

Online ISSN 2434-2440

グローバルセキュリティ調査報告 第4号  
Global Security Reports No. 4

## 自衛隊施設の防災・危機管理技術開発に関する調査報告

鳴原 良典 編



CENTER FOR GLOBAL SECURITY

防衛大学校先端学術推進機構  
グローバルセキュリティセンター

○ グローバルセキュリティ調査報告とは

『グローバルセキュリティ調査報告』は、防衛大学校におけるグローバルセキュリティに係る共同研究の成果として、複数の研究者が分担執筆した学术论文、研究ノート、資料等を取りまとめたものを、和文または英文により収録します。なお、本報告に収録された論文や研究ノート、資料等は、執筆者が独自の立場から分析・記述したものであり、日本政府あるいは防衛省の見解を示すものではありません。

© National Defense Academy, Japan Ministry of Defense

1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686 JAPAN

## 『グローバルセキュリティ調査報告』刊行にあたって

2016年4月、防衛大学校にグローバルセキュリティセンター（GS）が発足しました。GSは、国家国民または国際社会の安全・安心に係る多種多様な安全保障課題を多角的に研究し、その研究成果を広く内外に発信することを目的としています。

GSの特徴は、第一に、文理交叉型の統合的な研究アプローチにあります。約300名の防衛大学校教官の専門知識を総動員し、人文社会科学、理工学、防衛学による学際的な最先端研究に取り組みます。第二に、個々の研究成果に裏付けされた共同研究を積極的に行います。学内外の研究者、シンクタンク、官公庁の政策立案者、民間実務家等との連携・協力を推進することで、GSはグローバルセキュリティの研究拠点となることを目指します。

当面、GSがカバーする研究分野は、アジア安全保障、サイバーセキュリティ、宇宙安全保障、海洋安全保障、感染症対策と安全保障、防災・危機管理、ジェンダー・メンタルヘルス、ミリタリープロフェッショナリズム、安全保障・軍事作戦法規、デュアルユーステクノロジーなど広範囲なものです。GSは、これらの研究分野に属する諸課題を、原則2～3年単位のプロジェクト方式で柔軟に対応します。必要に応じて、国際ネットワークを構築し、研究の企画・立案、実施、発表、評価を行います。

GSの研究成果は、その内容に応じて「研究叢書」、「セミナー叢書」、「調査報告」の三つの形態で不定期に発行され、原則としてホームページ上のオンラインで広く公開されます。『グローバルセキュリティ調査報告』は、防衛大学校におけるグローバルセキュリティに係る共同研究の成果として、複数の研究者が分担執筆した学術論文、研究ノート、資料等を取りまとめたものです。本叢書の刊行を通じて、グローバルセキュリティ研究の裾野が広がり、内外の研究者との活発な研究交流が刺激されることを期待します。

2018年8月

防衛大学校先端学術推進機構  
グローバルセキュリティセンター長  
倉田 秀也

## まえがき

本調査報告は、「防災・危機管理」というテーマに関して、防衛大学校建設環境工学科（兼グローバルセキュリティセンター）所属の教官と防衛省総合職技術系（施設系）専門職員による共同研究の成果を収録したものである。

気候・地殻変動の影響を受け、これまでの想定を上回る大規模な自然災害が多発する傾向にある。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）や2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震など地震の発生が継続しており、それによる被害も甚大である。また近年では火山噴火活動が活発化しており、今後、富士山を代表とする活火山の大噴火を想定した防災計画が不可欠である。さらに、2018年西日本豪雨のような集中豪雨による河川の氾濫や大規模な斜面崩壊、土石流の発生など、安心・安全な社会を構築するために対策を講ずべき自然災害も増加している。一方で、国際政治の不安定化に伴う人為的な爆破テロあるいは化学プラント工場における大規模爆発も多発する傾向が認められる。一般に爆発災害の頻度は小さいものの、一度発生すると大規模な爆発を伴うため広い範囲にわたって人命や建物へ損害を与え、さらに社会機能の停止など社会へ甚大な影響を及ぼす。

このような人為的あるいは自然現象に起因する大規模災害に対し、被災した自治体の保有する防災・災害救助の能力では十分に対応できない場合、自衛隊に対して災害派遣が要請される。上記の様に、災害の態様が複雑かつ多様化していることから、自衛隊の災害救援活動は今後一層重要なものになることが予想される。しかしながら、大規模災害では活動の拠点となる自衛隊駐屯地や基地そのものが被災する可能性もあることから、防衛省としては、自衛隊施設の災害リスクを把握した上で事前に綿密な計画を立案し、訓練等を行う必要がある。

以上の背景を踏まえ、本報告では航空機テロに対する施設防護設計、自衛隊施設の地震・津波リスク評価、被災地域に対する支援量の推定と優先順位の決定方法といった、特に自衛隊施設の防災・危機管理技術開発に関する最新の研究成果をとりまとめた。本報告書が災害に対する理解をより深め、今後の我が国の防災対策の一助になれば幸いである。

## 目 次

柔飛来物の衝突を受ける鉄筋コンクリート版の設計法に関する研究 小塩友斗，別府万寿博 …… 1
東京圏（1都4県）における自衛隊施設の地震リスク評価に関する研究 松本翔，矢代晴実 …… 12
地震・津波被害に対する自衛隊支援量の見積もりと被害烈度曲線による要支援地域のプライオリティ評価 吉田多聞，鳴原良典，多田毅，八木宏 …… 25
海上自衛隊横須賀地区における津波発生時の船舶の避難海域設定に関する研究 北隆範，鳴原良典，多田毅，八木宏 …… 42

# 柔飛来物の衝突を受ける鉄筋コンクリート版の設計法に関する研究

小塩 友斗\*, 別府 万寿博\*\*

\* 公益財団法人 東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会

\*\* 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科

## 1 研究背景及び目的

### (1) 背景

原子力発電所や重化学プラント施設といった構造物は、大規模災害やテロに対しても安全性の確保が要求される。近年では、航空機衝突や竜巻飛来物等の衝突に対する安全性も求められている。防衛施設についてもこのような外力に対するリスク評価法が必要であるが、これらに対する合理的な設計法はまだ確立されていない。今後、地震荷重、風荷重、温度荷重のみならず、各種飛来物の衝突に対しても安全性を合理的に確保することが必要である。

一般に衝突問題を取り扱う場合、飛来物の変形性状と構造物との破壊区分に基づいて、ハードな衝撃とソフトな衝撃に区分されている。また、飛来物が鉄筋コンクリート (RC) 版に衝突する際に生じる貫通、裏面剥離等の局部破壊に関しては、衝突時に変形しない剛飛来物に対して、従来から多くの衝突実験に基づいた破壊限界版厚評価式が提案されてきた。

Kennedy は、剛飛来物による RC 版の衝突問題を概説するとともに、過去に研究された設計式を紹介している<sup>1</sup>。米国国防委員会 (National Defence Research Committee. 以後 NDRC) は、マッシュなコンクリートに剛飛来物が衝突した場合の貫入深さに関する NDRC 式を提案した<sup>2</sup>。この式は、貫入深さのほかに、衝撃力～時間関係および貫入深さ～時間関係を計算することができるものである。提示された NDRC 式の特徴として、理論に基づいて定式化されたことがあげられる。1946 年以降は、コンクリートへの飛来物貫入に研究はあまり行われておらず、NDRC は研究を中止するとともに、提案した NDRC 式については最近までは極秘扱われた。しかし、1966 年には理論的・実験的な面から再検討が行われ、ACE 式における裏面剥離および貫通に対する評価の考え方を取り入れた修正 NDRC 式が提案された。

近年、NDRC 式等の評価式と実験データとの比較から、新たな評価式が提案されている。日本においても、1987 年に電力中央研究所は剛飛来物の衝突による構造物の裏面剥離や貫

通の実験式を提案している<sup>3-5</sup>。しかし、飛来物が衝突時に変形する柔飛来物である場合には、飛来物の変形によってエネルギーが消費され、同じ重量、直径をもつ剛飛来物に比べると RC 版の局部損傷度が低減されることになる。これまで、飛来物の柔性を考慮して防護版厚を定量的に評価する手法が確立されていなかった。

また、コンピュータの容量や演算効率の進歩に伴い、解析的なアプローチが盛んに行われるようになってきた。英国では Barr によって構造物の耐衝撃設計指針に関する報告がなされている<sup>6</sup>が、柔飛来物の衝突による実験のデータは数例しか報告されていない。この目的から、耐衝撃設計における衝撃荷重を確立するため、武藤らは F4 ファントム (M=20ton, V=215m/sec) を用いた実物 (大型)・中型および小型の剛・柔飛来物を RC 版へ衝突させる一連の実験を行っている。しかしながら、柔飛来物に対する RC 版の耐衝撃性を評価するための基礎的データの蓄積は、現在も十分とは言えない。

## (2) 研究目的

本研究では、鉄筋コンクリート構造物に航空機等が衝突するような柔飛来物の衝突問題を対象とする。柔飛来物の柔性を考慮した防護設計手法の確立を目指し、剛飛来物から各種タイプの柔飛来物による局部および全体損傷を統一的に取り扱うことが可能となる手法を提案する。また柔飛来物の形状等のばらつきが被衝突体の損傷に与える影響について、フラジリティ評価を行う。

## 2 飛来物による衝突荷重および局部破壊評価法

柔飛来物の衝突による荷重～時間関係については、次式で求めることができる<sup>7,8</sup>。

$$F(t) = P_c[X(t)] + u[X(t)]V(t)^2 \quad (1)$$

ここに、 $F$ ：飛来物の衝突力 (N)、 $P_c$ ：飛来物のクラッシュ荷重 (N) であり、飛来物のある断面における強度 (降伏強度  $\sigma_y \times$  断面積  $A$ )、 $X$ ：飛来物の破壊長さ (m)、 $u$ ：飛来物の単位長さあたりの質量 (kg/m) であり、飛来物のある断面における質量、 $V$ ：飛来物の非破壊部分の速度 (m/s)。

式(1)は、ある時刻  $t$  における飛来物の速度などを求めることもできる。衝突後、時間  $t$  における減加速度  $\alpha$  は、運動法則  $F = ma$  より次式のように表される。

$$\alpha(t) = -\frac{F}{m} = -\frac{F_c \cdot A(t) + u \cdot V(t)^2}{m(t) - [X(t) - X(t-1)]u} \quad (2)$$

ここに、 $m$ ：飛来物の非破壊部分の質量 (kg)， $F_c$ ：飛来物の断面圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)， $A$ ：飛来物の断面積 (mm<sup>2</sup>)。

また、この時の時間変化量を  $\Delta t$  とすると、速度変化量  $\Delta V$  および飛来物の破壊長さの変化量  $\Delta X$  は、式(3) および式(4)で表され、時刻  $t$  における飛来物の速度  $V$  および飛来物の破壊長さ  $X$  を求めることができる。

$$\Delta V(t) = \alpha(t) \cdot \Delta t, \quad V(t) = V(t-1) + \Delta V(t) \quad (3)$$

$$\Delta X(t) = V \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \alpha(t) \cdot (\Delta t)^2, \quad X(t) = X(t-1) + \Delta X(t) \quad (4)$$

式(1)による評価は、ターゲットが剛の場合における衝突力の算定方法であり、ターゲットへの貫入は考慮されていない。そのため飛来物の壁への貫入量、貫入抵抗力および壁の応答速度を求めることができない。

一方、柔飛翔体の衝突挙動は、飛翔体が変形しながらターゲットへ貫入すると考えられる。また、RC 壁には貫入に伴う貫入抵抗力  $R$  が発生する。貫入抵抗力については、修正 NDRC 式の貫入理論<sup>19</sup>により求めることができる。この抵抗力  $R$  と式(1)から算出された衝突力  $F$  が接触面において釣り合っているとすれば、式(5)を解くことにより、飛来物の柔性を考慮しつつ比較的簡易に貫入深さ  $y_{12}$  を求めることができる。

$$P_c[X(t)] + u[X(t)]V(t)^2 = 58.9 \cdot A \cdot F_c^{0.5} \left\{ \frac{1}{d} \left( \frac{dy_{12}}{dt} \right) \right\}^{0.2} \cdot \frac{y_{12}}{2 \cdot d \cdot N} \quad (y_{12} \leq 2d) \quad (5)$$

ここに、 $y_{12}$ ：飛来物頭部の貫入量 (mm)， $d$ ：飛翔体の径 (mm)， $N$ ：飛来物の先端形状係数 (平坦=0.72，半球=1.00，先鋭=1.14)。

よって、 $y_{12} = x$  とすると、最大貫入量  $x$  における貫通限界厚さ  $e$  および裏面剥離限界厚さ  $s$  は、以下の式<sup>1</sup>で求めることができる。

貫通限界版厚  $e$

$$e = 3.19x - 0.718 \frac{x^2}{d} \quad (x \leq 1.35d) \quad (6a)$$

$$e = 1.32d + 1.24x \quad (1.35d \leq x \leq 13.5d) \quad (6b)$$

裏面剥離限界版厚  $s$

$$s = 7.19x - 5.06 \frac{x^2}{d} \quad (x \leq 0.65d) \quad (7a)$$

$$s = 2.12d + 1.36x \quad (0.65d \leq x \leq 11.75d) \quad (7b)$$

表 1 解析対象の諸条件

諸元	記号	物性値	単位
寸法	$l_x, l_y$	5×7	m
板厚	$T$	180	mm
単位体積重量	$\rho$	2300	kg/m <sup>3</sup>
弾性係数	$E_c$	$2.69 \times 10^4$	N/mm <sup>2</sup>
上端筋(長辺, 短辺とも)		D13@200	-
下端筋(長辺, 短辺とも)		D13@200	-
ポアソン比	$\nu_c$	0.20	-
コンクリートの圧縮強度	$\sigma_c$	20.6	N/mm <sup>2</sup>
コンクリートの引張強度	$\sigma_t$	1.42	N/mm <sup>2</sup>

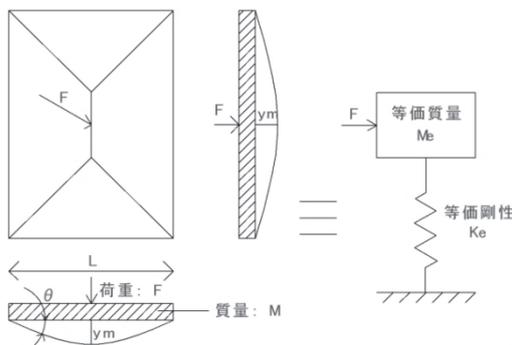


図 1 一質点系モデル

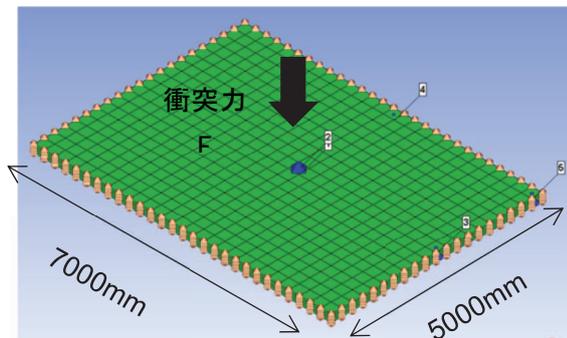


図 2 FDM 解析モデル

### 3 RC 版の全体破壊評価に関する解析的検討

局部破壊を発生させないための壁厚を設計すれば、構造物は全体応答へ移行することになる。ここでは、柔飛来物の衝突を受けた構造物の全体破壊について、一質点系モデル (SDOF) による実用的な評価を行うとともに、3次元有限差分法 (Finite Difference Method, FDM) による解析と比較、検討した。

衝突による集中荷重を版中央に受ける RC 版をモデル化し、応答の評価および解析値との比較を実施した。なお、入力する荷重～時間関係については後述する。RC 版モデルおよび一質点系モデルの解析条件を、それぞれ表 1 および図 1 に示す。また、FDM の解析モデルを図 2 に示す。FDM モデルの境界条件として、RC 版モデルの四周を完全固定とした。

式(1)により算定を行ったところ、軸方向に等断面を有する鋼管が衝突した時の荷重～時間関係は図 3 の実線で示す波形となった。計算の結果、実際の衝突問題では、荷重の作用時間  $t_d$  は 0.001sec 程度の非常に短い時間であることがわかった。ここでは、衝突時間による影響を調べるため、 $t_d=0.0007s$ ,  $t_d=0.07s$ ,  $t_d=0.7s$  の 3 パターンについて検討した。また RC 版の弾性および弾塑性の応答を確認するため、最大荷重を  $F_0=567kN$ , および  $F_0=2,835kN$

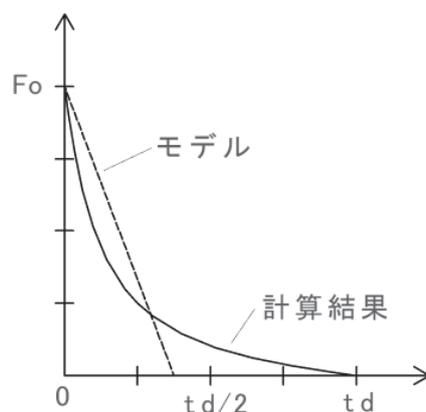


図3 荷重～時間関係

表2 一質点系モデルの等価剛性・等価質量

等価剛性 $K_e$ (kN/m)	$3.45 \times 10^5$
等価質量 $M_e$ (t)	8.049
1次固有振動数 $f_1$ (Hz)	31.56

表3 一質点系モデルの抵抗力特性

ひび割れ点	変位 $\delta_c$ (mm)	0.814
	せん断力 $Q_c$ (kN)	130.9
最大耐力点	変位 $\delta_y$ (mm)	60.4
	せん断力 $Q_y$ (kN)	3121.6

の2ケースとした。

一質点系モデルのパラメータは、式(8)～(14)を用いて、表2および表3のように設定した。抵抗関数は、ひび割れ点、最大耐力点を折れ曲がり点とするトリリニア型とした。

一質点系モデル等価剛性については、版の中央に集中荷重を受ける場合の等価剛性として、次式のように算定される。

$$K_e = \frac{192E_c \cdot I \cdot (l_x^4 + l_y^4)}{l_x^3 + l_y^3} \quad (8)$$

ここに、 $E_c$ ：コンクリートの弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $I$ ：短辺方向の単位長さ当たりの断面2次モーメント (mm<sup>3</sup>) =  $T^3/12$ 、 $l_x$ ：床スラブの短辺方向長さ (mm)  $l_y$ ：床スラブの長辺方向長さ (mm) である。

矩形板の4辺固定における1次固有振動数  $f_1$  は、式(9)から求められる。なお、4辺固定の境界条件以外は、理論的な厳密解は得られていないため、そのような場合には数値解析

表4 2次元部材モデルの曲げ振動の1次固有振動算定におけるk値

$l_y/l_x$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$k$	3.65	3.34	3.12	2.96	2.83	2.74

表5 最大耐力に達する時の変位

$l_y/T$	20	25	30	35	40	45	50
$\delta_x/T$	0.18	0.28	0.38	0.48	0.61	0.82	1.15

を行う必要がある。

$$f_1 = k \frac{\pi}{2l_x^2} \sqrt{\frac{D}{\rho T}} = k \frac{\pi T}{2l_x^2} \sqrt{\frac{E_c}{12(1-\nu^2)\rho}} \quad (9)$$

ここに、 $D$ : 板の曲げ剛性 (N),  $T$ : スラブ厚 (m),  $\rho$ : スラブの単位体積質量 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\nu$ : コンクリートのポアソン比 (0.2),  $k$ : 辺長比 ( $l_y/l_x$ ) で変化する値で詳細は表4に示す。なお、ここでは  $l_y/l_x=1.4$  であるため  $k=2.83$  とした。

等価質量  $M_e$  は、曲げ振動の1次固有振動数が等価になるように次式で求めることができる。

$$M_e = \frac{K_e}{4\pi^2 f_1^2} \quad (10)$$

ひび割れ発生時の荷重および変位は、弾性理論より次式から求めることができる。

$$Q_c = M_c \cdot \frac{12(l_x^4 + l_y^4)}{l_x \cdot l_y^3} \quad (11)$$

$$\delta_c = \frac{Q_c}{K_e} \quad (12)$$

ここに、 $M_c$ : 引張縁がコンクリートの引張応力度に達した時の曲げモーメント,  $Z$ : 断面係数,  $N$ : 断面に生じる軸力(N)で圧縮力を正とする。断面が対称であれば、断面の幅を  $B$  とし、式(13) および式(14)より求めることができる。

$$M_c = \left( 0.56\sqrt{F_c} \cdot Z + \frac{TN}{6} \right) / l_x \quad (13)$$

$$Z = \frac{l_x T^2}{6} \quad (14)$$

最大耐力時の変位  $\delta_y$  については、短辺長さとスラブ厚の関数で与えられることが既往の研究<sup>10</sup>で提案されており、表5に示す関係をもとに  $\delta_y$  を決定した。

