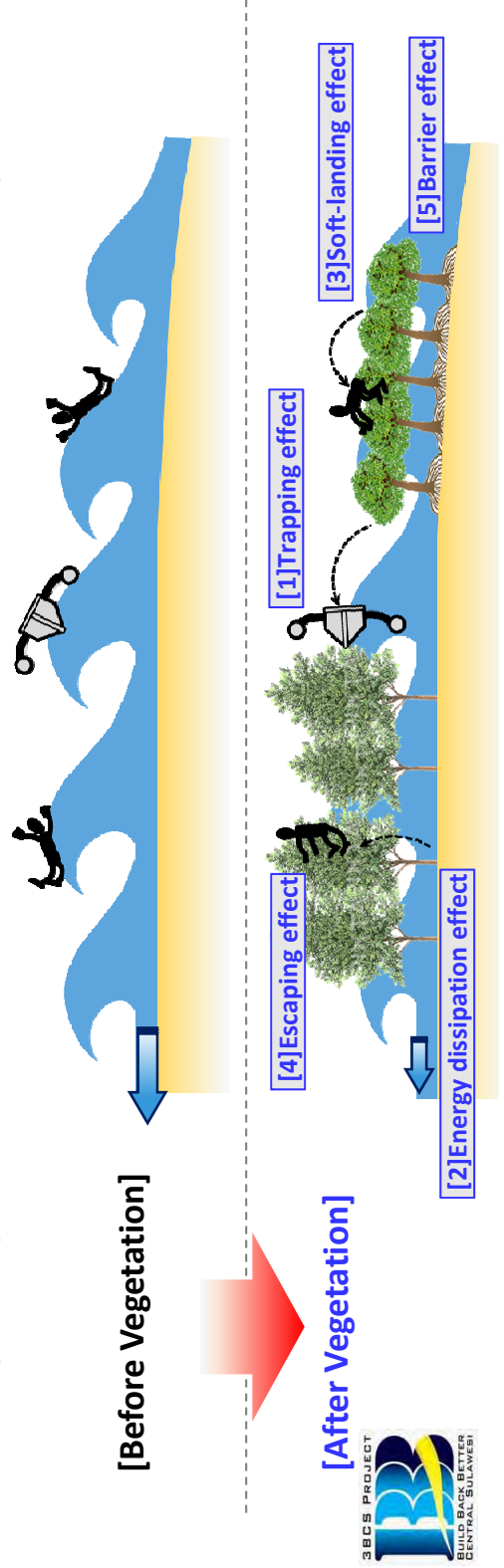


IV Tsunami Mitigation Effect of Vegetation in Palu Bay

General effects of coastal vegetation belts

Vegetation Effect	Contents
[1] Trapping effect	the effect to stop driftwoods (fallen trees, etc.), debris (destroyed houses, etc.) and other floatage (boats, etc.)
[2] Energy dissipation effect	the effect to reduce water flow velocity, flow pressure and inundation water depth
[3] Soft-landing effect	the effect to provide a life-saving means for people to catch tree branches when carried off by tsunamis
[4] Escaping effect	the effect to provide “a way” of escaping by climbing trees from the ground or from the second floor of a building
[5] Barrier effect	the effect to collect wind-blown sand and raise dunes which act as natural barriers against tsunamis
[6] Good landscape effect	the effect to provide a scenic moisture and peace
[7] Habitat environment improvement effect	the effect to providing coastal fauna and flora habitat and breeding environment

Source : ISSN 0386-5878 Technical Note of PWRI No.4177
Planning and Design of TSUNAMI-MITIGATIVE COASTAL VEGETATION BELTS, ICHARM Publication No.18, August 2010

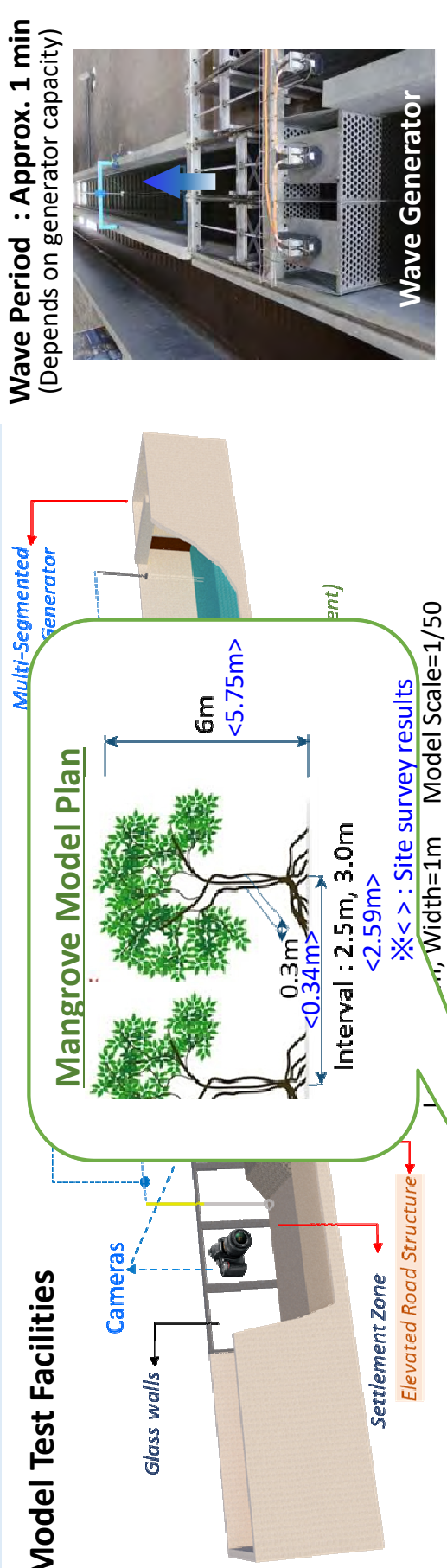


Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Verification of tsunami mitigation effect of vegetation	
Method I : Physical Model Test [by Balai Pantai Laboratory]	Method II : Simulation Analysis [by Chuou Univ. Prof. Arikawa]

Method I : Physical Model Test

➤ Model Test Facilities



➤ Model Scenarios

Parameter	Scenario
◆ Tide Level	MSL+0.7m, MSL+0.0m
◆ Target Wage	MSL+3.5 ~ 5.5m
◆ Elevated Road	MSL+5.0m
◆ Mangrove	Interval: 2.5, 3.0m, Width: 20m, 35m, 50m
◆ Inland Tree	φ=1m, Interval: 7.5m
◆ Inland Tree	φ=14m, Interval: 50m (Big Tree, BNPB request)

Set from the conditions of Pal Bay

Set from vegetation records, etc.

Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

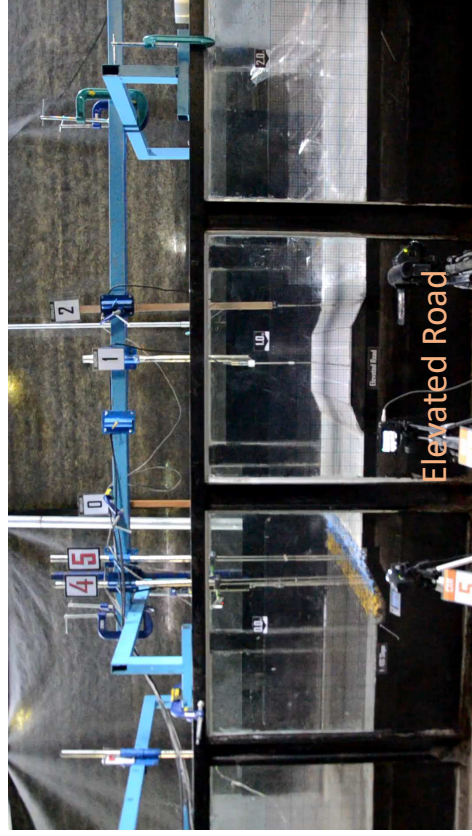
Method I : Physical Model Test

➤ Model Test Result (Overflow situation of elevated road)

Tide Level : MSL+0.7m

Wage Height : MSL+5.5m

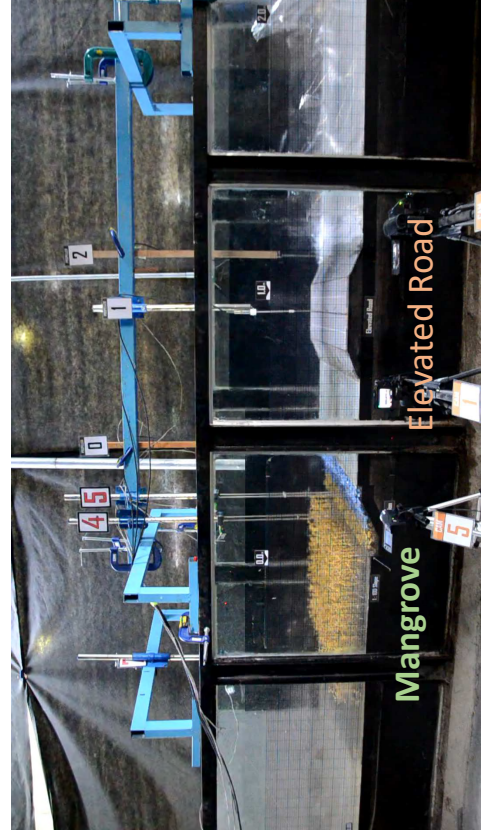
● Without Mangrove



● With Mangrove

Mangrove density : 2.5m
3.5m

Mangrove Width : 20m
35m
50m

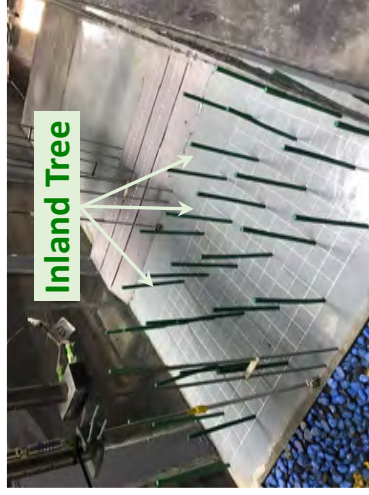


Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method I : Physical Model Test

➤ Model Test Situation (Inland Tree, Big Tree)

- Inland Tree



- Big Tree (BNPB Request)



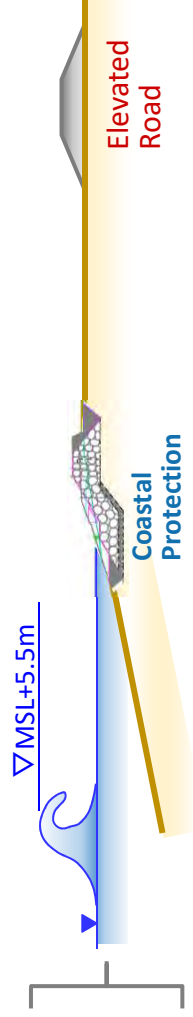
Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method I : Physical Model Test

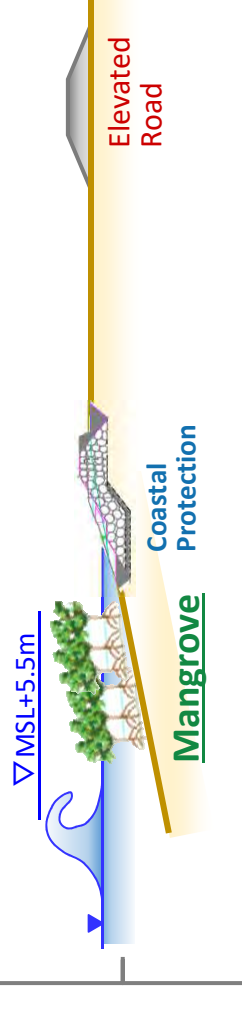
➤ Model Test Result (Overflow of elevated road)

Overflow the elevated road in all scenarios with vegetation

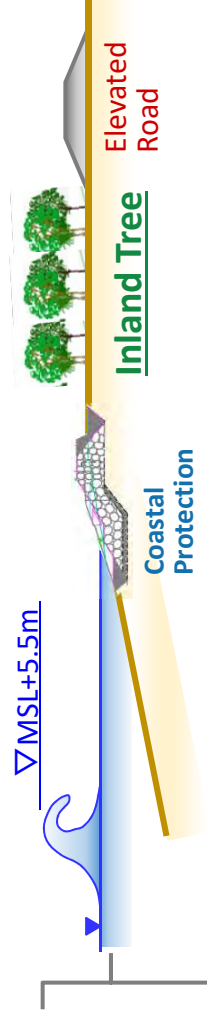
Wave Height , m	Without Vegetation
MSL+5.5m	YES



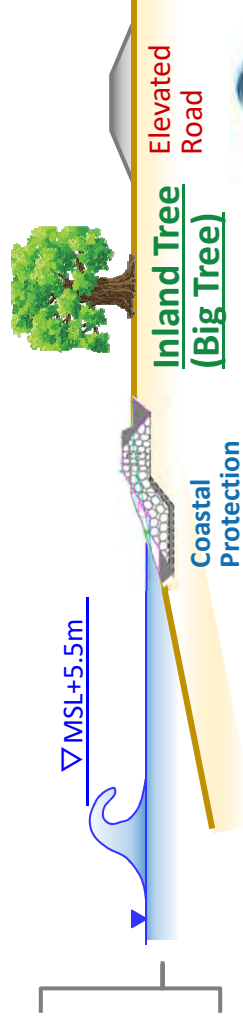
Wave Height , m	Mangrove		
	Width (m)	Interval (m)	
MSL+5.5m	20	2.5m	YES
	35	3.0m	YES
	50	3.0m	YES



Wave Height , m	Inland Tree	
	Width (m)	Interval (m)
MSL+5.5m	25	7.5m
		-



Wave Height , m	Inland Tree (Big Tree)	
	Diameter (m)	Interval (m)
MSL+5.5m	14	50m
		-



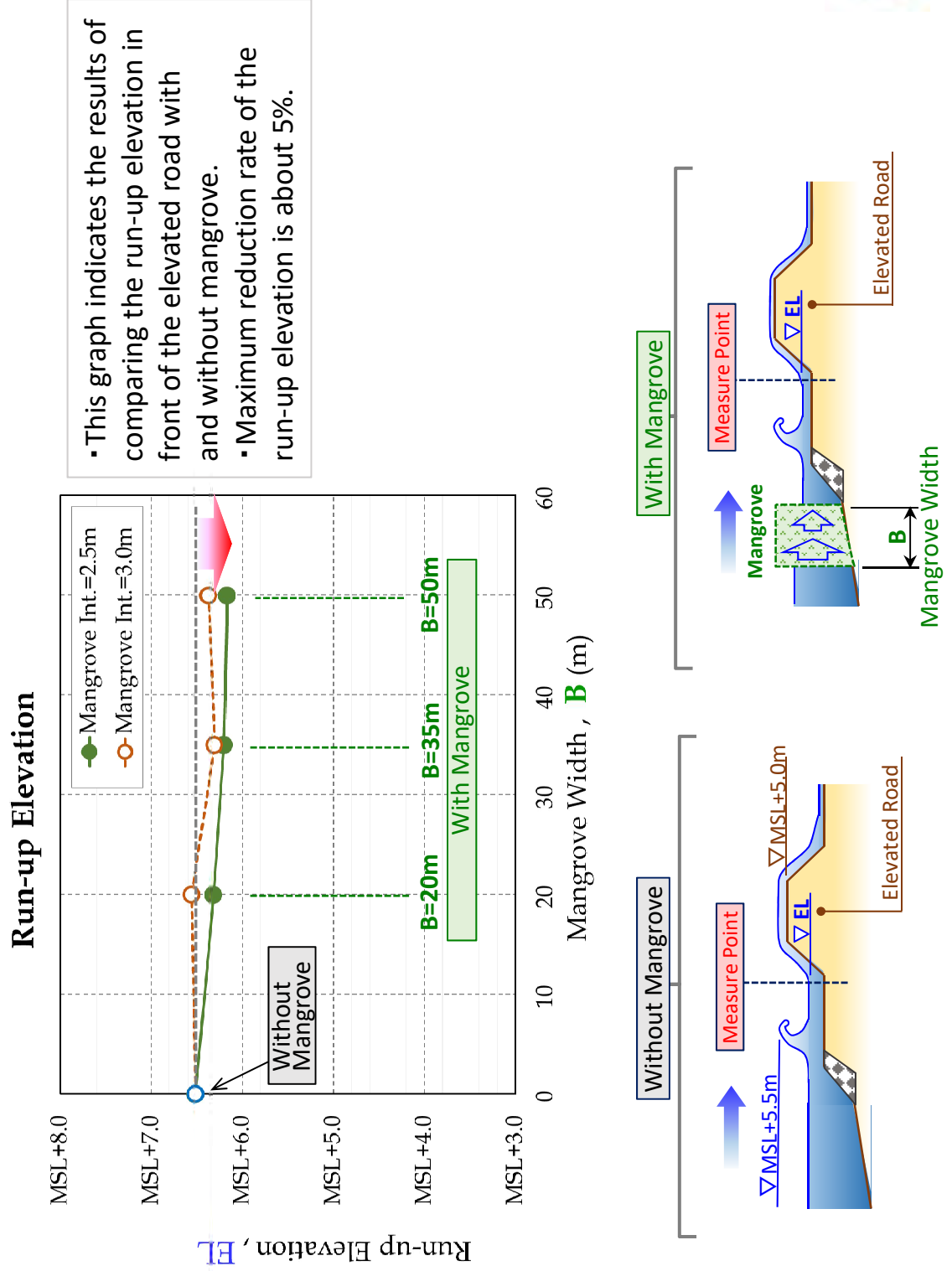
Legend
YES – Overflow , NO – Not Overflow

Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method I : Physical Model Test

➤ Model Test Result (Mitigation effect of Mangrove)

Run-up Elevation tend to decrease in the presence of mangrove.

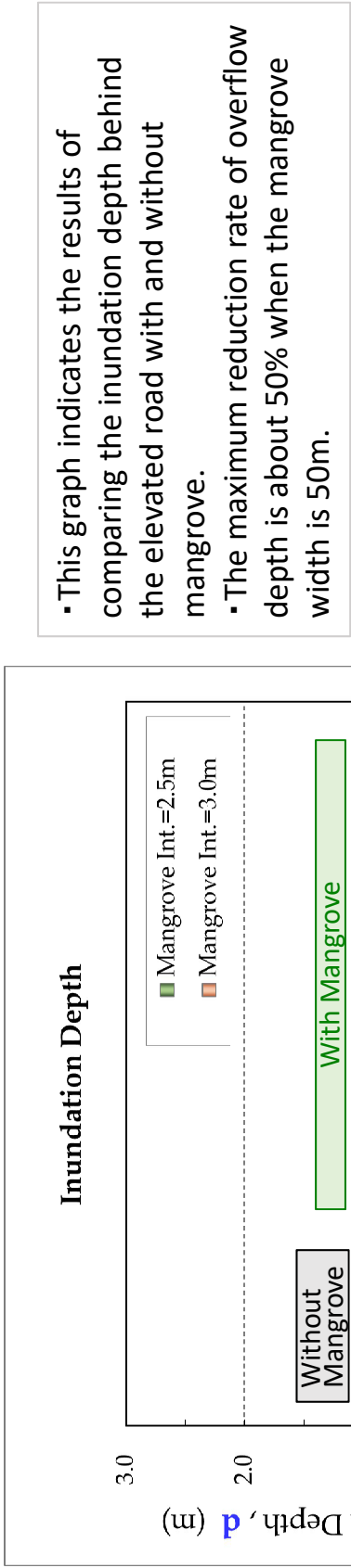


Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

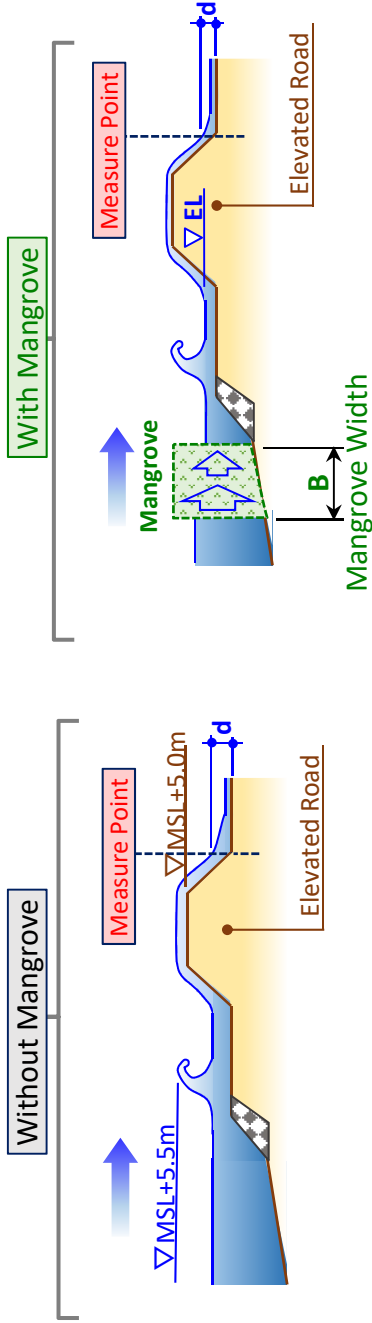
Method I : Physical Model Test

➤ Model Test Result (Mitigation effect of Mangrove)

Inundation depth tend to decrease in the presence of mangrove.



- This graph indicates the results of comparing the inundation depth behind the elevated road with and without mangrove.
- The maximum reduction rate of overflow depth is about 50% when the mangrove width is 50m.

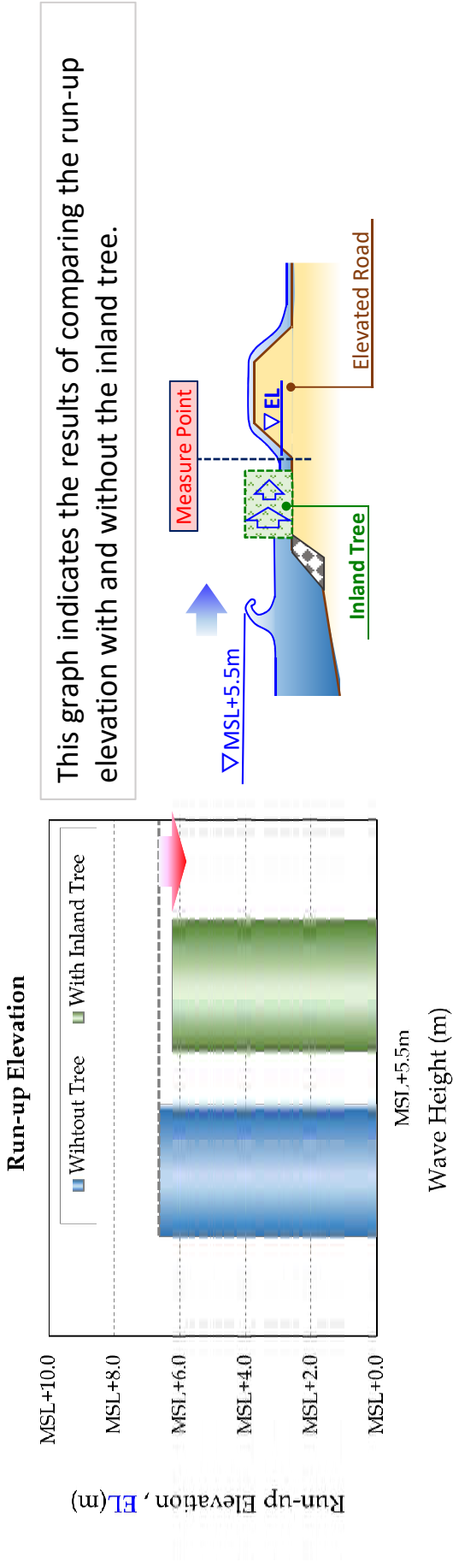


Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

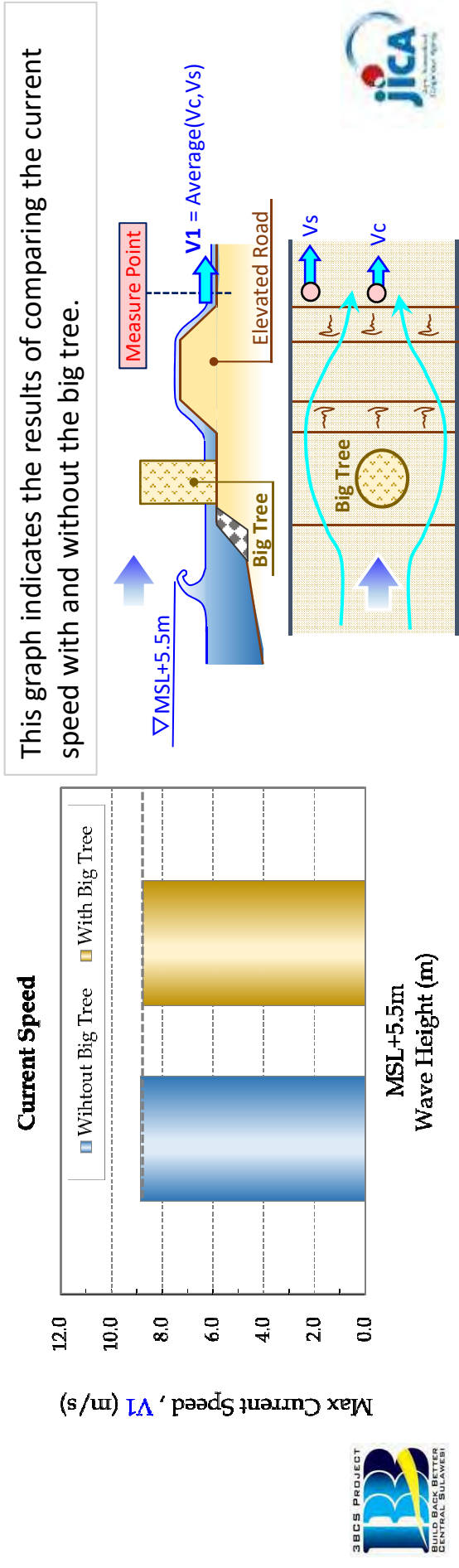
Method I : Physical Model Test

➤ Model Test Result (Mitigation effect of Inland Tree and Big Tree)

- Inland Tree - Run-up Elevation tend to slight decrease in the presence of inland trees.



- Inland Tree (Big Tree) Current speed is almost same in the presence of big trees.



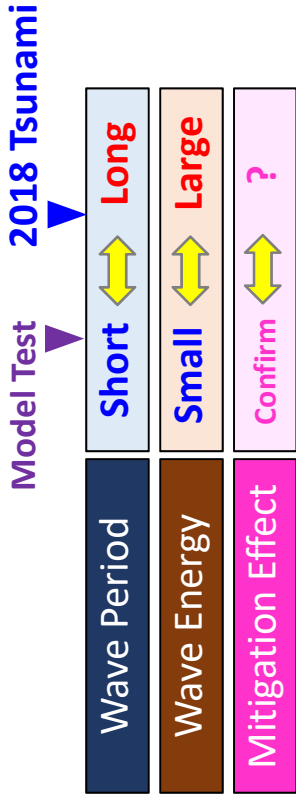
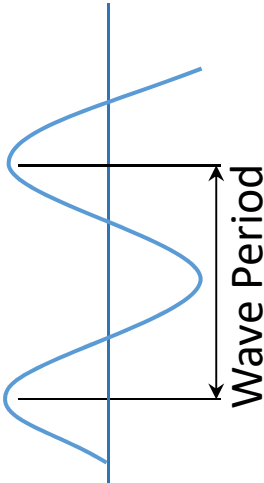
Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method II : Simulation Analysis

➤ Purpose of Simulation Analysis

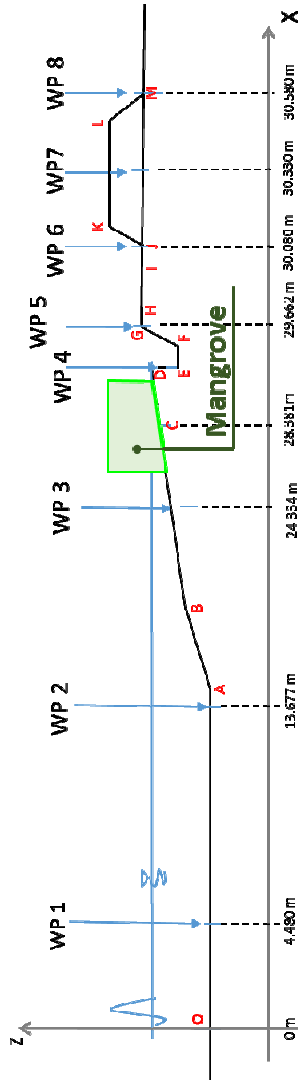
Reproduce the 2018 tsunami wave (wave period is approx. 3.5min) in the simulation analysis and confirm the mitigation effect of vegetation under this condition.

	Wave Period	Remark
2018 Tsunami	Approx. 3.5min	Pantoloan tide station data
Model Test	Approx. 1.0min	based on equipment capacity



➤ Analysis Condition and Model

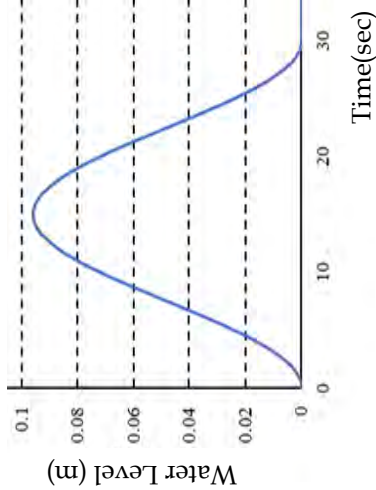
(1) Analysis Model



- Porosity of Mangrove = 98%
- * Based on the mangrove model

(2) Wave Model

2018 Tsunami period = 3.5min = 210sec
Model wave period = 210/7 = 30sec



Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method II : Simulation Analysis

(3) Analysis Scenario

Scenario	Incident Wave	Mangrove Width [m]	Scenario	Incident Wave	Mangrove Width [m]
1	Incident Wave-1: Physical Model Test Wave	0	5	Incident Wave-2 2018 Tsunami Wave	0
2		20	6		20
3		35	7		50
4		50	—		—

Mangrove Interval=3m

(4) Numerical analysis equation

[Analysis program : CADMAS-SURF/3D]

- Continuous equation
$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p$$
- Navier-Stokes equation (x direction)
$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v \partial p}{\rho \partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \\ - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned}$$

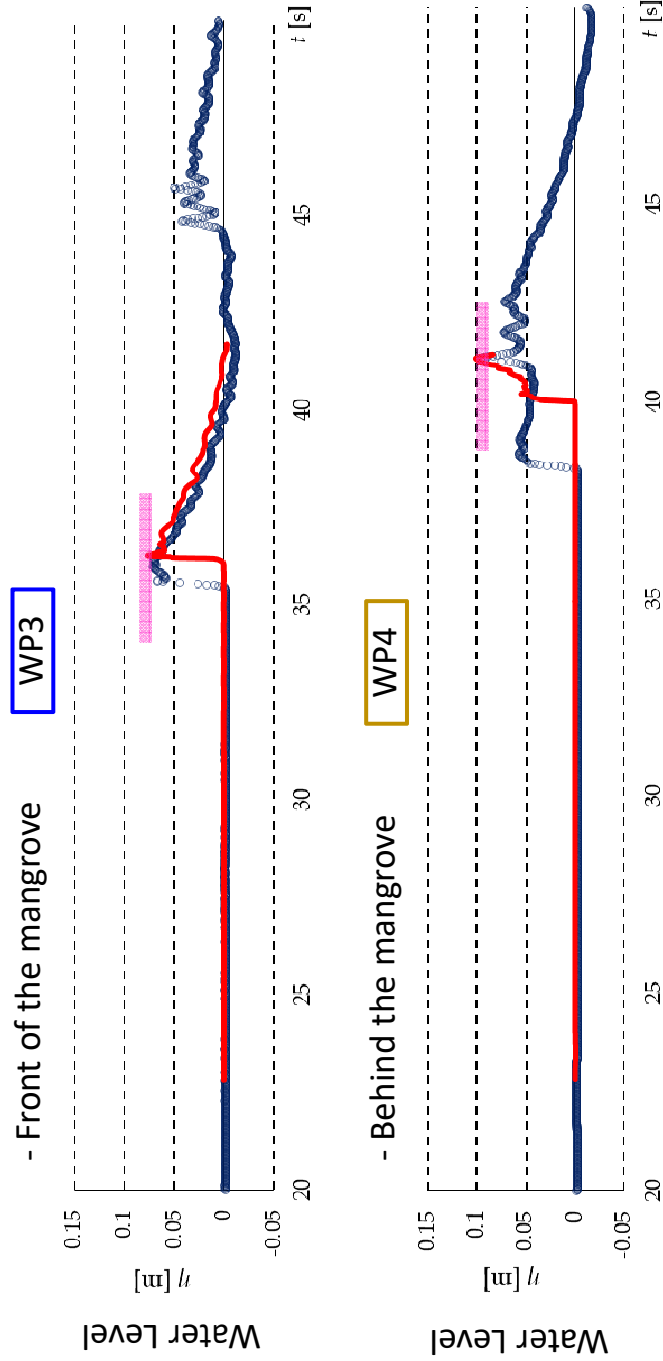
t : 時間, x, y : 水平方向座標, z : 鉛直方向座標, u, v, w : x, y, z 方向の流速成分,
 p : 圧力, ρ : 標準密度, ρ^* : 浮力を考慮する密度, ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数 ν_t の和,
 g : 重力加速度, $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: x, y, z 方向の面積透過率,
 D_x, D_y, D_z : エネルギー減衰帯のための係数, S_p, S_u, S_v, S_w : 造波ソースのためのソース項

Method II : Simulation Analysis

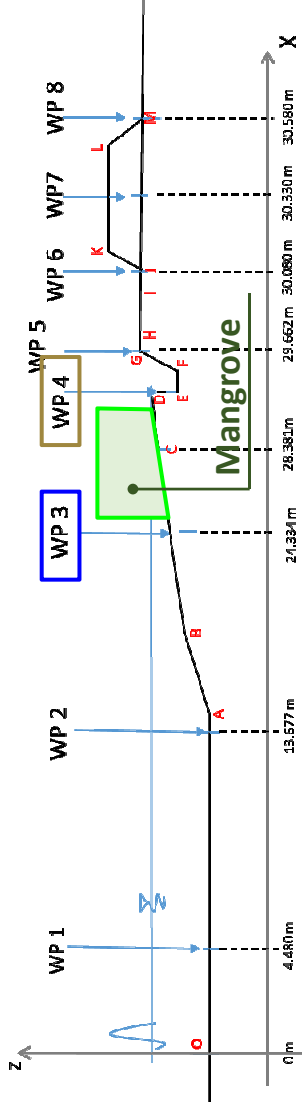
➤ Result of Simulation Analysis [Incident wave -1 : Physical model test wave]

Confirmation of reproducibility of physical model test

Scenario 2 : Mangrove width-20m



→ Confirmed that the analysis result reproduces the model test result



Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method II : **Simulation Analysis**

➤ **Result of Simulation Analysis [Incident wave -1 : Physical model test wave]**

Scenario 1 : Without Mangrove



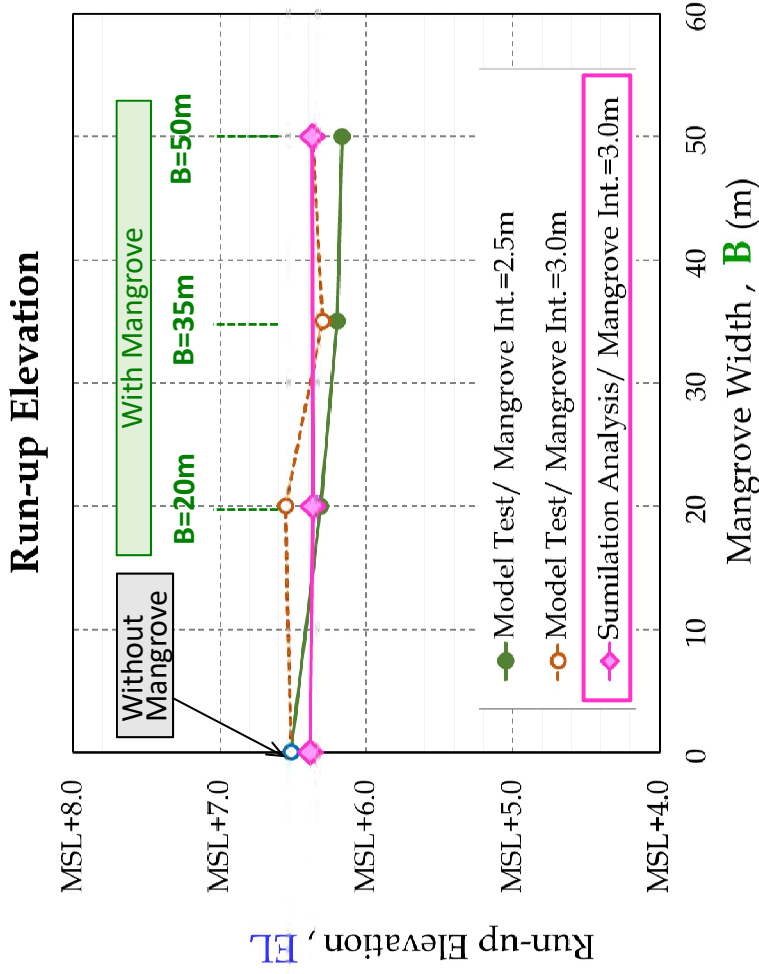
Scenario 2 : Mangrove width-20m



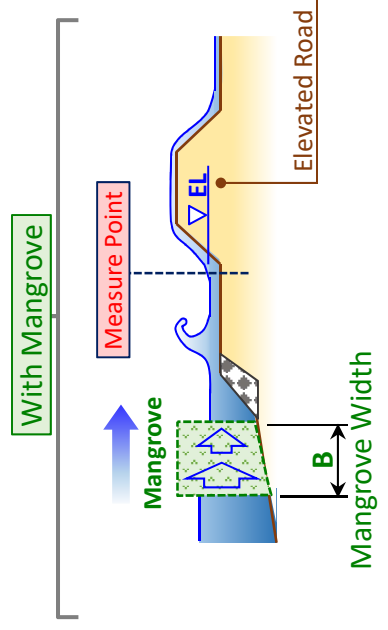
Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method II : Simulation Analysis

➤ Result of Simulation Analysis [Incident wave-2 : 2018 Tsunami wave]



- This graph indicates the results of comparing the run-up elevation in front of the elevated road with and without mangrove.
- An analysis using a tsunami with a longer wave period than the model test did not confirm a clear tsunami mitigation effect by mangroves.

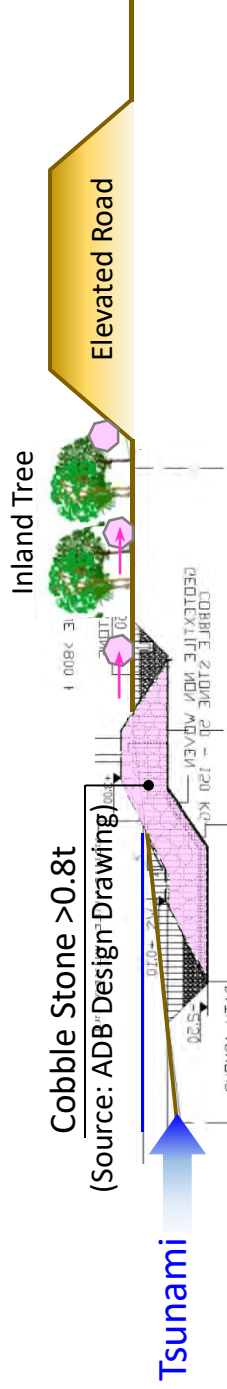


Verification of tsunami mitigation effect by vegetation

Method II : Simulation Analysis

➤ Stable Confirmation of Coastal Protection by Tsunami

- The stability of coastal protection was confirmed by simulation analysis and Japanese standards.
- As a result of the inspection, it was confirmed that the **current speed that occurred around the coastal protection was below the limit current speed**. In addition, due to differences in conditions such as stone weight, even if stones move, it is assumed that **elevated roads and inland trees will prevent this**.



◆ Calculation Formula for Limit Current Speed (which the stone moves) ----- Based on Japanese port standards

$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$ ----- **Isbash formula**

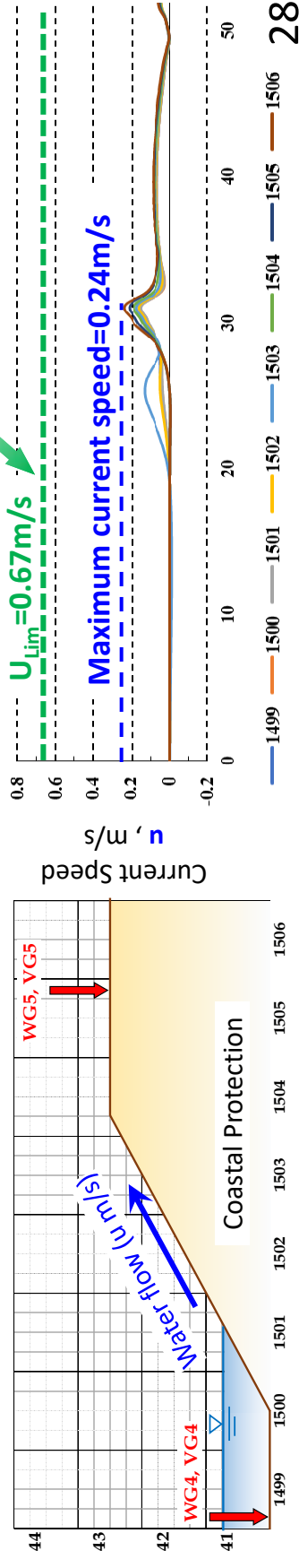
$$U_{Lim} = \left\{ \frac{M \cdot 48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}{\pi \cdot \rho_r} \right\}^{1/6}$$

U_{Lim} : Limit current speed
 M : Stone weight (=0.8t)
 ρ_r : Stone density
 y : Isbash constant value
 θ : Slope angle

$$U_{Lim} = 4.7 \text{ m/s (Full-scale)}$$

$$= 0.67 \text{ m/s (Model-scale)}$$

◆ Current Speed near the Coastal Protection by Simulation Analysis



Verification of tsunami mitigation effect by vegetation / Conclusion

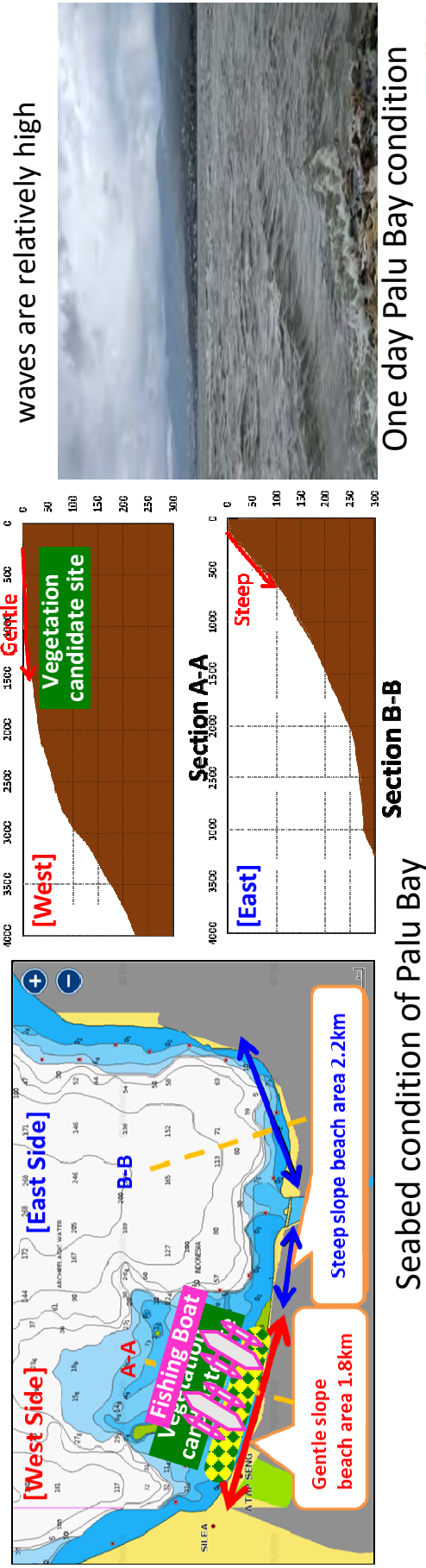
A certain tsunami mitigation effect by vegetation was confirmed by physical model test. But the effect could not be confirmed by the analysis that reproduced the 2018 tsunami. Considering not only the above result but also the concern things of Palu Bay shown below, the JICA team recommends that the height of the elevated road should not be lower than MSL + 5.0 m in anticipation of the effects of vegetation.

- 1) **Topographical features** : Vegetation cannot be applied to the entire target section due to steep topography (limited to the west side only, about 16% can vegetate with a width of 50 m or more)

2) **Embankment for vegetation** : The embankment is required to secure a more mangrove area, but it leads to further landslides, increased costs, and environmental impact.

3) **Growth period and environment** : It takes 10 years or more to growing up, and as it is a natural plant, it is affected by various environmental effects such as soil, water depth, waves and so on..

4) **Fishing boats** : Coordination with local fishing boats is necessary even on the west side of Palu Bay where mangrove vegetation is possible.



V Combination Countermeasure with Vegetation & Elevated Road

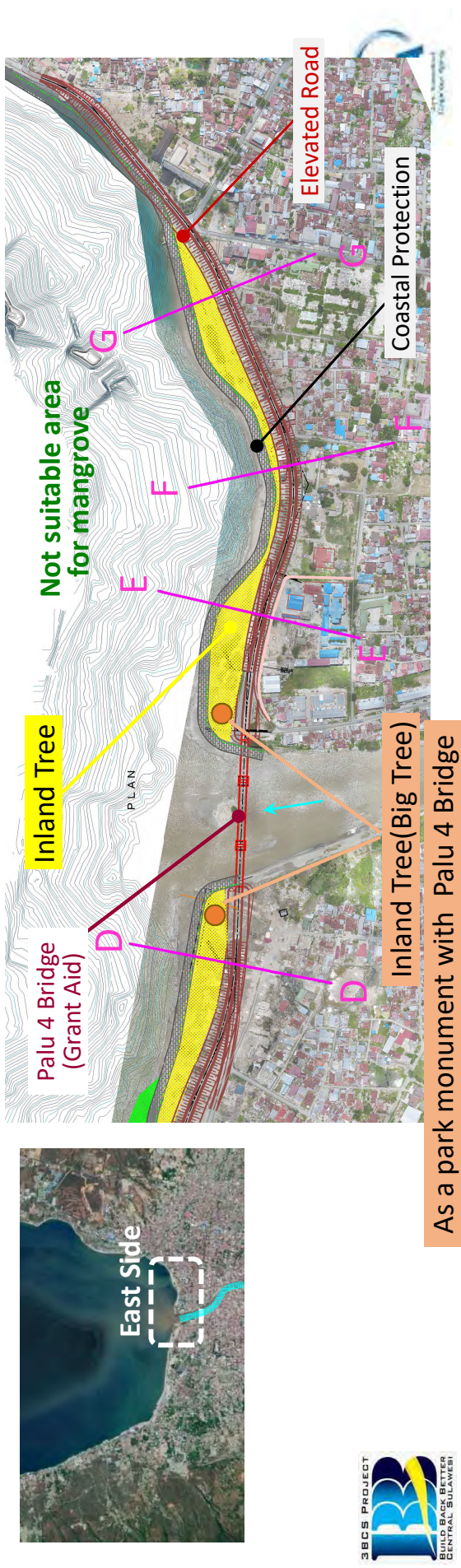
Draft Combination Countermeasure with Vegetation & Elevated Road

West Side



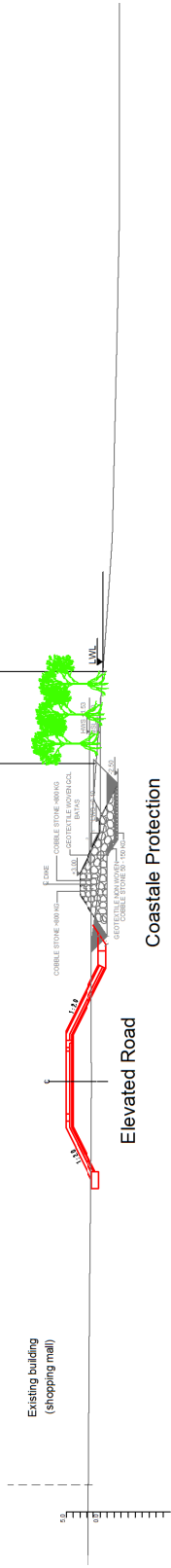
Inland Tree
West Side : 31,000m2
East Side : 30,500m2

