

アフリカ大陸全土を対象とした国際物流シミュレーションモデルの構築と時系列分析

渋谷 圭悟¹・柴崎 隆一²・川崎 智也³・徳織 智美⁴

¹学生非会員 東京大学 工学部システム創成学科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
kei5-0216@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 工学系研究科レジリエンス工学研究センター准教授
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1) E-mail: shibasaki@tmi.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻講師 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: kawasaki @sys.t.u-tokyo.ac.jp
⁴非会員 独立行政法人国際協力機構
E-mail: tomomi.tokuori@gmail.com

本研究では、陸海輸送の双方を含み、世界各地を対象として構築されてきたインターモーダル国際物流ネットワークモデルをアフリカ全域に適用し、2008年と2016年の2時点に関してモデルを構築する。構築したモデルについて、アフリカの港湾の輸出入貨物取扱量などを用いて概ね良好な再現性を有することを確認した。さらに、構築した2つのモデルを用いて、2時点におけるアフリカのコンテナ輸送状況の違いを考察した。その結果、2008年では2016年に比べて、トラック輸送費用が鉄道輸送費用に比べて相対的に高いことや、国境をまたぐ輸送の利便性が低かったことが示唆された。

Key Words : *intermodal transport network, global logistics, network assignment model, time-series simulation, West Africa*

1. 研究の背景と目的

近年、経済のグローバル化や全世界の交易の拡大に伴い、コンテナ輸送は急速に発展し、海上輸送および陸上輸送を合わせてより複雑化してきた。特に、地域全体として経済発展の著しいアフリカでは、人口の増加に伴い貿易需要の増加が予想される一方で、物流インフラは脆弱であり、図-1に示すように、中国など世界各国のドナーの資金供与をうけて多数の海上および陸上輸送インフラの開発計画が推進中である。さらに同地域は、地域経済統合の遅れや政治的緊張が原因で、EU やアジアなどほかの経済圏と比べて域内貿易額の比率が小さいことが課題として挙げられており、インフラ開発計画に加えて、地域経済共同体による貿易円滑化政策等にも注目が集まっている。

特に域内 56 か国中 16 か国が内陸国であるアフリカは、世界の他地域との貿易のために、海上輸送に加えて他国を陸送で通過する必要があることから、海上および陸上輸送を包括的に含む物流動向を再現するモデルを用い

て、複数の国や輸送手段を跨いだインフラの開発を含む様々な物流政策を包括的に評価することで、優先順位をつけて実行していくというニーズが存在する。

筆者らはこれまでに、アフリカを対象として国際物流モデルの構築を行ってきた^{3,4,5)}。これらの研究では、いずれも南部アフリカまたは東南アフリカのみを対象として国際物流シミュレーションモデルを構築し、当該地域

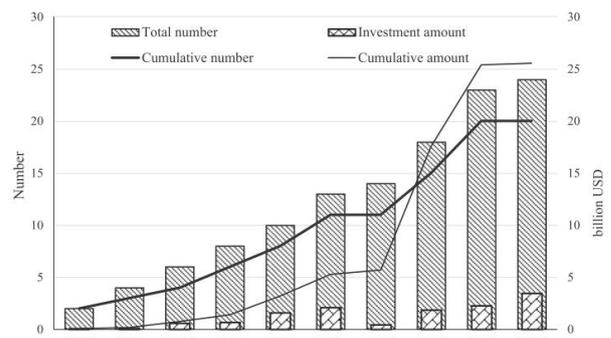


図-1 中国によるアフリカ港湾開発プロジェクトの件数と総額の推移 出典：Yang et al.²⁾

を対象とした政策分析を行っている一方で、アフリカ全土を対象としたモデルではない。複数の地域経済共同体による地域統合や、国をまたぐ回廊開発が進められているアフリカ全土を対象とするようにモデルを拡張することによって、より大域的なシミュレーションが可能になる。

そこで本研究は、このような背景に基づき、全世界の海上コンテナ輸送およびアフリカ全土の陸上輸送の動向を再現する物流モデルを構築することを目的とする。なかでも本稿では、複数の経済共同体による貿易政策やインフラ開発が進められている西アフリカに着目する。西アフリカにおいては、コートジボワールやガーナなどの経済規模の比較的大きい沿岸国各国とある程度経済規模のある内陸国を結ぶ経済回廊の整備が進められており、各国の回廊間で貨物輸送ルートの競争が存在する。その一方で、同地域には社会情勢が不安定な国も多く、内戦や政変も物流動向に影響を与えうる。このことから、同地域における物流動向の変化を分析することの意義は大きいと考えられる。

インターモーダル国際物流ネットワークモデルの構築や諸地域への適用に関する研究としては、最短経路探索モデルを適用したITF-OECD⁶⁾や、パスサイズロジックモデルを用いたTavasszy ら⁷⁾などが挙げられる。これらの複数輸送機関を含む大規模な物流シミュレーションモデルの構築、適用に関する研究では、十分なデータの入手が困難なため、よりシンプルなモデルが用いられる傾向がある。そのため、これらのモデルでは各輸送機関の容量は考慮されていないものの、途上国においては交通量の増加が著しいにも関わらず、インフラの整備が不十分であるため、インフラの容量制約がより深刻な問題として挙げられる。なお、途上国を対象とした最近の研究例としては、重力モデルを用いて南アフリカとインドに焦点を当てたAritua ら⁸⁾や、海上および陸上ネットワークを考慮したインターモーダルなネットワーク上においてロジックモデルにより輸出入港湾を選択するモデルを構築し、インド＝米国間貨物に適用しているVenkatasubramanian and Thill⁹⁾が挙げられる。後者においては、港湾のキャパシティなどの複数の要因から「港湾サービス指数」という指標を考案することで、港湾の容量制約を間接的に考慮している。

ここで、Shibasaki ら¹⁰⁾の一連のモデルは、全世界を対象とした海上輸送および特定地域を対象とした陸上輸送を考慮しており、現実に近いネットワーク上で荷主の立場から経路選択をするとともに、グローバルな貨物流動を考慮しつつローカルに適用できる点で有用である。このモデルの適用例として、たとえば西村ら¹¹⁾は、シベリア鉄道やチャイナランドブリッジなどのインパクトに着目し、現状再現性の確認やローカルな政策分析も行って

いる。ただし、陸上輸送の対象地域は中国・中央アジア・ロシア／東欧などのユーラシア大陸である。

一方、本研究と同様に西アフリカを対象としたモデルを用いた研究例としては、西アフリカにおけるゲートウェイ港湾を対象として、回廊ごとの陸送コストを考慮することで輸送機関の分担や港湾利用の競争を分析したKobina and Domfish¹²⁾や、海上輸送サービスネットワークを用いて、サブサハラ地域の港間の貨物フローを最短経路問題によって再現したKim ら¹³⁾が挙げられる。しかし、いずれもそれぞれ内陸国への回廊のみのネットワーク、または海上輸送ネットワークのみを考慮しており、海上および陸上ネットワークの双方を考慮するモデルではない。

また、近年のコンテナ輸送需要の拡大に伴って、世界的な貿易、物流の変化が各港湾や輸送インフラの利用にどのような影響を与えてきたかを分析する研究にも注目が集まっている。特に、複数時点におけるコンテナ貨物流動を分析した研究としては、Ducuet ら¹⁴⁾があげられる。この研究においては、1996年と2006年の世界の海上輸送定期航路ネットワークを比較することによって、港湾の階層構造と定期船のサービス形態の変化を分析している。特に、アフリカなどのインフラ開発や貿易円滑化政策の実施が急速に進められている地域においては、多時点の物流動向を比較することによって、同地域における開発がどのように物流動向を変化させてきたかを定量的に把握できるため、将来の物流政策の戦略策定に有用である。

以上を踏まえ、本研究では、柴崎らの一連のモデル¹⁰⁾をベースとし、全世界の海上コンテナ輸送およびアフリカ全土の陸上輸送の動向を再現する物流モデルを2008年および2016年の2時点について構築する。さらに、構築した2つのモデルを用いて2時点におけるアフリカの物流動向の違いについて考察する。

2. 西アフリカの物流

(1) 西アフリカにおける物流の現状

図-2に示すように、西アフリカでは、各主要港湾(Dakar港, Abidjan港, Tema港, Lome港, Cotonou港)からそれぞれ内陸国(マリ, ブルキナファソ, ニジェール)へ延びる経済回廊が存在する。

まず、マリの首都であるBamakoまでは、セネガルのDakar港とコートジボワールのAbidjan港から回廊が延びている。特に、Dakar港からBamakoまでは鉄道輸送も存在し、Bamakoにアクセスのある唯一の鉄道となっていることから、マリ発着貨物はDakar港を利用することが多い。