最大耐力については、降伏線理論に基づく代表的な終局強度算定方法として、さまざまな荷重および境界条件に関して耐力を整理した構造力学公式集<sup>11</sup>に示された Sawczuk の方法<sup>12</sup>による算定を行った。

FDM モデルのパラメータは、コンクリート要素についてはソリッド要素とし、降伏応力およびヤング係数については一質点系モデルの値で算定した値を使用した。状態方程式は線形とし、構成則は Drucker-Prager<sup>13</sup> の降伏関係を用いた。コンクリート要素にはエロージョン則を設定し、荷重の進行にともなって崩壊するモデルとした。鉄筋ははり要素でモデル化し、200mm 間隔に円形断面の鉄筋を配置した。状態方程式は線形とし、構成則は von Mises を用いた。鉄筋の破断は生じないと仮定し、数値エロージョンは設定していない。

図4に、荷重の作用時間を変化させた場合の変位～時間関係について、一質点系モデルと FDM 解析の結果を比較して示す。図中の左側が最大荷重  $F_0=567\text{kN}$  で弾性応答をした場合、右側が最大荷重  $F_0=2835\text{kN}$  で弾塑性応答を考慮した場合である。弾性応答では、一質点系モデルと FDM モデルの応答が概ね良好に対応しており、一質点系モデルにおける等価剛性、等価質量等の設定が適切であったことを示している。弾塑性応答では、 $t_d=0.0007\text{s}$  の場合には載荷時間が短いため塑性域に入ることがなく弾性応答を示した。 $t_d=0.07\text{s}$  では両モデルとも降伏を示した後は自由振動を示す結果となり、残留変位を示した。本ケースの応答から、塑性域においても二つのモデルは概ねよい一致を示した。 $t_d=0.7\text{s}$  では、FDM 解析の変位応答が非常に大きくなった。これは RC 版の端部における曲げによる破壊が進行し、RC 版が破壊したためと考えられる。

## 4 構造フラジリティへの検討

ここでは、前節で扱った RC 版を対象として全体曲げ破壊による評価を行った。要求性能マトリクスに対応する損傷レベルとして小、中、大、甚大の損傷レベルを設定し、前節で行った一質点系モデルによる応答解析を用いてフラジリティ評価を行った。前節で扱った柔飛来物が衝突した場合、荷重～時間関係は図3に示す実線のようになるが、最大荷重と力積が等しい三角形波形を仮定して、図3の破線のように設定した。荷重のばらつきの影響を考慮するため、荷重の継続時間および最大耐力にそれぞれ 20% および 10% の変動係数を与えて、試行回数  $10^5$  回のモンテカルロシミュレーションを行った。

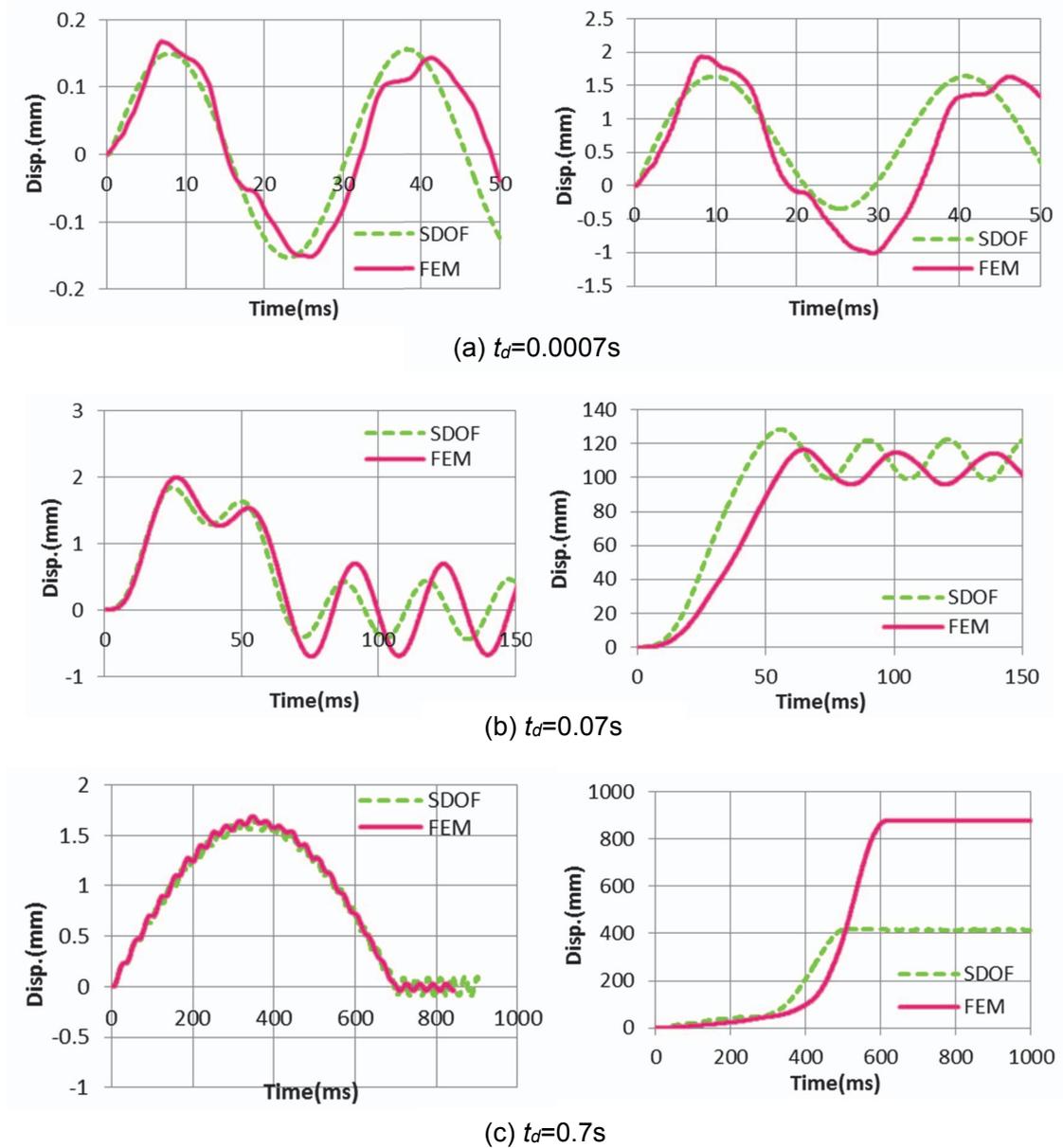


図4 1質点系モデルとFEMモデルとの応答比較

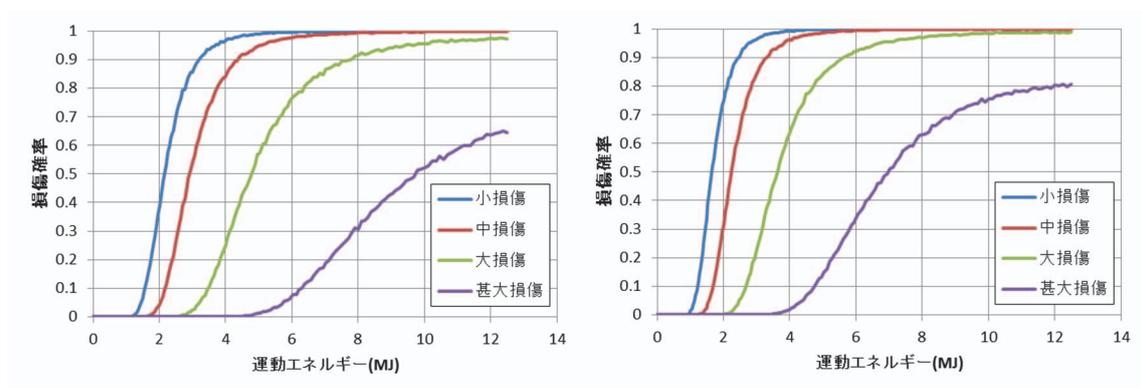
RC版が衝突を受けた際には、壁面中央部における変位が最大になるため、材端回転角は中央部の最大変位に基づいて次式を用いて算定を行った。

$$\theta = \frac{2y_m}{L} \quad (15)$$

損傷度の判定については、向井ら<sup>14</sup>の報告に基づいて、材端回転角 $\theta$ から部材種別ごとの損傷度判定を行った。表6に示すRC部材の損傷レベルと応答値の関係から、部材の損傷

表 6 部材の損傷レベルと材端回転角と最大変位

損傷程度	材端回転角 $\theta$	最大変位 $y_m$ (m)
小損傷	降伏耐力時 ( $Q_y=1359\text{kN}$ )	0.019~0.025
中損傷	0.010~0.017 (1/100~1/60)	0.025~0.042
大損傷	0.017~0.033 (1/60~1/30)	0.042~0.083
甚大損傷	0.033~ (1/30~)	0.083~



(a)座屈耐力 25kN

(b)座屈耐力 50kN

図 5 座屈耐力の変化によるフラジリティカーブ

レベルを無損傷もしくは「小損傷」、「中損傷」、「大損傷」、「甚大損傷」に分類している。柔飛来物の衝突力に影響を与える変数は、Riera 式より「座屈耐力」「単位長さあたりの質量」および「衝突速度」であることから、それぞれをパラメータとして評価を行った。

衝突速度を  $0\text{m/s} \sim 500\text{m/s}$  の範囲で、飛来物の断面積を変化させて座屈耐力  $P_c$  が  $25\text{kN}$  および  $50\text{kN}$  の場合について、フラジリティ評価を行った。飛来物は単位長さ当たりの質量が  $50\text{kg/m}$ 、長さ  $1\text{m}$  の柔飛来物とし、衝突によって一部が変形し停止するものとした。フラジリティの算定結果を図 5 に示す。図は、速度と質量の関係から得られるエネルギーを横軸にしている。運動エネルギーが  $2\text{MJ}$ (速度  $200\text{m/s}$ )の時、座屈荷重が  $50\text{kN}$  では小損傷確率が  $75\%$ であるのに対し、座屈耐力が  $25\text{kN}$  になると  $38\%$ 程度まで低減することがわかる。すなわち、座屈耐力の小さい飛来物（柔性が高い飛来物）の衝突を受ける RC 版の損傷は低減することを示している。ただし、座屈耐力の低下による損傷確率の低減は運動エネルギーが比較的小さい時であり、 $8\text{MJ}$ (速度  $400\text{m/s}$ )のような場合では、損傷の度合いに大きな差は生

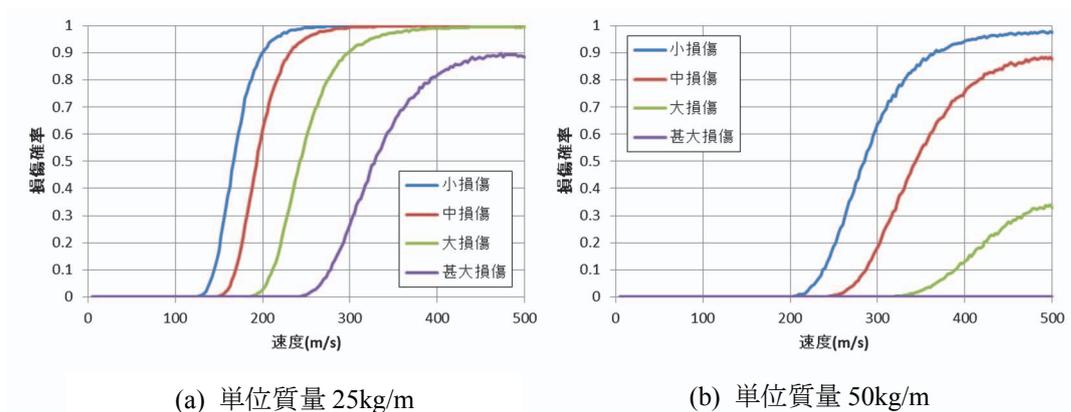


図 6 単位質量の変化によるフラジリティカーブ

じなかった。

次に、単位長さ当たりの質量  $U$  を  $25\text{kg/m}$  および  $50\text{kg/m}$  にした場合のフラジリティ評価を行った。飛来物は座屈荷重が  $50\text{kN}$ 、長さ  $1\text{m}$  の柔飛来物とし、衝突によって一部が変形し停止するものとした。評価結果を図 6 に示す。単位長さ当たりの質量を変化すると、フラジリティカーブの勾配が緩やかになることが確認できる。これは運動エネルギーが質量および衝突速度の 2 乗に比例するため、等エネルギーの場合、飛来物の質量を小さくすると衝突速度が大きくなり、破壊が大きくなったものと考えられる。

## 5 結論

本研究は、飛翔体の柔性を考慮した RC 版の耐衝撃性能評価法を提案し、その評価法の精度を解析によって検討したものである。本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 柔飛来物の衝突力の算定式、および剛被衝突体の貫入抵抗力の式を準用し、柔飛来物が衝突した際の貫入量、飛来物の変形量を推定する方法を提案した。提案式によって得られた必要版厚を持たせることで、局部破壊を防止し全体破壊に移行するものと考えられる。
- (2) 被衝突体を一質点系にモデル化し、変位応答の評価を行い、FDM 解析との比較を行った。第 3 章までの手法で算出した荷重～時間関係をもとに、弾塑性応答評価を行った。弾性、塑性のいずれの領域においても一質点系と FDM モデルの応答は概ね良い対応を示した。
- (3) 柔飛来物の衝突を受ける鉄筋コンクリート版のフラジリティ評価を行った。座屈耐力が小さい、単位長さあたりの質量が小さいほど、損傷が小さくなることが確認できた。また、損傷度に与える影響は、座屈耐力よりも単位長さ当たりの質量のほうが大きいことがわかった。

## 参考文献

- 1 Kennedy, R.P. : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, Vol.37, pp.183-203, 1976
- 2 Wolf, J.P., K.M. and Slrikerud, P.E. : Response of equipment to aircraft impact, Nuclear Engineering and Design, Vol.47, pp.169-193, 1978.
- 3 大沼博志, 伊藤千浩, 佐藤宏一, 高野博 : 鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性および有限要素法による解析, 電力中央研究所研究報告, No.384027, 1985.4.
- 4 伊藤千浩, 大沼博志, 白井孝治 : 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計法, 電力中央研究所総合報告, No.U24, 1991.7
- 5 Ito, C. et al. : Local rupture of reinforced concrete slab due to collision of hard missile, 10th SMiRT, paper, J6/4, pp.183-188, 1989.
- 6 Barr, P. : Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures Subjected to Impact, United Kingdom Atomic Energy Authority(UKAEA), 1988 Edittion, A89020309, 1988.
- 7 Riera, J.D. : Basic concepts and load characteristics in impact problems, RILEM, CEB, IABSE, IASS, Interassociation Symposium, Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading, Introductory Report, Berlin(BAM), 7-29, 1982.
- 8 Sliter, G.E. : Assessment of empirical concrete impact formulas, ASCE, Vol.106, No.ST5, pp.1023-1045, 1980.
- 9 Beth, R.A. : Penetration Theory, Separable Force Laws and the Time of Time of Penetration, NDRC Report A-333 (OSRD-5258), 1945.
- 10 坂尻公也, 川治正則ほか : RC床スラブの圧縮膜力を考慮した降伏線理論による終局耐力解の適用性について, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 1994.3.
- 11 土木学会 : 構造力学公式集, 1986.6.
- 12 Sauczuck, A.: Plastic behavior of simple supported rectangular reinforced concrete plates at moderately large deflection, Solid and Structures, Vol.1 No.1, 1965.
- 13 Drucker, D. C. and Prager, W. : Soil mechanics and plastic analysis for limit design. Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp.157-165, 1952.
- 14 向井洋一, 井川望, 崎野良比呂, 櫛部淳道 : 部材応答のクライテリア, 2012年度日本建築学会大会(東海), 構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料. 2012.

# 東京圏（1都4県）における自衛隊施設の 地震リスク評価に関する研究

松本 翔\*, 矢代 晴実\*\*

\* 防衛省 調達部土木課

\*\* 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科

## 1 研究背景及び目的

平成 23 年 3 月 11 日、原子力災害等を含む東日本大震災を引き起こした東北地方太平洋沖地震が発生し、死者・行方不明者は約 2 万人という未曾有の大災害となった<sup>1</sup>。これに対し防衛省・自衛隊は延べ約 1000 万人を超える災害派遣を行うなど、総力を挙げて各種活動に取り組んできた<sup>2</sup>。自衛隊員の献身的な働きにより、自衛隊が持つ災害対処能力が高く評価されたところであり、防衛省・自衛隊は、大規模災害に対しても極めて大きな役割を担っている。また、いくつかの航空自衛隊基地は首都直下地震の際の DMAT(Disaster Medical Assistance Team)参集拠点にも指定<sup>3</sup>されるなど、大規模災害時においても自衛隊施設はその能力を十分に発揮されなければならない。

しかし、平成 23 年東日本大震災では航空自衛隊松島基地が被災し滑走路が使用不能になるなど、自衛隊の活動を支える基盤たる自衛隊施設も被害を受けている。

南海トラフ地震や首都直下地震の発生の切迫性が高く、他の地震の危険度も高まっていると言われる現状において、自衛隊施設は震災のさなかに機能し、活動の基盤を支えることが必要不可欠である。

地震リスクとは、「将来に発生する地震による不利益や損害」を指す。我が国は巨大地震に見舞われる可能性が高いため、地震による損害を定量的に予測することが、地震対策のための第一歩となる。地震リスク評価とは、地震による被害を予測し、損害額・損害率などを定量的に推計し、それを用いて対応策等を検討する基礎資料とするものである。

本研究は東京圏（東京都、茨城県、埼玉県、千葉県、神奈川県）にある自衛隊施設の地震リスクを定量的に評価することを目的とする。東京圏に所在する自衛隊施設は防衛省本省、各基地・駐屯地、防衛大学校、防衛医科大学校（以下、基地等）、合わせて 46 施設である。これら基地等には、部隊・編制・目的などによって異なる様々な施設が存在している。それらの施設一つ一つについて地震リスクを全て評価するには多大な時間を要するた

め、基地等に必ず存在する本部庁舎（以下、庁舎）を対象として地震リスクを評価し、庁舎の地震リスクをその基地等の地震リスクと考えることとして地震リスクを評価する。

## 2 地震リスク評価手法

### (1) 地震リスク評価の流れ

地震リスクの評価手法としては確率論的手法を用い、庁舎の立地位置におけるすべての地震源を対象とした確率論的地震ハザードを求め、次に、建設年・構造種別・階層高から地震が発生した際の損傷確率から、損失額・再調達価格に対する損失率を求めることで地震リスクカーブを算出した。

解析の入力情報として地域に発生する地震情報と施設の耐力の情報が必要となる。地域に発生する地震情報は、施設サイトにおける地震の発生確率及び大きさに関する情報を意味し、地震ハザード情報と呼ばれる。また、これを発生確率と地点の加速度等の関係を示したものは地震ハザード曲線と呼ばれる。施設の耐力の情報は、地震の大きさと損害額の関係をもとめた情報であり脆弱性曲線と呼ばれる。脆弱性曲線と地震による施設の損失額を組み合わせ、地震動の大きさと施設の損傷の関係を示す損失関数が求まる。さらに、地震ハザード曲線と損失関数を組み合わせることで、地震動の大きさと施設の損失額の関係、すなわち地震リスク曲線を求めることができる。

地震リスク曲線から、損失期待値（NEL）や最大予想損失（PML）を求めることができるため、地震リスクの評価指標となる。

地震リスク評価の流れを示したフローチャートを図1に示す。それぞれの曲線は以降で説明する。

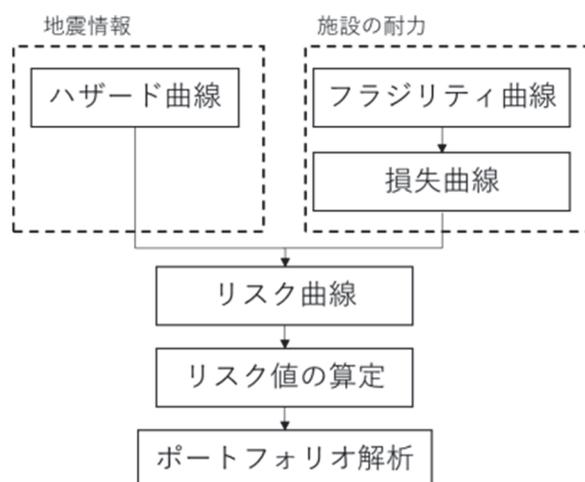


図1 地震リスク評価の流れ

## (2) 地震ハザード曲線

地震ハザード曲線は地震動指標  $\alpha$  と地震の年間超過発生確率（地震動指標  $\alpha$  を超える地震動が1年間に発生する確率）の関係を表したものであり、サイトの総合的な地震危険度を表す。横軸の地震動指標としては複数の指標があるが、本研究では地表面最大速度 (PGV: Peak Ground Velocity) を用いる。横軸に PGV をとった地震ハザード曲線を図2に示す。PGV が大きな地震ほど発生する確率は少なくなるため、地震ハザード曲線は PGV に対して減少関数となる。

