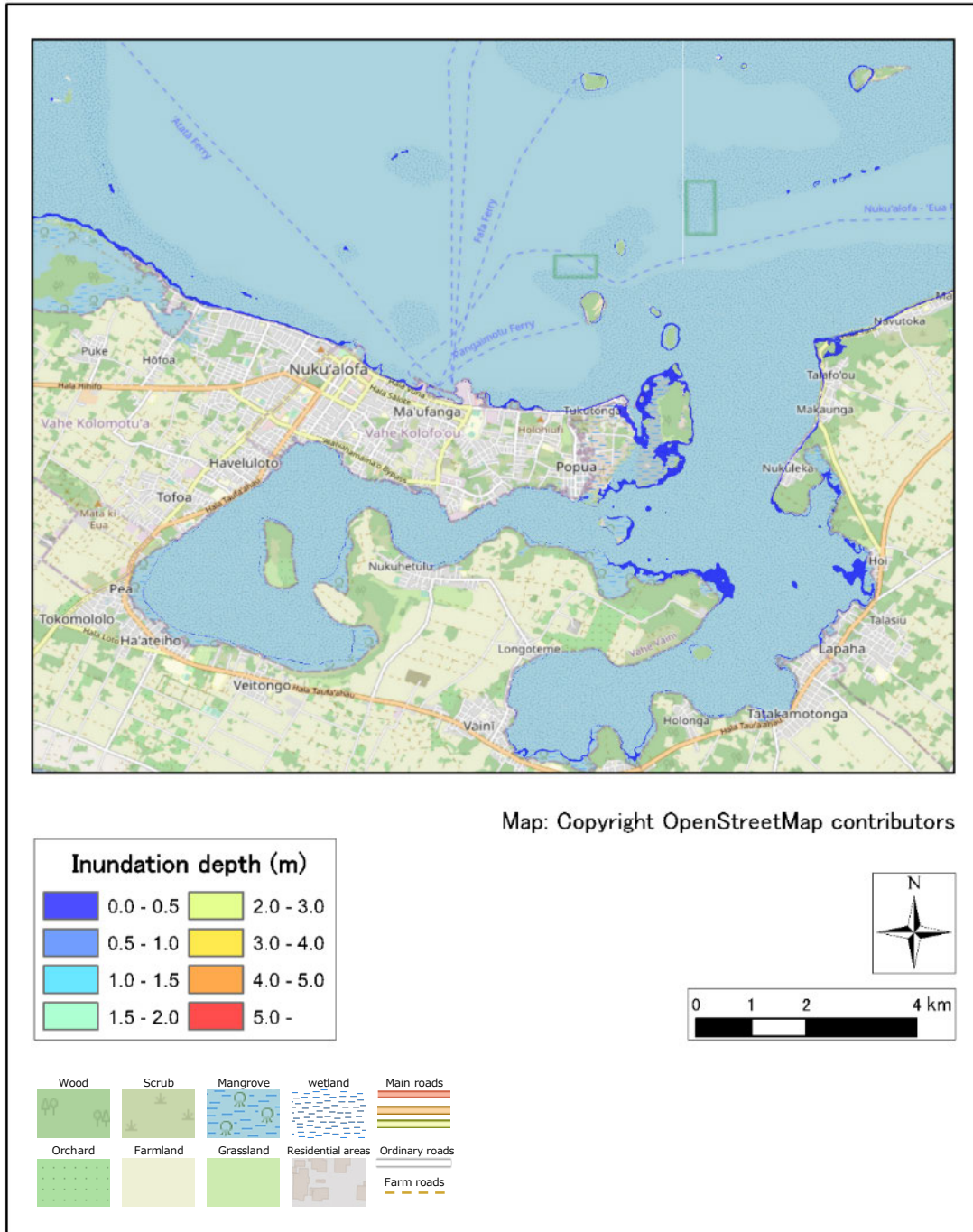


2) 最大浸水深分布図 (ヌクアロファ、トンガタブ島)

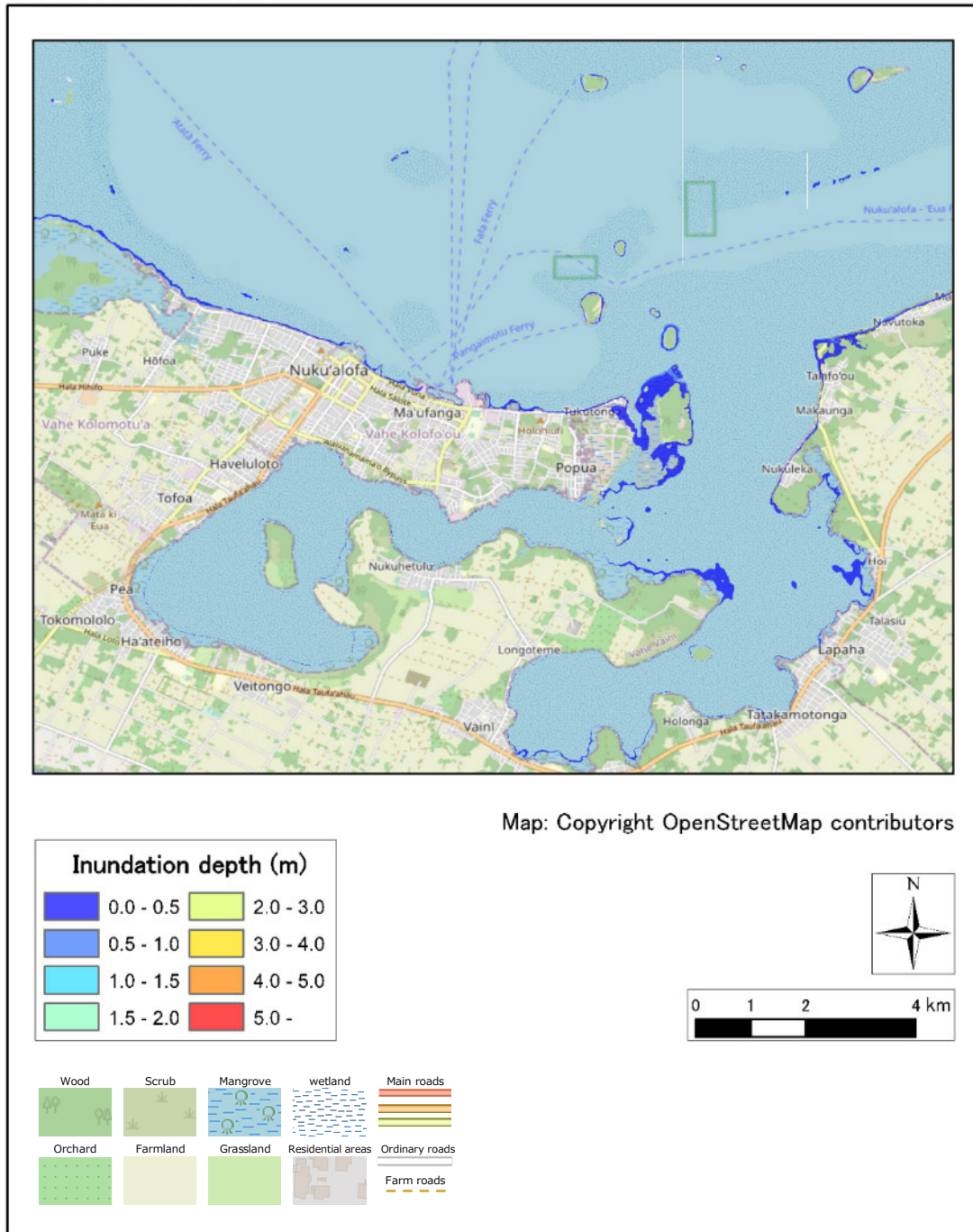
CASE: fault1976-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.33 最大浸水深分布図 (Fault 1976)

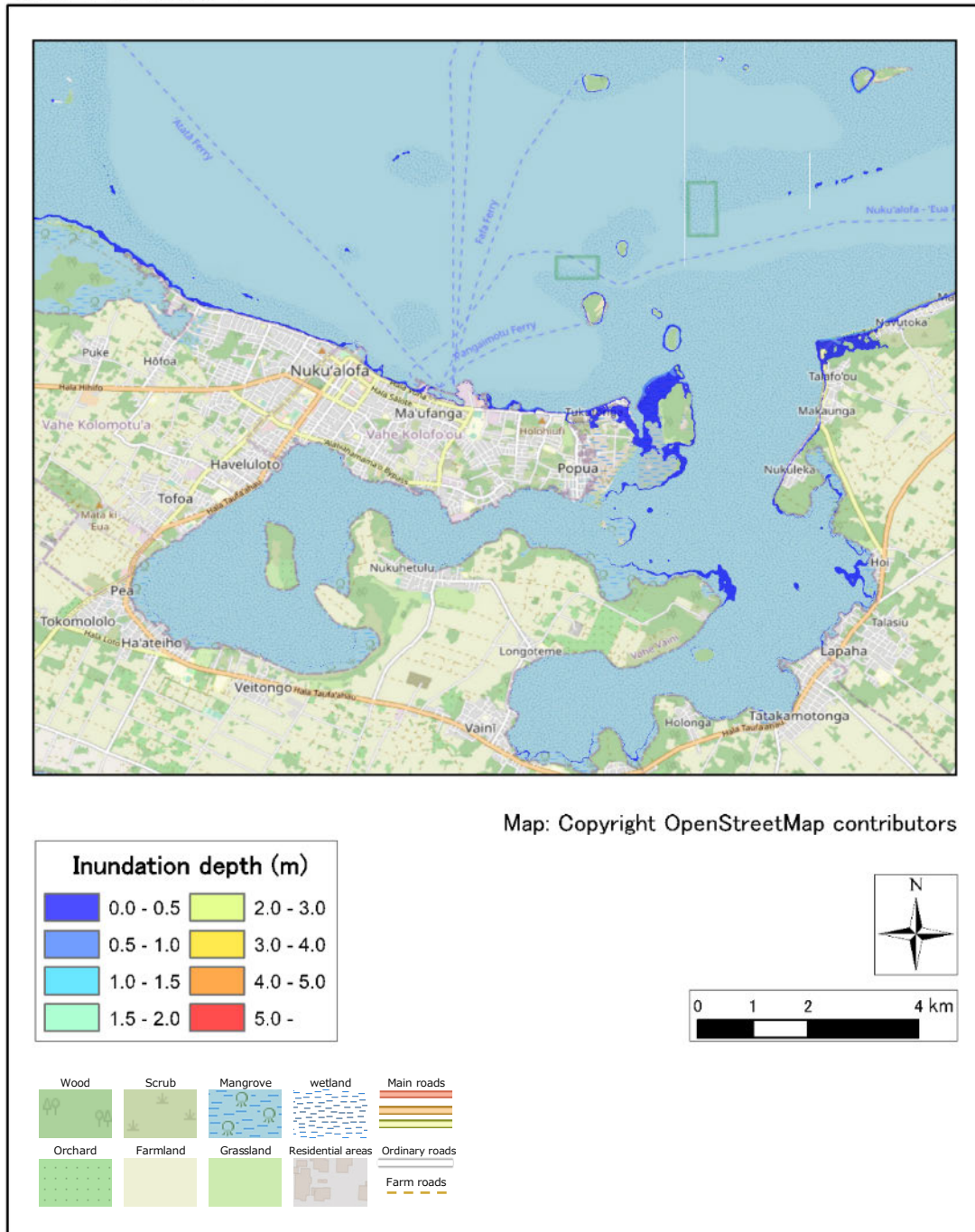
CASE: fault2006-1-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.34 最大浸水深分布図 (Fault 2006-1)

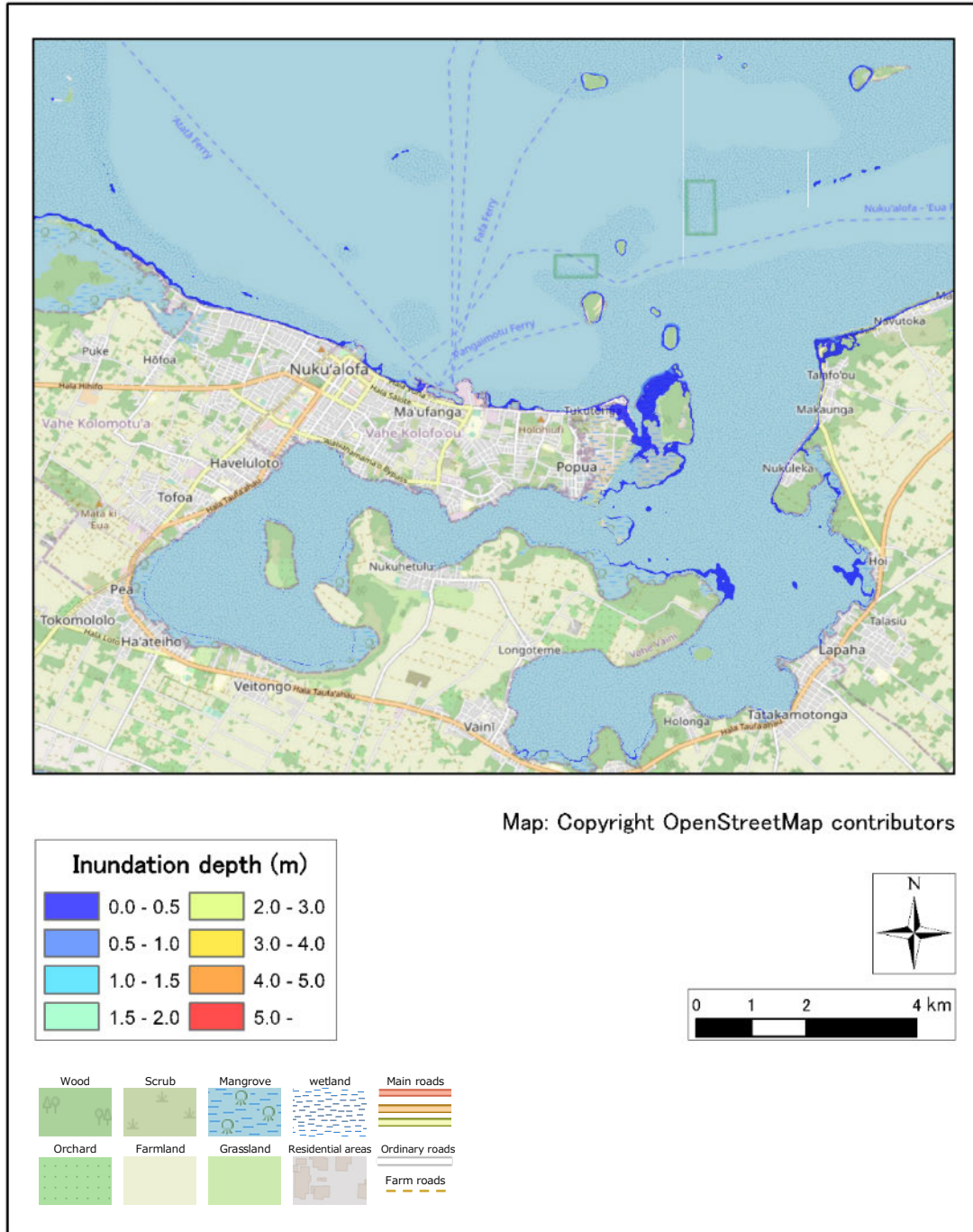
CASE: fault2006-2-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.35 最大浸水深分布図 (Fault 2006-2)

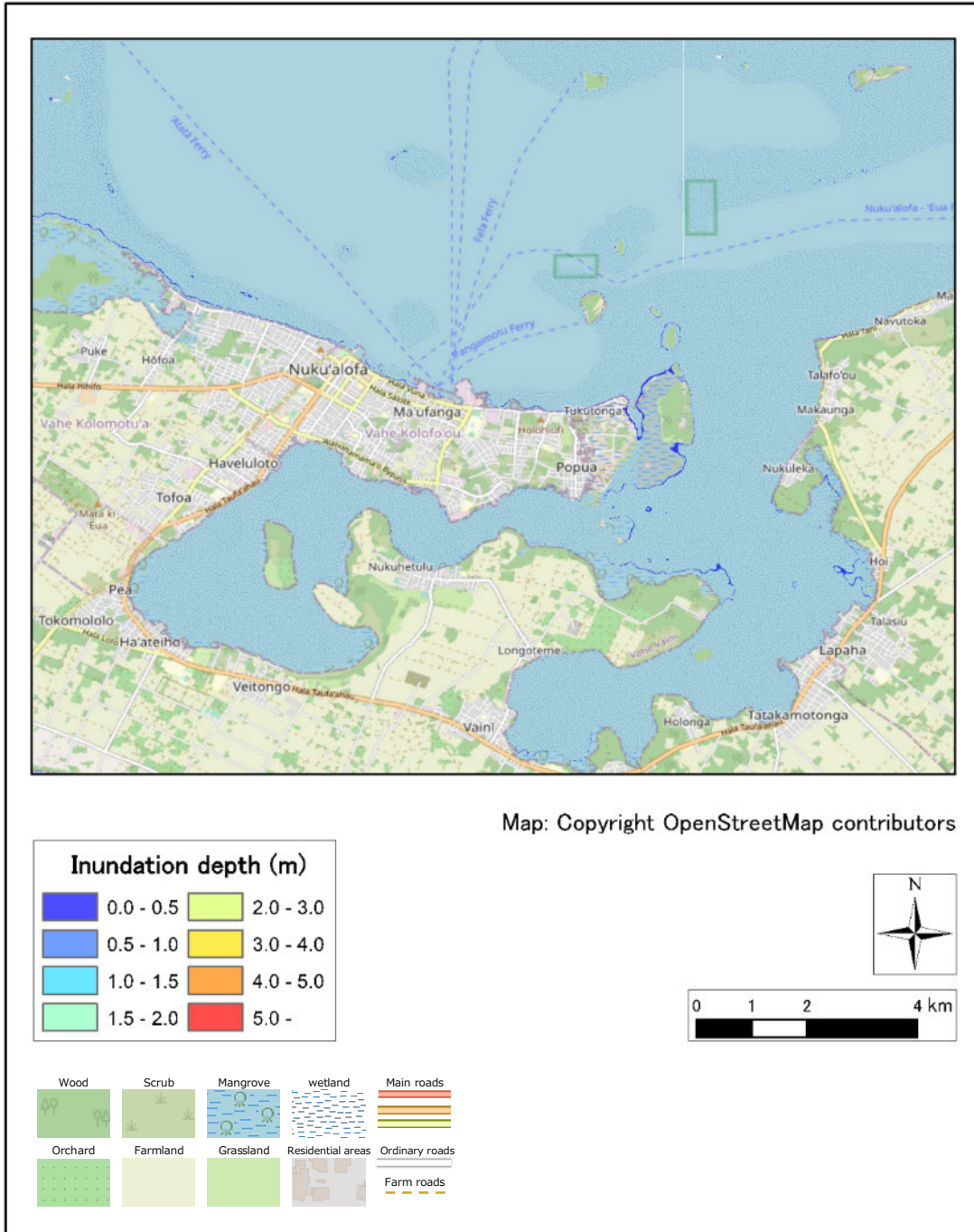
CASE: fault2009-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.36 最大浸水深分布図 (Fault 2009)

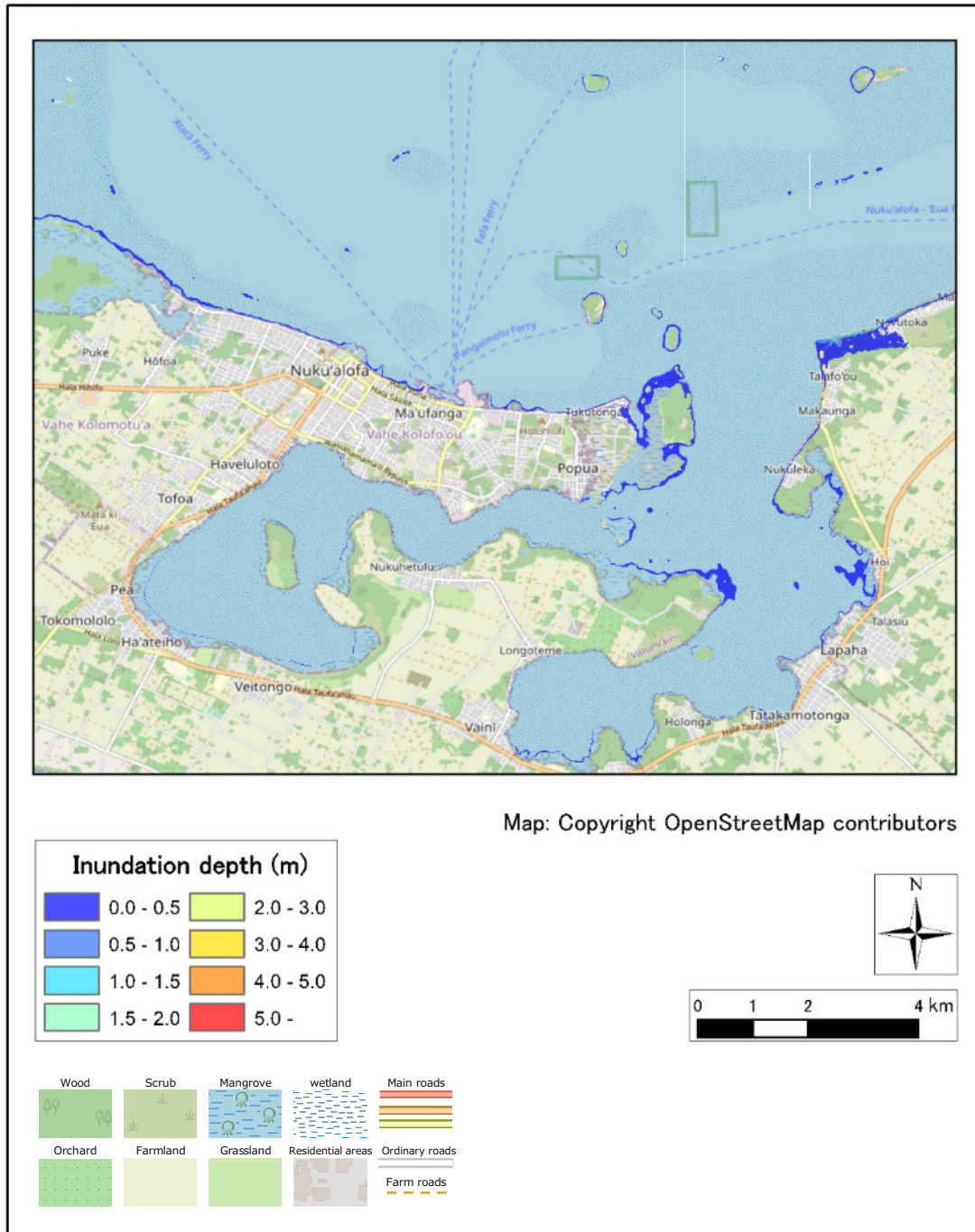
CASE: fault2018-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.37 最大浸水深分布図 (Fault 2018)

CASE: fault2021-1

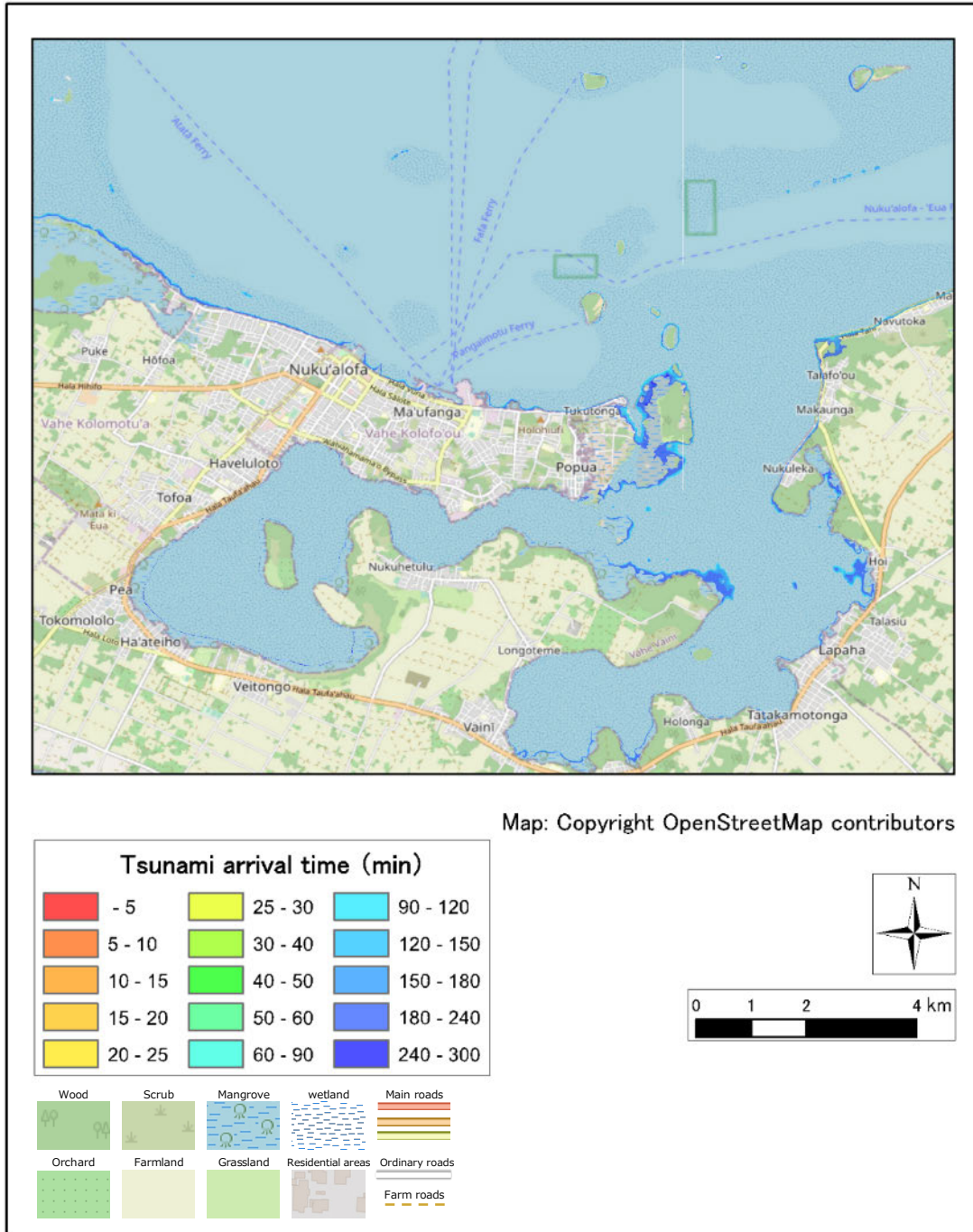


出典：JICA 調査団作成

図 2.7.38 最大浸水深分布図 (Fault 2021)

