台風の強大化に伴う伊勢湾湾奥部の 高潮・高波による氾濫危険度の評価

RISK ASSESSMENT OF INUNDATION INDUCED BY STORM SURGE AND HIGH WAVE UNDER INTENSIFICATION OF TYPHOON IN INNERMOST REGION OF ISE BAY

川崎浩司¹・丹羽竜也²
Koji KAWASAKI and Tatsuya NIWA

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-3(651))

²正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) 国土保全技術本部 港湾部
(〒206-0034 東京都多摩市関戸1-8-5)

The purpose of this study is to numerically examine the inundation characteristics induced by storm surge and high wave under the intensification of typhoon due to the global warming in innermost region of Ise Bay and assess the inundation risk. The numerical model employed in this study is comprised of the Myers-based typhoon model, a depth-averaged flow model with a one-way nesting technique, the wave model SWAN and an inundation model with a CIP method. The numerical results showed that the damage under virtual huge typhoon is as severe as or even more than one caused by Ise Bay typhoon in 1959. The risk assessment of the possible inundation were also discussed by making use of six inundation risk indices and an integrated risk index based on the numerical results.

Key Words : Risk assessment, Storm surge, High wave, Inundation, Typhoon, Ise Bay

1. はじめに

今後、進行するとみられる地球温暖化によって、台風が強大化し、沿岸部では高潮・高波災害の増大が懸念されている。吉野ら¹⁾によると、将来気候において最大強度の台風が上陸した場合、名古屋港における高潮は、満潮と重なり、さらに温暖化による海面上昇を考慮すると、最大で8.07mに達するとされている。このように強大化した台風が発生した場合、既存の海岸施設では防御できない大災害になる可能性があり、対策を講じることが急務である。しかしながら、防災・減災対策のための十分な検討に至っていないのが現状である。

本研究では、将来発生しうる超大型台風が伊勢湾に来襲した場合を想定し、川崎ら²⁾が開発した高潮時の陸域氾濫に及ぼす高波の影響を考慮することができ、高潮・高波氾濫モデルを用いて数値計算を行い、伊勢湾湾奥部における高潮氾濫状況について検討する。さらに、浸水深、氾濫流速、氾濫流到達時間などをはじめとし、多面的な視点から高潮・高波による氾濫危険度指標を提案・議論することで、伊勢湾湾奥部の高潮・高波氾濫に対する危険度を総合的に評価する。

2. 高潮・高波氾濫モデルの概要

本研究では、先に述べたように川崎ら²⁾が開発した高波の影響を考慮可能な高潮・高波氾濫モデルを用いて、超大型台風を想定した数値計算を実施した。ここでは、同モデルの概要について示す。

高潮・高波氾濫モデルは、Myers による台風モデル、one-way ネスティング手法を導入した単層流動モデル、第3世代波浪推算モデル SWAN (Simulating WAVes Nearshore)、Yabe and Aoki³⁾が開発した高精度な移流計算が可能な CIP (Constrained Interpolation Profile) 法に基づく氾濫モデルから構成されている。さらに、高潮氾濫時において不規則に変動する高波の影響を、平均的な水面上昇としてみなし、モデル化している。

計算の流れとしては、まず、台風経路・中心気圧を用いて台風モデルから気象場を計算し、得られた気象場を基にSWANを用いて波浪場を推算する。ついで、単層流動モデルと氾濫モデルに、気象場と波浪場の情報を取り込み、高潮・高波氾濫計算を行っている。なお、モデルの詳細については、川崎ら²⁾を参照されたい。また、同モデルの妥当性・有用性については、川崎ら²⁾による1959年の伊勢湾台風を対象とした再現計算によって、既に実証済みである。

3. 台風の強大化に伴う伊勢湾湾奥部の高潮氾濫特性

(1) 計算条件

計算領域は、図-1に示すように外洋を含むArea1、伊勢湾を含むArea2～Area4、伊勢湾湾奥部のArea5に分割して設定した。各計算領域の設定条件を表-1に示す。なお、氾濫計算を行うArea5は国土地理院の50mメッシュ数値地図および5mメッシュ数値地図をもとに作成した。