図2 西アフリカにおける主要港湾と回廊
 出典：Nathan Associates Inc.¹⁵⁾

次に、ブルキナファソの首都であるOugadougouまでは、コートジボワールのAbidjan港、ガーナのTema港、トーゴのLome港、ベナンのCotonou港からそれぞれ回廊が延びており、状況に応じてブルキナファソ発着の国際貨物は各国の港湾を選択して利用する。特にAbidjan港からOugadougouまでは、鉄道輸送が存在するという点で他国に対して優位性を持っているものの、鉄道積替え時間が長いことから、道路輸送が主流である。さらに、ブルキナファソへのアクセスについては回廊間の競争が激しく、港湾サービスの発達や回廊の整備によって、貨物輸送ルートは変化しうる。また、このエリアの国の中ではガーナのみが英語圏であるなど、文化的背景も物流状況に影響を与えうる。ブルキナファソ発着海上貨物の西アフリカ各主要港湾におけるシェアを図3に示す。実績値については各種港湾統計¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾およびJICAによる報告書²⁰⁾により算出した。

ブルキナファソ発着海上貨物の利用港湾別シェアについて、2016年においてはLome港が38%と最も高い比率であったのに対して、2008年ではAbidjan港が34%と最も高くなっている。このことから、2008年から2016年にかけて、ブルキナファソ発着の海上貨物がロメ港をより利用するようにシフトしていることがわかる。

ブルキナファソ発着
 トランジット貨物量実績値

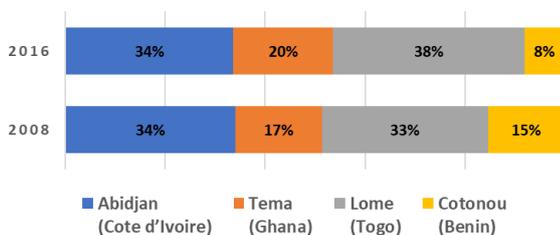


図3 ブルキナファソ発着海上貨物の西アフリカ各主要港湾におけるシェア

最後に、ニジェールの首都であるNiameyまでは、ベナンのCotonou港から回廊が延びており、Cotonou港はニジェール発着のトランジット貨物を多く取り扱っている。しかし、Nathan Associates Inc.¹⁵⁾によると、Cotonou港は、港湾の混雑が特にみられ、さらに海賊行為が発生するなど治安の面からも物流コストが高い傾向にある。

さらに、内陸国と各主要港湾を結ぶ回廊以外にも、コートジボワールのAbidjan港からナイジェリアのLagos港までを結ぶ沿岸回廊 (Abidjan-Lagos Corridor) も存在する。一方で、各国境での越境手続きの存在や、社会、文化的背景から、依然として海上輸送も用いられる。

このように、西アフリカにおいては、主要港湾と内陸国を包括的に含むような道路、鉄道網の整備が進められている。中でもコートジボワール、ガーナ、トーゴ、ブルキナファソを円形に結ぶ経済回廊の整備は、JICAにより西アフリカ「成長の環」広域開発プロジェクト²¹⁾として推進されている。さらに、西アフリカでは域内経済の統合や、政治的安定の確保を目指し西アフリカ経済通貨同盟 (以下、UEMOA) が創設されている。特に、UEMOAには上記で述べた3つの内陸国 (マリ、ブルキナファソ、ニジェール) が含まれることから、域内の経済発展において、回廊の整備や、国境手続きの簡略化は重要な課題である。そこで、国際物流を円滑化するために、国境の両側の施設を統合した共同運用施設を建設、運用することによって、従来は出国側と入国側で各1回停止していた時間を短縮するワンストップ・ボーダー・ポスト (One-stop Border Service) の整備が進められている。

(2) 西アフリカの紛争に伴う物流の変化

このように、西アフリカ地域において、経済共同体の推進および多数の貿易円滑化政策が進められている一方で、この地域には社会情勢が不安定な国が多く、ある国で内戦や政変が生じた際に、同国港湾を利用して貨物を輸送できなくなるという状況に陥る危険性がある。例として、コートジボワールでは、2002年から2011年にかけて長期的に政治情勢が不安定な状態が続いた。実際に、2011年に発生した内戦の際には、内陸国への貨物は、コートジボワールの港湾からではなく、隣国の港湾からより高額な迂回ルートによって輸送されたという報告²²⁾もある。

加えて、AICD²³⁾によると、長期的に政治状況が不安定であった影響から、道路・鉄道などの輸送インフラへの資金投資が滞り、道路整備事業が大幅な資金不足に陥っていることが報告されている。表-1に示すように、特に2002年の政治危機の際には、道路部門への支出がニーズを大きく下回っていることがわかる。

表-1 コートジボワールの道路部門への支出の推移

出典：AICD²³⁾

	(ニーズの目安)	(支出計画)	(動員資源)	(発生した支出)
Millions de dollars EU	Besoins estimés	Plans de dépenses	Ressources mobilisées	Dépenses réalisées
2002	57,4	0,6	0,7	0,0
2003	68,8	0,7	0,7	0,0
2004	75,7	2,7	3,7	0,7
2005	75,8	1,9	13,1	6,6
2006	76,5	49,0	19,4	5,5
2007	83,5	39,4	25,0	30,0
2008	89,3	34,0	26,5	18,4
2009	84,7	30,9	27,1	22,5
Totaux	611,8	159,2	116,2	83,7

Source : Fonds d'entretien routier, 2010

$$CTE_r = NB_r \cdot CTB / x_all_r \quad (1)$$

CTE_r : 港*r*におけるコンテナ1TEUあたりのコンテナターミナルコスト (US\$/TEU)

NB_r : 港*r*におけるコンテナターミナル数

CTB : 1ターミナル当たりの年間使用料金 (=300,000US\$とした)

x_all_r : 港*r*におけるコンテナ取扱量合計 (TEU/year)

ここで CTB については、コンテナターミナルにおける諸費用の実態を踏まえたうえで、対象港湾のターミナルコスト CTE_r の最大値が約1000となることも考慮して設定した。

3. 国際物流モデル

(1) モデルの概要

本研究で用いるインターモーダル国際物流モデルは、Shibasakiら¹⁰⁾の従来モデルの構造および配分手法を一部変更した山口²⁴⁾のモデルをベースとしている。図-4にモデルの全体構成を示す。

モデルは、海上ネットワークと陸上ネットワークを統合したインターモーダル国際物流ネットワーク上の配分モデル（上位モデル）を基本モデルとして、詳細な国際海上コンテナ輸送ネットワーク上での配分モデルをサブモデル（下位モデル）にもつ構成となっている。

本モデルでは、段階配分手法を適用することにより、均衡配分に基づく従来モデルに比べ、各輸送機関の容量制約による混雑をより精確に考慮することを試みている。さらに、各段階配分において確率的ネットワーク配分を導入し、リンクコストが最小の経路以外にもフローが流れる状況を表現している。

また、本モデルにおける入力データは、大きく分けると港湾データ、海上・陸上のネットワークデータ（距離、サービスレベル、輸送実績など）、および地域間輸送需要量（地域間OD貨物量）の3種類である。一方で、アウトプットは各リンクごとに出力されるコンテナフローであり、これを集計することによって各港湾のコンテナ取扱量や各港湾間の大局的なフローも確認することができる。

本研究では、港湾内リンクのうち、輸出入時に通過する港湾Oリンクおよび港湾Dリンク、積替え時に通過する船社間積替リンクおよび船社内積替リンクにおいて、港ごとのターミナルコストを以下のように設定し、利用量の大きい港湾ほど整備が進み、利用料金が安くなるという港湾における規模の経済性を反映した。

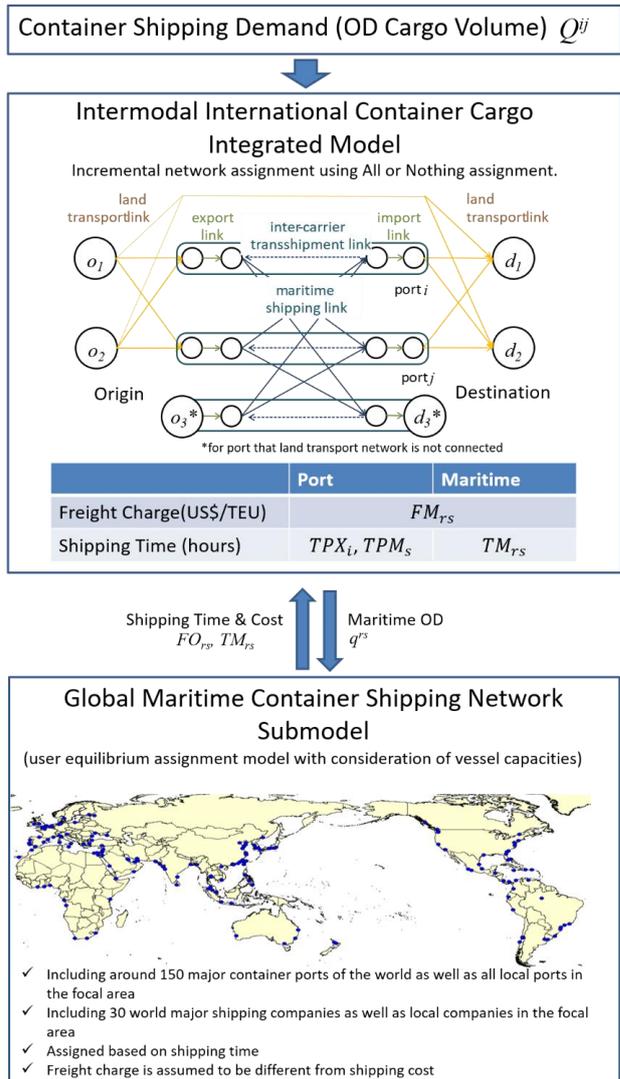


図4 本モデルの全体構成 出典：山口²⁴⁾

(2) モデルの入力データ

本研究では、2016年および2008年の2時点について、インプットデータ（港湾データ、海上輸送ネットワークデータ、陸上輸送ネットワークデータ、地域間貨物輸送需要量データ）を作成した。

