

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

LIFECYCLE EVALUATION FOR BRIDGES INCORPORATING GLOBAL ENVIRONMENTAL IMPACT

伊藤義人*, 永田裕規**, スヌワル・ラックスマン***, 西川和廣****

Yoshito ITOH, Hiroki NAGATA, Laxman Sunuwar and Kazuhiro NISHIKAWA,

*工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**工修 戸田建設株式会社関東支店土木部 (〒107-0052 東京都港区赤坂 8-5-34)

***工修 名古屋大学 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

****工修 建設省土木研究所 構造橋梁部橋梁研究室 (〒305-0804 筑波市旭 1)

Recently, the environmental problem such as the global warming has become a serious issue in the whole world. The researchers and practical engineers in civil engineering have to pay enough attention to the environmental impact in addition to the function, safety, cost and aesthetics at all lifecycle stages of a civil infrastructure. In this study, a system is developed to estimate the lifecycle CO₂ emission and cost of bridges using information technologies such as database management. This system makes it possible to predetermine the lifecycle performances of infrastructure components according to their deterioration procedure. Finally, for the purpose of reducing the environmental impact, several strategies on recycled materials are analyzed and compared using numerical examples.

Key Words: lifecycle evaluation, global environment, information technology, bridge.

1. はじめに

1996 年 7 月にジュネーブで開催された第 2 回締約国会議 (COP2)に引き続き、1997 年 12 月に、京都市で開催された「気候変動に関する国連枠組み条約第 3 回締約国会議」(COP3)においては、これまでの締約国会議での議論をふまえ、GHG(温室効果ガス, Green House Gas)を 1990 年レベルに削減するため、各国の状況に応じた 2010 年までの具体的な削減目標が定められた。COP3 において、発展途上国については数値目標が課せられておらず、今後の課題となっている。まだ解決すべき問題は多いが、この会議により、世界レベルでの GHG 削減に向けて本格的に動き出したといえるであろう。

数ある地球環境問題のなかで、最も深刻な問題といわれているのが、地球温暖化である¹⁾。その理由は、資源枯渇問題などのように、まだしばらく時間的余裕のある問題に比べ、地球温

暖化はすでに始まっており、様々な影響が全世界的に生じているためである。温暖化は地球規模で生ずるため、その影響も、気温の上昇(気候変動)や海面上昇など、地球全体で生ずることとなる。全球平均気温の推移をみると、過去 100 年間で平均気温が 0.3~0.6 度上昇していると言われている。また、海面上昇については、過去 100 年間に 10~25cm 上昇していると言われている^{2)~3)}。地球の気温が上昇し続けると、気候変動が生じ海面上昇、熱帯雨林の壊滅、砂漠化の進行、植生の変化による食糧問題につながると考えられる。このように問題の生じる規模が大きく、かつ取り返しがつかない事態が想定される。各分野でできる所から対処する必要があると言える。

地球温暖化は GHG の影響により生じている。各 GHG の地球温暖化への直接的寄与度を図-1 に示す。これによると 1992 年までの温暖化に最も寄与している物質は、全体の 63.7%を占

める二酸化炭素であることが分かる。また、近年の大気中の二酸化炭素濃度変化および二酸化炭素排出量の変化を図-2⁹⁾に示す。図-2 から、大気中の二酸化炭素濃度および二酸化炭素排出量ともに産業革命以後急激に増加しているといえる。図-2の傾向は、全球平均温度の変化と一致すると一般に言われている。

地球環境問題を考える際には二酸化炭素排出を削減することが不可欠であり、本研究においても、二酸化炭素排出量を環境負荷評価の指標として用いる。

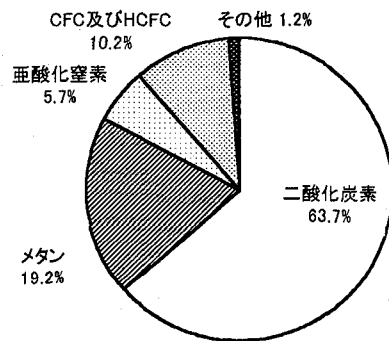


図-1 産業革命以降人為的に排出された温室効果ガスによる地球温暖化への直接的寄与度

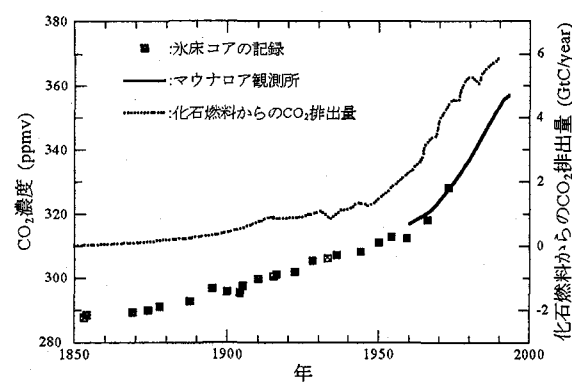


図-2 二酸化炭素濃度の推移と化石燃料からの二酸化炭素排出量

人間活動、基盤条件の形成そのものを土木分野が担ってきているという点で、土木分野は地球環境問題の一つである環境負荷を考えなければいけない分野の1つと考えられる⁴⁾。特に、地球温暖化問題において、図-3に示すように、わが国における社会資本整備の要となる建設業の分野に起因する二酸化炭素排出量は、誘発二酸化炭素排出分も含めると全排出量の1/4⁹⁾に達するという試算もあり、地球温暖化を阻止するという点において、建設分野で排出される二酸化炭素を削減することは非常に重要であると考えられる。

地球温暖化の影響自体を直接扱った研究としては松岡ら⁵⁾の研究が代表的といえる。地球温暖化の影響への対策を扱った研究例には、土木分野での構造物を対象として、その建設時に

排出される二酸化炭素量について評価したものが多い。土木学会地球環境委員会LCA小委員会の研究⁷⁾では、土木構造物の二酸化炭素排出量を算定するための原単位整備と、5種類(橋梁、道路舗装、ダム、トンネル、下水処理施設)の構造物を対象としたとして、構造物の建設時に排出される二酸化炭素量の試算が行われている。建設省土木研究所の研究例⁸⁾では、省エネルギー技術の評価を目的として、構造物において従来工法と省エネルギー工法の二酸化炭素排出量およびコストの比較が行われ、環境問題とコストの両面において最適となる工法の示唆を行っている。さらに伊藤ら^{9)~10)}の研究例では、経済性や景観等を指標として橋梁形式の選定を支援するために用いられる橋梁形式選定システムに環境負荷の項目を付け加え、形式選定の際に地球温暖化問題に対応できるようなシステムを構築している。また、構造物ライフサイクルについて、上記のものとは別にサービスによる二酸化炭素排出量、すなわち通過交通からの二酸化炭素排出量を算出して環境負荷の評価を行った研究例としては加藤ら^{11),12)}の行った研究が挙げられる。