地震ハザード情報は防災科学研究所が運営する地震ハザードステーションなどから入手できる。

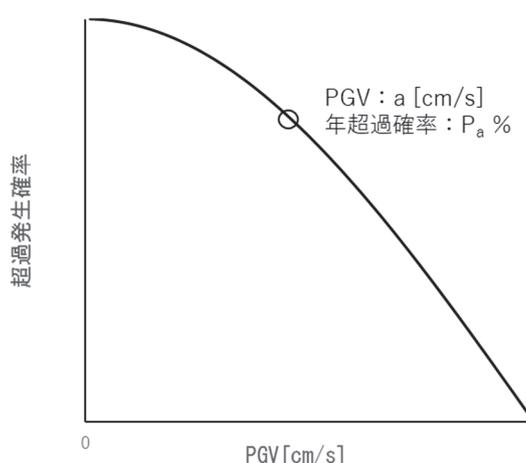


図2 地震ハザード曲線

## (3) フラジリティ曲線

フラジリティ曲線は、横軸に地震動指標、縦軸に施設の損傷割合をとった曲線であり、地震動の大きさに対して施設が被害を受ける割合を示す。本研究の対象である基地等の庁舎は大半が鉄筋コンクリート（以下、RC）造であり、その他は鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRC）造であるため、本研究では、既往の研究<sup>4</sup>にて示されたフラジリティ曲線を用いることとする。そこでは、RC造及びSRC造のフラジリティ曲線は同一として扱っている。なお、フラジリティ曲線の求め方は過去に起こった地震による実被害を統計解析することで求める手法を採っている。本研究で使用したフラジリティ曲線の一例を図3a～cに示す。

図3は1971年までに施工され旧々耐震基準下、1972年から1981年までに施工された旧耐震基準下、それ以降に施工された新耐震基準下で建設されたRC造建築物のフラジリティ曲線を階層高で区切って示している。耐震基準が新しくなる度に損傷割合は減少しており、階層高が高くなると同じ基準下でも損傷割合が高くなっていることが分かる。

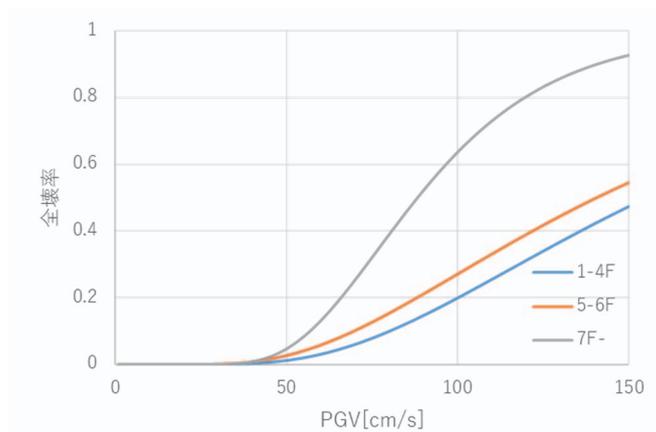


図 3a 旧々耐震基準の fragility 曲線

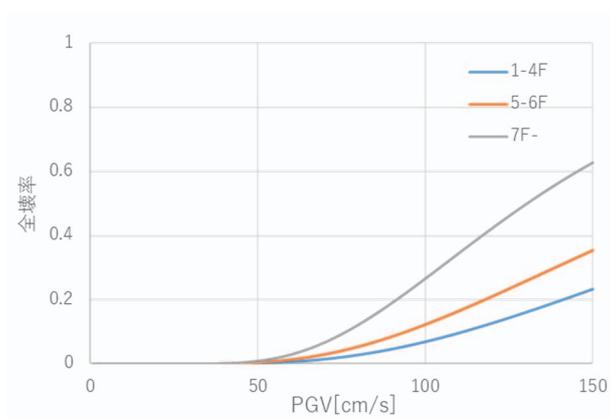


図 3b 旧耐震基準の fragility 曲線

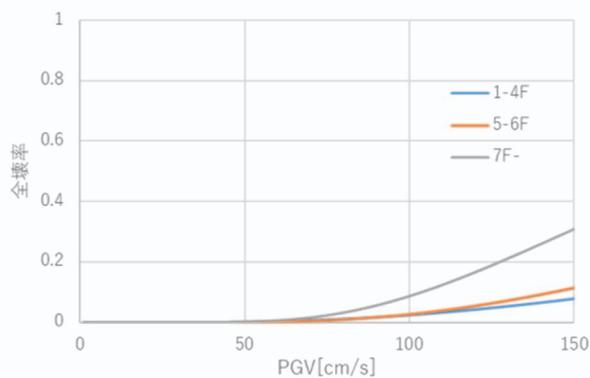


図 3c 新耐震基準の fragility 曲線

#### (4) 地震損失曲線

地震損失曲線は、地震動の大きさに対する施設の損失額を表した曲線である。曲線の横軸には地震動指標を、縦軸には損失額を取る。地震動が大きくなると施設の損失額は一般的には増加するため、地震損失関数は地震動指標に対して増加する関数となる。地震損失

曲線の値は、 fragility 曲線から各損傷形態の発生確率を求め、その値に応じた損失額を掛けることで求まる。代表的な損失曲線は図4に示す。

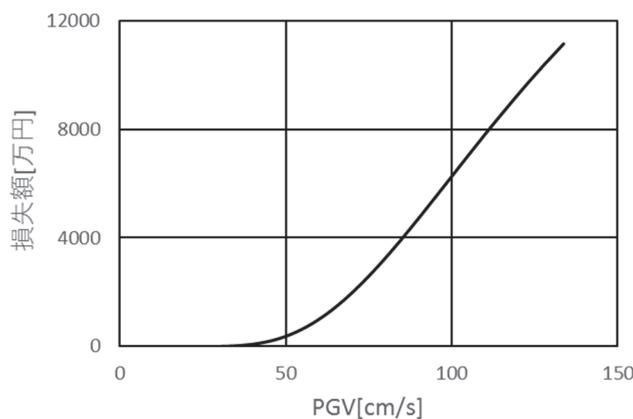


図4 地震損失曲線

損傷形態毎の損失額は表1のように設定した。再調達価格については次項にて述べる。

表1 損傷形態毎の損失額

損傷形態	損失額
無被害	0
半壊	0.5×再調達価格
全壊	再調達価格

つまり、地震損失曲線  $L(x)$  は全壊率  $P_{全壊}$  及び半壊率  $P_{半壊}$  を用いて下記の通り表される。

$$L(x) = P_{半壊} \times 0.5 \times \text{再調達価格} + P_{全壊} \times \text{再調達価格} \quad (1)$$

### (5) 再調達価格

地震損失を算定する上で、施設の価値を評価する必要がある。物価や地価の上昇などがあるため、取得価格で評価することは適切ではない。そこで、「再度同様の施設を建設するためにかかる費用」を再調達価格とし、地震損失の算定を行う。本研究では、直近の3年間に建設された庁舎3棟の、単位延床面積当たりの建設費用を用いた。そのため、再調達価格は

$$\text{(現有の延床面積)} \times 160,000 \text{ 円} \quad (2)$$

と設定した。

### (6) 地震リスク曲線

ここまでで求めた地震ハザード曲線及び地震損失曲線を基に地震リスク曲線を描くことができる。横軸に損失率（損失額／再調達価格）をとり、縦軸に地震の超過発生確率をとったものを地震リスク曲線と呼び、ある施設に  $a\%$  以上の地震損失率を与える地震が発生する確率が  $P_a\%$  である、という読み方をすることができる。代表的な例を図5に示す。

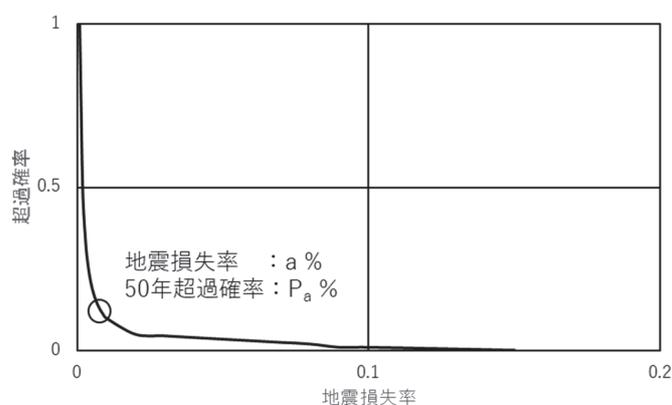


図5 地震リスク曲線

### (7) 期待損失値と予想最大損失

期待損失値 NEL (Normal Expected Loss) とはある一定期間内に起こる、地震による損失の平均値を意味する。予想最大損失 PML (Probable Maximum Loss) は、現在では一般的には「再現期間 475 年相当の地震が発生した場合の損失の 90% 非超過確率値」と定義される。なお、再現期間 475 年とは供用期間 50 年に 1 回以上遭遇する確率が 10% の地震に相当する。

### (8) ポートフォリオ解析

ここまでは単独施設を対象としての地震リスク評価法を記述してきた。しかし、ここまでで得られた個別施設の PML から施設群（以下、ポートフォリオ）を評価することができない<sup>5</sup>。個別施設の PML を足し合わせてポートフォリオの PML とすることは、予想最大損失の同時発生を考えることに等しく、PML を過大評価することに繋がる。

そこで施設群を評価する際にはポートフォリオ解析といわれる解析を行う必要がある。ポートフォリオ解析にはいくつか手法があるが、本研究では、多数のシナリオ地震を想定し、損失と地震の発生確率からイベントリスク曲線を求める手法を用いる。

イベントリスク曲線を求める方法は、ある地震の規模や震源域を仮定し（イベント地震）、それによってもたらされる各施設の損害を求める。イベント地震の数だけ損害を求め、損

害の大きなイベント地震順に並べ、イベント地震の発生確率から年超過確率を求める。横軸に損失率、縦軸にイベント地震の年超過確率を取ったものをイベントリスク曲線という。イベントリスク曲線からポートフォリオ PML を求めることができる。代表的な例を図 6 に示す。

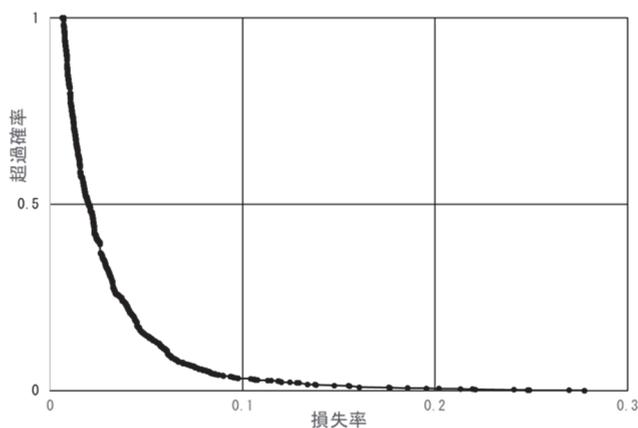


図 6 イベントリスク曲線

### 3. 地震リスク評価～海自・横須賀基地を例にして～

#### (1) 地震ハザード曲線

海上自衛隊横須賀基地を例にとって求めていく。庁舎については、神奈川県横須賀市に所在する比較的古い建物であり、旧々耐震基準で建設された3階建て鉄筋コンクリート(RC)造である。

このサイトの地震ハザード曲線を求めると図7の通りとなる。PGV=100 [cm/s]の地震は、今後50年以内に2%程度の確率で発生することが読み取れる。なお、PGV=100 [cm/s]の地震というのは、震度6弱程度の地震である。

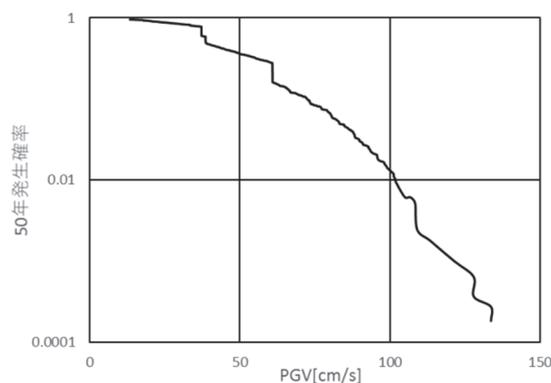


図 7 地震ハザード曲線～海自・横須賀基地

## （2）地震損失曲線

旧々耐震基準で建設された3階建て鉄筋コンクリート（RC）造の脆弱性曲線と損失関数を用いて地震損失曲線を求めたものを図8に示す。ここから、PGV=100 [cm/s]の地震が起こった場合、およそ6,000万円の損害が出るであろうことが読み取れる。これは損失率にして約5.1%である。

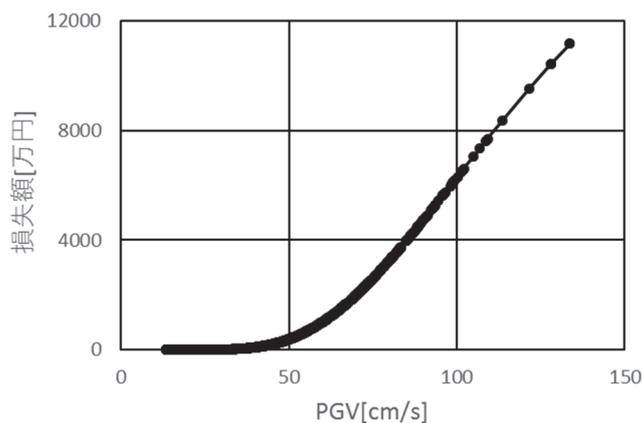


図8 地震損失曲線～海自・横須賀基地

## （3）地震リスク曲線

ハザード曲線及び損失曲線を用いて地震リスク曲線を求めたものを図9に示す。ここから、地震損失率0.58%以上の損失を与える地震が50年以内に30%の確率で発生する。損失額にすると約124万円である。

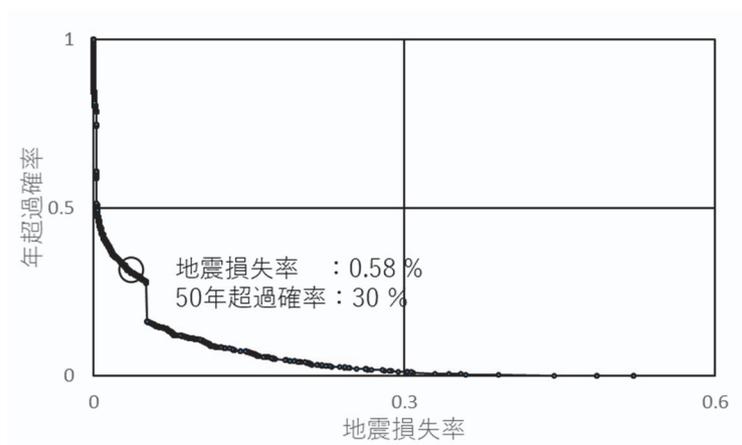


図9 地震リスク曲線～海自・横須賀基地

#### （4）NEL 及び PML

これまで求めてきた地震リスク曲線等から NEL 及び PML を求めたものを表 2 に示す。今後 50 年以内に地震が発生した場合、横須賀基地の庁舎では約 890 万円の損害が出るのが予想され、約 2,300 万円の損害が出ることも考慮しておかなければならない。

表 2 NEL 及び PML～海自・横須賀基地 [円]

NEL	8,898,432
PML	23,179,617

## 4. 東京圏の自衛隊施設の地震リスク評価

### （1）施設群の地震リスク評価

前章では海上自衛隊横須賀基地の庁舎を例に個別施設の地震リスクを評価した。同様の手法を用いて東京圏の自衛隊施設の地震リスク評価を行った。各施設の平均損失と予想最大損失の損失率を図 10 に示す。

ここから、陸自・木更津駐屯地及び海自・木更津地区の損失率が高いことがわかる。これらは同一の敷地にあるが敷地内で区域が分かれているため別々に計算を行っているが、損失率が高い理由は、地震動の大きさと庁舎の建設年・階層高が原因として挙げられる。地震動は、震度 6 強が予想されるイベント地震が数多くあり、震度 7 が予想される地震もあるなど、大きな地震に見舞われる可能性のあるサイトである。建物は、陸自・木更津駐屯地の庁舎は 2015 年建設と新しいが 7 階建てと高層である。 fragility 曲線から高階層であればあるほど損失率が高くなるため、高階層であることが、損失率に大きな影響を及ぼしたと考えられる。また、海自・木更津地区は 3 階建てと低層であるが、1967 年建設の旧々耐震基準での施設であるため、損失率が高くなっている。



図 10 各基地等の損失率

## (2) ポートフォリオ解析結果

図 10 で示した各施設の損失の結果からポートフォリオ解析を行う。ポートフォリオ解析によって得られたイベントリスク曲線を図 11 に示す。ここからポートフォリオ全体の PML は 3.2% となる。なお、これを損失額にすると約 33 億円となる。

また、ポートフォリオ PML を与える地震は、神奈川県川崎市から千葉県木更津市の深さ 24 km を震源域とする M7.2 の地震である。この地震では、横浜市から東京都心部、さらに

千葉県東京湾沿岸などを中心に震度6強の強い揺れが予想されている。

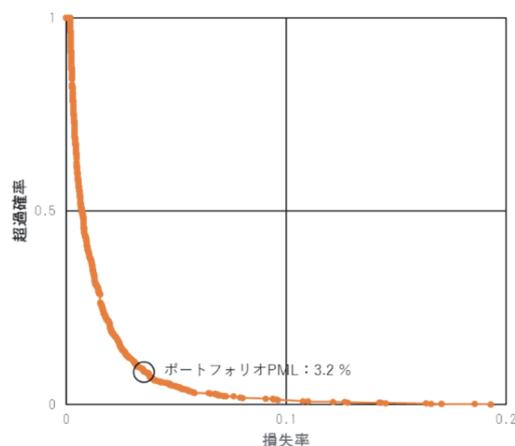


図11 イベントリスク曲線

## 5. 今後の地震対策に向けて

### (1) 耐震補強によるリスク低減

ここまでは現状の地震リスクを評価した。その地震リスクを軽減するについて考える。一般に、地震リスクへの対処方法として、①回避 ②転嫁 ③保有 という3つの方法が挙げられる。

①回避とは、施設を地震リスクの低い場所へ移すなどしてリスクそのものを回避する方法である。②転嫁とは地震保険などに加入し、損害に対して補償する方法である。

③保有はリスクを承知の上でそれ以上の対策を行わないことである。これは発生確率や損失を比較し、判断した上での方法となる。

旧々耐震基準、旧耐震基準下で建設された施設を新耐震基準に適合させるべく耐震補強を実施するとして、損失低減効果について検討を行った。

その結果として、いずれも耐震補強を行うための補修費用よりも、損失低減効果の方が低いという結果になった。つまり、建物における直接損害では、費用対効果のみで判断する場合、耐震補強を行わずリスクを保有する方がよいという結果となった。

### (2) 間接損失の導入

企業等の地震リスク評価を行う際、地震によって施設を使用できない期間の損失（営業利益損失）を考慮する。防衛省・自衛隊において間接損失という概念を導入する場合、一つの考え方として人命救助の機会損失や援助物資の遅配などを間接損失と捉えることとする。これらを東京圏の自衛隊施設全てを定量的に評価するのは多くの時間とデータは必要にな

るため、本研究では、人命救助や援助物資の遅配に影響を及ぼしうる重要な基地等（以下、重要施設）を選出し、損失額に重みをつけることで、簡易的に間接損失も含んだ地震リスク評価とする。

内閣府の首都直下地震への対策<sup>3</sup>によると、DMAT 参集拠点として自衛隊基地 3 拠点が指定されており、12 駐屯地が自衛隊の各方面隊の前進拠点と指定されている。また、その他に滑走路、港湾施設を有する基地等が 4 か所ある。これらの重要施設として、間接損失は重要施設の建物直接損失額の 2 倍と仮定し、地震リスク評価を行った。結果を図 12 に示す。ポートフォリオ PML は約 3.2 % から約 7.9 % に変化する。

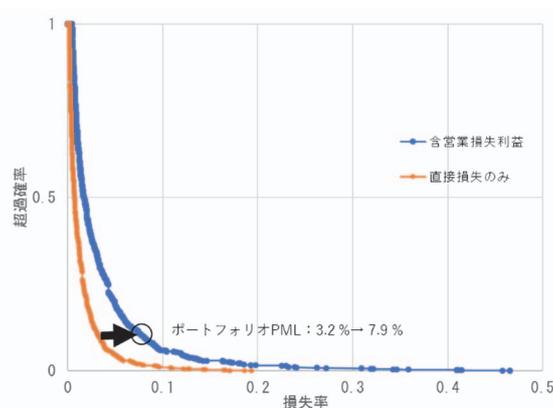


図 12 間接損失を考慮したイベントリスク曲線

本研究において、いくつかの仮定を置きながらリスク評価を進めてきたため、実情と必ずしも一致しているとは言えないところもある。その一つが耐震補強の有無の確認である。本研究では建設年を基に施設の耐力を評価しているが、耐震補強されていた場合、耐力は向上しているため、地震リスクを過大評価している可能性がある。各施設の耐震補強の有無が分かれば、さらに地震リスク評価の精度は高まると考えられる。