まず、港湾データに関しては、2016年モデルでは小菅

²⁵⁾で対象とされている基本港湾など183港に加えて、2016年のMDSデータ²⁶⁾において外航サービスが寄港するアフリカ地域の64港を追加した合計249港湾を対象とし、2008年モデルでは、2016年モデルの対象港湾のうち、2008年において開港前またはコンテナ取扱量が不明であった港湾を除いた合計221港湾を対象とした。輸出入別の港湾荷役費用とリードタイムに関しては、世界銀行のDoing Businessデータベース²⁷⁾の値を用いた。また、OD表の作成や現状再現性の確認で必要となる港湾取扱量については、対象港湾すべての実績を含んでいるデータベースがないことから、以下に示す複数のデータソースを用いている。

- a. 若島²⁸⁾で用いられた値を使用
- b. African Seaports and Maritime Economics in Historical Perspective²⁹⁾
- c. Containerization International Yearbook 2010³⁰⁾
- d. Digital Logistics Capacity AssessmentsのHP³¹⁾
- e. 世界銀行データベース³²⁾における、各国コンテナ取扱量で代用
- f. Kawasakiら¹⁰⁾で用いられた値を使用
- g. AfDB³³⁾のレポートの値を使用
- h. annaba港の港湾統計HP³⁴⁾
- i. 2008年値が不明な場合は2016年値で代用
- j. 世界銀行³⁵⁾のエリトリアに関するレポート

本研究で対象としたアフリカの港湾および後述する地域代表ノードを含む陸上輸送ネットワークを、図-5に示す。

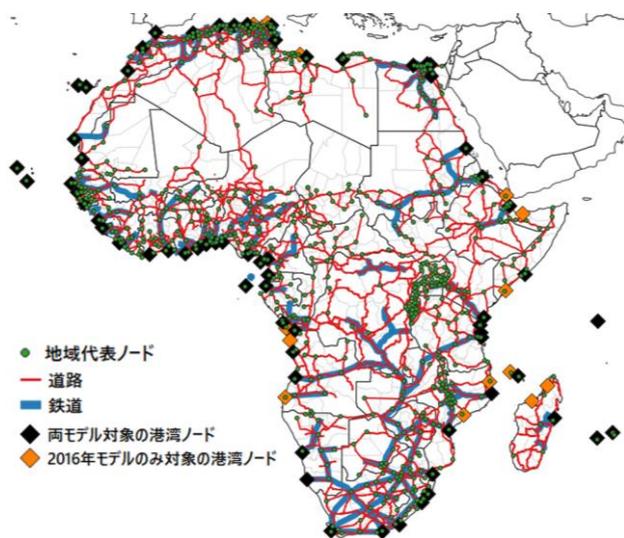


図-5 本研究で対象とした陸上輸送ネットワークおよび各種ノード

海上ネットワークデータに関しては、2016年および2008年のMDSデータ²⁶⁾を元に、2016年モデルでは55船社1014サービス、2008年では59船社1208サービスを対象と

する。これにより、全世界のモデル対象港の総寄港船腹量のうち、2016年モデルでは90.7%、2008年モデルでは89.2%がカバーされる。2008年における海上ネットワークデータの特徴として、年間コンテナ輸送キャパシティの小規模な船社が多数存在することが挙げられる。実際に、2016年モデルで対象としていた249港湾から、2008年モデルでは221港湾と減少しているにもかかわらず、寄港するサービス数は1014サービスから1208サービスと増加している。さらに、2016年モデルの対象である海上輸送サービスの平均船舶サイズが2,775TEUであるのに対し、2008年では1,801TEUと、約1,000TEU小さくなっている。

陸上ネットワークデータに関しては、道路については主にADC World Map³⁶⁾、鉄道についてはDIVA-GIS³⁷⁾のデータを元に、アフリカ大陸全土および周辺の島国およびスペインのカナリア諸島を考慮し、ノード総数は14,059、リンク総数は14,857である。また、陸上ネットワーク上のODノードおよび港湾ノードの割り当てについては、それぞれ、simple mapsのホームページのWorld Cities Database³⁸⁾およびWFP GeoNodeのホームページのGlobal Ports³⁹⁾から得られる各地域における代表都市・港湾の座標データを参照した。なお、2008年時点のネットワークデータが入手できなかったため、2008年モデルでも2016年モデルと同じネットワークを用いた。国境通過において必要な追加的な費用と時間については、世界銀行のDoing Businessデータベース(trading across borders)⁴⁰⁾から得られるデータのうち、「書類準備」と「税関手続き」に要する費用と時間のそれぞれの合計値を用いた。また、陸上輸送費用に関する各種パラメータについては、キャリブレーションにより決定した。詳細は5.で説明する。

地域間貨物輸送需要量データに関しては、2008年および2016年のGTA Forecastingデータ⁴¹⁾を元に、海上コンテナ貨物と(海上輸送されない)陸上輸送貨物の両方を対象として、陸上輸送ネットワークを考慮する各国について分割基準を定め、国レベルの貨物輸送需要データを、Google Earth Engine⁴²⁾で抽出した2016年の夜間光量平均に基づき比例配分する形で、合計750の地域レベル(ゾーン)に分割することにより作成した。加えて、本研究では、特に着目する西アフリカ地域における港湾間貨物需要量実績値を正確に再現するために、西アフリカのSan Pedro港、Abidjan港、Takoradi港、Tema港、Lome港、Cotonou港について、集約したGTA Forecastingデータを、各港湾統計データ⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾に基づく輸出入別の実績値に比例配分するという方法を採用した。なお、ゾーン分割の際に、陸上輸送ネットワークを持たないゾーンが生じた場合は、道路リンクをもち、かつ当該ゾーンと同国内で隣接したゾーンに統合した。

(3) モデル計算と解法

本モデルでは、山口²⁴⁾と同様に、あらかじめ設定された計算回数（本研究では2回）に従って、上位モデルおよび下位モデルの計算を交互に行う。さらに、OD需要量を読み込む分割回数設定である段階配分の分割回数について、10分割を採用した。これは、分割回数を多くすることでAll or Nothing配分の計算回数が増加し、全体の計算時間が増加することになるという多段階配分の特徴を考慮したためである。

4. モデル計算結果（現状再現性の確認）

本章では、構築した2016年および2008年モデルの現状再現性について、海上および陸上輸送量の分担率、全世界の主要ハブ港湾のトランシップ貨物量およびトランシップ貨物率、陸上輸送ネットワークを考慮する港湾における輸出入貨物取扱量、および陸上全体のフローの推計結果を用いて検証する。

(1) 2016年モデル

a) 海上および陸上輸送の機関分担率

アフリカ発着貨物（アフリカ域内貨物含む）に関する、2016年モデルによる海上輸送量と陸上輸送量の推計結果

表-2 アフリカ発着貨物における海上および陸上輸送量と分担率のモデル推計結果（2016年）

	輸送量(千 TEUs)と割合	
	海上輸送	陸上輸送
実績値	11,935 (96.0%)	503 (4.0%)
推計値	11,858 (95.4%)	579 (4.7%)

を表-2に示す。これより、アフリカ発着貨物の陸海輸送分担率について、概ね現状を再現できているといえる。

b) 全世界主要ハブ港湾のトランシップ貨物量とトランシップ貨物率

2016年モデルにおける全世界の主要ハブ港湾のトランシップ貨物量とトランシップ貨物率の推計値を、図-6に示す。図に示すように、Hong Kong港を除き概ね良好な再現性が得られた。Hong Kong港においては、トランシップ貨物の一部が再輸出という名目で統計上輸出貨物に含まれることがあるため、実績値が過小となっていると考えられる。

c) 陸上輸送ネットワークを考慮する港湾の輸出入貨物量

図-7に示す陸上輸送ネットワークを考慮する港湾の輸出入貨物取扱量の推計値により、陸上輸送と海上輸送の競合に関する再現性を確認する。図に示すように、全体として輸出、輸入ともに概ね良好な再現性が得られた。ただし、エジプトの港湾（Alexandria, Port Said, Damietta, El Sokhna）については、特に輸出において再現性が悪い。これは、エジプトには比較的キャパシティが大きく地理的距離の近い港湾が複数存在することに加えて、陸上輸送ネットワーク密度が高いことから、モデル上で各港湾の差別化が十分に行われていないためであると考えられる。この点の改善に関しては今後の課題である。

d) 陸上輸送ネットワークのコンテナフロー

陸上コンテナフローの推計結果を図-8に示す。図に示すように、マクロ的な傾向として、アフリカでは、各主要港湾から内陸国へ延びる回廊を利用して貨物が輸送されているという状況がわかる。また、特にアフリカでは整備不足によって鉄道輸送の利便性が向上していないことが一般的であり、トラックを用いた輸送が主流となっている。

