECHNOLOGY FOR RESTORING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT ,
Journal of JSCE, 6 巻, 1 号, pp.110-117, 2018.
- 3) 岡島いづみ, 野口博徳, 佐古猛 : 超臨界水酸化による有機塩素化合物の分解・無害化, 廃棄物学会論文誌, 17 巻, 6 号, pp. 387-395, 2006.
- 4) 加納陽輔, 赤津憲吾, 秋葉正一 : 水熱分解法を応用した旧アスファルトの性状回復技術に関する基礎研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 74 巻, 3 号, pp. I_53-I_61, 2018.
- 5) (一社) 日本アスファルト協会 : 天然アスファルトと石油アスファルト, アスファルト, 39 巻, 191 号, pp. 1-33, 1997.
- 6) 中島滋夫, 出口隆宏, 斉藤章 : 熱可塑性エラストマーによるアスファルト改質, 日本ゴム協会誌, 72 巻, 1 号, pp. 10-18, 1999.
- 7) 川島陽子, 新田弘之, 西崎到 : FTIR/ATR によるアスファルト混合物の簡易劣化評価試験の検討, 舗装, No. 51, pp. 29-33, 2016.
- 8) (公社) 日本道路協会 : 舗装調査・試験法便覧, [2], 306-315, 2019.
- 9) (公社) 日本道路協会 : 舗装調査・試験法便覧, [2]145-172, 2019.

- 10) 石油学会 : JPI-5-S-70-2010, 2010.
- 11) (公社) 日本道路協会 : 舗装調査・試験法便覧, [2]335-345. 2019.
- 12) (一社) 日本アスファルト協会 : SUPERPAVE によるわが国のアスファルトの評価, アスファルト, 39 巻, 190 号, pp.10-18, 1997.
- 13) (公社) 日本道路協会 : 舗装設計施工指針, pp.222, 2006.
- 14) (一社) 日本改質アスファルト協会 : ポリマー改質アスファルト ポケットガイド, 2015.
- 15) 上坂憲一, 杉浦麻衣子, 山之口浩, 丸山暉彦 : ポリマー改質アスファルトの貯蔵時品質劣化に関する研究, 舗装工学論文集, 11 巻, pp.155-161, 2006.
- 16) Shell bitumen : The Shell Bitumen Handbook fifth edition, 2003.
- 17) 前原弘宣, 高橋修, 芥川直人 : 経年劣化によるアスファルトの性状変化とアスファルト混合物の疲労特性に関する研究, 舗装工学論文集, 12 巻, pp.73-81, 2007.
- 18) 新田弘之, 西崎到, 小長井彰祐, 伊藤正秀 : 再生ポーラスアスファルト混合物の諸性状と配合設計に関する検討, 舗装工学論文集, 10 巻, pp.233-240, 2005.

第 6 章 結 論

6. 1 結 論

わが国の舗装の 95%をアスファルト舗装が占めており、アスファルト舗装発生材の再生利用技術においても、さまざまな社会的背景や法的な後押し、および製造上の機械的な技術の進歩と相まって広く普及している。

しかしながら、アスファルト舗装発生材の製造量や再生混合物中に占める再生骨材配合率の増加に伴い、発生材に被膜している旧アスファルトの品質が低下していることなどが課題となっている。また、再生骨材の重要性が増す中、品質管理試験である、アスファルト抽出試験方法は、環境や人体への影響を考慮した代替溶剤が求められている。

これらを背景に、既往研究では、水の溶媒性能に着目した高温高压水によるアスファルト舗装発生材からの骨材分離回収の検討およびアスファルト抽出試験法の開発を試みている。その結果、アスファルト舗装発生材の分別再資源化技術への適用の可能性を示唆している。しかし、アスファルト舗装発生材の年間排出量は膨大であり、高温高压水反応プラントの各合材工場などへの配置はコスト面の課題がある。また、高温高压水によるアスファルト抽出試験法の開発においては、多種のアスファルトへの適用に課題を残している。

そのため、本研究では、実用化の可能性のある亜臨界水を抽出溶媒としたアスファルト抽出試験方法の確立を試みた。また、アスファルト舗装発生材の分別再資源化技術の開発として、常圧の熱水（80~90°C）を用いた「熱水すりもみ法」に

