

## 招待論文

# エネルギー使用量を考慮した社会基盤施設の新しい設計法 A NEW INFRASTRUCTURE DESIGN METHOD CONSIDERING RESTRICTION OF ENERGY CONSUMPTION

松尾稔<sup>1</sup>・本城勇介<sup>2</sup>・杉山郁夫<sup>3</sup>

Minoru MATSUO, Yusuke HONJO and Ikuo SUGIYAMA

<sup>1</sup>正会員 工博 名古屋大学 工学部 理工科学研究センター長 土木学会会長  
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 岐阜大学 工学部 土木工学科 助教授  
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 株式会社日建設計 土木事務所 設計部長  
(〒541 大阪市中央区高麗橋4-6-2)

*Key Words: infrastructure design, environmental economics,  
energy consumption, sustainable development,  
carbon serviceability, design method, CO<sub>2</sub> emission*

## 1. まえがき

本研究の目的は、20世紀末の現在、これから人類が直面するであろう資源・環境の制約の問題を踏まえ、これを社会基盤施設の設計と言う観点から捉えたときの、新しいアプローチの仕方を模索し、試案を提示することにある。我々は、今日の根本的な問題を次のように認識している。

産業革命以来、特に20世紀の初頭、そして第2次世界大戦以後、近代の技術と科学の発展と普及に支えられ、世界の物的生産、消費は急激に拡大し、人口も50年ごとに倍増するという著しい増加を示した。これは、人類の歴史の中で未曾有の急激な変化であることは間違いない。もちろんその背後には、化石燃料など地球の長い歴史の中で蓄積された資源の大量の消費と、温室効果ガスの発生に代表される環境負荷の著しい増大があった。

このような、著しい経済成長を実現したのは、資本主義経済社会体制であり、またこの中で発展を遂げた科学技術の応用による生産性の著しい向上であった。このシステムは、人類の物的な欲望を刺激することにより、システム全体の効率化を極限まで追求することを可能にし、またそれを強いるシステムであった。しかし、一方でこ

のシステムでは拡大と成長が前提とされ、成長の停止を許容することのできないシステムでもある。このシステムではまた、資源・環境がその成長の制約となることは前提とされていない。

一方で、このような急激な成長は全世界で一様に起こったのではなく、先進工業諸国と言われる一部の北の国々で先行して起こった変化であった。現在では、最も豊かな国と貧しい国の一人当たりの所得格差は100倍以上にも達している。このような著しい経済的格差は、倫理的にも問題であるが、世界全体の経済・社会システムの安全性の上でも見過ごせない問題である。このような格差を是正し、国際社会を安定な状態に維持するためには、これら発展途上国の経済・社会的な成長のため、今後とも相当程度の経済成長を達成する必要がある。

先に言及したように、今日の成長を可能にした資本主義経済システムと並ぶもう一つの要素は、科学技術であった。これも経済システムの枠組みの中で、経済的な効率性を追求することで著しい進歩を遂げ、その結果細分化、専門分科が著しい。このような枠組みの中では、個別の分野の科学技術は、社会システム全体の中で求められている目的を把握し、これに整合する形で自身の個別分野を発展させて行くことが困難になりつつある。科

学技術においても総合化が必要であり、個々の分野で、全体を視野に入れた調和のとれた目的の設定が重要な課題である。

資源・環境問題を考えるに当たっては、一部のいわゆる「環境主義者」が唱えるように、ただ昔の「シンプル・ライフ」にかえればよいと言った解決はあり得ない。今日の人口は既に20世紀半ばの2倍以上に達しており、これを維持して行くだけでもそのような選択はあり得ないからである。今日では、この問題解決のため、新しいパラダイムが求められている。それは、資源と環境の長期的な保全を可能にする社会システムと、これを支える調和のとれた新しい科学技術の構築を目指すものである必要がある。

このような新しいパラダイムを視野に入れ、我々は今後必要とされる経済開発を可能にしつつ、エネルギー使用量や環境負荷の低減を考慮した社会基盤施設の設計法に関する新しいアプローチを提案するのである。新しい社会基盤施設の計画・設計法とは、現在までに得られている知識の総合化であり、人間活動と自然システムの調和のとれた意思決定手法のことである。

## 2. 研究の背景

### (1) 人口・資源・エネルギーと環境負荷

現在各方面で議論されている種々の環境問題の背景には、周知のように人類の爆発的な人口増大、これと合いました工業文明の進歩による資源とエネルギーの大量使用の問題がある。本節では、この点を基本的な統計を参照しながら簡単に指摘する。

図-1は、1991年に厚生省人口問題研究所より発表された「世界の人口の推移」である<sup>1)</sup>。これは種々あるこの種の推計の内、中位の部類に属する推計と思われるが、これによれば1950年に約25億人の人口が、1990年に53億人となり、2050年には約100億人になると言うまさに爆発的な人口増加を示している。また、その増加のほとんどが途上国で起こることにも注意する必要がある。

図-2は、世界のエネルギー利用の変遷を示したものである。第二次世界大戦後の大量生産・大量消費の進展に伴いこれもまた人口増加以上の爆発的なエネルギー消費が起こっていることが分かる<sup>2)</sup>。またその主役は、石油・石炭・天然ガス等のいわゆる化石燃料である。なお、統計には示されないが、一人当たりのエネルギー消費量には世界で著しい格差があることにも注意を要する。たとえば、全世界人口の5.2%を占める北米のエネルギー消

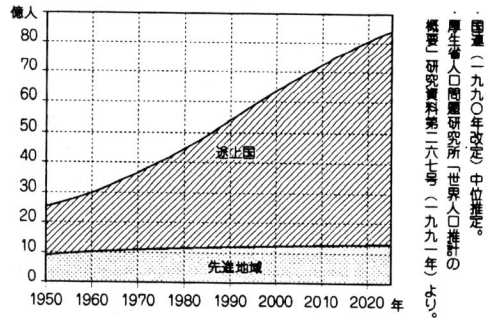


図-1 世界の人口の推移<sup>1)</sup>

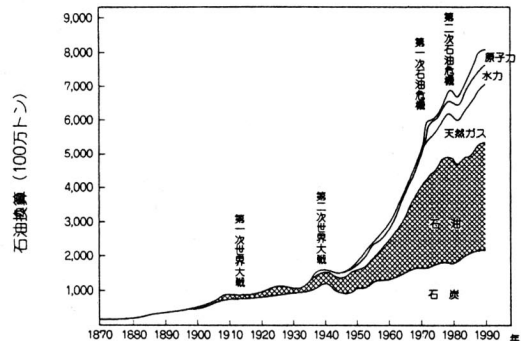


図-2 世界のエネルギー利用の推移<sup>2)</sup>

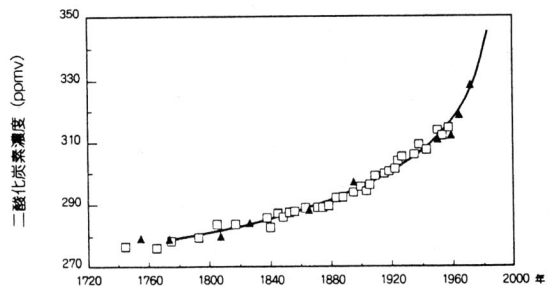


図-3 大気中の二酸化炭素の変動<sup>2)</sup>

費量は全世界のエネルギー消費量の27.5%であるのに対し、人口の12.2%を占めるアフリカのそれは僅か2.8%に過ぎない。今後途上国で開発が進めば、エネルギー使用量は、さらに増加することは確実であろう。

表-1 世界のエネルギー資源埋蔵量<sup>2)</sup>

|                        | 石 油                                              | 天然ガス                                     | 石 炭                  | ウ ラ ン                                                            |
|------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------|
| (注1)<br>確認可採埋蔵量<br>(R) | '93年1月1日現在<br>997.041 百万バレル<br>全世界               | '93年1月1日現在<br>138 兆m <sup>3</sup><br>全世界 | '90年末<br>10.392億ト    | '89年1月 200 万ト<br>\$80/kgU以下<br>139 万ト<br>\$80~\$130/kgU<br>61 万ト |
| (注2)<br>年 生 産 量<br>(P) | '92年<br>60.029 千b/d                              | '92年<br>216百億m <sup>3</sup>              | '90年<br>47.5 億ト      | '91年<br>2.7万ト<br>(共産圏を除く)                                        |
| 可 採 年 数<br>(R/P)       | '92年<br>全世界 45.5年                                | '92年<br>全世界 64年                          | 全世界 219年             | 74年<br>(共産圏を除く)                                                  |
| 出 所                    | (注1)<br>Oil & Gas Journal<br>(December 28, 1992) | Oil & Gas Journal<br>(December 28, 1992) | 世界エネルギー会議<br>( '92年) | OECD/NEA/IAEA<br>( '92年)                                         |
|                        | (注2)<br>Oil & Gas Journal<br>(March 8, 1992)     | Oil & Gas Journal<br>(March 8, 1992)     |                      |                                                                  |

表-2 世界の主要金属元素埋蔵量<sup>2)</sup>

| 金属資源   | 世界の埋蔵量 (R)   | 世界の年間生産量(P)  | 可採年数 (R/P) |
|--------|--------------|--------------|------------|
| 銅      | 120,000 千t   | 5,586.0 千t   | 21年        |
| 金      | 49,400 t     | 2,060 t      | 24         |
| スズ     | 6,000 千t     | 223.2 千t     | 27         |
| 銀      | 420,000 t    | 14,200 t     | 30         |
| 亜鉛     | 295,000 千t   | 7,187.5 千t   | 41         |
| カドミウム  | 970 純分千t     | 20,989 t     | 46         |
| 銅      | 574,000 千t   | 10,605.9 千t  | 54         |
| ビスマス   | 250,000 t    | 3,200 t      | 78         |
| タングステン | 3,438 純分千t   | 44,008 純分t   | 78         |
| アンチモン  | 4,695 千t     | 52,537 純分t   | 89         |
| モリブデン  | 11,810 純分千t  | 99,100 純分t   | 119        |
| ニッケル   | 111,586 純分千t | 891.1 純分千t   | 125        |
| マンガン   | 3,538 百万t    | 28,872 精鉱千t  | 148        |
| コバルト   | 8,340 純分千t   | 38,512 純分t   | 217        |
| ポーキサイト | 24,500 百万t   | 110,850.5 千t | 221        |
| 鉄鉱石    | 229,000 百万t  | 906 百万t      | 253        |

表-1には、1993年に通産省から発表された主たるエネルギー資源の埋蔵量に関する基本値を示した<sup>2)</sup>。可採年数を見ると石油45年、天然ガス60年、石炭200年となっている。我々が数億年の地球の歴史の中で固定されてきた太陽エネルギーをいかに急激に消費しようとしているかが分かる。

表-2は、1991年現在で推定された主要金属元素の可採年数の推定値を示した<sup>2)</sup>。いくつかのものは、年間生産量が世界埋蔵量の数パーセントに達すると言う異常な状態で、これもまた急激な消費であることが理解される。

