

橋梁のライフサイクルにおける環境負荷の定量的評価について

Study on Quantitative Assessment of Lifecycle Environmental Impact on Bridge Structures by using of Data Envelopment Analysis

北海道大学大学院工学研究科○学生員 大野良輔 (Ryousuke Ohno)
北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡卓司 (Takashi Obata)
北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

1. まえがき

近年においては、人間の生産活動等による地球規模の環境破壊が大きな社会問題となりつつある。中でも地球温暖化は、産業革命以降における二酸化炭素等の温室効果ガス濃度の急激な増加によって極めて深刻な状況となっており、2001年にまとめられた気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第3次評価報告書によると、20世紀中、地球の平均地上気温は $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 上昇したものと評価されている。さらに、平均地上気温は1990年から2100年の間に $1.4 \sim 5.8^{\circ}\text{C}$ 上昇すると予測されている。我が国における温室効果ガス排出量は2000年の時点で世界第4位と非常に多く、その中で産業部門(建設部門を含む)が我が国における CO_2 排出量に占める割合は、約38%に達している¹⁾。そのため橋梁等の社会基盤施設整備に関しても、その建設・維持管理等のライフサイクル全般における環境負荷低減への努力を進めることが極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、交通ネットワークのライフサイクルスパンを200年とし、その期間における橋梁システムの環境負荷およびコストを算出して包絡分析法 (Data Envelopment Analysis, 以下、DEA と称す) を適用することにより、ライフサイクル全体での環境負荷低減を目指した橋梁の定量的な評価方法に関して検討を試みることを目的とする。具体的には、まず現状の橋梁システムの環境負荷を確認するために、鋼桁橋10種類とPC橋1種類について、環境負荷低減対策を行わなかった場合の、ライフサイクル全体での CO_2 排出量とコストを算出する。その結果を用いて DEA による解析を行い、現状の橋梁システムにおける各種橋梁形式の効率性ならびに改善案を求める。次に、上記で得られた各橋梁の改善案の数値を分析することにより、環境性能を向上させるためにはどのパラメータをどのように改善すれば良いかを検討し、リサイクル材、高性能鋼材の使用や寿命の延長を仮定したいくつかのシナリオを想定する。これらのシナリオに対して、再度それぞれのライフサイクル全体における CO_2 排出量等を求め、DEA 解析によって定量的な環境性能の改善効果の評価を試みる。したがって、本研究ではこれらの解析結果から、橋梁のライフサイクル全体を通じて及ぼす環境負荷の定量的評価、ならびにその改善方法と効果に関して検討を加えたので、ここに報告するものである。

2. 橋梁のライフサイクル

本研究では、橋梁のライフサイクル全体での環境負荷およびコストの試算を行うために、橋梁のライフサイクルを初期投資段階、維持管理段階、廃棄・架替え段階の3つの段階に分類する。なお、橋梁の架替えに至るまでの寿命に

ついては、立地条件、施工技術等の差異によって一概に決定することは非常に困難であるが、本研究では、橋種、使用材料に関わらず寿命を75年として解析を実施した。

また、長期間のコスト算定においては一般に社会的割引率(以下、割引率と称す)が問題となる場合が多い。平成16年2月には、国土交通省において「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針」が策定され、全事業について当面4%を適用することが決められている²⁾。よって、本研究のLCC計算においても、割引率4%を考慮した場合と考慮しない場合の両者について解析を行うこととした。以下に本研究における各段階について述べる。

まず、初期投資段階においては、橋梁の建設時における CO_2 排出量およびコストを算出する。具体的には、 CO_2 排出量は、試設計により得られた鋼、コンクリート、アスファルト、塗料の各重量に、土木学会環境委員会原単価表³⁾の原単位を乗じて算出した。コストに関しても、試設計により得られた鋼、コンクリート等の各重量に積算資料⁴⁾の価格を乗じることで求めた。さらに主桁の製作費については、溶接延長その他の工費からも推定できるため、それらを参考に計算を行った。PC橋については、鋼橋から材料費と制作費の比を算定し、これを参考に制作費を加算することとした。