East Side

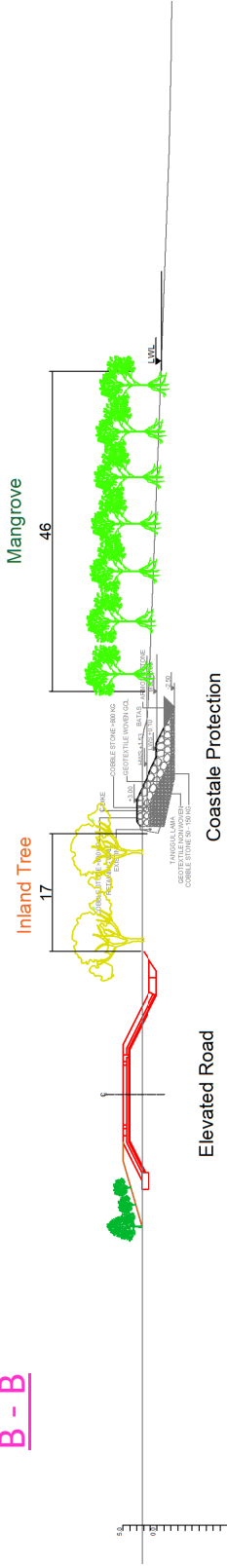


Draft Combination Countermeasure with Vegetation & Elevated Road

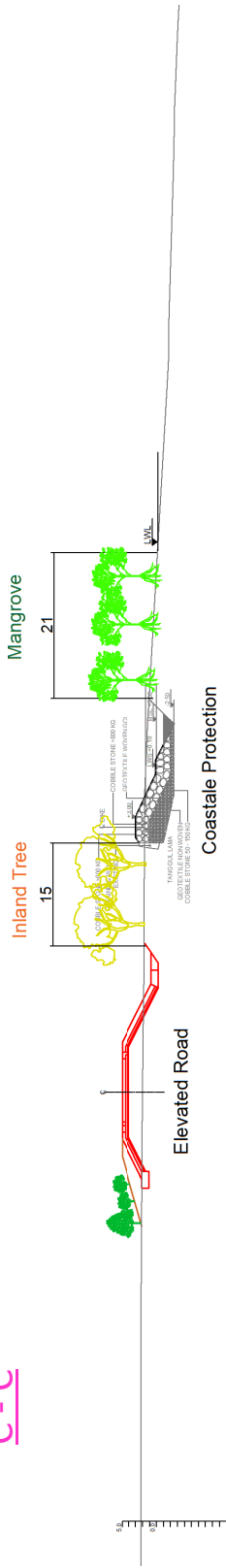
A - A



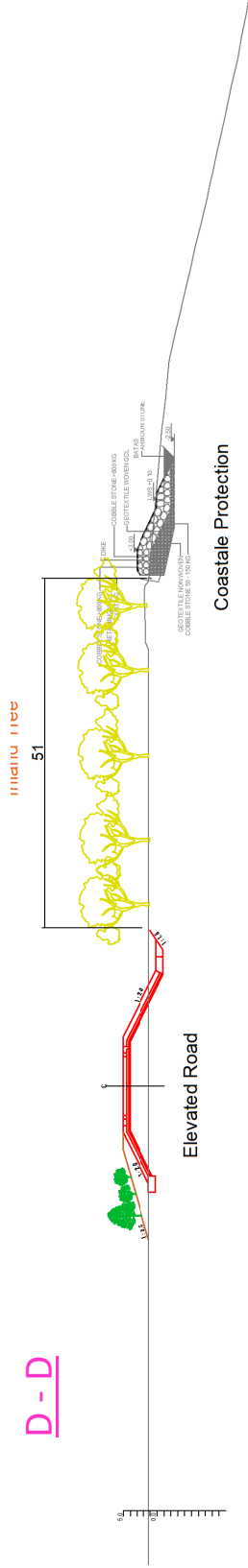
B - B



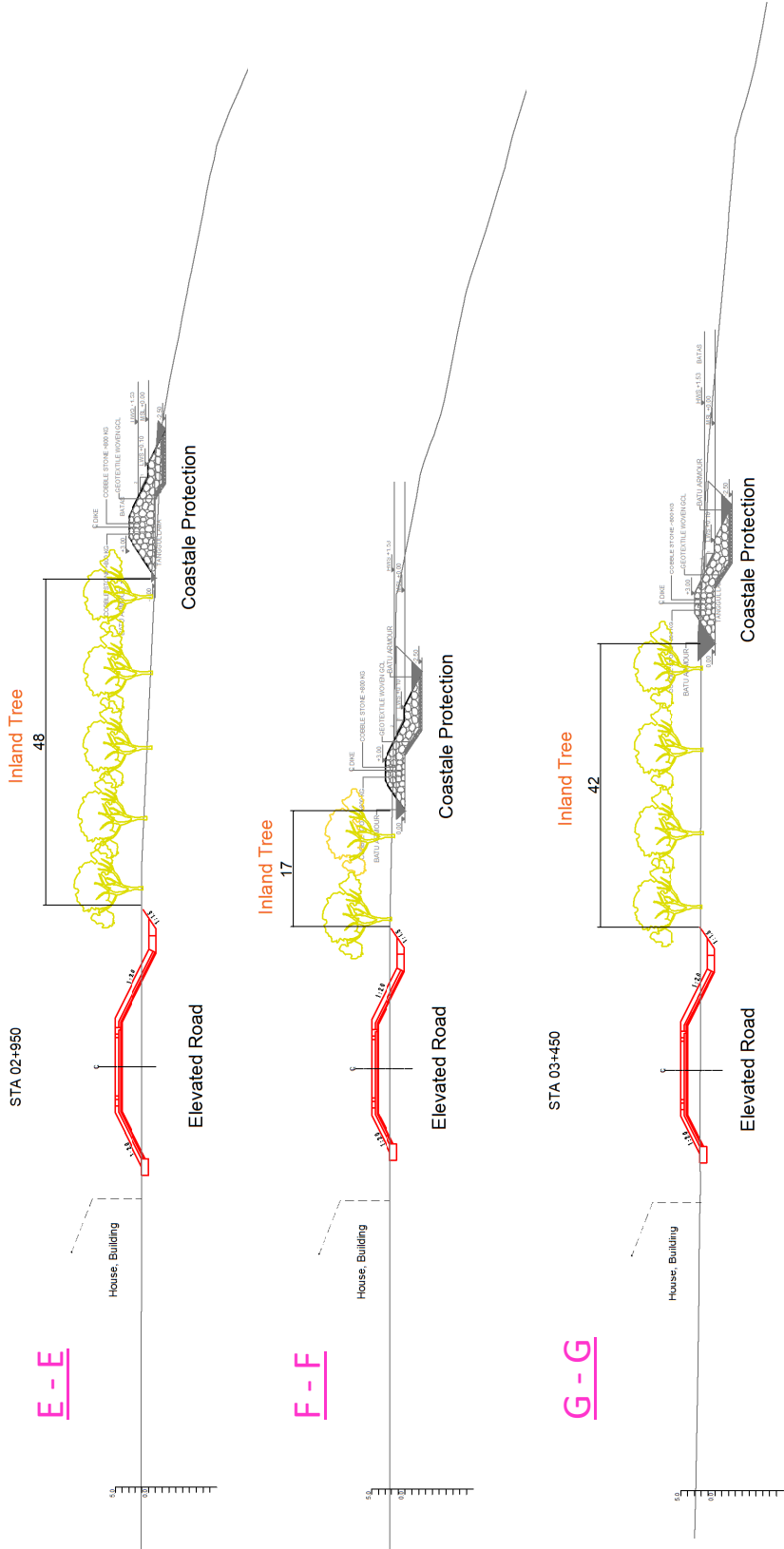
C - C



D - D

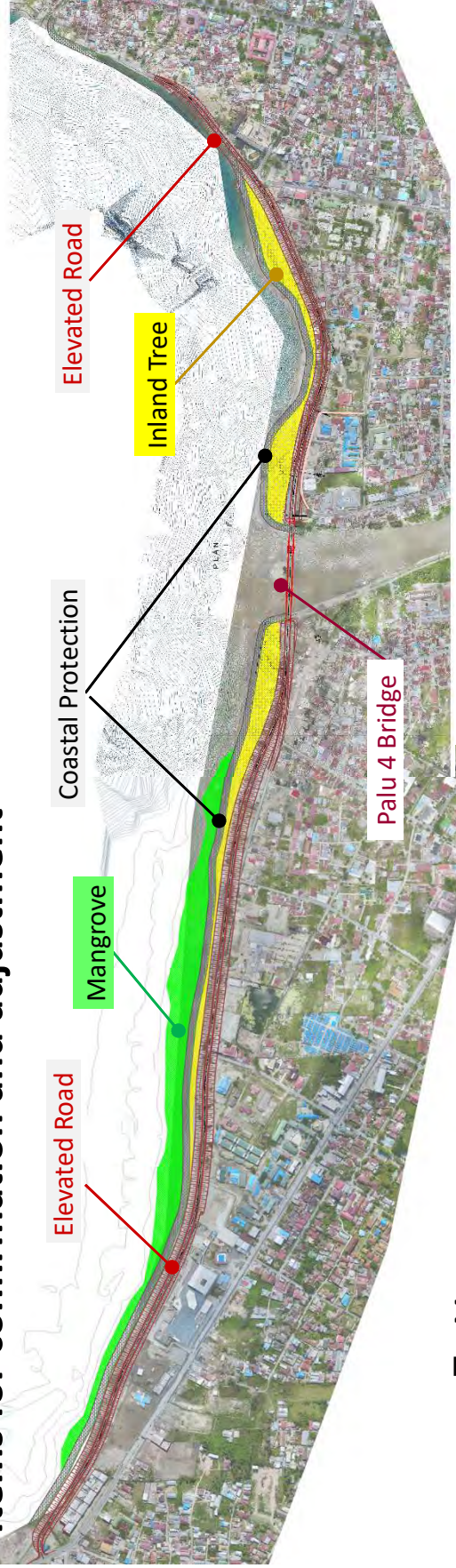


Draft Combination Countermeasure with Vegetation & Elevated Road

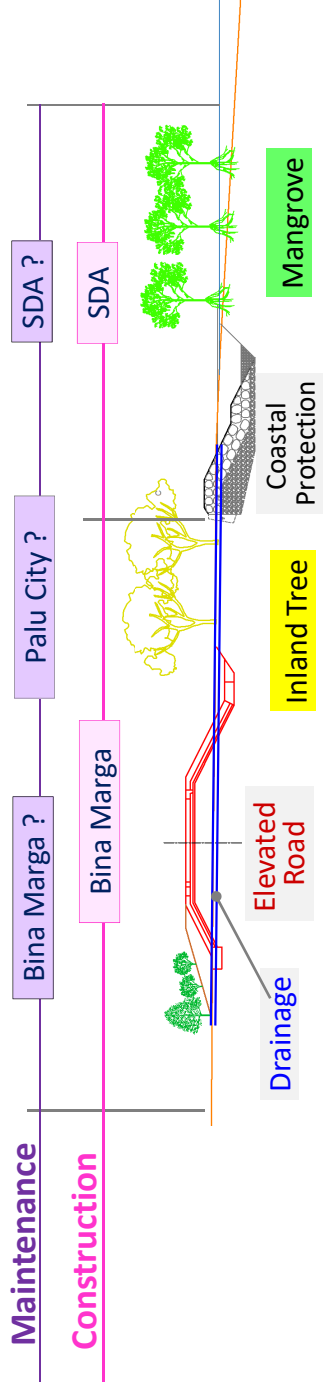


Draft Combination Countermeasure with Vegetation & Elevated Road

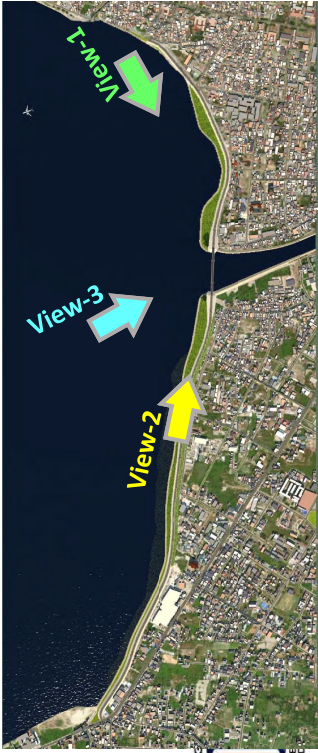
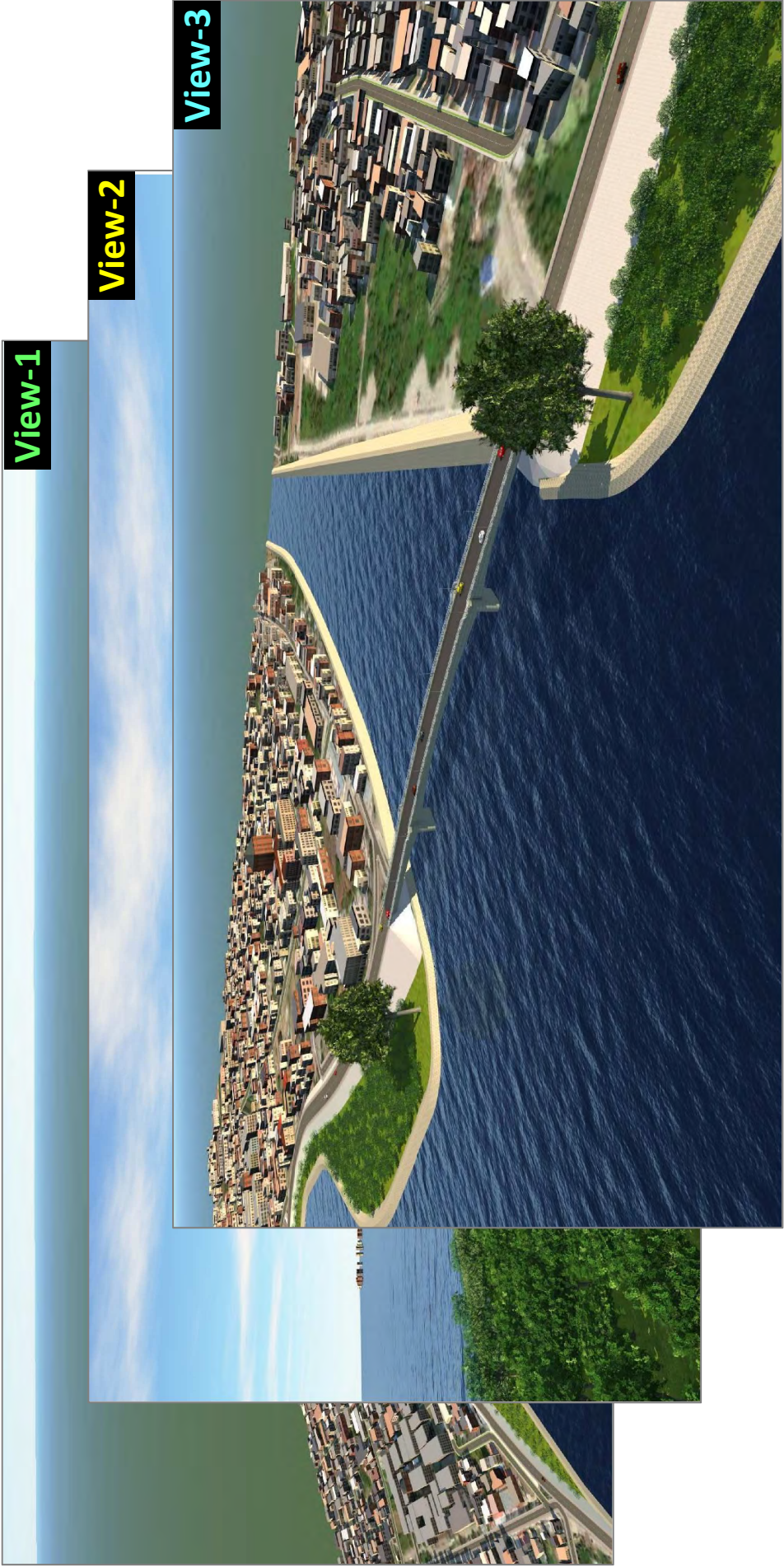
➤ Items for confirmation and adjustment



- Mangrove :
 - ✓ It is necessary to coordinate with fishing boat ports and routes.
 - ✓ It is necessary to investigate the growth environment such as the seabed topography, tide level, and soil condition. Consider installing a breakwater fence if necessary.
- Inland Tree and Big Tree :
 - ✓ Arrangement of trees around the estuary needs coordination with the park plan and big trees which BNPB requests.
- Management entity after construction
 - ✓ Whether to transfer to Palu City after construction, financial resources for maintenance budget.



Draft Combination Countermeasure with Vegetation & Elevated Road

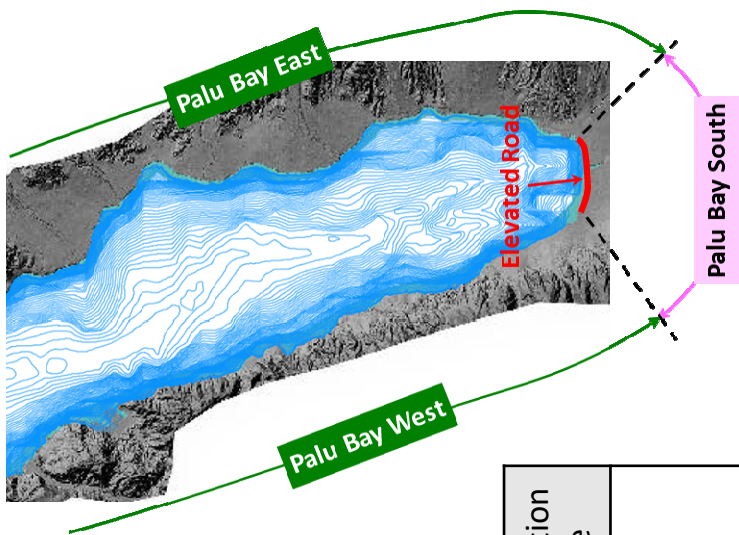


VI Tsunami Evacuation Plan (Basic Policy)

Tsunami Evacuation Plan (Basic Policy)

(1)Basic Policy of Evacuation Plan

- ✓ The evacuation plan considers two types of tsunamis due to the coastal landslide attributed to an earthquake and fault rupture of earthquake.
- ✓ Evacuation plans can be mainly classified into two areas:
Palu bay south area where elevated roads are planned and other areas.
- ✓ Only the basic policy is shown here, and detailed evacuation plans and evacuation equipment designs will be implemented within the future loan project.

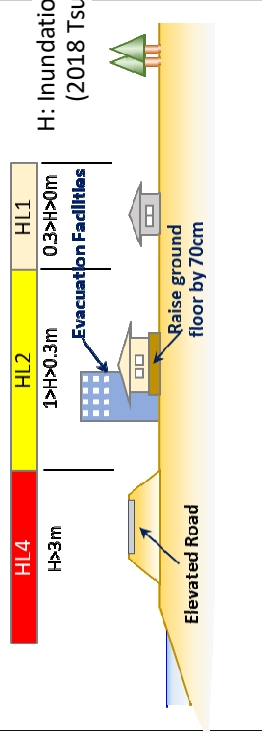
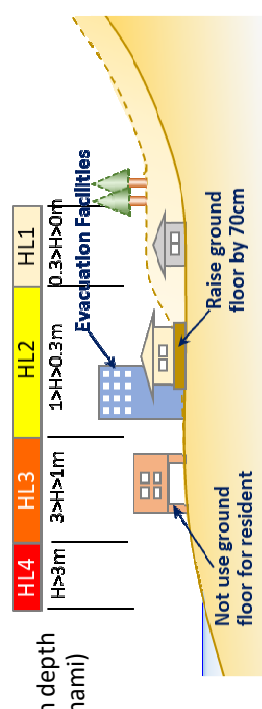
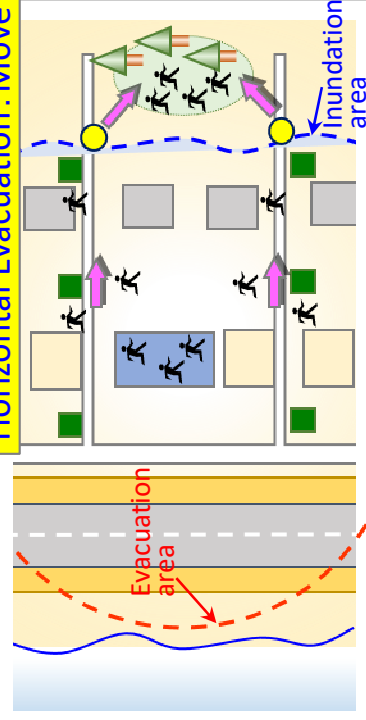
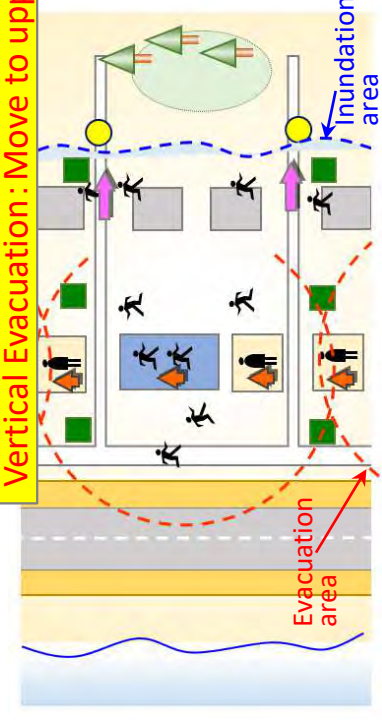
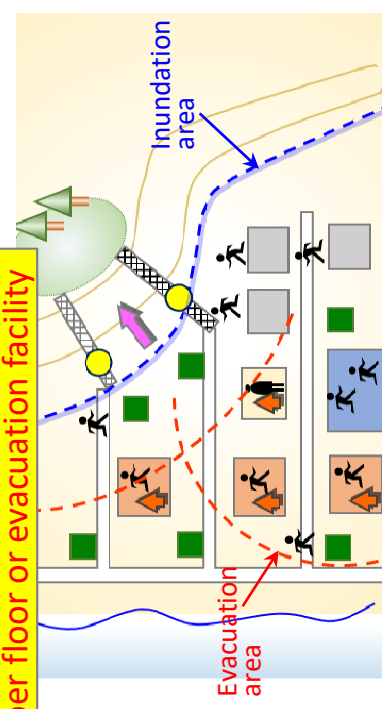
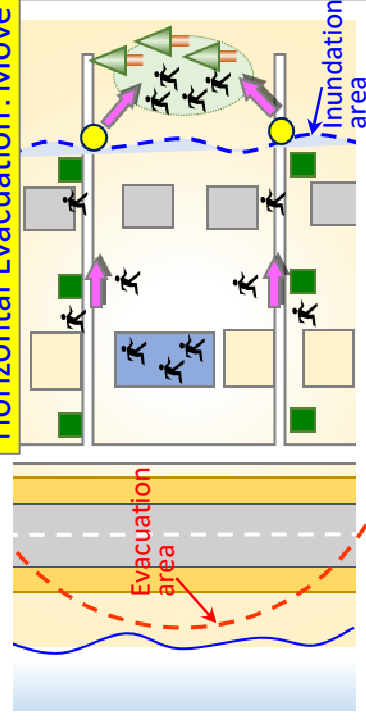
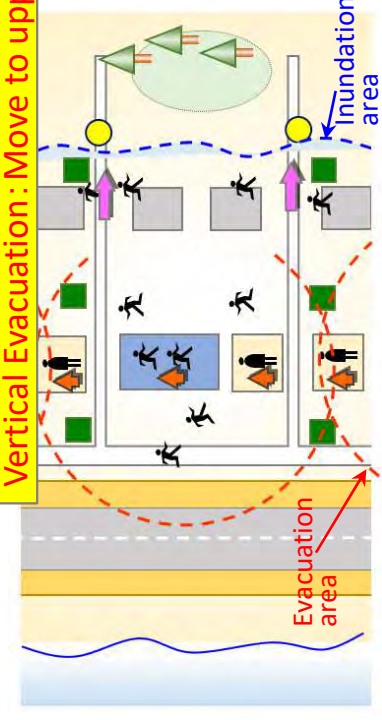
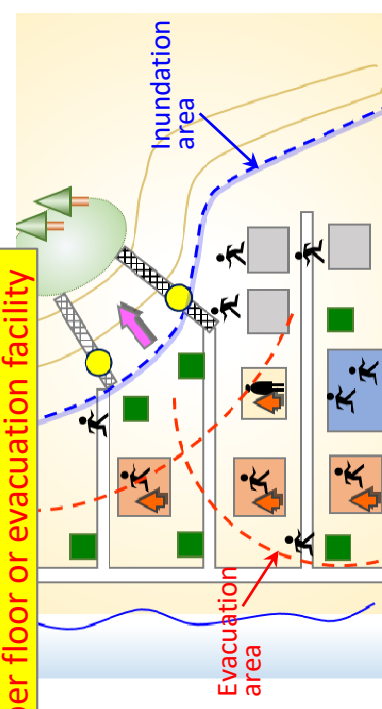


(2) Characteristics of Two Tsunami

Type of Tsunami		Cause Image	Wave Length (T)	Tsunami Arrival Time	Evacuation Time
	Coastal Landslides (Sep. 2018)		Short	Quick Approx. 5min	Short
	Fault Rupture		Long	Slow Approx. 20min	Long

Tsunami Evacuation Plan (Basic Policy)

(3) Evacuation Plan

Area of Pal Bay		Palu Bay South		Palu Bay West, East	
Side View					
Basic Action <u>Just after earthquake</u> [Supposed Tsunami] Fault Rupture					
Evacuation Time - Long					
Optional Action <u>If the tsunami arrival is confirmed</u> [Supposed Tsunami] Coastal Landslides (Sep.2018)					
Evacuation Time - Short					

Not only evacuation facilities but also daily evacuation drills are important

APPENDIX III-2

液状化地すべり（内陸部） に関する国内支援委員会 技術検討書

2021.6

付属書Ⅲ-2

液状化地すべり（内陸部） に関する国内支援委員会

技術検討書（案）

液状化地すべり（内陸部）に関する国内支援委員会 技術検討書

目 次

第 1 章	国内支援委員会設立の背景	1-1
1-1	本調査の背景と目的	1-1
1-2	国内支援委員会設立の目的	1-1
1-3	国内支援委員会メンバー	1-3
1-4	国内支援委員会の主な活動	1-4
第 2 章	地形地質概要	2-1
2-1	広域地質構造と今次地震	2-1
2-2	地形と地下水概要	2-13
2-3	地質概要	2-27
2-4	Nalodo 発生地域の被災状況	2-30
2-5	過去に発生した Nalodo 地形の判読	2-53
2-6	沿岸域の液状化を伴う流動性地すべり	2-58
第 3 章	現地調査	3-1
3-1	現地調査概要	3-1
3-2	第一次ボーリング調査	3-3
3-3	第二次ボーリング調査	3-47
3-4	トレンチ調査	3-83
3-5	参考；インドネシア政府機関が実施した調査	3-96
3-6	現場透水試験及び室内透水試験	3-108
3-7	地下水位観測（モニタリング）	3-114
3-8	室内土質試験	3-116
3-8-1	第一次ボーリング調査の土質試験の内容	3-116
3-8-2	第二次ボーリング調査の土質試験	3-117
3-8-3	土粒子の構成分析と土粒子の形状	3-118
3-9	PS 検層	3-126
3-10	水質分析	3-136
3-10-1	主要イオン分析	3-136
3-10-2	水素酸素同位体分析	3-140
3-11	堆積物の年代分析（C14）	3-142
3-12	被災者からのヒアリングと災害状況を記録したビデオ分析	3-143
3-12-1	ヒアリングの目的と方法	3-143
3-12-2	地震記録と周辺の震動被害の概要	3-145

3-1 2-3	被災者からのヒアリング	3-146
3-1 2-4	記録ビデオの分析	3-157
第4章	地質解析	4-1
4-1	液状化強度試験及び残留強度試験	4-1
4-1-1	試験の目的	4-1
4-1-2	試料の採取方法	4-1
4-1-3	運搬及び管理方法	4-2
4-1-4	供試体の特徴	4-2
4-1-5	試験結果の評価	4-9
4-2	液状化の検討及び評価	4-19
4-2-1	検討方法	4-19
4-2-2	優先 19 孔の液状化評価（ F_L ①法・ F_L ②法・エネルギー法）	4-30
4-2-3	被災の少ない平地主体エリア（残り 21 孔）の液状化評価結果	4-92
4-2-4	Nalodo 内部エリア（SWS のみ）の液状化評価結果	4-97
4-2-5	液状化判定結果の評価	4-99
4-2-6	想定以上の被圧が発生した場合の液状化評価	4-100
4-3	二次元浸透流解析	4-101
4-3-1	解析の目的	4-101
4-3-2	シミュレーションモデルの設定	4-102
4-3-3	物性値の設定	4-104
4-3-4	定常浸透流解析	4-107
4-3-5	非定常浸透流解析	4-108
4-3-6	液状化起源の地下水排出量の検討	4-112
第5章	長距離流動の発生要因の評価及び分析	5-1
5-1	地形地質の特徴	5-1
5-2	長距離流動の発生機構の分析とリスク評価	5-2
5-2-1	素因及び誘因の概要	5-2
5-3-2	長距離流動の発生メカニズムの分析	5-3
第6章	ハザードマップの精緻化および参照マニュアルの作成	6-1
6-1	概要	6-1
6-2	ハザードマップの作成方針	6-4
6-3	精緻化後の Nalodo ハザードマップ	6-9
第7章	Nalodo リスク軽減対策工の検討	7-1
7-1	対策工の基本方針	7-1
7-2	対策工の方向性	7-1

7-3	対策工の概略計画	7-2
7-3-1	構造物対策（案）	7-2
7-3-2	非構造物対策工案	7-11
7-3-3	対策工整備後の Nalodo ハザードマップ	7-15
7-4	灌漑水路の関連情報整理と地下水位観測計画の提案	7-16
7-4-1	地下水モニタリングの必要性	7-16
7-4-2	現況の地下水モニタリング実施状況	7-16
7-4-3	地下水観測計画	7-16
7-4-4	灌漑水路管理関係者の連携体制	7-19
7-4-5	関係機関及び他ドナーとの役割分担	7-19
第 8 章	長距離流動に係る国内支援委員会の意見	8-1
8-1-1	液状化した砂の沈降と水膜形成について	8-2
8-1-2	単調載荷試験（中空ねじり試験）結果にもとづく残留強度の推定	8-9
8-1-3	液状化発生後のすべり安定解析	8-14
8-1-4	被圧地下水の由来	8-17
8-2	國生委員の提供論文	8-18
8-2-1	Palu 緩斜面の液状化水膜流動メカニズム(國生委員).....	8-18
8-3	安田委員の提供論文	8-31
8-3-1	伏在する断層に沿って地震時に地下水が噴出して流動したと考えられるメカニズム	8-31
8-3-2	Palu の住民からのヒアリング結果に関する考察	8-44
8-4	東畑委員の提供論文 Nalodo 長距離斜面流動のメカニズム Mechanism of long-distance flow in Palu	8-58
8-4-1	はじめに	8-58
8-4-2	Nalodo の特異性	8-58
8-4-3	土の物性は異常か?	8-59
8-4-4	地震動は特異か?	8-60
8-4-5	地形は特殊か?	8-61
8-4-6	Nalodo 的長距離流動距離の算定方法	8-69
8-4-7	Nalodo の発生原因に関する提案の比較検討	8-78
8-5	清田委員の提供論文	8-87
8-6	岡村アドバイザーの提供論文	8-101
8-7	東畑委員の提供論文 補足 地震前後に観測される地下水異常について	8-115
8-8	ハザリカアドバイザーの提供論文	8-119

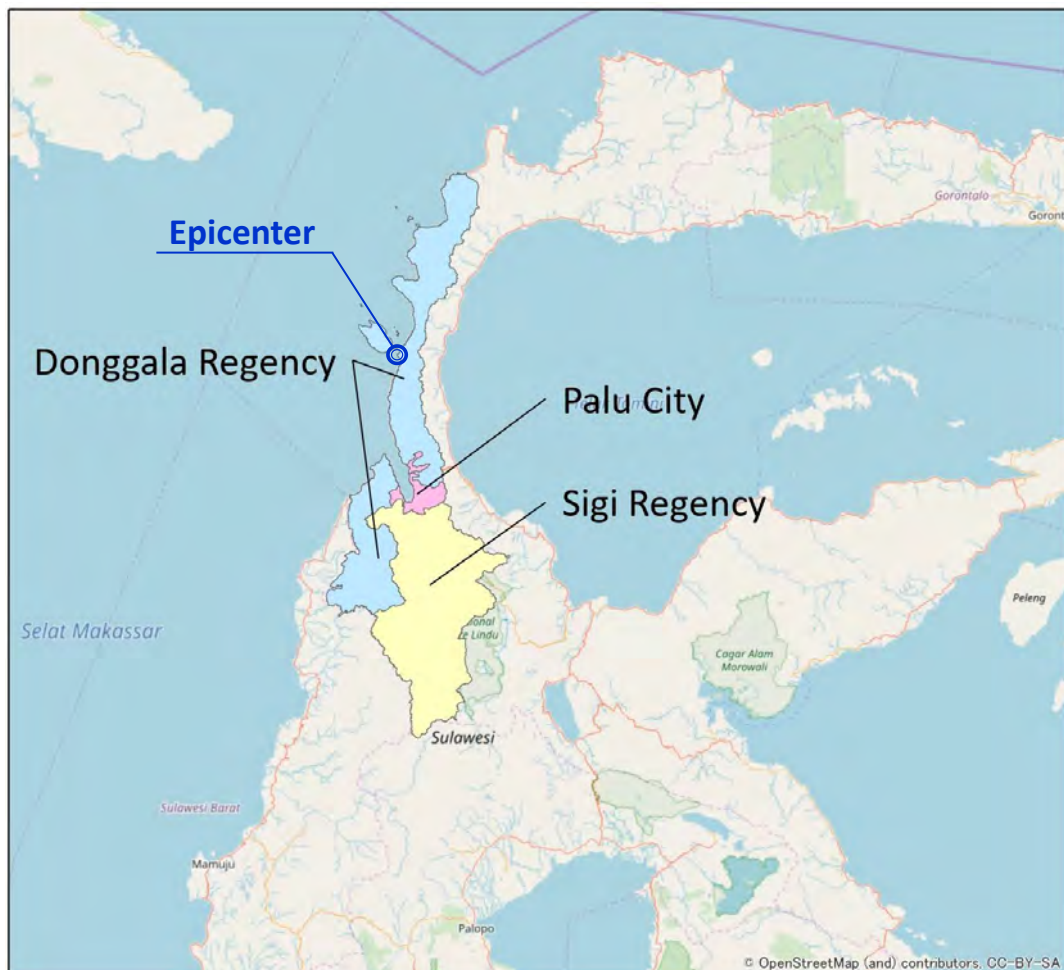
終わりに

プロジェクト位置図

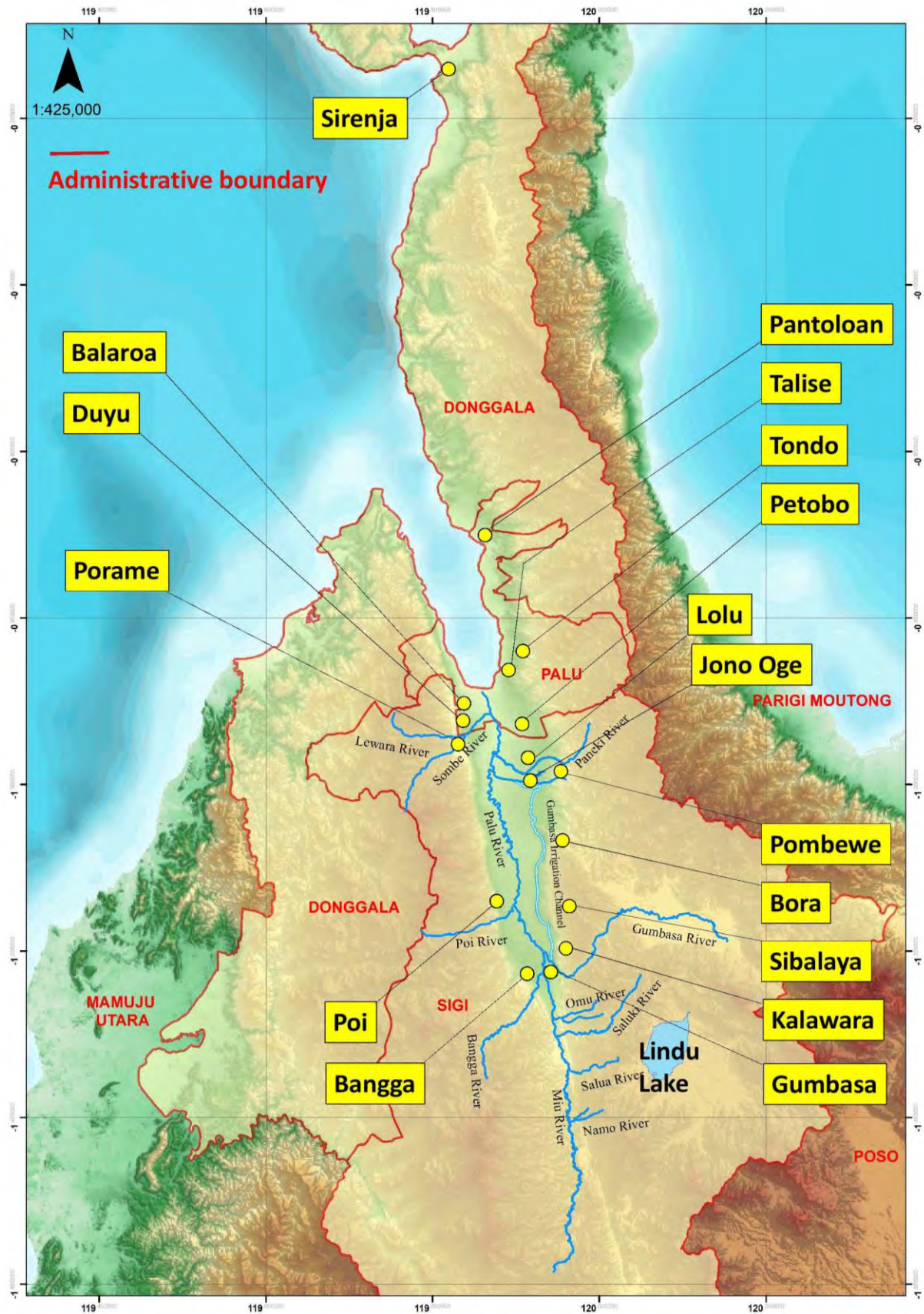
Location of Central Sulawesi Province



Location of Disaster Affected Area and Epicenter (Palu City, Sigi Regency and Donggala Regency)



Location of Target Area in the Project



出典：インドネシア国 国土地理院（BIG）データをベースに調査団作成

巻頭写真



Village affected by Liquefaction Landslide in Petobo



Collapse of Petobo Point Top



Rice Paddy Affected by Liquefaction in Jono Oge



Landslide-affected area Balaroa, Palu



Building Affected by Liquefaction in Lolu, Sigi



Upper part of of Liquefaction Landslide in Sibalaya, Sigi



Flow failed part of Petobo point



Support committee for Liquefaction

(25th March 2019)



Petobo Landslide-affected Area (Aerial view by drone)



Jono Oge Landslide-affected Area (Aerial view by drone)



Balaroa Landslide-affected Area (Aerial view by drone)



Petobo Landslide-affected Area (Aerial view by drone)

第 1 章 国内支援委員会設立の背景

1-1 本調査の背景と目的

2018 年 9 月 28 日、インドネシア国中部スラウェシ州の州都パル市の北 80km を震源とするモーメント・マグニチュード 7.5 の地震が発生し、パル市街地の西方では地表面に左横ずれ 4～5 m の地震断層が出現した。また、主に液状化に起因すると推測される内陸部での地すべり及び沿岸部での津波の影響により、甚大な被害が生じた。パル市、シギ県、ドンガラ県を中心に、橋梁の崩壊、港湾施設の損傷、給水施設の損傷、灌漑水路の損傷、病院や学校等の公共施設の機能不全、等が顕著な状況となった。2019 年 4 月の中部スラウェシ州公開情報によると、死者・行方不明者 4,547 人、被災者 172,999 人、住宅損壊 100,405 戸、経済的損失は 5 兆 IDR（約 370 億円）にのぼる。

この中部スラウェシ州地震災害（以下、「本震災」と呼ぶ）からの復旧・復興の実現に向け、インドネシア国政府機関である国家開発企画庁（以下、「Bappenas」と呼ぶ）は戦略的タスクフォースを設置し中部スラウェシ州の災害復興に係る復興マスタープラン案（以下、「復興 M/P 案」と呼ぶ）を 2018 年 12 月に策定、その後、復興 M/P 案に基づき、具体的な各種復興計画を策定し、復興支援事業を進めることを決定した。

国際協力機構（以下、「JICA」と呼ぶ）は、インドネシア国政府からの協力要請を受け、2018 年 10 月の緊急援助及び被災状況に関する情報収集のための第一次調査団の派遣を皮切りに、被災状況の把握及び復興 M/P 案の策定を支援した。加えて、今後のシームレスな復旧・復興支援策に係る協議を、Bappenas をはじめとするインドネシア国関係機関と実施した。その結果、インドネシア国政府から我が国に対して、本震災からの復興への技術協力の要請がなされ、本プロジェクト「インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト（以下、「本技術協力」と呼ぶ）」の実施が決定された。

本技術協力は、本震災からの復興計画の策定及びその実施支援等を行うことにより、的確かつ円滑な復興事業の促進と、「より良い復興」（Build Back Better: 以下、「BBB」と呼ぶ）の具現化を図り、災害に強い社会の形成に寄与することを目的として、開発計画調査型技術協力を実施するものである。

1-2 国内支援委員会設立の目的

本調査では、地域の災害リスク低減のための強靱化計画を準備、実行することにより、地域を災害に対して強靱な街として形成することが求められた。そしてこれを実現するために、主に 4 つの成果（アウトプット）のための活動を進める方針とした。

- Output ① 災害リスクの検証とハザードマップの整備支援
- Output ② 災害リスクの検証をもとにした空間計画の整備支援
- Output ③ インフラ・公共施設の復旧・復興計画支援
- Output ④ 生計回復及びコミュニティ再生の実現のための支援

①～④のうち、Output①に関しては、今次災害発生要因を分析し、津波、液状化地すべり、地震、洪水、土砂災害等の複数の災害を対象とした災害ハザードの評価を行うことを目的とした。しかし、被災直後に実施した第一次調査団の派遣を通じて、今回発生した内陸部の液状化地すべりが、一般には液状化することが少ない扇状地内の緩斜面で発生し、流動距離及び発生規模が液状化災害では前例を見ないほど大規模であったことが確認された。

このように世界的に類をみない大規模な液状化による災害を扱うこととなったため、この発生メカニズム、ハザードマップへの評価、ならびに Output③に関係する液状化地すべりの対策方針について、専門的知見から意見を頂くことを目的に、石原研而名誉教授（東京大学）を委員長とした日本の学識経験者からなる「インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト 液状化地すべり（内陸部）に関する国内支援委員会」（以下、国内支援委員会と呼ぶ）を設立した。

<今回の災害の特徴>

パル市及びシギ県の内陸部で広範囲に発生した液状化地すべり（Nalodo※）は、多くの死者・行方不明者を出し、建物やインフラが崩壊した。大規模な液状化地すべり（Nalodo）が発生したのは、Balaroa(0.39km²)、Petobo (1.63km²)、Jono Oge (1.75km²)、Sibalaya(0.5km²)、Lolu(0.26km²)である（図 1-1 参照）。Nalodo の特徴として以下があげられる。

- 内陸部の緩傾斜扇状地（地盤傾斜 3° 以下）において、地震直後に地盤の液状化を伴った大規模な流動性地すべりが複数箇所と同時に発生した。Balaroa を除くと概ね 2° 以下である。
- 地盤の流動距離は相対的に小型の Balaroa・Sibalaya においても数百 m、Petobo と Jono Oge では 800m 程度に達した。
- 地盤流動は発生後数分以内に完了し、大量の地下水を伴っていた。

Nalodo として大規模な地盤流動が発生した地域以外にも、Palu 川の東側の地域では地盤の側方流動が広範囲に発生し、その範囲は灌漑水路の西側の広範囲に発生したことに特徴がある。これらの地域は、Nalodo 内部のように多くの犠牲者は出ていないが、移動ブロックの境界付近の家は地盤の変形量が大きいために倒壊している。



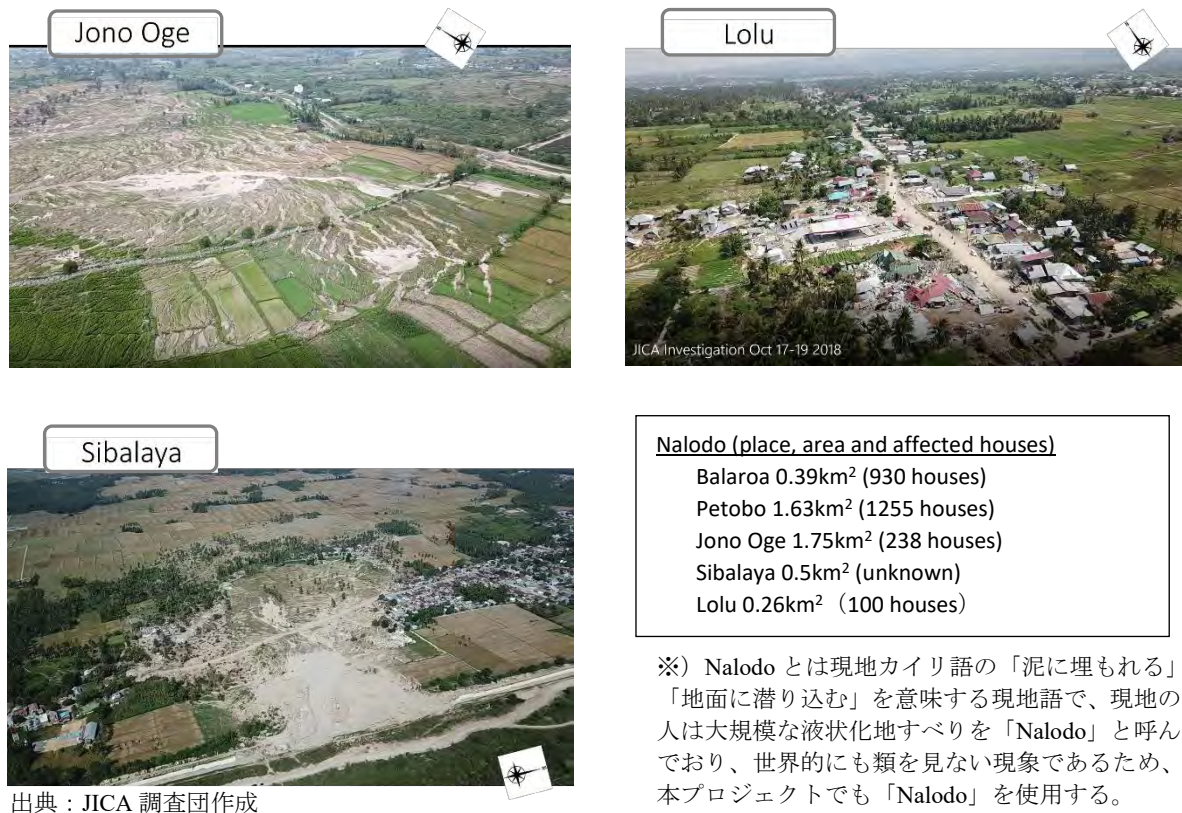


図 1-1 Nalodo の発生状況（上空写真）

1-3 国内支援委員会メンバー

国内支援委員会のメンバーは、石原研而東京大学名誉教授を委員長とし、表 1-1 に示す委員の先生方で構成されている。委員長を代表とする各委員の先生は、地盤工学（そのうち特に液状化）の専門家で、被災地での現地調査、インドネシア国で開催された専門家会議及び日本国内で開催された委員会等に参加いただき、活発なご意見、ご指導を頂いた。なお、有識者として、九州大学のハザリカ・ヘマンタ教授、愛媛大学の岡村未対教授及び東京大学の渡邊健治准教授他の先生方にも委員会及び現地調査等に参加頂いた。また、インドネシア国国家防災庁 総合防災政策アドバイザー多田直人氏をはじめとする多くの専門家に調査団を主導いただき、協議に参加いただいた。

表 1-1 国内支援委員会のメンバー一覧

委員会役職	氏名	所属	役職
委員長	石原 研而	東京大学 名誉教授・中央大学 研究開発機構 教授	
委 員	國生 剛治	中央大学	名誉教授
委 員	安田 進	東京電機大学	名誉教授
委 員	東畑 郁生	東京大学	名誉教授
委 員	清田 隆	東京大学	准教授
委 員	佐々木 哲也	土木研究所	上席研究員

出典：JICA 調査団作成

1-4 国内支援委員会の主な活動

この国内支援委員会は Nalodo に係わるリスク評価・分析のために合計 7 回開催し、技術検討会を含めると 10 回以上が開催された。国内支援委員会、技術検討会には、JICA 長期専門家である多田専門家をはじめとする多くの専門家が調査団を主導し、会議でのプレゼンを担当いただいた上、議論対象となる資料の一部まで提供いただいた。

国内支援委員会設置に先立ち、2018 年 10 月 17 日、18 日と 2018 年 11 月 2 日～11 月 4 日に JICA 現地調査団が編成され、第一次調査団には清田准教授が、第二次調査団には東畑名誉教授と清田准教授が現地調査を行った。現地調査の結果は、調査団の現地調査報告としてまとめられている。現地確認状況からは、ゆる詰めの中積砂質土が液状化したこと、被圧地下水の存在、細粒土層の影響などが大規模な液状化地すべりを発生させたと考えられた。その後、JICA は液状化地すべりのハザード評価及び移転地域の安全性確認を目的とした第一次ボーリング調査を開始している（2018 年 11 月着手）。

第 1 回の国内支援委員会では、内陸部で発生した液状化地すべり発生場の地形的特徴を整理するとともに、第一次ボーリング調査の結果の中間成果を報告した。液状化による地すべりは、ゆる詰めの中積砂質土層が液状化した状況と被災後においても部分的に被圧地下水が残存し、湧水帯を形成していることなどを報告した。

2019 年 1 月 5 日～10 日にかけて、石原名誉教授・安田名誉教授・國生名誉教授を含む国内支援委員会の先生が現地調査を行うとともに、ジャカルタにおいて日本における液状化研究をレクチャーし、インドネシアの研究者と意見交換を行った。この国際会議にも、多田 JICA 長期専門家が参加され、JICA 調査団の調査結果報告が行われた。

Palu 低地の東側には Gumbasa 灌漑水路が通っており、漏水の発生に伴って周辺地盤の地下水位が上昇し、液状化環境の地域が拡大した可能性が想定される。ただし、灌漑水路のない西側の Balaroa においても Nalodo が発生していることから、灌漑水路を主要因とすることは難しいとの意見が大半を占めた。また、液状化に伴って難透水層の下面に水膜が形成されることによって、緩斜面においても大規模な側方流動が発生すること、地盤流動発生のトリガーは伏在する断層からの異常間隙水圧が発生した可能性についても報告があった。

第 2 回～第 5 回の国内支援委員会では、液状化判定結果、二次元浸透流解析、ヒアリング結果、地下水の水質分析結果などの細部技術評価について議論が行われ、また、Nalodo 内部の地盤状況を把握するための第二次ボーリング調査についても議論が行われた。

2019 年 10 月のナショナルパネルへの参加では、石原名誉教授と安田名誉教授が出席され、インドネシア土質工学会の研究者と現地合同調査を行うとともに、Palu 及びバンドンにおいて研究成果などについて発表し、意見交換を行った。

2019 年 9 月 30 日開催の第 6 回の国内支援委員会では、「ゆる詰めの中積砂層・シルト層が液状化し、緩斜面において側方流動を発生させたことまでは、既往調査結果より明らかとなったが、長距離流動の発生機構の解明のためには、追加の調査の実施が望ましい」との提言がなされた。

これを受けて、Nalodo 内部のトレンチ調査、日本国内の試験機関での乱れの少ない試料の液状化試験・分析、PS 検層とその結果を反映した液状化評価、さらには 2 次元浸透流解析等の追加検討を実施した。2020 年 1 月から開始した液状化試験は、国内支援委員会の計画・ご指導の下に実施した。更に、2020 年 4 月～7 月にかけての外出制限期間中は、液状化試験結果の評価や活断層の地盤破壊形態（Supershear）等についてメールでの活発な議論が行われた。

国内支援委員会の開催状況と現地調査の経緯は表 1-2 の通りである。

表 1-2 国内支援委員会の開催状況及び現地調査の経緯

行事	実施日	作業状況	討議内容
JICA 第一次調査団	2018/10/17-18	内陸部の液状化地すべり地域及び沿岸域の液状化地すべり現地調査	緩傾斜の沖積扇状地において大規模な液状化を伴う地すべりが発生した。細粒分の影響及び被圧地下水の影響によって災害規模が大きくなった。
JICA 第二次調査団	2018/11/2-4	同上	上記に加え、大規模流動が発生した原因として、水膜の形成や水田として活用される表層の細粒土層の影響などが指摘され、地下水条件・土質条件を確認するための地質調査が要望された。また、住宅移転候補地についての助言が行われた。
国内支援委員会（第 1 回）	2018/12/19	第一次ボーリング調査実施段階	Nalodo の調査結果（途中段階）報告・沿岸域のボーリング調査計画について説明された。
現地調査及びインドネシアサイドとの研究報告（出張）	2019/1/5 ～ 2019/1/10	第一次ボーリング調査完了土質試験（未完了）	内陸部及び沿岸域で発生した液状化地すべりの現地踏査を行い、地盤の変状形態や土性を観察し、長距離流動の発生要因について議論を行った。1/10 現地調査結果や日本の研究事例をインドネシア側に発表した。
国内支援委員会（第 2 回）	2019/1/29	第一次ボーリング調査（完了）室内土質試験（未完了）トレンチ調査を追加	N 値（<10）の平面・深度方向の分布特性から、液状化の危険度について評価、 F_L 判定資料を添付。ハザードマップ及び対策工の選定方針の説明
国内支援委員会（第 3 回）	2019/3/19	液状化判定（ F_L 法・エネルギー法）の結果を報告	液状化の判定は被圧を考慮することが望ましい。災害発生状況のヒアリングを整理する。断層起源などの異常水圧の発生を検討する。などの指摘があった。
本邦招聘意見交換会	2019/4/27	対策工の選定方針説明	高官招聘時の説明
国内支援委員会（第 4 回）	2019/6/3	対策工の選定方針を説明第二次ボーリング調査計画	PS 検層は日本人技術者が現地で行うことが良い。トレンチ調査を追加することが望ましい。
国内支援委員会（第 5 回）	2019/8/8	第二次ボーリング調査結果の説明	二次元浸透流解析の結果および液状化解析結果について議論。
国内支援委員会（第 6 回）	2019/9/30	第二次ボーリング調査を完了、液状化検討・2 次元浸透流解析の説明	室内液状化試験は日本に試料を運搬して実施する。PS 検層を反映した液状化判定・長距離流動の発生要因分析（特に被圧条件）が必要。
ナショナルパネルへの参加	2019/10/5 ～ 2019/10/10	現地調査 ナショナルパネルへの発表	石原名誉教授・安田名誉教授とインドネシア側研究者による合同調査。パル・バンドンでのレクチャー。
技術検討会（最終委員会前）	2020/11/11	長距離流動に関する委員会としてのとりまとめ方針	液状化評価の修正結果、ヒアリング及びビデオの補足説明結果について議論を行った。長距離流動のシナリオは固定せず、複数シナリオを併記しとりまとめる方針となった。
国内支援委員会（第 7 回）	2020/12/11	JICA 報告書案の確認	JICA 調査報告書の確認

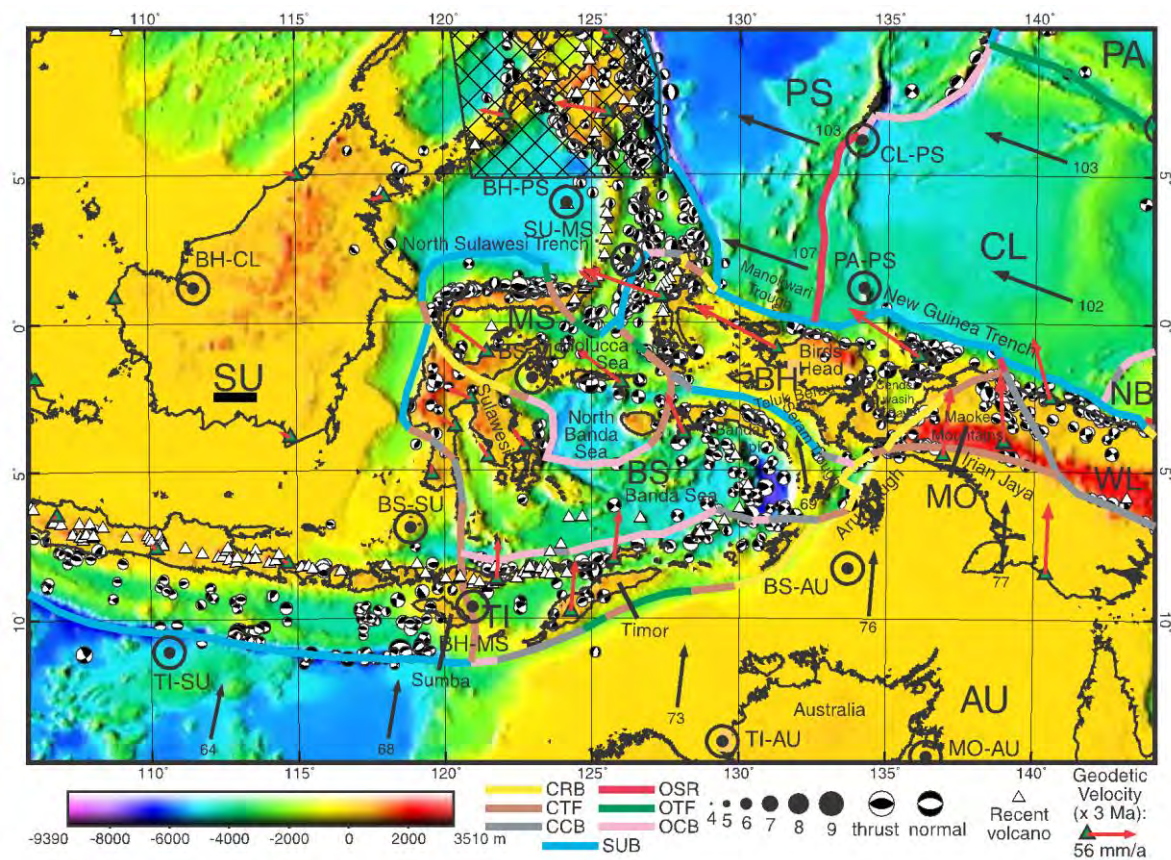
出典：JICA 調査団作成

第 2 章 地形地質概要

2-1 広域地質構造と今次地震

(1) 広域地質構造

図 2-1 に示すようにスラウェシ北部に位置する Palu は、MS (Molucca 海プレート)、BS (Banda 海プレート) 及び SU(Sunda プレート)の会合地点に位置し、MS と BS の境界は内陸部に延長するとともに CRB (continental rift boundary) としてプレート間の動きが年間 40mm を超えるとされている。この内陸部へ延長するプレート境界の断層は、「Palu-Koro 断層」と呼ばれ、中部スラウェシ地震を発生させた。



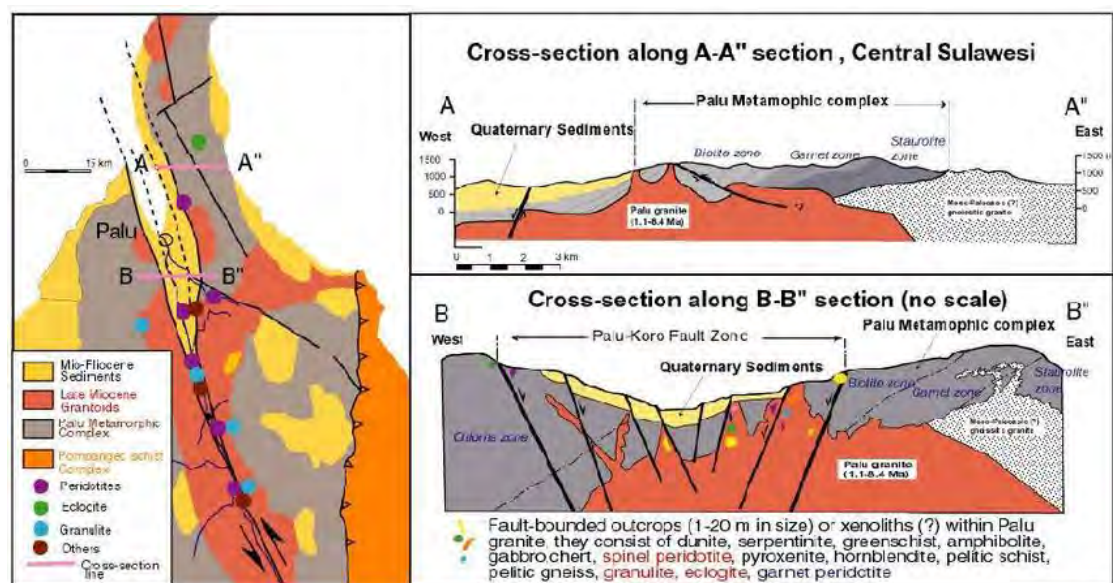
CCB continental convergent boundary, CTF continental transform fault, CRB continental rift boundary, OSR oceanic spreading ridge, OTF oceanic transform fault, OCB oceanic convergent boundary, SUB subduction zone.