また、各基地等の地震リスクを評価するために庁舎を代表として評価したが、いろいろな施設が混在する現状を考えるとさらに詳細な検討が必要である。さらに、重要施設として、首都直下地震の際の前進拠点等を選定したが、災害対応における実際の機能を分析し、より適切な選定方法を検討する必要がある。間接損失についても、施設の損失額の 2 倍と簡易的に設定したものの、人命救助の機会損失などを詳細に検討することでより現実に即した評価が行えると考えられる。

今後は上記を踏まえ、より精度の高い地震リスク評価をおこなう必要があると考える。

## 6. まとめ

本研究では、確率論的手法を用いて東京圏（1都4県）の自衛隊施設の地震リスク評価を行った。個別施設の地震リスク評価を行い、東京圏の自衛隊施設群の地震リスク評価を行うためポートフォリオ解析を行った。その結果、東京圏の自衛隊施設群のPMLは3.3%と求めることができた。

また、民間企業等で用いられている間接損失の概念を簡便に導入し、間接損失を含めたポートフォリオPMLは約7.9%となった。

最後に、今後の地震リスク評価の精度向上のために必要な事項を洗い出した。

### 参考文献

1. 内閣府：防災白書，2012
2. 防衛省：防衛白書，2011
3. 内閣府：首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画，2016
4. 神奈川県：地震被害想定調査報告書手法編，2015
5. 福島 誠一郎，矢代 晴実：地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価，日本建築学会論文報告集，67巻（2002）552号 p.169-176

# 地震・津波被害に対する自衛隊支援量の見積もりと被害烈度曲線による要支援地域のプライオリティ評価

吉田 多聞\*, 嶋原 良典\*\*, 多田 毅\*\*, 八木 宏\*\*

\* 防衛省 南関東防衛局 調達部土木課

\*\* 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科

## 1 研究背景及び目的

### (1) 背景

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震はマグニチュード 9.0 という我が国観測史上最大の地震であった。その震源域は岩手県沖から茨城県沖までの長さ約 450km, 幅約 200km にわたったため広範囲に揺れが観測され, また大津波が発生し約 2 万人に及ぶ死者・行方不明者をはじめとして東北地方の沿岸部を中心に未曾有の被害をもたらした<sup>1</sup>。こうした状況の中, 防衛省・自衛隊は発災当初から被災者の救助等の活動に取り組み, 同年 12 月 26 日の原子力災害派遣の終結に伴う活動終了までの間, 被災者への生活支援, 行方不明者の捜索, 福島第一原子力発電所への対応などに延べ約 1066 万名の隊員が従事した<sup>2</sup>。

防衛省・自衛隊ではこれらの活動に対する検討・研究を行い, 平成 24 年 11 月に「東日本大震災への対応に関する教訓事項 (最終取りまとめ)」としてこの内容をとりまとめ公表した。この中で, 初動対応をはじめとする自衛隊の活動については「全体として, 過去の教訓を踏まえた迅速な初動対応として評価」した一方, 情報集約や関係機関等の連携を課題として挙げている。とりわけ関係省庁等との情報共有に関しては, 「より一層円滑に実施されるよう, 平素から, 大規模震災等を含む事態発生時を想定し, 情報共有ルートの整理, 情報共有に用いるシステム等の整備が必要」であると指摘しており<sup>3</sup>, また防災対策推進検討会議最終報告<sup>4</sup>でも, 「地図上に各種の被災状況等を重ね合わせて, 整理・分析し, 視覚化することが出来る地理空間情報 (G 空間情報) の活用<sup>5</sup>が, 状況認識の統一や意思決定の支援を始めとして極めて有効である」と防衛省として提言している。

災害発生時には自衛隊所有の航空機等を用いた情報収集が行われるものの, 災害の規模が大きくなるにつれ被災地方公共団体の自律機能が損なわれることから被害全容等の状況把握に一定の時間を要する。他方, 大規模震災時には被災地方公共団体及び家庭等で備蓄している物資が枯渇することが予想されるため, 一刻も早く物資の支援等を行う必要がある。

したがって、災害発生時には「どのような支援を」「どこに」「どのくらい」行えばよいのかを迅速に把握することが求められる一方で、状況把握に必要な情報収集インフラが十分に活用できない可能性が高い。そこで、災害発生時の自衛隊支援量を見積もるにあたり、なるべく多くの1次情報に依存しない方法を考案する必要がある。

ところで、近年、数値計算による津波シミュレーション分野の学問が発展してきている。元来、津波の発生等のメカニズム解明に係る調査・研究は全世界的には盛んではなかったが、2004年に発生したスマトラ島沖地震により発生した津波によって甚大な被害をもたらされたことを契機として、全世界的に研究が行われるようになってきている。

数値計算による津波シミュレーションの仕組みは、地震発生時の地殻変動量の鉛直成分をトリガーとして、震源地から伝搬する水位を逐次的に計算するというものである。わが国では地震発生時に、地震に関する情報と併せて津波に関する情報も即座に提供されるようになってきているが、これは気象庁が数値計算による津波シミュレーションの計算結果をデータベース化した結果を活用しているものであり、津波シミュレーションの身近な例と言えよう。また、津波シミュレーションは海上のみならず陸上においても行うことが可能である。前述の、気象庁が発表する地震発生時の津波に関する情報は、「海岸線においてどれほどの高さの津波が襲来するか」という点に主眼を置いて我々に情報提供されているものであるが、これは計算途中の結果であり、津波シミュレーションは「ある地震により発生した津波が陸上においてどこまで遡上するか」という情報も提供してくれる。

津波シミュレーションの数値計算方法は、内閣府中央防災会議によって取りまとめられており、近年では統一的な方法が確立しつつある。これはHP上で公開されており、誰でも閲覧することが可能である。また、数値計算に必要な日本近海の海底の深さ及び日本陸上部の地盤（標高）高さのデータ等も無料で公開されており、数値計算のためのハードウェアさえあれば、誰でも津波シミュレーションを行うことが可能な状況になっている。したがって、これらを整備することで、陸上部における津波の浸水状況までを自前で計算することができる。津波浸水範囲の計算方法に加え、内閣府中央防災会議では陸上部が津波で浸水した際の各種インフラへの影響の見積もり方法についても公開している。これによって、どの程度の範囲まで停電・断水等が起こり得るかといったことがわかる。これらの結果は各都道府県にも共有され、地図上にまとめた結果が各地におけるハザードマップ等となって私たちに提供されている（ただし、ハザードマップはある地域における被害量の最大値を示したものであるという点は注意が必要である）。

ここまでの情報が整えられているにもかかわらず、このような検討結果が自衛隊の活動やその準備に活かされている例は少ないというのが現状である。他方で、実際に大規模地震が発生した際には、自衛隊は自らの情報収集能力に基づいた情報収集や、各地方自治体からの要請や情報提供により実際の災害救助活動に従事するケースが多い。既存の検討結果やそのノウハウを活かす形で、自衛隊による支援量を事前に見積もることができれば、情報収集や派遣準備にかかる時間を短縮することができる可能性がある。

そこで本研究では、任意の地域・任意の地震規模による津波シミュレーションを行い、対象地域の津波浸水範囲からインフラの被害を推定し、その被害状況に応じた自衛隊支援量を導き出すことを考えた。このことは、ある地域において、地震発生時の規模から自衛隊支援量が導出できることを意味しており、前述の「多くの1次情報に依存せずに自衛隊支援量を見積もる方法」に相当する。

## (2) 研究目的

本研究の目的は、地震・津波被害に対する自衛隊支援量を見積もること、また自衛隊の支援を特に必要であると考えられる要支援地域選定のためのプライオリティ評価手法の提案である。数値計算を活用した津波シミュレーションを行い、地震・津波の規模を変化させ必要支援量の変化を推定する。そして、各支援量の推定結果について地域特性を加味した分析を行い、地形や生活インフラの整備状況等が必要支援量の増減に与える影響を考察する。更に、あるエリアにおける最大被害に対する規模を表す指標として「被害烈度」を新たに定義し、この指標を用いることで、要支援地域に選定する際の優先順位づけのための新たな評価手法を提案する。

## 2 研究方法

### (1) 研究対象地域

近い将来発生することが危惧されている地震の1つに、南海トラフ沿いの巨大地震（以下、南海トラフ地震）がある。日向灘から駿河湾までの太平洋沿岸を含む南海トラフ沿いの地域では、ここを震源とした大地震が繰り返し発生していることが知られており、直近では1944年と1946年に発生している。従来、この地域における大地震発生周期は100～200年程度とされていたが、近年の研究によりこの周期だけでは説明できないことが明らかとなってきた。これまでに起こった地震の中で最大規模であると考えられている宝永地震は1707年に発生しているが、このクラスの地震が300～600年周期で発生しているという報告もなされている状況等を勘案し、地震調査研究推進本部では南海トラフ沿いでマグニチュード8～9クラスの地震が発生する確率を、今後30年以内に70%程度としている<sup>6</sup>。

内閣府中央防災会議では南海トラフ地震の被害の特徴やその対策について検討を行い、平成25年5月に「南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）」を取りまとめ公表した。その中で、南海トラフ地震の特徴として、超広域にわたって強い揺れと巨大な津波が発生することに加え、避難を必要とする津波の到達時間が数分しかないことを挙げ、この地震による被害を「これまで想定されてきた地震とは全く異なるもの」としている<sup>7</sup>。

本研究では南海トラフ地震に伴い発生する津波被害を、三重県東部から南部の沿岸地域の中から3地区を抽出し、推定した。この地域は1944年に発生した東南海地震において壊

滅的な被害を受けている地区であり、また 1960 年に発生したチリ地震に伴う津波によっても被害を受けたというような、津波の影響を受けやすい地区である。加えて、海岸に近い部分に災害派遣活動の拠点となる陸上自衛隊の駐屯地も存在する。東日本大震災では航空自衛隊松島基地が津波によって水没し、災害拠点として機能しえなかったという事例があった。したがって、沿岸部に近い場所に自衛隊施設が存在する地域においては、津波被害の予測研究を行う意義があると言える。

## (2) 津波シミュレーション方法

非線形長波方程式に基づき、有限差分法を用いた数値解析による津波シミュレーションを行った。この際、マグニチュード ( $M_w = 8.3, 8.5, 8.8, 9.1$ ) と地震発生時の潮位 (0.0, 0.5, 1.0m) を変化させ定量的な変化を見積もった。 $M_w \leq 8.8$  のケースについては既往の報告<sup>8</sup>に従い初期波形を作成し、 $M_w = 9.1$  のケースについては  $M_w = 8.8$  のモデルをスケーリング則に従って拡大することで得た (図 1)。その他のパラメータ設定については既往の報告を参考にした。計算格子は 810m から 30m まで 1/3 ずつ細分化した。三重県沿岸部を 8 つの地域に分割し 30m メッシュの計算を行ったが、本報告では前述の研究対象決定の考え方に基づき、このうち 3 つの領域の計算結果について報告する (図 2)。

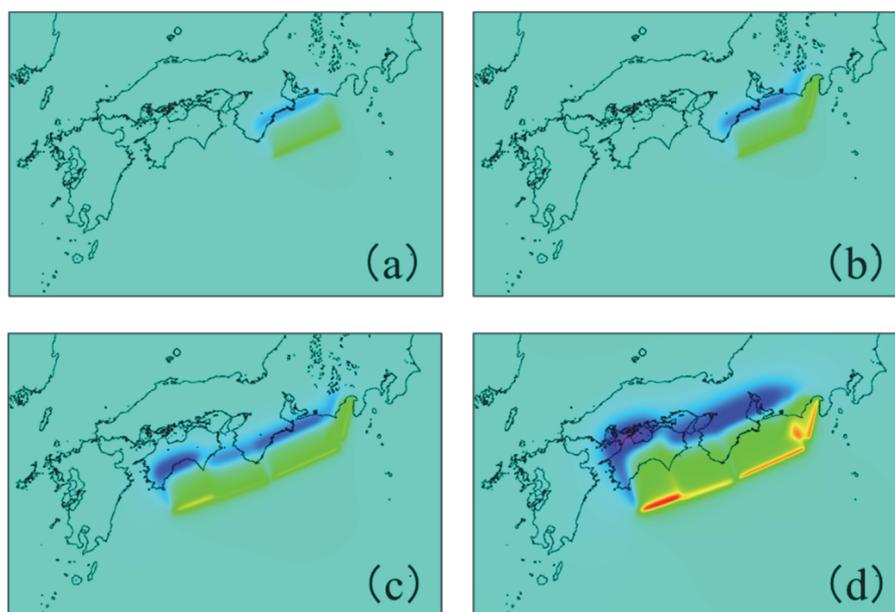


図 1 津波初期波形 (a)  $M_w = 8.3$ , (b)  $M_w = 8.5$ , (c)  $M_w = 8.8$ , (d)  $M_w = 9.1$

## (3) GISによる解析

GIS とは地理情報システムの略称であり、緯度、経度、標高などの空間データと地価、人口分布、土地利用などの属性データを重ね合わせることで検索、分析、表示を行うことで新た

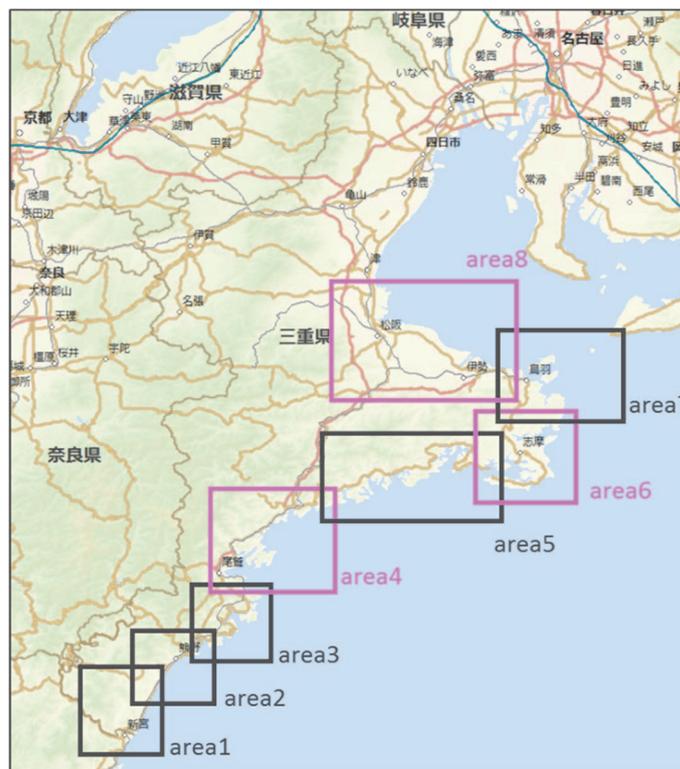


図2 研究対象領域

area4：尾鷲市，紀北町エリア，area6：志摩市エリア，area8：志摩半島北部エリア。

な価値や知見を得る情報処理ツールである。すでに官民の別を問わず幅広い分野で導入が進んでおり、活用分野も防災、情報発信、データ分析、販売戦略の立案と多岐にわたっている<sup>9</sup>。本研究では、津波シミュレーション結果から得られた浸水範囲と検討対象地域の属性データを重ね合わせることで必要支援量の推定を行った。東北地方太平洋沖地震において津波浸水によりインフラが被災し日常生活に多大な影響が発生したことを踏まえ、給水支援量、入浴支援量、仮設トイレ支援量の推定を行った。なお、支援量データの作成にあたり、地形等のデータは G 空間情報センター<sup>10</sup> や国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービス<sup>11</sup> を、各地のインフラの整備状況については東邦ガス<sup>12</sup> や各市町村上下水道部等のホームページ<sup>13,14</sup> より適宜入手・加工した。

#### (4) 各支援量推定方法

##### a) 給水支援量

給水支援量は、まず給水支援が必要なエリアを割り出し、次にそのエリア内の人口を算出し、これに1人1日あたりの必要水量<sup>15</sup>である3Lをかけることで算出した。給水支援が必要なエリアとは浄水場が浸水した場合のその浄水場の給水エリア、もしくは津波浸水範囲を意味する。これは、浄水場が浸水した場合にはその給水エリアが断水し、また住宅が浸水

することによって断水したり、その住民が避難したりすることによって給水支援が必要になることによる。

#### b) 入浴支援量

入浴支援量の算出も、支援対象エリアを選定し当該エリア内の人口から算出した。なお、入浴支援は避難施設に避難している人々に対して行われるため、避難所ごとの集結人口を算出した上で入浴支援量を推定した。支援対象エリアの選定にあたっては津波浸水範囲であるという条件に加え、震度6弱以上の都市ガス供給地区であるという条件を加えた。これは都市ガス設備に備え付けられている安全装置が作動し、ガスの供給が停止する閾値が 60 kine であり、これが震度6弱以上であることによる<sup>16</sup>。

#### c) 仮設トイレ支援量

仮設トイレ支援量は、支援対象エリアを選定した上で、当該エリア内の避難所数より算出した。津波浸水範囲であるという条件に加え、下水処理施設またはポンプ場施設の浸水の有無を条件に加えた。これらの施設が浸水した場合、その上流の流域において下水処理機能が喪失することになるため支援対象エリアが海岸線から内陸に向かって拡大することとなる。

## 3 結果・考察

### (1) 津波シミュレーション結果

図3に各地域における津波浸水範囲の変化を示す。各浸水範囲はMw=8.3, 8.5, 8.8, 9.1の順にそれぞれ青, 緑, 黄色, 赤と対応している。地震の規模が小さい浸水範囲を上重ねることで、地震の規模の増大に伴う浸水範囲の増大を示している。尾鷲市, 紀北町エリアでは地震の規模の増大に伴った浸水範囲の変化が見られた。地形がリアス式海岸であることによる津波高さの増大を反映しているものと考えられる。またこの地域ではMw=9.1の際に浸水範囲が大きく増大していることが分かる。これはMw=9.1の際の津波の規模が非常に大きいことを反映している。志摩市でも尾鷲市, 紀北町地区と同様のリアス式海岸を反映したジグザグの浸水範囲の変化が観察され、地震の規模によって津波浸水範囲が単調に増大していることがわかる。志摩半島北部ではMw=8.5, 8.8の時の津波浸水範囲がほとんど確認できなかった。これは規模の小さなMw=8.3の地震の段階で浸水範囲がほぼ決定されてしまうことを示している。

図4に各地の浸水面積と地震の規模の関係を示す。同図では潮位による浸水面積の変化も反映した。いずれのグラフにおいても地震の規模の増大に伴い、浸水範囲が増加傾向にあるということが分かる。また、各グラフにおける潮位による曲線の差は、それぞれの地域の地形の違いを反映しているものと考えられる。例えば、リアス式海岸が広がる尾鷲市, 紀北町及び志摩市のエリアではリアス式海岸により津波エネルギーが集中するため地形的に津波が高くなりやすい。今回検討した南海トラフ地震発生時の初期水位は四国沖で最大であり

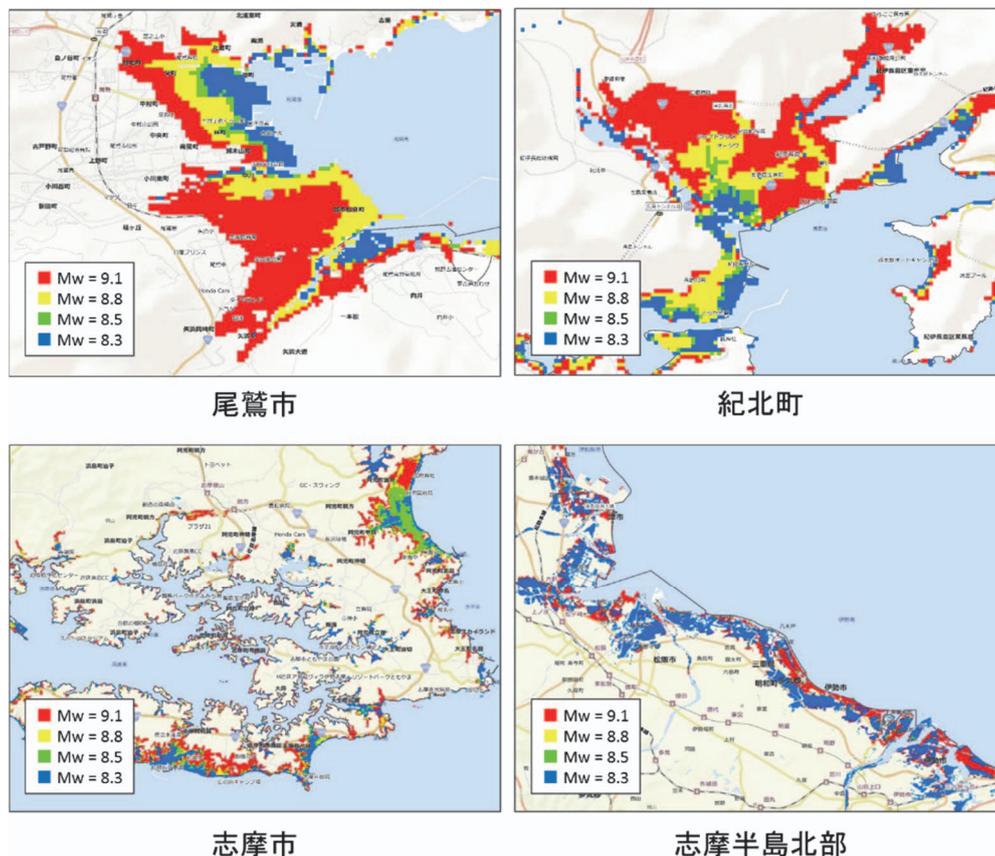


図3 各地域における津波浸水範囲の変化

約 5.5m, 志摩半島の沖合では 4m 程度であるが, 志摩市に到達する最大津波高さは初期水位の約 3 倍の 12m 程度と予想されており, これは三重県内で最大の値である<sup>17</sup>. したがって, 潮位が 1m 変化しても, 到達した津波高さはそれ以上の規模で変化するため, 結果的に潮位による寄与は小さくなる. 更に, リアス式海岸の地域では人が居住できる平地の面積が小さく, また海拔高度が低い地区に集中しているため, 海岸地形によって巨大化した津波の浸水範囲は各潮位間でそれほど変化しないと考えられる. 一方, 湾の内部に位置する志摩半島北部においてはリアス式海岸のような地形による津波の増大は起こりにくいため, 津波高さの変化には潮位の寄与が大きい. また沿岸部には都市部や田畑などの高低差の小さな地域が広がっているため, 潮位によって津波高さが増加した分が浸水面積の増加に直結した結果となっていると解釈できる.