次に、維持管理段階においては、各部の耐用年数到来時にそれらを取り替えることによって、橋梁自体の寿命まで供用していくと仮定した。本来は、橋梁の寿命と同様、各部の耐用年数を固定して考えることは難しいが、文献5),6),7)等を参考にして耐用年数を設定し、対象とする部位が耐用年数に到達した場合に、更新に伴う CO_2 排出量とコストを加算することとした。本研究で仮定した部位とその劣化寿命を表-1に示す。

廃棄・架替え段階において、 CO_2 に関しては、旧橋撤去後に同形式の橋梁を架替えるものと仮定して、建設段階と同量の CO_2 排出量を加えることとした。廃棄・架替えに関わる施工による環境負荷は除外している。コストに関しては、文献7)において、橋梁の架替え(撤去および新設)にかかるコストは建設段階の3倍程度(2.8倍)になると記述されており、本研究においても、同様にこの係数に基づいて算出を行った。

表-1 各部材の寿命

	従来型鋼橋	少数主桁橋	コンクリート橋
塗装	10年	10年	
床版	40年 (RC)	100年 (PC)	100年 (PC)
橋面舗装	15年	15年	15年
伸縮継手	20年	20年	20年

3. 解析手法

3. 1 包絡分析法

本研究では橋梁システムの環境負荷の効率性解析に包絡分析法 (DEA) を用いることとした。DEA とは、同種の入出力関係を有する複数の事業体、活動、製品等に対して、比率尺度を用いて効率性を比較する方法であり、最も高い効率性を有する活動を基準とした効率値と、効率性が劣った活動に関する入出力の改善案が結果として得られる手法である。DEA では、通常、解析手法は 2 段階線形計画問題 (LP) に帰着する。DEA における最も基本的なモデルである CCR モデルは、以下のような LP を解くことによって所定の解を得ることができる^{8,9)}。

$$\begin{aligned} \text{第1目的関数} & \min \theta \\ \text{第2目的関数} & \min -es_x - es_y \\ & \theta x_0 = X\lambda + s_x \\ \text{制約条件} & y_0 = Y\lambda - s_y \\ & \theta \geq 0 \quad \lambda \geq 0 \quad s_x \geq 0 \quad s_y \geq 0 \end{aligned}$$

ここで、 θ は対象とする問題の効率値であり、一般に D 効率と称する。 X, Y は各活動等の入出力、 λ は各活動に対する最適解となり、各活動に対する優位集合とその度合いを表す値である。また s_x および s_y は、スラック解と呼ばれ、それぞれ入力之余剰、出力の不足を表す変数である。さらに、上記の LP を解くことによって得られる最適基底から、入力への最適ウエイト v と出力への最適ウエイト u が算出される。上述の LP の解において、最適解 (λ, s_x, s_y) を最大スラック解と呼ぶ。この最大スラック解において、 $s_x=0, s_y=0$ を満たす活動をスラックレス活動という。また、最適解 ($\theta, \lambda, s_x, s_y$) において、 $\theta=1$ かつスラックレスであるとき、その活動は効率的であり、それ以外のとき非効率的であると定義される。なお、DEA における入出力とは、一般の解析におけるそれとは異なり、事業体等の活動において、資源・資本の投入を入力と呼び、それによる便益の産出を出力と称する。本研究ではこれらのプロセスに関して、プログラミングを実施し解析を行った。

3. 2 解析対象の橋梁構造物

本研究における解析対象の橋梁構造物は、一般国道等に架かる中規模の橋を想定して、橋長 90m、幅員 11.8m の直線橋 11 種類 (鋼橋は 4 主桁橋、5 主桁橋、2 箱桁橋、1 箱桁橋、2 主桁橋 (少数主桁橋) が、それぞれ 2 径間と 3 径間で 10 種類、コンクリート橋についてはポストテンション方式 3 径間 PC 橋の 1 種類) を用いることとした。以上の橋梁群について汎用設計ソフトを用いて上・下部構造の試設計を行い、CO₂ 排出量および工費を算出した。

4. ライフサイクル CO₂ 排出量および LCC の算出

以上のようにして、本研究では現状の橋梁システムにおける各種橋梁形式の、200 年を想定したライフサイクル全体での CO₂ 排出量および LCC の算出を試みた。図-1 はライフサイクル全体での CO₂ 排出量であり、図-2 および図-3 はそれぞれ割引率を考慮した場合と考慮しない場合の LCC の算定結果である。

