

**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**

加 納 孝 志

目次

第1章 序論

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 再生技術の現状および既往の研究

2. 1	発生材の再生利用の取り組み	12
2. 2	発生材および再生混合物・再生骨材の現状	16
2.2.1	アスファルト・コンクリート塊の再資源化率の推移	16
2.2.2	再生混合物の製造量の推移	17
2.2.3	再生骨材配合率の推移	18
2.2.4	再生回数の推計	19
2.2.5	旧アスファルトの針入度	20
2. 3	既往の研究	22
2.3.1	既往の研究	22
2.3.2	アスファルトの化学組成	26
2.3.3	アスファルトの構造	28
2. 4	まとめ	29
	【第2章の参考文献】	32

第3章 再生用添加剤の種類と添加量が繰返し再生したアスファルト

	の性状に与える影響	38
--	-----------	----

3. 1	概説	38
3. 2	実験概要	40
3.2.1	再生用添加剤の種類が再生アスファルトの性状に与える影響	40
3.2.2	再生用添加剤の使用量と繰返し再生したアスファルトの性状の関係	49
3. 3	試験結果	54
3.3.1	再生用添加剤の種類が再生アスファルトの性状に与える影響	54
3.3.2	再生用添加剤の使用量と繰返し再生したアスファルトの性状の関係	56
3. 4	考察	62
3. 5	まとめ	64
	【第3章の参考文献】	65

第4章 再生骨材配合率が繰返し再生したアスファルトと混合物

	の性状に与える影響	66
4. 1	概説	66
4. 2	実験概要	67
4.2.1	試験手順	67
4.2.2	使用材料	68
4.2.3	混合物の促進劣化方法	68
4.2.4	再生混合物の製造方法	69
4.2.5	回収アスファルトの評価試験	70
4.2.6	混合物性状の測定	74
4. 3	試験結果	75
4.3.1	アスファルトの性状	75
4.3.2	再生混合物の性状	83
4. 4	考察	85
4. 5	まとめ	87

【4章の参考文献】	89
第5章 再生用添加剤と再生骨材配合率がアスファルトと混合物の性状に与える影響	90
5.1 概説	90
5.2 実験概要	91
5.2.1 実験手順	91
5.2.2 使用材料	93
5.2.3 促進劣化方法	95
5.2.4 再生混合物の製造方法	96
5.2.5 アスファルトの物理・化学性状に関する試験	97
5.2.6 混合物の工学的性状に関する試験	97
5.3 試験結果	99
5.3.1 回収アスファルトの性状	99
5.3.2 再生混合物の工学的性状	102
5.4 考察	108
5.5 まとめ	109
【5章の参考文献】	111
第6章 結論	112
6.1 結論	112
6.2 今後の課題と展望	117
謝辞	120

Study on Asphalt Mixture Considering Repetitive Recycling

Takashi Kanou

The technology for recycling usage of reclaimed asphalt pavement (RAP) has been spread widely in 1980's and now, it is authorized in Japan. Along to this, the ratio of recycled asphalt mixture to total shipment of hot mix asphalt (HMA) was increased up to 75%. Also, the content of RAP in recycled asphalt mixture has been growing year by year, the average of RAP content in the local areas is became between 30% and 60%. From this reasons, RAP which has experienced recycling repetitively with highly ratio of RAP content is concerned to be increased in the future.

However, it is not found that the properties of repetitive recycled asphalt or recycled asphalt mixture, which compared with the property of virgin asphalt mixture, will be effected or not, including the extent of influence. And also the effects on the properties of recycled asphalt mixture. And also the effects on the properties of recycled asphalt mixture by the ratio of rap or by usage of rejuvenator are not clear.

The RAP is estimated to be recycled repetitively and continuously from now on. This study was conducted with aiming to present the suitable chemical composition of rejuvenator and the optimum ratio of RAP content, throughout the research of the effect on the properties of the repetitive recycled asphalt mixture with rejuvenator or the RAP content.

As the results, it is found that the properties of asphalt and HMA which is experienced aging and rejuvenation repetitively, would be influenced by the chemical composition of rejuvenator and the ratio of RAP content. Additionally, if considering of assumption the recycling HMA repetitively, it is necessary to take account of the chemical composition of rejuvenator to sustain the comparable high ratio of RAP. From this study, it is clear that rejuvenator which contains less saturates and more aromatics is suitable for repetitive recycling. And also, without considering the composition of rejuvenator, it would be suitable to surpass the ratio of RAP content for repetitive recycling.

第 1 章 序 論

1. 1 研究の背景

わが国では，1955 年（昭和 30 年）頃からの高度経済成長期に大量生産・大量消費型の経済構造が進展し，特に都市部で発生する”都市ゴミ”は急速に増加した¹⁾。また，同時期には社会資本が急速に整備され，都市開発に伴う建設廃材が大量に排出されるようになったが，同時に建設廃材等の不法投棄も増加し社会問題となった。このことを受け，1970 年（昭和 45 年）にそれまでの「清掃法」を改正し，「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」(以下，廃棄物処理法)が制定された。廃棄物処理法では，建設工事等で排出される廃棄物は「産業廃棄物」に指定され，排出事業者（施工者）が処理責任を負うこととなった。

建設工事の内，道路舗装に関しては，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 16.0%であったのに対し，15 年後の 1970 年には 78.5%に達し，高度経済成長期に舗装率が急速に上昇した²⁾。これに伴い，舗装の打ち換え工事も増加し，産業廃棄物である舗装発生材の発生量も急速に増加したが，①埋め立て地等の処分地の確保が困難になってきたこと，②廃棄物処理法の施行によって処分に制約が生じたこと，③1973 年（昭和 48 年）の第一次石油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

きたこと等を背景に舗装発生材，特に「アスファルト舗装発生材」（以下，発生材）の再生利用技術の開発・確立が求められるようになった³⁾。

このような社会的要請を受け，1970年代中頃から様々な研究機関や道路管理者において，発生材の再生利用に関する研究が始まり^{4)~8)}，1980~1990年代には舗装の再生技術に関する指針類の整備^{9)~13)}や新たな法律の施行^{14),15)}により本格的な再生利用が行われるようになった。現在では再生用添加剤や新アスファルトを用いて劣化した旧アスファルトの性状を回復させ，新規骨材を加えて再生混合物を製造する方法が一般的な技術として広く普及している。

再生利用技術の普及に伴い，加熱アスファルト混合物（以下，混合物）の全出荷量に占める再生加熱アスファルト混合物（以下，再生混合物）の割合は，1980年（昭和55年）の0.6%から年々増加し，1998年（平成10年）に50%に達した後，2014年（平成26年）には75.6%に達している¹⁶⁾。また，再生混合物中に占めるアスファルト・コンクリート再生骨材（以下，再生骨材）の割合である再生骨材配合率の全国の平均値は，統計の存在する1994年（平成6年）の29.9%から年々増加し，2014年（平成26年）には49.3%に達している¹⁶⁾。

アスファルト舗装の修繕サイクルは明らかになっていないが，仮にアスファルト舗装の更新周期を15年と仮定した場合，1988年から15年が経過した2003年（平成15年）以降の発生材の半分以上は，過去に1度以上再生されたことになり，さらに2018年（平成30年）以降の発生材の25%以上は過去

に 2 度以上再生されることとなる。このことから、今後は、再生骨材配合率が比較的高い状態で 2 回以上繰返して再生利用された発生材が増加してゆくこととなる。

以上のことから、現在、一般的な再生利用技術で繰返し再生された混合物の性能について問題があるか否か、再生用添加剤の性質や再生骨材配合率が繰返し再生されたアスファルトおよび再生混合物の性状に与える影響を確認し、より性状の変化が少ない再生方法を明らかにする必要がある。

1. 2 本研究の目的

本論文は，劣化と再生が繰り返されたアスファルトと混合物の性状の変化を実験的に確認し，現在まで行われてきた再生利用技術が再生混合物の性能に与える影響を体系的に整理し，現状の再生利用技術の問題の有無を明らかにすること，および再生が繰り返された場合でも再生混合物や再生アスファルトの性状の変化が少ない再生用添加剤の性質や再生骨材配合率を明らかにすることを目的として，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) 再生骨材が繰返し再生利用されることを前提とした場合，用いる再生用添加剤の性質と添加量について考慮する必要性の有無を確認することを目的に，再生用添加剤の性質および再生用添加剤の添加量が繰返し再生されたアスファルトの性状へ与える影響を確認する．
- (2) 再生骨材配合率が繰返し再生された混合物とアスファルトの性状へ与える影響を確認することを目的に，一般的に使用されている再生用添加剤を1種選定して再生骨材配合率を変化させた場合の再生混合物と再生アスファルトの性状を確認する．
- (3) 混合物を繰返し再生する場合に，混合物とアスファルトの性状変化の少ない再生用添加剤の性質（組成）と再生骨材配合率を提案することを目的に，組成の異なる数種の再生用添加剤等を用いて再生骨材配合率を変化させて再生混合物と再生アスファルトの性状を確認

する.

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 再生技術の現状および既往の研究

本章では，わが国におけるアスファルト舗装発生材のリサイクルの現状およびこれまでのアスファルト舗装発生材の再生利用に関する既往の研究について整理し，アスファルト舗装発生材を繰返し再生利用するにあたっての課題を示した．

第3章 再生用添加剤の種類と添加量が繰返し再生したアスファルトの性状に与える影響

現在，わが国では旧アスファルトの針入度などの性状を回復させるために用いる再生用添加剤についての規格がないことから，様々な成分を含む再生用添加剤が市販され使用されている．しかし，これらの再生用添加剤の性質が繰返し再生されたアスファルトへ与える影響は明らかとなっていない．

本章では，成分や性状の異なる市販されている数種の再生

用添加剤などを用いてアスファルトの状態での劣化と再生を繰り返す，再生用添加剤の種類が繰り返し再生されたアスファルトの性状に与える影響の有無を確認した。

第 4 章 再生骨材配合率が繰り返し再生したアスファルトと混合物の性状に与える影響

第 3 章の結果から，一般的に使用されている飽和成分を多く含む再生用添加剤を用いた場合，繰り返し再生されたアスファルトの性状は新規アスファルトと異なることが明らかとなった。

本章では，飽和分を多く含む再生用添加剤を用いて，再生骨材配合率を変化させて混合物の状態での劣化と再生を繰り返す，再生骨材配合率が再生アスファルトおよび再生混合物の性状に与える影響を確認した。

第 5 章 再生用添加剤と再生骨材配合率がアスファルトと混合物との性状に与える影響

第 3 章および第 4 章の結果から，繰り返し再生されたアスファルトと混合物の性状は，再生用添加剤の組成と再生骨材配合率の影響を受けることが明らかとなった。

本章では，組成の異なる数種の再生用添加剤等を用いて，再生骨材配合率を変化させて混合物の状態での劣化と再生を繰り返す，再生用添加剤等の種類および再生骨材配合率が再生アスファルトおよび再生混合物の性状に与える影響を確認した。その結果から，現在の再生利用技術の問題の有無を明らかに

し，混合物が繰返し再生されることを考慮した場合に性状変化が少ない再生用添加剤の性状と再生骨材配合率を提示した．

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，今後の課題と展望を提示した．

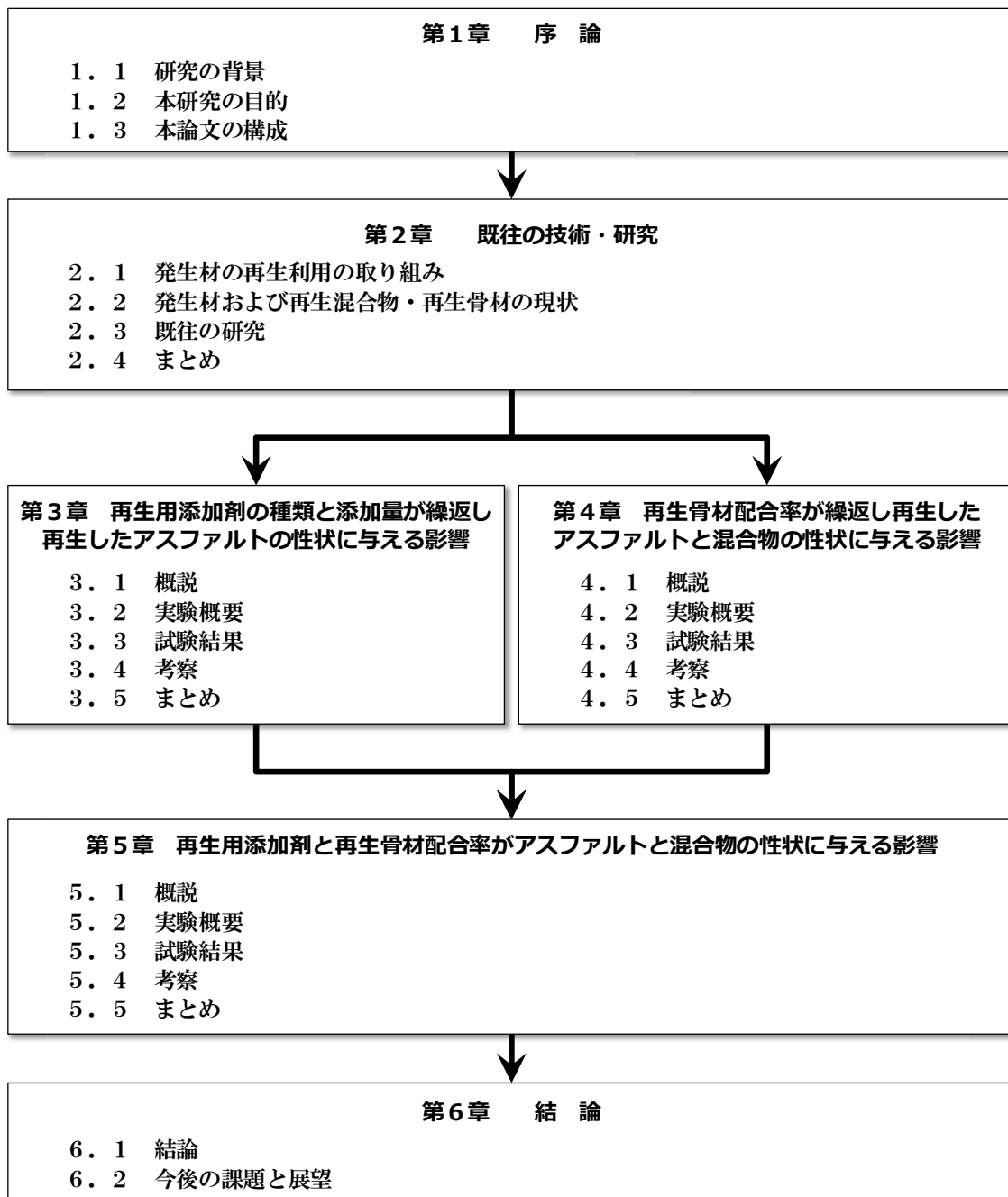


図-1.1 本論文の構成

【第1章の参考文献】

- 1) 環境省：日本の廃棄物処理(各年度版)
- 2) 全国道路利用者会議：道路統計年報
- 3) 河野宏，吉兼秀典：舗装廃材の再生利用の現状について，土木学会論文集，第390号/V-8，pp.23～34，1998年2月
- 4) 日本舗道(株)：アスファルト舗装の再生利用技術に関する研究報告，1977.
- 5) 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.
- 6) 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年9月
- 7) 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37回建設省技術研究報告(昭和58年度)，pp.267～335，1984年
- 8) 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年
- 9) (社)日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針(案)，1984.
- 10) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針(案)，1984.
- 11) (社)日本道路協会：路上再生路盤工法技術指針(案)，1987.
- 12) (社)日本道路協会：路上表層再生工法技術指針(案)，1988.
- 13) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，1992.
- 14) 資源の有効な利用の促進に関する法律，1991.
- 15) 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律，2000

16) (一社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報（各年度版）

第 2 章 再生技術の現状および既往の研究

2. 1 発生材の再生利用の取り組み

アメリカにおける合材工場での発生材の再生利用は、1915 年（大正 4 年）に Warren Brothers 社により実施された¹⁾。また、1950～1960 年代にはピッツバーグで多くの数量の再生混合物が製造された¹⁾。しかし、理由は定かではないが、その後は合材工場での再生混合物の製造は行われなくなった。アメリカにおいて発生材の再生利用が再び行われ本格的に普及したのは、アスファルトを含む建設資材が高騰した 1973 年（昭和 48 年）以降であった¹⁾。

一方、わが国における発生材の再生利用は、アスファルトの入手が困難であった終戦後の 1947～1948 年（昭和 22～23 年）に、剥ぎ起こした発生材を小割にして鉄板上で木材を燃料として加熱し、不足分のアスファルトを加えて人力で混合してパッチングの材料として用いたのが最初と言われている²⁾。その後、1949 年（昭和 24 年）に石油アスファルトの製造の再開が連合軍司令部（GHQ）から許可され、国産のアスファルトが入手し易くなると発生材の再生利用はされなくなった。しかし、昭和 40 年代後半には、建設廃棄物の処分場の枯渇とオイルショックなどにより発生材の再生利用が求められるようになり、各所で研究開発が行われるようになった。

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，適切に品質等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-2.1～図-2.3 に示す 3 種類に大別される³⁾。平成 26 年度末現在，仮設を除く常設の再生混合所は全国で 977 基あり⁴⁾，各地域・各県に隈無く設置されている。

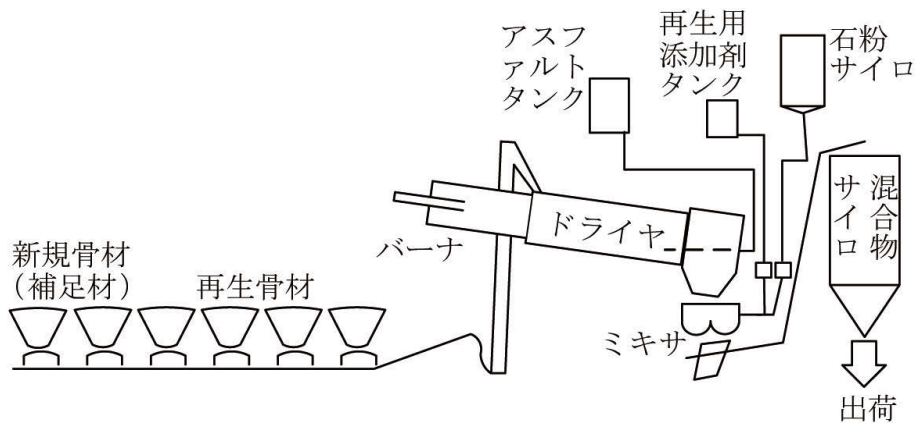


図-2.1 ドラムドライヤ混合方式の例³⁾

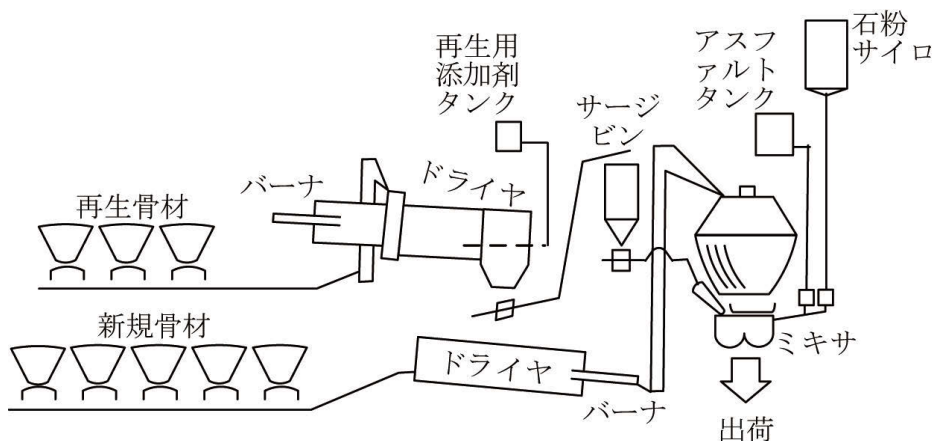


図-2.2 併設加熱混合方式の例³⁾

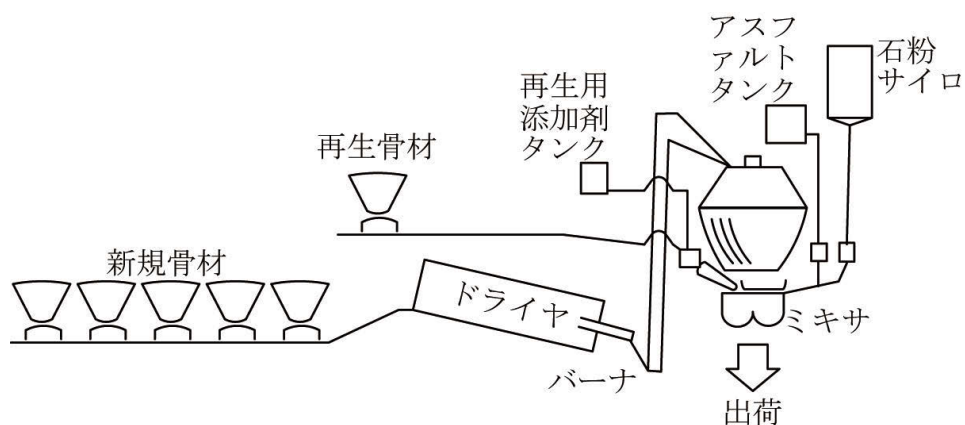
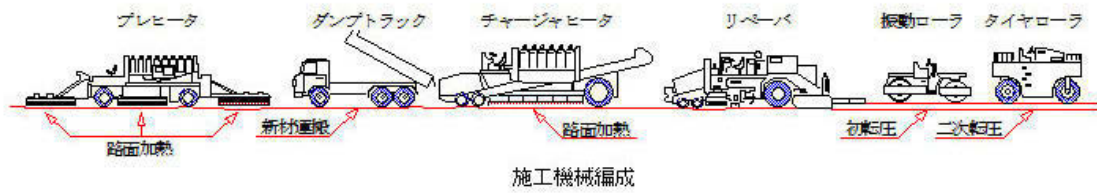


図-2.3 間接加熱混合方式の例³⁾

また、「路上表層再生工法」は、現位置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、締固め等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-2.4⁵⁾に示すよう機械編成で施工する³⁾。近年では、人家連担部での施行の困難性や再生混合所の地方部への普及などにより施工実績が減少し⁶⁾、2014年度（平成26年度）の施工実績は15,000m²程度となっている。しかし、その内訳は「路上表層再生機等を使用した路面維持工法」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⁷⁾。



チャージャヒータ

リベータ(リミキサ)

図-2.4 路上表層再生工法の機械編成とヒーター車の例 5)

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いると判断して差し支えないこと，当該研究においてもプラント再生舗装工法を対象としていることから，以降では「プラント再生舗装工法」に関連する事象について，その現状や既往の研究等について述べる．

2.2 発生材および再生混合物・再生骨材の現状

2.2.1 アスファルト・コンクリート塊の再資源化率の推移

前章でも述べたように，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^{8)~12)}，1980 年代以降に技術図書類^{13)~17)}と法律^{18)・19)}などが整備され，発生材の再生利用技術が普及した。

この結果，建設副産物であるアスファルト・コンクリート塊の再資源化率は 2000 年(平成 12 年)以降，98%以上を維持している(図-2.5 参照)²⁰⁾。

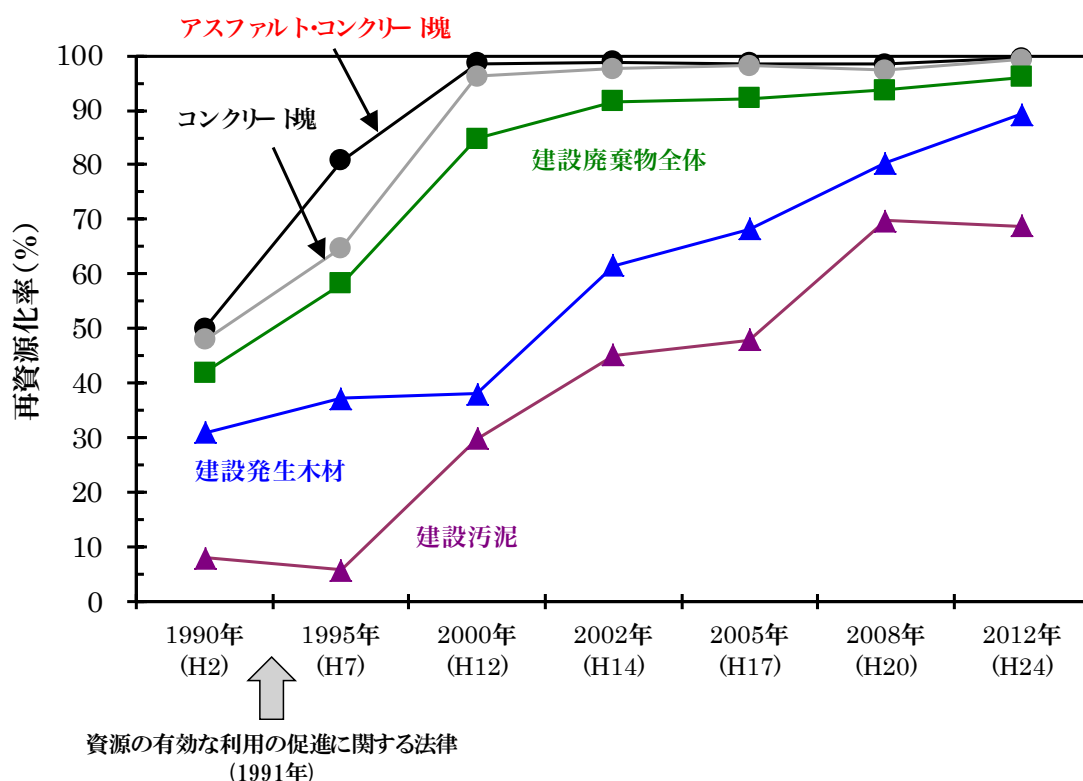


図-2.5 アスファルト・コンクリート塊の再資源化率²⁰⁾

2.2.2 再生混合物の製造量の推移

図-2.6には、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^{21),22)}を示す。1976年(昭和51年)に初めて再生混合物が4,000t出荷され²¹⁾、その後、再生混合物の出荷量は緩やかに増加していたが、1991年(平成3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(平成10年)には50.0%、2014年(平成26年)には75.6%に達している。

