

# マルチエージェントシミュレーションによる コンテナ貨物輸送市場のモデル化

Modeling of the container transportation market using  
multi-agent based simulation

秋元博路

Hiromichi Akimoto

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

Department of Systems Innovation, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

**Abstract:** Multi agent simulation approach is effective in numerical analysis of container flow networks. In our simulation, each containers search their route to minimize the total sacrifice of fare and time in their transportation. The behavior of container agents represents the decision making process of cargo owners. The simulation of these containers provides a numerical market of transportation services. It will be the basic tool for the evaluation of transportation services and related infrastructures.

## 1. 緒言

日本の輸出入貨物は、重量ベースで 99.8%を船舶による海上輸送に依存している。資源輸送の割合が低い日中間輸送においても、船舶輸送は重量ベースで 98%、貿易額ベースで 72%を占め、この輸送における主流は、海上コンテナ輸送である。

近年のアジア域におけるコンテナ輸送量は、経済的な停滞を経験しながらも、特に中国の急速な経済発展により増大を続ける。しかしながら、これに伴う大規模な貨物流動の変化に対し、日本の港湾や輸

送サービスの変化は遅れている。製造拠点の海外移転に伴う産業構造の変化についても、これを予測し、港湾投資の選択と集中を行うべきであったが、港湾にからむ権益は複雑であり、それに対抗する合理的な評価手段が無い事が、意志決定の遅れの原因のとなっている。

近年特に問題となってきたのは、北米航路、欧州航路の大型コンテナ船が、日本の港に立ち寄る回数を減らしている事である。これは日本からの製品輸出が減少している事も一因ではあるが、日本の港湾の集約が進んでいない事も大きく影響している。大型コンテナ船の基幹航路では、少量ずつ複数港での積載が必要な日本に立ち寄り、航海時間を伸ばす事は、ますます許容できなくなっている。

大型船の寄港が減り、日本発の間隔が長くなると、大型船が寄港する韓国の釜山港に小型コンテナ船で送り、そこで基幹航路に積み替える事が必要となってくる。この輸送コストの増加は、日本製品の価格競争力を削ぐ結果となる。また輸送リードタイムの増加は、欧米市場の変化への対応を一層難しくする。

このような問題を解消していくには、将来の貨物流動を合理的に予測し、港湾、船舶およびそれらを利用するサービスを整備する戦略を立てていく事が必要である。この評価には、陸上輸送(トラック、鉄道)や航空輸送などの競合する輸送モードの考慮も必要となる。また、海で囲まれた日本の国際物流は複数の輸送の連携(複合輸送)でしか実現できない。このため、運賃、輸送時間、機会損失の総犠牲量を最小化するには、特定の輸送分野の枠を超えて輸送網全体の効率を評価するツールが必要である。

近年、マルチエージェントシミュレーションの手法は、交通流や株式市場など、多数のプレーヤーによって生じる複雑な挙動を解析する道具として使わ



Fig. 1: 海上コンテナによる輸送の例(上: Roll-on roll-off 型コンテナ船のトレーラーヘッドによる荷役, 下: Lift-on lift-off 型コンテナ船の前部デッキ)

れている。この考え方を本研究は輸送市場に適用する。輸送市場において、荷主は輸送サービスの選択肢から、自分の貨物の時間価値に適合したものの選び、出発地から到着地までの複合輸送を行う。本論文では、個々のコンテナまでを離散化し、その流動を追跡するマルチエージェント手法を紹介する。

## 2. シミュレーション手法

### 2.1 コンテナ単位での離散化

輸送ネットワークのシミュレーションでは、船舶などの個々の乗り物を計算機上に再現する事は広く行われている。これには、数理計画法による定期船航路の最適化(大和ら[1])や、遺伝的アルゴリズムと線形計画法の併用によって海上コンテナの輸送ネットワークを最適化する(有木ら[2])などの試みがある。これらの手法は、大域的な貨物流動やその定常状態を把握するには有効である。しかし、荷主がどのようなサービスを選択するか、運賃・スケジュールなどの変更に対してどのように物流を変えていかななどの非定常な情報は得る事ができない。また、荷主の個性についても、統計的な扱いができるのみである。

