

32. ベトナム・メコンデルタにおける気候変動への 災害脆弱性及び適応策

安原 一哉^{1*}・田村 誠¹・信岡 尚道²・久保田 泉³

¹茨城大学地球変動適応科学研究機関（〒310-8512 茨城県水戸市文京2-1-1）

²茨城大学工学部（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

³国立環境研究所（〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2）

* E-mail: yasuhara@mx.ibaraki.ac.jp

気候変動の影響を受けるベトナム・メコンデルタの災害脆弱性の評価と適応策の検討を行った。その結果、(1) 物理影響と社会経済影響を加味し災害に脆弱な沿岸域を特定した、(2) 浸水に対する防護（堤防設置）シナリオを考慮した浸水影響の数値実験を行い、適応策を講じる時期を5年早めることによって影響人口を減少させる可能性があることを示した、(3)メコンデルタ3省の住民へのアンケート調査(訪問調査法)によって災害事象に対する認知や地域毎の適応策の実践の現状を明らかにした、(4)現地の実情を考慮した、堤防材料にヤシ繊維とセメントを混合する堤防強化技術を提案した、(5) ベトナムでの適応策支援のためには、二国間ODAの資金供与制度が最も効果的で高いパフォーマンスで適応策を推進する可能性があることを示した。

Key Words : Mekong Delta, Climate change, Vulnerability, Adaptation, Effectiveness metrics

1. はじめに

アジア太平洋地域は21世紀の成長拠点であると同時に、洪水や渇水、台風強度の増大などが顕在化しており、世界のなかでも気候変動に最も脆弱な地域の一つに挙げられる。これに急激な経済成長や都市部の人口増加が重なり、さらに気候変動の悪影響を受けるリスクの増加が見込まれる。アジア太平洋地域の人口は2000年の37億人から2050年頃には52億人に増加し、その大半が沿岸域に集中すると予想されている¹⁾。とりわけ、メコンデルタは広大な低平地が広がり、世界的に最も脆弱な地域の一つといえる。

UN DesInventar によると、ベトナムは過去 22 年間(1989-2010 年)で 9,941 名の自然災害による死者・行方不明者を出している(図-1)。このうち、要因別に見ると 7 割弱の 6,757 名が台風や豪雨などに伴う洪水による被害である。なかでも甚大な自然災害には、1997 年 11 月の台風リンダ(死者 3,111 名)、1999 年 11 月中部ベトナム洪水(死者 749 名)、2008 年 8 月の熱帯低気圧カムリ(死者 133 名、行方不明者 34 名)などがある。後述する調査結

果と総合すると河川堤防浸水よりも海岸沿岸域水害による死者・行方不明者の方が多い。地域別に見ると、メコンデルタでの死者・行方不明者は約 35%を占める。

これらの背景から本研究では、ベトナムのメコンデルタにおける事例研究を通して、気候変動への脆弱性評価と適応効果評価を試みる。さらに、地域特性に応じた適応技術の提案や適切な適応資金メカニズムのあり方を検討する。

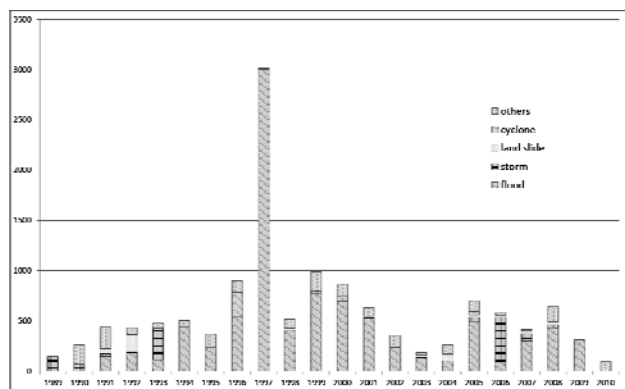


図-1 ベトナムの自然災害による被災者数の推移(1989-2010年)