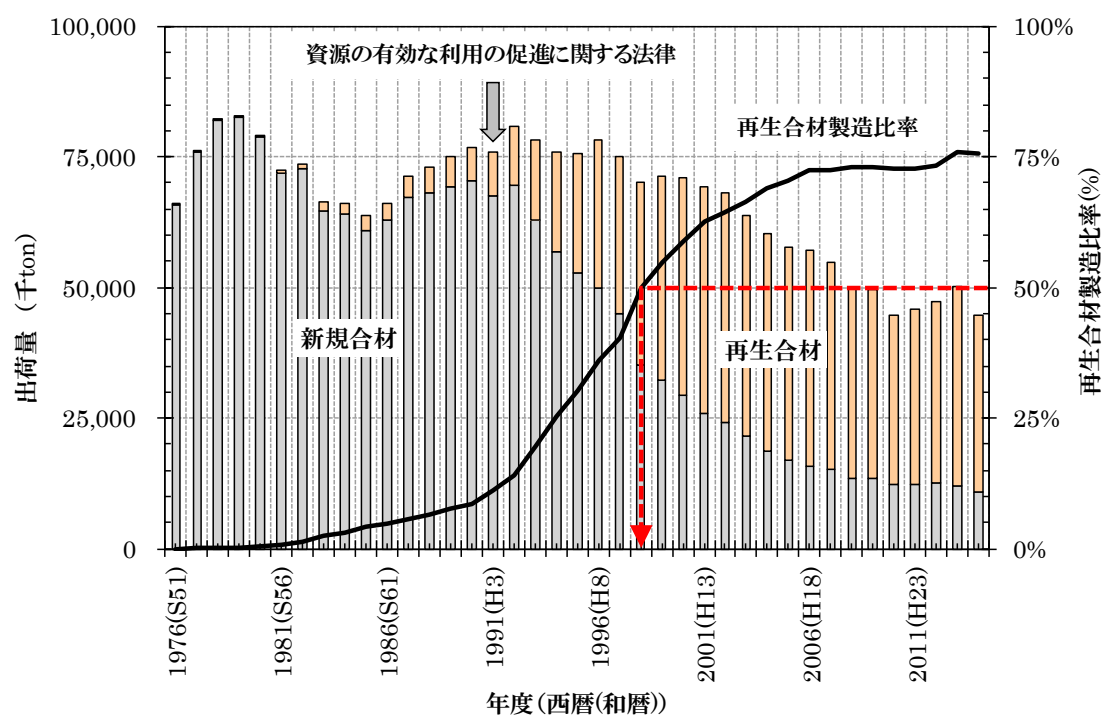


図-2.6 混合物の出荷量と再生混合物の製造比率の推移^{21),22)}

2.2.3 再生骨材配合率の推移

発生材の再生利用技術の普及に伴い，再生混合物中の再生骨材配合率は増加している。

図-2.7 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²²⁾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（平成6年）から現在まで増加する傾向があり，2014年（平成26年）の再生骨材配合率の平均値は36.6～61.5%（全国平均=49.3%）となっている。

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。

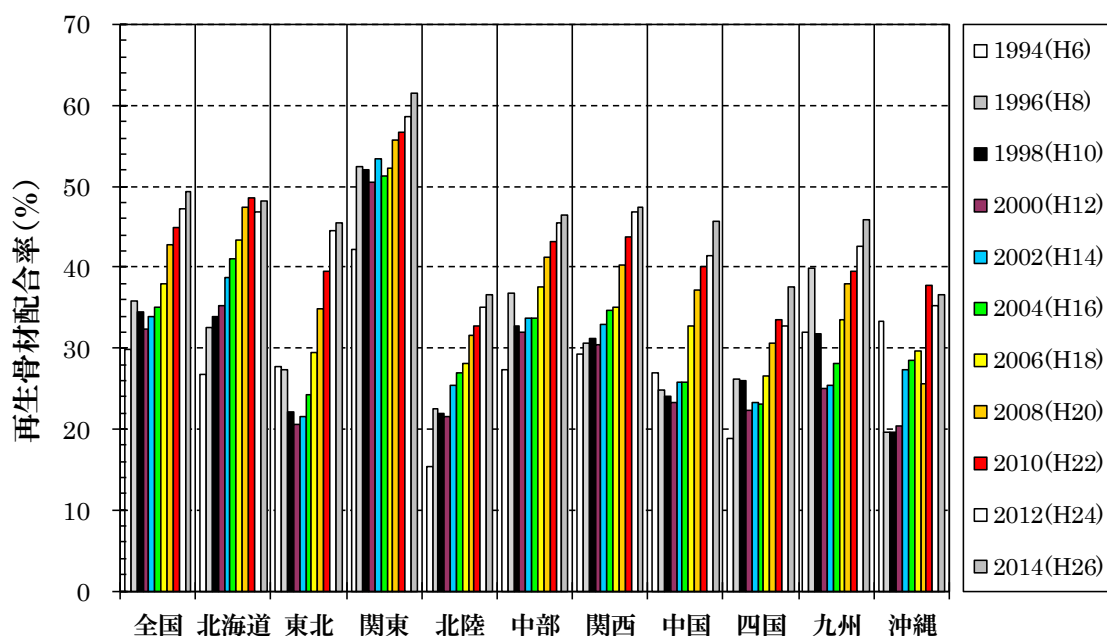


図-2.7 再生骨材配合率の推移²²⁾

2.2.4 再生回数の推計

これまでの統計データ²²⁾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，再生混合物の出荷比率が 50%となった 1998 年（平成 10 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ち換え周期を 15 年としておこなった．また，再生混合物の出荷比率は，1998 年（平成 10 年）と 2013 年（平成 25 年）は，統計データの数値を使用し，2028 年（平成 40 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-2.8 に示すが，2028 年（平成 40 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（平成 55 年）には 56.3%，2058 年（平成 70 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が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．

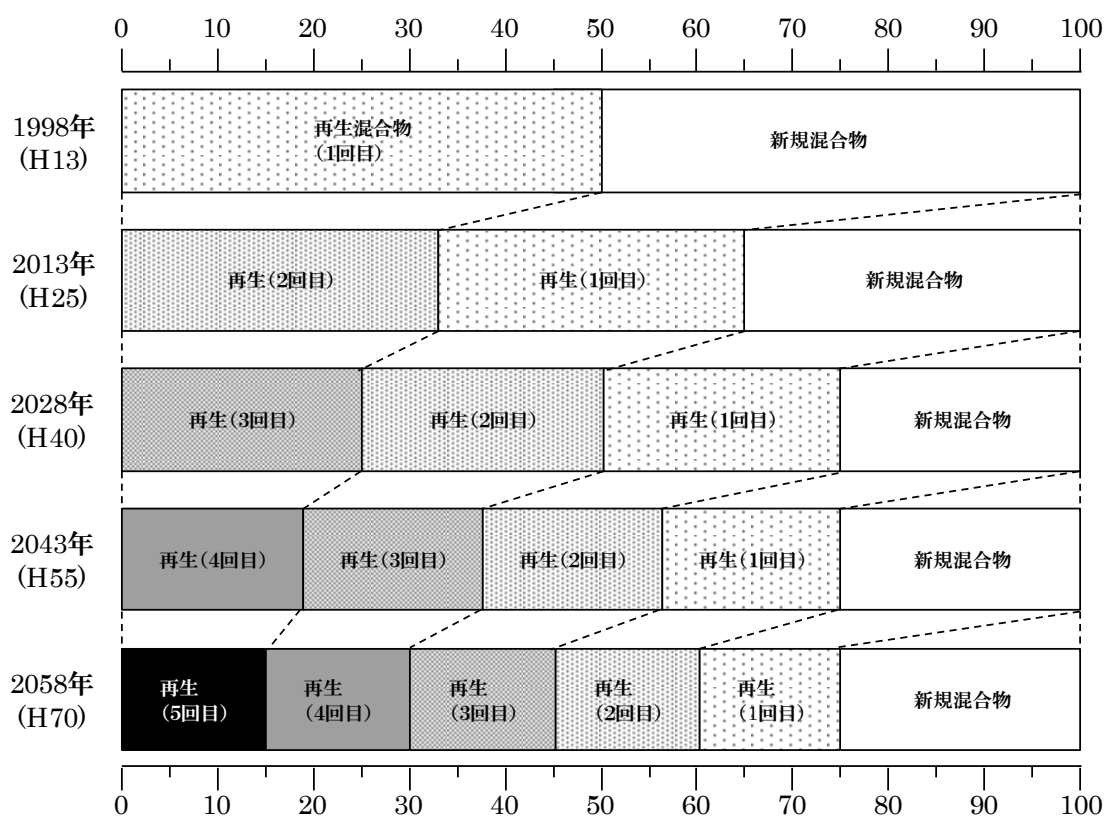


図-2.8 再生骨材の再生回数と再生混合物の出荷比率

2.2.5 旧アスファルトの針入度

1982～1983年（昭和57～58年）と2004～2007年（平成16～19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-2.9²³⁾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考えられるが²³⁾、前述の通り、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。

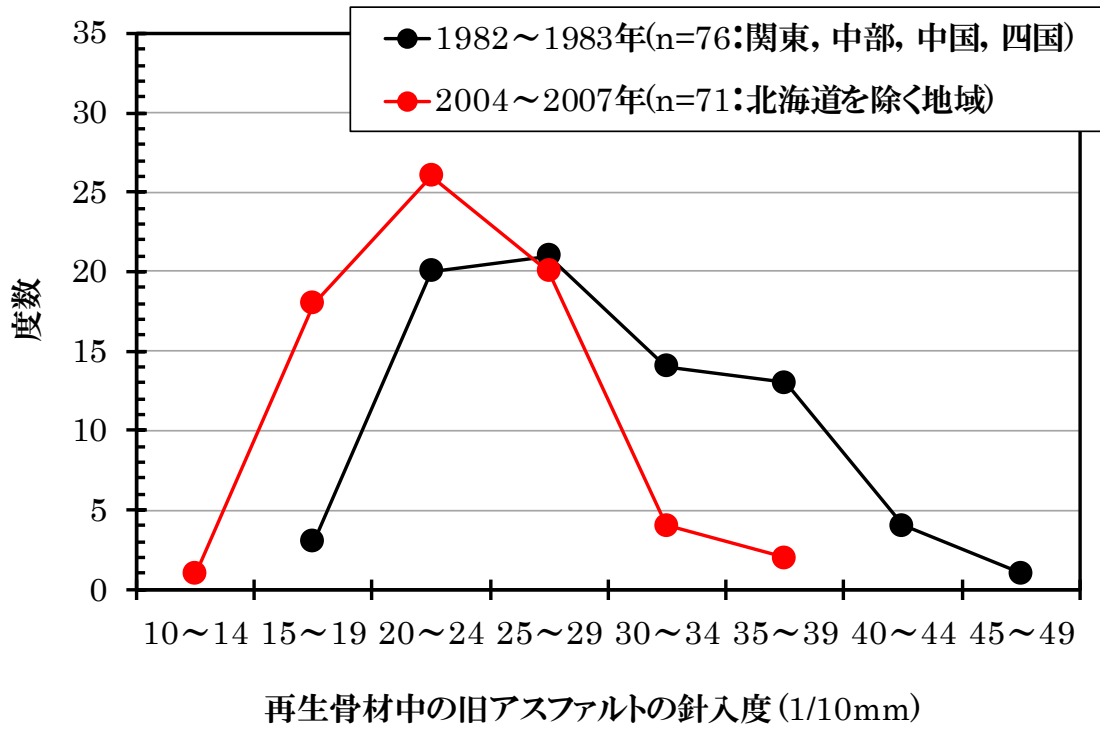


図-2.9 旧アスファルトの針入度の変化²³⁾

2.3 既往の研究

2.3.1 既往の研究

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^{8)~12)、24)~26)}。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等の報告はなく、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。そこで、これらの成果が反映され「舗装廃材再生利用技術指針(案)」¹³⁾が発刊された。なお、海外においては、再生骨材配合率と再生混合物の性状を確認し、再生骨材配合率が40~70%未満であれば、新規混合物と同等の性状が確保できると報告されている^{27)、28)}。

わが国における再生骨材に含まれる旧アスファルトの性状を回復するための再生用添加剤の研究は1980~2000年代にかけて数多く行われた^{29)~40)}。これらの研究では、数種の再生用添加剤を試作または市販品から選定し、アスファルトや混合物の状態での性状などの相対比較を行って検討されたものが多いが、開発に関する詳細な報告は少ない。海外においては、組成の面から再生用添加剤の研究が行われ、再生用添加剤の品質の暫定基準(表-2.1参照)などが提案されている^{41)~43)}。

表-2.1 再生用添加剤の暫定基準⁴¹⁾

試験項目	機能と目的	試験方法	L _a	M _a	H _a
60°C粘度(cst)	再生混合物のアスファルト 粘度調整	ASTM D 2170	80~500	1000 ~4,000	5000 ~10,000
引火点(°C) C.O.C	危険防止	ASTM D 92	177以上	77以上	77以上
蒸留 初留点(°C) 2%(°C) 5%(°C)	空気汚染の防止, 蒸発に よる効果の防止	ASTM D 1160	149以上 191以上 210以上	149以上 191以上 210以上	149以上 191以上 210以上
N/Pの構成比	再生混合物のアスファルト の耐久性	ASTM D 2006	0.5以上	0.5以上	0.5以上
化学的成分 (N+A1)/(P+A2)	再生混合物のアスファルト の耐久性	ASTM D 2006	0.2~1.2	0.2~1.2	0.2~1.2

※ポンプ圧送する温度:L=46°C, M=88°C, H=93°C

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）¹²⁾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が何回可能であるか検討している。その検討の結果、アスファルトの再生にあたっては再生用添加剤の品質が重要であり、アスファルトに類似した組成の再生用添加剤を用いれば、3回程度までの再生が可能であることを指摘している。

また、山田⁴⁴⁾らは、劣化と再生を繰返したアスファルトを用いて混合物を作製し、アスファルトと混合物の一般的な物理的性状を確認している。その結果、再生回数が多くなるにしたがってアスファルトと混合物の物理的性状が低下する可能性があることを指摘している。

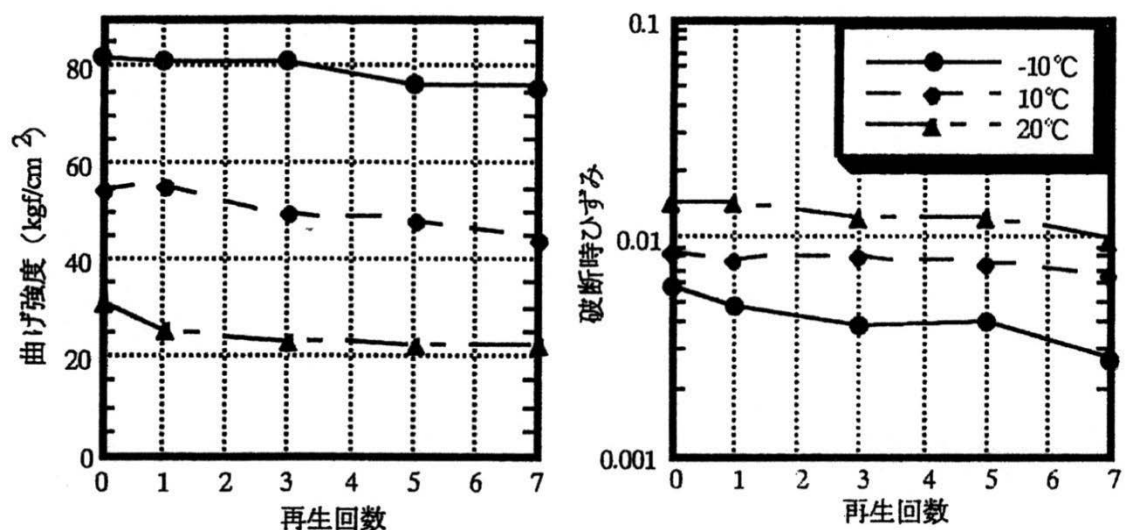


図-2.10 静的曲げ試験結果⁴⁴⁾

高橋⁴⁵⁾らは、Davidsonらと Danningら^{41), 46)}が提案した手法を参考に組成の異なる再生用添加剤を数種類用いてアスファルトを繰返し再生してアスファルトの物理的性状を確認し、繰返し再生に適した再生用添加剤の組成の範囲を提案している。

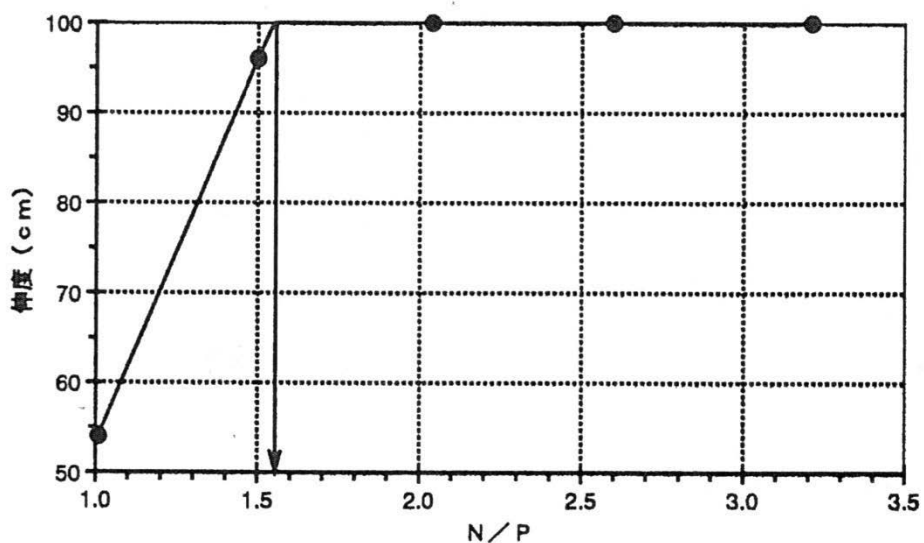


図-2.11 N/P と伸度の関係⁴⁵⁾

新田⁴⁷⁾は、市販されている再生用添加剤を用いて室内でアスファルトの劣化と再生を繰り返す、再生アスファルトの酸化物の蓄積 (Carbonyl Index: *CI*) の程度を確認した結果から、再生したアスファルトの *CI* の変化を定量的に推定して、望ましい再生骨材配合率の提案を行っている。

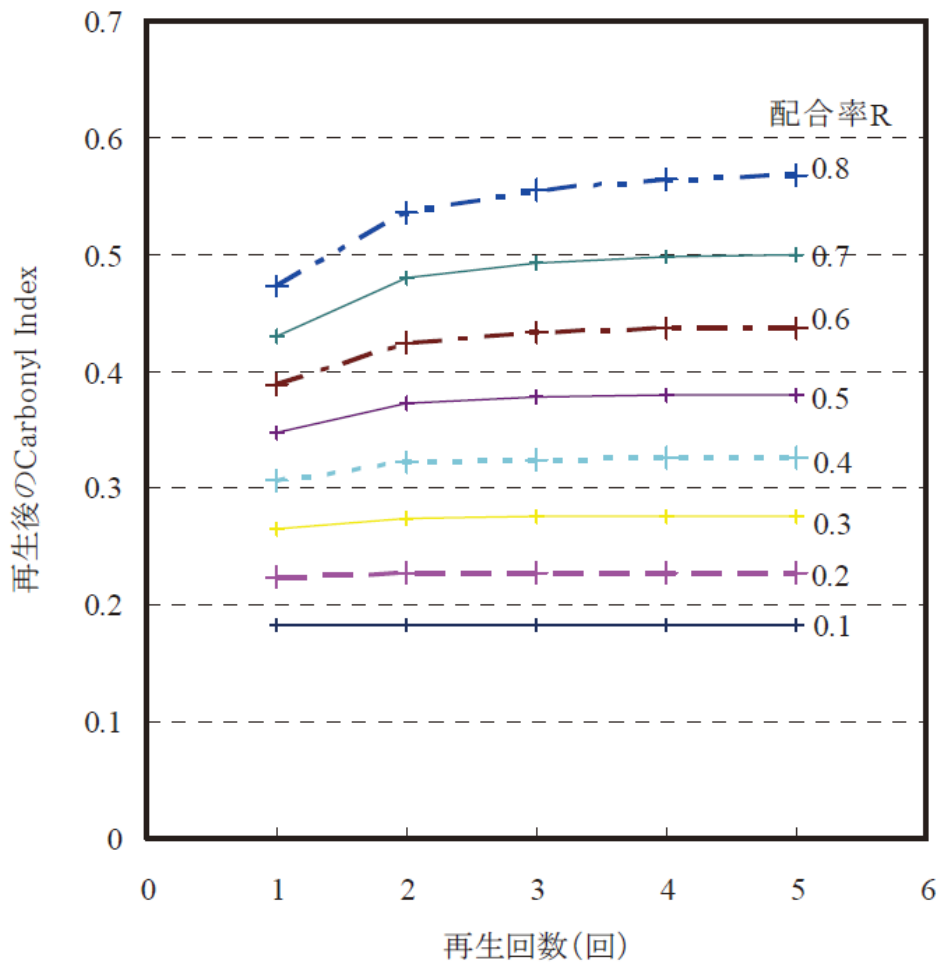


図-2.12 配合率を変化させたときの *CI* の変化(推定値)⁴⁷⁾

なお、海外においては繰返し再生されたアスファルトおよび再生混合物の研究は、ほとんど行われていない。

しかし、これら上記の研究は、初めて再生利用される発生材を対象としたものやアスファルトの状態での劣化と再生を繰返したものであり、実際の再生利用の形態と同様に混合物の状態での劣化と再生を繰返してアスファルトの物理的・化学的性状や混合物の物理的性状から望ましい再生方法を総合的に判断したものでない。また、このときに再生骨材配合率や再生用添加剤の性質の違いがアスファルトや混合物の物理的・化学的性状に与える影響についても明らかとされていない。

これらのことから、再生用添加剤の組成や再生骨材配合率を変化させ、混合物の状態での劣化と再生を繰返し、そのときのアスファルトと混合物の性状を確認して、望ましい再生骨材配合率の範囲や再生用添加剤の組成を提案する必要がある。

2.3.2 アスファルトの化学組成

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。このような手法は最初に **Marcusson** によって始められたと言われている⁴⁸⁾。その後、様々な手法が提案されたが、確立されたものとしてはアメリカ鉱山局法⁴⁹⁾が挙げられる。

わが国においては、石油学会法⁵⁰⁾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-2.13⁵¹⁾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に示す。

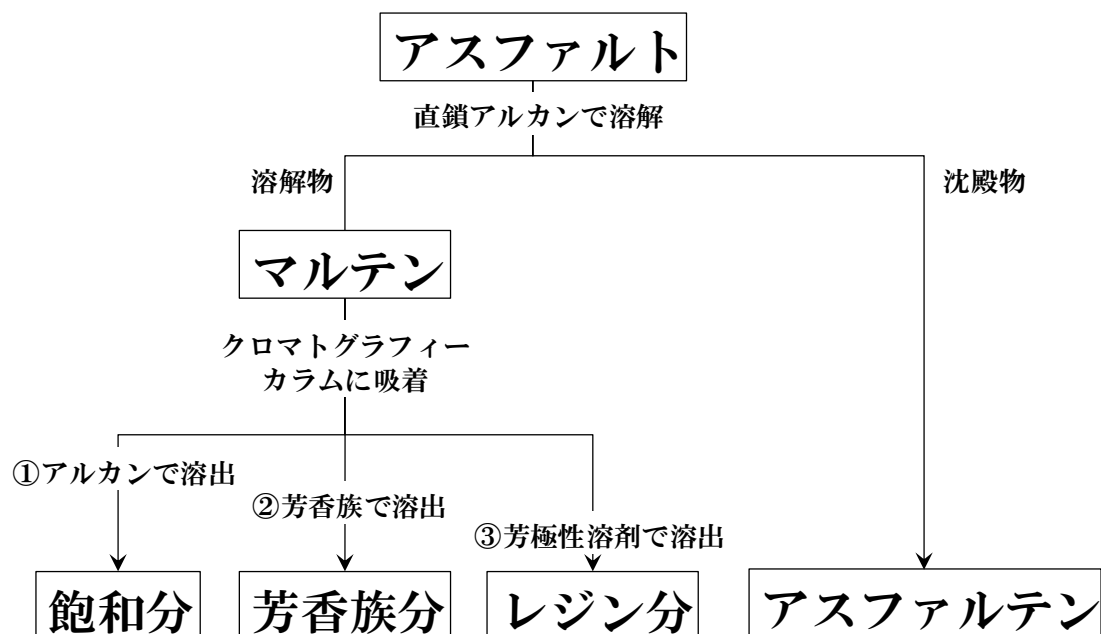


図-2.13 アスファルトの4成分分析の概略⁵¹⁾

表-2.2 アスファルトを構成する各成分の概要

成分	概要
アスファルテン	黒色～褐色の芳香環を有する化合物の集合体。
レジン	ダークブラウンの固体・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。薄い黄色を有する。アスファルトに5～20%含まれる。極性の粘性オイル。

2.3.3 アスファルトの構造

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-2.14⁵²⁾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ジン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．このゲル型は，酸化が進行し極性結合基が増大したブローンアスファルトの状態であると考えられている．

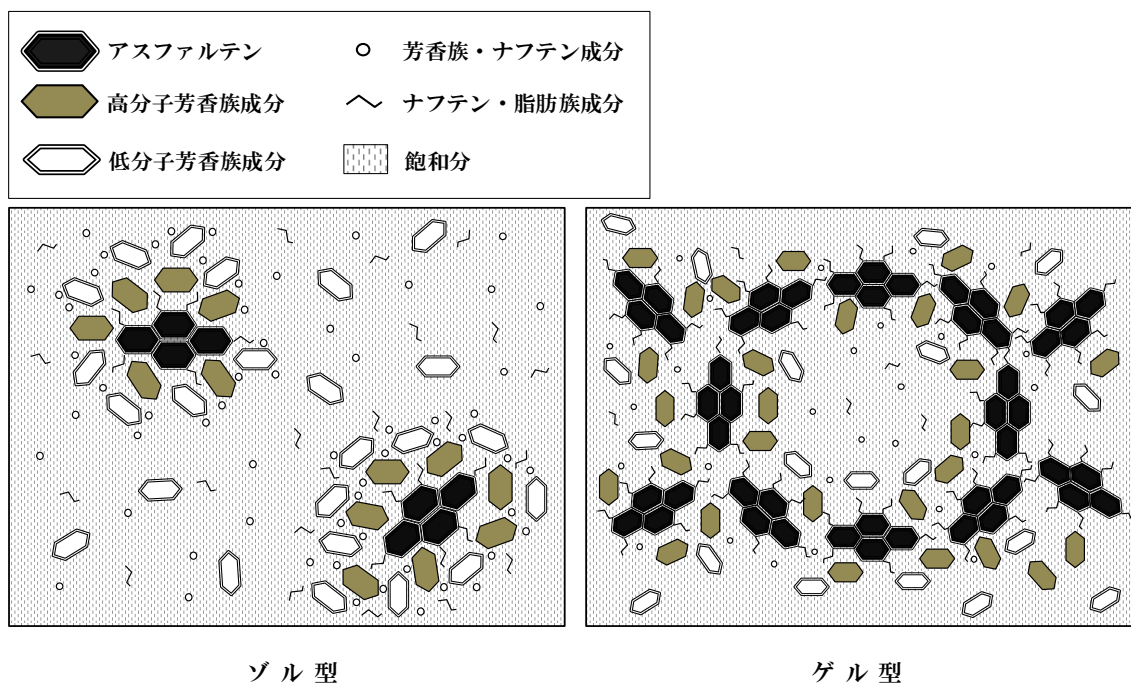


図-2.14 アスファルトの構造の概念 ⁵²⁾

2.4 まとめ

本章では，わが国におけるアスファルト舗装発生材のリサイクルの現状およびこれまでのアスファルト舗装発生材の再生利用に関する既往の研究について整理し，アスファルト舗装発生材を繰返し再生利用するにあたっての課題を示した．

