

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20710125

研究課題名（和文） 東アジア域内の時空間航路ネットワークに関する研究

研究課題名（英文） A Study on Spatiotemporal Shipping Route Network in East-Asia

研究代表者

鳥海 重喜 (TORIUMI SHIGEKI)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：60455441

研究成果の概要（和文）：200 字

本研究課題では、海上輸送ネットワークおよび陸上輸送ネットワークを構築した上で、コンテナ船の船舶動静データをもとに、国際および国内の物流の時空間的な分析を行うためのシミュレータを開発した。さらに、コンテナ船の寄港パターンを抽出し、巡回セールスマン問題として数理的に分析した。また、海賊回避のための迂回や北極海航路の活用など、輸送ネットワークの変化が与える影響を分析した。

研究成果の概要（英文）：

We constructed a digital shipping route network of ships based on a shipping route chart, and we developed an simulator to do spatial-temporal analysis of international and domestic logistics using the vessel movements database. Then, we found the ports of call pattern of each vessel and considered the travelling salesman problem for ports of call. Moreover, we analyzed to influence that the change in the transportation network, for example, the detour for the pirate evasion and the use of the Arctic Ocean sea route, gave to the ports of call pattern.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2008 年度 | 2,200,000 | 660,000 | 2,860,000 |
| 2009 年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：ロジスティクス，海上輸送，コンテナ船，船舶動静データ，航路ネットワーク，時空間

1. 研究開始当初の背景

平成 17 年 11 月に閣議決定された「総合物流施策大綱（2005-2009）」では、今後推進す

べき物流施策の基本的方向性の 1 つとして、「スピーディでシームレスかつ低廉な国際・国内一体となった物流の実現」を掲げて

いる。

この国際物流・国内物流の一体的展開を行うには、国際拠点港湾の機能向上に加え、国内外の物流ネットワークの構築が不可欠である。具体的には、国際拠点港湾における、①内航海運との円滑なネットワーク、②国内トラック輸送・鉄道輸送との円滑なネットワーク、の構築が必要である。

これらの施策が実施され、ネットワークが構築された際の物流の変化を推計するためには、海上輸送ネットワークと陸上輸送ネットワークとが統合されたネットワークが必要不可欠であるが、現状ではそのようなネットワークのデータはほとんど整備されていない。

特に船舶には、寄港地の発着スケジュール（ダイヤグラム）が設定されているため、単純な空間的ネットワークではなく、時間の概念を取り入れた時空間ネットワークを構築することで、ネットワークの時空間的分析を行うことが可能になる。

これまで、行政が主体となって、「グリーン物流」など効率的で環境にやさしい物流を実現するために、自動車による貨物輸送からCO2排出量の少ない鉄道・内航海運による輸送への転換（いわゆるモーダルシフト）を促進してきたが、現状ではモーダルシフトは進んでいるとは言えない。

これまでの施策は、輸送の一部分のみに着目し、単純にトラック輸送を船舶や鉄道に置き換えるという発想に基づいており、モーダルシフトの決定権を持つ荷主の立場で考えられていないものが多い。実際にモーダルシフトを推進していくためには、陸上輸送と海上輸送とを併せて、荷主の立場で「ドア・ツー・ドア」の輸送を考えなければならない。そのためのツールとして、統合ネットワークを用いた物流シミュレータは極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、まず、東アジア域内における時間の概念を取り入れた海上輸送および陸上輸送を統合したネットワークを構築し、港湾を単位として現状の国際・国内物流を時空間的に解析する。そして、運賃や時間に加え環境負荷などを含む輸送サービス評価指標を作成して、様々な施策が実施された場合における指標改善効果を推計するシミュレータを開発する。さらに、統合ネットワークの構造的および数理的な特徴を分析し、全体輸送効率から見た海上輸送システムの改善を図る。

3. 研究の方法

本研究は、以下の6つのフェーズから構成

される。

- (1) 東アジア域内の海上輸送および陸上輸送を統合した時空間ネットワークを構築
- (2) 現状の国際・国内物流を時空間的に解析し、地図上に表現
- (3) 環境負荷を考慮した輸送サービス評価指標の作成
- (4) シミュレータの開発
- (5) 統合ネットワークの数理的分析
- (6) 海上輸送システムの改善

