伊勢湾と三河湾を対象とした高潮災害の 集積リスク評価に関する研究

安田 誠宏¹・平井 翔太²・岩原 克仁³・辻尾 大樹⁴

¹正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: yasuda-t@kansai-u.ac.jp

²学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 環境都市工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: k047903@kansai-u.ac.jp

³元関西大学 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社 (〒530-0004 大阪市北区堂島浜1-2-1 新ダイビル)

E-mail: daiki.tsujio@os.pacific.co.jp

複数地点での高潮による同時・集積被害に関する研究事例はまだ数が少ない。本研究では、伊勢湾と三河湾を対象に、複数地点での高潮被災を考慮した集積リスクの評価を行った。確率台風モデルによる1000年分の仮想台風を用いて、台風経路の確認を行った。伊勢湾のみを通る192個の台風については、気象庁の経験式を使用して高潮推算を行う一方で、伊勢湾と三河湾の両地点を通る805個の台風については、高潮解析と氾濫解析を行った。さらに、三河湾の高潮解析結果から、簡易的に高潮偏差を計算する算定式を作成し、その妥当性を検討した。高潮解析結果から被害額を算定し損失関数を作成した。伊勢湾と三河湾の損失関数と各台風の高潮偏差を使用して、すべての台風の被害額を算定した。年超過確率と合計被害額の関係を表すイベントカーブを作成し、集積リスク評価を行い、1つの台風に対する期待被害額を算定した。

Key Words: aggregate risk, storm surge inundation, loss function, event curve, expected damage

1. 緒 論

これまでのリスク評価は、1つの地域、1つの災害に対して行われてきた。これは、その地域に存在する資産の被災リスクを把握するために重要である。しかし、実際に災害が発生した際は、災害によるリスクは絡み合い、二次災害の発生や複数の地域にまたがる被災が発生する可能性がある。特に、全国展開している企業にとっては、1つの自然災害によって、工場や事業所などが複数同時被災する可能性がある。災害などによって被災した際に、業務やシステムが中断・停止しないよう、または中断・停止したとしても早急に復旧し、事業を再開させ被害を最小限にするために準備・対策を施す事業継続計画(BCP: Business Continuity Plan)の策定が進められている。BCPを策定する際、複数地点での同時被災が発生する場合まで想定しているケースは稀で、想定外を避けるためにも1つの災害によって発生する可能性があるすべてのリスクを把握し、評価を行うことは重要といえる。

一方で、火災や自動車事故などは、過去の統計を分析することで将来の発生予測が可能であるのに対し、地震や台風などの自然要因の災害は発生予測が困難である。さらに、台風は経路予測が非常に難しい。自然災害によ

る損失を受けた企業は、自然災害に対して保険会社が発行するCATボンド(Catastrophe bond)等により、保険金を受け取ることができるが、反対に、保険会社には多額の保険金支払いが発生する。そのため、複数地域で同時被災する可能性等のあらゆるリスクを想定し、集積被害額を見積り、保険金をストックしておくが必要になる。

集積リスクに関する研究事例(辻田ら¹⁾)は少なく、方法が確立されていないため、全国に散在する資産に対して集積リスクの評価を系統的に行うのは困難であり、保険会社は複数地点で被災した際の集積被害額を把握できていないのが現状である。本研究では、伊勢湾と三河湾を対象に、台風により発生する高潮災害に焦点を当て、複数地点での被災を考慮した集積リスクの評価を行う。

2. 高潮リスク評価手法

本研究の高潮リスク評価のフローを図-1に示す。1000年分の確率台風モデルによる仮想台風の計算結果から、台風経路と個数、最大高潮偏差を求めていく。伊勢湾のみを通過する台風については、気象庁の経験式(回帰式)を使用し、高潮偏差を求める。両地点を通過する台風については、非線形長波モデルと氾濫解析モデルを用いて

図-1 高潮リスク評価フロー

氾濫原の浸水範囲および面積、浸水深を算定する。氾濫原の資産データを作成し、算定した浸水深から被害額の算定を行う。それらの結果から、最終的なリスク評価を行い期待被害額の算定を行う。

