

河川工事によるCO₂排出量の試算とライフサイクルアセスメント手法の適用に係る基礎的考察

池田 鉄哉¹・天野 邦彦²・岸田 弘之³

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部河川環境研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)
E-mail:ikedai-t92tb@nilim.go.jp

²正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部河川環境研究室長
E-mail:amano-k92ta@nilim.go.jp

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部長
E-mail:kishida-h2rq@nilim.go.jp

昨今の環境に対する意識の高まりを受けて、社会資本整備分野では地球温暖化の原因となる二酸化炭素(CO₂)の排出量削減に向けた研究・技術開発が進められている。国土交通省国土技術政策総合研究所では社会資本の構想段階においてライフサイクルを見通した環境負荷を把握し、最適な環境影響評価手法の開発に取り組んでおり、その一環として河川などの社会資本整備に対するライフサイクルアセスメント手法の適用について検討を行っている。本論文は今後の河川管理の実務に反映させることを念頭に、実際に設計・施工されている一般的な河川の築堤・護岸工事を対象としたCO₂排出量の試算を行い、河川工事の流れや工法・資材の使用実態を踏まえて今後のCO₂排出量の削減方策の検討を行った。そして河川工事に対するライフサイクルアセスメント手法の具体的な適用方策を提案し、その基礎的な考察を行った。

Key Words : river embankment and revetment work, estimation of CO₂ emission volume, Life-cycle assessment (LCA)

1. はじめに

河川や道路などわが国の社会資本整備分野においては、人の健康への影響や自然環境・生態系への影響などに対して環境規制措置や環境影響評価(EIA: Environmental Impact Assessment)が既に制度化されているが、昨今の環境に対する意識の高まりを受けて、地球温暖化の原因となる二酸化炭素(CO₂)の排出量削減に向けた研究・技術開発が進められている。しかしながらこれら個別技術については社会資本整備のライフサイクル全体の中でどのように活用すれば環境負荷削減に向けて最適となるかを定量的に把握する手法は十分に開発されていない。このため国土交通省国土技術政策総合研究所では、平成20～22年度の総合技術開発プロジェクトとして社会資本の構想段階において資材の採取・調達から廃棄に至るまでライフサイクルを見通した環境負荷を把握し、最適な環境影響評価手法の開発に取り組んでおり、その一環として河川などの社会資本整備に対するライフサイクルアセスメント手法(以下、「LCA手法」という。)の適用

について検討を行っている。

LCA手法は製品の原材料の採取から製造、使用及び処分に至る生涯を通しての環境側面及び潜在的影響を調査するものとして、1997年に国際標準規格ISO 14040シリーズとして「ライフサイクルアセスメントの原則及び枠組み」が発行されている¹⁾。LCA手法が製品やサービスに適用されるのに対し、公益的な社会資本整備事業として行われる河川工事にLCA手法の適用を検討するに当たっては、工事が行われるそもそもの目的や、計画・設計から維持管理に至るまでの河川管理者(発注者)・設計者・工事施工業者など各主体の役割、一連の業務の流れ、そして工法・資材など現場の実態を十分に踏まえる必要がある。河川工事ではその規模にもよるが、コンクリートやブロックなど大量の資材を用いるとともに、大型の建設機械を稼働させることで多くのエネルギーを消費する。また場合によっては土砂や骨材の採取によって大規模な土地改変をもたらすことも予想され、既設の構造物を取り壊し処分することで廃棄物を発生させる。河川工事を含む社会資本整備に関しては、工事が行われる現場

レベルで既に各種の環境規制措置や環境影響評価の適用を受けることとなるが、これら資材採取や廃棄、エネルギー消費などライフサイクルを通じた環境負荷の影響評価が必要との指摘もなされてきている。そして近年では地球温暖化の原因となるCO₂などの温室効果ガスの排出量削減が求められてきており、今後はあらゆる部門・セクターにおいて温室効果ガス排出量削減に向けた検討を行い、取り組みを推進する必要がある。このような背景から河川工事で使用される資材や工法に鑑み、まずはCO₂排出量を算定し、その削減に取り組むとともに、CO₂排出量といった環境負荷に対してライフサイクルを通じた影響評価手法を確立する必要がある。

本論文は今後の河川管理の実務に反映させることを念頭に、実際に設計・施工されている一般的な河川の築堤・護岸工事を対象としたCO₂排出量の試算を行い、河川工事の流れや工法・資材の使用実態を踏まえて今後のCO₂排出量の削減方策の検討を行った。そして河川工事に対するLCA手法の具体的な適用方策を提案し、その基礎的な考察を行った。

2. 河川の築堤・護岸工事を対象としたCO₂排出量の試算とその結果分析

(1) 試算の背景と目的

河川の築堤・護岸工事を対象としたCO₂排出量については、これまで島谷ら(1998)などによっていくつか試算が行われてきた^{2),3)}。その後多自然川づくりや自然再生事業など河川環境の保全・再生に向けた取り組みが進められたことや、リサイクル関連法の施行によって工事に使用する資材の採取・調達方法が見直され、廃棄物の再利用・再資源化が進められるなど、河川工事を取り巻く状況は大きく変化してきている。一方、CO₂排出量などの環境負荷量に関しては2000年の産業連関表を用い、そこで分類された各部門における単位生産活動に伴い直

接・間接的に発生する負荷量が「産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)」⁴⁾として公表されている。これまで作成・提案されてきたCO₂排出量の原単位については、わが国における製品・サービスを網羅する産業連関表を用いているものが多く、このうち3EIDは最新のデータを用いている。このため本論文では昨今の河川工事をめぐる状況の変化を踏まえつつ、現時点で利用可能であって社会資本整備分野で利用することが最もふさわしいと考えられる3EIDから製品量当たりのCO₂排出量原単位を作成して試算を行い、その結果を分析する。また試算で明らかとなった課題を抽出し、その解決方策を考察することにより、今後全国の個々の河川工事によるCO₂排出量を算定し、その削減に向けた取り組みを進める一助とするものである。ここで試算対象とした河川工事は、

