

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	ベトナム南部の沿岸域における災害脆弱性の検証
Title	ASSESSMENT OF THE COASTAL DISASTER RISKS IN SOUTHERN VIETNAM
著者	高木泰士, Nguyen Danh Thao, Miguel Esteban, Tran Thu Tam, Hanne Louise Knaepen, 三上貴仁
Authors	Hiroshi Takagi, Nguyen Danh Thao, Miguel Esteban, Tran Thu Tam, Hanne Louise Knaepen, Takahito Mikami
出典	土木学会論文集B3 (海洋開発) , Vol. 68, No. 2, pp. 1 888 - 1 893
Citation	, Vol. 68, No. 2, pp. 1 888 - 1 893
発行日 / Pub. date	2012, 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) 2012 Japan Society of Civil Engineers.

ベトナム南部の沿岸域における 災害脆弱性の検証

高木 泰士¹・Nguyen Danh Thao²・Miguel Esteban³・Tran Thu Tam⁴・
Hanne Louise Knaepen⁵・三上 貴仁⁶

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-S6-3)

E-mail:takagi@ide.titech.ac.jp

²ホーチミン市工科大学講師 (268 Ly ThuongKiet St., Dist.10, Ho Chi Minh, Vietnam)

³早稲田大学講師理工学術院 (〒169-8555 新宿区新宿区大久保3-4-1)

⁴ホーチミン市工科大学上級講師 (268 Ly ThuongKiet St., Dist.10, Ho Chi Minh, Vietnam)

⁵京都大学大学院博士課程2年地球環境学舎地球環境学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁶早稲田大学大学院博士課程1年創造理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 新宿区新宿区大久保3-4-1)

ベトナムは南北に長い海岸線を有し、沿岸域災害の危険性が高い国と考えられる。しかし、北部や中部と比較して、一般的に南部地域は台風や高潮災害の危険性が小さいと考えられてきた。本稿は、ベトナム南部沿岸域の災害、特に高潮脆弱性の検証を試みるものである。急成長を遂げる海岸都市において現地調査を行い、著しい海岸侵食により危険に瀕している集落や河川中洲の極めて低平な地帯に広がる集落を確認した。住民インタビューでは台風を危惧する声は皆無に近かった。一方で、過去60年間の台風経路分析より、北部や中部と比べて、台風の発生がおよそ1/2から1/3と無視できない頻度であることを示し、また50年前には1m程度の高潮が発生したことを数値解析に基づき明らかにした。これらの結果より、近年における最大クラスの台風が当該都市を襲った場合の危険性について指摘した。

Key Words : Vietnam, PhanThiet, Typhoons, Stormsurges, Field Survey, Numerical Simulation

1. はじめに

ベトナムは、1986年の改革開放路線以来、海外からの旺盛な投資も後押し、順調な経済成長を遂げてきている。地形的には、南北に伸びる全長3,260kmの長大な海岸線を有するため、沿岸域に拠点をもつ海運、水産、工業、観光等に従事する労働人口が多く、このため沿岸域の人口が多い。2007年にはWTOに加盟し、沿岸域の経済開発は益々加速していく状況にある。しかし、近年の沿岸域開発の急速な進展に対して、沿岸域防災の面での対応は遅れているといわざるを得ない状況にある¹⁾。ベトナムが今後健全な経済発展を実現するためには、沿岸域災害に対する着実な備えを進め、安全性の高い生活基盤、経済基盤を形成していく必要がある。特に、ベトナム南部地域は台風の上陸が希であることもあり、沿岸災害に対する危機感も比較的小さく、海岸線近くの低平地に住居が密集する状況が珍しくない。ベトナム南部と同緯度帯に位置するフィリピンのミンダナオ島では2011年12月に熱帯低気圧Washiが上陸し、土砂災害や洪水によって1,250人以

