

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	メコンデルタ都市の洪水の研究 - 潮汐と海面上昇の影響 -
Title	Influence of Ocean Tide and Sea-level Rise on Flood in Urban Areas of Mekong Delta
著者	高木泰士, Tran Van Ty, Nguyen Danh Thao, Esteban Miguel, 高橋勇人
Authors	Hiroshi Takagi, Tran Van Ty, Nguyen Danh Thao, Esteban Miguel, Yuto Takahashi
出典	土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. 1 988 - 1 993
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 69, No. 2, pp. 1 988 - 1 993
発行日 / Pub. date	2013, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 (c) 2013 Japan Society of Civil Engineers.

メコンデルタ都市の洪水の研究 — 潮汐と海面上昇の影響 —

高木 泰士¹・Tran Van Ty²・Nguyen Danh Thao³・Esteban Miguel⁴・高橋 勇人⁵

¹正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科国際開発工学専攻

(〒152-8550東京都目黒区大岡山2-12-1) E-mail:takagi@ide.titech.ac.jp

²カントー大学講師 (3/2 street, Ninh Kieu district, Can Tho city, Viet Nam)

³ホーチミン市工科大学講師 (268 Ly ThuongKiet St., Dist.10, Ho Chi Minh, Vietnam)

⁴東京大学大学院特任准教授 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

⁵東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8550東京都目黒区大岡山2-12-1)

メコンデルタの洪水リスクを評価するためには、今まで十分に考慮されてこなかった潮汐の影響の理解が不可欠である。加えて、将来的な洪水リスクの議論では、海面上昇の検証が必要となる。本研究では、潮汐と海面上昇がメコンデルタ都市の洪水頻度や浸水深に及ぼす影響を検証した。メコンデルタ最大の都市Can Thoは、河口より80km内陸に位置するが、河川水位は年間を通じて潮汐の影響が支配的であり、半日周潮、日周潮および年周潮の影響が顕著である。Can Thoの川岸では、現在年間2.5%程度の時間帯で浸水が発生しており、市内の主要道路では膝上程度の浸水が発生している。海面上昇により、将来洪水頻度が増加し、現在は雨季に集中している浸水が将来的には年間を通じて発生することが定量的に示された。

Key Words : Mekong Delta, Vietnam, Can Tho, flood, inundation, tide, sea-level rise, river flow

1. はじめに

メコン河は、チベット高原を源流とし、中国、ミャンマー、ラオス、タイ、カンボジア、ベトナムを流れて南シナ海に注ぐ、全長約4,800kmに達する世界10大河川の一つである¹⁾。この流域は、気候変動に対して世界で最も脆弱な地域の一つと考えられており、今世紀末までの水文学的影響は過去9,000年の変化を上回ると予測されている²⁾。ベトナム南部にはメコン河が運ぶシルトや粘土が堆積して形成されたメコンデルタが広がり(図-1)、その極めて低平な地理的条件のため、世界で最も海面上昇の影響が大きいと懸念されている場所の一つである。

ベトナム沿岸部では1993年から2008年の間、年平均3mmの海面上昇量が観測されている³⁾。将来の海面上昇は、Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) により全球平均で今世紀末には0.18-0.59mに達すると予測されている⁴⁾。最近では、IPCCの予測を大きく上回るとの見解も発表されており^{5) 6)}、メコンデルタの都市や集落では、今後洪水頻度と浸水深の増大が懸念される。

