

河川を利用した災害時緊急輸送シミュレーション

環境・エネルギー研究領域 リモートセンシング研究グループ

＊間島 隆博

輸送高度化研究領域 物流システム研究グループ

勝原 光治郎

関東運輸局 船舶部造船課

湯浅 勤

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⁾、河川の果たす役割は大きいと考えられる。本報では災害時を想定した河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。

2. 条件設定

次ページに示す前提のもと、基本条件を表1～3にまとめる。

2. 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。その結果、解析対象船舶数は5種、291隻となった。(表2)

2. 2 河川データ

河川は図1に示す荒川、隅田川、小名木川を対象とし、図2のようにノードとパスで表現される。ノードは363点あり、位置、水深、川幅などのデータが収められている。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箇所設定されている。

2. 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、表3、図1に示す24ヶ所を被災地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⁽⁴⁾の面積を乗じ、大規模地震の被災率を30%⁽⁵⁾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。

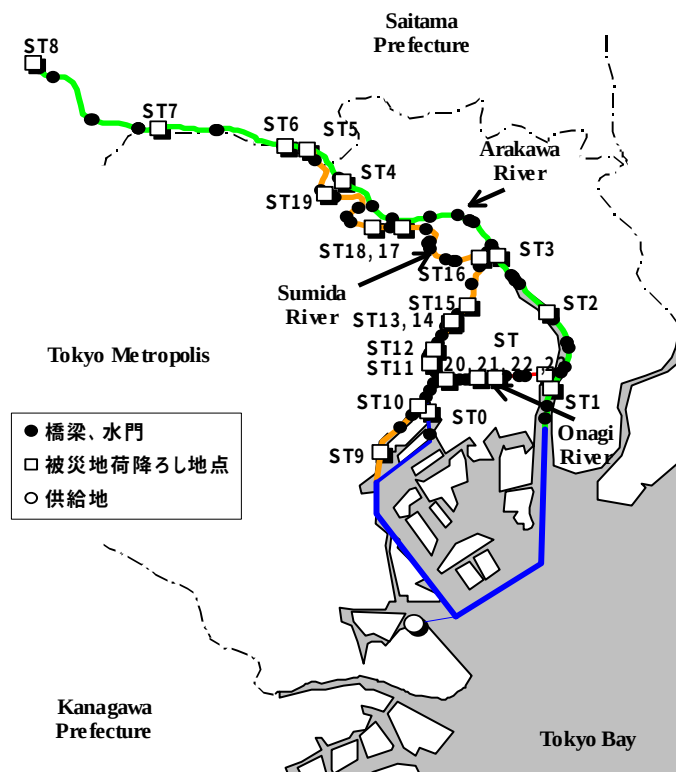


図1 解析対象河川と設定航路

前 提

- ・解析対象領域は荒川を中心とする東京湾に流入する河川（荒川、隅田川、小名木川、図 1 参照）
- ・被災地間の輸送は考慮しない。
- ・船舶間の物資の引き渡し（上流へは小型船で輸送するといった状況）は考慮しない。
- ・夜間航行を想定しない。(司令官、船舶の作業時間はそれぞれ 1 日 8、10 時間)
- ・船舶は給油を必要としない。
- ・船舶の航行可否は実績の有無に関わらず、A.P.0 時（干潮平均面）の河川幅 30mにおける水深、橋桁高さ、及び橋桁幅と船舶の大きさによって決定する。
- ・橋梁、水門、被災地、供給地・橋等には災害による影響を受けないものとする。

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	291 隻
船舶喫水と水深との干渉	○
船舶のマスト高さと橋桁高さとの干渉	○
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
被災地（船着場）数	24 ヶ所 (荒川、隅田川、小名木川)、表 3 参照
被災地（船着場）の位置	図 1 参照
被災地（船着場）の同時接岸隻数	1 隻
被災地（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 ID	積載可能荷種	荷役速度
屋形船	0～187	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)
水上バス	188～211	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)
押船、曳船＋舢舨	212～231	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)
鋼材運搬船	232～236	想定ダンボール	1 / 8 (箱/秒) x 3(列)
油槽船	237～290	生活用水(又は燃料)	4.1 (kl / min)

(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 18 リットル（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

表3 被災地の要求物資量

	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
	秋ヶ瀬栈橋	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
小名木川 水系	荒川遊園	ST18	8.04	31,032	559	236
	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
合計	番所橋	ST23	8.40	10,295	185	78
			156.6	366794	6602	2788

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、64リットル（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。

