

橋梁構造物の地球温暖化環境負荷に関するライフサイクルアセスメント

Study on lifecycle assessment of global warming environmental impact on bridge structures

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 三浦 貴 (Takashi Miura)

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の環境破壊が社会問題となっており、とりわけ地球温暖化問題は、気温や海面の上昇、さらには様々な異常気象や生態系の変化などを引き起こすものとして、もっとも深刻な環境破壊問題となりつつある。2001年に公表さ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世紀には地球の平均気温が 0.6°C 上昇したとされており、2100年には最悪の場合 5.8°C の気温上昇、88cmの海面上昇が起こると予測されている¹⁾。

温室効果ガスの中でもっとも地球温暖化に影響を与えているのが二酸化炭素である。2003年度の統計において、我が国が排出する温室効果ガスの地球温暖化への直接的寄与度は、二酸化炭素が94%にも達している。また、我が国の二酸化炭素発生の分野別割合では建設関連分野が実に50%を占めるという試算もあり、社会基盤整備の要である建設業での二酸化炭素排出量の低減が、地球温暖化抑制においていかに重要であるかがわかる。

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) と超包絡分析法 (Super Data Envelopment Analysis, 以下、SDEA 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加えることを目的とする。具体的には、まずはシナリオ1として鋼橋10種とPC橋1種それぞれについて、特別に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スパン200年全体のCO₂排出量 (以下、LCCO₂ と称す) とコスト (以下、LCC と称す) を算出する。なお、鉄鋼生産に関わる原単価は、(社)日本鋼構造協会によって算出された値を用いることとした²⁾。この結果を用いてDEA解析を行い、シナリオ1における各橋梁の効率性ならびに改善案を求める。次に、算出した各橋梁の改善案を検討し、どの値を改善すれば環境性能、コストが改善に向かうのかを実現可能性を考慮した上で考察する。この考察を踏まえ、新たにリサイクル材や耐候性鋼の使用といった環境負荷低減対策を行うシナリオを想定し、再度それらのLCCO₂とLCCを算出してDEA解析を行い、各シナリオの環境負荷改善効果の定量的評価を試みる。各シナリオにおいて最も効率的と評される橋梁が複数発生したときは、SDEA解析を実施して橋梁の環境性能の順位付けを行い、さらなる改善案を求める。よって、本研究はこれらの解析結果を通じて、橋梁構造物のライフサイクルアセスメントによって地球温暖化に及ぼす影響の定量的評価を行い、その改善方法と改善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. 解析手法

2.1 包絡分析法

本研究では橋梁システムの環境負荷効率性の解析に包絡分析法 (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それぞれの改善案が数値で算出される手法である。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^{3,4)}。

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

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、それ以外る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。

また、SDEA (超包絡分析法) については、D効率が1の事業体が複数発生した時に、真の効率値と改善案を求めるものである。SDEAの詳細については、8章において述べることとする。

2.2 解析対象の橋梁構造物

本研究における解析対象の構造物は、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種類を予備設計レベルで設計し、比較することとした。その内訳は、鋼橋は4主桁橋、5主桁橋、2箱桁橋、1箱桁

橋、少数主桁（2主桁）橋がそれぞれ2径間、3径間で10種類と、ポストテンション方式3径間PC橋1種類を用いることとした。なお、本研究の各橋梁データは文献5)と同様のものを用いており、紙面の都合上、ここでは割愛させて頂く。

3. 橋梁構造物のライフサイクル

本研究では、橋梁のライフサイクル全体でのCO₂排出量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段階に分類した。なお、橋梁の架替えに至るまでの寿命については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年と仮定して解析を行った。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。割引率の設定次第で、LCCの評価結果に大きな違いが生じる。本研究のLCC計算においては、国土交通省が設定した割引率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CO₂排出量およびコストを算出する。具体的には、CO₂排出量は、各橋梁に用いられる材料について、鋼については文献2)から原単価算出し、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⁶⁾の原単位を乗じて算出した。本研究で用いた原単位を表-1に示す。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⁷⁾の価格を乗じることで求めた。

