

地球温暖化に伴う海面上昇と降雨規模の変化を考慮した 沿岸都市域の内水氾濫解析

The Analysis of Inundation due to Interior Runoff in Coastal Urban Area considering Sea-Level Rise and Rainfall Change due to Global Warming

ポカレル パラメソル*・松尾 直規**・武田 誠**

Parameshor POKHAREL, Naoki MATSUO and Makoto TAKEDA

要旨 : IPCC レポートによれば, 次の 100 年において 0.18m~0.59m の海面上昇が生じると予想されており, 地球シミュレータを用いた解析により降雨量が約 20%増加するとも言われている. 著者らは都市域を対象に, 下水道システムをモデル化した高度な氾濫解析法を構築している. そのモデルには, 合流式下水道の雨水吐からの流出が考慮されており, 都市域, 河川域, 海域における水の挙動とそれらの相互作用を一体的に取り扱うことに特徴がある. 本研究では, この解析モデルを用いて, 都市の内水氾濫災害に焦点を絞り, 地球温暖化による海面上昇と降雨の変化の影響や, 治水計画論的観点からの地球温暖化の影響を検討する. 本研究から, 海面上昇が内水氾濫に与える影響や, 地球温暖化に伴う治水安全度の低下を示し, 目安的であるが, 対象領域の場合, 現状の施設による 100 年生起確率を有する降雨による 0.50m 以上の浸水面積は, 100 年後の地球温暖化のひとつのシナリオの下では, 45 年生起確率の降雨による 0.50m 以上の浸水面積と同程度であることなどが示された.

キーワード : 地球温暖化, 海面上昇, 降雨変化, 内水氾濫, 治水計画

1. はじめに

地球温暖化は近年注目されている世界規模の環境問題であり, 多くの国で様々な問題が生じている. 気候変動に関する政府間パネル IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) によると 2100 年までに海面水位が約 0.18m~0.59m 上昇するとされている¹⁾. さらに, 地球シミュレータによる温暖化予測計算によると「将来の世界が経済重視で国際化が進む」と仮定するシナリオでは二酸化炭素濃度が 720ppm となり, 降雨量は 19%増加し, 「環境重視で国際化が進む」と仮定したシナリオでは二酸化炭素濃度が 550ppm となり, 降雨量は 17%増加するとされている²⁾. 現在, 地球温暖化による水資源, 水災害に関わる影響評

価を目的として, 様々な研究が行われている. 例えば, 和田ら³⁾は, 地域的な洪水・渇水リスクに着目して, 四国地方の降雨変化を 20km の水平解像度を有する高解像度全球気候モデル (GCM20) を用いて検討しており, 100 年間で 100 年確率降雨の年最大日降水量はある地域において増大し, 地球温暖化に伴って洪水発生リスクが高まるとしている. また, 佐藤ら⁴⁾は, 地球温暖化が進行した場合の河川災害による被害額に着目し, 降雨極値の増加に伴う被害額の変化などを検討している.

著者らは, 都市域の氾濫解析モデルの構築を行っており, 2000 年の東海豪雨を対象とした氾濫現象の再現計算や開発されたモデルを用いて下

* 中部大学 研究生, ** 正会員 中部大学 工学部都市建設工学科

水道システムの影響評価を進めてきた⁵⁾⁶⁾。開発されたモデルは下水道システム内の水理現象を詳細に表現するという特徴を有しており、合流式下水道における雨水吐から河川への流出や逆流も考慮されている。このようなモデルの特徴を生かし、これまで、海面上昇が内水氾濫に与える影響を検討してきた⁷⁾。本研究では、海面上昇と同時に降雨変化を考慮した内水氾濫解析を実施し、それら外力の浸水に与える影響を検討すると共に、浸水深が0.5m以上となる氾濫面積を指標として、地球温暖化の影響が引き起こす治水安全度の低下について検討する。

2. 数値解析の概要

2.1 解析モデル

用いた数値解析モデルは、「統合型氾濫解析モデル」と称するものであり、海域、河川域、都市域そして下水道システムを対象に、それぞれの水理現象を適切なモデルで表現して解くものである。特に、海域を計算領域に含んでいること、下水道システム内の貯留施設や雨水吐を表現していることなどの特徴を有している。なお、本研究で使用した計算領域を図1～図3に、解析モデルの概要を表1に示す。詳細は、武田ら⁵⁾⁶⁾の文献を参考にしていきたい。