これらの研究では、ある条件を設定し二酸化炭素排出量算出のケーススタディを行うことにより、構造物ライフサイクルおよび施工法の環境負荷特性を把握すること、または代替案との比較を行うことに主眼がおかれている。従って、特定の構造物や工法の環境負荷特性は詳細に把握されている。しかし、構造物の基本計画時において、実際に計画構造物のライフサイクルにわたって環境負荷を算出し、代替案を決定する際には、この過程をシステム化する必要があると考えられる。

二酸化炭素排出による環境負荷に関するライフサイクル評価はまだ始められたばかりである一方で、コストに関するライフサイクル評価については、古くから研究されてきた。社会基盤施設整備にかかるコストは公的資金が用いられるため、限られた資金を有効に使用する必要がある。そのために、構造物のライフサイクル評価を行い、最適な構造物形式および工法を選択する必要があったためである。しかし、地球温暖化が大きな問題となっている現在、環境負荷とコストを同時に評価することが重要であると考えられる。

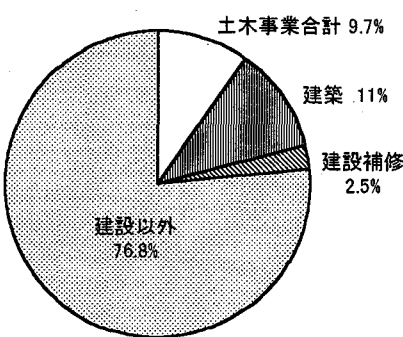


図-3 全産業における建設業の二酸化炭素排出の割合

2. 橋梁のライフサイクル

2-1 橋梁のライフサイクルと対象部材・部品

(1)建設段階

橋梁建設段階におけるライフサイクル評価を行うためには、評価対象とする橋梁計画断面から径間割、上部工形式、下部工形式、基礎形式を決定する必要がある。この一連の作業は、著者らにより文献8)において、評価に必要な情報を計算し、建設時の環境負荷およびコストがシステムティックに算出できる橋梁形式選定システムが作成されている。従って、本研究での建設段階の評価対象は橋梁形式選定システムに準じたものとし、その結果を利用することとする。

(2)維持管理段階

橋梁の維持補修は、通常定期点検により補修を行うかどうかが決まる。従って、本研究においても点検対象部材に着目する。即ち、1)橋面舗装、2)床版、3)塗装、4)伸縮装置、5)支承、6)主桁・床組、7)排水装置、高欄・防護柵、照明等、8)橋脚・橋台に分類し、各種文献を参考にするとともに、複数の橋梁技術者にヒヤリングを行った。点検対象部材や補修方法について、システムティックにライフサイクル評価が可能かどうかについて検討を行ったが、これは現時点では非常に困難な事であることが分かった。最終的には、表-1 に示すような仮定を設け、環境負荷などの第1近似値を検討することにした。

すなわち、本研究では、耐用年数および補修間隔をほぼ一定と推測することが可能で、ライフサイクル評価を行う際、橋梁の寿命において補修回数の推定が可能と考えられ、かつ、環境負荷およびコスト的に重要であると推測される、a)橋面舗装、b)床版、c)塗装、d)伸縮継手、e)支承の5部材を評価対象として扱うこととする。主桁・床組、排水装置、高欄・防護柵、照明においては、劣化の予測が困難であり、補修の間隔に非常に大きなばらつきがあるため、LCA手法を用いてシステム的に評価する対象とすることは現状では困難であるので、今回の評価対象からは除外して考えることとした。

(3)廃棄・解体(架替え)段階

廃棄架替え段階においては、現在以下の4工法が一般的に行われている。

- ①交通を全面封鎖し、改築を行う
- ②仮橋を設けて、交通を迂回し、改築を行う。
- ③片側の交通を止めて、片側づつ撤去改築を行う。
- ④横引きによる改築を行う。

この4工法を選択は橋梁が建設されている場所の地理的条件および車両交通状態により決定される。架替えにかかる環境負荷およびコストを評価するためには、架替えに要する資材および機材、また、単価のデータが必要となる。しかし、架替えにつ

いては、それぞれの工法について統計的にまとめられたデータがほとんど存在していないのに加え、土木事業の資機材およびコストを算出するために用いられる文献などにおいても掲載されておらず、必要なデータを得ることは非常に困難である。従って、本研究におけるライフサイクル評価では、工法ごとに評価せず、すべての工法について同等の環境負荷が発生し、またコストがかかるという仮定をして行うこととした。

表-1 対象部材・部品とその性質

	部材	劣化の要因	定期性	現状の部材寿命 ¹³⁾
上部工	橋面舗装	大型車交通量	○	5~20年
	床版	大型車交通量、 周辺環境、 しゃ水不足	○	15~30年で補修 (寿命は30~50年)
	塗装	周辺環境、橋梁形状	○	5~15年
	伸縮継手	交通量、周辺環境	○	5~20年
	支承	交通量、 周辺環境、橋梁形状、 材料特性、 しゃ水不足	△	20~30年
	主桁床組	橋梁形状、 材料特性	×	-----
	排水装置	周辺環境、橋梁形状	×	-----
	高欄防護柵	衝突など	×	-----
	照明	玉切れなど	×	-----
下部工	橋脚 橋台	地震(示方書)、 円弧滑り、 不等沈下、洗掘	×	-----

○…部材寿命の推定がある程度把握可能な部材

△…部材寿命の推定が困難ではあるが把握可能である部材

×…部材寿命の推定が把握が非常に困難な部材

2-2 橋梁寿命

橋梁の寿命に関する議論には現在のところ、①物理的耐用年数、②機能的耐用年数、③経済的耐用年数の3説が一般的にいわれている¹³⁾。物理的耐用年数は、構造物の寿命から考えられるもので、構造物の性能低下、構造材料の劣化、それに伴う抵抗力の低下など、構造力学的および構造工学的な構造物の寿命から算定されるものである。機能的耐用年数は、建設された構造物が時代の変遷とともに期待される機能を果たしきれなくな

った時点で橋梁の寿命とする考え方である。これは、既設橋梁に供用される交通容量を超える、もしくは橋梁に接続する道路の幅員が変更となった場合や河川改修に伴うものなどが挙げられる。経済的耐用年数については、減価償却資産としての法定耐用年数や、建設費の償還から算定された年数、すなわち償還年数から考えた寿命である。また、維持補修のための費用が増大し、維持補修を続けるよりも橋梁を架け替えた方がコスト的に有利になる場合もこの寿命に含まれる。

