

E-0807 社会資本整備における環境政策導入によるCO<sub>2</sub>削減効果の評価と実証に関する研究

## (5) 環境政策の検討と導入効果の評価(地方圏)

広島大学大学院工学研究院

河合研至・藤本郷史

平成20～22年度累計予算額： 5,639千円(うち、平成22年度予算額 1,584千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 広島大学サブグループでは、「道路の維持管理補修」「生コンクリートの製造」という2つの対象を選定して、地方政策立案のための調査・検討をおこなった。

環境政策としての道路政策の中に、道路構造物の維持管理や補修・補強等の環境負荷の要素を定量的に導入し、その導入効果について検討することを本研究の目的としている。なお、ここでは、地域特性を考慮した環境政策の導入を前提として、対象を地方圏としており、具体的には中国地方の高速道路を検討対象とした。上記の目的を達成するため、道路構造物の維持保全に関する環境負荷の現状把握を本研究の第一段階として実施し、その結果を踏まえて、環境政策の導入とその効果について検討を行った。

また、生コンクリートの製造プロセスに関わる制約に着目し、エネルギー消費量との動的な関係性を把握しようとする立場で検討を行った。”コンクリートの製造”ステージにおいては、個別のプロセスと関連付ける形でエネルギー消費特性を把握し、消費量推計モデルを構築することが必要である。本報では、生コンクリート工場製造プロセスの主動力源である電力を対象として、各プロセスの電力量実測値に基づいた分析を行った。具体的には、以下を検討した。1)実際の製造プロセスにおける簡便な電力量測定手法を導入し、実測に基づく定量化と分析のための基盤を構築する、2)上記測定データとプロセス稼働状況の時刻歴情報との相関分析に基づいて製造プロセス電力消費量推計手法を提案する、3)積み上げ法との比較から推計手法の有用性を示す、4)上記の推計手法を用いてシナリオ分析を行い、時間依存特性を利用した省エネルギーポテンシャルを定量的に示す。以上のような検討を通じて地域政策決定者が実行できる政策手段として、時間集中型の発注、稼働率の向上といった手法を提示した。

[キーワード] 道路、維持管理、二酸化炭素の排出削減、生コンクリート製造、電力量

## 1. はじめに

道路構造物の維持管理や補修・補強にあたっては、その構造物の重要度と保全実施の緊急度などを考慮し、年度予算の範囲内で行われているのが現状である。ここで最重要視されているのはコストであるが、近年の環境意識の高まりを勘案すれば、環境に及ぼす影響の考慮は不可避である。公共事業に対する予算の規模やその用途が、従来に増して社会から注視されている昨今では、公共事業実施に対するアカウンタビリティの重要性が増している。工事のコスト縮減や、構造物のライフサイクルコストの縮減がアカウンタビリティを確保する上では最も容易な方法ではあるが、これによって十分な成果があげられているとは言い難い。コスト至上主義となることは、道路構造物の維持保全を行う際の材料や工法を選定する選択肢を狭めることともなる。ライフサ

イクルコストを考慮することの重要性は認識されつつも、現実にはスポット的に実施される維持保全業務のコストの最小化が図られているからである。このような現状を踏まえ、またコスト偏重を脱却し長期スパンで考えた構造物の最適な性能保持を行っていくためには、複数の側面からの維持保全の最適化を図ることが必要であるとする。それらの側面として、コスト、性能、環境負荷が挙げられる。コストや性能に関しては、定量的に数値化して明示できるために、従来では性能を満足する最小のコストで維持保全の手法が選択されているが、構造物の維持保全に伴う環境負荷を具体的かつ定量的に数値化し、環境負荷低減の最適化を明示することが可能となれば、より一層幅の広いアカウンタビリティを確保できるものとする。環境負荷を意識し、それを定量的に評価して、ライフサイクルにおける環境負荷を最小化しようとする動きは、まだ十分に行われていない。道路保全事業に関わる環境負荷を定量的に数値として明示することは、環境負荷を強く意識しその最小化を図っていることを強くアピールし、アカウンタビリティの充実を十分に果たすものとする。ひいては、国際的にも、COP3の発効に伴って実現を果たさなければならない数値目標に対する、道路保全事業の到達目標を定量的に提示できる材料ともなりうる。以上の観点から、環境政策としての道路政策の中に、道路構造物の維持管理や補修・補強等の環境負荷の要素を定量的に導入し、その導入効果について検討することを本研究の目的としている。なお、ここでは、地域特性を考慮した環境政策の導入を前提として、対象を地方圏としており、具体的には中国地方の高速道路を検討対象とした。

上記の目的を達成するため、道路構造物の維持保全に関する環境負荷の現状把握を本研究の第一段階として実施し、その結果を踏まえて、環境政策の導入とその効果について検討を行った。

さらに、コンクリート関連産業は、そのフロー・ストックが多く、CO<sub>2</sub>排出削減に対する社会的要請にさらされる状況にある。一方で、これまでに提案されてきたCO<sub>2</sub>排出削減策には、必ずしも実現性が高くないものが多い。例えば、混合セメントへの転換は試算上有効であるが、実際には混合セメント生産量は、過去10年で微減している。混合セメントを用いたコンクリートの品質に対する信頼性の欠如や標準仕様書・規準・法規などへの採用の停滞が理由であろうが、この例に限らずCO<sub>2</sub>排出削減策にはその採用にともなう各種の技術的・社会的な制約がある。特に、生産量や品質の低下を伴う対策は、相応の説得力が無ければ採用できるものではないであろう。したがって現段階では、技術的・社会的な制約に対応できるように多様な選択肢を模索することが必要といえる。また、それらの選択肢を評価するにあたって、単にCO<sub>2</sub>排出原単位を算定してCO<sub>2</sub>削減可能量を評価するのでは不十分である。製造設備、需給バランス、商慣習など各種の技術的・社会的制約とCO<sub>2</sub>排出原単位との動的な関係性を明らかにし、その上で、それらの制約を考慮した評価を行う必要がある。以上のような観点から、本報は、製造プロセスに関わる制約に着目し、エネルギー消費量との動的な関係性を把握しようとする立場で検討を行った。多様な選択肢を模索する観点からいうと、コンクリートのライフサイクルステージのうち、“コンクリートの製造”は、これまでに示された選択肢が特に少ない。また、“コンクリートの製造”ステージでは、定量的評価を行うための知見も不足しており、各種の指針案も限定的な表現にとどまっている。以上の背景を鑑みると、“コンクリートの製造”ステージにおいては、第一段階として、個別のプロセスと関連付ける形でエネルギー消費特性を把握し、消費量推計モデルを構築することが必要である。本報では、生コンクリート工場製造プロセスの主動力源である電力を対象として、各プロセスの電力量実測値に基づいた分析を行うことを目的とした。