(1) 確率台風モデルによる仮想台風の抽出

中條ら²⁾の確率台風モデルで計算された1000年分の仮想台風データから、名古屋港と三河港を中心座標にし、半径1°の範囲を設定し、伊勢湾のみを通過する台風と、伊勢湾と三河湾の2地点を通過する台風を抽出した。重複範囲を除いた三河湾のみを通る台風は、三河湾側が可航半円であるため、高潮被害をもたらす台風は少ないと考えられ、これらの結果を含めると期待被害額が下がると判断し、リスク評価に用いないこととした。対象範囲を通過する台風数を調べると表-1のようになった。

(2) 高潮解析

伊勢湾のみを通過する台風については、気圧と風の効果を考えた気象庁の経験式を使用して高潮推算を行う。

$$h = a(1010 - P_m) + bU^2 \cos \theta_0 \quad (1)$$

ここで、 h は最大高潮偏差 (cm)、 P_m は現地の最低気圧 (hPa)、 U は最大風速 (m/s)、 θ_0 は最大風速の風向が主風向となす角であり、 a, b は過去の資料から求められる各地域の係数であり、伊勢湾のものはそれぞれ1.674, 0.165、主方向は147°(北を0°とし、時計回り)である。

三河湾については経験式のパラメータがないため、伊勢湾と三河湾を通過する台風については、Kimら³⁾が開発した双方向結合モデルSuWATを使用し、高潮の解析

表-1 各地点を通る台風数(確率台風モデル)

地点数	1地点	2地点
	伊勢	伊勢 三河
台風数	192	805

図-2 SuWATによる高潮解析の一例

を行う。これは、潮汐・高潮・波浪の相互作用を考慮したモデルであり、基礎式には、静水圧近似を基にした非線形長波近似式を使用している。SuWATによる高潮解析の一例を図-2に、伊勢湾における経験式とSuWATによる高潮偏差の推算値を比較した結果を図-3に示す。図-3をみると、気象庁の経験式は、SuWATの解析結果と比べて全体的に過小評価であり、特に中心気圧が960 hPa以下の規模の大きい台風の高潮を再現できていないことがわかる。よって、これらの強い台風についてはシミュレーションを行う方がよいといえる。

(3) 三河湾における高潮推算式の提案

三河湾における気象庁の経験式の係数が不明なため、1000年分の仮想台風のうち、伊勢湾と三河湾を通る805個の台風については、非線形長波モデルSuWATで高潮解析を行った。しかし、SuWATは計算コストが高く、膨大な量のデータの解析に使用するのには望ましくない。そこで、SuWATの解析結果から高潮偏差を求める簡易式を提案する。経験式に習い、同じ定義で作成することにした。三河湾の形状から、主方向を240°(北を0°とし、時計回り)と仮定し、係数 a, b で補正する形をとった。

使用した台風データから、三河湾での高潮偏差が2 m以上のもの55個を抽出し、現地での最低気圧 P_m (hPa)、最大風速 U (m/s)、最大風速の風向を算定した。図示は省略するが、これらの台風の経路は主に南→北、南西→北東であった。SuWATの高潮解析結果を目的変数 η (cm)に、 $(1010 - P_m)$ を独立変数1、 $U^2 \cos \theta_0$ を独立変数2に設定して重回帰分析を行い、回帰係数 a, b を算定すると、それぞれ4.0, 0.008となった。係数の適用性を確認するため、作成した係数を使用して、係数算定に用いた1000年分の

図-3 伊勢湾における経験式と SuWAT による高潮の比較

(a) 高潮偏差と中心気圧の関係

(b) 高潮偏差の比較

図-4 三河湾における SuWAT と提案式による高潮の比較

高潮推算を行うとともに、高潮推算および係数算定に用いていない5000年分のデータでも推算を行い、SuWATの結果（1000年分 805個の台風）と比較した（図-4）。ややばらつきはあるが、中心気圧が小さい規模の強い台風による高潮を再現できており、適用性はよいといえる。

(4) 浸水シミュレーション

SuWATによる高潮解析結果をもとに、氾濫解析モデルLISFLOOD-FP⁴⁾を使用し、三河湾奥部での浸水シミュレーションを行った。これは、氾濫原の浸水シミュレーションを高速で行うことができるモデルである。浸水シ

図-5 LISFLOOD-FPによる浸水解析結果の例（カラーバーは浸水深、ただし正負反転）

ミュレーションの一例を図-5に示す。三河湾では、その地形の複雑性から、高潮偏差が小さい時点で浸水が始まり、矢作古川と矢崎川で囲まれた吉良町と、田原湾周辺域から浸水する。高潮偏差が1 mを超えると渥美半島南西端域と豊川周辺域において浸水が始まり、高潮偏差が2 mを超えると、高潮偏差が大きくなるにつれて吉良町と豊川周辺域において広く浸水するという結果になった。