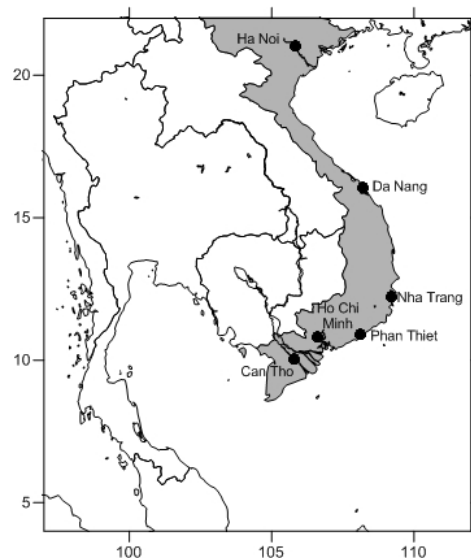


図-1 ベトナムの主要都市

上の死者を出した。ミンダナオも台風常襲国フィリピンの中にあつて、これまで台風の脅威と無縁と考えられていた。ここにベトナム南部との類似性を見出すことができる。本

研究では、ベトナムの南部地域を対象として、現地調査や数値解析など各種分析に基づき、当該地域の沿岸域災害の脆弱性を検証する。なお、本稿では南部地域の中でも海岸都市ファンティエット(Phan Thiet)を対象地とし、また沿岸域災害の中でも特に高潮災害に着目して検討を実施する。

2. 現地調査

以下では、2012年1月に実施したファンティエットにおける現地調査の概要について記述する。

(1) ファンティエットとその海岸

ファンティエット市はホーチミン市の東に約160kmに位置し、海岸に面した人口約19万人の中規模都市である。国内でも有数の漁獲高を誇る漁港を有し、また美しい砂浜海岸を有し、隣のMui Neとともに近年人気の高い観光地となっている。人口の増加も著しく過去30年の人口増加率は150%に達する²⁾。調査期間中にGPS装備の音響測深機により近隣海域の比較的狭領域を対象として深淺測量を行った(図-2)。図-3はこの結果とさらに広領域のGEBCO³⁾の30秒メッシュデータを合成して作成した等深線図である。海底勾配は1/100から1/500程度と緩やかであり、この遠浅な海岸が良好な漁場を形成している。造礁サンゴはベトナムの海岸の様々な場所に生息するが、ファンティエットの海岸では確認できなかった。底質が移動性の高い砂やシルトで構成されているため、サンゴの生息に適さないためと考えられる⁴⁾。

(2) Duc Long地区

ファンティエットのDuc Long地区において深刻な海岸侵食被害が発生している。侵食が著しく進み、ここ数年で数十軒の住居が消失し、今なお数多くの住居が危機に瀕している。なお、Google Earthで2001年と2010年の海岸を比較したところ、最大で40m程度の後退が確認された。



図-2 ファンティエット周辺の深淺測量状況

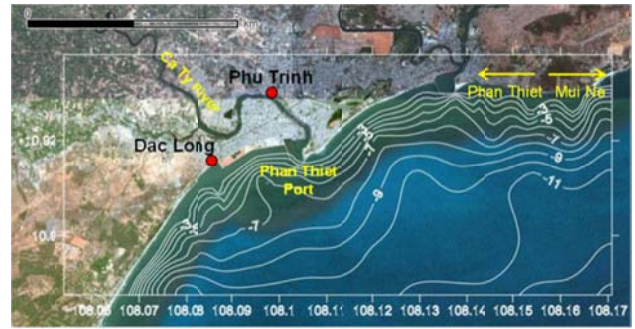


図-3 ファンティエット周辺の等深線図

また、同地区では17世帯に対して住民インタビューを実施したが、全員が過去10年で海岸侵食が顕著化していると回答した。近年周囲で発生した災害種に関する質問に対しては、海岸侵食と答える住民が最も多く(13世帯)、次いで地滑り(6世帯)、洪水(3世帯)の順であり、台風と答える住民は皆無であった。侵食の要因の一つとして、地区の東に建設された埋立地による沿岸漂砂の阻害が考えられるが、原因は十分に解明できていない。住民自らが木杭や土嚢を設置して侵食を抑止しようと努力しているものの、抜本的な解決には至っていない状況にある。またファンティエットの農業農村開発局(DARD)によって沖合に防波堤を建設する計画もあるが、資金難のため実現の目途は立っていない(当局職員談)。



図-4 Duc Long地区の深刻な海岸侵食の状況

(3) Phu Trinh地区

Phu Trinh地区は市内を蛇行して流れるCa Ty 川の中洲を埋立て、半ば不法的に集落が形成されてきた同市で最も貧しい地区の一つである。

牡蠣殻など貝殻で埋立てられた極めて低平な場所に形成されており、筆者らが測定した場所では平均潮位より49cmの高さに簡素な家屋が密集していた。河口より約1.5kmの場所にあるため、高潮位や増水の際には床下まで浸水する状況にある。