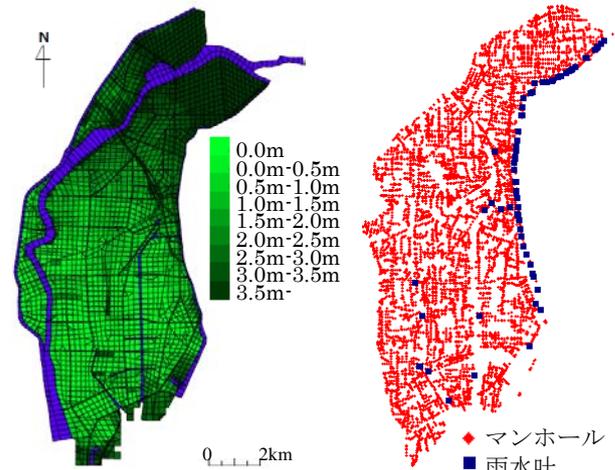


図2 都市域の地盤高

図3 雨水吐の位置

表1 解析モデルの概要

海域	デカルト座標を用いた平面二次元解析法
河川域	一次元解析法
都市域	非構造格子を用いた平面二次元解析法
下水道システム	
下水管	スロットモデルを考慮した一次元解析法
マンホール	連続式
河川域と都市域、下水管と河川における水の受け渡し	本間の越流公式
海域と河川域	河川から海域へ 流量を受け渡す 海域から河川へ 水位を受け渡す
その他考慮している現象	マンホールにおける水の落ち込みと吹き出し 雨水吐における下水管から河川への流出、逆流

2.2 解析モデルの妥当性評価

本研究に用いた解析法の妥当性評価として、武田ら⁶⁾の研究で示された東海豪雨の再現計算の結果に若干説明を加えて、浸水実績図と最大浸水深の分布をそれぞれ図4と図5に示す。なお、図4には名古屋市の浸水実績が示されているため、破