- ・ 試算手順や結果が全国的に利活用・普及されるように一般的に行われる工種・工法であること
- ・ 実態に即したCO₂排出量が算定できるよう設計図書及び施工計画書などが入手できること
- ・ 実態に即した試算が行えるようヒアリングなど工事発注機関及び施工業者から協力が得られること
- ・ 比較的近年実施された工事であること

などの視点から選定した。この結果、国土交通省が管理するA河川と、地方公共団体が管理する中小規模のB河川に係る築堤・護岸工事について、データなどが入手可能で、全国どの河川においても同様に実施される一般的な工事であることから試算対象とした。それらの工事概要を表-1に、A河川の施工断面図を図-1に示す。

(2) 工事に係るプロセスごとの試算手順

河川の築堤・護岸工事として今回試算を行った範囲を図-2に示す。工事の実施によってCO₂を排出するプロセスとしてa)建設機械の製造とb)建設機械の移動、また資材調達プロセスとしてc)資材の製造とd)資材の搬送に分類できる。試算はこれまで他の社会資本整備分野で行わ

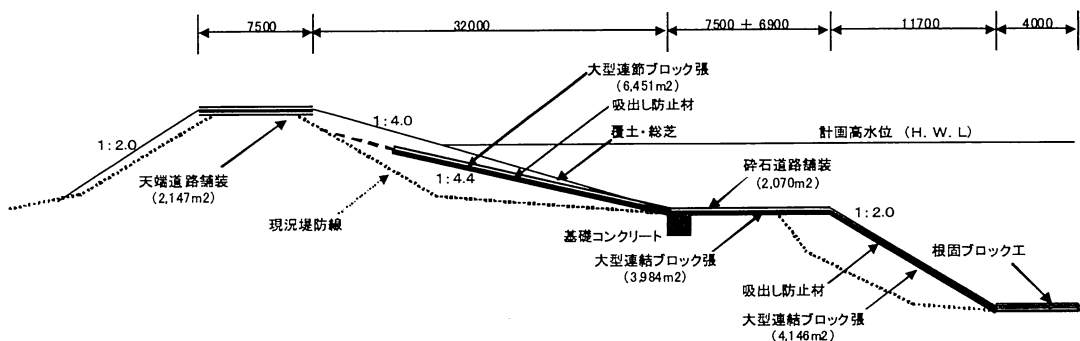


図-1 試算対象としたA河川の施工断面図

表-1 試算対象河川の工事概要

	A 河川	B 河川
計画高水流量	7,000m³/s	1,800m³/s
施工延長	300m	305.5m
推定工事費	約 480 百万円	約 340 百万円
高水護岸形式	大型連節ブロック 及び覆土・張芝	連節ブロック 及び覆土・張芝
低水護岸形式	大型連結ブロック	自然石固着金網, 玉石粗築工
根固め	ブロック工	捨石工

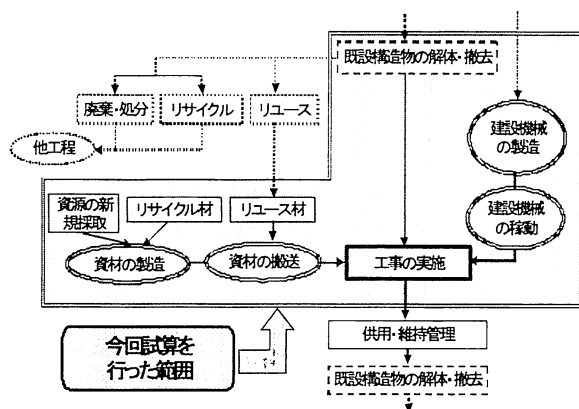


図-2 河川の築堤・護岸工事として試算を行った範囲

れた手法を参考とするとともに、CO₂排出量原単位以外の必要なデータは国土交通省の河川工事で用いられている設計要領⁹⁾によることとした。そのほか必要な情報は工事発注機関及び施工業者に対するヒアリングによって補足した。以下にプロセスごとの試算手順を述べる。

a) 建設機械の製造段階におけるCO₂排出量

河川の築堤・護岸工事では、ダンプトラックやブルドーザ、バックホウなどの大型建設機械が用いられる。A河川の工事で使用された建設機械の種類・台数を表-2に

表-2 A 河川の工事で使用された建設機械の種類・台数

機械名	種類	台数
バックホウ	0.15～0.2m³, 0.7m³	3
ローラー	振動ローラー (3.6, 8) , マカダムローラー (100) , タイヤローラー (100)	4
アスファルトフィニッシャー	3～6m	1
クレーン	クローラクレーン (55t 吊り, 150t 吊り) , ラフタークレーン (25t 吊り)	3
発電機	防音型出力 125KVA	2
ダンプトラック	2～10t	40
ブルドーザ	8t級, 21t級の2規格	2
モーターグレーダー	3.1m	1
パイプロハンマー	出力 45kW	1
水中ポンプ	8 吋	1

示す。建設機械の製造段階で排出されるCO₂については、これまでの研究成果において建設機械の使用に伴う減価償却相当分を加算していることから^{3), 9)}、本論文でも同様に取り扱うこととする。建設機械の製造段階におけるCO₂排出量原単位は、3EIDに示されている金額当たりのCO₂排出量原単位 (t-CO₂/百万円) に価格を乗じて算定した。3EIDでは生産者価格当たりの原単位と購入者価格当たりの原単位が示されているが、購入者価格については工事実施箇所によって製品の搬送・流通状況が大きく異なる可能性がある。このため本論文では生産者価格当たりの原単位によることとし、産業連関表の部門別品目別国内生産額表⁷⁾の品目別単価 (円/t) を用いて価格当たりの原単位から重量当たりの原単位に変換した。

建設機械の重量当たりCO₂排出量原単位 (t-CO₂/t)

= 3EIDの産業部門別排出量原単位 (t-CO₂/百万円)