②および③については、構造物や素材の耐久性とは関係なく、あくまで人為的な影響による架替え理由であり、本研究において環境負荷をできるだけ削減しようとする場合には、意図的に橋梁を廃棄し架け替えるような考え方はなじまないと考える。従って本研究では物理的耐用年数の考え方を採用し評価を行うこととする。図-4に架替え理由別の架替え橋数と供用年数をまとめたものを示す¹³⁾。横軸に橋梁の寿命を示し、縦軸に橋数を示す。これによると、架替え橋数のピークが2カ所あり、供用年数の短いものは架替え理由から②の説による架替えであると推測できる。従って、①の物理的寿命はこの図より約40～60年であると推測することができると考える。以上より、本研究で評価を行う際には、橋梁の寿命を約40～60年と仮定して行うこととする。

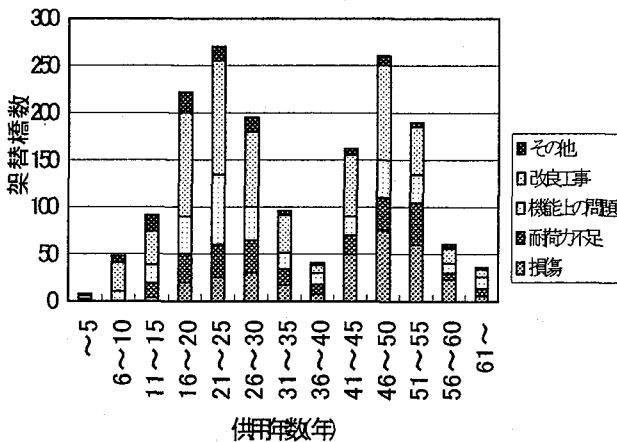


図-4 架替え理由別の架替え橋数供用年数¹³⁾

3. ライフサイクルアセスメント(LCA)手法

3-1 LCA手法の適用

本研究では、交通基盤施設のライフサイクル全般にわたっての評価を目的とするため、LCA手法を用いて評価を行うこととする。LCA手法は、工業製品を対象として評価を行う際、「原材料採取→生産→流通→使用→リサイクル→廃棄」という製品のライフサイクルを通したコストや環境負荷を定量化し、代替案を比較することによって、工程や資材についての評価および改善を行う手法として使用されてきた¹⁴⁾。一般的なLCA手法の流れは、図-5に示されるように4段階からなる。

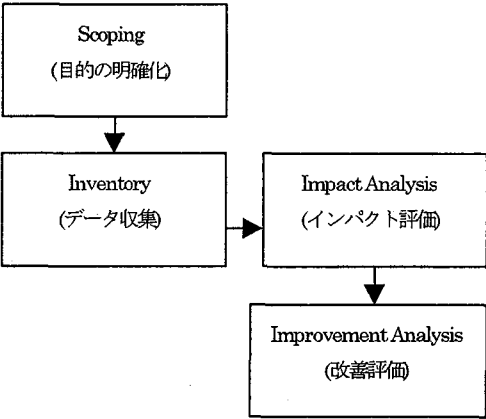


図-5 LCAの流れ

LCA手法は主に工業製品の評価に用いられてきたため、この手法を土木分野に適用できるよう考慮しなければならない。この適用手法について本研究では、文献7)で試みられた手法を参考に図-6のようにする。

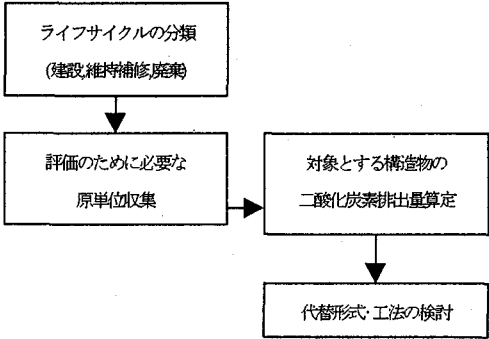


図-6 本研究におけるLCA手法の摘要

第一段階において、目的の明確化は通常のLCAと同じである。範囲設定は建設段階、維持管理段階、廃棄段階とする。すなわち、建設資材調達から廃棄処分までが評価対象となる。資源採取部分の評価に関しては、製造された資材にかかる原単位を用いることで、資源採取部分まで考慮されるため問題ない。本研究で対象とする橋梁に発生する環境負荷には、施設整備による環境負荷の他に、サービスによって生じる環境負荷(通過交通の排気ガスによる大気汚染)が考えられるが、基盤施設の計画時においてサービスによって発生する環境負荷を算出するためには、交通の予測モデルや、波及効果による経済分析モデルなどが必要となり、算出が煩雑で信頼性に欠ける可能性がある。また、建設活動は公的および私的資本の固定に貢献しているもので、ライフサイクルの視点にたてば、それらの資本を長持ちさせるとともに、同時にこれらの固定資本の上で、操業もしくはは運転される活動の物的代謝が省資源・省エネルギー的で低環境

負荷型となるようにあらかじめ構造を組み立てることが可能となる。従って、車両などからの排気ガスのようなサービスによって生じる環境負荷は別途考慮すべきと考え、本研究ではライフサイクルの視点にたった施設整備の環境負荷のみに着目し評価を行うものとする。第2段階においては、既往の研究で算出された原単位を用いることとする。第3段階においては、通常は二酸化炭素排出による影響(大気温度変化など)を評価するが、現時点では定量的に評価することが難しいため、本研究では、二酸化炭素排出量の総量を指標とすることで、その影響度を算定することとする。第4段階では算出された二酸化炭素排出量を代替案のものと比較し、最適な代替案を考察することで改善評価とする。

3-2 ライフサイクルに排出される二酸化炭素の算出法

本研究では、1)建設資材消費による環境負荷、2)建設機械運用に伴う燃料消費による環境負荷、3)建設資材の運搬に伴う燃料消費による環境負荷の3つを合わせたものを環境負荷としている。環境負荷は材料消費および建設機械使用に伴う燃料消費と二酸化炭素排出原単位とを用いて算出する。なお、建設資材消費量、機械運用に伴う燃料消費量、および建設資材の運搬に伴う燃料消費量は文献15)~19)を用いて算出した。

現在までに二酸化炭素排出量を推測するために作成された原単位は複数提案されているが、統一見解を得られた絶対的な値は算出されていない。用途に応じて様々な原単位の算出が試みられているというのが現状である。原単位の算出法には、大きく分けて産業連関分析法と積上げ法が一般的に用いられている^{20),21)}。本研究においては、土木構造物の二酸化炭素排出量を算定する目的で作成された原単位のうち、土木学会地球環境委員会により作成された原単位²⁰⁾と建設省土木研究所化学研究室により作成された原単位⁴⁾を使用することとする。土木研究所によるものは産業連関分析法で算出されており、また、土木学会地球環境委員会によるものは、基本的に積上げ法で算出し、あわせて産業連関表を用いて波及効果なども考慮できるようなものになっている。