3) 津波到達時間分布図 (ヌクアロファ、トンガタブ島)

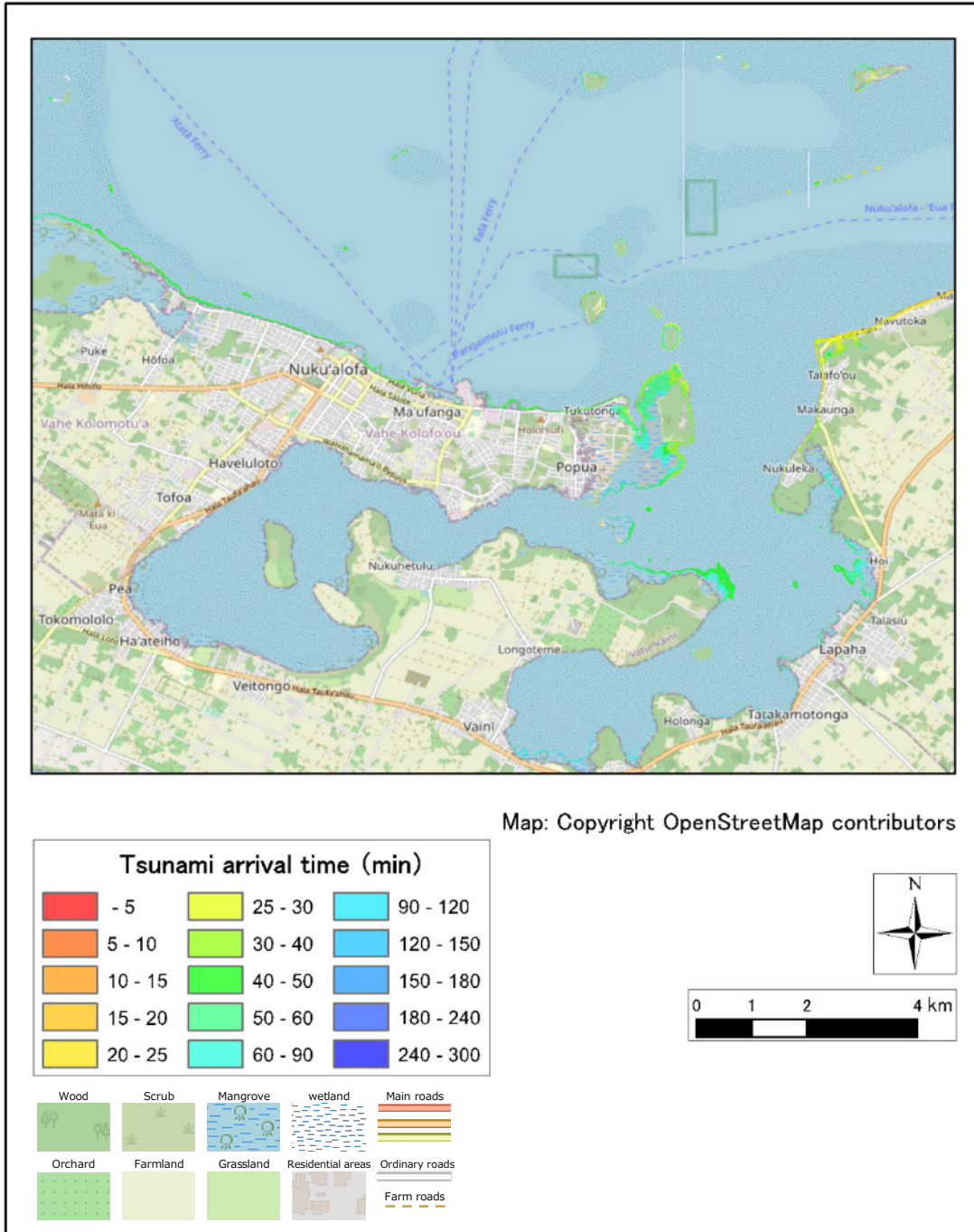
CASE: fault1976-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.39 津波到達時間分布図 (Fault 1976)

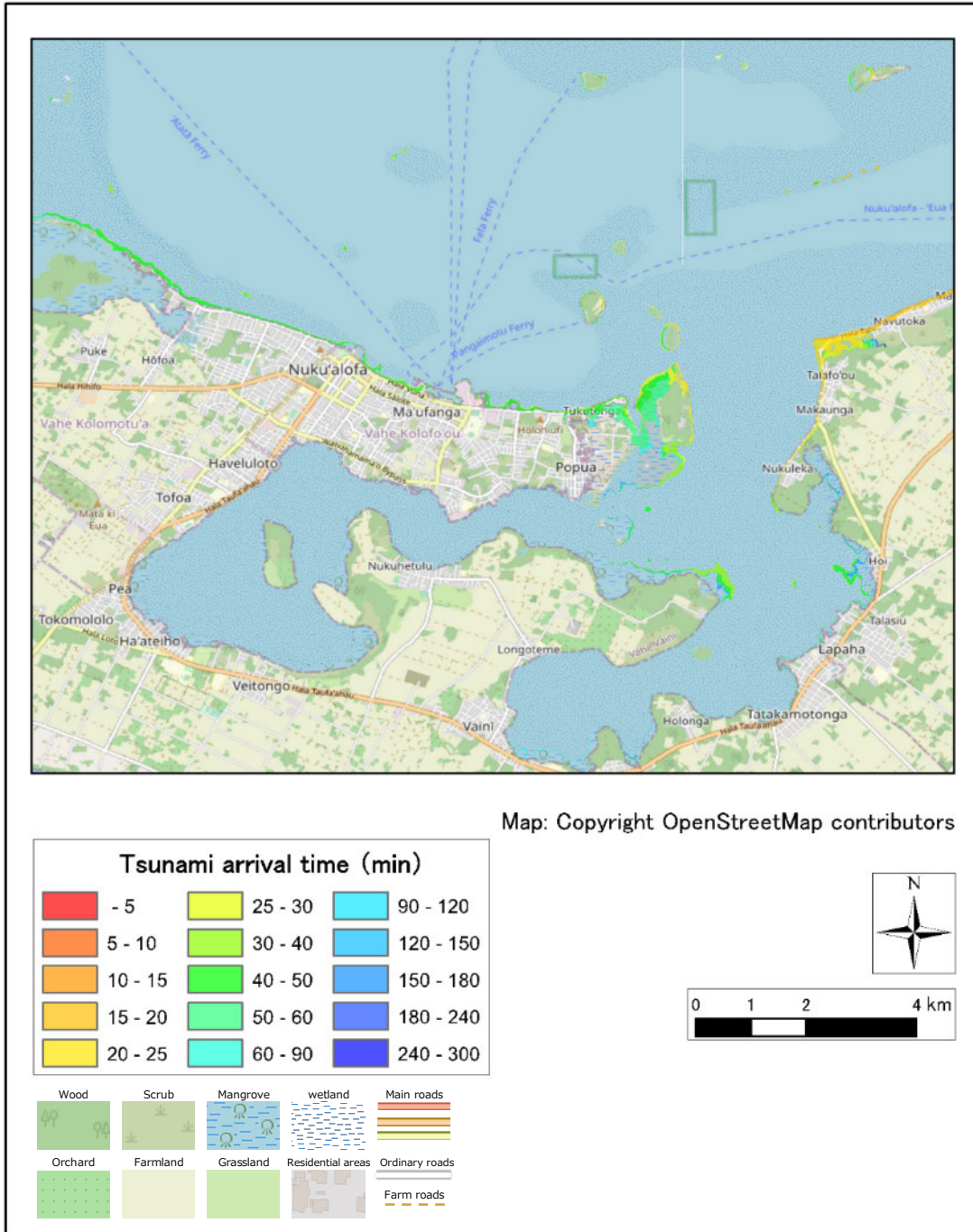
CASE: fault2006-1-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.40 津波到達時間分布図 (Fault 2006-1)

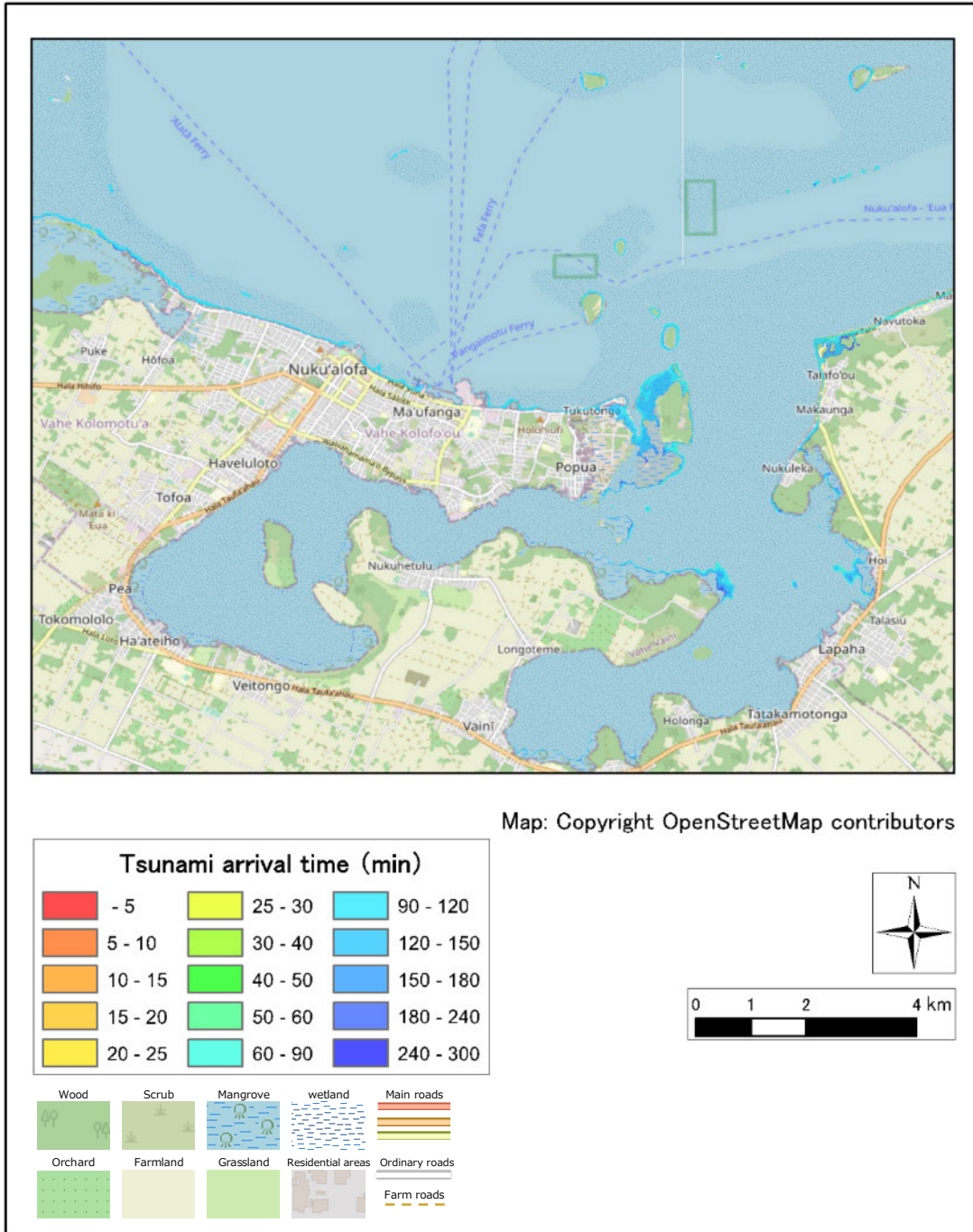
CASE: fault2006-2-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.41 津波到達時間分布図 (Fault 2006-2)

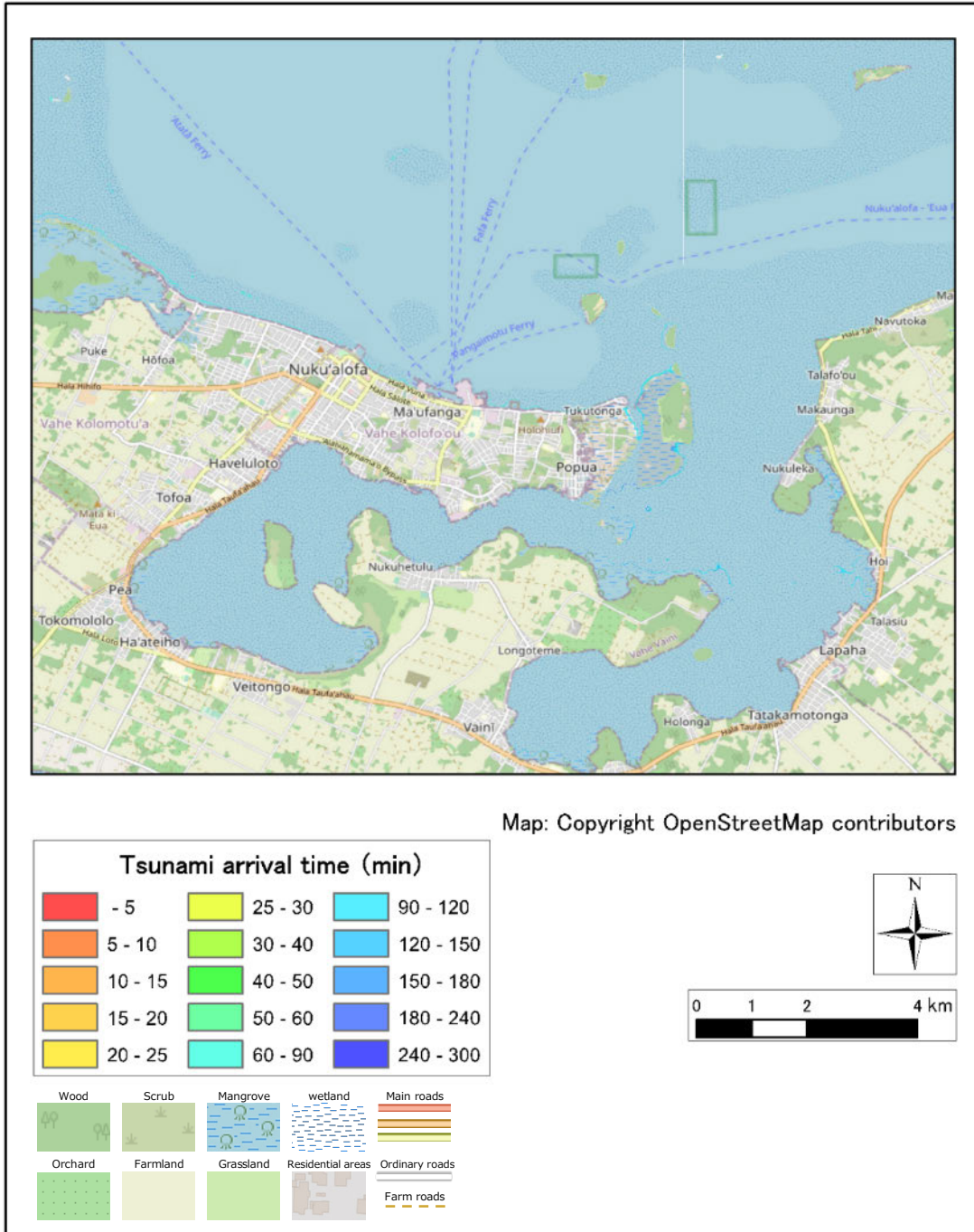
CASE: fault2009-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.42 津波到達時間分布図 (Fault 2009)

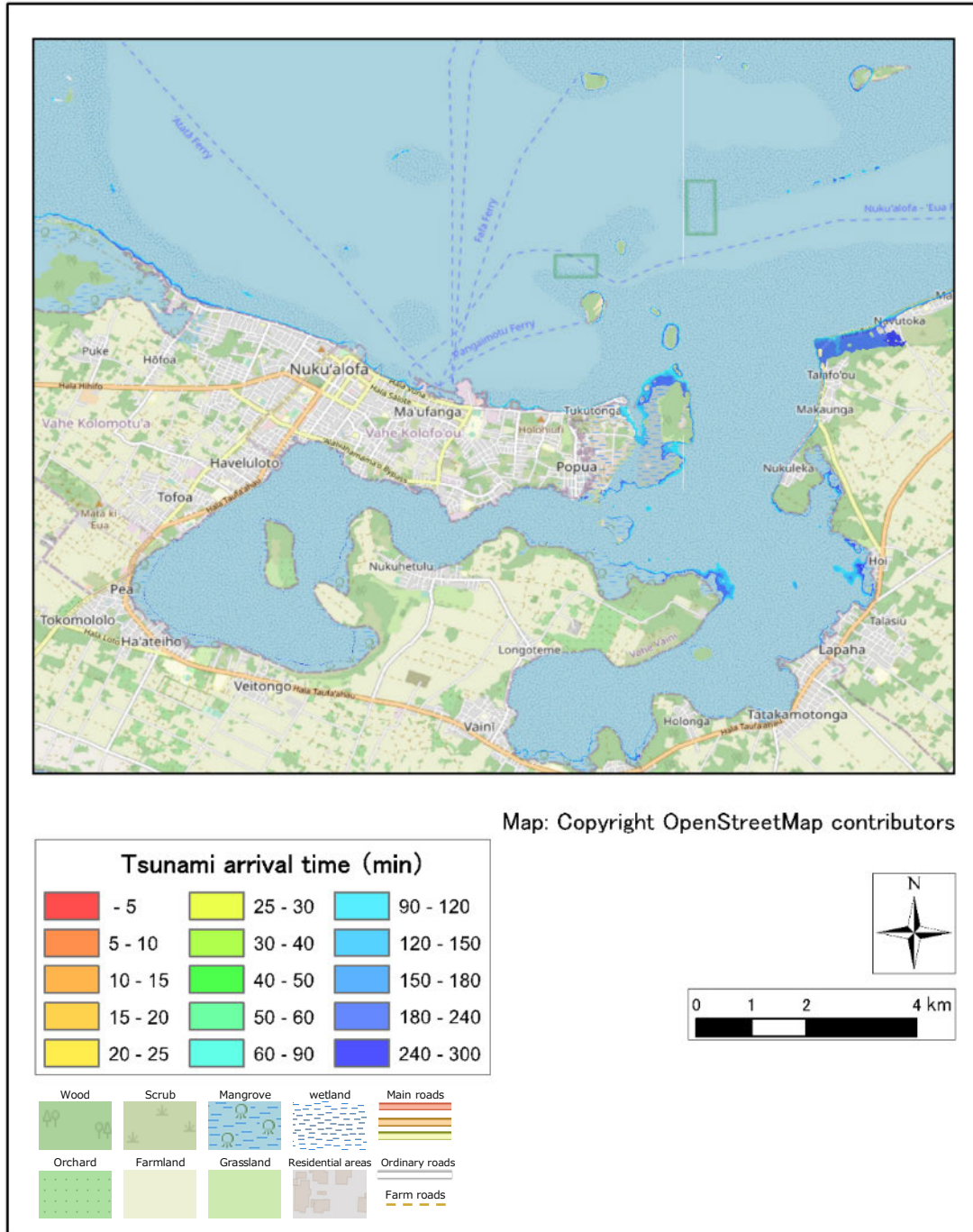
CASE: fault2018-1



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.43 津波到達時間分布図 (Fault 2018)

CASE: fault2021-1

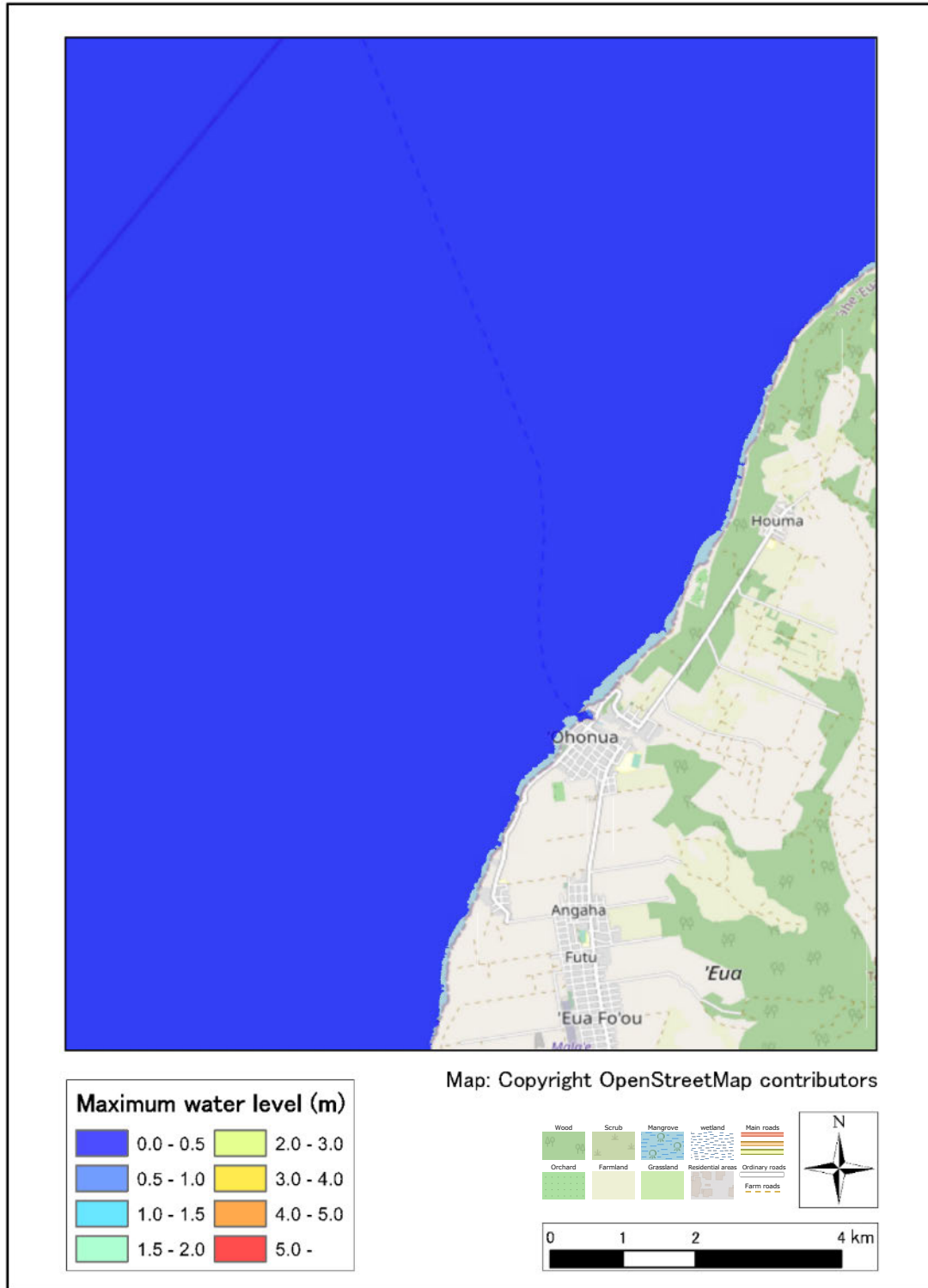


出典：JICA 調査団作成

図 2.7.44 津波到達時間分布図 (Fault 2021)

4) 最大水位分布図 (オホヌア、エウア島)

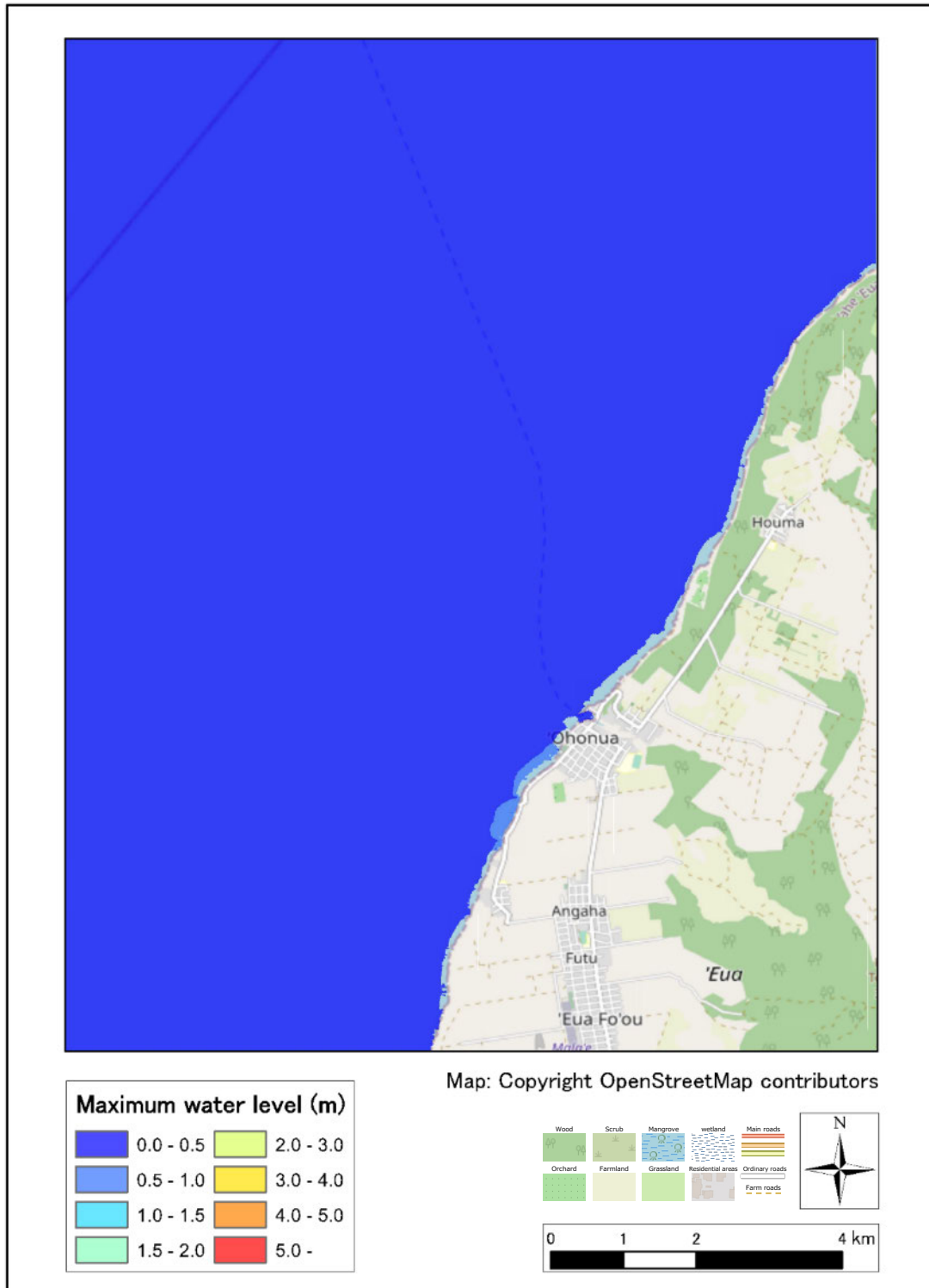
CASE: fault1976-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.45 最大水位分布図 (Fault 1976)

