

学位論文 博士(工学)

**アスファルト混合物の持続安定的な供給
に関する研究**

2019年3月

東京都市大学大学院工学研究科

越 健太郎

－ 要旨 －

日本の道路舗装は高度経済成長期に集中的に整備されてきたが、1980年から1990年代にかけて舗装新設費や維持修繕費が減少に転じている。少資源国の日本においては繰り返し再生可能な舗装材料は国家の財産であり、この膨大な道路ストックが老朽化していく中で、今後、この舗装材料の品質を保ちながら持続的に道路を維持していかなければならない。しかし、このまま維持修繕費が減少し、舗装材料の生産数量や製造拠点の減少が進むと、将来的に舗装材料の品質低下や供給が滞る問題が顕在化する可能性がある。

本研究の目的は、維持管理の根幹を担う舗装材料の品質と施工性を高める開発と開発した材料を活かした供給体制をマネジメントしていく手法の提案とした。

- ・ 先ず、舗装材料の品質向上技術として、持続的に繰り返し再生可能で施工性を高めたアスファルト混合物（合材）を開発した。この研究は、高温で製造されていたアスファルト混合物の製造温度を約30℃下げる中温化技術を低コストで実用化し、一般に広く普及させることにより、アスファルトの劣化を抑制させ、かつ施工性を高める、すなわちより長い時間使用できるアスファルト混合物を開発することである。
- ・ 次に、マネジメント手法として、将来に渡り持続安定的な供給方策を研究した。この研究では、現在、アスファルト混合物の供給状況に関して正確に把握されておらず、供給圏域を分析した既往研究も見当たらない。このため、現在の供給圏域を把握する手法を考案し、将来に対しての対応の提案を試みた。

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- ・ アスファルト混合物の開発に関しては、日本の高再生率のアスファルト混合物ではこれまで実用化されていない中温化技術である、フォームドアスファルト技術を研究した結果、発泡させる泡の改良および再生用添加剤の発泡化に成功した。これにより、従来と比して低コストで製造温度を低下させて製造が可能となり、製品の品質および可使時間を改善することができた。
- ・ 持続安定的な供給体制の構築に関しては、円を描いて供給範囲を把握している現状の手法をより高度化し、詳細な供給圏域を最短経路探索により算出・分析する手法により、設定エリアの供給状況を正確に把握することができた。さらに供給エリアの冗長性も算出することにより、供給可能エリア内における安定供給性を把握することができた。これらの成果により、将来的に舗装材料が供給されにくい空白エリアを想定することが可能となった。
- ・ 本研究の2つの成果を踏まえて、舗装材料の改良による安定供給の一方策を提言した。本研究により、近い将来の道路整備の維持修繕時代に向けて現状を把握し、現時点から対策を講じることで、より安定的な維持管理を将来に渡り持続的に行うことができる。

Study on the sustainable supply of asphalt mixture

Kentaro Koshi

Japanese road pavement had been intensively developed during the period of high economic growth, but the expenditures for new pavements and maintenance and repair expenses began to decline from 1980 to the 1990s. In Japan, a natural resource poor country, the continuously renewable paving material is the property of the country, and as this enormous capital stock of pavement becomes obsolete, keeping the road repeatedly with maintaining the quality of this paving material is needed in the future. Quality deterioration of paving materials and supply may become apparent issue in the future if the maintenance and repair costs decrease, and the number of production plants decrease.

The purpose of this research is to develop a method to increase workability and the quality of pavement material which is basis of maintenance and management, and to suggest a method of supply system management that utilizes developed materials

- First, as a technology for improving the quality of pavement materials, I developed an asphalt mixture that can be repeatedly recycled. This research is to develop the asphalt mixture that can be used for a longer time by suppressing deterioration of bitumen and improving workability. This can be done by putting into practical use and disseminating the warm temperature technology which can reduce 30 °C of production temperature of asphalt mixture.
- Second, as a management method, I studied a sustainable and stable supply policy for the future. Currently, the supply situation of asphalt mixture is not accurately grasped and there is no previous research analyzing the supply area. For this reason, I devised a method to grasp the current supply area and tried to propose a response to the future.

The results obtained in this research are as follows.

- Regarding the development of asphalt mixtures, as a result of research on foamed asphalt technology, which is a warm temperature technology that has not been put into practical use yet as a high regeneration rate asphalt mixture in Japan, I succeeded that foaming foam can be improved and foaming of rejuvenator. As a result, it enables to lower the manufacturing temperature at lower cost than before, and to improve product quality and usable time.
- Regarding the construction of a sustainable and stable supply system, I succeeded to accurately grasp the supply situation of selected areas by advancing the current method of drawing a circle in order to grasp the supply area and to calculate and analyze the detailed supply area according to the shortest path research. Furthermore, I could grasp the stable supply capability in the supply area by calculating the redundancy of the supply area. With these results, it enables to assume a blank area where pavement materials are difficult to be supplied in the future.

Based on the two results of this research, I suggested one strategy for stable supply by improving pavement materials. By this research, we can grasp the current situation toward maintenance and repair of road development in near future. Taking measures from now on enables to carry out more stable maintenance and sustainably in the future.

－ 目次 －

1. 序論	1
1.1. 研究の背景と目的	1
1.2. 本論文の構成	8
2. フォームドアスファルト混合物と供給に関する現状と課題	10
2.1. フォームドアスファルト混合物の現状と課題	10
2.2. アスファルト混合物の供給圏域に関する現状と課題	15
2.3. 本研究の位置づけ	18
3. フォームドアスファルト技術の改良	20
3.1. フォームドアスファルトが混合物へおよぼす影響	21
3.2. 微細泡化フォームドアスファルトの開発	27
3.3. 高再生率アスファルト混合物への適用	32
3.4. アスファルト合材工場における効果の検証	38
3.5. まとめ	46
4. 安定的な供給体制の提案	51
4.1. 道路別のアスファルト混合物の供給圏域の把握手法の考案	52
4.2. 全国のアスファルト混合物供給圏域の算出	55
4.3. 選定地域のアスファルト混合物供給圏域の算出	63
4.4. アスファルト混合物の供給に関する冗長性の算出	68
4.5. まとめ	74
5. 持続的な供給方策の提案	76
5.1. 供給エリアの拡大の提案	77
5.2. 供給エリアの拡大の効果	80
5.3. まとめ	87
6. 結論と今後の課題	89
6.1. 結論	89
6.2. 本研究が切り拓いた新しい展開	91
6.3. 今後の課題	93
業績	96
謝辞	99

1. 序論

1.1. 研究の背景と目的

我が国の人口は図- 1.1に示すように、2008 年付近をピークに減り始めており、将来は確実に減少すると推測されている¹⁾。人口減少が経済成長に与える影響は大きく、我が国は世界で経験したことのない高齢化社会へ突き進んでいる。高齢化が進み税収低下や社会保障費上昇傾向が強まれば、社会資本整備費も連動して減少する可能性が極めて高い。実際、近年の社会資本整備費は減少傾向にある。しかし、我が国では高度経済成長期に建設された膨大な社会資本ストックを持続安定的に維持していかなければならない。本研究では、その維持していく重要な社会資本である道路舗装に着目する。

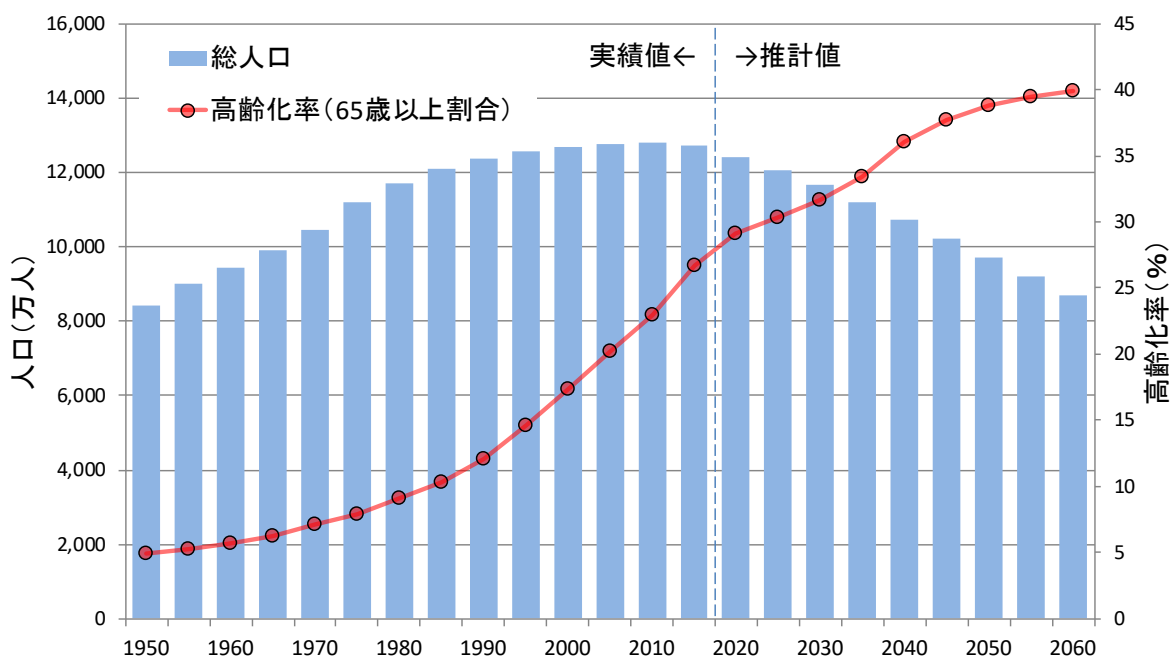


図- 1.1 高齢化の推移と将来推計

日本の道路舗装は約 50 年前の高度経済成長期の頃から現在にかけて着々と整備され、現在の舗装延長は約 100 万 km になっている¹⁻²⁾。図- 1.2に示すとおり、1980 年頃からは舗装新設費、1990 年代半ばにかけてからは舗装維持修繕費が減少に転じている。今後の高齢化社会時代を見据えると、全国の舗装新設費の大幅な増加はなく、舗装維持修繕費も高度経済成長期のような勢いで投じられる可能性は低いと推察される。そのような中で我が国では、100 万 km 以上の舗装ストックの持続安定的な維持管理の遂行が必要となる。

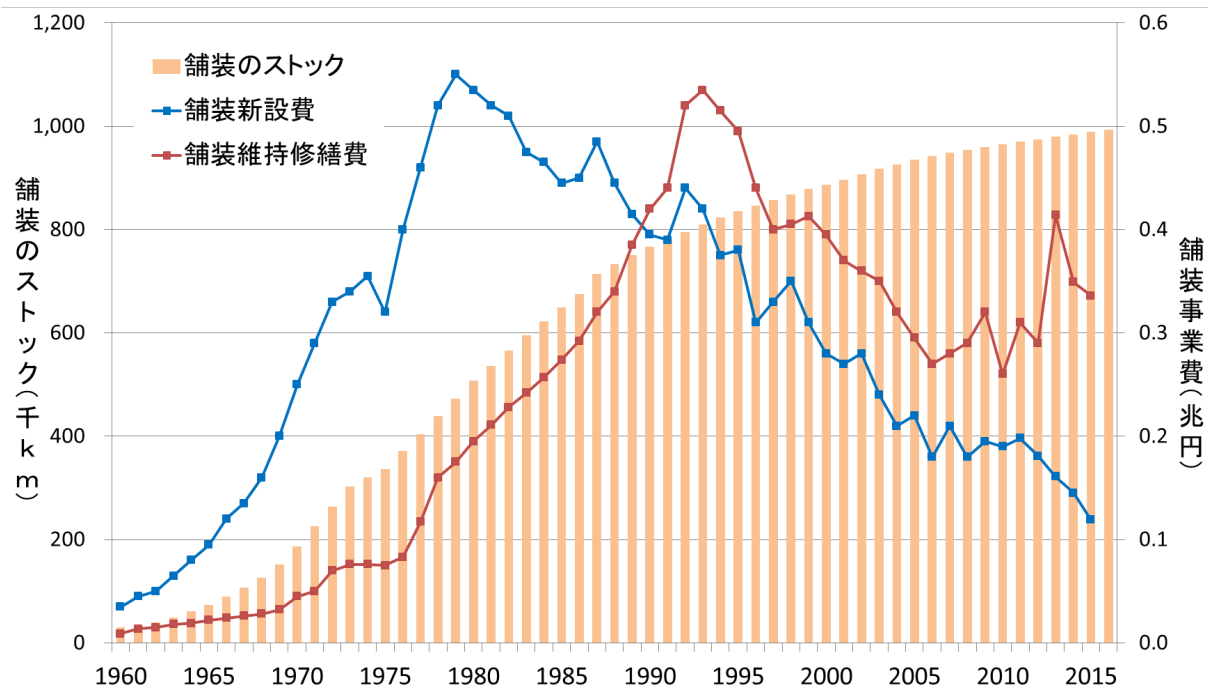


図- 1.2 舗装ストックと舗装整備費の推移

道路舗装整備費減少の影響により、日本国内のアスファルト混合物製造数量は年々減少している。日本アスファルト合材協会の調査¹⁻³⁾によると、図- 1.3に示すとおり、アスファルト混合物の製造数量は1992年時のピーク時には約8,000万トン製造されていたが、2015年度には約4,200万トン（ピーク時の約53%）まで減少してきている。

2020年には東京オリンピックが開催されるため、多少の需要の増加は期待できるが、全体的には今後もしばらくは減少傾向が続くと推測できる。

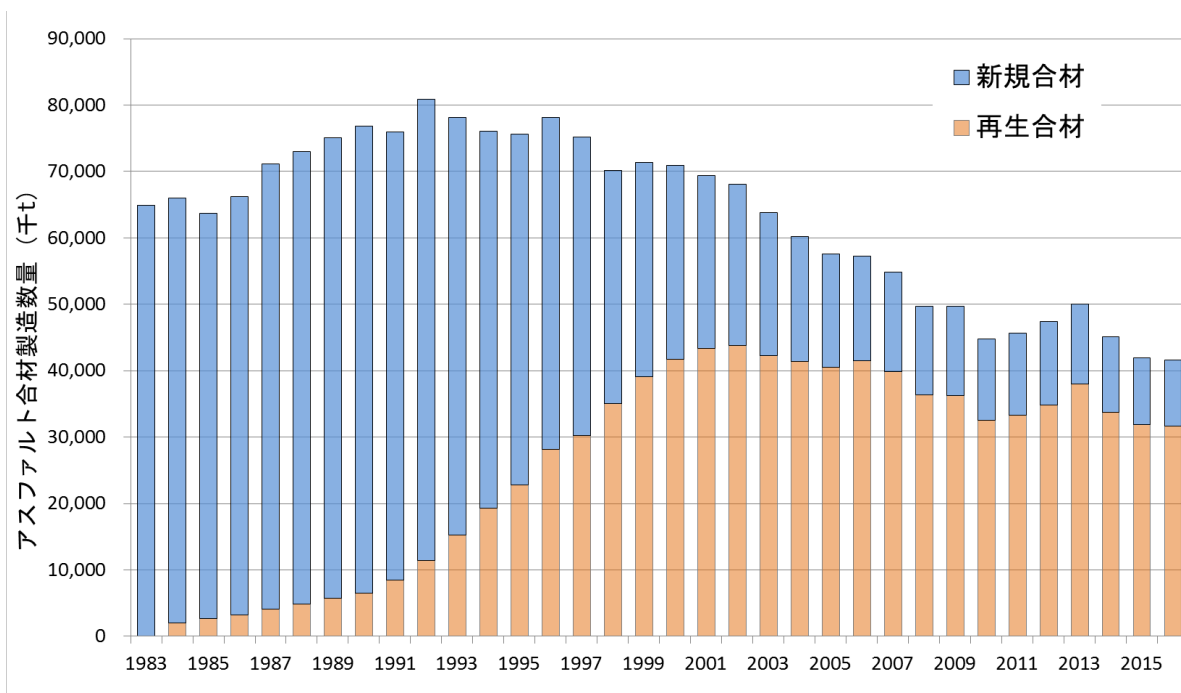


図- 1.3 アスファルト混合物と再生混合物の製造数量推移

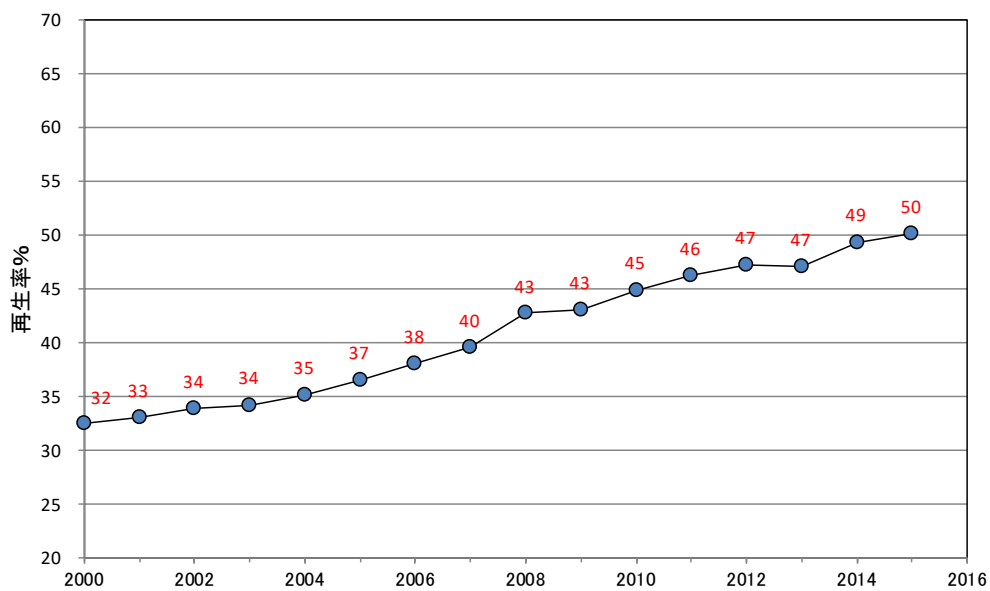


図- 1.4 再生アスファルト混合物の再生率の推移

図- 1.4に再生アスファルト混合物の再生率の推移を示す。近年、再生率は国内平均で約50%まで上昇している。また都市部などの地域によっては75%の高い再生率で使用されている例もある¹⁻⁴⁾。

このように日本では再生アスファルト混合物が主流であり、再生骨材の使用割合が非常に高い。このような状況から今後、再生アスファルト混合物の品質の低下も懸念されている。将来にわたり持続的に再生を繰り返していくためには新たな技術導入が求められている。

一方、海外の動向に着目すると、図- 1.5は日本と諸外国の高齢化率の推移と今後の予測を示している¹⁻⁵⁾。日本の高齢化率は一番高いが、他国も高齢化率は上昇傾向にあり、いずれ日本と同様に高齢化が進むであろう。また図- 1.6はEU28カ国と米国のアスファルト混合物製造数量を示したグラフだが、日本とは規模は違うが減少傾向にあることはわかる。このことから成熟化社会への移行として、近い将来世界の各国においても日本と同じ推移を辿ることが懸念される¹⁻⁶⁾。

この状況は日本だけではなく、日本と同様に諸外国も将来の対応等を早期に講じていく必要があると考える。

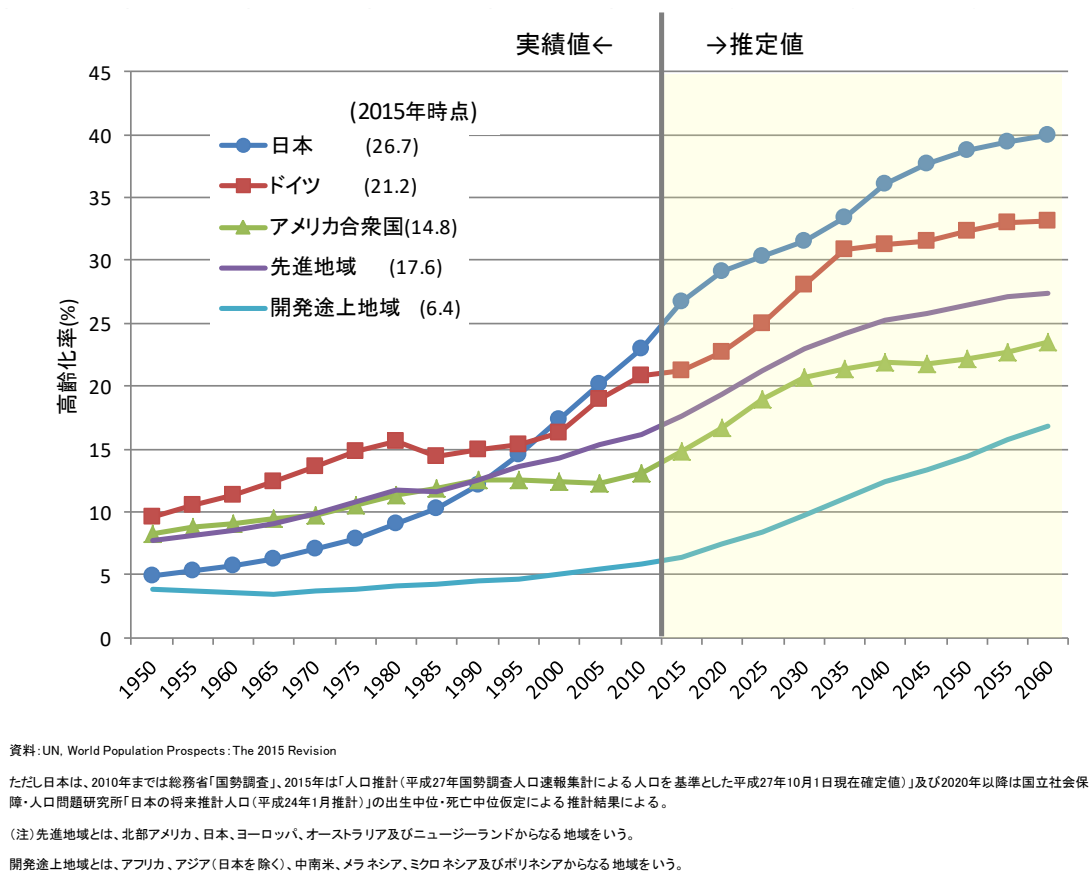


図- 1.5 世界の高齢化率の推移 (2016 高齢化社会白書 内閣府)

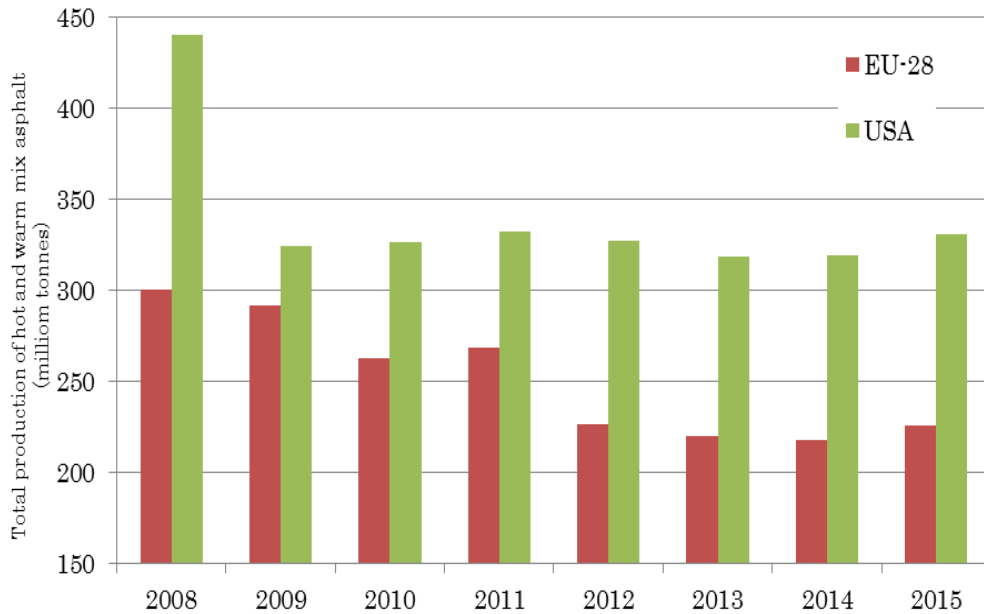


図- 1.6 EU28 カ国と米国のアスファルト混合物製造数量推移 (EAPA)

このような背景から、本研究では、維持管理の根幹を担う舗装材料の持続的再生利用に着目した。繰り返し再生可能な舗装材料であるアスファルト混合物（合材）は、少資源国の日本にとって国家の資財である。そのため、膨大な道路の舗装ストック¹⁻²⁾が老朽化していく中で、舗装材料の品質を保ちながら持続的に有効利用していかなければならない^{1-7) 1-8) 1-9)}。かつて経験したことのない維持管理時代を迎える中で¹⁻¹⁰⁾、再生アスファルト混合物をより最適化する技術向上が求められる¹⁻¹¹⁾。また、建設投資削減によってアスファルト混合物の生産量が減少している¹⁻¹²⁾。これに伴ってアスファルト混合物製造工場（以下、合材工場という）も減少し¹⁻³⁾、将来的に地域によってはアスファルト混合物の供給不安が懸念される。アスファルト混合物の運搬は2時間程度が限度であるため¹⁻¹²⁾、工場からの供給範囲が限られることから、今後の維持管理にとって主な課題である持続安定的な供給対策も併せて考えていく必要がある。

これは日本だけに限ったことではなく、諸外国においても道路整備の成熟に伴い同様の課題を抱えることになる。欧米においても近い将来、先進国以外の国々もいずれこのような課題に直面することになるであろう。

そこで本研究の目的は、維持管理の根幹を担う舗装材料の品質と供給に着目して、舗装材料の品質向上技術として「持続的に繰り返し再生可能で施工性を高めたアスファルト混合物の開発」、マネジメント手法の提案として「将来に渡り持続安定的な供給体制の提案」とした。

「持続的に繰り返し再生可能で施工性を高めたアスファルト混合物の開発」に関して

は、これまで CO₂ 排出量削減として取り組まれてきた中温化混合物に注目した¹⁻¹³⁾。中温化混合物はアスファルト混合物製造時の製造温度を下げて製造して CO₂ 排出量を抑制するだけでなく、製造温度の低下によりアスファルト性状の劣化も抑制される。アスファルト混合物のアスファルトの劣化は製造時の熱劣化が大きな要因を占めることから、製造温度の低下はアスファルト混合物の品質低下の抑制に大きく寄与する¹⁻¹⁴⁾。一方、中温化技術の使用によりアスファルト混合物の可使用時間を長くすることも可能である。混合物の温度が低い状態においても、締固めが可能である特性を活かし、通常のアスファルト混合物と比較して、より長い時間使用することができる。

中温化技術にはいくつかの方法があるが¹⁻¹³⁾、大量製造やコストを考慮すると、欧米で普及しているフォームドアスファルトが最も適していると考えられる^{1-15) 1-16)}。しかし、日本では、再生アスファルト混合物のアスファルト再生骨材の配合率（再生率）が高く¹⁻³⁾、フォームドアスファルトを適用しても新たに加えるアスファルトの量（新アスファルト量）が少なくなり、中温化効果も小さくなる。過去の研究¹⁻¹⁷⁾においても再生率の増加に伴い締固め改善効果が減少すると指摘されている。そのため、これまでフォームドアスファルト技術の研究はされていたがこの技術を使用したアスファルト混合物は実用化されていない^{1-18) 1-19) 1-20) 1-21)}。日本でフォームドアスファルト技術を適用させるには、高い再生率で効果を発揮できるように技術の改良が必要である。

「将来に渡り持続安定的な供給体制の提案」に関しては、これまで、合材工場は計画的に配置されていたわけではなく、あくまでも運営企業の経営戦略で設置されている。したがって舗装工事量の多い都市に多く設置されており、人里はなれた山間部には数が少ない。さらに、合材工場の供給範囲は各工場が独自に把握している。そのため、広域な範囲でのアスファルト混合物の供給圏域の把握は難しい。唯一把握している日本アスファルト合材協会の手法においても、円を描いて供給範囲を把握しており¹⁻²²⁾、詳細な供給可否の状況把握できないのが現状である。そのため、正確な現状把握に基づいた将来予測をすることができない。

これらの課題を解決することにより、近い将来の道路整備の維持修繕時代に向けて現状を把握し、現時点から対策を講じることで、より安定的な維持管理を将来に渡り持続的に行うことができる。

本研究は、高再生率に対応したフォームドアスファルト混合物の開発と、アスファルト混合物の供給圏域を詳細に把握する手法を考案し、その2つの成果を活かした安定供給可能なエリアを拡大する持続的な供給方策の提案を目的とした。

図- 1.7に研究フローを示す。この研究フローにしたがい目標を達成する。

- 現在の道路舗装を取り巻く状況を把握し、抽出された課題を踏まえて研究の目標を設定する。抽出された課題は「持続的に繰り返し再生可能で施工性を高めたアスファルト混合物の開発」と「将来に渡り持続安定的な供給体制の提案」。課題に対する研究目標は「高再生率に対応したフォームドアスファルト混合物の開発」と「供給圏域の算出手法の考案および冗長性の算出」
- 「高再生率に対応したフォームドアスファルト混合物の開発」の研究のために、現状のフォームドアスファルト技術を把握し、課題に対応した開発をして、その効果を確認する。
- 「供給圏域の算出手法の考案および冗長性の算出」の研究のために、現状の供給圏域手法を把握し、課題に対応した手法を考案し、冗長性を算出する。
- 研究した2つの成果を活用して、将来に向けたアスファルト混合物の安定供給について、方策を提案する。

