

アルミニウム合金製水門のライフサイクルアセスメントに関する研究

Study on Life Cycle Assessment for Aluminium Alloy Slide Type Tidal Gate

清宮理*, 眞田武**, 外山正幸***, 高木茂美****, 萩澤亘保*****, 由井孝昌*****

Osamu KIYOMIYA, Takeshi SANADA, Masayuki SOTOYAMA, Shigeyoshi TAKAGI, Nobuyasu HAGISAWA, Takamasa YUI

*工博 早稲田大学教授 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

**工博 株式会社 日本港湾コンサルタント 技術本部計画・環境部 (〒141-0031 東京都品川区西五反田 8-3-6)

*** 日立造船株式会社 水門事業部設計部 (〒108-0023 東京都港区芝浦 2-3-31)

**** 株式会社 住軽日軽エンジニアリング 設計技術部 (〒136-0071 東京都江東区亀戸 2-35-13)

***** 日本軽金属株式会社 グループ技術センター企画室 (〒421-3291 静岡県庵原郡蒲原町蒲原 1-34-1)

***** 石川島播磨重工業株式会社 鉄構事業部水門設計部基本設計グループ (〒135-8731 東京都江東区豊洲 2-1-1)

Careful consideration for earth environment is demanded when infrastructures are planned or are constructed. In design, not only initial construction cost but also life cycle cost for design life term should be considered. Furthermore it is important to estimate volume of carbon dioxide emission during life term and appropriate construction way and materials should be adopted so as to minimize it. The life cycle cost and the volume of carbon dioxide emission are estimated in this report for slide type tidal gates that are fabricated by aluminum alloy or steel. It is made clear that the aluminum alloy gate is superior to the steel gate in view of both the life cycle cost and consumption of the carbon dioxide through the comparison under the conditions that are lied down in this report.

Key Words : life cycle cost, life cycle CO₂, aluminum alloy, slide type tidal gateキーワード: ライフサイクルコスト, ライフサイクルCO₂, アルミニウム合金, 横引き式ゲート

1. はじめに

近年, 東南海・南海地震や東海地震等の大規模地震の発生とそれに伴う大津波の来襲の切迫性が指摘され^{1),2)}, 海岸防災への対応は緊急の課題となっていることから, 防潮水門の新設や老朽化した水門の改修等が今後ますます増えていくものと考えられる。

従来, 防潮水門の主な材質は, 製作費の低廉性から鋼材が一般的に多く用いられているが, 供用期間を通して塗装等の維持費用が必要となる。

しかし, アルミニウム合金製水門の場合, イニシャルコストは一般的に鋼製水門より高価となる場合が多く, 横引き式ゲートに関しては後述するように, 鋼製の 1.2 倍程度となるが, 軽量かつ耐食性・耐候性に優れ, 防食のための再塗装等の必要がなく, ローラー, 戸当たり, 駆動装置等を除く扉体本体についてはメンテナンスフリーに近いことおよび, 供用期間終了後はアルミニウム合金製品としてのリサイクルが可能であること等を考慮すると, 供用期間を通したライフサイクルコストは鋼製水門に比べ安価となることが予想される。

公共事業費が減少する昨今の経済状況においては, 短期的なイニシャルコストのみを評価するのではなく, 長期的なライフサイクルコストを考慮し, より経済的な材質を選定することは今後益々重要となってくる。

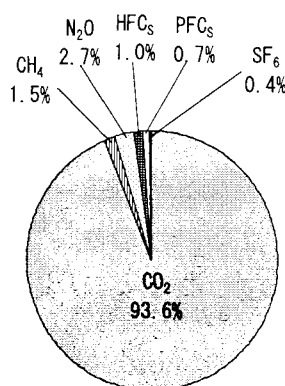
また, 近年, 人間活動や産業活動に伴う温室効果ガスの増加により地球温暖化問題が深刻化してきており, 1992 年に「環境と開発に関する国連会議」, 1997 年に「気候変動に関する国連枠組み条約第 3 回締約会議」いわゆる京都会議が開催された。2002 年における我が国の温室効果ガスの総排出量は図-1 に示したように約 13 億 t-CO₂ であり, このうち 93.6 % を二酸化炭素が占める³⁾。

したがって, 地球温暖化対策を行うにあたっては, 二酸化炭素排出量を如何に削減するかが重要な課題である。また, 我が国の土木建設分野で排出される二酸化炭素量は, 全体の約 1/4 を占めるといわれており⁴⁾, この分野における二酸化炭素削減努力を行う責務は大きい。

土木構造物に関するライフサイクル期間中に発生するコスト(LCC)や二酸化炭素量(LCCO₂)を扱った研究としては, 橋梁を対象とした伊藤らの研究⁵⁾が代表的である。また, 盛岡⁶⁾は道路舗装, ダム, トンネル, 橋梁上部工,

下水道終末処理施設の 5 つの構造物について LCCO₂ を試算している。

本研究は、アルミニウム合金製水門と鋼製水門の力学的特性や腐食特性等を踏まえながら、ライフサイクルコスト(LCC)およびライフサイクル期間中に発生する二酸化炭素量(LCCO₂)の算定を行い、両水門の長期的な経済性および環境に与える負荷についての比較を行った。



総排出量=1330.8百万t-CO₂

図-1 日本における 2002 年度の温室効果ガス排出量

防潮水門の構造は設置環境により多種多様に存在するが、本研究では、港湾や漁港において数多く設置されており、かつ基礎工や駆動装置等の機械設備の規模がアルミニウム合金製と鋼製とで大きな差異がない横引き式ゲートを対象とした。

また、対象とする水門の材質は、一般的に用いられているアルミニウム合金(A5083-O)と、溶接構造用圧延鋼(SM400)とした。

なお、アルミニウム合金製水門は、昭和 30 年代後半に中小河川や防潮用の小型水門に採用され始め、その後耐食性の良さと軽量であることから、中型、大型の防潮水門等に広く採用されるようになってきている。

2. 対象水門の特性

2.1 対象材質の力学的特性

対象とした材質の主な力学的特性を表-1に示す。

表-1 対象材質の力学的特性

	アルミニウム合金 A5083-O	溶接構造用圧延鋼材 SM400
引張強さ	275 N/mm ²	400 N/mm ²
ヤング係数	69 × 10 ³ N/mm ²	206 × 10 ³ N/mm ²
比重	2.7	7.85
比強度 (引張強さ/比重)	102	51
	同じ強度を得るために必要なアルミニウム合金の質量は、SM400の半分で良い	
比剛性 (ヤング係数/比重)	26	26
	引張材の場合、変形量を同一にするには同質量が必要	

アルミニウム合金(A5083-O)の強度定数等を溶接用圧延鋼材(SM400)と比較すると、引張強さは約 2/3、ヤング係数は約 1/3 とともに低い。

しかし、A5083-O の比重は、SM400 の約 1/3 と小さいことから、引張強さを比重で除した比強度は、溶接用圧延鋼材の約 2 倍となる。このことは、同じ強度を得るために必要となる A5083-O の重量は、SM400 の約半分になることを示している。

