

大メコン圏の地域間貨物輸送における 環境を考慮した機関分担率の算出

花岡 伸也¹・加藤 智明²・中道 久美子³

¹正会員 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）

E-mail: hanaoka@ide.titech.ac.jp

²非会員 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）

E-mail: katou@ide.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）

E-mail: nakamichi@ide.titech.ac.jp

成長著しいアジア地域では、低炭素な交通体系の構築が求められている。本研究では、大メコン圏の地域間貨物輸送における中長期の環境効率的な機関分担像を示すことを目的として、輸送費用、輸送時間、二酸化炭素排出量を目的関数とし、機関分担率を決定変数とする目標計画問題として定式化した。そして、バンコク・ハノイとバンコク・ヤンゴンの2つの路線をケーススタディとして取り上げ、既存輸送モードの改善と貨物鉄道導入の2つのインフラ開発シナリオと、複数の削減目標に対して、最適な機関分担率の算出を行った。計算の結果、路線や、削減目標、開発シナリオごとに最適機関分担率の差異が明らかになった。さらに、貨物鉄道導入により、高い削減目標の達成も可能になることが分かった。

Key Words : intermodal freight transport, modal split, Greater Mekong Subregion, goal programming

1. はじめに

温室効果ガスの排出量増加に起因する気候変動リスクは、人類が直面する全地球的な課題として広く認識されている。温室効果ガスの排出起源は、地域別と部門別の2つの切り口で整理できる。地域別の視点で見ると、アジア地域は極めて重要であることが分かる。2005年の世界の温室効果ガスの排出量のうち、アジア起源の排出量が占める割合は全体のおよそ36%を占める¹⁾。2050年までに世界全体の排出量を半減させるような低炭素社会を構築するためには、同地域における排出削減が大きな鍵を握る¹⁾。また、部門別に見ると、代表的な温室効果ガスである二酸化炭素の2007年の世界における総排出量の運輸部門のシェアは2割を超える²⁾。経済発展に伴うモータリゼーションの進展は運輸部門の二酸化炭素排出において支配的な影響を持つことから、経済発展と排出量増加をデカップリングする新たな交通体系の提示はアジア途上国にとって不可欠である。さらに、ビジョンの設定にあたっては、低炭素社会を想定した上での目標からの逆算(バックキャスティング)に基づいた取り組みが必要である。低炭素交通体

系の実現に向けた方策はAVOID（交通需要の抑制）、SHIFT（低炭素モードへの転換）、IMPROVE（排出係数の改善）の3つの大戦略にまとめることができ³⁾、地域間交通における低炭素交通システムによる空間開発（AVOID）、鉄道・水運の整備を軸としたインターモーダルな旅客・物流交通システム（SHIFT）、自動車・航空機の低炭素化（IMPROVE）の推進が有効であると指摘されている。

本研究では、この3大戦略のうち、SHIFTに着目し、大メコン圏（GMS: Greater Mekong Subregion）を対象地域として取り上げる。輸送機関の分担は、排出量に大きく影響する因子であり、輸送機関分担率はその指標として重要な意味を持つ。しかしながら、後述するようにインターモーダル輸送の優位性が種々の研究で指摘される一方で、マクロな視点でバックキャスティングで最適な機関分担率というのは定量的に論じられていない現状がある。そのため、目標指標の一つとして機関分担率の目標設定が必要とされている。また、本研究が対象として大メコン圏の地域間貨物輸送を取り上げるのは、以下に述べる3点の理由からである。

1点目は、急速な経済成長に伴う貨物需要の増加であ

る。大メコン圏の名目GDPは6000億ドル強にのぼり⁴⁾、地域全体の一人当たり名目GDPは2000ドルに迫っているという状況である。近年の経済成長率も順調に推移しており、2000年から昨年までの平均成長率は、約4%から10%となっている⁵⁾。域内の経済交流は特に2000年代以降、活発になっている。タイを例にとると、ミャンマー向け以外では輸出が大きく拡大しており、GMS5か国の輸出総額に占める割合は、2000年の7.1%から2009年には16.8%へ上昇している。輸出品目としては、鉱産燃料、車両関連製品、機械類電気電子製品などがある⁶⁾。

2点目は、道路インフラへの集中投資である。大メコン圏は、国際援助機関や各国援助機関の協力の下、経済回廊の集中的な整備を行い、陸路のコンネクティビティを高めることに注力してきた。主要3回廊と言われる、東西回廊（西はミャンマーのモラミヤインから東はベトナムのダナンまで）、南北回廊（北は中国の昆明から南はタイのバンコクまで）、南部回廊（西はタイのバンコクから東はベトナムのホーチミンまで）を中心に経済回廊の道路インフラはここ数十年で大きな進歩を遂げた。

3点目は、ソフトインフラの整備である。大メコン圏では、域内のヒト・モノの往来を活性化させるため、国境でのボトルネックの解消に向けた取り組みも行っている。越境交通協定（Cross-Border Trade Agreement: CBTA）については、2003年のミャンマーの署名をもって、GMS6か国での合意が形成された。同協定の目玉は、シングルウィンドウとシングルストップの2本立てで構成される越境手続きの簡素化である⁷⁾。

以上、述べた3つの状況の変化をきっかけとして、大メコン圏の地域間貨物輸送では、今後、トラックを利用した輸送が短中期的に増加していくことが予想される。長距離のトラック輸送の利用が増加し、片荷問題も解消されてくると、コスト面での競争力も上がることが考えられる。トラック輸送は頻度や柔軟性の面で高い優位性を持っており、トラック輸送のサービス水準の向上は物流の経済的効率性の観点から好ましいことである一方で、見方を変えれば、トラック輸送の積極利用が進むことは、従来は海上輸送で運ばれていた貨物がトラックへシフトしていくことを意味し、これは低炭素化とは逆のモーダルシフトと捉えることが出来る。低炭素交通システムへの転換は、道路投資等の交通インフラ投資が進んだ後では難しくなってしまうので、経済成長の初期の段階から将来的ビジョンを定めた上で低炭素交通システムのインフラ投資を積極的に進めていく必要がある⁸⁾。したがって、現在の大メコン圏を取り巻く物流環境は、勢いのある経済成長に歯止めをかけることなく、物流の経済的効率性と低炭素化をバランスしていくための重要な局面を迎えている。