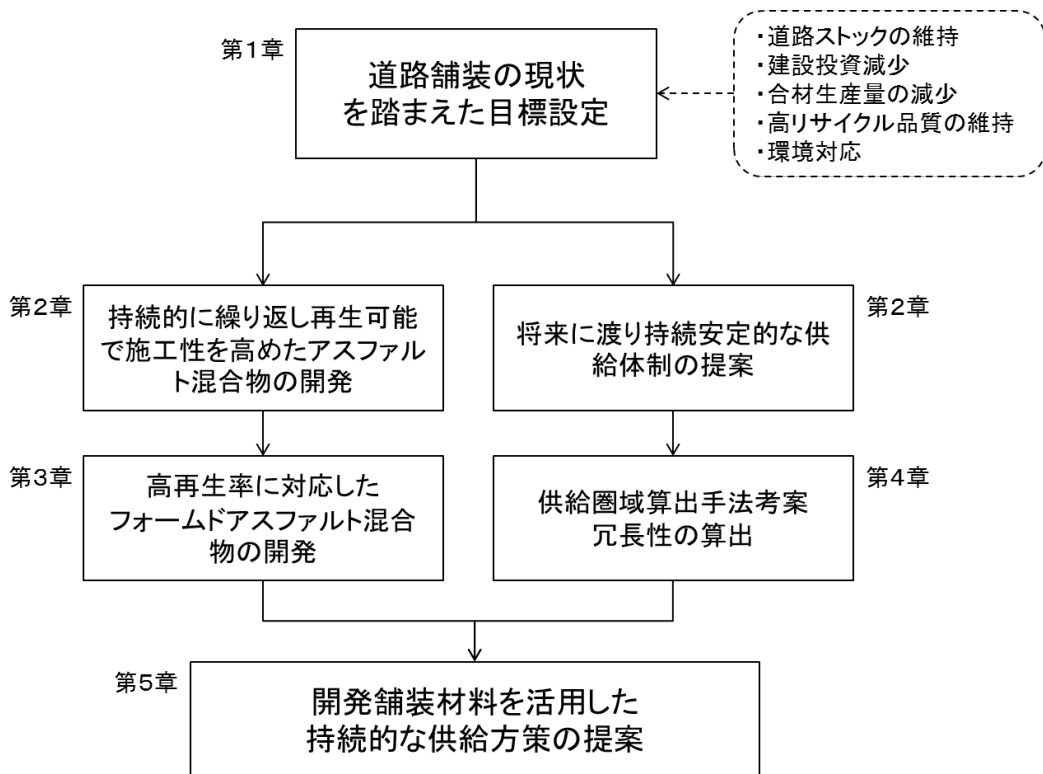


図- 1.7 研究フロー

1.2. 本論文の構成

本論文は 6 章から構成されており、各章の概要は次のとおりである。

- 第 2 章では、フォームドアスファルト混合物と供給マネジメントに関する現状と課題を明らかにし、本研究の位置づけを論ずる。
- 第 3 章では、アスファルト混合物の品質向上および施工性改善を向上させるために開発した、フォームドアスファルト技術の効果について論ずる。
- 第 4 章では、アスファルト混合物の供給に関する実態を把握するために供給圏域の算出手法を提案することにより、供給の冗長性を算出し現状の安定供給の状態を論ずる。
- 第 5 章では、本研究で得られた成果を基に、持続的な供給方策の提案を論ずる。
- 第 6 章では、本研究の成果と今後の課題を論ずる。

[第1章の参考文献]

- 1-1) 内閣府：高齢化社会白書，2018.
- 1-2) 国土交通省：道路統計年報，2018.
- 1-3) 日本アスファルト合材協会：平成28年度アスファルト合材統計年報，2017.
- 1-4) 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材 124，2017.
- 1-5) 内閣府：高齢化社会白書，2016.
- 1-6) EAPA: ASPHALT IN FIGURES, 2015.
- 1-7) 日本道路協会：舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針，2018.
- 1-8) 日本道路協会：舗装点検必携 平成29年版，2017.
- 1-9) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック2013，2013.
- 1-10) 武藤聡，久保和幸，藪雅行：「舗装点検要領」の策定について，建設図書「舗装57-1」，2017.
- 1-11) 日本道路協会：舗装再生便覧，2010.
- 1-12) 日本道路協会：アスファルト混合所便覧，1996.
- 1-13) 日本道路建設業協会：中温化(低炭素)アスファルト舗装の手引き，2012.
- 1-14) 日本道路協会：舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック，2014.
- 1-15) 近藤紀：アスファルトの加熱混合温度に関する一考察，土木技術資料10-12, pp.40-45, 1968.
- 1-16) NAPA: Asphalt Pavement Industry on ,Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2014.
- 1-17) 佐々木昌平，近藤裕章：フォームドアスファルト混合物の適用拡大に関する一考察，第30回日本道路会議論文集，2013.
- 1-18) 村井宏美，小柴朋広，伊藤大介：マイクロバブル型フォームドアスファルト混合物の作業性に関する一検討，第71回土木学会年次学術講演概要集，2016.
- 1-19) 新垣善雄，平嶋政臣，徳光克也：フォームドアスファルトによる再生混合物の中温化，第31回日本道路会議論文集，2015.
- 1-20) 佐々木昌平，近藤裕章：フォームドアスファルト混合物の性能評価，第29回日本道路会議論文集，2011.
- 1-21) 齋藤昌之，佐藤文映，矢野裕也：フォームドアスファルト混合物の締固め特性，第31回日本道路会議論文集，2015.
- 1-22) 日本道路建設業協会：全国アスファルトプラント地図，2008.

2. フォームドアスファルト混合物と供給に関する現状と課題

本研究の目的は、高再生率に対応したフォームドアスファルト混合物の開発と、アスファルト混合物の供給圏域を詳細に把握する手法を考案し、その2つの成果を活かした安定供給可能なエリアを拡大する持続的な供給方策を提案することである。

本章では、フォームドアスファルト混合物およびアスファルト混合物の供給圏域把握に関する現状と課題を明らかにし、本研究の位置づけを論ずる。

2.1. フォームドアスファルト混合物の現状と課題

2.1.1. 再生アスファルト混合物の品質向上技術

持続的な繰り返し再生には再生アスファルト混合物の品質を向上させなければならない。再生アスファルトの品質を向上させるために考えられる主な課題は以下の2点である。

- ①製造時の温度を低下させてアスファルトの劣化を抑制させる。
- ②再生骨材に付着している劣化したアスファルトを効率的に回復させる。

製造時の温度低下は、アスファルトの劣化を抑制させるだけではなく、製造時のCO₂排出量の削減やアスファルトフェーム発生抑制による作業環境改善などの効果が見込まれる²⁻¹⁾。また、単に製造温度を下げるだけではなく、低い温度でも施工がしやすく、締固めが十分できる耐久性のある高品質な再生アスファルト混合物の開発を目指すため、再生骨材の旧アスファルトを効率的に回復させる必要がある²⁻²⁾。これにより、施工時の混合物の温度低下に伴う施工不良等の品質低下も抑制でき、高品質な再生アスファルト混合物になると考えられる。

このため、混合物の品質面からアスファルトの劣化を抑制し、かつ、施工時の温度低下による品質低下の抑制の両面からのアプローチにより、総合的に舗装の耐久性向上や長寿命化に寄与するものとする。

これらの課題に対して、これまでCO₂排出量の削減として取り組まれてきた中温化混合物に注目した。

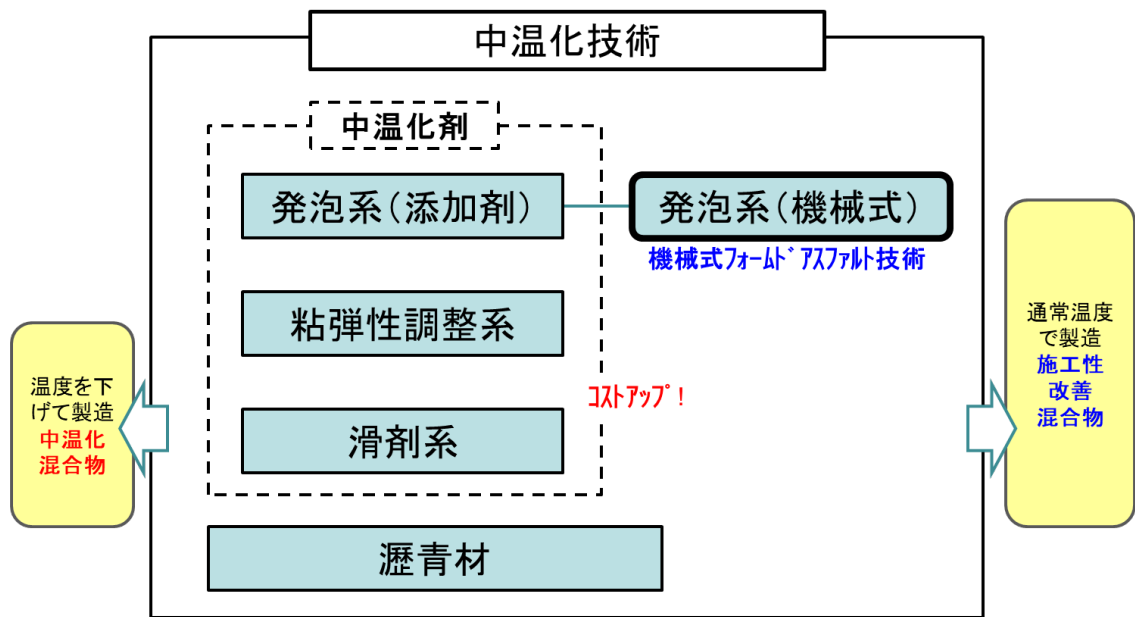


図- 2.1 中温化技術の概要図

中温化技術は図- 2.1に示すとおり、発泡系、粘弾性調整系および滑剤系といった中温化剤をアスファルトに添加する方法がこれまでの主流であった。しかし、中温化の添加剤は高価であり、アスファルト混合物の販売単価に大きく影響していた。そのため、中温化混合物の普及は進まず、2009年時点での普及率は0.1%に留まっている²⁻¹⁾。今後、一般的に再生アスファルト混合物へ使用するには、大量製造に対応しアスファルト混合物のコスト上昇が極力抑えられる技術でなくてはならない。

一方、中温化技術の発泡系に分類されるものに、機械式フォームドアスファルトがある²⁻³⁾。他の中温化技術と大きく異なる点はアスファルト合材工場に専用の発泡装置の導入が必要となるためイニシャルコストが掛かることである。しかし、添加材料は基本的には水であるためランニングコストは抑えられる。したがって、ある程度の製造量が見込められれば他の中温化技術と比較してコスト的に有利となる。

フォームドアスファルトは欧米では中温化技術として普及している技術である^{2-4) 2-5) 2-6) 2-7)}。特に米国ではフォームドアスファルトは一般的な技術であり、全アスファルト混合物製造量のうち3割以上が中温化混合物(WMA : warm-mix asphalt mixture)であり、その中で約8割が機械式フォームドアスファルトで製造されている(残りは添加剤方式)²⁻⁸⁾。この理由としてはフォームドアスファルトが添加剤方式と比較してコスト的に有利であることが大きい。米国では製造工場や舗装工事現場での作業環境の改善に取り組んでおり、今後も中温化混合物の取り扱いが増えていく見込みである。

2.1.2. フォームドアスファルト技術の概要

フォームドアスファルトは写真- 2.1に示すとおり、高温時のアスファルトに少量の水を噴霧混合することにより、水を急激に気化させてアスファルトを発泡させたものである²⁻⁹⁾。発泡したアスファルトは見かけ上の粘度が低下し、混合物製造時にアスファルトと骨材との混合性が向上するものである。混合物を製造した後にはアスファルトの泡は消えたように見えるが、実際はアスファルト中に微細な泡が残存して、この泡が施工時にベアリング的な働きをすることにより、混合物が締固め易くなる。アスファルト中の微細な泡は施工完了後、温度の低下とともに体積が減少し、無くなるため、混合物の品質に影響を及ぼすことはない。図- 2.2に施工時の概念図を示す²⁻¹⁾。



写真- 2.1 フォームドアスファルトの状態

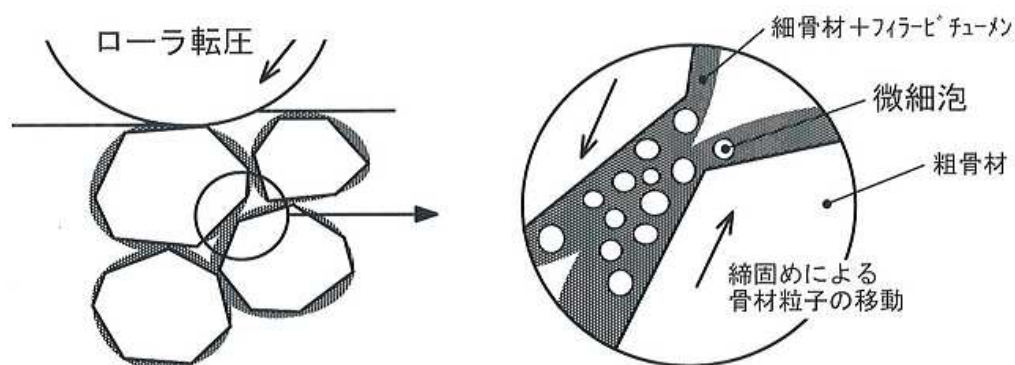


図- 2.2 施工時の概念図

アスファルトの発泡によりアスファルト粘度が低い間に施工を行うことにより一般的に以下の効果を得るとされている。2-1) 2-3) 2-10)

- ・中温化製造：製造温度を約 30℃程度下げて製造ができる。これにより、CO₂排出量削減、作業環境改善（夏期の熱中症対策）、フューム対策、アスファルトの熱劣化抑制、などの効果がある。
- ・施工性改善：従来のアスファルト混合物より低い混合物温度での施工が可能となる。製造温度は従来と同じで製造する。これにより、冬期温度低下対策、長距離運搬、などの効果がある。

フォームドアスファルトは、通常のアスファルトと比較して、同一温度では高い締固め度を得ることができる。図- 2.3は新規アスファルト混合物での一例であるが、フォームドアスファルトを使用した混合物は全体的に締固め度が高い。これにより、145℃で締固めた通常アスファルトと同等の締固め度が得られるのは、125℃であり、この時のフォームドアスファルト混合物の温度低減効果は約 20℃であるといえる。また、同じ温度条件でフォームドアスファルト混合物を使用すれば、通常混合物より長い時間使用することができるため、より均一な舗装の仕上がりが可能となる²⁻¹¹⁾。

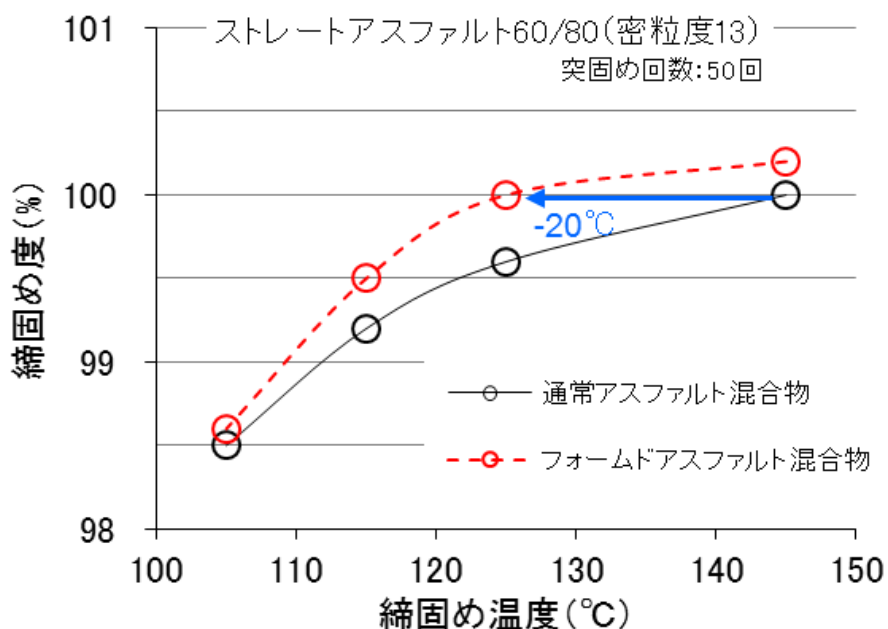


図- 2.3 温度低減効果の一例（新規混合物）

2.1.3. フォームドアスファルト技術の課題

フォームドアスファルトは、アスファルトの発泡により見掛けの粘性が低下するために、製造時の混合性および、残存する泡のベアリング効果によって締固め性や施工性が向上する。

しかし、日本においては、再生アスファルト混合物の再生率が高い²⁻¹²⁾。このためフォームドアスファルトを適用しても発泡させる新たに加えるアスファルト（新アスファルト）の量が少なくなるため²⁻¹³⁾、アスファルトの発泡効果も小さくなる。そのため、高い再生率に適用させるには、フォームドアスファルトの効果が欧米の技術より高くなるように新たに効果を向上させたフォームドアスファルト技術を開発する必要がある。

2.2. アスファルト混合物の供給圏域に関する現状と課題

2.2.1. 合材工場の減少・統廃合の実態

図- 1.2に示したように、近年の道路舗装整備費は減少傾向にある。その影響により、日本国内のアスファルト混合物製造数量は年々減少している。そこで本研究では、合材工場の数を過去 30 年遡り 2016 年までの推移を過去のアスファルト合材統計年報²⁻¹²⁾および工場への聞き取りにより調査した。図- 2.4は、合材工場のプラント基数と経営会社の推移を示している。図より、アスファルト混合物の製造数量の減少に伴って、合材工場の数も減少していることがわかる。1990 年のプラント基数が 1,938 基に対して 2016 年は 1,090 基とピーク時の約 6 割に減少している。1998 年以降の経営会社数は減少してはいるものの、プラント基数の減少と比較すると減少傾向は緩やかである。このことは、合材工場運営の廃業もしくは撤退が進む中、別会社の合材工場同士の統合（JV）も増えたことが一要因に挙げられる。また、これまでの合材工場数の推移から、今後も合材工場は横ばいもしくは減少していく可能性があるかと推察される。

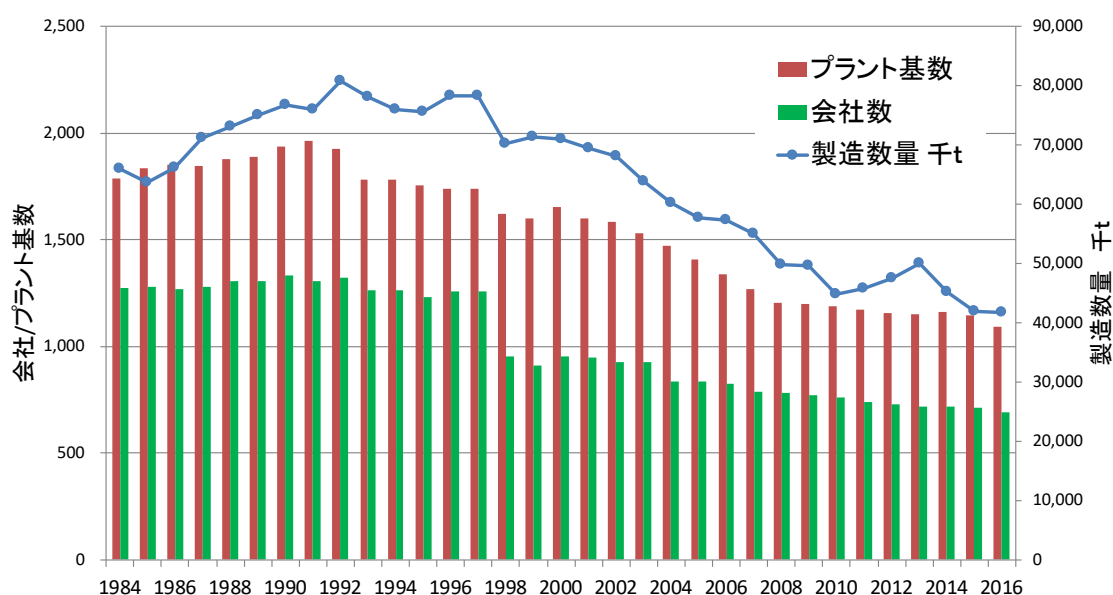


図- 2.4 合材工場数の推移

2.2.2. アスファルト混合物の供給圏域

アスファルト混合物は、高温時にアスファルトの粘度が低下することにより、作業性が向上し施工ができる。しかし、アスファルト混合物の温度が低下するとアスファルトの粘度が上がるため、作業性が低下して施工ができない。したがって、アスファルト混合物の使用は適正な温度範囲内に限られる²⁻¹⁴⁾。アスファルト混合物は、合材工場で温度の高い状態で製造されても、運搬などで時間が経つと温度は徐々に低下する。そのため、合材工場からアスファルト混合物を運搬供給できる範囲は限られる。一般的にはアスファルト混合物の運搬時間は1時間程度が適正で²⁻¹⁵⁾、条件の良い場合でも2時間が限界とされている²⁻¹⁶⁾。

今後、アスファルト混合物の製造数量が減少し、合材工場の統廃合が進むと、アスファルト混合物を供給できなくなるエリア（空白エリア）が生じ、このエリアが拡大していくことが懸念される。しかし、空白エリアが生じて道路の維持管理を必要最低限行わなくては、国民生活に支障を来し、経済活動にも影響する。このため、将来にわたり日本全域へアスファルト混合物を持続的に安定供給していく必要がある。

2.2.3. アスファルト混合物の供給圏域把握手法の課題

本研究では、全国におけるアスファルト混合物の製造拠点となっている合材工場の場所を日本アスファルト合材協会資料²⁻¹⁷⁾および協会関係者への聞き取りにより調査した。その結果、これまで、合材工場は計画的に配置されていたわけではなく、あくまでも運営企業の経営戦略で設置されていた。そのため、合材工場は舗装工事量の多い都市部に多く設置されており、人里はなれた山間部には数が少ないことがわかった。

さらに、各合材工場に対するアスファルト混合物の供給圏域としては、図-2.5に示すような合材工場を中心に半径20kmの円を描いて把握されている²⁻¹⁵⁾。この結果を見ると、供給圏域は俯瞰できるが、具体的な道路別の供給可否の把握までは難しい。

したがって、現状の供給圏域の把握手法では詳細な把握ができないため、将来のアスファルト混合物の安定供給に関する方策を論じることができない。

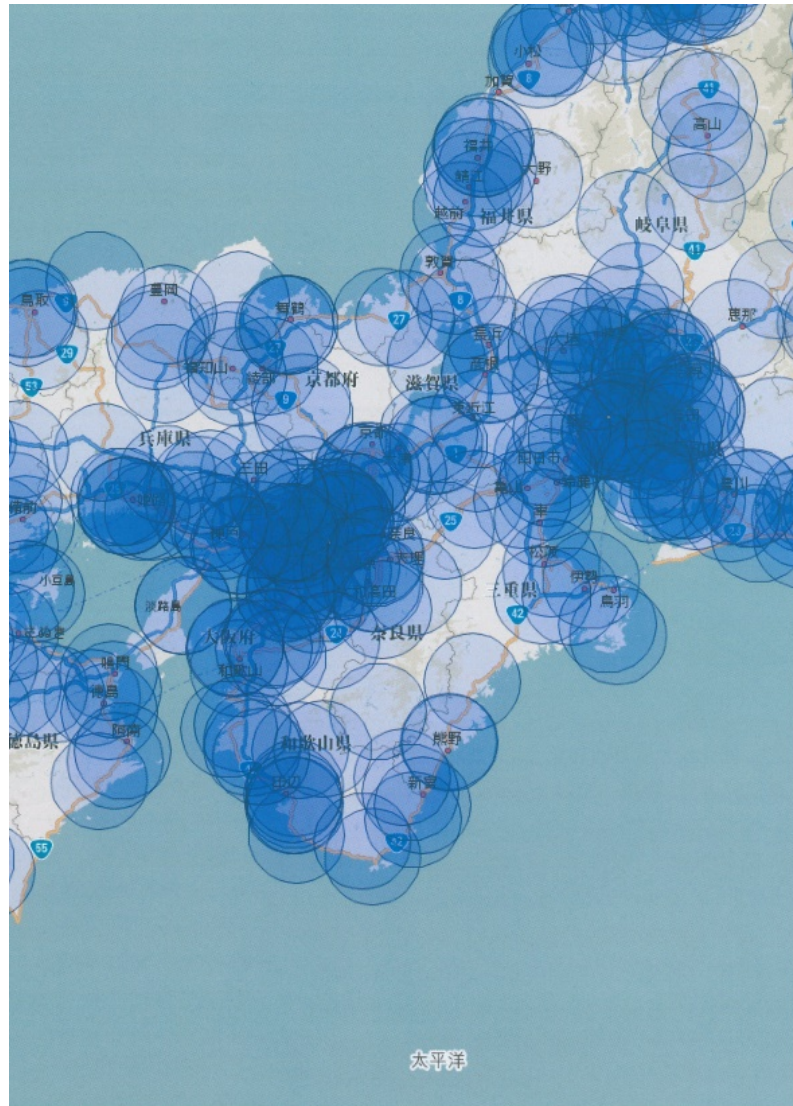


図- 2.5 既存のアスファルト混合物の供給圏域の把握

2.3. 本研究の位置づけ

本節では、前節で論じた課題に対して、本研究の目的がどの課題の解決に寄与するのかを整理する。

- 日本のアスファルト混合物は高再生率のため、新たに加えるアスファルトが少なくフォームドアスファルトによる締固め性や施工性を向上させる効果が小さい課題がある。

この課題に対して、本研究で開発するフォームドアスファルト技術は、日本の高再生率のアスファルト混合物に対応し、締固め性や施工性を向上させる。これにより、持続的に繰り返し再生可能で施工性を高めたアスファルト混合物を製造できる。

- 現状の円による供給圏域の把握手法では詳細な把握ができず、将来のアスファルト混合物の安定供給に関する方策を講じることができない課題がある。

この課題に対して、本研究で開発する供給圏域の把握手法では詳細な供給圏域を把握でき、冗長性の算出ができる。これにより、現状の安定供給を把握することができ、方策を講じることができる。

[第2章の参考文献]

- 2-1) 日本道路建設業協会：中温化(低炭素)アスファルト舗装の手引き，2012.
- 2-2) 日本道路協会：舗装再生便覧，2010.
- 2-3) 日本道路協会：環境改善を目指した舗装技術，2005.
- 2-4) NCHRP：NCHRP PRACTICE-READY SOLUTIONS FOR Warm Mix Asphalt, *RESEARCH TOPIC HIGHLIGHTS*, 2017.
- 2-5) Cindy,Estakhri. : LABORATORY AND FIELD PERFORMANCE MEASUREMENTS TO SUPPORT THE IMPLEMENTATION OF WARM MIX ASPHALT IN TEXAS, 2012.
- 2-6) MAXAM: Submitted in Accordance with Caltrans Approval Process for Warm Mix Asphalt Technologies , *AQUABlack Warm Mix Asphalt Technology* .2012.
- 2-7) NCHRP：Long-Term Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies, *NCHRP RESEAECH REPORT 843*, 2017.
- 2-8) NAPA: Asphalt Pavement Industry on ,*Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2014*.2014.
- 2-9) 越健太郎:フォームドアスファルト技術による再生アスファルト混合物の中温化について，アスファルト合材 No.126, pp.36-41, 2018.
- 2-10) 日本道路協会：環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック，2009.
- 2-11) 清水泰成，越健太郎，江向俊文：再生アスファルト混合物にも適用可能な汎用性の高いフォームドアスファルト技術，舗装，pp.25-30, 2016.
- 2-12) 日本アスファルト合材協会：平成 28 年度アスファルト合材統計年報，2017.
- 2-13) 清水泰成，江向俊文，村田純：再生アスファルト混合物に関するフォームドアスファルト技術の効果，第 13 回北陸道路舗装会議論文集，2015.
- 2-14) 日本道路協会：舗装施工便覧，2006.
- 2-15) 日本道路建設業協会：全国アスファルトプラント地図，2008.
- 2-16) 日本道路協会：アスファルト混合所便覧，1996.
- 2-17) 日本アスファルト合材協会：日本アスファルト合材協会 会員工場一覧及び工場位置図，CD-ROM, 2015

3. フォームドアスファルト技術の改良

日本の高再生率に対応したフォームドアスファルト混合物を研究開発するために、本研究ではフォームドアスファルト技術を改良し、微細発泡技術を開発した。さらに、中温化効果と再生品質のさらなる向上を目指し、再生用添加剤の発泡技術を開発した。