3-3 ライフサイクルコストの算出法

コスト算出において、新規建設ではデザインマニュアル^{15),19)}などの統計データ、および市場価格により、コストを算出している。しかし、維持補修および廃棄架替えについては、統計データのような整備されたデータは存在しない。従って、橋梁台帳、橋梁メーカーなどへのヒアリングによってライフサイクルコストを算出することとする。

しかし、名古屋市橋梁課などへのヒアリングにより入手できた橋梁台帳においても、過去の補修記録が明確に示されているものは数例ほどしかなく、維持補修及び廃棄・架替えコストの

単価を算出することは非常に困難であった。橋梁台帳からのデータにおいて、適用可能と思われる数だけのデータが揃っていたのは舗装補修、伸縮装置、旧橋撤去のみで、床版補修および取替え、支承、塗装については満足なデータが収集できなかった。従って、上記の方法で把握しきれないコストについては、土木研究所において橋梁ライフサイクルの試算を行った文献22)からの引用により対応した。

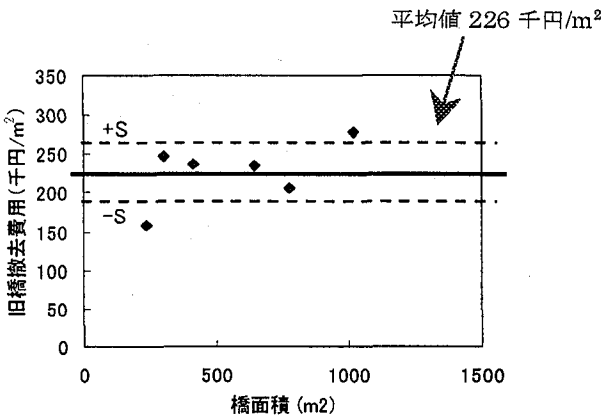


図-7 橋梁台帳による旧橋撤去コスト

表-2 橋梁台帳データ

橋梁名	橋梁形式	橋面積 (m2)	橋面積当たりの 旧橋撤去費用(千円)
A橋	単純プレテンT桁橋	239.5	158
B橋	単純合成桁	416	236
C橋	連続非合成箱桁橋	647	234
D橋	単純鋼床版箱桁橋	1022	277
E橋	単純ポステント桁橋	302	247
F橋	単純合成桁橋	780	206

表-2 および図-7 に名古屋市の橋梁台帳から得られた旧橋撤去コストのデータを示す。図-7 より旧橋撤去の平均値は226千円/m²となり、これを旧橋撤去コストとする。また、橋梁台帳データから求めた平均値の標本標準偏差Sは41千円/m²であり、図中に +S および -S として波線で示した。

橋梁架替えコストについては、一般に新規橋梁建設の3倍と言われているが、本研究では経年価格の割り増しを考慮できるような社会的割引率を用いて算出することとする。ここで用いる社会的割引率は文献22)を参考にし、2%とした。

4. 橋梁ライフサイクル評価のケーススタディ

4-1 評価条件設定

作成した評価システムを利用して橋梁のライフサイクルにおける、建設段階、維持補修(供用)段階、廃棄解体段階の環境負荷の特徴を把握することは、今後の改善点を見いだすため重要であると考え、ここでは、橋梁の条件を設定し、LCA のケーススタディを行うことにより、環境負荷の特徴を把握することとする。

表-3 評価対象橋梁の詳細

上部構造形式	鋼単純非合成 I 桁橋 PC 単純ポステン T 桁橋
橋長	100m
幅員(有効幅員)	17m, (16m)
径間割	33m+34m+33m の 3 径間
桁高	1.90m, 2.00m, 1.90m
主桁本数	9 本
下部構造形式	逆 T 式橋台, 逆 T 式橋脚
基礎構造形式	リバース杭

評価対象については、ケーススタディを行った結果の一般性を重要視するため、橋梁については、現在一般的に多用されている鋼単純非合成 I 桁橋と PC 単純ポステン T 桁橋を対象とし、評価対象地域を名古屋市と想定し、片側 2 車線の橋長 100m の表-3 の橋梁を想定し、評価を行った。

4-2 二酸化炭素排出原単位の違いによる誤差に関する考察

社会基盤施設の環境負荷を算出する際、一般に二酸化炭素排出原単位を用いて算出する。その結果は用いる原単位の種類によって差が生ずることは既に述べた通りである。従って、実際に評価を行い、結果を考察する前に原単位の誤差の範囲について考察する必要がある。そのため、①建設省土木研究所化学研究室により作成された原単位(PWRI)と②土木学会地球環境委員会により作成された原単位(JSCE)の両方を用いて、ライフサイクルについて二酸化炭素排出量を算出し、結果の比較を行った。

図-8 に比較の結果を示す。図-8 から、鋼単純非合成 I 桁橋および PC ポステン T 桁橋について、①を用いたものの方が 5~15%程度高く評価される結果となった。このような結果となった原因としては、①は産業連関表を用いて原単位の算出を行っており、波及効果まで含めた値となっているのに対し、②においては、資材製作工場をベースにし、材料製作に使用される原料や燃料を積み上げて計算しているため、一部には、波及効果が含まれていない可能性がある。従って、波及効果分だけ

①の方が高い二酸化炭素排出原単位となり、結果的に評価の値も高くなったと考えられる。ただし、5~15%程度の誤差は十分ありえるが、どちらを使用しても傾向は変わらないので正しい結果の認識が得られると考える。本研究では、基本的に土木学会地球環境委員会により算出された原単位を使用することとし、地球環境委員会の原単位で算出されていないものについては、土木研究所の原単位を用いることとする。

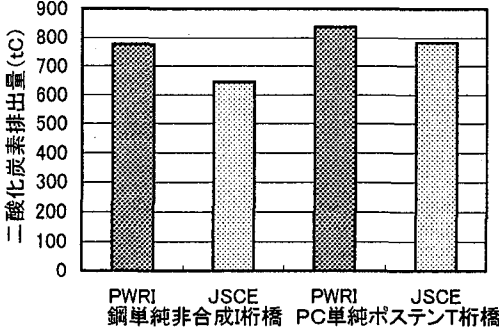


図-8 二酸化炭素排出原単位の違いにより生ずる誤差

4-3 ライフサイクルの各段階に発生する環境負荷およびコストの比較

表-3 の橋梁ライフサイクルのケーススタディを行った。橋梁の各部材が劣化し機能しなくなるまでの寿命については、表-1 に示したように相当な幅があるので、各部材において最も劣化速度の遅い場合、平均的に劣化が進んだ場合、最も劣化速度の速い場合の 3 ケースに分類し、各々のケースについて、新規建設から維持補修(供用)を経て、廃棄までのライフサイクル評価を行った。評価するケースについて、その補修間隔および橋梁寿命を表-4 に示す。橋梁寿命は、ここでは全て 60 年と固定した。