なお, 今回は津波浸水深が 1cm 以上の地域で被害が発生することとした. それは地下に埋設されているインフラに対する津波浸水の影響を見積もっているためである. また, 津波が建築物に与える影響を考慮する場合, 木造建築物であれば津波浸水深 2m で, 鉄筋コンクリート造であれば津波浸水深 7m で大破することが既往の研究<sup>18</sup>で指摘されているが, 今回はこの点については特段考慮しなかった.

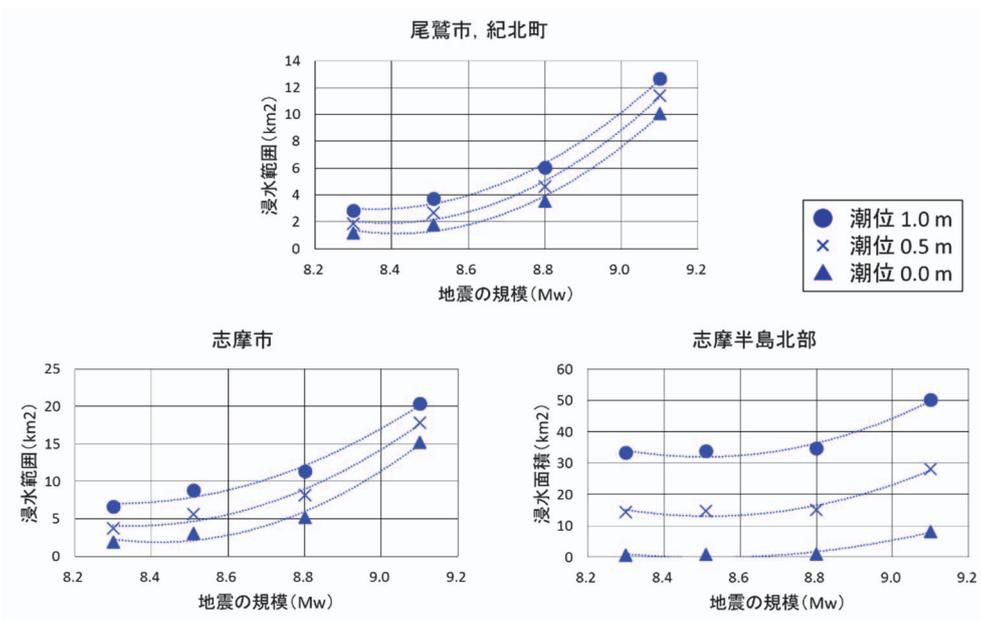


図4 地震の規模と浸水面積の関係

## (2) 各支援量推定結果

### a) 給水支援量

図5に志摩半島北部における給水支援量の分布図を、図6に給水支援量の地震の規模に対する変化のグラフを示す。図6より、この3地区における最大給水支援量は100t/日（志摩半島北部）であることが分かった。また最小値から最大値への変化はどの地区でも大きく、最大で約100倍となった。この結果は、給水支援量が地震の規模や潮位によって大きく変動することを示している。現行の防災対策は被害の最大値の見積もりをベースに立案されているが、実際に必要な支援の量は事前の想定よりも比較的抑えられたものとなる可能性が高い。各地域レベルの防災対策の立案は各地方自治体に委ねられているが、今回明らかとなった必要支援量の非線形的な変化は、備蓄物資の準備量を決定する際に考慮する必要があると言える。他方、実際に災害派遣活動にあたる自衛隊においては、必要支援量が非線形的に変化するという特徴を押さえることに加え、図5で示したような地域ごとの支援量を示した分布図と併せた運用や、支援計画の立案が必要であるといえる。

また、今回の給水支援量は津波浸水範囲と人口密度から算出した。支援量分布は沿岸部ほど支援量が大きく、また総支援量の変化の振る舞いは津波浸水範囲の変化と酷似していることから、給水支援量の増減には津波浸水範囲が支配的であると言える。

### b) 入浴支援量

図7に、三重県の都市ガス供給地区を示す。本研究では3つの地区を検討対象地域としたが、都市ガスが供給されているのは志摩半島北部のみであることがわかる。志摩半島北部において都市ガス供給地区に震度分布図を重ね合わせたのが図8である。この図は、 $M_w = 8.5$ 以上で都市ガスが停止することを示している。この結果をふまえ、津波浸水範囲も考慮した



図5 志摩半島北部における給水支援量の分布図

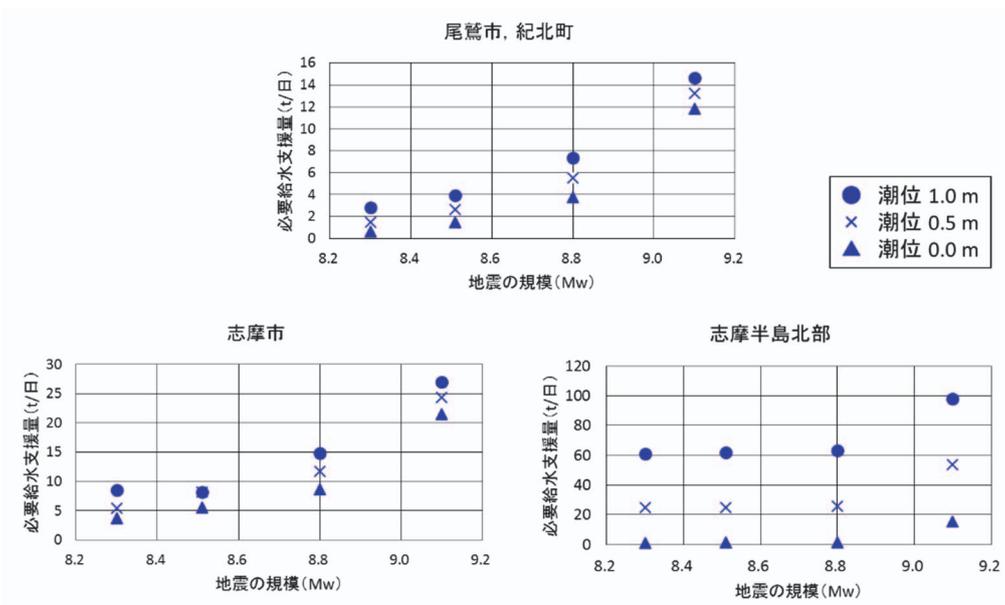


図6 地震の規模と給水支援量の関係

算出した入浴支援量の変化を図9に示す。尾鷲市、紀北町及び志摩市では入浴支援者数が指数関数的に増加した。これは津波の浸水範囲の変化の影響を反映している。志摩半島北部ではMw = 8.3からMw = 8.5にかけて都市ガス停止の影響を反映し、支援量が2万人から約23万人の約11倍に増大するという大きな変化が見られた一方、Mw ≥ 8.5の範囲では、地震の規模が増大しても大きな変化は見られなかった。この最大約23万人という数は他の2地区の量と比べ著しく大きなものである。したがって、入浴支援量の変化には地震による都市ガス停止の影響が支配的であり、津波の浸水のない地域でも多大な影響を受けることを考慮する必要があると言える。

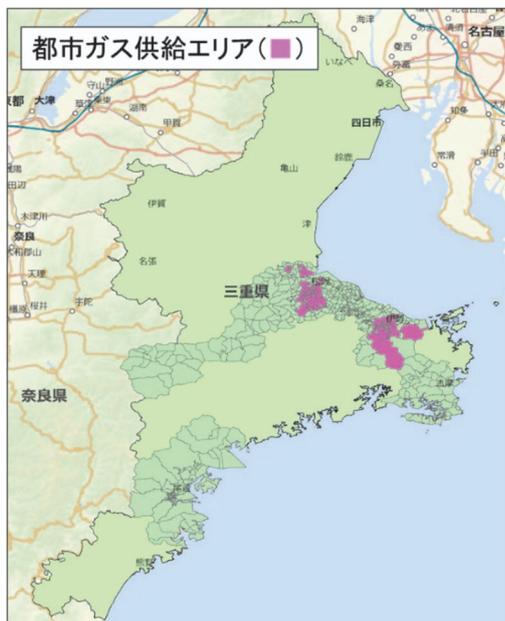


図7 検討対象地の都市ガス供給エリア

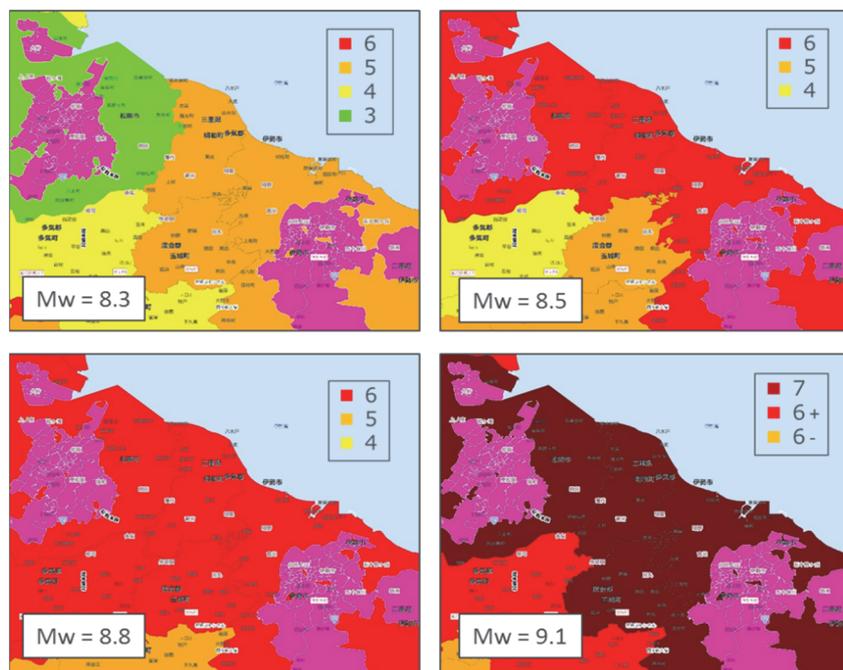


図8 都市ガス供給地区と震度分布. いずれの図でも不変のピンクの部分を図7で示した都市ガス供給地区.

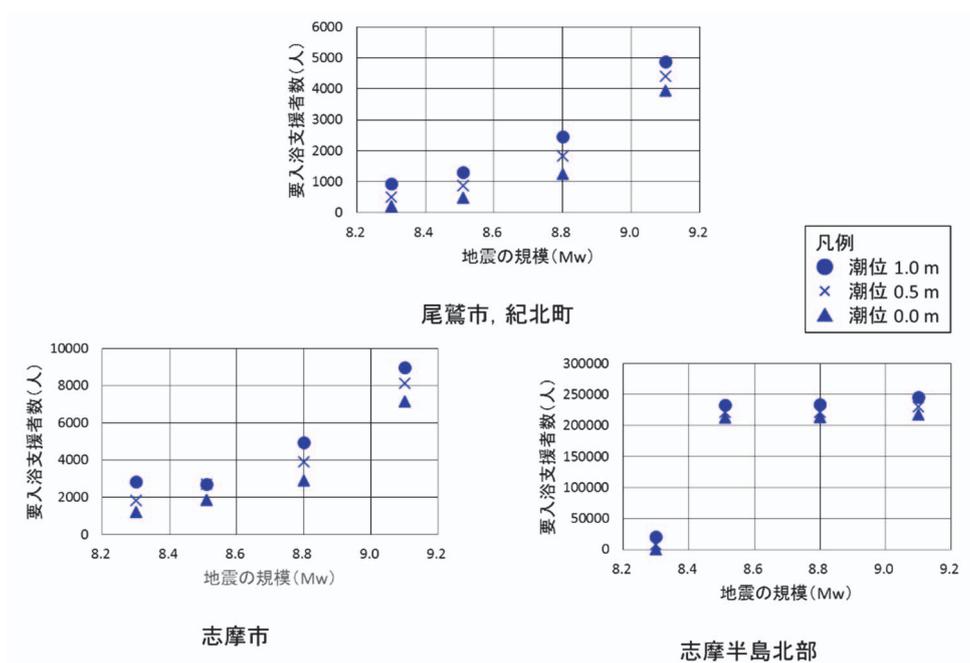


図9 地震の規模と入浴支援量の関係

c) 仮設トイレ支援量

仮設トイレの支援量は、支援対象エリア内の避難所等の数を算出することにより推定した。図10に、志摩半島北部における仮設トイレ支援対象エリアの変化を示す。青のエリアの増加は、浸水範囲の増加による支援対象エリアの拡大を示している。潮位の増加に伴いピンクのエリアが内陸に向かって拡大しているが、これは処理施設やポンプ場が浸水したことによる支援対象エリアの拡大を示しており、これらの処理施設等が受け持つ上流の下水流域にまで影響が及んでいることを反映している。

図11に各地域における仮設トイレ支援量の変化を示す。尾鷲市、紀北町及び志摩市では地震の規模が増大してもそれほど支援量が変化せず、飽和しているような振る舞いが見られる。これは、避難所のある平地のほとんどが浸水することを意味しており、志摩市でその傾向が顕著である。志摩半島北部においては、 $M_w \leq 8.8$ では支援量がほぼ一定であったが $M_w = 9.1$ になると急激に増大した。これは処理場施設等の機能停止による増加であり、仮設トイレ支援量の変化には下水処理場施設等の機能停止の影響が大きいことを示している。

(3) 統一的観点から評価した被害量の地域特性

自衛隊法第83条では自衛隊の災害派遣について規定しており、都道府県知事等は天変地異等の災害発生時に自衛隊の派遣を防衛大臣等に要請することができることとされている。一般論として、災害等が発生した際には一義的には各地方公共団体の警察もしくは消防が対処することになるが、これらの対処能力を超える事態であると都道府県知事等が判断した

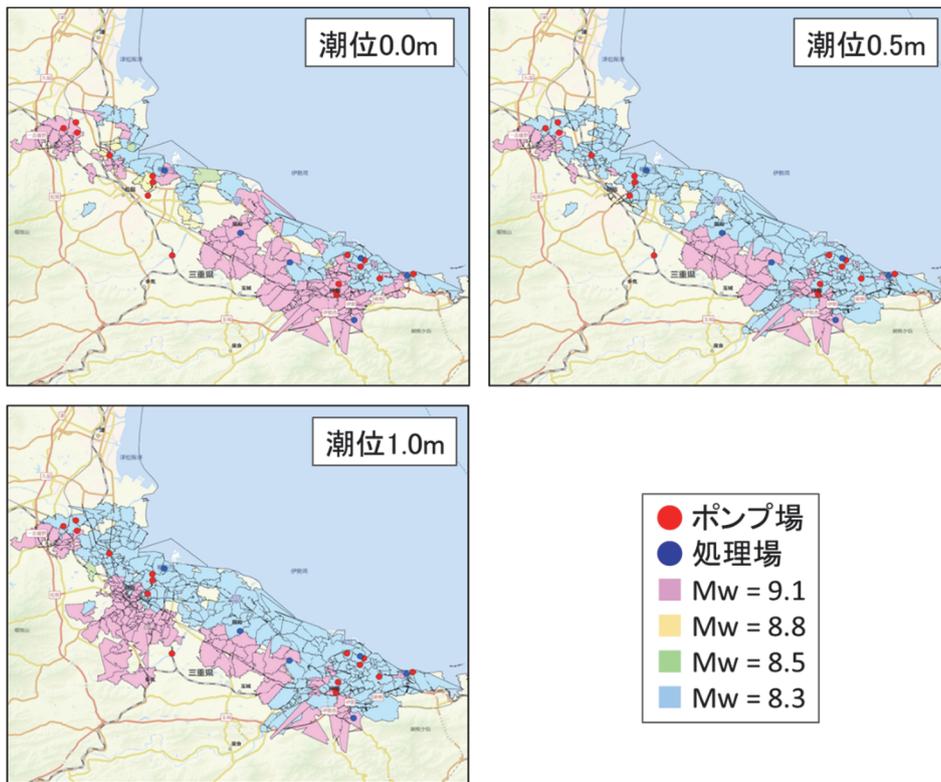


図 10 志摩半島北部における仮設トイレ支援対象エリアの変化。

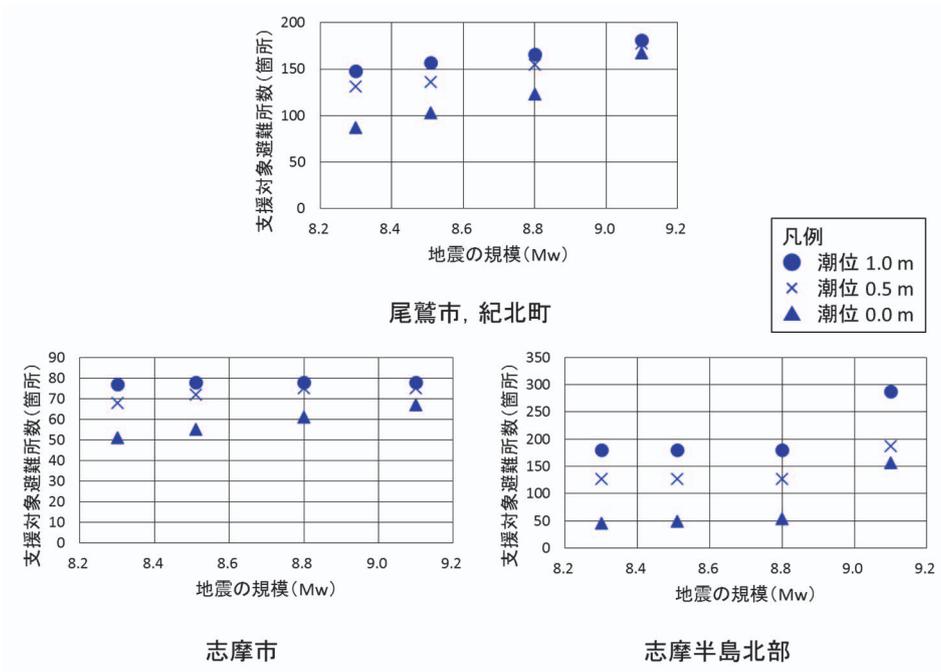


図 11 地震の規模と仮設トイレ支援量の関係

場合には、自衛隊の災害派遣が要請される。この際の「対処能力を超えるか否か」の判断基準は定量的には明らかになっていないが、本研究においては統一的な観点をを用いてこれを判断し、要支援地域選定のための優先順位づけを行うこととする。前項までの必要支援量の推定結果は、支援量ごとに値や変化の振る舞いが異なっているため、被害人口を共通の尺度に用いて再度評価を試みた。ここでは以下の式(1)に従い、各地の人口に対する被害の期待値(推定被害率)を算出することで地域特性を評価した。なお、この推定被害率は各地域において支援が必要な人の割合を示している。

$$\text{推定被害率(\%)} = \frac{\text{各種支援が必要な人口の和}}{\text{各地域の総人口}} \times \frac{1}{3} \times 100 \quad (1)$$