× 品目別単価 (円/t) × 10⁶

建設機械の製造に係る産業部門として3EIDには粗鋼(転炉)、鉄製品及び鍛工品(鉄)、建設・鉱山機械の3部門でCO₂排出量原単位が記されているが、このうち鉄製品及び鍛工品(鉄)については土木建設・鉱山機械用の品目まで分類されており、より実態に近い原単位が得られるものとして採用した。さらに鉄製品及び鍛工品(鉄)の土木建設・鉱山機械用品目として鋳鉄铸件と球状黒鉛铸件とに分類されているが、近年の生産数量及び生産額が比較的大きい球状黒鉛铸件を採用した。この結果、建設機械の製造に伴う重量当たりのCO₂排出量原単位として2.87t-CO₂/tが算定された。なおこの原単位に関して、使用する建設機械は1種類だけではないものの、ここでは便宜的に統一的な原単位を工事全体に適用した。この原単位に建設機械重量を乗じ、減価償却分として実際の稼働時間を標準使用年数及び年間標準運転時間で除することで建設機械の製造段階におけるCO₂排出量を算定した。具体的な算定式を下式(1)に示す。

建設機械の製造段階のCO₂排出量 (t-CO₂)

= 建設機械重量 (t) × 原単位 (2.87t-CO₂/t)

× 実際の稼働時間 (h) / {標準使用年数 (年)

× 年間標準運転時間 (h/年) } (1)

b) 建設機械の稼働段階におけるCO₂排出量

建設機械の稼働段階におけるCO₂排出量は機械稼働時の燃料消費によるものである。建設機械で消費される燃料は軽油と揮発油(ガソリン)であり、3EIDではその双方について発熱量とCO₂排出係数が示されている。これを用いてCO₂排出量原単位として軽油2.644kg-CO₂/L、揮発油2.308kg-CO₂/Lが得られた。また工種ごとに使用される建設機械の1日当たり標準施工数量に対する実際の施工数量から稼働日数を算定し、これに燃料消費量及び排出量原単位を乗じて建設機械の稼働段階におけるCO₂排出量を算定した。具体的な算定式を下式(2)に示す。

$$\begin{aligned} & \text{建設機械の稼働段階のCO}_2\text{排出量 (t-CO}_2\text{)} \\ &= \text{燃料消費量 (L/日)} \times \text{原単位 (kg-CO}_2\text{/L)} \times 10^3 \\ & \quad \times \text{実際の施工数量 (m}^3\text{)} \div \text{1日当たりの標準施工} \\ & \quad \text{数量 (m}^3\text{/日)} \end{aligned} \quad (2)$$

c) 資材の製造段階におけるCO₂排出量

工事で使用される資材については、工事発注段階において特記仕様書や数量総括表で製品が指定されている場合はそれを対象とし、そうでない場合は工事着手時に施工業者が作成する施工計画書を基にして試算を行った。資材の製造段階におけるCO₂排出量は使用される各資材について、a)と同じ考え方によって3EIDに示されている部門別CO₂排出量原単位 (t-CO₂/百万円) に品目別単価 (1t, 1m³又は生産数量ごとの価格)、そして施工数量を乗じて算定した。表-3に主要な資材の製造段階におけるCO₂排出量原単位を示す。これにより使用される資材のほとんどについて製造段階のCO₂排出量を算定することが可能であったが、堤防法面に張布される芝類は産業連関表の品目別単価が記されておらず算定できなかった。また異なる原材料によって製造される吸出し防止材は産業連関表ですべて不織布として同じ品目分類とされ、CO₂排出量原単位、品目別単価、CO₂排出量は同じ値となった。さらに異なる機能を有する製品として多くの種類が製造・販売される護岸用ブロックや様々な条件下で採取・製品化される購入土について、同じ原単位を一律に用いることが妥当であるかどうか疑問が残る。このように河川工事で使用される資材には更に詳細な部門・品目分類、部門・品目ごとのデータの更なる蓄積・充実、そして原単位に関して精査が必要なのがあった。具体的な算定式を下式(3)に示す。

$$\begin{aligned} & \text{資材の製造段階のCO}_2\text{排出量 (t-CO}_2\text{)} \\ &= \text{3EIDの部門別CO}_2\text{排出量原単位 (t-CO}_2\text{/百万円)} \\ & \quad \times \text{品目別単価 (百万円/t, m}^3\text{又は生産数量)} \\ & \quad \times \text{実際の施工数量 (t, m}^3\text{又は生産数量)} \end{aligned} \quad (3)$$

表-3 主要な資材の製造段階における CO₂排出量原単位

産業連関表部門名と CO ₂ 排出量原単位 (t- CO ₂ /百万円)			産業連関表品目名と 単価 (円/t)		排出量 原単位 (t-CO ₂ /t)
アスファルト	石油製品	4,573	アスファルト	15,082	0.069
コンクリート	生コンクリート	22,344	生コンクリート	11,742	0.262
ブロック	セメント製品	9,860	土木用コンクリート ブロック	16,105	0.159
鉄筋	熱間圧延鋼材	37,663	普通鋼小棒	30,083	1.133
玉石	砕石	4,820	石材その他	845	0.004
砂利	砂利・採石	5,047	砂利, 砂	1,500	0.008
丸太 ^{*)}	製材	1,722	その他製材	57,294	0.099
吸出し 防止材	その他の繊維 工業製品	4,248	不織布	450,013	1.912