ライフサイクルに発生する環境負荷とライフサイクルコストの評価結果を、図-9 および図-10 にそれぞれ示す。

表-4 各評価ケースの補修間隔

		Case 1	Case 2	Case 3
部材劣化速度		遅い	平均	速い
橋梁寿命(年)		60		
評価対象部材	橋面舗装(年)	20	12	5
	塗装塗替(年)	20	10	5
	床版補修(年)	25	20	15
	床版取替(年)	50	40	30
	伸縮装置取替(年)	20	12	5
	支承取替(年)	30	25	20

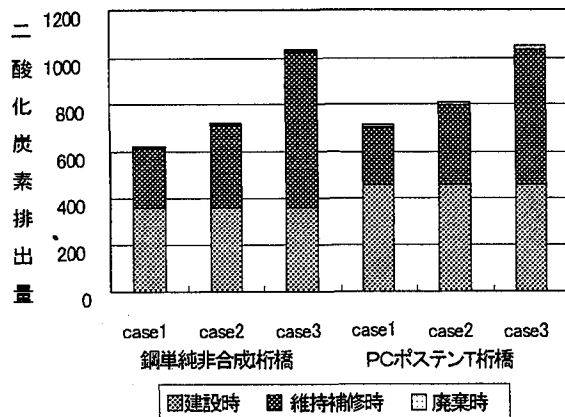


図-9 橋梁ライフサイクルに発生する環境負荷

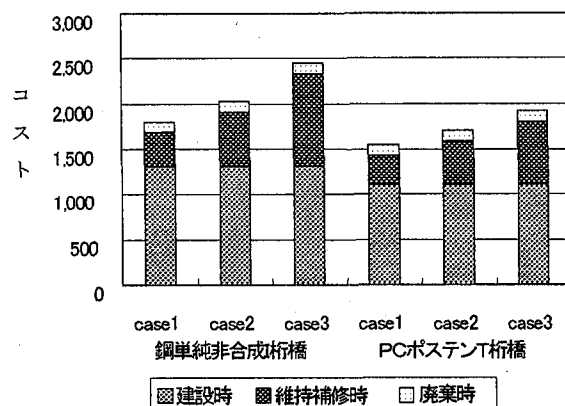


図-10 橋梁ライフサイクルコスト(100万円)

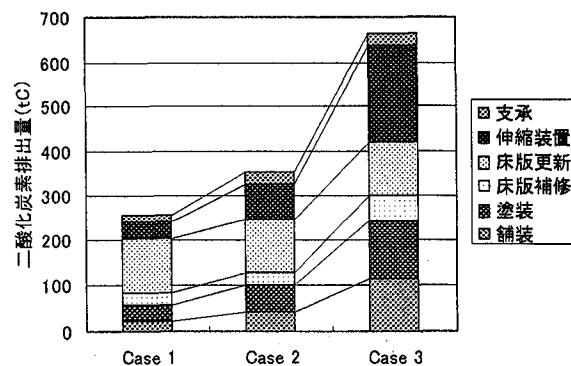


図-11 鋼単純非合成I桁橋の維持補修時における補修項目の環境負担状況

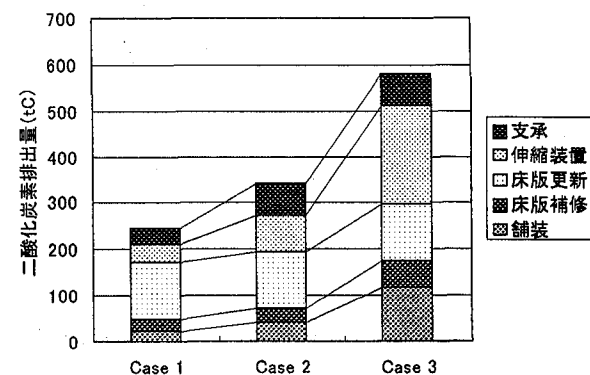


図-12 単純ポステンT桁橋の維持補修時における補修項目の環境負担状況

4.4 維持補修時における各部材の環境負荷分担率

橋梁ライフサイクルのうち維持補修時に発生する環境負荷については、ケースによっては建設時の発生量よりも高くなり、環境負荷削減の余地が十分あることが図-9 より分かる。しかし、環境負荷を削減するためには、維持補修時のどこに課題があるのかをさらに詳しく分析する必要がある。従って、ここでは維持補修時における各補修項目の環境負荷分担状況を示し、考察を行うこととする。本研究で対象とする各補修を1回行うごとの環境負荷を表-5 に示す。また、鋼単純非合成I桁橋と単純ポステンT桁橋の図-11 および図-12 に環境負荷分担の状態をそれぞれ示す。ただし、PC橋については塗装を考慮する必要がないため、評価対象から除外している。

表-5 各補修1回あたりの環境負荷 (単位:tC)

	鋼単純非合成I桁橋	PCポステンT桁橋
舗装	10.6	10.6
塗装	11.5	----
床版補修	28.9	28.8
床版更新	117.9	121.5
伸縮装置	19.7	19.7
支承	13.7	34.2

4.5 リサイクル材使用時の橋梁ライフサイクル評価

橋梁ライフサイクルに発生する環境負荷を削減する手法として、部材の寿命を延長させるなど、運用上の対策により環境負荷を減らす方法とは別に、リサイクル材料を使用することで、材料から発生する環境負荷を削減する方法も考えられる。そのため、ここでは、鋼材とアスファルトについてリサイクル材を用いたときの環境負荷を算出し、新規材料の時との比較を行う。

平成8年12月改訂の道路橋示方書で電炉材と高炉材は区別なく使えるように改訂された。しかし、規格品が十分な量で手に入るなどの理由で実際の橋梁においては、まだ鋼材のリサイクル材(電炉材)も適用可能であるとして評価を行った。なお、アスファルト舗装については、再生アスファルトをリサイクル材として使用することを考えた。

ライフサイクルに発生する環境負荷およびコストの評価結果を図-13 および図-14 に示す。図-13 は、ライフサイクル全体に発生する環境負荷について、新規材料を用いたときとリサイクル材を用いたときの比較を示し、図-14 はライフサイクルにかかるコストの比較を示している。図-13 より、リサイクル材を用いたときは、すべてのケースにおいて新規材料使用時に

比で鋼単純非合成 I 桁橋で約 20%、PC 単純ポステン T 桁橋で約 10%環境負荷を削減することが可能であることを示しており、リサイクル材の使用が環境負荷削減にとって有効であると考えられる。また、図-14 より、コストについては 2~5%未満の削減となり、新規材料時とほとんど変わらないことが分かった。ただし、リサイクル材のコストについては、不明確な点が多いことにも注意が必要である。