よる，ポリマー改質アスファルトを含有した舗装発生材からの骨材の分別回収，および，亜臨界水域の「水熱分解法」による，劣化アスファルトの回復効果の検討を試みた．

第 3 章で得られた知見は以下のとおりである．

- ① アスファルトの種類によっては，既報研究で実施した亜臨界水を用いた分離工程のみで抽出が行えないことを明らかにした上で，冷却工程において，水冷管を用いて 150°C まで冷却し，その後容器を水浸させることで測定精度の向上が図れることを示した．
- ② 分離工程のみで，目標とする目標精度 $\pm 0.3\%$ を得ることはできない．これは，骨材間隙中のアスファルト片によるものであったことから，分離工程終了後にアスファルト片の回収工程を加えることで，目標とする測定精度が得られることを確認した．
- ③ アスファルトおよび骨材配合の異なる各種のアスファルト混合物を対象とした測定精度の確認を行った結果，アスファルト混合物が異なっても測定精度に影響を与えず，亜臨界水法は多様な混合物の抽出試験としての適用できる可能性を確認した．
- ④ 再生骨材を対象とした抽出試験の検討を行い，再生骨材に適用可能である試験条件・試験方法を確認した．その結果，再生骨材のみを対象とした抽出試験では，骨材を加熱処理する試料調整を加えることで，良好な精度を得られることを示した．

第 4 章で得られた知見は以下のとおりである．

- ① 旧ポリマー改質アスファルトを含有した発生材から 80~90°C の熱水すりもみ法によって分別回収した骨材は、旧アスファルトおよび微粒分が大幅に除去されており、また新規骨材の品質目標値を満足していることから、新規骨材と同様に厳密な品質管理の元、利用が可能であることを明らかにした。
- ② 回収した骨材を配合した混合物は現行の再生方法による再生混合物と比較して、ひび割れへの抵抗が大きい可能性を示唆した。
- ③ 350°C の高温高压水反応を行うことにより、熱劣化によるアスファルトの構成成分比率および Ic を新規アスファルトと同程度に復元できる可能性を示唆した。
- ④ 高温高压水の反応温度上昇に伴い、熱劣化したアスファルトの針入度が新規アスファルトに近似する傾向が確認でき、350°C では、伸度の大幅な回復も確認した。

第 5 章から得られた知見は以下のとおりである。

- ① 水熱分解後のアスファルトは、反応温度 350~360°C・反応時間 15 分程度で各性状とも大幅に回復することを明らかにした。ただし、反応温度 340°C でも、反応時間増加に伴う回復の増加傾向が認められたことから、この温度における 20 分以上での検討を行う必要がある。
- ② 新規ストレートアスファルトは、原油の産地、採取時期や蒸留方法が異なれば、基本的な物理的性状に大きな差異が無くても分子構造が異なるので、劣化過程が同じでも水熱分解法による回復効果に差異が生じる可能性があることを確認した。

- ③ 水熱分解後のアスファルトは，水熱分解法の有する溶媒，熱分解，加水分解および相互作用により，劣化により蓄積した高分子成分が低分子化し，酸化物が酸化還元することを確認した．一方，再生混合物に用いている再生用添加剤は低分子成分を増やすことで劣化したアスファルトのしなやかさを取り戻しているが，劣化により蓄積した酸化物の解消ができない．したがって，水熱分解後のアスファルトの利用は，再生用添加剤を用いた劣化アスファルトの再生利用と比べ，繰返し利用に対して優位であることを確認した．
- ④ 水熱分解後のアスファルトは，疲労ひび割れ抵抗性の参考となる $|G^*| \cdot \sin\delta$ の低温域において，ORG より低く，再生用添加剤を用いて回復したアスファルトと同程度の性状回復効果が認められ，また，耐流動性の参考となる $|G^*|/\sin\delta$ の高温域において，ORG より高く，改質アスファルトと同程度の性状回復効果が認められ，再生混合物へ利用できる可能性があることを示唆した．

