

災害時緊急輸送システムの技術開発に関する研究

間島 隆博*、樋富 和夫**、勝原 光治郎*

Research and Development on Urgent Transportation System Under Disaster Circumstance

by

Takahiro MAJIMA, Kazuo HITOMI, Mitujiro KATUHARA

Abstract

Many Japanese coastal areas are expected to suffer serious damages when a massive earthquake strikes due to the concentration of population and industrial activities in these areas. Emergency goods transportation utilizing ships and boats was considerably effective when the Great Hanshin-Awaji Earthquake struck. Many parts of the ports, however, did not fully function because of the enormous damages caused by the Earthquake, and it resulted in difficulties of handling relief supplies. Although many disaster-controlling infrastructures were built after the Earthquake, effective transportation methods using ships and boats have not been fully discussed yet. For this reason “the Urgent Transportation System,” utilizing ships and boats in emergencies, has been studied to build an effective transportation system that affords diversified alternate transportation. This system consists of three different systems; “the Real-time 3D Survey System”, “the Optimum Ship Transportation System” and “the Urgent Transportation Ship”. The first two elements that we took charge are described in this report. First, the objective of “the Real-time 3D Survey System” is to collect necessary information for the safe ship operations. A survey ship, equipped with a 3D imaging sensor and a multi-beam sonar, searches for obstacles in the water such as damaged vehicles, fallen down bridges and so on before the fleets of transportation ships operate. In this way, the immediate decisions can be made for the transportation routes. Next, “the Optimum Ship Transportation System,” can calculate the most efficient ship operations and transmits the route order to each ship. Any new information on the database such as changes of ship locations, wharf repair, and removing obstacles can be updated on time, and the transportation plan is recalculated on site.

* 物流研究センター, **環境・エネルギー研究領域

原稿受付 平成17年10月7日

審査済 平成18年2月27日

目 次

1. はじめに	2
2. リアルタイム 3 次元測量システム	2
2. 1 航路内水中障害物の探査	2
2. 1. 1 マルチビーム測深システム	3
2. 1. 2 グリーンレーザによる測深	10
2. 2 橋等の倒壊物の探査	10
2. 2. 1 3 次元イメージングセンサ	10
2. 2. 2 測量例	10
2. 3 2 章のまとめ	11
3. 水上輸送最適化システム	11
3. 1 救援物資輸送シミュレーション	11
3. 1. 1 シミュレーション手法の概略	11
3. 1. 2 救援物資輸送の解析例(関東地方)	13
3. 1. 3 救援物資輸送の解析例(中部地方)	16
3. 2 被災者輸送シミュレーション	18
3. 2. 1 輸送量需要調査	18
3. 2. 2 被災者輸送の解析例	23
3. 3 物資と被災者の併存輸送解析	29
3. 4 リアルタイム情報処理機能	31
3. 5 3 章のまとめ	31
4. おわりに	34
謝辞	34
参考文献	34
研究発表等	34

1. はじめに

わが国沿岸域には多くの人口・産業が集中しており、このような地域でひとたび大地震が発生した場合、被害は甚大である。阪神・淡路大震災では、陸上輸送が途絶した状態において船舶輸送が大きな効果を発揮したが、港湾施設の損壊等のため物資の荷揚げは困難を極めた。この教訓を踏まえ、災害時の物資輸送の拠点として、海上防災拠点の開発や内陸河岸防災拠点の整備等が既に進められているが、これらを連携させ、適切に機能させるための輸送システムについては未検討のままであった。他方、わが国の防災体制における「防災基本計画」では、1)周到かつ十分な災害予防、2)迅速かつ円滑な災害応急対策、3)適切かつ速やかな災害復旧・復興の3段階に分けたうえで各々の方針を示し、陸・海・空にわたる複数の輸送モード及び輸送ルートからなる多重性・代替性の確保の強化・推進の必要性が示されている。

以上の状況を鑑み、本研究では、緊急輸送代替性確保への貢献、大量の救援物資の効果的な供給、災害時の初動対応の円滑化を図ることを目的とし、河川の利用も踏まえ、船舶を活用した災害時緊急水上輸送ネッ

トワーク構築のための検討を行った。本『災害時緊急輸送システム』は以下の三つのシステムで構成される。第一は「リアルタイム3次元測量システム」で、発災後に航路の健全性、岸壁や橋等の損壊状況をリアルタイムで把握し、それらの情報を次に述べる「リアルタイム情報に対応した水上輸送最適化システム」に迅速に送信することを目的としている。橋や岸壁等の水上および陸上情報は3次元イメージセンサ、水没車両や橋梁落下物などの水中障害物情報はマルチビームソナーにて測量を行う。これらの機器を小型船に搭載し、災害発生直後の緊急輸送ルート確保に必要な情報を提供する。

第二は「リアルタイム情報に対応した水上輸送最適化システム」で、上記の測量データ情報に加え、船舶リスト、河川情報、橋桁仕様等で構成される「緊急時用データベース」を基に、被災地への最も高効率な配船計画を解析し、各輸送船に配船指令を出す。これらの計算はリアルタイム情報に対応しているため、岸壁の修復、水中障害物の撤去等の新たな情報が入り次第、ルートや配船数の変更が可能である。

第三は「水上輸送船舶」で、災害事前対策として、低橋脚、浅水深等の河川輸送ボトルネック解消条件を備えた上、平時利用も考慮して試設計された。

図1に本システムの上記構成要素の位置づけと相互の関連について図示する。このうち、海上技術安全研究所が担当した項目は、「リアルタイム3次元測量システム」、「リアルタイム情報に対応した水上輸送最適化システム」であり、本稿では両者について報告する。

2. リアルタイム3次元測量システム

災害時緊急水上輸送船舶の航路内水中障害物情報や着岸岸壁の海底情報、橋等の倒壊状況をリアルタイムに水上輸送最適化システムのネットワークへ提供できるシステムとして、①マルチビームソナー測深システムと測量データの送受信システム、②グリーンレーザによる測深、③3次元イメージングセンサの測量性能について調査した。その概要について以下に示す。

2. 1 航路内水中障害物の探査

航路内水中障害物の探査法として、海底地形の測量や海中工事の施工確認等に導入・使用され性能も著しく進展しているマルチビーム測深システムと実用的な航空レーザ測深方式として開発され

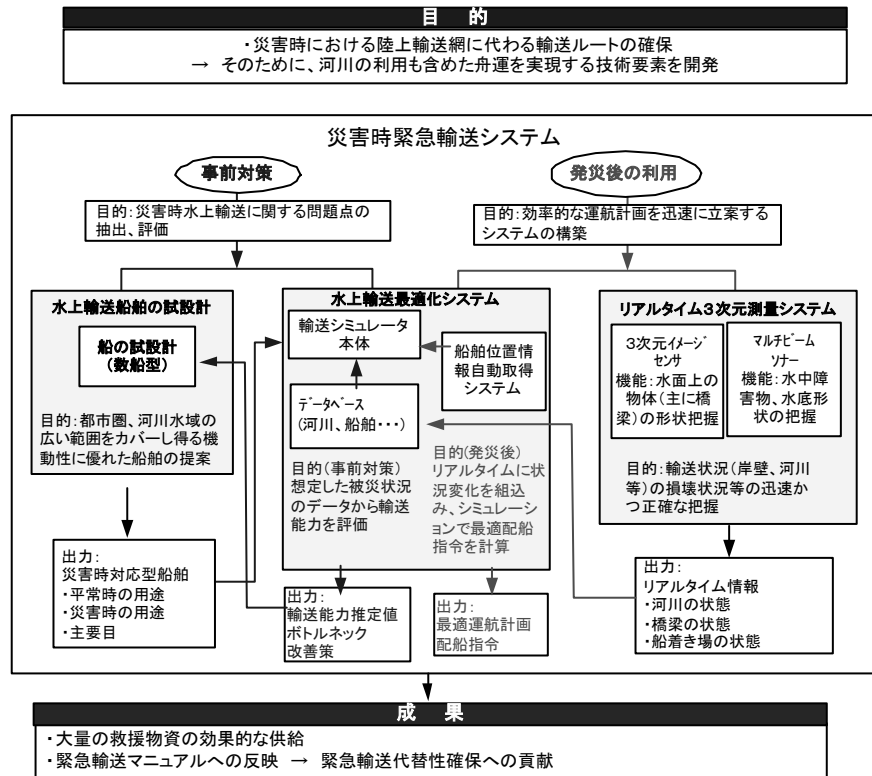


図1 災害時緊急輸送システム、構成要素の位置づけと関連

ているグリーンレーザによる測深法について示す。

2.1.1 マルチビーム測深システム

緊急時における航路内障害物をマルチビームソナーにより測深する場合は、平時の測量と異なりリアルタイム測量が重要な要件となる。その要件は、精度をある程度抑え、かつ専門家でなくても使えるような汎用性を踏まえた上で、必要不可欠な機能を有することである。

マルチビーム測深システムの概要を図2.1に示す。

マルチビーム測深システムは、マルチビーム測深機、測位システム、動揺補正装置、音速度測定装置及び測量ソフトウェア付属コンピュータで構成される。

マルチビーム測深機（ソナーヘッドとコントローラ）は扇形に広がった音響ビームによって線状の測深データを得るための装置である。測深値は音響ビームの送受信時間と音速度で算出される。

測位システムは、GPSアンテナの取り付け位置の緯度、経度データを取得するための装置である。動揺補正装置は船体動揺や方位データを取得するための装置である。音速度測定装置は、水中音速度の鉛直分布を測定するための装置である。

また、測量ソフトウェア付属コンピュータは各データの記録、補正演算、地形図作成を行うための装置である。

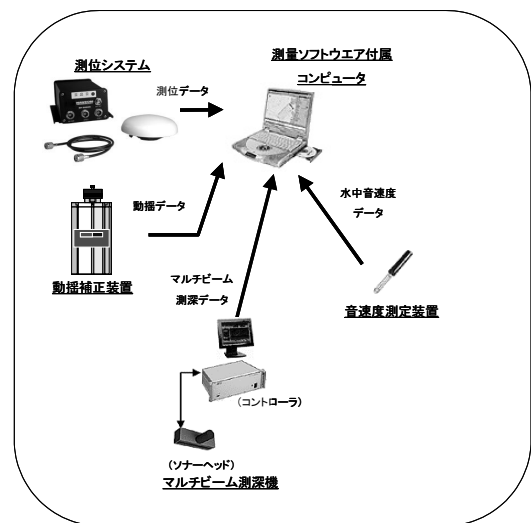


図2.1 マルチビーム測深システムの概要

以下にシステムを構成する機器性能、測量スピード、船速を上げた場合の課題等、測量量、測量方式と測量方法、適正なメッシュ、潮位、作業限界基準について示す。

(1) システムを構成する機器の性能

緊急時の測量システムに必要な機器の性能を以下に示す。

① マルチビーム測深機

マルチビームソナーの測量方式はクロスファンビーム方式が採用されている。クロスファンビーム方式の原理はソナーヘッドに送波器と受波器が直交するように配置され、送波器から海底面に向かって扇型に広がるビーム（ファンビーム）を発信し、直行する受波器も扇型のビーム形状で反射を待ち受けることにより、交点それぞれの測定値が得られる。

測量は、ビームの受信角度と送受信時間から水深とその位置、航行によるスキニングで海底の3次元形状を得る方式である。測深の概要を図2.2に示す。

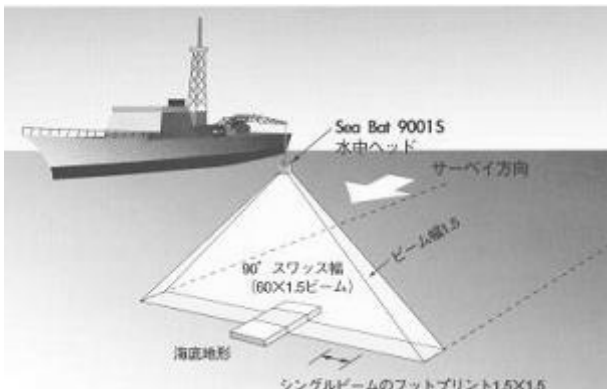


図2.2 測深概要図

図で示した扇型ビームの例は、広がり角 1.5° のビーム60本で構成されている。扇形ビームの広がり角（スワップ角）は $1.5^{\circ} \times 60本 = 90^{\circ}$ となる。広がり幅（スワップ幅）は水深の2倍 $\{= 水深 \times \tan(スワップ角 \div 2) \times 2\}$ となり、これがマルチビームによって測量される幅である。

ソナーヘッドの取り付け方によって測量方式が異なり、その方式には、下方、サイド、前方があり、以下のとおり測量の目的と範囲が異なる。

- ・ 下方探査：海底（河床）に向かってビームを発射し地形情報を得る方式
- ・ サイド探査：岸壁や橋脚等に向かってビームを発射し地形情報を得る方式
- ・ 前方探査方式：前方に向かってビームを発射し障害物情報を得る方式

マルチビーム測深機の測量性能を表2.1に示す。

緊急時は測量スピードを優先し広域をカバーでき、往復路の測量で輸送航路内海底地形情報を得る必要がある。荒川における検証実験では、荒川河口～戸田リバーステーション(公共の船着場、災害時の物資輸送拠点)間、距離約28km、川幅20～40m、船速5ノットで測量時間は3時間であった。1日の測量量として往復の測量時間6時間で40m～80m川幅の測量が可能で

あることが証明された。表2.1に示した機種ではスワップ幅の大きい機種ほど広域の測量が行える。

表2.1 マルチビーム測深機の測量性能

機種別	ビームショット数	測深レンジ (周波数)	ビーム角 ($^{\circ}$)	スワップ幅 (水深比)
SEABAT 8101	40回/秒	300m (240kHz)	1.5×1.5	7.4倍
SEABAT 8125	40回/秒	120m (455kHz)	0.5×1.0	3.5倍
SEABAT 9001S	30回/秒	140m (455kHz)	1.5×1.5	2倍

② 測位システム (GPS)

測位システムは、GPSアンテナの取り付け位置の緯度、経度データを取得するための装置である。そのデータは各測深点へ測地座標を与えるために利用される。

表2.2に測位システム (GPS) の測定性能を示す。

下記2種のGPSは橋下においてGPSデータの受信が途絶え、測量データの欠落が生じた。その対策として、GPSデータ受信が途絶えた時に位置データ、動揺補正データが出力できる慣性ナビゲーションシステムPOS/MVを測量システムに加えることで、測量スピード5ノットで欠落のない測量データを得た。下記2種のGPSは橋下以外の測量ではGPSデータが正常に受信され、StarFire2050Mを使った測量データの送受信実験では測量データが地図データに正常に表示された。従って、測位システムは15cm以内の測位精度を有する必要がある。

表2.2 測位システム (GPS) の測定性能

機種別	測位精度	更新間隔	測位遅延	橋下等 受信障害
Trimble-MS750	2cm	20Hz	20ms	有
StarFire 2050M	15cm	20Hz	20ms	有

③ 動揺補正装置

動揺補正装置は船体動揺や方位データを取得するための装置である。それらのデータは各測深点の測地座標を水深値を補正するために利用される。表2.3に動揺補正装置の測定性能を示す。

検証実験でTrimble-DSM-05の測定性能（ヒープ；精度5%、ロールとピッチ；精度 0.05° ）を有していれば十分な動揺補正ができることを明らかにしている。前述した慣性ナビゲーションシステムPOS/MVはTrimble-DSM-05と同等以上の測定性能（ヒープ；精度5%、ロールとピッチ；精度 0.02° ）を有しており、また、方位出力機能（方位精度 0.02° 、計測範囲 $0 \sim 360^{\circ}$ 、分解能 0.01° ）

を有しているため、機器の重複が省かれ動揺補正装置として適している。

表2.3 動揺補正装置の測定性能

機種別		精度	レンジ	分解能
TSS-DSM-05	ヒープ	5%	±10m	1cm
	ロール ピッチ	0.05°	±30°	0.01°
慣性ナビゲーションシステム POS/MV	ヒープ	5%	±10m	1cm
	ロール ピッチ	0.02°	±30°	0.01°

④ 音速度測定装置

表2.4に音速度測定装置の測定性能を示す。

音速度は水温等により変化するが、水深2m以下では実水深より0.33%短く測量される程度であり、緊急時には測量を優先し、必要に応じて、0.06m/sの精度を有する音速度測定装置により音速度鉛直分布を計測し補正することが望ましい。

表2.4 音速度測定装置の測定性能

機種別	精度	レンジ	分解能
SVPS	0.06m/s	1400m/s～ 1550m/s	0.015m/s

⑤ 測量ソフトウェア

SEABATシリーズのマルチビーム測深機には、海洋測量、港湾工事の全てのニーズに対応した多機能・統合型処理ソフトウェア（HYPACK Survey）が付属している。このソフトウェアは、測量後にデータ処理を行う方式であるため、測量データの取得時間は測量時間とほぼ同等となり、平時の精密測量に適している。

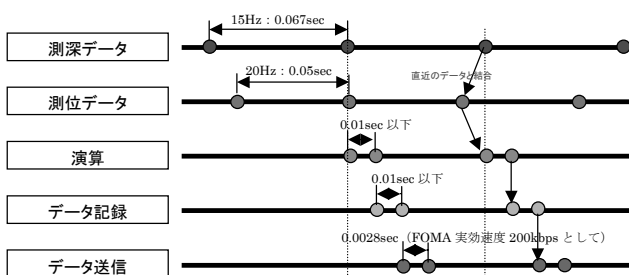


図2.3 測量～送信タイミングチャート

一方、Beluga Surveyorは図2.3に示すようにリアルタイムに測量、演算、記録、データ送信を実現している。また、測量をしながら等深線図（コンタ）をリアルタイムに表示できる機能を有し、設定項目も補正に関するパネル画面を使用するため、1日程度の訓練で使用が可能なものであり、緊急時の測量ソフトウェアとして適している。

(2)全体システムの構成

測量データをリアルタイムに緊急時水上輸送最適化システムに提供するには、以下の送配信システムが必要となる。

① 全体システムの構成図

全体システムの構成図を図2.4に示す。平時における精密測量には、水深算出に使用される音速度の測定が必要であるため、全体システム構成図に加えた。また、サイド探査方式で橋下及び岸壁（リバーステーション）を測量する場合はGPSデータを正常に受信できる位置で測量するため、GPSデータ受信途絶対策に必要な慣性ナビゲーションシステムPOS/MVが省略できる。前述した送信システムと配信システムで構成されるデータ送配信システムをネットワークへ組み込めない場合は、障害物の位置と大きさを伝達できる通信手段（船舶電話、無線等）を考慮する必要がある。

② 測量データの送信システム

データ配信システム（FOMA）はNTTドコモの packets 通信端末で、送受信最大384KBps、実効速度200KBpsとなっている。PCカードタイプであるため、コンパクトで装着が容易である。

