

鋼橋のライフサイクル環境負荷に関する定量的評価法について

Study on Quantitative Assessment of Lifecycle Environmental Impact on Steel Bridges by using of Data Envelopment Analysis

北海道大学大学院工学研究科○学生員 高田詞之 (Noriyuki Takada)
 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 学生員 大野良輔 (Ryousuke Ohno)
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)

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、仮に無対策のまま経過すれば、100年後には平均気温が2℃、海面が50cm上昇すると予測されている¹⁾。この地球温暖化問題に対処するため、気候変動に関する国際連合枠組条約締約国会議(COP)において、温室効果ガス排出量削減の具体的な数値目標を定めようとする動きは周知の事実である。我が国における温室効果ガス排出量は世界第4位と非常に多く、その中で建設部門が我が国におけるCO₂排出量、エネルギー消費量に占める割合は、それぞれ約24%、19%に達している。あらゆる生産活動が環境への配慮を必要とする21世紀においては、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。

一般に、橋梁構造物は鋼・コンクリート等の材料を複合的に使用し、上部構造および下部構造からなる構造システムと考えることができる。従来の基盤整備では、専ら建設時のコストを最小にすることが問題とされ、それに応じて材料、径間割(橋脚数)、上部構造形式等が決定されていたが、上述の通り、今後は100年程度のライフサイクルの中でコストの上昇をある程度抑制しながらも、環境に対する影響を重要視するような橋梁システムの整備を進めることが必要であると思われる。この地球温暖化に関わる環境負荷を軽減するには、まず建設時における材料製造、上部工製作・架設、下部工建設におけるエネルギー消費量、CO₂排出量の低減の実現のみならず、さらには長寿命化、ミニマムメンテナンス化、リサイクル性の向上による産業廃棄物の削減を目指すことが大きな課題である。これらを実現することで、温暖化抑止のための環境問題への本格的な対応が可能となり、後世への有効な社会資本の充実に向けた新たな橋梁システムの開発が可能になるものと考えられる。

以上を踏まえて、本研究では鋼橋のライフサイクルとして200年を想定し、その期間における環境負荷およびコストを算出して、その比較検討を行う。また、ライフサイクル全体でのコストとCO₂排出量をパラメータとして、包絡分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)を適用することにより、環境負荷低減を目指した鋼橋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、まず橋梁のライフサイクルを建設段階、維持補修段階、廃棄・架替え段階の3段階に分類し、各段階におけるCO₂排出量を加えていくことで、ライフサイクル全体におけるCO₂排出量を算出する。また、コストに関しても同様に算出するものとする。その結果を用いてDEAによる解析を行うことにより、効率性の比較、入出力の改善案の実現可能性に関して考察を加えるものである。よって、本研究ではこれらの解析結果を通じて、鋼橋が及ぼす環境負荷の定

量的評価におけるDEAの適用性、あるいは妥当性等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

2・1 建設段階

建設段階においては、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、試設計により得られた鋼、コンクリート、アスファルトの各重量に、表-1に示した土木学会環境委員会原単価表⁹⁾の原単位を乗じて算出した。ここで、建設時にリサイクル鋼を使用した場合のCO₂排出量に関しては、高炉製鋼(0.411kgC/kg)と電炉製鋼(0.128kgC/kg)の原単位から、約70%の削減がなされることが示されている。またコストに関しては、使用される材料費のみを考慮することとした。

2・2 維持補修段階

維持補修段階においては、橋梁の各部材についての寿命を設定し、各部材の寿命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、橋梁の架設された場所による環境条件や交通量などの供用のされ方により、各部材および橋梁自体の寿命は異なってくるため、寿命を固定して考えることは難しい。しかしながら、ライフサイクル全体での環境負荷評価を行うにあたっては、それぞれの寿命を決定する必要があるために、本研究においては文献^{2),3),4)}等を参考にして寿命を設定し、対象とする部材は橋面舗装、床版、塗装、伸縮継手の4種類とした。本研究で仮定した寿命を表-2に示す。

