

リアルタイム情報による水上輸送最適システム

環境・エネルギー研究領域 リモセンシング研究グループ
輸送高度化研究領域 物流システム研究グループ

* 間島 隆博
勝原 光治郎

1. はじめに

トラック等の代替輸送手段として河川・運河を活用した船舶輸送が期待されている。⁽¹⁾⁽²⁾特に、災害時では輸送体制の多重化、代替緊急輸送手段の確保についてその重要性が認識されており⁽³⁾、河川の果たす役割は大きいと考えられる。文献^{(4),(5)}では災害時を想定した図1に示す荒川、隅田川、小名木川における輸送能力の評価及びボトルネックの探索を目的とし、複雑系マルチエージェントシステムによる計算機シミュレーションを行った。解析結果から1日の輸送量の概算が得られ、さらにその輸送量のボトルネックは供給能力であることが示唆された。しかしながら、解析に用いているプログラ

ムの機能は輸送量の概算を目的としており、現実に関わり得る条件に十分対応できないものであった。本報告では、このシミュレーションプログラムを以下のように発展、拡張した。

- 1) 複数の供給地に対応
- 2) 船舶の離接岸作業時間の導入
- 3) 供給地、要求地とも同時接岸船舶数を複数隻設定可能
- 4) リアルタイム情報（条件修正情報）に対応
- 5) 上記変更に伴う配船アルゴリズムの改良

この結果、様々な状況におけるシミュレーションが可能となり、一例として新たな供給基地の増設というリアルタイム情報が総輸送量に与える影響について解析した。

2. 配船アルゴリズム

前章のように様々な条件に対応すべく、配船アルゴリズムの改良を行った。すなわち、「どの物資を、どの船で、どこの供給地から、どこの要求地へ」運ぶのかを以下の手順で決定する。なお、前報⁽⁴⁾との相違は「どこの供給地から」という項目が新たに追加されている点であり、これは前章1)に示した複数の供給基地の設定に対応したものである。以下にその手順を示す。

- 1) 任務が割り当てられていない船舶（無任務船舶とする）が出現した場合、下記の手順で配船する。
- 2) 要求地優先順位表1位～n位（nは任意）を作成する。（2.1 要求地優先順位表を参照）
- 3) 要求地優先順位表で、対象となる物資を供給できる供給地をすべてリストアップする。
- 4) 1)のリストアップされた無任務船舶と2)でリストアップされた要求地、3)でリストアップされた供給地の組み合わせで、すべての

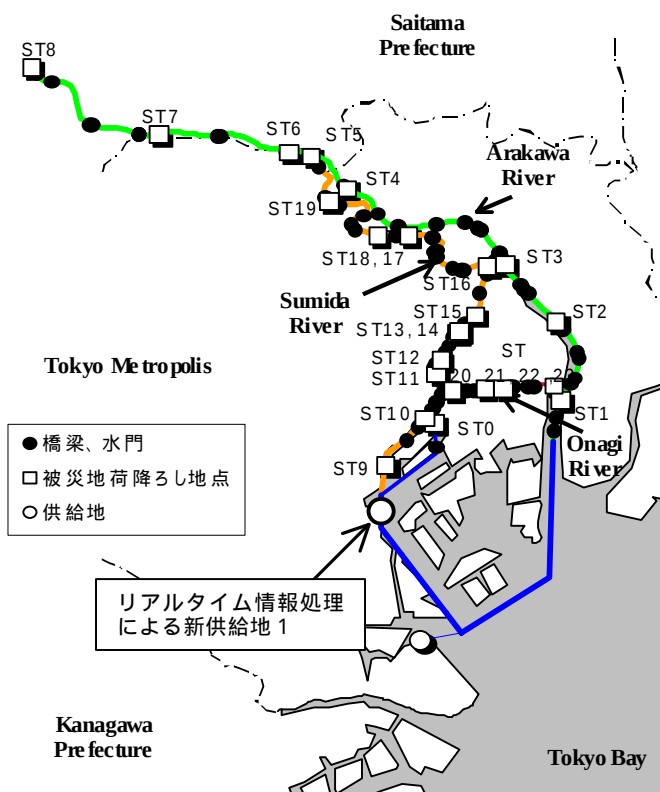


図1 解析対象河川と設定航路

航路について航行の可否も含めて $P_c(=L_c/T)$ を計算し、参照表を作成する。(2 . 2 参照表を参照)

