道路舗装の車種別限界維持管理費用の試算

田上貴士¹・瀬木俊輔²・貝戸清之³・小林潔司⁴

¹正会員 (株)オリエンタルコンサルタンツ SC 事業本部 関東支店 都市地域創生事業部門 社会政策部
(〒151-0071 東京都渋谷区本町 3-12-1)

E-mail: tagami-tk@oriconsul.com

²学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 博士後期課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: segi.shunsuke.33m@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

⁴フェロー会員 京都大学大学院教授 経営管理大学院経営管理講座 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

本研究では、道路の劣化要因が自然劣化と車両による劣化に大別されることに着目し、劣化過程を考慮した道路舗装の限界維持管理費用を試算する。舗装健全度及び路面耐力の影響を考慮した高速道路の劣化予測モデルに関する既存研究の推定結果を活用し、車両1台当たりの限界維持管理費用および自然劣化に起因する維持管理固定費用を計算する維持管理費用推計モデルを提案する。さらに、道路舗装のオーバーレイおよび打換えを対象とした適用事例を通じて、維持管理費用推計モデルの有効性について考察する。

Key Words : *marginal maintenance cost, fixed maintenance cost, road pavement, different car type, natural deterioration*

1. はじめに

道路の劣化要因は自然劣化と車両による劣化に大別されるが、特に大型車による劣化が主たる要因と考えられており、高速道路料金が無料であったドイツでは1995年1月より大型車のみ高速道路を有料とした経緯がある¹⁾。しかしながら、近年は地球環境問題の表出とともに自然劣化の影響の大きさについてクローズアップされてきている。例えば青木他(2010)²⁾は、大型車の交通量が多いほど、また道路建設後の経過年が長いほど、わだち掘れ量が大きくなる傾向にあることを理論的に示した。

現在の我が国においては、一般道路は基本的に税金により維持管理が行われ、高速道路を含む有料道路は基本的には利用者から徴収した料金を用いて維持管理が行われている。しかしながら、料金を徴収する有料道路の料金体系は主として有料道路の建設債務償還を目的として設定されており、維持管理費用を積極的に考慮したものとはなっていない。昨今の有料道路の無料開放に見られる通り、有料道路は債務償還後に無料開放され、維持管理は税金を用いて行われるようになる。また、高速道路と一般道路では道路施設の頑丈さが異なり、大型車は一般的には高速道路よりも一般道路に対してより大きなダメージを与える傾向にある。高速道路の大規模更新等に象徴されるように、道路は新設から維持管理の時代に移行しつつあり、道路の劣化要

因に着目した維持管理は避けられない。

さらに、道路の劣化過程は時間軸に関して確定的ではなく確率的に推移することが知られているが、オーバーレイ等の維持修繕工事は十数年以上で1回行われる等、頻度が少ないため、道路の維持管理費用を正確に求めるためには、実際の維持管理費用の支出だけでなく、道路の劣化過程を考慮した上で将来の維持管理も見据えたトータルな維持管理費用を算出する必要がある。特に社会的に効率的な料金設定問題を分析するに当たっては、車両1台当たりの道路の限界維持管理費用が必要となる。欧米諸国ではCost Allocation Studyと呼ばれる道路費用の負担配分に関する一連の研究により道路の限界維持管理費用を計算しているものの、日本においては道路の限界維持管理費用の公表値は筆者等の知る限り存在しない。維持管理費用を考慮した日本の高速道路の料金設定問題を分析するにあたっては、日本における車両1台当たりの道路の限界維持管理費用の値が必須である。

本論文では、道路舗装の劣化過程を表現した劣化モデルの既存研究における推定結果およびオーバーレイ費用、打換え費用を用いて、高速道路における限界維持管理費用および維持管理固定費用を試算する方法を提案する。以下、2.では既存研究および本研究の基本的な考え方を整理した。3.では維持管理費用推計モデルの理論的構築を行い、4.では適用事例を通じて限界維持管理費用および維持管理固定費用を試算し、その

