

トンガ王国

トンガ王国

火山噴火及び津波被害に対する災害復興 事業形成に係る情報収集・確認調査

ファイナルレポート

2023年10月

独立行政法人
国際協力機構（JICA）

株式会社 オリエンタルコンサルタンツグローバル
パシフィックコンサルタンツ株式会社

環境

JR

23-097

トンガ王国

トンガ王国

火山噴火及び津波被害に対する災害復興 事業形成に係る情報収集・確認調査

ファイナルレポート

2023年10月

独立行政法人
国際協力機構（JICA）

株式会社 オリエンタルコンサルタンツグローバル
パシフィックコンサルタンツ株式会社

為替レート：

US\$1 = JPY 141

TOP = JPY57.56

(2023年8月分日本銀行報告省令レート)

要 約

1. 背景

2022年1月15日、トンガの首都ヌクアロファの北約65kmに位置する海底火山フンガトンガ・フンガハアパイ（HTHH）で大規模な噴火が発生し、それに伴う地震・津波・降灰により沿岸部での建物の倒壊・浸水、交通・通信インフラ障害等、甚大な被害が発生した。日本政府はトンガ政府の緊急支援要請を受け、自衛隊と連携した JICA 緊急援助物資の供与を行い、飲料水、食料品、灰除去のための用具、個人防護具等の緊急援助物資の供与を行った。トンガが災害脆弱性において常に世界トップクラスに位置付けられている現状に基づき、シームレスに活動を展開し、今次災害から被害を復旧するのみならず、今後の同種災害の科学的根拠に基づく再現性の確認の上で、その再現性に応じた Build Back Better（BBB）ビジョンに基づく復興計画を実施することが求められている。

2. 業務の概要

業務名： トンガ王国火山噴火及び津波被害に対する災害復興事業形成に係る情報収集・確認調査

調査の目的： 本調査は、今般のトンガにおける噴火、地震及び津波の発生を受け、BBB ビジョンに基づくトンガの災害に強い国づくりを進めるにあたり、BBB ビジョンの策定支援、トンガの災害リスクの現況を把握し、類似の災害が発生した際の被害拡大の防止策や、中長期的な防災対策の支援等、今後の具体的な協力案件形成に必要な情報収集と分析を行うことを目的とする。

対象地域： トンガ全土（トンガタブ島、エウア島を重点対象エリアとして調査を実施する。）

トンガ国関係機関

- 気象・エネルギー・情報・災害管理・環境・気候変動・通信省 Ministry of Meteorology, Energy, Information, Disaster Management, Environment, Climate Change and Communications (MEIDECCC)
- 天然資源省 Ministry of Lands and Natural Resources (MLNR)
- 国家空間計画局 National Spatial Planning Authority Office (NSPAO)
- 社会基盤整備省 Ministry of Infrastructure (MOI)
- 公共事業省 Ministry of Public Enterprises (MPE)
- トンガ港湾公社 (PAT)、トンガ水道公社 (TWB)、トンガ電力公社 (TPL)、トンガ電信電話会社 (TCC)

国内支援委員会

国内支援委員会は調査開始から要所で調査団からの報告や支援委員からのアドバイスをいただきながら進められた。なお、国内支援委員会は業務開始から19回開催された。

3. 基本情報の収集・分析

Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption and Tonga Tsunami (HTHH Disaster) Recovery and Resilience Building Plan 2022 – 2025

周辺国やドナーのサポートを受けてトンガ政府が策定した復旧計画である。NEMO が調整機関となり、分野別のクラスター毎の会合にて、被害状況の確認、必要とする支援について取りまとめている。今回の復旧計画では、特に津波と降灰による被害が顕著であったことから、住宅復旧、食料安全保障と生活、観光産業、公共インフラの 4 項目を優先分野として位置付けている。またトンガ政府は、トンガタブ島、エウア島、ハアパイ島の影響を受けた島々全体の優先セクターでの復旧活動を実施するための資金の動員に力を注ぐ予定としている。

トンガタブ島の被災状況

被害の大きかった島の西端部と島の中央北部の被災状況を比べて、島の西端部では 10m を超える高さまで津波の遡上が見られるが、島の中央北部では護岸を少し超える程度の津波高（例えば護岸高 M.S.L.+2.6m に対して津波高 M.S.L.+4.2m）となっている。

エウア島の被災状況

今回の津波は島の南側から北上する形で港周辺を洗い流したため、港内の南に位置する旧港への被害よりは、北東の新港に被害が出た。矢板式岸壁自体に大きな損傷はなく、岸壁等の港湾構造物は比較的損傷は少なかったが、北西側の石積護岸と防波堤に大きな被害を受けていた。今回損傷の大きかった橋梁（小型のボックスカルバートを並べて上部に舗装したものは、後から追加施工したと思われる波除けの壁状のコンクリート構造物が大きく破損しており、この部分が今回の津波の力をまともに受けて被害を大きくしたと思われる。

ハアパイ島の被災状況

ハアパイの港湾は世銀により 2012-14 年、2018 年と度々補修を重ねているが、2020 年 1 月のサイクロンティノと今回の HTHH 津波により再び被害を受けた。コンクリート構造物が損傷し、裏込めの砕石や土砂の流出が複数箇所見られた。

ヴァヴァウ島の被災状況

ヴァヴァウの港湾は四方を山に囲まれた天然の良港であり、外洋からの波が直接湾内に入り込まないため、今回の噴火津波による被害はほとんど見られなかった。

4. BBB ビジョンに基づく復興計画策定支援

BBB ビジョンセミナーの開催

トンガ王国政府と JICA は、トンガ政府の BBB ビジョンを設定し、将来の開発プロジェクトを検討する際に必要な概念として BBB を示すためのセミナーを共同で開催した。

BBB ビジョンセミナー開催と合わせて、BBB ビジョンを NSPAO の政策として法制化するため、国会承認を受けるべく手続きを行った。2022 年 7 月頃から閣議で承認のプロセスを進めて

いたが、2023年になり BBB ビジョンは再度閣議に諮られ、2023年6月16日の閣議で承認された。

BBB ビジョンに基づくマルチハザード評価の実装化

本業務で対象とするハザードは、今次の災害である火山性津波、降灰に加え、地震性津波、地震、高潮・高波、暴風（サイクロンによる）である。

各ハザードレベルの強度・頻度と防災計画・対策の考え方について表-1に示す。この概念は、2011年東北地方太平洋沖地震を教訓として段階的に地震・津波の防災対策を行うために導入された考え方であり、日本においては様々なハザードに対する対策に用いている。

表-1 各ハザードレベルの強度・頻度および対策

ハザードレベル	ハザード強度及び頻度	対策の考え方
レベル1 (L1)	頻度の高いハザード 最大クラスのハザードより発生頻度が高く、低いハザード強度にもかかわらず重大な被害を与えるハザード ¹ ハザードの発生周期：数10年～百数十年	人命とその財産、地域経済を守るためにハード対策を実施する。
レベル2 (L2)	最大クラスのハザード 頻繁には発生しないが、ひとたび発生すれば甚大な被害をもたらすハザード ハザードの発生周期：数百年～数千年	人命救助を第一として、あらゆるソフト対策ハード対策を組み合わせることで住民を避難させるための総合的な対策を実施する。

出典：「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」報告、中央防災会議、2011年9月をもとに JICA 調査団にて作成

津波解析、高潮解析

津波解析については、2022年1月に発生した HTHH 火山による津波をふまえて、頻発する地震性津波と火山性津波の両方を数値解析で検討する。高潮解析については、サイクロン常襲地帯であることから、サイクロンによる高潮を検討する。なお、各解析の検討結果の詳細については、Appendix 3-2に掲載した。

過去の津波・高潮ハザード

津波ハザードとしては、トンガ国においては、海底火山の噴火や火山の山体崩壊により発生する火山性津波とトンガ東部に位置するトンガ海溝で発生する地震断層による津波（地震性津波）が考えられる。

トンガの島々の西側に多数の火山が位置しており、火山噴火自体の発生頻度は低いものの、トンガにおいては、火山性津波の発生可能性がある。

1913年以降多数の地震の記録があり、その中でも大きな津波をもたらすと考えられる M8.0 以上の地震は、8回も発生している。従って、地震性津波の発生可能性は非常に大きいと言える。

トンガ国では、サイクロンが毎年来襲しており、高頻度で高潮も発生する。アメリカ海洋大気庁の IBTrACS によると、1947年以降トンガタブ島周辺を通過したカテゴリ-4¹以上のサイクロンは7個、カテゴリ-3以上は17個あり、巨大なサイクロンが5年に1回は来襲している。

¹ カテゴリは、Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale に基づく熱帯低気圧の区分である。カテゴリ-3は最大風速 50～57m/s、カテゴリ-4は最大風速 58～69m/s となる熱帯低気圧で甚大な被害が発生する可能性が高い。

これまでの火山性津波の解析結果をふまえて、津波のハザードレベルの検討を行った。2022年 HTHH 火山と同規模の津波とした場合、対策護岸の必要天端高は、ヌクアロファで M.S.L.+4m、オホヌアで M.S.L.+12m の高さとなり、現況護岸 (M.S.L.+2m) よりも大幅に必要な高が大きくなることわかる。

これまでの地震性津波の解析結果をふまえて、対策護岸の必要天端高の検討を行った。過去に発生した M8 以上の津波を対象とした場合の対策護岸の必要天端高は、ヌクアロファで M.S.L.+1.3m、オホヌアで M.S.L.+1.4m の高さとなり、ヌクアロファにおいては、現況護岸 (M.S.L.+2m) より概ね低い結果となるため、現況の護岸で対応可能なことわかる。

1947～1990 年の潮位偏差と 1991～2021 年潮位観測データから算定した潮位偏差を極値資料として、確率高潮偏差について算定した。確率高潮偏差は、100 年間確率で 80cm となった。エウア島オホヌアにおける過去の地震津波の高さも H.W.L.時で 1～2m 程度であり、約 100 年間に数回発生している。従って、過去の地震性津波はハード対策で対応を行うハザードレベル 1 (L1) の津波と言える。

一方、2022 年 1 月の HTHH 火山と同規模の火山が他の場所で発生する場合にエウア島オホヌアで今後予想される火山性津波の高さは、H.W.L.時で 2.7～12m である。オホヌアにおいては、2022 年の HTHH 火山による津波を含め、3m を超える津波は過去 100 年間発生しておらず、HTHH 火山と同規模の火山が約百年間の間に繰り返し発生する可能性は低い。したがって、HTHH 火山と同規模の火山性津波は避難対策等で対応を行うハザードレベル 2 (L2) の津波 (最大クラスの津波) に分類する。

観測記録のある直近 30 年間 (1991～2021) のサイクロンによる高潮潮位偏差は、0.7m 程度であった。一方、高潮潮位偏差の極値統計結果から、H.W.L.を考慮した 100 年確率の偏差でも M.S.L.+1.60m となっており (高潮潮位偏差 0.8m)、過去 30 年間の高潮と大きな差がない。この検討結果をふまえ、ハード対策で対応を行うハザードレベル 1 (L1) の高潮は、100 年確率の潮位偏差に設定するのが妥当と思われる。

既設護岸の必要高さは、ハリケーンアイザック (1982) を計画外力として設定されている²波浪と潮位及びリーフ上の水位上昇量を考慮して設定されている。

ハザードレベル 2 の高潮・津波検討

悪条件として潮位を H.W.L. (M.S.L.+0.8m) として浸水域を計算し、その最大包絡範囲をハザードレベル 2 (L2) の浸水域とする。トンガタプ島北西部の浸水深が大きく、5m を超える浸水深となっている。ヌクアロファでも 2m を超える浸水深となるところもあり、大きな被害が想定される。また、エウア島は、オホヌア港が 5m を超える浸水となっているが、浸水範囲は沿岸低平地に限られている。

津波ハザードマップについては、SOPAC (南太平洋応用地球科学委員会) プロジェクトによって 2012 年に作成された南西太平洋津波リスクアセスメント能力強化(フェーズ 3)津波シミュレーションマップがある。このうち、「トンガ王国 全国早期警報システム導入及び防災通信能力強化計画 準備調査」(JICA) で採用されている「M8.7 の地震がトンガ海溝中央 (トンガタプ島の東) で発生した場合」について検討した。

² トンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書, 昭和 63 年 2 月, 国際協力事業団

地震性津波と異なり、津波の波源となる断層がトンガタブ島の東側にあることから、東側の浸水範囲及び浸水深が大きい。また、ヌクアロファの浸水深は火山性津波の浸水深より大きく、浸水深が3m以上になるところがある。

高潮計算では最悪条件の各ケースで、浸水範囲はほぼ同じ程度となっており、市街地部の浸水深は大きいところでも1m以下、港湾区域では1.5m以下となっている。

トンガ国のような島嶼国は、将来の気候変動に伴う海面上昇により浸水被害が拡大するなどの大きな影響を受ける可能性がある。そこで、IPCC第6次評価報告書をふまえて、SSP1-2-6（持続可能な発展の中で気温上昇を2°C未満におさえるシナリオ）におけるトンガ国で海面上昇量をふまえたハザードレベル2（L2）シナリオの検討を行った。

マルチハザードマップの作成

解析を行った津波と高潮についてハザードマップを作成した。ハザードマップは避難に用いるため、最大のハザードを示す必要がある。従って、今回検討した津波・高潮ハザードの中で最大の浸水域・浸水深を示すケースでマルチハザードマップ作成を行った。

なお、最大の浸水域を与えるケースが場所により異なる場合は、各ケースの最大包絡の浸水範囲・浸水深を示した。

災害対策の方向性

ハザード解析の結果から、津波及び高潮については、次の方向で対策を行うことを推奨する。

表-2 災害対策の方向

ハザード	対策の方向性
火山性津波	<ul style="list-style-type: none"> ➤ レベル1規模(2022年 HTHH の火山噴火以下の小規模な噴火等による津波)に対しては、地震性津波高潮対策と連携して構造物対策を実施する。 ➤ レベル2規模(2022年 HTHH の火山噴火と同等規模の火山が他の海底火山で発生する場合)の火山性津波に対しては、大規模な浸水が想定されることから人命の保護を第一に避難等のソフト対策を充実させる。
地震性津波	<ul style="list-style-type: none"> ➤ レベル1規模(M8クラスの頻繁に発生する地震性津波)に対しては、現況の防潮堤で防護可能であることから、現況防潮堤を維持する。 ➤ レベル2規模(M8~9クラスの最大クラスの地震性津波)に対しては、大規模な浸水が想定されることから人命の保護を第一に避難等のソフト対策を充実させる。
高潮	<ul style="list-style-type: none"> ➤ レベル1規模の数年から数十年に1回襲来するサイクロンによる高潮については、現況防潮堤を整備(改良を含む)して対策する。 ➤ レベル2規模のサイクロンによる高潮については、津波と同様に、大規模な浸水が想定されることから人命の保護を第一に避難等のソフト対策を充実させる。

出典：JICA 調査団

5. 沿岸防災個別事業の検討

ヌクアロファ護岸復旧計画

石積護岸、鉄筋コンクリート製護岸、CSG材を使用した護岸の比較検討を行った。

エウア島コースウェイ復旧計画

原位置での復旧案

ボックス部分 (M.S.L.+4.5m) と両岸の既存道路部分 (M.S.L.+5.5m) では約 1m の段差がある。沈下橋とは言えボックス下の断面積が小さく大雨やサイクロン時の洪水の際の上流の谷から流れてくる流木や砂利等による影響が大きいので、出来る限り大断面のボックスを採用し少なくとも既存道路と同じレベルで渡河出来るよう検討も必要である。

新橋梁架設案

同じく測量図によると、谷の両岸の既存道路と谷底との高低差がおよそ 15m と谷が深く、また谷底の幅も狭く谷底中央に橋脚を立てることができず、中間部の橋の支間長が 45m と長くなり、鋼橋を採用する必要がある。

6. 実施中・実施済案件の側面支援、新規支援案件の検討

新規支援プロジェクト案は本調査で形成したものほかに、別途厚生労働省発注案件「令和 4 年度水道プロジェクト計画作成指導事業（第 1 期）トンガ王国水道復興支援計画」で形成された案件も含んでいる。Appendix 5-1 にプロジェクトプロフィールを示す。

目 次

要約		
目次		
図・表リスト		
略語集		
調査対象地域位置図		
		ページ
1. 業務概要		1-1
1.1 業務実施の背景		1-1
1.2 業務の概要		1-1
2. 基本情報の収集・分析		2-1
2.1 開発計画		2-1
2.1.1 Tonga Strategic Development Framework 2015-2025 (TSDF II)		2-1
2.1.2 National Infrastructure Investment Plan 2021-2030 (NIIP3)		2-4
2.2 防災計画、災害モニタリング計画		2-6
2.2.1 Strategic Roadmap for Emergency and Disaster Risk Management (SREM) 2021 - 2023		2-6
2.2.2 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai Volcanic Eruption and Tonga Tsunami (HTHH Disaster) Recovery and Resilience Building Plan 2022 – 2025		2-8
2.2.3 各種防災計画		2-9
2.3 気候変動適応計画		2-11
2.3.1 Joint National Action Plan 2 on Climate Change and Disaster Risk Management (JNAP 2) 2018-2028		2-11
2.4 地形図・衛星画像		2-12
2.4.1 地形図		2-12
2.4.2 衛星画像		2-15
2.4.3 深浅測量データ		2-15
2.4.4 暴露情報		2-18
2.4.5 ハザードマップ		2-28
2.5 他の開発パートナーが作成した資料		2-30
2.5.1 南太平洋応用地球科学委員会 (SOPAC)		2-31
2.5.2 国内避難民監視センター (IDMC)		2-32
2.5.3 国連人道問題調整事務所 (UN OCHA)		2-34
2.5.4 欧州委員会人道援助・市民保護総局 (ECHO)		2-34
2.5.5 開発パートナーの災害関連支援		2-37
2.6 被害状況等に関する資料		2-42
2.6.1 浸水範囲		2-42
2.6.2 遡上高		2-46

2.6.3	火山灰被害	2-47
2.6.4	地震被害の状況	2-47
2.7	現地被害状況の確認	2-49
2.7.1	トンガタブ島の被災状況	2-49
2.7.2	エウア島の被災状況	2-53
2.7.3	ハアパイ島の被災状況	2-55
2.7.4	ヴァヴァウ島の被災状況	2-58
3.	BBB ビジョンに基づく復興計画策定支援	3-1
3.1	BBB ビジョン国際発信後の現地情報整理・とりまとめ	3-1
3.2	BBB ビジョンに基づくマルチハザード評価の実装化	3-2
3.2.1	ハザードレベルの検討	3-2
3.2.2	津波解析、高潮解析	3-3
3.2.3	マルチハザードマップの作成	3-58
3.2.4	災害対策の方向性	3-63
3.3	施設等の津波・高潮等の浸水被害対策、火山灰対策、地震対策、暴風対策の国内 外の事例収集	3-64
3.3.1	高潮・津波災害リスク	3-64
3.3.2	地震災害リスク	3-67
3.3.3	火山灰（降灰）リスク	3-69
3.3.4	暴風災害リスク	3-73
3.4	トンガの災害リスク現況把握（トンガタブ島及びエウア島を中心とする、ハザード 曝露及び物理的な脆弱性の実態把握）	3-73
3.4.1	施設・建物・土地利用状況及び開発計画の確認	3-73
3.4.2	各法令・制度にかかる防災関連情報の整理・分析	3-78
3.5	トンガタブ島・エウア島の防災計画及び BBB ビジョン具現化にかかるロードマッ プの提案（中長期的な要対応・防災配慮事項の整理）	3-84
3.5.1	ハザードごとの防御レベルに応じた適正な DRR インフラによる構造物対 策の検討	3-84
3.5.2	ハザードごとの防御レベルに応じた、重要構造物の強靱化の検討	3-84
3.5.3	土地利用・避難計画の検討	3-85
3.5.4	各事業化にあたっての留意事項	3-89
3.5.5	施設計画・概算	3-89
3.6	トンガおよび日本の支援による復旧・復興事業に対する BBB/防災配慮の助言	3-90
3.6.1	ハザードの理解とインフラ建設	3-90
3.6.2	水道施設調査	3-91
4.	沿岸防災個別事業の検討	4-1
4.1	ヌクアロファ護岸復旧計画	4-1
4.1.1	ヌクアロファ護岸の被害状況	4-1

4.1.2	計画案の検討と住民意見の確認	4-7
4.1.3	施設設計に向けた測量調査	4-9
4.2	エウア島コーズウェイ復旧計画	4-14
4.2.1	被害状況調査	4-14
4.2.2	復旧計画の検討	4-16
4.3	気象・地震・津波のモニタリング計画、警報体制・システムのレビューと提言	4-16
5.	実施中・実施済案件の側面支援、新規支援案件の検討	5-1
5.1	公共施設・ライフラインインフラ（下水・廃棄物、電力、港湾、道路、空港、任 量水供給施設、集会施設、公営住宅、移転補助金など）の BBB ニーズ把握	5-1
5.2	実施中案件の BBB ビジョンの展開	5-2
5.2.1	実施中案件のスコープ拡大及び実施済み案件のフォローアップによる BBB ビジョンの具現化のための情報収集	5-2
5.3	新規支援案件の検討	5-3
5.3.1	新規に確認されたニーズから、新規に形成すべき案件の早期実施方策の 検討（財政支援無償、包括無償、新規技術協力等）	5-3
5.3.2	技術協力プロジェクト案	5-5

Appendix

Appendix to Chapter 2

Appendix 2-1 TSDF II 29 の成果

Appendix 2-2 クラスター別復旧計画予算の目的

Appendix to Chapter 3

Appendix 3-1 BBB ビジョン

Appendix 3-2 津波高潮解析

Appendix 3-3 火山性・地震性津波の波形

Appendix to Chapter 4

Appendix 4-1 DCP テスト結果、及び測量結果

Appendix to Chapter 5

Appendix 5-1 プロジェクトリスト

図リスト

	ページ
図 2.1.1 TSDF Vision	2-2
図 2.2.1 SREM のプロジェクトサイクル	2-7
図 2.2.2 トンガによる DRR 実施に向けたステップ	2-10
図 2.2.3 トンガ緊急対応システム	2-10
図 2.3.1 JNAP2 のビジョン、ミッション、ゴール	2-11
図 2.4.1 ヴァヴァウ諸島地形図	2-13
図 2.4.2 エウア島地形図	2-13
図 2.4.3 ハアパイ諸島地形図	2-14
図 2.4.4 トンガタブ諸島地形図	2-14
図 2.4.5 トンガタブ島水深図 (LiDAR)	2-15
図 2.4.6 水深図 (トンガ全体)	2-16
図 2.4.7 水深図 (トンガタブ島、解像度 90m)	2-17
図 2.4.8 水深図 (エウア島、解像度 90m)	2-17
図 2.4.9 水深図 (トンガタブ島、解像度 5m)	2-17
図 2.4.10 水深図 (エウア島、解像度 5m)	2-17
図 2.4.11 トンガタブ島道路網	2-18
図 2.4.12 トンガタブ島道路網	2-18
図 2.4.13 トンガタブ島避難所位置図	2-19
図 2.4.14 エウア島避難所位置図	2-19
図 2.4.15 トンガタブ島建物・学校配置図	2-20
図 2.4.16 エウア島学校配置図	2-20
図 2.4.17 トンガタブ島給電施設	2-20
図 2.4.18 トンガタブ島発電・給電施設	2-20
図 2.4.19 トンガタブ島給水施設	2-21
図 2.4.20 トンガタブ島井戸分布図	2-21
図 2.4.21 エウア島給水施設	2-21
図 2.4.22 エウア井戸分布図	2-21
図 2.4.23 ヌクアロファ排水施設排水図	2-22
図 2.4.24 ファイバーケーブル配線図	2-23
図 2.4.25 トンガタブ島港湾施設	2-24
図 2.4.26 エウア島港湾施設	2-24
図 2.4.27 トンガタブ島行政区域図	2-25
図 2.4.28 トンガタブ島マングローブ分布図	2-26
図 2.4.29 エウア島河川図	2-27
図 2.4.30 沿岸浸水マップ (平均海面より水位が 1m 上がった場合)	2-28
図 2.4.31 沿岸浸水マップ (平均海面より水位が 2m 上がった場合)	2-28

図 2.4.32	沿岸浸水マップ（平均海面より水位が 3m 上がった場合）	2-29
図 2.4.33	沿岸浸水マップ（3 レベルの浸水マップを重ねて表示したマップ）	2-29
図 2.4.34	沿岸浸水災害に対して脆弱な村（平均海面より水位が 3m 上がった場合）	2-30
図 2.5.1	波源域と 6 つの津波シナリオ	2-31
図 2.5.2	トンガ海溝中央で M9.0 の地震が発生した場合の津波最大浸水深（最悪シナリオ）	2-31
図 2.5.3	トンガ海溝中央で M8.7 の地震が発生した場合の津波最大浸水深	2-32
図 2.5.4	Cyclonic wind risk map	2-33
図 2.5.5	Seismic hazard risk map	2-33
図 2.5.6	Tsunami risk map	2-34
図 2.5.7	TONGA: Natural Hazard Risks	2-35
図 2.5.8	Tonga and Pacific Ocean Volcanic Eruption and Tsunami	2-36
図 2.5.9	Tonga and Pacific Ocean Volcanic Eruption and Tsunami（拡大図）	2-36
図 2.5.10	プロジェクト位置図	2-40
図 2.6.1	2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲図	2-43
図 2.6.2	2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 1	2-44
図 2.6.3	2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 2	2-44
図 2.6.4	2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 3	2-45
図 2.6.5	2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 4	2-45
図 2.6.6	津波遡上高の分布	2-46
図 2.6.7	地震発生位置と規模（2022 年 1 月 13 日～17 日）	2-48
図 2.7.1	トンガタブ島現地調査位置図	2-49
図 2.7.2	エウア島調査位置及び写真撮影位置	2-54
図 2.7.3	ハアパイ島調査位置図	2-56
図 2.7.4	写真撮影位置図	2-56
図 2.7.5	ヴァヴァウ島調査位置図	2-59
図 2.7.6	ヴァヴァウ港周辺状況図	2-59
図 3.2.1	トンガの過去の津波波源	3-3
図 3.2.2	トンガ周辺の火山の分布	3-4
図 3.2.3	トンガ周辺の火山噴火の頻度の整理結果	3-5
図 3.2.4	トンガ周辺の火山区分	3-6
図 3.2.5	トンガ周辺の M7.5 以上の地震発生位置と規模（1913 年～2022 年）	3-6
図 3.2.6	トンガタブ島周辺を通過したサイクロン（1947 年～2022 年）	3-8
図 3.2.7	津波波源の設定イメージ図	3-8
図 3.2.8	トンガ周辺の過去の火山噴火の頻度の整理結果	3-9
図 3.2.9	計算対象火山位置図	3-10
図 3.2.10	計算地形モデル	3-12
図 3.2.11	現況護岸モデル	3-12
図 3.2.12	各火山の最大水位分布（R=5km, H=60m）	3-14
図 3.2.13	ヌクアロファにおける最大水位分布（R=5km, H=60m）	3-15

図 3.2.14	ヌクアロファにおける最大浸水深分布 (R=5km, H=60m)	3-15
図 3.2.15	ヌクアロファにおける津波到達時間分布 (R=5km, H=60m)	3-16
図 3.2.16	オホヌアにおける最大水位分布 (R=5km, H=60m)	3-16
図 3.2.17	オホヌアにおける最大浸水深分布 (R=5km, H=60m)	3-17
図 3.2.18	オホヌアにおける津波到達時間分布 (R=5km, H=60m)	3-17
図 3.2.19	火山性津波の対策護岸の必要天端高.....	3-18
図 3.2.20	震源位置図	3-19
図 3.2.21	断層モデル (1)	3-20
図 3.2.22	断層モデル (2)	3-21
図 3.2.23	各地震断層の最大水位分布 (R=5km, H=60m)	3-23
図 3.2.24	ヌクアロファにおける最大水位分布 (地震断層)	3-24
図 3.2.25	ヌクアロファにおける最大浸水深分布 (地震断層)	3-24
図 3.2.26	ヌクアロファにおける津波到達時間分布 (地震断層)	3-25
図 3.2.27	オホヌアにおける最大水位分布 (地震断層)	3-25
図 3.2.28	オホヌアにおける最大浸水深分布 (地震断層)	3-26
図 3.2.29	オホヌアにおける津波到達時間分布 (地震断層)	3-26
図 3.2.30	地震性津波の対策護岸の必要天端高.....	3-27
図 3.2.31	高潮潮位偏差 (1991-2021, ヌクアロファ)	3-28
図 3.2.32	計算対象のサイクロンコース.....	3-29
図 3.2.33	計算地形モデル (高潮)	3-31
図 3.2.34	サイクロンジータ (2018) の再現計算結果.....	3-32
図 3.2.35	サイクロンハロルド (2020) の再現計算結果.....	3-32
図 3.2.36	サイクロンレネー (2010) の再現計算結果.....	3-33
図 3.2.37	サイクロンリン (2009) の再現計算結果.....	3-33
図 3.2.38	サイクロンアイザック (1982) の再現計算結果.....	3-34
図 3.2.39	対象サイクロンのコースの比較.....	3-35
図 3.2.40	確率潮位偏差算定のために抽出したサイクロンのコース (1947~1990)	3-36
図 3.2.41	極値統計結果グラフ (確率高潮潮位偏差)	3-38
図 3.2.42	ヌクアロファにおける津波のハザードレベルの分類.....	3-39
図 3.2.43	オホヌアにおける津波のハザードレベルの分類.....	3-40
図 3.2.44	ヌクアロファにおける高潮のハザードレベルの分類.....	3-41
図 3.2.45	トンガタブ島・エウア島に影響が大きい火山.....	3-43
図 3.2.46	トンガタブ島浸水想定図 (火山性津波ハザードレベル 2)	3-44
図 3.2.47	エウア島浸水想定図 (火山性津波ハザードレベル 2)	3-44
図 3.2.48	初期水位分布 (SOPAC M8.7 の地震: トンガ海溝中央 (トンガタブ島の東))	3-45
図 3.2.49	トンガタブ島浸水想定図 (地震性津波ハザードレベル 2)	3-46
図 3.2.50	トンガタブ・エウア島浸水想定図 (地震性津波ハザードレベル 2)	3-46
図 3.2.51	最大クラスのサイクロン想定コース.....	3-47
図 3.2.52	トンガタブ島浸水想定図 (高潮ハザードレベル 2: 最大旋衡半径コース)	3-49
図 3.2.53	トンガタブ島浸水想定図 (高潮ハザードレベル 2: 直上コース)	3-50

図 3.2.54	各シナリオでの海面上昇量.....	3-51
図 3.2.55	海面上昇時の浸水想定図（高潮ハザードレベル 2：最大旋衡半径コース）	3-53
図 3.2.56	海面上昇時の浸水想定図（高潮ハザードレベル 2：直上コース）	3-54
図 3.2.57	現況護岸の設定	3-55
図 3.2.58	嵩上げ護岸の設定（M.S.L.+3.0m に嵩上げ）	3-55
図 3.2.59	防潮堤効果の比較（火山性津波、Unnamed2 , H=90m）	3-56
図 3.2.60	防潮堤効果の比較（火山性津波、Unnamed3 , H=90m）	3-57
図 3.2.61	防潮堤効果の比較（アイザック 1982, M.S.L.+0.8m）	3-57
図 3.2.62	津波ハザードマップ（火山性津波）	3-59
図 3.2.63	津波ハザードマップ（地震性津波）	3-60
図 3.2.64	高潮ハザードマップ.....	3-61
図 3.2.65	津波（火山性・地震性津波）・高潮ハザードマップ.....	3-62
図 3.3.1	日本における津波対策の堤防.....	3-65
図 3.3.2	モルディブにおける津波対策の堤防設置前（左）と設置後（右）	3-65
図 3.3.3	陸閘の自動化例	3-66
図 3.3.4	嵩上げ道路の実施例.....	3-66
図 3.3.5	公共施設の免震化事例.....	3-68
図 3.3.6	学校施設の耐震補強事例.....	3-68
図 3.3.7	ロードスウィーパー（道路に降り積もった火山灰を収集）	3-70
図 3.3.8	散水車（火山灰が舞い上がるのを防ぐために散水）	3-70
図 3.3.9	灰ステーション	3-71
図 3.3.10	降灰予報	3-72
図 3.4.1	火山性津波浸水域内の人口分布（トンガタブ島）	3-74
図 3.4.2	火山性津波浸水域内の人口分布（エウア島）	3-74
図 3.4.3	浸水域内の建物分布（トンガタブ島）	3-75
図 3.4.4	浸水域内の建物分布（エウア島）	3-75
図 3.4.5	浸水域内の電力施設分布（トンガタブ島、エウア島）	3-75
図 3.4.6	高潮浸水域内の人口分布（トンガタブ島）	3-76
図 3.4.7	高潮浸水域内の人口分布（エウア島）	3-76
図 3.4.8	高潮浸水域内の建物分布（トンガタブ島）	3-77
図 3.4.9	高潮浸水域内の建物分布（エウア島）	3-77
図 3.4.10	高潮浸水域内の電力施設分布（トンガタブ島）	3-78
図 3.4.11	高潮浸水域内の電力施設分布（エウア島）	3-78
図 3.5.1	エウア島防波堤計画案.....	3-85
図 3.5.2	L2 レベルの浸水範囲	3-86
図 3.5.3	避難所等の位置図	3-88
図 4.1.1	ヌクアロファ護岸全体配置図.....	4-1
図 4.1.2	設計区間分割図と A 区間標準断面図（H=3.00）	4-2
図 4.1.3	B 区間標準断面図（H=3.30）	4-3
図 4.1.4	C 区間標準断面図（H=2.80）	4-3

図 4.1.5	D 区間標準断面図.....	4-4
図 4.1.6	E 区間標準断面図 (H=2.30)	4-5
図 4.1.7	写真撮影位置図	4-5
図 4.1.8	ヌクアロファ護岸横断測量及び DCP テスト実施位置.....	4-10
図 4.1.9	ヌクアロファ護岸測量結果と高潮 L1 対策嵩上げ高さ H=M.S.L.+3.0m との比較.....	4-11
図 4.1.10	DCP No.2.....	4-12
図 4.1.11	DCP No.4.....	4-12
図 4.1.12	DCP No.6.....	4-12
図 4.1.13	DCP No.8.....	4-12
図 4.1.14	DCP No.10.....	4-13
図 4.1.15	DCP No.12.....	4-13
図 4.1.16	エウア島オホヌア地区新橋架設候補地位置図.....	4-14
図 4.1.17	エウア島新橋架設候補地縦断測量結果.....	4-14
図 4.2.1	オホヌア既存橋現況図 (2022 年 7 月)	4-15
図 4.2.2	オホヌア既存橋縦断測量結果.....	4-16

表リスト

ページ

表 1.2.1	国内支援委員会名簿.....	1-2
表 1.2.2	国内支援委員会のグループ分けと主な検討内容.....	1-3
表 1.2.3	国内支援委員会の開催.....	1-4
表 1.2.4	主な会議	1-5
表 2.1.1	国家の成果を支える柱ごとにグループ化された組織の成果.....	2-3
表 2.1.2	NIIP3 HTHH 改訂版で示されている優先プロジェクト	2-5
表 2.2.1	クラスター別復旧計画予算.....	2-9
表 2.3.1	JNAP2 の基本方針	2-12
表 2.5.1	トンガにおいて公表されているリスク情報.....	2-30
表 2.5.2	トンガにおける世銀プロジェクト.....	2-37
表 2.6.1	地震発生時刻及び規模 (2022 年 1 月 13 日～17 日)	2-48
表 2.7.1	各島への調査実施日程.....	2-49
表 3.2.1	各ハザードレベルの強度・頻度および対策.....	3-2
表 3.2.2	トンガ周辺の M7.5 以上の地震発生時刻と規模 (1913 年～2022 年)	3-7
表 3.2.3	トンガ周辺の火山一覧.....	3-9
表 3.2.4	計算条件	3-11
表 3.2.5	数値解析ケース	3-13
表 3.2.6	数値解析ケース	3-22
表 3.2.7	気象擾乱別潮位偏差一覧表.....	3-28
表 3.2.8	計算対象のサイクロン選定結果.....	3-29

表 3.2.9	計算条件（高潮）	3-30
表 3.2.10	数値解析ケース	3-31
表 3.2.11	確率潮位偏差算定のために抽出したサイクロン（1947～1990）	3-35
表 3.2.12	計算条件（確率潮位偏差算定用）	3-36
表 3.2.13	各サイクロンの潮位偏差の計算結果.....	3-37
表 3.2.14	極値統計入力値	3-37
表 3.2.15	極値統計結果（確率高潮潮位偏差）	3-38
表 3.2.16	各ハザードレベルの強度・頻度および対策（再掲載）	3-39
表 3.2.17	H.W.L.時のヌクアロファにおける確率高潮偏差.....	3-42
表 3.2.18	既存護岸の設計諸元概要.....	3-42
表 3.2.19	トンガタブ島・エウア島で浸水範囲・浸水深が卓越するケース（海底火山名）	3-43
表 3.2.20	計算条件（ハザードレベル2 高潮）	3-48
表 3.2.21	SSP シナリオの概要	3-51
表 3.2.22	ヌクアロファにおける海面上昇時の H.W.L.（SSP1-2.6）	3-52
表 3.2.23	災害対策の方向	3-63
表 3.2.24	本検討における火山性津波・地震性津波・高潮の L1/L2 外力及び再来周期	3-63
表 3.3.1	高潮・津波対策一覧.....	3-64
表 3.3.2	地震対策一覧	3-67
表 3.3.3	火山灰対策	3-69
表 3.3.4	暴風・強風対策一覧.....	3-73
表 3.4.1	年超過確率に対応する設計水平震度.....	3-80
表 3.4.2	建築物設計用風速と水平震度のまとめ.....	3-80
表 3.5.1	ハザード毎の防御レベルに応じた解析結果.....	3-84
表 4.1.1	護岸工法の比較表	4-8
表 4.1.2	BBB ビジョンワークショップ時の住民意見一覧表	4-9
表 4.1.3	ヌクアロファ護岸横断測量結果一覧表.....	4-11
表 4.1.4	DCP テスト結果一覧表	4-13
表 5.1.1	セクター別のプロジェクトリスト.....	5-1
表 5.2.1	実施中案件一覧	5-2
表 5.3.1	検討した無償プロジェクト案件一覧.....	5-3
表 5.3.2	検討した小規模無償プロジェクト案件一覧.....	5-4
表 5.3.3	検討した技術協力プロジェクト案件一覧.....	5-5

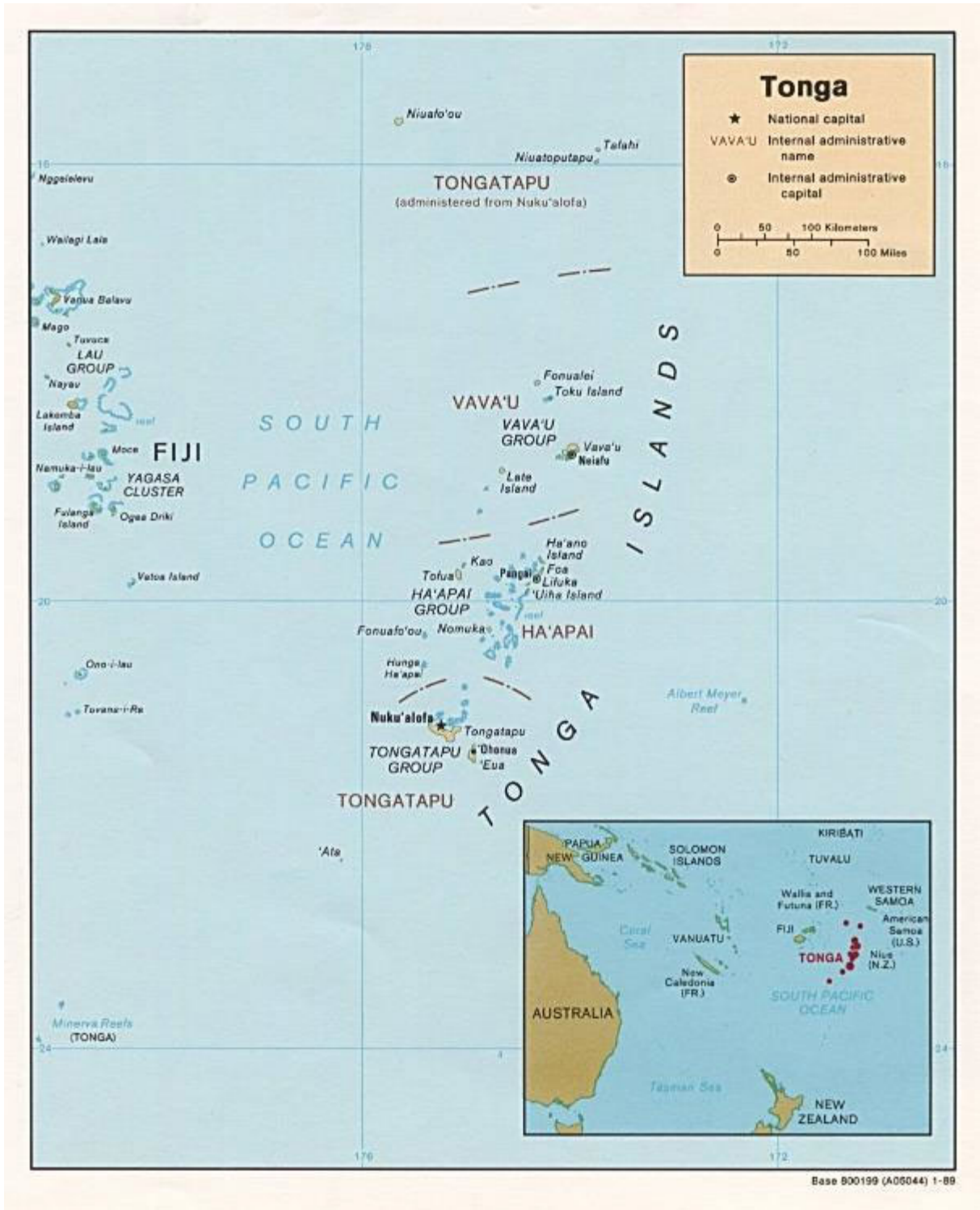
略語集

略語	名称	和訳
ADB	Asian Development Bank	アジア開発銀行
BBB	Build Back Better	よりよい復興
BCP	Business Continuity Plan	事業継続計画
CBDRM	Community-based Disaster Risk Management	コミュニティベース災害リスク管理
CCT	Conditional Cash Transfer	(教育のための) 条件付き現金給付
CEO	Chief Executive Officer	局長
C/P	Counterpart	カウンターパート
CHARM	Comprehensive Hazard and Risk Management	包括的なハザードおよびリスク管理
CMT	Centroid Moment Tensor	セントロイド・モーメント・テンソル
COVID-19	Coronavirus disease 2019	新型コロナウイルス感染症
CSG	Cemented Sand and Gravel	現地発生剤セメント混合材料
DCP	Dynamic Cone Penetrometer	動的コーン貫入試験
DEM	Digital Elevation Model	数値標高モデル
DEMC	District Emergency Management Committee	地方危機管理委員会
DRM	Disaster Risk Management	災害リスク管理、防災
DRR	Disaster Risk Reduction	災害リスク削減
ECHO	European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations	欧州委員会人道援助・市民保護総局
FAO	Food and Agriculture Organization	国際連合食糧農業機関
GCF	Green Climate Fund	緑の気候基金
GDP	Gross Domestic Product	国内総生産
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans	大洋水深総図
GFDRR	Global Facility for Disaster Reduction and Recovery	世界銀行防災共同プログラム
GIS	Geographic Information System	地理情報システム
GNI	Gross National Income	国民総所得
GPS	Global Positioning System	全地球測位システム
GRADE	Global Rapid Post Disaster Damage Estimation	国際緊急被災後評価
HMAF	His Majesty's Armed Forces	トンガ軍
HP	Home Page	ホームページ
H.W.L.	High Water Level	朔望平均満潮位
HTHH	Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	フンガトンガ・フンガハアパイ
ICT	Information and Communication Technology	情報通信技術
ICU	Intensive Care Unit	集中治療室
IDMC	Internal Displacement Monitoring Center	国内避難民監視センター

略語	名称	和訳
IBTrACS	International Best Track Archive for Climate Stewardship	気候管理に対する国際ベストトラックアーカイブ
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	気候変動に関する政府間パネル
JCC	Joint Coordinating Committee	合同調整委員会
JICA	Japan International Cooperation Agency	(独) 国際協力機構
JNAP	Joint National Action Plan on Climate Change and Disaster Risk Management	国家合同行動計画
LAN	Local Area Network	ローカルエリアネットワーク
LiDAR	Light Detection and Ranging	光検出と測距
L.W.L.	Low Water Level	朔望平均干潮位
M/M	Minutes of Meetings	協議議事録
MCA	Multi Criteria Analysis	多基準意思決定分析
MEFS	Ministry of Emergency and Fire Services	救急消防省
MEIDECCC	Ministry of Meteorology, Energy, Information, Disaster Management, Environment, Climate Change and Communications	気象・エネルギー・情報・災害管理・環境・気候変動・通信省
MET	Ministry of Education and Training	教育訓練省
MJP-J	Ministry of Justice and Prisons-Justice	法務刑務省法務局
MLNR	Ministry of Lands and Natural Resources	天然資源省
MoFNA	Ministry of Finance and National Planning	財務国家計画省
MOH	Ministry of Health	保健省
MOI	Ministry of Infrastructure	社会基盤整備省
MOP	Ministry of Police	警察省
MORDI Tonga Trust	Mainstreaming of Rural Development Innovation Tonga Trust	モルディトンガトラスト
MPE	Ministry of Public Enterprises	公共事業省
M.S.L.	Mean Sea Level	平均海面水位
NDC	National Disaster Council	国家災害会議
NDRMO	National Disaster Risk Management Office (formerly the National Emergency Management Office)	国家災害リスク管理局 (旧国家危機管理局)
NEMO	National Emergency Management Office	国家危機管理局
NEMC	National Emergency Management Committee	国家危機管理委員会
NEMP	National Emergency Management Plan	国家危機管理計画
NEOC	National Emergency Operation Committee	国家危機対応委員会
NERC	National Emergency Recovery Committee	国家危機復興委員会
NEMP	National Emergency Management Plan	国家危機管理計画
NGO	Non-Governmental Organization	非政府組織
NHK	Nippon Hoso Kyokai (Japan Broadcasting Corporation)	日本放送協会

略語	名称	和訳
NIIP	National Infrastructure Investment Plan	国家インフラ投資計画
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	アメリカ海洋大気庁
NSPAO	National Spatial Planning Authority Office	国家空間計画局
NZ	New Zealand	ニュージーランド
OLA	Office of the Legislative Assembly	立法議会事務局
PAT	Ports Authority Tonga	トンガ港湾公社
PDM	Project Design Matrix	プロジェクト・デザイン・マトリックス
PMU	Project Management Unit	プロジェクト運営ユニット
PREP	Pacific Resilience Programme	太平洋レジリエンスプログラム
PRIF	Pacific Regional Infrastructure Facility	太平洋地域社会基盤機構
RC	Reinforced Concrete	鉄筋コンクリート
SET	Skills and Employment for Tongans Project	トンガのためのスキルと雇用プロジェクト
SMS	Short Message Service	ショートメッセージサービス
SOPAC	South Pacific Applied Geoscience Commission	南太平洋応用地球科学委員会
SPC	Pacific Community (formerly the South Pacific Commission)	太平洋共同体
SREM	Strategic Roadmap for Emergency and Disaster Risk Management	緊急・災害リスク管理のための戦略的ロードマップ
SSP	Shared Socio-economic Pathway	共有社会経済経路
STOC	Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas	高潮津波シミュレーター
TAL	Tonga Airports Limited	トンガ空港公社
TAMA	Tonga Asset Management Association	トンガ資産管理協会
TCC	Tonga Communication Corporation	トンガ電信電話会社
TCL	Tonga Cable Limited	トンガ通信公社
TCRTP	Tonga Climate Resilient Transport Project	トンガ国気候変動レジリエンス交通プロジェクト
TGS	Tonga Geology Service	トンガ地質サービス
TMCL	Tonga Market Corporation Limited	トンガ市場公社
TMS	Tonga Meteorological Service	トンガ気象サービス
TOP	Tongan Pa'anga	トンガパアンガ
TPL	Tonga Power Limited	トンガ電力公社
TSDF	Tonga Strategic Development Framework	トンガ戦略的開発枠組み
TTI	Tupou Tertiary Institute	Tupou 中等学校
TVET	Technical and Vocational Education and Training	技術職業教育訓練
TWB	Tonga Water Board	トンガ水道公社
UNDP	United Nations Development Programme	国連開発計画

略語	名称	和訳
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund	国際連合児童基金
UN OCHA	United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs	国連人道問題調整事務所
USAID	United States Agency for International Development	アメリカ合衆国国際開発庁
USGS	United States Geological Survey	アメリカ地質調査所
USP	University of South Pacific	南太平洋大学
VEMC	Village Emergency Committee	村落危機管理委員会
VEI	Volcanic Explosivity Index	火山爆発指数
WAL	Waste Authority Limited	廃棄物公社
WASH	Water, Sanitation and Hygiene.	水、トイレ、衛生
WB	World Bank	世界銀行
WCDRR	World Conference on Disaster Risk Reduction	国連防災世界会議



出典：The map collection of the Perry-Castañeda Library (PCL) of the University of Texas at Austin, https://maps.lib.utexas.edu/maps/islands_oceans_poles/tonga.jpg

調査対象地域位置図

1. 業務概要

1.1 業務実施の背景

トンガ国（以下、「トンガ」という。）は、南太平洋のポリネシアに位置する大小 172 の島々からなる島嶼国で、排他的経済水域 700,000km²、陸地面積 720km²、人口約 10.4 万人（2019 年、世界銀行）、一人あたり GNI は 5,000 米ドル（2019 年、世界銀行）である。トンガは、北からニウアス、ヴァヴァウ、ハアパイとトンガタブの 4 つの諸島からなり、そのうち最大島である南部のトンガタブ諸島は、主に首都ヌクアロファのあるトンガタブ島とその南東約 40km に位置するエウア島から構成され、全人口の約 80%以上が居住している。トンガの主要産業は、農業および漁業の一次産業と観光業が主であり、GDP の約 20%を占めている。年間平均気温 24℃、年間降水量 1,700mm と温暖な気候であるが、毎年サイクロン被害に見舞われるほか、国内に活火山島や海底火山があるため地震等の自然災害が多く、世界リスク報告（2021 年）では、世界で 3 番目に災害被害リスクが高い国とされている。

2022 年 1 月 15 日、トンガの首都ヌクアロファの北約 65km に位置する海底火山フンガトンガ・フンガハアパイ（HTHH）で大規模な噴火が発生し、それに伴う地震・津波・降灰により沿岸部での建物の倒壊・浸水、交通・通信インフラ障害等、甚大な被害が発生した。日本政府はトンガ政府の緊急支援要請を受け、自衛隊と連携した JICA 緊急援助物資の供与を行い、飲料水、食料品、灰除去のための用具、個人防護具等の緊急援助物資の供与を行った。トンガが災害脆弱性において常に世界トップクラスに位置付けられている現状に基づき、シームレスに活動を展開し、今次災害から被害を復旧するのみならず、今後の同種災害の科学的根拠に基づく再現性の確認の上で、その再現性に応じた Build Back Better（BBB）ビジョンに基づく復興計画を行うことが求められている。

係る状況から、今般の調査では、現在 JICA 内で検討が進んでいる BBB ビジョンの内容を基として、トンガの災害に強い国づくりを進めるにあたり、災害リスクの現況を把握し、類似の災害が発生した際の被害拡大の防止策や、中長期的な防災対策の支援等、今後の具体的な協力案件形成に必要な情報収集と分析を行うことを目的として実施するもの。

1.2 業務の概要

(1) 業務名

トンガ王国火山噴火及び津波被害に対する災害復興事業形成に係る情報収集・確認調査

(2) 調査の目的

本調査は、今般のトンガにおける噴火、地震及び津波の発生を受け、BBB ビジョンに基づくトンガの災害に強い国づくりを進めるにあたり、BBB ビジョンの策定支援、トンガの災害リスクの現況を把握し、類似の災害が発生した際の被害拡大の防止策や、中長期的な防災対策の支援等、今後の具体的な協力案件形成に必要な情報収集と分析を行うことを目的とする。

(3) 対象地域

トンガ全土（トンガタブ島、エウア島を重点対象エリアとして調査を実施する）。

(4) 相手国関係機関

主たるカウンターパート（C/P）機関は以下のとおりである。

- 気象・エネルギー・情報・災害管理・環境・気候変動・通信省 Ministry of Meteorology, Energy, Information, Disaster Management, Environment, Climate Change and Communications (MEIDECCC)
- 天然資源省 Ministry of Lands and Natural Resources (MLNR)
- 国家空間計画局 National Spatial Planning Authority Office (NSPAO)
- 社会基盤整備省 Ministry of Infrastructure (MOI)
- 公共事業省 Ministry of Public Enterprises (MPE)
- トンガ港湾公社 (PAT)、トンガ水道公社 (TWB)、トンガ電力公社 (TPL)、トンガ電信電話会社 (TCC)
- 保健省 Ministry of Health (MOH)

(5) 国内支援委員会

本調査では国内支援委員会が形成された。以下に、国内支援委員会のメンバーを示す。

1) 国内支援委員会名簿

表 1.2.1 国内支援委員会名簿

No.	氏名	所属	グループ
1	上垣内修	気象業務支援センター	C
2	井口正人	京都大学 防災研究所	B
3	中田節也	防災科学技術研究所 火山研究推進センター	A
4	近貞直孝	防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門	C
5	井上公	防災科学技術研究所 マルチハザードリスク評価研究部門	B、C
6	大湊隆雄	東京大学 地震研究所 火山噴火予知研究センター	A
7	市原美恵	東京大学 地震研究所	A
8	野上健治	東京工業大学 理学院 火山流体研究センター	B
9	藤井敏嗣	NPO 法人 環境防災総合政策研究機構、山梨県富士山科学研究所長	B
10	今村文彦	東北大学 災害科学国際研究所	C、D
11	森信人	京都大学 防災研究所	C、D
12	有川太郎	中央大学 理工学部	C、D

出典：JICA 記録をもとに調査団作成

国内支援委員会はその専門性によりグループ A から D に分かれて活動してきた。以下に各グループでの検討事項と成果を示す。なお、本調査では国内支援委員の検討結果を活用して解析を進めた。

表 1.2.2 国内支援委員会のグループ分けと主な検討内容

グループ	検討内容	成果	要点
A	火山活動	<ul style="list-style-type: none"> 出版物や資料などの未公開情報の収集 詳細な噴火タイムライン 地震派と噴火のスタートとの相関関係と、噴火の理解 噴火の理解調査から得た海底ケーブルの断線と引き起こされた津波。 	2022年1月の噴火は、マグマと浅い海水の激しい相互作用に起因しており、その結果、深い凹地が生じた。それにより、HTHHで同様の噴火が100年の時間スケールで再発する可能性は低い。
B	火山噴火ダメージ調査とその対策	<ul style="list-style-type: none"> トンガ付近にある21の海底火山の噴火の歴史 噴火による市街地へのインパクト評価 グループCへのインプット（トンガ付近の海底火山のうち津波を誘発するもの） 降灰及び津波への対策メニュー 	トンガの居住地域に影響を及ぼす噴火は、100年に一度以上発生すると判断された。
C	海底火山性津波の解析及び調査	<ul style="list-style-type: none"> 被害調査報告書等既存資料の収集 津波伝播の数値解析 火山性津波発生モデルの提示 火山性津波伝播解析結果の提示 トンガトレンチでの過去の地震性津波(USGS) 	高解像度のDEM（地形データ）およびトンガ側から提供されたデジタル海底地形情報を用いて、シミュレーションを行っている。
D	トンガ付近のサイクロンおよび高潮の歴史的及び長期的評価	<ul style="list-style-type: none"> トンガ周辺を通過したサイクロンによって引き起こされた高潮の整理 過去60年間の歴史的な主要な高潮イベントを再現するための数値シミュレーション。 現在の高潮対策の見直し：堤防、監視・警報システム、ハザードマップと避難計画。 高潮による被害の予想される可能性と将来の可能性 IPCC第6次評価報告書をもとにした、この地域における地球温暖化の影響（海面上昇と発生頻度の変化やサイクロンの強さ）の考察。 高潮対策の方向性を提言し、グループCと一貫性を持った協力 	

出典；国内支援委員会資料より JICA 調査団作成

2) 主な国内支援委員会の開催

国内支援委員会は調査の調査開始から要所で調査団からの報告や支援委員からのアドバイスをいただきながら進められた。以下に、国内支援委員会の開催記録を示す。なお、本調査の契約締結日は2022年4月22日である。

表 1.2.3 国内支援委員会の開催

No.	日付	時間	概要	形式/場所	備考
1	2022年 4月7日	16:00より	4月以降の方針やコンサルタントへの引継事項	オンライン	
2	4月12日	8:00より	海底火山の山体崩壊の確率や崩壊規模についてのご相談	オンライン	
3	5月13日	17:00より	中田先生へ今後の取り組みについてご相談	オンライン	
4	5月13日	10:00より	トンガ BBB 復興・復興支援 進捗状況のご説明	オンライン	
5	6月1日	11:00より	トンガへの研究協力について	オンライン	
6	6月9日	9:00より	トンガへの研究協力について	オンライン	
7	6月15日	8:30より	Shane Cronin 教授の解析結果に関して	オンライン	
8	7月22日	17:00より	調査スケジュールに関するご相談	オンライン	
9	7月29日	10:30より	トンガにおける津波解析についての協議	オンライン	
10	8月1日	7:50より	L1・L2 の設定について	オンライン	
11	8月1日	13:00より	トンガ国における高潮解析についての協議	オンライン	
12	8月12日	10:00より	研究成果発表会	オンライン	
13	8月23日	8:00より	L1・L2 設定に関する打ち合わせ	オンライン	
14	2023年 1月18日	17:30より	進捗状況のご報告	オンライン	
15	2月2日	17:00より	進捗状況のご報告	オンライン	
16	2月19日	16:00より	津波データベースの活用	オンライン	
17	4月27日	8:30より	L1・L2 の議論、ハザード解析結果のご説明	オンライン	
18	5月18日	9:00より 17:00より	ハザード解析結果のご報告	オンライン	2回に分けて実施
19	6月9日	9:00より	トンガ火山噴火における災害復興事業に関する報告会"	オンライン	

出典：JICA 記録をもとに調査団作成

3) 主な会議

本調査では調査期間中にワークショップやセミナーを実施してきた。表 1.2.4 に実施した主な会議を示す。

表 1.2.4 主な会議

No.	日付	時間	概要	方法場所
1	2022年 3月30日	14:00-15:40	BBB ビジョン キックオフミーティング 関係省庁の CEO、関係地区選出の議員らを招いて、プロジェクト概要の説明と、トンガ版 BBB ビジョンの必要性とドラフト版の説明を行った。	対面及び オンライン
2	2022年 8月17日	10:00-12:30	2022 HTHH 噴火及び復興に関するセミナー BBB ビジョンセミナー 皇太子を招いて、NSPAO 側から BBB ビジョンについて説明 JICA 専門員から BBB ビジョンための日本の取り組みについて説明を行った。 オンライン会議は日本の関係省庁からも参加があり、終了後は NHK からの取材もあった。	対面及び オンライン
3	2023年 5月23日	9:00-13:00	ハザード解析結果の説明 JICA 調査団から行い、L1,L2 設定についての議論を行った。さらに、3つのグループに分けハザード解析結果について意見を集約した	対面及び オンライン
4	2023年 8月29日	9:00- 13:00	ドラフトファイナルレポート説明 ワークショップ JICA 調査団からハザード解析結果について説明を行い、今後のトンガにおける政策にどの様に反映するかについて議論を行った。	対面及び オンライン

出典：JICA 調査団作成

2. 基本情報の収集・分析

2.1 開発計画

2.1.1 Tonga Strategic Development Framework 2015-2025 (TSDF II)

「トンガ戦略的開発枠組み 2015-2025 より進歩的なトンガ：継承の強化」は、2015年5月に策定されている。本計画はトンガの開発フレームワークを示す最上位の国家計画である。財務及び国家計画省（Ministry of Finance and National Planning: MoFNA）により策定が行われ、2014年に関係者や関係機関に対するヒアリングが行われた。

TSDF IIの中では自然災害に対するリスクが172か国中2番目である点も重視している。特に、気候変動に対するリスクも認識されている。

TSDF IIのビジョン内で求められる国家的影響は以下のように示されている。

すべての人々のより高い生活の質をサポートするより進歩的なトンガ

TSDF IIのビジョン内で求められる国家的影響は、「すべての人々のより高い生活の質を支える、より進歩的なトンガ」としている。包括的で持続可能な成長に焦点を当てることで、より広範ですべての人にとってより公平な長期的な進歩を保証することを目指している。

この目標を達成するために7+1の国家的成果、29の組織的成果（5つの柱の下に位置付けられている）で構成されており、これらが連携して2025年までのトンガの発展を導く計画となっている。

(1) 7つの国家成果

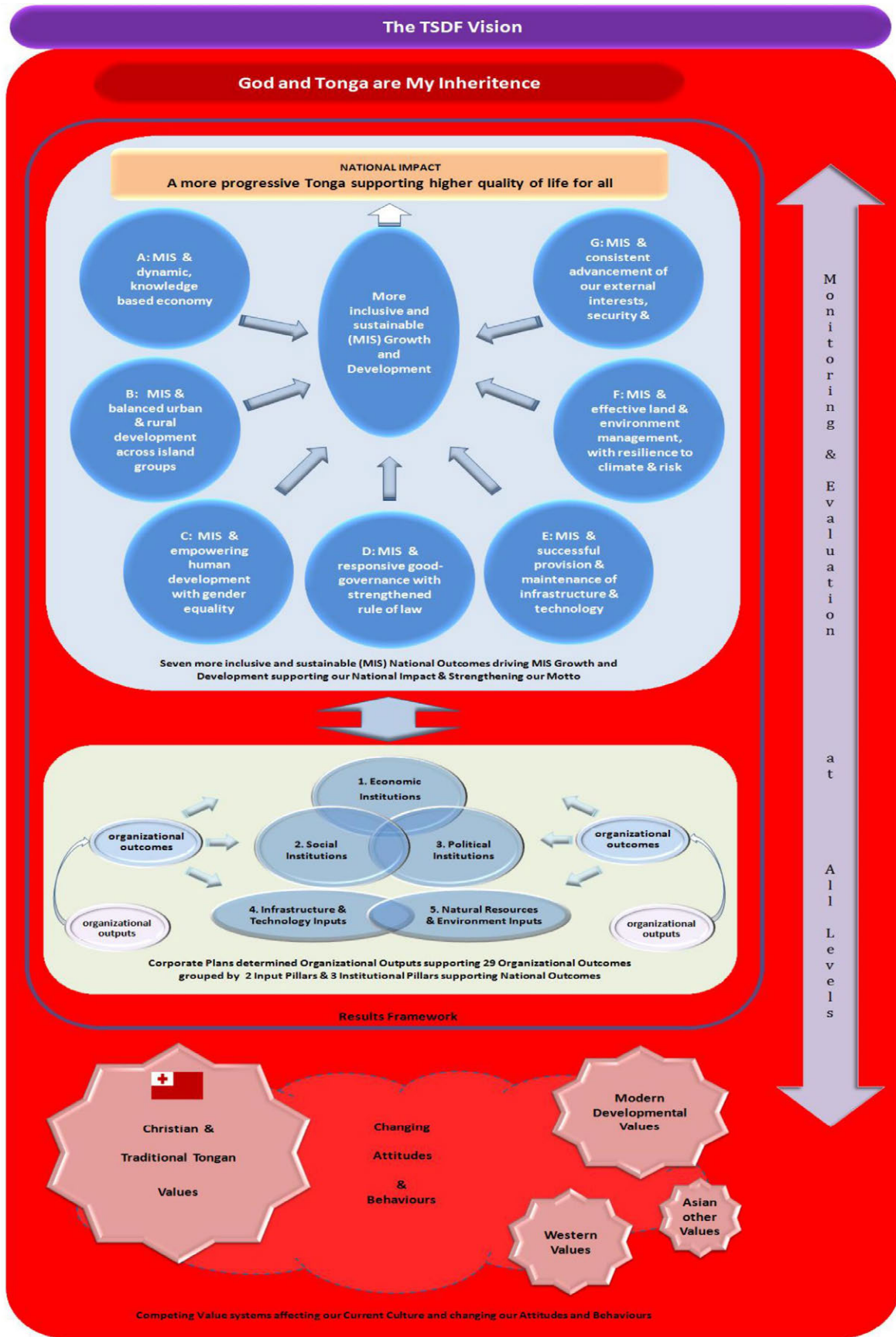
TSDF IIでは国家成果として、以下の7つをあげている。

1. より包括的で、持続可能で、動的な知識ベースの経済
2. 島嶼群全体にわたる、より包括的で持続可能でバランスの取れた都市と農村の開発
3. 男女平等を伴う、より包括的で持続可能で力を与える人間開発
4. 法と秩序を備えた、より包括的で、持続可能で、応答性の高いグッドガバナンス
5. インフラストラクチャーとテクノロジーのより包括的で持続可能で成功した提供と保守
6. より包括的で持続可能かつ効果的な土地管理、環境管理、および気候とリスクに対する回復力
7. 私たちの対外利益、安全保障、主権の、より包括的で、持続可能で、一貫した前進

(2) 5つの柱

3つの制度上の柱として、1. 経済機関、2. 社会制度及び3. 政治機関をあげている。

さらに、2つの投入の柱として4. インフラと技術の投入及び5. 天然資源と環境へのインプットをあげている。5つの柱の中の29の成果はAppendix 2-1に記載してある。



出典：Tonga Strategic Development Framework (TSDf) 2015-2025

図 2.1.1 TSDf Vision

表 2.1.1 は、各組織の成果が各国家の成果をどの程度サポートしているかを示している。暗い四角でマークされたセルは、特定の組織の成果がその国家の成果に重要なサポートを提供することを示し、中間色は中程度のサポートを示し、明るい色は部分的なサポートを示し、白色は寄与がないことを示す。

表 2.1.1 国家の成果を支える柱ごとにグループ化された組織の成果

Table 1: Organizational Outcomes Grouped by Pillars supporting National Outcomes

Pillars	National Outcomes => Organizational Outcomes	More inclusive, sustainable and...						
		A: ...dynamic & knowledge based economy	B: ...balanced urban & rural development across island groups	C: ...empowering human development with gender equality	D: ...responsive good-governance with strengthened rule of law	E: ... successful provision & maintenance of infrastructure & technology	F: ... effective land admin & environment management, with resilience to climate & risk	G: ... consistent advancement of our external interests, security and Sovereignty
1. Economic Institutions	1.1 Improved macroeconomic management & stability with deeper financial markets	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	1.2 Closer public/private partnership for economic growth	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	1.3 Strengthened business enabling environment	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	1.4 Improved public enterprise performance	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	1.5 Better access to, and use of, overseas trade & employment, and foreign investment	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue
2. Social Institutions	2.1 Improved collaboration with & support to civil society organizations and community groups	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	2.2 Closer partnership between government, churches & other stakeholders for community development	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	2.3 More appropriate social & cultural practices	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	2.4 Improved education & training providing life time learning	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	2.5 Improved health care and delivery systems (universal health coverage)	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	2.6 Stronger integrated approaches to address both communicable & non-communicable diseases	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	2.7 Better care & support for vulnerable people, in particular the disabled	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	2.8 Improved collaboration with the Tongan diaspora	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue
3. Political Institutions	3.1 More efficient, effective, affordable, honest, transparent & apolitical public service focussed on clear priorities	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	3.2 Improved law & order and domestic security appropriately applied	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	3.3 Appropriate decentralization of government admin with better scope for engagement with the public	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	3.4 Modern & appropriate Constitution, laws & regulations reflecting international standards of democratic processes	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	3.5 Improved working relations & coordination between Privy Council, executive, legislative & judiciary	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	3.6 Improved collaboration with development partners ensuring programs better aligned behind gov't priorities	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue
	3.7 Improved political and defence engagement within the Pacific & the rest of the world	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue
4. Infrastructure & Technology Inputs	4.1 More reliable, safe and affordable energy services	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	4.2 More reliable, safe, affordable transport services	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue
	4.3 More reliable, safe and affordable information & communication technology (ICT) used in more innovative ways	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	4.4 More reliable, safe and affordable buildings and other structures	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue
	4.5 Improved use of research & development focussing on priority needs based on stronger foresight	Dark Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
5. Natural Resources & Environment Inputs	5.1 Improved land use planning, administration & management for private & public spaces	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	5.2 Improved use of natural resources for long term flow of benefits	Dark Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue
	5.3 Cleaner environment with improved waste recycling	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
	5.4 Improved resilience to extreme natural events and impact of climate change	Dark Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue

Level of support from Organizational Outcome to National Outcome: significant moderate partial none

出典：Tonga Strategic Development Framework (TSDF) 2015-2025 Page 2

2.1.2 National Infrastructure Investment Plan 2021-2030 (NIIP3)

トンガではインフラ整備を促進するために2010年に太平洋地域社会基盤機構（Pacific Regional Infrastructure Facility (PRIF)）の支援により策定された優先インフラ投資のための10年計画（NIIP 1）が策定された。その後、NIIP 2（Phase 1 2013-2023）、NIIP 2（Phase 2, 2015-2025）、NIIP 3（2021-2031）と改訂版が策定されている。

トンガ国家インフラ投資計画（The Tonga National Infrastructure Investment Plan, 2021-2030 : NIIP3）は2021年8月には閣議で了承された。しかしながらその後COVID-19の蔓延、2022年1月15日に噴火をしたHTHHによる津波や火山の降灰による被害などの大きな状況の変化から、NIIP3を改訂して、これらの事象の後に浮かび上がってきた課題を解決する新たなプロジェクトの追加を行った。47のプロジェクトの追加を行い、そのうちHTHH噴火に直接かかわる21プロジェクトおよび部分的にかかわる7プロジェクトである。これらの新規に追加されたプロジェクトと当初からのプロジェクトを合わせてNIIP3として、2023年4月に発行した。

NIIP3では優先プロジェクトを決めるために、5つの指標により各プロジェクトを点数化して優先順位を決めている。その指標の一つに天然資源および環境、という指標があり、防災についても考慮されている。NIIP3では今後2021年から2030年までに実施をするプロジェクトを整理している。

(1) NIIP3での優先プロジェクトの選定

NIIP3の改訂版では第2章でHTHH噴火による影響を経済、社会面、復興の際の政府の主導面から分析を加えて、第3章で必要なインフラストラクチャープロジェクトの追加を行っている。計画では4つの優先分野（住宅の復旧、食料の確保と生活、観光産業及び公共インフラストラクチャー）³に分類しているNIIP3-HTHHリストとして47プロジェクトプラスその他のプロジェクトを加えて99の優先プロジェクトとしている。

NIIP3ではこれらのプロジェクトを点数化して、プロジェクトの優先順位を決めている。Group 1 (G1) は75.6以上、Group 2 (G2) は75.6から61まで、Group 3は60以下として優先順位を決めている。

(2) トンガの計画体系の中でのNIIPの位置づけ

トンガ国家インフラ投資計画2021～2030年（NIIP3）は2021年8月に閣議で承認され、すべてのインフラ分野をカバーする政府の優先事項が含まれている。第2次トンガ戦略的開発枠組み（TSDF II）2015年から2025年までとの整合性を確保してあるため、トンガでの最上位計画のプロジェクトリスト、という位置づけになると考えられる。

1) トンガのプロジェクトサイクルにおけるNIIPの優先順位付けの位置付け

今回の改訂版ではすべてのプロジェクトリストを再度優先順位付けして示している。このリストにはHTHH噴火による復旧、復興案件も示されている。トンガ政府は基本的には本プロジェク

³ The world Bank and the Global facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR) はHTHH噴火後にGlobal Rapid Post Disaster Damage Estimation (GRADE) 報告書を2022年2月7日に発行した。優先プロジェクトの分野は本報告書によっている。

トリストを活用して実施に移していく予定であるため、実施に際してはトンガ政府がすでに承認している BBB ビジョンのコンセプトに従った実施が望まれる。

表 2.1.2 NIIP3 HTHH 改訂版で示されている優先プロジェクト

No.	MDA or Public Enterprise	プロジェクトタイトル	コスト (千 TOP)	ドナー
1	TCL	New International Secondary Internet Cable linking VV and HH	39,200	Aust/NZ
2	OLA	New Fale Alea (Parliament House and Office Complex)	25,000	Aust/NZ
3	MOH	Upgrading of Vava'u Hospital (Prince Ngu Hospital)	40,000	WB/Aust
4	MJP-J	New Law Court Complex (Supreme and Magistrate)	13,500	Aust
5	TWB	Centralized Tonga Water Board and Village Water Supply Tongatapu	103,389	
6	MOH	Upgrade Health Centers (Kolovai, Kolonga), New Clinic Sopa (TT)	10,500	WB/Aust
7	MEIDECCC	Multi-Hazard Early Warning/Emergency Operations Centre (Niuas)	15,000	DRM
8	TWB	Improved Water Supply System in Vava'u (Greater Neiafu)	14,748	
9	TWB	Improved 'Eua Water Supply System	6,705	
10	TCC	Upgrade and Expansion 'Eua Mobile and Fixed Networks	2,960	
11	HMAF	Upgrade Touliki coastal protection structure	3,000	DRM
12	TMCL	Talamahu (TBU, Nuku'alofa) and 'Utukalungalu (Vava'u) Market upgrade	5,000	
13	TPL	Power Network Relocation, Extension, Connection, HTHH Villages	1,405	
14	TCC	Replace Telcoms Tower, BTS, Standby Generator Kanokupolu, Ohonua	1,340	
15	TAMA	Upgrade of Small Industrial Center - Ma'ufanga, TT	5,000	
16	TPL	Nuku'alofa Power Network Upgrade Project (NNUP) Area 4	12,360	
17	TPL	Additional/Replacement Generators (TBU, Vava'u, Ha'apai and 'Eua)	6,000	
18	MOH	Upgrading of a New Public Health Building (Tongatapu)	5,000	WB/Aust
19	MOI	Ohonua Bridge ('Eua)	16,000	
20	MOI	Fanga'uta Evacuation Bridge and Roads	150,000	ADB/Aust
21	PAT	Second New Tugboats	20,022	
22	TCC	Upgrade and Expansion Niuas Mobile Networks	2,627	
23	MEFS	Upgrade Fire Station 1, Nuku'alofa	2,360	
24	MOH	Reconstruction of Queen Salote School of Nursing Home	5,000	WB/Aust
25	MOI	Overlay of Asphalt Concrete on Primary Roads in Tongatapu	40,000	
26	TWB	Water Supply for HTHH Damaged and Relocated Villages (TT, HH, 'Eua)	2,061	
27	MOP	Tonga Police Stations Custody Upgrade Project	1,001	
28	MOP	Tonga Police Stations & Support Facilities Rehabilitation (all island groups)	2,850	
29	MEIDECCC	New Warehouses for NEMO (Vava'u)	1,000	Aust/NZ
30	TWB	Water Supply upgrade (post HTHH) Hihifo, Holopeka, Pangai, HH	6,898	

