エコロジカルフットプリント手法によるモーダルシフトの評価

学生員 劉 平 健* 正員 小 林 英 一**
堀 端 大 雅***

The Evaluation of Modal Shift by Ecological Footprint Method

by Pingjian Liu*, *Student Member* Eiichi Kobayashi**, *Member*
Daiga Horibata***

Summary

This paper discusses the evaluation of modal shift from truck and car transportation to sea transportation by use of the ecological footprint method. Three representative transportation routes were selected for analysis; those are routes between Osaka and Shin-Moji, routes between Sapporo and Osaka and routes between Tokyo and Tomakomai. The use of modal shift covers wide environmental impacts, including the use of fossil fuel energy, global-warming and sea or land resources. We calculated the carbon dioxide emission and the forest request for these changes before and after using modal shift in this study. The aim of this paper is to show an ecological footprint calculation related to the modal shift in transportation. Based on ecological footprint assessments, this article confirms that there is substantial potential for reducing the ecological footprint by using modal shift.

1. 緒 言

気候の変動は地球の環境、社会そして経済に対して脅威となるもののひとつである。人類の活動による化石燃料の使用や森林破壊などは大きな気候変動の要因となる。化石燃料の使用に伴い発生する二酸化炭素は、温室効果ガスとよばれ大気温上昇の主たる原因であり、気候変動を止めるために地球温暖化ガスの放出量を減少させなければならない。

Fig.1 に示すようにある地域における人々の生活を発展させる場合には、経済、社会、生態という相異なる3つの要素が絡み合っている。持続可能な社会とは、人々の生活の質的改善を、その生活支持基盤となっている各生態系の収容能力限度内で生活しつつ、すなわち生態系に悪い影響を及ぼすことなく達成する社会のことである。また環境面での”つけ”を次世代に残さない社会でもあらねばならない。この持続可能な社会は、当然のことながら限られた森林、限られた人口、限られた自動車などから構成されていなければならない。この今の生活水準を維持しながら、先に述べた持続可能な社会を形成することはそう容易なことではなく、さまざまな可能

Fig.1 Three distinct development processes underway at the local level. ¹⁾

性を多面的に検討する必要がある。

また、我々の今の暮らしに目を転じてみると、その生活基盤を支える重要なものは物流である。エネルギー源としての化石燃料、それから生ずる様々な生成物、工業製品の原料や部品、完成品、農作物、衣料品・・・と挙げればきりが無い。この物流は様々な輸送手段でなされているがその動力源としてほとんどが化石燃料に依存している。

本研究では、先に述べた輸送手段が地球環境に与える影響を評価することを狙い、経済活動の規模を面積に換算して評価するエコロジカルフットプリント分析手法を援用して、陸

* 神戸大学自然科学研究科

** 神戸大学海事科学部

*** 三菱電機ビルテクノサービス株式会社(研究当時 神戸大学海事科学部)

上輸送を海上輸送に切り替えるいわゆるモーダルシフトによる環境影響変化を評価することを試みた。この分析手法はある事象についてそれにかかる生産、運用、廃棄などすべての段階について必要となる“生産可能な土地面積”に換算するもので、その事象が持続可能かどうかを見極めるための指標を得ることができるものである。

2. エコロジカルフットプリント

陸上輸送を海上輸送に転換するモーダルシフトについては、それを数理化して分析する手法など様々な研究がなされてきた²⁾。本研究でとりあげるエコロジカルフットプリント分析とは、ある一定の人口あるいは経済活動を維持するための資源消費量を生み出す自然界の処理吸収能力を算定し、生産可能な土地面積に置き換えて表現する計算ツールである。そしてある汚染物質の瞬時の濃度などで判断するのではなく、持続可能な社会に関する分析ツールである。これは、人間が自然環境に及ぼす影響をわかりやすく伝えたとともに、その影響をどの程度減らすべきなのかを示す指標にもなる。Fig. 2 に示すように 1980 年代半ばから、人間の活動に基づくエコロジカルフットプリントはすでに一人当たりの使用可能範囲すなわち地球一個分を超え、年々上昇している。そして 2001 年には、一人当たり 2.2gha(グローバルヘクタール: 1 グローバルヘクタールは平均的な生物学的生産力を持つ土地 1 ヘクタールに相当する)となり、これは地球上で使用するののできるエコロジカルフットプリントとされる 1.8 gha を 0.4gha すなわち約 22%上回る値である。これは 1961 年と比較すると約 2.5 倍になっている。2001 年のデータによると、日本の国民一人当たりエコロジカルフットプリントは 4.3gha であり、これは世界の人口 100 万人以上の国の中で 28 番目になる³⁾。

