

環境負荷を考慮した社会基盤施設の設計法に関する研究
AN ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN METHOD OF INFRASTRUCTURE

杉山 郁夫¹・林 良嗣²・黒田 勝彦³

Ikuo SUGIYAMA, Yoshitsugu HAYASHI, Katsuhiko KURODA

まえがき

IPCC地球温暖化第二次レポートおよび地球温暖化防止京都会議(COP3)の結果、先進国による温室効果ガスの排出が地球環境に深刻な影響を与えつつあることが再認識され、各国の今後の対応に関して基本的合意がなされた。今後、温室効果ガスの削減が産業分野のみならず民生分野についても要求されると予想され、本研究対象である社会基盤の計画・設計の分野でも、そのライフサイクルにわたる二酸化炭素(CO₂)排出量を考慮する必要があると考えられる。従来の計画・設計局面では、計画段階で便益・費用分析をおこない、対象施設の存在価値を確認し、設計段階で費用を含めその実現性確認するのが一般的手法であった。本研究ではこれに加え、CO₂排出に代表される環境負荷を考慮した社会基盤施設の設計法を提案している。この理由として、短期的にはCOP3の結果に基づき、長期的にはIPCC地球温暖化第二次レポートの削減シナリオに沿って、年々その削減目標が厳しくなっていくと予想されることがあげられる。この結果、従来の評価手法では厳しい削減目標に対応した、社会基盤整備の意思決定ができない事態が発生することが懸念される。この対策として、社会基盤の計画から設計に及ぶ意思決定を、様々な種類の社会基盤について、同一の概念の下でおこなう可能性について述べる。

1. 研究の背景

(1) 地球温暖化防止京都会議 (COP3)

1997年12月、「地球温暖化防止京都会議」が開催され、下記の内容が決定された。

- 1) 削減の目標年次は2008～2012年。
- 2) 先進国全体で少なくとも5%の温室効果ガスの削減。

- 3) 6ガス対象(基準年) CO₂, メタン、亜酸化窒素：(1990年)、HFC, PHC, SF6：(1995年)
- 4) 1990年以降の植林を吸収源と認める。
- 5) 排出権取引(先進国間)、共同実施(先進国間)、クリーンディベロップメントメカニズム(途上国に対する技術供与)を考慮。

この結果、日本の削減目標6.0%に対する考え方が次のように示されている。

1) CO ₂ , メタン、亜酸化窒素抑制	： -2.5%
2) 代替フロン等 (HFC, PHC, SF6) 排出抑制	
不可能分	： +2.0%
3) 土地利用の変化と森林吸収	： -3.7%
4) 排出権取引、国際的共同実施枠組	： -1.8%
合計	： -6.0%

(2) 社会基盤施設整備に伴うCO₂削減

(財) 計量計画研究所資料によれば、1985年の我が国のCO₂総排出量のうち、41%が建設分野に関するものであり、この内訳として、建築分野32.9% (建築新築・増改築12.8%、建築運用20.1%)、土木分野8.4%となっている。土木分野の運用に伴うCO₂排出量が少ないと考えられるため、我が国のCO₂総排出量のうち、建築新築・増改築12.8%に土木分野の8.4%を加えた約20%が建設工事、同じく約20%がその運用に伴って発生するCO₂とみなされる。削減目標との対応では、前節の日本の削減目標のうち項目1) および3) の合計は6.2%、この削減目標6.2%が建設分野の割合41%に対しても同じ割合で求められるとすると、日本の排出量削減の約2.5%を建設分野で担うことになる。加えて、総合エネルギー調査会(1996)によれば、

キーワード：計画手法論、公共事業評価法、整備効果計測法、地球環境問題

¹正会員 株式会社日建設計土木事務所 設計室長 (〒541-8528 大阪市中央区高麗橋4-6-2、電話 06-229-6372, fax 06-201-2433)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科 地圏環境工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町、電話052-789-2772, fax 052-789-3837)

³正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設工学科 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町、電話078-803-1011, fax 078-803-1016)

CO₂排出量は1990年から1994年にかけて3.2億から3.4億tc(炭素重量に換算したCO₂排出量)と約6%増加している。この上昇分を考慮すると、建設分野全体で担うべき削減量は1994年時点で我が国のCO₂総排出量の約5%と考えられる。このように日本のCO₂排出の中でも大きなシェアを占めるとともに、建設規模が大きく、一度建設されたら長期にわたり供用される社会基盤施設では、特に「環境負荷を考慮した評価手法」の確立が必要である。

2. 環境負荷を考慮した設計法の基本概念と定式化

(1) 新設計法の基本概念

— Carbon Serviceability (C.S.)