^{*)}丸太の単位について単価は (円/m³)、排出量原単位は (t-CO₂/m³)

d) 資材の搬送段階におけるCO₂排出量

資材の搬送距離や手段については施工計画書や工事発注機関及び施工業者へのヒアリングを踏まえて極力実態に即して設定した。河川の築堤工事で使用される土砂について、近隣で行われた掘削や浚渫、或いは他工事で発生した残土を用いる場合は工事発注機関からの指定にしたがって搬送距離を設定した。また調達先に関して特段の指定がないブロックやコンクリートについては施工計画書にしたがい、その他十分な情報が得られなかった場合は当該工事が実施される都道府県庁所在地からの距離を搬送距離と仮定した。搬送距離については、例えば往路で資材を搬送して復路は空積みか、或いは廃棄物を搬出しているかなど、工事の実態を踏まえる必要があるものの、ここでは土木工事積算基準における運搬費の積み上げ方法にならって片道分とした⁸⁾。資材の搬送は軽油使用のダンプトラック (10tダンプで可能積載量9.5t) で行われるものとみなし、重量換算した資材の施工数量を可能積載量で除して運行回数を算定した。この運行回数に、標準的な時速 (30km/h) ⁸⁾に対する搬送距離から搬送時間を算定し、これに災害復旧工事の設計要領に記されている燃料消費量 (12L/h) 及びb)で算定した軽油の排出量原単位 (2.644kg-CO₂/L) を乗じて資材の搬送段階におけるCO₂排出量を算定した。また施工業者へのヒアリングから、既設構造物の取り壊しに伴い発生するコンクリート殻やアスファルト殻で再利用されないものは専門のリサイクル業者へ搬送され他の工事で有効活用されることのであったため、これに関しては実際の搬送距離を設定した。具体的な算定式を下式(4)に示す。

$$\begin{aligned} & \text{資材の搬送段階のCO}_2\text{排出量 (t-CO}_2\text{)} \\ &= \text{重量換算した施工数量 (t)} \div \text{可能積載量 (t)} \\ & \quad \times \text{搬送距離 (km)} \div \text{標準的な時速 (km/h)} \\ & \quad \times \text{燃料消費量 (L/h)} \times \text{原単位 (kg-CO}_2\text{/L)} \times 10^3 \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 試算結果とその分析

以上によりある程度条件を仮定した部分もあったが、対象工事の実施によるCO₂排出量を試算することができ、ここで用いた手法・手順は全国の他の河川工事にも適用可能と考えられる。A河川、B河川の双方について建設機械の製造・稼働、資材の製造・搬送段階におけるCO₂排出量の内訳を土工や護岸工などの工種ごとに表-4及び表-5に取りまとめる。またA河川について更に詳細な工種ごとのCO₂排出量の内訳を図-3に示す。これらからA河川の護岸工、B河川の高水護岸について資材の製造段階におけるCO₂排出量の割合が最も大きく、それぞれ約7割、約4割を占めた。一般的に河川の護岸構造の決定に当たっては洪水に対する洗掘や侵食を防御することが最低限必要とされる。この観点からA河川、B河川の高水護岸としていずれもブロックが用いられ、このブロックの製造段階におけるCO₂排出量が多くなっている。また

表-4 A 河川の工種別 CO₂排出量試算結果 (単位: t-CO₂)

工 種	建設機械		資材	
	製造	稼働	製造	搬送
撤去工 (取り壊し撤去)	0.5	24	—	0.6
仮設工 (工事用道路仮締切)	49	168	63.8	142
土工 (築堤盛土、掘削等)	11.6	68.9	32	96.0
護岸工 (基礎工、根固含む)	16.8	101.0	1093.3	35.6
うち高水護岸	6.8	40.9	377.2	12.5
うち低水護岸	4.4	26.3	256.1	8.5
道路工 (天端道路等)	0.6	1.9	45.0	20.3
CO ₂ 排出量 小計 (割合)	34.2 (2.1%)	191.0 (12.0%)	1,205.3 (75.5%)	166.7 (10.4%)
CO ₂ 排出量 合計	1,597.3 (100%)			

表-5 B 河川の工種別 CO₂排出量試算結果 (単位: t-CO₂)

工 種	建設機械		資材	
	製造	稼働	製造	搬送
撤去工 (取り壊し撤去)	0.2	0.9	—	4.5
仮設工 (天端砕石等)	1.2	6.4	47.5	53.5
土工 (築堤盛土、掘削等)	11.7	60.0	469.3	199.4
高水護岸 (連節ブロック基礎工)	6.4	33.0	688.9	8.3
低水護岸 (自然石護岸、玉石)	2.9	17.4	33.9	5.4
CO ₂ 排出量 小計 (割合)	22.3 (1.4%)	117.7 (7.1%)	1,239.5 (75.1%)	271.0 (16.4%)
CO ₂ 排出量 合計	1,650.5 (100%)			

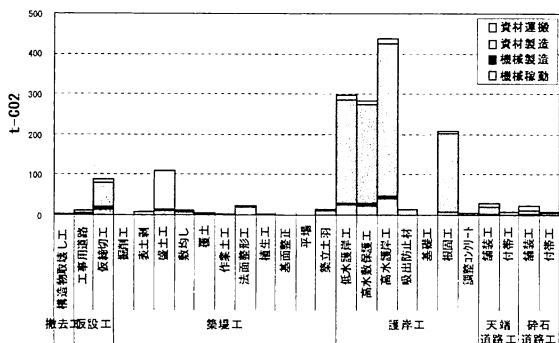


図-3 A 河川における詳細な工種ごとの CO₂排出量試算結果

B河川の低水護岸はブロックによらず自然石や玉石を用いたことから、資材の製造段階におけるCO₂排出量は比較的少ない。このように護岸に用いる資材の製造段階におけるCO₂排出量の全体に占める割合が大きくなっており、使用する資材によってCO₂排出量を大幅に削減できる可能性がある。しかしながら護岸構造の決定は想定する洪水の規模や流水による洗掘への抵抗力、背後地の地盤高や土地利用状況、そしてコストや住民要望、施工性、資材調達の可否などを総合的に考慮する必要がある、CO₂排出量が少ないからといって洪水に対して十分な安全性が確保されないようなことがあってはならない。

