

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 16 日現在

機関番号：54401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560511

研究課題名（和文） 社会基盤施設整備における地球環境負荷の影響評価

研究課題名（英文） Study on consideration of steel resources in society of global warming  
environmental impact assessment on infrastructures

研究代表者

小幡 卓司（OBATA TAKASHI）

大阪府立大学工業高等専門学校・総合工学システム学科・教授

研究者番号：20214215

研究成果の概要（和文）：

今日の社会資本整備は、持続的発展を意識した開発や現有の基盤施設の延命等、投資の効率化や温暖化防止、3R を考慮した社会の構築が必要と考えられ、将来に負の財産を残さない社会資本の整備が必要である。本研究は、橋梁構造物における資源ストックとしての鋼重に着目して、11 種の橋梁について CO<sub>2</sub> 排出量、コスト、製品としての橋、寿命と鋼重をパラメータとして、抱絡分析法(DEA)および超抱絡分析法（SDEA）により環境性能の改善案について評価を試みるものである。

研究成果の概要（英文）：

The global warming environmental impact is most important problem all over the world. In this study, the volumes of steel of bridges are considered social resource, and the volume of steel is one of the parameter for analyses. The analytical methods are performed by Data Envelopment Analysis (DEA) and super DEA, also parameters are CO<sub>2</sub> emissions of lifecycle and lifecycle cost are used as input data, life length and volume of steel are used as an output data.

In the present bridges system, when considering the social steel resource environmental impact of the all type of bridges are not larger deference occurred in DEA analyses. In the case of analyses are performed by using super DEA, high reliable ranking carried out for the environmental impact of bridges.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成 22 年度	800,000	240,000	1,040,000
平成 23 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地球環境負荷、資源ストック、包絡分析法、超包絡分析法、橋梁構造物、LCC

## 1. 研究開始当初の背景

近年においては、人間の生産活動など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。この全世界的な気候変動は、現状における生物相を破壊する危険を有する可能性があることから、1990 年初頭から国際的な議論の対象となっている。気候変動枠組

条約締約国会議は、1995 年に第 1 回が開催され、2012 年までに 18 回の会議が行われているが、各国の様々な思惑もあり、有効な削減手段は未だに決まっていない。特に、1993 年の COP3 では、京都議定書として温暖化ガスを 2008 年から 2012 年までに、1990 年に比して 6%削減する具体的目標が掲げられたが、

排出量は現在も増加傾向にあり、2011年のCOP17では、京都議定書を当面延長し、2020年までに新たな枠組み造りを目指すことが決められた。

地球温暖化は、産業革命以来、地球が数十億年に亘って石炭・石油として備蓄した炭素を、人類はその生産活動などのために僅か数百年で急激に排出しつづあり、この大気への排出速度の速さが原因の1つとなっていると言われている。我が国では、1993年に環境基本法が制定されて以来、温暖化の防止、生物多様性の保全、循環型社会の構築などをコアにして、少なくとも500年程度以上の持続的発展が可能な社会の枠組み造りが考えられている<sup>1)</sup>。そのため、社会資本整備においても、持続的発展を意識した開発や現有の社会基盤施設の維持管理など、資本投資の効率化や温暖化ガス排出量の削減、あるいはリサイクル・リミックスを考慮した社会システムの再構築が必要である。エネルギー問題においても、東日本大震災の影響を受けて、本稿執筆時点でほぼ全ての原子力発電所が停止し、CO<sub>2</sub>を排出しない代替となる再生可能なエネルギーの確保が大きな問題となってきた。あらゆる生産活動が環境への配慮を必要とする現代においては、社会基盤施設整備に関しても、建設・維持管理から廃棄に至るまで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<sup>2),3)</sup>。

ここで、橋梁構造物に眼を向けると、これは上部構造と下部構造から構成された、鋼・コンクリートなどの材料を複合的に使用した構造システムと考えられる。近年の基盤整備では、まず既存の基盤施設の長寿命化が図られ、新設の場合でも100年程度以上の寿命と建設コストの極小化、コストを含めたメンテナンスの最小化が重要な要求性能とされ、社会の持続可能性を高めるために長い供用期間を考慮した上で、コストを抑制しながら環境への影響を小さくする橋梁システムの整備を進めることが必要である。地球温暖化に関わる環境負荷を軽減するには、上部構造製作・架設、下部構造建設における、高性能材料やリサイクル材の利用などによるCO<sub>2</sub>排出量の低減のみならず、長寿命化、ミニマムメンテナンス化などによるライフサイクル全体でのCO<sub>2</sub>排出量の低減を、LCC削減を実現しながら行う必要がある。これらの努力により、温暖化抑止への対応が可能となり、後世の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と考えられる。以上の観点から、主にCO<sub>2</sub>排出量およびエネルギー消費量をパラメータとした橋梁形式ごとの環境負荷に関する研究が、伊藤ら、米沢らにより行われている<sup>4)~8)</sup>。これらの研究では、鋼橋においては、原材料の生産に比