そこで本研究では、コンテナ1つ1つを計算機上に離散化して各々をエージェントとして表現し、それらの振る舞い追跡する手法を提案している。最近の大型船コンテナ船は20フィートコンテナを単位として8000~1000TEU(Twenty-foot Equivalent Unit)のサイズに達する。このため、コンテナ単位での解析は、従来の船単位の離散化に比べて計算コストが著しく増加するが、個々のコンテナの時間価値の差などの特性を考慮する事が可能となる。Fig. 1に代表的なコンテナの積載方法を示す。

世界の主要40港の2007年におけるコンテナ取扱量の総計は、3200万TEU(2007年日本船主協会統計)である。取扱量には、積み替えによる重複、同一コンテナの複数回利用を含むため、全世界で動いているコンテナ数は100万個程度と見積られる。これは、一般的なPC上でも、全世界のコンテナ物流を再現する事が可能であることを意味する。

個々のコンテナは、生成時に時間価値を与えられ、輸送運賃と時間経過による価値低下の総和が最小となる経路を選択する。シミュレーション上の各コンテナの振る舞いは、荷主の経路選択嗜好のモデル化となっており、船会社間のサービス品質、コスト競争等に対する荷主の動向が計算機上に再現される。本手法は、最適化などの解析的な取り扱いには不向きであるが、現実の複雑な現象を、極端な簡略化を施すことなく扱う事ができる。

### 2.2 犠牲量のモデル化

時間価値は、時間経過とともに輸送物の価値が低下する速度であり、輸送物の劣化や、輸送の緊急度を表現している。この値を対数正規分布に従うと仮定

し、コンテナ発生時に乱数で確率的に与える。輸送における総犠牲量 $C_t$ は、海上、陸上の輸送コストと時間価値により次式で評価する。

$$C_t = C_S + C_L \quad (1)$$

ただし、 $C_S$ と $C_L$ は、それぞれ海上船舶輸送および陸上トラック輸送の犠牲量であり以下の定義とする。

$$C_S = TV \cdot t_s + S_c \quad (2)$$

$$C_L = H_w + FMd + H_r t_L + TV \cdot t_L \quad (3)$$

ここでTVはコンテナの時間価値[円/TEU day]、 $S_c$ はコンテナ船の運賃[円]、 $t_s$ は海上輸送の所要時間(停留時間を含む)[day]である。また $H_w$ は大型車の高速道路料金[円]、 $F$ は燃料価格[円/l]、 $^w M$ は高速道路におけるトラックの燃料消費率[l/km]、 $d$ は港と都市間の走行距離[km]、 $H_r$ はトラック運転手の人件費と諸経費[円/day]、 $t_L$ は陸上輸送の所要時間[day]である。 $F$ 、 $M$ 、 $H_r$ 以外の諸量は、選択された陸上経路および輸送船によって異なる。今回の解析で使用した値をTable 1に示す。

国内陸上経路の探索については、市販のカーナビゲーションソフトウェアを用いて事前にデータベースを作成しておく。このデータは、都道府県庁所在地から国内主要港までの距離、所要時間、高速道路料金を含んでいる。一方、中国側は主要貿易港の配置が日本ほど密ではないので、内陸の都市を指定すればその利用港は、ほぼ一意に定まる。このため、中国側の内陸都市と貿易港とを結ぶ陸路は固定とした。

港のコンテナヤードは、関税処理等のため、船が発する数時間前に到着期限(CY cut)が設けられている。CY cutの時間は、LoLo船、RoRo船の場合について、それぞれ出航の24時間前、12時間前とした。到着便の場合も同様に、ヤードから荷主への受け取りタイミング(CY release)についても同様である。

### 2.3 コンテナ発生から到着までの流れ

本研究では都道府県庁の所在都市においてコンテナが発生し、発生時刻とコンテナ時間価値に応じて利用港が変わる事を想定している。コンテナの生成から、輸送、到着までの概略を以下に示す。

1. コンテナが都市(都道府県庁所在地)で発生。貨物時間価値の出現頻度は指定した対数正規分布に従う。
2. 日本の各港について、陸上輸送の経過時間を考慮して搭載可能なコンテナ船(CY cut前にゲートに到着できる便)を選別する。
3. 選別された港と船舶スケジュールの組み合わせについて、陸上輸送と海上輸送の総犠牲量を算出する。
4. 上記の組み合わせから、複合輸送の総犠牲量が最小となるものを選び、コンテナ船を予約する。
5. 輸送を実行。
  - (1) 陸路：連続的に輸送し、所要時間が経過した後、出発港のコンテナヤードに集積。