- 5) 参照表の要求地優先順位 1 位の物資について、 P_c 最大となる供給地、船舶、航路を選択する。ただし、リストアップされる船舶と航路の組み合わせが存在しないならば、要求地優先順位を 1 つ落として考える。
- 6) P_c が最大となる組み合わせで輸送任務を開始するが、任務開始時に供給地の物資貯蔵量を減じ、要求地の予定荷受け量を増加させて 2) の要求地優先順位表を更新する。
- 7) 船舶は要求地での揚げ荷役が終了すると任務完了となり、無任務船舶であることを提示する。この無任務を示す船がなくなるまで、2) ~ 6) の処理を繰り返す。

また、今回の報告には示さないが、上記のアルゴリズムの流れとは別に、長時間の荷役待ちを回避するアルゴリズムも含まれる。

2 . 1 要求地優先順位表

司令官は物資を配送する要求地の優先順位表を作成する。この表の中で、高順位の要求地に対して優先的に船舶を配船する指令を出す。また、物資が数種類ある場合は、順位が「物資の種類数 × 要求地数」となり、この順位を随時更新して、最新情報を保持する。順位の基準となる発送率、 P_s は以下の式により求める。

$$P_s = D_{ij} / R_{ij} \quad \text{式(1)}$$

ここで、

D_{ij} : 要求地 i への荷種 j の発送量

R_{ij} : 要求地 i の荷種 j の初期要求物資量

i = 要求地番号

j = 荷種番号 (0 → タンク・ル箱、1 → 水)

よって発送率 P_s が小さいほど順位は高くなる。この操作は、各要求地への輸送率を時間的に均等に保つことを意図しており、要求地を平等に扱うことを意味する。

2 . 2 参照表

下には参照表の一例を示す。ここで要求地順位の行は 2 . 1 要求地優先順位表により得られる。参照表では要求地優先順位表をもとにして、要求地が要求している物資を供給できる供給地をピックアップする。さらに各無任務船でその要求地と供給地を結ぶ航路の中から最短の航路を選択して、輸送能力 P_c を計算する。参照表はこれらの情報をまとめたものであり、この表をもとにして最大の輸送能力を持つ、供給地、船舶、航路を決定する。

要求地順位	1			2			3			4		
要求地 ID	2			1			3			3		
物資 ID	1			2			2			1		
供給地 ID	4	5	6	2	4	2	4	4	5	6		
船 1(物資 1)	10	11		×	×	×	×	3	4			
船 2(物資 1)	5	3	6	×	×	×	×	11	8	13		
船 3(物資 2)	×	×	×	2	5	8	9	×	×	×		
船 4(物資 2)	×	×	×	6	1	5	3	×	×	×		

船舶 1 では航行不能より

船 1 は物資 1 の専用船だから ×

船舶の行内の数値は P_c を示す。ただし、各船舶の最短航路で計算

$$P_c = L_{cjk} / T_{ikl}$$

式(2)

ここで

L_{cjk} : 船舶 k の荷種 j の最大積載量

T_{ikl} : 船舶 k の供給地 l を経由する要求地 i への航行予測時間と供給地と要求地での荷役時間の和

なお、往復航行予測時間は供給地から要求地 i へ至る複数の航路の中で自船が航行できる最短航路の距離を河川航行速度で除した値を用いている。つまり、 P_c は単位時間当たりの輸送量を示すことになる。

3 . リアルタイム情報の処理

シミュレーションプログラムを災害時の最適配船処理を支援するシステムとして利用するためには、実世界における様々な状況変化に対応する必要がある。よって、本プログラムでは以下のよう