Area5における陸上でのマンニングの粗度係数は、小谷ら⁴⁾にならい、図-2に示すように設定した。具体的には、住宅の密集している名古屋市などの地域では粗度係数 n を0.08とし、その他の住宅の中密集地帯では $n=0.06$ 、工業地帯では $n=0.04$ 、建物があまりみられない地域では $n=0.02$ とした。

氾濫計算においては、最小浸水深を0.1mに設定し、それ以下の水深のときに流速を0とした。また、初期流量は0とし、静水状態とした。なお、水位の初期条件については、計算の安定性を考慮し、計算領域全体に気圧低下による吸い上げ効果による潮位偏差のみ与えた。

図-1 計算領域および台風経路

表-1 計算領域の設定条件

	Area1	Area2	Area3	Area4	Area5
格子間隔 (degree)	3/40	1/40	1/120	1/360	1/1080
解像度	130×80	135×126	243×171	360×288	402×300
時間間隔(s)	24.3	8.1	2.7	0.9	0.3

図-2 粗度係数の設定(Area5)

(2) 海岸護岸・河川堤防の設定条件

伊勢湾台風来襲後、高潮防波堤の建設や海岸護岸の復旧など、伊勢湾湾奥部では数多くの高潮対策が進められた。図-3に、伊勢湾台風計算時（伊勢湾台風当時）と仮想大型台風計算時（現在）における海岸、河川堤防の設定条件をそれぞれ示す。両図をみると、現在では、これまでの高潮対策により伊勢湾台風当時より強固な護岸・堤防が建設され、埋立などにより当時と異なる地形が形成されていることがわかる。例えば、名古屋港では、高さT.P.+6.5mの高潮防波堤が建設され、さらに埋立地が新設されている。また、木曽川、長良川の河口部周辺においても、T.P.+8.2mの堤防が建設されている。なお、本研究では、日光川水閘門が開いている状態を仮定し、計算を行った。

(a) 伊勢湾台風時

(b) 仮想大型台風計算時
図-3 海岸護岸・河川堤防の設定条件

(3) 仮想大型台風の設定

吉野ら¹⁾は、将来気候において発生しうる最大規模の台風を、CMIP3マルチ気候モデルデータの高度成長シナリオSRES A1Bの2099年9月のデータより推定している。その結果、将来発生しうる最大規模台風の名古屋港上陸時の中心気圧は約910hPaに達するとされている。

本研究では、台風上陸時に名古屋港において計測される気圧が、吉野ら¹⁾が推定した将来発生しうる最大規模の台風と同程度となるように仮想大型台風を設定した。具体的には、仮想大型台風の経路は、図-1に示すように伊勢湾台風と同一とし、中心気圧が、図-4に示すように、上陸時に約910hPa程度となるように伊勢湾台風と比べ50hPa低く設定した。その結果、台風モデルによって計算される名古屋港での最大風速は、図-4に示すように、伊勢湾台風と比較して約10m/s上昇した。また、伊勢湾湾奥部において最大規模の氾濫が発生する場合を想定して数値計算を行った。具体的には、天文潮位は、朔望平均満潮位T.P.+1.22mに、将来予想される海面上昇量を加え、一定値で与えた。すなわち、IPCCの高度成長シナリオSRES A1Bによれば、今世紀末には地球温暖化に伴い、全球平均で0.35m海面が上昇すると予測していることから、天文潮位はT.P.+1.57mと設定した。