No.	MDA or Public Enterprise	プロジェクトタイトル	コスト (千 TOP)	ドナー
31	MEIDECCC	Renovation Community Evacuation Centers TT, post HTHH	1,500	DRM
32	TAL	Second New Fire Tender Fua'amotu	2,100	
33	MET	TIST & TMPI Extension/Upgrade Building (more inclusive for student)	6,000	WB
34	MOI	New Wharfs for Small Outer Island	16,000	
35	WAL	Close (Kalaka) and Establishing New Landfill(s) Vava'u	12,000	
36	TMCL	Upgrade of TMCL's Tofoa Market	1,600	
37	TPL	Replacement of Residential Smart Meter Project	1,400	
38	MOI	Widening to Three Lanes, Taufa'ahau Rd (Pea to Tofoa)	1,500	
39	WAL	Convert Dump Sites to New Structured Landfill, Ha'apai & 'Eua	8,000	
40	TAL	Upgrade/Expand Carpark, Pedestrian Access Fua'amotu Airports	1,000	
41	MET	New Junior Campus for Tupou College	10,000	WB/Aust
42	PAT	Replace of Existing Rock Revetment for QS Wharf	15,620	ADB/WB
43	MET	New ICT Building & Infrastructure Tupou Tertiary Institute (TTI)	2,000	WB/Aust
44	MET	New 'Safer Schools' Warehouse Building	2,000	WB/Aust
45	MET	New Tonga Side School Complex (phase 3)	3,000	WB/Aust

出典：National Infrastructure Investment Plan 2021-2030 (NIIP3), April 2023 の内容を元に JICA 調査団作成

2.2 防災計画、災害モニタリング計画

2.2.1 Strategic Roadmap for Emergency and Disaster Risk Management (SREM) 2021 - 2023

本ロードマップは NEMO と防災関連機関との共同により作成されたものである。また、本ロードマップを作成するにあたり、PIEMA (The Pacific Islands Emergency Management Alliance)、SPC、オーストラリア、ニュージーランド政府の協力も受けて作成された。また、TSDF II の実施もサポートしている。本ロードマップは 6 つの成果から成り立っており、2021 年から 23 年にかけて実施されることとしている。

本ロードマップは現在提出されている災害リスク管理法をサポートすることを一つの目的としている。既存の危機管理法は緊急対応を念頭に作成されているが、近年大きな被害を受けたサイクロンジータやハロルドなどの経験から防災の枠組みを大きくとらえ、災害サイクルに沿って緊急対応だけでなく、事前準備や減災活動、被災後の復旧、復興までを含んだ法律とすることを狙っている。また、新法の一つの提案である、クラスターシステム（対策分野別の省庁を横断した検討会議）を適用することを目的としている。

また、NEMO は防災機関として災害リスク管理政策フレームワークなどの策定も新しい法律の下、作成していく予定とされている。

ただし、MEIDECCC が危機管理法の元、他省庁のプロジェクトまでも実施している現状から、他省庁からは MEIDECCC の他省庁の業務分掌への浸食が拡大するとの見方があり、新法の承認は得られていない。

(1) SREMのビジョン

トンガ政府とそのパートナーは、効果的かつ効率的な緊急および災害リスク管理サービスの提供を確保するための取り組みを調整する。

(2) SREMの結果

成果1：トンガが、確立された緊急調整および通信システムによってサポートされる完全に機能する緊急オペレーションセンターを持つ。

成果2：トンガの緊急・災害リスク管理セクターがより包括的になる。

成果3：政府の政策、計画、予算、および調達プロセスが、トンガにおける災害リスク管理の主流化を積極的に支援する。

成果4：トンガのクラスターシステムが完全に制度化され、強化される。

成果5：トンガは、避難所の安全性とセキュリティを強化した、トンガでの避難プロセス管理に関する明確な基準とガイドラインを持つ。

成果6：トンガが参加型の村落緊急事態・災害リスク管理の計画と実施を実践する。

(3) 実施とモニタリング

ロードマップの実施は、NEMOによって調整され、NEMCによって導かれる。各ロードマップワークプランは、NEMOまたはクラスターリードのいずれかに割り当てられ、アクションを実行し、その進捗状況を報告する。ワークプランのリーダーは、NEMOを通じて毎年NEMC会議で進捗状況を報告する。次の図は、ロードマップの実装と監視のサイクルを示している。



出典：Strategic Roadmap for Emergency and Disaster Risk Management (SREM) 2021 - 2023

図 2.2.1 SREM のプロジェクトサイクル

2.2.2 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption and Tonga Tsunami (HTHH Disaster) Recovery and Resilience Building Plan 2022 – 2025

今回の災害を受けて、周辺国やドナーのサポートを受けてトンガ政府が策定した復旧計画である。NEMO が調整機関となり、分野別のクラスター毎の会合にて、被害状況の確認、必要とする支援について取りまとめている。

(1) 被害の概要と復旧予算

津波による建物被害は、トンガタブ島に加え、エウア島、フォノイフア島、マンゴー島、ノムカ島の少なくとも 300 棟以上の住宅を含む約 600 棟の被害があった。IOM の調査によると 317 世帯 1,525 人の人々が移転を余儀なくされている。

世銀の集計では復旧計画の実現に必要な予算は 9,040 万米ドルとなっているが、トンガ政府がクラスター毎にまとめた数字では、2 億 4,000 万米ドルとなっている。

(2) 復旧ビジョン、ゴール、指針

本計画では以下のような構成となっている。

復旧ビジョンとして「より強靱な復興」とされている。さらに、計画のゴールは経済、社会、文化及び自然にそれぞれ設定されている。

経済：より包括的で持続可能でダイナミックな知識ベースの経済

社会：ジェンダー平等による、より包括的で持続可能で力を与える人間開発

文化：私たちの人々、土地、そして私たちの文化を支える強力なキリスト教と伝統的な価値観という形で私たちの遺産と富をより深く理解する。

自然：土地利用の計画、管理、管理を改善し、公共および私有空間のより適切な提供、インフラストラクチャーのより適切な配置、環境の保護、およびリスクの制限を確実にする、より強力で適切な実施により、安全条件を改善する。

また、本計画を策定するにあたり、基本的に考えなければならない基本的な指針として、宗教性、BBB、貧困層と包括、持続可能性の確保、コラボレーションと調整及び環境の保護をあげている。

(3) 復旧計画の優先分野

今回の復旧計画では、特に津波と降灰による被害が顕著であったことから、住宅復旧、食料安全保障と生活、観光産業、公共インフラの 4 項目を優先分野として位置付けている。またトンガ政府は、トンガタブ島、エウア島、ハアパイ島の影響を受けた島々全体の優先セクターでの復旧活動を実施するための資金の動員に力を注ぐ予定としている。

(4) 緊急対応の実施

トンガ政府と人道支援団体は、災害が始まって以来、影響を受けたコミュニティに緊急支援を提供してきた。いくつかの二国間パートナー（ニュージーランド、中国、日本、英国、オーストラリアなど）も政府の取り組みに参加し、必要に応じて救援物資、助成金、物流および技術支援を

提供している。副首相と NEMC を通じて NEMO が主導し、全体的な対応を調整した。同時に、関係省庁は、クラスターのメンバーや他のパートナーや利害関係者を巻き込んだ特定の重複するクラスターの活動を調整している。

その結果、9つのクラスターの42の活動が計画され、実施に移されている。クラスター毎の復旧計画予算の目的については Appendix 2-2 参照。

表 2.2.1 クラスター別復旧計画予算

クラスター	配分予算 (TOP)	要求予算 (TOP)	リード省庁	活動数
水・衛生	1,000,000	15,000,000	MOH	7
教育	2,940,000	8,000,000	MET	1
シェルター	700,000	700,000	MOI	3
安全・保全	2,100,000	5,000,000	MIA	5
食糧安全保障・生計	700,000	700,000	MAFF/MOF	10
物流	5,000,000	968,863	MOP	1
		2,000,000	HMAF	
		600,000	TFES	
		2,431,137	NEMO	
不可欠なサービス	2,100,000	10,211,072	MPEs/PEs	7
経済・社会回復	2,000,000	6,000,000	Finance	1
緊急通信	1,000,000	1,000,000	MEIDECCC	4
合計	17,540,000	52,611,072		42

出典：NEMO-MEIDECCC National Response Plan

(5) モニタリングと評価

モニタリングと評価はサイクロンジータの災害復旧計画を元に作成されている。首相府では、今回の復旧計画実施、復旧プログラム、およびマイルストーンに向けた進捗状況をレビューし、公に報告している。

首相府は、政府省庁、火山噴火復興委員会 (VERC)、NERC、およびセクターのクラスターと協議して、復旧の進捗状況を最適に測定するために、既存の監視および評価の枠組みに復旧活動の指標を取り込んでいる。

2.2.3 各種防災計画

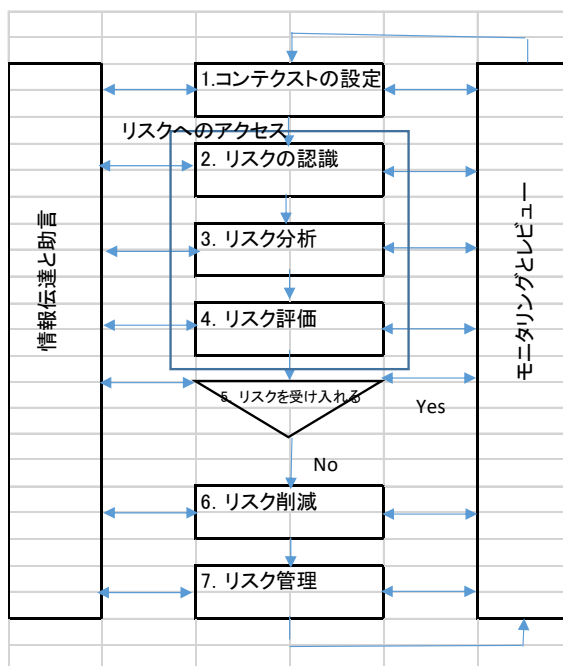
(1) 国家危機管理計画 (National Emergency Management Plan)

国家危機管理計画は危機管理法 2007 に基づいて、2009 年に作成された。同法は法律にのっとり危機管理委員会で議論された結果を基に取りまとめられたものである。同計画は 3 つのパートからなっている。すなわち、パート A はトンガの概要、パート B 災害リスク管理、パート C 緊急対応計画である。

1) パート B 災害リスク削減 (Disaster Risk Reduction : DRR)

本計画では南太平洋応用地球科学委員会 (SOPAC) によって開発された「包括的なハザードおよびリスク管理 (CHARM)」ツールを用いて分析が行われた。

図 2.2.2 にトンガ国における CHARM に基づいた DRR 実施に向けたステップを示す。



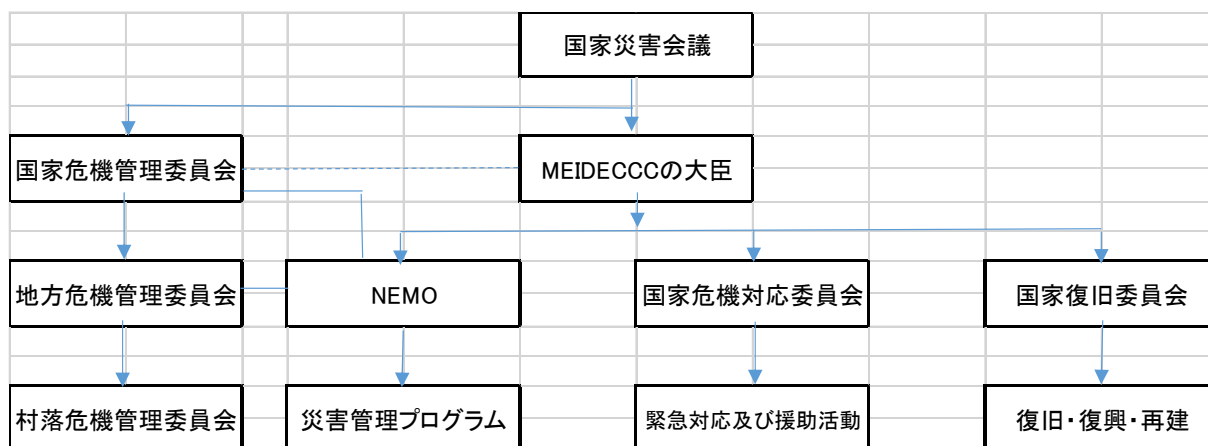
出典：National Emergency Management Plan

図 2.2.2 トンガによる DRR 実施に向けたステップ

(2) 緊急対応手順書 (Emergency Response Procedure)

トンガの国家レベルの緊急対応は NEMO が主導して 24 時間体制で行われている。NEMO には活動できる人材を配置して 365 日 24 時間体制で動いている。また、地方レベル、村落レベルについてはそれぞれ地方危機管理委員会、村落危機管理委員会が対応している。

以下にトンガの緊急対応システムを示す。



出典：National Emergency Response Plan

図 2.2.3 トンガ緊急対応システム

緊急対応手順書には各省庁の役割や概略の対応の手順が書かれている。実際の緊急対応はこれらの手順書の他、詳細な手順書や計画に沿って実施されている。

2.3 気候変動適応計画

2.3.1 Joint National Action Plan 2 on Climate Change and Disaster Risk Management (JNAP 2) 2018-2028

(1) JNAP2 の概要

トンガ政府は 2010 年から 2015 年の 5 年間に計画期間とした気候変動と災害リスク管理のための国家合同行動計画 (Joint National Action Plan on Climate Change and Disaster Risk Management: JNAP) を策定し、実施してきた。主に、組織体制の整備、気候変動基金の設立、気候変動政策の立案などである。

EU からの資金支援などにより、2018 年 5 月に気候変動と災害リスク管理のための国家合同行動計画 2 2018-2028 (Joint National Action Plan 2 on Climate Change and Disaster Risk Management 2018-2028 : JNAP 2) を発表した。本計画では 2016 年に策定した気候変動政策 (2016) に沿っており、ビジョン、ミッション及びゴールが示され、10 の基本方針が示されており、10 年間の計画となっている。また、6 つの目標が示され、それぞれの目標毎にプロジェクトが形成されている。これらの増額は約 1 億 5 千万米ドルである。

トンガ政府はこれらの計画を実施に移しているが、主な主管省庁は MEIDECCC であり、防災組織でもある NEMC も実施管理機関として活動を行っている。

(2) JNAP2 のビジョン、ミッション、ゴール

JNAP 2 は、トンガの気候変動政策 (2016) 年から次のビジョン、ミッション、ゴール、および基本指針を採用している。この気候政策と JNAP 2 は、トンガの気候変動に対する包括的な枠組みと戦略的行動を提供することを目的としている。

ビジョン	トンガは、気候変動や災害リスクの影響に対して回復力があり、現在および将来の市民を保護および保護することができる
ミッション	優れたガバナンスに基づく包括的で参加型のアプローチを通じて回復力のあるトンガを開発し、知識が豊富で積極的なコミュニティを構築し、強力で持続可能な開発経路をサポートする
ゴール	2035 年までに強靱なトンガのビジョンを達成する

出典 : Joint National Action Plan 2 on Climate Change and Disaster Risk Management (JNAP 2)

図 2.3.1 JNAP2 のビジョン、ミッション、ゴール

JNAP2 で示されている 10 の基本方針は表 2.3.1 に示すとおりである。

表 2.3.1 JNAP2 の基本方針

	指導原則	解説
1	未来に向けた強靱なトンガ	強靱なトンガには、気候変動と災害リスクの現実に対処するために、伝統的な知識と価値観を最新の知識と技術と結びつける再設計されたアプローチが必要です。
2	強力なリーダーシップと優れたガバナンス	強靱なトンガの実現には、明確で強力かつ一貫したガバナンスが必要です。
3	総合的、多面的、マルチセクター的なアプローチ	総合的、多面的、マルチセクター、マルチハザードのリスクアプローチが採用されます。このアプローチに固有のものは、予防原則、早期警告、効果的かつ効率的な対応と復旧です。
4	統合と主流化	レジリエントなトンガの設計と開発には、適応と緩和（温室効果ガス排出量の削減）および災害リスク管理への統合的アプローチを含む積極的な変更が必要です。これは、国レベルから地方レベルまで、適用されるすべての法律、政策、計画、および活動に主流化されます。
5	コミュニティの所有権、利害関係者の参加とコラボレーション	強靱なトンガを実現するには、コミュニティの強力なオーナーシップ、すべての利害関係者の参加、すべての政府省庁、民間部門、市民社会の間の協力が重要です。
6	公平性と公正性	イニシアチブ、プログラム、およびプロジェクトは、気候変動や災害に対する脆弱性や能力が異なることを認識しつつ、社会的に不利な立場に置かれたグループへのすべての利益、情報、および支援への公平なアクセスと分配を確保します。
7	ジェンダーの包括性	男性と女性が異なる社会的、環境的、経済的状況に直面していることを認識して、ジェンダーの問題はすべての計画と実施プロセスで考慮されます。気候変動や災害に対処するためのさまざまな性別グループの脆弱性と能力についてのより良い理解が促進されます。
8	継続的な能力開発	レジリエンスを構築するという共通の目標に向けた継続的な取り組みを確実にするために、あらゆるレベルで継続的な能力開発が必要になります。
9	長期的な持続可能性	イニシアチブとプログラムは、トンガ社会のあらゆるレベルで自給自足を確保することに基づいて、長期的で前向きな環境的、社会的、経済的利益をもたらすように設計されます。
10	学際的な科学と証拠に基づく対応	政策の策定、計画、および行動は、科学および技術的に健全なデータ、情報、および知識に基づいており、伝統的な知識の価値と組み合わせられています。

出典：Joint National Action Plan 2 on Climate Change and Disaster Risk Management (JNAP 2)

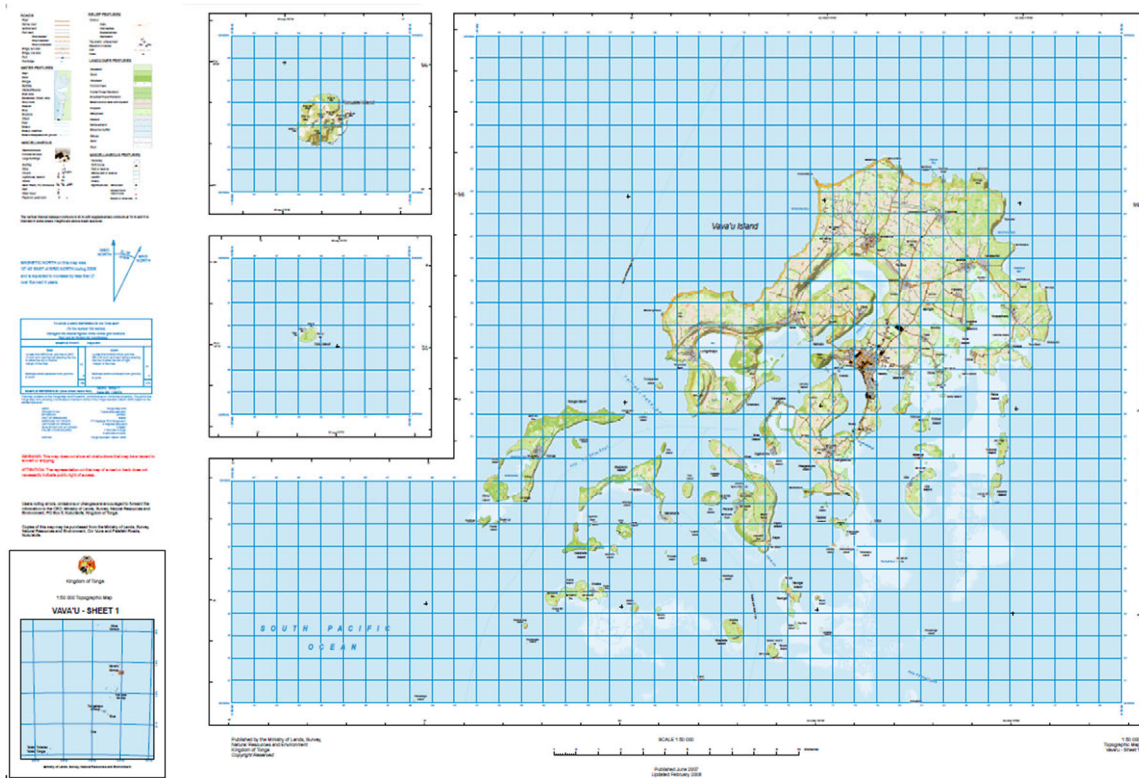
2.4 地形図・衛星画像

トンガ政府等より収集した地形図・衛星画像及び GIS データについて、整理を行った。

2.4.1 地形図

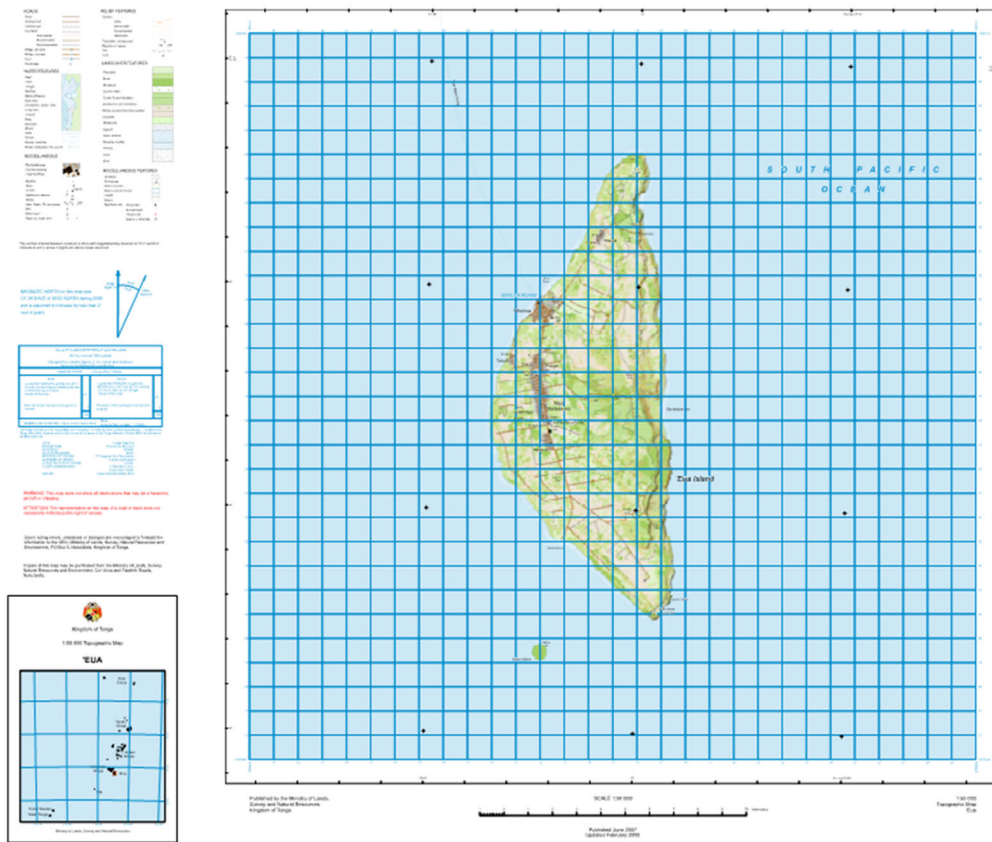
地形図について土地・測量・自然資源・環境省により発行されている。（図 2.4.1～図 2.4.4）

ヴァヴァウ諸島は、ヴァヴァウ本島と周辺の数十の島々からなる。火山島であるため、非常に入り組んだ地形をしており、起伏も激しい地形となっている。ハアパイ諸島も数十の島からなり、東側のリフカ諸島などは比較的平坦な地形となっているが、西側にあるトファ島・カオ島などは火山となっており、切り立った地形となっている。トンガタブ島は全体的にはヌクアロファのある北部中央の標高が低く、平坦な土地となっている。一方、南部・東部は標高が高く、崖地形となっており、西部はなだらかな地形である。エウア島は全体的に標高が高く、周囲は崖地形となっており、オホヌア港のある北西部は唯一標高が低くなっている。



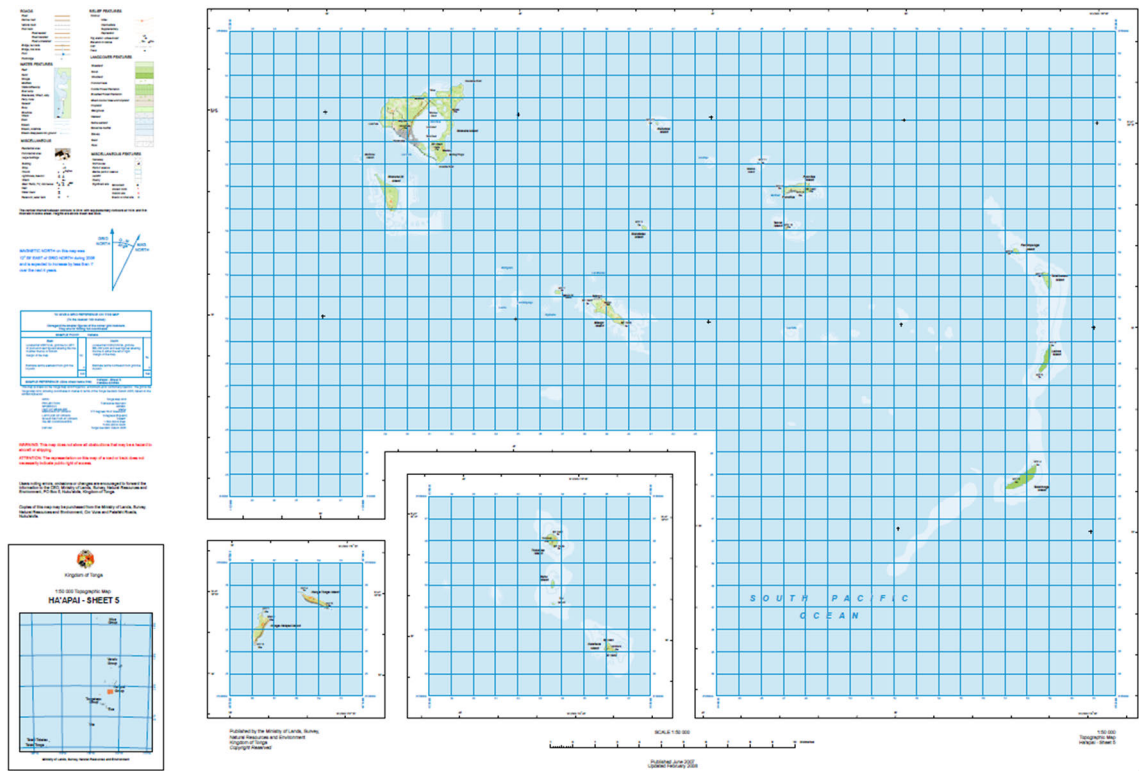
出典：Ministry of Lands, Survey, Natural Resources, and Environment

図 2.4.1 ヴァヴァウ諸島地形図



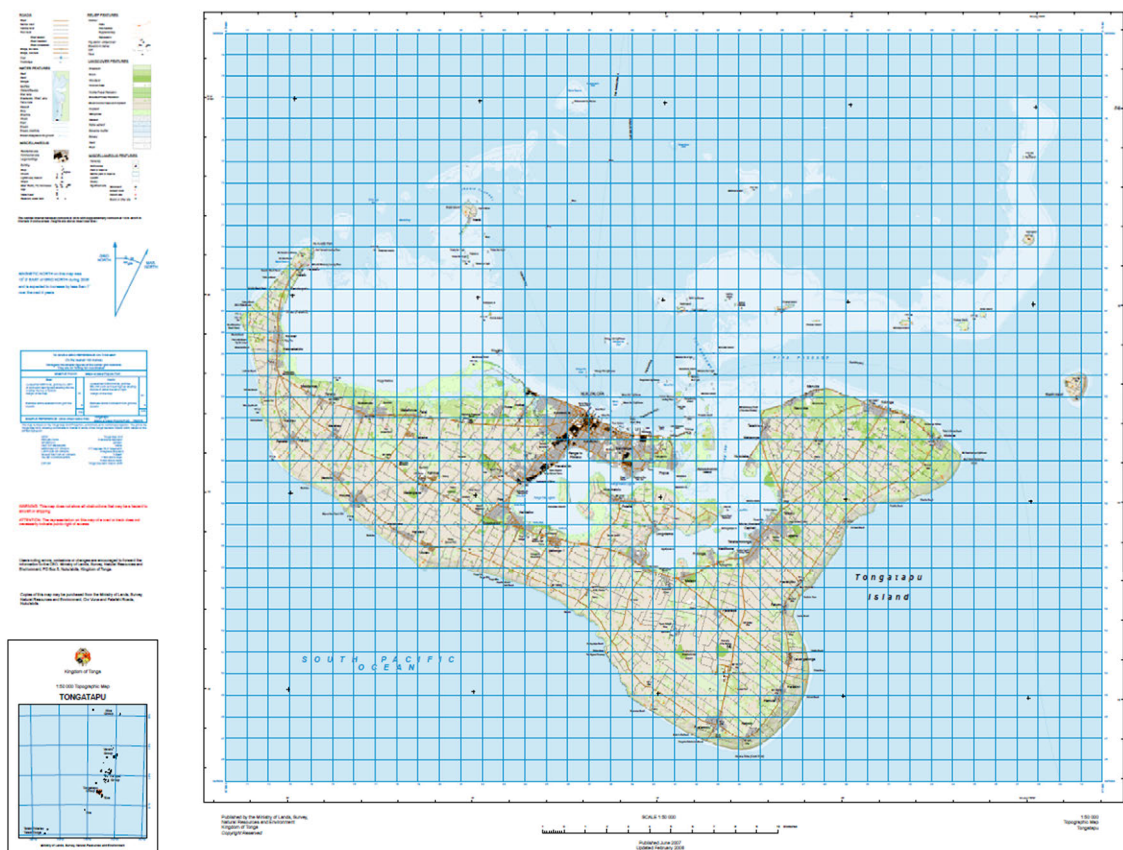
出典：Ministry of Lands, Survey, Natural Resources, and Environment

図 2.4.2 エウア島地形図



出典：Ministry of Lands, Survey, Natural Resources, and Environment

図 2.4.3 ハアパイ諸島地形図



出典：Ministry of Lands, Survey, Natural Resources, and Environment

図 2.4.4 トンガタプ諸島地形図

2.4.2 衛星画像

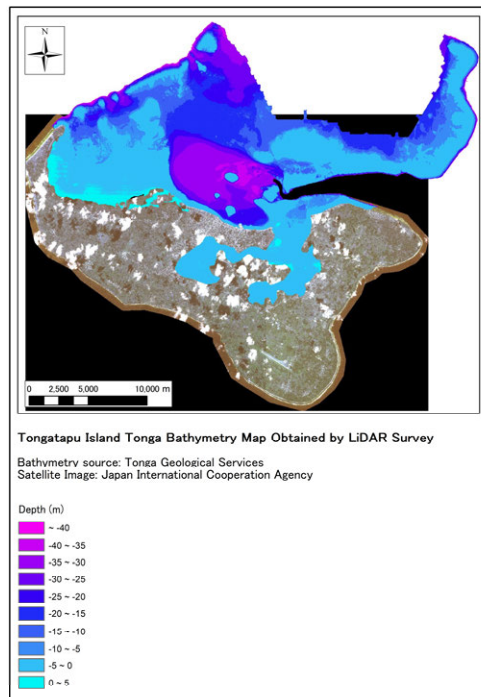
衛星画像については、「トンガ国海底火山噴火に伴う被害状況調査」において、トンガ全域の衛星画像が JICA により整備されている。整備された衛星画像から、浸水範囲の判定等が行われている。

2.4.3 深浅測量データ

今後の高潮・津波ハザードの検討に重要となる深浅測量データについて整理を行った。整理については、主な検討対象であるトンガタブ島、エウア島に対して整理を行った。

(1) 浅海域のデータ (LiDAR データ)

LiDAR データについては、主に浅海域のデータについて LiDAR により取得されたものである。取得されたデータと水深分布を以下 (図 2.4.5) に示す。トンガタブ島北部については、水深 5m 以下の浅海域が広がっている。エウア島のデータは取得されていない。



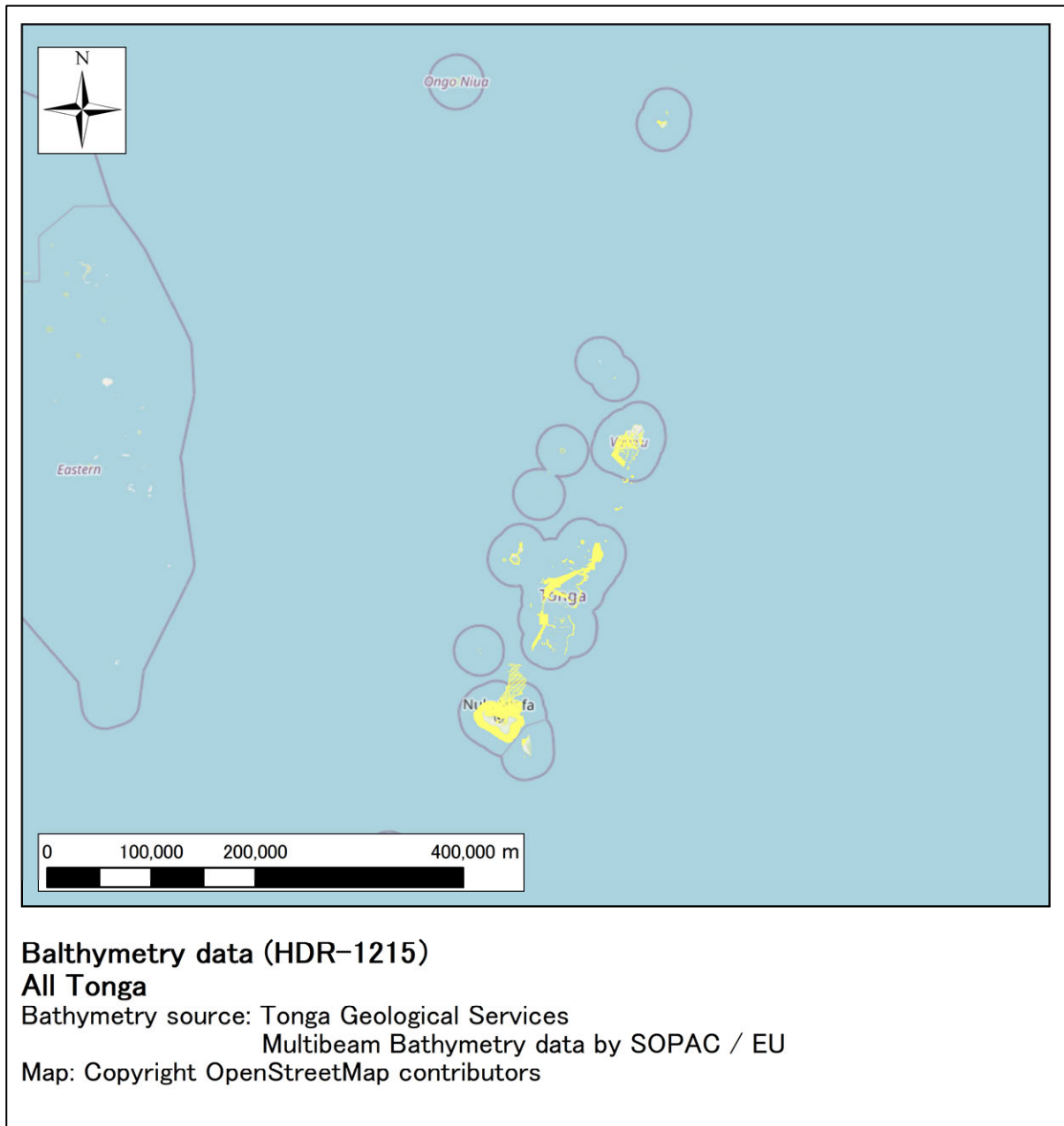
出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.5 トンガタブ島水深図 (LiDAR)

(2) 広域の深浅測量データ

広域の深浅測量データは、南太平洋応用地球科学委員会 (SOPAC、現在は 2011 年より太平洋共同体 (SPC) の一部) により作成された主要島周辺の水深データである。90m、30m、10m、5m の解像度のデータから構成されている。取得範囲はかなり広域であるが、水深値があるのは主要島周辺となっており、水深が深いエリアの測深データはない。以下に全体の水深値取得範囲 (図 2.4.6) とトンガタブ島とエウア島周辺データ (図 2.4.7~図 2.4.10) のみを示す。

なお、水深値は、解像度 5m までであるが、取得範囲はほぼ同じである。後述する数値シミュレーションでは水深が深いエリアについては、GEBCO⁴のデータを用いた。



出典：Tonga Geological Services, SOPAC のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.6 水深図（トンガ全体）

⁴ GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans, <https://www.gebco.net/>

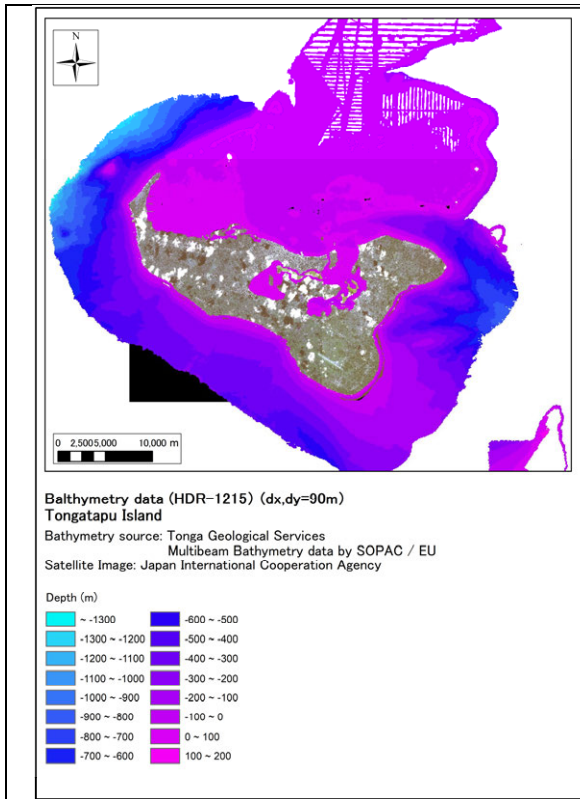


図 2.4.7 水深図 (トンガタブ島、解像度 90m)

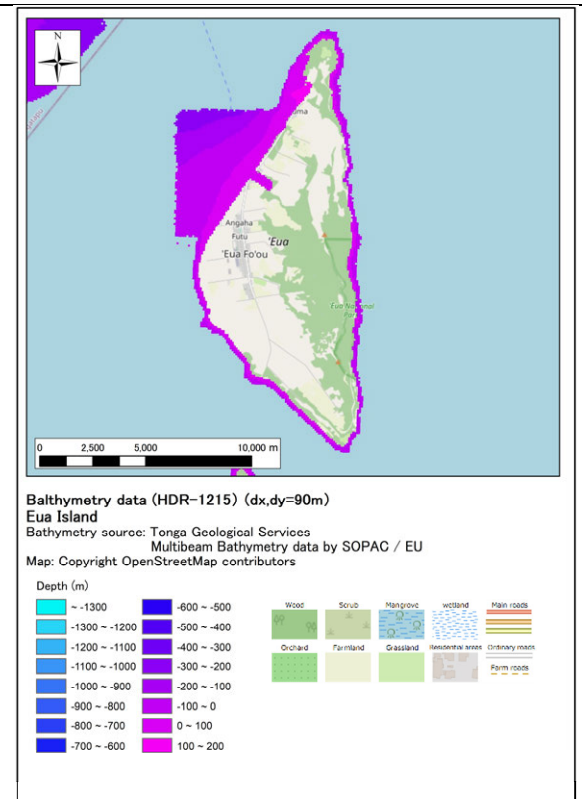


図 2.4.8 水深図 (エウア島、解像度 90m)

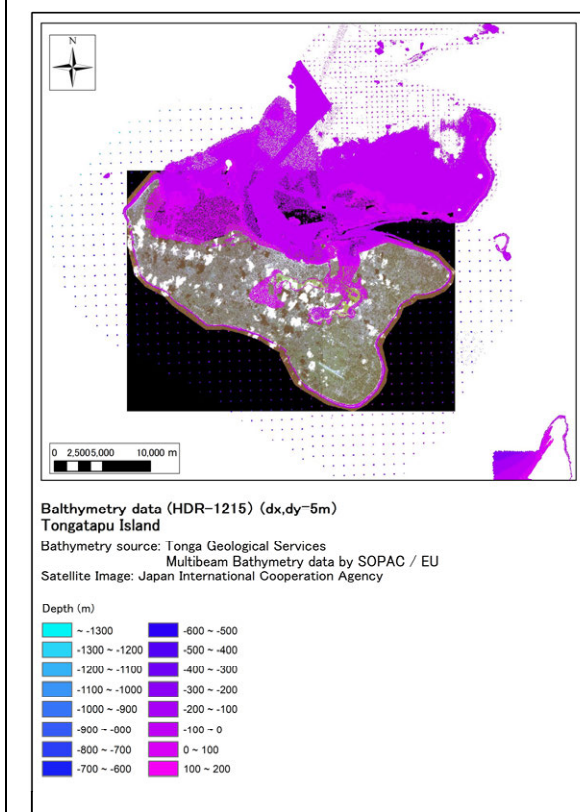


図 2.4.9 水深図 (トンガタブ島、解像度 5m)

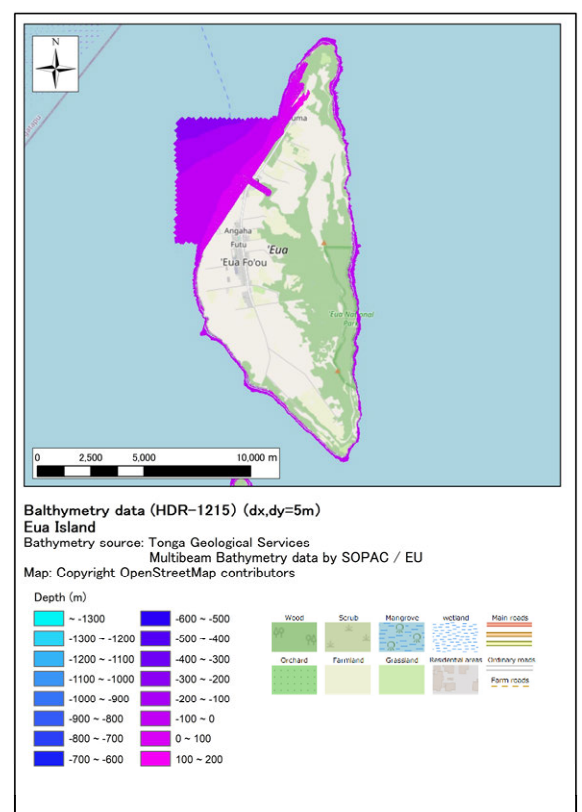


図 2.4.10 水深図 (エウア島、解像度 5m)

出典：Tonga Geological Services, SOPAC のデータを用いて JICA 調査団が作成

2.4.4 暴露情報

トンガ政府より、道路等の各種インフラや公共施設建物等の GIS データを収集し、今後検討するハザードに対する暴露情報として整理を行った。整理結果について以下に示す。各データの背景図については地形図とし、エウア島については、地形図がなかったため、衛星写真とした。対象としては、トンガタブ島・エウア島を対象に情報整理した。

なお、この情報はあくまでトンガ政府が持つ GIS データを元に説明を加えている。データに含まれない情報については触れていない場合がある。

(1) 道路

トンガタブ島の道路網は、全域に張り巡らされている（図 2.4.11～図 2.4.12）。特に人口の集中するヌクアロファ地区は道路網が密になっている。比較的標高の南部や東部は海岸近傍の低平地に沿った主要道路はなく、海岸へのアクセス路が一定間隔であるだけである。エウア島は、丘陵となっているため、道路網は島の西側に集中しており、特に河口部にあるオホヌア、丘陵上のパンガイ～コロマリエ付近の密度が高い。

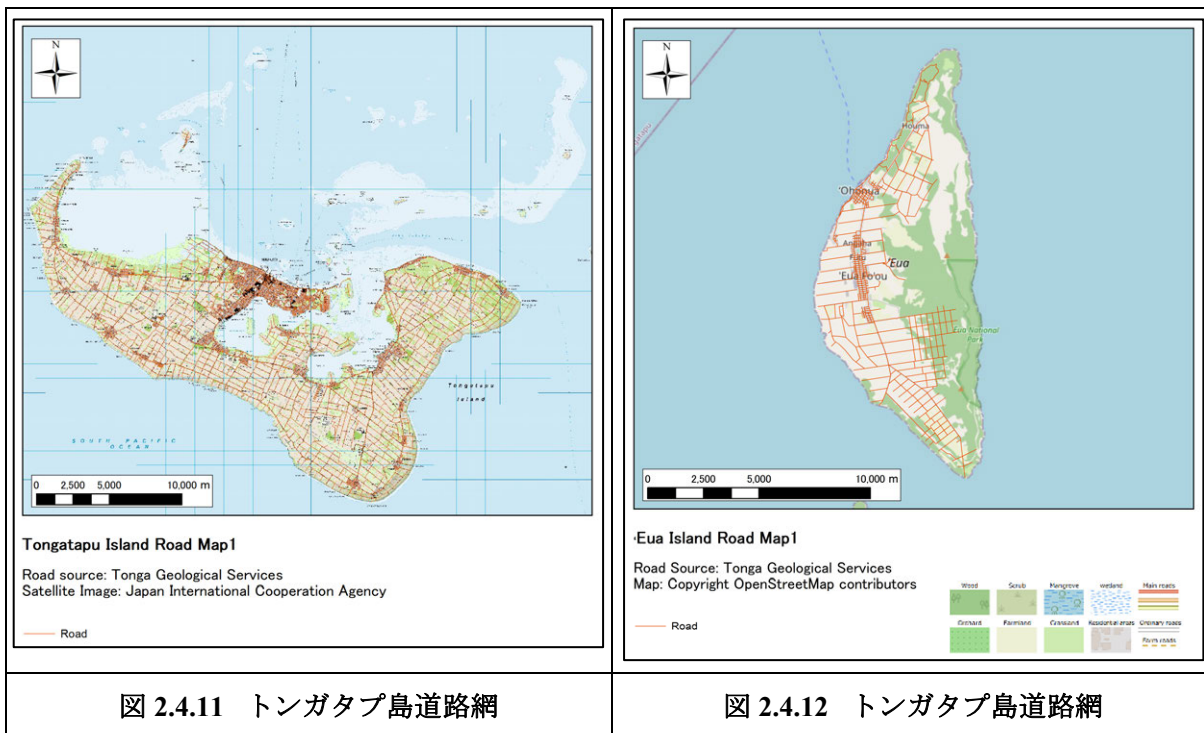


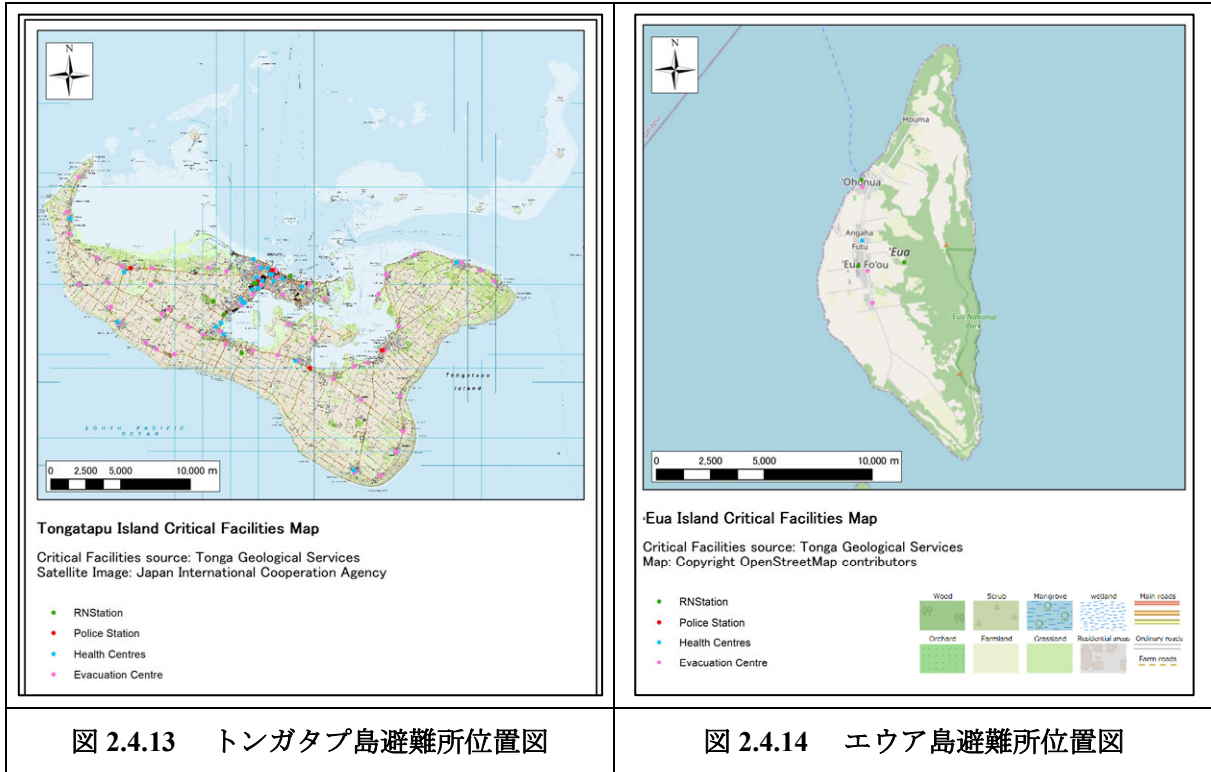
図 2.4.11 トンガタブ島道路網

図 2.4.12 トンガタブ島道路網

出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

(2) 重要施設

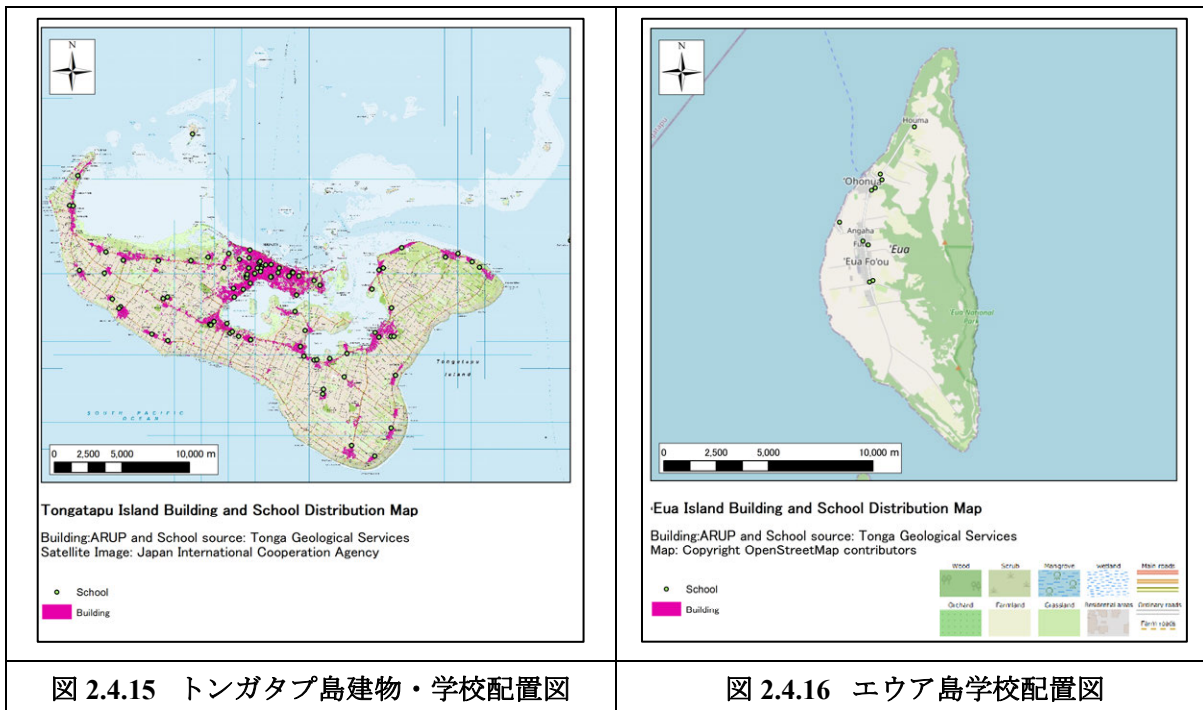
重要施設の配置を以下に示す（図 2.4.13～図 2.4.14）。警察署や医療機関は人口集中地区に配置されている。また、避難所は、トンガタプ島全域の主要な集落に配置されている。エウア島も同様であるが、トンガタプ島と比較して各施設の数は少ない。重要施設は標高が高いところに配置されているものばかりではなく、低いところに配置されているものもある。



出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

(3) 建物と学校

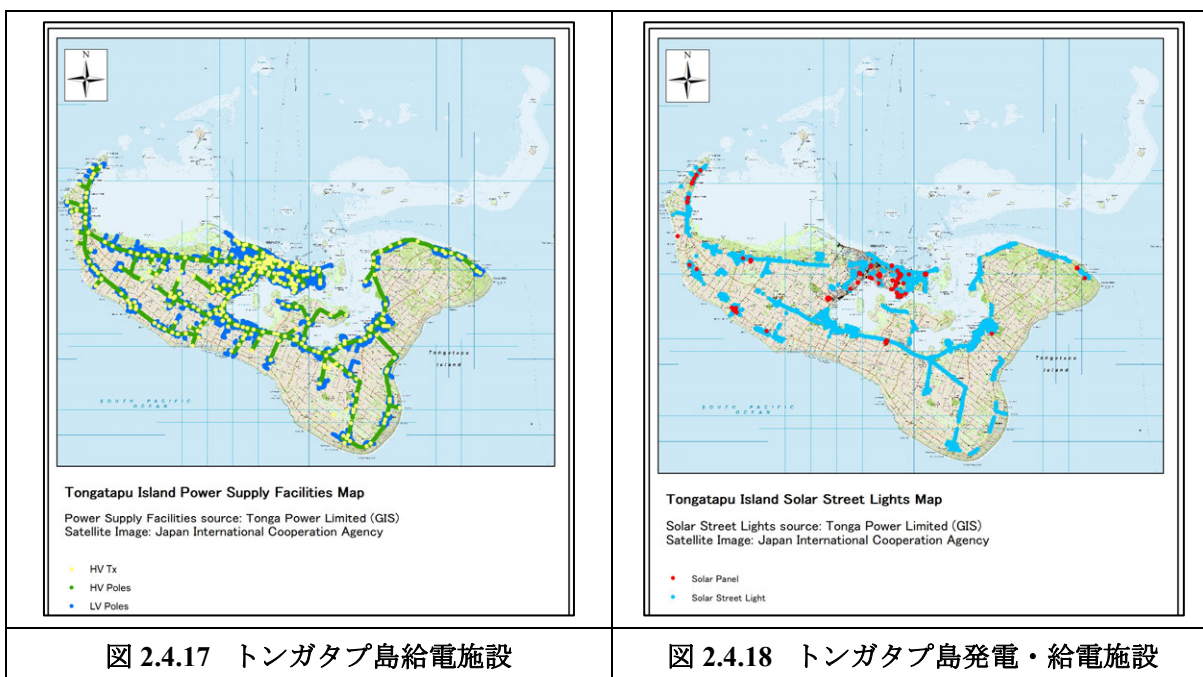
建物（一般住宅を含む建築物）と学校分布図を以下に示す（図 2.4.15～図 2.4.16）。当然ながら、建物は集落に集中しており、学校も集落に 1 箇所程度位置している。ヌクアロファ地区は特に建物・学校が集中している。なお、エウア島は建物データがないため、表示していない。



出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

(4) 配電施設

トンガタプ島の電力配電施設の配置図、ソーラー街灯施設の位置を図 2.4.17、図 2.4.18 に示す。



出典：Tonga Power Limited(GIS)のデータを用いて JICA 調査団が作成

(5) 給水施設

トンガタプ島の給水施設の配置図を図 2.4.19、井戸の配置と給水施設の配置を図 2.4.20 に示す。トンガタプ島のヌクアロファでは、井戸を水源とする上水道システムで給水が行われている。エウア島を図 2.4.21、図 2.4.22 に示す。

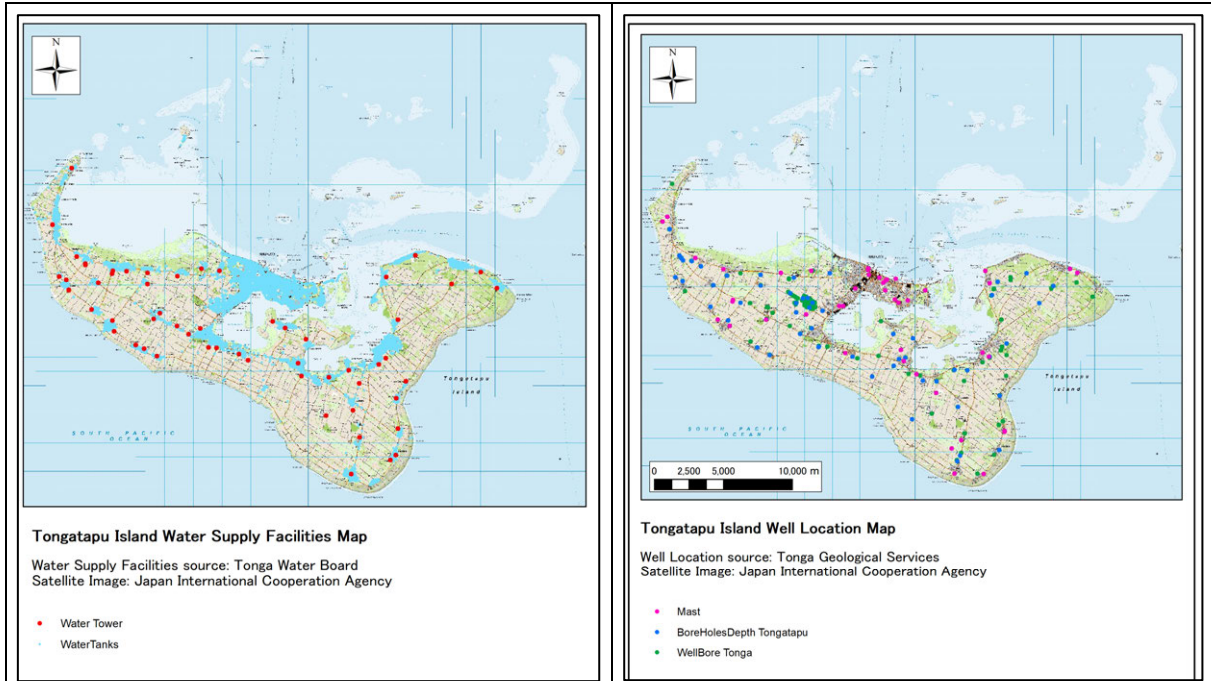


図 2.4.19 トンガタプ島給水施設

図 2.4.20 トンガタプ島井戸分布図

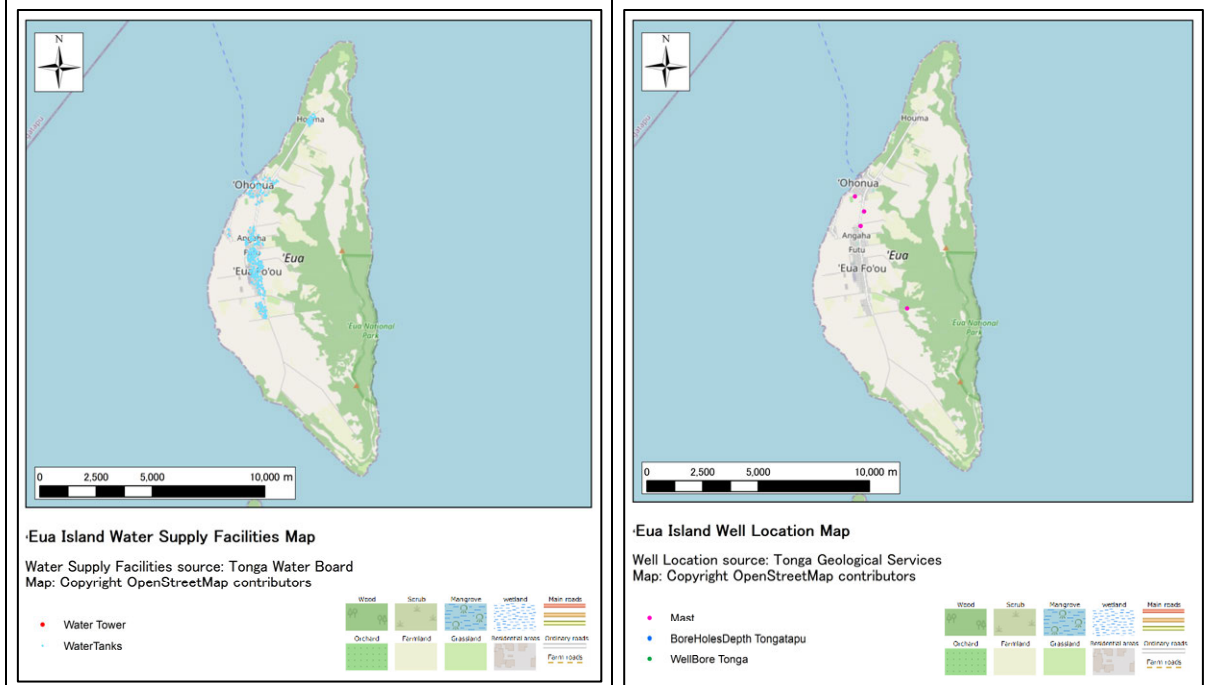


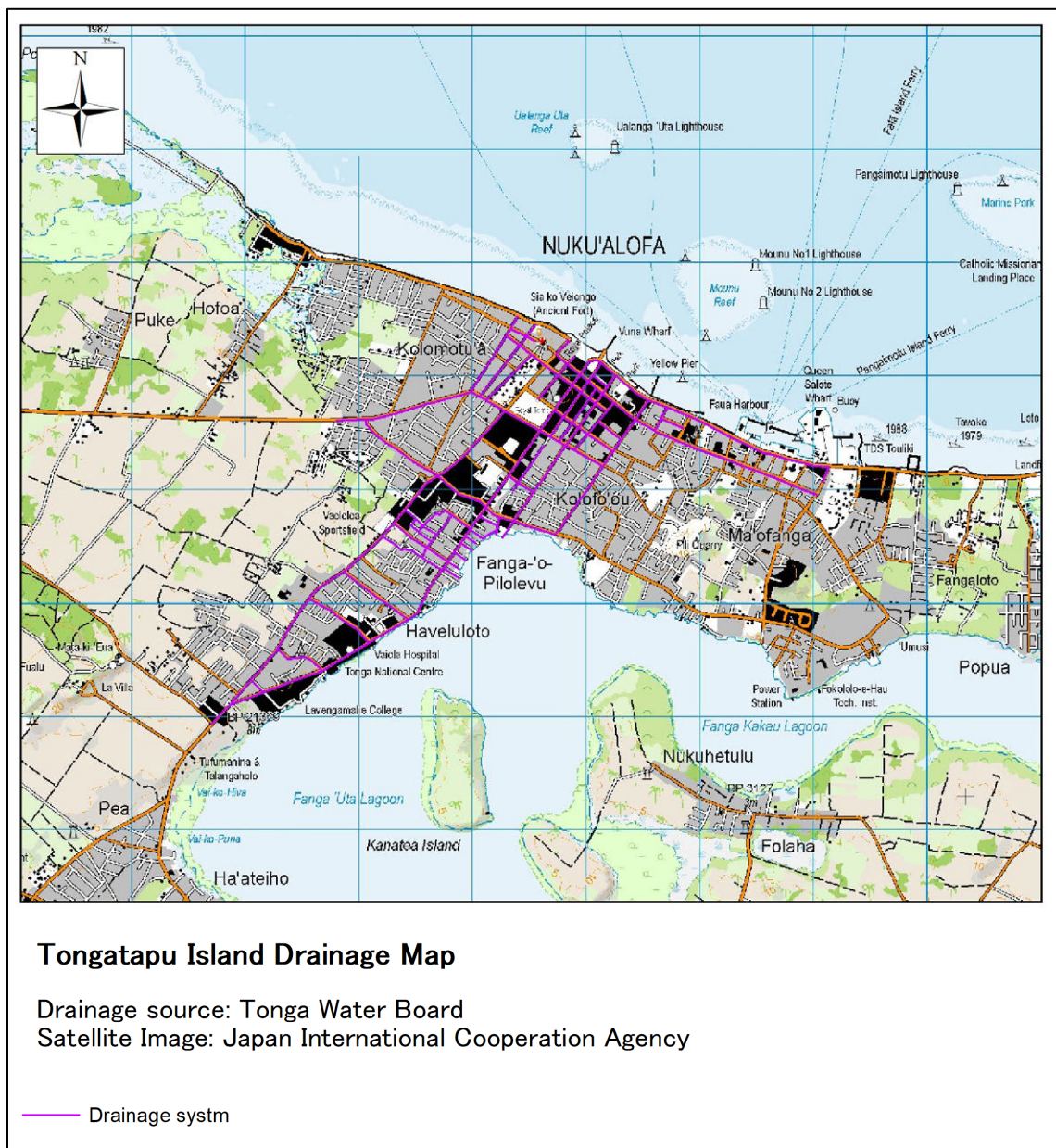
図 2.4.21 エウア島給水施設

図 2.4.22 エウア井戸分布図

出典：Tonga Water Board のデータを用いて JICA 調査団が作成

(6) 排水施設

排水施設の配置図を示す。対象はトンガタプ島ヌクアロファである。

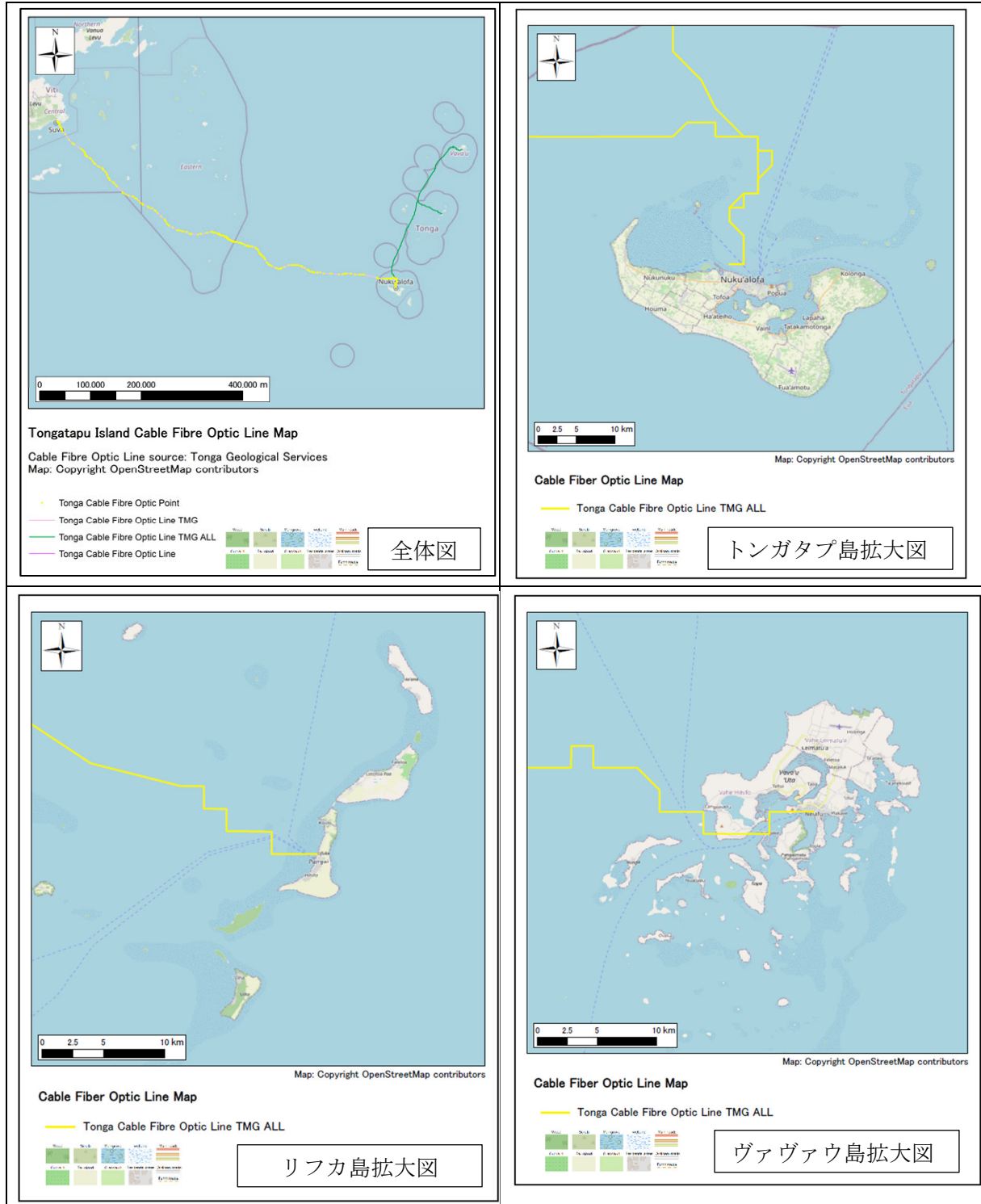


出典：Tonga Water Board のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.23 ヌクアロファ排水施設排水図

(7) 海底ケーブル

海底ケーブル配置図を図 2.4.24 に示す。海底ケーブルはオーストラリアからトンガタブ島、トンガタブ島から他の島に接続されている。なお、2022 年の HTHH 噴火津波で、国際、国内の両ケーブルが切断されたが、前者は同年 2 月、後者は 2023 年 7 月で修復されている。

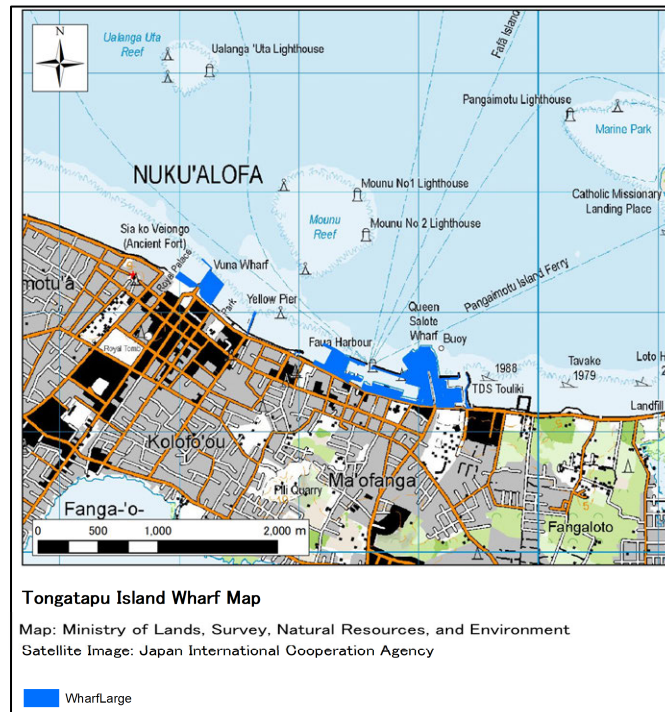


出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.24 ファイバーケーブル配線図

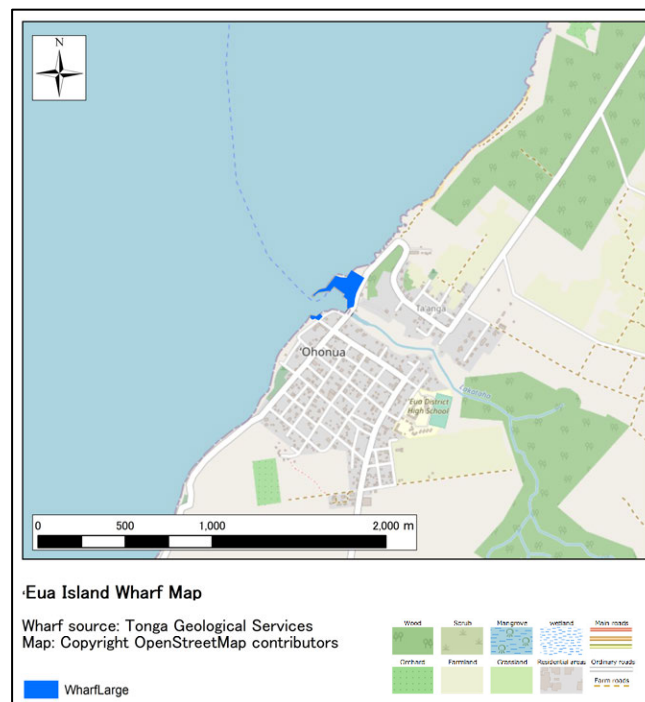
(8) 港湾施設

トンガタブ島およびエウア島の港湾施設位置を図 2.4.25～図 2.4.26 に示す。トンガタブ島はヌクアロファに大規模港湾施設があり、エウア島は河川河口部にあるオホヌアに港湾施設が設置されている。