UN DesInventarより作成。

2. 研究の内容と手法

本研究の検討内容は、以下のとおりである。

- ① 脆弱性と適応効果の評価手法開発
脆弱性と適応効果の評価手法を開発し、メコンデルタにおける沿岸域災害に関する事例研究を通じて検証する。
- ② 適応効果のシナリオ分析
シナリオ分析によって気候変動による海面上昇や高潮などが引き起こす浸水影響と適応策実施の効果を定量化する。
- ③ 気候変動の認知と適応策の現状評価
気候変動の認知と脆弱性を低減するために現地で講じられている適応策の現状と課題を把握する。
- ④ 地域特性に応じた適応技術の提案
対象地域の技術的背景、経済性、入手しやすい材料の活用などを考慮した適応技術、特に堤防強化技術を提案する。
- ⑤ ベトナムにおける適応関連資金メカニズムの効果・パフォーマンス分析
ベトナムにおける適応策支援のための4つの資金供与制度を分析し、その効果と想定されるパフォーマンスを比較検討する。

3. 脆弱性と適応効果の評価手法開発

(1)脆弱性評価

メコンデルタにおいて、海面上昇や高潮などの物理影響と人口密度、貧困などの社会経済影響を加味して脆弱な地域の特性を試みた。ここでは、メコンデルタの災害歴、海面上昇などの物理条件と社会経済条件に注目した市町村単位(メタスケール)での脆弱性評価を行った。特に海面上昇、人口などの独自推計を評価に加えていること、メコンデルタの沿岸域において市町村単位の詳細な評価を実施する点などは本研究の特色である。

過去の自然災害歴は、素因となる自然条件を反映する指標の一つと考えられる。そこで前節の過去22年間の省別の災害死者・行方不明者数を各省の災害指標として脆弱性の一要素に加えた。海面上昇は、48cm(A1Bシナリオ)およびさく望平均満潮位の外力による恒常的な浸水高や浸水域を推計した。2010年のベトナムの人口は約8,600万人である。UN人口シナリオ(中位推計)によれば、2045年の最大人口約1.05億人(2010年比19%増加)を境に減少へ転じ、2050年は約1.03億人(2010年比18%増加)、2100年には約8,200万人になると見込まれる。人口は、都市域と農村域の人口変化を再検証し、RCP6.0シナリオ(5km, 2.5-arc-minute)に基づき2100年までダウンスケーリングした。これによって、都市域のスプロール化

などがより詳細に再現可能となっている。貧困率は、NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)がダウンスケールした1999年のデータを利用した²⁾。

これまで脆弱性を増大させる指標(主に外力と曝露)を挙げてきたが、一方で脆弱性を低減させる適応能力の存在も考えられる。本研究でも適応能力指標の組み込みを検討したが、最終的には脆弱性評価へ入れなかった。

図-2は、ベトナムの各省における人間開発指数(HDI)と100万人当たりの災害死者・行方不明者との関係を示したものである。所得、教育、寿命等を総合評価したHDIは適応能力の代理指標としてしばしば使われるが³⁾、少なくともベトナムの省別では両者には相関関係が見られなかった。同様に、GRPなどの経済指標と災害被害との関係を検証したが相関が見られなかった。それゆえ、適応能力指標については今回の脆弱性評価には入れなかった。

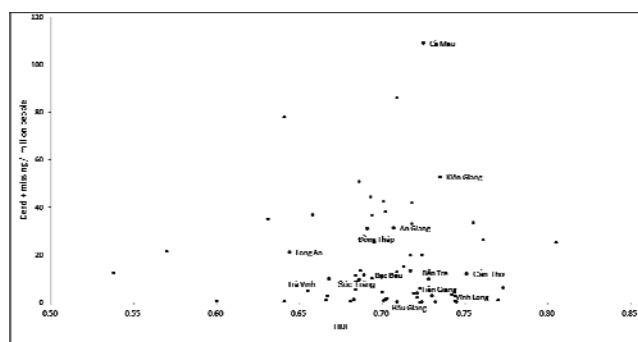


図-2 ベトナムの各省における100万人当たり死者・行方不明者(1989-2010年)とHDI(2008年)