## 2. 研究目的

中国地方の高速道路における点検業務、補修業務に関わる環境負荷の現状把握を通して、道路構造物の維持管理や補修・補強等の保全業務に関わる道路政策において、環境政策の導入方法とその効果を検討し、さらに、1) 製造プロセスにおける簡便な電力量測定手法を導入し、実測に基づく定量化と分析のための基盤を構築する、2) インベントリデータとプロセス稼動状況の時刻歴情報との相関分析に基づいて製造プロセス電力消費量推計手法を提案する、3) 積み上げ法との比較から推計手法の有用性を示す、4) 上記の推計手法を用いてシナリオ分析を行い、時間依存特性を利用した省エネルギーポテンシャルを定量的に示す。

## 3. 研究方法

点検業務に関しては、過去5年間に実施された点検の詳細内容を関係機関へのヒアリング等を通じて入手し、過去5年間における環境負荷量の算出を行った。補修業務に関しては、橋梁床版補修工事の実例を対象として、工事に関わる各種数量を関係機関へのヒアリング等を通じて入手し、補修に伴う環境負荷量の算出を行った。ここで対象とした環境負荷は、CO<sub>2</sub>排出量、NO<sub>x</sub>排出量、SO<sub>x</sub>排出量、ばいじん排出量である。なお、環境負荷量の算出に必要なインベントリデータには、既往の文献データ<sup>1)</sup>を活用し、既往の文献において網羅されていないインベントリデータに関しては、高速道路に関する実態調査、文献調査、関係機関へのヒアリング調査を通じて情報を入手し、新規にインベントリデータを作成した。点検業務において調査対象とした点検内容の概要を表 21に、補修業務において調査対象とした補修工事の概要を表 22に示す。点検業務の評価の対象範囲は、日常点検では点検車の走行、詳細点検では点検車の走行と現地での点検作業である。補修工事の評価の対象範囲は、床版の解体・撤去、材料の製造・運搬、床版の施工・架設、舗装工であり、A橋に関してはさらに迂回路工を含む。

表 21 調査対象とした点検業務の概要

点検の種類	点検日数	点検手法
日常点検（安全点検）	4日/2週（5年間、522日）	車上目視
詳細点検（橋梁）	過去の実績5年間 計142日 (H13、14、15、19、20)	近接目視
詳細点検（トンネル）	過去の実績5年間 計72日 (H14、16、17、18、20)	近接目視

表 22 調査対象とした補修工事の概要

工事名	A橋床版補修工事		B橋床版補修工事	
	上り線		上り線	下り線
橋長 (m)	143.15		125.5	146.6
幅員 (m)	10.71		10.9	9.9
コンクリート量 (m <sup>3</sup> )	354.6		301.3	309.5
水セメント比	0.360		0.465	0.490
単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	444		356	327
補修概要	PCa床版による全面取換え		RC床版を現場打設	RC床版を現場打設
現場作業期間	平成21年9月～11月 (3カ月間)		平成19年6月～平成20年3月 (10カ月間)	

次に広島県内の生コンクリート工場3箇所（以後、工場P1～P3と呼ぶ）を選定し、電力測定を行った。月産能力の観点から、2工場は大～中規模に、1工場は中～小規模に分類される。一般に電力会社によって課金用の電力測定が行われている。しかしながら予備調査によると、生コンクリート工場では、機器プロセス別の電力量は測定されておらず、既設の電力測定機器を用いた情報収集はできない。そこで、クランプ電力計を受電設備内に設置して測定を行った。本装置は、電圧を抵抗分圧方式、電流をクランプ式で測定し、2電力計法によって有効電力量を算定するものである。特長は以下のようにまとめられる。1) 原理的には工場の電力供給を止めることなく設置可能、2) 小さいので、配電盤などに特殊な工作なしで設置可能、3) データの自動記録が可能、4) 工場で一般的な三相3線式に対応。

#### 4. 結果・考察

はじめに、点検業務に関する環境負荷量の結果を示す。本研究において対象とした点検は、日常点検、詳細点検に区分でき、詳細点検については、橋梁とトンネルについて調査を行うことができた。なお、調査を実施した高速道路は、中国地方の一部区間（ある管理事務所管内の区間、道路延長102.8km）である。ただし、入手ができた過去5年間の点検内容は、日常点検、詳細点検（橋梁）、詳細点検（トンネル）のそれぞれで対象年度が異なる。また、それぞれの対象年度5年間における点検日数は、日常点検で522日、詳細点検（橋梁）で142日、詳細点検（トンネル）で72日となっている。日常点検は車上目視で実施されており、ここでは点検車の平均走行時速を60km/hと仮定した。詳細点検では、点検車両等がインターチェンジ（以下、IC）あるいはジャンクション（以下、JCT）から入り、点検を行った後に次のICあるいはJCTでUターンして元のICあるいはJCTに戻ることで、また、大型の点検機械等ではリースが多く、これらはICあるいはJCTの事務所を基地として搬入・搬出が行われることを考慮して、車両の走行に関する環境負荷量の算出を行うのは点検箇所を挟むICあるいはJCT間の距離を基として、その倍の距離（往復分）を走行距離とした。ただし、点検車両では、点検箇所まで自走して点検箇所にて機械を稼働し点検作業が行われるが、走行時の環境負荷量と点検停車時のアイドリングや機械の稼働に伴う環境負荷量をここでは区別することができなかった。

以上の条件の下で算出された環境負荷量を表 23、図 53に示す。表、図中では、詳細点検（トンネル）と詳細点検（橋梁）を合計して詳細点検として記している。表から明らかなように、点検業務に伴う環境負荷の絶対量は、それほど大きくはない。先述のとおり、ここでデータを収集した日常点検、詳細点検（トンネル）、詳細点検（橋梁）の過去5年間については、それぞれで年度が異なるため、単純にそれぞれを比較することはできないが、日常点検と詳細点検を比較したとき、CO<sub>2</sub>排出量は日常点検の方が詳細点検をやや上回るのに対して、SO<sub>x</sub>排出量、NO<sub>x</sub>排出量、ばいじん排出量は詳細点検の方が日常点検よりも圧倒的に大きい。特に、NO<sub>x</sub>排出量とばいじん排出量において、その傾向が顕著である。