なお、強度、たわみ度ともに許容値以下となるように部材断面を選定すれば横引き式ゲートを設計可能なことから、力学的性質の違いによる材料としての適・不適はない。

2.2 対象材料の腐食特性

アルミニウム合金と鋼の種々の設置環境下における定常腐食速度を表-2に示す⁷⁾。これによれば、アルミニウム合金の定常腐食速度は、鋼に比べ低く、特に大気環境中では、極めて低い。これは、アルミニウム合金の表面が酸化皮膜を形成し不動態化することに起因し、耐食性の良さを如実に表している。

なお、本研究で対象としたアルミニウム合金である A5083-O は、表-2中の A6061-T6 に比べマグネシウムの含有量が多く耐食性に優れた合金であり、海洋雰囲気と海水中では特に優れており、防潮水門に適した材質である。また、溶接用圧延鋼材 SM400 は軟鋼であり、軟鋼の炭素含有量は 0.18 ～ 0.3%である。したがって、表-2中の炭素鋼(0.25C)は SM400 に相当する鋼材である。

表-2 各金属の定常腐食速度

		単位: μm/年			
種類	合金	内陸大気	海浜大気	海水浸漬 (平均潮位)	海水 全浸漬
アルミニウム合金	A1100	< 0.25	< 0.25	0.5	0.8
	A6061-T6	< 0.25	< 0.25	0.5	0.8
	Alclad A2024-T6	< 0.25	< 0.25		
鋼	炭素鋼(0.25C)	14	21	69	69
	含銅鋼(0.22C-0.3Cu)	15	19	71	69
	低合金鋼(Corten)	4.6	10	86	122

注1) 暴露場所・内陸大気: Miraflores Locks海岸(パナマ運河地帯)から8km
・海浜大気: Limon Bay(パナマ運河地帯)
・海水浸漬、海水全浸漬: Naos島(パナマ運河地帯)

注2) 含銅鋼(0.22C-0.3Cu)とは、空気中での耐食性を向上させるため、鋼に0.4%程度以下まで銅を含有させた鋼材をいう。

このような耐食性の良さから、アルミニウム合金製水門は、据付時における化粧塗装は行わぬが、その後の塗装替えは基本的に行わない。一方、鋼製水門は、塗装の耐用年数が過ぎた後は、扉体の腐食が進行するため、これを防ぐためには定期的な塗装替えが必要となる。

代表的な塗装仕様の標準塗装替え期間を表-3に示す⁸⁾。

表-3 代表的な塗装仕様の飛沫帯・干潮帯における標準塗装替え期間

塗装仕様	塗装替え期間
厚膜型無機質ジクロリドペイント(75 μm) +エポキシ樹脂塗料(200 μm × 2回)	10年
厚膜型無機質ジクロリドペイント(75 μm) +タールエポキシ塗料(200 μm × 2回)	10年
厚膜型無機質ジクロリドペイント(75 μm) +塩化ビニル塗料(200 μm × 2回)	10年
有機質ジクロリドプライマー(15 μm) +ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料(500 μm × 2回)	15年

表-4 対象水門の定性的特性

	アルミニウム合金製横引き式ゲート	鋼製横引き式ゲート
加工性	切断、研削等は容易だが、溶接性は良くない	加工性、溶接性は良い
耐食性	表面に酸化皮膜を形成し不動態化するので、空気中では耐食性に優れている	腐食性を有し、定期的な再塗装作業が必要
美 観	扉体据付時には一般的に化粧塗装を行うが、その後は再塗装を行わなくても長期的に美観が保たれる	使用期間が経過するにつれて、塗膜の劣化により、美観が損なわれる
維持管理	再塗装の必要はない	防食および美観維持のため再塗装が必要
操作性	質量が小さいため開閉装置がコンパクトになり、開閉時間も短縮できる	質量が大きく、輸送・据付・開閉装置の面で不利となることがある
市場性	市場性に欠けるので、納期は充分確保することが必要	市場性は豊富であり、材料選択上の自由度は高い

2.3 対象水門の定性的特性

対象とした水門の定性的な主な特徴は表-4に示すとおりであり、アルミニウム合金製水門は、鋼製水門と比べ加工性、市場性に若干劣るが、その他の特徴については、優位となる。特に、アルミニウム合金の表面が酸化皮膜を形成し不動態化するため、空気中の耐食性は極めて良いことから、供用期間中の塗装替えは基本的に必要なく、LCCやLCCO₂に優位に働くものと期待できる。

また、前述したとおり、アルミニウム合金製水門は、鋼製に比べ軽量であることから、開閉装置をコンパクトにすることができ、万一の停電時においても手動で閉鎖を行うことが可能となる。

3. 水門のライフサイクルコストの算定

3.1 水門に係る諸費用の算定

(1) 対象とする費用項目の設定

算定する費用は、イニシャルコストとして材料費、塗装費を含む扉体製作費と据付費を、維持修繕費用として塗装替え費用（鋼製水門のみ）を、解体処分費用として撤去費とスクラップ引取価格を対象とした。

なお、基礎工や駆動装置等の機械設備に係る費用は、横引き式ゲートに関しては、扉体規模が同一であればアルミニウム合金製、鋼製ともに一般的に大きな差異は見られない。したがって、本研究では両水門のライフサイクルコストの比較を行うという観点から、これら両水門に共通の費用は考慮しないものとした。

(2) 諸費用の算定

既存の横引き式ゲート（アルミニウム合金製 14 施設、鋼製 12 施設）の設計図面にに基づき、以下の条件で諸費用の算定を行った。

- ① 扉体製作費および据付費は、既存水門の設計図面を基に、積算基準等^{9), 10)}に準拠して算定し直した。
- ② 扉体撤去費は、扉体の設置環境により異なるが、実績に基づき平均的に扉体据付費の 1/2 と仮定した。
- ③ 塗装面積は、実績に基づき平均的に扉体面積の 6 倍とした。
- ④ 扉体 1 m²あたりの塗装替え費用は、実績に基づく 1.0 ～ 3.0 万円/m²程度（エポキシ樹脂塗料が主）であ

るが、これには塗装のための仮設足場の施工費用も含んでおり、扉体の設置環境により異なってくる。本研究では塗装替費用として、実績値の平均的な値である 1.5 万円/m²とした。

- ⑤ アルミニウム合金製横引き式ゲートに関しては、塗装替えは必要ないため、製作時の美観用の化粧塗装費のみ計上した。
- ⑥ スクラップの引取価格は、アルミニウムは現在の相場を基に 140 円/kg とし、鋼材はゼロ円とした。

以上の条件の基で算定した、扉体面積と諸費用の関係を図-2および図-3に示す。これより、扉体面積と諸費用との間には、相関係数が概ね 0.9 以上と強い相関性が見られ、各費用は扉体面積を A として、それぞれ次式で算定できることが分かる。

● アルミニウム合金製 横引き式ゲート

- ・ 製作費(千円) = $728.23 \times A$ (m²)
- ・ 据付費(千円) = $128.12 \times A$ (m²)
- ・ 撤去費(千円) = $63.99 \times A$ (m²)
- ・ スクラップ引取価格(千円) = $-19.79 \times A$ (m²)

● 鋼製 横引き式ゲート

- ・ 製作費(千円) = $438.67 \times A$ (m²)
- ・ 据付費(千円) = $297.57 \times A$ (m²)
- ・ 撤去費(千円) = $148.79 \times A$ (m²)
- ・ 1回あたりの塗装替え費(千円) = $90.00 \times A$ (m²)