以上のようなエネルギーと資源の大量消費は、資源の枯渇と言う意味でも大変大きな問題であるが、同時に温暖化に代表される地球環境に著しい変化をもたらすと言う意味でも極めて深刻な事態となっている。図-3は、18世紀末から今日までの大気中の二酸化炭素濃度の変化を示している<sup>2)</sup>。極地の氷に閉じこめられた古大気の実験より、五千年〜一万年前から産業革命頃までは、大気中の二酸化炭素濃度は280~290ppmであったことが確認されており、著しい増加を示していることが分かる。

二酸化炭素の増加と地球の温暖化の因果関係について

は、研究者の間でも多くの議論があるが、最近のIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の報告では、人為的温暖化説を採るに至っている<sup>4)</sup>。

以上示した統計値は、この種のものとしてはごく一部であるが、それでもなお生物としての我々が、子孫の生存の可能な限りの延長を、今真剣に考えるべき時であることを教えるのに十分であろう。

## (2) エネルギー使用量の低減を考慮した社会基盤施設の建設

前節で述べたような地球規模での環境問題を踏まえ、1992年2月にリオ・デ・ジャネイロで開催されたのが、地球環境サミットであった<sup>5)</sup>。そこで採択された宣言「アジェンダ21」の中心的な概念は「持続可能な開発」(sustainable development)であった。環境破壊を引き起こさない環境容量範囲にいて、可能な限りの経済成長を成し遂げるというこの概念は、何人にも反対することの出来ない理想的な概念である。しかしそもそも環境の保全(sustain)と経済の開発(development)はトレードオフ関係にある対立概念である。人口の約2割を占める先進諸国でエネルギーの約8割を消費しているという現実がある。途上国の経済開発に伴い、エネルギー使用量は増大し、それは必然的に環境負荷を増大させることは必至である。「持続可能な開発」と言う言葉は、環境の保全を望む北と、経済開発を望む南の国々の、両者を満足させるための詭弁にすぎないと指摘する向きもあるくらいである。

このような観点に立てば、「持続可能な開発」の達成は、絶望感に襲われ、気力が萎えるほどの困難さを感じさせる。しかし我々は何かをしなければならぬ。上述の困難さを認識した上で、我々に可能なことから、具体的に行動を始めなければならぬと考える。

環境問題を考えるときの一つの基本的な概念は、建設・生産に要する各種の資源と、それが生み出す産物と

廃棄物の関係を、出来る限り循環可能な「閉じたシステム」として全体を捉えることである。そして、我々技術者の使命とは、このような循環の中で、環境負荷が低減され、資源が有効利用されて行くような技術を開発することであろう。このようなアプローチにより、従来は廃棄されていた材料を、全く異なった局面への活用を図ると言った発想も生まれてくる。

本論文で我々は、このような考え方を社会基盤構造物の設計法に適用しようとしている。従来社会基盤施設の設計は、経済性と安全性と言う2つのトレードオフ関係にある評価尺度を用いて行われてきた。一般的には、安全性を安全率で表した制約条件とし、この上で経済性が最適化するように構造物は設計されてきた。信頼性設計法は、構造物の安全性を破壊確率として評価し、構造物が破壊したときの費用と破壊確率の関数である期待破壊費用と、直接の建設費の和である、総建設費用を最小化するような設計代替案を選ぶという構造を持っている。これは、経済性の制約上、我々は無限に安全な構造物を建設することは出来ないと言う現実を反映している<sup>9)</sup>。

このような従来からの設計法の評価尺度に、経済性、安全性の他に、環境負荷を加えたときの設計法の定式化がどの様なものとなるべきかと言うのが、この研究の最初の着眼点である。これは先に述べた、「閉じたシステム」として社会基盤施設の設計問題を定式化しようというところに、狙いがある。

本研究では、エネルギー使用量の指標として、発生する二酸化炭素量を用いる。二酸化炭素発生量を指標とした理由は、これがエネルギー（特に化石燃料起源のエネルギー）使用量と密接に結びついていることにもよるが、地球温暖化など環境問題に直結した指標であることも一つの理由である。

ところで、酒井と漆崎<sup>7)</sup>、外岡ら<sup>8)</sup>の研究によれば、わが国の土木・建築を含む社会基盤施設の建設と維持管理より発生する二酸化炭素の、日本全体での発生量に対する割合は、約1/3（炭素換算で約3億トン）であると言う結果も出ている。途方もない難題である地球規模の環境問題からすれば、局所的なことではあるかもしれないが、上記の意味でエネルギー使用量と環境負荷を低減させる社会基盤施設の設計方法を考察することは、環境負荷を低減させるサブシステムの一つとして重要な課題であると考えられる。

なお本研究と類似のアプローチとして最近注目を集めているものにLCA (Life Cycle Assessment) がある。LCAは、環境にやさしい商品 (Environmental Conscious Product) の開発のため、商品の生産・消費・廃棄の全ライフ・サイクルの発生する環境負荷を計量

し、これを低減することを目指している (Yamamoto, 1995<sup>9)</sup>; Boustead, 1995<sup>10)</sup>; Gotoh, 1995<sup>11)</sup>)。LCAは本研究と極めて近い問題意識をベースとしているが、著者らは少なくとも次の2点で異なっていると考えている：

1) LCAは、生産における環境負荷の低減と経済開発の競合的な関係を意識した、商品開発における意思決定という意識は極めて乏しい。本研究が問題としているような社会基盤施設の計画・設計の問題では、これは避けて通ることの出来ない問題であり、この競合関係を考慮した意思決定の方法が、本研究の一つの目的である。

2) LCAは、本来大量生産可能な消耗品を主体とした製品を対象に発展してきたため、社会基盤施設の計画・設計のように、規模が大きく、一品性で、構成材料が多様、耐用年数の長い構造物への適用については未開発である (Okada and Koizumi, 1995<sup>12)</sup> ; Ikaga and Ishifuku, 1995<sup>13)</sup>)。本研究ではこのような構造物のエネルギー使用量や環境負荷を考慮することの意味についてもできる限り考察を加えた。

著者等は、21世紀の社会基盤施設の設計代替案の採択には、従来の経済性と安全性の尺度に加えて、環境負荷やエネルギー使用量を評価尺度として取り入れなければならないと信じている。

### 3. 従来の設計法と新設計法

先に2章でも述べたように、現在環境問題として登場している問題は、従来経済発展の前提条件として無限と考えられていた資源や、環境容量が実は有限であり、このため経済発展が資源や環境容量の有限性を考慮せずには、もはや成り立たないことを示している。

本章ではこの様な視点より、従来からの社会資本整備計画、特にこの一部である社会基盤施設の設計法のあり方を反省し、将来のあるべき姿を考察するとともに、新設計法の具備すべき条件を考察する。

#### (1) 従来の社会基盤施設の計画・設計法

現在最も一般に行われている社会資本整備計画の評価手法の一つは、費用・便益分析である。そこでは当該代替案の実施にともない生じる便益を消費者余剰として計量し、また代替案の実施に伴う直接的な費用を算出し、その差である純便益が大きい代替案を実施するものである。上記のような計画法を、簡単な数式を用いて書くと：

### (従来の計画法)

$$\max B(a) = B_T(a) - C_T(a) \quad (1)$$

ここに、 $B$ ：純便益、 $B_T$ ：プロジェクト実施により得られる余剰的な便益、 $C_T$ ：総費用、 $a$ ：代替案。

社会基盤施設の計画法と設計法が基本的に同一ものであることに着目し、設計法が一つの意味決定問題として定式化できることを明確な形で示したのは松尾<sup>9)</sup>である。すなわち、社会基盤施設の個々の構造物の設計では、純便益の最大化と適正な安全性の確保という2つの指標を考慮した意思決定問題として設計法が定式化できることを示した。ところで、構造物の設計では、その構造物の建設により生ずる便益については、その構造的な設計にかかわらずほぼ一定であると仮定できる場合がほとんどなので、設計法の問題は、総費用の最小化を目的とした意思決定問題として定式化される。

信頼性設計法では、安全性に関する不確実性を設計の中で陽に考慮し、構造物が破壊したときに生じる期待損失費用と、建設費用の合計である総建設費用を最小化することにより、設計代替案の選択を行うことを提案している。換言すると、安全性を期待損失費用と言う形で建設費用と同じ金銭タームの評価指標に置き換え、この合計である総費用を用いて、意思決定を行う設計法と見ることができる。この方法では、経済的な制約のため無限に安全な構造物を建設することはできないという現実を、設計法の中に直接反映させている。この場合、問題は次のように定式化される：

#### (信頼性設計法)

$$\min C_T(a) = C_C(a) + P_F(a) \cdot C_F \quad (2)$$

ここに、 $C_C$ ：建設費用、 $P_F$ ：破壊確率、 $C_F$ ：破壊費用であり、構造物の重要度は破壊費用 $C_F$ の増大として表される。

しかし一方でその構造物の破壊費用や破壊確率を適切に評価することは容易ではない。また、ルーチ的に建設される構造物でこのような評価を行うことは、実務的にも非能率的である。そこで慣用的に用いられている安全率を用いた設計法（部分安全率を用いる設計法や、限界状態設計法を含む）では、安全率を満足させるということにおいて一定の安全性を構造物に保証している（規格化された安全性）。これは、安全性を制約条件とした費用最小化問題と見ることができる。すなわち：

### (安全率を用いた設計法)

$$\min C_C(a) \quad (3)$$

*s.t.*  $P_F(a) < P_F^*$

ここに、 $P_F^*$ は、ある規格化された破壊確率であり、通常安全率として与えられる。この設計法は、総費用最小化と言う観点からすると、1つの簡易化された設計法と見ることができる。

以上からわかるように、信頼性設計法でも、安全率を用いる設計法でも、設計法への安全性の採り入れ方が異なるとは言え、経済的な便益を最大化しようとする点では、総便益の最大化と言う従来からの社会基盤施設の計画法と同じ範疇に属する考え方、さらに言えば伝統的な経済学のパラダイムに基づく考え方によって、定式化が行われていることがわかる。

前章までに詳しく述べてきたように、資源や環境容量を無限と考えてきた従来の経済学のパラダイムは、すでに破綻の兆しを示しており、現在では新しいパラダイムが求められている。新しいパラダイムとはどのようなものか、またその元で社会基盤施設の計画法や設計法はどのような方向を目指して行けばよいのか、それが次節の課題である。

### (2) 新設計法が具備すべき内容

社会基盤施設の計画や設計は、社会全体の経済活動の一部であり、この意味で経済学の動向を見ておくことは重要である。経済学分野でも伝統的な経済学に対する反省に立ち、資源や環境容量の有限性を考慮した新しいパラダイムに立った理論的な枠組みの構築が盛んに試みられている。植田・落合・北畠・寺西(1991)<sup>14)</sup>は、このような経済学の動きを、(1)物質代謝論アプローチ、(2)環境資源論アプローチ、(3)外部不経済論アプローチ、(4)社会的費用論アプローチ、(5)経済体制論アプローチの5つに類型化している。

物質代謝論アプローチは、従来の経済学が市場経済の分析に終始し、物質収支（マテリアル・バランス）の分析をなおざりにして来たことを批判し、議論を展開している。このアプローチは、物質収支の分析、熱力学のエントロピー概念を導入した物質循環の不可逆性の経済学の導入等を通し、経済学の根本的な再構築を展開している。