Table.1 Sacrifice model parameters

高速道路料金 $H_w$	入力データから設定
燃料価格 $F$	100円/リットル (一律)
燃費 $M$	3.2km/リットル (一律)
港と都市間の距離 $d$	入力データから設定
人件費 $H_r$	48,000円/day (一律)

- (2) 海路: CY cut 以前にヤードに到着したコンテナを積載、スケジュールに基づく間欠的な輸送。航海時間が経過後に目的港のヤードにコンテナを下ろす。
- (3) 空路: 速度、通関が速い特殊な船舶として表現。

6. 目的地に到着したコンテナは、統計上必要なデータを記録後削除し、計算リソースを解放する。これらのモデル化から、時間価値が高いコンテナほど、高速だが高運賃の陸上輸送の割合を増やし、時間短縮によって総犠牲量を削減する傾向が現れる。たとえば、東京から上海への輸送では、高時間価値の貨物を陸路で西日本に送り、途中からコンテナ船に乗せる事となる。ある程度以上の時間価値の貨物は九州まで陸上輸送される一方、低時間価値の貨物は、陸路の高コストを避けて、東京港発の上海行きコンテナ船が選択される。

ただし、同じ時間価値のコンテナであっても、発生タイミングと船舶スケジュールによっては、ヤード内の待ち時間による犠牲を避け、正味の輸送時間は長くても CY cut が直近の便と港が選択される事がある。また、便数が多い(出発機会が多い)港ほど選択される確率が高くなる。

2.4 高速道路および航空輸送の表現

本研究でのコンテナ船は、一定量の貨物を内部に溜めてから移動する間欠的な輸送であり、実在の運航スケジュールに従う。一方、トラック輸送は、高速道路へ入るタイミングに制約が無いため、連続的な輸送として表現される。

航空機は、基本的にコンテナ船と同じモデルとし、移動速度、通関時間を航空機に合わせて設定する。ただし、現実の航空コンテナは、海上コンテナに比べて小さく、20 フィート海上コンテナの重量 20t に対し、航空機内の積載単位であるパレットあたりの重量は、最大でも 3t にすぎない。このため、航空輸送を選択したコンテナは、海上コンテナ 1 個相当の複数の航空貨物として取り扱っている。現状のシミュレーションにおける航空輸送は、主として海上および陸上輸送との競合を解析するために使われる。

3. 海陸複合輸送の経路検索サービス

本手法の適用例として、海陸複合輸送の経路選択シミュレーションを示す。これは、特定の企業の視点に立って、その所在地にコンテナを発生させ、どのような輸送を行うべきかを検討するものである。こ

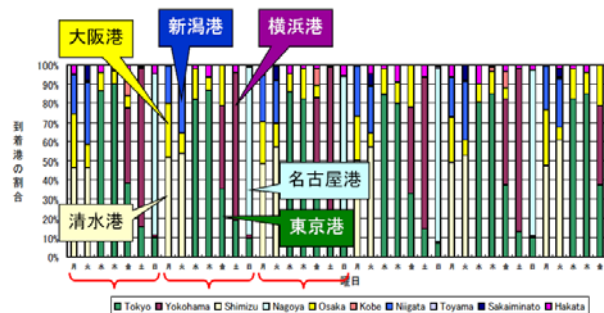


Fig. 2: Time history of the daily share of ports on containers from Shanghai to Nagano city.

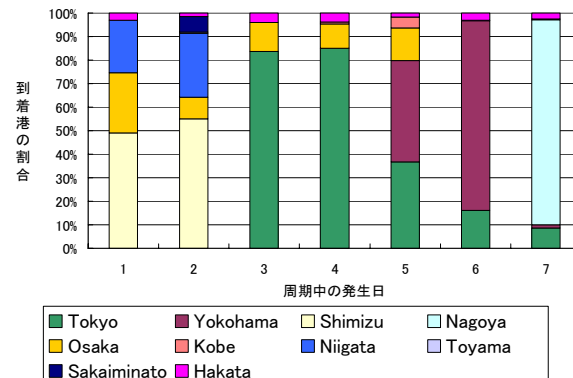


Fig. 3: Share of arriving ports in each day of the week.