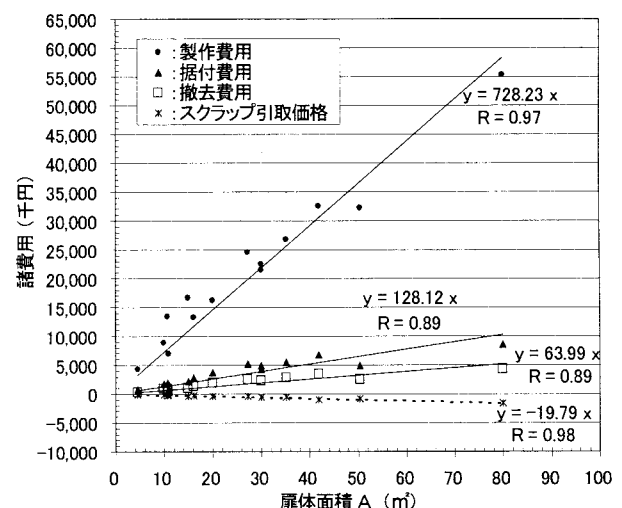


図-2 扉体面積と諸費用との関係(アルミニウム合金製)

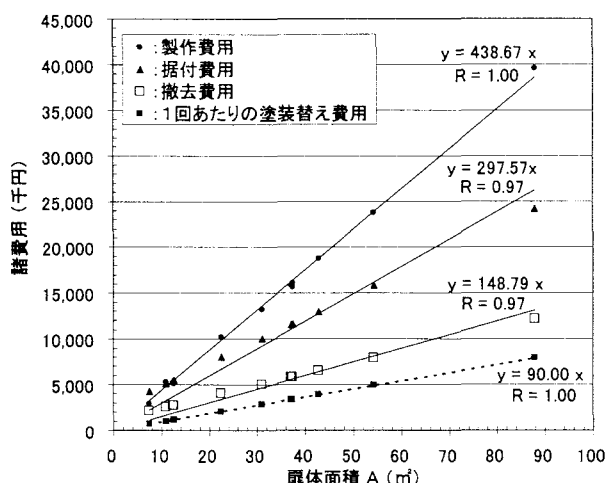


図-3 扉体面積と諸費用との関係（鋼製）

以上の諸費用と扉体面積の算定式を基に、アルミニウム合金製横引き式ゲートと鋼製横引き式ゲートのイニシャルコスト（扉体製作費＋据付費）を算定した結果を図-4に示す。

これによれば、扉体面積に関わらず、鋼製に比べアルミニウム合金製の方が高くなり、扉体面積が大きい程、その差は大きくなった。また、アルミニウム合金製のイニシャルコストは、鋼製の約1.2倍程度高くなった。

このように、イニシャルコストのみ考えれば、鋼製横引き式ゲートの方が経済的に優位となる。

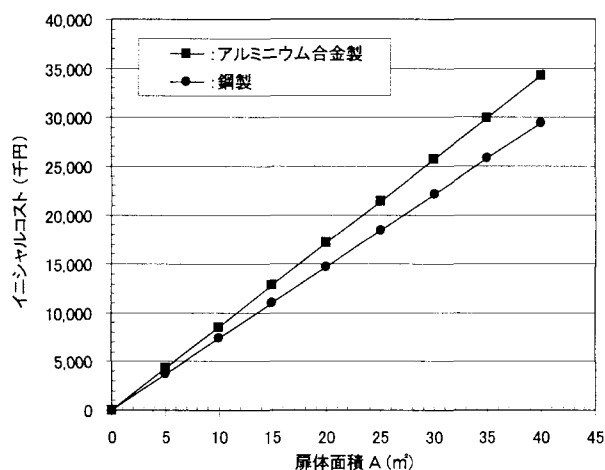


図-4 扉体面積とイニシャルコストとの関係

3.2 ライフサイクルコストの算定と経済性評価

(1) ライフサイクルコストの算定条件および算定方法

ライフサイクルコストの算定にあたっては、以下の条件を設定した。

① 扉体の耐用年数：50年

一般的に、アルミニウム合金製の扉体は鋼製に比べ物理的耐用年数は長いものと考えられるが、あまりにも長い耐用年数を設定すると、地球環境の変化（高潮潮位の変化）に基づく「機能的耐用年数」や社会情勢

の変化に基づく「社会的計画的耐用年数」を越えることとなり、現実的な観点に基づいたライフサイクルコストを算定する意義が薄れる恐れがある。

したがって、本研究では、約40年を経過した鋼製水門も未だ機能を果たしていることを考慮し、耐用年数を最大50年として設定した。

② 鋼製水門の塗装替え期間：8, 10, 15年

鋼製水門の塗装仕様は主としてエポキシ樹脂系の塗料であるが、塗装替え期間は、設置環境により異なるものと考えられることから、文献 8), 11)を参考に、8年、10年、15年の3種類を想定した。

③ 水門の規模：扉体面積 $A = 5.0 \text{ m}^2 \sim 40.0 \text{ m}^2$

前述した様に水門の諸費用は、扉体面積との間に大きな相関関係が見られること、および、扉体巾が同じであっても、設置環境により扉体高が異なってくるため、扉体高を同一として扉体巾をパラメータとしたライフサイクルコストでは汎用性がないことから、水門の規模を表す指標としては扉体面積を用いるものとした。

④ 社会的割引率：4%

港湾や漁港施設あるいは海岸保全施設に関する事業において行われる費用対効果分析では、社会的割引率を4%と設定するものとされている（例えば、文献 12)を参照）。したがって、本検討においても、社会的割引率を4%として設定した。

以上の条件に基づき、ライフサイクルコスト（LCC）を次式で算定した。

$$LCC = C_1 + \sum_{n=1}^N \frac{C_M}{(1+r)^n} + \frac{C_R}{(1+r)^N} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、

C_1 : イニシャルコスト（扉体製作費＋据付費）

C_M : 塗装替え費用（鋼製水門のみ）

C_R : 撤去費用＋スクラップ引取価格

r : 社会的割引率（4%）

n : 供用年

N : 耐用年数

なお、鋼製水門の塗装替え期間は、8年、10年、15年の3ケースの場合を想定したことから、水門の供用開始後、それぞれ8年、10年、15年毎に、塗装替え費用を計上するものとする。

(2) ライフサイクルコストの算定結果と経済性評価

以上の算定条件および算定方法の基で計算した扉体面積とライフサイクルコストとの関係を図-5に示す。

イニシャルコストは、図-4に示したように、アルミニウム合金製が鋼製の約1.2倍高くなった。

しかし、ライフサイクルコストは、図-5および図-6に

示すように、鋼製水門の塗装替え期間が 8 年と 10 年の場合は、逆に鋼製の方がアルミニウム合金製の約 1.12 倍、1.05 倍高くなり、供用期間を通したライフサイクルコストで評価すると、アルミニウム合金製が経済的に優位となることが判明した。