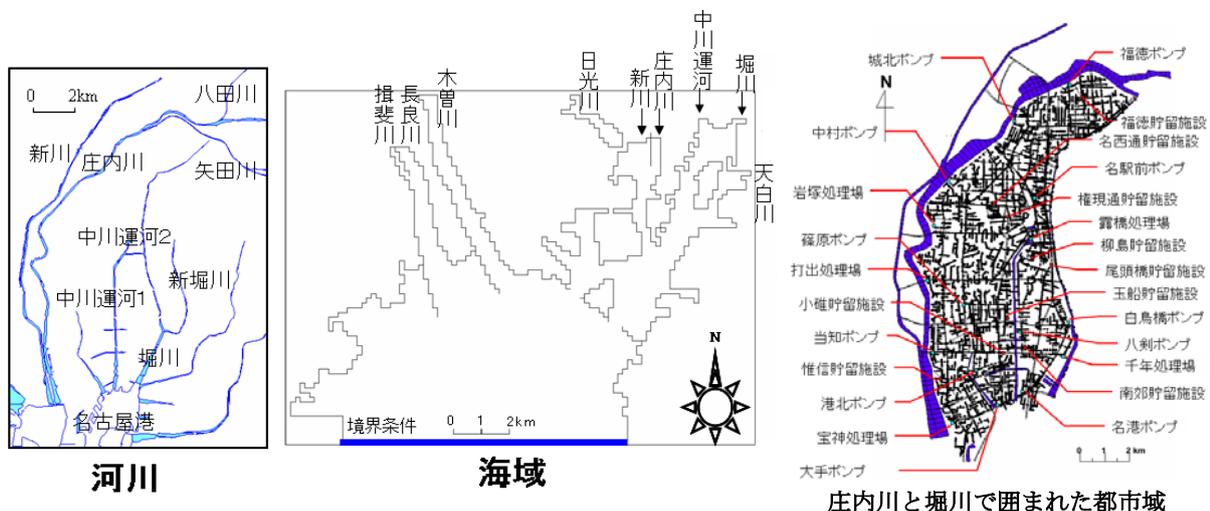


図1 計算領域

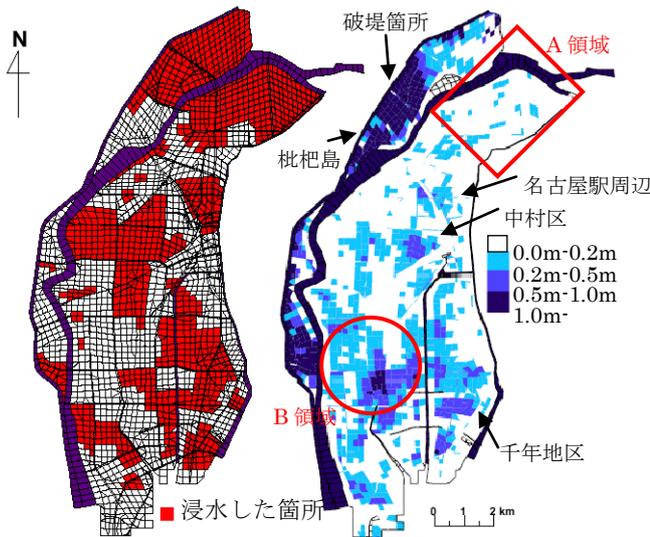


図4 浸水実績図⁸⁾ 図5 最大浸水深の分布

堤箇所から南部の西枇杷島町の実績は記されていない。これらの図から、名古屋駅周辺や中村区、千年地区などの浸水域における計算結果と観測結果が概ね適合していることが分かる。しかし、名古屋市北部(図中A領域)、名古屋市西南部(図中B領域)で実績と解析結果の浸水域が適合していない部分も認められる。名古屋市北部では、解析結果において浸水が見られるが、その値は0.2m以下であり、浸水が顕著に現れなかった。また、計算結果では、図中のB領域において浸水の集中がみられ、実績よりも大きな浸水が見られる。このような不一致の原因を特定し、解析モデルや計算領域、条件の修正を行ってから、現実の治水対策に関する検討を進めるべきであろうが、本研究で対象とする内水氾濫の事象は非常に複雑であり、モデルにもいくつかの仮定が含まれていること、得られている実績データの精度が乏しく精緻な検証が難しいこと、ここで対象とする地球温暖化に伴う海面上昇と降雨変化の内水氾濫に与える影響を示し、それに伴う治水安全度の低下について議論することは非常に重要であることなどから、本研究では、解析モデルの問題点は認識しつつも、十分に有益な情報が得られると判断し研究を進めた。



写真1 雨水吐

3. 海面上昇による内水氾濫の影響

3.1 計算条件

本研究の理解を助けるために、着目した現象について示す。写真1は合流式下水道の雨水吐であり、対象領域には図3のように配置されている。名古屋市では合流式下水道が整備されており、豪雨時には雨水吐から河川への流出が生じるが、逆に河川水位が高い場合には、河川から下水道へ逆流が生じる。したがって、地球温暖化による海面上昇は、河川水位を上昇させ、その結果、都市の雨水排除機能を低下させる可能性がある。

ここでは、沿岸都市における内水氾濫を対象として、地球温暖化に伴う海面上昇を考慮した解析を実施し、それらの内水氾濫に与える影響の度合いを検討する。初期条件として、海域および海域に直接連結している庄内川、新川、堀川、新堀川の水位をM.S.L.(後述するように、条件により変化している)とし、中川運河の水位は現行の運用方法に準じT.P.-1.21mとする。さらに、流速をゼロ、都市域および下水道内に水は無いものとする。海域の開境界には、大潮時の潮汐変動を考慮して、M.S.L.をT.P.+0.0mとし、周期12時間、振幅1.1mの正弦関数のピークが降雨ピークと重なるような水位変動を与えた。雨水吐が存在する堀川の上流端には庄内川からの導水量0.3m³/sの流量を与え、その他の河川には平均流量を与えている。また、下水道システムと中川運河に存在するポンプの排水量や流域内の雨水貯留施設の容量を設定している。計算では、名古屋市の10年生起確率を有する中央集中型の降雨を与え、潮汐の満潮時

と降雨のピークが合致するように設定した。計算期間は、潮汐変動の安定と雨水吐から下水道への水の進入および拡がりのための前駆計算として、潮汐のみの解析を 10 日間行い、その後には潮汐とともに降雨を与え、21 時間後までを計算した。これを基本の計算条件 (case A) とする。海面上昇の影響を考察するために、基本の計算条件において、M.S.L.の値を T.P.+0.5m とした場合を case B, T.P.+1.0m とした場合を case C, T.P.+1.5m とした場合を case D, T.P.+2.0m とした場合を case E とした。降雨と潮汐に関する計算条件の概念を図 6 に示す。