またこのツールの一つの特徴として、人間活動に伴う消費に注目していることが挙げられる。これによりこのエコロジカルフットプリント手法を活用すると、個人レベル、地方自治体レベル、国レベル、地球全体レベルなどさまざまな範囲について分析することができる。

3. 計算手法の概要

本研究ではモーダルシフトが地球環境に対してどの程度の影響があるかについて、エコロジカルフットプリント手法により評価することを試みた。この手法を輸送システムに適用する場合、製造段階と運用段階及び廃棄段階に分けて積み上げていくことが基本であるが、本研究では基礎的な検討で

Fig.2 World Ecological Footprint.⁴⁾

あることを考慮し、運行距離から推算される CO₂ 排出量に基づきを算出する手法とした。またその算出された量からさらに CO₂ 以外の地球温暖化ガスである酸化窒素、メタン、ハイドロフルオロカーボンについても考慮することを試みている。また運用段階については道路や港湾設備の使用によりある面積を持続的に占有するためこれの影響についても検討することとした。なおこのエコロジカルフットプリント手法はある社会活動による環境影響を再生可能な面積に換算するものであるが、それに海洋まで含めることについては、様々なアプローチが現在議論されている段階でもあるので、本研究では比較的研究例が多い土地面積についての解析を試みた。この計算手法の概要は次のとおりである⁵⁾。

- (1) 貨物輸送の始点と終点を決め、そのルートを決定する。
海上輸送に対応するルートについては始点および終点から該当する海上経路部までは陸上経路を通ると考える。それぞれルートの距離を計算する。
- (2) 設定された海上輸送ルートで運搬される貨物についてトラック輸送換算量を求める。
- (3) (1)で計算した距離と船とトラックの二酸化炭素排出原単位でそれぞれの輸送ルートで排出される二酸化炭素量を求める。
- (4) 求められた二酸化炭素量から、他の温暖化ガスである酸化窒素、メタン、ハイドロフルオロカーボンの排出量を求め、等価な二酸化炭素量に換算する。
- (5) 排出される総二酸化炭素量を求め、対応するエコロジカルフットプリント量を求める。
- (6) 輸送手段として用いた道路や港湾施設についての面積を求め、使用したエコロジカルフットプリントの量として用いる。

このフローをまとめて Fig.3 に示す。

Fig.3 Outline of ecological footprint assessment for modal shift.

4. 経路の設定

現在、日本での貨物輸送の半分以上はトラック輸送であり、このトラック輸送から船舶(海上)へのモーダルシフトは大気中二酸化炭素濃度の増加による地球温暖化問題を解決する1つの方法であると考えられる。本研究ではモーダルシフトによるエコロジカルフットプリント変化を評価するため次の三つの代表的なルートを選定した⁶⁾。

1. 札幌と大阪の間のルート:

Fig.4 に示すように船舶を利用するルートとして、小樽・札幌間は一般道、小樽・舞鶴間は新日本海フェリー航路、大阪・舞鶴間は舞鶴自動車道を選定した。陸上輸送ルートは、札幌自動車道、道央自動車道、国道5号線、東北自動車道、磐越自動車道、北陸自動車道そして名神高速道路とした。

2. 東京と苫小牧の間のルート:

Fig.5 に示すように船舶を利用するルートとして、苫小

牧港までは一般道、苫小牧港・東京港間は商船三井フェリー航路、東京港からは一般道を選定した。陸上輸送ルートは、道央自動車道、東北自動車道、そして東京外かく環状道路とした。

3. 大阪と新門司の間のルート:

Fig.6 に示すように船舶を利用するルートとして、大阪南港までは一般道、大阪南港・新門司港間は名門大洋フェリー航路、新門司港からは一般道を選定した。陸上輸送ルートは、中国自動車道、山陽自動車道、中国自動車道、九州自動車道とした。

これらのルートの供試されるフェリーの要目等を Table 1 に示す。

Fig.4 Routes between Sapporo and Osaka.