青：中部沿岸省,赤：メコン13省。Desinventar, UNDP⁴⁾より作成

図-3は、上記の指標を統合して脆弱性の推計したものである⁵⁾。バクリウウ省、ソクチャン省、ベンチェ省の東部沿岸部、カマウ省の南端部等において脆弱性の高い地域が同定される。ここは災害歴や浸水域と人口密度の高さが重なって脆弱性の増大に影響している。このように、海面上昇等の物理影響と社会経済影響の両面で脆弱な地域を確認できた。今回の指標化によって、メコンデルタにおいて特に脆弱な沿岸域が特定された。これは、適応策を重点的に実施すべき場所の選定に結びつく成果である。



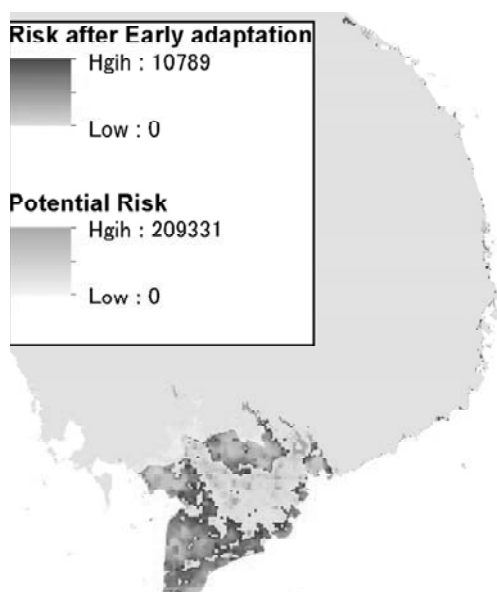
図3 メコンデルタにおける脆弱な地域の推定

(2) 適応効果のシナリオ分析

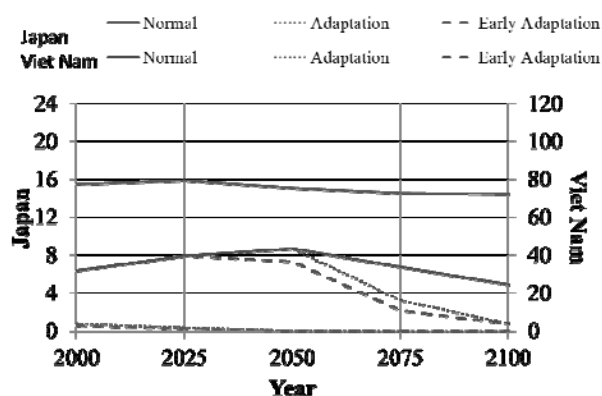
次に、メコンデルタにおいて気候変動に伴う海面上昇と潮汐変動の浸水影響（浸水面積、影響人口等）と適応効果のシナリオ分析を行う手法を開発した。そして、所得や人口密度に基づく防護（堤防設置）シナリオを考慮し、将来にわたる浸水影響の数値実験を行った。

図4 は、メコンデルタでの SRES A2 シナリオでの適応シナリオ別の浸水域と影響人口を示している⁹⁾。シナリオを比較すると、通常の適応シナリオよりも適応策を講じる時期を5年早める（早期適応）ことによって影響人口を減少させる可能性がある。

今後さらに、信頼度や空間分解能の高い情報を得て地盤沈下のようなメコンデルタ特有の環境変化を考慮することで、より確からしい適応効果のシナリオ分析が期待される。



(a) 浸水範囲に及ぼす適応策の影響



(b) 浸水影響人口の経年変化に及ぼす適応策の影響

図4 適応策の浸水への影響(A2 シナリオ)

(浸水面積、影響人口：単位 100 万人)