(5) 被害額の算定

a) 資産データの作成

被害額の算定を行うため、国土数値情報⁵⁾から三河湾の一般資産額データを作成した。一般資産額には、家屋資産額、家庭用品資産額、事務所償却資産額、事務所在庫資産額、農漁家償却資産額、農漁家在庫資産額、農作物資産額の7種類が存在する。国勢調査データ内には、「住宅の延べ面積階級別住宅に住む一般世帯数」という、住宅の延べ床面積を0～29m²の世帯、30～49m²の世帯、50～69m²の世帯というように、面積階級別に6段階に分類した世帯数が記録されている。家屋資産額については、それぞれの階級値とその世帯数を乗じることで住宅の延べ床面積とし、その値と家屋1m²当り単価の積を家屋資産額として求めた。また、農作物資産額において、土地利用データには作物別作付面積のデータがなく、すべてまとめて畑としての分類しかない。そこで本研究では、

表-2 高潮浸水被害の各資産被害率

浸水深等の規模 資産種類等		床下浸水	床上浸水				
			50cm未満	50-99 cm	100-199 cm	200-299 cm	300cm以上
家 屋		0.045	0.151	0.299	0.480	1.000	1.000
家庭用品		0.021	0.189	0.489	0.889	1.000	1.000
事業所	償却資産	0.101	0.278	0.589	1.000	1.000	1.000
	在庫資産	0.056	0.166	0.401	1.000	1.000	1.000
農漁家	償却資産	0.000	0.187	0.308	0.416	1.000	1.000
	在庫資産	0.000	0.259	0.555	0.859	1.000	1.000

図-6 合計一般資産額の分布

辻田ら⁹⁾が作成した、畑の面積当り単価を使用した。これは、愛知県と三重県の農林水産省の作物統計を用いて、県単位での作物別の面積当り収穫量に単価を乗じて面積当り価格を算出し、各作物の作付面積で重み付けして畑の平均の価格を算出したものである。この単価に畑の面積を乗じることで農作物資産額とした。なお、使用するデータは第3次メッシュ(1 km メッシュ)であるのに対し、浸水解析は 100 m メッシュで行うため、求めた資産データの 1 メッシュ(1 km×1 km)を 100 等分することで、100 m×100 m のデータに変換して使用した。作成した合計一般資産額の分布を図-6 に示す。

b) 被害率算定方法

農作物資産を除く被害率の算定は、表-2 に示される高潮浸水被害の各資産被害率から算定する。これは、「治水経済調査マニュアル(案)⁹⁾」の被害率表に、イギリスの海水による被害係数を乗じたものである。表から明らかなように、被害率は浸水深に応じて決定される。しかし、この表によると、ある範囲内の浸水深の被害率が一律で、ステップ関数のようになっており、閾値を超えた瞬間に被害額にギャップが生じてしまう。本研究では、辻田ら⁹⁾が作成した被害率曲線を使用する。これは、表-2 に示す被害率の浸水深の中間値と、それに対応する被害率の値をとり、それらの点から作成されたものである。これは、横軸に浸水深、縦軸に被害率の関係を表しており、この被害率曲線に浸水シミュレーションで算定した浸水深を代入し、被害率を算定する。また、農作

物資産額に対する被害率は、海水冠水の場合は浸水深によらず被害率を 1 として定められている。

c) 被害額の算定

三河湾奥部の浸水範囲及び浸水深と、求めた資産データ、被害率を使用して被害額を算定する。「海岸事業の費用便益分析指針(改訂版)⁷⁾」によると、被害額には、一般資産被害額、農地資産被害額、公共土木施設・公益事業等被害額の 3 種類がある。これらの被害額の算定方法は以下の i)~iii) のとおりである。

i) 一般資産被害額

前述の手法でそれぞれ求めた一般資産額と被害率を乗じることで算定する。

ii) 農地資産被害額

農地が海水冠水することにより農作物が減収する被害額を、農地資産被害額とする。被災年に加え、将来 5 年にわたる農作物被害額を農地資産被害額として算定する。つまり、農作物被害額に減収率合計である 3 を乗じたものが農地資産額である。