な状況変化、すなわち計算条件の変化に対応できるようにした。

- 1) 新要求地、新供給地の設置
- 2) 供給地、要求地、同時接岸隻数の変化
- 3) 供給地、物資貯蔵量の変化、要求地、物資要求量の変化
- 4) 船舶位置の修正
- 5) 船舶航行速度の変化
- 6) 荷役速度の変化
- 7) 橋梁落下等、航行不能航路の出現

その処理システムを図2に示す。輸送作業を行う前に計算条件が記述された状況ファイル（バックグラウンド情報ファイル）により予めシミュレーションを1度実行して1日分の運行計画を作成する。橋梁落下など、現実と異なる状況（リアルタイム情報）が報告された場合、その状況を反映した計算条件の変更点を報告時刻とともにリアルタイム情報ファイルへ記述し、再度シミュレーションをやり直す。シミュレーション内の時刻がリアルタイム情報ファイルの報告時刻になった際、リアル

タイム情報ファイルの条件を取り込み、新たな条件下での計算を継続する。

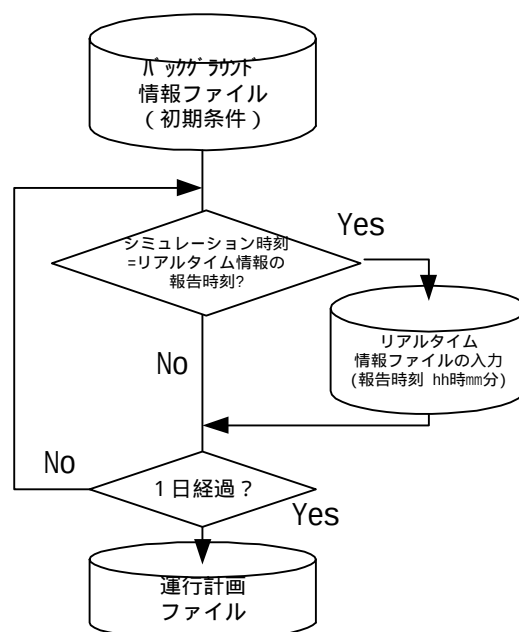


図2 リアルタイム情報処理の流れ図

4. 解析条件の設定

災害時を想定した基本的条件は前報⁽⁴⁾と同じで

表1 基本条件

輸送量の制約に関する項目	シミュレーションの対処方法
対象船舶数	最大 99 隻
船舶喫水と水深との干渉	○
船舶のマスト高さとの干渉	○
船舶幅と橋桁幅の干渉	○
船舶幅と水門幅の干渉	○
船速（海上）	船舶の航海速度
船速（河川）	(10 Knot、船舶の航海速度)のうち低い速度
追い抜き、対向時の航行速度の変化	×
河川曲率と船舶速度の関係	×
積載重量による喫水、マスト高さ変化	×
潮汐変化による河川幅、水深、流速の増減	×
係留場所（初期位置）の設定	○
水門開閉時間、時刻	常時開
輸送物資量（要請量）	表3参照
輸送物資の種類	2種類（生活水、ダンボール箱）
供給地の数	1地点、(3ヶ所を1地点で代表)
供給地の位置	東京湾内、図1参照
供給地の船舶の同時接岸隻数	10隻 (3隻 x2ヶ所、4隻 x1ヶ所)
供給地の物資貯蔵量	∞
供給地の荷役速度	一定、表2参照
要求地（船着場）数	24ヶ所（荒川、隅田川、小名木川）、表3参照
要求地（船着場）の位置	図1参照
要求地（船着場）の同時接岸隻数	1隻
要求地（船着場）の荷役速度	一定、表2参照

○：考慮する、×：考慮しない

表 2. 船種、荷種、荷役速度

解析対象船種	船舶数	積載可能荷種	荷役速度	離接岸時間
屋形船	63 隻	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)	10 分
水上バス	7 隻	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)	
押船、曳船 + 舢舨	8 隻	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)	
鋼材運搬船	2 隻	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)	
油槽船	19 隻	生活用水(又は燃料)	4.1 (kl / min)	