妥当性について考察した。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 維持管理費用の定義

「道路の維持管理は、すなわち舗装の維持管理」と言われるほど、道路の維持管理に占める舗装の割合は大きいという³⁾。その理由として、他の土木構造物が半永久的な施設として設計されているのに対して、舗装の場合は一般的な設計期間が10年(アスファルト舗装)あるいは20年(コンクリート舗装)と比較的短く、「損傷が進めば、繰り返し修繕を行う」ことを前提とした、ある意味で消耗品的な性格を持っていることが挙げられる。

道路の構造(土工部)は、大きくは表層、基層、路盤(上層、下層)、構築路床、路床(原地盤)、路体に分類できるが、このうち表層、基層、路盤部分は舗装と呼ばれる。舗装の維持管理には維持工法と修繕工法の2種類があり、維持工法はパッチングや表面処理、切削等の簡易な工法、修繕工法はオーバーレイや切削オーバーレイ、打換え等の維持工法よりも高価な工法である。

オーバーレイは窪み等を修正するために、そのままアスファルト等を被せるが、切削オーバーレイは表層・基層の一部を軽く削り取り施工し直す。打換えは表層や基層をはがし、路盤を整えてから施工するため、新規舗装と同様である。

米国全州道路交通運輸行政官協会(AASHTO)の道路試験(1962)は、個々の車両が道路舗装へ与えるダメージは等価単軸荷重(ESAL:Equivalent Single Axle Load)の約4乗に比例している(4乗ルール)ことを導き出した⁴⁾。そのため、日本および世界の多くの国々でこの4乗ルールが用いられることとなった。この4乗ルールはPeng他(2004)⁵⁾においても採用されているが、Peng他は道路の維持管理費用の定義をTellis and Khistyに倣い、以下の4項目で構成されるとした。

- Capital Outlays(資本的支出): 機器等固定資産の補修 等
- Maintenance: 補修, 修繕 等
- Highway Service: 清掃, 光熱水費 等
- Administration: 料金収受, 交通管理 等

日本においては建設コストの一部と管理コストが維持管理費用に該当する⁶⁾。具体的には以下の4項目から構成される。

- 修繕工事: 道路の修繕に必要な工事で、新たに資産形成をする工事(機構の債務引受, 建設コストの一部であり資本的支出に相当)
- 維持修繕費: 高速道路の保守に係る費用で、主に清掃作業, 点検, 雪氷作業等の維持作業と舗装補

修, 橋梁補修などの修繕作業に係る費用(修繕作業は、新たな資産形成に係らない部分)

- 管理業務費: 高速道路の管理に係る費用で、主に料金収受業務, 交通管理業務等に係る費用
- 一般管理費等: 高速道路の運営全般に関する費用で、人件費や経費等に係る費用(ETCマイレージ割引費用を含む)

管理コストである維持修繕費, 管理業務費, 一般管理費等は毎年比較的一定額が計上されているが、修繕工事については実施された年と実施されていない年によって金額に大きな変動が生じる。そのため、維持管理費用の設定にあたっては、ある一定期間の平均値を用いることが望ましいと考えられる。なお、修繕工事の内容は幅広く、橋梁修繕から機械施設修繕, 渋滞対策まで及んでいる。具体的には、橋梁修繕, トンネル修繕, のり面修繕, 土工修繕, 舗裝修繕, 交通安全施設修繕, 交通管理施設修繕, 渋滞対策, 休憩施設修繕, 雪氷対策施設修繕, 震災対策, 環境対策, トンネル防災, のり面防災, 雪害対策, のり面付属物設置, 橋梁付属物設置, トンネル施設修繕, 電気施設修繕, 通信施設修繕, 建築施設修繕, 機械施設修繕の22項目である。

(2) 限界維持管理費用の定義

限界費用は経済学的に重要な概念であり、社会的に効率的な最適解を導く際のファクターである。Mohring and Harwitz(1962)⁷⁾は、ある条件下(道路の容量最適, メンテナンスコストの固定部分が道路のその他の固定コストに含まれる等)では、混雑料金収入が長期的に道路コストをカバーすることを示したが(Self-Financingの定理)、この混雑料金は社会的限界費用と私的限界費用の差分として表現され、交通量に関する限界費用を用いている。