Fig.5 Routes between Tokyo and Tomakomai.

Fig.6 Routes between Osaka and Shin-Moji.

これらの三つのケースについて、国土交通省の資料などに基づき船舶輸送ルート、トラック輸送ルートそれぞれについて距離計算を行った。この結果を Table 2 に示す。船舶輸送ルート、トラック輸送ルートいずれも始点終点は同一場所で、船舶輸送ルートに一部トラック輸送が存在するし、トラック輸送部についても一部船舶輸送が存在する。なお本表中、S、T は船舶およびトラックを意味する。

Table 1 Principal characteristics of the ferries.

Sapporo ⇔ Osaka	Sea-lane		Otaru-Maizuru
	Ship Name		Hamanasu/Akashia
	Tonnage (GT)		16,810
	Ship-speed (knot)		30.5
	ME output (KW)		25,200
	NOV	car	66
truck		158	
Tokyo ⇔ Tomakomai	Sea-lane		Tokyo-Tomakomai
	Ship Name		Sunflower Tomakomai
	Tonnage (GT)		12,526
	Ship-speed (knot)		30
	ME output (PS)		32,400×2
	NOV	car	46
truck		200	
Osaka ⇔ Shin-Moji	Sea-lane		Osaka-Shin-Moji
	Ship Name		Ferry of Kyoto 2
	Tonnage (GT)		9,730
	Ship-speed (knot)		23.2
	ME output (PS)		13,500×2
	NOV	car	100
truck		180	

NOV:積載可能なトラックと乗用車数

Table 2 distance of each road.

	mode	distance (km)	
Sapporo ⇔ Osaka	ship	S	1078.61
		T	175.11
	truck	T	1478.37
		S	106.40
Tomakomai ⇔ Tokyo	ship	S	1066.72
		T	24.08
	truck	T	965.48
		S	106.40
Osaka ⇔ Shin-Moji	ship	S	537.41
		T	43.77
	truck	T	530.81
		S	0

これらの3つのルートではいずれも、始点から終点まで往路・復路それぞれ毎日一回運行し、それが一年間続くとして計算を実施した。

5. フットプリント計算パラメタの設定

5.1 純二酸化炭素排出量

最も基本的な運行中に排出される二酸化炭素量を把握するため、単位走行キロトンあたりの二酸化炭素排出量を国土交通省の資料に基づき⁷⁾、Table 3 に示すように、トラックについては178g/(トン Km) (トン Km : 1 トンの荷物を 1km 運ぶ時に排出される二酸化炭素量)、船舶輸送については40 g/(トン Km)とした。なおこの表には参考のため、鉄道輸送、航空輸送などに関する排出係数も示した。

Table 3 CO₂ discharge basic unit.

Transportation mode	g-CO ₂ /(t・km)
Medium-duty truck for business	178
Pickup truck for business	819
Light truck for business	1,933
Private medium-duty truck	372
Private pickup truck	3,049
Railway	21
Ship	40
Airline	1,483

先の Table 2 に示した各コースの距離と Table 3 に示す二酸化炭素排出原価からそれぞれの経路について排出される二酸化炭素の総量は Table 5 の Before correction 欄に示すように算出された。

次にそれぞれの船舶の燃料消費量について、先に Table 3 で示した 40g-CO₂ から算出される一日あたりの燃料消費量に対する、公表されている燃料消費量との比を求めた。これらの値を Table 5 に示す。なおフェリーきょうとは類似船型のものから類推している。

この修正係数を Table 4 に示す船舶からの CO₂ 排出量に乗じたものを Table 5 の After correction 欄に示す。ここで示す CO₂ 排出量は概ねそれぞれの船舶が排出する二酸化炭素の実数に近いと考えられる。

Table 4 Correction coefficient.