(4) 伊勢湾湾奥部の高潮および氾濫特性

図-5に、仮想大型台風と伊勢湾台風による名古屋港の潮位の時系列変化を比較したものを示す。同図より、仮想大型台風においては、名古屋港での最大潮位は約6.4mに達しており、伊勢湾台風と比べ約2.4m高いことがわかる。伊勢湾台風当時の潮位はT.P.+0.37m程度であるのに対し、本計算では潮位をT.P.+1.57mとしている。従って、1.2mが天文潮位による潮位上昇量であり、残りの約1.2mが、台風の強大化に伴う高潮への影響と地形の変化による影響と考えられる。さらに、仮想大型台風では、伊勢湾台風時の最大潮位より高い潮位が約2時間半もの間続いており、湾奥部での大規模な氾濫が予想される。また、仮想大型台風による高潮は、伊勢湾台風と比べ15分ほど遅れて最大潮位を記録している。これは、伊勢湾台風以後に建設された高潮防波堤に起因すると推察される。

湾奥部で生じる最大浸水深分布を、伊勢湾台風時と仮想大型台風時と比較して、図-6に示す。なお、同図中の点線は、伊勢湾台風時の氾濫域を示している。同図より、ゼロメートル地帯（図-3(b)中の灰色部分）は浸水深が大きく、特に危険な地域であることがわかる。また、仮想大型台風による氾濫域は、伊勢湾台風時の氾濫域とほぼ同等の範囲に広がっている。したがって、伊勢湾台風来襲後、図-3(b)のように高潮防波堤の建設や海岸護岸の復旧といった高潮・高波対策が実施されたにもかかわらず、台風の強大化により、伊勢湾台風と同等の大規模な氾濫が生じることが判明した。

図-4 名古屋港における気象の時系列
(仮想大型台風と伊勢湾台風の比較：計算値)

図-5 名古屋港における潮位の時系列
(仮想大型台風と伊勢湾台風の比較：計算値)

図-6 伊勢湾湾奥部の氾濫域
(赤点線：伊勢湾台風時の計算結果)

4. 伊勢湾湾奥部の氾濫危険度評価

先に示したように、将来発生しうる強大な台風による甚大な高潮・高波災害を防ぐためには、早急な対策が必要である。しかしながら、限られた予算で海岸護岸や河川堤防などのハード面の対策を全面的に見直すことは非常に困難であり、ハード対策については効率化を図る必要がある。加えて、事前に氾

瀬の危険性を住民に周知させるといったソフト対策も必要不可欠である。

以上の高潮防災の観点から、想定される高潮・高波氾濫の挙動を把握し、適切に危険度を評価することが重要である。そこで、本研究では、浸水深、氾濫流速、歩行困難度、氾濫流到達時間、家屋被害、車・コンテナの流出といった観点から6種の氾濫危険度指標を設定し、さらに、これらの指標を用いて各氾濫危険度を検討するとともに、総合的な氾濫危険度についても評価を行う。

(1) 高潮・高波による氾濫危険度指標の設定

a) 浸水深に基づく氾濫危険度指標

高潮・高波氾濫が発生した場合、その危険性を最もわかりやすく住民に示す指標は、水深であると考えられる。国土交通省が公表している浸水想定区域図作成マニュアル⁵⁾によれば、浸水した場合に想定される水深（浸水深）については、浸水深のランク別の等深線をもって表示することとされている。ただし、浸水深のランク付けは地域ごとの浸水の危険度などを考慮して設定する必要がある。本研究では、国や地方公共団体が公表している標準的な浸水深のランク分けにならない、表-2に示すとおりに浸水深に基づく氾濫危険度指標を設定した。

b) 氾濫流速に基づく氾濫危険度指標

氾濫発生時には、徒歩による避難が原則とされる。そのため、氾濫流が到達する前に避難を完了させることが望ましい。しかし、万一避難が遅れた場合など、氾濫流が到達後の浸水状態においても避難する場合があります。よって、氾濫流の流速により避難が困難となることを示し、浸水前の早期避難を促す必要がある。ここでは、建設省河川局⁶⁾による危険度のランク分けを参考に、表-3のように設定した。