2. 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

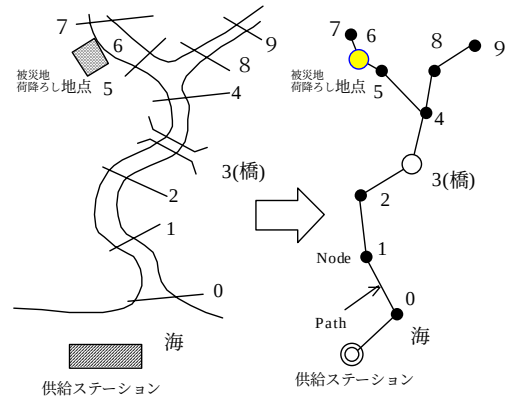


図2 河川の表現方法の模式図

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。ここでは3列と仮定した。一方、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箱が荷役されると考える。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）=毎秒3/8箱が荷役速度となる。

3. 解析手法

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、Agent Based Simulator Ver.1.1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、被災地（荷降ろし地点）、船舶である。一例として船舶エージェントの行動規則の概略を下表に示す。

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
供給基地で沖待ち	2	着栈順位をもらう 着栈許可を得たら 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
被災地沖待ち	6	着栈順位をもらう。着栈許可を得たら 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。

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

ェントは向かう」といった具合である。エージェントは”Index”に示される数字により、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。

また、シミュレーション全体の流れは以下のようになる。

作業開始時間になると司令官は対象となる 291 隻の船舶を供給地に招集する。到着した船舶は次章に示す規則に従い着栈、積み荷役を行う。積み込みが終了した船舶は次章に示す規則により指定された被災地へ向け航行し、到着後、荷役をしている船舶がいる場合は待ち行列に並ぶ。荷役中の船舶がない場合は揚げ荷役を行い、供給地へ帰還する。作業終了時刻になると、司令官は帰港命令を出し、船舶は自船の係留場所へ帰る。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、供給地では耐震強化岸壁⁽⁵⁾の利用を考え、その岸壁長を参考にして同時接岸隻数（10 隻）を決定した。一方、被災地側の船着場では同時接岸隻数を 1 隻とした。

4. 優先順位表及び配船順位

4. 1 被災地優先順位表

司令官は物資を配送する 24 ヶ所の被災地の優先順位表を作成する。この表の中で、高順位の被災地に対して優先的に船舶を配船する指令を出す。また、物資が水とダンプ・オール箱の 2 種類であることから、2 物資 x 24 被災地より、1~48 位までの表を更新して、最新情報を保持する。順位の基準となる発送率、Ps は以下の式により求める。

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

ここで、

D_{ij} : 被災地 i への荷種 j の発送量

R_{ij} : 被災地 i の荷種 j の初期要求物資量

i = 被災地番号

j = 荷種番号 (0→ダンプ・オール箱、1→水)

よって発送率 Ps が小さいほど順位は高くなる。また、Ps 値が同じになる場合は、供給地からの最短航路距離が遠い被災地が高順位となる。一つの

被災地で水、ダンプ・オール箱の Ps 値が同じになる場合、距離に違いが生じないため、荷種番号の低い物資、つまりダンプ・オール箱が優先されるとした。

4. 2 配船順位

前節の被災地優先順位表は供給地における沖待ち船舶を接岸させる順位に利用される。その手順では、沖待ちしている全船舶が対象とされ、被災地優先順位表で高順位となる被災地と物資の組み合わせで運送可能な船舶を選択する。ある順位で該当船舶がない場合は次の順位で処理を行い、複数の船舶が該当する場合は以下の式による実効輸送速度、Pc 値が最大となる船舶を選定する。

$$Pc = Lc_{jk} / T_{ik} \quad \text{式(2)}$$

ここで

Lc_{jk} : 船舶 k の荷種 j の最大積載量

T_{ik} : 船舶 k の被災地 i への往復航行予測時間と供給地と被災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被災地 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、Pc は単位時間当たりの輸送量を示すことになる。

5. 解析結果

5.1 輸送能力の背景

各被災地へ到達可能な船舶数を水輸送船、ダンプ・オール箱輸送船に分けて図 3 に示す。ダンプ・オール箱輸送船（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 秋ヶ瀬栈橋(ST8)、小名木川沿いの被災地

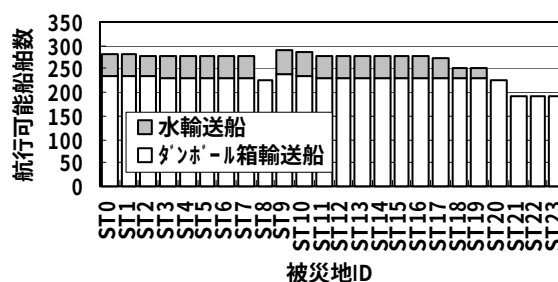


図 3 各被災地への輸送可能船舶数

(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、ST 8 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：1.15m、水積載量：100 ト、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。

5. 2 基本条件下の解析

図 4 には 1 日 8 作業時間および 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。4.1 被災地優先順位表では、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くれている。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