高速道路の持続可能な運営を可能とする料金設定問題を分析する際には、高速道路事業者が生じる全費用を考慮することが必要である。高速道路事業者が生じる費用としては、債務償還費用, 日常的維持管理費用(施設の清掃・点検・補修など), 施設の修繕・更新費用, 事務的な費用等が挙げられる。高速道路事業者に生じない費用(混雑費用, 環境費用, 施設の修繕・更新時の交通規制がもたらす費用, 一般道路の維持管理費用など)は、効率的な料金設定を議論する際に必要となる。料金設定の効率性が問題とならない場合には、必ずしもこれらの費用を考慮する必要はないが、効率的な料金設定を議論する際には、各費用について車種別の限界費用を求めることが必要となる。

完全に効率的な料金設定を議論する場合には、全ての限界費用を考慮する必要があるものの、ある種の限界費用の大きさが無視できるほど小さい場合は必ずし

も考慮する必要はない。本研究は環境問題をテーマとしていないため、環境費用は対象外とする。修繕・更新時の交通規制費用は、通常の旅行時間コストとの重複に留意して扱う必要がある。この重複を解消するためには交通量配分を通常時と規制時で分けて行う必要がある。また、高速道路事業者が直接負担する費用（調査費、補修費等）と比較しても交通規制費用の推計精度に課題が残されていると言わざるを得ないため、本研究の限界維持管理費用には反映しないこととする。

また、交通量に着目すると、交通量が増加するほど清掃や点検、巡回等の回数が増加し日常的維持管理費用は増大する傾向にあるが、大型車交通量のみが影響を与えるのは舗装や橋梁等の土木構造物修繕費用であり、車種別の限界維持管理費用を考えるには土木構造物の修繕に着目することが第一である。

さらに、道路は大きくは土工部、橋梁部、トンネル部に分かれるが、NEXCOでは土工部が約7割、都市高速では橋梁部が約8割を占めている^{8)–12)}。トンネル部はNEXCOにおいても都市高速においても約1割程度であり、土木構造物修繕に占める割合は小さい。

なお、大型車は舗装だけではなく橋梁部へも大きなダメージを与えていると想定されているが、大型車交通量を考慮して橋梁部の劣化過程を研究した事例として坂井（2009）¹³⁾が挙げられる。坂井（2009）は小濱他（2008）¹⁴⁾の相対評価モデルを参考に大型車交通量を考慮して橋梁の維持管理のトータルコストを算出しているものの、橋梁の劣化予測モデルの研究事例が非常に少ないことから、橋梁の劣化予測モデルの更なる精度向上が待たれるところである。

以上の整理を踏まえ、本研究では、劣化予測モデルの研究事例が豊富な舗装（表層、基層、路盤）を対象とした限界維持管理費用を試算することとする。なお、交通量に着目すると、限界維持管理費用は「交通量が1台増加した時の道路舗装の維持管理費用の増分」と定義できる。維持修繕費用としてはオーバーレイおよび打換え費用を考慮するものとする。

なお、当然のことながら、道路舗装の限界維持管理費用はサービス水準によって変動する。舗装を良い状態に保てば限界維持管理費用は増加する。本研究ではLCCを最小化する社会的に最適なサービス水準における限界維持管理費用を求めることとする。

(3) 既存研究の整理

舗装の維持管理費用および限界維持管理費用の推計方法には2つのアプローチが存在する。1つ目のアプローチは舗装の維持管理費用と交通量に関するクロスセクションのデータを用いて、維持管理費用の費用関数を直接推計する計量経済学的アプローチである。も

