

1. はじめに

資源や環境の制約が顕在化しつつある現在、環境負荷の少ない循環型社会への移行が強く求められている。大規模な施設整備の上に成立する大量の物資輸送等の港湾サービスは、大量の物質やエネルギーの消費を伴うため、港湾事業の実施においては環境負荷の最小化の努力が求められる。その実現に向けて、原料調達・製造・使用・廃棄の全ステージを通じた適切な環境負荷の評価手法が必要となり、港湾分野に適用できる実用的な環境負荷の推定手法を練り上げて行く必要がある。このため、本研究では、港湾におけるユニットロード輸送の高度化プロジェクトに伴うエネルギー消費と CO2 排出を推計する手法の全体的な体系を整理するとともに、その手法体系の実用性等を高めるための個々の製造・使用過程における基本的な条件設定の考え方と計算の基礎となる数値と算法の整理を行う。

財・サービスの製造から廃棄までの過程における環境負荷を推計し、評価する代表的な枠組みとしてライフサイクルアセスメント (LCA: Life Cycle Assessment) という手法がある。ISO (International Organization for Standardization) や JIS (Japan Industrial Standard) で規格が制定されているとともに、数多くの研究蓄積がある。これらを用いて港湾における環境負荷を推計するための準備を行う。LCA を実施するためには製造に関わる分野の膨大な情報・データが必要であり、それらを全てオリジナルに整備することは大きな困難を伴う。本研究では、既往の研究や他分野の研究で使用できる情報・データはできるだけ活用し、評価をしようとする対象である港湾の独自の情報・データもしくは推計結果に影響が大きいと考えられる情報・データについて収集・整理を行うという方法で研究を行う。

どのような情報・データが推計結果に大きな影響を持つかを知るためには、環境負荷をもれなく見積もり、環境負荷の全体像を把握することが必要である。しかし、それを行うことは無限ともいえる環境負荷の積上げ作業を必要とするため、どのような情報・データが推計結果に大きな影響を持つかを直接確認することは難しい。このため、本研究の対象とする情報・データは、経験的知見から影響が大きいと想定されるものを取り上げる。本研究の対象範囲はそのようなものであるが、それを実際の事例に適用し、そこから求められる環境負荷の推計値と実際の環境負荷量の一致具合を調べることによって、本研究の対象範囲の不足や整理・モデル化の不適切さを知ることができる。それらが分かれば、不足する情報・

データを追加・整備や不適切な整理やモデル化の修正を行うことができる。こうした過程を繰り返すことによって、完成度の高い推計体系ができあがる。本研究は、そうしたプロセスを進めるための第一歩であると考えられる。

本論文では、まず第二章で ISO14040s の LCA の考え方をレビューする。次に、第三章で港湾プロジェクトにおける環境負荷推定の基本的な考え方を整理する。その後、港湾プロジェクトを評価する際に必要となる海上輸送モデル、陸上輸送モデル、港湾モデルの具体的な内容第四章～第六章に記述する。そして、第七章に全体的な総括を記述する。

2. LCA の概要

ある財・サービスのライフサイクル全般にわたる環境影響を評価する手法の代表的なものに LCA がある。LCA とは、Life Cycle Assessment の略語である。ISO14040 (ISO, 1997) では、LCA を「製品の原材料の採取から製造、使用および処分に至る生涯を通しての環境側面および潜在的影響を調査するものである。」と規定し、それは、

- ①製品システムに関連する入力および出力のインベントリをまとめる。
 - ②これらの入力および出力に付随する潜在的環境影響を評価する。
 - ③インベントリ分析段階および影響評価段階の結果を調査の目的に応じて解釈する。
- という行為から構成されるとしている。

こうした LCA の考え方は道路、鉄道、下水道、ゴミ処理施設といった社会資本あるいはそれによって成立する社会システムなどにも応用可能であるが、社会資本整備に対する LCA の適用は、消費財を主な対象とする製品 LCA と、その利用目的、意思決定への反映のさせ方などにおいてかなりの違いがある (井村秀文, 2001) といわれている。LCA の考え方は、港湾分野を対象にしたライフサイクル全般にわたる環境負荷の評価にも適用可能であり、それから得られる知見は本研究においても極めて有益なものである。このため、本研究では LCA の考え方を踏襲するものとし、以下にその概要を示す。

2.1 LCA 研究の流れ

LCA の研究は、1969 年に実施されたコカコーラのライフサイクル可能なビンと PET ボトルの比較分析に始まり、1970 年代における製品アセスメント、ライフサイクルアナリシスやライフサイクルエネルギーなどの概念生成を経て、1980 年代には、米国で、化学物質のリスク分析を

中心として製品アセスメント研究が活発化するとともに、スイス、オランダ、フランスなどの欧州においても LCA の研究が活発化した。そして、1991 年には SETAC (Society of Environmental Toxicology & Chemistry) が LCA の方法論を発表した。日本では、同年にプラスチック処理促進協議会と日本生活協同組合連合会がケーススタディーを実施した。1992 年に環境庁（現在の環境省）が「環境への負荷の評価に関する予備的検討」を実施し、日本における LCA 研究が本格化した。1993 年には、ISO (International Organization for Standardization : 国際標準化機構) が環境管理システム規格の検討に着手し、その一部として LCA の規格が ISO14040s として検討されることになり、2000 年までに一連の規格が発効し、2003 年に JIS 化が完了している。

表-1 ISO14040s の規格化の状況

ISO 規格番号	ISO の状況	JIS の状況
14040 (原則および枠組み)	1997 年 6 月発行	JISQ14040 1997 年 11 月発行
14041 (目的及び調査範囲の設定並びにインベントリ分析)	1998 年 10 月発行	JISQ14041 1997 年 11 月発行
14042 (ライフサイクル影響評価)	2000 年 3 月発行	JISQ14042 2003 年 3 月発行
14043 (ライフサイクル解釈)	2000 年 3 月発行	JISQ14043 2003 年 3 月発行

1994 年 10 月には日本でエコバランス国際会議が開催され、同 12 月閣議決定の「環境基本計画」では LCA 研究の推進が位置づけられた。1995 年には通商産業省（現在の経済産業省）の主導で LCA フォーラムが設立され、1998 年度から 5 年計画で通商産業省の「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発 (LCA プロジェクト)」が実施された。未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会、1995；伊加賀俊治・外岡豊，2004）。

LCA という言葉が一般的に使われるようになったのは、1990 年代に入ってからである。それは、1991 年に ISO が環境管理システム規格(1400X)の検討作業に着手したのが契機だといわれている。LCA は、ライフサイクルが特定できるもの、特に一般消費財を念頭に置いて開発されてきた手法であるが、似た概念や手法は以前から各種の建築物や生産過程にも適用されていた例がある（未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会，1995）。

2.2 LCA の構成

ISO14040 (1997) では、LCA は①目的および調査範囲の設定、②インベントリ分析、③影響評価、④解釈から構成されるとしている。①、②、④の手順のみを行うの

をライフサイクルインベントリ分析(LCI分析:Life Cycle Inventory Analysis)とし、それだけでは LCA としては不完全で、①から④まで全ての手順で行った場合のみ LCA であるとしている。さらに、LCA の付帯事項として「報告」と「クリティカルレビュー」を規定している。

①および②によって求められた環境負荷量とそれによって引き起こされる環境影響を何らかの方法で関連付け、その環境影響予測をもって何らかの評価をするのが③影響評価である。この③影響評価における課題の一つは、様々な環境影響をどのように統合して評価をするか、である。例えば、GHG (Green House Gases : 温暖化ガス) の大気中濃度の上昇によって引き起こされる温暖化は、様々な環境影響を引き起こす。それは、台風の強大化、雨量の増減などの気候変動による影響、温暖化による海面上昇による高潮・津波・波浪災害の激化、浸食の増大、塩害の増大といった沿岸域影響、温暖化による水循環の変化、生態系の変動による食料問題、疫病問題、消費性向の変化などであり、様々な種類の影響が広範囲にわたり地域差を持って生じる可能性が想定されている。この場合、これらの様々な影響をある程度の確度をもって予測することがかなり難しい。その上、異なる種類の影響をどのように比較して評価するかがまた難しい。しかも、環境負荷は GHG だけではなく、エネルギー消費量やその他の様々な環境評価を含めると、それらの予測・評価はますます複雑になり、困難の度合いを高める。こうした課題に対して、様々な取組みがなされているが、決定的な手法が見出されているとはいえない状況にある。

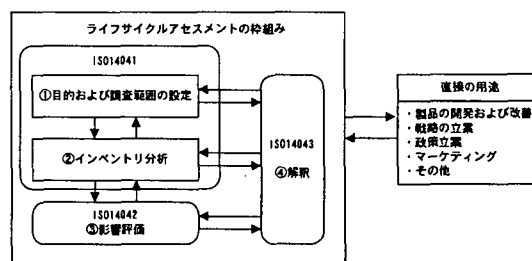


図-1 LCA の枠組み (ISO, 1997)

LCA の範囲は、その分析によって何をしようとするかにあわせて、適切に設定しなければならない。具体的には、①機能単位 (function unit)、②システム境界 (system boundaries)、③配分手順 (allocation procedures)、④解釈 (interpretation) の方法、⑤データ要件 (data requirements)、⑥前提条件 (assumptions) および⑦限界 (limitations) を記述することによって分析の範囲が画定される (ISO, 1997) と考えるのが一般的である。これに、実施主体の

判断によって、⑧影響評価 (impact assessment) の手法、⑨クリティカルレビュー (critical review) および⑩報告書の種類および書式についても含まれる場合がある。ISO (1997) では、⑧から⑩についても含めることを推奨している。これに関する ISO14040 (1997) の基本的な考え方は以下のとおりである。

(1) 機能単位

機能単位とは、製品が提供する性能である。LCA では、製品の性能が同じ場合に、どれだけ環境影響が異なるかを比較することによって評価を行う。このため、比較する各製品の性能をそろえなければならない。

(2) システム境界

どのような製造・使用・廃棄過程が LCA の計算対象になるかを決定する境界線である。システム境界を決定する要因としては、調査の目的・用途、前提条件、カットオフ基準、データおよび費用の制約、結果の伝達先などの要因などが考えられる。入力および出力項目の選定、データの集約の程度、計算対象のモデル化は、調査の目的に合致していなければならない。

(3) データの要件

調査に必要なデータの特性を決定する。データの要件は、LCA 調査の目的および範囲に合致しなければならない。データの要件は、①時間に関する有効範囲、②地理的な有効範囲、③技術の有効範囲、④データの精度・完全性および代表性、⑤情報の不確実性を含むものとするのが望ましい。

(4) ライフサイクル影響評価

インベントリデータを特定の環境影響と関連づけ、これらの影響を整理する。作業には、①分類化：インベントリデータを影響区分に振り分ける、②特性化：それぞれの影響区分内でインベントリデータと影響の関係をモデル化する、③重み付け：非常に特殊な場合でかつ意味のあるときに限り可能な場合は特性化の結果を統合する、といったものがある。

(5) ライフサイクル解釈

インパクト分析やインベントリ分析の結果から結論や提言を導き出すものである。

(6) クリティカルレビュー

クリティカルレビューは、①LCA で用いた手法が、ISO14040s に合致していること、②LCA で用いた手法が、科学的小および技術的に妥当であること、③使用したデータが、調査の目的に照らして適切かつ合理的であること、④解釈が、調査の目的および調査の限界を反映していること、⑤報告書が、透明性があり、データおよび論理が整合していること、を保証するために実施される。

(7) LCA の使用上の注意

LCA を使用する上では、以下の注意が必要である。

①LCA がまだ開発の初期段階にあるという認識に立っているため、LCA の結果は、適切に解釈および適用されることが重要である。

②LCA が役立つためには、技術的信憑性を維持する必要がある。同時に適用に対して柔軟性、実用性、費用対効果があることが必須になる。

③LCA 調査の範囲、境界および詳細度は、その調査の課題および意図している用途による。

④LCA における各種の選択および前提条件 (例えば、システム境界の設定、データ源および影響区分の選択) は、主観的な場合がある。

⑤インベントリ分析または影響評価に用いられるモデルは、その前提条件によって制約を受け、全ての潜在的影響または用途に対して必ずしも適用可能とは限らない。

⑥局地的な条件に地域的または地球規模の条件をあてはめるのは適切でないことがある。

⑦LCA 調査の正確さは、関連するデータの入手可能性もしくは利用可能性、または、データの欠損、データの形式、データの集約方法平均化手法、特定の場所への依存性などの、データ品質による制約を受ける場合がある。

⑧空間的および時間的次元の欠落したインベントリデータを使用して影響評価を実施した場合、その評価結果は不確実性を伴う。この不確実性は、それぞれの影響区分の空間的・時間的特性によって変化する。

⑨異なる LCA 調査の結果は、それらの前提条件および分析方法が同一の場合だけに比較可能である。また、これらの前提条件は透明性を保つ上からも明示的に記述すべきである。

3. 港湾プロジェクトにおける環境負荷推定の基本的な考え方

港湾プロジェクトに伴うライフサイクル全般にわたる環境負荷量を推定するための準備を行ううえで、基本となる考え方を整理する。

ISO (1997) によれば、LCA は①目的および調査範囲の設定、②インベントリ分析、③影響評価、④解釈から構成されるとしている。このうち③影響評価は、様々な環境負荷量から社会がどのような影響を受けるかを推定し、評価値を求める手続きである。LCA の場合、対象とする財・サービスのライフサイクル全体にわたる環境負荷のトータルインパクトを推定し、評価することが基本コンセプトである。そのようにライフサイクル全体で環

環境負荷を整理しようとする、環境負荷の発生場所が各地に広く分布するため、困難な問題が生じる。環境負荷の発生によってどのような環境変化が引き起こされ、それが社会にどのような影響を与えるのかは、多くの場合、環境負荷発生場所の周辺の環境状態と社会経済状態に依存するため、場所ごとに影響を推定しなければならない、非常に多くの場所を対象として調査と推計作業をしなければならないことになる。個別の公共事業に対する環境アセスメントですら膨大な費用と時間を必要とすることを考えると、前述のようなライフサイクル全体にわたる環境影響を推定することは作業が膨大となり、ほとんど実行不可能である。しかし、中には、環境負荷の発生による環境影響が発生場所にほとんど依存しない環境負荷もある。エネルギー消費とGHG排出である。それら環境負荷は、地球上のどこで起こってもエネルギー資源の枯渇および気候変動に対するインパクトはほとんど差異はない。この特性から、それら環境負荷は環境負荷量の合算値によってその環境インパクトの大きさを計量することができるため、ライフサイクル全体での環境負荷を推計する対象として適している。このため、エネルギー消費とGHG排出量を環境負荷量の推計対象と考える。

エネルギー消費とGHG排出量はそれぞれ合算値をもって環境負荷のトータルな大きさを表現するとしても、環境負荷の発生によって具体的にどのような形でエネルギー資源の枯渇や気候変動に影響を引き起こし、そして、その影響がどのような社会影響を引き起こすかは、影響機構が複雑多岐にわたるため、最終的に影響を受ける項目についてロバストな予測結果を出すことはできていない。それは、影響の正逆判定であっても、安定性のある推定ができない状況である。しかも、非常に多くの社会影響に対して、それぞれに重みを設定し、各影響を統合して一元的に影響の大きさを表現する技法は、実用に耐えるだけのものが見出されているとはいえない。従って、ISO(1997)が整理したLCAの構成のうち、③影響評価は合理的な実施が難しいと考えられるため、これを除く概念であるLCI分析を本研究では対象範囲とする。また、LCI分析は④解釈まで適切に行われて効果を発揮するが、どのように解釈するかもまた非常に難しい課題である。解釈についての議論の重点は、環境負荷量を求めようとする財・サービスと得られる環境負荷量の大きさによって異なるため、ここでは、④解釈の検討がなされる前段として、手法の体系化が遅れている港湾プロジェクトという評価対象に対するライフサイクル全体にわたる環境負荷量を推計する枠組みを整理することを目的とする。

評価しようとする財・サービスのライフサイクル環境

負荷を見積もるためには、評価対象を供給するために必要とされる個々の固有の製造・使用・廃棄過程について詳細な情報を集め、それをもとに各製造・使用・廃棄過程の環境負荷を定量し、それをライフサイクル全体にわたって合算することによって求めることが基本である。しかし、こうした作業は膨大な労力と時間を必要とするうえ、施設や機材の設計や運用の詳細な情報を必要とするため、計画の初期段階では実施上の制約が大きい。これを補うため、LCI分析を行う際に固有の情報を得ることが難しい設計や運用についての情報およびそれら情報に対応する環境負荷発生量についての情報の主要なものについて、標準的なモデルを作成することが有効である(加藤博和, 2004)。本研究では、LCI分析実施において、評価対象に関する固有の情報・データが得られる場合は、できる限りそれらを用いて評価対象に即した個別のモデル化を行い、それを組み込むことを基本とする。しかし、固有の情報・データが十分には得られないあるいは固有の情報・データを得ることが時間的労力的に困難な場合には、標準的なモデルを想定し、それを使用して計算を完結させるという計算体系を想定する。そして、こうした計算体系の実施を補助するため、評価対象の幾つかの主要な部分を構成するユニットについて標準的な状態を想定したモデルを作成するための考え方を準備する。具体的には、モデルの構造、環境負荷原単位を含むモデルのパラメータ値および標準値を予め整理・算出しておくというものである。

港湾分野に限定されることなく、あらゆる分野に対して同程度の精度で結果を得ることができる汎用的な手法を作り上げ、それに従ってLCI分析を行うためには、あらゆる製造・使用・廃棄過程について算法とデータを整備することが必要となり、それらが整うまでにかかなりの時間を待たなければならない。しかも、現代の社会や経済や技術の変化速度は非常に早いため、LCI分析手法をそれに追従させて修正・更新していくことはかなり難しい。また、仮にそのような汎用的なLCI分析手法が確立・維持されたとして、それを用いて港湾分野のLCI分析を実行しようとするれば、全体に広く影響を及ぼす電源の構成比率や製鉄における高炉、転炉、電炉の比率など緻密な条件を、分析の対象とする港湾サービスにあわせて設定しなければならないことになる。それらは一般に比較したい項目ではないにもかかわらず、それらによって多くの作業を必要とすることになる。

このため、汎用的なLCI分析手法に準拠するというアプローチはとらず、港湾分野、なかでも分析の需要が比較的大きいと予想されるユニットロードの海上輸送を対

象とした専用目的の LCI 分析手法を構築することを目指す。

3.1 環境負荷の発生関数

ライフサイクル全体にわたる環境負荷量を実際に計算して求めるためには、環境負荷の発生関数のデータベースが必要となる。環境負荷の発生関数は、膨大な数の財・サービスについて準備しておく必要があるため、最も単純な比例モデルとするのが一般的である。比例モデルは、説明変数と被説明変数の正の投入産出関係を表現することができ、しかも、助変数が 1 しかないため、少ないデータで助変数の推定が可能である。さらに、説明変数の変化に伴う環境負荷の変化を、説明変数の絶対値を必要とせず、説明変数の差分だけで表現することができるという便利な特徴もある。このため、ここでは比例モデルを基本に考える。比例モデルの場合は、生産活動量に対する環境負荷量の発生割合を助変数とするのが一般的であり、その助変数は環境負荷原単位と呼ばれている。日本の平均的な産業構造を想定して求めた生産動員を含む環境負荷原単位のデータベースは、幾つかの機関で推計され、公表されている（日本建築学会，2003；南齋規介ら，2002；本藤祐樹ら，2001 など）。

3.2 対象とする環境負荷

LCI 分析は、理論上どのような環境負荷でも計算することができる。例えば、公表されている環境負荷原単位データで対象とされている環境負荷の種類は、エネルギー、GHG、SOX、NOX、BOD、COD、SS、N、NH₄、P、Cl、SO₄ などがある。

LCI 分析は、対象とする財・サービスが、原料の採取から廃棄までの全てのライフサイクルにおいて引き起こす環境負荷を積分して、それをもってインパクトの大きさとするものである。言い換えるならば、発生する時刻や場所が異なる環境負荷を合成するという行為をその概念の中心に置いている。このため、井村（2001）も指摘しているように、NOX による大気汚染や有機物による水質汚濁などのように局所的もしくは局時的な汚染物質濃度が重要となるような環境負荷の評価に対しては、環境負荷量を低減するという一般論としての意味合いは認められるものの、問題の発生の有無や定量的な対策を検討するうえでは、LCI 分析は評価ツールとして適していない。かわりに、GHG の排出やエネルギー資源の消費のように、地球上のどの場所での発生であるか、あるいは、数年単位の幅の中でどの時点での発生であるかは問題にならず、地球上での環境負荷量の合計値が意味を持つ

ようなものを評価しようとする場合には、LCI 分析は有益な知見を提供する。

この他、LCI 分析が必要となるのは、製造・使用・廃棄過程における技術的対策が困難で、需要側の対策を進める必要がある場合である。また、LCI 分析を実際に行うためには、原単位データの整備がかなり進んでいるものでなければならない。こうした点を考慮すると、本研究では、環境負荷の影響が発生場所や発生時間にほとんど左右されない「エネルギー消費」と「GHG 排出」、特に、日本では GHG 排出のなかで大宗を占める「CO₂ 排出」を推定対象の環境負荷とする。

3.3 機能単位とシステム境界の設定

港湾プロジェクトに伴うライフサイクル環境負荷を推定することは、環境負荷の低減に取り組んでいくための前提である。港湾プロジェクトといっても、その目的は、石油関係の輸送や貯蔵、ドライバルク関係の輸送や貯蔵、雑貨関係の輸送や貯蔵、旅客の乗継や休憩、出漁準備や水産物の水揚げ・保管・加工、工場や発電所や業務施設や住宅の立地、レクリエーション、廃棄物処分など多岐にわたる。これら全てについて環境負荷を推定できるようにすることは理想であるが、準備の作業量が大きくなりすぎて対応できない。そこで、ここでは、最も代表的な港湾の整備の一つであるユニットロード輸送を環境負荷量比較の機能単位とする。具体的には、整備を行う岸壁、クレーン、ヤードおよび泊地等の施設の整備計画において、取扱が想定されている全ての貨物の発地から着地までの一連の輸送が、多くの場合に機能単位として設定されることになる。

LCI 分析が行われる典型的なケースの 1 つと考えられる状況は、ユニットロード輸送のための施設をいくつかの港湾に整備する必要の有無を検討する場合である。このような検討を行う時点では、各種施設及び設備の数・寸法、稼働のためのエネルギー消費量、使用材料の種類・量がほとんど決まっていない。このため、この段階で LCI 分析を行おうとすると、それらの想定が面倒な作業となる。そのため、ここでは、それら負担を軽減するため、標準的と考えられる施設及び設備の寸法、稼働のためのエネルギー消費量、使用材料の種類と量を想定するための数値や式を整理する。もちろん、LCI 分析を検討する段階で、対象とする施設や設備の固有の情報が見られる場合には、それらを優先的に使用することが前提である。

LCI 分析はシステム境界の取り方の違いによって Streamlined LCI 分析と Full-scale LCI 分析に分類される。

従来は、Full-scale LCI 分析が理想とされてきたが、ハイブリッド法を用いたとしても、作業量が膨大になる。また、近似的に Full-scale を目指すにしても、それさえも膨大な作業を必要とするため、実用に耐えない。そのため、現実には、主要な部分だけを計算し、それを比較分析するという Streamlined LCI 分析が採用されるのがほとんどである。理想的な Full-scale LCI 分析を実施することは膨大な作業量を必要とするため、研究レベルであっても、実行不可能である。このため、本研究では、実務への適用が可能な Streamlined LCI 分析を前提に検討を進める。

また、これらと異なる概念として Comparative LCI 分析がある。これは、Full-scale LCI 分析が環境負荷の絶対値を推計しようとするのに対して、多くの場合に特定のケース間の相対比較ができれば用が足りるので、比較するケース間で共通する部分の推計は行わず、ケース間の違いのみを推計し、ケース間の相対的な差を求めるのが、Comparative LCI 分析である。Comparative LCI 分析で十分な場合は、推計のための作業量が Full-scale LCI 分析に比べて飛躍的に少ない。例えば、京都議定書の CO2 排出量の目標値を達成するために、様々な対策の実施の下での CO2 排出の総削減量を推計しようとする場合、基準ケースに対する増減だけを知るだけでも有意義なので、Comparative LCI 分析でも十分に価値がある。

LCI で分析しようとする港湾プロジェクトは、ここでは、港湾におけるユニットロード輸送を効率化するための各種の改善策である。これによって環境負荷を有意に変化させる輸送の変化は、港湾内における貨物の運搬方法の変化にとどまらない。輸送の際に通過する港湾が変化することによって、海上輸送や陸上輸送の輸送距離や使用する輸送機材等が変化する。このため、評価の対象とする機能単位は発地から着地までのユニットロードの輸送ということになる。これを一般化して整理すると、システム境界の設定においては、原料採取から廃棄までをシステム内に取り込む垂直的統合と同時に、評価しようとする行為によって変化が生じる行為をシステム内に取り込む水平的統合をあわせて行う必要があるということである(図-2)。これらの輸送を実現するためには、海上輸送では船舶に加え GPS、交通監視レーダー、灯台、ブイおよび開発保全航路などの航行支援施設が必要である。また、陸上輸送では、車両、路面、盛り土、法面保護、橋梁、トンネル等の基盤施設、換気施設、排水施設、照明、情報板、信号機、管理センター等の交通支援施設などが必要である。港湾内輸送では、荷役機械、荷捌き地、上屋、倉庫等の荷役・保管施設、航路、泊地、防波堤、岸壁、臨港道路等の基盤施設、照明、リーフアープラグ、管理棟等の補助施設、埋立等の土地造成が必要で