また、ベトナム南部は、北部や中部に比較すると台風の頻度は明らかに小さいが、可能性が無視できるほどに

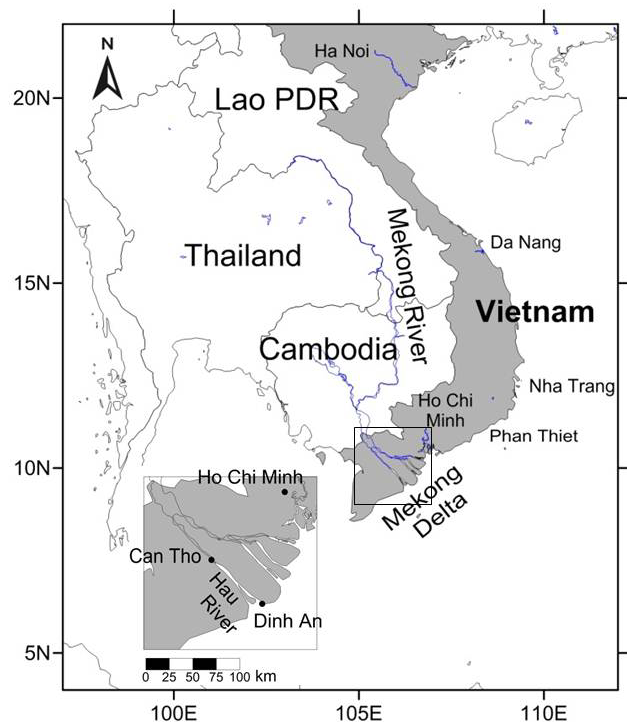


図-1 ベトナムおよびメコンデルタの位置

小さいものではない⁷⁾。したがって、海面上昇により浸水危険性が増したメコンデルタに台風が接近し、顕著な高潮をもたらした場合、被害はこれまでに経験したことのない規模に達する可能性を否定できない。

本研究ではメコンデルタ最大の都市であり、今後社会的にも、経済的にも洪水の影響が最も顕在化すると予想されるCan Tho市を対象とする。Can Tho市(図-1, 図-2)は、メコン河の分流Hau川の中流に位置し、人口は120万人(2011年時点)を超えている。

メコン河は非常に感潮域の広い河川であり、河口から190km内陸のカンボジア国境の町でも1m程度の潮位変動が観測されている⁹⁾。したがって、メコンデルタの洪水リスクを評価するためには、潮汐伝播の特性を理解する必要がある。この点に関しては、日本の木曾川や南米のラプラタ河を対象にした研究^{8) 9)}などがあるが、メコン河を対象とした研究はこれまで十分に行われていない。

本研究では、メコンデルタの都市を対象として、潮汐が洪水頻度や浸水深に及ぼす影響を評価し、さらに将来の海面上昇の影響を定量的に検証する。



図-2 Can Tho市の中心部とHau川

2. 潮汐伝播の分析および現地調査の手法

ここでは、河口地点と内陸都市の2地点で観測された水位データを用いた潮汐伝播の分析および現地調査の手法について述べる。

(1) 潮汐伝播の分析

Hau川には、Dinh AnとCan Thoの2地点にMekong River Commission (メコン河委員会, 以下, MRC) により管理されている水位観測施設がある(図-1)。Dinh Anの観測所はHau川が南シナ海に注ぐ河口地点に設置されている。この2地点の水位について、データの欠測が少なかった2009年7月1日から2010年6月30日までの1年間のデータを使用して水位変動の分析を行う。

河口に位置するDinh Anの水位変動は天文潮が支配的と考えられるため、Dinh An地点に対するCan Tho地点の水位応答を調べることで、2地点間の潮汐伝播特性を検

証することができる。具体的には年変動や日変動など周期的な特性を調べるためにフーリエ解析を行う。また、河口のDinh An地点については、主要分潮に対する調和解析を行う。

また、河川流と潮汐の相互影響の検証も重要である。Can Thoでは水位に加えて河川流量も観測されているが、このデータには潮汐振動流の影響が明らかに混入しているため、上流からの純粋な流量として扱うことはできない。純粋な河川流量を把握するためには、降雨流出モデルを用いた評価などが別途必要になるが、本研究ではそのような詳細な検討は行わず、代わりにCan Thoの降水量³⁾や河口から十分遠方の非感潮域で計測された河川流量¹⁰⁾を用いて簡易的に両者の相互影響を検証する。