フォームド技術の研究開発フローを図- 3.1に示す。

- フォームドアスファルト技術で懸念される、アスファルトへ水を添加したときのアスファルト混合物への影響を確認する。
- フォームドアスファルトの効果を高めるために微細法技術を開発し、その効果を検証する。
- さらに、高再生率のアスファルト混合物へ対応するために、再生用添加剤の発泡技術を開発し、その効果を検証する。
- 実際に稼働している合材工場へ設置する、効率的なフォームド発生装置を開発し、工場へ設置して、その効果を検証する。

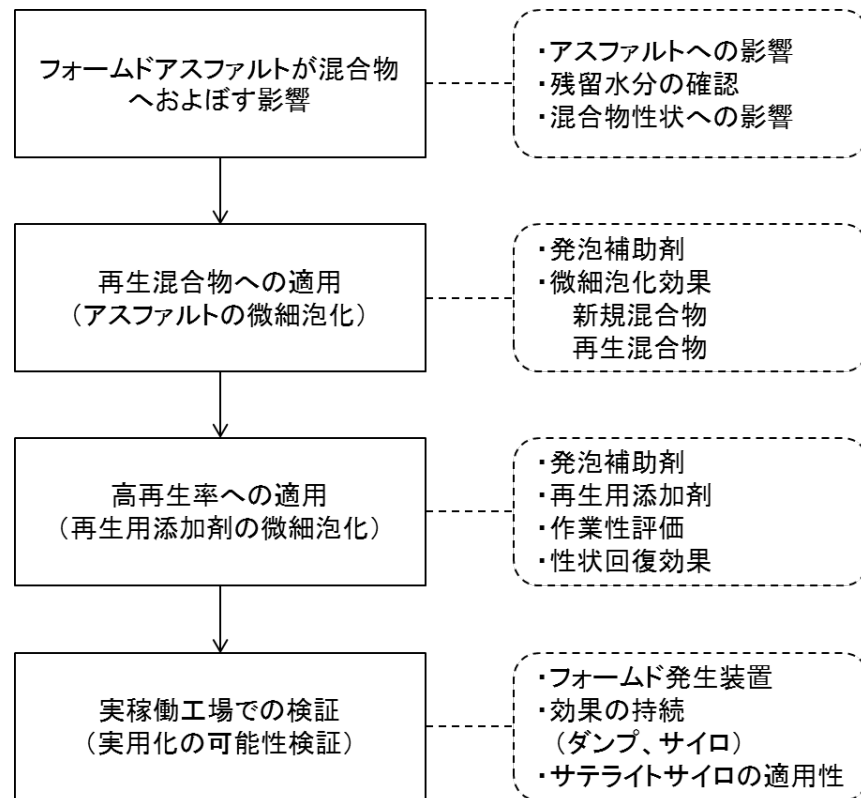


図- 3.1 フォームド技術の研究開発フロー

3.1. フォームドアスファルトが混合物へおよぼす影響

フォームドアスファルトは加熱したアスファルトに微量の水を添加してアスファルトを発泡させる技術であるが、元来アスファルト混合物にとって水は大敵であり、特に製造時には極力水分の混入を避けてきた。したがって、微量とはいえ水を直接アスファルトに添加するフォームドアスファルトを使用した、アスファルト混合物が水の影響を受けていないか懸念される。

そこで、フォームドアスファルトの本格的な研究の前に、フォームドアスファルトの添加水がアスファルトの性状およびアスファルト混合物に与える影響を検証した。

3.1.1. 検証項目

フォームドアスファルトがアスファルト混合物へおよぼす影響は下記の試験を実施して確認した。

(1) フォームドアスファルトの針入度試験³⁻¹⁾

アスファルト中に添加した水が残留した場合、アスファルト混合物の性状に影響を及ぼす。そこで、アスファルトの針入度の変化で添加した水がアスファルトへ影響を与えていないかを確認する。

(2) フォームドアスファルト混合物の回収アスファルトの針入度試験³⁻²⁾

アスファルトに水を添加することにより、アスファルト混合物の製造時や締め固め時に添加した水がアスファルトの性状に影響を与えていないかを、アスファルト混合物から回収したアスファルトの針入度で確認する。

(3) フォームドアスファルト混合物の残留水分量測定³⁻³⁾

アスファルト混合物中に添加した水が残留していないかを確認する。

(4) フォームドアスファルト混合物の性状試験³⁻⁴⁾

アスファルトに水を添加して発泡させることにより、アスファルト混合物の性状に影響を与えていないかを混合物の性状試験で確認する。

3.1.2. 検証結果

(1)フォームドアスファルトの針入度試験

フォームドアスファルトはアスファルト中に微細泡が混入しており、この微細泡が測定値に影響するため、そのままではアスファルトの性状試験を行うことができない。そのため、泡抜きを行った後に試験を実施した。泡抜きは下記の2つの方法を試みた。

(a)乾燥機養生による泡抜き

フォームドアスファルト製造後、ペール缶にフォームドアスファルトを採取して、乾燥機 155℃で 9 時間養生した後、針入度試験を実施した。なお、比較用の発泡無のアスファルトはフォームド発生装置から水を添加せずに採取した。したがって、水以外は同条件のものである。

(b)薄膜加熱試験による泡抜き

フォームドアスファルト製造後、採取したフォームドアスファルトで薄膜加熱試験を実施。薄膜加熱後の目視では泡は観測されなかった。その後、針入度試験を実施した。なお、比較用の発泡無のアスファルトは(a)と同条件で採取した。

表- 3.1にフォームドアスファルトの針入度試験結果を示す。この結果より泡抜きをすることによりアスファルトの劣化が進み針入度の値が小さくなっている。特に薄膜加熱試験は熱条件が厳しいため、より値が小さくなっている。しかし、フォームドしたものと、しないものの差はほとんどない。フォームドアスファルトの性状確認は製造直後の泡を含んだままでは測定ができないため、真の値は定かではないが、泡抜きによる劣化の影響はあるもののフォームドの有無による針入度の値に差はないため、添加した水がアスファルトへおよぼす影響はほとんどないものと推察できる。

表- 3.1 フォームドアスファルトの針入度試験結果

試験条件	アスファルトの種類	針入度平均 (1/10mm)
乾燥機加熱溶解※	ストレートアスファルト60/80	61
乾燥機加熱による 泡抜き	フォームドアスファルト	53
	フォームド無アスファルト (フォームド装置で水添加無)	54
薄膜加熱試験による 泡抜き	フォームドアスファルト	43
	フォームド無アスファルト (フォームド装置で水添加無)	43

※アスファルト温度:160℃

(2)フォームドアスファルト混合物の回収アスファルトの針入度試験

フォームドアスファルトを用いたアスファルト混合物の作製を行い、この混合物からアスファルトを回収して、針入度試験を実施した。比較用として無発泡の通常のアスファルトで作製したアスファルト混合物から回収したアスファルトの針入度と、使用したストレートアスファルトの針入度の測定結果を表- 3.2に示す。

表- 3.2 フォームドアスファルト混合物の回収アスファルト性状

アスファルトの種類	針入度平均 (1/10mm)
ストレートアスファルト60/80	62
フォームドアスファルト混合物回収	57
通常アスファルト混合物回収	57

表- 3.2より、フォームドアスファルト混合物から回収したアスファルトと通常のアスファルト混合物から回収したアスファルトの針入度は同等であることがわかる。したがって、アスファルトを発泡してもアスファルトの針入度には影響しないといえる。

(3)フォームドアスファルト混合物の残留水分量の測定

フォームドアスファルトは製造時に微量の水を添加する。そのためこの添加した水分が残留して混合物へ影響を及ぼすことが懸念されることから、フォームドアスファルト混合物中の残留水分について確認を行った。

試料は160℃のストレートアスファルト60/80に2.5%の水を添加し発泡させて混合物を製造して、通常の混合物と残留水分を比較した。なお、中温化製造を想定して130℃製造の試験も実施した。試験結果を表-3.3に示す。

表- 3.3 水分量測定結果

アスファルトの状態	混合温度	混合物の水分量(g)
通常	160℃	0.0
フォームド	160℃	0.0
フォームド	130℃	0.0

表- 3.3より、フォームドアスファルト混合物からは通常の混合物と同様、混合物中の水分量は検出されなかった。また中温化を想定した混合温度130℃の混合物においても水分量は検出されなかった。したがって、フォームドアスファルトを使用しても混合物中に水分は残留せず、アスファルトに添加した水分が混合物におよぼす影響はないものと考えられる。

(4)フォームドアスファルト混合物の性状試験

フォームドアスファルトに添加した水の影響を検証するため実際の合材工場でフォームドアスファルト混合物を製造し、その強度および耐水性を評価した。結果を表- 3.4に示す。

表- 3.4 フォームドアスファルト混合物の性状

項目	新規混合物		再生混合物(再生率60%)	
	フォームド	通常	フォームド	通常
締固め度 (%)	100.1	100.1	100.3	100.1
マーシャル安定度 (kN)	11.8	12.1	13.0	12.7
残留安定度 (%)	90	91	92	90
WT 動的安定度 (回/mm)	830	730	1340	1210
水浸WT 剥離率 (%)	0.92	1.46	0.00	0.00

※混合物は密粒度アスファルト混合物(13)

表- 3.4より、フォームドアスファルトを使用したアスファルト混合物の性状は通常のアスファルト混合物と同等の性状を示しており、フォームドアスファルトに添加する水は混合物性状に影響しないことが確認された。再生アスファルト混合物においても同様の結果が得られた。

3.1.3. まとめ

アスファルトを発泡させることにより、アスファルトの針入度に大きな変化はなく、混合物中の残留水分も確認されなかった。また、混合物の基本性状にも影響はなかった。この結果より、アスファルトに微量の水分を添加してアスファルトを発泡させてもアスファルトやアスファルト混合物におよぼす影響はないものといえる。

3.2. 微細泡化フォームドアスファルトの開発

高再生率の再生アスファルト混合物は新アスファルト量が少ないため効果が低下する。したがって、フォームドアスファルトを再生アスファルト混合物に適用するためには、フォームドアスファルトのベアリング効果を高める必要がある。表- 3.5は従来のフォームドアスファルトと微細泡に改良したフォームドアスファルトの概念を示したものである。従来のフォームドアスファルトは、発泡・膨張した後、比較的粒径の大きな泡同士が結合・肥大化することにより消滅し、施工時における泡の残存量が減少する傾向にある。この泡の残存量を増やし、ベアリング効果を高めるためには、微細泡化することが望ましいと考えられる。

表- 3.5 フォームドアスファルトの概念

項目	フォームドアス 噴射直後	数分後	敷きならし時
従来型			
改良型			

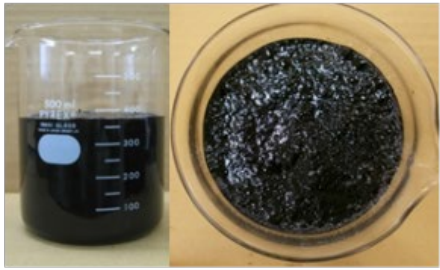
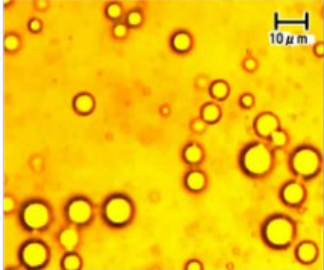
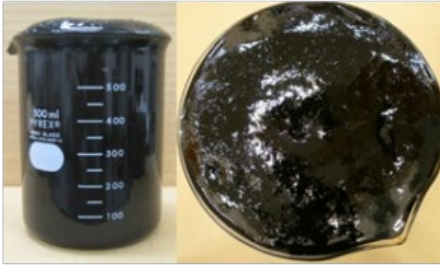
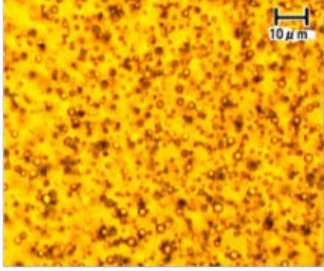
フォームドアスファルトを微細泡化するため、アスファルトの発泡状態を改善させるための添加剤（以下、発泡補助剤）を使用することとした。各種材料を実験した結果、表- 3.6に示すような発泡補助剤の使用によって発泡状態が大幅に改善され、これまで課題であった大きな泡を抑制し、大量の微細泡が存在するフォームドアスファルトに改良することができた³⁻⁵⁾。

表- 3.7にフォームドアスファルトの発泡状況およびマイクロスコープ画像を示すが、発泡改善剤を添加した開発品は発泡倍率が大きく、キメ細かい泡が大量に発生していることが確認できる。

表- 3.6 発泡補助剤の性状

項目	性状値
形状	液体
動粘度(25℃) mm ² /s	100
密度(15℃) g/cm ³	0.97
引火点 ℃	315

表- 3.7 フォームドアスファルトの発泡状況

種別	発泡状況	マイクロスコープ画像
従来型		
開発品		

また、フォームドアスファルトの性状は、既往の研究³⁻⁶⁾で実績のある式- 3.1を使用して評価した。これは、発泡倍率と半減時間を測定し、指標となるフォームインデックス（以下、FI）を算出する方法であり、FI が大きいほど泡の持続性があり、効果の高いフォームドアスファルトと評価される。結果を表- 3.8に、使用した使用したストレートアスファルトの性状を表- 3.9に示す。結果から、開発品は発泡倍率、半減時間ともに大きく改善されており、FI が大きいことが確認できた。なお、発泡補助材はアスファルトに対して 0.1%程度の添加量であり、アスファルトの性状に影響を与えることもなく、アスファルト混合物としての価格の上昇も 1%程度である。

$$FI = \frac{-\tau_{1/2}}{\ln 2} \left(4 - ER_m - 4 \ln \left(\frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left(\frac{1+c}{2c} \right) * ER_m * t_s \quad \text{式- 3.1}$$

ここに、 $\tau_{1/2}$ ：半減時間 ER_m ：発泡倍率

c ：膨張率補正係数

t_s ：フォームドアスファルト噴射時間

表- 3.8 発泡倍率と半減時間（FI 測定）

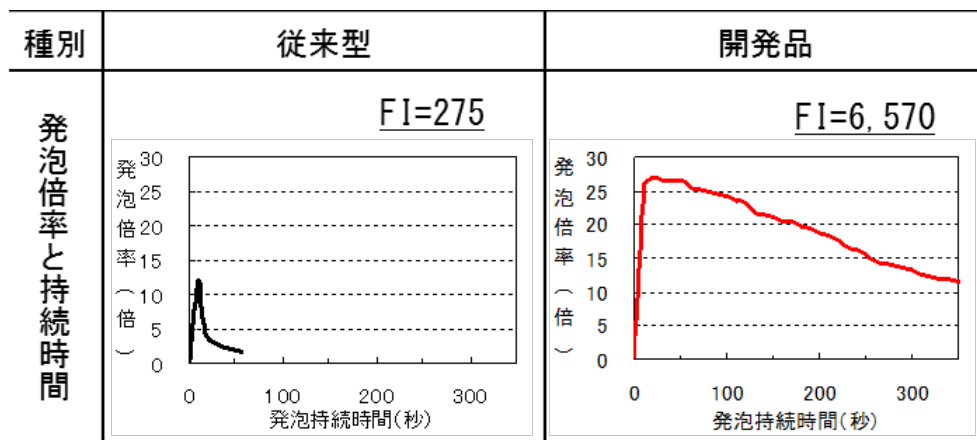


表- 3.9 使用アスファルトの性状

項目	品名	針入度(25°C) (1/10mm)	軟化点 (°C)	伸度(15°C) (cm)	密度(15°C) (g/cm ³)
性状	StAs 60/80	71	47.5	100+	1.039

これまでの結果を踏まえて、開発した改良型フォームドアスファルトを使用したアスファルト混合物（フォームド混合物）の効果を検証した。

(1)新規アスファルト混合物

図- 3.2は通常のアスファルトと従来型のフォームドアスファルト、改良型のフォームドアスファルトを使用した時の新規の密粒度アスファルト混合物（13）の締固め温度と締固め度の測定結果である。なお、アスファルトはストレートアスファルト 60/80を使用した。

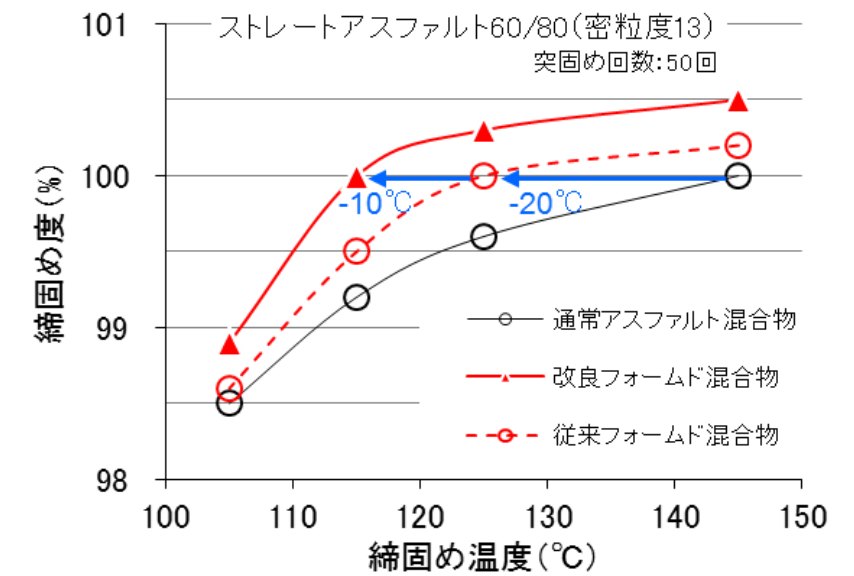


図- 3.2 締固め温度と締固め度の関係 (新規混合物)

この結果から、通常のアスファルトを使用した混合物より、従来型のフォームドアスファルトを使用した混合物は締固め効果が高いことがわかる。また改良型のフォームドアスファルトは、従来型よりさらに効果が改善されている。

製造温度低減効果は従来のフォームドアスファルトでは約 20°C であるのに対して、改良したフォームドアスファルトでは約 30°C と大きく改善されている。

ポリマー改質アスファルトでも図- 3.2 と同様の傾向を示しており、製造温度低減効果を確認した。各改質アスファルトを使用した時の製造温度低減効果を表- 3.10 に示す³⁻⁷⁾。

表- 3.10 改質アスファルトを使用した混合物の温度低減効果

アスファルトの種類	混合物の種類	温度低減効果例 (°C)
改質Ⅱ型	密粒度アスファルト混合物(13)	29
改質H型	ポーラスアスファルト混合物(13)	22

(2)再生アスファルト混合物

フォームドアスファルトの再生アスファルト混合物への適用を検証した。表・3.11に評価条件、図・3.3に再生骨材配合率を変化させた時の製造温度低減効果を示す。改良型のフォームドアスファルトを使用した混合物は従来型のフォームドアスファルトを使用した混合物よりも、製造温度低減効果は高い。従来型のフォームド混合物は再生骨材配合率が60%の時の製造温度低減効果が5℃程度しかないのに対して、改良型のフォームド混合物は25℃程度の低減効果がある。したがって、改良型のフォームドアスファルトは再生アスファルト混合物でも十分な効果が確認された。

表- 3.11 フォームドアスファルトの効果の評価条件

項目	条件
混合物種別	密粒度アスファルト混合物(13)
再生骨材配合率	0, 30, 60, 70
新アスファルト 添加方法	通常添加
	従来フォームド
	改良フォームド
突固め方法	マーシャルランマ 両面50回
突固め温度	145～105℃

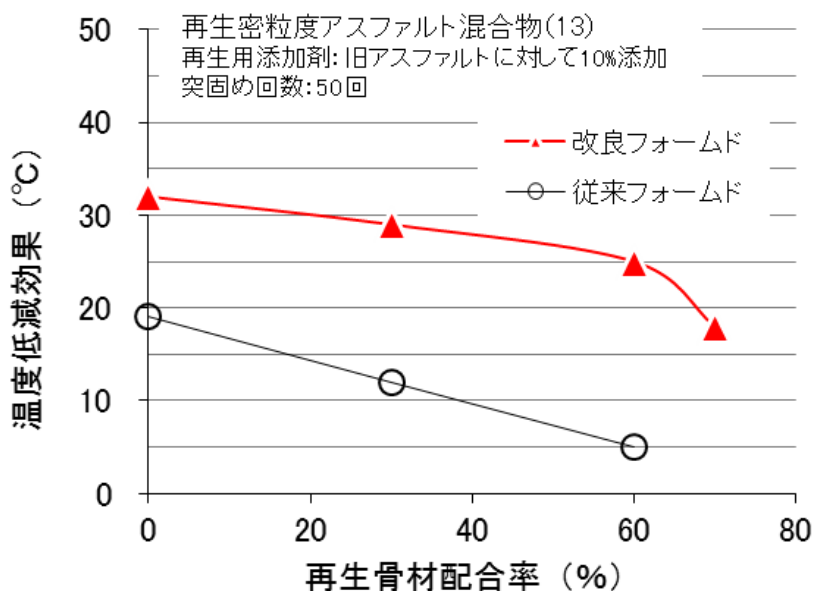


図- 3.3 再生骨材配合率と温度低減効果の関係

3.3. 高再生率アスファルト混合物への適用

前節の結果から、フォームドアスファルトを微細泡へ改良することにより再生アスファルト混合物に対して締固め性が向上し、製造温度低減効果が十分に得られることが確認できた。しかし、図- 3.4に示すとおり、再生率が高くなると新アスファルト量が少なくなる影響もあり、効果が小さくなる。そのため、高再生率の混合物に対しては、改良したフォームドアスファルトでも適用効果を十分に出すことは難しい。本研究ではより高い再生率へ適用するためにはさらに効果の上乗せが必要だと考えた。

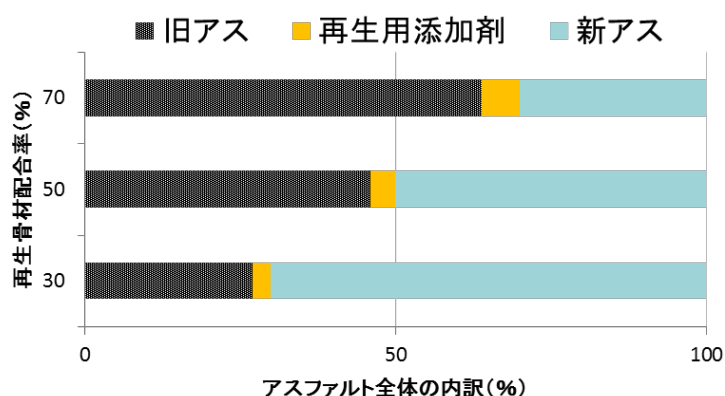


図- 3.4 再生アスファルトの構成

そこで、再生アスファルト混合物に使用している再生用添加剤に着目した³⁻⁸⁾。再生用添加剤は図- 3.4のように、再生骨材配合率が高くなると添加される再生用添加剤の量は増加していることがわかる。このことから、アスファルトの一部となる再生用添加剤を発泡させることにより、製造温度低減効果の上乗せ効果を得られると考えた。

また、再生用添加剤を発泡させることは表- 3.12に示すように、泡のベアリング効果による混合物の製造温度低減効果を向上させるだけでなく、見掛け上の容積が増加した状態で添加することにより、混合直後から再生用添加剤の旧アスファルトに対する被膜状態が良好であり、旧アスファルトの性状が回復しやすいものと考えられる。

これらのことから、再生用添加剤をアスファルトと同様に発泡させることにより、高再生率アスファルト混合物の製造温度低減効果および再生骨材の品質回復が効果的に図られるものと考えた。

表- 3.12 添加方法による分散・被膜状態の違い

項目	添加状況	分散・被膜状況
通常添加	<p>再生用添加剤</p> <p>再生骨材</p>	
発泡添加	<p>水</p>	

3.3.1. 再生用添加剤のフォームド実験

再生用添加剤の発泡について確認を行った。室内フォームド発生装置を用いて実験を行ったが、その際、再生用添加剤の種類および加熱温度を変化させた。なお、アスファルトの場合と同様に再生用添加剤にも発泡補助剤を添加し、フォームド実験を行った。

実験結果を表- 3.13に示す。この結果より、再生用添加剤の種類によっては発泡しづらいものがあることが分かった。また、再生用添加剤の加熱が必要なことは当然であるが、130℃程度に加熱することで発泡に必要な温度を確保できることも分かった。

表- 3.13 再生用添加剤のフォームド実験結果

再生用 添加剤 種別	加熱温度 (°C)		
	100	115	130
A	△	○	○
B	△	△	○
C	×	△	△

○：泡のキメが細かく持続性が良い
 △：泡のキメが粗く消泡が早い
 ×：ほとんど発泡しない

3.3.2. フォームド再生用添加剤の製造温度低減効果

フォームド再生用添加剤を用いた再生アスファルト混合物の締固め特性を評価した。なお、試験では表- 3.13の A の再生用添加剤を使用した。アスファルトは①通常のアスファルト、②アスファルトのみフォームド (Sフォームド)、③アスファルトと再生用添加剤ともにフォームド (Wフォームド) で比較した結果を図- 3.5に示す。Wフォームドすることにより、Sフォームドより締固め特性が改善され、本試験条件では温度低減効果が約 8℃改善された。

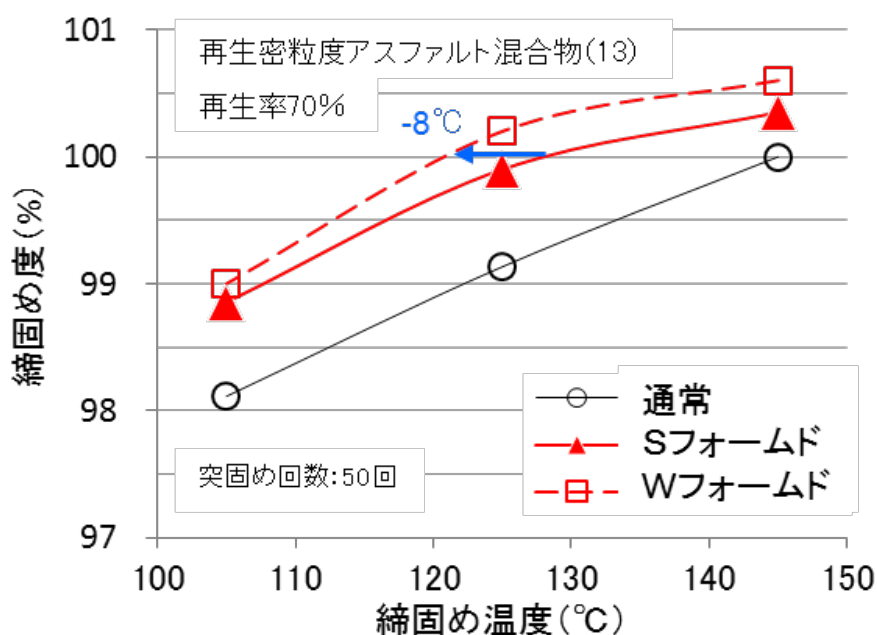
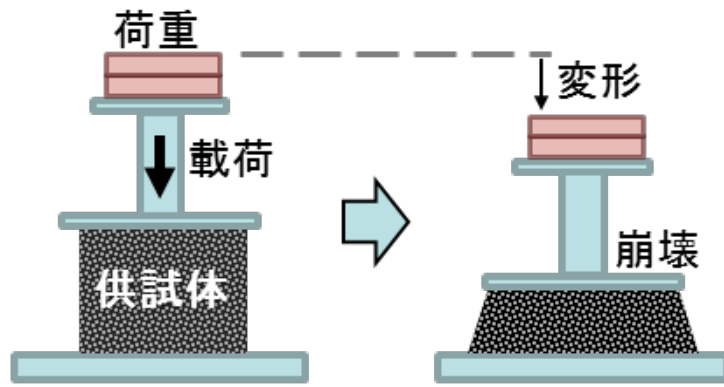


図- 3.5 締固め度試験結果 (Wフォームド効果)

3.3.3. 作業性の評価

(1)作業性評価方法

アスファルト混合物には作業性評価については確立された手法はないが^{3-9) 3-10)}、本研究では、図- 3.6に示すように、“アスファルト混合物のほぐれ易さ”に着目した作業性評価方法を用いて評価を行った。これは所定の締固めを与えてアスファルト混合物を塊状にし、荷重を加えた時の供試体の崩れやすさ (ほぐれ易さ) で作業性を評価する方法であり、測定データとして図- 3.7に示すように、载荷時間と変形量の関係が求められる。载荷開始直後から供試体が徐々に変形し、ある時点で急激に変形が加速する。この変形速度が最大になる点を混合物がほぐれたと見なし、ほぐれるまでの载荷時間を求め、このほぐれるまでの時間が短いほどほぐれ易い (作業性が良好) という評価になる。