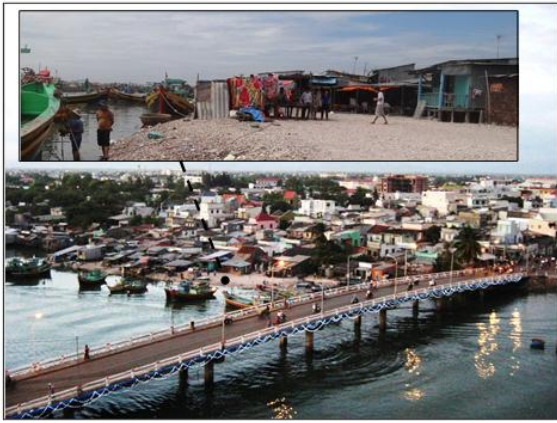


図5 Phu Tinh地区の集落

3. 台風経路分析

ベトナムにおいて、特に台風被害が深刻なのは、北部と中部の沿岸域であるが、南部においても台風と無関係というわけではない。通常、台風シーズンの初期の頃(5, 6月)は台風のほとんどが北部に集中するが、シーズンが深まるにつれて台風経路が南部へと移行していき、10-12月の時期には南部でも台風が上陸することがある。

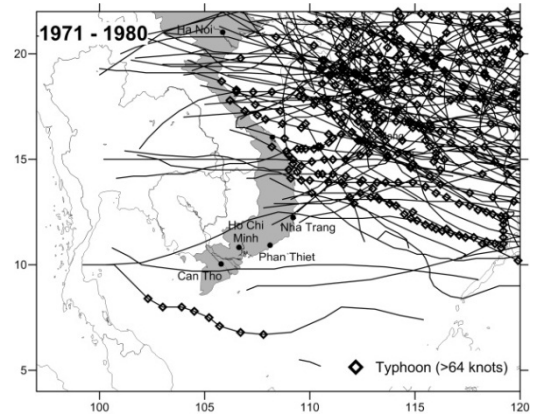


図8 台風経路図 (1971年~1980年)

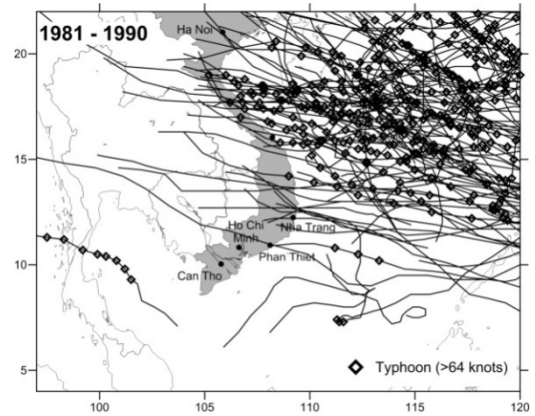


図9 台風経路図 (1981年~1990年)

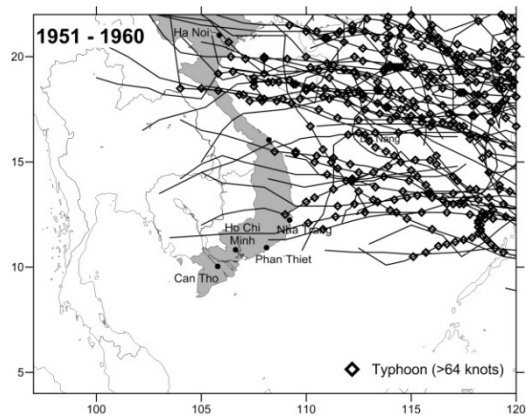


図6 台風経路図 (1951年~1960年)

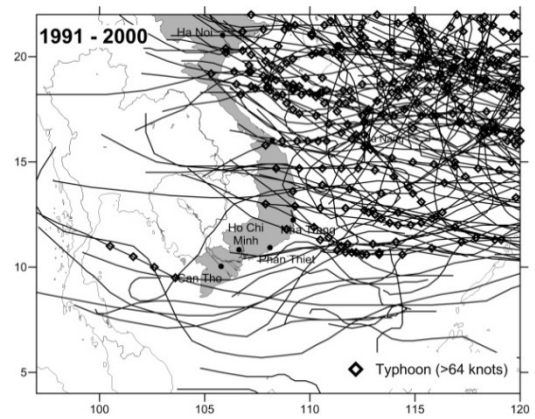


図10 台風経路図 (1991年~2000年)

