

シミュレーションによる太平洋コンテナ船定期航路の CO₂ 排出量とコスト削減の検討

47116704 曹 樺楠
指導教員 大和 裕幸 教授

In this paper, a marine transportation simulation system which reproduces the container flow of the North Pacific Ocean's regular lines is developed. The change of the freight and the voyage of the vessels are expressed visually on the interface. The influences of oceanographic phenomena, empty containers, and seasonal changes are also taken into consideration. The validity of model and the effectiveness of simulation are verified. Several situations are simulated by setting the parameters (voyage speed, number of participating vessels, and voyage plans) as case studies. As the main constraint condition, the same number of containers as actual should be carried. The effects of CO₂ emissions and transportation costs reduction by slowdown voyage, introduction of efficient large vessels, and optimization of voyage plans, are confirmed quantitatively.

Key words: Simulation, Marine Transportation, CO₂ Reduction, Cost Cut, Pacific Ocean's Regular Line, Container

1 緒言

近年、海上貨物輸送量に伴う CO₂ 排出量が飛躍的に増大し、地球温暖化の大きな原因となっている。しかし、国際経済の不況により海運会社の利益が深刻に悪化し、環境への配慮と同時に運航コストを削減しなければならない。

海上輸送システムは、時間と共に変動する様々な要因（貨物の変動・荷主の判断・天候海象…）を受ける複雑なシステムで、数学的に表現することが極めて難しい。シミュレーション技法は、数理解析手法で表現できない非線形要因をモデル化して組み込み、より詳細に、精度よく現実を再現することができる。

本研究では、タイムステップの概念を用いて船舶と貨物を個別に扱い、時系列に沿った貨物流動と船の動きを視覚的に再現できる海運シミュレーションシステムを開発する。その際に、天候海象、空コンテナ、季節による貨物変動の船舶運航への影響も考慮する。貨物量増加が著しい太平洋コンテナ船定期航路のシミュレーションを行い、モデルの妥当性とシミュレーション技法の有効性を検討する。また、既存のコンテナ船定期航路網に新たに高効率な大型船を導入する場合や、ルールとして全船舶に減速航海を行わせる場合、また各船舶の航路計画を最適化する場合、海運システム全体の CO₂ 排出量とコストにどれだけの削減効果があるかを定量的に評価する。

2 開発した海運シミュレータ

2.1 フレームワーク

シミュレーションのフレームワークを Fig. 1 に示す。

評価関数に影響するパラメータを適切に調整し、得られるパラメータセットを入力データの一部として用意する。数多くの入力データをシミュレータに読み込み、インターフェースを生成して初期設定を済ませる。その後、実際のシミュレーションを進行させる。設定時刻に達すると、シミュレーションが終了し、各種評価式に基づき計算された出力データを収集する。出力結果が制約条件の輸送需要を満たすならば、結果と初期設定したパラメータセットを考察候補として記録する。その後、再度パラメータの設定部分に戻り、異なる条件におけるシミュレーションの準備を開始する。出力結果が輸送需要に満たさない場合は、データを保存せずにパラメータの設定に戻る。