れは、コンテナエージェント(荷主)モデルの挙動チェックともなっている。

荷主が上海から長野市へ貨物を輸送するケースについて、シミュレーションの結果選択された日本側輸入港の変化を Fig. 2 に示す。コンテナ発生量は 50 個/day とし、252 日間の輸送シミュレーションから 6 週間分を取り出したものである。船舶データには、138 隻の実在する日中間航路のコンテナ船スケジュールを用いた。

船舶スケジュールの多くは曜日ベースで設定されているため、全体的に 1 週間を単位とするパターンが繰り返され、最適港の選択傾向が曜日によって大きく変わっていく状況が見られる。

選択された到着港を曜日別に平均化したものが Fig. 3 である。各港の便数が曜日によって異なるため、総犠牲量を最小化する港は一定ではない。また、少数ではあるが、全ての曜日で博多港を選択する貨物が一定量存在している。これは、高時間価値の貨物において、博多から長野までをトラック輸送することで輸送時間短縮を行う行動を示している。

月曜日について、コンテナ時間価値の最大値、最小値と平均値を Table 4 に示す。この上海発-長野着輸送のケースでは、時間価値が高くなるに従って、富山、新潟、清水、大阪、博多の順に最適港が推移する傾向が現れている。本来ならば上海から遠い新潟港の方が、富山港よりも利用されるのは、新潟発の方が便数が多く、輸送リードタイムの短縮上、有利である事を反映している。

Fig. 4 は、同じく月曜日を例に、横軸をコンテナ発生時刻、縦軸を時間価値にとり、到着港の違いをプ



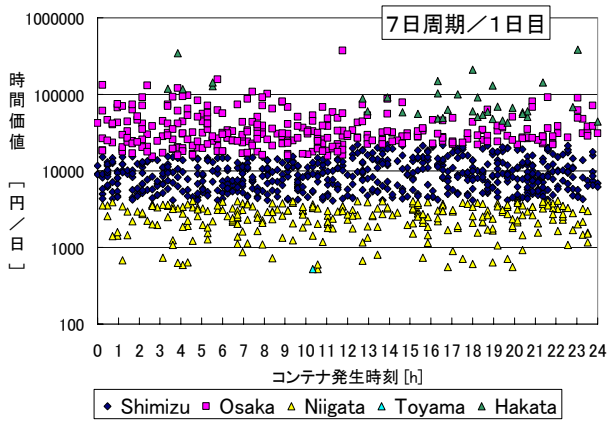


Fig. 4: Time value distribution of containers and arriving domestic ports

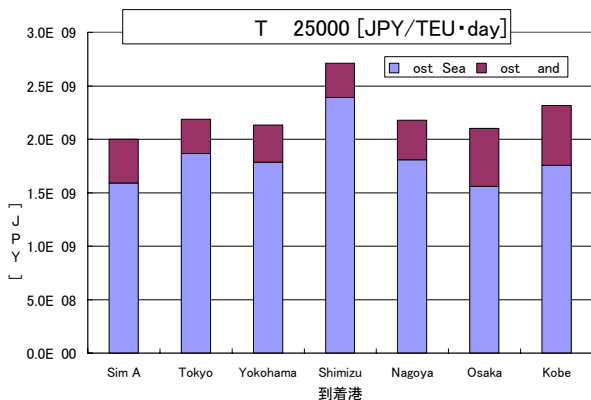


Fig. 5: Total amount of sacrifice on variable arriving port case (Sim A) and fixed arriving port case (others.)

ロット点のパターンで区別したものである。先ほどと同様に、時間価値が高くなるにつれて選択港が推移する様子が見られるが、選択港が切り替わる時間価値の境界線は明瞭でない。これは、コンテナ発生時刻によってコンテナヤードでの待ち時間が異なり、にその犠牲量によって選択が変化するためである。特に高時間価値の貨物では、博多港と大阪港の選択境界は不明瞭であり、出港タイミングによって容易にルート選択が変わりうる事を示している。