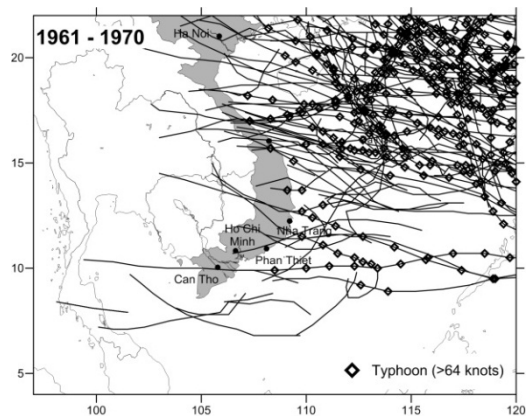


図7 台風経路図 (1961年~1970年)

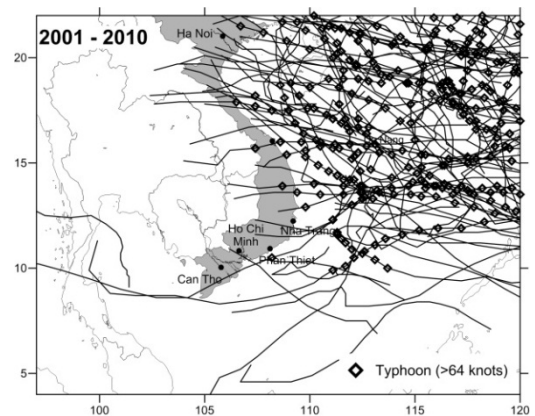


図11 台風経路図 (2001年~2010年)

台風の出現頻度を統計的に分析するため、米軍合同台風警報センター(JTWC)⁵⁾のベストトラックデータを使用して、1951年から2010年までの過去60年間の熱帯低気圧の経路分析を行った結果を図-6から図-11に示す。経路は熱帯低気圧の中心位置の軌跡を示し、最大風速が33m/s (64ノット)以上の強い台風はひし形で明示した。また、この経路分析データをもとに熱帯低気圧が消滅した地点の緯度を基準として、北～中部と中～南部の熱帯低気圧の発生頻度を比較した結果を表-1に示す。これらより、ベトナム周辺の台風発生について以下のことが言える。

- ア. 台風の発生頻度は年代によってばらつきが大きい
- イ. 過去60年間に於いて発生頻度の増減に明白なトレンドは認められない
- ウ. 中～南部の台風発生頻度は北～中部の1/2から1/3程度

上記ア. はエルニーニョ・南方振動(ENSO)のような10年規模変動の気候システムの影響が要因の一つとして考えられる⁶⁾。また、イ. は北大西洋を除く太平洋、大西洋、インド洋において1975年から2004年の30年間で顕著な熱帯低気圧の頻度増加が見られないことを指摘したWebster et al.⁷⁾の検証結果と一致する。そして、ウ. は中～南部の台風発生頻度が北～中部と比べて確かに低頻度であることを示している一方、無視できるほどに少ないことを同時に示唆しているといえる。

表-1 年代別の熱帯低気圧発生頻度・割合 (1951年-2010年)

Zone	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
北部-中部 (N25°-15°)	67 (70%)	129 (67%)	103 (76%)	100 (72%)	106 (68%)	94 (76%)
中部-南部 (N15°-5°)	29 (30%)	63 (33%)	33 (24%)	38 (28%)	51 (32%)	29 (24%)
熱帯低気圧総数	96	192	136	138	157	123

4. 高潮再現計算

ベトナム南部の海岸において数十年にわたり常時潮位を観測してきた施設が不十分であるため、過去60年間の台風に伴う高潮を推算するために数値解析を行うこととした。このため、過去60年間にベトナム南部、特にファンティエット周辺に上陸・接近した台風より図-12に示す代表的な5台風を抽出し、高潮再現計算を行った。このうち、1997年に発生した台風Lindaでは多くの漁師が高波に飲み込まれており、メコン地域を中心に3,111名の死者が発生している⁸⁾。