ると言ってよく、中長期的なモーダルスプリット（輸送機関分担）の在り方について今から議論していくことが重要である。

上記の背景認識に基づいて、本研究では研究目的を次のように設定する。

- [1] 地域間貨物輸送について複数の貨物輸送機関のサービス水準、温室効果ガス排出量、輸送機関分担率を明示的に反映した形で問題の定式化を行う。
- [2] 定式化した問題を利用し、大メコン圏における将来のインフラ開発シナリオや、二酸化炭素削減目標に対応した適切な機関分担を提示する。

2. 本研究の位置づけ

種々の先行研究からインターモーダル輸送の有効性が明らかにされており、また、輸送機関選択を規定する要因についても広く研究されているが、低炭素社会を志向して競合モード間の分担の在り方を論じた先行研究は数少ない。近い研究としては、Kimら(2009)⁹⁾が二酸化炭素排出と輸送コストのトレードオフ関係に着目し、インターモーダル輸送やトラック輸送を含む複数の輸送機関の最適な分担について、多目的最適化問題として捉え、欧州の事例を分析している。同研究では、輸送時間や輸送時間信頼性などを考慮しておらず、今後の研究課題としている。Yangら(2011)¹⁰⁾は、輸送コスト、輸送時間、輸送時間信頼性を目的関数として、目標計画法を用いてインターモーダル輸送ネットワークの最適化を行っている。また、Hanaokaら(2011)¹⁰⁾では、タイの国内輸送を例にとり、エネルギー消費量、輸送時間、輸送費用の3つの目的関数を機関分担率を反映させた形で定式化し、多目的最適化問題を解くことでモーダルシフト時のエネルギー削減量を計測している。

以上のように、貨物輸送のサービス水準として極めて重要となる時間側面、費用側面に加え、環境側面も同時に考慮した形で、輸送機関の分担をバックキャスティングアプローチに基づき定量的に論じた先行研究は存在しない。この点において、本研究の新規性を見出すことが出来る。

3. 分析手法

(1) 対象輸送機関と対象貨物

本研究で対象とする輸送モードは、トラック輸送、海上船舶—トラックのインターモーダル輸送（以下、海上輸送と呼称）、鉄道—トラックのインターモーダル輸送（以下、鉄道輸送と呼称）の3つである。複数の

輸送機関を組み合わせる運ぶ輸送形態をインターモーダル輸送や複合輸送と呼び、通常、輸送形態を一つの輸送モードとは呼ばないが、本稿では便宜上、これらの一連の輸送形態をそれぞれ、海上輸送、鉄道輸送として一つのモードとして扱い、これらのモード（輸送形態）間の分担に焦点を当てる。以下、輸送機関分担率、モーダルシェア、モーダルスプリットと言った場合には、輸送形態間の分担を指す。

本研究では、複数の輸送モード（形態）が競合する場合を取り扱う。Dekkerら(2012)¹¹⁾は、往々にして選択すべきモードは、輸送距離と貨物の品目により制限されると述べている。また、モーダルシフト等推進官民協議会の中間とりまとめ²⁴⁾では、「物流分野におけるCO₂削減方策の検討に当たっては、距離帯毎の方策が必要と考えられる。」と述べており、遡って2001年の新総合物流施策大綱においては、「モーダルシフト化率（長距離輸送における鉄道・内航海運分担率）を向上させ、平成22年までに50%を超える水準とする。」という目標が打ち出され、その対象貨物となったのは、輸送距離500km以上の雑貨貨物であった¹²⁾。

以上の文献調査から、本研究では輸送距離500km以上の路線におけるコンテナ化適合貨物をモーダルシフト対象貨物（モード間競合貨物）として捉え、研究の対象とする。コンテナは荷姿を変えずに輸送機関間を乗り換えることができ、規格化も進んでいるため、インターモーダル輸送に適している。コンテナ貨物で輸送できる品目（コンテナ化適合貨物）は近年、コンテナ技術の進歩により急激に増えてきているが、本研究では、簡単のため、コンテナ内容物の品目は対象とせず、貨物重量に焦点を当てて議論を進める。

(2) ケーススタディ路線

a) バンコクーハanoi路線

1つ目の路線は、タイの首都バンコクからベトナムの首都ハanoiに向かう路線である。2006年12月にラオス・サバナケット県とタイ・ムクダハン県を結ぶ第2メコン友好橋が日本の支援により開通し、東西回廊を経由しラオスを通過するバンコクーハanoi間の陸上3か国間輸送が実現している。2011年11月には、第2メコン友好橋の北約110kmに位置する第3メコン友好橋がタイ・ナコンパノム県とラオス・カムムアン県ターケーウを結び、新規ルートも開通した。本研究では、トラック輸送のルートとして第2メコン友好橋を経由するルートを考える。海上輸送は、現状、本路線における貨物輸送の大部分を担っていると考えられる。代表的ルートとして、バンコクからトラックでラムチャバン港まで輸送し、そこでコンテナ船に積み替え、ホーチミン港で別の船に積み替えた後、ハイフォン港に行き、そこか

らハanoi市内まで輸送するルートを考える。鉄道輸送は、現状開通していないが、ADB(2010)¹³⁾を参考にして、ラオスのビエンチャンを経由する経路が将来開通することを想定した。

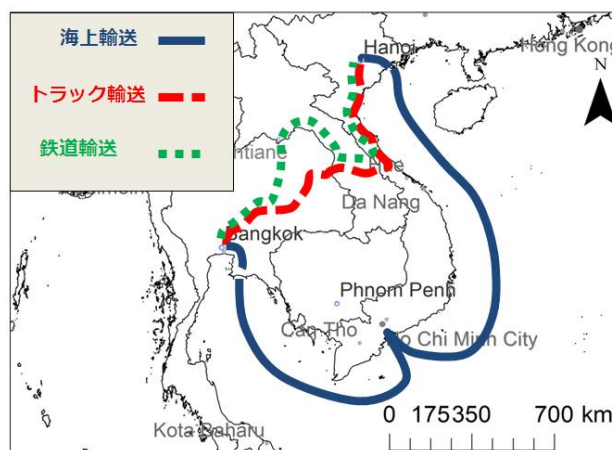


図-1 バンコクーハanoi路線の輸送経路

b) バンコクーヤンゴン路線

バンコクから、その北西約600kmに位置するミャンマー経済の中心地ヤンゴンに向かう路線が二つ目のケーススタディである。トラック輸送経路は、バンコクから北進し、タークから東西回廊西部に入り、国境のメーソート、ミャワディを経由し、ヤンゴンへ向かうルートである。（図3-3）道路の整備状況、外国人通行制限区間、トラック相互乗り入れ不可から、現状は本格的な商用利用は難しい状況である¹⁴⁾。トラック輸送が上記のような状況であるので、本路線の現状の貨物輸送は海上輸送に大きく依存している。海上輸送ルートはタイのラムチャバン港から出港し、マレー半島を迂回してマラッカ海峡を通過し、ヤンゴン港に至るルートを考える。鉄道輸送は、タイのタムトクとミャンマーのダウェイ間が接続することを想定した。