ただし、塗装替え期間が 15 年と長い場合は、ライフサイクルコストでも鋼製水門の方が若干ではあるが優位となった。しかし、今回の調査では、塗装替え期間に関わらず塗装費用は一律に設定したが、実際は塗装替え期間が長い程、塗装材が高品質かつ高価となるため、鋼製水門の塗装替え期間が 15 年の場合でも、アルミニウム合金製水門が優位となる可能性もあり得る。

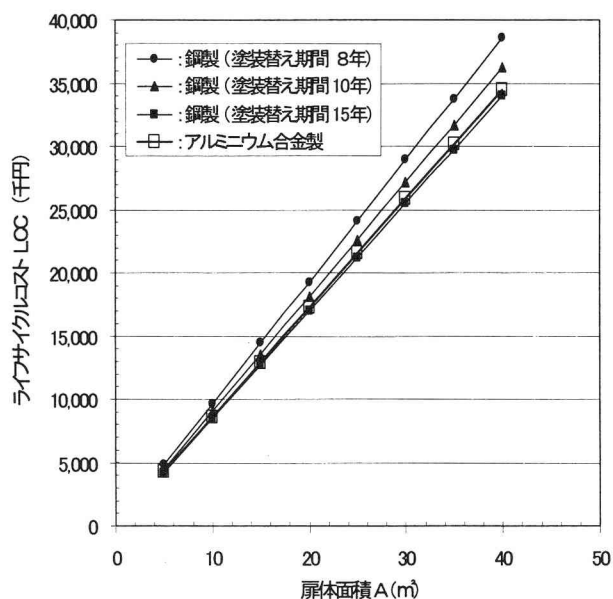


図-5 扉体面積と LCC との関係（扉体耐用年数 50 年）

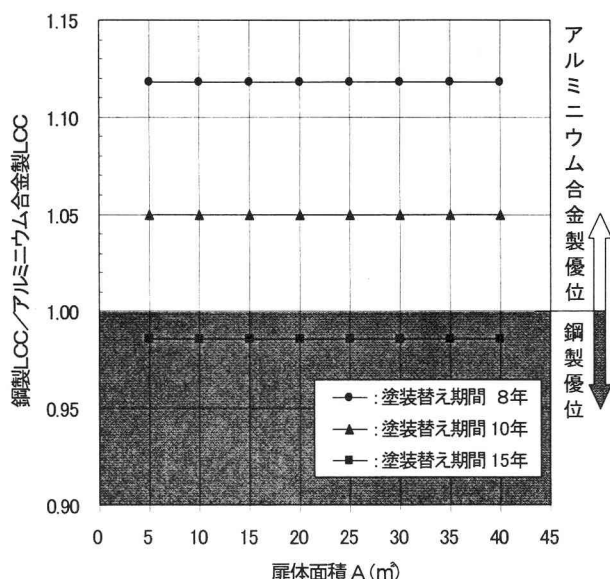


図-6 扉体面積と LCC の比との関係（扉体耐用年数 50 年）

以上、扉体耐用年数を 50 年とした場合、鋼製水門の塗装替え期間が 8 年と 10 年の場合では、ライフサイク

ルコストで評価すると、アルミニウム合金製水門の方が鋼製水門より優位となることが判明した。

しかし、耐用年数が 50 年よりも短い場合は、鋼製水門の塗装替え回数が少なくなるため、逆に鋼製水門の方が優位になる場合も考えられる。そこで、扉体の耐用年数が何年以上であれば、アルミニウム合金製水門の優位性が確保されるかを調べるため、扉体の耐用年数をパラメーターとしたライフサイクルコストの算定を試みた。

その結果を、図-7に示す。これによれば、鋼製水門の塗装替え期間が8年の場合では、扉体耐用年数が8年以上、塗装替え期間が10年の場合では、扉体耐用年数が20年以上であれば、アルミニウム合金製水門が優位となることが判明した。また、扉体耐用年数が増すに伴い、塗装替え期間が8年と10年の場合は、アルミニウム合金製水門の優位性が増加し、塗装替え期間が15年の場合は、鋼製水門の優位性が減少することが判明した。

アルミ合金製水門、鋼製水門ともに、機能的耐用年数や社会的経済的耐用年数は、一般的に20年以上は十分にあることから、耐用年数によらずアルミニウム合金製水門の優位性は十分にある。

アルミニウム合金製水門の経済的優位性を更に大きくするためには、一般的に鋼製水門より高い扉体製作費を低減させることが重要であると考えられる。そのためには、扉体重量の軽減化が必要である。

押出材は、アルミニウムに特有な部材であり、これを有効に利用することによって扉体重量の軽減化および製作費の低減化が可能になるものと期待される。

また、アルミニウム合金製水門の大きな特徴は、『軽量』と『耐食性の良さ』であり、これらのメリットをさらに生かし、より経済的な水門を設計するためには、既存の『アルミニウム合金製水門設計指針案』⁹⁾の見直しや、新たな構造形式を開発するなどの技術革新を行う必要があるものと考えられる。

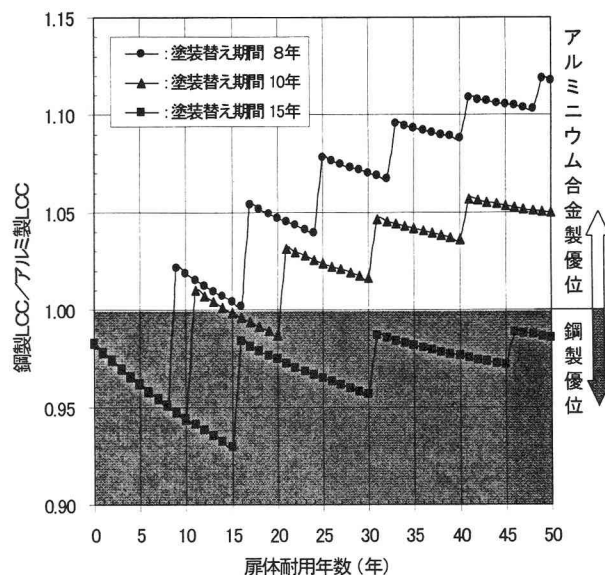


図-7 扉体耐用年数と LCC の比との関係

4. 水門のライフサイクルCO₂の算定

4.1 対象とした二酸化炭素の発生源

二酸化炭素の発生量は、水門のライフサイクルを下記の6段階に分け、それぞれ算出し、ライフサイクル期間中に発生する二酸化炭素の総量(LCCO₂)を推計するものとした。

- ① 扉体の材料となる板材の資源採掘を含む製造過程
- ② 扉体製作時の溶接
- ③ 扉体製作時の工場クレーン稼働
- ④ 扉体製作時の塗装（塗料および塗装作業）
- ⑤ 扉体の据付
- ⑥ 供用期間中の塗装替え（塗料および塗装作業）

なお、本研究は、アルミニウム合金製と鋼製の横引き式ゲートのどちらが環境に対しての負荷が小さいかについて比較検討を行うものである。したがって、基礎工や駆動装置については、アルミニウム合金製の方が軽量で小規模であると定性的には言えるが、鋼製と一般的に大きな差異は見られないことから考慮しないものとした。また、扉体の工場から現場までの運搬に関しても、扉体規模が同一であれば、運搬トラックの規格も概ね同一であることから考慮しないものとした。