	F.O. Present (t/D)	F.O. Actual (t/D)	Correction coefficient
HAMANASU	160	193	1.21
SUNFLOWER TOMAKOMAI	83	182	2.19
FERRY KYOTO2	45	60	1.34

Table 5 carbon dioxide emission according to correction coefficient.

	Truck Present amount of CO ₂ exhaust (t)	Ship Amount of CO ₂ exhaust after it shifts(t)	
		Before correction	After correction
Sapporo ⇄ Osaka	1.33×10 ⁶	3.69×10 ⁵	4.46×10 ⁵
Tomakomai ⇄ Tokyo	7.28×10 ⁵	1.93×10 ⁵	4.21×10 ⁵
Osaka⇄ Shin-Moji	3.33×10 ⁵	1.03×10 ⁵	1.39×10 ⁵

5.2 他の温室効果ガスの排出

船舶や自動車輸送においては二酸化炭素以外の地球温暖化ガスとして亜酸化窒素、メタン、HFC(ハイドロフルオロカーボン)が含まれているとした⁸⁾。これらの温暖化ガスとしての影響度を示す係数 GWP は IPCC の資料に基づく Table 6 に示すようになる⁹⁾。

Table 6 GWP of the N₂O, CH₄, and HFC.

Gas	GWP
CO ₂	1
N ₂ O	310
CH ₄	21
HFC	1700

また、メタン、亜酸化窒素、HFC の具体的な排出量については、船舶輸送およびトラック輸送について、二酸化炭素排出量に対する比率の統計データ^{10),11)}を用い、Table 8 に示す二酸化炭素の排出量に乗じるとエコロジカルフットプリントが計算できる係数λを導入した。すなわち、

$$\lambda_{N_2O} = Q_{N_2O} / Q_{CO_2} \times GWP_{N_2O}$$

$$\lambda_{CH_4} = Q_{CH_4} / Q_{CO_2} \times GWP_{CH_4}$$

$$\lambda_{HFC} = Q_{HFC} / Q_{CO_2} \times GWP_{HFC}$$

ここで

λ_{N_2O} : 亜酸化窒素の係数

Q_{N_2O} : 亜酸化窒素の年間排出量

Q_{CO_2} : 二酸化炭素の年間排出量

GWP_{N_2O} : 亜酸化窒素の GWP 係数

λ_{CH_4} : メタンの係数

Q_{CH_4} : メタンの年間排出量

GWP_{CH_4} : メタンの GWP 係数

λ_{HFC} : HFC の係数

Q_{HFC} : HFC の年間排出量

GWP_{HFC} : HFC の GWP 係数

この計算式で算出された温室ガス等価影響係数λを Table 8 に示す。この結果によれば、二酸化炭素以外の温暖化ガスは二酸化炭素に換算して、トラック輸送の場合 4%、船舶輸送の場合 3%程度であることが分かる。

Table 7 Green house emission data.

	Ship	Truck
N ₂ O	11.4×10 ³ t/yr	48.62 t/yr
HFC	2.8~5.2×10 ³ t/yr	18.41 t/yr
CH ₄	184×10 ³ t/yr	29.17 t/yr
CO ₂	437×10 ⁶ t/yr	9.21×10 ⁵ t/yr

Table 8 Greenhouse factor.