較的多くのCO<sub>2</sub>を排出するものの、リサイクル性は高く、従来型の多主桁橋よりも少数主桁橋の方が、使用鋼材も少なく環境負荷に対しては優れた特性を有している結果となっている。また、コンクリート橋は、CO<sub>2</sub>排出量は鋼橋に比して少ないが、リサイクル性に関しては現状の技術水準では鋼橋に劣り、多くの産業廃棄物を排出する傾向にあることが示されている。

また、著者は500年程度の持続的発展期間を考慮して、交通ネットワークのライフサイクルスパンをその約半分程度として200年間と想定し、その期間における橋梁システムの地球温暖化に関わる、CO<sub>2</sub>排出による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地球温暖化に対する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、いくつかのシナリオを設定して環境負荷低減の具体的な方法について検討を行った<sup>9)</sup>。

## 2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究では、文献9)に加えて、鋼の社会的資源ストックと言う概念を取り入れ、再度解析を行い、環境にやさしい橋梁形式を検討することを目的とする。ここで、鋼の社会的資源ストックとは、鋼はリサイクル可能な有限の地下資源であるが、社会基盤構造物にリサイクルの視点を取り入れようとすると、その長期間にわたる供用年数を考慮すれば、一般のリサイクルの概念を当てはめることは適当でなく、例えば、鋼橋に使用された鋼が、資源として社会的にストックされた状態と考えるのが妥当である。そこで、本研究ではDEAのパラメータとして、新たに鋼重を加え再計算を行った。なお、本研究では特に断らない限り、「環境負荷」とは地球温暖化に関する問題を意味するものとする。

また、DEAで複数が効率値1となった場合、真の効率性の順位を決定するために、多変数入出力問題に対する超包絡分析法(Super Data Envelopment Analysis, 以下、SDEAと称す)の適用を試みた。

以上より、本研究では、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、特別な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<sub>2</sub>排出量、コストと鋼重を算出する。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と改善案を求める。次に、上記で得られた各橋梁の効率性を分析し、SDEAを用いて鋼の社会的資源ストックを考慮した環境性能を検討し、解析方法の適用性、

各橋梁形式における環境性能の検討，定量的評価の方向性などに関して検討を加えたので，ここに報告するものである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 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建設段階，維持管理段階および廃棄・架替え段階の3つの段階に分類する<sup>9)</sup>。このライフサイクル期間とは，橋梁を含んだ交通ネットワークのライフスパンを最大200年間として，その間に橋梁の耐用年数が経過した場合には同形式の橋梁を架替えることで，交通需要に対応するものである。交通ネットワークにおける200年間のライフスパンの根拠として，自動車を例として内燃系から燃料電池などの機関に変化した場合でも，車輪走行以外のシステムが実用化されることは相当先であり，車両重量は大きく変化しないことから，長期間に渡り既存の交通網の利用・活用を基本としても重大な錯誤は起こらないと考えられる。また，鉄道系においてリニアなどの浮上走行が一般化すれば，既存の鉄道交通網をそのまま用いることは困難と思われるが，一部にリニア化の計画は存在するものの，大半の鉄道交通網では既存路線の高速化の方向で進んでおり，鉄道系交通システムの大きな変革がいつ生じるかは不明である。人類社会の健全性を500年程度確保する観点からは，各種燃料の埋蔵量や発電効率の向上なども加味して考えると，動力機関の効率性の改善は大きく前進するものの，車輪走行システムは今後も長く存続するとして，本研究では最大200年間のライフスパンを設定した。

また，橋梁の架替えに至るまでの寿命については，建設費の減価償却の観点からは50年ないし60年，現行の道路橋示方書では100年程度，1987年以前のドイツの供用年数に関する基準ではコンクリートRC橋70年，鋼橋80年とされ<sup>10)</sup>，別の考え方としてコンクリートの中性化から見た耐用年数などの見解があり，立地条件，施工技術など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。本研究の基本的なスタンスとしては，前にも述べたとおり既存の交通ネットワークの利用・活用を前提としており，これには設計・施工年次が古い橋梁や維持管理が十分でないもの，海砂を直接使用した橋梁も含まれ，当初の予測よりも遙かに大きな交通量に曝されるケースも多く，現行の示方書に規定されている100年程度の使用に耐えられない場合も容易に想定される。以上を考慮して，本研究で取り扱う橋梁については，その供用期間中適切なメンテナンスが行われ，極端な塩害などを受けないことを仮定して，橋種，

表-1 CO<sub>2</sub>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
鋼炉製熱間圧延鋼材	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
塗料	0.452