出典：Bird, P.,(2003) An updated digital model of plate boundaries, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252, 2003. ¹⁾

図 2-1 スラウェシ島周辺のプレート境界と地震記録

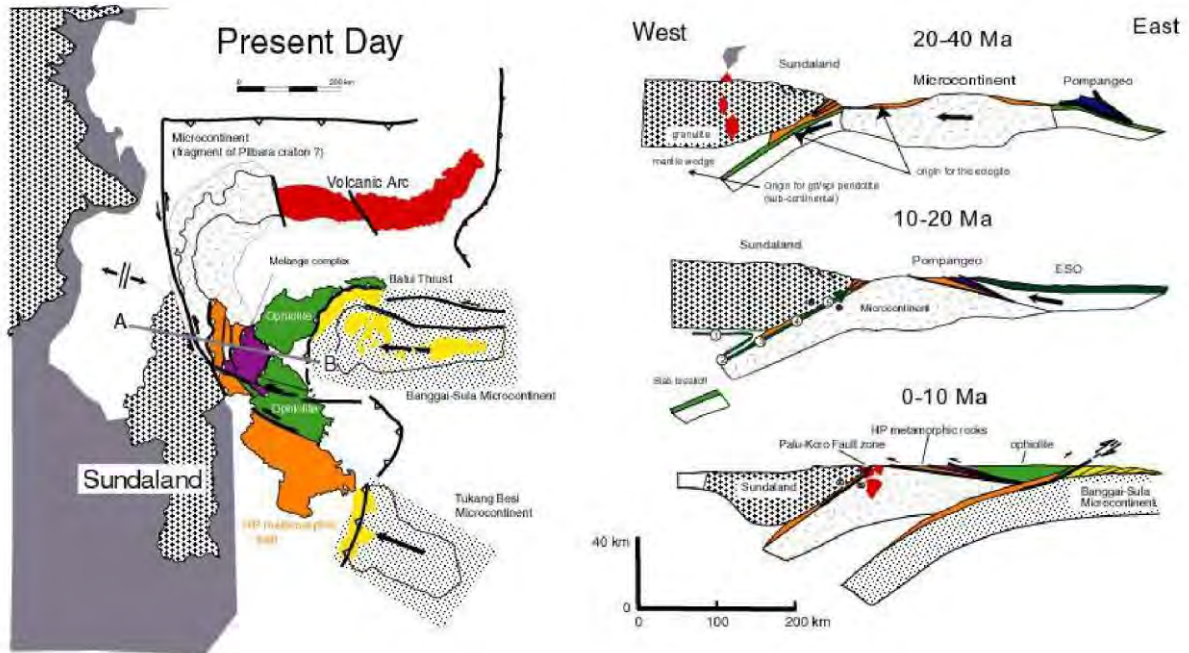
Palu 地域の広域的な地質構造（図 2-2、図 2-4 参照）の形成史は、表層地質分布、岩石の鉱物組成及び変成年代などから次の様に考えられている。（図 2-3 参照）

- 1) 20–40Ma（2 千万年～4 千万年前）；MS（Molucca 海プレート）が西進し、BS（Banda 海プレート）の下に沈み混む。西側の BS（Banda 海プレート）には花崗岩マグマが形成されるとともに地表では火山活動が発生する。
- 2) 10–20Ma（1 千万年～2 千万年前）；東側の MS（Molucca 海プレート）には衝上断層が形成され、Palu-Koro 断層帯は展張場に変わる。
- 3) 0–10Ma（現世～1 千万年前）；Palu-Koro 断層帯は左横ずれを主体に、東西山地は開きながら中央が陥没する。また、花崗岩マグマが貫入し、Palu 変成岩複合岩体に熱変成を与えている。Hennig et al.（2017）によると、花崗岩の貫入年代は 3.1Ma、変成岩類の熱変成年代は 3.1～2.7Ma を示し、新第三紀鮮新世の地質年代に該当する。第四紀以降では、山地斜面から供給された碎屑物が東側山地境界付近に数 100m の厚さで堆積するとともに、中央低地が陥没を繰返し、Palu 低地及び Palu 湾が形成される。



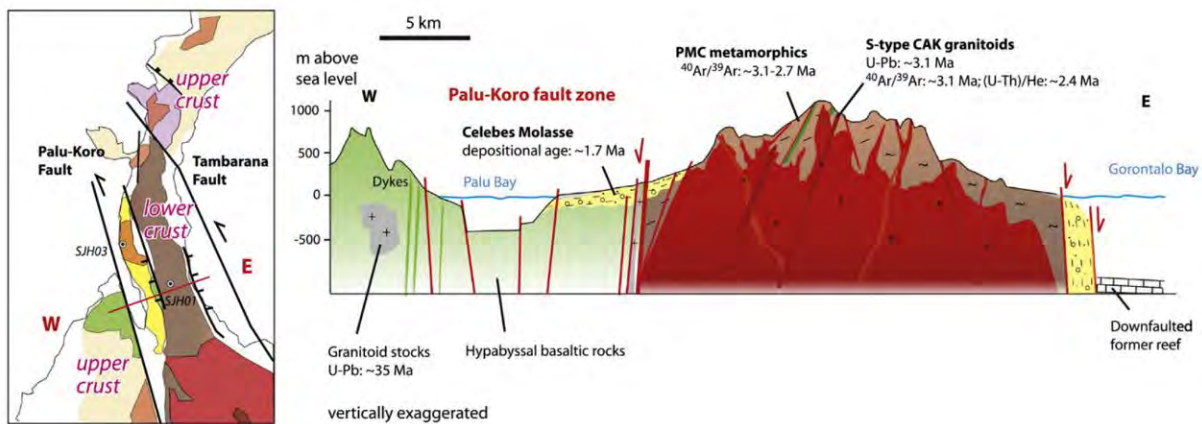
出典：Kadarusman et al., 2011 ²⁾

図 2-2 Palu 湾及び Palu 盆地の地質構造断面図



出典: Kadarusman et al., 2011 ²⁾

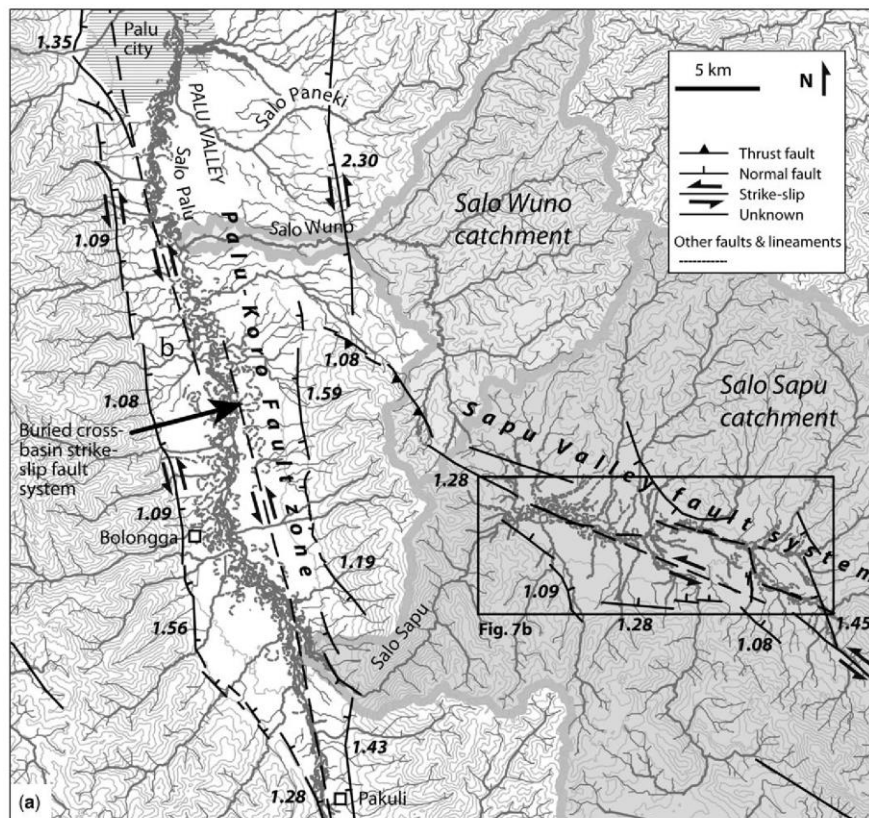
図 2-3 スラウェシ島の地質構造形成史



出典: Hennig et al., 2017 ³⁾

図 2-4 Palu 湾周辺の地質構造断面図

第四紀 (2.58Ma より新しい) の活構造については、WATKINSON 等 (2017) が図 2-5 に示すように詳細な地形検討結果を報告している。Palu 低地の山地斜面との境界 (西縁) には、明瞭な変位地形を伴う活断層が確認される。また、Palu 低地の Palu 川近傍においても、河川の蛇行形態から活断層を推定している。Palu 低地の東縁では正断層系の断層を推定しているが、相対的に見ると東縁断層は地形的明瞭度が低い。



出典：WATKINSON & ROBERT HALL (2017) ⁴⁾

図 2-5 Palu 周辺の地形判読から得られた活断層分布図

(2) 今次地震と歴史地震記録

2018 年 9 月 28 日 (UTC10:02:46) にインドネシア・スラウェシ島で Mw7.5 (USGS) の地震が発生した。日本の国土地理院は、地球観測衛星「だいち 2 号」(ALOS-2) に搭載された合成開口レーダー (PALSAR-2) のデータを使用して SAR 干渉解析を行い、10 月 5 日には地殻変動図 (図 2-6 参照) を公開した。公開した地殻変動図から読み取れる変動域は震央から南側へ約 160km の範囲に及んでいる。また、Palu から南側で大きな地殻変動が見られ、5m 程度の変位が生じている。南北に走向をもつ断層の左横ずれ運動と調和的である。

Valkaniotis 等 (2018) は、衛星画像から移動量を算出して地震発生 3 週間後の 10 月 19

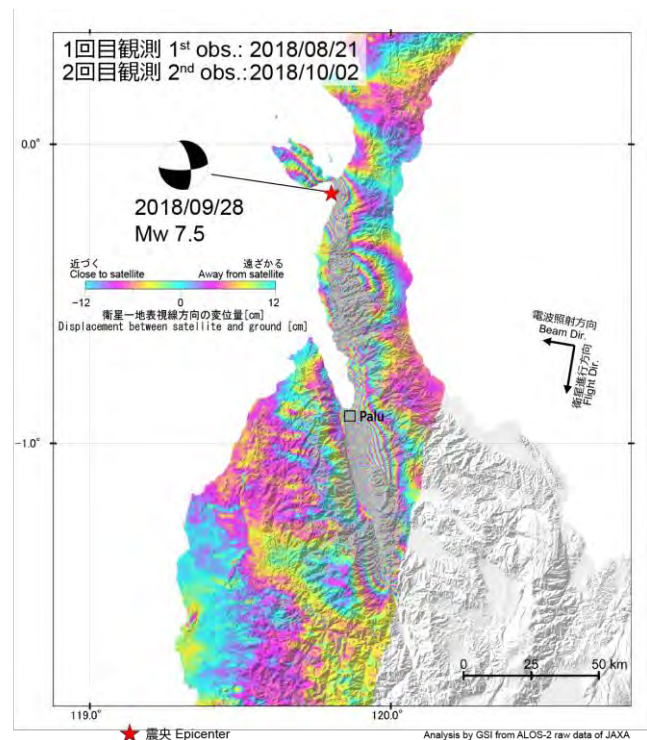


図 2-6 SAR 干渉からの変動量

出典；国土地理院 HP

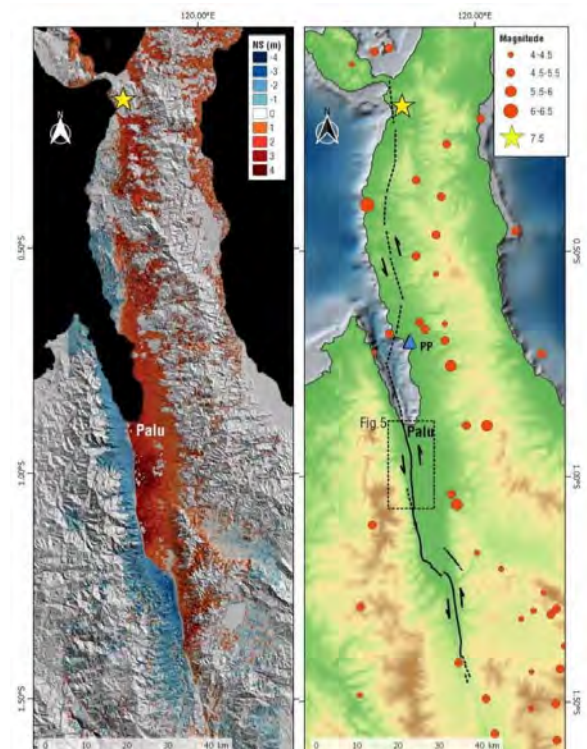
<https://www.gsi.go.jp/cais/topic181005-index.html>

日には変動量図を報告している（出典： Valkaniotis (2018) 5)

図 2-7 参照）。衛星画像から解析された南北方向の変位成分は、4m以上の左横ずれを示し、Palu 低地の西縁付近を南北に縦断している。

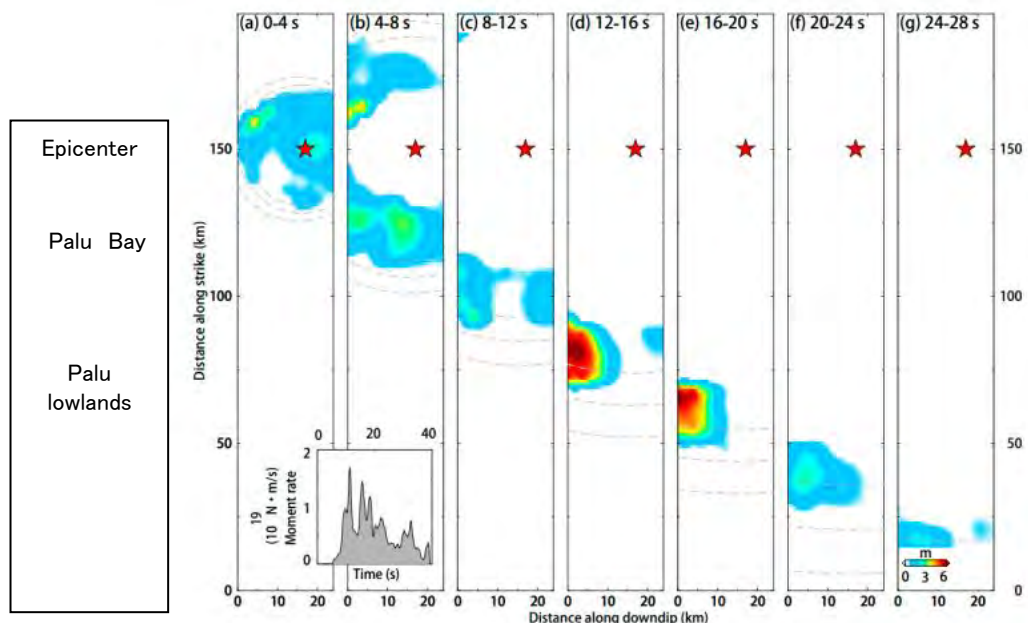
WATKINSON 等 (2017) によって地形検討から報告された活断層位置は、基盤岩や洪積礫層に形成された滑落崖地形を指標としているのに対して、今次災害で発生した地表地震断層は東側に 1～3km ずれた Palu 低地（沖積扇状地）内に出現したことに特徴がある。

地震の震源は、Palu の北方約 80km 深さ約 20km 地点であるが、地盤の破壊過程を広域に配置された地震計記録から断層の破壊過程を解析した結果は図 2-8 のとおり報告されている。震源での地震発生を 0 秒とすると、12～20 秒後には南方約 70km の Palu 低地の深さ 5km より浅い地域で最大 6m 程度の高角横ずれ破壊が発生している。一般的な S 波の伝播速度は 3～3.5km/sec であるのに対して、地盤破壊の伝播速度はそれを上回る 4.1km/sec(Bao Han,2019⁵⁶⁾)であったと報告されている。



出典： Valkaniotis (2018) 5)

図 2-7 衛星画像の分析による変動量 (NS) と
今次地震の震源・地表断層



出典： The 2018 Mw 7.5 Palu Earthquake: A Supershear Rupture Event Constrained by InSAR and Broadband Regional Seismograms Remote Sens. 2019, 11, 1330; ⁷⁾

図 2-8 断層の破壊過程（破壊の位置と経過時間の関係）

GPS 測位に基づく地殻変動の観測結果は、Socquet 等（2006）に報告がある。図 2-9 に示すように Palu-Koro 断層を挟んで東側の北スラブブロックは北北西方向に 40～45mm/year 移動し、西側のマカッサルブロックは北西方向に 10～20mm/year 移動している。長期間の平均的な変位速度差は 34mm/year との報告があり、この平均変位速度は今次災害での地表面左横ずれ量（最大 5m 程度）の 1/100～1/150 に相当する。歴史地震の記録は、Palu がオランダ統治以降に発展した町で、それ以前は山地地域で生活をしてきたため、沿岸域の詳細な津波などの災害記録は残っていない。Palu 博物館に残されている歴史地震の記録概要は以下の様に、1907 年以降 10～30 年間隔に Mw6～Mw7.6 クラスの地震被害が発生している。

Palu 博物館の地震災害記録要旨（1968 年以降の詳細については表 2-1 に示す）

1907 年；Lemo (Kulawi) Earthquake（詳細不明）

1927 年；15 m Tsunami & EQ Mw6 14 ,dead, 50 injured

1938 年；Palu Bay, 4 m Tsunami & EQ Mw7.6

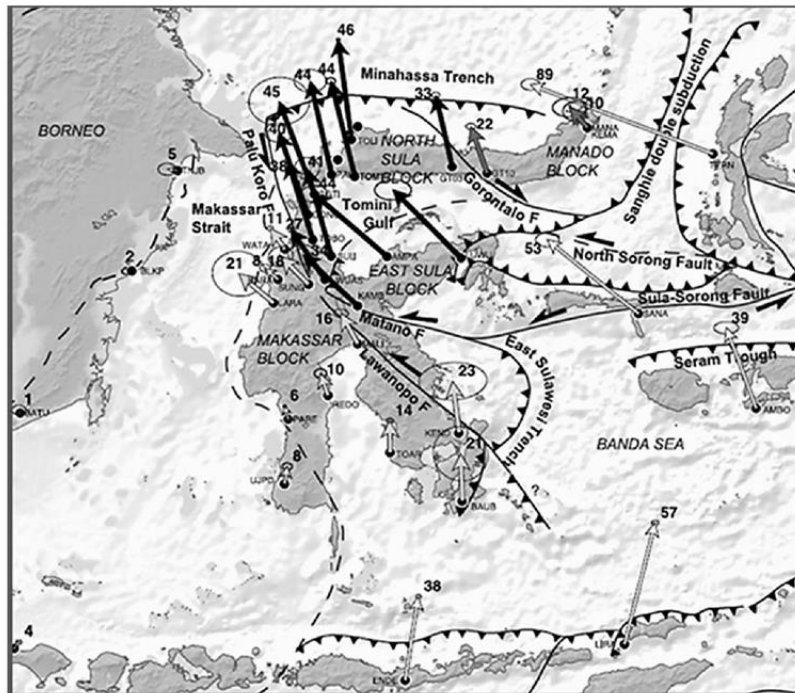
1968 年；Tambu, 9 - 10 m Tsunami & EQ Mw7.2

The northern part of Tambu Village drops $\pm$ 4 m

1996 年；Tonggolobibi, 4 m Tsunami & EQ Mw7 , Siboang Village

2005 年；Bora, EQ Mw6.2 Liquefaction area found at Babul Jannah Mosque,

2012 年；Lindu, EQ Mw6.3



出典：Socquet 等（2006）⁸⁾

図 2-9 マカッサルブロック（西側）と北スラブロックの GPS 観測による移動速度（mm/yr）

Figure 2. GPS velocities of Sulawesi and surrounding sites with respect to the Sunda Plate. Grey arrows belong to the Makassar Block, black arrows belong to the northern half of Sulawesi, and white arrows belong to non-Sulawesi sites (99% confidence ellipses). Numbers near the tips of the vectors give the rates in mm/yr. The main tectonic structures of the area are shown as well.

表 2-1 北スラウェシの歴史地震記録

No.	Date	Magnitude	Location		Strike/Dip/Rake	Length (km)	Width (km)	Slip (m)	Ref.
			Latitude	Longitude					
0	14/08/1968	7.2	0.157°	119.80°	*	*	*	*	A
1	01/01/1996	7.9	0.73°	119.93°	53°/7°/68°	90	60	1.8	B
2	16/07/1996	6.6	1.02°	120.25°	63°/14°/71°	20	19	0.6	A
3	22/07/1996	7.0	1.00°	120.45°	57°/14°/63°	40	18	1.1	A
4	21/05/1998	6.6	0.21°	119.58°	195°/74°/20°	21	20	0.62	C
5	10/10/1998	6.0	-0.40°	119.84°	250°/94°/96°	15	20	0.22	C
6	23/01/2005	6.2	-1.239°	119.9°	321°/61°/-59°	18	20	0.26	A
7	18/08/2012	6.3	-1.326°	120.092°	339°/83°/-5°	20	20	0.31	A
8	29/05/2017	6.6	-1.292°	120.4	104°/44°/-95°	16	11	1.2	D
9	28/09/2018	7.5	-0.256°	119.846	350°/67°/-17°	#	#	#	E

Note: The earthquake parameters were extracted from the following sources: (A) USGS earthquake catalogue; (B) Gomez et al., 2000; (C) Vigny et al., 2002; (D) Wang et al., 2018; (E) Song et al., 2019; and # refers to E for finite fault parameters and * refers to unavailable earthquake parameters. Length and width means along-strike and down-dip length, respectively.

出典：Chang Liu（2020）Stress partition on the Palu-Koro fault controlling the 2018 Mw 7.5 Palu earthquake and its seismic hazards ⁹⁾

既往の地震（1968 年の Tambu 地震, Mw7.2 及び 2005 年 Bora の地震, Mw6.2）において、地震後に温泉が湧き出した記録が Palu 博物館に残されている。地震時あるいは地震の直後であることの確認は取れていないが、Bora の温泉は水柱が立ち上がり、現在は温泉保養施設が立地されている。また、今次地震においても、内部の Poi 村付近で、泥の温泉が湧き出した記録がある。（図 2-10 参照）

現地ヒアリング調査を行ったものの、地震発生時に突発的に温泉が発生したのか、ある程度の時間（数日程度）以降に発生したのかは、当時の詳しい時間関係は確認できていない。

1968/8/15

Tambu



The hot waterspring created at earthquake at Mapaga, Tambu Village, Balaesang Sub District



The sinking village, Lembu Village



2005/1/24

Bora



Hot springs blew out (left) and fumaroles appeared (right) during the earthquake on January 24, 2005 at Bora

2018/9/28

Poi

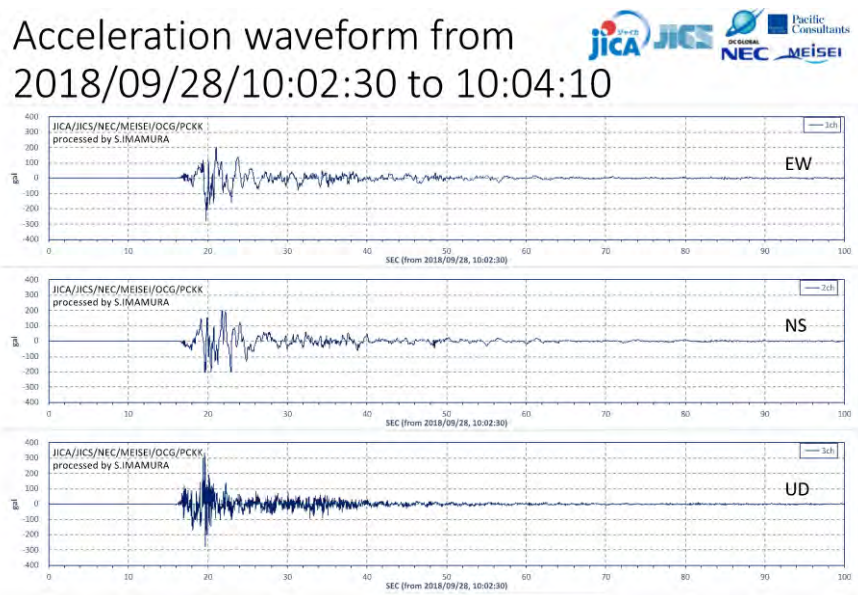


出典：Palu 博物館の所蔵データ

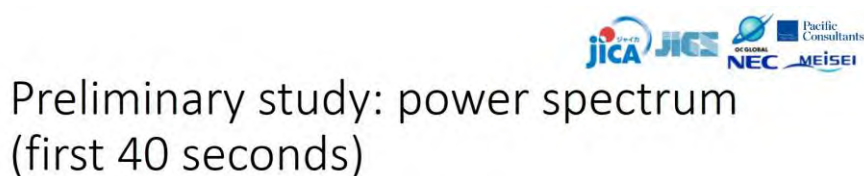
図 2-10 既往地震と温泉の出現記録

(3) 地震動記録

Palu における地震記録は、震災直後に大規模な停電が発生したため多くの地震記録が失われた。唯一強震計記録が取得できたものは、Palu の BMKG に設置された地震データに限られる。地震計は本調査の開始前に、JICA プロジェクトで設置されたもので、最大レンジ 3000gal、サンプリングレートは 100 sample/sec の三成分強震計である。地震波は 0.2~0.6Hz の短周期が卓越することが特徴で、最大加速度は水平成分 EW281gal、水平成分 NS203gal、鉛直成分 335gal が報告されている。水平成分の合成では 333gal、三軸成分の最大加速度は 400gal である。(図 2-11、図 2-12 参照)



※X 軸 : Second、Y 軸 : gal



Dominant frequency is 0.2 to 0.6Hz

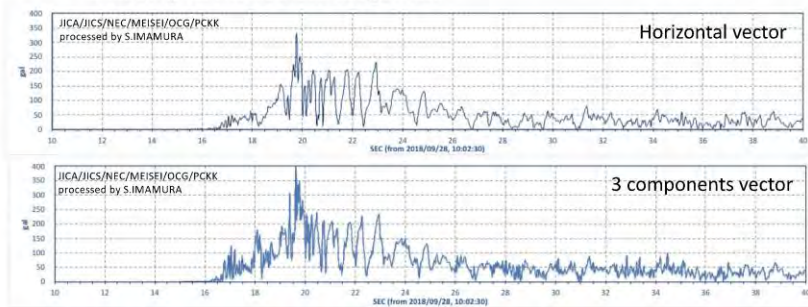
※X 軸 : Second、Y 軸 : gal・PSD

出典 : JICA 調査団作成

図 2-11 地震波形記録 (BMKG Palu)

Preliminary study : Seismic Intensity

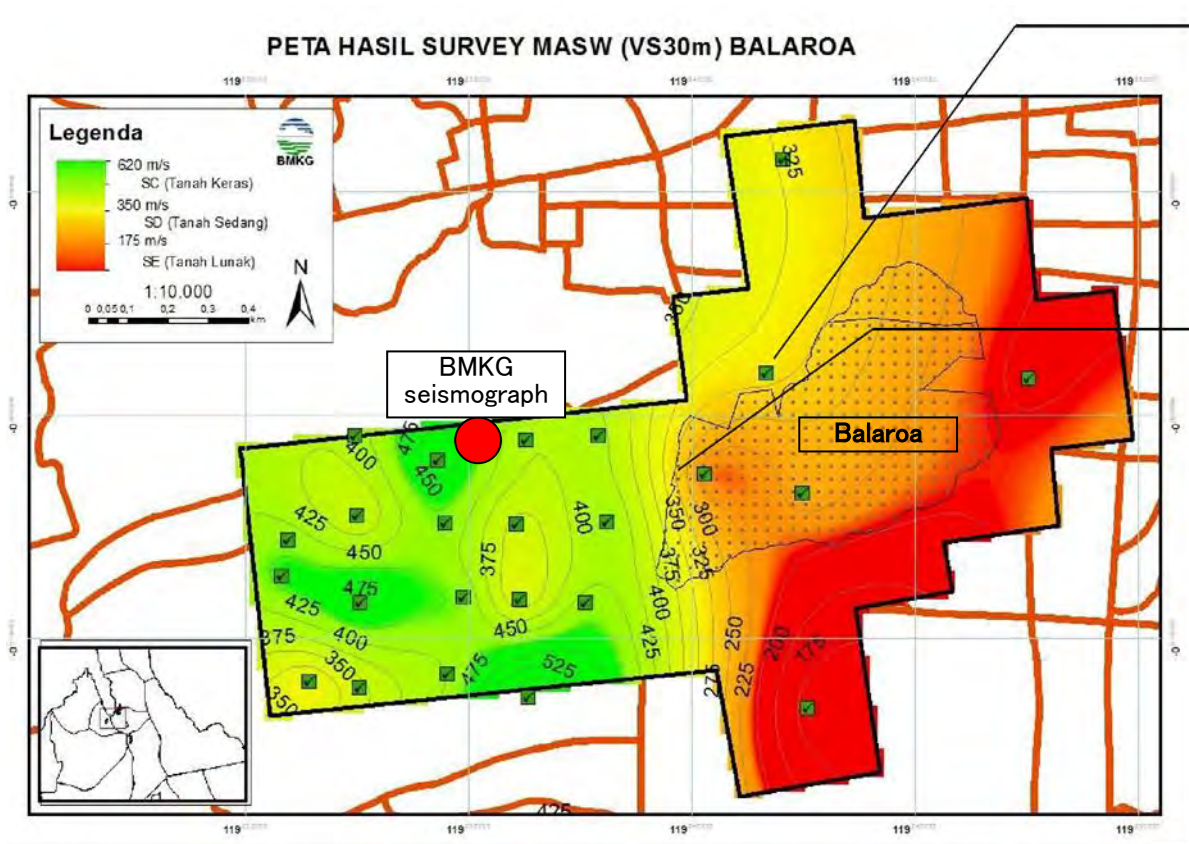
- JMA Instrumental Seismic Intensity:
 - 5.56 , Class 6- (six minus)
- PGA & MMI
 - EW: 281gal VII, NS: 203gal VII, UD: 335gal VIII
 - Horizontal vector: 333gal VIII
 - 3 component vector: 400gal VIII



※X 軸 : Second、Y 軸 : gal

出典 : JICA 調査団作成

図 2-12 地震波形水平成分及び 3 成分合成記録 (BMKG Palu)



出典 : BMKG と JICA の合同調査

図 2-13 地震計設置位置と Vs30 (MASW による計測結果)

図 2-13 に地震計設置箇所周辺の深さ 30m までの平均的な S 波速度 (V_{s30}) を示す。 V_{s30} 分布図によると Nalodo の発生した Balaroa 地域は、300m/sec よりも低い領域であるのに対して、地震計の設置された地盤は工学的基盤と見なせる 425m/sec に該当している。なお、地震計設置箇所の PS 検層結果は後述する。

地震計の設置地盤は、Balaroa の高位にある小型扇状地にあり、図 2-14 に示すように良く締まった礫層の分布する地域であることが判っている。扇状地の地形勾配は約 10%、それより低位の Balaroa は 5% 程度以下の緩斜面であることから工学的基盤も深く分布する。今次地震の断層破壊の伝搬速度が地震波の S 波よりも速い特徴「Supershear」を考慮すると、地震波（特に S 波及び表面波）は震源から到達するよりも速く、直近の地震断層（深さ 5km より浅い位置）から発生した波が到達することとなる。地震波は脆弱な沖積地盤では地震波の速度が遅くなることによって S 波の震幅が増幅されて地表に伝播する。ただし、Palu 低地内で観測記録としてある地震データは BMKG の 1 箇所に限定されるところから、S 波の重複反射や表面波の増幅特性に関するデータは得られていない。

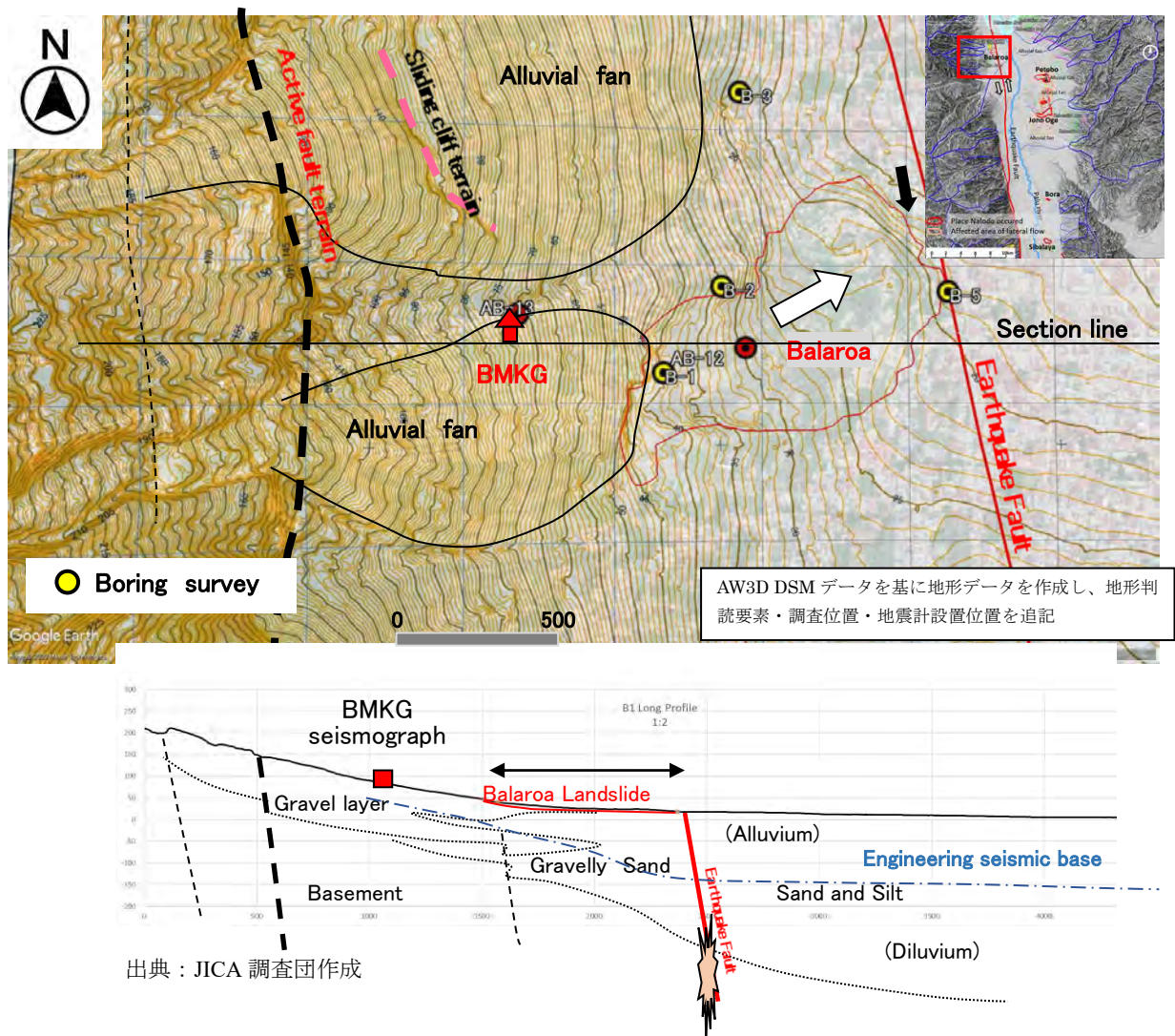
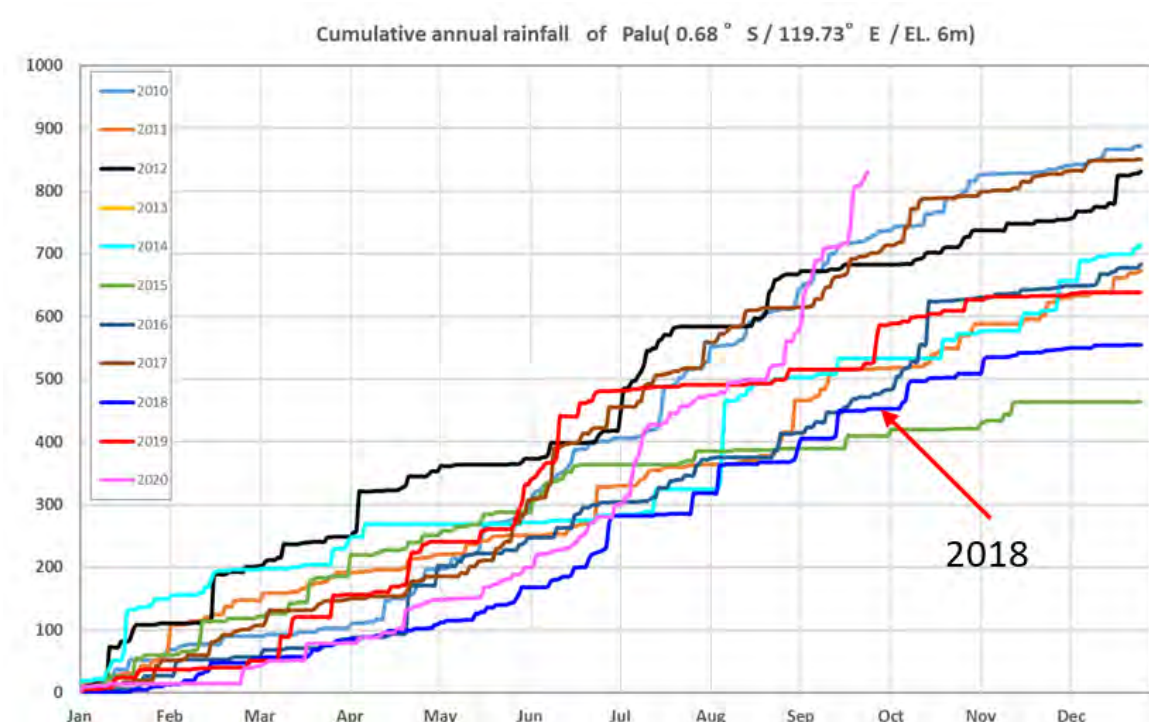


図 2-14 地震計の設置場所と地震断層の位置関係 (Balaroa 周辺)

(4) 地震発生時の降水量

Palu 市街地の東に位置する Palu 空港の 11 年間の降水量データから年間の累積降水量図を作成した (図 2-15 参照)。Palu 低地における年間降水量は 500~900mm と少雨である。その中でも、今次地震の発生した 2018 年は降水量が比較的に少ない年に当たり、地震発生直前においても大きな降水は観測されていない。液状化地すべりの発生した地域は、地下水の豊富な扇状地の先端に位置するが、降雨記録を見る限り、地震発生時には異常に地下水位が上昇する条件にはないと判断できる。また、地元ヒアリングや被災時の稲の生育度を見ると、Palu 低地に広範囲に広がる水田に水が張られた状態ではなかったことが判っている。ただし、東側にある灌漑用水路は年間を通して水量があった。



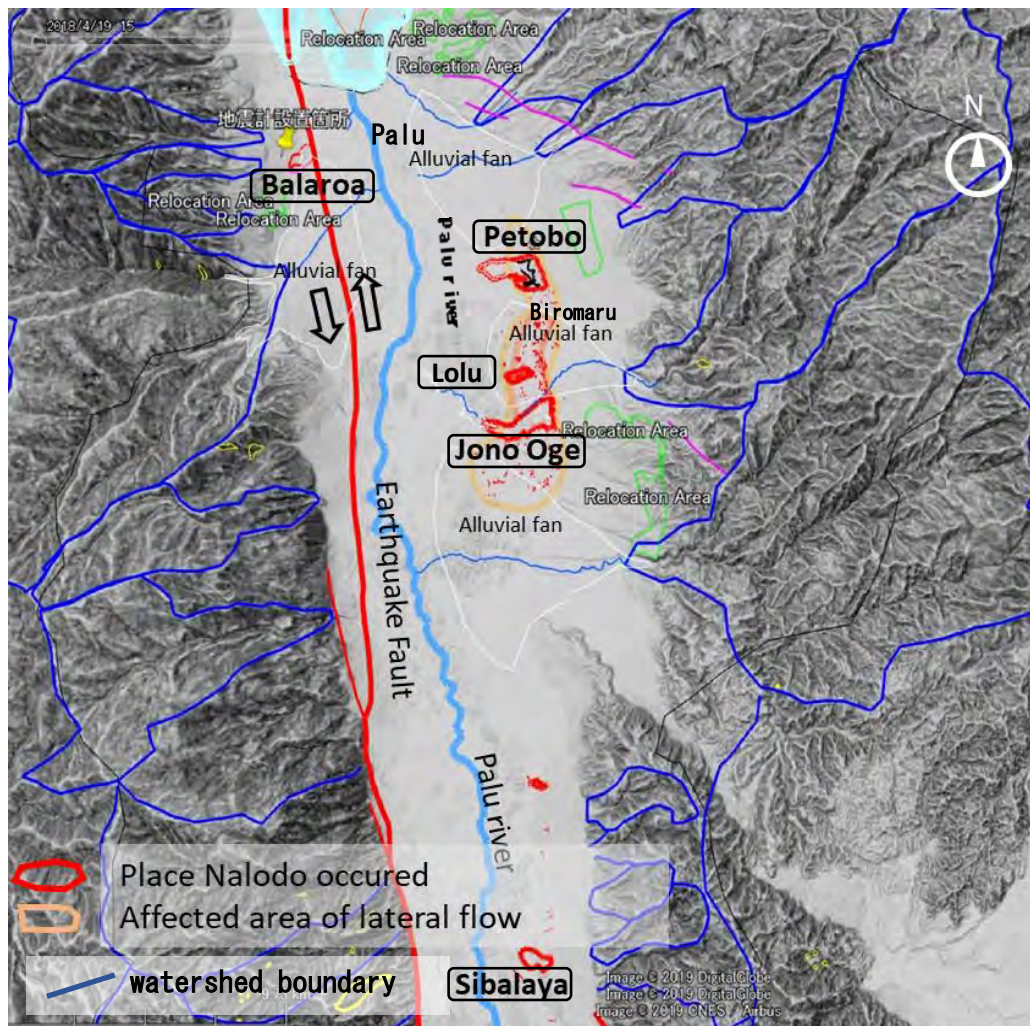
出典：JICA 調査団作成（データ；気象庁 HP、
http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/dailyview/graph_mkhtml_d.php?&n=97072&p=183&s=1&r=0&y=2018&m=10&d=1&e=0&k=0)

図 2-15 Palu 空港の年別の累積降水量

2-2 地形と地下水概要

(1) 地形概要

Palu 低地は、活動性の著しく大きいプレート境界型の横ずれ活断層によって形成され、低地の西縁は Palu-Koro 断層、東縁は正断層系によって陥没している。このため両岸山地からの碎屑物供給により広大な扇状地が形成されている（図 2-16 参照）。完新世（約 1 万年前より新しい）堆積物の厚さは、Palu 川河口付近で 60m 程度、被災地域の扇状地で 10～15m 程度であり、土石流の到達していない緩斜面（勾配 1～4%）では、未固結の液状化砂層・シルト層が互層として堆積している。また、基盤岩山地の集水域から流下する季節河川は、被災地の upstream で扇状地に伏流し、被災地域で湧水帯を形成している。Nalodo の発生場所は大型扇状地の境界微低地に当たり、これらの条件は、液状化環境（緩い砂質土・浅い地下水位）及び地表面とほぼ平行な細粒難透水層を挟み、必要な滑動力の起源となる斜面勾配を作っている。



出典：JICA 調査団作成

図 2-16 Nalodo 発生地域の地形概要

本図は AW3D DTM データを基に GIS 上で地形起伏図を作成し、Google Earth 機能を使用して表示したもの。以降の本報告書の位置図（断りがない衛星画像）は震災直後に Google に公開された衛星画像を用いている。

図 2-17 に、震災前の衛星データから作成した地形図とその地形図から作成した地形分類（基盤岩山地・扇状地・Palu 川河床低地）を示す。Palu 周辺地域は灌漑水路の建設や市街地化地域の造成を除くと、大きな地形改変はなく自然地形がよく残されている。地形は、大きく基盤岩や洪積礫層から構成される山地地域、山地地域から供給された碎屑物で構成される各種の扇状地および Palu 川本川の蛇行によって形成された Palu 川低地（蛇行原）に 3 分類される。その中の扇状地は、規模・地形勾配や堆積物の供給源となる沢の有無で 2 つに分類できる。ここでは、長さや幅が 2 ～3km 以上の扇状地を大型、それ以外の小さいものを小型と分類するが、以下の特徴を持つ。

大型扇状地；末端が Palu 河床低地まで達し、Palu 川によって削剥されている。地形勾配は 1～3% 程度で非常に緩い。扇頂部の沢の特定が難しく、高位に小型の扇状地によって覆われる形態で分布する。

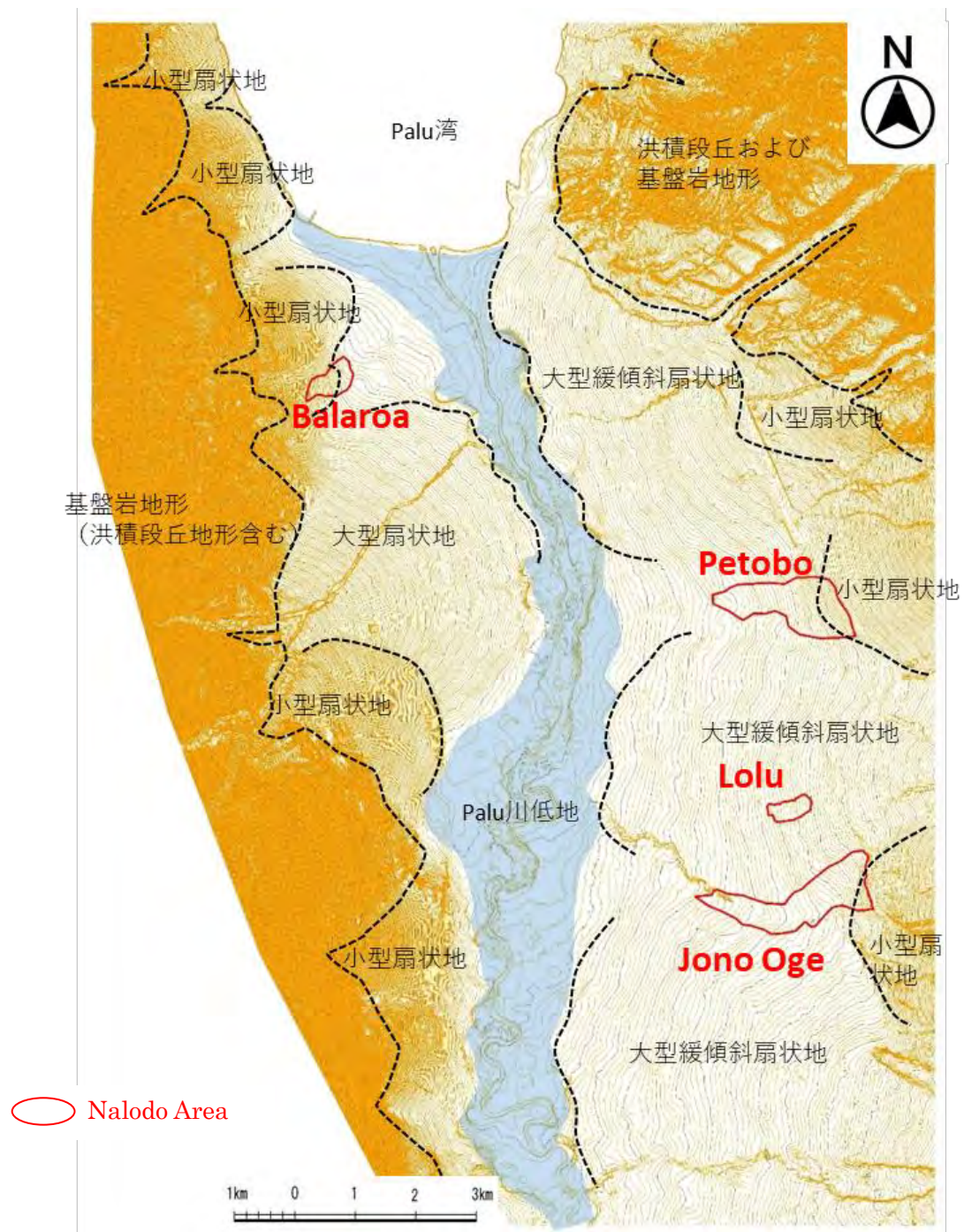
小型扇状地；扇頂部に両岸山地の沢が分布している。地形勾配は一般に 5% 以上で、土石流などで形成された地形である。地形的には、大型の扇状地を覆うように分布する。

大型の扇状地と小型の扇状地は、図 2-18 に示す土地利用図との関係でも区別することもできる。土地利用図は、衛星データを用いた反射周波数特性や現地調査結果から作成している。市街地化地域は、Palu の湾に沿いおよび主要幹線道路沿いに拡大している。水が豊富にある農地及び樹木地域は Palu 低地全域に広がるが、地下水に乏しい草地や裸地は東側の Gumbasa 灌漑水路より高位の扇状地と西側でも一定の標高を超える扇状地斜面に広がっている。一部の灌漑地域を除いて、小型の扇状地は草地・裸地であり、大型の扇状地の大半は農地（水田）や樹木地域に相当している。

Nalodo 発生地域（Petobo・Jono Oge および Balaroa）の特徴は、小型扇状地の扇端付近を頭部として、大型扇状地に挟まれた微低地で発生していることに特徴がある。

Balaroa は、高位に小型扇状地を伴うことまでは Petobo・Jono Oge と同様であるが、発生域は南側に大型扇状地があるが、北側に小型扇状地が分布することが異なる。また、地形勾配は他で発生した地域よりも急勾配（3° 程度）であることが特徴である。

Lolu は、これらの地形的特徴とは異なり、大型緩傾斜扇状地の扇央に位置している。また、Petobo・Jono Oge 間の広範囲に発生した側方流動地域のほぼ中央部に位置している。