出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.25 トンガタブ島港湾施設

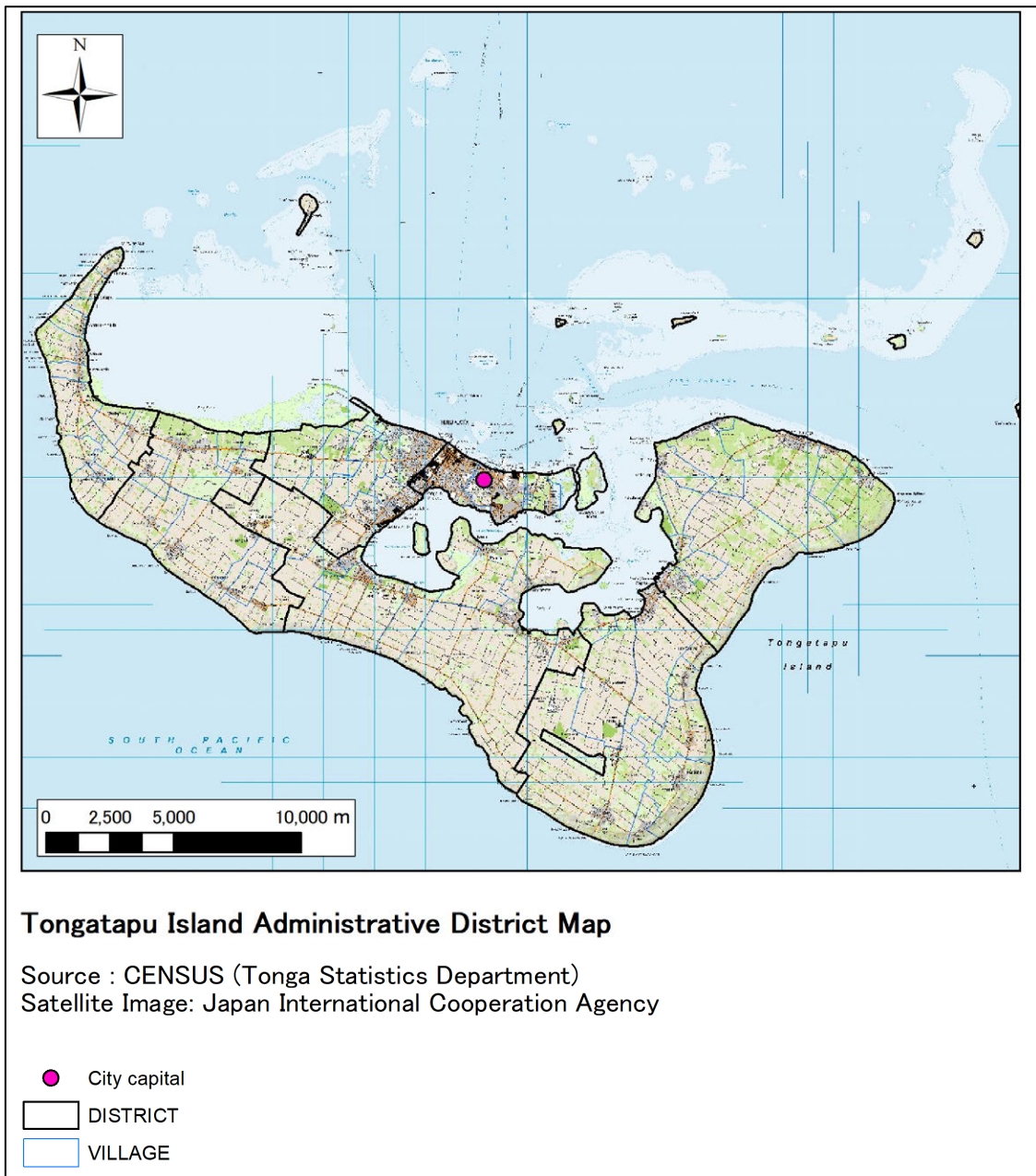


出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.26 エウア島港湾施設

(9) 行政区域

トンガタプ島の行政区域区分図を図 2.4.27 に示す。トンガタプ島は、7つの地区 (District) に分かれており、その中でさらに村 (Village) に分かれている。

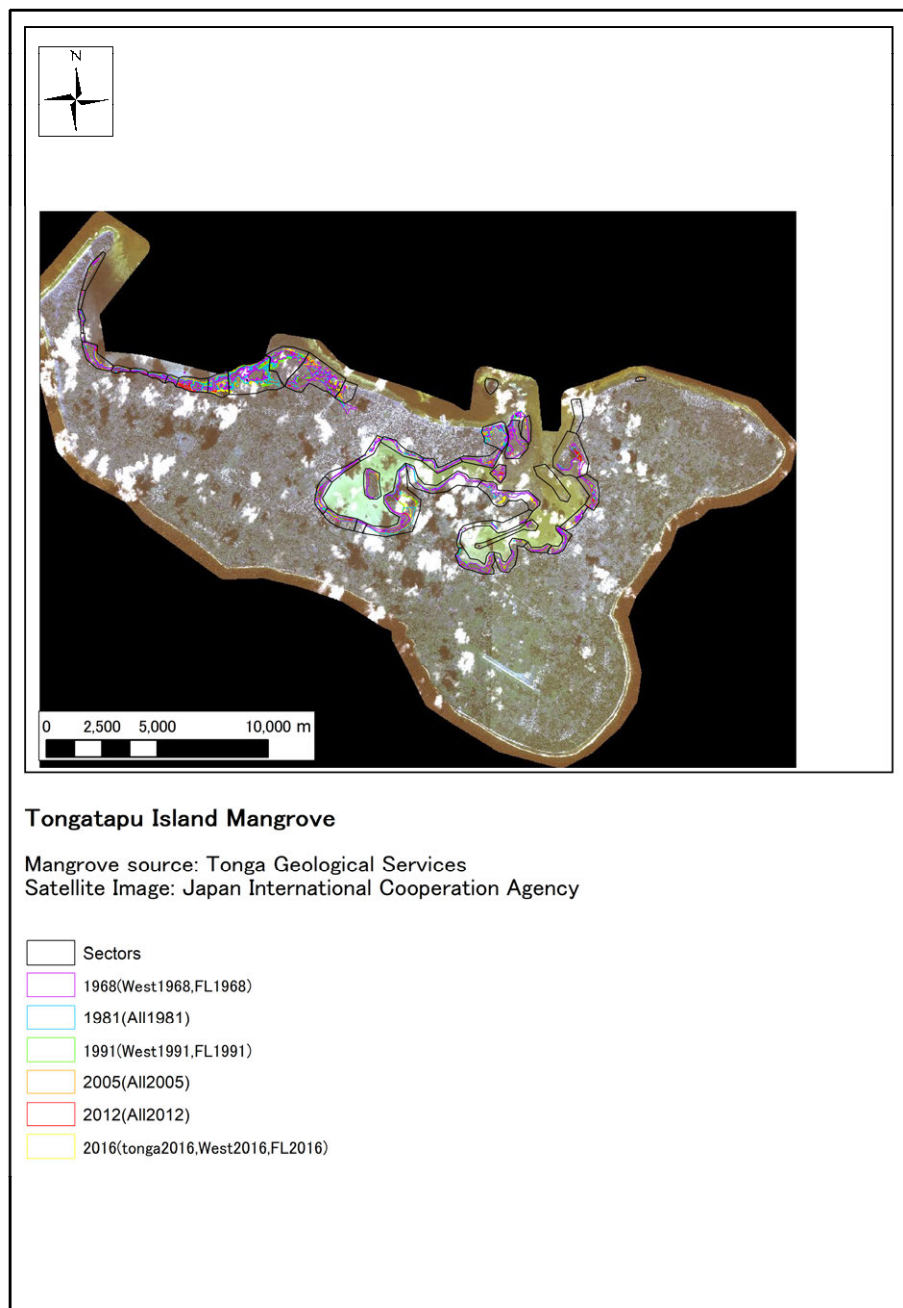


出典：Tonga Statistics Department のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.27 トンガタプ島行政区域図

(10) マングローブ

マングローブの分布については、1968年から経年的に調査が行われており、その分布が調査されている。トンガタプ島のマングローブの分布図を図 2.4.28 に示す。おもにマングローブが分布しているのはトンガタプ島の北西、中央の湾内である。

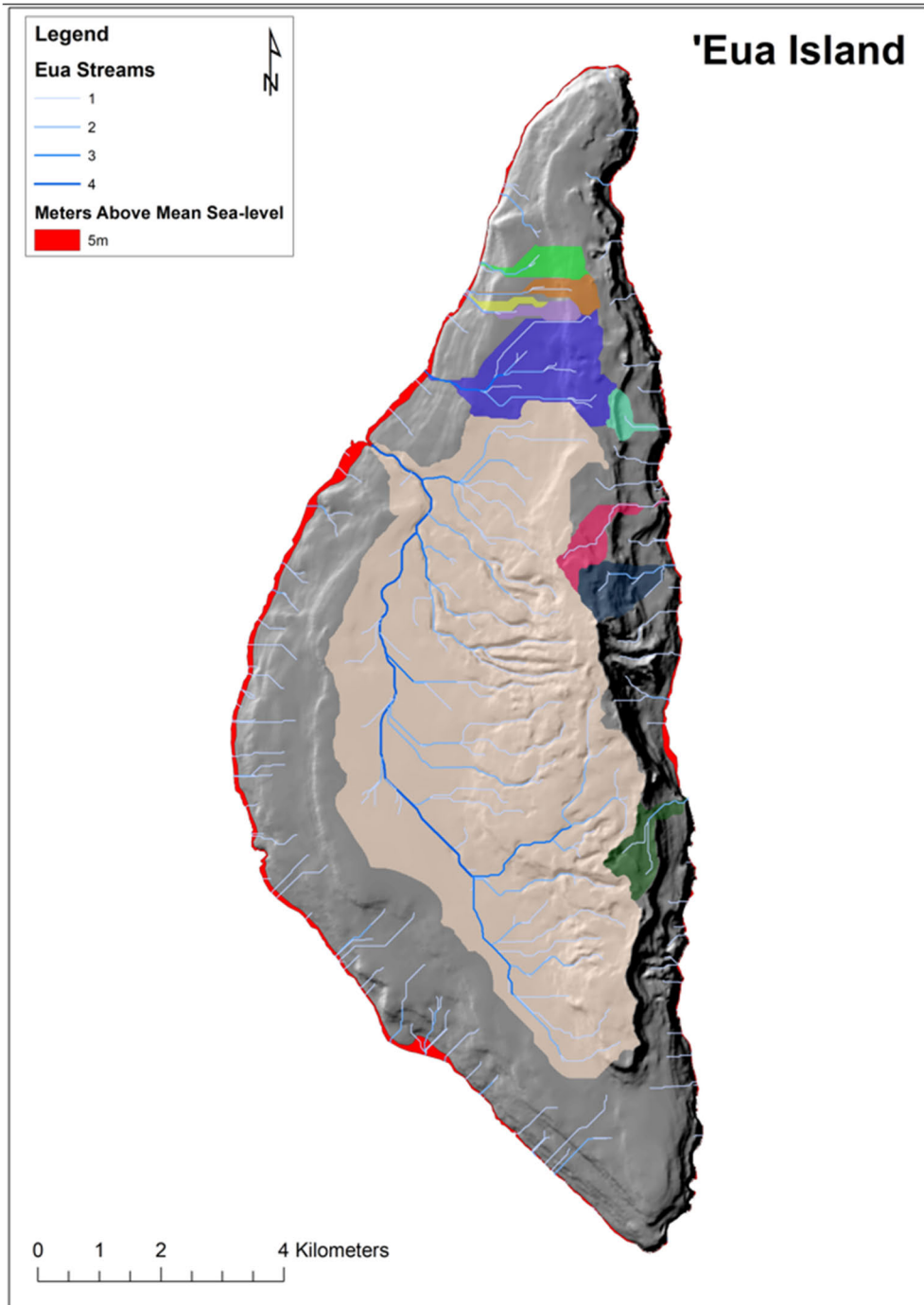


出典：Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.4.28 トンガタプ島マングローブ分布図

(11) 河川 (エウア島)

エウア島には河川があり、同島の中心部であるオホヌアに注いでいる。また、河口には港湾施設が位置している。エウア島は、丘陵性の島となっており、低平地が河口部を除いて存在せず、東部に連なる丘陵から西側へ注いでいる。



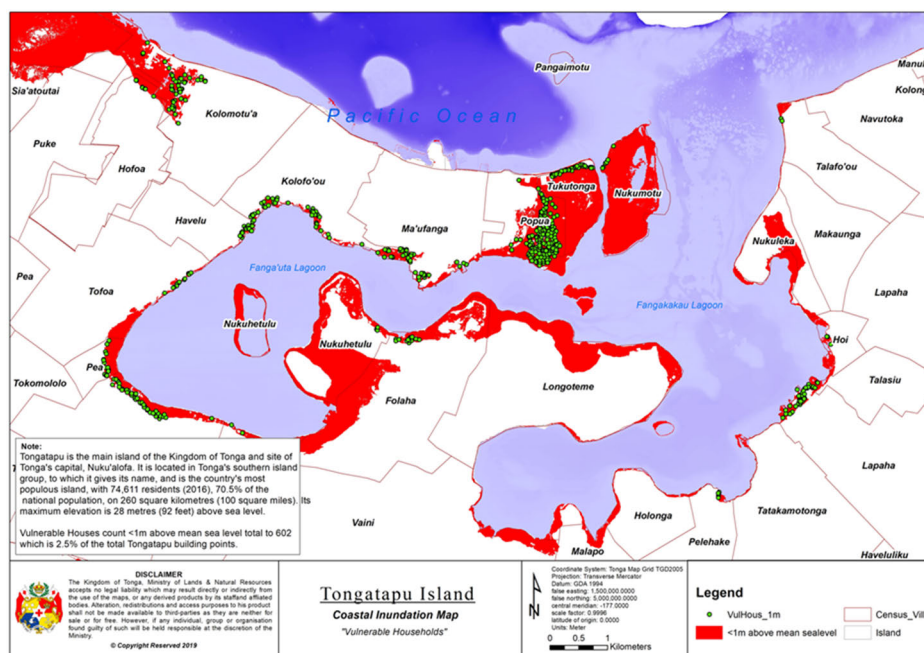
出典：Tonga Geological Services

図 2.4.29 エウア島河川図

2.4.5 ハザードマップ

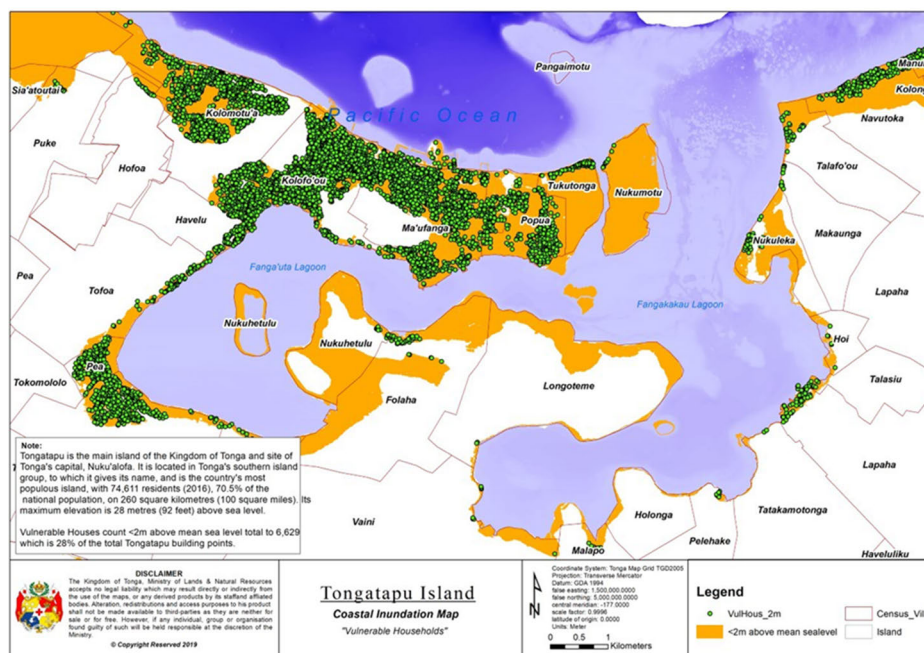
(1) 浸水ハザードマップ

トンガ政府による海岸部の浸水ハザードマップを図 2.4.30 から図 2.4.34 に示す。これは、トンガタブ島の地盤高に基づき、3m まで高潮や津波により水位が上がって浸水が生じた場合に、どのような被害が生じるか検討を行い、沿岸災害に対するリスクマップとして整理したものである。なお、本評価は地盤高のデータでのみ評価したものである。



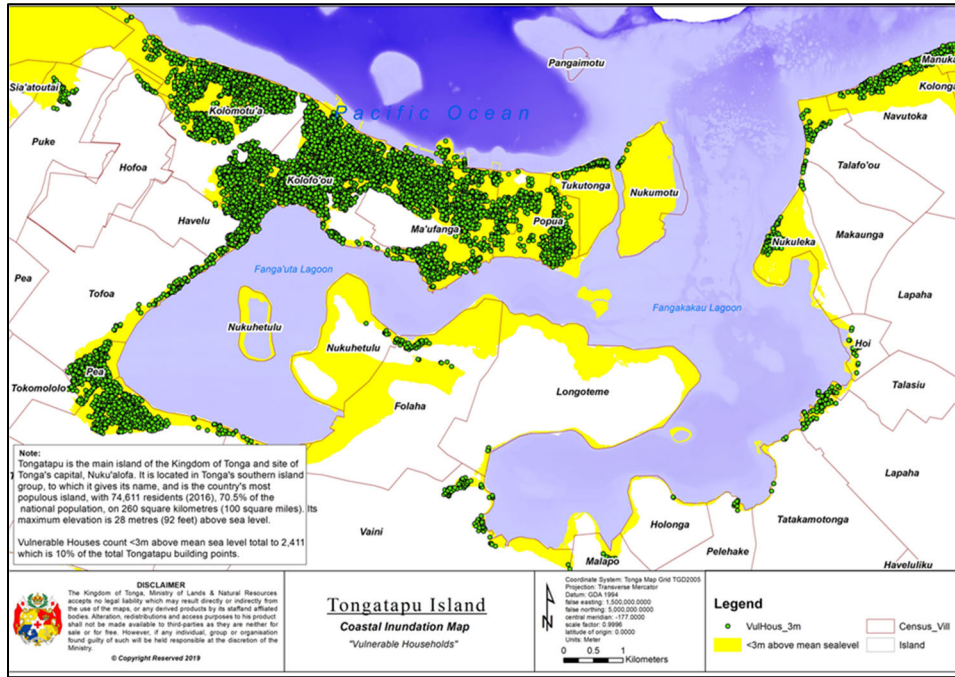
出典：Ministry of Lands & Natural Resources

図 2.4.30 沿岸浸水マップ（平均海面より水位が 1m 上がった場合）



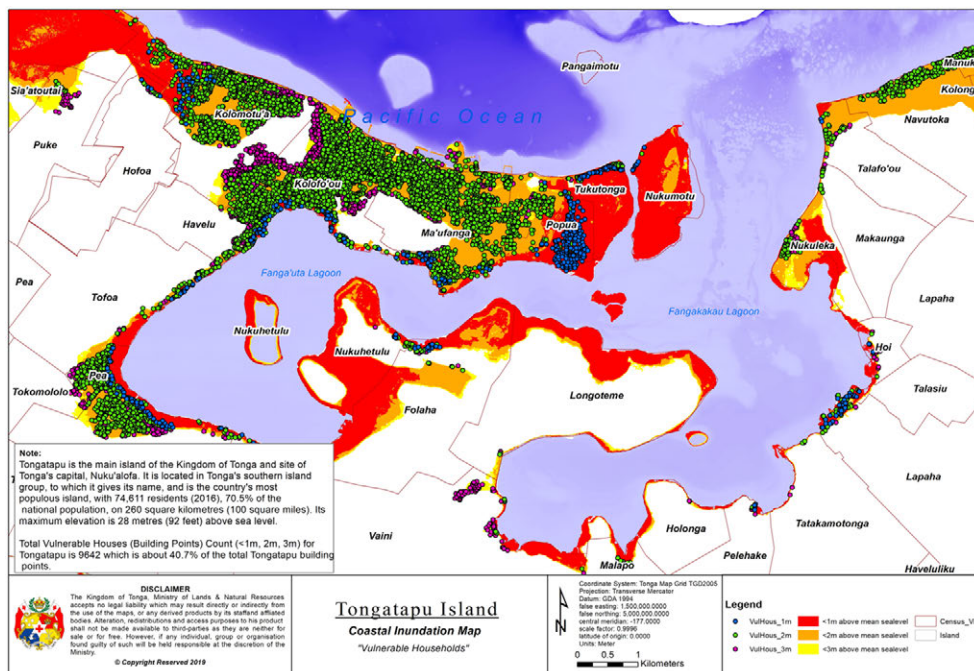
出典：Ministry of Lands & Natural Resources

図 2.4.31 沿岸浸水マップ（平均海面より水位が 2m 上がった場合）



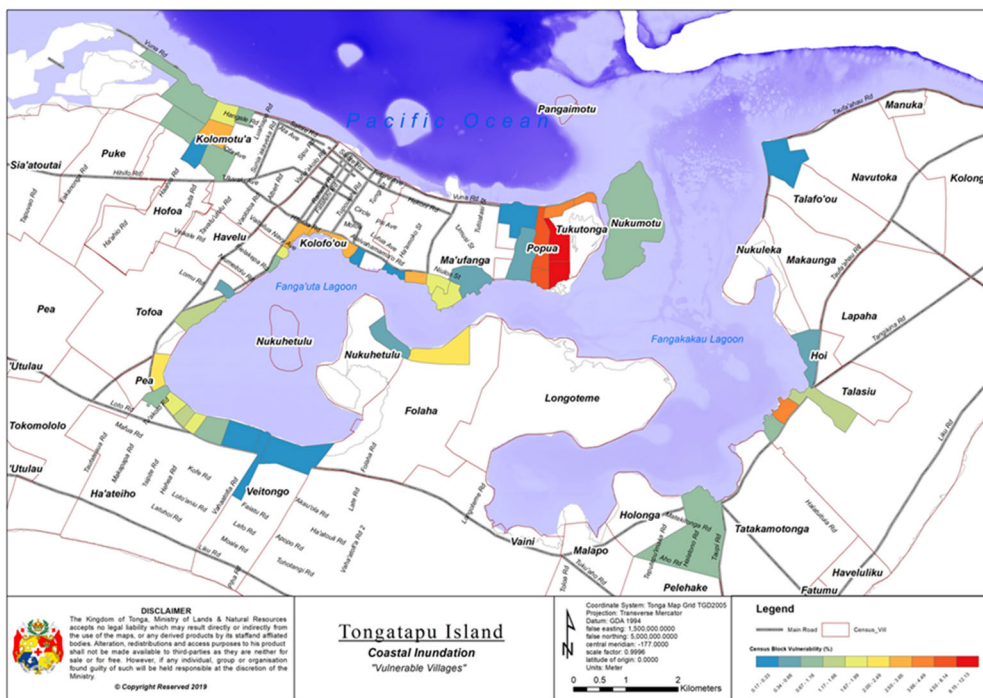
出典：Ministry of Lands & Natural Resources

図 2.4.32 沿岸浸水マップ（平均海面より水位が3m上がった場合）



出典：Ministry of Lands & Natural Resources

図 2.4.33 沿岸浸水マップ（3レベルの浸水マップを重ねて表示したマップ）



出典：Ministry of Lands & Natural Resources

図 2.4.34 沿岸浸水災害に対して脆弱な村（平均海面より水位が 3m 上がった場合）

特に水位が 1m 上がっただけで浸水する家屋が多い村を沿岸浸水に対して脆弱性が特に高いと定義している。これによるとツクトンガ、ポプア村が特に沿岸災害に対して脆弱性が高い。

2.5 他の開発パートナーが作成した資料

他の開発パートナーが作成したトンガにおけるリスク情報の一覧を表 2.5.1 に示す。他の開発パートナーによりトンガのハザード評価が行われている。ハザード評価については、主に想定最大について検討が行われている。

表 2.5.1 トンガにおいて公表されているリスク情報

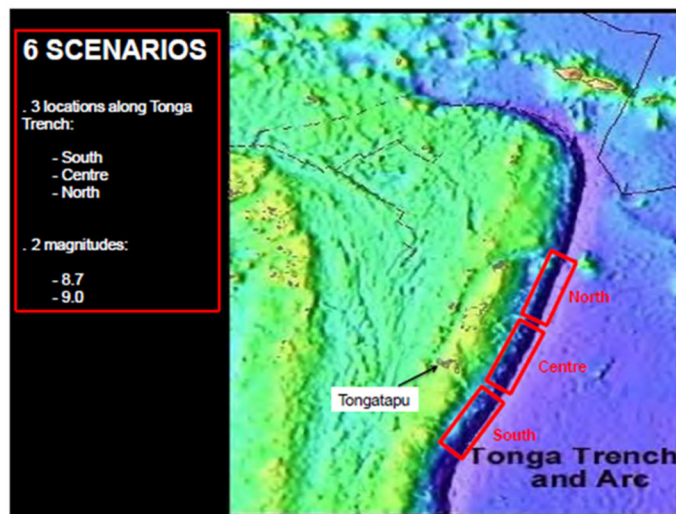
No.	組織	資料名	備考
1.	SOPAC South Pacific Applied Geoscience Commission	南西太平洋津波リスクアセスメント能力強化（フェーズ 3）津波シミュレーションマップ（SOPAC2012）	津波のハザード評価
2.	IDMC Internal Displacement Monitoring Center	Sudden-Onset Hazards and the Risk of Future Displacement in Tonga	暴風災害、地震災害、津波災害のハザード評価
3.	UN OCHA United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs	TONGA: Natural Hazard Risks	地震、火山、熱帯低気圧のハザード評価
4.	ECHO European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations	Tonga and Pacific Ocean Volcanic eruption and tsunami –DG ECHO Daily Map 17/01/2022	2022 年 HTHH の海底火山噴火の評価

出典：JICA 調査団作成

2.5.1 南太平洋応用地球科学委員会⁵ (SOPAC)

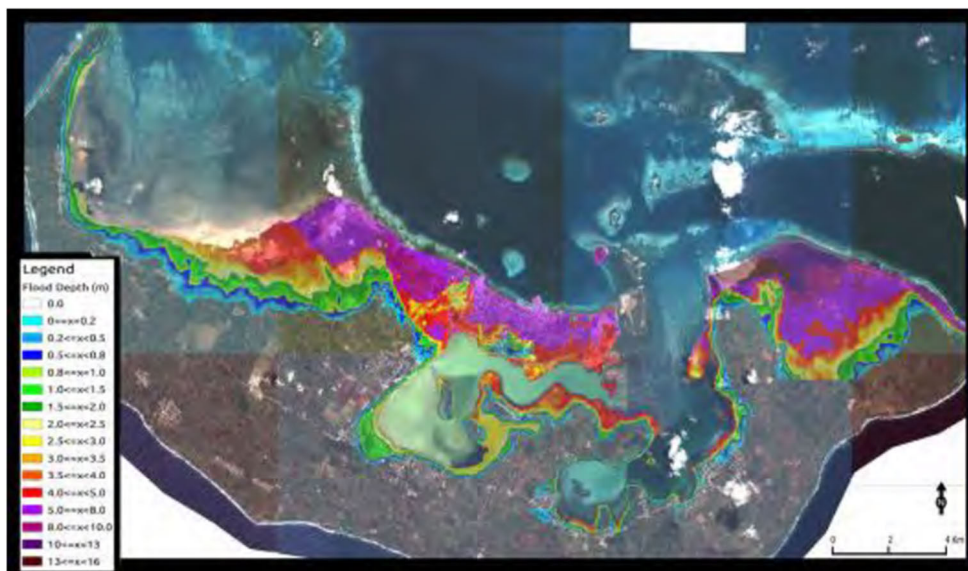
津波ハザードマップについては、トンガタプ島地域のみであるが詳細なハザードマップがあり、SOPAC プロジェクトによって 2012 年に作成された南西太平洋津波リスクアセスメント能力強化 (フェーズ 3) 津波シミュレーションマップがある。

SOPAC プロジェクトによって作成された津波ハザードマップは、トンガタプ島の東に位置するトンガ海溝において北、中央、南の 3 つの津波源 (震源) を設定し、地震の規模をそれぞれ M8.7 または M9.0 とした場合の 6 つのシナリオにより検討されたものである (図 2.5.1)。6 つのうち最悪のシナリオは M9.0 の地震がトンガ海溝の中央で発生した場合 (図 2.5.2) であり、最も軽いシナリオは、M8.7 の地震がトンガ海溝の北側で発生した場合である。



出典：SOPAC2012

図 2.5.1 波源域と 6 つの津波シナリオ

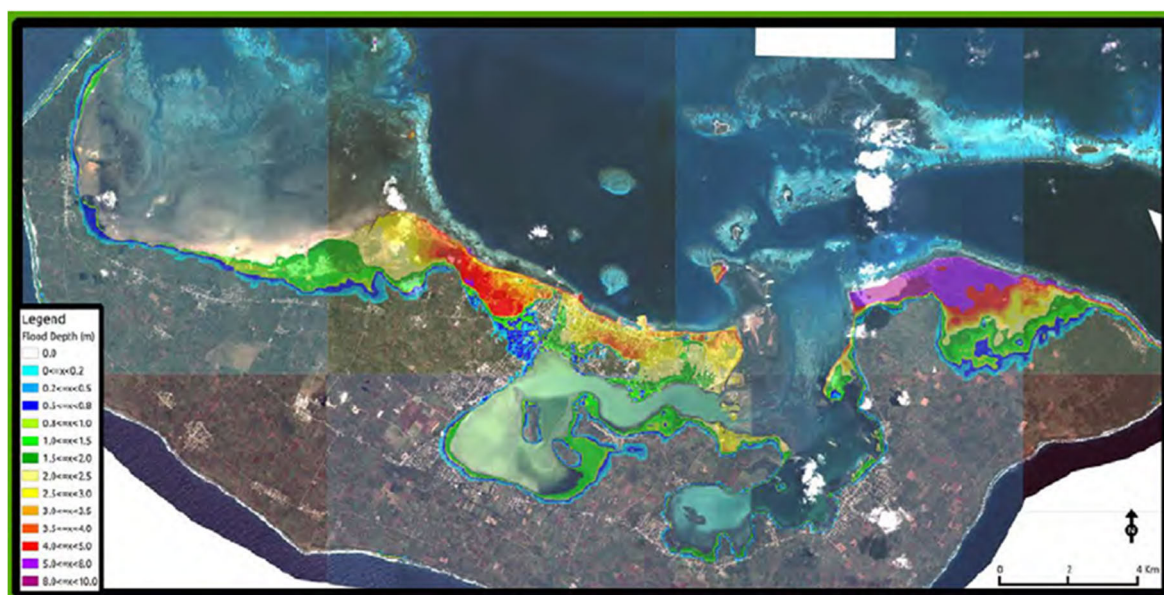


出典：SOPAC2012

図 2.5.2 トンガ海溝中央で M9.0 の地震が発生した場合の津波最大浸水深 (最悪シナリオ)

⁵ South Pacific Applied Geoscience Commission

なお、「トンガ王国 全国早期警報システム導入及び防災通信能力強化計画 準備調査」(JICA)において、施設及び機材計画を行うこととしたシナリオは、SOPAC2012で想定した6つのシナリオのうち、トンガタブ島で最も発生する可能性の高い地震規模かつ最も影響力のある震源位置の設定である「M8.7の地震がトンガ海溝中央(トンガタブ島の東)で発生した場合」を採用している(図2.5.3)。その理由として、以下の2つをあげている。1つめの理由は、過去150年の災害記録において、最大の地震は1977年に発生したM8.3であり、M9.0規模の地震は記録されていないことである。2つめの理由は、SOPAC2012の報告書においてもM9.0の最悪シナリオは過大であるとされており、津波防災上、想定し得る最悪シナリオに備えることは重要であるが、そのような地震が発生する確率は低いことである。以上から、SOPACで想定した6つのシナリオから「M8.7の地震がトンガ海溝中央(トンガタブ島の東)で発生した場合」を採用している。



出典：SOPAC2012

図 2.5.3 トンガ海溝中央で M8.7 の地震が発生した場合の津波最大浸水深

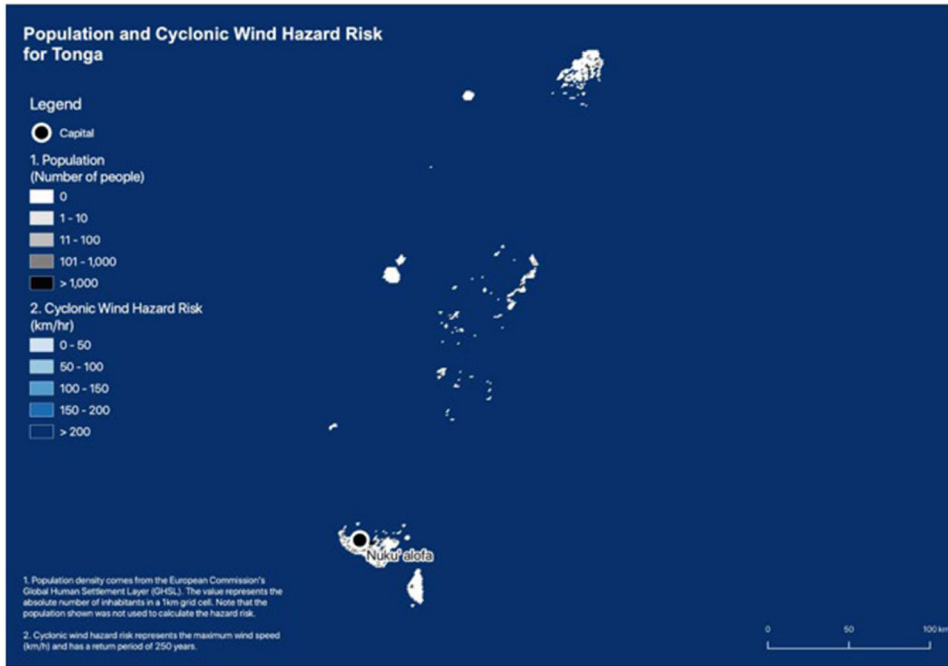
2.5.2 国内避難民監視センター (IDMC)

2.5.2 国内避難民監視センター (Internal Displacement Monitoring Center : IDMC) では、サイクロンによる暴風災害と地震、津波災害についてそのハザード評価をしている。各ハザードマップを図 2.5.4～図 2.5.6 に示す。

- 暴風災害については、トンガ周辺域は最大風速 200km/hr (55m/s) と評価されており、その再現確率は 250 年とされている。
- 地震災害については、地震動 (地表面の加速度) が 150cm/s^2 (150Gal) と評価されており、その再現確率は 475 年とされている。

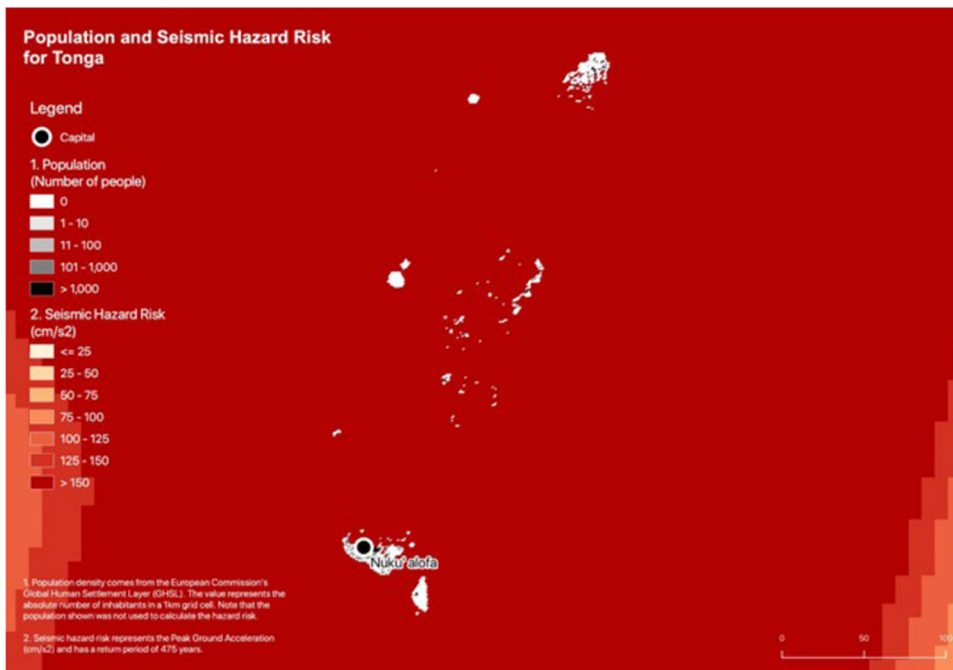
津波災害については、各島周辺の比較的浅海部での波高が 1～5m と評価されており、その再現確率は 475 年とされている。

公開されているハザードの情報は対象スケールが広域であり、インフラ強靱化および復旧・復興のメニューは解像度が低いため検討できない。



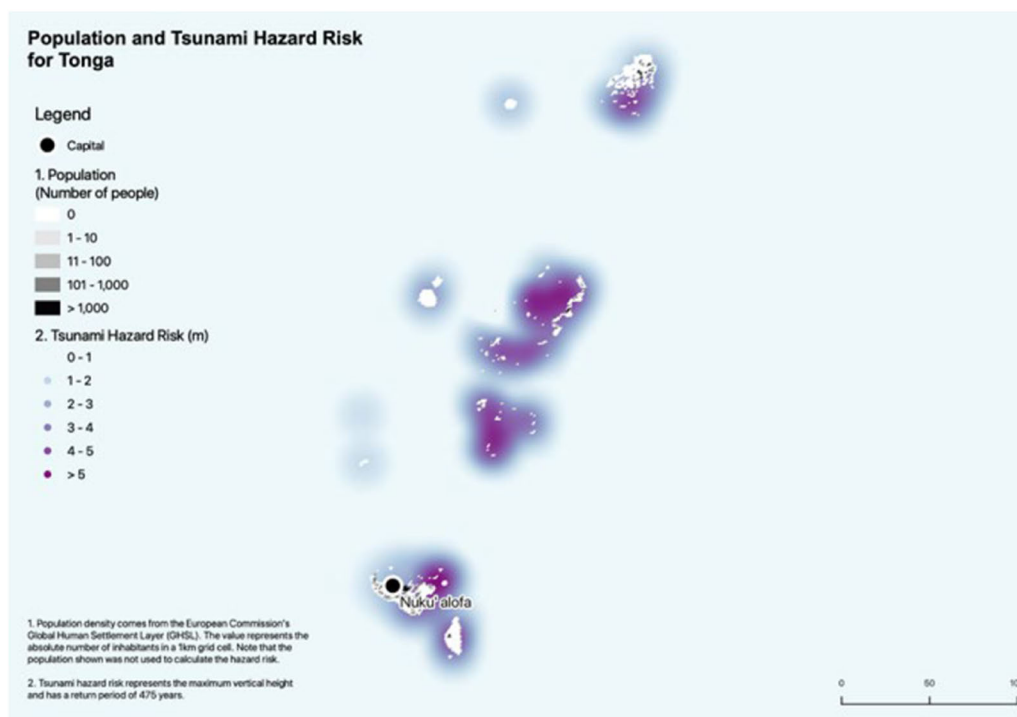
出典：IDMC

図 2.5.4 Cyclonic wind risk map



出典：IDMC

図 2.5.5 Seismic hazard risk map



出典：IDMC

図 2.5.6 Tsunami risk map

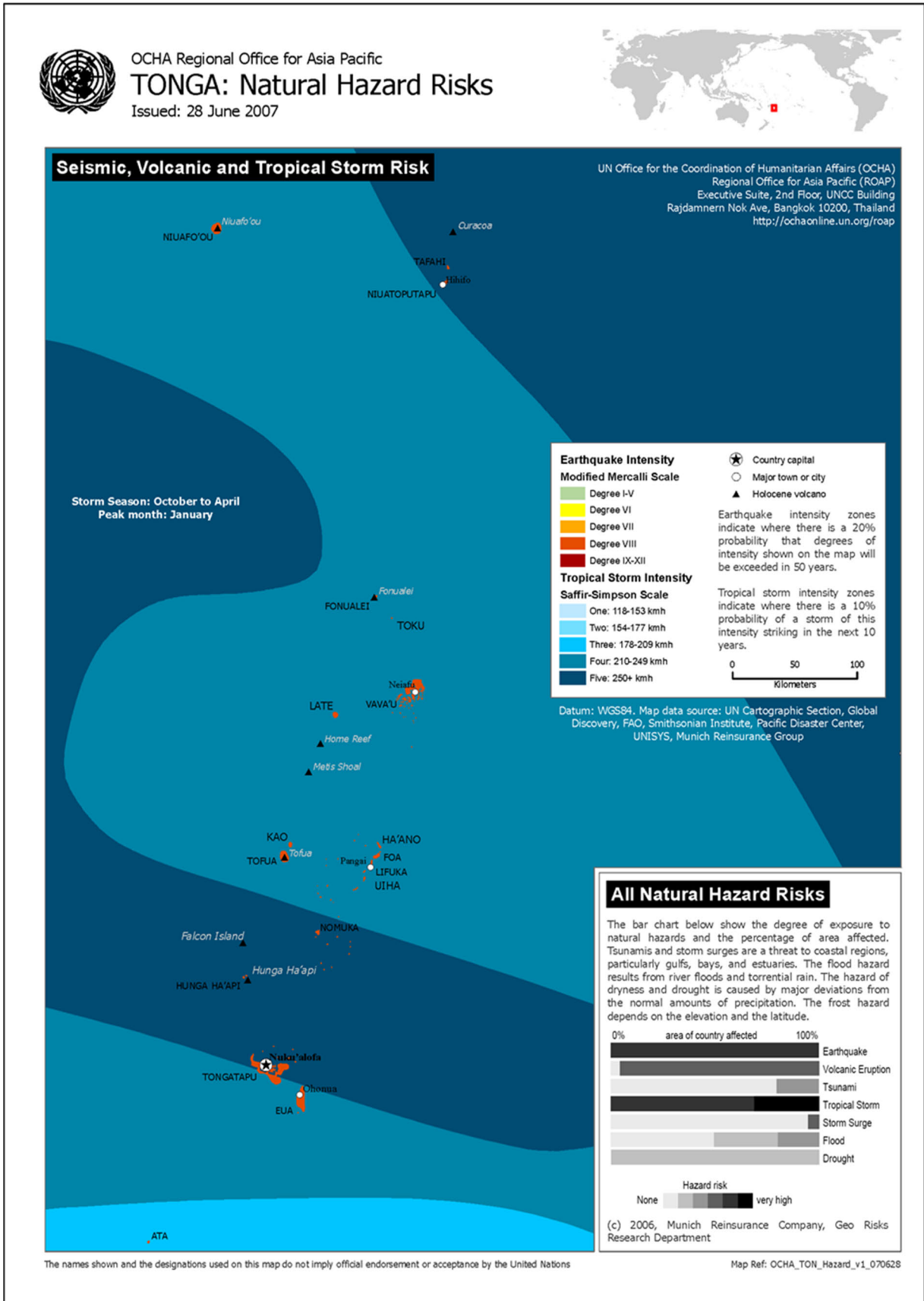
2.5.3 国連人道問題調整事務所（UN OCHA）

UN OCHA では、2007 年にトンガ周辺の地震と火山、熱帯低気圧のハザードを評価している。評価結果を図 2.5.7 に示す。

- 地震災害については、トンガタブ島においてメルカリ震度階級でⅧと評価されており、極めて強い地震動で重い家具が転倒し、多くの建造物が一部損壊する地震動（地表面の加速度＝94-202gal）が発生する可能性があるとしている。
- 熱帯低気圧については、サファ・シンプソン・ハリケーン・スケールでカテゴリー5、つまり風速 250km/時以上（風速 70m/秒以上）の評価となっている。
- トンガにおいては、全ての自然災害の中で、熱帯低気圧による災害、地震災害、火山の順に影響面積が大きく、被害リスクが高い。

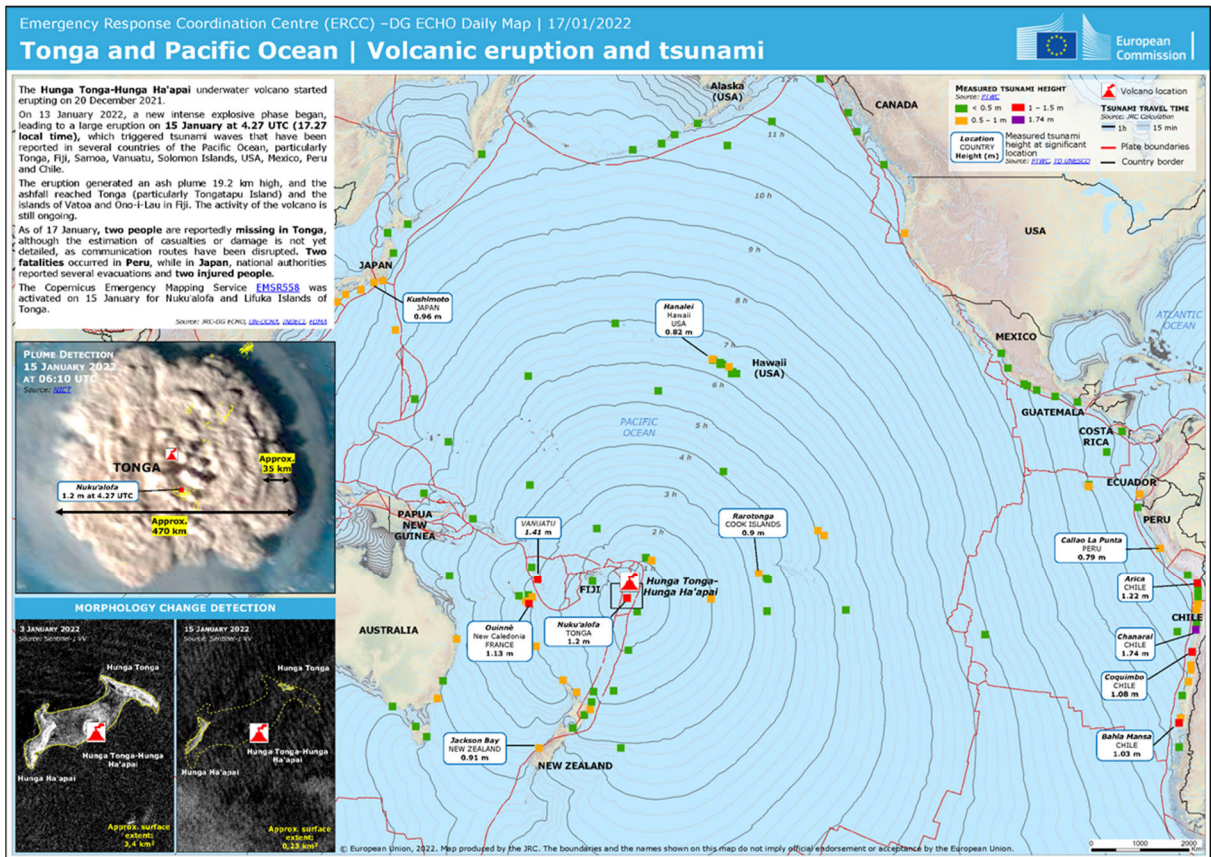
2.5.4 欧州委員会人道援助・市民保護総局（ECHO）

ECHO では、2022 年の HTHH の海底火山噴火に伴う、太平洋沿岸の津波高と到達時刻について整理している。整理結果を図 2.5.8 に示す。また、同図からトンガ付近を拡大して示したものを図 2.5.9 に示す。



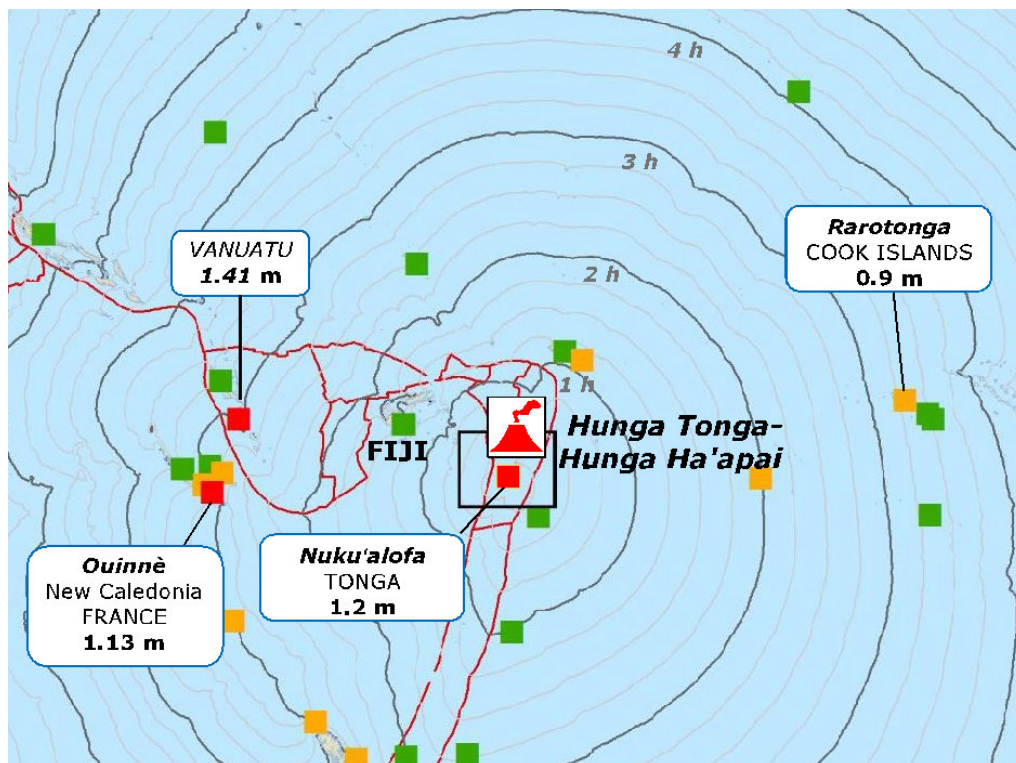
出典：UN OCHA

☒ 2.5.7 TONGA: Natural Hazard Risks



出典：ECHO

図 2.5.8 Tonga and Pacific Ocean Volcanic Eruption and Tsunami



出典：ECHO

図 2.5.9 Tonga and Pacific Ocean Volcanic Eruption and Tsunami (拡大図)

2.5.5 開発パートナーの災害関連支援

(1) 世界銀行 (WB)

WB は他国での災害直後の支援と同様に、HTHH 噴火災害直後から MEIDECCC 傘下の NEMO をカウンターパートに、クラスターと呼ばれる分野別グルーピングによるトンガ側省庁の担当者を集めて、緊急復興計画策定を支援し、国家対応計画 (National Response Plan) として災害後 1 か月の 2022 年 2 月に取りまとめられた。

HTHH 噴火用の緊急資金はアジア開発銀行 (ADB) と協調し、WB が 300 万米ドル、ADB が 600 万米ドルを拠出した。

今回の災害対策ではないが、最近のサイクロンの高波被害を受けたプロジェクトとして、MOI を対象に、道路のリハビリ、離島の港湾施設のリハビリ、空港滑走路の再舗装等のプロジェクトを MOI にプロジェクト運営ユニット (PMU) を設けて実施しているが、度重なる災害や COVID-19 の影響で進捗は遅れていた。

世銀の支援は財務省の下に設けられた中央サービスユニット (CSU (Central Service Unit)) が資金管理をしており、その下に各省の PMU がある。8 つのプロジェクトが進行中。各プロジェクトの詳細については表 2.5.2 参照。

表 2.5.2 トンガにおける世銀プロジェクト

プロジェクト	費用 (米ドル)	概要	コンポーネント
トンガ国気候に強靱な交通プロジェクト (TCRTP)	2,602 万	優先エリアの道路網の修復や、離島の湾口維持工事、ハアパイ航空の滑走路の再舗装など。	1. 部門別および空間計画ツール 2. 気候変動に強いインフラストラクチャーソリューション 3. 実現する環境の強化 4. 緊急事態への対応
トンガ国気候に強靱な交通プロジェクト II (TCRTP-II)	3,500 万	運輸部門の気候変動に対する回復力と安全性を向上させ、危機または緊急事態が発生した場合に、適格に即時に対応できるようにする。	1. 輸送計画と政策に関する能力構築 2. 気候変動に強く安全なインフラストラクチャーソリューション 3. プロジェクト管理 4. 緊急事態への対応
持続可能な海洋への道プロジェクト	3,500 万	漁業および水産養殖の管理を改善することを目標とした、コンサルティングサービス、コンサルティング以外の商品やサービス、トレーニング、ワークショップ、設備の調達など。	1. 漁業ガバナンスの強化 2. 漁業および水産養殖に関する知識ベースの強化 3. 持続可能な漁業管理と開発への投資 4. 効果的なプロジェクト管理のサポート
トンガデジタル政府支援プロジェクト (電子政府)	182 千	ICT インフラストラクチャー、情報システム、一部の国民向け電子サービス、およびトンガデジタル政府戦略枠組み内の目標と目的を達成するためのサポート。	1. 環境の実現と継続的な改善 2. 政府の組織アーキテクチャ 3. コアレジストリ: 市民登録および国民 ID システム 4. デジタル政府インフラストラクチャー

プロジェクト	費用 (米ドル)	概要	コンポーネント
太平洋レジリエンスプログラム (PREP) ⁶	3,407 万	参加国だけでなく地域にも利益をもたらす国と地域の要素を備えた一連のプロジェクトであり、フェーズ I の参加国にはサモア、トンガ、マーシャル諸島共和国、バヌアツの政府が含まれていた。 トンガの早期警戒、回復力のある投資、財政保護を強化する。	1. 早期警戒と備えの強化 2. リスク軽減と回復力のある投資 3. 災害リスクファイナンス(予備費を含む推定コスト: 540 万米ドル) 4. プロジェクトおよびプログラム管理
トンガのためのスキルと雇用プロジェクト (SET)	2,090 万	トンガ人の中学校への進学と修了の機会を改善し、国内外の労働市場への就労移行を促進する。	1. 中学校の入学および出席のための条件付き現金給付プログラム(CCT) (650 万米ドル) 2. 技術職業教育訓練(TVET)提供の強化(370 万米ドル) 3. 労働力移住の機会の拡大(180 万米ドル) 4. プロジェクト管理、監視と評価、集中サポート(890 万米ドル)
トンガ安全で強靱な学校プロジェクト (TSRSP)	1,500 万	台風ジータによって浮き彫りになった、トンガ内の学校インフラの脆弱性と、将来教育施設への同様の影響を回避するためにトンガの校舎インフラの強靱性を向上させるもの。	1. 教育施設の安全性と強靱性の向上 2. 教育管理情報システム (EMIS) の確立と教育の質の向上 3. 緊急事態対応コンポーネント(CERC) - 重大な危機や緊急事態が発生した場合の対応と再建を支援するための未割り当てのプロジェクト資金。 4. プロジェクト管理
トンガにおける統計革新と能力向上プロジェクト (SICBT)	200 万	トンガにおける福祉データ収集の質と効率を向上させ、比較可能な福祉データへのアクセスしやすさを向上させる。	1. データ収集におけるイノベーションと能力構築 (142 万米ドル) 2. 組織の強化 (35.4 万米ドル) 3. 導入サポート (21.6 万米ドル)

出典：世界銀行のサイトをもとに JICA 調査団にて作成

⁶ 本プロジェクトの詳細なコンポーネントは以下の通り。
 コンポーネント 1: 早期警戒と備えの強化 (予備費を含む推定コスト: 1,150 万米ドル)
 (i) トンガとサモアのマルチハザード早期警戒システムに統合するための影響ベースの予測モデリング、(ii) 災害リスク管理におけるチームリーダーシップ研修、(iii) 必要に応じた災害後のニーズ評価の専門家によるトレーニングとサポートの提供。
 1. トンガサブコンポーネント: 早期警戒と準備への投資
 2. 大洋州地域サブコンポーネント: 影響予測と準備を強化するための地域 TA
 コンポーネント 2: リスク軽減と回復力のある投資 (予備費を含む推定コスト: 1,550 万米ドル)
 (i) トンガとバヌアツへの LiDAR 調査、データ取得および品質保証、(ii) バヌアツの 2 つの住区 (タンナ島とマレクラ島) の都市計画、(iii) Pacific Resilience Nexus データベース プラットフォーム。
 1. トンガサブコンポーネント: リスク軽減と強靱な投資 -
 2. 大洋州地域サブコンポーネント: リスク軽減と強靱な投資計画をサポートする地域プラットフォーム
 コンポーネント 3: 災害リスクファイナンス (予備費を含む推定コスト: 540 万米ドル)
 (i) トンガへの災害リスクファイナンス検討の支援、(ii) 大洋州への相互保険基金設立の支援
 1. トンガサブコンポーネント: 災害リスクファイナンス手段
 2. 大洋州地域サブコンポーネント: 相互保険基金の開発
 コンポーネント 4: プロジェクトおよびプログラム管理 (予備費を含む推定コスト: 150 万米ドル)
 (i) プロジェクト管理ユニット支援、(ii) 大洋州地域プログラム管理調整ユニットへの支援
 1. トンガサブコンポーネント: プロジェクト管理
 2. 大洋州地域サブコンポーネント: 地域プログラムの管理と調整

(2) ADB

ADB は他ドナーと協調して大洋州各国への災害強靱化プログラムを継続して支援している。2023 年からはフェーズ 4 が始まることとなっている。HTHH 噴火後は、トンガタブ島のマルチハザード災害リスクに関する評価が行われ、その結果はすでに公開されている。ハザードリスクを評価した結果、二つのインフラプロジェクトが計画されている。一つは、ヌクアロファとヌクアチュルを結ぶ橋梁で、渋滞の改善だけでなく、緊急時避難路としての利用することが想定されている。もう一つは港湾の改修計画であるが、こちらは入札価格が予定核を大きく超過したため再検討中である。

更に NSPAO への支援を含む都市強靱化を支援する技術支援プロジェクトが 2023 年より開始されている。

1) 太平洋災害強靱化プログラム（フェーズ 4）

ADB は他ドナーと共に災害復興のため様々なプロジェクトでトンガ政府を支援している。2023 年から始まるフェーズ 4 では自然災害と緊急支援のための資金供与と技術支援で 1,000 万米ドルを拠出する計画である。概要は以下の通り。

改革分野 1: リスク管理強化のための政策と制度的取り決め

政策改革は、災害リスク管理、気候変動、健康危機管理に関する政策、計画、法的枠組みにおけるギャップに対処することを目的としている。これには、災害リスク管理および保健危機管理の政策と法律、国家および準国家の災害対策計画、及び災害復旧の政策と枠組み（ジェンダーに対応した備えと復旧を支援する戦略を含む）が含まれる。

改革分野 2: リスク情報に基づいた開発を含むリスク管理強化のためのシステム、情報、ツール

このプログラムは、大洋州地域、キリバス、サモア、ソロモン諸島、トンガの 5 つの国と地域を対象とした規制枠組みの承認と実施、およびリスク管理ツールの設計と適用をサポートする。これには、気候や災害のリスク情報の改善、リスクに基づいた意思決定ツール、更に空間計画や建築基準に関連する法律や規制が含まれる。健康・保健分野の緊急管理能力の強化を目的とした政策措置には、健康情報および通信システムのアップグレード、標準的な手術手順、症候群の監視と報告のためのプロトコルが含まれることが期待されている。

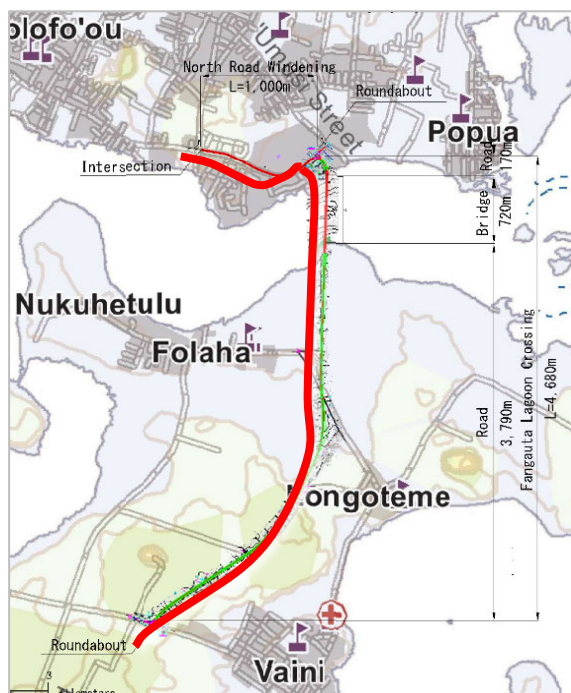
改革分野 3: 災害影響への対処を改善するためのリスクファイナンスと公的財政管理

改革により、気候変動と災害リスクへの資金調達と資金の効率的、効果的かつ透明性のある管理へのアクセスとその戦略的利用が増加する。政策措置には、災害リスク資金調達戦略の採用や緊急時の公共財政管理実践に関する改善が含まれる。

2) ファンガウタ・ラグーン横断橋プロジェクト（The Fanga'uta Lagoon Crossing Project）

低地の多いヌクアロファ地区からの津波に対する避難経路を確保するため、ADB の支援でファンガウタ・ラグーンを渡って、南のムクヘトゥルファラハ地区に繋げる橋梁と取り付け道路のプロジェクトを検討している。このプロジェクトは HTHH 火山噴火以前の 2020 年からスタートしており、日本企業が応札して設計を行った。

取り付け道路も含んだ道路延長は 5,680m、橋梁部分の長さは 720m となっている。片側 1 車線の計 2 車線の計画となっている。



出典：Project Update (Civil Works for the Fanga'uta Lagoon Crossing Project), ADB, 2021

図 2.5.10 プロジェクト位置図

3) 統合都市強靱化分野への支援

ADB は 2019 年より、統合都市強靱化分野プロジェクトと称してトンガ政府への支援を行っている。支援額は 2,131.7 万米ドルで、このうち 85.7% の 1,827.5 万米ドルが ADB の負担分となっている。

内容は、①地上交通局 (LTD) への洪水リスクに対応したインフラ管理、②トンガ水道公社 (TWB) へのヌクアロファ地区への水供給サービス、③廃棄物公社 (WAL) への環境に配慮した新しい埋立地の整備、④ヌクアロファ地区のジェンダー配慮のコミュニティベースの災害リスク管理プログラム、となっている。

アウトプット③では、トンガ地質サービス (TGS) が WASH 啓発活動を実施し、家庭衛生システムの管理を強化するのを支援している。またアウトプット④では、NSPAO を C/P としてヌクアロファ都市圏におけるジェンダーに配慮した気候変動と災害に強い都市開発戦略と投資計画を作成し、都市計画の促進と都市部への投資を導くことで、気候変動の影響に対する長期的な回復力に取り組むことを目的としている。NGO と協力してコミュニティベースの災害リスク管理 (CBDRM) 計画の策定を目指しており、現在コンサルタントの調達が開始されている。

(3) 国連

トンガの 9 つの国連機関 (国連人口基金、国連児童基金、国連食糧農業機関、国際移住機関、国連女性機関、等) が共同で利用している事務所を持ち、噴火前は 35 人のスタッフだったが、噴

火以降緊急支援で保健、教育、栄養、広報のスタッフが 12、3 名増員されていたが順次アサインが終わって帰国した。

国連児童基金を中心とした教育省への支援、世界保健機構から保健省への支援、観光省への技術支援等を行っている。

国連は大洋州をまとめて統括する方向になっており、パプアニューギニアを加えて 15 か国ほどあるが、これを 3 グループに分けて管轄する方向に動いている。（太平洋協力枠組み（Pacific Cooperation Framework））2023 年度からの 5 か年計画で見直す。プロジェクトも複数国でまとめたものが増えてくる。

1) トンガタブ島北部海岸保全プロジェクト

国連開発計画は、グローバル気候変動アライアンスの GCF（緑の気候基金）による「トンガタブ島北部海岸保全プロジェクト」⁷の一環として NEMO に対して他ドナーと協調して技術支援を行っている。国連開発計画はトンガタブ島北東部の住民居住地を中心に、アジア開発銀行、トンガ政府と協調し、マングローブ等の植物を活用したグリーンインフラストラクチャーのコンセプトで護岸計画を行っている。

2) HTHH 火山と津波後のトンガの災害に対する回復力と適応能力の強化（2023～2025 年）プロジェクト

このプロジェクトは、国連開発計画と国連防災機関が協調して、トンガ政府が将来の危険からのリスクを軽減し、準備し、効果的に対応する能力を全体的に強化できる一連の行動を特定し、優先順位を付けることを支援することを目的としている。強靱性を構築するというこのビジョンは、予期せぬハードルに頻繁につまずいてしまう、バラバラで断片的な災害リスク管理対策を追求する現在の傾向から脱却する。このプロジェクトは次の 4 つの具体的な成果をサポートすることを目的としている。

- ・ 成果 1: トンガにおける災害リスク管理プロセスの効果的な調整を補完する、法律、規制、政策、手順の改善されたシステムを通じた DRM の運用。
- ・ 成果 2: コミュニティの回復力をサポートするための DRM ガバナンスと制度的取り決めが強化される。
- ・ 成果 3: 国家の災害への備え、対応、復旧の改善を通じて、リスク状況の変化に対応する災害強靱化への取り組みに投資する。
- ・ 成果 4: 影響を受ける住民の早期行動を支援するための早期警戒および準備システムの強化。

(4) アメリカ合衆国国際開発庁（USAID）

USAID がトンガに対し、260 万米ドルの人道支援プログラムを実施中である。この資金は国連機関と NGO パートナー（MORDI Tonga Trust、カトリック救援事業会（Catholic Relief Services : CRS）による平和構築活動の支援資金となる。コミュニティレベルの災害対応プログラムを準備している。障害者や高齢者の避難支援をコミュニティベースで行うものである。UNICEF には日

⁷ <https://ccprojects.gsd.spc.int/wp-content/uploads/2021/03/2.-Conceptual-design-and-costing-Full-report.pdf>

本との協調ファンド、FAO を通しての農業漁業支援、UN OCHA を通した調整機能へも支援している。

更に UNAID は科学的な取り組みを 2 件行っている。一つは TMS に対し早期警戒システムについて長年協力している。これはイリジウムの衛星通信システムを利用したシステムで、送信機の故障のため取り換えを予定している。このシステムで島外に津波警報を発信できる。今回の HTHH 噴火の 11 分後に送信機がシステム全体に緊急メッセージを送信したが、トンガタブ島には届かなかった。フィジー気象サービスには届いていた。もう一つは、地震・噴火監視システムであり、インフラサウンドアレイと呼ばれる機器の設置を進めている。TGS は 2023 年 4 月に「アテレ」ステーションに設置済みであり、噴火音を通じて火山を検知できる状態となっている。

(5) オーストラリア

今回の災害では 1800 万豪ドルの資金支援を行っている。

(6) ニュージーランド

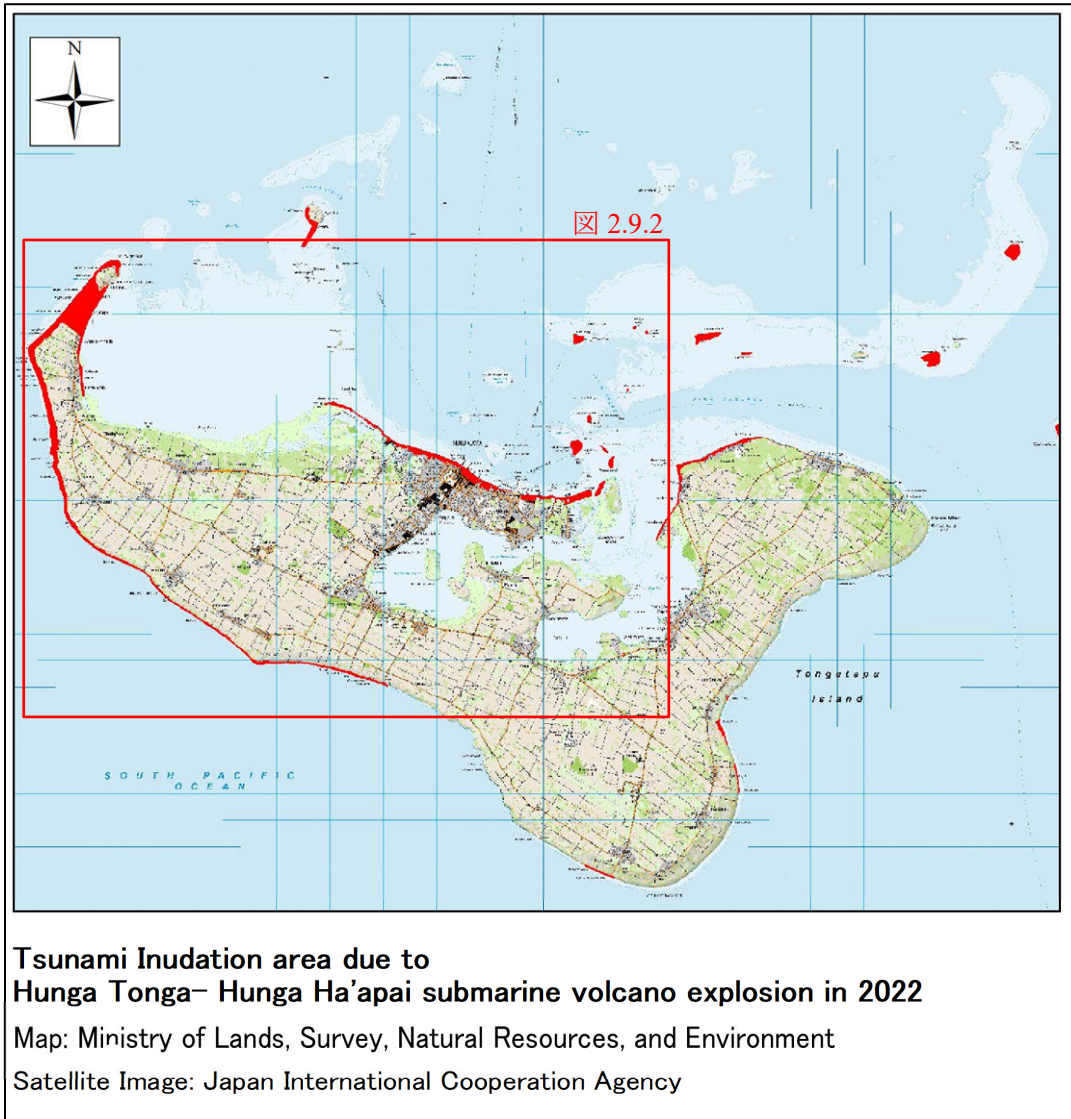
ニュージーランド政府は、今回の災害対策として約 755 万 NZ ドルの支援を表明した。通信の強靭化、気候変動対策、コミュニティの強靭化、健康の強靭化、経済の強靭化の分野への支援を行っている。

2.6 被害状況等に関する資料

2.6.1 浸水範囲

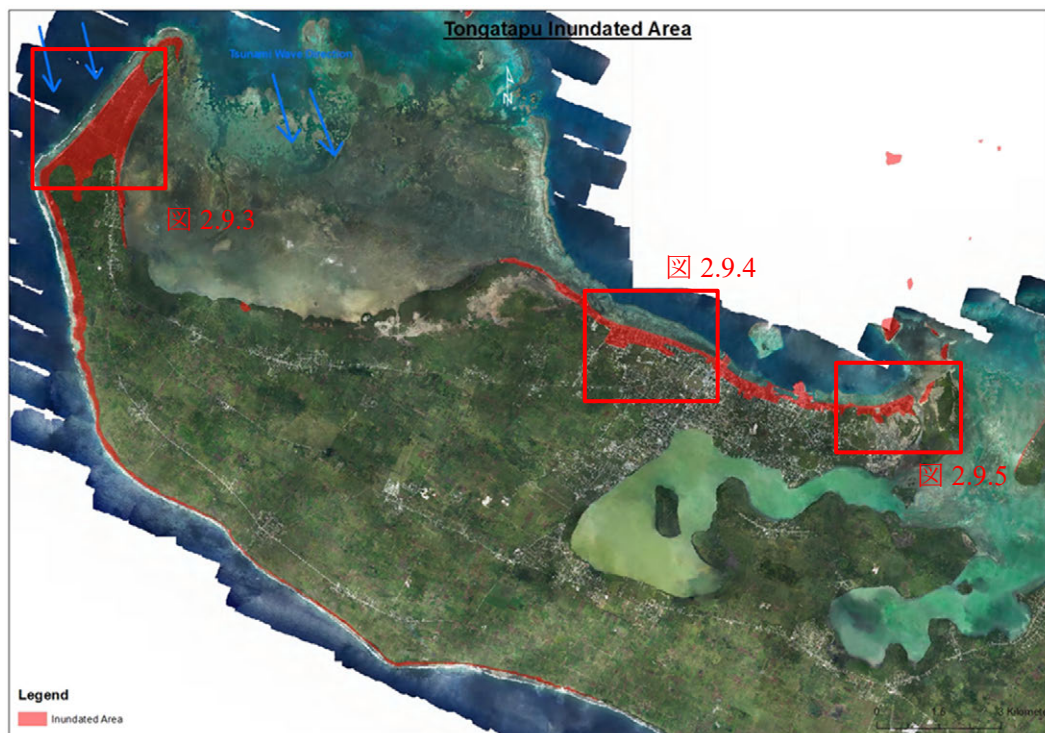
2022 年 1 月 15 日に発生した HTHH 海底火山で大規模な噴火に伴う浸水範囲資料を図 2.6.1 に示す。浸水範囲は、北西部の岬部分（カノクポル、ハアタブ村）では浸水範囲が非常に広がっている。また、ヌクアロファにおいても地盤高が低いいため、浸水が発生している。南部海岸においては、地盤高が高いことから、浸水範囲は非常に狭くなっている。