4. 気候変動の認知と適応策の現状評価

科学アプローチの一つである脆弱性評価と適応効果評価とともに、地域アプローチは現地の課題把握や適応策を検討する上で相補的な役割を担う。そこで、カマウ省、ソクチャン省、アンザン省においてベトナム水資源大学 (Water Resource University) と協働でアンケート調査(訪問調査法)を実施し、地区住民レベルでの気候変動の認知と適応策の実態把握を行った。調査期間は 2012 年 11-12 月で、カマウ省、ソクチャン省、アンザン省の 3 省 27 地区(1 坊、3 市鎮、23 社)から 50 件ずつ合計 1,350 名に質問した。質問票はカントーのみで類似の調査を行った DWF⁷⁾を参考に、事前にベトナム水資源大学や省政府の担当者とも協議して 3 省の現状に合わせて質問項目や選択肢を見直した。

アンケート調査は回答者属性(年齢、職業、家族構成等)、災害の被害経験や日頃の観察、政府への意見などの多岐の質問にわたるが、ここでは代表的な結果のみを示す(図-6、図-7)。現地住民は、①季節性の洪水と壊滅的な被害を及ぼす洪水を区別している、②住民レベルでは家屋の修理や補強、高床化が 3 省で共通し、地域によっては洪水耐性米の導入、洪水避難用の小型船の購入などの適応策を講じ、「洪水とともに生きる (Living with floods)」ことを実践している、③一方で 10 年単位の降雨や災害事象の変化を実感し将来的な気候外力の増大を懸念している、ことが明らかとなった。これら地域毎の災害事象と適応策の特徴を表-1 にまとめた。リスク認知と適応策の結果から、3 省を大まかに特徴付けると、カマウ省は海岸部の災害である台風や海岸浸食、アンザン省は内陸災害である河川氾濫や河川浸食を主な災害と捉えている。ソクチャン省は 2 省の中間的な傾向を示している。

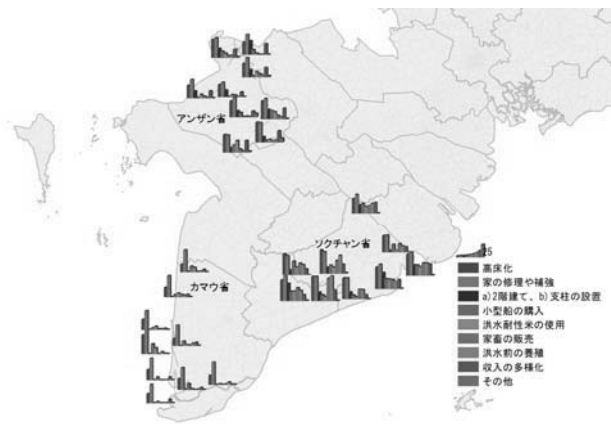
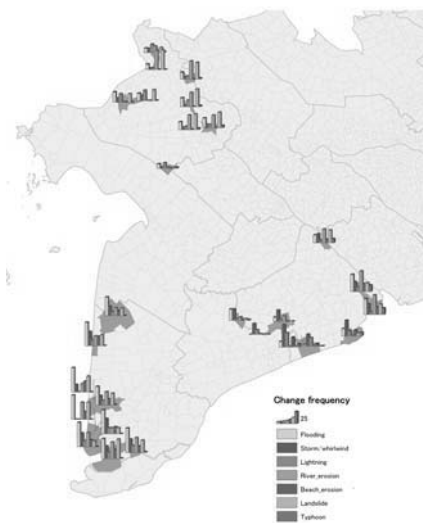
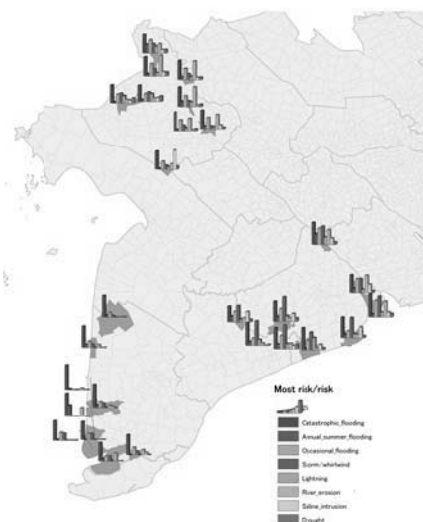