う1つのアプローチは舗装の劣化過程を交通量を含む形式でモデル化し、このモデルの推定結果と舗装の維持管理戦略を基にして、費用関数を計算する工学的アプローチである。

計量経済学的アプローチは、舗装の維持管理費用と交通量に関するクロスセクションデータさえあれば推定できる簡便な手法であるが研究事例は多くない。Link^{15),16)}やHaraldson¹⁷⁾がOLS等を用いて研究している。ただし、計量経済学的アプローチには2つの問題点がある。1つ目は舗装技術や舗装の維持管理戦略の変化を考慮した費用関数の推計ができないことである。もう1つはデータの観測期間が短い場合、維持管理費用が舗装のオーバーレイ等の実施時期により大きく変動し、維持管理費用を正確に把握できない可能性があることである。

工学的アプローチは、舗装の劣化過程を表すモデルを推定する必要があるため、要求されるデータの量は計量経済学的アプローチよりも多くなるものの、舗装技術や舗装の維持管理戦略の変化を考慮した費用関数の推計が可能である。具体的には、交通量を考慮した舗装の劣化過程のモデル化および推定結果を基に維持管理費用の費用関数の計算を行う。この推計方法はNewbery¹⁸⁾、Small and Winston¹⁹⁾、Small et al.²⁰⁾等が最初に用いたものであり、その後の多くの研究でも同様の手法が用いられている^{21),22),23)}。

Small et al.²⁰⁾等が用いた計算手法は、舗装の劣化過程が確定的であるものとし、舗装の維持管理費用としてオーバーレイに要する費用のみを考慮するものである。これに対して、Anani and Madanat²²⁾は、オーバーレイの費用の他に、維持工法の実施に要する費用を考慮した計算手法を提案している。また、Anani²³⁾は、舗装の劣化過程が確率的であることを考慮した計算手法を提案している。

また、舗装のライフサイクルコストを考慮した研究として田村・慈道・小林（2002）²⁴⁾は、予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルールについて研究を行い、三重県を対象とした実証分析を行っている。具体的には、MCI値による劣化推定システムを通じて、利用者費用と修繕費用で構成される期待ライフサイクル費用を最小にするような状況依存的修繕ルールおよび修繕順位を決める費用便益ルール等を提案している。

限界維持管理費用については日本における研究事例は見あたらないが、米国のCost Allocation Study（1982）²⁰⁾によると、米国の地方部の州間高速道路における限界維持管理費用は9セント/マイル・ESALであるのに対して、都市部の幹線道路では66セント/マイル・ESAL、都市部の一般道路では80セント/マイル・ESALという結果が報告されている。高速道路よりも一般道路の

方が限界維持管理費用が大きく、高速道路よりも一般道路の方が約7~9倍の限界維持管理費用を要する。

また、米国州間高速道路の Cost Allocation Study (1997)²⁵⁾によると、乗用車1台の舗装の限界維持管理費用は、地方部で0セント/マイル、都市部で0.1セント/マイルである。一方、40キロポンドの4軸トラック1台の舗装の限界維持管理費用は、地方部で1.0セント/マイル、都市部で3.1セント/マイルである。また、60キロポンドの4軸トラックの舗装の限界維持管理費用は、地方部で5.6セント/マイル、都市部で18.1セント/マイルである。乗用車の限界維持管理費用は大型車と比較してかなり小さく、限界維持管理費用は軸荷重(ESAL)について非線形に増加することが確認できる。

ただし、欧米諸国を中心として実施されてきた Cost Allocation Study と呼ばれる道路費用の負担配分に関する一連の研究は、受益者負担の原則に立つとともに、道路利用により発生する費用の負担割合を計算しているが、具体的な計算過程は明らかにされていないことが多い。