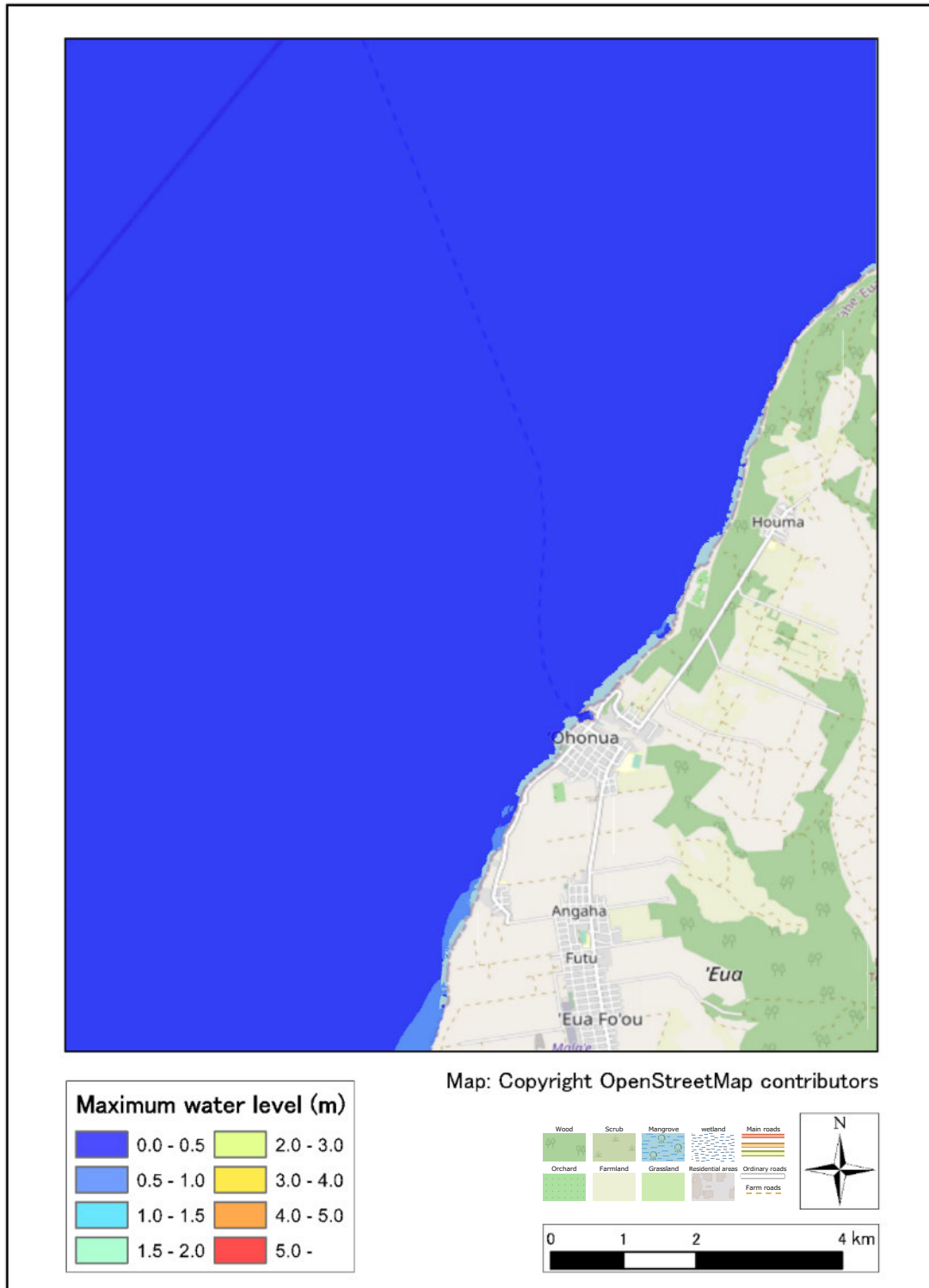
CASE: fault2006-1-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.46 最大水位分布図 (Fault 2006-1)

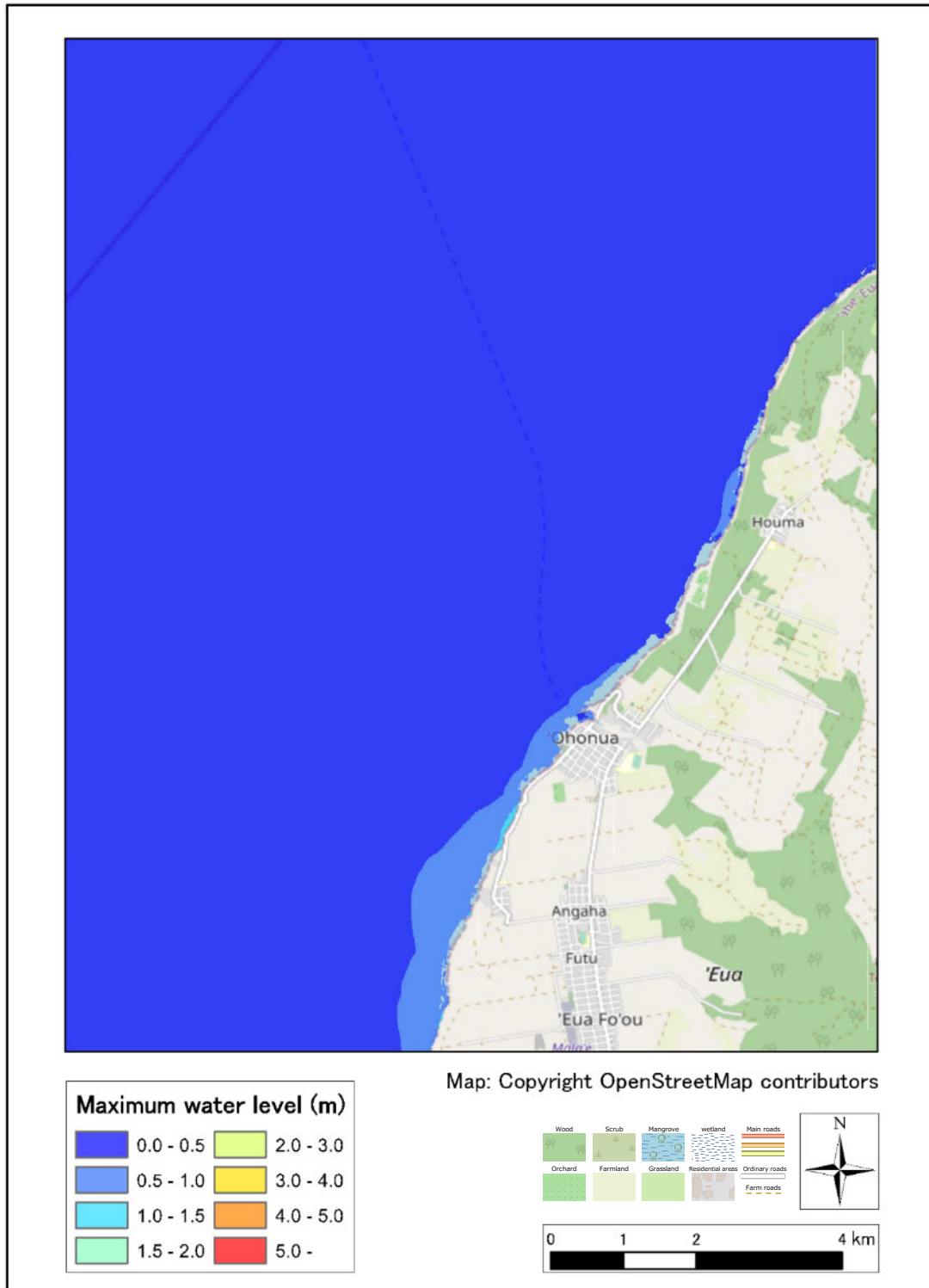
CASE: fault2006-2-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.47 最大水位分布図 (Fault 2006-2)

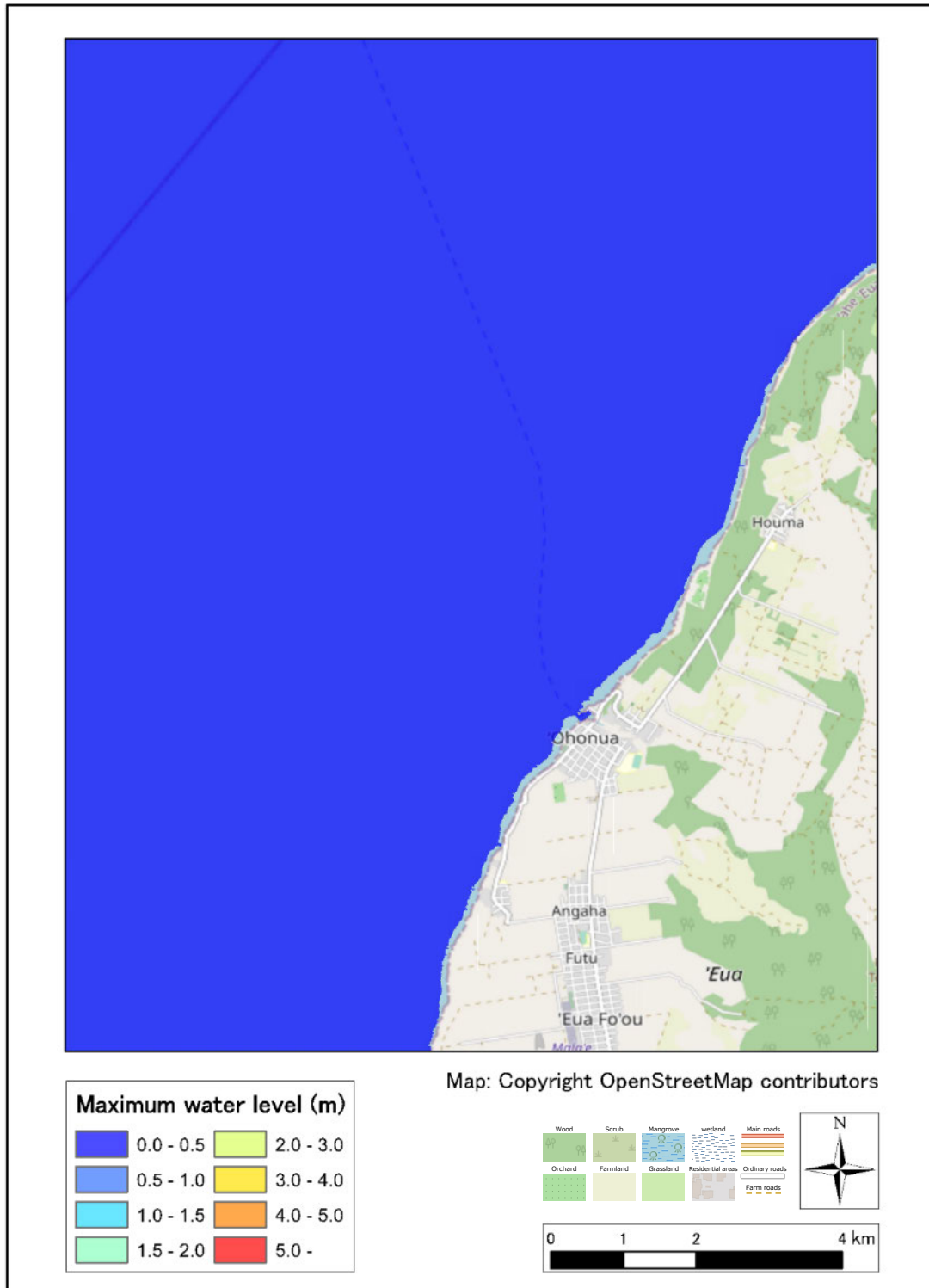
CASE: fault2009-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.48 最大水位分布図 (Fault 2009)

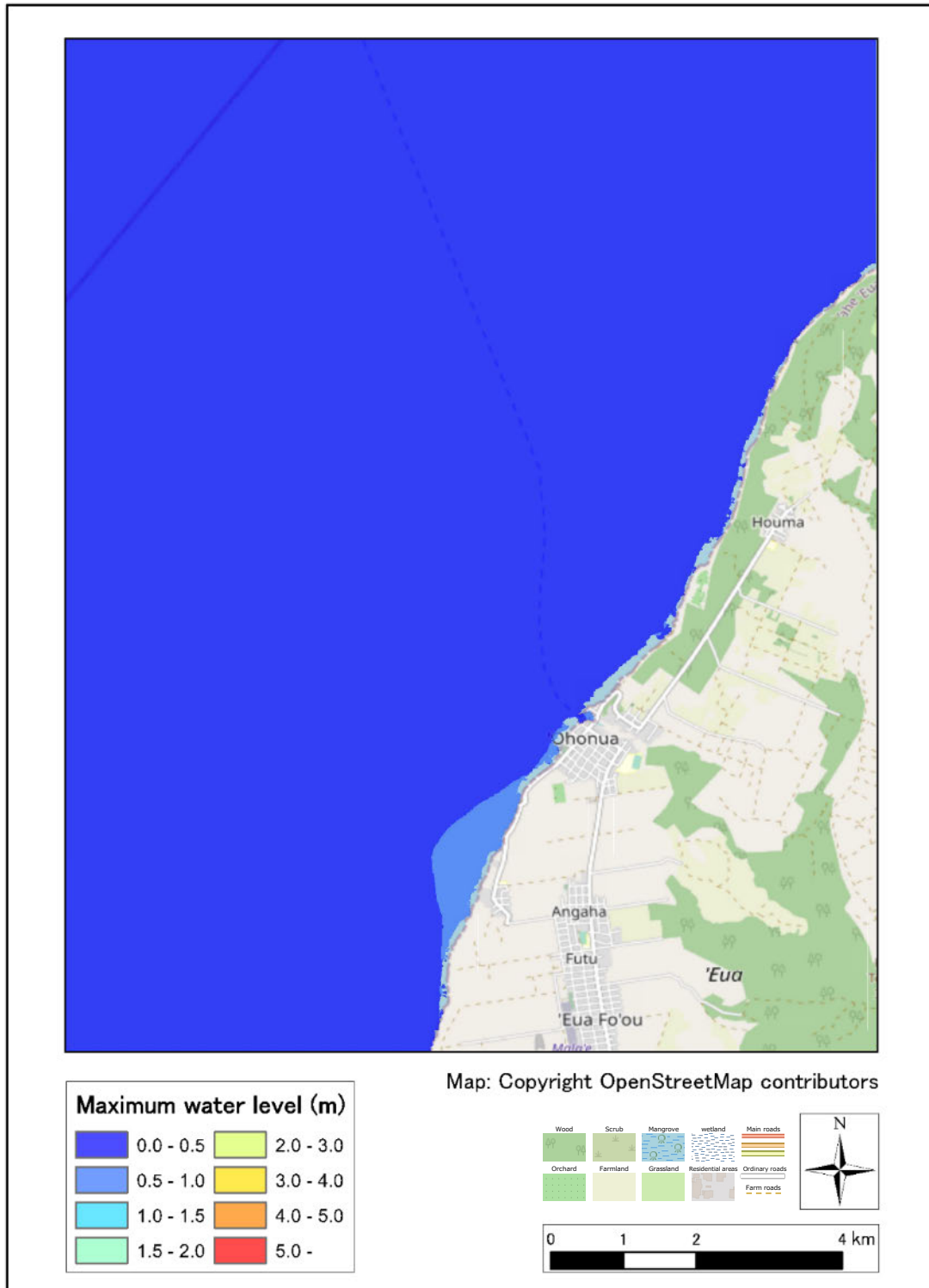
CASE: fault2018-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.49 最大水位分布図 (Fault 2018)

CASE: fault2021-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.50 最大水位分布図 (Fault 2021)

5) 最大浸水深分布図 (オホヌア、エウア島)

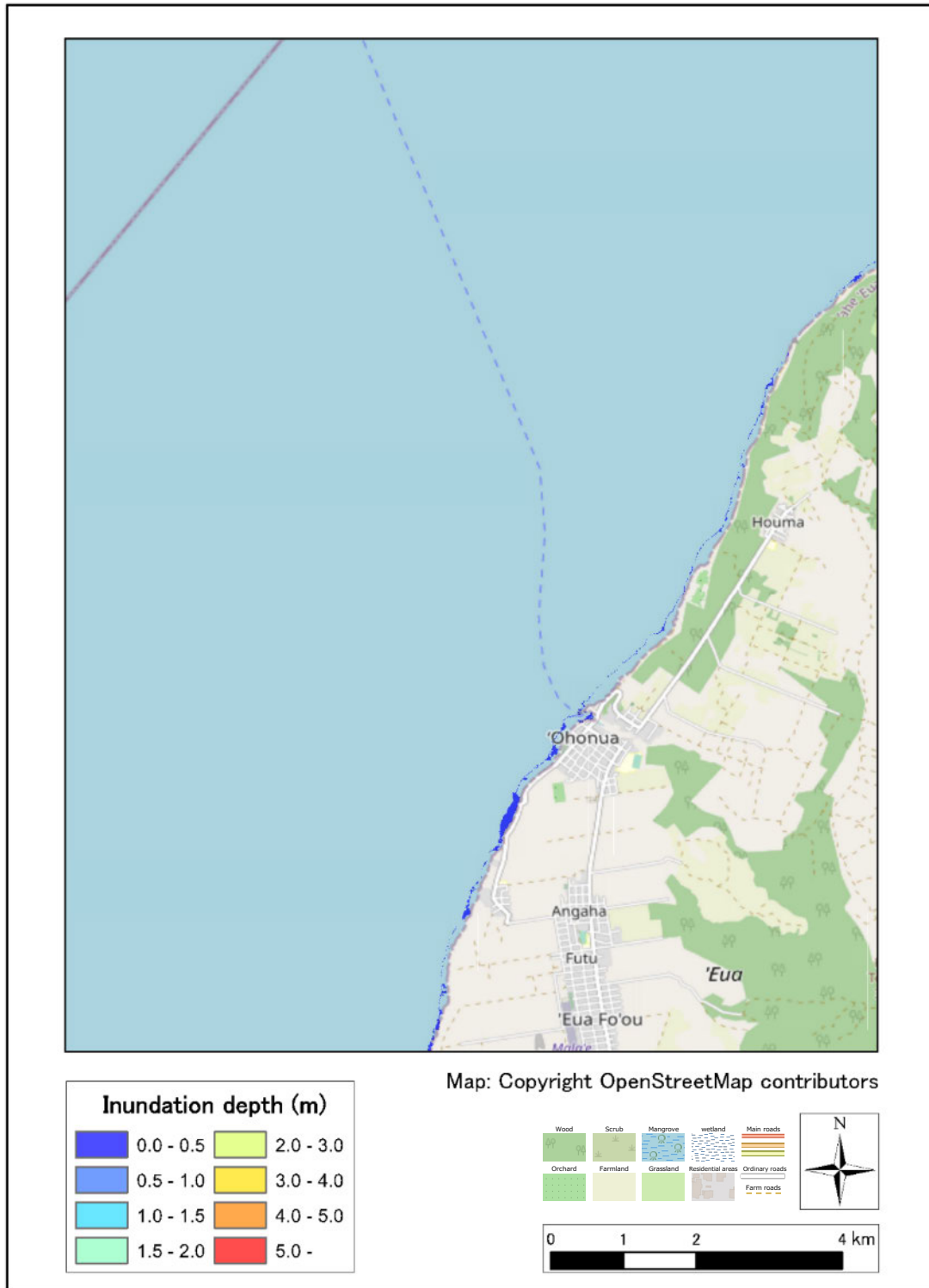
CASE: fault1976-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.51 最大浸水深分布図 (Fault 1976)

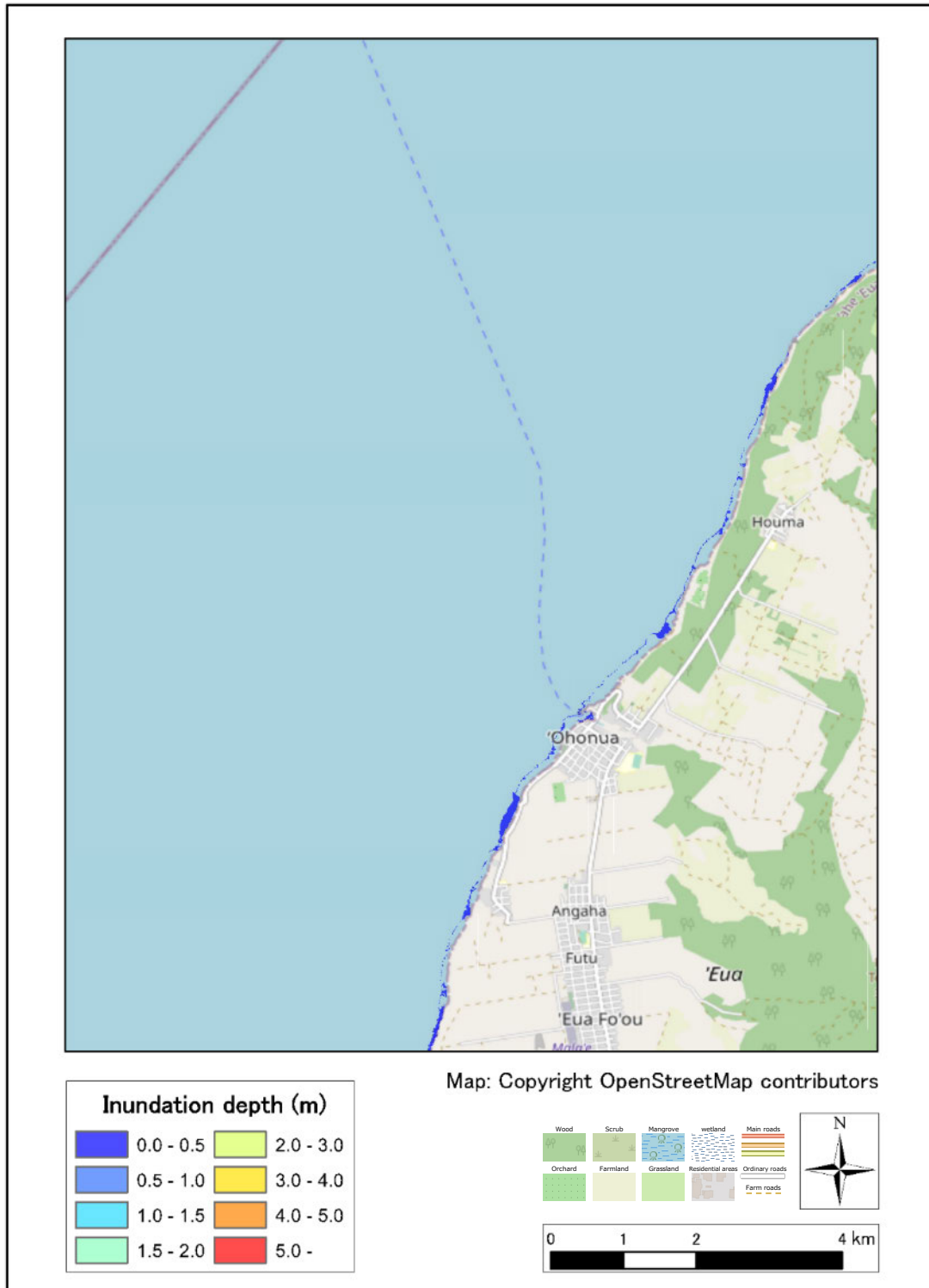
CASE: fault2006-1-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.52 最大浸水深分布図 (Fault 2006-1)

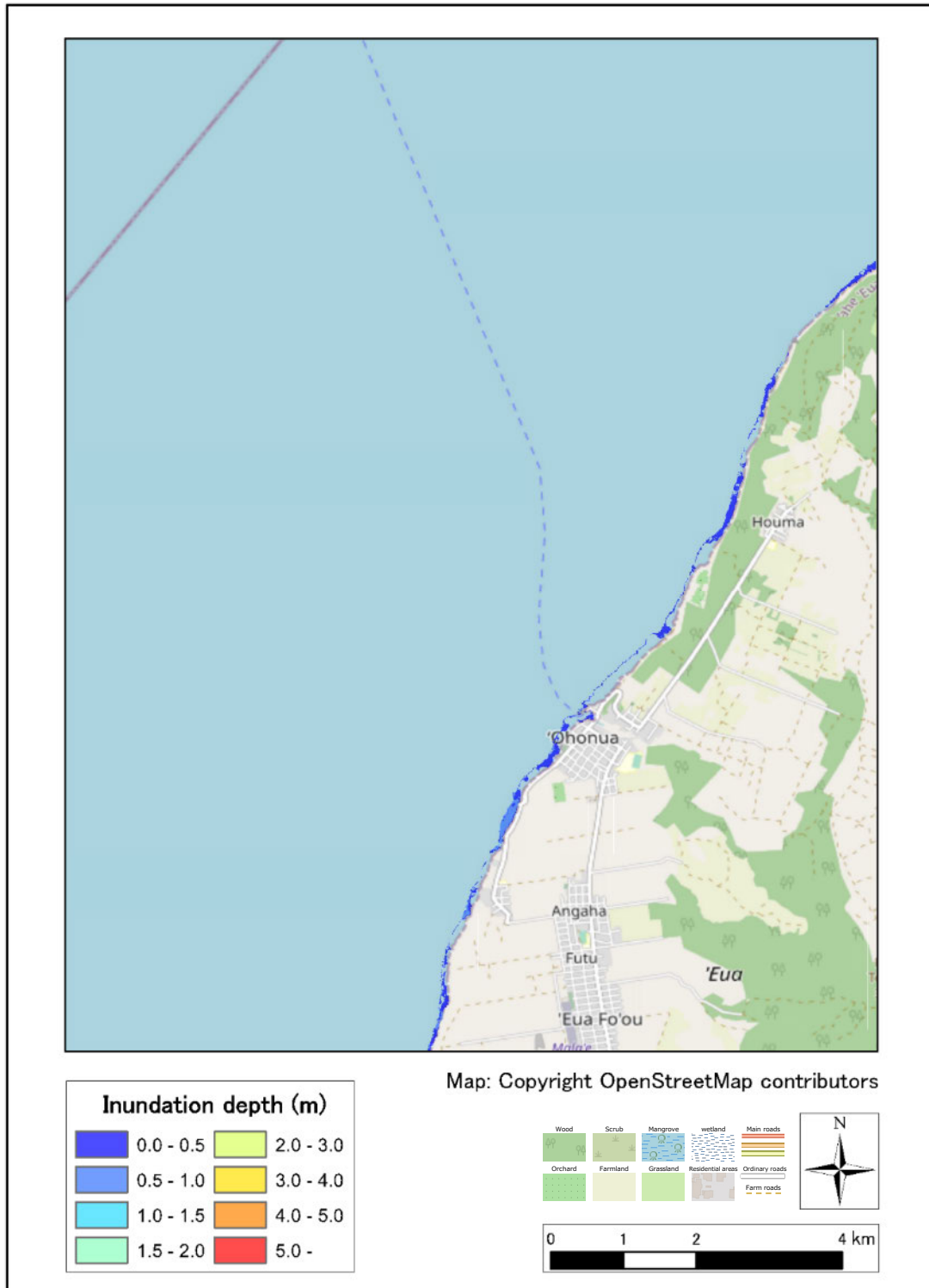
CASE: fault2006-2-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.53 最大浸水深分布図 (Fault 2006-2)