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。我が国では，平成16年2月に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<sup>11)</sup>。よって，本研究のLCC計算においては，割引率4%を考慮して計算を行った。次に各段階の設定条件について言及する。

#### a) 初期投資段階

初期投資段階においては，橋梁の建設時におけるCO<sub>2</sub>排出量，コストおよび鋼重を算出する。CO<sub>2</sub>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，表-1の土木学会環境委員会原単価表<sup>12)</sup>の原単位を乗じて算出した。施工時における環境負荷は，文献4)に詳しく述べられているが，橋種の違いによる差異は床版形式の影響以外は比較的小さく，後述する本研究の橋梁の立地条件（どの橋種も全く同一）や構造条件（RC床版を使用）からはほとんど差が生じないと判断した。解析対象の橋梁は，橋長は同一で2径間と3径間のものを対象としており，文献4)によれば径間数が減少すると下部工施工のCO<sub>2</sub>排出量は減少するが，上部構造の重量増加の影響で，上部工架設時のCO<sub>2</sub>は逆に増大し，結果として径間数が減少しても施工に関わる環境負荷は同程度か，むしろ増加する傾向にあることが示されている。なお，文献4)における対象橋梁は，橋長200m以上の比較的大規模な橋梁3橋を比較したものであり，(2)にて詳述する，本研究の対象橋梁はより小規模であり，施工時の環境負荷はほとんど変わらないと考えられるため，ここでは加算を行わなかった。

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，アスファルト等の各重量に積算資料<sup>12)</sup>の価格を乗じることで算出し，CO<sub>2</sub>排出量と同様の理由により施工時のコストは算入していない。さらに主桁の製作費については，鋼橋は工場製作費として積算基準が汎用設計ソフトなどにも組み込まれており，溶接延長など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，一般に桁製作費は施工費に含まれるため

判然としないが、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。

b) 維持管理段階

維持管理段階においては、設定された橋梁自体の寿命よりも劣化が早いと考えられる各部についての耐用年数を設定し、各部の耐用年数到来時にそれらを新規に交換することによって、橋梁自体の寿命まで供用して行くと仮定した。

前述のとおり、橋梁の架設地点の環境条件や交通量などの影響で橋梁各部や全体の耐用年数が異なってくるため、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場合、それぞれの寿命を決定する必要がある。本研究では文献(6),(7),(8)などを参考にして耐用年数を設定した。対象とする部位は塗装、床版、橋面舗装、伸縮継手の4種類とし、これらが耐用年数に到達した場合に、更新に伴うCO2排出量とコストを加算することとした。本研究で仮定した劣化寿命を表-2に示す。ここで、表-2においてPC床版の耐用年数を最大値として100年と設定したが、橋梁自体の寿命は75年であるため、架替えと同時に床版も更新することとした。

c) 廃棄・架替え段階

廃棄・架替え段階において、CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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、ここでも初期建設時と同様の理由で除外している。

この際に、社会的資源ストックとしての鋼を回収することで、リサイクルの概念を導入し、DEAおよびSDEAのパラメータとして扱うこととした。

この段階でのコストに関しては、文献(8)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。

(2) 解析手法

(2.1) 包絡分析法と超包絡分析法

本研究では橋梁システムの環境負荷の効率性解析に、まず包絡分析法(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、製品に対して、比率尺度を用いて効率性を評価する方法であり、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対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)の考え方に応じていくつかのモデルが与えられているが、通常、解析手法は2段

表-2 各部材の寿命

	従来型 鋼橋	少数 主桁橋	RC 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

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を解くことによつて解を得ることができる<sup>13),14)</sup>。

$$\begin{aligned} \theta x_0 &= X\lambda + s_x \\ \min \theta & \\ \min y_0 &= Y\lambda - s_y \\ \min \theta & \\ \theta \geq 0, \lambda \geq 0, s_x \geq 0, s_y \geq 0 \end{aligned}$$

第1目的関数  
第2目的関数  
制約条件

ここで、 $\theta$ 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。 $X, Y$ は各活動の入出力、 $\lambda$ 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を解くことによつ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 $(\lambda, s_x, s_y)$ 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、事業体などの活動において、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。このとき出力(産出)/入力(投入)という比を用いて、その変換過程の比率尺度を求めたものが効率性であり、この値の大小によつて事業体の相対比較を行うことが可能となる。

また、超包絡分析法(SDEA)は、複数の効率解が得られたとき、効率解を1つずつ消去して計算を繰り返す、他の活動に対する影響度を比較して最も効率的な活動を決定する方法である。SDEAにおける効率性の判断は、図化できる程度の入出力関係であれば簡単に行えるが、多変数入出力の場合、著者らの知る限りでは確立されていない。そこで本研究では、最も効率的な活動を1つずつ消去することにより、他の活動におけるD効率の変化量の合計に着目して順位付けを行うこととした<sup>15)</sup>。