iii) 公共土木施設・公益事業等被害額

公共土木施設(橋、道路、公園等)、公益事業等(電気、ガス、水道等)の被害額は、一般資産被害額との過去 26 年(1976~2001)の平均比率を用いて算定する。ここで、一般資産被害額を 100 とした場合、公共土木施設被害額の比率は 180、公益事業等被害額の比率は 3 である。

d) 被害額算定結果

前述の方法で三河湾奥部での被害額を算定する。このとき、高潮偏差と被害額の関係を示した三河湾の損失関数を作成する。伊勢湾のみを通過する台風の被害額は、辻田ら⁹⁾による伊勢湾の損失関数から算定した。2 地点を通過する台風の被害額は、SuWAT の高潮解析結果を各湾の損失関数に代入し、その結果を合計し算定した。使用した損失関数を図-7 に示す。

3. 年超過確率の算定

被害額の発生がポアソン分布に従うと考えると、年超過確率 P は以下のように求められる。

$$P(k) = 1 - \exp\{-\nu(k)\} \quad (2)$$

図-7 伊勢湾と三河湾の損失関数の比較
(伊勢湾のデータは辻田らより引用)

$$v(k) = \frac{n_k}{T} \quad (3)$$

ここで、 $v(k)$ は被害額 k (円) 以上の被害額の年平均発生確率を示し、 n_k は T 年間における被害額が k (円) 以上の被害額の発生回数、 T は観測年数を表し、本研究の場合は $T=1000$ 年である。

4. イベントカーブの作成

最終的なリスク評価には、合計被害額と年超過確率の関係を表したイベントカーブを使用する。本研究では、SuWAT で三河湾の高潮解析を行った際、伊勢湾と三河湾の距離が近く、同時に伊勢湾での高潮解析も行ったため、2 地点を通る台風の伊勢湾側の高潮偏差を気象庁の経験式で算定したもの(ケース 1)と、SuWAT から算定したもの(ケース 2)の 2 ケースでイベントカーブを作成(図-8)し、比較することにした。さらに、津波時のような地震による大規模な被災も起き難いことから、防潮堤高以下の高潮偏差の場合は被災しないものとして被害額を 0 とし、高潮偏差が堤防高以上になって越流すると破堤が起こるとして、防潮堤 3.5 m が存在する場合のイベントカーブを重ねて示している。図示は省略するが、防潮堤 2.5 m、3 m のイベントカーブも作成した。防波堤なしのイベントカーブを比較すると、年超過確率が低い場合においては、ケース 1 の方が合計被害額は大きい、年超過確率が 0.005 以上になると合計被害額はケース 2 の方が大きいことがわかる。気象庁の経験式は、計算コストが小さく膨大な量の台風データの高潮計算を瞬時に行うことができたが、計算結果のほとんどが高潮偏差 1 m 未満のものであり、被害額は小さくなった。一方、SuWAT での高潮解析結果は、経験式の結果と比べて大きく、被害額が大きくなった。図-3 による高潮偏差の比較からも、気象庁の経験式は高潮推算が過小評価であることから、SuWAT で高潮解析をしてリスク評価を行

図-8 高潮によるイベントカーブ
(青：ケース 1，赤：ケース 2)

う必要があるといえる。また、防潮堤を設置することで、年超過確率と合計被害額がともに小さくなり、安全側にシフトしていることがわかる。

5. 期待被害額の算定結果

リスクは損失の大きさと損失の発生確率で表されることから、イベントカーブの下側の面積が、1つの台風が発生した際の期待被害額を表している。作成したイベントカーブからそれぞれの場合で期待被害額を算定すると、表-3および4のようになった。経験式の高潮偏差を使用した場合、期待被害額は防波堤なしの場合、2兆4500億円、防潮堤高が 2.5 m の場合6400 億円、3 m の場合で2600 億円、3.5 m の場合で1700 億円となった。SuWATの高潮偏差を使用した場合、期待被害額はそれぞれ2兆7600 億円、6800億円、3800億円、2100億円となった。気象庁の経験式は前述の通り、過小評価であるため、期待被害額はSuWATのものと比べ全般的に過小評価になった。