日常点検では、点検車による車上点検のため、燃料としてはガソリンの使用が大半であるが、詳細点検では大型車両が多くなり燃料として軽油の使用が多くなる。このために、点検の総日数としては、詳細点検は日常点検よりも大幅に少ないものの、詳細点検では1回の点検規模が大きく、点検機械を多く使用し、軽油の使用量が多くなることから、表 23、図 53に示される結果となったものと思われる。

表 23 高速道路の点検業務に伴う環境負荷量の計算結果（道路延長102.8km、5ヶ年）

点検の種類	5ヶ年の点検総日数	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> )	SO <sub>x</sub> 排出量 (kg-SO <sub>x</sub> )	NO <sub>x</sub> 排出量 (kg-NO <sub>x</sub> )	ばいじん排出量 (kg-PM)
日常点検	522日	33,924	8.66	13.55	0.97
詳細点検	85日(トンネル)、44日(橋梁)	29,278	22.18	212.84	17.87

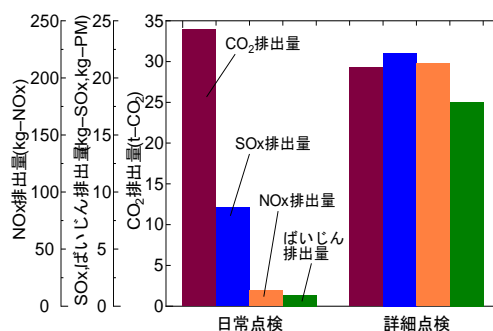


図 53 高速道路の点検業務に伴う環境負荷量の計算結果（道路延長102.8km、5ヶ年）

次に、補修業務に関する環境負荷量の結果を示す。環境負荷評価を行った環境影響要因の中から、一例としてCO<sub>2</sub>排出量、NO<sub>x</sub>排出量の計算結果をそれぞれ図 54、図 55に示す。なお、A橋では床版の解体撤去と床版の架設が一連の工事の中で行われ、両者を分離することができないため、A橋では施工・解体として示している。図 54に示すとおり、B橋と比較してA橋の単位セメント量が多く、コンクリート量も多いことから、CO<sub>2</sub>排出量が大きくなっている。材料に由来するCO<sub>2</sub>排出量のうち、約6割をセメント、残りの大半を鋼材が占めている。A橋では、PCa床版端部のループ筋を介して順次床版を接合していく構造となっているが、ループ筋の折曲げ最小半径の制約から版厚がRC床版よりも大きくなっている。そのため、A橋におけるコンクリート量がB橋よりも大きくなっている。一方、B橋では、ブレイカーやウォータージェットを用いて床版コンクリートが解体されるが、腐食等の著しい鋼材を除いて、鋼材はそのまま使用するため、材料に由来するCO<sub>2</sub>排出量の中で鋼材の占める割合は極めて低い。大半は、セメントに由来するCO<sub>2</sub>排出量である。これらの相違が、材料に由来するCO<sub>2</sub>排出量の相違となり、大きな差が生じる結果となっている。概して新設構造物では、総CO<sub>2</sub>排出量に占める個々の段階の割合が材料6～7割、施工2～3割、輸送1割程度となる。補修の場合には、B橋が端的な例となるが、異なった比率となることがわかった。材料と同程度の割合を解体が占める場合もあることから、解体工法の選定が環境負荷の低減には非常に重要となる。また、図 55に示されるように、B橋の場合には、NO<sub>x</sub>排出量の大半を解体が占めていることがわかる。この傾向は、ばいじん排出量においても示されている。このことから、解体機器類の低環境負荷化は、CO<sub>2</sub>排出量のみならず、NO<sub>x</sub>排出量やばいじん排出量の低減にも寄与することがわかる。

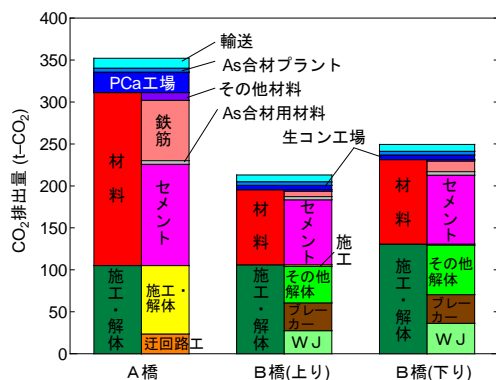


図 54 高速道路の橋梁補修に伴うCO<sub>2</sub>排出量の計算結果

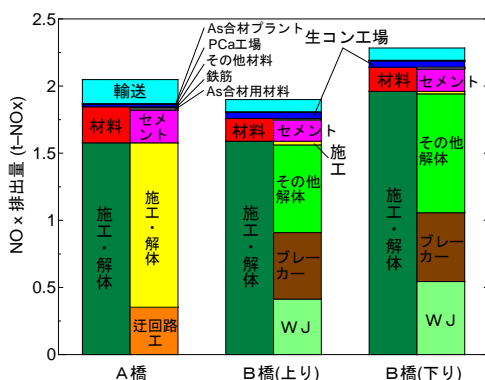


図 55 高速道路の橋梁補修に伴うNO<sub>x</sub>排出量の計算結果

以上の結果を基に、補修後の耐用年数を考慮して、長期にわたる環境負荷を算出した結果を、一例としてCO<sub>2</sub>排出量について図 56に示す。ここで、A橋の場合には、補修後の耐用年数を70年とし、B橋の場合には、10年ごとに30%の部分補修をした場合と、35年ごとに全面補修をした場合で試算を行っている。いずれの補修方法においても、補修後の耐用年数の設定値には議論の余地はあるが、A橋のライフサイクル(LC)CO<sub>2</sub>はB橋と同程度となることが予想される。このとき、NO<sub>x</sub>排出量やばいじん排出量は、A橋においてB橋の2分の1から3分の1程度にまで抑えることができる。よって、本研究において着目したCO<sub>2</sub>排出量、NO<sub>x</sub>排出量、SO<sub>x</sub>排出量、ばいじん排出量を総合的に考慮したときには、PCa床版による全面取換えの方が、従来工法よりも環境負荷低減に資すると思われる。