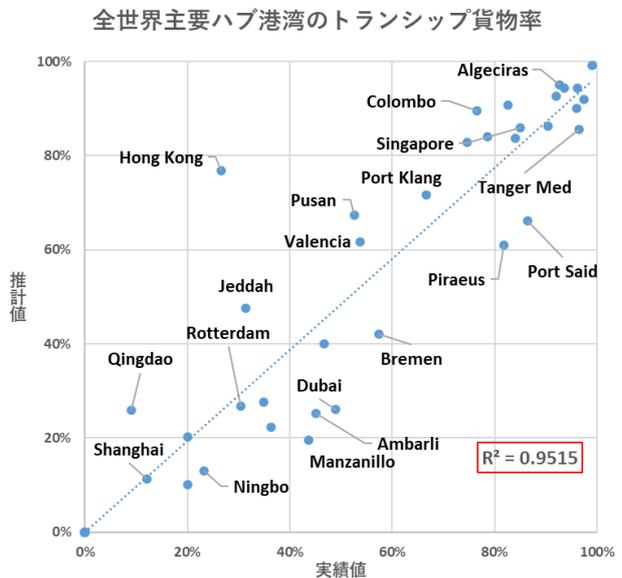
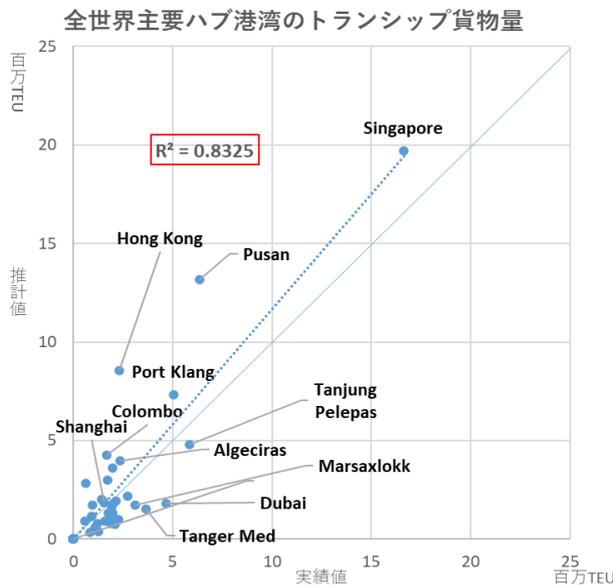


図-6 全世界の主要ハブ港湾のトランシップ貨物量とトランシップ貨物率の実績値とモデル推計値の比較（2016年）

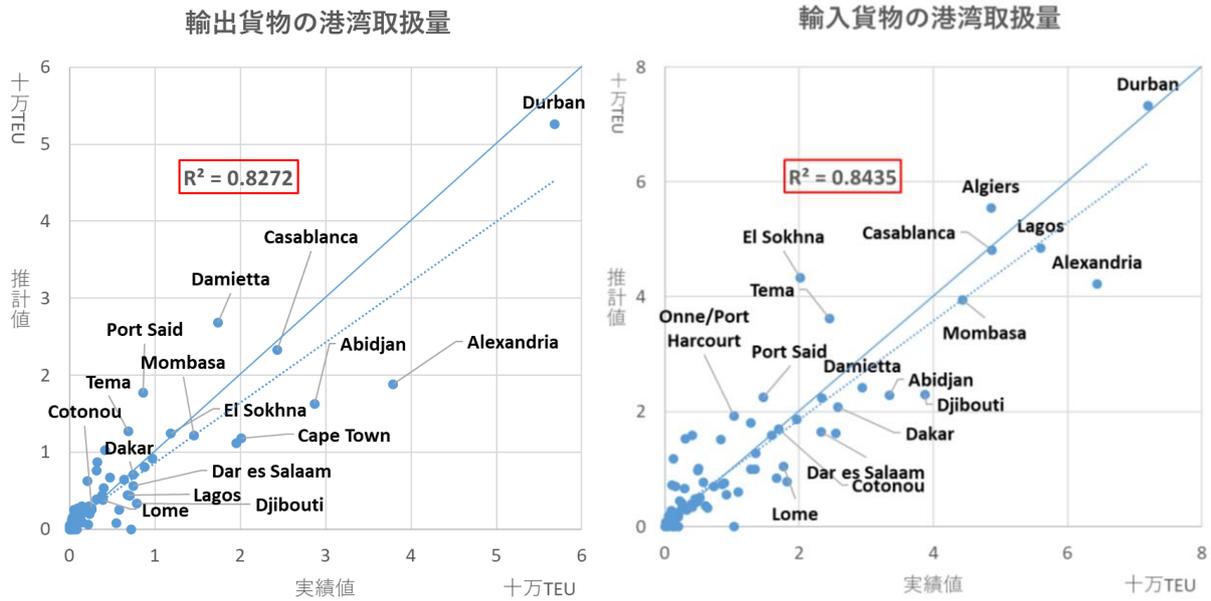


図-7 陸上輸送ネットワークを考慮する各港湾の輸出入貨物取扱量の実績値とモデル推計値の比較 (2016年)

さらに、本研究で特に注目する西アフリカ地域の国境周辺のフローについて検証する。具体的には、西アフリカ主要港湾 (Abidjan, Tema, Lome, Cotonou) から内陸国へ続く経済回廊に着目し、特に内陸国との国境におけるコンテナフローについて検証を行った。図-8 下に示すように、西アフリカ主要港湾の存在する沿岸4国から内陸国ブルキナファソへの輸送ルートに着目すれば、各港からブルキナファソへ延びる経済回廊を利用して貨物が輸送されている状況がわかる。

図-9に、ブルキナファソ発着の海上貨物における西アフリカ各主要港湾のシェアに関する実績値と推計値の比較を示す。ここで、推計値については、ブルキナファソと各沿岸国間の越境交通量 (リンクフロー) の推計値から、両国間の陸上発着貨物量実績値を差し引いた値に基づき計算している。図より、このエリアにおいて、Lome 港のシェアが最も大きいという現状をモデルでも再現できていることがわかる。一方で、実績値がトラン

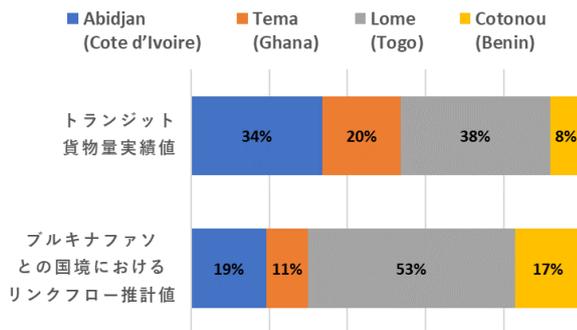


図-9 ブルキナファソ発着海上貨物における西アフリカ各主要港湾のシェア (輸出入合計, 2016年)

ジット貨物かつコンテナ貨物以外も含むのに対し、推計値においては国境を通過するコンテナリンクフローを集計しており、他国発着の貨物も含まれるという定義の違いもあり、実績値と推計値の間に差が生じている。

(2) 2008年モデル

a) 海上および陸上輸送の機関分担率

アフリカ発着貨物 (アフリカ域内貨物含む) に関する、2008年モデルによる海上輸送量と陸上輸送量の推計結果を表-3に示す。これより、2016年モデルに比べると若干の差異が見られるものの、アフリカ発着貨物の陸海の輸送量の分担率について、概ね現状を再現できているといえる。

表-3 アフリカ発着貨物における海上および陸上輸送量とモデル分担率の推計結果 (2008年)

	輸送量(千 TEUs)と割合	
	海上輸送	陸上輸送
実績値	9,767 (96.8%)	327 (3.2%)
推計値	9,525 (94.4%)	568 (5.6%)

b) 全世界主要ハブ港湾のトランシップ貨物量とトランシップ貨物率

2008年モデルにおける全世界の主要ハブ港湾のトランシップ貨物量とトランシップ貨物率の推計値を、図-10に示す。図に示すように、Hong Kong港やPusan港を除き概ね良好な再現性が得られた。2008年モデルは2016年モデルに比べて、海上ネットワークが多数の小規模な船社からなるため、特定の港湾において貨物の積替えが偏ったためだと考えられる。