まず，発生材および再生混合物・再生骨材の現状について，発生材の再生利用技術の普及はわが国のリサイクルの推進に大きく寄与しているものの，以下のような状況にある．

- ① 1980年代以降の技術図書類と法律の整備により，平成24年度のアスファルト・コンクリート塊の再資源化率は99.5%に達し，ほぼ全てのアスファルト・コンクリート塊が再利用されている．
- ② 全混合物に占める再生混合物の出荷比率および再生混合物中の再生骨材配合率は年々上昇し，2014年度の再生混合物の出荷比率は75.6%，再生骨材配合率は49.6%に達している．
- ③ 1998年（平成10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ち換え周期を15年と仮定した場合，2028年（平成40年）以降は，出荷される再生混合物の50%以上が2回以上の再生された履歴をもつものとなる．
- ④ 再生骨材に含まれる旧アスファルトの針入度は，1980年代の調査に比べ2000年代の調査では小さくなっており，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

ことが要因の一つと考えられる。

これらのことから、現状の発生材はその全てが再利用され、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を繰り返した場合、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、今後も発生材を繰り返し再生利用するためには、劣化等が蓄積され難い方法を用いて発生材を再利用する必要がある。

つぎに、発生材の再利用に関する既往の研究は、これまでに数多く行われている。しかし、その内容は、初めて再生利用する発生材を対象としたものや、アスファルトの状態での劣化と再生を繰り返したものであり、実際の再生利用の形態と同様に混合物の状態での劣化と再生を繰り返してアスファルトの物理的・化学的性状や混合物の物理的性状から望ましい再生方法を総合的に判断したものでない。また、このときに再生骨材配合率や再生用添加剤の性質の違いが再生アスファルトや再生混合物の物理的・化学的性状に与える影響についても明らかとされていない。

これらのことから、再生用添加剤の組成や再生骨材配合率を変化させ混合物の状態での劣化と再生を繰り返し、そのときのアスファルトと混合物の性状を確認して、望ましい再生用添加剤の組成や再生骨材配合率の範囲を提案する必要がある。

以上、発生材のリサイクルの現状および既往の研究から、本研究は、劣化と再生が繰り返されたアスファルトと混合物の性状の変化を実験的に確認し、現在まで行われてきた再生

利用技術が再生混合物の性能に与える影響を体系的に整理し、現状の再生利用技術の問題の有無を明らかにすること、および再生が繰り返された場合でも再生混合物や再生アスファルトの性状の変化が少ない再生用添加剤の性質や再生骨材配合率を明らかにすることを目的として次章以降において検討を実施した。

【第2章の参考文献】

- 1) アメリカ国立科学アカデミー 交通運輸研究委員会 ((社)日本道路建設業協会 技術振興委員会 海外技術資料部会 訳) : 舗装材料のリサイクリング指針, 1983.4.
- 2) (社)日本道路建設業協会 : 道路技術シンポジウム 舗装廃材のリサイクリング, pp.5~6, 1981.2.
- 3) (公社)日本道路協会 : 舗装再生便覧 (平成 22 年版), 2010.11.
- 4) (一社)日本アスファルト合材協会 : 合材統計年報 (各年度版)
- 5) 大成ロテック株式会社ホームページ,
<https://www.taiseirotec.co.jp/technicalinfo/surface/>
- 6) 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, 1995.7
- 7) 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, 2015.7.
- 8) 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」, 1977.3.
- 9) 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.
- 10) 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 年 9 月
- 11) 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 37 回建設省技術研究報告(昭和 58 年度)，pp.267～335，1984 年
- 12) 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 年
- 13) (社)日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針(案)，1984.
- 14) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針(案)，1984.
- 15) (社)日本道路協会：路上再生路盤工法技術指針(案)，1987.
- 16) (社)日本道路協会：路上表層再生工法技術指針(案)，1988.
- 17) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，1992.
- 18) 資源の有効な利用の促進に関する法律，1991.
- 19) 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律，2000
- 20) 国土交通省：建設副産物実態調査結果，
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/jittaichousa/index01.htm> (平成 27 年 9 月現在)
- 21) 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，1981.2.
- 22) (一社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報（各年度版）
- 23) 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.

- 24)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， 1976.11.
- 25)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， 1977.11.
- 26)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， 1981.2
- 27)M.A.Ferreira,V.P.Servas,C.P.Marais : Accelerated
Testing of recycled Asphaltic Concrete, Asphalt Paving
Technology Vol.56, pp.259～276, 1987
- 28)A.Shan,R.S.McDaniel,G.A.Huber,V.L.Gallivan :
Investigation of Properties of Plant-Product Reclaimed
Asphalt Pavement Mixtures, Transportation Research
Record, No.1998, pp.103～111, 2007
- 29)飯田章夫， L.E.Wood， W.H.Gostz：アスファルト合材の
リサイクリングにおける軟化剤の使用について，第14回日
本道路会議論文集， pp.185～186， 1981.10
- 30)雑賀義夫，川野敏行：再生アスファルト混合物に関する一
考察－主として添加剤について－，道路建設，pp.56～61，
1981.11
- 31)永松洋之，島津和夫，村上光博：アスファルト混合物の再
生用添加剤に関する2，3の実験，舗装，pp.22～29，1983.7
- 32)日浅治次，児玉充生，高木淳一，池沢広：再生用添加剤と
ビチューメンの親和性，第15回日本道路会議論文集，pp.311
～312， 1983.10

- 33)佐藤元志,添谷守,林伸行:再生用添加材の性状について,
第15回日本道路会議論文集, pp.313~314, 1983.10
- 34)坂本浩行,寺田剛:再生用添加剤の添加性状,第16回日本道路会議論文集, pp.381~382, 1985.10
- 35)山内幸夫,伊藤康伸,上原常裕:再生用添加材に関する二,
三の考察,第16回日本道路会議論文集, pp.399~400,
1985.10
- 36)川野敏行,塩尻謙太郎:再生混合物の添加剤に関する研究
—軟化剤か若返り剤か—,道路建設, pp.70~76, 1985.10
- 37)川島義昭,岩田久志,寺嶋悟:路上表層再生用添加剤を用
いたアスファルト混合物の評価,昭和59年度日本道路公団
試験所報告, pp.73~86, 1985.12
- 38)野村健一郎,鍛冶邦弘:再生用添加剤の選定およびその添
加・混合方法,道路建設 No.501, pp.57-65, 1989.10
- 39)鈴木義昭,田辺知子:再生用添加材の再生能力と耐久性に
ついて,道路建設, pp.59~65, 1990.5
- 40)八谷好高,高橋修,松崎和博,坪川将丈:再生用添加剤が再生
アスファルトの性能に及ぼす影響に関する実験的研究,土
木学会論文集, Vol. 2004, No. 753, pp.127~136, 2004.2
- 41)D.D.Davidson,William,Canessa,S.J.Escobar: Practical
Asphalt of Reconstituting Deteriorated Bituminous
Pavement, ASTM STP 662, pp.16~33, 1978
- 42)R.L.Dunning,R.L.Mendenhall: Design of Recycled
Asphalt Pavements and Selection of Modifiers, ASTM
STP 662, pp.35~46, 1978

- 43) Steven J. Escobar, Donald D. Davidson : Role of Recycling Agents in the Restoration of Aged Asphalt Cements, Asphalt Paving Technology Vol.48, pp.375~402, 1979.2
- 44) 山田優, 河田圭司, 山端一浩 : 繰返し再生したアスファルトの混合物バインダーとしての評価, 土木学会第51回年次学術講演会概要集 第5部, pp.130~131, 1996.9
- 45) 高橋光彦, 鈴木秀輔, 野村健一郎 : アスファルトの再々生用添加剤に関する一検討, 土木学会第54回年次学術講演会概要集 第5部, pp.34~35, 1999.8
- 46) Fritz S. Rostler, Heinz W. Sternberg : Compounding Rubber with Petroleum Products - Correlation of Chemical Characteristics with Compounding Properties and Analysis of Petroleum Products Used as Compounding Ingredients in Rubber-, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.41, No.3
- 47) 新田弘之 : アスファルト舗装におけるリサイクル技術の開発とライフサイクル評価に関する研究, (独)土木研究所, 土木研究所報告 第217号, pp.1-66, 2011.
- 48) 阿部頼政 : 道路技術者のアスファルト講座 第2回 アスファルトの製法と組成, アスファルト, No.92・93, pp.46-52, 1973.10
- 49) R.H.Hubbard, K.E.Stanfield : Anal. Chem 20. 460, 1948
- 50) (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.
- 51) 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.

52) Shell Bitumen : The Shell Bitumen Handbook sixth
edition, 2015

第3章 再生用添加剤の種類と添加量が繰返し再生したアスファルトの性状に与える影響¹⁾

3.1 概説

一般に、再生骨材に含まれる旧アスファルトの針入度の回復には、再生用添加剤や舗装用石油アスファルト（以下、ストレートアスファルト）、針入度の大きなアスファルト（以下、高針入度アス）が用いられている^{2),3)}。新田ら⁴⁾は、再生用添加剤を用いて繰返し再生されたアスファルトは、アスファルトの物理的・化学的性状が変化し、針入度が元に戻っても繰返し回数が増すごとに、針入度以外の指標が舗装用アスファルトの一般的性状の範囲からはずれることがあることを示している。

今後、発生材が繰返し再生利用されることを考慮すれば、再生用添加剤の性質が繰返し再生されたアスファルトや混合物の性状に与える影響を明らかにし、望ましいと考えられる再生方法を示す必要がある。

本章では、市販されている再生用添加剤や高針入度アスファルトが繰返し再生されたアスファルトの性状に与える影響を確認することを目的に、室内において市販の再生用添加剤9種類および高針入度アスファルトを用いて、劣化と再生を繰返したアスファルトの物理的・化学的性状を確認した。そ

してその結果から，混合物が繰返し再生利用されることを考慮した場合に望ましいと考えられる旧アスファルトの再生方法およびその後の研究の方向性について考察を行った．

3.2 実験概要

3.2.1 再生用添加剤の種類が再生アスファルトの性状に与える影響

(1) 実験手順

再生添加剤の種類を変化させ，アスファルトの劣化と再生を2回繰返し，それぞれ劣化・再生段階におけるアスファルトの物理・化学性状を確認した．試験手順を図-3.1に示す．なお，使用材料および各再生段階での実験の詳細は以下に詳述する．

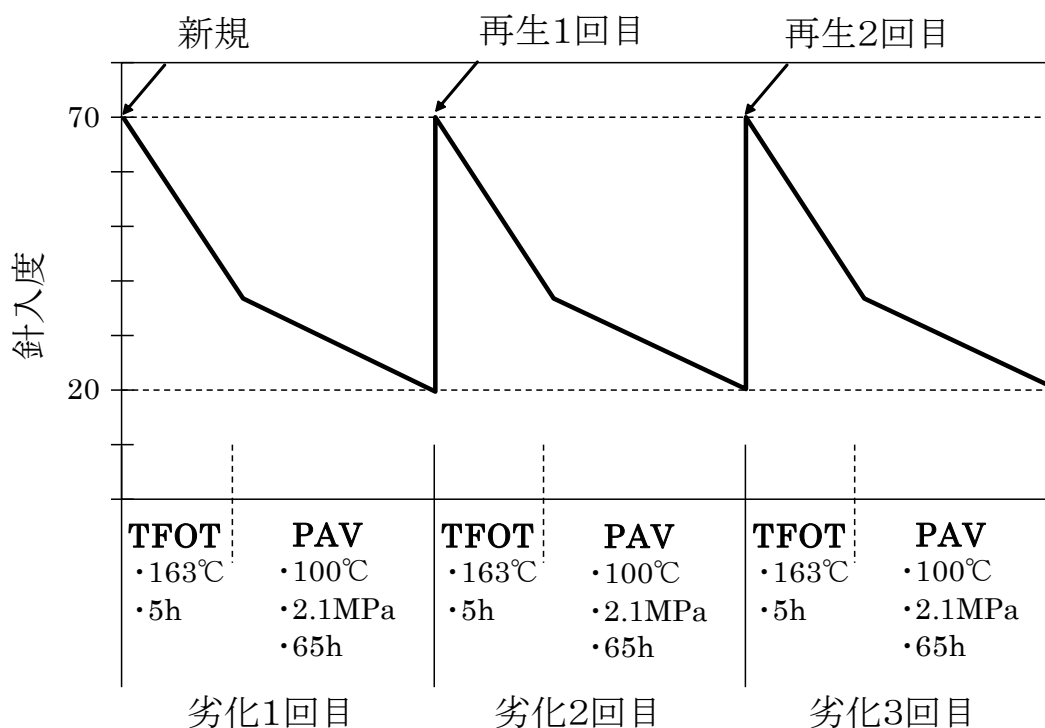


図-3.1 試験手順

(2) 使用材料

アスファルトには JIS K 2207 を満足する舗装用アスファルト 60/80 を使用した．また，再生用添加剤は国内に流通しているもので，実際にアスファルト合材工場で使用された実

績のあるものを使用した。使用したアスファルトおよび再生用添加剤の性状を表-3.1, 表-3.2 に示す。なお, 再生用添加剤①～⑦は石油潤滑油系, ⑧～⑨はアスファルト系に分類されるものである。写真-3.1 にアスファルトおよび石油潤滑油系とアスファルト系の再生用添加剤の例を示す。

表-3.1 アスファルトの性状

密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	軟化点 ℃	伸度 15℃ cm
1.038	70	47.0	100+

表-3.2 使用した再生用添加剤の性状

再生用 添加剤	60℃粘度 mm ² /s	引火点 ℃	密度 g/cm ³	薄膜加熱後 粘度比	備考
①	81	256	0.911	未測定	石油 潤滑油系
②	98	240	0.948	1.12	
③	91	234	0.956	1.13	
④	91	232	0.966	1.22	
⑤	101	248	0.981	1.24	
⑥	210	276	0.998	1.14	
⑦	87	235	1.014	1.21	
⑧	1,091	272	0.975	1.25	アスファ ルト系
⑨	526	327	0.978	1.10	

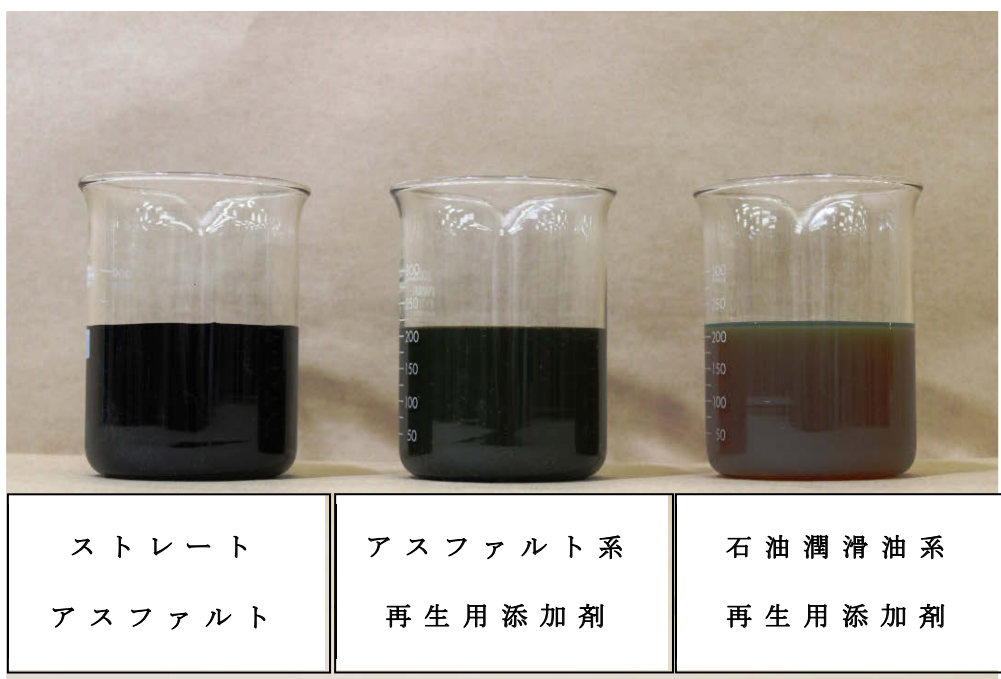


写真-3.1 アスファルトおよび再生用添加剤の例

(3) 促進劣化方法

アスファルトの促進劣化は，わが国で一般に普及している「A046 薄膜加熱試験方法」⁵⁾ (以下，TFOT)と「A059 加圧劣化試験方法」⁵⁾ (以下，PAV)により行った(図-3.2，図-3.3 参照).

なお，促進劣化により目標としたアスファルトの針入度は，旧アスファルトの再生アスファルト混合物への利用限界である針入度 20 とした (図-3.1 参照). これは，アスファルトがより劣化した状態で再生を繰り返すことで再生用添加剤の性質の影響がより明確になると考えたためである. これに伴い，PAV における加圧劣化時間については，針入度が 20 となる条件を予備実験より求め，試験時間を 65hr に変更して行うこととした.

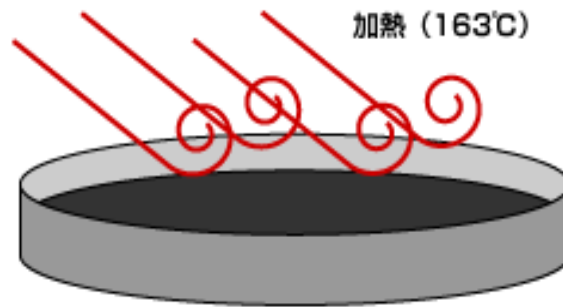


図-3.2 TFOT の概念(混合物製造時の劣化)

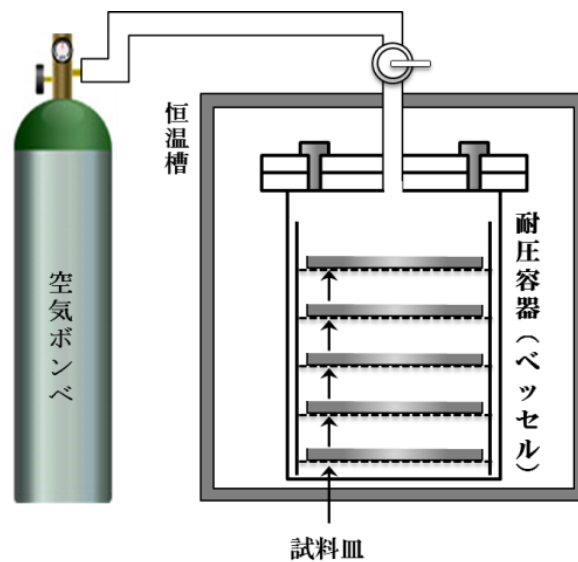


図-3.3 TFOT の概念(供用時の劣化)

(4) 再生方法

促進劣化試験(TFOT+PAV)後のアスファルトは、舗装再生便覧(平成22年版)²⁾に示されている再生用添加剤を使用する方法にしたがって再生した。ここでは、より多くの再生用添加剤を添加し、再生用添加剤の違いが再生アスファルトの性状に与える影響をより明確にするために、再生アスファルトの針入度の目標値を70、再生骨材の配合率を60%とした。

なお、再生骨材配合率 60%は、2014年度の全国の平均 49.3% (図-2.7 参照) より約 10%高いものの、同年度の関東地方の再生骨材配合率が 61.3%となっていることを踏まえれば、決して高すぎることはない数値と考える。

(5) アスファルトの性状試験方法

各劣化・再生段階のアスファルトについて、物理性状試験としては針入度試験、軟化点試験を⁵⁾、化学性状試験としてはアスファルトの組成成分の分析、赤外吸光度測等を行った。

ここで、アスファルトの組成の分析には、薄層クロマトグラフ法(以下、TLC-FID法)⁶⁾を用いた。TLC-FID法は、棒状の薄層吸着層上でアスファルトを4つの成分(飽和分、芳香族分、レジン分、アスファルテン分)に分離(TLCの操作)し、それぞれの成分をイオン化し(FID)検出する方法を組み合わせた分析方法である。測定機器の外観を写真-3.2に、TLC-FID法の測定方法の概念を図-3.4⁷⁾に、TLC-FID法の概要を表-3.3に示す。

なお、本研究においては、組成成分の分析結果から、(1)式によりコロイダルインデックス(以下、 I_c)を算出し、劣化度を評価した。 I_c はポリマー改質アスファルトの相溶性を評価するために用いられることも多いが、感温性が高く変形追従性に乏しい成分である飽和分(ワックス分)およびアスファルテン分の構成比であることから、変形追従性や靱性の低下指標としても有効であると考え、本検討では劣化成分蓄積量の指標として用いた。

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



水素
発生装置

本体

薄層
吸着層

写真-3.2 組成分析装置（エアトロスキヤン）

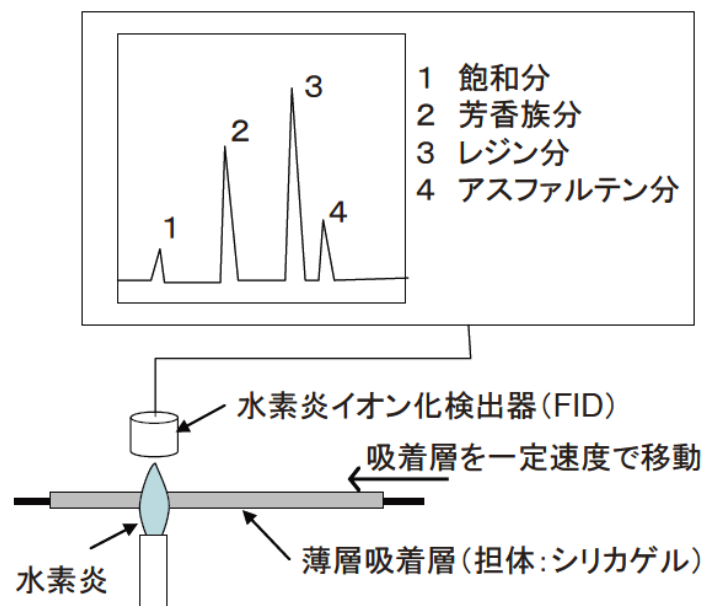


図-3.4 TLC-FID 法の測定方法の概念 7)

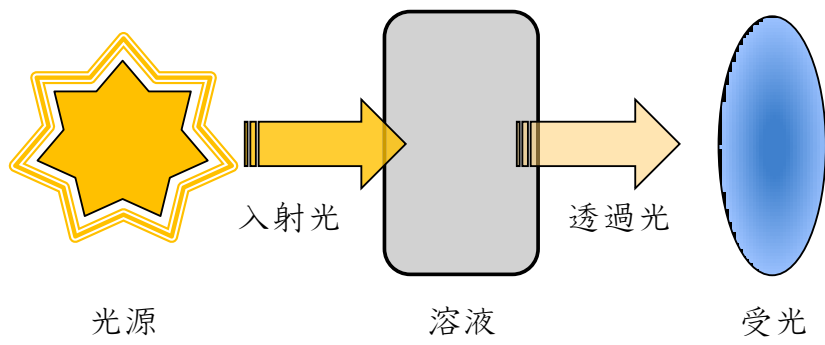
表-3.3 TLC-FID法の概要

	概 要
吸着層	棒状薄層吸着層(担体：シリカゲル)
検出器	水素炎イオン化検出器(FID検出器．有機成分を水素炎中で燃焼させ，発生イオン電流を検出)
操作方法	①吸着層上にアスファルトをスポットした後，ヘキサソール(展開距離10cm) ②トルエン(展開距離5cm) ③ジクロロメタン+メタノール混液(95:5)(展開距離2cm)の順で展開し，4成分に分離する． ④乾燥後，それぞれの濃度をFID検出器で測定し，それぞれの濃度比を求める．

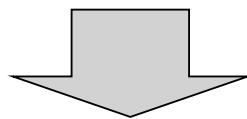
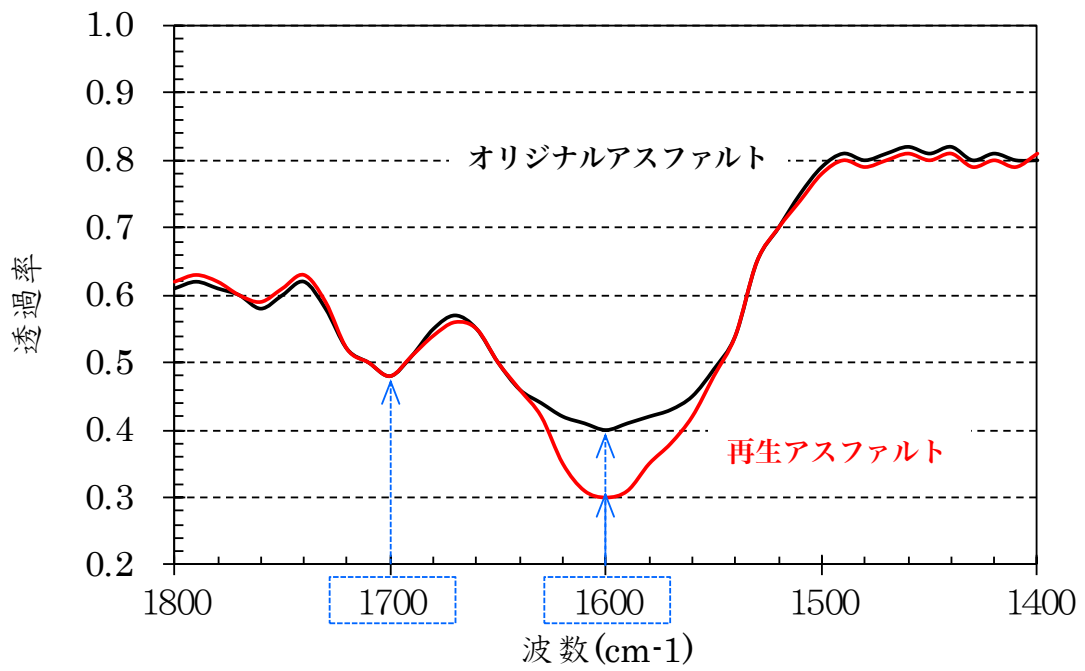
また，アスファルトの酸化劣化反応の進行を定量的に評価するため，赤外吸光度測定を行った．赤外吸光度測定は，フーリエ変換赤外分光光度計(Fourier Transform Infrared Spectrometer: 以下 FT-IR)を用い，アスファルトの酸化劣化の指標となる酸素含有官能基(カルボニル基)増加の挙動を測定した．具体的には，アスファルトを溶液(クロロホルム)に溶解させ，この溶液中に光を透過させて透過光の波長を計測し，カルボニル基伸縮振動に帰属する 1700cm^{-1} 付近のピークと，劣化の影響を受けないとされる C=C 伸縮振動に帰属する 1600cm^{-1} 付近のピークの比からアスファルトの赤外吸光度=カルボニル指数(Carbonyl Index: 以下，CI)を求めた．測定機器の外観を写真 3.3 に，FT-IR の概念を図-3.5 に，測定条件等を表-3.4 に示す．