出典：JICA 調査団作成

図 2-17 震災前の地形分類と Nalodo 発生地域との関係

本図は震災前の AW3D DTM データを基に GIS 上で地形コンターを作成し、地形分類（基盤岩山地・扇状地・Palu 川河床低地）を表示したもの。

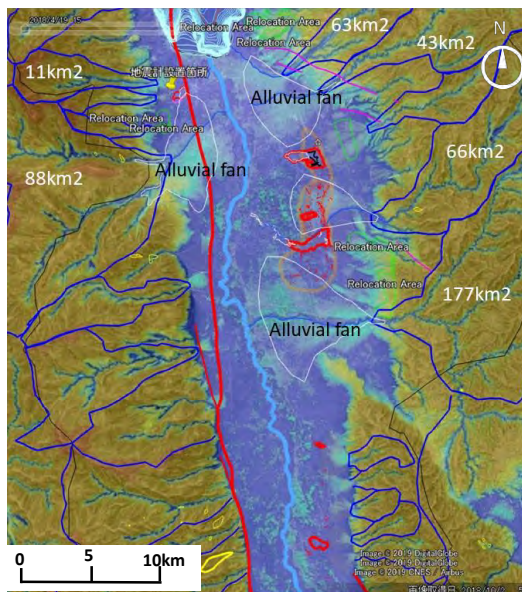
(2) 地下水概要（浅層地下水）

Palu 低平地の浅層地下水は両岸山地の表流水から主に供給されている。東側では基盤岩山地から流下した表流水は高位にある小型扇状地に入ると伏流し、Palu 空港の東側、Petobo 及び Jono Oge の高位で豪雨時を除いて涸れ沢となっている（図 2-19 参照）。伏流した地下河川は、小型扇状地の扇端付近（地形勾配変換点付近）で湧水し、再び河川を形成するようになる。Nalodo の発生地域（Petobo と Jono Oge）は高位の扇状地で伏流した地下水が湧出する地点であることに共通点がある。一端湧出した表流水は、大型扇状地を表流水及び地下水として流下し、Palu 川に注ぐ（図 2-21 参照）。

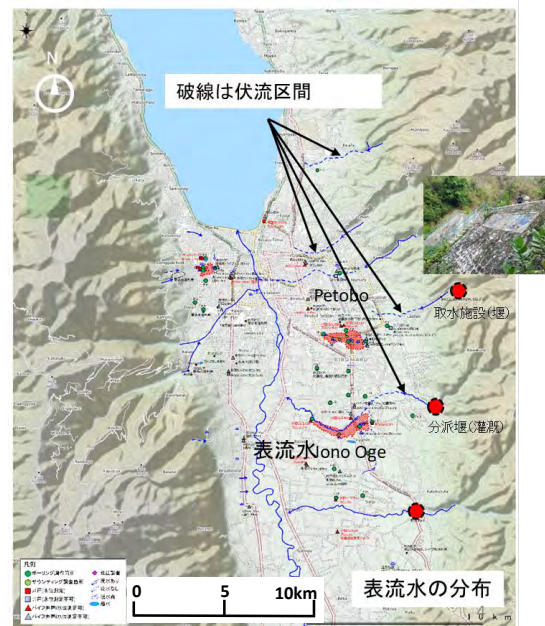
Nalodo の発生場所は、Palu 川河床よりも 20～50m 標高が高く、湧出する地下水は左右岸山地から流下した浅層地下水が湧き出す地点である。大型の扇状地は地形勾配が小さいことから、地表付近の浅い地下水位を常に保持し、そのまま、Palu 川に流下する。

西側の Balaroa でも、高位にある小型扇状地の扇端で震災後においても恒常的に湧水が認められる。Balaroa では、Nalodo の頭部標高で南北に帯状の湧水帯が認められている（図 2-22 参照）。

Nalodo の発生場所は、大型扇状地間の微低地であったことを、前項で示したが、標高が低い場所は地下水が湧き出す場とも一致している。



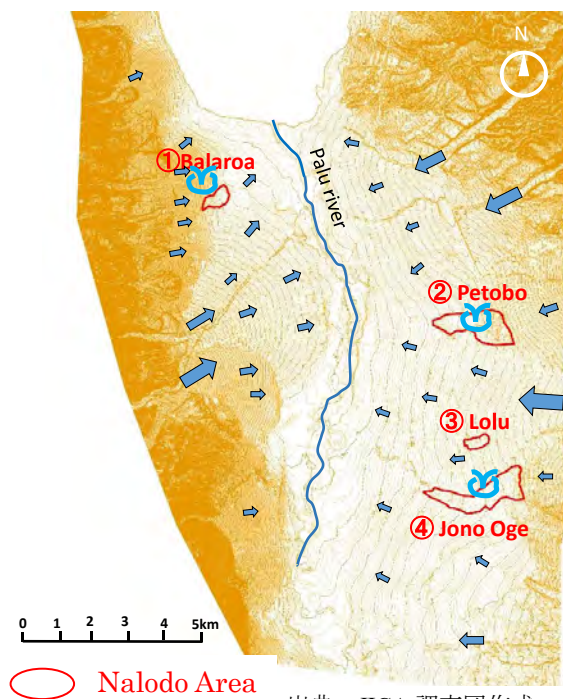
流域図（谷からの比高で着色）



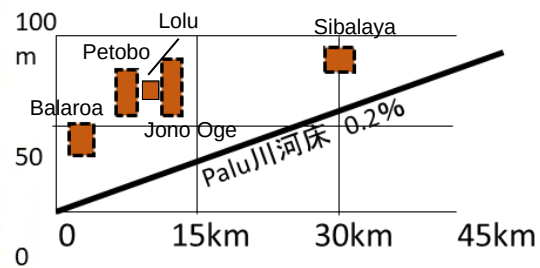
表流水の分布

出典：JICA 調査団作成

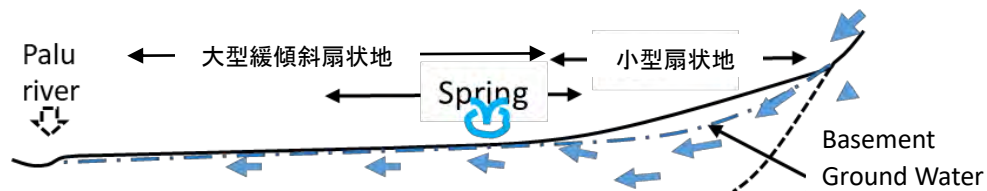
図 2-19 Palu 低地の流域図及び表流水の分布



出典：JICA 調査団作成
図 2-21 浅層地下水の流れ



出典：JICA 調査団作成
図 2-21 Nalodo 発生地域と Palu 川河床との比高



出典：JICA 調査団作成
図 2-22 浅層地下水流動のイメージ（中央に湧水帯が形成される）

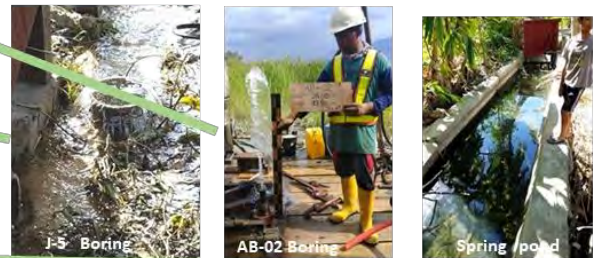
図 2-23 に、衛星画像から判読した湧水帯の位置図を示す。地下水の湧き出す場所は、植生の現れる上限位置を指標とした。Palu 低地の西側の斜度 5%以上の扇状地は裸地の色調を示す褐色系の色調を示し、斜度が 5%以下となる緩斜面には緑地が帯をなして分布する。Palu 川との比高との関係もあるが、高透水性の礫層から構成される小型扇状地で一端伏流した浅層地下水が扇端の遷緩線付近で湧出しているものと考えられる。Palu 低地東側においても、扇状地の扇端付近に湧水が多く認められる。東側の湧水帯が比較的直線に配列する傾向は、後述する標高 80m 付近の灌漑水路の影響も考えられる。

図 2-24 には、2018 年度にインドネシア中部スラウェシ州で実施された Palu 市街地の地下水井戸分布図と地下水コンターを示す。この調査は、市街地限定であるが、Balaroa と Petobo の一部が網羅されており、Balaroa 及び Petobo で地下水が両岸山地から Palu 川に向かって流れている状況や地下水位が地表に近い高い位置にあることが示されている。

Spring zone extracted from vegetation and topography



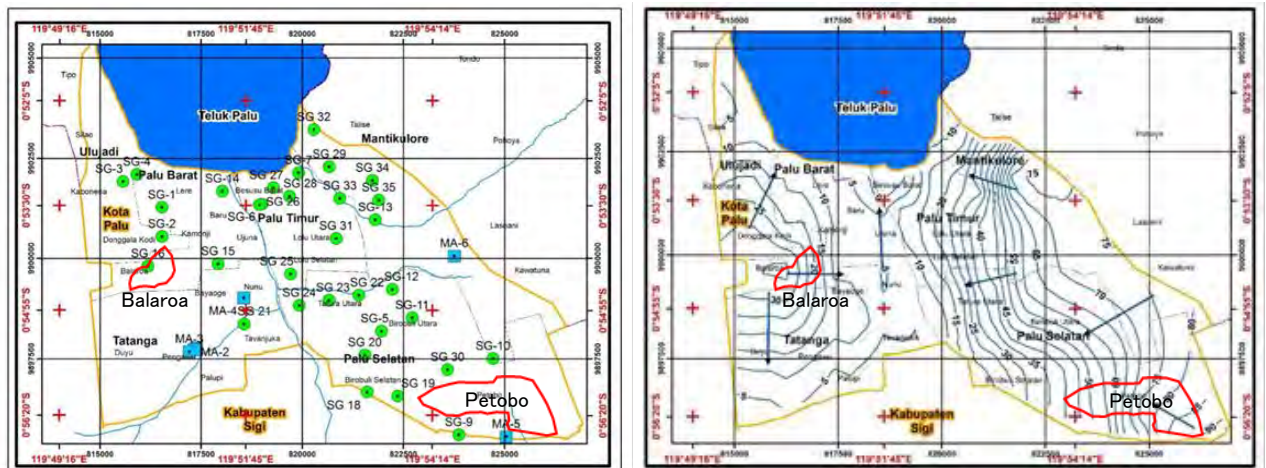
On-site confirmation



(JICA investigation)

出典：JICA 調査団作成

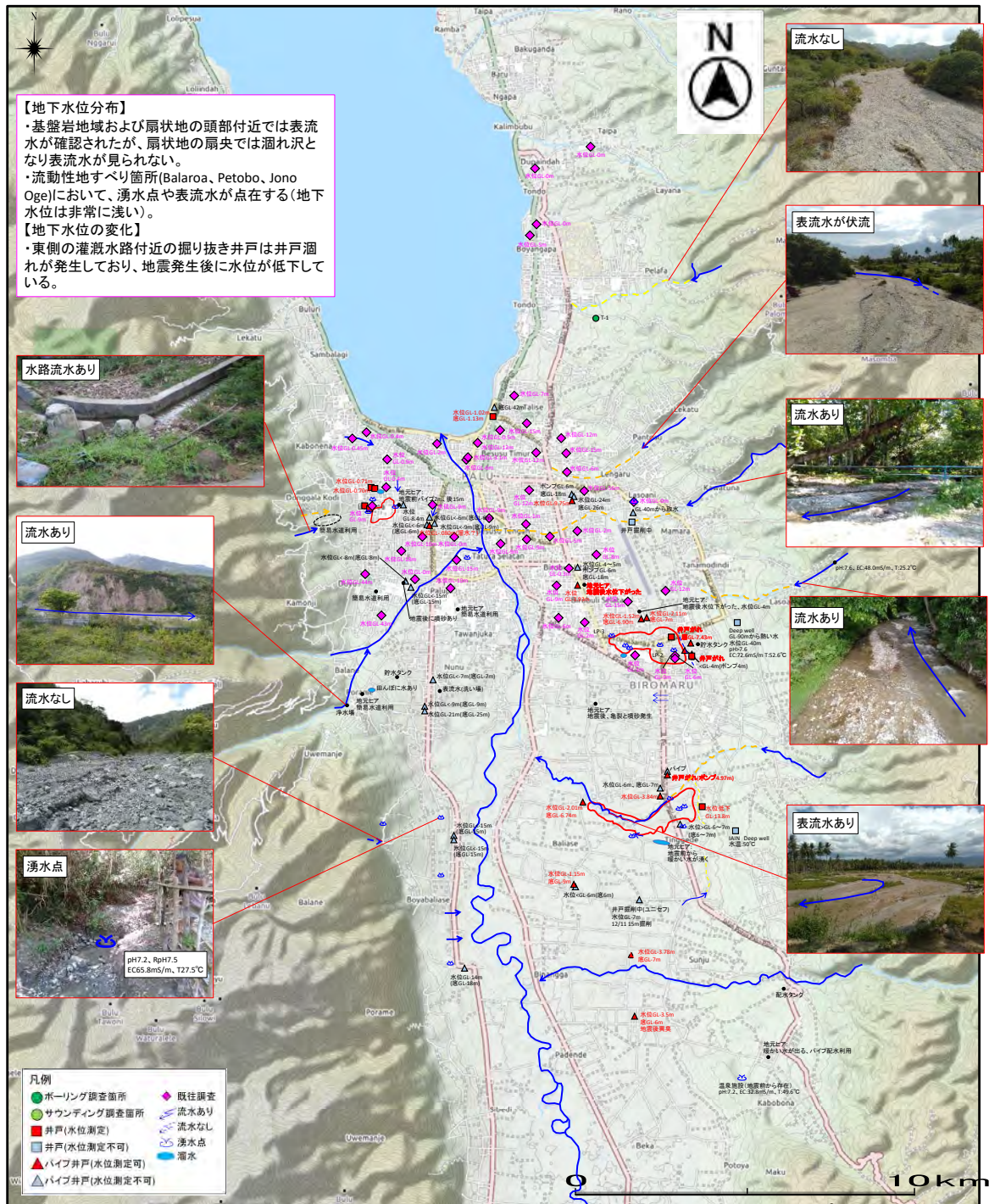
図 2-23 Palu 低地の衛星画像から判読できる湧水帯と現地確認状況
(写真はすべて震災後 2 ヶ月～1 年の状況)



出典：PEMETAAN ZONA KONSERVASI AIR TANAH PADA CAT DI KOTA PALU (2018) ⁸⁾

図 2-24 2018 年中部スラウェシ州 (Palu 市街地) 地震前の地下水調査による浅井戸位置図と地下水コンター (地震前に測定したデータに基づく)

水文調査結果(Palu 市の既往調査を含む)



出典; JICA 調査団作成

図 2-25 地下水踏査結果と既往地下水調査による井戸分布

震災後に地下水分布特性を評価するために行った踏査の結果を図 2-25～図 2-28 に示す。

- **Balaroa** では、**Nalodo** 頭部で複数の湧水地があるほか、北側の同じ高さの地域では多数の浅井戸が設けられ生活用水として活用されている。このような浅井戸は、湧水地に特徴的な施設である。
- **Petobo** では、上流側から流入する河川はなく（伏流）、**Nalodo** の発生した内部で多数の湧水が確認されている。灌漑水路のあった頭部付近では、浅井戸の井戸涸れが発生している。**Nalodo** 内部で発生していた湧水は地震後 2 ヶ月程度でほとんどの地域で無くなっている。
- **Petobo** の上位の斜面は、住民移転候補地としてあげられ、**JICA** 調査の **P-1** 地点近傍では、深さ 129m の深井戸の建設が **ESDM** によって進められていた。この井戸は移転候補地の生活用水として設置されたもので、水位 **GL-40m**、水温 **52℃** の温水が深井戸ポンプによって揚水されている。
- **Jono Oge** では、**Petobo** 同様に **Nalodo** の発生した内部で湧水が確認されたが 1～2 ヶ月でほとんどの湧水地は無くなった。**Jono Oge** 地区を横断する **Palu-Palolo** 道路沿いには、地震前から自然湧水があり集落が形成されている。この付近では、浅井戸を掘って生活用水としていたとのことである。また、湧水の水温は平均気温より高い **30～40℃** のぬるいお湯であったとのことである。地震後に新たに発生した湧水地は、以前の湧水地よりも下位の被災地域の中央部南端付近の水田中に発生し、そこから小川が形成されている。頭部付近は、灌漑水路に水が無くなったことによる井戸涸れがあり、ボーリング調査による水位は **GL-13m** となっている。



出典; JICA 調査団作成

図 2-26 Balaroa 周辺の地下水環境（震災 1 ヶ月後）

[illegible]

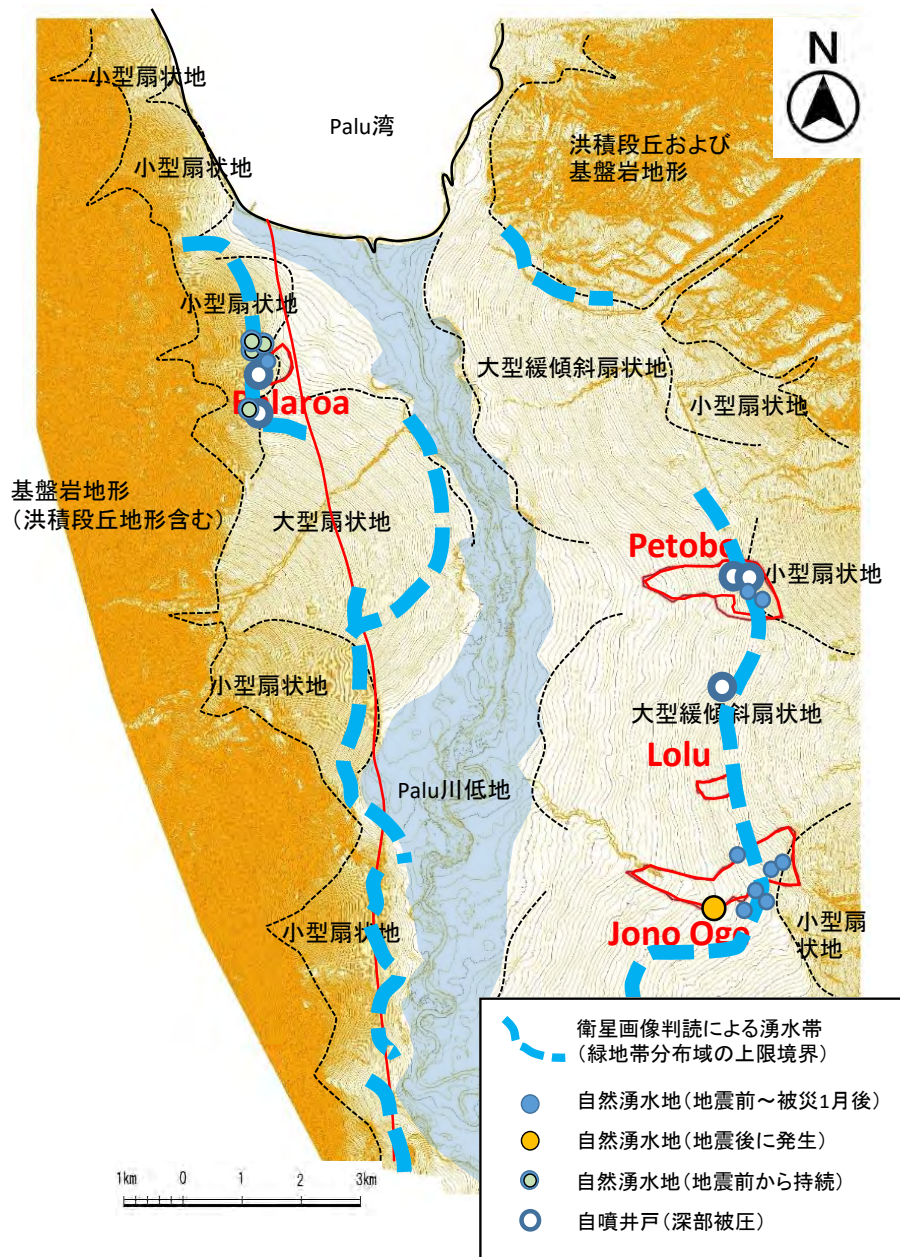
Jono Oge 図 2-27 Petobo 周辺の地下水環境（震災 1 ヶ月後）



図 2-28 Jono Oge 周辺の地下水環境（震災 1 ヶ月後）

図 2-29 に地形分類と衛星画像判読による湧水帯、震災後 1 ヶ月後の湧水地の重ね合わせ図を示す。

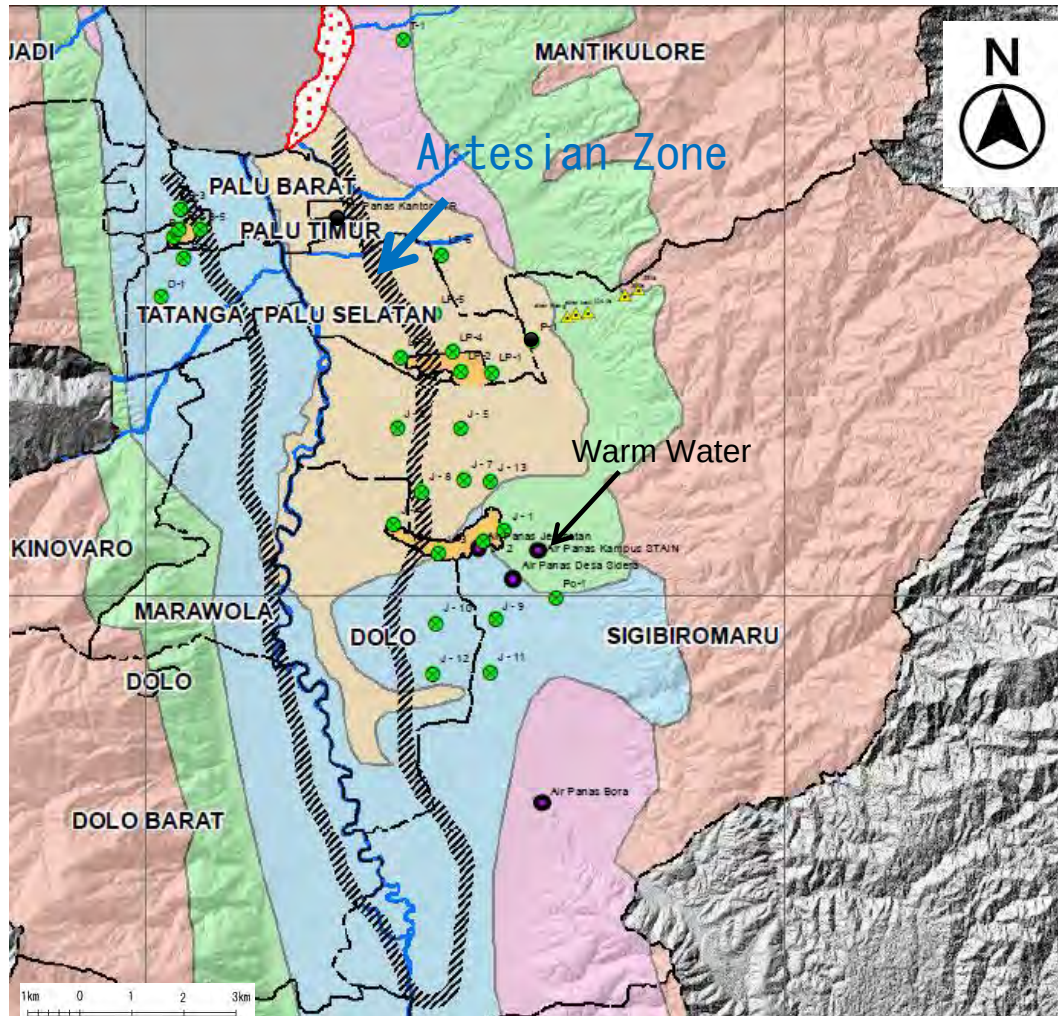
- 一般に扇状地の地下水構造は、扇頂部で伏流し、扇央部では地下水位が深く、扇端部で扇状地内部を流れた地下水が湧出する構造があるとされている。Palu においても、Balaroa は小型扇状地の扇端付近の湧水帯に一致し、Petobo・Jono Oge も高位にある小型扇状地の扇端付近である。
- 東側の Petobo と Jono Oge に挟まれた大型緩傾斜扇状地のほぼ中央には、Lolu の被災地域がある。この地域は 3 章で記述したボーリング調査で深さ 25m 程度から自噴する被圧が確認されているが、地形的には扇状地の端部には位置していない。



出典; JICA 調査団作成

図 2-29 地形と衛星画像から判読した湧水帯および主な湧水ポイントの重ね合わせ図

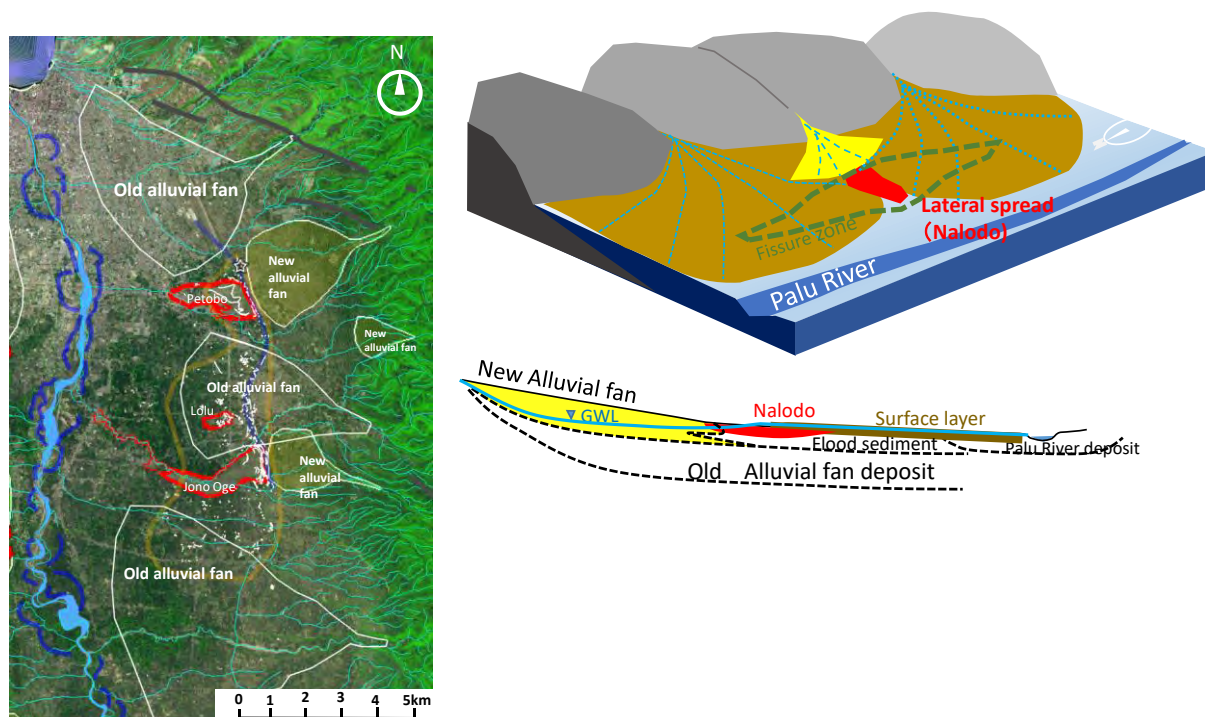
これらの様に、小型の扇状地の扇端（小型扇状地と大型扇状地の境界付近）において、自噴地帯（湧水帯）があることは、地質庁（以下、「BG」と呼ぶ）作成の Palu 地域水理地質図にも明記されている。2019 年 1 月に開催されたインドネシアと共同した研究報告会では、BG 作成の水理地質図に明記されている自噴地帯（湧水帯）を紹介している（図 2-30 参照）。また、この図には、Jono Oge の高位にある深井戸が温水である状況も報告されている。



出典：BG 作成、合同研究報告会資料（BG 水理地質図に JICA ボーリングと温水井戸を追記したもの）

図 2-30 Palu 地域の水理地質図と湧水帯

以上の地形的特徴を整理すると、Nalodo の発生場は、古い（大きな）扇状地に挟まれた凹地で、高位に小規模な新しい扇状地（土石流錐）を伴っている。図 2-31 に示した Nalodo 発生場の地形的特徴では、大型緩傾斜扇状地を古い沖積扇状地、小型扇状地を新しい沖積扇状地と表記しているが、堆積物すべての新旧を示すものではなく、地形的に覆う地形を新しいとして表示した。



出典：JICA 調査団作成

図 2-31 Nalodo 発生場の地形的特徴

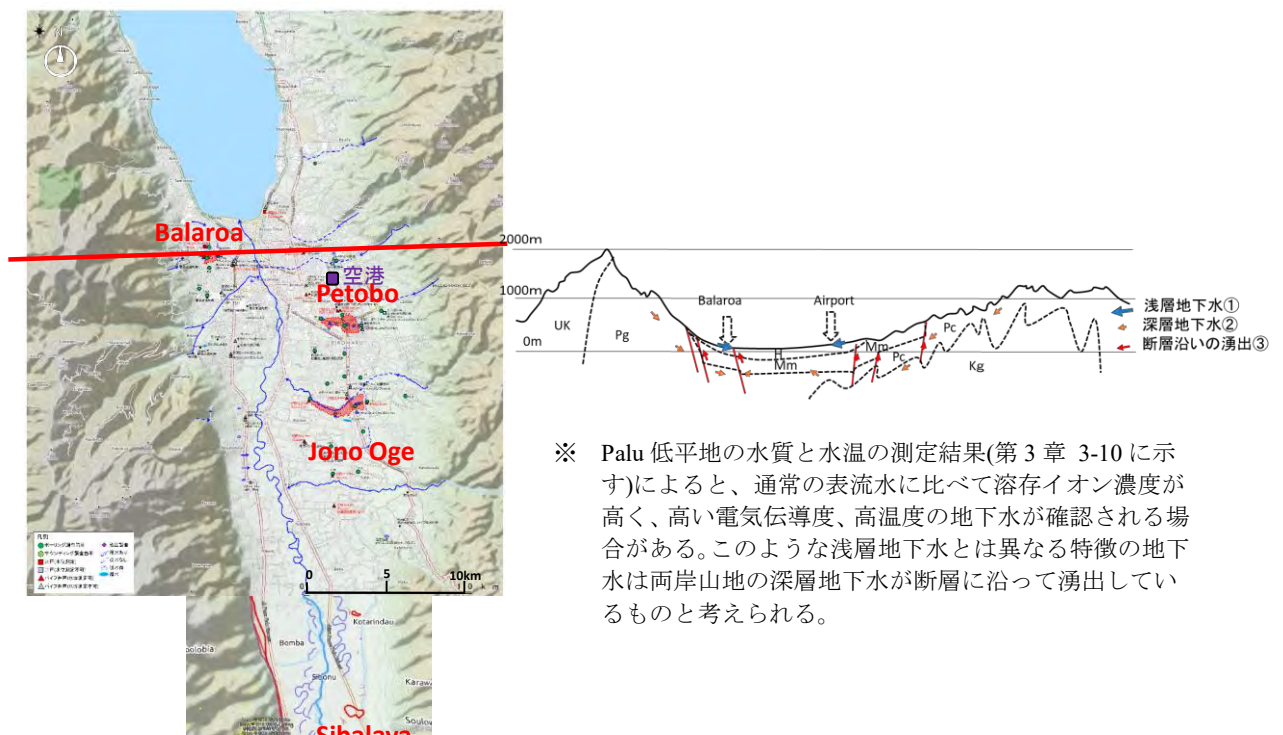
地下水位との関係では、表 2-2 に示すように、高位の小型扇状地が高い透水性を示す礫層から構成され地下水位が深い領域であるのに対して、Nalodo の発生した大型緩傾斜扇状地では粒径の小さな砂やシルトが多く堆積する場にあり、地下水位も浅くなる（一部では被圧地下水を構成）。そのまま Palu 川までの区間は、浅い地下水位を形成している。

表 2-2 Nalodo 発生場の地形・地質・地下水位の特徴

	New Alluvial fan area	Land slide area	Paddy field area	Palu River
Geology	Gravel/Coarse Sand (高透水性)	Fine Sand/Thin Silt layer(Weakest layer)	Fine Sand//Silt	Sand/Silt/Gravel
Ground water level	Deep(more than10m)	Shallow (confined aquifer)	Shallow	Shallow

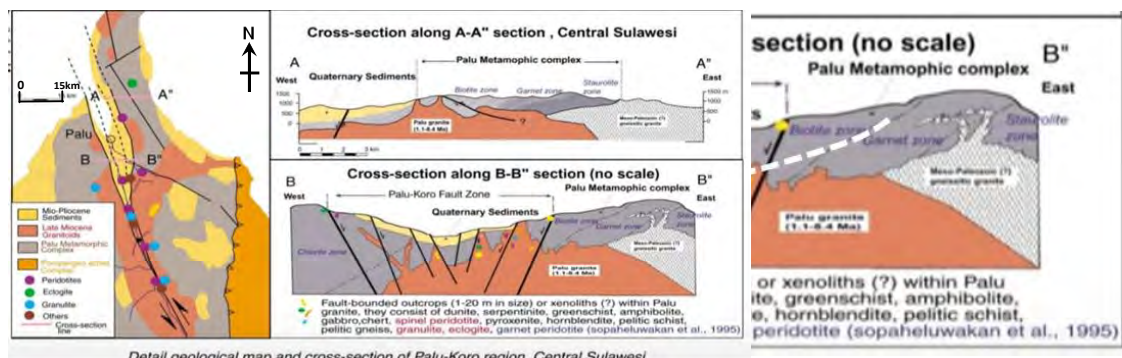
(3) 深層地下水

Palu 低地に湧出する地下水は、表流水を起源として扇状地を伏流する”浅層地下水”以外にも、基盤岩を長い時間滞留して湧出する”深層地下水”も存在すると考えられる（図 2-32、図 2-33 参照）。深層地下水は、長い時間地下深部に滞留することで、溶存成分が浅層地下水とは異なること、地下にある花崗岩マグマの熱などにより水温が高いことに特徴がある。深層地下水は、古い天水起源以外に、マグマ起源・地殻から絞り出されるものなど様々な過程で形成される。Palu は、プレート境界が内陸部に延長された地域で、図 2-10 に示した温泉が地震に伴って発生している事例が認められている。



出典：JICA 調査団作成

図 2-32 Balaroa/空港を結ぶ東西地質断面と地下水流動（模式図）

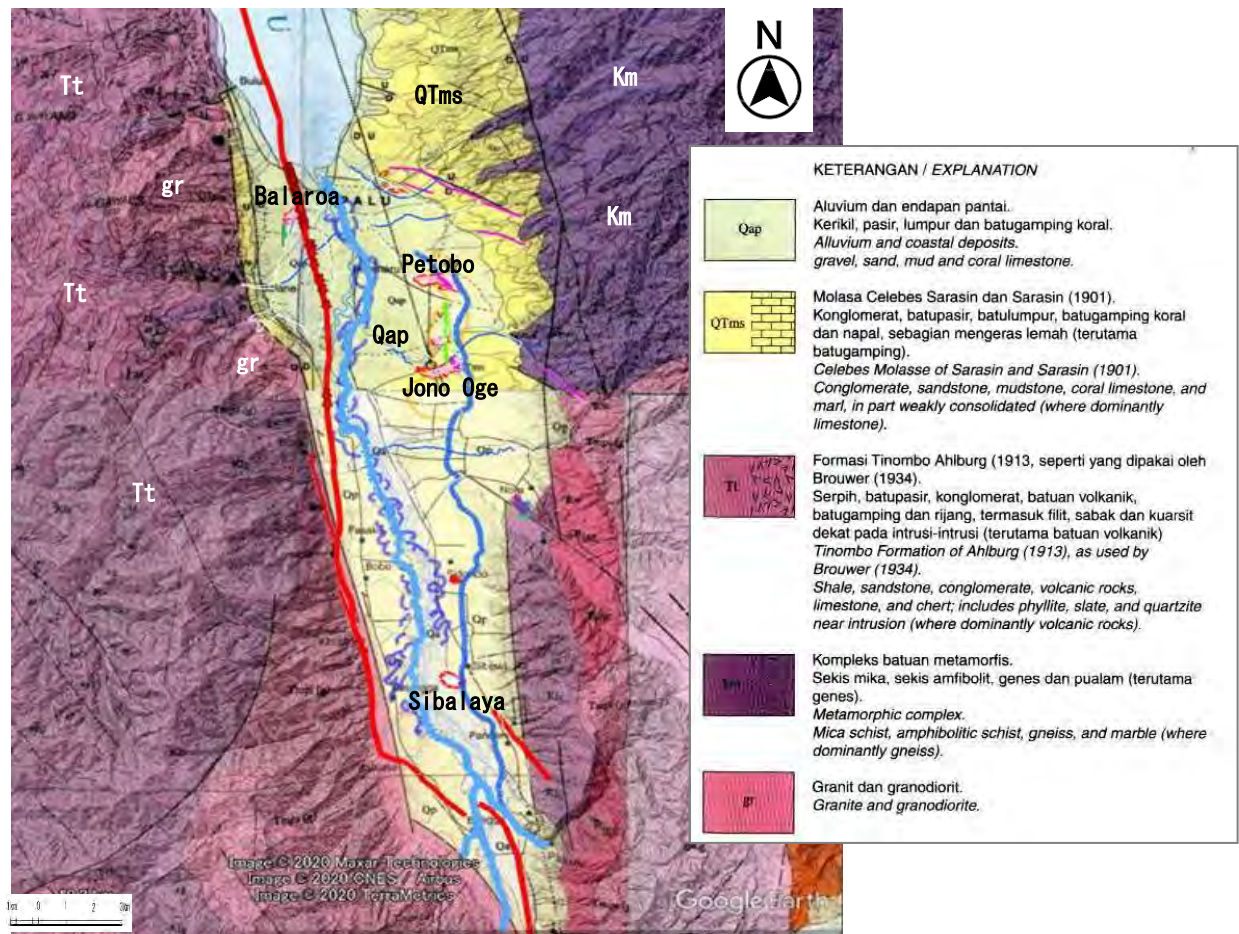


出典：sopaheluwan et al 1995 に JICA 調査団加筆

図 2-33 深層地下水の流れ

2-3 地質概要

Palu 周辺の地質は、Palu Fault Zone によって東西が異なった地質から構成される。東側の基盤岩は、主に三畳紀～ジュラ紀の変成岩類（Palu Complex・Gumbasa Complex）からなり、西側は上部白亜紀の堆積岩類や変成岩類が分布する。これらの基盤岩に新生代以降の深成岩類（Palu Granite/Kambuno Granite）が貫入し、更に、始新世の礫岩（ME）及び中新世の礫岩（Mm）が Palu 湾東岸地域に堆積している。Palu の低地には、完新世（約 1 万年）以降の新しい堆積物（主に扇状地堆積物）が分布する（図 2-34～図 2-37 参照）。



出典：PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JICANGEOLOGI（1973）¹¹⁾に調査団加筆

図 2-34 Palu 周辺の広域地質平面図⁹

Nalodo の発生場所の後背地は、Balaroa では花崗岩貫入岩(gr)、Petobo・Jono Oge では花崗岩質の変成岩類（Km）であり、優白質の完晶質岩石から構成され、細粒マサ様に風化する基盤岩が分布することに特徴がある。白亜紀の堆積岩類（Tt）の分布地域では発生していない。

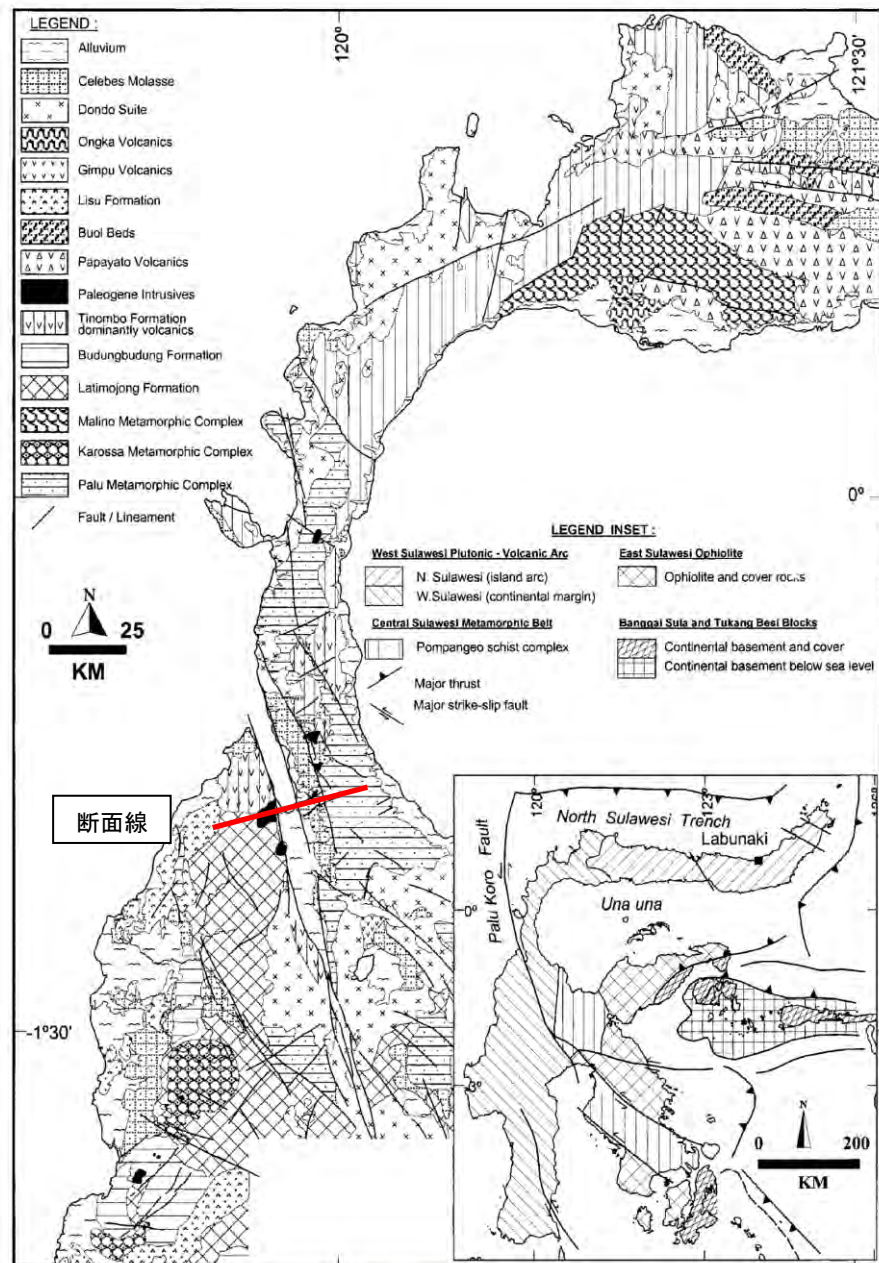
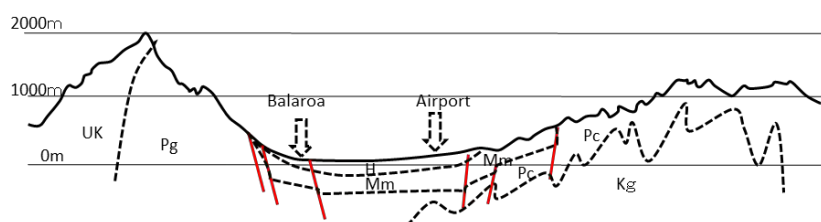


Fig. 2. Summary of the geology of NW Sulawesi; modified after Sukanto (1973), Ratman (1976), Simandjuntak et al. (1991a,b), Hadiwijoyo et al. (1993) and Calvert (2000). Inset map shows the principal tectonic provinces of Sulawesi.

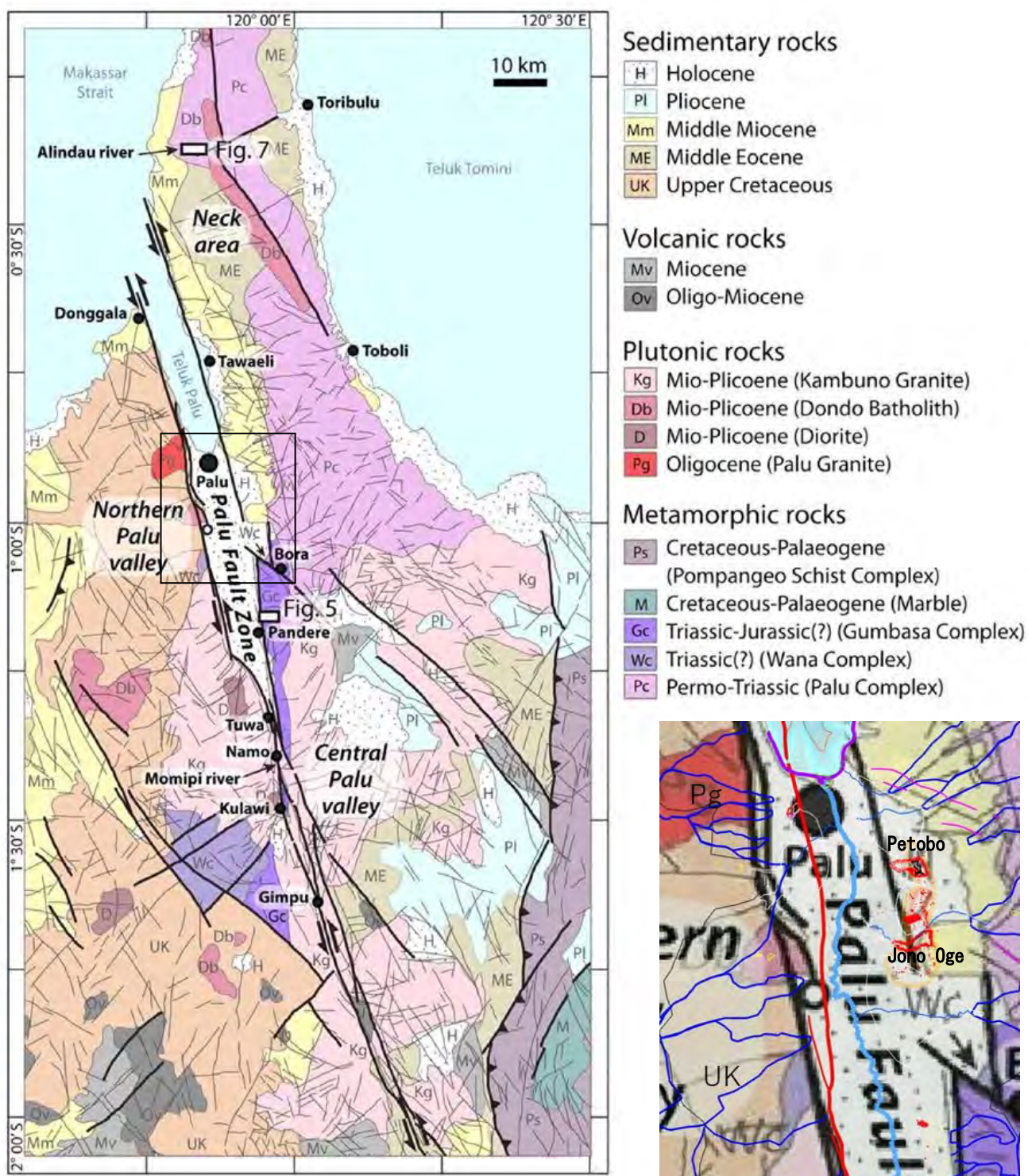
出典：Theo M, 2005¹⁰⁾に断面線を追記

図 2-35 Palu 周辺の広域地質平面図



出典：JICA 調査団作成

図 2-36 Palu 地域の東西方向地質構造断面図



出典：WATKINSON 他 2011、Modified after SULAROX; Sukanto (1973,1975); Sukido et al. (1993); and van Leeuwen & Muhandjo (2005).¹³⁾

図 2-37 Palu 地域の地質図

2-4 Nalodo 発生地域の被災状況

2018 年 9 月 28 日夕方にスラウェシ島中部で発生した Mw7.5 の地震は、沿岸域で発生した津波災害とともに内陸部で大規模な高速流動化地すべりを発生させ、2019 年 4 月の中部スラウェシ州公開情報によると、死者・行方不明者 4,547 人、被災者 172,999 人、住宅損壊 100,405 戸、経済的損失は 5 兆ルピー（約 380 億円）にのぼる。内陸部の地すべりは、扇状地の緩斜面（斜面勾配 1～5°、大型扇状地の狭間で上位に小型の扇状地を伴う緩斜面）の複数箇所ですべて同時に発生し、液状化による災害としてこれまでに世界的に類を見ない流動距離と災害規模である。JICA の調査団は、震災発生後 17 日に第一次現地調査、震災発生後 1 ヶ月後に第二次現地調査を行っているが、それより早い段階（被災後 10 日程度）での現地状況が公共事業・国民住宅省道路総局（Bina Marga）から公表されている（図 2-38 参照）。住宅地域であった Balaroa と Petobo の堆積域は、流動層が集積したことにより大量の家屋・施設などが倒壊した状況で集まった。Palu 市街地から離れた Jono Oge 地区では、流動化層が大量の水を伴って流下した状況が記録として残されている。



Balaroa の東端集積域中央部（被災状況；倒壊した家屋が集積している状況）



Petobo の南西端集積域末端（被災状況；倒壊した家屋が集積している状況）



Jono Oge 地すべりの中央部付近から流下方向を望む
（被災状況；流動化した地盤から水が湧き続け、水たまりが残っている）

出典：インドネシア政府機関からの被災直後の状況報告資料

図 2-38 主要な Nalodo 発生地域の被災直後の状況（Balaroa、Petobo、Jono Oge）

JICA 第一次及び第二次現地調査により、被害エリアの大きい Balaroa・Petobo・Jono Oge・Sibalaya および Lolu 周辺の 5 箇所の被災後の状況およびその他特筆すべき箇所の状況を以下に示す。

(1) Balaroa

Balaroa は Nalodo が唯一 Palu 川西岸の扇状地で発生した地域であり、地形勾配は、東岸の Petobo・Jono Oge に比べると急峻（4～5%）で、頭部付近は花崗岩巨礫を含んだ土石流堆積物が被覆している。西側半分の表層土塊はすべて無くなり、東側の地すべり末端に集積・堆積した。堆積域に集積された堆積物は、表層土壌層（細粒土・有機質土）を多く含んでおり、また頭部付近からは、地すべり発生後に恒常的に湧水が発生していた（図 2-39～図 2-41 参照）。



出典：JICA 調査団作成

図 2-39 Balaroa における流動化地すべりの概要



出典：JICA 調査団作成

図 2-40 Balaroa 地すべりの鳥瞰写真（震災後 19 日経過）



震災後 1 月後の頭部滑落崖付近（流動化地域は整地された）



整地された底面は、所々に湧水が発生していた。礫は花崗岩（左写真）

頭部滑落崖；厚さ 5m 程度の巨礫層（土石流堆積物）の下面にルーズな砂層が帯状に確認できる（流動化層と思われる）（中央、右写真）

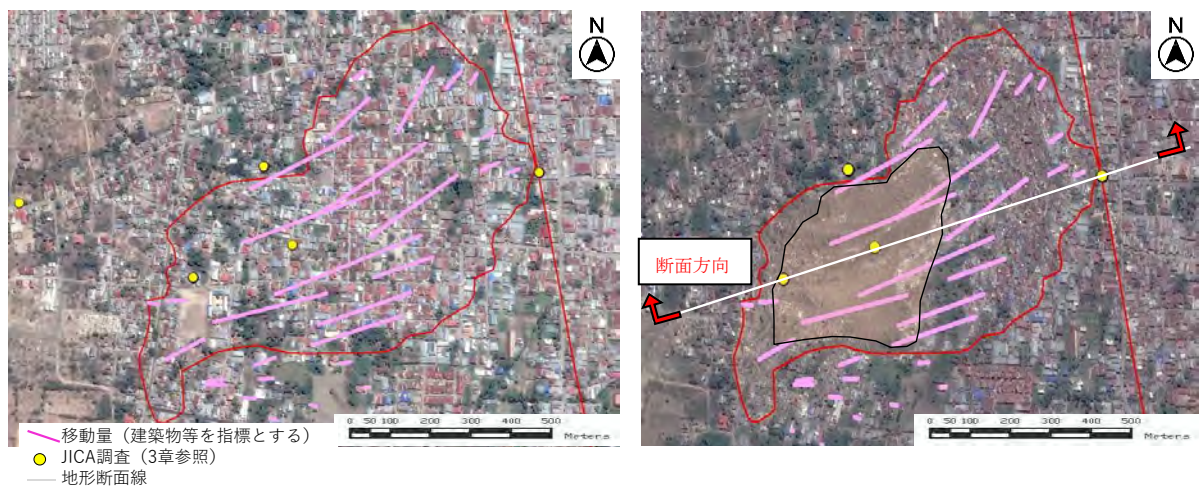


末端に集積した家屋と土砂、周辺地盤よりも 3～5m の小高い丘を作った。（大きな水たまりがあり、細粒土・異臭を放つ腐植土が集積していた）

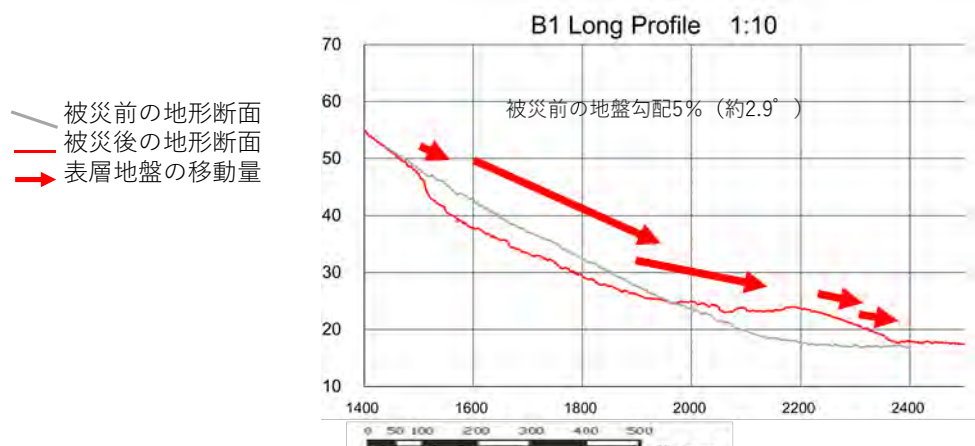
出典：JICA 調査団作成

図 2-41 Balaroa における現地被災状況

図 2-42 に地震前と地震後の衛星データ（AW3D）から取得した可視画像データと地形断面を示す。地震前と地震後の衛星画像から表層地盤の地物（家屋など）を対比することにより水平移動量を評価した。Nalodo 範囲の上半部は 300m 程度の移動量があり、住宅地であった場所は、茶褐色の地盤が露出している。頭部の幅 50m 程度の範囲および末端の堆積域では移動量は相対的に小さい。表層地盤の地物の移動量を地震前後の地形断面に投影すると、上半部では 4～5m 地盤の低下が発生し、堆積域では 5～7m 地盤が高まっていることが確認できる。表層地盤の移動量が Nalodo 発生域の半分程度の長さで発生している状況を見ると、移動層が単層とする場合には深いすべりではなく、浅い（厚さ 5m 程度）範囲が流動化したものと想定することが可能である。