③ データ配信システム

データ配信システム（BELUGA.NET）はデータ配信サーバー、データベース（地図データ）、データ処理・配信ソフトウェアで構成される。データ配信システムのCPUはPentiumM相当で1.0GHz以上、メモリーは512MB以上、HDDは40GB以上の性能を必要とする。

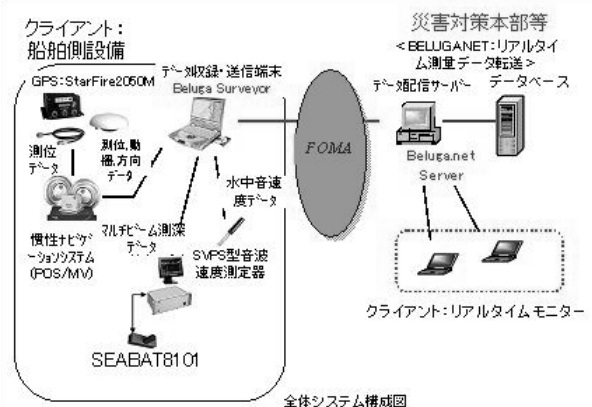


図2.4 全体システムの構成図

(3)測量スピード

測量はソナーが扇型のビームを送受信し船が進行することにより行われる。扇型ビームはビーム角とビームの本数で決まり、その積がスワッス角(SEABAT 9001型 90度=1.5度×ビーム数60本、SEABAT 8101型 150度=1.5度×100、SEABAT 8125型 120度=0.5度×240)となり、扇形状を成す連続的なビーム(図2.1参照)となっている。図2.5に示すようにビームショット数は機種で定められた測量水深レンジとの関係で決まる。

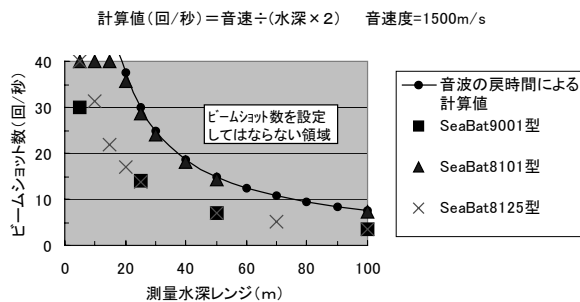


図2.5 測量水深レンジとビームショット回数の関係

測量水深レンジは、測量河川における大潮干潮時の最大水深、満潮時の増加分、増水分を考慮した水深を算出し、下方測量方式ではその水深値とスワッス角より求めた斜距離(最大広がり距離)の値を用いる。サイド測量方式では、算出した水深値はサイド方向の最長距離値のどちらか大きい方の値を用いる。

船速とビームショット数の関係を次式に示す。

船速(ノット)

= 測量対象物の長さ(m)

÷ 測量対象物に当てるビームショット数に要する時間(秒) × 1.9444(ノットへの換算値)

= 測量対象物の長さ(m)

÷ {測量対象物に当てるビームショット数(回)}

÷ ビームショット数(回/秒)}

× 1.9444(ノットへの換算値)

= {測量対象物の長さ(m)}

÷ 測量対象物に当てるビームショット数(回)}

× ビームショット数(回/秒)}

× 1.9444(ノットへの換算値)

(2-1)

ここで、{測量対象物の長さ(m) ÷ 測量対象物に当てるビームショット数(回)} は測量対象物の分解能であり、船速と毎秒のビームショット数の関係を表す勾配である。

従って、

船速(ノット)

= 分解能(m) × ビームショット数(回/秒)

× 1.9444(ノットへの換算値) (2-2)

と表すことができる。

障害物大きさの想定

想定した障害物の大きさは、実際の護岸調査で測量された軽自動車(長さ4m×幅1.5m×高さ1.5m)の短い寸法を用い1.5m角、高さ1.5mと仮定した。

分解能

分解能 > 1.5m では、扇型の連続ビームによる1ラインの測量か、測量不能になる。

1.5m ≥ 分解能 > 0.75m では1ライン若しくは2ラインの面として測量される。

分解能 ≤ 0.75m では2ライン以上の面として測量され、1ラインをノイズと見誤ることを防ぐため、0.75m以下の分解能が望ましい。

分解能は(2-2)式を変形して次式から計算できる。

分解能(m)

= 船速(m/s) ÷ ビームショット数(回/秒) (2-3)

(2-3)式を用いたSEABAT8125型の計算例を表2.5に示す。これは1.5m角障害物の測量限界を示すものである。表中では分解能 > 1.5mを太字、1.5m ≥ 分解能 > 0.75mを斜体で示した。測量手順として、まずレンジが決定され、次に図2.5よりビームショット数が決まり、(2-3)式により、そのビームショット数と船速により分解能が計算されるため、表の横軸にはレンジとその数値に対応するビームショット数を付した。

レンジ30mにおいて、2ライン以上の面で探査する場合は14ノット以下での測量が望ましい。想定する障害物を認識できる分解能(寸法の2分の1以下)と測量水深(ビームショット数)から船速が決定できる。また、逆に測量船の最大船速から測量時の分解能を知ることでもある。

実船実験では、ビームショット数21回/秒、分解能0.196m、船速8ノット、ターゲット2m×5mの測量で、ターゲットが認識されることが確認されている。

表 2.5 1.5m 角・障害物の測量限界(8125 型)

	レンジ (m)	7	10	15	20	25	30	50	70	100
	ショット数 (回/秒)	40.5	31.39	21.98	16.93	13.76	10.01	7.11	5.03	3.61
船速 (ノット)	1	0.013	0.016	0.023	0.030	0.037	0.051	0.072	0.102	0.142
	2	0.025	0.033	0.047	0.061	0.075	0.103	0.145	0.204	0.285
	3	0.038	0.049	0.070	0.091	0.112	0.154	0.217	0.307	0.427
	4	0.051	0.066	0.094	0.122	0.150	0.206	0.289	0.409	0.570
	5	0.063	0.082	0.117	0.152	0.187	0.257	0.362	0.511	0.712
	6	0.076	0.098	0.140	0.182	0.224	0.308	0.434	0.613	0.855
	7	0.089	0.115	0.164	0.213	0.262	0.360	0.506	0.716	0.997
	8	0.102	0.131	0.187	0.243	0.299	0.411	0.579	0.818	1.140
	9	0.114	0.147	0.211	0.273	0.336	0.462	0.651	0.920	1.282
	10	0.127	0.164	0.234	0.304	0.374	0.514	0.723	1.022	1.425
	11	0.140	0.180	0.257	0.334	0.411	0.565	0.796	1.125	1.567
	12	0.152	0.197	0.281	0.365	0.449	0.617	0.868	1.227	1.710
	13	0.165	0.213	0.304	0.395	0.486	0.668	0.940	1.329	1.852
	14	0.178	0.229	0.328	0.425	0.523	0.719	1.013	1.431	1.995
	15	0.190	0.246	0.351	0.456	0.561	0.771	1.085	1.534	2.137
	16	0.203	0.262	0.374	0.486	0.598	0.822	1.157	1.636	2.279
	17	0.216	0.279	0.398	0.516	0.635	0.873	1.230	1.738	2.422
	18	0.229	0.295	0.421	0.547	0.673	0.925	1.302	1.840	2.564
	19	0.241	0.311	0.445	0.577	0.710	0.976	1.374	1.943	2.707
	20	0.254	0.328	0.468	0.608	0.748	1.028	1.447	2.045	2.849

(4)船速を上げた場合の課題等

測量船速は、前項で述べたとおりビームショット数(水深に関連)、測量対象物の大きさ及び分解能をパラメータとして求めることができるが、船速に影響する因子として、測量に使用する船の性能、河川の通航ルール、潮流の影響、ソナーヘッドから発生する泡の影響がある。

荒川における通航ルールには船速に関する規定はなく、河岸の自然環境や係留施設等に係留している船舶に支障が生じないように減速区域、追い越し禁止区域、回転禁止区域等が定められており、橋や河岸に標識で示されている。

潮流の影響として、上流から下流に向かう4ノットの潮流があった場合、上流から下流へ測量速度は4ノット以上となり、4ノット以下で測量する場合は下流から上流へ向かうのみの測量となる。また、逆に下流から上流へ向かう測量では船の能力によって困難な場合もあり、上流から下流のみの測量となる。

また、ソナーヘッドから泡が発生し送受信器面を覆う場合、測量データに欠落が生じる。その対策として、写真2.1に示すようなソナーヘッドを整流にする流線

形のマウントがオブションとして用意されている。マウントが用意されていない場合は、製造業者から泡が発生しない船速を聞いておく必要がある。SEABAT シリーズでは20ノット以下ではソナーヘッドから泡は発生しないとのことである。写真には架台、キールや船底側への装備例が示されている。キール装備方式を採用している海上保安庁の測量船は精密測量で5～8ノット、それ以外では10～15ノットで測量されている。架台を使用する場合は揺れと歪みを考慮すると6～8ノットが限界と云われているが、設計時に強度等を十分に検討する必要がある。

(5)測量量

測量量は、測量間隔と毎秒ビームショット数の積で求まる。測量間隔は分解能であるため、(2-4)式より求めることができる。

測量量(m/s)

= 分解能 (m) × ビームショット数 (回/秒)

= 船速(m/s)

(2-4)



(a)流線形マウント



(b)昇降式架台



(c)キールへの装備例



(d)船底側への装備例

写真2.1 流線形マウント等の装備例

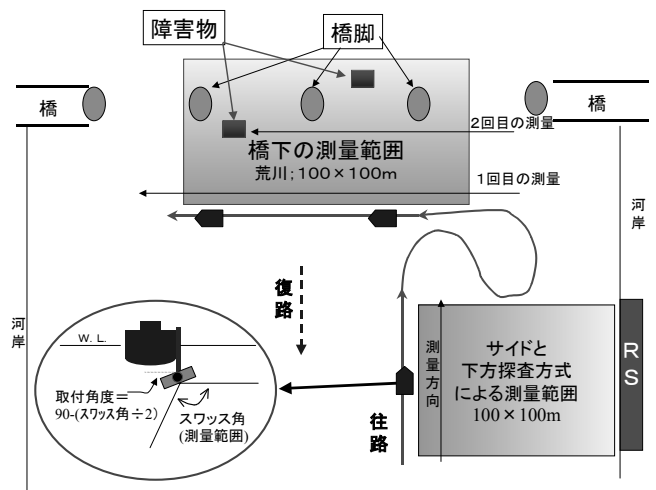


図2.6 測量方式と測量方法の概要

ビームの1ショットに必要なデータの記録容量は0.569KB(SEABAT 8101型の場合、水深データ、測位データ、動揺データ等)である。単位時間当たりの記録容量は下式より求まる。

$$\begin{aligned} \text{単位時間当たりの記録容量(KB/h)} \\ = 0.569\text{KB} \times \text{ビームショット数(回/秒)} \times 3,600 \\ (\text{時間換算値}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

(6)測量方式と測量方法

スワッス角の大きいソナーヘッドを傾けて測量するサイド方式では、下方とサイドの探査を実現し測量範囲を拡大できる。

サイド測量方式の概要と橋下とリバーステーションの測量方法を図2.6に示す。図中の丸囲に取付角度が示されている。スワッス角が150度(8101型)、120度(8125型)の場合、取付角度はそれぞれ30度と15度となる。

図は平面図で表したもので、リバーステーションや橋下の測量を優先し、測量水深レンジを大きくする。測量方法はリバーステーションや橋下の測量範囲100m×100mを測量水深レンジ50mで2回の測量で障害物を探査する。1.5m障害物とした場合、表2.5から船速は11ノット以内でなければならない。

この測量方法の場合、測量船が橋下を通過する前に橋下障害物の測量が終了しているため、橋下のGPSの受信不能は問題にしくなくても良くなる。

(7)適正なメッシュサイズ

等深線図(コンタ)や鳥瞰図はメッシュによって色分けされる。メッシュの水深値はメッシュ内にある測量データの平均値が用いられている。従

って、メッシュサイズやメッシュの切り方によって障害物の高さを小さく表示した場合、衝突の危険性があるため、メッシュサイズは障害物寸法の2分の1以下が適正である。

(8)潮位

大潮干潮位を零位とした(A.P.水位基準)天文潮位と実測潮位が気象庁等のインターネットで公開されており、実質潮位データを用いて、AP基準の水深データが得られる。実測潮位は天文潮位より川の増水等の理由で50cm程度違う場合があり、測量精度に影響する。インターネットで実質潮位が得られない場合は、測量当日の天文潮位を前日の実測潮位で補正を行うと測量当日の実測潮位と同等になる。計算式を以下に示す。

補正計算による予測潮位

= 測量当日天文潮位 + (前日23時実測潮位 - 前日23時天文潮位) (2-6)

その補正精度は実測潮位の±9%以内{(実質潮位 - 予測潮位) ÷ 実測潮位 × 100}である。

(9)作業限界基準

作業限界基準は、波高1.5m、風速10m/s、視程1km(安全作業基準)で、船長の判断による。測量実験で海上保安庁京浜港長へ提出した作業許可申請書の作

業中止条件は以下のとおりである。

- 1) 作業及び作業中においても気象情報に留意し、原則として下記の条件になった場合は、作業を中止する。また、この条件に達しなくても危険を感じた場合は、作業を中止する。①風速 10m/秒以上、②波高 1.0m以上、③視界 1000m以下
- 2) 事故及び異常事態が発生した場合は、作業を中止する。
- 3) 東京海上保安部からの中止の指示があった場合は、作業を中止する。

作業開始及び終了時には、東京海上保安部へ連絡する。

(10)測量例

測量例を図2.7に示す。これは、傾いた橋脚防御構造物と正常な橋脚防御構造物(図中の写真の丸印)の測深データを用いて等深線図と3次元鳥瞰図を作成した例である。

等深線図は測地座標と水深カラーによって水中障害物の位置情報、寸法、障害物の水深及び通航できるルートが分かる。

また、3次元鳥瞰図は立体的に寸法と水深が表示され、水中障害物の大きさが視覚的に確認できる。

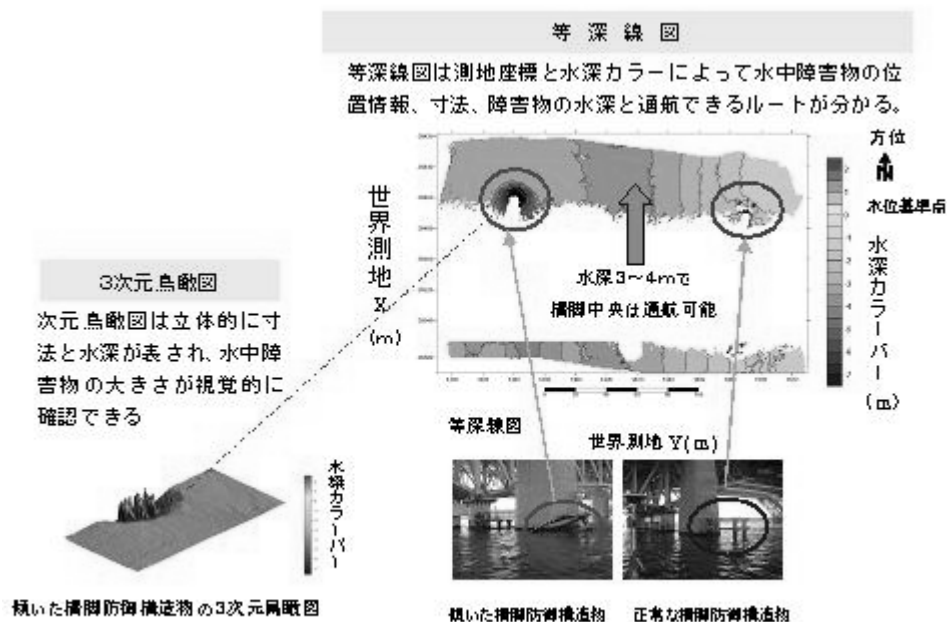


図 2.7 等深線図と3次元鳥瞰図表示の測量例

2. 1. 2 グリーンレーザによる測深

グリーンレーザを使った実用的な航空レーザ測深方式が開発されている。グリーンレーザはYAGレーザ(1,064nm)の第2高調波の波長532nm光である。測量船への装備を前提として、グリーンレーザを使った水深4mの斜め方向からの観測において測深が可能であるが、レーザービームは濁りによって減衰する。532nmビームの散乱減衰係数(K)と到達深度(D)の関係は、次式となることが知られている。

$$K \times D = 4 \quad (2-7)$$

分光透過率の相違から分類した海水タイプの散乱減衰係数は $K=0.8 \sim 0.04(\text{m}^{-1})$ となる。その場合の到達深度は $D=5 \sim 100(\text{m})$ となる。海域や河川によって測量できる水深が異なるため、測量箇所ごとの散乱減衰係数(K)を求め、濁度と測深限界を明確にする必要があり、グリーンレーザによる測深システムの開発と共に今後の課題である。

2. 2 橋等の倒壊物の探査

水面上構造物の3次元測量法として、電子光学式の距離測定をベースとしてレーザースキャナ方式が欧米で開発され、土砂崩れ等の地形測量実績が積み重ねられてきた。災害時においては、落橋の通航幅や高さ及び倒壊状態を3次元的に測量する必要があるため、レーザースキャナ方式測量装置の性能について調査

した。

2. 2. 1 3次元イメージングセンサ

3次元イメージングセンサは、電子光学式の距離測定器と2軸のビームスキャン機構によって、正確に定義された角度データとレーザ測距データによって3次元データが得られる。3次元データは①送信パルスと受信パルスの時間差から得られる距離と縦横の位置情報、②受信パルスの強さから得られる反射強度に関する数値と縦横の位置情報で構成される2種の画像が得られる。近赤外900nmのレーザーパルスを20KHzで発射し、フォトダイオード受光器で反射強度が計測される。送信パルスと受信パルスの時間間隔は時間計測ユニットの水晶クロック周波数でカウントされる。計算された距離データは内蔵のマイクロコンピュータへ送られ、垂直スキャン角や水平スキャン角によって求められた座標データを含めた測定データに処理される。

2. 2. 2 測量例

3次元イメージングセンサの性能を検証するため、実船実験により橋等を測量した。

3次元イメージングセンサの測量性能は分解能2.5cm、計測距離2～350m、水平スキャン速度約11度/秒である。この装置の特徴は、昼夜観測(特に夜間観測)、橋下を通行できる航路高さ、航路幅、径2.5cm以上のワイヤ等の測量が可能な点である。