写真-3.3 赤外吸光度計 (FT-IR)



フーリエ変換



カルボニル指数(Carbonyl Index: *CI*)の算出

図-3.5 FT-IR の概念

表-3.4 FT-IR の条件等

	条件等
吸光分析法	KBr結晶上に，溶剤（アス+クロロホルム）を用いて試料の薄膜を形成し透過測定
カルボニル指数 (Carbonyl Index: <i>CI</i>)	$CI = \frac{\log(I_{01}/I_1)}{\log(I_{02}/I_2)}$ <p> I_1: 1700cm⁻¹ 付近のスペクトルの透過率 I_2: 1600cm⁻¹ 付近のスペクトルの透過率 I_{01}, I_{02}: 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 </p>

3.2.2 再生用添加剤の使用量と繰返し再生したアスファルトの性状の関係

(1) 試験手順

再生アスファルトの設計針入度を一定に保ちつつ，旧アスファルトを再生する際の再生用添加剤の使用量を変化させ，再生用添加剤の使用量が繰返し再生したアスファルトに与える影響を確認した．試験手順を図-3.6に示す．

なお，本実験ではアスファルトおよび混合物の状態で，それぞれ促進劣化と再生を4回繰返し，各段階の劣化・再生のアスファルトの物理的・化学的性状を測定した．また，使用した再生用添加剤は，表-3.2に示す石油潤滑油系の中から，アスファルト合材工場での使用実績が比較的多く，平均的な性状を有する再生用添加剤④を選定することとした．なお，使用材料，促進劣化方法および各段階での実験の詳細は以下に詳述する．

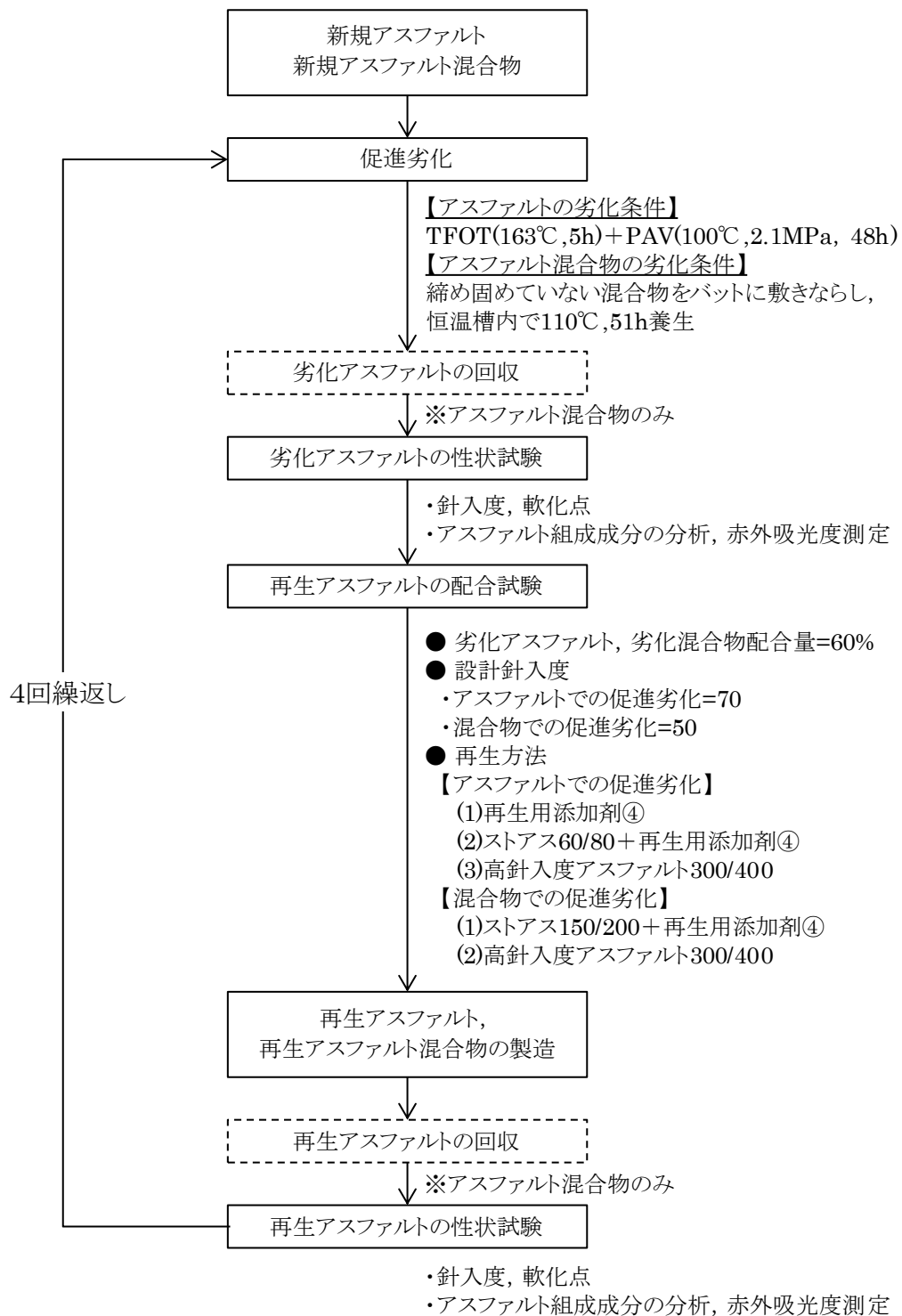


図-3.6 試験手順

(2) 使用材料

ここでは，表-3.1 に示すストレートアスファルト 60/80 を用いてアスファルトと混合物の状態それぞれ促進劣化させた．促進劣化を経たアスファルトは，①再生用添加剤のみ，②ストレートアスファルト 60/80 と再生用添加剤を併用，③高針入度アスファルトのみを用いて，それぞれ再生して，アスファルトの物理的・化学的性状を確認した．なお，再生用添加剤には，比較的多くの合材工場で用いられているものとして表-3.2 に示す再生用添加剤④を選定した．使用した再生用添加剤や高針入度アスファルトの性状などを表-3.5 に示す．

表-3.5 再生用添加剤と高針入度アスファルトの性状

材料	密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	組成分析			
			アスファ レン分	レジ 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

(3) 促進劣化方法

アスファルトの促進劣化は，の TFOT⁵⁾と PAV⁵⁾により行った．促進劣化により目標としたアスファルトの針入度は，旧アスファルトの再生アスファルト混合物への利用限界である針入度 20 とした．これは，アスファルトがより劣化した状態

で再生を繰り返すことで再生用添加剤の性質の影響がより明確になると考えたためである。これに伴い、PAVにおける加圧劣化時間については、予備実験結果より48hrに変更して行うこととした。

また、混合物の促進劣化は、簡便性を考慮して一般に普及している機器である熱風循環乾燥炉を用いて行った。促進劣化は、締め固めていない状態の混合物7.5kgを36×24cmのバットに敷きならし、なるべく直接熱風が当たらぬよう表面を幅広のアルミ箔で一重に覆い、アルミ箔の縁はバットの縁の返し部分に折り込むようにして110℃に設定した熱風循環乾燥炉で84時間養生した。なお、このときの養生時間（84時間）は、劣化後の混合物から回収したアスファルトの針入度が20となる条件とした。

(4) 再生方法

アスファルトの促進劣化試験(TFOT+PAV)後のアスファルトは、舗装再生便覧（平成22年版）²⁾の“再生用添加剤および新アスファルトを使用する方法”に従い再生した。このときの再生用添加剤を含めた新アスファルトの配合率は40%、目標針入度は70(1/10mm)とした。なお、ここで設定した新アスファルトの配合比率と目標針入度は、再生用添加剤④の使用量に差が生じるよう、高針入度アスファルト300/400を使用したときの配合比率と目標針入度に合わせた結果である。

また、混合物の促進劣化試験後は、再生用添加剤を含めた新アスファルトの配合率が40%、目標針入度が50(1/10mm)

となるように再生を行った。ここで設定した新アスファルトの配合比率と目標針入度は，再生用添加剤④の使用量のわずかな差が再生アスファルトの性状に与える影響を確認するためである。

再生方法ごとの再生用添加剤の添加量を表-3.6に示す。

表-3.6 再生方法ごとの再生用添加剤の添加量

促進劣化の方法	設計針入度 (1/10mm)	再生方法	再生アスファルトに占める再生用添加剤の量 (%)
アスファルト	70	再生用添加剤④	15～24
		ストレートアスファルト 60/80 + 再生用添加剤④	7～19
		高針入度アスファルト 300/400	0
混合物	50	ストレートアスファルト 150/200 + 再生用添加剤④	1～3
		高針入度アスファルト 300/400	0

(5) 試験方法

各劣化・再生段階のアスファルトについて，物理性状試験としてアスファルトの針入度試験，軟化点試験を⁵⁾，化学性状試験としてはアスファルトの組成分析，赤外吸光度測定を行った。

3.3 試験結果

3.3.1 再生用添加剤の種類が再生アスファルトの性状に与える影響

再生用添加剤の性質の違いによる、軟化点の変化を測定した。軟化点の測定結果を図-3.7に示す。図から、PAV65時間後の軟化点は再生用添加剤の種類により差が見られ、再生1回目よりも再生2回目の差が大きくなった。

このことは、繰返しの再生回数が多くなるにしたがって、再生アスファルトの性状は再生用添加剤の性質の影響をより強く受ける可能性があることを示していると考えられる。

このことから、繰返し再生されることを考慮した場合、再生用添加剤の品質について考慮する必要があると考えられる。

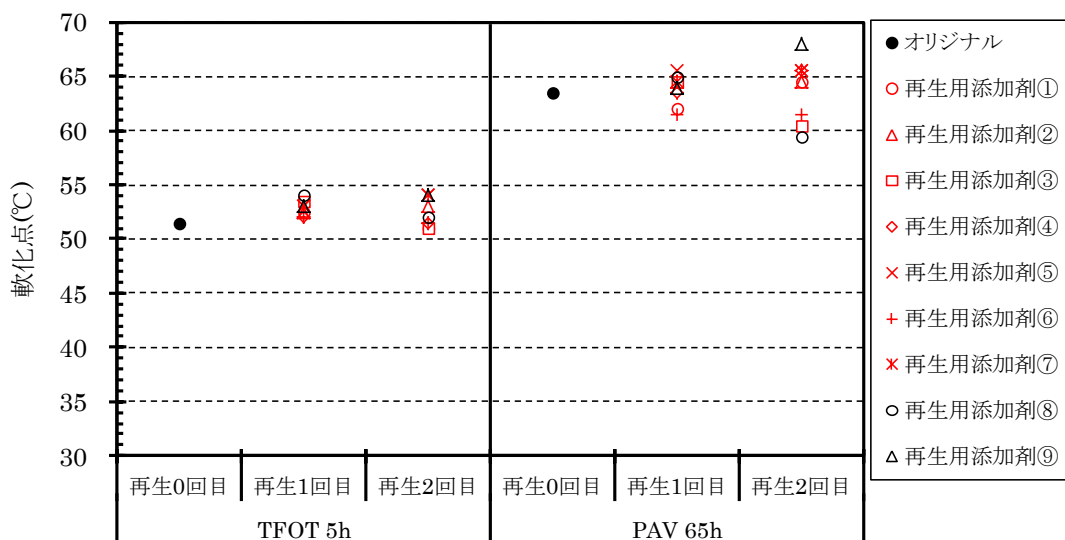


図-3.7 再生用添加剤の種類と軟化点の関係

また、劣化における酸化等の化学的変化を見るために、FT-IR を用いてカルボニル基の変化を測定した。測定結果を図-3.8 に示す。図から、再生回数が多くなるにしたがってアスファルトの酸化度 CI は大きくなる傾向が見られたが、その程度は、再生用添加剤の種類によって異なることがわかった。このことは、再生用添加剤の種類によっては再生用添加剤自体が酸化物を蓄積しやすく、その程度の差が再生アスファルトの酸化度 CI の違いとなって現れたものと考えられる。

このことから、再生用添加剤により旧アスファルトの針入度を回復させた場合でも劣化生成物が消失するわけではなく、再生用添加剤の種類によっては、酸化物がより多く蓄積してゆくことが分かる。

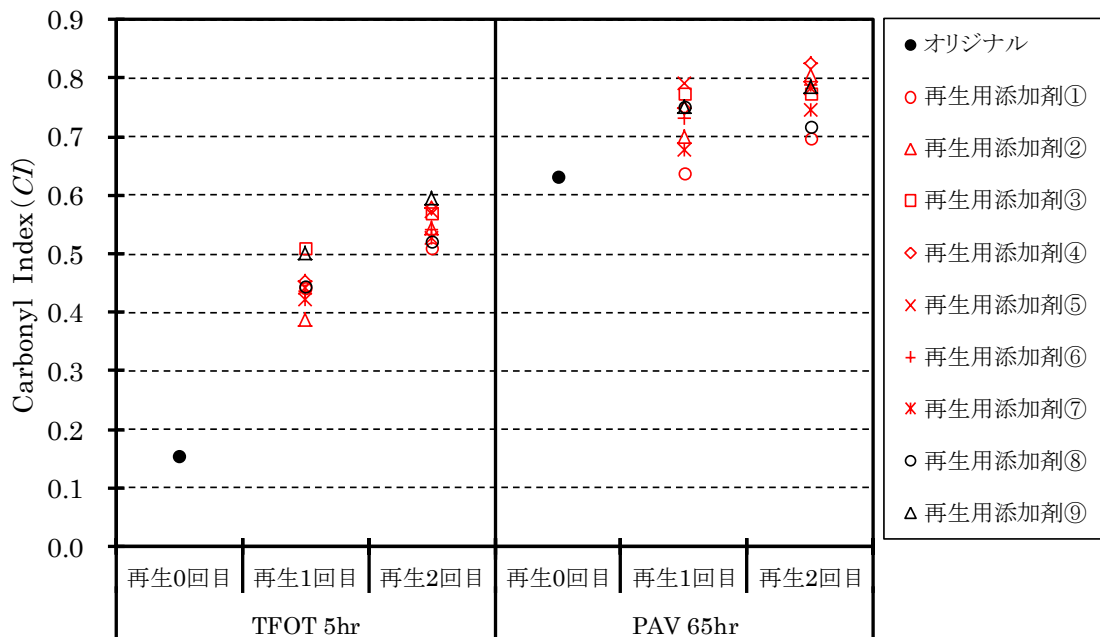


図-3.8 酸化度測定結果

3.3.2 再生用添加剤の使用量と繰返し再生したアスファルトの性状の関係

(1) アスファルト単体で促進劣化と再生を繰返しした場合

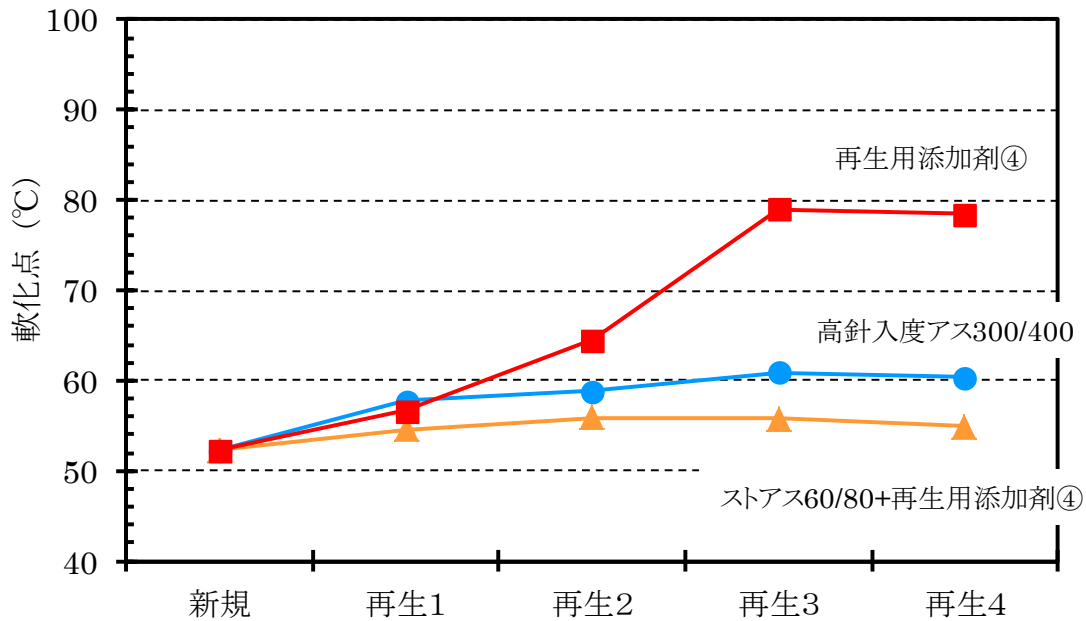
a) 軟化点

TFOT と PAV を用いて促進劣化と再生を繰返し、各再生段階のアスファルトの軟化点を測定した。測定結果を図-3.9 に示す。

図から、軟化点は、再生回数が多くなるにともない高くなる傾向が見られたが、高針入度アスファルト 300/400 およびストレートアスファルト 150/200 と再生用添加剤④を併用した場合は、再生を繰返した場合でも軟化点の上昇は比較的小さく 60℃程度であった。一方、再生用添加剤④のみで再生した場合は、再生 3 回目以降の軟化点が 80℃程度となった。

このことは、再生用添加剤④の使用量が多くなるほど、繰返し再生によりアスファルトの感温性が鈍くなり硬くなる可能性があることを示していると考えられるが、ポリマー等を混入しないストレートアスファルトの軟化点が 80℃程度以上となることは、耐流動性に優れると解釈することは困難であり、変形抵抗性を失い脆化しているものと推測される。

このことから、繰返し再生を考慮した場合には、石油潤滑油系の再生用添加剤④の使用量は、できるだけ少ない方が望ましいと考えられる。



*) 新規:TFOT後のアスファルト

図-3.9 軟化点測定結果

b) 組成分析

劣化における化学的変化を見るために、再生アスファルトの組成分析を行った。測定結果を図-3.10に示す。

図から、再生用添加剤④のみで再生を繰り返した場合は、再生回数が増えるにしたがって促進劣化後のアスファルトの I_c が増加する傾向が見られた。また、ストレートアスファルト 60/80 と再生用添加剤④を併用した場合は劣化 3 回目までは I_c の増加は見られないものの劣化 4 回目で I_c が急激に大きくなった。一方、高針入度アスファルト 300/400 を用いた場合は、 I_c は漸増傾向にあるものの大きく増加しなかった。このことは、旧アスファルトの再生時に再生用添加剤④の使用量が少なくアスファルトの使用量が多い場合は、脆化を誘

発すると考えられる飽和分の蓄積を抑制できるとともに、酸化重合等によりアスファルテン等の巨大なコロイド状物質が蓄積されにくいことを示しているものと考えられる。

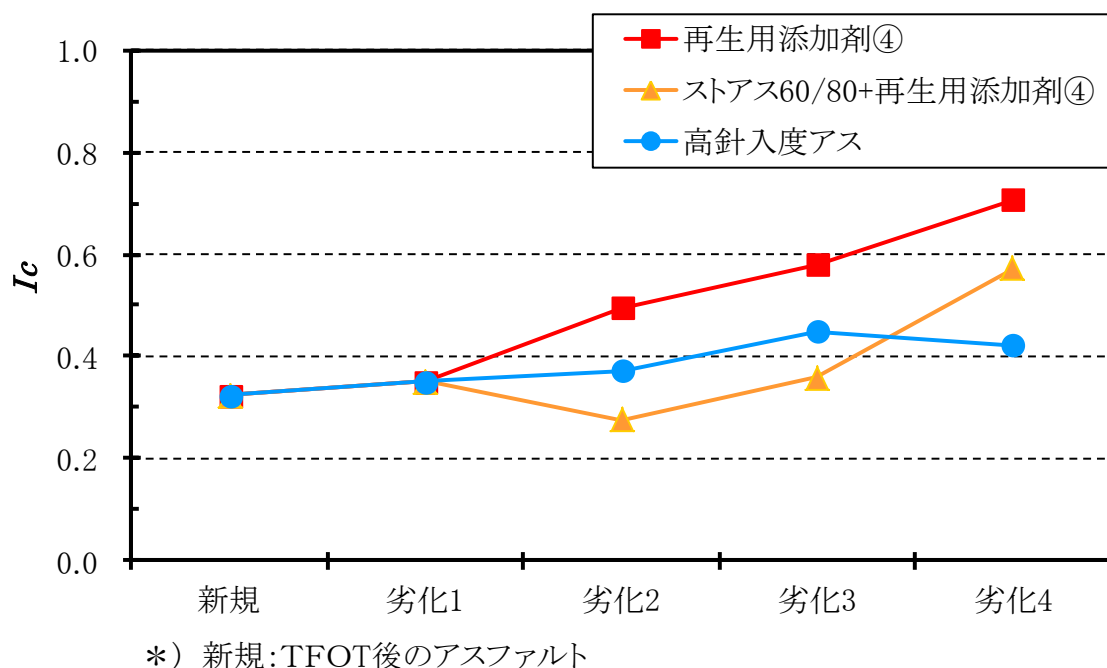


図-3.10 組成分析結果

c) 赤外吸光度

赤外吸光度測定の結果を図-3.11に示す。

図から、促進劣化後のアスファルトの酸化度 CI は再生回数が多くなるにしたがって大きくなる傾向が見られ、繰返し再生によって酸化物は蓄積されてゆくことが分かる。また、酸化物の蓄積度合いは再生用添加剤の使用量によって異なり、促進劣化3回目および4回目の酸化度 CI の値は、再生用添加剤の使用量が多いほど大きくなった。酸化度の増加は、アスファルトの酸化により生成されるカルボニル基等の増加を

表しており，再生用添加剤④の使用量が多いほど，新規に添加されるアスファルトの量が少ないため，繰返し再生によって酸化物はより蓄積されてゆく傾向が強いと考えられる．

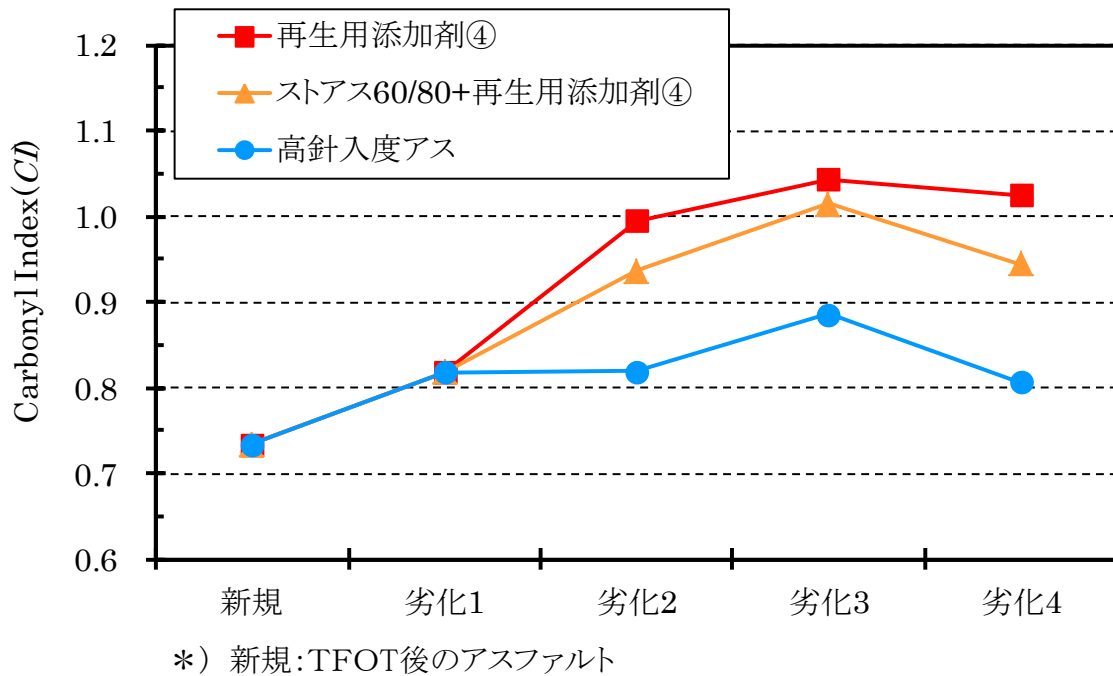


図-3.11 赤外吸光度(CI)測定結果

(2) アスファルト混合物で促進劣化と再生を繰返した場合

各再生段階における混合物からの回収アスファルトの軟化点試験結果を図-3.12に，伸度試験結果を図-3.13に示す．

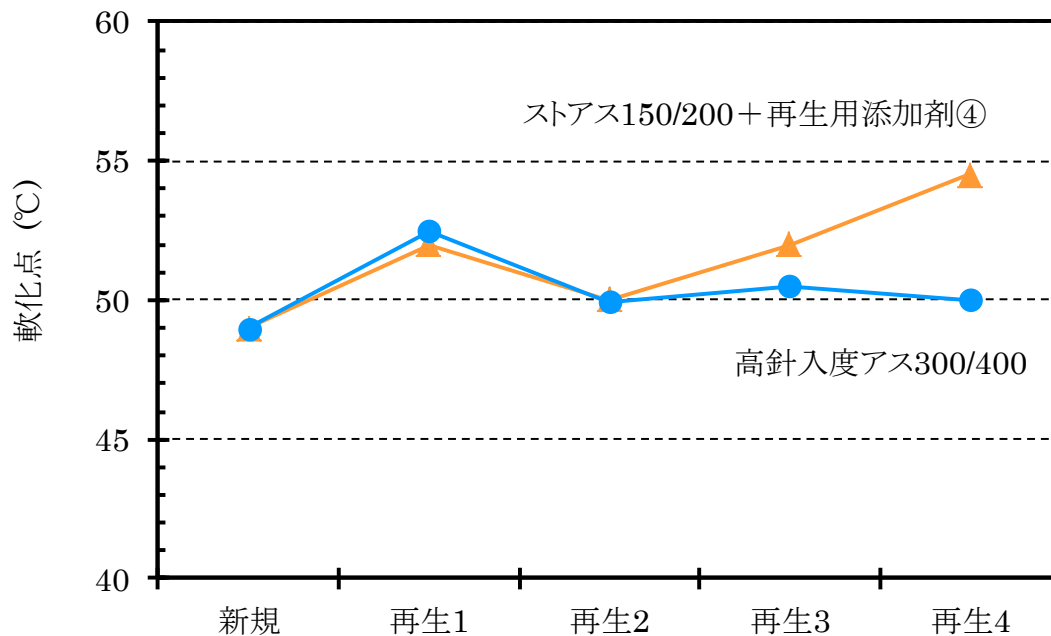
図-3.12 から，ストレートアスファルト 150/200 と再生用添加剤④を併用した場合は，高針入度アスファルトを用いた場合に比べ，再生回数が多くなるにしたがって軟化点が高くなる傾向が見られた．