評価：崩れる時間が早い＝ほぐれ易い

図- 3.6 作業性の評価方法

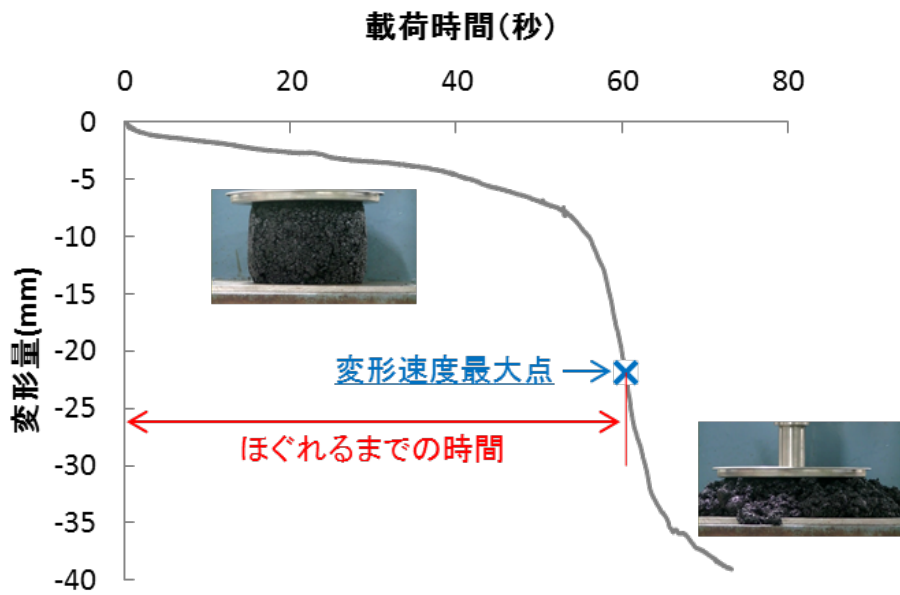


図- 3.7 作業性評価試験測定データ (例)

(2)作業性評価試験結果

3種類の添加方法で製造されたアスファルト混合物について試験を実施した。結果を図-3.8に示す。アスファルト混合物温度が低いほど、フォームドアスファルトを使用したアスファルト混合物は通常のアスファルト混合物に比べてほぐれるまでの時間が短く、すなわちほぐれ易く、作業性が良好であるということが確認できた。

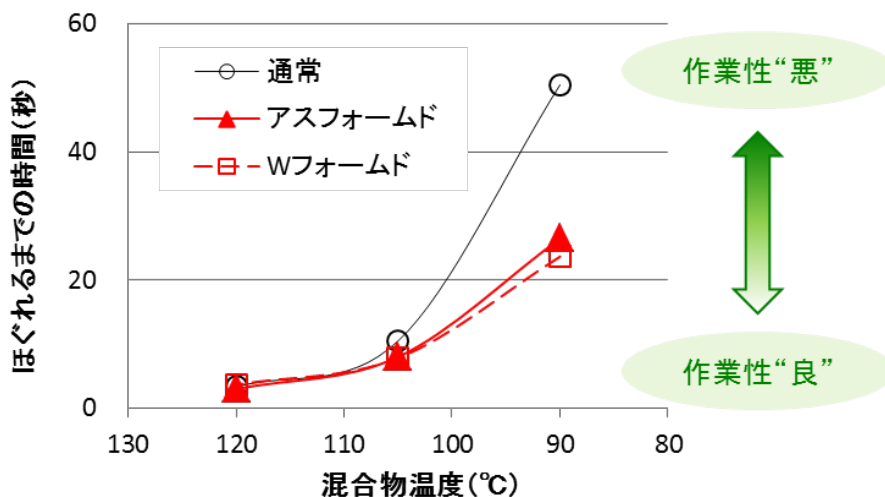


図- 3.8 フォームドアスファルトの作業性評価結果

3.3.4. フォームド再生用添加剤の性状回復効果

再生骨材の旧アスファルトの回復状況を評価するために、圧裂試験³⁻¹¹⁾にて効果を確認した。ただし、本研究では効果を明確にするため再生骨材のみを使用した。試験結果を図-3.9に示す。圧裂係数は密度に依存するため、密度と圧裂の傾向線で比較した。通常添加では添加1時間後と5時間後の傾向に違いがある。これは、経過時間が長くなると、再生用添加剤がよく馴染むことにより旧アスファルトの性状が回復し圧裂係数が小さくなっていると考えられる。これに対して発泡添加では、添加1時間後と5時間後について、ばらつきはあるものの同様の傾向がみられる。また、発泡添加の添加1時間後、5時間後は通常添加の5時間後と同様な傾向がみられる。

このことから、発泡添加は旧アスファルトと急速に馴染むことが示唆される。今後の課題として、試験を重ねて効果を検証していくことが挙げられる。

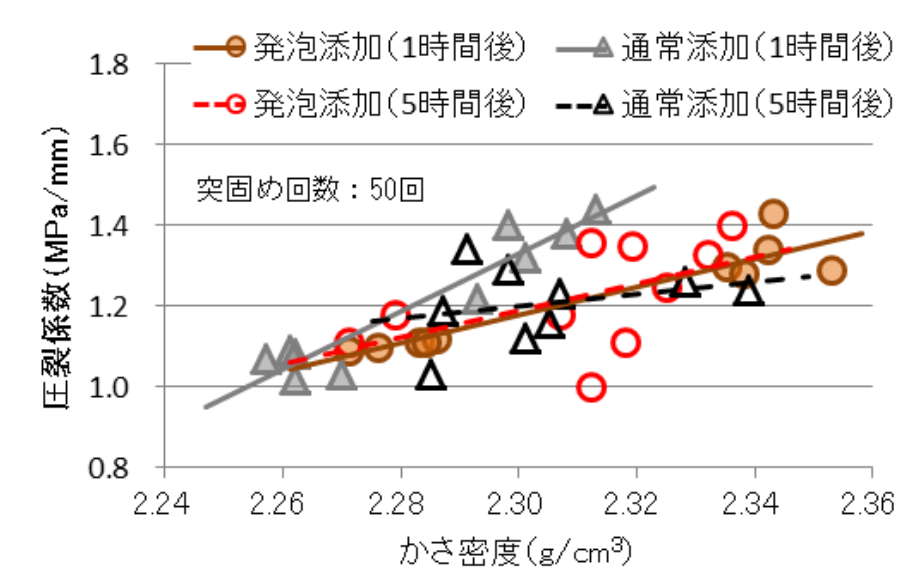


図- 3.9 密度と圧裂係数（再生骨材、再生用添加剤のみ使用）

3.4. アスファルト合材工場における効果の検証

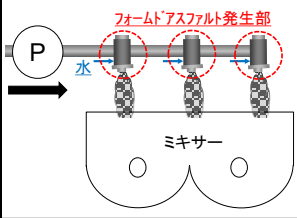
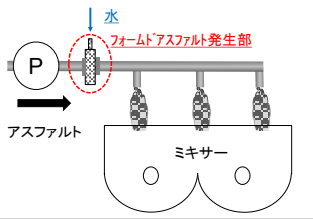
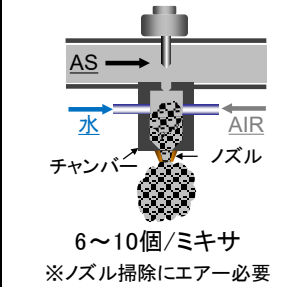
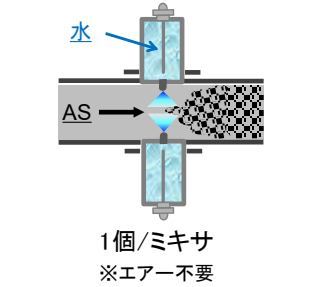


改良したフォームドアスファルトおよび再生用添加剤の発泡による効果が室内実験で十分確認できたため、稼働している合材工場で開発したフォームドアスファルト混合物を製造し、その評価をして実用化の可能性を得る。

3.4.1. フォームドアスファルト発生装置の研究開発

(1)装置の特徴

アスファルトフォームド発生装置は、いくつかの種類があり、大別すると欧州で主流である従来型のチャンバー発泡方式（以下、チャンバー式）と米国で主流である簡易型の配管発泡方式（以下、配管式）がある。表- 3.14は、今回、実際に導入して検証した上記 2方式の装置の概要を示すものである³⁻¹²⁾。

表- 3.14 フォームドアスファルト発生装置の概要

フォームド方式	チャンバー式	配管式	
装置概略図			
フォームドアスファルト発生部	 <p>6~10個/ミキサー ※ノズル掃除にエアが必要</p>	 <p>1個/ミキサー ※エア不要</p>	
プラント 取付	位置	 <p>ミキサ直上 ※取付空間が必要</p>	 <p>アスファルト配管中</p>
	取付	10日	3日
	調整	3日	1日
適用アスファルト	改質Ⅲ、Hは適用不可 ※ノズルが閉塞しやすいため	全て可	

チャンバー式は、ミキサ上部に設置されたチャンバーでアスファルトと水が混合され発泡し、ノズルから下部のミキサに噴射される。また、チャンバー数はミキサ容量に応じて決定される。一方、配管式は、アスファルト配管途中に挿入された水供給装置から高压水を噴射して、配管中でアスファルトと水が混合され発泡するものである。水供給装置はミキサ容量に関わらず1個で良く、非常にコンパクトである。

プラント取付けは、チャンバー式はミキサ直上に取付空間が必要となる。さらに、装置も大掛かりで、取付工事・調整日数が多くかかるため、コスト高になる。配管式は既存の配管部の加工で済むため短期間での取付けが可能であり、コストもチャンバー式に比べ安く済む。特に稼働中のプラントでは休業することなく設置できることは大きなメリットである。

また、チャンバー式に高粘度タイプのポリマー改質アスファルトを適用する場合は、ノズル部が閉塞しやすいため、ノズルヒーター設置などの対策が別途必要になる。

(2)フォームド性状

図-3.10は、プラント装置と同型の室内用発生装置を用いて試験した発泡性状を示したものである。高再生率の再生アスファルト混合物などにも適用するため、発泡補助剤の有無による違いも確認した。

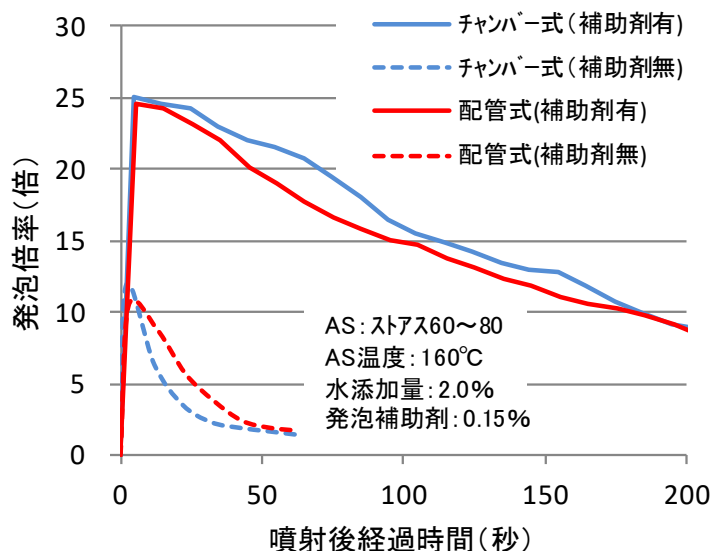


図- 3.10 フォームドアスファルト発生装置と発泡性状

この結果より、発泡補助剤の添加により、最大発泡倍率および発泡持続時間ともに大幅に向上した。また、装置の差異については、性状は同程度であり、装置が簡素な配管タイプでも、良質な泡が製造可能であることが分かった。

以上のことから、既設プラントへの設置や導入コストを考慮すると配管式が有利である。これまでの結果を基に、既設プラントにも容易に設置ができ、小型で整備性もよく再生添加剤の少量噴射にも対応できる配管式のフォームドアスファルト発生装置を日本仕様に開発した。

発泡補助剤は配管内で添加させラインミキサーで混合できる方式とし、既設の配管途中に約1mの幅で納まる仕様とした。図- 3.11に配置図を示す。

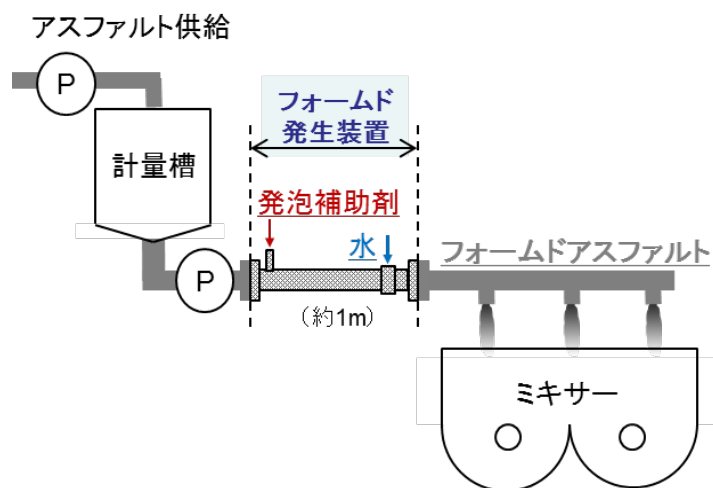


図- 3.11 フォームドアスファルト発生装置の配置図

3.4.2. フォームドアスファルト効果の持続

開発したフォームドアスファルト発生装置を合材工場に設置し、フォームドアスファルト混合物の持続効果を検証した。合材工場にはアスファルトと再生添加剤用の発生装置をそれぞれ設置し、Wフォームドで検証した。表- 3.15に検証条件を示す。

表- 3.15 フォームド再生アスコンの効果の検証条件

項目	条件
混合物種類	再生密粒度混合物(13) 再生骨材配合率70%
再生用添加剤量	10%(対旧アスファルト)
製造温度	出荷目標165℃
製造方法	①【通常】アスファルト、添加剤ともに通常添加 ②【Wフォームド】アスファルトと添加剤をフォームド添加
サンプリング時間	①【ダンプ運搬試験】 0～5時間(1時間毎) ②【サイロ貯蔵試験】 0～30時間(6時間毎)

(1) ダンプ運搬試験

ダンプ運搬試験は図- 3.12に示すようにアスファルト混合物積載後 1 時間毎に 5 時間までサンプリングした。なお、サンプリング以外の時間は合材工場周辺を走行することとした。アスファルト混合物の評価は、マーシャル安定度試験供試体の締固め度により検証した。W フォームドの再生アスファルト混合物は、製造直後から通常アスファルト混合物に比べて高い締固め度を示しており、運搬時間が経過しても締固め度はほぼ同一の値で推移した。

このことから、ダンプ運搬中に時間が経過してもアスファルト中に含まれる微細泡は減少せず、発泡によるベアリング効果が持続していることが確認でき、長距離運搬において効果的なアスファルト混合物であるといえる。

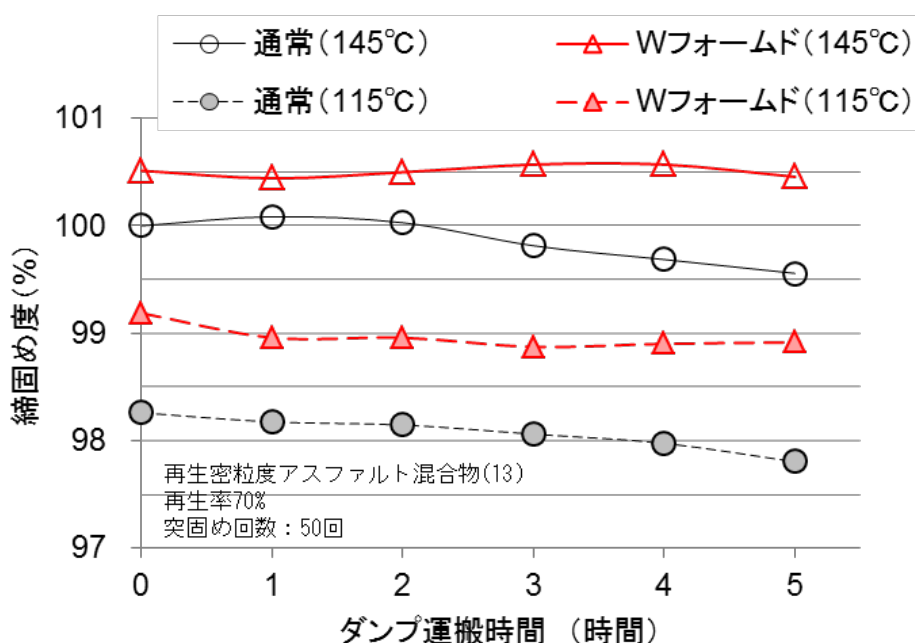


図- 3.12 締固め密度測定結果 (ダンプ運搬試験)

(2) 構内サイロ貯蔵試験

サイロ貯蔵試験は図- 3.13に示すように合材工場内に設置されているサイロで、貯蔵後 6 時間毎に 30 時間までサンプリングし、マーシャル安定度試験供試体により締固め度を測定した。まず、再生骨材配合率が 70%と高い再生アスファルト混合物は、W フォームドの使用により 20°C以上の温度低減効果が確認できた。また、ダンプ運搬試験の結果と同様に、サイロ貯蔵に伴い時間が経過しても発泡によるベアリング効果が持続されていることが確認できた。

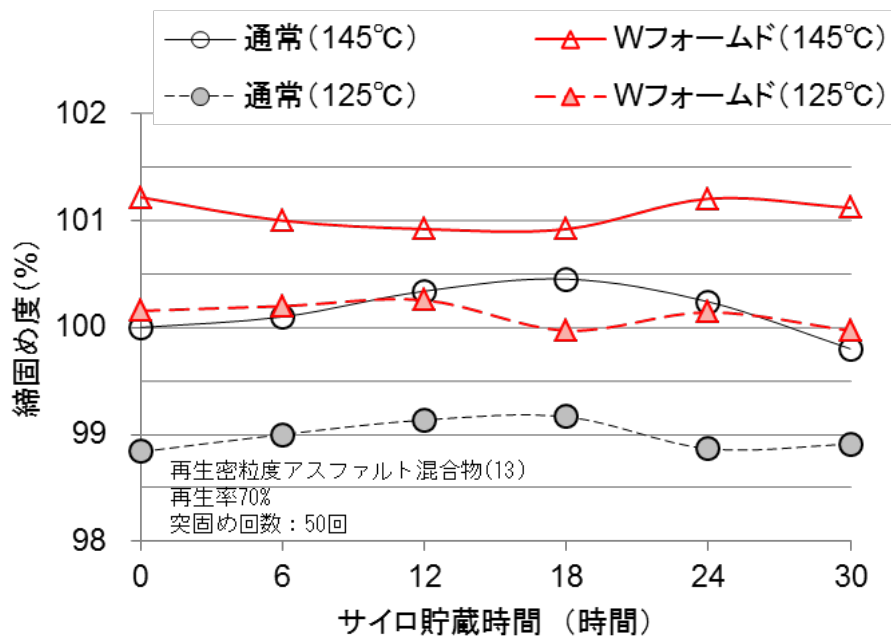


図- 3.13 締固め密度測定結果（サイロ貯蔵試験）

3.4.3. アスファルト合材工場における新たな用途拡大

合材工場における検証では、実際の出荷（ダンプ運搬、構内サイロ貯蔵）においても効果があることが確認された。これにより、更なる用途の拡大を目的としてサテライトサイロにおける利用の検証をした。

図- 3.14に示すサテライトサイロという方式のアスファルト混合物の出荷方法がある³⁻¹³⁾。これはアスファルト混合物の製造を本体の合材工場で行い、その混合物を離れた場所にある貯蔵サイロ（サテライトサイロ）で一時的に貯蔵し、供給する方式である。この方式は合材工場設置が困難な都市部へ一時貯留して供給を行う、または、需要の少ない地域へ少ない設備投資で効率的な供給が行えるといったメリットがある。しかし、運搬時間中の温度低下は避けられず、特に寒冷期の品質確保が課題となる。

そこで、長距離運搬や長時間サイロ貯蔵に効果のあるフォームドアスファルト混合物が課題解決および品質向上に対して、効果があると考えた。



図- 3.14 サテライトサイロ方式イメージ

(1) 検証方法

サテライトサイロにおける混合物温度低下時の品質確保を目的に、通常のアスファルト混合物とフォームドアスファルト混合物との比較検証をした。検証した製造方法の概要を表- 3.16に示す。

通常のアスファルト混合物は、サテライトサイロ方式で効果が最も高いと考えられる、二次混合方式を採用する。サテライトサイロの二次混合方式による製造は、最少量のアスファルトを添加した状態の混合物を合材工場で製造・運搬し、サテライトサイロに詰めたものを、出荷時にサイロ下部に設けたミキサで残りのアスファルトを添加・混合する方法である。この方式はアスファルトの劣化抑制が期待できるため、アスファルト混合物の品質確保や施工性の改善が見込める。

フォームドアスファルト混合物の製造方法は、フォームドアスファルトを使用して混合物を合材工場で製造・運搬し、サテライトサイロに詰めたものを出荷する方法である。本体の合材工場には、アスファルトと再生添加剤の2つを発泡できる装置を設置し、アスファルトと再生添加剤の両方を発泡させ添加・混合する。

以上、本研究では2種類の製造方法の比較検証を実施した。

表- 3.16 検証した製造方法

製造方法 種別	混合条件	
	合材工場	サテライトサイロ
二次混合	防塵目的の最少量のアスファルトと再生用添加剤を混合	残りのアスファルトをサイロ下部ミキサで混合して出荷
フォームド	アスファルトと再生用添加剤を発泡して混合	計量のみで出荷

注) 対象とした混合物：再生密粒度混合物 13F（再生骨材配合割合 60%）

(2)フォームドの効果

2種類の製造方法により混合物を製造・運搬し、サテライトサイロの2本のサイロに各々貯蔵した。その後、所定の時間経過ごとに、混合物を出荷してサンプリングし、マーシャルランマで締固めて供試体の作製をした。

実験より得られた締固め密度の測定結果を図- 3.15に示す。貯蔵時間経過ごとに各締固め温度における締固め密度を示しているが、すべての時点においてフォームドアスファルト混合物の方が二次混合で製造されたものよりも高い密度を示していることが確認できる。

また、密度測定を実施した供試体で圧裂試験を実施した。結果を図- 3.16に示すが、圧裂係数は締固め密度に大きく依存するため、密度と圧裂係数の関係でデータをまとめている。この結果より、同一の密度で比較した場合、フォームドアスファルト混合物の方が圧裂係数が低い。これは、アスファルトおよび再生用添加剤を発泡して添加することにより旧アスファルトに対する被膜が良好であり、旧アスファルトが十分に回復した結果と考えられる。

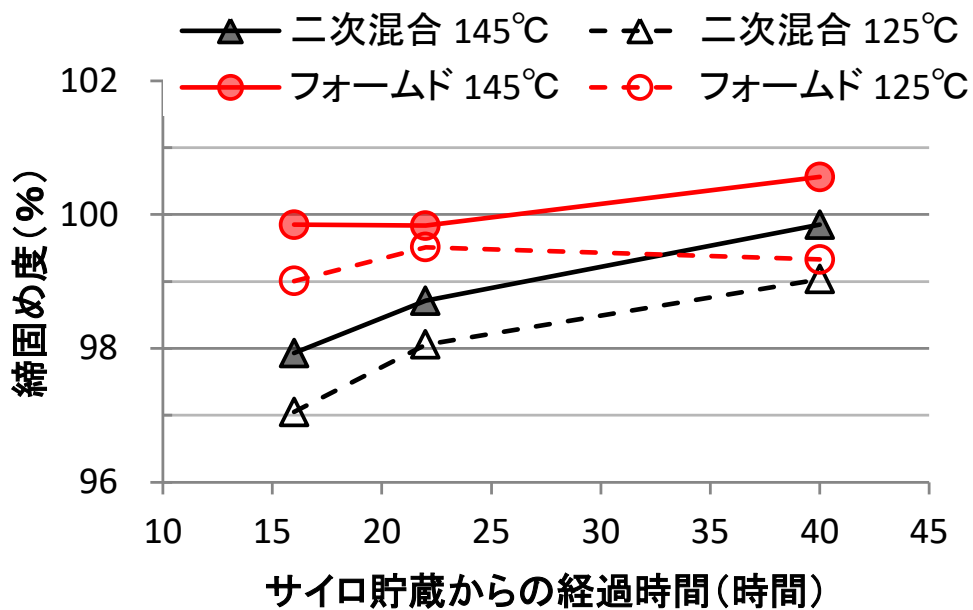


図- 3.15 サイロ貯蔵時間と締固め密度

3.5. まとめ

第3章では、社会資本整備の要である道路舗装の維持管理に欠かせない再生アスファルト混合物の品質向上および持続的安定供給に対応するため、中温化技術であるフォームドアスファルト技術について研究した。

第3章で得られた知見を以下に示す。

- 発泡改善剤により、従来よりも泡を微細化したことで、フォームインデックスを大幅に向上させることが可能となった。
- フォームドアスファルトの微細泡化によるベアリング効果の向上は、高再生率の再生アスファルト混合物の締固め性や施工性を従来よりも向上させることが確認できた。
- 再生用添加剤を発泡させることにより、締固めや施工性を向上させ、高再生率の再生アスファルト混合物の混合物性状が向上することが確認された。
- バッチ式アスファルト合材工場には小型配管式のフォームド発生装置が適している。
- 混合物運搬時間やサイロ貯蔵可能時間が改善される。

本研究により、日本の高再生率のアスファルト混合物ではこれまで実用化されていない中温化技術である、フォームドアスファルト技術を研究した結果、発泡させる泡の改良および再生用添加剤の発泡化に成功した。これにより、従来より低コストで製造温度を低下させて製造が可能となり、製品の品質および可使用時間を改善することができた。

さらに踏み込んで考えると、フォームド技術の効果として、アスファルト混合物を中温化製造せず、通常の製造温度でフォームドアスファルトを使用するだけで、得られる効果もある。具体的には以下のような効果が期待できる。

(1)路面密度の均一性確保

一般的にアスファルト混合物を製造・出荷した後、ダンプトラックで施工現場まで運搬する。この時、シート等で保温対策を行うが、荷台に接する部分や上面シート部などの周辺部からアスファルト混合物の温度が低下する。特に冬期は温度低下が顕著になるが、これには、影響のない範囲で製造温度を上げて対応しているのが現状である。

しかし、アスファルト混合物は図-3.17に示すように、ダンプトラックが現場に到着し、アスファルトフィニッシャーに荷卸しするまでに、外周部温度は低下し、混合物内部と外周部とでは温度差（不均一）が出てくる。

その後、アスファルトフィニッシャーのフィーダやスクリードで混ぜられるため、全体的には均一になり、温度管理上は特に問題はない。しかし敷きならし後、均一に見えるアスファルト混合物中ではある程度の温度の不均一は残るため、この不均一が転圧後の締固め具合に差が生じる懸念がある。特に冬期施工や手引き施工時などでは温度差が大きくなるものと考えられる。

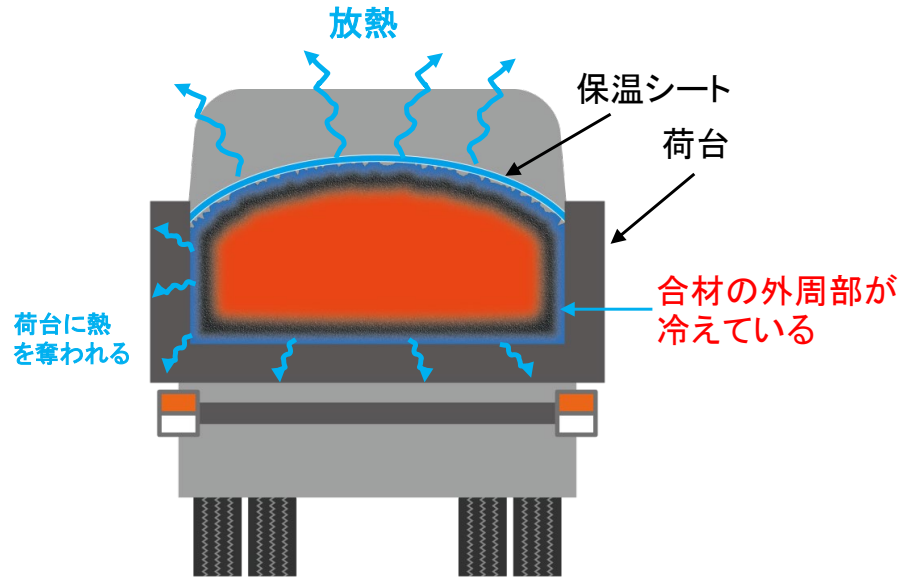


図- 3.17 合材温度低下のイメージ

道路舗装は工場での製造品ではなく、現場打ちの製品であるため多少の変動はあるが、許容範囲内であれば特に問題はない。しかし、より品質を重視し将来を見据えた場合、部分的に温度が低く、結果的に密度が多少低い箇所に、将来ポットホールやクラックが発生する可能性は残る。

そこで、温度のバラツキによる締固めの変動をより少なくするために、フォームドアスファルト技術の適用が有効であると考えている。

フォームドアスファルトを使用した場合でも、通常のアスファルト混合物と同じように敷きならし後には温度のムラは多少あるかもしれない。しかし、フォームドアスファルトは温度が多少低くてもアスファルトの見かけの粘度が低いため、通常のアスファルト混合物より良く締め固まる性質がある。このため、温度のバラツキに対して締固めの変動は極力小さくなると推察できる。

