# 日本を拠点とした SEA&AIR 輸送の実現可能性

石原　宏幸[1]・石黒　一彦[2]・竹林　幹雄[3]

[1]非会員　神戸大学大学院　海事科学研究科（〒658-0022 神戸市東灘区深江南 5-1-1）
E-mail:225w101w@cloud.kobe-u.jp

[2]正会員　神戸大学大学院准教授　海事科学研究科（〒658-0022 神戸市東灘区深江南 5-1-1）
E-mail:ishiguro@maritime.kobe-u.ac.jp

[3]正会員　神戸大学大学院教授　海事科学研究科（〒658-0022 神戸市東灘区深江南 5-1-1）
E-mail:takebaya@maritime.kobe-u.ac.jp

国際海空一貫輸送（SEA&AIR 輸送）の実現は，輸送過程における時間，費用削減や適切な国際輸送形態の選択など高度な物流ニーズに対応し国際輸送競争力向上にも貢献する．本論文では，犠牲量モデルを用いて東アジア発北米向けコンテナ貨物を対象に日本経由 SEA&AIR 輸送の実現可能性を分析する．結果として(1)高雄発 NY 行が最も日本経由 SEA&AIR 輸送の可能性が高いことが明らかとなり，神戸港を対象に SEA&AIR 輸送に必要な政策を分析より見出した．

***Key Words:*** *Sea and Air transport, international and intermodal transport, generalized cost model*

## 1. 序論

### (1) 背景

東アジア各国においては製造業の発展に伴い貿易量の増加も著しい．貿易量の増加には輸送時間の短縮，輸送コストの削減，環境負荷低減といった物流の高度化・深度化が求められる．このニーズに対応しつつ，我が国の貨物輸送システム全体の国際競争力を向上させるためにも，海上コンテナ輸送と航空輸送が連携した国際複合一貫輸送の一つである国際海空一貫輸送（SEA&AIR 輸送）の推進が必要である．SEA&AIR 輸送の特徴として，海上輸送単体と比べ所要日数が少なく，航空輸送単体に比べコストが削減できることが挙げられる．海上輸送と航空輸送の中間的なサービスである．

SEA&AIR 輸送の歴史は 1960 年代，Air Canada によって日本発北米経由欧州向けのサービスが行われたことが始まりである．具体的には日本の主要港から北米西岸まで海上輸送を行い，港から空港まで陸上輸送，空港から欧州までを航空輸送を行うものであった．背景として，日本発欧米行航空輸送コストが高かったこと，海上輸送は基幹航路として充実しており，この二つを組み合わせることで航空輸送のみと比べ運賃が安いこと，海上輸送のみと比べ所要日数が短縮されるというメリットがあった．

1988 年になると SEA&AIR 輸送を最初に開発した Air Canada による日本発北米西岸経由 SEA&AIR 輸送が合理化の一環として休止された．さらに 1990 年代に入ると，①航空運賃と海上運賃の差が縮小したことにより SEA&AIR 輸送の割安感が薄れたこと，②海上輸送がスピードアップしたため，SEA&AIR 輸送のリードタイム面でのメリットが表れにくくなったこと，③日本企業の海外進出により日本発貨物が東南アジア発貨物にシフトしたこと，これら 3 点の要因から日本発の SEA&AIR 輸送需要は低迷するようになった．現在では定常的な運用はされておらず，非常時における輸送代替手段として SEA&AIR 輸送が位置づけられている．

物流ニーズの高度化に伴う輸送形態の選択は荷主にとっては CSR の観点からも非常に重要な問題であり，特に SDGs への関心が高まる昨今において化石燃料を使用したジェット燃料を用いた航空輸送は適切な使用が求められる．ジェット燃料の代替となる持続可能な航空燃料である SAF は研究や大量生産が計画されている段階であり，仮に SAF が燃料の主力となった場合には現在の燃料とのコスト面で競争が予想される．いずれにしてもこのような背景から将来，航空輸送においては機体の性能以上にエネルギー効率性や燃料の選択が大きな問題となるため航空輸送だけに頼らない，海上輸送も組み合わせた SEA&AIR 輸送には大きなポテンシャルがあると考える．SEA&AIR 輸送環境負荷低減やエネルギー効率の高いインターモーダル輸送ソリューションを荷主に提示することとなり，その実現可能性の分析が求められる．

さらには日本において主要都市の空港国際化の動きが顕著である．2010年以降，羽田空港の国際線の便数は急増し，2030年には神戸空港の国際化が予定されている．これら空港はいずれも近隣にコンテナターミナルが存在するなど地理的条件に恵まれているため SEA&AIR 輸送の拠点になるポテンシャルが高いと考えられる．

### (2) 目的

本研究では，犠牲量モデルを用いて東アジア発北米行のコンテナ貨物における SEA&AIR 輸送の実現可能性の分析を行う．さらにシナリオ分析を行うことにより SEA&AIR 輸送のさらなる実現可能性を考察し，将来的必要とされるサービスや政策の効果について検討を行う．本研究では発地から経由地までを海上輸送，経由地から到着地までを航空輸送のケースのみを対象とした．日本における経由地を表-1 に，表-2 には各港湾と空港の距離関係を示す．神戸空港は現在，国際線が就航していないが，2030年を目途に国際定期便が就航する見通しである．そのため神戸空港及び神戸空港に最も近い神戸港に焦点を当て神戸空港を活用するシナリオも検討する．

表-1 選定港湾及び空港

| 地方 | 港湾 | 空港 |
|---|---|---|
| 関東地方 | 東京港<br>横浜港 | 成田国際空港<br>東京国際空港 |
| 関西地方 | 大阪港<br>神戸港 | 関西国際空港<br>神戸空港 |
| 中部地方 | 名古屋港 | 中部国際空港 |
| 九州地方 | 博多港 | 福岡空港 |

表-2 各港湾と空港の距離関係

| 地方 | 港湾 | 空港 | 陸送距離 (km) |
|---|---|---|---|
| 関東地方 | 東京港 | 成田国際空港 | 60 |
| | 横浜港 | | 90 |
| | 東京港 | 東京国際空港 | 10 |
| | 横浜港 | | 20 |
| 関西地方 | 神戸港 | 関西国際空港 | 60 |
| | 大阪港 | | 45 |
| 中部地方 | 名古屋港 | 中部国際空港 | 30 |
| 九州地方 | 博多港 | 福岡空港 | 6 |

## 2. 先行研究

### (1) SEA&AIR 輸送

日本経由の SEA&AIR 輸送の重要性を分析するため，我が国における研究と他国における SEA&AIR 輸送の取り組みおよび複合一貫輸送に関する研究を概観する．

Yang (2010)[1] は，台湾海峡を経由する海上および航空輸送の実現可能性を分析した．厦門から高雄までの海上輸送と，高雄からロサンゼルスまでの航空輸送による SEA&AIR 輸送の貨物需要量を予測した．その結果，リードタイムや輸送コストの削減，政府間の対立，海上・航空輸送における通関の非効率性，適時性の不確実性などが課題となり，予測貨物量が当初の想定を大幅に下回っていることが判明した． Chung ら (2010)[2]は，SEA&AIR 輸送が実践されている仁川地域の展望について述べている．従業員へのアンケート調査データと2001年から2008年までの貨物取扱量の変化率をもとにSWOT分析を実施した結果，将来について不確実性が高いことが示された．これは業界がリーマンショックで大きな影響を受けたことも一因である． Raguraman ら (1994)[3]は，SEA&AIR 輸送を画期的な輸送形態として紹介した．SEA&AIR 輸送を利用する貨物の特徴として，輸送時間の短縮を図るため時間に敏感である必要があるとしている． SEA&AIR 輸送の盛衰を歴史的背景とサービスレベルの低下という観点から解説している． Abid ら (2020)[4] は，SEA&AIR 輸送を利用してサプライチェーンの効率を改善するモデルとしてチュニジアのアパレルメーカーを使用した．会社の利益を追求することが目標であるため，変数と分析では財務コストと顧客満足度を考慮している．サプライチェーンの観点から見ると，SEA&AIR 輸送はトレンドのアパレル製品に対して望ましい性質を持っていると考えられる． 沖田ら (2010)[5] は，製造業が東アジアに集中し，消費者需要が米国，日本，そしてヨーロッパに集中している時代に，輸送のボトルネックとなっていた中国の空港容量と輸送量の不均衡を解消するために SEA&AIR 輸送の推進を提案した．在庫と輸送コストを考慮して総利益を決定する関数から最適配分を求めた．ただし，輸送手段の選択においては，現実的なサービス頻度ではなく，仮想的な輸送手段の割り当てを作成し，どの輸送手段の割り当てが最も収益性が高いかを感度分析により決定している．その結果，航空輸送が最も高価で，海上輸送が最も安価な輸送手段である場合に最大の利益が得られると結論付けた． Lee ら (2011)[6]は，分析方法としてファジィ SAW およびファジィ多基準 Q 分析手順を使用して，太平洋とアジアの間の SEA&AIR 輸送ルートを研究した．物流の観点が非常に重視されている．パフォーマンスの満足度も測定された．対象地域はシンガポール，香港，台北，上海，ソウルで，大手企業数社にアンケートを送付した．その結果，上海，シンガポール，香港が優れていることを示しており，ルート選択の曖昧さはある程度定量化できることを示した．川崎ら（2009）[7]は，日露間輸送においてシベリア鉄道の利用が低く，ロシア向け貨物の SEA がスペース不足や