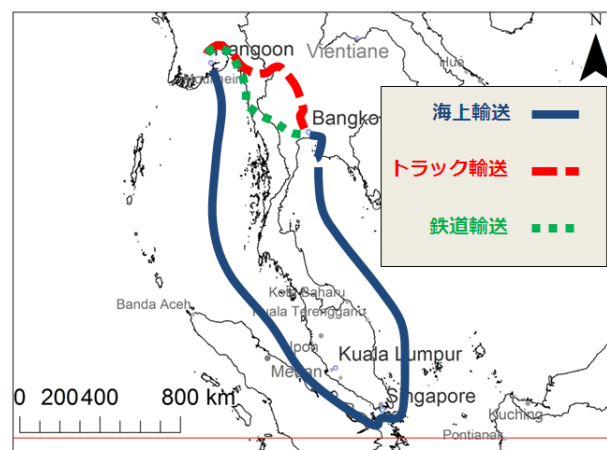


図-2 バンコクーヤンゴン路線の輸送経路

(3) 目標機関分担率の算出方法

対象とする2路線のコンテナ適合貨物の輸送において、環境効率性を考慮した輸送機関分担を定量的に提示するために、本研究では目標機関分担率の算出を行う。算出の流れは、図-1の通りである。算出のステップは、大きく①三指標（輸送費用、輸送時間、二酸化炭素排出量）の算出モデルを用いたベースラインシナリオの作成、と②目標計画法によるシナリオ毎の目標機関分担率の算出に分けることが出来る。以下で、算出ステップの詳細について述べる。

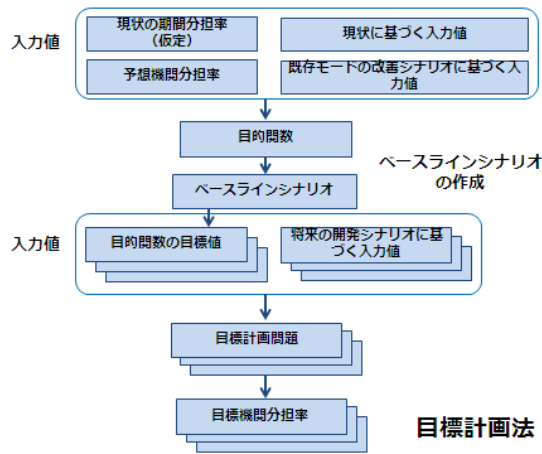


図3 目標機関分担率算出の手順

a) 目的関数の設定

本研究で用いる輸送費用、輸送時間、輸送に伴う二酸化炭素排出量の3つの目的関数は、Hanaokaら(2011)を参考にして、次のように定式化した。

① 輸送費用の定式化

$$f_1 = \sum_i s_i (Cm_i \times dm_i + tc_i + pc_i + Cae_i \times dae_i) \quad (1)$$

$$\sum_i s_i = 1 \quad (2)$$

$$s_i \geq 0 \quad (3)$$

- i : 輸送機関 (1:海上輸送、2:トラック輸送、3:鉄道輸送)
 s_i : 輸送機関*i*の分担率
 Cm_i : 輸送機関*i*の代表輸送機関の輸送費用 (USD/ton-cargo・km)
 dm_i : 輸送機関*i*の代表輸送機関の輸送距離 (km)
 tc_i : 輸送機関*i*のターミナルにおける荷役費用 (USD/ton-cargo)
 pc_i : 輸送機関*i*の通関費用 (USD/ton-cargo)
 Cae_i : 輸送機関*i*のアクセス・イグレス輸送機関の輸送費用 (USD/ton-cargo・km)
 dae_i : 輸送機関*i*のアクセス・イグレス輸送機関の輸送距離 (km)

JETRO(2008)¹⁵⁾によれば、海上輸送費用の基本構成要素は、

- [1] 道路運送費：発着荷主と港湾間の短距離のコンテナ輸送費
- [2] 海上運賃：コンテナ船の輸送費
- [3] 港湾諸費用：港湾におけるターミナルハンドリングチャージや書類作成料

である。この定式化では、シナリオ分析の便宜上、港湾諸費用を荷役料と通関関連費用に分けて式に盛り込んでいる。

同じくトラック輸送費用の基本構成要素は、

- [1] 道路運送費：燃料費、消耗費、人件費、維持管理費などを含めた輸送費
- [2] 積み替え費：国境で車両間のコンテナ積み替えが必要な場合の費用

1. 事務手続き費：通関手続きに関する費用

となっている。この定式化では、これらに対応した形で3つの要素からなっており、アクセス・イグレス輸送の費用は入力値が0になる。

鉄道輸送費用の構成要素は海上輸送と同様に代表輸送機関、アクセス・イグレス輸送機関、ターミナルでの荷役、通関の費用で構成されると考える。この3つの輸送機関の費用に分担率を掛け合わせることで、特定ODにおいて単位重量の貨物を輸送する際の輸送費用を表現している。