環境資源論アプローチは、環境をある特殊性を持った資源（再生産不可能など）と捉え、これを経済分析モデルの定式化に取り入れ、特に持続可能な資源の合理的な管理を考えようとする立場である。このアプローチは、規範分析的な側面が強い。

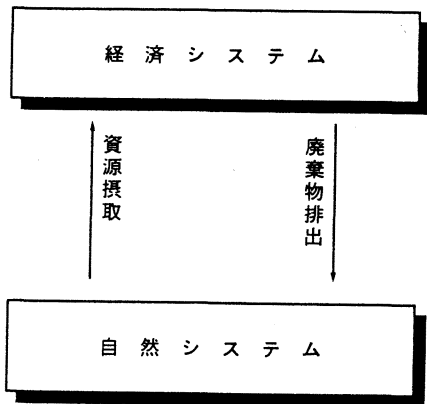


図-4 経済システムと自然システムにおける物質収支

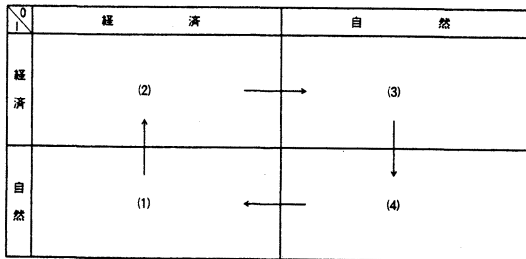


図-5 経済システムと自然システムの連関構造

外部不経済論アプローチと、社会的費用論アプローチは、従来の経済学の中でも資源配分の「効率」、また所得配分の「公正」と言った経済状態の判断の基準を展開することを問題としてきた厚生経済学の分野にルートを持つアプローチである。特に前者は、市場経済に反映されない外部不経済による「市場の失敗」を問題とし、これを何らかの手段（多くは公共的な政策手段）を用いて市場に内部化するべきだと言う考え方を確立してきた。一方後者は、市場に外部的な社会的費用は、経済体制上不可避であるとする考え方を導入するなど、より政治経済学的な志向を持っている。

最後の、経済体制論アプローチは、社会経済体制のあり方が公害等の発生やそれに対する対応の仕方に違いをもたらさうという、政治経済学的方法論である。

我々はこのような5つのアプローチの内第1番目の「物質代謝論アプローチ」と、第2番目の「環境資源論アプローチ」が前節で展開してきたような問題に対し、最も根本的な批判を展開していると考え、これらのアプローチに即して我々の考えを展開することにする。従って、これらのアプローチについては、ここで少し詳しく紹介する。

物質代謝アプローチはまず、従来経済学が分析の対象としてきた市場システムの枠を越えて、人間の経済活動と、資源や廃棄物と自然の生態系全体を含む自然システムとの関連に注目し、その全体での物質収支を捕え、分析しようとした(図-4)。このアプローチが登場した1970年代初頭には、すでに公害と言った形で環境汚染の問題が深刻化していた時代であり、従来までの経済分析がたとえば「最終消費」として燃料、原料、最終製品のような物質が、あたかもどこかに消滅してしまうような取り扱いをしているのに対し、これらの物質収支を明確にし、これらを制御することを主張した。

このような物質収支の考え方と平行して、人間の営む経済活動を、熱力学の第2法則であるエントロピーの増大として捕え、展開しようという考え方も出てきた。すなわち、人間の経済活動は、外的な自然からさまざまな資源として低エントロピー状態の物質を摂取し、生産、交換、消費を通して経済活動を支え、高エントロピーの排熱や廃棄物を外的な自然に捨てると言う不可逆過程を通過することにより成り立ってきた。このような活動は、外的な自然が人間の経済活動に対し無限に大きい時には可能であるが、人間の経済活動が拡大し、その規模が地球の自然システムと対置しうる大きさに達してきたとき、危機をもたらす。このような反省に立ち、現在の経済システム、生産システムを根源的に問い直すことが必要であると主張した。

以上のような物質代謝論アプローチを進めて行くうえで、経済システムと自然システムの相互構造を捉える一つの方法として、寺西は投入・算出分析の方法を拡張した、図-5のような表現を提案している。

図-5の領域(2)は<経済-経済>の領域であり、従来からの経済循環を表し、いわゆる産業連関表により表される。一方、領域(1)の<自然-経済>の部分は、人間の経済活動へ自然システムから投入される物質収支を記述する領域である。また領域(3)の<経済-自然>の領域は、経済システムから自然システムへ排出されるエネルギーや諸物質に係わる部分である。最後に領域(4)の<自然-自然>の領域は、自然システムにおける物質循環を表現する領域であり、自然システムによるたとえ

ば排出された諸物質の分解、拡散、固定、蓄積過程と、それらが自然システムに与える影響などの分析が行われる部分である。

以上見てきたように物質代謝論アプローチでは、経済システムと自然システムの全てに関わる物質収支を解明し、環境や資源の有限性を考慮した経済活動のあり方を模索しようとしている。しかし、このように個々の物質の循環のメカニズムを全体的に捉えることに多くの未解明な点のあることは明らかであろう。これに対し、2番目の「環境資源論アプローチ」は、環境資源と言うやや抽象的な概念を用いて論を進めており、前者が定量的な分析を目指しているとするれば、後者はより規範的な分析を目指していると言える。

北島<sup>14)</sup>は環境資源論アプローチの一つの典型的なモデルとして、環境の自己再生能力に注目することによって、持続可能な開発の方途を模索するため次のようなモデルを提案している。環境の自己再生能力は、現在存在している環境の蓄積量に依存していると考え、まずこれを環境ストック  $S(t)$  と定義した。環境ストックはそれ自身が存在することにより、環境を再生産するものである。

さらに現在の環境ストック  $S(t)$  の関数であるような環境の自己再生能力をモデルに組み込んだ。これは環境再生産関数  $H(S)$  として定義され、単位時間当たりの環境の自己再生能力を表す。この関数は  $S$  に関して単調増加（環境ストックが大きいくほど再生産力は大きい）、逓減的（環境ストックが大きくなるほど自己再生能力の増加率が減少する）であると仮定する。

一方開発とは、環境ストックを投入することにより環境以外の何らかの価値を産出することであると言える。従ってこの場合、開発とは環境ストック  $S$  を取り崩し、それを消費して環境以外の何らかのフローを生産する行為と言うことになる。このフローを環境負荷（北島では開発フロー）と呼び、その単位時間当たりの量を  $z(t)$  で表すことにしよう。

以上の準備の下で環境ストックの収支を考えると、単位時間当たり再生産される環境ストック量から、開発により単位時間に取り崩される環境負荷を差し引いたものが、環境ストックの変化率であるから、各時間ステップにおいて次式が成り立つ：

$$\frac{dS(\tau)}{d\tau} \Big|_{\tau=t} = H(S(t)) - z(t) \quad (4)$$

( $t=0,1, \dots, T$ )

北島(1991)はこの方程式を環境ストックの蓄積方程式と呼んだ。この方程式の初期条件としては、現在の環境

ストックの量を与えればよい。

一方、北島は開発効用関数を仮定し、開発により得られる効用を計量している。結局のところこのような効用を計量できる実際的な指標は純便益であると考えられるから、環境負荷  $z(t)$  により生み出される第  $t$  期目の純便益を  $B(z(t))$  と置く。経済学ではごく一般的な仮定である、 $B$  の単調増加性や、逓減性を仮定する。

以上の準備の下で持続可能な発展とはどのように定式化されるであろうか。それは、次のように表される：

$$\max \sum_{t=0}^{\infty} B(Z(t)) (1+r)^{-t}$$

$$s.t. \frac{dS(\tau)}{d\tau} \Big|_{\tau=t} = H(S(t)) - z(t) \quad (5)$$

( $t=0,1, \dots, \infty$ )

ここに、 $r$ ：社会的割引率で与件として与える。

すなわち長期的な純便益の総計を、環境ストックの蓄積方程式の制約の下で最大化するような開発行為を選択するのである。このような定式化をしなければ、開発主体は環境ストックに関する制約を無視し、短期的な視野に立ち、時間ステップごとに便益を最大化するような開発行為 ( $B(z(t)) = 0$ ) を繰り返す、開発フローの拡大が環境ストックの枯渇をもたらす、結局は開発自体が不可能になるような事態に突入してしまう。それが、資源や環境容量を無限と仮定した、従来の経済学のパラダイムでの開発の結果である。

北島は、このような問題設定の基で、この問題の定常点 ( $dS/dt = 0$ ) に到達したとき、環境ストックはその限界再生産性が社会的割引率と等しくなる点で均衡する ( $H(S_0) = r$ )、またこのときの環境ストック量 ( $S_0$ ) に対応したシャドープライスにより開発税を課すことにより、持続可能な開発が半永久的に可能であること等を見いだしている。また、現時点からこのような定常点に収束して行くための開発税政策についても、議論している。

この「環境資源論アプローチ」は、環境ストックの具体的な姿が明確でない、またこれに付随して実際の環境再生産関数  $H$  を決定する方法が現在のところない、環境負荷の分配の問題（南北問題）が含まれていない、社会的割引率を与件としている等多くの単純化はあるものの、環境ストックの蓄積方程式を定義することを通じて、環境がそれ自身の有限性に基づいて経済活動に課してくる制約条件を定式化に取り入れることにより、パラダイムの転換が表現されているところに意義がある。また、資源の問題を考えると、長期的な視野に立った便益や、環境負荷の考慮が重要であることを示している。いずれ

にせよ、このアプローチは、環境経済学の規範分析の道具として発展して行くと考えられ、実際の定量的な分析に使用することは当分考えられない。

以上の考察より、社会基盤施設の新しい計画法や設計法が具備すべき内容として、以下のような点を上げることができる。

1) 純粋に経済的なメカニズムとは異なった、資源や環境容量の有限性から課せられる制約を定式化の中に取り込む必要がある。

2) 長期間にわたる視野が評価に当たり重要である。すなわち、少なくともプロジェクトのライフサイクル（建設、維持管理、破棄）全体での経済効果と環境負荷の評価を行う必要がある。

3) 上記の制約の基で、経済的な純便益の最大化を行うことが、人口の増大に対し一定以上の福祉を保証して行くような経済開発を可能にして行く上で必要である。

#### 4. 新設計法の概念と定式化

##### (1) 概説

本章では、エネルギー使用量を考慮した社会基盤施設の新しい設計法を提案する。まず前章までの議論を踏まえ、資源や環境の制約を考慮した新しいパラダイムに立つ経済システムと自然システムを同時に考慮したモデルを説明する(4.(2) a)). 一般的なモデルは非線形で極めて複雑なモデルとなるが、この経済システムの部分を線形化（あるいは線形であると仮定した）モデルは、産業連関表となり、これを用いることにより自然システムから経済システムへの資源の入力や、経済システムから自然システムへの廃棄物の出力をある程度定量的に捉えることが出来る可能性があることを示す(4.(2) b)). 自然システム内の物質収支の問題は極めて複雑であり、現在これを完全に記述できるモデルは存在しないため、ここでは前章で紹介した環境ストックの蓄積方程式を修正したもので説明する。