また，図-3.13 より，ストレートアスファルト 150/200 と再生用添加剤④を併用した場合は，再生 3 回目以降で伸度が

20cm 程度となったのに対し、高針入度アスファルトのみで再生した場合は再生 4 回目まで伸度は 100cm 以上であった。

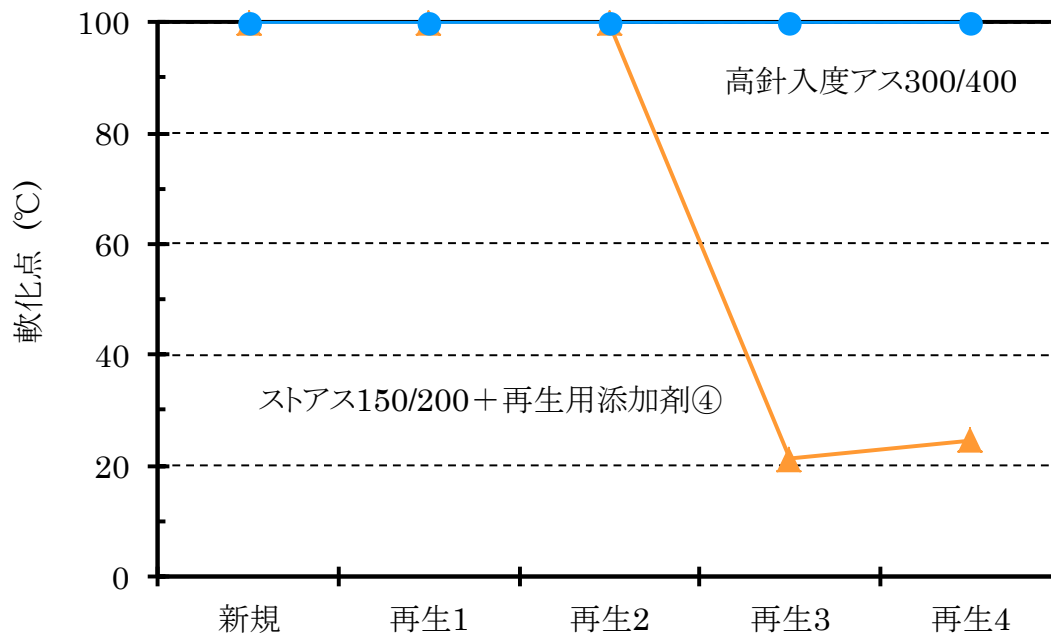
このことは、アスファルト単体での試験結果と同様に、混合物の状態での促進劣化と再生を繰り返した場合でも再生用添加剤④の使用量が多くなるほど、アスファルトの感温性が鈍くなり硬くなると同時に延性が低下する傾向があることを示している。

このことから繰り返し再生されたアスファルトの物理的性質の変化を抑制するためには、石油潤滑油系の再生用添加剤の使用量をより少なくすることが望ましいと考えられる。



*) 新規:新規混合物から回収したアスファルト

図-3.12 軟化点測定結果



*) 新規:新規混合物から回収したアスファルト

図-3.13 伸度測定結果

3.4 考察

一般に石油潤滑油系の再生用添加剤は，芳香族分が少なく，飽和炭化水素（パラフィン）成分（以下，飽和分）の多いものが使用される傾向がある．これは，多環芳香族炭化水素の発がん性リスクや比較的少ない添加量で旧アスファルトの針入度を回復させる能力の高いことなどの理由によると考えられる．

本章での実験において，一般的な石油潤滑油系の再生用添加剤の使用量によって繰返し再生されたアスファルトの物理的・化学的性状は徐々に新規のアスファルトとは異なったものとなることがわかったが，これは旧アスファルトを再生する際に使用する再生用添加剤の組成がアスファルトとは大きく異なっていることが原因であると考えられる．このことから，劣化したアスファルトを再生する場合には，石油潤滑油系の再生用添加剤の使用量をより少なくするために，より針入度の大きなアスファルトを新アスファルトとして用いることが望ましいと考えられる．

しかし本章では，ある一定の旧アスファルトの配合率（再生骨材配合率）のもとでの結果であり，その配合率が異なった場合について検討はなされていない．また，再生用添加剤の組成が再生アスファルトの性状に与える影響についても検討がされていない．さらには，これらの要因が再生混合物の性状に与える影響についても検討されていない．

このことから，次章においては，再生骨材配合率を変化させ，飽和分が多い一般的な石油潤滑油系の再生用添加剤を用

いて繰返し再生されたアスファルトや混合物の物理的・化学的な性状をより詳しく確認し，望ましい再生骨材配合率などを明らかにすることを目的に実験を行う必要がある。

3.5 まとめ

本章では，市販されている再生用添加剤や高針入度アスファルトが繰返し再生されたアスファルトの性状に与える影響を確認することを目的に，劣化と再生を繰返したアスファルトの物理的・化学的性状を確認した．その結果から，混合物が繰返し再生利用されることを考慮した場合に望ましいと考えられる旧アスファルトの再生方法およびその後の研究の方向性について考察を行った．

以下に，本章において得られた知見をまとめる．

- (1) 再生用添加剤の種類によって，繰返し再生されたアスファルトの性状は異なる．
- (2) 石油潤滑油系の再生用添加剤のみで繰返し再生されたアスファルトは，石油潤滑油系の再生用添加剤の使用量が少ない場合（ストレートアスファルトと石油潤滑油系の再生用添加剤との併用，高針入度アスファルトのみで再生）に比べ，以下のような状態にあることがわかった．
 - ・軟化点が上昇し，オリジナルアスファルトより感温性が低下する傾向がある
 - ・アスファルトの組成 Ic および酸化度 CI が上昇する度合いが大きい
 - ・繰返しの再生回数がより少ない段階で伸度が低下する
- (3) アスファルトが繰返し再生されることを考慮した場合，石油潤滑油系の再生用添加剤の使用量は，より少ないことが望ましいと考えられる．

【第3章の参考文献】

- 1) 加納孝志, 新田弘之, 佐々木巖, 西崎到, 久保和幸: 繰返し再生を考慮したアスファルト混合物の再生方法に関する研究, 舗装工学論文集第14巻, pp.117~122, 2009.12
- 2) (公社)日本道路協会: 舗装再生便覧(平成22年版), 2010.11
- 3) 峰岸順一, 橋本喜正: 再生アスファルト混合物への高針入度アスファルトの適用, 東京都土木技術支援・人材育成センター年報, pp.65~72, 2014.10
- 4) 新田弘之, 西崎到: 繰返し再生したアスファルトの性状, 第26回日本道路会議, 論文番号12125, 2005.10
- 5) (公社)日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 2007.6
- 6) (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.
- 7) 新田弘之: アスファルト舗装におけるリサイクル技術の開発とライフサイクル評価に関する研究, (独)土木研究所, 土木研究所報告 第217号, pp.1-66, 2011.

第4章 再生骨材配合率が繰返し再生したアスファルトと混合物の性状に与える影響¹⁾

4.1 概説

第3章の結果から，一般的に使用されている飽和分を多く含む再生用添加剤を用いた場合，繰返し再生されたアスファルトの性状は新規アスファルトと異なることが明らかとなった。

本章では，わが国で一般的に使用されている再生用添加剤の内，飽和分の多いものを使用してアスファルトや混合物が繰返し再生された場合に再生アスファルトや再生混合物の性状に与える影響の有無およびその程度を確認することを目的として，試験室内で劣化と再生を繰返した再生骨材配合率の異なる再生混合物およびアスファルトの物理的・化学的性状がどのように変化するのかを確認した。

4.2 実験概要

4.2.1 実験手順

本章では，混合物の劣化と再生を実験室内で繰返し，それぞれの劣化と再生の段階のアスファルトの物理・化学性状と再生混合物の工学的性状を確認した．実験手順を図-4.1に示す．なお，使用材料，促進劣化方法および各段階での実験の詳細は以下に詳述する．

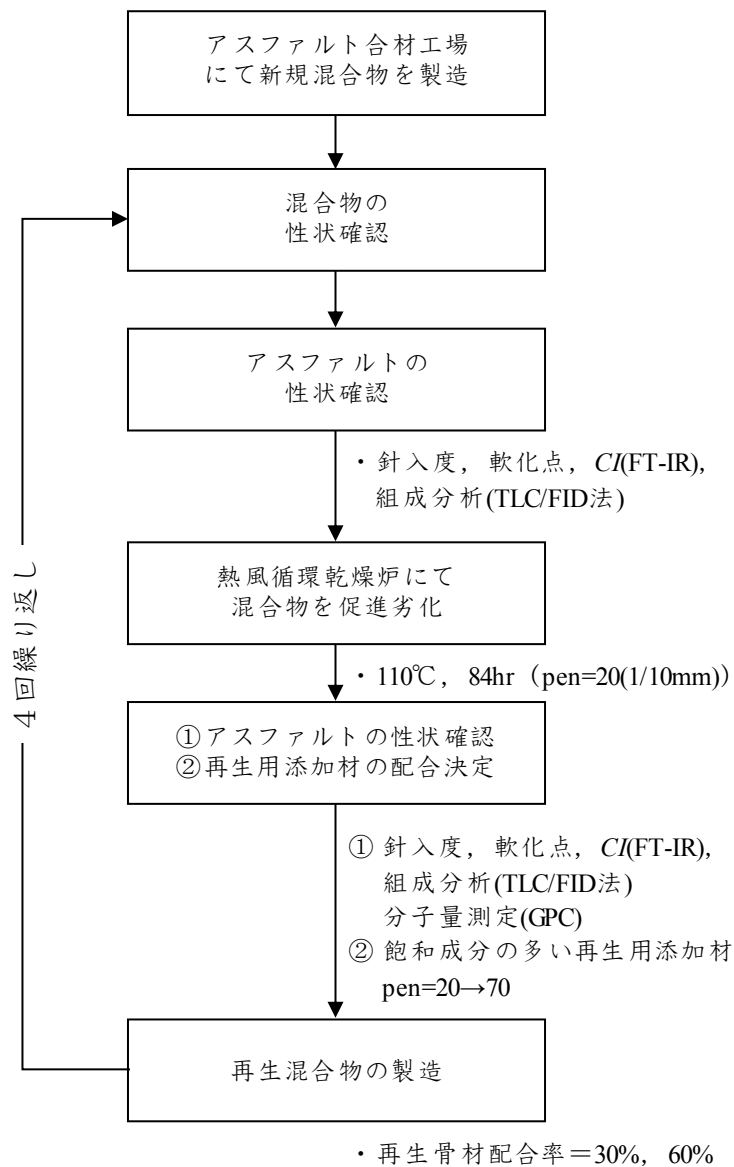


図-4.1 実験手順

4.2.2 使用材料

実験に使用した混合物は，表-4.1 に示す舗装用石油アスファルト 60/80（以下，オリジナルアスファルト）を使用した最大粒径が 13mm の密粒度アスファルト混合物で，最適アスファルト量は 5.3% である．また，劣化したアスファルトの再生には，一般に市販されている飽和分の多い再生用添加剤を用いた．再生用添加剤の性状を表-4.2 に示す．

表-4.1 使用したストレートアスファルト 60/80 の性状

密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	軟化点 ℃	伸度 15℃ cm
1.038	70	47.0	100+

表-4.2 再生用添加剤の組成

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
0.966	0.0	6.3	26.6	67.1

4.2.3 混合物の促進劣化方法

混合物の促進劣化は，簡便性を考慮して一般に普及している機器である熱風循環乾燥炉を用いて行った．促進劣化は，締め固めていない状態の混合物 7.5kg を 36×24cm のバットに敷きならし，なるべく直接熱風が当たらぬよう表面を幅広のアルミ箔で一重に覆い，アルミ箔の縁はバットの縁の返し

部分に折り込むようにして 110℃に設定した熱風循環乾燥炉で 84 時間養生した。なお、このときの養生時間（84 時間）は混合物の促進劣化後の回収アスファルトの針入度が 20 となる条件とした。

4.2.4 再生混合物の製造方法

促進劣化させた混合物は再生骨材として用い、再生用添加剤および新規骨材、新アスファルトとともに室内用縦型ミキサで混合し、再生混合物として再生した。再生手順を以下に示す。

- ① 再生骨材を 165℃の熱風循環乾燥炉内で 3 時間養生
- ② 再生骨材を室内用の縦型ミキサ内へ投入して 30 秒混合
- ③ 所定量の再生用添加剤を添加して 90 秒混合
- ④ 160℃の新規骨材を所定量投入し、30 秒混合
- ⑤ 160℃の新規アスファルトを所定量投入後、120 秒混合
- ⑥ 室内用縦型ミキサから排出
- ⑦ 各種試験用の型枠（ホイールトラッキング試験用、圧裂試験用）に再生混合物を所定量投入し、適切な締固め機を用いて締め固めて供試体とした。

なお、再生混合物の作製にあたっては、アスファルトの針入度が 70 程度に回復するように再生用添加剤を添加した。また、再生骨材の配合率は、わが国の地域ごとの再生骨材配合率の平均値がおよそ 30～60%となっていること²⁾を踏まえ、30%および 60%の 2 種類とした。

4.2.5 回収アスファルトの評価試験

新規混合物および再生 1～4 回の再生混合物から回収したアスファルト（以下，回収アスファルト）について，以下に示す物理性状試験および化学性状試験を実施した．

なお，混合物からのアスファルトの回収は，「G029 アスファルトの回収試験方法（JPI-5S-31-1988 準拠）」³⁾に従って行った．

(1) 物理性状試験

物理性状試験としては，針入度試験³⁾，軟化点試験³⁾を実施した．

(2) 化学性状試験

a) TLC/FID 法によるアスファルト組成分析試験⁴⁾

アスファルト組成成分は，前章で行った方法と同様に（株）LSI メディエンス社製のイアトロスキャン（MK-6s）を用いて TLC/FID 法にて分析した．試験法の概念および使用した溶媒などの条件は，**第 3 章**で示した図-3.2 および表-3.3 に示す通りである．

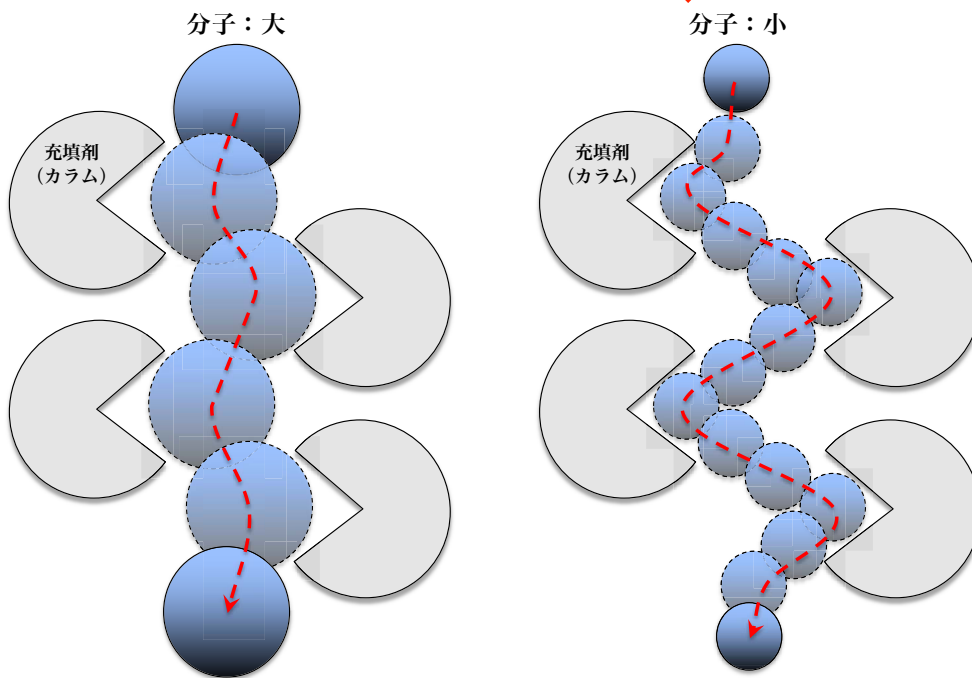
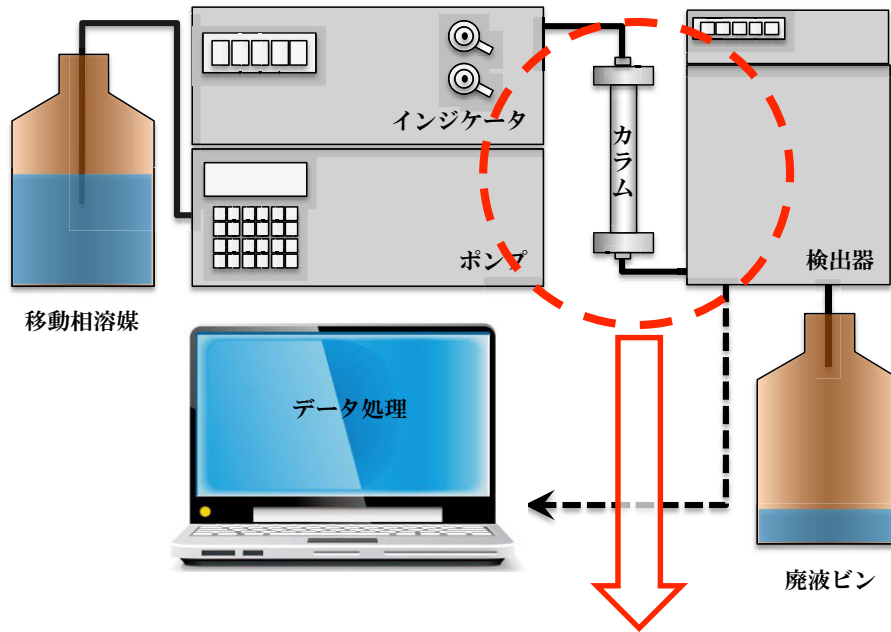
b) 赤外吸光度測定

酸化反応の進行を定量的に評価するため，日本分光(株)社製の FT/IR-4000 フーリエ変換型赤外分光光度計（FT-IR）を用いてアスファルトの酸化劣化の指標となる酸素含有官能基（カルボニル基）増加の挙動を測定し，*CI* を求めた．なお，FT-IR の測定条件等は，**第 3 章**の表-3.4 に示す通りである．

c)ゲルパーミエーションクロマトグラフィーによる分子量分布測定¹⁾

分子量分布の測定では，劣化時のアスファルトの分子量分布の違いを把握するために，ゲルパーミエーションクロマトグラフィー（Gel Permeation Chromatography: 以下，GPC）を用いて分子量分布の測定を行った．

GPCは，測定する物質の分子量の違いによって“充填剤（カラム）”が有する細孔への浸透のし易さが異なることを利用して分子量の分布を測定するものである．具体的には図-4.2に示すように，溶液中における分子サイズの大きいもの（分子量が大きいもの）はカラムの細孔への浸透がし難いため，カラム中の移動経路が短く溶出時間が早くなる．一方，分子サイズの小さいもの（分子量が小さいもの）は，細孔に浸透しやすく移動経路が長くなり溶出時間が遅くなる．GPCの概念を図-4.2に，使用したGPC装置の外観を写真-4.1に，操作条件を表-4.3に示す．



大きい分子（分子量大）の場合，充填剤（カラム）の細孔へ分子が入り込みにくく，移動経路が短くなる．
→溶出時間：早

小さい分子（分子量小）の場合，充填剤（カラム）の細孔へ分子が入り込み易く，移動経路が長くなる．
→溶出時間：遅

図 - 4.2 GPC の概念



写真-4.1 GPC装置の外観

表-4.3 GPC装置構成と操作条件

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

4.2.6 混合物性状の測定

新規混合物および再生混合物の性状は，圧裂試験⁵⁾とホイールトラッキング試験³⁾を実施し，それぞれ新規混合物，再生1回目および再生3回目の再生混合物の特性値を確認した．

なお，圧裂試験により得られる圧裂係数は，混合物の疲労抵抗性と相関があると言われている⁶⁾．このことから本研究においては，圧裂試験を各混合物の疲労抵抗性の確認を目的に実施した．また，ホイールトラッキング試験は，各混合物の耐流動性を確認するために実施した．

4.3 試験結果

4.3.1 アスファルトの性状

(1) 物理性状試験

a) 針入度試験

針入度試験結果を図-4.3に示す。促進劣化したアスファルトは、各段階において設計針入度70となるよう再生している。そのため、劣化と再生が複数回繰り返された場合でも、再生後および促進劣化後の混合物から回収したアスファルトの針入度は、それぞれ55程度および20程度となっており、目標とした再生と劣化が繰り返されていることを確認した。

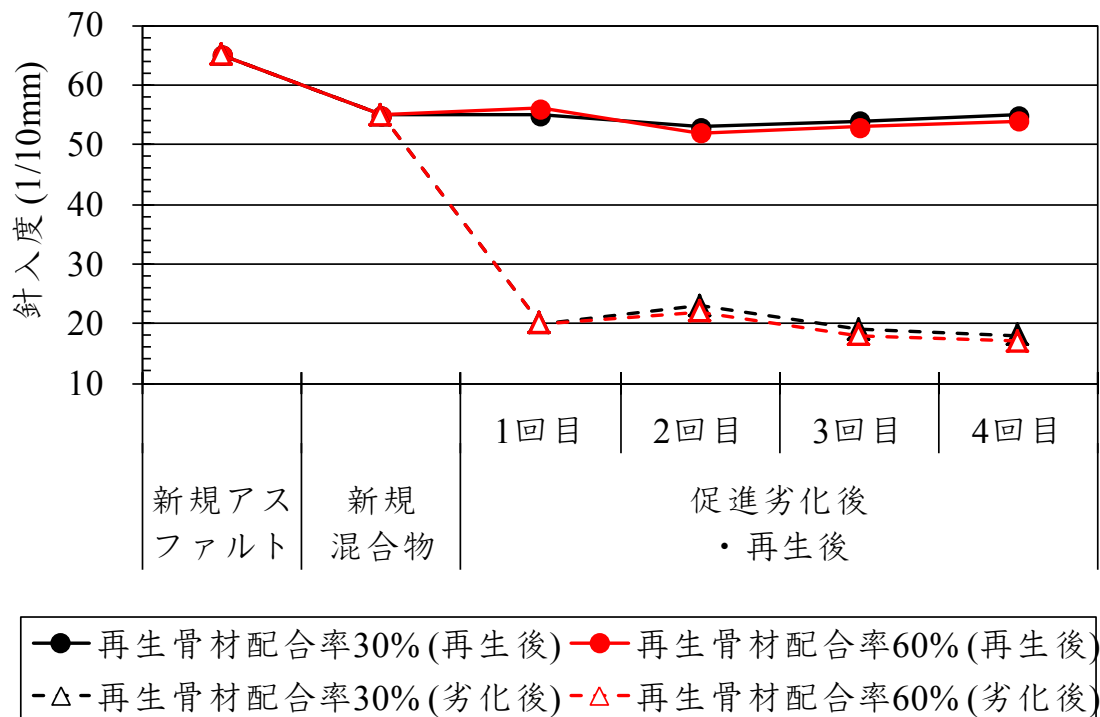


図-4.3 針入度試験結果

b) 軟化点試験

軟化点試験結果を図-4.4に示す。軟化点は、劣化と再生が繰り返されるにしたがって高くなる傾向がみられた。また、劣化と再生の繰り返しの回数が増えるにしたがって、再生骨材配合率が60%の場合は30%の場合に比べ、軟化点が高くなる傾向が見られた。

このことは、再生回数が増える、再生骨材配合率が高くなるにしたがってアスファルトの感温性が鈍くなることを示している。

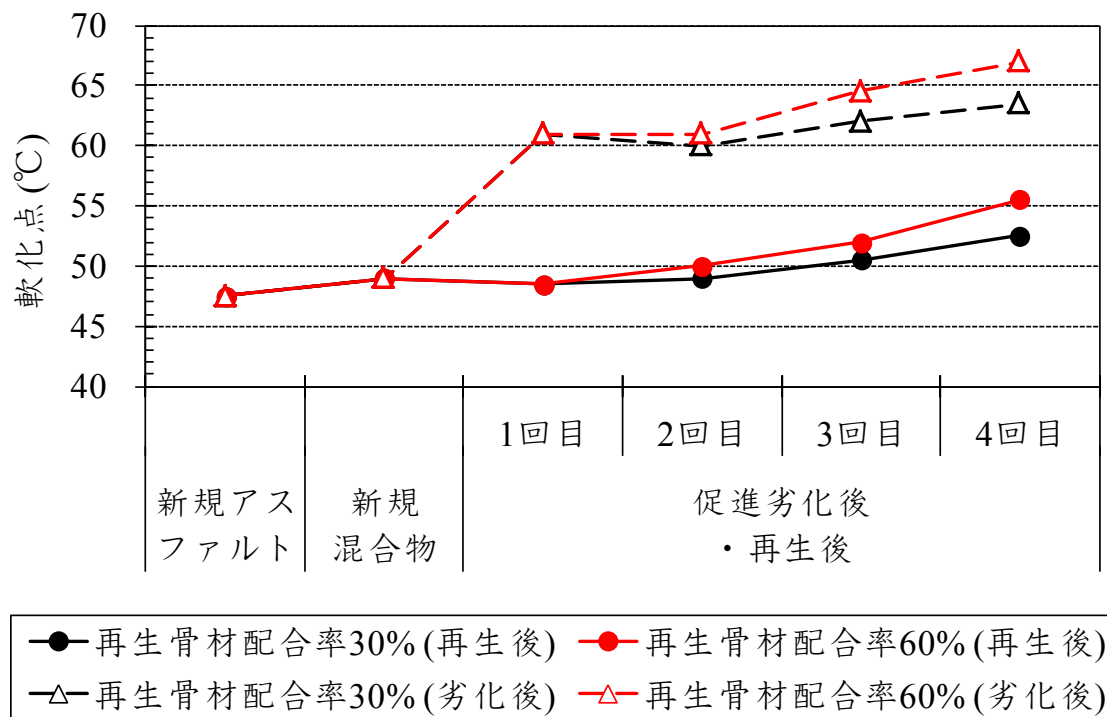


図-4.4 軟化点試験結果

(2) 化学性状試験

a) TLC/FID 法によるアスファルト組成分析試験

促進劣化試験後の混合物および再生混合物から回収したアスファルトの組成分析試験結果を図-4.5, 図-4.6 に示す.