② 輸送時間の定式化

$$f_2 = \sum_i s_i \left(\frac{dm_i}{vm_i} \times \frac{1}{cm_i} + tt_i + pt_i + \frac{dae_i}{vae_i} \times \frac{1}{cae_i} \right) \quad (4)$$

$$\sum_i s_i = 1 \quad (5)$$

$$s_i \geq 0 \quad (6)$$

- i : 輸送機関 (1:海上輸送、2:トラック輸送、3:鉄道輸送)
 s_i : 輸送機関*i*の分担率
 vm_i : 輸送機関*i*の代表輸送機関の平均輸送速度(km/hrs)
 dm_i : 輸送機関*i*の代表輸送機関の輸送距離(km)
 cm_i : 輸送機関*i*の代表輸送機関の輸送容量(ton-cargo)
 tt_i : 輸送機関*i*のターミナルにおける荷役所要時間 (hrs/ton-cargo)
 pt_i : 輸送機関*i*の通関所要時間 (hrs/ton-cargo)
 vae_i : 輸送機関*i*のアクセス・イグレス輸送機関の平均輸送速度 (km/hrs)
 dae_i : 輸送機関*i*のアクセス・イグレス輸送機関の輸送距離 (km)
 cae_i : 輸送機関*i*のアクセス・イグレス輸送機関の輸送容量 (ton-cargo)

JETRO(2008)³⁾によれば、海上輸送時間の基本構成要素は、

- [1] 運送時間：道路運送と船舶運送の運送時間
- [2] 荷役時間：港湾でのコンテナの積み下ろしの所要時間

- [3] 事務手続き時間：通関作業の所要時間

である。この定式化では、シナリオ分析の便宜上、トラック運送時間と海上運送時間を分けて式に盛り込んでいる。

同じくトラック輸送時間の基本構成要素は、

- [1] 運送時間：トラックでの走行時間
- [2] 休憩時間：長距離走行の場合に発生する休憩時間
- [3] 荷役時間：トラック間でのコンテナ積み替えに要する時間

- [4] 事務手続き時間：通関手続きの所要時間
- となっている。この定式化では、休憩時間を一定間隔で一定量とすることで平均走行速度に反映させている。また、アクセス・イグレス輸送の時間は入力値が0になる。

鉄道輸送費用の構成要素は海上輸送と同様に代表輸送機関、アクセス・イグレス輸送機関、ターミナルでの荷役、通関の所要時間で構成されると考える。この3つの輸送機関の時間に分担率を掛け合わせることで、特定ODにおいて単位重量の貨物を輸送する際の輸送時間を表現している。

③ 輸送に伴う二酸化炭素排出量の定式化

$$f_3 = \sum_i s_i (\mu m_i \times dm_i + \mu t_i + \mu ae_i \times dae_i) \quad (7)$$

$$\sum_i s_i = 1 \quad (8)$$

$$s_i \geq 0 \quad (9)$$

- i : 輸送機関 (1: 海上輸送、2: トラック輸送、3: 鉄道輸送)
- s_i : 輸送機関 i の分担率
- μm_i : 輸送機関 i の代表輸送機関の排出係数 (kg-CO₂/ton-cargo・km)
- dm_i : 輸送機関 i の代表輸送機関の輸送距離 (km)
- μt_i : 輸送機関 i のターミナルにおける荷役作業の排出係数 (kg-CO₂/ton-cargo)
- μae_i : 輸送機関 i のアクセス・イグレス輸送機関の排出係数 (kg-CO₂/ton-cargo・km)
- dae_i : 輸送機関 i のアクセス・イグレス輸送機関の輸送距離 (km)

輸送に伴う排出量は、輸送プロセスにおけるリンク部分とノード部分からの排出から構成されている。Hanaoka(2011)のエネルギー消費量式では、輸送時のみを考慮しているが、港湾や鉄道のターミナルなどの結節点においても荷役活動などから温室効果ガスが排出されているため、異なる輸送機関間での比較を行う際に

は、これらも考慮する事がより実態に即した議論が出来る。したがって、この定式化では結節点の荷役作業における排出量も式に盛り込んでいる。ただし、トラック輸送に関しては排出係数の参考情報が入手困難であったため、考慮には含まれていない。

b) 目標計画法

上述したように、本研究では、目標計画法を用いて目標機関分担率の算出を行う。目標計画法は元来、企業の経営戦略や生産戦略などを扱う経営学の分野で発展を遂げてきた。多目的の目標計画法は、複数の目標の間に「あちらを立てれば、こちらが立たず」というトレードオフの関係がある時に有用性を発揮する¹⁰⁾。また、目標計画法は、目的達成度合いの尺度が多様で目的間での等価交換性がない時や目的設定の形式が、ある値以上（あるいは以下）、ある値に近づきたい、ある範囲におさめたいなどといった要求にも、うまく対処が出来る。このような特長が、本研究の文脈によく適合していると言える。一方で、目標計画法は、得られる解が必ずしもパレート最適解でないことや、リグレット関数の重みづけが曖昧であるといった短所も持ち合わせている。

目標計画法では、通常の前最大化/最小化問題において、実行可能領域を示す制約条件に加え、通常の目的関数に目標値と目的地との乖離を示す差異変数を導入した式を制約条件に含める。そして、差異変数の関数であるリグレット関数を目的関数として最小化を図る。

本研究における目標計画法の定式化は以下のようになる。

$$\min R = \left(\frac{d_c^+}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{d_t^+}{T_t}\right)^2 + \left(\frac{d_e^+}{T_e}\right)^2 \quad (10)$$

s.t.

$$\sum_i s_i (Cm_i \times dm_i + tc_i + pc_i + Cae_i \times dae_i) + d_c^- - d_c^+ = T_c \quad (11)$$

$$\sum_i s_i \left(\frac{dm_i}{vm_i} \times \frac{1}{cm_i} + tt_i + pt_i + \frac{dae_i}{vae_i} \times \frac{1}{cae_i} \right) + d_t^- - d_t^+ = T_t \quad (12)$$

$$\sum_i s_i (\mu m_i \times dm_i + \mu t_i + \mu ae_i \times dae_i) + d_e^- - d_e^+ = T_e \quad (13)$$

$$d_c^- \times d_c^+ = 0 \quad (14)$$

$$d_t^- \times d_t^+ = 0 \quad (15)$$

$$d_e^- \times d_e^+ = 0 \quad (16)$$

$$\sum_i s_i = 1 \quad (17)$$

$$d_c^-, d_c^+, d_t^-, d_t^+, d_e^-, d_e^+, s_i \geq 0 \quad (18)$$

T_c	: 輸送費用の目標値 (USD/ton-cargo)
T_t	: 輸送時間の目標値 (hrs/ton-cargo)
T_e	: 二酸化炭素排出量の目標値 (kg-CO ₂ /ton-cargo)
d_c^-	: 輸送費用の超過差異変数 (USD/ton-cargo)
d_c^+	: 輸送費用の不足差異変数 (USD/ton-cargo)
d_t^-	: 輸送時間の超過差異変数 (hrs/ton-cargo)
d_t^+	: 輸送時間の不足差異変数 (hrs/ton-cargo)
d_e^-	: 二酸化炭素排出量の超過差異変数 (kg-CO ₂ /ton-cargo)
d_e^+	: 二酸化炭素排出量の不足差異変数 (kg-CO ₂ /ton-cargo)