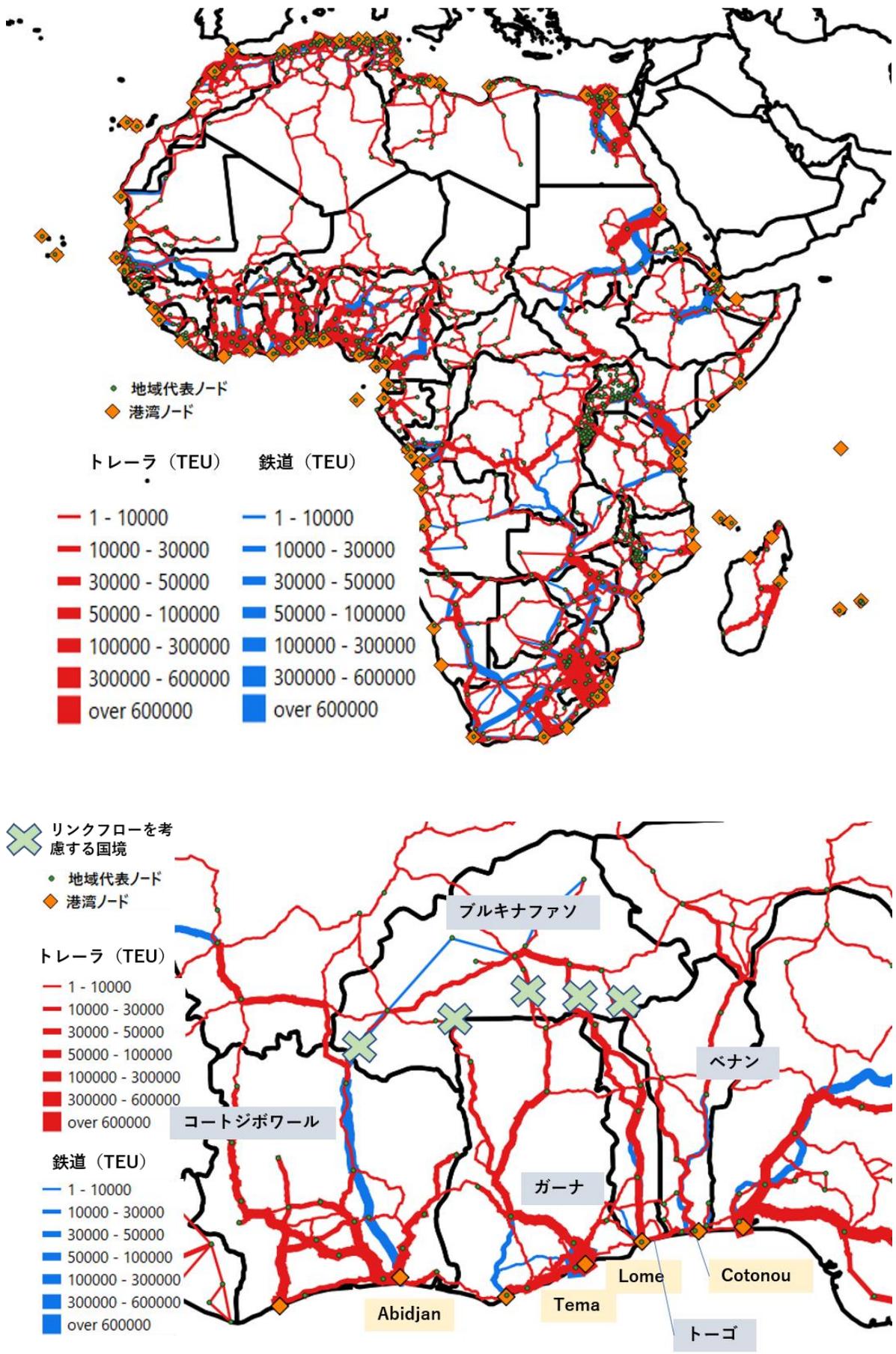


図-8 陸上コンテナフローの推計結果 (2016年, 上: アフリカ全土, 下: 西アフリカ)

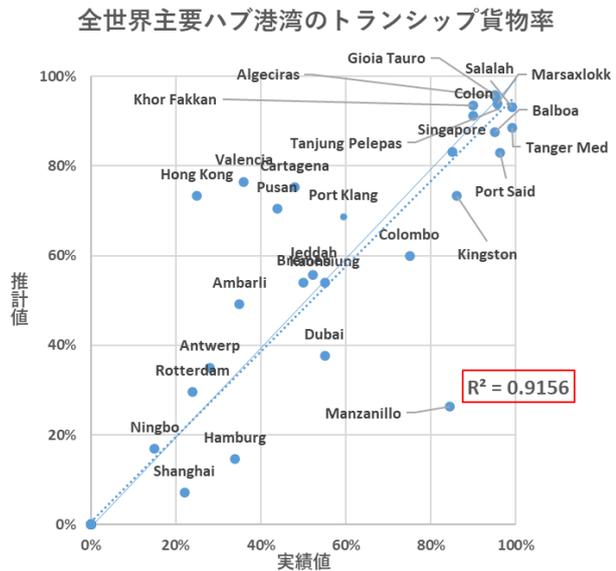
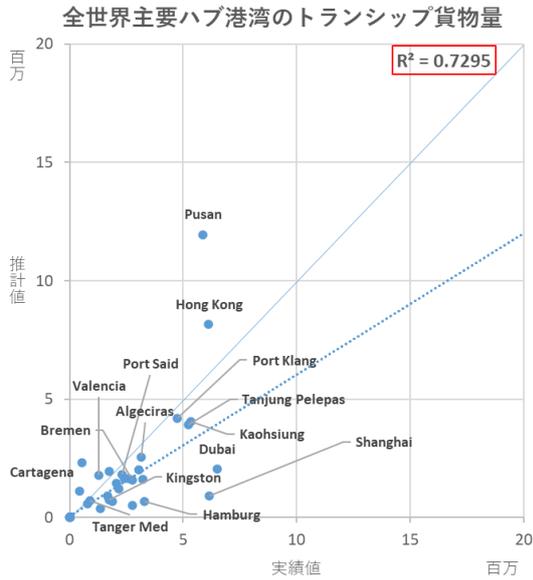


図-10 全世界の主要ハブ港湾のトランシップ貨物量とトランシップ貨物率の実績値とモデル推計値の比較 (2008年)

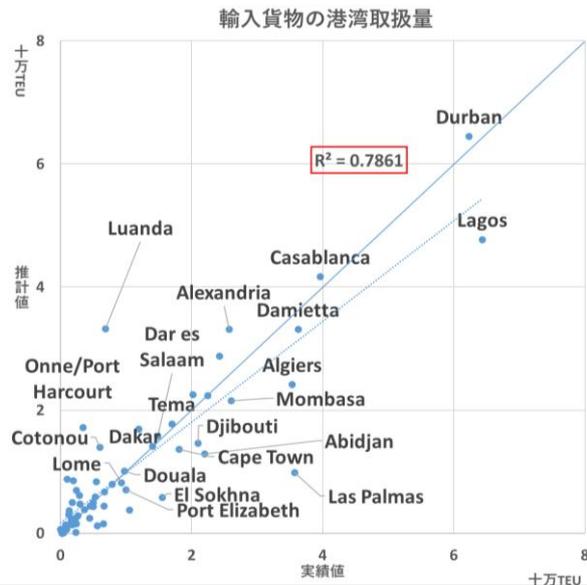
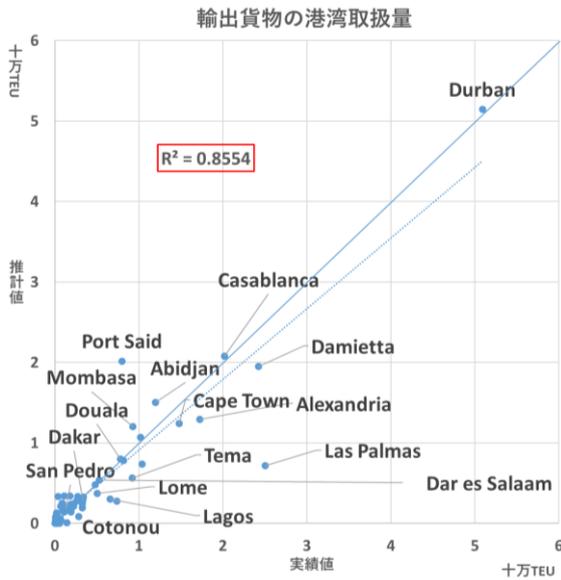


図-11 陸上輸送ネットワークを考慮する各港湾の輸出入貨物取扱量の実績値とモデル推計値の比較 (2008年)

c) 陸上輸送ネットワークを考慮する港湾の輸出入貨物量

図-11 に示す陸上輸送ネットワークを考慮する港湾の輸出入貨物取扱量についてみると、輸出貨物の取扱量については概ね良好な再現性が得られた一方で、輸入貨物の取扱量の再現性は相対的に悪い。この原因のひとつとして、OD 貨物量の地域分割において現在得られる夜間光量平均を用いているため、2008 年の実態に沿わない量の OD 貨物量が設定された地域が存在することが考えられる。

d) 陸上輸送ネットワークのコンテナフロー

アフリカ全土における陸上コンテナフローの推計結果を図-12 に示す。図に示すように、2008 年においては、2016 年と比べて貨物輸送需要量が小さいことから、陸上リンクフローも全体的に小さくなっている。さらに、