したがって、フォームド技術を通常のアスファルト混合物に適用させることにより、品質の精度が高まり、舗装の耐久性（寿命）を延ばすことができると考えられる。

(2)アスファルトの劣化抑制

近年、再生アスファルト混合物の全製造量に占める割合は約 75%に達している。また、再生アスファルト混合物に使用されている再生骨材の使用割合（再生率）は平均で約 50%まで上昇し、都市部などの地域によっては 75%の高い再生率で使用されていることもある。このように現在では、アスファルト混合物は再生アスファルト混合物が主流となっている。

そして、再生骨材に含まれている旧アスファルトは劣化により硬くなっている。また、製造時に旧アスファルトを劣化させないように、直火ではなく熱風等で加温させるため、芯まで温まり難い傾向がある。したがって、舗装現場では再生アスファルト混合物は「重

い（作業性が悪い）」「冷めやすい」といった評価になることがある。

そのために、図- 3.18に示すように、アスファルト混合物の製造時に製造温度を許容範囲内で高くして、舗装現場で使いやすいように対応している。

しかし許容範囲内とはいえ、アスファルトの劣化は製造時の熱劣化が大きな要因を占めていることから、製造温度を高くすることは、望ましいことではない。

そこで、フォームドアスファルトは見かけの粘度が下がるという特徴を利用して、再生アスファルト混合物に適用させることにより、製造温度を上げることなく、新規アスファルト混合物と同じ温度で製造しても、舗装現場で使いやすい混合物になると考えられる。

したがって、アスファルトの劣化を抑制し、使いやすい再生フォームドアスファルト混合物を使用することにより、舗装の品質は保たれ、耐久性が確保されることが期待できる。

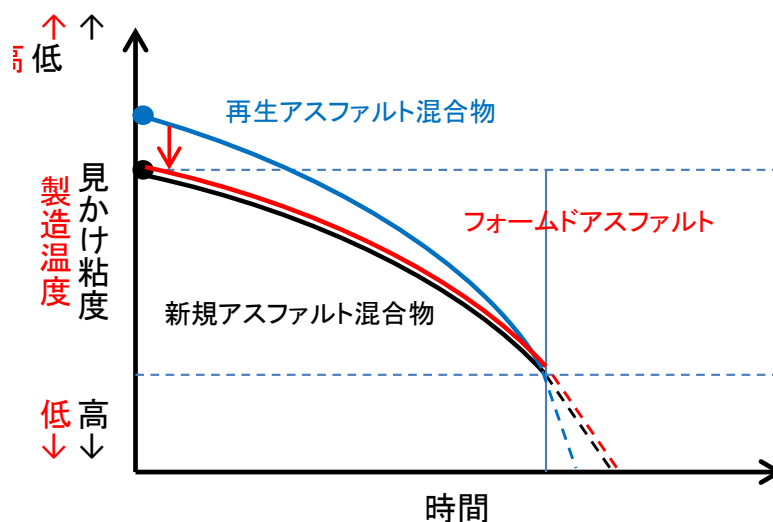


図- 3.18 再生アスファルト混合物のイメージ

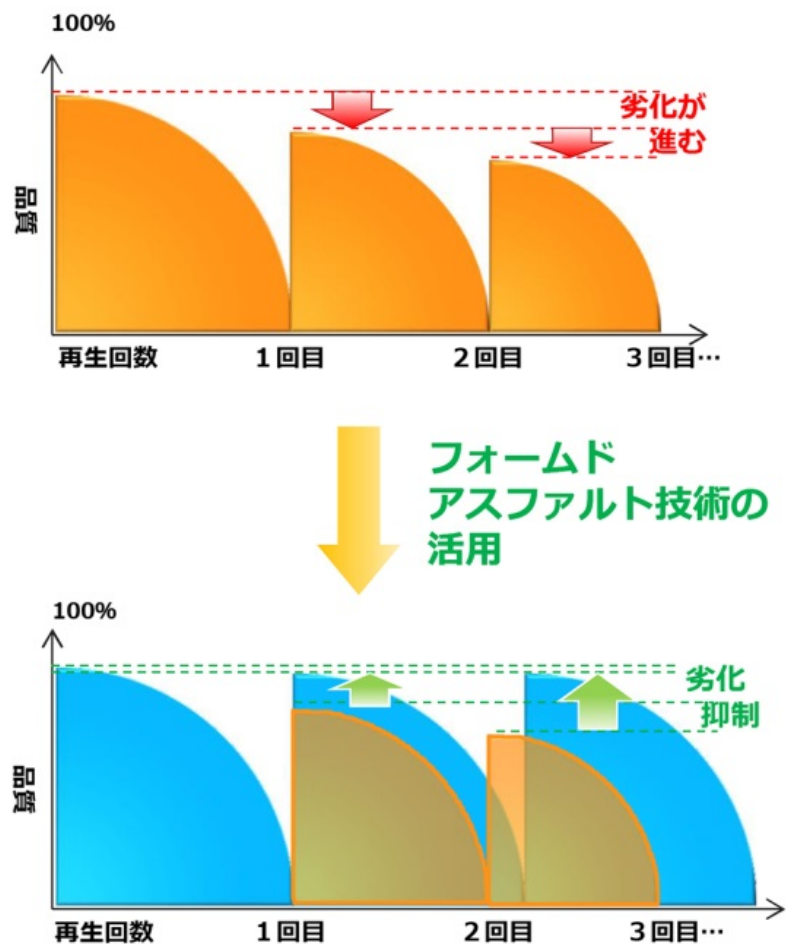


図- 3.19 持続的リサイクルのイメージ

このような対策をすることにより、再生アスファルト混合物の繰り返し再生時の品質低下を極力抑えることができると考えられる。これにより、図- 3.19に示すような、持続的かつ安定的にアスファルト混合物のリサイクルを推進することができる。

また、本研究で得られた施工性改善効果により、アスファルト混合物をこれまで以上に遠方へ運搬できること、また、サイロの貯蔵可能時間が大幅に改善できることが確認されたことは非常に意義のあることと考えている。これにより、これまでの合材供給の概念以上に供給圏域を広げることができることは、道路舗装の維持管理の対応能力の向上につながることであり、また、持続的な安定供給が図れることは、今後の社会基盤整備において重要なことである。

次章以降では、アスファルト混合物の安定供給について現状分析をして、フォームドアスファルト技術の効果的な適用について提案をする。

[第3章の参考文献]

- 3-1) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 A041, 2007.
- 3-2) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 G029, 2007.
- 3-3) 日本道路建設業協会：舗装工事に関する試験方法ハンドブック, 1980.
- 3-4) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 B001 B003 B004, 2007.
- 3-5) 清水泰成, 越健太郎, 江向俊文：再生アスファルト混合物にも適用可能な汎用性の高いフォームドアスファルト技術, 舗装, pp.25-30, 2016.
- 3-6) KJ Jenkins : Characterisation Of Foamed Bitumen, *7TH CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA*, 1999.
- 3-7) Koshi, K., Moriyasu, H., Saito, K., Shimizu, Y.: Study on the improved recycled asphalt mixtures by microbubble-foamed asphalt, *The 12th International Conference on Asphalt Pavements ISAP North Carolina 2014*, 2014.
- 3-8) 日本道路協会：舗装再生便覧, 2010.
- 3-9) 村井宏美, 小柴朋広, 伊藤大介：マイクロバブル型フォームドアスファルト混合物の作業性に関する一検討, 第71回土木学会年次学術講演概要集, 2016.
- 3-10) 工藤朗, 徳光克也, 大沼美彦：マイクロバブル型フォームドアスファルト中温化混合物のワーカビリティとその持続性, 第29回日本道路会議論文集, 2011.
- 3-11) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 B006, 2007.
- 3-12) 越健太郎, ANDY WELCH：フォームドアスファルト発生装置の導入, 第31回日本道路会議論文集, 2015.
- 3-13) 日本道路協会：プラント再生舗装技術指針, 1992.

4. 安定的な供給体制の提案

アスファルト混合物の供給体制を把握し、将来に渡り持続的に安定供給するための提案をするために、現在よりも正確で詳細な供給圏域の把握手法を開発する。さらに、供給の冗長性を算出して、供給の脆弱な地域を把握する。

供給体制把握の研究開発フローを図-4.1に示す。

- 始めに、合材工場の位置情報と道路ネットワークデータから、経路探索をして書く合材工場からの供給圏域の算出手法を考案する。
- 考案した算出手法により、都道府県別の供給圏域を算出する。この算出では近隣からの流入の影響は考慮はしない。
- 近隣県をリンクして、他県からの流入を考慮した供給圏域を算出する。四国地域は周囲を海で囲われているため、四国四県以外からの流入も少なく影響が小さいため、算出例とする。
- 供給圏域に使用したデータから冗長性を算出し、安定供給性を把握する。

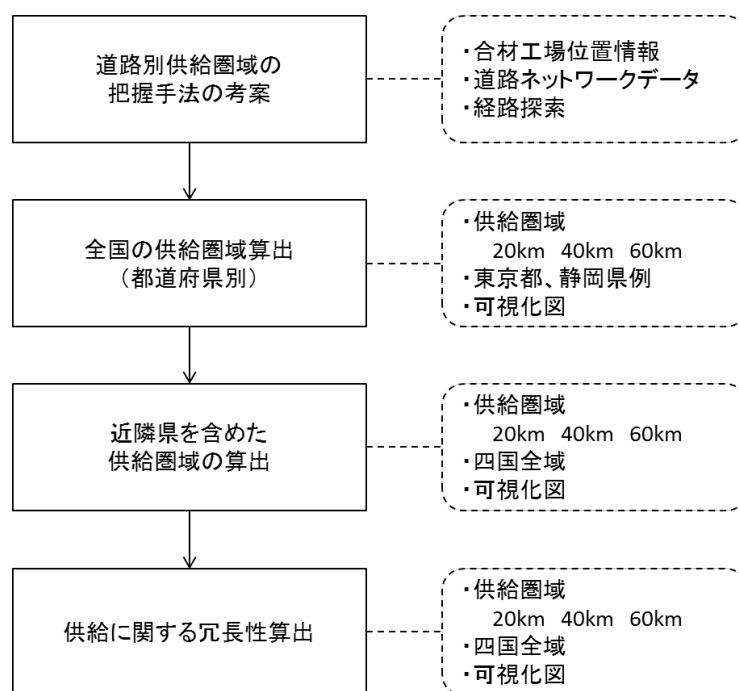


図- 4.1 供給体制把握の研究開発フロー

4.1. 道路別のアスファルト混合物の供給圏域の把握手法の考案

本研究では、道路毎に対するアスファルト混合物の供給可否を把握するために算出手法を考案した。同手法の手順を図-4.2、各段階の内容を以下に示す。

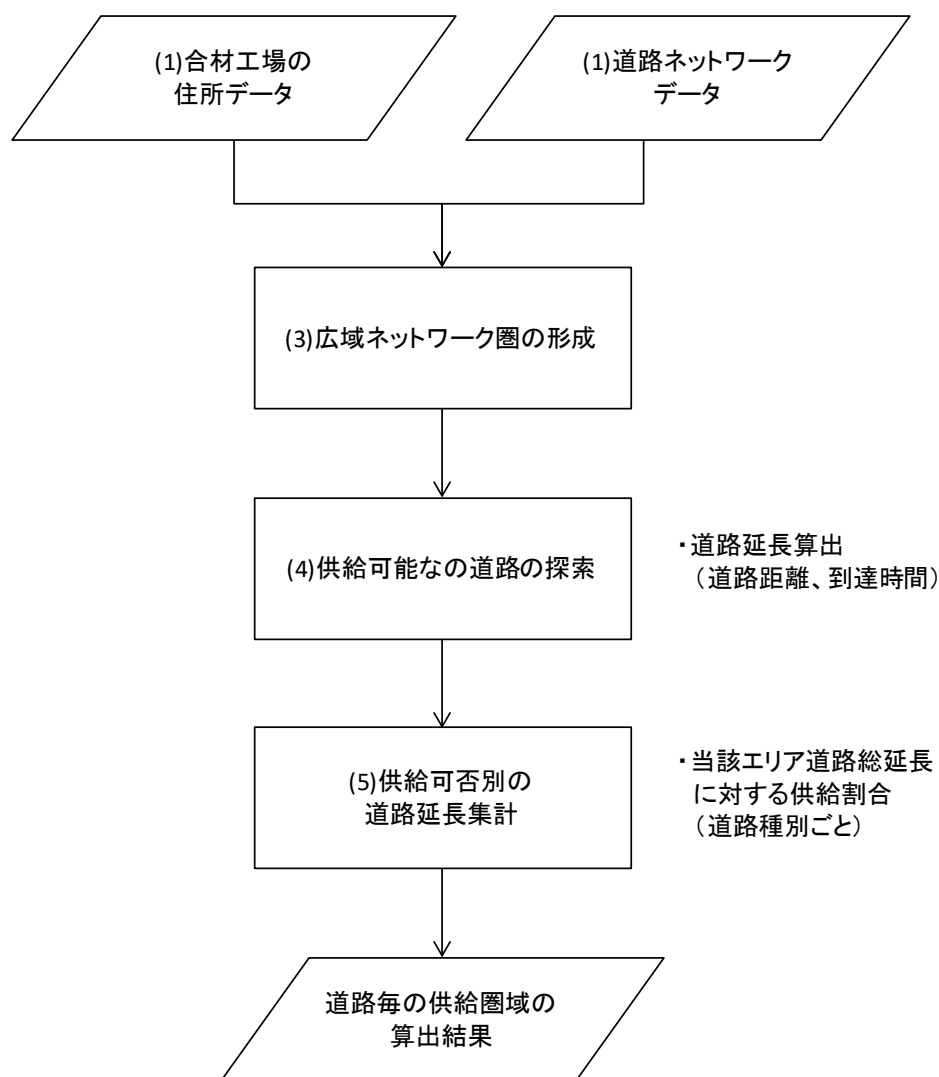


図- 4.2 道路別のアスファルト混合物の供給圏域の把握手順

(1)使用データ

本手法では、次の3種類のデータを用いる。アスファルト混合物の供給圏域の起点となる合材工場の住所データを用いる。本論文内では考慮していないが、各合材工場のキャパシティなどを含めて分析する際は、合材工場毎の製造容量、年度別の製造量や操業年月（新

設や統廃合)も属性として収録しておく必要がある。

道路毎のアスファルト混合物の供給圏域の算出には、道路ネットワークデータを用いる。具体的には、道路交通分析や経路探索で利用されているノードとリンクとで構成されたデジタル道路地図⁴¹⁾・道路ネットワークデータを対象とする。また、リンク長(道路延長)および道路種別の属性の収録は必須で、車線数や幅員なども収録されていると供給圏域の面積も算出できる。さらに、都道府県や市区町村の単位で供給圏域が集計できるように、行政界データを用いる。

(2)作業環境

アスファルト混合物の供給圏域の算出には、前項の各データを用いて経路探索ができる汎用的な地理情報システム(GIS)を作業環境とする。

(3)広域ネットワーク圏の形成

通常、道路ネットワークデータは、2次、3次や500mのメッシュ単位または行政区単位で収録されている。この道路ネットワークデータに対して、メッシュ間のノードおよびリンクを接続して広域な道路ネットワーク網をGIS上で形成する。また、合材工場の住所データもインポートし、両データを背景地図に重畳する。これにより分析環境を整える。

(4)供給可能な道路の探索

各合材工場を起点に置いてアスファルト混合物の供給圏域となる道路を探索し、その延長を算出する。合材ダンプが1時間で走行可能な距離を20kmと想定⁴²⁾して次の3段階を基本条件として算出する。本論文内では考慮していないが、基本条件は道路交通センサス(交通量調査や旅行速度調査)などの交通調査の結果を踏まえて、分析対象地域に応じて適宜設定すると、算出精度を高められる。

- ・20km：品質が適切に保たれる運搬時間1時間⁴²⁾を想定。
- ・40km：運搬時間2時間を想定。運搬対策により品質が保たれる⁴³⁾。
- ・60km：運搬時間3時間を想定。一般的にはアスファルト混合物の温度低下により品質が保てない条件になるが、運搬や製造等の対策によっては供給圏域となり得る可能性がある。

図・4.3は経路算出のイメージを示している。既存手法では合材工場を起点に半径20kmの円弧を描画し、供給可能な範囲を可視化している。一方、本手法は合材工場を起点に供給可能な道路を探索して道路延長を算出し、その結果を可視化する。

(5)供給可否別の道路延長の集計

前項の算出結果は、アスファルト混合物の供給可能な道路を示しているため、道路の総延長に対する供給可否を道路種別毎に集計する。

従来手法では図- 2.5や図- 4.3の円弧のような可視化による把握に主眼が置かれているが、本手法を用いると道路延長に基づく定量的数値と具体的な場所が把握できる。

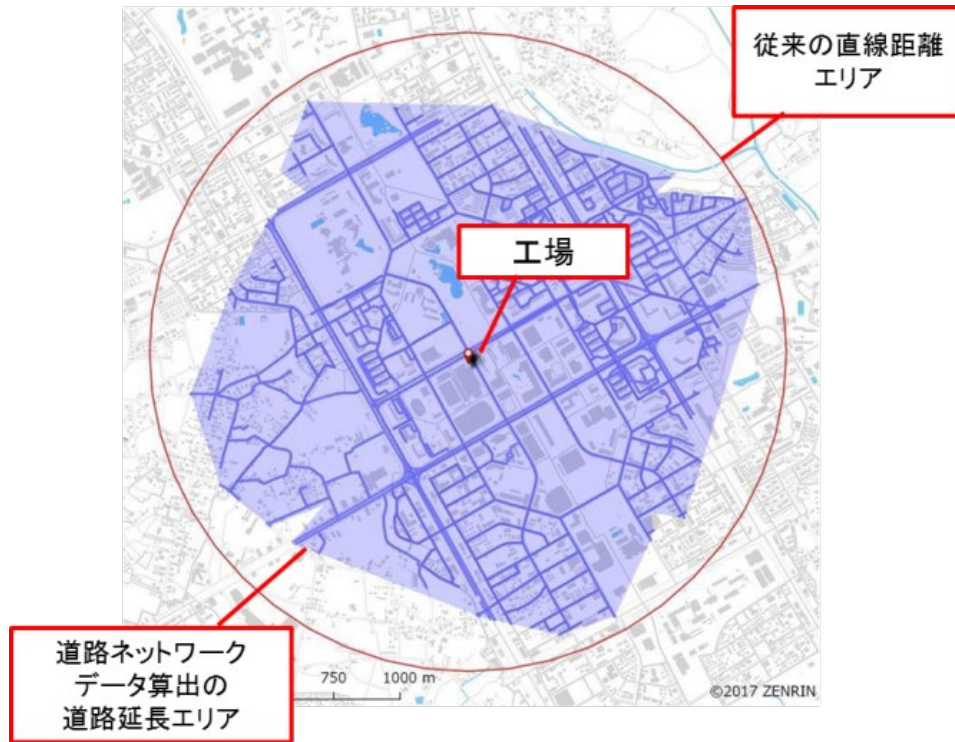


図- 4.3 アスファルト混合物の供給圏域の算出イメージ

4.2. 全国のアスファルト混合物供給圏域の算出

4.2.1. 実施内容

本研究では、前節の手法に則して、次の条件の下でアスファルト混合物の 20km、40km および 60km の供給圏域を算出した。

(1)合材工場の住所データ

平成 28 年度版のアスファルト合材統計年報⁴⁴⁾によると、全国の合材工場数は 1,061 工場となっているが、同年報では各合材工場の住所までは把握することができない。このため、本研究では、日本アスファルト合材協会の所属企業で住所が公表されている 909 工場の住所データを使用した⁴⁵⁾。したがって、今回の算出では、132 工場の供給圏域は対象外となる。

(2)道路ネットワークデータ

主にカーナビゲーションシステムの経路探索に利用されているゼンリン社製の全国の道路ネットワークデータを使用した。この道路ネットワークデータの総延長は約 140 万 km となっており、道路種別などの属性も豊富で本手法の適用条件を満足し、かつ現行の道路延長を精緻に算出できるデータセットである。統計資料である道路統計年報⁴⁶⁾とは次の理由から道路延長の値が異なる。

- ・道路統計年報の対象である道路法の適用外の道路（農道⁴⁷⁾、林道⁴⁸⁾や港湾道路⁴⁹⁾も調製対象としている。
- ・国土地理院の地形図⁴¹⁰⁾に掲載されている約 110 万 km の道路以外の細道路なども調製対象としている。
- ・一部の道路は上下線を別々にネットワークを調製している。

(3)行政界データ

今回は都道府県を集計単位とすることとし、ESRI 社の市町村界データを使用した⁴¹¹⁾。

(4)算出条件

合材工場の供給圏域は、工場の場所によって複数の県に跨ることが予測される。このため、当該県の供給圏域を正確に把握するには隣接する県も含めて算出する必要があるが、算出に係わる処理量が膨大となる。この点を踏まえて、今回は基礎分析と位置づけて、まずは都道府県単位の供給圏域を算出することとした。上述の隣接県を含めた供給圏域の算出は今後の課題とし、今回の算出結果を踏まえて、実施の是非を判断することとした。

本手法に則した作業のうち、供給可能な道路の探索（アスファルト混合物の供給圏域の算出）には、道路ネットワークデータを用いた最短経路探索ができる PostGIS / PostgreSQL⁴¹²⁾の拡張モジュールの pgRouting⁴¹³⁾を用いた。

4.2.2. 算出結果

都道府県別の県内道路総延長に対するアスファルト混合物の供給圏域の割合の要約を表-4.1に示す。この結果は、前節(4)で述べた県単位の算出、さらに前節(1)で述べた現存する132工場は算出の対象外となっている。後者に関しては、県ごとの総工場数および協会会員工場数は公開⁴⁾⁵⁾されているため、表-4.2に示すとおり、アスファルト合材統計年報の工場数が50%以下(半分以下)の県の工場数は算出に大きく影響するため対象外とした。具体的には、長野県、京都府、和歌山県および沖縄県の4府県を対象外とした。したがって、132工場を含めた4府県および近隣県の供給圏域の算出は今後の課題として残るが、20km供給圏域では13.5%の県内道路が圏域外となり、供給圏域40kmでは1.6%が圏域外となることがわかる。東京都では20km供給圏域の0.8%(243km)が圏域外なのに対し、高知県では30%(4,558km)、さらに40km供給圏域で8.3%(1,259km)が圏域外となっており、地域により供給に差があることがわかる。

表-4.1 アスファルト混合物の供給圏域の割合の要約

都道府県別算出データ	20km圏域		40km圏域		60km圏域	
	圏内延長 /総延長	網羅率 圏域外	圏内延長 /総延長	網羅率 圏域外	圏内延長 /総延長	網羅率 圏域外
	対象都道府県		対象都道府県		対象都道府県	
平均	1,241,982 /1,435,212km	86.5% 13.5%	1,411,624 /1,435,212km	98.4% 1.6%	1,432,047 /1,435,212km	99.8% 0.2%
	43都道府県		43都道府県		43都道府県	
最大値	29,417 /29,660km	99.2% 0.8%	—	100.0% 0.0%	—	100.0% 0.0%
	東京都		4都道府県		20都道府県	
最小値	10,618 /15,176km	70.0% 30.0%	13,917 /15,176km	91.7% 8.3%	13,878 /14,542km	95.4% 4.6%
	高知県		高知県		奈良県	

※長野,京都,和歌山,沖縄のデータは除外。

網羅率(圏域内) = 到達可能地域内総延長(圏内延長) ÷ 対象都道府県道路総延長(総延長) × 100

圏域外 = (総延長 - 圏内延長) ÷ 総延長 × 100

表- 4.2 算出対象外とした府県

データ除外 都道府県	協会員 合材工場数 (工場)	統計年報 合材工場数 (工場)	工場数 の差 (工場)	協会員 /統計年報 (%)
長野県	4	31	-27	13
京都府	7	15	-8	47
和歌山県	9	22	-13	41
沖縄県	8	20	-12	40

全国の算出結果のうち、本論文では、静岡県および東京都の結果を用いて説明する。静岡県の算出結果を表- 4.3および図- 4.4に示す。東京都の算出結果を表- 3.6および図- 4.5に示す。各図表に示すとおり、従来図- 2.5のような直感的な把握ではなく、より緻密に供給圏域の実態を把握できる。

図- 4.4の静岡県の算出結果を見ると、人口の多い沿岸都市部に合材工場が配置されている様子がわかる。しかし内陸の山間部には合材工場が無く供給が難しい様子がわかる。このような場所にアスファルト混合物を供給するには、運搬に工夫が必要となる。現実的にはアスファルト混合物の製造温度を規定範囲の上限で製造することにより、初期の温度を上げてより遠くへ運ぶ事が多い。しかし、この手法ではアスファルト混合物の品質に懸念が残る。今後、合材工場の減少が想定される中で、アスファルト混合物の品質を踏まえた供給体制を考えていく必要がある。

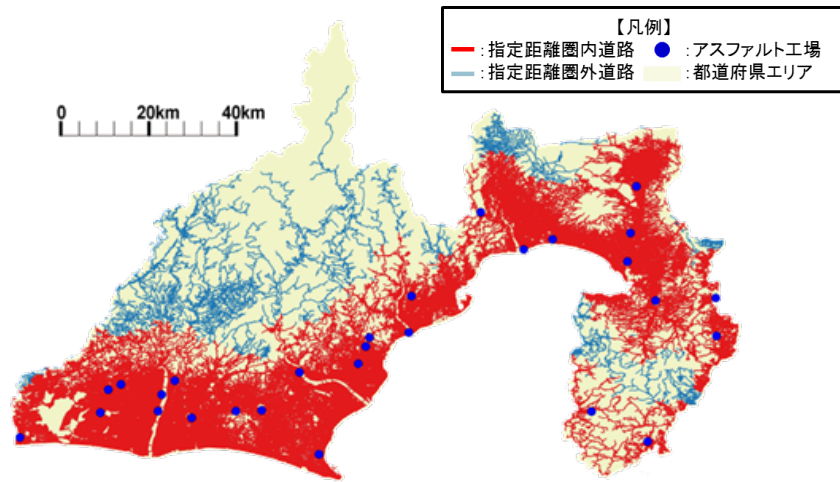
これに対して図- 4.5の東京都の算出結果を見ると、現状の合材工場からの供給 20km 圏内ではほぼ全ての道路を網羅している。都市部では道路網も密集しており効率的にアスファルト混合物を供給できると推察できる。

表- 4.3 静岡県の供給可能圏域の算出結果

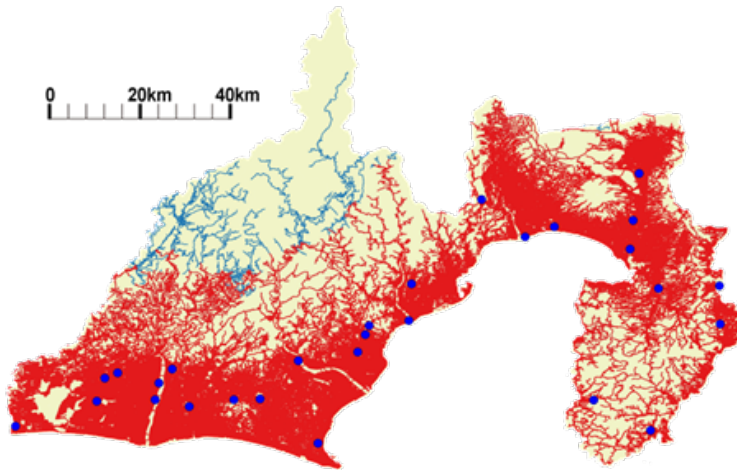
道路延長 (km)	総延長	20km		40km		60km	
		圏域内	圏域外	圏域内	圏域外	圏域内	圏域外
高速自動車国道	930	915	15	930	0	930	0
都市高速道路	0	0	0	0	0	0	0
一般国道	1,479	1,278	200	1,440	38	1,479	0
主要地方道	1,430	1,115	315	1,367	63	1,417	13
主要地方道(指定市道)	0	0	0	0	0	0	0
一般都道府県道	1,789	1,496	293	1,732	57	1,789	0
主要一般道	953	947	6	953	0	953	0
一般道	11,132	9,857	1,275	10,640	492	10,957	175
細道路	32,653	29,860	2,793	31,999	654	32,547	106
その他	0	0	0	0	0	0	0
合計	50,366	45,468	4,898	49,061	1,305	50,071	295