4.2 二酸化炭素排出原単位

二酸化炭素の排出量の算定に使用した原単位は、土木学会地球環境委員会・環境負荷評価(LCA)研究小委員会により作成された値¹³⁾を用いた。

なお、この原単位は、炭素換算質量で示されているが、「気候変動枠組条約」では、二酸化炭素質量で表した値を温室効果ガスの排出量として通報することが求められていることから、本研究においても全ての原単位を二酸化炭素質量で表示した値を用いるものとした。炭素換算質量から二酸化炭素質量への変換は、炭素換算質量で表示された原単位を炭素の原子量 12 で除し、二酸化炭素の分子量 44 を乗じることにより行った。

本研究で用いた二酸化炭素質量で表示した原単位を表-5に示す。

表-5 二酸化炭素の発生原単位

項目	二酸化炭素排出原単位
アルミニウム	7.443 kg-CO ₂ / kg
鋼	1.507 kg-CO ₂ / kg
塗料	1.657 kg-CO ₂ / kg
軽油	2.856 kg-CO ₂ / L
商用電源	0.473 kg-CO ₂ / kWh

4.3 対象とした水門の扉体質量と塗装面積

水門規模は、ライフサイクルコストと同様に扉体面積 5 m²～40 m²までとした。

扉体質量は、既存の横引き式ゲートに基づき推計した

図-8に示す算定式を用い算出した。また、塗装面積は、実績に基づき扉体面積の6倍とした。

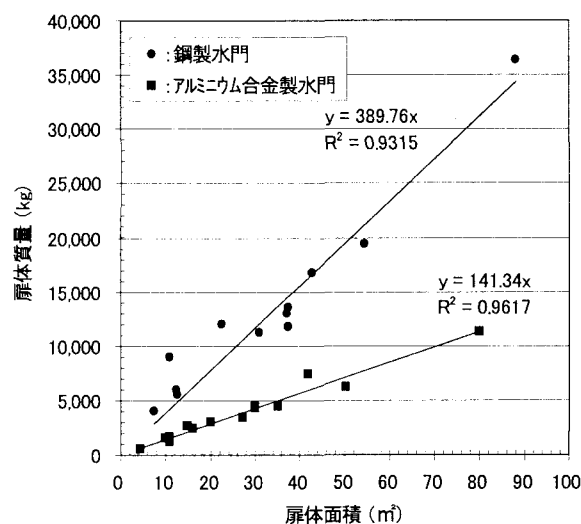


図-8 扉体の面積と質量との関係

4.4 二酸化炭素発生量の算出

ライフサイクル期間中の各段階において発生する二酸化炭素量を、使用板材の質量、施工機械の出力、燃料消費量、二酸化炭素排出原単位等を用い算出した。

なお、施工機械の出力、燃料消費量については文献 14)、塗装仕様と塗料の標準使用料については文献 9)、10)に基づき設定した。

(1) 板材の製造過程で発生するCO₂量

扉体質量に材料の原単位を乗じることにより、板材の製造過程で発生する二酸化炭素の量を算定した。その結果を、図-9に示す。

アルミニウム合金の材料原単位は、鋼材の約5倍と大きいですが、扉体質量は逆に鋼材の約1/3と小さいため、板材の製造過程で発生する二酸化炭素量は、鋼材の約2倍程度で抑えられることが分かる。

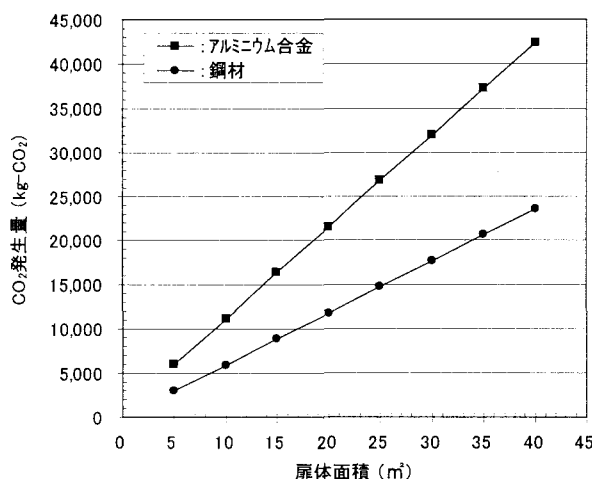


図-9 板材の製造過程で発生する二酸化炭素量

(2) 扉体製作時の溶接作業に伴い発生するCO₂量

板材の溶接方法としては、鋼製水門の場合は、ガスシールドアーク溶接を用いるが、この際にシールドガスとして放出される二酸化炭素量と空気圧縮機の稼働に伴う発生する二酸化炭素量を算定した。シールドガスとして放出される二酸化炭素量については、一般的な値として、必要となる溶接金属量を扉体質量の 1%、単位時間あたりの溶接量を 80g/分として溶接作業に要する時間を算出し、その値に単位時間あたりのシールドガス（二酸化炭素）の放出量 20 $\frac{kg}{m^3}$ /分と二酸化炭素密度 1.964g-CO₂/ $\frac{m^3}{m^3}$ を乗じることにより算出した。空気圧縮機の稼働に伴う二酸化炭素発生量については、商用電源を使用するものとし、出力 81kW に溶接時間と原単位を乗じて算出した。

なお、アルミニウム合金製水門の場合、シールドガスはアルゴンガスを使用し、ボンベの圧力を利用し溶接を行うことから、二酸化炭素の発生は一切ない。

算定結果は、図-10に示すとおりである。

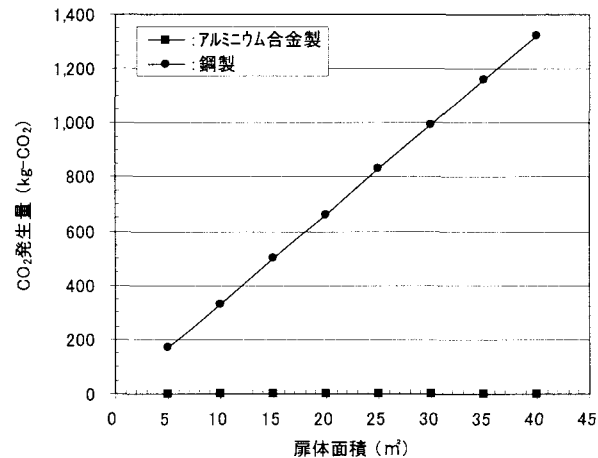


図-10 溶接作業に伴い発生する二酸化炭素量

(3) 扉体製作時のクレーン稼働に伴い発生するCO₂量

工場内において扉体を製作する際に使用するクレーンの稼働に伴う二酸化炭素量を算定した。クレーンの実稼働時間は、扉体製作工場の実績に基づき、扉体質量 1t あたり 0.6 時間とした。

使用クレーンは、扉体製作工場の実績に基づき、鋼製水門の場合、主巻用 (60kW)、補巻用 (30kW)、走行用 (30kW)、横行用 (7.5kW) の 4 基を使用するものとし、その使用時間比率を、それぞれ 25%、15%、50%、10% とした。

また、アルミニウム合金製水門の場合は、巻上用 (7.7kW)、走行用 (0.4kW × 2 台)、横行用 (0.75kW) を使用するものとし、その使用時間比率 40%、50%、10% とした。