2・3 廃棄・架替え段階

廃棄・架替え段階においては、旧橋撤去により排出されるCO₂に関して、具体的な数値データを得ることは非常に困難であると判断し、旧橋撤去後に同形式の橋梁を架替えるものと仮定して、建設段階と同様のCO₂排出量を加えることとした。また文献⁴⁾において、橋梁の架替え(撤去お

表-1 CO₂排出量原単位表

分類項目	土木学会 LCA 小委員会推奨値 (kgC/kg)
生コンクリート	0.034
高炉製熱間圧延鋼材	0.411
電炉製棒鋼・型鋼	0.128
舗装用アスファルト混合物	0.011

表-2 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	25年	25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

よび新設)にかかるコストは建設段階の3倍程度(2.8倍)となると仮定しているため、本研究においてもこの仮定を用いることとした。

3. 解析手法

3.1 包絡分析法 (DEA)

前述のように、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、経済学における規模のリターン(収穫)の考え方に依拠していくつかのモデルが与えられているが、一般に、解析手法は2段階線形計画問題(LP)に帰着し、制約条件の相違によって各種モデルが与えられる。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^{6,7)}。

第1目的関数 $\min \theta$

第2目的関数 $\min -es_x - es_y$

$$\theta x_0 = X\lambda + s_x$$

制約条件 $y_0 = Y\lambda - s_y$

$$\theta \geq 0 \quad \lambda \geq 0 \quad s_x \geq 0 \quad s_y \geq 0$$

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、優位集合とその度合いを表す。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、それ以外の場合非効率的であると定義される。これらのプロセスに関して、本研究ではMATRAB R13を用い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の橋梁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3径間PC橋1種類)を用いることとした⁵⁾。以上の橋梁群について試設計を行い、CO₂排出量および簡単な工費を算出した。図-1、図-2は2径間連続4主桁を採用した際の断面図と側面図の例であり、表-3は各橋梁形式の材料の重量データである。

ここで、設計方法あるいは設計条件に関して言及すると、予備設計段階での環境負荷の検討を想定して、上部構造の断面照査は1次部材のみとし、2次部材については鋼重の算定には含まれているが、断面・部材は経験的に決められたものである⁸⁾。下部構造に関しては、震度法による設計で断面および鉄筋量を決定した。これらの方法は、現実の実務設計とは多少異なるが、比較を行う上ではすべて同条件であれば大きな問題は生じないと判断されるため、上述

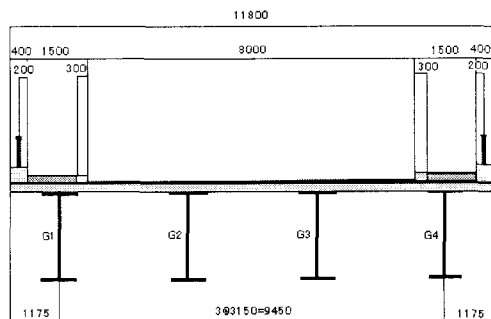


図-1 2径間連続4主桁橋断面図

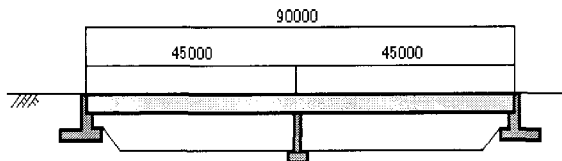


図-2 2径間連続4主桁橋側面図

表-3 各橋梁形式における各材料の重量

No.	橋梁形式	鋼 (t)	コンクリート (t)	アスファルト (t)
1	2径間4主桁	251.54	1991.96	148.69
2	3径間4主桁	215.13	2395.71	148.69
3	2径間5主桁	274.12	1941.67	148.69
4	3径間5主桁	227.41	2355.82	148.69
5	2径間2箱桁	286.92	1963.43	148.69
6	3径間2箱桁	220.24	2367.21	148.69
7	2径間1箱桁	327.38	1952.67	148.69
8	3径間1箱桁	293.03	2356.60	148.69
9	2径間2主桁	292.15	1963.36	148.69
10	3径間2主桁	162.94	2367.27	148.69
11	3径間PC	68.71	3187.18	148.69