なお、本計算の一部は、P. Pokharel et al.⁷⁾によって既にまとめられているが、確率降雨を用いた総合的な検討、治水安全度の変化の検討など、更に考察を進め得られた新たな知見を報告する。なお、計算時間の表示として、10 日後からをゼロとして示す。

3.2 計算結果

図 7 に氾濫域の浸水水量、図 8 に下水道システム内の水量を示す。これらの図から、case E では浸水が大きく表れていることが分かるが、これは 2.0m の海面上昇の影響で、河川から越水した水に加え、下水道のマンホールから都市域内へ流出した水によって、氾濫水量が大きくなったと考えられる。なお、case E の浸水深の分布から、堀川と中川運河で挟まれる地域の浸水が甚大であった。また、図 7 と図 8 をみると、海面上昇量を 1.5m とした case D から水量に差がみられている。case D と case E では、前駆計算において潮汐の影響により浸水が現れていた。これらは、水位上昇に伴い、雨水吐からの逆流が生じ、下水道を通じて都市域に噴き出していることと、河川堤防からの越水が合わさって浸水が生じていると考えられる。さらに、逆流した水が下水道と小河川を広く進行して、堀川流域が持つ治水容量を減少させ、排水システムの機能低下が生じたと考えられ

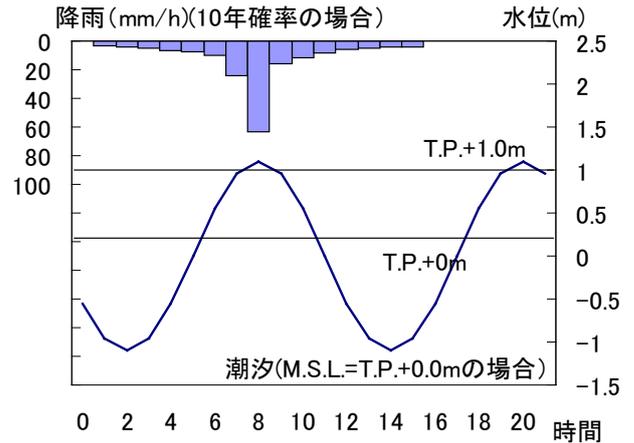


図 6 計算条件の概念

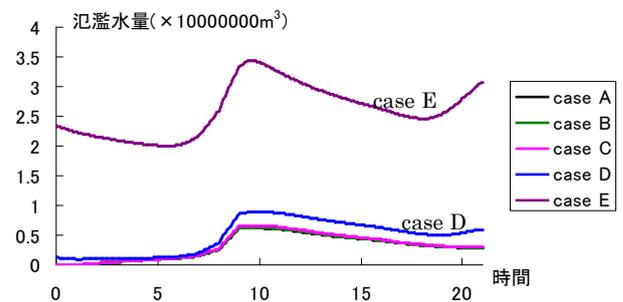


図 7 氾濫水量の時間変化

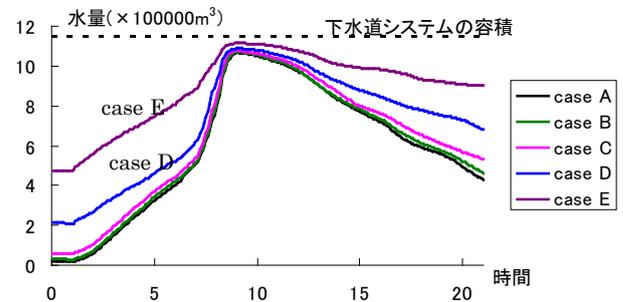


図 8 下水道内水量の時間変化

る。すなわち、海面上昇の値が大きい場合には、雨水吐における下水道水の排出先である河川水位が高く、排出流量を低下させると共に、非降雨時に下水道内に流入することにより、本来有している下水道システムの容量面での浸水低減機能が失われる可能性があり、本研究の場合、水位上昇 1.5m 以上でそのような治水安全度の低下が現れている。現在、100 年後に予測されている海面上昇は 0.15m~0.59m であり、この値からすれば、特に問題視する状況ではないと考えられるが、地域的なバラツキによりそれ以上の海面上昇が生