地震前と地震後（2018 年 9 月 30 日）AW3D 衛星画像を使用



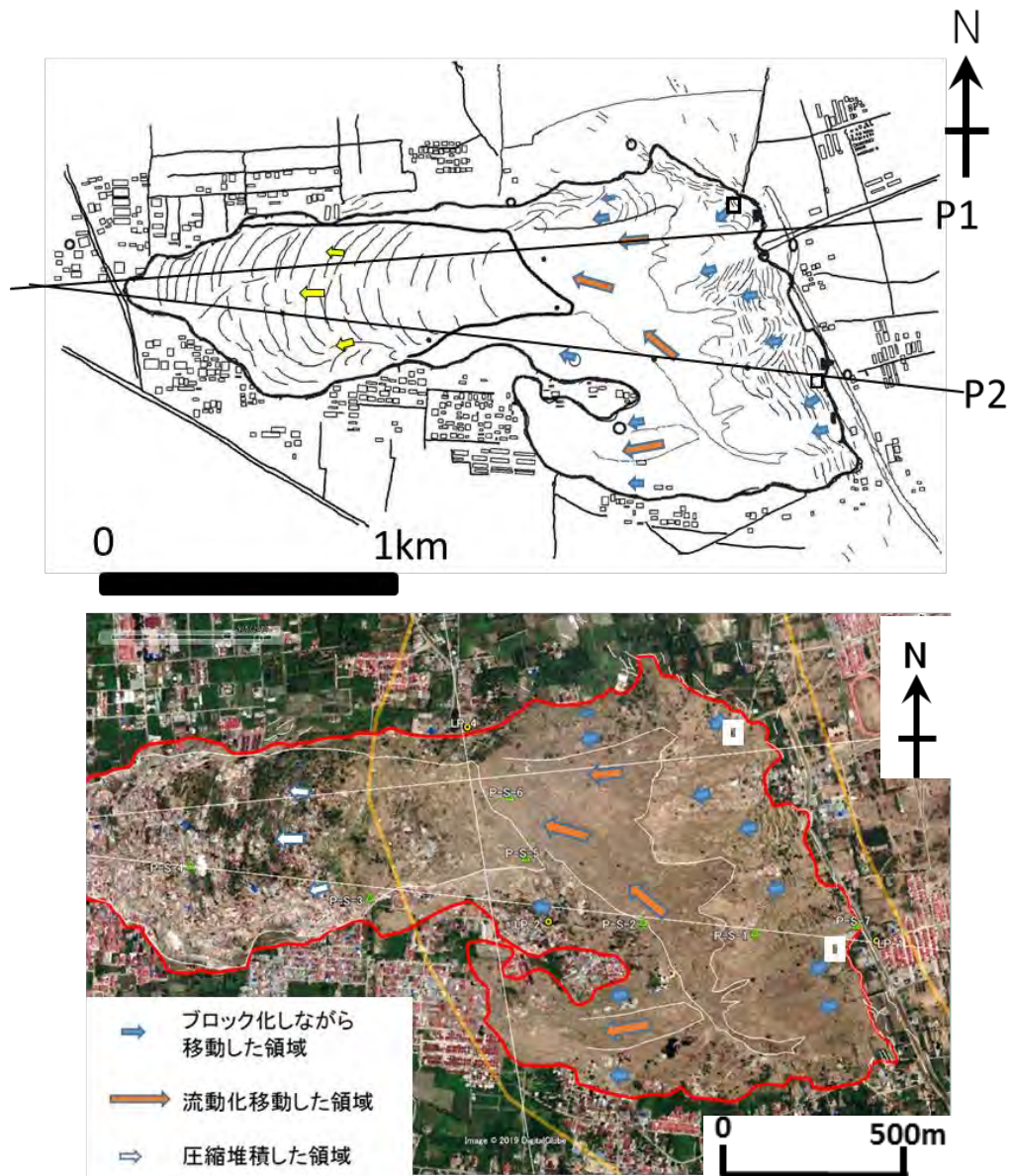
地震前と地震後（2018 年 9 月 30 日）AW3D DTM を使用

出典：JICA 調査団作成

2-42 Balaroa における地物の移動量と地形変化

(2) Petobo

Petobo は、頭部に灌漑水路を伴っている。すべりは、北側の大きな領域と南側の小さな流動化域が複合したものである。頭部から 200～400m 間はブロック化しながら移動した領域、それより西側（中央付近）は流動化した領域が分布する。流動化した領域には、湧水が発生している。最西端の圧縮堆積した領域では、5m 程度盛り上がり住宅が集積した。集積した堆積物は、細粒土も多く含んでいた（図 2-43、図 2-44 参照）。



出典：JICA 調査団作成

図 2-43 Petobo における流動化地すべりの概要



Petobo の頭部滑落崖 比高差 3～5mの崖が出現し、アスファルト道路が無くなっている。



Petobo の頭部から 400m程度下流側、移動した土塊がブロックとして残る地域（写真右）と流動化した地域（写真左）。流動化した地域は流水の痕跡を残し、地盤はぬかるみとなっている。



水田（淡水）に生息していた巻き貝（タニシ類）
出典：JICA 調査団作成



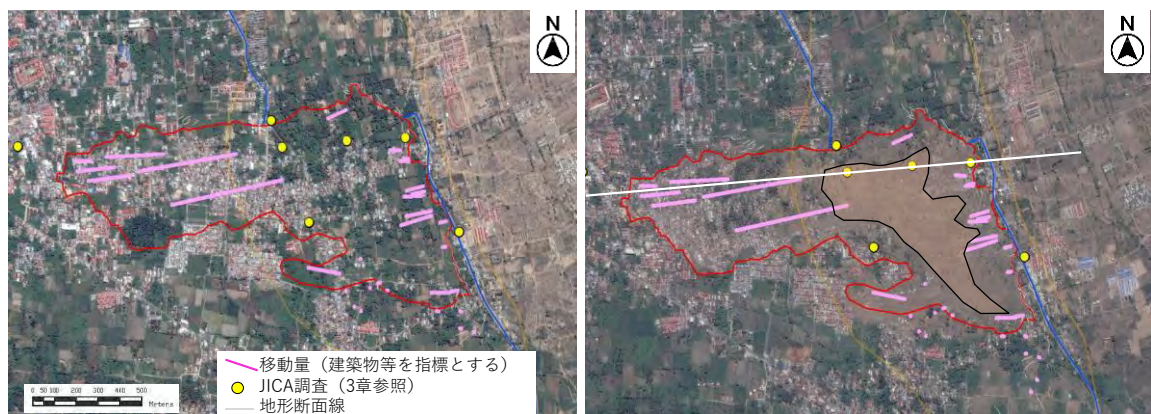
移動層中の礫（集水域に分布する
変成岩類を主体とする）



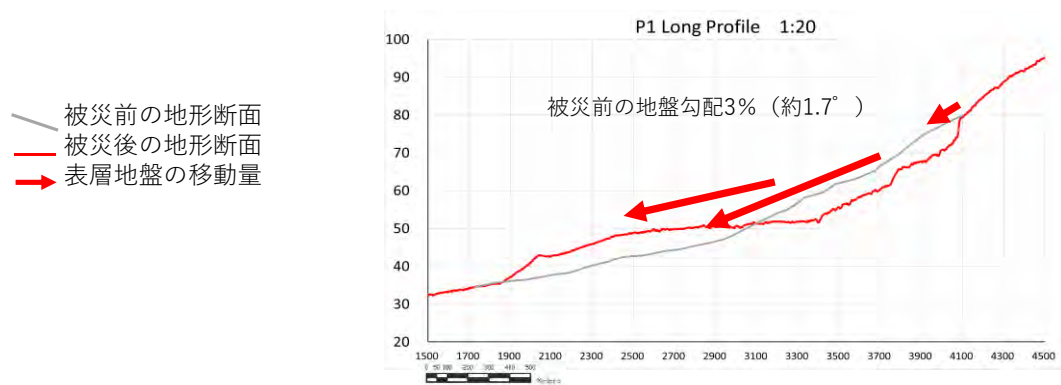
移動層の主な層相。細粒分質
の細砂を主体に構成される。

図 2-44 Petobo における現地被災状況

図 2-45 に地震前と地震後の衛星データ (AW3D) から取得した可視画像データと地形断面を示す。地震前と地震後の衛星画像から表層地盤の地物 (家屋など) を対比することにより水平移動量を評価した。Nalodo 範囲の上半部は 800m 程度の移動量があり、住宅地・水田であった場所は、茶褐色の地盤が露出している。頭部の幅 300m 程度の範囲および末端の堆積域では移動量は相対的に小さい。表層地盤の地物の移動量を地震前後の地形断面に投影すると、上半部では 5~7m 地盤の低下が発生し、堆積域では 6m 程度地盤が高まっていることが確認できる。表層地盤の移動量が Nalodo 発生域の半分程度の長さで発生している状況を見ると、移動層が単層とする場合には深いすべりではなく、浅い (厚さ 10m 程度以下) 範囲が流動化したものと想定することが可能である。



地震前と地震後 (2018 年 9 月 30 日) AW3D 衛星画像を使用



地震前と地震後 (2018 年 9 月 30 日) AW3D DTM 使用

出典: JICA 調査団作成

図 2-45 Petobo における地物の移動量と地形変化

(3) Jono Oge

Jono Oge は中央付近から下流側で右に屈曲した特徴的な形をなす。頭部は灌漑水路が位置する。頭部には引っ張り亀裂が形成されたブロック化領域が広く分布し、500m 程度西側から流動化領域となる。すべり範囲の縁となるように、北側にはワジ・南側には湧水池と水田上の噴砂分布域がある。屈曲してから西側の地域は、地すべり後半に発生した砂泥流堆積物の分布地域である（図 2-46～図 2-48 参照）。

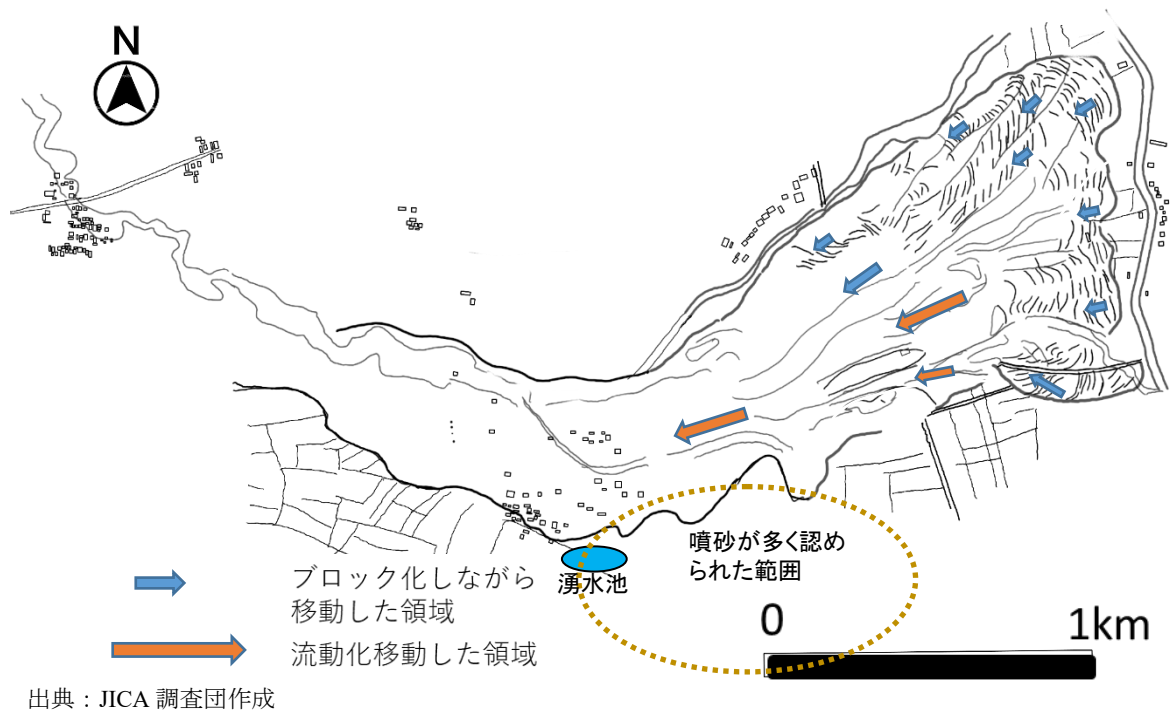


図 2-46 Jono Oge における流動化地すべりの概要



ブロック化しながら移動した領域の典型例

出典：JICA 調査団作成

図 2-47 Jono Oge 南東端頭部の地すべりの鳥瞰写真（震災後 19 日経過）



水田として利用されていた Jono Oge 頭部滑落崖

段差 1m程度の展張した亀裂で階段様となる



同上



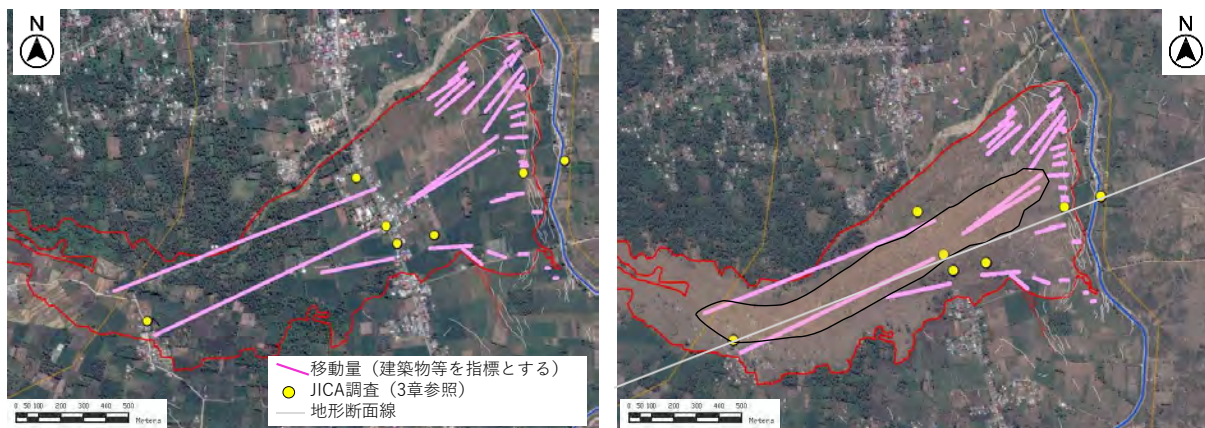
展張性亀裂に露出した地盤の確認状況確認状況細粒分を含んだ細砂を主体とする

(写真は第二次現地調査の東畑委員)

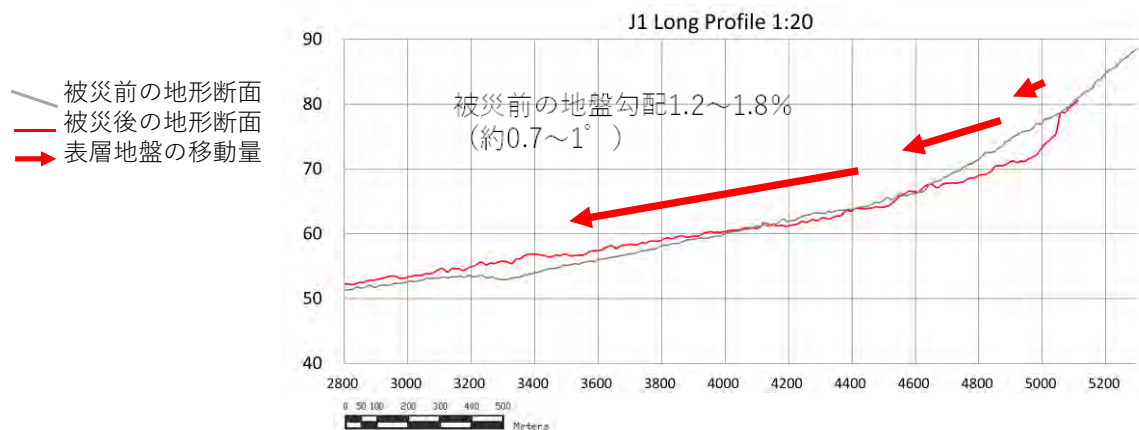
出典：JICA 調査団作成

図 2-48 Jono Oge における現地被災状況

図 2-49 に地震前と地震後の衛星データ（AW3D）から取得した可視画像データと地形断面を示す。地震前と地震後の衛星画像から表層地盤の地物（家屋など）を対比することにより水平移動量を評価した。Nalodo 範囲の上半部は 300～800m 程度の移動量があり、水田などと宅地であった場所は、茶褐色の地盤が露出している。頭部の幅 500m 程度の範囲および末端の堆積域では移動量は相対的に小さい。表層地盤の地物の移動量を地震前後の地形断面に投影すると、上半部では 5m 程度地盤の低下が発生し、堆積域では 2～4m 程度地盤が高まっていることが確認できる。Jono Oge では地盤流動の最後には砂泥流が発生したことが知られており、堆積域は明瞭な丘を作っていない。表層地盤の移動量が Nalodo 発生域の半分程度の長さで発生している状況を見ると、移動層が単層とする場合には深いすべりではなく、比較的浅い（厚さ 10m 程度以下）範囲が流動化したものと想定することが可能である。



地震前と地震後（2018 年 9 月 30 日）AW3D 衛星画像を使用



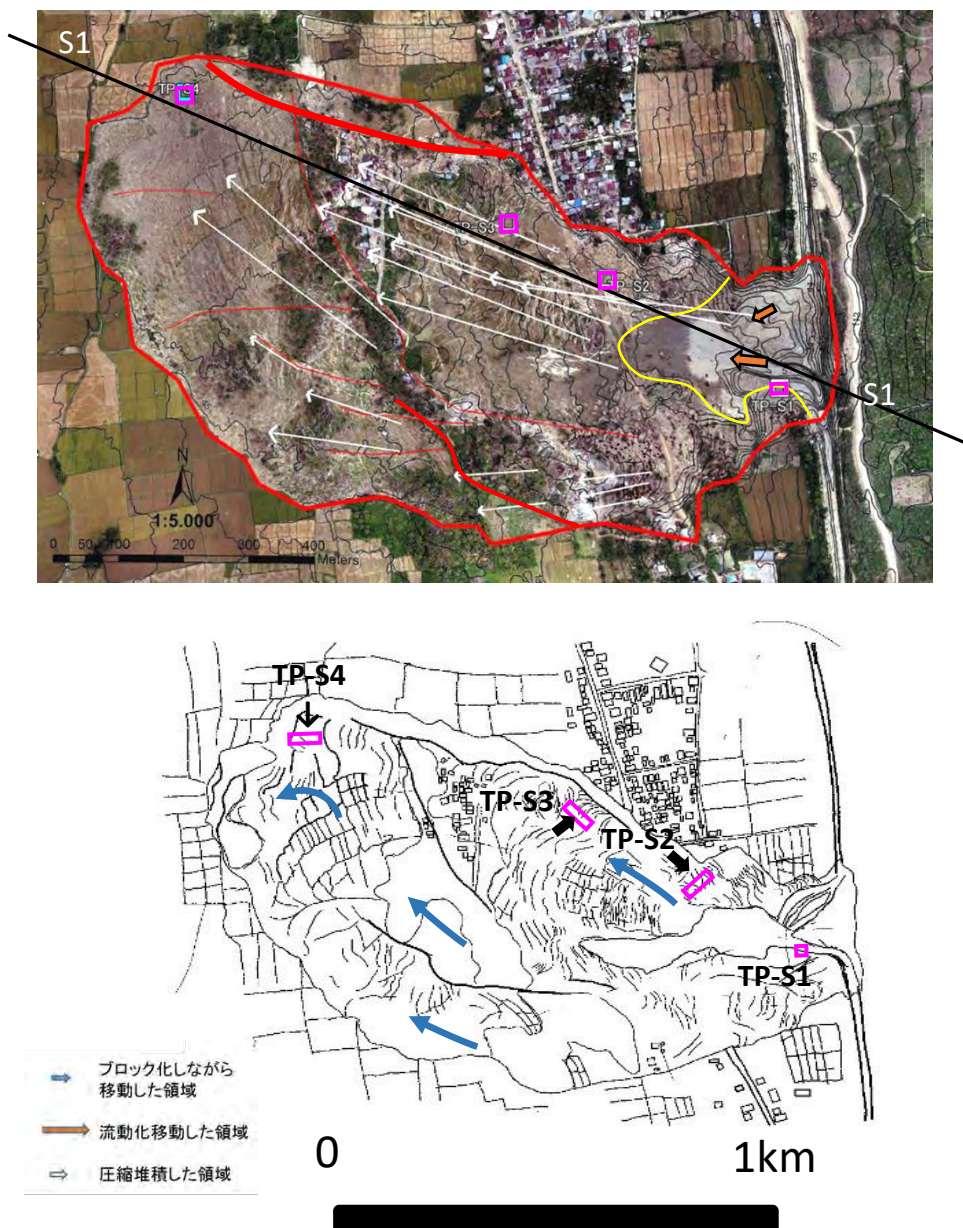
地震前と地震後（2018 年 9 月 30 日）AW3D DTM 使用

出典：JICA 調査団作成

図 2-49 Jono Oge における地物の移動量と地形変化

(4) Sibalaya

Sibalaya では、頭部滑落崖に灌漑水路が位置する。移動土塊は大きく 3 つのブロックに分かれて西北西方向に 200～400m 移動している。先端（末端・堆積域）でも圧縮集積の形跡はなく、弱く左回転を伴い水田上を被覆している（全体に引張り亀裂が形成されている）。トレンチ調査では、滑動層の厚さは TP-S2 で 1.2m、TP-S3 で 2.5m+、TP-S4 で約 2m である。移動層内に旧表土（厚さ 30cm 程度）を伴い、その下位の地層は液状化・流動化の痕跡を示している。最上部は液状化せずに移動。頭部付近で確認する移動層は、緩いシルト質砂・細礫・シルトの細互層である（図 2-50～図 2-54 参照）。



出典：JICA 調査団作成

図 2-50 Sibalaya における流動化地すべりの概要



Sibalaya 地すべりの頭部鳥瞰
灌漑水路と頭部滑落崖が完全に一致している。流動した水路堰堤により、水路の水もすべて流出し、頭部付近は土砂が流出した。写真中央の水門施設も大きく被災している

出典：JICA 調査団作成

図 2-51 Sibalaya の鳥瞰写真（震災 19 日後）

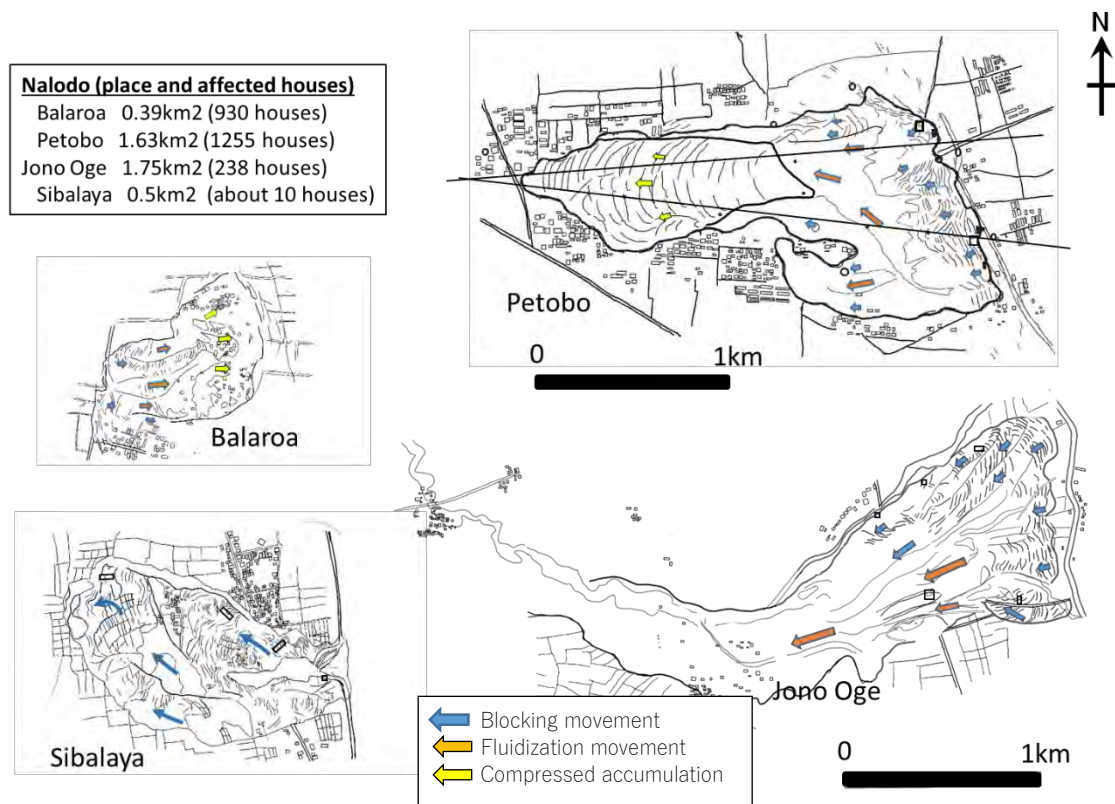
※；Sibalaya の地形断面および被災状況などは、第 8 章に掲載した岡村他（2019）に詳しく記載されているので参照されたい。

（５）Nalodo 発生地区の特徴

Palu 低地で発生した 4 箇所の地盤流動（Nalodo）は、発生規模・斜面勾配・流動形態などにそれぞれ特徴があるが、上位の斜面に小型の扇状地を伴うことが共通している（前述の図 2-17 など）。

被災面積の大きな地域は、Jono Oge と Petobo で、頭部での幅は約 1km、長さは 2km である。頭部に引っ張り亀裂帯、中央部に完全に流動化した領域、末端に圧縮した堆積域を伴うことがある。

（図 2-52 参照）。Jono Oge の移動土塊は、泥流として流出したため明瞭な堆積域はなくなっている。Balaroa では流動化した範囲が広く明瞭な圧縮堆積域がある。Sibalaya では、Gumbasa 灌漑水路の崩壊によって頭部付近の変状はあまり残されていないが、移動層は水田として利用されている平地を広範囲に広がりながら運搬されたことが上空からの写真判読で認められる。



出典：JICA 調査団作成

図 2-52 被災地ごと Nalodo の概要

Nalodo の発生した内部では、展張した亀裂を埋めるように噴砂・噴泥などが多く確認されている。また、発生域の周辺においても噴砂（図 2-53）が確認されており、これは地盤が液状化した証拠とみられる。また、東側で発生した Nalodo（Petobo・Jono Oge・Sibalaya）の頭部は、灌漑水路にはほぼ一致し、地盤の変状は灌漑水路を境に発生している。常時流水のあった灌漑水路の斜面は西側に転倒するなどして開口した亀裂が形成されている。水路には遮水構造はなく、上流の Sibalaya 付近に限定して水路の片側（下流側）にコンクリートライニングが設置されていた（図 2-54）。



Nalodo 内部で確認された噴砂跡、展張性亀裂の隙間から噴砂が発生している。
地盤流動の完了後の最終段階に発生している。左；Petobo 頭部）



Jono Oge の南側に広がる水田の中に見られる多数の噴砂跡、噴砂の近傍の水田に新しい湧水池が出現している。

出典：JICA 調査団作成

図 2-53 噴砂の確認（液状化が発生した状況証拠）



Petobo 頭部

コンクリートのライニングはなく、遮水構造は見られない。写真右側の下流側が流動したために、水路にも開口亀裂が多数形成された。



Jono Oge 頭部

コンクリートのライニングはなく、遮水構造は認められない。上流側の堤体も液状化によるとみられる流動に伴う開口亀裂が形成されている。



Sibalaya 頭部の灌漑水路（流出した灌漑水路の北側 200m地点）
斜面下側だけにコンクリートのフェーシングが設置されている。水路底及び山側には遮水構造は認められない。

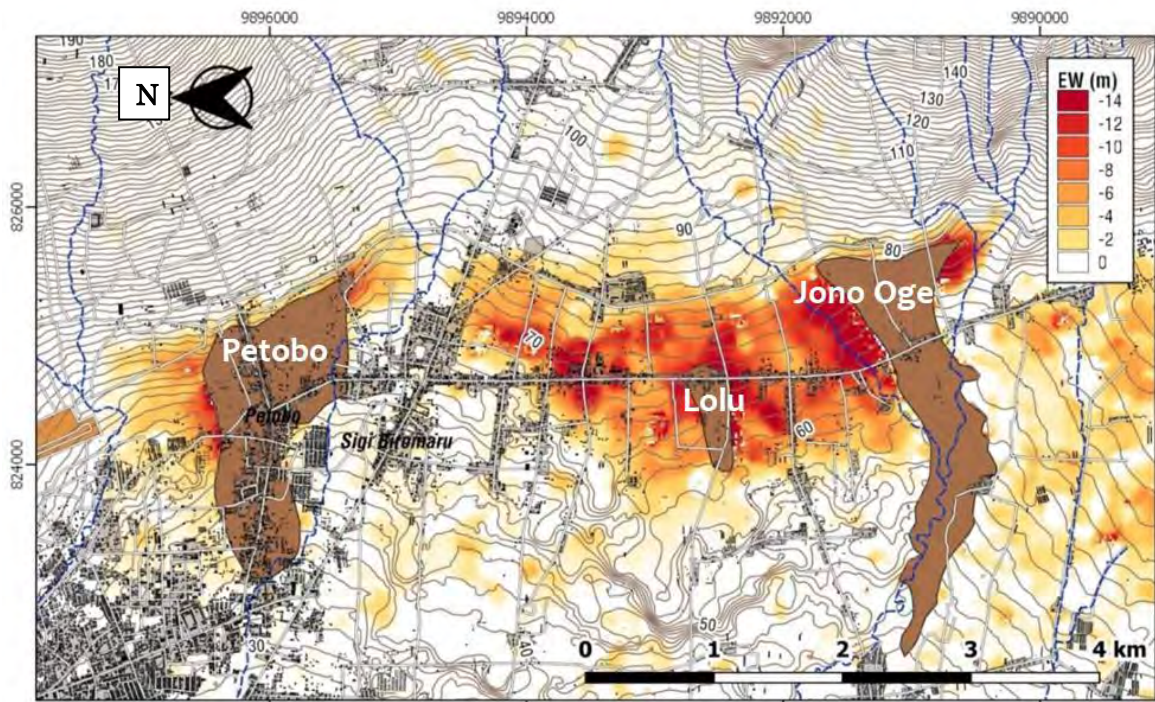
出典：JICA 調査団作成

図 2-54 灌漑水路の表層構造と被災状況

（６）Palu 低地東側の広い側方流動発生地域

Nalodo の発生地域の外においても、Palu 低地東側の領域は広範囲の側方流動が確認されている。Valkaniotis 等（2018）は、衛星画像から移動量を算出して地震発生 3 週間後の 10 月 19 日には変動量図を報告している（図 2-55 参照）。変位の方向は地形の傾斜方向に一致し、数 m～10 m を超える側方流動が発生している。Petobo 及び Jono Oge はカイリ族による古地図で河川に該当する凹地であったとされる。また、地震発生前から湧水があり、液状化層が厚く堆積した地域であることは地形発達の視点から想像ができる。ただし、Petobo と Jono Oge に挟まれた Lolu を代表とする地域及び Jono Oge の南側の地域は大型の扇状地上に位置し、緩い凸地形（丘状）をなすため、凹地で活発に堆積物が供給されるのに対して、凸の緩斜面では新しい堆積物が供給されにくい地形条件にあり、遷緩線も不明瞭であることから浅層地下水の湧き出す地点と判定することは難しい地域である。

Watkinson 他（2019）は、Petobo と Jono Oge の地すべりを、その東側に位置する灌漑水路の影響と結論づけている。灌漑水路によって地下水位が上昇したことは、地震後の地下水位低下量が大きいことから正しいと思われる。ただし、日本で知られている側方流動の移動距離に対して著しく大きいことや、西側の灌漑水路のない Balaroa で Nalodo が発生していることを理由として、他のメカニズムを考慮する必要性が委員会で指摘された。



出典：Valkaniotis et al., (2018)；査読なし報告⁵⁾

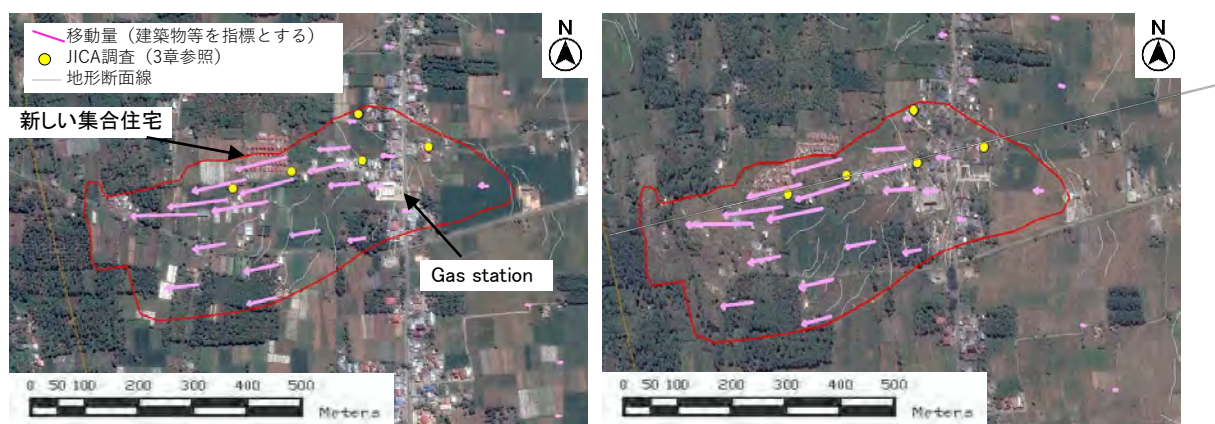
図 2-55 Palu 低地東側の Nalodo 発生地域と広範囲な側方流動

Extensive ground displacement on the eastern Palu valley. Brown polygons are large catastrophic slides that caused major loss of life and swept small settlements. Red and yellow color indicates the horizontal displacement (movement towards west), reaching locally 14 m. There is a wide zone of 1-2 km width that was dislocated towards west.

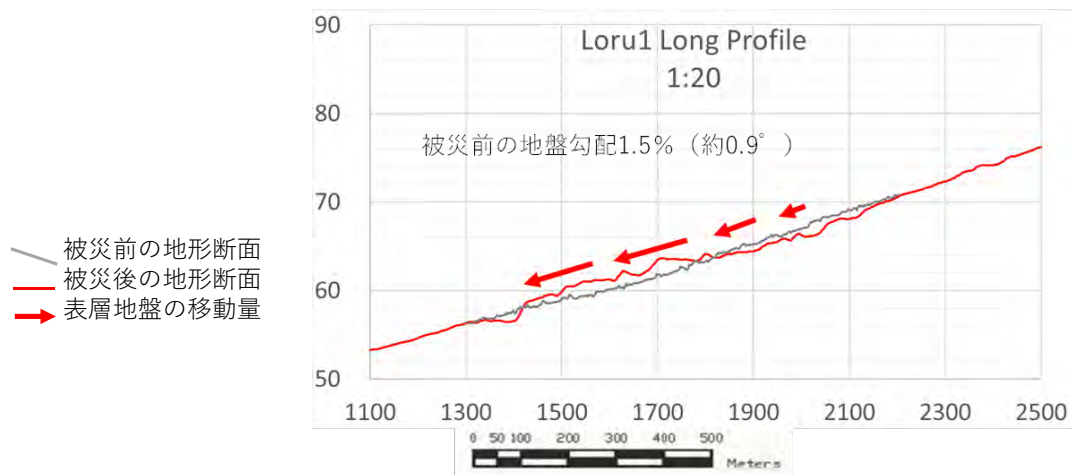
(7) Lolu 周辺

Lolu は、前述のとおり大型緩傾斜扇状地内にあり、新しいルーズな堆積物の堆積場あるいは地下水が湧き出す大型扇状地に挟まれた凹地地形には該当していない。しかし、最大水平移動量 130 m 程度の地盤流動が発生している。前記した 4 箇所の Nalodo と比較すると、頭部の滑落崖を伴わず、地盤全体に開口した亀裂が形成され、上半部の地盤は展張した状況にある。そのため、図 2-56 に示す地形断面を見ると上半部では 1~2m の地盤低下、下半部では 2m 程度の地盤の高まりに留まっている。

南北に貫通する Palu-Palolo の幹線道路沿いのガソリンスタンドで地震時のビデオが公開されている他、北側の新興住宅が東西方向の流動境界で分断されたことなどが特徴である。



地震前と地震後（2018 年 9 月 30 日）AW3D 衛星画像を使用



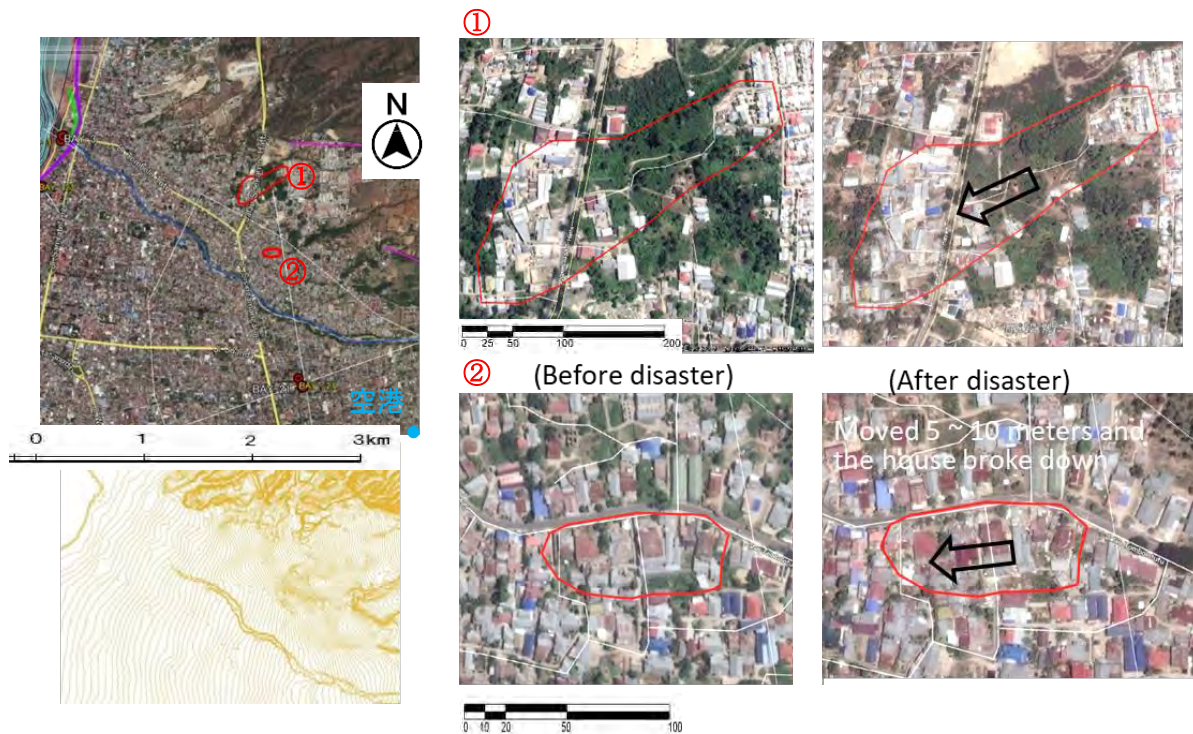
地震前と地震後（2018 年 9 月 30 日）AW3D DTM 使用

出典：JICA 調査団作成

図 2-56 Lolu における地物の移動量と地形変化

（８）主要な Nalodo 以外の側方流動

Petobo や Jono Oge の周辺域で広範囲に側方流動が発生しているが、空港よりも北側の地域でも図 2-57 に示すように 5～10m¹の移動量を示す側方流動が発生した場所がある。



出典：JICA 調査団作成

図 2-57 Nalodo 地形の判読（Maxar Technologies 衛星画像）

地盤移動量の評価方法は新旧の衛星画像を重ね・交互に表示することで、動いていない建物と動いた建物、移動量を識別している。

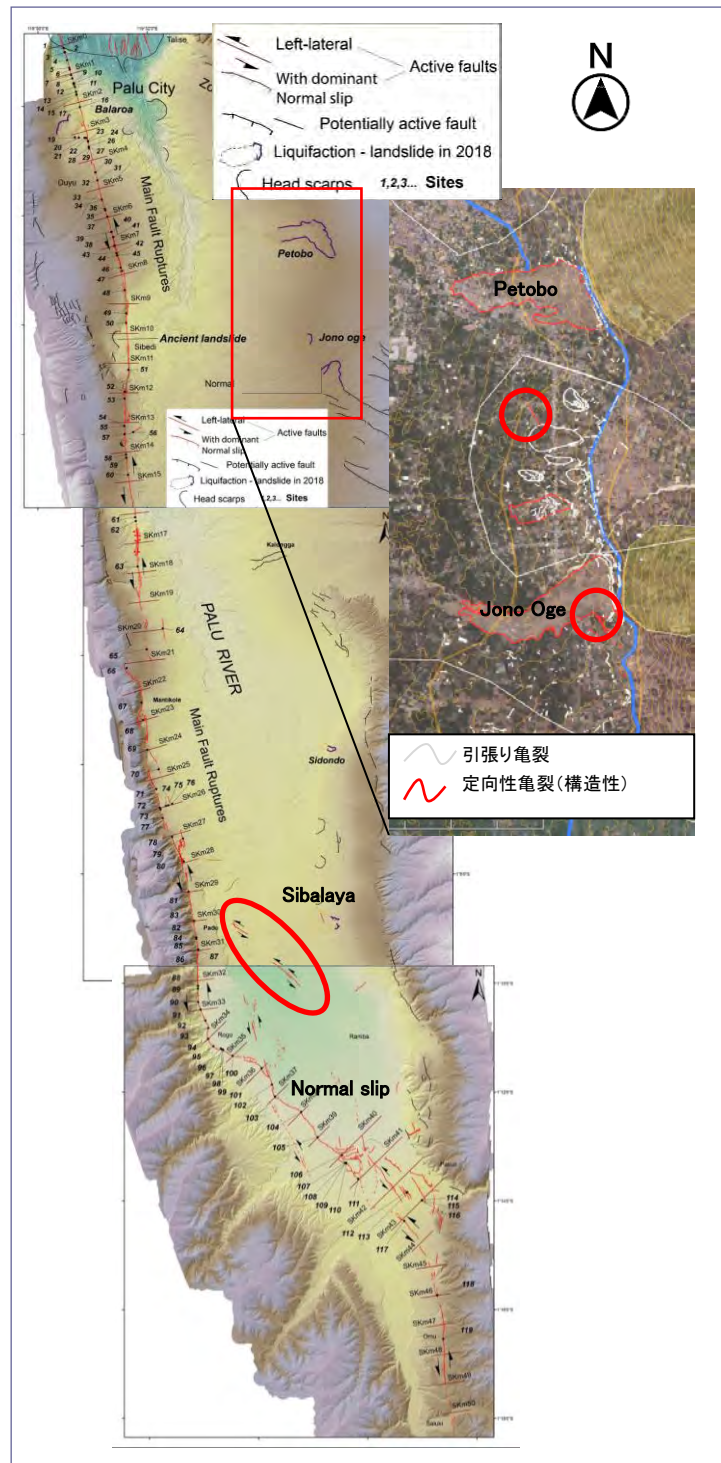
（９）灌漑水路と Nalodo の位置関係

扇状地起源の地下水は被災地域中央部付近で被圧帯水層を形成するが、すべり移動時の 1～10 分程度に流動化層（移動層と不動地盤の境界層）に供給される水は、異常な被圧条件を前提としない限り、扇状地起源及び灌漑水路起源の短時間で湧出する量は相対的に少なく、流動化層の直下（近傍）にある液状化層から供給されたものが主体をなすことが地下水シミュレーションの結果から導かれた。東側の地域には農業用の灌漑水路が標高 80m 付近にあり、この水路を頭部とした側方流動が広範囲に発生している。農業用灌漑水路よりも高位の扇状地では被害が認められない状況は、農業用灌漑水路が地下水位を堰上げたことで、液状化地すべりの被害を拡大させたことが考えられる。灌漑水路近傍の地下水位については、第 3 章 7 項で地下水位観測結果についてとりまとめている。

(10) Palu-Koro 断層周辺の地盤変形（構造的）

Palu 低地の Palu-Koro 断層の変形構造は、LIPI 活断層調査チーム他の現地調査により地表の変位がトレースされている。図 2-58 に示すように Palu 湾から南の約 30km 区間は直線的に左横ずれの変位が卓越するが、Palu 湾から 30km 南方より谷の東縁にステップし、プルーアパートに伴う正断層の変位が出現している。また、北西-南東方向の副次的な破断面（ミ型の雁行断層）が認められる場合がある。

Palu 低地の東側の Petobo～Jono Oge 間では、広範囲な側方流動が発生し、地盤傾斜方向への引張りによる正断層の変位が多く認められる。これらは地盤の側方流動に伴うもので構造的とは考えられない。ただし、この中の幾つかは、北北西-南南東方向の定向性亀裂があり、Jono Oge 地すべりの頭部付近に連続する。また、Petobo 地すべりの流動化領域は北北西-南南東の傾向を持っていることから、構造的な亀裂も中にはあると考えられる。

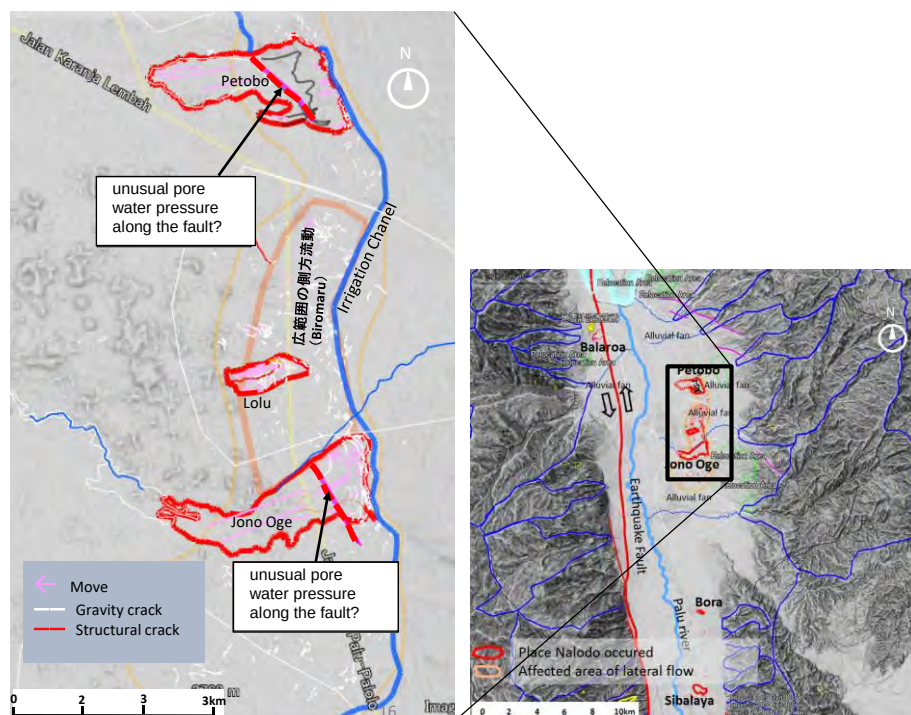


出典：JICA 調査団作成

図 2-58 Palu-Koro 断層による地表断層分布

図 2-59 に Petobo と Jono Oge 間の側方流動に伴う展張性亀裂（白）と直線状の定向性亀裂（赤）を示す。Lolu 付近では広範囲の側方流動が発生し、水平移動量が全体に 10～50m を示す。水田に形成された亀裂は、重力性の引張り亀裂が大半を占めるが、一部には構造的と考えられる北北西－南南東の定向性の亀裂も認められ、Petobo と Jono Oge の最も流動化の著しい地域を通過する可能性がある。Nalodo の外であれば、この直線状の亀裂地形を残すが、Nalodo 内部ではその延長を確認することが出来ない（ここでは、Petobo 地域では、最も地盤流動が激しい凹地の直線状の際と Jono Oge で確認された圧縮リッジの延長を記している）

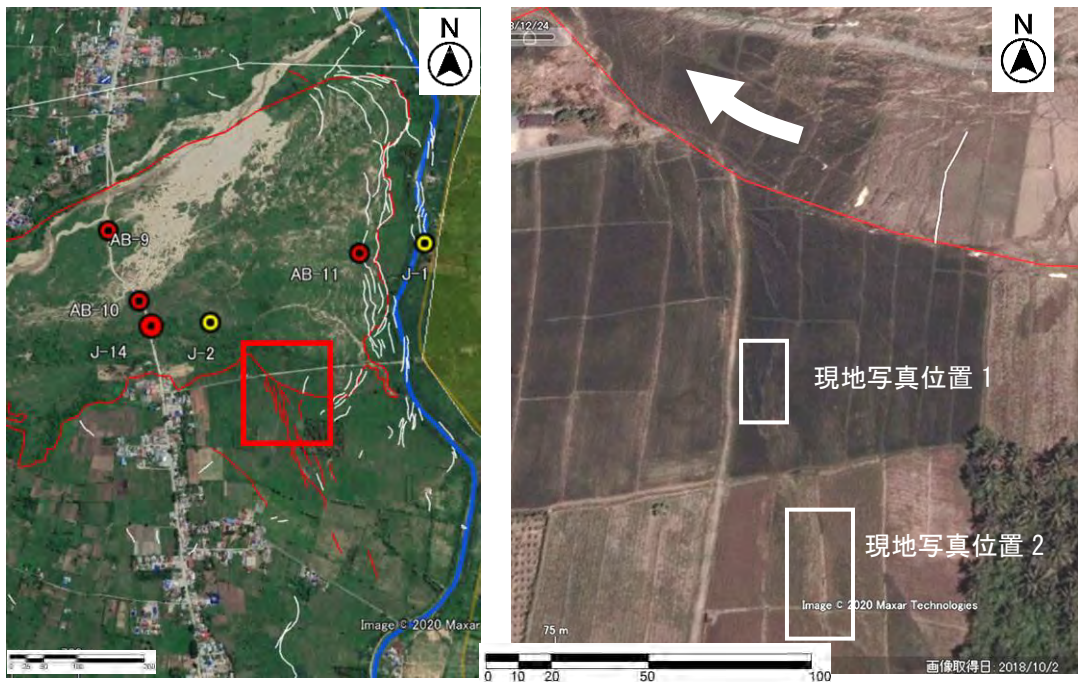
図 2-60 には、Jono Oge 南部で発生したミ型の派生雁行断層と思われる圧縮リッジの状況を示す。



出典：JICA 調査団作成

図 2-59 Nalodo 東部の構造的と思われる直線状の亀裂と Nalodo 内部への方向性

Nalodo 内部の直線状亀裂の有無は確認されたものではないが、図 2-40 Petobo 内部の状況、後述する図 2-59（地盤高の変化量）などから、Nalodo 内部への連続性を延長すると、地盤流動の著しい境界に一致することから図化したもの。



Jono Oge 南東部の定向性の圧縮地形 (2018/10/2 撮影 digital globe)