図12に、推定被害率の変化を示す。尾鷲市、紀北町及び志摩市では推定被害率は20~30%程度で推移し、エリア内の人口に対する被害の割合は低いことがわかった。一方、志摩半島北部では最大約60%の住民に被害が出るという結果となった。したがって、マグニチュード9.1の地震が発生した場合は志摩半島北部が第一の要支援地域として選定されることとなる。他方、推定被害率は発生した地震の規模によって大きく異なるため、発生した地震の規模に応じて臨機に判断することも求められる。

地域間の推定被害率の違いは各地の生活インフラの抗堪性を反映していると考えられる。推定被害率の低かった地域では都市ガスは整備されておらず下水管網も未発達であるが、例えばプロパンガスは停止しても自力で復旧が可能であるため、抗堪性は高いと解釈できる。一方、都市ガスや下水道網が整備されている地域では、拠点施設が機能喪失することによりその影響が広範囲に及ぶため、結果的に抗堪性は低いと解釈できる。このことから今後のインフラ網の整備にあたっては、各地をブロック化する等の対策を施すことによって被害が及ぶ範囲を最小限にとどめるといった対策をとる必要があると言える。

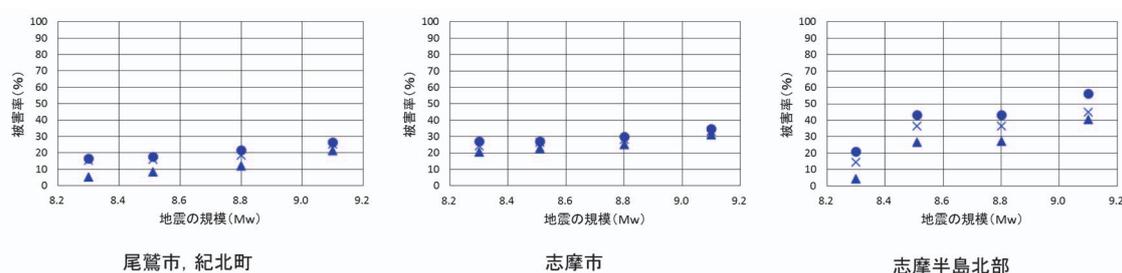


図12 各地の推定被害率

### (3) 統一的観点から評価した被害量の地域特性

最後に、同程度の推定被害率の地域にも要支援地域選定のための優先順位づけを行うため、被害烈度曲線による評価を行った。被害烈度は上記の推定被害率をそのエリア内の最大

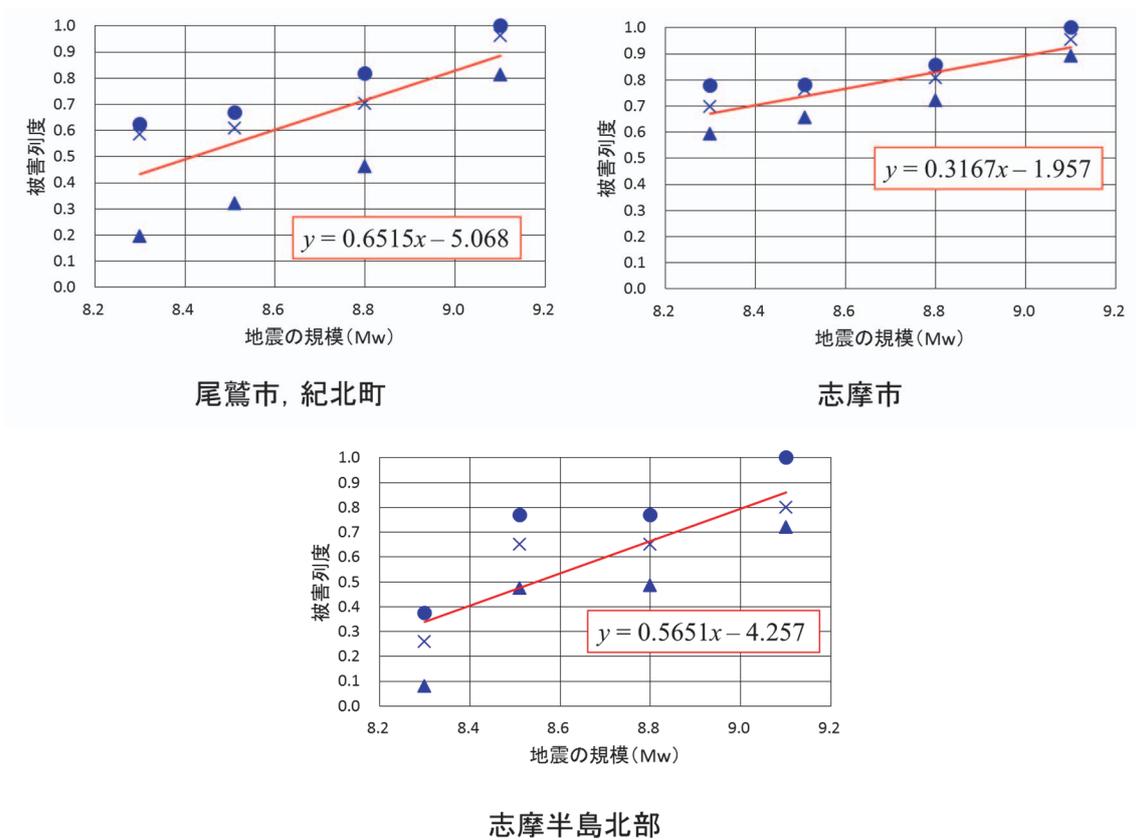


図 13 被害烈度曲線

推定被害率の値で正規化し算出した量であり、1に近いほどそのエリアで考えられる被害の最大値に近いことを示している。今回は  $Mw = 9.1$  かつ地震発生時の潮位が  $1.0m$  の場合が最も被害が大きいケースに相当するため、この被害にどれだけ近い規模の被害がもたらされるかということを示していることになる。

図 13 に被害烈度をプロットしたグラフを示す。この被害烈度の変化の振る舞いを被害烈度曲線とし、最小二乗法により導出し図中の赤線で示した。この曲線の傾きが小さいほど、規模の小さな地震であっても最大被害に近い被害が発生することを意味している。したがってこのようなエリアでは自衛隊支援のニーズが大きく、潜在的に要支援地域に相当するといえる。一方で被害烈度曲線の傾きが大きなエリアでは、発生した地震の規模や地震発生時の潮位によって被害の程度が大きく変化することを示している。したがってこのような地域においては、発生地震の規模や発生時の潮位を見極め、支援のプライオリティを決定する必要があると言える。

今回のケースでは、志摩市の被害烈度関数の傾きが約  $0.3$  と最も小さな値であった。したがって、マグニチュード 9 の地震が発生した場合、志摩市が第二の要支援地域として選定されることとなる。なお、マグニチュード 8 のとき  $y \approx 0.58$  であり、最大被害量の約 60% の被害が出ることが予想される。一方、尾鷲市、紀北町及び志摩半島北部では同じマグニチャー

ドでそれぞれ  $y \doteq 0.14$ ,  $y \doteq 0.26$  であり、志摩市における被害烈度の大きさがマグニチュード8の段階で際立っていることが伺える。前述のとおり、来るべき南海トラフ地震ではマグニチュード8～9クラスの地震が発生することが予想されており、被害烈度関数の結果を基にすることで、推定被害率だけでは決定することのできない優先順位付けを行うことができると言える。

## 4 結論

三重県東部から南部の沿岸部に向け、南海トラフ地震発生に伴う津波被害による自衛隊の必要支援量の推定を給水支援量、入浴支援量、仮設トイレ支援量について行った。給水支援量には津波浸水範囲の変化が、入浴支援量には都市ガスの被害の有無が支配的である。仮設トイレ支援量は、津波浸水範囲の影響が支配的である地域では地震の規模が増大しても頭打ちになる傾向がある一方、下水処理場を有する地域では処理場の浸水により支援量が激増する。これら3つの支援が必要な人口を各地域の総人口で除すことにより支援が必要な人口の割合をそれぞれ求め、平均値を取ることで各地域の推定被害率を算出した。尾鷲市、紀北町及び志摩市では推定被害率が30%以下で推移する一方、志摩半島北部では最大約60%と大きな値となり、今回検討を行った3地域において最大規模の地震が発生した場合には志摩半島北部が第一の要支援地域であると言える。これらの推定被害率の違いは都市ガスや下水網の整備状況に起因するものと考えられ、都市ガスや下水網の整備が進んでいる地域ほど津波浸水による影響が広範囲にわたることを示している。また各被害率の値をそれぞれの地域の最大被害率で正規化することにより各地域の被害烈度曲線を作成した。この曲線の傾きが小さいほど地震の規模が小さくても大きな被害が発生すること意味しており、自衛隊による支援のニーズの高い要支援地域であることを潜在的に示している。本研究においては、志摩市が第二の要支援地域であることを示した。

本研究において示した各種支援量の値の変化や被害烈度曲線は、大規模震災発生時の即応性に資することはもちろん、防災対策にも活用することができる。地方公共団体との事前打ち合わせにおいてこれらの資料を示すことで、各市町村レベルで必要な支援量を事前に定量的に示すことができる。これにより、震災発生時の物資の受入れ拠点にどれくらいの容量が必要かといったことや、地方公共団体において備蓄すべき物資量を示すことができる。また都道府県レベルとの協議の際には、各都道府県内において自衛隊派遣の際の優先順位付けを事前に議論することができる。

今後の課題として、各種支援量のより詳細な検討や、被害烈度曲線の精緻化が挙げられる。本研究においてはマグニチュードを4段階で変化させたが、これをより小刻みにすることでさらに詳細な各種支援量の変化や被害烈度曲線を得ることが出来る。マグニチュ

ード8以上の地震による被害は相当程度に大きくなることが予想されるものの、マグニチュード9に近づくとつれ、被害がさらにもう1段階スケールアップすることが予想される。この閾値を事前に正確に把握することで、災害発生時に被害の全体像をより容易に把握することができると期待される。また、津波浸水範囲の影響を見積もるにあたっては人口密集地か否かを考慮しなかった。尾鷲市、紀北町エリアはリアス式海岸の地形であるため沿岸部のみに人口が集中している可能性が高い。この居住人口の地理的な偏りは3.3で求めた推定被害率の計算結果に影響を与えるが、人口集中を考慮した場合、尾鷲市、紀北町エリアの推定被害率が激増し、同項で述べた優先順位が入れ替わる可能性がある。

今回解析で用いたGISの特徴の1つに、データの共有ができることが挙げられる。実際、GISを導入している地方公共団体においては、災害情報を住民向けにインターネットで配信しているところもある。また、災害発生後のオペレーション時にもGISの有用性が認められていることは冒頭で述べた通りである。防衛省・自衛隊は情報管理に相当程度の注意を払うことが求められる組織ではあるものの、このようなGISの特性をうまく活用することで関係機関等とも円滑に情報共有ができ、未曾有の災害に対する救援活動等においてもより多くの国民を救うことが出来ると期待される。

さらに将来的な展望として、本研究において提案した自衛隊支援量の見積もり手法を精緻化していった暁には、気象庁が保有している津波計算結果のデータベースと、本研究によって提案する自衛隊支援量の見積もり方法をリンクさせ、あらゆる規模の地震・津波に対応した自衛隊支援量算出システムが構築できるということが期待される。省庁横断的な案件にはなるが、先の震災のような未曾有の事態において一刻も早い自衛隊による支援を可能とするため、こうしたコラボレーションが生まれることを期待したい。

謝辞：自衛隊の災害対処計画に関する資料の提供等については防衛省統合幕僚幹部運用第2課災害派遣班よりご支援を賜りました。ここに附記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1 内閣府：平成24年度版 防災白書，2012。
- 2 防衛省：平成28年度版 防衛白書，2016。
- 3 防衛省：東日本大震災への対応に関する教訓事項（最終取りまとめ），2012。
- 4 内閣府中央防災会議：防災対策推進検討会議最終報告，2012。
- 5 総務省：平成25年度版情報通信白書，2013。
- 6 地震調査研究推進本部：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について，2013。
- 7 内閣府中央防災会議：南海トラフ巨大地震対策について（最終報告），2013
- 8 安中正，稲垣和男，田中寛好，柳沢賢：津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴，土木学会地震工学論文集，第27巻，0307(1-4)，2003
- 9 Esri ジャパンホームページ：<https://www.esri.com/>（2017年6月閲覧）

- 10 G 空間情報センター：[https://www.geospatial.jp/gp\\_front/](https://www.geospatial.jp/gp_front/)
- 11 国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービス：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- 12 東邦ガス：<http://hajimeru.chuden.jp/gas/mie/>
- 13 伊勢市上下水道部下水道建設課：<http://www.city.ise.mie.jp/6045.htm>
- 14 志摩市：[https://www.city.shima.mie.jp/kurashi\\_tetsuzuki/jogesuido/gesuido/1458721507902.html](https://www.city.shima.mie.jp/kurashi_tetsuzuki/jogesuido/gesuido/1458721507902.html)
- 15 内閣府中央防災会議：南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画，2015.
- 16 アズビル株式会社ホームページ：[https://www.compoclub.com/support/faq/faq\\_ses.html#6](https://www.compoclub.com/support/faq/faq_ses.html#6)
- 17 三重県防災対策部：地震被害想定調査結果（ハザード関係）の概要について，2014.
- 18 飯塚秀則，松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.381-385，2000.

# 海上自衛隊横須賀地区における津波発生時の船舶の避難海域設定に関する研究

北 隆範\*, 嶋原 良典\*\*, 多田 毅\*\*, 八木 宏\*\*

\* 防衛省 北関東防衛局土木課

\*\* 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科

## 1 背景と目的

我が国は世界でも有数の地震の多発地帯に位置し、過去を振り返ると概ね一定の間隔で発生する地震や地震によって引き起こされた津波などによって、幾度となく被害を受けてきた。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（M9.0）では、東北地方を中心に死者・行方不明者が2万人以上、被害額が16兆円以上という甚大な被害をもたらした<sup>1</sup>。また、2016年4月14日以降に発生した熊本県を中心とする熊本地震では、九州地方で初となる震度7を観測し、死者・行方不明者が49人<sup>2</sup>、内閣府によれば被害額は最大4.6兆円にのぼるとの試算を示す<sup>3</sup>など甚大な被害となったことも記憶に新しい。

防衛省では、内閣府中央防災会議が想定している津波等を念頭にした防衛省防災業務計画（H19.9.1）を基に「自衛隊施設の津波対策ガイドライン」（経設第9190号.21.7.31）を策定し、自衛隊施設の津波対策を進めている。本研究で対象とする海上自衛隊横須賀地区は海上自衛隊の中樞の基地であり、我が国の防衛の観点から重要な地区であるが、他方で、平成27年3月、神奈川県は地震被害想定調査報告書<sup>4</sup>を作成し、同県において被害をもたらす可能性がある地震を対象とした調査を実施し、横須賀市の沿岸部で浸水が発生するとの結果を示した。

横須賀地区には多くの艦船が所在しているが、襲来する津波の挙動によっては艦船の避難や自衛隊の任務の1つである災害派遣活動の迅速な遂行に影響を与えることが懸念されることから、今後発生が想定される地震が横須賀地区周辺海域に及ぼす影響を検証し、津波の襲来時における艦船が取るべき行動について検討する必要がある。

また、一般的に、津波の襲来時には艦船などの船舶は津波被害から逃れるために沖合に避難することが多い。津波により船舶が受ける被害としては、津波の流れに押し流されて操船不能となる場合と碎波に巻き込まれる場合がある。このため、現行では船舶が避難する海域の条件として、1. 避難海域での最大流速が津波の流速によって操船が困難となる操

船限界流速 1 m/s 以下であること、2. 碎波の発生がない水深であることの 2 点が挙げられる。これらの条件の下、津波シミュレーションを用いて安全な海域を事前に示すことは重要な津波対策の 1 つと言える。一方、現在示される避難海域の多くがいわゆる「最大クラスの津波」を想定したものであるが、懸念として、実際に地震が発生した際にその地震が事前に想定したものであるかを知ることは非常に難しく、そもそも想定外の地震である可能性もある。また、いわゆる「最大クラスの津波」が「発生頻度の高い津波」より必ずしも強い流速が生じるとは限らない。従って、艦船が向かうべき避難海域の設定に当たっては、対象とする地域に影響があると思われる「最大クラスの津波」と「発生頻度の高い津波」のサンプル数を出来るだけ多く集め、個々のケースを重ね合わせて統一的に評価することが望ましい。また、この評価結果によっては、これまでは見えてこなかった、潜在的に強い流速が生じやすい危険な海域を抽出することも期待される。

そこで本研究では、津波シミュレーションを用いて、南関東近傍で想定される津波が横須賀地区周辺海域にもたらす影響を検証し、艦船の規格毎に津波襲来前の避難海域への移動の可否を評価する。また、現行の避難海域の設定手法に、潜在的に危険な海域の評価も含めた避難海域の設定を試みる。

## 2 対象地域

### (1) 東京湾

本研究の対象地域である東京湾は、図 1 に示すように南側の太平洋に向けて開けた湾であり、三浦半島の観音崎と房総半島の富津岬を結んだ線の北側（内湾）と南側の浦賀水道を含んだ海域（外湾）を指す。海底地形として、内湾部の水深は数十 m オーダーと比較的浅いが、外湾になると急激に深くなる特徴を有する。また、同図中に紫線で示しているのは東京湾中央航路であり、東京港・横浜港・千葉港等に出入りする船舶が 500 隻 / 日以上航行する海上交通の過密海域である。

### (2) 横須賀地区の概要

横須賀地区は東京湾沿岸部に位置し、自衛艦隊司令部・護衛艦隊司令部・潜水艦隊司令部などが所在する海上自衛隊の中核的な機関が所在している。昨年 3 月 25 日には、第 1 護衛隊に最新型護衛艦の「いずも」(DDH-183) が配備されており、南極観測船の「しらせ」(AGB-5003) の母港としても有名である。

### (3) 神奈川県地震被害想定調査報告書

平成 27 年 3 月、神奈川県は県内に甚大な被害をもたらす可能性がある地震に関する地震被害想定調査報告書を策定した<sup>4</sup>。この結果「最大クラスの津波」の場合、横須賀市の港湾

地区の大半が浸水するといった結果が得られ、海上自衛隊の施設が所在する地区も約 1~2 m 浸水するとされている。

### 3 解析手法

#### (1) 津波シミュレーション方法

津波の伝播・遡上計算から津波波高と流速を算出した。支配方程式には海底摩擦や非線形効果を考慮した非線形長波理論を適用した。具体的には式(1)の連続の式、式(2)と(3)の運動の式で示される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\eta$ は水位（平均海面を基準とする）、 $M$ は $x$ 方向の線流量、 $N$ は $y$ 方向の線流量、 $h$ は静水深、 $g$ は重力加速度、 $n$ はManningの粗度係数、 $D$ は全水深（= $\eta+h$ ）である。支配方程式を数値的に解くため、Staggered Leap-frog 差分法を使用した<sup>5</sup>。

地形データは内閣府公開のものを使用し、津波波減域を含む沖合から空間格子長を 270, 90, 30, 10m まで順次小さくするように空間接続を実施した。各計算領域の範囲は図 1 に示す通りである。津波の再現時間は地震発生から 6 時間、時間ステップは 0.1 秒とした。Manning の粗度係数は海域を 0.025、陸域は遡上も考慮し、粗度を土地利用状況等に応じて与えた。津波時の潮位条件としては朔望平均満潮位 0.9m に設定した。

#### (2) 想定地震（震源モデル）

本研究では想定した地震の震源モデルとして神奈川県津波浸水想定(平成 24・27 年度)を参考に、南関東近傍を震源とする「最大クラスの津波」に元禄型関東地震 (M8.4) を、「発生頻度の高い津波」として大正型関東地震 (M8.0)、三浦一鴨川断層地震 (M7.4)、東京湾内地震 (M7.0)、神縄・国府津-松田断層地震 (M7.0-2) を対象とした。各震源モデルにより生じる地殻変動量は Mansinha and Smylie の方法<sup>6</sup>により求めた。得られた津波初期水位分布を図 1 と図 2 に示す。

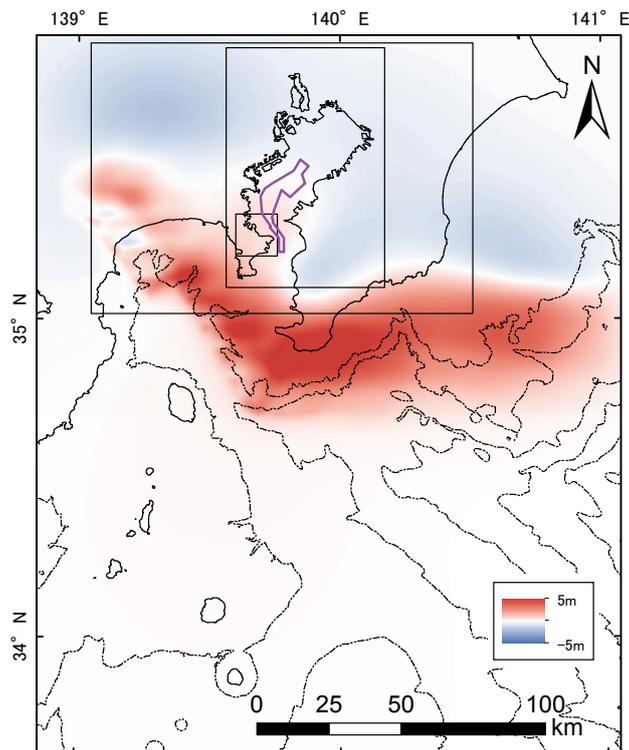


図1 計算領域 (270 m 格子, 枠内: 90, 30, 10 m 格子) と想定震源モデル (M8.4) による津波初期波形. コンターは水深 1,000 m 毎に表示.