図-4.5 から, 促進劣化後の混合物から回収したアスファルトの組成は, 再生骨材配合率の違いによらず, 促進劣化回数が増えるとアスファルテン分と芳香族分が減少し, レジン分と飽和分が増加する傾向が見られた.

一方, 図-4.6 に示すように, 再生骨材配合率が 30% の場合, 再生混合物から回収したアスファルトは繰返し再生された場合でも各成分の比率に大きな変化が見られなかったが, 再生骨材配合率 60% の場合には, 促進劣化後のアスファルトの分析結果と同様に, 繰返し再生されるとアスファルテン分と芳香族分が減少し, レジン分と飽和分が増加する傾向が見られた.

このことは, 再生骨材配合率が 30% 程度の場合には再生される際に追加される新アスファルトによって各成分が補われるが, 再生骨材配合率 60% の場合には新アスファルトによって補うことができず, 再生用添加剤の組成の影響を受けたものと考えられる.

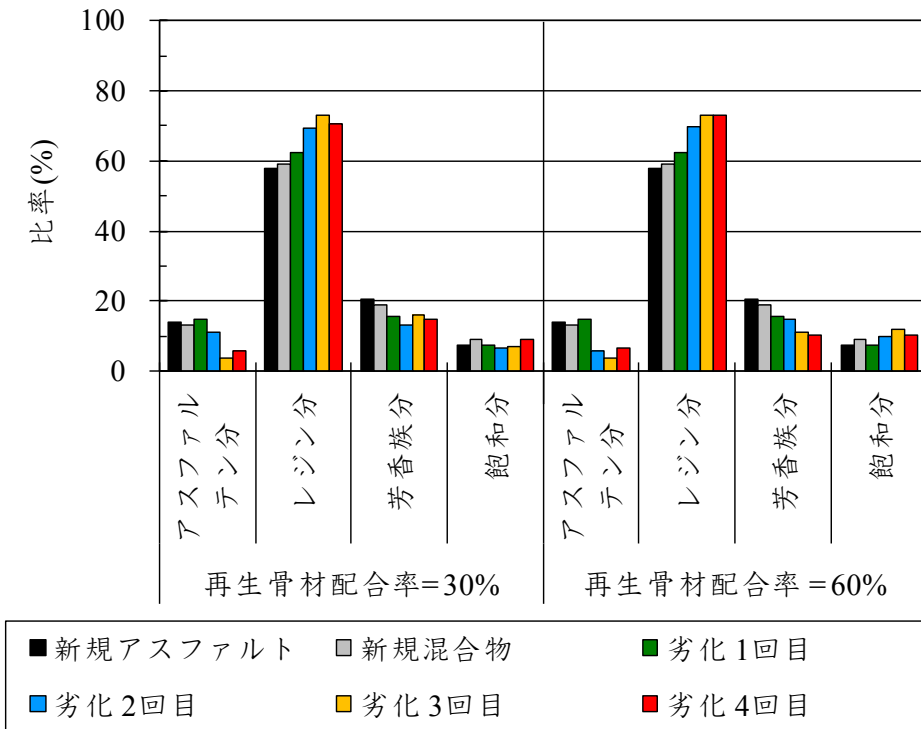


図-4.5 組成分析結果（促進劣化後）

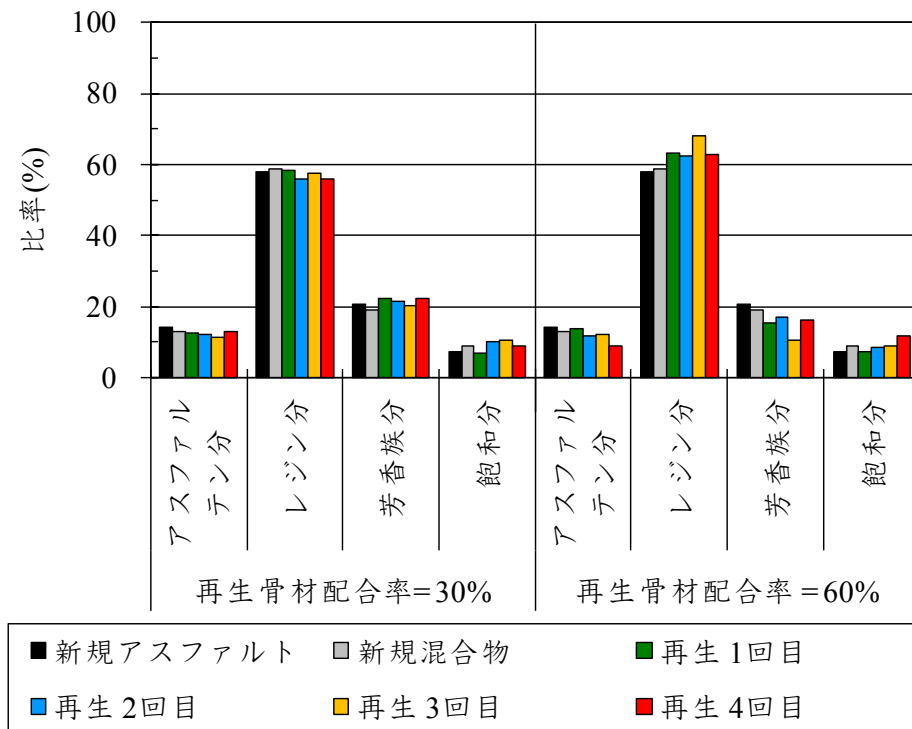


図-4.6 組成分析結果（再生後）

b) 赤外吸光度測定

促進劣化後，再生後の各混合物から回収したアスファルトの赤外吸光度測定結果よりカルボニル指数（*CI*）を求めた結果を図-4.7に示す．促進劣化後のアスファルトは，繰返しの劣化回数が多くなるに従って *CI*が増加する傾向が見られ，特に再生骨材配合率 60%は，30%に比べ急激に増加した．また，再生後のアスファルトについては，再生骨材配合率 30%の場合は *CI*に大きな変化が見られないのに対し，60%では再生回数が増えるにしたがって *CI*が増加する傾向が見られた．

このことは，再生骨材配合率が多いほど，再生時の新アスファルトの添加量が少ないため酸化物が蓄積されやすいことを示しており，飽和分の多い再生用添加剤を用いる場合，再生時の再生骨材配合率は，より低いことが望ましいと考えられる．

なお，新田の研究⁷⁾では，アスファルトの *CI*は，再生骨材配合率が 30%程度の場合は，繰返し再生された場合でも変化が小さいが，再生骨材配合率が高くなるに従って変化が大きくなる可能性があることを示している（図-2.12参照）が，本実験の結果はそれと一致するものであると言える．

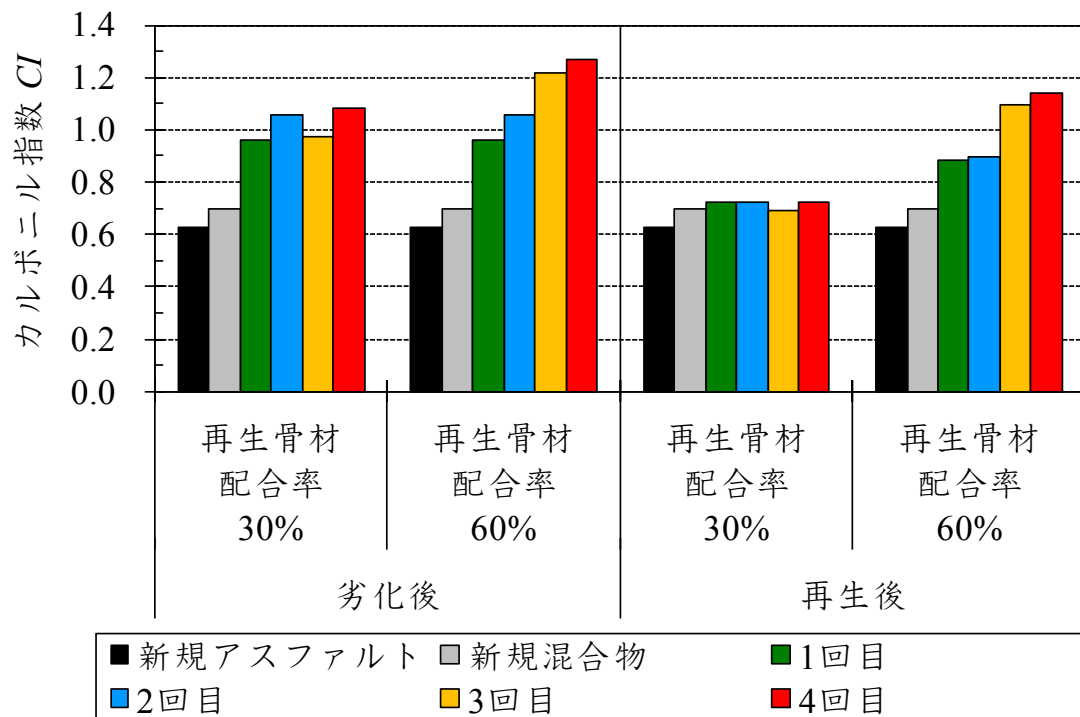


図-4.7 赤外吸光度測定結果

c) ゲルパーミアエーションクロマトグラフィーによる分子量分布測定

再生骨材配合率 30%および 60%で再生を繰返した混合物から回収したアスファルトの分子量分布測定結果をそれぞれ図-4.8 および図-4.9 にそれぞれ示す.

結果から, 再生骨材配合率 30%の場合は繰返しの劣化回数が増えても保持時間 7.0~7.2min 付近のピークに大きな差は見られないが, 再生骨材配合率 60%の場合は繰返しの劣化回数が増えるにしたがって, 大分子量の成分が多くなる傾向が見られた. この傾向は, 図-4.7 に示した *CI* の傾向と同様であることから, 本実験での分子量の増加は酸化による影響が大きいと考えられる. また, 再生骨材配合率 60%は 30%に比べ, 再生時に添加される新アスファルトが少ないことから, 酸化により劣化し分子量が大きくなったアスファルトの成分が蓄積され易いことを示していると考えられる.

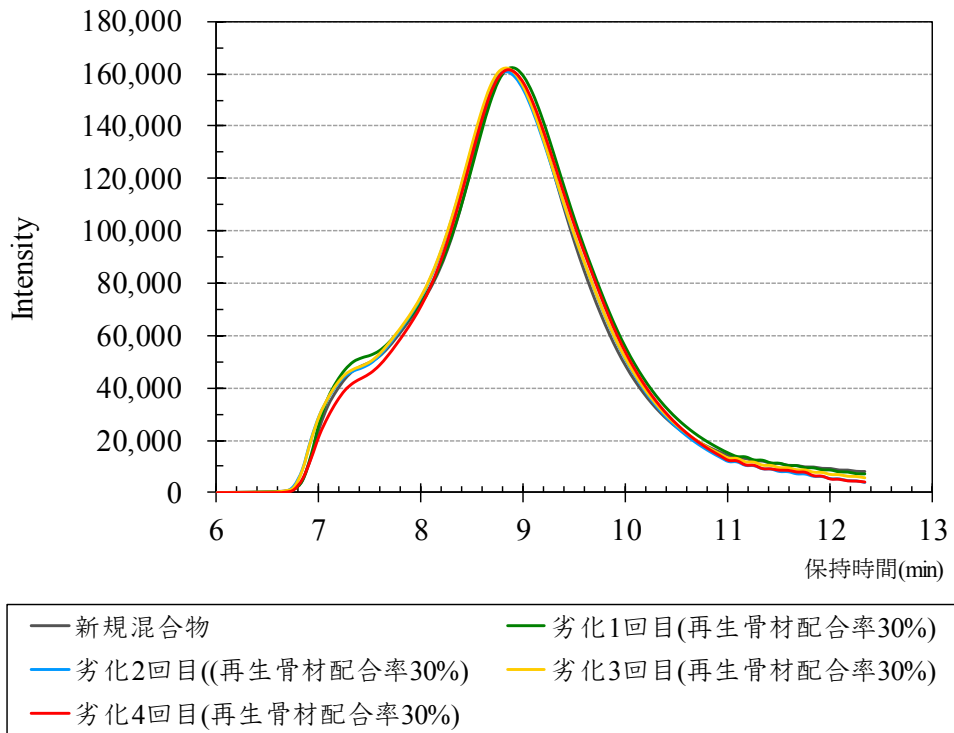


図-4.8 分子量分布測定結果(再生骨材配合率 30%)

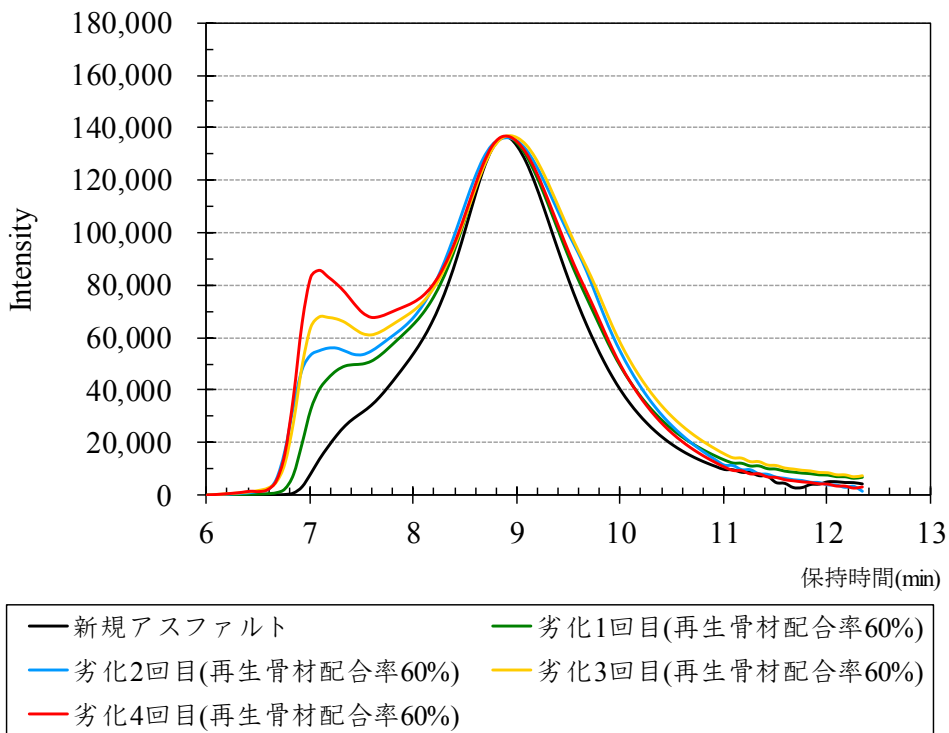


図-4.9 分子量分布測定結果(再生骨材配合率 60%)

4.3.2 再生混合物の性状

(1) 圧裂試験

新規混合物および再生 1 回，3 回の再生混合物の圧裂試験結果を図-4.10 に示す．結果から，再生骨材配合率 30%の圧裂係数は，再生回数が増加しても変化が小さかった．一方，再生骨材配合率 60%の圧裂係数は，再生骨材配合率 30%の場合に比べ大きく，かつ再生回数が増加するにしたがって大きくなる傾向が見られた．

圧裂係数は，大きいほど混合物が硬く，疲労抵抗性が低いことを表すことから，飽和分が多い再生用添加剤を使用し複数回繰返して再生された場合，再生骨材配合率 60%の再生混合物は 30%に比べ，硬く，疲労抵抗性が低くなる可能性があると考えられる．ただし，圧裂係数の値自体は，再生混合物として許容される範囲内にあることから，混合物のパフォーマンスに影響を与えるものではないと考えられる．

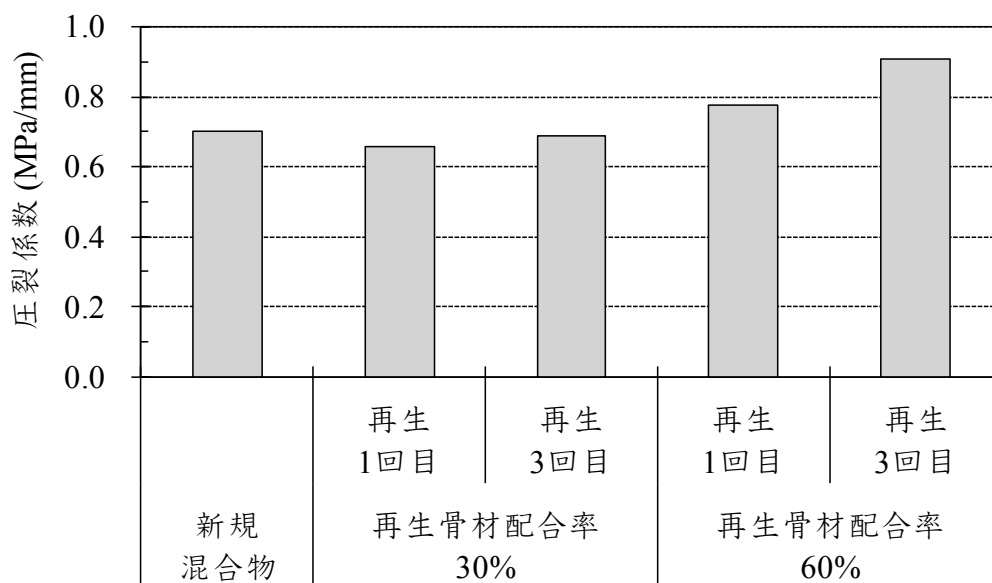


図-4.10 圧裂試験結果

(2) ホイールトラッキング試験

新規混合物および再生 1 回目, 3 回目の再生混合物のホイールトラッキング試験結果を図-4.11 に示す. 結果から, 再生骨材配合率が 30%の動的安定度(以下, DS)は新規混合物と同程度であったのに対し, 再生骨材配合率が 60%では大きくなる傾向がみられた. ただし, 再生骨材配合率が同じ場合, DS は再生回数が増加しても大きな差異は認められなかった. なお, この結果は図-4.4 の軟化点試験の結果を説明するものとなっている.

このことから, 再生骨材配合率 60%の再生混合物は 30%に比べ, 比較的温度の高い領域でも感温性が鈍くなり, 硬くなる傾向があると考えられる. ただし, DS 値は, アスファルト混合物として一般的な数値の範囲内にあることから, 混合物のパフォーマンスに影響を与えるものではないと考えられる.

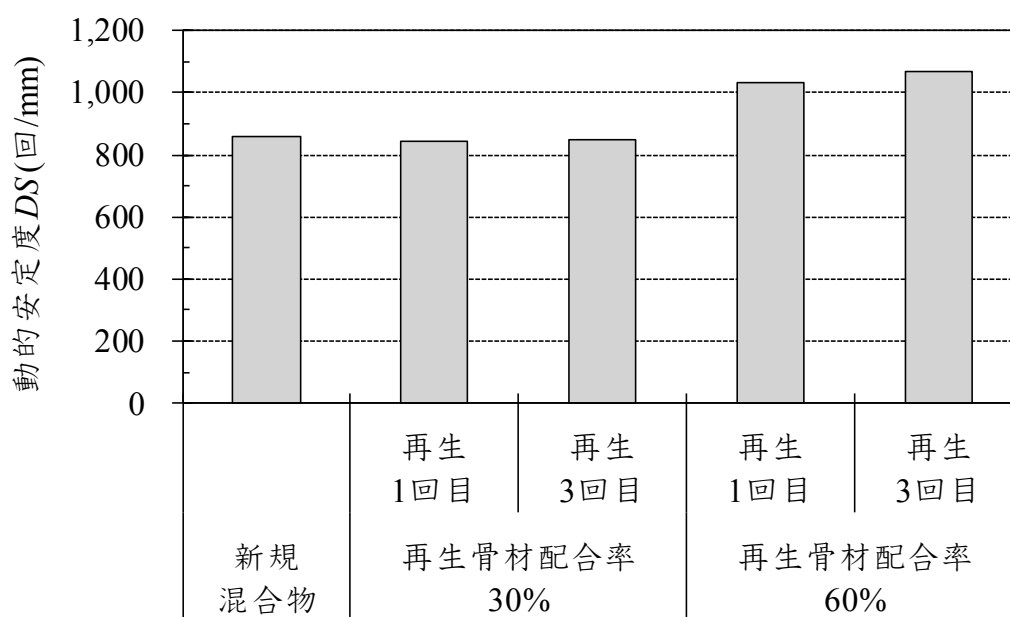


図-4.11 ホイールトラッキング試験結果

4. 4 考察

混合物が繰返し再生された場合に，再生骨材配合率および再生用添加剤が再生混合物や再生アスファルトの性状に与える影響について考察する．

本章では，飽和分の多い再生用添加剤を用いて混合物の再生が繰り返された場合に再生混合物および再生アスファルトの物理的および化学的な性状は，徐々に変化することが示されたが，再生骨材配合率の違いによりその変化の度合いに差が見られた．これは，再生骨材配合率が高い場合は，再生混合物の製造時に添加される新アスファルトの量が少ないため，旧アスファルトや再生用添加剤の性質の影響をより多く受け，再生アスファルトの物理的・化学的性質がオリジナルアスファルトと異なるものとなった結果と考えられる．このことから，飽和分の多い再生用添加剤を用いて混合物が繰返し再生される場合には，再生骨材配合率はより低いことが望ましいと考えられる．

一方，**第3章**では，アスファルトを再生する場合には，針入度が150程度以上のアスファルト（以下，高針入度アス）などを使用し，再生用添加剤の使用量を少なくすることで，再生されたアスファルトの性状の変化が少なくなることを確認している．このことは，アスファルトの組成に近い成分を再生混合物製造時により多く使用することで，比較的高い再生骨材配合率で劣化と再生が繰り返された場合でも，再生アスファルトや再生混合物の性状の変化が小さくなる可能性があることを示していると考えられる．

しかし、これまでの結果は、飽和分の多い再生用添加剤を用いた場合について検討したものであり、再生用添加剤の組成の違いが劣化と再生が繰り返された再生混合物や再生アスファルトの性状に与える影響を明らかにできていない。したがって次章においては、組成の異なる再生用添加剤などを用いて再生骨材配合率を変化させ、劣化と再生を繰り返した場合の再生混合物や再生アスファルトの性状を比較し、その影響の有無を明らかにして、混合物が繰り返し再生されることを考慮した場合の望ましい再生方法について検討する。

4.5 まとめ

本章では，わが国で一般的に使用されている再生用添加剤の内，飽和分の多いものを使用してアスファルトや混合物が繰返し再生された場合に再生アスファルトや再生混合物の性状に与える影響の有無およびその程度を確認することを目的として，試験室内で劣化と再生を繰返した再生骨材配合率の異なる再生混合物およびアスファルトの物理的・化学的性状がどのように変化するかを確認した．

以下に，本章で得られた知見をまとめる．

- (1) 繰返し再生されたアスファルトは，軟化点が高くなり感温性が低下する傾向が見られ，再生骨材配合率が高いほどその傾向が強くなった．
- (2) 繰返し再生されたアスファルトの組成は，再生骨材配合率 30%の場合，再生回数の違いにより大きな変化が見られないが，再生骨材配合率 60%の場合，再生回数が多くなるにしたがって，アスファルテン分と芳香族分が減少する傾向が見られた．
- (3) 繰返し再生されたアスファルトの *CI* は，再生骨材配合率 30%の場合，再生回数の違いにより大きな変化が見られないが，再生骨材配合率 60%の場合，再生回数が多くなるにしたがって，増加する傾向が見られた．
- (4) 劣化と再生が繰り返されたアスファルトの分子量分布は，再生骨材配合率 30%の場合には大きな変化が見られないが，

再生回数が多くなるにしたがって、分子量が大きな成分（保持時間 7.0～7.2min）の度数が多くなる傾向が見られた。このことは *CI* が増加する傾向と同様であることから、本実験での分子量の増加は酸化による影響が大きいと考えられる。

- (5) 飽和分の多い再生用添加剤を用いてアスファルト混合物が繰返し再生された場合、再生骨材配合率が 60%では、添加される新アスファルトの量が少ないため、再生されたアスファルトに酸化物等が蓄積されやすく、混合物の工学的性状およびアスファルトの物理的・化学的性質が変化する可能性があることが分かった。
- (6) 圧裂試験およびホイールトラッキング試験の結果より、繰返し再生された再生混合物は、再生骨材配合率が高いほど「硬く」、「疲労抵抗性が低く」なる可能性があると考えられ、特に再生骨材配合率が高い場合にその傾向が強くなった。ただし、それぞれの値は、再生混合物として一般的な数値の範囲内にあることから、再生混合物のパフォーマンスに大きな影響を与えるものではないと考えられる。
- (7) 飽和分の多い再生用添加剤を用いて混合物が繰返し再生される場合、再生骨材配合率が高いほど、再生混合物や再生アスファルトの性状の変化の度合いは大きくなる傾向があることから、再生骨材配合率はより低い方が望ましいと考えられた。

【第4章の参考文献】

- 1) 加納孝志，新田弘之，佐々木巖，川上篤史：飽和成分の多い再生用添加剤で繰り返し再生した再生混合物と再生アスファルトの性状に関する一検討，土木学会論文集 E1(舗装工学)，Vol.71，No.3，pp.I_65-I_71，2015.12
- 2) (一社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報（各年度版）
- 3) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.6
- 4) (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.
- 5) (公社)日本道路協会：舗装再生便覧(平成22年版)，2010.11
- 6) (独)土木研究所，(社)日本アスファルト合材協会：アスファルト舗装の再生利用に関する共同研究報告書，整理番号第408，2009.12
- 7) 新田弘之：アスファルト舗装におけるリサイクル技術の開発とライフサイクル評価に関する研究，(独)土木研究所，土木研究所報告 第217号，pp.1-66,2011.