具体的には、効率解を1つずつ消去してDEA

の再計算を行い、その時の他の活動における D 効率を求める。このときの D 効率の変化の合計を計算し、その絶対値が最大となる活動が最も効率的と判断することとした。すなわち、消去した最も効率的な活動の他の活動に対する影響度が大きければ、D 効率の変化量の合計は大きくなると考えられることから、その活動は他の活動に対して影響度が高いと判定することが可能であるため、本研究では D 効率の変化を指標として多入力多出力における SDEA の効率性順位付けの方法として用いている<sup>15)</sup>。

## (2.2) 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、前回と同様に一般国道などの生活道路に架かる中規模の橋を想定して、橋長 90m、幅員 11.8m の直線橋を用いる<sup>9,15)</sup>。その内訳は、上部構造形式に関しては、鋼橋では 4 主桁橋、5 主桁橋、2 箱桁橋、1 箱桁橋の従来型橋と、合理化を行って低コストと鋼重の削減を目指した 2 主桁橋（少数主桁橋）について、また、コンクリート橋についてはポストテンション方式 PC 橋の合計 6 種類を対象とした。2 主桁橋に関しては PC 床版を、他の従来型鋼橋には RC 床版を使用している。また、4 主桁橋は、通常形式に若干の合理化を施したものであり、その効果がどの程度あるか検討するためである。橋長 90m に対する径間割としては、鋼橋については 2 径間と 3 径間の場合を、PC 橋は 3 径間のみとした。これらの組み合わせの総数は、合計 11 種類となる。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、その結果に基づいて CO<sub>2</sub> 排出量および工費を算出した。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 は各橋梁形式と材料の重量データである。

本研究での設計方法ならびに設計条件は、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、鋼橋の 2 次部材は鋼重の算定には含まれているが、部材断面は型钢を用いて経験的に決定した<sup>16)</sup>。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求めた。これらの方法は、実務設計とは異なるが、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考えられるため、このような手法を用いている。なお、前述の通り、本研究では現状の橋梁システムについて全ての橋梁の寿命を 75 年と仮定して解析を行っている。また、架替え時において旧橋撤去後に新設される橋梁も、旧橋と完全同一として扱っている。

## (2.3) LCCO<sub>2</sub>および LCC の算出

以上より、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、ライフサイクル

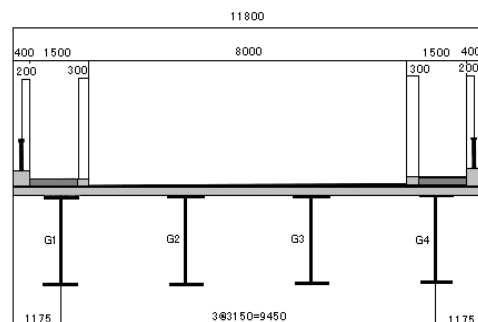


図-1 2 径間連続 4 主桁橋断面図

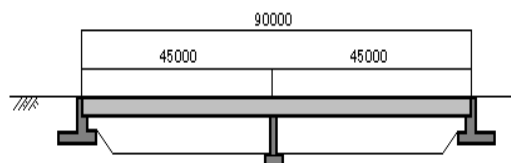


図-2 2 径間連続 4 主桁橋側面図

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	
3	2 径間 5 主桁	274.12	1941.67	
4	3 径間 5 主桁	227.41	2355.82	
5	2 径間 2 箱桁	286.92	1963.43	
6	3 径間 2 箱桁	220.24	2367.21	
7	2 径間 1 箱桁	327.38	1952.67	
8	3 径間 1 箱桁	293.03	2356.60	
9	2 径間 2 主桁	292.15	1963.36	
10	3 径間 2 主桁	162.94	2367.27	
11	3 径間 PC	68.71	3187.18	

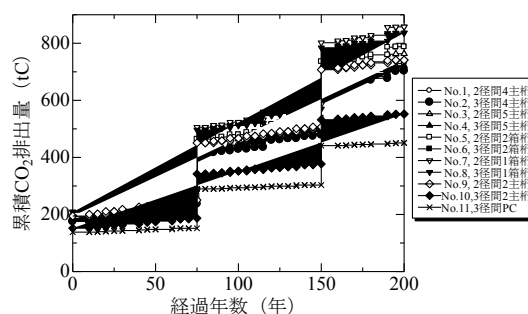


図-3 ライフサイクル環境負荷

200 年を想定した LCCO<sub>2</sub> および LCC の算出を行った。図-3 はライフサイクル全体での LCCO<sub>2</sub> であり、図-4 は割引率を考慮した場合の LCC 算定結果である。