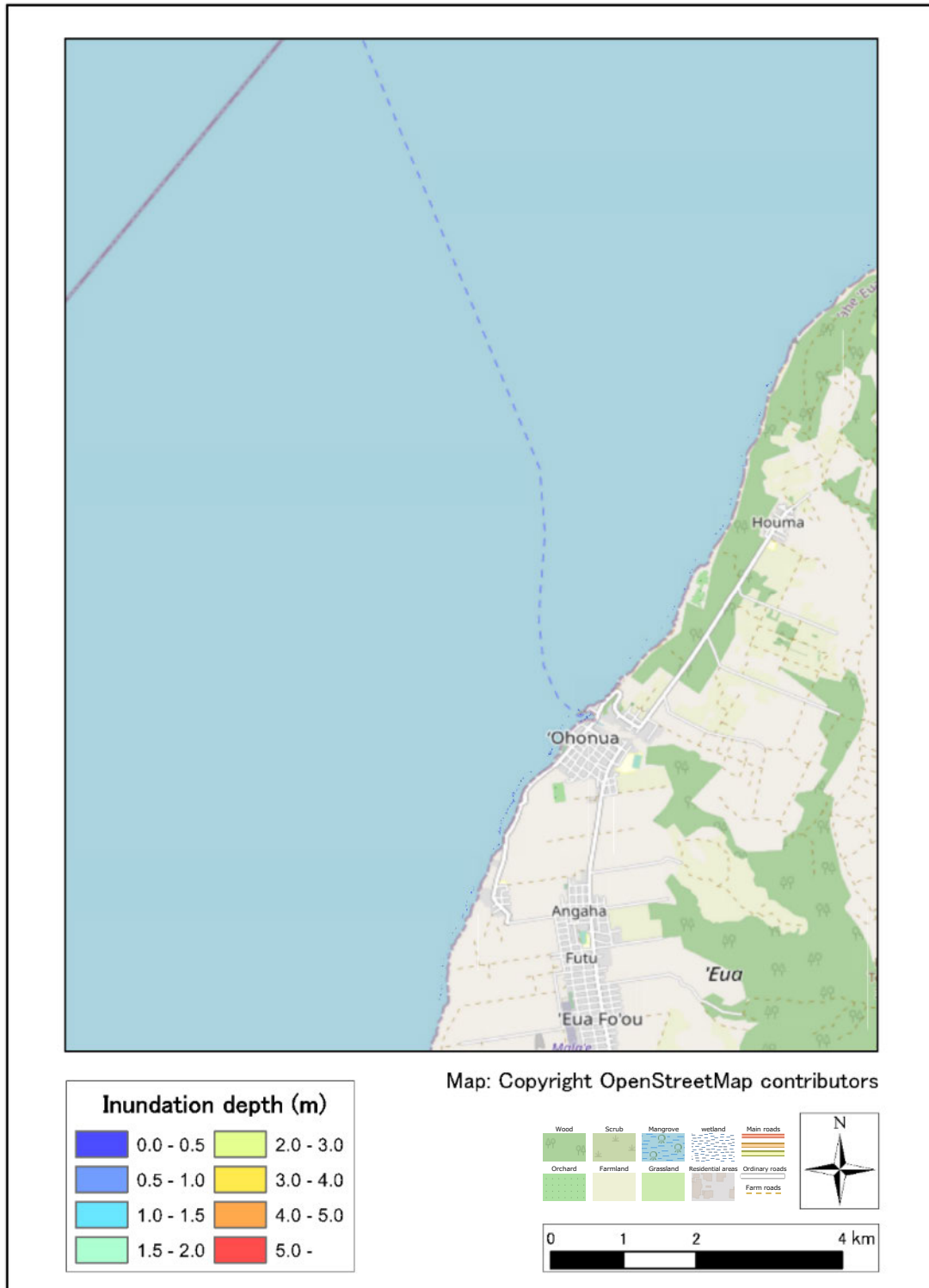
CASE: fault2009-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.54 最大浸水深分布図 (Fault 2009)

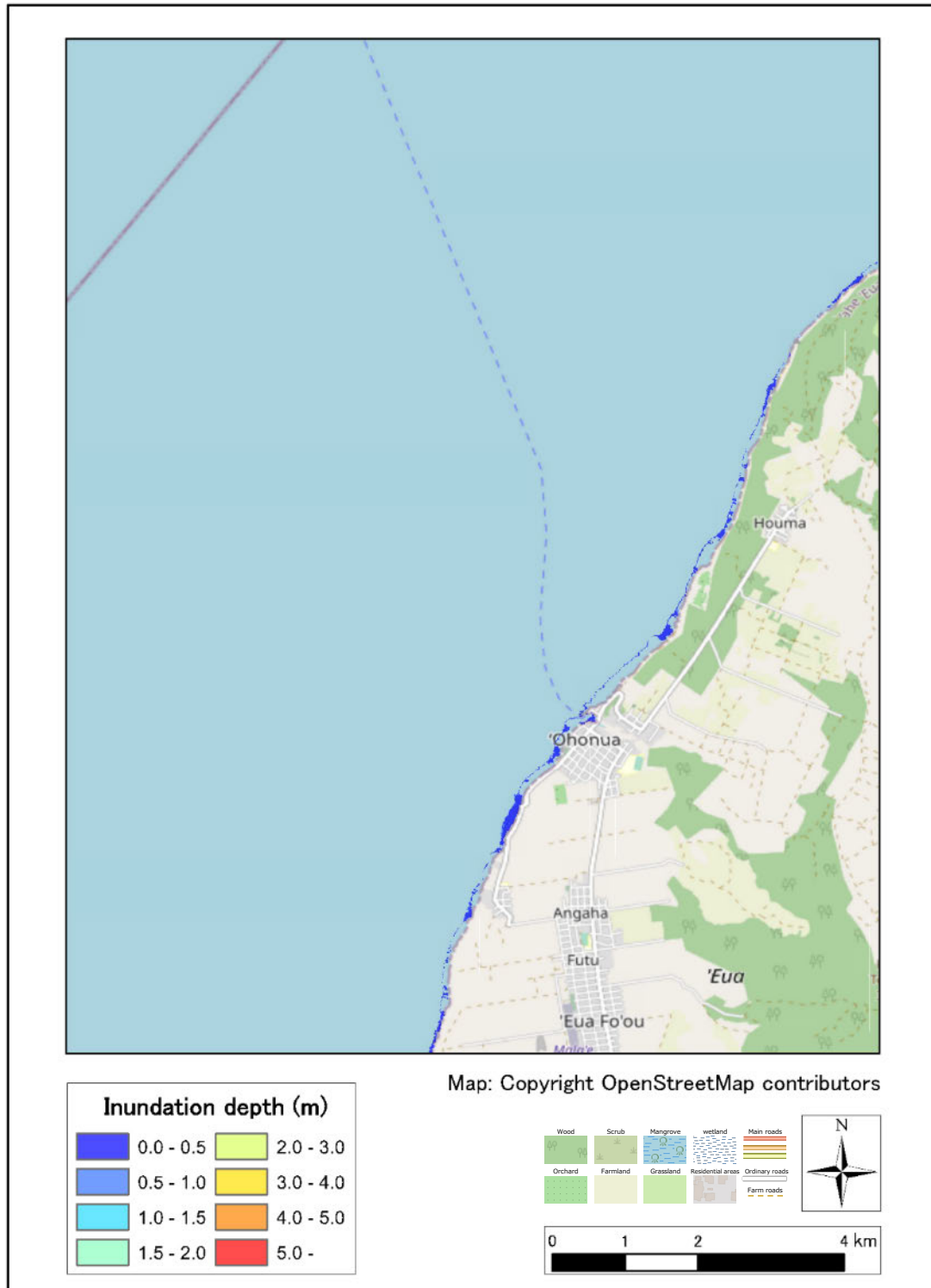
CASE: fault2018-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.55 最大浸水深分布図 (Fault 2018)

CASE: fault2021-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.56 最大浸水深分布図 (Fault 2021)

6) 津波到達時間分布図 (オホヌア、エウア島)

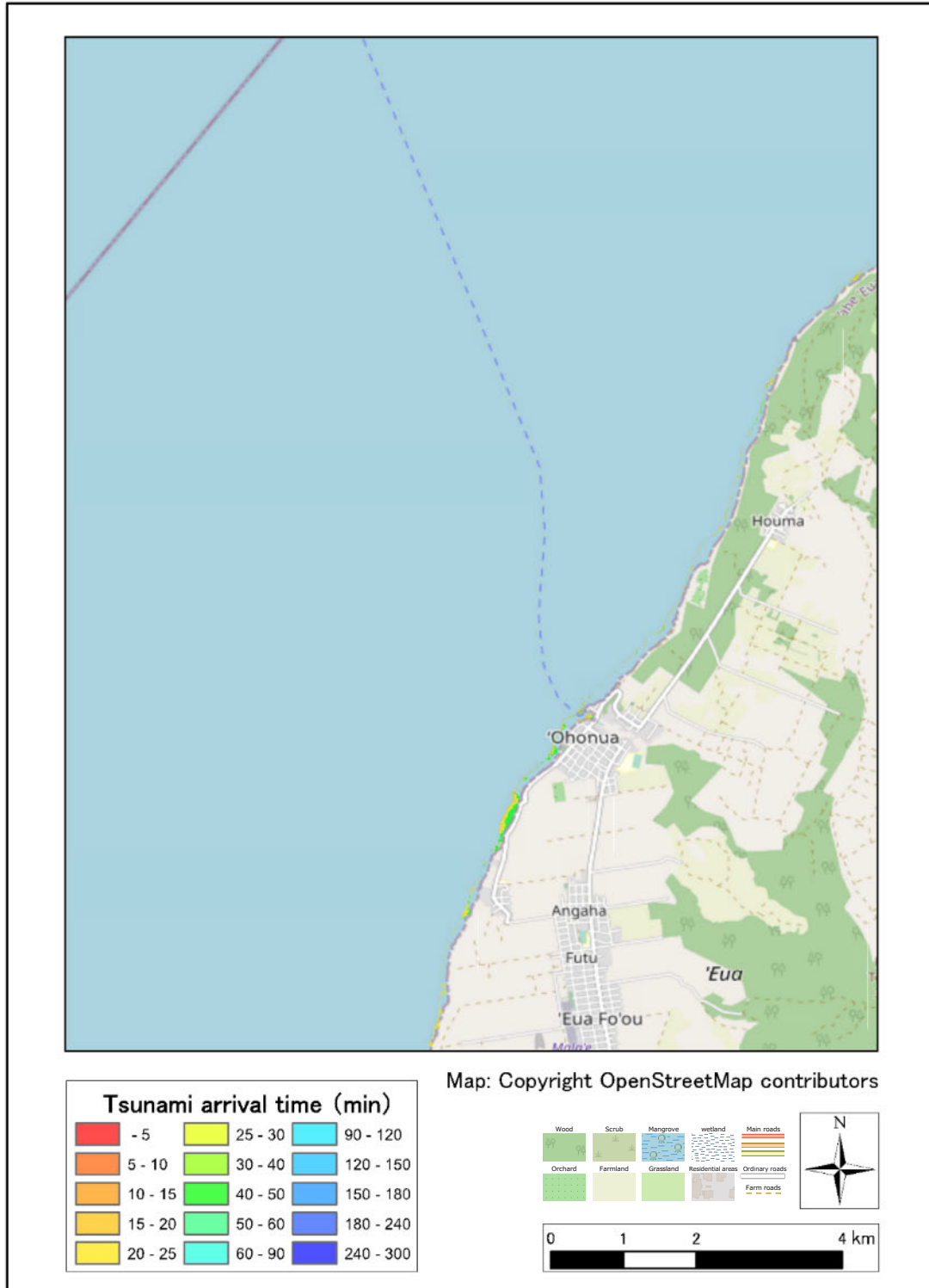
CASE: fault1976-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.57 津波到達時間分布図 (Fault 1976)

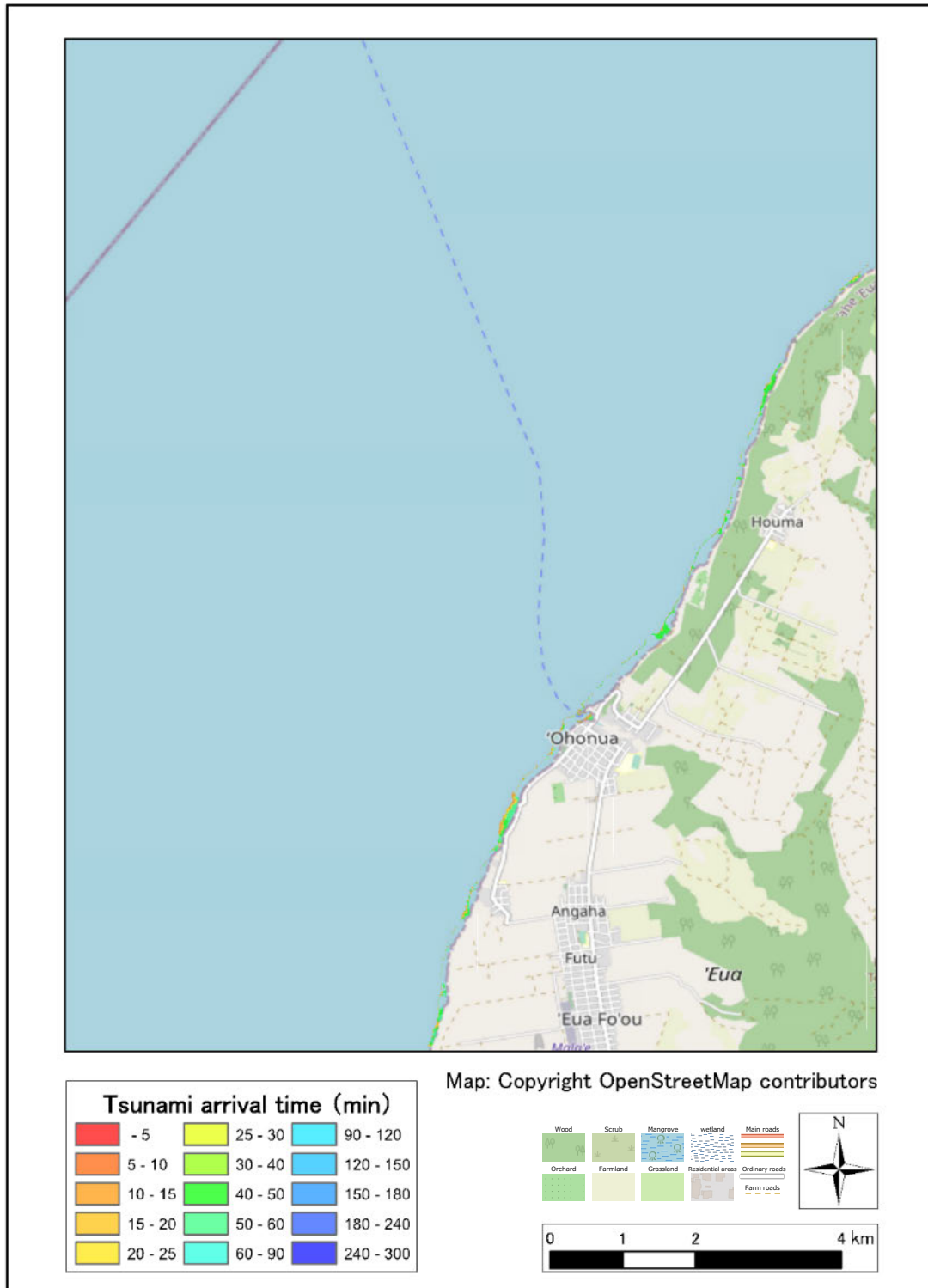
CASE: fault2006-1-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.58 津波到達時間分布図 (Fault 2006-1)

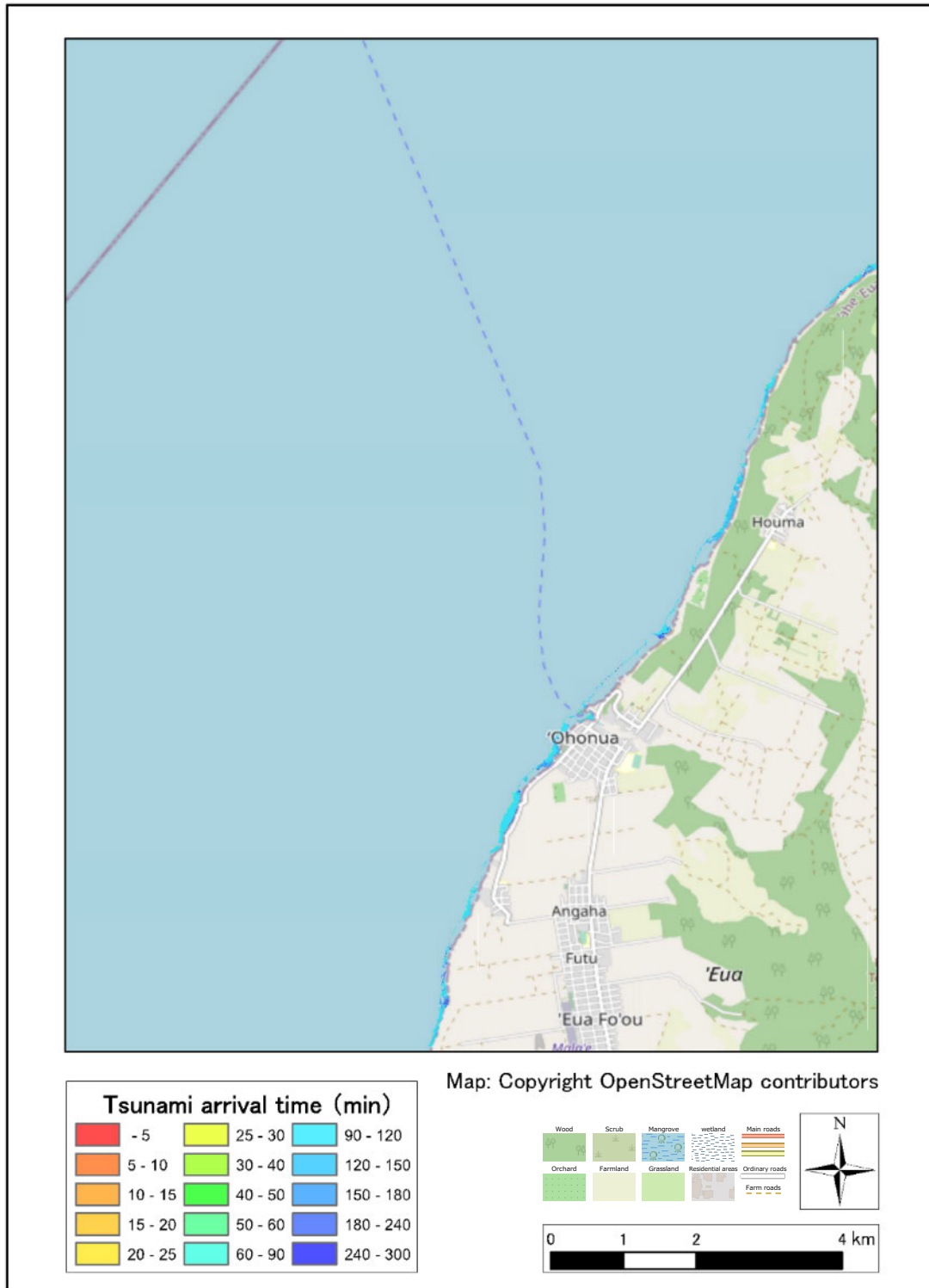
CASE: fault2006-2-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.59 津波到達時間分布図 (Fault 2006-2)

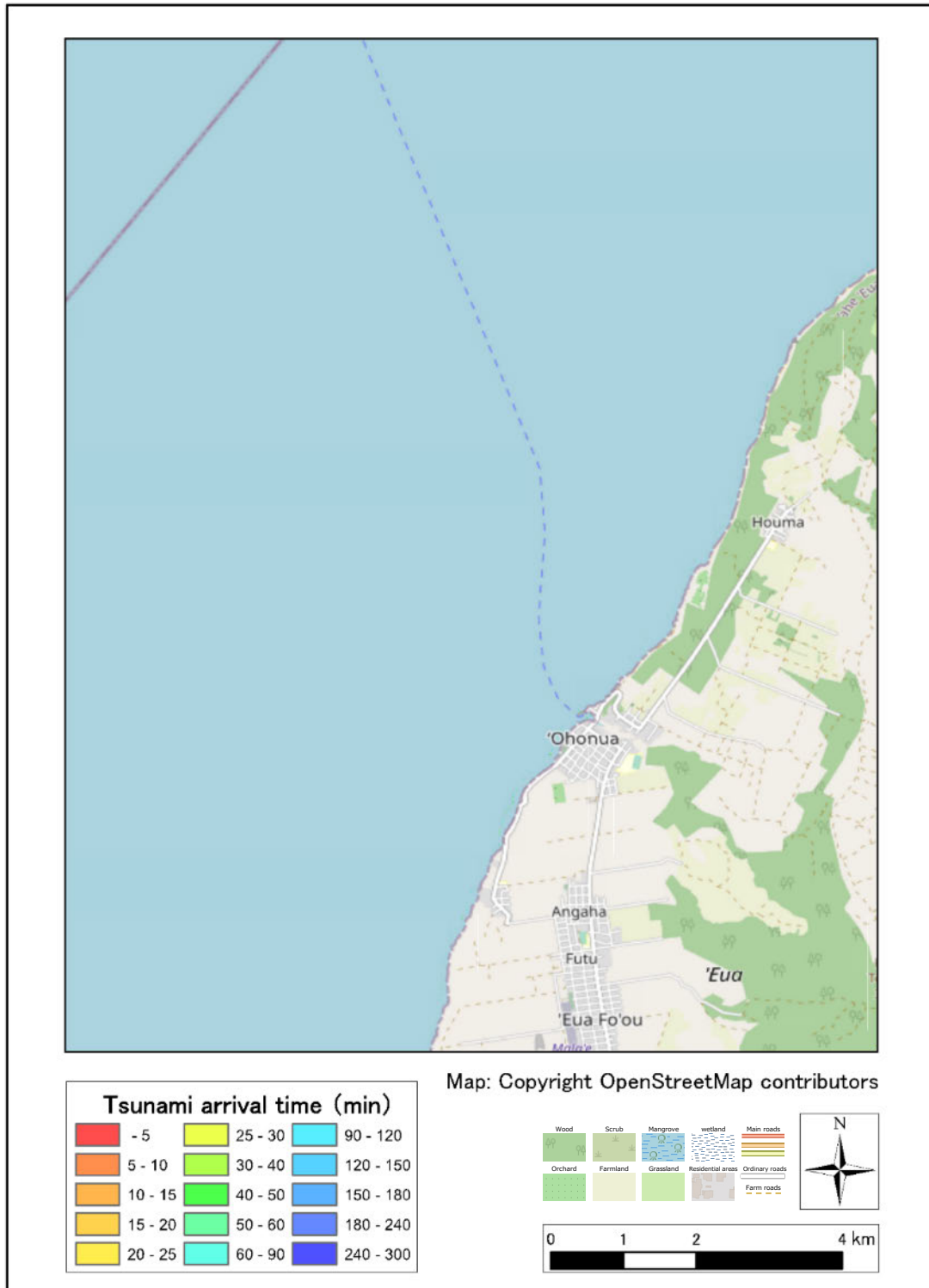
CASE: fault2009-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.60 津波到達時間分布図 (Fault 2009)

CASE: fault2018-2



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.61 津波到達時間分布図 (Fault 2018)

CASE: fault2021-2



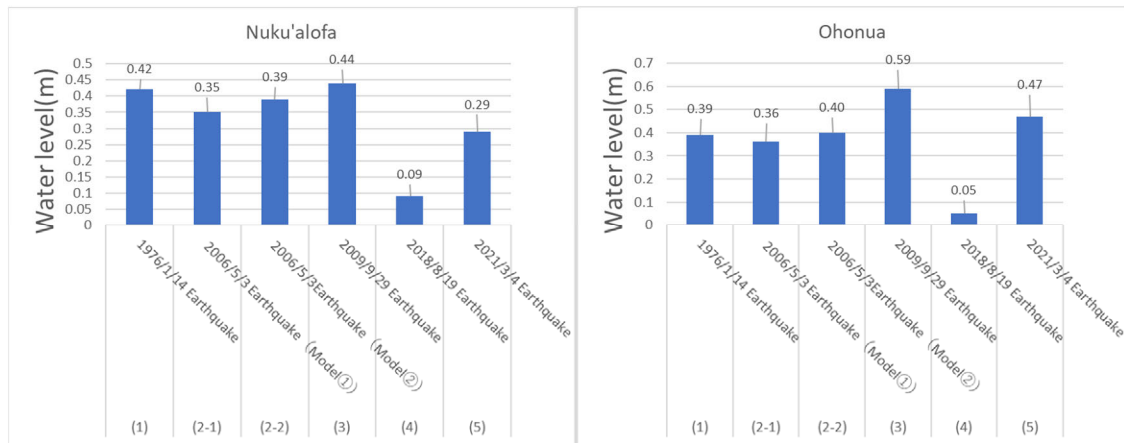
出典：JICA 調査団作成

図 2.7.62 津波到達時間分布図 (Fault 2021)

7) 津波水位の比較

地震性津波の水位の比較を下図に示す。

津波水位は、いずれも 1m 以下となっており、ここ 100 年間に発生した地震性津波の水位は低いと言える。



出典：JICA 調査団作成

図 2.7.63 地震性津波の水位の比較

2.7.2 防潮堤に対する解析

地震性津波については、前日のように水位が概ね 1m 以下であり、護岸のあるヌクアロファでは現況の護岸高を越えないと考えられる。従って、地震性津波については、護岸高を嵩上げする必要性は低いと言える。

2.8 ハザードレベルの検討

2.8.1 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、レベル 2 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 2.8.1 に示す。

表 2.8.1 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 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。