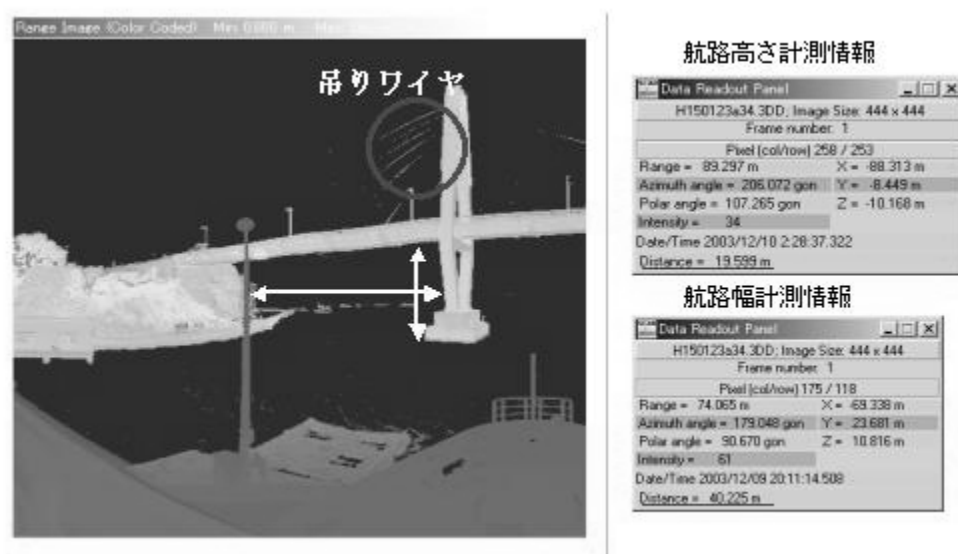


図 2.8 橋の測量例

図2.8に橋の測量例を示す。カーソルで画像上の2点を指示することにより航路高さや航路幅情報が表示される。図中の丸囲は測量された吊りワイヤである。

2.3 2章のまとめ

災害時緊急輸送船舶の航路内水中障害物情報や着岸岸壁の海底情報、橋等の倒壊状況をリアルタイムに水上輸送最適化システムのネットワークへ提供できるシステムとして、①マルチビームソナー測深システムと測量データの送受信システム、②グリーンレーザによる測深、③3次元イメージングセンサの測量性能について示した。

以下に本章のまとめを示す。

(1) マルチビームソナー測深システムと測量データの送受信システム

- ① システムを構成する機器の性能として、緊急時の測量システムに必要な機器の性能と要件を示した。
- ② 測量データの送受信システムとして必要な機器の性能と要件、更に全体システムの構成と注意点を示した。
- ③ 測量スピード（船速）、ビームショット数、測量対象物の大きさ、その対象物に当てるビームショット数、分解能の関係を表す計算式を(2-1)～(2-3)式、想定した障害物の大きさ1.5m角に対する測量限界を表2.5に示した。また、船速を上げた場合の課題や注意点について示した。
- ④ 単位時間当たりの測量量に関する計算式を(2-4)式、また、単位時間当たりの記録容量を(2-5)式に示した。更に、災害時における測量方式と測量方法を図2.5に示した。
- ⑤ 適正なメッシュサイズ（障害物寸法の2分の1以下）を示した。
- ⑥ 測量精度に影響する予測潮位の補正計算式を(2-6)式に示した。
- ⑦ 測量に当たっての作業限界基準を示した。
- ⑧ 水中障害物の位置情報、寸法、障害物の水深と通航できるルートが分かる等深線図や水中障害物の大きさが視覚的に確認できる3次元鳥瞰図で表した測量例を図2.7に示した。

(2) グリーンレーザによる測深

グリーンレーザによる測深における濁りに係わる532nmビームの散乱減衰係数と到達深度の関係を(2-7)式に示し、濁度と測深限界の明確化とグリーンレーザによる測深システムの開発が今後の課題であることを示した。

(3) 3次元イメージングセンサによる測量

3次元イメージングセンサによる測量原理や特徴を示した。また、測量例により橋下を通行できる航路高さと航路幅、径2.5cm以上のワイヤ等の測量が可能であることを示した。

3. 水上輸送最適化システム

トラック等、陸上輸送の代替輸送手段として河川・運河・海上を活用した船舶輸送が期待されている^{1), 2)}。特に、災害時では輸送態勢の多重化、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⁾、河川や船舶が果たす役割は大きいと考えられる。ここでは災害時を想定した船舶輸送能力の評価及びボトルネックの探索を目的として構築した船舶輸送シミュレーターについて報告する。輸送対象は救援物資と被災者とし、両者の輸送が別々に行われる場合と混在する場合について輸送上の問題点を把握した。さらに、ここで構築したシミュレーターはリアルタイム情報（シミュレーションの計算条件と異なる現実の条件に関する情報）への対応が可能となっており、このシステム構成と実船計測により動作検証を行った結果についてもまとめた。

3.1 救援物資輸送シミュレーション

船舶で輸送する救援物資として、生活水と食料などが納められたダンボール箱を考えた。本シミュレーションにより、関東地方を流れる主要河川や、中部地方の海上輸送量を大略的に把握することができた。さらに、輸送の妨げとなるボトルネックの要因といった今後の施策展開に際し極めて有益な情報が得られた。以下ではシミュレーション手法の概略に関して記述し、その後に関東および中部地方を例とした解析結果をまとめる。

3.1.1 シミュレーション手法の概略

解析手法にはマルチエージェントシミュレーションを採用した。主なエージェントは司令官、リバーステーション（荷降ろし地点）、船舶である。

エージェントは周囲の状況や条件に応じて自律主体として行動するが、ある規則に従ってエージェント同士の相互関係が構築されている。例えば、「司令官エージェントが示す行き先に船舶エージェントは向かう」、「船舶エージェントが被災地のリバーステーションに到着すると、リバーステーションエージェントは着栈の許可を与え、船舶エージェントはその許可を受けた後、着栈作業を行う」といった具合である。船舶エージェントの

場合は表3.1に示す自身が保持するIndex番号により、どのような状況にいるか認識し、その番号に対応した”Action”で示される判断、行動を行う。

表 3.1 船舶エージェントの行動規則

状況	Index	Action
係留地（運航前）	0	司令官の要請を待つ
係留地→供給基地	1	供給基地に着いたら index=2
供給基地で待機	2	着積順位をもらう 着積許可を得たら index=3
荷積み中	3	荷積み終わったら目的地へ向かう index=5
供給基地→被災地	5	被災地に着いたら index=6
被災地待機	6	着積順位をもらう。着積許可を得たら index=8
荷降ろし中	8	荷降ろし終わったら index=10
被災地→供給基地	10	基地に着き、司令官の指令待ち index=2、index=11 or index=20へ
供給地→係留地	11	係留地に着いたら index=0、翌日の作業開始時間に召集される。
供給地→係留地	20	翌日の作業開始時間に召集されない。

なお、航行を阻害する要因として、橋梁の高さ、橋梁の桁と水門の幅、河川幅、河川水深と船舶の大きさを考え、橋梁の落下、栈橋の崩壊等は考慮しない。そのため、河川は図3.1のようにノードとパスで表現され、ノードには、位置、橋梁高さ、水深などのデータが保存されている。

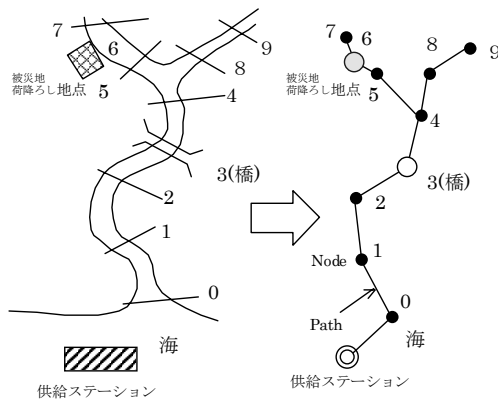


図 3.1 河川の表現方法の模式図

(1) 配船アルゴリズム

配船アルゴリズム、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。

- 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)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、すべての航路について航行の可否も含めて後述する $P_c(=Lc/T)$ を計算し、参照表を作成する。（(3)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 が最大となる供給地、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。

(2) 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、最大の順位は「物資の種類数 × 要求地数」となる。司令官はこの順位表を随時更新して、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。

$$P_s = D_{ij} / R_{ij} \quad (3-1)$$

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→タンポール箱、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。

(3) 参照表

表3.2には参照表の一例を示す。ここで要求地順位の行は(2)の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、式(3-2)より輸送能力 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。

表3.2 参照表の例

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△

船舶 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

$$P_c = L_{jk} / T_{ikl} \quad (3-2)$$

ここで

L_{jk} : 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、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。

3.1.2 救援物資輸送の解析例（関東地方）

解析対象水域は河川及び東京湾とし、河川は図3.2に示す、荒川、隅田川、小名木川を設定した。解析に用いる、船舶、貨物、輸送量等のデータを次にまとめる。



図3.2 解析対象河川とリバーステーションの位置

(1)船舶データ

日本船舶明細書により総トン数20トン以上100トン未満で船籍が東京湾内である船舶を調査した。また、河川を航行している船舶または、港等に停泊している船舶の保有会社を調査し、聞き取り及びアンケートにより河川航行船を調査した。これらの船舶について、総トン数、船長、幅、喫水、マスト高さ、航行速度、貨物区画面積、乗客数、積載量等を入手し、データが欠落している項目については入手済みのデータをもとに補間操作を行った。輸送物資は生活水と後述するダンボール箱の2種を考慮し、船種により積載する物資を検討した。その結果、解析対象船舶数は表3.3の通り、5種、291隻となった。生活水輸送船の船種は白油タンカーのみであり、生活水と白油の平均比重を考慮して、積載容量の81%を生活水の積載量とした。段ボール箱を輸送する船舶は客船と貨物船に分けられる。客船の場合は乗客1人あたり5箱を積載できると仮定して総積載量を算出した。貨物船は視認性、人手による荷役の安全性等を考慮し、貨物区画の面積に対して5段重ね（高さ2m）で積載量を計算した。また、航行速度は河川内で10ノットの上限を設け、海上では自船の航行速度を用いた。

表3.3 船種と隻数（東京湾内での調査）

解析対象船種	船舶数	積載可能荷種
屋形船	188 隻	想定ダンボール
水上バス	24 隻	想定ダンボール
押船、曳船+舢舨	20 隻	想定ダンボール
鋼材運搬船	5 隻	想定ダンボール
油槽船	54 隻	生活用水(又は燃料)

(2)河川、リバーステーションデータ

各ノードに保存される水深はA.P.O（干潮平均面）を用いた。また、河川に架かる橋梁及び水門もノードで表現され、桁高さ、桁幅、水門幅等のデータが収められている。なお、対象河川及び運河には橋梁が90、水門が3、閘門が1ヶ所設定されている。また、リバーステーションや供給地となるノードには、同時接岸隻数、荷役速度、要求物資量などのデータが納められる。なお、供給地では耐震強化岸壁⁴⁾の利用を考え、複数ある岸壁を羽田沖、1ヶ所で代表した。また、同時接岸隻数はその岸壁長の和から10隻と仮定した。一方、被災地側リバーステーションの船着場では同時接岸隻数を1隻とした。

(3)物資必要量

物資輸送の対象被災地は船舶が接岸できる設備をもつ地域とし、図3.2、表3.4に示す24ヶ所を被災地リバーステーション（荷降ろし地点）として設定した。物資の供給対象となる人口は各地域の人口密度と接岸場所を中心とする半径2kmの円内⁵⁾の面積を乗じ、大規模地震の被災率を30%⁴⁾として算出した。ただし、複数の被災地に対して描かれる円が重なる範囲については、計算する人口が重複しないよう均等に振り分けた。

① 生活水の必要量

生活水は1人が1日に運搬できる限界を18L（ポリタンク1杯分）と考え、これを1人1日消費量として各被災地の必要量を計算した。

② 想定ダンボール箱の必要量

ダンボール箱は、埼玉県、東京都の食料品、生活必需品備蓄量に関するデータ^{6) 7)}を参考に、飲料水、食料品（米、乾パン等）、生活用品（トイレットペーパー、タオル、医薬品、毛布等）を選定した。各物資の1人1日の消費量を1つのダンボール箱に収めることとし（以降、想定ダンボール箱）、7.6kg、64L（40x40x40cm³）の値が得られた。この値に補給対象人口を掛けて必要量を算出した。

(4)荷役速度

① 生活用水（又は燃料）の荷役速度
（白油タンカー）

タンカーの荷役は、積み荷役で陸側のポンプ、揚げ荷役は船内ポンプで行う方式が一般的である。供給地のポンプ能力は精油所での荷役に用いられるポンプ流量（約200～300 kL/hr）を参考に250kL/hr（=4.1kL/min）とした。船内ポンプは若干大きめの流量であるが、オーダーとしてみれば同等の能力とみて差し支えないため、同じ数値を用いた。

② 想定ダンボールの荷役速度

（押船、曳船及び舢、鋼材運搬船、旅客船）

想定ダンボール箱の荷役は人力で行うことを前提とした。荷役の速さは、人列の長さに関係なく、列の数で増減する。列の数は集まる人数によるため予測できないが、ここでは3列と仮定した。さらに、荷役の速さはブルワークを越えるダンボール箱の数で決まり、その値は1列あたり5～10秒に1箱が荷役されると仮定した。ここでは中間値7.5を切り上げ8（秒／箱）とした。よって3列÷8（秒／箱）=每秒3／8箱を荷役速度とした。

(5)解析結果

まず、シミュレーション結果の前に、各被災地へ到達可能な船舶数を水輸送船、ダンボール箱輸送船に分けて図3.3に示す。ダンボール箱輸送船（237隻）についてはほとんどの船舶がすべての被災地に対して物資を輸送できる。水輸送船については秋ヶ瀬棧橋(ST8)、小名木川沿いの被災地(ST20～23)に航行できる船舶がないことが分かる。原因は河川の水深が浅いためであり、ST8で1.7m、ST20～23で1.2m以下の喫水となる船舶が確保されなければならない。

よって、以下に示す解析では仮想水輸送船（船種：油槽船、喫水：1.1m、水積載量：100トン、航行速力：10ノット）を5隻付け加え、これを基本条件として解析を行う。

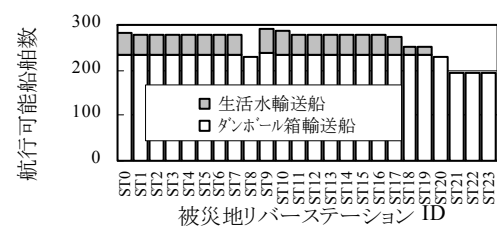
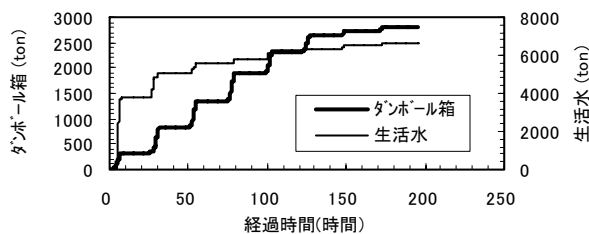


図3.3 各被災地リバースステーションへ航行可能な船舶数

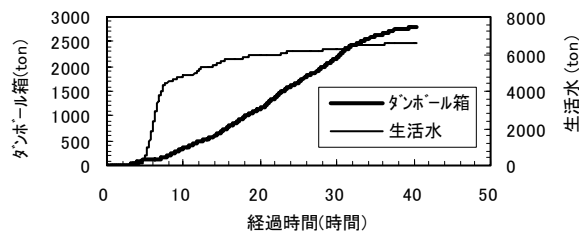
表 3.4 要求地の要求物資量

	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	366794	6602	2788

図3.4には1日8時間作業および24時間連続作業とした時の、水とダンボール箱の全被災地への総輸送量を時間履歴として示す。1日8時間作業では8.1日、24時間連続作業では1.7日で輸送を完了している。どちらの作業時間に対しても、先に水の供給が大きくなり、後にダンボール箱の供給が追いつく形となる。前節(2)の要求地優先順位表では、被災地、荷種に関して平等な供給を目指すことを考えている。よって、水とダンボール箱は同じように推移し、全被災地、全荷種がほぼ同時に要求量に達するはずである。しかし図ではダンボール箱の輸送が遅れている。これは、水輸送船とダンボール箱輸送船1隻当たりの輸送能力の差による。水輸送船の平均積載量は1隻当たり約25,000人分であるのに対して、ダンボール箱輸送船は560人分となっており、50倍近い差が生じている。初期には発送率（輸送率）を表す式(3-1)の Ps 値が0%であるから、水、ダンボール箱の優劣なく輸送を開始する。よって、水は1隻で輸送できる量が多いいため、初期に大きな輸送量を確保することができる。その後、初期に生じた水の大量輸送のひずみを除去すべく、ダンボール箱輸送船が重点的に配船され、徐々にその格差が減少していく。ダンボール箱輸送が遅れるのはこのためである。この結果から1日8時間作業の場合、初日の輸送量はダンボール箱340トン、水3,760トン、平均輸送量は1日当たりダンボール箱340トン、水820トンとなっている。なお、要求量は1日の消費量である。よって、24時間連続作業を行っても、輸送量は間に合わない。



(a) 1日8時間作業



(b) 24時間連続作業

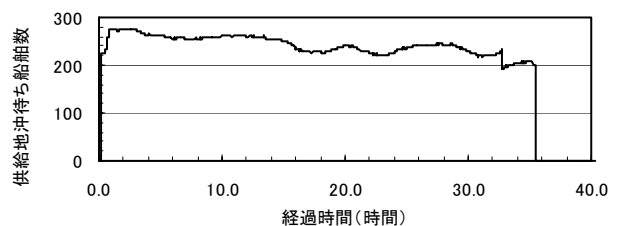
図3.4 全被災地への輸送量の時間履歴

次に荷役地における船舶の滞留状況を確認するため、24時間連続作業下の供給地の沖待ち船舶数、及び全被災地沖待ち船舶数の合計の推移を図3.5に示す。

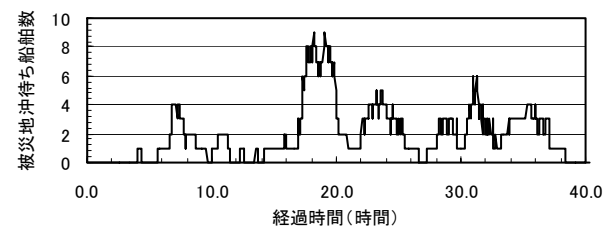
供給地では296隻の船舶のうち、200隻を超える滞留が見られる。一方、24ヶ所ある被災地では滞留は少なく、間欠的に0隻となる時間帯もある。よって、供給地における供給能力がボトルネックとなる状況が確認できた。

被災地の物資要求量は1日の消費量であるため、1日目のみ計算を行うこととし、荷役速度、同時接岸隻数等を変化させて改善効果を見てみる。

表3.5に改善項目の一覧と解析により観察されたボトルネックを、図3.6に要求量に対する輸送量の割合を示す。なお、Case0、1はそれぞれ前節の1日8時間作業、24時間連続作業と同条件である。Case2は供給地、被災地、両者の荷役能力を増加させた場合に相当し、Case3はCase0,1でボトルネックであった供給地の供給能力だけを増加させた場合である。なお、各改善効果の内容は仮に設定した状況であり、実現困難な条件も含まれることを注記しておく。