設備の老朽化などの問題で代替輸送の台頭が望まれていたため，SEA&AIR 輸送の可能性を荷主の選好という観点から分析している．インタビュー結果より SEA&AIR 輸送は代替輸送になりえないという結論に至っている．理由としては，規模の経済，積替リスク，コンテナサイズ，航空運賃の低下，SCM の発達が挙げられている．

### (2) インターモーダル輸送

SEA&AIR 輸送以外の複合一貫輸送に関する研究を取り上げる．Wang ら (2018)[8]は，仁川から中央アジア（カザフスタン）への貿易量の増加に伴う鉄道サービスに焦点を当て，複合一貫輸送の効率的な輸送を Fuzzy Delphi と Fuzzy ELECTRE により評価した．荷主が輸送ルートを選択する際の結果に基づいて，5 つの主要要素（総コスト，信頼性，輸送能力，総時間，安全性）について説明している． Chen ら (2008)[9] は，台湾海峡を越える貨物フォワーダーの複合一貫輸送ルート選択に関する意思決定モデルを提案した．分析された貨物は繊維製品（低価格商品）と電化製品（高価格商品）であり，低価格商品は低速輸送を好み，高価格商品は高速輸送を好むことを証明した．航路距離が短いため航空輸送の優位性は証明されていないが，海運と航空輸送の各社データと相場が明確に示されている． Fan ら (2019) [10]は，目標最適化アルゴリズム PMSS の有効性を示し，それを海上および鉄道輸送のエネルギー消費の研究に使用した． PMSS を使用した感度分析では，単純なルート (海上輸送と鉄道輸送) の組み合わせおよび長期にわたるエネルギー消費量を調査した．実際のルートや貨物を明示的に選択するのではなく，輸送時間に応じて効率的な輸送モードを提案している． Sahin ら (2014)[11]は， 道路，鉄道，海上輸送を組み合わせた複合一貫輸送のコスト分析を実施した．トルコをモデルケースとして使用し，平準化コスト分析手法を使用して，単一モーダル輸送と複合モーダル輸送のどちらかを選択する際の輸送距離ごとの経済的な輸送モデルを提案している．貨物の時間的価値は考慮されていない．Gillen ら (2018)[12]は，西海岸のカナダ港の運用データを利用したシミュレーションモデルを使用して，港湾における複合一貫輸送の総滞留時間の変化を調査した．彼らはまた，船舶のサイズの増加と滞留時間との間に相関関係があり，貨物需要の増加により船舶のサイズが増加すると，港の効率に滞留時間の観点からマイナスの影響が生じると予測した．複合一貫輸送としては，海上輸送と鉄道輸送を想定した．いくつかの船舶サイズのパターンが設定され，需要の増加に応じて港の効率がどのように向上するかを決定するための感度分析を実施した．需要の伸びには弾力性やその他の制限があるため，操作頻度を増やすことが最も効果的な方法であると結論付けた．Chang (2008) [13]は，国際複合一貫輸送における最適なルート選択は，複数の目的，配送時間と配送方法，規模の経済，その他の要因によって複雑であることを踏まえ，ヒューリスティックモデルの定式化と開発によってこの問題を解決を試みた．分析対象となる貨物の例として，モニター数を指定して台湾から米国までモニターを輸送するルートを選定・策定し，シミュレーションを行った．花岡ら (2010) [14]は，バンコクーロンドン線およびバンコクーソウル線での貨物と乗客の予想外の増加による輸送不足を抑制するために，航空輸送ベリー便の乗客数予測を実施した．Choi (2023)[15] は，多様化する韓国の航空輸送貨物の中で衣類，プラスチック，化粧品などの新興貨物が航空輸送に依存しており，これらの品目は今後も航空輸送シェアを独占し，航空貨物市場を牽引すると述べている． また，小池（2021）[16]らは，応用一般均衡モデルを用いて貨物輸送の時間短縮による価値を推計している．その際に様々な感度分析を行い比較検討している．結果としては災害時に道路の経済的役割が重要になることが分かっている．しかし，実際の物流輸送時間や費用を把握できていないことや外部性を考慮していないことが課題である．Bona ら（2004）[17]は，インドネシアを対象に複合一貫輸送の重要さを示している．貨物ターミナル開発での戦略を考える際に計画で使用できるツールとして考案したモデルを提言することで，貨物輸送ネットワークの挙動を適切に表現，流れを把握できている．貨物のマルチモーダル輸送体系を確立するためには港湾・鉄道駅・トラックターミナルなどの物流ターミナルの効率的な整備・配置が重要であると結論付けている．柴崎ら（2004）[18]は，世界の主要地域での国際海上コンテナ貨物の国内背後輸送を考察し，日本との比較も行っていた．各国では SEA＆rail が盛んであるが，日本は SEA＆Track が主流であり，米国発東アジア向けの貨物についてどこから輸送されているか触れている．松田ら（2015）[19]は，パナマ運河拡張に伴い，アジア積北米東岸揚げコンテナ貨物において西岸揚げで鉄道利用のインターモーダル輸送と発地から目的地まで海上輸送の２つを比較，考察している．結論としては，船舶の大型化によるパナマ運河経由海上輸送の運賃低下がインターモーダル輸送での輸送日数よりも大きく影響する必要があると述べている．このようなことからパナマ運河拡張が All-water 輸送の増加に繋がるとは言いけれず，不確定要素が多い． 山鹿ら（2004）[20]は，日本の産業競争力の向上のため，マルチモーダル輸送への取り組みが必要と述べたうえで，マルチモーダル輸送推進に向けて国際コンテナ貨物の港湾背後地圏の分析を行い地域別の特性，鉄道，船舶貨物の特性を分析している．結果としては，鉄道輸送貨物は関東・東北・北陸と東京港の結びつきが強く，船舶輸送貨物は中国・四国・九州と神戸港，大阪港の結びつきが強い．また，鉄道貨物は小ロット高頻度な

品目，船舶貨物は大ロット貨物単価が低い品目の需要があることを導いている．背後地への輸送はトラックが非常に優勢であるが，CO2 排出量の観点から鉄道輸送のシェア向上が望まれており，実現のためには，鉄道輸送費用削減，コンテナターミナルとの接続改善，輸送頻度の向上などサービス面でも柔軟な対応が必要と述べている．

### (3) 環境負荷低減

SEA&AIR 輸送の環境負荷低減も考察するため，インターモーダル輸送が環境にどのように貢献しているかをまとめた研究を取り上げる．花岡ら（2014）[21]は，アジア圏の輸送部門の CO2 排出量削減が必要と述べ，低炭素化を実現する手段であるインターモーダル輸送の重要性を時間，費用の効率化に加え効率性を損なわず CO2 排出量削減を実現する最適な機関分担率を定量的に述べることを目的としている．モデルケースはバンコク―ハノイ路線，バンコクーヤンゴン路線．結果としては輸送時間を削減しようとすると，トラック輸送と鉄道輸送のシェアが高まり，輸送費用を削減しようとすると，海上輸送と鉄道輸送のシェアが高まる．輸送時間と排出量はトレードオフの関係にあるため同時に削減しようとすると，全体的に不達成度が高まると述べている．村田ら（2006）[22]は新幹線のネットワークが進む当時，道路輸送と比べて長距離輸送やエネルギーの面から新幹線にモーダルシフトする可能性が有るのではないかと論じている．鉄道が優位性を持つ貨物の時間価値を調べて品目別時間価値の推計結果と照合している．品目特性やモーダルシフトによる CO2 現象の便益も求めている．料金が一倍の時に最も他輸送モードからの転換輸送量が増えている． 渡邊ら（2016）[23]は，日本の都市間交通において効率的な利用を行うことを目標に，幹線旅客交通網を対象として，消費者余剰に関する評価値と二酸化炭素排出量に関する評価値のパレート最適の枠組みで評価している．航空，新幹線・在来特急，幹線バスの３つを評価している．結果としては鉄道の運行本数を現状程度確保することや，幹線交通機関は連携したサービスを展開することが二酸化炭素排出量を大きく増加させずに，利用者利便性の向上効果が期待できると述べている．井村ら（2006）[24]は，犠牲量モデルを使用して鉄道，トラック，海運，航空の既存する交通機関に加えて，新たに高速貨物輸送機関を導入したと仮定してモーダルシフトについて研究している．対象は東京～福岡間．高速貨物輸送機関の特徴としては比較的大量に輸送可能だが，鉄道ほどではない，所要時間は短く，高付加価値商品を運ぶ予定．中間的立ち位置のサービスのため距離も中間的部分となっている．多くのシェアを持つことはないが，CO2 排出量削減に期待が持たれるという結果になった．