図-1 における CO₂ 排出量の算定結果からは、No.11 の 3 径間 PC 橋が最も環境負荷が小さい橋梁形式であるという

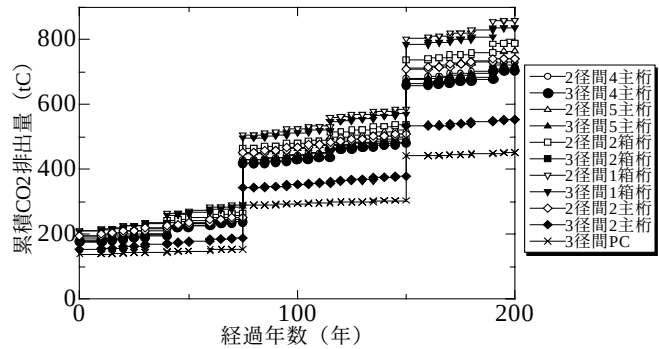


図-1 ライフサイクル環境負荷

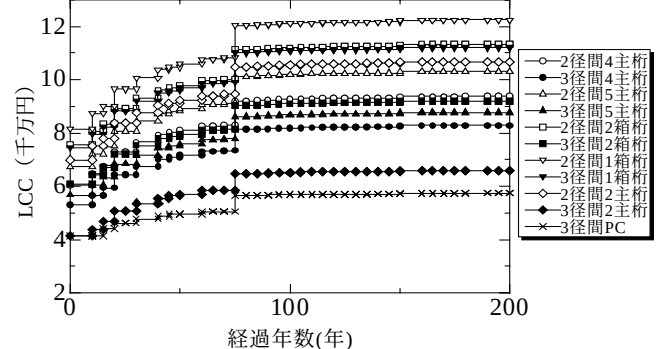


図-2 割引率を考慮した LCC

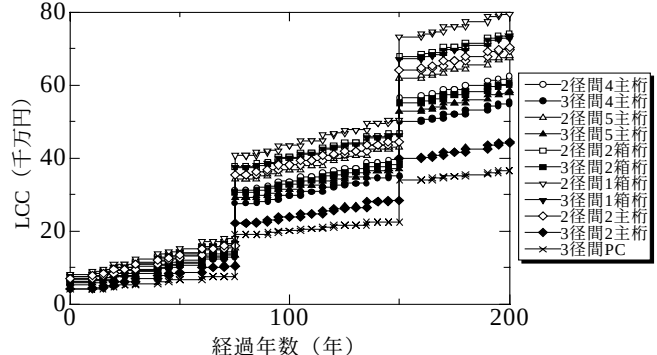


図-3 割引率を考慮しない LCC

結果となった。鋼橋に関しては No.10 の少数主桁橋の環境負荷が小さく、従来型鋼橋は両者と比して CO₂ 排出量が大い橋梁形式であることがわかる。LCC については、図-2 ならびに図-3 を比較すると、割引率を考慮した場合は 100 年程度経過すると維持管理に関わるコストの影響は非常に小さくなり、初期投資段階での差のみとなっている。LCC そのものは、No.11 の 3 径間 PC 橋が最もコストの低い橋梁形式となり、No.10 の少数主桁橋のコストが次に低く、従来型鋼橋においては比較的割高となる結果が得られた。

5. 現状の橋梁システムに対する環境負荷の定量的解析

以上より得られた結果を用いて、現状の橋梁システムに対して DEA による解析を行った。200 年経過時の CO₂ 排出量およびコストを入力とし、出力はその橋梁が入力に対する製品として 1 を与えることとした。また、供用期間の延長による効果を検討するために、全ての橋梁で 75 年を出力値として加えている。解析結果の一例として、表-2 に割引率を考慮した場合の D 効率を、表-3 に改善案の一部を示す。

表-2 の D 効率に着目すると、No.11 の 3 径間 PC 橋が D 効率 1.0 であり、他の全ての橋梁に対する優位集合となっていることから、現状の橋梁システムでは最も効率的とい

う結果が得られた。これに対して、鋼橋としてはCO₂排出量とコストの低いNo.10の3径間2主桁橋が、PC橋に比して87%程度のD効率値となっており、PC橋と同程度の環境性能を有するものと判断される。また、No.2の橋梁もD効率70%程度と、PC橋に対して大幅に劣っている訳ではなく、十分に改善の余地があると考えられる。