(a) 供給地



(b) 全被災地合計

図3.5 24時間連続作業時、沖待ち船舶数の推移

表3.5 改善項目と結果の比較

	Case				
基本条件の変更項目	0	1	2	3	4
1日24時間作業		○			○
荷役速度：水2倍、箱2.7倍			○		○
供給地同時接岸隻数24隻				○	
輸送量					
ダンボール箱 (トン)	336	1,602	955	523	2788
生活水 (トン)	3,760	6,170	5,985	4,114	6,602
ボトルネック ^{注)}	B, T	B	B, T	B, T, R	B

注) T:1日作業時間, B:供給地の供給能力, R:被災地の荷受能力

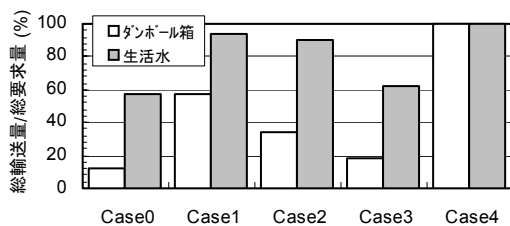


図3.6 全被災地への輸送率(輸送量/要求量)

図3.6より、各条件を単独で増加させても効果は見られるものの、輸送は間に合わない。一方、荷役速度の増加及び24時間連続作業を組み合わせたCase4では約17時間で任務が完了した。Case4を含むすべてのCaseで供給地側に滞留が起きていることから、船舶数は輸送を達成する上で十分であることを意味している。なお、本解析の基本条件では、できる限り現状の輸送能力を正確に評価する状況設定に努めた。しかし、船舶同士の対向、追い抜き等による航行速度変化、及び接岸作業にかかる時間を無視しており、輸送能力は過大に評価されている可能性がある。よって、河川からの供給のみで1日以内に輸送を完了するためには、Case4で示した条件を最低限確保することが望ましい。

3.1.3 救援物資輸送の解析例（中部地方）

前述のシミュレーターを活用し、中部地方においても救援物資輸送の解析を行った。ここで、輸送対象はダンボール箱のみとした。これより、本シミュレーターは入力データの入れ替えにより地域に特有な条件における解析が行え、汎用性があることが分かる。

愛知県が行った調査⁸⁾によれば、陸上の輸送網は堅牢であり、大震災（想定東海・東南海地震連動）においても名古屋市を含めた愛知県内では陸上輸送が機能すると考えられている。しかしながら、三河湾沿岸、知多半島、渥美半島へ通ずる道路は緊急輸送に大きな支障を来す恐れがあり、この地域が孤立する可能性が示唆されている。よって船舶輸送が有効となるのは三河湾、知多半島、渥美半島への輸送と考えられる。

さらに、愛知県の調査⁸⁾では、津波、液状化による港湾への影響も解析されており、多くの港や漁港が利用不能となることが報告されている。しかしながら、その条件下においても、三河湾内のいくつかの港は利用できる可能性が示されている。また、「名古屋圏広域防災ネットワーク整備・連携方策検討委員会」の報告書によると、名古屋港に耐震強化岸壁が整備とされており、さらに2005年に開港した常滑沖の中部国

際空港は、物資供給が可能な防災拠点としての可能性が考えられる。

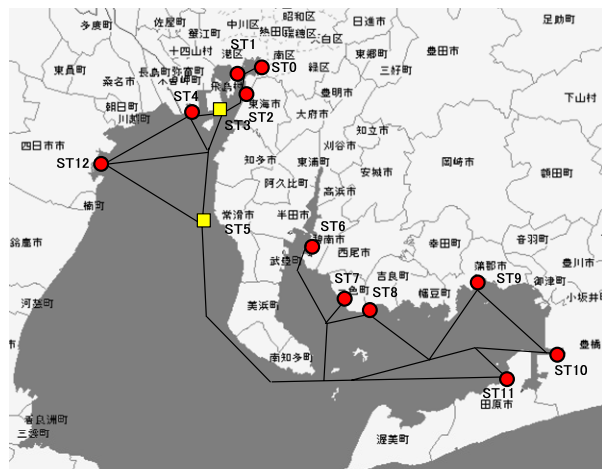


図3.7 解析対象領域と輸送航路網

(● 被災地物資荷受け地点、□ 供給基地)

表3.6 物資要求量(中部地方)

被災地荷役地点	記号	対象人口 (被災率30%を仮定)	タンホール箱必 要量(トン/日)
名古屋市(南区)	ST0	44,374	346
名古屋市(港区)	ST1	45,484	355
東海市	ST2	29,976	234
名古屋港	ST3	供給地	
弥富町	ST4	10,973	86
中部国際空港	ST5	供給地	
碧南市	ST6	20,344	159
一色町	ST7	7,302	57
吉良町	ST8	6,497	51
蒲郡市	ST9	24,632	192
豊橋市	ST10	109,457	854
田原町	ST11	11,094	87
四日市市	ST12	87,332	681
合計		397,465	3,100

以上の調査結果を踏まえて、解析地域の構成は、名古屋港（及び、又は、常滑沖、中部国際空港）を供給基地とし、想定東海・東南海地震の発災後にも利用可能な三河湾内（知多半島、渥美半島）の港を被災地の荷受け地点とする。さらに、耐震強化岸壁が備えられている三重県四日市港も被災地荷受け地点として解析対象とする。この条件から構成した輸送網を図3.7に示す。（図3.7は「白地図KenMap Ver.7」の地図画像を編集したものである）

(1)輸送物資

輸送する物資は関東地方の解析に用いた想定ダンボール箱のみとし、11ヶ所の荷受け地点周辺の

人口と被災率から前節3.1.2(3)と同様に考えて、要求物資量は合計3,100トンと計算された。各被災地の要求量を表3.6にまとめる。

(2)船舶データ

中部地方の船舶リストから利用可能と思われる船舶を表3.7のように抽出した。なお、中部地方では海上を利用するため、河川の利用を前提とした関東地方と異なり、喫水、マスト高さ等のデータは不要である。最低限、シミュレーションに必要なデータは

・積載可能量

(貨物船：積載面積に5段積み、

旅客船：定員数×5箱)

・航行速度

の2項目となる。

表3.7 船種と隻数(中部地方での調査)

解析対象船種	隻数	平均速力	平均積載量
旅客船(小型)	9隻	12.7ノット	8トン
押船、曳船+舢舨	56隻	10ノット	18トン
鋼材運搬船	20隻	6.9ノット	9.6トン
カーフェリー	10隻	14.5ノット	40トン

(3)解析結果

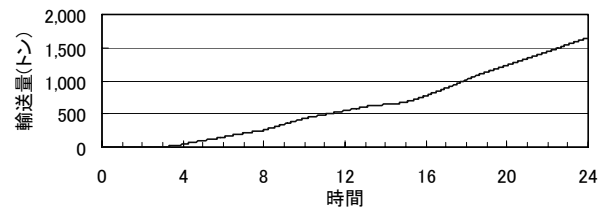
ここでは上記船舶数が変化した時の輸送量変化について結果を示す。なお、作業時間は1日(24時間連続)とし、船舶数は表3.7の全船舶が利用可能とした95隻、押船、曳船が10隻のみ利用可能とした49隻(約半分)、さらにその半数が利用可能とした24隻(約1/4)の3ケースで計算を行った。また、中部国際空港の利用可否についてもその有効性を確認するための解析を行った。結果を表3.8にまとめる。

表3.8 船種と隻数(中部地方での調査)

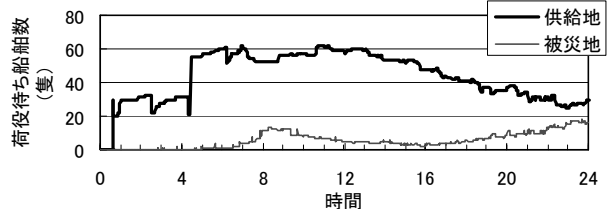
Case No.	同時接岸隻数		船舶数 ¹⁾	荷役速度	結果			
	名古屋港	新空港			BN ²⁾	輸送率	要求量(トン)	輸送量(トン)
0	10	0	95		B	0.53	3100	1643
1	10	0	49		(B,S)	0.47	3100	1457
2	10	0	24		S	0.27	3100	837
3	10	0	24	2.7倍	S	0.41	3100	1259
4	10	5	95		(B,D)	0.68	3100	2099
5	10	5	49		S	0.49	3100	1519
6	10	2	49		S	0.48	3100	1488

注1) 95隻:対象船舶全数、49隻:押船、曳船(舢舨)10隻のみ、24隻:49隻の半分

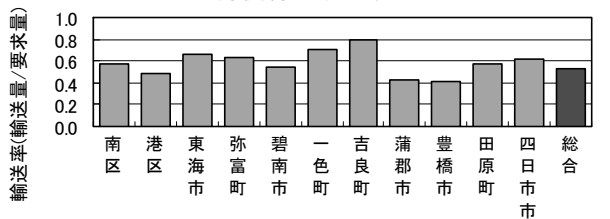
注2) ボトルネック(BN) B:供給基地(供給能力)、S:船舶数、D:要求地(荷受け能力)



(a) 輸送量



(b) 荷役待ち船舶数



(c) 輸送率

図3.8 Case0の解析結果、時系列

(a)輸送量、(b)荷役待ち船舶数、(c)輸送率

①供給基地が名古屋港のみの場合 (Case 0~3)

名古屋港の耐震強化岸壁の長さは500m程度である。この場合10隻が同時に接岸できるとする。表3.8の解析結果は船舶数の減少(Case 0→2)に伴い、輸送量も減少することを示している。Case0の輸送量、荷役待ち船舶数の時間履歴、各被災地への輸送率を図3.8にまとめる。この図(b)の通り、95隻が利用可能な場合、ボトルネックは供給能力であるため、これ以上船舶数を増加させても輸送能力は改善されない。よって、名古屋港のみが健全である場合の輸送量の上限は1,600トン程度となる。

一方、24隻のCase2の解析結果を図3.9にまとめる。図(b)の通り、供給地、被災地の船着き場とも荷役待ちの船舶数は低いため、ボトルネックは船舶数となる。よって、Case1のように49隻へ増加させると輸送量は倍近く上昇する。ただし、49隻でボトルネックは船舶数から供給能力へ移行しかけているため、50隻程度の船舶数がバランスのとれた状態と言える。(ここで、“バランスがとれた”とは、供給能力、荷受け能力がボトルネックにならない最大の船舶数を意味する。)なお、実現の可能性は低い、船舶数の確保が困難なCase

2の状況でも、荷役速度を2.7倍に上昇させると（JRコンテナの利用を考慮、全船舶積載可とする）Case 3のように輸送量1,300トン、輸送率40%程度に達する。

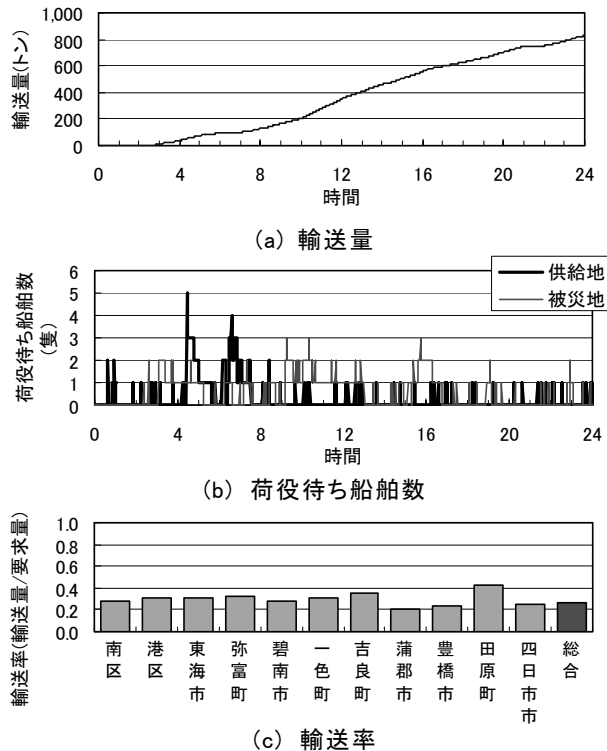


図3.9 Case2の解析結果、時系列
(a)輸送量、(b)荷役待ち船舶数、(c)輸送率

②中部国際空港も供給地となる場合(Case4～6)

名古屋港が健全でなおかつ中部国際空港が供給地（同時接岸隻数5隻）として考慮できる場合を考える。つまり、供給能力を増加させたことに対応する。この場合、供給能力がボトルネックであったCase 0はCase 4のように変化し、輸送量が1,600トンから2,100トンへ増加する。図3.10にはこのCase4の解析結果をまとめる。図(b)より、Case 0で見られた供給地での滞留は軽減されるが、被災地側の荷受け能力がボトルネックになりかける。よって、90隻程度がバランスのとれた状態と言える。

一方、船舶数が49隻以下であるCase 5はCase 1との対照である。Case 1の時点で船舶数がボトルネックになりかけていたため、Case 5で供給能力を増加させても大きな改善には至らず、船舶数が明らかなボトルネックとなる。なお、Case 6のように中部国際空港の同時接岸隻数を2隻としてもこの傾向は変わらず、輸送量もほぼ同じであった。

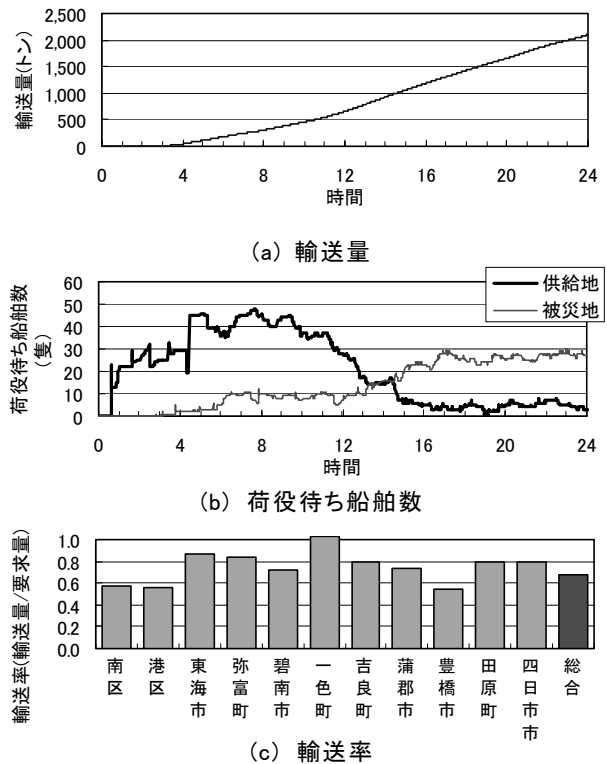


図3.10 Case4の解析結果、時系列
(a)輸送量、(b)荷役待ち船舶数、(c)輸送率

3.2 被災者輸送シミュレーション

ここでは物資輸送とは別に、被災者輸送を目的としたシミュレーターを構築し、図3.2に示した関東地方（隅田川、荒川、小名木川）における船舶による被災者輸送能力の把握を試みた。

3.2.1 輸送量需要調査

図3.2の河川ネットワーク内のリバーステーション間で被災者輸送需要がどの程度見込めるかを推定する。まず、阪神淡路大震災における被災者輸送の知見をまとめ、この水上輸送システムの活用方法を検討した結果、災害発生後3、4日後から生ずる「通勤通学」の需要に対して本輸送システムが有効に機能できることが判明した。そこで、平常時の通勤通学の交通量を算出し、災害時のシナリオを設定して被災者輸送人数をリバーステーション間のOD表（発地着地間移動人数表）の形式で求めた。なお、被災者輸送に利用される船舶は、水上バスや屋形船などである。

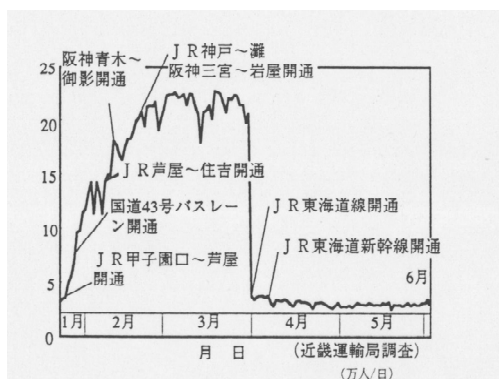
(1)水上輸送システムの活用状況の推定

阪神・淡路大震災における交通状況から水上輸送システムが活用される状況を推定する。

(1-1)阪神・淡路大震災における交通状況

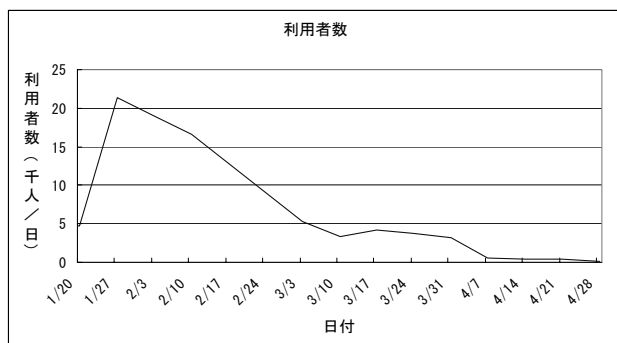
阪神淡路大震災における交通障害⁹⁾は、主に鉄軌道系交通施設の被害が大きかった。橋梁部の被害が多く、そのような区間については復旧までに数ヶ月を要した。駅部に大きな被害を受けた場所についても、復旧までに数ヶ月～1年を要しており、そのため、被災駅の通過や仮駅による暫定営業といった処置が行われた。

代替輸送に関して、バスと海上輸送が活躍した⁹⁾。代替バスの運航は、被災後約1週間後から始まり、利用者数がピークとなった時期（3月）には、通常時の鉄道輸送量の3割程度を代替していた。図3.11に代替バスの利用者数の推移を示す。鉄道不通区間が解消される6月下旬まで、代替バスの運航が行われていた。代替バスの運航区間は、鉄道路線の開通状況に合わせて、頻繁に変更が行われた。

図3.11 代替バスの利用者数推移⁹⁾

被災後数日で、鉄道のみを利用した阪神間の迂回ルート（三田駅経由）が開通したが、乗換駅となる三田駅や谷上駅で混雑が発生した。

臨時航路の開設は震災後数日で行われ、1月下旬には輸送量がピークとなっている。陸上交通機関を利用した経路が確立した（一部、バス代替区間が残る）時点で、水上輸送は概ね終了している（図3.12）。

図3.12 臨時海上航路の利用者数推移¹⁰⁾

被災後の道路交通量は、震災後1ヶ月で震災前の7割程度の水準まで回復している¹¹⁾。震災後3日以内に5割以上の人が、また2週間程度で9割以上の人が通勤を再開している¹²⁾。震災前に鉄道を利用して通勤していた人の3割程度が、震災後自動車利用に転換している。震災後3日間のマイカー利用者のうち、避難目的は8%、通勤目的は15%程度であった。