次ページより、トンガ政府による浸水範囲の拡大図および津波の浸水方向を示した図を示す（図 2.6.2～図 2.6.5）。これからも北部は浸水範囲が広いことがわかる。



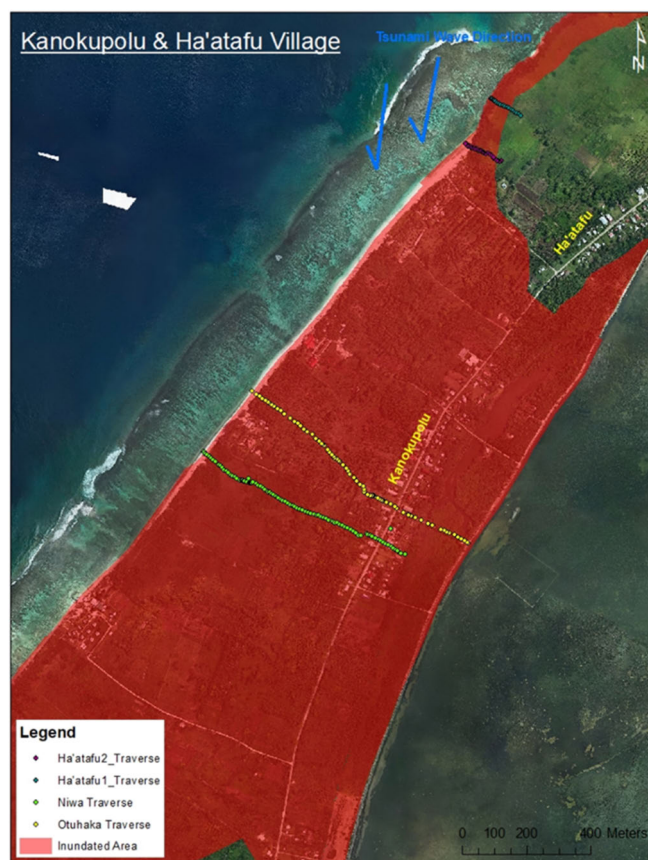
出典：Prof. Cronin と Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.6.1 2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲図



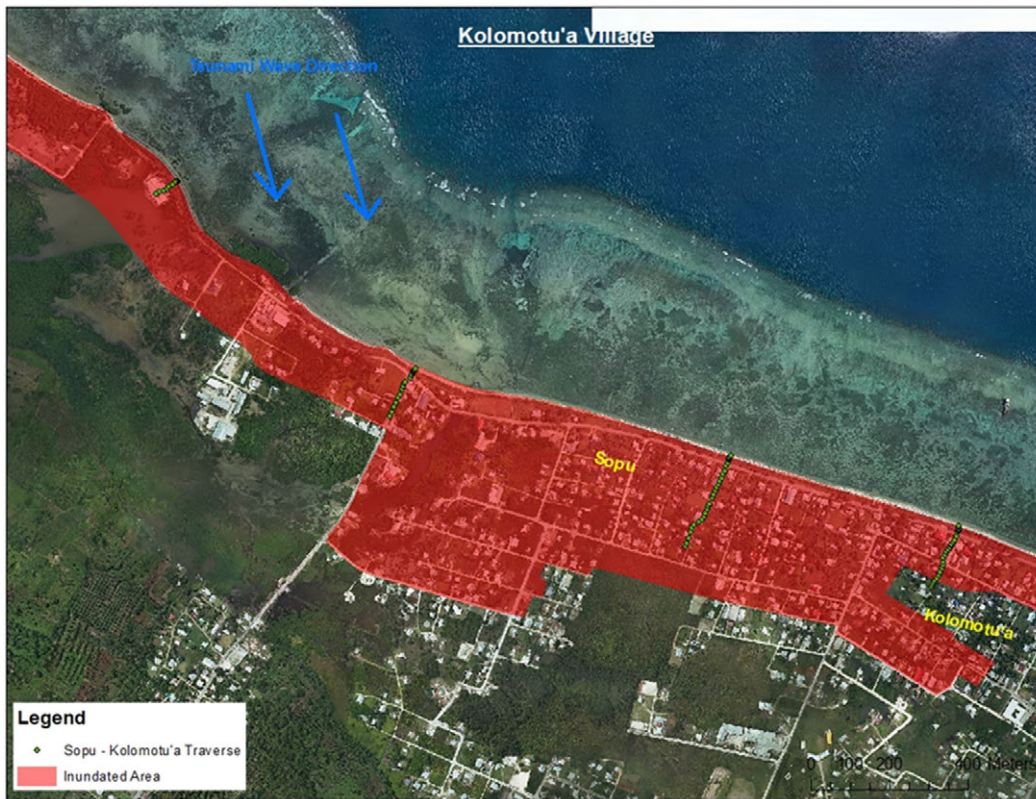
出典：Tonga Geological Services

図 2.6.2 2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 1



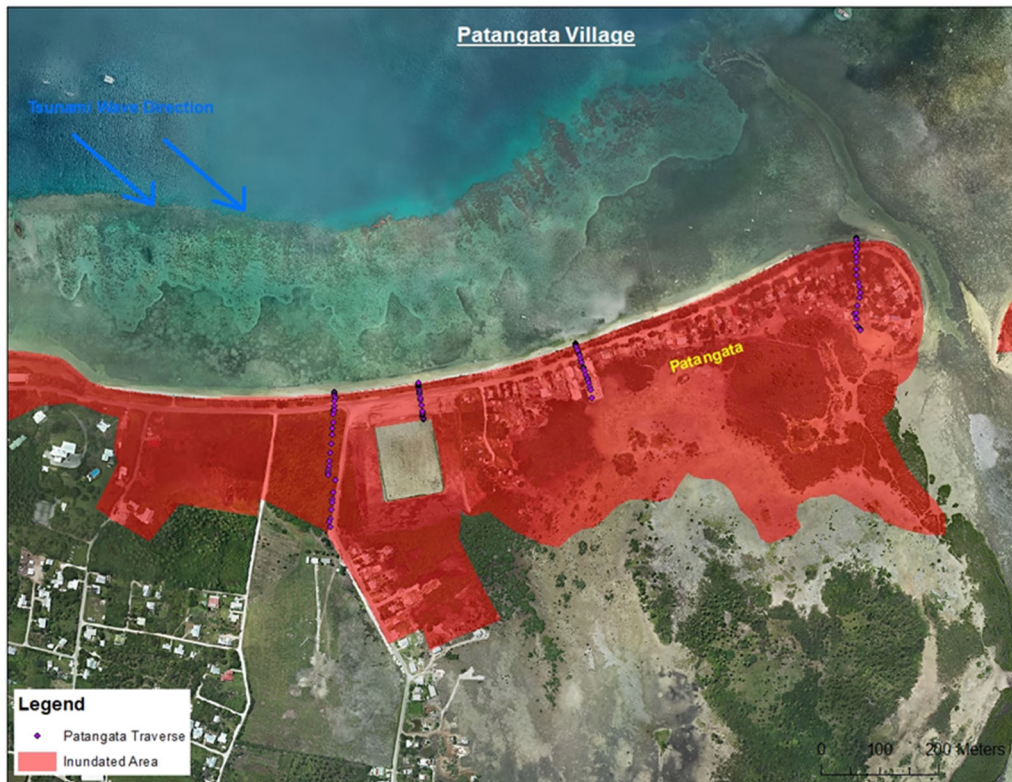
出典：Tonga Geological Services

図 2.6.3 2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 2



出典：Tonga Geological Services

図 2.6.4 2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 3

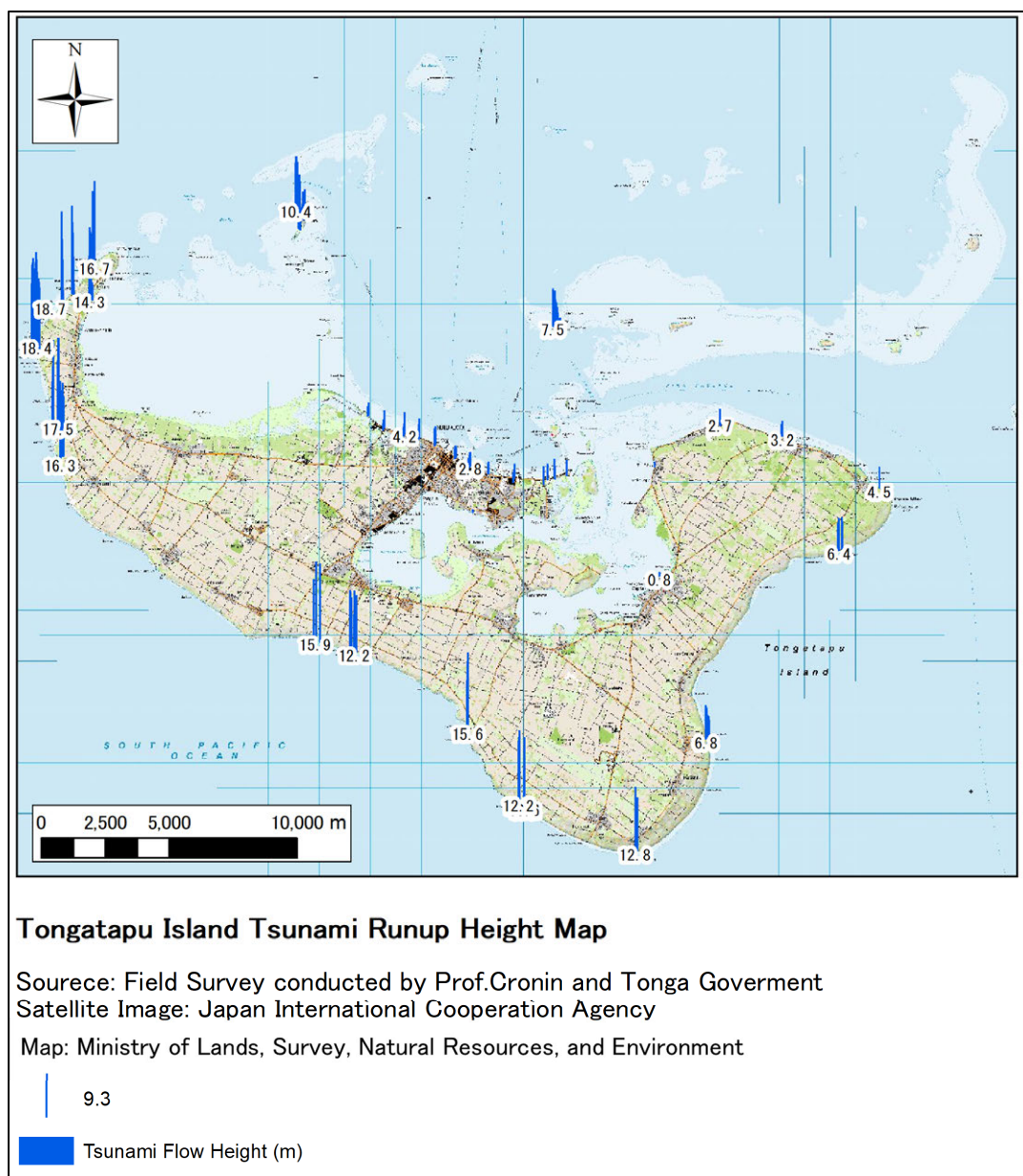


出典：Tonga Geological Services

図 2.6.5 2022 年 HTHH 火山津波による津波浸水範囲拡大図 4

2.6.2 遡上高

遡上高データについてトンガ政府から提供を受け、整理を行った。整理結果を図 2.6.6 に示す。ここで遡上高として示した高さ（標高）は、厳密には津波の陸上部の浸水高である。北西部の津波遡上高が非常に高くなっており、15m を超えている。また、南部も津波遡上高が高く、ヌクアロファでは、浸水は大きいものの、遡上高としては小さくなっている。これは、岬状の地形や浅海域の地形による津波の変形や集中が大きく影響していると考えられる。



出典：Prof. Cronin と Tonga Geological Services のデータを用いて JICA 調査団が作成

図 2.6.6 津波遡上高の分布

2.6.3 火山灰被害

2022年1月15日のHTHH火山の噴火により、周辺の島々は火山灰で覆われた。トンガタブ島、ハアパイ諸島の一部、エウア島を被覆し大きな被害を被った一方、北部のニウアス、ヴァヴァウの諸島は当初は被害が大きかったが1年程度で回復した。積もった灰の厚さは、20～60mmとなっており、トンガタブ西部地区は、東部地区の2倍程度灰が多かったとされている。

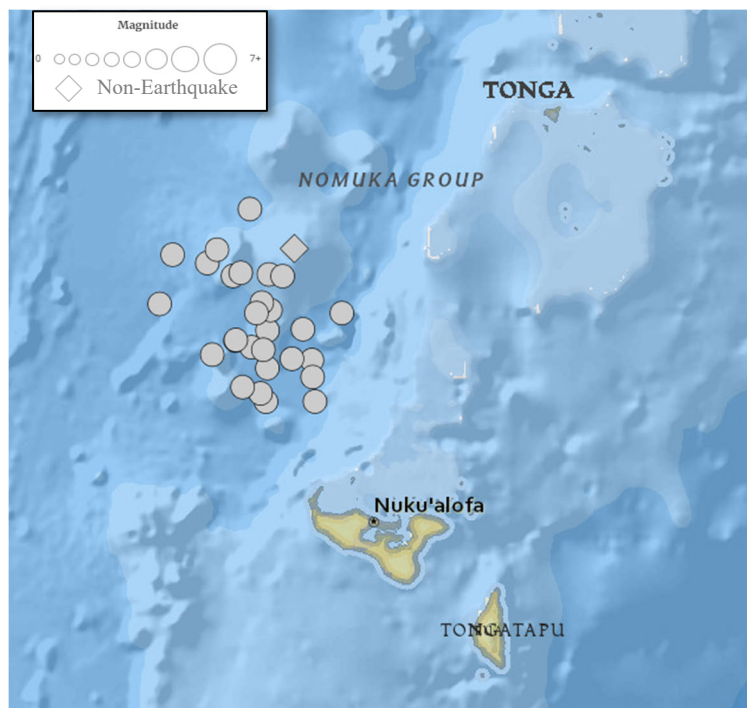
灰の影響・被害については、主に次の通りである。

- 灰は、人体（目・鼻・喉、皮膚）に大きな影響を与えることはなかった。
- 作物の光合成阻害については、噴火直後は影響があったが、その後の降雨で影響は小さくなった。
- トンガタブ島の作物被害は場所により30～95%となっており、噴火当時に栽培されていた野菜（根菜類）や果樹も影響を一時的に受けたが、その後の降雨で回復した。

家畜への影響は、直接的なものはほとんどなかったが、今後の食物の採取で影響がでることが懸念される。また、空気中の灰や水、食品や家畜への影響については、灰の溶出試験がニュージーランドのMassey大学により行われ、影響が小さいことが確認された。

2.6.4 地震被害の状況

地震動については、噴火前後でマグニチュード4.4～4.9程度の地震がHTHH火山周辺で発生しており、火山噴火の際は、マグニチュード5.8の地震が発生した。地震規模としては、いずれも大きくないことから地震被害としては、ほとんどなかったと考えられる。トンガタブ島周辺で2022年1月13日から2022年1月17日までの地震位置とその規模を図2.6.7に示す。また、その地震リストを表2.6.1に示す。



出典：USGS WEB ページ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

図 2.6.7 地震発生位置と規模（2022 年 1 月 13 日～17 日）

表 2.6.1 地震発生時刻及び規模（2022 年 1 月 13 日～17 日）

time	latitude	longitude	depth	mag	type
2022-01-17T20:57:58.159Z	-20.8468	-175.51	10	4.6	earthquake
2022-01-17T20:29:49.092Z	-20.5484	-175.57	10	4.5	earthquake
2022-01-17T18:23:09.595Z	-20.8249	-175.348	10	4.6	earthquake
2022-01-17T16:41:27.784Z	-20.7853	-175.396	10	4.7	earthquake
2022-01-17T15:57:59.917Z	-20.7213	-175.37	10	4.4	earthquake
2022-01-17T14:16:13.738Z	-20.6861	-175.478	10	4.5	earthquake
2022-01-17T13:15:02.936Z	-20.878	-175.342	10	4.5	earthquake
2022-01-17T11:59:26.704Z	-20.8604	-175.469	10	4.4	earthquake
2022-01-17T07:48:48.134Z	-20.5985	-175.515	10	4.6	earthquake
2022-01-17T07:26:07.929Z	-20.5593	-175.673	10	4.5	earthquake
2022-01-16T16:07:43.141Z	-21.4629	-176.195	137.29	4.6	earthquake
2022-01-16T16:02:08.468Z	-20.7446	-175.526	10	4.5	earthquake
2022-01-16T15:50:05.981Z	-20.7658	-175.462	10	4.5	earthquake
2022-01-16T14:50:54.677Z	-20.6663	-175.703	10	4.5	earthquake
2022-01-16T11:42:04.235Z	-20.6055	-175.532	10	4.7	earthquake
2022-01-16T10:45:07.511Z	-20.6635	-175.466	10	4.5	earthquake
2022-01-16T10:00:49.269Z	-20.5775	-175.592	10	4.5	earthquake
2022-01-16T05:46:18.410Z	-20.6059	-175.417	10	4.7	earthquake
2022-01-16T03:55:13.907Z	-20.6021	-175.449	10	4.5	earthquake
2022-01-16T02:24:37.770Z	-20.8784	-175.456	10	4.8	earthquake
2022-01-16T01:22:16.176Z	-20.7603	-175.489	10	4.7	earthquake
2022-01-15T18:11:29.058Z	-20.6798	-175.446	10	4.9	earthquake
2022-01-15T13:43:37.809Z	-20.6861	-175.28	10	4.6	earthquake
2022-01-15T09:51:46.774Z	-20.7882	-175.349	10	4.4	earthquake
2022-01-15T05:30:17.706Z	-20.7459	-175.527	10	4.7	earthquake
2022-01-15T04:40:37.335Z	-20.7239	-175.452	10	4.8	earthquake
2022-01-15T04:14:45.000Z	-20.546	-175.39	0	5.8	volcanic eruption
2022-01-15T04:13:01.763Z	-20.7763	-175.581	10	4.7	earthquake
2022-01-15T04:07:53.837Z	-20.8057	-175.453	10	4.7	earthquake
2022-01-14T21:16:48.952Z	-22.0678	-174.361	10	4.9	earthquake
2022-01-14T01:08:39.043Z	-20.4601	-175.493	10	4.7	earthquake

出典：USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

2.7 現地被害状況の確認

本調査ではコロナ禍での現地調査となり、当初はトンガタブ島とエウア島を主体に調査を実施し、他の島への現地状況は出来なかった。しかし、現地に入りヴァヴァウ、ハアパイ両島にも出張可能となり、急遽両島への調査も実施することになった。しかし、コロナ対策については非常に厳しく、特にゼロコロナ政策をとっているエウア島を中心に各島滞在中は現地住民と接触をしないバブル方式となり、制約のある現地調査を行った。

以下にトンガタブ島以外の各島への調査実施日程を示す。

表 2.7.1 各島への調査実施日程

実施日	調査地	調査実施者	現地滞在時間	移動手段	備考
5月28日	エウア島	小竹、叶	6時間	チャーター機	日帰り
6月30日	ヴァヴァウ島	小竹、叶、森本	3.5時間	L812/L815	日帰り
7月2日	ハアパイ島	小竹、叶、森本	3時間	L8022/L8025	日帰り
7月13日	エウア島	森本	6時間	L8032/L8037	日帰り

出典：JICA 調査団作成

2.7.1 トンガタブ島の被災状況

トンガタブ島は、首都ヌクアロファを有する東西 35km、南北 15km、面積 260km²のトンガ最大の島で、その内陸部にラグーンを有する扇型の島である。その地形的な特徴としては、島の中央部に位置するラグーン周辺及び首都ヌクアロファ市街地は低地が多く平坦であるが、島の東西及び南部は高台になっている。但し、島の一番高い所でも標高は 70m と全体的には平坦な島となっている。島の周辺の状況としては、北側の海岸線は沖合 500m 前後の位置にコーラルリーフがあるが、それ以外の東側、西側、南側には見られない。

被害の大きかった島の西端部と島の中央北部の被災状況を比べて、島の東西端部では 10m を超える高さまで津波の遡上が見られるが、島の中央北部では護岸を少し超える程度の津波高となっている。

トンガタブ島の調査に当たっては、図 2.7.1 に示す様にトンガタブ島を北西部、ヌクアロファ市街部、北東部及び東部の 4 地区に分けて調査を行った



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.1 トンガタブ島現地調査位置図

(1) トンガタブ島北西部

トンガタブ島北西部は HTHH 火山に対峙し、今回の津波で最も被害の大きかった地区である。

トンガタブ島の南東海岸と南西海岸は、海岸線からすぐに高さ 20m を超える断崖が立ち上がり、後背地の高台には津波の影響は無かったが、この地区は海岸線からなだらかに高度が上がる地形となっており、津波が斜面を遡上し半島を乗り越えている。

この地区は海岸線には砂浜が連続し、海に沈む夕日を楽しめるため、観光用のホテルやレストラン・バーなどの飲食施設も多く立地していたが、今回の津波で全て壊滅的に被害を受けている。



写真 2.7.1 津波によって砂浜が広がった



写真 2.7.2 津波に破壊された建物



写真 2.7.3 この基礎上のリゾートが破壊された



写真 2.7.4 完璧に破壊されたリゾートホテル

出典：JICA 調査団撮影

(2) ヌクアロファ市街

ヌクアロファ市街の海岸は、東西が半島や島で囲われた入り江状の遠浅のリーフとなっており、津波の力は減衰されて数mの津波高であった。しかしながら、既存の護岸を乗り越えて、1m前後の波が内陸に侵入した。

津波高は低かったといえ、既存の石積護岸の石材は津波の力で流され、それも加わって建物やフェンスなどの構造物に多くの被害が見られた。



写真 2.7.5 石積護岸の石が散乱した



写真 2.7.6 津波に押されたフェンス



写真 2.7.7 津波によって下段の枠が壊れた



写真 2.7.8 突堤の西側部分の損傷



写真 2.7.9 津波によって壊れたブロック塀



写真 2.7.10 津波によって洗われた民家

出典：JICA 調査団撮影

(3) トンガタブ島北東部

トンガタブ島北東部は ADB の支援した護岸や、住民主体で施工された護岸など、タイプの異なる護岸が整備されていた。この地区は前面にリーフがあり、津波の力は弱まったものの、海岸沿いの石積護岸や構造物は多くが被害を受けた。特に住民主体で整備した区間は、護岸の土台部分から流出するなど、破損箇所が多く見られた。



写真 2.7.11 石積護岸決壊状況



写真 2.7.12 石積護岸破損状況



写真 2.7.13 コンクリート被覆破損状況



写真 2.7.14 津波によって打上げられた船

出典：JICA 調査団撮影

(4) トンガタブ島東部

トンガタブ島東部の海岸は高い断崖が続く地形で、その間に小さな砂浜があり、ホテルや宿泊施設が整備されていた。HTHH 火山の反対側の海岸ではあるが、回り込んだ津波により海岸に整備された施設は壊滅的に被害を受けた。



写真 2.7.15 津波被害を受けたリゾート

写真 2.7.16 津波被害を受けたリゾート

出典：JICA 調査団撮影

2.7.2 エウア島の被災状況

エウア島の被災状況調査では、島の西岸中央部に位置するナファヌア港を中心に周辺の状況を調査した。エウア島の港湾施設は北西方向に港口が開き、眼前にトンガタブ島を見ることが出来る。コーラルリーフが港の岸壁からから 100m 程度と近いため、外洋からの波を直接受ける厳しい条件下にある。

港内施設は、港外南西方向に突き出した防波堤に守られている。北東に位置するランプと小型船舶用岸壁及びターミナルビルを有する港（新港）と、港内南側 100m 程度のリーフ内側に設置された北西に伸びた防波堤（古い構造物で先端の 50m 程度しか残っていない）の内側に位置する小型船舶用岸壁（旧港）に分かれている。

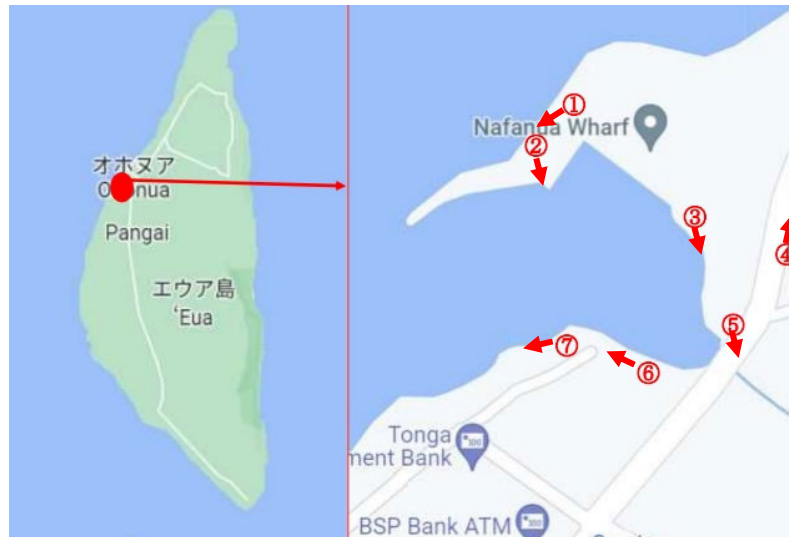
旧港については記録が無く建設年が不明である。新港部分は 1988-89 年に建設された。2020 年 1 月からは WB の援助（TCRTP）による工事が開始されたが、直後の 4 月にサイクロンハロルドによって被害に遭い損傷した。その後再整備を行い、2021 年 10 月に工事が無事完了したが、今年 1 月の HTHH 噴火による津波によって再び被害を被った。

現地でのヒアリングでは、今回の津波は島の南側から北上する形で港周辺を洗い流したため、港内の南に位置する旧港への被害よりは、北東の新港に被害が出たとのことであった。実際に現場を確認したところ、矢板式岸壁自体に大きな損傷はなく、岸壁等の港湾構造物は比較的損傷は少なかったが、北西側の石積護岸と防波堤に大きな被害を受けていた。

今回損傷の大きかった橋梁（小型のボックスカルバートを並べて上部に舗装したもの）は、後から追加施工したと思われる波除けの壁状のコンクリート構造物が大きく破損しており、この部分が今回の津波の力をまともに受けて被害を大きくしたと思われる。

港に隣接していたターミナル施設を始め、港周辺の標高の低い土地に立地していた政府施設や商業施設などは、ことごとく津波の被害に遭い、完全に洗い流されたか、再利用不可能なほど損傷を受けている。トンガ政府はこれらの施設は高台に移転する方向で検討を行っている。

以下にエウア島の調査位置及び写真撮影位置を示す。



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.2 エウア島調査位置及び写真撮影位置

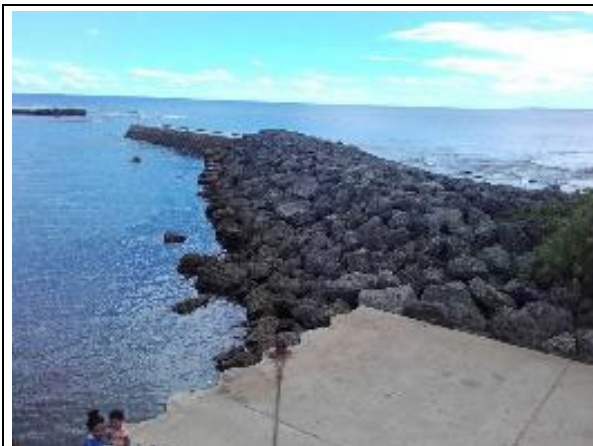


写真 2.7.17 被災前(2014年1月)の状況



写真 2.7.18① 石積護岸が大きく崩れていた



写真 2.7.19② 新港岸壁エプロン部の破損状況



写真 2.7.20③ 新港小型船舶用岸壁破損状況



写真 2.7.21④ 右側の家迄津波が遡上した



写真 2.7.22⑤ 既存橋梁(カルバート)破損



写真 2.7.23⑥ 旧港コンクリートブロック岸壁



写真 2.7.24⑦ 旧港側広大な土地と沖合防波堤

出典：JICA 調査団撮影

2.7.3 ハアパイ島の被災状況

ハアパイ島の港湾施設は島の西海岸に位置し、海岸から 150m 程度離れた浅瀬に陸地と平行に独立して設置された防波堤によって、港内が守られている形になっている。港内施設としては、北側のフェリー用埠頭、中央部のジェットイ、ランプと小型船舶用のスリップウェイ（船揚げ施設）がある。ハアパイの港湾は世銀により 2012-14 年、2018 年と度々補修を重ねているが、2020 年 1 月のサイクロンティノと今回の HTHH 津波により再び被害を受けた。コンクリート構造物が損傷し、裏込めの碎石や土砂の流出が複数箇所見られた。

実際に現場を見た印象は、確かに北側護岸及び混成堤に被害が集中しているように見える。これは海中に設置された防波堤が、北側の岸壁を防護出来ていないためで、防波堤の効果が大きいことを実感した。一方で矢板岸壁については、上部工は多少被害を受けているが基礎としては、確実に波に抵抗している。

防波堤の構造は石積護岸と先端を湾内に傾けた矢板岸壁の複合形式であるが、石積の部分がかかり消失していて、元々どこまで延長があったのか不明である。今後、この港湾の復旧を行う際には、この防波堤をどのような範囲と構造で設置するか、その設計計画が非常に重要となる。



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.3 ハアパイ島調査位置図



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.4 写真撮影位置図



写真 2.7.25① 北側埠頭東側石積護岸工



写真 2.7.26② 東側石積護岸の延長約 130m



写真 2.7.27③ 北側埠頭突端部



写真 2.7.28④ ケーソン式混成堤



写真 2.7.29⑤ 石積護岸奥に矢板岸壁が見える



写真 2.7.30⑥ ランプ部から矢板岸壁を望む

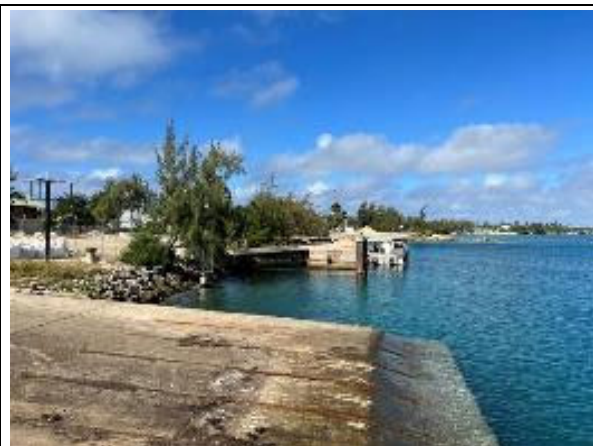


写真 2.7.31⑦ ランプからジェットイを望む



写真 2.7.32⑧ ジェットイ端部と石積の堺



写真 2.7.33⑨ スリップウェイ底面洗堀状況



写真 2.7.34 ⑩ 海中の防波堤

出典：JICA 調査団撮影

2.7.4 ヴァヴァウ島の被災状況

ヴァヴァウ島の港湾は四方を山に囲まれた天然の良港であり、外洋からの波が直接湾内に入り込まないため、ヨット等の寄港地として世界的に有名である。今回の噴火津波による被害はほとんど見られなかったが、現地でのヒアリングにおいて港湾自体が持つ問題点を指摘されたため下記に報告する。

国内船フェリーバースは水深が 3m と浅く、バース延長も 40m 弱 (39.8m) と短く、トンガ国内の島嶼間フェリーのほとんどの船 (約 60m。日本が供与したフェリーも同じ大きさ。) が収まらず国際船用バース (貨物用) の利用に影響が出る。一方国際船用バースは水深も 10m を確保でき 10,000 トン程度のフェリーや旅客船、貨物船にも対応可能だが、バース長が 64.6m と短く、対応出来る船舶に制限がある。

港の後背地が狭く、港内に荷役の機械設備も持っていないため、荷捌きにも問題がある。この港湾自体の接岸できるバースが貨物用も含めても 2 バースに限られているため、大規模場会議が行われるなど船での旅客が集中した際には、常に「バース混み」の状態となり、湾内の泊地にも余裕がない為、運用に支障を来たしている。

既存の港湾施設用地が狭いため、南東側は軍の用地、北西側は漁業組合の用地に挟まれていて横への拡張の余地がないと同時に、沖合も湾の奥にある石油貯蔵施設へのタンカーの航路に設定

されており十分な拡張余地がない。また、湾内に入出りする湾口が狭い為、石油タンカーなどの大型船が通ると小型船の操船に影響が出ている。このため、港湾機能自体を湾口の外側に移転することが検討されている。



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.5 ヴァヴァウ島調査位置図



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.6 ヴァヴァウ港周辺状況図



写真 2.7.35 国内船用バース、奥が国際船用



写真 2.7.36 国際船用バース



写真 2.7.37 東側海軍所有施設



写真 2.7.38 湾奥にヨット泊地を望む

出典：JICA 調査団撮影

3. BBB ビジョンに基づく復興計画策定支援

3.1 BBB ビジョン国際発信後の現地情報整理・とりまとめ

(1) BBB ビジョンセミナーの開催

トンガ政府と JICA は、トンガ政府の BBB ビジョンを設定し、将来の開発プロジェクトを検討する際に必要な概念として BBB を示すためのセミナーを共同で開催した。BBB ビジョンについての詳細は Appendix 3-1 に示す。

その目的は下記のとおり。

1. 復興過程における災害リスク削減のための BBB ビジョンを提示する
2. トンガの政府職員、ドナー、NGO などのすべての復興に係わる関係者に、起こりうる将来の危険とその結果生じる災害について情報共有する

会議の開催日は 2022 年 8 月 17 日であり、トゥポウトア・ウルカララ皇太子殿下、宗永健作在トンガ日本大使館大使ご臨席のもと行われた。加えて、セミナーは Zoom 会議でも日本側に発信され、JICA の副理事長をはじめ関係者のほか、外務省、国土交通省、在日トンガ大使館からの参加もあった。

(2) セミナーの報道について

NHK を始め複数のメディア関係者が Zoom 会議に参加し、NHK ワールドニュースにて今回の津波被害とセミナーの報道と合わせて報道された。下記はその放送の WEB リンクである。

1. https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/news/20220817_28/
2. <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220817/k10013775971000.html>

(3) 国王への報告

BBB ビジョンセミナーにご臨席頂いた皇太子閣下から国王に対して、今回の BBB ビジョンセミナーの内容について報告した。国王は BBB ビジョンについて強い興味を持っており、BBB ビジョンを用いた国づくりを進める様にと意見を述べた。

(4) BBB ビジョンの国会承認状況

BBB ビジョンセミナー開催と合わせて、BBB ビジョンを NSPAO の政策として法制化するため、国会承認を受けるべく手続きを行った。2022 年 7 月頃から閣議で承認のプロセスを進めていたが進まず、2023 年になり BBB ビジョンは再度閣議に諮られ、2023 年 6 月 16 日の閣議で以下の決定がなされた。決定された内容については Appendix 3-1 に示す。

1. 提案されているトンガの BBB ビジョンが、2012 年国家空間計画管理法に基づく政府政策として検討され、承認された。
2. 提案されているトンガの BBB ビジョンが、2022 年から 2025 年までの HTHH 火山噴火・津波復興・強靱性構築計画の拡張として受け入れられた。

3. 同内閣は、BBBに関する作業の進捗状況、現在計画段階が最終段階にあり、次のステップは「BBBプロジェクトの実施段階」となることを書き留めた。

(5) ロードマップの国家計画への取り込み

ロードマップの位置づけについて、既にトンガ政府には他ドナーが支援して作成した Hunga-Tonga-Hunga-Ha'apai Volcanic Eruption and Tonga Tsunami (HTHH Disaster) Recovery and Resilience Building Plan 2022 - 2025、Tonga National Infrastructure Investment Plan (NIIP)インフラ投資計画がある中、日本側が別途ロードマップを作成しても法的位置づけが無いものでは実効性が乏しい。

首相府の計画担当者との議論で、長期的に BBB ビジョンの具現化のためには、トンガ戦略的開発枠組み (TSDF) の改訂が 2023 年から予定されており、その中に BBB で示された内容を反映させればよいとの結論になった。今回トンガ政府で確認された BBB ビジョンを具体化するための具体的な方策は、今後改訂される TSDF で議論されることが理想的である。そのためには日本側からも、BBB ビジョン実現に向けた技術的な支援を行い BBB ビジョン実施につなげることを望まれる。

3.2 BBB ビジョンに基づくマルチハザード評価の実装化

3.2.1 ハザードレベルの検討

本業務で対象とするハザードは、今次の災害である火山性津波、降灰に加え、地震性津波、地震、高潮・高波、暴風（サイクロンによる）である。

本項では、トンガにおける各対象ハザードの強度と発生周期を把握し、対象ハザードの評価を実施した上で、防災計画、防災対策の対象とすべきハザードレベルを設定する。具体的には、防災計画・防災対策対象のハザードレベルとして、レベル 1 (L1)、レベル 2 (L2) の 2 種類のハザードレベルを検討する。

各ハザードレベルの強度・頻度と防災計画・対策の考え方について表 3.2.1 に示す。この概念は、2011 年東北地方太平洋沖地震を教訓として段階的に地震・津波の防災対策を行うために導入された考え方であり、日本においては様々なハザードに対する対策に用いている。

表 3.2.1 各ハザードレベルの強度・頻度および対策

ハザードレベル	ハザード強度及び頻度	対策の考え方
レベル 1 (L1)	頻度の高いハザード 最大クラスのハザードより発生頻度が高く低いハザード強度にもかかわらず重大な被害を与えるハザード ¹ ハザードの発生周期：数 10 年～百数十年	人命とその財産、地域経済を守るためにハード対策を実施する。
レベル 2 (L2)	最大クラスのハザード 頻繁には発生しないが、ひとたび発生すれば甚大な被害をもたらすハザード ハザードの発生周期：数百年～数千年	人命救助を第一として、あらゆるソフト対策ハード対策を組み合わせることで住民を避難させるための総合的な対策を実施する。

出典：「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」報告、中央防災会議、2011 年 9 月をもとに JICA 調査団にて作成

3.2.2 津波解析、高潮解析

津波解析については、2022年1月に発生した HTHH 火山による津波をふまえて、頻発する地震性津波と火山性津波の両方を数値解析で検討する。高潮解析については、サイクロン常襲地帯であることから、サイクロンによる高潮を検討する。なお、各解析の検討結果の詳細については、Appendix 3-2に掲載した。ここでは、その概要を示す。

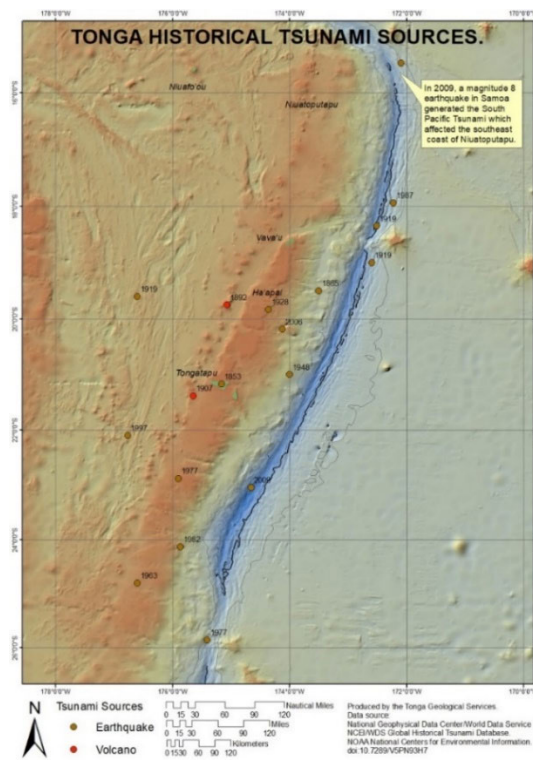
(1) 過去の津波・高潮ハザード

1) 津波ハザード

津波ハザードとしては、トンガにおいては、海底火山の噴火や火山の山体崩壊により発生する火山性津波とトンガ東部に位置するトンガ海溝で発生する地震断層による津波（地震性津波）が考えられる。

トンガにおける過去の津波波源を図 3.2.1 に示す。図中の 18 波源のうち 2 つが火山性の津波波源となっており、2022 年の噴火の事例を加えると 1853 年以降の津波のうち 84%が地震性の津波であり、16%が火山性津波となっている。

津波に関しては、1860 年以降 23 回の津波が記録されているが、その多くは 1m 以下で被害がほとんど発生していない。しかし 1919 年にトンガタプ島中心部で発生した地震によりハアパイ諸島で 2.5m の津波が観測されたことや 1977 年地震によって 3 つの津波が発生したことが記録されている。また、2009 年にサモア沖地震（Mw8.1）が発生し、トンガタプ島の北 600km にあるニアウトプタプ諸島に津波が来襲し、9 名が亡くなった。

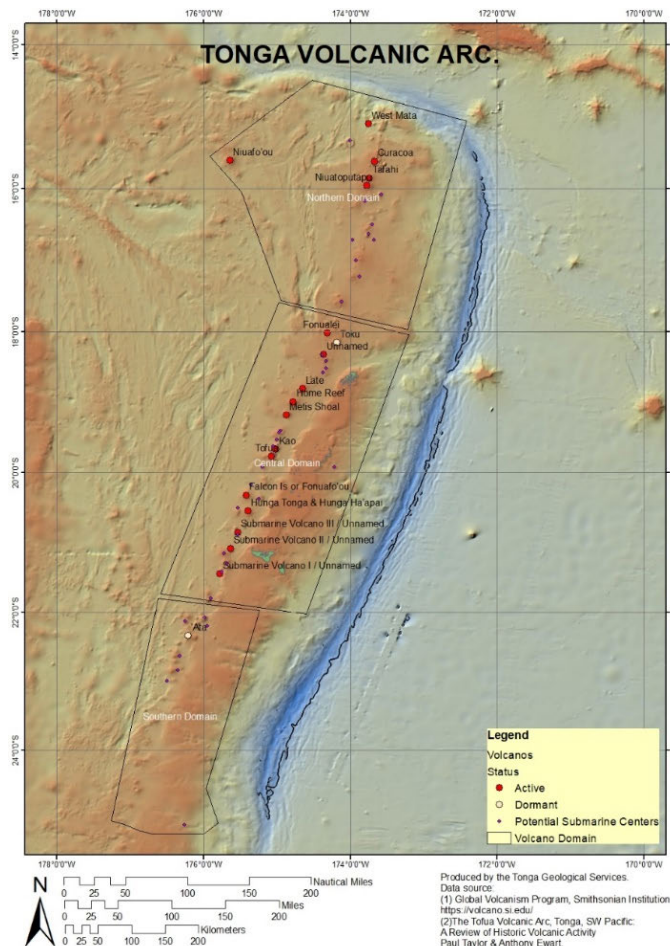


出典：Tonga Geological Service

図 3.2.1 トンガの過去の津波波源

2) 火山性津波

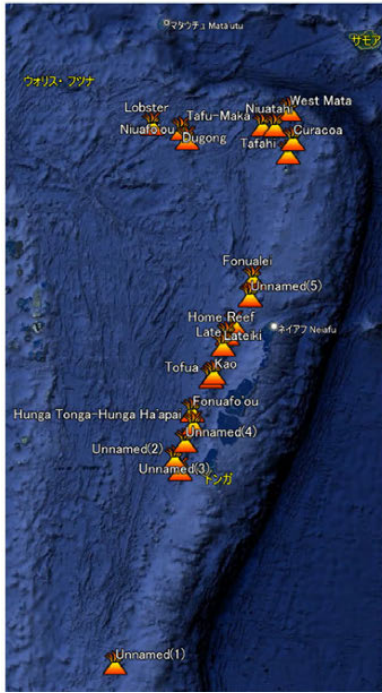
トンガ周辺の火山の配置を図 3.2.2 に示す。トンガの島々の西側に多数の火山が位置しており、火山噴火自体の発生頻度は低いものの、トンガにおいては、火山性津波の発生可能性が非常に高いと言える。



出典：Tonga Geological Service

図 3.2.2 トンガ周辺の火山の分布

過去の火山の発生頻度と規模については、国内支援委員会のメンバーにより整理されている(図 3.2.3)。これによると約 200 年の間に今回の噴火と同程度の火山噴火 (VEI3 以上) が 5~6 回発生しており、30~50 年に 1 回は今回と同規模の火山性津波が、トンガのどこかの島で発生する可能性がある。また、海底火山の一覧を図 3.2.4 に示す。これから対象 21 火山中 9 火山が海中火山となっており、火山性津波の発生可能性は無視できない。



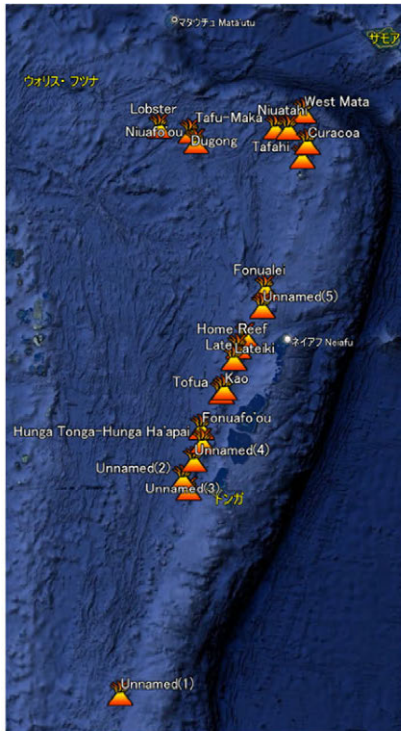
Evaluate the eruption activity of 21 Holocene volcanoes* based on their eruption history.

Volcano Name	21th century	20th and 19th century										Before 18th century				
Lobster																
Dugong																
Niuatou'ou				1985	1946	1943	1935	1929	1912	1887	1886	1867	1853	1814		
Tafu-Maka	2008															
Niuatahi																
West Mata	2008															
Tafahi																
Curacao				1979	1973											
Fonualei				1974	1957	1951	1939	1906	1846							
Unnamed																
Late															1790	
Home Reef	2006			1984	1857	1852										
Lateiki	2019			1995	1991	1979	1967	1894	1886	1878	1858	1852	1851	1781		
Kao																
Tofua	2022	2015	2004	1958	1906	1885	1854	1847	1845					1792	1774	
Fofuafo'ou				1936	1933	1927	1885	1877							1791	
Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	2021	2014	2009	1988	1937	1912									1110	
Unnamed	2017			1999	1923	1911										
Unnamed																
Unnamed				1932	1907											
Unnamed																

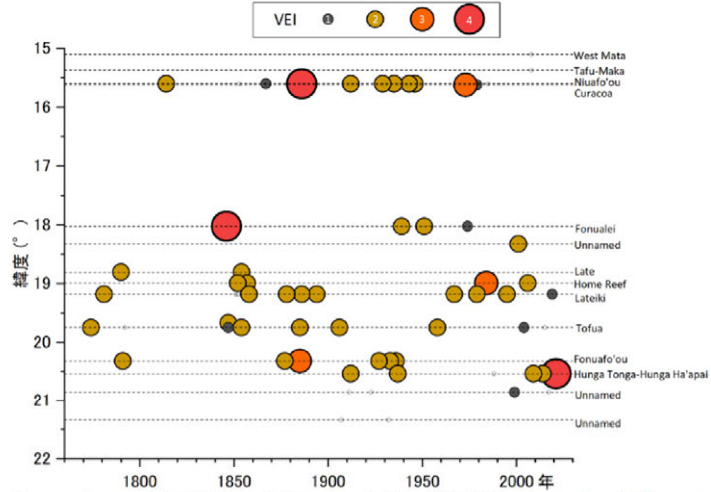
Active Volcanoes: VEI 1, VEI 2, VEI 3, VEI 4
 Inactive volcanoes: VEI 1, VEI 2, VEI 3, VEI 4
 *Extract especially active volcanos listed in the country list on the Smithsonian Institution Global Volcanism Program

- 5 eruptions with VEI 3 or higher and 38 with VEI 2 since the 19th century
- Hazards caused by past eruptions above VEI 3 should be estimated as equivalent to the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption.
- Eruptions affects residential areas are judged to occur more than once every 100 years.

4



Evaluate the eruption activity of 21 Holocene volcanoes* based on their eruption history.



- 5 eruptions with VEI 3 or higher and 38 with VEI 2 since the 19th century
- Hazards caused by past eruptions above VEI 3 should be estimated as equivalent to the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption.
- Eruptions affects residential areas are judged to occur more than once every 100 years.

出典：国内支援委員会メンバーによる資料

図 3.2.3 トンガ周辺の火山噴火の頻度の整理結果

Output to Group C: List of volcanoes in Tonga that can generate tsunamis

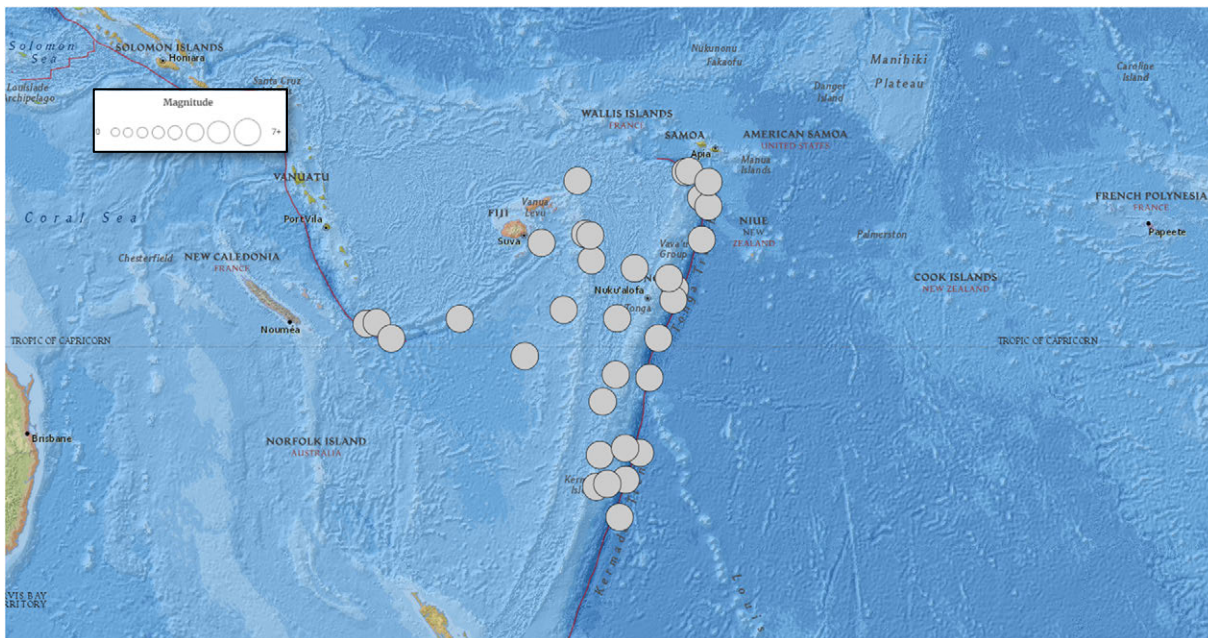
Volcano Name	Location	Last Eruption	Primary Volcano Type	Latitude(°)	Longitude(°)	Elevation (m)
Lobster	Northwest Lau Basin	Unknown - Evidence Uncertain	Submarine	15.333 S	176.283 W	-1500
Dugong	Northwest Lau Basin	Unknown - Evidence Uncertain	Submarine	15.431 S	175.725 W	-1170
Niuafo'ou	Tonga Ridge	1985 CE	Shield	15.6 S	175.63 W	260
Tafu-Maka	Northeast Lau Basin	2008 CE	Submarine	15.37 S	174.23 W	-1400
Niuaatahi	Northeast Lau Basin (Tonga)	Unknown - Unrest / Holocene	Caldera	15.379 S	174.003 W	-1270
West Mata	Tonga Ridge	2009 CE	Submarine	15.1 S	173.75 W	-1174
Tafahi	Tonga Ridge	Unknown - Evidence Uncertain	Stratovolcano	15.85 S	173.72 W	560
Curacoa	Tonga Ridge	1979 CE	Submarine	15.62 S	173.67 W	-33
Fonualei	Tonga Ridge	1957 CE	Stratovolcano	18.023 S	174.317 W	188
Unnamed	Tonga Ridge	2001 CE	Submarine	18.325 S	174.365 W	-40
Late	Tonga Ridge	1854 CE	Stratovolcano	18.806 S	174.65 W	540
Home Reef	Tonga Ridge	2006 CE	Submarine	18.992 S	174.775 W	-10
Lateiki	Tonga Ridge	2019 CE	Submarine	19.18 S	174.87 W	43
Kao	Tonga Ridge	1847 CE	Stratovolcano	19.668 S	175.016 W	1009
Tofua	Tonga Ridge	2022 CE	Caldera	19.75 S	175.07 W	515
Fonuafu'ou	Tonga Ridge	1936 CE	Submarine	20.32 S	175.42 W	-17
Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	Tonga Ridge	2022 CE	Submarine	20.536 S	175.382 W	114
Unnamed	Tonga Ridge	2017 CE	Submarine	20.852 S	175.55 W	-296
Unnamed	Tonga Ridge	Unknown - Evidence Credible	Submarine	21.15 S	175.75 W	-65
Unnamed	Tonga Ridge	1932 CE	Submarine	21.338 S	175.65 W	-68
Unnamed	Tonga Ridge	Unknown - Unrest / Holocene	Submarine	24.8 S	177.02 W	-385

出典：国内支援委員会メンバーによる資料

図 3.2.4 トンガ周辺の火山区分

3) 地震性津波

過去の地震性津波のカタログを図 3.2.5、に示す。これから、1913 年以降多数の地震の記録があり、その中でも大きな津波をもたらすと考えられる M8.0 以上の地震は、8 回も発生している。従って、地震性津波の発生可能性は非常に大きいと言える。



出典：USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

図 3.2.5 トンガ周辺の M7.5 以上の地震発生位置と規模（1913 年～2022 年）

表 3.2.2 トンガ周辺の M7.5 以上の地震発生時刻と規模 (1913 年～2022 年)

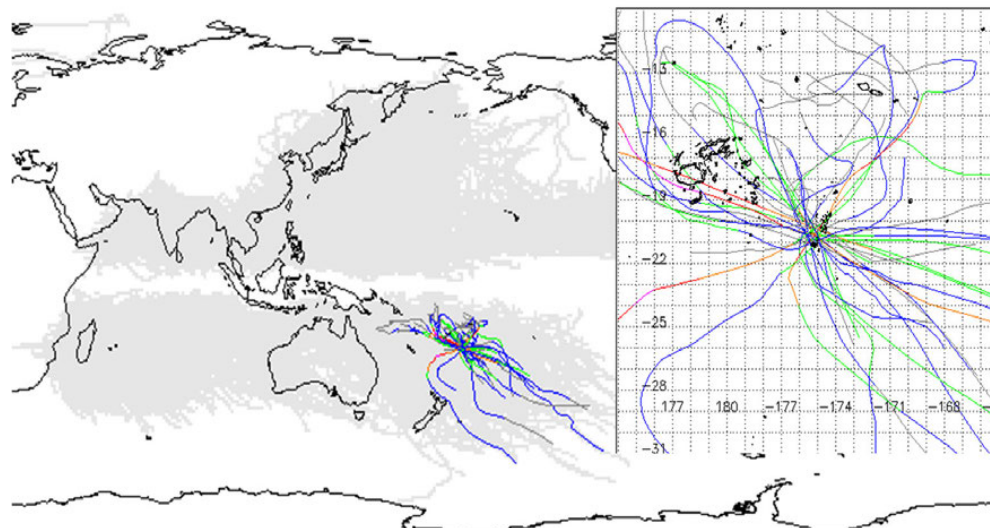
time	latitude	longitude	mag	magType	place	type
1913-06-26T04:57:18.290Z	-20.68	-173.808	7.79	mw	111 km SSE of Pangai, Tonga	earthquake
1917-05-01T18:26:20.360Z	-31.195	-176.653	8.2	mw	Kermadec Islands region	earthquake
1917-06-26T05:49:44.390Z	-14.996	-173.27	8	mw	120 km NNE of Hihifo, Tonga	earthquake
1917-11-16T03:19:35.760Z	-29.849	-177.839	7.5	mw	Kermadec Islands, New Zealand	earthquake
1919-01-01T03:00:34.460Z	-19.318	-178.08	7.8	mw	Fiji region	earthquake
1919-04-30T07:17:16.970Z	-18.322	-172.442	8.1	mw	166 km ENE of Neiafu, Tonga	earthquake
1928-03-16T05:01:05.850Z	-22.36	170.395	7.56	mw	274 km ESE of Tadine, New Caledonia	earthquake
1948-09-08T15:09:14.220Z	-21.222	-173.891	7.5	mw	110 km E of 窠楼honua, Tonga	earthquake
1950-12-14T01:52:54.230Z	-19.705	-175.874	7.8	mw	159 km W of Pangai, Tonga	earthquake
1955-02-27T20:43:27.880Z	-28.336	-175.599	7.52	mw	Kermadec Islands region	earthquake
1956-05-23T20:48:32.710Z	-15.434	-178.803	7.6	mw	144 km SSW of Leava, Wallis and Futuna	earthquake
1963-12-18T00:30:05.470Z	-24.749	-176.844	7.6	mw	south of the Fiji Islands	earthquake
1975-10-11T14:35:15.000Z	-24.894	-175.119	7.8	ms	south of Tonga	earthquake
1975-12-26T15:56:38.700Z	-16.264	-172.467	7.8	ms	146 km ESE of Hihifo, Tonga	earthquake
1976-01-14T16:47:33.500Z	-28.427	-177.657	8	ms	Kermadec Islands region	earthquake
1977-04-02T07:15:22.700Z	-16.696	-172.095	7.6	ms	199 km ESE of Hihifo, Tonga	earthquake
1981-09-01T09:29:31.540Z	-14.96	-173.085	7.7	ms	133 km NE of Hihifo, Tonga	earthquake
1986-10-20T06:46:09.980Z	-28.117	-176.367	7.7	mw	Kermadec Islands region	earthquake
1990-03-03T12:16:27.960Z	-22.122	175.163	7.6	mw	south of the Fiji Islands	earthquake
1994-03-09T23:28:06.780Z	-18.039	-178.413	7.6	mw	240 km E of Levuka, Fiji	earthquake
1997-10-14T09:53:18.150Z	-22.101	-176.772	7.8	mwb	192 km WSW of Haveluloto, Tonga	earthquake
1998-01-04T06:11:58.970Z	-22.301	170.911	7.5	mwc	southeast of the Loyalty Islands	earthquake
2002-08-19T11:01:01.190Z	-21.696	-179.513	7.7	mwc	Fiji region	earthquake
2002-08-19T11:08:24.310Z	-23.884	178.495	7.7	mwc	south of the Fiji Islands	earthquake
2006-05-03T15:26:40.290Z	-20.187	-174.123	8	mwc	47 km SSE of Pangai, Tonga	earthquake
2007-12-09T07:28:20.820Z	-25.996	-177.514	7.8	mwc	south of the Fiji Islands	earthquake
2009-03-19T18:17:40.470Z	-23.043	-174.66	7.6	mwc	191 km S of 窠楼honua, Tonga	earthquake
2009-09-29T17:48:10.990Z	-15.489	-172.095	8.1	mwc	168 km SSW of Matavai, Samoa	earthquake
2011-07-06T19:03:18.260Z	-29.539	-176.34	7.6	mww	Kermadec Islands region	earthquake
2018-08-19T00:19:40.670Z	-18.1125	-178.153	8.2	mww	267 km E of Levuka, Fiji	earthquake
2018-09-06T15:49:18.710Z	-18.4743	179.3502	7.9	mww	45 km S of Levuka, Fiji	earthquake
2021-02-10T13:19:55.530Z	-23.0511	171.6566	7.7	mww	southeast of the Loyalty Islands	earthquake
2021-03-04T19:28:33.178Z	-29.7228	-177.279	8.1	mww	Kermadec Islands, New Zealand	earthquake

出典：USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>より JICA 調査団が作成

4) 高潮ハザード

トンガでは、サイクロンが毎年来襲しており、高頻度で高潮も発生する。NOAA の IBTrACS によると、1947 年以降トンガタブ島周辺を通過したカテゴリー⁸以上のサイクロンは 7 個、カテゴリー³以上は 17 個あり、巨大なサイクロンが 5 年に 1 回は来襲している。

⁸ カテゴリーは、Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale に基づく熱帯低気圧の区分である。カテゴリー³は最大風速 50～57m/s、カテゴリー⁴は最大風速 58～69m/s となる熱帯低気圧で甚大な被害が発生する可能性が高い。



出典 : <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs>

図 3.2.6 トンガタブ島周辺を通過したサイクロン (1947年～2022年)

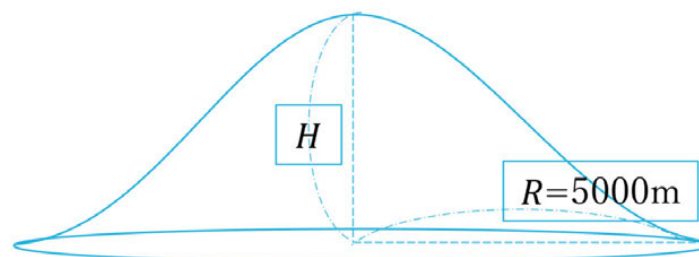
(2) 火山性津波の解析

1) 解析方法

a. 津波波源の想定

- 波源モデル

本業務では火山性津波の波源モデルとして、コーン型の津波波源を設定する (図 3.2.7)。国内支援委員会による検討結果に基づき、2022年1月の HTHH 火山噴火による津波高を再現できるよう、コーンの形状はサインカーブを仮定し、半径を 5km、水位上昇量の最大値を 30~90m とする。



R : distance from the burst center [m]

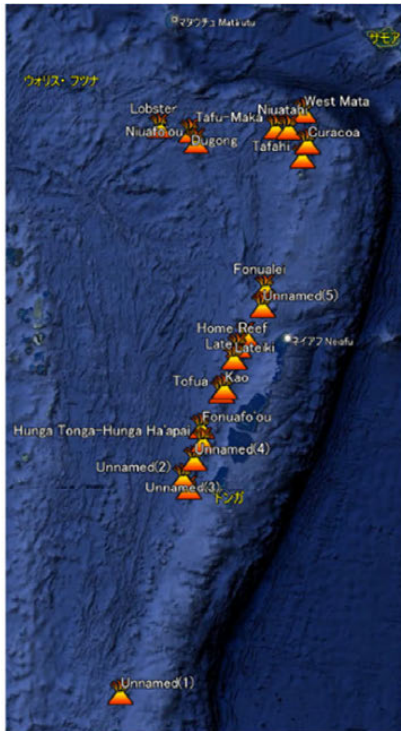
H : Maximum rise [m]

出典 : 国内支援委員会メンバー資料

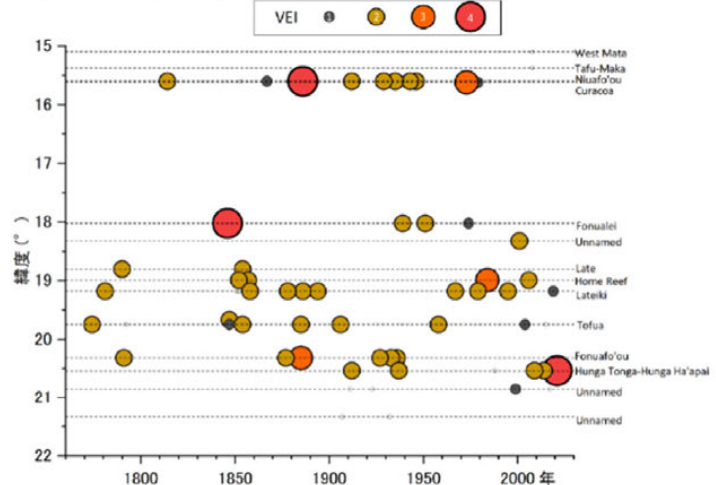
図 3.2.7 津波波源の設定イメージ図

• 対象火山

過去の火山噴火の発生頻度と規模については、国内支援委員会メンバーにより整理されている(図 3.2.8)。これによると約 200 年の間に今回の噴火と同程度の火山噴火 (VEI3 以上) が 6 回発生しており、今後も同規模の火山噴火が発生する可能性がある。



Evaluate the eruption activity of 21 Holocene volcanoes* based on their eruption history.



- 5 eruptions with VEI 3 or higher and 38 with VEI 2 since the 19th century
- Hazards caused by past eruptions above VEI 3 should be estimated as equivalent to the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption.
- Eruptions affects residential areas are judged to occur more than once every 100 years.

出典：国内支援委員会資料

図 3.2.8 トンガ周辺の過去の火山噴火の頻度の整理結果

また、トンガ周辺の火山の一覧を表 3.2.3 に示す。これから 21 火山中 9 火山が海中火山となっており、火山性津波の発生可能性は無視できないと言える。本業務では、これらの海底火山のうち、沖合の 15 秒メッシュ領域内に含まれ、トンガタブ島への影響が大きいと考えられる 8 火山を対象として津波解析を実施する。計算対象とする火山位置を図 3.2.9 に示す。

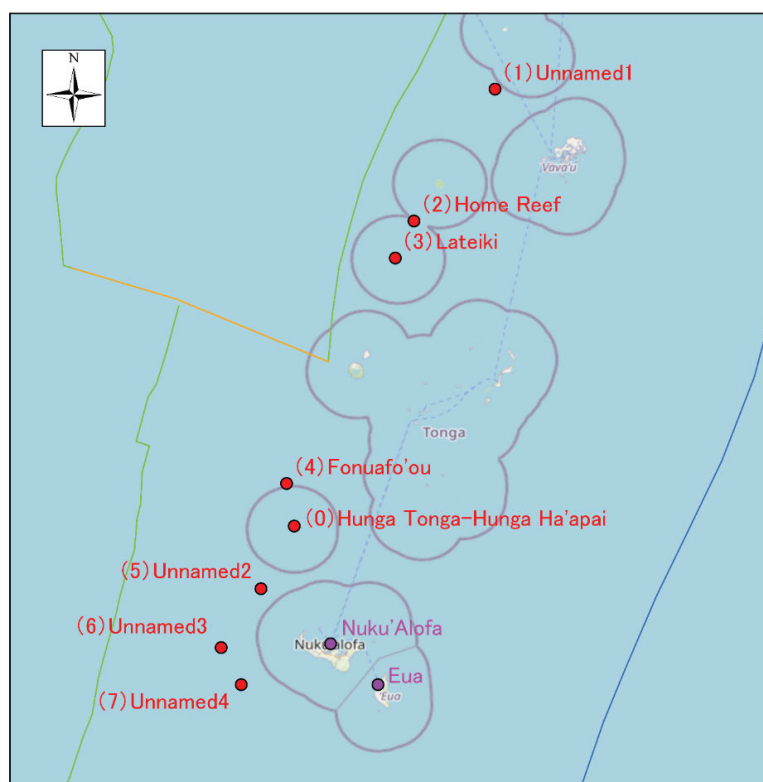
表 3.2.3 トンガ周辺の火山一覧

火山名	場所	最終噴火	主な火山タイプ	緯度 (degree)	経度 (degree)	高さ (m)
Lobster	Northwest Lau Basin	Unknown - Evidence Uncertain	submarine	15.333 S	176.283 W	-1500
Dugong	Northwest Lau Basin	Unknown - Evidence Uncertain	submarine	15.431 S	175.725 W	-1170
Niuafo'ou	Tonga Ridge	1985 CE	shield	15.6 S	175.63 W	260
Tafu-Maka	Northwest Lau Basin	2008 CE	submarine	15.37 S	174.23 W	-1400
Niuatahi	Northwest Lau Basin (Tonga)	Unknown - Unrest / Holocene	caldera	15.379 S	174.003 W	-1270
West Mata	Tonga Ridge	2009 CE	submarine	15.1 S	173.75 W	-1174
Tafahi	Tonga Ridge	Unknown - Evidence Uncertain	stratovolcano	15.85 S	173.72 W	560
Curacao	Tonga Ridge	1979 CE	submarine	15.62 S	173.67 W	-33

火山名	場所	最終噴火	主な火山タイプ	緯度 (degree)	経度 (degree)	高さ (m)
Fonualei	Tonga Ridge	1957 CE	stratovolcano	18.023 S	174.317 W	188
Unnamed1	Tonga Ridge	2001 CE	submarine	18.325 S	174.365 W	-40
Late	Tonga Ridge	1854 CE	stratovolcano	18.806 S	174.65 W	540
Home Reef	Tonga Ridge	2006 CE	submarine	18.992 S	174.775 W	-10
Lateiki	Tonga Ridge	2019 CE	submarine	19.18 S	174.87 W	43
Kao	Tonga Ridge	1847 CE	stratovolcano	19.668 S	175.016 W	1009
Tofua	Tonga Ridge	2022 CE	caldera	19.75 S	175.07 W	515
Fonuafo'ou	Tonga Ridge	1936 CE	submarine	20.32 S	175.42 W	-17
Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	Tonga Ridge	2022 CE	submarine	20.536 S	175.382 W	114
Unnamed2	Tonga Ridge	2017 CE	submarine	20.852 S	175.55 W	-296
Unnamed3	Tonga Ridge	Unknown - Evidence Uncertain	submarine	21.15 S	175.75 W	-65
Unnamed4	Tonga Ridge	1932 CE	submarine	21.338 S	175.65 W	-68
Unnamed5	Tonga Ridge	Unknown - Unrest / Holocene	submarine	24.8 S	177.02 W	-385

□ : 海底火山、 赤字 : 計算対象とする火山

出典 : 国内支援委員会メンバー資料



Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典 : JICA 調査団作成

図 3.2.9 計算対象火山位置図

b. 数値解析手法

エウア島も対象に拡張した広域モデルで 2022 年 1 月の噴火による津波の再現計算を行う。解析モデルは、STOC⁹を用いる。基本となる STOC モデルについては、国内支援委員会の中央大学有川教授より提供されたモデルを使用した。

STOC-ML は、津波による流体運動を計算するための、静水圧近似を使用した準三次元モデルである。沖合の津波では静水圧近似が良い近似となることが従来の研究により分かっているため、太平洋などを伝播する津波の計算には STOC-ML を適用する。

c. 数値解析条件

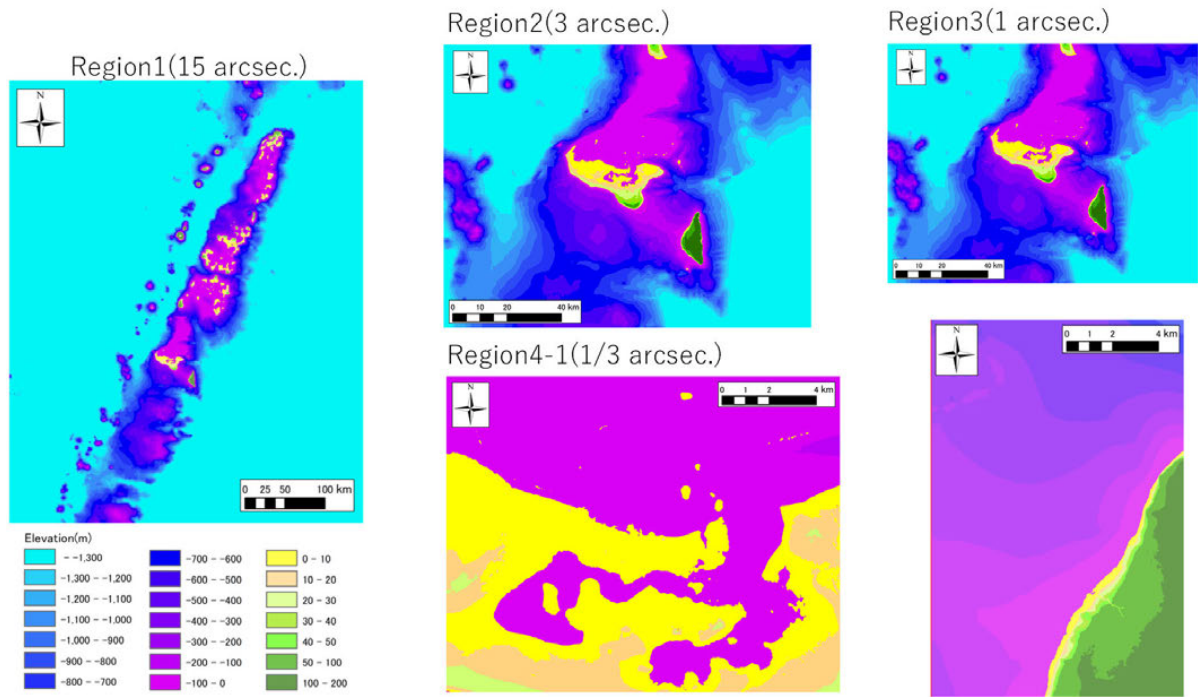
計算条件一覧を表 3.2.4 に示す。

表 3.2.4 計算条件

項目	計算条件
メッシュ構成	Region1 (15 秒 (約 450m) メッシュ) : トンガトレンチ周辺
	Region2 (3 秒 (約 90m) メッシュ) : トンガタブ島、エウア島周辺
	Region3 (1 秒 (約 30m) メッシュ) : トンガタブ島、エウア島周辺
	Region4 (1/3 秒 (約 10m) メッシュ) : トンガタブ島、エウア島市街地部
解析手法	STOC-ML (Tomita and Kakinuma, 2005)
対象津波	2022 年 1 月 15 日 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai 火山で発生した噴火に伴う津波
波源	中央大学モデル (Hunga Tonga-Hunga Ha'apai 火山の位置に、半径 5km、最大水位上昇量 30m の波源を設定)
地形条件	東北大学の地形データを基に、90m メッシュ領域、30m メッシュ領域にエウア島の範囲を追加
潮位条件	M.S.L. (平均海面水位) +0m
計算時間	地震発生後 : 5 時間
	時間解像度 : 最小 0.01sec
その他	構造物 : 無し

出典 : JICA 調査団作成

⁹ Tomita and Kakinuma: Development of Storm Surge and Tsunami Numerical Simulator STOC Considering 3-Dimensionality of Seawater Flow and Its Application to Tsunami Analysis, Report of Port and Research Institute, Vol.44, No.2, pp.83-98, 2005.