### (4) 分析手法

経路選択モデルである犠牲量モデルとロジットモデルを含む複合一貫輸送に関する研究について述べる．

まずは犠牲量モデルの先行研究を取り上げる．Hanseen ら (2012) [25]は，犠牲量モデルを使用して，ノルウェーから中央ヨーロッパまでの鮮魚の複合一貫輸送が望ましい条件を分析した．複合一貫輸送に有利な条件は，(1) ターミナルハンドリングコストの増加，(2) 総輸送距離の増加，(3) 輸送前後のコストの増加，(4) 距離依存性，(5) 距離に依存するトラックの限界一般費用が減少，(6) トラック運転手の休憩費用が減少することと述べている．トラック単独輸送に比べ複合一貫輸送を推進するため，1. 国境を越えた複合一貫輸送の標準化，2. 都市部における事前事後輸送に特化した車両の輸送コストの削減，3. 貨物列車の優先化，4. 輸送費の追加料金，5. 長距離のトラック輸送に対する休憩規制の強化が必要としている．本研究とは複合一貫輸送の形態として海運と鉄道輸送を想定していること，貨物の対象が鮮魚である点で相違点があるが，複合一貫輸送の想定実現条件を考慮している点で類似点が認められる．井山ら（2012）[26]は，東アジア発北米，欧州向け貨物に着目して，犠牲量モデルにて国際海上コンテナ貨物量を港湾ごとに捉えている．日本の対象港湾にて京浜港，阪神港の輸出入取扱量を求めたのちに，各背後地を考慮したコンテナ貨物の増減を示した．Tavassy ら (2009) [27]は，犠牲量モデルの概念を拡張して一貫性のあるものを作成している．将来の貨物輸送需要シナリオ， 運送事業者や荷主企業のコスト削減と最適なフレームの提供を目指している． 同氏は，犠牲量モデルはサプライチェーンの最適化に適しているが，製造場所や保管場所の選択，補充出荷の頻度，在庫の問題などの課題が残っていると述べている．

一般的に，貨物輸送の行動分析ではロジットモデルが適用されることが多く，その実績も豊富である．Jourquin ら (2014) [28]は，ヨーロッパを対象としたロジットモデルから，鉄道と道路の一貫輸送におけるトラック輸送のコスト弾力性を求めている．弾力性は道路と鉄道のコストが変化したときに取得され，モデルルートをアントワープからベッテンブルクとしている．結果として，Rail&Road 輸送は，トラック輸送コストの変化に対してトラック輸送よりセンシティブであるが，需要自体は変化しないことを示している．これは，トラック輸送コストの削減が複合一貫輸送に利益をもたらすことを示している．大橋ら(2005) [29]は，航空貨物の積み替えにおける重要な要素を決定するために多項ロジットモデルを適用した．結果として，積み下ろし時間の短縮が空港料金よりも効果的であることを示し，比較的時間価値の高い航空貨物の積み替えには，時間の節約，サービス品質の向

要な要素を決定するために多項ロジットモデルを適用した． 結果として，積み下ろし時間の短縮が空港料金よりも効果的であることを示し，比較的時間価値の高い航空貨物の積み替えには，時間の節約，サービス品質の向上，多様化が必要であると述べている．Kupfer ら (2016) [30]は多項ロジットモデルを利用して，貨物便にヨーロッパの航空輸送を利用する際に荷主が出発地と目的地の空港をどのように選択するかを分析した． 分析の結果，空港におけるフォワーダーの存在，空港での貨物取り扱いの経験，空港使用料が重要であると結論づけている．

最後に時間価値についての先行研究を取り上げる．瀬木（2016）[31]は，トラック輸送において貨物の時間価値が高まる原因と輸送能力のバッファが増加する要因を在庫管理モデルから時間価値を推定している．結果としては短距離輸送や荷主が小規模の際に貨物の時間価値が高まり，その輸送トラックのバッファも高まる．そのバッファを減らすことがコストダウンにつながる．貨物の時間価値について詳しく研究している．茅野（2014）[32]は，荷主の港湾選択行動要因分析から特性を把握することを目的とし，東北，中国，四国を対象に研究している．平均待ち時間を曜日から割り出すことや，パラメータ推定からどの要因で港湾選択されるかを把握した後にモデル再現を行い最も望ましい値の港湾について便数増加による影響を仮想シナリオで考えている．

本研究では海上輸送や航空輸送などの各輸送モードについて，貨物輸送時間による価値損失と物流コストを合わせた一般化費用を用いた犠牲量モデルを適用する．理由としては，ロジットモデルは，荷主の選択経路などの詳細な情報が必要であるが，犠牲量モデルでは貨物の輸送時間と費用で経路選択を行うことが出来るためである．これにより，輸送モード間の比較や，与えられた時間価値における最適な輸送手段の選択が可能になる．

## 3. 分析手法

### (1) 犠牲量モデル

本研究で適用される犠牲量モデルは，輸送ルートの選択肢ごとに時間と費用で表現される犠牲量を設定し，その選択肢の中から犠牲量が最も小さくなるルートが選択されるとするものである．非集計行動モデルにおいて代表的なものにロジットモデルが存在する．ロジットモデルは，荷主の輸送手段や経路など意思決定を推計することが出来るが，観測可能な確定港と観測不可能な確率項から成る効用関数を扱っているため，モデル作成に膨大なデータがかかると同時に変数も多い．一方で犠牲量モデルは，変数が時間と費用のみであるため，サービス水準の設定が容易であり扱いやすいという利点がある．また

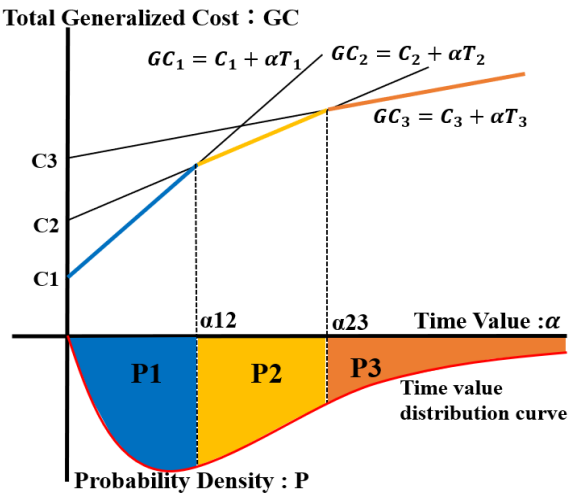



**図-1** 犠牲量モデルの概念図

たロジットモデルに比べると数は少ないが，先行研究でも用いられている．

ここで総輸送費用を$C_r$，貨物の時間価値をα，総輸送時間を$T_r$とすると犠牲量$GC_r$は式(1)で表される．

$$GC_r = C_r + T_r \times \alpha \qquad (1)$$

$GC_r$: 犠牲量のルート r(円/トン)
$C_r$: 総輸送費用のルート r（円/トン）
$T_r$: 総輸送時間のルート r（h）
α: 貨物の時間価値（円/トン/h）

SEA&AIR 輸送において海上コンテナ輸送費用と陸上輸送費，航空輸送費を足し合わせたものを総輸送費用とし，所要日数や荷役時間に加え海上輸送の待ち時間を足したものを総輸送時間とする．

犠牲量を用いたルート選択の概念を図-1 に示す．ここで，縦軸は犠牲量，横軸は貨物の時間価値であり，例えば選択できるルートが 3 種類あると仮定すると，各ルートの犠牲量はそれぞれ $G_1$，$G_2$，$G_3$の 3 本の直線で表される．ここでの添え字1.2.3は各ルートの番号を表している．図-1 の通り，貨物の時間価値が変化すると犠牲量が最小となる直線(ルート)が変化することがわかる．この場合は，時間価値が 0 から $\alpha_{12}$までの貨物は犠牲量が最も小さくなるルート 1 を選択し，時間価値が $\alpha_{12}$から $\alpha_{23}$までの貨物はルート 2 を，そして時間価値が $\alpha_{23}$以上の貨物はルート 3 を選択する．図-1 の下のグラフは縦軸を確率密度関数 P，横軸を時間価値 a としたものであり，時間価値の分布曲線を表している．例えば貨物の時間価値が 0 から $\alpha_{12}$までの確率 P1 は，ルート 1 が選択される確率となる．従って，時間価値の確率密度分布を与えることができれば，各ルートの分担率を求めることができる．

### (2) 時間価値

時間価値は人や貨物の経路選択，輸送ルートや輸送機関別の分担率を考える際に重要なファクターであるほか，輸送時間の削減効果などを貨幣換算する際に重要な項目である．交通分野における時間価値とは，時間の節約によって享受しうる便益を貨幣表示したもの，すなわち貨物の時間経過による金利として捉える．本研究で扱う時間価値は国土交通省港湾局が 5 年に 1 度実地している全国輸出入コンテナ貨物流動調査のデータを基にしている．井山ら（2012）[26]の既往研究より今回の時間価値分布は対数正規分布を仮定している． 前節でも触れたように図-1 の下のグラフは縦軸に確率密度関数 P，横軸を時間価値 α（円/トン/時間）とし対数正規分布の確率密度関数を描いている．井山ら（2012）[26]は 2008 年のコンテナ貨物流動調査結果を用いてモデルを構築していたのに対し，佐々木ら（2017）[33]は 2013 年の同調査の結果を用いて時間価値の対数正規分布のパラメータを再推計している．本研究では佐々木ら（2017）[33]の対アジアを対象とした輸入時の平均：7.53，標準偏差：1.64 を使用する．対アジア輸入の時間価値を採用した理由としてアジア地域から日本へ海上輸送で輸入されたコンテナ貨物を北米に航空輸送で輸出を行う SEA&AIR 輸送形態を想定しているため輸入された貨物の平均値と標準偏差としている．

## 4. SEA&AIR 輸送分析対象地域と輸送ルート

### (1) 使用データの概要

SEA&AIR 輸送の実現可能性分析において必要となる海上輸送所要日数や対象港湾は国際輸送ハンドブック 2022 年版のデータを使用し，輸送費用を Drewry Maritime Research による Container Freight Rate と Sea & Air Shipper Insight のデータを用いている