土工に関して、B河川では築堤盛土に使用する土砂

(約3.5千m³)を購入土によることとし、河道掘削に伴い発生する残土処分(約2万m³)を含め資材の製造及び搬送段階におけるCO₂排出量の合計が全体の約4割を占めた。これに対してA河川では工事実施箇所の下流部で過年度実施された河道掘削工事から発生した残土を有効活用していたため、資材の製造段階におけるCO₂排出量はわずかであった。仮にA河川で築堤盛土に使用する大量の土砂(約4万m³)を購入土によってまかなおうとすれば資材の製造段階におけるCO₂排出量も多くなる。また土砂の調達先の位置関係にもよるがその搬送距離は掘削残土を有効活用する場合に比べて長くなることが予想され、資材の搬送段階におけるCO₂排出量もそれだけ多くなると考えられる。土砂の調達に関しては、工事を実施する時点で築堤盛土材として要求される品質や数量などの条件に見合った土砂が、必ずしもタイミングよく容易に活用・搬送できるとは限らない。この点に関してA河川では大量の掘削土砂をストックできるだけの敷地が同じ河川敷地内に確保されたが、それよりも規模の小さいB河川で仮に利用可能な土砂が調達できたとしてもそれをタイミングよくしかも長時間ストックできる敷地を確保することは困難と考えられる。

またA河川について工事発注機関及び施工業者に対して行ったヒアリングから、改修対象となった既設護岸や構造物を取り壊して発生するコンクリート殻は廃棄処分するのではなく、細かく粉砕して他の工事の裏込め材などとして再利用されるとのことであった。アスファルト殻に関してもリサイクルプラントへ搬送・回収され、有効活用される。このように河川の築堤・護岸工事では利用可能な資材・廃材を最大限有効活用しようとする取り組みが既に進められており、実際のCO₂排出量は試算結果に比べてその分だけ少ないと考えられ、併せて新規資材の投入や廃棄物の処理等の工程が抑制されるといった効果も大いに期待される。副産物を資材として再利用することによるCO₂排出削減量に関しては、工事関係者へのヒアリングなどを通じて実際の搬送・回収・再利用工程を調査し、副産物を発生させる工程と、それを再生材として利用する工程との間におけるCO₂排出量の配分の考え方について検討を行った上で算定する必要がある。

3. 河川分野におけるCO₂排出量の削減に向けて

これまで個別の河川工事を対象として行ったCO₂排出量の試算結果から、排出量割合の大きい部分を抽出してその原因分析を行うとともに今後の排出量削減の可能性について考察した。その結果を踏まえるとともに、他の社会資本整備分野での取り組み状況を把握し、河川分野におけるCO₂排出量の削減方策について検討を行う。な

おこれまで行った試算はいずれも工事実施段階にのみ着目したものであり、検討に当たっては河川工事の流れをあわせ勘案する必要がある。

まず河川工事を含む社会資本整備分野において、文献やウェブサイトからCO₂排出量削減に係る取り組み状況について検索を行った。その結果、一部の工事発注機関によって総合評価落札方式として道路改良工事や構造物改築工事などでCO₂排出量削減に取り組む技術提案を高く評価する事例がいくつか見られた⁹⁾。しかしながら、河川分野に関して国土交通省が実施する年1,000件を超える工事のうち、CO₂排出量削減を評価しようとするものは2009年の1件だけであった。またこれらはいわば工事発注機関の自主的な取り組みであり、そしていずれも工事実施段階にのみ着目したもので、計画・設計から維持管理までを視野に入れたものではなかった

次に河川工事の計画・設計、工事から維持管理に至るまでの流れを図-4に示す。平成9年に改正された河川法では、基本高水流量や工事・維持について基本となるべき事項として河川整備基本方針が定められ、これを踏まえて関係地方公共団体の意見聴取、関係住民の意見を反映させつつ、築堤・護岸の構造形式を含めた河川整備計画が策定される。築堤・護岸構造の計画・設計に際しては河川工学の見地から洪水に対する安全性を十分確保するとともに、コストや施工性を考慮しつつ極力自然石や天然木を使用したり、或いはコンクリートやブロックによる場合でも堤防法面を覆土し張芝を施すなど、近年では良好な河川環境の整備と保全に取り組まれている。また平成12年に制定された建設工事に係る資材の再資源化

等に関する法律（建設リサイクル法）などに基づき建設資材として再生資源の利用や建設副産物・汚泥などの再資源化が図られ、さらに国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律（グリーン購入法）に基づき河川管理者を含め公的機関が率先して環境負荷の低い製品・サービスの調達を進めようとしている。

これまでの試算結果から工事の実施により建設機械の製造・移動、資材の製造・搬送の各段階でCO₂が排出され、排出量の割合が最も大きいのはブロック等資材の製造段階であったことから、そこでの取り組みが排出量削減に効果的と考えられる。また過年度実施された掘削土や浚渫土を築堤盛土として有効活用することや、近隣で採取された自然石を用いることで資材の製造・搬送段階におけるCO₂排出量を大幅に削減することが可能となる。さらに建設リサイクル法などに基づき他の工事で発生したコンクリート殻やアスファルト殻を再利用・再資源化することによってもCO₂排出量が抑制される。なお、このような資材の再利用や再資源化を進めることでCO₂排出量の削減だけでなく、資源の枯渇防止、廃棄物の発生抑制が図られ、そして自然石を利用することで良好な河川環境の創出・保全に寄与することとなる。このようなCO₂排出量削減策はいずれも実施可能とはいえ、工事実施段階では既にコストや工期、工事範囲などが確定している場合が多く、資材や工法の選定、再生資源の利用方策などを変更する余地も限られてくる。このため、計画・設計段階からその後の工事・維持管理までを視野に入れ、全体としてCO₂排出量削減に取り組む基本的な方針を確立させ、河川管理者や設計者、工事施工業者など各主体がそれぞれの役割の中で削減策に取り組むことが重要となる。そのような方針に基づき、例えば計画・設計段階でCO₂排出量の少ない堤防形状・護岸構造や、他の工事の実施状況なども踏まえた資材の再利用方策について比較検討を行うことが考えられる。また工事発注段階において金額だけでなくCO₂排出量もあわせて考慮し（表-6参照）、そしてCO₂排出量削減に取り組む技術提案には高い評価を与えるといったインセンティブの付与などを含め、個々のCO₂排出量削減方策に取り組