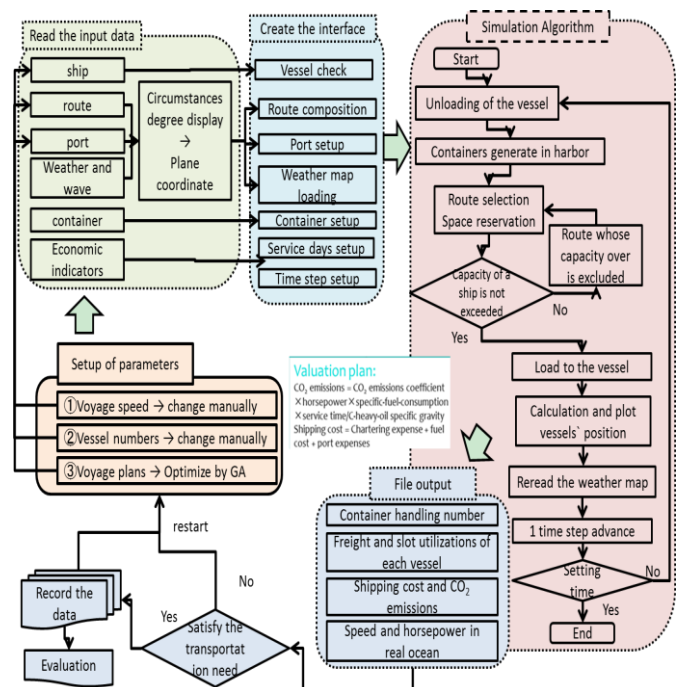


Fig. 1 Framework of Simulation System

この一連の作業を繰り返すことで、様々な条件またケースにおいて記録したデータが複数蓄積され、考察においてこれらのパラメータ設定条件、そして評価関数としてシステム全体の CO₂ 排出量とコスト削減効果を検討する。制約条件として、各船舶の消費率が最大積載量を超えてはならない。輸送されるコンテナ総量も常に一定で、実際の各港間の要求輸送量と一致する必要がある。

2.2 パラメータの設定

評価関数に影響するパラメータは、①各船舶の航海速度、②システムに投入する船舶の隻数、③各船舶の航路計画である。シミュレーションを実行するごとにパラメータの設定を行う。航路計画に関しては、 s 隻の船舶が r 航路を選ぶ計 r^s 通りの解がある組み合わせ最適化問題として定義され、遺伝的アルゴリズムにより航路計画の最適化を行う。

2.3 入力データの読み込み

本研究で開発したシミュレータは、特定の港や航路に関する定期船輸送のみを対象にだけでなく、入力データの差し替えを行うだけで、他の様々な港や航路に関する

海上輸送に適用することが可能である。

主な入力データは、船舶・航路・港湾・コンテナ・天候海象の5つである。

2.4 シミュレーションの進行アルゴリズム

実際のコンテナ輸送と同様に、貨物は個々の時間軸に沿って港で発生し、船に積まれ、目的地まで輸送される。

各港で単位時間分ごとの貨物が発生するが、季節により各港湾の発生量が大幅に変化する。各コンテナには目的地までの到着時間が最小となる船舶を探索・予約するエージェントがついている。既に満載か予約の空きがない場合、他の船舶もしくは航路を探索する。積載予定の船舶が出発港へ到着したら、貨物は積載される。最後に船舶が目的地に到着して、貨物が荷降され、消費される。また、新たに積載予定のコンテナを積み始める。

この一連の作業を単位時間ごとに進行させることを繰り返す。タイムステップごとにシステムの状態を更新し、各船舶・貨物・海象地図をシミュレータ上に再描画する。

2.5 評価式

以下の各種評価式を元に出力結果の記録も同時に行う。

- CO₂ 排出量(千 ton)=CO₂ 排出量係数(kg/l)×馬力(PS)×燃料消費率(kg/PS/h)×運航時間(h)/C 重油比重(kg/l) (1)
- 運航コスト(円)=船費+燃料費+港湾費+管理費+荷役費 (2)
- 船費[一隻](円)=傭船費 or 減価償却費 (3)
- 傭船費[一隻](円)=傭船単価(円/日)×運航時間(日) (4)
- 減価償却費用(円)=減価償却率×(1-減価償却率)^{使用年数-1}×建造費用(円) (5)
- 燃料費[一隻](円)=燃料価格(円/l)×馬力(PS)×燃料消費率(kg/PS/h)×運航時間(h)/C 重油比重(kg/l)/1000 (6)
- 港湾費[一隻](円)=一回あたりの寄港費×寄港回数 (7)
- 荷役費(円)=荷役単価(円/個)×個数 (8)

2.6 出力データの記録

出力データを以下の4つとする。

- (1)港湾別のコンテナ取扱個数及び扱い総数
- (2)各時刻における各船舶の積載量と消費率
- (3)海運会社の負担コストと CO₂ 排出量
- (4)実海域における各船舶の波高と出力馬力

3 太平洋定期船航路への適用とモデルの検証

開発したシミュレータに太平洋定期船航路を適用し、2009年のコンテナフローを再現する。ハブ港間の海上貨物に限定し、陸路・内航・トランジット輸送を考慮しない。

3.1 太平洋コンテナ船定期航路の入力データ

(1)船舶データ

国際輸送ハンドブック 2011年版¹⁾を参考に、船速、総トン数、最大コンテナ積載量、常用出力馬力、船長を入力する。アライアンスや船会社の違いは考慮しない。本ケーススタディで対象とするコンテナ船は480隻である。