第 5 章 再生用添加剤と再生骨材配合率がアスファルトと混合物の性状に与える影響¹⁾

5.1 概説

第 3 章および第 4 章の結果から，繰返し再生されたアスファルトと混合物の性状は，再生用添加剤の組成と再生骨材配合率の影響を受けることが明らかとなった．

本章では，わが国で一般的に使用されている組成の異なる再生用添加剤 2 種と高針入度アスを用いて，再生骨材配合率を変化させ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確認し，望ましい再生用添加剤の性質や再生骨材配合率について考察した．

5.2 実験概要

5.2.1 実験手順

本章では，混合時に受ける酸化劣化の状態をアスファルト合材工場により近づけることを目的に，室内用の二軸パグミルミキサ（写真-5.1，写真-5.2 参照）を用いて混合物を製造²⁾し，混合物の促進劣化と再生を 5 回実施し，劣化後と再生後のそれぞれの段階において再生混合物と再生アスファルトの物理・化学性状を確認した．実験手順を図-5.1 に示す．なお，使用材料，促進劣化方法および各段階での実験の詳細は以下に詳述する．



写真-5.1 パグミルミキサ（全景）



写真-5.2 パグミルミキサ (ミキサ内部)

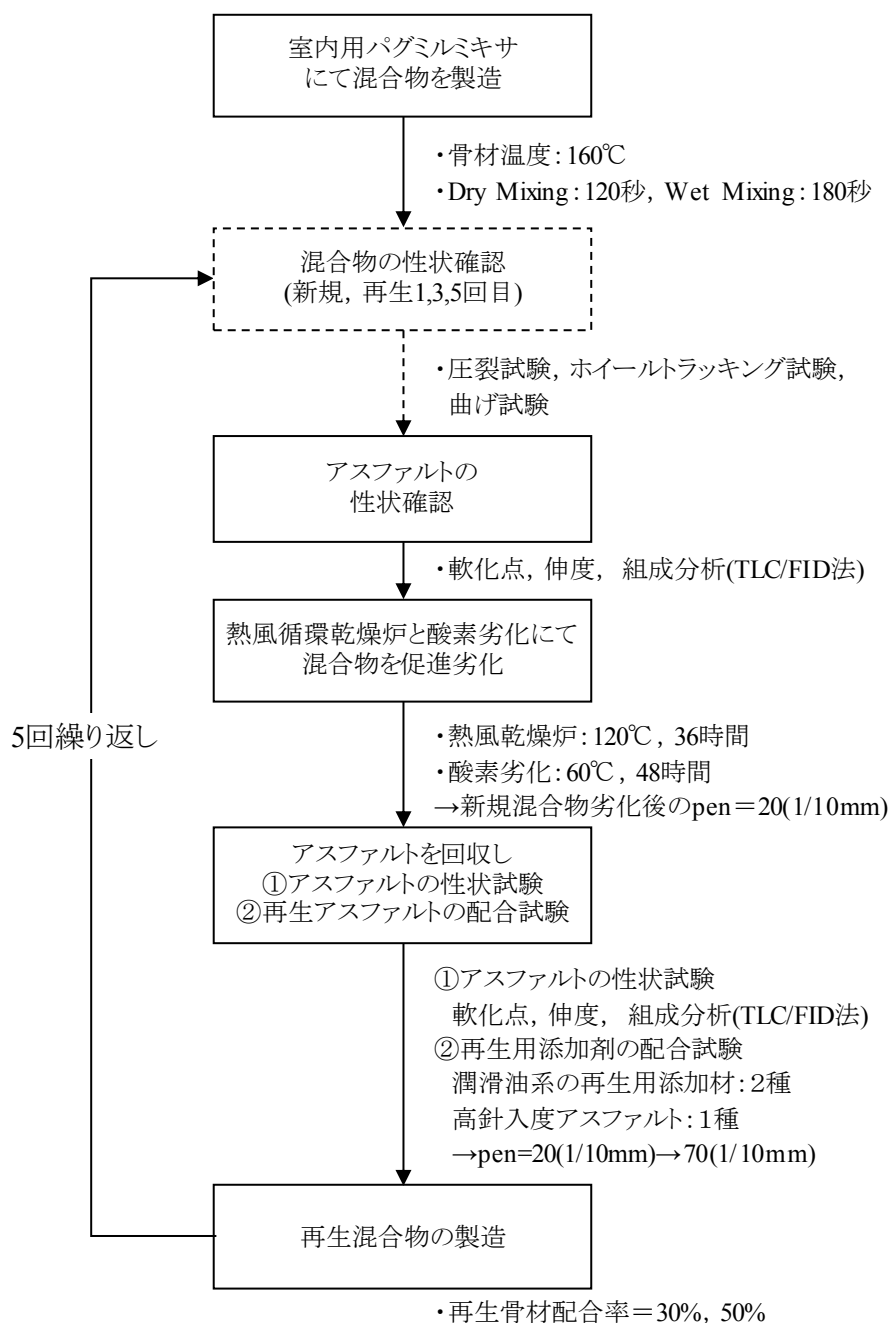


図-5.1 実験手順

5.2.2 使用材料

実験に使用した混合物は、表-5.1 に示す舗装用石油アスファルト 60/80（以下、オリジナルアスファルト）を使用した最大粒径が 13mm の密粒度アスファルト混合物（突固め回

数：両面 50 回）で，最適アスファルト量は 5.2%である．

また，劣化したアスファルトの再生には，一般に市販され，使用頻度が高いと思われる 3 種類の再生用添加剤を使用した．すなわち，組成成分の内，飽和分の多い潤滑油系の再生用添加剤（以下，添加剤 A）と比較的に飽和分が少なく芳香族分が多い再生用添加剤（以下，添加剤 B）および針入度が 270 の高針入度アスを用いた．再生用添加剤，高針入度アスの性状を表-5.2 に示す．

表-5.1 舗装用石油アスファルト 60/80 の性状

密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	軟化点 ℃	伸度 15℃ cm
1.034	60	52.0	100+

表-5.2 再生用添加剤と高針入度アスファルトの性状

種類	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
添加剤 A	0.966	0.0	2.4	16.9	80.7
添加剤 B	1.012	1.0	9.0	67.0	23.0
高針入度 アス	1.027	12.8	18.0	65.1	4.1

5.2.3 促進劣化方法

促進劣化は，熱風循環乾燥炉による熱劣化（以下，熱劣化）と酸素槽劣化促進試験（以下，酸素劣化）²⁾を組み合わせ，これら 2 種類の促進劣化を経た後の混合物から回収したアスファルトの針入度が 20 となるように，それぞれの促進劣化時間を定めて行った．これは，旧アスファルトの再生アスファルト混合物への利用限界である針入度とすることで，アスファルトがより劣化した状態で再生を繰り返すことができ，再生用添加剤の性質の影響がより明確になると考えたためである．

なお，本章では，比較的短時間でアスファルトの針入度を低下させることができる熱劣化と，混合物の供用中の劣化を再現する手法としての酸素劣化²⁾を組み合わせることで，最適アスファルト量の混合物の促進劣化を効率よく行うことができると考え，これら 2 種類の促進劣化方法を併用することとした．

以下に，促進劣化の手順を示す．

- ① 締め固めていない 7.5 kg の混合物を 36×24cm のバットに敷きならす
- ② なるべく直接熱風が当たらぬよう表面を幅広のアルミ箔で一重に覆い，アルミ箔の縁はバットの縁の返し部分に折り込む
- ③ 120℃に設定した熱風循環乾燥炉で 36 時間養生
- ④ 室温になるまで 1 日程度放冷
- ⑤ 60℃に調整した恒温槽内にバットを静置

- ⑥ 真空ポンプで恒温槽内の空気を抜き取った後，酸素を充填し 48 時間養生（図-5.2 参照）

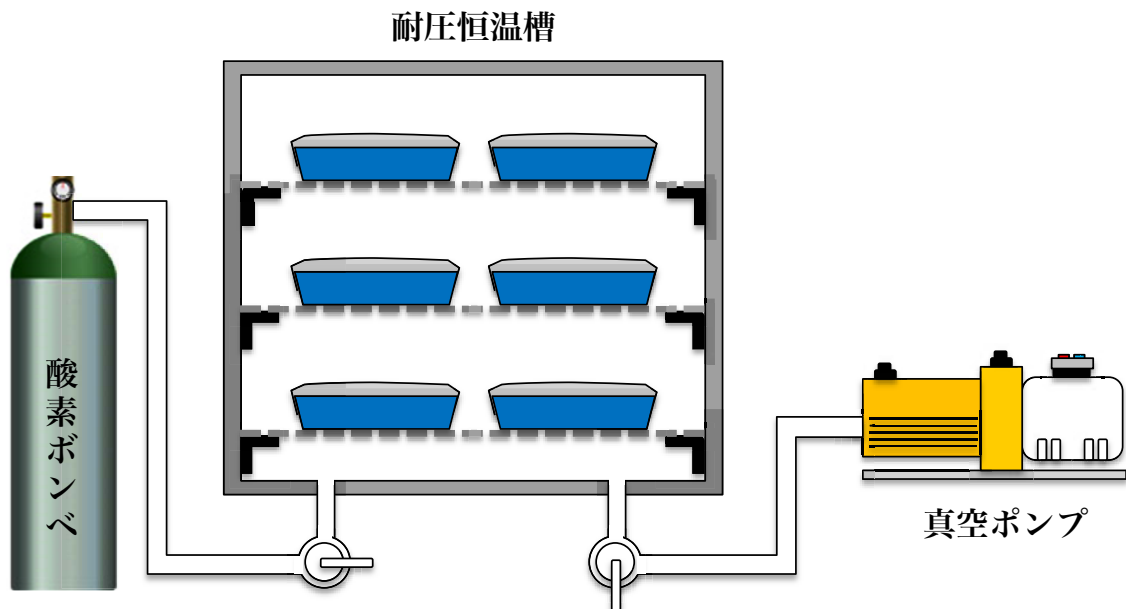


図-5.2 促進酸素劣化の概要

5.2.4 再生混合物の製造方法

劣化させた混合物は，再生骨材として用い，添加剤 A，B および高針入度アスを用いて室内用二軸パグミルミキサで混合し，再生した．

なお，劣化したアスファルトは，回復後の針入度が 70(1/10mm)となるよう調整した上で再生混合物を製造した．これは，設計針入度を大きくすることで，より多くの再生用添加剤等を添加することができ，再生アスファルトの性状に与える再生用添加剤等の影響がより明確になると考えたためである．また，再生骨材の配合率は，地域ごとの配合率の平均値を踏まえ 30%と 60%とする予定であったが，再生骨材配

合率 60%で高針入度アスを用いた場合に再生後のアスファルトの針入度を 70 まで回復させることができなかった。そのため、再生骨材の配合率は 30%および 50%の 2 種類とした。

5.2.5 アスファルトの物理・化学性状に関する試験

新規混合物および促進劣化後、再生後の各段階の混合物から回収したアスファルト（以下、回収アスファルト）について、以下に示す物理性状試験および化学性状試験を実施した。

(1) 物理性状試験

物理性状試験としては、針入度試験³⁾、軟化点試験³⁾、伸度試験³⁾を実施した。

(2) 化学性状試験

アスファルト組成成分は、(株)LSI メディエンス製のイアトロスキャン(MK-6s)を用いて薄層クロマトグラフ法(以下、TLC/FID 法)⁴⁾にて分析した。使用した溶媒などの条件は**第 3 章**で示した表-3.3 と同様である。

5.2.6 混合物の工学的性状に関する試験

新規混合物および再生混合物の性状は、圧裂試験(圧裂係数)⁵⁾、ホイールトラッキング試験(動的安定度)³⁾、曲げ試験(曲げ強度、曲げひずみ)³⁾により確認した。なお、各試験は、新規混合物、再生 1、3、5 回目の再生混合物で行った。また、曲げ試験では、50×50×300mm の直方体に整形した供試体を用いた。なお、これらの試験を選定した理由は、アスファルト混合物に求められる基本的な性状である「疲労抵抗性(圧

裂試験)」、「耐流動性 (ホイールトラッキング試験)」、「可撓性 (曲げ試験)」を確認するためである。

5.3 試験結果

5.3.1 回収アスファルトの性状

(1) 物理性状試験

a) 軟化点試験

軟化点試験結果を図-5.3に示す。軟化点は、再生回数が多くなるにしたがって高くなる傾向がみられた。特に添加剤Aは、添加剤Bおよび高針入度アスに比べ、軟化点が高くなる傾向が見られた。

このことは、再生回数が多くなるにしたがってアスファルトの感温性が鈍くなることを示している。

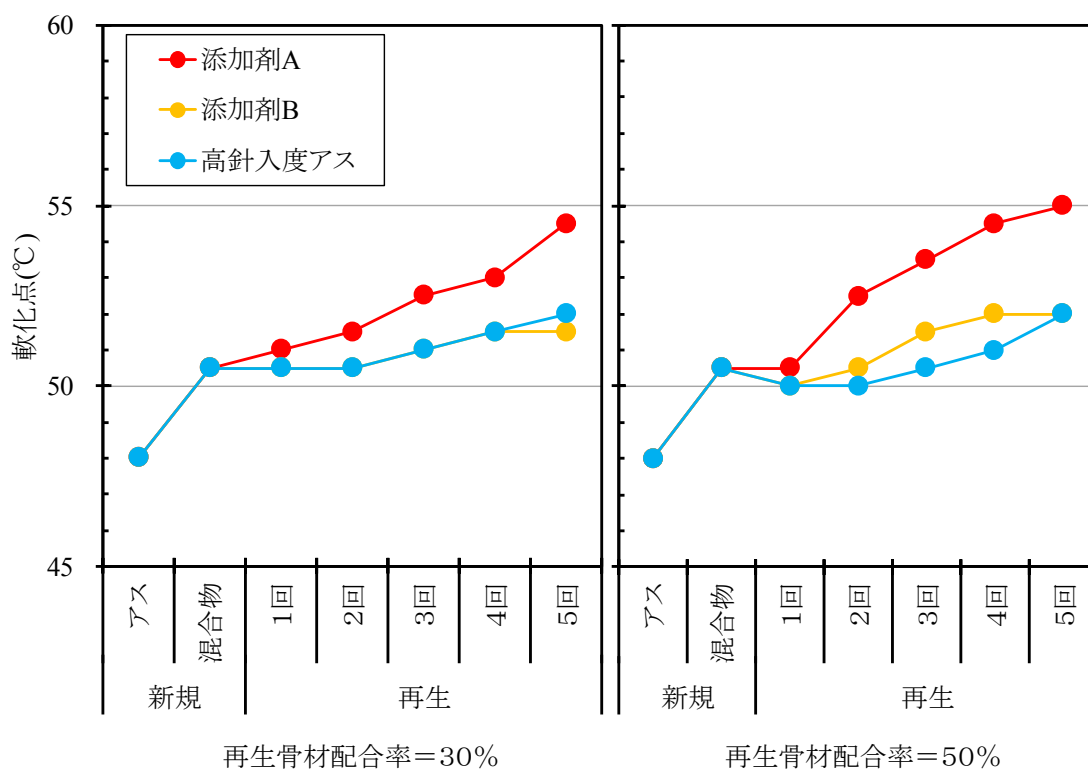


図-5.3 軟化点試験結果

b) 伸度試験

伸度点試験結果を図-5.4に示す。再生骨材配合率が30%の場合、添加剤の違いに関わらず伸度は再生回数4回まで変化が見られないが、再生回数5回目で添加剤AとBの伸度が低下した。また、再生骨材配合率が60%の場合は、添加剤Aが再生3回目で、添加剤Bが再生4回目で伸度が低下し始めた。なお、高針入度アスを使用した場合は、再生骨材配合率によらず、再生5回目でも伸度は低下しなかった。

このことは、再生骨材配合率が高く、再生回数が多くなるにしたがって再生アスファルトの延性は低下する傾向があり、添加剤の組成の違いによって、再生アスファルトの延性の低下の程度に差が生じる可能性のあることを示している。

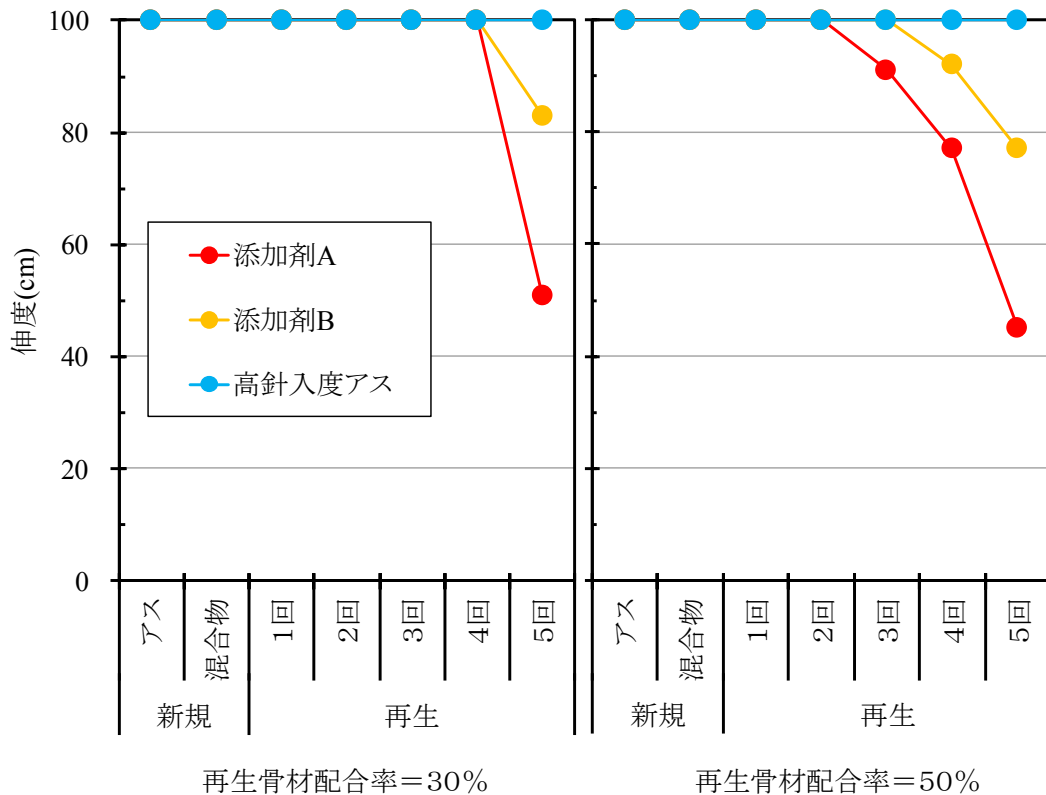


図-5.4 伸度試験結果

(2) 化学性状試験

再生骨材配合率 30%および 50%の再生混合物から回収したアスファルトの組成分析試験から算出した I_c を図-5.5に示す。

この結果から、再生骨材配合率が 30%の再生混合物から回収したアスファルトは、添加剤の種類が異なっても再生回数の増加に伴う各成分の比率の変化に明確な差が見られなかった。一方、再生骨材配合率 50%の場合、添加剤の種類によって I_c の値に差が見られ、特に添加剤 A は、再生回数が多くなるにしたがって I_c が増加する傾向を示した。このことは、飽和分の多い添加剤を用いた場合でも、再生骨材配合率が低い場合には劣化成分の蓄積量は増加せず、再生骨材配合率が高い場合には劣化成分の蓄積量は増加する可能性を示していると考えられる。

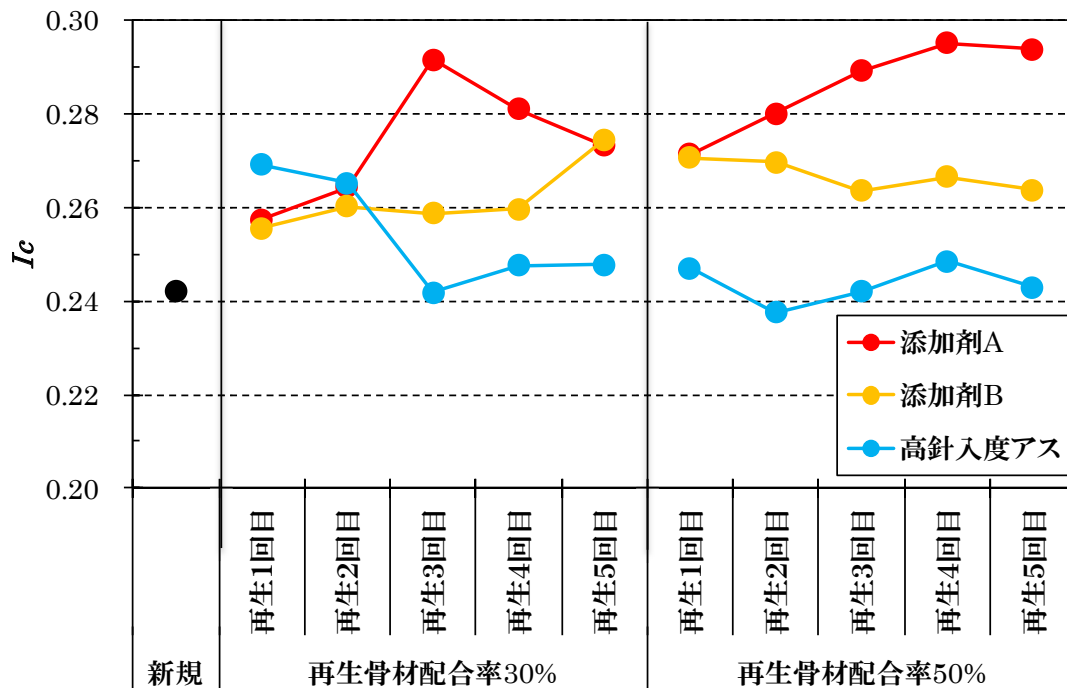


図-5.5 組成分析結果（再生骨材配合率 30%）

5.3.2 再生混合物の工学的性状

(1) 圧裂試験

新規混合物および再生 1, 3, 5 回目の各再生混合物の圧裂試験結果を図-5.6 に示す。図より，再生骨材配合率 30%の圧裂係数は，新規混合物と同程度で，また再生回数の増加に対する変化が小さかった。一方，再生骨材配合率 50%の圧裂係数は，再生骨材配合率 30%の場合に比べ若干大きく，かつ再生回数が増加するにしたがって大きくなる傾向が見られた。特に飽和分が多く，芳香族分の少ない添加剤 A でその傾向が顕著であった。

このことは，再生骨材配合率が比較的多い場合，繰返し再生された再生混合物は，疲労抵抗性が低下する可能性があり，添加剤の組成によってはその傾向が顕著になる可能性があることを示していると考ええる。ただし，圧裂係数は，アスファルト混合物として一般的な数値の範囲内にあることから，再生混合物のパフォーマンスに影響を与えるものではないと考えられる。

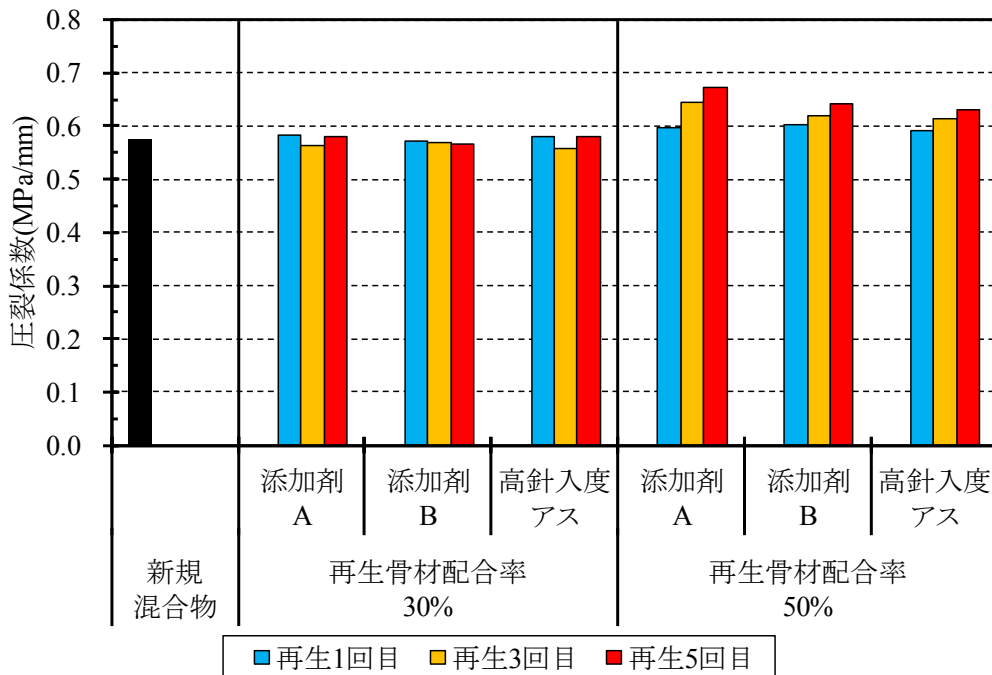


図-5.6 圧裂試験結果

(2) ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験結果を図-5.7に示す。これより、再生混合物は新規混合物に比べ、再生回数が多くなるにしたがってDSが大きくなる傾向が見られた。また、再生骨材配合率30%に比べ、50%のDSは大きくなったが、添加剤の違いによる明確な差は見られなかった。

このことから、再生混合物は、添加剤の種類によらず再生回数が多くなるにしたがって、新規混合物に比べ比較的温度の高い供用温度領域において感温性が低下し、硬くなる傾向があり、再生骨材配合率が高いほどその傾向が顕著になると考えられる。ただし、DS値は、アスファルト混合物として一般的な数値の範囲内にあることから、混合物のパフォーマンスに影響を与えるものではないと考えられる。