また自然システム内の物質収支の複雑さのため、上記のモデルで全ての資源や廃棄物の収支を計算することは現時点では出来ない。そこで本研究では、これらを総合的に計量する指標として、経済システムから自然システムに排出される二酸化炭素量を選んだ。4.(2)c)では、この指標を選択した理由及び定量的な排出量の計量方法について述べる。

4.(3)は本論文の主要部分であり、4.(2)で説明したモデルに基づき、新しい社会基盤施設の計画や設計手法を定式化する(4.(3)a)). 新設計法は、経済システムと自然

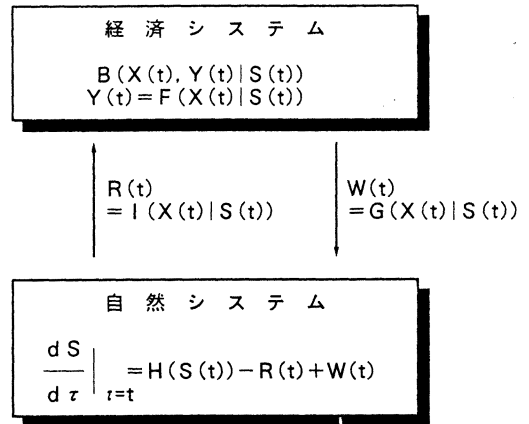


図-6 経済-自然システムの基本モデル

システムのメカニズムを制約とした上での純便益を最大とする意思決定問題として定式化される。本論文では特に純便益の算定に当たり、総便益を考慮する必要がある問題を「計画問題」、総便益が意思決定の結果に依らず一定と仮定でき、従って費用最小化に目的関数が帰着する問題を「設計問題」と定義している。

定式化された設計法では、自然システムに対する二酸化炭素の排出量の許容値を算定することが、自然システムの複雑さのため現時点では困難である。4.(3) b)では、この点を暫定的に回避し、環境負荷を設計法に取り込んで行く当面の指標としてcarbon serviceability (CS)なる概念を導入することを提案する。

##### (2) 経済-自然システムの基本モデルとエネルギー使用量の計量

###### a) 一般モデル

図-6に本研究で提案する経済-自然システムに関するモデルを示した。まず、経済システムにおける各産業部門の生産量を表すベクトルを $X(t)$ とし、この内最終需要ベクトルを $Y(t)$ とする。このとき、産業連関方程式として次式が成り立つ：

$$Y(t) = F(X(t)|S(t)) \quad (6)$$

ここに、 $S(t)$ は自然システムの中のいろいろな物質の蓄積量を表すベクトルであり、 $S$ は総じて経済活動の環境に影響を与える。また、 $t$ はこれらが第 $t$ 期間のものであることを示す。

一方、式(6)のような経済活動により生み出される全体の純便益（効用と言ってもよい）は、次の関数により計量されるとする：



$$B(X(t), Y(t) | S(t)) \quad (7)$$

投資は、この便益を増大させるように行われると考えられる。

経済システムは、その活動のため自然システムより生産量  $X(t)$  に応じた資源ベクトル  $R(t)$  を摂取し、また廃棄物ベクトル  $W(t)$  を排出している。これらは生産量  $X(t)$  の関数と考えられるから、それぞれ次のように表される：

$$R(t) = I(X(t) | S(t)) \quad (8)$$

$$W(t) = G(X(t) | S(t)) \quad (9)$$

これらが環境ストック量ベクトル  $S(t)$  で条件付けられるのは自然であろう。ここに、式(8)を資源負荷方程式、式(9)を廃棄物負荷方程式と呼ぶことにする。

自然システムは、 $R(t)$  と  $W(t)$  をそれぞれ出力と入力とする極めて複雑な、物質収支システムである。これを記述することは困難であるが、ここでは前章で紹介した「環境資源論アプローチ」の考え方を借り、これを環境ストックの蓄積方程式の形で与えることにする：

$$\frac{dS}{dt} \Big|_{t=t} = H(S(t)) - R(t) + W(t) \quad (10)$$

ここに、 $H(S(t))$  は環境の自己再生能力を表すベクトル関数であり、物質の蓄積量ベクトル  $S(t)$  の関数（すなわち多くの環境ストックが複雑な相互作用により自己再生を行っている）であると考えられる。なお、式(10)は物質により異なった形をしていることが容易に想像される。たとえば、ある物質では  $R$  または  $W$  が 0 に近かったり、また自己再生能力がほとんどない物質も存在すると思われる。この方程式は、自然システムに関する我々の知識が極めて不十分であるため、多くの未知の部分を含んでいるが、資源や環境の有限性をモデルに取り込むと言う、本研究の目的のためには、有用な道具であると考えられる。

以上のように経済-自然システムを記述することにより、経済システムばかりでなく、それに伴う資源や環境の自然システムに対する負荷を、おおよそモデル化できたとと思われる。

## b) 線形化モデル

図-6に示した一般モデルは、あまりにも抽象的であると感じられる読者も多いと思われる。そこで、これをもう少し具体的に、また物質の収支の計量を可能にするため、このモデルを線形化してみることにする。

非線形方程式を線形化するもっとも一般的な方法は、テラー展開の第一項をとる方法である。式(6)にこの方法を適用すると：

$$\delta Y(t) = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X=X(t)} \delta X(t) \quad (11)$$

これは、産業連関方程式を、第  $t$  期の生産量  $X(t)$  と環境ストック量  $S(t)$  で  $X$  についてテイラー展開したときの、最終需要増分  $\delta Y(t)$  と総生産増分  $\delta X(t)$  の関係を示したものである。このとき  $F$  が、一般の非線形関数であれば、式(11)は  $X(t)$ 、 $S(t)$  における接線勾配となるが、もし  $F$  がもともと線形関数であったと仮定すると、これは通常の産業連関分析の単位行列  $I_n$  から投入係数行列  $A(t)$  を差し引いた値に一致する：

$$\delta Y(t) = (I_n - A(t)) \delta X(t) \quad (12)$$

式(7)は、周知のように総生産量増分  $\delta X(t)$  は、最終需要増分  $\delta Y(t)$  と中間需要増分  $A(t) \cdot \delta X(t)$  の和に一致することを表している：

$$\delta Y(t) + A(t) \delta X(t) = \delta X(t) \quad (13)$$

なお、 $A$  が  $t$  の関数となっているのは、これがテラー展開による近似であり、時間とともに  $X(t)$  や  $S(t)$  が変化すれば  $A$  も変化することを示している。

産業連関分析は、Leontiefにより既に1930年代後半に考案され、その後発展してきた国民経済のフロー面の解析を行う枠組みである<sup>15)</sup>。単純化されているとは言え、一般均衡を簡単な枠組みで記述しているため、多くの応用面を持っている。土木計画学の分野では、プロジェクトの実施に伴う投資効果の予測や、施設の立地に伴う産業構造の変化の予測にこの方法が用いられることがある。

式(12)を用いて、最終需要量増分よりレオンチェフ逆行列を介して、総生産量増分を求めることが出来る：

$$\delta X(t) = (I_n - A)^{-1} \delta Y(t) \quad (14)$$

次に式(8)と、式(9)を線形化する：

$$\delta R(t) = \frac{\partial I}{\partial X} \Big|_{X=X(t)} \delta X(t) \quad (15)$$

|     |                                                                |                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|     | 経 済                                                            | 自 然                                                      |
| 経 済 | $\delta Y(t) + A(t)\delta X(t) = \delta X(t)$<br>$\delta X(t)$ | $\delta W(t) = E\delta X(t)$<br>$\delta W(t)$            |
| 自 然 | $\delta R(t) = M\delta X(t)$<br>$\delta R(t)$                  | $\frac{dS}{dt} = H(S(t)) - R(t) + W(t)$<br>$\delta R(t)$ |

図-7 経済-自然システムの線形化モデル

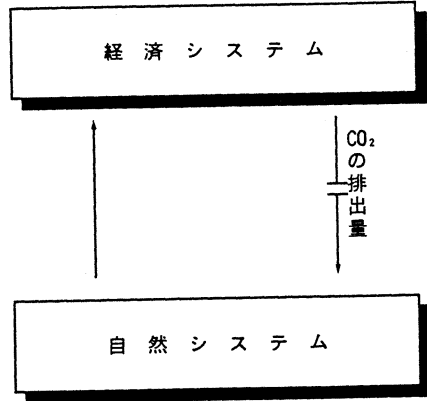


図-8 本研究における物質収支のとらえ方

$$\delta W(t) = \frac{\partial G}{\partial X} \Big|_{X=X(t)} \delta X, \quad (16)$$

式(15)の係数行列は、生産量増分  $\delta X(t)$  が発生することによる、資源摂取量増分  $\delta R(t)$  を計算する行列である。これは、各生産部門で消費される原材料の構成を調査すれば求めることの出来る値である。この係数行列を、摂取係数行列  $M$  と置く。

一方式(16)の係数行列は、生産量増分  $\delta X(t)$  が発生することによる、廃棄物排出量増分  $\delta W(t)$  を計算する行列である。これは、各生産部門で排出される廃棄物の構成を調査すれば求めることの出来る値である。事実本研究でも二酸化炭素の排出量をこの係数を求めることにより、計算する。この係数行列を、排出係数行列  $E$  と置く。以上の結果より、式(15)と(16)は、次のようになる：

$$\delta R(t) = M \delta X(t) \quad (17)$$

$$\delta W(t) = E \delta X(t) \quad (18)$$

もちろん、式(17)と(18)をすべての物質について求めることは不可能である。後述するように、本研究では経済システムから排出される二酸化炭素量を計量することにより、これらの式で表される物質循環のおおまかな全体像を捉えることとした。

環境ストックの蓄積方程式(式(10))については、ここでは線形化を行わない。

以上の結果を踏まえて、図-6に示した物質循環の関係を行列形式で書き直したのが図-7である。

### c) エネルギー使用量の指標と計量方法

本節では、この研究で用いるエネルギー使用量の指標の選択と、その計量方法について述べる。結論から先に

述べれば、本研究では二酸化炭素発生量をこの指標として用いた。二酸化炭素排出量を指標に選んだ理由、及びその発生原単位の推定法について述べるのが、本節の目的である。

#### 1) エネルギー使用量の指標

既に述べてきているように、本研究の目的は、資源や環境容量が有限であると言うことを認めた上で、なお必要な経済発展を持続的に可能にするような、新しいパラダイムにおける社会基盤施設の設計法について提案することである。この目標を達成するためどのような指標を用いて、エネルギー使用量や環境負荷を定量的に計量するかということが問題である。

摂取資源や排出廃棄物を細部に渡って考えて行くと化石燃料、鉱物資源、稀少金属、温室効果ガス、森林、各生物種、各種廃棄物量、微量汚染物質、土壌等無数に存在し、これらすべてを考慮しモデル化することは不可能である。これは、図-7に示した物質収支の全ての項目を考慮することに相当する。そこで、本研究ではこれらの負荷を大まかに捕らえる指標として、各経済活動により発生する二酸化炭素量を用いることにした。これは、図-6の経済システムから自然システムへ排出される物質の代表指標として二酸化炭素を選んだことに相当する(図-8)。その理由は以下の通りである：