式(16)から式(18)で、本来の3つの目的関数式に差異変数と目標値を導入し、制約条件としている。最小化するリグレット関数は、3つの目的関数の各不達成度を目標に対する割合で表現したものの各二乗の和である。目標の不達成度を割合で表現したのは、各指標間に重みを付けずに、リグレット関数の影響を等しくするためである。また、二乗にしたのは、特定の指標に不達成度が集中するのを避ける狙いがある。

c) シナリオ作成

本研究では、目標計画法を用いてシナリオ別の目標機関分担率の算出を行う。シナリオ別に算出することの目的は、長期の将来を議論する上で、貨物鉄道導入否かや各指標の優先度の度合いに応じて目標機関分担率がどのように変化するかを明らかにすることにある。シナリオ設定においては、まず、ベースラインシナリオを作成する。種々の文献調査から現状の物流環境（ハードインフラ、ソフトインフラ）に対応するモデル入力値を設定し、そこから既存の輸送モードであるトラックと海上輸送のハード/ソフトインフラ改善（表-2参照）を想定して入力値の改善を行ってベースラインシナリオを作成する。また、ベースラインシナリオに対応する分担率の予想も行い、上記の入力値と共にモデルに入力することでベースラインシナリオ実現時の3つの目的関数の値を算出する。こうして得られたベースラインシナリオの値を基準に、目標とする3つの目的関数の値を設定する。目標設定は、ベースラインシナリオから輸送費用およびCO₂排出量を削減する方向と、輸送時間およびCO₂排出量を削減する方向の2つがある。また、それぞれに対し、3段階の削減レベルを設定する。こうして設定した目標値に対して、既存モードの改善のみの場合と既存モードの改善に加えて貨物鉄道を導入する場合の2通りの将来の開発シナリオを与えて分析を行う。以上の目標及びシナリオを一覧に示したのが、表-1である。

表-1 開発シナリオと削減目標

改善箇所	内容
道路条件	路面整備や複数車線化が挙げられる。ベトナムやラオス、ミャンマーの一部区間では舗装の陥没などの悪路や単線であることから低速走行を余儀なくされる区間がある。
夜間走行用設備	照明灯の設置などがある。夜間は視界が悪くなる他、一部地域では盗賊出現の懸念等もあるため、低速での走行を行ったり、夜間走行自体控えたりすることも少なくない。
トラックの相互乗り入れ	タイ車両のベトナムやミャンマーへの乗り入れは現状不可能である。トラックの相互乗り入れの自由化もCBTAに盛り込まれているため、今後、相互乗り入れが実現する可能性は十分にある。
越境手続き	「シングル・ウィンドウ」と「シングルストップ」による越境手続の簡素化がある。
港湾における荷役処理能力	港湾のターミナル増設、ヤード拡張やクレーン等の荷役機械の更新、オペレーションの改善による荷役作業の効率化が考えられる。
航路	バンコクーハノイ路線を例にとると、現状はラムチャバンーハイフォン間の直行便よりもホーチミン港での積み替えが主流であるが、将来的に貨物量が増加してきた際には、直行便が主流化してくる可能性がある。

表-2 既存モードの改善内容

シナリオ 削減項目	既存モードの改善のみ	貨物鉄道導入
輸送費用とCO ₂ 排出量	削減レベル1	削減レベル1
	削減レベル2	削減レベル2
	削減レベル3	削減レベル3
輸送時間とCO ₂ 排出量	削減レベル1	削減レベル1
	削減レベル2	削減レベル2
	削減レベル3	削減レベル3

注1) 輸送費用とCO₂排出量の削減レベル

削減レベル1:	費用、排出量をベースラインから各10%削減、時間はベースラインを維持
削減レベル2:	費用、排出量をベースラインから各20%削減、時間はベースラインから10%増加
削減レベル3:	費用、排出量をベースラインから各25%、40%削減、時間はベースラインから20%増加

注2) 輸送時間とCO₂排出量の削減レベル

削減レベル1:	時間、排出量をベースラインから各10%削減、費用はベースラインを維持
削減レベル2:	時間、排出量をベースラインから各20%削減、費用はベースラインから10%増加
削減レベル3:	時間、排出量をベースラインから各35%、40%削減、費用はベースラインから20%増加

4. 分析結果

(1) データ

ベースラインシナリオの作成と目標計画法による分担率の算出には、各ケーススタディ路線について、現状、既存モード改善シナリオ、貨物鉄道導入シナリオの3種類の入力値セットが必要になる。現状に対応する入力値の設定にあたっては、主にJETROが実施した実走調査結果の報告を参考にした。既存モード改善シナリオに対応する入力値は、表-2の改善を想定し、関係する入力値の改善を行った。貨物鉄道導入シナリオでは、日本や欧州の事例を参考にして鉄道に対応する入力値を仮定した。

(2) 算出結果

a) 基礎分析結果

基礎分析として、現状とベースラインシナリオの比較とそれぞれの開発シナリオにおける理論上の削減可能幅を確認する。

まず、バンコクーハノイ路線について、現状の分担率は統計が存在しなかったため、海上インターモーダル輸送 95%、トラック輸送 5%と仮定して計算を行った。また、ベースラインシナリオの入力値と予想機関分担率を用いて、ベースラインシナリオにおける目的関数値も算出し、現状からの変化を計算した。予想機関分担率は、日本の事例を参考にした。国土交通省の旅客・貨物地域流動統計にある距離帯別品目別輸送機関分担率の最新統計¹⁷⁾では、輸送距離 1000km 以上のモーダルシフト対象品目のトラック輸送と海上輸送の総量に対するそれぞれのシェアは海上輸送が 67.3%、トラック輸送が 32.7%となっている。ベースラインシナリオにおける予想機関分担率の入力値には、これを転用した。