(1) まず、海上輸送ネットワークとして、日本航海士会の「世界港間距離図表」を用いて外航航路および内航航路の空間ネットワークを構築する。そして、船舶の運航実績であるLloyd's Marine Intelligence Unitの「Shipping Movements Database（船舶動静データ）」を元に時空間ネットワークに拡張する。次に、国内の陸上輸送ネットワークとして、「デジタル道路地図（DRM）」を用いて高速道路ネットワークおよび幹線道路ネットワークを構築し、さらに、国土地理院の「数値地図25000」を用いて貨物鉄道ネットワークを構築する。そして、「Digital Chart of the World」を用いて国外の陸上輸送ネットワークを構築する。最後に、これらを緯度・経度を基準にして1つに統合する。

(2) 港湾別外貨コンテナ取扱量を発生量

(O:Origin)・集中量(D:Destination)と考え、(1)でも利用した「Shipping Movements Database（船舶動静データ）」を元にOD分布量を推計する。さらに、日本を発着地とするOD分布量については、月別の港湾統計を利用して月別OD分布量を推計する。そして、犠牲量モデルを用いて、OD分布量を(1)で構築したネットワーク上に配分することにより、時間を考慮した航路・経路別のコンテナ流動量を把握する。

(3) コスト、リードタイム、エネルギー使用量、CO2排出量等をもとに、旧運輸省が策定した「物流効率化指標」や日本ロジスティクスシステム協会が策定している「ロジスティクス経営指標」等、既存のものを参考に、輸送サービス評価指標を作成する。

(4) Microsoft社のWindowsプラットフォームで稼働するスタンドアロンアプリケーションとして開発する。入力には統合ネットワーク、外貨コンテナのOD分布量、輸送サービス評価指標とし、これらは物流に関する施策に応じて、適宜変更できるようにする。そして経路配分問題を解くことにより、航路・経路別のコンテナ流動量を算出する。算出された流動量は地図上に図示され、また、表計算ソフトで集計できるように、結果をファイルに出

力する機能を持たせる。

(5) 統合ネットワークにおける位相幾何情報に基づく、利便性や頑健性等を評価する。利便性の評価指標としては、直線（大圏）上のコスト（例えば、距離）とネットワーク上のコストとの比が考えられる。また、頑健性については、ある地域が通航（通行）不能となった場合に、どの程度迂回を強いられるか、で評価することを考えている。

(6) 海上輸送ネットワークおよび陸上輸送ネットワークの整備が行われた場合、あるいは、輸送サービス評価指標を変更した場合など、物流に関する様々な施策を組み合わせてシミュレーションすることで、全体輸送効率から見た海上輸送システムの改善を行う。

4. 研究成果

(1) 時空間ネットワークの構築

① 海上輸送ネットワークの構築

船舶動静データにおける地点および、「世界港間距離図表」に記載されているウェイポイント（変針点）をノードとし、それらのノード間のつながりをリンクとした海上航路ネットワークを構築する。リンクは大圏航路とし、リンクが陸地と重なる場合は、地形を考慮し、適宜ウェイポイントを追加してリンクを分割する。

構築した海上輸送ネットワークを図1に示す。図中の円は港等の地点、ウェイポイントを表し、線は地点間の大圏航路リンクを表している。図1は正距円筒図法で描画されているので、高緯度地域ほど歪んでいることに注意されたい。ネットワークの規模は、ノード数が約4,000（内訳は、港が約2,000、ウェイポイントが約2,000である）、リンク数が約6,100である。

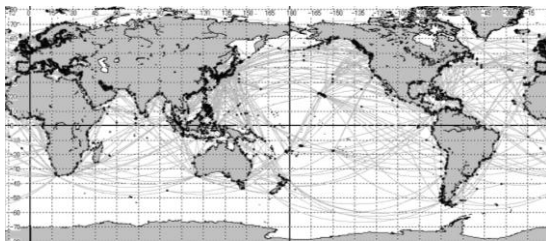


図1. 海上輸送ネットワーク

② 陸上輸送ネットワークの構築

カーナビゲーションシステムなどでも用いられているデジタル道路地図データは、広域化、詳細化に伴って、そのデータ量を飛躍的に増大させている。一般に、データ量が増加すると、処理の手間や必要となる記憶域も増加するため、過剰な情報を削減し、利用目的に応じた適切な規模のデータを用意することが望ましい。