社会基盤施設を建設するに際して、これに必要な材料の製造・運搬・組み立て過程におけるCO₂排出量をあらかじめ計算するための排出原単位は、産業連関表の利用や積み上げ法により求められる。¹⁾ また、建築の設備分野では、空調や照明に要するエネルギーを削減するための努力が1970年代のいわゆるオイルショック以降継続的に研究・実施されている。このように一部の社会基盤施設における、建設・維持管理・廃棄・リサイクルの各段階を考慮したCO₂排出量を計算する方法については既に研究が進められつつある。^{2) 3)}

その一方で、社会基盤施設のライフサイクルにわたるCO₂排出量が、計画・設計の意思決定の要素である、便益・費用・安全率・破壊確率および地球全体の浄化能力と、どのような関係があるのかが、松尾・本城・杉山の研究(1996)⁴⁾によって示されている。この研究では、従来の計画手法である費用便益分析の考え方を拡張した「CO₂排出量を考慮した社会資本の設計法」の提案と位置づけが試みられた結果、以下の包括的な概念がその定式化とともに示されている。

$$\max. \sum_{t=0}^T (B(t|a, s(t)) - C(t|a, s(t)))(1+r)^{-t}$$

$$\text{st. } \delta w(t|a) - \delta R(t|a) < E(t) = \text{const.}$$

$$E(t) = H(S(t)) - dS(t)/dt - R(t|S(t)) + W(t|S(t))$$

ここに

$B(t|a, s(t))$: プロジェクト実施により得られる便益、

$C(t|a, s(t))$: 総費用、 r : 社会的割引率

t : 対象とする時点、 $W(t|a)$: 自然システムへの廃棄物、 $R(t|a)$: 自然システムからの資源、 $E(t)$: 制約値、 $H(S(t))$: 自然システムの自己再生能力、 $S(t)$: 自然システム内の資源ストック量

新設計法の特徴を以下に示す。

1) 新設計法は、費用便益分析の(便益) - (費用)を、エネルギーを含んだいわゆる天然資源の再生速度を考慮した、資源の有限性という制約条件の下で最大化することを目的としている。その有限性を定量的に把握するためには、自己再生能力のモデル化が必要と考えられる。結果的には、相互に関連する複雑な自然システムを精度良くシミュレーションすることが必要になり、これは現時点ではかなり困難な作業となると予想される。

2) そこで「C.S. (Carbon Serviceability)」の概念を導入する。この定義は「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、それらが建設、供用、廃棄の全期間に排出するCO₂排出総量で除した値」である。言い換えれば、1単位のCO₂が提供するサービスの量を、C.S.と定義している。

$$C.S. = \frac{\sum_{t=0}^T (B(t|s(t)) - C(t|a, t))}{\sum_{t=0}^T (W(t|s(t)))}$$

$W(t|s(t))$: 対象施設のCO₂排出量。

3) この定式化において「計画」と「設計」とは明確に区別される。すなわち、上式の便益 B と費用 C の両方が変数である場合を計画段階、与えられた便益および環境負荷の制約条件下で費用の最小化を図る場合を設計段階、と定義する。

(2) C.S.の概念に基づく新設計法の定式化

表1は、参考文献4)における「設計法の定式化一覧」の一部であり、信頼性設計と安全率を用いた設計において、1) C.S.を制約条件として考える場合、2) 環境負荷を金銭の単位に換算して費用の最小化を計る場合、を定式化している。