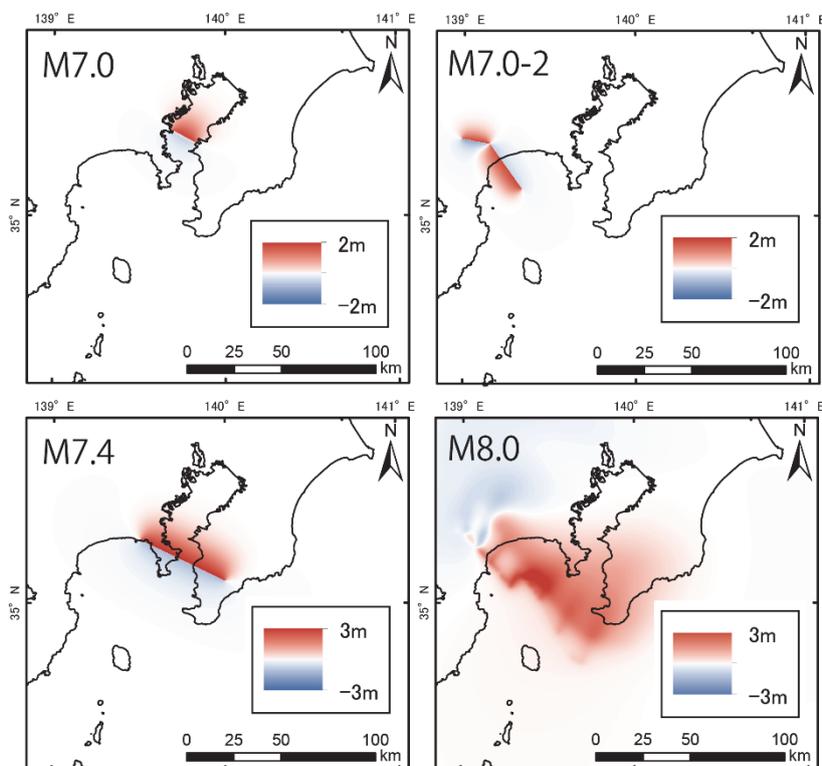


図2 想定震源モデル (M7.0~M8.0) による津波初期波形

## 4 津波シミュレーション結果 —横須賀地区に來襲する津波—

津波シミュレーションによって得られた、各震源モデルに対する津波の最大浸水深分布を図2、最高水位分布を図3に示す。元禄型関東地震の場合、神奈川県の上水予測図と同様、港湾地区の大半が浸水するといった結果になり、海上自衛隊施設も約1m浸水するという結果になった。その他、三浦—鴨川断層地震や東京湾内地震でも浸水が見られた一方、大正型関東地震と神縄・国府津—松田断層地震は震源地が相模湾であることから浸水は見られなかった。また、横須賀地区における最高水位は元禄型関東地震の4.0mを筆頭に、三浦—鴨川断層地震で3.7m、東京湾内地震で3.3mなどとなっている。

次に、各震源モデルに対する津波の最大流速分布を図5に示す。元禄型関東地震の場合、長浦地区と本港地区の湾の狭窄部では、他の水域と比較して強い流速が発生しており、場所によっては流速が約3m/sの流れが生じている。一方で、大正型関東地震の場合、三浦半島の西側が強震域であることや元禄型関東地震と比較して初期水位は低いことから、両地区の湾の狭窄部でも1.5m/s以下の流れにとどまっている。

「発生頻度の高い津波」の三浦—鴨川断層地震では、両地区の湾の狭窄部で流速約2.2m/sの流れが生じ、大正型関東地震と比較して強い流速となっている。また、東京湾内地震でも長浦地区の湾の狭窄部で約1.8m/sの流れが生じている。他方で、神縄・国府津—松田断層地震は横須賀地区から離れた相模湾を震源とすることから、ほとんど流速は生じていない。

続いて、特に強い流速が発生する元禄型関東地震について、長浦地区内での津波流速の時系列を図6に示す。同地点は、津波襲来時に船舶が沖合に避難する際に航行すると思われる箇所のうち、特に強い流速が生じた箇所を抽出している。元禄関東地震のケースの場合、流速3m/sほどの強い流速はいずれも第1波の到達となる津波発生から約34～44分後の引き波時に生じている。また、元禄型関東地震の特徴として、現行の避難海域の目安とされる流速1m/sが繰り返し生じていることが分かった。元禄型関東地震の場合、湾の狭窄部の中央部における最大流速は津波発生から約44分後に観測される2.9m/sである。この時刻における流れの様子を図7に示すが、流れの向きが多方向で複雑になっていることが分かる。仮に沖合に避難に向かう船舶がこの時間帯に遭遇する場合、複雑な流れ方向と強い流速に同時にさらされる可能性がある。

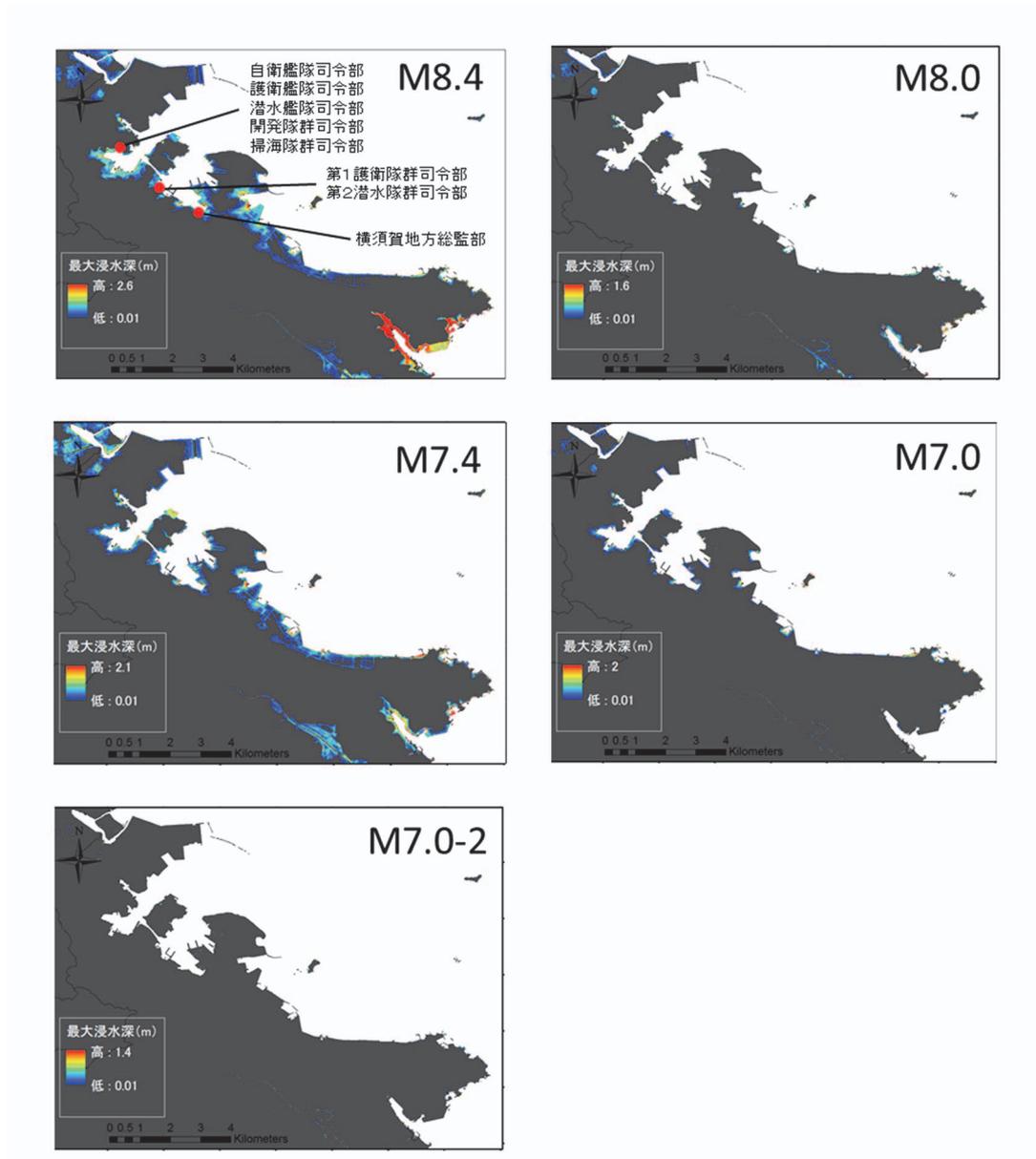


図3 各想定地震に対する津波の最大浸水深分布

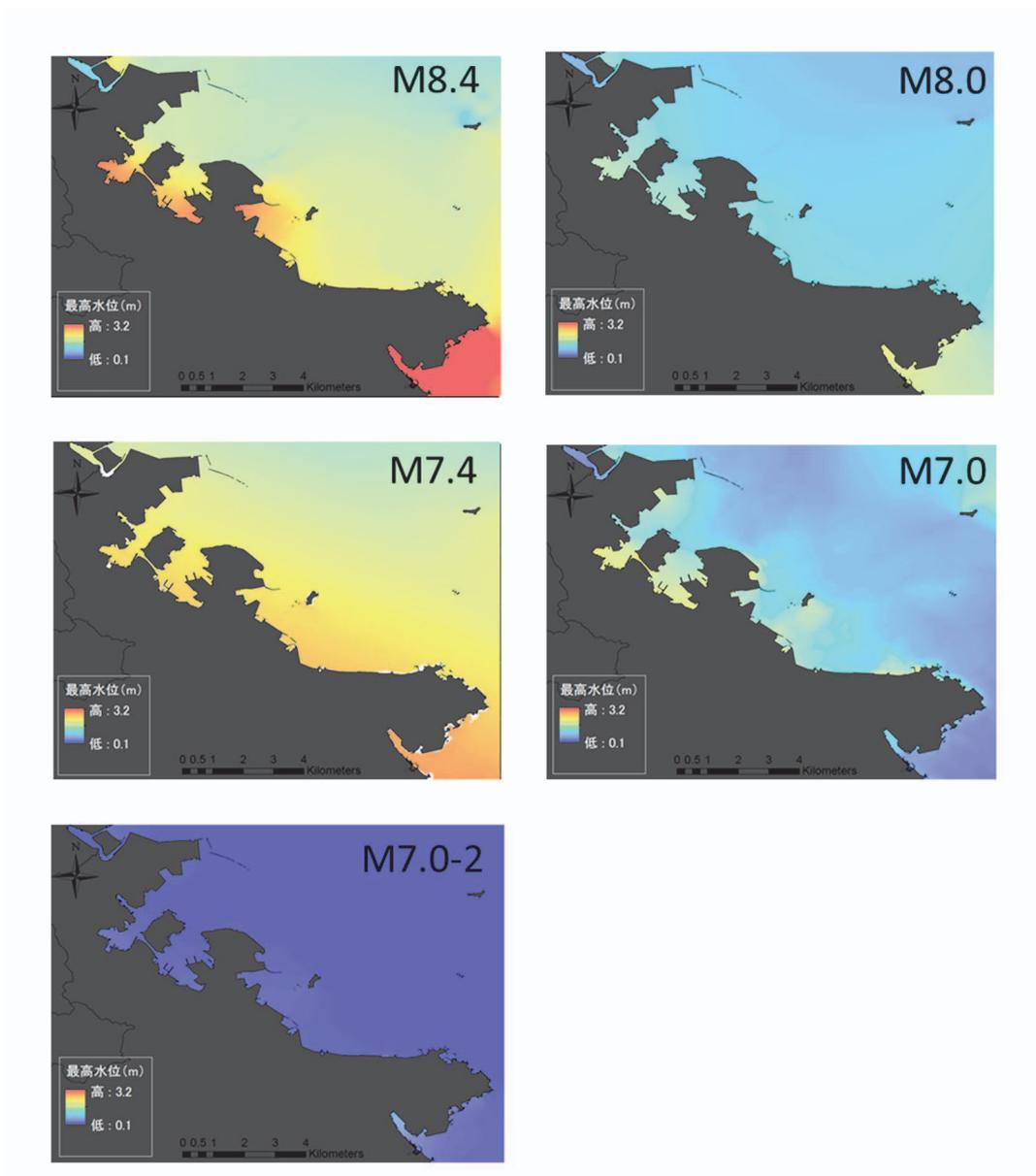


図4 各想定地震に対する津波の最高水位分布

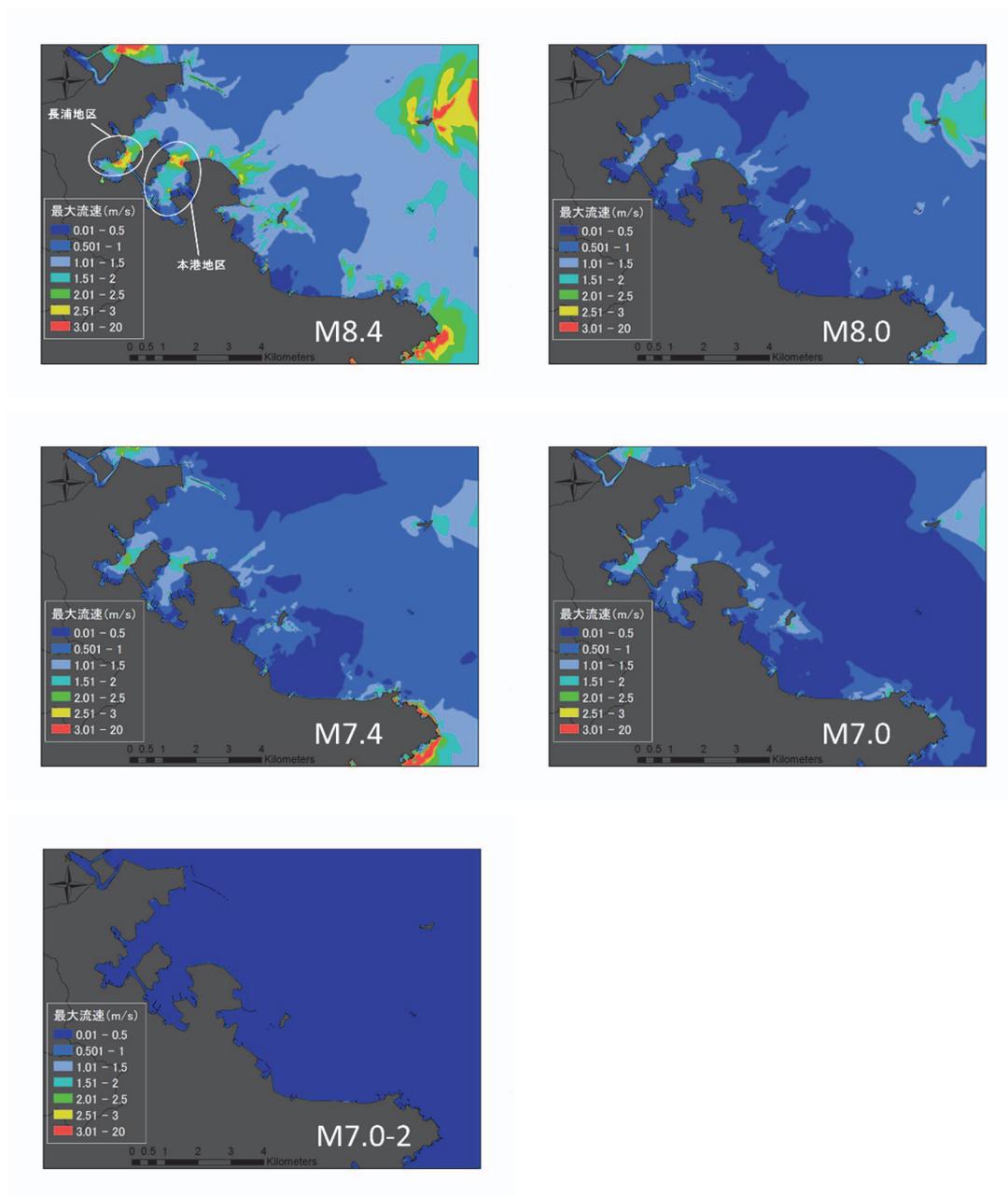


図5 各想定地震に対する津波の最大流速分布

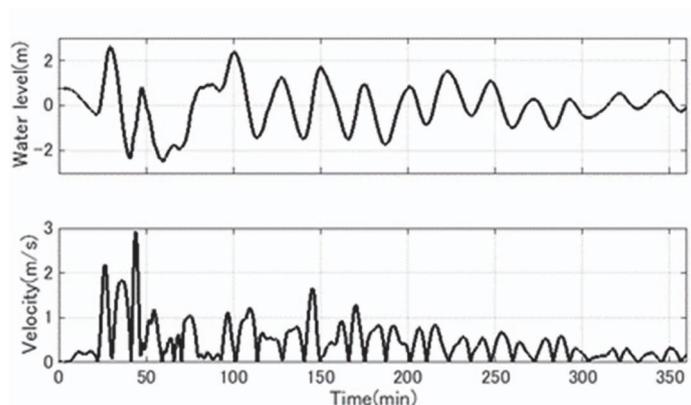


図 6 長浦地区内の津波水位と流速の時間波形（元禄型関東地震 M8.4）

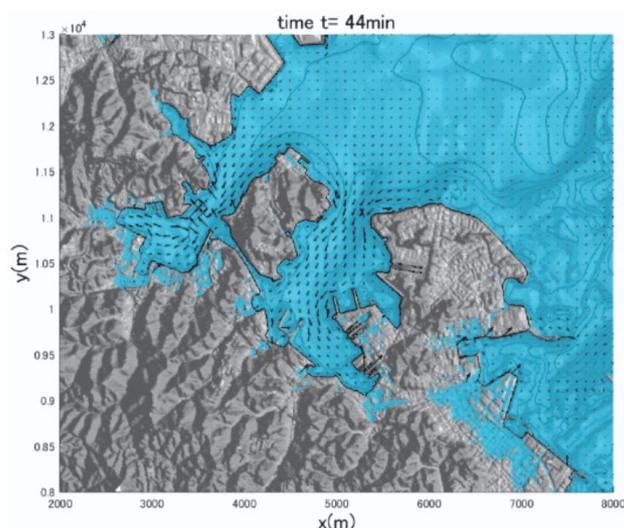


図 7 地震発生から 44 分後の津波流況（元禄型関東地震 M8.4）

## 5 船舶避難リスクマップに基づく津波時の艦船の避難海域・航路の設定

以下では、4.で得られた各津波イベントの水位・流速の結果を基に船舶避難リスクマップを新たに作成し、特に艦船の避難海域の設定と避難海域への移動の可否を評価する。必要な情報として津波の砕波条件、全想定地震（津波イベント）を通じての津波の最大流速分布、操船が困難となる限界流速の超過確率、である。これらの情報を重ね合わせることで船舶避難リスクマップを構築・利用することにより操船困難になりかつ砕波の影響を受ける可能性が小さい、津波時の推奨避難海域を抽出することができる。さらに、艦船の規格毎に津波来襲前に推奨避難海域への移動の可能性についても検証する。

### (1) 砕波条件

現在の避難海域の設定手法では砕波の発生しない目安を想定津波高さの4倍以上の水深としている。本研究においても横須賀地区における想定津波高さ4.0mの4倍の水深を安全側に評価して、20mを砕波の発生しない水深とした。

### (2) 全想定地震における津波の最大流速分布

避難海域の設定条件の1つである流速について、式(4)に基づき、全想定地震においてある地点  $Z(x, y)$  で観測される流速を重ね合わせて最大となる流速を抽出したマップをベースとする。図8に5つの地震の最大流速を重ね合わせたものを示す。なお、 $N$ は想定地震の総数である。

$$V_z = \max(v_{1,xy}, v_{2,xy}, \dots, v_{N,xy}) \quad (i = 1, 2, \dots, X_N) \quad (4)$$