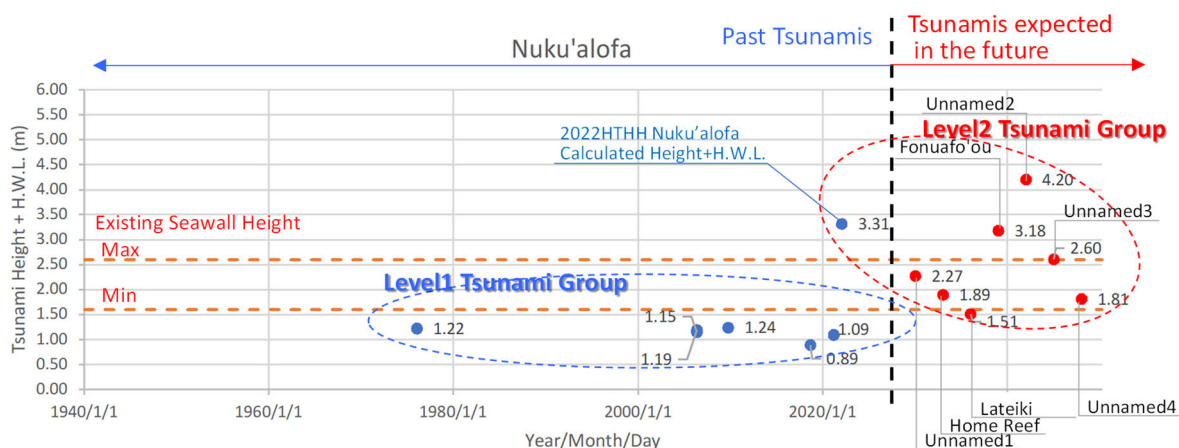
出典：JICA 調査団作成

(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 2.8.1 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.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 の津波と言える。

一方、2022 年のフンガトンガ・フンガハアパイ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 年のフンガトンガ・フンガハアパイ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、フンガトンガ・フンガハアパイ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、フンガトンガ・フンガハアパイ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 の津波（最大クラスの津波）に分類する。

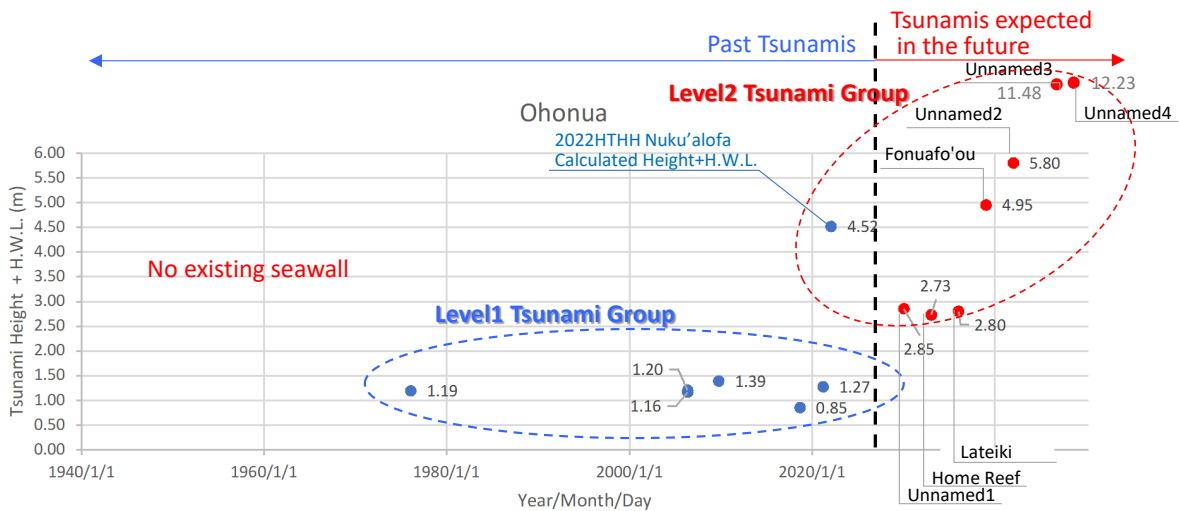


出典：JICA 調査団作成

図 2.8.1 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 の津波と言える。

一方、2022 年 1 月のフンガトンガ・フンガハアパイ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 年のフンガトンガ・フンガハアパイ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、フンガトンガ・フンガハアパイ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、フンガトンガ・フンガハアパイ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 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 2.8.2 オホヌアにおける津波のハザードレベルの分類

なお、本検討ではフンガトンガ・フンガハアパイ火山と同規模の火山性津波を検討したが、フンガトンガ・フンガハアパイ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。

2.9 ハザードレベル 2 の津波の解析

(1) ハザードレベル 2 の津波解析 (火山性津波)

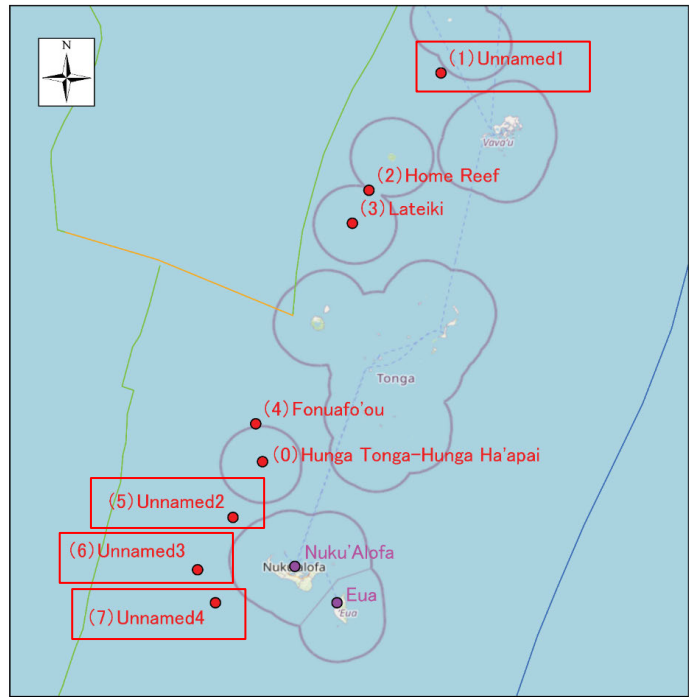
前項までの検討結果から、2022 年 1 月のフンガトンガ・フンガハアパイ火山と同規模の火山による津波が他の海底火山で発生した場合の津波はハザードレベル 2 に分類した。その中でもトンガタブ島、エウア島への影響が大きいケースについて検討する。検討結果について表 2.9.1、図 2.9.1 に示す。

表 2.9.1 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 の浸水域とする。浸水域の計算結果を図 2.9.2、図 2.9.3 に示す。

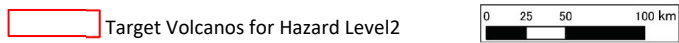
表 2.9.1 トンガタブ島・エウア島で浸水範囲・浸水深が卓越するケース (海底火山名)

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

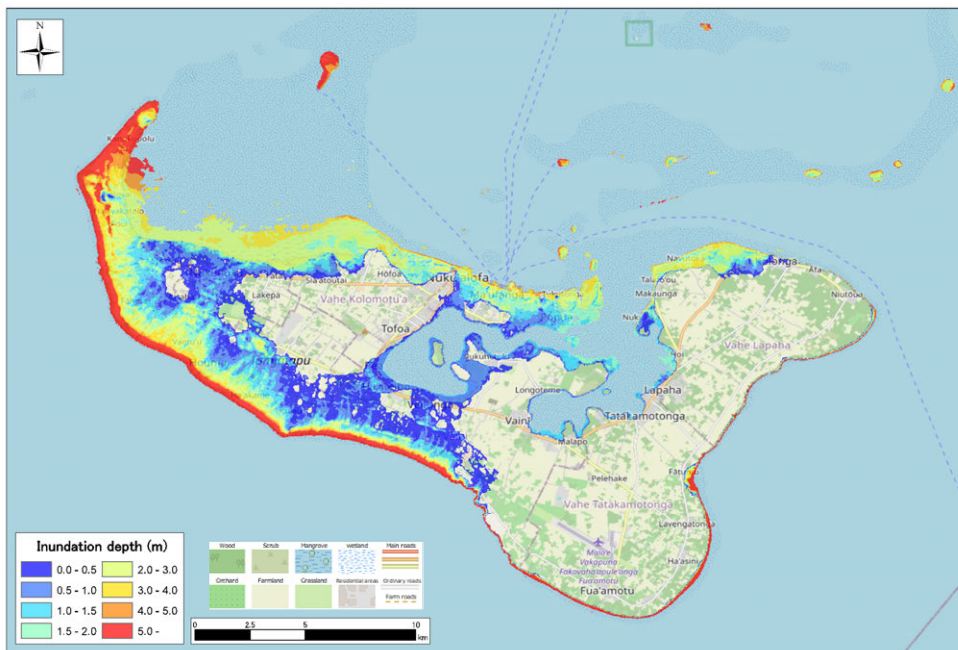


Map: Copyright OpenStreetMap contributors



出典：JICA 調査団作成

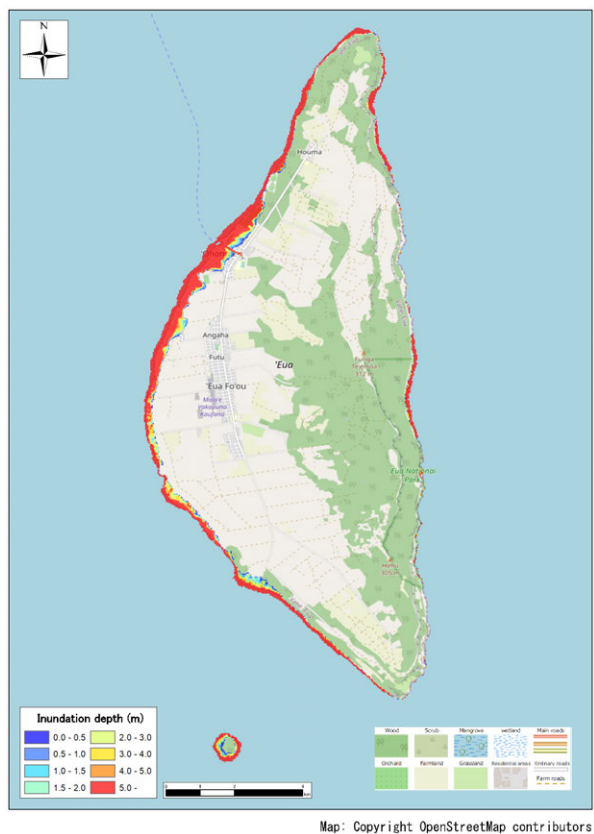
図 2.9.1 トンガタブ島・エウア島に影響が大きい火山



Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 2.9.2 トンガタブ島浸水想定図（火山性津波ハザードレベル 2）



出典：JICA 調査団作成

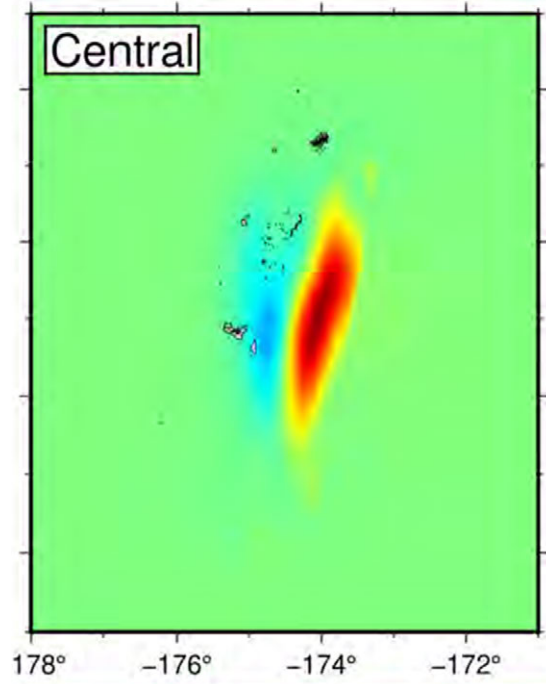
図 2.9.3 エウア島浸水想定図（火山性津波ハザードレベル 2）

(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。本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。

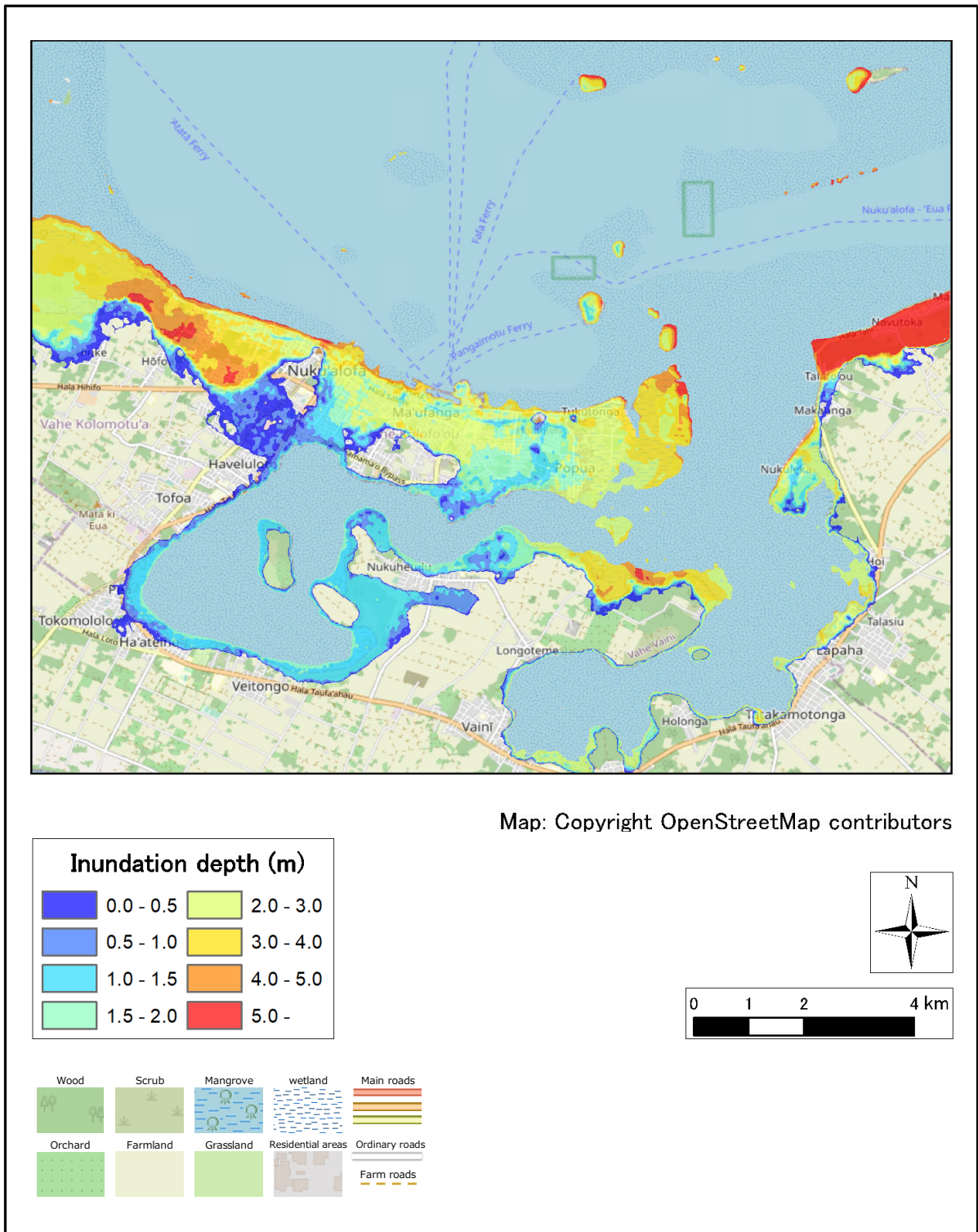
SOPAC の地震断層モデルのパラメータについては、明確な断層パラメータに関する情報が無いことから、初期水位分布を再現し、津波の入力波とする。初期水位分布を図 2.9.4 に示す。

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 2.9.5、図 2.9.6 に示す。



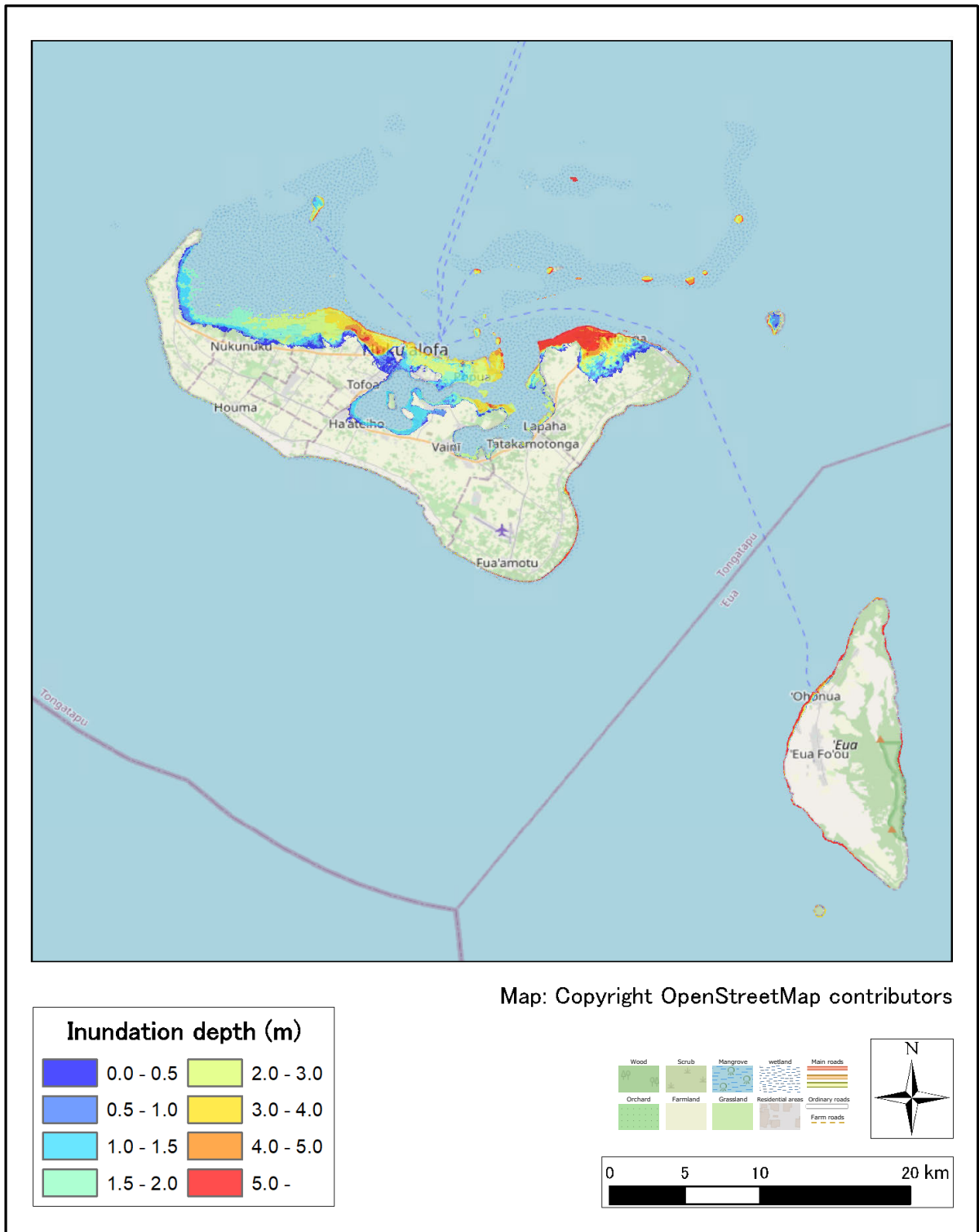
出典： Multi-Hazard Risk Assessment Tongatapu Interim Hazard Assessment Report – Tsunami, Asian Development Bank

図 2.9.4 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 2.9.5 トンガタブ島浸水想定図（地震性津波ハザードレベル 2）



出典：JICA 調査団作成

図 2.9.6 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. 高潮解析

3.1 検討フロー

高潮解析の実施フローを図 3.1.1 に示す。

本業務では、過去にトンガタブ島に顕著な影響があったサイクロンを抽出し、再現計算と確率高潮偏差を算定する。その上で、最大クラスのサイクロンについて検討する。



出典：JICA 調査団作成

図 3.1.1 高潮解析フロー

表 3.1.1 数値計算ケース

種別	サイクロン名	潮位条件	構造物条件	最小領域
再現計算	2018 ジータ	M.S.L.+0.00m	現況護岸	10m トンガタプ島
	2020 ハロルド			
	2010 レネー			
	2009 リン			
	1982 アイザック			
確率高潮偏差用の計算	1989 ジーナ	M.S.L.+0.00m	護岸なし	4050m
	1985 ドレーナ			
	1982 アイザック			
	1981 名前なし86			
	1981 名前なし47			
	1981 ベッツィー			
	1979 レスリー			
	1977 ぱっと			
	1975 ベティ			
	1973 エレノア			
	1972 ヘレン			
	1970 ギリアン100			
	1970 ギリアン98			
将来予測計算	Isaacコース	M.S.L.+0.8m	現況護岸	10m トンガタプ島
	最大旋衡半径コース	M.S.L.+0.99m		
	気圧低下 (930hpa一定)	M.S.L.+1.12m		
	最大速度	M.S.L.+1.24m		
	Isaacコース	M.S.L.+0.8m	現況護岸	10m トンガタプ島
	直上コース	M.S.L.+0.99m		
	気圧低下 (930hpa一定)	M.S.L.+1.12m		
	最大速度	M.S.L.+1.24m		
護岸に対する検討	1982 アイザック	M.S.L.+0.8m	現況護岸	10m トンガタプ島
			対策護岸 M.S.L.+3.0m	
		M.S.L.+1.12m	現況護岸	
			対策護岸 M.S.L.+3.0m	

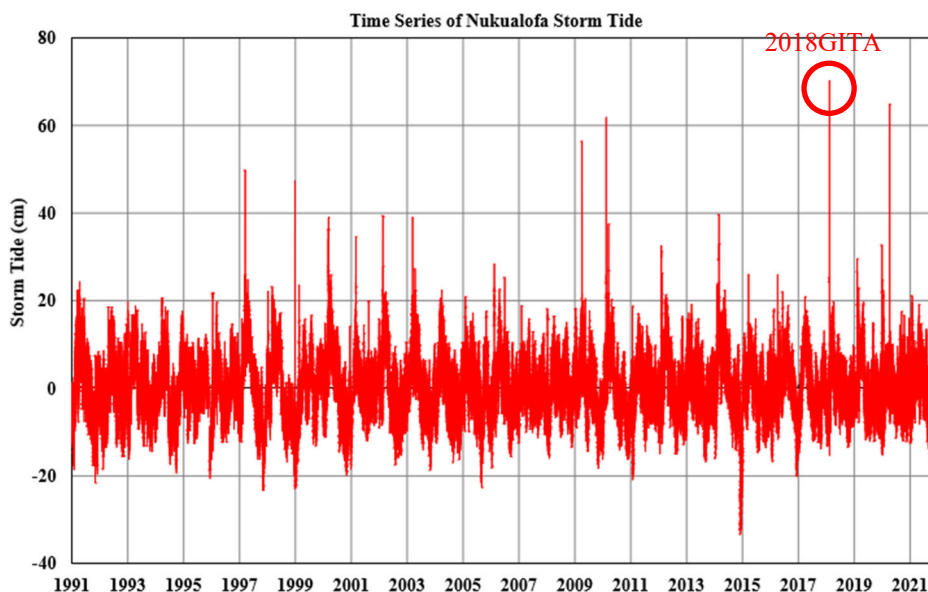
出典：JICA 調査団作成

3.2 高潮再現計算

3.2.1 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 3.2.1 に示す。また、気象擾乱別の高潮偏差について表 3.2.1 に示す。

これから、1991年から2021年までトンガに来襲したサイクロンの中では、2018年2月に来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 3.2.1 高潮潮位偏差 (1991-2021, ヌクアロファ)

表 3.2.1 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 GITA

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

3.2.2 解析方法

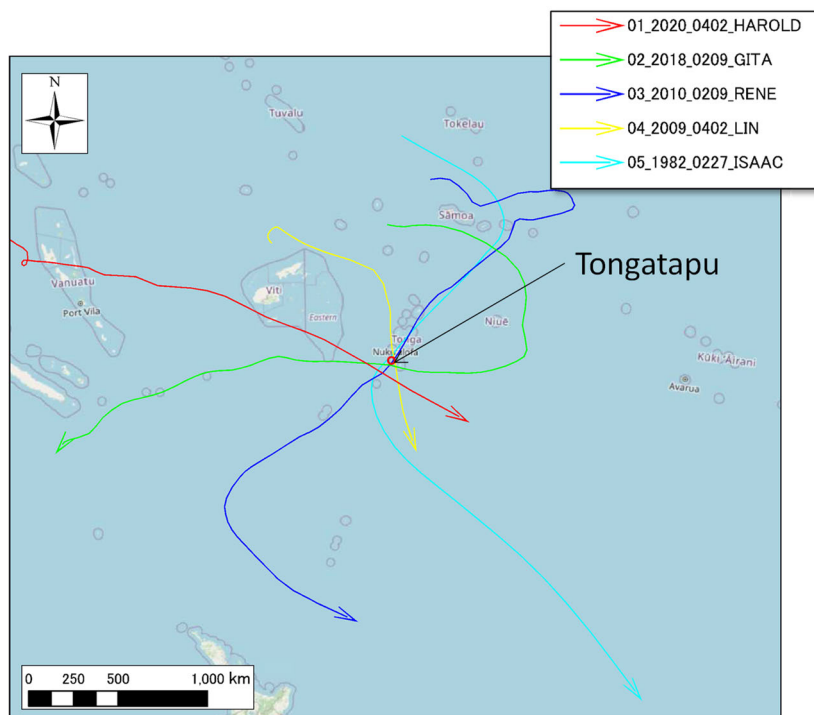
(1) 検討対象サイクロンの想定

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 3.2.2 に示す。基本的には、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、IBTrACS⁵を使用した。

表 3.2.2 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 3.2.2 計算対象のサイクロンコース

⁵ IBTrACS(<https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive>)

(2) 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。STOC の概要を図 3.2.3 に示す。

Numerical Analysis of Storm Surge Hazard Storm Surge Inundation Simulator

STOC-ML

The calculation model is the same model as for tsunamis.