じる可能性も否定できず、さらに、100年以降の状況を想定すれば、1.5m以上の海面上昇は否定できないことから、特に、沿岸域に位置し、かつ、河川に直接排水する雨水排除システムを有している都市では、内水氾濫対策において地球温暖化による海面上昇の影響を想定しておくことも重要であるといえる。

4. 地球温暖化に伴う海面上昇と降雨変化を考慮した内水氾濫

4.1 計算条件

3.では海面上昇が内水氾濫に与える影響について検討した。ここでは、海面上昇に加えて降雨変化が内水氾濫に与える影響を対象とする。3.と同様に、M.S.L.をT.P.+0.0mとした場合と、100年後に0.59mの海面上昇が生じると予想されていることを考慮し、M.S.L.をT.P.+0.59mとした同様の潮汐変動の場合も取り上げた。また、名古屋市の2年、3年、5年、10年、20年、30年、50年、100年の確率年を有する中央集中型の降雨を設定した。さらに、「将来の世界が経済重視で国際化が進む」と仮定するシナリオでは降雨量は19%増加し、「環境重視で国際化が進む」と仮定したシナリオでは降雨量は17%増加すると予想されていることから、これらの知見が確率年を基に作成した計画降雨においても適用できると仮定して、それぞれの確率年を有する降雨の値を1.17倍、1.19倍したものも取り扱った。その他の条件は3.1と同様である。本研究で取り扱った計算条件をまとめると表2となり、降雨の条件と潮汐の条件を組み合わせると、48通りの計算を行った。

4.2 計算結果

計算の一例として、case 0-100-0 (case [海面上昇の有無 0:無し 1:有り]-[対象とする確率年]-[降雨変化の有無 0:無し 1:17%増加 2:19%増加]) と case 1-100-0, case 1-100-2 の浸水の

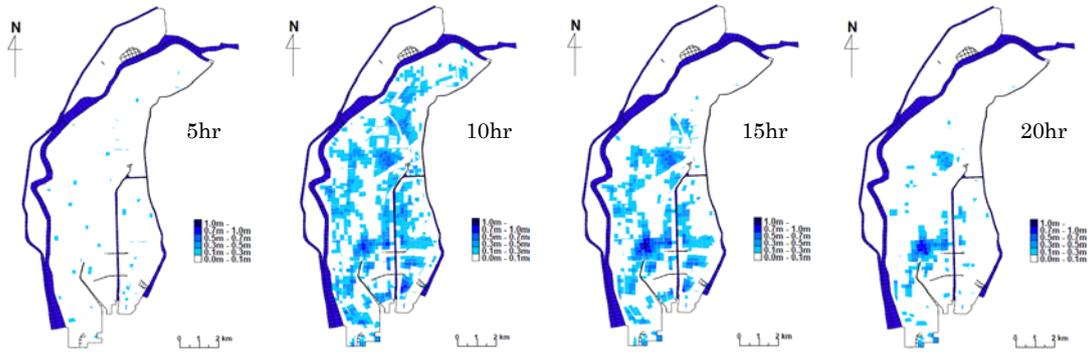
表2 計算条件

降雨	2年, 3年, 5年, 10年, 20年, 30年, 50年, 100年 (対象とした確率年)	1.0倍(現状)
		1.17倍(17%増加)
		1.19倍(19%増加)
潮汐	振幅1.1m 周期12時間の潮汐変動	M.S.L.=T.P.+0.0m(現状)
		M.S.L.=T.P.+0.59m

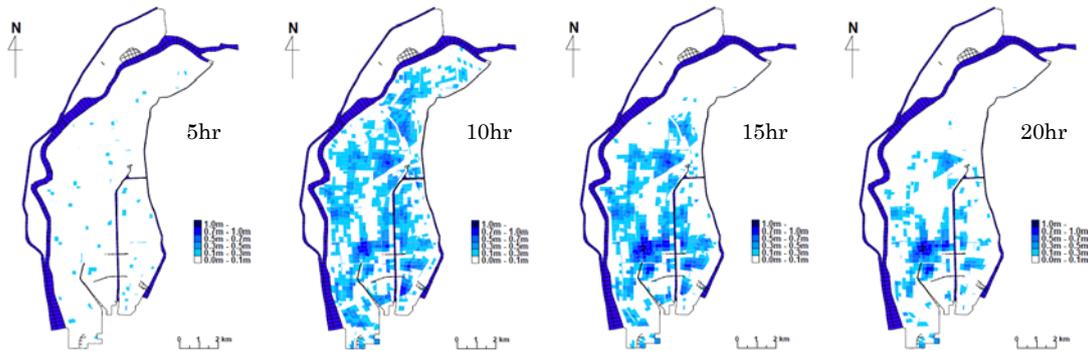
様子を図9に示す。本図から、海面上昇を考慮した場合に、新たな浸水面積が生じており、さらに降雨を19%増加した場合には浸水深が大きくなっていることが分かる。また、後述する図10に示されるように、被害を与える0.5m以上の浸水面積からみれば、case 0-100-0 と case 1-100-0 の差よりも、case 0-100-0 と case 0-100-2 の差の方が大きい。したがって、当然の結果ではあるが、内水氾濫では、地球温暖化に伴う降雨の変化が非常に重要であることが分かる。