c) 歩行困難度に基づく氾濫危険度指標

歩行による避難が困難であることをより明確に示す指標として歩行困難度が挙げられる。浸水している場合の歩行避難時には、主に水深と流速の関係から危険度が決定されるといわれている。例えば、実際の避難行動に近い状況を想定した水中歩行実験⁷⁾によると、成人男性の場合、水深が膝程度（40～50cm）のときには、流速がある程度あったとしても、ゆっくりではあるが安定して歩ける。水深が股下程度（80cm）のときには、大きく影響を受け歩きづらくなる。これらの結果がまとめられたものが図-7である。また、末次⁸⁾は、浸水している場合の歩行避難時には、主に水深と流速の関係から危険度が決定されることから、表-4に示すように、避難の可能性を表現している。本研究では、同表をもとに歩行困難度に基づく氾濫危険度指標を設定した。同氾濫危険度指標は、歩行による避難が可能な場合に氾濫危険度1、困難な場合に氾濫危険度2、不可能な場合に氾濫危険度3とした。

d) 氾濫流到達時間に基づく氾濫危険度指標

避難基準や避難行動を考慮する上で、氾濫流の到達時間は有力な情報となる。氾濫流の到達が早いほ

ど、避難行動などの対策が困難となる。到達時間は、計算領域内の陸域で浸水が発生した時間を0とし、その時点から計測した。氾濫流到達時間に基づく氾濫危険度指標は、表-5に示すとおりに設定した。

e) 家屋被害に基づく氾濫危険度指標

避難場所への距離が長く、避難が困難である場合や、自宅の2階などの高いところで氾濫が治まるのを待つ場合など、避難を行えない、もしくは行わないことがある。そのため、家屋被害に基づく氾濫危険度指標を示すことで、家屋が氾濫によって破壊される危険性を知らせ、避難を促す必要がある。また、災害に強い街づくりといった観点からも重要な項目

表-2 浸水深に基づく氾濫危険度指標

氾濫危険度	浸水深	浸水の目安
1	0.5m 未満	大人の膝までつかる程度
2	0.5m 以上 1.0m 未満	大人の腰までつかる程度
3	1.0m 以上 2.0m 未満	1 階の軒下まで浸水する程度
4	2.0m 以上 5.5m 未満	2 階の軒下まで浸水する程度
5	5.5m 以上 7.5m 未満	3 階の軒下まで浸水する程度
6	7.5m 以上	3 階の軒下以上が浸水する程度

表-3 氾濫流速に基づく氾濫危険度指標

氾濫危険度	流速	避難の可能性
1	0.5m/s 未満	水深が腰以下のとき避難可能
2	0.5m/s 以上 1.5m/s 未満	水深が膝以下のとき避難可能
3	1.5m/s 以上	安全な避難は困難

図-7 洪水避難時に水中歩行できる領域⁷⁾

表-4 流速と水深の関係による徒歩での避難可能性

浸水深 h	$1.0\text{m} \leq h$	$0.5\text{m} \leq h < 1.0\text{m}$	$h < 0.5\text{m}$
流速 U			
$1.5\text{m/s} \leq U$	不可能	不可能	困難
$0.5\text{m/s} \leq U < 1.5\text{m/s}$	不可能	困難	可能
$U < 0.5\text{m/s}$	困難	可能	可能

不可能：氾濫危険度3 可能：氾濫危険度1
 困難：氾濫危険度2

表-5 氾濫流到達時間に基づく氾濫危険度指標

氾濫危険度	氾濫流の到達時間
1	4 時間以上
2	3 時間以上、4 時間未満
3	2 時間以上、3 時間未満
4	1 時間以上、2 時間未満
5	30 分以上、1 時間未満
6	0 分以上、30 分未満