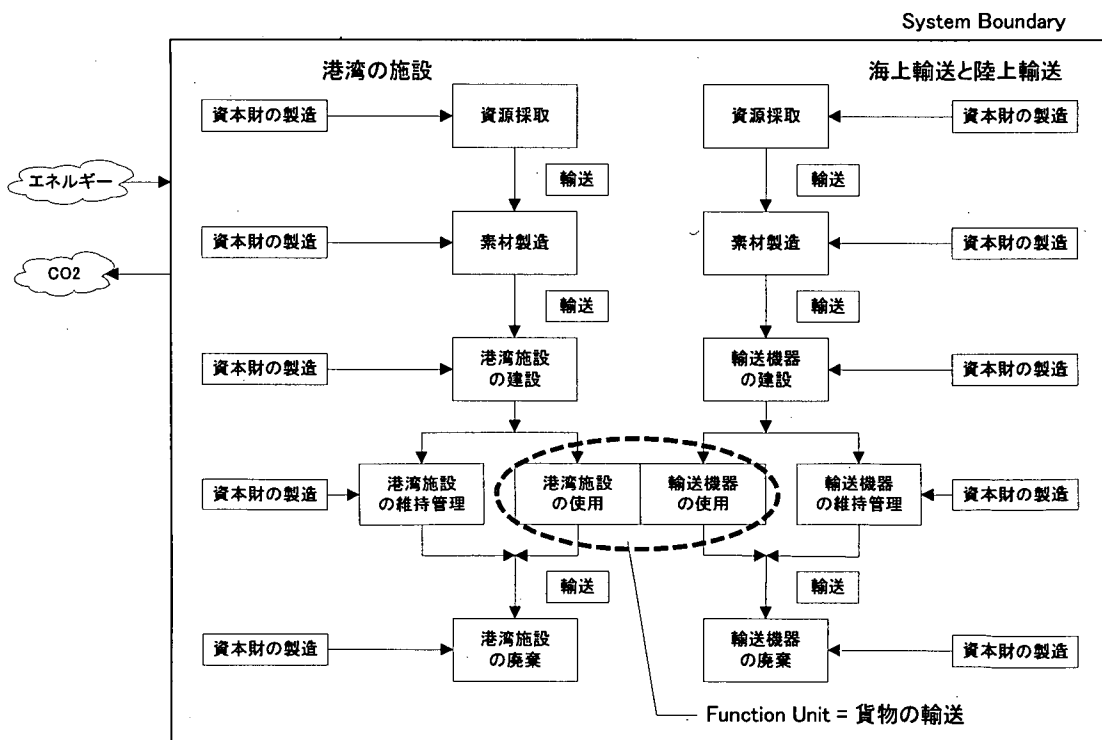


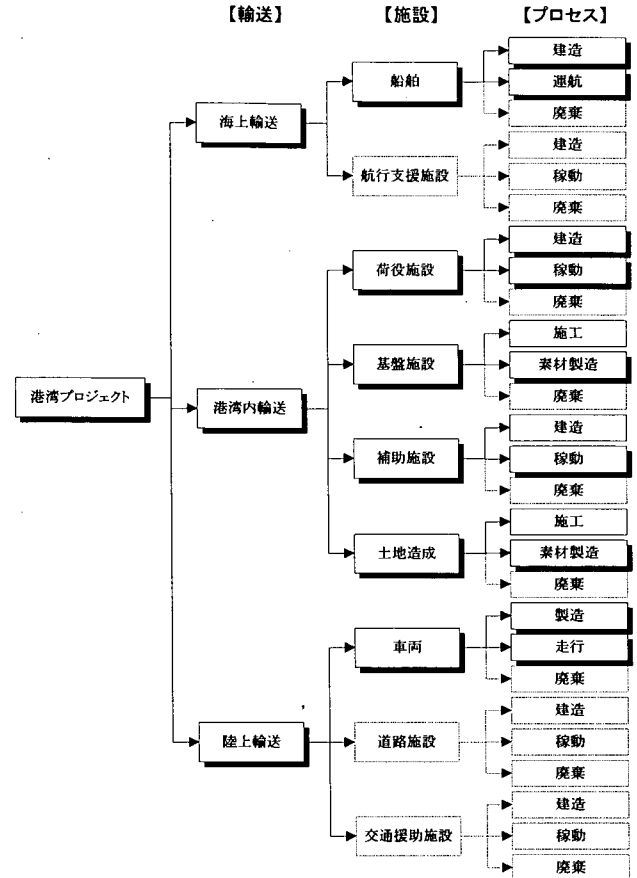
図-2 港湾 LCI 分析のシステム境界と機能単位

ある。

このうち、航行支援施設、道路施設、交通援助施設は、利用量の大小にかかわらず財・サービスの投入量はそれほど変化しないものであるため、対象とする貨物の輸送量の大小による利用量の変化程度で財・サービスの投入量はほとんど変化しないと考えられる。このため、これらに関する環境負荷は埋没投入とみなし、港湾の LCI 分析においては環境負荷を推計する対象とはしないことが適当である。また、森口祐一ら（1993）が行った自動車走行に伴う走行台キロ当たりのライフサイクル CO2 排出量の推計によれば、CO2 排出量は走行によるものが 70%、車両の製造によるものが 20%、道路の建設・維持によるものが 10%程度となっている。道路の環境負荷を旅客車両と貨物車両にどのように配分するのは非常に難しい問題だと思われるが、仮にこの 10%という値をそのまま使って考えると、建設段階の環境負荷量が小さいのは、基本的に、道路の利用台数が多いためと、耐用年数が長いためである。大型車による貨物輸送を考えた場合は、道路施設の建設・維持で発生する環境負荷は、車両の走行に伴う環境負荷に対する割合がさらに小さくなると予想される。このため、陸上輸送においては、車両走行に伴う環境負荷量を推計することが基本となる。さらに、輸送機械の製造で発生する環境負荷量は、荒い推計をすることは比較的容易であるため、それを計測する。

海上輸送も同様の方針で推計することとし、船舶航行に伴う環境負荷量と船舶の製造に伴う環境負荷量を推計する。港湾での輸送に伴う環境負荷量は、港湾の土地・固定施設を新たに整備もしくは改造をすることを想定するものについては、その建設・運用等に伴う環境負荷量は、道路のように埋没負荷と考えることが出来ないため、それらを含めて考える。港湾での輸送に伴う環境負荷は、荷役機械の運転・建造等に伴う環境負荷量と、新規整備もしくは改造を想定する港湾の土地・固定施設の建設・運用等に伴う環境負荷量を推計する。ただし、土地・固定施設の建設段階における各種施工機械・輸送機械の工数は、データ収集が十分できていないため、ここではそれらについてのモデル化を行わず、別途何らかの方法で推計するものとする。同様に、コンテナの製造に伴う環境負荷は、対象貨物の輸送に起因してどれだけの量のコンテナが製造されるかを推定するための情報の収集が不足しているため、ここでは推計の対象としない。また、廃棄に伴う環境負荷は、使用材料のほとんどが鋼材、コンクリート、土石、アスファルトで、かなりの割合でリサイクルが可能になっているためと、処分が極めて難しい材料をほとんど使用していない、そして近年はその傾

向が強まってきている、ために廃棄過程で大きな環境負荷があるとはあまり考えられないことと、廃棄過程の情報が全体的に不足していることから、ここでは推計の対象としない。以上をまとめると、図-3 のとおりとなる。



注)実線：LCI 分析の対象とする項目，破線：対象としない項目，影付：今回考え方を整理する項目。

図-3 港湾プロジェクトのシステム境界

さらに、素材生産、建造、稼働といった過程を動かすために働く人々がいる。この人々の通勤、購買、その他家計を支えるための活動、さらには、家計を成り立たせる前提としての社会を支える活動、あるいは、呼吸、排泄などの生物としての活動によっても環境負荷が発生する。これらの活動もある港湾プロジェクトの有無によって活動量が有意にしかも比例的に変化するとは考えにくい。特に生物としての活動は、人間が生きている限りほぼ一定量が発生すると考えられる。港湾プロジェクトの有無による家計の各種活動の活動量の変化は、社会的な価値観や社会の全体的な状態の変化による大きな変動の中で発生しており、それらの中に変化がまぎれてしまっていて、検出するのが難しいうえ、微小な所得変化を介した家計の活動変化の発生の仕方が比例的であると考えることが難しい。このため、こうした労働市場を通した

社会変化による環境負荷は、算定の対象外とする。

輸送条件の変化による産業全般の活動レベルの増減は、エネルギー消費や GHG 排出を考える場合、無視できないインパクトを持つ場合がある。しかし、本研究のねらいは、様々に輸送条件を変化させた場合に、同じ量のユニットロードを輸送する場合に環境負荷がどのように変化するかを推計することであり、さらには、それらの結果を考慮に入れることで、ユニットロード輸送という単位でよりよい条件を選択することができるようにすることである。したがって、産業全般の活動レベルの変化による環境負荷の変化は、必要があれば、別途の推計体系によって推計を行うものと想定する。ただし、貨物量予測の段階で、そうした要素が必要に応じて考慮されるので、考慮されている場合は、貨物量を通して環境負荷推計に輸送条件の変化による産業全般の活動量の変化が考慮されることになる。

こうした考え方は、新たな知見やシステム解析の結果、必要があれば見直していかなければならないものである。

3.4 環境負荷の算法

環境負荷の算法は、目的に応じていくつかの考え方がある。一つは、京都議定書のわが国の GHG の削減目標の達成状況を把握するために、日本という国を単位として CO2 排出量を推計するという目的が存在する。このためには、各国間で対等な条件となるように、その推計は世界共通の推計ルールに従わなければならない。この場合、全国の CO2 排出総量をできるだけ精度良く見積もることが重要だが、CO2 排出量とそれを引き起こす最終消費活動との関係を知ることは重要でないため、二重計上が発生しにくく、国境の内外の仕分けを明確に行うことが出来る発生源となる財・サービスの投入量と各財・サービスの生産過程から直接排出される環境負荷の発生関数から排出量を推計する方法がとられる。このような方法は、環境負荷の発生段階で環境負荷を推計する方法であり、これを発生ベースの環境負荷推定方法と呼ぶ。

第二の目的は、個別の財・サービスの消費に対して、その財・サービスを生み出すために必要とされる全ての生産過程における環境負荷の総発生量を推計するというものである。このような推計アプローチを最終消費ベースの環境負荷推定方法と呼ぶ。このために、環境負荷を見積もろうとする財・サービスについて全ての主要な生産過程をリストアップし、各生産過程における財・サービスの投入・産出量を見積もり、同時に、各生産過程における環境負荷の発生関数を推定し、投入・産出量と環境負荷発生関数から環境負荷量を見積もり、それらを合

算することによって環境負荷の総発生量を求めるといった方法がとられる。このような方法が積上げ法である。この方法は、生産過程が数少なければ、対象とする財・サービスの各生産過程における投入・産出量と環境負荷発生関数をかなり精度よく求めることが可能であるが、多くの場合は生産過程が多岐にわたり複雑であるため、各生産過程のリストアップ、投入・産出量の見積もり、環境負荷発生関数の推定が、対象とする財・サービス固有のものとして行うことは困難である。このため、多くの仮定を導入した一般的な生産過程とその連関を想定して投入・産出量の見積もりや環境負荷の発生関数が求められる。このため、この方法では、推定精度がどうしても低いものになってしまう。このような手法の代表的なものが産業連関表モデルを用いた推計法であり、産業連関法と呼ばれる。

環境負荷量の推定のための算法の特質と使用目的は概ね以上のとおりである。以上説明した積上げ法と産業連関法にハイブリッド法を加えて、以下に内容を詳述する。

(1) 積上げ法

環境負荷量を求めようとする財・サービスを生産するために必要とされる財・サービスと生産過程をリストアップして各生産過程における生産活動量を求め、生産活動量に対する環境負荷の発生関数を求め、それらにより各生産過程から直接発生する環境負荷発生量を求め、財・サービスの生産段階の環境負荷発生量とする。生産段階を最終製造工程や完成品の輸送だけではなく、部品や装置の運搬、部品や装置の製造、材料の運搬、材料の製造、原料の運搬、原料の採取等の関連する生産過程全てに遡って環境負荷発生量を求める。さらに、使用後の廃棄の過程における環境負荷発生量を推計し、それらを全て合算することによって、対象とする財・サービスのライフサイクル全体の環境負荷発生量を推計するのが、積上げ法である。

この方法は、直感的に理解しやすく、どのような対象物にも適用可能である。しかし、材料や装置の製造などの上流段階や廃棄などの下流段階の全てに遡及して計算するためには、膨大な積上げ作業を必要とし、現実には計算が困難である。また、計算結果が無数の助変数の設定如何によって大きく変化し、結果に安定性がないことが問題点である(森本一史, 1995)という指摘がある。他方、信頼性の高い財・サービスの投入・産出量の推定関数や環境負荷の発生関数を詳細に整備することができれば、全ての製造・廃棄過程を対象とすることはできないが、選定された製造・廃棄過程に対しては、それら関数を使って注目する条件変化をきめ細かく、しかも他の

手法に比べて精度良く推定することができる優れた方法である。

また、CDM (Clean Development Mechanism) や JI (Joint Implementation) などの排出権の移転もしくは取引を行うための排出量の計測 (例えば、地球環境センター、2003) においては、積上げ法が指向される傾向があるように見える。これは、全ての製造・使用・廃棄過程を捕捉するのは難しいものの、選定した対象過程については、財・サービスの投入・産出量や GHG の排出量の推計・検証が比較的精度よく行うことが求められているためであると考えられる。

(2) 産業連関法

産業間の原材料や中間製品の流れを取引の金額や物量として示した表である産業連関表を用いて、環境負荷量を求めようとする財・サービスの生産のために動員された各産業の生産活動量を求め (Leontief, W. W., 1966), それをもとに環境負荷の発生関数から環境負荷量を求めるのが産業連関法である。各産業の環境負荷量は各産業の生産活動量に比例し、各産業の生産活動量は各産業の生産額に比例すると考えれば、次の関係が成立する。

$$E = e \cdot X \tag{1}$$

ここで、 E は環境負荷量、 e は各産業部門から直接発生する環境負荷量を生産額で除した係数 (以下、「直接環境負荷原単位」という。) を要素とする行ベクトル (以下、「環境負荷原単位ベクトル」という。), X は産業部門ごとの生産額を要素とする列ベクトル (以下、「生産額ベクトル」という。) である。また、生産は最終消費と次式の関係にある。

$$X = A \cdot X + F \tag{2}$$

ここで、 A は産業部門間の投入係数の行列 (以下、「投入係数行列」という。), F は産業部門ごとの最終消費額を要素とする列ベクトル (以下、「最終消費ベクトル」という。) である。この関係から、最終消費による生産誘発が全て国内に生じるという仮定を置くと、生産と最終消費の関係は、

$$X = (I - A)^{-1} \cdot F \tag{3}$$

となる。これは最終諸費に対して誘発される生産の関係を示している関係式であるが、見方を変え、最終消費とそれをもたらすために動員された生産関係を示している関係式となる。このモデルを I-A 型という。これを

式(1)に代入すると、

$$E = e \cdot (I - A)^{-1} \cdot F \tag{4}$$

となり、これにより環境負荷量を推計することができる。この中で、 $e \cdot (I - A)^{-1}$ が動員された生産分を含む環境負荷原単位ベクトルとなる。この場合は、全ての動員された生産が産業連関表の関係が成り立つ地域内で行われているという状態を想定していることになる。国ベースの産業連関表を使用している場合は、全ての動員された生産が国内で行われる、あるいは、国外で動員された生産の構造が国内と同じと仮定して、国外で動員された生産までを含めて、環境負荷量を推計しているとみることができる。この場合、ほとんどの財・サービスが輸入されている産業部門は、輸入品の産業連関関係が国内のものと大きく異なり、全体として生産動員の大きさを大きく見誤る可能性がある。このため、公表されている環境負荷原単位の中には、ほとんどが輸入である産業部門については、輸入元での投入産出関係を調査・想定し、補正を行ったうえで、環境負荷原単位を作成しているものがある (本藤祐樹ら、2001; 南齊規介ら、2002; 日本建築学会、2003 など)。

輸出入が存在する状況のもとで、国内分の生産動員を推計する場合は、国内需要と輸入を分けて処理するか、輸入が国内需要に比例すると仮定して処理するのが一般的である。輸入が国内需要に比例すると考える場合、国内生産、国内最終消費、輸出および輸入の関係は、

$$X = A \cdot X + F_D + F_E - m \cdot (A \cdot X + F_D) \tag{5}$$

となり、国内生産は、

$$X = \{I - (I - m) \cdot A\}^{-1} \cdot \{(I - m) \cdot F_D + F_E\} \tag{6}$$

となる。ここで、 m は産業部門別の国内需要額に対する輸入額の比率を対角成分とする行列 (以下、「輸入係数ベクトル」という。), F_D は産業部門ごとの国内最終消費額を要素とする列ベクトル (以下、「国内最終消費ベクトル」という。), F_E 産業部門ごとの輸出額を要素とする列ベクトル (以下、「輸出ベクトル」という。) である。このときの環境負荷量の推計式は、

$$E = e \cdot \{I - (I - m) \cdot A\}^{-1} \cdot \{(I - m) \cdot F_D + F_E\} \tag{7}$$

となる。このモデルは I-(I-m)A 型といわれる。

国内の生産動員を求める別の方法は、国内分と輸入分を分けた投入係数行列を使用することである。この場合の国内生産、国内最終消費および輸入の関係は、

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}_d \cdot \mathbf{X} + \mathbf{F}_d \quad (8a)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}_m \cdot \mathbf{X} + \mathbf{F}_m \quad (8b)$$

となる。このとき、投入係数行列及び最終消費ベクトルに関して次の関係が成り立つ。

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_d + \mathbf{A}_m \quad (8c)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_m \quad (8d)$$

これらの関係が成り立つとき、国内生産は、

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}_d)^{-1} \cdot \mathbf{F}_d \quad (9)$$

となる。ここで、 \mathbf{M} は輸入品の産業部門ごとの輸入額列ベクトル（以下、「輸入ベクトル」という。）、 \mathbf{A}_d は国内品の産業部門間の投入係数の行列（以下、「国内品投入係数行列」という。）、 \mathbf{A}_m は輸入品の産業部門間の投入係数の行列（以下、「輸入品投入係数行列」という。）、 \mathbf{F}_d は国内品の産業部門ごとの最終消費額を要素とする列ベクトル（以下、「国内品最終消費ベクトル」という。）、 \mathbf{F}_m は輸入品の国内における産業部門ごとの最終消費額を要素とする列ベクトル（以下、「輸入品最終消費ベクトル」という。）である。このときの環境負荷量の推計式は、

$$\mathbf{E} = \mathbf{e} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A}_d)^{-1} \cdot \mathbf{F}_d \quad (10)$$

となる。このモデルは I- \mathbf{A}_d 型といわれる。

式(4)、(7)もしくは(10)のように投入係数行列を使って、動員された全ての生産によって発生する環境負荷量を推計する手法が産業連関法である。I-(I-m)A 型や I- \mathbf{A}_d 型の条件では、輸入分の生産動員を除外して産業部門ごとの生産動員を求めるため、I-A 型と比べて輸入の分だけ環境負荷量が小さく見積られる。

京都議定書による GHG の削減目標を達成しようとする対策を検討する場合のように、国内で動員される全ての生産によって発生する環境負荷量を推定しようとするときは、I-(I-m)A 型や I- \mathbf{A}_d 型を使用して国内発生分を推定することが妥当となる。環境負荷の発生場所を国内に

限定しない場合には、I-A 型を使用するか、I-(I-m)A 型か I- \mathbf{A}_d 型に輸入の分の生産動員を別途追加することになる。輸入の分を別途推計して環境負荷原単位を求める方法の一つに、外岡豊・伊加賀俊治 (2003) の方法がある。

この方法は、まず、輸入品の投入係数行列 \mathbf{A}_m を、国産品と同じとみなせる部分の投入係数行列 \mathbf{A}'_m と国産品がほとんどないため、海外事情の調査から求められる投入係数行列 \mathbf{A}''_m に分割する。同様に輸入ベクトル \mathbf{M} もそれぞれ対応する二つのベクトル \mathbf{M}' および \mathbf{M}'' に分割し、輸入品の最終消費ベクトル \mathbf{F}_m もそれぞれ対応する二つのベクトル \mathbf{F}'_m および \mathbf{F}''_m に分割する。このとき、投入係数行列及び最終消費ベクトルに関して次の関係が成り立つ。

$$\mathbf{M}' = \mathbf{A}'_m \cdot \mathbf{X} + \mathbf{F}'_m \quad (11a)$$

$$\mathbf{M}'' = \mathbf{A}''_m \cdot \mathbf{X} + \mathbf{F}''_m \quad (11b)$$

$$\mathbf{A}_m = \mathbf{A}'_m + \mathbf{A}''_m \quad (11c)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}' + \mathbf{M}'' \quad (11d)$$

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}'_m + \mathbf{F}''_m \quad (11e)$$

さらに、わが国の場合、国産品のない財・サービスは原料であるため、

$$\mathbf{O} = \mathbf{F}''_m \quad (12)$$

が成立する。

これら整理の下では、式(8a)と式(11a)から国内生産に関し、

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}_d + \mathbf{A}'_m) \cdot \mathbf{X} + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}'_m - \mathbf{M}' \quad (13)$$

が成立するので、国内生産は、

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}_d - \mathbf{A}'_m)^{-1} \cdot (\mathbf{F} - \mathbf{M}') \quad (14)$$

となる。また、国産品のない輸入は、

$$\mathbf{M}'' = \mathbf{A}''_m \cdot \mathbf{X} \quad (15)$$

であるから、国産品のない輸入の輸入額あたりの環境負

荷量を要素とする行ベクトルを e^m とすると、輸入品の直接環境負荷原単位が国内と異なると考えた場合の環境負荷量は、

$$E = (e + e^m \cdot A^m) \cdot (I - A_d - A^m)^{-1} \cdot (F - M) \quad (16)$$

となる。これは、輸入係数行列 m を、国産品と同じとみなせる輸入品の輸入係数行列 m' と国産品がほとんどない輸入品の輸入係数行列 m'' に分割すれば、 A_d を $(I - m)A$ 、 A^m を $m'A$ 、 A^m を $m''A$ と置き換えると競争輸入型に変換することができる。

$I - A_d$ 型は、どの需要部門でも国産分と輸入分が実際の割合で分けられているため、実態をより正確に反映している。しかし、国産品を使うか輸入品を使うかはかなり流動的なため、投入係数の経年的な安定性が低いという問題点を持つ。 $I - (I - m)A$ 型は、需要部門ごとに輸入係数を定めていないのが問題だが、逆にその分安定的で、最も多く使われている。どの型を用いた環境負荷原単位を使用するかは、使用目的に応じて適切に選択される必要がある。

産業連関法は、産業連関表のデータがそのまま利用できるもので、作業に要する労力は際限のないものにはならない。しかし、商品の分類の数が 500 以下であるので、適切な分類が得られなかったり、各部門ごとの平均値しか得られなかったりする。このため、分類にある部門を単位とする平均的な産業構造のもとに製造された財・サービスであればよいが、それと大きくかけ離れた財・サービスである場合は、結果を大きく見誤ることになる。また、新技術やリサイクルのような産業として実績のない産業構造を前提とした財の分析は不可能である（森本一史，1995）。あるいは、産業もしくは財・サービスの分類が制限されるため、産業や財・サービスの分類以下の細目の違いによる変化を比較することができない。さらには、産業連関法は投入と産出に需要変化を駆動力とする比例関係の生産波及を前提としているが、在庫が積み上がっていたり、生産力が限界に達していたりして、ただちには生産拡大が起こらない、さらには、その間にデマンド・プルによる価格上昇により、財・サービスの代替が起こったりしてしまうなどと言った場合があり、産業連関法はそれらを正しく推計することができない（宮沢健一，1995）という欠点を持っている。このような論議は、生産波及による生産の拡大を予測する際の議論である。LCI 分析の場合には、生産が誘発されるかどうかではなく、環境負荷を求めようとする最終需要に対してどの部門の生産がどの程度動員されるかが問題であ

る。このため、積み上がった在庫による生産波及の中断に対する考え方は異なる。在庫が積み上がっている場合には、需要の増大による生産波及は確かに中断し生産拡大は起こらない。しかし、積み上がった在庫を生産するために過去において生産が動員されていて、それに伴って環境負荷を生じさせているので、環境負荷量を求めようとする財・サービスの需要によって引き起こされる環境負荷量という意味では、生産動員が起こっていると考えられることになる。見方を替えて、過去に生じた環境負荷は元に戻らないのだから、埋没したものと考えて、新たに生じる環境負荷のみを推計するという考え方もある。この場合は、単純な比例モデルでは対応できなくなることもあり、本研究では、遠くない過去に発生した環境負荷を、将来発生する環境負荷と同等に取り扱うという立場をとることにする。

環境負荷量を求めようとする財・サービスは、今後発生する需要である場合もあるし、既に消費された財・サービスである場合もある。既に消費された財・サービスの場合は、それを生産するため動員されたであろう全ての生産に伴って発生した環境負荷量を推計するものである。産業連関法の算法は今後発生する需要についての算法と同じである。ただし、既に生産された財・サービスについての生産動員を見積もることになるため、生産能力の制約による生産波及の中断という問題は生じ得ない。それでも、副生成物の使用がある場合の環境負荷量や交通量が変化する場合の道路関係の環境負荷量などは、生産動員が中断するので現実とモデルが乖離することになる。

例えば、道路関係の環境負荷を推計するとき、交通量が減れば自動車の走行に関する環境負荷量は減少するが、道路に関する環境負荷量は道路を建設しないという状態を考えない限りほとんど減少することはない。こうした部分を全てシステム境界内として産業連関法を用いて環境負荷量を推計すると、道路関連の環境負荷量も交通量の変化にあわせて増減してしまうことになり、現実と乖離した推計をしてしまうことになる。このような生産動員の中断は程度の大小はあってもシステム境界内の各所に存在し、それを逐一同定してモデルを修正するという事は難しい。こうした問題への現実的な対処としては、道路関係の環境負荷のような大規模かつ明白な生産動員の中断は予めシステム境界の外とし、システム境界内で産業連関法を適用し、Comparative LCI 分析を行うという方法がある（例えば、加藤博和・大浦雅幸（2000））。これが、このような問題に対する一つの現実的な割り切りであると考えられる。

こうした問題はあるものの、投入係数行列に基づく産業連関関係によって表現された範囲内では、理論上、無限に近い生産動員の連鎖を全て考慮して環境負荷を推定していることになるという利点を持つため、際限のない積上げ作業をしないで済むという長所を持つ。

以上の方法は、財・サービスを生産するまでの生産動員を推定し、それによる環境負荷を推定するものである。このため、生産された財・サービスが最終消費されるためには、生産された場所から消費される場所までの輸送がなされなければならない。この輸送過程における環境負荷量は、具体的な生産地点と消費地点を設定し、輸送方法を設定することにより、個別具体的に推計することが望ましい。しかし、計画の初期の段階では、一般に生産地点や輸送方法を特定することが困難であるため、標準的な輸送による環境負荷量を求めておくことが必要である。このため、産業連関表取引基本表の需要合計欄に記載された品目ごとの各流通産業への投入金額に、当該部門の生産者価格あたりの環境負荷原単位を乗じて集計すること（外岡豊・伊加賀俊治，2003）などにより、製品の輸送段階での環境負荷原単位を求めるといった方法がとられる場合がある。

1995年の産業連関表から作成された環境負荷原単位は、国立環境研究所（南齋規介ら，2002）、日本建築学会（2003）などから公表されているため、原単位はそれらの中から適当なものを選んで使用するものとし、ここでは環境負荷原単位の算出は行わない。

(3) ハイブリッド法

積上げ法を行う場合、動員される全ての部門の生産に伴う環境負荷を見積もることは事実上不可能である。一方、産業連関法では、産業部門や製品分類の数が限られているため、評価したい要素の違いを見ることができない場合がかなりある。このため、ある部分については環境負荷量を求めようとする財・サービスの固有のデータに基づく生産動員を見積もり、ある部分については産業連関表からえられるモデル的な産業間の投入関係から生産動員を見積もり、それらを組み合わせる用い、その結果に環境負荷原単位を乗じる方法がとられる。これがハイブリッド法と呼ばれるものである。ハイブリッド法の建設プロジェクトへの適用方法の例としては、各産業の最終需要1単位あたりに動員されるすべての生産に伴い発生する環境負荷量を求め、これを建設に要する材料や工事金額を乗じることによって建設プロジェクト全体の環境負荷量とするという方法がある（井村秀文，2001）。この方法は、積上げ法と産業連関法の欠点を補い、作業量を抑えつつ目的とする条件の違いによる環境負荷量の

違いをみることができるため、広く用いられている。積上げ法や産業連関法の単独使用では、作業量が膨大になってしまうことや必要な計画条件の変化に伴う環境負荷量の変化が検知できないことがあるため、本研究ではハイブリッド法を用いることを基本に考える。

3.5 輸送の基本条件

ユニットロードの輸送をモデル化するにあたり、モデルの複雑化を軽減するため、輸送に関して次の仮定を置く。

①20ft コンテナと40ft コンテナの個数の比率は、輸送の全ての局面で一定である。

②実コンテナ1個あたりの総重量（積載されている貨物の重量にコンテナの自重を加えた重量）と空コンテナ1個あたりの総重量、実セミトレーラー1台の総重量（積載されている貨物の重量にセミトレーラーの自重を加えた重量）と空セミトレーラー1台の総重量は、全ての局面で一定である。

①の仮定により、コンテナのTEUと個数は比例関係となり、TEUもしくは個数の比率を使う場合は、どちらで計算しても違いがなくなる。また、①と②の仮定を組み合わせることにより、20ft コンテナと40ft コンテナを併せたコンテナの1個あたりの平均総重量は一定となり、総重量を考える場合は、20ftと40ftを分けて考える必要がなくなる。

ところで、対象貨物の寄与分を見積もる際に、考えるべき貨物の量を表現する尺度は大きく分けて二つある。一つは重量で表現する方法である。この方法の中でも、フレートトンかメトリックトンか、貨物の重量かユニットロードの総重量かというバリエーションがある。一般に、モノを動かす過程においては、仕事量に応じてエネルギーを消費し、それに伴ってCO2を排出するため、メトリックトンベースのユニットロードの総重量が環境負荷の大きさを規定する。もう一つの表現方法は、ユニットロードの個数で貨物の量を表現する方法である。この方法も、単純な個数なのかTEUのような大きさを調整した個数なのかというバリエーションがある。施設の損耗を考える場合は、クレーンのように各ユニットロードを動かす仕事量に対応して損耗が生じると考えられる場合は、ユニットロードの総重量が意味を持つが、岸壁のようにユニットロードの総重量に起因する損耗よりも材料の劣化等による損耗のほうが支配的な場合には、対象とするユニットロード輸送のために占有する空間や時間が規定要因となる。このように占有空間や占有時間が対象施設の損耗を規定するような場合には、ユニットロード