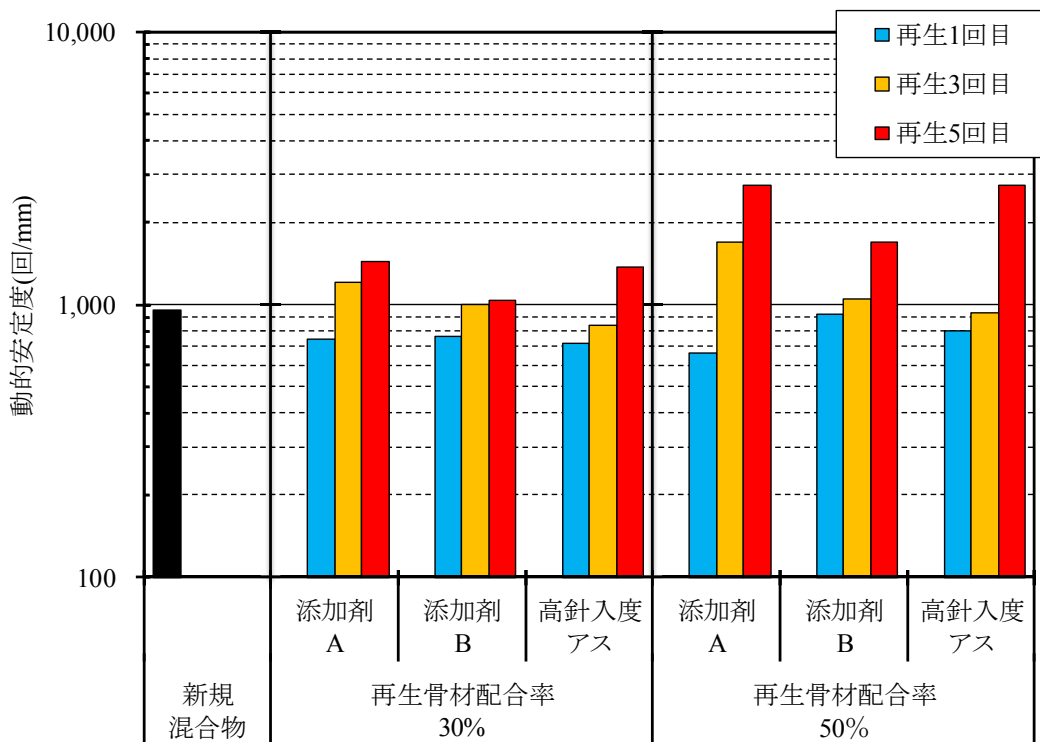


図-5.7 ホイールトラッキング試験結果

(3) 曲げ試験

新規混合物および再生 1, 3, 5 回目の再生混合物の曲げ試験結果を図-5.8～5.11 に示す。

図-5.8, 図-5.9 から, 曲げ強度は再生用添加剤の違いに関わらず, 再生回数が増えるにしたがって低下する傾向が見られた。また脆化点は, 新規混合物と比較して再生骨材配合率 30% の場合は再生 3 回目以降で低温側に約 5℃ 程度移行し, 再生骨材配合率 50% の場合は添加剤 A における再生 5 回目で低温側に約 7℃ 移行したケースを除き, 再生することで低温側に約 5℃ 移行した。

また, 図-5.10, 図-5.11 から, 再生混合物の曲げひずみは, 添加剤 B および高針入度アスは新規混合物と同程度であった

が，添加剤 A はおよそ 0～10℃ の試験温度領域で新規混合物と比較して大きくなった．

このことから，密度が小さく，粘性が低い飽和分を多く含む添加剤は，脆化点や曲げひずみの変化の程度が大きくなる可能性があると考えられる．

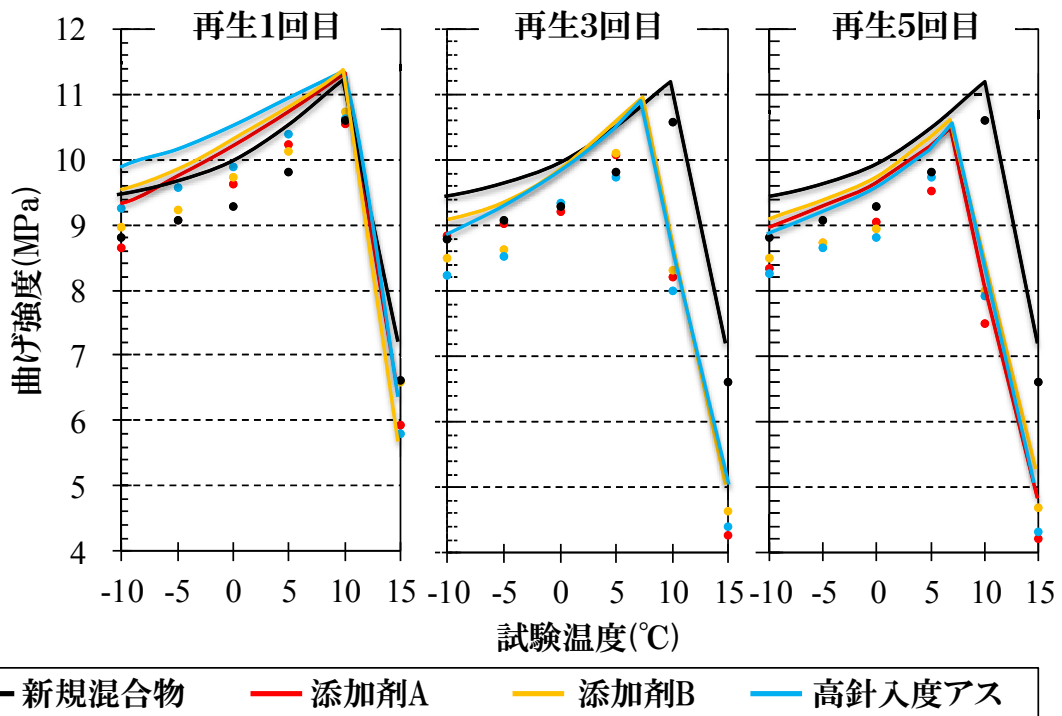


図-5.8 曲げ試験結果（曲げ強度：再生骨材配合率 30%）

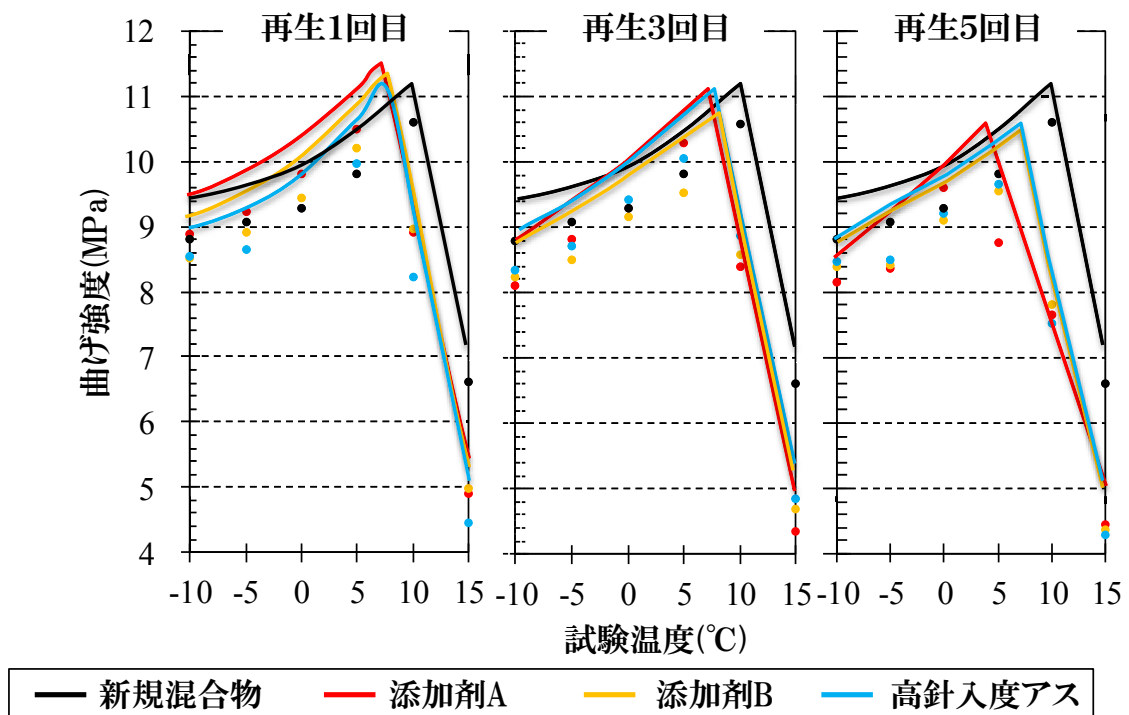


図-5.9 曲げ試験結果（曲げ強度：再生骨材配合率 60%）

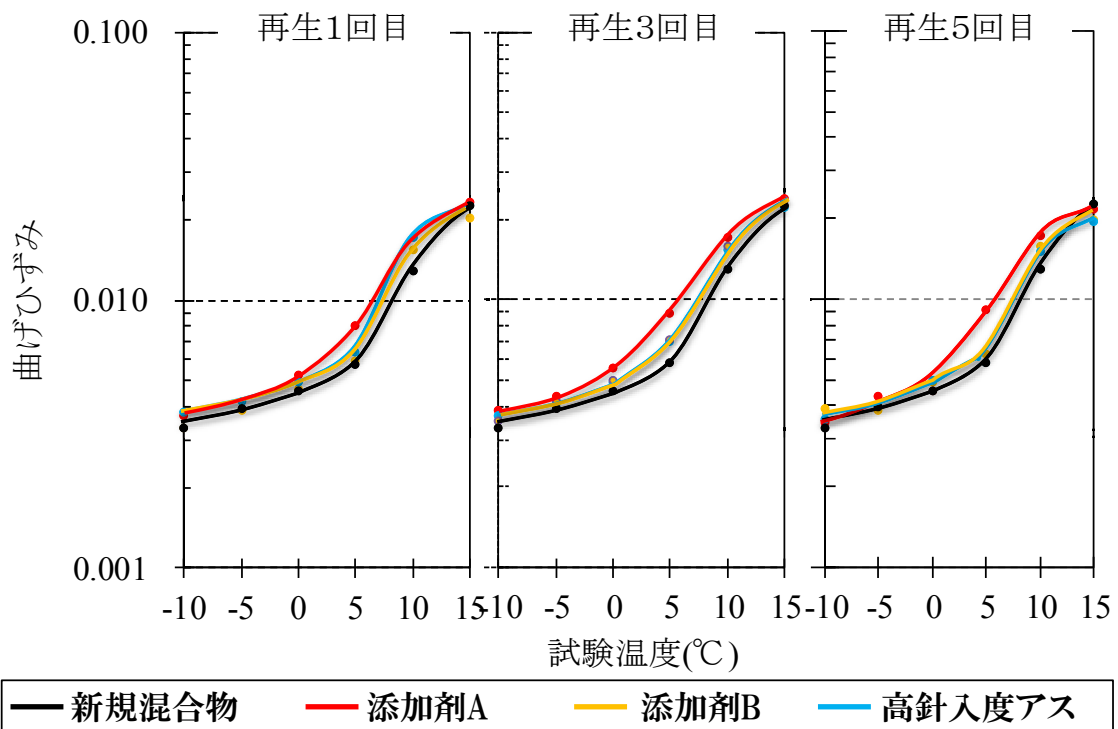


図-5.10 曲げ試験結果（曲げひずみ：再生骨材配合率 30%）

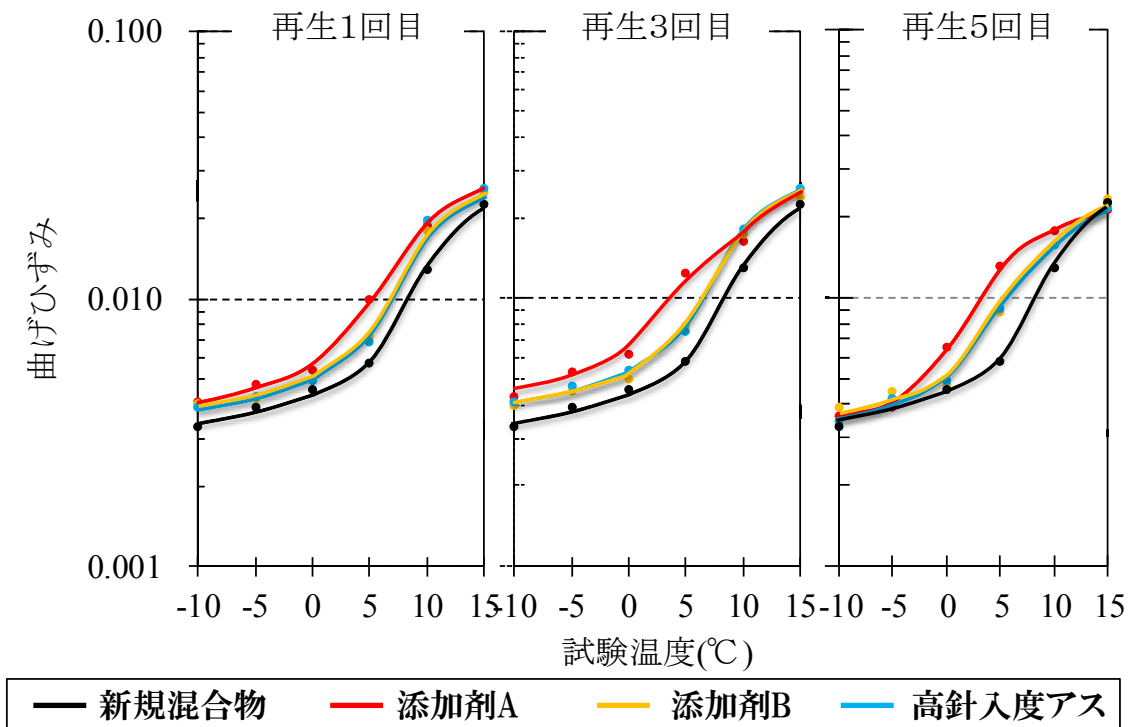


図-5.11 曲げ試験結果（曲げひずみ：再生骨材配合率 60%）

5.4 考察

以上の結果から，劣化と再生を繰り返した再生アスファルトと再生混合物の性状は，再生骨材配合率と再生用添加剤の組成の違いによって変化する可能性があることがわかった．具体的には，再生骨材配合率が30%の場合は使用する再生用添加剤の組成によらず再生アスファルトと再生混合物の性状の変化は少ないが，再生骨材配合率が50%の場合は飽和分が多く，芳香族分の少ない再生用添加剤ほど再生アスファルトと再生混合物の性状の変化が大きくなった．ただし，再生混合物の性状は，アスファルト混合物として一般的な数値の範囲内にあることから，混合物のパフォーマンスに影響を与えるものではないと考えられる．

このことから，混合物が繰り返し再生されることを前提にした場合，再生骨材配合率を比較的高い水準で維持するためには再生用添加剤の組成について考慮する必要があるが，本研究の結果からは飽和分が少なく芳香族分の多い添加剤の使用が望ましいと考えられた．

また，使用する再生用添加剤の組成等について考慮しない場合には，再生骨材配合率は比較的低くすることが望ましいと考える．

5.5 まとめ

本章では，わが国で一般的に使用されている組成の異なる再生用添加剤 2 種と高針入度アスを用いて，再生骨材配合率を変化させ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確認し，望ましい再生用添加剤の性質や再生骨材配合率について考察した．

以下に，本章で得られた知見をまとめる．

- (1) 軟化点は，再生回数が多くなるにしたがって高くなる傾向がみられ，アスファルトの感温性が鈍くなると考えられた．また，飽和分が多く芳香族分の少ない添加剤 A は，より感温性が低下する可能性があることがわかった．
- (2) 伸度は，再生骨材配合率が高く，再生回数が多くなるにしたがって低下し，再生アスファルトの延性は低下する傾向がみられた．また，飽和分が多く芳香族分の少ない添加剤 A は，伸度の低下の程度が大きく，より早い再生回数で伸度が低下し始めた．このことから，再生アスファルトの延性は，再生用添加剤の組成の影響を受けることがわかった．
- (3) 再生アスファルトの組成は，再生回数と再生骨材配合率が多いほど，添加剤の組成の影響を強く受けることがわかった．
- (4) 再生混合物は再生回数が多くなるにしたがって圧裂係数が大きくなる傾向があり，疲労抵抗性が低下し，飽和分

が多く芳香族分の少ない添加剤はその傾向が顕著になる可能性があることがわかった。

- (5) 動的安定度は、再生回数と再生骨材配合率が多いほど大きくなる傾向が見られたが、再生用添加剤の違いによる差は、明確には見られなかった。
- (6) 再生混合物は再生回数が増加するにしたがって脆化点が低温側へ移行し、0～10℃の範囲の曲げひずみが大きくなる傾向が見られた。特に、飽和分が多く芳香族分の少ない添加剤 A は、その傾向が顕著であった。
- (7) 各再生混合物の性状は、アスファルト混合物として一般的な数値の範囲内にあることから、混合物のパフォーマンスに影響を与えるものではないと考えられる。
- (8) 混合物が繰返し再生されることを前提にした場合、再生骨材配合率を比較的高い水準で維持するためには再生用添加剤の組成について考慮する必要があり、本研究の結果からは飽和分が少なく芳香族分の多い添加剤の使用が望ましいと考えられた。また、使用する再生用添加剤の組成等について考慮しない場合には、再生骨材配合率は比較的低くすることが望ましいと考えられた。

【第5章の参考文献】

- 1) 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)，Vol.71，No.3，pp.I_73-I_78，2015.12
- 2) 野村健一郎，丸山暉彦，高橋光彦：アスファルトの促進劣
化方法に関する研究，土木学会舗装工学論文集 第1巻，
pp.223～230，1996.12
- 3) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.6
- 4) (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.
- 5) (公社)日本道路協会：舗装再生便覧(平成22年版)，2010.11

第 6 章 結 論

6. 1 結 論

わが国におけるアスファルト舗装発生材の再生利用技術は、様々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、一般的なものとなっている。これに伴い、現在のアスファルト舗装発生材は、比較的再生骨材配合率が高い状態にあり、かつ複数回目の再生利用の段階になっている。

しかしながら、アスファルト舗装発生材を複数回、再生アスファルト混合物として再生利用した場合に、その性状が変化するか否かは明らかとなっていない。また、再生時に劣化したアスファルトの針入度等を回復させるために添加される再生用添加剤の性質や再生骨材の配合率が複数回、再生された混合物の性状に与える影響も明らかとなっていない。

このような背景のもと本論文では、劣化と再生が繰り返されたアスファルトと混合物の性状の変化を実験的に確認し、再生が繰り返された場合でも再生混合物や再生アスファルトの性状の変化が少ない再生用添加剤の性質や再生骨材配合率を明らかにすることを目的として、検討を実施した。

第 3 章 で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 再生用添加剤の種類（性質）によって、繰返し再生されたアスファルトの性状は異なる。
- (2) 石油潤滑油系の再生用添加剤のみで繰返し再生されたア

スファルトは，石油潤滑油系の再生用添加剤の使用量が少ない場合（ストレートアスファルトと石油潤滑油系の再生用添加剤との併用，高針入度アスファルトのみで再生）に比べ，以下のような状態にあることがわかった．

- ・軟化点が上昇し，オリジナルアスファルトより感温性が低下し脆化する可能性がある
 - ・繰返し再生したアスファルトの有害成分蓄積量 Ic および酸化度 CI が上昇する度合いが大きい
 - ・繰返しの再生回数がより少ない段階で伸度が低下する．
- (3) アスファルトが繰返し再生されることを考慮した場合，石油潤滑油系の再生用添加剤の使用量は，より少ないことが望ましいと考えられる．

第 4 章 で得られた知見は以下のとおりである．

- (1) 繰返し再生されたアスファルトは，軟化点が高くなり感温性が低下する傾向が見られ，再生骨材配合率が高いほどその傾向が強くなった．
- (2) 繰返し再生されたアスファルトの組成は，再生骨材配合率 30% の場合，再生回数の違いにより大きな変化が見られないが，再生骨材配合率 60% の場合は，再生回数が多くなるにしたがって，アスファルテン分と芳香族分が減少する傾向が見られた．
- (3) 繰返し再生されたアスファルトの酸化度 CI は，再生骨材配合率 30% の場合，再生回数の違いにより大きな変化が見られないが，再生骨材配合率 60% の場合は，再生回数

が多くなるにしたがって，増加する傾向が見られた．

- (4) 劣化と再生が繰り返されたアスファルトの分子量分布は，再生骨材配合率 30%の場合には大きな変化が見られないが，再生回数が多くなるにしたがって，分子量が大きな成分の度数が多くなる傾向が見られた．このことは酸化度 CI が増加する傾向と同様であることから，本実験での分子量の増加は酸化による影響が大きいと考えられる．
- (5) 繰り返し再生された再生混合物は，圧裂試験およびホイールトラッキング試験の結果より，再生骨材配合率が高いほど「硬く」，「疲労抵抗性が低く」なる可能性があると考えられ，特に再生骨材配合率が高い場合にその傾向が強くなった．
- (6) 飽和分の多い再生用添加剤を用いてアスファルト混合物が繰り返し再生された場合，再生骨材配合率が 60%では，添加される新アスファルトの量が少ないため，再生されたアスファルトに酸化物等が蓄積されやすく，混合物の工学的性状およびアスファルトの物理的・化学的性質が変化する可能性があることが分かった．
- (7) 飽和分の多い再生用添加剤を用いて混合物が繰り返し再生される場合，再生骨材配合率が高いほど，再生混合物や再生アスファルトの性状の変化の度合いは大きくなる傾向があることから，再生骨材配合率はより低い方が望ましいと考えられた．

第 5 章 で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 軟化点は，再生回数が多くなるにしたがって高くなる傾向がみられ，アスファルトの感温性が鈍くなると考えられた。また，飽和分が多く芳香族分の少ない添加剤 A は，より感温性が低下する可能性があることがわかった。
- (2) 伸度は，再生骨材配合率が高く，再生回数が多くなるにしたがって低下し，再生アスファルトの延性は低下する傾向がみられた。また，飽和分が多く芳香族分の少ない添加剤 A は，伸度の低下の程度が大きく，より早い再生回数で伸度が低下し始めた。このことから，再生アスファルトの延性は，再生用添加剤の飽和分の多少により影響を受けることがわかった。
- (3) 再生アスファルトの組成は，再生回数と再生骨材配合率が多いほど，添加剤の組成の影響を強く受けることがわかった。
- (4) 再生混合物の圧裂係数は，再生回数が多くなるにしたがって大きくなる傾向があり，疲労抵抗性が低下し，飽和分が多く芳香族分の少ない添加剤はその傾向が顕著になる可能性があることがわかった。
- (5) 動的安定度は，再生回数と再生骨材配合率が多いほど大きくなる傾向が見られたが，再生用添加剤の違いによる差は，明確には見られなかった。
- (6) 再生混合物は再生回数が増加するにしたがって脆化点が低温側へ移行し，0～10℃の範囲の曲げひずみが大きくなる傾向が見られた。特に，飽和分が多く芳香族分の少な

い添加剤 A は，その傾向が顕著であった．

- (7) 各再生混合物の性状は，アスファルト混合物として一般的な数値の範囲内にあることから，混合物のパフォーマンスに影響を与えるものではないと考えられる．
- (8) 混合物が繰返し再生されることを前提にした場合，再生骨材配合率を比較的高い水準で維持するためには再生用添加剤の組成について考慮する必要がある，本研究の結果からは飽和分が少なく芳香族分の多い添加剤の使用が望ましいと考えられた．また，使用する再生用添加剤の組成等について考慮しない場合には，再生骨材配合率は比較的低くすることが望ましいと考えられた．

本研究により，以下のことが確認できた．

- ① 再生骨材配合率が 60%以下で再生回数 5 回程度であれば再生用添加剤の組成の違いにかかわらず，再生混合物の性状は，アスファルト混合物として一般的な数値の範囲内にあることがわかった．
このことから，現在の再生技術に大きな問題はないと考えられた．
- ② 飽和分が少なく芳香族分の多い添加剤を使用すること，または再生骨材配合率を 30%程度とすることにより，アスファルトや混合物の性状の変化を少なくすることができる．

6. 2 今後の課題と展望

本研究により，現在の一般的な再生技術においては，再生が繰り返された場合でも再生混合物の性状の変化は許容できる範囲内にあり，直ちに破損するなどの事象を引き起こす可能性は低いことが明らかになった．このことは，既存の再生技術に大きな問題はなく，今後，しばらくの期間は，現状の再生技術を用いることができることを表していると考えている．

一方，再生用添加剤の性質によっては，再生骨材配合率が高く再生回数が多くなると，再生混合物の性状の変化の程度が大きくなることがわかった．このことは，混合物の永続的な再生利用ができなくなる可能性があることを示しているが，飽和分が少なく，芳香族分の多い再生用添加剤もしくは高針入度アスファルトを用いること，再生骨材配合率を30%程度とすることによって，より長期にわたり再生利用を繰り返すことができる可能性があることがわかった．

これらの知見は，有用な成果であると考えている．

しかし，永続的な再生利用をより確実なものとするためには更なる研究開発が必要である．

一つには，これまで“針入度”を指標に再生アスファルトの質を管理してきたが，今後は，これに代わる指標が必要と考えられる．本研究により，針入度を同じとした場合でも，再生用添加剤の組成によっては再生アスファルトや再生混合物の性状に差が見られることがわかった．このため，再生アスファルトや再生混合物の性状の変化を推察しやすい新たな

指標が必要である。例えば，本研究でアスファルトの劣化成分の蓄積量として用いた I_c の利用が考えられる。ただし，本研究においては，使用した再生用添加剤の種類が少なく， I_c と再生アスファルトや再生混合物の関係を明確にすることができなかった。また，再生限界を迎えたアスファルトの I_c や混合物の性状も確認できていないことから， I_c の閾値を設定することもできていない。今後は，さらに多くの再生用添加剤を用いて実験を行うことで，再生用添加剤の I_c や旧アスファルトの I_c によって再生骨材配合率の上限を定めるなどのような活用ができる可能性があると考えている。

二つには，本研究においては，「圧裂試験」によって間接的に疲労抵抗性を評価したが，“曲げ疲労試験”などのような直接的な疲労抵抗性を確認できていない。

疲労ひび割れは，交通荷重の繰返しの载荷によって，アスファルト混合物層の下面から上面へ進展するひび割れである。アスファルト混合物全層にわたってひび割れが発生した場合，ひび割れから浸透した雨水等が，路盤・路床まで達して，舗装全体の支持力が低下することで舗装が構造的に破損する。したがって，繰返し再生されたアスファルトの延性（例えば，伸度など）が低下したり，脆化したりした場合には，再生混合物の疲労抵抗性が低下して比較的早期に疲労ひび割れが発生することが懸念される。

このことから今後は，本研究と同様に再生用添加剤の種類や再生骨材配合率を変化させ，繰返し再生されたアスファルト混合物の疲労抵抗性を曲げ疲労試験などを行って評価し，

本研究で得られた知見と合わせて，改めて望ましい再生用添加剤の組成や再生骨材配合率を提案する必要がある．

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

本研究を進めるにあたり，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伊藤義也教授，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．

国立研究開発法人土木研究所の西崎到上席研究員，久保和幸上席研究員には，土木研究所の在職中に本研究につながるアスファルト舗装のリサイクルに関する研究を担当させていただき，ご指導いただきました．また，先端材料資源研究センターの新田弘之上席研究員，佐々木巖主任研究員，舗装チームの川上篤史主任研究員には，本研究の細部にわたりご教授いただきました．ここに謹んで感謝の意を表します．

最後に，私を在職のまま日本大学大学院に社会人入学させて下さった大成ロテック(株)代表取締役社長・藪田英俊様，役員の皆様方，事業本部副本部長・野村健一郎様（当時），技術研究所長・島崎勝様をはじめとする技術研究所職員の皆様方には，物心両面にわたりご支援を頂きました．ここに謹んで感謝の意を表します．

平成 28 年 2 月

加納 孝志