(2) 浸水深の推定方法

観測所で取得された水位を用いて洪水頻度や浸水深を求めるためには、河川水面と対象地点の相対的な高さ関係を明らかにする必要がある。加えて、都市部での浸水深を把握するためには高精度の標高データが必要となる。しかし、ASTER-GDEMやSRTMなどの衛星データを用いた推定では、仕様上の測定誤差が1~10mオーダーに達するため¹¹⁾、海面上昇の影響評価で必要となる1~10cmオーダーでの浸水深の評価は困難である。そこで、2012年3月にGPS(スタティック測位)による現地測量を行い、高精度の標高データを取得した。

このように陸上の具体的な浸水深を得るため、まずCan Thoの川岸に陸上基準点を設けて、その点と水面の差を標尺を用いて2日にわたって計測を行った(図-3)。次に、MRCの水位データを計測データと対比させて、陸上基準の水位へと変換した。今回のケースでは、図-4に示す通り、元水位データを1.5m下方にシフトすることで精度良く変換できることがわかった。さらに、川岸の陸上基準点を既知点として、市内の主要道路にGPSを据えて、スタティック法による標高計測を行った。このような方法により、MRCの水位データを用いて、具体的に川岸および都市部の浸水深を求めることができる。



図-3 Can Thoの川岸における水位観測

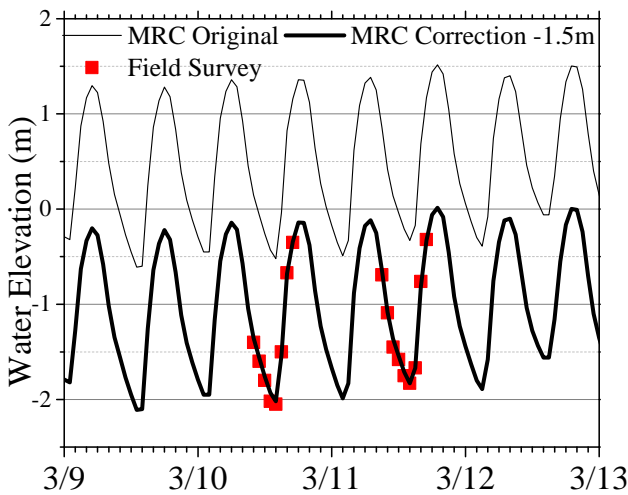


図-4 現地調査時のCan Tho地点の水位と陸上基準へのキャリブレーション結果

3. 結果と考察

ここでは、潮汐伝播の検証を行うとともに、海面上昇に伴い顕在化すると予想される洪水について考察する。

(1) 水位変化の長周期特性

図-5(a), (b)は、Dinh AnとCan Tho各地点における水位の時間変化(線A)とローパスフィルターにより抽出した長周期(年周期)変動を示している(線C)。河口地点に位置するDinh Anの水位変動は天文潮が支配的と考えられるため、調和解析により抽出したSa分潮(太陽年周潮, 周期365.2日)を同時にプロットしている(線B)。ローパスフィルターによる年周期のトレンド線(線C)をみると、Dinh Anでは12月から4月頃にかけて振幅のピークが現れている。

これに対してCan Thoでは9月から1月頃にかけてピークが出現しており、両地点では3, 4ヵ月程度のタイムラグが生じている。Dinh Anについては、この年周期トレンド(線C)とSa分潮(線B)が振幅、位相ともに似通った傾向を示しているため、河口地点の長周期変動としては天文潮位が支配的であることが裏付けられる。一方、Can Thoの年周期(線C)はDinh Anの年変動と比較すると明瞭なタイムラグが生じており、天文潮位以外に長周期特性に影響を及ぼす要因の存在が示唆される。