2016 年と比べて道路輸送費用が相対的に高いため、鉄道の利用量が多くなる結果となっている。

また図-13 に、ブルキナファソ発着の海上貨物における西アフリカ各主要港湾のシェアに関する実績値と推計値の比較を示す。図に示すように、Abidjan 港と Lome 港のシェアが他港湾と比べて大きいという傾向は再現できている。一方で、特に Lome 港発着のトランジット貨物量が過大に推計され、Cotonou 港発着の貨物量が過小に推計される結果となった。この一因として、本モデルにおいて、各道路リンクのキャパシティや距離比例費用をアフリカ全土一律で定めているため、より陸上輸送距離の近いトゴに貨物が集まりやすくなっていることが考えられる。

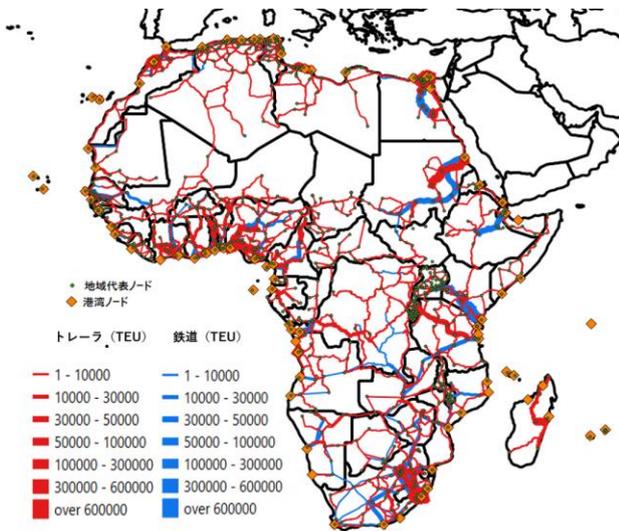


図-8 陸上コンテナフローの推計結果 (2008年)

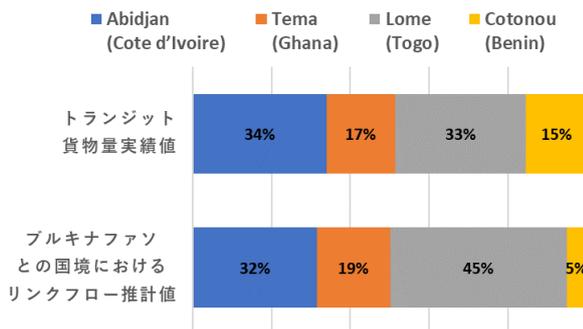


図-93 ブルキナファソ発着海上貨物における西アフリカ各主要港湾のシェア (輸出入合計, 2008年)

5. 輸送費用の時系列変化に着目した分析

本章では、前章で再現性の検討を行ったモデルを用いて、2008年と2016年における物流動向の違いを分析する。

はじめに、本研究における2時点のモデルの輸送費用設定について説明する。本研究では、キャリブレーションにより、2時点のモデルのトラック固定費用 (US\$/TEU)、トラック距離比例費用 (US\$/TEU/km)、鉄道距離比例費用 (US\$/TEU/km)、国境抵抗係数λについて以下の表-4のように設定した (なお参考として、アセアン地域を対象とした既存モデルにおける設定値も表中に示す)。ただし、国境抵抗係数に関して、括弧内はUEMOA域内の値を表す。キャリブレーションにおいては、アフリカにおいては鉄道のメンテナンス不足から鉄道輸送の利便性が停滞している一方で、道路輸送は国境手続きの簡略化や道路インフラの整備が進められており、結果として2008年に比べ2016年は相対的にトラック輸送費用が安いことを考慮している。

表-4 各モデルにおける輸送費用に関するパラメータ

	2016年モデル	2008年モデル	(参考) Yamaguchiら ⁴⁵⁾ のモデル (2016年)
トラック固定費用 (US\$/TEU)	100	200	60
トラック距離比例費用 (US\$/TEU/km)	1.0	1.5	1.0
鉄道固定費用 (US\$/TEU)	0	0	0
鉄道距離比例費用 (US\$/TEU/km)	1.5	2.0	1.75
国境抵抗係数λ	0.5 (0.3)	1.0 (0.8)	0.4

次に、上記で設定したパラメータの感度分析結果の例として、2008年モデルにおいて鉄道距離比例費用を変化させた場合の計算結果 (トラックと鉄道の分担率) を、図-13に示す。ここで、図-13に示す分担率は、南アフリカおよびトーゴにおける図-14に示される区間を対象として算出している。図に示すように、いずれの区間も、鉄道距離比例費用が増加すると鉄道の分担率が減少し、鉄道距離比例費用が減少すると鉄道の分担率が増加していることがわかる。さらに、南アフリカの対象区間に比べ、トーゴの対象区間の方が鉄道距離比例費用の増減に対する分担率変化の感度が高いことも分かった。これは、トーゴの対象区間の鉄道リンクが南アフリカの対象区間の鉄道リンクに比べて短いためであると考えられる。

最後に、2008年の輸送費用が、2016年においても改善されなかったとした場合のシミュレーション結果を示す。これは、アフリカ各地域における経済共同体によって近年進められている物流政策や国境円滑化政策が、アフリカのコンテナ輸送にどのような影響を与えたのかについて分析することを念頭に置いた設定である。具体的には、4章で示した2016年モデル (以降ではベースシナリオとよぶ) におけるインプットデータ (ネットワークや輸送需要) はそのままに、表-4に示す各パラメータに加え、国境通過による追加費用および時間についてのみ、2008年モデルの設定値を入力してシミュレーションを行う。これを比較シナリオとよぶ。

図-15に、ベースシナリオにおけるリンクフロー推計結果から、比較シナリオにおける推計結果のリンクフローへの変化量を示す。図に示されるように、比較シナリオにおいては鉄道費用が相対的に安いことから、ベースシナリオに比べて鉄道の利用が全般的に多い結果となっている。

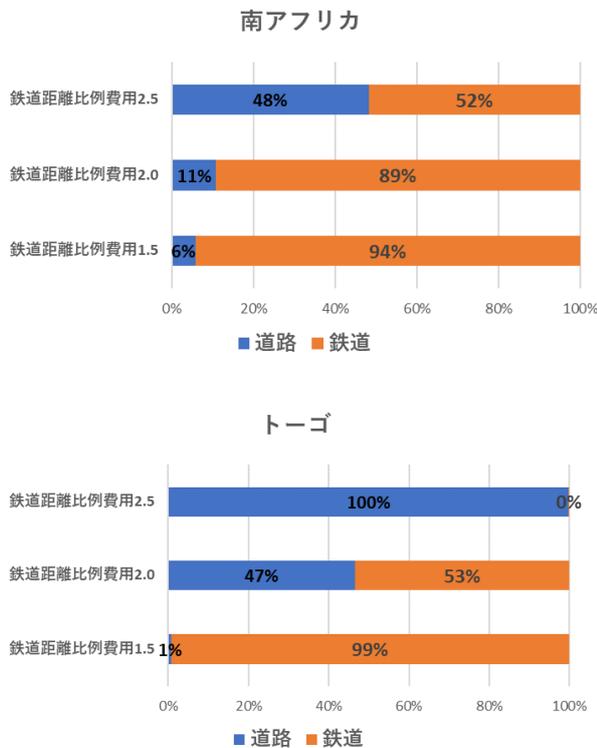


図-10 2008年モデルにおける鉄道距離比例費用の感度分析結果 (南アフリカおよびトーゴにおける対象区間の機関分担率)

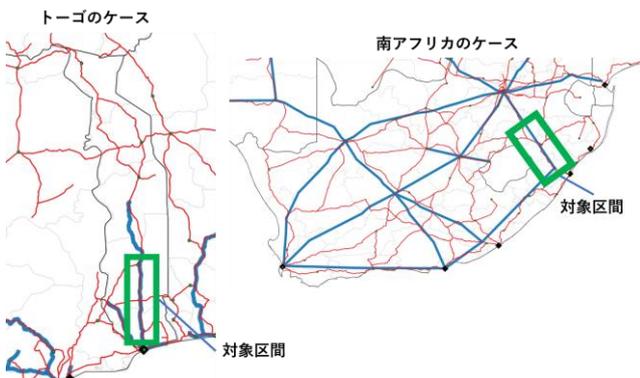


図-115 感度分析における道路/鉄道分担率算出の対象区間

さらに、特に西アフリカに着目した場合、比較シナリオにおいては、ベースシナリオに比べ、Lome港からブルキナファソへ続く回廊の利用量が4,000TEU減少し、コートジボワールから鉄道を利用して輸送される貨物量が3,300TEU増加している。すなわち、比較シナリオにおいては、コートジボワールとブルキナファソ間の輸送が、トーゴとブルキナファソ間の輸送に対して相対的に利便性が高いことが示されている。