### (2) 対象地域の選定

本研究では日本経由の SEA&AIR 輸送実現について考える．SEA&AIR 輸送における対象地域を表-3 に記す．まずは，神戸港及び大阪港を経由する SEA&AIR 輸送について犠牲量モデルを用いて有効性を確かめる．国際輸送ハンドブック 2022 より北米，欧州，東アジア，東南アジア，オセアニア地域から東京港，横浜港，神戸港，大阪港，名古屋港，博多港に寄港するサービス便をすべて確認し，全ての前港から対象港湾を選定した．

出発地としては表-3 の 8 港を対象としている．理由としては，各港湾はすべて神戸，大阪港に直行便が出ており，その便数も 5 便以上ある．また，目的地としたロサンゼルス，シカゴ，ニューヨークのいずれかに 1 便以上直行便があるためである．なお，SEA&AIR 輸送の競合となる韓国・仁川との地理的距離を考慮し，上海以南の港湾としている．

表-3 SEA&AIR 輸送における対象地域

| 国名 | 港湾名 |
|---|---|
| **出発地** | |
| 中国 | 上海，寧波，深セン |
| 香港 | 香港 |
| 台湾 | 高雄 |
| ベトナム | ハイフォン |
| タイ | レムチャバン |
| シンガポール | シンガポール |
| **中継地** | |
| 日本 | 大阪，神戸，東京，横浜，名古屋，博多 |
| **目的地** | |
| アメリカ | ロサンゼルス（LA），シカゴ（CHI），ニューヨーク（NY） |

目的地をロサンゼルス，シカゴ，ニューヨークの 3 都市を設定した．理由としては，北米，主にアメリカを対象とした際に西海岸，内陸部，東海岸の地域によって海運，航空，SEA&AIR 輸送の競争関係が異なると考えられるからである．

### (3) 時間とコスト

#### a) 所要時間

本研究では，①海上輸送時間，②航空輸送時間，③陸上輸送時間，④荷役時間(港湾，航空)，⑤海上輸送の平均待ち時間の 5 つを想定した．①，⑤海上輸送時間，海上輸送の平均待ち時間に関しては，国際輸送ハンドブック 2022 を用いて実際の輸送スケジュールから設定した．①の海上輸送時間は，東京港，横浜港，神戸，大阪港，名古屋港，博多港への直行便サ―ビスの有無を調べたのちに全ての前港湾より東京港，横浜港，神戸，大阪港，名古屋港，博多港に寄港するまでにかかる所要日数をサービスごとに調べた．サービスごとのローテーション日数（船が一周するまでの日数）の半分以下のみを採用することで実用性のある日数のみを選択している．⑤の海上輸送の平均待ち時間に関しては，全ての前港湾別に東京港，横浜港，神戸，大阪港，名古屋港，博多港への直行便サービスを把握することで各港湾からの便数を得た．それを使い一週間で平均どれほど待つ必要があるかを出した．これには式(2)を用いた．

$$T_w = \frac{7}{F_l} \times \frac{1}{2} \times 24 \qquad (2)$$

$T_w$: 平均待ち時間（時間），$F_l$: 便数（便/週）

②の航空輸送時間に関しては，現状公開されているデータでは明確な輸送時間を把握することができないため，本研究ではどのルートも 24 時間であると設定した．③の陸上輸送時間に関しては，アメリカでの陸上輸送時間は松田ら(2015)[19]の論文より，ロサンゼルス港からシカゴまでを 96 時間と設定し，日本では，陸上の輸送距離から時速 60 km での輸送時間を推測した．④の荷役時間に関しては，港湾，航空それぞれ港湾政策審議会(2007)と財務省(2018)より，それぞれ港湾での荷役を 48 時間，航空では 8 時間と設定した．以上より，①，⑤海上輸送時間，海上輸送の待ち時間に関しては，実際のデータからの引用であるため明確な値だが，航空輸送時間や陸上輸送時間，荷役時間は推計値となっている．

b) コスト

費用は，①海上輸送コスト，②航空輸送コスト，③陸上輸送コスト，④荷役費用の 4 つを想定し，いずれも 1 t 当たりの運賃で設定した．まず①の海上輸送コストに関しては，Drewry Maritime Research による Drewry container fright rate 2021 December から分析するルートの記載の数値より算出した．佐々木ら(2017)[33]より，コンテナタイプの比率は 20 フィートの個数：40 フィートの個数 = 10：12 であること，コンテナ 1 個当たりの貨物量は約 23.3 トンであることから，貨物 1 トン当たりの海上輸送費用を式(3)により（円/トン）を算出した．

$$\frac{C_{20ft}\times 10+C_{40ft}\times 12}{(10+12)\times 23.3} \quad (3)$$

$C_{20ft}$: 20ft Dry 1 個当たりの海上輸送費用，
$C_{40ft}$: 40ft Dry 1 個当たりの海上輸送費用

今回用いたデータは手に入る最新のコンテナ運賃であり，近年はコロナウイルスの影響でコンテナ運賃価格が急上昇しているため平常時とは運賃が異なる．しかし，海上コンテナ輸送においては，コンテナ運賃が毎月変動することや輸送ルートの変更などが多く見受けられる．そこでの影響を考慮し，より最新の運賃と航路を選択した．次に②航空輸送コストは Sea & Air Shipper Insight より Buy rate US$/kg，Fuel surcharge，Security surcharge の 3 つから構成されているデータを使用している．

①海上輸送コスト，②の航空輸送コストに関しては，Drewry にて公開されているデータでは分析対象全てのルートのコストは公開されていなかった．そこで本研究では，データのない区間（非データ区間）では，データが存在している区間との直線距離の比より算出した．なお，非データ区間の参照元データは距離が最も近い区間のデータを使用している．ハイフォンから LA, NY 行に関してはホーチミンから LA, NY 行を参考にしている．③の陸上輸送コストに関しては，まず日本は LOGI-BIZ APRIL2020 より，トラック実勢運賃を参考に距離比から算出した．④は海上・航空輸送に比べ Sea&Air 輸送を行った際のみに生じる追加荷役費用を指す．これに関しては，詳細な値がないため 3 万円/トンとした．以上よりコストに関しては，海上輸送コストは現状のデータより引用しているが，区間によっては距離の比率から推計している．また，航空輸送コスト，陸上輸送コストも同様に推計値である．

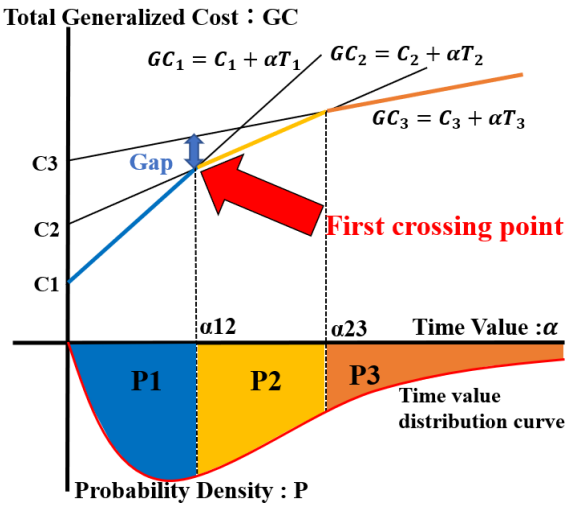



図-2　第 1 交点とギャップについて

## 5. 分析結果

### (1) SEA&AIR 輸送の分析結果

犠牲量モデルを用いて海上輸送，航空輸送，各 SEA&AIR 輸送（神戸，大阪，東京，横浜，名古屋，福岡経由）の分析を行った．縦軸を総犠牲量 G（円/トン），横軸を時間価値 α（円/トン/h）とする．また，図中の SEA は海上輸送，AIR は航空輸送，神戸 SEA&AIR は神戸経由の SEA&AIR 輸送を指すように経由地名を SEA&AIR の前につけるものとする． 分析結果をページの都合上「各輸送モード，SEA&AIR 輸送のポテンシャルの有無，第 1 交点でのギャップ（円/トン）」の 3 項目に分けて表にまとめ，概念図を図-2 に示す．

ギャップ（円/トン）とは，第 1 交点での AIR と各 SEA&AIR 輸送との犠牲量の差を取っており，この値がマイナスの場合は，日本経由 SEA&AIR 輸送の可能性はなく実現のためにはマイナス分だけ犠牲量を下げなければならない．逆にプラスの場合は，SEA&AIR 輸送可能性はあるが，ギャップ分だけ AIR の犠牲量が低下すれば SEA&AIR 輸送の実現性が低くなることを意味している．