表1 C.S.の概念に基づく設計法の定式化一覧

	C.S.を制約条件として用いた設計法	環境負荷の換算率を用いた設計法
信頼性設計法	$\min. C_c + C_f P_f$ s.t. $C.S. \geq C.S.^*$	$\min. C_c + C_f P_f + \alpha Z$
安全率を用いた設計法	$\min. C_c$ s.t. $C.S. \geq C.S.^*$ $P_f \leq P_f^*$	$\min. C_c + \alpha Z$ s.t. $P_f \leq P_f^*$
C_c : 建設、維持管理、廃棄費用、 C_f : 破壊被害修復費用、 P_f : 破壊確率、 Z : 環境負荷、 α : 環境負荷の換算率、 P_f^* : 破壊確率の基準値、 Z^* : 環境負荷の基準値、 $C.S.$: Carbon Serviceability, $C.S.^*$: Carbon Serviceabilityの基準値		

3. C.S.を用いた社会基盤施設の設計

(1) 新設計法適用上の課題

前節で、C.S.の概念を導入した設計法が定式化されたが、実際の設計に際して以下の点が問題になる。

a) 既存の施設・構造物は、環境負荷を考慮しないで設計されていることが多い。多少C.S.が低くてもこれらを寿命に至るまで利用するのか、又はよりC.S.の高い施設を新築すべきかが問われる。

b) 対象とする施設が太陽光発電発電施設など、環境負荷を伴わないエネルギーを得るためのものである場合、建設に伴うCO₂排出はどこまで許容されるかが問われる。

c) 木材の建設資材としての活用をどのように考えるかについての問題がある。COP3では1990年以降の植林によるCO₂固定量をカウントすることを認めているが、20～30年後には植林された樹木はCO₂固定能力が減少し、その後は伐採・植林を繰り返すことになる。伐採された木材を資材として活用することによって、腐敗により大気へ排出される時期を更に延長し、鉄やコンクリートなど、従来タイプの建設資材の消費を減らすことが可能となるような、木材利用効果の評価法の確立が必要である。

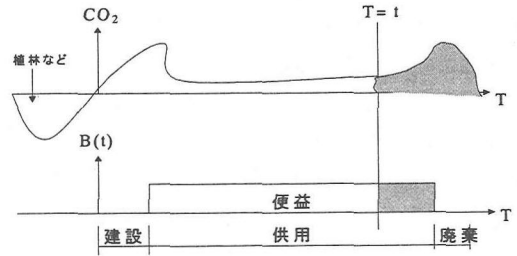
(2) 課題への対応

前節a)～c)は異なった問題のように思えるが、以下のように、意思決定のための指標C.S.を、各ケース同一の方法で求めることが可能である。

(a) 既存施設が老朽化し便益が年々低下する場合の

評価

この場合は、「現状維持」して寿命まで使いつづけるか、「廃棄」して「新築」するかの判断が必要である。図1において、「現状維持」のケースは時間tより右側のC.S.、新設する場合はライフサイクル全体のC.S.を求め、これらの結果をを比較することにより、意思決定に有効な情報を提供できる。


図1 施設のライフサイクルCO₂・便益

(b) クリーンエネルギー施設建設の評価

太陽光発電、水力発電、原子力発電など、建設時のCO₂排出量は大きい、CO₂排出量の少ないエネルギー供給を可能にする施設の評価が必要である。すなわち、供用時の便益が大きく、全体として環境負荷の視点では優位性を持つ施設計画の定量的評価が重要になる。特に、年々技術的改良が加えられ発電効率が向上してきている太陽光発電については、建設にかかるエネルギーを含めた、ライフサイクルを考慮した継続的評価が必要であり、これにはC.S.の活用が効果的である。

(c) 建設資材における木材利用およびリサイクルの評価

C.S.を用いることにより、建設資材としての木材の利用など、図1の「植林など」に示すように、材料自体が大気中のCO₂を固定する場合の評価が可能になる。すなわち、1) 木材をCO₂固定段階を含め最終的なエネルギー回収のためのバイオ発電に至るまで多段階に利用する場合、2) セメントや鉄など一般的な建設資材を一回だけ使用する場合、などについて、C.S.を用いることによりライフサイクルを考慮した便益と環境負荷の関係に基づいた定量的な比較・評価が可能になる。