図-6 メコンデルタにおける住民レベルの適応策³⁾



(a)過去10年間で頻度が増えたと感じる災害事象



(b)災害リスク認知の違い

図-7 地域による災害要因とリスク認知度の違い

以上を総合して、調査した3つの省における主要な災害と住民レベルの適応策と行政レベルの適応策をまとめたものが表-1である。このうち、行政レベルの適応策については、日常的に行政と密接に関わっている研究者(Dr. Trinh Cong Van, Water Resources University)と実務者(Mr. Martijn, Mekong Delta Plan)にヒアリングした結果を総括したものである。ここからわかるように、住民が考える適応策と行政が考えている適応策は必ずしも一致しておらず、両者を埋めるためには認知調査の継続に意義があると考えられる。

なお、調査の対象とした3省の地勢を表-2にまとめている。

表-1 メコンデルタにおける適応策

	災害	住民レベルの適応策	行政レベルの適応策
アンザン省 An Giang	河川堤防水害	1) 家の強化・修理 2) 高床化 3) 収入の多角化	・高床式住居 ・洪水耐性の作物 ・河川洪水制御
ソクチャン省 Soc Trang	河川堤防水害 沿岸域高潮水害	1) 家の強化・修理 2) 高床化 3) 2階建て家屋	・沿岸域管理 ・沿岸域防護策 ・マングローブ維持 ・淡水維持制御
カマウ省 Ca Mau	河川堤防水害	1) 家の強化・修理 2) 高床化	・沿岸域管理 ・沿岸域防護策(高潮、越波など) ・マングローブ維持 ・地下水利用抑制のための淡水供給 ・塩水侵入に耐える農業・漁業

表-2 調査対象地域の地積

	Can Tho	An Giang	Soc Trang	Ca Mau
面積(km ²)	1,409	3,536	3,311	5,294
農地(km ²)	1,155	2,974	2,765	4,628
人口(K)	1,200	2,151	1,304	1,216
行政地区(district)	9	9	11	9
区(Wards)	85	156	109	101
GDP(K VNDs)	36,000	27,360	28,549	23,399
年間降水量(mm)	1,635	1,130-1,800	1,700-1,800	2,500

5. 地域特性に応じた適応技術の提案

沿岸域災害に対しては、地域特性に応じた多重防護による適応策が有効である。本研究は、メコンデルタで入手しやすいと考えられる天然材料のヤシ繊維とセメントを混合し、侵食抵抗の大きい堤防強化技術を開発した(図-8)⁸⁾⁹⁾。表-3は、地盤改良と地盤補強を融合した新しいハイブリッド地盤技術である。このような技術では、人工的な短繊維を土に混合する補強工法は提案されているが、それらに比べて、ここで提案されている技術の特徴は、ベトナム南部で手に入りやすい自然繊維として、ヤシ繊維を利用しようとする点にある。このような自然由来の繊維を利用して成功した事例としては、バングラ

Diagram illustrating the components of the hybrid structure equation (5.1):

- 地盤補強** (Ground Reinforcement) leads to **内部摩擦角 ϕ' の増加** (Increase in internal friction angle ϕ').
- 地盤改良** (Ground Improvement) leads to **粘着力 c' の増加** (Increase in adhesion c').
- Both methods contribute to the **ハイブリッド構造** (Hybrid Structure).

Examples provided:

- <例: 繊維混合>** (Example: Fiber mixing) is associated with ground reinforcement.
- <例: セメント混合>** (Example: Cement mixing) is associated with ground improvement.