**表-4** 各ルートの分析結果（成田国際空港）

| No. | Each Route | Potential of SEA&AIR | Gap (JPY/ton) |
|---|---|---|---|
| 1. | Shanghai to LA | No | -331,962(Osaka) |
| 2. | Shanghai to CHI | No | -257,238(Osaka) |
| 3. | Shanghai to NY | No | -145,702(Osaka) |
| 4. | Ningbo to LA | No | -600,473(Nagoya) |
| 5. | Ningbo to CHI | No | -410,094(Nagoya) |
| 6. | Ningbo to NY | No | -191,375(Nagoya) |
| 7. | Hong Kong to LA | No | -359,119(Osaka) |
| 8. | Hong Kong to CHI | No | -257,092(Osaka) |
| 9. | Hong Kong to NY | Yes (Osaka) | 22,870(Osaka) |
| 10. | Shenzhen to LA | No | -432,949(Osaka) |
| 11. | Shenzhen to CHI | No | -267,790(Osaka) |
| 12. | Shenzhen to NY | Yes (Osaka) | 62,320(Osaka) |
| 13. | Kaohsiung to LA | No | -285,530(Tokyo) |
| 14. | Kaohsiung to CHI | No | -181,991(Tokyo) |
| 15. | Kaohsiung to NY | Yes (Osaka) | 144,921(Tokyo) |
| 16. | Haiphong to LA | No | -359,497(Osaka) |
| 17. | Haiphong to CHI | No | -287,630(Osaka) |
| 18. | Haiphong to NY | No | -46,816(Osaka) |
| 19. | Laem Chabang to LA | No | -380,564(Tokyo) |
| 20. | Laem Chabang to CHI | No | -292,184(Tokyo) |
| 21. | Laem Chabang to NY | No | -55,980(Tokyo) |
| 22. | Singapore to LA | No | -344,908(Tokyo) |
| 23. | Singapore to CHI | No | -274,654(Tokyo) |
| 24. | Singapore to NY | No | -256,024(Tokyo) |

**表-5** 各ルートの分析結果（東京国際空港）

| No. | Each Route | Potential of SEA&AIR | Gap (JPY/ton) |
|---|---|---|---|
| 1. | Shanghai to LA | No | -331,962(Osaka) |
| 2. | Shanghai to CHI | No | -257,238(Osaka) |
| 3. | Shanghai to NY | No | -145,702(Osaka) |
| 4. | Ningbo to LA | No | -600,473(Nagoya) |
| 5. | Ningbo to CHI | No | -410,094(Nagoya) |
| 6. | Ningbo to NY | No | -191,375(Nagoya) |
| 7. | Hong Kong to LA | No | -359,119(Osaka) |
| 8. | Hong Kong to CHI | No | -257,092(Osaka) |
| 9. | Hong Kong to NY | Yes (Osaka) | 22,870(Osaka) |
| 10. | Shenzhen to LA | No | -432,949(Osaka) |
| 11. | Shenzhen to CHI | No | -267,790(Osaka) |
| 12. | Shenzhen to NY | Yes (Osaka) | 62,320(Osaka) |
| 13. | Kaohsiung to LA | No | -282,869(Tokyo) |
| 14. | Kaohsiung to CHI | No | -174,488(Tokyo) |
| 15. | Kaohsiung to NY | Yes (Tokyo) | 146,907(Tokyo) |
| 16. | Haiphong to LA | No | -359,497(Osaka) |
| 17. | Haiphong to CHI | No | -287,630(Osaka) |
| 18. | Haiphong to NY | No | -46,816(Osaka) |
| 19. | Laem Chabang to LA | No | -378,406(Tokyo) |
| 20. | Laem Chabang to CHI | No | -285,012(Tokyo) |
| 21. | Laem Chabang to NY | No | -54,233(Tokyo) |
| 22. | Singapore to LA | No | -343,421(Tokyo) |
| 23. | Singapore to CHI | No | -267,810(Tokyo) |
| 24. | Singapore to NY | No | -253,877(Tokyo) |

また，関東地方には成田国際空港と東京国際空港の二空港が存在するため成田国際空港を使用したバージョンと東京国際空港を使用したバージョンを分けて分析を行った．その結果を表-4，表-5 に示す．

日本経由 SEA&AIR 輸送の可能性があるのは 9．香港 NY と 12．深セン NY 行 15．高雄 NY のみという結果が得られた．高雄 NY 行に関しては，日本経由 SEA&AIR 輸送のギャップの値が全経由地ともにプラスを取っているため SEA&AIR 輸送のポテンシャルが高いことが判明した．では，経由地ごとに見ていくと，SEA&AIR 輸送の実現性が高いのは大阪港，次点で東京港であると考えられる．これは日本において関東地方と関西地方が大きな消費地でありこれを支える港湾としての機能が大阪港と東京港にあるため日本経由地として候補に挙がることは不思議ではない．実際にも大阪港と東京への海上輸送所要日数は他港湾より短く便数が多い傾向にある．このことは犠牲量モデルを使用する本研究では，時間価値が大きな影響を持つことを示唆している．

目的地別にギャップを見るとマイナスの値が NY＜シカゴ＜LA の順に大きくなっているため，SEA&AIR 輸送の実現可能性が高い目的地としてはLA＜シカゴ＜NY の順で可能性が有ると見てとれる．これは目的地までの距離が遠ければ遠いほど SEA&AIR 輸送の可能性が広がることを意味する．

また，表-4 の成田国際空港バージョンと表-5 の東京国際空港バージョンで異なることとして東京港におけるギャップの値が大きくなりより SEA&AIR 輸送の可能性が出たことを示唆している．今回の分析では航空輸送時の荷役時間や所要日数，待ち時間に対して同じ条件を与えて，空港までの陸送時間とコストのみ異なっているためこの陸上輸送での費用とコストが犠牲量モデルに影響を与えたと考えることが出来る．しかし，ギャップや第一交点最小時間価値が大きく変化しているわけではないため陸上輸送時間及び費用は僅かな影響と考えられる．

### (2) 検討対象ルートへの適用

前節の結果より香港，深セン，高雄発 NY 行が SEA&AIR 輸送実現可能性が高いためこの 3 つのルートについて与えた費用面などの設定条件も踏まえて考察していく．なお 3 ルートに関しては成田国際空港と東京国際空港の二つのバージョンが存在するが，今後はよりギャップが高く SEA&AIR 輸送の時間価値範囲が広い東京

国際空港バージョンを考察していく．香港，深セン，高雄発 NY 行の犠牲量グラフを図-3～5 に示す．

大阪経由 SEA&AIR 輸送の可能性がある図-3 の香港発 NY 向けのグラフだが，東京 SEA&AIR 輸送も僅かながら可能性が出ている．しかし，ギャップ値（円/トン）で比較すると 22870（大阪 SEA&AIR 輸送），5267（東京 SEA&AIR 輸送）と約 4 倍の差があるため大阪 SEA&AIR 輸送について述べていく．費用に関しては，海上輸送，航空輸送ともに Drewry Maritime Research による Container Freight Rate と Sea & Air Shipper Insight の値を使用している．詳細な値としては，香港から神戸，大阪の海上輸送コストは香港から横浜の運賃より距離比を用いて算出している．目的地が同じ日本であり，距離としても約 400 ㎞程度の差のため実際の運賃との誤差は少ないと考えられる．一方，関空から NY の航空輸送は，上海から NY の距離比より求めているため誤差が生じていると考えられる．また，輸送時間に関しては航空輸送時間を 24 時間と設定している．海上輸送において香港から NY と香港から神戸，大阪は国際輸送ハンドブック 2022 より値を用いているため誤差は少なく設定ができている．3 つのルートの中で最もデータの推計値が少ないため，現実的な分析である．結果より大阪経由 SEA&AIR 輸送の可能性は時間価値範囲では 1,897～2,006（円/トン/h）でありシェアは 1.35%と僅かである．しかし，シェア 1.35%はコンテナ 1,000 個中 13.5 個が SEA&AIR 輸送されることになる．これは中間的輸送モードの特性を考えると妥当である．今後の政策や分析次第で SEA&AIR 輸送の実現が高いと考える．

図-4 の深セン発 NY 向けの輸送では，大阪 SEA&AIR 輸送を筆頭に東京，横浜と順に SEA&AIR 輸送の可能性がある．3 港湾が日本経由 SEA&AIR 輸送の可能性が出ていることよりポテンシャルが高いルートとみなせる．ギャップ値は 62,320（大阪），41,131（東京），14,867（横浜）と香港 NY に比べ大きい．ここでも最も可能性がある大阪 SEA&AIR 輸送について述べていく．深センから NY までの海上輸送のコストは Drewry より直接求めることができたが，航空輸送コストは香港から NY のデータより距離比で算出した．深センから各港湾への海上輸送コストも香港同様に深センから横浜のコストより距離比で求めている．関空から NY は香港と同じく上海から NY のコストを関空から NY までの距離比を用いて使用している．輸送時間もまた香港と同様に航空輸送のみ 24 時間と設定し，その他の時間は国際輸送ハンドブック 2022 より求めている．香港と比較すると輸送コストを推計値で求める箇所が多く，実際の輸送コストとのズレが大きい可能性がある．時間価値範囲は 1,893～2,217（円/トン/h）でありシェアは 3.84%と香港 NY に比べ 2 倍以上となった．