この最大の要因は河川流の影響と考えるのが自然である。ベトナム南部は、熱帯モンスーン気候に属し、おおよそ5月から10月の雨季と11月から4月の乾季に分かれる。Can Tho市の降水量を示す図-5(c)から明らかな通り、雨季と乾季では明瞭に降水量が異なる。また、図-5(d)はメコン河上流各地点の河川流量を示しているが、降水量同様に雨季・乾季の違いが明瞭である。

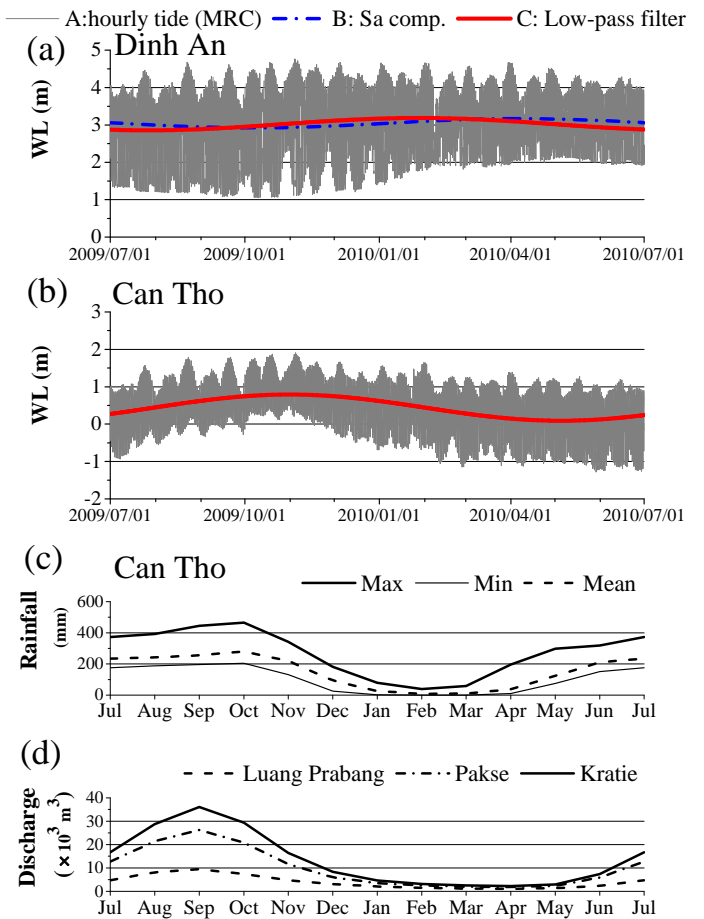


図-5 (a) (b) Dinh AnとCan Tho各地点の水位変動, (c) Can Thoの降水量, (d) 上流3地点の平均河川流量, Luang Prabang(ラオス), Pakse(ラオス), Kratie(カンボジア)

図-6は、フーリエ変換により周波数毎の振幅値を算出した結果である。年周期に対応する振幅がDinh An地点では16cmであるのに対して、Can Tho地点では35cmと2倍程度に増幅しており、この差が河川流の寄与と考えられる。一方、同じ長周期変動に区分される半年周潮(周期182.6日)の振幅に関しては、Dinh Anと比較してCan Thoでは若干の減衰が見られるが、潮汐成分の大部分がCan Thoにそのまま伝播していると考えられる。

これらの観測的考察より、Can Thoの水位の年周期変動は潮汐と河川流の相互の影響によりピーク時期が決まり、両者とも同程度の振幅をもたらすものと推察できる。

長周期の水位変動に及ぼす影響としては、その他にエルニーニョ・南方振動(ENSO)の影響が予想される。最近では2009年夏から2010年春にかけてエルニーニョが発生しており¹²⁾、本研究の対象期間と合致する。一般的にエルニーニョの発生により太平洋西部においては平年より水位が低下するといわれている。本研究では詳しく検証できなかったが、メコン下流域においてもエルニーニョの影響が有意であった場合、対象期間の水位は平年より低下していた可能性がある。