本研究では以下の浅水長波理論の支配方程式に基づいて高潮数値解析を行い、吹き寄せと吸い上げによる高潮を評価した⁹⁾。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^3} M \sqrt{M^2 + N^2} - fN + \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - \frac{A_h}{D} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} - fM + \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{A_h}{D} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) = 0 \tag{3}$$

ここで、 M, N は x, y 方向の流量フラックス、 ρ_w は海水の密度、 η は水位、 h は静水深、 D は全水深、 n はマニングの粗度係数、 f はコリオリ係数、 P は大気圧、 τ は風応力、 A_h は水平拡散係数である。

台風域内の気圧分布は次のMyersの式で与える。

$$P(r) = P_0 + \Delta P \cdot \exp \left(-\frac{r_0}{r} \right) \tag{4}$$

r は台風中心からの距離、 P_0 は中心気圧、 ΔP は気圧深度である。 r_0 は台風中心から最大風速までの距離であるが、今回は加藤の算定式¹⁰⁾で求めた。

なお、式(2)と(3)の風応力は式(4)を使って求まる傾度風に台風の移動速度をベクトル的に加算して求まる正味の風速 W より以下の式で算出される⁹⁾。

$$\tau = \rho_a C_D |W|W \tag{5}$$

ρ_a は大気密度、 C_D は大気の抵抗係数である。

計算にはGEBCO08gidの水深データ³⁾を使用し、 $N6^\circ \sim 14^\circ, E99^\circ \sim 112^\circ$ の計算領域を3000mの直交格子で再現した。図-13に台風Lindaについての高潮偏差の時系列を示す。前述の通り、ベトナム南部海岸では有意な潮位データが入手できないため、代わりにタイ国のKoLak検潮所($N11.8^\circ, E99.817^\circ$)の観測潮位を参照し、再現性を確認した。高潮最大時および台風到達前の水位変化について、大きさ、発生時ともに計算による再現性は比較的高い。但し、観測記録では台風通過後も高潮位がしばらく滞留している。この原因として、陸域からの洪水流出が海岸線近くの水位を押し上げたことが一因として挙げられる。今回使用したモデルは降雨の影響を考慮できないため、デルタのような低平な場所で洪水流出が時間をかけて発生する条件においては高潮位の滞留時間を過小評価する可能性がある。このように解析モデルに課題は残っているものの、高潮偏差の値については比較的再現性が高いと考え、以降

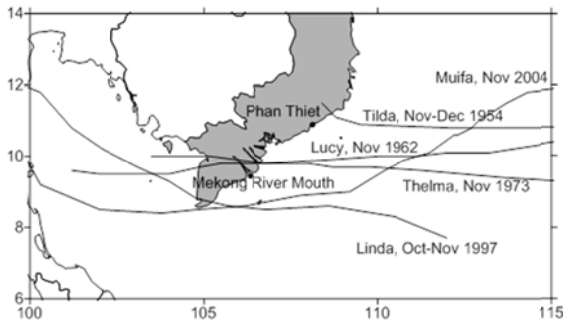


図-12 ベトナム南部に上陸・接近した代表的な5つの台風

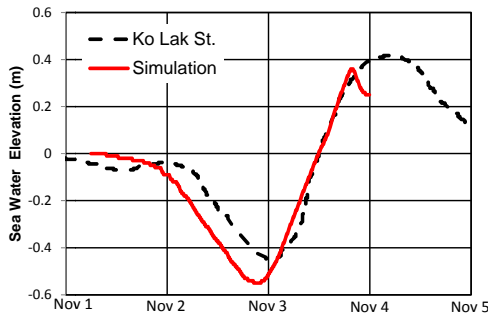


図-13 1997年台風Lindaの高潮再現計算

の検討を行った。

5台風について高潮偏差の最大値を抽出した計算結果を表-2に示す。モニタリングはファンティエット沿岸とメコン河口沿岸の2地点で行った。ファンティエット沖では1962年の台風Lucyにより56cm, またメコン河口沖では1997年の台風Lindaにより70cmの高潮がそれぞれ計算された。