現地写真位置 1；農地として平坦な地形をなしていた場所に高さ 1m 弱の圧縮リッジが形成されている

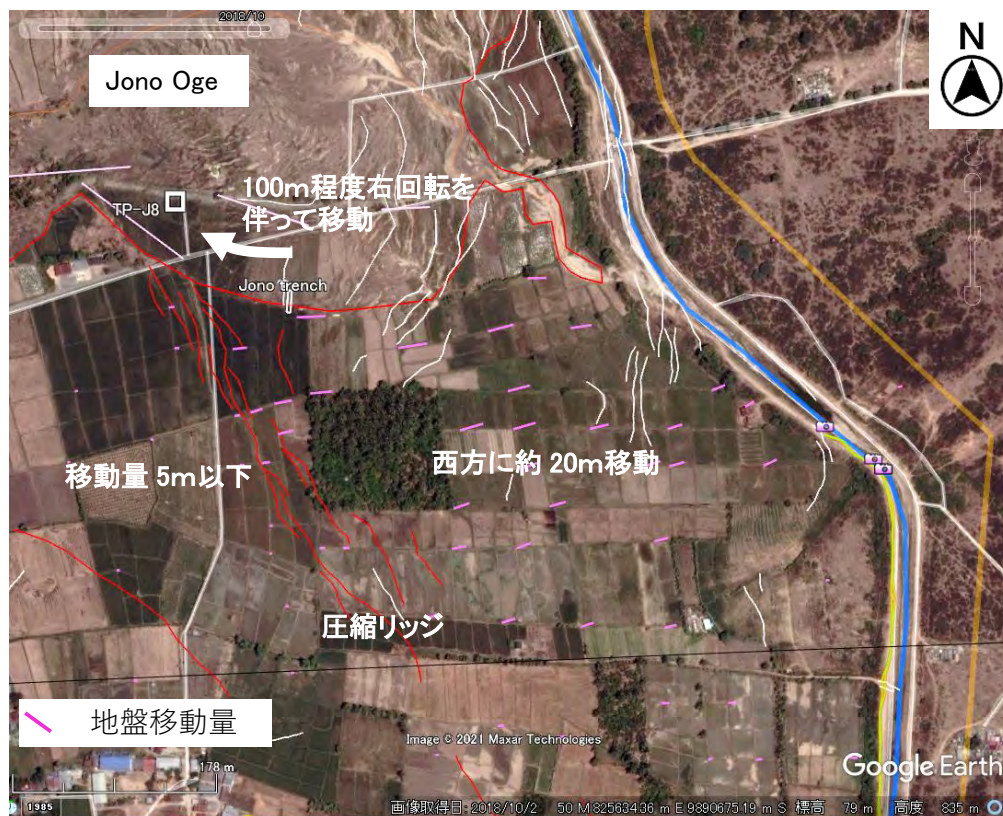


現地写真位置 2；ヤシの林の手前高さ 1.5m の地盤破壊領域が線状に配列

出典：JICA 調査団作成

図 2-60 Jono Oge 南部の構造的亀裂（圧縮リッジ）の確認状況

Jono Oge 南東端に確認された圧縮リッジ付近の地盤移動について、震災前後の衛星画像（Google Earth）からその特徴を分析し図 2-61 に示した。Jono Oge の南東端は、水田の区画を残しながら、右回転を伴って約 100m 西方に地盤が流動している。円弧状に回転した地盤の境界は、圧縮リッジの延長線上に位置し、Nalodo として長距離流動した範囲は、圧縮リッジによって画されているように見える。また、それより南方の範囲では、圧縮リッジを境に東側の地盤が 20 m 程度西方に移動し、西側の地盤はほとんど移動していない。圧縮リッジとしての地形は、この 20m 程度の地盤短縮によって形成されているが、直線状の配列は地盤の側方流動発生前の段階に弱層として形成されていたと考えた方が、直線状の配列を説明することが容易である。すなわち、直線状の亀裂地形（おそらく Palu-Koro 断層の副次的な破断面）によって画されたその東側が選択的に 20m の側方流動を発生させている状況は、直線的な亀裂が側方流動の発生に関与していることとなる。なお、この地域に住宅が無いことから、地震時・地震後の湧水等の発生状況は情報が得られていない。



出典：JICA 調査団作成

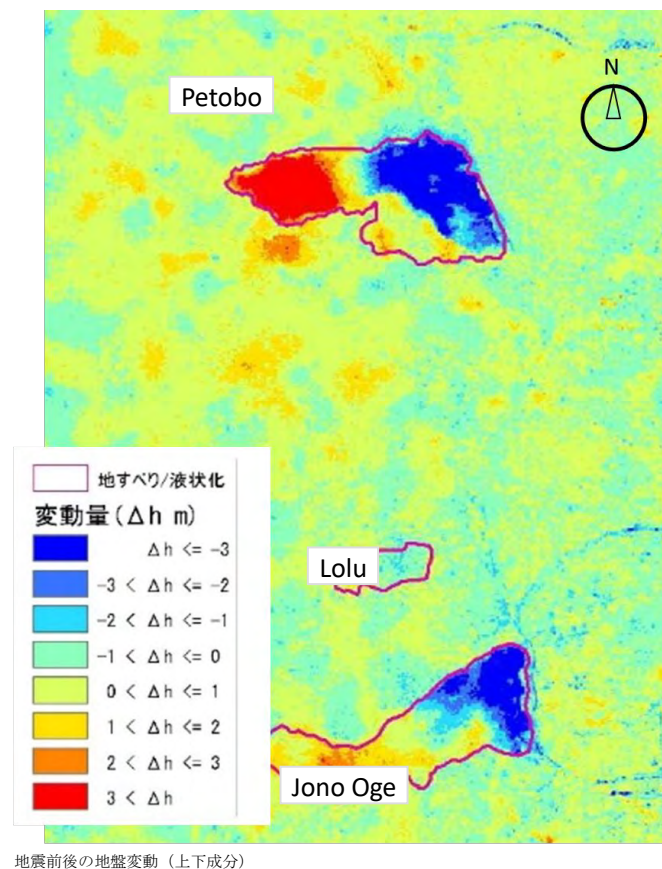
図 2-61 Jono Oge 南東部の地盤流動の特徴

2-5 過去に発生した Nalodo 地形の判読

Palu は世界的にも特出した地震が活発な地区であり、例えば約 100 年前にも大地震が発生している。その時にも同様の Nalodo が発生していたら、その跡が現在の地形にも残っている可能性がある。そこで、2018 年震災前の AW3D の衛星データをもとに地震前の地形を判読して、過去に Nalodo が発生した地区を推定してみた。Nalodo はこれまで世界的に見て類を見ない希な現象である。表層地盤が長距離流動により広い範囲が削剥され、末端では集積し丘様の地形を作る場合がある。灌漑水路のない過去にも同様の長距離流動が発生していた可能性について震災前の地形を判読し、Nalodo で発生した地形の特徴が残っている地域について検討を行った。

(1) Nalodo 発生後の地形的特徴

今次災害では、内陸部扇状地の傾斜 1~5% 緩斜面の 4~5 箇所で Nalodo が発生した。すべての地点でルーズな沖積層が分布し、扇状地扇端の浅い地下水の地域であったことに特徴があり、液化化による噴砂も各所に認められた。図 2-62 に示すように Nalodo の地形は、頭部から流動域にかけて 3~7m の低下が見られ、末端の堆積域は移動した土塊が圧縮堆積により 1~5m 程度標高が上がっている。地形的特徴は、頭部の地形低下領域と端部の堆積領域がセットとして分布することである。中間の Lolu については、明瞭な滑落崖が認められず、堆積域の比高差も 1m 程度であるため、地形図からの判読は難しい。



出典：JICA 調査団作成

図 2-62 Nalodo 発生により地形変化の特徴 (AW3D 2mメッシュデータ)

(2) Balaroa 周辺の判読

Nalodo の発生した Balaroa 周辺の 2m メッシュ地形データ (AW3D) から作成した被災前地形図を用いて、地すべり地形の判読を行った。Balaroa は、頭部に高さ 5m 程度の滑落崖と堆積域の押し出し地形が明瞭に判読できる。これ以外に 5 箇所 (TL1～TL5) の疑わしい地形を抽出した (図 2-63、図 2-64 参照)。5 箇所は、すべて明瞭なものではない。TL1・TL4・TL5 の 3 地点はクリープ様の地形。TL2 と TL3 は、その疑いを残すが、人工的な地形や他の成因も考えられる地形である。

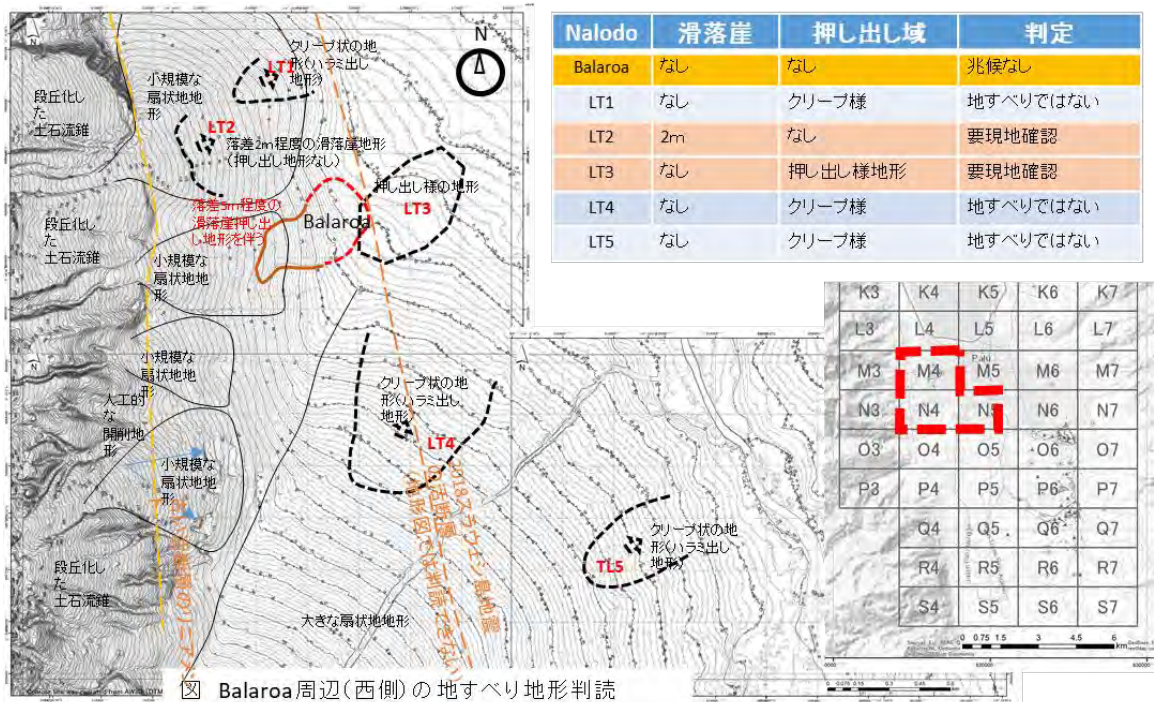
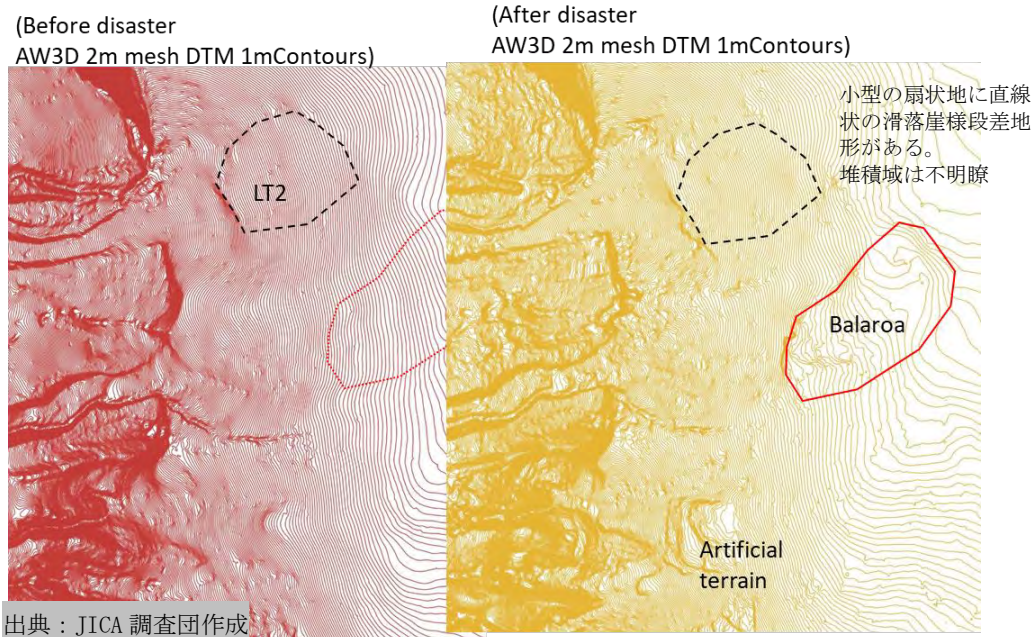


図 Balaroa 周辺(西側)の地すべり地形判読

出典：JICA 調査団作成

図 2-63 震災前地形図の判読 (AW3D 2m メッシュデータ、Balaroa)



出典：JICA 調査団作成

図 2-64 古い Nalodo 地形の判読 (新旧 AW3D 地形データ、Balaroa)

（３）Petobo・Jono Oge 周辺の判読

Balaroa と同様に 2m メッシュ地形データ（AW3D）から作成した被災前地形図を用いて、地すべり地形の判読を行った。Petobo と Jono Oge は、頭部に高さ 5m 程度の滑落崖と堆積域の押し出し地形が判読できる。中間の Lolu については、滑落崖が認められず堆積域の比高差も 1m 程度であるため、地形図からの判読は難しい。Nalodo の周辺域について 3 箇所（LT6～LT8）の疑わしい古い Nalodo 地形を抽出した（表 2-3 参照）。

LT6 及び LT7 は、Petobo の南側に隣接し、地形地質条件は Petobo と同様の地域と考えられる。頭部付近に 1m 程度の凹みがあり、中央から末端域には押し出し様地形を伴うため、小規模な Nalodo が発生した可能性がある（図 2-65 参照）。

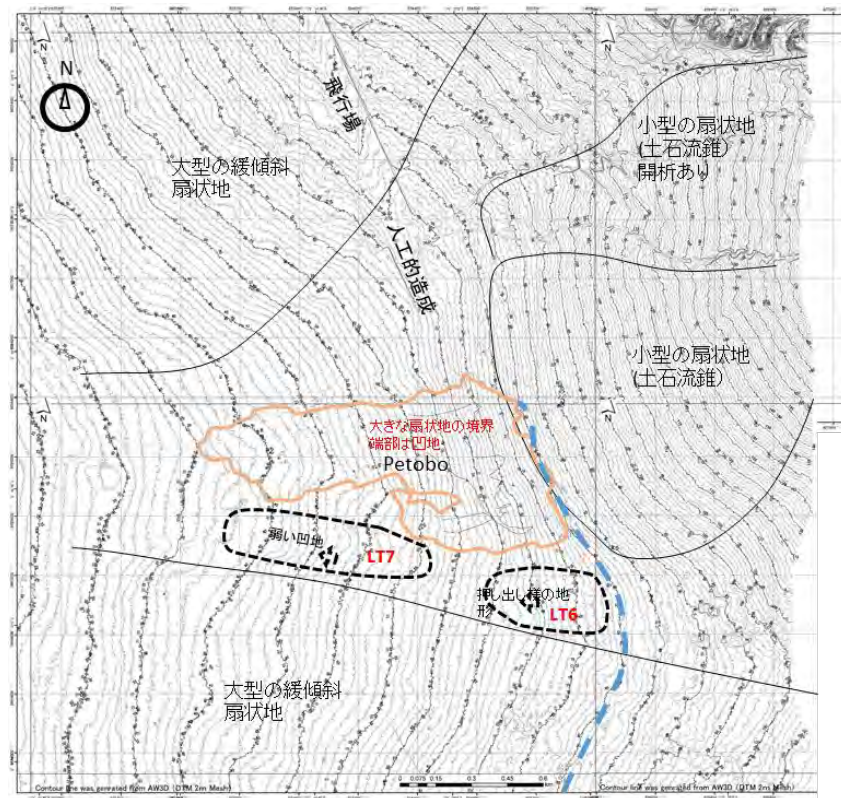
LT8 は、Jono Oge の南側に隣接し、地形地質条件は Jono Oge と同様に、大型の扇状地に挟まれた微低地（凹状地）に位置する。Palu 地域の扇状地は非常に綺麗な弧状の等高線を描き、大型の扇状地に挟まれた凹地の地域は、緩い起伏を伴う地形（等高線がやや乱れる）特徴がある。Jono Oge に隣接した南部の地域では、頭部付近に 2m 程度の滑落崖様の凹みがあるが、中央から末端にかけて押しだし様の地形は不明瞭である。地すべりとしても薄いすべりであったか、Jono Oge と同様に泥流化したために明瞭な堆積域を残さなかった可能性がある（図 2-66 参照）。

地形判読結果から、Nalodo の発生地域は大きな扇状地の縁（凹地）の地域で、上部に小型の扇状地（土石流錐）を伴うことが特徴である。また、今次災害の Nalodo 発生地域は災害履歴の認められない平滑な斜面をなし、古い災害履歴は隣接した箇所で発生したとみることができる（図 2-67 参照）。

表 2-3 震災前地形図を用いた古い Nalodo 地形の判読概要（東側）

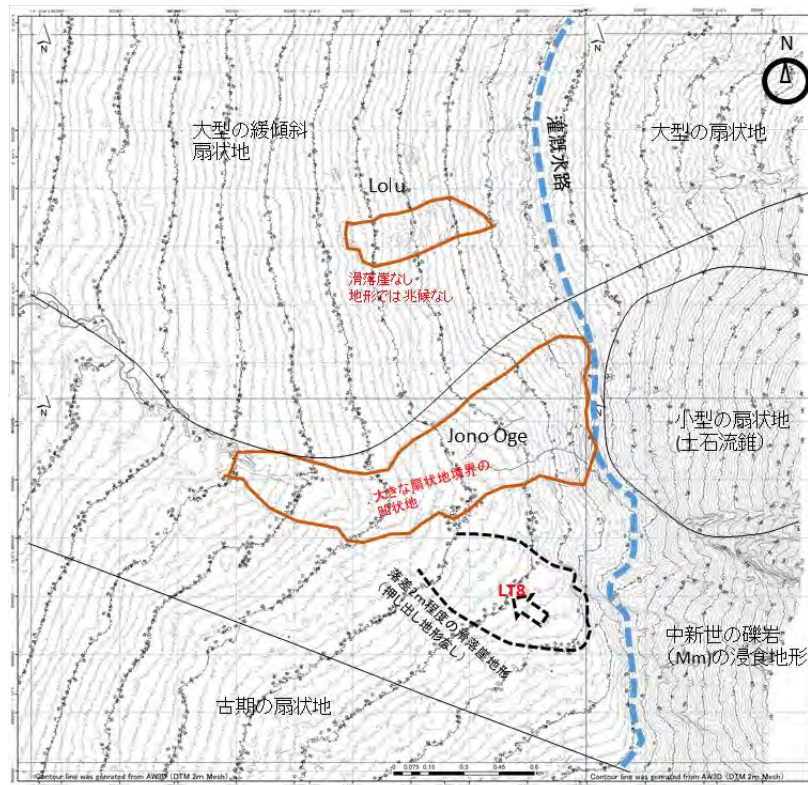
Nalodo	滑落崖	押し出し域	判定
Petobo	なし	なし	兆候無し
Lolu	なし	なし	兆候無し
Jono Oge	なし	なし	兆候無し
LT6	1m（陥没様）	押し出し様地形	要現地確認
LT7	1m（陥没様）	なし	要現地確認
LT8	2m 程度	押し出し様地形	要現地確認

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 2-65 Petobo 周辺（東側）の地すべり地形判読（災害発生前地形図）

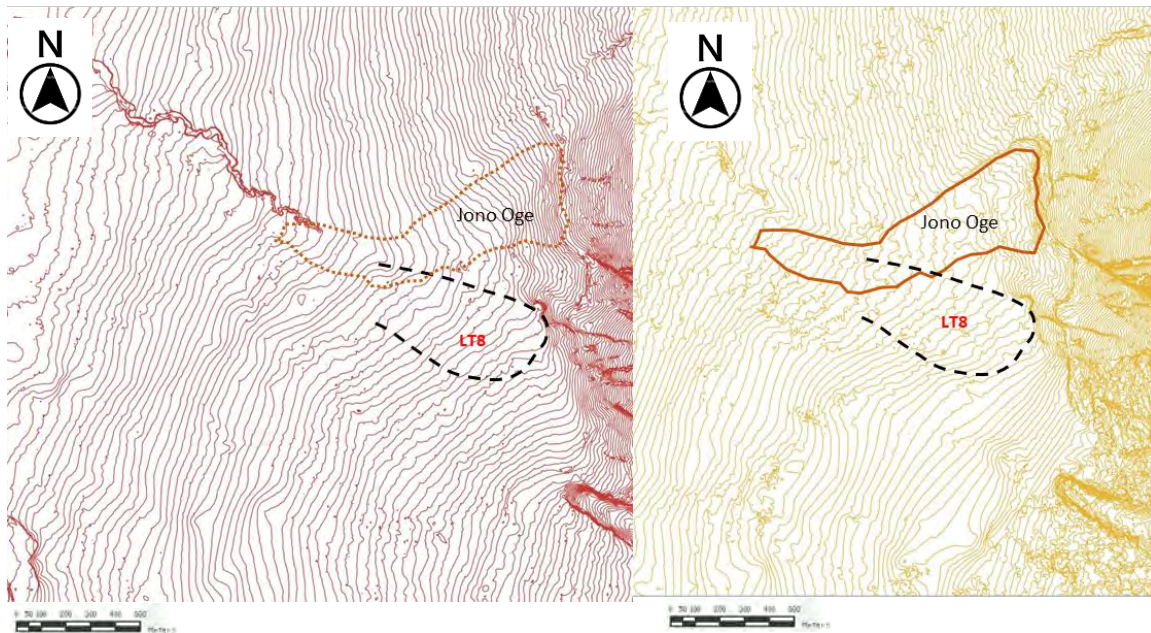


出典：JICA 調査団作成

図 2-66 Jono Oge 周辺（東側）の地すべり地形判読（災害発生前地形図）

(Before disaster
AW3D 2m mesh DTM 1mContours)

(After disaster
AW3D 2m mesh DTM 1mContours)



出典：JICA 調査団作成

図 2-67 古い Nalodo 地形の判読（新旧 AW3D 地形データ、Jono Oge 周辺）

2-6 沿岸域の液状化を伴う流動性地すべり

(1) Palu 湾沿岸域の流動性地すべり

Palu 湾の沿岸では、河川の州に堆積した砂州堆積物が液状化により地すべり（重力流）を発生させている。JICA の第一次現地調査団報告によると、埋設されたヒューム管がランダムに浮き上がる又は埋没した状況を確認しており、液状化の影響を典型的に示していると評価している（図 2-68 参照）。地震前後の衛星画像の対比及び現地確認により幅 100～1000m 規模の地すべりが図 2-69 の A～P の 16 箇所で発生し、沿岸域の地表が海底に没した。Palu 湾は水深 700m 以上の深い海底谷をなし、岸から地形勾配が大きい特徴を持つ。地すべりの発生箇所は、両岸山地から海に流入する河川河口の砂州堆積物分布地域に限定される。沿岸域には、沖積三角州（扇状地）以外に段丘化した洪積礫層分布域及び基盤岩地域があるが、これらの地域に地すべりは発生していない。また、この沿岸域の地すべりによって津波が発生したことが、船上からの津波発生画像などからわかっている。

New Evidence of Extensive Liquefaction at Coast



出典：JICA 調査団作成

図 2-68 JICA 第一次現地調査団（2018 年 10 月 30 日 Sassa による報告）



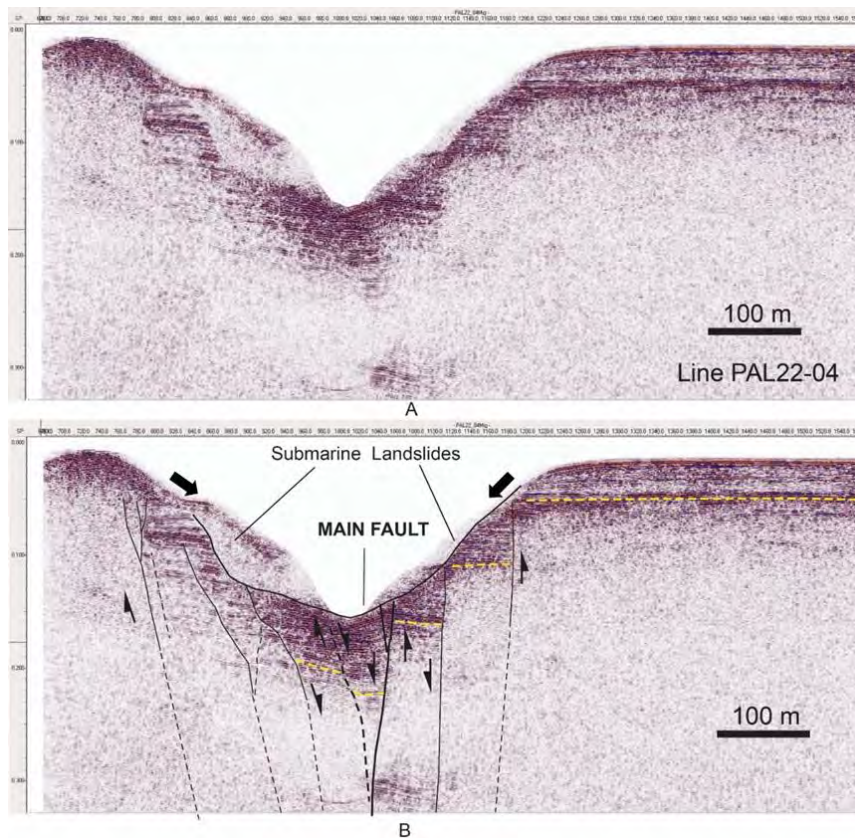
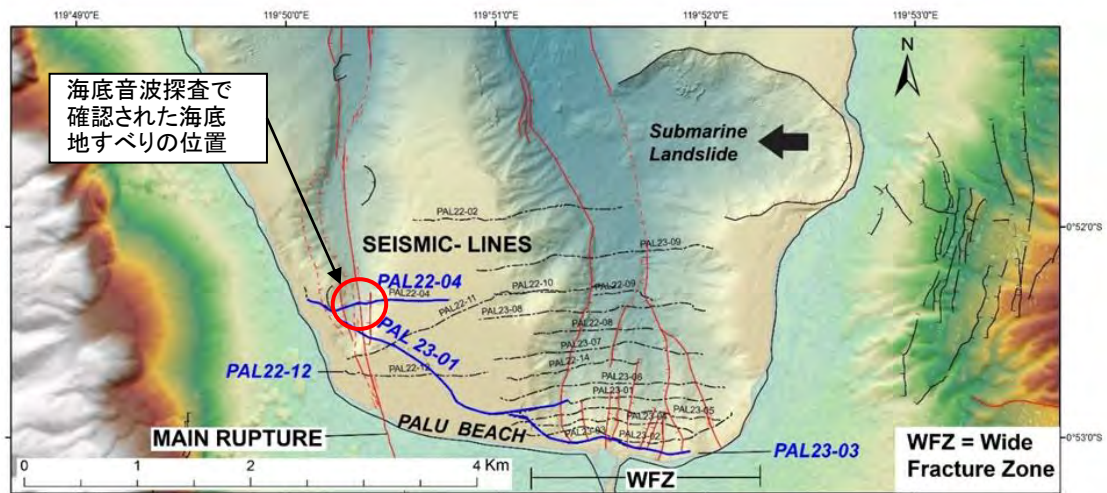
出典：JICA 調査団作成

図 2-69 沿岸域の液状化地すべり発生場所

（２）Palu 湾の海底音波探査による海底地すべり

JICA 調査団は、2019 年の 4 月に Palu 湾南岸の海底音波探査を行った。探査はシングルチャンネルの反射法音波探査で、探査延長は述べ 29.6km である。Palu-Koro 断層が Palu 低地の西縁を主体に分布するが、今次地震では Palu 低地の沖積層分布地域に地表断層が発生したため、海底の堆積構造を探査することによって Palu 低地域に延長する活構造を評価することとした。

その結果、海底地盤の浅層を変位する活構造を複数確認した。また、断層以外の海底下の斜面において海底地すべりが発生した状況が認められた。図 2-70 に示す 22-4 測線では、音波反射断面から推定される断層および地すべりを記入したところ、2018 年に水平横ずれ変位のあった Palu-Koro 断層が海底地すべり堆積物によって覆われる構造が認められ、今次地震によって滑動した海底地すべりと考えられる。



出典：JICA 調査団作成

図 2-70 海底音波探査(PAL22-04 測線)によって確認された Palu-Koro 断層と海底地すべり
PAL22-04 測線 (上；解釈を行わない音波反射断面、下；反射断面から推定される断層および地すべりを記入)

(3) 類似の液状化を伴う長距離流動地すべりの実績

Palu における大規模な液状化を伴う流動性地すべりは、内陸部の扇状地で発生した。陸上において液状化による側方流動については多数報告があるが、流動距離が数百 m を超え、下流域で洪水となるような大量湧水を伴う類似の報告は、陸上部においては稀であるように見える。1920 年に中国甘粛省で起きた海原地震による石碑原での 2.5° 程度の緩斜面流動破壊の軌跡は乾燥地帯でもあり未だに明瞭に確認できる(國生 2009)。ただし構成される堆積物は風成層とされている。

一方、沿岸域や海底下では類似の大規模な流動性地すべりの発生が知られている。1964 年のアラスカ地震ではバルデスやスワードで、1999 年のイズミット地震では沿岸部を震源とする海底地すべりが発生しており、特に、1980 年のカリフォルニア沖地震では、 $20\text{km} \times 2\text{km}$ の大きさの砂泥交互の海底地盤(傾斜度 1%以下)が、海面下 60m まで流れていたことがわかっている(図 2-71 参照)。

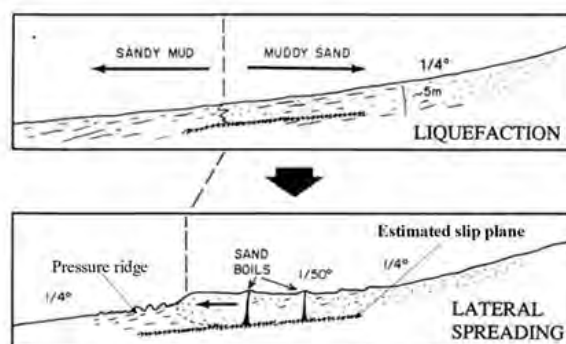


Fig.3 Cross-sectional change of sea bed off-California Coast before and after a 1980 medium Magnitude earthquake.

出典 : Field et al.1980

図 2-71 カリフォルニア沖地震の海底地盤

参考文献

- 1) Bird, P.,(2003) An updated digital model of plate boundaries, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252, 2003
- 2) Kadarusman et al., 2011 Eclogite, peridotite, granulite and associated high-grade rocks from Palu-Koro region, Central Sulawesi, Indonesia: An example for mantle and crust interactions in young orogenic belt, <https://www.researchgate.net/publication/252886093>
- 3) Hennig et al., 2017 Rapid cooling and exhumation as a consequence of extension and crustal thinning: Inferences from the Late Miocene to Pliocene Palu Metamorphic Complex, Sulawesi, Indonesia, *Tectonophysics Volumes 712–713*, 21 August 2017, Pages 600-622
- 4) WATKINSON & ROBERT HALL (2016) Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards, *Geohazards in Indonesia: Earth Science for Disaster Risk Reduction*. Geological Society, London, Special Publications, 441, <https://doi.org/10.1144/SP441.8>
- 5) Valkaniotis 等 (2018) A preliminary report on the M7.5 Palu earthquake co-seismic ruptures and landslides using image correlation techniques on optical satellite data, <https://www.researchgate.net/publication/328414705>
- 6) Bao Han, Ampuero Jean-Paul, Meng Lingsen, Fielding Eric J., Liang Cunren, Milliner, Christopher W. D., Feng Tian & Huang Hui (2019) Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake, *Nature Geoscience* 12(3): 200–205.)
- 7) Jin Fang 等 (2019) ,The 2018 Mw 7.5 Palu Earthquake: A Supershear Rupture Event Constrained by InSAR and Broadband Regional Seismograms *Remote Sens.* 2019, 11, 1330; (査読なし)
- 8) Socquet,(2006), Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction(Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 111, B08409, doi:10.1029/2005JB003963, 2006
- 9) Chang Liu (2020) Stress partition on the Palu-Koro fault controlling the 2018 Mw 7.5 Palu earthquake and its seismic hazards, (査読なし)
- 10) Theo M(2004) Fig.2, Stratigraphy and tectonic setting of the Cretaceous and Paleogene volcanic-sedimentary successions in northwest Sulawesi, Indonesia: implications for the Cenozoic evolution of Western and Northern Sulawesi ,*Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 25, Issue 3, June 2005, Pages 481-511.
- 11) WATKINSON 他 2011、Ductile flow in the metamorphic rocks of central Sulawesi, History and Tectonics of the Australia–Asia Collision. Geological Society, London, Special Publications, 355, 157–176.
- 12) Valkaniotis et al., (2018) ; A preliminary report on the M7.5 Palu earthquake co-seismic ruptures and landslides using image correlation techniques on optical satellite data EMSC(査読なし報告)
- 13) WATKINSON(2011), Ductile flow in the metamorphic rocks of central Sulawesi, History and Tectonics of the Australia–Asia Collision. Geological Society, London, Special Publications, 355, 157–176.

第 3 章 現地調査

3-1 現地調査概要

(1) 本プロジェクトで実施した地質調査

地質調査等は、内陸部で発生した液状化地すべり及び津波を発生させた沿岸域の地すべりを対象とした他、Palu IV 橋梁・かさ上げ道路及び砂防ダムを対象としても実施した。ボーリング調査以外では、Palu 湾南岸の海底音波探査、堆積物に含まれる有機物の放射性同位体年代測定、地下水・表流水の水質分析を行った。また、Nalodo 発生地域を主体とした地下水位のモニタリング、シギ島の政府建物用地の地盤調査及び Palu-Koro 断層の調査を行った。

地質調査は、ボーリング調査（室内土質試験・トレンチ調査を含む）、海底音波探査、放射性同位体を用いた年代測定及び水質分析を行った。ボーリング調査は、内陸部の液状化地すべりを対象に 2 業務、沿岸域の地すべり及び嵩上道路を対象に 2 業務、Palu IV 橋梁を対象に 1 業務、砂防ダム検討地点を対象に 1 業務の計 6 件の調査を行った。海底音波探査は、Palu 川河口周辺を含む Palu 湾南端の海底の地質構成・構造を把握するために実施した。水質分析及び放射性同位体を用いた年代測定は、対象地域の地下水の起源や堆積物の年代を評価し、調査対象地域全域の水理地質あるいは地質構造形成の検討に資するために実施した。これらの検討対象と調査数量などは、次に示すとおりである。

表 3-1 地質調査項目と数量

No.	検討対象	実施時期	調査内容と数量など
1	内陸部の液状化地すべり調査(第一次調査)	2019 年 1 月～ 2019 年 3 月	内陸部液状化地すべりの広域危険度調査、ボーリング調査 30 本、現場透水試験、SWS33 箇所、室内土質試験、トレンチ 19 箇所
2	内陸部の液状化地すべり調査(第二次調査)	2019 年 7 月～ 2020 年 4 月	内陸部液状化地すべりの内部調査、ボーリング 14 本（UDS 試料採取）、DCP13 箇所、トレンチ 12 箇所、現場透水試験・室内透水試験、PS 検層、室内土質試験（液状化強度試験）
3	沿岸域のボーリング調査(1)	2019 年 1 月～3 月	沿岸域地すべりの広域危険度調査、ボーリング調査 23 本、室内土質試験
4	沿岸域のボーリング調査(2)	2019 年 7 月～12 月	沿岸域（地盤沈下地域）の調査、ボーリング調査 6 本、室内土質試験（圧密試験）
5	Palu IV 橋梁のボーリング調査	2019 年 3 月～7 月	Palu IV 橋梁の予備設計調査、ボーリング 7 本、室内土質試験（圧密試験他）
6	Palu 湾南岸の海底音波探査	2019 年 4 月～9 月	延べ 29.6km、浅海域のシングルチャネル海底音波探査、DGPS 測位
7	堆積物に含まれる有機物の放射性同位体年代測定(C14)	2019 年 4 月～12 月	内陸部液状化地すべり地域、Palu 川河口地域及び Palu 湾南東低地（津波堆積物）の C14 放射性同位体年代測定、延べ 14 試料
8	地下水・表流水の水質分析	2019 年 7 月～12 月	主要イオン分析、水素酸素同位体分析 10 試料
9	地下水位のモニタリング	2020 年 2 月～9 月	自記水位計設置 20 箇所、雨量計設置 1 箇所、水位計等のデータ収集整理 5 ヶ月間
10	シギ島政府施設用地調査(Bora 地区)	2020 年 2 月～9 月	表面波探査 1 式（13 測線延べ 4,346m）、DCP50 箇所、CPT1 式
11	Palu-Koro 断層調査	2020 年 2 月～7 月	文献調査 1 式、現地調査 1 式、活断層評価図作成 1 式、断層の活動性検討 1 式

出典：JICA 調査団作成

各調査の詳細は本業務ファイナルレポート、付属書Ⅲ-3（データ集）に保存

(2) Nalodo を対象とした調査

Nalodo を対象とした調査は、第一次ボーリング調査及び第二次ボーリング調査、トレンチ調査、放射性同位体分析・地下水分析、被災者からのヒアリング及び地下水モニタリング(表 3-1 に示す No.1・No.2・No.7～9)を行っている。

第一次ボーリング調査は、Palu 低地の広域及び住民移転候補地を対象として、液状化に伴うハザード分析を目的として実施した。第二次ボーリング調査は、Nalodo の発生条件を評価する目的で、地盤流動の発生箇所の地盤条件・地下水条件などを評価するために実施した。

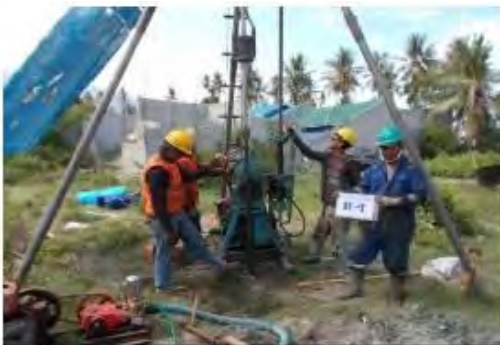
地質調査の代表的な作業状況を図 3-1 に示す。ボーリング調査・標準貫入試験・スウェーデンサウンディングおよび室内土質試験は、インドネシアの地質調査会社と共同で実施した。



ボーリング調査



スウェーデン式サウンディング試験



標準貫入試験



室内試験

出典：JICA 調査団撮影

図 3-1 地質調査の作業状況

3-2 第一次ボーリング調査

第一次調査は、移転予定地及び Palu 低地域内を対象に広いメッシュ（2～3km）を用いて広範囲の地盤条件を調査した。調査は、ハザードマップの精緻化を行うために、液状化による地すべりの危険度を評価することを目的とした。ボーリング調査 30 箇所及びスウェーデン式サウンディング（以下 SWS と略す）33 箇所である（図 3-2 図 3-3）。

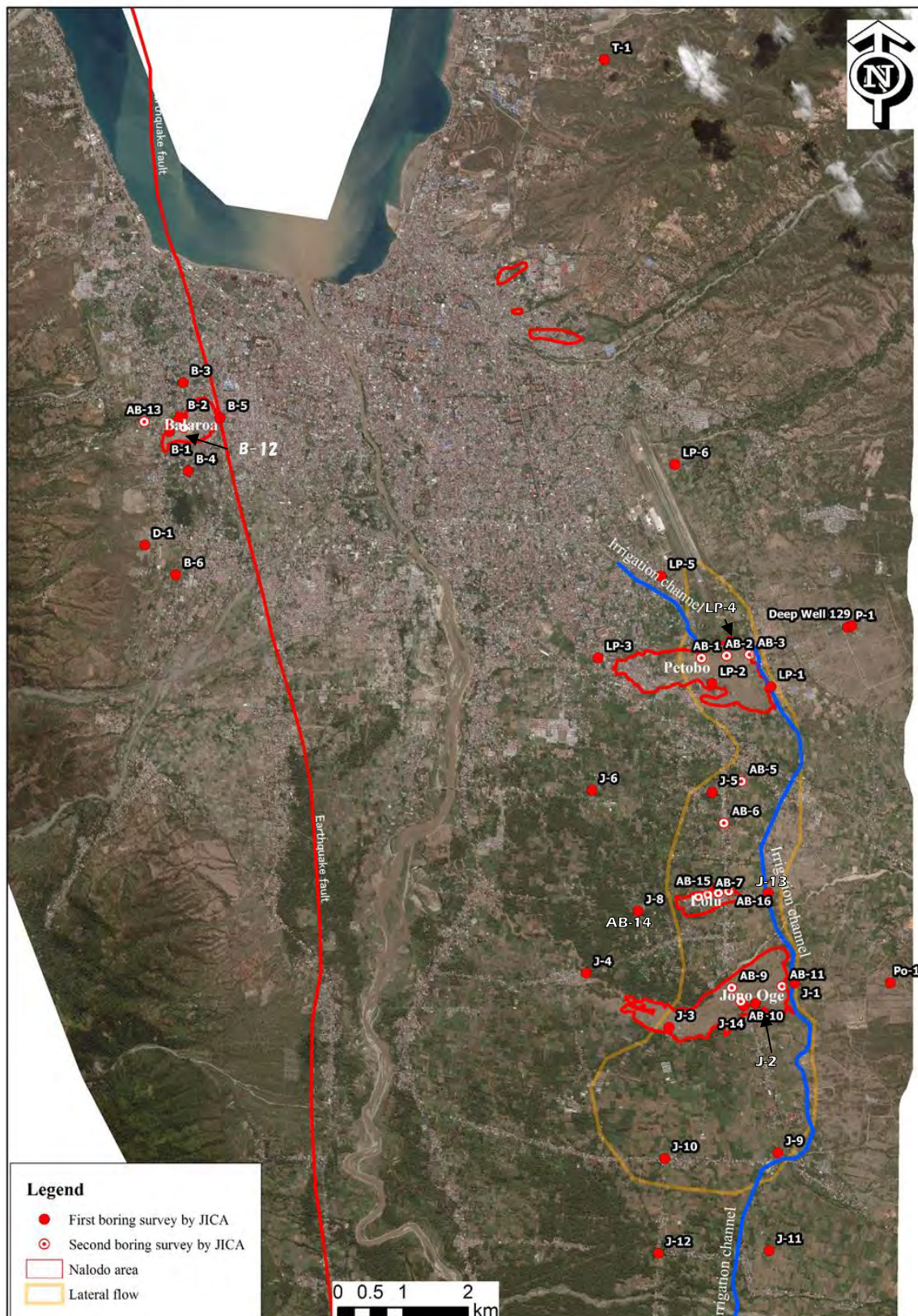
（3）調査位置・数量

ボーリング調査の配置及び実施数量は、図 3-2、図 3-3、及び表 3-3 に示したとおりである。調査位置図には一次調査に加えて、二次調査位置も併記している。調査標準貫入試験（以下 SPT と略す）は、1m毎に行い、液状化評価のための室内土質試験を行った。ボーリング完了後は水位観測孔となるように保孔管を設置した。4 箇所の住民移転予定地では、Nalodo 発生地域よりも標高が高く、当初計画した 30m までの調査は行わず、10m 程度で終了した。なお、*N* 値が表層から大きく、孔内水位も深いことから液状化の懸念はないと判断できる。Palu 低地の 26 箇所の調査は、Nalodo 発生地域及びその周辺地域を対象とした。調査は被災後 1 ヶ月程度で開始し、行方不明の被災者がまだ現地に残されている状況であったことから、Nalodo 内部の調査を避け、運搬できる範囲での調査となった。ボーリング調査の孔口標高は、地震後の衛星データ（AW3D）DTM データから求めた。

表 3-2 Nalodo の第一次ボーリング調査

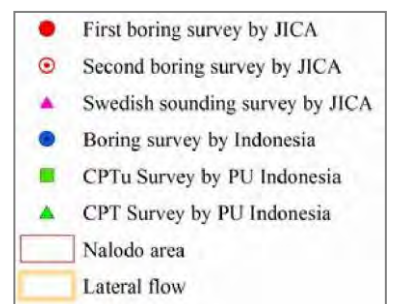
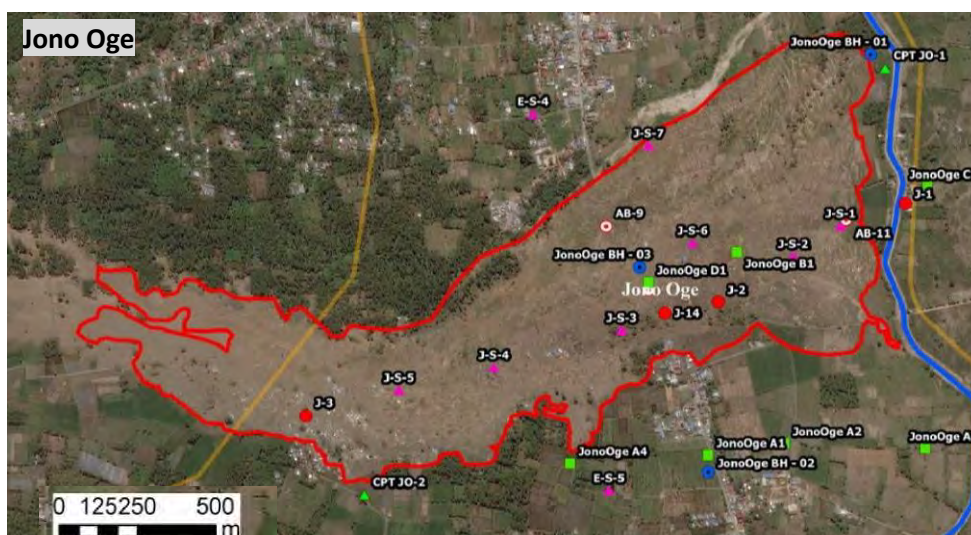
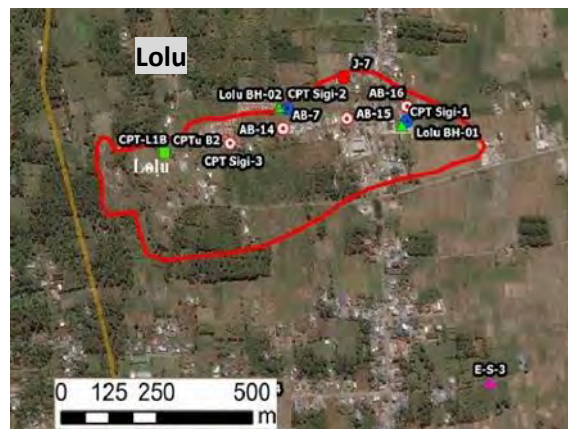
Location	Borehole Name	Length(m)	Ground Elevation(m)	SPT test	Lab test Grain size	Groundwater observation hole	Ground water level(GL-m) (Water level after completion)
Relocation area		11.0	141.7	11	0	1	11.00
		10.0	103.8	5	0	1	10.00
	o-1	10.0	149.0	6	0	1	10.00
		10.0	100.0	5	0	1	10.00
Balaraoa		30.0	40.4	29	13	1	-1.95
		30.0	35.4	26	11	1	2.10
		30.0	22.4	25	10	1	-0.30
		30.0	32.8	18	15	1	-0.60
		30.0	19.0	30	15	1	0.55
		30.0	73.8	30	13	1	16.91
Petobo		35.0	81.4	26	16	1	11.22
		32.0	57.1	32	16	1	2.60
		30.0	34.4	29	15	1	0.13
		30.0	53.4	30	16	1	0.80
		30.0	60.6	30	13	1	5.59
		27.0	96.5	26	15	1	20.00
JonoOge and Around it		30.0	83.7	30	13	1	14.08
		25.0	64.9	25	14	1	3.20
		30.0	53.3	30	13	1	0.70
		30.0	37.2	30	15	1	1.20
		28.0	62.0	28	14	1	-1.95
		30.0	37.2	30	15	1	1.07
		30.0	67.8	30	14	1	3.71
		30.0	48.9	30	13	1	1.05
		30.0	81.7	19	7	1	8.30
		30.0	66.1	30	14	1	5.80
		30.0	66.1	30	13	1	8.50
		30.0	68.9	29	13	1	3.60
		30.0	81.6	30	13	1	10.66
		10.0	65.0	0	0	1	0.65
		30	798.0		729.0	339.0	

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3-2 Nalodo の第一次ボーリング調査位置図（第一次調査及び第二次調査・広域）



出典：JICA 調査団作成

図 3-3 Nalodo の第一次ボーリング調査位置図（第一次調査及び第二次調査・被災エリア毎）

(4) 標準貫入試験

標準貫入試験は、第一次調査及び後述する第二次調査において 1m 毎に実施した（図 3-4 参照）。試験機材は、図 3-5 に示すように、半自動落下方式の機材を用いて ASTM D1586 に準拠して実施している。第一次調査では、GL-0.5m を 1 回目として以降 1m 毎に実施し、日本方式の予備打ち 15cm、本打ち 10cm×3 回を記録し、本打ち 30cm の打撃回数を N 値としている。第二次調査では、験開始深度は GL-1.5m とし予備打ち 15cm ($N1$)、本打ち 15cm×2 回 ($N2 \cdot N3$) を記録し、本打ち 30cm 貫入の打撃回数を N 値としている。第一次調査の結果から、表層付近は層厚 10cm 程度の薄層を挟み、互層をなすことが想定されたため、表層付近の複雑な地盤強度評価の補足として、同一地点において深さ 3m の DCP 試験を併用している。

Hole Number : B-1
Location : Baraloa

No.	Depth (m)	Total of blow					N - Value	Remarks
		15 cm	10 cm	10 cm	10 cm	5 cm		
1	0.50 - 1.00	14	5	2	1	1	8	26-Nov-18
2	1.50 - 2.00	11	2	2	3	2	7	27-Nov-18
3	2.50 - 3.00	2	1	1	1	1	3	29-Nov-18
4	3.50 - 4.00	4	2	2	1	1	5	
5	4.50 - 5.00	3	2	1	1	1	4	
6	5.50 - 6.00	10	4	3	3	1	10	
7	6.50 - 7.00	11	7	3	2	1	12	
8	7.50 - 8.00	19	21	24	7		52	

SPT code	Sample depth		SPT Value		
	from (m)	to (m)	N1	N2	N3
SPT-01	1.50	1.95	1		1
SPT-02	2.50	2.95	1		1
SPT-03	3.50	3.95	1	2	2
SPT-04	4.50	4.95	2	3	4
SPT-05	5.50	5.95	3	4	6
SPT-06	6.50	6.95	3	3	6
SPT-07	7.50	7.95	4	6	7
SPT-08	8.50	8.95	5	7	9
SPT-09	9.50	9.95	5	8	9

出典：JICA 調査団作成

図 3-4 第一次調査（左）と第二次調査（右）の標準貫入試験開始深度と試験仕様



出典：JICA 調査団作成

図 3-5 標準貫入試験の試験方法及び試験機材

(5) スウェーデンサウンディング (SWS)

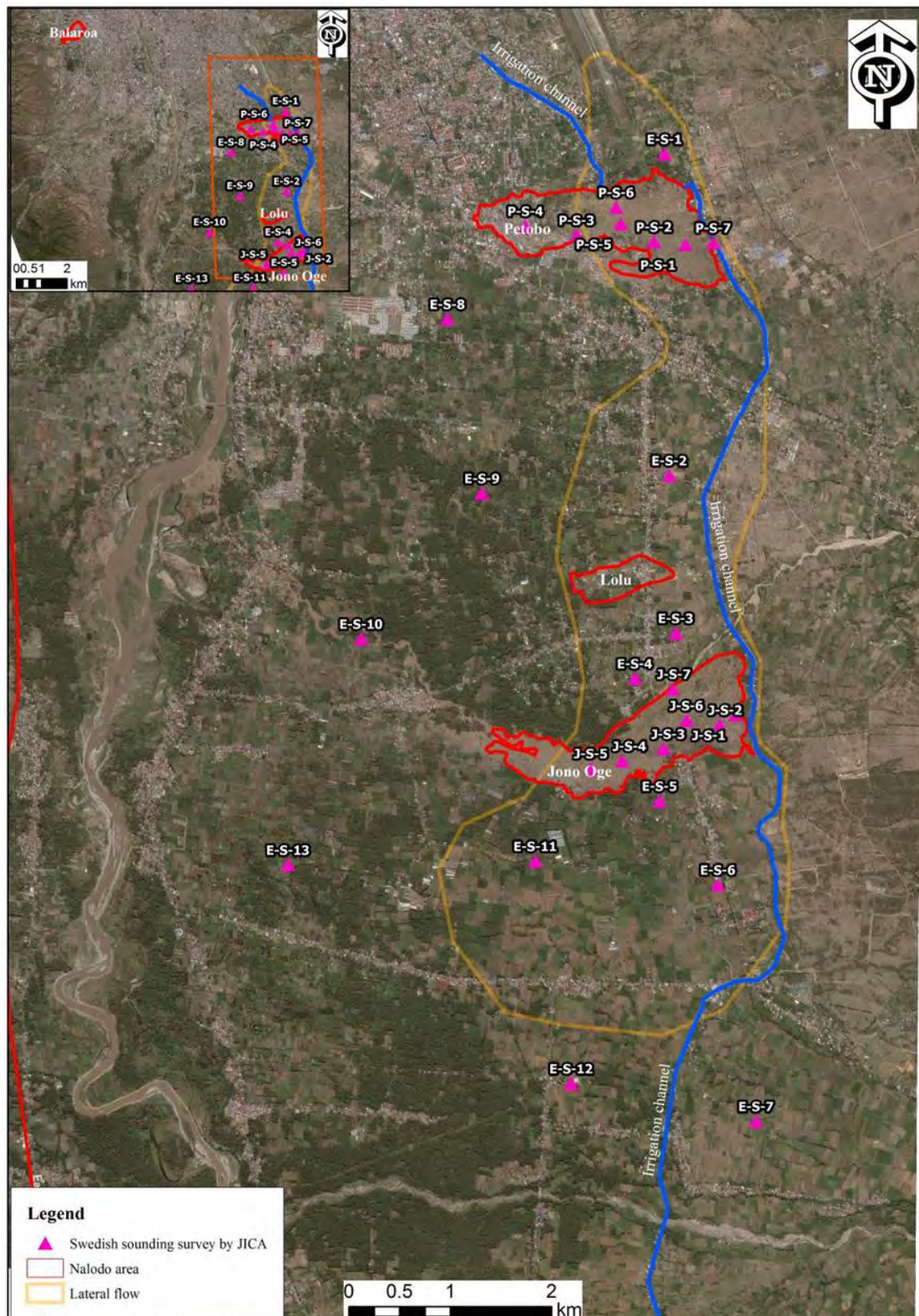
SWS 調査の配置及び実施数量は、図 3-6 及び表 3-3 に示したとおりである。SWS 調査は、ボーリング機材運搬の困難な Nalodo 内部を主体に配置し、ボーリング調査を補完するために、Palu 低地の広範囲にも行った。調査深度¹は最大 10m とし、貫入困難な場合には 10 m に満たない場合でも終了した。