1) 資源の有限性が論ぜられるとき、その当面の中心的な課題は石油、石炭、天然ガス等のいわゆる化石燃料の可採年数である。二酸化炭素の発生量は、これら化石燃料の燃焼と直結しており、経済活動のエネルギー使用量を計量する上で、もっともふさわしい指標の1つであると考えられる。

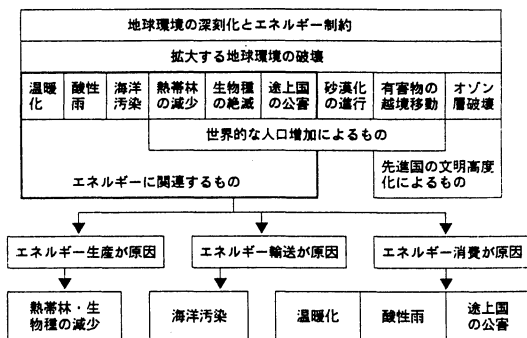


図-9 地球環境問題とエネルギーの関係

2) 現在地球環境問題として議論されている問題の中の多くは、図-9に示されるように、温暖化、酸性雨、途上国の公害等、化石エネルギー使用量と直接結びついているものが多い。従って、化石燃料の使用量と直接結びついている二酸化炭素発生量は、適当な指標である。

3)特に温暖化は、二酸化炭素発生量と直結していると考えられる。文献によっては、資源枯渇より先に、地球温暖化の影響の方が人類の生存にとりクリティカルとなり、人類は資源の枯渇を待つまでもなく、温暖化による海面上昇や気候の変動等で決定的な危機を向かえると予測するものもある。

### 2) 二酸化炭素発生原単位の推定

ある財1単位を使用したときに発生する二酸化炭素量を、二酸化炭素発生原単位と言う。原単位の推定は、その財の生産にさかのぼり、その工程で発生したすべての二酸化炭素を累計する必要がある。本研究での原単位の算出は、産業連関表を用いる方法で得られたものを利用する。

わが国では、1960年以来5年毎に政府より産業連関表が公表されており、わが国の経済の実態を把握するための貴重な資料として活用されている。

産業連関表は、種々の産業間の財の入出関係を定量的に記述したものである。たとえば本研究で求めようとしている二酸化炭素原単位の算出を行おうとする場合など、ある最終財を生産するために他の財がどの様に投入されてきたかを求めることができる。

産業連関表を用いてCO<sub>2</sub>の排出原単位を算出方法の基本的な考え方は、以下の通りである。

まず、CO<sub>2</sub>の排出につながる燃料等のエネルギー材に着目し、各材を生産するとき、これらエネルギー材の燃料に使用される割合、それぞれのエネルギー材の高

発熱量、熱量当りのCO<sub>2</sub>発生係数等を調べ、これより排出係数ベクトル $e_j$ を求める。この量は、第j材についてベクトル $e_j$ として表され、エネルギー材以外の材についての係数は0である。このとき参考とする資料は、石油等消費構造統計、鉄鋼統計、ガス事業統計等である。例えば外岡(1994)<sup>8)</sup>は、各部門材の $e_j$ を、次のように求めている：

$$e_j = (\text{第 } i \text{ エネルギー材の } 1 \text{ 単位の重量}; t)$$

- (第j部門材の生産に投入される第iエネルギー材の内、燃料用に使用されたエネルギー材の割合)
- (第iエネルギー材の高発熱量; Gcal/t)
- (CO<sub>2</sub>排出係数; t/Gcal)

(19)

一方、第j材を一単位生産するときの各材の投入量ベクトル $x_j$ は、産業連関分析を利用し、式(14)を用いることにより次のように計算出来る：

$$x_j = [I-A]^{-1}f_j \quad (20)$$

ここに、 $f_j$ は、第j番目の要素が1、その他は0の縦ベクトルである。

さらに、CO<sub>2</sub>の発生を考える場合、最終財が燃料である場合、最終的にこれも燃焼され、CO<sub>2</sub>が発生するから、これを最終消費による排出として $C_j^e$ で表す。

以上の準備のもとで、第j財のCO<sub>2</sub>発生原単位を求める：

$$C_j^B = e_j x_j + C_j^e = e_j [I-A]^{-1} f_j + C_j^e \quad (21)$$

### 3) 原単位の算出結果

前述したように、本研究では外岡ら<sup>9)</sup>の行ったCO<sub>2</sub>原単位の算出方法を中心に述べ、算出結果については他の研究の結果も従記するものとする。

外岡は、1985年の産業連関表基本表(529行x408列)より正方化した406行x406列の投入産出表をつくり、内建設部門11列について建設部門産業連関表の66列(中間計を除くと31列)x213列(基本表529行のうち建設部門への直接投入のあった行のみ抽出)を用いて細分化し、建設部門を取り込んだ441行x441列の正方投入産出表を作成した。この正方441部門表を用いて(I-A)<sup>-1</sup>型と(I-(I-A))<sup>-1</sup>型の逆行列を作成し、これより式(21)を用いて、各財の誘発CO<sub>2</sub>排出量を推定している。

外岡の推計方法が、他の推計と比較して優れていると

表-3 主な建設材料の二酸化炭素発生量原単位<sup>16)</sup>

(原単位はkg-c, すなわち炭素発生量で与えられている)

| 引用資料       | 単 位                 | 伊香賀(1994)による推計 |       | 酒井ら(1992)による推計 | 土木研究所による推計 |
|------------|---------------------|----------------|-------|----------------|------------|
|            |                     | I-A型           | I/MA型 |                |            |
| 鉄鋼(粗鋼)     | kg/t                | 352            | 305   | 515            |            |
| 普通鋼型鋼      | kg/t                | 349            | 305   |                | 360~2630   |
| セメント       | kg/t                | 220            | 216   | 81             | 85.8~125   |
| 生コンクリート    | kg/m <sup>3</sup>   | 65.6           | 63    |                | 26.4~49.0  |
| 7#ミニウム(鉱粉) | kg/t                | 900            | 708   | 616            |            |
| 製材         | kg/m <sup>3</sup>   | 28.5           | 19.4  | 7.8(kg/t)      | 1.7~34.9   |
| 砂利・採石      | kg/t                | 2.2            | 2     |                |            |
| 碎石         | kg/t                | 2.8            | 2.5   | 0.3            |            |
| 灯油         | kg/GJ <sup>20</sup> | 83.5           | 78.7  |                | 86.3       |
| 軽油         | kg/GJ <sup>20</sup> | 92.3           | 85.7  |                | 86.9       |
| A重油        | kg/GJ <sup>20</sup> | 84.9           | 80.5  |                | 87.8       |
| B・C重油      | kg/GJ <sup>20</sup> | 89.8           | 86    |                | 87.8       |

思われる理由の一つは、各燃料より発生するCO<sub>2</sub>排出量の推計を、相当丁寧に行っている点である。すなわち、CO<sub>2</sub>の排出があるのは、燃料製品等、特定の投入に限られるが、投入金額から求めるより、投入量から求める方が正確である。従って、物量表がある場合はこれを用い、物量表がない場合は、投入量が得られる他の統計を活用し、石油等消費構造統計、電気事業統計、鉄鋼統計、ガス事業統計、エネルギー生産需要統計等から、詳細な燃料種類別の投入量を推計し、補足的な物量表を独自に作成している。

さらに投入された燃料製品の燃料として燃焼される割合、すなわち「燃焼比率」を石油等消費構造統計から求め、また各燃料製品の「高発熱量原単位」や「CO<sub>2</sub>排出係数」に関しても、諸機関からの推薦値を慎重に吟味するなど、多くの細かい配慮を払っている。

また、特に鉄鋼製品については、製造が高炉転炉による場合と、電炉による場合ではCO<sub>2</sub>発生量に相当な差があることを考慮し、各鉄鋼製品毎に高炉転炉網と電炉網の混合割合を鉄鋼統計より工程別に推計し、鉄鋼製品毎に誘発CO<sub>2</sub>排出量を補正している。これにより、鉄骨と鉄筋の誘発排出水準の違い等も評価できる。

表-3に外岡の行った推計結果を、伊香賀が二次加工した値を、当面我々の関心のある項目につき整理した<sup>16)</sup>。また、このほかに酒井らの推計<sup>17)</sup>と、建設省土木研究所の行った推計結果<sup>17)</sup>についても比較のため示した。CO<sub>2</sub>誘発量が多いのは、鉄鋼製品、セメント製品が大きい。なお、表3に記されているのは、炭素発生量(kg-c)である。

### (3) 新設計法

#### a) 基本定式化

社会基盤施設の計画や設計では、与えられたいくつかの代替案の中から便益の最大となるものを選択すると言う意思決定が問題となる。代替案をa<sub>i</sub>と表すと、これは経済システムの中の一組の最終需要量増分の組み合わせとして表現されるので、次のように書くことが出来るであろう：

$$a_i : \delta Y(t|a_i) \quad (i=1, \dots, N) \quad (22)$$

このとき、この代替案a<sub>i</sub>の実施により得られる各生産部門の生産量の増加は式(6)より：

$$\delta X(t|a_i, S(t)) = \frac{\partial F^{-1}(X, Y|S(t))}{\partial Y} \Big|_{Y=Y(t), X=X(t)} \delta Y(t|a_i) \quad (23)$$

このときの便益は、式(7)により計量され：

$$\delta B(t|a_i) = \frac{\partial B}{\partial X} \Big|_{X=X(t)} \delta X(t|a_i) \quad (24)$$

便益の計量方法には、代替案実施による最終需要増分の波及効果による付加価値の増加を計算したり、また費用便益分析法を用い消費者余剰を計算する等いくつかの方法があり、ここではその方法は特定しない。

一方、代替案の実施により発生する資源摂取増分と廃棄物排出量増分は、次の様に計算される：

$$\delta R(t|a_i) = \frac{\partial I}{\partial X} \Big|_{X=X(t)} \delta X(t|a_i) \quad (25)$$

$$\delta W(t|a_i) = \frac{\partial G}{\partial X} \Big|_{X=X(t)} \delta X(t|a_i) \quad (26)$$

このような資源摂取量や廃棄物排出量の増加は、最終的に環境ストックの蓄積方程式に次のような影響を与える：

$$\frac{dS}{dt} \Big|_{t=\tau} = H(S(t)) - R(t) - \delta R(t|a_i) + W(t) + \delta W(t|a_i) \quad (27)$$

以上のような準備の基で、計画法や設計法の一般的な定式化は、次のように書くことができるであろう：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{t=0}^T \delta B_T(t|a_p, S(t)) (1+r)^{-t} \\ = \quad & \sum_{t=0}^T \{ \delta B_T(t|a_p, S(t)) - \delta C_T(t|a_p, S(t)) \} (1+r)^{-t} \\ \text{s.t.} \quad & \left. \frac{dS(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=t} = H(S(t)) \quad (28) \\ & - R(t) - \delta R(t|a_p) + W(t) + \delta W(t|a_p) \\ & \quad (t=0,1, \dots, T) \end{aligned}$$