今回の高潮解析モデルでは計算できないが、水深が浅い汀線付近においては波浪によるウェーブセットアップが無視できない。特に外洋に面した海岸ではその影響が大きく、一般的に碎波波高の10%程度と考えられている。高潮のピーク時には高波浪が発生していると考えてもよいので、吹き寄せと吸い上げの効果以外にもセットアップを評価する必要がある。そこで、ECMWF 40年再解析データ¹⁰⁾より有義波を抽出し、その結果を使用してセットアップを算定することとした。台風Lucy通過時のファンティエット沖110kmの最大有義波高は36m, 周期は9sであった。これより、次式を繰り返し計算で解いて平均水位変化を計算し¹²⁾, 汀線付近でのセットアップを計算した。

表-2 代表5台風に関する高潮偏差の再現計算結果

Stations	Tilda 1954	Lucy 1962	Thelma 1973	Linda 1997	Muifa 2004
Phan Thiet	0.07m	0.56m	0.28m	0.36m	0.28m
Mekong River Mouth	0.05m	0.30m	0.09m	0.70m	0.39m

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{h+\bar{\eta}} \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{8} \bar{H}^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{4\pi h/L}{\sinh 4\pi h/L} \right) \right] \quad (6)$$

ここで、 \bar{H}^2 は有義波高の自乗平均値、 h は水深、 L は波長を示している。

ファンティエットの海岸付近におけるウェーブセットアップを断面測線に対して表示した結果が図-14である。海底勾配は現地での深淺測量の結果より1/100と1/500の2勾配を設定した。水深が5mより浅くなるとセットアップが顕著となり、水深1m程度の場所では勾配によらず40cm程度の値になる。よって、高潮偏差を加えると台風Lucyによって1m程度の水位上昇が発生したものと予測される。

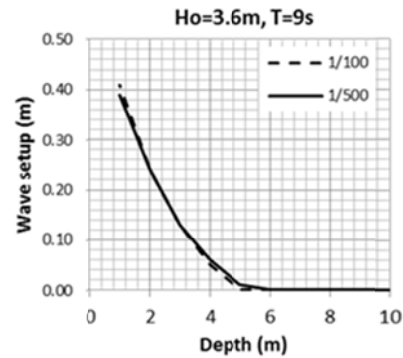


図-14 台風Lucy通過時のファンティエットの海岸でのセットアップ

5. 災害脆弱性についての考察

2章で記した通り、ファンティエットのDuc Long地区でインタビューした結果では台風を危惧する意見は皆無であった。この理由として、筆者らは大きく以下に示す3つの要因があると考えている。

- 要因1:** 南部に上陸・接近する台風の数が北部・中部に比較すると有意に少ないため
- 要因2:** 都市化はここ20年程度で急速に進んでいるが、もともと海岸近くに住居は密集していなかった
- 要因3:** かつては海岸に広い砂浜が広がっており、それがバッファーとなり台風や高潮の被害が軽減されていた

これに対して、現地調査と各分析・解析より明らかになった危険因子としては以下が挙げられる。

- 危険1:** 南部においても台風の来襲は無視できず、過去には少なくとも1m程度の高潮が発生したと予測される
- 危険2:** 現在では海岸線に住居が密集しており、また川の中洲など極めて低平なエリアにも集落が形成されている
- 危険3:** 過去10年程度で数十メートルの海岸侵食が発生したエリアもあり、波浪や高潮の脅威が高まっている
- 危険4:** 過去に深刻な台風や高潮の経験がなく災害を具体的にイメージできず、また早期警報の為の有効な手段もないため、住民の避難が遅れる可能性がある

ファンティエットにおいてはこれまで長期にわたって台風が上陸・接近することがなかったため、幸いにして高潮の被害を受けることなく、その間に海岸部を中心に住居の

密集化が進んできた」と推察できる。

問題は台風が来襲しないという、いわば幸運な状況がいつまで続くかであるが、近年の最大規模である1962年台風Lucyクラスの台風がいつファンティエット付近に再来してもおかしくはなく、そのときには高々1m程度の高潮であっても、河川の低平地帯や砂浜を失った海岸に密集する家々を襲い、大きな被害を及ぼす可能性があると考えられる。

また、上記の危険4で挙げたように住民の災害時の対応によってリスクが増大する可能性もある。2008年にミャンマーを襲い、14万人近くの死者を出したサイクロンNargisの際には平時より家屋の浸水に慣れている住民が高潮を危険視せずに逃げ遅れたという報告もある⁹⁾。