図-3 における LCCO<sub>2</sub> の算定結果を見る限りにおいては、No.11 の 3 径間 PC 橋が最も CO<sub>2</sub> 排出量が小さい橋梁形式であるという結果となった。鋼橋に関しては No.10 の少数主

桁橋の CO<sub>2</sub> が少なく、従来型鋼橋は両者と比較して LCCO<sub>2</sub> が大きい形式であることがわかる。

LCC については、図-4 のように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。したがって、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。また、割引率 4% で 100 年程度経過すると、LCC がほぼ一定になり、150 年目の 2 度目の架替え時にもほとんど変化しないという結果から、社会基盤構造物の寿命は少なくとも 100 年、可能であれば 150 年程度が投資効果の上からは望ましいことが理解できる。

以上の結果は、単純に LCCO<sub>2</sub> や LCC を比較する上では、コンクリート橋が鋼橋に比して優れており、鋼橋の中では少数主桁橋がかなり良好である点から、従来の伊藤らの研究などと一致する傾向を示している<sup>9)</sup>。よって、本研究における橋梁のライフサイクルの設定、予備設計手法や LCCO<sub>2</sub> および LCC の算出方法に大きな問題は生じていないと考えられ、本研究ではこのデータを用いて DEA および SDEA による解析を実施した。

#### (2.4) DEA および SDEA における入出力関係

以上のような結果を用いて、DEA を適用する場合、入出力関係を十分に検討する必要がある。本研究では、それぞれのパラメータを入れ替える予備解析を行って検討した結果、CO<sub>2</sub> 排出量および LCC を入力とし、出力はその橋梁が入力に対する製品として、ライフサイクルスパンにわたって供用されることを考慮して 1 を与えることとした。また、橋梁の寿命は 75 年間と設定したため、全ての橋梁で 75 年を出力値として加えている。さらに、架替え時における資源ストックとしての鋼重を出力値として設定した。また、時間的には、4 章で考察した通り、100 年を越えて 2 回目の架替えを迎える 150 年目でも、割引率 4% を考慮すると、75 年目の 1 回目の架替え以降、各橋梁における LCC の差はほとんど変化しないため、入力値としては 2 回目の架替え直前の 140 年経過時の LCC を入力値として用いることとした。表-4 に、DEA および SDEA における入出力関係のパラメータを示す。

### 4. 研究成果

#### (1) DEA による解析結果

表-5 に、DEA による解析結果を示す。まず、D 効率の括弧内の数値は鋼重を無視した場合の効率値である。また、優位集合における数字は、各橋梁が優位集合であると見なす橋梁

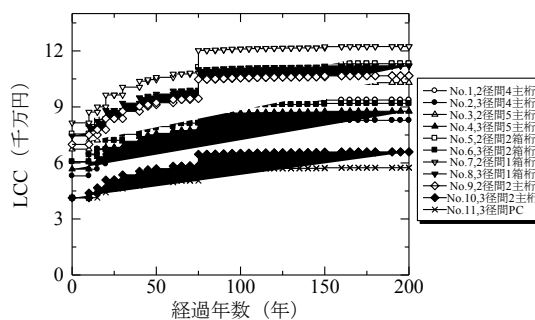


図-4 割引率を考慮した LCC

表-4 DEA と SDEA における入出力関係

No	入力値		出力値		
	CO <sub>2</sub> (tC)	LCC (千円)	橋梁 (1 橋)	寿命 (年)	鋼重 (t)
1	491.94	9.32	1	75	251.54
2	474.67	8.23	1	75	215.13
3	515.20	10.24	1	75	274.12
4	486.47	8.72	1	75	227.41
5	531.80	11.25	1	75	286.92
6	478.76	9.14	1	75	220.24
7	578.88	12.16	1	75	327.38
8	564.05	11.14	1	75	293.03
9	500.79	10.61	1	75	292.15
10	378.81	6.55	1	75	162.94
11	303.14	5.71	1	75	68.71

の番号と依存度を示している。「入力を改善」、「出力を改善」の意味は、DEA によって計算される、最も効率的な活動になるための具体的な改善目標値である。

表-5 に着目すると、D 効率は、鋼橋 3 橋と PC 橋が 1.0 となり、全ての橋梁で 0.9 以上となる結果となった。鋼重を考慮しない場合は、PC 橋に比して D 効率は 0.5~0.8 程度であることから、鋼橋に使用される鋼を、社会的資源ストックと見なすことで鋼橋の D 効率は大きく向上し、PC 橋、鋼橋ともほぼ同程度の環境性能となることが判明した。これは、鋼橋において、リユースやリサイクルを十分に考慮した上で、必要な橋長に対して適切な橋梁形式、径間割を選択して設計すれば、環境性能もある程度確保できる結果となることを示していると考えられる。