表- 4.4 東京都の供給可能圏域の算出結果

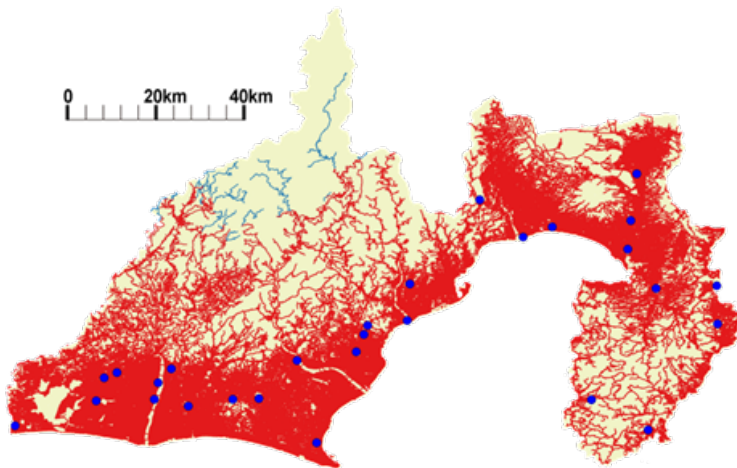
道路延長 (km)	総延長	20km		40km		60km	
		圏域内	圏域外	圏域内	圏域外	圏域内	圏域外
高速自動車国道	126	122	4	126	0	126	0
都市高速道路	526	521	5	526	0	526	0
一般国道	583	565	18	583	0	583	0
主要地方道	1,297	1,293	4	1,297	0	1,297	0
主要地方道(指定市道)	0	0	0	0	0	0	0
一般都道府県道	1,020	972	48	1,020	0	1,020	0
主要一般道	937	937	0	937	0	937	0
一般道	7,290	7,222	68	7,290	0	7,290	0
細道路	17,879	17,784	95	17,879	0	17,879	0
その他	0	0	0	0	0	0	0
合計	29,660	29,417	243	29,660	0	29,660	0



合材工場から 20km 圏

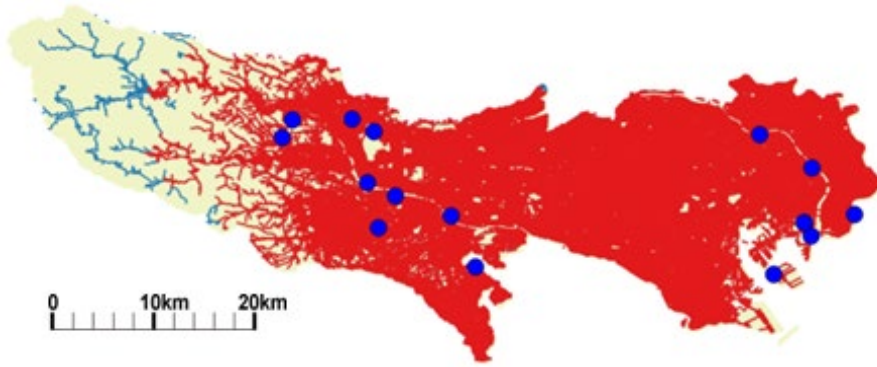


合材工場から 40km 圏

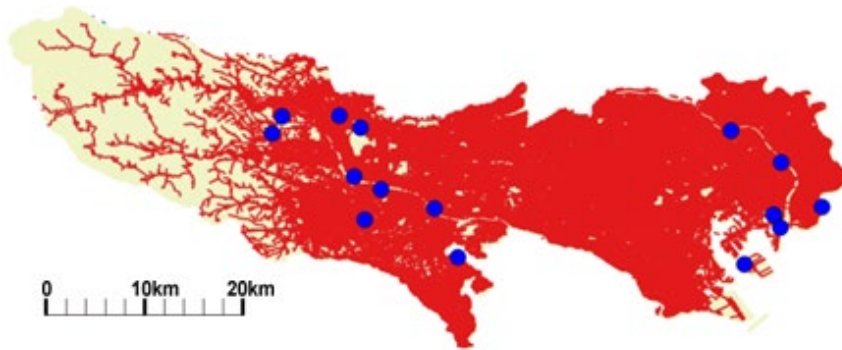


合材工場から 60km 圏

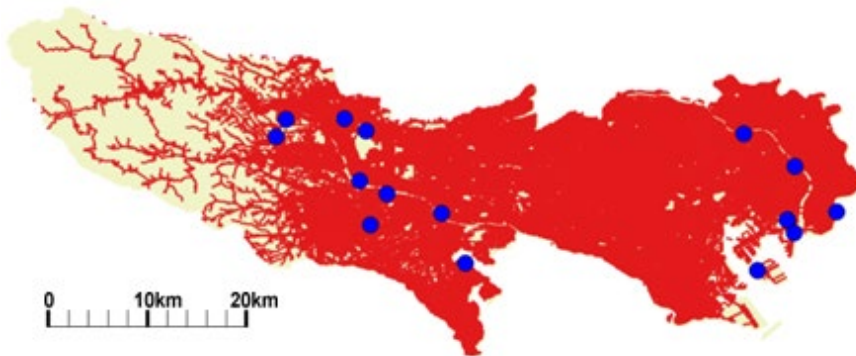
図- 4.4 合材供給可否の可視化（静岡県）



合材工場から 20km 圏



合材工場から 40km 圏



合材工場から 60km 圏

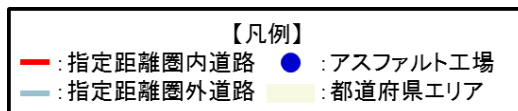


図- 4.5 合材供給可否の可視化（東京都）

4.2.3. 考察

都道府県別の合材工場あたりの道路延長を図- 4.6に示す。この結果を見ると、各県の平均値は 1,729km/工場である。都道府県で面積差や道路網の条件の違いはあるものの、1,000～2,000km/工場の範囲に 77%の都道府県が含まれている。このことから、都道府県の合材工場数によってある程度、合材工場あたりの道路延長は平準化されていることがわかった。

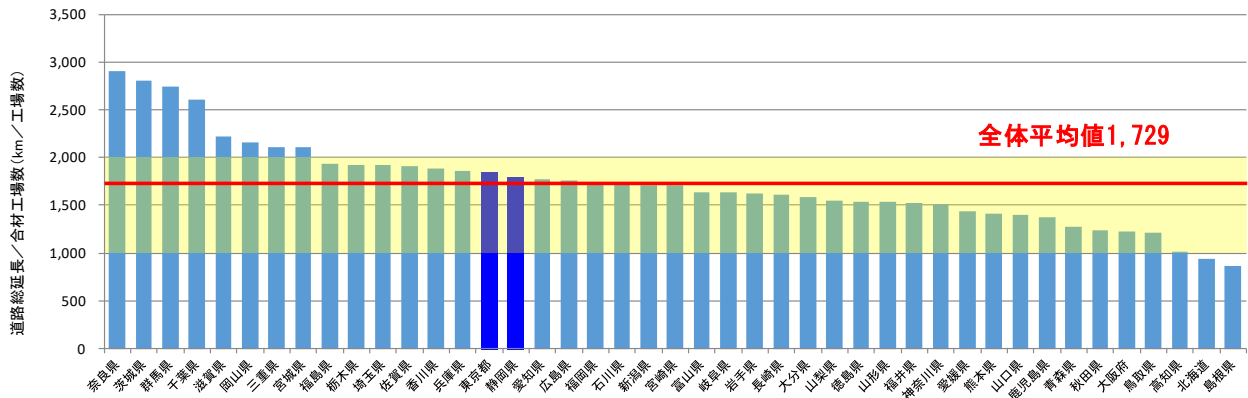


図- 4.6 合材工場あたりの道路延長

このうち、静岡県および東京都の詳細に着目すると、表- 4.5に示すとおりであり、道路延長の長い静岡県は合材工場数も多く1合材工場あたりの道路延長は1,800km程度である。それに比べて道路延長の短い東京都は合材工場数も少なく、1合材工場あたりの道路延長は静岡県とほぼ同じ1,800km程度である。したがって、両者は道路網などの条件が異なるが、合材工場あたりの道路延長に差がないことがわかる。

次に、静岡県および東京都の面積を合材工場数で割ると、その数値は、静岡県は東京都の約2倍となっている。また、面積を道路延長で割った単位面積あたりの道路延長は、東京都は静岡県の2倍となっている。

東京都の道路網は小さな面積内で構成しており、合材工場間で重複した供給圏域もあるため、ある程度の数の合材工場で一定範囲を経営的に効率よく網羅できる。一方、静岡県の道路網は、広い面積内で構成しており、合材工場間で重複した供給圏域も少ない。このため、今後、合材工場の数が減少すると、アスファルト混合物の供給ができない道路が生じる脆弱な課題が潜在していると言える。

表- 4.5 合材工場の受け持つ範囲

都道府県	人口 (千人)	合材工場 (数)	道路延長 (km)	延長/工場 (km/工場)	面積※ (km ²)	面積/工場 (km ² /工場)	延長/面積 (km/km ²)
静岡県	3,700	28	50,366	1,799	7,777	278	6
東京都	13,515	16	29,660	1,854	2,191	137	14

※国土地理院、平成28年全国都道府県市区町村別面積調

この結果に基づくと、都市部の合材工場では効率よくアスファルト混合物を供給できるのに対して、地方部では同じ道路延長でも合材工場の立地条件によっては効率的に供給できない可能性がある。したがって、合材工場の運営状況や合材の供給圏域の定期的なモニタリングの重要性は高く、効率的なモニタリング手法の確立と実行が今後の課題としてあげられる。

今回は基礎分析として都道府県毎の供給圏域（道路延長）のマクロ的な算出を試行したが、今後の課題および分析の方向性を以下に整理する。

- ・隣接県の工場を含めた供給圏域の算出
- ・道路交通センサス旅行速度調査（時間）等に基づく道路種別毎の自動車交通流を加味した供給圏域の算出
- ・供給圏域および供給圏域外（空白圏域）の道路面積の算出
- ・定期的な供給圏域把握の仕組みづくり
- ・供給圏域外に対する対応方策の確立

4.3. 選定地域のアスファルト混合物供給圏域の算出

前節の結果を踏まえて、近隣県を含めた供給圏域の算出を試みた。

4.3.1. 供給圏域の算出

供給圏域の算出手法は、前節と同様に合材工場の位置情報と道路ネットワークデータを用いて各合材工場を起点に置いてアスファルト混合物の供給圏域となる道路を探索し、その延長を算出した。また、全国の算出では県単位の算出をしていたが、県境の道路をリンクさせたことにより、複数の県を一体化させて算出することができた。これにより、県外の合材工場からのアスファルト混合物の供給も考慮でき、より供給圏域の精度が高まっている。

合材工場の位置情報も前節と同様に、日本アスファルト合材協会の所属企業で住所が公表されている工場の住所データを使用している。

なお、今回の算出は、日本全国を対象とすると膨大な時間と労力が必要なため、一部の地域を抽出して周辺地域の状況を加味した。算出をした地域は四国地域の四県である。四国地域を選定した理由は、四国は周囲を海で囲われており、地続きの隣接する県がないため、隣接する他県からの合材運搬流入の影響が最小であると考えたためである。

供給圏域は合材ダンプが1時間で走行可能な距離を20kmと想定して次の3段階を基本条件として算出した。

- ・20km：品質が適切に保たれる運搬時間1時間を想定。
- ・40km：運搬時間2時間を想定。運搬対策により品質が保たれる。
- ・60km：運搬時間3時間を想定。一般的にはアスファルト混合物の温度低下により品質が保てない条件になるが、運搬や製造等の対策によっては供給圏域となり得る可能性がある。

4.3.2. 算出結果

算出結果を表- 4.6に、四国全域の可視化図を図- 4.7から図- 4.9に示す。

表- 4.6 カバー率の算出結果（四国全域）

項目	道路種別/県	愛媛	香川	高知	徳島	総計
道路延長 km	高速道路	440	217	219	288	1,163
	一般国道	1,173	465	1,097	743	3,479
	主要地方道	1,074	676	1,034	806	3,591
	一般都道府県道	1,659	876	1,062	926	4,523
	主要地方道	52	51	5	32	140
	一般道	4,510	2,560	4,031	2,495	13,595
	細道路	15,525	11,955	7,603	8,475	43,558
	その他	0	1	0	0	1
	合計	24,434	16,801	15,050	13,765	70,050
県面積 km ²		5,676.2	1,876.7	7,103.9	4,146.8	18,803.6
合材工場数		17	9	15	9	50
道路延長/合材工場数		1,437	1,867	1,003	1,529	1,401
面積/合材工場数		334	209	474	461	376
各合材工場から 20kmの供給圏域	延長計	20,091	15,963	10,414	11,502	57,970
	カバー率	82.2	95.0	69.2	83.6	82.8
各合材工場から 40kmの供給圏域	延長計	23,423	16,740	14,044	12,713	66,920
	カバー率	95.9	99.6	93.3	92.4	95.5
各合材工場から 60kmの供給圏域	延長計	23,642	16,740	15,006	13,480	68,867
	カバー率	96.8	99.6	99.7	97.9	98.3

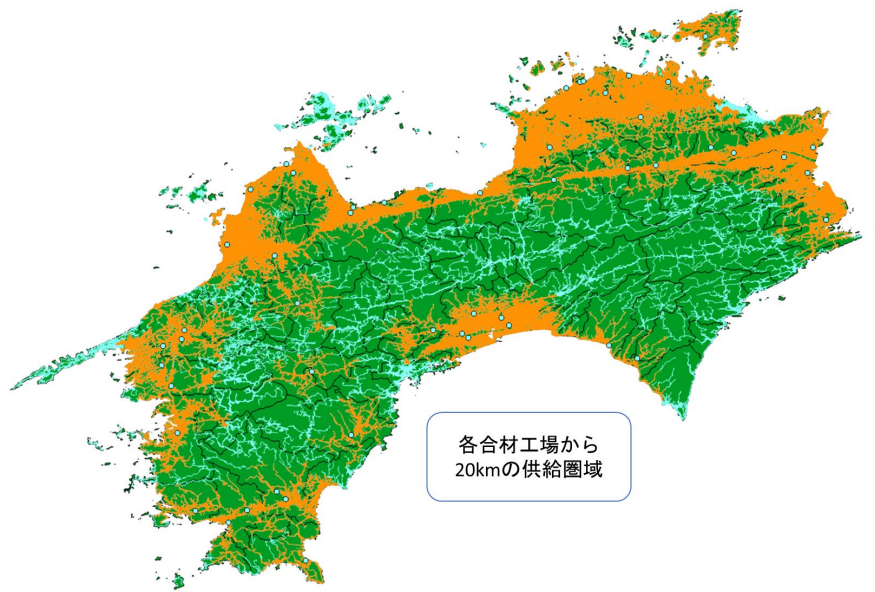


図- 4.7 供給圏域の可視化図（四国全域）供給圏域 20km

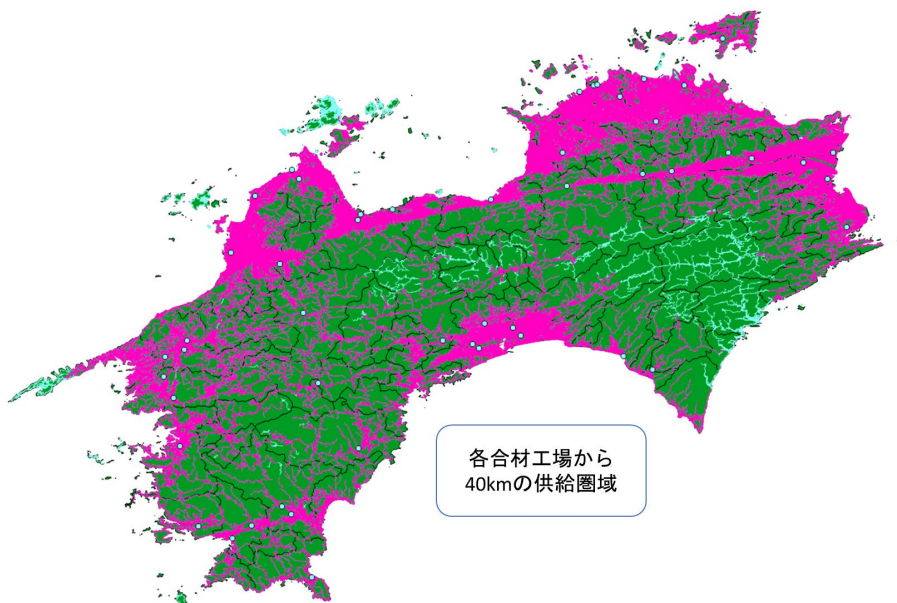


図- 4.8 供給圏域の可視化図（四国全域）供給圏域 40km

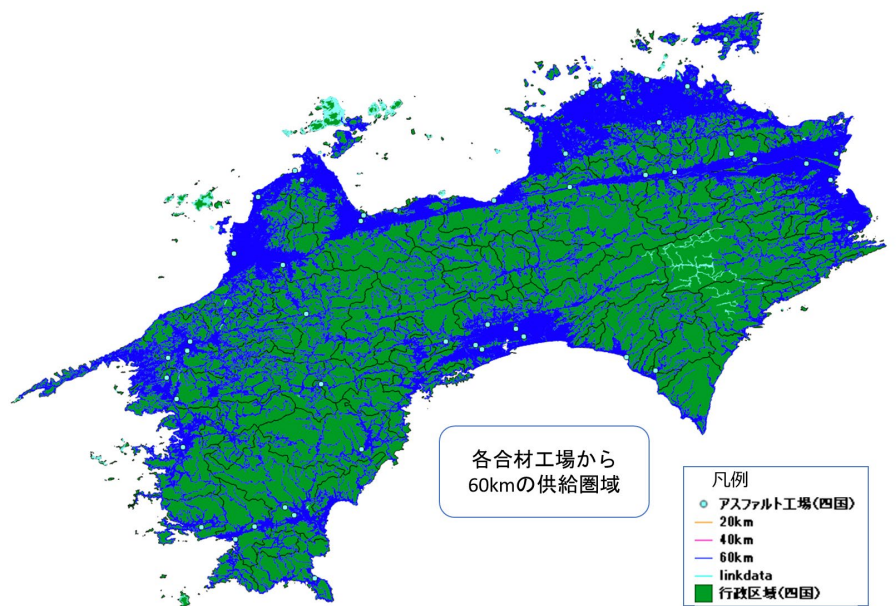


図- 4.9 供給圏域の可視化図（四国全域）供給圏域 60km

表- 4.6の結果から、最適に合材運搬ができる運搬時間 1 時間を想定した合材工場から 20km の供給圏域カバー率は、四国全域で 82.8%、品質が確保できる運搬時間 2 時間を想定した合材工場から 40km の供給圏域カバー率は 95.5%である。すなわち空白エリアとしては 4.5%である。この空白エリアは、合材の保温対策や製造温度を許容上限まで上げて出荷するなどの対策を行うことや、平均走行速度が設定より速ければ供給は可能である。これらを想定した工場から 60km の供給圏域カバー率は 98.3%であり、空白エリアは 1.7%まで減らすことができる。

各県別の結果では、20km 供給圏域のカバー率では高知県が 69.2%と低い数字であるが、40km、60km 供給圏域のカバー率は 93.3%、99.7%と高い数値になっている。一方、香川県では 20km 供給圏域で既に 95.0%のカバー率であり、40km、60km 供給圏域のカバー率はともに 99.6%と非常に高い数値になっている。

これは、香川県は面積が 1,876.7km²と四国四県の中で最小であることや、単位合材工場あたりの面積が 209km²/工場とこれも四県中最小であることなどが、影響しているものと考えられる。さらに、香川県は徳島県境沿いの徳島県側に徳島県の合材工場が点在していることから、徳島県側からの供給がかなりあることが、大きく影響している。

面積が小さい県ほど、供給効率が良くカバー率が高い傾向にあると考えられるが、供給圏域が 40km、60km と広範囲になると県外からの供給も多くなり、各県とも 60km 圏域では 95%以上となる。

また、県内での合材工場の配置が均一なのか、海側などに偏っているか等により、供給

の効率が変わるため、カバー率にも影響するものと考えられる。徳島県では県南部に合材工場が無いが、供給圏域を広げることにより高知県側からの供給があるため、最終的に高いカバー率を得ている。

したがって、本研究では隣接県からの供給を考慮したため、精度の高い算出結果となっている。

4.3.3. 考察

隣接県からの供給を考慮して供給圏域を算出することで、その地域の供給状況がより緻密に実態を把握することができた。四国全域の算出においては、県境沿いに合材工場が多くある場合はその影響は大きいことが確認され、山間部に県境がある場合は双方補の県からの供給が少なく、空白エリアになる可能性が高いことが確認された。四国全域としては運搬時間2時間を想定した供給圏域40kmでカバー率は高い数値であるが、山間部に不安が残る。日本の各地域では合材工場の配置の状況は異なるため、開発した算出手法により、供給圏域の詳細な可視化図の活用で、その地域にあった対応が可能となる。本研究では合材工場のデータは位置情報のみで算出しているが、今後、合材工場の製造能力、運搬能力などの他の情報を加味した算出ができればより実態に近い状況を把握できるものとする。

4.4. アスファルト混合物の供給に関する冗長性の算出

前節で四国地域を一例とした供給圏域を算出し、現状の供給状況を把握した。しかし、今後、アスファルト混合物の製造数量が減少し、合材工場の統廃合が進むと、アスファルト混合物を供給できなくなるエリア（空白エリア）が生じ、このエリアが拡大していくことが懸念される。

現状では、都市部などでは複数の合材工場が比較的近くにあり、供給圏域が重なる道路が多くある。これに対して都市部から離れた山間部などのエリアでは1つの工場からしか供給できない道路もある。こうした地域に関しては現在供給圏域でカバーされているが、今後の状況により、唯一供給できていた合材工場が無くなると、すぐに供給圏域外の空白エリアになってしまう。

そこで、いくつかの工場から供給できるか（リンク数）を算出して、対象地域の安定供給性（冗長性）を把握する。

4.4.1. 冗長性の算出

冗長性の算出は合材工場から計算させた到達圏域が重なっている道路（リンク）の和より算出した。リンクの数が少ないほど供給のバックアップが少なく供給は不安定であるといえる。

算出に必要な情報とツールを下記に示す。

- ・合材工場の位置情報
- ・道路延長の算出および到達圏域を計算する道路リンクデータ
- ・QGIS ツールのプラグインツール（ダイクストラ法）

算出の手順を以下に示す。

- 1.分析対象範囲の道路リンクデータを準備する
- 2.到達圏もしくは冗長性を分析したい施設の位置データを準備する
- 3.これらと QGIS のプラグインツールを用いて施設の到達圏を生成する
- 4.施設ごとに道路リンクデータが生成されるため、道路リンクデータ固有の ID の和を求めすることで施設の冗長性を把握する

結果は各合材工場から設定距離の供給範囲内でのリンク数ごとに道路延長の合計をまとめた。

4.4.2. 算出結果

算出結果を表- 4.7に、四国全域の合材工場からのリンク数図を図- 4.10から図- 4.12に示す。

表- 4.7 冗長性の算出結果（四国全域）

項目	道路種別/リンク数	空白リンク	1本	2本	3本	4本以上	総計
各合材工場から 20kmの供給圏域内 のリンク数ごとの 道路延長 (km)	高速道路	200	213	258	280	194	1,145
	一般国道	1,098	855	558	489	469	3,469
	主要地方道	1,034	729	651	541	630	3,586
	一般都道府県道	1,377	1,089	815	574	657	4,510
	主要地方道	27	20	15	25	53	140
	一般道	4,109	2,489	2,224	2,233	2,498	13,552
	細道路	4,143	7,635	10,667	9,793	11,283	43,520
	その他	0	0	0	1	0	1
	合計	11,987	13,030	15,188	13,935	15,783	69,924
	割合(%)	17.1	18.6	21.7	19.9	22.6	100.0
各合材工場から 40kmの供給圏域内 のリンク数ごとの 道路延長 (km)	高速道路	51	9	21	81	984	1,145
	一般国道	292	266	355	329	2,227	3,469
	主要地方道	203	298	353	261	2,470	3,586
	一般都道府県道	291	346	452	303	3,119	4,510
	主要地方道	11	3	5	4	117	140
	一般道	1,167	1,008	1,158	901	9,317	13,552
	細道路	1,092	930	1,064	1,576	38,858	43,520
	その他	0	0	0	0	1	1
	合計	3,107	2,859	3,409	3,455	57,094	69,924
	割合(%)	4.4	4.1	4.9	4.9	81.7	100.0
各合材工場から 60kmの供給圏域内 のリンク数ごとの 道路延長 (km)	高速道路	51	0	0	0	1,094	1,145
	一般国道	57	68	155	86	3,102	3,469
	主要地方道	65	39	85	32	3,365	3,586
	一般都道府県道	89	52	116	52	4,201	4,510
	主要地方道	6	3	3	0	128	140
	一般道	313	158	497	203	12,381	13,552
	細道路	601	96	318	126	42,379	43,520
	その他	0	0	0	0	1	1
	合計	1,182	416	1,174	499	66,652	69,924
	割合(%)	1.7	0.6	1.7	0.7	95.3	100.0

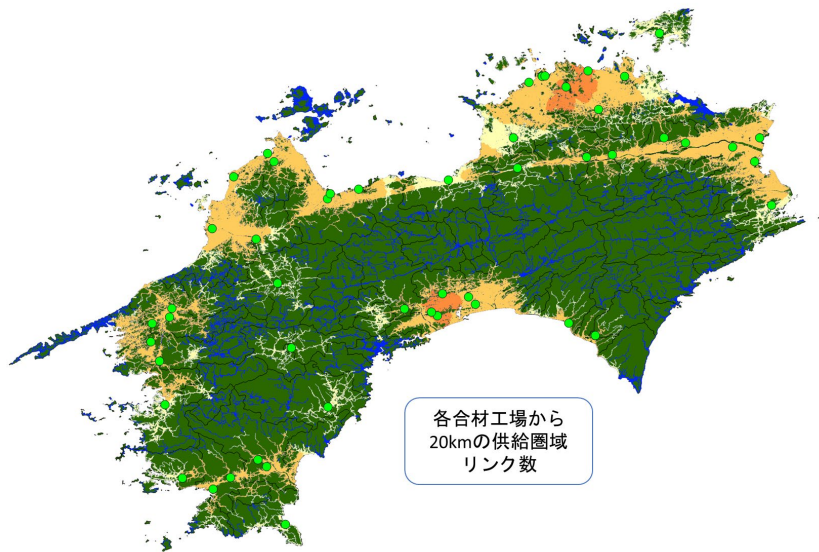


図- 4.10 合材工場からのリンク数図（四国全域）供給圏域 20km

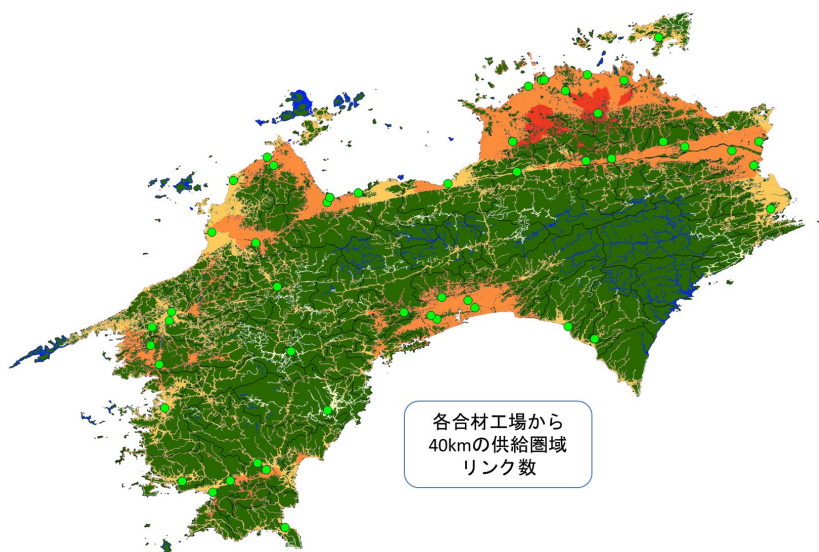


図- 4.11 合材工場からのリンク数図（四国全域）供給圏域 40km

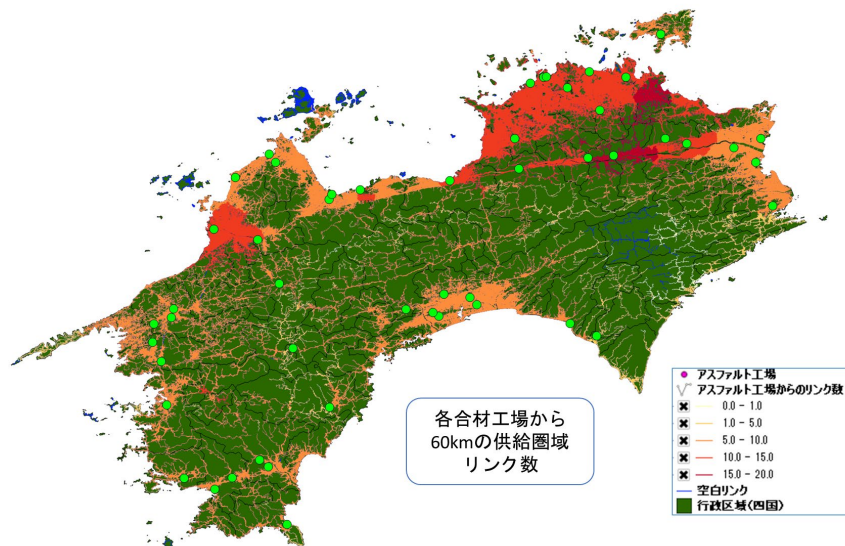


図- 4.12 合材工場からのリンク数図（四国全域）供給圏域 60km

表- 4.7の結果から、各工場からの空白リンクは20km供給圏域時では17.1%、40km供給圏域時では4.4%、60km供給圏域時では1.7%であり、この結果は表- 4.6のカバー率に結果とほぼ一致する。0.1%程度誤差があるのは、算出時に県境のリンクに多少の差異があるためであるが、算出結果には影響はないものと考えている。