のような手法を用いている。

リサイクル材を用いた場合の工費は、一般にリサイクルのものにかかる費用が製品にも反映されるため、原材料から生産した場合と比較して同等か若干高価になるものと思われる。よって、本研究においてはリサイクルを考慮した場合においても、バージン材を用いた際と同一の工費で解析を実施した。また寿命については、橋梁の立地条件、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はあるが、コンクリート橋50年、従来型鋼橋60年²⁾、少数主桁橋100年²⁾と仮定して取り扱うこととした。

3.3 対象橋梁のシナリオ設定

ライフサイクル全体での環境負荷評価を行うにあたって、本研究においては表-4に示す4つのシナリオを設定し、ライフサイクル環境負荷およびライフサイクルコスト(LCC)の算定を行った。シナリオ1に関しては、旧橋撤去後に新設される橋梁は全てバージン材を用いるものとした。シナリオ2に関しては、鋼材の場合は電炉鋼で鉄を溶かし再生するため、理論的には100%リサイクルを行うことが可能であるので、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3に関しては、1回目の架替えの際に、120年程度の寿命を想定した下部工を架設するものとして、2回目の架替え時には上部

工のみ架替えると仮定した。シナリオ4については、現在の技術力で100程度の寿命をもつ橋梁が架設されていることから、従来型の橋梁形式においても10年程度であれば寿命の延長は充分可能であろうと判断し、コンクリート橋の寿命を60年、鋼橋の寿命を70年とした。

4. ライフサイクル環境負荷およびLCCの算出

以上のようにして、本研究では200年を想定したライフサイクル全体での環境負荷の算出を試みた。結果の一例として、図-3にシナリオ1、図-4にはシナリオ4におけるライフサイクル全般でのCO₂排出量の算定結果を示す。結果からは、リサイクル鋼の使用によるCO₂排出量の低減が極めて大きいということが分かる。従来型の鋼橋に着目すると、シナリオ4においてはシナリオ1に比して半分程度までCO₂排出量が削減されていることが理解できる結果となった。また、全てのシナリオにおいてNo.6の3径間2箱桁橋を除く3種類の箱桁橋は、建設時のCO₂排出量も多くライフサイクル全般においても環境負荷の大きい橋梁形式であると考えられる。さらに少数主桁橋に関して言及すると、寿命が100年と長寿命であることから200年のライフサイクルにおいても架替えが1回で済むので、ライフサイクル全体において最も環境負荷の少ない橋梁となっている。

表-4 本研究におけるライフサイクルシナリオ

項目	仮定
シナリオ1	架替え時に全てバージン材を使用
シナリオ2	架替え時に全てリサイクル材を使用
シナリオ3	シナリオ2+2回目の架替えは上部工のみ
シナリオ4	シナリオ3+鋼橋の寿命を10年延長

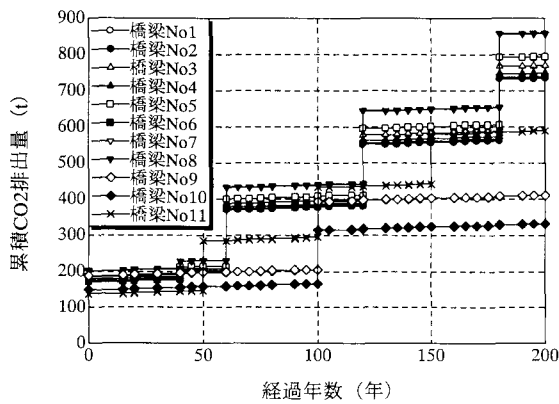


図-3 ライフサイクル環境負荷比較図 (シナリオ1)