そこで、デジタル道路地図データを対象と

して、それに含まれる属性データおよびネットワークの位相幾何学的情報を活用することで、自動的に疎な道路ネットワークを構築するアルゴリズムを開発した。

基本的な考え方は、道路ネットワークにおいて、交差点などを表すノードや道路を表すリンクについて、近接するものどうしをまとめてしまうというものである。

関東地方を対象とした実験では、元の道路ネットワークと構築した疎な道路ネットワークにおいて、適当に選んだ2地点間の最短経路距離がほぼ同じであるという結果が得られた。すなわち、元の道路ネットワークの特性を維持したままネットワークの規模を小さくすることに成功しており、輸送問題を解く上で十分実用的なネットワークを構築できた。

(2) 国際・国内物流の時空間解析

コンテナ船の船舶動静データに対し、それぞれの航路を推計する。航路の選択基準は、航行する各リンクの大圏距離の総和が最小（最短航路）となるものとする。実際の航海では、気象・海象や水深等も考慮するので、必ずしも最短航路を選択するわけではないが、多くの場合で航海距離が第一の基準であることから、本研究では航海距離のみを基準に航路を選択すると仮定する。ただし、大型船はパナマ運河を通航できないことを考慮し、コンテナ積載能力が5,000TEU以上のコンテナ船については、パナマ運河を通航できないと仮定して最短航路を求める。短航路を求める際のアルゴリズムにはDijkstra法を用いる。推計した結果を図2に示す。図2はコンテナ船の通航量が多い地域ほど黒く示している。図2から、コンテナ船の通航量が多いのは、「東アジア - マラッカ海峡 - ベンガル湾 - アラビア海 - 紅海」というルートであることがわかる。

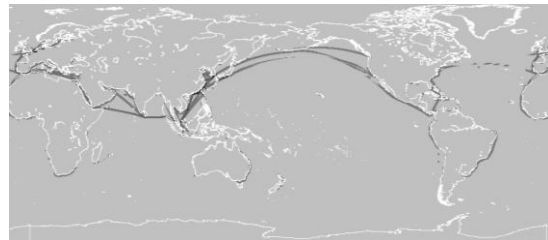


図2. コンテナ船の推計航路

また、推計した航路と寄港日をもとに、ある時刻におけるコンテナ船が航行している位置を推計した結果を図3に示す。図3では、コンテナ船一隻を一つの点で表している。濃淡はコンテナ船のコンテナ積載能力を表しており、濃いほどコンテナ積載能力が大きいことを示している。東アジアと欧州を結ぶ航路には、濃いコンテナ船が多く、コンテナ積載能力が大きい船が就航していることがわ

かる。

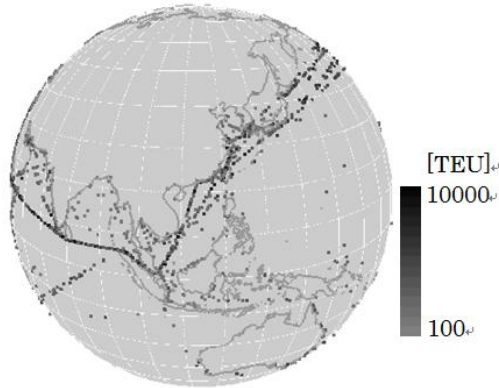


図 3. コンテナ船が航行している様子

(3) シミュレータ開発

当初の計画通り、Microsoft 社の Windows 上で稼働するスタンドアプリケーションとして開発した。基本的な機能として、

- ・海上輸送ネットワークの入力・編集
- ・船舶動静データをもとにした OD 需要の読み込み

- ・OD 需要の航路（経路）配分・出力
 - ・配分結果の地図表示
 - ・船舶の航行アニメーション表示
- などを有する。

前掲の図 1 から図 3 は、全て開発したシミュレータで出力・表示したものである。

(4) 輸送ネットワークにおける数理的分析

① 船舶のクラスタリングと寄港パターンの抽出

世界を 8 つの地域に分割し、その地域ごとの航海距離に基づいてコンテナ船を分類する。この分類基準によれば、同一航海（出発港と目的港が同じ）であってもコンテナ船によって航路が異なる（大型船はパナマ運河を通航できない）ということも考慮に入れることができる。