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)、8)、9)、10)等を参考に耐用年数を設定した。すなわち、対象とした部位が耐用年数に達した場合に、更新に伴うCO₂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-2に示す。

廃棄・架替え段階において、CO₂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CO₂排出量を加えることとした。コストに関しては、文献11)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、この係数に基づいて算出を行った。

4. LCCO₂およびLCCの算出

以上のようにして、本研究は現状の橋梁システム（シナリオ1）における各橋梁のライフサイクル200年全体でのLCCO₂、LCCの算出を試みた。図-1にライフサイクル環境負荷（LCCO₂）を、図-2に割引率を考慮しないLCCを、図-3に割引率4%を考慮したLCCを示す。

LCCO₂の結果である図-1によると、全体ではNo.11の3径間PCがもっとも環境負荷が少なく、鋼橋ではNo.10の3径間2主桁橋の環境負荷が小さいという結果になった。従来型鋼橋に関しては比較的環境負荷が大きいことが見てとれる。LCCを表した図-2、図-3に注目すると、割引率4%を考慮した図-3については、100年程度経過時点からは割

表-1 CO₂排出量原単価

分類項目	土木学会 LCA 小委員会推奨値 (kgC/kg)	鋼構造協会 (kgC/kg)
生コンクリート	0.034	
鋼炉製熱間圧延鋼材	0.411	0.360
電炉製鋼、型钢	0.128	0.182
舗装用アスファルト混合物	0.011	
塗装	0.452	

表-2 各部材の寿命

	従来型鋼橋	少数桁橋	PC 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

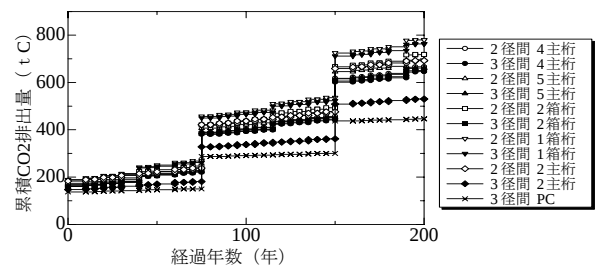


図-1 ライフサイクル環境負荷

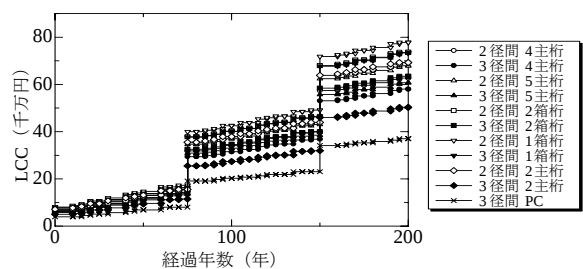


図-2 割引率を考慮しないライフサイクルコスト

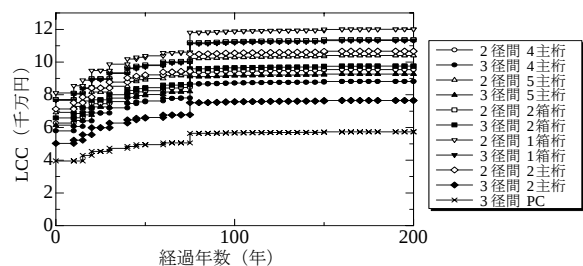


図-3 割引率を考慮したライフサイクルコスト

引率の影響が大きくなり、維持管理コストの影響は非常に小さくなっているのがわかる。割引率を考慮しないLCCからは、コストはそのものはLCCO₂と同様の傾向を示し、No.11の3径間PC橋が最も低コストの橋梁であり、No.10の3径間2主桁橋が次にコストが低くなっている。従来型鋼橋については、両者に比して高いコストになるという結果が得られ、LCCO₂、LCC共に何らかの対策が必要であると考えられる。