被災地からの人口流出は3～4%であった。また、避難所への避難者数は、被災後1週間あたりがピークとなった。神戸市の場合、全人口の約15%が避難所へ避難していた。

(1-2)被災シナリオと水上輸送システムの役割

関東圏で大震災が起きたときに陸上交通機関の被害状況（被災シナリオ）を次のように想定した。

鉄軌道系交通機関では、被災後1週間から数週間が経過した時点における都心部の鉄道は一部区間の不通、損傷により利用できない駅が残り、全面復旧には数ヶ月を要する。しかし、高密度な都心部の鉄道ネットワークは高い冗長性を持っており、上述する被害区間（箇所）を迂回する代替経路が存在する可能性が高い。運転を再開している路線（区間）においては、運転本数の減少、徐行運転等が行われるために、輸送力やスピードなどが、通常時よりも大幅に低下する。

道路系交通機関では、被災後1週間から数週間が経過した時点における都心部の道路は、一部区間の不通、損傷により利用できない区間・車線が未だ残る。復旧工事用車両などを優先するため、一般自家用車の乗り入れは制限される。鉄道不通区間を連絡する代替バスの運航が実施される。ただし、専用レーンが設置され、各地から応援の車両、人員が到着することにより、効率的な運用が行えるようになるまでには、1～数週間が必要となる。

その中で、水上輸送システムに期待される役割は、①鉄道不通区間を連絡する役割、②鉄道の不足する輸送力を補完する役割、③道路の通行車両規制に対応した代替交通手段④陸上交通機関による代替交通手段（代替バス、迂回鉄道ルート）の体制が整うまでの繋ぎ的な役割などがある。

こうした役割を、被災時に発生する主な目的別交通流動に対して推定する。目的別交通流動は次の3種類が想定される。

①被災直後の帰宅流動

発生は被災直後の短時間に集中する。流動方向は都心部から郊外部の片方向に片寄る。東京都が推計した帰宅困難者は約371万人である¹³⁾。被災

直後の水上輸送システムの運航は不可能ではないが
相応の事前の対策が必要である。

②徐々に回復する日常流動（通勤流動など）

通常時の流動パターンと同じだが、量的には通常時
よりも少ない。水上輸送システムは陸上交通機関（主
として鉄道）の代替となる。

③避難先への流動

被災直後～1週間に発生。流動方向や量の予測が困
難。徒歩、自家用車による移動が中心になる。水上輸
送システムは陸上交通機関の復旧が進んでいない被災
初期の段階における代替交通機関となる。

本調査では②徐々に回復する日常流動および、③避
難先への流動を採り上げる。

(2)災害時徐々に回復する日常交通量の推定

災害時徐々に回復する日常交通量には、通勤・通
学・買い物などがあり、大都市交通センサス¹⁴⁾の鉄
道定期券利用者データおよびパーソントリップ調査
データを用いて平常時交通量をまず求め、これを被災
シナリオの条件の下での推定値に変換して、災害時に
おける徐々に回復する日常交通量を求める。

(2-1) 平常時通勤通学交通量の推定

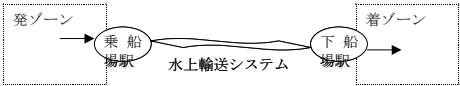
(2-1-1) OD抽出

水上輸送システムを利用可能な人流の発地と着地
（OD）を求める。通常の陸上交通機関から水上輸送
システムへと転換するパターンとしては、図3.13の3
通りが考えられる。ここで発ゾーンから乗船場または
駅へは2,000m（小名木川域ではRS間距離が短いので
1,200m）の範囲とした。

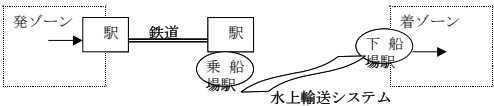
【通常時の経路】



① 通常時の経路の全部が水上輸送システムに転換
（パターン1）



② 通常時の経路の一部（端部）が水上輸送システムに転換
（パターン2）



③ 通常時の経路の一部（中間）が水上輸送システムに転換
（パターン3）

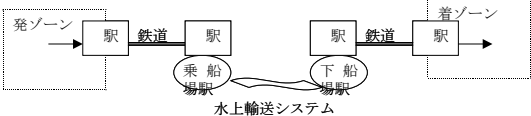


図3.13 水上輸送システム利用可能なODパターン

乗船場（リバーステーション）は貨物輸送で利用
した表3.4に示す24ヶ所である。乗船場と乗り継
ぎ可能な鉄道駅は表3.9に示すように31ヶ所あり、
うち乗船場との距離が1,000m以内は20ヶ所、乗船
場は13ヶ所で隅田川系が多い。

表3.9 乗船場と乗り継ぎ可能な鉄道駅

乗船場	乗り継ぎ駅、 距離（m）	乗船場	乗り継ぎ駅、 距離（m）	乗船場	乗り継ぎ駅、 距離（m）
小松川	（大東島）,1200	日の出*	日の出,200 浜松町,700	高橋*	森下,500
平井 水上S	（平井）,1100	新川*	八丁堀,700	扇橋 開門	（錦糸町）,1700
堀切*	堀切菖蒲園*,700 堀切,1000	浜町*	浜町,100 人形町,600	スポーツ 会館前	（錦糸町）,1700
新田	（王子神谷）,1600	両国*	両国,400	番所橋*	東大島,300
岩淵*	赤羽岩淵*,800	吾妻橋*	浅草,200～ 400	越中島*	月島,600 越中島,300 門前仲町,700
川口	（川口元郷）,1200	墨田区庁 舎前*	本所吾妻橋 500 業平橋800		
戸田	（戸田公園）,2500	桜橋	（曳舟）1200		
秋ヶ瀬 棧橋	（西浦和）,2300	千住*	京成開屋,500 牛田,600		
		東尾久	（町屋）,1600		
		荒川遊園	（尾久）,1100		
		神谷*	王子神谷,600		

注）表中の数字は乗船場から駅までの距離（m）
カッコのついた駅名は、最寄り駅であるが距離が1,000m以上のもの
大都市交通センサスの調査時点である平成12年10月現在に開業していた駅のみ対象

(2-1-2) OD別利用可能者数

大都市交通センサス調査¹⁴⁾の鉄道定期券利用者
ベースのOD別利用可能者を集計すると、415,516
人となった。次に、同じく大都市交通センサス調
査のパーソントリップ（PT）データからOD別利
用可能者数（鉄道利用、通勤・通学目的）を抽出
すると315,927人となった。定期券保有者は必ずし
も実際に鉄道を利用してはいないと考えられるの
で、人数はPTデータを採用して、鉄道定期利用者
データのOD別に割合を乗じて総数を315,927人
にし、鉄道定期利用者データの鉄道利用経路情報
を利用することとした。

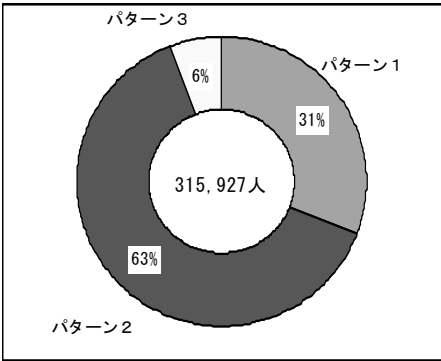


図3.14 鉄道からのパターン別
水上輸送システム利用可能者数

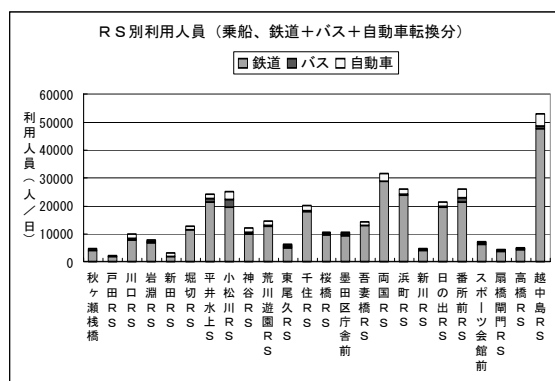


図3.15 RS別利用可能者数(乗船側)

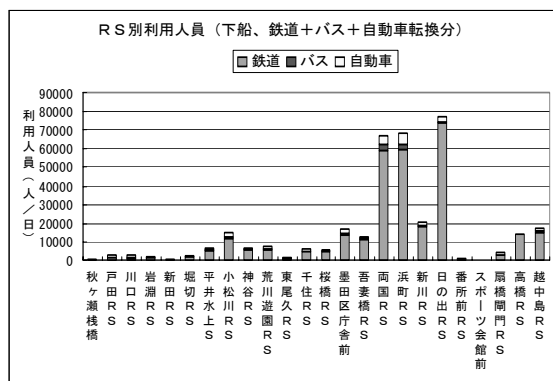


図3.16 RS別利用可能者数(下船側)

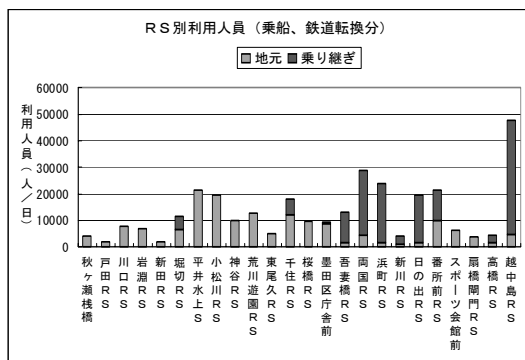


図3.17 乗継ぎの有無別利用可能者数(乗船側)

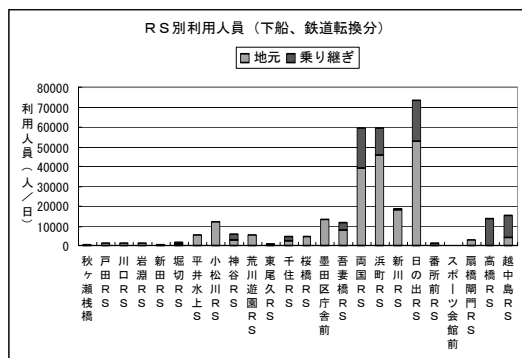


図3.18 乗継ぎの有無別利用可能者数(下船側)

図3.14に鉄道からの水上輸送システム利用可能者数を示す。パターン1は31%、パターン2は63%、パターン3は6%、（合計315,927人）となった。

表3.10 乗船場と乗り継ぎ可能な鉄道駅

	パターン1	パターン2		パターン3	合計
		乗車側	降車側		
鉄道	97,002	129,584	71,216	18,125	315,927
バス	11,639	-	-	-	11,639
自動車	20,550	12,905	-	-	33,455
合計	129,191	142,489	71,216	18,125	361,021

さらに、鉄道以外にバス・自動車からの利用者をPTデータから抽出し、表3.10のように合計約36万人となった。その約9割が鉄道である。この結果を乗船場別、乗船・下船別に見ると、まず図3.15のように乗船側は越中島の利用者が5万人を越え最も多い。次いで両国、など7ヶ所のリバーステーション（RS）で2万人を越えている。下船側では図3.16のように日の出、浜町、両国の3ヶ所が7万人前後の利用者数となっており、他のリバーステーションと比較して突出している。さらに、鉄道からの（への）乗り継ぎ利用の有無別に集計した（図3.17、3.18）。乗船側では、越中島、両国など都心側のリバーステーションで鉄道からの乗り継ぎ利用者が多いのに対して、平井水上や小松川などではリバーステーションへの直接アクセス利用が多い。下船側は、乗船側に比較して鉄道への乗り継ぎ利用者は多くなく、下船側の利用者数が多い、日の出、浜町、両国についても利用者の大部分が直接アクセス利用となっている。

リバーステーション間ODをみると、隅田川下流の各リバーステーション（両国、浜町、越中島）と日の出リバーステーション相互、および荒川水系（平井水上、小松川）と両国、浜町リバーステーション相互などで水上輸送システムへの転換可能利用者数が多い。

これらの利用可能ODのパターンからみて、水上輸送システムが最も有効に活用されるのは、郊外部よりも都心部の交通施設の被害が大きいケースの場合となる。

(2-2)災害時交通量（徐々に回復する日常流動）

被災時においては、通常時よりも交通量が減少すると考えられる。阪神・淡路大震災時においては、被災後3日以内に通勤を行った人が54%程度、震災後1ヶ月を経過した時点における被災地域内の発生交通量が、震災前の7割程度であったとの報告がある。

被災により、鉄道サービス水準は通常時よりも低下すると考えられる。阪神・淡路大震災時では、震災後1ヶ月を経過した時点においても不通区間が存在し、それを代替バスにより連絡していたため、通常時の2～3倍の所要時間が阪神間でかかっていた。

一方、水上輸送システムの平均速度を7.4ノットと仮定しリバーステーション間の所要時間を算定し、リバーステーションと鉄道駅間の乗り継ぎ時間および乗下船時間（10分）を考慮に入れ、鉄道利用との便益の比較において水上輸送システムが選択される選択確率を、以下の鉄道経路選択ロジットモデル¹⁵⁾ から求めた。

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{i=1,k} e^{V_i}}$$

$$V_i = \sum_{j=1,J} \alpha_j \cdot X_{ij}$$

ここで、

i : 経路

P_i : 経路*i*の選択確率

V_i : 経路*i*を利用したときの効用

α_j : パラメータ

X_{ij} : 経路*i*の*j*番目の特性

特性変数	単位	パラメータ
鉄道乗車時間	分	−0.0943
乗り換え時間	分	−0.112

水上輸送システム選択率は、鉄道サービス水準（所要時間）の変化により大きく変動し、通常時の平均選択率が約10%であるのに対して、2倍時で約20%、3倍時には約40%となった。

阪神・淡路大震災時の状況を参考にし、標準ケースとして、鉄道時間2倍かつ交通量比率70%ケースの場合における、水上輸送システム利用者数は約54,000人／日（通勤・通学目的）と推計する（表3.11）。このときのRS間のOD表は表3.12の通りである。

表3. 11 水上輸送システム利用者数の推定

		鉄道所要時間			RS間
		通常時	2倍	3倍	移動人員
流動量・通学	通常時(人)	36,167	77,227	142,092	361,021
	通常の70%(人)	25,304	54,047	99,454	252,715
	通常の54%(人)	19,495	41,720	76,811	194,951
水上輸送システムの選択率(%)		10.0	21.4	39.4	——

RS間利用者数をみると、「越中島→浜町」6,214人、「浜町→日の出」5,025人が特に利用者の多いODとなっている。また、両国、浜町、日の出を着地とするODに、利用者数が1,000人を超すものが多い。荒川水系では、「堀切→平井」の859人が最大となっている。

表 3. 12 水上輸送システムの利用需要標準OD表

RS間利用者数（×0.7、鉄道時間2倍）

	秋ヶ瀬 橋	戸田	川口	岩淵	新田	堀切	平井 水上 S	小松 川	神谷	荒川 遊園	東尾 久	千住	桜橋	墨田 区庁 舎前	吾妻 橋	両国	浜町	新川	日の出	番所 橋	ス ポ ー ツ 会 館 前	扇橋 閘門	高橋	越中 島	合計
秋ヶ瀬橋	0	3	1	14	0	0	0	0	9	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	29
戸田	0	0	29	11	0	0	1	0	52	1	0	1	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	99
川口	0	93	0	0	0	4	3	4	167	12	4	1	5	3	4	25	6	0	95	0	0	0	0	0	428
岩淵	0	4	0	0	1	4	5	1	164	144	7	29	3	3	3	19	33	4	12	0	0	0	0	3	439
新田	0	0	98	0	0	0	0	0	0	4	0	37	0	3	5	15	31	2	6	0	0	0	0	0	201
堀切	0	0	0	0	3	0	859	196	4	12	0	0	77	228	114	528	694	79	176	8	0	2	5	34	3,019
平井水上S	0	0	0	8	3	227	0	21	16	6	2	146	5	170	128	91	73	9	22	18	0	0	0	4	949
小松川	0	0	2	0	0	55	28	0	2	5	1	12	1	5	6	22	17	12	16	0	0	0	14	4	202
神谷	0	0	56	42	0	0	2	2	0	320	5	62	5	17	30	38	106	22	38	1	0	0	0	5	751
荒川遊園	0	1	4	184	0	20	4	3	245	0	0	76	15	10	28	130	163	15	38	1	0	0	0	8	945
東尾久	0	0	4	0	0	2	3	3	13	0	0	32	2	14	65	65	65	10	17	1	0	0	0	8	304
千住	0	0	3	5	4	0	41	12	25	247	8	0	36	93	731	1,352	1,619	165	429	2	0	0	0	119	4,891
桜橋	0	0	0	1	0	79	1	1	7	30	0	17	0	0	462	1,504	267	454	0	0	0	0	0	41	2,864
墨田区庁舎前	0	0	0	0	0	0	12	2	1	1	0	137	0	0	0	1,518	780	69	232	0	0	1	0	30	2,783
吾妻橋	0	0	0	0	0	16	6	0	1	1	0	45	0	0	0	2,250	989	61	155	0	0	0	8	29	3,561
両国	0	0	0	2	0	6	8	2	13	15	1	98	80	2,429	895	0	0	425	1,136	2	0	8	42	71	5,233
浜町	0	0	0	2	0	109	1	1	1	2	0	177	196	292	209	0	0	0	5,025	1	0	0	0	607	6,623
新川	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	8	26	0	183	0	0	1,858	0	0	0	0	0	2,076
日の出	0	0	2	0	0	0	0	1	3	4	0	46	33	41	279	900	2,746	2,090	0	3	0	2	0	358	6,508
番所橋	0	0	1	0	1	14	12	0	1	2	0	16	0	4	7	42	88	67	47	0	0	5	23	6	336
スポーツ会館前	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	43	12	26	26	0	0	133	44	291
扇橋閘門	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	7	52	200	32	103	2	0	0	0	287	687
高橋	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	4	3	5	19	152	0	52	187	1	0	0	0	234	659
越中島	0	0	0	1	0	5	1	5	3	3	1	16	7	99	82	688	6,214	0	2,962	0	0	31	51	0	10,169
合計	0	101	200	270	12	542	987	257	727	809	29	954	476	3,444	2,613	8,539	15,375	3,393	13,034	66	0	49	276	1,894	54,047

(3)避難交通量の推定

避難先への流動（避難流動）は被災直後から1週間の間に発生すると考えられる。これは避難先によって①最寄避難所、②知人宅等避難所以外、③首都圏から脱出、の3つに分けられる。①最寄避難所へは自宅から徒歩移動圏と考えられ、水上輸送システムが関与する余地は少ない。

ここで、避難所以外への避難者の夜間人口¹⁶⁾に対する比率として、阪神・淡路大震災時における圏域外への転居比率なみの3%を想定する。隅田川・荒川水域における夜間人口は約4,480,000人なので、避難所以外への避難者は約130,000人となる。

また、避難所以外への避難流動における水上輸送システム利用率を、通常時における通勤通学の水上輸送システム利用率とほぼ同じと仮定し、これを求めると11%であった。よって、避難所以外への避難者で水上輸送システムの利用者は約14,600人と推計される。