しかし、リンク1本、すなわち供給が1工場の割合は20km供給圏域時では18.6%、40km供給圏域時では4.1%、60km供給圏域時では0.6%であり、空白リンクと近い数値である。これは現在の空白エリアの2倍程度は空白エリアになる危険性があることになる。

さらにリンク2本までの割合の合計を計算すると、20km供給圏域時では合計57.4%、40km供給圏域時では合計13.4%、60km供給圏域時では合計4.0%であり、品質が確保できる運搬時間2時間を想定した合材工場から40kmの供給圏域ではカバー率が90%以下になる可能性がある。

算出結果を踏まえて、空白エリアになる可能性が高い地域を想定したエリアを図- 4.13に示す。選定したエリアの工場周辺の道路はリンク1本であり、この地域の合材工場がなくなると、周辺が空白エリアとなりうる。

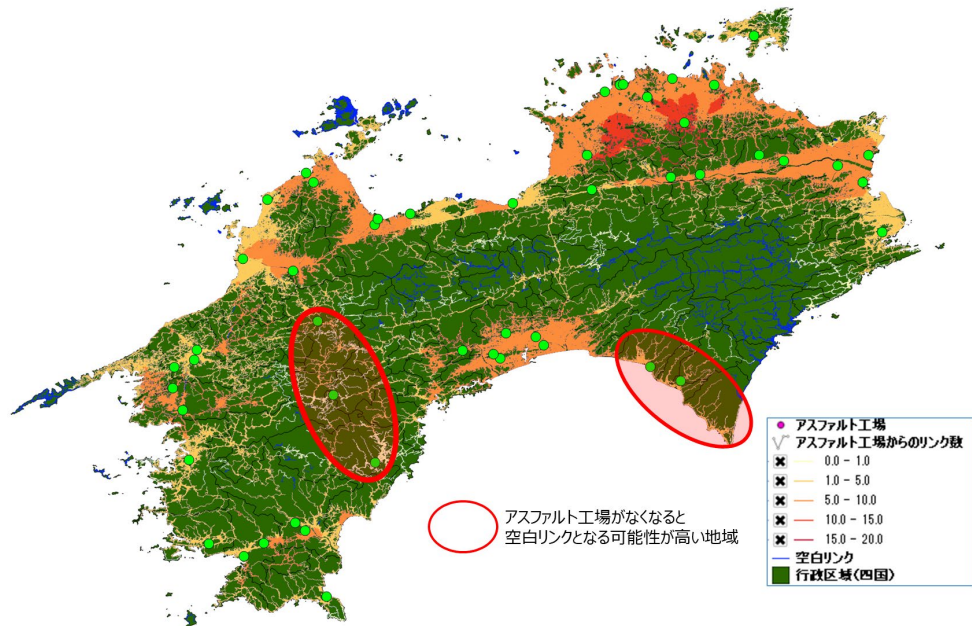


図- 4.13 空白エリアになりうる想定地域（供給圏域 40km）

4.4.3. 考察

冗長性の算出により、カバー率や供給圏域図だけでは確認できない、安定供給の脆弱さが確認できた。また、空白リンクとなる可能性の高い地域や、さらにここの合材工場まで特定することができる。供給圏域内であっても、1工場のみでの供給体制では、災害などの緊急時や将来の需要の減少による合材工場の閉鎖などの可能性から、非常に供給体制に不安がある。少なくとも2工場からの供給は確保したい。

表- 4.8に合材工場の推移から算出した10年ごとの合材工場の減少率を示す⁴⁾¹⁴⁾。合材工場は1990年から10年ごとに約20%ずつ減少している。この傾向が今後も続くと仮定した場合、2026年には合材工場数量が830工場であり、2016年時点から200工場程度減少する計算になる。これは、あくまでも仮定の数字であるが、百単位の数の工場が減少した場合、リンク2本まで影響するかもしれない。

今後も合材を安定的に供給するには、冗長性により状況を確認するとともに、品質を確保しながら運搬時間3時間を想定した合材工場から60kmまで供給圏域を広げる対策を講じることも必要であると考えられる。

表- 4.8 10年ごとの合材工場減少率

年度	1996	2006	2016
合材工場数	1,608	1,230	1,038
減少数	-	378	192
減少率(%)	-	24	16

4.5. まとめ

第4章では、アスファルト混合物の供給に関する実態を把握するために供給圏域の算出手法を考案することにより、供給の冗長性を確認し現状の安定供給の状態をケーススタディで把握する有効性を検証した。

第4章で得られた知見を以下に示す。

- 合材工場位置情報と道路ネットワークデータを用いて、経路探索をすることにより供給圏域を算出することが可能となった。
- 供給圏域の算出データより可視化図を作成することができた。これにより工場の配置を考慮した供給圏域の把握が可能となった。
- 運搬時間を想定した一定距離で算出すると供給状況が把握できた。
- ネットワークデータをリンクすることにより、近隣県からの流入を考慮した精度の高い供給圏域算出が可能となった。
- 供給圏域の算出データを使用して、冗長性を算出することにより、将来空白エリアの可能性のある地域を把握することができた。

本研究により、円を描いて供給範囲を把握している現状の手法をより高度化し、詳細な供給圏域を最短経路探索により算出・分析する手法により、設定エリアの供給状況を正確に把握することができた。さらに供給エリアの冗長性も算出することにより、供給可能エリア内における安定供給性を把握することができた。これらの成果により、将来的に舗装材料が供給されにくい空白エリアを想定することが可能となった。

[第4章の参考文献]

- 4-1) 日本デジタル道路地図協会：デジタル道路地図データベースとは， <<http://www.drm.jp/database/structure.html>>，（参照 2018.6.11）．
- 4-2) 日本道路建設業協会：全国アスファルトプラント地図， 2008.
- 4-3) 日本道路協会：アスファルト混合所便覧， 1996.
- 4-4) 日本アスファルト合材協会：平成 28 年度アスファルト合材統計年報， 2017.
- 4-5) 日本アスファルト合材協会：日本アスファルト合材協会 会員工場一覧及び工場位置図， CD-ROM， 2015.
- 4-6) 国土交通省：道路統計年報， 2018.
- 4-7) 農林水産省大臣官房統計部：平成 27 年度農道整備状況調査， 2016.
- 4-8) 農林水産省林野庁：森林・林業統計要覧， 2016.
- 4-9) 総務省行政管理局総合窓口（e-Gov）：港湾法第 2 条第 5 項第 4 号， 2016.
- 4-10) 国土交通省国土地理院：電子地形図， <<http://dkgd.gsi.go.jp/dkgx/page1.htm>>，（参照 2018.6.11）．
- 4-11) ESRI：市町村界， <<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=57ec39b6d8c94598a89da34d4dfae7a1>>，（参照 2018.6.11）．
- 4-12) PostgreSQL Global Development Group：PostgreSQL， <<https://www.postgresql.org/>>，（参照 2018.6.11）．
- 4-13) pgRouting Community, pgRouting, <<http://pgrouting.org/>>，（参照 2018.6.11）．
- 4-14) 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報， 1997～2017.

5. 持続的な供給方策の提案

本章では、アスファルト混合物の供給圏域の現状把握と今後の安定供給に対しての冗長性の基礎分析を実施した。今後、合材工場の減少も想定されることから、供給圏域外への対応方策を考えておく必要がある。ここでは、その対応の一方策に寄与するアプローチを考察する。

供給圏域外への対応方策例を表- 5.1に整理して示す。対応方法としては、全国の道路網の供給圏域を踏まえて合材工場を配置することや合材工場を必要としない舗装材料の適用などが考えられるが、前者は国の施策としての取り組みが必要であるため、民間経営の合材工場でそのような再考は現実的ではない。後者の対応に置いては、アスファルト舗装に替わり、常温で使用できる材料（例えばセメントコンクリートや常温アスファルト混合物など）を使用する方法や現地で直接アスファルト舗装を再生する方法などの採用が挙げられる^{5-1) 5-2) 5-3) 5-4)}。しかし、これらの対応法は、合材工場で製造されたアスファルト混合物と比べて、価格、品質、工期、走行性、補修性など一般的な導入としてはいくつかの課題が残る。

そこで、合材工場側からのアプローチとして、第3章で開発したフォームドアスファルト技術によるアスファルト混合物の改良により、施工性を改善して運搬距離の延長化を図る取り組みは有効と考えられる。

表- 5.1 供給圏域外への対応方策例

対応策		対応方法	概要
エリア拡大	合材改良対応	施工性改善技術	添加剤方式、フォームド方式などの中温化合材技術が適用できる。
	中間拠点対応	サテライト方式	<ul style="list-style-type: none"> ・サイロによる一時保管. ・合材工場効率化、有効利用. ・施工性改善技術の併用.
現位置対応		<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート舗装 ・常温アスファルト合材 ・路上表層再生工法 ・仮設プラント ・その他 	現場条件により対応が異なる. <ul style="list-style-type: none"> ・コスト高 ・工期が長い ・品質低下 など考慮する必要がある.

この供給エリアの拡大を図る技術を対応方策の一策として、その供給方策を提案する。

5.1. 供給エリアの拡大の提案

5.1.1. 長距離運搬

フォームドアスファルト技術による長距離運搬性の検証は第3章で述べているが、ここでは実際の使いやすさについて、時間経過によるフォームドアスファルト混合物のハンドリング評価について検証した結果を表-5.2に示す。評価結果から、第4章の供給算出条件に設定したとおり、通常のアスファルト混合物の使用可能時間は2時間程度であるのに対して、フォームドアスファルト混合物は使用可能時間が3～4時間まで延長される。すなわち、その分運搬距離が延長される。

フォームドアスファルト技術により、運搬時間が延長可能となると、図-5.1に示す供給圏域の拡大を図ることができる。これにより第4章で算出した結果例の供給圏域の道路延長60kmが可能となるため、供給安定性を格段に向上させることができる。

表-5.2 ハンドリング評価（ダンプ運搬）

種類	ダンプ運搬時間(h)					
	0	1	2	3	4	5
フォームド	◎	◎	◎	◎	○	△
通常	◎	◎	◎	△	△	×

◎:良好 ○:使用可能 △:使用困難 ×:使用不可

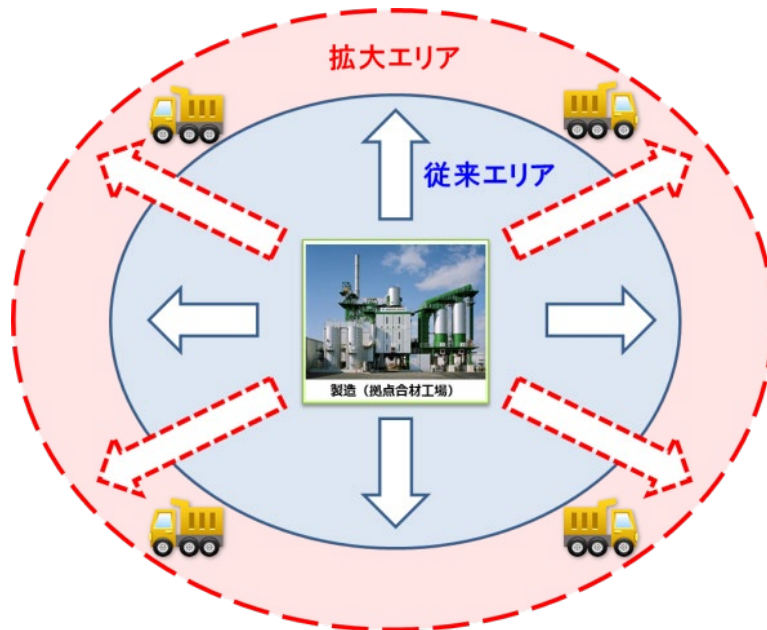


図-5.1 供給エリア拡大の概念（長距離運搬）

5.1.2. サテライトサイロの活用

第3章4節では、サテライトサイロでのフォームドラスファルトによる品質改善効果と貯蔵性改善効果が確認された。

そこで、長距離運搬や長時間サイロ貯蔵に効果のあるフォームドラスファルト混合物を適用させることにより、従来の運搬時間中の温度低下や寒冷期の品質確保などの課題を解決でき、供給圏域拡大の手法としてサテライトサイロを有効的に活用して、供給エリアの拡大を図ることが可能となった。表- 5.3にフォームドラスファルト混合物のサイロ貯蔵時におけるハンドリング評価結果、図- 5.2にサテライトサイロ活用の概念を示す。

表- 5.3 ハンドリング評価（サイロ貯蔵）

種類	サイロ貯蔵時間(h)					
	0	6	12	18	24	30
フォームド	◎	◎	◎	◎	◎	◎
通常	◎	○	△	×	×	×

◎:良好 ○:使用可能 △:使用困難 ×:使用不可

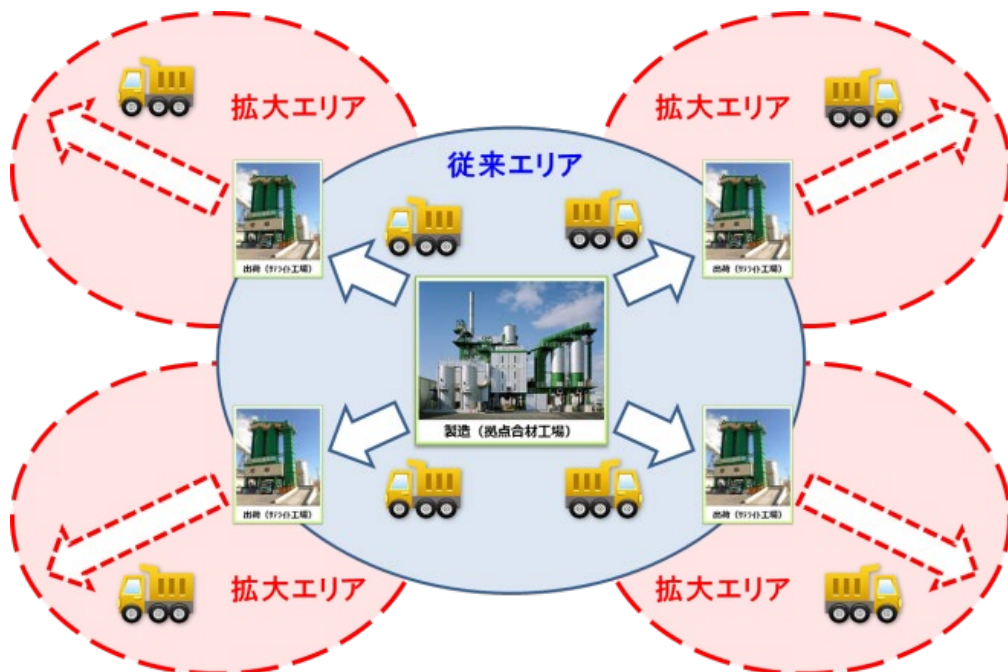


図- 5.2 供給エリア拡大の概念（サテライトサイロ活用）

貯蔵性の評価ではフォームドアスファルト混合物は通常のアスファルト混合物と比較して長時間貯蔵が可能であることがわかる。したがって、従来以上にサイロの活用を活用した供給エリアの拡大が可能であると考えられる。

この方式では地方工場において供給エリア内のアスファルト混合物の需要が減少し、経営が成り立たなくなった場合、そこをサテライト工場にして経費を削減し、メインの合材工場から合材を供給することにより、メイン工場のアスファルト混合物製造量の安定化も図ることが期待でき、合材工場数の減少が抑制されることが期待できる。

5.2. 供給エリアの拡大の効果

供給エリアが拡大された場合の効果を確認するため、四国エリアの他に東海地区の静岡県と東北地区の5県で合材工場から運搬時間2時間想定 of 40km と運搬時間3時間想定 of 60km の供給圏域を算出した。算出対象県と項目を表-5.4に示す。

表-5.4 算出対象県と項目

対象エリア	算出対象県	流入を考慮した周辺地域	算出項目
四国地域	愛媛、香川、高知、徳島	周囲が海のため無し	カバーエリア、冗長性
東海地域	静岡	愛知、神奈川、長野、山梨	カバーエリア、冗長性
東北地域	青森、岩手、宮城、秋田、山形	福島、新潟	カバーエリア

5.2.1. 選定地域での確認

静岡県および隣接県のカバー率算出結果を表-5.5に、可視化図を図-5.3、図-5.4に示す。

表-5.5 東海地域（静岡県）のカバー率算出結果

東海地区(静岡)km	静岡	愛知	神奈川	長野	山梨	総計
高速道路	897	687	213	43	433	2,272
都市高速道路	0	202	213	0	0	416
一般国道	1,078	1,175	818	135	457	3,662
主要地方道	965	1,098	454	114	446	3,077
一般都道府県道	1,146	1,510	300	70	534	3,561
主要地方道	429	458	547	38	63	1,535
一般道	6,458	7,554	3,010	805	2,164	19,992
細道路	19,473	17,660	7,434	921	6,546	52,033
その他	0	0	0	0	0	0
総計	30,447	30,344	12,988	2,127	10,642	86,548
各合材工場から 40kmの供給圏域 カバー率 %	96.2	99.4	100.0	67.9	98.4	97.5
各合材工場から 60kmの供給圏域 カバー率 %	99.0	99.9	100.0	77.3	100.0	99.0

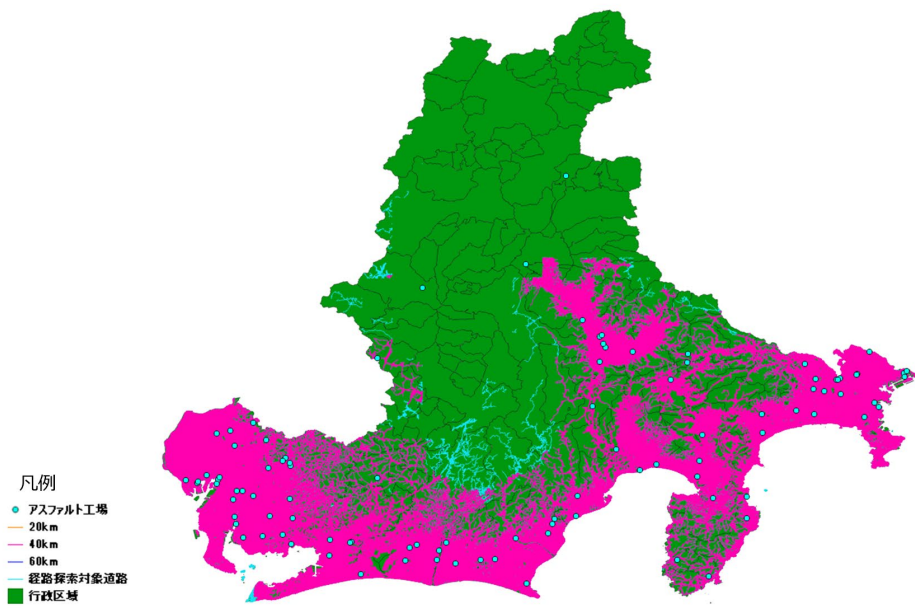


図- 5.3 供給圏域の可視化図（静岡県と隣接県）供給圏域 40km

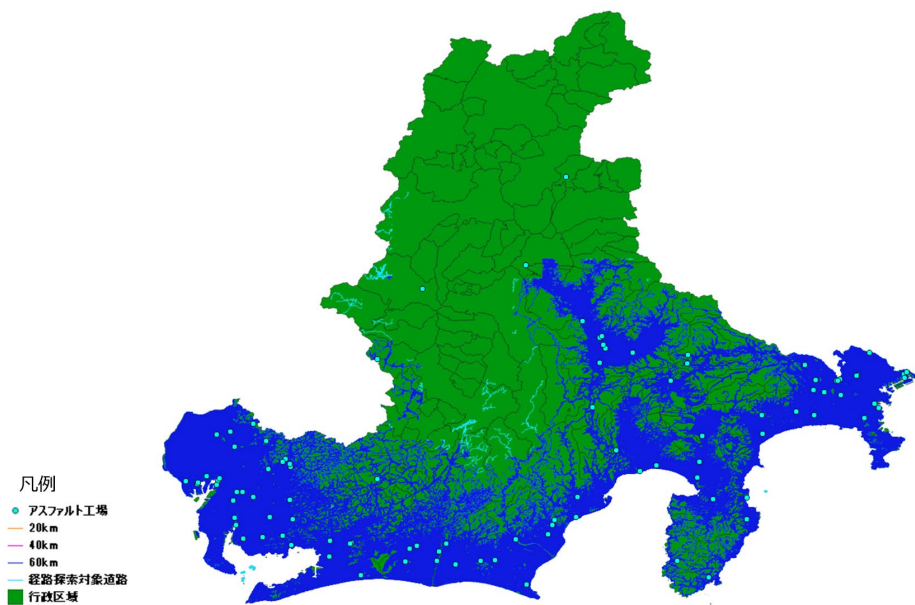


図- 5.4 供給圏域の可視化図（静岡県と隣接県）供給圏域 60km

結果より、静岡県の供給圏域 40km 時のカバー率算出結果は 96.2%で、供給圏域 60km 時のカバー率算出結果は 99.4%である。したがって、エリア拡大時の効果は 3.2%となる。

静岡県は海岸線に沿った地形をしており、また東海道という背景からそれなりの都市が点在していることから、合材工場もバランスよく配置されている。そのため、現状の供給状態もよい結果となった。しかし、図- 5.5と図- 5.6に冗長性の可視化図を示すが、地形が半島になっている地域はリンク数も少ないため、このようなエリアでは将来の安定供給に不安が残るが供給圏域が広がると改善されている様子がわかる。

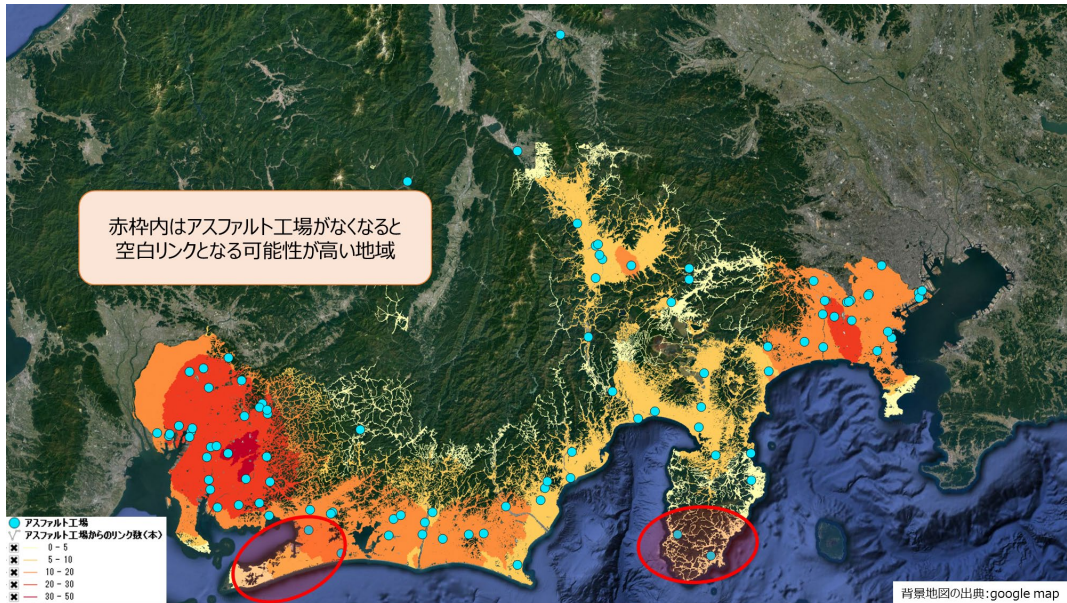


図- 5.5 空白エリアになりうる想定地域 静岡県周辺（供給圏域 40km）

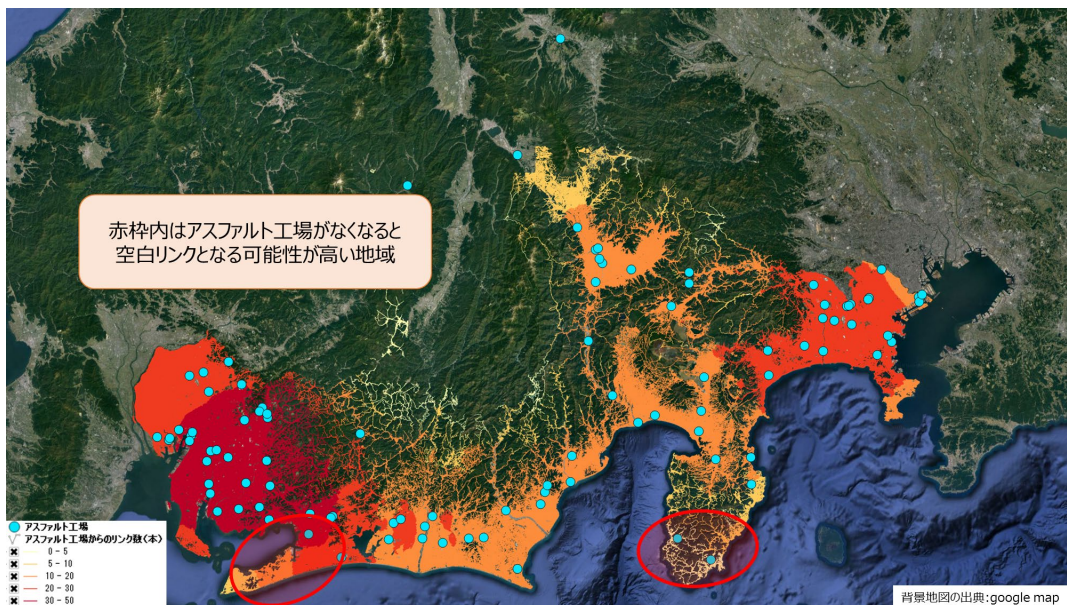


図- 5.6 空白エリアになりうる想定地域 静岡県周辺（供給圏域 60km）

次に東北地域のカバー率算出結果を表- 5.6に、可視化図を図- 5.7、図- 5.8に示す。なお、隣接県からの流入を考慮するため、福島県と新潟県を算出しているが、この2県は隣接県からの流入が考慮されていないため対象外とし、対象は他の5県とした。

表- 5.6 東北地域のカバー率算出結果

東北地区(5県)km	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	新潟県	総計
高速道路	254	802	506	527	475	1,091	1,130	4,786
都市高速道路	0	0	0	0	0	0	0	0
一般国道	1,477	1,879	1,559	1,622	1,289	2,169	2,142	12,137
主要地方道	1,274	1,415	1,207	1,283	1,193	2,022	1,901	10,294
一般都道府県道	1,291	1,653	1,184	1,143	1,417	2,208	2,743	11,640
主要地方道	35	58	59	30	41	76	40	338
一般道	7,403	11,880	9,426	8,434	6,786	11,478	11,695	67,102
細道路	13,035	21,759	20,555	18,337	15,661	28,450	35,887	153,685
その他	1	0	1	0	0	0	10	13
総計	24,770	39,446	34,497	31,377	26,862	47,494	55,548	259,994
各合材工場から 40kmの供給圏域 カバー率 %	97.8	98.3	99.8	99.1	99.7	99.6	99.4	99.2
各合材工場から 60kmの供給圏域 カバー率 %	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9

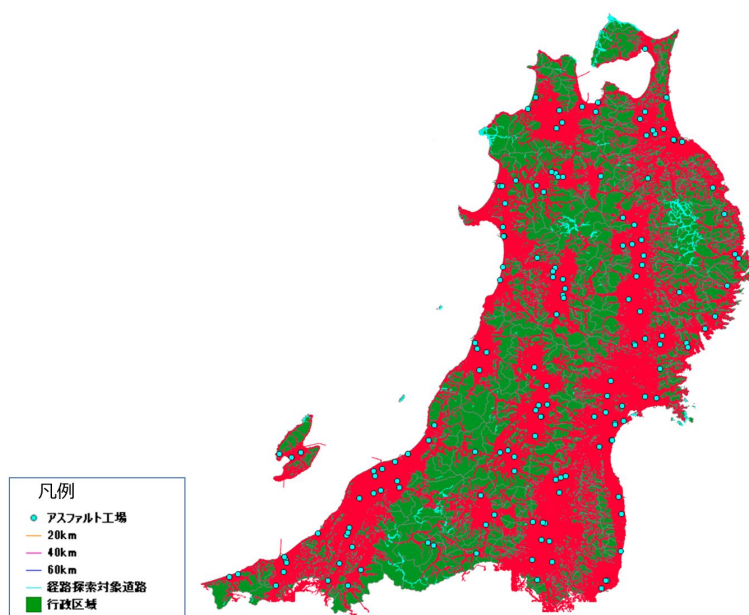


図- 5.7 供給圏域の可視化図（東北地域）供給圏域 40km

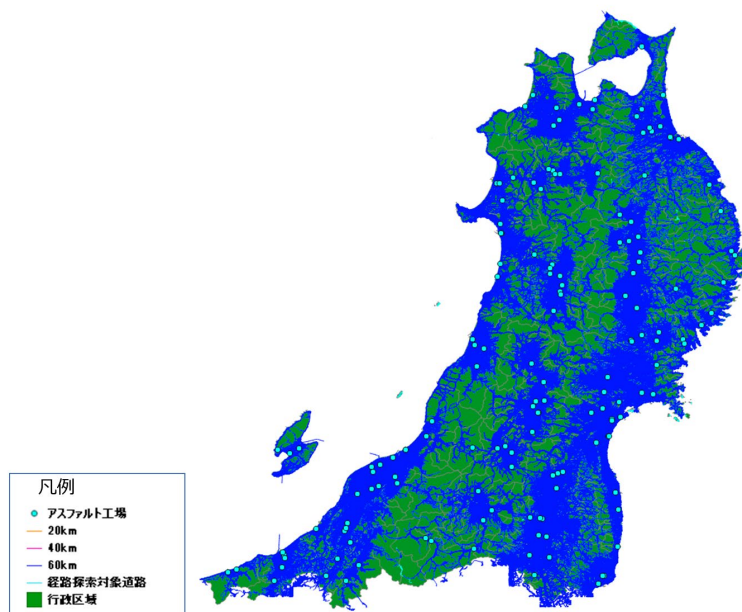


図- 5.8 供給圏域の可視化図（東北地域）供給圏域 60km

結果より、東北地域5県の供給圏域40km時のカバー率算出結果は97.8～99.8%で、供給圏域60km時のカバー率算出結果は99.8～99.9%と非常に高い値である。したがって、エリア拡大時の効果は2.0～0.1%となる。