表-6 CO₂排出量管理を考慮した工事設計書のイメージ

使用資材	数量	単価	金額	CO ₂ 排出量 原単位	CO ₂ 排出量
土砂	Xm ³	Y円/m ³	X・Y 円	Z t-CO ₂ /m ³	X・Z t-CO ₂
コンクリート	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
合計	-	-	Σ(X・Y)円	-	Σ(X・Z) t-CO ₂

従来作成していた設計書の記載事項

CO₂排出量の追加・管理

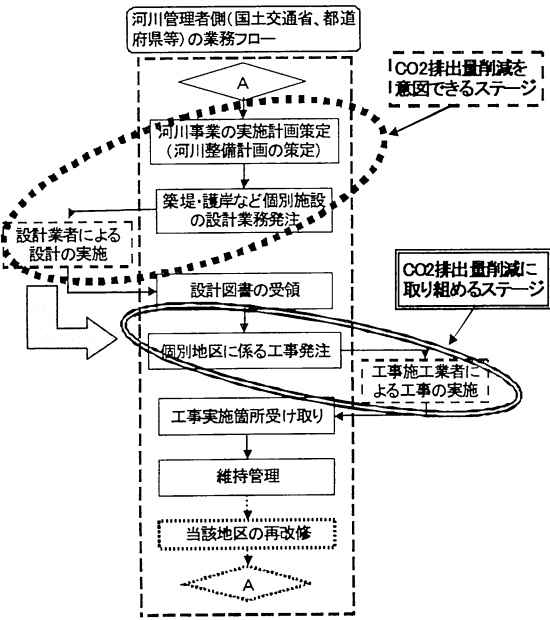


図-4 河川工事の流れと CO₂排出量削減に取り組めるステージ

むことが必要となる。その場合、例えば単にCO₂排出量が多いことを理由として洪水に対する強度や抵抗力の低い護岸を選定し、その結果補修や改修が頻繁に行われることで維持管理段階で負担となるようなことや、流域の治水安全度が損なわれるようなことがあってはならない。このため、河川工事の目的が達成される最低限の機能が確保される範囲で、異なる堤防形状や護岸構造などについてコストやCO₂排出量の比較検討を行うことが前提となる。

一方、近年では鉄鋼生産で副産物として発生する鉄鋼スラグや高炉スラグを再利用したセメントやブロックの開発・製造が進められている。これらに関しては、今後実用化・普及が進むことでCO₂排出量削減に寄与するものと期待されるが、低コスト化や供給の安定化、様々な規模の洪水への耐用性の検証など、更なる研究・技術開発も必要とされている。また現在市販されている製品で従来製品に比べてCO₂排出量が少ないとしているものに関して、図-5の例に示す通り製品Xでは製品の製造工程がCO₂排出削減量の算定範囲に含まれておらず、製品Yでは購入電力分が含まれていないこと、そしていずれも輸送工程が考慮されていないなど、必ずしも比較算定方法が統一されていないことから、算定に係る考え方や手法を整理・統一する必要がある。

なお、近年の河川工事ではコンクリートやブロック護岸を覆土して芝・植生を施す事例が多く見られる。このように芝や植生を繁茂させることでわずかもかもしれないが工事終了後長期にわたってCO₂の吸収効果が期待される。現時点では芝や植生によるCO₂吸収量の算定方法が開発されておらず、今後更に研究を進める必要がある。

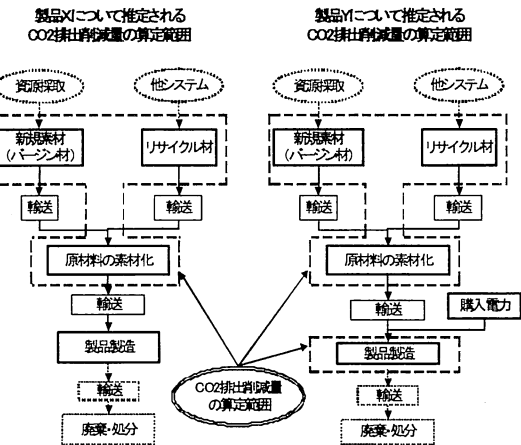


図-5 従来製品に比べ CO₂ 排出量が少ないとする市販セメント製品(X・Y)の生産工程と排出量が少ないとした算定範囲の例

4. 河川工事に対するLCA手法の具体的な適用方策の提案とその基礎的考察

LCA手法の枠組みが既に国際標準化され、一部の工業製品やサービスでは実際に適用されようとしている。これら工業製品の製造と河川などの社会資本整備とは性格的に異なるところがあることに留意しつつ、ここではCO₂排出量を主な評価項目として河川工事に対するLCA手法の具体的な適用方策について提案を行い、その基礎的な考察を行う。

LCA手法に関してはISO 14040として「ライフサイクルアセスメントの原則及び枠組み」が規定され、それによりまずは目的及び調査範囲の設定が必要となる(図-6)。またLCA手法の直接の用途として製品の開発及び改善、戦略・政策の立案、マーケティングなどの支援が期待される。このため河川工事でLCA手法を適用する目的としてはライフサイクル全体を見通してCO₂排出量などの環境負荷を算定し、コストなどの諸条件も勘案して環境負荷のなるべく少ない計画の策定や資材の調達、工法の選定・改良を行うための参考とすべきものであろう。

河川工事については、人工放水路以外で何も無いところに河川が新たに築造されることはなく、通常、既存の河川について整備・改修が行われる。そしてそれが最終的に廃棄されることはなく、一定期間を経た後に再改修される。河川工事は道路や上下水道とは異なり、工事完成後に供用され機能を発揮する際にCO₂が大量に排出されることは考えにくい。通常は維持管理段階で補修などの工事が行われるため、これらをあわせて影響評価を行う必要がある。このため調査範囲としては計画・設計段階において、既設構造物の取り壊しから工事の実施、維持管理までを視野に入れつつ、工事に使用される建設機械の製造・稼動、資材の製造・搬送段階における環境負荷を算定し、その影響評価を行うこととなる。