λ	Truck	Ship
λ _{CO2}	100	100
λ _{N2O}	1.64	0.81
λ _{CH4}	0.07	0.88
λ _{HFC}	2.60	0.89
Total	104.31	102.59

5.3 運用時の土地使用

船舶やトラック輸送のエコロジカルフットプリントを考
える場合、港湾設備や道路などの土地を占有するためこれら
の面積影響も検討した。

船舶について本研究では¹²⁾、港湾施設の面積と船舶の入
港隻数などから船舶一隻当たりの使用した面積の推定を行
った。ここでは計算に必要なデータが整っている苫小牧港を
代表港として用いた。具体的には 苫小牧港の港湾区域は約
606ha で、平成 15 年度の入港船舶の数 15,435 隻より、港湾
土地使用面積は

$$\text{使用港湾面積} = \frac{\text{港湾区域の面積}}{\text{入港船舶数}} \times \text{対象船舶の年間入港数}$$

の関係をを用い 28.66ha と算出された。

また、トラック輸送においては¹³⁾、道路の長さ、幅、通
行量等からトラックが用いた面積を推定した。具体的には、
札幌ー大阪間の距離は 1478km、道路の幅は 25m とし、トラ
ックの数は対応船舶の積載可能な数とした。高速道路の通行
台数は「高速道路統計月報」平成 17 年の資料を参考に計算
を行った。

これらの推定結果を以下の Table 9 に示す。

Table 9 High way area and port area used in modal shift

	High way area for truck transportation (ha)	Port area for Ship transportation (ha)
Sapporo ⇔ Osaka	165.6	40
Tomakomai ⇔ Tokyo	114.67	71
Osaka ⇔ Shin-Moji	59.5	132

6. エコロジカルフットプリントの比較

先に示した 3 つの経路(札幌ー大阪、苫小牧ー東京、大阪
ー新門司)について計算した等価 CO₂ 排出量を Table 10 に示
す。

森林は、光合性によりある植物質を生産するために、一定
量の CO₂ を吸収して、一定量の酸素を放出する。和田の資
料によると二酸化炭素 1 トンを固定するのに必要な土地面
積は 0.19 ヘクタール/トン/年とされており¹⁴⁾、この値で森林
面積に換算したものと運用時の土地占有面積を Table 11 に
示す。これがエコロジカルフットプリントに相当する。この
表に示されるように、トラック輸送、船舶輸送いずれについ
ても運用時の土地占有面積の影響はかなり小さいことが分
かった。

今回検討を行った三つのルートについて、トラック輸送の
エコロジカルフットプリントを 100 として、船舶輸送ルー
トの値を Fig. 7、Fig. 8、Fig. 9 に示す。三つのケースともモー
ダルシフトすると、相当量の二酸化炭素量と森林面積を減少
することができかなり環境に良い影響を与える。

Table 10 Total emissions according to CO₂-equivalent.

	CO ₂ Emission from trucks(t)	CO ₂ Emission from ships (t)
Sapporo ⇔Osaka	1.35×10^6	4.50×10^5
Tomakomai⇔Tokyo	7.43×10^6	4.25×10^5
Osaka ⇔Shin-Moji	3.40×10^5	1.40×10^5

Table 11 Total footprinting for ship and truck transportation.

	Total footprinting for truck transportation (gha)		Total footprinting for ship transportation(gha)		Area of saving forest (gha)
	With High way area	Without highway area	With port area	Without port area	
Sapporo ⇔ Osaka	2.58×10^5	2.57×10^5	8.56×10^4	8.56×10^4	1.72×10^5
Tomakomai⇔ Tokyo	1.43×10^5	1.41×10^5	8.08×10^4	8.07×10^4	6.04×10^4
Osaka⇔ Shin-Moji	6.46×10^4	6.45×10^4	2.67×10^4	2.66×10^4	3.78×10^4

case between Sapporo and Osaka
(EF for truck 100%)

Fig.7 EF reduction ratio between Sapporo and Osaka.

case between Tomakomai and Tokyo
(EF for truck 100%)

Fig.8 EF reduction ratio between Tomakomai and Tokyo.

case between Osaka and Shin-Moji
(EF for truck 100%)

Fig.9 EF reduction ratio between Osaka and Shin-Moji.