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.10 計算地形モデル



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.11 現況護岸モデル

d. 数値解析ケース

数値解析ケースは次の通りである。

表 3.2.5 数値解析ケース

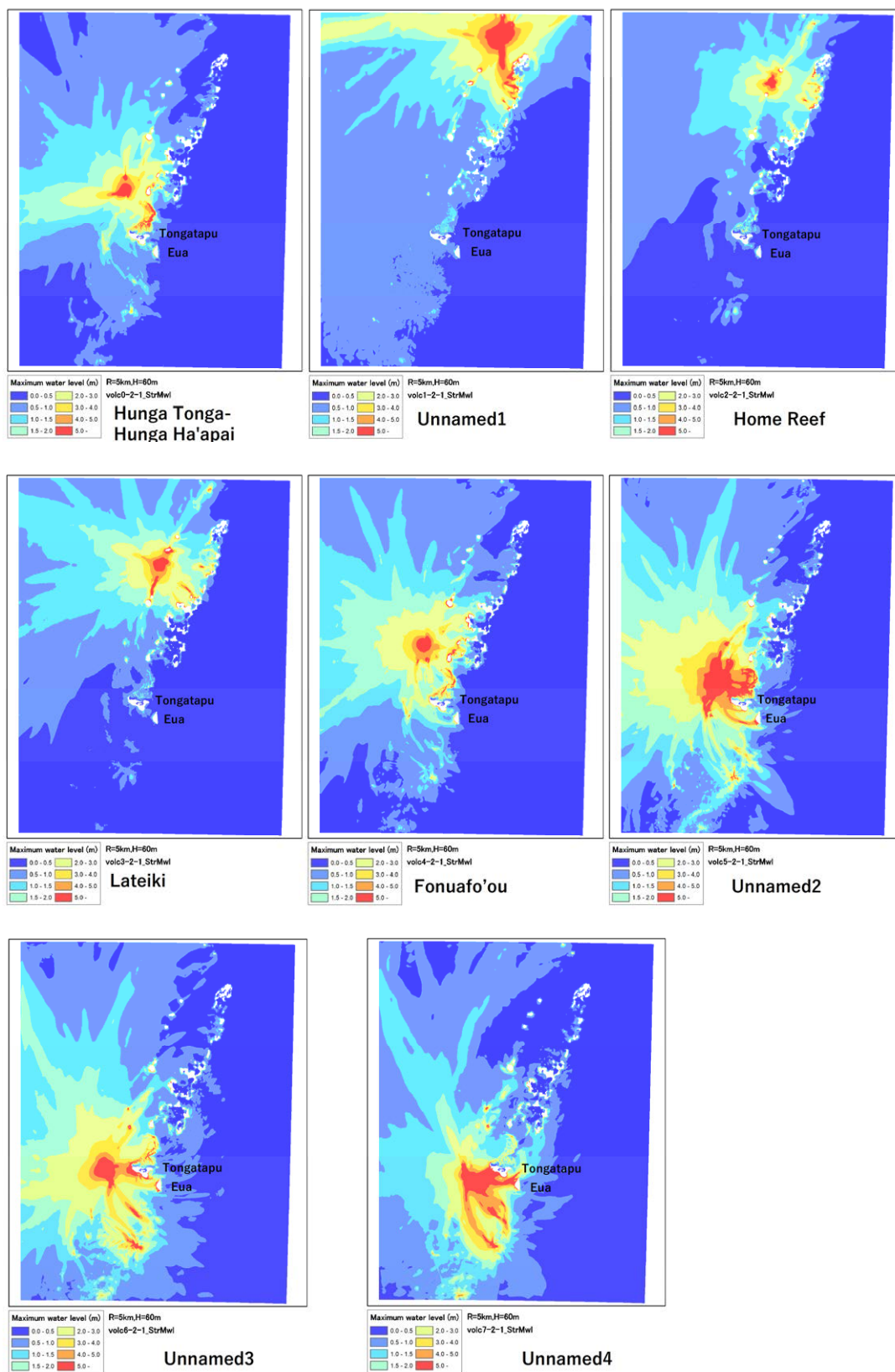
Source	CASE	Volcano name	Tsunami Source	Structure	Minimum Region	
Volcanic Tsunami	Volc0-1-1	Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	R=5km、H=30m	Exitsting Seawall (Tongatapu Island)	reg4-1(Tongatapu Island 1/3sec grid (10m grid)	
	Volc1-1-1	Unnamed1				
	Volc2-1-1	Home Reef				
	Volc3-1-1	Lateiki				
	Volc4-1-1	Fonuafo'ou				
	Volc5-1-1	Unnamed2				
	Volc6-1-1	Unnamed3				
	Volc7-1-1	Unnamed4				
	Volc0-1-2	Hunga Tonga-Hunga Ha'apai				
	Volc1-1-2	Unnamed1				
	Volc2-1-2	Home Reef				
	Volc3-1-2	Lateiki				
	Volc4-1-2	Fonuafo'ou				
	Volc5-1-2	Unnamed2				
	Volc6-1-2	Unnamed3				
	Volc7-1-2	Unnamed4				
		Volc0-2-1	Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	R=5km、H=60m	Exitsting Seawall (Tongatapu Island)	reg4-1(Tongatapu Island 1/3sec grid (10m grid)
	Volc1-2-1	Unnamed1				
	Volc2-2-1	Home Reef				
	Volc3-2-1	Lateiki				
	Volc4-2-1	Fonuafo'ou				
	Volc5-2-1	Unnamed2				
	Volc6-2-1	Unnamed3				
	Volc7-2-1	Unnamed4				
	Volc0-2-2	Hunga Tonga-Hunga Ha'apai				
	Volc1-2-2	Unnamed1				
	Volc2-2-2	Home Reef				
	Volc3-2-2	Lateiki				
Volc4-2-2	Fonuafo'ou					
Volc5-2-2	Unnamed2					
Volc6-2-2	Unnamed3					
Volc7-2-2	Unnamed4					
	Volc0-3-1	Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	R=5km、H=90m	Exitsting Seawall (Tongatapu Island)	reg4-1(Tongatapu Island 1/3sec grid (10m grid)	
Volc1-3-1	Unnamed1					
Volc2-3-1	Home Reef					
Volc3-3-1	Lateiki					
Volc4-3-1	Fonuafo'ou					
Volc5-3-1	Unnamed2					
Volc6-3-1	Unnamed3					
Volc7-3-1	Unnamed4					
Volc0-3-2	Hunga Tonga-Hunga Ha'apai					
Volc1-3-2	Unnamed1					
Volc2-3-2	Home Reef					
Volc3-3-2	Lateiki					
Volc4-3-2	Fonuafo'ou					
Volc5-3-2	Unnamed2					
Volc6-3-2	Unnamed3					
Volc7-3-2	Unnamed4					

出典：JICA 調査団作成

2) 解析結果

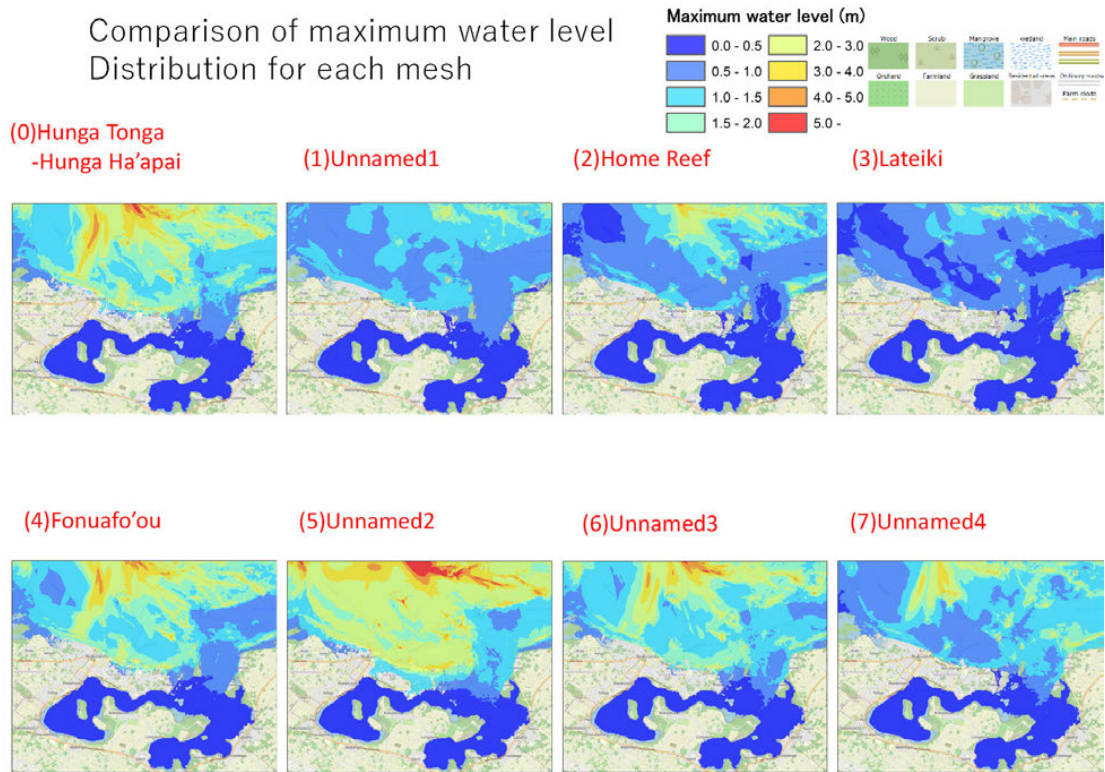
次頁より解析結果の一例を示す。全ての計算結果については、別冊参考資料に掲載する。

図 3.2.12 から、火山性津波は、火山を中心にほぼ同心円状に波が伝播するため、特に火山に近い島の津波水位が高い。図 3.2.13 及び図 3.2.14 よりヌクアロファでは、トンガタプ島の北西側に位置する HTHH 火山や Unnamed2 火山による津波の影響が大きいといえる。一方、エウア島オホヌアにおいては、エウア島西側に位置する Unnamed3 及び Unnamed4 火山による津波の影響が大きい。なお、HTHH 火山や Unnamed2 火山は、トンガタプ島が波を遮蔽するため、エウア島オホヌアにおいては影響が小さくなっている。



出典：JICA 調査団作成

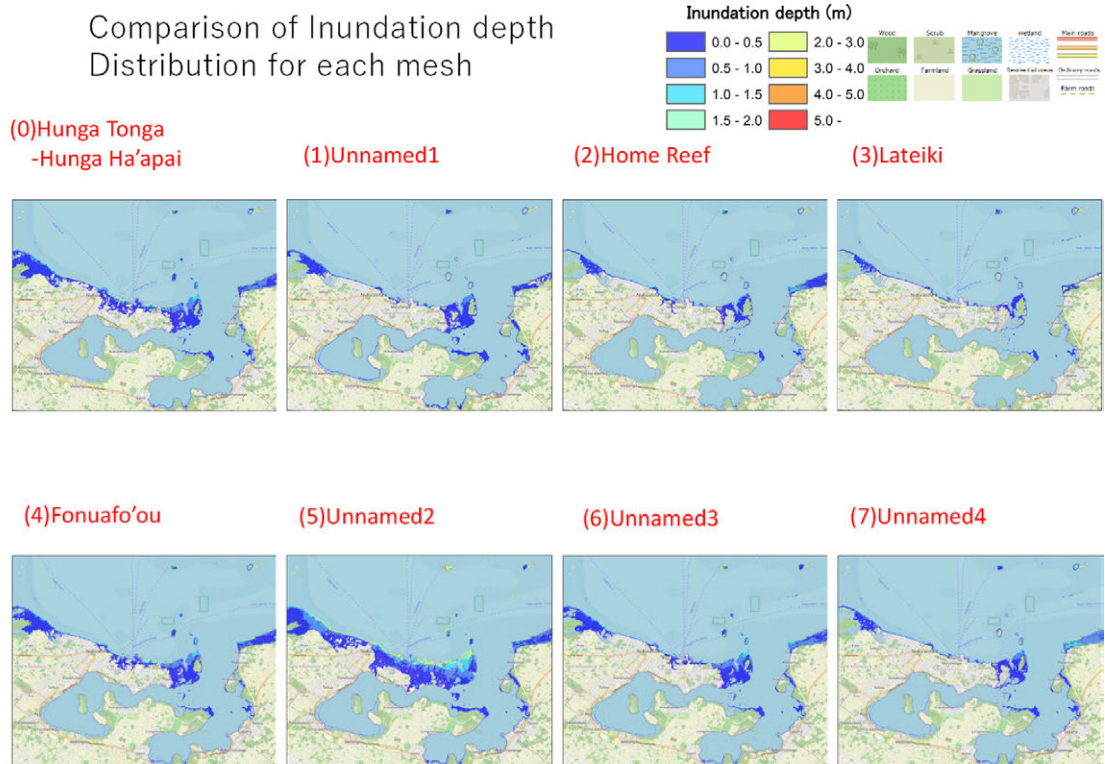
図 3.2.12 各火山の最大水位分布 (R=5km, H=60m)



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.13 ヌクアロファにおける最大水位分布 (R=5km, H=60m)

Maximum Inundation Depth at Nuku'alofa (R=5km, H=60m)

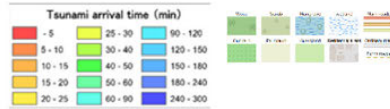


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.14 ヌクアロファにおける最大浸水深分布 (R=5km, H=60m)

Tsunami Arrival Time at Nuku'alofa (R=5km, H=60m)

Comparison of Tsunami Arrival Time Distribution for each mesh

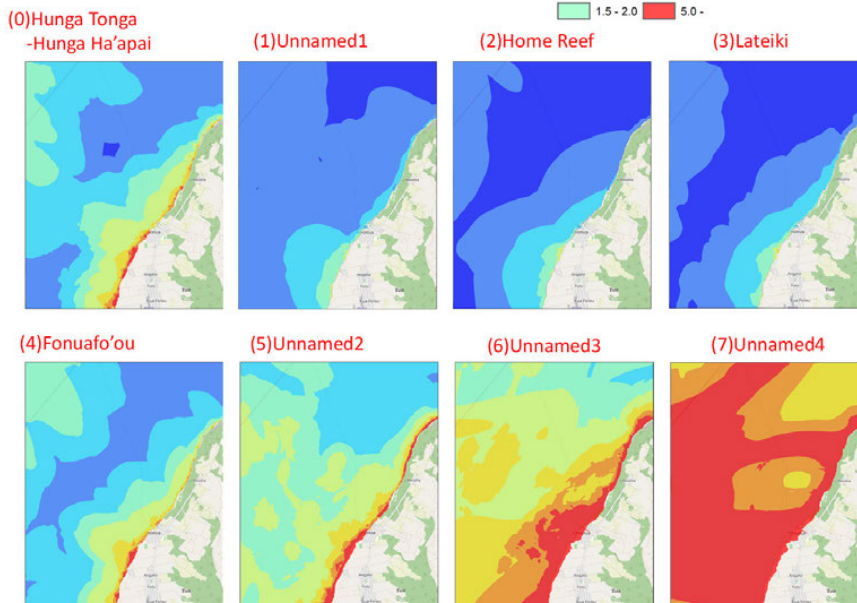
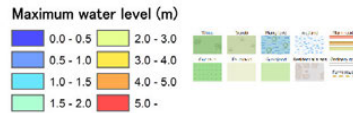


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.15 ヌクアロファにおける津波到達時間分布 (R=5km, H=60m)

Maximum Water Level at Ohonua, Eua Island (R=5km, H=60m)

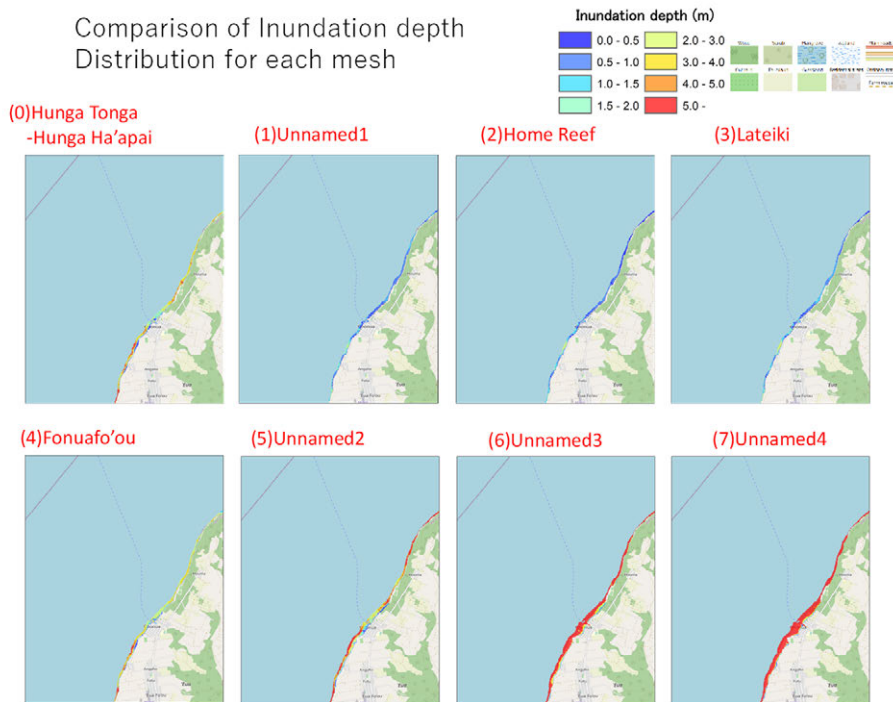
Comparison of maximum water level Distribution for each mesh



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.16 オホヌアにおける最大水位分布 (R=5km, H=60m)

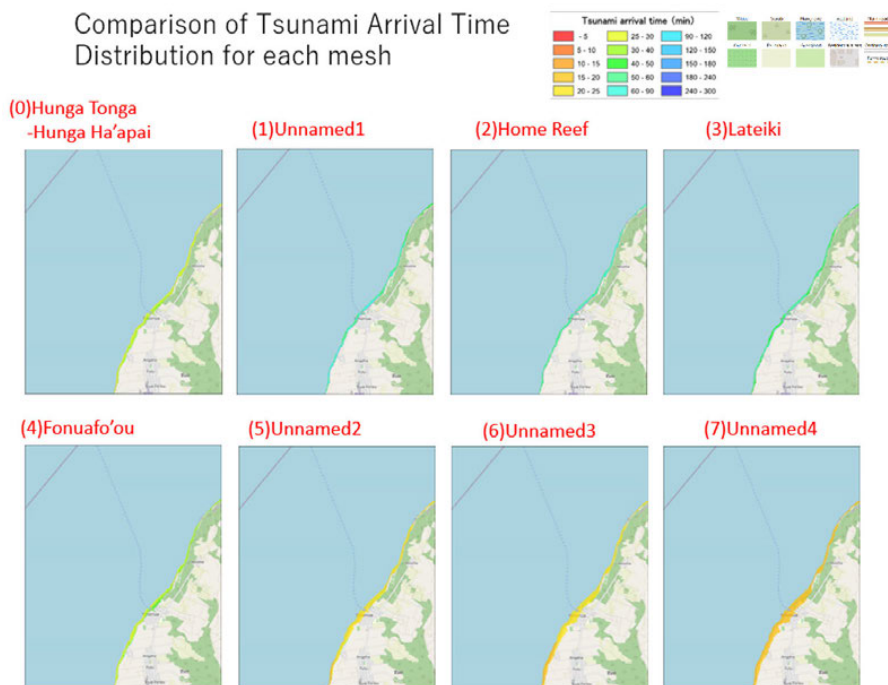
Maximum Inundation Depth at Ohonua, Eua Island (R=5km, H=60m)



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.17 オホヌアにおける最大浸水深分布 (R=5km, H=60m)

Tsunami Arrival Time at Ohonua, Eua Island (R=5km, H=60m)



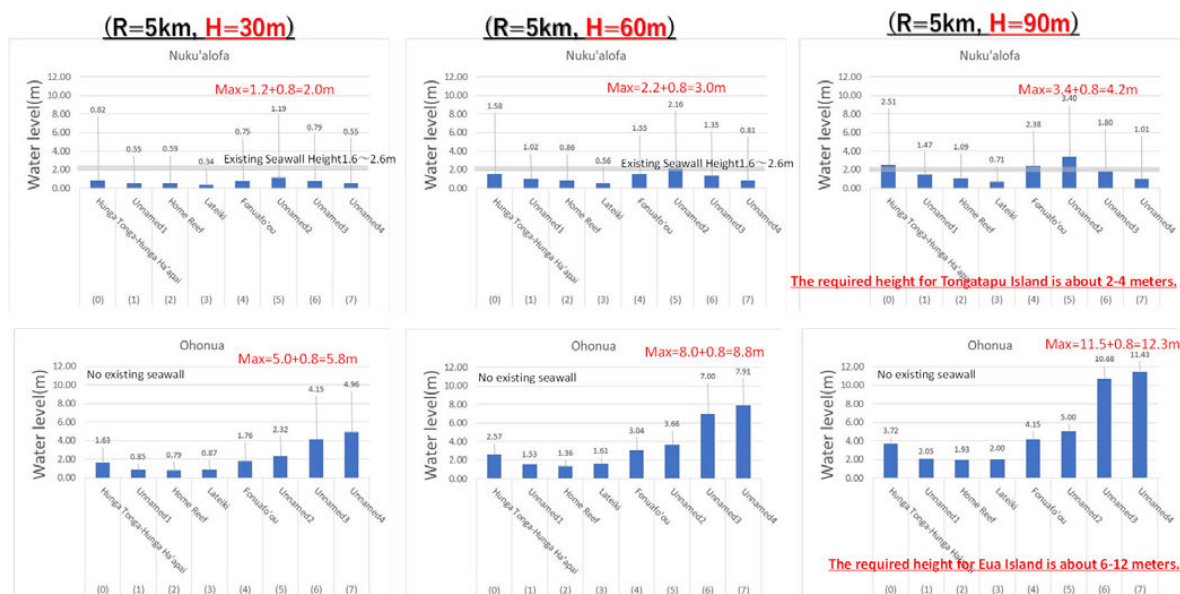
出典：JICA 調査団作成

図 3.2.18 オホヌアにおける津波到達時間分布 (R=5km, H=60m)

3) 対策護岸の必要天端高の検討

これまでの火山性津波の解析結果をふまえて、津波のハザードレベルの検討を行う。2022年 HTHH 火山と同規模の津波をレベル 1 (L1) のハザード (ハード対策での防護を行う対象) とした場合の対策護岸の必要天端高を以下に示す。

対策護岸の必要天端高は、ヌクアロファで M.S.L.+4m、オホヌアで M.S.L.+12m の高さとなり、現況護岸より (M.S.L.+2m) よりも大幅に必要な高が大きくなることになる。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.19 火山性津波の対策護岸の必要天端高

(3) 地震性津波の解析

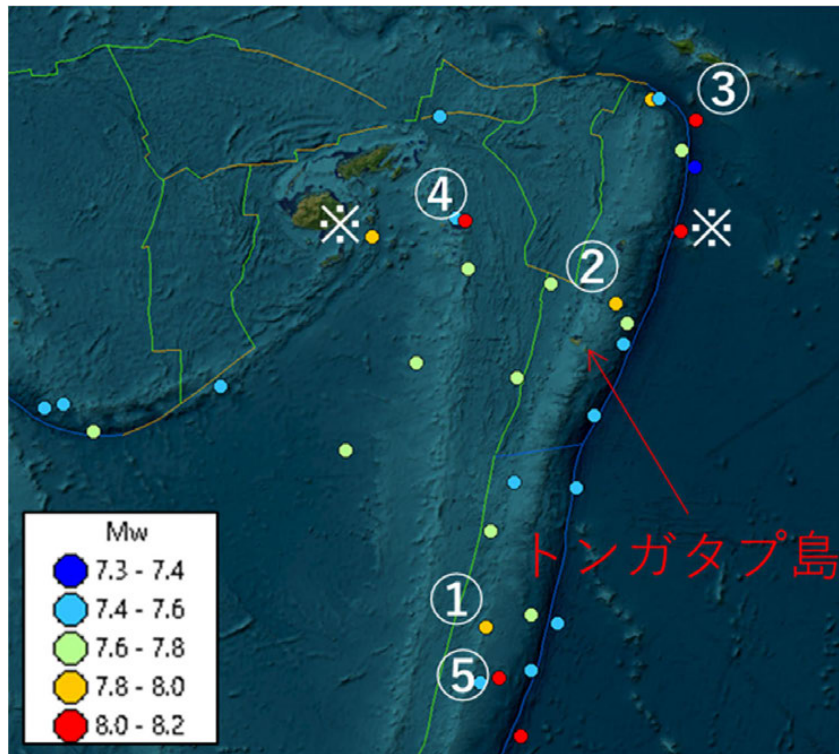
1) 解析方法

a. 津波波源の想定

- 対象地震

本業務では、アメリカ地質調査所 (USGS) の地震カタログより、1913 年以降に発生した地震のうち、モーメントマグニチュード (Mw) が上位となる地震を抽出する。抽出した上位 5 つの地震を対象として、断層パラメータを設定し、津波解析を実施する。

対象地震の震源位置図を図 3.2.20 に示す。なお、1975 年以前の地震については、CMT 解や余震分布等の情報が少なく、断層パラメータの設定が困難であるため、対象から除外する。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.20 震源位置図

- 対象地震の断層パラメータの設定

対象地震の津波断層をモデル化するにあたり、断層面を1枚の矩形断層で近似する。

断層モデルの設定に当たっては、表 2.6.1 のパラメータを USGS の地震カタログ¹⁰、地震調査研究推進本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法¹¹」（2020年3月）、土木学会の「原子力発電所の津波評価技術 2016¹²」（2016年9月）をもとに設定した。

本業務で設定した断層パラメータ及び地盤変動量分布を次頁より示す。

¹⁰ USGS Earthquake Catalog: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

¹¹ 震源断層を特定した地震の強震動予測手法，地震調査研究推進本部： https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf

¹² 原子力発電所の津波評価技術，土木学会： <https://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/84>

Fault Model for Tsunami①
1976/1/14 Earthquake (Mw7.9)

Latitude (°)	Lat	-28.29
Longitude (°)	Long	-177.15
Depth at Top (km)	d	23
Length (km)	L	83.496
Width (km)	W	83.5
Strike (°)	strike	189
Angle of Slope (°)	dip	11
Slide Angle (°)	rake	71
Slip Amount (m)	D	2.41
Moment		
Magnitude	Mw	7.9

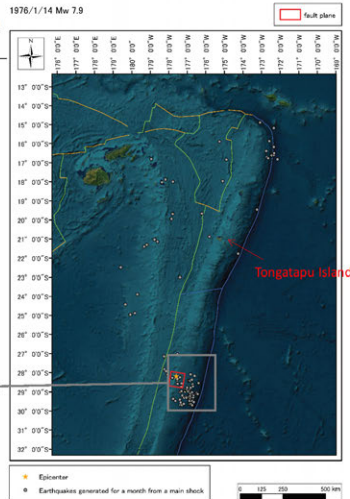
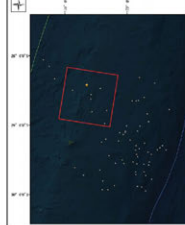


Fig. 7 1976/1/14 Epicenter location and aftershock distribution of the earthquake

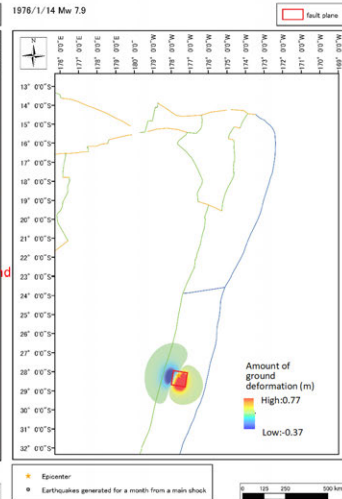


Fig. 8 Distribution of ground deformation①
※Calculated by Okada (1985) formula 42

Fault Model for Tsunami②
2006/5/3 Earthquakes (Mw8.0)

Latitude (°)	Lat	-20.39
Longitude (°)	Long	-173.56
Depth at Top (km)	d	6.9
Length (km)	L	49.412
Width (km)	W	147.74
Strike (°)	strike	222
Angle of Slope (°)	dip	19
Slide Angle (°)	rake	117
Slip Amount (m)	D	3.45
Moment		
Magnitude	Mw	8

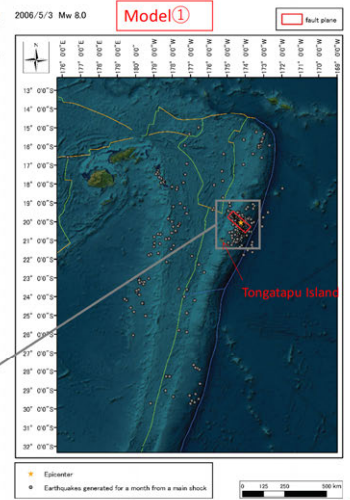
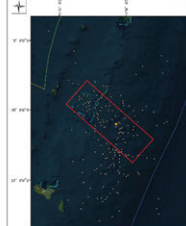


Fig. 9 2006/5/3 Epicenter location and aftershock distribution of the earthquake

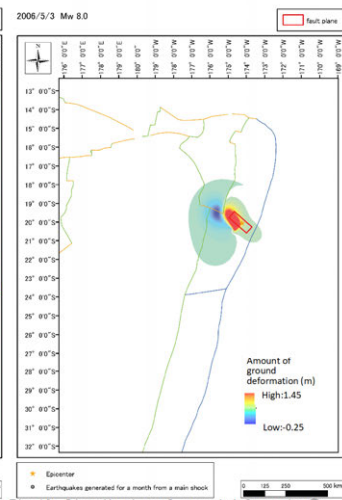


Fig. 10 Distribution of ground deformation②
※Calculated by Okada (1985) formula 43

Model②
Fault Model for Tsunami
2006/5/3 Earthquakes (Mw8.0)

Latitude (°)	Lat	-20.94
Longitude (°)	Long	-174.37
Depth at Top (km)	d	6.9
Length (km)	L	145.139
Width (km)	W	50.298
Strike (°)	strike	13
Angle of Slope (°)	dip	73
Slide Angle (°)	rake	81
Slip Amount (m)	D	3.45
Moment		
Magnitude	Mw	8

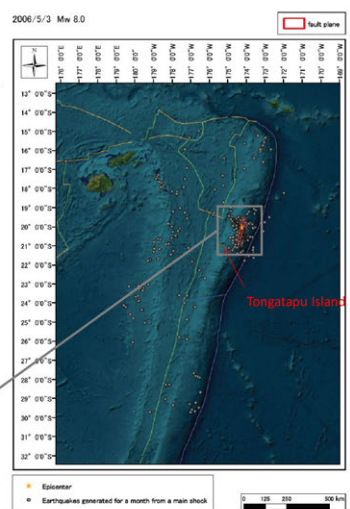
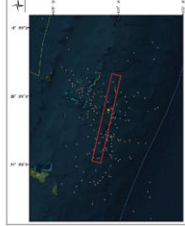


Fig. 3 2006/5/3 Epicenter location and aftershock distribution of the earthquake

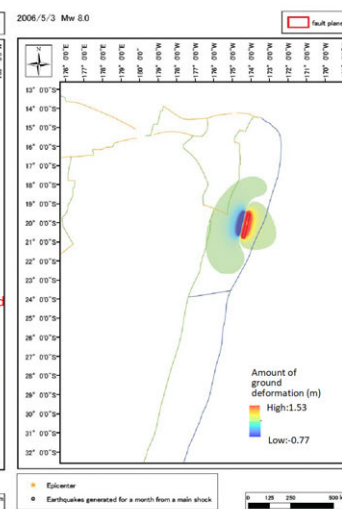


Fig. 4 Distribution of ground deformation
※Calculated by Okada (1985) formula 44

出典：JICA 調査団作成

図 3.2.21 断層モデル (1)

Fault Model for Tsunami③

2009/9/29 Earthquakes (Mw8.1)

※Source: Baevn et al. (2010)

		Fault①	Fault②
Latitude (°)	Lat	-16.061	-15.408
Longitude (°)	Long	-172.234	-172.382
Depth at Top (km)	d	13	18
Length (km)	L	114.0	109.0
Width (km)	W	28.0	90.0
Strike (°)	strike	352	175
Angle of Slope (°)	dip	48	16
Slide Angle (°)	rake	319	85
Slip Amount (m)	D	8.6	4.1
Moment			
Magnitude	Mw	7.9	8.0

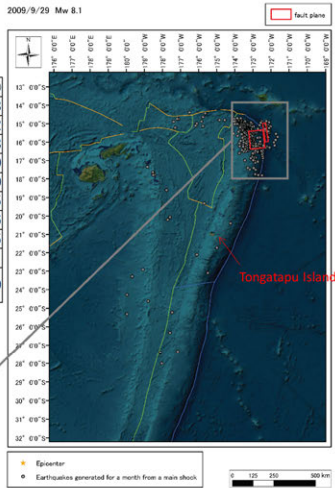
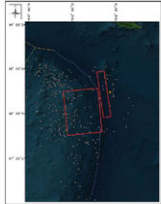


Fig. 11 2009/9/29 Epicenter location and aftershock distribution of the earthquake

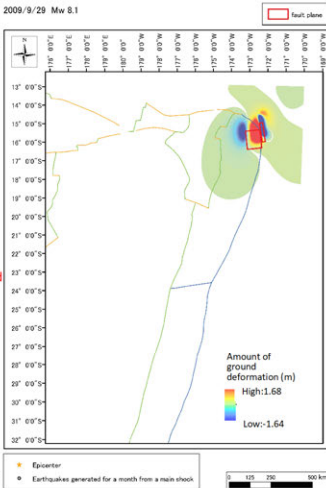


Fig. 12 Distribution of ground deformation③
※Calculated by Okada (1985) formula 45

Fault Model for Tsunami④

2018/8/19 Earthquakes (Mw8.2)

Latitude (°)	Lat	-18.33
Longitude (°)	Long	-178.47
Depth at Top (km)	d	489.97
Length (km)	L	73.46
Width (km)	W	157.5
Strike (°)	strike	18
Angle of Slope (°)	dip	69
Slide Angle (°)	rake	266
Slip Amount (m)	D	3.1
Moment		
Magnitude	Mw	8.2

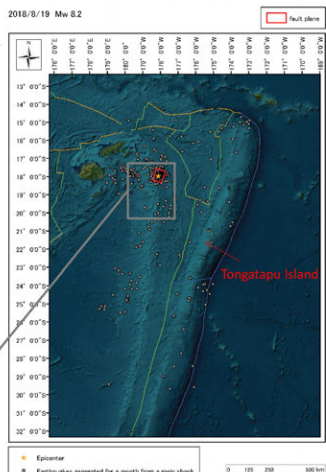
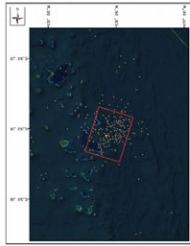


Fig. 13 2018/8/19 Epicenter location and aftershock distribution of the earthquake

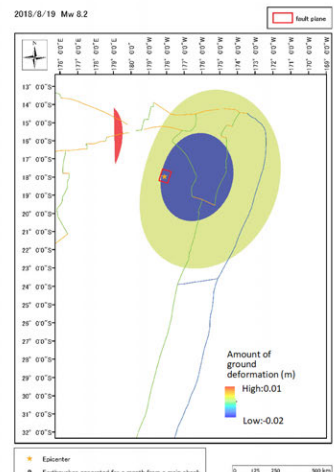


Fig. 14 Distribution of ground deformation④
※Calculated by Okada (1985) formula 46

Fault Model for Tsunami⑤

2021/3/4 Earthquakes (Mw8.1)

Latitude (°)	Lat	-29.21
Longitude (°)	Long	-176.32
Depth at Top (km)	d	10
Length (km)	L	109.332
Width (km)	W	84.06
Strike (°)	strike	201
Angle of Slope (°)	dip	16
Slide Angle (°)	rake	98
Slip Amount (m)	D	3.87
Moment		
Magnitude	Mw	8.1

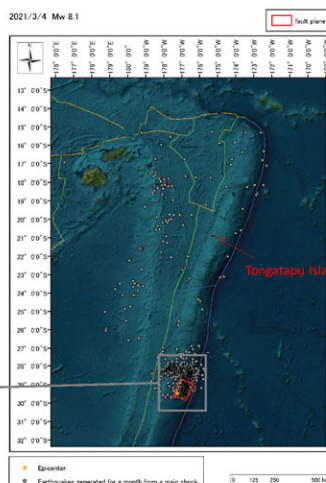
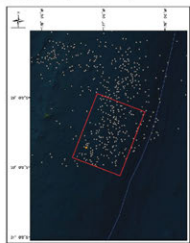


Fig. 15 2021/3/4 Epicenter location and aftershock distribution of the earthquake

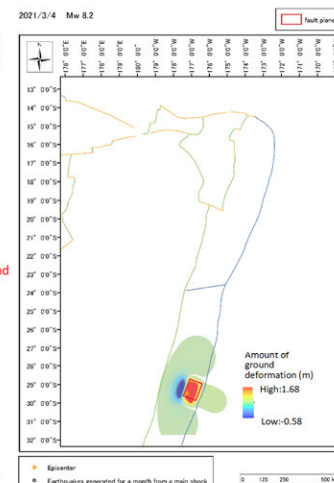


Fig. 16 Distribution of ground deformation⑤
※Calculated by Okada (1985) formula 47

出典：JICA 調査団作成

図 3.2.22 断層モデル (2)

b. 数値解析手法

数値解析手法は、火山性津波と同じとした。ただし、遠方の地震断層については、必要に応じて領域を拡大して津波シミュレーションを実施した。

c. 数値解析条件

数値解析条件も火山性津波と同じとした。

d. 数値解析ケース

数値解析ケースは次の通りである。

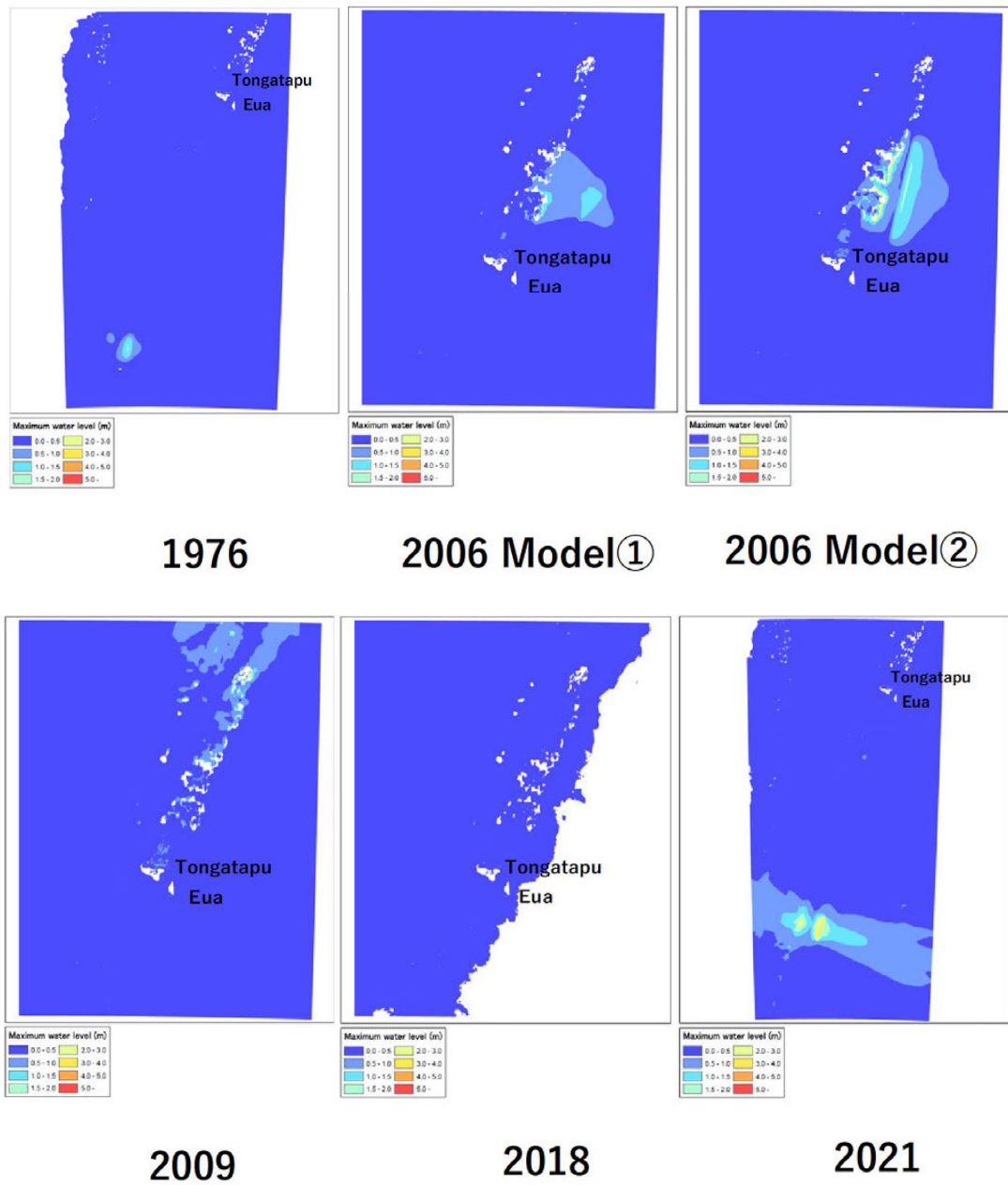
表 3.2.6 数値解析ケース

Source	CASE	Volcano name	Tsunami Source	Structure	Minimum Region
Seismic Tsunami	fault1976-1	1976/1/14 Earthquake	Past Seismic Tsunamis	Exitsting Seawall (Tongatapu Island)	reg4-1(Tongatapu Island 1/3sec grid (10m grid)
	fault2006-1	2006/5/3Earthquake(Model①)			
	fault2006-2	2006/5/3Earthquake(Model②)			
	fault2009-1	2009/9/29 Earthquake			
	fault2018-1	2018/8/19 Earthquake			
	fault2021-1	2021/3/4 Earthquake		-	reg4-2(Eua Island) 1/3sec grid (10m grid)
	fault1976-2	1976/1/14 Earthquake			
	fault2006-1	2006/5/3Earthquake(Model①)			
	fault2006-2	2006/5/3Earthquake(Model②)			
	fault2009-2	2009/9/29 Earthquake			
fault2018-2	2018/8/19 Earthquake				
fault2021-2	2021/3/4 Earthquake				

出典：JICA 調査団作成

2) 解析結果

次頁より解析結果の一例を示す。全ての計算結果については、Appendix 3-2 に掲載する。

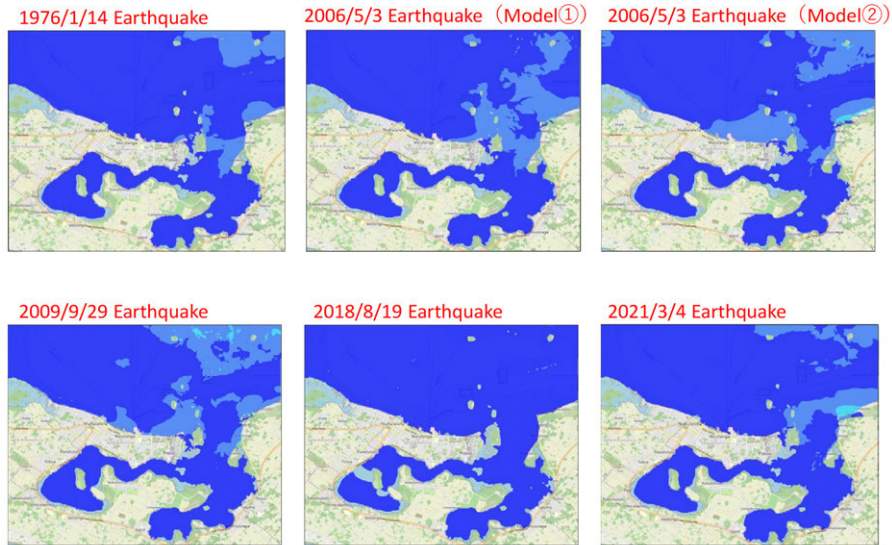
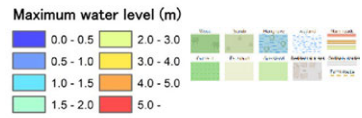


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.23 各地震断層の最大水位分布 (R=5km, H=60m)

Maximum Water Level at Nuku'alofa (Past Earthquake)

Comparison of maximum water level
Distribution for each mesh

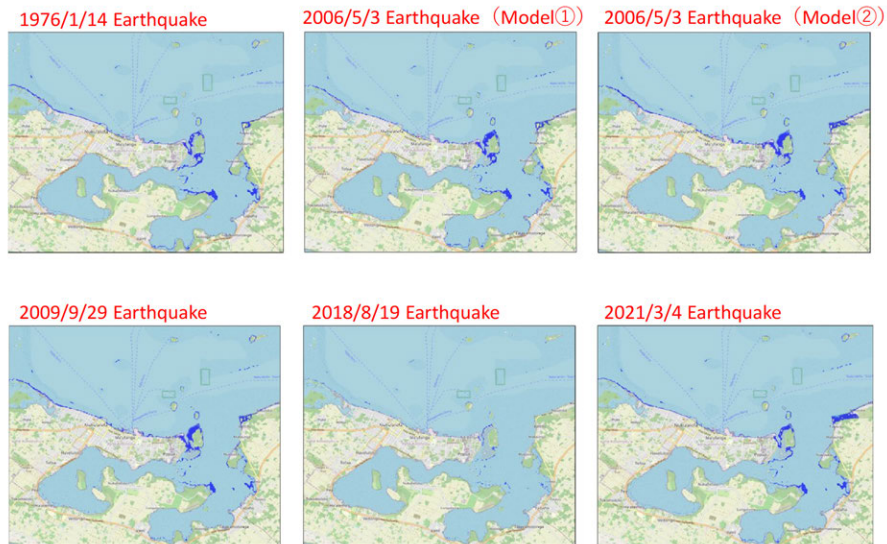
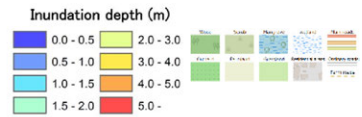


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.24 ヌクアロファにおける最大水位分布（地震断層）

Maximum Inundation Depth at Nuku'alofa (Past Earthquake)

Comparison of Inundation depth
Distribution for each mesh

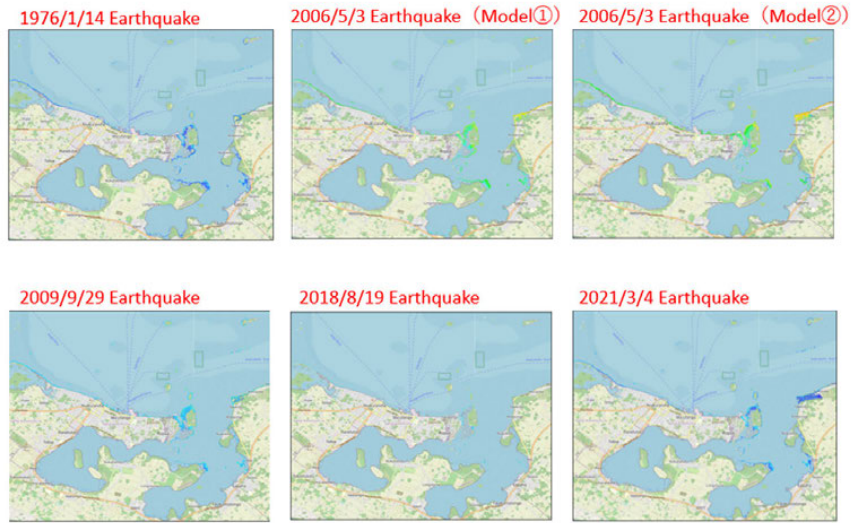
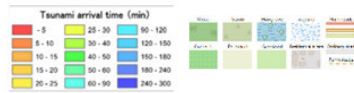


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.25 ヌクアロファにおける最大浸水深分布（地震断層）

Tsunami Arrival Time at Nuku'alofa (Past Earthquake)

Comparison of Tsunami Arrival Time Distribution for each mesh

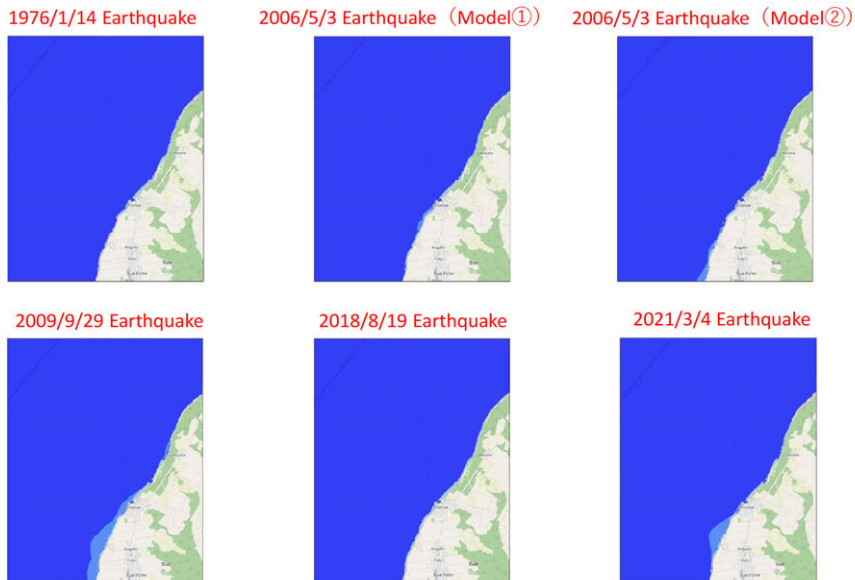
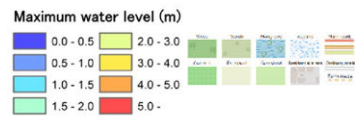


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.26 スクアロファにおける津波到達時間分布（地震断層）

Maximum Water Level at Ohonua, Eua Island (Past Earthquake)

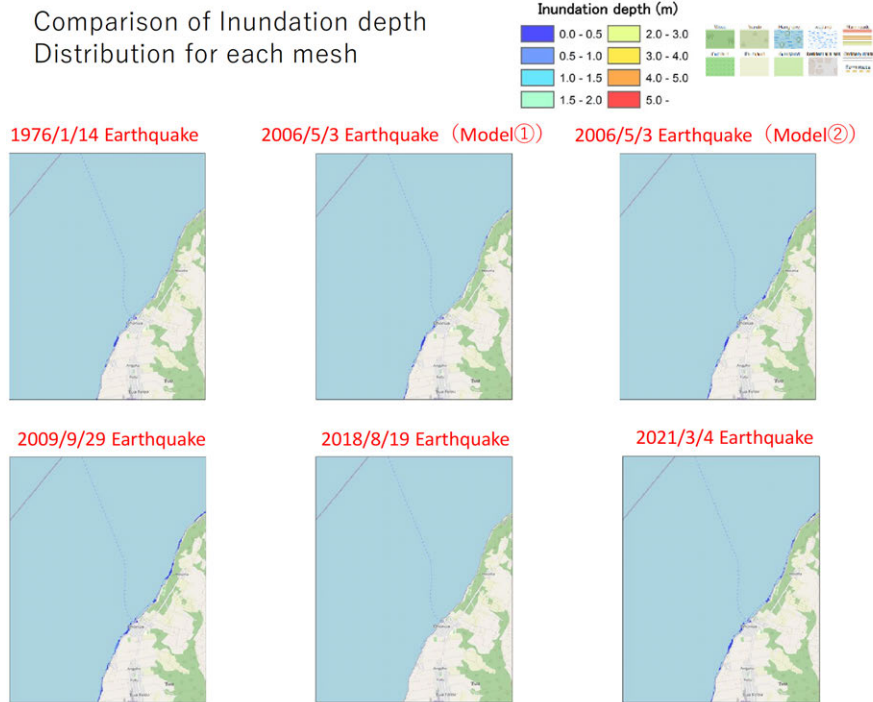
Comparison of maximum water level Distribution for each mesh



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.27 オホヌアにおける最大水位分布（地震断層）

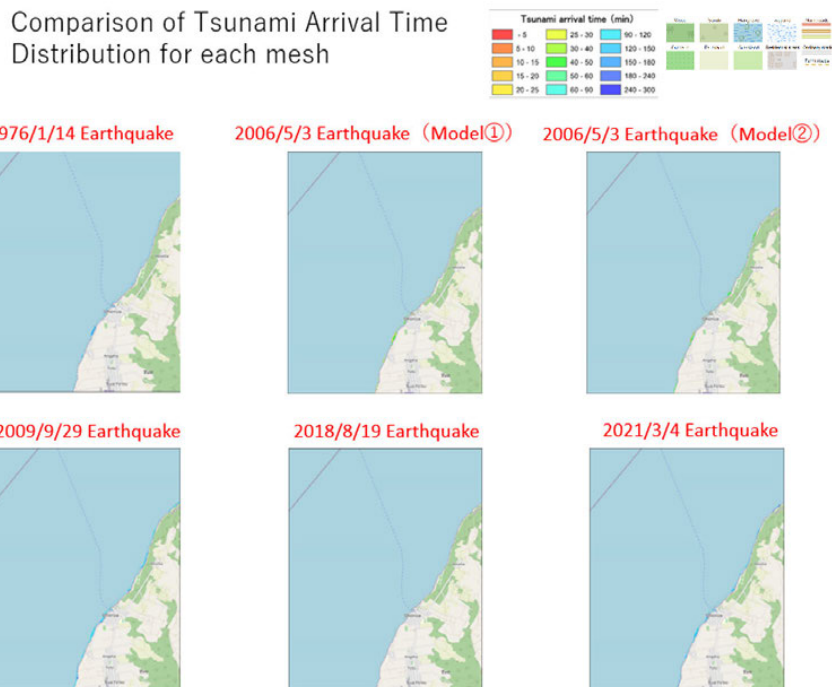
Maximum Inundation Depth at Ohonua, Eua Island (Past Earthquake)



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.28 オホヌアにおける最大浸水深分布（地震断層）

Tsunami Arrival Time at Ohonua, Eua Island (Past Earthquake)



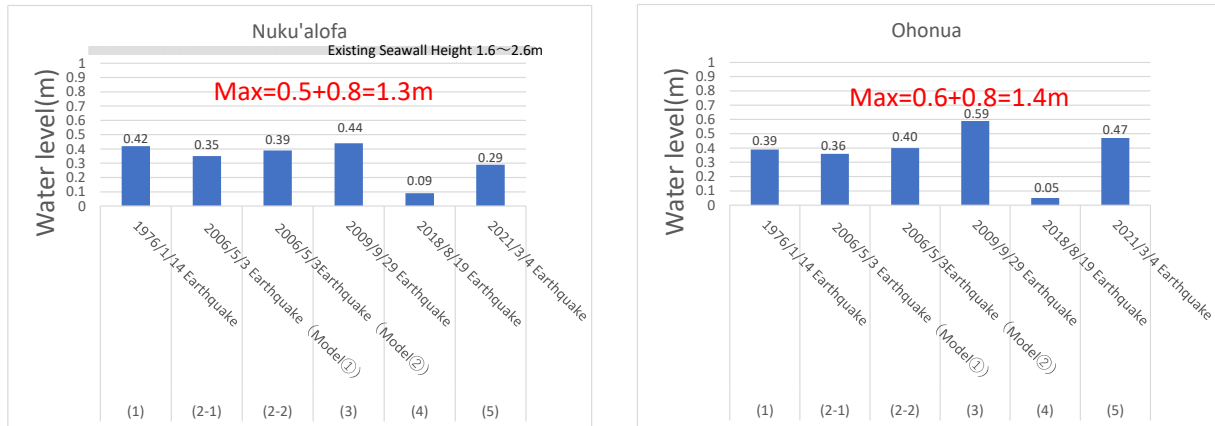
出典：JICA 調査団作成

図 3.2.29 オホヌアにおける津波到達時間分布（地震断層）

3) 対策護岸の必要天端高の検討

これまでの地震性津波の解析結果をふまえて、対策護岸の必要天端高の検討を行う。過去に発生した M8 以上の津波を対象とした場合の対策護岸の天端高を下記に示す。

対策護岸の必要天端高は、ヌクアロファで M.S.L.+1.3m, オホヌアで M.S.L.+1.4m の高さとなり、ヌクアロファにおいては、現況護岸より (M.S.L.+2m) より概ね低い結果となるため、現況の護岸で対応可能なことがわかる。



出典：JICA 調査団作成

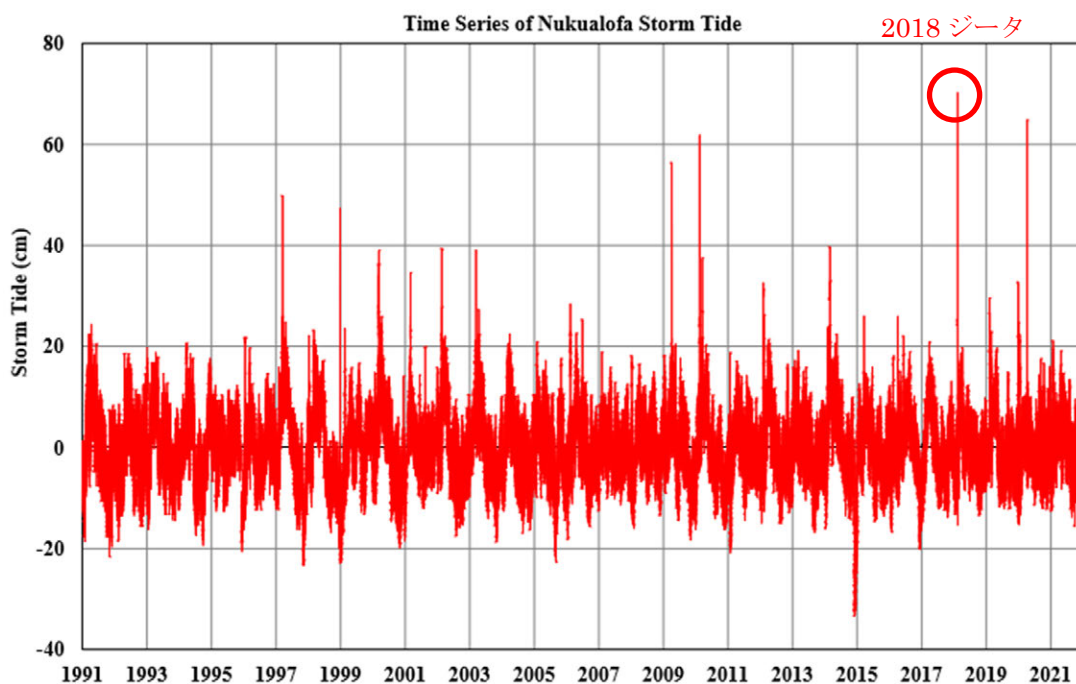
図 3.2.30 地震性津波の対策護岸の必要天端高

(4) 高潮解析

1) 潮位偏差の分析

ヌクアロファでは、1991 年より潮位観測が行われている。そこで、1991 年から 2021 年の潮位観測データに対して調和分解を行い、調和定数を算定して、天文潮を算定した。また、実測潮位より天文潮を差し引き、高潮潮位偏差を算定した。算定した高潮潮位偏差について図 3.2.31 に示す。また、気象擾乱別の高潮偏差について表 3.2.7 に示す。

これから、1991 年から 2021 年までトンガに來襲したサイクロンの中では、2018 年 2 月に來襲したサイクロンジータが最も潮位偏差が大きいことが分かる。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.31 高潮潮位偏差 (1991-2021, ヌクアロファ)

表 3.2.7 気象擾乱別潮位偏差一覧表

Year	Month	Day	Hour	Storm surge deviation:cm	Rank
1997	3	8	15	25.78	
1997	3	10	4	25.78	
1997	3	14	9	25.78	
1997	3	16	8	49.78	5
1998	12	26	2	47.15	6
2000	3	9	9	39.00	10
2000	4	7	21	25.90	
2001	3	2	12	34.59	
2002	2	19	1	39.20	8
2002	2	20	14	27.80	
2003	3	13	5	39.03	9
2003	4	14	14	27.23	
2006	2	13	11	28.36	
2006	6	30	1	25.26	
2009	4	4	23	56.31	4
2010	2	15	9	61.70	3
2010	3	16	20	37.50	
2012	2	5	15	32.42	
2012	2	14	5	26.22	
2014	3	1	15	39.68	7
2015	3	21	18	25.97	
2016	4	5	14	25.93	
2018	2	12	11	70.19	1
2019	2	8	11	29.56	
2019	12	30	18	32.66	
2020	4	8	18	64.82	2

2018 ジータ

注：潮位偏差が高い順に順位が3位までを黄色に着色

出典：JICA 調査団作成

2) 解析方法

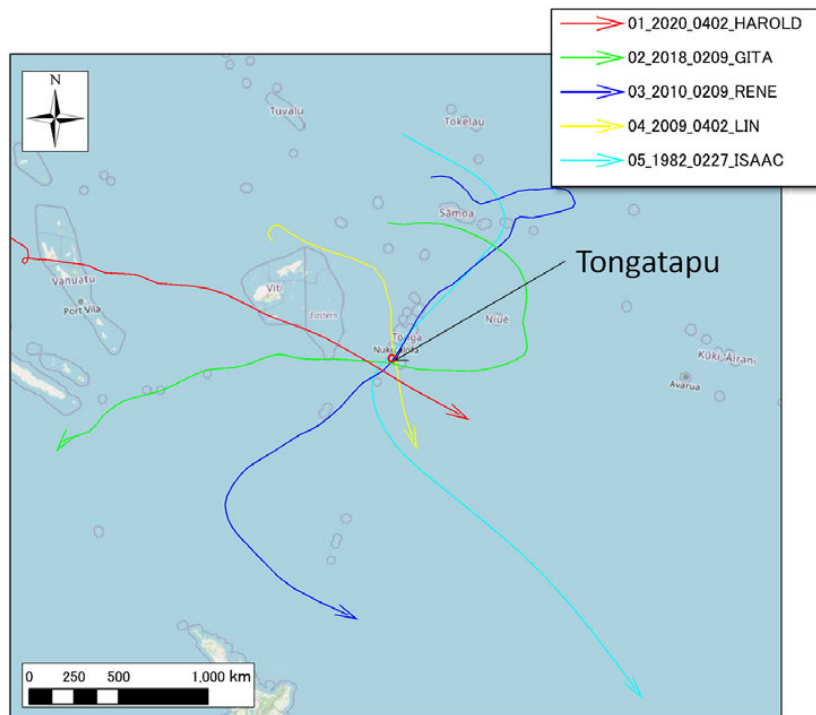
a. 検討対象サイクロンの想定

前述した高潮潮位偏差の分析結果から、再現計算を行うサイクロンを選定したサイクロンの選定結果を表 3.2.8 に示す。基本的には、表 3.2.7 の中から潮位偏差が大きいものを対象に選定した。1982年のサイクロンアイザックについては、深刻な被害が出たことから選定した。また、数値計算に用いるサイクロンのコース等の基本情報は、IBTrACS¹³を使用した。

表 3.2.8 計算対象のサイクロン選定結果

Year	Month	Day	Hour	Storm Surge Deviation (cm)	Rank	Cyclone NAME	Reasons for Selection
2018	2	12	11	70.2	1	Gita	High storm surge deviation
2020	4	8	18	64.8	2	Harold	ditto
2010	2	15	9	61.7	3	Rene	ditto
2009	4	4	23	56.3	4	Lin	ditto
1982	3	3	-	No DATA	-	Isaac	Most Severe Damage

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.32 計算対象のサイクロンコース

¹³ IBTrACS(<https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive>)

b. 数値解析手法

高潮解析に用いる解析手法も津波解析同様に STOC を用いた。

c. 数値解析条件

計算条件一覧を表 3.2.9 に示す。サイクロンコースを計算領域に含めるため、津波より計算領域を拡大して計算した。高潮計算に用いた計算地形モデルを図 3.2.33 に示す。

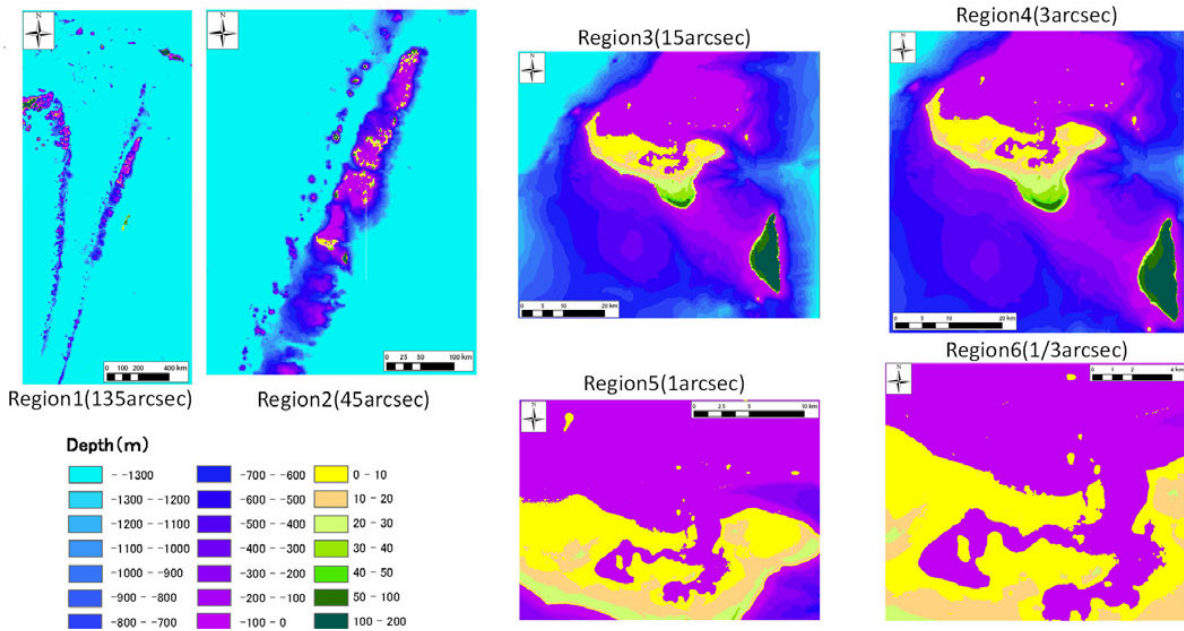
表 3.2.9 計算条件（高潮）

項目	計算条件
メッシュ構成	Region1 (135 秒 (約 4050m) メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region2 (45 秒 (約 1350m) メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region3 (15 秒 (約 450m) メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region4 (3 秒 (約 90m) メッシュ) : トンガタブ島
	Region5 (1 秒 (約 30m) メッシュ) : トンガタブ島
	Region6 (1/3 秒 (約 10m) メッシュ) : トンガタブ島
解析手法	STOC-ML (Tomita and Kakinuma, 2005)
対象サイクロン	2018 ジータ、2020 ハロルド、2010 レネー、2009 リン、1982 アイザック
サイクロンモデル	サイクロン中心気圧・サイクロンコース: IBTrACS 気圧分布: Myers (1954) ¹⁴ サイクロン半径: Kato (2005) ¹⁵
地形条件	東北大学の地形データを基に作成
潮位条件	M.S.L.+0m
計算時間	各サイクロンの発生・終了時間に合わせて計算
	時間解像度 : 最小 0.01sec
その他	構造物 : 現状護岸

出典 : JICA 調査団作成

¹⁴ Myers, V.A. (1954): Characteristics of U.S. hurricanes pertinent to levee design for lake Okeechabee, Fla., Hydrometeorological. Rep., No. 32, Weather Bureau, U. S. Dept. Commerce, Wash D. C. 106p.