この計算例のように、発生する貨物ごとに輸送経路を変更する事は、現状の輸送サービスでは対応困難である。このため、経路を固定した輸送契約についても輸送コスト比較を行う。Fig. 4 は、貨物の時間価値を 25000 円/TEU・day に固定した場合の総犠牲量を比較したものである。輸送コストは、海上輸送と陸上輸送のパートに分けてあり、長時間の海上輸送により低運賃の海上輸送の犠牲が大きな割合を占める事が現れている。このケースでは、大阪港で陸揚げし、そこから長野までトラック輸送を行う組み合わせが最も低コストとなる。

前述の陸揚げ港を可変とした場合のコストが、同じグラフの左端に名称 Sim A として示されている。この結果は、利用港を常に変更させる事が可能であれば、陸揚げを大阪に固定した場合よりもさらに犠牲量を 5.6% 削減できる事を示している。

先に述べたように、コンテナ毎に到着港を変化させる事は、現在の日中間物流の情報化レベルから考えると非現実的である。しかし、乱立するプレイヤーの統合、あるいは少なくとも情報の共有・統合が実現できれば、このような手法は意味を持つてくる。ここで示したシステムは、定常的な輸送サービスの選択ツールとして利用できるほか、突発的な輸送要求に対して輸送経路を迅速に検索するツールとしての利用も考えられる。

#### 4. コンテナ輸送船隊の設計

##### 4.1 海運会社と荷主の総コストの最小化

前節での解析例は、荷主の輸送サービス選択挙動を、コンテナエージェントとして実装したものである。多数のコンテナ(荷主)が、自己に最適なサービスの選択を行えば、輸送サービスの数値市場をコンピュータ上に再現した事となる。本節では、この数値輸送市場を基に、輸送サービスの評価、改良を行う手法を紹介する。

この立場では、海運会社と荷主双方の利益を最大化する事が目標となる。このため評価関数を、荷主の犠牲量と海運会社の運航経費の総和とし、これを最小化する運航サービスを探索する事となる。具体的には、海運会社の収益や消席率を増大し、輸送時間による貨物価値の減少を抑制する。現実社会では、コスト減少による利益は、海運会社と荷主の双方が分配して享受し、その比率は運賃の市場原理により決まるはずである。現時点では、この比率は問題とせず、海運会社と荷主が得る利益の最大化だけを考慮する。本研究では次の2段階に分けて解析を行う。

- (1) コンテナフローの再現と検証: 前節の荷主のモデル化をもとに日中間航路のシミュレーションを行う。生じたコンテナ流動を現実のデータと比較し、シミュレーションの妥当性を検証する。
- (2) コンテナネットワークの自動改良: 所与のコンテナ輸送需要量とコンテナ船仕様等を基に就航可能な航路を探索する。各航路の組み合わせに対してコンテナフローを形成し、総コストを比較することによりネットワークを設計する。

##### 4.2 日中間コンテナ流動のモデル化

航路やネットワーク設計での基本となるのは、各 OD(origin, destination)間における輸送需要と OD 間距離である。各 OD 間の輸送需要は、輸送統計データ

Table 4: Time value of containers through major domestic ports on Monday from Shanghai to Nagano.

	到着港				
	Toyama	Niigata	Shimizu	Osaka	Hakata
コンテナ数	1	267	588	308	36
Max.	521	4064	21839	370964	381025
Min.	521	523	4104	15515	42926
Ave.	521	2530	9704	38282	97252

※時間価値の単位: [JPY/TEU・day]

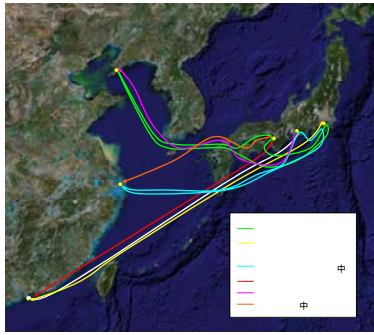


Fig. 8: An example of the optimized network.