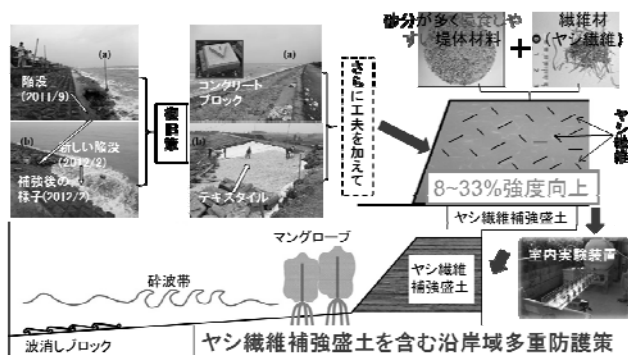
The final equation (5.1) is shown at the bottom:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (5.1)$$

表4 堤防の改良・補強技術の例

改良/補強	技術例	備考
機械的な改良 あるいは補強	・ 粒度調整 ・ 締め固め ・ 繊維材料の混合	・ 安価 ・ 地域で入手しやすい伝統的な自然材料の利用 ・ 耐久性の確認
化学的な改良	・ セメント、石灰、その他固結材料の混合	・ 汚染物質への配慮
機械的な改良 補強と化学的 改良との融合	・ 繊維材料と固結材料の混合 ・ 消石灰と不織布の併用 ・ セメント固化処理と水平補強材の併用	・ ハイブリッド構造 ・ 費用便益分析が必要

地盤工学におけるせん断抵抗力の増加という立場からこのことを考えてみると、式(5.1)に示したように、繊維混合は内部摩擦角 ϕ' の増加に、セメントの添加は粘着力 c の増加に寄与することによって、堤防の強度を改善し、堤防全体の安定性の増加に繋がる。



これらの技術は、単独では、気候変動に伴って大規模

また、このような技術的背景，経済性，入手しやすい材料など，地域特性に応じた適応技術は，同種の問題を抱えるその他の地域でも応用が期待される．そのためには，室内試験や現地試験などによる検証が不可欠である．

ベトナムに対する適応策支援のための既存の4つの資金供与制度（①GEF 国家・省レベル，②GEF 小規模グラント，③二国間 ODA（国家・省レベル），④二国間 ODA（小規模グラント）のパフォーマンスを比較した¹⁰⁾。11) 評価項目は，①効果，②柔軟性，③十分性，④費用効果，⑤アカウンタビリティ，⑥持続可能性である。

表-5 ベトナムにおける適応策資金供与制度の比較

	効果	柔軟性	十分性	費用 効果	アカウント ビリティ	持続 可能性
①GEF 国家・省レベル資金供与制度	✓			✓	✓	✓
②GEF 小規模グラント資金供与制度	✓	✓		✓		
③二国間 ODA 国家・省レベル資金供与制度	✓	✓	✓	✓	✓	✓
④二国間 ODA 小規模グラント資金供与制度	✓	✓				

本研究では、社会経済学及び工学的手法を組み合わせ、気候変動の影響をうけるメコンデルタの災害脆弱性評価と気候変動に対する適応効果評価、住民への認知調査等を試みた。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 海面上昇や高潮などの物理影響と人口密度シナリオ、
貧困などの社会経済影響を加味して、メコンデルタにお
いてとりわけ脆弱な地域を特定できた。
- 2) メコンデルタにおいて気候変動に伴う海面上昇と潮汐
変動の浸水影響と適応効果のシナリオ分析を行う手法を
開発し、所得や人口密度に基づく防護（堤防設置）シナ