この利用者数は、1日に発生する量ではなく、被災後1週間程度の間には発生する避難流動の総量となる。したがって、徐々に回復する日常流動に比べて1桁少ない人数であるため、無視しても概算把握が目的である本解析に支障はないと判断した。

(4)移動需要量調査のまとめ

阪神・淡路大震災のデータを基に、関東圏大震災の場合の水上輸送システムの利用需要を推計した。通勤通学流動が最も多く、標準ケースとして約54,000人/日と推計された。この人数をRS間のOD表にまとめた。首都圏が被災した場合の交通流動の変化には不確定な要素が多い。本調査の検討ケースは、様々な状況が考えられる中での1ケースに過ぎないことに留意して用いられるべきものである。

3.2.2 被災者輸送の解析例

物資輸送シミュレーターで採用しているマルチエージェントシステムに、被災者輸送の問題に対応して2つのエージェントを新たに追加する。一つは、被災者輸送船エージェントであり、もう一つは被災者エージェントである。

被災者輸送船は物資輸送船の運航形態と大きく異なる。物資輸送船は、適切な供給地、需要地の組み合わせが輸送のたびに異なる。一方、被災者輸送船に関しては、あらかじめ決められた航路を往復あるいは循環する、いわゆる定期船の運航形態が妥当と思われる。

被災者輸送船は路線に沿って往復（各駅停車）を繰り返すが、移動需要を満たすべく輸送ネットワーク内を複数の路線であらかじめ構成する必要がある。一方、被災者エージェントは路線の情報を考慮して乗り換え等の旅程を自律的に決定しなければならず、この

過程をプログラム化する必要が生じる。以降の節ではネットワーク内の路線決定の過程と被災者の旅程決定アルゴリズムの概要について記す。

(1)路線の決定

図3.19の例では、ステーションST0とST1、ST1とST2が隣り合い、そのステーション間の輸送量はST0,1間とST1,2間と桁違いの差があることを意味している。

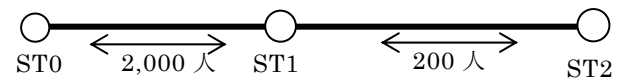


図3.19 輸送量と路線構成に関する説明図

路線をST0,1,2の往復航路で構成すると、船舶数はST0,1間の需要を満たすべく決定することになる。ST1,2間にとってこの船舶数は過剰であり、不効率な輸送システムとなってしまう。よって、路線の決定は、隣接ステーション間の輸送量をクラス(輸送量のオーダーが等しいものをクラスとした)分けし、各クラスをまとめて路線を構成する方針をとる。

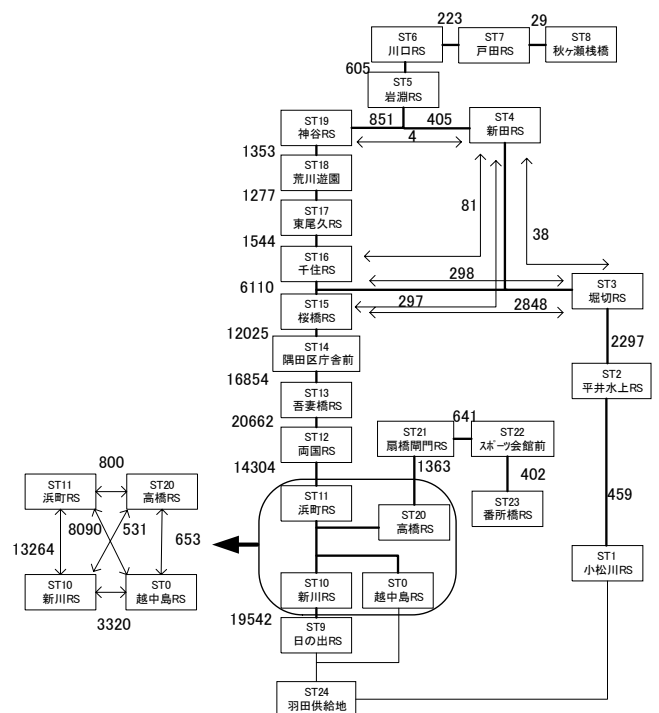


図3.19 ステーション間の輸送量

図3.20では表3.12に示したOD表と図3.2に示した輸送ネットワークから推計した、各ステーション間の輸送量を示す。この隣接ステーション間

の輸送量の常用対数をCとし、Cをクラス分けの指標として用いることにする。これより、

C=1.0～2.7	: 秋が瀬線(PR3),小名木川線(PR4)
C=1.0～3.2	: 小松川線(PR2)
C=2.7～3.2	: 荒川遊園線(PR1)
C=3.2～	: 小桜線(PR6),日の出線(PR0)
C=3.7～	: 越中島線(PR5)
その他	: 臨海線(PR7)

となり、クラス分けされた隣接ステーション間を結ぶ航路をまとめ図3.21の路線が得られる。なお、図3.20から隅田川、特に下流域の輸送量が圧倒的に大きいことが分かる。

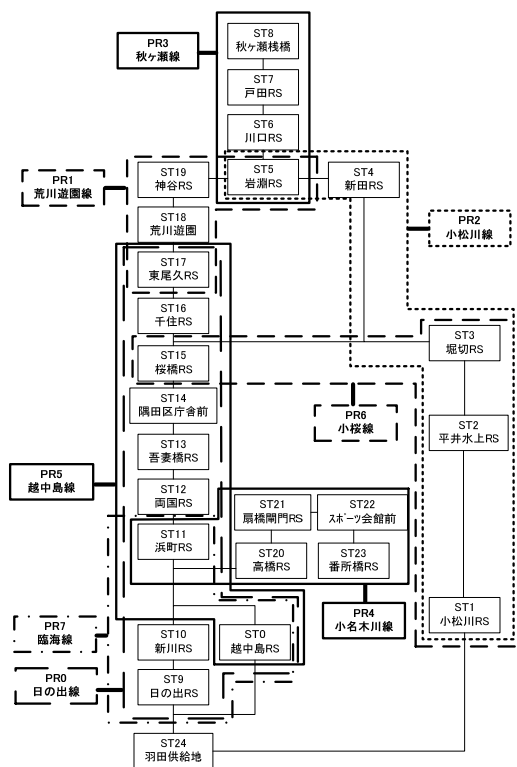


図3.21 設定路線

(2)被災者の旅程決定アルゴリズム

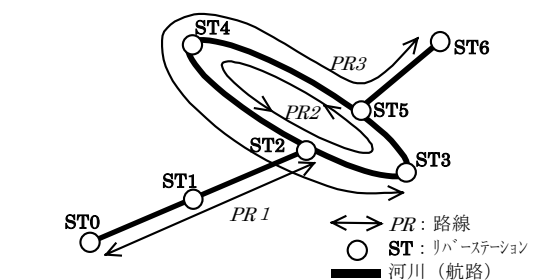
被災者エージェントの旅程決定アルゴリズムは#1,#2の2種類考案した。アルゴリズム#1で目的の旅程が決定できない場合、#2が起動する。

アルゴリズム#1の旅程決定方法

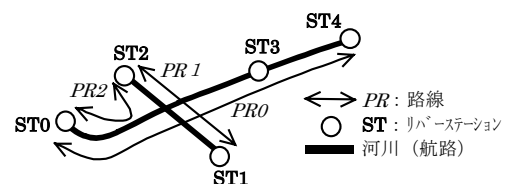
- ① 路線は通過順に並ぶST(ステーション)番号で定義され、(各駅停車以外は考慮しない)各被災者輸送船にはどの路線に属するかが登録されている。
- ② 出発ST、目的STを結ぶ最短航路を抽出する。

- ③ ②の航路のSTを通過順に並べる。
- ④ ①の路線を構成するST#のデータから逆に、③で選んだSTが属する路線#を得、隣り合うSTの両方に共通する路線を記録する。その際、条件として路線が保持するST#も向きが同じ必要がある。(往復以外に図3.21.1のPR2のような循環路線も考慮するため)
- ⑤ ④で抽出された、路線の全組み合わせを記憶し、旅程候補とする。
- ⑥ ⑤の旅程候補で乗り換え回数が最小のものを選択するが、複数ある場合はすべての組み合わせを保持する。(被災者は保持している旅程(路線)に合致する最初にやってきた船舶に乗船する。)

図3.22(a)の場合、このアルゴリズム#1によりST1からST6へ向かう旅程として、
ST1-(PR1)→ST2-(PR2)→ST3-(PR2)→ST5-(PR3)→ST6
が得られる。



(a)



(b)

図3.22 路線、航路の模式図

アルゴリズム#2の旅程決定方法

アルゴリズム#1では2つのステーションを結ぶ最短航路の利用を前提にしているため、図3.22(b)のような路線構成ではST0からST1へ向かう旅程が見出せない問題が起きる。

この問題の解決には、航路(河川)上に構成される路線がつながってさえいれば、旅程を見出せるアルゴリズムが必要となる。以下では、そのアルゴリズム#2について図3.22(b)を例として記述

し、アルゴリズムの各操作に対応した動作を図3.23に示す。なお、このアルゴリズムでは乗り換えの際、1度利用した路線およびステーションを2度利用しないことを前提としている。

- ① ステーションを行に、路線を列に並べた行列を作成し、各路線に属するステーションのセルに0を入力し、 $i=1$ とする。
- ② 次に、出発STであるST0を基準STとし、基準STの行で0が記述された列内を走査して、基準STの行以外で0が記入してあるセルに i を加算し、(この操作は乗船による移動を表現している。)さらに i を1増加する。
- ③ ②で値が変化したセルが属する行内で0が記述されたセルに i を加算し、(この操作は乗り換えを意味している。)さらに i を1増加する。
- ④ ③の操作で値が変化したセルのSTを基準STとして②③の操作を目的STであるST1の行内の0が他の数字に置き換わるまで繰り返す。



図 3.23 アルゴリズム#2 の具体例

- ⑤ 最終的に得られた行列内の数字を昇順でたどることにより旅程が決定できる。上の場合、
 No.0 : (ST0,PR0) (ST0,PR2)
 No.1 : (ST2,PR2) (ST3,PR0) (ST4,PR0)
 No.2 : (ST2,PR1)
 No.3 : (ST1,PR1)

が得られ、この組み合わせのうち連続する3つのNo. (上の例では、No.0,1,2およびNo.1,2,3) から取り出した (ST, PR) が行列内で直角な位置関係であることが要求される。これより、最終的に以下の組み合わせだけが旅程の候補となる。

ST0→(PR2)→ST2→(PR1)→ST1

なお、複数の旅程がある場合は、さらに、最小距離となる旅程を採用する。

(3)解 析

まず、図3.21で示される各路線を独立に解析する。例えば「路線PR0を独立路線として解析する」とはOD表で出発、目的STがPR0に属する輸送量のみを入力して (他は0人) 解析することを意味する。その後、図3.21の全路線を組み合わせた解析を行う。この際、各路線に投入する船舶数と輸送能力との関係を観察する指標として、飽和隻数を定義する。

(3-1)飽和隻数

飽和隻数、 C_{sat} とは路線に就航できる有効な船舶数で、それ以上船舶数を増加させても、輸送量の増加や所要時間の短縮が見込めない隻数を意味している。模式図を図3.24に示す。

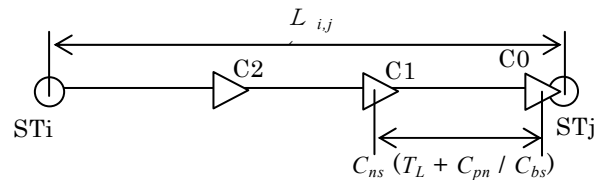


図3.24 飽和隻数導出の模式図

今、船舶C0がステーションSTjに到着したとすると、接岸時間+乗降時間の間、このステーションは他の船舶が利用できない状況になる。よって、次にSTjにやってくる船舶C1の最適な到着時刻はC0の離岸時刻であり、C1がC0と隔てる距離は、C0の接岸時間+乗降時間にC1の航行速度を乗ずればよい。つまり、ステーション間距離とC0,1間距離との比が飽和隻数となる。なお、往路復路で考えると飽和隻数は2倍になる。また、STi, j間に他のステーションがあってもC0, C1の離岸と到着に関するタイミングの関係は変化しない。飽和隻数を式で表せば、

$$C_{sat} = 2L_{ij} / \{ C_{ns} (T_L + C_{pn} / C_{bs}) \}$$

ここで

- C_{sat} : ステーション i, j 間の飽和隻数
- L_{ij} : ステーション i, j 間の距離
- T_L : 接岸離岸時間
- C_{pn} : 旅客定員
- C_{bs} : 乗降速度
- C_{ns} : 航行速度

なお、被災者輸送船に利用できる船種の候補として、屋形船、水上バスが挙げられる。3.1.2節の関東地方における調査結果から、この船種についてまとめると、隻数：212隻、平均定員：103人(定員総数：21,843人)というデータが得られる。なお、

平均定員数は100人程度であるが、500人を越す船舶も8隻含まれている。

(3-2)独立路線の解析

図3.21に示した各路線に投入できる船舶数を把握してみる。解析対象とする路線は、PR0,5,7の3路線とし、移動需要が最も大きな隅田川下流域のステーションを含む。

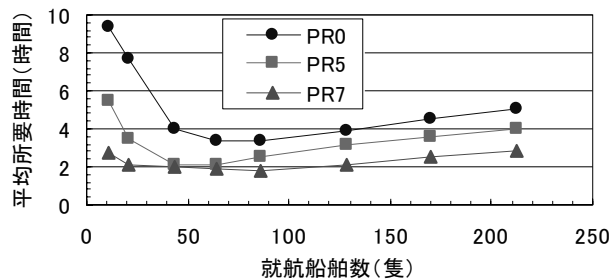


図3.25 独立路線解析の結果

表 3.13 独立路線の予想結果

路線	L (km)	所属 ST数	T _c (分)	OD _i (人)	T ₁₀₀ (分)	ΔT _{sat} (分)	C _{sat} (隻)	C _{nd} (隻)	C ₃₀ (隻)	独立路線用 隻数
PR0	20.9	10	181	44148	0.6	3.3	54	295	6	54
PR1	8.2	4	68	1124	24	3.2	21	3	2	3
PR2	18.9	5	143	1411	19.1	2.9	49	7	5	7
PR3	14.1	4	106	155	174	2.9	37	1	4	4
PR4	5.8	5	58	522	52	3.8	15	1	2	2
PR5	13.7	8	124	24173	1.1	3.5	36	111	4	36
PR6	11.4	4	89	1550	17	3.0	30	5	3	5
PR7	8.1	5	73	21860	1.2	3.5	21	59	2	21
合計							262	482	28	132

L : 路線の片道距離
 T_c : 路線の往復時間{=2Lx1000÷310(m/分=10ノット)+ 接岸、乗降時間(2.5分×ST数)}
 C_{sat} : 飽和隻数
 OD_i : 独立路線内の被災者輸送人数
 T₁₀₀ : 路線内全 ST の乗船待ち人数が 100 人となる時間=100 ÷ (OD_i÷270 分)
 ΔT_{sat} : 飽和船団の ST への到着間隔
 C_{nd} : 路線内で乗船待ち人数が 100 人を越えないために必要な隻数
 C₃₀ : $T_c \div T_{100}$
 所属STに30分間隔で船舶が接岸するために必要な隻数= T_c ÷ 30

この3路線は互いにステーションを共有しているが、これを独立に解析してみる。よって、表 3.12 の OD 表で出発、到着、両 ST が解析対象路線内に含まれる輸送量だけを利用する。また、ステーションに集合する被災者は4時間半(6:00~11:30)をかけて均一に集まるとした。図 3.25 には航路に就航させた船舶数と被災者が経験した平均所要時間を示す。

図から各路線とも就航隻数が数十隻までは隻数の増加により所要時間も減少し、より早く移動が完了する。しかしながら、それ以上に船舶数を増加させると所要時間が増加し、不用意な船舶数の増加はかえって悪化を招くことが分かる。

表3.13には各路線別に解析した飽和隻数を示す。なお、作表の際、次の仮定を行った。

- ・ステーション間は最短距離を航行し、航行速度は10ノットとした。
- ・離接岸時間の和は1分とし、船舶の平均定員数が100人であることから、乗降速度を100人/分¹⁷⁾として、乗降時間は1.5(分)とした。
- ・人の集合する時間は4.5時間(6:00~11:30)とし、この時間に一様に集合する。

これより、表内の飽和隻数はほぼ図3.25の所要時間が最小となる隻数に一致している。また表では、C_{nd}(路線内で乗船待ち人数が100人を越えないために必要な隻数)及びC₃₀(所属STに30分間隔で船舶が接岸するために必要な隻数)も合わせて計算されており、最終列が各独立航路へ就航させる船舶数である。なお、この最終判断は次式による。

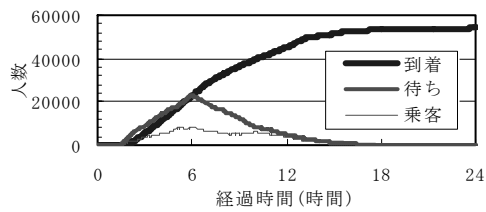
$$\text{独立路線の船舶数} = \min\{C_{sat}, \max(C_{nd}, C_{30})\}$$

(3-3)被災者輸送解析

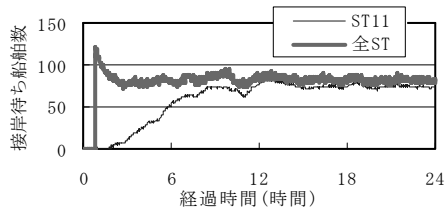
前節で独立路線に対する基本的な輸送量の傾向が解明された。これより全路線の解析を進める。この解析では、複数の路線に、同時に船舶が就航するため、各路線を航行する船舶の干渉が起こる。特にST11浜町では、4つの路線の船が接岸するため、大きな滞留が予想される。まず、表3.13の船舶数をそのまま適応してみる。解析時間は24時間とし、被災者は各STに6:30~11:00の4時間半の間一様に集合するとした。解析結果を図3.26に示す。なお、図中0時は午前5:00である。

ほぼ全員が24時間以内に目的地へ到達しているが、ST20からST1,2へ向かう被災者は目的地へ到着できなかった。旅程距離が長いことと、船舶が滞留するST11での待ち時間が長かったことが理由である。図(a)では乗船待ち人数が集合完了時刻11時頃(図では6時間)で2万人にも達する。この人数は11時まで単調増加していることから、時間あたりの集合人数と船舶への乗船人数の釣り合いがとれていないことになる。