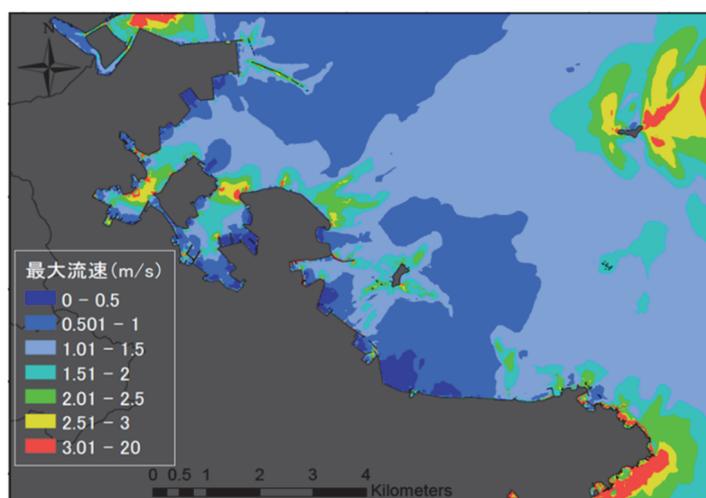


図8 津波の最大流速分布（全津波イベントの最大値）

### (3) 操船限界流速の超過確率分布

#### a) 操船限界の目安

1.で述べた、船舶の避難海域の条件として挙げられる操船限界流速について、日本海難防止協会の報告書<sup>7</sup>で一般的貨物船を対象とした針路保持の限界の試算を行っている。その試算結果を図9に示す。避難海域の設定に当たり、沖合に避難する船舶は出来る限り津波を直角に乗り切ることが望ましいが、4.で示したように、津波の流れ方向は複雑であることも考慮し、保針可能限界の流向を7.5°, 9.0°, 12°の3パターンに分けて避難海域に必要な船速を求める。横須賀地区に配備されている各艦船の速力を表1、評価結果を表2に示す。なお、横須賀地区に所在する艦船のうち、潜水艦については本研究では対象外としている。

例えば、速力 14knot のやえやまに注目すると、流速 2.5m/s 以上の流れの中ではいずれの流向でも必要船速を下回り保針ができないことから、安全に操船することが困難となる。また、1.5m/s や 2m/s の流れの中では、流向によっては必要船速を下回り、安全な操船が困難となる可能性がある。従って、避難海域の設定にあたっては、いずれの流向でも操船可能な流速を目安とする。この場合、速力 14knot のやえやまの避難海域に望ましい流速は 1m/s 以下となる。

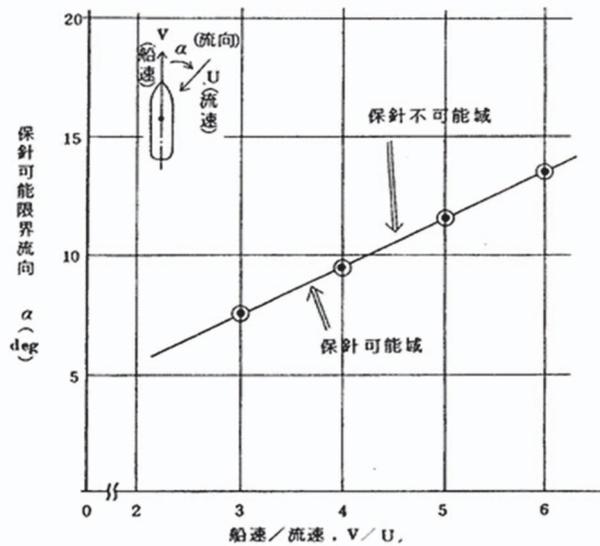


図9 斜め流れに対する保針限界

表1 艦船一覧

艦番号・艦名	速力(kt)	所属
むらさめ, いかづち, いずも, たかなみ	30	自衛艦隊-護衛艦隊-第1護衛隊群-第1護衛隊
たかなみ, おおなみ, てるづき, きりしま	30	自衛艦隊-護衛艦隊-第2護衛隊群-第6護衛隊
やまゆき, やまぎり, ゆうぎり	30	自衛艦隊-護衛艦隊-第11護衛隊
ときわ	22	自衛艦隊-護衛艦隊-第1海上補給隊
ちよだ	17	自衛艦隊-潜水艦隊-第2潜水隊群-直轄艦
うらが	22	自衛艦隊-掃海隊群-直轄艦
やえやま, つしま, はちじょう	14	自衛艦隊-掃海隊群-第51掃海隊
あすか	27	自衛艦隊-開発隊群-試験艦(あすか)
にちなん	18	自衛艦隊-海洋業務-対潜支援群-第1海洋観測隊
わかさ, しょうなん	16	自衛艦隊-海洋業務-対潜支援群-第1海洋観測隊
ちちじま, えのしま, はつしま	14	横須賀地方隊-第41掃海隊
はしだて	20	横須賀地方隊-横須賀警備隊-はしだて(特務艇:ASY91)
しらせ	19	横須賀地方隊-しらせ(砕氷艦:AGB5003)
輸送艇2号	12	横須賀地方隊-輸送艇2号(LCU2002)
えんしゅう	15	横須賀地方隊-えんしゅう(多用途支援艦:AMS4305)

表 2 避難海域で求められる船速

流向(°) \ 流速(m/s)	7.5	9	12
1	6	8	10
1.5	9	12	15
2	12	16	20
2.5	15	20	25
3	18	24	30

※1 表の白部分の単位はknot.

※2 1(m/s)=2(knot)として計算.

#### b) 地震の発生頻度の設定

地震の発生頻度  $n$  と地震マグニチュードには、グーテンベルク・リヒター則が概ね成立することを踏まえ、寺岡<sup>8</sup>は南関東近傍を震源とする5つの地震の発生頻度として式(5)を用いている.

$$p(M) = p_0 10^{-b(M-M_0)} \quad (5)$$

ここで、 $p_0=1$ 、 $M_0=8$  を標準の設定とし、グーテンベルク・リヒター則の  $b$  値は、 $b=1$  を標準とした。ただし、式(5)の形は地域によって異なり、あくまで M7 クラス以上の地震が発生した場合の各地震の相対的な起こりやすさを示すに過ぎない。この密度関数では、マグニチュード 8 以上の地震の発生回数が 0.43(回/50年)となる。

#### c) 操船限界流速の超過確率の算出

上記の仮定の下、全津波イベントに関して操船限界流速 1m/s (約2knot) を超える津波流速の発生確率を求める。各地震の発生確率  $P_i$  を式(6)、ある地点  $Z(x, y)$  での操船限界流速を超える津波流速の発生の有無を表す変数を  $I_{i,xy}$  とし式(7)のように定義すると、全津波イベントを通じて操船限界流速以上になる津波流速が発生する確率は式(8)のように表すことができる。

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1 \quad (6)$$

$$I_{i,xy} = \begin{cases} 0 & (\text{if } V_z < 1\text{m/s}) \\ 1 & (\text{if } V_z \geq 1\text{m/s}) \end{cases} \quad (7)$$

$$R_z = \sum_{i=1}^N P_i I_{i,xy} \quad (8)$$

ここで、 $P_i$ は式(5)により求めた各地震の発生頻度  $p(M)$ を正規化した確率密度で表現している。結果として得られる操船限界流速の超過確率分布図は図10のようになる。長浦地区と本港地区では全てのケースで、操船限界流速 1m/s 以上の流速の発生確率が高いことが分かる。また、第2海堡の右岸から沖合方向、八景島付近も同様に高いことが示された。これらの地区はマグニチュードや震源位置の異なる全てのケースのシミュレーションの結果、潜在的に流速が強まる海域であることが示され、本研究の対象地震以外のケースであっても強い流速が生じる可能性がある。このように最大流速分布と発生確率を組み合わせることにより、強い流速は発生するが発生確率は低い海域や、比較的弱い流速ではあるが発生確率は高い海域などを把握することが可能となり、潜在的に強い流速が生じやすい海域を把握することが可能となる。

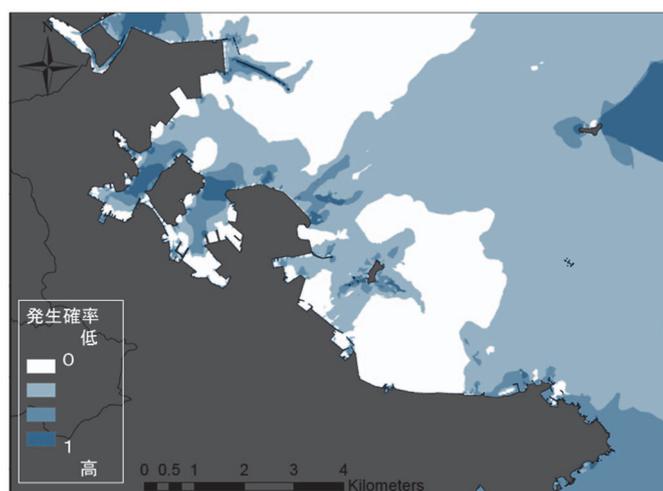


図10 操船限界流速 (1m/s) の超過確率分布

#### d) 船舶避難リスクマップの作成と推奨避難海域の抽出

津波の最大流速分布と操船限界流速の超過確率分布を組み合わせることで、船舶避難リスクマップを作成する。ハザードの大きさと発生確率を同一のマップ上で把握する手法として、多田<sup>9</sup>はハザードの大きさを色合いで、確率の大きさを濃さ・明るさで表現するカラーマップを利用することにより、外力リスクの空間分布を評価する手法を提案している。本研究では多田の手法に倣い、津波流速の大きさとして jet (青・緑・黄・赤) のカラーマップを基本とし、発生確率が大きくなると色が濃くなるような割り当てにした。具体的には、操船限界流速 1 m/s 未満は白、被害が発生する可能性が出てくる 1m/s 以上を青とし 0.5m/s 毎に色を変化させ、3 m/s 以上は赤に統一する。そして、確率の大きさに対応して3段階の濃淡で設定した。結果を図11に示す。長浦地区と本港地区の湾の突出部分は流速 2.5m/s 以上、発生確率 0.67 以上を示す濃い赤色となっており、避難航行に当たっては注意を要する箇所であることが分かる。このように津波流速の強さと操船限界流速の超過確率を同時に

可視化することで、船舶の津波避難時におけるリスクの大きい海域を容易に確認することが出来る。

さらに同図に碎波条件（水深 20m の等水深線）を重ねることで、操船困難になるかつ碎波の影響を受ける可能性が小さい、津波時の推奨避難海域を抽出した（図中 A, B の赤点線枠内）。例えば速力 12~14knot の場合、避難海域に望ましい流速は 1m/s 以下なので、地震発生時に横須賀湾内に所在した場合は一方で、いずれのケースでも操船限界流速 1m/s を超える流速が発生しない A 領域、もし、横須賀湾外に所在した場合は A 領域もしくは B 領域に向かうことが推奨される。また、避難海域への避難に際して何らかの支障が生じ、向かうことが出来ない場合は強い流速が発生しない海域かつ発生確率も低い海域、つまり、白色もしくは薄い青色で表示された海域に避難することが望ましいと言える。また、本研究では操船限界流速を 1m/s としたが、速力 15knot 以上の艦船についても、出来る限り安全を確保するという観点から見れば、A 領域もしくは B 領域に向かうことが望ましいと言える。

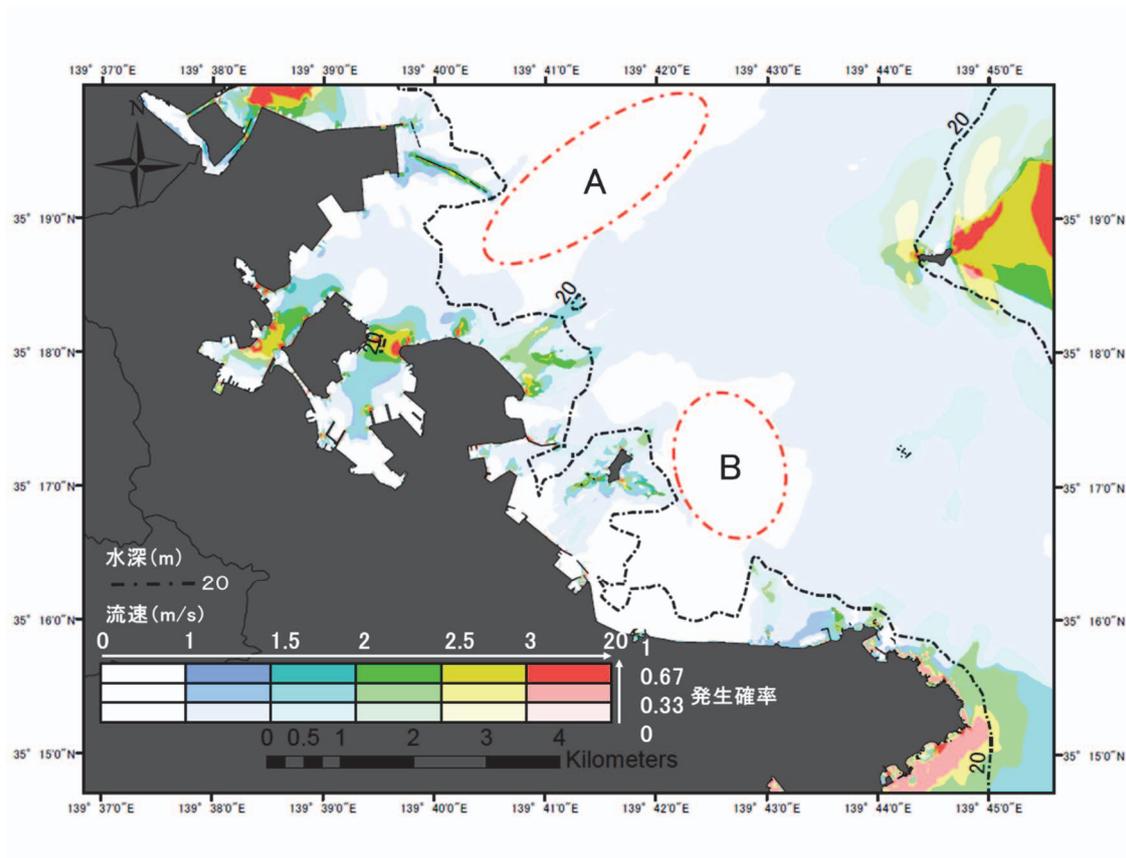


図 11 横須賀地区の船舶避難リスクマップと推奨避難海域（図中 A, B の赤点線枠内）

## e) 横須賀地区での艦船の津波避難の可能性

最後に、艦船の規格毎に津波襲来前に避難海域への移動が可能かについて検証する。実際に M7, 8 クラスの地震が発生した時にどの程度の流速が発生するのか、いつ最大流速に到達するのかなどを知ることは非常に困難である。現状で可能な方法としては、想定される全津波イベントに対して最短で出現する時間を示すことが参考になると考えられる。そこで表 3 のように艦船を 3 種類の規格に分類し、それぞれについて全津波イベントに対して操船限界流速が最短で出現する時間を求めた。

結果を図 12 に示す。流速 1m/s は長浦地区と本港地区の狭窄部で地震発生から 10 分以内に出現することが分かった。限界流速を 1m/s とする艦船は地震発生後すぐに出航しない限り、避難海域への移動が困難になる可能性があり、例えば、避難海域には向かうのではなく、係留索を強化するなどして津波をしのぐといった対応の可能性が考えられる。また、流速 2 m/s は長浦地区で約 20 分後、本港地区では 30 分後に出現することから、出港準備を迅速に行うことによって限界流速を避けることができる可能性がある。最後に、流速 3m/s は長浦地区で約 40 分後、本港地区で 30 分後に出現するが、狭窄部の陸の突出する箇所での発生であることから、速力 30knot の艦船は狭窄部中央を航行することによって限界流速を避けることが可能なことが示された。

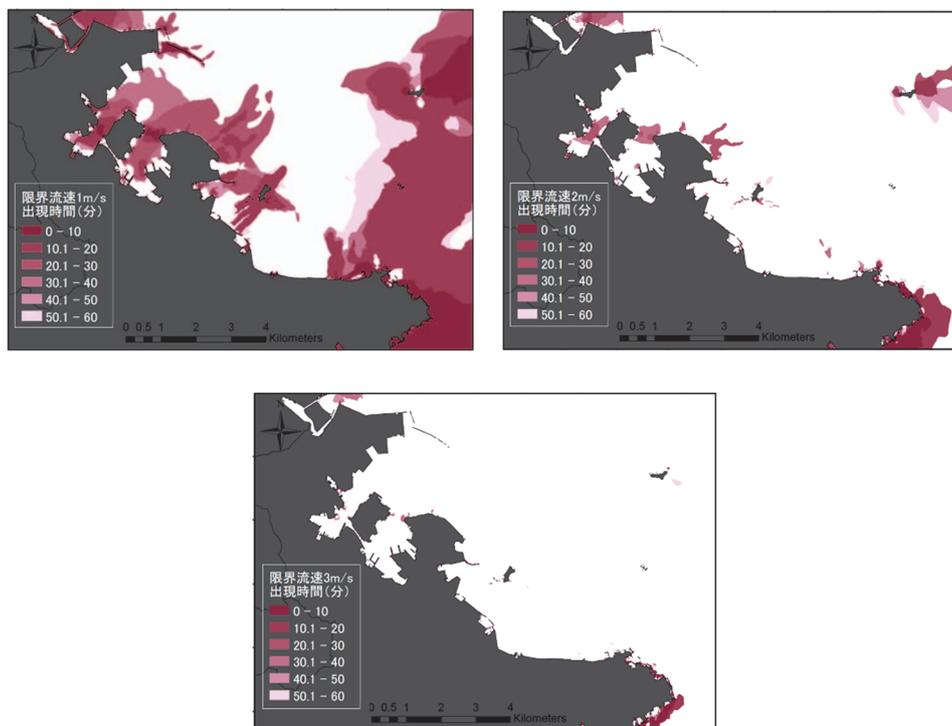


図 12 横須賀地区における津波流速の最短出現時間。

流速の閾値を上段左上：1m/s，上段右上：2m/s，下段：3m/s と設定している。

表 3 艦船の船速に対する操船限界流速の出現時間

艦船の船速 (knot)	操船限界流速 (m/s)	出現時間(分後)	
		長浦地区	本港地区
$V < 20$	1	0~10	0~10
$20 \leq V < 30$	2	20~30	30~40
$V = 30$	3	40~60	30~40

## 6 結論

本研究では、今後、南関東近傍で想定される津波が横須賀地区周辺海域にもたらす影響を検証し、横須賀地区における避難海域の設定と艦船の規格毎に避難海域への移動の可否を検証した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 複数の津波イベントの最大流速と操船限界流速の超過確率を同時に考慮した船舶避難リスクマップを提案した。これにより、従来の津波避難海域の設定手法では考慮されなかった潜在的に危険な海域の評価が可能になる。
- (2) 本手法を横須賀港に適用したところ、長浦地区と本港地区の湾の狭窄部、第2海堡の右岸側、八景島付近では、マグニチュードや震源位置の異なる地震のいずれにおいても操船に注意を要する流速が発生する。これらの地区は、潜在的に流速が強まる海域であることが示され、本研究の対象地震以外でも強い流速が生じる可能性が高い。
- (3) 流速 1 m/s の流れは地震発生から 10 分以内に出現し、操船限界流速を 1m/s とする艦船は避難海域への移動が困難な可能性が高く、対策が必要である。その他の艦船は速やかな出港準備と湾の中央部を避難航路とすることで避難海域への移動が可能である。

## 参考文献

1. 内閣府：月例経済報告等に関する関係閣僚会議 震災対応特別会合資料，p.2，2011.
2. 内閣府：平成 28 年（2016 年）熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について(6 月 16 日 17:15 現在)，p.3，2016.
3. 内閣府：平成 28 年熊本地震の影響試算について，p.2，2016.
4. 神奈川県：地震被害想定調査報告書，2015.
5. 後藤智明，小川由信：'Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法'，東北大学工学部土木工学科，1982.
6. L. Mansinha and D.E. Smylie：'The Displacement Fields of Inclined Faults.'，Bulletin of the Seismological Society of America，Vol.61，pp.1433-1440，1971.
7. （社）日本海難防止協会：平成 15 年度津波が予想される場合の船舶の安全確保に関する調査報告書，pp.1433-1440，2003.

8. 寺岡駿輔：横須賀市を対象とした津波による人的被害予測に関する検討，防衛大学校卒業論文，2015.
9. 多田毅：浸水確率の空間分布を考慮した浸水リスクマップの提案，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I\_1339-I\_1344, 2016.

---

グローバルセキュリティ調査報告 第4号

『自衛隊施設の防災・危機管理技術開発に関する調査報告』

2019年6月発行

編 者 鳴原 良典

発 行 防衛大学校先端学術推進機構グローバルセキュリティセンター

〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

防衛大学校先端学術推進機構グローバルセキュリティセンター

電話 046-841-3810 内線 2302

---

Online ISSN 2434-2440



CENTER FOR GLOBAL SECURITY

Online ISSN 2434-2440

GLOBAL SECURITY REPORTS No. 4

# Technological Development on Disaster Prevention and Crisis Management of Facilities of the SDF

Edited by Yoshinori Shigihara

June 2019

Center for Global Security  
National Defense Academy, Japan Ministry of Defense