航海ごとに算出した地域別航海距離をコンテナ船ごとにまとめ、それらの値を総航海距離で除することで地域別航海距離比率を求める。この値を指標として、非階層クラスタ分析手法の一つである k-means 法により、コンテナ船を 8 つのクラスターに分類する。

得られたクラスターの特徴量を表 1 に示す。「欧州～アジア」、「太平洋」クラスターは、平均積載能力が大きく、平均寄港回数が少ない半面、平均航海距離は長いことがわかる。一方、「アジア」、「欧州」クラスターは、その逆の傾向を有しており、積載能力の小さいコンテナ船が短距離航海を高頻度に繰り返していることが推測される。

表 1. クラスターの特徴量

| クラスター名 | 船舶数 | 平均積載能力 [TEU] | 平均寄港回数 | 平均航海距離 [NM] |
|--------|-----|--------------|--------|-------------|
| アジア | 822 | 1,006 | 124 | 65,506 |
| 欧州～アジア | 813 | 4,685 | 69 | 110,839 |
| 太平洋 | 631 | 4,031 | 64 | 120,302 |
| 欧州 | 627 | 1,339 | 99 | 63,560 |
| 大西洋 | 549 | 1,793 | 84 | 80,509 |
| 南米 | 241 | 2,515 | 81 | 100,911 |
| アフリカ | 237 | 2,278 | 53 | 91,539 |
| 豪州 | 229 | 1,685 | 73 | 77,029 |

② 寄港パターンの分析

次に、各コンテナ船に対し、時間順に並べた寄港地の系列をもとに、主要な巡回パターンを抽出する。それぞれのコンテナ船に対し、複数の巡回パターンを抽出できる可能性があるが、本研究では巡回パターン P の航海距離を D_P 、巡回数を M_P 、年間総航海数を N とし、以下の式 (1) で表されるパターン距離率 R_P が最も大きい巡回パターンを抽出する。

$$R_P = \frac{D_P \times M_P}{N} \quad (1)$$

ただし、最低でも巡回数は 2 回以上とし、巡回中に同一寄港地を複数回寄港してもよいものとする。この条件を満たす巡回パターンを有するコンテナ船は 3,678 隻（全体の約 89%）であった。

抽出したパターンの特徴量をクラスターごとにまとめた結果を表 2 に示す。ここで、パターンに含まれる寄港地の数を「パターン寄港地数」と呼ぶ。「アジア」、「欧州」クラスターは、短距離の寄港パターンを数多く巡回しているのに対し、「欧州～アジア」、「太平洋」クラスターは、長距離の寄港パターンであることがわかる。

表 2. クラスター別寄港パターンの特徴量

| クラスター名 | 平均巡回回数 | 平均巡回パターン距離 [NM] | 平均パターン寄港地数 |
|--------|--------|-----------------|------------|
| アジア | 13.0 | 3,849 | 5.9 |
| 欧州～アジア | 3.5 | 13,469 | 7.4 |
| 太平洋 | 3.8 | 15,316 | 7.4 |
| 欧州 | 9.1 | 4,226 | 4.5 |
| 大西洋 | 6.5 | 6,355 | 5.5 |
| 南米 | 3.3 | 8,865 | 6.8 |
| アフリカ | 2.8 | 11,685 | 5.8 |
| 豪州 | 8.8 | 7,564 | 5.6 |

さらに、巡回パターンに出現する全ての寄港地に高々 1 回しか寄港しないパターンを有

するコンテナ船 (2,371 隻) に対し、寄港地の巡回セールスマン問題を解くことで、寄港パターンが航海距離からみて効率的であるか分析する。結果を図 4 に示す。短距離のパターンである「アジア」、「欧州」クラスターでは、他のクラスターに比べて最短寄港順でない比率が低い。