ここで、D 効率と改善案に着目すれば、まず No.1 と No.2 において No.2 の方が非効率で CO<sub>2</sub> 排出量が多すぎるという結果になっている。これは、橋脚 1 基分の CO<sub>2</sub> が影響し、わずかながら D 効率が低下したと思われる。また、高度成長期に多数架設されたであろう No.4 については、入力の改善値からは CO<sub>2</sub> が若干多く、LCC もわずかに高いが、出力の改善を見ると、140 年間の解析期間の中で、製品が 0.018 の不足、すなわちコストダウン



表-5 DEA 解析結果の一覧（140 年間，架け替え 1 回）

橋梁 No.	D 効率	優位集合	スラック解		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
1	1.0000 (0.6162)	1 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	491.937	491.937	0.000	491.937	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	9.316	9.316	0.000	9.316	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	251.540	251.540	0.000	251.540	0.000
2	0.9937 (0.6937)	1 (0.589) 10 (0.411)	余剰	26.2361	CO <sub>2</sub> (tC)	474.668	445.446	-29.222	448.266	-26.402
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	8.233	8.233	0.000	8.233	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.475	0.475
			不足	0.0000	鋼重 (t)	215.130	215.130	0.000	215.130	0.000
3	0.9799 (0.5884)	1 (0.444) 9 (0.556)	余剰	7.9593	CO <sub>2</sub> (tC)	515.199	496.859	-18.340	507.076	-8.123
			余剰	0.3143	LCC (千万円)	10.240	9.720	-0.521	9.920	-0.321
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.021	0.021
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	76.542	1.542
			不足	0.0000	鋼重 (t)	274.120	274.120	0.000	279.757	5.637
4	0.9823 (0.6550)	1 (0.728) 10 (0.272)	余剰	1.6714	CO <sub>2</sub> (tC)	486.468	476.171	-10.297	484.766	-1.702
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	8.719	8.564	-0.155	8.719	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.018	0.018
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	76.354	1.354
			不足	0.0000	鋼重 (t)	227.410	227.410	0.000	231.515	4.105
5	0.9324 (0.5700)	9 (0.960) 10 (0.040)	余剰	0.4102	CO <sub>2</sub> (tC)	531.800	495.442	-36.358	531.360	-0.440
			余剰	0.0441	LCC (千万円)	11.248	10.443	-0.804	11.200	-0.047
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.072	0.072
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	80.437	5.437
			不足	0.0000	鋼重 (t)	286.920	286.920	0.000	307.721	20.801
6	0.9137 (0.6332)	1 (0.154) 9 (0.338) 10 (0.508)	余剰	0.2158	CO <sub>2</sub> (tC)	478.763	437.240	-41.523	478.527	-0.236
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	9.138	8.349	-0.788	9.138	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.094	0.094
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	82.082	7.082
			不足	0.0000	鋼重 (t)	220.240	220.240	0.000	241.036	20.792
7	0.9772 (0.5237)	9 (1.000)	余剰	4.5088	CO <sub>2</sub> (tC)	578.880	561.178	-17.702	574.266	-4.614
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	12.163	11.886	-0.277	12.163	0.000
			不足	0.1206	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.121	1.147	0.147
			不足	9.0442	寿命 (年)	75.000	75.000	9.044	86.004	11.004
			不足	0.0000	鋼重 (t)	327.380	327.380	0.000	335.015	7.635
8	0.9554 (0.5374)	9 (1.000)	余剰	3.6569	CO <sub>2</sub> (tC)	564.047	535.209	-28.838	560.219	-3.828
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	11.136	10.639	-0.407	11.136	0.000
			不足	0.0003	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.047	0.047
			不足	0.2259	寿命 (年)	75.000	75.226	0.226	78.741	3.741
			不足	0.0000	鋼重 (t)	293.030	263.030	0.000	306.723	13.693
9	1.0000 (0.6053)	9 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	500.789	500.789	0.000	500.789	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	10.607	10.607	0.000	10.607	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	292.150	262.150	0.000	292.150	0.000
10	1.0000 (0.8713)	10 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	378.814	378.814	0.000	378.814	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	6.555	6.555	0.000	6.555	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	162.940	162.940	0.000	162.940	0.000
11	1.0000 (1.0000)	11 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	303.138	303.138	0.000	303.138	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	5.711	5.711	0.000	5.711	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	68.710	68.710	0.000	68.710	0.000