(2)航路データ

BLM-Shipping データベース²⁾により、港間の距離、運航スケジュール、所要時間、通過地点の経緯度、航海方向等の情報を含む航海プランが再現される。シミュレータの地図に反映するために、経緯度極座標表示からインターフェース基準の平面直角座標へと座標変換を行う。実際の太平洋定期船航路、計62ルートの航海プランを再現する。

(3)港湾データ

各港湾の経緯度を元にインターフェース上に表示する。各港湾における月ごとのコンテナ発生量も入力する。

日本、中国、韓国、香港、台湾、シンガポール、米国の7カ国と地区の11主要ハブ港をする。外航コンテナ船の寄港地で、かつ取扱量が多い代表的な港湾のみを選定した。

(4)コンテナデータ

各貨物と船舶には OD が定義されていて、独立した離散データとして扱う。各船舶が貨物データを保持することで、どの船舶にどの貨物が積載されているかが分かる。

また、往路・復路のコンテナ積み個数の差は空コンテナとして持ち帰るとする。持ち帰った空コンテナをどの港に下ろすか、そして下ろす量は貨物発生量の比率配分に従う。

太平洋コンテナ船定期航路の OD 表を Table.1 に示す。対象とするコンテナ貨物の総数は約1700万 TEU である。

Table.1 OD matrix of simulation (10000TEU)

	D	Japan	China			Korea	Hong Kong	Taiwan	Singapore	USA			
O		Tokyo	Kobe	Shanghai	Shenzhen	Qingdao	Dalian	Busan	Hong Kong	Kaohsiung	Singapore	Los Angeles	Total
Japan	Tokyo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	32
	Kobe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20
China	Shanghai	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	274	274
	Shenzhen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	227	227
	Qingdao	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	103	103
	Dalian	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102	102
Korea	Busan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53	53
Hong Kong	Hong Kong	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	84
Taiwan	Kaohsiung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79	79
Singapore	Singapore	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158	158
USA	Los Angeles	46	28	86	71	32	32	62	63	66	113	0	1132
Total		46	28	86	71	32	32	62	63	66	113	599	1731

月別のコンテナ荷動きを Fig. 2 に示す。各港における発生量の計算は総荷動き量の月別比率によって配分する。

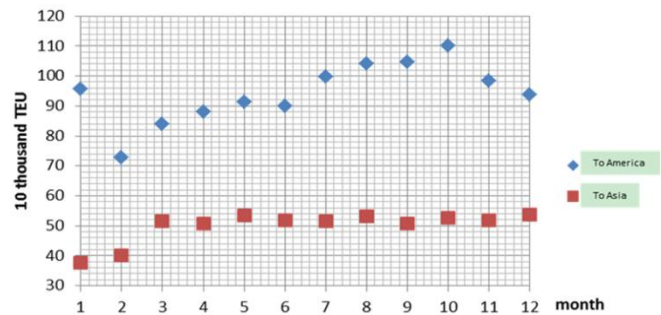


Fig. 2 Monthly change of container's amount

(5)天候海象データ

気象庁より北太平洋の2009年1月から12月までの1年分の波浪の有義波高と方向を海象データとして入力する。その一例を Fig. 3 に示す。これは12時間ごとに更新される計730組のデータである。

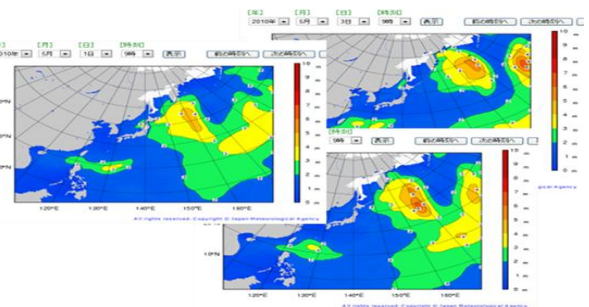


Fig. 3 Examples of weather and wave data

波浪図の色を認識することによって船舶経路場所の有義波高を取得し、各船舶の進行方向との出会い角を計算し、実海域での速力と主機馬力を出力する。実海域での海象条件における船舶の性能を評価する際、海の 10 モード指標計算法³⁾を用いた。