の個数が占有空間や占有時間と概ね比例すると考えられるため、ユニットロードの個数が規定要因になっていると考えることができる。したがって、これらの尺度は、環境負荷の性質に応じて使い分けることになる。

なお、貨物を積載したユニットロードの総重量と空のユニットロードの総重量の間には、次の関係が成り立つ。

$$WC_{mi} = WC_{sekisai} + WC_{kara} \quad (17)$$

ここで、 WC_{mi} は貨物を積載したユニットロード 1 個あたりの総重量 (t)、 $WC_{sekisai}$ はユニットロード 1 個あたりの積載貨物の重量 (t)、 WC_{kara} は空ユニットロード 1 個あたりの総重量 (t) である。

コンテナ船の場合には、TEU とコンテナの個数といった単位が用いられ、両者の間には次の関係が成り立つ。

$$TEU = (2 - KC_{20}) \cdot NC \quad (18)$$

ここで、 TEU はコンテナの 20ft 換算個数 (TEU)、 KC_{20} は 20ft コンテナの占める個数割合、 NC はコンテナの個数である。

港湾の計画に用いられる貨物量の単位はフレートトンであるが、ここで用いる貨物の重量はメトリックトンである。そのため、フレートトンとメトリックトンに換算する必要がある。

コンテナ船の場合は、予めコンテナの個数を求めておいて、それとコンテナ 1 個あたりの貨物の積載重量からメトリックトンを求める方法が考えられる。RO-RO 船の場合は、車両台数を求めておいて、それと貨物を積載した車両 1 台あたりの貨物の積載重量から次式の関係を用いてメトリックトンに換算する方法が考えられる。

$$W = WC_{sekisai} \cdot NC_{mi} \quad (19)$$

ここで、 W は輸送される貨物の重量 (t)、 $WC_{sekisai}$ はコンテナ 1 個、セミトレーラー 1 台もしくはトラック 1 台あたりの積載貨物の平均重量 (t)、 NC_{mi} は貨物を積載したコンテナ、セミトレーラーもしくはトラックの個数もしくは台数である。

また、各油種の燃料油の比重、発熱量および CO₂ の直接排出係数は表-2 のとおりである。

表-2 燃料油の密度、標準発熱量および CO₂ 排出係数

油種	密度 (kg/l)	標準発熱量 (MJ/l)	CO ₂ 排出係数 (g-C/l)
A 重油	0.84	39.1	739.0
C 重油	0.93	41.7	814.8
軽油	0.83	38.2	734.2
ガソリン	0.78	34.6	632.8

注 1) ガソリンの密度は JIS K2202 の上限値、その他の密度は公害研究対策センター (2000) より。

注 2) 標準発熱量は資源エネルギー庁総合政策課 (2002) より。

注 3) CO₂ 直接排出係数は日本国政府 (1994) より

以上の仮定や換算方法は、大きく環境負荷を把握するためには概ね妥当なものであると思われるが、実例を用いた試行過程で鋭敏な感度を有していることが発見されたり、輸送の仕方が変化したりした場合などには、適切に見直しが行われなければならないものである。

4. 海上輸送モデル

八島弘倫ら (1997) は、日本発着貨物を輸送するために外航海運が消費する 1994 年のエネルギーを推計し、それが日本国内の全エネルギーの 7.6% に相当することを示した。そして、それは世界の全エネルギーに対する外航海運の消費量の 1.4% と比べると極めて高い値であり、貿易に依存する日本の経済構造の反映であるとしている。この推計では日本発着貨物の輸送のために船舶が消費するエネルギーを全て日本に帰属するものとして計算しているが、日本の輸入は相手国の輸出でもあることを考えると、両国に負荷を配分する必要がある。このため、大雑把に見てエネルギー消費量を 1/2 にしてみる必要がある。そうであっても日本の外航海運の消費エネルギーの比率は、世界の比率の約 2 倍である。

IPPC のルールでは外航海運による CO₂ 排出量は各国の排出量に算入しないことになっている (IPPC, 1996) ので、京都議定書の CO₂ 排出削減目標と比較するために排出量を推計する場合は、外航海運の CO₂ 排出量を推計する必要はない。しかし、地球温暖化を防ぐもしくは緩和するためには、各国の排出量への算入対象となっていない外航海運であっても CO₂ の排出量を推計し、その削減努力をすることは重要である。

海上輸送に伴う環境負荷量を推定するためのモデルを構築する際の基本的な考え方を整理する。

ユニットロードの海上輸送で使用する船舶の種類は幾つかあるが、外貨貨物は船上クレーンを持たない LOLO タイプのフルコンテナ船で輸送されるものが大宗を占めるため、外貨貨物は船上クレーンを持たない LOLO タイプのフルコンテナ船 (以下、単に「コンテナ船」という。)

によって輸送されるものを対象とする。内貿貨物はフェリーによる輸送が最も多いが、規制緩和が進展する中でRORO貨物船（以下、単に「RORO船」という。）による輸送の拡大が期待されるため、内貿貨物はRORO船によって輸送されるものを対象とする。RORO船による貨物輸送では、陸上用セミトレーラーのトレーラー部分だけを船舶に積載するのが最も効率が良い、一般的であるため、そのような輸送形態を想定する。

ある船舶に着目すると、その船舶の航路は一つのループを形成し、そのループの中をぐるぐると回り続けていることが分かる。例えば、図-4のようにA港、B港、C港の3港を貨物輸送のサービス対象とする海上輸送ネットワークを考えれば、ある船がA港→B港→C港→A港という順番で寄港し、それを繰り返す。それは、 f_{AB} 、 f_{BC} 、 f_{CA} という三角形のループの中を回転するという形に、船舶の運航をモデル化することができる。現実の船舶の運航モデルは、この三角形のモデルをもとに、寄港港湾数を増やしたり減らしたりするとともに、同航路上に投入される船舶の数を変化させることによって作り出すことができる。

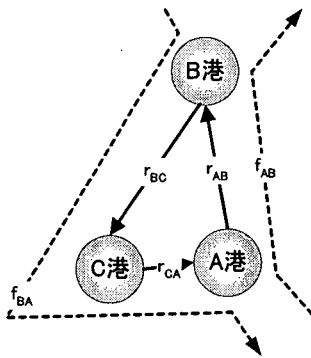


図-4 ループモデルの説明図

これに対して、分析の対象範囲が特定の埠頭を通過する雑貨の発地から着地までの一連の輸送になるため、それに対応する海上輸送が海上モデルの対象となる。分析対象とする特定の埠頭とは、ただ一つの埠頭である場合もあるし、単一港の複数埠頭である場合もあるし、複数港の複数の埠頭である場合もある。これらに対応する海上輸送は、複数の航路による海上輸送サービスが組み合わせられたものであるから、一つのループからなる海上輸送パターン・モデルを複数作成し、それらを組み合わせることによって、分析の対象となる全ての航路を表現することができる。

対象とする貨物は、海上輸送の多重ループ上の一部の

ルートを使って船積み港から陸揚げ港に輸送される。図-4の場合で考えれば、A港からB港に貨物が輸送される場合は、 f_{AB} のルートを輸送される。これに対して、B港からA港へという逆の荷動きの場合には、一般には逆回りのループがないので、別のルートで輸送される。図-4の場合は、B港からA港に輸送される場合は、B港→C港→A港のルート、つまり f_{BA} で輸送される。従って、これらの同じ港間の2方向の貨物輸送は、起終点だけで見れば同じ距離を貨物が移動しているのだが、実際の貨物の移動距離は大きく異なる。

これに対して、それぞれの海上輸送ループはループごとの一つのシステムを構成していて全体として機能していて分割不可能だと考えれば、同一の海上輸送ループを使う全ての貨物輸送は、基本輸送単位ごとに等しい環境負荷寄与分を持つと考えることもできる。この場合は、（発港と着港の間の海上距離）×（貨物重量）で定義されるトンキロを輸送活動量の単位として、海上輸送ループからでてくる環境負荷を配分するのが一般的なので、海上輸送ループごとにトンキロ当たりの環境負荷、つまり環境負荷原単位をトンキロに乗じることによって環境負荷の総量を推計することになる。この概念をさらに押し進めて、全ての海上輸送ループは全体として一つの輸送システムを形成し、それを部分に分割して環境負荷を考慮することができないと考えると、海上輸送全体で原単位を作成し、基本輸送単位で計られる輸送量をそれに乗じることによって環境負荷を推計することになる。全海上輸送ループを一つの分割不可能な輸送システムと捉えた場合、船舶の大きさ、速度、運航ルートが変化した場合の原単位の変化を検出することができない。また、海上輸送ループ単位で原単位を作成する場合は、海上輸送ループごとに全貨物の輸送量を把握・推定しなければならなくなり、作業量が膨大となる。このため、前述のとおり、海上輸送ループのうち関連する一部を取り出し、そこでの対象貨物の移動を考え、各リンクおよびノードごとに対象貨物分の環境負荷を割り当てるという方法のほうが汎用性があり現実的であると考えられる。

対象とする全ての起終点の貨物輸送を、海上輸送の多重ループに全て当てはめて、対象とする環境負荷を計算し、それを集計することにより、海上輸送による環境負荷の総和を求めることができる。このようなモデルを、「多重ループモデル」と呼ぶこととする。

輸送ルートは前述の方法でほぼ完全に表現することができるが、必ずしも、全ての航路をループとしてモデル化する必要がない場合がある。例えば、対象とする港がフィーダー港で、本船の寄港する港までフィーダー輸送

をし、その本船寄港港で本船に積み替えてコンテナ輸送をしていたもの(図-5)が、対象港が本船寄港港となる場合(図-6)に、対象とする貨物輸送をKK港と欧州としていると仮定すると、港湾プロジェクトの with と without のケース間で海上輸送の変化がある部分は、without のKK港とP港の間のフィーダー輸送とP港からK港への本船輸送に対して、with のP港からKK港、KK港からK港への本船輸送である。つまり、この部分だけを計算すれば、両ケースの比較を行うことが可能である。

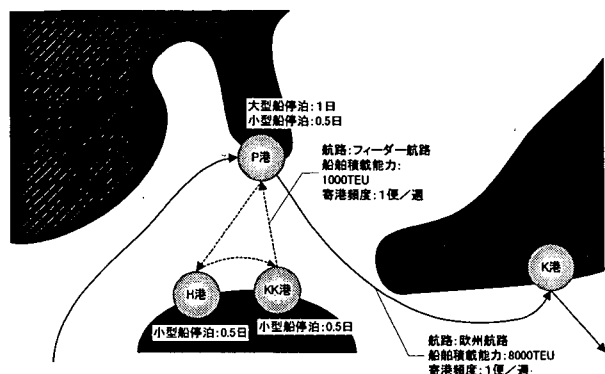


図-5 開ルート・モデル説明図 (without)

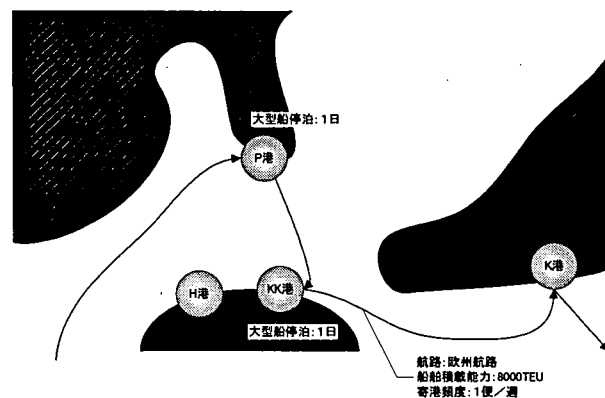


図-6 開ルート・モデル説明図 (with)

このような場合に、欧州まで含めてモデル化をすると、環境負荷の推定量の絶対値の精度が高まり、想定外のケースと比較できる可能性が高まるものの、算定される without と with の間の環境負荷量の差に違いが生じないにもかかわらず、環境負荷量推定のための作業量が著しく大きくなり、検討作業の負荷を著しく増大させてしまう。これは、実用上、望ましいことではない。

次に、このモデルにおいて、対象とする貨物輸送に、船舶からの環境負荷をどのように配分するかを整理する。船舶は貨物を輸送するために航行する。航行のための推

力を得るためにエネルギーを消費し、船舶を建造するためエネルギーを消費し、それらに伴い CO2 を排出する。これは、あくまでも船舶1隻を単位としてエネルギーを消費し、CO2 を排出しているの、そのどれだけの割合が、対象とする貨物輸送の寄与によるものかを整理しておかなければならない。最も大括りの整理は、船舶1隻から生じる環境負荷量に対する貨物輸送1トンキロの寄与は、Laplace の原理に従い全て等しいと考える方法である。この場合の貨物輸送1トンキロ当たりの環境負荷量は、例えば年間の燃料消費量から年間の環境負荷量を求め、当該船舶が年間に輸送した貨物の総トンキロで除すことにより、求めることができる。それを、対象とする貨物の輸送トンキロに乗ずることにより得られる値を、環境負荷量とする方法である。

製品の LCA などでは、このような方法がとられることが多いが、この方法では、①輸送密度の低い港間の航行による環境負荷が、輸送密度の高い港間の貨物輸送に転嫁されてしまう、②特定の区間の航海や停泊等の条件を変化させた場合の予測が困難である、という欠点がある。港湾のプロジェクトは輸送の条件を変化させるために実施するものなので、そうした影響を十分に分析することができなければ、LCA をやる意味が少なくなってしまう。

そこで、一つの航路ループ(ここでは、開ルートの場合を含めて「航路ループ」と考える。)を単位として整理するのではなく、航路ループを各港間の航海と各港での停泊(ここでは、入出港を「停泊」に含めて考える。)に分割して考える。

なお、ここでは年間航海数を用いて整理を行うため、計算条件を寄港間隔で設定をする場合は、次式の関係を用いて換算するものとする。

$$N^s = \frac{365}{INT^s} \tag{20}$$

ここで、 N^s は航海数《年間》、 INT^s は寄港間隔 (day) である。

4.1 船舶の航海・停泊

船舶による環境負荷は、航行動力、搭載機器動力、厨房・照明等の一般電源を内燃機関を動かして発生し、居住区と燃料の暖房をボイラを燃やすことによって行う。このため、船舶の燃料消費量をまず求め、その燃料消費量によって消費されたエネルギーの量と排出された CO2 の重量を、燃料消費量に原単位を乗じることによって求める。

八島ら(1997)の推計は、外航海運によるエネルギー消費量は、航路別の船舶のDWTを設定し、DWTと主機馬力の関係、主機馬力と燃料消費量の関係、主機馬力と航海速度の関係を使って燃料消費量と航海速度を求め、航路別の貨物量及び航路距離から航路別に年間の燃料消費量を求め、それらから日本発着の貨物量に対するCO2排出量を推計している。この方法は、船舶のDWTを航路別に固定して関係式を作っているため、任意のサイズおよび速度の船舶を仮定して推計を行うことはできない。

公害研究対策センター(2000)の方法による船舶の燃料消費量の推計は、船舶のGTから主機馬力および補機馬力を推定し、それに負荷率と稼働時間を乗じることによって主機及び補機の燃料消費量を求める。そして、GTとボイラ燃料消費量の関係からボイラ燃料消費量を求める。この方法では航行速度の違いを負荷率として与えることになり、航行速度と負荷率の関係が不明確なため使いにくい。この推計方法はもともと停船時および入出港時を対象に作られたものであるため、外洋航海時における航行速度の違いによる環境負荷量の変化を適切に見積もることには向いていない。

コンテナ船の燃料消費のパターンは、大きく、航海時、入出港時、停泊時の3つに分けられる。このうち入出港時は、簡略化のために航海時に含めて整理する。

(1) 航海時

船舶は、燃料の燃焼をシャフトの回転力に変換し、その回転力でスクルーを回し推進力を獲得し、その力を使うことによって、船体が受ける海水の流体抵抗等に抗して船体を移動させている。風による抵抗は通常それほど大きくないため、船舶の航行に必要な単位時間あたりの燃料消費量は、船体が受ける海水の流体抵抗に抗するための単位時間あたりの仕事量に比例する。海水の流体抵抗の主なものには摩擦抵抗と造波抵抗である。摩擦抵抗は、断面積に速度の3乗を乗じたものに比例する。造波抵抗は船長の0.5乗に対して船速が大きくなると急激に大きくなるため、一般に、この値が一定値以下になるように船体は設計されている。このような条件の下では、造波抵抗は、断面積に速度の3乗を乗じたものに概ね比例する。同じ船種の場合、船体形状は概ね相似と考えられるため、断面積は船舶の排水量の2/3乗に比例すると考えられる。また、積載量が変わった場合は、喫水のみが変化するので、断面積は満載排水量に対する航海時排水量の割合に比例する。エンジンの必要馬力はこのほかに、プロペラの推進損失、シャフトの伝達損失、エンジンの熱損失、シーマージンを加えて考えることになるが、これらは推進抵抗、即ち海水の流体抵抗に比例すると考

えられているため、最終的に燃料消費量は海水の流体抵抗に比例する。以上をまとめると船舶の主機の燃料消費量は次式のとおりとなる。

$$FO_{i-j}^{s,nav} = K_{FO}^{s,nav} \cdot (FDT_{i-j}^{s,nav} - (1 - LF_{i-j}^{s,nav}) \cdot DWT_{i-j}^{s,nav}) \cdot (FDT_{i-j}^{s,nav})^{-1/3} \cdot (V_{i-j}^{s,nav})^3 \quad (21)$$

$FO_{i-j}^{s,nav}$ は i 港と j 港の間の船舶の主機の航海時燃料消費量 (kg/h) 《1 航海》、 $K_{FO}^{s,nav}$ は燃料消費係数、 $FDT_{i-j}^{s,nav}$ は船舶の満載排水量 (t) 《1 航海》、 $DWT_{i-j}^{s,nav}$ は船舶の満載積貨重量トン (t) 《1 航海》、 $LF_{i-j}^{s,nav}$ は i 港と j 港の間の消費率 《1 航海》、 $V_{i-j}^{s,nav}$ は i 港と j 港の間の航行速度 (km/h) 《1 航海》である。

この式を仮定し、入手できたコンテナ船の燃料消費量の2003年の実績データおよびRORO船の代替として入手できた2002年のフェリーの設計諸元データから、 $K_{FO}^{s,nav}$ を求めた。結果は表-2、図-7、8のとおりである。

表-3 $K_{FO}^{s,nav}$ の推定結果

船種	$K_{FO}^{s,nav}$	適合指標	N	DWT	Vs	Yb
コンテナ船	53.4×10^{-6}	0.977	25	17,700	25.0	1977
				74,400	42.0	2003
				45,300	35.2	1992
				18,030	4.5	6.76
RORO船	75.1×10^{-6}	0.857	8	734	33.3	1986
				13,068	41.7	2001
				3,539	37.3	1992
				4,159	2.8	5.0

注1) 適合指標は、上段がt値、下段が実績と推計の相関係数である。
 注2) Nはサンプル数、DWTは(t)、Vsは航行速度で(km/h)、Ybは建造年である。
 注3) DWT、VsおよびYbは、上段から順に最小、最大、平均および標準偏差である。

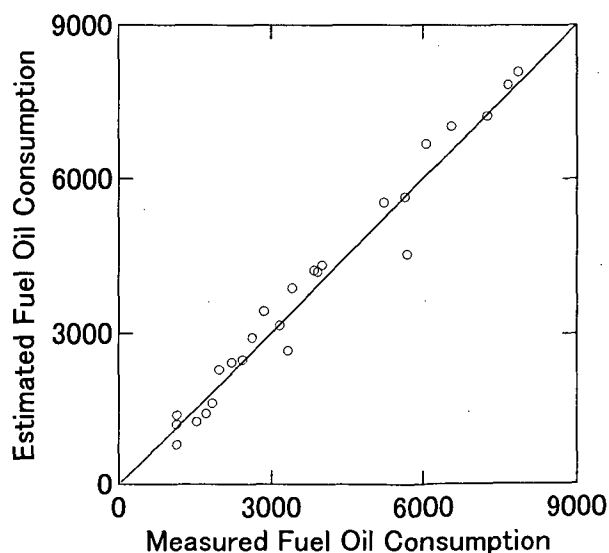


図-7 主機燃料消費量の実測と推定(コンテナ船)

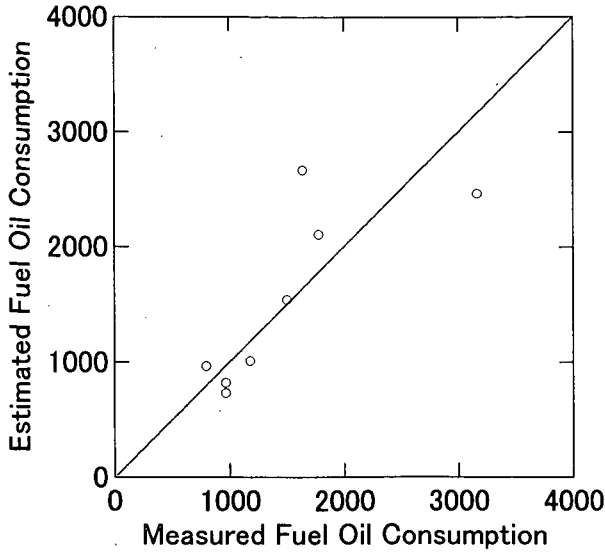


図-8 主機燃料消費量の実測と推定(RORO 船)

経年的な技術の向上を仮定して建造年の指数を式(21)に乗じた式を作成し、実績値と推計値の相関係数を求めるとコンテナ船が0.977, RORO 船が0.924で、式(21)と等しい値となったため、建造年の項を追加した式は採用しなかった。入手したデータには満載排水量がなかったため、赤倉康寛ら(1998)のデータをもとに最小自乗法により DWT と満載排水量の関係式を求め、それによって満載排水量を推定している。DWT (t) と満載排水量 FDT (t) の関係式は、次のとおりである。

(コンテナ船)

$$FDT = 1.37 \cdot DWT + 1660 \quad (22a)$$

(RORO 船)

$$FDT = 1.87 \cdot DWT + 4580 \quad (22b)$$

この関係式を求めるために使用したデータの数はいは11(コンテナ船), 13(RORO 船), 相関係数は1.000(コンテナ船), 0.998(RORO 船)である。また、燃料消費量を分析するために収集した実船データから最小自乗法によって求めた DWT (t) と積載能力 CAPA (TEU) の関係は、次のとおりである。

(コンテナ船)

$$DWT = 10.8 \cdot CAPA + 12400 \quad (23a)$$

使用したデータの数はいは25, 相関係数は0.973である。

また、赤倉ら(1998)のデータから最小自乗法によって求めた GT(t) と DWT(t) の関係は、次の通りである。

(RORO 船)

$$DWT = 0.445 \cdot GT \quad (23b)$$

使用したデータの数はいは13, 相関係数は1.000である。

外航船舶の主機及び補機は、一般に、A 重油および C 重油ともに使用可能である。外洋航海時には、経済的な理由から C 重油が使われ、出入港時には A 重油が使われることが一般的である。ここで求めた $K^{s,nav}_{FO}$ は、そのような場合の実績値をもとにしている。

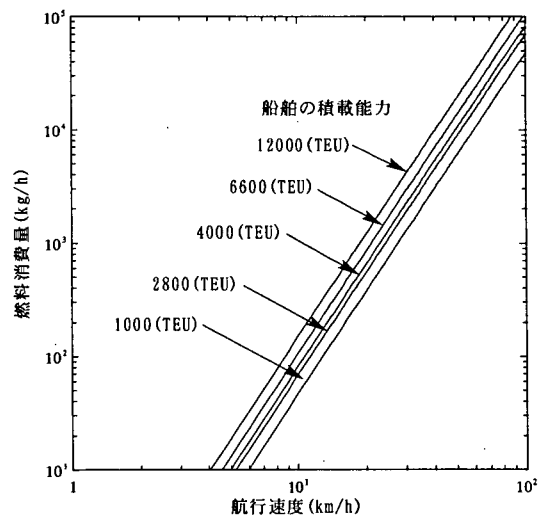


図-9 船舶の主機燃料消費量(コンテナ船)

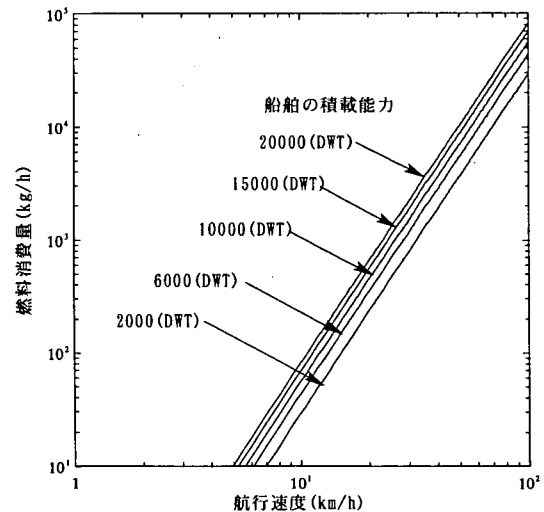


図-10 船舶の主機燃料消費量(RORO 船)

コンテナ船の場合、補機は、搭載機器動力(積荷冷凍・冷却・加温, コンプレッサー等の動力), 厨房・照明等の

一般電源に電力を供給するための装置である。積荷の冷凍・冷却・加温に使われる電力量は主にリーファの数によって変化する。それ以外の電力は安定的に消費される。そこで、コンテナ船の補機の年間平均の燃料消費量とリーファの積載能力 (TEU) の分布から、リーファの積載能力の変化によらない燃料消費量を読み取り、それを一般電源の使用による燃料消費量と考える。リーファの積載能力に対して大きな燃料消費量を示している3サンプルは、リーファの積載率が高い航路に就航しているか、あるいは1970年代に建造された小型の2サンプルはDWTとコンテナ積載能力の関係からみて当初はセミコン船として建造されたと考えられ、サイドスラスタや可変ピッチプロペラの搭載等があり電力を多く消費する設計になっている可能性がある。このためこれら3サンプルを除き、上側包絡直線を引き、その切片を一般電源使用による補機の燃料消費量とする。この方法によって得られた一般電源使用による補機の燃料消費量は、切片が9.33kg/h (t値:12, データ数:6, 実績値と推計値の相関係数:0.995)である(図-11)。また、この直線の傾きからリーファ積載能力1TEUに対する補機の燃料消費量が求められ、それは0.0411kg/h/TEU (t値:21, データ数:6)である。これを使えば、リーファ積載能力が既知であり、リーファ積載量が未知の場合に、この関係を用いて補機の燃料消費量を推計することができる。

リーファ1個の最大電力消費量は40ftコンテナで10年以上前だと12kWh/h(440V)、近年は10kWh/hもしくは8kWh/hといわれている。清水港のコンテナターミナル(袖師埠頭及び興津ふ頭)のリーファプラグの2000年度の平均電力消費量は10.6kWh/h/TEUであった。2004年2月時点の主なディーゼル発電機の製品仕様によれば、単位発電量あたりのC重油消費量は0.170kg/kWhである。発電機の発電効率は、例えば富士電機JEM1354(2極~8極)の場合、定格出力1000kVAで92.8%, 2000kVAで93.8%, 3750kVAで94.1%, 5000kVAで94.3%であり、力率は80%を想定している。このため、発電効率を93%, 力率を80%と仮定すると、リーファのための補機の燃料消費量は2.42kg/h/TEUである。

これに対して、船舶に積載されたリーファは、ホールド内におかれるため、太陽の放射熱を吸収する量が、ヤードにおかれる場合に比べてかなり小さい。このため、補機の燃料消費量から求めたリーファの電力消費量は、積載能力で割っていることもあるが、それを割り引いても、ヤードにおかれた場合に比べかなり小さい値になる。