次に表-3の入出力に関する改善案について考察を加える。従来型鋼橋の中で最も効率性の高いNo.2の3径間4主桁橋においては、入力改善案ではCO₂排出量を約36%およびコストを約31%削減することで、効率性が改善されるという結果となっている。また、出力改善案に着目すると、CO₂排出量で約8%、寿命を約33年延長し、製品をおよそ1.4橋とすればPC橋と同等の効率性が得られる。橋梁が1橋以上必要となる原因は、コストダウンが必要であることと同義であり、CO₂削減と寿命の延長に加えて40%程度コストを抑えれば、効率性の改善が期待できる。一般に、DEAにおいては、入力における改善案、あるいは出力の改善案のどちらか一方を実現することで、効率性の向上に対して同様の効果を期待することができる。本研究の結果からは、出力の改善案ではCO₂とコストの削減ならびに寿命の進延をバランス良く行えば、環境性能の向上には入力を改善する場合に比して高い効果が得られると推定されることから、本研究では出力の改善案に着目し、環境性能を向上させるためのいくつかのライフサイクルシナリオを設定して、橋梁システムの環境負荷低減対策について検討を試みる。

6. ライフサイクルシナリオの設定

以上の結果から、本研究では環境性能を向上させるための4つのライフサイクルシナリオを設定する。ここで、環境負荷低減対策を行っていない現状の橋梁システムについての解析を以下シナリオ1と称する。

まず鋼についてはリサイクルが可能であり、リサイクル材(電炉製鋼)を使用した場合環境負荷の低減が予想され、表-5の出力の改善案を満たすと考えられることから、架替え時には撤去した橋梁の鋼材を全てリサイクル材として再利用すると仮定したシナリオを設定し、これをシナリオ2とする。ここで、リサイクル材を用いた場合の工費に関してはバージン材を用いた際と同一とした。

次に、鋼橋に関しては、耐候性鋼材、PC床版を使用することで、初期投資は一般の鋼橋と比して若干大きくなるもののメンテナンスが軽減され、ライフサイクル全体ではコストの大幅な削減とCO₂排出量の削減が見込まれる。耐候性鋼材のコストは文献10)を参考に普通鋼塗装使用のコストを1.05倍することにより求めた。CO₂に関しては、本研究においては普通鋼材を用いた際と同一であると仮定した。このことから、出力の改善案におけるCO₂排出量およびコストの削減を実現するために、架替え時において全ての鋼橋に耐候性鋼材を使用し、加えて従来型鋼橋にはRC床版に替えてPC床版を使用すると仮定したシナリオを設定し、これをシナリオ3とする。

シナリオ4として、今後のリサイクル技術の発展を想定して、リサイクル材を用いて耐候性鋼材を作製できるものと仮定し、架替え時において鋼橋に使用するものとする。また、加えて従来型鋼橋にはRC床版に替えてPC床版を使用すると仮定する。つまり、シナリオ2とシナリオ3を

表-2 現状の橋梁システムにおけるD効率

橋梁No.	1	2	3	4	5	6
D効率	0.6162	0.6937	0.5884	0.6550	0.5700	0.6332
橋梁No.	7	8	9	10	11	
D効率	0.5237	0.5374	0.6053	0.8713	1.0000	

表-3 現状の橋梁システムにおける改善案

No.	入力データ		入力を改善		出力を改善	
	単位	値	効率値	差	効率値	差
2	CO ₂ 排出量 (t)	474.67	303.138	-171.530	437.010	-37.658
	LCC (千万円)	8.23	5.711	-2.522	8.233	0.000
	製品 (橋)	1.00	1.000	0.000	1.442	0.442
	寿命 (年)	75.00	75.000	0.000	108.122	33.122

同時に行うと仮定するものであり、建設時のCO₂削減に加え維持管理段階でのコストおよび環境負荷の削減がなされることで、鋼橋においてCO₂排出量およびコストの大幅な減少による効率性の改善が予想される。