各将来インフラシナリオにおける目的関数値の理論上の削減可能幅は、ベースラインシナリオから機関分担率の変化（モーダルシフト）が起きた時に各指標が最大で削減可能な割合を示す。これらの結果を以下に一覧で示す。

表-3 基礎分析結果（バンコクーハノイ路線）

		輸送費用 (USD/ton- cargo)	輸送時間 (hrs/ton- cargo)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /ton- cargo)
シ ナ リ オ	現状	116.06	11.32	52.99
	ベースライン	113.44	4.94	82.3
変化率		-2.26%	-56.35%	55.3%
削 減 可 能 幅	既存モード改 善シナリオ	25.6%	35.17%	45.32%
	貨物鉄道導入 シナリオ	25.6%	37.55%	45.32%

同様の手順で、バンコクーヤンゴン路線についても基礎分析を行った。本路線の陸上輸送経路は、現状、物理的に通過可能ではあるものの、商用利用の段階には至っていないので、現状の機関分担率は海上輸送 100%と仮定した。ベースラインシナリオに用いる予想機関分担率については、バンコクーハノイ路線と同じように日本の例を参考にしたが、バンコクーヤンゴンの陸路輸送距離は約940kmなので、輸送距離750 km以上 1000km未満の値を参考にした。結果、予想機関分担率は、海上輸送が53.4%、トラック輸送が46.6%となった。基礎分析の結果を下表に示す。

表-4 基礎分析結果（バンコクーヤンゴン路線）

		輸送費用 (USD/ton- cargo)	輸送時間 (hrs/ton- cargo)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /ton- cargo)
シ ナ リ オ	現状	137.77	7.46	53.75
	ベースライン	157.37	4.34	71.11
変化率		-2.26%	+14.23%	-41.77%
削 減 可 能 幅	既存モード改 善シナリオ	13.01%	37.18%	24.41%
	貨物鉄道導入 シナリオ	29.94%	37.18%	55.98%

b) シナリオ別目標機関分担率の算出結果

次に、先に述べた目標計画法を用いて、将来の開発シナリオと目標設定に対応する目標機関分担率の算出結果を路線別に示す。（図-4がバンコクーハノイ路線、図-5がバンコクーヤンゴン路線）合わせて、それに対応する目標の不達成度を示す。（図-6がバンコクーハノイ路線、図-7がバンコクーヤンゴン路線）目標の不達成度は先に説明したように、各指標の目標値に対する実際の値の超過割合を意味する。目標と等しい、あるいは目標を下回っている場合には0となる。