- Developed by Tomita and Kakinuma (2005).*
- A quasi-3-dimensional model for calculating fluid dynamics that result from a tsunami by using hydrostatic approximation

○ Continuity Equation ○ Free Surface Equation

$$\frac{\partial}{\partial x}(y_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(y_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(y_z w) = 0 \quad y_x \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^{\eta} y_x u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^{\eta} y_y v dz = 0$$

○ Momentum Conservation Equation (Navier-Stokes equation) x direction

$$y_x \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(y_x u u) + \frac{\partial}{\partial y}(y_y u v) + \frac{\partial}{\partial z}(y_z u w) - y_x f_x = 0$$

$$= -y_x \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(y_x y_x z \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(y_x y_y \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(y_x y_z \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right)$$

*STOC-ML calculates with the continuity equation without solving the z-direction momentum conservation equation

○ Hydrostatic Pressure Equation

$$p(z) = p_{atm} - \rho g(\eta - z)$$

Item	Description
Fundamental equation	An equation extended from the Navier-Stokes equation by using the Porous approximation for 3-dimensional incompressible viscous fluids. - Equation of continuity - Equation of momentum conservation - Equation for free surfaces - Hydrostatic conditions (STOC-ML)
Physical model	- Run-up tip model - Transparent boundary model - Overflow model : Honma's Formula - Model for a change in water level due to an earthquake
Discretization	- Difference equations using staggered mesh - Shape approximation using the porous model
Advection term	- Second-order accurate central-differencing scheme - First-order accurate upwind scheme - Hybrid difference, weighted average of the above parameters
Time integration	- Leap-frog method - SMAC (Simplified Marker and Cell) method
Method to solve simultaneous linear equations	- MILU-Bi-CGSub method

* 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 Airport Research Institute, Vol.44, No.2, pp.63-98,2005.

Source : Prof.Arikawa, Chuo University 3

出典 : 出典 : 国内支援委員会メンバー資料

図 3.2.3 STOC の概要

(3) 数値解析条件

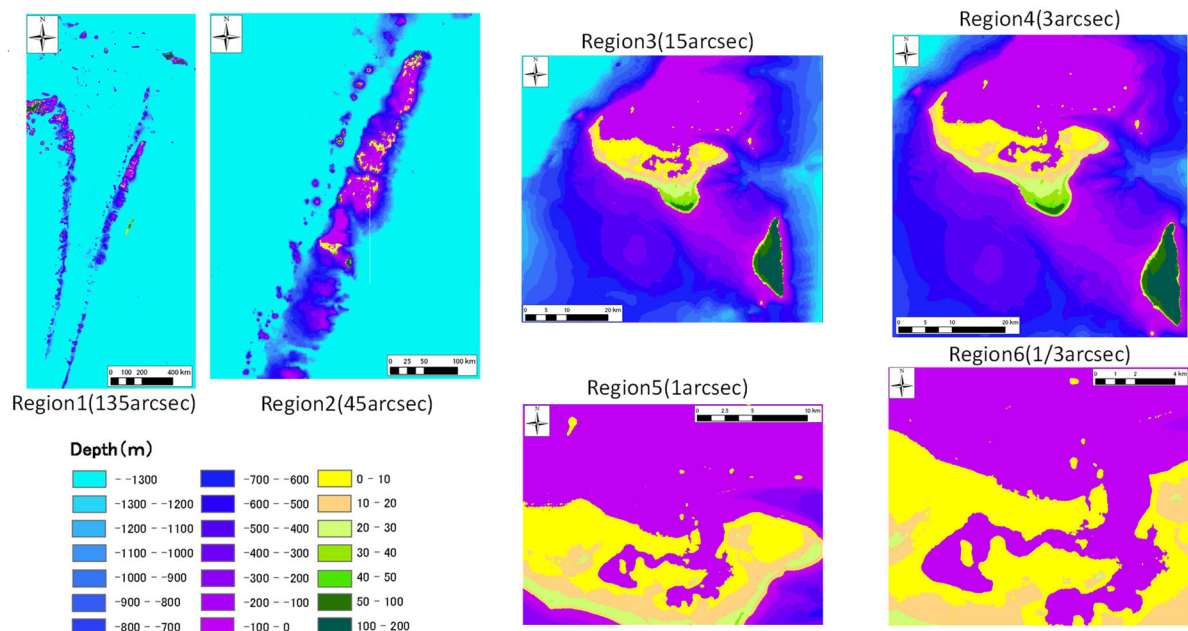
計算条件一覧を

表 3.2.3 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 3.2.4 に示す。

表 3.2.3 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) ⁶ サイクロン半径: Kato(2005) ⁷
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



出典：JICA 調査団作成

図 3.2.4 計算地形モデル（高潮）

⁶ 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.

⁷ Kato, F (2005); Study on Risk Assessment on Storm Surge Flood, TECHNICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management, No.275

(4) 数値解析ケース

数値解析ケースは次の通りである。

表 3.2.4 数値解析ケース

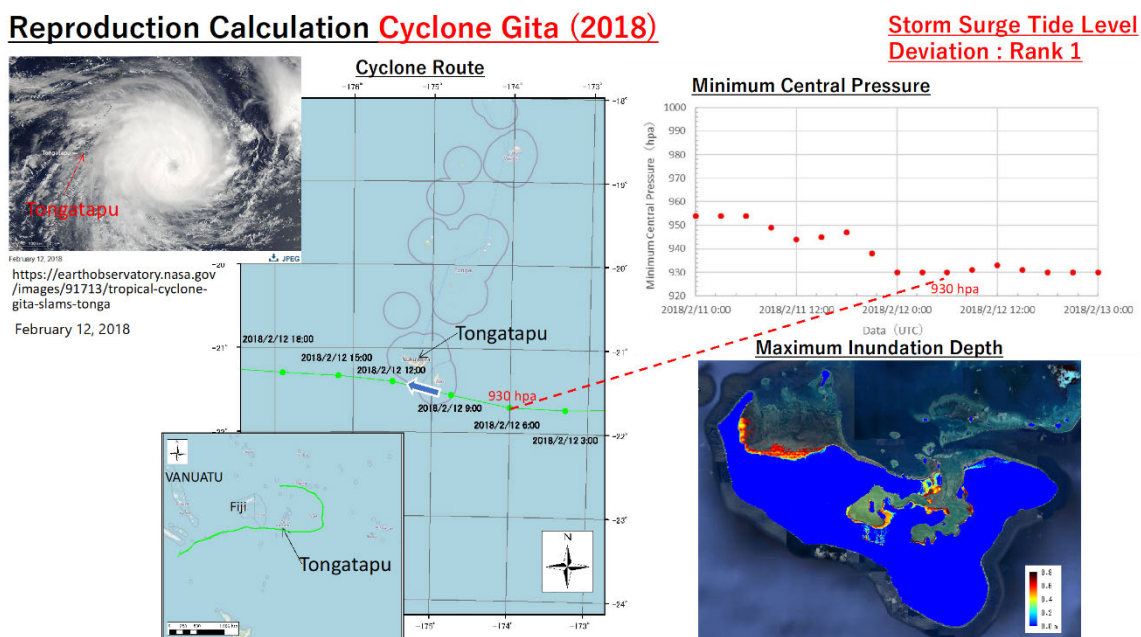
年	名称	計算期間	
		開始	終了
2018	ジータ	2018/02/11 18:00	2018/02/12 18:00
2020	ハロルド	2020/04/08 00:00	2020/04/09 00:00
2010	レネー	2010/02/14 18:00	2010/02/15 18:00
2009	リン	2009/04/04 06:00	2009/04/05 06:00
1982	アイザック	1982/03/02 09:00	1982/03/03 09:00

出典：JICA 調査団作成

3.2.3 解析結果

(1) 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 3.2.5～図 3.2.9 に示す。

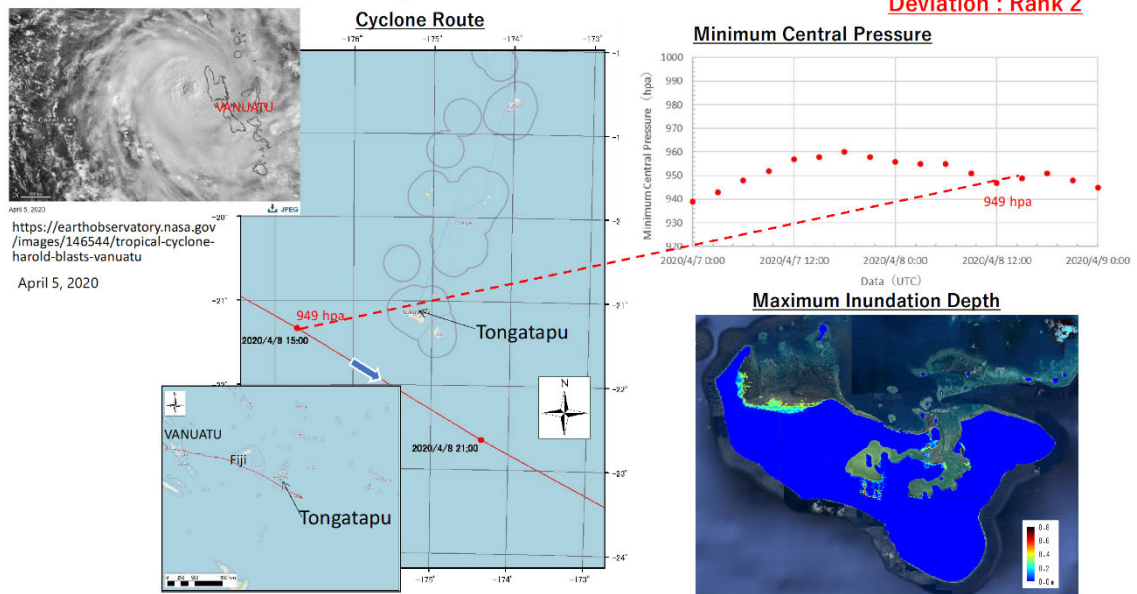


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.5 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

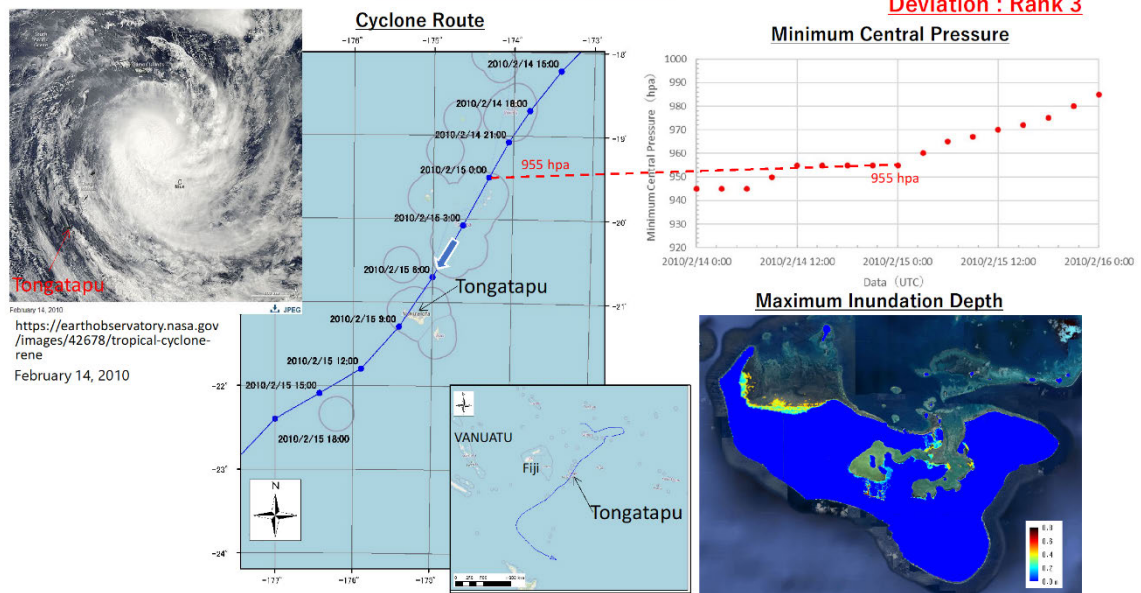


出典 : JICA 調査団作成

図 3.2.6 サイクロン Harold (2020) の再現計算結果

Reproduction Calculation Cyclone Rene (2010)

Storm Surge Tide Level Deviation : Rank 3

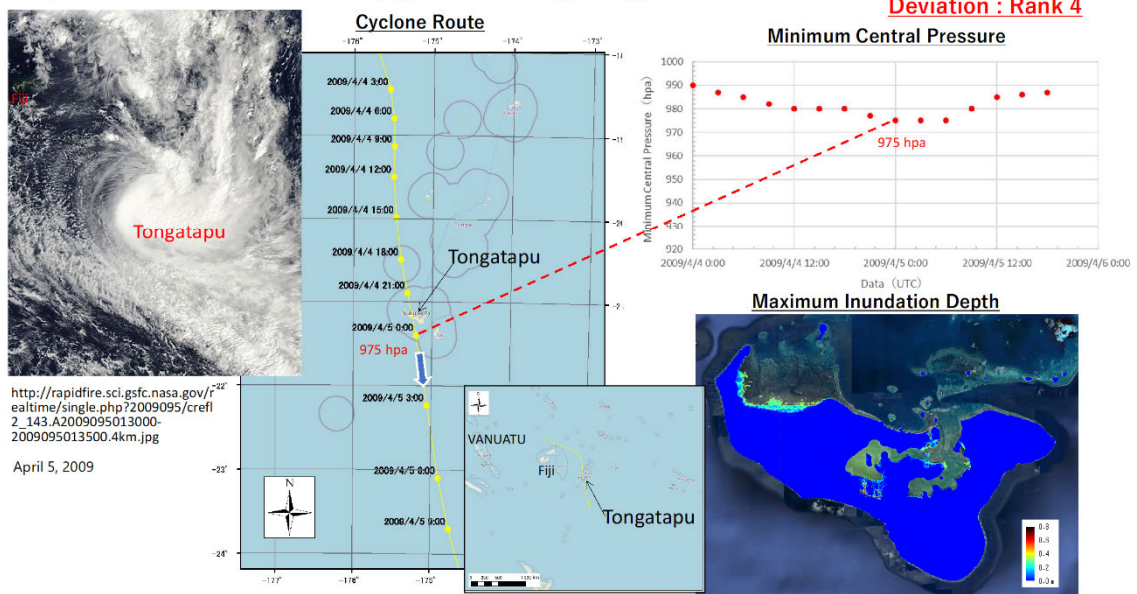


出典 : JICA 調査団作成

図 3.2.7 サイクロンレネー (2010) の再現計算結果

Reproduction Calculation **Cyclone Lin (2009)**

Storm Surge Tide Level Deviation : Rank 4

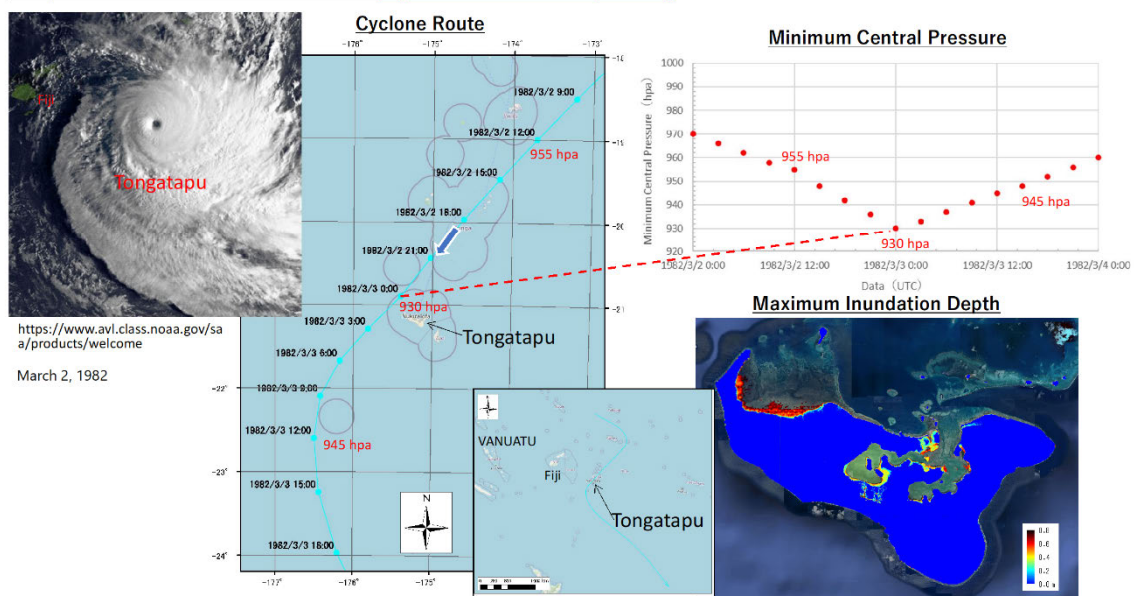


出典：JICA 調査団作成

図 3.2.8 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

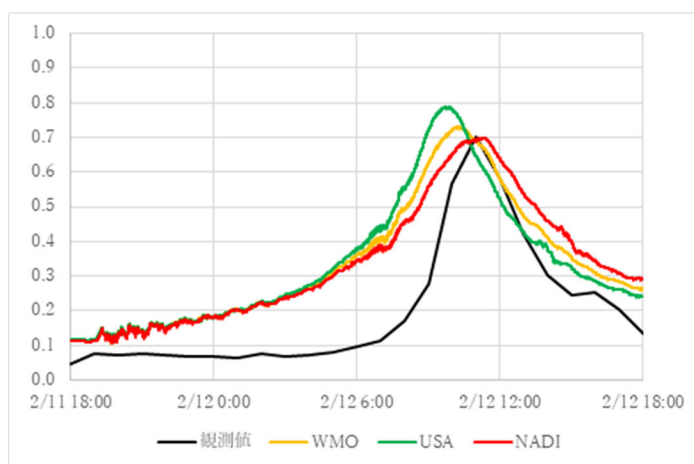
図 3.2.9 サイクロンアイザック (1982) の再現計算結果

3.3 再現性の評価

3.3.1 再現性の検討

(1) ジータ

ジータのサイクロン経路情報は、WMO・USA・NADI と 3 種類あり、NADI で計算すると、修正なしで観測値とよく一致した。

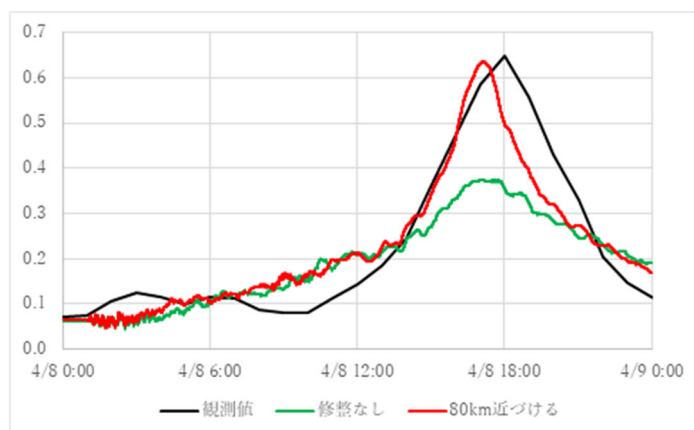


出典：JICA 調査団作成

図 3.3.1 サイクロンジータ（2018）の再現計算結果

(2) ハロルド

ハロルドは検討点から離れたところを通過するため、経路を検討点に近づけることで潮位偏差を大きくした。検討点に 80km 近づけるように経路変更することでよく一致した。

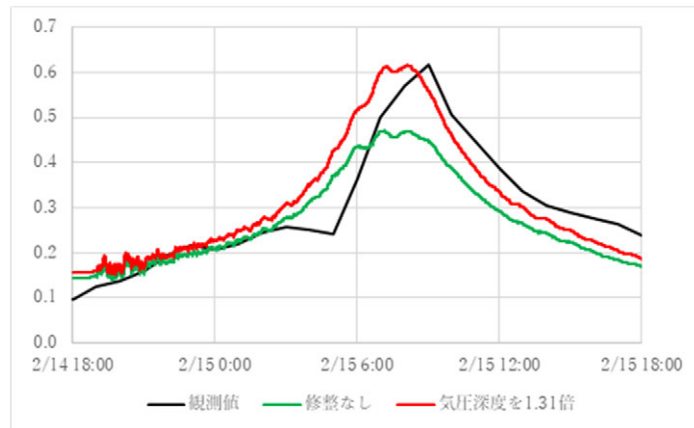


出典：JICA 調査団作成

図 3.3.2 サイクロンハロルド（2020）の再現計算結果

(3) レネー

レネーは検討点付近を通過するため、経路を変更しても潮位偏差は大きくなり、気圧深度を大きくすることで、観測値に近づけた。気圧深度を 1.31 倍することでよく一致した。

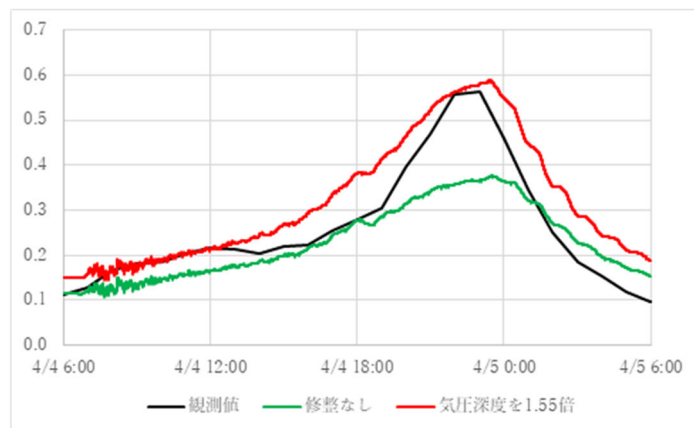


出典：JICA 調査団作成

図 3.3.3 サイクロンレネー（2010）の再現計算結果

(4) リン

リンは検討点付近を通過するため、経路を変更しても潮位偏差は大きくなり、気圧深度を大きくすることで、観測値に近づけた。気圧深度を 1.55 倍することでよく一致した。

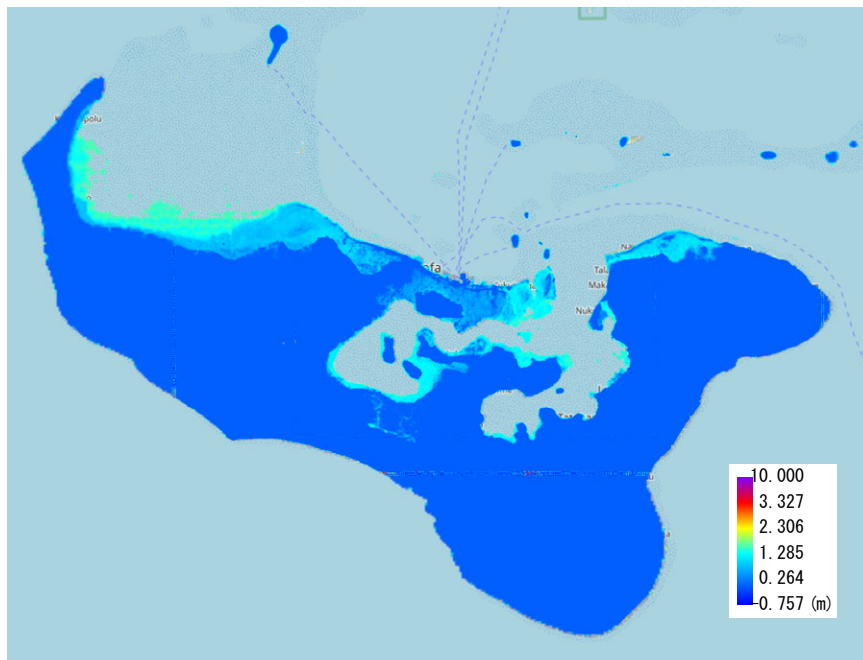


出典：JICA 調査団作成

図 3.3.4 サイクロンリン（2009）の再現計算結果

(5) アイザック

アイザックは潮位偏差の観測値が無いため、最大浸水深分布図を作成し、国内支援委員会の最大浸水深分布図と比較した。この計算でのみ、潮位を 0.8m として計算を行った。



出典：JICA 調査団作成

図 3.3.5 サイクロンアイザック（1982）の再現計算結果

3.3.2 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 3.3.6 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。

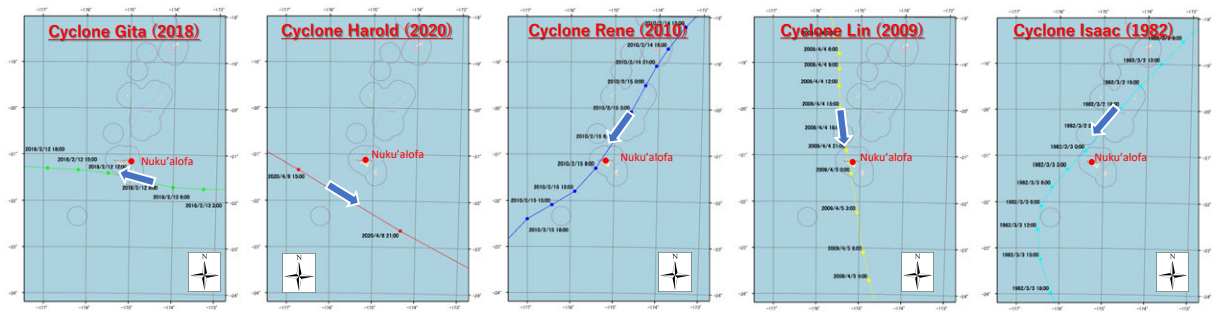
一般的に、サイクロンがトンガタブ島の近くを通過する場合に高潮が高くなる。また、サイクロンの進行方向と同じ方向の風が強くなると考えられることから、サイクロンの進行方向に対して左側にトンガタブ島が位置する場合の場合に風が強くなり、高潮も高くなると考えられる。

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ブ島の直上～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ブ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ブ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ブ島南側をゆっくりと通過し、トンガタブ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、トンガタブ島（Nuku' alofa）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 3.3.6 対象サイクロンのコースの比較