図-13 において、鋼橋と PC 橋で削減率が異なっている理由は、リサイクル材の使用割合によるものであると考えられる。すなわち、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が、PC 橋ではアスファルト舗装の部分のリサイクルしか考慮されていないためである。今後、たとえコンクリートのリサイクルを考慮したとしても、コンクリートについては骨材にリサイクル材が使用できる程度で、100%リサイクル可能というわけでは無い。従って、必然的に PC 橋の場合は新規材料を使用する割合が高くなり、その結果リサイクル材使用による環境負荷の削減率が低いものになるであろう。

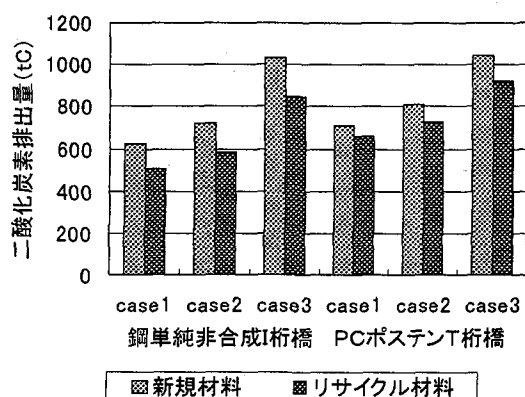


図-13 リサイクル材を用いたときのライフサイクルに発生する環境負荷

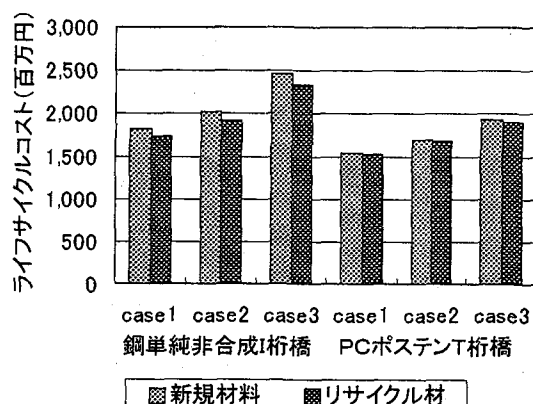


図-14 リサイクル材を用いたときのライフサイクルコスト

5. ライフサイクルシナリオの設定

5-1 はじめに

交通基盤施設は、多種多様な環境下で長期間機能し続けなければならないという特性を持っている。本研究では 4. において寿命や補修間隔を仮定してケーススタディを行った。その結果は、社会基盤施設の環境負荷の特徴を把握する点に関しては意味あるものであると考えられるが、より現実的な評価を行うとすると、実際に構造物が建設される場所に合わせたシナリオに基づいて評価を行う必要がある。ライフサイクルのシナリオを仮定し、実際に評価を行うという研究は、維持管理費用最小化の観点から、建設省土木研究所の西川ら^{29, 30)}により、仮定したライフサイクルシナリオにおいて橋梁ライフサイクルにかかるコストを試算した研究は既に行われている。本研究では、このライフサイクルコスト評価の適用例を用い、環境負荷についても算出することで、環境負荷の見地からのコスト最小化について考察を行うこととする。

5-2 建設省土木研究所の 3 種類のシナリオに基づくライフサイクルコスト評価

建設省土木研究所では、今後建設されるであろう橋梁のライフサイクルコストを最小限に抑えるため、架替えが不要で、かつ維持管理負担費用を最小に抑えることができるような橋梁が必要であると考え、原因が明らかな耐久性喪失要因に対して技術的・経済的に可能な対策を施した最小限の維持行為を前提とした橋、すなわち工学的永久橋の提案を行っている。土木研究所ではこの工学的永久橋を実現する橋を、ミニマムメンテナンス橋とし、200 年の寿命を持つ橋梁の提案を行っている。ミニマムメンテナンス橋では、その目的を達成するために、以下の 10 種類の技術項目について考慮されている。

- 1) 取替えが容易な構造の伸縮装置の採用
- 2) 多径間連続化
- 3) 上路橋形式の採用
- 4) 長寿命で省力化が図れる桁の採用
- 5) 塗装の長寿命化あるいは無塗装化
- 6) 床版の長寿命化
- 7) ゴム系支承の採用
- 8) 橋面防水層の採用
- 9) 排水装置および排水回りの工夫
- 10) 舗装の長寿命化

土木研究所は、上述したような技術を取り入れ、橋梁の各部分材をより耐久性に優れたもの、あるいは維持補修の行いやすいものに変更し、ミニマムメンテナンス橋のライフサイクルコストと従来橋のライフサイクルコストの比較を行っている。従来橋とミニマムメンテナンス橋のライフサイクルコスト試算条件を表-6 に示す。

表-6 ミニмумメンテナンス橋と従来橋のライフサイクルコスト試算条件

	現在の橋	ミニмумメンテナンス橋
架替 サイクル	60 年	200 年
塗装 (塗膜)	塩化ゴム系塗料 15 年	亜鉛めっき 130 年
塗替え	塩化ゴム系塗料 15 年	亜鉛溶射 70 年
床版	RC 床版 40 年	PC 床版 200 年
床版補修	部分補修 建設後 20 年 20 年	継目部補修 50 年
支承	鋼製支承 30 年	ゴム支承 100 年
伸縮装置	従来使用 10 年	ミニмум メンテナンス仕様 20 年
舗装	普通アスファルト 10 年	改質アスファルト 15 年
防水層	シート防水 (舗装のサイクル) 10 年	シート防水 (舗装のサイクル) 15 年
防水層更新	塗装防水 (舗装のサイクル) 10 年	塗膜防水 (舗装のサイクル) 15 年

ミニмумメンテナンス橋では、初期コストは従来橋に比べて高くなっているが、200 年の評価期間においてかかるライフサイクルコストは 1/3 以下となり、ライフサイクルコスト削減に対して、効果の高い橋梁であるとされている。

5-3 土木研究所により設定されたライフサイクルシナリオに対する環境負荷評価

ここでは、土木研究所により行われたライフサイクルコストの試算結果と、本研究で行う橋梁ライフサイクルに発生する環境負荷の試算結果との比較を行う。したがって、評価対象橋梁条件およびシナリオ設定などを土木研究所で設定されたものと同じ条件とし、評価を行うこととする。設定した評価対象橋梁条件を表-7 に示す。

表-7 シナリオ評価のための橋梁諸条件

上部構造形式	鋼単純非合成 I 桁橋
橋長	30.7m
幅員(有効幅員)	11.5m, (10.5m)
径間割	30.7m の単径間
主桁本数	5 本
下部構造形式	逆 T 式橋台
基礎構造形式	鋼管杭