クレーンは商用電源を使用するものとし、出力に各クレーンの稼働時間と原単位を乗じることにより、二酸化炭素量を算出した。

その結果を、図-11に示す。クレーンの規格は、工場

により多少異なると考えられるが、二酸化炭素発生量は、板材製造時に比べ、1%以下と少ないことから、クレーン規格の差異は全体の発生量に影響しないものと考えられる。

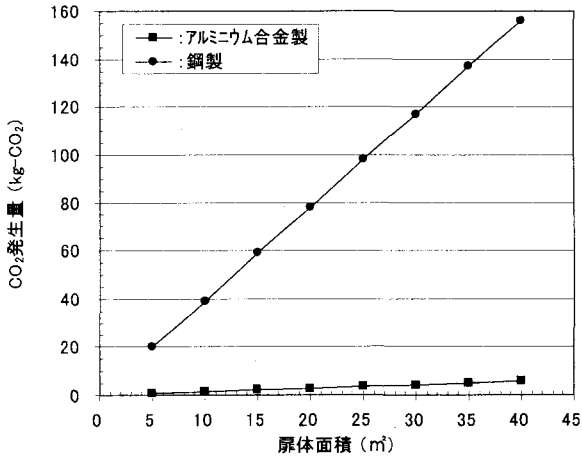


図-11 クレーンの稼働に伴い発生する二酸化炭素量

(4) 水門製作時の塗装に伴い発生するCO₂量

塗料の使用と、塗装作業に用いる空気圧縮機の稼働に伴い発生する二酸化炭素量を算定した。

水門の製作時における塗装仕様と塗料の標準使用量は表-6に示すとおりとした。この値を基に、扉体面積毎の塗料使用量を算定し、塗装の原単位を乗じることにより、塗料使用に伴う二酸化炭素発生量を算定した。

また、空気圧縮機については商用電源を使用するものとし、出力 (37kW) に台数、作業時間、原単位を乗じることにより、二酸化炭素量を算定した。

なお、空気圧縮機の台数、作業時間は、1 日あたりの塗装施工量を 70 m²とし、1 層分の塗装を 1 日で施工可能となるように設定した。

表-6 (1) 製作時の塗装仕様 (アルミニウム合金製水門)

	塗装仕様 (製作時)	標準使用量 (g/m²)	
一次処理	エッチングプライマー	90	380
下塗	塩化ゴム系プライマー	170	
上塗	塩化ゴム系上塗り塗料	120	

表-6 (2) 製作時の塗装仕様 (鋼製水門)

	塗装仕様 (製作時)	標準使用量 (g/m²)	
一次処理	無機ジンクリッチプライマー	200	2,280
第1層(下塗)	無機ジンクリッチペイント	700	
第2層	ミストコート	160	
第3層(下塗)	エポキシ樹脂塗料下塗	500	
第4層(下塗)	エポキシ樹脂塗料下塗	300	
第5層(中塗)	エポキシ樹脂塗料	220	
第6層(上塗)	エポキシ樹脂塗料	200	

算定結果は、図-12に示すとおりである。アルミニウム合金製水門の塗装目的は、防食のためではなく美観上

の化粧塗装であることから、塗装層数や塗料使用量が少なく済むため、二酸化炭素発生量も鋼製水門の約 1/3 と少ないことが分かる。

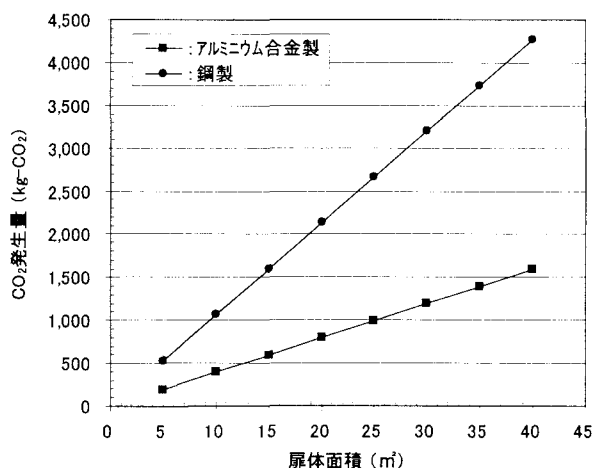


図-12 水門製作時の塗装に伴い発生する二酸化炭素量

(5) 水門の据付工事に伴い発生するCO₂量

水門の据付は、扉体質量に応じて、16 t吊ラフタークレーンから 80 t吊トラッククレーンの重機を用い行うものとした。各クレーンの規格を表-7に示す。

二酸化炭素発生量は、各重機の出力に燃料消費量と作業時間および原単位を乗じるにより算出した。なお、作業時間は一律2時間として設定した。

算定結果は、図-13に示すとおりである。80tトラッククレーンは、出力、燃料消費量ともにラフタークレーンに比べ低いため、二酸化炭素発生量も少なく済む。

表-7 クレーンの規格

	作業半径 (m)	ブーム長 (m)	吊り能力 (t)	出力 (kW)	燃費消費量 (ℓ/kWh)
16t吊ラフタークレーン	10	23.3	3.3	162	0.105
25t吊ラフタークレーン	10	23.5	7.1	193	0.105
45t吊ラフタークレーン	10	24.7	12.3	237	0.105
80t吊トラッククレーン	10	24.0	20.4	147	0.050

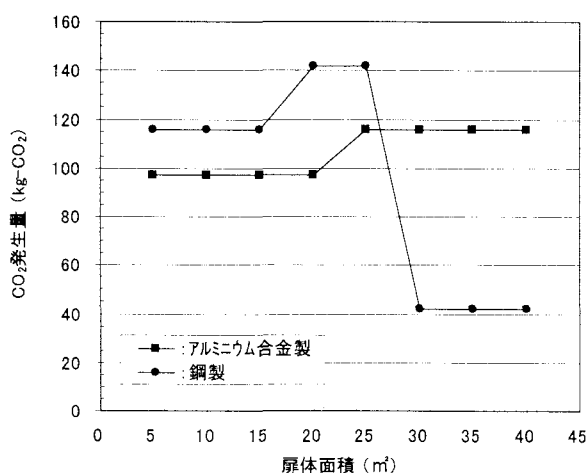


図-13 据付作業に伴い発生する二酸化炭素量

(6) 鋼製水門の塗装替えに伴い発生するCO₂量

鋼製水門の塗装替え1回あたりの塗料の使用に伴う二酸化炭素量と、塗装作業用の空気圧縮機および、扉体背面奥部の塗装を行う際に使用する照明灯等のための発動発電機の稼働に伴い発生する二酸化炭素量を算定した。

塗装替え時における塗装仕様と標準使用量は表-8に示すとおりとした。この値を基に、扉体面積毎の塗料使用量を算定し、塗装の原単位を乗じるにより、塗料使用に伴う二酸化炭素発生量を算定した。

また、空気圧縮機(37kW, 燃料消費量 0.211 ℓ/kWh)、発動発電機(57kW, 燃料消費量 0.173 ℓ/kWh)については軽油を使用するものとし、出力に台数、作業時間、燃料消費量、軽油の原単位を乗じるにより、二酸化炭素発生量を算定した。