(4) 本研究の位置づけ

本研究では、道路の主たる維持管理である舗装の維持管理について、道路の劣化要因が自然劣化と車両による劣化に大別されることに着目し、劣化過程を考慮した道路舗装の限界維持管理費用を試算する。舗装健全度及び路面耐荷力の影響を考慮した高速道路の劣化予測モデルに関する既存研究の推定結果を活用し、車両1台当たりの限界維持管理費用および自然劣化に起因する維持管理固定費用を計算する維持管理費用推計モデルを提案する。さらに、道路舗装のオーバーレイおよび打換えを対象とした適用事例を通じて、維持管理費用推計モデルの有効性について考察する。筆者等の知る限り、日本の道路における車種別限界維持管理費用を推計した研究事例は他に見あたらない。また、海外ではオーバーレイを考慮した研究事例は存在するが、舗装の打換えを考慮し、道路舗装全体の維持管理費用を計算した研究事例は見あたらない。なお、限界維持管理費用を求めることにより、社会的に最適な高速道路料金体系等の研究に活用することが可能であることも本研究の有用性を意味する。

3. 維持管理費用推計モデルの構築

(1) 舗装の維持修繕費用の計算手法

道路舗装は表層、基層、路盤より構成される。道路の路面健全度と舗装耐荷力の推移過程は相互に影響を及ぼし合うため、舗装の維持修繕費用を計算するためには、オーバーレイだけではなく打換えによる舗装更

新も考える必要がある。オーバーレイだけではなく打換えも考慮して維持修繕費用を計算した研究は存在しない。

本研究では、小林他(2012)²⁶⁾が提案した路面耐荷力の低下が舗装健全度に与える影響を考慮した劣化モデルを活用し、維持管理費用推計モデルを構築する。なお、小林他(2012)の研究では、舗装の最適補修更新モデルを構築しているため、LCCを最小化する最適なサービス水準における限界維持管理費用を試算することが可能である。

a) 計算の前提条件

舗装耐荷力を離散的状態変数 $s(s=1, 2, \dots, S)$ を用いて表現する。レーティング s は、 s の値が大きくなるほど舗装耐荷力が低下していることを意味する。道路施設の建設・更新時点においては、 $s=1$ である。 $s=S$ の場合は、舗装耐荷力が使用限界に到達していることを意味する。

同様に、路面健全度を I 個のレーティング ($i=1, 2, \dots, I$) で記述する。道路施設の建設・更新時点および路面の補修時点においては、 $i=1$ が成立する。 $i=I$ は路面の使用限界を表す。

舗装耐荷力 $s(s=1, 2, \dots, S-1)$ のハザード率 λ^s を次のように表す。

$$\lambda^s = \exp(x\beta^s) \quad (1)$$

ここで、 x は説明変数ベクトル(大型車交通量を含む)、 β^s は係数パラメータベクトルである。

次に舗装耐荷力 s を与件としたときの健全度 $i(i=1, 2, \dots, I-1)$ のハザード率 $\mu^i(s)$ を次のように表す。

$$\mu^i(s) = \exp(\gamma_0^s y \gamma^i) = \exp(\gamma_0^s \mu^i) \quad (2)$$

ここで、 γ_0^s は舗装耐荷力 s に依存する路面劣化速度の異質性を表すスケールパラメータ、 y は説明変数ベクトル(大型車交通量を含む)、 γ^i は係数パラメータベクトルである。

b) 維持修繕費用推計モデル

以下の6つの仮定の下に舗装の維持修繕費用推計モデルを定式化し、Dynamic Programming(動的計画法)の考え方をを用いて計算を行う。

- (a) 舗装の維持工法・修繕工法としてオーバーレイおよび打換えを考える
- (b) 路面健全度 i が使用限界 I に達するとオーバーレイが行われる。オーバーレイが実施されると、路面健全度が1に回復する。オーバーレイを実施するたびに、事業者には c_o の費用が生じる。
- (c) 舗装耐荷力 s が使用限界 S に達すると打換えが行われる。打換えが実施されると、路面健全度 i が1に、耐荷力 s が1に回復する。打換えを実施するたびに、事業者には c_r の費用が生じる。

- (d) 交通量 (ESALs 等) は通時的に一定の値 Q とする
(e) 実質金利は時間を通じて一定であり, 年間 ρ % である.
(f) 道路は永久に供用され続ける