表-6 SDEA の解析例

橋梁 No.	初期解析の D 効率	No.1 を削除		No.9 を削除		No.10 を削除		No.11 を削除	
		D 効率	増加量	D 効率	増加量	D 効率	増加量	D 効率	増加量
1	1.0	×	0	1.0	0	1.0	0	1.0	0
2	0.99716	0.99517	-0.00199	0.994128	-0.00303	1.0	0.00284	0.994128	-0.00303
3	0.98020	0.98082	0.0006206	1.0	0.019799	0.980202	8.2E-07	0.980202	8.2E-07
4	0.98127	0.98245	0.00118	0.98125	-1.7E-05	0.985672	0.0044018	0.981253	-1.7E-05
5	0.93241	0.93241	0	0.99566	0.063553	0.933013	0.0006029	0.932404	-5.6E-06
6	0.91346	0.91366	0.000235	0.93685	0.023423	0.953731	0.0403059	0.91339	-3.5E-05
7	0.97751	0.97775	0	1.0	0.022249	0.977751	-4.6E-07	0.977751	-4.6E-07
8	0.95529	0.95529	0	0.97562	0.020327	0.955293	-4.6E-07	0.955293	-4.6E-07
9	1.0	1.0	0	×	0	1.0	0	1.0	0
10	1.0	1.0	0	1.0	0	×	0	1.0	0
11	1.0	1.0	0	1.0	0	1.0	0	×	0
		Σ	4.56E-05	Σ	0.146304	Σ	0.0481505	Σ	-0.00309

する可能性は大きいと思われる。ただし、No.7 の 2 径間 1 箱桁橋では D 効率 0.9772 であり、箱桁に適した径間長の場合は高い効率性を示す可能性もあるものと考えられる。さらに、優位集合に関しては、D 効率が 1 以下の橋梁は、形式や径間割が近い橋梁を選択する傾向があることが分かった。少数主桁橋については、2 径間、3 径間ともに D 効率が 1 となっており、今回の解析結果では有意な差は見られないが、逆に支間長が与えられた際に、D 効率の値を比較検討することで、最適な径間割の検討ができ得るものと思われる。また、PC 橋において、今回はメンテナンスフリーとして CO<sub>2</sub>、LCC の計算を行っているが、実際はひび割れなどの補修も行われているため、CO<sub>2</sub> 排出量および LCC は増加する可能性が高いと考えられる。

(2) SDEA による順位の検討

表-6 に、本研究における SDEA の解析結果の一例を示す。まず、初期解析において橋梁の建設に使用された鋼を社会的な資源ストックとして考えた場合、4 種類の橋梁で D 効率が 1.0 となり鋼橋、PC 橋ともに適切に設計されたケースではほとんど差が生じないことが判明した。箱桁を用いた橋梁は、0.913~0.977 程度と効率性が他の橋梁形式と比較してやや劣る結果となったが、2 径間ないし 3 径間の橋長 90m 程度では、鋼箱桁の選択は特殊な設計と言っても過言ではなく、そのため効率性が若干悪化したものと考えられる。

次に、SDEA の結果に着目すると、表-6 の場合増加量の合計が、No.9 の 2 径間 2 主桁橋を除外した場合が最も大きくなっており、No.9 の橋梁形式が最も効率的であるという結果が得られた。表-4 のデータを比較すると、鋼重、CO<sub>2</sub> 排出量、LCC の面から考えてもバランスが取れており、この形式が最も環境性能が高いものと判断できる。したがって、本研究で用いた多入出力の SDEA における評価方法は、D 効率が複数 1.0 となった場合の正

表-7 DEA と SDEA の比較 (順位)

No	橋梁形式	DEA	SDEA
1	2 径間 4 主桁	1 位	7 位
2	3 径間 4 主桁	2 位	4 位
3	2 径間 5 主桁	4 位	6 位
4	3 径間 5 主桁	3 位	8 位
5	2 径間 2 箱桁	7 位	7 位
6	3 径間 2 箱桁	8 位	8 位
7	2 径間 1 箱桁	5 位	5 位
8	3 径間 1 箱桁	6 位	8 位
9	2 径間 2 主桁	1 位	1 位
10	3 径間 2 主桁	1 位	2 位
11	3 径間 PC	1 位	3 位

しい順位付けに適用可能であると思われる。

また、表-7 は DEA による順位付けと SDEA による順位付けの比較である。DEA の場合、1 位の橋梁が 4 種類も存在しどれが最も効率的か判然としないが、下位となる橋梁についてはほぼ正しいと思われる結果が得られている。一方、SDEA については、上位 6 位までは完全に順位付けがなされたものの、下位については No.1 と No.5 が同率 7 位、No.4、6、8 が同率 8 位となってしまう、最後まで十分な順位付けが出来ない結果となった。この原因は、上位から順位が決まり、比較する事象の数そのものが減少してしまい、最終的には下位の橋梁においてすべて D 効率が 1.0 になることにより、比較が不能になったことが挙げられる。また、特筆すべきは初期段階で D 効率が 1 位であった No.1 の橋梁が SDEA では 7 位にランクされたことである。表-6 のデータからは、資源ストックとしての鋼重は比較的大きいが、CO<sub>2</sub> 排出量、LCC もそれなりに大きく、データからは非常に中途半端な印象を受ける。このため、SDEA のような厳密な順位付けを行うと、わずかな差が順位付けに大きく影響し、結果として下位にランクされたものと推測される。したがって、比較する