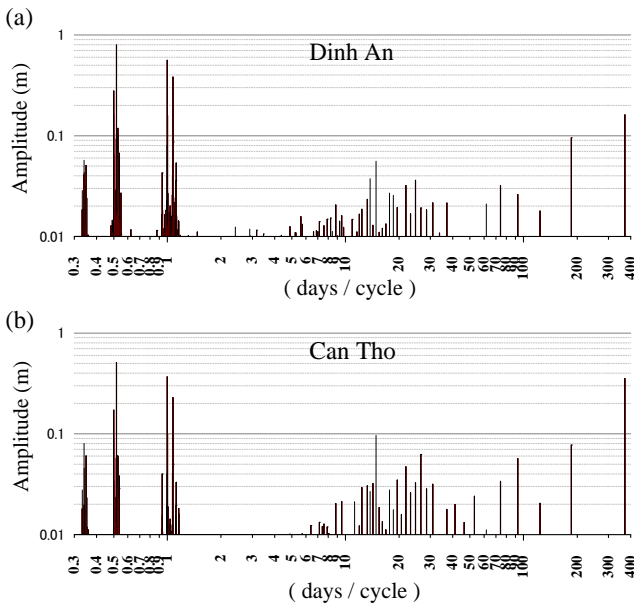


図-6 (a) (b) Dinh AnとCan Tho各地点の振幅スペクトル

(2) 水位変化の短周期特性

図-6よりCan Thoの周波数特性が河口のDinh Anの特性と非常に類似していることがわかる。したがって、河口より80km内陸のCan Thoにおいても潮汐の影響が卓越していることが裏付けられる。中でも短周期潮である半日周潮と日周潮の成分が卓越しており、先に議論した長周期潮である年周潮の影響はこれらに次いで大きい。

再度、図-5(a), (b)の水位変化を確認すると、河口地点のDinh Anでは7月頃から1月頃にかけて全振幅で3m前後の日変化を示しているのに対して、同時期のCan Thoでは2m以下であり、明瞭な差異が認められる。この原因は潮汐が河川を遡上する際の減衰によるものと考えられるが、上記以外の期間については、両地点とも2m前後となっており、明瞭な減衰は認められない。

この原因を精査する目的のため、図-7を作成した。この図では、バンドパスフィルターにより最も影響の大きい半日周潮の成分のみを抽出し、両地点の振幅成分を比較している。この図より明らかな通り、おおよそ雨季の時期は振幅の減衰が顕著であり、Can ThoではDinh Anに比べて、最大67%の減衰が生じている。これに対して、乾季における減衰は最大でも20%程度であり、河川流量の大小がCan Thoにおける水位変動に大きく影響を及ぼしていると推察できる。また、両地点の遅角差の計算より、半日周潮は平均3.2時間(標準偏差0.45時間)程度の時間をかけてDinh AnからCan Thoに伝播していることが判明した。