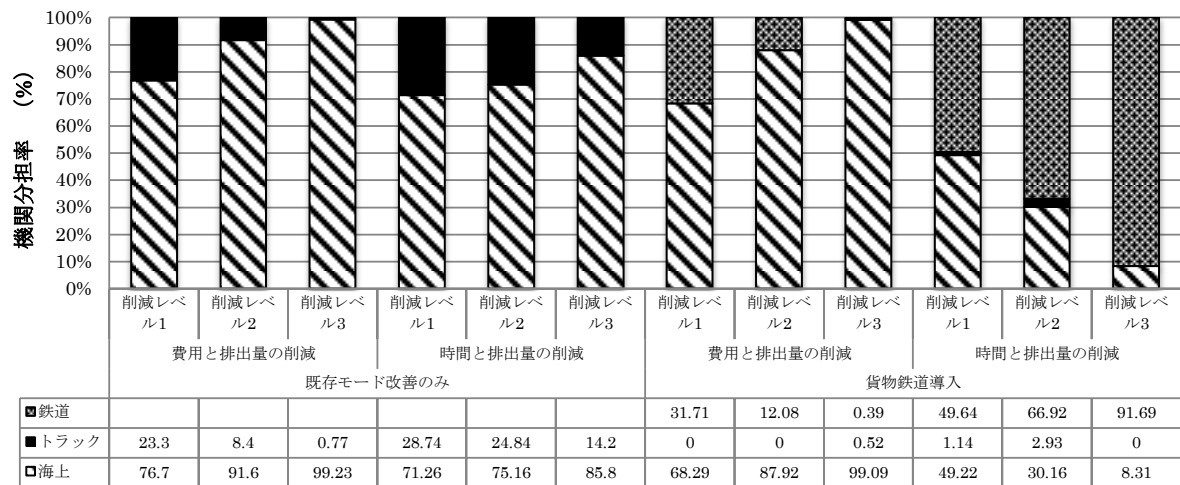


図4 目標機関分担率の算出結果（バンコク－ハノイ路線）

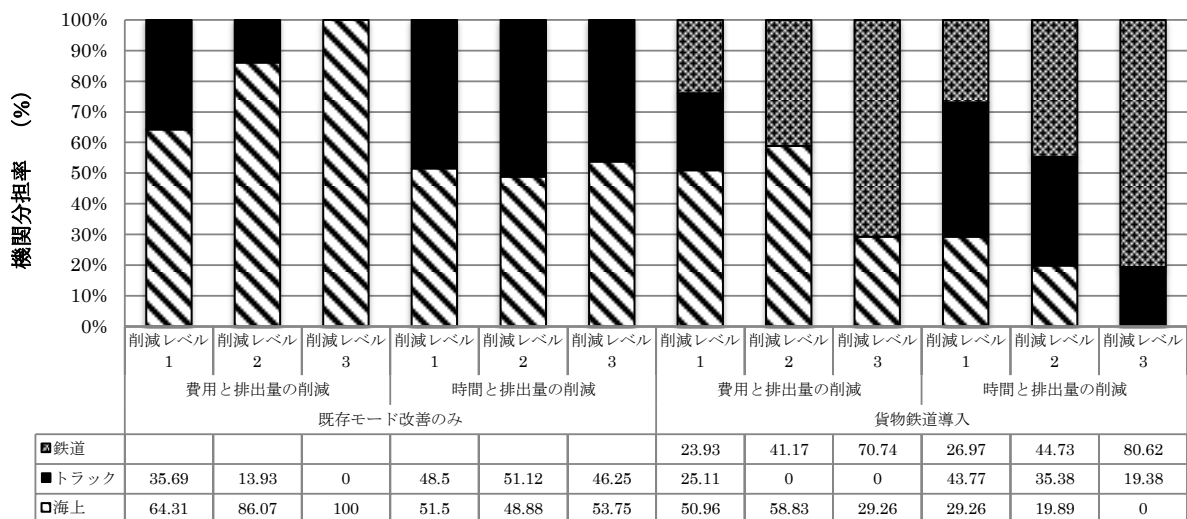


図5 目標機関分担率の算出結果（バンコク－ヤンゴン路線）

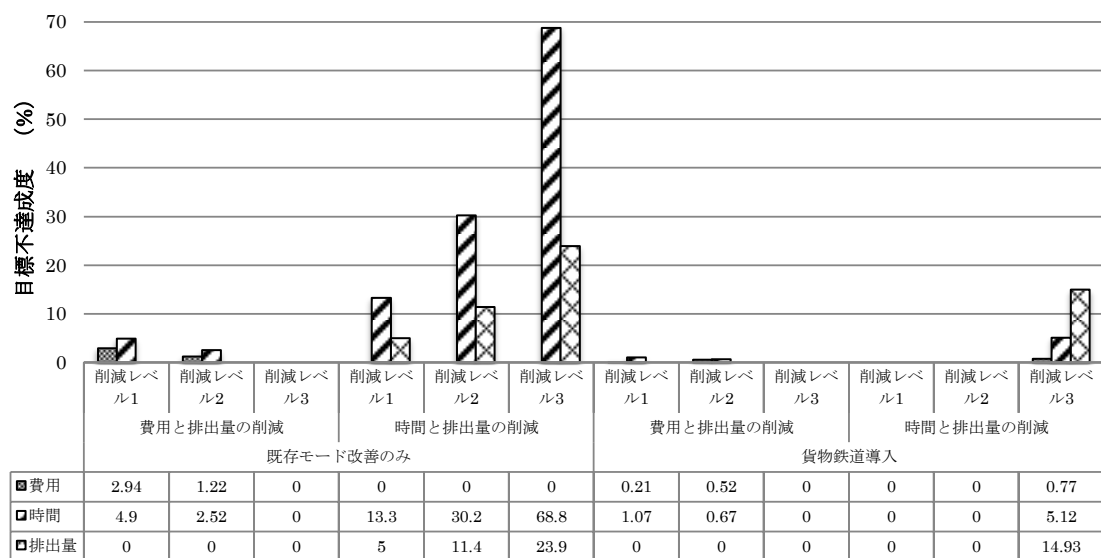


図6 目標不達成度（バンコク－ハノイ路線）

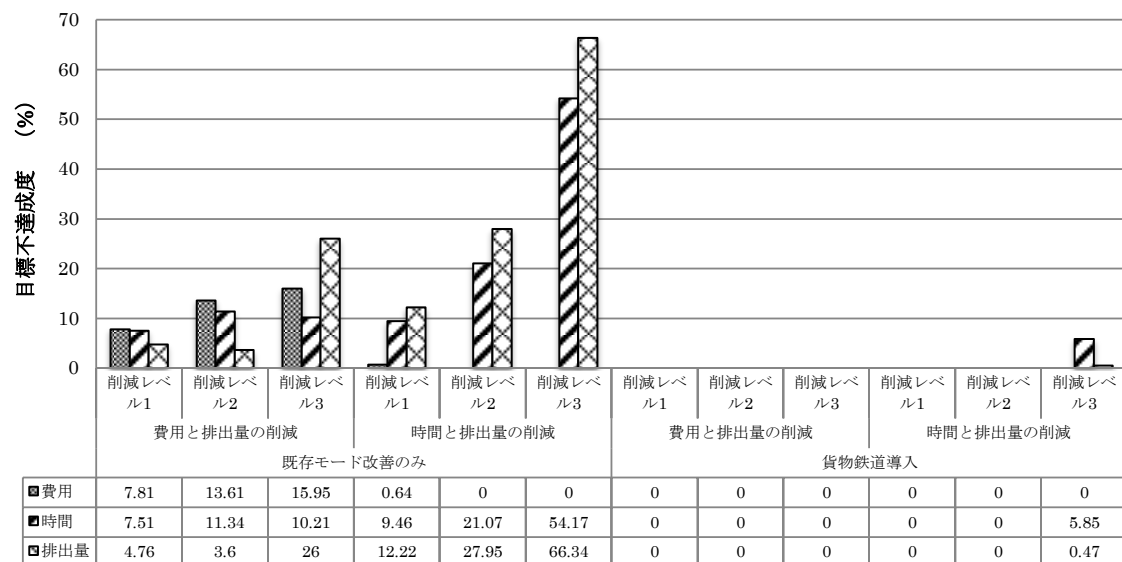


図-7 目標不達成度（バンコクーヤンゴン路線）

(3) 考察

表-3 から、バンコクーハノイ路線のベースラインシナリオでは、現状に比べ、輸送費用が微減、輸送時間が大幅な減少、二酸化炭素排出量が大幅な増加を示していることが分かる。海上輸送に比べ費用が割高なトラック輸送のシェアが増えたにも関わらず、全体として費用が微減を示しているのは、海上輸送とトラック輸送ともにインフラの改善による費用の減少が大きかったためであると考えられる。特に、両モードのターミナルでの費用削減が大きく、これは航路の変更による寄港地での積み替えの必要なくなったことや、トラックの相互乗り入れが自由化され、ラオスでのトラック間の積み替えが必要なくなった点を反映した結果である。

既存モード改善のみのシナリオの目標機関分担率(図-4)を見ると、削減レベルが高くなるにつれて、海上輸送のシェアが増えるという妥当な結果が得られた。特に、費用・排出量の削減の削減レベル 3 では、海上輸送のシェアは 99%を超えて支配的になる。一方、時間・排出量の削減では、トラック輸送のシェアが残っており、不達成度が著しく高くなっている。そして、鉄道を導入すると、鉄道がトラックに代替し、トラックのシェアがなくなって目標の達成度も改善されることが分かる(図-4, 6)。鉄道のシェアの動向は、費用削減と時間削減で大きく異なり、費用削減の場合は削減レベルが高くなるにつれ、鉄道のシェアはなくなっていき、時間削減では逆に支配的になっていく。いずれも、目標の不達成度は低い。