表 3-3 Nalodo の第一次 SWS 調査

Site	Borhole No	UTM Zone 50M		N<15 depth(m)	End depth(m)
		X (m E)	Y (m S)		
Petobo	P-S-1	825042 m E	9895812 m S	8.2	8.5
	P-S-2	824733 m E	9895841 m S	10.0	10.0
	P-S-3	823970 m E	9895907 m S	8.5	8.8
	P-S-4	823464 m E	9895996 m S	10.0	10.0
	P-S-5	824407 m E	9896016 m S	6.2	6.5
	P-S-6	824362 m E	9896181 m S	7.0	7.2
	P-S-7	825320 m E	9895832 m S	3.0	3.2
Jono Oge	J-S-1	825534 m E	9891168 m S	10.0	10.0
	J-S-2	825381 m E	9891070 m S	6.8	7.0
	J-S-3	824829 m E	9890833 m S	10.0	10.0
	J-S-4	824418 m E	9890714 m S	3.0	5.4
	J-S-5	824112 m E	9890641 m S	3.0	5.8
	J-S-6	825057 m E	9891113 m S	10.0	10.0
	J-S-7	824916 m E	9891426 m S	6.5	6.8
	J-S-8	Red house area		5.5	6.0
	J-S-9	Red house area		5.5	6.5
	J-S-10	Red house area		6.8	7.5
	J-S-11	Red house area		9.0	9.2
	J-S-12	Red house area		7.2	7.8
	J-S-13	Red house area		7.5	7.8
EAST Area	E-S-1	824839.00 m E	9896707.00 m S	2.8	3.0
	E-S-2	824885.00 m E	9893533.00 m S	4.6	5.0
	E-S-3	824948.00 m E	9891975.00 m S	1.0	2.0
	E-S-4	824543.00 m E	9891528.00 m S	1.2	1.8
	E-S-5	824788.00 m E	9890319.00 m S	5.6	10.0
	E-S-6	825365.00 m E	9889490.00 m S	10.0	10.0
	E-S-7	825742.00 m E	9887156.00 m S	1.2	1.8
	E-S-8	822693.00 m E	9895077.00 m S	3.5	5.4
	E-S-9	823037.00 m E	9893357.00 m S	6.2	10.0
	E-S-10	821844.00 m E	9891918.00 m S	7.6	10.0
	E-S-11	823563.00 m E	9889723.00 m S	7.5	10.0
	E-S-12	823917.00 m E	9887529.00 m S	3.0	3.2
	E-S-13	821122.00 m E	9889687.00 m S	8.8	10.0

出典：JICA 調査団作成

¹ 標高は地震後の AW3D の地表面標高より設定している



出典：JICA 調査団作成

図 3-6 Nalodo の第一次（SWS 調査位置図）

(6) ボーリング調査と SWS 調査結果

図 3-7(1)～図 3-7 (27)にボーリング調査の概要柱状図・コア写真および粒度試験結果の概要を示す。粒度試験結果には、後述する液状化判定に利用する細粒分含有率 (F_c) 塑性指数 (I_p) 平均粒径 (D_{50}) を表示している。ボーリングコアの判定は、調査実施中およびその後の室内土質試験完了後に複数人の技術者が同時にコアを広げて見直しを行っているが、以下の理由から全ての土質試験の土質分類に合わせた見直しを行っているわけではない。

- 当該地域の地層は細粒分あるいは礫分を含む砂質土を主体とし、ペネ試料だけでは識別出来ない細互層をなす層や礫を多く含む層を挟んでいる（特に細粒土層の薄層を頻繁に挟む場合があり、ペネ区間以外の薄層を記録として残す必要がある）。
- ボーリング調査は、標準貫入試験区間以外も可能な範囲でコアリングし、互層形態など複雑な地層構造の判定を試みた。
- 基質の色調・細粒分含有状況・礫の含有状況などによって判断される堆積環境などの急変を伴わない一連の堆積層は、単層中の土質分類が複数にまだがる場合でも単層としての記載を残した（断面図作成などの層境界の根拠を残すため）。
- 室内土質試験結果は、後述する液状化判定の基礎データとして実施したが、深さ 10m よりも深く、 N 値が大きなゾーンは代表試料として 1m 毎の試験を省略している。

図 3-8(1)～ 図 3-8 (3)は、ボーリング調査中の孔内水位測定結果から間隙水圧を推定したものである。

ボーリング調査の結果は本業務ファイナルレポート、付属書Ⅲ-3（データ集）にまとめているため、ここでは調査結果概要についてまとめる。なお、本調査によるボーリング柱状図などの基礎データは、JICA 図書館のページ(<https://libportal.jica.go.jp/library/public/Index.html>)から検索画面に行って「中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト成果品」で検索すると閲覧・ダウンロード可能である。

【西側の Balaroa 周辺】

B-1； 深さ 7m までルーズな粗砂、7～15m、15～22m および 22～30m は礫質砂からなる。

15m より N 値は概ね 30 以上²である。孔内水位は 21m の深さまでの区間ではほぼ地表面にあったが、その後 30m の深さまで掘ると GL+1.95m の高さの被圧を確認した。

B-2； 表層 3m は良く締まった礫層、3～7m はルーズな砂あるいは亀裂による空洞、7～30m は $N>50$ ゾーンの礫混じり砂。地下水位は概ね GL-2.1m である。

B-3； 表層から $N>50$ の礫質砂。地下水位は m まで GL であったが、深さ m より深部で GL+0.3m 被圧を確認した。周辺でも湧水が多く見られる。

B-4； 深さ 7m までルーズな砂・シルトの互層、深さ 7m より深部は、 $N>50$ の良く締まった砂あるいは砂質礫・礫質砂。地下水位は m まで GL であったが、深さ m より深部で GL+0.6m 被圧を確認した。

² 本調査は地震後に実施したものであり、後述の液状化判定は地震後に測定した N 値を用いている（地震前の地盤条件を正確には反映していない可能性を残す）

B-5 ; 地すべりの末端付近で、深さ 10m 程度までルーズな細粒土主体。10m より深部は良く締まった礫混じり砂質シルト及び互層。地下水位は概ね GL-0.55m。

B-6 ; 北側に位置する大型の扇状地の調査。表層から $N>50$ の礫層・礫質砂層。地下水位は深さ 17m まで GL-3m 付近に宙水があり、GL-17m より深部では GL-17m となる。

【Petobo 周辺】

LP-1 ; 地すべり頭部の灌漑水路近傍。深さ 3m より深部は $N>50$ ゾーン。地下水位は GL-11.5m と深い。

LP-2 ; 表層 10m はルーズな細粒土及び砂・シルト互層、深さ 10m より深部は $N>30$ の礫混じり砂層。地下水位は概ね GL-3m。Nalodo の範囲内として表示しているが、表層を覆った地域で移動量は大きくない。

LP-3 ; 表層 2m はルーズな細粒土、それより深部では細粒土層と砂質土層で $N>30$ ゾーン。地下水位は地表付近。

LP-4 ; 深さ 12m まで砂・シルトの互層、 N 値は 20 以下を挟む。深さ 12m より深部は $N>50$ の良く締まった礫質砂層。地下水位は概ね GL-1m。

LP-5 ; 深さ 5m まで N 値 20 程度の砂と細粒土の互層。深さ 5m より深部は良く締まった礫混じり砂層・礫層で細粒土を挟む。地下水位は概ね GL-6m。

LP-6 ; 表層から $N>30$ の礫混じり砂層。地下水位は 10m の深さで宙水の可能性のあるたまり水を確認。

【Jono Oge 及びその周辺】

J-1 ; 深さ 7m 程度までは $N<20$ の砂層・細粒土層。それより深部は $N>50$ ゾーン。15~16m に赤褐色土壌層を挟む。地下水位は GL-14m と深い。

J-2 ; 深さ 6m まで細粒土・砂の互層でルーズ。深さ 10m より深部は $N>50$ ゾーン。地下水位は概ね GL-4m。

J-3 ; 深さ 6m まで $N<20$ の砂・細粒土層。それより深部は $N>30$ ゾーン。地下水位は概ね GL-1m。

J-4 ; 表層からすべて良く締まった砂質土層。地下水位は概ね GL-1m。

J-5 ; 深さ 2m より深部は $N>50$ ゾーン、礫質砂層主体とし、細粒土層を挟む。地下水位は 21m まで GL-1m 付近であったが、深さ 21m より深部で GL+1.95m 被圧を確認した。

J-6 ; 全体に良く締まった礫質砂。深さ 3m 及び 7m 付近に N 値 20~30 を挟む。地下水位は概ね GL-1m。

J-7 ; 表層から深さ 11m は N 値 10~30 の礫質砂と細粒土の互層。それより深部は $N>30$ の礫混じり砂層。地下水位は概ね GL-3.7m。

J-8 ; 深さ 2m まで細粒土と砂の互層。それより深部は良く締まった礫質砂層主体。地下水位は概ね GL-1m。

J-9 ; 深さ 2m まで細粒土と砂の互層。それより深部は良く締まった礫質砂~砂質礫 (φ2cm 以上の亜円礫を含む)。地下水位は概ね GL-8.3m。

J-10；表層から良く締まった礫質砂層。深さ 9～13m と 14～16m に細粒土層を挟む。地下水位は概ね GL-5.8m。

J-11；深さ 2m までルーズな砂層。それより深部は $N>30$ の礫質砂層（細粒土を挟む）。地下水位は GL-8.5m。

J-12；深さ 9m までルーズな砂・細粒土の互層。それより深部は $N>50$ の礫質砂。地下水位は概ね GL-3.6m。

J-13；深さ 2m まで N 値 10 程度の砂質土。それより深部は良く締まった礫質砂層。地下水位は概ね GL-10.5m。

J-14；赤い家脇の調査。深さ 10m まで砂質土主体。7m までは SWS による換算 N 値で 10 以下。地下水位は概ね GL-0.6m。

【住民移転予定地】

P-1；すべて $N>30$ の礫層。地下水位は GL-10m より深い（深井戸の水位は GL-40m）

T-1；すべて $N>50$ の礫層。地下水位は GL-10m より深い。

Po-1；すべて $N>50$ の礫層。地下水位は GL-10m より深い。

D-1；すべて $N>50$ の礫層。地下水位は GL-10m より深い。

広範囲のボーリングを行った結果、Palu 低地は Nalodo が発生しうる様なルーズな砂質土層の分布域は極希で、表層から良く締まった礫質砂層を主体とすることが判った。液状化の可能性のある $N<20$ の概略の深さを見ると、B-1（深さ 16m）、B-4（深さ 7m）、B-5（深さ 10m）、LP-2（深さ 10m）、LP-4（深さ 7m）、J-1（深さ 6m）、J-2（深さ 4m）J-12（深さ 9m）に限定される。これらの調査位置は Nalodo の発生した場所近傍に当たる。Nalodo の発生した場所は、特殊な堆積環境にある限定された場所（ルーズな堆積物が堆積する場）と考えられる。東側の地域で数 m 程度地盤傾斜方向に移動した範囲にある調査（J-5・J-7・J-9・J-10）は、深さ 2～5m より深部では良く締まった礫質砂層が分布している。また、移転候補地は地下水位が深く液状化環境にない洪積の扇状地礫層が広く分布することが判った。

Balaroa B-1

ボーリングB-1コア

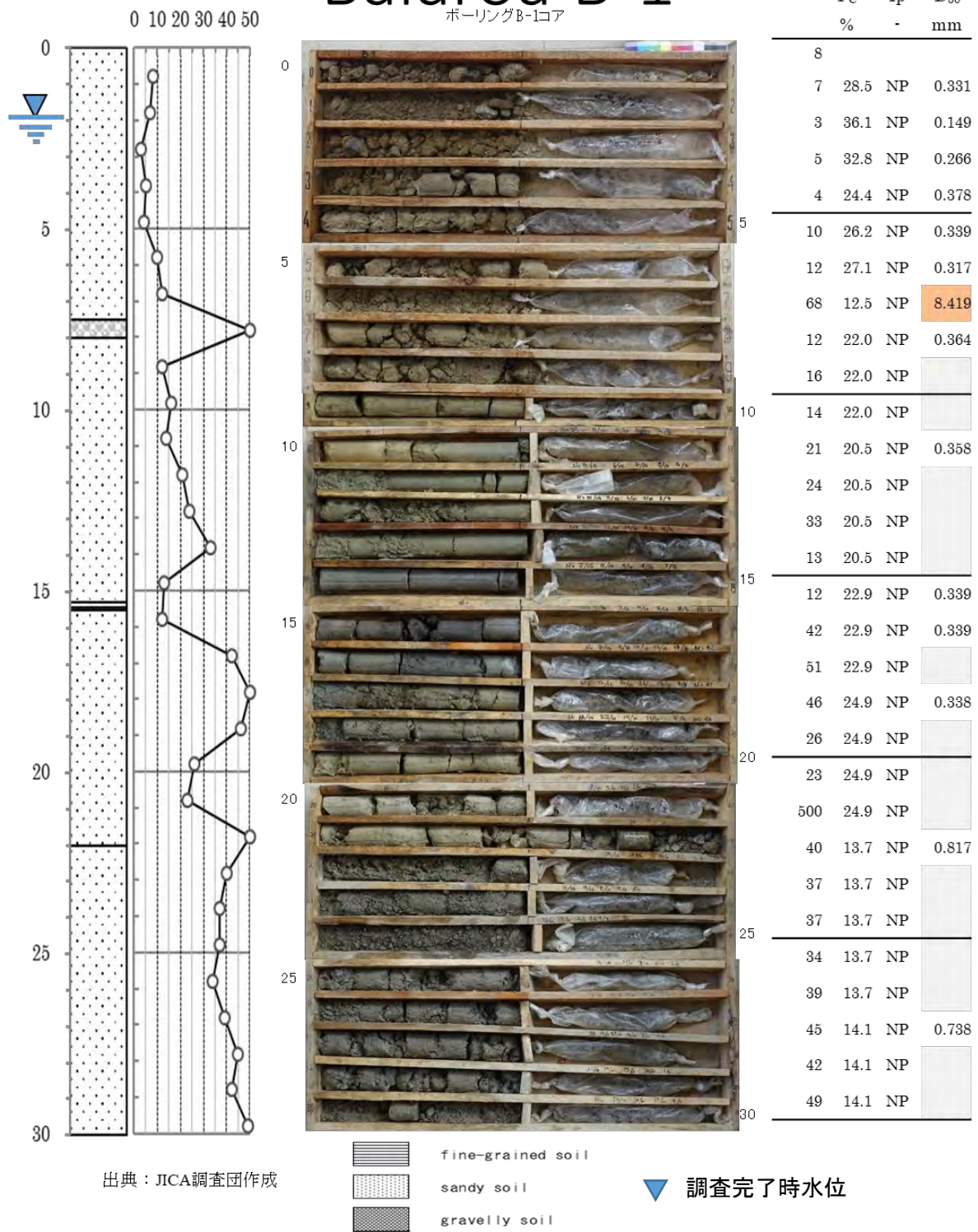


図 3-7(1) ボーリング第一次調査結果 (Balaroa 地区)

Balaroa B-2

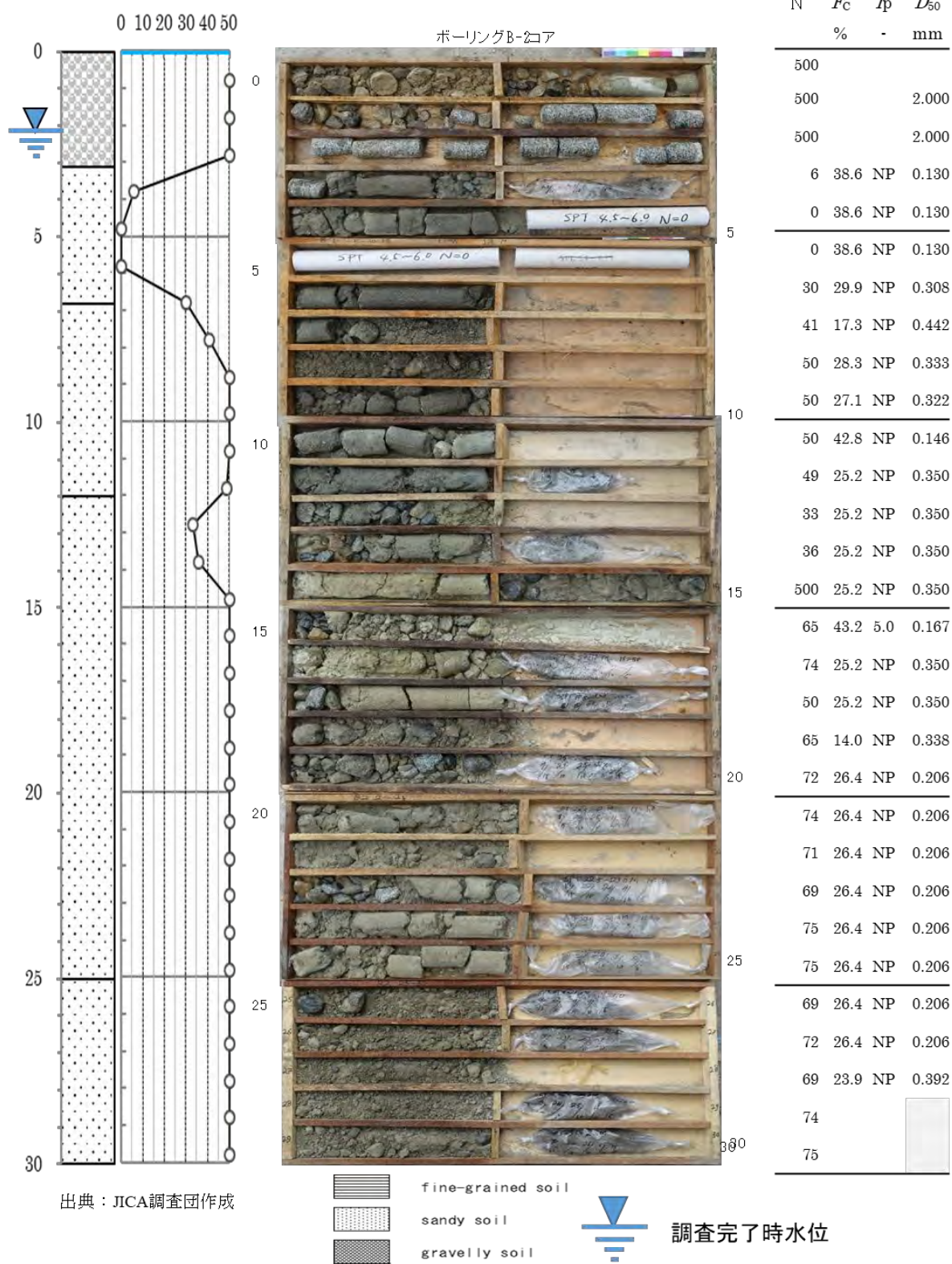


図 3-7 (2) ボーリング第一次調査結果 (Balaroa 地区)

Balaroa B-3

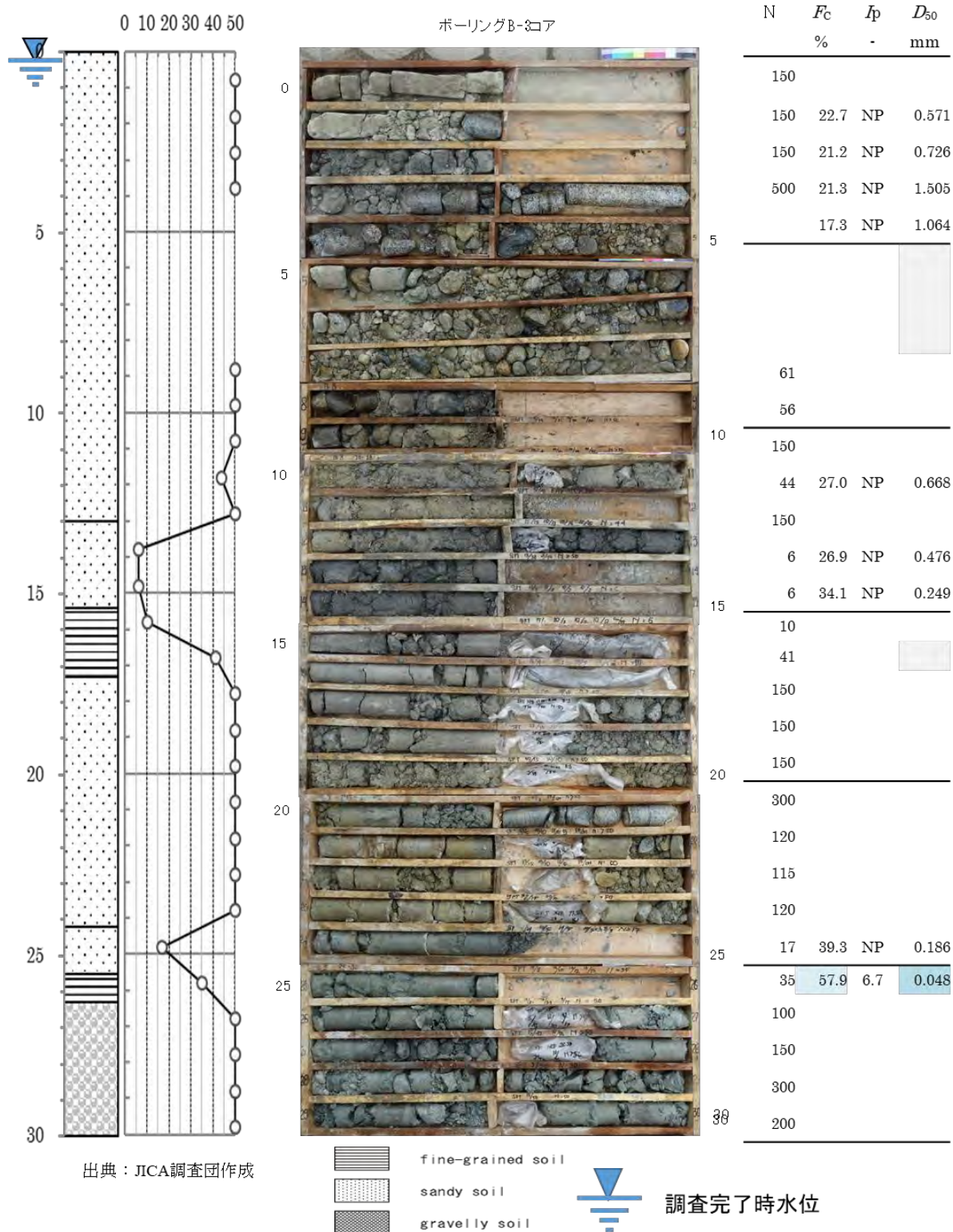


図 3-7 (3) ボーリング第一次調査結果 (Balaroa 地区)

Balaroa B-4

ボーリングB-4コア

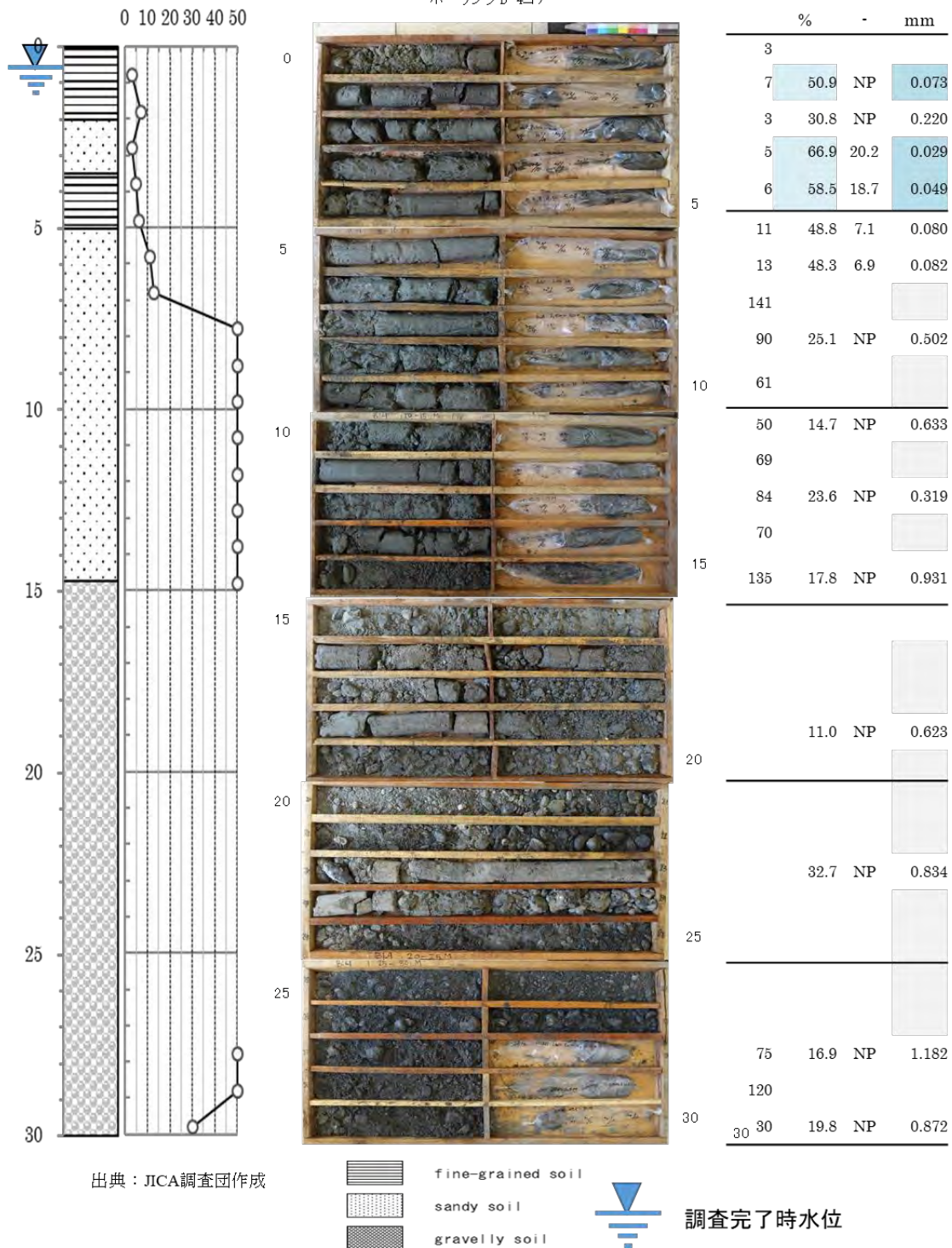


図 3-7 (4) ボーリング第一次調査結果 (Balaroa 地区)

Balaroa B-5

ボーリングB-5コア

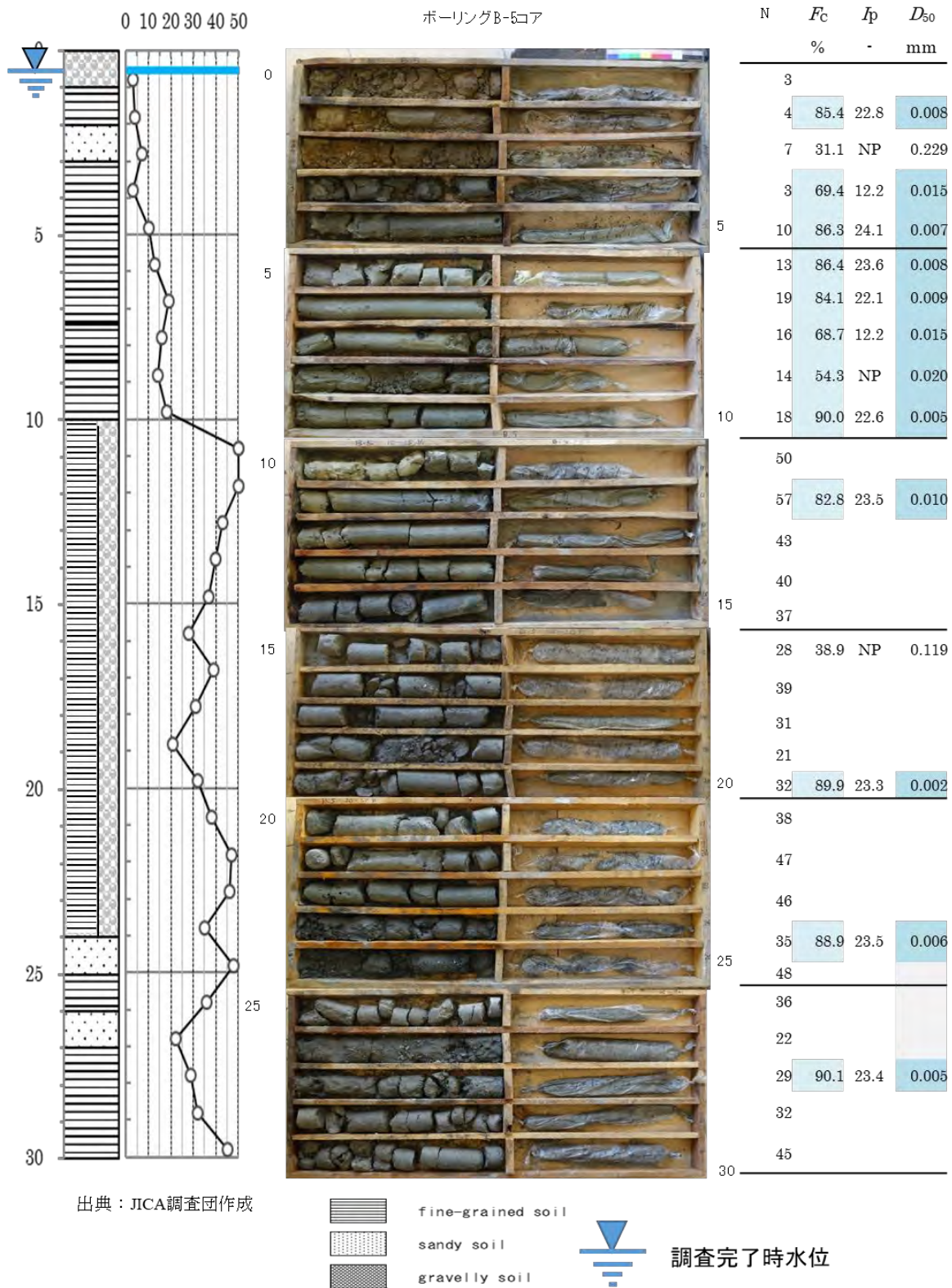


図 3-7 (5) ボーリング第一次調査結果 (Balaroa 地区)

Balaroa B-6

ボーリングB-6コア

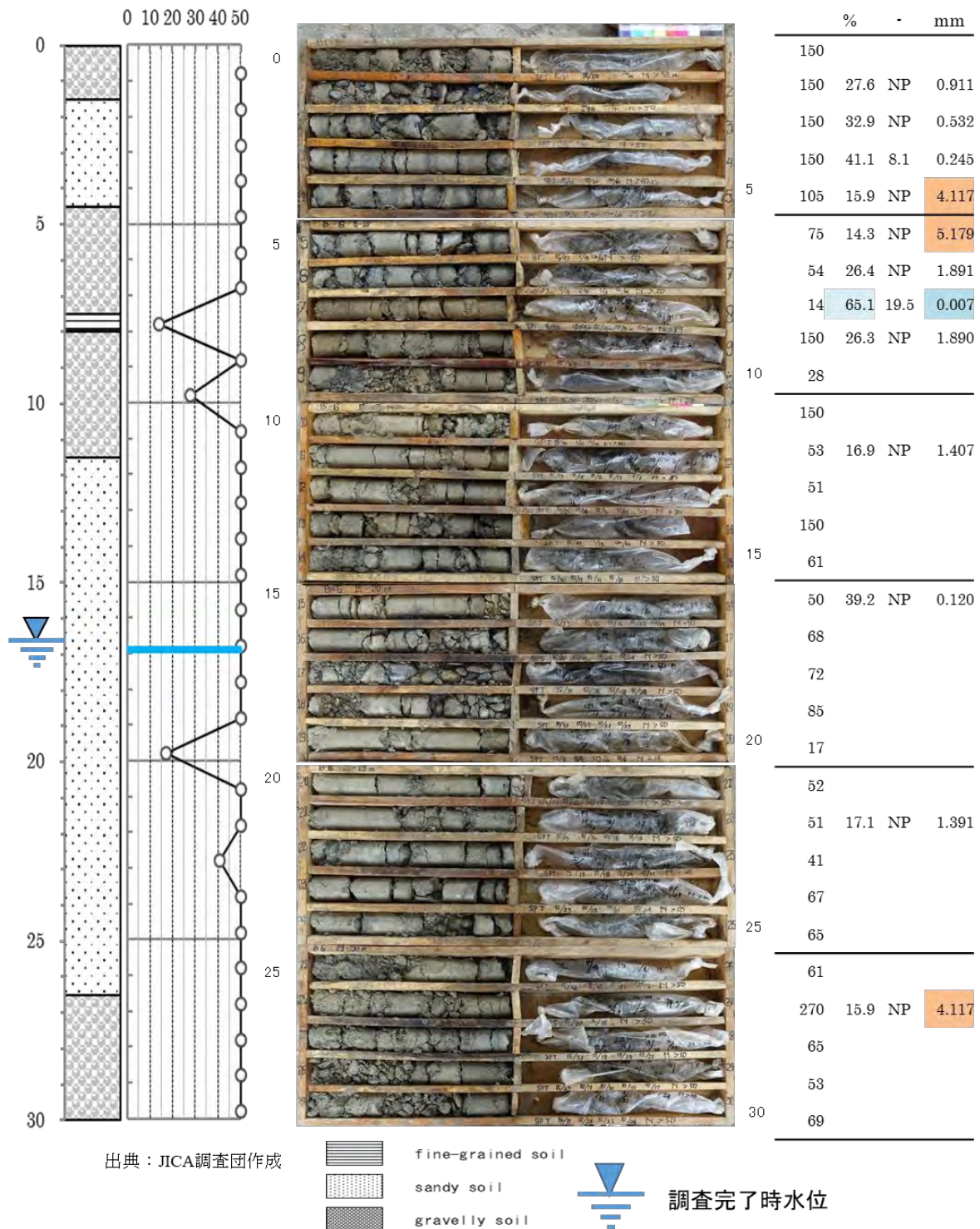


図 3-7 (6) ボーリング第一次調査結果 (Balaroa 地区)

Petobo LP-1

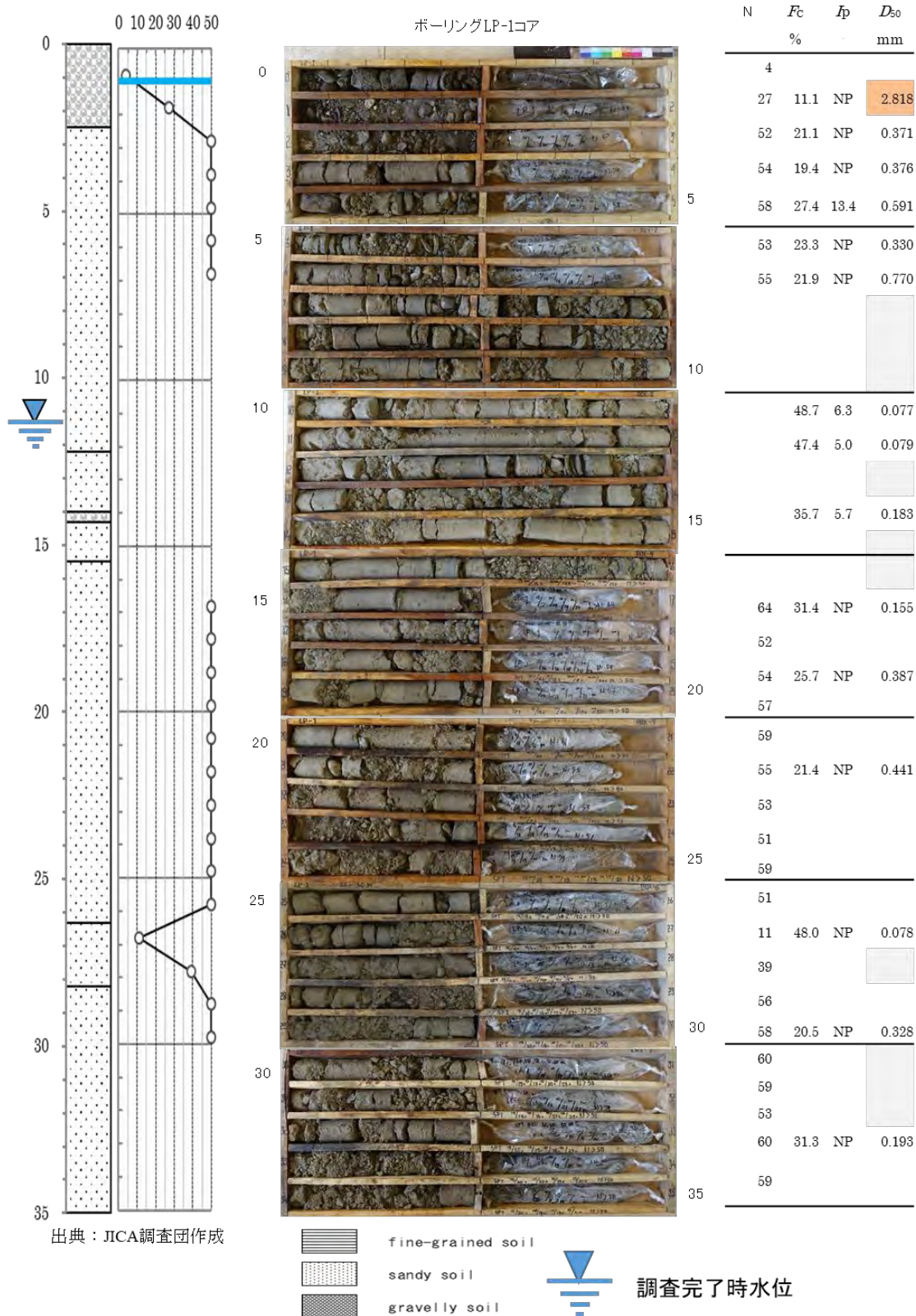
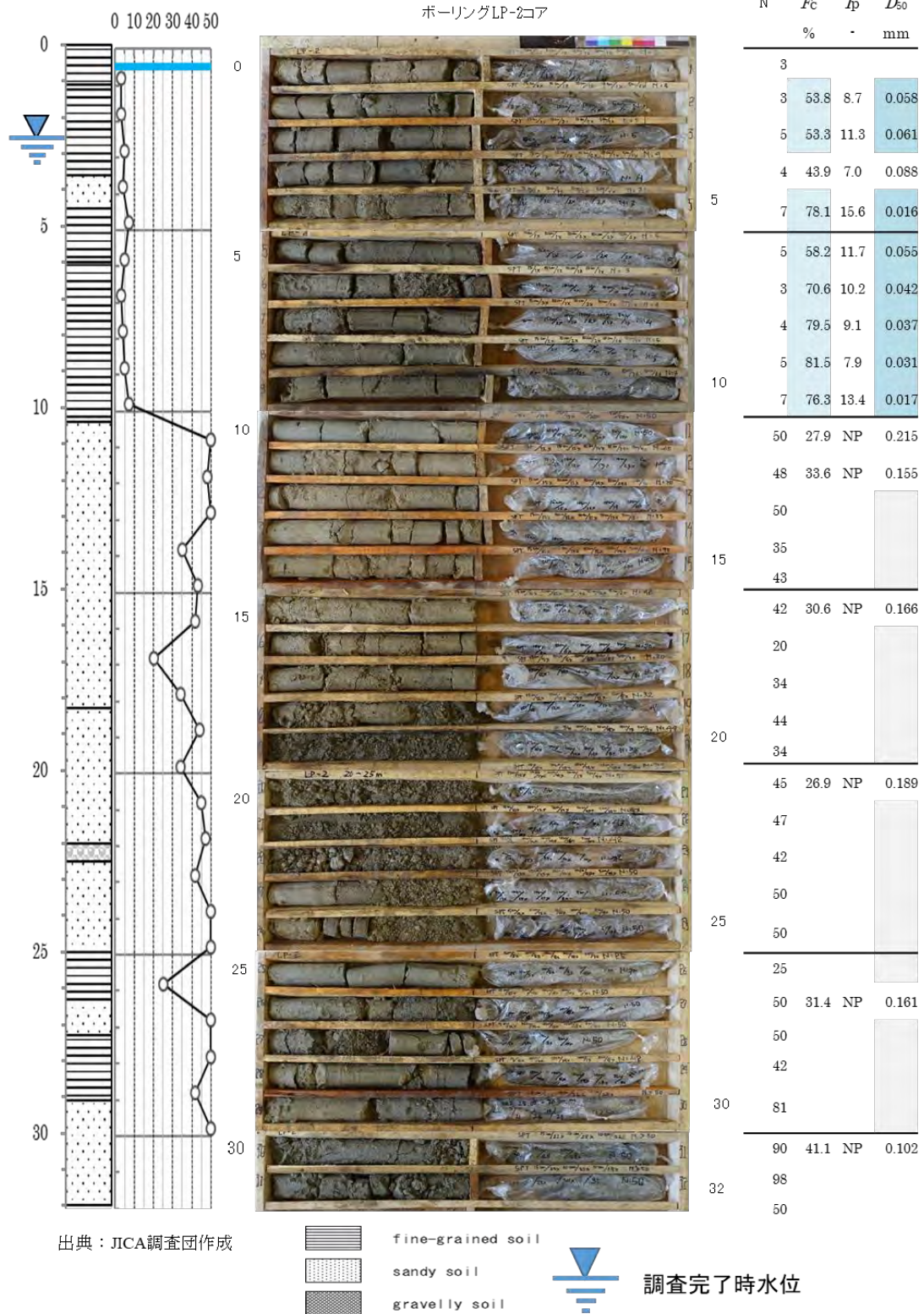


図 3-7 (7) ボーリング第一次調査結果 (Petobo 地区)

Petobo LP-2

ボーリングLP-2コア



Petobo LP-3

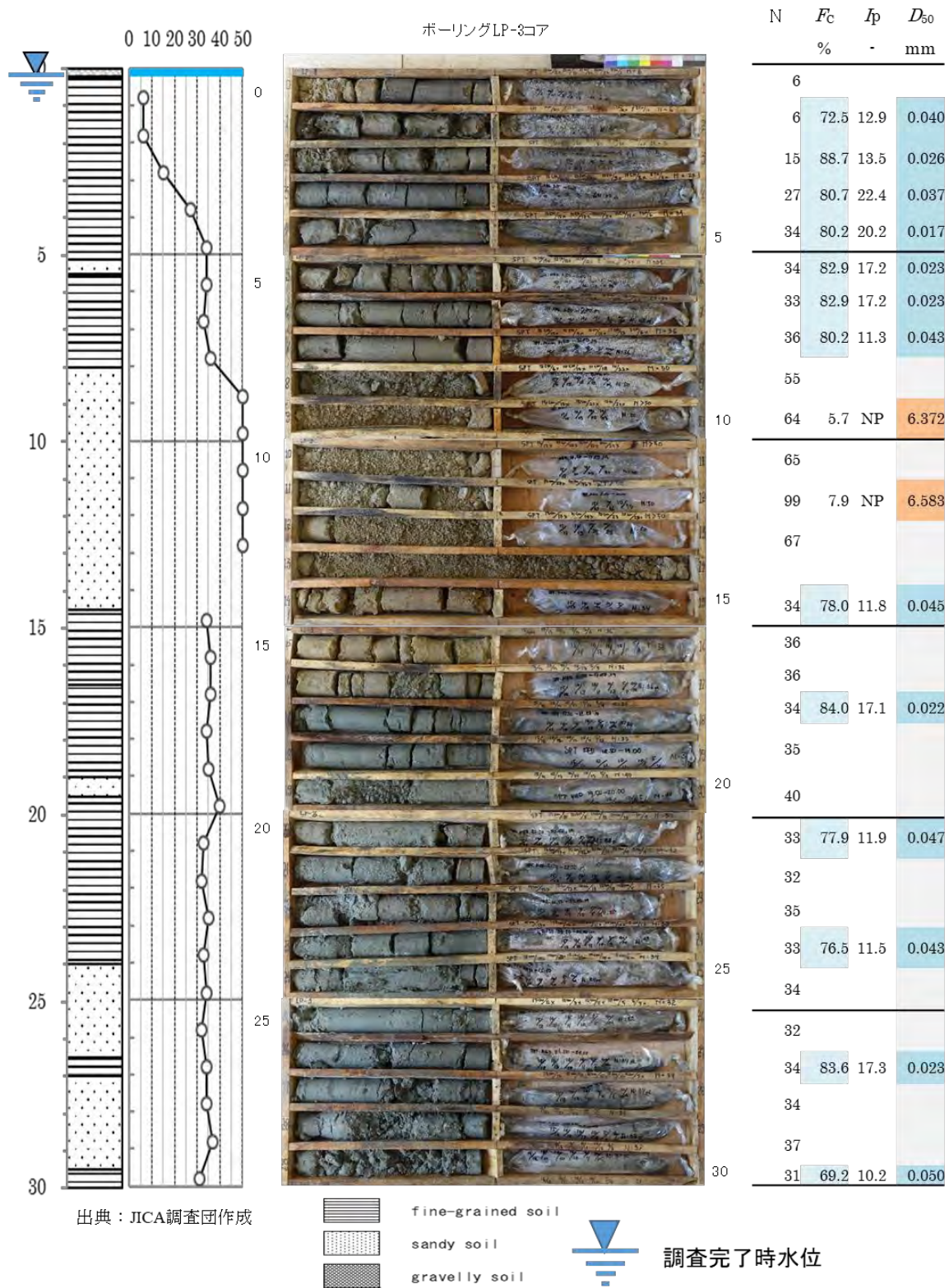


図 3-7 (9) ボーリング第一次調査結果 (Petobo 地区)

Petobo LP-4

ボーリングLP-4コア

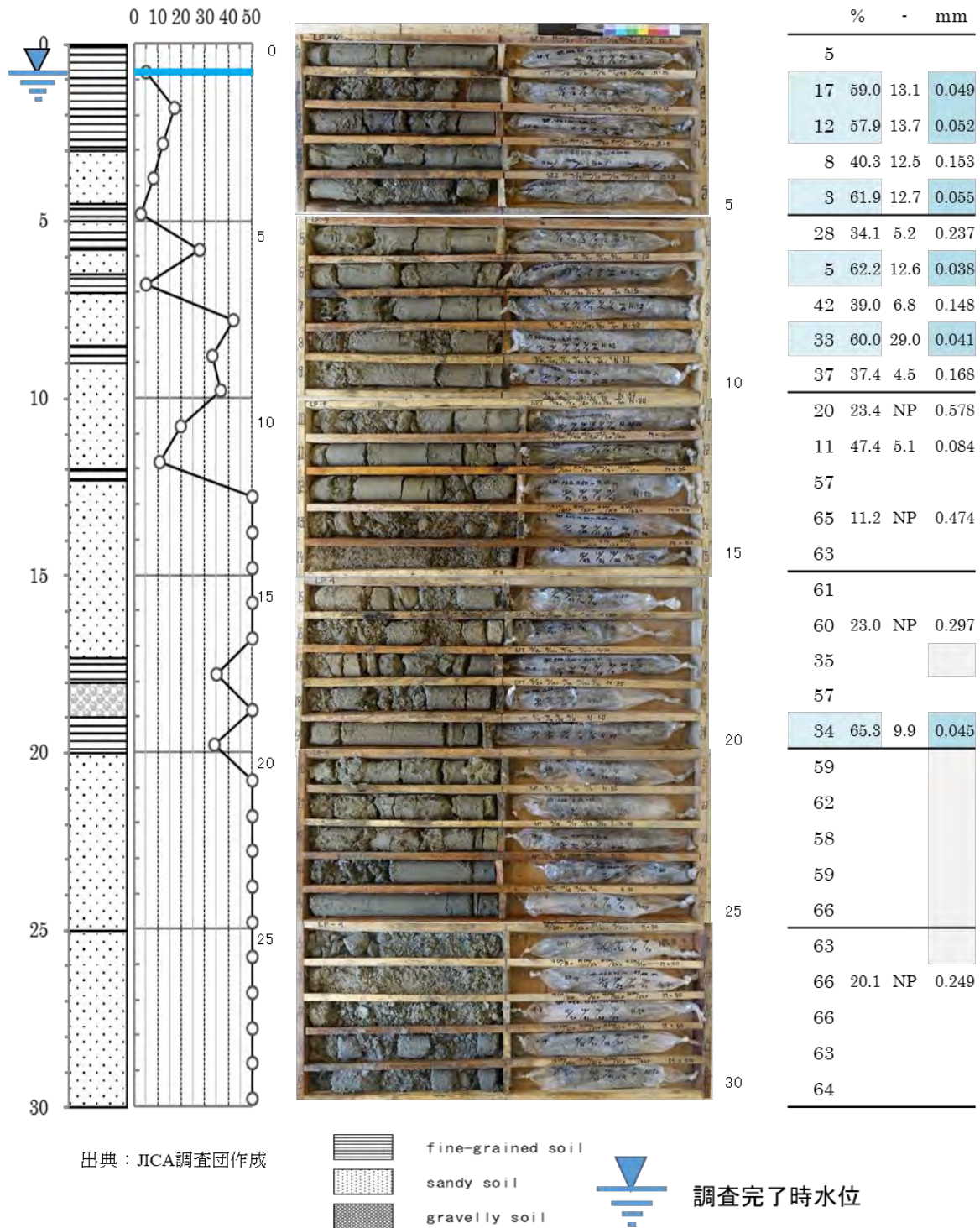


図 3-7 (10) ボーリング第一次調査結果 (Petobo 地区)

Petobo LP-5

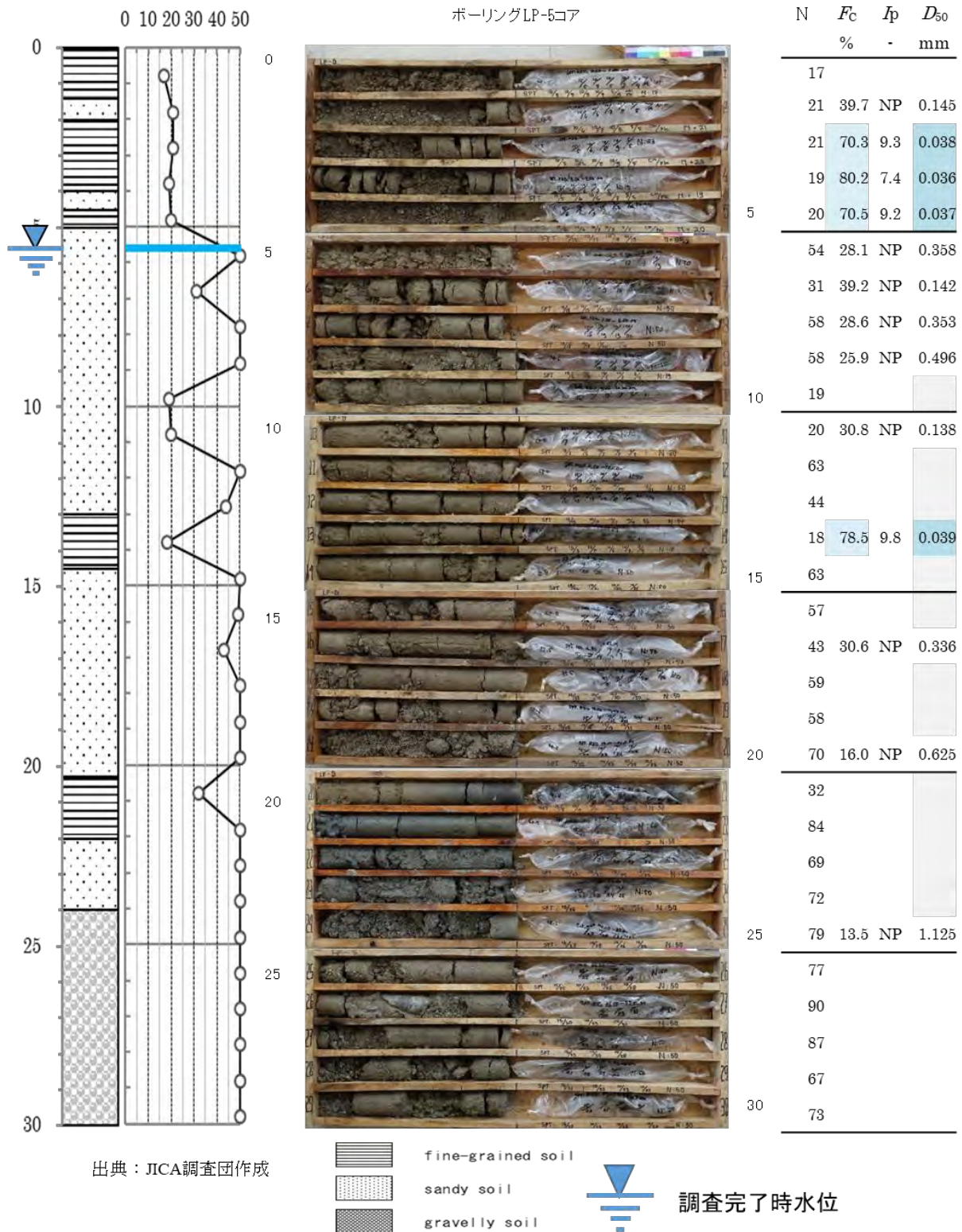


図 3-7 (11) ボーリング第一次調査結果 (Petobo 地区)