¹⁵ Kato, F (2005); Study on Risk Assessment on Storm Surge Flood, TECHNICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management, No.275



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.33 計算地形モデル（高潮）

d. 数値解析ケース

数値解析ケースは次の通りである。

表 3.2.10 数値解析ケース

年	名称	計算期間	
		開始	終了
2018	ジータ	2018/02/11 18:00	2018/02/12 18:00
2020	ハロルド	2020/04/08 00:00	2020/04/09 00:00
2010	レネー	2010/02/14 18:00	2010/02/15 18:00
2009	リン	2009/04/04 06:00	2009/04/05 06:00
1982	アイザック	1982/03/02 09:00	1982/03/03 09:00

出典：JICA 調査団作成

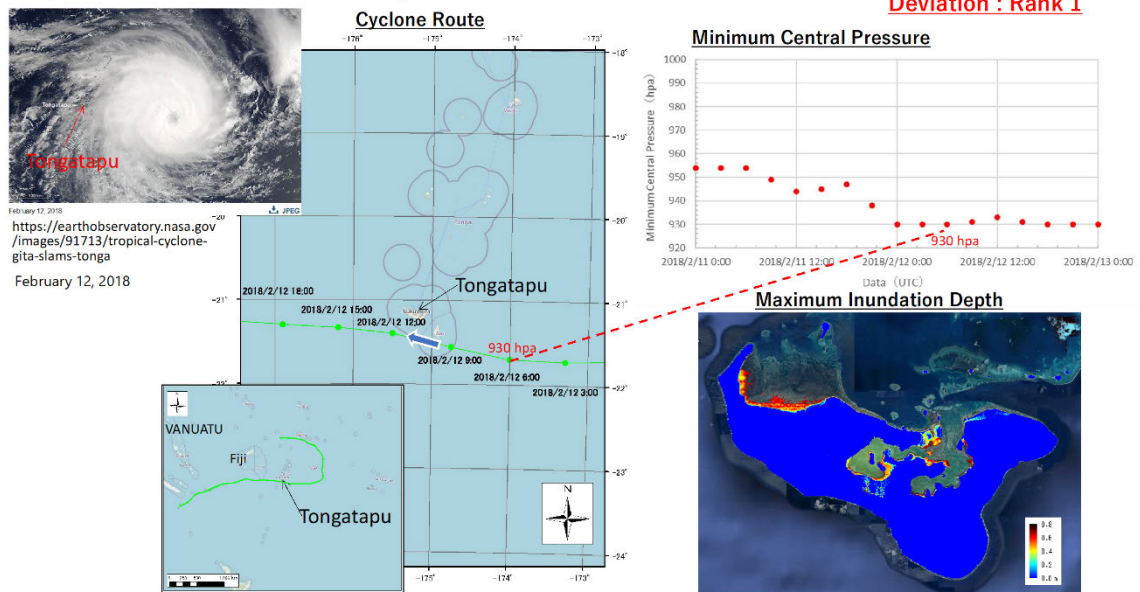
3) 解析結果

a. 各サイクロンの再現計算結果

各サイクロンの解析結果の概要を図 3.2.34～図 3.2.38 に示す。

Reproduction Calculation **Cyclone Gita (2018)**

Storm Surge Tide Level Deviation : Rank 1

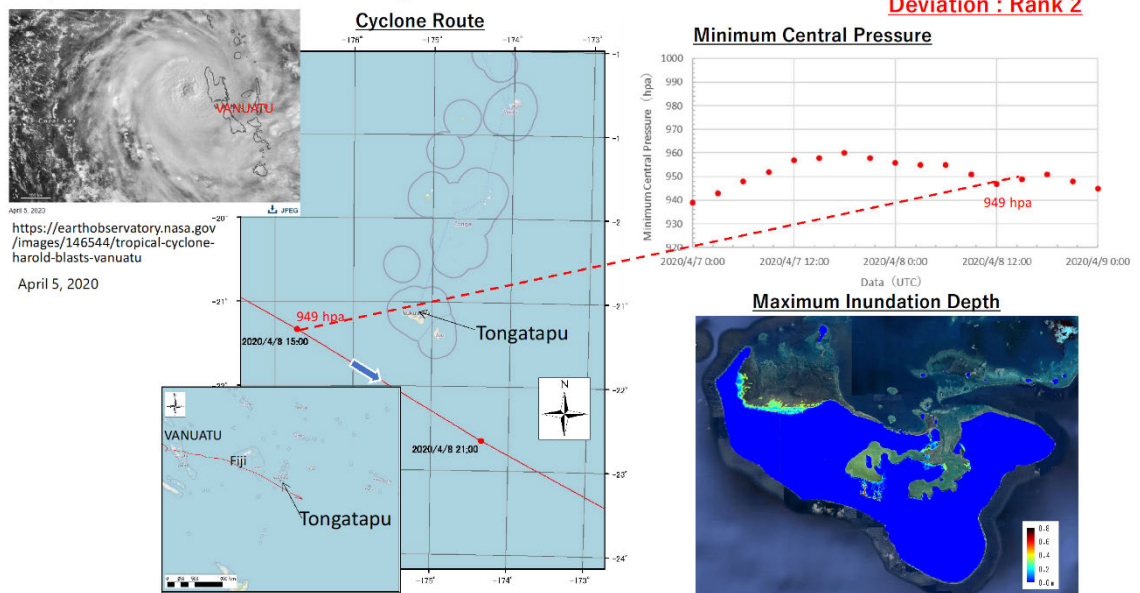


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.34 サイクロンジータ (2018) の再現計算結果

Reproduction Calculation **Cyclone Harold (2020)**

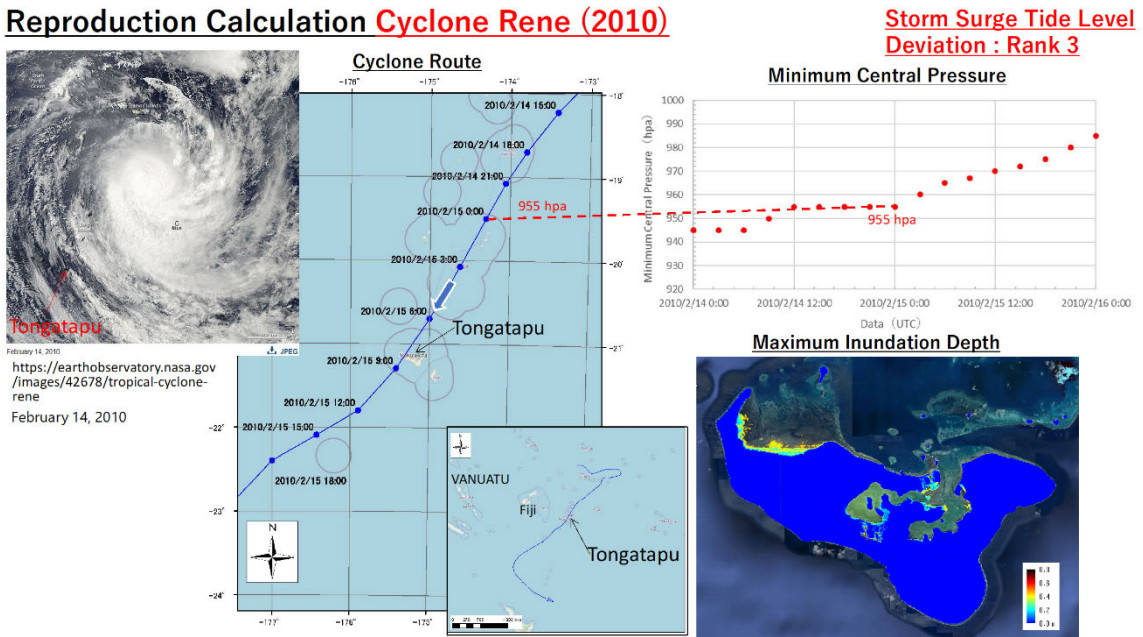
Storm Surge Tide Level Deviation : Rank 2



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.35 サイクロン Harold (2020) の再現計算結果

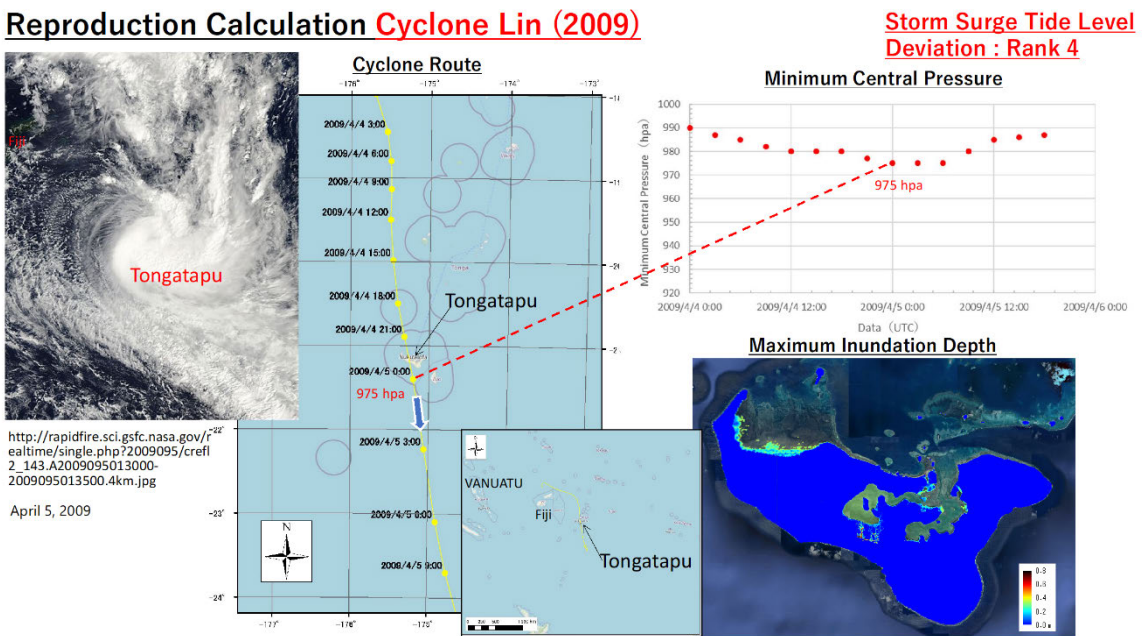
Reproduction Calculation Cyclone Rene (2010)



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.36 サイクロンレネー（2010）の再現計算結果

Reproduction Calculation Cyclone Lin (2009)

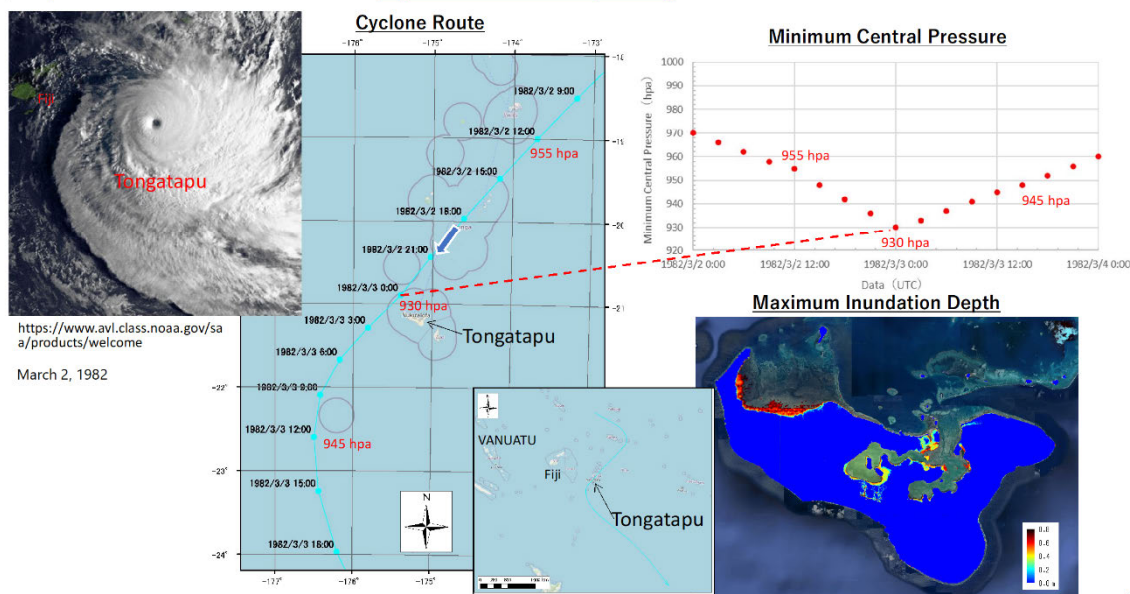


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.37 サイクロンリン（2009）の再現計算結果

Reproduction Calculation **Cyclone Isaac (1982)**

Most Severe Damage



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.38 サイクロンアイザック（1982）の再現計算結果

4) **ヌクアロファにおいて厳しい条件となるサイクロンの特徴**

ヌクアロファにおいて過去大きな高潮を発生させたサイクロンのコースを比較したものを図 3.2.39 に示す。また、ヌクアロファに大きな高潮を発生させるサイクロンの特徴を以下に列記する。

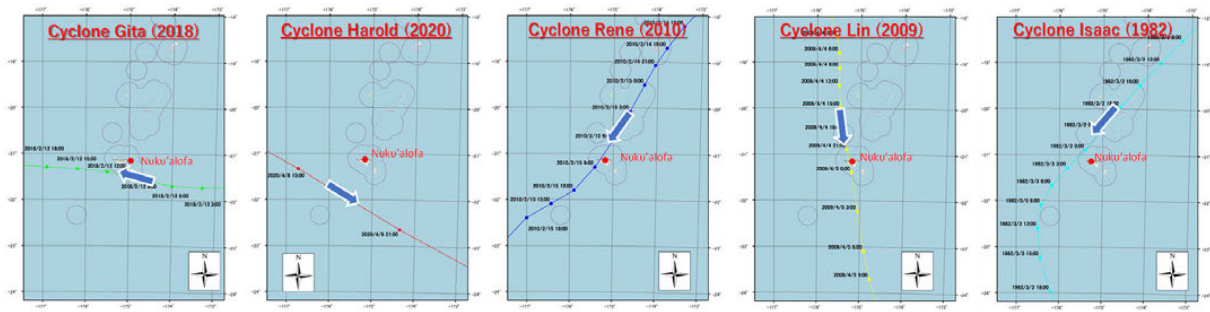
一般的に、サイクロンがトンガタプ島の近くを通過する場合に高潮が高くなる。また、サイクロンの進行方向と同じ方向の風が強くなると考えられることから、サイクロンの進行方向に対して左側にトンガタプ島が位置する場合の場合に風が強く、高潮も高くなると考えられる。

その観点では、過去顕著な高潮となった各再現サイクロンはトンガタプ島の直上～極近傍を通過している。また、サイクロンの進行方向に対して左側にトンガタプ島が位置するように通過しているサイクロンが多い（再現 5 サイクロン中 4 サイクロン）。

ただし、サイクロンジータ（2018）は他の高潮が大きいサイクロンと異なるコースとなっており、進行方向に対してトンガタプ島は右側に位置している。これは、サイクロン自体が巨大（最低気圧 930hPa）であったことに加えて、サイクロンがトンガタプ島南側をゆっくりと通過し、トンガタプ島北側から南側に対して強風が長時間吹き込んだためと考えられる。

また、他の特徴的な例としては、サイクロンハロルドは移動速度が速いため、風が強くなり高潮が高くなった例と考えられる。

以上を総合すると、トンガタプ島に対して最悪コースとなる典型例としては、被害が甚大であったサイクロンアイザック（1982）コースであると考えられる。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.39 対象サイクロンのコースの比較

5) 確率高潮偏差の検討

a. 対象サイクロンの抽出

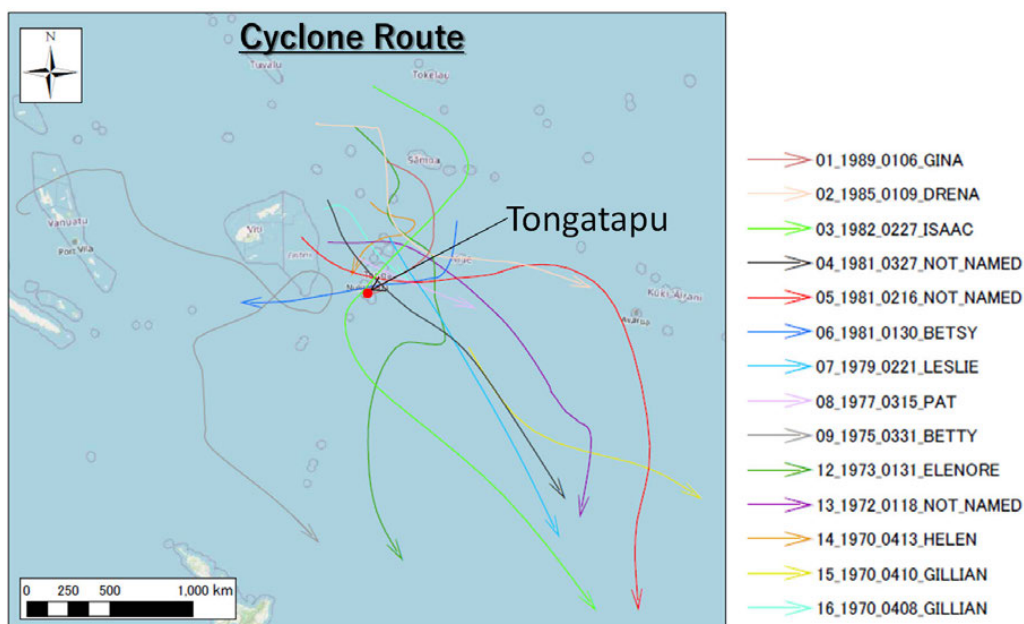
トンガタブ島での潮位観測期間は、1991 年以降で 30 年間となっており、確率潮位偏差を算定するための統計期間としてはやや短い。従って、1991 年以前でトンガタブ島に影響を与えたと考えられるサイクロンを抽出し、高潮潮位偏差の計算を行うことで統計解析のデータを補うこととする。

抽出方法としては、トンガタブ島のヌクアロファを中心として、500km 圏内を抽出したサイクロンについて IBTrACS から抽出する。抽出期間としては、IBTrACS データの中でトンガにおいて潮位観測が行われていない 1947～1990 年とし、数値計算を行う都合上、中心気圧データがないものは除外した。抽出したサイクロンを、表 3.2.11、図 3.2.40 に示す。

表 3.2.11 確率潮位偏差算定のために抽出したサイクロン (1947～1990)

Cyclone Name	Central Pressure (hPa)	Cyclone Radius (km)
1989GINA	995	154
1985DRENA	993	151
1982ISAAC	944	78
1981NOT_NAMED_86	997	156
1981NOT_NAMED_47	997	157
1981BETSY	997	157
1979LESLIE	989	144
1977PAT	989	144
1975BETTY	984	136
1973ELENORE	990	145
1972NOT_NAMED	997	157
1970HELEN	997	157
1970GILLIAN_100	980	129
1970GILLIAN_98	987	141

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.40 確率潮位偏差算定のために抽出したサイクロンのコース（1947～1990）

6) 各サイクロンの潮位偏差の算定

前項で抽出したサイクロンについて、数値計算を行う。計算条件としては、潮位偏差のみを得ることを目的に大領域での計算を行った。計算条件及び計算結果（高潮偏差）を以下に示す。

表 3.2.12 計算条件（確率潮位偏差算定用）

項目	計算条件
メッシュ構成	Region1 (135 秒 (約 4050m) メッシュ)：サイクロン発達範囲
解析手法	STOC-ML (Tomita and Kakinuma, 2005)
対象サイクロン	1989GINA,1985DRENA, 1982ISAAC, 1981NOT_NAMED_86 ,1981NOT_NAMED_47 1981BETSY, 1979LESLIE, 1977PAT, 1975BETTY, 1973ELENORE, 1972NOT_NAMED 1970HELEN, 1970GILLIAN_100, 1970GILLIAN_98
サイクロンモデル	サイクロン中心気圧・サイクロンコース: IBTrACS 気圧分布: Myers (1954) サイクロン半径: Kato (2005)
地形条件	東北大学の地形データを基に作成
潮位条件	M.S.L.+0m
計算時間	各サイクロンの発生・終了時間に合わせて計算 時間解像度：最小 0.01sec
その他	構造物：現状護岸

出典：JICA 調査団作成

表 3.2.13 各サイクロンの潮位偏差の計算結果

サイクロンの名前	ヌクアロファにおける最大潮位偏差 (m)
1970GILLIAN_100	0.06
1970GILLIAN_98	0.13
1970HELEN	0.09
1972NOT_NAMED	0.06
1973ELENORE	0.08
1975BETTY	0.14
1977PAT	0.13
1979LESLIE	0.08
1981BETSY	0.16
1981NOT_NAMED_47	0.12
1981NOT_NAMED_86	0.13
1982ISAAC	0.70
1985DRENA	0.07
1989GINA	0.16

出典：JICA 調査団作成

7) 確率高潮偏差の算定

前項で計算した 1947～1990 年の潮位偏差と 1991～2021 年潮位観測データから算定した潮位偏差を極値資料として、確率高潮偏差について算定した。使用した極値資料を表 3.2.14 に示す。また、確率潮位偏差算定結果を表 3.2.15、図 3.2.41 に示す。確率潮位偏差は、100 年間確率で 80cm となった。

表 3.2.14 極値統計入力値

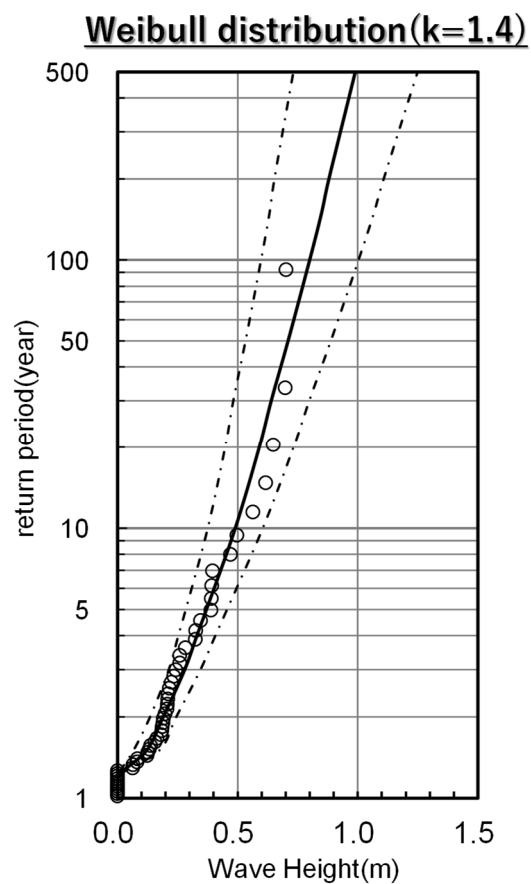
No.	Year	Max Storm surge deviation at Nuku'alofa (m)	No.	Year	Max Storm surge deviation at Nuku'alofa (m)
1	1970	0.13	22	2002	0.39
2	1972	0.06	23	2003	0.39
3	1973	0.08	24	2004	0.23
4	1975	0.14	25	2005	0.21
5	1977	0.13	26	2006	0.28
6	1979	0.08	27	2007	0.19
7	1981	0.16	28	2008	0.18
8	1982	0.70	29	2009	0.56
9	1985	0.07	30	2010	0.62
10	1989	0.16	31	2011	0.19
11	1991	0.24	32	2012	0.32
12	1992	0.19	33	2013	0.19
13	1993	0.20	34	2014	0.40
14	1994	0.21	35	2015	0.26
15	1995	0.12	36	2016	0.26
16	1996	0.22	37	2017	0.21
17	1997	0.50	38	2018	0.70
18	1998	0.47	39	2019	0.33
19	1999	0.23	40	2020	0.65
20	2000	0.39	41	2021	0.21
21	2001	0.35			

出典：JICA 調査団作成

表 3.2.15 極値統計結果 (確率高潮潮位偏差)

再現期間	ヌクアロファにおける確率高潮偏差(m)
10 years	0.49
20 years	0.59
30 years	0.64
50 years	0.71
100 years	0.80

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.41 極値統計結果グラフ (確率高潮潮位偏差)

(5) 高潮・津波解析結果に基づいたハザードレベルの検討

津波解析・高潮解析結果に基づき、防災計画・防災対策対象のハザードレベルとして、レベル1 (L1)、レベル2 (L2) の2種類のハザードレベルを検討する。各ハザードレベルの定義を表3.2.16に示す。

表 3.2.16 各ハザードレベルの強度・頻度および対策（再掲載）

ハザードレベル	ハザード強度及び頻度	対策の考え方
レベル1 (L1)	<p>頻度の高いハザード 最大クラスのハザードより発生頻度が高く低いハザード強度にもかかわらず重大な被害を与えるハザード1 ハザードの発生周期：数10年～百数十年</p>	人命とその財産、地域経済を守るためにハード対策を実施する。
レベル2 (L2)	<p>最大クラスのハザード 頻繁には発生しないが、ひとたび発生すれば甚大な被害をもたらすハザード ハザードの発生周期：数百年～数千年</p>	人命救助を第一として、あらゆるソフト対策ハード対策を組み合わせさせて住民を避難させるための総合的な対策を実施する。

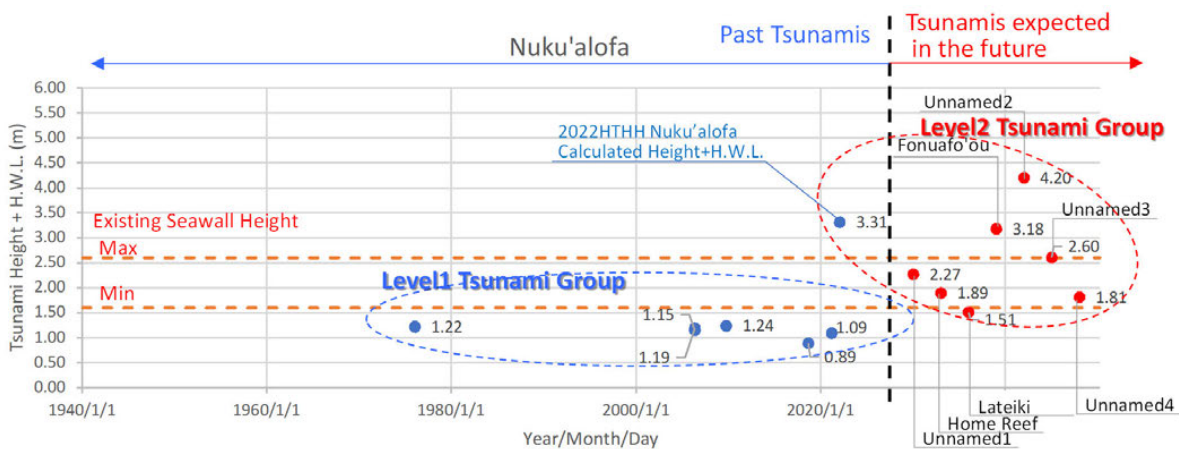
出典：JICA 調査団作成

1) 津波のハザードレベル

火山性津波と地震性津波両方のヌクアロファにおける津波解析結果を時系列にプロットしたものを図3.2.42に示す。

ヌクアロファにおける過去の地震津波の高さはH.W.L.（高水位：朔望平均満潮位）時で1～2m程度であり、約100年間に数回発生している。従って、過去の地震性津波はハード対策で対応を行うハザードレベル1 (L1) の津波と言える。

一方、2022年のHTHH火山と同規模の火山が他の場所で発生する場合にヌクアロファで今後予想される火山性津波の高さは、H.W.L.時で1.5～4.2mである。2022年のHTHH火山による津波を含め、3mを超える津波は過去100年間発生しておらず、HTHH火山と同規模の火山が約百年間に繰り返し発生する可能性は低い。したがって、HTHH火山と同規模の火山性津波は避難対策等で対応を行うハザードレベル2 (L2) の津波（最大クラスの津波）に分類する。

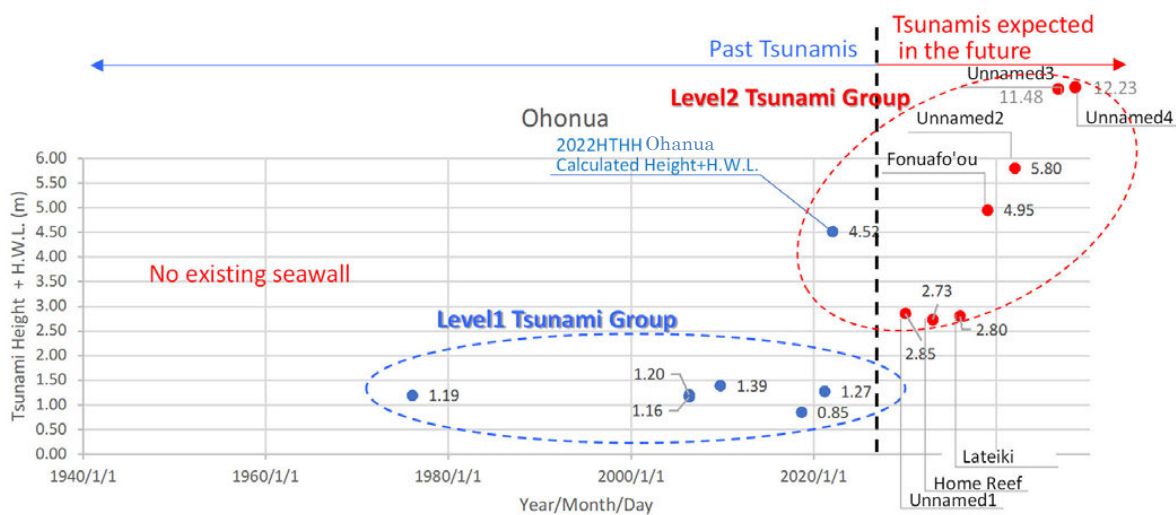


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.42 ヌクアロファにおける津波のハザードレベルの分類

エウア島オホヌアにおける過去の地震津波の高さも H.W.L.時で 1~2m 程度であり、約 100 年間に数回発生している。従って、過去の地震性津波はハード対策で対応を行うハザードレベル 1 (L1) の津波と言える。

一方、2022 年 1 月の HTHH 火山と同規模の火山が他の場所で発生する場合にエウア島オホヌアで今後予想される火山性津波の高さは、H.W.L.時で 2.7~12m である。オホヌアにおいては、2022 年の HTHH 火山による津波を含め、3m を超える津波は過去 100 年間発生しておらず、HTHH 火山と同規模の火山が約百年間の間に繰り返し発生する可能性は低い。したがって、HTHH 火山と同規模の火山性津波は避難対策等で対応を行うハザードレベル 2 (L2) の津波 (最大クラスの津波) に分類する。



出典：JICA 調査団作成

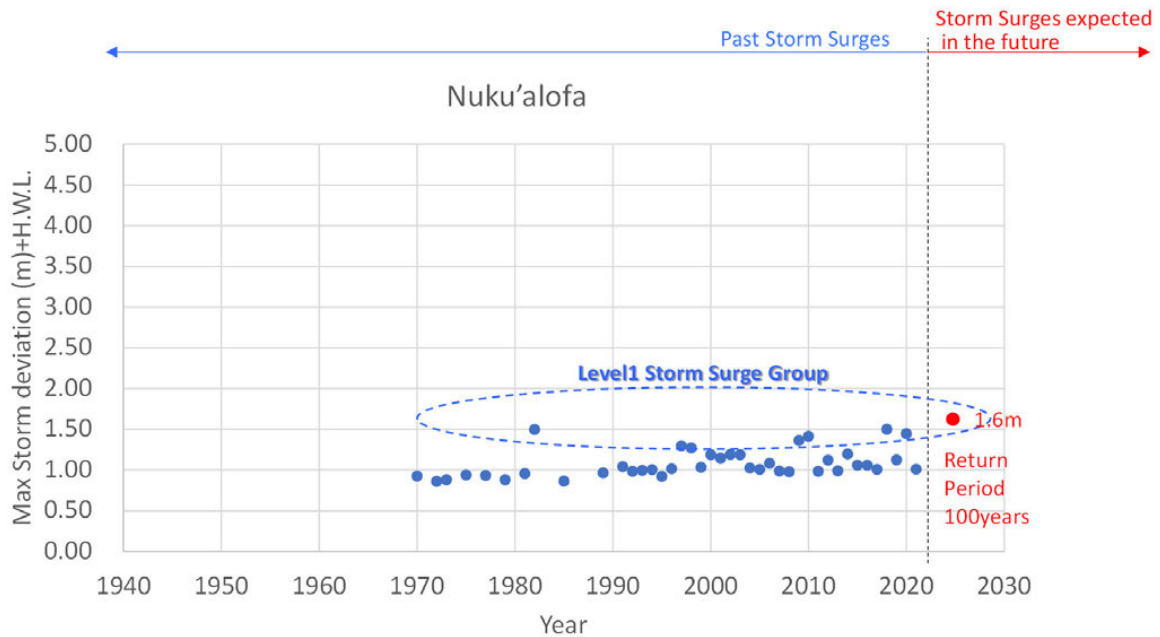
図 3.2.43 オホヌアにおける津波のハザードレベルの分類

なお、本検討では HTHH 火山と同規模の火山性津波を検討したが、HTHH 火山より小さい火山による津波は 100 年間の間に数回発生する可能性があることに留意が必要である。

2) 高潮のハザードレベル

観測記録のある直近 30 年間 (1991~2021) のサイクロンによる高潮潮位偏差は、0.7m 程度であった。一方、高潮潮位偏差の極値統計結果から、H.W.L.を考慮した 100 年確率の偏差でも M.S.L.+1.60m となっており (高潮潮位偏差 0.8m)、過去 30 年間の高潮と大きな差がない。この検討結果をふまえ、ハード対策で対応を行うハザードレベル 1 (L1) の高潮は、100 年確率の潮位偏差に設定するのが妥当と思われる。

なお、堤防の必要高さは、高潮潮位に加えて波浪も考慮する必要があることに留意が必要である。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.44 ヌクアロファにおける高潮のハザードレベルの分類

本検討における H.W.L.は、既存護岸拡充時の朔望平均満潮位（H.W.L.）とした。既存護岸拡充時の H.W.L.は、ヌクアロファの 15 昼夜の潮位観測記録から調和解析を行って決定した主要 4 分潮の調和定数から計算された潮位（天文潮位）である。比較的短期間の観測から決定された主要 4 分潮から決定されたことから、概略の朔望平均満潮位と言える。なお、キングタイドは一般に年数回発生する高潮位のことであり、サイクロンなどの気象による高潮の影響を含まない予測可能な天文潮位である。従って、本検討で採用した概略の朔望平均満潮位と同種の潮位と言えるが、キングタイドは主要 4 分潮の他に地域の気象パターンや海洋状況に影響を受けることから、本検討の H.W.L.よりも大きいと考えられる。

表 3.2.17 H.W.L.時のヌクアロファにおける確率高潮偏差

再現期間	ヌクアロファにおける確率高潮偏差 + H.W.L.(m)
10 years	1.29
20 years	1.39
30 years	1.44
50 years	1.51
100 years	1.60

出典：JICA 調査団作成

3) 既設護岸設計時の設計潮位とハザードレベル1の潮位との比較

既設護岸の必要高さは、アイザック（1982）を計画外力として設定されている¹⁶波浪と潮位及びリーフ上の水位上昇量を考慮して設定されている。検討結果の概要は次の通りである。

表 3.2.18 既存護岸の設計諸元概要

項目	設定値	根拠等
設計沖波波高	H0=11.6m	1982Isaac Willson 法推算値
設計沖波周期	T0=12.6s	-
設計沖波波向	NE（北東）	-
堤前波高	H1/3=1.7~5.4m	-
設計潮位	H.W.L.+高潮偏差 L.W.L.+1.5+0.2=L.W.L.+1.7m = M.S.L.+1.0m	-
リーフ上の水位上昇量	0.21~0.9m	-
必要護岸天端高	L.W.L.+2.95~3.00m 例：設計潮位+リーフ上の水位上昇量+許容越波流量必要高=1.7+0.9+0.35=2.95m	許容越波流量を満たすように設定
設計護岸天端高	L.W.L.+2.3~3.3m（M.S.L.+1.6~2.6m）	-

出典：JICA 調査団作成及びトンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書

L1 高潮水位を 100 年確率とした場合、既設護岸の設計に対して 0.6m の護岸高の増設が必要になる。必要護岸天端高は越波流量より決定しているため、改めて算定し直す必要がある。

(6) ハザードレベル2の高潮・津波検討

1) ハザードレベル2の津波解析（火山性津波）

前項までの検討結果から、2022 年 1 月の HTHH 火山と同規模の火山による津波が他の海底火山で発生した場合の津波はハザードレベル 2（L2）に分類した。その中でもトンガタブ島、エウア島への影響が大きいケースについて検討する。検討結果について表 3.2.19、図 3.2.45 に示す。

表 3.2.19 に示す火山において、悪条件として潮位を H.W.L.（M.S.L.+0.8m）として浸水域を計算し、その最大包絡範囲をハザードレベル 2（L2）の浸水域とする。浸水域の計算結果を図 3.2.46、

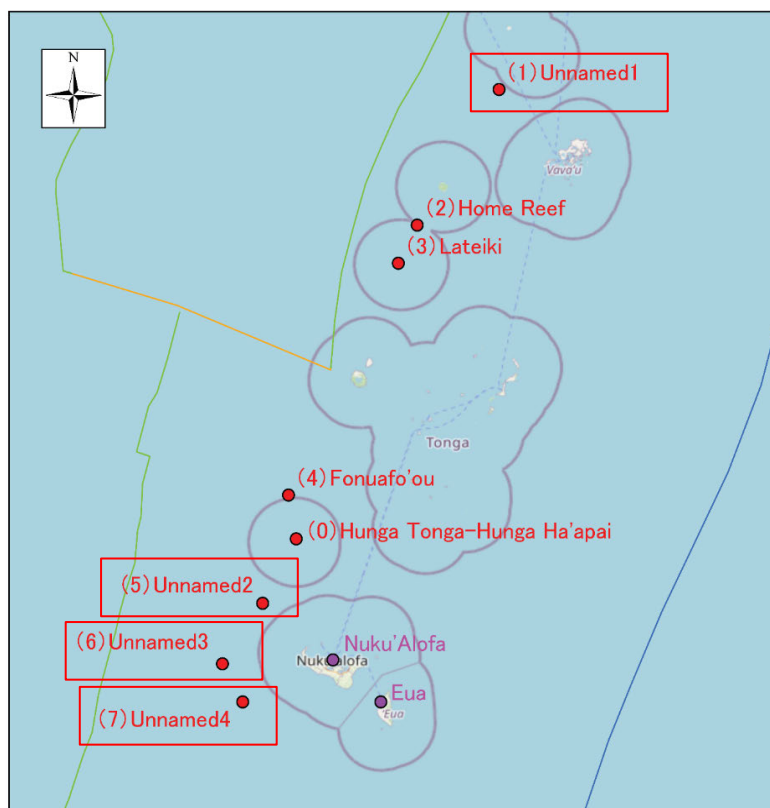
¹⁶ トンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書，昭和 63 年 2 月，国際協力事業団

図 3.2.47 に示す。特にトンガタブ島北西部の浸水深が大きく、5m を超える浸水深となっている。ヌクアロファでも 2m を超える浸水深となるところもあり、大きな被害が想定される。また、エウア島は、オホヌア港が 5m を超える浸水となっているが、浸水範囲は沿岸低平地に限られている。

表 3.2.19 トンガタブ島・エウア島で浸水範囲・浸水深が卓越するケース（海底火山名）

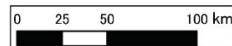
トンガタブ島	エウア島
Unnamed1 (H=90m)	Unnamed2 (H=90m)
Unnamed2 (H=90m)	Unnamed3 (H=90m)
Unnamed3 (H=90m)	Unnamed4 (H=90m)
Unnamed4 (H=90m)	-

出典：JICA 調査団作成



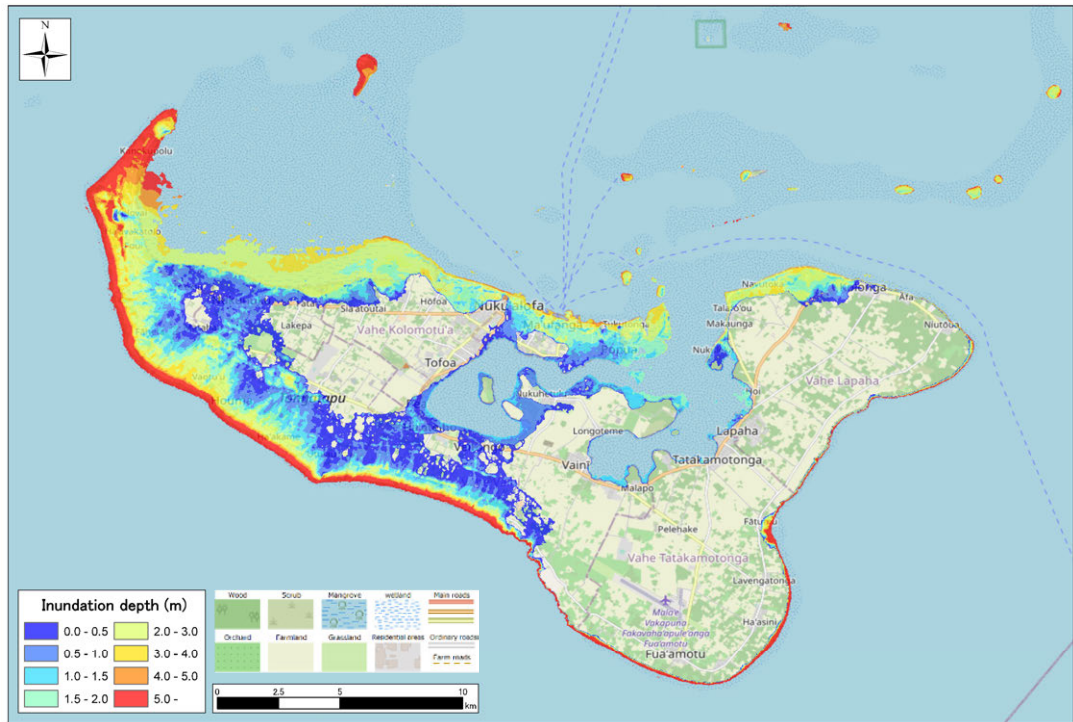
Map: Copyright OpenStreetMap contributors

Target Volcanos for Hazard Level2



出典：JICA 調査団作成

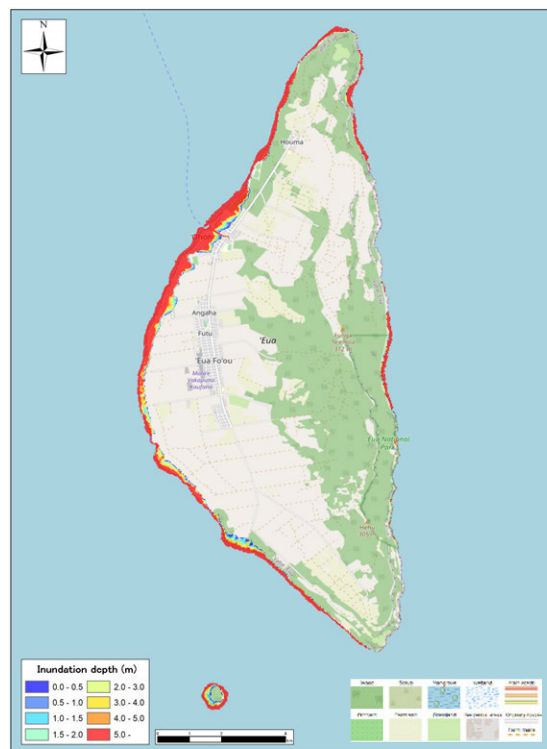
図 3.2.45 トンガタブ島・エウア島に影響が大きい火山



Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 3.2.46 トンガタプ島浸水想定図（火山性津波ハザードレベル 2）



Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 3.2.47 エウア島浸水想定図（火山性津波ハザードレベル 2）

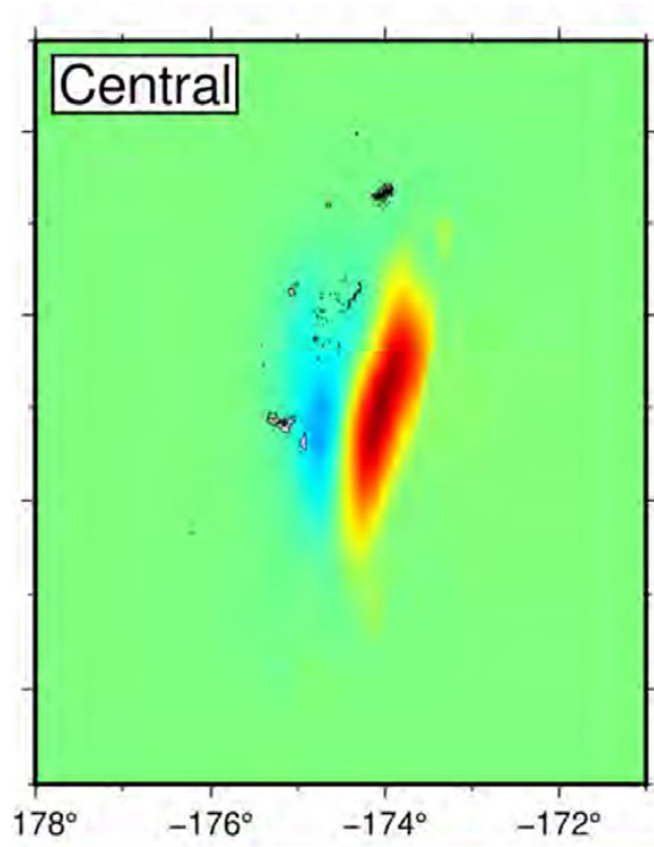
2) ハザードレベル2の津波解析（地震性津波）

津波ハザードマップについては、SOPACプロジェクトによって2012年に作成された南西太平洋津波リスクアセスメント能力強化（フェーズ3）津波シミュレーションマップがある。このうち、「トンガ王国 全国早期警報システム導入及び防災通信能力強化計画 準備調査」（JICA）での検討で採用されている「M8.7の地震がトンガ海溝中央（トンガタブ島の東）で発生した場合」について検討する。

SOPACの地震断層モデルのパラメータについては、明確な断層パラメータに関する情報がないことから、初期水位分布を再現し、津波の入力波とする。初期水位分布を図3.2.48に示す。

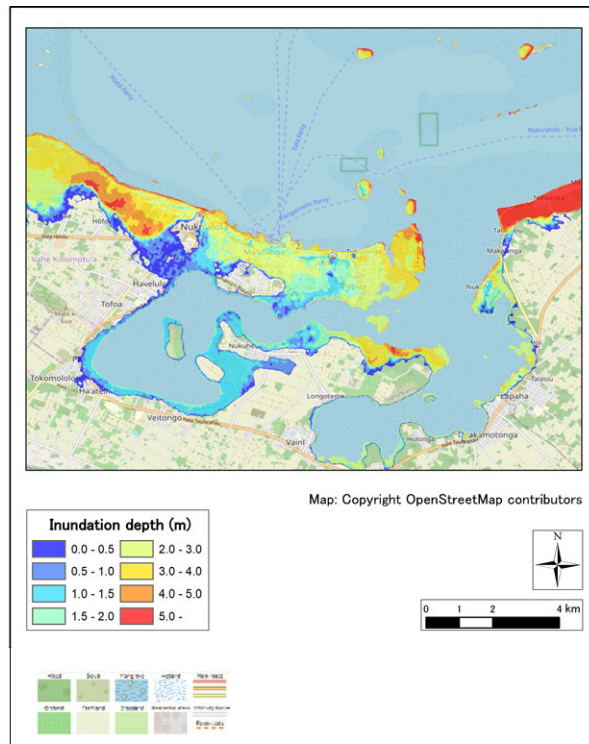
この初期水位分布を波源として、悪条件として潮位をH.W.L.（M.S.L.+0.8m）として浸水計算を実施した。護岸条件は現況護岸である。浸水計算結果を図3.2.49、図3.2.50に示す。

火山性津波と異なり、津波の波源となる断層がトンガタブ島の東側にあることから、東側の浸水範囲及び浸水深が大きい。また、ヌクアロファの浸水深は火山性津波の浸水深より大きく、浸水深が3m以上になるところがある。



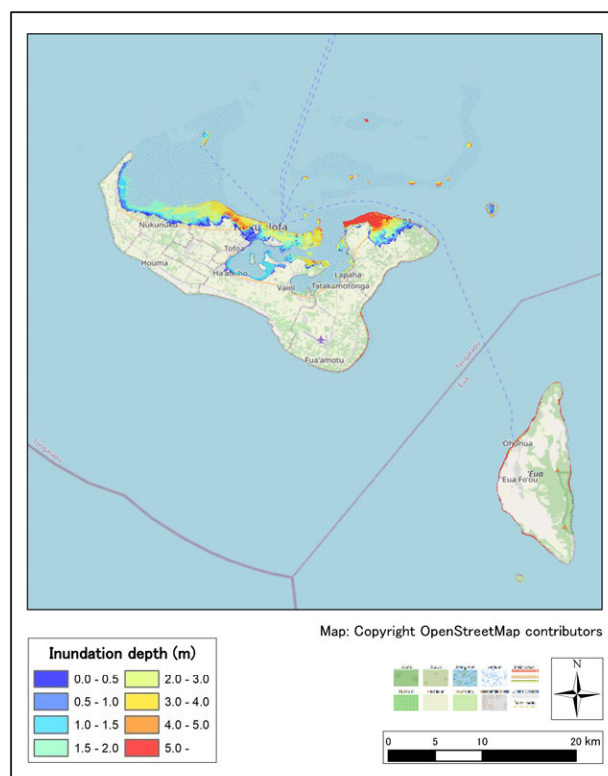
出典：Multi-Hazard Risk Assessment Tongatapu Interim Hazard Assessment Report – Tsunami, Asian Development Bank

図 3.2.48 初期水位分布（SOPAC M8.7の地震：トンガ海溝中央（トンガタブ島の東））



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.49 トンガタプ島浸水想定図（地震性津波ハザードレベル 2）



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.50 トンガタプ・エウア島浸水想定図（地震性津波ハザードレベル 2）

3) ハザードレベル2の高潮解析

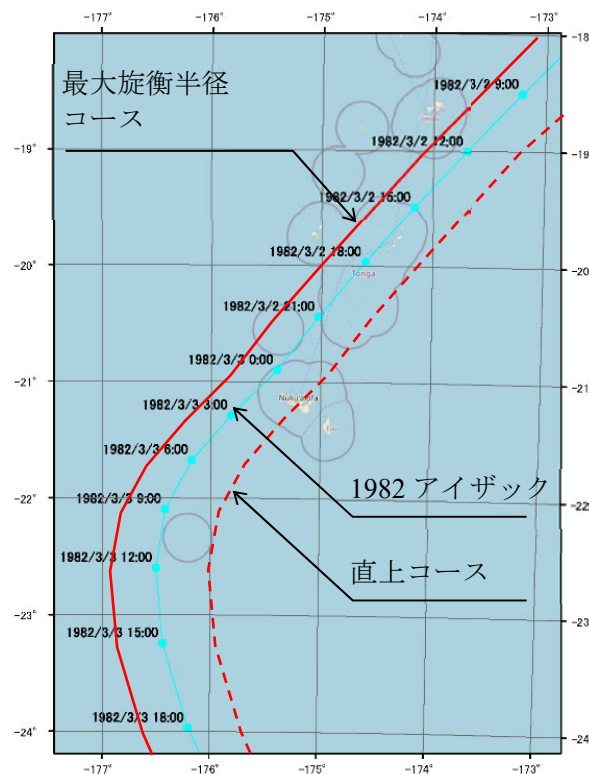
a. ハザードレベル2高潮条件の設定

ハザードレベル2の高潮解析については、前項までの検討において過去の最大の高潮と考えられる1982年アイザックのコース・条件を基本に、さらに悪条件下になった場合について想定する。悪条件下の条件としては、以下の条件を想定する。

- サイクロンの中心気圧を、サイクロンアイザックのトンガタブ島接近時の最低気圧930Hpaとし、計算期間中一定(930Hpa)とする。
- コースはサイクロンアイザックのコースを基本として、トンガタブ島で最も風が強くなる最大旋衡半径分トンガタブ島中心から西へ移動したコースを設定する(最大旋衡半径コース、図3.2.51)。
- 過去高潮が大きくなったサイクロンがトンガタブ島直近を通過していた状況(例えば、2010年サイクロンレネー、2009年サイクロンリン)をふまえ、風による吹き寄せ効果より気圧低下による吸い上げ効果が卓越する場合を想定し、サイクロンの中心がトンガタブ島中心を通過するコースを設定する(直上コース、図3.2.51)。
- サイクロン速度が速い場合、進行速度方向に風速が大きくなり、高潮も大きくなることから(例えば2020年サイクロンハロルド)、サイクロン速度を2020年サイクロンハロルドの移動速度の最大値(一定)にする。

潮位条件は悪条件としてH.W.L.(M.S.L.+0.8m)を設定する。

以上を基に設定した計算条件を表3.2.20に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.51 最大クラスのサイクロン想定コース

表 3.2.20 計算条件 (ハザードレベル2 高潮)

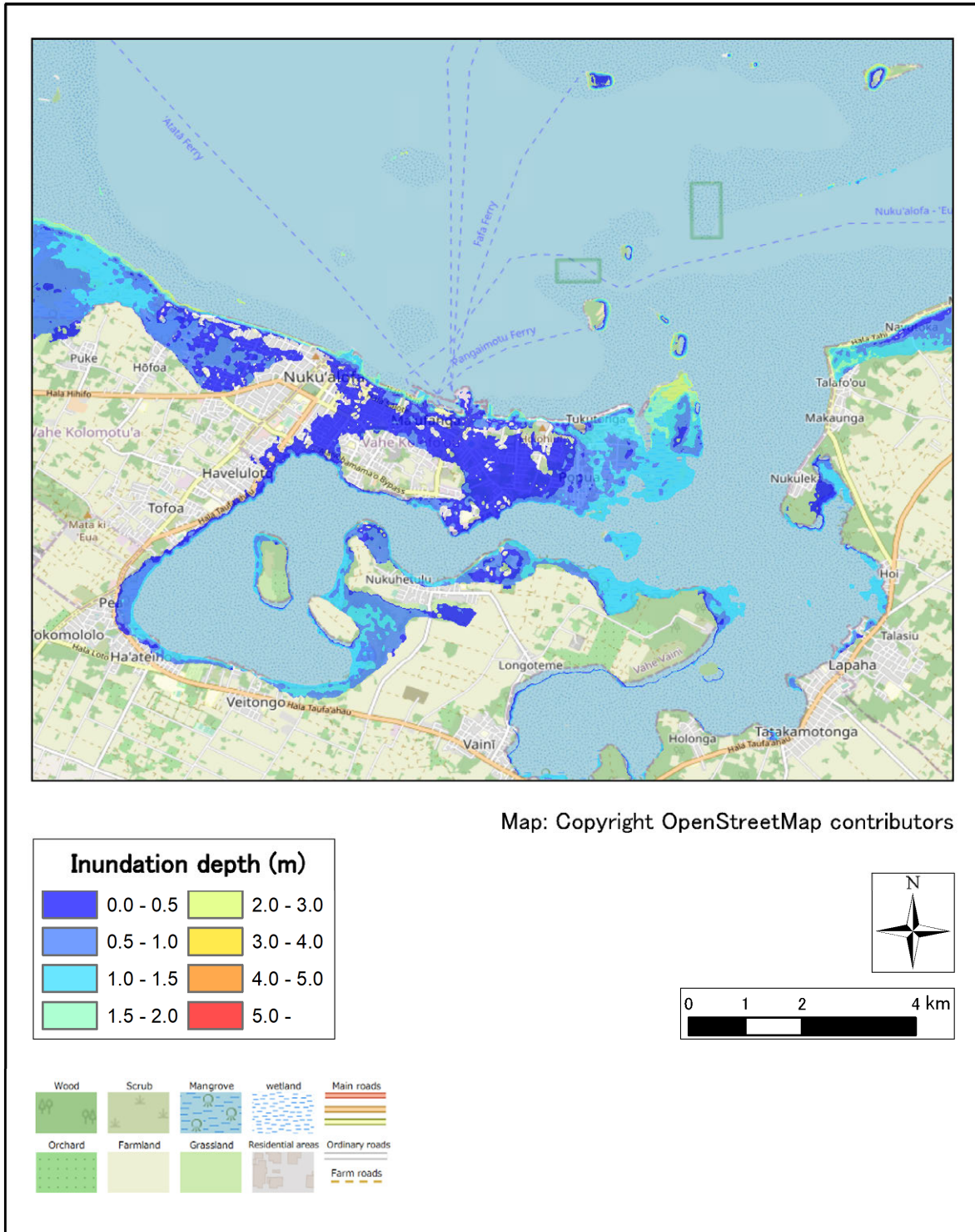
項目	計算条件
メッシュ構成	Region1 (135 秒(約 4050m)メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region2 (45 秒(約 1350m)メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region3 (15 秒(約 450m)メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region4 (3 秒(約 90m)メッシュ) : トンガタブ島
	Region5 (1 秒(約 30m)メッシュ) : トンガタブ島
	Region6 (1/3 秒(約 10m)メッシュ) : トンガタブ島
解析手法	STOC-ML (Tomita and Kakinuma, 2005)
対象サイクロンコース	2018 ジータと同じコースを平行移動したコース ・最大旋衡半径コース ・直上コース
サイクロンモデル	サイクロン中心気圧 : 930Hpa (一定) サイクロン速度 : ハロルドの最大速度 : 56km/h (一定) 気圧分布: Myers (1954) サイクロン半径: Kato(2005)
地形条件	東北大学の地形データを基に作成
潮位条件	M.S.L.+0.8m
計算時間	サイクロンの発生・終了時間に合わせて計算
	時間解像度 : 最小 0.01sec
その他	構造物 : 現状護岸

出典 : JICA 調査団作成

b. ハザードレベル2 高潮の計算結果

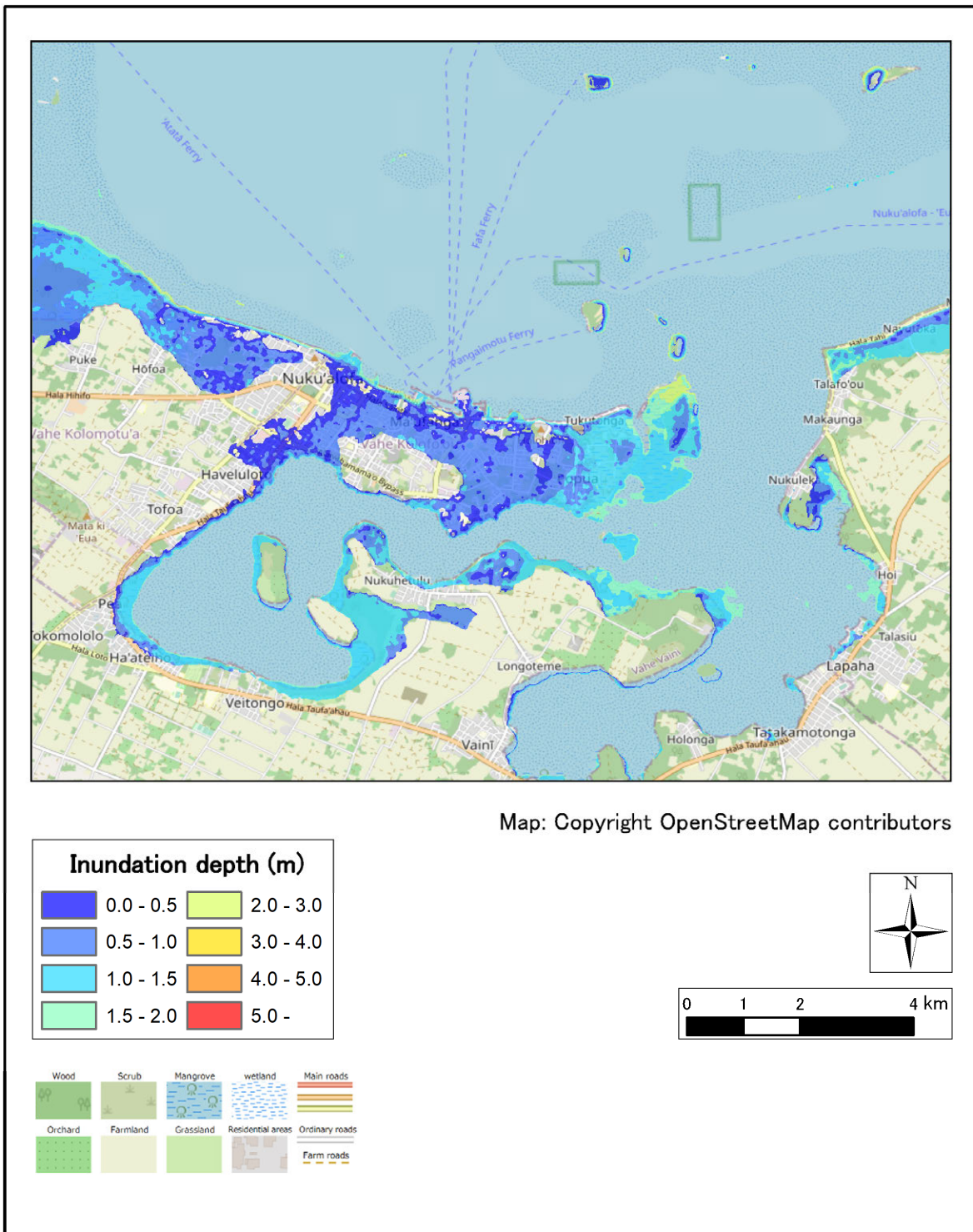
上記の設定で計算した高潮浸水域について図 3.2.52～図 3.2.53 に示す。両ケースともに、浸水範囲はほぼ同じ程度となっており、市街地部の浸水深は大きいところでも 1m 以下、港湾区域では 1.5m 以下となっている。結果として、直上コースの方が浸水範囲・浸水深が大きくなった。トンガタブ島は島であり、吹き寄せにより高潮水位が上がるような地形（例えば、V 字型の湾等）ではないためと考えられる。

ただし、実際は高潮だけでなく高波浪の影響もあることから、より波高が大きくなり易い最大旋衡半径コースにも注意が必要である。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.52 トンガタプ島浸水想定図（高潮ハザードレベル 2：最大旋衡半径コース）



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.53 トンガタブ島浸水想定図（高潮ハザードレベル2：直上コース）

c. 気候変動による海面上昇の影響

トンガのような島嶼国は、将来の気候変動に伴う海面上昇により浸水被害が拡大するなどの大きな影響を受ける可能性がある。そこで、IPCC 第 6 次評価報告書をふまえて、SSP1-2.6（持続可能な発展の中で気温上昇を 2℃未満におさえるシナリオ）におけるトンガで海面上昇量をふまえたハザードレベル 2（L2）シナリオの検討を行う。各 SSP シナリオの概要及び各シナリオでの海面上昇量を表 3.2.21、図 3.2.54 に示す。

SSP1-2.6 シナリオによるトンガの海面上昇量を下記に示す。また、海面上昇時の H.W.L.の設定を下表に示す。下表の潮位条件でハザードレベル 2（L2）高潮での浸水を検討した。なお、潮位条件以外の計算条件は、表 3.2.20 と同じである。

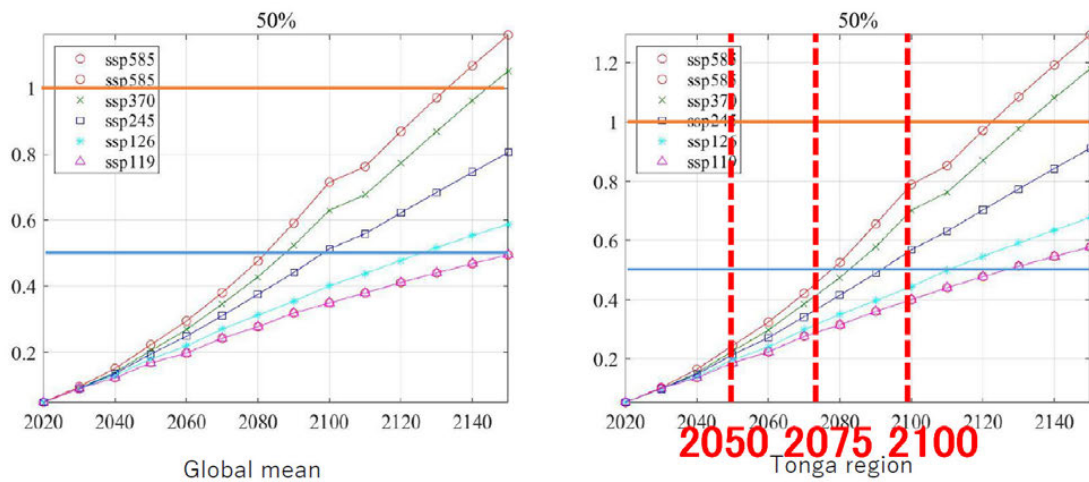
計算結果を図 3.2.55～図 3.2.56 に示す。当然ながら、浸水域・浸水深は拡大する結果となった。

表 3.2.21 SSP シナリオの概要

シナリオ	シナリオの概要
SSP1-1.9	持続可能な発展の下で気温上昇を 1.5℃以下におさえるシナリオ
SSP1-2.6	持続可能な発展の下で気温上昇を 2℃未満におさえるシナリオ
SSP2-4.5	中道的な発展の下で気候政策を導入するシナリオ
SSP3-7.0	地域対立的な発展の下で気候政策を導入しないシナリオ
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない最大排出量シナリオ

出典：全国地球温暖化防止活動推進センター

Sea-level rise



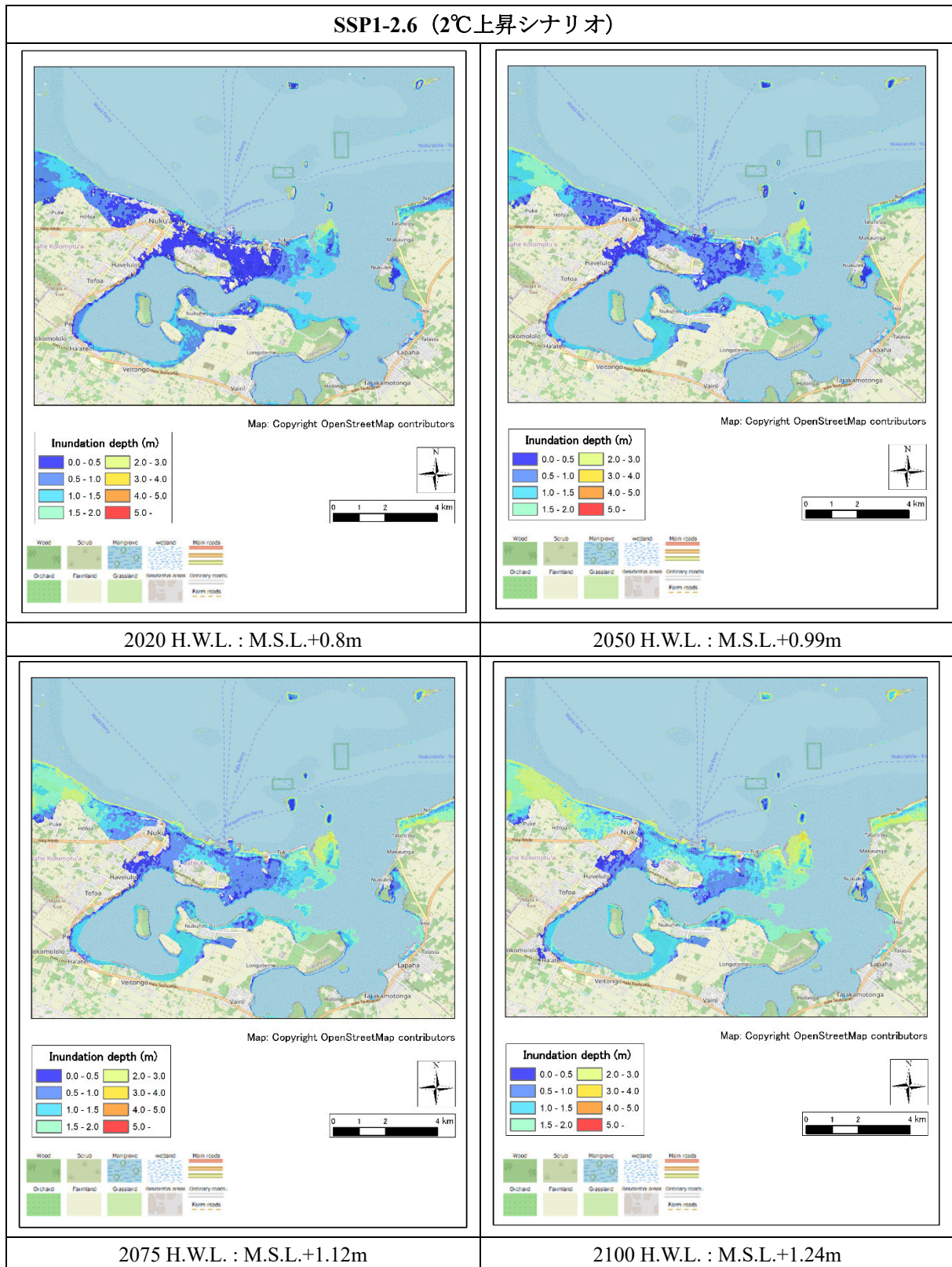
出典：国内支援委員会資料に加筆

図 3.2.54 各シナリオでの海面上昇量

表 3.2.22 ヌクアロファにおける海面上昇時の H.W.L. (SSP1-2.6)

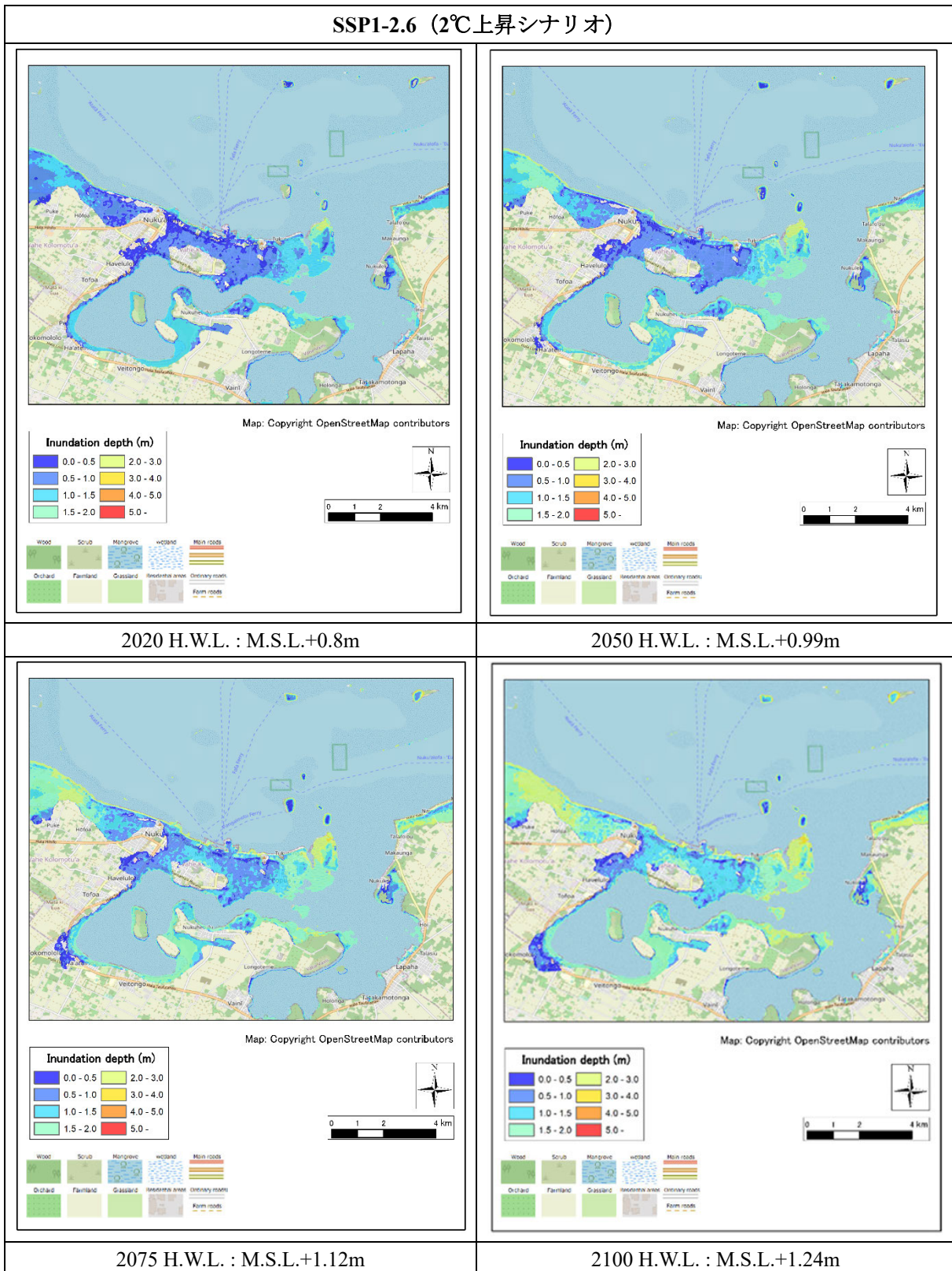
Year	H.W.L. (M.S.L.+m)	Sea Level Rise(m)	Calculation Tide Level (M.S.L.+m)
2020	0.8	0.00	0.8
2050	0.8	0.19	0.99
2075	0.8	0.32	1.12
2100	0.8	0.44	1.24

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.55 海面上昇時の浸水想定図（高潮ハザードレベル2：最大旋衡半径コース）



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.56 海面上昇時の浸水想定図（高潮ハザードレベル 2：直上コース）

4) 防潮堤に対する解析

a. 防潮堤条件

トンガタブ島には北岸に約 2m の護岸が整備されている。津波・高潮のような浸水被害に対するハザード対策としては、防潮堤の嵩上げが最も直接的な効果があると考えられる。そこで、防潮堤を嵩上げた場合の検討を行った。防潮堤の嵩上げ高は、現況を約 1m 程度嵩上げて、M.S.L.+3.0m の高さに整備を行った場合の検討を行った。護岸条件を図 3.2.57、図 3.2.58 に示す。

なお、港湾部分の防潮堤については、嵩上げた場合、港湾の利用及び今後の開発の支障となる可能性がある。従って、港湾部分の防潮堤は嵩上げしないこととした。



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.57 現況護岸の設定



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.58 嵩上げ護岸の設定 (M.S.L.+3.0m に嵩上げ)

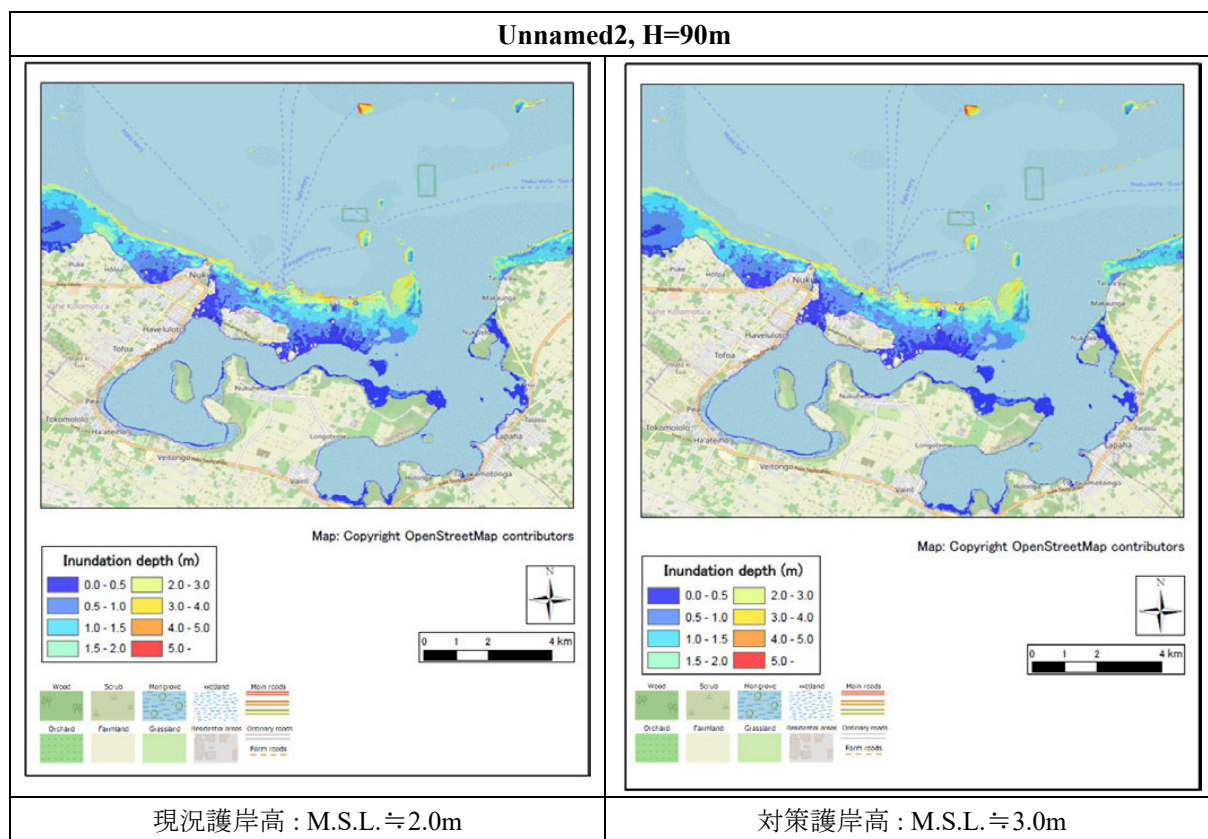
b. 防潮堤効果の確認

現況護岸と嵩上げ護岸を設定した場合の浸水計算を行った。ここでは、一例として、ヌクアロファで浸水が大きい火山性津波の Unnamed2・Unnamed3 に HTHH 火山噴火と同規模の火山が発生したケース (H=90m) の結果を比較したものを図 3.2.59、図 3.2.60 示す。その他のケースについては、Appendix 3-2 に収録した。