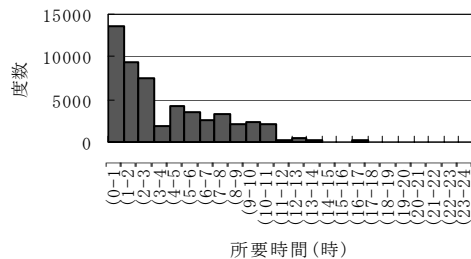
このつりあいをとるために必要な船舶数は表3.13のC_{nd}であり、隅田川の3路線以外はこの隻数を上回る設定である。よって、図中の乗船待ち人数はほぼ隅田川沿いのステーション内の人数となる。また、図(b)で示される通り、全ステーション合計の接岸待ち船舶数(船舶の滞留隻数)は80隻程度であるが、大多数はST11での接岸待ちであり、予想された現象が起きた。また、図(c)は所要時間の頻度分布で、多くの被災者が数時間で目的地へ到達している。この結果、全被災者の平均所要時間は3.8時間であった。



(a) 到着、乗船待ち、乗船人数



(b) 接岸待ち船舶数



(c) 所要時間の度数分布

図3.26 132隻就航時の解析結果

そもそも、独立な路線による飽和隻数を基礎としたため、複数の路線が乗り入れるST11で大きな滞留が起きた。過剰な船舶数は図3.25で見られたように、かえって所要時間を増大させる。そこで、船舶数を減少させて所要時間の変化をしてみる。

ST11を航行する路線以外では、大きな滞留が見られないため、就航船舶数を減少させる対象路線は隅田川の3路線、PR0,5,7のみとした。結果を所要時間と就航隻数の関係として図3.27に示す。

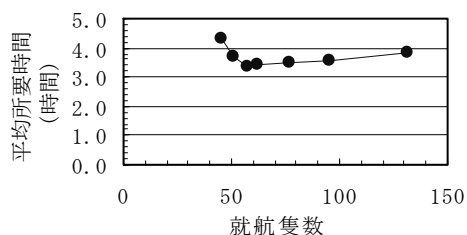
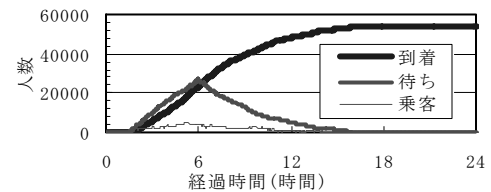


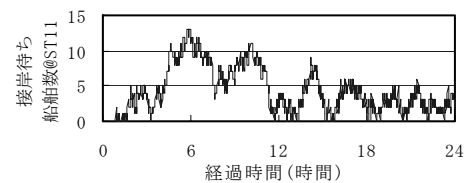
図3.27 全路線への就航隻数と所要時間の変化

表 3.14 最適な就航船舶数

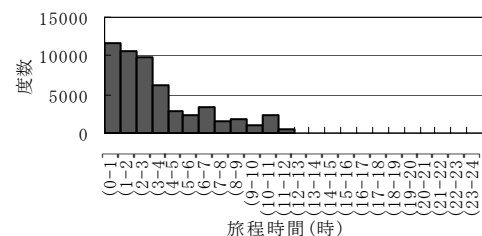
路線名	路線記号	独立航路解析による就航隻数	最適就航隻数
日の出線	PR0	54	18
荒川遊園線	PR1	3	3
小松川線	PR2	7	7
秋ヶ瀬線	PR3	4	4
小名木川線	PR4	2	2
越中島線	PR5	36	11
小桜線	PR6	5	5
臨海線	PR7	21	7
計		132	57



(a) 到着、乗船待ち、乗船人数



(b) 接岸待ち船舶数



(c) 所要時間の度数分布

図3.28 57隻就航時の解析結果

図3.25と同様、極小値を持つ曲線が得られており、最適船舶数が50～60隻程度であることが示された。この時の平均所要時間は船舶数を半数以下にしたにもかかわらず、図3.26での3.8時間に対して3.4時間と短縮されている。就航船舶数を57隻としたときの各路線の船舶数を表3.14に、解析結果を図3.28にまとめる。図(b)の通り、ST11での船舶の大きな滞留は改善され、図(a)では乗船者数が小さくなっている。これは、接岸待ち船舶の乗船者数の減少を意味している。また、図(c)の所要時間の頻度分布でも、短時間で目的地へ到着する人数が増加している。

(4)対 策

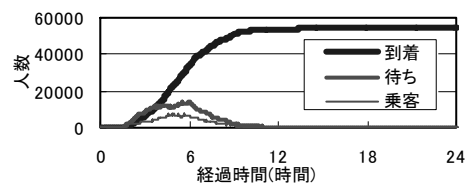
現在の条件下における解析結果から、小名木川の路線も含めて4つの路線が乗り入れる浜町(ST11)で船舶の滞留隻数が大きく、所要時間を悪化させている。よって、乗降時間短縮、すなわち同時接岸隻数の増加により、輸送時間が改善されると考えられるが、浜町ST11のみの改善は意味をなさない。1ヶ所のSTで乗降速度を改善しても、同じ路線内の他のステーションへ負荷が移るだけであることは容易に想像できる。よって、隅田川沿いPR0,5,7に属する全ステーション(ST0越中島、ST9日の出、ST10新川、ST11浜町、ST12両国、ST13吾妻橋、ST14隅田区庁舎前、ST15桜橋、ST16千住、ST17東尾久)で同時接岸隻数を2隻とした。この改善により、飽和隻数は単純に2倍になるだけなので、PR0,5,7の船舶数を前節の最適値の2倍とし、それぞれ36、22、14隻、計72隻、それ以外の就航船舶数は変化させず全路線合計93隻による解析を行った。この就航隻数を表3.15にまとめ、結果は図3.29に示す。

表 3. 15 最適な就航船舶数

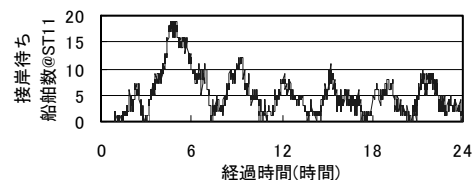
路線名	路線記号	隅田川下流域の ST の同時接岸隻数	
		1 隻	2 隻
日の出線	PR0	18	36
荒川遊園線	PR1	3	3
小松川線	PR2	7	7
秋ヶ瀬線	PR3	4	4
小名木川線	PR4	2	2
越中島線	PR5	11	22
小桜線	PR6	5	5
臨海線	PR7	7	14
計		57	93

図(b)のST11における接岸待ち船舶数から、このステーションの能力が限界に達し、これ以上、船舶を受け入れられない状況である様子が描かれている。よって、これ以上、船舶数を増加させても、大きな効果は期待できず、かえって、所要時間が長くなる場合も考えられる。図(a)から、人が集合する時間(図中の1.5時間～6時間)の間に乗船待ち人数の推移が大きく上昇せず、横這いになる時間帯も示され、時間当たりの集合人数と乗船人数の釣り合いが示唆されている。この改善項目と解析結果の比較をまとめると次の通りである。

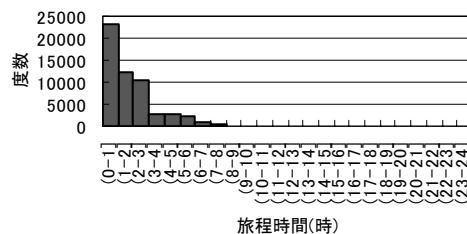
改善項目 : 隅田川下流域のステーションの同時接岸隻数: 1隻→2隻
 船舶数 : 57隻 → 93隻
 平均所要時間 : 3.4時間 → 1.8時間
 平均混雑度 : 91% → 86% (被災者が経験した混雑度)



(a) 到着、乗船待ち、乗船人数



(b) 接岸待ち船舶数



(c) 所要時間の度数分布

図3. 29 57隻就航時の解析結果

改善前と比べ、混雑率が落ちていることから、多少輸送効率が落ちているものの、平均所要時間は約半分に減少している。図3.27の結果と併せて、PR0,5,7路線のみ船舶数を増減させた時の平均所要時間を図3.30に示す。

これより、同時接岸隻数の増加による効果が明確に捉えられ、理想的な船舶数以上の就航隻数を設定すると、改善前後で平均所要時間が1/2程度にまで減少できることが示されている。また、上で示した93隻の船舶数はほぼ最適化された隻数であり、ST11浜町のみ同時接岸隻数を増加させても、あまり効果がないことが読みとれる。

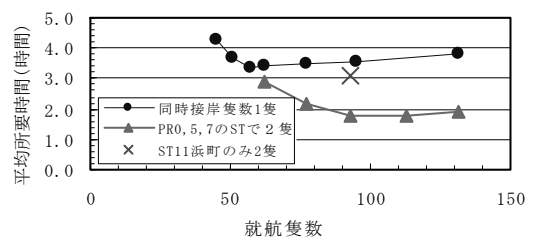


図3. 30 就航隻数と所要時間との関係

(5)被災者輸送のまとめ

関東地方をモデルケースとして、54,000人あまりの被災者輸送シミュレーションを実施した。ここで設定した解析条件下では、全被災者の平均所要時間が3～4時間程度と推定され、定期船のような運航形態をとる場合、船舶の滞留が原因で被災者の所要時間が増加する現象が見られた。よって、むやみに船舶数を増加させても、かえって事態を悪化させることが判明し、最適な船舶数が存在することが明らかになった。現状の施設を利用することを前提とした場合、本条件下で平均所要時間が最小になる船舶数は東京湾周辺に在籍する、屋形船、水上バスなどで満足できる隻数であった。また、輸送を滞らせる大きな原因は隅田川下流域のリバーステーションに集中する被災者の乗降速度であることが分かった。

3.3 物資と被災者の併存輸送解析

3.1.2で示した関東地方を対象とした物資輸送と、3.2の被災者輸送が混在する場合の解析結果について述べる。

(1)解析条件と結果

輸送時間は24時間とし、船舶は朝5時に一斉に活動を始め、被災者は前述の通り6:30～11:00にステーションに集合する。また、船舶が滞留しているステーションでは、物資輸送船より、被災者輸送船を優先的に接岸させる方針をとった。よって、物資輸送船が接岸できるタイミングは、被災者輸送船が各ステーションの待ち行列に並んでいない状況に限る。（なお、ここで解析する物資輸送船は離接岸作業にかかる時間が設定されており、この作業時間を考慮せずに解析した3.1.2の輸送量と若干異なる。）

被災者輸送の解析で見たように、現状における理想的な船舶数は50～60隻程度であり、図3.27から、これより多くても少なくとも利用者の所要時間が大きくなる。被災者の輸送を優先的に考えると、この隻数は変化させない方が良い。よって、ここでは物資輸送船の船舶数を変化させてみる。前節の被災者輸送の解析に用いた屋形船、水上バス57隻は固定し、その他のダンボール箱輸送船と生活水輸送船については両輸送船の比率や輸送能力の分布が大きく崩れないよう配慮した。物資、被災者（往路のみ）輸送率について図3.31、表3.16にまとめる。

物資輸送船の隻数の上昇に伴い、物資輸送率が上昇し、被災者輸送率は落ちてくる。100隻程度で被災者、生活水輸送率に変化がなくなり、100隻越えてからダンボール箱輸送率の上昇が止まる。被災者は9割程度輸送できる結果であるが、目的地へ到着できなかった

被災者を除いた平均所要時間は物資輸送船がない場合に比べ、2倍以上（7～8時間）に増加している。

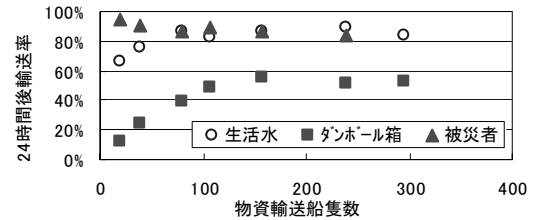


図3.31 物資輸送船隻数と輸送率の関係

表3.16 輸送船隻数と輸送率の関係

輸送船団	物資輸送船	296	239	158	106	79	39	20
(隻)	(水輸送船)	(59)	(59)	(40)	(26)	(20)	(10)	(5)
	(箱輸送船)	(237)	(180)	(118)	(80)	(59)	(29)	(15)
	被災者輸送船	57	57	57	57	57	57	57
輸送率 (%)	生活水	84%	89%	86%	83%	86%	75%	66%
	ダンボール箱	53%	52%	55%	49%	39%	24%	13%
	被災者		84%	87%	89%	87%	90%	95%
輸送量 (トン)	生活水	5573	5863	5673	5473	5673	4973	4366
	ダンボール箱	1474	1448	1528	1369	1101	682	353
	被災者		45404	46805	47999	46866	48815	51124
被災者(到達者のみ)の所要時間(時間)		7.6	8.8	7.9	7.2	7.4	6.2	

次に、被災者輸送を行わない場合の物資輸送率を表3.17に示す。

表3.17 被災者輸送を行わない場合の輸送率

物資輸送船(隻)	158	106	79
生活水	86%	84%	86%
ダンボール箱	56%	50%	42%

この結果は図3.31、表3.16と変化がない。つまり、被災者輸送船を優先的に接岸させる方針であるにも関わらず、物資輸送船は被災者輸送の影響を受けていないことになる。

(2)考 察

物資輸送が被災者輸送船の存在に影響を受けない理由としていくつかの要素が考えられるが、その1つが図3.32で示される。図中1つの点は1つのステーションに対応している。物資要求量（ダンボール箱要求量も生活水要求量と比例している。）が大きなステーションで被災者の乗降人数は小さく、逆に、乗降人数が大きなステーションは物資要求量が小さい。物資輸送船の配船方法では、要求量が大きなステーションへより多くの船舶が向

かう性質があり、被災者輸送船では乗降人数が大きなステーションへ多くの船舶を就航させている。

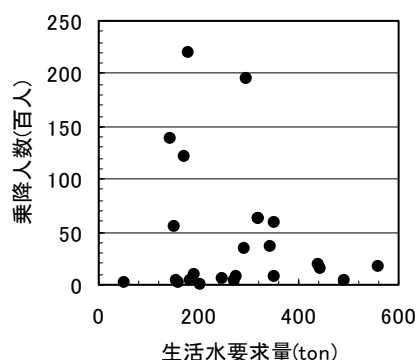


図3.32 ステーションの乗降人数と物資要求量の相関

しかしながら、図3.32は、船が集まりやすいステーションが物資と被災者で異なることを意味し、物資輸送船は容易に空いている船着き場に接岸できることになる。被災者輸送船の就航隻数が多い、隅田川下流域であっても、飽和隻数を超えないよう調整された船舶数が運航されているに過ぎず、飽和隻数自体、平均された数値を用いて計算されている。実際にはばらつきがあり、飽和隻数の定義で示したようなスムーズな船舶の入れ替えが必ず起きるとは限らない。そのため、その狭間を縫って物資輸送船が接岸するようである。表3.18には物資輸送船の平均荷役時間と被災者輸送船の平均乗降時間を本解析で仮定している接岸時間とともに示す。これより、被災者輸送船のステーションでの船の入れ替えは頻繁に起こることが分かり、前述した「狭間」が起りやすく、物資輸送船は難無く接岸できるために被災者輸送の影響を受けないことになる。

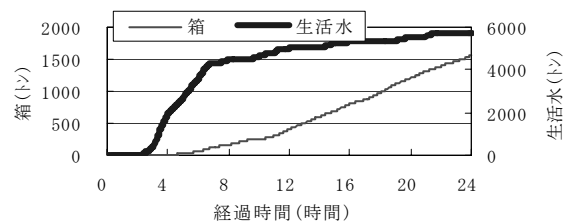
表3.18 平均荷役、乗降時間と接岸時間

船 種	平均荷役、乗降時間	接岸時間*
生活水輸送船	103分	3分
ダンボール箱輸送船	31分	3分
被災者輸送船	2分	1分

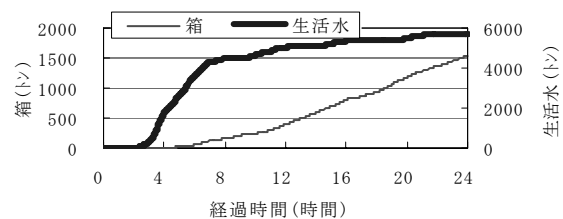
*満載、満員を仮定した平均値

一方、被災者輸送は物資輸送船の影響を大きく受けている。図3.31では被災者輸送船の約1/3、わずか20隻の物資輸送船団においても、輸送率は100%を到達できなくなり、所要時間は物資輸送船がない場合の2倍近い6.2時間となった。前述の通り、物資輸送船は容易に接岸でき、一端接岸してしまうと、表3.18の通り被災者輸送船と比較して長時間岸壁を占有してしまう。物資輸送船に占有されるステーションに被災者

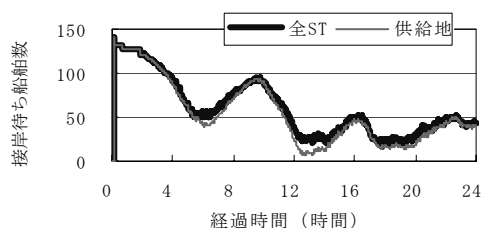
輸送船は団子状態で接岸作業を待つことになって、大きな影響を受ける。



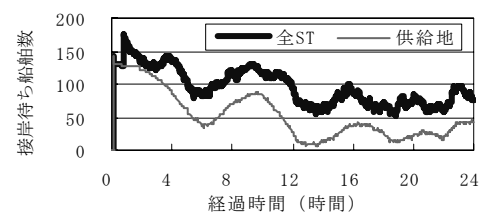
(a) 物資到達量(被災者輸送無し)



(b) 物資到達量(被災者輸送有り)



(c) 接岸待ち船舶数(被災者輸送無し)



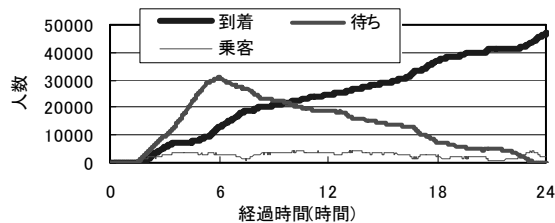
(d) 接岸待ち船舶数(被災者輸送有り)

図3.33 物資、被災者到達量と接岸待ち船舶数の推移

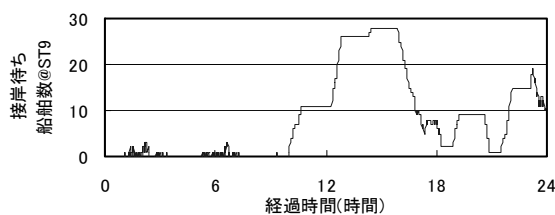
図3.33には被災者輸送を行う場合と行わない場合の物資輸送量、及び接岸待ち船舶数を示す。このときの貨物輸送船は水輸送船40隻、ダンボール箱輸送船118隻の計158隻である。

被災者輸送のあるなしに関わらず、図(a)(b)より物資到達量の推移に大きな違いは見られない。前述の通り、物資輸送は被災者輸送の影響を受けないことがこの図からも確認できた。また、図(c)から、全ステーションの接岸待ち船舶数のほぼすべてが、供給地における接岸待ちであることが分かり、船舶数が上下しながら減少している。よって、物資供給能力がボトルネックからはずれかけてい