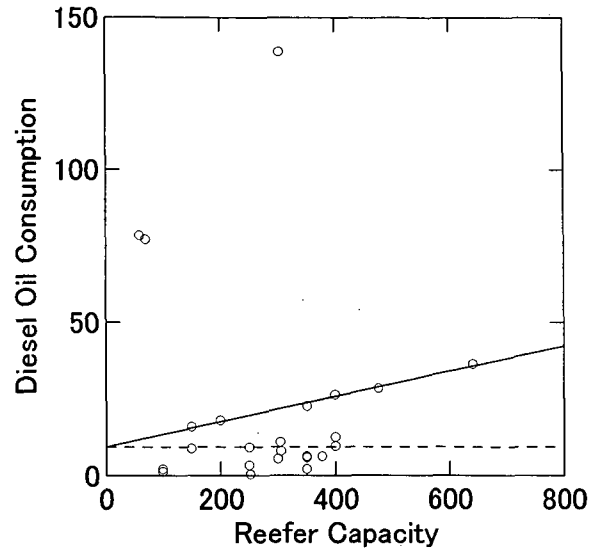


図-11 リーファ積載能力と補機燃料油

RORO船の場合は、データが得られなかったため、コンテナ船の原単位を準用する。冷凍コンテナの燃料消費量は、コンテナ船のリーファの燃料消費量と等しいとみなし、0.0411kg/h/TEUとする。ただしRORO船の場合は、サイドスラスタや可変ピッチプロペラ等が搭載されている可能性があり、コンテナ船の燃料消費傾向と必ずしも一致しない可能性がある。これらの検証と修正は今後の課題である。RORO船で使用するコンテナはセミトレーラーと一体となったもので、いわゆる海上コンテナとは異なり、サイズは一般に最大積載重量で表現されるため、適宜、換算をして用いるものとする。大まかには、大型トレーラーのコンテナ1個は、最大積載重量で見ても海上コンテナの1TEUと概ね等しいと考えることができる。一般電源の使用による燃料消費量は、船舶のサイズによりあまり変化しないため、コンテナ船と同じ2.42kg/hを想定する。以上をまとめると補機の燃料消費量は次式のとおりとなる。

$$DO_{i-j}^{s,nav} = DO_{general}^{s,nav} + DO_{reefer}^{s,nav} \cdot NR_{i-j}^{s,nav} \quad (24)$$

$DO_{i-j}^{s,nav}$ は i 港と j 港の間の補機の航海時燃料消費量 (kg/h) 《1航海》, $DO_{general}^{s,nav}$ は一般電源による燃料消費量 (kg/h) 《1航海》, $DO_{reefer}^{s,nav}$ はリーファによる燃料消費量 (kg/h/TEU) 《1航海》, $NR_{i-j}^{s,nav}$ は i 港から j 港までの間の航海におけるリーファの搭載数量 (TEU) 《1航海》である。

ボイラによる燃料消費量は船舶全体の燃料消費量の

1%に満たない。しかも、近年は排ガスエコマイザの搭載が進み、主機のC重油使用の開始時以外はボイラを使うことはほとんどなくなっている。このため、ボイラによる燃料消費は無視する。

以上をもとに船舶が*i*港から*j*港に航海する際に燃料を燃焼することによって発生する環境負荷量は次のとおりとなる。

$$E_{total,i-j}^{s,nav} = \left(\frac{e_{fuel}^{s,nav}}{\rho_{fuel}^{s,nav}} \cdot FO_{i-j}^{s,nav} + \frac{e_{diesel}^{s,nav}}{\rho_{diesel}^{s,nav}} \cdot DO_{i-j}^{s,nav} \right) \cdot T_{i-j}^{s,nav} \quad (25)$$

ここで、 $E_{total,i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港への航海時の環境負荷量 (kcal, t-c) 《1航海》、 $e_{fuel}^{s,nav}$ は主機の使用燃料の環境負荷原単位 (kcal/l, t-c/kg/l)、 $e_{diesel}^{s,nav}$ は補機の使用燃料の環境負荷原単位 (kcal/l, t-c/kg/l)、 $\rho_{fuel}^{s,nav}$ は主機燃料の密度 (kg/l)、 $\rho_{diesel}^{s,nav}$ は補機燃料の密度 (kg/l)、 $FO_{i-j}^{s,nav}$ は*i*港と*j*港の間の主機の航海時燃料消費量 (kg/h) 《1航海》、 $DO_{i-j}^{s,nav}$ は*i*港と*j*港の間の補機の航海時燃料消費量 (kg/h) 《1航海》、 $T_{i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港への航海時間 (h) 《1航海》である。

航海時間については、次式の関係が成立する。

$$T_{i-j}^{s,nav} = \frac{L_{i-j}^{s,nav}}{V_{i-j}^{s,nav}} \quad (26)$$

ここで、 $T_{i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港への航海時間 (h) 《1航海》、 $L_{i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港への航海距離 (km) 《1航海》、 $V_{i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港への平均航海速度 (km/h) 《1航海》である。実際には、入港時間等の調整のための停泊などを行う場合があるので、この関係が成り立たない場合もある。ここではモデルを単純化するため、沖合での停泊等を考慮する必要がある場合は、その停泊等を適当な港湾における停泊に置き換えて考えるものとする。

各港間の航海時の環境負荷量に対する対象貨物の寄与分は、船舶の寄港ルートが変化し、航海距離や航海速度が変化するような場合においても環境負荷量の変化を検出することができる方法として、各港湾間の船舶運航をそれぞれ一つの分割不可能な輸送単位と考え、(対象ユニットロードの重量/全積載ユニットロードの重量)を対象貨物の寄与率と考える。これらをもとに、対象とする各航海における対象貨物の環境負荷の寄与分を求め、対象とする全ての航海について合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと、次の通りとなる。

$$E_{target}^{s,nav} = \sum_{i \in L^s} \sum_{j \in R^s} \left(E_{total,i-j}^{s,nav} \cdot N^s \cdot \frac{\left(WC_{mi} \cdot NC_{mi,target,i-j}^{s,nav} + WC_{kara} \cdot NC_{kara,target,i-j}^{s,nav} \right)}{\left(WC_{mi} \cdot NC_{mi,total}^{s,nav} + WC_{kara} \cdot NC_{kara,total}^{s,nav} \right)} \right) \quad (27)$$

ここで、 $E_{target}^{s,nav}$ は対象船舶の航海による環境負荷量のうち対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{total,i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港への対象船舶の航海による環境負荷量 (kcal, t-c) 《1航海》、 N^s は航海数 《年間》、 WC_{mi} は貨物を積載したユニットロード 1個あたりの総重量 (t)、 WC_{kara} は空ユニットロード 1個あたりの総重量 (t)、 $NC_{mi,target,i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港までの間を輸送する対象貨物を積載したユニットロードの個数 《1航海》、 $NC_{kara,target,i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港までの間を輸送する空ユニットロードの個数 《1航海》、 $NC_{mi,total}^{s,nav}$ は対象船舶に積載されている貨物を積載したユニットロードの総個数、 $NC_{kara,total}^{s,nav}$ は対象船舶に積載されている空ユニットロードの総個数、 R^s は*i*航路ループにおける対象貨物の輸送に必要な港間の航海の集合、 L^s は対象貨物の輸送に必要な航路ループの集合である。

なお、1航海あたりの対象ユニットロードの数は、次式によって求めることができる。

$$NC_{mi,target,i-j}^{s,nav} = \frac{W_{target,i-j}^{s,nav}}{WC_{seksai} \cdot N^s} \quad (28a)$$

$$NC_{kara,target,i-j}^{s,nav} = NC_{mi,target,i-j}^{s,nav} \cdot KC_{kara,target} \quad (28b)$$

ここで、 $W_{target,i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港の間を輸送される対象貨物の重量 (t) 《年間》、 WC_{seksai} はユニットロード 1個に積載された貨物の重量 (t)、 N^s は航海数 《年間》、 $NC_{mi,target,i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港の間を輸送される対象貨物を積載したユニットロードの個数 《1航海》、 $NC_{kara,target,i-j}^{s,nav}$ は*i*港から*j*港の間を輸送される対象貨物に随伴する空のユニットロードの個数 《1航海》、 $KC_{kara,target}$ は対象貨物に対する対象貨物に随伴する空コンテナの割合もしくは対象貨物のうち帰り荷がない貨物の割合である。

また、1航海あたりの対象船舶のユニットロードの総積載個数は、次式によって求めることができる。

$$NC_{total}^{s,nav} = NC_{capa}^{s,nav} \cdot K_{shoseki}^{s,nav} \quad (28c)$$

ここで、 $NC_{total}^{s,nav}$ は対象船舶におけるユニットロードの積載個数《1航海》、 $NC_{capa}^{s,nav}$ は対象船舶におけるユニットロードの最大積載個数《1航海》、 $K_{shoseki}^{s,nav}$ は対象船舶の平均消席率である。

(2) 停泊時

一般に、停泊時は、主機を停止させ、補機のみを稼働させる。ボイラの燃料消費量は非常に小さいので、計算上は無視する。補機の燃料消費量は、補機の機能からみて航海時と同程度になると考えられるため、次式により推計することができる。

$$DO_j^{s,mor} = DO_{general}^{s,nav} + DO_{reefer}^{s,nav} \cdot \frac{NR_{i-j}^{s,nav} + NR_{j-k}^{s,nav}}{2} \quad (29)$$

$DO_j^{s,mor}$ は j 港における補機の停泊時燃料消費量 (kg/h) 《1停泊》、 $DO_{general}^{s,nav}$ は一般電源による燃料消費量 (kg/h) 《1停泊》、 $DO_{reefer}^{s,nav}$ はリーフアーによる燃料消費量 (kg/h) 《1停泊》、 $NR_{i-j}^{s,nav}$ は i 港から j 港までの間の航海におけるリーフアーの搭載数量 (TEU) 《1停泊》である。

i 港における停泊の際に燃料の燃焼によって発生する環境負荷量は次のとおりとなる。

$$E_{total,i}^{s,mor} = \frac{e_{diesel}^{s,mor}}{\rho_{diesel}^{s,mor}} \cdot DO_i^{s,mor} \cdot T_i^{s,mor} \quad (30)$$

ここで、 $E_{total,i}^{s,mor}$ は i 港における停泊時の燃料消費に伴う環境負荷量 (kcal, t-c) 《1停泊》、 $e_{diesel}^{s,mor}$ は補機の使用燃料の環境負荷原単位 (kcal/l, t-c/kg/l)、 $\rho_{diesel}^{s,mor}$ は補機燃料の密度 (kg/l)、 $DO_i^{s,mor}$ は i 港における補機の停泊時燃料消費量 (kg/h) 《1停泊》、 $T_i^{s,mor}$ は i 港における停泊時間 (h) 《1停泊》である。

各港における停泊時の環境負荷量の対象貨物の寄与分については、航海時と同様の考え方をとる。各港における停泊をそれぞれ一つの分割不可能な輸送単位と考え、

(対象港湾で荷役する対象ユニットロードの個数/対象港湾で荷役する全ユニットロードの個数) を対象貨物の寄与分と考える。これらをもとに、対象とする各停泊における対象貨物の環境負荷の寄与分を求め、対象とする全ての停泊について合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと、次の通りとなる。

$$E_{target}^{s,mor} = \sum_{i \in L} \sum_{i \in R_i^{s,mor}} \left(\frac{E_{total,i}^{s,mor} \cdot N^s}{NC_{mi,target,i}^{s,mor} + NC_{kara,target,i}^{s,mor}} \right) \quad (31)$$

ここで、 $E_{target}^{s,mor}$ は対象船舶の停泊時の燃料消費に伴う環境負荷量のうち対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{total,i}^{s,mor}$ は i 港における対象船舶の停泊時の燃料消費に伴う環境負荷量 (kcal, t-c) 《1停泊》、 N^s は航海数《年間》、 $NC_{mi,target,i}^{s,mor}$ は i 港で対象船舶に荷役する対象貨物を積載したユニットロードの個数《1停泊》、 $NC_{kara,target,i}^{s,mor}$ は i 港で対象船舶に荷役する対象貨物に随伴する空のユニットロードの個数《1停泊》、 $NC_{mi,total,i}^{s,mor}$ は i 港で対象船舶に荷役する貨物を積載したユニットロードの個数《1停泊》、 $NC_{mi,target,i}^{s,mor}$ は i 港で対象船舶に荷役する空のユニットロードの個数《1停泊》、 $R_i^{s,mor}$ は i 航路ループにおける対象貨物の輸送に必要な停泊港の集合、 L^s は対象貨物の輸送に必要な航路ループの集合である。

なお、1停泊あたりの対象貨物に随伴するユニットロードの個数は、次式によって求めることができる。

$$NC_{mi,target,i}^{s,mor} = \frac{W_{target,i}^{s,mor}}{WC_{seksai}} \cdot N^s \quad (32a)$$

$$NC_{kara,target,i}^{s,mor} = NC_{mi,target,i}^{s,mor} \cdot KC_{kara,target,i} \quad (32b)$$

ここで、 $W_{target,i}^{s,mor}$ は i 港で荷役される対象貨物の重量 (t) 《年間》、 WC_{seksai} はユニットロード 1 個に積載された貨物の重量 (t)、 N^s は航海数《年間》、 $NC_{mi,target,i}^{s,mor}$ は i 港で荷役される対象貨物を積載したユニットロードの個数《年間》、 $NC_{kara,target,i}^{s,mor}$ は i 港で荷役される対象貨物に随伴する空のユニットロードの個数《年間》、 $KC_{kara,target,i}$ は対象貨物に対する対象貨物に随伴する空コンテナの割合もしくは対象貨物のうち帰り荷がない貨物の割合《年間》である。

4.2 船舶の建造

輸送を担う船舶を建造するためのエネルギー消費量とCO2排出量は、コンテナ船についてはコンテナ船の一般的な船舶諸元を想定し、内貿 RORO 船についてはデータの入手ができていないため、大型はPCC、中型はフェリーのデータを参考に提示することとし、3隻の船舶のデータを調査し、それらをもとに一般的な建造方法を想定

し、それを前提に材料・燃料および電力の使用量を推定すると、表-4~7 のとおりとなる。これから得られる船舶の建造に要する材料・燃料および電力に環境負荷原単位を乗じることによって船舶の建造に伴う環境負荷を求めることができる。

表-4 コンテナ船主要諸元

	バ・ナックス型	ポストバ・ナックス型	ス・バ・ナックス型
コンテナ積載能力	約 4,000TEU	約 6,600TEU	約 12,000TEU
デッキ列数と段数	13 列 4 段	17 列 6 段	22 列 7 段
船長×船幅	294m×32.2m	347m×42.8m	380m×54.4m
満載喫水	13m	14.5m	14.8m
満載排水量	78,000t	142,800t	207,000t
載荷重量トン	56,000t	105,000t	157,000t
主エンジン馬力	55,900ps	74,500ps	125,000ps
満載航海速度	24.5kt	25.0kt	25.0kt
船体自重	22,000t	37,800t	50,000t
燃料消費量	170t/day	200t/day	330t/day

表-5 コンテナ船の建造時のエネルギー等使用量

	バ・ナックス型	ポストバ・ナックス型	ス・バ・ナックス型
電力	4,840,000kWh	8,316,000kWh	11,000,000kWh
酸素	330t	567t	750t
プロパン	176t	302t	400t
シールドガス	572t	983t	1,300t

表-6 フェリー主要諸元

	大型	中型①	中型②
総トン	約 21,000t	約 11,000t	約 8,000t
積載能力	乗用車 4,560 台	セミトレーラ、トラック 179 台 乗用車 71 台	コンテナ 122TEU セミトレーラ 42 台
建造年	1986 年	1996 年	1991 年
船長×船幅	80.0m×32.2m	166.0m×25.0m	151.1m×23.0m
型深	20.3m	13.6m	13.7m
満載排水量	26,110t	11,726t	10,384t
載荷重量トン	13,068t	4,756t	4,268t
主エンジン馬力	14,500ps	28,800ps	16,200ps
満載航海速度	18.5kt	21.5kt	21.0kt
船体自重	13,042t	6,970t	6,167t
燃料消費量	39.4t/day	76t/day	42.8t/day

表-7 フェリーの建造時のエネルギー等使用量

	大型	中型①	中型②
電力	2,869,240kWh	1,533,400kWh	1,356,630kWh
酸素	196t	105t	92t
プロパン	104t	56t	49t
シールドガス	339t	181t	160t

その環境負荷量に対する各航海・停泊ごとの対象貨物の寄与分は、船舶の航海・停泊と同様に、(各状態の経過時間×年間運航回数) / (耐用年数×365×24) × (対象ユニットロードの量 / 全ユニットロードの量) と考える。財務省令 (財務省, 2003) によれば、船舶の耐用年数は

15 年 (船舶, 船舶法第 4 条から第 19 条までの適用を受ける鋼船, その他のもの, 総トン数が 2,000 トン以上のもの) である。また、実態としては外航コンテナ船が 25 年 (船尾泰文, 2001), 内航 RORO 船が 23 年が耐用年数の目安になっている。これらをもとに、対象とする各航海・停泊における対象貨物の環境負荷の寄与分を求め、対象とする全ての航海・停泊について合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと、次の通りとなる。

$$E_{target}^{s,bld} = \sum_{i \in R^s} \left[\sum_{i-j \in R^{s,nav}} \left(\frac{E_{ini}^{s,bld} \cdot T_{i-j}^{s,nav} \cdot N^s}{T_{life}^{s,bld} \cdot 8760} \cdot \frac{NC_{mi,target,i-j}^{s,nav} + NC_{kara,target,i-j}^{s,nav}}{NC_{mi,total,i-j}^{s,nav} + NC_{kara,total,i-j}^{s,nav}} \right) \right] + \sum_{i \in R^{s,mor}} \left(\frac{E_{ini}^{s,bld} \cdot T_i^{s,mor} \cdot N^s}{T_{life}^{s,bld} \cdot 8760} \cdot \frac{NC_{mi,target,i}^{s,mor} + NC_{kara,target,i}^{s,mor}}{NC_{mi,total,i}^{s,mor} + NC_{kara,total,i}^{s,mor}} \right) \quad (33)$$

ここで、 $E_{target}^{s,bld}$ は船舶建造による環境負荷量の対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{ini}^{s,bld}$ は対象船舶の建造による環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 建造》、 $T_{life}^{s,bld}$ は船舶の耐用年数 (year)、 $T_{i-j}^{s,nav}$ は i 港から j 港への航海時間 (h) 《1 航海》、 $T_i^{s,mor}$ は i 港における停泊時間 (h) 《1 航海》、 N^s は航海数《年間》、 $NC_{mi,target,i-j}^{s,nav}$ は i 港から j 港までの間を輸送する対象貨物を積載したユニットロードの個数《1 航海》、 $NC_{kara,target,i-j}^{s,nav}$ は i 港から j 港までの間を輸送する対象貨物に随伴する空のユニットロードの個数《1 航海》、 $NC_{mi,total,i-j}^{s,nav}$ は i 港から j 港までの間を輸送する対象船舶に積載された貨物を積載したユニットロードの個数《1 航海》、 $NC_{kara,total,i-j}^{s,nav}$ は i 港から j 港までの間を輸送する対象船舶に積載された空のユニットロードの個数《1 航海》、 $NC_{mi,target,i}^{s,mor}$ は i 港で荷役する対象貨物を積載したユニットロードの個数《1 停泊》、 $NC_{kara,target,i}^{s,mor}$ は i 港で対象船舶に荷役する貨物に随伴する空のユニットロードの個数《1 停泊》、 $NC_{mi,total,i}^{s,mor}$ は i 港で荷役する対象船舶の貨物を積載したユニットロードの個数《1 停泊》、 $NC_{kara,total,i}^{s,mor}$ は i 港で対象船舶に荷役する空のユニットロードの個数《1 停泊》、 $R^{s,nav}$ は l 航路ループにおける対象貨物の輸送に必要な港間の航海の集合 $R^{s,mor}$ は l 航路ループにおける対象貨物の輸送に必要な停泊港の集合、 L^s は対象貨物の輸送に必要な航路ループの集合である。

5. 陸上輸送モデル

陸上輸送に伴うエネルギー消費量およびCO2排出量を推計するためのモデルを構築する際の基本的な考え方を整理する。

対象貨物は、発地から船積港まで、もしくは、陸揚港から着地まで陸上を輸送される。この過程では、コンテナトレーラー（海上コンテナ用のセミトレーラー）で輸送されるか、バンニング前やデバンニングの後に中型トラックで輸送されることになるが、近年はコンテナトレーラーで輸送される場合が多い。このため、外貨貨物の陸上輸送は全てコンテナトレーラーで行われるものと想定する。また、RORO船のアクセス・イグレス輸送の場合は、バンタイプの陸上セミトレーラーで輸送される場合が多い。バンタイプのセミトレーラーの情報収集が不足しているため、大きな割り切りとして、バンタイプのトレーラーを、海上コンテナのセミトレーラーとコンテナのデータで代用する。比較ケースとして必要となる発地から着地までを全て陸上で輸送される場合は、大型トラック（バンタイプ）で輸送される場合が多い。このため、発地から着地まで全て陸上を輸送される場合は、全て大型トラックで輸送されるものとする。これらの貨物は詰め合わせ輸送される場合が多くないことと、全て同じ車両で同じ区間を輸送する場合、詰め合わせによって1車両あたりの対象貨物の積載重量が小さくなると、その分だけ運行回数が増えるため、1車両あたりの全貨物の積載率が同じであれば、環境負荷量の1車両あたりの寄与率の減少と総運行台数の増加が相殺するため、詰め合わせを考慮してもしなくても環境負荷量の対象貨物の寄与分に変化がない。このため、詰め合わせはないものとして考える。トラックの大中型小型の区分は、道路運送車両法の保安基準では表-8のとおりとなっている。

表-8 トラックの大中型小型の分類

	全長×全幅×全高	重量
大型車	12m×2.5m×3.8m 以内	車両総重量 8t 以上もしくは最大積載量 5t 以上
中型車	12m×2.5m×3.8m 以内	車両総重量 8t 未満かつ最大積載量 2t 超 5t 未満
小型車	4.7m×1.7m×2m 以内	最大積載量 2t 以下

コンテナトレーラーおよび大型トラックは、経済性を向上させるために種々の燃費改善努力が積み重ねられてきている。エンジンは、圧縮比を高く取ることができるディーゼルエンジンが採用され、ガソリンエンジンより20~30%良い熱効率が得られている。それに加えて、タ

ーボ・インタークーラー（TC-IC）および高圧直噴機構の採用によって燃焼効率とトルクが高められている。トランスミッションは、10-16 段トランスミッションと自動変速操作機構の採用により、低燃費パワーラインが設定されている。ボディーは、ウィンドデフレクタ等の採用により、空力特性が14~24%改善され（武田信之、1992）、アルミ部品や樹脂部品の採用によって、軽量化が図られている。サスペンションは主に荷痛み防止等の目的でエアサスが採用されるが、これにより積載率の向上がもたらされる（羽山富士男、2000；北村俊夫・磯邊修、2000；松本克彦・菅野秀一、2000）。また、タイヤの断面形状や材質の変更により転がり抵抗が20~40%低減されるなどしている（例えば、ダンロップ、2004）。こうした技術改善を考慮しながら、コンテナトレーラーおよび大型トラックの標準的な諸元は、市販製品（自動車技術会、2003）を参考に表-9のとおりと想定する。

表-9 コンテナトレーラーの標準的諸元

トラック	車両重量	7t
	車両総重量	17t
	第5輪荷重	10t
	連結車両総重量	40t
	エンジン	ディーゼル/水冷/TC-IC /高圧直噴/ウィンドデフレクタ有
	排気量	13l
	燃料	軽油
	変速機	自動 10-16 段
	ウィンドデフレクタ	あり
	車輪/サスペンション	4x2/後軸エアサス
セミトレーラー車両重量	3.7t (40ft) / 3.5t (20ft)	
コンテナ自重	3.8t (40ft) / 2.3t (20ft)	

表-10 大型トラックの標準的諸元

車両重量	10t
最大積載量	12t
車両総重量	22t
エンジン	ディーゼル/水冷/TC-IC /高圧直噴/ウィンドデフレクタ有
排気量	13l
燃料	軽油
変速機	自動 10-16 段
ウィンドデフレクタ	あり
車輪/サスペンション	6x2/後軸エアサス
架装	ドライバン

陸上輸送に伴う環境負荷量を求めるため、陸上輸送を次のようにモデル化する。まず、背後圏を適切なくつかのゾーンに分割し、ゾーンを代表する地点を各ゾーンに付与する。次に、各代表地点と対象港湾の間に適切な輸送ルートの一つだけを設定する。各ゾーンで発生集中する貨物量は全て対象港湾と当該ゾーン代表地点の間で輸

送され、しかも、全ての貨物は設定されたルートを通るものとする。輸送距離は、設定した輸送ルートを特性ごとにいくつかの区間に分割し、類似の区間を統合したうえで、区間ごとの輸送距離、区間平均走行速度および高速・一般道の別を与える。結果としては、ルートごとに貨物量と輸送距離、平均走行速度および高速・一般道の別を与え、そこから環境負荷量を求める「点と距離モデル」ともいうべきものである。一般に、対象港湾に近いゾーンは、貨物量が多く、幾何学的な関係から代表地点までの高速・一般道別の輸送距離のばらつきは相対的に大きくなる。このため、背後圏のゾーン分割を全域同程度に行う場合を考えると、対象港湾から遠距離のゾーンの間の推定精度は、相対的に高くなる一方で、近距離ゾーンでは低くなる。しかも、近距離のエリアの発生集中貨物量は相対的にかなり大きいので、全体の推定精度がほぼ近距離ゾーンの推定精度となってしまう。このため、近距離エリアのゾーン分割から得られる推定精度に対して、遠距離エリアのゾーン分割を相応の水準まで荒くしても、全体の推定精度をほとんど低下させることはない。推定の作業量を考えると、ゾーン数は少ないほど

まり意味を持たない。それよりも、例えば、ゾーン内の平地部の幾何重心に近い地点を採用するなど、その代表地点と対象港湾の間の距離などの輸送条件がゾーン内を起終点とする全ての輸送からみて平均的なものとなるように設定することが重要である。これらの点を勘案して適切にゾーン分割と代表地点の設定を行うことが重要である。

5.1 車両の走行

車両の環境負荷量を推定するためには、一般的な走行モードを想定して、シャシダイナモによって抵抗を与えて、燃料消費量を計測する。それによって得られた燃料消費量からエネルギー消費量やCO2排出量を推計することが出来る。しかし、車両総重量2.5tを超える重量車の場合には、対応できるシャシダイナモメータがなかったために、このような手法による燃料消費量の計測が行われていない。このため、国土交通省は「重量車燃費評価手法検討会」を設置し、車両総重量2.5tを超えるトラック・バス等の燃費測定法を2003年3月にとりまとめた。その方法は、まず走行モードを決定し、自動車の諸元、走行抵抗、エンジン諸元を使って、各時点でのシフト位置、エンジン回転数およびトルクを求める。これと予め実測しておいたエンジンの回転数及びトルクの組合せに対する燃料消費量の関係を示す燃費マップを用い、燃料消費量を求める。それを全区間分合算したものを、全走行距離で除すことによって平均燃料消費量を求める、というものである(国土交通省自動車交通局技術安全部, 2003)。この方法によって算出された重量車の燃料消費量が今後公表されていくことになるが、現時点では公表されたものがない。また、近年は、大型のシャシダイナモメータが開発され、整備が進められつつあることから、徐々に重量車もそれを使った計測が行われるようになっていく可能性もある。エンジンの燃焼シミュレーションによって回転数や負荷率ごとの燃料消費量を求め、それをある走行パターンに当てはめることで大型車の燃料消費量を推計する試みもある(交通安全環境研究所, 2003)。しかし、この方法は、未確定パラメータがまだ多くあり、実用には不十分な点が多い。このため、コンテナトレーラーについては、実際の車両の走行時の燃料消費量を計測し、それをもとに燃料消費量推計式を作成したものを使う。高速道路走行時は村野昭人・鈴木武(2003)の燃料消費量推計式を用い、一般道路走行時は、村野昭人・鈴木武(2003)の燃料消費量推計式の加速抵抗の項を修正したものを使用する。加速抵抗の項は、データの低速走行時のデータはヤード内走行が多いため、区間平均速