開発したシミュレータには海象を考慮しない平水中の地図も用意している。地図を切り替えることで、平水中と海象考慮時の船舶の挙動や評価関数への影響を考察することができる。

3.2 インターフェースの生成

インターフェースを Fig. 4 に示す。緑の枠内は港湾、船舶、貨物、航路などの入力データで、赤の枠内は船社負担コスト、CO₂ 排出量、各船舶の馬力、積載コンテナ数、消費率、出会う波の高さと角度などの出力データである。左側は波浪の有義波高を反映した海象地図となる。本シミュレータは、画面へのプロットのために、タイムステップの概念を導入し、スケジュールの情報から単位時間ごとに各船舶の位置を計算している。

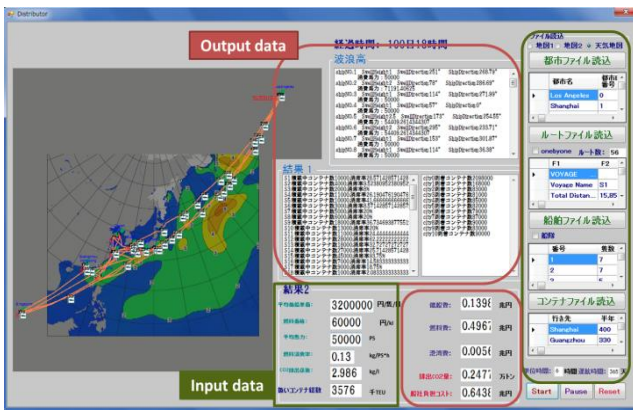


Fig. 4 Interface of simulator

3.3 太平洋コンテナ船定期航路の出力結果

6 時間ごとにシステムの状態を更新し、1 年間シミュレーションを行った出力結果を以下に示す。

各船舶が運んだコンテナ総数は 21465 千 TEU で、そのうち約 3/4 は実入りコンテナで、約 1/4 の 4820 千 TEU は調整用の空コンテナである。

天候海象を考慮する場合としない場合システム全体における負担コストと CO₂ 排出量を Table.2 に示す。

Table.2 Total cost and CO₂ emission amount

weather and wave		considered	not considered
cost [Trillion yen]	ship fee	0.373	0.373
	fuel fee	2.751	2.324
	port fee	0.056	0.056
	management fee	0.143	0.143
	Handling fee	0.295	0.295
	Total	3.618	3.191
CO ₂ emission amount [Million ton]		137	117

3.4 非線形要因天候海象による船舶運航への影響

コンテナ 1 個を運ぶ際にかかる燃料費を Fig. 6 に示す。

冬の北太平洋の天気が荒れているため、夏と比較して消費燃料費が多いことが分かる。

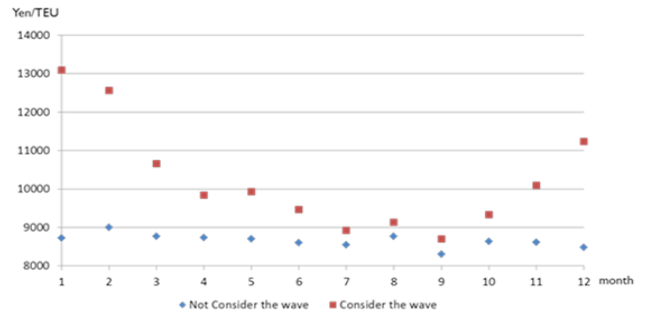


Fig. 6 Fuel fee of every containers separated by months

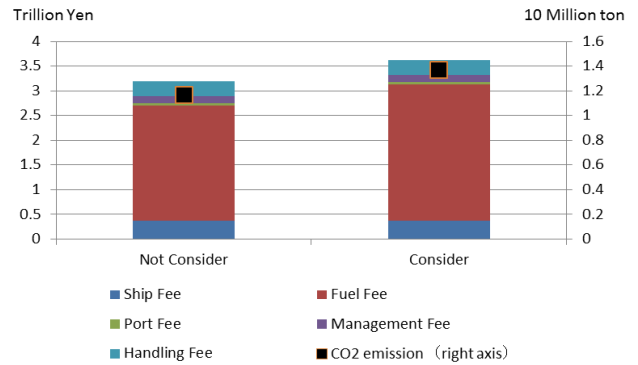


Fig. 7 Difference according to consideration of weather

Fig. 7 に示すように、天候海象を考慮しない場合より、考慮する場合の燃料費が 8.9 億円 (18.1%)、CO₂ 排出量が 4.22 万トン (17.8%) 増加する。数理的解析手法で表現できない、天候海象のような非線形要因をシステムに取り組むことで、本シミュレーションシステムは、より詳細に、精度よく現実を再現し、有効性を持つことを示した。