ここに  $\delta B_T$  は、当該代替案の実施により発生する総便益を、 $\delta C_T$  はその総費用を表しており、 $T$  は、当該社会基盤施設の供用期間である。

式(28)では、便益や費用が環境ストック  $S(t)$  の関数となっており、また  $S(t)$  は代替案の実施により発生する環境負荷（資源摂取量と、廃棄物排出量を合わせて環境負荷と呼ぶ）の影響を受けて変化し、これが制約として考慮されていることに注意を要する。

先にも述べたように、伝統的に土木工学では、便益の計量を主に考慮する問題を計画問題、その意思決定によっては便益には大きな変化のないような問題を設計問題と分類してきたように思われる。そこで本研究では、このような事実を考慮し、設計法を次のように定義する：

「社会基盤施設計画の意思決定において、当該プロジェクトの便益がその決定により影響を受けない意思決定問題」

上記のように設計法を定義すれば、式(28)の  $\delta B_T$  は一定となり、設計問題は式(28)に基づき費用最小化問題として、次のように定式化される：

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=0}^T C_T(t|a_p, S(t)) (1+r)^{-t} \\ \text{s.t.} \quad & \left. \frac{dS(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=t} = H(S(t)) \quad (29) \\ & - R(t) - \delta R(t|a_p) + W(t) + \delta W(t|a_p) \\ & \quad (t=0,1, \dots, T) \end{aligned}$$

上の定式化で、その制約条件をなす環境ストックの蓄積方程式について、次のことが言える：

1) 現在の環境ストック量  $S(t)$  は、極めて大きな値であり、ここで議論している意思決定問題とは関係なく、与えられていると考えてよい。また許容される環境スト

ックの変化率（左辺）も、既に与件として与えられていると仮定してよいであろう。

2) 時間ステップ  $t$  における当該代替案の実施以外で発生する環境負荷  $R(t)$  や  $W(t)$  は、当該代替案の実施で発生する環境負荷  $\delta R(t)$  や  $\delta W(t)$  に比べ、遥かに大きく、与件として与えられると考えられる。

3) 当該代替案の実施で発生する環境負荷  $\delta R(t)$  や  $\delta W(t)$  は、全体の持続的發展を可能にする環境負荷を上限とし、できるだけ小さい方がよい。

以上より、式(29)の制約条件は次のように書き直すことができる：

$$\min \quad \sum_{t=0}^T C_T(t|a_p, S(t)) (1+r)^{-t} \quad (30)$$

$$\text{s.t.} \quad \delta W(t|a_p) - \delta R(t|a_p) \leq E^*(t) = \text{const.}$$

ここに、

$$\begin{aligned} E^*(t) = & H(S(t)) - \left. \frac{dS(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=t} - R(t|S(t)) + W(t|S(t)) \\ & (t=0,1,2, \dots, T) \end{aligned}$$

式(30)は、環境負荷を考慮した社会基盤施設設計法の最も基本的な定式化であり、以下では新設計法の基本定式化と呼ぶことにする。

本研究では、式(30)の制約条件をすべての物質について行うことは、現在我々の持っている知識の範囲では全く不可能であることを認識し、それらの代表値として二酸化炭素の発生量を取り、これを制約するような設計代替案の選択を考えるという立場をとる。このとき  $\delta R(t)$  は、当該代替案を実施したときの二酸化炭素の固定量（植林等）、 $\delta W(t)$  はその発生量、 $H(S(t))$  は自然システムの二酸化炭素の固定を支配する関数であるが、これは二酸化炭素のストック量ばかりでなく、他の環境ストック（例えば森林の量）の関数でもあることには注意を要する。しかし、これら関数を設定することも現在の我々の知識では、容易ではない。制約値  $E^*(t)$  をどのように決定するかも今後の課題とならざるをえない。

## b) Carbon Serviceability と実用定式化

### 1) Carbon Serviceability

本研究における環境負荷を考慮した新設計法の基本定式化を先に、式(30)に示した。本節では、この定式化をもう少し具体的に考え、実際に意思決定を行うことができるような形に変形することを考える。まずはじめに、この定式化の源泉となった考え方を再考察してみたい。

この式では、総費用が最小化されることを目的としている。これは、さかのぼれば純便益の最大化を考えたものであったが、設計問題のような社会基盤施設計画全体の中で下位の決定に属するような意思決定問題では、その決定の結果が総便益の評価にはほとんど影響しないと考えられるため、総費用の最小化という目的関数が採られたのであった。

ところで、総費用の内訳は、実際に建設・維持管理・破棄にかかる費用の他に、万一構造物が破壊したときに発生する破壊費用が、その不確実性を考慮し、期待破壊費用と言う形で入っている。これは、経済的な制約のため、我々は無限に安全な構造物を作ることはできないと言う動かしがたい現実を、定式化したものである。換言すれば、構造物の安全性は、結局経済的な制約で制限されており、従って金銭タームで評価できるとした定式化である。

一方、環境負荷は環境ストックの使用に関する制約条件と言う形で、定式化に導入されている。このことを反省すると、これは経済的価値では計量することの出来ない、資源や環境容量の有限性から来る制約を考慮しなければ、人類の生存そのものが危険にさらされると言う、パラダイムの変化に起因し、課せられる制約条件であると言える。この制約は、従来の市場均衡から決まる可変な制約（石油価格が上がれば、開発可能な油田が増え、供給量が増す）ではなく、環境ストックの蓄積方程式から来る絶対的な制約条件である。

ところで、ここで環境負荷に関する制約が絶対的な制約条件であると記したが、この具体的な制限値（ $E^*$ ）を決定することは、現時点では容易ではない。我々が、環境ストックとその再生産関数について持っている知識は、地球温暖化問題のように大きな注目を集めている問題でさえも、まだ非常に大きな未知の領域を含んでいる。従って、当面この絶対値を決定することは、困難であると思われる。（たとえ二酸化炭素の発生量を1990年レベルに押さえると言うことが全世界的に合意されたとしても、これを基に規準値を各レベルで設定することは、かなり難しいと考えられる。しかし、1990年の二酸化炭素発生レベルが地球温暖化防止上、必要かつ十分な条件であるという保証は、現在のところ何もない。）

この困難を、当面便宜的に回避し、しかも環境負荷を出来る限り低減させて行くために有効な指標として、我々は「Carbon Seviceability（以下CSと呼ぶ）」なる概念を提案する。CSは、次のように定義される：

「当該プロジェクト、施設、構造物、あるいは部材が提供する全供用期間中のサービスの総量を、それが建

設、供用、廃棄の全期間に排出する全二酸化炭素量で除した値」

すなわち、1単位の二酸化炭素が提供するサービスの量を、CSと呼ぶのである。

ここでまず、「サービス」と言う言葉を用いたのは、我々はプロジェクト、施設、構造物さらにはその構成部材の一つ一つに共通する概念を定義することを意図したからである。すなわち、プロジェクト、施設などではサービスは、供用期間中の純便益の総量と言う言葉で置き換えられてよい。しかし、構造物、さらには部材となると、その便益を直接計量することはできない。その「サービス」は、ある機能を一定期間果たす、またある荷重を一定期間支持する、と言う表現しか取れない。例えば、2車線T-25荷重、スパン30mの道路橋梁を25年間機能させるとか、径間7m、 $0.3t/m^2$ の等分布荷重を40年間支持する単純梁と言ったものが、「サービス」の具体的な内容である。

また、特にサービスの提供を受けられる時間の長さを問題にするのは、見てきたようにエネルギー使用量や環境負荷の問題では、時間が非常に重要な要因であるからである。材料開発等により、より長い期間機能を果たす部材があれば、結果的にそのCSは高くなる。

以上より分かるように、CSは我々が社会基盤施設から受けているサービスが、どの程度のエネルギー使用量や環境負荷により支えられているかを示す指標であると言える。これは特に我々がこの研究で問題としている構造物の設計をエネルギー使用量や環境負荷との関係で考えるとき、有用な指標であると考えられる。式(30)は従って、CSを用いると、次の様に書き換えることができる：

$$\begin{aligned} \min. \quad & \sum_{t=0}^T C_T(t|a_p)(1+r)^{-t} \\ \text{s.t.} \quad & CS(a_p) \geq CS^* \end{aligned} \quad (31)$$

CSを導入すると次のような利点があると考えられる。

1) 同じ種類の、しかし異なる量のサービスを提供する構造物、部材などを、相対的に比較するのに便利な指標である。

2) CSの下限値を何らかの方法で決定できれば、これを制約条件として費用の最小化を行うような設計代替案の選択を行うことが出来る。たとえば、二酸化炭素排出量を1990年レベルに安定化させると言う目標が設定されれば、このときの標準的な構造物、や部材のCSを

表-4 新設計法の実用定式化一覧

|            | CSを制約条件として導入した設計法                                           | 環境負荷の換算率を導入した設計法                                                  | CSの最小化を導入した設計法                                            |
|------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 信頼性設計法     | 定式化 I :<br>$\min. C_c + C_f \cdot P_f$ $s.t. CS \geq CS^*$  | 定式化 II :<br>$\min. C_c + C_f \cdot P_f + \alpha_z \cdot z$        | 定式化 III :<br>$\min. C_c + C_f \cdot P_f$ $\max. CS$       |
| 安全率を用いた設計法 | 定式化 I' :<br>$\min. C_c$ $s.t. CS \geq CS^*, P_f \leq P_f^*$ | 定式化 II' :<br>$\min. C_c + \alpha_z \cdot z$ $s.t. P_f \leq P_f^*$ | 定式化 III' :<br>$\min. C_c, \max. CS$ $s.t. P_f \leq P_f^*$ |

(備考)  $C_c$ : 建設、維持管理、廃棄費用、 $C_f$ : 破壊費用、 $P_f$ : 破壊確率、 $z$ : 環境負荷、 $\alpha_z$ : 環境負荷の換算率、 $P_f^*$ : 破壊確率の規準値(安全率)、 $z^*$ : 環境負荷の規準値、 $CS$ : carbon serviceability、 $CS^*$ : carbon serviceabilityの基準値

求め、総量の減少のための低減率をこれに考慮し、制約条件を設定できるであろう。

3) 新技術の開発による直接的な二酸化炭素発生量の低減や、長寿命化の効果などをCSを通じ直接的に設計に持ち込むことが可能となる。

## 2) 実用定式化

以上の考察の基で、可能な実用定式化は、表4に示すように、次のようなものが考えられる。

### (定式化I: CS制約を導入した定式化)

式(31)の定式化通り、建設費用等の直接費用と、期待破壊費用の合計である総建設費用を、Carbon Serviceability制約の下で、最小化する。このとき、CSの許容値を決定するのは必ずしも容易ではないが、現状のCSと相対的な比較を行うなどすれば必ずしも不可能ではない。なお本研究の考察の流れでは、最も自然な定式化である。

### (定式化 I')

(定式化 I)とほとんど同様であるが、構造物の安全性を、目的関数に入れず、制約条件とする。すなわち、CSと安全性に関する制約条件の基で、建設費用等の直接費用を最小化する。