次に、現在の周回パターン P に対し、最短寄港順によるパターン距離 D_{TSP} を算出し、どの程度の距離をロスしているのかということを表す迂回率 R_D を

$$R_D = \frac{D_P - D_{TSP}}{D_{TSP}} \quad (2)$$

と定義する。このとき、各クラスターにおける迂回率の平均を求めると、「アジア」、「欧州」クラスターは、他のクラスターに比べて高いことがわかる。

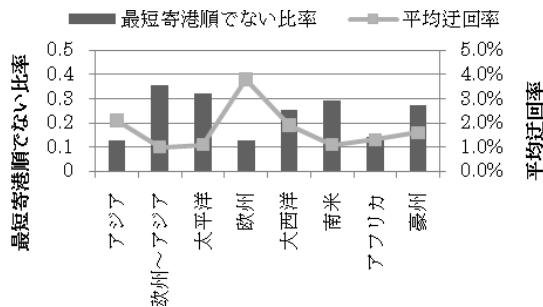


図 4. 最短寄港順でない比率

(5) 海上輸送ネットワークの変化が与える影響

① 海賊回避のための迂回の影響

近年、ソマリア沖のアデン湾では海賊による商船への被害が多発している。この海賊に対処すべく、2009年3月に自衛隊が派遣され、海上警備行動を始めた。しかし、広大な海域を航行する全ての船舶を少数の護衛艦で警備することは難しく、船社によってはその海域を迂回することも検討している。

ここでは、もともとその海域を航行していたコンテナ船が全て迂回したらどのような影響があるのかということ推計する。具体的には、海上航路ネットワークの一部のリンクを切断し、改めて船舶動静データを最短航路に割り当てて、元のネットワークにおける航海距離との差を算出する。

寄港日が明確な船舶動静データ約 29.3 万のうち、迂回を余儀なくされる航海は約 8,200 (約 2.8%) である。それらの平均迂回距離は約 6,500NM であり、現状と同じ船速で航行すると仮定すれば、その迂回に要する日数は約 17 日である。また、迂回する航海の総コンテナ積載可能量は約 3,900 万 TEU (全体の約 6.1%) である。航海の比率に比べて数値が高いのは、この海域を航行するコンテナ

船は「欧州～アジア」クラスターに分類されたものが多く、コンテナ積載能力が比較的大きいためである。

② 北極海航路の活用

近年、地球温暖化が叫ばれている。地球温暖化に関して、多くの弊害が指摘されているが、有益なことがまったくないわけではない。その一つに、北極海を船舶が通航できるようになることが挙げられる。これまで、北極海は夏季においても氷で閉ざされていたが、温暖化によりその氷が解ければ、砕氷船ではない一般の商船でも通航できるようになる。実際、2008年には、北米大陸寄りの北極海とユーラシア大陸寄りの北極海とで氷が解け、航路が出現したことが報告されている。

ここでは、北極海航路 (Northern Sea Route; NSR) を表すリンクを海上航路ネットワークに追加し、改めて船舶動静データを最短航路に割り当てることで、北極海航路の影響を推計する。

北極海航路を活用できるのは夏季期間に限定されるため、寄港日が明確な船舶動静データの中から、出港日が6月1日から8月31日までのものを抽出し、北極海航路を活用する航海の候補とする。候補となった船舶動静データは約 7.6 万である。

それらのデータを、北極海航路を追加した海上輸送ネットワークに割り当てた結果、北極海航路を通航すると航海距離が短縮される航海は 237 (全航海の約 0.3%) であることがわかった。例えば、現状では韓国のプサンとイギリスのフェリックストウとを結ぶ航路は約 10,700NM であるのに対し、北極海航路を活用すると約 7,400NM となる。

短縮される距離の総和は、約 37.8 万 NM (全航海距離の約 0.5% に相当)、コンテナ積載能力の総和は約 116 万 TEU (全体の約 0.7% に相当) である。航海数の比率よりも航海距離の比率やコンテナ積載能力の比率が高いことから、北極海航路を活用する航海は少ないものの、航海距離短縮効果は大きく、その恩恵を受けるコンテナも多いことがわかる。

ただし、ここでは実際の航海データに基づいて出発港と目的港を定めて北極海航路を活用するか否かを推計しており、欧州とアジアを航行しているコンテナ船が途中で中東などに寄港しているような場合、航海データは「欧州⇄中東」、「中東⇄アジア」と分割されるため、北極海航路を利用できたとしても航海距離は短縮されない。しかし、北極海航路を利用できるようになった場合、中東のトランシップ港湾に寄港せずに欧州とアジアを行き来するようになる可能性があり、この場合には北極海航路を利用すれば航海距離を短縮することができる。前述した航海距離短縮効果には、このような影響は含まれてい