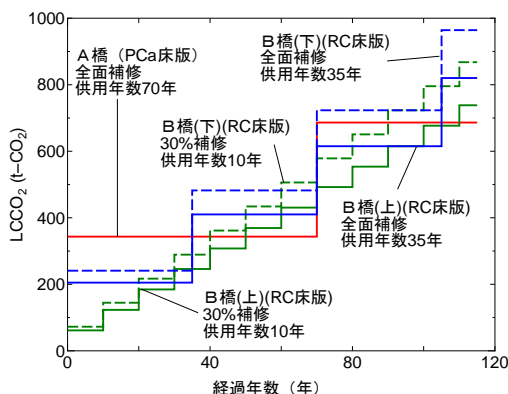


図 56 高速道路の橋梁補修におけるLCCO<sub>2</sub>の試算結果

上記の結果を基に、道路構造物の維持管理・補修の全体に関する考察を行う。ただし、ここでは道路舗装に関する環境負荷量の検討結果がないことから、別途実施している道路舗装に関する環境負荷の検討例<sup>2),3)</sup>を適用することとする。なお、この検討例は一般道を対象としたものであり、高速道とは異なる点がある。主な相違点は、アスファルトの種類の違いと、高速道では再生アスファルト合材を使用していない点である。これらの相違は認識しつつ、一般道の結果をそのまま高速道に準用できるとして、ここでは検討に用いることとする。アスファルト舗装の補修に伴う大型交通量別の環境負荷量を表 24に示す。大型車交通量を1000台/日・方向とし、道路の幅員が一律に10mであると仮定すると、アスファルト舗装の補修に伴う環境負荷量は、CO<sub>2</sub>排出量167t/km、SO<sub>x</sub>排出量387kg/km、NO<sub>x</sub>排出量691kg/km、ばいじん排出量124kg/kmとなる。

表 24 アスファルト舗装の補修に伴う環境負荷量

		CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /100m <sup>2</sup> )	SO <sub>x</sub> 排出量 (kg-SO <sub>x</sub> /100m <sup>2</sup> )	NO <sub>x</sub> 排出量 (kg-NO <sub>x</sub> /100m <sup>2</sup> )	ばいじん排出量 (kg-PM/100m <sup>2</sup> )
大型車 交通量 (台/日・方向)	100未満	966	2.051	5.373	0.715
	100以上250未満	966	2.051	5.373	0.715
	250以上1000未満	1,671	3.870	6.910	1.236
	1000以上3000未満	1,671	3.870	6.910	1.236
	3000以上	2,376	5.688	9.963	1.758

一方、点検業務に関する評価は、ある管理事務所管内を対象として行ったが、この管理事務所管内の鋼橋すべてに対して、上述した橋梁補修が実施されたとして試算すると、橋梁補修に伴う環境負荷の総量は次のようになる。

PCa床版補修を採用した場合：

CO<sub>2</sub>排出量31,300t、SO<sub>x</sub>排出量33.8t、NO<sub>x</sub>排出量166t、ばいじん排出量8.96t

RC床版補修（全面補修）を採用した場合：

CO<sub>2</sub>排出量18,000t、SO<sub>x</sub>排出量9.43t、NO<sub>x</sub>排出量168t、ばいじん排出量8.44t

以上の数値を用い、アスファルト舗装表層の補修間隔を10年としたとき、上述の管理事務所管内における点検業務、橋梁補修、舗装補修に伴う将来100年間の環境負荷量を概算すると、表 25のようにまとめられる。

表 25 中国地方の高速道路における点検・橋梁補修・舗装補修に伴う100年間の環境負荷量の試算結果（ある管理事務所管内、道路延長102.8km）

		CO <sub>2</sub> 排出量 (t-CO <sub>2</sub> )	SO <sub>x</sub> 排出量 (t-SO <sub>x</sub> )	NO <sub>x</sub> 排出量 (t-NO <sub>x</sub> )	ばいじん排出量 (t-PM)
点 検		1,260	0.617	4.53	0.377
橋梁補修	PCa床版(70年)	31,300	33.8	166	8.96
	RC床版(全面, 35年)	36,000	18.9	336	16.9
	RC床版(30%, 10年)	54,000	28.3	504	25.3
舗装補修		17,200	39.8	71.0	12.7
合 計	PCa床版(70年)	49,800	74.2	242	22.0
	RC床版(全面, 35年)	65,800	59.3	412	30.0
	RC床版(30%, 10年)	72,500	68.7	580	38.4

橋梁補修で採用する工法・補修面積によって結果は異なるものの、総じてCO<sub>2</sub>排出量、NO<sub>x</sub>排出量では橋梁補修に伴う環境負荷が大きな比率を占め、SO<sub>x</sub>排出量、ばいじん排出量では橋梁補修の工法・補修面積によって、橋梁補修と舗装補修の占める割合が大きく変化する。ただし、全橋にわたって均等に補修が繰り返されることは、経済的な観点から現実的には考えにくいことを勘案すると、巨視的には橋梁補修と舗装補修が全体の環境負荷の大半を占め、その両者が環境負荷の発生に同程度の寄与をなしているとみなせるものと思われる。

ここで、橋梁補修における環境負荷量の低減策を検討する。現実的な策として、コンクリートの結合材において混和材による多量置換を行うこと、また、A橋の場合に該当するが、プレキャストコンクリート製造時の蒸気養生を湿空養生あるいは散水養生に変更することを考える。普通ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末に置換し、プレキャストコンクリート製造時の蒸気養生を湿空養生とした場合のA橋における試算結果を、例としてCO<sub>2</sub>排出量、SO<sub>x</sub>排出量についてそれぞれ図 57、図 58に示す。A橋では、この低減策によってCO<sub>2</sub>排出量約23%、SO<sub>x</sub>排出量約39%の削減を図ることができ、NO<sub>x</sub>排出量、ばいじん排出量についてもそれぞれ約7%、約20%が削減される。一方、舗装補修では、補修間隔の長期化による環境負荷量の低減策が考えられる。その一つとして、アスファルトの高耐久化が挙げられるが、各種アスファルト混合物のインベントリデータが明らかでなく、これに関する検討は行えていない。補修間隔を長期化させるもう一つの方法としては、コンクリート舗装への変更が挙げられる。舗設時の交通規制などの制約から、現実的には実現性に乏しいかもしれないが、アスファルト舗装の耐用年数を10年、コンクリート舗装の耐用年数を29年とした試算結果では、コンクリートに使用する結合材を高炉スラグ微粉末50%置換とし、連続鉄筋コンクリート舗装とした場合、新規舗設から100年間の環境負荷量が、アスファルト舗装の場合と比較して、SO<sub>x</sub>排出量で約73%削減、ばいじん排出量で約58%削減となる結果が得られている（大型車交通量1000以上3000未満のとき）<sup>3)</sup>。ただし、CO<sub>2</sub>排出量は約25%、NO<sub>x</sub>排出量は約30%増加する。

以上の低減策の中で、橋梁補修の低減策は有効と考えられ、これを表 22のA橋の場合に適用すると、全体での環境負荷量ではCO<sub>2</sub>排出量で約15%、SO<sub>x</sub>排出量で約18%、NO<sub>x</sub>排出量で約5%、ばいじん排出量で約8%の削減が図れる計算となる。