ここで、文献 22)には下部構造および基礎構造形式が明記されていないため、橋梁形式選定システムより選定されたものをを用い、また、ライフサイクルシナリオの設定は、山間部 (Scenario 1)、海岸部 (Scenario 2)、そして都市部 (Scenario 3) の 3 種類とする。ライフサイクル評価を行う期間は、ミニмумメンテナンス橋が 1 サイクル(建設、維持補修(供用)、廃棄)するまでの期間で 200 年とする。なお、都市部においては本研究では住宅地、周辺環境との調和が必要な地域とした。

5-4 各シナリオのライフサイクル評価結果

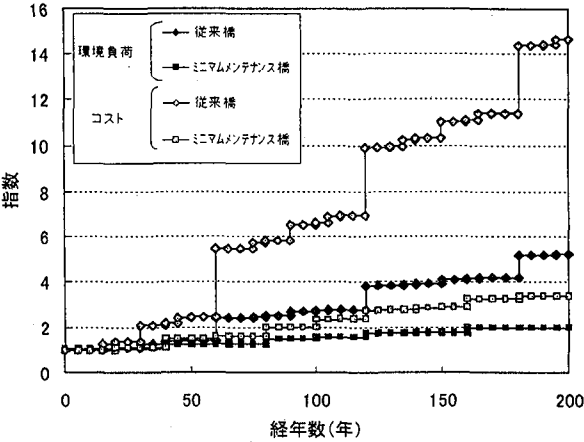


図-15 Scenario1(山間部)のライフサイクル評価結果

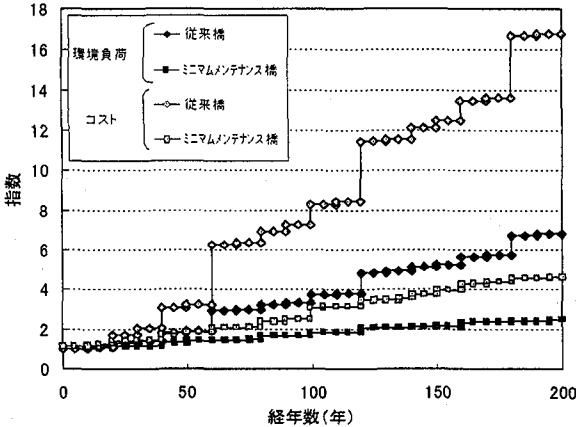


図-16 Scenario2(海岸部)のライフサイクル評価結果

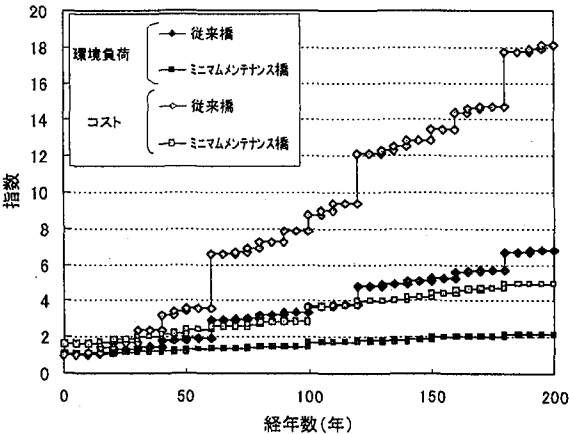


図-17 Scenario3(都市部)のライフサイクル評価

図-15～図-17 は Scenario 1～3 におけるライフサイクル評価の結果を示したものである。図の横軸には新規建設からの経年数を表し、縦軸には、評価期間内における環境負荷およびコストの変化を明確にするため、従来橋の建設時における環境負荷およびコストをそれぞれ 1 とし、その比を示している。図中にプロットされた点は新規建設後からの累積環境負荷および

び累積コストを示しており、経年数が 200 となったところが評価期間内において発生したトータルの環境負荷およびコストである。これらの図において環境負荷およびコストはそれぞれ◆、■および◇、□として示す。また、◆と◇は従来橋を示し、■と□はミニмумメンテナンス橋を示す。

図-15 において、建設後 200 年を経るまでの累積環境負荷および累積コストについては、両者ともに従来橋の方が高くなっており、環境負荷については建設時の約 2.6 倍となり、コストについては約 4.3 倍もの差が生ずる結果となった。なお、山間部における建設時のコスト及び環境負荷の内訳は、表-8 のようになる。

表-8 山間部の建設時の環境負荷及びコストの内訳 (単位: tC, 千円)

	従来橋		ミニмумメンテナンス橋	
	コスト	環境負荷	コスト	環境負荷
材料・加工費用	24,999	50.205	11,800	54.987
塗装費	7,748	2.571	14,200	----
床版・舗装費用	12,800	31.233	13,200	31.233
防水層	1,000	----	1,000	----
輸送・架設費用	7,900	----	7,900	----

また、コストにおいては従来橋とミニмумメンテナンス橋との差が非常に大きくなっているが、環境負荷については従来橋とミニмумメンテナンス橋とでコストほどは極端な差はみられなかった。また、従来橋のコストおよび環境負荷においては、橋梁の架替え時において大きく上昇していることが分かる。さらに、図-16 および図-17 においても、同じような傾向となった。

これらの結果を総合すると、従来橋においては、架替え時に発生する環境負荷およびコストは他の要因に比べ非常に大きいといえる。従って、ライフサイクルコストを最小化するために提案されたミニмумメンテナンス橋は、耐久性のある部材を使用することによって、架替えを減らしコストだけでなく環境負荷を削減するという点でも、非常に合理的な橋梁と考えられる。

5-5 各シナリオにおけるライフサイクルに発生する環境負荷の比較

ここでは、各シナリオにおける環境負荷の発生について比較し、シナリオの持つ環境負荷特性について考察する。図-18 に 3 種類のシナリオによる環境負荷の発生の比較を示す。なお、図-18 において、従来橋を◆、■および●で示し、ミニмумメンテナンス橋を◇、□および○で示した。

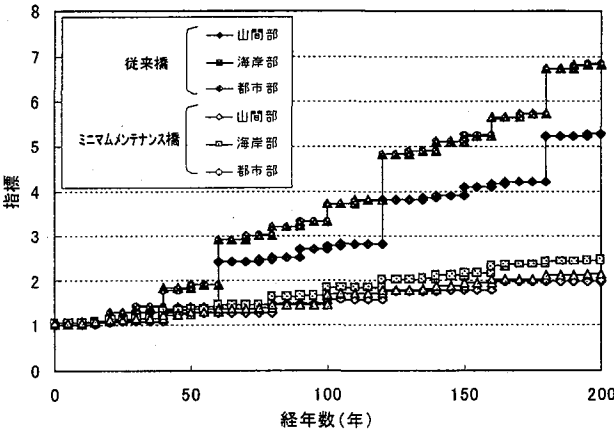


図-18 各シナリオによる環境負荷排出の比較

従来橋において、都市部と海岸部での橋梁については、ほぼ同じ割合で環境負荷が増加している。また、山間部での橋梁は他のシナリオと比べると、最終的には約 0.8 倍程度となり他のものより発生する環境負荷が少なくなっている。これは、海岸部や都市部に比べ交通量や腐食の面で有利であるためと考えられる。土木研究所のシナリオ設定では、床版の補修間隔について山間部のみ 30 年としており、そのほかは 20 年で補修としているため、結果的に山間部の環境負荷発生が少なくなったと考えられる。一方、ミニмумメンテナンス橋については、どのシナリオにおいてもほぼ同じような経緯で環境負荷が発生している。海岸部での橋梁が他に比べて若干環境負荷の発生が多くなっているが、これは橋梁が塩素イオンの多く存在する海岸部に位置するため、耐食性鋼材の適用が難しく、塗装の塗替えが不可欠なため、他のシナリオより環境負荷が多くなったと考えられる。