ないので、実際に北極海航路が活用されるようになった場合には、さらなる航海距離短縮効果が見込まれる。

最後に、航海距離が短縮されたことによる消費燃料の削減効果を推計する。まず、北極海航路を通航する航海において、現状の航海日数を要すると仮定すると、航海距離が短縮された分、船速を落とす（減速航海する）ことができる。

船舶では、航海による単位時間あたりの燃料消費量は概ね船速の3乗に比例するので、船速 v で時間 t だけ航行したとすると、燃料消費量 F は

$$F = av^3t \quad (a>0) \quad (3)$$

と表される。今、減速航海により、船速が v' ($v' < v$) になると、(航海日数は変わらないので)燃料消費量 F' は

$$F' = av'^3t \quad (a>0) \quad (4)$$

となり、削減できる燃料消費量 E は

$$E = F - F' = at(v^3 - v'^3) \quad (5)$$

と表すことができる。ここでは、通常航海時との比 R_F

$$R_F = \frac{E}{F} = \frac{v^3 - v'^3}{v^3} \quad (6)$$

を燃料消費量削減効果と考え、各航海について算出し、図5にまとめる。比較対象として、船速を維持した場合の燃料消費量削減効果も示す。船速を維持した場合、削減される燃料消費量は短縮される航海距離の単純な比 (=短縮された航海距離/元の航海距離) によって決まる。

図5から、船速を維持した場合と比べて、航海日数を維持して減速航海した場合は、燃料消費量の削減効果が非常に大きいことがわかる。

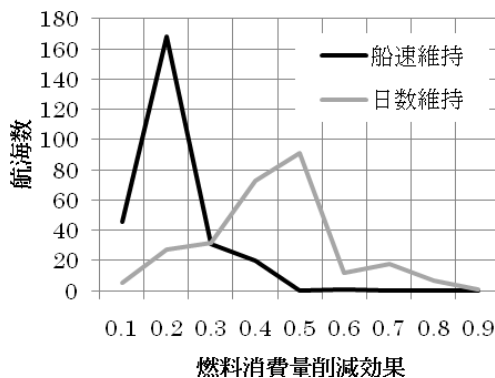


図5. 燃料消費量削減効果

(6) 今後の展望

本研究では、当初東アジアのみを対象地域と考えていたが、域内と域外とを航行するコンテナ船が多いこと、他地域と比較することなどを考慮し、対象地域を世界全体に拡大した。そのため、港湾別外貨コンテナ取扱量の

推計や輸送サービス評価指標の作成などについて一部不十分な結果となった。この点については、今後継続して研究を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 鳥海重喜, 海上航路ネットワークを用いたコンテナ船の運航パターン分析, オペレーションズ・リサーチ, 55, 2010, 査読有, 掲載決定.
- ② Shigeki TORIUMI, An Algorithm for Composing Principal Road Network from Digital Road Map by Using Topological Information, *FORMA*, 23, 97-107, 2008, 査読有.

[学会発表] (計4件)

- ① Shigeki TORIUMI, An analysis for shipping route of container carrier using vessel movements data, *INFORMS Annual Meeting 2009*, Oct. 14, 2009, San Diego, California, USA.
- ② 鳥海重喜, 寄港実績データによるコンテナ船の寄港パターンの地域分析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2009年秋季研究発表会, 2009年9月10日, 長崎大学.
- ③ 鳥海重喜, 船舶動静データを用いた船舶の航路ネットワークの分析と北極海航路による航海距離短縮効果の推計, 南山大学数理情報研究科・数理情報研究センター オープン・リサーチ・センター「都市の持続可能な繁栄のためのインフラストラクチャーの最適運用計画の策定と普及」2008年度第5回公開研究会, 2009年2月28日, 南山大学.
- ④ 鳥海重喜, 船舶動静データを用いたコンテナ貨物船の航路ネットワークの分析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2008年秋季研究発表会, 2008年9月11日, 札幌コンベンションセンター.

[その他(雑誌)]

- ① 鳥海重喜, オペレーションズ・リサーチ手法を用いた北極海航路の評価, *海運*, 2010年1月号.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥海 重喜 (TORIUMI SHIGEKI)
中央大学・理工学部・助教
研究者番号: 60455441