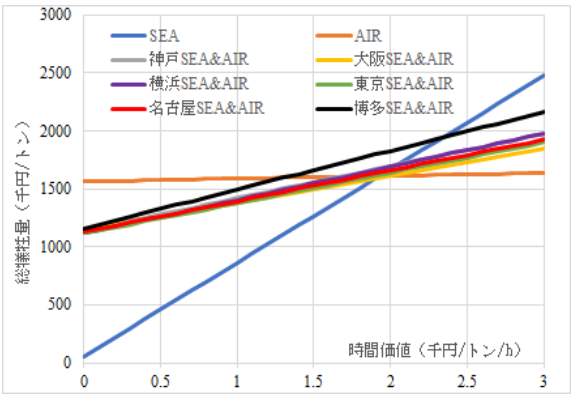



**図-3**　香港 NY の犠牲量モデル

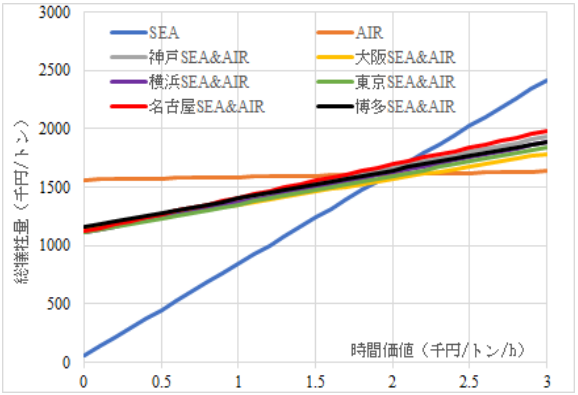



**図-4**　深セン NY の犠牲量モデル

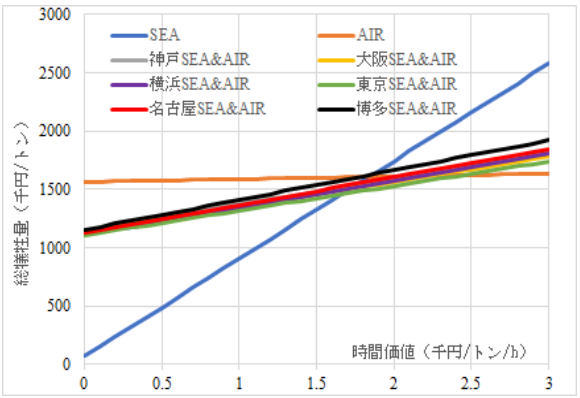



**図-5**　高雄 NY の犠牲量モデル

図-5 の高雄 NY では香港発や深セン発と異なり東京経由が最も SEA&AIR 輸送の可能性が高く，そのギャップ値が最も高いため SEA&AIR 輸送の実現性が本分析で最も高い．それだけでなく，全港湾でギャップ値が正の値，つまり全港湾で SEA&AIR 輸送の実現可能性がある．ここでは東京 SEA&AIR 輸送について述べていく．高雄発 NY 向けでは，海上輸送コストは Drewry の値を使用し，航空輸送コストは香港から NY 行の値より距離比で算出，高雄から各港湾へは高雄から横浜より距離比で求めた．

輸送時間もまた香港同様に航空輸送のみ 24 時間とし，その他は国際輸送ハンドブック 2022 を使用している．そのため信頼性では深センと同程度である．しかし，3 つのルートの中で最も SEA&AIR 輸送の可能性が高く，その時間価値範囲は 1,658～2,447（円/トン/h）と広くシェアは 9.43%である．

ここで日本経由 SEA&AIR 輸送の候補として有力な大阪港と東京港について 3 ルートをモデルに比較する．大阪経由と東京経由の差が発生している項目は設定上，トラック輸送時間とその費用，出発地から海上輸送での平均所要日数，費用，便数による平均待ち時間，航空輸送費用である．陸送費は，大阪港から関西国際空港まで約 45 ㎞，東京港から東京国際空港まで約 10 ㎞のため距離の差より約 3,500 円東京経由が高く，時間にすると大阪が東京より約 0.6 時間長く値を与えている．しかし，5.1 でも述べたように陸上輸送時間，費用が本分析に与える影響は僅かであるためここでの差は大きくないと考えられる．海上輸送では香港，深センでは約 1 日大阪への所要日数が短く，高雄では大阪，東京共にほぼ同じ所要日数がかかっている．海上輸送費用は全体を通して距離的関係より大阪が約 1,000 円/トン低くなっている．海上輸送便数は東京が大阪より全体を通して多いため待ち時間は東京が少なく有利である．航空輸送費用は距離的関係より東京が大阪より 2 万円/トン安い．

大阪港と東京港において総費用面での優位性は東京港にあるが，香港，深センに関しては，時間面で大阪港が優位性を持っており，香港，深セン NY では大阪経由が優位ということから，海上輸送所要時間が日本経由 SEA&AIR 輸送の優位性に大きな影響を与えていると推測される．距離の面では実現可能性が高い香港，深セン，高雄と日本までの海上距離は約 2,000～2,500km，日本の空港から NY まで約 10,000km 以上と海上輸送は航空輸送の 1/4 以下となっている．これは出発地から経由地まで海上輸送所要日数がかかり過ぎず，出発地から目的地まで航空輸送単体費用より安いコストを実現できる距離であると考えられる．しかし，データ制約など実測することが困難であるため今後様々な感度分析が必要となる．

現状，大阪港や東京港が優位性を持っているが，かつて日本において世界有数の貿易港として栄えた歴史がありかつ，直線距離 5km に 2030 年に国際化を図る神戸空港が存在する神戸港を経由する有効性について次章で考察する．現状神戸港が SEA&AIR 輸送の経由地にはなりにくいが，シナリオ分析により効率の高い輸送形態の選択のため必要となる政策や注力すべきポイントを見出す．

### (3) SEA&AIR 輸送の輸送形態としての役割

SEA&AIR 輸送実現性の高い 3 ルートの詳しい値を見ていったが，ここでは SEA&AIR 輸送の役割，特にシェアに関して海上輸送，航空輸送のどちらから取っているかを明確にしていく．3 ルートおける海上，航空，SEA&AIR 輸送のシェアを表-6，SEA&AIR 輸送が存在しない場合の 3 ルートのシェアを表-7 に示す．

表-6　海上，航空，SEA&AIR 輸送のシェア

| ルート | SEA (%) | SEA&AIR 輸送 (%) | AIR (%) |
|---|---|---|---|
| 香港 NY | 50.44 | 1.35 | 48.21 |
| 深セン NY | 50.39 | 3.84 | 45.78 |
| 高雄 NY | 47.17 | 9.43 | 43.40 |

表-7　SEA&AIR 輸送が存在しない場合のシェア

| ルート | SEA (%) | SEA&AIR 輸送 (%) | AIR (%) |
|---|---|---|---|
| 香港 NY | 50.81 | NO | 49.19 |
| 深セン NY | 51.41 | NO | 48.59 |
| 高雄 NY | 49.68 | NO | 50.32 |

表-6，7 より SEA&AIR 輸送は香港 NY 間においては海上輸送から 0.37%，航空輸送から 0.98%のシェアを奪う結果となったことがわかる．同様に深セン NY 間では海上輸送から 1.02%，航空輸送から 2.81%，高雄 NY 間では海上輸送から 2.51%，航空輸送から 6.92%奪うこともわかる．SEA&AIR 輸送は主に航空輸送のシェアを奪う形で表れていることが分かった．これは中間的輸送サービスである SEA&AIR 輸送だが，実は航空輸送のシェアの一部を奪う輸送サービスであると考えられる．

## 6. シナリオ分析

本章では前章で SEA&AIR 輸送のポテンシャルが最も高い結果が得られた高雄発 NY 行きを対象として将来あり得る 3 つのシナリオの効果の分析を行う．

### (1) 空港国際化が航空貨物輸送にもたらす影響分析（シナリオ 1）

5.2 で述べたように神戸港に隣接した神戸空港は現在，国内線のみが就航しているが，2022 年に行われた第 12 回関西 3 空港懇談会において 2025 年には国際チャーター便を，2030 年には国際定期便の検討をしている．神戸空港は埋め立て地であり用地も現在ある程度空いているため SEA&AIR 輸送を行う際のスペース確保も難しくないと推測される．また，神戸港がある人工島であるポートアイランドに関しても使用されていない土地があるため新たな輸送形態確立に向けた用地問題は解決できる．空港国際化に伴う SEA&AIR 輸送実地における貨物スペ

ースの問題は充分クリアしており，神戸空港と神戸港は 5km 圏内という立地条件から潜在ポテンシャルは高い．このことを踏まえて，第 5 章では関西国際空港を神戸港の航空輸送の拠点としていたが，シナリオ 1 では神戸空港を神戸港の拠点として分析を行う．これにより現状のまま空港の国際化が SEA&AIR 輸送に与える影響を考察する．結果を図-6 に示す．空港拠点を神戸空港にしただけでは神戸港の優位性は現れないことが判明した．仮想シナリオ 1 で変更した点は陸上輸送時間，費用の短縮と低減である．空港拠点を変更し，陸上輸送の時間短縮及びコスト低減を図っても全体に対しては大きな影響を与えないことが判明した．SEA&AIR 輸送において空港の国際化や陸上輸送の効率化だけでは効果が薄い．

### (2) 都市の輸出入需要増加による輸送形態への影響（シナリオ 2）

海上輸送所要時間が大きな影響を持っていることが判明しているため，神戸港への海上輸送日数に焦点を当てて分析を行う．現状 SEA&AIR 輸送の候補地として最有力な大阪港と神戸港は同じ関西地方に含まれており，この 2 港湾で比較すると地理的関係や背後地の産業発展度合い，消費需要から両港に寄港する定期航路の多くは大阪港，神戸港の順で寄港している．ここでは神戸市及びその背後地が産業の誘致や発展，交通網の拡大，効率化により神戸港への輸出入が増大した場合を想定する．
神戸への輸入需要が増え神戸港，大阪港の順に寄港するようになるケースを想定する．与えるデータ条件としては，SEA&AIR 輸送における出発地から神戸港，大阪港までの海上輸送所要時間を入れ替えたものをシナリオ 2 とする．なおシナリオ 1 にて設定した条件は引き継ぐものとする．結果を図-7 に示す．海上輸送日程を神戸港と大阪港で入れ替えることで神戸 SEA&AIR 輸送の優位性が現れた．これはもともと神戸港がアジアからの輸出入需要は大阪港より高いことを意味し，現状は大阪港に一度寄港したのちに神戸港に寄港するため海上輸送所要日数値が長くなり SEA&AIR 輸送実現性を妨げている．