る状況である。図(d)では、被災者輸送船が参加している分、全ステーションでの接岸待ち船舶数が図(c)に比較して増加しているが、物資輸送船だけが接岸する供給地の傾向は図(c)と大きく変わらない。この図からも物資輸送船が被災者輸送の影響を受けていない状況が確認できる。



(a) 到達、乗船待ち、乗船者数の推移



(b) ST9(日の出RS)での接岸待ち船舶数の推移

図3.34 貨物、被災者輸送混在下における被災者輸送の推移

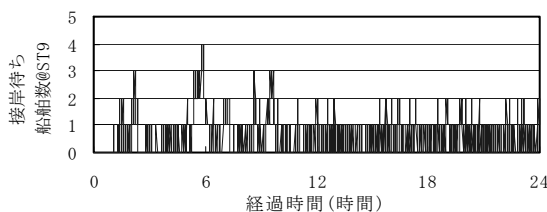


図3.35 被災者輸送のみのST9(日の出RS)の接岸待ち船舶数の推移

一方、被災者の輸送状況を図3.34で示す。物資輸送船が併存しない図3.28の結果と大きく異なり乗船待ち人数は長期間大きな数字で推移する。一方、到着人数もなめらかな曲線ではなくなり、階段状に上昇していく。ST9での接岸待ち船舶数の図で大きな船舶数が記録されているが、この時間帯で物資輸送船の荷役が行われ滞留を引き起こしている。なお、被災者輸送のみの同ステーションでは図3.35のような船舶数の推移であり、滞留隻数の違いが明確に示されている。

(3) 物資と被災者の併存輸送解析のまとめ

前章で構築した被災者輸送シミュレーターを、関東地方の主要河川である、荒川、隅田川、小名木川へ適用し、被災者輸送と物資輸送が混在する、より複雑な条件のもと解析を行った。解析の結果、被災者輸送船

の隻数は物資輸送量に影響を与えず、逆に物資輸送船の隻数は被災者輸送率に影響を与えることが判明した。よって、物資輸送船は被災者輸送船の存在が無い状況とほぼ同じ輸送量の推移を示し、物資供給能力がボトルネックになりやすい傾向は変わらなかった。

なお、少数の物資輸送船であっても、被災者移動の所要時間に与える影響は大きく、物資輸送自体が被災者輸送のボトルネックを生み出す可能性が示唆された。

3.4 リアルタイム情報処理機能

ここまで記述したプログラムの機能は災害前の事前評価を前提にしたものであり、輸送量の概算を目的としている。そのため、細かな被災状況、すなわち計算条件を反映する機能を有していなかった。これは、実際の災害時にどのような状況になるのか、正確に予測することが困難であることに起因する。一方、発災後では、この予測困難な被災状況、具体的には、「どここの船着き場が利用可能であるのか」、「どの被災地がどの物資を必要としているのか」といった情報は、ある程度正確に把握できるはずである。そこで、発災後にシミュレーションが貢献できる機能として、効率的な輸送を行える運航計画、配船計画の立案、といった活用方法が考えられる。特に発災後の限られた時間で、被災状況を考えながら、輸送量を確保すべく、船舶1隻1隻に的確な指示を与えていく過程は複雑であり、船舶数が多くなると計算機の支援が必須となる。そこで、輸送量を概算するシミュレーターに改良を加え、リアルタイム情報を処理する機能および、各船舶の運航計画、船着場の管理計画を出力する機能を付加した。

(1) リアルタイム情報処理

以下に示すようなリアルタイム情報を処理する機能を持たせた。なお、2)の河川修正状況は2章で示したリアルタイム3次元測量システムの測量結果が活用される。

- 1) 割り込み配船指令：臨時便の追加
- 2) 川状況修正：橋梁落下等、航行不能航路（ノード）の出現
- 3) 供給地・被災地船着場の状況修正：新要求地、供給地の設置、同時接岸隻数の変化
- 4) 荷役速度の変化
- 5) 船舶情報修正：位置修正、航行速度の変化

また、PC内のリアルタイム情報処理の流れを図3.36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日分の運航計画を作成する。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し、船舶、船着場の計画を出力する。なお、24時間のシミュレーションの計算時間は1分程度で終了できるため、修正された1日分の計画は即座に得ることができる。

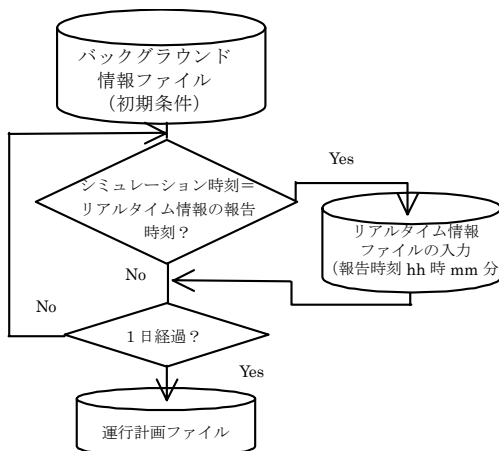


図3.36 リアルタイム情報処理の流れ図

(2)船舶位置自動修正機能

リアルタイム情報の多くは発生頻度が限られると考えられ、システムへの入力にはキーボードによる操作で対応するよう設計されている。しかし、船舶位置情報については、計算による予想位置と現実の位置の違いが頻繁に発生することもありうるので、キーボード入力では状況に追従できない可能性がある。そこで、図3.37に示す「リアルタイム船舶位置情報自動収集システム」、すなわち、GPSを搭載した船舶から自動的に位置情報を収集するシステムを構築した。この「リアルタイム船舶位置情報自動収集システム」は、現在東京湾や伊勢湾などにおいて土砂や石材運搬船の航行管理のために運用中である「COS-NET：船舶航行監視システム」（測位衛星（株）製）を基礎としている。さらに、「リアルタイム船舶位置情報自動収集システム」をシミュレーター本体と結びつけることにより、シミュレーション予測位置と現実の位置の乖離を自動認識し、あらかじめ設定された閾値を越えた場合には、新たにシミュレーションを実行して、現実に合わせて最適な輸送計画を出力するシステムを構築した。

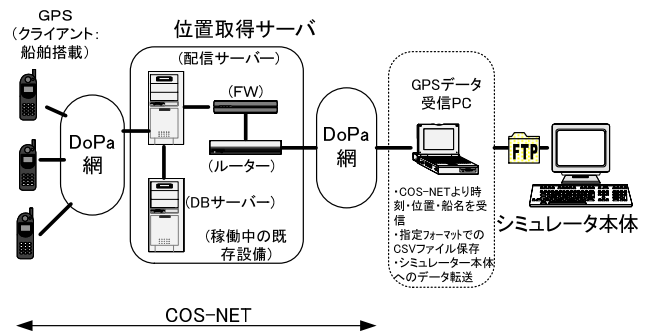


図3.37 リアルタイム船舶位置情報自動取得システム概要

以下、システム内におけるデータの流れについて概略を記述する。各船舶に搭載されたGPSにより測定された位置データはNTT ドコモが提供する双方向パケット通信網、DoPa経由で、測位衛星（株）が保有する船舶航行監視システム「COS-NET」に送られる。一方、GPSデータ受信PCにはFOMAが搭載されており、DoPa経由で定期的に船舶航行監視システム「COS-NET」へGPSデータを取得する通信を行う。GPSデータ受信PCに得られたGPSデータはLANを介して接続されているシミュレーター本体が納められたPCに定期的に位置情報と取得時刻が書かれたCSVファイルを生成する。

次に、シミュレーター側の処理過程について記述する。図3.38ではこの処理過程の流れ図を位置修正以外の一般的なリアルタイム情報処理も含めて描いている。

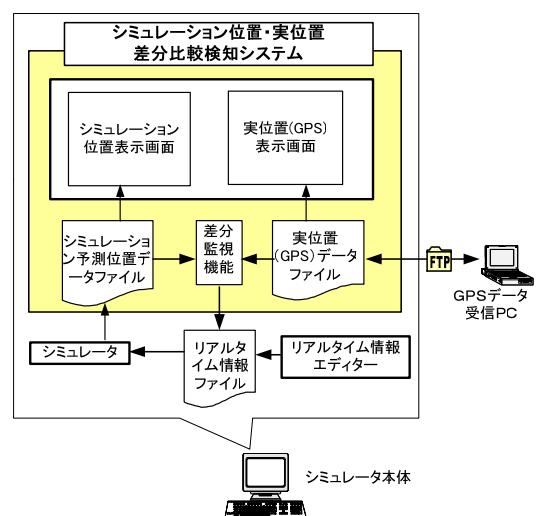


図3.38 シミュレーターの処理過程(シミュレーション位置、実位置差分比較検知システム)の流れ図

まず、前述の通り、あらかじめ最初にシミュレーターを起動させて1日分の運航計画を作成する。この結果には船舶の位置情報の時間履歴も含まれている。次にシミュレーション予測位置、実位置差分比較システムが起動し、GPSデータ受信PCから送られてくる位置情報CSVファイルが生成されるディレクトリを監視し、最新のGPSデータを取得する。シミュレーターで出力された予測位置と最新のGPSデータ（実位置）との比較から、両者の距離があらかじめ設定された距離以上に乖離している場合、リアルタイム情報ファイルに該当船舶、時刻、修正位置を記述し、シミュレーターを再起動させる。シミュレーターはリアルタイム情報ファイルに記載された内容を反映させて修正された運航計画を出力する。

なお、修正内容が記述されたリアルタイム情報ファイルを介した処理過程は、船舶位置修正のような自動処理だけでなく、手入力による修正情報にも対応しており、図にあるように、リアルタイム情報エディターによる修正項目を取り込んで再シミュレーションを行うことも可能である。

(3)実船試験による動作検証

「リアルタイム船舶位置情報自動収集システム」は非常に複雑な処理過程であり、いくつもの小さなシステムの組合せで実現されている。この「リアルタイム船舶位置情報自動収集システム」が滞りなく実行可能であることを確認するため、関東運輸局、東京海運支局をはじめとした協力体制の下、実船試験（参加船舶数9隻）による動作検証を行った。

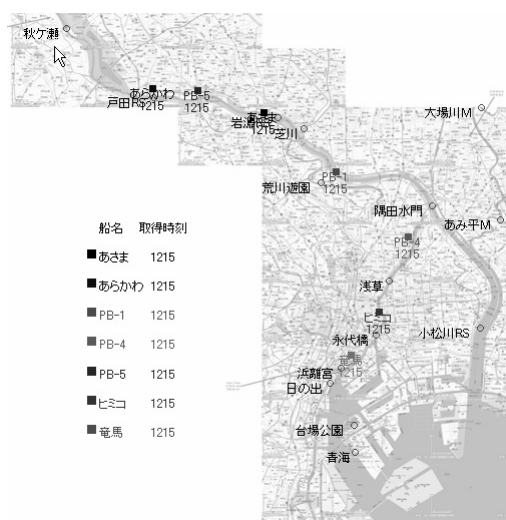


図3.39 計測されたGPS位置データのプロット例
(12:15頃)

図3.39に計測されたGPS位置データのプロットを示す。今回、GPSデータは5分間隔で船舶から船舶航行監視システム「COS-NET」へ送信され、船舶航行監視システム「COS-NET」とGPSデータ受信PCとの間では2分間隔でデータが送信されている。また、通信状態が悪い場合は過去の位置データのうち、最新のデータが送信され続けることになっている。

図3.40では試験に参加したある1隻のプレジャーボート（PB-5）について、シミュレーションによる予測位置とGPSデータによる実位置との差を時間履歴として示す。今回は位置修正機能の作動条件となる、実位置と予測位置との差は5kmに設定した。図中、○印で示された時刻でリアルタイム情報の位置修正機能が作動したことを示している。（なお、5kmを越えた時点で位置修正されるため、○の点は5kmを越える直前のデータ送信位置を示している。）

この実験により、前述した複雑なシステムがダウンすることなく、機能することが確認できた。

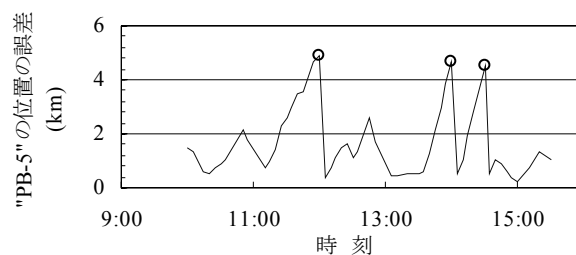


図3.40 シミュレーション予測位置と
実位置との差（○は船舶位置修正が機能した点を
示す。）

3.5 3章のまとめ

「水上輸送最適化システム」として、災害時という特殊な条件下で利用可能な船舶による輸送シミュレーターを開発し、救援物資、被災者輸送の解析を行った。関東地方については物資と被災者の両輸送形態を考慮し、ボトルネックや概算輸送量の把握から荒川、隅田川が持つ潜在的な輸送能力が明らかになった。一方、中部地方については地域の特性を考慮して、救援物資の海上輸送について解析を行った。これより、本シミュレーターはデータの入れ替えにより、地域に依存せず解析が実施できることが示された。さらに、このシミュレーターは事前評価における概算輸送量計算やボトルネック解析だけでなく、手計算では困難な発災後の配船計画作成機能も兼ね備えている。発災後の利用を考慮することから、シミュレーション条件と異なるリアルタイム情報にも対応して修

正された配船計画も出力できる。また、発生頻度の点から手入力が困難と推測される船舶位置修正のリアルタイム情報に対しては、船舶から発信されるGPS位置データを取り込み、自動処理する機能を備えている。このシステムは、動作検証を目的とした実船試験を行い、良好な結果が得られた。

4. おわりに

災害時緊急輸送システムを構成する3項目のうち、海上技術安全研究所が担当した2つのシステム、「リアルタイム3次元測量システム」および「リアルタイム情報に対応した水上輸送最適化システム」についてまとめた。3次元測量システムでは、災害時用としてリアルタイム測量を可能とする水中測量システムを開発した。これによって迅速に測量結果を活用できるようになった。水上輸送最適化システムでは、基本となる輸送シミュレーターの開発を通して支援物資や被災者の概算輸送量、輸送の妨げとなる要因（ボトルネック）といった重要なデータを出力し、防災計画に資するとともに、災害時にリアルタイムに配船指令等を出力できるシステムを開発した。これらのシステム開発によって、技術的基礎を確立し、災害時に河川・沿岸の水上輸送が有効であることを示した。

ここでは2つのシステムの概略だけでなく、その検討過程、解析結果や考察についても記載したが、さらに詳細な情報は提出された各報告書^{18),19)}を参照されたい。

謝 辞

本研究は国土交通省技術研究開発委託費（総合政策局）により実施しました。また、海洋産業研究会が主催する「災害時緊急輸送システムの開発に係る研究会」では横浜国立大学の角委員長をはじめ、委員の方々から貴重な御意見を頂きました。さらに、実船検証試験に関しては、「河川舟運活性化検討委員会」を主催する関東運輸局海事振興部船舶産業課に御尽力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省荒川下流工事事務所（現国土交通省）、荒川物流計画検討業務報告書、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) 運輸省港湾局（現国土交通省）、臨海部防災拠点マニュアル、平成9年3月
- 5) 東京都、防災船着場整備計画、平成11年6月
- 6) 社団法人 海洋産業研究会、河川・沿岸域におけるローコスト防災情報・支援システムの研究報告書、平成12年度
- 7) 埼玉県防災会議、埼玉県震災対策計画、平成11年11月
- 8) 愛知県、愛知県東海地震・東南海地震等被害予測調査報告書、
- 9) 阪神・淡路大震災調査報告10巻 交通施設と農業施設の被害と復旧、（財）土木学会
- 10) 神戸海運管理部の調査
- 11) 財団法人国際交通安全学会、阪神・淡路大震災の実態調査に基づいた震災時の道路交通マネジメントの研究、平成10年3月
- 12) 松本、小谷、今井、震災後時におけるマイカーの交通実態に関する一考察、第52回土木学会学術講演会、(1997)
- 13) 東京都、「直下型地震の被害想定に関する調査報告書」、平成9年8月
- 14) 運輸政策研究機構、大都市交通センサス、平成12年度、<http://www.jterc.or.jp/>
- 15) 運輸政策審議会第18号答申
- 16) 平成12年国勢調査
- 17) 中村 幸史、通勤電車運航スケジュールにおける遅延計算モデルの構築、
<http://www.ise.chuo-u.ac.jp/ise-labs/taguchi-lab/pdf/a02n8100038.pdf>、(2005年4月現在)
- 18) 関東運輸局船舶部：災害時緊急輸送における河川航行船の利用可能性調査報告書、平成14年3月、(2002)
- 19) 国土交通省 総合政策局 技術安全課、平成14～16年度「災害時緊急輸送システムの技術開発」報告書、(2003～5)

研究発表等

- 1) 間島隆博、勝原光治郎、湯浅勤、河川を利用した災害時緊急輸送シミュレーション、第2回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.89-94、(2002)
- 2) 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、192号、pp.465-474、(2002)

- 3) 間島隆博、勝原光治郎、リアルタイム情報による水上輸送最適システム、第3回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.55-60、(2003)
- 4) 間島隆博、勝原光治郎、船舶による災害時物資輸送シミュレーションの可能性、第70回マリンエンジニアリング学術講演会、講演論文集、pp.40-41、(2003)
- 5) 間島隆博、勝原光治郎、服部聖彦、船舶による災害時物資輸送シミュレーター、マリンエンジニアリング学会誌、第39巻6号、pp.23-28、(2004)
- 6) 間島隆博、服部聖彦、勝原光治郎、リアルタイム情報に対応した災害時における船舶による物資輸送シミュレーション、第54回理論応用力学講演会講演論文集、pp.483-484、(2005)
- 7) 樋富和夫、桐谷伸夫、山之内博、他、災害時緊急水上輸送システムの技術開発 その1：緊急時輸送航路内のリアルタイム測量システム、第5回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.113-116、(2005)
- 8) 勝原光治郎、間島隆博、坂本隆、災害時緊急水上輸送システムの技術開発 その2：関東圏河川利用大災害時被災者輸送需要の推計、第5回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.117-122、(2005)
- 9) 間島隆博、勝原光治郎、災害時緊急水上輸送システムの技術開発 その3：河川を用いた被災者輸送のシミュレーション解析、第5回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.123-128、(2005)
- 10) 勝原光治郎、間島隆博、坂本隆、大貫麻子、災害時緊急水上輸送システムの技術開発 ー関東圏河川利用大災害時被災者輸送需要の推計ー、第24回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、pp.203-204、(2005)
- 11) 間島隆博、勝原光治郎、災害時緊急水上輸送システムの技術開発 ー河川を用いた被災者輸送のシミュレーション解析ー、第24回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、pp.205-206、(2005)
- 12) 樋富和夫、間島隆博、災害時緊急水上輸送システムの技術開発 ー緊急時輸送航路内のリアルタイム測量システムー、第24回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、pp.207-208、(2005)