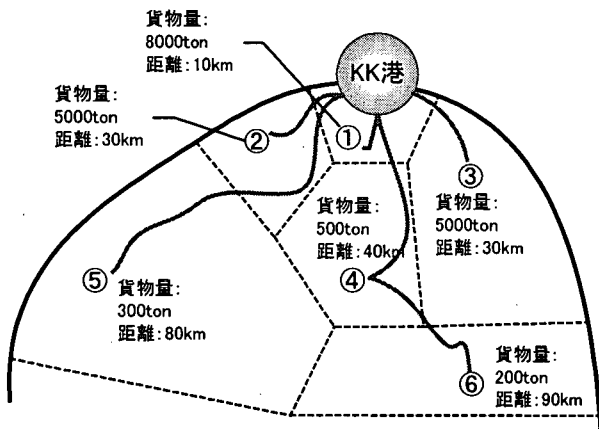


図-12 点と距離モデル[1]

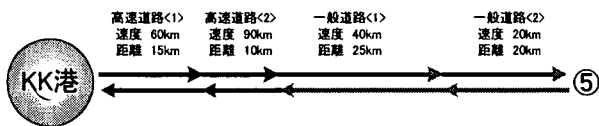


図-13 点と距離モデル[2]

良いので、対象港湾から近距離のエリアではゾーン分割を相対的に細かくし、遠距離のエリアではゾーン分割を相対的に荒くすること合理的となる。また、ゾーンの代表地点の設定においては、一般の交通モデルの場合、市役所や中心的な駅などのランドマークを採用する場合は多いが、このような設定方法は物流モデルの場合にはあ

度が 20km/h 未満のものを除去し、加速抵抗の式形を高速道路走行時と同形として最小二乗法でパラメータを推計したものに置き換える。

そのコンテナトレーラーの燃費の推計式は、2002 年 10 月および 2003 年 1 月に東京港大井埠頭を発着地とするコンテナトレーラー（トラクター車両重量：6.6t、セミトレーラー車両重量：3.7t (40ft 用) / 3.5t (20ft 用)、コンテナ自重：3.7~3.9t (40ft)、2.2~2.4t (20ft)、コンテナ総重量：9t~29t、エンジン：総排気量 13.1l、TC-IC、高圧直噴式、変速装置：自動 12 段、サスペンション：後軸エアサス、ウィンドデフレクタ：有、製造：2000 年）の一般道路走行（主に港湾地帯）と高速道路（首都高速道路と常磐自動車道路）における走行時の速度と燃料消費量を計測し、その値をもとに次のとおり作成されたものである。高速道路については、加減速が多い場合と加減速が少ない場合の式が求められている。加減速が多い場合は適用できる速度の範囲が狭いため使いにくいいため、ここでは加減速が少ない場合の式を使うものとする。また、ここで新たに求めた一般道路走行時の加速抵抗の推計式と消費した燃料のエネルギーの相関係数は、0.84 であった（図-14）。

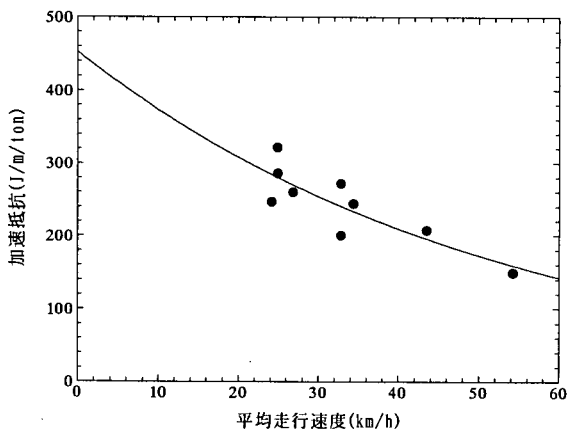


図-14 陸上コンテナトレーラーの一般道路走行時の加速抵抗

以上を整理すると陸上コンテナトレーラーの燃料消費量の計算式は次のとおりである。

一般道路走行時

$$FO^{t,run} = \frac{\left((453 \cdot e^{-0.019 \cdot V^{t,run}} + 98) \cdot W^{t,run} \right) + 7.9 \cdot (V^{t,run})^{1.2}}{18000} \quad (34a)$$

高速道路走行時

$$FO^{t,run} = \frac{\left((170 \cdot e^{-0.0097 \cdot V^{t,run}} + 98) \cdot W^{t,run} \right) + 7.9 \cdot (V^{t,run})^{1.2}}{18000} \quad (34b)$$

ここで、 $FO^{t,run}$ はコンテナトレーラーの燃料消費量 (l/km)、 $V^{t,nav}$ は区間平均速度 (km/h)、 $W^{t,run}$ は車両総重量 (t) である。

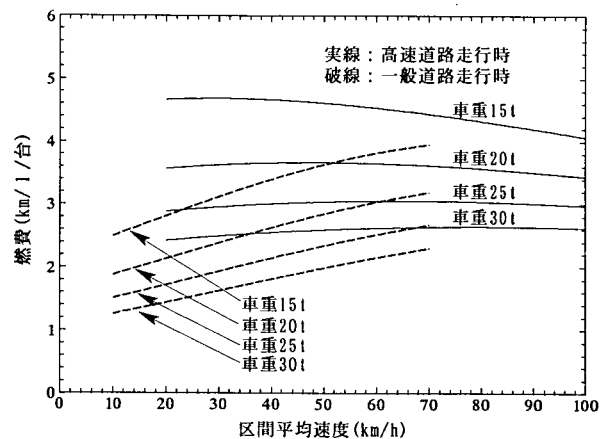


図-15 陸上コンテナトレーラーの燃費

一般道路走行時の式の適用可能範囲は、ヤード内での低速走行を除外すると、20km/h~60km/h であり、高速道路走行時の式が適用可能な速度帯は、20km/h~90km/h である。この式を得るために計測を行ったコンテナトレーラーの運転手は省エネ運転に心がけている運転手であり、計測時も省エネ運転といってよい運転の仕方をしていた。2003 年 9 月から 2005 年 9 月以降の最初の車検までに大型トラック（車両総重量 8 トン以上又は最大積載量 5 トン以上）に最高速度 90km/h のスピードリミッターを設置することが義務付けられているため、これからスピードリミッターを設置したトラックに順次置き換えられていく。また、追突警報装置の普及・改善と自動変速機の改善によって、運転手が意識的な努力を行わずともより良い省エネ運転を行うことが可能になるため、今回計測した運転パターンが特殊なものではなくなる可能性もある。しかし、現時点では、これが通常の運転パターンであるとはいいがたいため、通常の運転パターンの場合の燃料消費量を、前述の式から得られる結果に修正係数を乗じて求めることとする。

全日本トラック協会（1999）が 1999 年 3~5 月に実施

した、全国各地の大型トラック（車両総重量 20t 級）9 台を使った同一運転手、類似経路での「通常運転」と「省エネ運転」の燃費計測の結果では、通常運転の平均燃費が 3.5km/l（標準偏差 0.3km/l）、省エネ運転の平均燃費が 4.0km/l（標準偏差 0.3km/l）であった。この結果から（通常運転の燃費/省エネ運転の燃費）を 0.88 とし、式(34a)～(34b)をその比率で除して通常時の燃料消費量とする。

表-11 大型トラックの燃費

	平均値	標準偏差
通常運転	3.5 km/l	0.3 km/l
省エネ運転	4.0 km/l	0.3 km/l

大型トラックの燃費は、窒素酸化物総量規制マニュアル（改訂版）（環境庁大気保全局大気規制課編，1993）があるが、大型トラックやコンテナトレーラーのデータがないこととデータが古いことから、それをそのまま使うことはできない。そのため、ここでは、全日本トラック協会（1999）が 1999 年に実施した走行試験の結果を使用する。全日本トラック協会が実施した走行試験による大型トラックの平均燃費は表-11 のとおりである。

車両の走行により発生する環境負荷量は、各ルートを高速道路と一般道路に区切り、さらにそれを平均走行速度が異なる区間に区切り、各ルートにおける車両の走行による 1 台あたりの環境負荷量を求め、それに車両の運行回数を乗じることにより算出する。それら区間ごとの車両の走行による環境負荷量を、対象とする全ての輸送ルート・区間について合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと、次の通りとなる。

$$E_{target}^{t,run} = \sum_{k \in P^t} \sum_{i,j \in R_k^{t,run}} (E_{mi,i,j}^{t,run} \cdot NC_{mi,j}^{t,run} + E_{kara,i,j}^{t,run} \cdot NC_{kara,i,j}^{t,run}) \quad (35)$$

ここで、 $E_{target}^{t,run}$ は車両走行による環境負荷量の対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{mi,i,j}^{t,run}$ は i ルートの j 区間を対象貨物を載せた車両が走行することによる環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 輸送》、 $E_{kara,i,j}^{t,run}$ は i ルートの j 区間を空荷で車両が走行することによる環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 輸送》、 $NC_{mi,i}^{t,run}$ は i ルートを対象貨物を載せて走行する車両の台数 《年間》、 $NC_{kara,i}^{t,run}$ は i ルートを空荷で走行する車両の台数 《年間》、 $R_k^{t,run}$ は k 港を起終点とする対象貨物の輸送に必要なルートと区間の集合、 P^t は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合である。

なお、年間の車両運行台数は、次式によって求めることができる。

$$NC_{mi,target,i}^{t,run} = \frac{W_{target,i}^{t,run}}{WC_{sekisai}} \quad (36a)$$

$$NC_{kara,target,i}^{t,run} = NC_{mi,target,i}^{t,run} \cdot KC_{kara,target} \quad (36b)$$

ここで、 $W_{target,i}^{t,run}$ は i ルートを輸送する対象貨物の重量 (t) 《年間》、 $WC_{sekisai}$ はユニットロード 1 個に積載された貨物の重量 (t) 《年間》、 $NC_{mi,target,i}^{t,run}$ は i ルートを対象貨物を載せて走行する車両の台数 《年間》、 $NC_{kara,target,i}^{t,run}$ は i ルートを空荷で走行する車両の台数 《年間》、 $KC_{kara,target}$ は対象貨物に対する対象貨物に随伴する空コンテナの割合もしくは対象貨物のうち帰り荷がない貨物の割合 《年間》である。

5.2 車両の製造

車両の製造についてもハイブリッド法を用いて環境負荷量を推計することが望ましいが、コンテナトレーラーや大型トラックについて適切な分析がなされ、公表されたものが見当たらない。このため、これら車両の材料構成や組立過程での環境負荷量が分からないため、車両重量という情報だけで環境負荷を推定する。コンテナトレーラーは、トラクターの車両重量 (t/台) × トラック・バスその他の自動車の環境負荷原単位 (unit/t)、セミトレーラーを、セミトレーラーの車両重量 (t/台) × 自動車車体の環境負荷原単位 (unit/t)、コンテナをコンテナの自重 (t/unit) × 自動車車体の環境負荷原単位 (unit/t) によって推計する。また、大型トラックは、車両重量 (t) × トラック・バスその他の自動車の環境負荷原単位 (単位/t) によって推計する。そして、それらを各耐用年数で除して 1 年当たりの環境負荷量に換算する。トラクター、セミトレーラー、コンテナ、トラックの標準的な製品（2003 年製）の車両重量は表-12 のとおりである。耐用年数は、財務省令（財務省，2003）によればトラクターおよびトレーラーが 5 年（車両及び運搬具、前掲のもの以外のもの、自動車(二輪又は三輪自動車を除く)、その他のもの・貨物自動車・その他のもの）、コンテナが 7

表-12 コンテナトレーラー・トラックの車両重量

部品構成	コンテナトレーラー (40ft)の重量(kg)	コンテナトレーラー (20ft)の重量(kg)	トラックの重量(kg)
トラクター/トラック	7,000	7,000	10,000
セミトレーラー	3,700	3,500	—
コンテナ	3,800	2,300	—
合計	14,500	12,800	10,000

年（容器及び金庫，大型コンテナ（長さが6メートル以上のものに限る））である。また，実態としては10年がトラックの耐用年数の目安となっている（日野自動車，2004）。

車両を製造することによる環境負荷量に対する各輸送ルート・区間ごとの対象貨物の寄与分は，（区間ごとの輸送時間×年間運行回数）／（365×24）と考える。それらをもとに，車両の製造に伴う環境負荷量の対象貨物の寄与分を区間ごとに求め，対象とする全ての輸送ルート・区間について合算することにより環境負荷量を求める。

$$E_{target}^{t,bld} = \sum_{i \in P^t} \sum_{j,k \in R_i^{t,run}} \left(\frac{E_{ini}^{t,bld}}{T_{life}^{t,bld}} \cdot \frac{T_{j,k}^{t,run} \cdot N_j^{t,run}}{8760} \right) \quad (37)$$

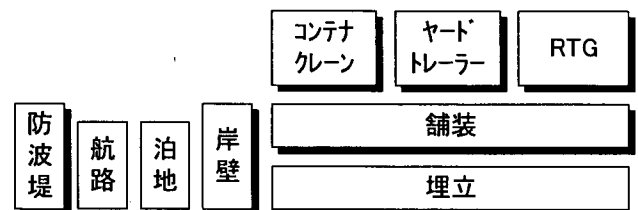
ここで， $E_{target}^{t,bld}$ は車両製造による環境負荷量の対象貨物の寄与分（kcal, t-c）《年間》， $E_{ini}^{t,bld}$ は車両製造による環境負荷量（kcal, t-c）《1製造》， $T_{j,k}^{t,run}$ はjルートのk区間を輸送するために必要となる時間（h）《1輸送》， $T_{life}^{t,bld}$ は車両の耐用年数（year）， $N_j^{t,run}$ はjルートの運航台数《年間》， $R_i^{t,run}$ はi港を起終点とする対象貨物の輸送に必要なルートと区間の集合， P^t は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合である。

6. 港湾モデル

まず，港湾内の輸送に伴うエネルギー消費量およびCO2排出量を推計するためのモデルを構築する際の基本的な考え方を整理する。

港湾は，防波堤，航路，泊地，係留施設，舗装，埋立，荷役機械という施設で構成されると考える。係留施設は，係留施設の形式を岸壁とし，構造はケーソン式，矢板式もしくは栈橋式のいずれかであるとする。岸壁クレーンは，シングルトロリのコンテナ荷役用のローブトロリ式ガントリークレーンとする。ヤード荷役形式はトランスファークレーン式とし，ヤード荷役機械はトランスファークレーンとヤードトレーラーから構成されると考える。これらは，世界的にみて本格的なコンテナターミナルの多くが採用しているシステム構成である。また，トランスファークレーンは，日本で主流となっているRTG（Rubber Mount Gantry）を想定する。これらのうち，複数の材料で作られている施設，つまり，防波堤，岸壁，岸壁クレーン，ヤードトレーラー，RTGについて，水深や設計震度等から主要諸元および材料使用量を求める式を作成する。これらによって求められる材料使用量を使

って，材料の製造段階における環境負荷を求めることができる。航路，泊地，埋立の主な材料は土砂であり，その使用量は容易に算定することができるため，その方法を整理することはここでは行わない。また，各種の材料を使用して施設を建造するときの環境負荷，つまり施工時の環境負荷は，各施設の主要諸元，材料使用量，施設の設置条件などから何らかの方法で施工方法を想定し，それに基づいて環境負荷量を推定することができるものとし，施工についての整理はとりあえずここでは行わない。荷役機械の稼動に伴い環境負荷が生じるので，それを推計するために，荷役機械の稼動に伴う環境負荷原単位を整理する。以上をまとめると図-16のとおりとなる。



注）影付は，主要諸元，材料使用量及び稼動に伴う環境負荷原単位の整理を行うものである。

図-16 港湾モデルの施設構成

6.1 防波堤

1991年度から2001年度にかけて運輸省港湾建設局が設計した防波堤の設計データをもとに，標準的と考えられる防波堤の主要諸元および材料使用量の推定方法を整理する。

わが国の港湾の第一線防波堤は，消波ブロック被覆混成堤か直立ケーソン堤が主流である。このため，この二つの構造形式を想定してモデルを作成する。この二つの構造形式は，若干のプロポーシヨンの違いはあるものの，消波ブロック被覆以外は設計諸元に大きな違いがない。このため，消波ブロック被覆以外は二つの構造形式の全サンプルの平均的な諸元を持つ防波堤を防波堤モデルとする。消波ブロック被覆は，消波ブロック被覆混成堤の全サンプルの平均的な設計諸元を求め，計算ケースに応じて消波ブロック被覆を加除する。ケーソンの高さは，設置位置の水深が大きくなるにつれて大きくなるが，製作可能な最大の高さ26.5mで，それ以上は大きくならない。このため，ケーソン高さが製作条件で制限されているサンプル，防波堤の設置水深でいえば30m超の場合は，標準値設定の対象外とする。また，防波堤の諸元についての分析は，防波堤延長1m当たりで行う。

防波堤の建設による環境負荷量の対象貨物の寄与分は，

(対象ユニットロードの個数/防波堤を必要とする係留施設のユニットロードの海上出入個数/耐用年数)と考える。この他にも、対象船舶の入出港や停泊の時間もしくは隻数、船舶の大きさの違いによる静穏性の要求水準の違いなどを考慮するという方法もありうるが、それらの情報を収集整理するのは多大な労力を必要とするため、ここでは単純にユニットロードの個数で配分するものとする。また、防波堤の耐用年数は、税法に基づく耐用年数に関する省令(財務省, 2003)によれば50年(構造物、鉄骨鉄筋コンクリート造又は鉄筋コンクリート造のもの(前掲のものを除く)、岸壁、さん橋、防壁(爆発物用のものを除く)、堤防、防波堤、塔、やぐら、上水道、水そう及び用水用ダム)である。これらをもとに、対象とする各港湾における対象貨物の環境負荷の寄与分を求め、対象とする全ての港湾について合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと、次の通りとなる。

$$E_{target}^{bw,bld} = \sum_{i \in P} \sum_{j \in F_i^{bw,bld}} \left(\frac{E_{ini,j}^{bw,bld} \cdot T_{life}^{bw,bld}}{NC_{mi,target,i,j}^{bw,bld} + NC_{kara,target,i,j}^{bw,bld}} \right) \quad (38)$$

ここで、 $E_{target}^{bw,bld}$ は防波堤建造による環境負荷量のうち対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{ini,i,j}^{bw,bld}$ は i 港 j 区間の防波堤建造による環境負荷量 (kcal/m, t-c/m) 《1 建造》、 $T_{life}^{bw,bld}$ は防波堤の耐用年数 (year) 《1 建造》、 $L_{ij}^{bw,bld}$ は i 港 j 区間の防波堤の延長 (m)、 $NC_{mi,target,i,j}^{bw,bld}$ は輸送に i 港 j 区間を必要とする対象貨物を積載したユニットロードの個数 《年間》、 $NC_{kara,target,i,j}^{bw,bld}$ は輸送に i 港 j 区間を必要とする対象貨物に随伴する空のユニットロードの個数 《年間》、 $NC_{mi,total,i,j}^{bw,bld}$ は i 港 j 区間の防波堤を必要とする係留施設における貨物を積載したユニットロードの海上出入個数 《年間》、 $NC_{kara,total,i,j}^{bw,bld}$ は i 港 j 区間の防波堤を必要とする係留施設における空のユニットロードの海上出入個数 《年間》、 P は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合、 $F_i^{bw,bld}$ は i 港における対象貨物の輸送に必要な防波堤の建造区間の集合である。

(1) ケーソン高

ケーソン高は、設置位置の水深に比例すると見ることができ、その関係は次式のとおり記述することができる。

$$H_{caisson} = a_{00} \cdot D_{sea} \quad (39)$$

ここで、 $H_{caisson}$ はケーソン高 (m)、 a_{00} は定数、 D_{sea} は防波堤の原地盤水深 (m) である。この式を使って最小自

乗法により a_{00} を推定すると 0.826 となる。ここで、推定に用いたサンプル数は 90、重相関係数は 0.98、 a_{00} の t 値は 49 である。

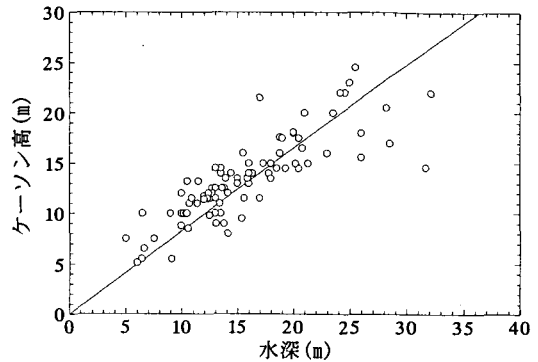


図-17 水深とケーソン高

(2) ケーソン幅

ケーソン幅は、外洋と内海で異なるものの、原地盤水深に比例するとみることができ、その関係は次式のとおり記述することができる。

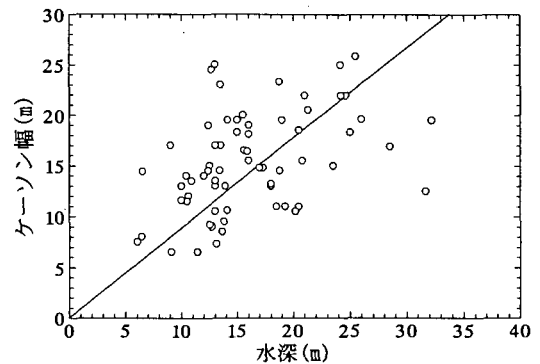


図-18 水深とケーソン幅 (外洋)

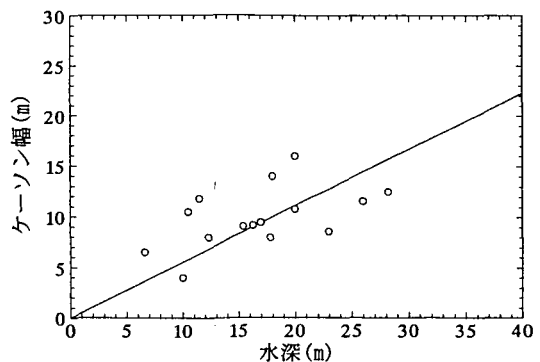


図-19 水深とケーソン幅 (内海)

$$B_{caisson} = a_{01} \cdot D_{sea} \quad (40)$$

ここで、 $B_{caisson}$ はケーソン幅 (m)、 a_{01} は定数、 D_{sea} は防波堤の原地盤水深 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{01} を推定すると 0.889 (外洋), 0.558 (内海) となる。この式の推定に用いたサンプル数は 67 (外洋), 15 (内海), 重相関係数は 0.94 (外洋), 0.96 (内海), a_{01} の t 値は 23 (外洋), 12 (内海) である。

(3) ケーソン重量

ケーソン重量 (自重) は、外洋と内海で異なるものの、ケーソンの断面積と比例するとみることができ、その関係は次式のとおり記述することができる。

$$a_{02} = \frac{W_{caisson}}{H_{caisson} \cdot B_{caisson}} \quad (41)$$

ここで、 a_{02} はケーソン断面積に対するケーソン重量の比率 (t/m^2)、 $W_{caisson}$ はケーソン重量 (t/m), $H_{caisson}$ はケーソン高 (m)、 $B_{caisson}$ はケーソン幅 (m) である。 a_{02} の頻度分布は図-20, 21 のとおりであり、平均値は 0.600 (外洋), 0.701 (内海) である。このときの標準偏差は 0.086 (外洋), 0.102 (内海) である。また、推定に用いたサンプルの数は 61 (外洋), 14 (内海) である。

(4) ケーソンに関するその他諸元

上部工は、一般に、ケーソン上面全面を 1.5m のコンクリートで嵩上げする。その上で、越波流量を抑えるなどの目的から、必要に応じてパラペットが設置される。このため、大きな割り切りとして、上部コンクリートは、ケーソン上面全面を 2m のコンクリートで嵩上げすることと仮定する。

蓋コンクリート厚は 0.5m, 幅は $0.9 \cdot B_{caisson}$ と仮定する。

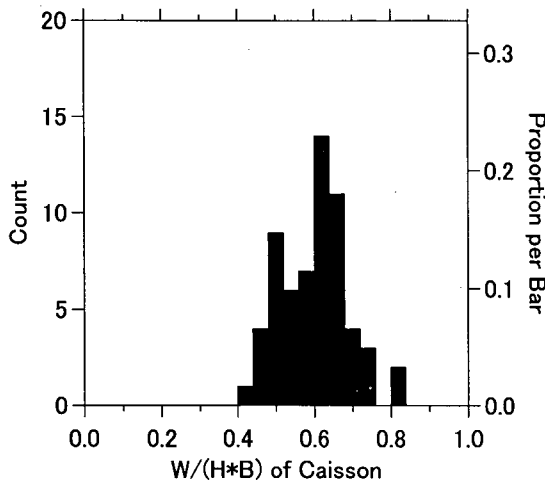


図-20 ケーソン重量とケーソン断面積 (外洋)

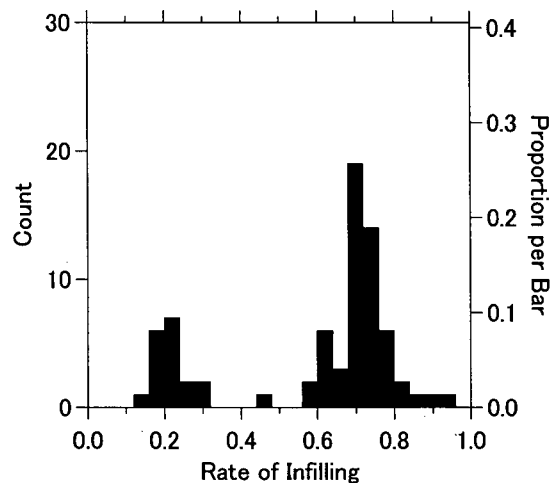


図-22 中詰め材の割合

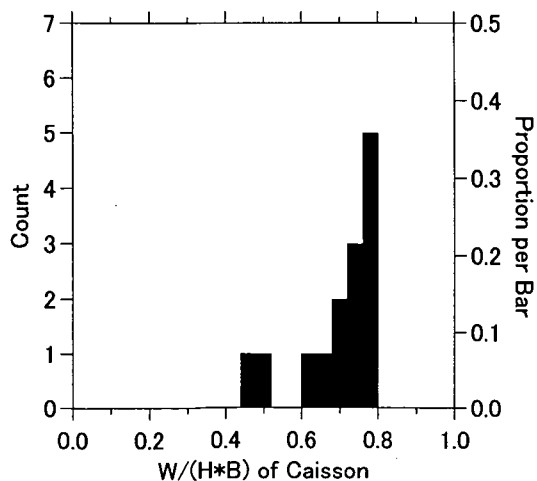


図-21 ケーソン重量とケーソン断面積 (内海)

中詰め材のケーソンの外法体積に対する割合 (以下、「中詰め材充填率」という.) は図-22 のとおりである。概ね、70%と20%の周辺に分布している、大部分が70%周辺に分布している。このため、40%以上の中詰め材充填率のサンプルを標準的な中詰め材充填率と考える。その中詰め充填率の平均値は 71.5%, 標準偏差 7.8%, サンプル数 56 である。一方、外法幅に対する内法幅の割合は約 90%であり、その3乗が中詰め充填率にほぼ一致する (0.9^3) ので、中詰め材はケーソンの内部空間をほぼ 100%を充填していることが分かる。また、充填材は 93%が砂で、残りが石である。

(5) マウンド体積

マウンド体積は、原地盤水深のべき乗に比例するとみることができ、その関係は次式のとおり記述することができる。

$$\ln(V_{mound}) = a_{031} \cdot \ln(D_{sea}) + a_{032} \quad (42)$$

ここで、 V_{mound} はマウンド体積 (m^3/m)、 a_{031} および a_{032} は定数、 D_{sea} は防波堤の原地盤水深 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{031} および a_{032} を推定すると 1.57 および 1.09 となる。この式の推定に用いたサンプル数は 77、重相関係数は 0.73、 a_{031} および a_{032} の t 値は 9.3 および 2.3 である。