であると考えられる。氾濫危険度を設定するに当たっては、家屋被害に影響を及ぼす氾濫流速や浸水深を考慮すべきと考えられる。松富ら⁹⁾は、津波氾濫流による家屋被害に関して、過去の事例を対象とした調査を行い、浸水深、流速、家屋被害の関係を示している。また、現地調査データに基づき、浸水深と流速、浸水深と抗力の暫定的な関係式を決定している。関係式と、浸水深と家屋の造り別の被害程度との関係から、家屋が破壊に至る流速は表-6のように示される。本研究では、表-6に示す流速を用いて、家屋被害に基づく氾濫危険度指標を表-7のように設定した。

f) 車・コンテナの流出に基づく氾濫危険度指標

図-8に、紀の川流域委員会¹⁰⁾がまとめた氾濫による車への被害発生状況を示す。車高にもよるが、おおそ浸水深が1mほどに達すると、車が氾濫水に押し流されるとされている。

コンテナは通常、積み重ねられて保管されており、ここでは、三段積みの場合を対象とした。ゼロメートル地帯の高潮対策検討会¹¹⁾によると、三段積みのコンテナに対し、浸水深が60cmに達すると、コンテナが流出するとされている。よって、60cmを境に氾濫危険度のランク分けを行う。以上のことから、

表-6 家屋が破壊に至る流速(m/s)⁹⁾

家屋の種類	被害程度	小破	中破	大破
木造		1.6	3.5	4.2
コンクリート・ブロック造		2.6	5.2	10.2
鉄筋コンクリート造		2.6	10.2 以上	10.2 以上

表-7 家屋被害に基づく氾濫危険度指標

氾濫危険度	流速	家屋への被害
1	1.6m/s 未満	被害はほぼなし
2	1.6m/s 以上, 2.6m/s 未満	木造家屋が小破
3	2.6 m/s 以上, 3.5m/s 未満	コンクリート・ブロック造が小破
4	3.5 m/s 以上, 4.2m/s 未満	木造が中破
5	4.2 m/s 以上, 5.2m/s 未満	木造が大破
6	5.2 m/s 以上, 10.2m/s 未満	コンクリート・ブロック造が中破

図-8 浸水による車への被害発生状況図¹⁰⁾

表-8 車・コンテナの流出に基づく氾濫危険度指標

氾濫危険度	浸水深	流出の危険性
1	0.6m 未満	車、コンテナともに流出の危険性なし
2	0.6m~1.0m	車の一部、コンテナに流出の危険性
3	1.0m 以上	車、コンテナともに流出する

車・コンテナの流出に基づく氾濫危険度指標を、表-8のように設定した。

(2) 各指標に対する氾濫危険度の評価

前節に示した6つの氾濫危険度指標を用いて、仮想大型台風による高潮・高波氾濫シミュレーションの結果に対し、それぞれ氾濫危険度評価を行った。ここでは、紙面の都合上、氾濫流速および氾濫到達時間を指標とした氾濫危険度を、図-9および図-10にそれぞれ示す。両図において、長島輪中周辺(図-6参照)に着目すると、氾濫流速を指標とした氾濫危険度では危険度3と高いものの、氾濫到達時間を指標とした氾濫危険度では危険度2と低いことがわかる。このように、多面的に氾濫危険度評価した場合、各指標の結果に違いが生じることがあり、どの地域がより危険であるかが、不明瞭となることがわかる。よって、種々の指標を総括して検討し、総合的に氾濫危険度評価する必要があるといえる。また、複数の指標を統合して氾濫危険度を設定することで、簡易的ではあるものの、より信頼性の高い氾濫危険度の総合評価を行うことが可能となると考えられる。

(3) 高潮・高波による総合氾濫危険度の評価

a) 総合氾濫危険度の設定

本研究では、式(1)に示すように、上記の6つの氾濫危険度を用いて総合氾濫危険度を定義した。

図-9 氾濫流速による氾濫危険度の最大値

図-10 氾濫到達時間による氾濫危険度の最大値

$$R_c = \sum_{i=1}^6 \frac{R_i}{R_{\max i}} \times w_i \quad (1)$$

ここで、 R_c は総合氾濫危険度、 R_i は各指標による氾濫危険度、 $R_{\max i}$ は各指標による氾濫危険度の最大値、 w_i は各指標の総合氾濫危険度に対する重みである。重み w_i は、各地域の土地利用形態などを加味し、それぞれの指標に重みを付けて検討する必要がある。しかし、本計算では、重みを決定する情報が十分ではないため、各指標に同等の重みをつけることとし、 w_i に1/6を与えた。以上のように、総合氾濫危険度を計算し、表-9に示すように、湾奥部において危険度のランクを設定した。