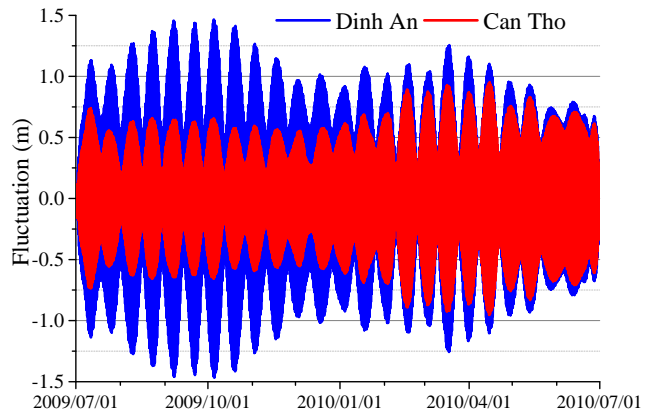


図-7 2地点の半日周潮成分の比較

(3) 洪水の頻度と浸水深

図-8は、Can Thoにおける各水位レベルの年間発生時間を示している。水位は、川岸の陸上基準点(GL)をゼロとしたときの相対的な高さであり、前述の方法でMRC水位データを補正して使用している。したがって、縦軸のゼロ以上の範囲が川岸での浸水の発生時間を表している。水位は正規分布ないしは対数正規分布で表されるような分布傾向となっているが、2009年7月から2010年6月の1年間では、合計215時間(年間2.5%)で浸水が発生しており、その最大浸水深は40cm程度である。

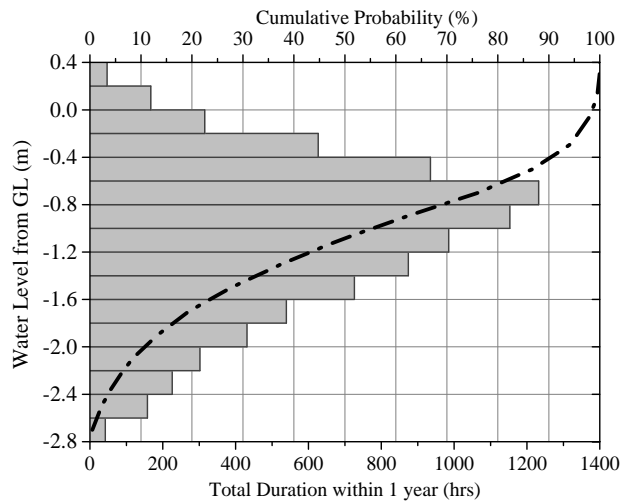


図-8 Can Tho市の川岸からの水位と発生時間

図-9は、2012年3月の調査時にCan Thoの陸上基準点の近くで撮影したほぼ満潮時の状況である。図-5(b)で確認できる通り、3月は比較的水位が低い時期であるが、テラス直下まで水面が迫ってきている。



図-9 満潮時の川岸の状況 (撮影2012年3月)

(4) 将来の海面上昇の影響

川岸付近では、現在すでに年間2.5%の時間帯で浸水が発生していることが明らかになったが、海面上昇が進行すればより浸水発生時間が長くなると予想される。図-10は、今後の海面上昇量として20, 40, 60cmの3パターンを想定して、MRCの水位データにこれらの水位上昇量を加算し、川岸地点の浸水発生時間を試算した結果である。浸水は、現在では雨季の時期に集中して発生しているが、海面上昇が進むと一年中浸水が発生する状況になることがわかる。また、海面上昇量が60cmでは、年間の4分の1程度の時間帯で浸水が発生すると予測される。

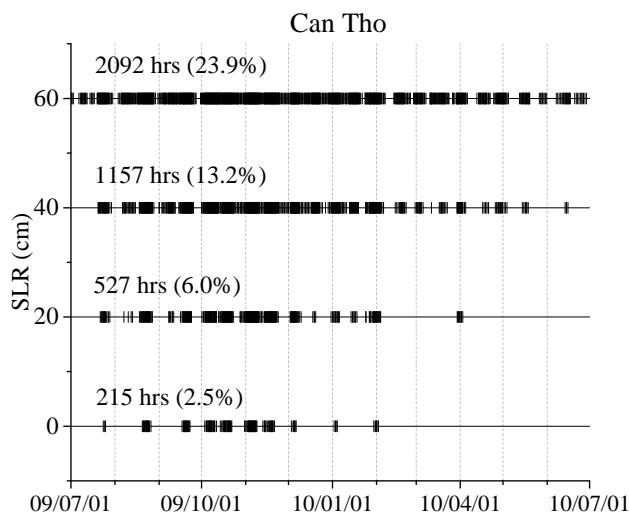


図-10 海面上昇(SLR)に伴う浸水発生時間の増加

図-11は、川岸から約300mに位置する市内の主要道路におけるGPS測定の状況である。同地点と川岸の陸上基準点の標高差を求め、この道路での浸水深を算出した結果、2009年11月に47cmの浸水が生じていたことが判明した。この浸水深を基準として、将来の海面上昇量として60cmを加算すると、浸水深は道路上107cmに達する。現