算定結果は、図-14に示すとおりであり、水門製作時の塗装に伴い発生する二酸化炭素量より、若干小さな値となった。

表-8 塗装替え時における塗装仕様と標準使用量

	塗装仕様 (塗装替え時)	標準使用量 (g/m²)	1,320
第1層(下塗)	変性エポキシ樹脂塗料下塗	450	
第2層(下塗)	変性エポキシ樹脂塗料下塗	450	
第3層(中塗)	エポキシ樹脂塗料	220	
第4層(上塗)	エポキシ樹脂塗料	200	

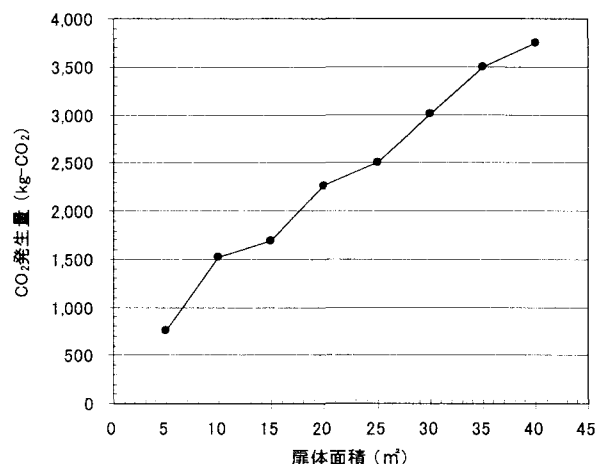


図-14 1回あたりの塗装替えに伴い発生する二酸化炭素量

4.5 二酸化炭素発生量の算定結果の総括

ライフサイクルの各段階で発生する二酸化炭素量を取りまとめた結果を表-9に示す。板材の製造から据付工事までに発生する二酸化炭素量のうち、板材製造時に発生するものが、アルミニウム合金製水門で約 95%、鋼製水門で約 80%と大部分を占めた。また、板材の製造から据付工事までの間に発生する二酸化炭素量は、図-15に示すように、アルミニウム合金製水門が、鋼製水門より約 1.5 倍多かった。さらに、鋼製水門の塗装替え1回あたりに発生する二酸化炭素量は、製作・据付までの発生量の約 13 ~ 20%と比較的多かった。

表-9(1) 二酸化炭素発生量の算定結果（アルミニウム合金製）

単位：kg-CO₂

扉体面積 (㎡)	板材製造	溶 接	工場クレーン 稼働	製作時塗装	据 付	合 計
5.0	5,954 (95.3%)	0 (0.0%)	1 (0.01%)	199 (3.2%)	97 (1.6%)	6,251
10.0	11,165 (95.7%)	0 (0.0%)	2 (0.01%)	398 (3.4%)	97 (0.8%)	11,661
15.0	16,375 (95.9%)	0 (0.0%)	2 (0.01%)	597 (3.5%)	97 (0.6%)	17,071
20.0	21,585 (96.0%)	0 (0.0%)	3 (0.01%)	796 (3.5%)	97 (0.4%)	22,480
25.0	26,795 (96.0%)	0 (0.0%)	4 (0.01%)	995 (3.6%)	116 (0.4%)	27,909
30.0	32,005 (96.1%)	0 (0.0%)	4 (0.01%)	1,193 (3.6%)	116 (0.3%)	33,318
35.0	37,215 (96.1%)	0 (0.0%)	5 (0.01%)	1,392 (3.6%)	116 (0.3%)	38,728
40.0	42,425 (96.1%)	0 (0.0%)	6 (0.01%)	1,591 (3.6%)	116 (0.3%)	44,138

注：() 内は、合計値に対する比率を示す。

表-9(2) 二酸化炭素発生量の算定結果（鋼製）

単位：kg-CO₂

扉体面積 (㎡)	板材製造	溶 接	工場クレーン 稼働	製作時塗装	据 付	合 計	塗装替え (1回あたり)
5.0	3,014 (78.2%)	169 (4.4%)	20 (0.5%)	533 (13.8%)	116 (3.0%)	3,853	758 (19.7%)
10.0	5,877 (79.1%)	330 (4.4%)	39 (0.5%)	1,067 (14.4%)	116 (1.6%)	7,429	1,515 (20.4%)
15.0	8,891 (79.6%)	500 (4.5%)	59 (0.5%)	1,600 (14.3%)	116 (1.0%)	11,166	1,694 (15.2%)
20.0	11,755 (79.6%)	661 (4.5%)	78 (0.5%)	2,133 (14.4%)	142 (1.0%)	14,769	2,258 (15.3%)
25.0	14,769 (79.8%)	830 (4.5%)	98 (0.5%)	2,667 (14.4%)	142 (0.8%)	18,506	2,501 (13.5%)
30.0	17,632 (80.2%)	991 (4.5%)	117 (0.5%)	3,200 (14.6%)	42 (0.2%)	21,982	3,001 (13.7%)
35.0	20,646 (80.3%)	1,161 (4.5%)	137 (0.5%)	3,734 (14.5%)	42 (0.2%)	25,719	3,501 (13.6%)
40.0	23,509 (80.2%)	1,322 (4.5%)	156 (0.5%)	4,267 (14.6%)	42 (0.1%)	29,296	3,744 (12.8%)

注：() 内は、合計値に対する比率を示す。

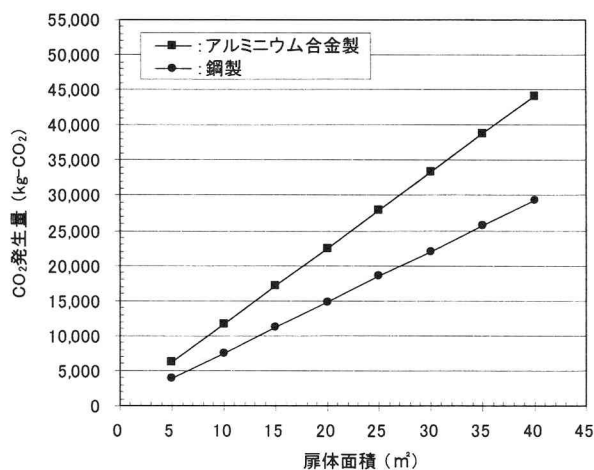


図-15 板材製造から据付までに発生する二酸化炭素量

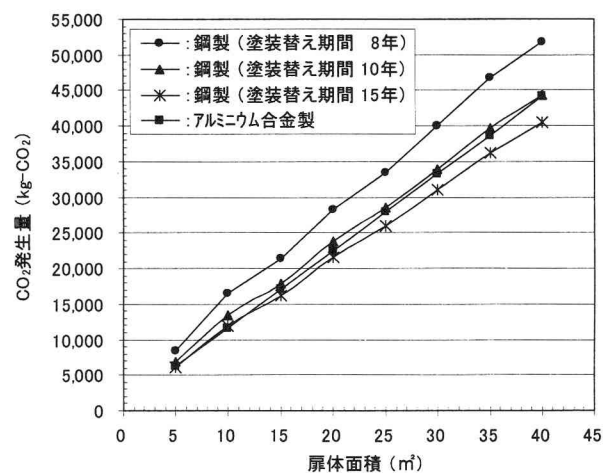
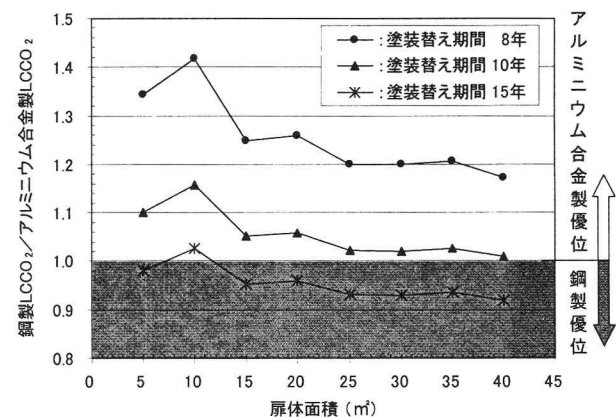