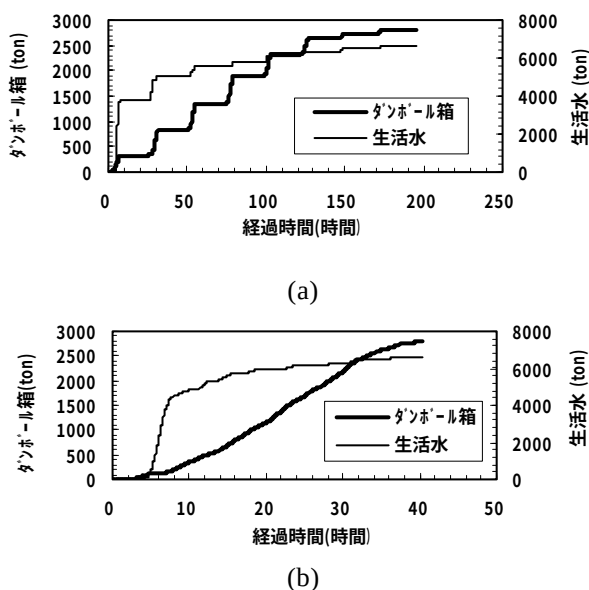


図 4 全被災地への輸送量
(a) 1 日 8 時間作業、(b) 24 時間連続作業

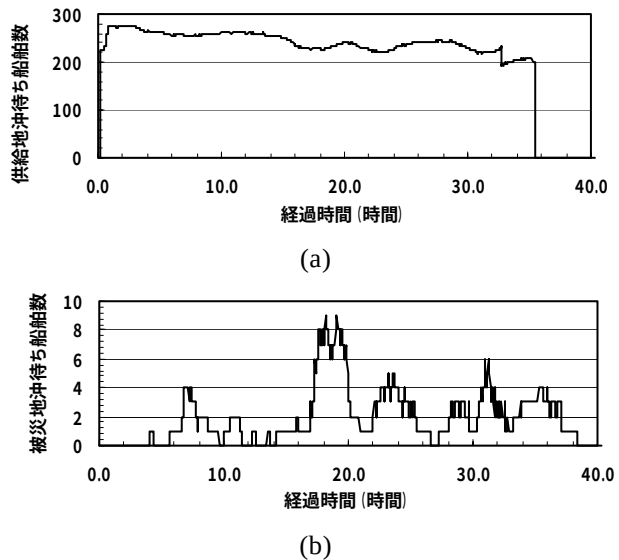


図 5 24 時間連続作業時沖待ち船舶数の推移
(a) 供給地側、(b) 全被災地

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(1)の P_s 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大きいため、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。この結果から一日 8 時間作業の場合、初日の輸送量はダンボール箱 340 ト、水 3,760 ト、平均輸送量は 1 日当たりダンボール箱 340 ト、水 820 トとなっている。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。

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 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 箇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。

5. 3 輸送能力の改善

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 4 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 6 に要求量に対する輸送量の割合を示す。なお、Case0、1 は前節の 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。

表 4 改善条件

	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、ダンプ・ール箱2.7倍			○		○
供給地同時接岸隻数 24隻数				○	
輸送量 ダンプ・ール箱 (ト)	336	1,602	955	523	2788
生活水 (ト)	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

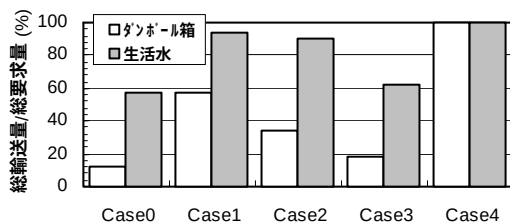


図 6 全被災地への輸送量

図 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。

6. まとめ

複雑系マルチエージェントシステムによる荒川、隅田川、小名木川を利用した災害時緊急輸送シミュレーションを行った。その結果、以下の項目が明らかとなった。

- (1) 秋ヶ瀬栈橋、小名木川へは浅喫水の水輸送船が必要であることが分かった。
- (2) 基本条件では、初日の輸送量はダンプ・ール箱 340 ト、水 3,760 ト、平均輸送量は 1 日当たりダンプ・ール箱 340 ト、水 820 トとなった。
- (3) 供給地側の物資供給能力がボトルネックとなる傾向が捕らえられ、供給地における同時接岸隻数の増加(24 隻)、又は荷役時間の短縮(基本条件の約 1/2)により改善できることが示された。
- (4) 1 日消費量の輸送を 1 日で達成するための条件を示すことができた。

7. 謝 辞

本研究は関東運輸局からの受託により「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」へ提出した報告に基づいており、御指導頂いた角 洋一 委員長(横浜国立大学大学院教授)をはじめとする委員の方々に感謝の意を表します。

【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) 防災船着場整備計画、東京都、平成 11 年 6 月
- (5) 臨海部防災拠点マニュアル、運輸省港湾局(現国土交通省)、平成 9 年 3 月
- (6) 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、社団法人 海洋産業研究会
- (7) 埼玉県震災対策計画、埼玉県防災会議、平成 11 年 11 月