あり、詳細は文献を参照されたい。ただし、災害時に利用できる可能性を持つ船舶数を 291 隻と仮定した数値は過大な期待と予想され、本報告では 99 隻（水輸送船 19 隻、ダンボール箱輸送船 80 隻）としている。なお、文献⁽⁵⁾により船舶数が 100 隻程度としても、総輸送量は大きく変化しないことが示されている。この理由はこれ以上の船舶数を利用出来たとしても、供給地の供給能力がボトルネックとなるためである。また、1 章 2) への対応より全船舶、離接岸作業に 10 分を割り当てており、解析対象は図 1 の東京湾に流入する、隅田川、荒川、小名木川である。次に示す前提のもと基本条件を表 1 ~ 3 にまとめる。

5. 解析

解析手法には複雑系マルチエージェントシミュレーションを採用し、(株)構造計画研究所、Multi Agent Simulator を使用した。本シミュレーションの主なエージェントは司令官、要求地（荷降ろし地点）船舶である。

本シミュレーションプログラムは災害時における様々な状況に対応すべく拡張されており、その機能を限られた誌面で網羅することは難しい。ここでは一例として上記条件における計算結果及び、リアルタイム情報により新たな供給地の出現といった状況を仮に設定して解析を試みる。

5. 1 基本条件下の解析 (Case0)

図 3 (a), (b)には 1 日 24 時間連続作業とした時の、水とダンボール箱の全要求地への総輸送量を時間履歴として示す。

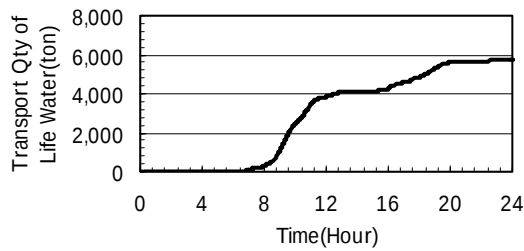
総要求量は生活水が 6,602 トン、ダンボール箱が 2,788 トンであるのに対して総輸送量は生活水が 5,800 トン、ダンボール箱は 1,050 トンとなり、それぞれ 9 割、4 割

表 3 要求地の要求物資量

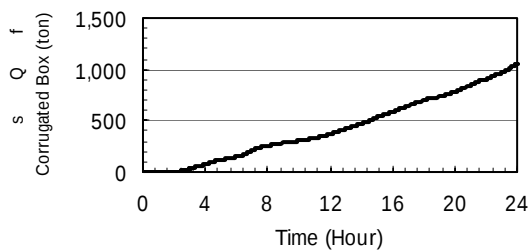
	R.S. 名前	記号	対象面積 (km ²)	対象人口 被災率 (3 割)	生活水 必要量 (トン/日)	ダンボール箱 必要量 (トン/日)
荒川水系	小松川 R.S.	ST1	7.15	8,754	158	67
	平井水上ステーション	ST2	7.44	24,442	440	186
	堀切 R.S.	ST3	5.31	19,167	345	146
	新田 R.S.	ST4	0.83	2,887	52	22
	岩淵 R.S.	ST5	4.26	19,650	354	149
	川口 R.S.	ST6	5.53	13,673	246	104
	戸田 R.S.	ST7	5.15	8,935	161	68
	秋ヶ瀬棧橋	ST8	5.66	11,272	203	86
隅田川水系	日の出	ST9	7.39	16,509	297	125
	新川	ST10	5.79	8,481	153	64
	越中島	ST0	5.48	9,525	171	72
	浜町	ST11	6.32	9,909	178	75
	両国	ST12	5.20	8,029	145	61
	吾妻橋	ST13	6.44	17,722	319	135
	墨田区役所前	ST14	6.12	17,826	321	135
	桜橋	ST15	5.48	16,273	293	124
	千住	ST16	4.90	19,451	350	148
	東尾久	ST17	5.65	27,261	491	207
	荒川遊園	ST18	8.04	31,032	559	236
小名木川水系	神谷	ST19	7.99	24,690	444	188
	高橋	ST20	7.28	10,584	191	80
	扇橋	ST21	12.30	15,323	276	116
	スポーツ会館前	ST22	12.49	15,105	272	115
	番所橋	ST23	8.40	10,295	185	78
合計			156.6	366,794	6,602	2,788