以上の結果より、維持補修のコスト削減のために用いられてきた耐食性鋼材や亜鉛メッキ、フッ素塗料などは、コストを削減すると同時に環境負荷も削減できる可能性が高いと考えられる。ただし、ここではあくまでシナリオを想定し、寿命も仮定して行った評価結果であるため、環境負荷に対してより削減効果があるかどうかは、環境促進実験などの材料試験を実際に行い、効果を検証する必要があると思われる。

6. 結 論

本研究では、これまでの構造物の建設段階の環境負荷算出に加えて、ライフサイクル全体の環境負荷を算出できるようなシステムを考案した。また、橋梁寿命の延長という視点からライフサイクルコストの最小化について試みられた研究に基づき、各シナリオごとの環境負荷を試算することでコストと環境負荷の関係を明らかにした。以下に本研究で得られた結論を示す。

- 1) 橋梁のライフサイクル(建設時、維持補修時、廃棄時)評価において、現在用いられている手法や工法に加え、各部材の寿命をまとめることにより、現状でのライフサイク

ル評価の問題点について明らかにした。

- 2) ヒアリングなどを行い情報収集することにより、各補修方法におけるコストや環境負荷の算出を試みた。また、同時に補修間隔についての考察も行った。
- 3) これまで橋梁建設時の環境負荷を扱っていた橋梁形式選定システムを拡張し、橋梁において、ライフサイクル全般にわたって発生する二酸化炭素排出量とライフサイクルコストが算出可能となるシステムを試作した。
- 4) 現在用いられている二酸化炭素排出原単位について、算出方法の違いによる誤差を明らかにし、原単位使用時における信頼性の範囲について示唆した。
- 5) 橋梁ライフサイクルについて環境負荷とコストのケーススタディ評価を行った。その結果、橋梁部材の劣化の進行が速い場合、維持管理時において建設時よりも環境負荷が高くなる可能性を示した。
- 6) 土木研究所が橋梁ライフサイクルコスト最小化の観点から提案したミニマムメンテナンス橋について、環境負荷評価を行った。その結果、コスト最小化を目的としたミニマムメンテナンス橋は、環境負荷についても大きく削減できる可能性を示した。

なお、今回試作したシステムは、まだ第1段階のものであり、大胆な仮定などに基づいたものもあり、今後、種々の目的で利用するためには、さらに基礎的なデータを収集するとともに、種々のレベルでの検証が必要と思われる。

最後に、資料提供やヒアリングに協力いただいた名古屋市橋梁課などの技術者に感謝致します。

参考文献

- 1) IPCC 編(環境庁地球環境部 監訳)：IPCC 地球温暖化第二次レポート，中央法規，平成8年7月
- 2) J. J. Houghton, L. G. Merio Filho et al.：Climate Change 1995-The Science of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996.
- 3) 環境庁編：環境白書(総説)平成9年度版，大蔵省印刷局，平成9年6月。
- 4) 土木研究所資料 資源・エネルギー消費，環境負荷の算定手法の開発と実態調査報告(その1)，建設省土木研究所材料施工部化学研究室，平成5年2月。
- 5) 松岡譲，森田恒幸，水野健太：エネルギー消費技術の改善が二酸化炭素排出量抑制に及ぼす効果のシミュレーション，土木学会論文集，No. 573/VII-4，pp.81-92，1997年8月。
- 6) 松岡譲，森田恒幸，甲斐沼美紀子，水野健太：わが国における二酸化炭素排出量の見通しとその抑制対策の効果について，土木学会論文集，No. 580/VII-5，pp.27-36，1997年11月。

- 7) 盛岡通：土木建設システムにおける LCA の考え方と事例，第4回地球環境シンポジウム講演集，土木学会，pp.29-34，1996年7月。
- 8) 伊藤義人，平野徹，永田裕規，ハマト アシ，西土隆行，加島章：環境負荷を考慮した橋梁形式選定支援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年12月。
- 9) L. Sunuwar, Y. Itoh, H. Nagata, T. Nishido：Characteristics of Environmental Impact of Bridges for Type Selection, Journal of Civil Engineering Information Processing System, Vol. 6, JSCE, pp.173-180, 1997. 10.
- 10) 永田裕規，伊藤義人，スワル ラシマン，西土隆行：環境負荷を考慮した橋梁形式選定に関する2, 3の考察，第5回地球環境シンポジウム講演集，土木学会地球環境委員会，pp.65-70，1997年7月。
- 11) 加藤博和，林良嗣，登秀樹：道路構造代替案の地球環境負荷に関するライフサイクル的評価手法，環境システム研究論文集，Vol. 24，pp.282-293，1996年11月。
- 12) 岡田清，今井宏典：損傷と補修事例にみる道路橋のメンテナンス，阪神高速管理技術センター，平成5年3月。
- 13) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No. 501/I-29，pp.1-10，1994年10月。
- 14) 未踏科学技術協会，エコマテリアル研究会編：LCA のすべて，工業調査会，1995年1月。
- 15) PC 道路橋マニュアル，プレストレスト・コンクリート建設業協会，平成9年3月。
- 16) 道路維持補修の施工と積算，建設物価調査会，1996年6月。
- 17) 土木工事積算研究会編：建設省土木工事積算基準 平成9年度版，建設物価調査会，平成9年4月。
- 18) 建設工事積算研究会編：土木工事積算基準マニュアル 平成9年度版，建設物価調査会，平成9年6月。
- 19) 日本鋼構造協会編：鋼橋計画マニュアル(改訂版)，平成3年9月。
- 20) 酒井寛二：土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定，第4回地球環境シンポジウム講演集，土木学会，pp.43-48，1996年7月。
- 21) 地球環境時代における建築設備の課題，空気調和・衛生工学会地球環境に関する委員会，平成7年7月。
- 22) 土木研究所資料 ミニマムメンテナンス橋に関する検討，建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室，平成9年6月。
- 23) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎 97-7，pp.64-72，1997年8月。

(1998年9月18日受付)