シナリオ5として、表-3のNo.2の橋梁における出力の改善案をもとに、鋼橋の寿命を約30%延長して耐用年数100年と仮定する。この際、鋼橋のみ耐用年数を100年とし、コンクリート橋は75年としたが、実際に適切なメンテナンスにより100年経過している鋼橋も存在していること、さらに道路橋示方書¹¹⁾にも100年程度の供用期間を想定することが明記されているため、このように設定することは問題がないと判断した。このシナリオ5では、200年のライフサイクルスパンを考慮すると、寿命75年の場合では架替え回数2回であるが、寿命100年では架替え回数1回となりCO₂排出量等が削減されることから、長寿命化の効果を詳細に検討することができると考えられる。

以上、4つのシナリオを設定し、ライフサイクル全体におけるCO₂排出量等をシナリオ1と同様に算出した。

7. 各シナリオに対する解析結果とその考察

以上より得られた結果を用いて、4つのシナリオに対してそれぞれDEAによる解析を行うことで環境性能の改善効果の定量的評価を試みた。現状の橋梁システムにおける解析を含めた5つのシナリオにおける各橋梁形式のD効率の推移を、割引率を考慮した場合について図-4に、考慮しない場合について図-5に示す。

まず図-4、図-5のシナリオ2に着目すると、リサイクル材の使用により、CO₂排出量が15%程度削減されたことで、シナリオ1と比して、No.10の橋梁を除く全ての鋼橋において同程度の改善がなされていることがわかる。また、リサイクル材の使用によるCO₂削減効果は鋼重に比例して大きくなるため、鋼重の大きい2径間の鋼橋において、より有効な効果となっている。このことから、リサイクル材の使用は鋼重の大きい橋梁においてはかなり有効な改善となり、No.10のような鋼重が比較的小さな橋梁ではCO₂削減だけでは有効な改善とはならないことが判明した。

シナリオ3に着目すると、全ての鋼橋においてシナリオ1と比して10%程度の効率性改善がなされているが、シナリオ2と比較すると効率性が劣っていることがわかる。このことから、耐候性鋼材、PC床版の使用による維持管理段階での環境負荷およびコストの削減効果は、ある程度の改善は期待できるものの、メンテナンスフリーと仮定したコンクリート橋との初期投資段階における差は変わらない

ことから、初期投資段階での環境負荷低減と組み合わせることで、より有効な対策になると考えられる。

次に、シナリオ4に関しては、大半の鋼橋が80%以上の効率値となっており、特にNo.10の3径間2主桁橋においてはPC橋とほぼ同程度の効率性を示している。よって、リサイクル材を用いた耐候性鋼を架替え時において鋼橋に使用するものとし、加えて従来型鋼橋にはRC床版に替えてPC床版を用いることで、初期投資段階での環境負荷低減と維持管理段階での環境負荷およびコストの削減がなされ、従来型鋼橋においては概ね85%の効率性を実現でき、特に3径間少数主桁橋では、PC橋に匹敵する環境性能を有することが判明した。

シナリオ5は、鋼橋の寿命を100年に延長して解析を行ったものである。この結果は、図-4の割引率を考慮した場合と図-5の考慮しない場合とでは、PC橋の効率性が大きく異なっている。割引率を考慮しない図-5においては、200年のライフサイクルスパンで鋼橋の寿命を100年に延長して考えることにより、架替え回数が75年の寿命に比して1回減少し、全ての鋼橋において寿命の延長による出力の改善と同時にCO₂排出量およびコストが20%程度削減されたことで、No.10の2主桁橋のD効率値が1となり、他の橋梁の優位集合となっていることから、これが最も効率的であるという結果となった。ここで、PC橋と従来型鋼橋との比較を行えば、PC橋のD効率0.9171に対して、No.2ならびにNo.6の橋梁においては、PC橋に比して85%程度の効率値を有しており、ライフサイクル全体での環境負荷対策を行ったシナリオ4と同程度の効率性を持つことが判明した。

以上の結果について考察を加えると、200年程度のライフサイクル期間における戦略的なシナリオを考慮することで、地球環境に対する影響を非常に低減できる可能性を有することが判明した。すなわち、架替えの際に、その材料としてリサイクル材、耐候性鋼材等を使用することや、適切なメンテナンスにより橋梁自体の耐用年数を100年程度にすることで、コストと環境性能に関する効率性を大幅に改善できると考えられる。特にリサイクル材を使用した耐候性鋼材およびPC床版の使用と寿命の延長による改善効果は大きく、コンクリート橋に限らず、少数主桁橋や従来型の鋼橋においてもかなりの環境性能の向上が期待できるものと思われる。