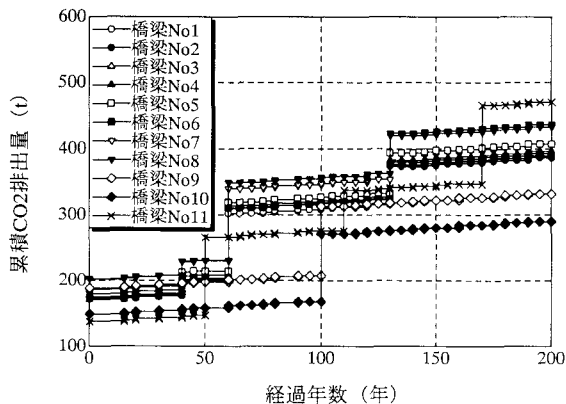


図-4 ライフサイクル環境負荷比較図 (シナリオ4)

また同様に、LCCの算出を試みた。結果の一例として、図-5にシナリオ1、図-6にはシナリオ4におけるLCCの算定結果を示す。結果からは、架替えの回数が1回少なくなる従来型の鋼橋において、約1億円程度コストの削減がなされていることがわかる。しかし、コンクリート橋および少数主桁橋においては、バージン材を用いた場合とリサイクル鋼を用いた場合とでコストが変わらないものと仮定しているため、最終的な結果としてあまり差は見られなかった。また、シナリオ2・3に関して、シナリオ1に比して若干の低減はあるものの、ほとんど変わらない程度の差であると判断される。

5. DEAによる解析結果とその考察

以上より得られた結果を用いて、本研究ではDEAを用いた橋梁の環境負荷に関する定量的評価を試みた。基本的な入出力関係を予備解析にて検討した結果、CO₂排出量、LCCを入力とし、これらの入力によりある1橋梁が完成することを踏まえて、出力を製品(1橋)として用いることとした。表-5にシナリオ1における200年経過時のCO₂排出量等の各パラメータを、表-6にシナリオ4における各パラメータを示す。また、少数主桁橋梁の環境負荷が少ないことは上述のとおり明らかであるので、ここではNo.9とNo.10の橋梁は解析対象から外すこととした。解析結果の一例として、表-7に各シナリオにおけるD効率の一覧を、表-8にシナリオ4の改善案の一部を示す。

まず表-7のシナリオ1に関しては、鋼橋においては使用鋼材の少ない3径間の鋼橋(No.2,4,6,8)が、同形式の2径間の鋼橋(No.1,3,5,7)に比して高いD効率を示す結果となった。また、建設時においてCO₂排出量が少ないコンクリート橋がD効率1となっており、比較を行った橋梁の中で最も環境負荷の少ない橋梁と判断された。次にシナ

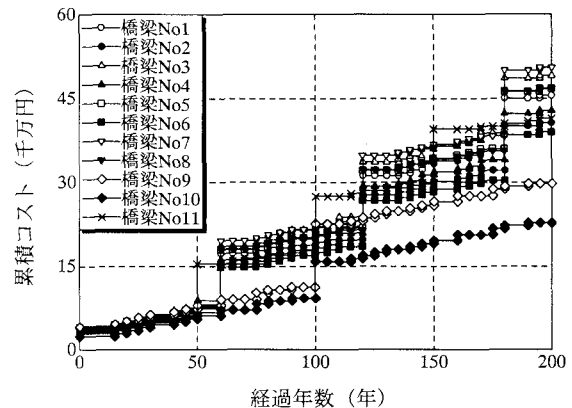


図-5 LCC比較図 (シナリオ1)

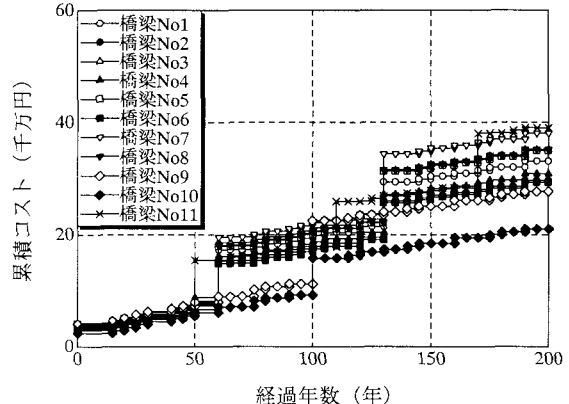


図-6 LCC比較図 (シナリオ4)