リオを考慮し、将来にわたる浸水影響の数値実験を行った。その結果、適応策を講じる時期を5年早める（早期適応）ことによって影響人口を減少させる可能性を示した。

3) メコンデルタ3省の住民1,350人を対象にアンケート調査を実施し、住民レベルでの気候変動の認知と適応策の実態把握を行った。その結果、現地住民は、①季節性の洪水と壊滅的な被害を及ぼす洪水を区別していること、②住民レベルの適応策としてでは、家屋の修理や補強、高床化を行っている点で共通しているが、地域によっては洪水耐性米の導入、洪水避難用の小型船の購入などの適応策を講じていること、③一方で10年単位の降雨や災害事象の変化を実感し将来的な気候外力の増大を懸念していること、が明らかとなった。

4) 現地に実情に応じた適応技術として、堤防材料にメコンデルタで入手しやすいと考えられる天然材料のヤシ繊維とセメントを混合し、侵食抵抗の大きい堤防強化技術を開発した。これは、地盤改良と地盤補強を融合した新しいハイブリッド地盤技術である。

5) ベトナムに対する適応策支援のための既存の4つの資金供与制度のパフォーマンスを比較し、ベトナムでは二国間ODAの資金供与制度が最も効果的で高いパフォーマンスで適応策を推進する可能性があることを示した。

地球規模の持続可能性を実現に向けて、アジア太平洋地域の環境保全と脆弱性の低減を目指すことが不可欠である。そのなかで、日本はアジア太平洋地域の適応策の推進に関して中心的な役割を果たすことが求められている。また、グローバル化が進む中で、アジアの気候変動の悪影響を軽減することは、結果的に日本の生活基盤を守ることに繋がる。このように適応策の実践（Good practice）を蓄積することは、日本を含むアジア太平洋地域の適応技術の進展、ひいては将来にわたる地域の持続可能性の確保に寄与すると考えられる。

謝辞：本研究は環境省環境研究総合推進費（「S-8 温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」、2010-2014年度、研究代表者：茨城大学・三村信男教授）の支援により実施されている。また、研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究A「気候変動に起因するベトナム沿岸災害適応策のための統合型モニタリングシステム」（2011-2013年度、研究代表者：茨城大学・安原一哉名誉教授）の助成を受けた。ともに、付記して深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) UNFPA: 2011 State of World Population Report. UNFPA, 2011.
- 2) Storeygard A, Balk D, Levy M, Deane G: The global distribution of infant mortality: A subnational spatial view. *Population, Space and*

Place, 14(3), 209-229, 2008.

- 3) Yusuf A.A. and Francisco H.A.: Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia. Economy and Environment Program for Southeast Asia, 2009.
- 4) UNDP: Social Services for Human Development: Viet Nam Human Development Report 2011. UNDP, 2011.
- 5) 田村誠・信岡尚道・木下嗣基・田林雄・Frank Hiroshi Ling・安島清武：メコンデルタにおける気候変動への脆弱性と適応策，茨城大学人文学部紀要（社会科学論集），56, 27-37, 2013.
- 6) Nobuoka H. and Cong V. M.: Vulnerability change in coastal zones of Vietnam and Japan, *Proceeding of Asian and Pacific Coasts 2011*, 392-404, Hong Kong, Dec.14-16, 2011.
- 7) DWF: Survey on Perception of Risks in Can Tho City. Development Workshop France, 183p, 2011.
- 8) Sato K., Komine H., Murakami S., and Yasuhara K.: An experimental evaluation on effects on seepage failure using a natural fiber mixed with soils for river dykes, *Proceedings of Geotechnics for Sustainable Development - Geotech Hanoi 2013*, 2013.11.27-29.
- 9) Yasuhara K., Komine H., Sato K., and Duc D.M.: Geotechnical response to climate change-induced disasters at Vietnamese coasts and rivers: A perspective, *Proceedings of Geotechnics for Sustainable Development - Geotech Hanoi 2013*, 3-21, 2013.11.27-29.
- 10) 森田香菜子：ベトナムにおける気候変動への適応策支援メカニズムの研究，環境情報科学学術研究論文集，25, 359-364, 2011
- 11) Morita K.: Financing systems for adaptation-comparison of south pacific island states-, *Environmental Science*, 25(5), 347-366, 2012/