東北地域は海岸線と内陸部に合材工場が数多くバランスよく配置されており、供給圏域40kmでも十分カバーされていることがわかる。

しかし、東北地域は寒冷地域であり、温暖地域と比べて冬季は気温が低い。そのため、アスファルト混合物の温度も冷え易く、運搬距離が短くなることも想定される。そのような地域ではエリア拡大技術も必要であると考える。

供給圏域20kmと40km時のカバー率比較を表-5.7に、供給圏域20km時の可視化図を図-5.9に示す。結果から、供給圏域が20kmになるとほとんどの県でカバー率が90%を下回る。可視化図からもその様子を読み取れるため、寒冷地域の冬季におけるエリア拡大対策は供給およびアスファルト混合物の品質の面からも考慮すべき課題である。

表- 5.7 東北地域の供給圏域 20km と 40km 時のカバー率比較

東北地区(5県)km	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	新潟県	総計
各合材工場から 20kmの供給圏域 カバー率 %	87.7	84.6	89.5	85.0	91.8	88.4	91.4	88.5
各合材工場から 40kmの供給圏域 カバー率 %	97.8	98.3	99.8	99.1	99.7	99.6	99.4	99.2

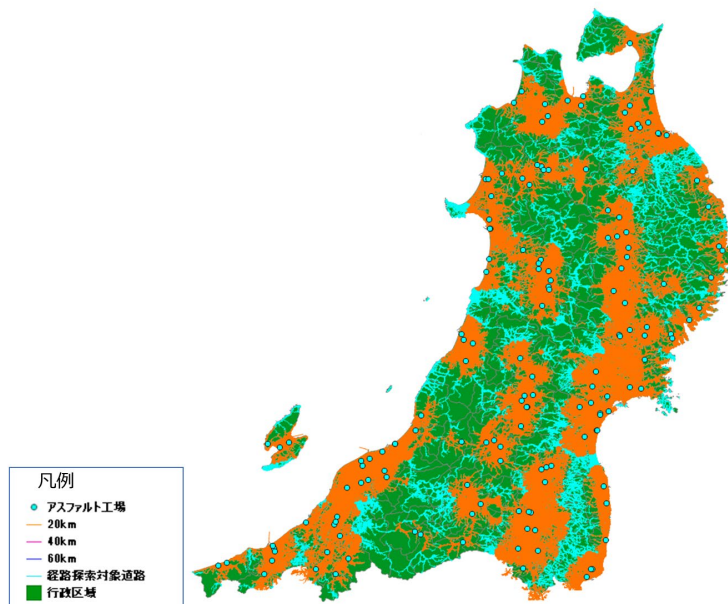


図- 5.9 供給圏域の可視化図（東北地域）供給圏域 20km

5.2.2. 考察

選定した各地域でのエリア拡大効果のまとめを表- 5.8に示す。

これまでの結果のとおり、各対象地域により状況は大きく違うことが確認された。四国では合材工場の少ない山間部に供給不安な可能性の地域があり、静岡県周辺地域では半島地域で、供給不安の可能性が算出された。また東北地域でも現在は安定供給されているが、将来の冬季では供給が滞るかもしれない。

このように、各地域によりその状況は違うが、本研究で得られた、供給圏域の算出と冗長性の確認手法により顕在化した将来の供給の不安点を、フォームドアスファルト混合物による供給エリアの拡大で対応することは問題解決の一方策となりうる。

表- 5.8 各地域でのエリア拡大効果のまとめ

対象エリア	算出対象県	項目	供給圏域40km	供給圏域60km
四国地域	愛媛、香川、高知、徳島	カバー率 %	95.5	98.3
		リンク4本以上の道路延長割合 %	81.7	95.3
東海地域	静岡	カバー率 %	96.2	99.4
	静岡、愛知、神奈川、長野、山梨	リンク4本以上の道路延長割合 %	91.8	97.6
東北地域	青森、岩手、宮城、秋田、山形	カバー率 %	97.8～99.8	99.8～99.9

※東海地区のカバー率は隣接する県からの流入を考慮した静岡県のみで算出している。冗長性のリンク割合は静岡県の隣接地域全体で算出しているため、周辺地域からの流入がある。

※東北地区のカバー率は隣接県の新潟県と福島県を考慮して算出している。

5.3. まとめ

第5章では、第3章と第4章から得られた2つの成果を踏まえて、舗装材料の改良による安定供給の一方策を提言した。本研究により、近い将来の道路整備の維持修繕時代に向けて現状を把握し、現時点から対策を講じることで、より安定的な維持管理を将来に渡り持続的に行うことができる。

第5章で提案した方策を以下に示す。

- 供給圏域外への対応方策をまとめた。しかし、合材工場を必要としない方策（現位置対応）には課題が残る。
- フォームドアスファルト混合物による供給エリアの拡大方策が供給安定性を向上させることができる。
- 供給エリアの拡大の方法としては、運搬時間を延長する方法と、サテライトサイロを活用した方法がある。
- 供給エリアの拡大の効果について、供給圏域を算出することにより確認した。算出結果から、各地域で状況は異なるがエリアの拡大により、各地域における課題解決の一方策となる可能性を確認した。

[第5章の参考文献]

- 5-1) 日本道路協会：設計施工便覧，2006.
- 5-2) 日本道路協会：舗装再生便覧，2010.
- 5-3) 日本道路協会：簡易舗装要項，1996.
- 5-4) 日本道路建設業協会：中温化(低炭素)アスファルト舗装の手引き，2012.

6. 結論と今後の課題

6.1. 結論

本研究では、社会資本整備の要である道路舗装の維持管理に欠かせない、持続的に繰り返し再生可能な高再生率アスファルト混合物を中温化技術であるフォームドアスファルト技術を用いて実用化に成功し、その技術を活かした供給体制をマネジメントしていく手法を考案したことにより、将来的な安定供給の提案をとりまとめた。

(1) フォームドアスファルト技術による再生アスファルト混合物の開発

中温化技術であるフォームドアスファルト技術に注目し、アスファルトを発泡することにより、見掛けの粘度が低下し、ベアリング効果により締固め密度の向上を確認した。しかし、現在の日本の高再生率アスファルト混合物に適用するために効果の向上方法を考え、フォームドアスファルトの微発泡化を考案した。これにより、締固め性は向上し高粘度改質アスファルトにも適用可能となった。さらに、効果を向上させるために、再生用添加剤の発泡を考案した。これにより、効果は上乘せされ、再生率 70% の高再生率アスファルト混合物にも適用可能となった。

室内試験の結果を踏まえて、工場のプラントで実証実験を行うために、日本のバッチ式アスファルトプラントに適した、フォームド発生装置を開発し、稼働工場で効果を確認した。その結果、使用可能時間の延長による、長距離運搬および長時間貯蔵の効果が確認された。

(2) アスファルト混合物の供給圏域の算出と安定供給に関する分析

道路舗装ストックは今後も増え続けていく中で、道路工事量は減り、アスファルト混合物の製造量も連動して減少傾向である。この状況が続いて限界点に到達したとき、社会資本整備の根幹である道路ネットワーク網の維持が滞る可能性がある。しかし、これまでこの課題は講じられてはいない。

そこで、本研究では全国の合材工場数を調査した。その結果、製造量の減少と同様の傾向で、合材工場もピーク時の約 6 割に減少していることがわかった。合材工場の減少に伴い、今後、アスファルト混合物が供給できない地域が顕在化することが懸念される。しかし、現状の供給圏域の把握手法では道路別の供給可否までは把握することができない。そこで、道路ネットワークデータを用いた詳細な供給圏域算出手法を考案した。これにより、特定の工場から設定時間の到達範囲を正確に把握することができ、将来の合材工場の減少による空白エリアを推定することにより、供給対策の対応が可能となった。また、最短経路探索および県境のリンクすることにより広範囲で緻密な実態を把握することができた。さらに、この算出手法を用いて冗長性を算出し、可視化することにより、供給圏域の把握だけではわからない脆弱な供給地域を把握することができた。これにより、将来供給ができなくなる可能

性の高い地域の特定をすることが可能となった。

(3)持続的な供給方策の提案

本研究で得られた成果、「フォームドアスファルト技術による再生アスファルト混合物の開発」と「アスファルト混合物の供給圏域の算出と安定供給に関する分析」から、将来に渡り、持続的にアスファルト混合物を供給する一方策を提案した。

通常のアスファルト混合物の運搬可能時間は2時間程度である。2時間程度の運搬時間であると将来的に供給ができない地域が顕在化する可能性が高い。しかし、運搬時間を3時間まで延長することができれば、その可能性は大幅に軽減する。そこで、フォームドアスファルト技術を用いたアスファルト混合物を日常的に運用することにより、合材工場の供給範囲を拡大する。また、サテライトサイロを活用することにより、民間運営されている合材工場のこれまでの拠点を最大限生かし、供給範囲を維持していく方策を提案した。

始めに算出した四国地域以外の静岡地域と東北地域で、供給範囲の拡大効果を確認した。供給圏域の算出により、それぞれの地域において特有の供給状況を把握することができ、かつ、地域の安定供給に関する課題を把握することができたため、算出手法の有用性を確認するとともに、供給拡大の必要性も確認することができた。

6.2. 本研究が切り拓いた新しい展開

本研究で得た成果が切り拓いた新しい展開を論ずる。

(1) フォームドアスファルト技術

現在のアスファルト混合物に関する主な課題を以下に挙げる。

- ✓ CO₂ 排出量削減
- ✓ 作業環境の改善（熱環境、アスファルトフューム）
- ✓ 地球環境への対応（高リサイクル率維持、化石燃料使用量削減）
- ✓ 道路ストックの維持管理
- ✓ 繰り返し再生によるアスファルト混合物の品質低下抑制
- ✓ アスファルト混合物製造量減少に伴う合材工場の統廃合

これらの課題に対応できる技術が中温化技術である。しかしながら、コストが上昇することから、普及しなかった。一方、欧米で普及している、低いコストで対応できるフォームドアスファルトの研究は過去におこなわれてはいたが、実用化には至っていない。その理由は、日本は少資源国であり、従来からリサイクルに力を入れていることから世界的に見ても、アスファルト舗装のリサイクル率は極端に高いことにある。そのため、フォームドアスファルト技術は日本では適応できないと考えられていた。

しかし、本研究で微細泡に成功し、また再生用添加剤を発泡させる二つの技術を完成させたことにより、日本の高再生率アスファルト混合物への適用が可能となった。

そのため、現在、日本でもフォームドアスファルト技術が実用化し、十数の合材工場で実際に運用されている。低コストで中温化技術を実用化できるため、全国的に普及できる、そこに大きな意義がある。

(2) 供給圏域算出手法

これまでの合材工場に対するアスファルト混合物の給圏域は、合材工場を中心に半径 20km の円を描いて把握されている。そのため、供給圏域は俯瞰できるが、具体的な道路別の供給可否の把握までは難しかった。

本研究で、考案した手法により道路種別や道路延長などを含んだ、緻密な実態を把握することが可能となった。また、冗長性の概念を取り入れ算出することにより、安定供給に対する認識の確度が格段に高まった。そのため、脆弱な地域を的確に把握することが可能となり、得られた課題に対する対応をいち早く初動させることができる。

今後、本研究の成果を公的機関の道路台帳などと連携させて、包括的なデータにより算出が可能となれば、戦略的なマネジメント計画の立案など、より発展する可能性が高い。

(3)供給方策

これまで合材工場は経営する会社が営業戦略として設置場所を決めて、運営している。したがって、供給需要の多い都市部は多く、地方の特に山間部などでは合材工場の拠点は少ない。それでも、道路建設が多く行われて時代は、合材工場の数も多く全国的に供給はされていたが、今後、需要が減少し、また維持工事などの少量出荷が広範囲にわたり多箇所で行われるようになると、供給が滞る可能性がある。その対策としては、公的機関での合材工場の設置なども考えていかなければならない。

しかし、まずは減少していく合材工場の現状を踏まえた中で、できうる限りの対策を行うことが、建設投資費削減の時代に対して、社会資本整備に携わるものの責務である。

これらの観点から、本研究で提案した、舗装材料と供給マネジメント双方の利点を生かした方策は、今後の道路舗装整備のあり方に必ず役立つものと考えている。

6.3. 今後の課題

本研究で得られた成果を踏まえ、今後の課題を述べる。

(1)フォームドアスファルト技術による再生アスファルト混合物の開発

- 微細泡の高性能化

発泡させた泡の微細泡をより細かくさせる。これにより効果の持続時間、および分散性や混合性の向上が図られるものと考えている。効果の持続時間が長くなれば、より長距離運搬や長期保存が改善される。また分散性や混合性が向上することにより、製造時の混合時間の短縮や混合負荷軽減により省エネルギーによる製造が可能となると考えられる。開発には添加剤、発生装置双方からのアプローチが必要である。目標は現在のマイクロバブルからナノバブルへ改良することである。

- 再生用添加剤の効果的な作用

再生用添加剤をさらに効果的に再生骨材へ作用させる。これにより、再生アスファルト混合物の品質がより新規のアスファルト混合物へ近づき、繰り返し再生時の品質の維持や舗装の長寿命化がなされるものと考えられる。

このためには、再生用添加剤の成分や効果的な添加方法の研究さらにナノバブル化も有効と考えられる。

- Wフォームドの高性能化

現在のシステムにおいては、アスファルトフォームドと再生用添加剤を別々に発泡させており、2系統のフォームド発生装置が必要である。このシステムを1系統に集約できれば、インシヤルコストも軽減され、より普及しやすくなる。

しかし、効率的な発泡効果を得るためには、噴射タイミングや噴射場所など様々な要因が絡むため簡単ではない。結果によってはアスファルトと再生用添加剤の混合発泡等の研究が必要となる可能性がある。

- フォームド発生装置のコストダウン

フォームドアスファルト技術を導入するには、フォームド発生装置の導入が必要となる。長期間で考えれば装置の導入によるアスファルト混合物の価格上昇はわずかである。しかし、初期投資が必要なため、現在導入している合材工場は舗装大手建設会社が運営している合材工場である。今後、全国の安定供給を講ずるためには、地方の地元の企業が運営している合材工場でも導入しやすい価格にする必要がある。

(2)アスファルト混合物の供給圏域の算出と安定供給に関する分析

- 供給圏域把握の仕組みづくり

アスファルト混合物の安定供給は社会資本整備の根幹である道路ネットワーク整備の重要課題であるため、業界全体で仕組みづくりに取り組む必要がある。

まず、現状で行われている協会などの民間主導で全国の供給状況を把握するために、合材工場の拠点や供給能力、実績を正確に把握する必要がある。また、運営会社においても、将来において効率的な合材工場の拠点や供給能力などを考える必要がある。

また、官庁主導で、定期的に供給圏域を把握することにより、道路舗装材料に関する戦略的なマネジメント計画を策定する。この計画を受けて、必要に応じて、公民連携で包括的にエリアを管理し、その地域の将来に渡る需要を想定して合材工場の運営を含めた供給管理体制を構築することや、需要の少ない地域では公設民営合材工場の導入も講ずる必要がある。

- 合材工場の製造能力、運搬能力を考慮した供給圏域や冗長性の算出

各合材工場の製造能力や運搬能力をなどの供給拠点の詳細な情報を得て、算出データとして考慮できれば、より現実に近い正確な供給圏域の算出や安定供給の把握が可能となる。しかし、個別の合材工場の製造の製造能力や運搬能力は公表されていないため、データの入手が課題となる。データの入手においても上記の仕組みづくりが必要となる。

- 道路工事量を考慮した算出

道路舗装工事量を考慮した算出ができれば、需要と供給のバランスを考慮した計画が可能となる。道路舗装工事量の把握はある程度可能であると考えているが、これに加えて民間の舗装工事量の把握も考慮しなければならない。特に都市部地域においてはショッピングセンター、工場、配送センターなどの民間舗装需要も多い。これらのデータは協会などの民間団体でとりまとめる必要がある。道路舗装工事量の把握は、道路台帳との連携が可能となればより、将来予測を含めより正確な算出が可能となる。

- 算出手法の自動化

本研究では、合材工場位置データや道路ネットワークデータなどの各種データを用いて、供給圏域を算出しているが、これらの一連の作業を自動化するプログラムの開発が課題として挙げられる。これにより、データの更新時に速やかに供給状態の確認ができる。供給圏域把握の仕組みづくりができた際には、必需であると考えられる。

- 旅行速度調査結果を考慮した算出
旅行速度調査結果を算出データに組み込めれば、より現実に近く正確な供給圏域の算出が可能となる。また、将来の安定供給の把握もより正確になる。
- 供給圏域および供給圏域外（空白圏域）の道路面積の算出
供給圏域および供給圏域外の道路面積を算出することにより、より正確な需要量の算出が可能となる。
- 効率的な冗長性リンク数の算出
合材工場に対して最適な冗長性リンク数を設定することができれば、供給マネジメント計画を具体的に策定することが可能となる。そのためには詳細な合材工場のデータが必要となる。

業績

—学術論文（査読有）—

- 今井龍一, 越健太郎, 金井翔哉: アスファルト合材の安定供給に関する分析, 土木学会論文集【投稿済】
- 越健太郎, 今井龍一, 金井翔哉: アスファルト合材の供給圏域の基礎分析, 土木学会論文集 E1(舗装工学論文集第 23 卷), pp.I_63-I_70, 2018.
- 越健太郎, 今井龍一: 高再生率アスファルト混合物の品質確保と安定供給, 土木学会論文集 E1(舗装工学論文集第 22 卷), pp.I_147-I_154, 2017.
- Kouzu,M.,Fujimori,A.,Suzuki,T.,Koshi,K.,Moriyasu,H.: “Industrial feasibility of powdery CaO catalyst for production of biodiesel,” *Fuel Processing Technology* 165, 2017.
- 清水泰成, 江向俊文, 谷口博, 越健太郎: CAE 路盤材料の理論的設計法の適用性に関する検討, 土木学会論文集 E1(舗装工学論文集第 17 卷), pp.I_97-I_103, 2012.
- 守安 弘周, 越 健太郎, 佐藤 亜悠, 鈴木 忠典, 中垣内 敦子, 高津 淑人: 機械的粉砕によるバイオディーゼル合成反応用 CaO 触媒の活性化, 日本エネルギー学会誌, pp.495-502, 2012.
- 守安 弘周, 越 健太郎, 高津 淑人: 各種の石灰製品から得た CaO の大豆油エステル交換活性, 日本エネルギー学会誌, pp.34-40, 2012
- 清水泰成, 吉村啓之, 谷口博, 越健太郎: コンクリート発生材を用いた中央混合方式 CAE 混合物に関する検討, 土木学会論文集 E1(舗装工学論文集第 16 卷), pp.I_117-I_122, 2011.

—国際会議—

- Hatakeyama,K.,Okamura,T.,Koshi,K.: “Development of environment friendly cold mix asphalt,” *PIARC World Road Congress AbuDhabi 2019*【投稿済】
- Fukuyama,N.,Hatakeyama,K.,Koshi,K.,Yamamoto,T.: “Development of environment friendly cold mix asphalt repair material,” *IRF Global R2T Expo & Conference*, 2018.11.
- Koshi,K.,Moriyasu,H.,Imai,R.: “Study on warm-mix foamed asphalt mixture with high recycled asphalt content and its quality improvement,” *ISAP APE 2017*, 2017.11.
- Koshi,K.,Moriyasu,H.,Saito,K.,Shimizu,Y.: “Study on the improved recycled asphalt mixtures by microbubble-foamed asphalt,” *The 12th International Conference on Asphalt Pavements ISAP North Carolina 2014*, 2014.6.
- Moriyasu,H.,Taniguchi,H.,Koshi,K.,Hatakeyama,K.: “Development of Water-Based Curing Reactive Cold Asphalt Repair Material,” *The 12th International Conference on Asphalt Pavements ISAP North Carolina 2014*,

2014.6.

— 学術論文（査読無） —

- 越健太郎, ANDY WELCH : フォームドアスファルト発生装置の導入, 第 31 回日本道路会議論文集, 2015.
- 清水泰成, 越健太郎, 川上篤史, 寺田剛 : 路盤の強化による交通振動軽減効果に関する検討, 第 68 回土木学会年次学術講演概要集, pp.1243-1244, 2013.
- 越健太郎, 谷口博, 郭慶煥 : 中央混合方式 CAE 混合物の液状化被害軽減に関する検討, 第 67 回土木学会年次学術講演概要集, pp.703-704, 2012.
- 谷口博, 越健太郎, 齋藤啓大 : 高炉スラグ微粉末を固化材に用いた中央混合方式 CAE 混合物に関する検討, 第 67 回土木学会年次学術講演概要集, pp.787-788, 2012.
- 清水泰成, 高木耕平, 越健太郎 : 再生路盤材を用いた CAE 混合物に関する検討, 第 12 回北陸道路舗装会議論文集, 2012.
- 松浦悠貴, 鈴木清美, 越健太郎 : バイオマス燃料の有効活用による CO2 排出量削減対策, 第 12 回北陸道路舗装会議論文集, 2012.
- 谷口博, 齋藤啓大, 越健太郎 : 再生路盤材を用いた中央混合方式 CAE 混合物に関する検討, 第 66 回土木学会年次学術講演概要集, pp.649-650, 2011.
- 清水泰成, 谷口博, 越健太郎 : 再生路盤材を用いた中央混合方式 CAE 混合物に関する検討, 第 29 回日本道路会議論文集, 2011.
- 森嶋洋幸, 芹田美佳, 越健太郎, 大内克行 : 下水熱を利用した融雪舗装の検討, 第 63 回土木学会年次学術講演概要集, pp.153-154, 2008.
- 谷口博・佐久間渉・越健太郎 : 揚水型凍結抑制ブロック舗装の開発, 第 10 回北陸道路舗装会議論文集, pp.162-165, 2006.
- 越健太郎, 杉浦博幸, 峰岸順一 : セメント系材料による塗布型遮熱性舗装の開発, 第 25 回日本道路会議論文集, 2003.
- 本間政弘, 越健太郎, 山根美佳 : 地下貯留システムを利用した凍結抑制舗装の検討, 第 25 回日本道路会議論文集, 2003.
- 越健太郎 : 地下貯留システムを利用した凍結抑制舗装, 第 18 回北陸雪氷技術シンポジウム, 2003.
- 越健太郎, 吉田武, 新田弘之, 梁真二 : 高耐流動性アスファルト混合物の評価試験に関する検討 (第 2 報), 第 56 回土木学会年次学術講演概要集, 2001.
- 越健太郎, 山口信彦, 大野博之 : コンクリート再生骨材を使用したアスファルト混合物の施工事例, 第 23 回日本道路会議一般論文集, pp.122-123, 1999.
- 越健太郎, 杉浦博幸, 小林良太 : コンクリート再生骨材のアスファルト混合物への利用, 第 22 回日本道路会議一般論文集, 1997.
- 小林良太, 越健太郎, 大塚正樹 : コンクリート再生骨材の処理方法に関する検討, 第 21 回日本道路会議一般論文集, pp.650-651, 1995.
- 河田久儀, 越健太郎 : ジオグリッドによるリフレクションクラック抑制対策の試験施工, 第 20 回日本道路会議一般論文集, pp.816-817, 1993.
- 河田久儀, 竹内康二, 越健太郎 : ジオグリッドのリフレクションクラック抑制効果, 第 19 回日本道路会議一般論文集, pp.798-799, 1991.

—特許—

- 守安弘周, 越健太郎, 谷口博, 畠山慶吾: アスファルト混合物およびその製造方法ならびにそれを用いた舗装方法, 第 5916938 号, 2016.4.
- 守安弘周, 越健太郎, 畠山慶吾: アスファルト混合物およびその製造方法、ならびにそれを用いた舗装方法, 第 6089139 号, 2017.2.
- 守安弘周, 越健太郎, 谷口博, 畠山慶吾: アスファルト混合物およびその製造方法ならびにそれを用いた舗装方法, 第 5916937 号, 2016.4.
- 香川光治, 岡本澄雄, 越健太郎: 舗装用材料及びその製造方法, 第 5753139 号, 2015.5.
- 守安弘周, 越健太郎, 江向俊文: 再生加熱アスファルト混合物の製造方法, 第 5965066 号, 2016.7. 【本研究関連特許】
- 守安弘周, 越健太郎: バイオディーゼル燃料の製造方法, 第 5186606 号, 2013.1.
- 香川光治, 守安弘周, 越健太郎, 谷口博: 舗装用高付加価値リサイクル混合物, 第 5775013 号, 2015.7.

—記事執筆等—

- 越健太郎, 黒田康熙: アスファルトの発泡が混合物の品質におよぼす影響について, アスファルト 234, pp.47-52, 2018.12.
- 越健太郎: フォームドアスファルト技術による再生アスファルト混合物の中温化について, アスファルト合材 No.126, pp.36-41, 2018.4.
- 清水泰成, 越健太郎, 江向俊文: 再生アスファルト混合物にも適用可能な汎用性の高いフォームドアスファルト技術, 舗装, pp.25-30, 2016.2.
- 越健太郎: 「舗装」創刊号を読んで, 舗装, pp.32-33, 2015.9.
- 越健太郎, 鈴木哲雄: 廃ガラスびんカレット入りアスファルト舗装の長期供用性と再生利用, 舗装, pp.9-12, 2005.4.
- 越健太郎, 行川恒弘, 小林良太, 山口信彦: コンクリート再生骨材のアスファルト混合物への適用事例, 舗装, pp.3-7, 1999.8.
- 越健太郎: 道路舗装用語の解説 多孔質弾性舗装, 舗装, 1999.
- 越健太郎, 水口浩明, 吉村啓之: 第3回舗装のリフレクティブクラッキングに関する国際会議の論文抄録, 舗装, 1999.
- 越健太郎: 道路舗装用語の解説 マット軸重計, 舗装, 1998.
- 傳田喜八郎, 小林良太, 越健太郎: コンクリート再生骨材のモルタル除去装置, 建設機械, 1998.
- 河田久儀, 越健太郎, 小林武史: 繊維混入によるアスファルト混合物への耐流動効果, 道路建設, pp.48-60, 1993.12.
- 河田久儀, 竹内康二, 越健太郎: ジオグリッドのリフレクシオンクラック抑制効果, 道路建設, pp.61-67, 1991.11.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京都市大学 大学院総合理工学研究科 今井龍一准教授には、研究テーマの模索時期から懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました。先生の温かく時には厳しいご指導がなければ論文を完成させることはできませんでした。心より深甚なる感謝の意を表します。

東京都市大学 大学院総合理工学研究科 皆川勝教授、丸山收教授、五艘隆志准教授、高津淑人准教授および前田道路株式会社 製品技術部部长 守安弘周様には、貴重なご助言を賜り、博士論文の完成度を高めることができました。心より深く御礼申し上げます。

青山学院大学 情報メディアセンター 櫻井淳助手、東京都市大学大学院生 金井翔哉様には供給圏域の分析に多大なご協力をいただきいただきました。深く感謝いたします。

東京都市大学大学院博士後期課程への進学にご協力していただきました、松浦弦三郎様、アールテックコンサルタント株式会社 社長久野宏様、誠にありがとうございました。

前田道路株式会社 技術研究所所長 山本富業様をはじめとするフォームドアスファルト技術の開発に関わった前田道路の皆様にはご協力いただき、深く感謝いたします。

私一人では博士論文を完成させることは到底できませんでした。本研究に関与していただいた皆様のご指導ご鞭撻を賜ることができたため、本論文を完成することができました。心より深甚なる感謝の意を表する次第です。

最後に勉学への意欲に対して深く理解を示してくださり、日々の生活を支え、私に活力を与えてくれた妻 直子と息子 遼太郎、慶次郎、優三郎、また、博士論文の完成を楽しみにしてくれていましたが、論文完成前の昨年7月に亡くなった母 茂子には心から感謝いたします。

2019年3月

越 健太郎