(3) 排出削減価値の時間的割増

一般に社会基盤施設整備においては、建設に要する資材量が大きく、かつ供用期間が30年～50年、長い場合は100年以上に及ぶ場合も少なくない。したがってCO₂の大気中の残存期間を考慮すると、計画・設計時点において、対象施設のライフサイクル全体の環境負荷を考慮した検討が必要である。一方、CO₂排出量に関してはIPCCレポートにより削減シナリオ(図2)が提案されており、長期的には排出量を現状の1/2以下にすることが述べられている。この場合、IPCCシナリオに従って排出量を制御してゆくことが合意されたとすれば、現在のCO₂排出量と、100年後のCO₂排出量は、量は同じでも目標自体が厳しくなるため、計画上の価値は異なる。そこで、 $(1+s)^t$ を排出量に乘じこれを補正する事を提案する。

$$C.S.=\sum_{t=0}^T (B(t|a s(t))-C(t|a s(t)))(1+r)^{-t} / \sum_{t=0}^T W(t|S(t)) (1+s)^{-t}$$

s: t年後の排出量を現在量に換算するための割増率

この割増率sの導入により、C.S計算時、分子の純便益相当分が、割引率rにより将来価値から現在価値に補正されると同時に、将来のCO₂排出量が割増率sにより現在等価排出量へ補正される。また、化石燃料の可採年数を考慮すると、将来の化石燃料枯渇時点以後はCO₂排出を抑制する必要が無くなるため、枯渇時期に近い排出量は逆に割引かれる必要があるが、本研究ではこの影響を考慮していない。

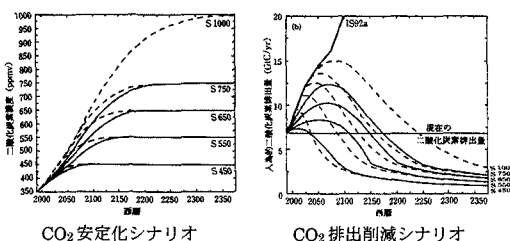


図2 IPCCの削減シナリオ⁵⁾

4. むすび

CO₂の社会的費用は、現在のところ炭素換算で600～30,000円/tc程度といわれている。これは、

社会資本整備における建設費と比較して通常数%のオーダーであり、費用便益分析を導入したとしても、現在のところ計画・設計時の意思決定にはそれほど影響しないように思われる。しかしながら、先進国間で排出量を徐々に削減することはすでに合意されており、達成するための各産業分野で排出量削減目標が決められている。この目標をプロジェクトの拘束条件として考慮すると、社会基盤の計画・設計に当たっては、決められた削減枠以内で、どの社会基盤施設を優先的に建設するかを決定する必要が生じ、C.S.は意思決定時の重要な判断要素となる。また将来、IPCCのシナリオにしたがって排出量削減が計画されると、長期的にはこれに対応する形で、排出量を削減できるための炭素税の税率が決定される可能性がある。この評価においても、各施設のCO₂排出量の代わりにC.S.を用いることにより、よりの確な判断が可能となる。

参考文献

- 1) 酒井寛二, 漆崎昇; “建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定”, 環境情報科学21-2, pp.130～135, 1992.
- 2) 林良嗣, 京谷孝史, 加藤博和, 中島義人; “地球環境インパクトと周辺アメニティを考慮した道路構造代替案の評価手法に関する研究”, 環境システム研究論文集Vol.23, pp.314～320, 1995.8.
- 3) 池田秀昭, 井村秀文; “社会資本整備に伴う環境インパクトの定量化に関する研究”, 環境システム研究Vol.21, pp.192～199, 1993.8.
- 4) 松尾稔, 本城勇介, 杉山郁夫; “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”, 土木学会論文集No.533/VI-33, 1-19, 1996.12
- 5) IPCC [気候変動に関する政府間パネル] 編, 環境庁地球環境部監修; “IPCC地球温暖化第二次レポート”, pp.24～30, 1996.7