の輸送率ということになる。この数値は前報告⁽⁴⁾より小さな値であるが、離接岸に要する作業時間を考慮した影響が大きい。生活水について作業開始から 20 時間以降、輸送量の変化がにぶる。これは生活水輸送船が比較的大型な船舶が多いためであり、20 時間を過ぎるとこのような大型船舶が到達できる要求地はほぼ要求量が満たされて作業が割り当てられなくなるため、少数の小型水輸送船のみが機能することによる。また、図 3 (c)は供給地で積み荷役を待つ船舶数の推移を示している。荷役待ち船舶数は 17 時間程度経過しないと 0 隻にならないことが分かる。一方、配船アルゴリズムから要求量が多い要求地にはより多くの船舶が

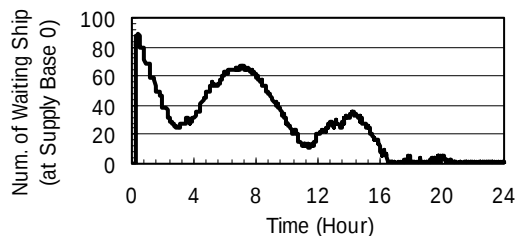
配船される。表 3 から ST2,17,18,19 は要求量が多い要求地であることが分かり、図 3 (d)はこれらの船着き場の揚げ荷役を待つ合計船舶数の推移を示している。図より 4 カ所の合計で最高 10 隻程度の滞留記録されているが、ボトルネックになるほどの酷さではない。



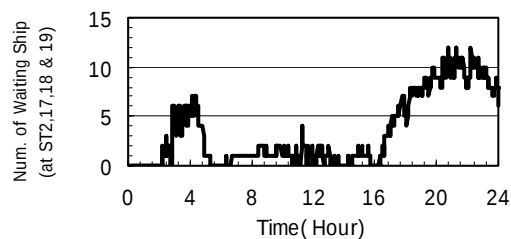
(a) 生活水の輸送量



(b) ダンボール箱の総輸送量



(c) 供給地における荷役待ち船舶数

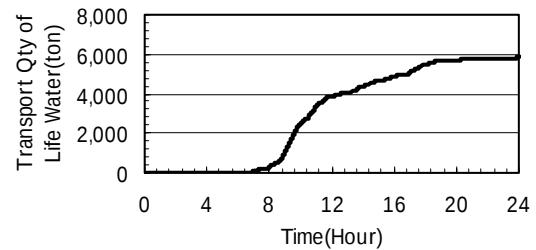


(d) 要求地における荷役待ち船舶数
(ST2,17,18,19 の合計)

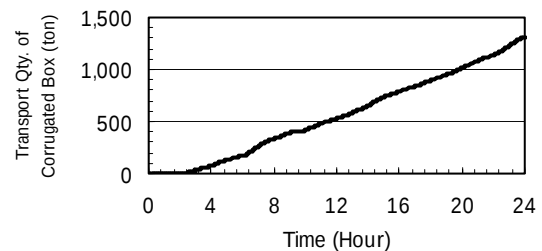
図 3 Case 0 の解析結果

5.2 新供給地の設置 (CaseR)

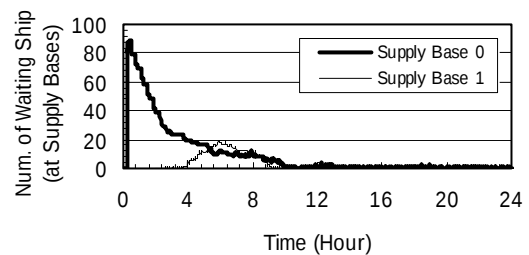
次にリアルタイム情報により、輸送開始から 2 時間後に供給基地が新設された場合の解析結果を示す。なお、前節、羽田沖の供給地を供給地 0、ここで増設する新供給地を供給地 1 として示し、設置場所を有明付近とする。なお、供給地 1 の同時接岸隻数は供給地 0 の半分、5 隻とした。結果を図 4 に示す。この場合の総輸送量は生活水が