浸水が大きい Unnamed2 では、現況と嵩上げ護岸で浸水範囲に大きな変化はない。浸水が比較的軽微な Unnamae3 のケースでは、浸水範囲が減少している。

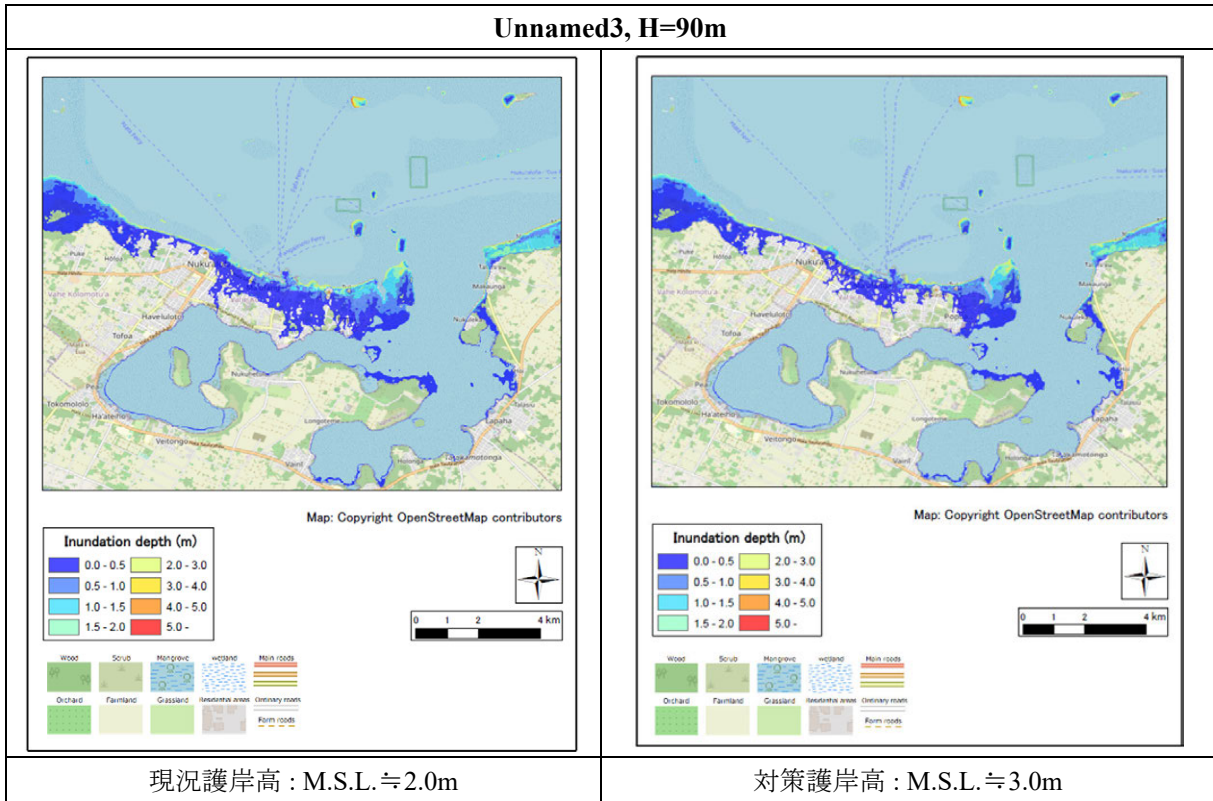
さらに嵩上げを行えば効果が大きくなると考えられるが、一方で、1m 以上の嵩上げは景観が悪くなることが想定されることから、慎重な検討が必要である。

高潮についても、アイザックの場合 (M.S.L.+0.8m) で防潮堤高さによる浸水域の違いについて検討を行った。検討結果を以下に示す。この場合、浸水域に大きな違いが現れないが、ヌクアロファ中心部の浸水範囲に減少が見られた。(図 3.2.60)



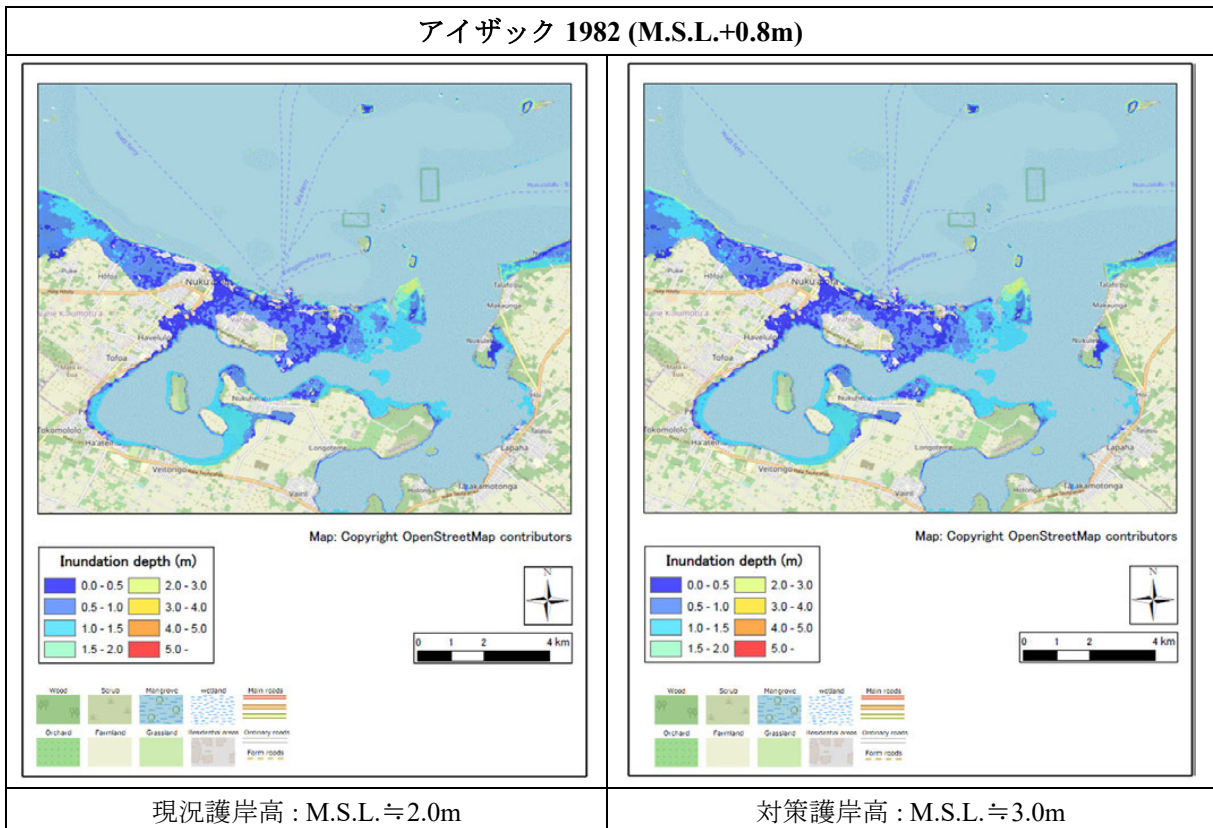
出典 : JICA 調査団作成

図 3.2.59 防潮堤効果の比較 (火山性津波、Unnamed2 , H=90m)



出典: JICA 調査団作成

図 3.2.60 防潮堤効果の比較 (火山性津波、Unnamed3, H=90m)



出典: JICA 調査団作成

図 3.2.61 防潮堤効果の比較 (アイザック 1982, M.S.L.+0.8m)

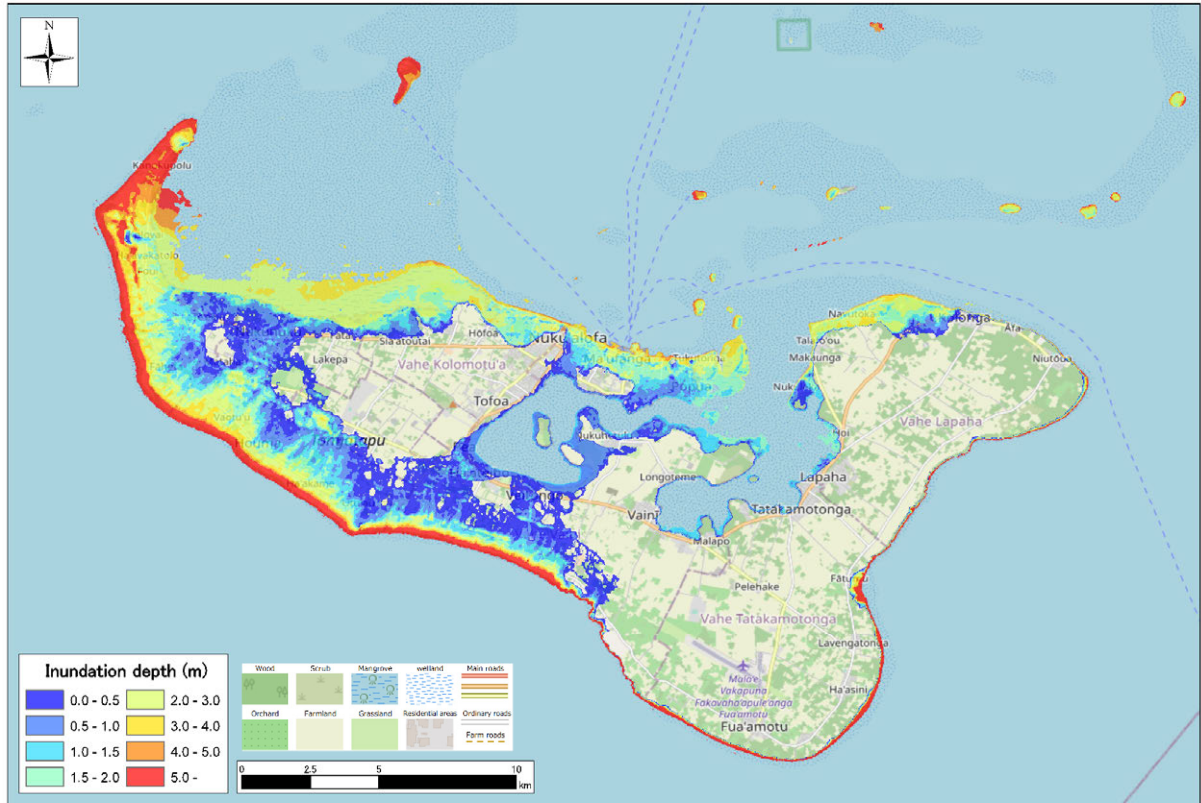
3.2.3 マルチハザードマップの作成

解析を行った津波と高潮についてハザードマップを作成した。ハザードマップは避難に用いるため、最大のハザードを示す必要がある。従って、今回検討した津波・高潮ハザードの中で最大の浸水域・浸水深を示すケースでハザードマップ作成を行った。

なお、最大の浸水域を与えるケースが場所により異なる場合は、各ケースの最大包絡の浸水範囲・浸水深を示した。

(1) 津波ハザードマップ (火山性津波)

ハザードレベル 2 (L2) で検討した最大クラスの火山性津波の想定に基づくハザードマップを図 3.2.62 に示す。



Map: Copyright OpenStreetMap contributors



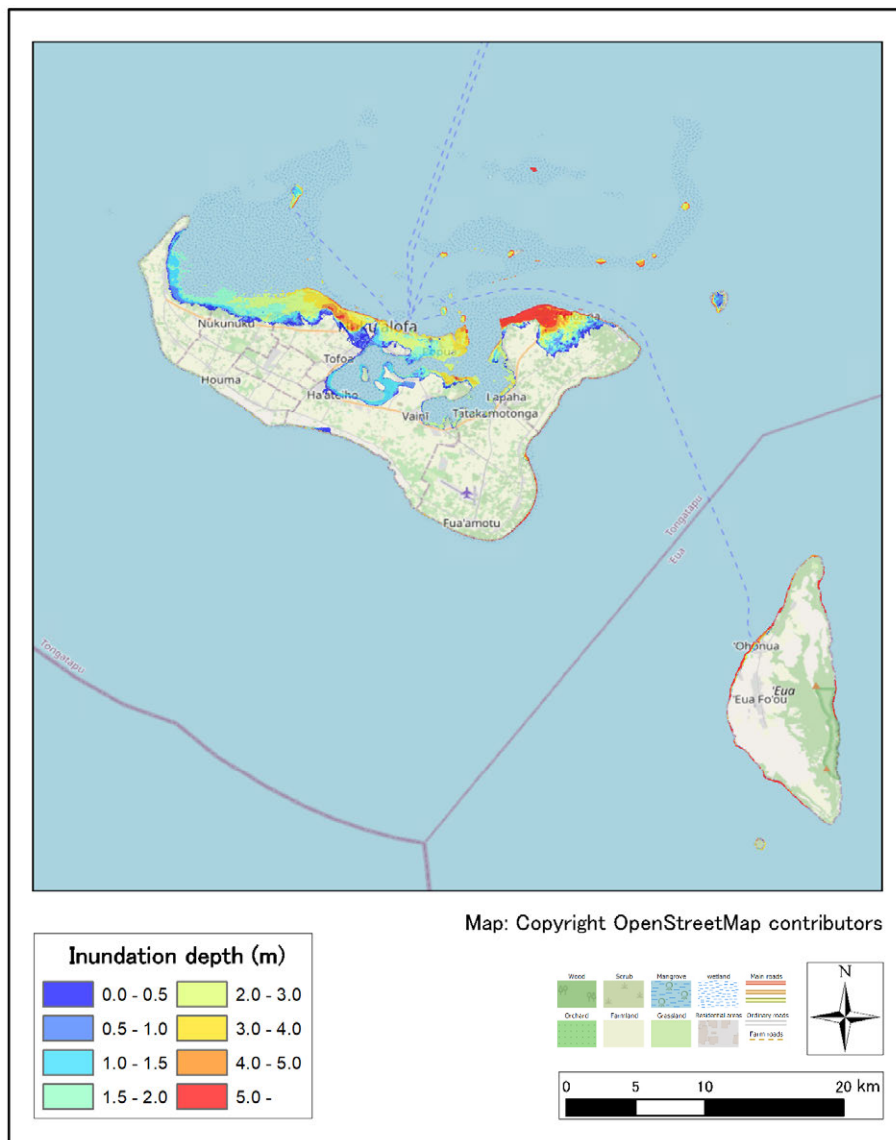
Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 3.2.62 津波ハザードマップ（火山性津波）

(2) 津波ハザードマップ (地震性津波)

ハザードレベル 2 (L2) で検討した最大クラスの地震性津波の想定に基づくハザードマップを図 3.2.63 に示す。

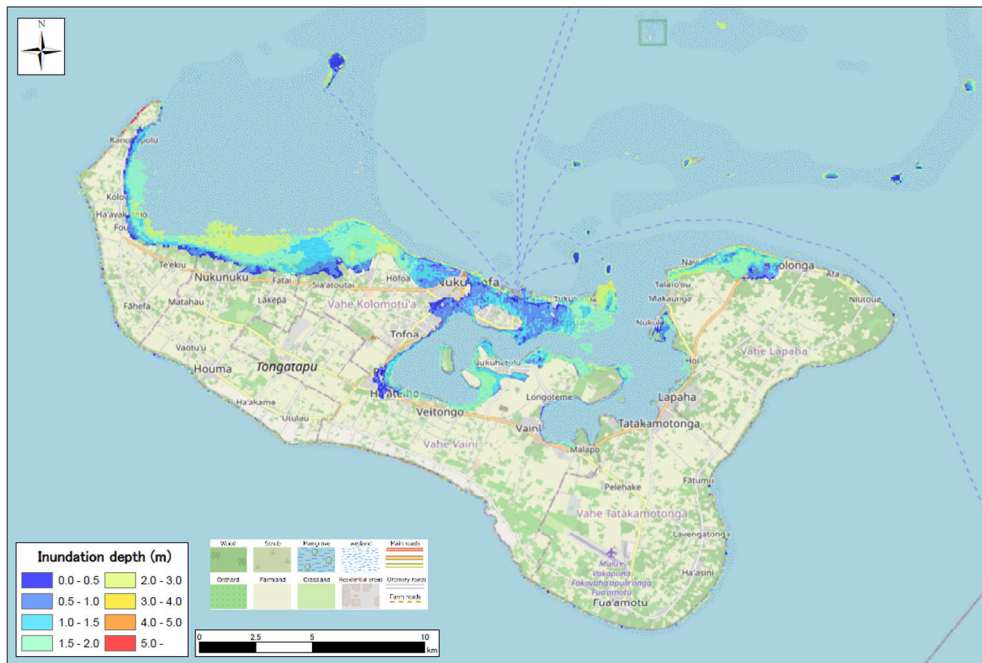


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.63 津波ハザードマップ (地震性津波)

(3) 高潮ハザードマップ

ハザードレベル 2 (L2) で検討した最大クラスの地震性津波の想定に基づくハザードマップを図 3.2.64 に示す。なお、潮位条件は、気候変動を考慮した海面上昇ケース (2050, 2075, 2100 年) のうち、中位の 2075 年の予測ケースを示す。

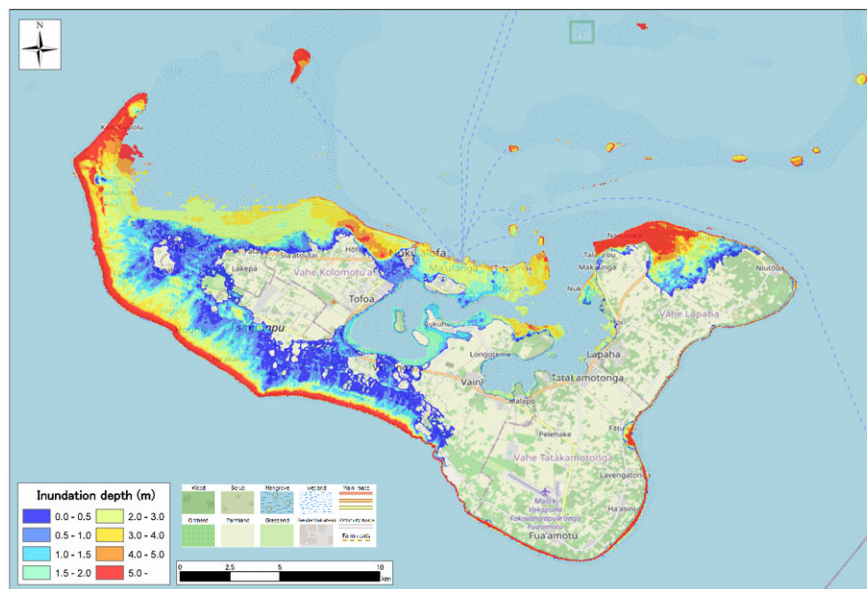


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.64 高潮ハザードマップ

(4) 津波（火山性・地震性津波）・高潮の最大包絡ハザードマップ

(1)～(3)までに整理したハザードマップを重ね合わせて、津波高潮ハザードマップを作成した。作成結果を以下に示す。



Map: Copyright OpenStreetMap contributors



Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 3.2.65 津波（火山性・地震性津波）・高潮ハザードマップ

3.2.4 災害対策の方向性

ハザード解析の結果から、津波及び高潮については、表 3.2.23 の方向で対策を行うことを推奨する。なお、本検討で検討した各ハザードの規模・再来周期について表 3.2.24 に整理した。

表 3.2.23 災害対策の方向

ハザード	対策の方向性
火山性津波	<ul style="list-style-type: none"> ▶ レベル 1 規模 (2022 年 HTHH の火山噴火以下の小規模な噴火等による津波) に対しては、地震性津波高潮対策と連携して構造物対策を実施する。 ▶ レベル 2 規模 (2022 年 HTHH の火山噴火と同等規模の火山が他の海底火山で発生する場合) の火山性津波に対しては、大規模な浸水が想定されることから人命の保護を第一に避難等のソフト対策を充実させる。
地震性津波	<ul style="list-style-type: none"> ▶ レベル 1 規模 (M8 クラスの頻繁に発生する地震性津波) に対しては、現況の防潮堤で防護可能であることから、現況防潮堤を維持する。 ▶ レベル 2 規模 (M8~9 クラスの最大クラスの地震性津波) に対しては、大規模な浸水が想定されることから人命の保護を第一に避難等のソフト対策を充実させる。
高潮	<ul style="list-style-type: none"> ▶ レベル 1 規模の数年から数十年に 1 回襲来するサイクロンによる高潮については、現況防潮堤を整備 (改良を含む) して対策する。 ▶ レベル 2 規模のサイクロンによる高潮については、津波と同様に、大規模な浸水が想定されることから人命の保護を第一に避難等のソフト対策を充実させる。

出典：JICA 調査団作成

表 3.2.24 本検討における火山性津波・地震性津波・高潮の L1/L2 外力及び再来周期

災害種	ハザードレベル	想定したハザードと発生周期
火山性津波	レベル 1	トンガ周辺海域で 2022 年 HTHH の火山噴火より小さい規模の海底火山噴火 (VEI3 以下) による発生頻度が高い津波※ ハザードの発生周期：不明 (数十年~百数十年程度)
	レベル 2	トンガ周辺海域で 2022 年 HTHH の火山噴火と同規模以上の海底火山噴火 (VEI4 以上) による大規模な津波 ハザードの発生周期：200 年~数千年以上 補足：VEI4 以上の火山噴火は、19 世紀から現在までの間で 1846,1886,2022 年に発生 (40~136 年間隔) に発生しているが、大規模津波を発生させたのは 2022 年であるので、トンガタブ島に大きな影響を与えるような大規模津波の発生間隔は 200 年以上
地震性津波	レベル 1	トンガ周辺のトンガトレンチ周辺で発生した M8 以上の地震による発生頻度が高い津波 ハザードの発生周期：数年~数十年
	レベル 2	トンガタブ島の東で発生した M8.7 規模の地震に伴う大規模な津波 (SOPAC2012 想定) ハザードの発生周期：百数十年~数千年以上 補足：USGS 地震カタログ (1913~2022 年) によると、トンガ周辺で 8.7 規模の地震は発生していないため。
高潮	レベル 1	トンガ周辺を通過する大規模なサイクロンによってトンガタブ島 (ヌクアロファ) で発生する頻度が高い高潮 ハザード発生周期：100 年 (同程度の高潮は数年~数十年間隔で発生)
	レベル 2	トンガにおいて既往最低気圧のサイクロンがトンガタブ島 (ヌクアロファ) に最悪のコースで通過する場合の最大規模の高潮 (2°C 上昇シナリオによる海面上昇を考慮) ハザード発生周期：100 年以上

出典：JICA 調査団作成

※火山性津波のレベル 1 津波は、本調査では検討していない。

3.3 施設等の津波・高潮等の浸水被害対策、火山灰対策、地震対策、暴風対策の国内外の事例収集

3.3.1 高潮・津波災害リスク

(1) 対策一覧

高潮・津波災害の対策一覧を以下に示す。高潮・津波の対策としては、沿岸の大規模構造物（港湾・漁港施設、海岸堤防、河川堤防）や二線堤になり得る沿岸の道路などが対象となる。

表 3.3.1 高潮・津波対策一覧

対策の種類	具体的対策	対策の効果（目的）
構造物	堤防・護岸（河川/海岸）	高潮・津波による浸水防止
	水門・陸閘	〃
	防波堤等沖合施設	高潮・津波の水位・流勢の低減
	嵩上げ道路等兼用構造物	高潮・津波による浸水防止
土地利用	用途規制	浸水想定域の土地利用用途を規制することで浸水被害を軽減する。
	建築規制	浸水想定区域の建築物の構造の規制（構造、階数等）
都市計画	都市構造	用途規制とリンク
	移転計画	防災集団移転等
避難計画	避難計画（タイムライン）	浸水域内の人的被害削減
	BCP	浸水域内の事業所被害の削減
警報システム	波浪観測施設	波浪計（GPS 波浪計、海底設置型等）
	潮位観測施設	潮位計・水位計
	情報システム	観測施設の遠隔監視 水門・陸閘等の遠隔操作
救援計画	早期救援体制の確保 救援通報システムの確保	人命の保護
誘導政策	民有護岸改修の促進 （補助金・助成金制度、税率優遇）	民有施設（海岸護岸等）の耐震化・改修の促進
	浸水対策の補助制度	耐浸水建築の普及

出典：総合防災関連研修内容の検討 JICA

(2) 対策事例

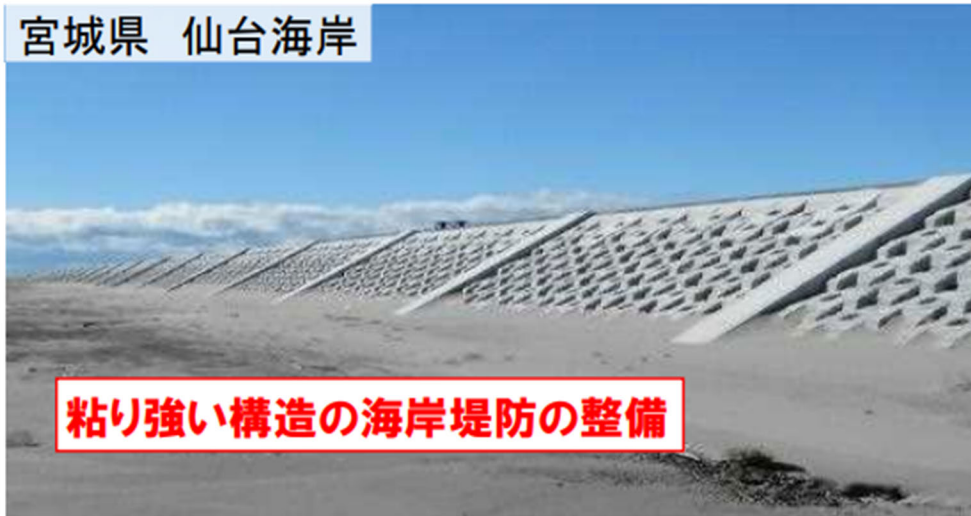
主に構造物による対策事例を以下に示す。

1) 堤防・護岸（河川/海岸）

比較的発生頻度の高い津波や地震等の災害から海岸を防護するために、堤防、護岸、離岸堤、津波防波堤等の海岸保全施設の新設、改良等による対策を推進している。

津波・耐震対策の例

宮城県 仙台海岸



出典：国交省「海岸保全に関する取組の現状（令和元年）」¹⁷

図 3.3.1 日本における津波対策の堤防



出典：土木学会 The International Infrastructure Archives¹⁸

図 3.3.2 モルディブにおける津波対策の堤防設置前（左）と設置後（右）

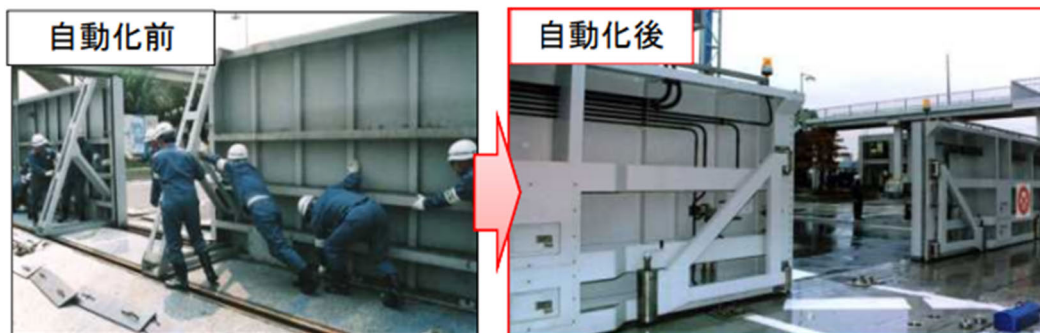
2) 水門・陸閘

津波が発生した際に、津波の到達前に水門、陸閘等を確実に閉鎖するため、水門・陸閘の自動化を行っている。

¹⁷ https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hozen/dai02kai/pdf/doc3.pdf

¹⁸ <https://www.jsce.or.jp/e/archive/project/pj14.html>

【陸閘の自動化の例(名古屋港海岸:愛知県)】

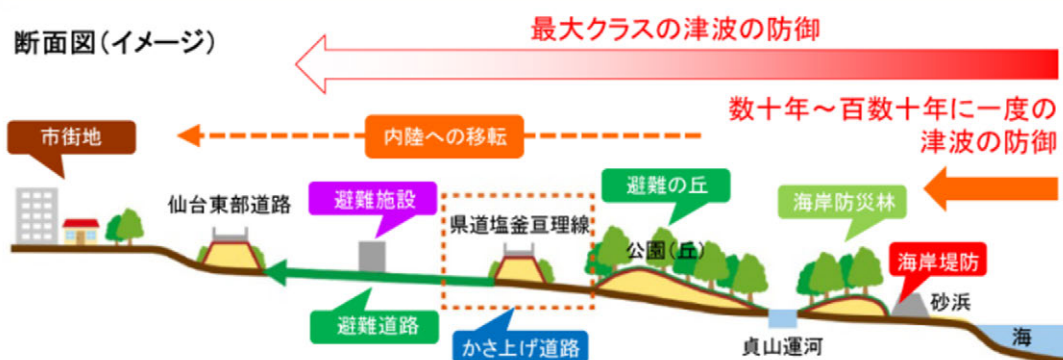


出典：国交省「海岸保全に関する取組の現状（令和元年）」

図 3.3.3 陸閘の自動化例

3) 嵩上げ道路等兼用構造物

道路を嵩上げることにより、堤防機能を持たせて、多重に防護している。



出典：防災環境都市・仙台¹⁹

図 3.3.4 嵩上げ道路の実施例

¹⁹ https://sendai-resilience.jp/efforts/government/development/elevated_road.html

3.3.2 地震災害リスク

(1) 対策一覧

地震対策として、まずは各種建築物・インフラ施設・ライフライン施設等の耐震設計基準が整備され適切に運用されることが重要である。その上で、耐震性の低い建物や施設の耐震補強を実施し、また液状化や地震火災への対策を行う必要がある。

表 3.3.2 地震対策一覧

種別	具体的対策	効果
構造物	建築物・インフラ・ライフライン等の構造物の耐震化工事（耐震改修、建替え）	建築物・インフラ・ライフライン等の構造物の被害軽減、構造物の被害による人的被害・機能途絶の軽減
	建築物・インフラ・ライフライン等の液状化対策（構造物の基礎、配管のフレキ ²⁰ や柔軟性の確保）	液状化等の地盤変状に起因する建築物・インフラ・ライフライン等の被害の軽減
	地盤改良工事	液状化等の地盤変状に対する構造物等の被害の軽減
	建築物等の耐火構造	地震火災の延焼拡大の防止
都市計画／土地利用	建築規制（耐震設計基準の策定と適用）	建築物の耐震化による被害軽減、建物被害による人的被害の軽減
	土木構造物、インフラ施設、ライフライン施設の耐震設計基準の策定と適用	土木構造物、インフラ施設、ライフライン施設の物理的被害・機能途絶の軽減
	防災都市計画、防災を考慮した再開発計画	建築物の建替え等による耐震化、避難路等の整備等による地域の防災能力向上
	建物密集地域の解消、公園・緑地等オープンスペースの整備	地震火災の延焼拡大の防止
	活断層近傍の用途規制／建築規制	断層直上や近傍での構造物被害の回避・軽減
警報システム	早期地震警報	保護姿勢の確保や機器・設備等の緊急停止による二次被害の軽減
救援計画	早期救援体制の確保 救援通報システムの確保	人命の保護
誘導政策	構造物の耐震化促進（補助金・助成金制度）	建築物・インフラ・ライフライン等の耐震化（構造対策）促進による被害の軽減
	表示・認定制度（住宅性能表示制度、耐震性能認定制度等）	建築物の耐震性能向上の促進による被害の軽減

出典：総合防災関連研修内容の検討、JICA

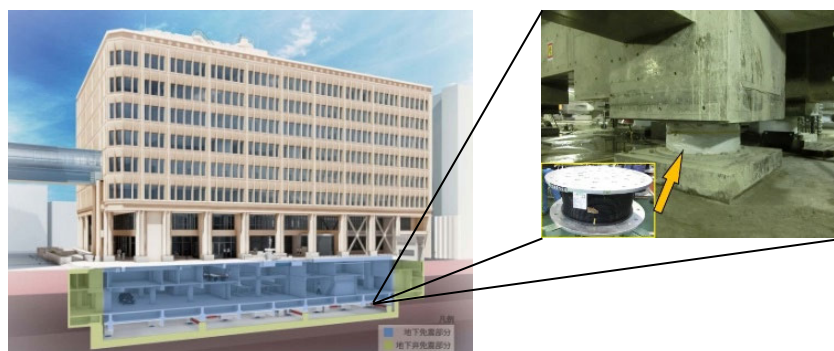
(2) 対策事例

主に構造物による対策事例を以下に示す。

²⁰ フレキ管、フレキシブルジョイント、フレキホース、フレキ配管の総称

1) 建物の免震化（公共施設）

新宿区役所本庁舎免震改修工事：地震に遭遇した後も区の防災拠点として機能を果たし、継続して使用できるよう、免震改修と防災機能強化のための工事を実施。



出典：新宿区ホームページ²¹

図 3.3.5 公共施設の免震化事例

2) 建物の耐震化

新潟県立十日町総合高等学校

既設校舎の極脆な柱は、袖壁の増設、開口閉塞により解消した。また、建物の耐力の不足は新設鉄骨ブレース、耐震壁等により補強された。

■補強前（外観）



■補強後（外観）



■補強前（内観）



■補強後（内観）



出典：文部科学省（学校施設の耐震補強に関する調査研究 報告書 1 章 1 新潟県立十日町総合高等学校校舎）²²

図 3.3.6 学校施設の耐震補強事例

²¹ https://www.city.shinjuku.lg.jp/kusei/soumu01_001026.html

²² https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2015/12/11/1237614_001.pdf

3.3.3 火山灰（降灰）リスク

(1) 対策一覧

降灰に対する対策としては、事前準備と降灰中、事後対応に分けられる。各段階での対応を以下に示す。

表 3.3.3 火山灰対策

種別	具体的対策	効果
事前準備	備品等の準備 防塵マスク、防護めがね 飲用水・保存食の準備 清掃用具（ほうき、掃除機、フィルター、ショベル）	降灰時、事後対応を円滑に行うことができる。
	家屋の対策 <ul style="list-style-type: none"> ・ ドア・窓の閉鎖 ・ 隙間をテープ等で塞ぐ ・ 壊れやすい電気製品へのカバー ・ 給水用に雨水収集施設を使っている場合は収集施設とタンクとパイプをはずす 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 家屋への灰の侵入を防ぐ ・ 電化製品・機械製品への灰の侵入を防ぎ、故障を防ぐ。
	家屋の改良（窓やドア等開口部の気密性を高くする）	灰が入りにくい構造にする。
	屋根や樋、側溝、庭の配置や形態等の工夫、仕上げの選定等灰の溜まりにくい構造、形状、仕上げとする	灰の堆積しにくい構造・形状にする
降灰中	<ul style="list-style-type: none"> ・ 屋内に留まる ・ 屋外にいる場合は、避難施設に避難する ・ 情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 灰の影響を防ぐ。 ・ 事後対応等のため、情報を集める。
事後対応	屋外の清掃 <ul style="list-style-type: none"> ・ ロードスweeper ・ 散水車 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 火山灰の浮遊等を防ぐ ・ 居住地からの除去
	屋内の清掃	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電子機器の故障の防止 ・ 機械の故障の防止
その他	降灰予報	・ 噴火に対して準備が可能となる。
	噴火警報・噴火予報	・ 火山の監視

出典：JICA 調査団作成

(2) 対策事例

1) 火山灰の除去

道路等については、ロードスweeperや散水車で清掃する。



出典：鹿児島市

図 3.3.7 ロードスイーパー（道路に降り積もった火山灰を収集）



出典：鹿児島市

図 3.3.8 散水車（火山灰が舞い上がるのを防ぐために散水）

住宅地については、市民に無償配布している克灰袋等で市民が収集し、灰ステーションで集積・回収する。

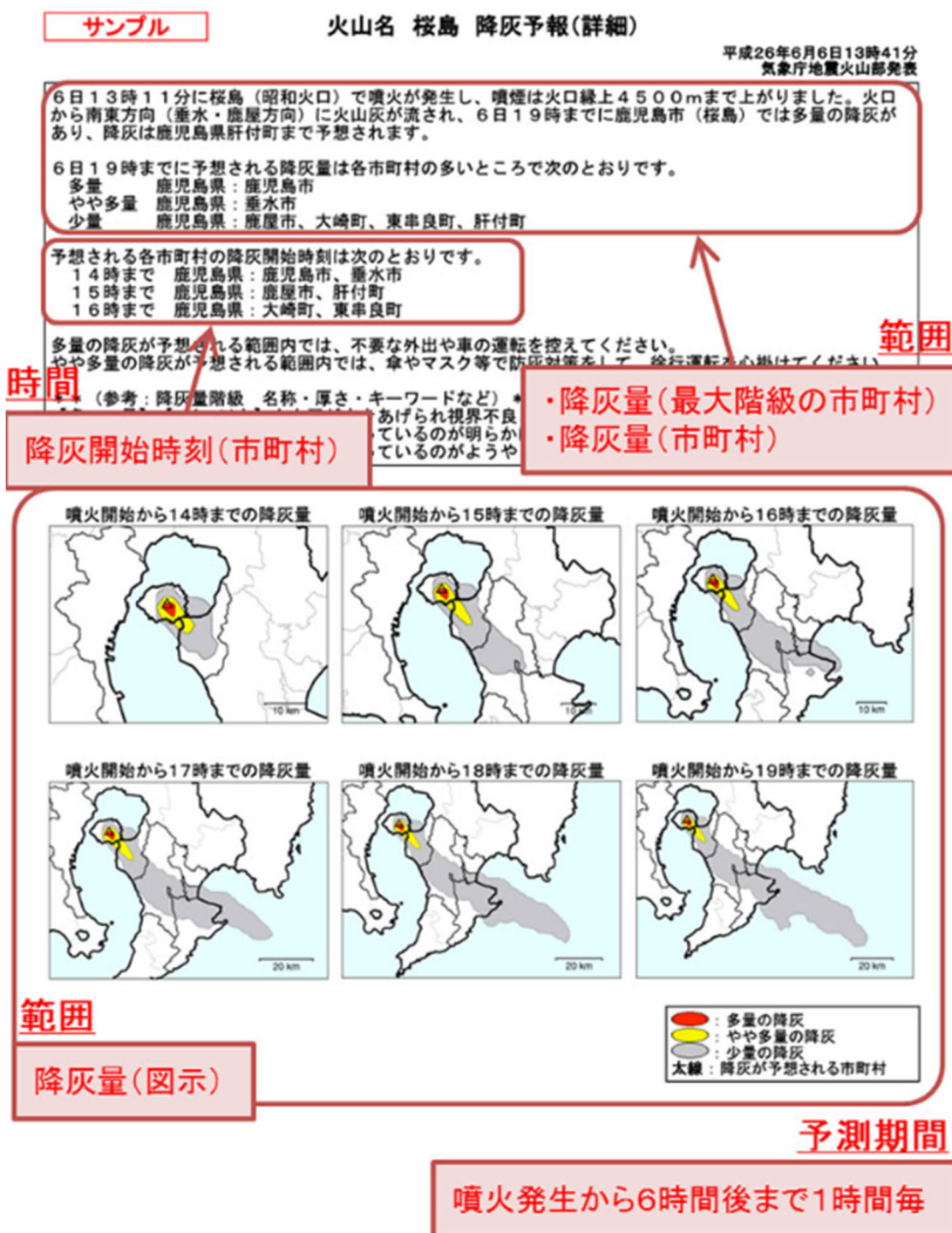


出典：鹿児島市

図 3.3.9 灰ステーション

2) 降灰予報

降灰対策に役立てるため、気象庁では、2008年3月より「降灰予報」の運用を開始しており、日本国内の火山で一定規模以上の噴火が発生した場合に、おおむね6時間先までに降灰が予想される地域を発表するものである。運用当初、この予報では地域に関する情報のみであったが、その後の研究により、降灰の量についても予測が可能になり、2015年3月から、これまでの降灰予報をバージョンアップし、より詳細な情報を伝える新しい降灰予報が開始している。



出典 : https://www.gov-online.go.jp/useful/article/201502/img/01_10b.jpg

図 3.3.10 降灰予報

3.3.4 暴風災害リスク

(1) 対策一覧

サイクロンでは、高潮に加えて暴風・強風が発生する。暴風・強風対策の一覧を表 3.3.4 に示す。

表 3.3.4 暴風・強風対策一覧

種別	具体的対策	効果
構造物	屋根の強風対策 瓦などの屋根材の連結 屋根材の固定方法の改善	強風で屋根が被災しないようにする。
	窓ガラスの強風対策 雨戸・シャッターの取付 飛散防止フィルムの貼付	強風によるガラス等の破損の防止
	機器の固定	機器の飛散対策
	建築物等の耐風構造	暴風により飛散するものの固定 家財 コンテナ 船など
誘導政策	建築物の告示基準の変更 (強風対策の強化)	新築建築物の強風対策の強化
	強風対策の補助制度 ・屋根の耐風診断 ・耐風改修工事の補助金制度の設立 ・リフォーム推進事業の適用	既存建築物の強風対策の強化

出典：JICA 調査団作成

3.4 トンガの災害リスク現況把握（トンガタブ島及びエウア島を中心とする、ハザード曝露及び物理的な脆弱性の実態把握）

3.4.1 施設・建物・土地利用状況及び開発計画の確認

災害リスクは、将来の一定の期間にシステム、社会、またはコミュニティに発生する可能性のある人命の損失、負傷、または資産の損失であり、ハザード、暴露、脆弱性の関数として確率的に決定される。本検討では、津波・高潮以外のハザード情報は平面的な分布情報の詳細がないことから、津波・高潮ハザードについて、その災害リスクの現況を把握した。

(1) 人口・施設・建物等の暴露、脆弱性情報

人口・施設・建物等の暴露・脆弱性情報は、2.4.4 章に整理を行った。本項では、人口と建物、特に重要なインフラ施設として給電施設の暴露・脆弱性情報を用いた。

(2) 津波災害リスク

津波災害リスクについては、浸水域内の影響人口と浸水建物数、浸水する給電施設について整理を行った。津波ハザードについては、火山性津波の最大包絡範囲を対象とした。

1) 津波影響人口

人口分布と浸水範囲を重ねた図を図 3.4.1、図 3.4.2 に示す。人的被害の発生の有無については、避難の有無（避難率）も強く関係することから、ただちに人的被害が発生する訳ではないが、津波影響人口はトンガタブ島で約 40,000 人となっており、トンガタブ島は人口の 45%が影響を受ける。一方、エウア島の津波影響人口は約 460 人となっており、人口の約 10%程度である。

以上から、トンガタブ島はエウア島に比べて津波による浸水災害リスクが高いと言える。

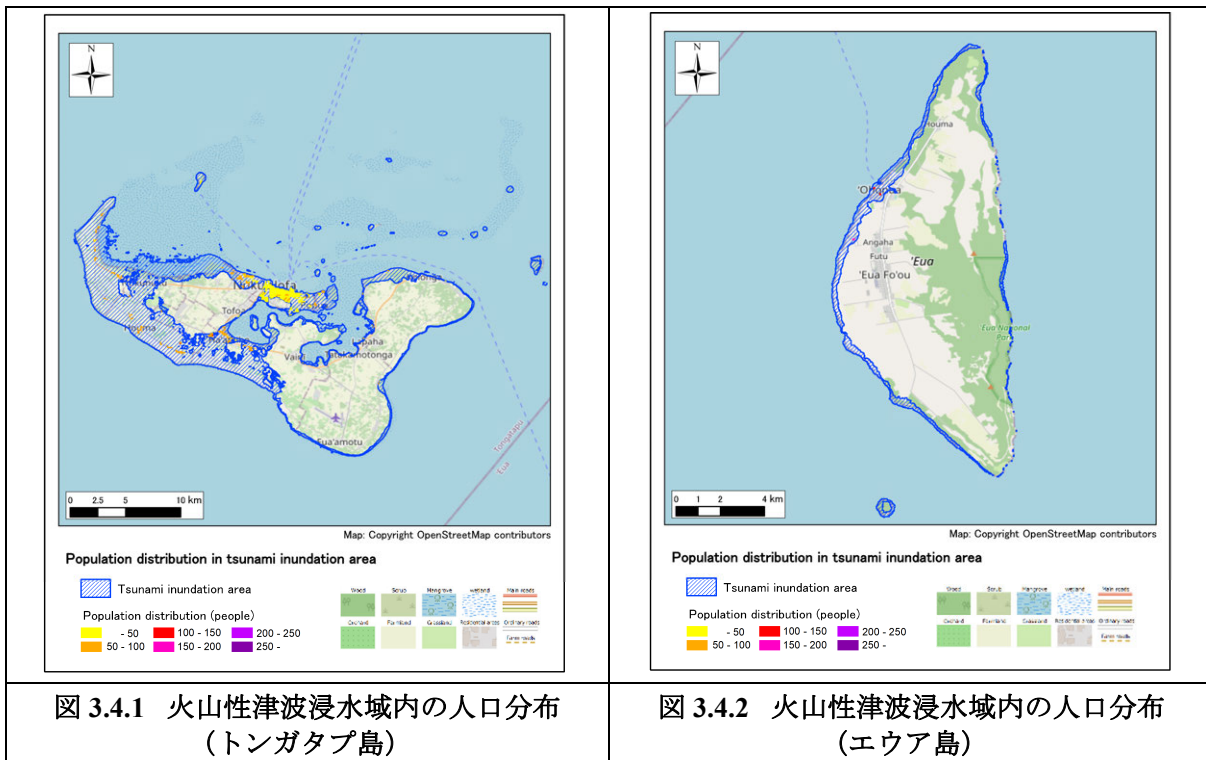


図 3.4.1 火山性津波浸水域内の人口分布 (トンガタブ島)

図 3.4.2 火山性津波浸水域内の人口分布 (エウア島)

出典：JICA 調査団作成

2) 浸水建物数

建物分布と浸水範囲を重ねた図を図 3.4.3、図 3.4.4 に示す。浸水建物数は、トンガタブ島で約 11,400 棟となっており、人口と同様に全建物数の約 49%である。一方、エウア島の浸水建物数は約 440 棟（全建物数の 20%）となっている。建物においてもトンガタブ島の浸水リスクはエウア島より大きいと言える。

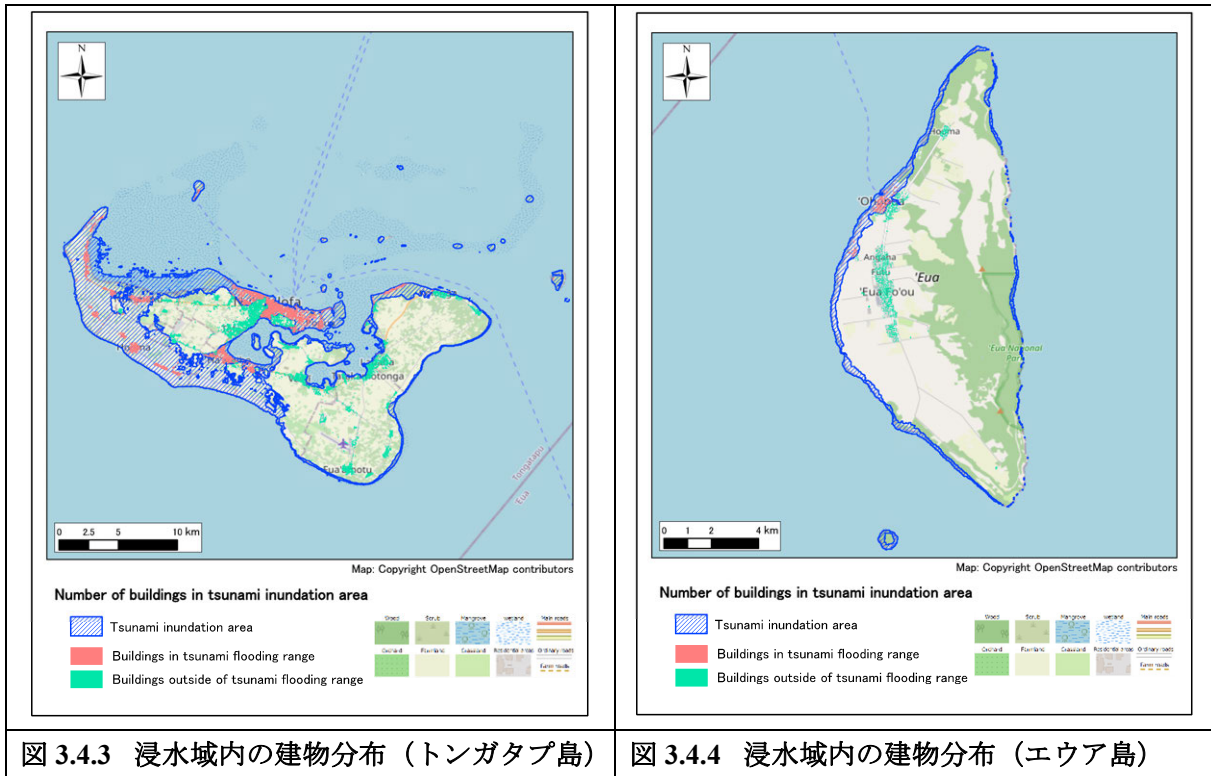


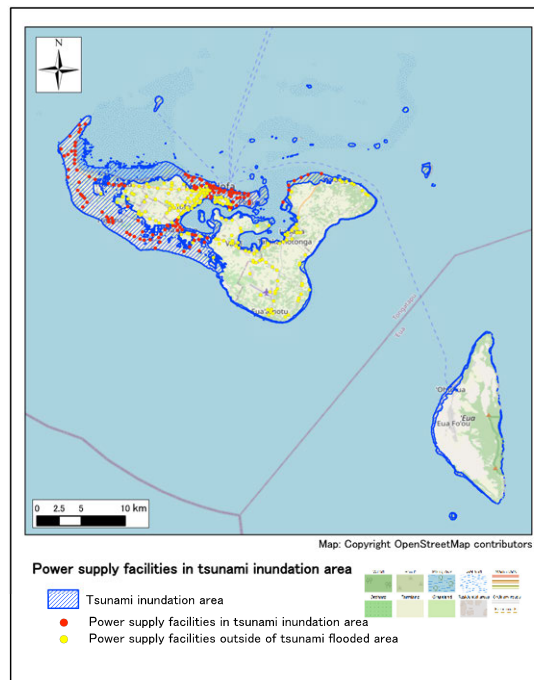
図 3.4.3 浸水域内の建物分布（トンガタプ島）

図 3.4.4 浸水域内の建物分布（エウア島）

出典：JICA 調査団作成

3) 浸水給電施設

浸水に極めて脆弱な重要施設として給電施設と浸水域を重ね合わせた図を図 3.4.5 に示す。ただちに全ての施設が使えなくなるわけではないが、極めて重要なインフラ施設であることから、対策をすることが望ましい。



出典：JICA 調査団作成

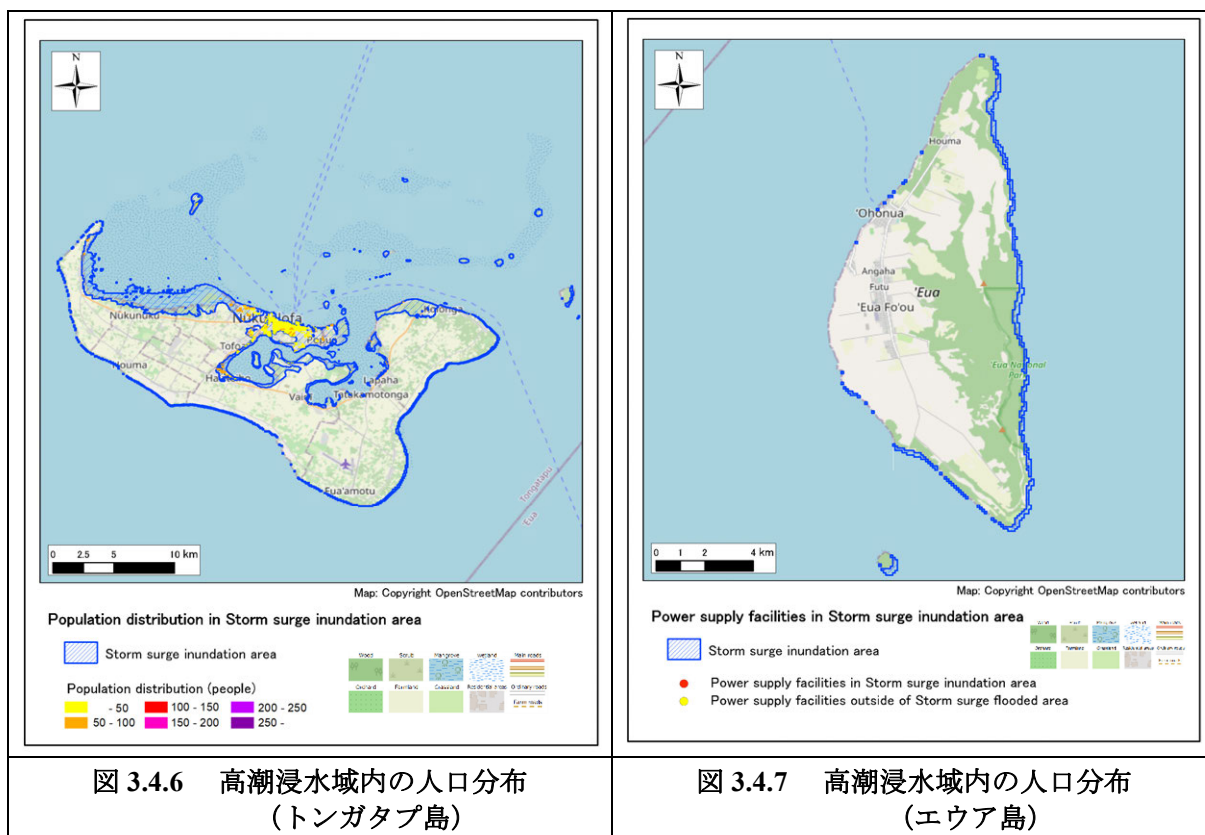
図 3.4.5 浸水域内の電力施設分布（トンガタプ島、エウア島）

(3) 高潮災害リスク

高潮災害リスクについても、浸水域内の影響人口と浸水建物数、浸水する給電施設について整理を行った。高潮ハザードについては、ハザードレベル2 (L2) の高潮で潮位条件を2075年時想定 (M.S.L.+1.22m) とした。

1) 高潮影響人口

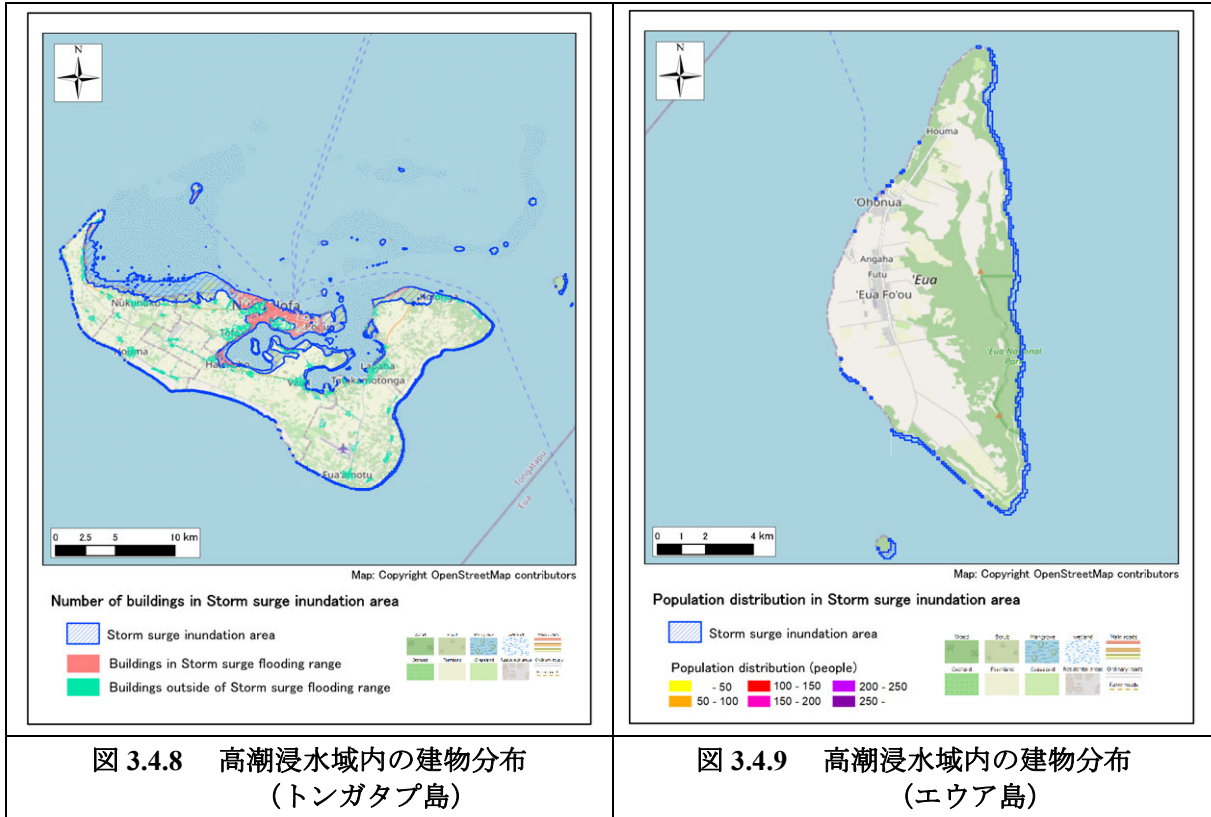
人口分布と浸水範囲を重ねた図を図 3.4.6 に示す。高潮影響人口はトンガタブ島で約 31,600 人となっており、トンガタブ島は人口の 35%が影響を受ける。一方、エウア島の高潮影響人口は 0 人となっている。以上から、津波同様にトンガタブ島はエウア島に比べて高潮による浸水災害リスクが高いと言える。



出典：JICA 調査団作成

2) 浸水建物数

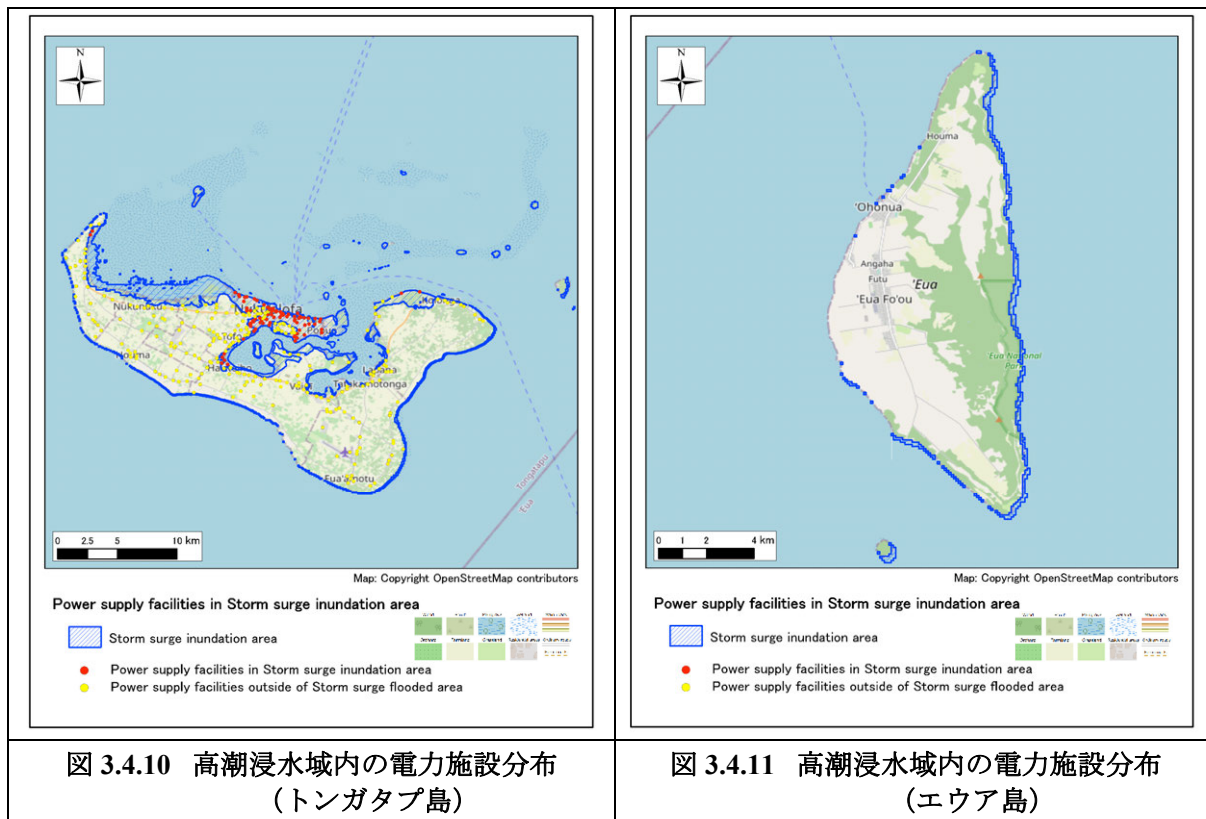
建物分布と浸水範囲を重ねた図を図 3.4.8、図 3.4.9 に示す。浸水建物数は、トンガタブ島で約 7,600 棟となっており、全建物数の約 32%である。一方、エウア島の浸水建物数は約 2 棟となっている。



出典：JICA 調査団作成

3) 浸水給電施設

浸水に極めて脆弱な重要施設として給電施設と浸水域を重ね合わせた図を図 3.4.10～図 3.4.11 に示す。津波同様にただちに全ての施設が使えなくなるわけではないが、極めて重要なインフラ施設であることから、対策をすることが望ましい。



出典：JICA 調査団作成

3.4.2 各法令・制度にかかる防災関連情報の整理・分析

(1) 防災関連法

1) 国家空間計画および管理法 (National Spatial Planning and Management Act 2012)

a. 概要

この法律は、トンガの空間開発を規定し、特に、自然資源および人工資源の保護と生態学的プロセスの維持を含む、公正、秩序ある、経済的かつ持続可能な土地の使用、開発、および管理を規定するため 2012 年に策定された。

国家空間計画局を設立し、国土大臣を権限者として任命する。機関の主要な機能は、持続可能な管理計画の準備と承認を促進し、開発評価を実施する。土地の持続可能な利用に関する戦略的計画と調整された行動を促進する。国、地域、地区、村、またはサイト固有の空間計画は、この法律に従って作成される。当局は、一連の開発標準を準備し、承認することができる。

計画または規則で別段の定めがない限り、すべての開発にはこの法律に基づく同意が必要となっている。状況に応じて、当局は申請者に対し、戦略的計画、土地利用および開発を評価する

開発計画を開発申請書とともに提出するよう要求する場合がある。申請書には、適用される環境法の下で必要とされる環境影響評価を添付する必要がある。当局は、適切と考えるあらゆる条件を開発同意に含めることができる。

b. 構成

Part 1 前章

Part 2 国家空間計画庁

国家空間計画庁の設立目的や機能を規定

Part 3 空間計画

空間計画の定義、内容、計画策定の手順、計画の承認手続き等について規定

Part 4 計画と開発の評価

開発許可の対象となる開発内容の規定、

Part 5 計画の審判

開発の許可に関する計画裁判所への上訴を規定

Part 6 執行と法的手続き

法的強制力に関する規定。

Part 7 その他

2) 危機管理法 (Emergency Management Act 2016)

トンガにおける防災関連法規は 2007 年に制定された危機管理法 (Emergency Management Act) が根拠法となっている。その後、2014 年と 2016 年に修正が加えられており、2014 年の修正では危機管理法で規定されている防災行政を行う上での必要な組織のメンバーを修正した。同法はトンガの防災行政を実施するうえでの枠組みを示している。その中でトンガの防災行政を行う機関として NEMO の設立を規定するとともに、防災行政を実施するうえでの主要な委員会を設立している。同時に防災関連計画、危機管理の緊急事態宣言の発出などを規定した。しかしながら、同法は緊急対応を中心となっており、災害リスク管理など防災全般を取り扱うには至っていない。

また、同法ではトンガの災害に関連する年次報告書の提出とその内容も規定されており毎年の緊急対応状況、災害リスク削減の優先度の情報などが含まれる。

3) 災害リスク管理法 (Disaster Risk Management Bill 2021)

災害リスク管理法 (Disaster Risk Management Bill 2021) は、現行の危機管理法 (2007) が主に災害後の緊急対応に焦点を当てているが、災害リスク管理法は災害全般を災害マネジメントサイクルに従って対応できるように改定されている。災害リスク管理法は自然災害だけではなく、人災、疫病なども含まれる。ただし、戦争や原子力災害、サイバー攻撃、労使紛争や暴動などは除外している。

現行法律では緊急対応に重きが置かれていたが、同法では防災全体を扱うことが出来ることから、防災行政を進めていくためには是非必要な法律である。2021 年 7 月に同法は国会に提出されたが、権限の集中を心配され承認されずにあった。しかし 2023 年 6 月に Act として承認された。

4) 建築基準法

トンガにおける建築行政の基本となる建築規制基準法（Building Control and Standards Act）は2002年に制定・施行された。この法律では建築行政に関する組織体制、建築許認可手続き、建築基準などが規定された。2004年に建築規制基準施行規則（Building Control and Standards Regulations）が制定され2007年の建築基準規定（Building Code Regulations）の施行により建築基準（National Building Code of the Kingdom of Tonga）が運用されている。

トンガの建築基準は基本的にオーストラリア及びニュージーランドの基準を基にして制定されている。また、多くの条項において、オーストラリア及びニュージーランドの基準がそのまま使われているが、2007年の建築基準規定では耐震設計について、カリフォルニア建築基準（California Building Code 1998）とオーストラリア及びニュージーランド耐震基準のどちらに從うことも可能である、とされている。2007年に制定された建築基準規定は、その後2018年に性能設計の手法などを取り入れ、大きく改定された。

5) 地震及び風についての考え方

2018年建築基準で規定されている設計水平震度は、建築物の重要度（レベル1-4）と耐用年数（25、50、100年）の組み合わせで、標準水平震度 $Z (=0.7g$ 、年超過確率 $1/500$) と再現期間係数 R (Return Period Factor) の積 ($Z \cdot R$) により計算される。再現期間係数とそれに対応する設計水平震度を表3.4.1に示す。また、トンガの再現期間係数 R はニュージーランドの係数と比較すると多少変更がある。参考のため、ニュージーランドの再現期間係数も併せて表3.4.1に示す。

表 3.4.1 年超過確率に対応する設計水平震度

年超過確率	再現期間係数 R	設計水平震度 $Z \cdot R$ (g)	NZS1170.5 による R の値
1/2500	2.0	1.4	1.8
1/2000	1.8	1.26	1.7
1/1000	1.4	0.98	1.3
1/500	1.0	0.7	1.0
1/250	0.75	0.525	0.75
1/100	0.50	0.35	0.5
1/50	0.40	0.28	0.35
1/25	0.30	0.21	0.25
1/20	0.25	0.175	0.2

出典：National Building Code of the Kingdom of Tonga

また、年超過確率とそれに対応する設計風速と水平震度は表3.4.2になる。

表 3.4.2 建築物設計用風速と水平震度のまとめ

建物の重要度	風 (風速, m/s)			地震 (水平震度係数, g)		
	<25	50	100	<25	50	100
設計年数 (年)	<25	50	100	<25	50	100
重要度レベル 1	-	60	66	0.28	0.35	0.525
重要度レベル 2	60	66	70	0.525	0.7	0.98
重要度レベル 3	66	70	76	0.7	0.98	1.4
重要度レベル 4	70	76	*	0.98	1.4	*

* 重要度レベル4のうち設計耐用年数が100年の建物は別途調査が必要

出典：National Building Code of the Kingdom of Tonga

トンガの設計水平震度は50年耐用年数の場合、一般建築物は0.7g、不特定多数が利用する重要建築物などは0.98g、防災上重要建築物は1.4gである。耐用年数100年の場合、一般建築物は0.98g、不特定多数が利用する重要建築物などは1.4gである。日本のレベル2設計水平震度は1.0gであり、重要度係数は、I類（緊急対応政府施設、災害拠点病院、公共避難施設など）が1.5、II類（政府施設、一般病院、学校など）が1.25、III類（一般建築物）1.0である。トンガと日本の水平震度を比べると、耐用年数50年の一般建築物は日本より小さいが、耐用年数50年、100年の重要建築物は日本とほぼ同程度と考えられる。

トンガの建築基準はオーストラリア/ニュージーランドの基準をもとにして作成されている。構造設計においては、地域ハザードをトンガ用に変更した以外の部分はそのまま適用している。ニュージーランドは地震ハザードが高く、最初の耐震基準は1935年に遡り、耐震設計の歴史が長い。ニュージーランドの耐震基準は2004年版が最新版である。

2018年の改定では、標準水平震度Zが0.4gから0.7gに増加、また、再現期間係数Rが導入され、ほとんどの建築物に対して設計水平震度が2007版より大きくなったため、2007以前、並びに2007版により建てられた建築物の取り扱い（耐震診断、耐震補強）に関する検討が必要と思われる。

トンガでは建築規制の歴史が短く、建築規制・建築基準の遵守に関するシステムの構築、建築行政にかかわる組織・人材の能力強化、特に新しい設計基準を理解し、耐震設計・品質管理にかかわる技術人材の能力強化が課題と思われる。

(2) 防災関連組織

1) 気象・エネルギー・情報・災害管理・環境・気候変動・通信省 (Ministry of Meteorology, Energy, Information, Disaster Management, Environment, Climate Change and Communications (MEIDECCC))

MEDIDECCは現在10の部門からなり（①リーダーシップ、②企業サービス、③気象、④エネルギー、⑤情報、⑥防災、⑦環境、⑧気候変動、⑨通信、⑩CERT/エーガバメント）、2018/19には211名のスタッフを擁していた。また、年間予算は1億1130万TOPである。特に、本省内には防災にかかわる部署が多く含まれている。

2) 国家危機管理局 NEMO (National Emergency Management Office: NEMO)

防災行政を扱う主要な組織であり、現在はMEIDECCCの下に置かれている。NEMOは緊急対応委員会など3つの委員会に対するサポートや助言を行う機関として、国家危機管理計画(National Emergency Management Plan)のレビューとモニタリングを行う。さらに、NEMOの政策や決定事項を実施することとされている。また、危機管理活動の調整も重要な役割とされている。トンガでは度重なる災害のため、災害のリスクを低減し、災害に備えるための施策の必要性が認識され、組織の役割を拡大するため2021年に「Disaster Risk Management Bill 2021」が国会に提出された。しかしながら当時は承認されず、HTHH噴火の緊急対応が落ち着いた2023年6月に「Disaster Risk Management Act」として閣議承認され、NEMOはNational Disaster Risk Management Office: NDRMOとなった。承認後1年間は混乱を避けるため、両方の呼称を併用することとなっている。

(本報告書では記載をNEMOで統一する。)

3) トンガ気象サービス (Tonga Meteorological Service: TMS)

TMS は MEIDECCC の管理下の組織であり、主に気象の観測を担当している。トンガタブ島のファアモツ国際空港国内線ターミナルにオフィスがあり、ここでは気象の観測のほか、津波のモニタリングも行っており、津波警報基準に基づき津波警報が発令される。

最近、気象観測装置をニュージーランドの協力のもと更新した。トンガ全体で全自動の観測システムが 21 か所設置済みである。内訳としては、トンガタブ島に 8 か所、ヴァヴァウに 5 か所、ハアパイ諸島に 4 か所となっており、残りはその他の島に既に設置済みである。これらのデータは携帯電話経由で本部に集約されている。

4) トンガ地質サービス (Tonga Geology Service: TGS)

TGS は Ministry of Lands and Natural Resources の管理下の組織である。TGS は地震の観測を行っている。また、海底火山についても TGS が観測を行う責任がある。現在 TGS には 8 セットの地震計があるが、そのうち 6 セットは既に設置済みである。さらに、今後世界銀行の協力によりさらに 8 セットの地震計の導入を検討している。

また、2022 年 1 月 15 日に噴火した海底火山 HTHH 大規模噴火を契機として、火山の観測機材も導入が進んでいる。USGS の支援により、海底火山観測用にインフラサウンドアレイを 1 セットすでに受領している。これは TMS の空港内の観測施設で運用することとなっているが、設置場所はまだ確定していない。TGS ではさらにもう 1 セットを USGS から支援してもらいたいと考えており、それをヴァヴァウに設置する予定である。

5) 社会基盤整備省 (Ministry of Infrastructure : MOI)

社会基盤整備省はトンガのインフラ開発を主に担当している省庁である。MOI には 5 つの局(民間航空、陸上交通、海上交通及び港湾、建築規制、その他のインフラ)である。トンガのインフラ開発を担当していると言える。現在、107 名のスタッフが在籍している。

6) 国家災害会議 (National Disaster Council: NDC)

トンガの災害に係わる組織の中で、最も上位に位置付けられている。NDC は内閣に設置され、首相が議長を務め、各閣僚により組織されて、トンガの防災に関する最高機関に位置づけられている。NDC の下には以下に示す 3 つの委員会が組織されており、NEMO が事務局を務める。

7) 国家危機管理委員会 (National Emergency Management Committee : NEMC)

トンガには 3 つの委員会が設置されているが、NEMC は危機管理全体を管轄しており、3 つの委員会は現在 MEIDECCC の大臣が議長を務めている。

NEMC は危機管理に関する政策策定を行う委員会であり、国家緊急対応計画の許可、同計画の実施、危機管理下での他国との調整などを行うとされている。

8) 国家危機対応委員会 (National Emergency Operation Committee: NEOC)

トンガで起こった、あるいは起こりつつある、または起こる可能性のある危機に対して対応する委員会である。危機管理は本委員会が中心となり行われることになる。

トンガでは首相が緊急事態を発出することとなっている。同法 32 項では緊急事態を発出する時の条件を以下通り規定している。

緊急事態が起こった場合、起こりつつあるか起こる可能性がある場合

その場合首相の権限が行使できる場合は、人命の損失、病気やケガ、財産の損失や被害、環境への損害、となっている。

9) 国家復興委員会 (National Emergency Recovery Committee : NERC)

災害が起こった後の復旧、復興の調整などを行うために設立される委員会である。メンバーはトンガ政府の主要官庁がメンバーとなっている。

10) 地方危機管理委員会 (District Emergency Management Committee: DEMC)