5. シナリオ 1 に対する DEA 解析

以上の結果を用いて、シナリオ 1 に対して DEA による解析を行った。LCCO₂ および LCC を入力とし、製品として橋梁 1 橋を出力とした。また、今後のシナリオにおいて橋梁の寿命の延長による環境負荷改善効果を検討するために、すべての橋梁の寿命を 75 年とし、これも出力として加えた。表-3 に、解析結果の一例として各橋梁の D 効率を示す。また、表-4 は入力、出力の改善案の一例である。

表-3 に着目すると、No.11 の 3 径間 PC 橋が D 効率 1 となっていることから、現状の橋梁システムであるシナリオ 1 において最も効率的であるという結果が得られた。鋼橋においては、No.10 の 3 径間 2 主桁橋が最も効率的であり、シナリオ次第では十分 PC 橋と同等の効率性を有することが可能であると考えられる。また、従来型鋼橋に関しては 57～69%程度の効率性にとどまっている。

次に表-4 について考察する。一般に DEA 解析においては、入力改善案と出力改善案のどちらか一方を実現出来れば、効率性を向上させることができるので、ここでは入力改善案と出力改善案の実現可能性を個別に検討する。まず、入力改善案については、No.2 の 3 径間 4 主桁橋において、LCCO₂ は 199.71 tC、LCC は 3,446 万円削減すれば効率性が改善されるという結果となった。ここで、CO₂ を約 31%削減することは、鋼材使用量を同様に 31%程度少なくする必要が生じ、構造的に実現が困難と考えられる。次に出力改善案については、LCC を 1 千万円削減、橋を 1.5 橋作製し、かつ寿命を 34 年延長すれば PC 橋と同等の効率性を有するという結果となっている。ここで橋が 1 橋以上必要であるというのは LCCO₂ の削減と LCC における、特に初期投資とメンテナンスコストの削減が必要であるということと同義である。これらの結果は、すべてのパラメータをバランスよく改善することで効率性が改善されるということを示しており、溶接延長の削減、防食の工夫等によって実現できる可能性は高いと判断される。よって本研究では、出力改善値を基準として、各パラメータを改善するためのいくつかのシナリオを想定し、再度 DEA 解析を行うことで、各シナリオの環境負荷低減対策の有効性について検討を試みる。

6. シナリオ設定

以上の結果から、本研究では LCCO₂、LCC、寿命といった出入力のパラメータを改善することで、環境負荷の低減を目指したいいくつかのライフサイクルシナリオを設定する。

まずシナリオ 2 として、鋼橋において架け替え時に鋼材をすべてリサイクル材（電炉製鋼）として再利用できると仮定したシナリオを設定する。リサイクル材の使用によって、初期投資段階や架け替え段階の LCCO₂ の低減に効果があると考えられる。

鋼橋においては、耐候性鋼、PC 床版を用いることで維持管理段階の環境負荷、コストの改善が期待できる。このことから、本研究ではシナリオ 3 として、架け替え時に鋼橋に耐候性鋼を使用し、加えて従来型鋼橋には PC 床版を用いると仮定したシナリオを設定する。

シナリオ 4 としては、リサイクル材を用いた耐候性鋼の実現を仮定し、架け替え時に鋼橋にこれを用いることとした。また、シナリオ 3 と同様に従来型鋼橋には架け替え時に PC 床版を用いることとしている。シナリオ 4 においてはシナリオ 2、3 を同時に行うこととなるので、環境性能の大幅な向上が期待できる。

次にシナリオ 5 として、初期投資段階から耐候性鋼、架

表-3 シナリオ 1 における各橋梁の効率値

橋梁 No.	1	2	3	4	5	6
効率値	0.6700	0.6908	0.6412	0.6751	0.6215	0.6855
橋梁 No.	7	8	9	10	11	
効率値	0.5723	0.5849	0.6445	0.8419	1.0000	

表-4 シナリオ 1 における改善案例

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)	645.89	446.181	-199.710	645.890	0.000
	LCC (千万円)	8.82	5.372	-3.446	7.776	-1.042
	製品 (橋)	1.00	1.000	0.000	1.448	0.448
	寿命 (年)	75.00	75.000	0.000	108.570	33.570