### (定式化II: 環境負荷換算率を導入した定式化)

環境負荷に換算率を掛けて金銭タームに変換し、これと総建設費用の合計という、一元化された評価関数を用いた、制約条件のない最小化問題として定式化する。このとき、換算率(例えば、炭素税)をうまく調整すれば、

定式化Iで示したCSを満足するように出来る。その意味で、定式化IとIIは、等価な定式化である。換言すると、この換算率は炭素税のようなものを考えており、この費用を課すことにより、市場メカニズムを通じて資源摂取量や廃棄物排出量が抑制され、結果的にCS\*が達成されるような換算率が選択されるべきである。

### (定式化 II')

(定式化 II)と類似しているが、安全性を目的関数に入れず、制約条件とし、建設費用等の直接費用と、環境負荷に換算率を掛けた値との和よりなる目的関数を最小化する。

### (定式化III: 環境負荷最小化を導入した定式化)

CS制約の制限値の決定が困難であることを考慮し、総建設費用とCSをとともに最小/大化するような、多目的最適化問題として定式化する。ただし、これらの2つの目的関数を同時に最小/大化する解が存在するという保証はない。多目的計画法でこの問題を解いた場合、パレート解と呼ばれる幾つかの解を導く。これらパレート解から最終的に一つの解を選択するためには、多属性効用関数論や階層分析法(AHP)など、多軸評価尺度を一元化する方法が必要であると思われる。

### (定式化III')

(定式化 III)と類似しているが、安全性を目的関数に入れず、制約条件とした上で、建設費用等の直接費用と、CSを同時に最小/大化する、制約条件付き多目的最適化問題として、定式化する。

それぞれの定式化の命名からも分かるように、CSまたは環境負荷を、(I)制約条件、(II)換算率による金銭タームでの評価、(III)最大化、として扱っている点がこの3つの定式化の違いである。それぞれプライムのついている定式化では、安全性に関する評価を目的関数からはずし、制約条件として取り扱っている点が異なっている。

なお表5では記述の簡素化のため省略したが、それぞれの代替案の費用や環境負荷の算定に当たっては、プロジェクトライフを通して、建設、供用、廃棄の全過程で発生する費用やCS（環境負荷）を算定し、考慮する必要があるのは、言うまでもないことである。

CSの具体的な利用例は、次章の例題を参照されたい。

## 5. 簡単な例題

### (1) 単純梁の例

まずはじめに単純梁に関する例題を示し、CSを用いることの意味を説明する。

**例題1A：**この例題では、スパン7.5mの単純梁において材料を変え、それぞれの環境負荷を計算している（表-5）。このような場合各設計代替案の二酸化炭素発生量を直接比較することにより、環境負荷を比較し、また建設費用を比較することにより経済性を比較できる。この場合、木材が最も環境負荷が少ないことが分かる。

**例題1B：**実際の計画・設計では、ある幅を持った条件下での環境負荷の比較が必要である。単純梁を例にとれば、実際の設計条件は特に計画段階では例題1Aで示す「7.5mのスパン」と決められているのではなく、「川を渡る」などの条件の下で、便益がスパンを変えることに応じて変化すると想定し、何メートルのスパンで単純梁を設計するのが最も経済的であるか、あるいは環境負荷が少ないかと言う視点が重要となる。このような場合、CSの考え方の有効性が現れる。

この例題では、5.0m、7.5m、10.0mの3通りのスパンに対してCSを求めた（表-5及び表-6）。この結果、スパン5mのものがどの材料についても最大のCSを与えたが、これは総便益がスパンと寿命の積である場合の結果であり、例えばスパンの代わりに最大曲げモーメント $M_{max}$ と寿命の積を総便益とすると、スパン7.5mの場合がどの材料においても最大のCSを与える。このように単位発生二酸化炭素当りの便益、すなわちCSで比較すると、木材を除けば、スパンの違いによ

表-5 例題1A：スパン7.5mの単純梁の二酸化炭素発生量及びCS





| 材料                          | 木材                                                                                | 鉄筋コンクリート (RC)                                                                     | 鉄骨 (S)                                                                            | アルミニウム                                                                              | 備考                         |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ① 材質                        | あままつ、くままつ                                                                         | R: SD 295<br>C: $\sigma_{yk}=240$                                                 | SS400                                                                             | —                                                                                   | 寿命:<br>木材: 20年<br>その他: 40年 |
| ② 許容応力(N/mm <sup>2</sup> )  | 95                                                                                | R: 2000<br>C: 80                                                                  | 1600                                                                              | 1340                                                                                |                            |
| ③ 断面 (mm)                   |  |  |  |  |                            |
| ④ 断面係数 (cm <sup>4</sup> )   | 3000                                                                              | —                                                                                 | 184                                                                               | 285                                                                                 |                            |
| ⑤ 作用応力(N/mm <sup>2</sup> )  | 87                                                                                | R: 1590<br>C: 75                                                                  | 1410                                                                              | 910                                                                                 |                            |
| ⑥ 重量 (kg)                   | 135(0.45m <sup>3</sup> )                                                          | R: 90<br>C: 1040                                                                  | 160                                                                               | 57                                                                                  |                            |
| ⑦ 発生(CO <sub>2</sub> , t-C) | 13                                                                                | 100                                                                               | 56                                                                                | 51                                                                                  |                            |
| ⑧ 便益 (m-F)                  | 7.5×20<br>150                                                                     | 7.5×40<br>300                                                                     | 7.5×40<br>300                                                                     | 7.5×40<br>300                                                                       |                            |
| ⑨ C.S. (⑧/⑦)                | 12                                                                                | 3                                                                                 | 5.5                                                                               | 6                                                                                   |                            |
| ⑩ 総費用 (円)                   | 43,500                                                                            | 21,200                                                                            | 9,600                                                                             | 88,400                                                                              |                            |

表-6a 例題1B：スパン5.0mの単純梁の二酸化炭素発生量及びCS









| 材料                          | 木材                                                                                 | 鉄筋コンクリート (RC)                                                                      | 鉄骨 (S)                                                                             | アルミニウム                                                                               | 備考                         |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ① 材質                        | あままつ、くままつ                                                                          | R: SD 295<br>C: $\sigma_{yk}=240$                                                  | SS400                                                                              | —                                                                                    | 寿命:<br>木材: 20年<br>その他: 40年 |
| ② 許容応力(N/mm <sup>2</sup> )  | 95                                                                                 | R: 2000<br>C: 80                                                                   | 1600                                                                               | 1340                                                                                 |                            |
| ③ 断面 (mm)                   |  |  |  |  |                            |
| ④ 断面係数 (cm <sup>4</sup> )   | 1333                                                                               | —                                                                                  | 89                                                                                 | 89                                                                                   |                            |
| ⑤ 作用応力(N/mm <sup>2</sup> )  | 80                                                                                 | R: 1300<br>C: 60                                                                   | 1230                                                                               | 1230                                                                                 |                            |
| ⑥ 重量 (kg)                   | 60(0.2m <sup>3</sup> )                                                             | R: 40<br>C: 580                                                                    | 70                                                                                 | 25                                                                                   |                            |
| ⑦ 発生(CO <sub>2</sub> , t-C) | 6                                                                                  | 52                                                                                 | 25                                                                                 | 23                                                                                   |                            |
| ⑧ 便益 (m-F)                  | 5×20<br>100                                                                        | 5×40<br>200                                                                        | 5×40<br>200                                                                        | 5×40<br>200                                                                          |                            |
| ⑨ C.S. (⑧/⑦)                | 18                                                                                 | 4                                                                                  | 8                                                                                  | 9                                                                                    |                            |
| ⑩ 総費用 (円)                   | 17,500                                                                             | 10,400                                                                             | 4,200                                                                              | 30,000                                                                               |                            |

表-6b 例題1B：スパン10.0mの単純梁の二酸化炭素発生量及びCS

| 材料                          | 木材                                                                                  | 鉄筋コンクリート (RC)                                                                       | 鉄骨 (S)                                                                              | アルミニウム                                                                                | 備考                         |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ① 材質                        | あままつ、くままつ                                                                           | R: SD 295<br>C: $\sigma_{yk}=240$                                                   | SS400                                                                               | —                                                                                     | 寿命:<br>木材: 20年<br>その他: 40年 |
| ② 許容応力(N/mm <sup>2</sup> )  | 95                                                                                  | R: 2000<br>C: 80                                                                    | 1600                                                                                | 1340                                                                                  |                            |
| ③ 断面 (mm)                   |  |  |  |  |                            |
| ④ 断面係数 (cm <sup>4</sup> )   | 6667                                                                                | —                                                                                   | 324                                                                                 | 481                                                                                   |                            |
| ⑤ 作用応力(N/mm <sup>2</sup> )  | 75                                                                                  | R: 1680<br>C: 70                                                                    | 1540                                                                                | 1040                                                                                  |                            |
| ⑥ 重量 (kg)                   | 300(1 m <sup>3</sup> )                                                              | R: 160<br>C: 2300                                                                   | 300                                                                                 | 130                                                                                   |                            |
| ⑦ 発生(CO <sub>2</sub> , t-C) | 29                                                                                  | 208                                                                                 | 105                                                                                 | 117                                                                                   |                            |
| ⑧ 便益 (m-F)                  | 10×20<br>200                                                                        | 10×40<br>400                                                                        | 10×40<br>400                                                                        | 10×40<br>400                                                                          |                            |
| ⑨ C.S. (⑧/⑦)                | 7                                                                                   | 2                                                                                   | 4                                                                                   | 3.5                                                                                   |                            |
| ⑩ 総費用 (円)                   | 98,800                                                                              | 41,400                                                                              | 18,000                                                                              | 156,000                                                                               |                            |



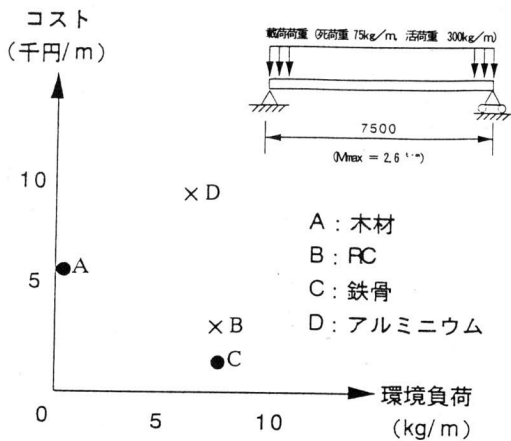


図-10 例題1：単純梁の費用と環境負荷（炭素換算CO<sub>2</sub>排出量）

り最大のCSを与える材料が変化しているなど、いろいろ多様な比較ができ、実際の計画・設計にCSを導入することの有効性を示している。

なお、この例題では問題が単純化されており、梁を支える柱（あるいは橋脚）の構造を計算に入れていないこと、建設時の環境負荷のみ対象にしており維持管理や廃棄の負荷を無視していること、材料の寿命を木材で20年、その他の材料で40年とした点、荷重を単純化していること、および材料の応力だけで断面を決定し、変位についての検討は行っていないことなど、実際の設計とは異なる。