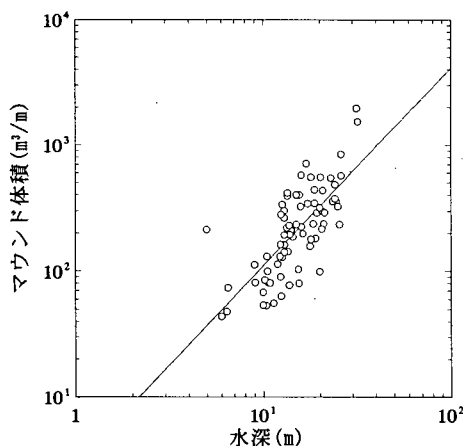


図-23 水深とマウンド体積

(6) 消波ブロック体積

消波ブロックは、収集した事例ではほとんど外洋のものしかないため、外洋の場合に使用するものと仮定する。消波ブロックの体積は、ケーソン高の2乗に比例するとみることができ、その関係は次式のとおり記述することができる。

$$\ln(V_{block}) = 2 \cdot \ln(H_{caisson}) + a_{04} \quad (43)$$

ここで、 V_{block} は消波ブロック体積 (m^3)、 a_{04} は定数、 $H_{caisson}$ はケーソン高 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{04} を推定すると 0.408 となる。この式の推定に用いたサンプル数は 45、重相関係数は 0.70、 a_{04} の t 値は 6.2 である。これと空隙率 50% (テトラポッドの場合) を用いて消波ブロックのコンクリート体積を推計することができる。

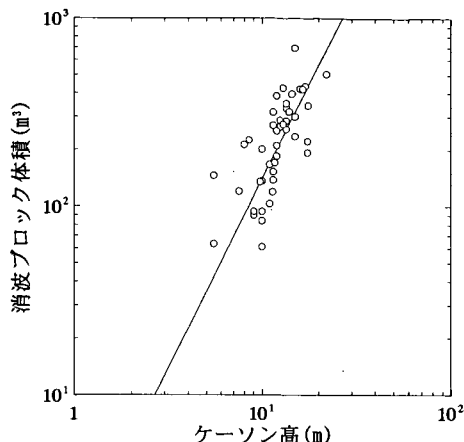


図-24 ケーソン高と消波ブロック体積

(7) 地盤改良

地盤が軟弱な場合（ほとんどは海底地盤がシルト・粘土の場合）に、地盤改良が行われる。最も代表的な地盤改良の方法は SCP (Sand Compaction Pile) 工法である。SCP の深さ方向の改良は、通常、基盤層まで行われるため、SCP 改良深度 (L.W.L (Low Water Level) からの深さ) D_{SCP} は原地盤水深 D_{sea} との関連性が見られない。また、ケーソン幅 $B_{caisson}$ に対する SCP の改良幅 B_{SCP} の比率 ($BB_{SCP} = B_{SCP}/B_{caisson}$ 、以下、「SCP 改良幅比率」という。) あるいは SCP 改良体積も原地盤水深との関連性が見られない。このため、地盤改良を考慮する場合のデフォルト値として、 D_{SCP} と D_{sea} の差 ($H_{SCP} = D_{SCP} - D_{sea}$)、即ち SCP の砂杭の長さおよび SCP 改良幅比率 BB_{SCP} の単純平均値を用いる。それぞれの平均値は 15.7m (H_{SCP})、4.3 (BB_{SCP})、標準偏差は 8.5m (H_{SCP})、1.7 (BB_{SCP})、サンプル数は 11 (H_{SCP})、11 (BB_{SCP}) である。改良率は、高改良部分 78%、中改良部分 50%、低改良部分 30% が組み合わせられて使用されている。このなかでよく使用される改良率は 78% である。

6.2 水域施設

水域施設の整備による環境負荷量のうちの対象貨物の寄与分は、(対象ユニットロードの個数/水域施設を必要とする係留施設のユニットロードの海上出入個数/耐用年数) と考える。この他にも、対象船舶の出入港や停泊の時間もしくは隻数、船舶の大きさの違いによる安全性向上の違いなどを考慮するという方法もありうるが、それらの情報を収集整理するための労力が多大となるため、ここでは単純にユニットロードの個数で配分するものとする。また、水域施設の耐用年数は物理的には無限大であるため、維持浚渫の間隔を耐用年数と考える。耐

用年数は想定が難しいが、一つの目安として5年を仮定する。これらをもとに、対象とする各港湾における対象貨物の環境負荷の寄与分を求め、対象とする全ての港湾について合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと、次の通りとなる。

$$E_{target}^{c\&a,bld} = \sum_{i \in P^c} \sum_{j \in F_i^{c\&a,bld}} \left(\frac{E_{ini,i,j}^{c\&a,bld}}{T_{life}^{c\&a,bld}} \cdot \frac{NC_{mi,target,i,j}^{c\&a,bld} + NC_{kara,target,i,j}^{c\&a,bld}}{NC_{mi,total,i,j}^{c\&a,bld} + NC_{kara,total,i,j}^{c\&a,bld}} \right) \quad (44)$$

ここで、 $E_{target}^{c\&a,bld}$ は維持浚渫による環境負荷量の対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{ini,i,j}^{c\&a,bld}$ は i 港 j 地区の維持浚渫による環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 浚渫》、 $T_{life}^{c\&a,bld}$ は維持浚渫の耐用年数 (year) 《1 浚渫》、 $NC_{mi,target,i,j}^{c\&a,bld}$ は i 港 j 地区の水域施設を利用する対象貨物を積載したユニットロードの個数 《年間》、 $NC_{kara,target,i,j}^{c\&a,bld}$ は i 港 j 地区の水域施設を利用する対象貨物に随伴する空のユニットロードの個数 《年間》、 $NC_{mi,total,i,j}^{c\&a,bld}$ は i 港 j 地区の水域施設を利用する係留施設における貨物を積載したユニットロードの海上出入個数 《年間》、 $NC_{kara,total,i,j}^{c\&a,bld}$ は i 港 j 地区の水域施設を利用する係留施設における空のユニットロードの海上出入個数 《年間》、 P^c は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合、 $F_i^{c\&a,bld}$ は i 港における対象貨物の輸送に必要な水域施設の浚渫区域の集合である。

6.3 岸壁

1991年度から2001年度にかけて運輸省港湾建設局が設計した岸壁の設計データをもとに、標準的と考えられる防波堤の主要諸元および材料使用量の推定方法を作成する。

代表的な岸壁の構造形式は、ケーソン式、矢板式、棧橋式であるため、この3形式をモデル化する。ケーソン式および矢板式の場合は、エプロン舗装はアスファルトコンクリート舗装とし、大型のフォークリフトを想定して、表層と基層でアスファルトコンクリート20cm、それ以下は裏込、裏埋めとして扱う。棧橋式の場合は、コンクリート舗装とし、舗装を床版に含めて整理する。また、以下の分析は岸壁延長1m当たりの諸元で行う。

岸壁の建設による環境負荷量の対象貨物の寄与分は、(対象ユニットロードの個数/対象岸壁で荷役するユニットロードの個数/耐用年数) と考える。この他にも、対象船舶の占有時間もしくは隻数などを考慮するという

方法もありうるが、船舶ごとの占有時間の情報を収集整理するためには多大な労力を必要とすることと、隻数の場合には大きな船と小さな船を同じに扱うことはかなり公平性を欠くことから、ここでは単純にユニットロードの個数で配分するものとする。また、岸壁の耐用年数は、税法に基づく耐用年数に関する省令(財務省, 2003)によれば50年(構築物、鉄骨鉄筋コンクリート造又は鉄筋コンクリート造のもの(前掲のものを除く)、岸壁、さん橋、防壁(爆発物用のものを除く)、堤防、防波堤、塔、やぐら、上水道、水そう及び用水用ダム)である。これらをもとに、対象とする各港湾における対象貨物の環境負荷の寄与分を求め、対象とする全ての港湾について合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと、次の通りとなる。

$$E_{target}^{q,bld} = \sum_{i \in P^q} \sum_{j \in F_i^{q,bld}} \left(\frac{E_{ini,i,j}^{q,bld} \cdot L_{i,j}^{q,bld}}{T_{life}^{q,bld}} \cdot \frac{NC_{mi,target,i,j}^{q,bld} + NC_{kara,target,i,j}^{q,bld}}{NC_{mi,total,i,j}^{q,bld} + NC_{kara,total,i,j}^{q,bld}} \right) \quad (45)$$

ここで、 $E_{target}^{q,bld}$ は岸壁建造による環境負荷量のうち対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{ini,i,j}^{q,bld}$ は i 港 j 岸壁建造による環境負荷量 (kcal/m, t-c/m) 《1 建造》、 $T_{life}^{q,bld}$ は岸壁の耐用年数 (year) 《1 建造》、 $L_{i,j}^{q,bld}$ は i 港 j 岸壁の延長 (m)、 $NC_{mi,target,i,j}^{q,bld}$ は i 港 j 岸壁で荷役する対象貨物を積載したユニットロードの個数 《年間》、 $NC_{kara,target,i,j}^{q,bld}$ は i 港 j 岸壁で荷役する対象貨物に随伴する空のユニットロードの個数 《年間》、 $NC_{mi,total,i,j}^{q,bld}$ は i 港 j 岸壁で荷役する貨物を積載したユニットロードの個数 《年間》、 $NC_{kara,total,i,j}^{q,bld}$ は i 港 j 岸壁で荷役する空のユニットロードの個数 《年間》、 P^q は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合、 $F_i^{q,bld}$ は i 港における対象貨物の輸送に必要な岸壁の建造区間の集合である。

(1) 重力式岸壁

重力式岸壁は、ケーソン式構造を想定する。ケーソンは現場打ちRC (Reinforced Concrete) 造で、バットレスが大きいもの、裏埋土は軽量混合土や事前混合処理土などを使用していないもの、地盤改良はSCP工法を想定する。

a) ケーソン高さ

ケーソン高は、一般に岸壁水深と水面上の余裕天端高の合計であるため、それらの関係は次式によって現される。

$$H_{caisson} = a_{10} + D_{quay} \quad (46)$$

ここで、 $H_{caisson}$ はケーソン高 (m)、 a_{10} は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{10} を推定すると 2.16 となる。一般にケーソン天端の高さは海面から潮位差 +0.5m とされ、これが概ね 2m となる。これより、マウンドの設置水深は岸壁水深に等しいことがわかる。この式の推定に用いたサンプル数は 83、重相関係数は 0.95、 a_{10} の t 値は 22 である。

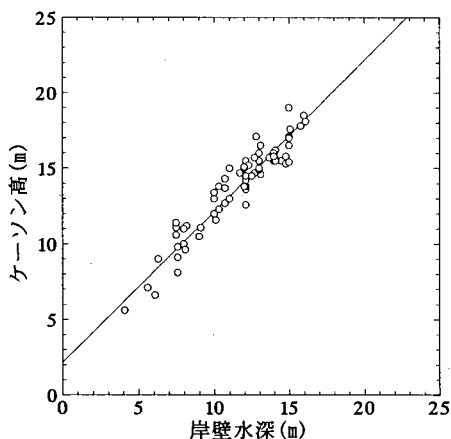


図-25 岸壁水深とケーソン高

b) ケーソン重量

ケーソンの滑動安定の条件は、ケーソン総重量に比例するケーソン底面の摩擦抵抗と、ケーソン総重量と設計震度の積に比例するケーソンの地震時水平力およびケーソン背後の地震時土圧が、安全率を乗じた状態で等しくなることである。

このとき、最も代表的な RC タイプのケーソンを想定し、ケーソン重量 (自重) がケーソン総重量と比例すると考え、コンクリートと捨石の摩擦係数を 0.6 (国土交通省港湾局, 1999) と考えると、ケーソン重量は、

$$W_{caisson} = a_{11} \cdot \frac{1+k_{eq}}{0.6-k_{eq}} \cdot H_{caisson}^2 \quad (47)$$

となる。ここで、 $W_{caisson}$ はケーソン重量 (t/m)、 a_{11} は定数、 k_{eq} は設計震度、 $H_{caisson}$ はケーソン高 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{11} を推定すると 0.179 となる。この式の推定に用いたサンプル数は 72、重相関係数は 0.98、 a_{11} の t 値は 40 である。ここで得られた式から求められるケーソン重量と実際のケーソン重量を比較すると図-26 のとおりとなる。

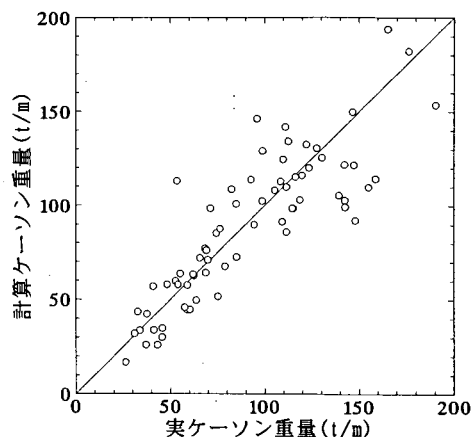


図-26 ケーソン重量の実際と推定

c) ケーソン幅

ケーソンの重量はケーソンの断面積に比例すると考えられる。このため、ケーソン幅はケーソン重量/ケーソン高と比例関係にあると考えられ、その関係は次式のように表される。

$$B_{caisson} = a_{12} \cdot W_{caisson} / H_{caisson} \quad (48)$$

となる。ここで、 $B_{caisson}$ はケーソン幅 (m)、 a_{12} は定数、 $W_{caisson}$ はケーソン重量 (t/m)、 $H_{caisson}$ はケーソン高 (m) である。この式を使って RC タイプのケーソンについて最小自乗により a_{12} を推定すると 1.75 となる。この式の推定に用いたサンプル数は 72、重相関係数は 0.98、 a_{12} の t 値は 46 である。

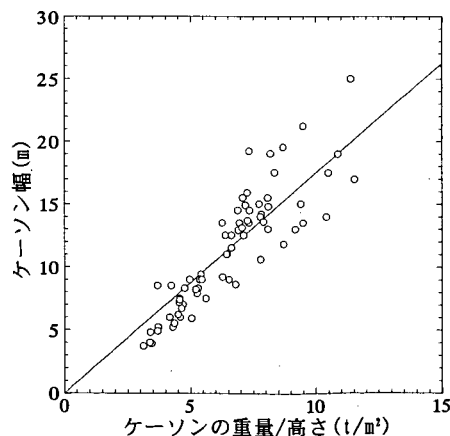


図-27 ケーソンの重量/高さとケーソン幅

d) マウンド体積

マウンド体積は、原地盤水深が岸壁水深より浅い場合

と深い場合で異なる。

原地盤水深が岸壁水深より浅い場合は、原地盤をケーソン設置水深より必要最小限掘り下げてマウンドを設置することになる。このため、マウンド体積は設計震度および岸壁水深によって規定されるので、これら変数の相関係数を求めると表-13 のとおりとなり、これらの変数の間には相関関係がほとんどないことがわかる。このため、マウンド体積の頻度分布を見ると図-28 のとおり、ある値を中心に概ね対数正規分布をなしているように見える。そこで、マウンド体積 (m³/m) の対数変換した値の平均値を求めると 3.97 (マウンド体積は 52.8m³/m)、標準偏差が 0.81、サンプル数が 42 である。

表-13 マウンド体積と関連変数の相関係数

	設計震度	岸壁水深
マウンド体積	0.213	0.196

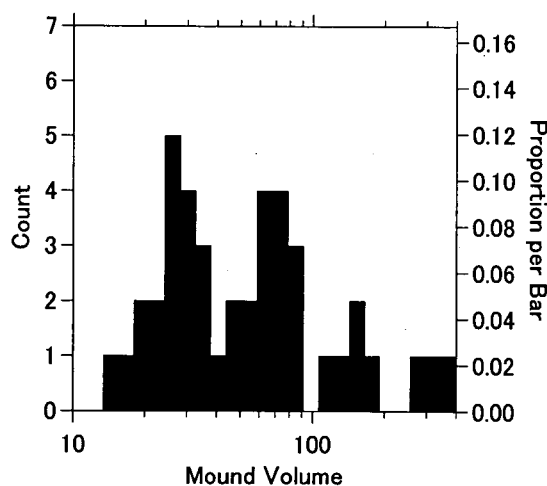


図-28 マウンド体積の頻度分布

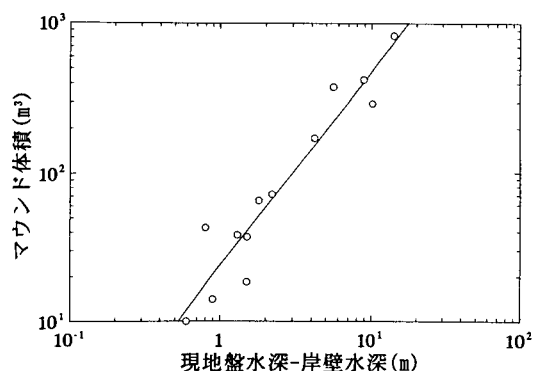


図-29 水深差とマウンド体積

原地盤水深が深い場合は、マウンド体積は原地盤水深と岸壁水深の差のべき乗に比例すると考えられるため、次式を仮定してパラメータを推定する。

$$\ln(V_{mound}) = a_{131} \cdot \ln(D_{sea} - D_{quay}) + a_{132} \quad (49)$$

ここで、 V_{mound} はマウンド体積 (m³/m)、 a_{131} および a_{132} は定数、 D_{sea} は原地盤水深 (m)、 D_{quay} は岸壁水深 (m) である。最小自乗法で a_{131} および a_{132} を推定すると 1.30 および 3.18 となり、各推定変数の t 値は 10 および 19 である。また、重相関係数は 0.95 で、サンプル数は 13 である。

e) ケーソン上部工

ケーソンの上部工の体積は幾つかの事例を参考に、

$$V_{capping} = \left(2 \cdot \frac{H_{caisson}}{15} \right)^2 \quad (50a)$$

と想定する。ここで $V_{capping}$ は上部工体積 (m³/m)、 $H_{caisson}$ はケーソン高 (m) である。岸壁クレーンの軌道がこの上に設置される場合は、

$$V_{capping} = 3 \cdot \left(2 \cdot \frac{H_{caisson}}{15} \right)^2 \quad (50b)$$

と想定する。

f) 裏込体積

裏込は、通常、ケーソンの天端から一定の水平幅を取り、そこから一定の法勾配でケーソン設置水深までの台

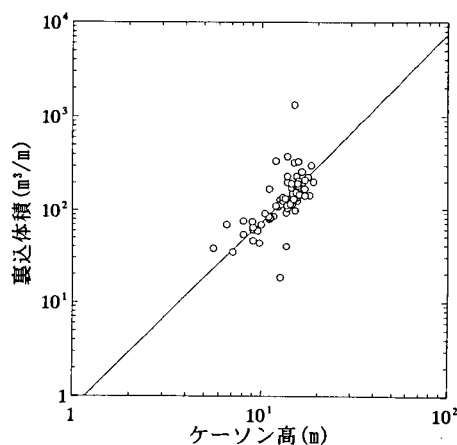


図-30 ケーソン高と裏込体積

形の断面で設計される。このため、裏込体積はケーソン高の2乗に比例すると考えられるので、次式によって回帰曲線を推定する。

$$\ln(V_{backing}) = 2 \cdot \ln(H_{caisson}) + a_{14} \quad (51)$$

ここで、 $V_{backing}$ は裏込体積 (m^3/m)、 a_{14} は定数、 $H_{caisson}$ はケーソン高 (m) である。最小自乗法で a_{14} を推定すると -0.302 となり、推定変数の t 値は -5.4 である。また、重相関係数は 0.67 で、サンプル数は 74 である。

g) 地盤改良

地盤が軟弱な場合に、地盤改良が行われる。最も代表的な地盤改良の方法は SCP 工法である。SCP の深さ方向の改良は、通常、基盤層まで行われるため、SCP 改良深度 (L.W.L からの深さ) D_{SCP} は原地盤水深 D_{sea} との関連性が見られない。また、ケーソン幅 $B_{caisson}$ に対する SCP の改良幅 B_{SCP} の比率 (BB_{SCP} : $B_{SCP}/B_{caisson}$ 、以下、「SCP 改良幅比率」という。) あるいは SCP 改良体積も原地盤水深との関連性が見られない。このため、地盤改良を考慮する場合のデフォルト値として、 D_{SCP} と D_{sea} の差 (H_{SCP} : $D_{SCP} - D_{sea}$)、即ち砂杭の長さおよび SCP 改良幅比率 BB_{SCP} の単純平均値を用いる。それぞれの平均値は 23.5m (H_{SCP})、1.6 (BB_{SCP})、標準偏差は 10.7m (H_{SCP})、1.1 (BB_{SCP})、サンプル数は 51 (H_{SCP})、45 (BB_{SCP}) である。改良率は、高改良部分 78%、中改良部分 50%、低改良部分 30% が組み合わせられて使用されている。このなかでよく使用される改良率は 78% である。

h) 岸壁クレーン軌条の基礎

コンテナ埠頭の岸壁に大型岸壁クレーンを設置する場合は、陸側のクレーン軌条の基礎として鋼管杭を打設すると想定する。海側の軌条はケーソン上に設けるため、基礎工は特に施さない。標準的なサイズは、-14m 岸壁の設計例の一つである港湾構造物設計事例集に掲載されている例を採用することとし、鋼管杭の直径: 1m、延長: 33m、ピッチ: 4.5m、重量: 1.92t/m とする。

(2) 矢板式岸壁

矢板式岸壁の構造は、矢板は鋼矢板、控杭は鋼管もしくは H 型鋼の直杭構造、裏埋土には軽量混合土や事前混合処理度などを用いていないもの、地盤改良は SCP を想定する。矢板式は、既設の岸壁を改良する場合に用いられる場合が多いが、改良の場合は分析が複雑になるため、ここでは新規の場合のみを考える。

a) 矢板重量

矢板体積は、岸壁水深のべき乗に比例するとみることができるため、その関係は次式のとおり記述することができる。

できる。

$$\ln(W_{yaita}) = a_{201} \cdot \ln(D_{quay}) + a_{202} \quad (52)$$

ここで、 W_{yaita} は矢板重量 (t/m)、 a_{201} および a_{202} は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{201} および a_{202} 定数を推定すると 1.64 および -2.11 となる。この式の推定に用いたサンプル数は 11、重相関係数は 0.95、 a_{201} および a_{202} の t 値は 9.3 および -5.5 である。

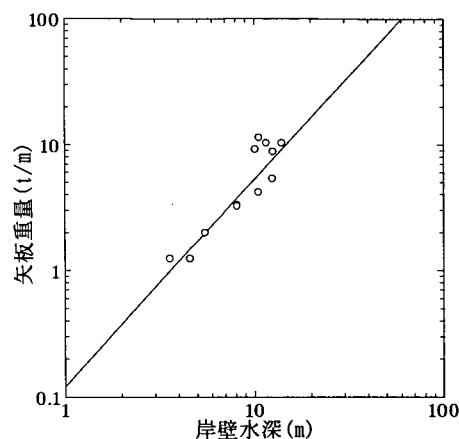


図-31 岸壁水深と矢板重量

b) 矢板上部工体積

矢板の上部工の体積は、岸壁水深のべき乗に比例すると考えられるので、次式によって回帰曲線を推定する。ここでは、上部工の構造は RC とし、密度 $2.3t/m^3$ を乗じることにより重量に変換することができる。

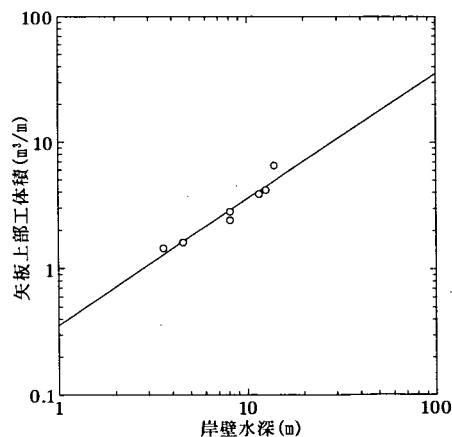


図-32 岸壁水深と矢板上部工体積

$$\ln(V_{cap, yaia}) = a_{211} \cdot \ln(D_{quay}) + a_{212} \quad (53)$$

ここで、 $V_{cap, yaia}$ は矢板上部工体積 (m^3/m)、 a_{211} および a_{212} は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m) である。ここで、傾向が著しく異なる常陸那珂港作業基地-5m 岸壁、秋田港向浜-12m 岸壁、酒田港北港-10m 岸壁を除外して、最小自乗法で a_{211} および a_{212} を推定すると 1.01 (1.00 とみなす。) および -1.06 となるので、 a_{211} を 1 とおいて a_{212} を再度推定すると、-1.03 となり、その t 値は -18 である。また、重相関係数は 0.96 で、サンプル数は 7 ある。

c) 裏込体積

裏込は、通常、矢板の天端から一定の水平幅をとり、そこから一定の法勾配で原地盤水深までの台形の断面で設計される。このため、裏込体積は概ね原地盤水深の 2 乗に比例すると考えられるので、次式によって回帰曲線を推定する。

$$\ln(V_{backing}) = 2 \cdot \ln(D_{sea}) + a_{22} \quad (54)$$

ここで、 $V_{backing}$ は裏込体積 (m^3/m)、 a_{22} は定数、 D_{sea} は原地盤水深 (m) である。この式をもとに最小自乗法で a_{22} を推定すると 0.366 となり、その t 値は 1.8 である。また、重相関係数は 0.98 で、サンプル数は 5 である。

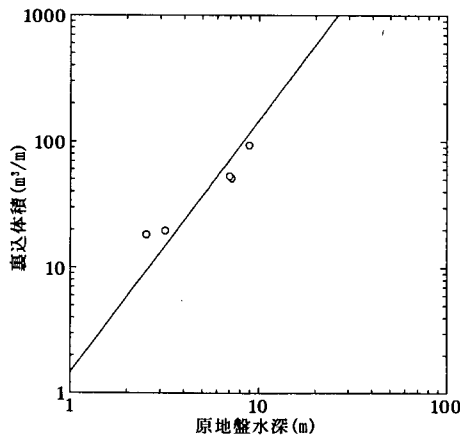


図-33 原地盤水深と裏込体積

d) 控杭重量

控杭は、矢板に作用する土圧のベキ乗に比例すると考えられ、土圧は岸壁水深のベキ乗に比例すると考えられるので、次式によって回帰曲線を推定する。

$$\ln(W_{hikae}) = a_{231} \cdot \ln(D_{quay}) + a_{232} \quad (55)$$

ここで、 W_{hikae} は控杭重量 (t/m)、 a_{231} および a_{232} は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m) である。最小自乗法で a_{231} および

a_{232} を推定すると 1.15 および -2.30 となり、それらの t 値は 4.7 と -4.3 である。また、重相関係数は 0.84 で、サンプル数は 11 ある。

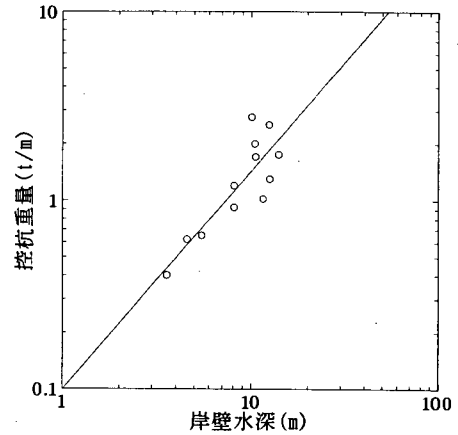


図-34 岸壁水深と控杭重量

e) 控杭上部工体積

控杭の上部工の体積は、岸壁水深のベキ乗に比例すると考えられるので、次式によって回帰曲線を推定する。ここでは、上部工の構造は RC ととし、密度 $2.3t/m^3$ を乗じることにより重量に変換することができる。

$$\ln(V_{cap, anchor}) = a_{241} \cdot \ln(D_{quay}) + a_{242} \quad (56)$$

ここで、 $V_{cap, anchor}$ は控杭上部工体積 (m^3/m)、 a_{241} および a_{242} は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m) である。ここで、傾向が著しく異なる常陸那珂港作業基地-5m 岸壁、秋田港向浜-12m 岸壁、酒田港北港-10m 岸壁を除外して、最小