また、表-5は両方の湾を通る台風の、ケース2で防潮堤が3.5 mの場合での被害の内訳である。また同時にそのイベントカーブを図-9に示す。伊勢湾だけを見た被害を赤、三河湾だけを見た被害を青、2地点の集積被害を見た場合を黒でプロットしている。ここで、伊勢湾での被害額が17.4 兆円の台風(表-5の左上)を見ると、伊勢湾だけの被害額を見ると全体で2番目に大きい台風であるが、三河湾での被害額も考慮すると被害額が1番大きい台風となる。伊勢湾と三河湾は距離が近く、同じ台風で2箇所に被害が発生することがあるため、集積被害を考えると合計被害額が大きくなる。よって、これらの地域では、個別に被害想定を考えるのではなく、総合的に被災リスクを考える必要があるといえる。

6. 結 論

表-3 高潮浸水による期待被害額(ケース 1)

	防潮堤 なし	防潮堤 2.5m	防潮堤 3m	防潮堤 3.5m
期待被害額 (兆円)	2.45	0.64	0.26	0.17

表-4 高潮浸水による期待被害額(ケース 2)

	防潮堤 なし	防潮堤 2.5m	防潮堤 3m	防潮堤 3.5m
期待被害額 (兆円)	2.76	0.68	0.38	0.21

表-5 2地点を通る台風の被害の内訳(防潮堤 3.5m の場合)

伊勢 被害額(兆円)	三河 被害額(兆円)	集積被害額 (兆円)
17.4	38.2	55.6
26.9	27.3	54.1
0	47.6	47.6
12.8	27.3	40.1
0	39.5	39.5
0	26.8	26.8
16.7	0	16.7
13.1	0	13.1

伊勢湾と三河湾を対象に、台風で引き起こされる高潮浸水による集積被害額を算定するプロセスを提案した。伊勢湾と三河湾は距離が近いこと、同じ台風で2箇所に被害が発生することがあるため、集積すると被害額が大きくなることがわかった。したがって、これらの地域では、個別に被害想定を考えるのではなく、統合的に被災リスクを考える必要があるといえる。また、経験式が存在していなかった三河湾の高潮推算式を提案し、適合性を確認した。経験式でも期待被害額をおおよそ算定できるが、強い台風については過小評価になるため、シミュレーションを行う方が良いことが示された。

謝辞：本研究は、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラムおよび科研費の助成を受けたことを記す。

図-9 伊勢湾と三河湾の合計被害額と年超過確率(防潮堤 3.5m の場合)

参考文献

- 1) 辻田大揮, 安田誠宏, 篠原瑞生, 森 信人, 間瀬 肇: 複数地域での同時被災を考慮した高潮災害の集積リスク評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.1639-1644, 2016.
- 2) 中條壮太, 森 信人, 安田誠宏, 間瀬 肇: 時系列相関型の全球確率台風モデルの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.1, pp.64-76, 2013.
- 3) Kim, S. Y., Yasuda, T. and Mase, H.: Numerical Analysis of Effects of Tidal Variations on Storm Surges and Waves, Applied Ocean Res., Vol. 30, pp.311-322, 2008.
- 4) Bates, P., Horritt, M., Wilson, M., Hunter, N.: LISFLOOD-FP User manual and technical note, <http://www.bristol.ac.uk/media-library/sites/geography/migrated/documents/lisflood-manual-v2.6.2.pdf>, 2005.
- 5) 国土交通省国土政策局: 国土数値情報土地利用3次メッシュデータ, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-a.htm> (2016年12月8日参照), 2006.
- 6) 国土交通省河川局: 治水経済調査マニュアル(案), 106p., 2005.
- 7) 農林水産省農村振興局・水産庁, 国土交通省河川局・港湾局: 海岸事業の費用便益分析指針(改訂版), 103p., 2004.

(2017.3.15 受付)

RISK ASSESSMENT OF AGGREGATE LOSS BY STORM SURGE INUNDATION IN ISE BAY AND MIKAWA BAY

Tomohiro YASUDA, Shota HIRAI, Katsuhito IWAHARA and Daiki TSUJIO

In the event of disaster, the risks of disaster are intertwined, and there is an occurrence possibility of simultaneous damage in multiple areas. This study assesses aggregate risk of storm surge by typhoons which attack Ise and Mikawa bay, and employs synthetic typhoon datasets made by the stochastic typhoon model. Storm surges in Ise and Mikawa bay are calculated by an empirical formula and a nonlinear shallow water equation model. Parameters of empirical formula to estimate storm surge in Mikawa bay is also derived, and applicability is confirmed. The study estimates loss function in Mikawa bay using the results of inundation simulation, and calculates damage using asset map. Event curve is estimated by the relationship of annual exceedance probability and aggregate loss.