対象により DEA と SDEA を使い分け、すべてにおいて正しい順位付けを行うことが必要であると考えられる。

### (3) 結論

以上のように、本研究は DEA および SDEA を用いて、社会における鋼の資源ストックという概念を導入し、各種橋梁形式の D 効率を求めることによって、環境性能向上の可能性について検討を加えたものである。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 解析結果からは、鋼を社会的資源ストックと見なし、環境性能を評価すれば、鋼橋、PC 橋ともほぼ同一の環境性能を有することが判明した。
- (2) 架橋地点に対して、適切な径間割、形式の選択が行われていれば、十分な環境性能が得られることが明らかとなった。
- (3) DEA は、具体的な改善案が提示可能なため、例えば、現在供用中の橋梁において、今後の維持管理計画を策定する一助にでき得る可能性も有するものと思われる。
- (4) 本研究で用いた SDEA の順位設定方法は妥当であり、上位となる事象の正確な順位付けがなされることが確認された。

最後に、今後の課題として、具体的な実現可能性を考える必要がある。すなわち、数値的なパラメータの削減量などは解析で具体的数値として得られるが、実際にどのようなメンテナンスや架替えを行えば、CO<sub>2</sub> を削減可能なのか、現実的な方法を十分に検討する必要があるものと思われる。

### 【参考文献】

- 1) 環境省：環境白書 平成 16 年度，環境省，2004.
- 2) 全国地球温暖化防止活動推進センター HP, <http://www.jccca.org/>, 2012, 4.
- 3) 安井 至：市民のための環境学ガイド時事編 HP, <http://www.yasuienv.net/>, 2012, 4.
- 4) 米沢栄二，三輪恭久，中原勝也，中村俊一：CO<sub>2</sub> 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.
- 5) 伊藤義人，梅田健貴，岩田厚司：橋梁のライフサイクル環境負荷および建設副産物発生量に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A, pp.1109-1118, 2001.
- 6) 伊藤義人，平野徹，永田裕規，ハマート<sup>®</sup> 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.
- 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) 小幡卓司，大野良輔：橋梁構造物のライフサイクルにおける地球温暖化環境負荷の定量的評価に関する研究，土木学会論文集 A, Vol.62, No2, 2006, 4, pp191-203.
- 9) 土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会編：近代木橋の今とこれから—その実績と将来展望—，土木学会平成 16 年度全国大会研究討論会研-7 資料，2004.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 経済調査会：積算資料 2002 年 12 月号，経済調査会，2002.
- 13) 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.
- 14) 今野浩：線形計画法，日科技連出版社，1987.
- 15) 中西宏貴，小幡卓司：橋梁構造物の地球温暖化環境負荷における定量的評価手法に関する研究，土木学会関西支部平成 23 年度発表会講演概要集，I-11，平成 23 年 6 月
- 16) 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.

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- ① 中西宏貴，小幡卓司，橋梁構造物の地球温暖化環境負荷における定量的評価手法に関する研究，土木学会関西支部平成 23 年度発表会講演概要集，査読無，2011，I-11（2 頁）.
- ② 小幡卓司，森若浩司，中西広貴，岡本和也，資源ストックを考慮した橋梁の地球温暖化環境負荷における定量的評価法，土木学会第 66 回年次学術講演会概要集第 1 部，査読無，2011，pp267-268.
- ③ 九里将太郎，中西宏貴，小幡卓司，資源ストックを考慮した各種橋梁形式の地球温暖化環境負荷に関する研究，査読無，土木学会関西支部平成 24 年度発表会講演概要集，2012，（印刷中）.
- ④ 小田 輝，小幡卓司，橋梁構造物の地球温暖化環境負荷における定量的改善案に関する研究，土木学会関西支部平成 24 年度発表会講演概要集，2012，（印刷中）.

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 中西 宏貴，橋梁構造物の地球温暖化環境負荷における定量的評価手法に関する研究，土木学会関西支部平成 23 年度発表会，平成 23 年 6 月 12 日，京都大学吉田キャンパス（論文発表賞受賞）。
- ② 小幡卓司，資源ストックを考慮した橋梁の地球温暖化環境負荷における定量的評価法，土木学会第 66 回年次学術講演会，平成 23 年 9 月 9 日，愛媛大学法学部講義棟 102。

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小幡 卓司 (OBATA TAKASHI)

研究者番号：20214215

### (2) 研究分担者

新納 格 (NIIRO TADASHI)

研究者番号：70198422

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：