4.3 治水安全度からみた評価

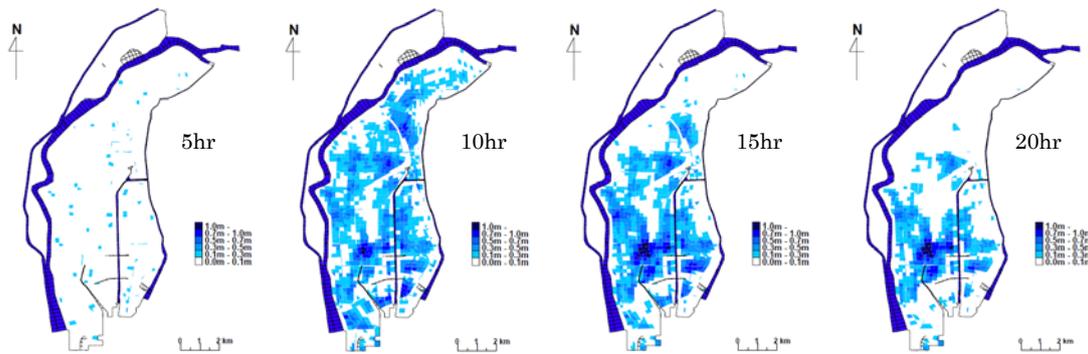
ここで、それぞれの計算結果の最大浸水深を対象に、床上浸水の目安である浸水深0.5m以上の浸水面積と確率年との関係を図10に示した。図中には、降雨の増加がある場合(17%と19%)とない場合で、海面上昇がある場合とない場合の計6つのラインが示されており、6つの計算結果の大小関係は凡例の順となっている。本図から、海面上昇よりも降雨規模の変化が内水氾濫の被害を受ける面積の増減に大きく関与していることが分かる。さらに、例えば、現在の状況において、100年確率の降雨による浸水深0.50m以上の面積は約5km²となっているが、本図を用いれば、同じ面積を示す19%の降雨増加と海面上昇ありの場合の確率年は約45年となることが分かる。すなわち、100年後地球温暖化の影響を受けて、海面が0.59m上昇し、降雨が19%増加した場合、これまで100年確率の降雨で生じていた浸水被害が45年確率で生じるようになることが分かる。研究対象の名古屋市では、都市域の内水氾濫対策として、10年の生起確率を有する降雨を用いて



(a) case 0-100-0 (海面上昇なし, 100年確率の計画降雨)



(b) case 1-100-0 (海面上昇あり, 100年確率の計画降雨)



(c) case 1-100-2 (海面上昇あり, 100年確率の計画降雨, 降雨19%増加)