本研究より，以下のことが確認できた．

- ① 亜臨界水を用いたアスファルト抽出試験法は，多様な素材および混合物に対し，高い試験精度でのアスファルトの抽出が可能であり，環境に配慮した品質管理試験としての適用のできることを示した．
- ② 熱水すりもみ法は，旧ポリマー改質アスファルトを含有した舗装発生材から良質な骨材を回収できることを確認し，本技術は，多様なアスファルト舗装発生材から良質な骨材を回収できることを示した．

③ 水熱分解後のアスファルトは物理的性状において回復が期待でき、また、従来の再生技術と比較して、化学的性状において優位性があることを確認した。また、水熱分解後のアスファルトは動的粘弾性状より、再生混合物への利用の可能性を示唆した。

6. 2 今後の課題と展望

本研究により、まず、既往のアスファルト抽出試験法の代替となる、環境に配慮した亜臨界水によるアスファルト抽出法の適用の可能性を確認した。また、アスファルト舗装発生材の持続的な循環利用を目的とした再材料化技術として、熱水すりもみ法の多様な舗装発生材への適用の可能性、水熱分解法による劣化アスファルトの回復の可能性を確認した。これらの技術は、一般的な水道水を使用していることから、利用に必要なことは装置の設置のみであることから、普及は容易であると考えられる。

しかしながら、実用化を視座した中で、それぞれの技術において、以下の課題がある。

- ① 亜臨界水によるアスファルト抽出法は、再生骨材に適用可能な試験条件として試料調整を提案している。しかしながら、この工程は多少時間を要することから、更なる簡略化が可能であれば、より効率的な再生骨材のアスファルト抽出試験が行える。また、実用化に向け、試験機の自動化や、より正確かつ効率的な試験方法・条件の検討など、多くの試験実績を積む必要があると考えられる。
- ② 熱水すりもみ法により、旧アスファルトを含有した舗装発生材から回収した骨材において、旧アスファルトを濃縮して含有した 1mm 通過分の骨材の利用方法について検討する必要がある。
- ③ 水熱分解法を用いた場合に、さまざまな性状を有する劣化アスファルトに対して、一定の回復性状が得られるようにするため、触媒の利用を含めた反応手法の検討や、実用性

を考慮した試験機の改良などを検討する必要がある。また、水熱分解法の従来の再生技術との優位性を明確にするため、劣化と再生を繰り返したアスファルトの再生に関する検討を行う必要があると考えている。

本研究で得られた知見が今後の研究に活用され、持続的なアスファルト舗装発生材の再生利用が実現されることを期待する。

謝 辞

本論文の作成にあたり，日本大学生産工学部土木工学科・秋葉正一教授には，終始適切な助言，また懇切なご指導とご鞭撻を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

日本大学生産工学部土木工学科の渡部正教授，同大学環境安全工学科の鶴澤正美教授には，本論文の審査にあたり，貴重なるご教示とご指導を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

日本大学生産工学部土木工学科・加納陽輔准教授には，これまでの研究，試験，論文執筆など，さまざまなご指導とご鞭撻を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

大成ロテック株式会社技術研究所副所長・加納孝志様をはじめとした同研究所の皆様には，資材の調達や試験機の利用などのご支援を賜りました．国立研究開発法人土木研究所・新田弘之上席研究員，同研究所・川島陽子研究員をはじめとした同研究所の皆様には，アスファルトの化学的性状や動的粘弾性状の測定のための試験機の使用とご教授を賜りました．また，日本大学生産工学部土木工学科元非常勤講師・木下庄次先生，同大学同学科非常勤講師・野村健一郎先生には，研究に向かう姿勢への助言を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

日本大学大学院の修了生である大成ロテック株式会社・佐久間達也様，日本大学大学院・飯山和輝氏をはじめとした歴代の大学院生および卒業研究生には，研究の実働的なご協力を頂きました．ここに謹んで感謝の意を表します．

最後に，筆者の博士課程進学を支えて頂いた両親をはじめ，温かい言葉を掛けて頂いた家族・友人の皆様，お気に掛けて頂いた皆様に心から感謝申し上げます．

令和 2 年 2 月
赤津 憲吾