を基に入力データとして用意する。各船舶の最大積載量と速度は簡単のためそれぞれ 500TEU、15knot に統一する。ネットワーク設計の概略を以下に示す。

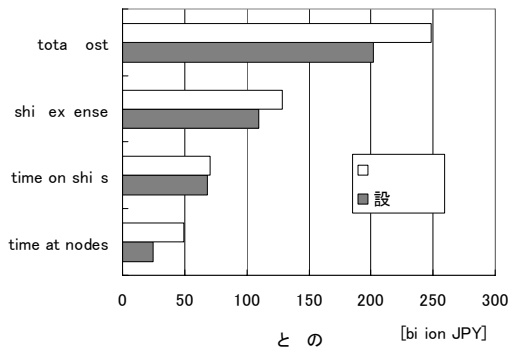


Fig. 9 Total costs and their breakdown of the existing and planned fleet network

1. 設計領域の全航路探索  
可能な全航路を生成する。航路は、寄港地とその寄港順によって表現される。
2. 航路を寄港地ごとに分類し、分類ごとに最適なルーティングと船舶数を探索する。簡単なルールで選別可能な不採算ルートは、初期段階で候補から

Table 5: Design area

港	港	港
港	港	港
港	港	港
港	港	港
中港	寧波	
港	港	深圳

Table 6 OD data in 2004

O	Kanto	Nagoya	Kansai	Kahoku	Katyu	Kanan
Kanto	0	0	0	95	137	122
Nagoya	0	0	0	54	56	59
Kansai	0	0	0	76	129	105
Kahoku	231	87	186	0	0	0
Katyu	313	141	310	0	0	0
Kanan	129	53	115	0	0	0

Table 7 Result of the optimized network

路	数	周期 [day]
Nagoya Kahoku	9	14
Kansai Katyu	14	7
Nagoya Kanan	6	14
Kanto Kanan	15	14
Kansai Kanan	10	14
Kanto Kansai Kahoku	36	14
Nagoya Kanto Katyu	43	14

除外する。

3. 寄港地で分類した航路を全て組み合わせ、ネットワークを設計する。

採算性が低い船舶については、消席率(最大積載量に対する積荷の割合)が設定値を下回った船舶は撤退し、シミュレーションから削除されるものとする。

問題を簡略化するため、日本側 3 港と中国側 3 港を代表港として、Table 5 に示すグルーピングを行った。Table 6 はこのグルーピングに基づき集計した、2004 年の日中間コンテナ輸送量データである。

単純化のため、使用するコンテナ船の最大積載量は 500 [TEU]、航海速度は 15 [kt]、コンテナ時間価値は 7,500 [JPY/TEU・day]として統一した。各船舶は、消席率 60%以上で運航可能とし、1 年間のシミュレーションを行う。

Table 7 に得られた航路とその船隊構成数および航海日数を示す。Fig. 8 は、このネットワークを地図上にプロットしたものである。

Fig. 9 に既存ネットワークと本設計法による結果について、総犠牲量とその内訳を示す。既存ネットワークの船隊は 2004 年の日中間航路の 138 隻とした。本手法の結果は、既存ネットワークの総犠牲量から 18.6% (460 億円)の削減が見込まれる。内訳をみると、各港におけるコンテナ滞留時間削減の寄与が大きいことがわかる。

### 5. まとめ

コンテナを単位としたマルチエージェントシミュレーションにより、輸送市場のモデル化が可能である事を示した。現時点では、計算処理のため集約して港の数を減らすなどの単純化を行っているものの、本手法は、物流ネットワークの時間発展的な変化を考慮した数値実験を提供するものである。今後は、解析用途に応じてモデルの現実性を調整し、国、物流企業、荷主など、それぞれの視点から見た物流戦略の策定、評価ツールとしての発展が期待される。

### 参考文献

- [1] 大和裕幸,田中大士,“数理計画法を用いた定期船航路の計画に関する研究”,日本船舶海洋工学会講演会論文集,第1号,pp.443-444,2005
- [2] 有木敏博,鈴木克幸,“詳細な貨物フロー予測に基づく特定船舶の最適航路設計法”,日本船舶海洋工学会講演会論文集,第3号,pp.467-470,2006.
- [3] 佐藤陽平,宮田秀明,“日中間海上物流の離散型シミュレーターの開発”日本船舶海洋工学会講演会論文集,第2E号,pp.17-18,2006
- [4] 佐藤俊輔,秋元博路,宮田秀明,佐藤陽平,“日中コンテナ物流における海陸複合輸送の経路選択システム”,日本船舶海洋工学会講演会論文集,第4号,pp.487-490,2007
- [5] 木村哲也,秋元博路,宮田秀明,“マルチエージェントシミュレーションを基にした日中間コンテナ輸送ネットワークの設計法”,日本船舶海洋工学会講演会論文集,第6号,pp.439-442,2008.