在の浸水は膝上程度の浸水であり、被害としては交通障害や一部家屋で床上浸水などが発生しているが、大規模な洪水被害という様子ではない。また、メコンデルタの人々についていえば、ある程度の浸水を受忍する風土が根付いていることもあり¹³⁾、現時点では必ずしも深刻な事態という雰囲気ではない。しかし、将来海面上昇の影響が深刻化し、かつこれまで以上に人口が増加していった場合、人々の日常生活や経済活動、農業などに多大な影響を及ぼす洪水が発生しうると予想される。

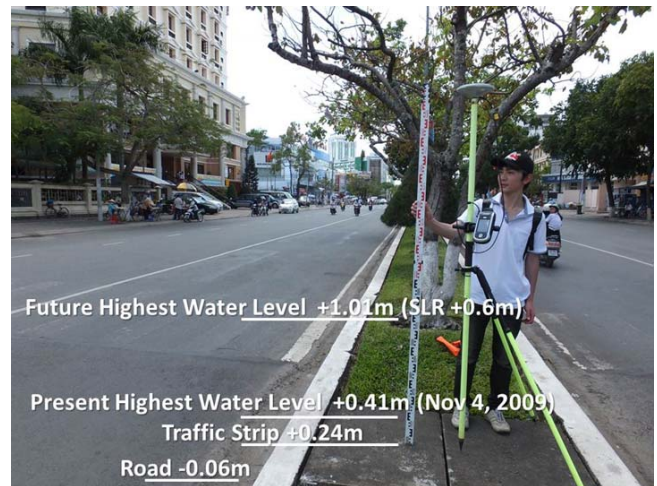


図-11 Can Tho主要部での浸水深の推定 (現在および将来)

4. 結論

メコンデルタは極めて低平な土地に人口が密集し、気候変動に対して世界で最も脆弱な地域の一つと考えられている。将来的な海面上昇や塩水遡上、洪水などの問題にいかに対応していくかが大きな課題となっている。特に、海面上昇への脆弱さはこれまでも広く指摘されてきたところであるが、本研究では潮汐の影響についても考慮して、より定量的にこの事実を明らかにした。

研究対象としたメコンデルタ最大の都市Can Thoは、河口より80km内陸に位置するが、河川水位は年間を通じて潮汐の影響が支配的であることがわかった。特に影響の大きい潮汐成分は、半日周潮、日周潮および年周潮である。このうち、半日周潮は平均3.2時間程度で河口からCan Thoに伝わる。また、河川流は遡上する潮汐の振幅を減衰させる効果があると考えられ、雨季では最大67%の低減が生じている。これに対して乾季の振幅減衰は最大20%程度と小さい。

また、2009年7月から1年間の水位データを分析したところ、Can Thoの川岸では、年間2.5%の時間帯で浸水が発生していることがわかった。これに対して、IPCCの予測範囲にある20, 40, 60cmの海面上昇量を想定して浸水発生時間を試算したところ、年間6, 13.2, 23.9%と大

幅に発生時間が増加していくと試算された。したがって、現在では雨季に集中する浸水は将来的には年間を通じて発生する状況になると予想される。また、Can Tho市内の主要道路ではすでに膝上程度の浸水が発生しているが、さらに将来海面上昇が進行した場合、人々の日常生活や経済活動、農業などに多大な影響を及ぼす洪水が発生すると予想される。

謝辞：本研究の一部は、平成24年度日本沿岸域学会・研究グループ助成「ベトナム南部沿岸域の災害脆弱性の評価と防災啓発（代表：高木泰士）」の支援の下実施されたことを付記する。