図9 浸水深の分布の時間変化

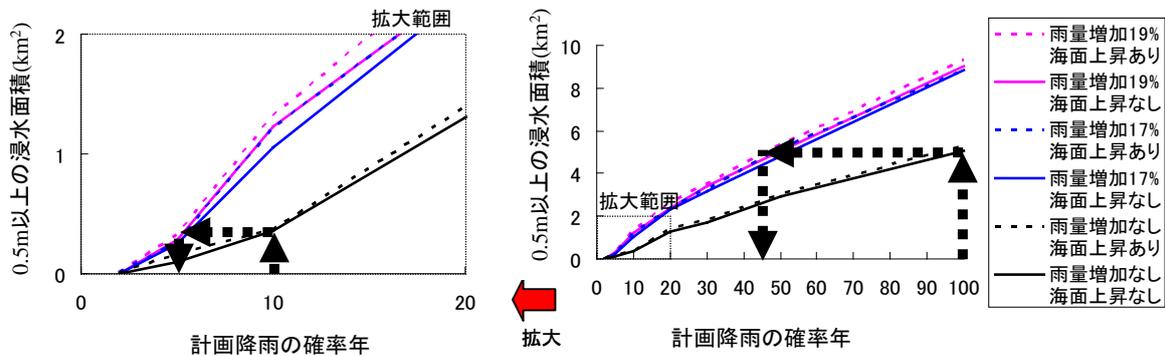
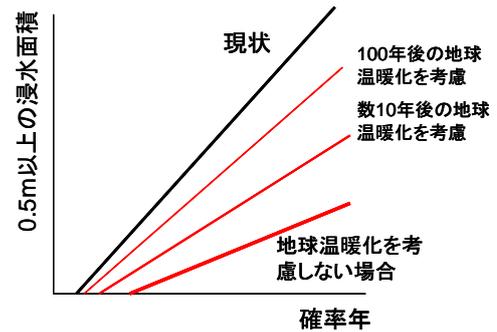


図10 計画降雨の確率年と0.5m以上の浸水面積

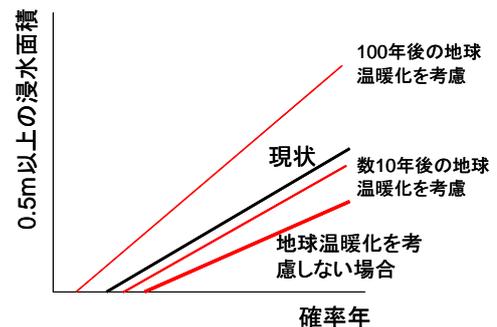
いる。図 10 の拡大図から、10 年の生起確率を有する降雨によって生じる浸水被害は 0.3km^2 となり、100 年後、前述した仮定を設ければ、同じ面積を示す 19% の降雨増加の確率年は 5 年となる。すなわち、この確率年の減少が治水安全度の低下を意味する。したがって、地球温暖化が進行するに従い、治水安全度も低下することを考慮しながら、治水対策を講じる必要がある。なお、3.2 で示したように、現段階における数値解析モデルの精度を考えると、得られた値は目安的な意味になると考えている。

ここでは、100 年後のあるシナリオによる想定の下で治水安全度の低下を示してきた。しかし、気象現象は、100 年後極端な変化を遂げるわけではなく、徐々に変化が現れてくることが予想される。一方で、治水対策の効果も事業に着工してすぐに現れるわけではなく、その機能が発揮されるには完成に要する数十年が費やされるのが一般的である。それらを考慮した概念図を図 11 に示す。

図 11 の (a) は治水対策によって大きな改善が見込まれるダム建設などの場合であり、100 年後の地球温暖化が進んだとしても、現状よりも治水安全度が高まる状況を示している。一方、(b) の場合は、治水対策の効果がそれほど望まれずに、地球温暖化の影響によって、その効果を上回る被害が見込まれる場合である。(a) のような対策を講じることが望ましいのは当然であるが、経済面も合わせて考えれば、都市域における内水氾濫対策など、構造的な治水安全度の向上は非常に難しい場合が多い。したがって、この (b) のような状況下では、構造的対策と共に、避難対策や保険制度、土地利用規制など、ソフト面の対策を充実させる必要がある。今後の地球温暖化による海面上昇や気象の変化が十分に明らかでない現状においては、将来の治水安全度をどのように見積もるかは非常に困難な作業であるが、用いる降雨規模に出来る限り適切な安全係数 (例えば 100 年後を



(a) 大きな治水効果が見込まれる場合



(b) 大きな治水効果が見込まれない場合

図 11 治水対策の評価に関する概念図

見据えた場合には 1.2 など) を与えて、少しずつ議論を進めていくことも重要であると考え。

5. おわりに

本研究では、名古屋市を対象に、地球温暖化による海面上昇と降雨の変化を考慮した内水氾濫について検討した。得られた結果をまとめれば、以下のようなものである。

1) 海面上昇に伴い合流式下水道の雨水吐から河川水が逆流することに着目し、その都市内水氾濫への影響を指摘した。特に、名古屋市では、海面上昇が 1.5m を超える場合に、満潮時や激しい降雨時において浸水被害が現れることを示し、雨水吐からの排水量の低下と逆流による下水道容量の低下が浸水に影響を与えていることを示した。