3.4 簡易高潮計算及び確率偏差の算定

3.4.1 確率高潮偏差の検討

対象サイクロンの抽出

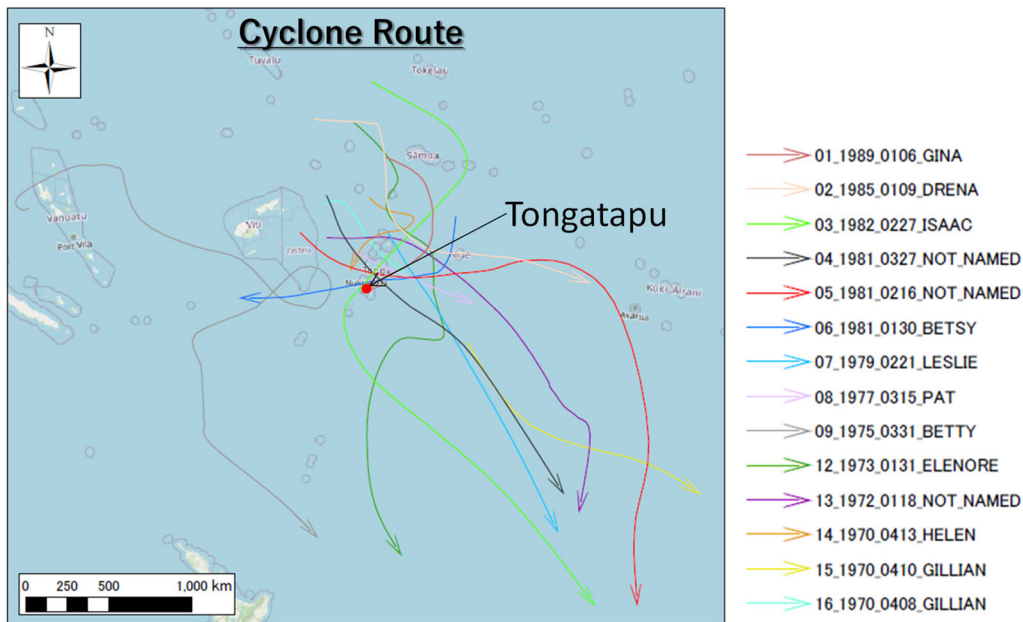
トンガタブ島（Nuku'alofa）での潮位観測期間は、1991年以降で30年間となっており、確率潮位偏差を算定するための統計期間としてはやや短い。従って、1991年以前でトンガタブ島に影響を与えたと考えられるサイクロンを抽出し、高潮潮位偏差の計算を行うことで統計解析のデータを補うこととする。

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3.4.1、図3.4.1以下に示す。

表 3.4.1 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 3.4.1 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)

1) 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 3.4.2 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 3.4.3 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

2) 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 3.4.4 に示す。また、確率潮位偏差算定結果を表 3.4.5、図 3.4.2 に示す。確率潮位偏差は、100 年間確率で 80cm となった。

表 3.4.4 極値統計入力値

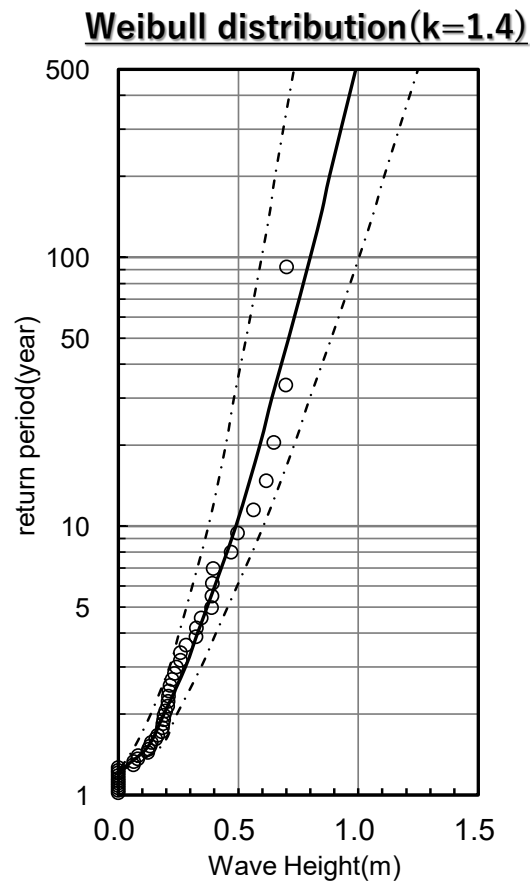
No.	Year	Max Storm surge deviation at Nuku'alofa (m)	No.	Year	Max Storm surge deviation at Nuku'alofa (m)
1	1970	0.13	22	2002	0.39
2	1972	0.06	23	2003	0.39
3	1973	0.08	24	2004	0.23
4	1975	0.14	25	2005	0.21
5	1977	0.13	26	2006	0.28
6	1979	0.08	27	2007	0.19
7	1981	0.16	28	2008	0.18
8	1982	0.70	29	2009	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 3.4.5 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 3.4.2 極値統計結果グラフ (確率高潮潮位偏差)

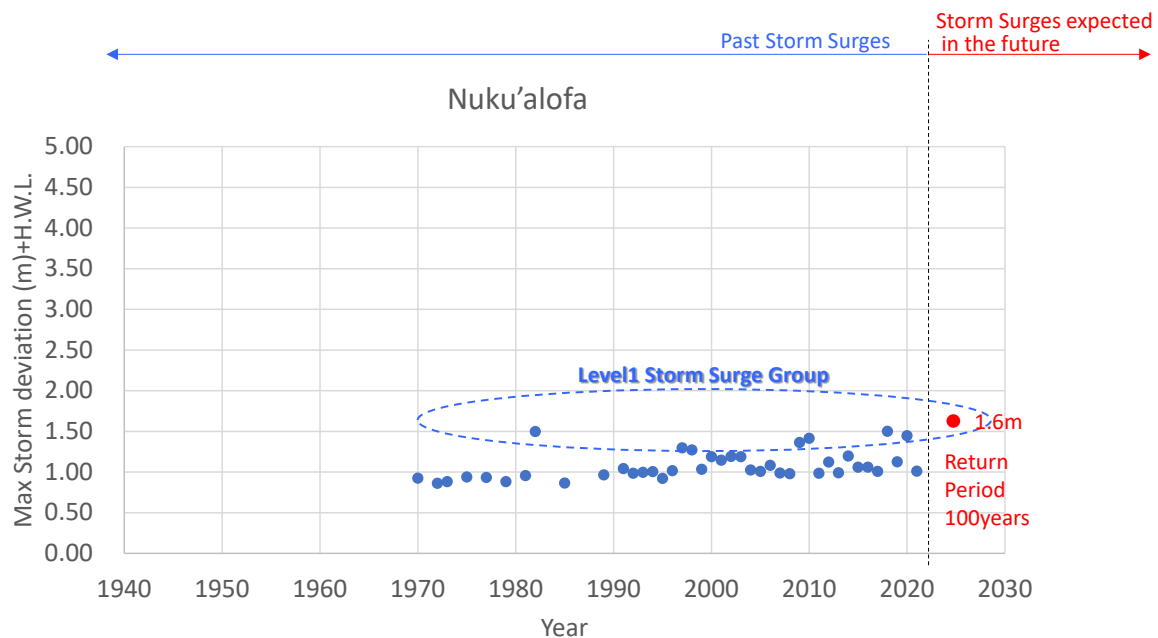
3.5 高潮将来予測計算

3.5.1 ハザードレベルの検討

(1) 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 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 3.5.1 ニクアロファにおける高潮のハザードレベルの分類

表 3.5.1 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

(2) 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。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 3.5.2 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 = <u>M.S.L.+1.0m</u>	-
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

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。

3.5.2 ハザードレベル 2 の高潮・津波検討

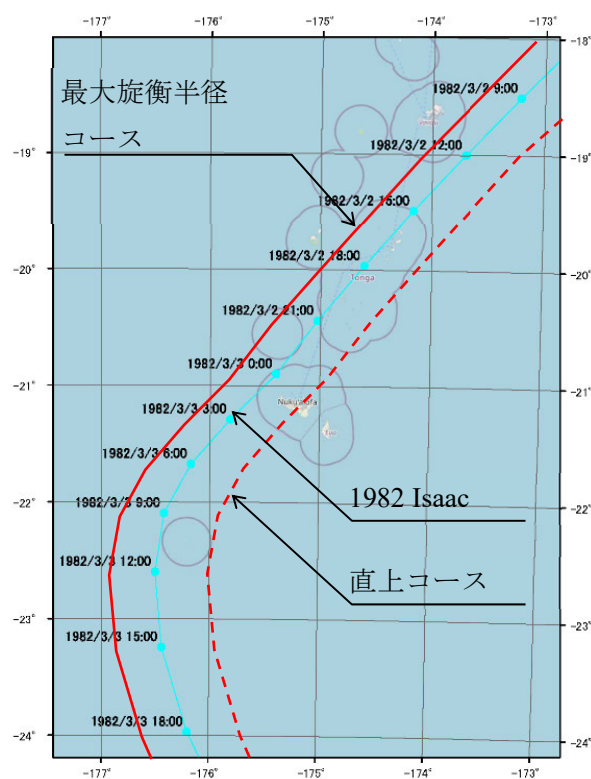
(1) ハザードレベル 2 高潮条件の設定

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 3.5.2）。
- 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 3.5.2）。
- 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 3.5.3 に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 3.5.2 最大クラスのサイクロン想定コース

表 3.5.3 計算条件 (ハザードレベル2 高潮)

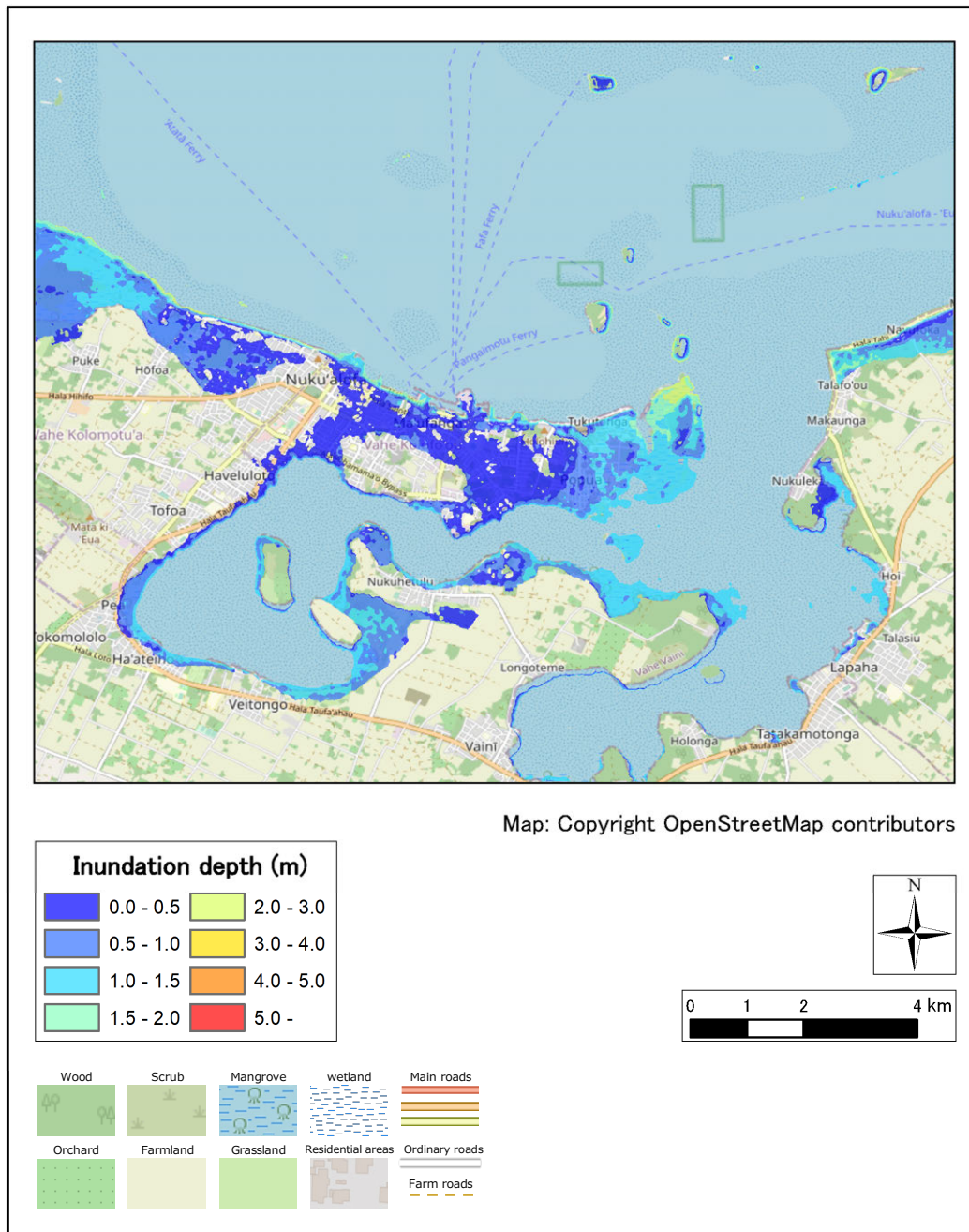
項目	計算条件
メッシュ構成	Region1 (135秒 (約 4,050m) メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region2 (45秒 (約 1,350m) メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region3 (15秒 (約 450m) メッシュ) : サイクロン発達範囲
	Region4 (3秒 (約 90m) メッシュ) : トンガタブ島
	Region5 (1秒 (約 30m) メッシュ) : トンガタブ島
	Region6 (1/3秒 (約 10m) メッシュ) : トンガタブ島
解析手法	STOC-ML (Tomita and Kakinuma, 2005)
対象サイクロンコース	2018 ジータと同じコースを平行移動したコース <ul style="list-style-type: none"> 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

(2) ハザードレベル2 高潮の計算結果

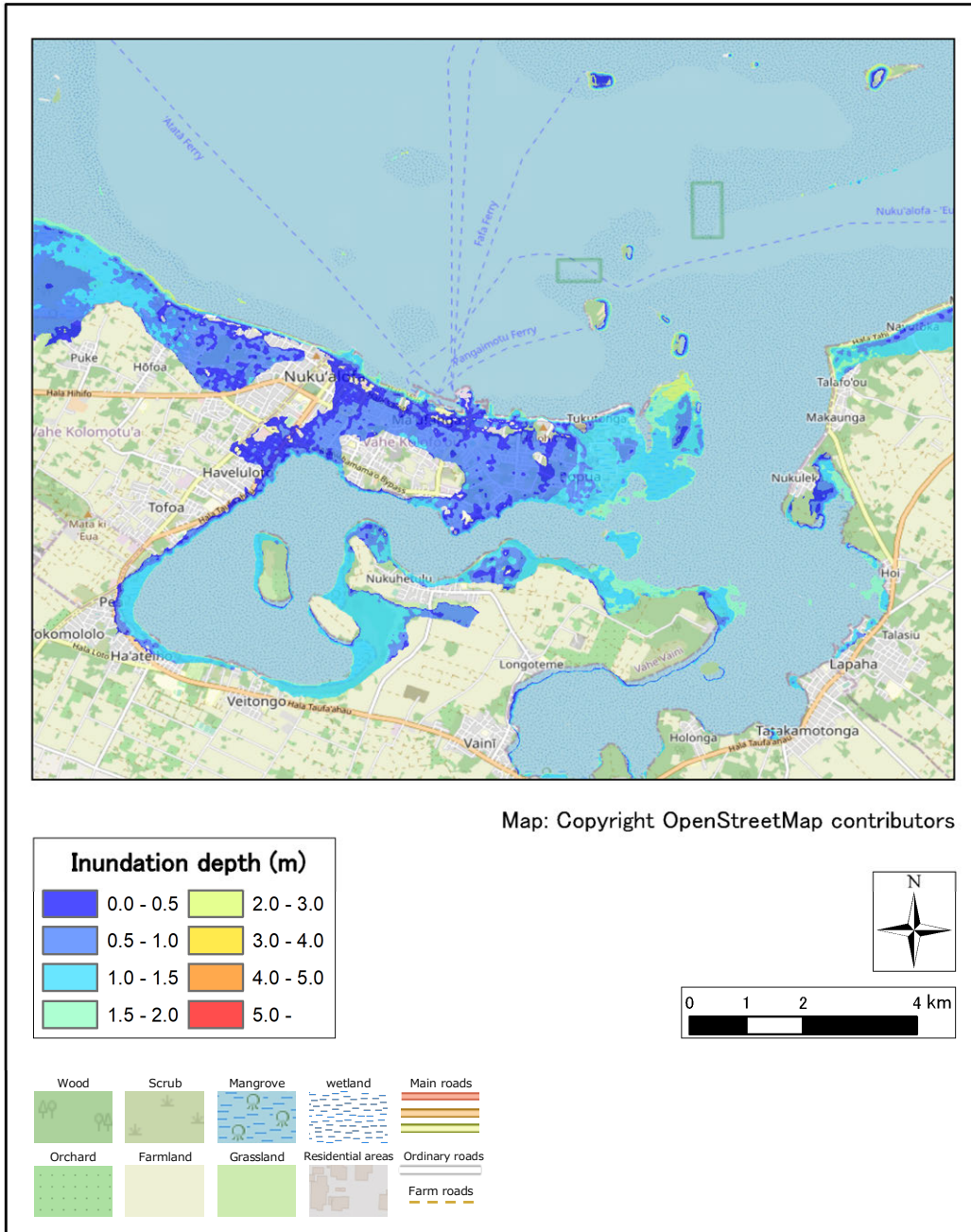
上記の設定で計算した高潮浸水域について図 3.5.3～図 3.5.4 に示す。結果として、直上コースの方が浸水範囲・浸水深が大きくなった。トンガタブ島は島であり、吹き寄せにより高潮水位が上がるような地形（例えば、V字型の湾等）ではないためと考えられる。

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 3.5.3 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）



出典：JICA 調査団作成

図 3.5.4 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）

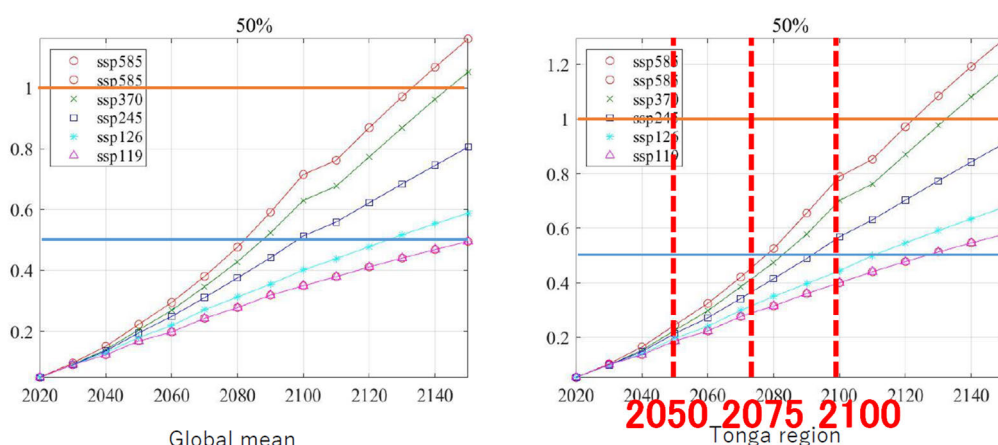
(3) 気候変動による海面上昇の影響

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°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シナリオの検討を行う。

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 3.2.19 と同じである。

計算結果を図 3.5.6～図 3.5.7 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。

Sea-level rise



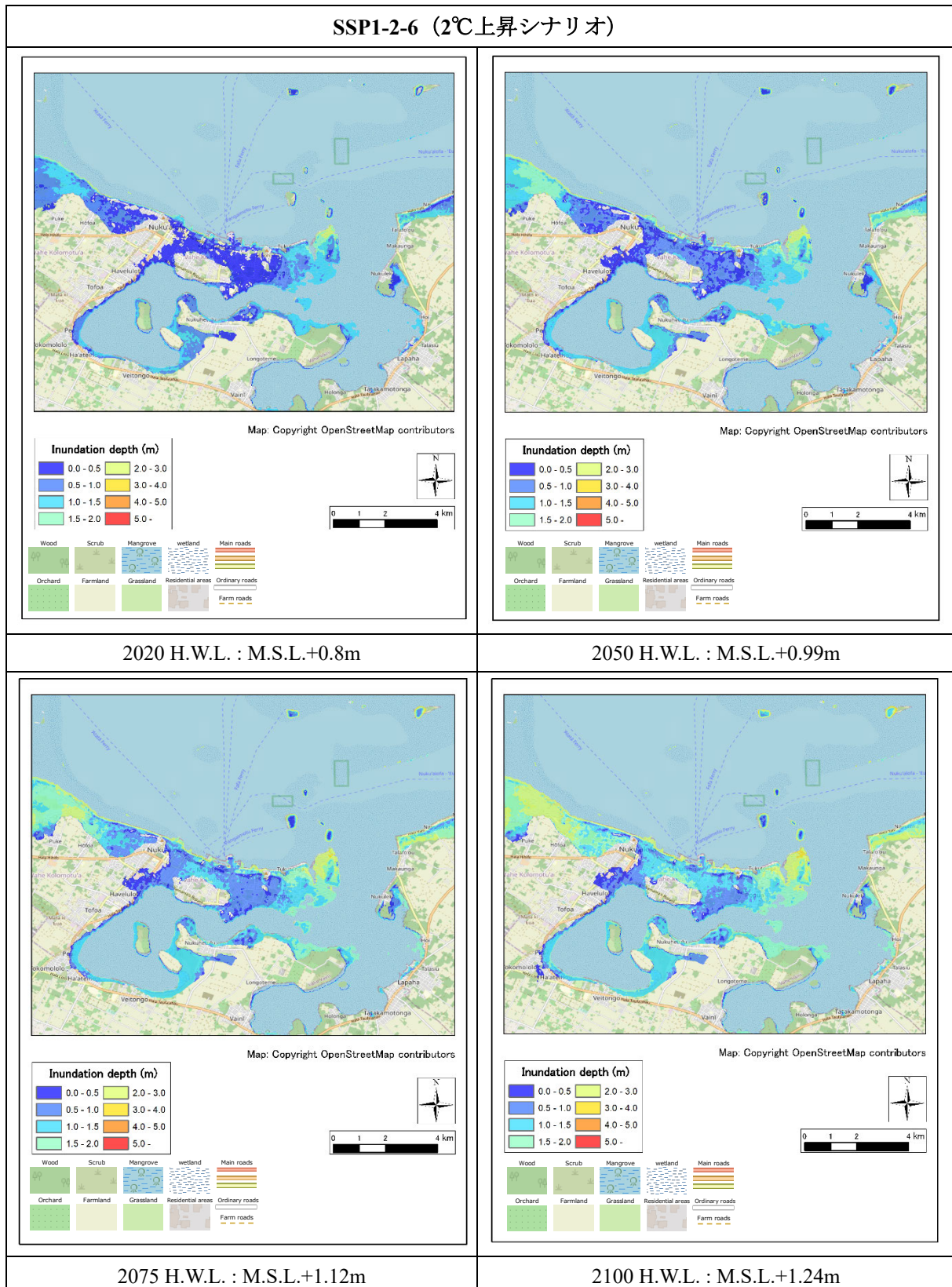
出典：国内支援委員会資料に加筆

図 3.5.5 各シナリオでの海面上昇量

表 3.5.4 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

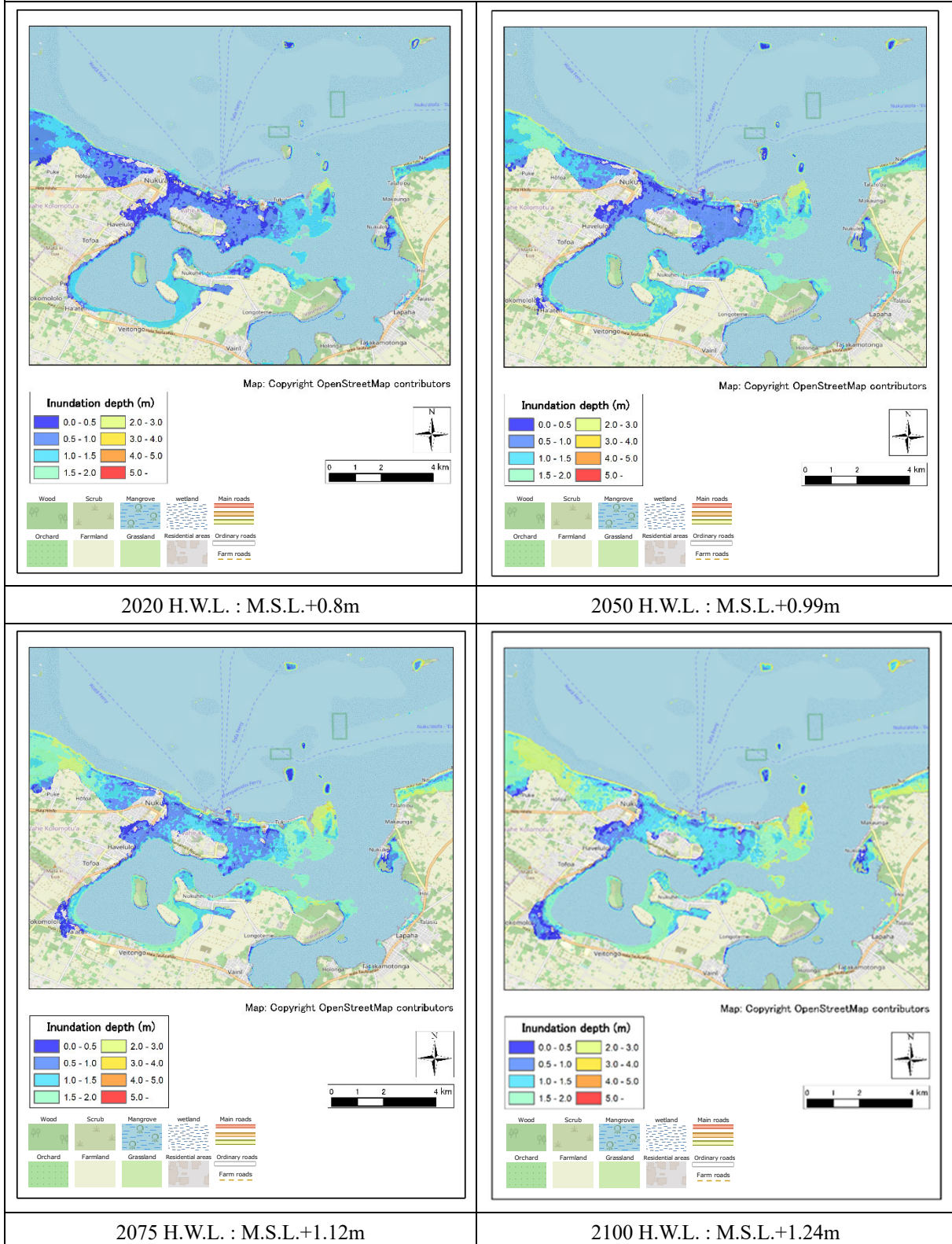
出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3.5.6 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)

SSP1-2-6 (2°C上昇シナリオ)



出典：JICA 調査団作成

図 3.5.7 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)

3.6 防潮堤に対する解析

3.6.1 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、護岸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、防潮堤を嵩上げした場合の検討を行った。防潮堤の嵩上げ高は、現況を約 1m 程度嵩挙げて、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 3.6.1、図 3.6.2 に示す。