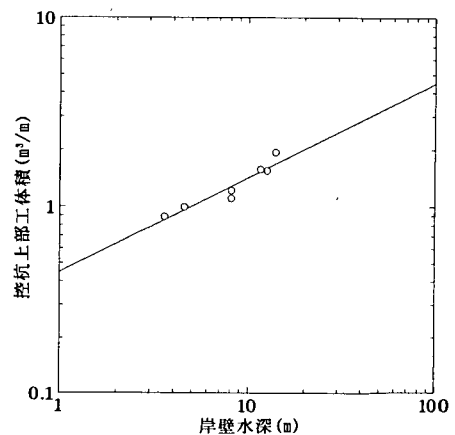


図-35 岸壁水深と控杭上部工体積

自乗法で a_{241} および a_{242} を推定すると 0.514 および -0.834 となるので、 a_{241} を 0.5 とおいて a_{242} を再度推定すると、-0.804 となり、その t 値は -24 である。また、重相関係数は 0.95 で、サンプル数は 7 ある。

f) タイロッド重量

タイロッドの重量は、矢板に作用する土圧のベキ乗に比例すると考えられ、土圧は岸壁水深のベキ乗に比例すると考えられるので、次式によって回帰曲線を推定する。

$$\ln(W_{tie}) = a_{251} \cdot \ln(D_{quay}) + a_{252} \quad (57)$$

ここで、 W_{tie} はタイロッド重量 (t/m)、 a_{251} および a_{252} は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m) である。最小自乗法で a_{251} および a_{252} を推定すると 2.97 および -7.40 となり、それらの t 値は 7.8 と -8.9 である。また、重相関係数は 0.93 で、サンプル数は 11 ある。

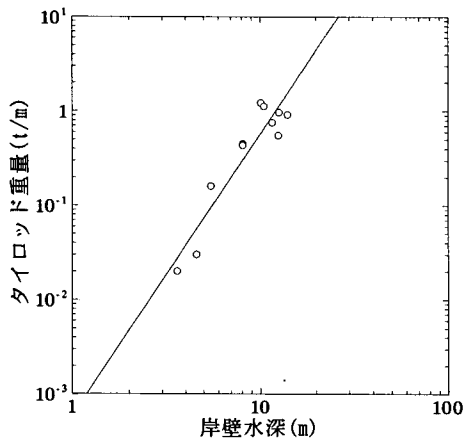


図-36 岸壁水深とタイロッド重量

g) 地盤改良

矢板構造の場合には、表層地盤が軟弱な場合に、地盤改良が行われる。深層まで軟弱地盤が及んでいる場合は、一般に他の構造形式が有利になるため、矢板構造で深層まで地盤改良をするということは一般的には行われない。このため、SCP 改良深度 (L.W.L からの深さ) D_{SCP} は岸壁水深 D_{wharf} に比例すると仮定する。SCP の海側と陸側の改良幅 $B_{SCP, sea}$ および $B_{SCP, land}$ は、また D_{SCP} と D_{wharf} の差 ($H_{SCP, sea} : D_{SCP} - D_{wharf}$) および D_{SCP} と原地盤水深 D_{sea} の差 ($H_{SCP, land} : D_{SCP} - D_{sea}$)、つまり海側および陸側の SCP の砂杭の長さに比例すると仮定する。このため、鋼管矢板もしくは鋼板矢板を用いた矢板構造で、SCP 工法を行い、裏埋土に特殊な改良をしていない事例は、宇野港宇野地区岸壁 (-10m) の事例しかいない。ここでの値

をデフォルト値として使用する。しかし、この事例では海側海底に 3.5m の張り石を設けているが、モデルの複雑化を防ぐため、張り石は存在せず、海底面まで SCP が一様に行われたと仮定する。このとき、 D_{wharf} に対する D_{SCP} の比率 $DD_{SCP} (D_{SCP} / D_{wharf})$ は 2.0、 $H_{SCP, sea}$ に対する $B_{SCP, sea}$ の比率 ($BH_{SCP, sea} : B_{SCP, sea} / H_{SCP, sea}$) は 2.5、 $H_{SCP, land}$ に対する $B_{SCP, land}$ の比率 ($BD_{SCP, land} : B_{SCP, land} / H_{SCP, land}$) は 2.3 である。改良率はともに 70% である。

h) 岸壁クレーン軌条の基礎

コンテナ埠頭の岸壁に大型岸壁クレーンを設置する場合は、クレーン軌条の基礎として鋼管杭を 2 列打設すると想定する。標準的なサイズは 6.3 (1 h) の陸側と同様であると考え、鋼管杭の直径：1m、延長：33m、ピッチ：4.5m、重量：1.92t/m とする。

(3) 栈橋式岸壁

栈橋式岸壁の構造は、直杭式横栈橋を仮定する。杭は鋼管杭、床版は RC、土留め工は L 型コンクリートブロック、裏埋土には軽量混合土や事前混合処理度などを用いていないもの、地盤改良は SCP を想定する。

a) 鋼管杭長

鋼管杭の長さは、岸壁の水深のベキ乗と設計震度のベキ乗の積に比例するように見受けられ、その関係は次式のとおり表現される。

$$\ln(L_{pile}) = a_{301} \cdot \ln(D_{quay}) + a_{302} \cdot \ln(k_{eq}) + a_{303} \quad (58)$$

ここで、 L_{pile} は鋼管杭長 (m)、 $a_{301} \sim a_{303}$ は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m)、 k_{eq} は設計震度である。この式を使って最小自乗法により $a_{301} \sim a_{303}$ を推定すると 1.13、0.284、1.29 となり、それぞれの t 値は 3.2、2.3、1.4 となる。こ

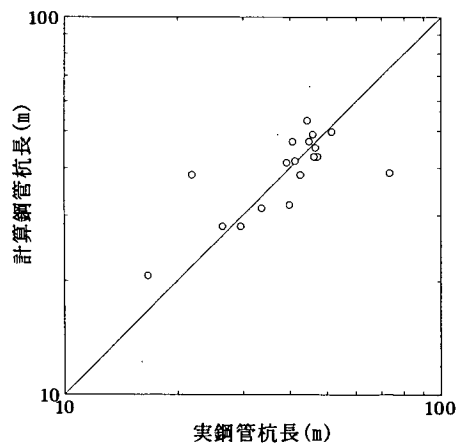


図-37 鋼管杭長の実際と推定

ここで、推定に用いたサンプル数は18、重相関係数は0.73である。

b) 鋼管杭重量

鋼管杭の重量は、岸壁の水深のベキ乗と設計震度のベキ乗の積に比例すると考えられ、その関係は次式のとおり記述することができる。

$$\ln(W_{pile}) = a_{311} \cdot \ln(D_{quay}) + a_{312} \cdot \ln(k_{eq}) + a_{313} \quad (59)$$

ここで、 W_{pile} は鋼管杭重量 (t/m), $a_{311} \sim a_{313}$ は定数, D_{quay} は岸壁水深 (m), k_{eq} は設計震度である。この式を使って最小自乗法により $a_{311} \sim a_{313}$ を推定すると 2.89, 0.622, -3.85 となり、それぞれの t 値は 6.0, 3.7, -3.0 となる。ここで、推定に用いたサンプル数は17、重相関係数は0.89である。

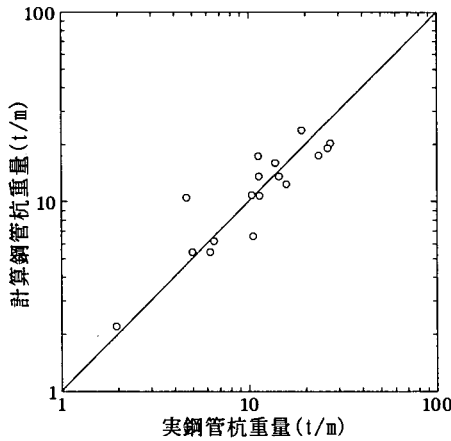


図-38 鋼管重量の実際と推定

c) 床版幅

床版幅の標準値は、一般の岸壁では表-14、コンテナ埠頭では 40m~70m とされている（国土交通省港湾局，1999）。栈橋の床版の幅は、一般岸壁では概ねその値と一致するように設定されるのが一般的である。コンテナ埠頭では、岸壁クレーンの軌条が2条とも載るように設計されるのが一般的である。大型のクレーンのレールスパンは 30m もしくは 30.5m が、小型のクレーンは 16m もしくは 20m が一般的である。

レールスパンの変化は、クレーンの大型化によって引き起こされたものであるが、それは単にクレーンの大型化だけではなく、岸壁のエプロン規格によっても左右される。小型クレーンのレールスパン 16m は公共埠頭の床版幅 20m から定まったものだと考えられるし、レールスパン 20m のものは専用埠頭で採用された規格である。レ

ールスパンが 30m/30.5m に変化されるのはポストパナマックス型船対応の岸壁クレーンが出現してからであるが、それ以前につくられた岸壁を改良して使用しているものが一部有り、それらの場合には 16m/20m のレールスパンとなっている。コンテナ埠頭の場合は、岸壁水深が 14m 未満の時は栈橋の床版幅は一般埠頭の床版幅と同じで、岸壁水深 14m 以上の時は床版幅は 36m が標準値と考えられる。

表-14 床版幅の標準値

岸壁水深	床版幅
4.5m 未満	10m
4.5m 以上 7.5m 未満	15m
7.5m 以上	20m

表-15 床版幅の標準値（大型コンテナ埠頭）

岸壁水深	床版幅
14m 未満	一般埠頭の床版幅
14m 以上	36m

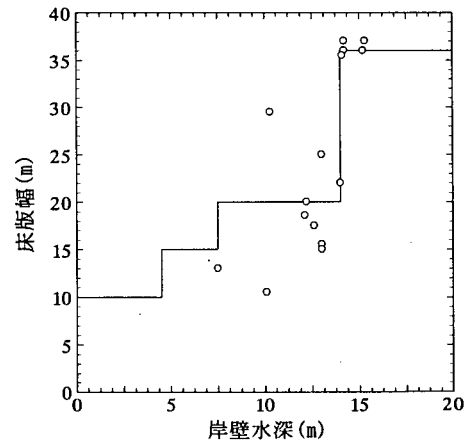


図-39 岸壁水深と床版幅

d) 床版重量

床版の重量は、床版の幅のベキ乗と設計震度のベキ乗の積に比例するように見受けられ、その関係は次式のとおり表現される。

$$\ln(W_{slab}) = a_{321} \cdot \ln(B_{slab}) + a_{322} \cdot \ln(k_{eq}) + a_{323} \quad (60)$$

ここで、 W_{slab} は床版重量 (t/m), $a_{321} \sim a_{323}$ は定数, B_{slab} は床版幅 (m), k_{eq} は設計震度である。この式を使って最小自乗法により $a_{321} \sim a_{323}$ を推定すると 0.488, 0.300, 2.88 となり、それぞれの t 値は 2.4, 1.9, 3.7 となる。こ

ここで、推定に用いたサンプル数は 17, 重相関係数は 0.73 である。

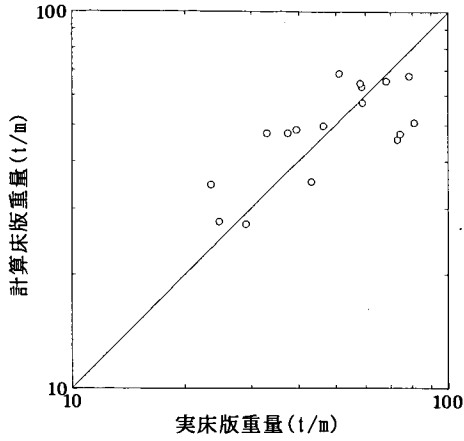


図-40 床版重量の実際と推定

e) L型ブロック高

L型ブロックの高さは、データ数が少なく、得られたデータから曲線形状を判断することができないため、岸壁水深に比例すると割り切る。その関係は次式のとおりである。

$$H_{Lblock} = a_{33} \cdot D_{quay} \tag{61}$$

ここで、 H_{Lblock} はL型ブロック高 (m), a_{33} は定数, D_{quay} は岸壁水深 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{33} を推定すると 0.420 となり、その t 値は 8.8 となる。ここで、推定に用いたサンプル数は 5, 重相関係数は 0.98 である。

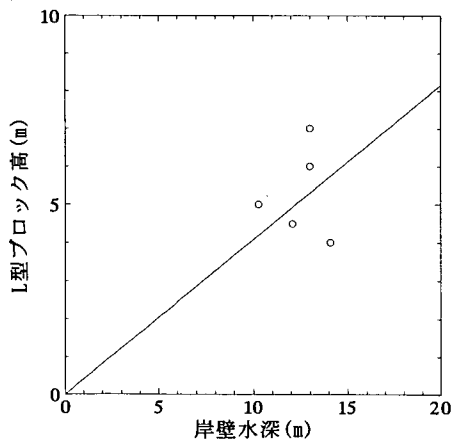


図-41 岸壁水深とL型ブロック高

f) L型ブロック重量

L型ブロックの重量は、得られたデータから曲線形状を判断することができないため、岸壁水深の2乗に比例すると割り切ると、それらの関係は次式のとおりとなる。

$$\ln(W_{Lblock}) = 2 \cdot \ln(D_{quay}) + a_{34} \tag{62}$$

ここで、 W_{Lblock} はL型ブロックの重量 (t/m), a_{34} は定数, D_{quay} は岸壁水深 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{34} を推定すると -2.13 となり、その t 値は -25 となる。ここで、推定に用いたサンプル数は 5, 重相関係数は 0.65 である。

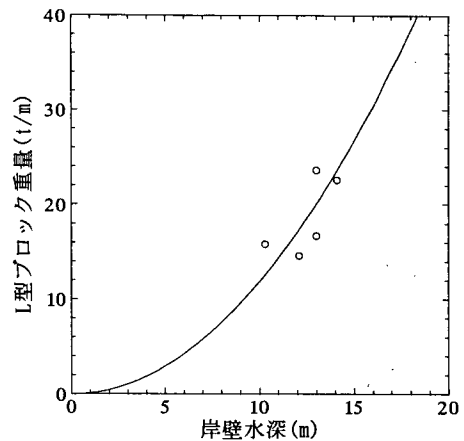


図-42 岸壁水深とL型ブロック重量

g) L型ブロック上部工重量

L型ブロックの上部工の重量は、得られたデータから曲線形状を判断することができないため、岸壁水深の2乗に比例すると割り切ると、それらの関係は次式のとおりとなる。

$$\ln(W_{capping}) = 2 \cdot \ln(D_{quay}) + a_{35} \tag{63}$$

ここで、 $W_{capping}$ は上部工重量 (t/m), a_{35} は定数, D_{quay} は岸壁水深 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{35} を推定すると -3.60 となり、その t 値は -29 となる。ここで、推定に用いたサンプル数は 5, 重相関係数は 0.55 である。

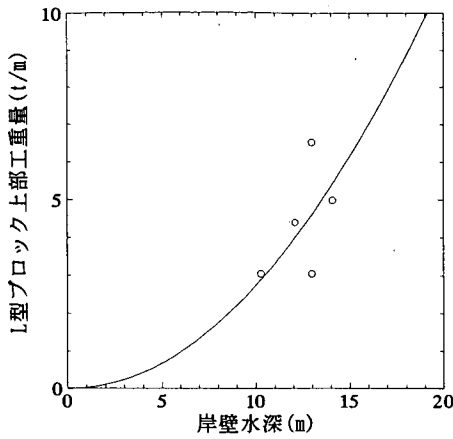


図-43 岸壁水深と上部工重量

h) 裏込体積

裏込の体積は、得られたデータから関数の形状を判断することができないため、L型ブロック高の2乗に比例すると割り切ると、それらの関係は次式のとおりとなる。

$$\ln(V_{backing}) = 2 \cdot \ln(H_{Lblock}) + a_{36} \quad (64)$$

ここで、 $V_{backing}$ は裏込体積 (m^3/m)、 a_{36} は定数、 H_{Lblock} はL型ブロック高 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{36} を推定すると0.877となり、その t 値は9.0となる。ここで、推定に用いたサンプル数は4、重相関係数は0.83である。

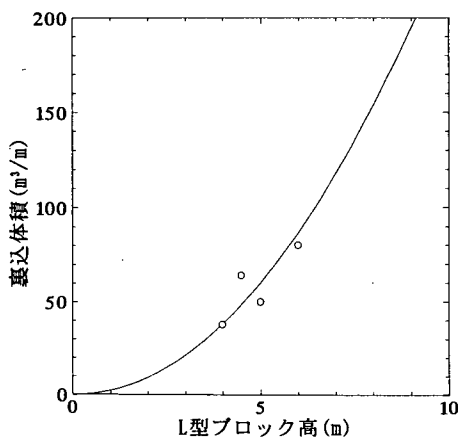


図-44 L型ブロック高と裏込体積

i) 捨石体積

捨石の体積は、岸壁水深12m以下で $33m^3/m$ で一定で、岸壁水深12mから急激に増大している。得られたデータから岸壁水深12m以上の部分の関数の形状を判断する

ことができないため、(岸壁水深 - L型ブロック高)の2乗に比例すると割り切る。当該区間の関係は次式のとおりとなる。

$$V_{mound} = a_{37} \cdot (D_{quay} - H_{Lblock})^2 \quad (65)$$

ここで、 V_{mound} は捨石体積 (m^3/m)、 a_{37} は定数、 D_{quay} は岸壁水深 (m)、 H_{Lblock} はL型ブロック高 (m) である。この式を使って最小自乗法により a_{37} を推定すると3.05となり、それぞれの t 値は3.2となる。ここで、推定に用いたサンプル数は4、重相関係数は0.90である。

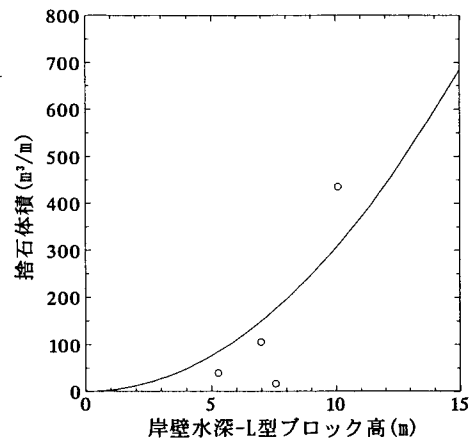


図-45 (岸壁水深-L型ブロック高)と捨石体積

j) 地盤改良

地盤が軟弱な場合に、地盤改良が行われる。最も代表的な地盤改良の方法はSCPである。SCPの深さ方向の改良は、通常、基盤層まで行われるため、原地盤水深との関連性があるとは考えられない。また、L型ブロック高 H_{Lblock} に対するSCPの改良幅 B_{SCP} の比率 ($BHL_{SCP} : B_{SCP}/H_{Lblock}$ 以下、「SCP改良幅比率」という。) あるいはSCP改良体積も原地盤水深との関連性があるとは考えられない。このため、地盤改良を考慮する場合のデフォルト値として、SCPの砂杭の長さ H_{SCP} とSCP改良幅比率 BHL_{SCP} を標準値を想定して用いる。L型ブロックを使用している新規施設で、改良形状が単純なものは、得られたデータの中では四日市港霞ヶ浦埠頭地区南埠頭-12m岸壁(東)しかないため、ここでの値を標準値として使用する。それぞれの値は12.5m (H_{SCP})、4.6 (BHL_{SCP}) である。改良率は80%である。

k) 岸壁クレーン軌条の基礎

コンテナ埠頭の岸壁に大型岸壁クレーンを設置する場合は、クレーン軌条は2つとも栈橋床版上に設置すると想

定する。このための基礎工は特に施さないと想定する。

6.4 ヤード舗装

(1) 舗装

コンテナターミナルの舗装は、大まかには、トレーラー、フォークリフト、トップリフタ、乗用車等の走行区画（以下、「車両区画」という。）、RTG 区画、コンテナ蔵置区画、の3種類に分類できる。

車両区画の舗装は、アスファルトコンクリートを使用し、表層を5cm、基層を5cmとするのが一般的である。計算を単純化するために、舗装は表層と基層を一体として材料等を想定する。路盤は条件によって材料や厚さ等が変化する。路盤は碎石を使うのが一般的であるため、材料、運搬・施工方法の素性としては土砂に近い。このため、計算を単純化するため、埋立土砂と同じであるとみなして計算を行う。

RTG 区画は、幅125cm、厚さ27cm（2cmのグラウトを含めた換算厚さである。）のRTG用のPC版を路床上に設置すると想定する。PC版の周辺は車両区画と同じ舗装をすると想定する。

コンテナ蔵置区画は、幅150cm、厚さ27cm（2cmのグラウトを含めた換算厚さである。）のコンテナ支承用のRC版を路床上に設置すると想定する。RC版の周辺は車両区画と同じ舗装をすると想定する。

RTG版の総面積およびコンテナ版の総面積を想定し、その残りから建物敷地面積を差し引いた面積がアスファルト舗装面積になる。横浜港南本牧MC1-2のコンテナターミナルの場合は、CY（Container Yard）（ここでは、MY（Marshaling Yard）と外周道路と岸壁エプロンを含めて考える。）が全体の70%である。CYの面積に対して、コンテナ版の総面積は10%、RTG版の総面積は9%となり、残りの81%がアスファルト舗装である。また、建物の敷地面積の合計は、CY以外の区域の面積の24%であり、その残りがアスファルト舗装である。舗装の耐用年数は、税法に基づく耐用年数に関する省令（財務省、2003）によれば50年（構築物、鉄骨鉄筋コンクリート造又は鉄筋コンクリート造のもの（前掲のものを除く）、岸壁、さん橋、防壁（爆発物用のものを除く）、堤防、防波堤、塔、やぐら、上水道、水そう及び用水用ダム）である。

(2) 地盤改良

ターミナル用地が新規埋立地の場合で、良質な埋立柱材を用いていない場合は、地盤改良が必要である。地盤改良は、最も代表的な手法であるSD（sand drain）を仮定する。SDの砂杭の量は、横浜港本牧BC突堤改良工事の例から、砂杭の直径：40cm、ピッチ：2.5m、打設深さ：

原地盤水深まで、サンドマット厚さ：50cmをSDの標準的な量と仮定する。また、近年、工期短縮のためにプレロードが行われる場合が多いが、それらは、別途使用目的のある材料の仮置きとなる、特に港湾内で使用する材料の仮置きという場合が多いため、一般にはプレロードの材料に関するエネルギー消費およびCO2排出を考慮する必要はない。

6.5 荷役機械

岸壁クレーンは、本格的コンテナターミナルで採用されているシングルトロリのコンテナ荷役用のローブトロリ式ガントリークレーンを想定する。ヤード荷役形式は大型コンテナターミナルでは世界的に主流となっているトランスファークレーン式を想定し、ヤード荷役機械はトランスファークレーンとヤードトレーラーから構成されると考える。また、トランスファークレーンは、日本では主流となっているRTGを想定する。

RTG方式を採用している清水港コンテナヤードにおける2000年度の電力、燃料油、油脂類、ワイヤロープ、タイヤの消費量から日本建築学会地球環境委員会LCA指針策定小委員会（1998）の(I-A₄)型の物量単位あたりの排出原単位を使用して推計した年間のCO2排出量の発生源別構成比は表-16のとおりである。機材・施設別の発生源は岸壁クレーン、ヤード荷役機械、リーファー、ヤード照明、管理棟に整理分類することができる。

表-16 清水港コンテナターミナルのCO2排出量構成

発生源	構成比
岸壁クレーン	5.9%
RTG	42.8%
ヤードトレーラー	15.7%
トップリフタ	17.3%
フォークリフト	0.3%
リーファー	13.7%
ヤード照明	1.3%
管理棟	2.1%
メンテナンス棟、ゲート等	0.8%
合計	100.0%

荷役機械等の環境負荷量のうちの対象貨物の寄与分は、ユニットロードの量によって按分して求める。按分のためのユニットロードの数量は、理論上、ヤード単位もしくは装置単位で考えることができるが、ここでは簡便のため、ヤード単位で考えることとする。

(1) 岸壁クレーン

わが国の岸壁クレーンの幾つかの設計を参考に、Panamax型(P型)、Post Panamax型(PP型)、Super Panamax型(SP型)の3ケースについて、荷役時エネルギー使用

量, 材料使用量, 製作・組立据付時エネルギー使用量を整理する。こうした分析を行うにあたり, 岸壁クレーンの実態を把握するために, 全国の岸壁クレーンの設計諸元の分析と荷役実態の調査を2000年度に実施した(鈴木武・佐藤英治, 2003)。それらの知見とコンテナ船の大型化の動向を勘案し, 岸壁クレーンの代表的な船上デッキ積載可能コンテナの条件を, P型では13列4段, PP型では17列6段, SP型では22列7段と想定する。これらを指標として, 各サイズの岸壁クレーンの諸元を表-17のとおり想定する。

表-17 岸壁クレーンの諸元

項目	P型	PP型	SP型
デッキサイズ	13列4段	17列6段	22列7段
定格荷重	30.5 t	40.6t	50.0t
アウトリーチ	37m	47m	62m
レールスパン	16m	30m	30m
バックリーチ	11m	15m	16m
レール上揚程	30m	36m	39m
巻上速度	50-120m/min	60-150m/min	70-150m/min
横行速度	150m/min	180m/min	210m/min
走行速度	45m/min	45m/min	45m/min
制御方式	インバータ	インバータ	インバータ
電源	6600V	6600V	6600V

注1) 定格荷重はコンテナの場合を示す。

注2) ハッチカバーは全て35.6t。

注3) 岸壁法線と海レール間距離は全て3mである。

注4) 起伏速度は全て8min/cycleである。

a) 荷役

岸壁クレーンの稼働により発生する環境負荷量は, 取扱コンテナの重量あたりで等しいと考え, 清水港袖第一埠頭の第2号および第5号岸壁クレーンの2000年度のデータを用いて, 当該クレーンの年間の電力消費量(kWh/year)を, 当該クレーンが荷役したコンテナの総重量(t/year)で除すことにより, P型およびPP型の岸壁クレーンの荷役コンテナの総重量あたりの電力消費量(kWh/t)を求める。年間の取扱コンテナの総重量は(実コンテナの平均総重量×実コンテナの年間取扱個数) + (空コンテナの平均総重量×空コンテナの年間取扱個数)によって算出する。この結果, 岸壁クレーンの荷役に伴う取扱コンテナの単位重量あたりの電力消費量はP型が0.462kWh/t, PP型が0.243kWh/tとなる。これらを参考に, 岸壁クレーンの諸元の違いによる荷役に要する運動エネルギーの比を求め, その比に従いSP型岸壁クレーンの単位エネルギー使用量を推計して用いるものとする。

岸壁クレーンの取扱コンテナの総重量あたりの電力消費に伴う環境負荷量は, 次の通りとなる。

$$E_{weight,i,j}^{qc,ope} = e_{electric}^{qc,ope} \cdot EP_{weight,i,j}^{qc,ope} \quad (66)$$

ここで, $E_{weight,i,j}^{qc,ope}$ は i 港 j ヤードにおける岸壁クレーンの稼働によるコンテナ総重量あたりの環境負荷量(kcal/t, t-c/t), $e_{electric}^{qc,ope}$ は電力消費の環境負荷原単位(kcal/kWh, t-c/kWh), $EP_{weight,i,j}^{qc,ope}$ は i 港 j ヤードにおける岸壁クレーンの稼働によるコンテナ総重量あたりの電力消費量(kWh/t)である。

これに対象とする岸壁クレーンで荷役するコンテナのうち対象とする全コンテナの総重量を乗じることにより, 対象岸壁クレーンの稼働による環境負荷量を計算する。それら岸壁クレーンごとの稼働による環境負荷量を, 対象とする全ての岸壁クレーンについて合算することにより環境負荷量を求める。これを式に表すと, 次式のとおりとなる。

$$E_{target}^{qc,ope} = \sum_{i \in P} \sum_{j \in R_i^{qc,ope}} \left[E_{weight,i,j}^{qc,ope} \cdot \left(WC_{mi} \cdot NC_{mi,i,j}^{qc,ope} + WC_{kara} \cdot NC_{kara,i,j}^{qc,ope} \right) \right] \quad (67)$$