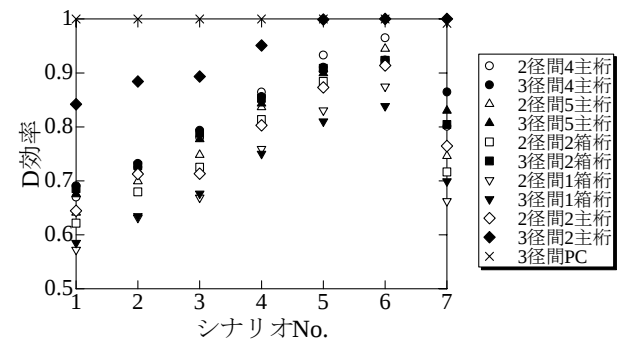


図-4 各シナリオにおける D 効率

け替え時にリサイクル耐候性鋼を用いるシナリオ、また、シナリオ 6 として、初期投資・架け替え段階ともにリサイクル耐候性鋼を用いるシナリオを設定する。ともに初期建設時から環境負荷低減対策を行っているので、LCCO₂、LCC の大幅な削減による環境性能の大きな向上が見込まれる。

最後にシナリオ 7 として、初期投資・維持管理段階はシナリオ 1 と同様とし、鋼橋の寿命のみを 100 年に延長したシナリオを設定する。これは出力改善案に示された寿命の延長による環境負荷改善効果を評価すると同時に、架け替え回数の減少による効果も検討が可能となる。

以上、7 つのシナリオにおいてシナリオ 1 と同様に LCCO₂ と LCC の算出を行った。

7. 解析結果とその考察

以上のような、7 パターンのシナリオに対して、まず通常の DEA 解析を行うことことで環境性能の改善効果の定量的評価を試みた。各シナリオにおける 11 種の橋に対する D 効率の推移を図-4 に示す。なお、割引率を考慮した場合としない場合について D 効率値の推移はほぼ等しくなったために、これ以降は割引率を考慮しない場合についてのみ考察する。

図-4 に着目すると、すべてのシナリオにおいて D 効率の向上が見られるが、初期投資段階、維持管理段階、廃棄・架け替え段階すべてに環境負荷低減対策を行っているシナリオ 5、6 において鋼橋の D 効率の向上が顕著に見られる。特にシナリオ 6 に関しては、No.10 の 3 径間 2 主桁橋の D 効率が 1.0 まで向上し、PC 橋と同等の環境性能を発揮できることが判明した。従来型鋼橋の D 効率も 80%を超えており、本研究のライフサイクルシナリオでは最も優れたシナリオであることがわかった。

シナリオ 7 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。鋼橋の架け替え回数が減少したことにより LCCO₂、LCC の大幅な削減が実現し、No.10 の 3 径間 2 主桁橋がすべての橋梁に対しての優位集合となっている。全体的に見ると、シナリオ 7 は寿命の延長だけで、ライフサイクル全体で低減対策を行っているシナリオ 4 と同程度の効率性を実現できることが判明した。

8. SDEA による再評価

シナリオ 6 において No.10 の 3 径間 2 主桁橋と No.11 の 3 径間 PC 橋の D 効率が 1 となったので、本研究では SDEA 解析を行って、シナリオ 6 においてどちらが環境性能面で優れた橋梁であるかを決定することとした。

DEA 解析とは、各事業体にとって最も有利になるようにウエイトを決定し効率値を算出するものであるため、解析手法上、D 効率が 1 のものが複数発生することがある。その際には SDEA 解析を用いることで、最も効率的な事業体を決定することが可能となる。解析方法としては非常に簡単で、DEA 解析において D 効率が 1 となった事業体を順に除いて再度 DEA 解析を実施し、得られた効率性・改善案を比較して再評価を行う。本研究においては、D 効率が 1 となった事業体は 2 つであるので、各事業体を除いてそれぞれに DEA 解析を行った。DEA は相対評価であるので、非効率的と判断された事業体の D 効率が、より低くなっている解析の優位集合となっている事業体が最も優れていると判断できる。