### (3) 保税地域における効率化政策の是非（シナリオ 3）

貨物の荷役時間は主に①入港～搬入，②搬入～申告，③申告～許可の 3 工程が存在しており，この工程を経て保管地区外への輸送が可能になる．シナリオ 3 では神戸港及び神戸空港周辺，つまりポートアイランドと神戸空港を総合保税エリアに指定し，円滑な貨物輸送が行われ工程の②と③にかかる時間が無くなるまたは短縮されることを想定する．与えるデータとしては，荷役時間が半減，つまり港湾で 24 時間，空港で 4 時間となったとして分析を行う．なお神戸港のみ対象とするため近い距離にある大阪港での荷役時間の変更はなく，仮想シナリオ

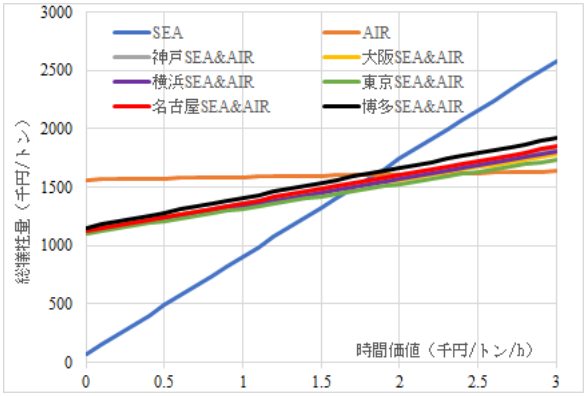



図-6 シナリオ 1 の結果（高雄 NY）

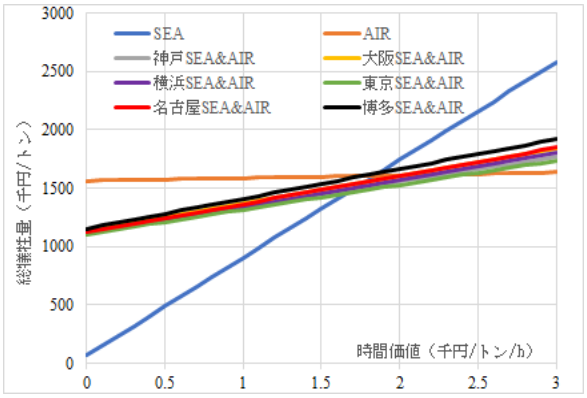



図-7 シナリオ 2 の結果（高雄 NY）

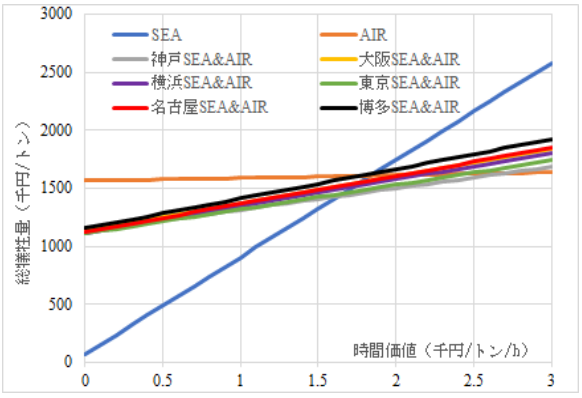



図-8 シナリオ 3 の結果（高雄 NY）

2 で設けた条件は引き継ぐものとする．結果を図-8 に示す．神戸 SEA&AIR 輸送の可能性が現れかつ，ギャップも 10 万円/トン以上と高い値となった．時間価値が 1,629～2,695（円/トン・h）の範囲の貨物において犠牲量が最小となりそのシェアは 12.17%である．

シナリオ分析より効果の高い政策は，海上輸送時間の短縮と荷役時間の短縮が挙げられる．この二つが空港拠点の変更に必須の条件となる．

### (4) 考察

日本で SEA&AIR 輸送が実現するための条件や施策と神戸港が SEA&AIR 輸送を行うために必要な条件，政策を検討する．

まず日本経由型 SEA&AIR 輸送実現に向けた条件と施策を述べる．距離の面では実現可能性が高い香港，深セン，高雄と日本までの海上距離は約 2,000～2,500km，日本の空港から NY まで約 10,000km 以上と海上輸送は航空輸送の 1/4 以下に収まっている．しかし，距離面では今後様々な感度分析が必要である．時間面は海上輸送日数と便数が大きな影響力を持っており逆に陸上輸送時間はあまり影響を与えないことが判明したため施策としては海上輸送の時間短縮に向けた取り組み及び便数の増加のための効率的な港湾運用計画が SEA&AIR 輸送では効果が高い．国際輸送競争力向上には陸上輸送時間の効率化など国内輸送の部分ではなく外国とのやり取りを担う港湾，空港及び税関での協力と効率化が施策として必要である．貨物面では SEA&AIR 輸送が海上輸送ではなく航空輸送からシェアを奪うサービスという性質上あまり低付加価値の貨物を取り扱うべきではない．具体的には，5.4 のように 1 トン当たり 100 万円以下の貨物では SEA&AIR 輸送を使用する利点がない．航空輸送される貨物からのトランジットのようにある程度の高付加価値貨物を扱う必要がある．

次に神戸港が SEA&AIR 輸送を行うために必要な条件と政策を述べていく．日本経由 SEA&AIR 輸送の条件に加え背後地の需要増加による寄港順の入れ替わりと荷役時間を短縮することが効率的な輸送を目指す上で大きな要因であることが判明した．空港拠点の国際化だけでは SEA&AIR 輸送実現は難しいことも分かった．大阪港と神戸港への寄港順を入れ替えるだけで神戸 SEA&AIR 輸送の可能性が発生したように神戸港自体のポテンシャルは決して低くない．便数に限れば日本有数の港湾である．神戸港への寄港優先度の増加，すなわち，消費需要の増加のためには神戸市の取り組んでいる産業誘致の強化が必要である．かつて港町として世界的港湾であった神戸港を保有する神戸市は人口規模が大きい日本で二番目に多い関西地方に所属しているが，現在若者の人口減少が続いており，働く場の創出が急務である．しかしながらこの人口減少も影響し，大阪に比べオフィスコストは低くなっており，企業にとっては非常に魅力的である．ここに産業誘致政策を組み合わせていくことが神戸港の背後地の充実化及び消費需要の増加につながり寄港優先度が上昇し SEA&AIR 輸送の実現可能性が高まる．

また総合保税エリアの拡大も必要である．総合保税地域においては貨物の蔵置や運搬だけでなく展示や製造など総合的な貿易の円滑化が可能となる．現在日本では総合保税地域は名古屋のみである．このエリアを SEA&AIR 輸送ポテンシャルが潜在的にある神戸港と神戸港と 5km圏内に存在する神戸空港にも拡充することで荷役時間の短縮が望まれ最適な輸送形態の選択肢の一助となる．また神戸港の属する人工島であるポートアイランドは産業誘致の場でありまだ用地もある程度あるためそのスペースの有効活用の面でも総合保税地域に選定する利点はある．

## 7. まとめ

本研究では日本経由型 SEA&AIR 輸送の実現可能性について犠牲量モデルを用いて東アジア発北米向けルートを対象に分析を行った．

今回の結果より SEA&AIR 輸送の可能性があるルートとして香港発 NY 行，深セン発 NY 行，高雄発 NY 行の 3 つが候補として挙がった．SEA&AIR 輸送のシェアとしては香港 NY 1.35%，深セン NY 3.84%，高雄 NY 9.43%であり，最有力候補は高雄発 NY 行である．SEA&AIR 輸送のシェア 9.43%はコンテナ 1,000 個中，約 94 個が SEA&AIR 輸送に転換可能ということを意味している．

日本経由候補地としては大阪港，東京港の順に有力であった．これは日本における消費需要が大きい地方である関東，関西地方の代表都市であることからも候補地としては妥当であると考えられる．第 5 章より日本経由 SEA&AIR 輸送に必要な条件としては，①SEA&AIR 輸送は航空輸送からシェアを奪うため航空輸送貨物からのトランジットを想定した貨物選定，②航空輸送距離の 25%以下の海上輸送距離，③海上輸送日数の短縮と便数の増加の 3 つが存在している．②に関しては出発地から経由地まで海上輸送所要日数がかかり過ぎず，かつ出発地から目的地まで航空輸送単体費用より安いコストを実現できる距離の参考値である．SEA&AIR 輸送が実現できる必要距離を分析するためには今後様々な感度分析が必要となる．

日本経由 SEA&AIR 輸送は航空輸送からシェアを奪うという輸送形態から，航空輸送だけに頼らない海上輸送も掛け合わせた SEA&AIR 輸送の実現は，環境負荷低減やエネルギー効率の高いインターモーダル輸送ソリューションを荷主に提示することが可能である．