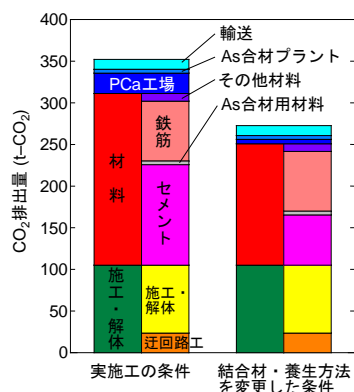


図 57 低減策におけるCO<sub>2</sub>排出量の試算結果 (A橋)



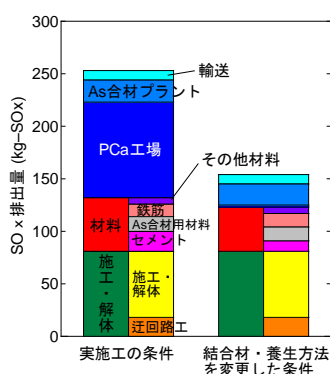


図 58 低減策におけるSOx排出量の試算結果（A橋）

表 26 社会資本整備における新しい環境政策の仕様と効果詳細

政策名	道路構造物の維持補修における低環境負荷誘導政策
政策の仕様	十分な環境負荷低減効果が見込まれる補修技術を採用する場合には、その採用によって発生する費用増分（工期の長期化に伴い発生する費用増分を含む）を相殺させる補助金支給を行う（相殺の程度は、環境負荷低減効果の程度と連動させる）。
政策の目的	今後、比重が増大すると考えられる維持補修工事の低炭素化・低環境負荷を目指すことで、社会資本整備全体のCO <sub>2</sub> 排出量削減ならびにSO <sub>x</sub> 排出量、NO <sub>x</sub> 排出量、ばいじん排出量削減をめざす。
政策導入効果と効果場所	単発の補修工事の実施では、環境負荷低減効果は限定的で、環境負荷低減効果が見込まれる補修技術を長期的に採用することによって、政策導入効果が有効となる。100年スパンで見たときには、従来技術による維持補修と比較して、補修工法の適切な選択によりCO <sub>2</sub> 排出量で約15%、SO <sub>x</sub> 排出量で約18%、NO <sub>x</sub> 排出量で約5%、ばいじん排出量で約8%を上回る削減が見込まれる。
政策の地域性および、どのように導入すれば効果がよく出るか。	補修工事に伴う交通渋滞が発生しやすい地域では、交通渋滞に伴う環境負荷が新たに発生し、政策導入効果を低下させることから、交通渋滞の発生が生じにくい地方圏での導入が効果的と考えられる。

続いて、工場の稼働状況と電力消費の定量的な相関関係について検討した結果を示す。

平成21年度までの成果を踏まえて、工場の稼働状況と電力消費の定量的な相関関係について検討した。稼働状況を示す時刻歴情報として、A～C系統は計量印字記録、D系統は骨材搬入の日報を用いた。計量印字記録の記録値のうち、各材料質量は計量値(kg)、出荷量は練混ぜ指示値(m<sup>3</sup>)を用いた。工場の稼働時間(min)は、計量印字記録に記入された最初の時刻から最後の時刻までとして算定した。

表 27 電力負荷からみた製造プロセス機器の系統(A～E)

記号	概要	接続機器（電力負荷上、主なものを抜粋）
A	工場本体棟	ミキサ、コンプレッサ、計量機器
B	セメント搬送	ブロワ（サイロ→本体棟）

C	骨材搬送	ベルトコンベア（サイロ→本体棟）
D	骨材搬入	ベルトコンベア（工場搬入口→サイロ）
E	排水処理設備	トロンメル、攪拌機、ポンプなど

注：本報では以後、表 27の記号を各系統の名称として記載した。

図 59にB系統の稼働状況と電力消費量の関係を示す。全3工場で決定係数は0.85を上回っており、セメント搬送量と電力消費には非常に高い相関があった。本測定は受電設備で行っているの、セメントブロワ以外にも雑多な電力負荷が接続されているが、電力消費量予測の観点からは、セメント搬送量のみを説明変数とすれば十分に評価可能といえる。出荷量から電力消費量が予測可能であれば、さらに簡便である。図 59（右）によると電力消費量は出荷量とも高い相関がみられる。本測定は1週間～1か月程度の短期間の結果であるので、調合が均一であるために擬似的に相関を示した可能性もある。そこで、 $1\text{m}^3$ あたりのセメント量のばらつきについて検討した（図 60 参照）。短い測定期間内においても比較的幅広い値を示しており、調合の多様さが読み取れる。すなわち、B系統においては、調合がある程度多様であっても出荷量を説明変数として電力消費量が推測可能であるといえる。なお、出荷 $1\text{m}^3$ あたりセメント量の算定には先送りモルタルなどの出荷量を含めているため、単位セメント量と異なる。