表-5 に No.10 と No.11 を相互に除いて行った、SDEA 解析結果を示す。表-5 によると、No.11 を除外した場合、すなわち No.10 を基準としたほうが、No.10 を除外、すなわち No.11 を基準とした場合よりも、ほんのわずかではあるものの、No.1～9 の橋梁の D 効率値が低くなっているのがわかる。これは No.10 のほうが No.11 よりも効率的であることが判断できる結果であり、SDEA 解析の結果、シナリオ 6 においては、No.10 の 3 径間 2 主桁橋が環境性能面において最も効率的であるということが判明した。

今後は、この解析結果を用いて、さらなる改善シナリオを設定する予定である。

9. あとがき

以上のように本研究では、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ついて検討を試みるため、鋼、コンクリートを主材料とした橋梁システムについて、最新の原単価、原単位を用いて、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 排出量やコストといったデータをパラメータとした DEA 解析を行い、その結果に基づき 11 種の橋梁形式の比較を行った。次に、DEA 解析によって得られた各形式の改善案をもとに 6 つのライフサイクルシナリオを設定し、それぞれのシナリオについて DEA 解析を行うことで、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 では各橋梁形式の環境負荷への影響が D 効率として非常に理解しやすい形で表現されていることから、比較検討が容易に可能であることがわかった。また、DEA では改善案として具体的な目標を数値として提示でき、本研究のようにその数値目標に基づいて具体的な対策の検討を行うことが可能であり、環境負荷への影響や改善案の検討に大きな威力を発揮できると考えられる。また、SDEA を用いることで、最も効率的な橋梁形式を決定することが可能であり、さらなる改善案の検討も今後行うことができると考えられる。

表-5 SDEA 解析結果の比較

橋梁 No.	No.10 除外	No.11 除外
1	0.96517118	0.96517113
2	0.92368002	0.92367997
3	0.94494634	0.94494630
4	0.91631335	0.91631330
5	0.92290405	0.92290400
6	0.92316192	0.92316187
7	0.87485849	0.87485844
8	0.83856945	0.83856941
9	0.91387135	0.91387130
10		1.00000000
11	1.00000000	

さらに、200 年程度のライフサイクルにおける戦略的なシナリオを設定することで、環境負荷を大幅に低減できる可能性を有することが判明した。すなわち、リサイクル材や耐候性鋼の使用、適切なメンテナンスを施すことによる寿命の延長などでコストと環境負荷に関する効率性を改善できると考えられる結果が得られた。特に寿命の延長、リサイクル耐候性鋼の使用と床版を PC 床版にすることによる環境負荷改善効果は大きく、少数主桁橋だけではなく、従来型鋼橋においてもコンクリート橋に匹敵する環境性能に改善することが可能であると思われる。リサイクル耐候性鋼については、現時点では、耐候性鋼材をリサイクル材で作製した例は現在のところ知られていないが、今後の技術進歩による高性能鋼の実現が、環境負荷を低減するためには必要であると考えられる。

なお、本研究の一部に、平成 18 年度独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号：18560460、研究代表者：小幡卓司) の援助を受けてことを付記する。

【参考文献】

- 1) 環境省：STOP THE 温暖化 2005、環境省、2005。
- 2) (社) 日本鋼構造協会、鋼構造物の環境性評価データベースの構築小委員会：鋼構造物の環境性評価データベース構築報告書、(社) 日本鋼構造協会、2005。
- 3) 刀根薫：経営効率性の測定と改善 ―包絡分析法 DEA による―、日科技連出版社、1993。
- 4) 今野浩：線形計画法、日科技連出版社、1987。
- 5) 大野良輔：橋梁構造物のライフサイクルにおける環境負荷の定量的評価に関する研究、大野良輔修士論文、2004。
- 6) 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。
- 7) 経済調査会：積算資料 2006 年 10 月号、経済調査会、2006。
- 8) 伊藤義人、平野徹、永田裕規、ハムルト・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。
- 9) 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。
- 10) 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.46A, pp.1261-1272, 2000。