また 6 章より神戸港など現在 SEA&AIR 輸送の候補地ではない港湾が SEA&AIR 輸送の候補地になるためには，背後地の貨物需要増加によるコンテナ船寄港優先度上昇がもたらす海上輸送日数短縮と便数増加だけでなく，荷役時間を短縮することが SEA&AIR 輸送を目指す上で大きな要因であり，近隣の空港拠点である神戸空港の国際化による国際貨物取扱の影響はほぼないことが判明した．

日本経由 SEA&AIR 輸送の最有力候補地である大阪港と神戸港の海上輸送所要日数を入れ替えただけで大阪港と神戸港の優位性が入れ替わったことから，海上輸送日数が約 1 日でも減少すると候補となる港湾が変化することが判明した．そのため寄港順も SEA&AIR 輸送には大きな影響を与えることが分かった．神戸エリアの保税地域指定を推進し，貨物の荷役時間を短縮することで神戸港が大阪港，東京港を抑えて最有力候補となったことからも荷役時間の短縮を官民で協力して行う必要性がある．

神戸港は関東地方の港湾と比べアジア地域から近い位置に存在し，港湾設備としてもある程度の規模を所有しており，今後国際化を図る神戸空港とも 5km 圏内という SEA&AIR 輸送を行うにあたって良い条件がそろっていると考えられる．さらには背後地に関西地方という大きな消費地を持つ神戸を日本で SEA&AIR 輸送を行う拠点にするためには有効な候補と位置づけて良いことが本研究の結果から示唆されうる．

日本は現在 SEA&AIR 輸送について極めて限定的にしか行っていな．しかし，本研究で明らかになったルートを実際に使用する際には，ここでは述べていない諸問題が発生する可能性がある．いずれにしても，今後日本経由型 SEA&AIR 輸送を行うには，SEA&AIR 輸送が現在行われている韓国の仁川のように港湾業者や航空会社だけでなく，日本政府もまた協力し，推進していくことが今後の SEA&AIR 輸送には必要不可欠である．

分析において費用や輸送時間はルートによっては明確な値を使用しているものもあるが，不明なところについては距離比で算出しており，結果の信頼性については十分に高いとは言い難い．SEA&AIR 輸送では港湾，航空貨物取扱時に追加的荷役コストが生じ，その他の輸送形態よりもコストが多く必要となっている．本研究では Sea＆Air 輸送時の追加荷役コストを 3 万円/トンとしている．トンベースの荷役コストの具体的な値は公表されていないためあらゆる値での感度分析が今後の課題である．

## 参考文献


1) Yang, Y. (2010) Future prospect of sea-air transport logistics across the Taiwan Strait via the Kaohsiung Offshore Shipping Center. Journal of Marine Science and Technology, 18(4)
2) Chung, T., Han, J. (2010) A Study on the prospect of Sea & Air multi-transport in the perspective of international logistics environment. Journal of Navigation and Port Research International Edition, 34(7), 587-594.
3) Raguraman, K., Chan, C. (1994) The development of sea-air intermodal transportation: an assessment of global trends. The Logistics and Transportation Review, 30(4).
4) Abid, T.B., Ayadi, O., Masmoudi, F. (2020) An Integrated Production-Distribution Planning Problem under Demand and Production Capacity Uncertainties: New Formulation and Case Study. Mathematical Problems in Engineering, 2020.
5) Okita, K., Amemiya, T. (2010) Optimal Allocation of Three Modes for the Intercontinental Transportations of Mass-Market Products. Industrial Engineering and Management Systems, 9(4), 294-302.
6) Lee, K.L. (2011) Preference analysis of sea-air multimodal logistic system using the fuzzy multicriteria q-analysis procedure. African Journal of Business Management, 5(11), 4355-4368.
7) 川崎智也，花岡伸也：SEA&AIR の分析と日露間貨物輸送における荷主の選考，土木計画学研究・講演集，Vol.40，No.126，2009
8) Wang, Y., Yeo, G.T. (2018) Intermodal route selection for cargo transportation from Korea to Central Asia by adopting Fuzzy Delphi and Fuzzy ELECTRE I methods. Maritime Policy & Management, 45(1), 3-18.
9) Chen, C.F., Lai, Y.J. (2008) Modeling and Optimizing Logistics Route across the Taiwan Straits. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 11,666-677.
10) Fan, Q., Jin, Y., Wang, W., Yan, X. (2019) A performance-driven multi-algorithm selection strategy for energy consumption optimization of sea-rail intermodal transportation. Swarm and Evolutionary Computation, 44,1-17.
11) Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, A.F., Gulsun, B., Turan, E. (2014) An Approach for Economic Analysis of Intermodal Transportation. The Scientific World Journal, 2014, 1-10.
12) Gillen, D., Hasheminia, H. (2018) Empirical analysis and simulation modeling of a Canadian seaport transportation network. Journal of Supply Chain and Operations Management, 16(1), 17-35.
13) Chang, T. (2008) Best routes selection in international intermodal networks. Computers & Operations Research, 35, 2877-2891.
14) Hanaoka, S. Ekachai, P. : Estimation of the occurrence of “short-shipping” of air cargo, Journal of Air Transport Management, Vol.16, pp.315-319, 2010
15) Jong Hae Choi: The value of time and the impact on the air freight product portfolio - A study of the South Korean market 2017–2021, Journal of Air Transport Management, Vol.109, 2023
16) 小池 淳司,高村 望,山崎 雅人,織田澤 利守: 応用一般均衡モデルを利用した貨物輸送の時間短縮価値の推計, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.5 (土木計画学研究・論文集第 38 巻), I_507-I_514, 2021.
17) Bona Frazila RUSS, Tadashi YAMADA, Jun CASTRO: MODELLING MULTIMODAL FREIGHT TRANSPORT NETWORK TOWARDS FREIGHT TERMINAL DEVELOPMENT, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, No.3, 2004
18) 柴崎隆一，山鹿知樹，小島肇，角野隆：国際海上コンテナの背後輸送に関する国際比較，土木計画学研究・講演集，No.30，pp.353-356，2004
19) 松田琢磨，赤倉康寛：アジア積北米東岸揚コンテナ貨物の経路選択：インターモーダルとオールウォーター，土木計画学研究・講演集，Vol.51，No.387，2015
20) 山鹿知樹，柴崎隆一，角野隆，渡部富博：鉄道およ

び船舶による国際海上コンテナ貨物の 国内輸送特性に関する分析，沿岸域学会誌, Vol.17, No.1, pp.39-50, 2004
21) 花岡伸也，中道久美子，加藤智明：大メコン圏の地域間貨物輸送における 環境負荷を考慮した機関分担率の算出，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.70, No.5, I_879-888, 2014
22) 村田洋介,青山吉隆,中川大,柄谷友香,白柳博章: 新幹線ネットワークによる貨物輸送の便益評価に関する研究，土木計画学研究・論文集, No.23, no.2, pp.455-462, 2006
23) 渡邉 拓也, 柴田宗典，鈴木崇正：多目的最適化に基づく都市間交通 ネットワークの評価手法に関する研究，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.72, No.5, I_903-916, 2016
24) 井村幸代，浅野光行：高速貨物輸送機関の導入がモーダルシフトに及ぼす効果の分析，土木計画学研究・講演集，Vol.34, No.17, 2006
25) Hanseen, T.S., Mathisen, T.A., Jorgensen, F. (2012) Generalized transport costs in intermodal freight transport. Social and Behavioral Sciences, 54, 189-200.
26) 井山繁，渡部富博，後藤修一：犠牲量モデルを用いた国際海上コンテナ貨物流動分析モデルの構築，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68, No.2, pp.I_1181-I_1186, 2012
27) Tavasszy, L., Davydenko, I., Ruijgrok, K. (2009) The Extended Generalized Cost Concept and its application in Freight Transport and General Equilibrium Modeling. Integration of Spatial Computable General Equilibrium and Transport Modelling Bilateral Joint Seminar under agreement between NWO and JSPS
28) Jourquin, B., Tavasszy, L., Duan, L. (2014) On the generalized cost - demand elasticity of intermodal container transport. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 14(4), 362-374.
29) Hiroshi Ohashi, Tae-Seung Kim, Tae Hoon Oum, Chunyan Yu: Choice of air cargo transshipment airport: an application to air cargo traffic to/from Northeast Asia, Journal of Air Transport Management, Vol.11, pp.149-159, 2005
30) Franziska Kupfer, Roselinde Kessels, Peter Goos, Eddy Van de Voorde, Ann Verhetsel : The origin–destination airport choice for all-cargo aircraft operations in Europe, Transportation Research Part E, Vol.87, pp.53-74, 2016
31) 瀬木俊輔：在庫管理モデルを応用した貨物の時間価値に対する理論的アプローチ，土木学会論文集 D3（土木計画学）, Vol.72, No.2, pp.113-127, 2016
32) 茅野宏人：配船スケジュールを考慮した荷主の港湾選択行動分析, 土木学会論文集 D3（土木計画学）, Vol.70, No.5, I_789-799, 2014
33) 佐々木友子, 赤倉康寛, 渡部富博：我が国とアジア・欧米地域との国際海上コンテナ貨物流動に関わる経路選択モデルの構築, 国土技術政策総合研究所資料, No.943, 2017

# FEASIBILITY ANALYSIS OF INTERNATIONAL SEA–AIR TRANSPORT VIA JAPAN

Hiroyuki ISHIHARA, Kazuhiko ISHIGURO and Mikio TAKEBAYASHI