参考文献

- 1) Mekong River Commission (MRC): Overview of the Hydrology of the Mekong Basin, ISSN: 1728 3248., 2005.
- 2) Aerts, J., H. Renssen, P. J. Ward, H. de Moel, E. Odada, L. M. Bouwer, and H. Goosse: Sensitivity of global river Discharges under Holocene and future climate conditions. *Geophysical Research Letters*, Vol.33, DOI: 10.1029/2006GL027493, 2006.
- 3) Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE): Vietnam-Netherlands Mekong Delta Masterplan project, Final Draft, 49 pp., 2010.
- 4) IPCC: "Summary for policymakers," in Climate Change [2007] The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 18 pp., Cambridge University Press, 2007.
- 5) Kerr, R.: Seas to Rise Faster This Century, *Science Magazine* 4 Sept 2008, 2008.
- 6) Vermeer, M. and Rahmstorf, S.: Global Sea Level Linked to Global Temperature, *PNAS*, Vol.106, No.51, pp.21527-21532, 2009.
- 7) 高木泰士, Nguyen D. T., Esteban M., Tran T. T., Knaepen H. L., 三上貴仁: ベトナム南部の沿岸域における災害脆弱性の検証, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 4, pp.888-893, 2012.
- 8) 宇野木早苗: 河川潮汐の研究 (第一報), 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp.226-235, 1968.
- 9) D'Onofrio E., Oreiro F., Fiore M.: Simplified empirical astronomical tide model—An application for the Rí o de la Plata estuary, *Computers & Geosciences*, pp.196-202, 2012.
- 10) Mekong River Commission (MRC): The Flow of the Mekong, *MRC Management Information booklet series*, No. 2, 11 pp, 2009.
- 11) USGS, GTOPO30 Documentation, <http://webgis.wr.usgs.gov/globalgis/gtopo30/gtopo30.htm>, Accessed 2 February 2013.
- 12) 気象庁: 海洋の健康診断表 総合診断表 第 2 章気候に関連する海洋の変動, pp.153-168, 2012.
- 13) 高木泰士: 途上国防災の現実と課題—土木と国際開発の 2 つの視点から, 土木技術, Vol.68, No.3, pp.85-88, 理工図書, 2013.

INFLUENCE OF OCEAN TIDE AND SEA-LEVEL RISE ON FLOOD IN URBAN AREAS OF MEKONG DELTA

Hiroshi TAKAGI, Tran Van TY, Nguyen Danh THAO,
Miguel ESTEBAN and Yuto TAKAHASHI

The present paper investigates the vulnerability of urban areas in the Mekong Delta to inundation due to seasonal flooding, a phenomenon which is likely to be exacerbated by future sea-level rise. The research reveals that ocean tides predominantly determine water elevation even in an upstream location such as Can Tho City, 80 km inland from the river mouth, and that the river flow causes tidal damping and effectively reduces the energy of the incoming tides. This tidal damping is especially pronounced during the rainy season. Analysis based on the water levels monitored by the Mekong River Commission revealed that the ground near the riverbank of Can Tho City had experienced inundation for a total of 215 hours between July 2009 and June 2010 (2.5 % of the time over a one year period). Assuming three scenarios of SLR of 20, 40, and 60 cm, all within the range of the IPCC AR4's projections, it was found that the duration of inundation will be prolonged from the present percentage of 2.5 % to 6, 13.2, and 23.9% of the year, respectively. It is thus feared that in the future inundation can occur during any season of the year, whereas it is mostly limited to the rainy season under present sea levels. Furthermore, the field survey carried out by the authors shows that inundation reached up to a height of 47 cm above the roads of Can Tho downtown on November 2009. Such flooding can influence daily life, agriculture and traffic in the region and an increase in their frequency and height due to sea-level rise can have negative consequences on the socio-economic conditions of the inhabitants of the delta.