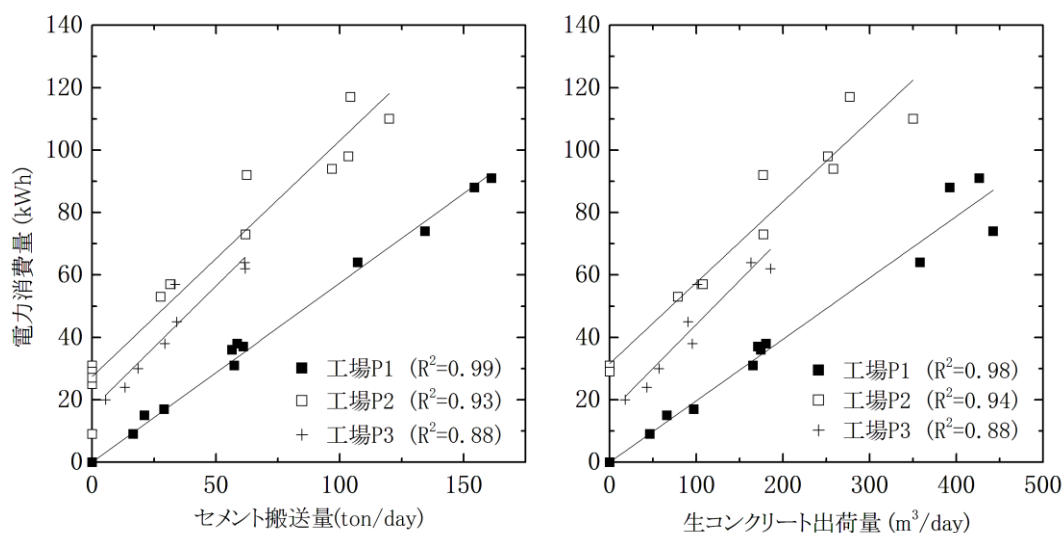


図 59 B系統の電力消費量とセメント搬送量、生コンクリート出荷量の関係

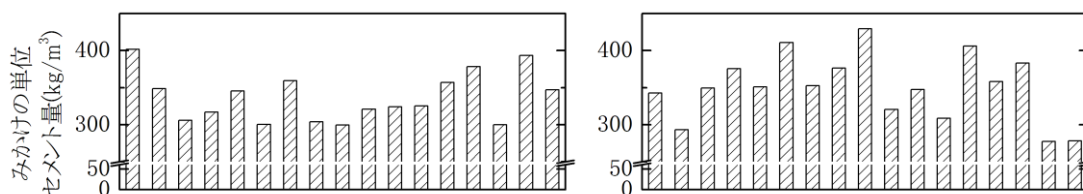


図 60 出荷 $1\text{m}^3$ あたりセメント量（日平均値の推移）（左）工場P1、（右）工場P2

結果の一部を抜粋して示しているが、他の搬送プロセスについても、生産量や材料質量と線形の関係であった。図 61にA系統の電力消費量と生コンクリート出荷量の関係を示す。A～C系統と比べると値にばらつきがみられ、出荷量以外の因子の介在が示唆された。文献18や実地調査によると、工場本体棟ではミキサ以外にコンプレッサが大きな電力負荷源であり、これが、ばらつきの原因と推測される。コンプレッサの稼働状況と直接的に対応する時刻歴情報は存在しない。しかし、コンプレッサは出荷前に起動してその日の最終清掃後に停止するのが一般的であることから、工場の稼働時間から説明可能と考えられる。また、高強度コンクリートでは一般に練混ぜ時間が長く設定されることから電力量消費が普通コンクリートより大きくなると予想される。以上の考察に基づいて、工場の稼働時間と高強度コンクリートの生産比率を説明変数とした重回帰分析を行った。念のためAIC stepwise法を用いて2次相互作用までのモデル選択について検討し、モデル式が選択されることを確認した。

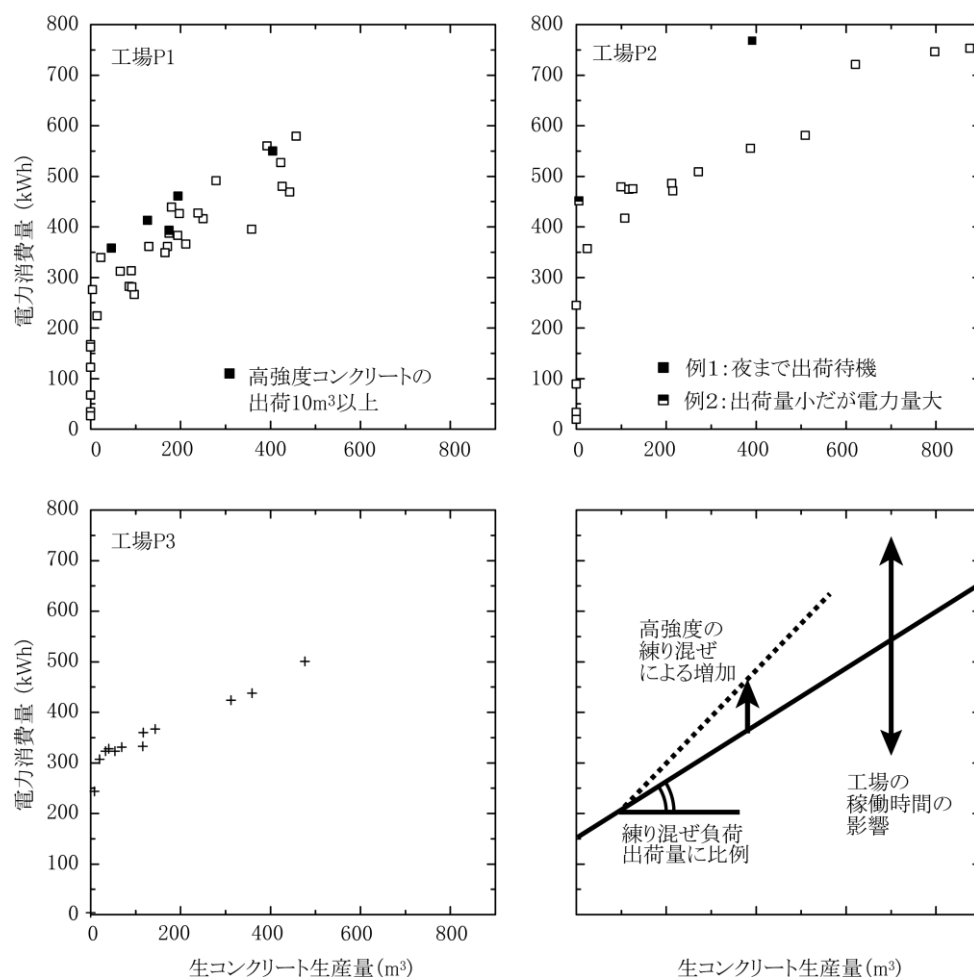


図 61 A系統の電力消費量と生コンクリート出荷量の関係  
(左上)工場P1, (右上)P2, (左下)P3, (右下)説明図

前節までの結果を踏まえると、生コンクリート工場の電力消費量は式(1)～(3)のように表現でき、式(4)の係数推定が可能である。すなわち、数理的な手順によって製造プロセスの電力消費量の定量的予測が可能である。計量印字記録と日報は日本国内のほとんどの生コンクリート工場

で記録・管理されていると期待される。したがって、本手順はほとんどの生コンクリート工場に適用可能と推察される。但し、E系統については今後のさらなる検討が必要である。

$$E_{all} = E_A + E_B + E_C + E_D + E_E + E_{事} \quad (1)$$

$$= (\alpha_1^A p_N + \alpha_2^A p_H + \alpha_3^A t + \alpha_4^A) + (\alpha_1^B m_{ce} + \alpha_4^B) + \quad (2)$$

$$(\alpha_1^C m_{ag} + \alpha_4^C) + (\alpha_1^D m_{ag} + \alpha_4^D) + (\alpha_1^E p + \alpha_4^E) + E_{事}$$

$$= E(p, m) + E(t) + E_{constant} + E_{事} \quad (3)$$

ここで、 $E_i$  :  $i$ 系統の電力消費量[kWh]。ただし  $i=all$ は工場全体、 $i=事$ は事務所棟・試験室・整備室の総和、 $i=constant$ なら  $E$ は定数、 $E(x_1, x_2)$  は  $E$ が  $x_1, x_2$ に対して線形であることを表す。 $p$  : 生コンクリートの出荷量[m<sup>3</sup>] (添え字  $H$ は高強度コンクリート、 $N$ はそれ以外。添え字無しは総出荷量)、 $t$  : 工場の稼働時間[min]、 $\alpha_j^i$  :  $i$ 系統の最小自乗推定値、 $m_k$  : 材料の重量[ton]  $k=\{ce:セメント, ag:骨材\}$