これより森林面積の削減量を先の Table 11 の Area of saving forest 欄に示す。ここで示されるように広大な土地面積が節約できる。

今回の計算では、二酸化炭素の排出量について、トラックではその分野の平均値として使われているデータを援用し、船舶についてはこの分野の平均的な値に対しそれぞれの船舶の航行中の燃料消費量に基づく補正を施す手法を採用した。船舶からの二酸化炭素の排出量については運航中がその殆どを占めるので、今回の検討結果は概ね妥当であると思われる。

一方、今回試算した 3 ルートに関して削減率が 40%から 65%と相当に幅がある。これには個々のルートの特徴や計算精度の課題が含まれている。今後より計算精度を高めるためには、トラック輸送について実態に合わせた個々のトラックからの二酸化炭素量排出量の推算、道路や港湾設備の詳細影響の把握、その他の廃棄物処理の影響などの検討が必要である。

このエコロジカルフットプリントの概念は、大気に排出された二酸化炭素を吸収する森林面積など、必要な土地の広さで環境に対する影響度を比較するという新しい考え方である。今回の検討の結果、大づかみな傾向として、このモーダルシフトにより、必要な土地面積が軽減されるという第一次結論が得られ、持続可能な社会を達成するために、モーダルシフトは有効であると考えられる。

7. 結 論

本研究では陸上トラック輸送を船舶輸送に変更するモーダルシフトによりエコロジカルフットプリントがどの程度節約できるかについて検討を行った。この結果を次に要約する。

1. 今回の 3 ケースについて、積載率が 100%なら陸上トラック輸送を船舶輸送に変更するモーダルシフトにより大気中への二酸化炭素排出量をより減らすことができることが確認できた。
2. 船舶輸送およびトラック輸送いずれも場合も港湾設備や道路などインフラが占めるエコロジカルフットプリントが運行時のそれと比較して相当小さいことが分った。
3. エコロジカルフットプリント評価手法により、この軽減される排出二酸化炭素量および、それを吸収する森林面積に換算すると、40%から 65%程度となる。これは苫小牧・東京を例にとるとおよそ CO_2 削減量 $3.18 \times 10^5 \text{ t CO}_2$ 、生産可能な土地面積 $6.04 \times 10^4 \text{ gha}$ となる。
4. このような評価を行う際にエコロジカルフットプリント手法は有効であると思われる。

参 考 文 献

- 1) Government of western Australia, Hope for the future, the western Australian State Sustainability Strategy, 2003, p.24.
- 2) 松尾俊彦・鶴田三郎・黒川久幸・宮重徹也, わが国のトラック輸送経路選択モデルとモーダルシフト政策, 日本航海学会論文集 第104号, 2001, pp.21-29.
- 3) Mathis Wackernagel and William E. Rees, illustrated by Phi Testemale, Our Ecological Footprint- reducing human impact on the earth, New Society Publishers, 1996.
- 4) WWF, LIVING PLANET REPORT 2004, <http://www.panda.org/>.
- 5) Erling Holden, Karl Georg Høyer, The ecological footprints of fuels, Transportation Research Part D, 2005, pp. 395-403.
- 6) Pingjian Liu, Eiichi Kobayashi, A case study of health assessment in modal shift, Journal of Kansai Soc. N. A., Japan, 2005, pp.73-76.
- 7) 国土交通書, 平成14年度国土交通白書, <http://www.mlit.go.jp/>.
- 8) 財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団, 平成13年度 船舶排ガスの環境への影響と排出抑制に関する総合的調査報告書, 2002.
- 9) Synthesis Report, CLIMATE CHANGE 2001, Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 10) 造船技術研究開発「重要課題調書」重要研究開発課題の動向調査, 日本造船研究協会, 2001.
- 11) 大気・水・環境負荷分野の環境影響評価、技術検討会環境負荷分科会（通算第6回）、環境影響評価情報支援ネットワーク, 2002.
- 12) 社団法人 日本港湾協会、日本の港湾 2005
- 13) 財団法人 日本道路調査会、高速道路と自動車、2005年1月～2006年5月
- 14) ニッキー・チェンバース, クレイグ・シモンズ, マティース・ワケネゲル, エコロジカル・フットプリントの活用, 合同出版, 2005, p.126.