次にLCA手法の具体的な適用方策を提案し、その基礎的な考察を行う。河川工事の目的としては治水対策や環境整備・自然再生などがあげられる。工事の計画・設計段階では、このような目的を達成する最低限の機能が確保される範囲で、異なる堤防形状や護岸構造などの複数

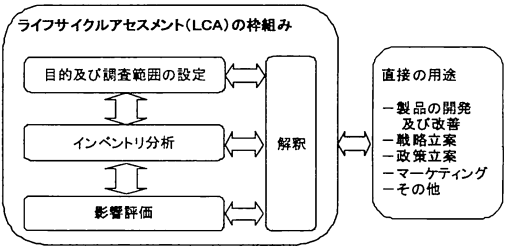


図-6 ISO 14040におけるLCAの枠組み(文献¹⁾より)

表-7 河川事業に対するLCA手法の適用方策のイメージ

○ 異なるオプションに対するこれまでの一般的な比較検討方法

	a案	b案	c案	...
堤防形状・護岸構造	法勾配 1:1.0 ブロック護岸	法勾配 1:2.0 土堤・張芝	...	...
工事費(円)	a1万円	b1万円	...	...
維持管理費(円/年)	a2万円/年	b2万円/年	...	...
必要用地面積(m ²)	a3 m ²	b3 m ²	...	...
→ 金銭換算(円)	→ a4万円	→ b4万円	...	...
総費用(円/年)	a万円/年	b万円/年	...	...
評価結果	◎	○	△	...

● LCA手法を適用した新たな比較検討イメージ

	a案	b案	c案	...
堤防形状・護岸構造	法勾配 1:1.0 ブロック護岸	法勾配 1:2.0 土堤・張芝	...	...
工事費(円)	a1万円	b1万円	...	...
維持管理費(円/年)	a2万円/年	b2万円/年	...	...
必要用地面積(m ²)	a3 m ²	b3 m ²	...	...
→ 金銭換算(円)	→ a4万円	→ b4万円	...	...
総費用(円/年)	a万円/年	b万円/年	...	...
地球温暖化(CO ₂ 等温室効果ガス排出量) *1	a5 t-CO ₂	b5 t-CO ₂	...	...
廃棄物の排出	...	...	...	...
資源・エネルギー消費	...	...	...	...
土地の改変	...	...	...	...
大気・水質汚染 *2	...	...	...	...
...	...	...	...	...
評価結果	◎	○	△	...

*1 今回試算を行った部分で、LCA手法のインベントリ分析・特性化に相当。

*2 従来の環境影響評価における影響予測手法が利用可能な部分。

案について比較検討を行い、表-7の上部に示すように費用として金銭換算し評価することが一般的である。これに対してライフサイクルを見通した環境影響評価を行う場合は、表-7の下部に示すように個々の影響領域についてもあわせて評価することが求められる。地球温暖化を影響領域としたCO₂排出量については既に築堤・護岸工事を対象に試算を行ったところであり、同様の手法によればインベントリ分析を行うことが可能となる。しかしながら、今回の試算を通じて工事で使用される資材の中には多くの種類が製造されるブロックや様々な条件下で製品化される土砂など、実際の製造・搬送工程を踏まえCO₂排出量原単位の精査・再検討が必要なものがあつた。また再生資源に関するシステム境界の設定や配分方法の検討、インベントリ分析の質的評価や誤差などについても今後精査を行う必要がある。さらに築堤・護岸工事だけでなく他の工種や維持管理工事についても試算を行い、標準的な算定手法を確立する必要がある。

地球温暖化に関してはCO₂以外にもメタン(CH₄)や一酸化二窒素(N₂O)など、他の温室効果ガス排出量も同様に算定し評価する必要がある。これらは河川工事に

起因することが考えにくいものの、いずれにせよ現場の実態を踏まえて算定手法を検討・確立し、地球温暖化係数(GWP: Global Warming Potential)¹⁰⁾を用いて特性化を行い、温室効果ガス全体として評価を行う必要がある。

河川工事による影響領域に関して、ここでは地球温暖化だけを取り上げたが、廃棄物の発生や土地の改変、そして自然環境や生態系への影響など、評価すべき影響領域の選定と各影響領域に係るインベントリ分析手法について検討する必要がある。なおこれら影響領域で大気・水質汚染については、社会資本整備に既に適用されているEIAにおける予測手法を活用して直接的影響を予測することが考えられるが、その間接的影響については今後検討すべき課題である。

そして異なる影響領域間の重み付け(統合化)について、ISO14040では必須要素とされていないが、その取り扱いについて考察する。従前行われてきた河川工事では、表-7の上部に示すように複数案に対して金銭換算して比較検討が行われてきたが、LCA手法を適用した場合(表-7の下部)にCO₂排出量などをどのように取り扱うかが課題となる。河川工事に関しては、大規模な事業についてはEIAが行われることとなり、また試算で取り上げたような、EIAの適用規模要件以下である築堤・護岸工事についても河川整備計画策定時における住民意見の聴取、或いは現場説明会における住民要望などを踏まえて環境への影響に対して回避・軽減措置が講じられる。このような河川工事に係る計画策定・工事実施手順について、今後はライフサイクルを見通した環境影響も併せて考慮されるようLCA手法を用いた検討状況を組み入れ反映させ、地域住民や一般国民などの理解を得ながら評価・意思決定を行っていく必要がある。具体的な反映の仕方に関して、CO₂排出量については国土交通省により公共事業評価で用いる貨幣価値原単位が示されており¹¹⁾、これを用いて金銭換算することも一つの手法であり、また文献¹²⁾による被害化係数を用いることも考えられる。いずれの手法によるかは今後さらに議論を深め、方針を確立する必要がある。

ここまで河川工事へのLCA手法の具体的な適用方策について基礎的な考察を行ってきたが、実際に工事が行われる現場を取り巻く環境や諸条件は様々であると推測される。例えば河川工事が環境整備・保全を目的として実施される場合、目的を満たす複数案に対し実際に横並びで比較検討・評価できるかどうか、また工事完成後に経験する洪水の規模や頻度によってライフサイクル全体での補修や再改修の進め方も異なってくる。そして河川工事の位置づけとなる河川整備計画の策定に当たっては住民意見を聴取し反映する必要があることから、評価結果と住民意見との整合性をいかに確保するかが課題となる。今後LCA手法を実際に適用しようとする場合には、例え