現在一般に行われているLCAでは原単位法によって環境負荷因子を算定することが多い。図 62 (左) に原単位法の説明図を示す。原単位法では、環境負荷の発生に関わる因子 (ex. エネルギー消費量, 廃棄物発生量) を機能単位の出力や入力に比例すると仮定している<sup>2)</sup>。建築分野ではこの機能単位を”工場”あるいは”工場群”として一体に捉えてきており、これまでの建設分野の検討事例では全て製品量に比例すると仮定されている。一方、式(3)と対応する形で、図 62 (右) に生コンクリート工場における電力量消費傾向の概念図を示す。式(3)・第1項は生産量や材料重量に比例する項であり、ベルトコンベヤ、セメントブロワ、ミキサなどの生産機器と対応する。第2項は工場の稼働時間に比例する項であり、コンプレッサや洗車機ポンプの一部など工場が稼働中にのみ起動される機器と対応する。第3項は混和剤タンクやスラッジ貯水槽の攪拌機など出荷量と直接的な関係がなく恒常的に利用される機器と対応する。式(3)は、原単位法では考慮しない時間的な要因(式3第2項), や固定費的な要因(式3第3項)が電力消費量の推計において無視できないことを示している。

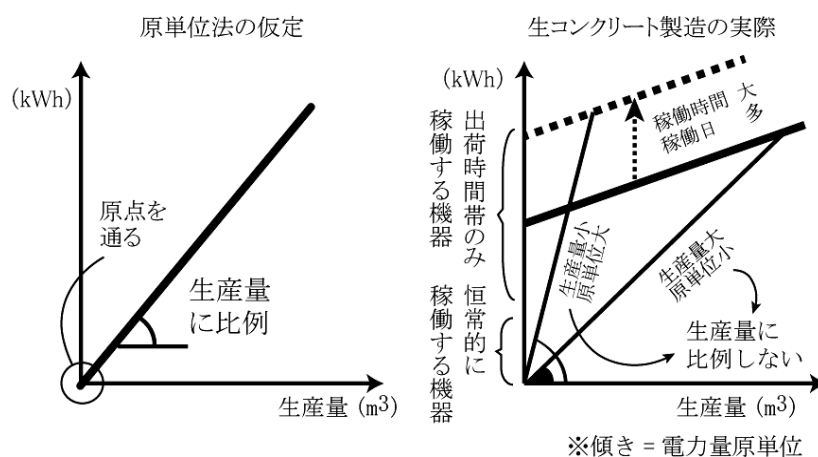


図 62 原単位法との比較からみた生コンクリート工場の電力量消費の特徴

以上の考察から、電力消費量の低減に関して、一つの可能性を見出せる。表 28に電力消費量に影響を与える因子を示す。一般的に、省エネルギーの議論では機器の違い(因子F1)のみに着目することが多い。生コンクリート製造においては、ミキサの新旧や排水処理設備方式の違いなどが

該当する。設備投資を行えば改善の可能性があるが、費用を伴うので中小企業では必ずしもすぐに採用できるものではない。工場配置の違い(因子F2)とは、ベルトコンベアの長さや敷地の高低差などに起因するプロセス特性の違いである。これは無視できない違いを生むことがあるが、工場の取組みによる改善は実質的に不可能であろう。したがって、仮に省エネルギーへの取り組みについて工場を評価するとすれば、このような因子は排除するのが妥当と思われる。また、生産量の削減(因子F3)も環境負荷低減の観点からは議論されることがある。しかし、このような産業縮小につながる環境政策は(当然のことながら)可能な限り避けるべきであろう。

表 28 電力消費量・原単位に影響する因子と削減手法

記号	電力消費量・原単位に影響を与える因子	省エネルギー手法 (非現実的な案を含む)	式(5)との対応
F1	機器の性能の違い	高効率機器への更新	第1項
F2	工場の立地・配置の違い	工場の全面改修・移転	第1項
F3	生産量の違い	受注量の削減	第1項
F4	発注タイミングの違い	発注者の工夫・協議	第2項

注：因子F3は電力消費原単位には影響しない。

以上のように、表 28のF1～3はいずれも省エネルギー対策(あるいはCO<sub>2</sub>排出削減策)の実施にあたって生コンクリート製造者側の負担となるものである。一方で、工場の稼働時間や稼働日の変更(因子F4)は、生産量の削減や設備の更新を伴わず、工場の負担が比較的小さく、発注者側への負担となるものと推測される。以上のような考察をもとに、多様な省エネルギー手法を模索する観点から、因子F4のみを対象として、省エネルギーポテンシャルに関するシナリオ分析を行った。

表 29 シナリオ分析の仮定条件

シナリオ	稼働状況
シナリオ1	生産量：平日は毎日同一の量 工場の稼働時間=10h/dayで一定
シナリオ2	生産量：平日は毎日同一の量 工場の稼働時間=8h/dayで一定
シナリオ3	月産能力の範囲で特定日に発注を集中 工場の稼働時間=8h/dayで一定
シナリオ4	月産能力の範囲で特定日に発注を集中 工場の稼働時間=最小化(1. 15分/バッチ)