8. あとがき

以上のように本研究は、ライフサイクル全体における環境負荷の低減を目指した橋梁構造物のあり方に関して基礎的な検討を試みるため、鋼およびコンクリートを材料とした橋梁システムについて、まず現状の橋梁システムにおける環境負荷を把握するためにCO₂排出量等のデータをパラメータとしてDEAによる解析を実施し、その結果に基づき各種橋梁形式の比較を行った。次にDEAにより得られる改善案をもとに4つのライフサイクルシナリオを設定することで、橋梁のライフサイクル全体を通じて及ぼす環境負荷の定量的評価、ならびにその改善方法と効果に関して検討し考察を加えたものである。解析結果からは、DEAでは効率性の比較が容易に可能であることから、環境負荷への影響度が非常に理解し易い形で表現されていることがわかる。また、DEAでは改善案として具体的な数値目標を提

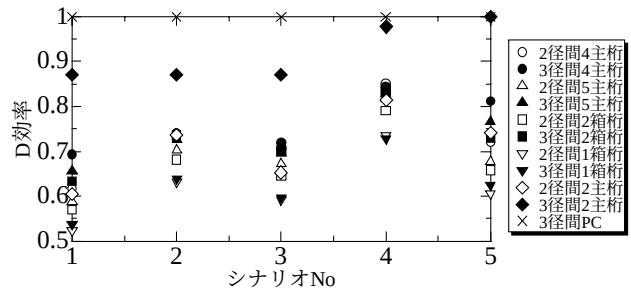


図-4 各シナリオにおける割引率を考慮したD効率

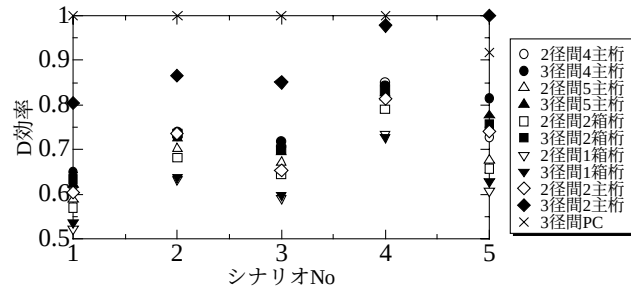


図-5 各シナリオにおける割引率を考慮しないD効率

示でき、本研究のようにその数値目標に基づいて具体的な改善案に対して検討を行うことが可能であり、環境負荷への影響度や改善案の検討に大きな威力を発揮出来得ると考えられる。そして、200年程度のライフサイクル期間を想定した上で、その間の維持管理や架替え等を考慮した戦略的なシナリオを設定することにより、地球環境に対する影響を非常に低減できると考えられる結果が得られた。したがって、本研究の手法は橋梁構造物が有する環境負荷に対する効率性、あるいは具体的な改善案等の検討に大きな威力を発揮するものと思われる。

参考文献

- 1) 環境省：環境白書 平成16年度，環境省，2004。
- 2) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針，2004。
- 3) 酒井寛二：土木建設物の二酸化炭素排出量原単価の推定，第4回地球環境シンポジウム講演集，pp.43-48，1996。
- 4) 経済調査会：積算資料 2002年12月号，経済調査会，2002。
- 5) 伊藤義人，平野徹，永田裕規，ハマー・アミン，西土隆幸，加島章：環境負荷を考慮した橋梁形式選定システムの作成と利用に関する研究，土木学会論文集，No.553/VI-33，pp.187-199，1996。
- 6) 伊藤義人，永田裕規，スワル・ラックスマン，西川和廣：地球環境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1295-1305，1999。
- 7) 伊藤義人，梅田健貴，西川和廣：少数主桁橋梁と在来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1295-1305，1999。
- 8) 刀根薫：経営効率性の測定と改善 一包絡分析法 DEAによる一，日科技連出版社，1993。
- 9) 今野浩：線形計画法，日科技連出版社，1987。
- 10) 日本鉄鋼連盟 橋梁研究会編：高性能鋼の概要
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説，平成14年3月。