地方レベルの危機管理委員会をトンガの以下の地域で設立されている。

ハアパイ、ヴァヴァウ、ニウアトプタブ、ニウアフォオウ、エウア

地方危機管理委員会では地方危機管理計画の策定、国家危機管理委員会の政策に従い地方での災害管理の実施、国家危機管理委員会の提言に従って災害リスク削減活動の実施、などを実施することが求められている。これらの地方では地方危機管理委員会が中心となり災害管理活動を押し進めていくことになる。

さらに、各地方での年次報告書の提出も求められている。

11) 村落危機管理委員会 (Village Emergency Committee : VEMC)

各村では村長を議長として村落危機管理委員会を組織することとなっている。この組織は国家危機管理委員会の求めに応じて村落レベルの危機管理及び災害リスク削減に当たることとなる。

村落危機管理委員会は災害サイクルに応じて住民に対する啓蒙活動なども実施することとなっている。さらに、村落レベルの年次報告書の提出も規定している。

(3) 防災関連計画

1) 国家危機管理計画 (National Emergency Management Plan: NEMP)

NEMC は国家危機管理計画 (NEMP) を策定しなければならない。その内容については以下の通り規定されている。

- 災害リスク管理のプロセスに従って、減災、事前準備、緊急対応及び復旧復興
- 特別なイベント
- 関係各機関の役割と責任
- 災害リスク削減の優先順位
- 国やドナーからの支援
- 地方危機管理委員会へのサポートや調整

等の事項について含まれていなければならない。また、同様に地方緊急管理計画も同様にそれぞれの地方で策定が義務付けられている。これらの計画は一般にも公開される。

3.5 トンガタブ島・エウア島の防災計画及び BBB ビジョン具現化にかかるロードマップの提案 (中長期的な要対応・防災配慮事項の整理)

3.5.1 ハザードごとの防御レベルに応じた適正な DRR インフラによる構造物対策の検討

(1) ハザードごとの防御レベルについて

今回、ハザード解析を実施したのは以下の 3 種のハザードであり、その解析結果も合わせて一覧表にまとめた。

表 3.5.1 ハザード毎の防御レベルに応じた解析結果

対象地域	防御レベル	地震性津波	火山性津波	高潮 (サイクロン)
トンガタブ島	L1	H=1m-2m	N/A	H=M.S.L.+3.0m
	L2	H=1m-4m	H=1m-4m	-
エウア島	L1	H=1m-2m	N/A	-
	L2	H=3m-12m	H=3m-12m	-

出典：JICA 調査団作成

(2) DRR インフラによる構造物対策の検討

1) トンガタブ島

- 地震性津波 L1 に対しては、現状のヌクアロファ護岸の高さが平均 2m であり現在の標高のまま特別な対策を必要としていない。
- 高潮 (サイクロン) L1 に対しては、3m までの嵩上げが必要となる。
- 地震性津波及び火山性津波 L2 に対しては、前述した L1 対策として嵩上げされた護岸を越波した波が市街地に侵入してくるため、浸水想定エリアに居住する住民のための津波避難タワーの建設や住民の高所への移転や、沿岸道路や土地の嵩上げなどの根本的な対策が必要となる。

2) エウア島

- 地震性津波 L1 に対しては、トンガタブ島と同様に大きな被害は想定されていないため特別な対策は必要ない。
- 地震性津波及び火山性津波 L2 に対しては、想定高さ 12m の津波より低い土地にある構造物はできる限り高い場所へ移転を検討すべきである。

3.5.2 ハザードごとの防御レベルに応じた、重要構造物の強靱化の検討

(1) トンガタブ島

地震性津波及び火山性津波 L2 に対する対策としては、既存の港湾構造物について、先ず現在の標高の確認と浸水域のハザードマップの整備が急務である。その後、4m の越波に対する対策として、高床式の民家の建設、既存建屋内の電気室等の重要施設の 2 階以上への垂直避難などの対策を含めた避難ビルの特定などを検討すべきである。

(2) エウア島

地震性津波及び火山性津波 L2 に対する対策として、標高 12m 以下のオホヌア地区の沿岸部にある既存のナファヌア港及び周辺の関連施設を津波から守るために、図 3.5.1 に示す約 1km に亘って港の沖合に防波堤を設置することも、技術的には可能である。



出典：JICA 調査団作成

図 3.5.1 エウア島防波堤計画案

3.5.3 土地利用・避難計画の検討

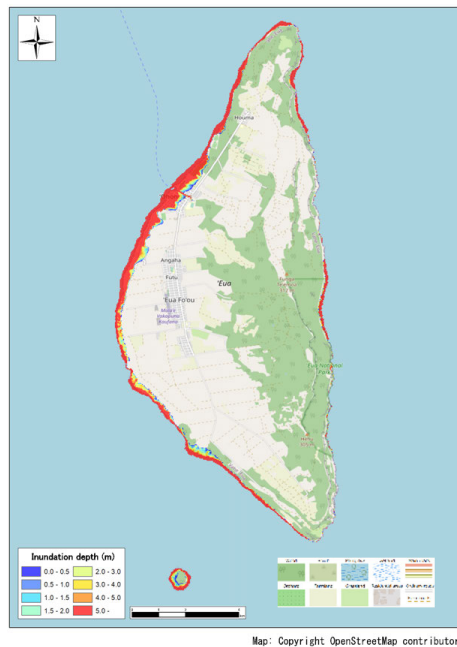
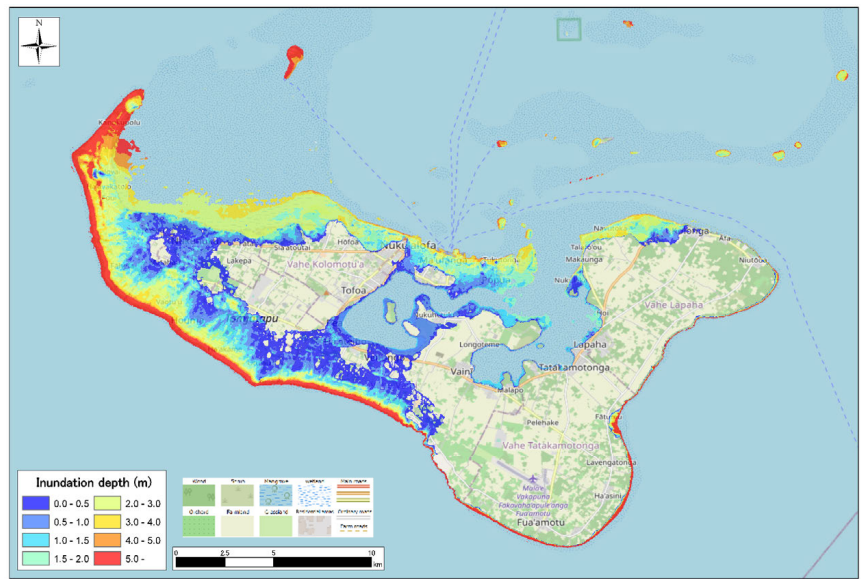
(1) 土地利用

現在トンガには土地利用計画は存在していない。したがって、土地利用規制により建物の制限を行うことは困難であるが、津波の浸水深により土地を区分けして、それらの区分け毎に建物の申請時に対応を要請することは可能であろう。

(2) 避難計画

本調査によるハザード解析結果によると、トンガタブ島及びエウア島では避難を要するハザードは規模の大きい火山性津波・地震性津波（ハザードレベル 2 (L2)）であることが確認された。人口が一番多いトンガタブ島のヌクアロファ市では発生頻度の高い地震性津波（ハザードレベル 1 (L1)）は既存の防御施設で防ぐことが出来る。また、エウア島では津波の高さが高くなるものの低地にはほとんど人が住んでいないため、大きな被害にはならないと考えられる。ただし、一部の地域では低地部にも人がすんでいるため、これらの住民に対して、防御施設で保護するか、土地利用規制により他の地域への移転を促進する必要があるだろう。

火山性津波ではトンガタブ島及びエウア島ともに高い津波の襲来が予想されている一方、発生頻度が低いことが指摘されている。以下に火山性津波の影響範囲図を示す。



出典：JICA 調査団作成

図 3.5.2 L2 レベルの浸水範囲

この図では地震性津波やサイクロンとは違う方向から来襲することが分かる。今後、トンガでの避難計画策定に当たっては今回作成したハザードマップを参考にして早急に避難計画を策定すべきである。

避難計画策定に当たっては、以下の点に留意する必要がある。これらの避難計画は NEMO が中心となり整備することになる。

1) 避難体制の整備

避難体制の整備では、現在の防災法ですでに規定されている。緊急対応にかかる政府の体制、手順や各政府の役割分担、初動体制の立ち上げなどは比較的よく整備されている。

2) 避難指示の判断・伝達

TMS は気象災害をはじめ、津波に関してもモニタリングを実施している。しかしながら、地震の観測は TGS が受け持っており、海底火山の観測も含まれている。TMS は 24 時間観測を行っていることから警報の発令を行う。警報の発令は JICA からの支援²³により設置されたサイレンにより情報を送ることが可能となった。その後、各村落で避難指示が出され、避難することとなっている。

TMS でのヒアリングによると、警報の発令は TMS の役割だが、その基準が明確になっていない。現在はマグニチュード 7.3 以上の地震の場合には津波警報を発出するが、より津波警報の内容を具体的な内容をするべきである。

3) 避難誘導

2023 年 5 月 11 日に起きた M.7.6 の地震では TMS によりサイレンによる警報の発令が行われ、避難した市民がいた。多くの住民が自家用車による避難を行ったが、避難誘導が十分ではなく渋滞が多発したとの証言がある。避難誘導は警察の役割であるが、事前に関係者と十分な調整を行いスムーズな避難を目指す必要がある。

4) 避難所の指定、開設、運営

避難所の指定は NEMO の役割であるが、本調査でハザードマップを作成したため、それを参考に再度指定しなおす必要がある。また併せて運営などについても事前に取り決めをしておく必要がある。

現在確認できる避難所の位置を図 3.5.3 に示す。

²³ トング王国 全国早期警報システム導入及び防災通信能力強化計画報告書 2018 年 6 月



出典：JICA 調査団作成

図 3.5.3 避難所等の位置図

ハザードマップ（図 3.5.2）及び到達時間分布図（図 3.2.15）では、火山性津波が北西～南西方面からトンガタプ島に來襲することが分かる。津波の高さがかなり高いため、トンガタプ島でも多くの部分が浸水する可能性がある。また、最も早い津波の到達時間が約 18 分（ヌクアロファ）と比較的短いため（トンガタプ島西部はさらに早い）、効率的な避難が必要である。津波ビルの指定など垂直避難の考え方も取り入れて短時間に避難できる工夫が必要である。

5) 要配慮者の安全確保

要配慮者の避難についても事前に取り決めを行うと共に、どこの村落に何人くらいの要配慮者がいるのかを事前に明らかにしておき、安全の確保を行う必要がある。

3.5.4 各事業化にあたっての留意事項

(1) トンガタブ島

1) スクアロファ護岸の嵩上げ

護岸の嵩上げに際しては、場所によっては嵩上げ後の護岸の高さが高過ぎて沿線の道路から海が見えなくなる恐れがある為、護岸上部に遊歩道及び一定間隔での階段等を整備し、住民が海に容易にアクセスできるような工夫が必要である。

2) 津波避難タワー、民家の移転や高床式住居の建設

津波避難タワーについては、高齢者や障害者に対する階段以外の昇降設備の問題がある。また、道路、水道、電気等の基本のインフラについても十分な計画が必要である。

3) 道路含む地盤の嵩上げ

沿岸道路や一部地盤の嵩上げによって、護岸を越波して内陸部に侵入した海水が海側に戻ることができず滞留することが無いように、低い土地からの排水路の整備が必要である。

(2) エウア島

1) H=12m 以下にある重要施設の高台への移設

道路、水道、電気等の基本のインフラについても十分な計画が必要である。

2) 防波堤の建設

建設には莫大な資金が必要なので、費用対効果に疑問が残る。

3.5.5 施設計画・概算

(1) トンガタブ島

1) スクアロファ護岸の嵩上げ

本計画については後述するスクアロファ護岸の改善計画の中で詳細を述べる。

2) 津波避難タワー、民家の移転や高床式住居の建設

津波避難タワー：日本では 10m 程度の高さで 2 億円の実績あり

民家の移転：20 フィートコンテナ 2 台を結合したプレハブで 90,000TOP

高床式民家：上記同じ条件 (30m²) で 2,200top/m²x30=66,000TOP

3) 道路含む地盤の嵩上げ

一般的な2車線道路の建設価格 100 万円/m

(2) エウア島

1) H=12m 以下にある重要施設の高台への移設

既設の橋の移設については、後述のコースウェイの復旧計画の中で詳細を述べる。

2) 防波堤の建設

建設費は現地の条件によって左右されるが、条件によっては 5,000 万円/m の事例がある²⁴。

3.6 トンガおよび日本の支援による復旧・復興事業に対する BBB/防災配慮の助言

3.6.1 ハザードの理解とインフラ建設

本プロジェクトでは火山性津波、地震性津波及びサイクロンによる高潮についてシミュレーションによる解析を行った。解析結果にはハザード毎の L1 及び L2 が示されている。海岸構造物の建設に当たってはハザード解析結果を反映して建設を行う必要がある。また、トンガ政府も解析結果から得られた知見を設計基準に反映することが必要である。

(1) 観光産業へ防災の普及

今回の HTHH 噴火による津波被害では観光産業も大きな被害を受けた。特に、トンガタブ島の西側に位置する観光施設ではほぼ全壊の被害を受けている。観光産業はトンガが力を入れていく産業でもあるし、海外からの観光客を受け入れるためには観光産業にも防災の考え方を十分に普及することが重要である。特に、今回の解析で明らかになった火山性津波は島の南側で高くなるため、十分な対策が必要である。さらに、日ごろから避難訓練などを行い発災後の避難経路や手順、外国人観光者などの誘導なども訓練しておく必要がある。

(2) 土地利用とのリンク

本調査で作成したハザードマップ(図 3.5.2)を活用して、土地利用にハザード情報も入れて、建物の構造なども示していく必要がある。加えて津波危険地域に居住している住民に対してはその危険性を確認すると共に、可能であれば移転も促進する必要がある。

(3) 避難計画の策定と避難訓練の実施

ヌクアロファ市にはドイツおよび日本の支援により護岸施設が建設されている。現在の護岸施設は建設当時より低くなっており²⁵津波や高潮被害に見舞われる可能性がある。さらに、今回の解析では火山性津波はトンガタブ島の南東側から来襲するため、通常とは違う避難行動が必要で

²⁴ 国土交通省近畿地方整備局「柴山港柴山地区避難港整備事業」

²⁵ 本調査の測量結果によると、日本からの無償資金援助で建設された東側の護岸施設では 1m 以上低くなっているところがある。東側でも 50 cm 程度低くなっているところがある一方、建設当時より高くなっているところもある。MOI が維持管理を行っている。

ある。現在避難所の指定が行われているが、ハザード解析結果により見直しが必要である。これまでの避難行動では、自動車の利用をどの様に考えるのか、要支援者に対してどの様に避難するのかなど課題も多い。津波タワーや津波避難ビルなどの垂直避難を効果的に活用して効率的な避難を実施すべきである。

トンガタプ島南岸は直接かつ早く津波が到達して、津波被害を受けることになる、避難訓練などでは通常北側海岸からの浸水を想定しているが、レベル2 (L2) の津波は南側から来るため、通常の訓練では想定できない事態が起こる可能性がある。レベル1 (L1) で使えると考えていた避難所が使用できない可能性がある、構造物対策はレベル1 (L1) 程度の津波を対象として建設されるが、トンガタプ島の場合、レベル1 (L1) で建設された構造物対策は北側になり、南側は無防備である。

また、避難訓練も必要になる。定期的に政府としても取り組む必要がある。

3.6.2 水道施設調査

厚生労働省委託事業「令和4年度水道プロジェクト計画作成指導事業（第1期）トンガ王国水道復興支援計画 2023年3月」は、HTHH噴火で被害を受けた水道施設も含めて分析を行っている。BBBビジョンを理解してプロジェクトを形成していることから、早期の実施が望まれる。また、トンガが取りまとめたNIIP3でも水道施設プロジェクトが取り上げられており²⁶、トンガの希望とも合致していると言える。

²⁶ 例えば 5. Centralized Tonga Water Board and Village Water Supply Tongatapu, 8 Improved Water supply system in Vava'u

4. 沿岸防災個別事業の検討

4.1 スクアロファ護岸復旧計画

4.1.1 スクアロファ護岸の被害状況



出典：JICA 調査団作成

図 4.1.1 スクアロファ護岸全体配置図

首都スクアロファ北部の海岸道路沿いに、沖合のコーラルリーフを超えて侵入してくる高潮や津波に対する防護として、石積みを主体にして、一部コンクリートで補強した護岸工が設置されている。

1. 全長は約 8.2km、その区分は以下に示す 3 つの範囲に分かれている。
2. 1988-89 年に 2 期に亘って施工された、日本の無償援助による石積護岸の部分で、中央の市街地部を除いて、西側に 2.7km、東側に 2.5km の範囲である。
3. 施工された年代が不明だが、日本の無償案件実施前から存在したドイツの無償援助による護岸で、当初からの設計かどうか分からないが、現在は石積の上にコンクリート覆工を設置した構造となっている。延長は市街地中心部のブナワーフを挟んで、東西に 1km 全長は約 2km となっている。

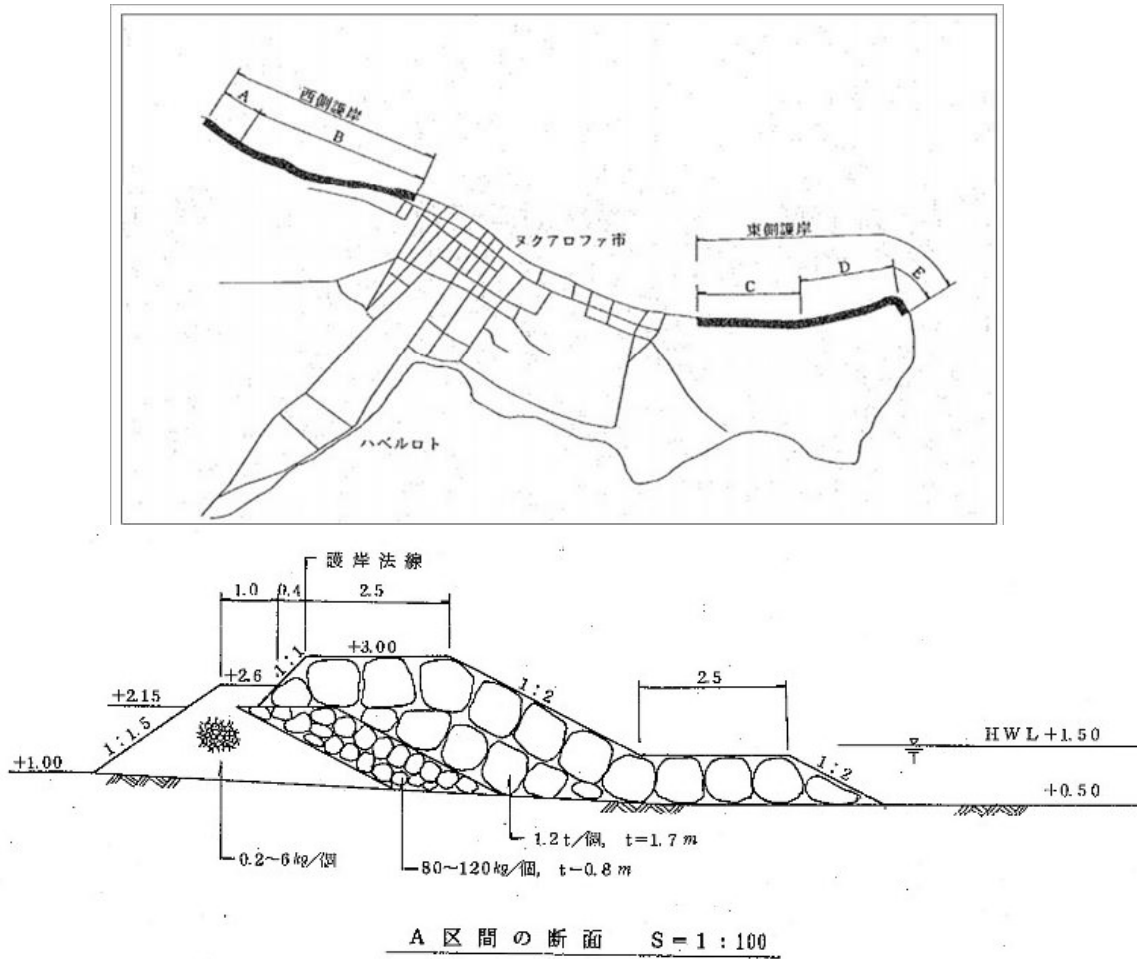
上記 2 つの護岸の範囲以外で既存の港湾施設背面に位置し、道路沿いに護岸設置の必要のない区域が約 1km となっている。

(1) 日本無償援助の護岸の設計時の標準断面と現在の被災状況写真

護岸の設計天端の高さの違いによって、施工範囲を 5 つに分割しているため、A～E の標準断面図を添付する。これら断面図中に記載された高さ (H.W.L.+1.60m など) は、建設当時の潮位観測で決められた朔望平均満潮位 (H.W.L.) で表示されている。当時の報告書では、この H.W.L は平均海面水位 (M.S.L.) +0.7m と潮位観測により決められた旨が記載されている。ただし、この当時

の M.S.L.と現在の M.S.L.との厳密な関係は不明である。また、それぞれの範囲に施工された護岸の現状写真を合わせて添付する。

1) A 区間



出典：JICA 公開資料（トンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書）



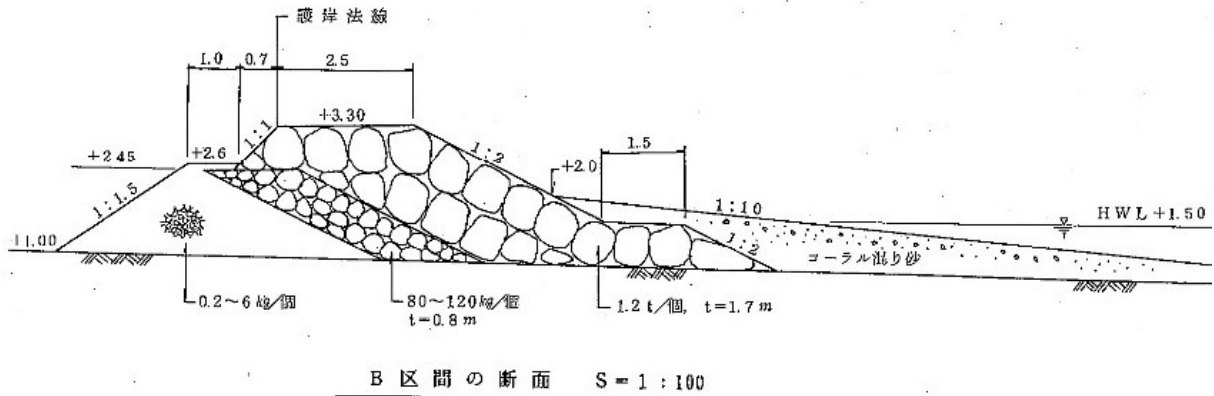
写真 4.1.1 西側始点はマングローブ林との境界

写真 4.1.2 津波で洗い流された石積護岸

出典：JICA 調査団撮影

図 4.1.2 設計区間分割図と A 区間標準断面図 (H=3.00)

2) B 区間



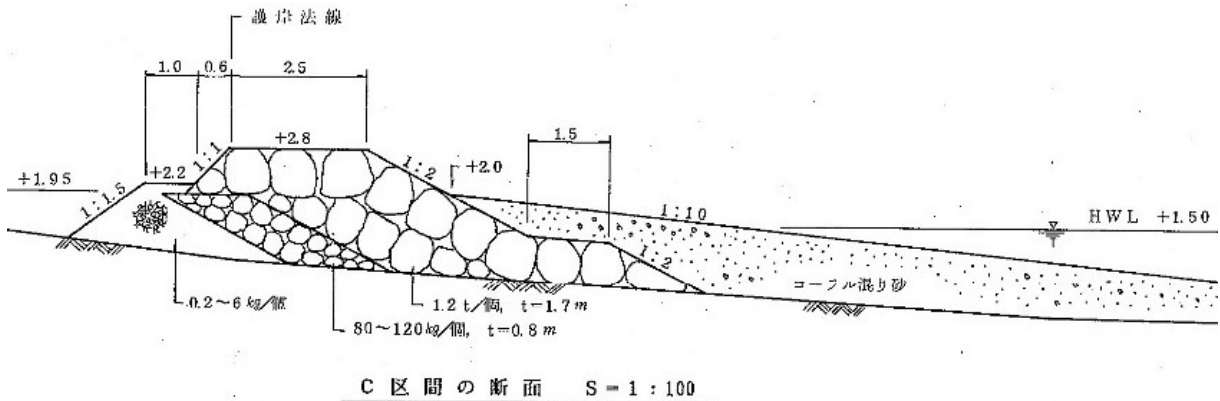
出典：JICA 公開資料（トンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書）

図 4.1.3 B 区間標準断面図 (H=3.30)



出典：JICA 調査団撮影

3) C 区間



出典：JICA 公開資料（トンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書）

図 4.1.4 C 区間標準断面図 (H=2.80)



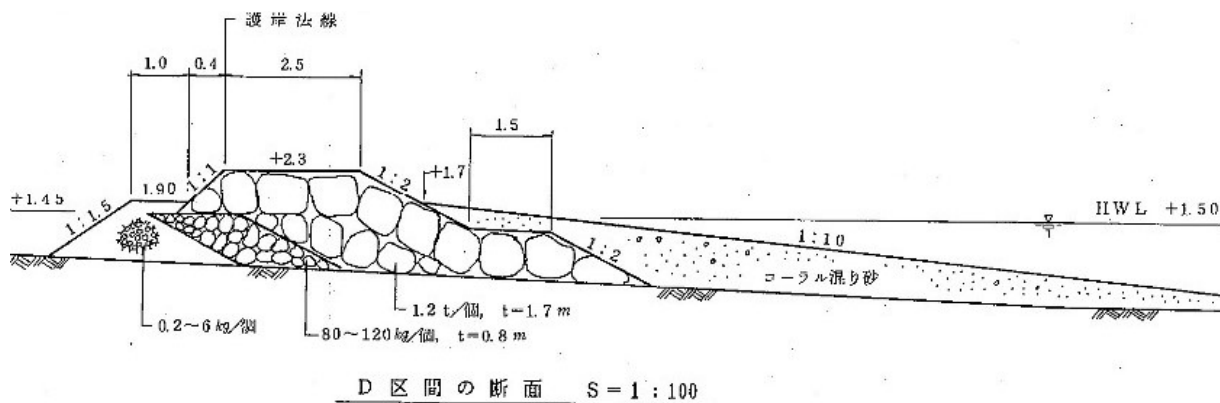
写真 4.1.5 東側は高さが低く目立たない



写真 4.1.6 なだらかな丘のようにになっている

出典：JICA 調査団撮影

4) D 区間



出典：JICA 公開資料（トンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書）

図 4.1.5 D 区間標準断面図



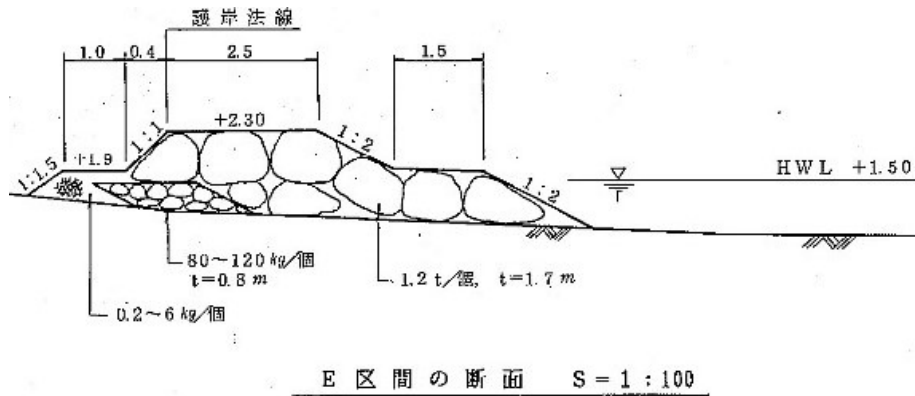
写真 4.1.7 未だに岩が散乱している



写真 4.1.8 もはや護岸とは言えない

出典：JICA 調査団撮影

5) E 区間



出典：JICA 公開資料（トンガ王国ヌクアロファ護岸拡充計画基本設計調査報告書）

図 4.1.6 E 区間標準断面図 (H=2.30)



写真 4.1.9 海岸道路終点で東海岸に面している

写真 4.1.10 こちらは津波の影響はほとんどなかった

出典：JICA 調査団撮影

(2) ドイツ無償援助の護岸の被災状況

この区間については、昨年の2次調査の段階ではMOIに図面、報告書等の記録が無いとの報告を得ている。



出典：JICA 調査団作成

図 4.1.7 写真撮影位置図



写真 4.1.11 ブナワーフまでの護岸が崩壊



写真 4.1.12 一部では護岸の形状を保っていた



写真 4.1.13 ここから再び被災していた



写真 4.1.14 左の写真位置から約 60mが崩壊



写真 4.1.15 ここから約 45mの範囲で崩壊



写真 4.1.16 国内船ターミナル・フェンス手前

出典：JICA 調査団撮影

4.1.2 計画案の検討と住民意見の確認

ヌクアロファ護岸復旧の計画を検討するに際しては BBB ビジョンの考えに基づき、前項 3.6 にてハザード毎の対応についてその高さの検討を実施したが、既存の石積護岸をそのまま復旧するのではなく、護岸自体をよりの強靱な構造体として津波や高波などに対応できるように石積以外に、RC 造及び新工法である CSG 工法の 3 案について比較検討を行った。

(1) CSG 工法

今回護岸の構築において採用を提案する新工法の CSG 工法について、以下にその概要を簡単に紹介する。

- CSG 工法の CSG とは、Cemented Sand and Gravel の略であり、現地発生材（土石）とセメント、水を混合して得られる材料のことで、強度の定義とその試験方法、品質管理方法を有している材料のことである。なお、材料強度を確保するために専用の混合プラントを開発し、複数（現在 8 社）の会社や法人による特許を取得している。
- この工法は、その必要強度が担保されていることから、最も重要な永久構造物の一つであるダム本体への適用が進められてきたが、元来ダム建設時の仮設道路の材料として製造されていたこともあり、今回の様な小型の堤防の堤体材料としても十分に適用できる実績のある工法である。



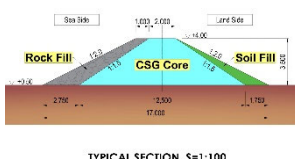
【工法の特徴・メリット】

1. 材料の合理化、低コスト、環境保全の実現
分級・粒度調整・洗浄等を行わず、オーバーサイズの除去や破碎を行う程度で、現地の材料を有効活用することができる。
2. 施工の合理化、短工期、低コストの実現
大規模な骨材プラントが不要であり、現地での材料製造や汎用機械による機械化施工によって、短工期、低コストでの施工が可能である。
3. 地すべり対策、防潮堤等ダム以外の構造物へも適用可能
工事で発生する現地発生土を原材料として有効活用することが可能である。

(2) 石積護岸、RC 護岸、CSG 工法の比較

石積護岸、鉄筋コンクリート製護岸、CSG 材を使用した護岸の比較表を表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1 護岸工法の比較表

工法の種類	石積護岸	コンクリート護岸	CSG 工法
イメージ図			
長所と短所	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> 材料(石灰岩や木材)は現地にて容易に入手可能 施工も簡単で汎用機械を使用し復旧も容易 工事費が一番安い <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> 護岸自体にコアがなく、越波した津波に対抗不可 	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> 護岸のコアの構造体として強固で、品質の信頼性も高く越波した津波に対しても対抗可能 <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> 骨材、木材以外はセメント、鉄筋、金物等輸入が必要 施工に際しては適正な品質管理が不可欠 工事費が一番高い 	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> 現地の掘削した発生土を CSG の材料として利用可能 セメント以外は全て現地調達が可能 道路工事の汎用機械で施工、連続施工が可能 護岸のコアとして CSG 断面が越波津波に対抗可能 工事費は中間 <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> 特許工法であり専用のプラントの輸入等配慮が必要
*m 当たり単価	290,000 円/m	1,000,000 円/m	780,000 円/m
評価	○	△	◎

* 直接工事費ベース

出典：JICA 調査団作成

(3) 住民意見の確認

今回の調査業務の内、第4次の現地調査（2023年5月9日～2023年5月25日）に際して、5月23日に現地トンガ政府の関係者等を招待し、BBB ビジョンのワークショップを開催したが、その際にヌクアロファ護岸の改善計画（M.S.L.+3.0m 嵩上げ案）についても意見をいただいたので、以下に意見を要約して紹介する。

1) ワークショップの意見の要約

実際のワークショップでは以下の3つのグループに分かれて討議をしていただき、それぞれのグループの意見をまとめて発表していただいた。

表 4.1.2 BBB ビジョンワークショップ時の住民意見一覧表

グループ名	グループの構成	意見の要約
グループ 1	トンガ気象サービス (TMS) 南太平洋大学 (USP)	<ul style="list-style-type: none"> 護岸の嵩上げについて平均的な高さ (M.S.L.+3.0m) に条件付で同意 条件：地形的要因、海面上昇、地震津波の数か月先の予測、護岸高 M.S.L.+4 の場合の計画に対する影響
グループ 2	トンガ MOI	<ul style="list-style-type: none"> Peni Fa'au 氏との協議の結果は概ねグループ 1 と同意見である
グループ 3	Tupou Tertiary Institute (TTI) トンガ警察	<ul style="list-style-type: none"> 護岸の高さを決める際は若い世代を考慮する必要がある 津波を避けるために土地を利用するが、護岸の嵩上げ (M.S.L.+3.0m) にも同意する 警察から東側の火山性津波は前回の HTHH 津波より被害が大きくなる事を住民によく周知させる必要があるとのコメントあり

出典：JICA 調査団作成

2) 今後の対応

今回のワークショップの結果、住民は護岸の嵩上げが必要なことは理解されているので、技術的背景に基づき海が見えなくなるような過剰な高さ (M.S.L.+4.0m) ではなく適切な高さ (M.S.L.+3.0m 程度) を提案して行く必要がある。

4.1.3 施設設計に向けた測量調査

ヌクアロファ護岸の復旧の計画を検討するに際し、本来ならばヌクアロファ北部沿岸の地形測量及び土質調査を実施する必要があるが、今回は具体的な詳細設計業務を行うわけではないので、まずは現在の護岸の状態を大まかに把握するために、ある一定の距離で既設護岸の横断測量と簡易的な土質の原位置試験 (DCP テスト：動的コーン貫入試験) を実施した。

また、エウア島に関しても、既存のコースウェイとボックスカルバートの複合形式である沈下橋の現状と、既存の橋の位置から山側に移動した新しい橋の架設候補予定地の縦断測量をそれぞれ 2022 年 11 月から 12 月にかけて実施した。

(1) ヌクアロファ護岸の横断測量及び DCP テスト実施



出典：JICA 調査団作成

図 4.1.8 ヌクアロファ護岸横断測量及び DCP テスト実施位置

上図に示すように全長 7.2km の護岸を約 1km 毎の間隔で断面測量を実施。具体的には日本無償援助部分の西側から 1、2、3、4、5 断面、ドイツ無償援助部分は 6、7、8、9 日本無償援助東側が 10、11、12、13 と全部で 13 断面の測量を実施した。

また、DCP テストについては、日本無償援助西側部分 2 箇所、ドイツ無償援助西側 2 箇所、ドイツ無償援助東側 2 箇所、日本無償援助 2 箇所の計 8 箇所を実施した。

1) 横断測量

横断測量は、全地球測位衛星システム (GNSS) 受信機を利用し、リアルタイムキネマティック (RTK) 方式とトータルステーションを使用して測量を行った。また、トンガタブ島においては、高さの基準を Ton1 (M.S.L.+1.119m) の基準点を参照して取得、エウア島については基準点が無いので RTK の値をそのまま採用している。

2) DCP テスト

今回の復旧計画の柱として考えている CSG 工法の施工条件として、施工地盤での標準貫入試験値(N 値)が 15 以上とされている。トンガタブ島自体サンゴによって形成された島であり、しかも今回の計画護岸の位置には既に古くからコーラルストーンによる石積護岸が設置されていた経緯を考慮すると地盤の強度に問題は無いと思われる。そこで、その測定値 (Nd) と N 値との関係が一般に $Nd=1.5N$ で換算できる簡易動的コーン試験 (DCP) を実施して CSG の想定施工基面 M.S.L.-0.2m (LWL+0.5m) 位置での Nd 値を測定した。

なお、今回使用した機器は ASTM D6951 に準じた器具で、先端 60° のコーンを持つ直径 20mm、1m のロッドと 8 kg のハンマーにて構成されていた。測量結果を Appendix 4-1 に示す。

(2) 断面測量結果

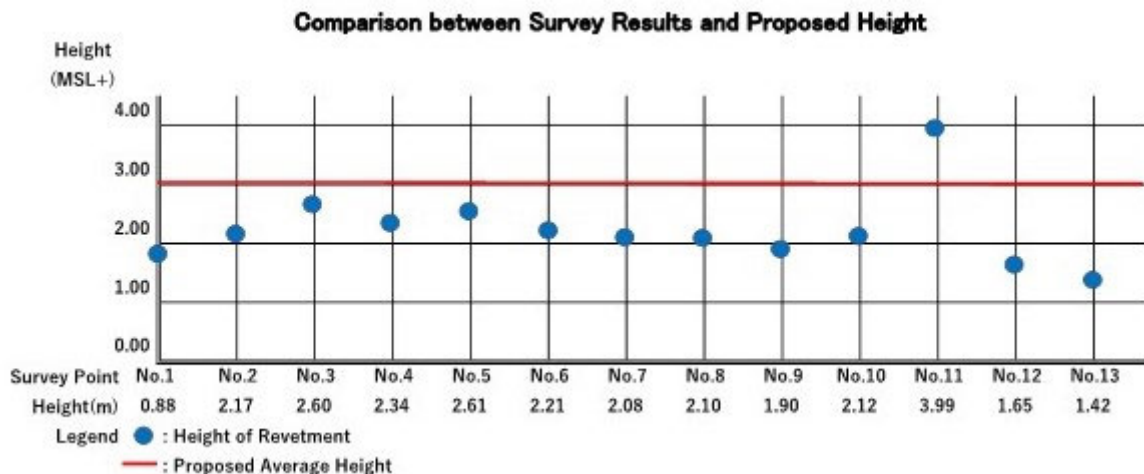
今回のヌクアロファ護岸の断面測量に際しては、海岸線に並行して走る湾岸道路との位置関係を重視し、断面測量の範囲を既存道路の陸側端部から海側に測定、海側は汀線に至るまでの範囲を測量したため場所によって測定範囲が異なっている。

以下に各測点毎の護岸の高さと既存道路の高さを一覧表にまとめたものを示す。また、併せて各測点の護岸高さが高潮 L1 対策としての嵩上げ高さ M.S.L.+3.0m とを比較した図面も添付する。

表 4.1.3 ヌクアロファ護岸横断測量結果一覧表

測点 No.	距離程	護岸部高さ	道路部高さ	備考
No.1	0.00	0.88	0.05	M.S.L.+
No.2	202.28	2.17	1.31	M.S.L.+
No.3	907.31	2.60	1.74	M.S.L.+
No.4	1,949.61	2.34	2.23	M.S.L.+
No.5	2,657.82	2.61	2.59	M.S.L.+
No.6	3,082.96	2.21	2.3	M.S.L.+
No.7	3,315.10	2.08	2.17	M.S.L.+
No.8	3,896.94	2.10	1.88	M.S.L.+
No.9	4,859.08	1.90	1.62	M.S.L.+
No.10	6,301.74	2.12	2.20	M.S.L.+
No.11	7,324.13	3.99	2.00	M.S.L.+
No.12	7,913.00	1.65	1.09	M.S.L.+
No.13	8,574.76	1.42	1.22	M.S.L.+
	平均値	2.20	1.72	M.S.L.+

出典：JICA 調査団作成

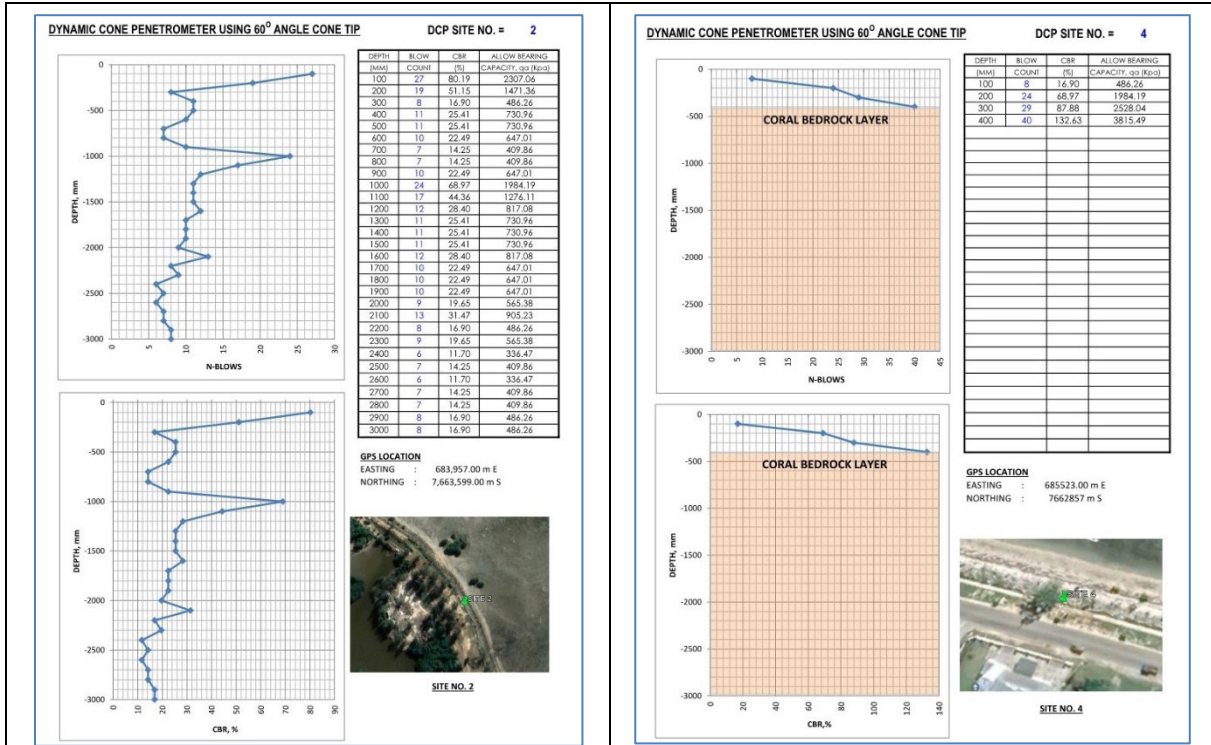


出典：JICA 調査団作成

図 4.1.9 ヌクアロファ護岸測量結果と高潮 L1 対策嵩上げ高さ H=M.S.L.+3.0m との比較

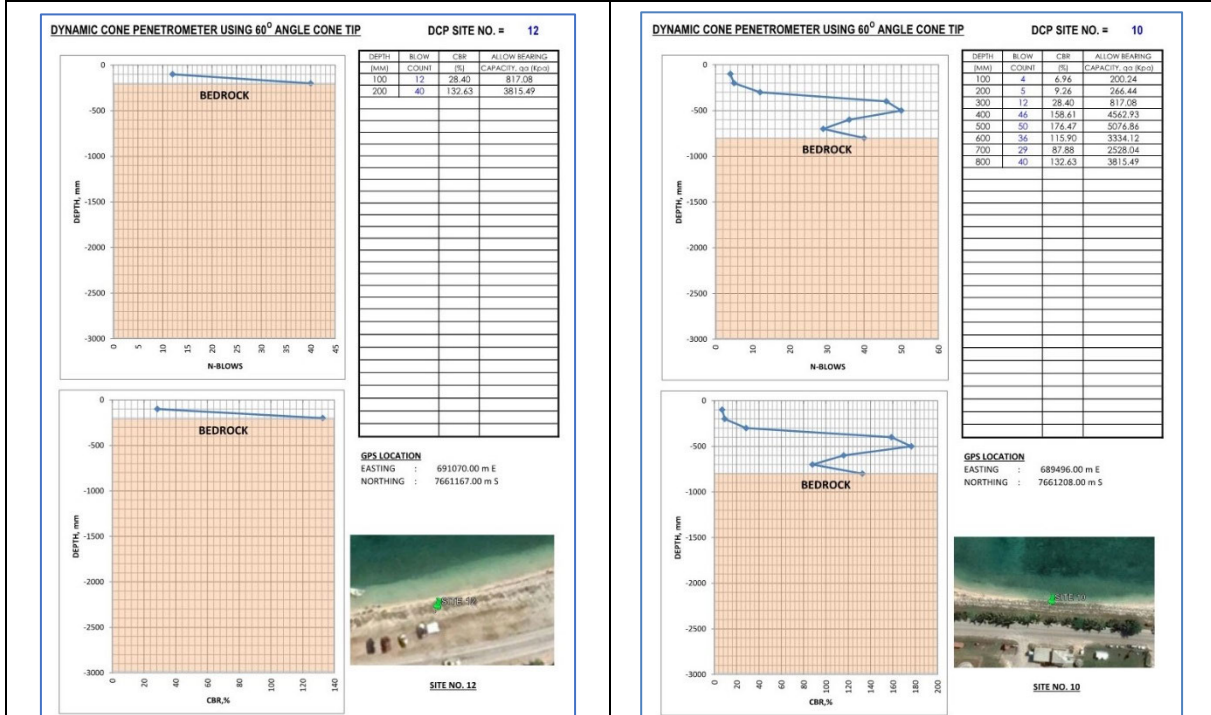
(3) DCP テスト結果

DCPテストの結果、CSG工法施工基面位置でのNd値及び換算N値の値を以下の一覧表に示す。
 なお、表中のNPはロッドの貫入不能 (No Penetration) を示しカッコ内はNPになった位置の高さを表示している。



☒ 4.1.10 DCP No.2

☒ 4.1.11 DCP No.4



☒ 4.1.12 DCP No.6

☒ 4.1.13 DCP No.8

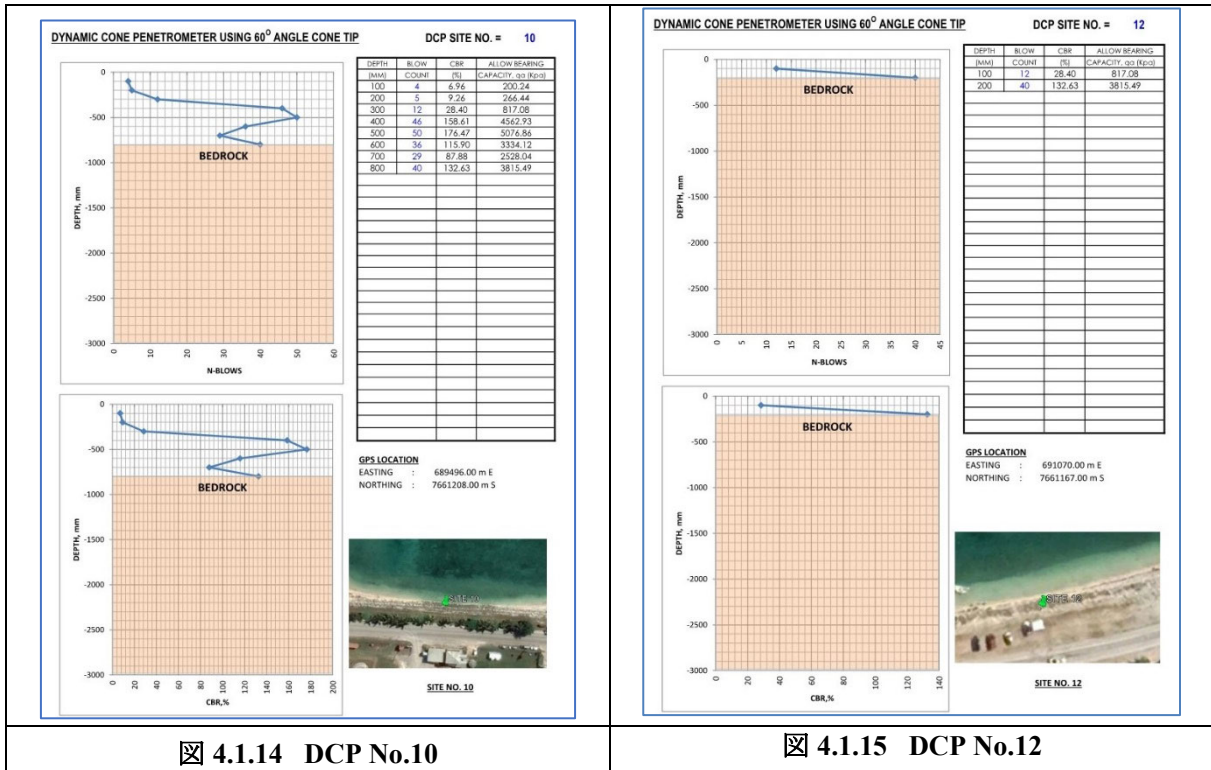


図 4.1.14 DCP No.10

図 4.1.15 DCP No.12

出典：JICA 調査団作成

表 4.1.4 DCP テスト結果一覧表

測点 No.	地盤高 (M.S.L.+)	施工基面迄の深さ (m)	Nd/N
2	1.59	1.79	10/7
4	2.10	2.30	NP(M.S.L.+1.60)
6	1.85	2.05	NP(M.S.L.+1.15)
8	1.52	1.72	16/11
10	1.59	1.79	NP(M.S.L.+0.69)
12	1.15	1.35	NP(M.S.L.+0.85)

出典：JICA 調査団作成

結果に関して、測点 2 及び 8 の地点が予想に反してコーラル層に達していなかったため、実施工に際してはこの 2 点の周辺に留意しながらより精度の高い調査で支持層を確認する必要がある。

(4) エウア島測量結果

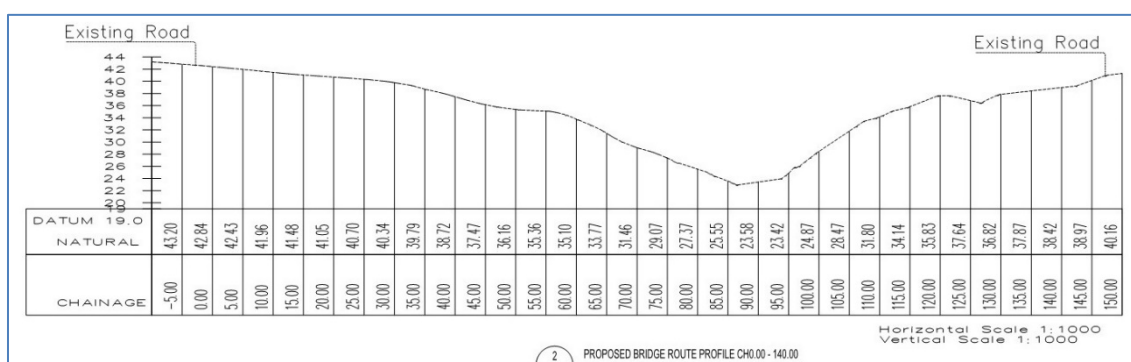
エウア島オホヌア地区の新しい橋の候補地は、港に近い既存の橋から山側に約 520m 上流に移動した、ハンゴ農業研究所と MOI 事務所の間で、この地区の川で分断された北側道路と南側道路を、川を約 150m 渡って横断して繋ごうとするもので、以下にその位置を示す。



出典：JICA 調査団作成

図 4.1.16 エウア島オホヌア地区新橋架設候補地位置図

図 4.1.17 に縦断測量結果を示す。



出典：JICA 調査団作成

図 4.1.17 エウア島新橋架設候補地縦断測量結果

4.2 エウア島コーズウェイ復旧計画

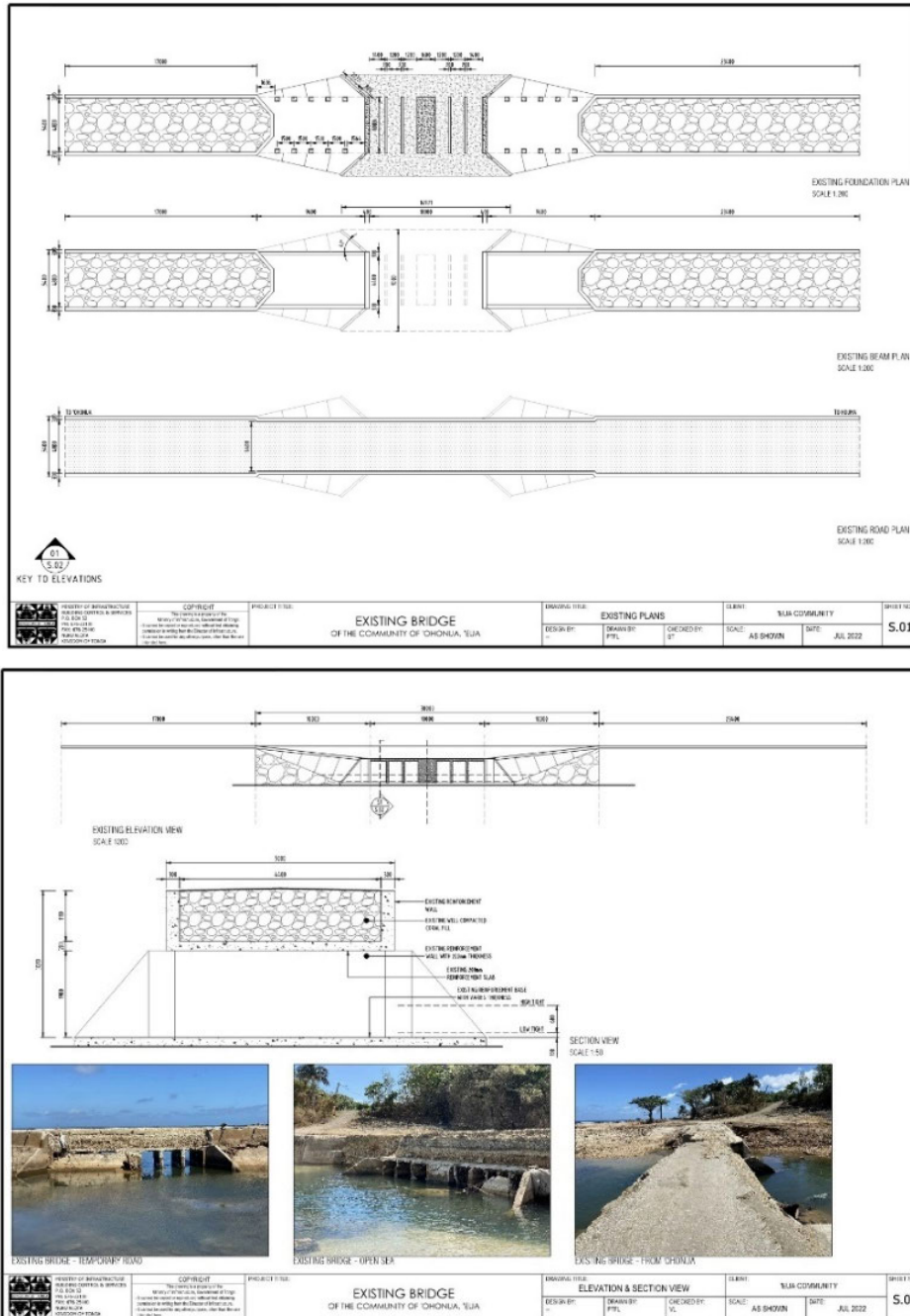
今回の調査で、エウア島のコーズウェイは既存の橋梁（ボックスカルバート）であることが判明したが、この橋の被害状況はエウア島の被災状況にて報告済みである。

2022年8月時点の調査ではこの橋の架け替えについての話が別途浮上してきていたが、その後具体的な動きは無い模様である。

4.2.1 被害状況調査

エウア島オホヌア地区ナファヌア港湾奥東側の河口付近に島の南北を結ぶ唯一の橋梁である既存の橋がある。この橋の構造は全長 30m の河川幅に対して中央部 10m を RC 造のボックスカルバート、その両端と既存の道路を石積のコーズウェイで連結する形となっている。

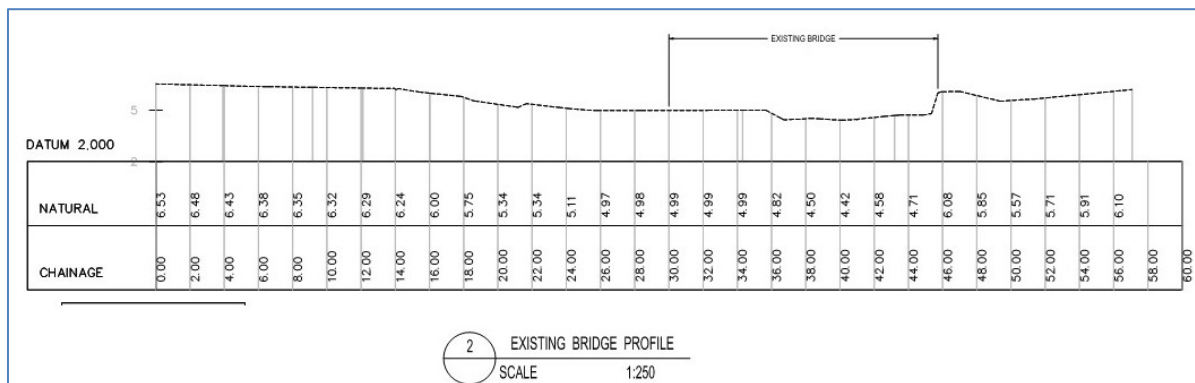
今回の調査では、2022年7月13日にナファヌア港自体の被災状況の調査を実施した際に港の背後地にある当該橋についても調査したが、その状況は既に本報2.10.2章にて説明済みである。そこで、ここでは2022年7月にMOIに依頼して調査した際の現況図を添付するが、この時点では橋梁自体はHTHH津波で壊れた部分の仮復旧も完了している状態だが、現地にレベルの機械が無く、高さの表示が抜けている。



出典：トンガ MOI

図 4.2.1 オホヌア既存橋現況図（2022年7月）

この図面と写真を見ても明確だが、ボックス部分は左右の既存道路より明らかに下がっている状態であり、その高さを測定した結果を以下に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 4.2.2 オホヌア既存橋縦断測量結果

4.2.2 復旧計画の検討

今までに述べてきた測量の結果を基に、既存橋梁の原位置での復旧案と、既存橋設置場所より高い位置に移転した場合の2案について以下に述べる。

(1) 原位置での復旧案

前述の測量図（図 4.2.2）を見ると、ボックス部分（M.S.L.+4.5m）と兩岸の既存道路部分（M.S.L.+5.5m）では約 1m の段差がある。沈下橋とは言えボックス下の断面積が小さく大雨やサイクロン時の洪水の際の上流の谷から流れてくる流木や砂利等による影響が大きいので、出来る限り大断面のボックスを採用し少なくとも既存道路と同じレベルで渡河出来るよう検討も必要である。

このような技術的検討を考慮しても、本案の実施については現地業者での施工が可能で、概算費用は TOP0.5M 程度と想定される。

(2) 新橋架設案

同じく測量図（図 4.1.17）によると、谷の兩岸の既存道路と谷底との高低差がおよそ 15m と谷が深く、また谷底の幅も狭く谷底中央に橋脚を立てることができず、中間部の橋の支間長が 45m と長くなり、鋼橋を採用する必要がある。

そこで、一つの提案として以下の様な仮定条件の下での概算金額を想定した。

- 橋種（橋長）—RC 桁橋（15m）+鋼アーチ橋（45m）+RC 橋（15m）=75m
- アプローチ通路—左側：50m、右側：25m
- 橋梁幅員—2 車線（3.5m x 2）+路肩（1.5m x 2）=10m

この条件での概算費用は 21 億円と想定される。

4.3 気象・地震・津波のモニタリング計画、警報体制・システムのレビューと提言

気象・地震・津波のモニタリング計画、警報体制・システムについては 3.4.2 参照のこと。

トンガではすでに気象災害や地震の観測体制の整備が進んでいる。しかしながら、観測結果からそれを次の行動に移行する警報体制や警報発出の基準の明確化、住民が正しく警報の意味を理解し、分かり住民が正しい行動をとれるか、などの課題がある。

今後は NEMO が中心となり防災の視点から警報発出後の住民を安全な場所に誘導する避難計画とその実行を実施する必要がある。

5. 実施中・実施済案件の側面支援、新規支援案件の検討

5.1 公共施設・ライフラインインフラ（下水・廃棄物、電力、港湾、道路、空港、任意水供給施設、集会施設、公営住宅、移転補助金など）の BBB ニーズ把握

トンガで作成された NIIP3 の改訂版は HTHH 噴火後の復興需要まで含めて改訂されている。

以下に NIIP3 に基づくインフラ分野別の内訳を示す。「その他の建築物」カテゴリーには、官公庁をはじめ、消防、警察、防衛施設など幅広い用途の案件が多数あり、トンガでは海上輸送が重要で、海上輸送が全プロジェクトの 14% を占めている。

表 5.1.1 セクター別のプロジェクトリスト

Infrastructure Sector Category					Number =千 TOP			
	G1	G2	G3	Total	G1	G2	G3	Total
Roads	4	5	0	9	207,500	17,835	0	225,335
Aviation	2	2	1	5	3,100	11,800	103,100	118,000
Maritime	3	6	5	14	51,642	162,003	172,080	385,725
Waterways	1	3	4	8	3,000	43,000	56,660	102,660
Water and sanitation	5	1	0	6	133,801	3,000	0	136,801
Energy	4	1	0	5	21,165	4,000	0	25,165
Telecommunications	4	0	0	4	46,127	-	0	46,127
Education and training	2	3	0	5	16,000	7,000	0	23,000
Health	4	1	0	5	60,500	5,500	0	66,000
Other buildings	8	13	6	27	62,211	65,458	39,100	166,769
Urban development	5	5	2	12	31,600	33,972	10,215	75,787
Total	42	40	18	100	636,646	353,568	381,155	1,371,369

注)

1. ランキングには、国家インフラ投資計画 2021 ~ 2030 年 (NIIP3) に基づくプロジェクトと、HTHH 噴火に対するトンガ政府の対応を含む NIIP3 改訂版に基づくプロジェクトが含まれている。両方のバージョンのランキングは多基準分析に基づいており、トンガ政府内閣の最終決定に従って修正された。
2. インフラストラクチャー分野のカテゴリーは NIIP3 では使用されなかったため、一貫性を保つために、リストに残っている既存の NIIP3 プロジェクトに追加された。ここに示してあるプロジェクトは今後 2030 年までに実施に移されていくことになるが、実施に移す段階でトンガ政府が承認した BBB ビジョンに従って実施に移していくことが期待されている。

出典：Tonga National Infrastructure Investment Plan 2021-2030、April 2023

5.2 実施中案件の BBB ビジョンの展開

5.2.1 実施中案件のスコープ拡大及び実施済み案件のフォローアップによる BBB ビジョンの具現化のための情報収集

指示書に示されている、プロジェクトについて、以下の通り、取りまとめた。

表 5.2.1 実施中案件一覧

タイトル	年月	協力方法	プロジェクト概要	BBB ビジョンの実現化の提案
遠隔技術を活用した集中治療能力強化プロジェクト（遠隔 ICU）	2021年7月～ 2022年9月	技術協力	トンガ側から離島医療体制の強化にかかるニーズが確認されているため、既存コンポーネント拡張を検討。他方、ICT活用のインフラなど、先方の状況に応じた必要なインフラについても確認予定。	災害時にも機能することを保証するための訓練の実施と、衛星インターネットの整備。
太陽光を活用したクリーンエネルギー導入計画	2010年3月～	無償資金協力	住民の帰還希望に応じて、被害の大きいアタタ島等での家庭用太陽光発電システム完全復旧を既存協力のコンポーネント拡充で対応。	災害時の非常用電源としての使用のための、更なる普及支援。
太平洋地域ハイブリッド発電システム導入プロジェクト	2017年3月～ 2022年6月	技術協力	遠隔で電気設備の被害状況把握や復興計画などへの助言等を検討中。2022年3月の研修へのトンガの参加に向けて調整中。	ハザードマップに基づいた、リスクの少ないエリアへの建設。
大洋州地域廃棄物管理改善支援プロジェクトフェーズ 2 (J-PRISM2)	2017年2月～ 2022年2月	技術協力	災害廃棄物処理計画作成支援について、サモアにいる専門家により検討中。処分場効率使用のための重機供与の要請は被災前よりあり。廃棄物収集及び処分場運営に対する技術的助言及び、廃棄物収集に係る燃料支援を開始済。	災害廃棄物処理場自体が被災した際の、災害種ごとの事業継続計画策定支援。
ブレッドフルーツ（BF）の有効利用と新規加工品開発による住民の生計向上と健康改善	2017年3月～ 2023年2月	技術協力	現地のニーズに基づき、より広範囲の農業技術による支援（火山灰土壌での栽培方法指導、育苗施設建設、苗木供給など）を検討中。	被災した育苗施設の建物強度の補強と、新たなハザードマップに基づいた栽培種の再検討。

出典：JICA 調査団作成

5.3 新規支援案件の検討

新規支援プロジェクト案は本調査で形成したもののほかに、別途厚生労働省発注案件「令和4年度水道プロジェクト計画作成指導事業（第1期）トンガ王国水道復興支援計画」で形成された案件も含んでいる。Appendix 5-1 にプロジェクトプロフィールを示す。

5.3.1 新規に確認されたニーズから、新規に形成すべき案件の早期実施方策の検討（財政支援無償、包括無償、新規技術協力等）

無償プロジェクト案としては、インフラ整備を中心にまとめた。

表 5.3.1 検討した無償プロジェクト案件一覧

番号	プロジェクト名	概要	概算費用 (億円)	関係機関
1	護岸施設の復興及び強靱化	現在建設されている護岸施設を再建する。 護岸施設の距離：市街地中心部を含めた約 8.2 キロメートル 構造：CSG (Cemented Sand and Gravel) 工法（添付 3CSG 工法参照）を採用し、現地で容易に入手できる砂や砂礫などを水とセメントを加えて混合し、堤体のコア部を作成、その海側に既存のコーラルや岩を再利用して設置し、内側に盛土を施しその上に植栽することで環境にも配慮した、より強靱な護岸を作ることが可能である。鹿島建設が特許取得しているが、使用は可能 断面構造や高さは追加検討が必要	21.0 但し予算により分割は可能	MOI、 MLNR
2	エウア島の橋梁建設	新規橋梁候補地については、3通りの考え方がある。 第1案：今回津波の最高到達点(青色屋根の家)の上まで、新規橋梁を含む道路を取り付け、港湾への進入路を別途考慮する。(想定橋梁形式:鋼製桁橋 S=50m) 第2案：対象車両を限定するか否かで、橋梁の構造が大きく変わる可能性はあるが、現行の道路からのアクセスを考慮すると一番の候補と言える(想定橋梁形式:鋼製床板箱桁橋 S=150m) 第3案：上記2の位置から上流に100m程入った個所で取付道路を整備する事で橋梁の支間長を短くできる可能性がある。(想定橋梁形式:鋼製床板過去桁橋 S=100m)	21.0	MOI
3	ヴァヴァウ新港の建設	ヴァヴァウ港の建設は、緊急時のみならず、平常時ヴァヴァウ島への物資の輸送の改善にも資することとなり、ヴァヴァウ島の開発の促進にも寄与する。BBB ビジョンにより、現状より高いレベルのインフラ施設を開発することは、開発促進効果もあることを実感できることとなり、減災効果のあるインフラの建設にもつながると期待できる。 本プロジェクトでは、以下のコンポーネントが含まれる。 新港の選定	52.0 (港湾施設を含む)	MOI、 MLNR、 PAT

番号	プロジェクト名	概要	概算費用 (億円)	関係機関
		新港の設計 新港の建設と取り付け道路の建設などを含む。 新港は民間の貨物と旅客を対象にするほか、旅客ターミナルも整備することにより観光客の利用も期待できる。		
4	船舶点検用のスリップウェイの建設	国の調査によるとトンガタプ島内に4か所候補地がある。この調査結果を参考に適地を選定する必要がある。 スリップウェイ（65m程度）の建設 必要な機材の導入 人材育成の実施	30.0	MOI、 PAT
5	自然災害に対する水道システムの強化	新規水源開発による水道水源の複数化と既存排水池への連絡管の整備。	28.2	TWB
6	気候変動による水道水源の塩水化への対応（その1）	気候変動における海面面上昇による地下水の塩水化対策のため、水源調査や、地下水観測井戸の設置、そのほか新規水源開発など。	14.2	TWB

出典：JICA 調査団作成、5番、6番については令和4年度水道プロジェクト計画作成指導事業（第1期）トンガ王国 水道復興支援計画

ここでは数億円規模の小規模の無償プロジェクト案をまとめた。

表 5.3.2 検討した小規模無償プロジェクト案件一覧

番号	プロジェクト名	概要	概算費用 (億円)	関係機関
7	トンガ防災情報センター	・自然災害の記録をアーカイブし、国民の防災教育のための防災情報センターの建設（施設は高台に建設し、災害時の避難シェルターとしても利活用される） ・今後発生する災害を記録するための、観測・記録機材の供与（潮位計増設、波浪観測網、地震動計測網、等） ・災害後の迅速な被害状況情報収集のための機材（長距離観測ドローン、各種分析装置、簡易GPS測量機器、等） ・収集資料の整理、アーカイブ、公開映像作成のための機材（PC、映像ストレージ）	2-4	MLNR/TGS MEIDECCC / MET
8	津波タワーの建設	・ヌクアロファ市内に垂直避難路を確保するために、津波タワーの建設を行う。津波タワーはヌクアロファ市内で避難路の確保が困難な地域や高齢者や障害者など避難が困難な住民が多く居住する地域に建設する。 ・津波タワーの建設に際しては避難計画を十分確認すると共に、平常時の活用についても観光利用なども含めて検討する。 ・津波タワーの建設には日本ですでに建設運用が行われている事例を紹介するとともに、トンガの実情を考慮した計画とする。 ・さらに、本プロジェクトはトンガが進めるBBBビジョンの具体化にも貢献し、復興のシンボリックな役割を期待する。	2	MOI、 MLNR、 MEIDECCC

番号	プロジェクト名	概要	概算費用 (億円)	関係機関
9	水質管理の改善	水質検査ラボの整備と、濁度、pH、残留塩素等の日常項目を検査する水質検査機器、記録・分析用の OA 機器の機材供与。水質管理の指導（水質試験・データ分析、マニュアル整備等）を行う。	0.4	TWB トンガタブ 本部・各離 島支所
10	応急復旧の強化支援	火山噴火、津波により損傷を受けた給水管の復旧を目的として、ワークショップの整備と必要な資機材の供与、応急復旧に係る能力育成。	1	TWB トンガタブ 本部・各離 島支所
11	気候変動による水道水源の塩水化への対応（その2）	気候変動における海面上昇による地下水の塩水化対策のため、水源調査や、地下水観測井戸の設置、そのほか新規水源開発など。	3.1	TWB リフカ島

出典：JICA 調査団作成、9、10、11 番については令和 4 年度水道プロジェクト計画作成指導事業（第 1 期）
トンガ王国 水道復興支援計画

5.3.2 技術協力プロジェクト案

ここでは技術協力プロジェクト案を取りまとめた。

表 5.3.3 検討した技術協力プロジェクト案件一覧

番号	プロジェクト名	概要	概算費用 (億円)	関係機関
12	トンガ BBB ビジョン実現のための防災行政能力強化プロジェクト	トンガ政府は JICA の協力のもと、BBB ビジョンを NSPAO の政策として位置付け、今後トンガ国内で実施されるプロジェクトはすべて BBB ビジョンに基づき評価されることとなる。一方トンガ政府では BBB ビジョンに基づいた評価体制の構築を望んでいる。係る状況から、本プロジェクトでは、BBB ビジョンの内容を基として、トンガの災害に強い国づくりを進めるにあたり、BBB ビジョンに基づく新規プロジェクトの形成とその評価方法を確立するとともに、今後同じような災害が起こった時に警報の発令と避難が出来る体制の構築を目指す。 (1) 上位目標 BBB ビジョンに基づいたプロジェクトの形成及び評価及び実施により、国土の強靱化が図られる (2) プロジェクト目標 BBB ビジョンに基づいた災害リスク削減に資する活動を促進し、防災行政能力が強化される	85MM 程度	MEIDECCC/ NEMO/ NSPAO/ MLNR
13	トンガハザード監視体制確立のための人材育成	先の火山噴火ではトンガ内のハザード監視体制の脆弱さが確認された。特に、災害リスクが高いトンガではハザード毎の監視を行う必要がある。本プロジェクトでは各ハザード監視やモニタリングする専門家を養成することを目標とする。 (1) 上位目標	30MM 程度	MEIDECCC/ MET/NEMO/ MLNR/TGS

番号	プロジェクト名	概要	概算費用 (億円)	関係機関
		ハザード毎の監視、モニタリングが実施できる (2) プロジェクト目標 ハザードモニタリング体制が整備され、人材が育成される		
14	BBB ビジョンに基づいた観光開発	本プロジェクトではトンガの重要な産業である観光開発に着目して、ハザードマップにより示された各災害の危険度により、観光開発を実施するエリアを大きく分類するとともに、観光開発の方向性を示す。 また、観光開発に必要な施設建設については BBB ビジョンに従って、災害に強い施設建設を行うと共に被災後の外国人観光客の安全確保と避難についても提言を行うと共に、パイロットエリアでの避難訓練なども併せて実施する。	40MM 程度	観光庁

出典：JICA 調査団作成