ば現場を取り巻く実情を踏まえたケース・スタディ又は試行的な運用を行うことで、河川工事と環境影響との関係についての社会的な意識を見極めるとともに課題の抽出を行い、解決を図りながら取り組んでいくことが重要と考える。

5. おわりに

本論文では今後の河川管理の実務に反映させることを念頭に、実際に設計・施工されている一般的な河川の築堤・護岸工事を対象としたCO₂排出量の試算を行い、その結果分析を踏まえて河川の計画・設計から維持管理までを見通した排出量削減方策の検討を行った。試算ではある程度条件を仮定した部分もあったものの、ここで用いた手法・手順によることで全国の他の河川についても同様にCO₂排出量を算定することが可能と考えられる。しかしながら河川工事には多様な工種・工法があり、使用される資材の種類も多い。このため、それらについても標準的な算定手法を確立するとともに、使用される資材に関してよりきめの細かい分類化、排出量原単位に関するデータの蓄積・充実及び精査を行う必要がある。また現時点でも一部の工事発注機関によってCO₂排出量の削減に向けた自主的な取り組みが進められており、今後はCO₂排出量削減に係る基本的な方針を樹立することで全国レベルで展開させることが必要である。さらにCO₂排出量削減に関する研究・技術開発を促進し、その実用化を目指すかたわら、現時点で利用可能な制度や技術を最大限活用し、実施可能なところから取り組みを始動させることが肝要である。

そして河川工事に対するLCA手法の具体的な適用方策を提案し、その基礎的な考察を行った。その結果、未だ基本的な考え方を整理すべき部分、或いは更なる研究・技術開発が必要な部分が多く残されており、今後は他の社会資本整備分野での研究の動向や河川工事が行われる現場の実情を詳細に把握しつつ、引き続き検討を進めていく必要がある。

最後に、昨今の土木・建築分野では3次元CADソフトを用い、計画・設計段階で最終的な工事の完成形や施工・管理の状況をモデル化するBIM (Building Information Modeling) が行われている。この3次元モデルは3次元座標や時間だけでなく、資材の材質や価格、そして資材製造や運搬・施工時のCO₂排出量についても属性として持たせられることから、計画・設計段階からライフサイクルを見通した最も経済的・効率的な施工・管理方法、そしてCO₂排出量の最も少ない資材・工法を選定すること

が可能となる。このような手法が今後実用化され、普及・展開していくことでライフサイクル全体でのCO₂排出量がよりの確に把握・管理されるものと期待される。

謝辞：河川の築堤・護岸工事によるCO₂排出量の試算及び各種情報の収集・取りまとめに当たり八千代エンジニアリング株式会社及び試算対象とした工事関係機関に協力いただいた。また論文の全体構成について和歌山工業高等専門学校の鶴巻峰夫教授に助言をいただいた。ここに深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 財団法人日本規格協会：JIS ハンドブック 58-2 環境マネジメント, pp.263-326, 2009.
- 2) 島谷幸宏ら：自然を活かした川づくりによる CO₂排出量の削減, 土木技術資料 Vol.40, No.6, pp.56-61, 1998.
- 3) 白川直樹ら：多自然型川づくりへの LCA の適用, 土木学会第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.293-298, 1998.
- 4) 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター：産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), 2002.
http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/jpn/page/data_file.htm (平成 22 年 3 月 11 日取得)
- 5) 社団法人全国防災協会：平成 21 年版災害復旧工事の設計要領, 2009.
- 6) 土木学会地球環境委員会 LCA 評価・環境パフォーマンス評価研究小委員会：ISO14030-40 の規格化による建設業の環境パフォーマンス評価とライフサイクルアセスメント, pp.99-104, 鹿島出版会, 2000.
- 7) 南斉規介ら：産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) - 付録：環境負荷原単位と品目別国内生産額との対応表 (2000), 独立行政法人国立環境研究所, 2006.
http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/jpn/pdf/2/Unit_Price_2000.pdf (平成 22 年 3 月 11 日取得)
- 8) 財団法人建設物価調査会：土木工事積算基準マニュアル, pp.78-81, 2003.
- 9) 日経コンストラクション 2008.7.11：CO₂削減が総合評価の加算対象に―盛り土 1 層の厚さを倍にして重機減らす, pp.56-57, 日経 BP 社, 2008.
- 10) IPCC：Climate Change 1990, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 1990.
- 11) 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 (共通編), p.21, 2009.
<http://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/090601/shishin/shishin090601.pdf>
- 12) 伊坪徳宏ら：ライフサイクル環境影響評価手法 LIME-LCA, 環境会計, 環境効率のための評価手法・データベース, p.117, 社団法人産業環境管理協会, 2005.

ESTIMATION OF CO₂ EMISSION VOLUME AND FUNDAMENTAL CONSIDERATION TO APPLY THE LIFE-CYCLE ASSESSMENT METHOD TO THE RIVER WORKS

Tetsuya IKEDA, Kunihiko AMANO and Hiroyuki KISHIDA

Based on raising awareness on environmental issues recently, development of research and technology on the reduction of CO₂ emission volume, which is the cause of global warming, is underway in the field of infrastructure construction. National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) is trying to develop the most adequate environmental assessment method at the time of designing the infrastructure by estimating the environmental load throughout its life-cycle. As a part of it, NILIM is also trying to investigate the application of the Life-Cycle Assessment (LCA) method to the infrastructure construction including the river works. Considering to reflect on the actual works of river management for the future, this thesis tries to estimate the CO₂ emission volume of the common river embankment and revetment works which have actually been designed and constructed, and explores the possible ways to reduce the CO₂ emission volume by checking the actual workflow, the methods and the materials used in the river works. It also proposes the concrete way to apply the LCA method to the river works, and conducts its fundamental consideration.