ここで, $E_{target}^{qc,ope}$ は岸壁クレーンの稼働による環境負荷量の対象貨物の寄与分(kcal, t-c)《年間》, $E_{weight,i,j}^{qc,ope}$ は i 港 j ヤードにおける岸壁クレーンの稼働による単位重量あたりのコンテナを荷役する際の環境負荷量(kcal/t, t-c/t), WC_{mi} は貨物を積載したコンテナの1個あたりの総重量(t), WC_{kara} は空コンテナの1個あたりの総重量(t), $NC_{mi,i,j}^{qc,ope}$ は i 港 j ヤードにおける対象貨物を積載したコンテナの荷役個数《年間》, $NC_{kara,i,j}^{qc,ope}$ は i 港 j ヤードにおける対象貨物に随伴する空コンテナの荷役個数《年間》, $R_i^{qc,ope}$ は i 港における対象貨物を荷役する上で必要なヤードの集合, P は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合である。

b) 製造

岸壁クレーンを1基製作するために要する材料のサイズ別の使用量を, 岸壁クレーンの見積もり事例等を参考に表-18の通り想定する。工場から現時までの海上輸送は, 輸送距離によって大きくエネルギーの消費量が変化するため, 別途推計するものとする。

岸壁クレーンの製作・組立据付に要するエネルギー量を, 岸壁クレーンの見積もり事例等を参考に表-19の通り設定した。製作の工程は切断・加工・溶接, 鋼材の構内運搬, スクラップの輸送を対象としている。

岸壁クレーンの製造による環境負荷量は, 材料やエネルギーの使用量に環境負荷原単位を乗じて合算すること

によって求める。

$$E_{ini,j}^{qc,bld} = N_j^{qc} \cdot \sum_{k \in Z_j^{qc,bld}} (e_k^{qc,bld} \cdot Z_{ini,j,k}^{qc,bld}) \quad (68)$$

ここで、 $E_{ini,j}^{qc,bld}$ は j ヤードの岸壁クレーンの製造による環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 ヤード》、 N_j^{qc} は j ヤードの岸壁クレーンの基数 《1 ヤード》、 $e_k^{qc,bld}$ は第 k 番目の材料・エネルギーの製造・使用による環境負荷原単位 (kcal/unit, t-c/unit)、 $Z_{ini,j,k}^{qc,bld}$ は j ヤードの岸壁クレーンの製造に使用する第 k 番目の材料・エネルギーの量 (unit) 《1 基》、 $Z_j^{qc,bld}$ は j ヤードの岸壁クレーンの製造に使用する材料・エネルギーの種別の集合 《1 基》である。

表-18 岸壁クレーン製作に要する材料の使用量

分類	材料種別	単位	P 型	PP 型	SP 型
構造部分	鋼材	t	580.9	971.5	1,284.3
機械部分	機械装置	t	165.6	108.6	123.2
電気部分	電動機	t	8.0	16.5	19.0
	制御機器	t	11.0	25.0	28.8
	照明設備	k¥	24,620	25,817	29,690
	ケーブル類	t	8.0	12.0	13.8
	配線材料	t	2.0	3.0	3.5
塗料	塗料	t	10.0	11.9	15.8
クレーン重量		t	670	1,060	1,400

表-19 岸壁クレーンの製作等に要するエネルギー等の消費量

分類	エネルギー等	単位	P 型	PP 型	SP 型
工場製作	電力	kWh	162,712	250,162	309,663
	酸素	t	8.6	14.6	19.3
	プロパンガス	t	4.6	7.8	10.3
	シールドガス	t	14.9	25.3	33.4
	軽油	l	138	207	275
組立据付	電力	kWh	750	750	750
	ガソリン	l	192	192	192
	軽油	l	615	873	978
	A重油	l	19,723	19,723	19,723
運転調整	電力	kWh	5,400	12,000	18,600

岸壁クレーンを製造することによる環境負荷量に対する対象貨物の寄与分は、コンテナ 1 個あたりの取扱時間が等しいとみなし、(対象取扱コンテナの個数/全取扱コンテナの個数/耐用年数) と考える。クレーンの耐用年数は、財務省令 (財務省, 2003) によれば 17 年程度 (車両及び運搬具, 前掲のもの以外のもの, その他のもの・貨物自動車・その他のもの) である。それらをもとに、岸壁クレーンの製造に伴う環境負荷量の対象貨物の寄与分を各ヤードごとに求め、対象とする全てのヤードについて合算することにより環境負荷量を求める。

$$E_{target}^{qc,bld} = \sum_{i \in P} \sum_{j \in R_i^{qc,ope}} \left(\frac{E_{ini,j}^{qc,bld}}{T_{life}^{qc,bld}} \cdot \frac{(WC_{mi} \cdot NC_{mi,target,j}^{qc,ope} + WC_{kara} \cdot NC_{kara,target,j}^{qc,ope})}{(WC_{mi} \cdot NC_{mi,total,j}^{qc,ope} + WC_{kara} \cdot NC_{kara,total,j}^{qc,ope})} \right)_i \quad (69)$$

ここで、 $E_{target}^{qc,bld}$ は岸壁クレーンの製造による環境負荷量の対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{ini,j}^{qc,bld}$ は j ヤードの岸壁クレーンの製造による環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 ヤード》、 $T_{life}^{qc,bld}$ は岸壁クレーンの耐用年数 (year)、 WC_{mi} は貨物を積載したコンテナの 1 個あたりの総重量 (t)、 WC_{kara} は空コンテナの 1 個あたりの総重量 (t)、 $NC_{mi,target,j}^{qc,ope}$ は j ヤードにおける対象貨物を積載したコンテナの荷役個数 《年間》、 $NC_{kara,target,j}^{qc,ope}$ は j ヤードにおける対象貨物に随伴する空コンテナの荷役個数 《年間》、 $NC_{mi,total,j}^{qc,ope}$ は j ヤードにおける貨物を積載したコンテナの全荷役個数 《年間》、 $NC_{kara,total,j}^{qc,ope}$ は j ヤードにおける空コンテナの全荷役個数 《年間》、 $R_i^{qc,ope}$ は i 港における対象貨物を荷役する上で必要なヤードの集合、 P は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合である。

(2) RTG

コンテナターミナル内の荷役形式は、日本で最も多く採用されているトランスファークレーン方式を想定する。トランスファークレーンは、多くのターミナルで採用されている RTG を想定する。日本は地価が高いためシャシ方式は極めて成立が困難である。残る代表的な荷役方式であるストラドルキャリア方式は、荷役用の機械であるストラドルキャリアをヤード内運搬にも使用するため、荷役機械部分を載せた運搬機がヤード内を運搬することになる。このため、一般に、エネルギー消費量はトランスファークレーン方式のほうが小さくなる。

a) 荷役

RTG の燃料消費量は、実績値を用いて推計する。ヤード内荷役は、ヤード面積が狭い場合は、実コンテナを RTG で荷役し、空コンテナをトップリフタやフォークリフトで荷役するケースが多く、ヤード面積が広い場合は、全てのコンテナを RTG で荷役するケースが多い。ここでは、新型のコンテナヤードを推計することを想定し、全てのコンテナを RTG で荷役すると考える。RTG の燃料消費量は、RTG で荷役したコンテナの総重量 (t/year) に比例する。これは、TRG の消費エネルギーの大部分がスプレッドの運動によるものであることによる。このため、適当なコンテナターミナルについて、全 RTG の年間の燃料

消費量 (l/year) を, 全 RTG の空コンテナを含む取扱コンテナの年間総重量 (t/year) で除すことにより, RTG の取扱コンテナの総重量あたりの燃料消費量を求めることができる. 清水港のコンテナターミナル (袖師埠頭および興津埠頭) の 2000 年度のデータによれば, RTG の取扱コンテナの総重量あたりの燃料消費量は 0.0967l/t である.

ヤード荷役機械がコンテナ荷役する際に, 燃料の燃焼によって発生する取扱コンテナ総重量あたりの環境負荷量は次のとおりである.

$$E_{weight}^{rig,ope} = e_{fuel}^{rig,ope} \cdot EP_{weight}^{rig,ope} \quad (70)$$

ここで, $E_{weight}^{rig,ope}$ は RTG の稼動ともなう荷役コンテナの総重量あたりの環境負荷量 (kcal/t, t-c/t), $e_{fuel}^{rig,ope}$ は RTG の燃料の環境負荷原単位 (kcal/l, t-c/l), $EP_{weight}^{rig,ope}$ は RTG の稼動に伴う荷役コンテナの総重量あたりの燃料消費量 (l/t) である.

RTG の環境負荷原単位に, 対象とする貨物を積載したコンテナとそれに随伴する空コンテナの総重量 (t) を乗じることにより, 対象とするヤードにおける RTG の環境負荷量を求める. ヤードごとの RTG の稼動による環境負荷量を求め, それを対象とする全てのヤードについて合算することにより環境負荷量を求める. これを式に表すと次式のとおりとなる.

$$E_{target}^{rig,ope} = \sum_{i \in P} \sum_{j \in R_i^{rig,ope}} \left(E_{weight}^{rig,ope} \cdot \left(WC_{mi} \cdot NC_{mi,i,j}^{rig,ope} + WC_{kara} \cdot NC_{kara,i,j}^{rig,ope} \right) \right) \quad (71)$$

ここで, $E_{target}^{rig,ope}$ は RTG の稼動に伴う環境負荷量の対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》, $E_{weight,i,i}^{rig,ope}$ は RTG の稼動に伴う荷役コンテナの総重量あたりの環境負荷量 (kcal/t, t-c/t), WC_{mi} は貨物を積載したコンテナの 1 個あたりの総重量 (t), WC_{kara} は空コンテナの 1 個あたりの総重量 (t), $NC_{mi,i,j}^{rig,ope}$ は i 港 j ヤードにおける対象貨物を積載した荷役コンテナの個数 《年間》, $NC_{kara,i,j}^{rig,ope}$ は i 港 j ヤードにおける対象貨物に随伴する空の荷役コンテナの個数 《年間》, $R_i^{rig,ope}$ は i 港における対象貨物を荷役する上で必要なヤードの集合, P は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合である.

b) 製造

RTG を 1 基製造するために要する材料の使用量を, RTG 見積もり事例等を参考に表-20 の通り設定した. それらの推定のために想定する RTG は, 定格荷重: 40.6t,

揚程: 23.5m (1 over 4), 巻速度: 20-50m/min, 横行: 70m/min, 走行: 135m/min, 制御方式: インバータである.

RTG の製作に要するエネルギー等の消費量を, 見積もり事例等を参考に表-21 の通り設定した. 製作の工程は切断・加工・溶接, 鋼材の構内運搬, スクラップの輸送を対象としている. 工場から現時までの海上輸送は, 輸送距離によって大きくエネルギーの消費量が変化するため, 別途推計するものとする.

表-20 RTG 製作に要する材料の使用量

分類	材料種別	単位	RTG
構造部分	鋼材	t	55.2
	機械部分		
	機械装置	t	38.5
	タイヤ	t	2.6
電気部分	電動機	t	3.5
	制御機器	t	4.5
	エンジン	t	1.6
	発電機	t	2.2
	照明設備	k¥	502
	ケーブル類	t	2.7
	配線材料	t	0.3
塗料	塗料	t	1.0

表-21 RTG 製作等に要するエネルギー等の消費量

分類	エネルギー等	単位	RTG
工場製作	電力	kWh	24,200
	酸素	t	0.84
	プロパンガス	t	0.45
	シールドガス	t	1.46
	軽油	l	13.8
据付	軽油	l	10.5
	A重油	l	3,651
運転調整	軽油	l	720

RTG の製造による環境負荷量は, 材料やエネルギーの使用量に環境負荷原単位を乗じて合算することによって求める.

$$E_{ini,j}^{rig,bld} = N_j^{rig} \cdot \sum_{k \in Z_j^{rig,bld}} \left(e_k^{rig,bld} \cdot Z_{ini,j,k}^{rig,bld} \right) \quad (72)$$

ここで, $E_{ini,j}^{rig,bld}$ は j ヤードの RTG の製造による環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 ヤード》, N_j^{rig} は j ヤードの RTG の基数 《1 ヤード》, $e_k^{rig,bld}$ は k 番目の材料・エネルギーの製造・使用による環境負荷原単位 (kcal/unit, t-c/unit), $Z_{ini,j,k}^{rig,bld}$ は j ヤードの RTG の製造に使用する第 k 番目の材料・エネルギーの量 (unit) 《1 基》, $Z_j^{rig,bld}$ は j ヤードの RTG の製造に使用する材料・エネルギーの種別の集合 《1 基》である.

RTG を製造することによる環境負荷量に対する対象貨物の寄与分は, コンテナ 1 個あたりの取扱時間が等し

いとみなし、(対象荷役コンテナの総重量/全荷役コンテナの総重量/耐用年数)と考える。RTGの耐用年数は、財務省令(財務省、2003)によれば17年程度(車両及び運搬具、前掲のもの以外のもの、その他のもの・貨物自動車・その他のもの)である。それらをもとに、岸壁クレーンの製造に伴う環境負荷量の対象貨物の寄与分を各ヤードごとに求め、対象とする全てのヤードについて合算することにより環境負荷量を求める。

$$E_{target}^{rig, bld} = \sum_{i \in P} \sum_{j \in R_i^{ope}} \left(\frac{\frac{E_{ini, j}^{rig, bld}}{T_{life}^{rig, bld}}}{\left(\frac{WC_{mi} \cdot NC_{mi, target, j}^{qc, ope}}{+ WC_{kara} \cdot NC_{kara, target, j}^{qc, ope}} \right)} \right) \quad (73)$$

ここで、 $E_{target}^{rig, bld}$ は RTG の製造による環境負荷量の対象貨物の寄与分 (kcal, t-c) 《年間》、 $E_{ini, j}^{rig, bld}$ は j ヤードの RTG の製造による環境負荷量 (kcal, t-c) 《1 基》、 $T_{life}^{rig, bld}$ は RTG の耐用年数 (year)、 WC_{mi} は貨物を積載したコンテナの 1 個あたりの総重量 (t)、 WC_{kara} は空コンテナの 1 個あたりの総重量 (t)、 $NC_{mi, target, j}^{qc, ope}$ は j ヤードにおける対象貨物を積載した荷役コンテナ(海上出入)の個数《年間》、 $NC_{kara, target, j}^{qc, ope}$ は j ヤードにおける対象貨物に随伴する空の荷役コンテナ(海上出入)の個数《年間》、 $NC_{mi, total, j}^{qc, ope}$ は j ヤードにおける貨物を積載した全荷役コンテナ(海上出入)の個数《年間》、 $NC_{kara, total, j}^{qc, ope}$ は j ヤードにおける空の全荷役コンテナ(海上出入)の個数《年間》、 R_i^{ope} は i 港における対象貨物を荷役する上で必要なヤードの集合、 P は対象貨物の輸送に必要な港湾の集合である。

(3) リーフアー

リーフアーは庫内の設定温度と外気温の差により消費電力が変化し、またコンテナの表面積の違いによっても変化する。設定温度と外気温の差はさまざまにばらつくので、それはある平均的な状態にあると考え、この要因による変化は考慮しない。コンテナの表面積は 8.5ft×8ft×20ft と 8.5ft×8ft×40ft で約 55:100 となるので、概ね 1:2 であると考え、リーフアーTEUあたりで電力消費量を考える。

リーフアーの電力消費量は、清水港の 2000 年度の実績で 10.6kw/TEU で、リーフアーの滞留時間は約 3 日であった。そして、それらを TEU あたりの電力消費量にすると 763kWh/TEU となる。これを参考にリーフアーの電力

消費量を設定し、それにリーフアーの取扱個数を乗じることにより、リーフアーによる電力消費量を求めることができる。そして、それに電力消費による環境負荷原単位を乗じることにより、リーフアーによる環境負荷量を求めることができる。

(4) ヤード照明

夜間荷役が多い清水港の 2000 年度の実績で、海上に出入する空を含むコンテナの TEU あたりのヤード照明の電力消費量は 0.548kWh/TEU であった。これを勘案して TEU あたりの電力消費量を設定し、それに海上に出入りする空を含むコンテナの TEU を乗じることにより、夜間荷役が多い場合のヤード照明による電力消費量を推計することができる。そして、それに電力消費による環境負荷原単位を乗じることにより、ヤード照明による環境負荷量を推計することができる。

(5) 管理棟等

海上に出入りする空を含むコンテナの TEU あたりの管理棟、メンテナンスショップ、ゲート等の電力消費量は、清水港の 2000 年度の実績で 1.18kWh/TEU、四日市港の 2000 年度実績で 2.33kWh/TEU であり、両者の平均は 1.76kWh/TEU である。これらを参考に管理棟の電力消費量の発生源単位を設定し、それに電力消費による環境負荷原単位を乗じることにより、管理棟等による環境負荷量を推計することができる。

7. まとめ

資源や環境の制約が顕在化しつつある現在、環境負荷の少ない循環型社会への移行が強く求められている。大規模な施設整備とその上に成立する大量の物資輸送等の港湾サービスは、大量の物質やエネルギーの消費を伴うため、港湾事業の実施においては環境負荷の最小化の努力が求められる。その実現に向けて、原料調達・製造・使用・廃棄の全ステージを通じた適切な環境負荷の評価手法が必要となり、港湾分野に適用できる実用的な環境負荷の推定手法を練り上げて行く必要がある。本研究では、環境負荷をエネルギー消費と CO2 排出に絞る。これらについて環境負荷量の推定手法の信頼性と実用性を高めるための基本的な条件設定の考え方と計算の基礎となる数値の整理を行った。それらの作業は、より具体的には、推計しようとする機能単位とシステムの境界の設定、基本的なサブシステムの構成の整理、各サブシステムのモデル化や条件設定のための考え方と代表的な推計式の整理、採用すべき説明変数とパラメータの値の設定の考え方と値の設定を補助するための基礎的な情報・

データの収集・整理、環境負荷原単位についての情報の収集・整理と原単位使用についての留意点の整理、環境負荷を対象とする機能単位に配分する方法の基本形の整理などを、ISO14040s の考え方を基礎として行った、というものである。

ISO14040s が規定する LCA の構成のうち、「影響評価」は合理的な実施が難しいと考えられたため、これを除く概念である LCI 分析を行うという立場を本研究ではとることにした。そして、汎用的な LCI 分析手法を港湾分野に適用すると作業損失が多くなるため、汎用的な手法に完全に準拠するという方針はとらず、分析の需要が比較的大きいと予想されるユニットロードの海上輸送を対象とした専用目的の LCI 分析手法を構築するという方針を採用した。

分析の対象となるシステムを、大きく海上輸送モデル、陸上輸送モデル、港湾モデルに分け、それぞれについて標準的な状態を表現する考え方、関係式、パラメータ値、説明変数の代表値等を整理した。

海上輸送モデルは、船の運航ルートと貨物の移動ルートを設定し、船舶の運航・停泊時の環境負荷発生量を実測値から求めた関係式等によって求め、さらに建造時の環境負荷を求め、それを重量ベースで按分することによって対象とする環境負荷量を求める方法を整理した。また、船舶の建造時の環境負荷を求めるために、代表的な船舶の諸元、材料構成等を整理した。

陸上輸送モデルについては、各 OD 貨物量に対して輸送距離と平均走行速度を設定し、そこから村野昭人・鈴木武（2003）の方法等によって環境負荷量を求め、それを重量ベースで按分することによって対象とする環境負荷量を求める方法を整理した。また、車両の建造時の環境負荷を求めるため、代表的な大型車両の諸元、材料構成等を整理した。

港湾施設モデルは、対象施設を防波堤、岸壁、エプロン、ヤード、岸壁クレーン、トランスファークレーンとし、それらについて主要な諸元を設定したときの材料構成等を求め、そこから環境負荷を求め、個数もしくは重量ベースで按分することによって対象とする環境負荷量を求める方法を整理した。こうした計算を簡略化するため、防波堤～ヤードについて設置条件から必要諸元を求め、そこから材料構成を求める方法を整理した。荷役機械については、サイズ別の材料構成を整理した。運用時の環境負荷については、荷役条件から環境負荷量を求める原単位を整理した。

以上、著者が 2000 年 4 月に研究に着手し、2001 年 4 月から本格的な取組みを始め、多くの方々の協力を得て

研究を行ってきた成果である。本研究でまとめた知見を活用すれば、港湾を通過するユニットロードの輸送に伴うエネルギー消費量と CO2 排出量の推計の精度と実用性を向上させることができるものとする。しかし、本研究では、情報や作業の不足から考え方の整理や情報・データの整理を行わず、他に譲るとした部分が少なからず存在する。また、本研究で得られた知見を具体的事例に当てはめて精度を検証し、過敏なあるいは説明力の低いパラメータやサブシステムの改良、欠落している重要なパラメータやサブシステムの追加を行うこともまだ行っていない。これらは重要な課題であり、今後、機会を捉えて取組みを進めていかなければならないものである。このように課題は残るが、目的とする環境負荷の推計の精度と実用性を向上するという意味では、かなり多くのまとめた知見を整理することができたと思う。こうした知見が実務において有効に活用されることを期待したい。

(2004 年 6 月 4 日受付)

謝辞

高杉孝弘（当時、港湾荷役機械化協会港湾荷役システム調査研究委員会委員長）氏および高橋雄次（当時、港湾荷役機械化協会参事）氏には、荷役機械の情報・データ収集・整理に尽力して頂くとともに、荷役機械に関して助言を多数頂いた。松本英雄（当時、国土技術政策総合研究所港湾研究部主任研究官）氏には、港湾施設の設計諸元を調査するための調査票の作成・配布・回収を実施して頂くとともに、港湾施設の設計データの整理方法について多くの有益な意見を頂いた。村野昭人（国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸域システム研究室研究官）氏には、コンテナトレーラーの燃費の実測・分析・モデル化に力を尽くして頂いた。その他の方々にも貴重なデータの提供や分析・整理にあたっての助言を頂いた。また別の方々には、膨大なデータの入力・チェック・修正・整理に協力を頂いた。細川恭史（国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部）部長には、本論文のまとめ方について種々の有益な指摘を頂いた。藤井喜一郎（港湾荷役機械システム協会）専務理事には、研究開始の段階から本研究の意義を理解頂き、様々な面で便宜・調整をとって頂いた。ここに記して、協力を頂いた方々に感謝の意を表す。

参考文献

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996) :
Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC.
- ISO (International Organization for Standardization)
 (1997) : *ISO14040*, ISO.
- Leontief, W. W. (1966): *Input-Output Economics* (新居田宏
 訳 (1969) : 産業連関分析, 岩波書店.)
- 赤倉康寛・高橋宏直・中本隆 (1998) : 統計解析等による
 対象船舶の諸元, 港湾技研資料 No.910, 港湾技術
 研究所
- 伊加賀俊治・外岡豊 (2004) : LCA の研究動向, 建物の
 LCA 指針, 建築学会, pp.7-18.
- 井村秀文編著 (2001) : 建設の LCA, オーム社.
- 加藤博和 (2004) : 交通活動に伴う環境負荷のライフサイ
 クル評価手法, 環境科学会誌, Vol.17, No.2, 環境
 科学会, pp.141-145.
- 加藤博和・大浦雅幸 (2000) : 新規鉄道整備による CO2
 排出量のライフ・サイクル評価法の開発, 土木計画
 学研究・論文集, No.17, 土木学会, pp.471-479.
- 環境庁編 (1998) : 平成 10 年度版環境白書, ぎょうせい.
- 環境庁大気保全局大気規制課編 (1993) : 窒素酸化物総量
 規制マニュアル (改訂版), 公害対策研究センター.
- 環境管理協会 (1998) : LCA 実務入門 (LCA 実務入門編
 集委員会編), 環境管理協会.
- 北村俊夫・磯邊修 (2000) : 12 段電子制御変速操作装置,
Motorring, Vol.10, 自動車技術協会.
- 公害研究対策センター窒素酸化物検討委員会 (2000) : 窒
 素酸化物総量規制マニュアル, 公害研究対策センタ
 ー.
- 交通安全環境研究所 (2003) : 交通安全環境研究所講演会
 講演概要集, 交通安全環境研究所.
- 国土交通省港湾局監修 (1999) : 港湾の施設の技術上の基
 準・同解説, 日本港湾協会.
- 国土交通省自動車交通局技術安全部 (2003) : トラック・
 バス等の重量車の燃費評価手法を取りまとめました,
 国土交通省記者発表資料.
- 財務省 (2003) : 減価償却資産の耐用年数等に関する省令
 (昭和四十年三月三十一日大蔵省令第十五号, 最終改
 正 : 平成一五年三月三十一日財務省令第三八号)
- 資源エネルギー庁総合政策課 (2002), エネルギー資源別
 標準発熱量表の改訂について (平成 14 年 2 月).
- 自動車技術会 (2003) : 2003 年版自動車諸元表, 自動車
 技術会.
- 鈴木武・佐藤英治 (2003) : 大型コンテナクレーンの荷役
 実態と荷役動作モデルの構築, 国土技術政策総合研
 究所資料, No.59, 国土技術政策総合研究所.
- 全日本トラック協会 (1999) : 省エネ運転による燃料節減
 効果, http://www.torakyo-hiroshima.or.jp/03_kaiin/07_shoene.html
- 武田信之 (1992) : 大型トラックの設計, 山海堂.
- ダンロップ (2004) : ダンロップ「DECTEC」採用のトラ
 ック・バス用タイヤ, <https://www.dunlop.co.jp>.
- 地球環境センター (2003) : 温暖化対策クリーン開発メカ
 ニズム事業調査 実施マニュアル(Ver.6), 地球環境
 センター.
- 外岡豊・伊加賀俊治 (2003) : 産業連関表の利用, 建物の
 LCA 指針, 日本建築学会, pp.81-86.
- 南齋規介・森口祐一・東野達 (2002) : 産業連関表による
 環境負荷原単位データブック (3EID) - LCA のイン
 ベントリデータとして -, 国立環境研究所地球環境
 研究センター.
- 日本建築学会 (2003) : 建物の LCA 指針, 日本建築学会.
 日本建築学会地球環境委員会 LCA 指針策定小委員会
 (1998) : 建物の LCA 指針 (案), 日本建築学会.
- 日野自動車 (2004) : トラック・バスの豆知識,
http://www.hino.co.jp/j/world/faq/1_001.html.
- 船尾泰文 (2001) : これからのコンテナ船の需給動向 - 大
 型コンテナ船の大量竣工はいかなる影響を及ぼすの
 か, 日本工業新聞.
- 松本克彦・菅野秀一 (2000) : 大型トラックの基本構造,
Motorring, Vol.10, 自動車技術協会.
- 未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会編 (1995) :
 LCA のすべて - 環境への負荷を評価する -, 工業調
 査会.
- 宮沢健一編 (1995) : 産業連関分析入門, 日本経済新聞社.
- 村野昭人・鈴木武 (2003) : 陸上コンテナ輸送における燃
 料消費特性の把握, 第 31 回環境システム研究論文発
 表会講演集, 土木学会, pp.421~429.
- 棚山富士男 (2000) : トラック技術の現状, *Motorring*,
 Vol.10, 自動車技術協会.
- 本藤祐樹・森泉由恵・外岡豊 (2001) : 産業連関表 (1995
 年表) 部門別直接エネルギー消費量および直接 CO2
 排出量の推計, 電力中央研究所調査資料, No.Y1908.
- 森口祐一・近藤美則・清水浩・石谷久 (1993) : 自動車に
 よる CO2 排出のライフサイクル分析, エネルギー経
 済, Vol.19, No.4, 日本エネルギー研究所.
- 森本一史 (1995) : 自動車におけるライフサイクルアセス
 メントの現状, 豊田中央研究所 R&D レビュー,
 Vol.30, No.2, 豊田中央研究所.

八島弘倫・松本亨・井村秀文（1997）：国際物流にともな
うエネルギー消費量及び CO2 排出量の評価，環境シ
ステム研究，Vol.25，pp.303～309.