また、南アフリカに着目すると、比較シナリオにおいては、ベースシナリオに比べ、モザンビークのMaputo港から国境を越えてトラックにより輸送される貨物量が26,900TEU減少しているのに対して、南アフリカのDurban港から延びるリンクにおけるトラックによる貨物輸送量が30,000TEU増加している。すなわち、比較シナ

リオにおいては国境通過時により大きな追加費用および時間がかかるため、国境をまたぐ陸上輸送の利便性が相対的に低いことが示されている。

6. 結論

本研究では、柴崎らの一連の研究におけるインターモーダル国際物流モデルをアフリカに適用し、2008年および2016年の2時点におけるコンテナ貨物流動を再現するモデルを構築した。モデルを構築する上で、コンテナ取扱量の大きい港湾ほど価格の下がるターミナルコストをモデルのコスト式に追加することで、規模の経済性を考慮した。さらに、構築したモデルをアフリカ全土に適用するためにモデルの設定を一部変更した。特に、モデルのインプットデータを作成する際には、地方自治体ごとの統計データが十分に管理されていないというアフリカの特徴を考慮し、夜間光量平均を用いて地域間貨物輸送需要量データを作成した。

上記手順により構築したモデルを計算し、陸上輸送と海上輸送の機関分担率、全世界の主要ハブ港湾のトランシップ貨物量とトランシップ貨物率、加えて陸上を考慮する港湾の輸出入貨物取扱量、および西アフリカにおけるブルキナファソと各国の国境におけるフローから現状の再現性の確認を行い、概ね妥当な再現性を得た。

構築した2時点のモデルを利用してコンテナ貨物流動のシミュレーションを行うことによって、特に主要港湾から内陸国にかけて続く回廊などにおける貨物流動が2時点間でどのように変化したかを分析した。その結果、2008年モデルにおいては、2016年モデルに比べて、トラックによる輸送費用の設定が鉄道による輸送費用設定に比べて相対的に高いことから、鉄道の利用が全般的に多い結果となっていることがわかった。また、特に西アフリカにおいて、コートジボワールとブルキナファソ間の輸送がトーゴとブルキナファソ間の輸送に比べて相対的に利便性が高かったこと、および南アフリカの地域において国境をまたぐ輸送の利便性が相対的に低かったことが示唆された。

以上より、本研究の目的は概ね達成することができたと言える。特に、アフリカ全土を対象とした広域な陸上を含む国際物流モデルを構築し、複数年にまたがるシミュレーション分析を行うことができることを示した点が本研究の貢献と言える。しかし、いくつかのモデル上の課題は残っている。

まず、モデルの現状再現性に改善の余地があるといえる。アフリカにおいては、自治体ごとの統計データが包括的に管理されていないことも多く、地域ごとのコンテナ貨物輸送需要量などの指標が手に入らないため、本研究では夜間光指標を用いた。今後現地調査やヒアリング

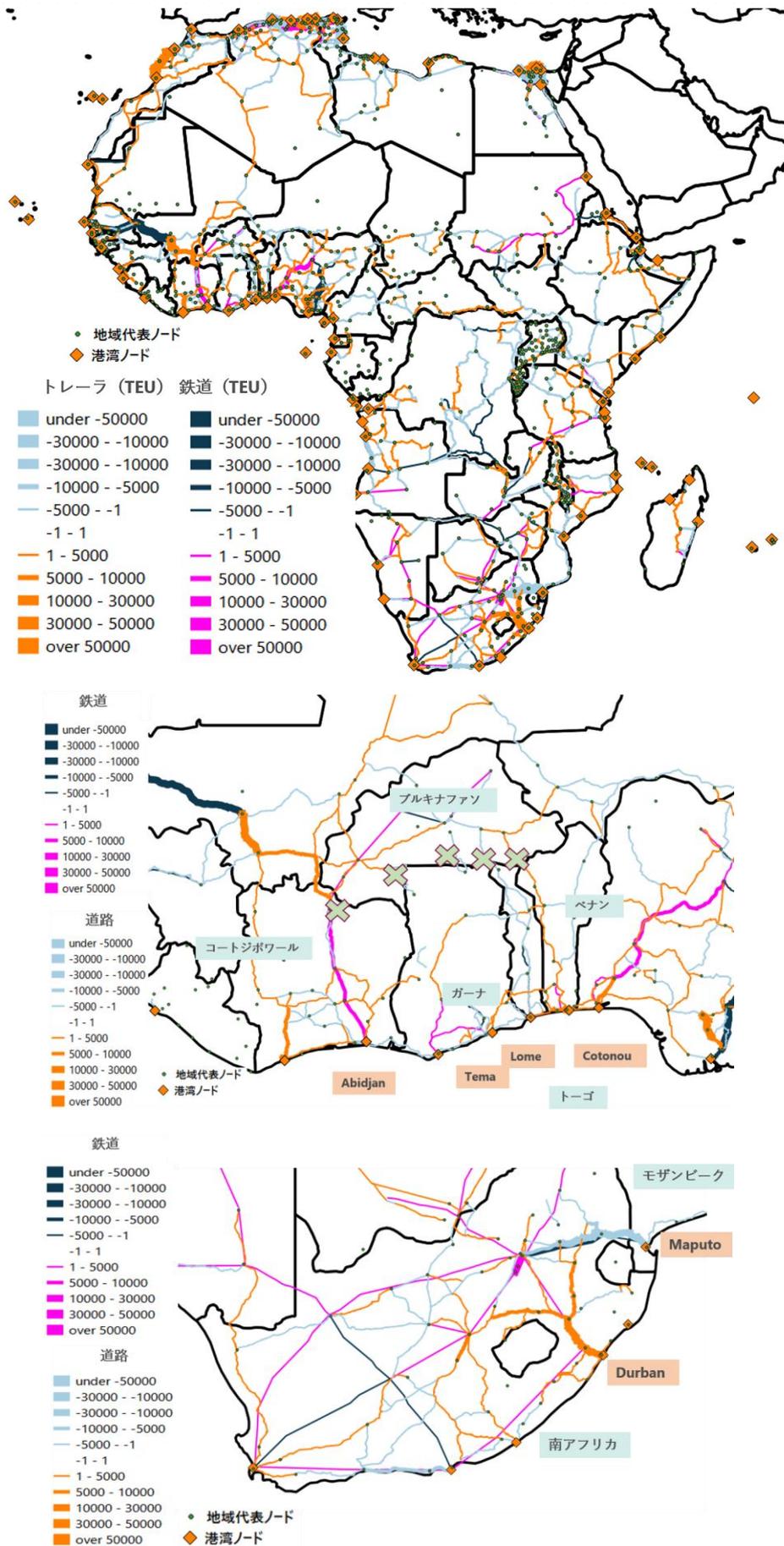


図-12 ベースシナリオと比較シナリオのリンクフロー推計値の差異 (上: アフリカ全土, 中: 西アフリカ, 下: 南アフリカ)

などを行い、現地の正確なデータが手に入れば、再現性が向上する可能性がある。また、夜間光指標の有用性についても検討が必要である。アフリカの自治体ごとの貨物輸送需要実績値のデータ、または GRP 等の指標が広く手に入れば、夜間光指標がどの程度貨物輸送需要量の分割に適しているかを検証することが可能になる。加えて、ブルキナファソの国境におけるリンクフローと、西アフリカ主要港湾におけるトランジット貨物量を比較した再現性においても課題が残る結果となった。こちらに関しては、回廊ごとの検問の数や、通行費用などより詳細なデータを集めてコストを設定する必要が示唆された。

さらに、本モデルはアフリカ全土という大規模なネットワークを対象としており、他国、他地域を対象とした分析も可能である。このことから、今回行ったシナリオ分析以外にも、様々な物流政策や貿易円滑化の分析を行うことができると考えられることから、引き続き新たなシナリオを設定してシミュレーションを行っていくことも今後の課題である。