図-16 ライフサイクル期間中に発生する二酸化炭素量

4.6 ライフサイクルに発生する二酸化炭素量の算定

扉体の耐用年数を50年、鋼製水門の塗装替え期間を8年、10年、15年とした場合のライフサイクル期間中に発生する二酸化炭素量(LCCO₂)を算定した結果を図-16に示す。また、鋼製水門とアルミニウム合金製水門とのLCCO₂の比率を図-17に示す。

水門の据付までに発生する二酸化炭素量は、図-15に示したとおり、アルミニウム合金製水門が鋼製水門の約1.5倍と多いが、鋼製水門の定期的な塗装替えを考慮したLCCO₂では逆に鋼製水門の方が多くなり、図-17に示すとおり、塗装替え期間8年の場合アルミニウム合金製水門の約1.2～1.4倍、塗装替え期間10年の場合

図-17 LCCO₂の比率（扉体耐用年数50年）

はアルミニウム合金製水門の約 1.0 ～ 1.16 倍と多くなることが判明した。また、扉体面積が小さい程、アルミニウム合金製水門の優位性が増すことが判明した。

しかし、塗装替え期間 15 年の場合、依然アルミニウム合金製水門の方が鋼製水門に比べ、若干 LCCO₂ の値が大きくなることが判明した。

このように、LCCO₂ の観点からも、ライフサイクルコストと同様に、扉体の耐用年数が 50 年で、鋼製水門の塗装替え期間が 8 年と 10 年の場合、アルミニウム合金製水門の方が優位となることが判明した。

ここで、扉体の耐用年数をパラメーターとして LCCO₂ を算定した結果、図-18に示すとおり、耐用年数が 65 年以上あれば、塗装替え期間に関わらず、アルミニウム合金製水門が優位となることが判明した。

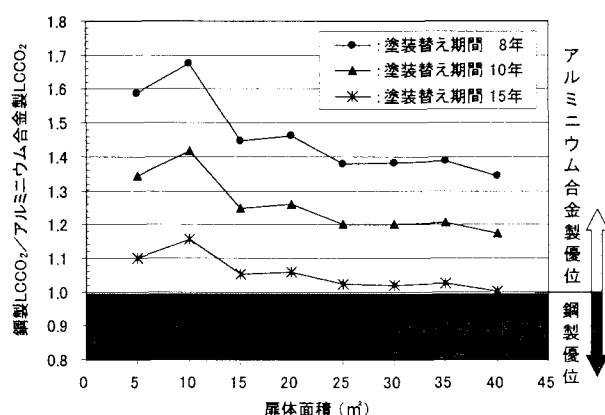


図-18 LCCO₂ の比率（扉体耐用年数 65 年）

5. 結 論

本研究では、アルミニウム合金製と鋼製の横引き式ゲートに関するライフサイクルコストおよび、二酸化炭素量を算定し、両者の比較検討を行った。

以下に本研究で得られた結論を示す。

- 1) アルミニウム合金製水門のイニシャルコストは鋼製水門の約 1.2 倍と高く、イニシャルコストのみを見れば、鋼製水門の方が経済的に優位となった。
- 2) 扉体耐用年数が 50 年で、鋼製水門の塗装替え期間が 8 年と 10 年の場合、鋼製の LCC がアルミニウム合金製に比べ、それぞれ約 1.12 倍、1.10 倍高くなり、アルミニウム合金製水門が経済的に優位となった。
- 3) 板材の製造から扉体の据付工事までの間に発生する二酸化炭素量のうちで、板材製造時に発生するものが、鋼製水門で約 80%、アルミニウム合金製水門で約 95%と大部分を占めた。
- 4) 板材の製造から扉体の据付工事までの間に発生する二酸化炭素量は、アルミニウム合金製水門が鋼製水門の約 1.5 倍多かった。
- 5) 扉体耐用年数が 50 年で、塗装替え期間 8 年および 10 年の場合、LCCO₂ の値は鋼製水門の方が大きくなり、

アルミニウム合金製水門の約 1.2～1.4 倍および約 1.0 ～ 1.1 倍となった。

- 6) 扉体の耐用年数が 65 年以上であれば、鋼製水門の塗装替え期間に関わらずに、アルミニウム合金製水門の LCCO₂ の値の方が小さくなった。
- 7) 扉体耐用年数や塗装替え期間等の種々の条件にもよるが、アルミニウム合金製水門は、経済性や環境負荷の観点から、鋼製水門より優位となった。

本研究では、防潮水門の中でも横引き式ゲートを対象に検討を行ったが、今後はローラーゲート等その他の形式の水門や、河川水門等に関しても LCC および LCCO₂ の比較検討を行うことにより、より経済的かつ環境に優しい材質の選定が行えるものと考えている。

最後に、本研究は(社)日本アルミニウム協会内に設置された水門 LCC 調査ワーキンググループ(座長清宮理)で検討された結果を一部利用させて頂いた。貴重なご意見を頂いた委員各位およびアルミニウム協会に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 東南海・南海地震対策大綱，内閣府中央防災会議，平成 15 年 12 月。
- 2) 東海地震対策大綱，内閣府中央防災会議，平成 15 年 5 月。
- 3) 環境省資料 2002 年度(平成 14 年度)の温室効果ガス排出量について，環境省地球環境局，2004 年 5 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) 伊藤義人，永田裕規，スヌワル・ラックスマン，西川和廣，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，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1295-1305，1999 年 3 月。
- 6) 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。
- 7) アルミニウムハンドブック(第 6 版)，社団法人日本アルミニウム協会標準化総委員会，2001 年 10 月。
- 8) 海洋構造物の防食指針・同解説(案)(飛沫帯・干潮編)，鋼管杭協会，平成 2 年 8 月。
- 9) アルミニウム合金製水門設計製作指針案，社団法人軽金属協会，昭和 54 年 3 月。
- 10) ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル 編)，社団法人ダム・堰施設技術協会，平成 11 年 3 月。
- 11) 機械設備管理指針(案)，水資源開発公団，平成 6 年 10 月。
- 12) 海岸事業の費用便益分析指針(改訂版)，農林水産省農村振興課，農林水産省水産庁，国土交通省河川局，国土交通省港湾局，平成 16 年 6 月。
- 13) 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。
- 14) 建設機械等損料算定表(平成 15 年度版)，社団法人日本建設機械化協会，平成 15 年 4 月。

(2004 年 9 月 17 日受付)