6. まとめ

ベトナム南部は台風の来襲が少なく台風災害の危険性はこれまで小さいと考えられてきた。しかし、今回の検証で、北部・中部と比較すると頻度は小さいが、可能性が無視できるほどに小さいものでないことが示された。再現計算によって求められた過去60年間の最大クラスの高潮は1m程度であり、日本の太平洋側のような高潮常襲地帯で発生する規模に比べると十分に小さい。しかし、インタビューより明らかになったように台風を危惧する住民は皆無に近く、また台風災害と無縁な時期が長期間続いているため、この間に海岸部では住居が密集化し、また河川中洲のような極めて低平地帯に集落が広がってきている。このため、ベトナム南部の海岸都市は高潮災害に対して、社会的な脆弱性が高く、さらには海岸侵食が顕著化している場所もあり、物理的な脆弱性も急速に高まりつつある。故に高々1m程度の高潮であっても大きなハザードになりうると考えられる。

謝辞：科学技術振興機構「平成23年度SATREPS特定型課題形成調査：ベトナム沿岸域の災害脆弱性調査と防災力

向上のための基礎的研究」及び東京工業大学大学院理工学研究科研究助成の支援の下実施されたことを付記する。

参考文献

- 1) 高木泰士, Nguyen DanhThao, Le Van Cong : 高い経済成長の渦中にあるベトナムの沿岸域開発の現状, 沿岸域学会誌, Vol.21, No.4, pp.113-122, 2008.
- 2) General Statistics Office of Vietnam: <http://www.gso.gov.vn/>, Accessed 10 March 2012
- 3) The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO): <http://www.gebco.net/>
- 4) Latypov, Y. Y. : Scleractinian Corals and Reefs of Vietnam as a Part of the Pacific Reef Ecosystem, Open Journal of Marine Science, 1, pp.50-68, 2011.
- 5) Joint Typhoon Warning Center (JTWC) www.usno.navy.mil/JTWC/
- 6) Mousavi, M. E., Irish, J. L., Frey, A. E., Olivera, F., and Edge, B. L.: Global warming and hurricanes: the potential impact of hurricane intensification and sea level on coastal flooding, Climatic Change 104: pp.575-597, 2011.
- 7) Webster, P. J., G. J. Holland, et al.: Changes in tropical cyclone number, duration, and Intensity in a warming environment, Science 309(5742), pp.1844-1846, 2005.
- 8) ReliefWeb, <http://reliefweb.int/node/119819>, Accessed 15 February 2012
- 9) 室田明：高潮理論，水工学に関する夏期研修会講義集，1964.
- 10) 加藤史訓：高潮危険度評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.275, 2005.
- 11) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://www.ecmwf.int/>
- 12) Goda Y: Radom seas and design of maritime structures, World Scientific, Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 15, 443p, 2000.
- 13) 柴山知也, 高木泰士, NgunHnu : 2008年サイクロンNargisの被災状況調査報告, 自然災害学会誌, 27-3, pp.331-338, 2008.

ASSESSMENT OF THE COASTAL DISASTER RISKS IN SOUTHERN VIETNAM

Hiroshi Takagi, Nguyen Danh Thao, Miguel Esteban, Tran Thu Tam,
Hanne Louise Knaepen and Takahito Mikami

Vietnam has a long coastline that stretches from north to south and thus is a country highly susceptible to coastal disasters. However, the southern part of Vietnam has generally been perceived to be less vulnerable to typhoons or storm surges compared to the northern and central parts of the country. The authors tried to understand the actual vulnerability of this southern coastline to coastal disasters, in particular storm surge, through the field surveys and numerical simulations. Through the field survey it was evident that there are a number of settlements at risk, such as a number of houses standing on a severely eroded beach and a village located in a low-lying river bank. The interviews with local residents revealed that people living there were not concerned about typhoons, while a typhoon track analysis shows that a substantial number of typhoons have approached southern Vietnam in the past. The authors estimated that the highest water elevation due to storm surges in the past 6 decades was approximately one meter by performing the numerical simulation. It is feared that these vulnerable local communities could be devastated by a storm surge accompanied by strong waves if the past biggest class typhoon occurs.