参考文献

- 1) R. Longo and K. Sekkat, "Economic Obstacles to Expanding Intra-African Trade," *World Dev.*, vol. 32, no. 8, pp. 1309–1321, 2004, doi: 10.1016/j.worlddev.2004.02.006.
- 2) Z. Yang, Y. He, H. Zhu, and T. Notteboom, "China's Investment in African Ports: Spatial Distribution, Entry Modes and Investor Profile," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 37, no. February, p. 100571, 2020, doi: 10.1016/j.rtbm.2020.100571.
- 3) T. Kawasaki, M. Kobayashi, and R. Shibasaki, "Southern Africa: Overcoming corridor and border challenges for landlocked countries," in *Global Logistics Network Modelling and Policy*, Elsevier, 2020, pp. 301–320.
- 4) 小野寺仁, 柴崎隆一, 大谷直輝, 中川淳史, 高田雄暉, "全世界国際物流ネットワークモデルを用いたアフリカ大陸における回廊開発・貿易円滑化効果の分析."
- 5) 渋谷圭悟, 志賀航介, 高田雄暉, 川崎智也, 柴崎隆一, "アフリカ大陸を対象とした経済回廊開発及び貿易円滑化効果の分析," 日本物流学会, 2020.
- 6) International Transport Forum, "ITF Transport Outlook 2015 | READ online." https://read.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2015_9789282107782-en#page1 (accessed Jan. 21, 2021).
- 7) L. Tavasszy, M. Minderhoud, J. F. Perin, and T. Notteboom, "A strategic network choice model for global container flows: Specification, estimation and application," *J. Transp. Geogr.*, vol. 19, no. 6, pp. 1163–1172, 2011, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2011.05.005.
- 8) B. Aritua, J. Havenga, Z. Simpson, and E. W. L. Chiew, *Unlocking India's Logistics Potential: The Value of Disaggregated Macroscopic Freight Flow Analysis*. World Bank, Washington, DC, 2018.
- 9) K. Venkita Subramanian and J. C. Thill, "Effect of privatization and inland infrastructural development on India's container port selection dynamics," *Asian J. Shipp. Logist.*, vol. 35, no. 4, pp. 220–229, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ajsl.2019.12.009.
- 10) R. Shibasaki, H. Kato, and C. Ducruet, "Global Logistics Network Modelling and Policy: Quantification and Analysis for International Freight," *Elsevier*, vol. Chapter 15, no. doi:10.1016/B978-0-12-814060-4.00005-8, pp. 99–104, 2020.
- 11) 西村健太郎, 柴崎隆一, 田邊怜, 加藤浩徳, "ランドブリッジと海上輸送の競合を考慮したユーラシア大陸インターモーダル国際物流ネットワークモデルによる一帯一路政策の分析," *土木計画学研究・講演集* 57, vol. OR7453, 2018.
- 12) G. Kobina and S. A. Domfeh, "Gateway Port Selection Based on Inland Transport Cost and Performance Metrics in West Africa," *Int. J. Econ. Commer. Manag. United Kingdom*, vol. 12, no. December, 2017, [Online]. Available: <http://ijecm.co.uk/>.
- 13) H. J. Kim, J. S. L. Lam, and P. T. W. Lee, "Analysis of liner shipping networks and transshipment flows of potential hub ports in sub-Saharan Africa," *Transp. Policy*, vol. 69, pp. 193–206, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.tranpol.2018.05.018.
- 14) C. Ducruet and T. Notteboom, "The worldwide maritime network of container shipping: Spatial structure and regional dynamics," *Glob. Networks*, vol. 12, no. 3, pp. 395–423, 2012, doi: 10.1111/j.1471-0374.2011.00355.x.
- 15) Nathan Associates Inc., "Logistics Cost Study of Transport Corridors in Central and West Africa," no. 7161353, 2013.
- 16) Port Autonome d'Abidjan, "Port statistics | Port Autonome d'Abidjan." <http://www.portabidjan.ci/en/le-port-dabidjan/statistiques-portuaires> (accessed Jan. 16, 2021).
- 17) Port autonome de Lomé, "Transit - Port autonome de Lomé." <https://www.togo-port.net/statistiques-pal/transit-togo-port/> (accessed Jan. 16, 2021).
- 18) "Cotonou." https://www.wto.org/english/tratop_e/tpr_e/s362-01_e.pdf (accessed Jan. 16, 2021).
- 19) Ghana Shippers Authority, "Maritime Trade Statistics - Ghana Shippers Authority." <https://shippers.org.gh/index.php/trade-statistics/> (accessed Jan. 16, 2021).
- 20) Japan Institutional Cooperation Agencies, "トーゴ国 ロメ港を起点とした広域回廊形成のための基礎情報収集調査報告書," 2011.
- 21) Japan Institutional Cooperation Agencies, "西アフリカ「成長の環」広域開発のための戦略的MP," 2017.
- 22) D. Ivoire, P. Custers, A. Langer, R. B. for A. UNDP, M. Bible, and J. Fenske, "The Conflict in Côte d'Ivoire and its Effect on West African Countries: A Perspective from the Ground," *Land Econ.*, vol. 4, no. 4, pp. 1–37, 2006.

- 23) AFRICA INFRASTRUCTURE COUNTRY DIAGNOSTIC, “Infrastructure de la République cote d’ivoire: Une perspective continentale,” 2010, [Online]. Available: http://siteresources.worldbank.org/INTAFRICA/Resources/AICD-RC_Country_Report-FR.pdf.
- 24) 山口拓哉, “大規模並列多段階配分によるインターモーダル国際物流ネットワークモデルの構築とASEAN地域への適用,” 東京大学修士論文, 2021.
- 25) 小菅直樹, 柴崎隆一, 讃井一将, 大窪香織, “国際経済モデルとインターモーダル国際物流モデルを用いたカンボジア物流効率化政策の将来シミュレーション,” 土木計画学研究発表会, vol. 61, pp. 45–2, 2021.
- 26) MDS containership Databank, “Data.” <https://www.mdst.co.uk/data> (accessed Jan. 16, 2021).
- 27) THE WORLD BANK, “Doing Business.” <https://www.doingbusiness.org/> (accessed Jan. 16, 2021).
- 28) 若島久幸, “日本における複数の背後圏輸送機関を考慮した国際物流モデルシミュレーション,” 東京大学卒業論文, 2018.
- 29) A. Olukoju and C. H. Daniel, “African Seaports and Maritime Economics in Historical Perspective,” 2020.
- 30) L. Jones, L. Kerr, and F. John, *Containerization International Yearbook 2010*. T&F Informa UK, Limited.
- 31) Digital Logistics Capacity Assessments, “LCA Homepage - Logistics Capacity Assessment - Digital Logistics Capacity Assessments.” <https://dlca.logcluster.org/display/public/DLCA/LCA+Homepage> (accessed Jan. 25, 2021).
- 32) THE WORLD BANK, “Container port traffic (TEU: 20 foot equivalent units) | Data.” <https://data.worldbank.org/indicator/IS.SHP.GOOD.TU> (accessed Jan. 25, 2021).
- 33) African Development Bank, “Somalia Transport Sector Needs Assessment and Investment Programme,” pp. 1–296, 2015, [Online]. Available: https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Publications/Somalia_Transport_Sector_Needs_Assessment_and_Investment_Programme.pdf.
- 34) ENTREPRISE PORTUAIRE DE ANNABA, “RUBRIQUE ACTUALITE-ENTREPRISE PORTUAIRE DE ANNABA-” <http://www.annaba-port.com/actual126.php> (accessed Jan. 25, 2021).
- 35) THE WORLD BANK, “STAFF APPRAISAL REPORT ERITREA PORTS REHABILITATION PROJECT,” no. October, 1997.
- 36) “ADC WorldMap v7.7 | ADCi | Digital Map Data ADCi.” <https://www.adci.com/adc-worldmap/> (accessed Jan. 16, 2021).
- 37) DIVA-GIS, “Download data by country | DIVA-GIS.” <https://www.diva-gis.org/gdata> (accessed Jan. 16, 2021).
- 38) Simplemaps, “World Cities Database | Simplemaps.com.” <https://simplemaps.com/data/world-cities> (accessed Jan. 16, 2021).
- 39) “Global Ports — WFP GeoNode.” https://geonode.wfp.org/layers/esri_gn:geonode:wld_tis_ports_wfp (accessed Jan. 16, 2021).
- 40) THE WORLD BANK, “Trading across Borders - Doing Business - World Bank Group.” <https://www.doingbusiness.org/en/data/exploretopics/trading-across-borders> (accessed Jan. 16, 2021).
- 41) GTA Forecasting, “GTA Forecasting Database.” <https://my.ihs.com/Connect?callingUrl=https%3A%2F%2Fconnect.ihsmarket.com%2Fgta-forecasting> (accessed Jan. 16, 2021).
- 42) “Google Earth Engine.” <https://earthengine.google.com/> (accessed Jan. 16, 2021).
- 43) Port Autonome de San Pedro, “Rapport Annuel 2018 l’Oreal,” pp. 20–31, 2018.
- 44) 徳織智美, “アビジョン-ラゴス回廊視察出張報告書 2020,” pp. 1–21, 2020.
- 45) T. Yamaguchi, R. Shibasaki, H. Samizo, and H. Ushirooka, “Impact on Myanmar’s Logistics Flow of the East – West and Southern Corridor Development of the Greater Mekong Subregion — A Global Logistics Intermodal Network Simulation,” *Sustain.*, 2021.

(2021. 3. 7 受付)

Model development of global logistics intermodal network simulation and time-series analysis across the entire African continent

Keigo SHIBUYA, Ryuichi SHIBASAKI, Tomoya KAWASAKI and Tomomi TOKUORI

In this study, we applied the global logistics intermodal network simulation model, which includes both land transport and maritime shipping and has been applied to various parts of the world, to Africa in two

time periods, 2008 and 2016. The model fitness was confirmed from the viewpoints of import and export container throughputs in African ports and other indicators.

Furthermore, using the models developed in the two time points, we examined the differences in the container transport market in Africa. As a result, it was found that trucking costs were relatively higher than rail transport costs in 2008 than in 2016 and that cross-border transport was less convenient.