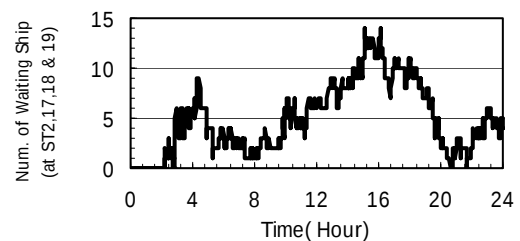
(a) 生活水の輸送量



(b) ダンボール箱の総輸送量



(c) 供給地における荷役待ち船舶数



(d) 要求地における荷役待ち船舶数
(ST2,17,18,19 の合計)

図 4 Case R の解析結果

5,800 トンと変化しないのに対してダンボール箱が1,300 トンと3割程度増加している。これより、生活水については小型水輸送船が絶対的に不足しており、供給地増設の効果がダンボール箱輸送量にのみ反映されていることが分かる。供給地の積み荷役待ち船舶数の推移を示す図4(c)から供給地0、1での船舶数が10時間程度で0となり、Case0と比較して短縮されていることから供給能力の増加が反映されていることが分かる。一方、要求地側の揚げ荷役待ち船舶数を図4(d)で確認すると、最高で14隻の待ち行列となり、0隻となる期間も短くなっていることから、荷受け能力が限界に近くなっていると推察できる。

二つの条件下における解析結果を表4にまとめる。Case RはCase 0より供給能力が1.5倍になっているが、水輸送については前述の通り小型水輸送船の不足により変化がなく、ダンボール箱については3割程度の増加にとどまる。要求地側の荷受け能力が限界にさしかかっているものの、要求地、供給地とも荷役待ち船舶数は低く推移しているため、この条件下でのボトルネックは船舶数と言える。

表4 解析結果

	総要求量 (ton)	輸送率(%)		
		Case 0	Case R	Case R2
生活水	6602	87	88	87
ダンボール箱	2788	38	47	49

ここで詳細な記述は控えるが、供給地1を有明付近ではなく、要求地により近い荒川沿いの新田R.S.付近へ設置した場合の解析結果をCase R2として表4に示す。表の通り輸送率はCase Rとほぼ同じであった。この結果は船舶数の不足という考察と矛盾しない。よってCase R以上の供給能力の増加を目的とした供給基地の増設は、輸送媒体である船舶の確保が伴わなければならないことが分かる。

6. まとめ

河川を利用した災害時の物資輸送を想定し、マルチエージェントシステムによるシミュレーション

プログラムを作成した。本プログラムは平成14年度に実施された「災害時緊急輸送における河川航行船の利用可能性の調査委員会」⁽⁶⁾の成果であるプログラムを実世界で起きる様々な条件に対応すべく拡張、発展させたものである。さらに、このプログラムではリアルタイム情報を取り込み、その情報をもとに最適配船を変更する機能を持ち合わせている。また、その機能の一部を利用し、新たな供給基地の増設が総輸送量に与える影響の解析を試みた。この結果、船舶数が100隻程度の場合、供給基地の増設により輸送量は増加したが、さらなる供給能力の増加は輸送媒体である船舶数を確保しなければならないことが分かった。

【参考文献】

- (1) 荒川物流計画検討業務報告書、建設省荒川下流工事事務所（現国土交通省）平成11年3月
- (2) 東京圏アクア・ハイウェイプラン構想第2回検討委員会・検討資料、平成11年8月
- (3) 防災基本計画、中央防災会議
<http://www.bousai.go.jp/keikaku/kplan.html>
- (4) 間島隆博、勝原光治郎、他、河川を利用した災害時緊急輸送シミュレーション、第2回海技研究発表会講演集、pp.89-94
- (5) 間島隆博、勝原光治郎、服部聖彦、複雑系マルチエージェントシミュレーションによる河川を利用した災害時緊急輸送能力の評価、日本造船学会論文集第、192号、2003
- (6) 関東運輸局船舶部、関東地方整備局河川部、災害時緊急輸送における河川航行船の利用可能性の調査報告書、平成14年3月