注：生産無の平日＝排水処理設備の恒常的消費量＋平日の事務棟など平均値  
日曜日＝排水処理設備の恒常的消費量＋休日の事務棟など平均値

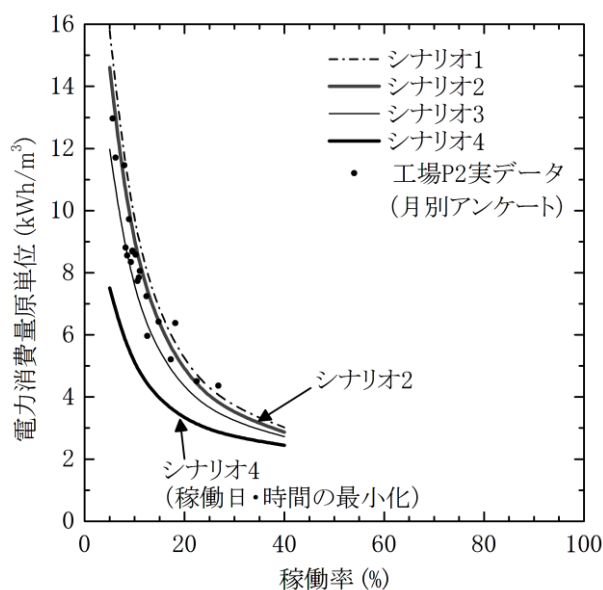


図 63 省エネルギーポテンシャルの算定（工場P2）

#### まとめ

生コンクリート製造プロセスの電力量実測に基づく分析によって、電力消費量は生産量や材料質量だけではなく、工場の稼働時間の影響を大きく受けることを見出した。また、排水処理設備では恒常的な電力量消費の比率が高く、工場全体としても無視できない電力消費量であることを示した。また、このような時間依存特性を持つ製造プロセスのエネルギー消費量推計において、原単位法は不適切であることを示した。上述の時間依存性を利用して、生産量や設備更新を伴わない省エネルギー方策が見いだせることを示した。提案した電力消費量推計式を用いて、定量的に省エネルギーポテンシャルを算定した。例えば、一般的な生コンクリート工場の稼働率10%においても電力消費量を30%以上削減できる可能性がある。このような省エネルギーは、1工場への集中した発注やタイミング制御、発注量増加による稼働率の向上など、発注者の意思決定によって実現可能である。したがって特に公共投資の比率の高い地方政策として有効と考えられる。

表 6 社会資本整備における新しい環境政策の仕様と効果詳細

政策名	生コンクリートの発注タイミングの制御政策
政策の仕様	生コンクリートの製造に伴うCO <sub>2</sub> 排出は工場への発注時間帯をの集中、発注日の集中によって生産量の増減なしで削減可能であることが明らかとなった。そこで、公共工事の現場間で調整を発注時間帯を調製することを可能にする。 ・現場間での発注時間リアルタイム評価調整システムの運用 発注時間のタイミング調整へのインセンティブ (グリーン調達・VE提案などへの採用)
政策の目的	生コンクリート製造プロセスからのCO <sub>2</sub> 排出の削減 (エネルギー消費の削減)
政策導入効果と効果場所	生コンクリートの製造を行う全国どこでも適用可能。ただし、発注タイミングの制御政策は、公共投資の比率の高い地方都市において特に効果が高いと推察される。

<p>政策の地域性および、どのように導入すれば効果がよく出るか。</p>	<p>地方都市やその周辺地域では比較的生コンクリートの需要があり、公共投資の比率も高い。したがって、公共工事の現場間の発注タイミング調整が可能な状況が生まれやすい。現場間での発注時間調整を義務付けるリアルタイム評価調整システムの開発とその運用のための政策レベルでの裏付け（発注時間の現場間調整作業の義務付けなど）によって効果が発揮される。</p>
--------------------------------------	---

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

高速道路の維持管理、補修・補強等の保全業務に伴う環境負荷量をCO<sub>2</sub>排出量、SO<sub>x</sub>排出量、NO<sub>x</sub>排出量、ばいじん排出量について明らかとし、一例ではあるが、長期スパンでみた場合にどの業務が大きな環境負荷をもたらすこととなるのかを示すことができた。また、環境負荷の低減策について考察し、低減効果を把握した。

また、通常の工業製品の製造では、一定の設定条件を維持して持続的な生産を行うため、工場の稼働状況（例 稼働時間）が著しく変動することは少ない。しかし、生コンクリート製造のような受注産業においては、稼働状況は発注者の都合によって大きく変動する。とりわけ生コンクリート製造はバッチプロセス方式であるため稼働への影響が大きい。したがって、生コンクリート製造の電力消費量推計においては、通常用いられる「原単位法」を用いた評価は適切ではないことを発見した。さらに、代替となる適切な評価手法を提示した。

### (2) 環境政策への貢献

一例ではあるが、地方圏における高速道路の点検業務、橋梁補修、舗装補修に伴う環境負荷量を把握し、環境負荷低減に効果的な低減策を考察した。本研究より得られた結果の範囲では、橋梁補修時のコンクリートに使用する結合材で普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末置換すること、プレキャストコンクリート製造で蒸気養生を用いないことが、最も効果的な環境負荷低減をもたらすと判断された。そして、この低減策を誘導できる環境政策を検討した。

また、生コンクリートの製造プロセスの時間依存性を発見し、これを利用して、生産量や設備更新を伴わない省エネルギー方策が見いだせることを示した。提案した電力消費量推計式を用いて、定量的に省エネルギーポテンシャルを算定した。例えば、稼働率5%では48.6% (7.1 kWh/m<sup>3</sup>)、関東の平均値 (10.7%) に近い稼働率10%では41.5% (3.28 kWh/m<sup>3</sup>)、稼働率20%では30.0% (1.37 kWh/m<sup>3</sup>)など、高い削減ポテンシャルがあることを示した。

## 6. 引用文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズNo. 62 コンクリートの環境負荷評価（その2）、土木学会、2004年
- 2) 河合研至・岩谷祐太・青木雄祐：各種道路舗装の補修に伴う環境負荷評価，土木学会第64回年次学術講演会講演概要集第5部，pp. 563-564，2009年9月。

## 7. 国際共同研究等の状況

なし

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

なし

<査読付論文に準ずる成果発表> (社会科学系の課題のみ記載可) なし

<その他誌上発表(査読なし)>

1) Satoshi Fujimoto, Takafumi Noguchi, Takaaki Ohkubo, Hiroshi Furui: Effect of Order Placement on Energy Efficiency in Ready-mixed Concrete Plants in Japan, Concrete Sustainability Conference, pp.1-12, Tempe, Arizona, April 13-15th, 2010

### (2) 口頭発表(学会等)

1) 藤本郷史, 野口貴文, 大久保孝昭, 古井博, 北垣亮馬, 兼松学, 長井宏憲: 生コンクリート工場の電力消費傾向に関する一考察, 2009年度日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.33, 117.1-117.4, 2010.03

### (3) 出願特許

なし

### (4) シンポジウム, セミナーの開催(主催のもの)

なし

### (5) マスコミ等への公表・報道等

なし

### (6) その他(総説)

1) 藤本郷史, 野口貴文: 資源循環シミュレーションの開発について, 建材試験情報(JTCCM Journal), Vol.47, pp.57-60, 2011.01