4 ケーススタディ-減速航海・隻数調整・航路再編による CO₂ 排出量とコスト削減の検討

4.1 CO₂ 排出量とコストの削減対策

現実の船舶の消費率は 100%ではないため、より遅い航海速度か、より少ない船舶か、より最適な航路計画を用いても輸送需要を満たすことができると考えられる。各種パラメータ (各船舶の航海速度、船舶の隻数、各船舶の航路計画) を適切に調整し、Table.3 に示すようにいくつかのケースに分けてそれぞれの CO₂ 排出量とコスト削減効果を確認する。

具体的な調整方法としては、輸送需要に満たす限り、シミュレーションごとに開始前手動で各船舶に現実速度の 0.01 倍ずつ減速航海させるか、システムに投入する船舶の隻数を 1 隻ずつ増加また減少させるか、遺伝的アルゴリズムを用いて各船舶の航路計画の最適化を行う。

4.2 減速航海・隻数調整・航路再編の同時執行による削減

現実の速度において、航路最適化を行いつつ、低効率の小型船を減らしたところ、輸送需要を満たすのに 405 隻で十分である。その平均速度を 1 とし、倍率比率別に必要最低限の船舶隻数を調べた。隻数を減らす場合は低効率な小型船から廃止し、増やす場合は高効率な大型船を投入する方法を採用した。その結果を Fig. 8 に示す。平均速度が下がるに連れて必要な隻数が増える傾向がある。

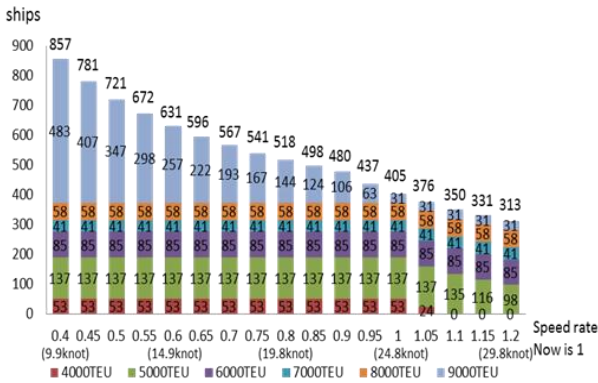


Fig. 8 Ship size separated by velocity

速度を下げると、必要な船舶隻数が増えて傭船費は増加するが、燃料費が減るため全体のコストが減少する。速度を現実の 0.55 倍以下まで抑えると、必要船舶数が著しく増加するため、傭船費が増加し、全体のコストが増え始める現象が起きる。故に、現在運航中の船舶が一斉に速度を現実の 0.55 倍までに抑えることでコストの最適解が求まり、年間の CO₂ 排出量を 1.054 億トン(77%), 総コストを 1.641 兆円(45%)削減できる。その分布図を Fig. 9 に示す。