ある時刻において, 舗装耐荷力と路面健全度の組が (s, i) であることが観測されたときに, その時刻以降に発生する修繕・更新費用の割引現在価値の期待値を $C_{s,i}$ で表す. $C_{s,i}$ は以下の線形連立方程式 (3)-(6) の解として求められる.

$$\begin{aligned} \rho C_{s,i} &= \lambda^s [C_{s+1,i} - C_{s,i}] \\ &\quad + \mu^i (s) [C_{s,i+1} - C_{s,i}] \\ (1 \leq s \leq S-2, 1 \leq i \leq I-2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho C_{s,I-1} &= \lambda^s [C_{s+1,I-1} - C_{s,I-1}] \\ &\quad + \mu^{I-1} (s) [c_o + C_{s,1} - C_{s,I-1}] \\ (1 \leq s \leq S-2) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho C_{S-1,i} &= \lambda^{S-1} [c_r + C_{1,1} - C_{S-1,i}] \\ &\quad + \mu^i (S-1) [C_{S-1,i+1} - C_{S-1,i}] \\ (1 \leq i \leq I-2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho C_{S-1,I-1} &= \lambda^{S-1} [c_r + C_{1,1} - C_{S-1,I-1}] \\ &\quad + \mu^{I-1} (S-1) [c_o + C_{S-1,1} - C_{S-1,I-1}] \end{aligned} \quad (6)$$

また, 長期定常状態においては, 舗装耐荷力と路面健全度の組が (s, i) である舗装の割合 $p_{s,i}$ は一定の値に収束するため, $p_{s,i}$ は以下の線形連立方程式 (7)-(10) の解として求められる.

$$\sum_{s=1}^{S-1} \sum_{i=1}^{I-1} p_{s,i} = 1 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \lambda^{s-1} p_{s-1,i} + \mu^{i-1} (s) p_{s,i-1} \\ &\quad - [\lambda^s + \mu^i (s)] p_{s,i} \\ (2 \leq s \leq S-1, 2 \leq i \leq I-1) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \lambda^{s-1} p_{s-1,1} + \mu^{I-1} (s) p_{s,I-1} \\ &\quad - [\lambda^s + \mu^1 (s)] p_{s,1} \\ (2 \leq s \leq S-1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \mu^{i-1} (1) p_{1,i-1} - [\lambda^1 + \mu^i (1)] p_{1,i} \\ (2 \leq i \leq I-1) \end{aligned} \quad (10)$$

$p_{s,i}$ と $C_{s,i}$ の積の和を計算すれば, 長期定常状態における舗装の修繕・更新費用の割引現在価値の平均値 C を計算できる.

$$C = \sum_{s=1}^{S-1} \sum_{i=1}^{I-1} p_{s,i} C_{s,i} \quad (11)$$

この数値に実質金利 ρ を掛ければ, 修繕・更新費用の割引現在価値を 1 年間当たりの数値に直すことができる. 以上の計算過程を関数と見なせば, 年間の舗装の

修繕・更新費用 ρC と大型車交通量 Q の関係を $\rho C(Q)$ という関数形で表現できる. 数値微分を用いれば, 大型車交通量に関する道路舗装の限界維持管理費用 MC は以下のように計算可能である.

$$MC = \rho \frac{C(Q + \Delta q) - C(Q - \Delta q)}{2\Delta q} \quad (12)$$

4. おわりに

本研究では, 舗装健全度と路面耐荷力の両方の劣化を考慮した道路舗装の維持管理費用推計モデルの枠組みについて定式化した. 道路舗装の維持管理費用の試算結果及び考察等の本研究の結論については講演時に発表する.