図 3.6.1 現況護岸の設定

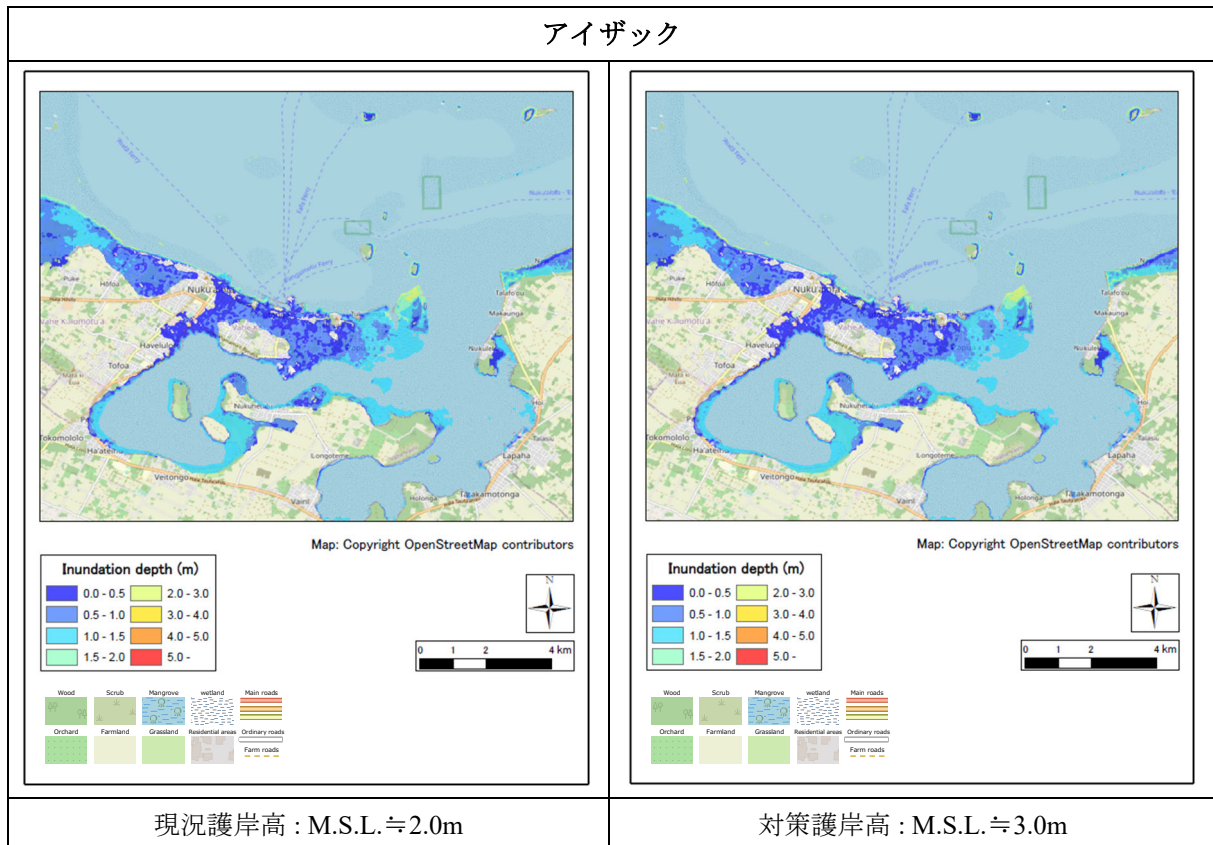


図 3.6.2 嵩上げ護岸の設定 (M.S.L.+3.0m に嵩上げ)

(1) 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。

結果として浸水範囲は大きく変わらない結果となった。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。



出典 : JICA 調査団作成

図 3.6.3 防潮堤効果の比較 (アイザック)

4. マルチハザードマップの作成

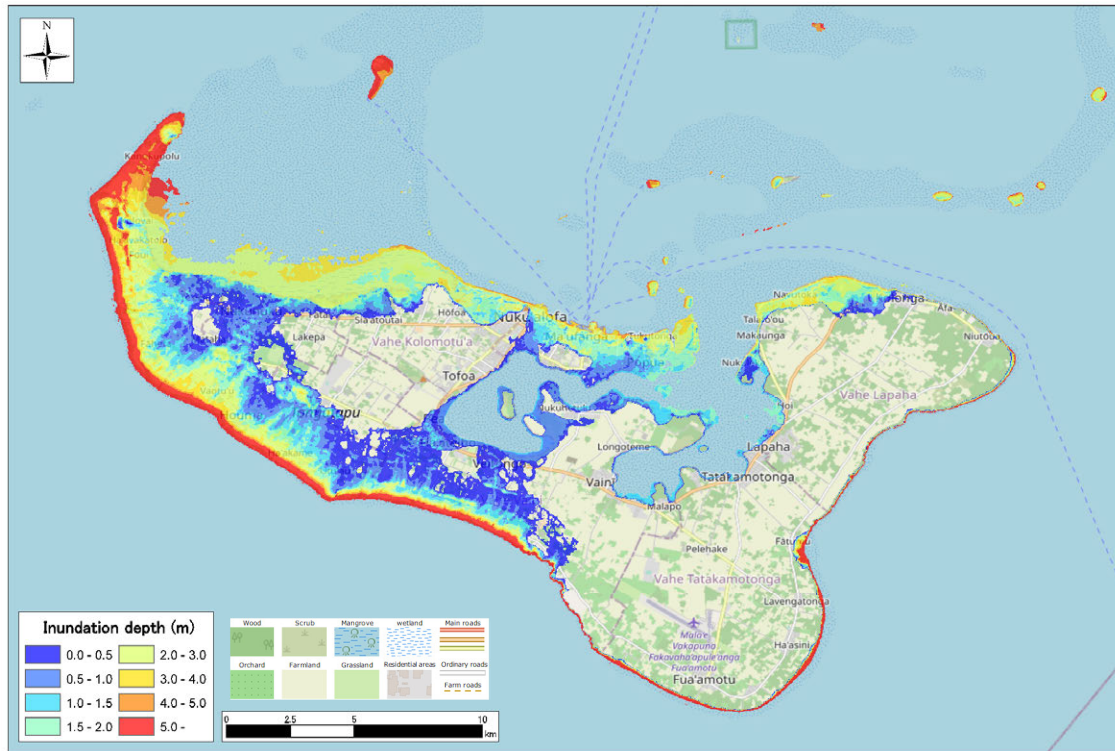
4.1 作成方法

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)

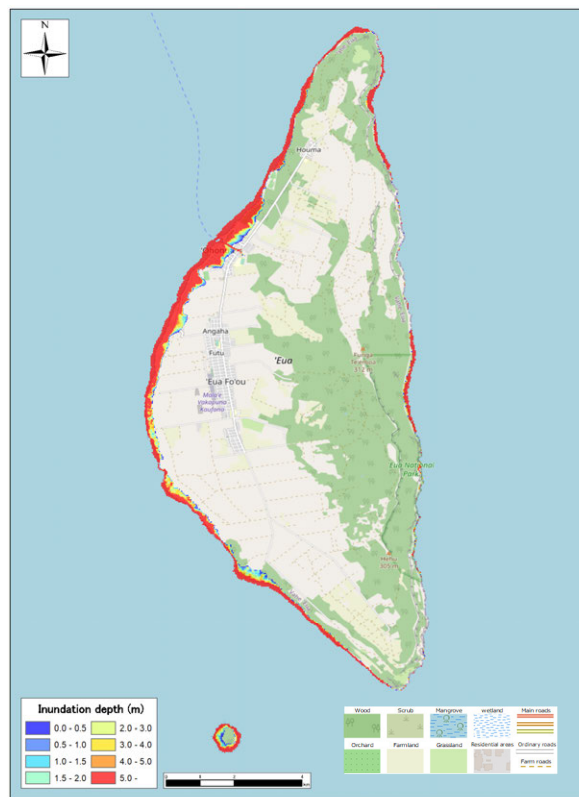
ハザードレベル2で検討した最大クラスの火山性津波の想定に基づくハザードマップを図 4.1.1、図 4.1.2 に示す。



Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 4.1.1 トングatap島 津波ハザードマップ (火山性津波)



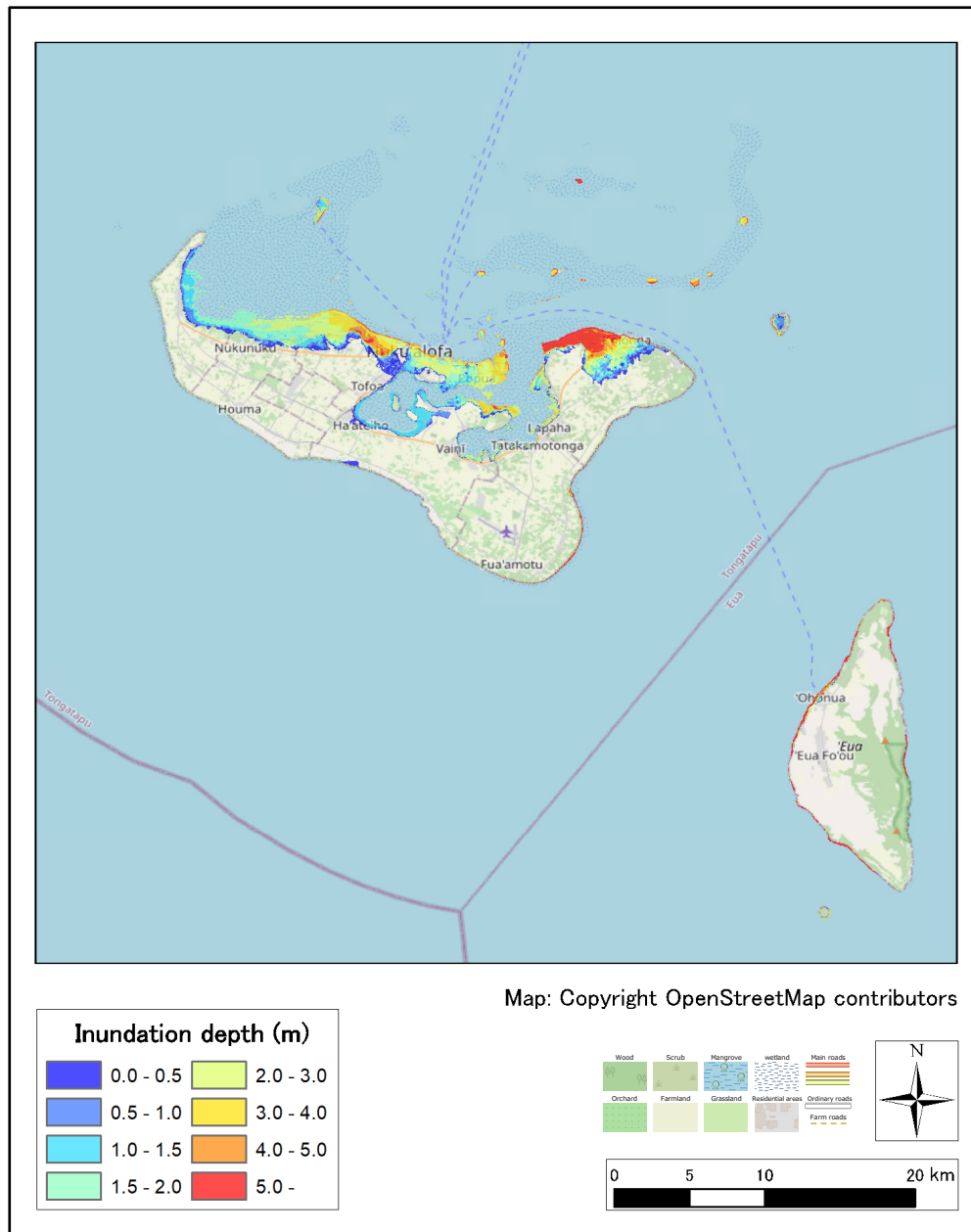
Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 4.1.2 エウア島 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 4.1.3 に示す。

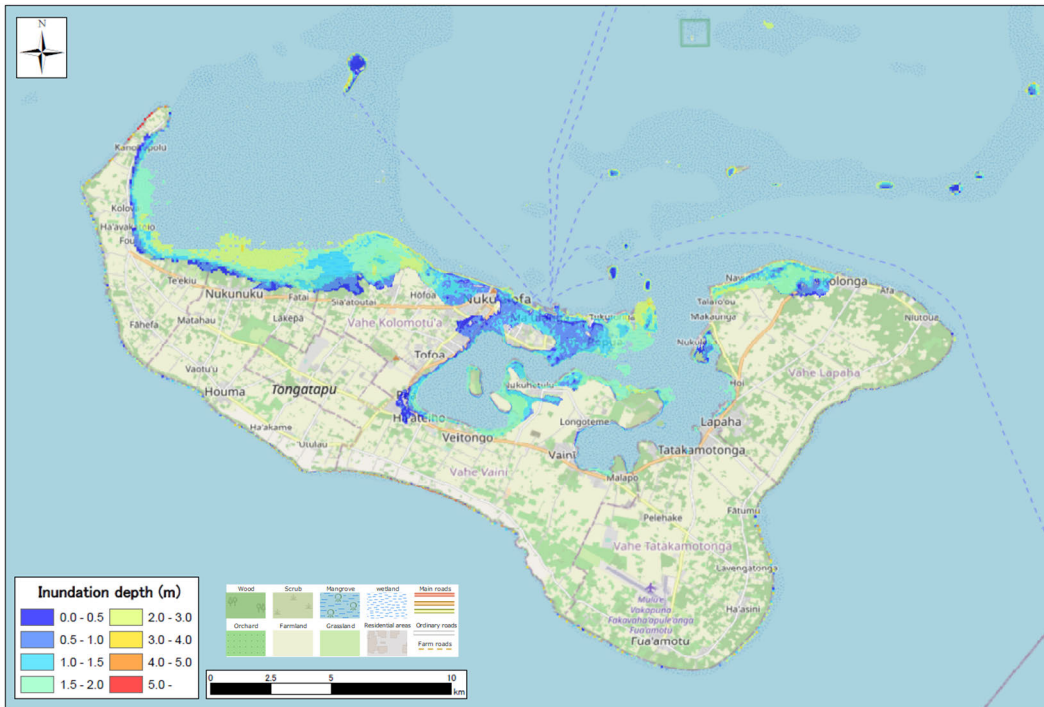


出典：JICA 調査団作成

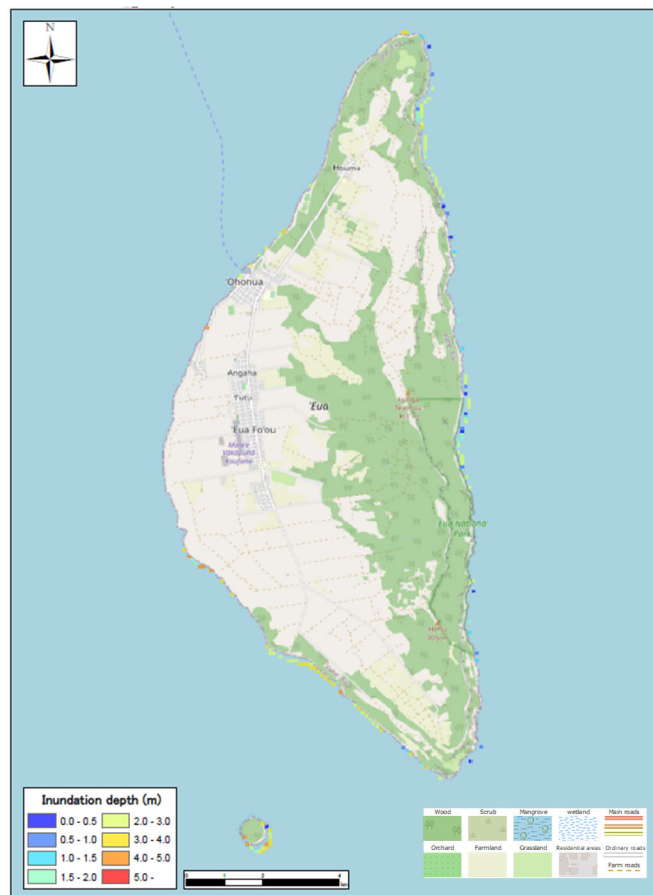
図 4.1.3 津波ハザードマップ (地震性津波)

(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 4.1.4 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。



Map: Copyright OpenStreetMap contributors



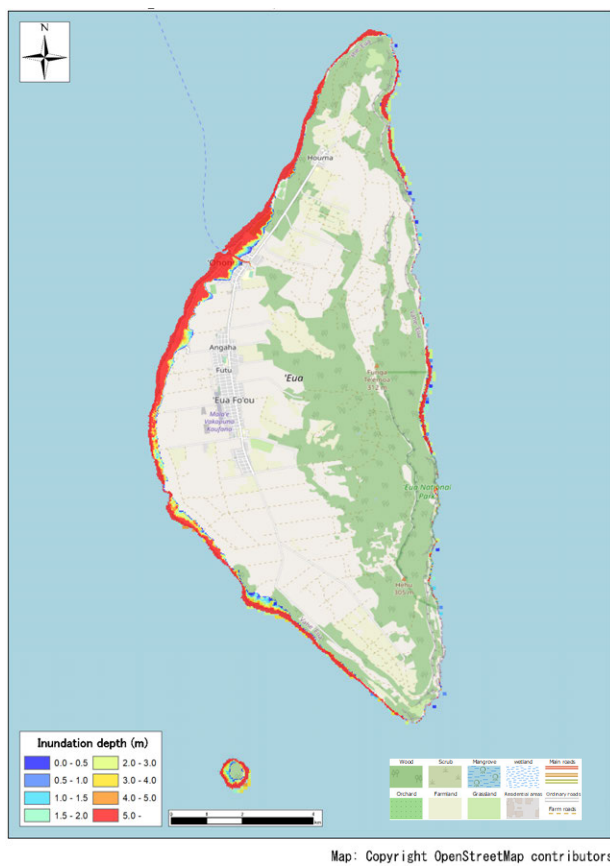
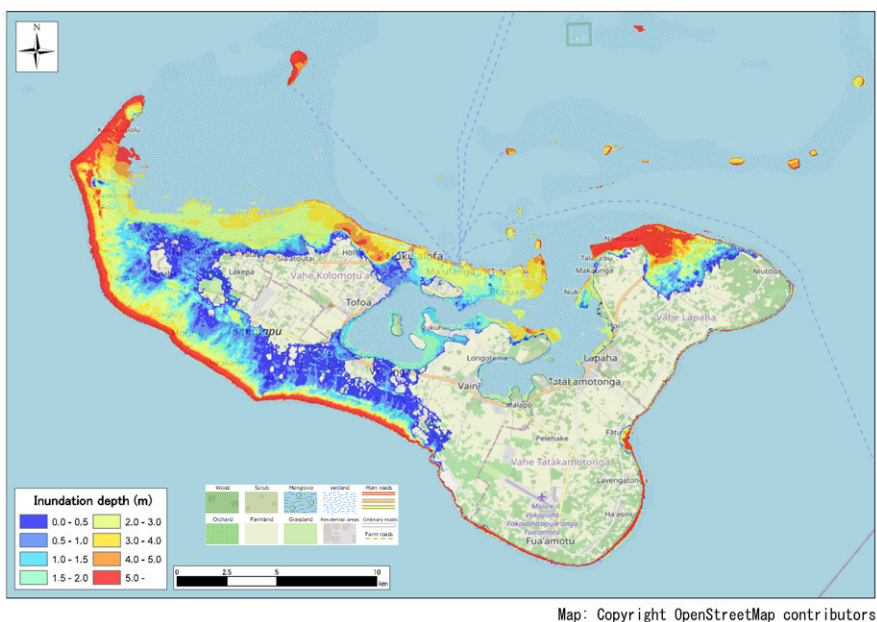
Map: Copyright OpenStreetMap contributors

出典：JICA 調査団作成

図 4.1.4 高潮ハザードマップ

4.2 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。



出典：JICA 調査団作成

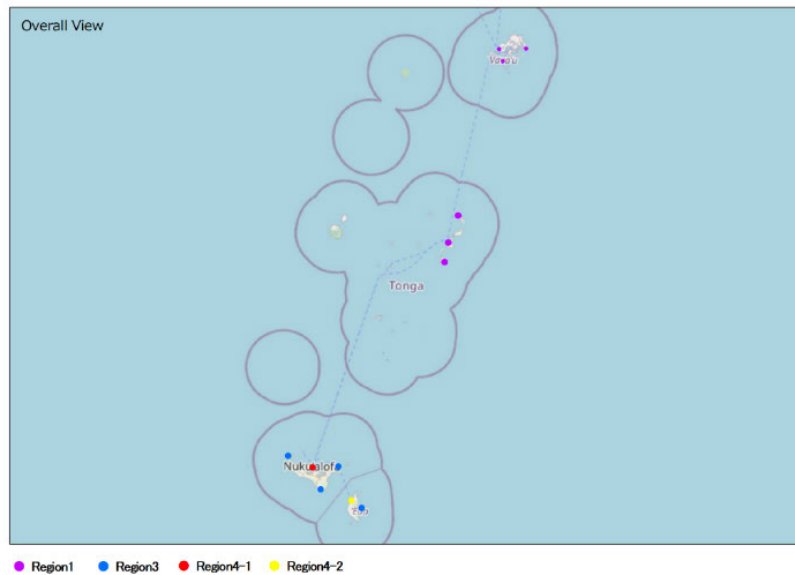
図 4.2.1 津波（火山性・地震性津波）・高潮ハザードマップ

5. 波形の整理

5.1 火山性津波の波形

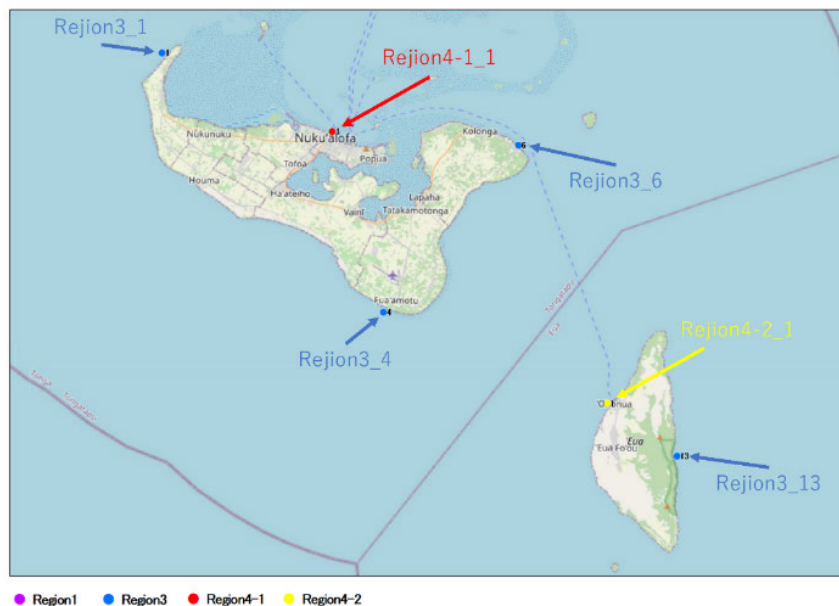
火山性津波について、今後の防災に資するため、トンガタプ島・エウア島以外の津波到達波形を Appendix3-3 に整理した。波形から津波の高さ・到達時間のおおよそを知ることができる。

抽出した波形の位置図を以下に示す。



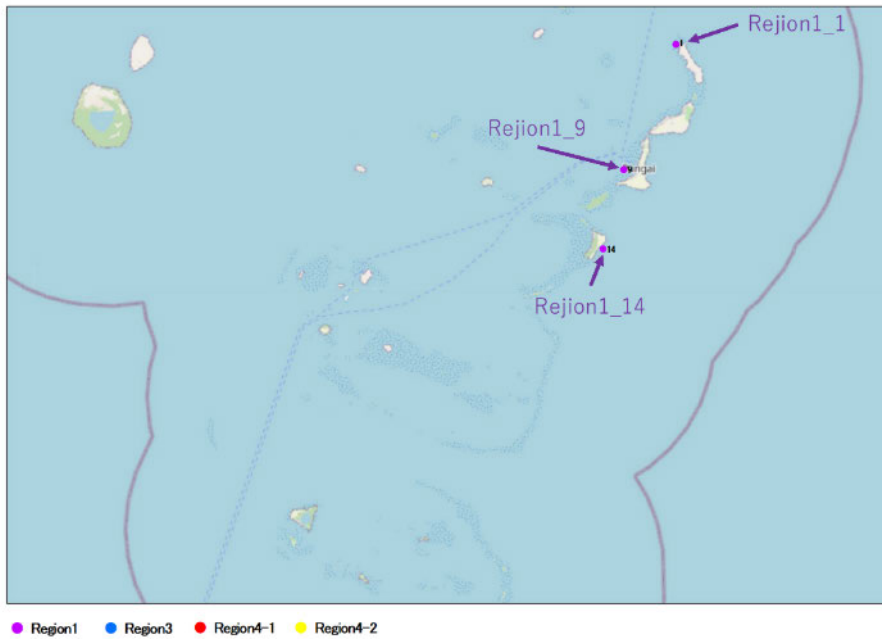
出典：JICA 調査団作成

図 5.1.1 波形出力点位置図（全体図）



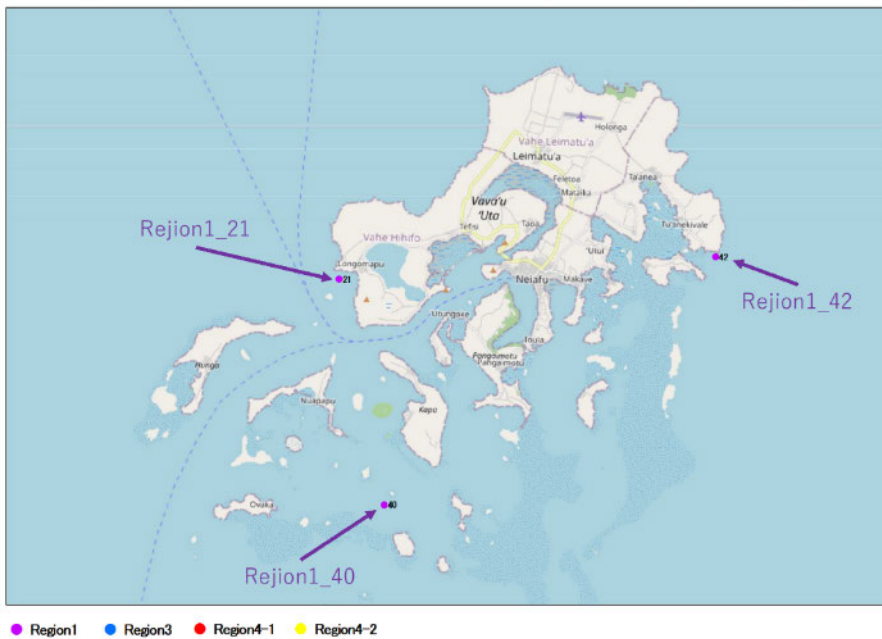
出典：JICA 調査団作成

図 5.1.2 波形出力点（トンガタプ島、エウア島）



出典：JICA 調査団作成

図 5.1.3 波形出力点 (HA'APAI 諸島)



出典：JICA 調査団作成

図 5.1.4 波形出力点 (VAVA'U 諸島)