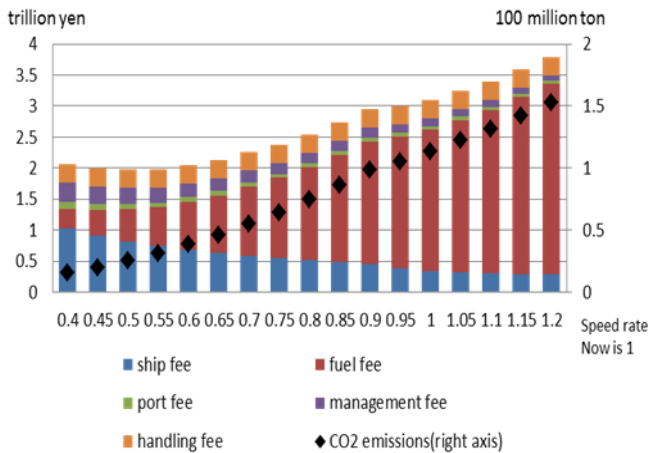


Fig. 9 Cost and CO₂ emission separated by velocity

4.3 シミュレーション結果のまとめと考察

これまでに説明を省略した対策も含め、それぞれの最大削減効果を Table.3 にまとめる。

減速航海、隻数調整、航路計画最適化の 3 つのパラメータ調整方法の中で、最も削減効果が高いのは減速航海である。単位時間当りの燃料消費量は速度の約 3 乗に比例するため、速度を 1/2 にすれば燃料消費量は約 1/8 となる。結果として燃料費と CO₂ 排出量の大幅な削減につながる。

隻数調整も大きな削減効果をもつ。積み荷で満載であれば、大型船が小型船より貨物単位あたりの輸送コストが下がり、1 航海あたりの収入が増加する。必要のない低効率の小型船を減らせば、その分の削減につながる。

航路計画最適化による削減が 1%台と比較的少ないと思われるが、数値で見ると 0.023 億トンと 0.037 兆円となっており、大きな削減効果があることが分かる。

また、複数の対策を組み合わせた場合には、単独の対策を行うよりも大きな削減効果があることが分かった。例えば、減速航海と航路計画最適化を同時に行う削減方法や、隻数調整と航路計画最適化を同時に行う削減方法は、単独の減速航海と隻数調整よりも更に削減効果が著しい。

Table.3 Maximum reduction effect of every situation

Case	Maximum reduction effect	
	CO ₂ emissions (Million ton)	cost (Trillion yen)
Voyage speed down	30.1(-22%)	0.605 (-16.8%)
Adjust vessel number	18.7(-13.7%)	0.435 (-12%)
Voyage speed down + Adjust vessel number	Above 104.6(-76%)	1.562 (-43%)
Optimize voyage plans	2.3(-1.7%)	0.037 (-1.03%)
Voyage speed down + Optimize voyage plans	38.5(-28.1%)	0.769 (-21.3%)
Adjust vessel number + Optimize voyage plans	23.4(-17%)	0.526 (-14.5%)
Voyage speed down + Adjust vessel number + Optimize voyage plans	Above 105.4(-77%)	1.641 (-45%)

減速航海・隻数調整・航路計画最適化を同時に行うことで、コストの最大削減効果は現実の 45%カットとなる。またコスト最適値における CO₂ 排出量の削減効果は 77% カットとなる。更に速度を減らしていくと、必要な船舶隻数が増えすぎてコストパフォーマンスが悪くなるが、更なる CO₂ 排出量の削減効果を見積もることは可能である。

5 結言

本研究では、定期船航路のコンテナフローを再現できる海運シミュレータを開発した。船と貨物を個別に扱い、タイムステップ等の概念を用いて、時系列に沿った貨物と船の変化の様子をビジュアルアニメーションで表現した。天候海象、空コンテナ、季節による貨物変動が船舶の運航への影響も考慮した。太平洋コンテナ船定期航路の現状を再現することで、モデルの妥当性とシミュレーション技法の有効性を示した。

また、各種パラメータ（航海速度、船舶の隻数、航路計画）を適切に調整し、いくつかの対策に分けて実験を行った。減速航海>隻数調整>航路計画最適化の順にシステム全体への CO₂ 排出量とコストの削減効果が大きく、複数の対策を組み合わせたものはより大きな削減効果を持つことを定量的に確認した。現在運航中のコンテナ船の航路計画を最適化した上、一斉に航海速度を現状の 0.55 倍までに抑えることでコストの最適解が求まり、年間の CO₂ 排出量を 1.054 億トン(77%)、総コストを 1.641 兆円(45%)抑えられるという削減効果を確認した。

文献

- 1) 国際輸送ハンドブック, オーシャンコマース, 2010
- 2) BLM-Shipping database, BoLooMo International Group Ltd. , <http://www.boloomo.com>
- 3) 辻本勝, 佐々木紀幸, 藤原敏文, 上野道雄, 臼井謙彰, 加戸正治, 野村大吉, 高木健, 海の 10 モード指標計算法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 10 号, pp97-104, 2010