## (2) 埋立護岸の設計代替案の選択の例

水深4m、海底面下10mの粘性土地盤上に、海底面より5m高さの埋め立てを行うための護岸を設計する問題を考える。このケースでは、埋立を排水したドライな状態で行うことを想定しているので、護岸は止水性を有している必要がある。

紙面の制約のため詳細を示すことはできないが、二重鋼矢板式、鋼製セル式、ジャケット式、ケーソンと止水壁を組み合わせた形式、捨石と自立鋼矢板を組み合わせた形式の5つの形式が、設計代替案として検討された。

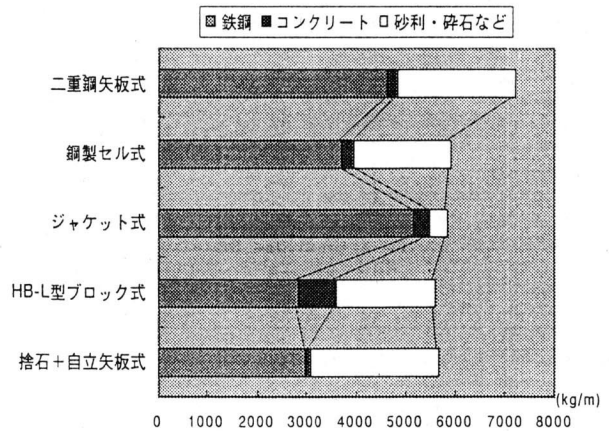


図-11 例題2：設計代替案別炭素換算CO<sub>2</sub>発生量の内訳

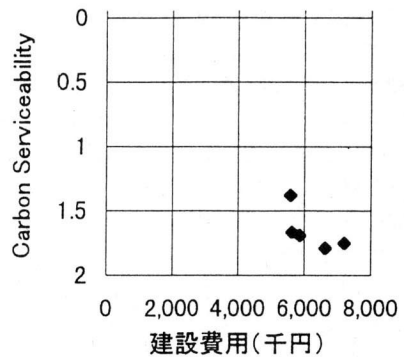


図-12 例題2：護岸建設費用とCS

表-7に、それぞれの設計案で計算された法線1m当りの建設費用と、先の表-3を基に計算した炭素排出量を示した。また、このとき法線1m当り護岸が提供するサービスを1とすれば、CSは炭素排出量の逆数となり、これも表-7に合わせて示した。

ところで、各設計案で計算された炭素排出量のおおよその内訳を示したのが、図-11である。鉄鋼、コンクリートなど二酸化炭素を多く発生させる製造工程を持つ材料の使用の多い設計案が炭素の発生量が大きいと言えるが、捨て石堤など、単位発生量の少ない材料を使用する案でも、使用量が多くなると結果的には大きな発生量となることが分かる。

表-7 例題2：護岸の設計代替案の建設費，CO<sub>2</sub>排出量と換算総費用

| 設計代替案      | 建設費用 (千円/m) | 炭素発生量 (kg-c/m) | CS (サ-ビス/kg-C/m)      | 換算総建設費用 (千円/m) |
|------------|-------------|----------------|-----------------------|----------------|
| 二重鋼矢板式     | 5,580       | 7,200          | $1.38 \times 10^{-4}$ | 5,594          |
| 鋼性セル式      | 5,860       | 5,900          | $1.69 \times 10^{-4}$ | 5,872          |
| ジャケット式     | 5,620       | 6,000          | $1.67 \times 10^{-4}$ | 5,740          |
| ケーソン+止水壁式  | 6,630       | 5,600          | $1.79 \times 10^{-4}$ | 6,742          |
| 捨て石+自立鋼矢板式 | 7,200       | 5,700          | $1.75 \times 10^{-4}$ | 7,211          |

図-12に、各設計案の建設費用とCSをこれらを軸とするグラフに示した。この図から分かるように5個の代替案の内4個はパレート最適解である。すなわち、この中の任意の2個の案を比較したとき、2つの評価規準（建設費用とCS）のどちらかは一方が優れており、他方はもう一方が優れている。この意味で、この2つの評価規準を独立に考慮する場合、これら2つの案のどちらが優れているとはいえない（無差別である）。

この例題で、表4の定式化Iをとり、現在最低の建設費用である、二重鋼矢板式護岸の炭素発生量、7,200kg/mの80%の発生量に押さえることが要求されていると仮定すると、この時のCSは、 $7,200 \times 0.8 = 5,760$ の逆数 $1.74 \times 10^{-4}$ 以上の設計案が選ばなければならない。この中で、建設費用が最小なのはケーソン+止水壁護岸であり、これが選択される。なお、このときこれらの設計代替案はすべて同じ設計条件で同じ設計基準を用いて設計されているので、破壊確率はほぼ等しく、構造物の信頼性に関する制約は同程度に満足されているとした。

一方、定式化IIをとり、仮に炭素1t当りの環境負荷換算率を2千円（=約US\$20）としたとき、建設費と環境負荷換算費の合計金額は、表-7の最後の列に示した通りとなる<sup>18)</sup>。期待破壊費用は同じと考えられるので計算に考慮していない。このときは二重鋼矢板式が最適解となった。

最後に、定式化IIIの場合は、先に述べたように4つの代替案がパレート最適解となり、この中から一つの最適解を決定することは、このような多目的計画法ではできない。

## 6. むすび

本研究では、これから我々が直面するであろう資源・環境の制約を踏まえたうえでの社会基盤の整備の問題を、社会基盤施設の設計法という立場

から捉え、そのアプローチの方向を示すことを目的とした。

この問題を考える前提として、人類の経済活動の大規模化にともない、従来それに資源を提供し、また廃棄物を受容していた自然システムが、もはや無限の容量を持つとは考えられなくなったことを示した。そして、我々の経済活動を従来のように経済システム内の金銭と財の循環としてだけ捉えるのではなく、自然システムをも含めた枠の中で、物質収支を分析することが必要であることを述べた。しかし、我々の知識の不足と、自然システムの複雑さのため、すべての物質の収支を追うことは現時点では不可能である。

以上のような理解に基づき、我々は社会基盤施設の設計法に物質収支と言う観点を考慮した指標を、従来から考慮されてきた経済性と信頼性と言う指標に加えるため、当該構造物の環境負荷をおおまかに測る現実的な指標として、二酸化炭素発生量をとることを提案した。各構造物の建設・維持管理・廃棄のときに発生する二酸化炭素量は、各構成材料の二酸化炭素発生原単位を積み上げることにより計量される。さらに、一単位二酸化炭素により得られるサービスを表す指標として、Carbon Servicability (CS) を提案した。

提案した設計法では、設計代替案を評価する指標として構造物の建設費用と信頼性に加えて二酸化炭素発生量（すなわちCS）を加えている。このため設計代替案の選択の問題は、多目的決定法の問題となる。我々はここに3つの定式化を示したが、これらは決定的なものではなく将来にわたり改良を重ねて行く必要がある。最後に簡単な例題を加え、説明の一助とした。

今後の課題は数多い。そのいくつかを列挙すると、

- 1) 経済性、信頼性、環境負荷と言う3つの指標を持つ意思決定問題としての設計法の、決定的合理的な方法を研究する必要がある。
- 2) 環境負荷として二酸化炭素発生量に基づく指

標(例えばCS)をとる場合でも、この発生や固定を支配するメカニズムのより詳細な把握が必要である。

3)物質収支と言う観点から見れば、二酸化炭素だけの収支を考慮するだけでは不十分である。他の物質の収支も、モデルに付加して行かなければならない。

この外にも、多くの解決されなければならない問題点があるであろうが、もはや我々の経済活動を取り囲み支える自然システムの容量をあたかも無限であるように考える従来からの社会基盤施設の設計法は十分ではなく、このような環境負荷から来る制約を考慮せざるをえないことに疑いの余地はない。

著者らは、21世紀の社会基盤施設の設計では、従来の経済性と安全性の尺度に加え、環境負荷やエネルギー使用量を評価尺度として取り入れなければならないと信じている。

**謝辞：** 本論文に示した研究成果は、本論文の筆頭著者が座長を勤めた私的 연구グループ、「エネルギー使用量を考慮した新しい設計法の開発研究会」(活動期間1993年6月から1996年4月)での活動の成果の一部である。ここに著者ら以外の構成メンバーの名前を列挙し、その労に感謝したい。小澤良夫、矢木康熙、玉木勝平、梅崎邦男、鷹羽信勝、西嶋善昭、林良嗣、大塚悟、中野正樹、奥野隆明、山田英司の諸氏。また、例題の計算では1996年岐阜大学卒業生、石倉宙、魚住研司両君の協力を受けた。

## 参考文献

- 1) 厚生省人口問題研究所：世界人口推計の概要，研究資料267号，1991.
- 2) 綿引邦彦：地球—この限界，オーム社，1995.
- 3) 通産省編：エネルギー'93，1993.
- 4) 環境庁編：平成6年度環境白書：環境への負荷の少ない社会経済活動に向けて，1995.
- 5) 環境庁 UNCED報告，1992.
- 6) 松尾稔：地盤工学—信頼性設計法の理論と実際—，技報堂出版，1983.
- 7) 酒井寛二，漆崎昇：建設業の資源消費量と環境負荷の推定，第5回環境研究発表会論文，環境情報科学21-1，pp.130-

135，1992.

- 8) 外岡豊，河中俊：産業連関表による建設部門誘発CO<sub>2</sub>排出量の解析，IBS研究報告30周年記念号，pp.86-103，(財)計量計画研究所，1995.
- 9) Yamamoto, R.: An introduction to LCA from the viewpoints of sustainable development and conservation of biosphere, *Proc. of International Conference on Eco-Balance*, Tsukuba, pp.1-2, Japan, 1995.
- 10) Boustead, I.: What can we do with LCA?, *Proc. of International Conference on EcoBalance*, pp.3-8, Tsukuba, Japan, 1995.
- 11) Gotoh, S.: Methodology for Assessing Environmental Load, *Proc. of International Conference on EcoBalance*, Tsukuba, pp.9-14, Japan, 1995.
- 12) Ikaga, T. and Ishifuku, A.: Evaluation of building design using Life Cycle CO<sub>2</sub> analysis, *Proc. of International Conference on EcoBalance*, pp.119-124, Tsukuba, Japan, 1995.
- 13) Okada, T. and Koizumi, Y.: Practical application of the Life Cycle Assessment theory to construction, *Proc. of International Conference on EcoBalance*, pp.125-130, Tsukuba, Japan, 1995.
- 14) 植木和弘，落合仁司，北島佳房，寺西俊一：環境経済学，有斐閣，1991.
- 15) 宮沢健一編：産業連関分析入門—新版—，日経文庫(508)，1995.
- 16) 伊香賀俊治：1985年産業連関表に基づくCO<sub>2</sub>原単位，日本建築学会ライフサイクルCO<sub>2</sub>小委員会資料，1994.
- 17) 建設省土木研究所：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書，1993.
- 18) Pearce, D.W., W.R.Cline, A.N.Achanta, S.Fankehauser, R.K.Pchauri, R.S.J. Tol and P.Vellinga: Chapter 6 The social cost of climate change; Greenhouse damage and the benefits of control, *IPCC Working Group III Report*, 1995.

(1996.8.22受付)