表-9 総合氾濫危険度

危険度	総合氾濫危険度 R_c
1	0～0.2
2	0.2～0.4
3	0.4～0.6
4	0.6～0.8
5	0.8～1.0

b) 氾濫危険度の総合評価

総合的な危険度の最大値を図-11に示す。氾濫域のほぼ全域で危険度3以上を示しており、湾奥部が高潮・高波氾濫に対して非常に危険な地域であることがよくわかる。特にゼロメートル地帯では、危険度が4を示しており、長島輪中央付近では危険度が5に達している。この付近は、ほぼ住宅のない自然裸地となっており、氾濫流の流れを妨げる障害物がないため、氾濫流の流速が非常に速くなったと推測される。その結果、住宅のある他の地域に比べて、危険度が高くなったと考えられる。

6. おわりに

本研究では、将来発生しうる超大型台風が伊勢湾に来襲した場合を想定し、高潮・高波氾濫シミュレーションを行った。その結果、伊勢湾台風と同等の大規模な氾濫が生じることが判明した。さらに、伊勢湾湾奥部における高潮氾濫状況に対して、高潮・高波による氾濫危険度指標として、浸水深、氾濫流速、氾濫流到達時間などの各指標を提案・議論し、伊勢湾湾奥部の高潮・高波氾濫に対する危険度の総合的評価を行った。総合的評価より、特にゼロメートル地帯を中心として伊勢湾湾奥部は非常に危険性の高い地域であることが判明した。このように、本評価システムは、今後の高潮・高波氾濫による防災・減災対策に役立つものといえる。ただし、各指標の総合的氾濫危険度に対する重みづけを本検討では行っておらず、各地域の土地利用形態など様々な情報を基に、それぞれの指標の重みを決定すること

図-11 総合氾濫危険度の最大値

は今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A)（研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046）であることをここに付記し、感謝の意を表する。また、本論文の執筆にあたり、名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程2年生・鈴木一輝君に協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉野純，小林孝輔，児島弘展，安田孝志：大気・海洋力学的手法に基づく伊勢湾の可能最大高潮・波浪の評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，pp.396-400，2009.
- 2) 川崎浩司，丹羽竜也，水谷法美：高波の影響を考慮した高潮・高波氾濫モデルの構築とその精度検証，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66 No.1，pp.196-200，2010.
- 3) Yabe, T. and T. Aoki : Universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation I. one-dimensional solver, Computer Physics Communications, Vol.66, pp.219-232, 1991.
- 4) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第 45 巻，pp.356-360，1998.
- 5) 国土交通省河川局治水課：浸水想定区域図作成マニュアル 平成 17 年 6 月，pp.17，2005.
- 6) 建設省河川局治水課：洪水ハザードマップ作成要領解説と運用改訂版 平成 12 年 9 月，2000.
- 7) 国土交通省河川局：地下空間における浸水対策ガイドライン 同 解説 <技術資料>，pp.G-11，2001.
- 8) 末次忠司：氾濫原管理のための氾濫解析手法の精度向上と応用に関する研究，九州大学諾意請求論文，1998.
- 9) 松富英夫，首藤伸夫：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，第 41 巻，pp.246-250，1994.
- 10) 紀の川流域委員会：洪水避難時の流速と水深について洪水解析モデルの違いについて，http://www.kkr.mlit.go.jp/wakayama/ryuiki_iinkai/ryuiki/comm11/pdf/data1_11.pdf，2002.
- 11) 国土交通省：ゼロメートル地帯の高潮対策検討会，第 2 回 検討会（平成 17 年 11 月 14 日）会場追加資料 コンテナ参考資料，2005.