2) 海面上昇と降雨の変化を考慮した内水氾濫解析を実施し、海面上昇よりも降雨の変化の方が、浸水状況に甚大な被害を与えることを改めて示した。

3) 地球温暖化に伴う治水安全度の低下を示し、目安的であるが、対象領域の場合、現状の施設による100年生起確率を有する降雨による0.50m以上の浸水面積は、100年後の地球温暖化のひとつのシナリオの下では、45年生起確率の降雨による0.5m以上の浸水面積と同程度であることが示された。地球温暖化に伴い、このような治水安全度の低下が懸念されることを指摘した。

4) 地球温暖化による治水安全度の低下を考慮した治水対策の検討が不可欠であり、場合によっては、地球温暖化による海面上昇および気象変化により、結果として治水効果が認められない事例が生じる可能性があることを指摘した。

引用・参考文献

- 1) IPCC : Climate Change 2007, The physical science basis, <http://www.ipcc.ch/SP/M2feb02.pdf>, pp.13-14, 2007.
- 2) 東京大学気候システム研究センター：地球シミュレータによる最新の地球温暖化予測計算が完了, 9/16, 2004, <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp>.
- 3) 和田一範, 楠 昌司：高解像度全球モデルを用いた地球温暖化にともなう四国地方の洪水・渇水リスクの評価, 水工学論文集, 第52巻, pp.529-534, 2008.
- 4) 佐藤 歩, 川越清樹, 風間 聡, 沢本正樹：降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価, 水工学論文集, 第52巻, pp.433-438, 2008.
- 5) 武田 誠, 松尾直規, 山中威士, 森田豊：総合的な氾濫解析システムの構築に関する研究, 水工学論文集 第49巻, pp.613-618, 2005.

6) 武田誠, 森田豊, 松尾直規：下水道システムを考慮した氾濫解析の治水対策への適用, 水工学論文集 第51巻, pp.529-534, 2007.

7) P Pokharel, M Takeda and N Matsuo: Application of inundation analysis model in Nagoya city considering sea level rise due to global warming, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.52, pp.109-114, 2008.

8) Web 資料 名古屋市：
<http://www.city.nagoya.jp>, 2006年1月

著者紹介



ポカレル パラメソル (非会員)

中部大学大学院工学研究科 (愛知県春日井市松本町1200), 昭和43年生まれ, 平成20年3月中部大学大学院工学研究科博士後期課程を満期退学, 現在, 中部大学大学院工学研究科研究生, 土木学会.



松尾直規 (正会員)

中部大学工学部都市建設工学科 (愛知県春日井市松本町1200), 昭和24年生まれ, 昭和50年3月京都大学大学院工学研究科修士課程を修了, 同年京都大学工学部土木工学科助手, 昭和56年中部工業大学勤務, 現在, 中部大学工学部都市建設工学科教授, 工学博士, 土木学会, IAHR, 混相流学会会員
E-mail: ic30600@isc.chubu.ac.jp



武田 誠 (正会員)

中部大学工学部都市建設工学科 (愛知県春日井市松本町1200), 昭和45年生まれ, 平成9年3月京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 同年中部大学工学部土木工学科勤務, 現在, 中部大学工学部都市建設工学科准教授, 博士 (工学), 土木学会会員
E-mail: mtakeda@isc.chubu.ac.jp

The Analysis of Inundation due to Interior Runoff in Coastal Urban Area considering Sea-Level Rise and Rainfall Change due to Global Warming

Parameshor POKHAREL, Naoki MATSUO and Makoto TAKEDA

ABSTRACT : IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) reported that the sea level increases between 0.18m to 0.59m for the next 100 year. Moreover, it is also reported that intensity of rainfall increases about 20% in some scenario analyzed by the Earth Simulator. In urban area where the combined sewer system is developed, the indisposed water flows into the rivers from the storm outlet. If the river level increases more than the water level at sewer pipe due to global warming, it seems that the river water flows into the sewer system and this flow behavior causes increasing of water disaster in urban area. In this study, the inundation due to interior runoff considering sea-level rise and rainfall change by global warming is treated by numerical analysis. The influence of global warming on the water disaster due to interior runoff is shown and the safety level of risk management for the water disaster is also discussed.

KEYWORDS : *Global warming, Sea-level rise, Rainfall change, Inundation due to interior runoff, Flood control plan*