参考文献

- 1) 古川浩太郎: 高速道路の通行料金制度 - 歴史と現状 -, レファレンス, pp.99-118, 2009 年 10 月.
- 2) 青木一也, 小田宏一, 児玉英二, 貝戸清之, 小林潔司: ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価, 土木技術者実践論文集, Vol.1, No.1, pp.40-52, 2010.
- 3) 元田良孝, 中村俊行, 塚田幸広, 久保和幸: 技術士を目指して (建設部門) 選択科目 7 巻 道路, 山海堂, 2006.
- 4) Newbery, David M.: Road Damage Externalities and Road User Charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.
- 5) Chu, C. and Tsai, J.: Road pricing models with maintenance cost, *Transportation*, Vol.31, pp.457-477, 2004.
- 6) 独立行政法人 日本高速道路保有・債務返済機構: 高速道路機構ファクトブック 平成 18 年度版, 2006.
- 7) H.Mohring and M.Harwitz: Highway Benefit: An Analytical Framework, Northwestern University Press, 1962, H. モーリング, M. ハーウィッツ: 道路経済学 - 便益の分析 -, 鹿島研究所出版会, 1968.
- 8) 西日本高速道路株式会社: 高速自動車国道中央自動車道西宮線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 営業年度), 平成 24 年 8 月.
- 9) 中日本高速道路株式会社: 高速自動車国道中央自動車道富士吉田線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 営業年度), 平成 24 年 8 月.
- 10) 東日本高速道路株式会社: 高速自動車国道北海道縦貫自動車道函館名寄線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 営業年度), 平成 24 年 8 月.
- 11) 阪神高速道路株式会社: 大阪府道高速大阪池田線等及び京都市道高速道路 1 号線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 事業年度), 平成 24 年 8 月.
- 12) 首都高速道路株式会社: 都道首都高速 1 号線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 事業年度), 平成 24 年 8 月.
- 13) 坂井康人: ロジックモデルを用いた都市高速道路の維持管理マネジメントに関する研究, 京都大学博士論文, 2009 年 8 月.
- 14) 小濱健吾, 岡田財一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマ - キング, 土木学会論文集 A, Vol.64, No. 4, pp.857-874, 2008.
- 15) Link, H.: An Econometric Analysis of Motorway Renewal Costs in Germany, *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.19-34, 2006.
- 16) Link, H.: Road Econometrics - Case Study on Re-

- newal Costs of German Motorways, *Annex A1 a of Deliverable 10 of Unite*, Funded by the European Commission 5th Framework - Transport RTD, ITS, University of Leeds, 2002.
- 17) Haraldsson, M. : Marginal Costs for Road Maintenance and Operation - a Cost Function Approach, *Working Papers No.2007:7*, Swedish National Road & Transport Research Institute (VTI), 2007.
 - 18) Newbery, David M.: Road Damage Externalities and Road User Charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.
 - 19) Small, K. A. and Winston, C. : Optimal Highway Durability, *The American Economic Review*, Vol.78, No.3, pp.560-569, 1988.
 - 20) Small KA., Winston C, Evans CA : Road Work - A New Highway Pricing and Investment Policy, Washington.DC: The Brookings Institution, 1989.
 - 21) Lindberg, G. : Marginal Cost of Road Maintenance for Heavy Goods Vehicles on Swedish Roads, *Annex A2 of Deliverable 10 of Unite*, Funded by the European Commission 5th Framework - Transport RTD, ITS, University of Leeds, 2002.
 - 22) Anani, S. B. and Madanat, S. M. : Estimation of Highway Maintenance Marginal Cost under Multiple Maintenance Activities, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.136, No.10, pp.863-870, 2010.
 - 23) Anani, S. B. : Revisiting the Estimation of Highway Maintenance Marginal Cost, *Ph. D. Dissertation*, University of California, Berkeley 2008.
 - 24) 田村謙介, 慈道充, 小林潔司 : 予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルール, *土木計画学研究・論文集*, No.19, pp.71-82, 2002年9月.
 - 25) Federal Highway Administration : *Addendum to the 1997 Federal Highway Cost Allocation Study Final Report*, United States Department of Transportation, 2000.
 - 26) 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之, 松村泰典 : 舗装構造の最適補修更新モデル, *土木学会論文集 E1 (舗装工学)*, Vol.68, No.2, pp.54-58, 2012.

(平成 25 年 8 月 1 日 受付)