表-5 シナリオ1における各パラメータ

No.	CO ₂ 排出量 (t)	LCC (千万円)	製品 (橋)
1	739.6517	45.5562	1
2	734.6439	40.6236	1
3	769.9375	49.1082	1
4	749.4124	42.8154	1
5	793.9318	46.7758	1
6	739.1630	39.0072	1
7	858.9913	50.5610	1
8	857.3834	46.8638	1
9	410.4103	29.7842	1
10	331.6305	22.7454	1
11	590.6314	41.4752	1

リオ2に関しては、2径間の鋼橋 (No.1,3,5,7) において、D 効率が大幅に改善される結果となった。理由として、2径間の鋼橋は建設時における使用鋼材が3径間の鋼橋に比して多いため、架替え時においてリサイクル鋼の使用による CO₂ 排出量の低減が極めて大きいことが挙げられる。シナリオ2およびシナリオ3に関してもほぼ同様の結果となった。また、単に数値の比較を行うだけでは、環境に対して非常に不利と思われる鋼橋においても、材料としての特徴であるリサイクル性を考慮することによって、コンクリート橋と遜色ない程度まで環境負荷が改善される可能性を有することが十分に理解できる。

ここで、以上の結果について考察を加えると、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。よって、このような問題に対する DEA の適用性、有効性はきわめて高いと考えることができる。

また、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、本研究のように架替えの際に、その材料としてリサイクル材を使用することや、強度的に問題がなければ下部構造はそのまま利用するといった対策を講じることにより、環境負荷はもちろん、コストも大幅に低減できると考えられる。

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が非常に理解しやすい形で得られることから、今後の環境に‘やさしい’橋梁システムの構築・検討に十分活用できるものと考えられる。

6. 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鋼橋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、CO₂ 排出量等のデータをパラメータとして DEA による効率性ならびに改善案の解析を実施し、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り、どのパラメータをどれだけ改善すれば良いかが数値で示されるため、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。また、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。

表-6 シナリオ4における各パラメータ

No.	CO ₂ 排出量 (t)	LCC (千万円)	製品 (橋)
1	386.4810	33.0907	1
2	389.0251	29.7317	1
3	396.4162	35.1048	1
4	393.1511	30.8906	1
5	407.1688	34.9840	1
6	389.5256	29.3969	1
7	433.0614	38.0395	1
8	436.9935	35.2197	1
9	332.1895	27.7589	1
10	289.9772	21.0285	1
11	470.2783	39.0594	1

表-7 各シナリオにおける D 効率

No.	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3	シナリオ4
1	0.8823	1.0000	0.9876	1.0000
2	0.9693	0.9990	0.9992	1.0000
3	0.8315	0.9792	0.9653	0.9749
4	0.9353	0.9821	0.9826	0.9880
5	0.8528	0.9558	0.9402	0.9492
6	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
7	0.7894	0.9053	0.8865	0.8924
8	0.8396	0.8788	0.8746	0.8876
11	1.0000	0.9943	1.0000	0.8233

表-8 シナリオ4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
3	CO ₂ 排出量 (t)	396.481	386.529	-9.952	396.481	0.000
	LCC (千万円)	33.091	31.126	-1.965	31.927	-1.163
	製品 (橋)	1.000	1.000	0.000	1.026	0.026

【参考文献】

- 1) 米沢栄二, 三輪恭久, 中原勝也, 中村俊一: CO₂ 発生量に着目した鋼橋の環境負荷, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1075-1082, 2001.
- 2) 伊藤義人, 平野徹, 永田裕規, ハワード・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.
- 3) 伊藤義人, 永田裕規, スリル・ラクスマン, 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.
- 4) 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.
- 5) 小幡卓司, 大野良輔, 高田詞之, 林川俊郎, 佐藤浩一, 小野武彦: DEA を用いた橋梁構造物の環境負荷に関する定量的評価法について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第59号, pp.892-893, 2003.
- 6) 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.
- 7) 今野浩: 線形計画法, 日科技連出版社, 1987.
- 8) 日本橋梁建設協会編: デザインデータブック'93 年版, 日本橋梁建設協会, 1993.
- 9) 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.