バンコクーヤンゴン路線の基礎分析結果(表-4)では、現状とベースラインシナリオの比較を行うと、バンコ

クーハノイ路線と異なり、輸送費用が増加している。これは、トラック輸送のシェアの増加がより著しく、かつ、想定される海上輸送の費用減少幅も少ないためである。

図-5より、既存モード改善シナリオで輸送費用と排出量の削減を目指した場合の分担率の傾向は、バンコクーハノイ路線と類似している一方で、時間と排出量の削減を目指した場合のトラック輸送のシェアはかなり高めである。削減レベルを高めても、シェアの変化があまりなく、排出量の目標不達成度が高いのが特徴的である(図-7)。鉄道導入シナリオでは、削減レベルが低いと、3つのモードでバランスよく分担するが、削減レベルを上げていくと、費用・排出量削減では海上輸送と鉄道輸送の2モードによる分担、時間・排出量削減では、トラック輸送と鉄道輸送の2モードによる分担となり、いずれ目標はよく達成されている。

全体的な傾向として、既存モード改善シナリオでは費用と排出量の同時削減よりも、時間と排出量の同時削減の方が目標達成の状況は悪い。これは、時間と排出量が明確なトレードオフの関係にあるためであり、鉄道輸送が選択肢に加わることで、目標への対応力が高まると考えられる。

5. 結論

本研究では、大メコン圏の地域間貨物輸送を対象として、輸送費用および二酸化炭素排出量、輸送時間および二酸化炭素排出量の組み合わせを同時に削減することを目的し、機関分担率を決定変数とする目標計画問題として定式化した。そして、バンコクーハノイと

バンコク－ヤンゴンの2つの路線をケーススタディとして取り上げ、複数のインフラ開発シナリオと削減目標に対して、最適な機関分担率の算出を行った。計算の結果、路線、削減目標、開発シナリオごとに異なる目標機関分担率が得られた。具体的には、ハノイ路線に比べ、ヤンゴン路線は鉄道の優位性が大きく、全体的に鉄道の分担率が高くなった。削減目標別に見ると、輸送時間を削減目標に加えると、トラック輸送や鉄道輸送のシェアが高くなり、輸送費用を削減目標に加えると、海上輸送や鉄道輸送のシェアが高くなった。また、輸送時間と排出量はトレードオフの関係にあるため、これらを同時に削減しようとする場合の不達成度は全般的に高くなった。開発シナリオ別に見ると、貨物鉄道を導入することで、目標の達成度が大幅に改善されることが分かった。

今後の課題としては、各輸送機関の輸送容量や輸送頻度、アクセス可能範囲などの種々の制約条件を考慮していないことが挙げられる。また、輸送時間信頼性や輸送品質などの他の指標を評価に加えることも今後の研究の課題である。加えて、貨物鉄道の有効性の評価には、イニシャルコストなどを考慮したより多面的な検討が必要である。

謝辞：本研究は、環境省・環境研究総合推進費(S-6-5)「アジアにおける低炭素交通システム実現方策に関する研究」の支援により実施された。ここに深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 環境研究総合推進費 S-6 アジア低炭素社会研究プロジェクト：低炭素アジアに向けた 10 の方策、2012.
- 2) International Energy Agency: CO₂ Emissions from fuel combustion Highlights 2009 Edition, 2009
- 3) Hayashi, Y. and Nakamura, K.: Climate change, mobility

- and cost of transport, *Transport Policy*, 2013.
- 4) 川田敦相：メコン広域経済圏 インフラ整備で一体開発、勁草書房、2011
- 5) International Monetary Fund: World Economic Outlook Database, (<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2013/01/weodata/index.aspx>), 2013 年 7 月 12 日入手
- 6) JICA：メコン地域における物流促進のための通関業務の改善にかかる調査 ファイナルレポート、2011
- 7) 石井正美：越境交通協定（CBTA）とは何か、メコン地域開発研究－動き出す国境経済圏－ 調査研究報告書、石井正美編、2008
- 8) Kim, N. S. et al: Trade-off Between Carbon Dioxide Emissions and Logistics Costs Based on Multiobjective optimization, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, Vol. 2139, 2009
- 9) Yang, X. et al: Analysis of intermodal freight from China to Indian Ocean: A goal programming approach, *Journal of Transport Geography*, Vol.19, pp.515-527, 2011
- 10) Hanaoka, S. et al.: Measurement of energy-saving effect by intermodal freight transport in Thailand, *World Review of Intermodal Transportation Research*, Vol.3, No.4, pp.320-337, 2011
- 11) Dekker, R. et al: Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges, *European Journal of Operational Research*, Vol. 219, pp.671-679, 2012
- 12) 高橋宏直：モーダルシフト化率の推計方法と動向分析、国土技術総合研究所資料、No. 407、2007.
- 13) Asian Development Bank: Connecting Greater Mekong Subregion railways: A strategic framework, 2010.
- 14) JETRO：東西回廊・西側ルートを経由したバンコク－ヤンゴン間陸路輸送調査、2013
- 15) JETRO：ASEAN 物流ネットワークマップ 2008、2008
- 16) 伏見多美雄ら：経営の多目標計画 目標計画法の考え方と応用例、森北出版、1987
- 17) 国土交通省：貨物・旅客地域流動統計 最新の統計資料、(<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/17/17x0excel.html>) 2013 年 5 月 23 日入手

(2013.??受付)

ECO-EFFICIENT MODAL SPLIT OF INTERREGIONAL FREIGHT TRANSPORT IN GREATER MEKONG SUBREGION

Shinya HANAOKA, Tomoaki KATO and Kumiko NAKAMICHI

It is our great challenge to establish Low-carbon transport system in Asian region because the emission of carbon dioxide from transport sector in Asia is substantial and expected to grow over the future. In this study, interregional freight modal split in GMS was formulated as a goal programming problem which aimed to achieve the targets of transport cost, transport time and CO₂ emission in order to calculate eco-efficient modal split. Two case study routes, Bangkok – Hanoi and Bangkok – Yangon, were examined by development scenarios and targets. As a result, the optimal modal splits for respective scenarios, targets and routes were calculated and the trends and differences between them were also revealed. The results also implied the efficiency of the railway introduction on the case study routes.