Petobo LP-6

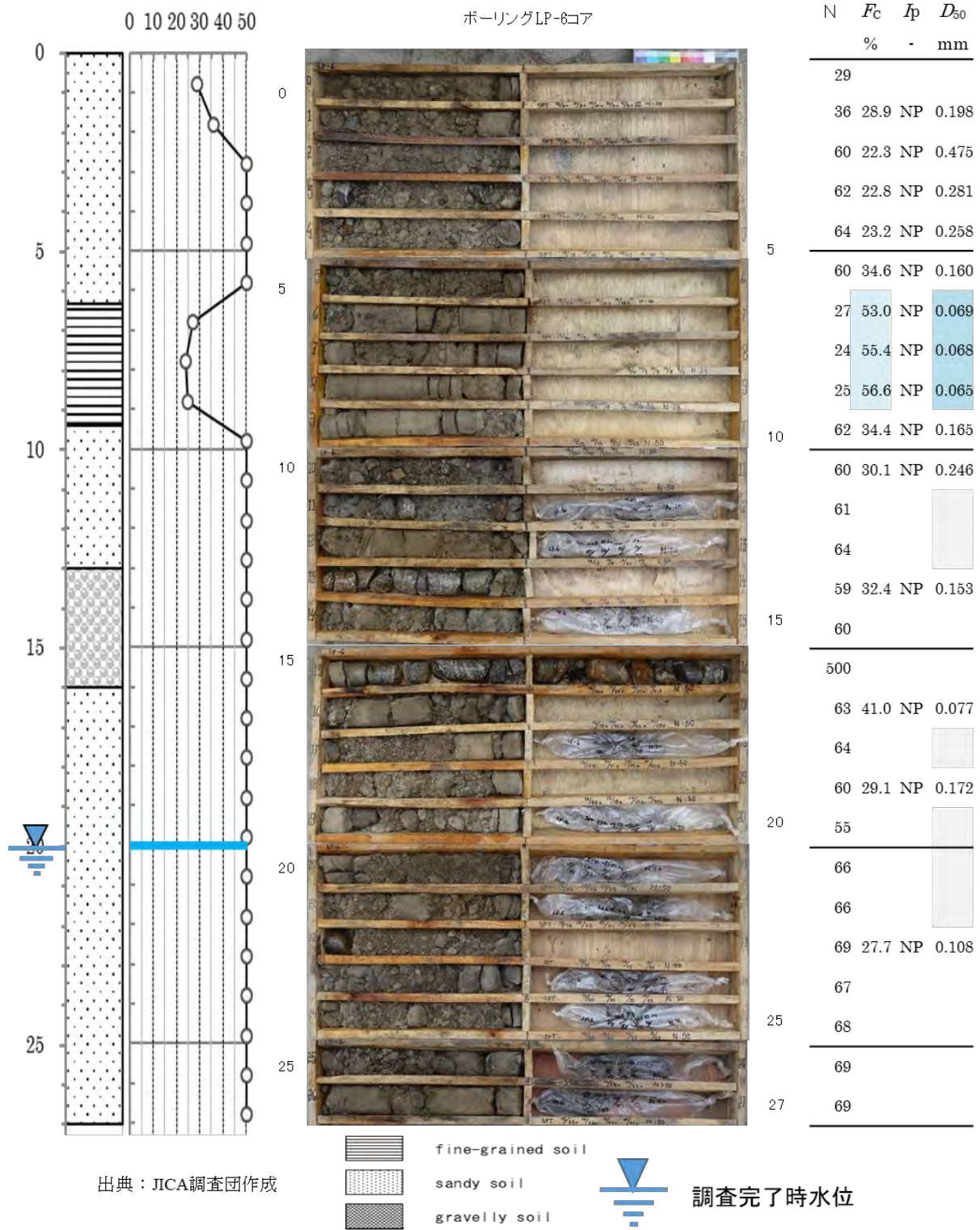


図 3-7 (12) ボーリング第一次調査結果 (Petobo 地区)

Jono Oge J-1

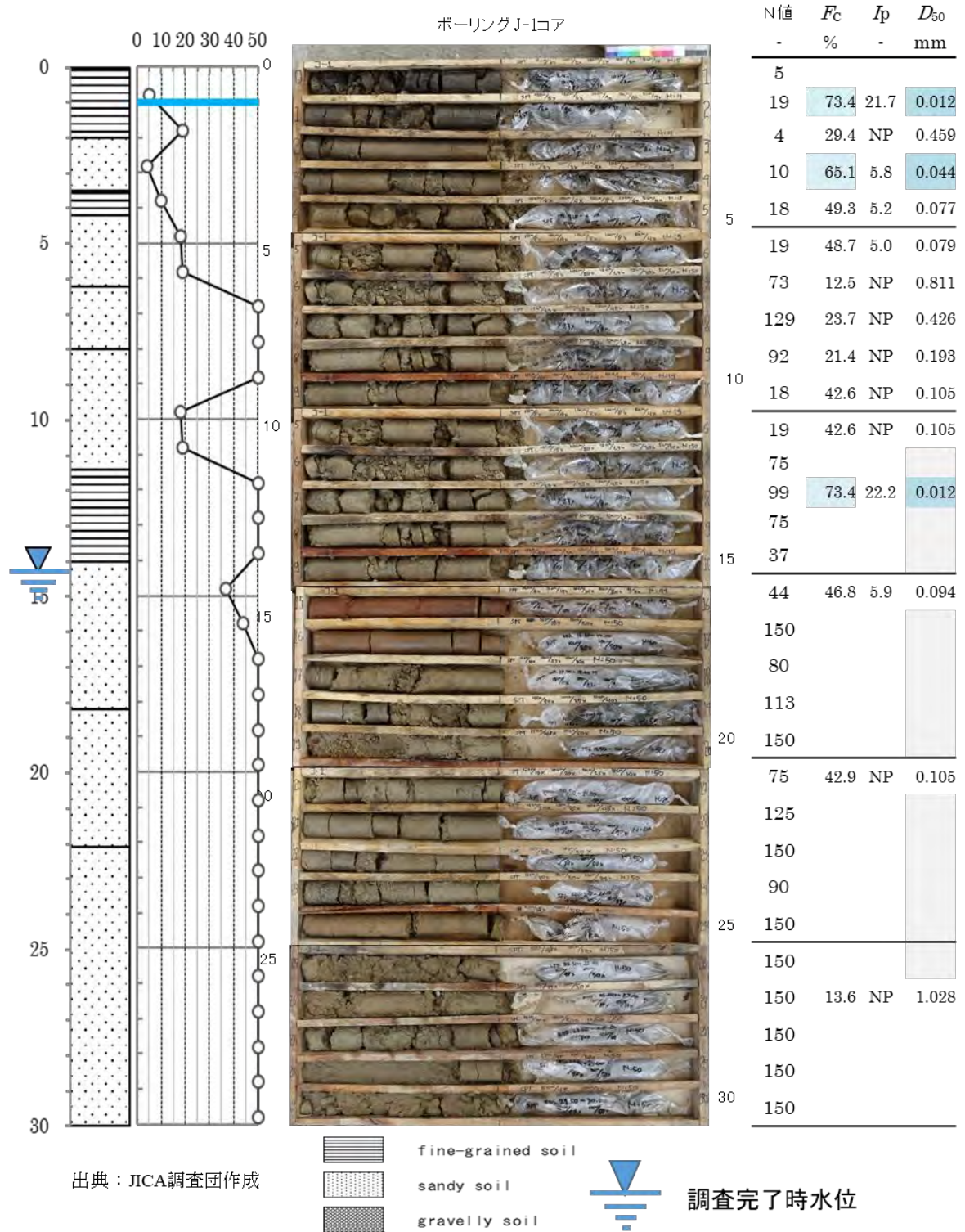


図 3-7 (13) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-2

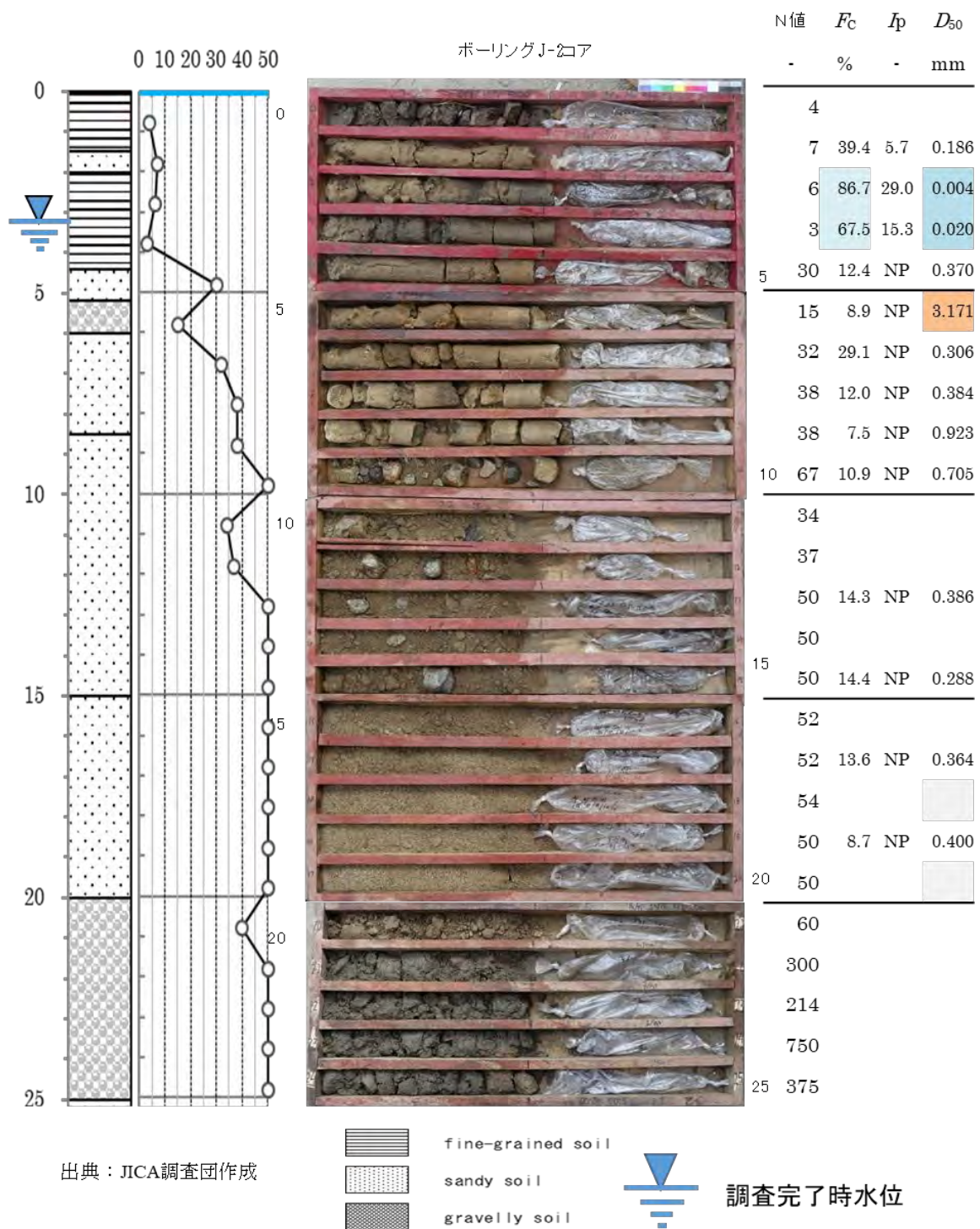


図 3-7 (14) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-3

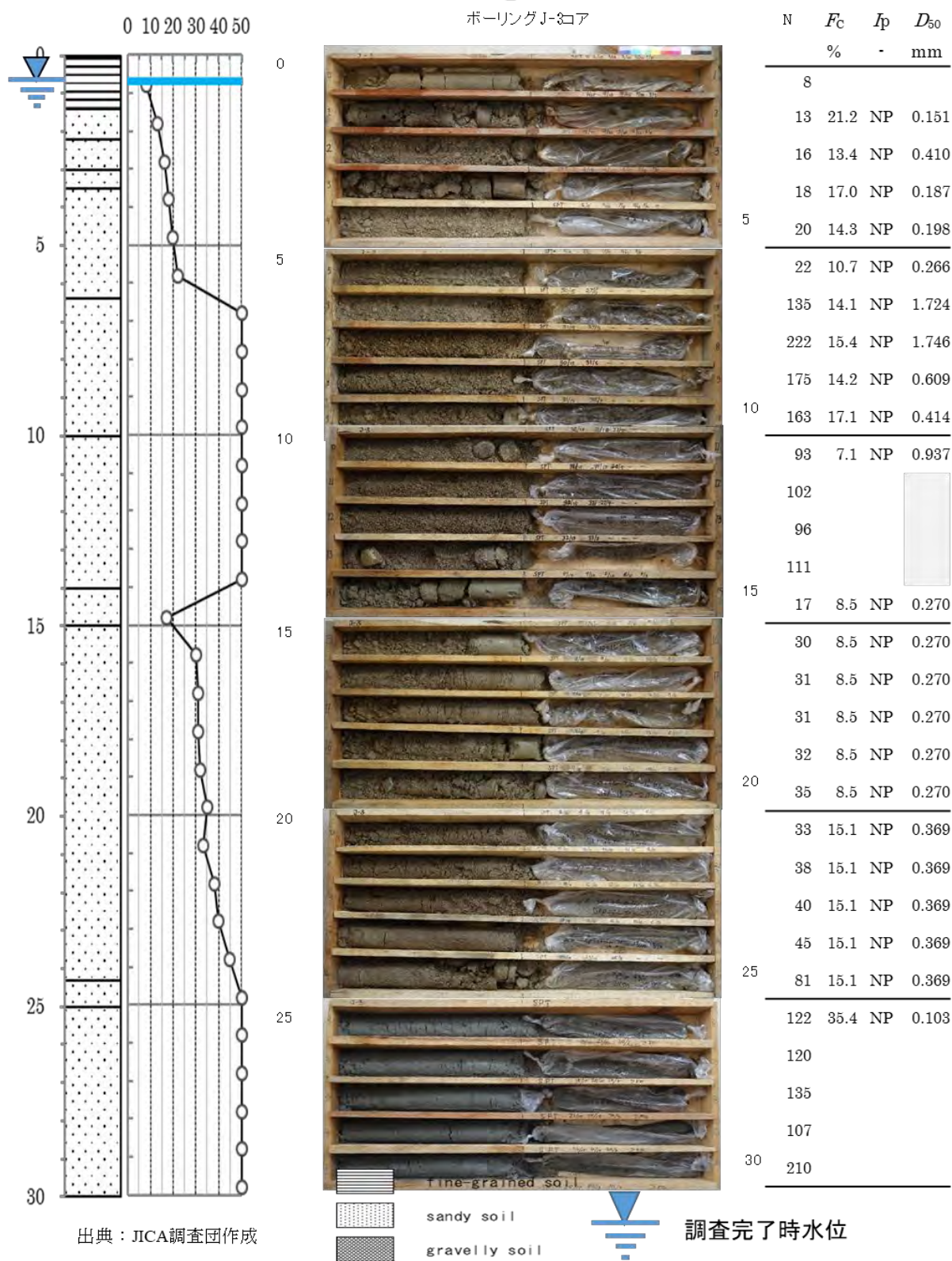


図 3-7 (15) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-4

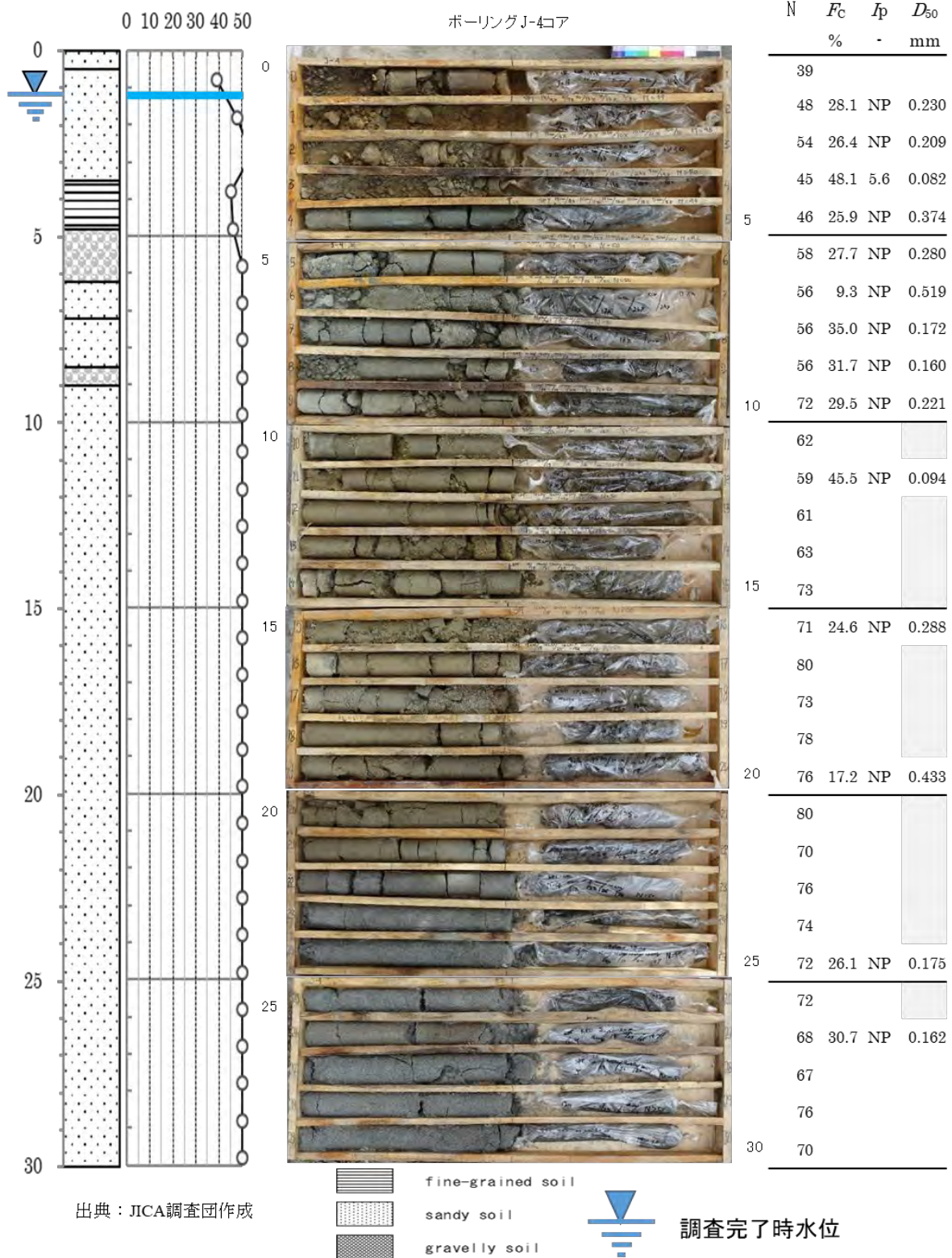


図 3-7 (16) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-5

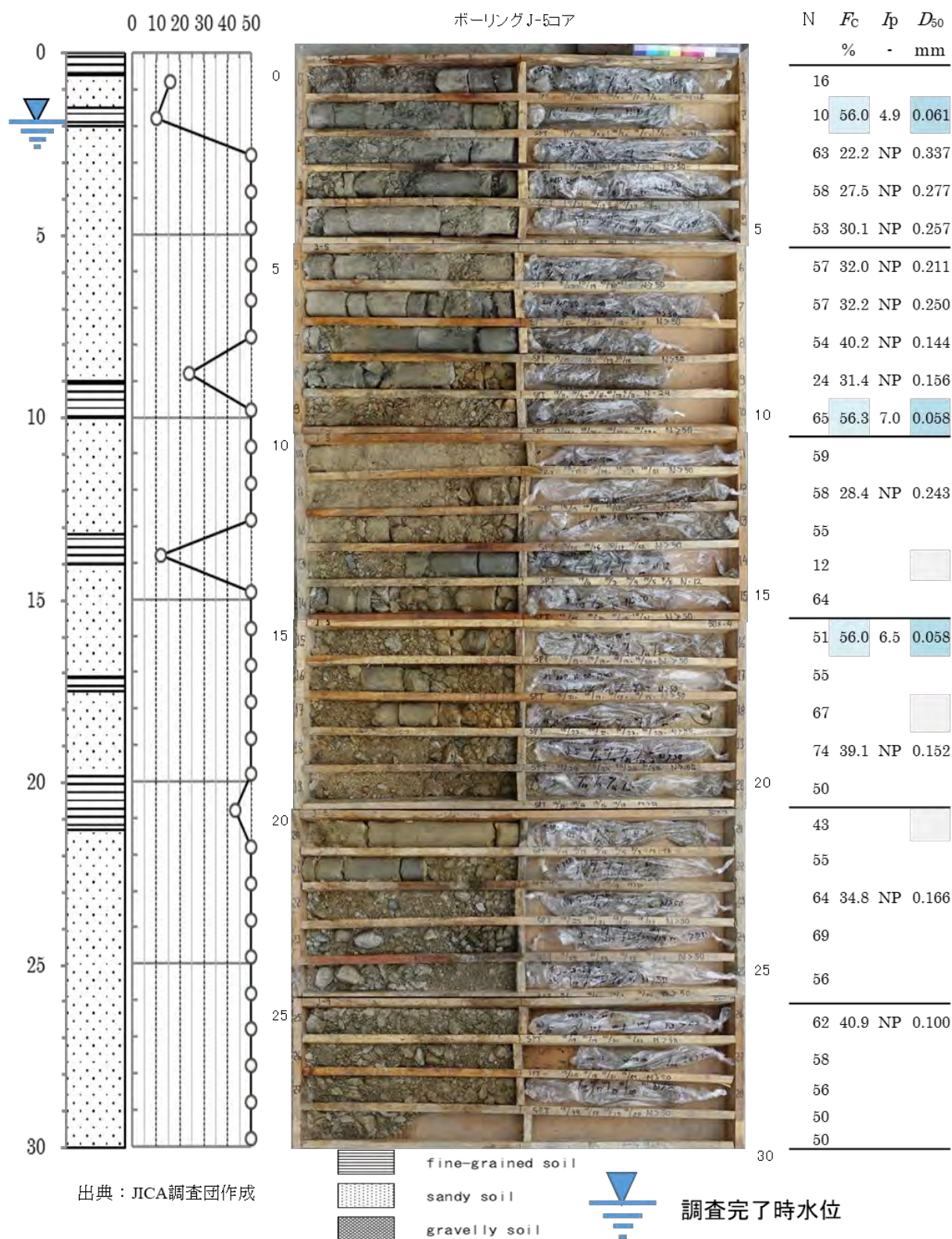


図 3-7 (17) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-6

ボーリングJ-6コア

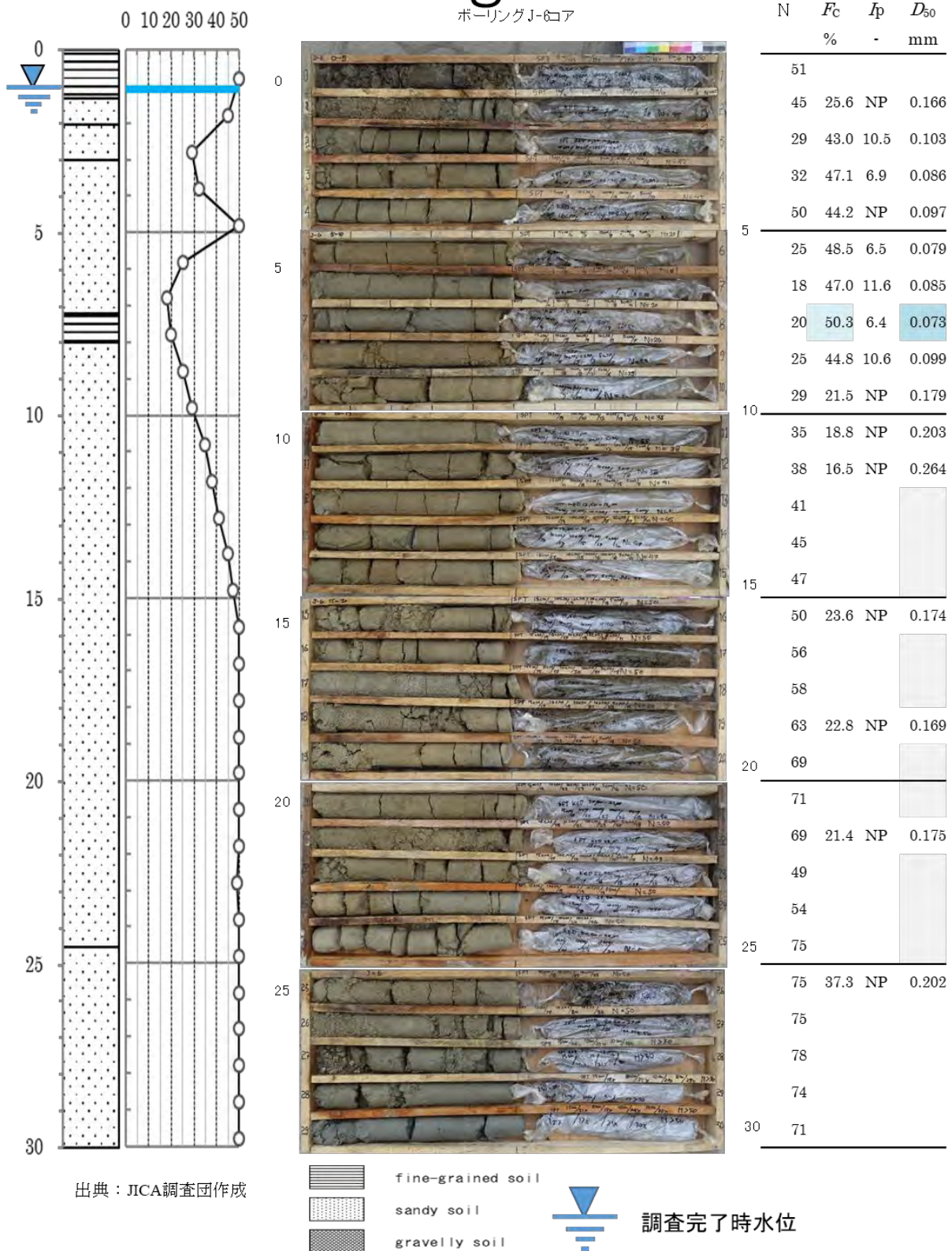


図 3-7 (18) ボーリング第一次調査結果(Jono Oge 地区)

Jono Oge J-7

ボーリングJ-7コア

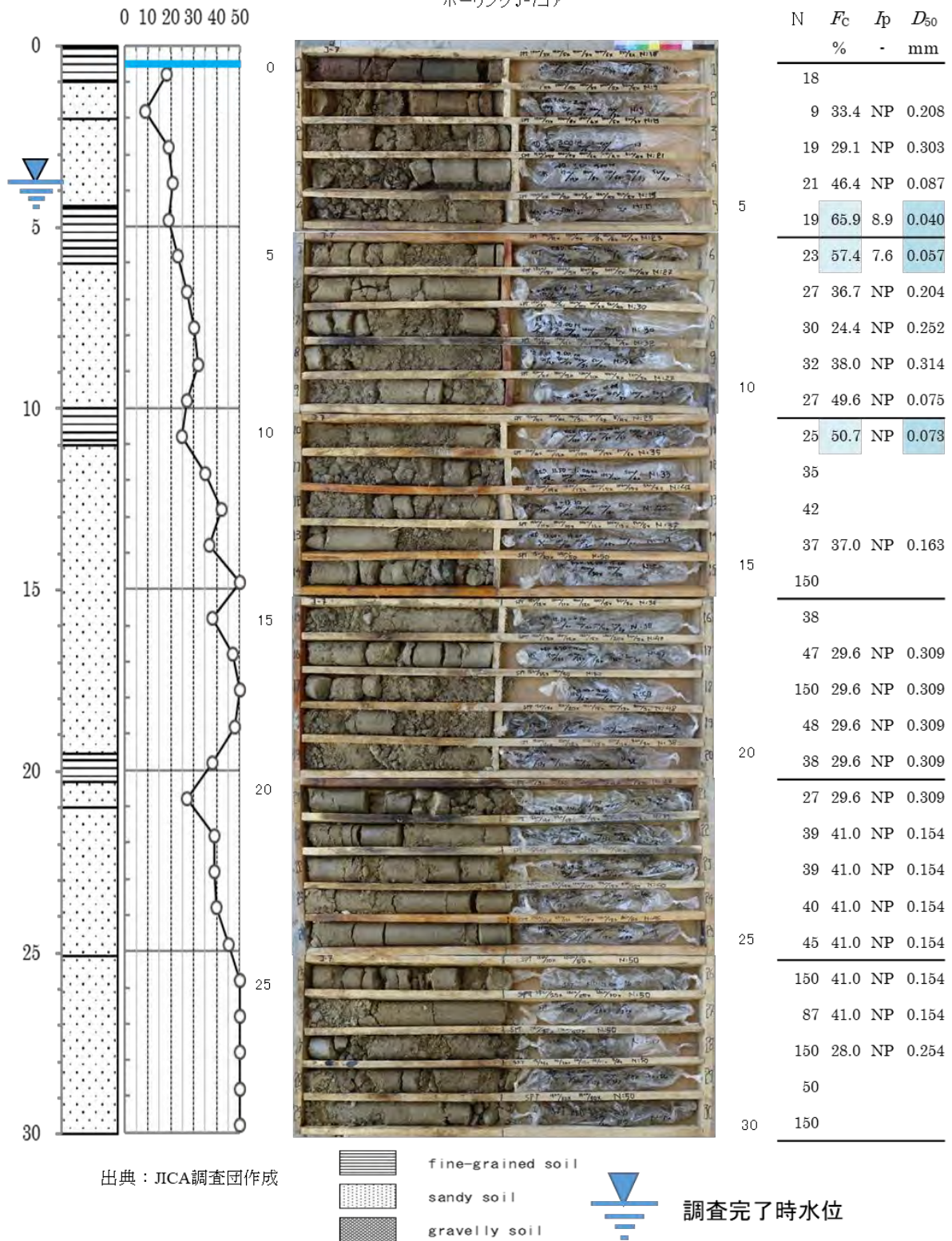


図 3-7 (19) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-8

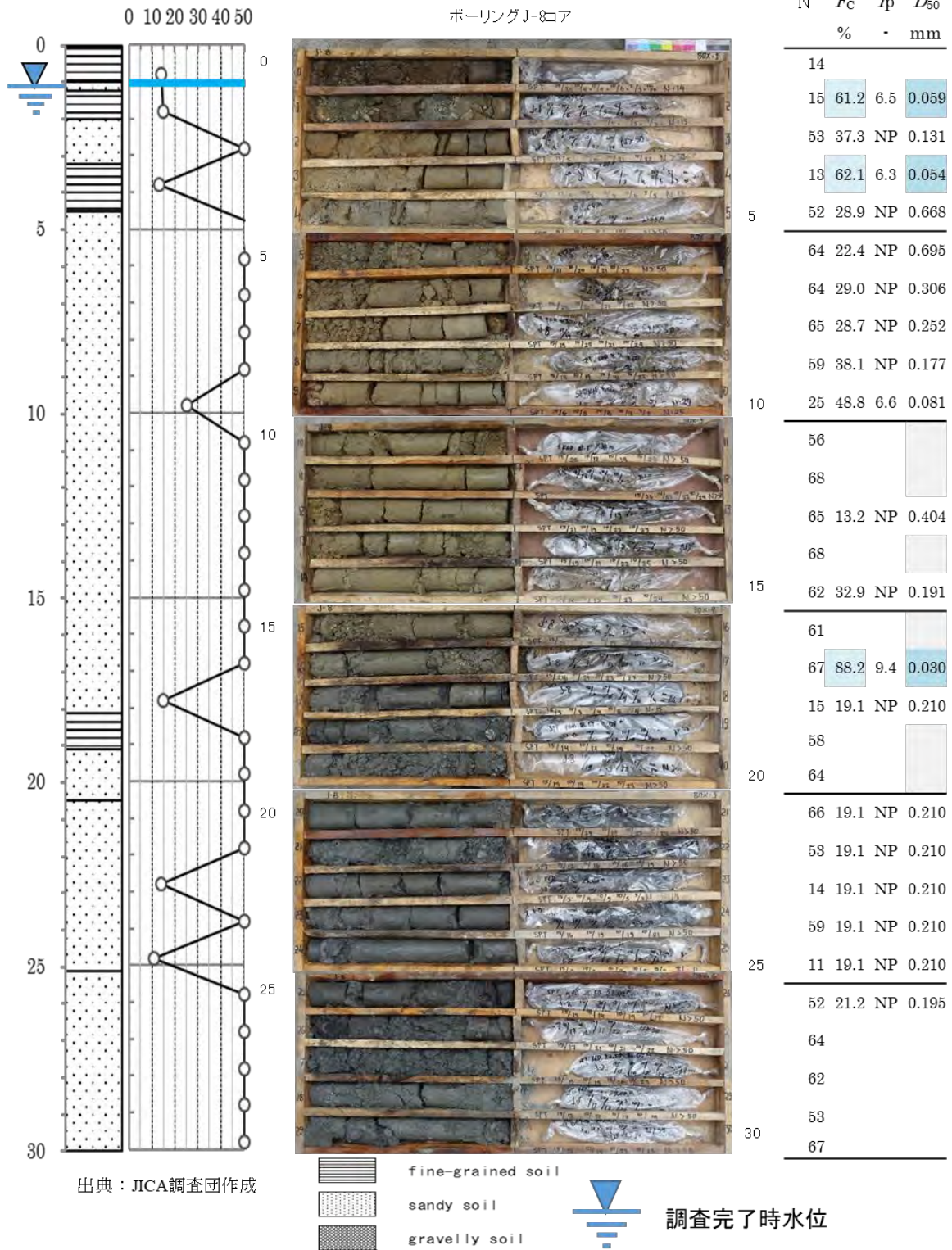


図 3-7 (20) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-9

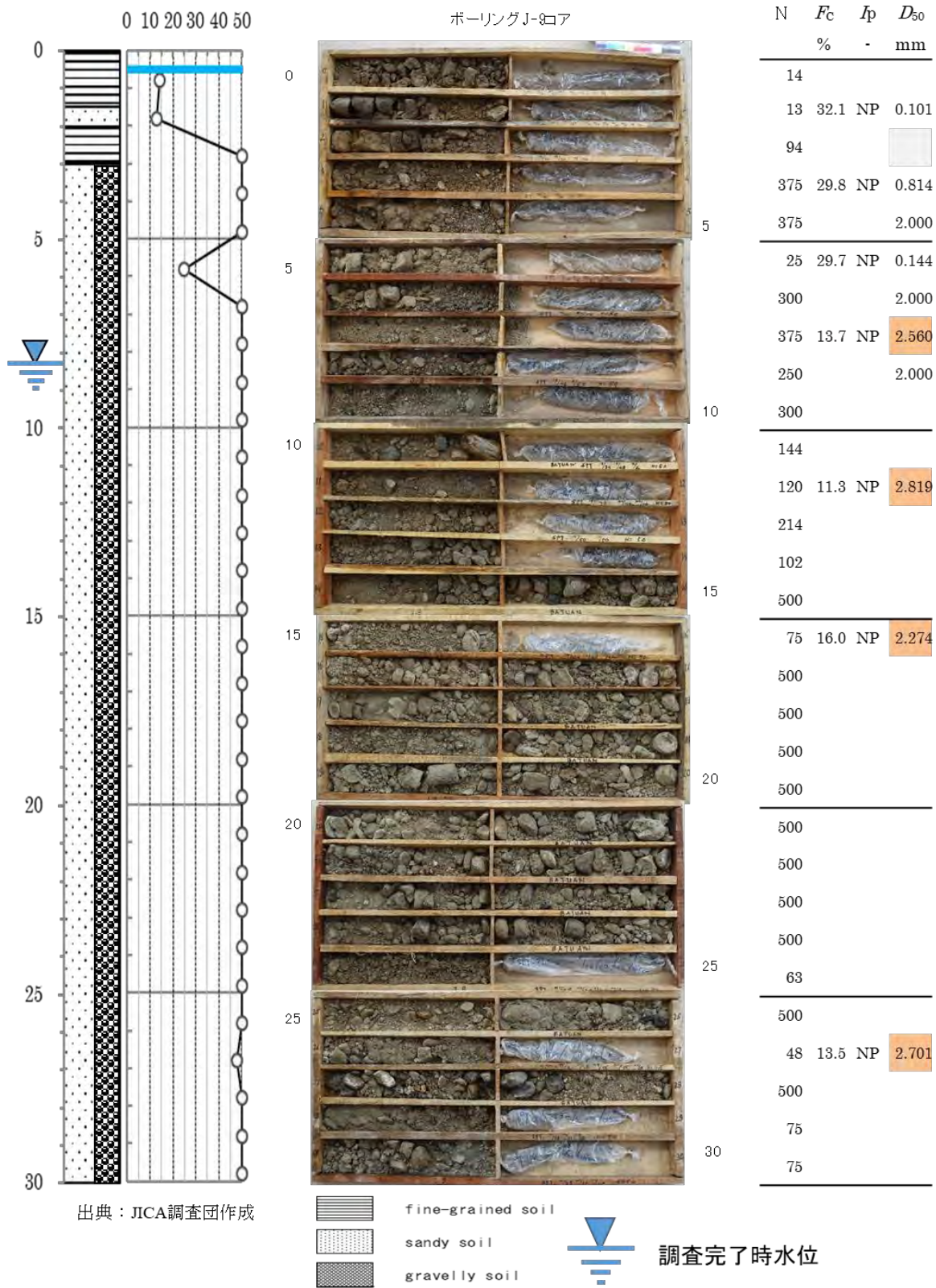


図 3-7 (21) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-10

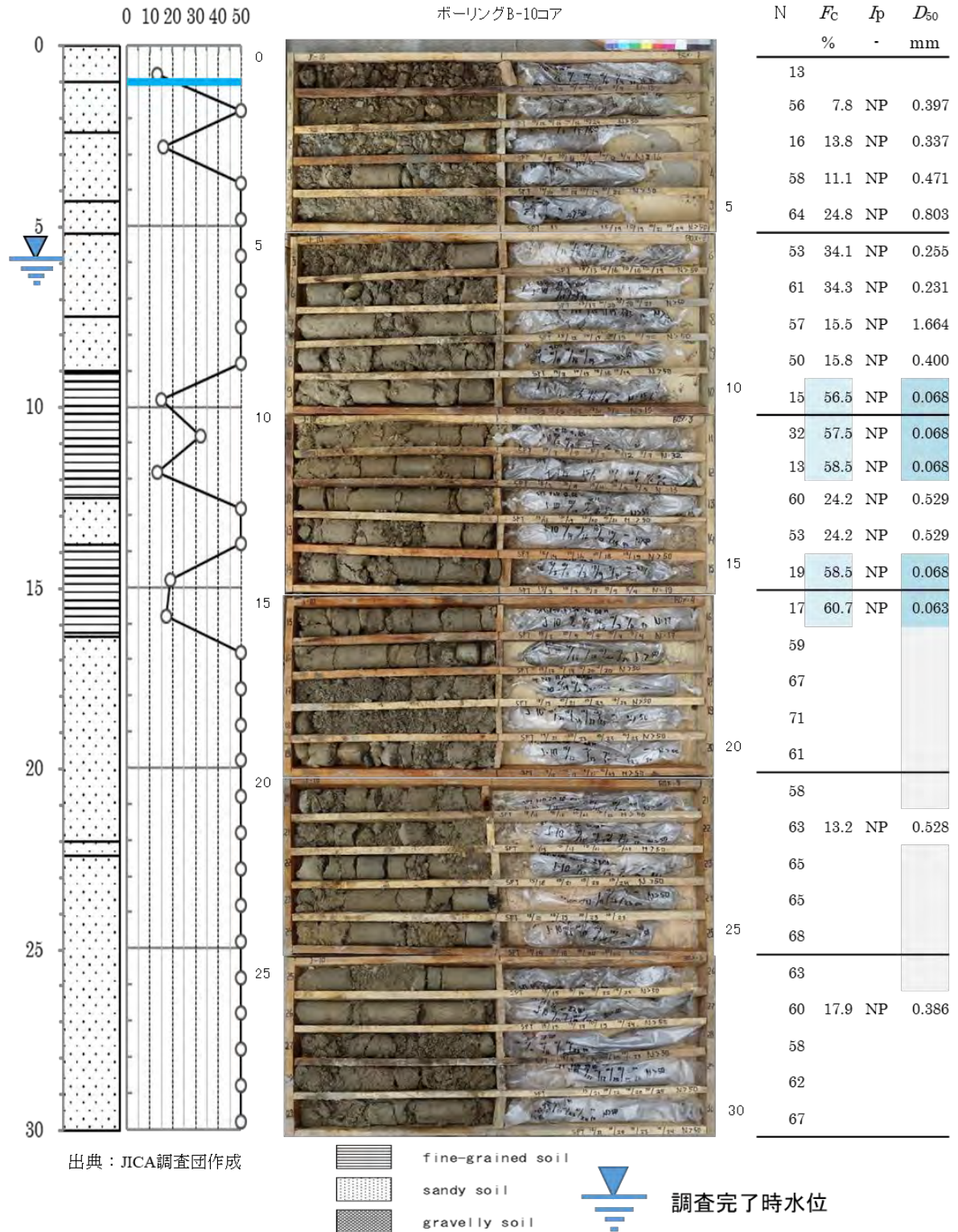


図 3-7 (22) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-11

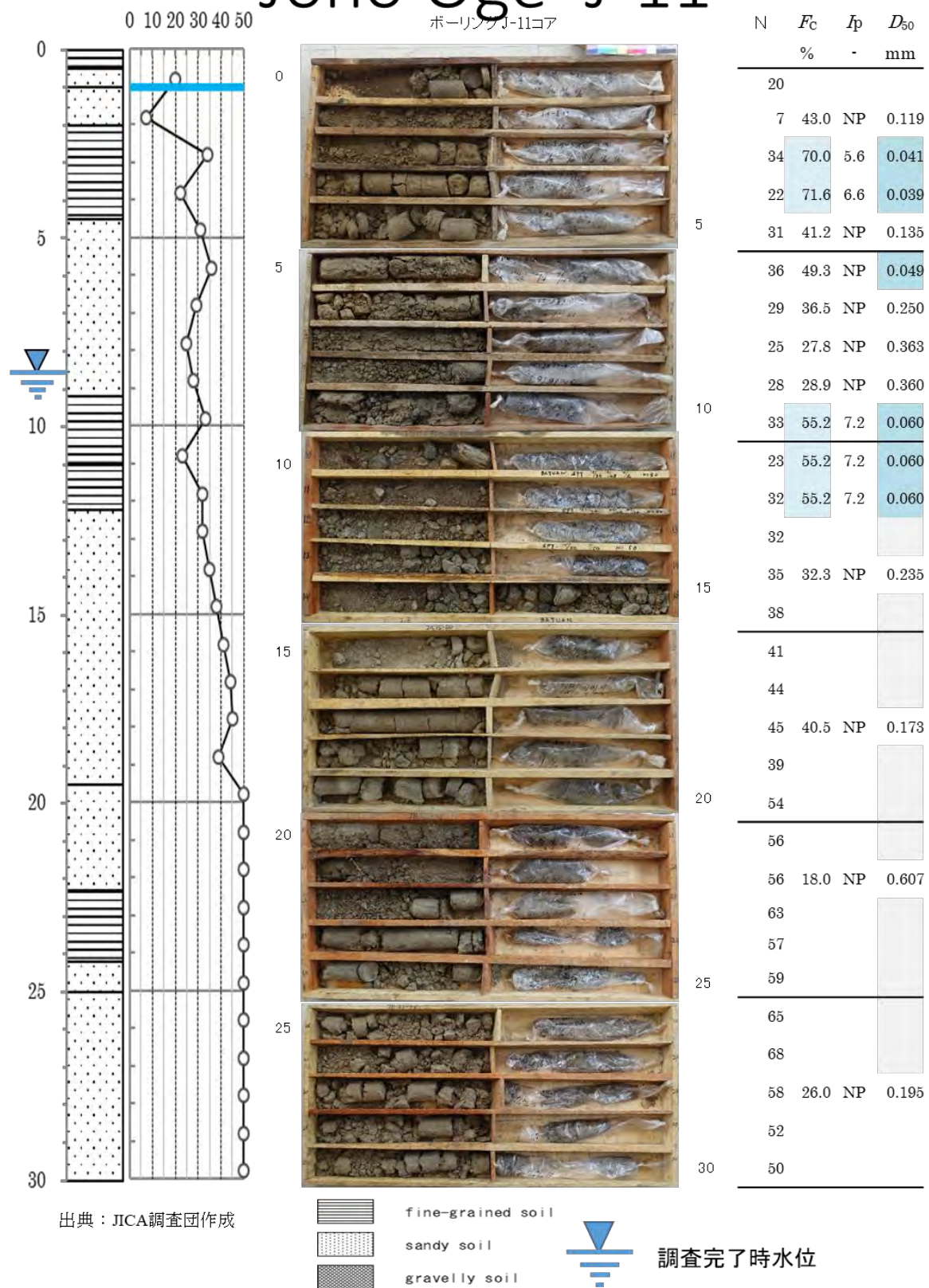


図 3-7 (23) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-12

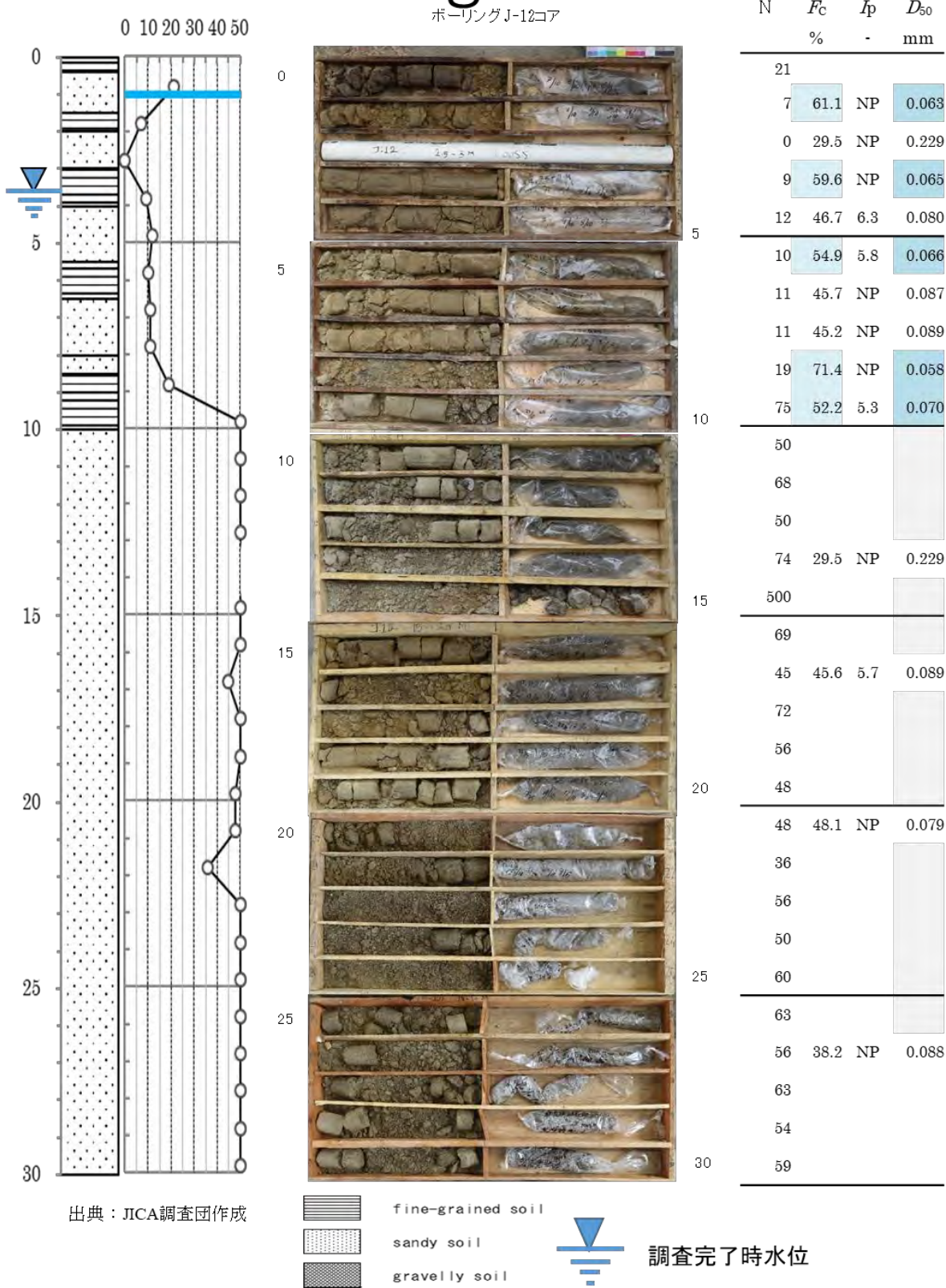


図 3-7 (24) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-13

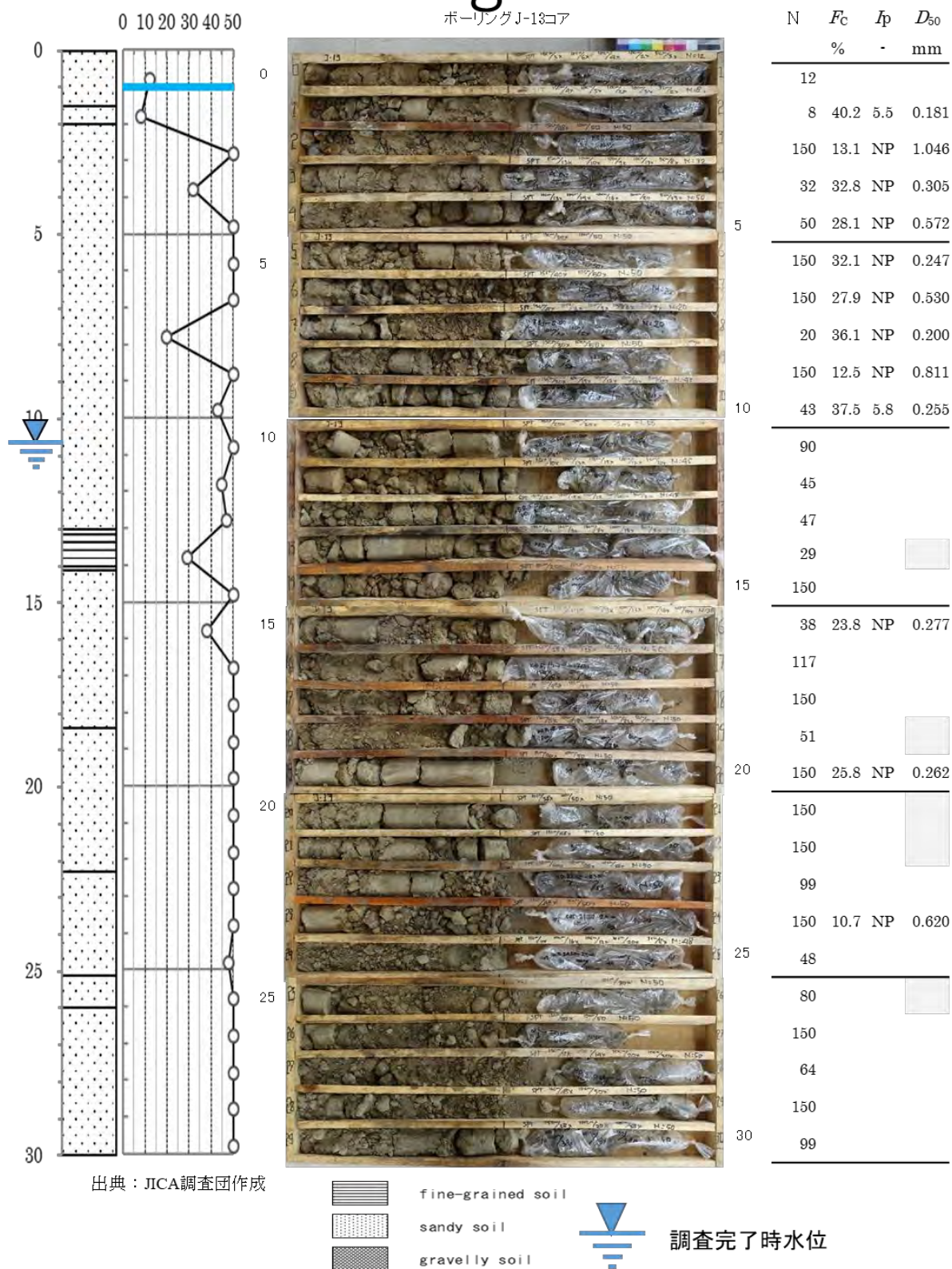


図 3-7 (25) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)

Jono Oge J-14

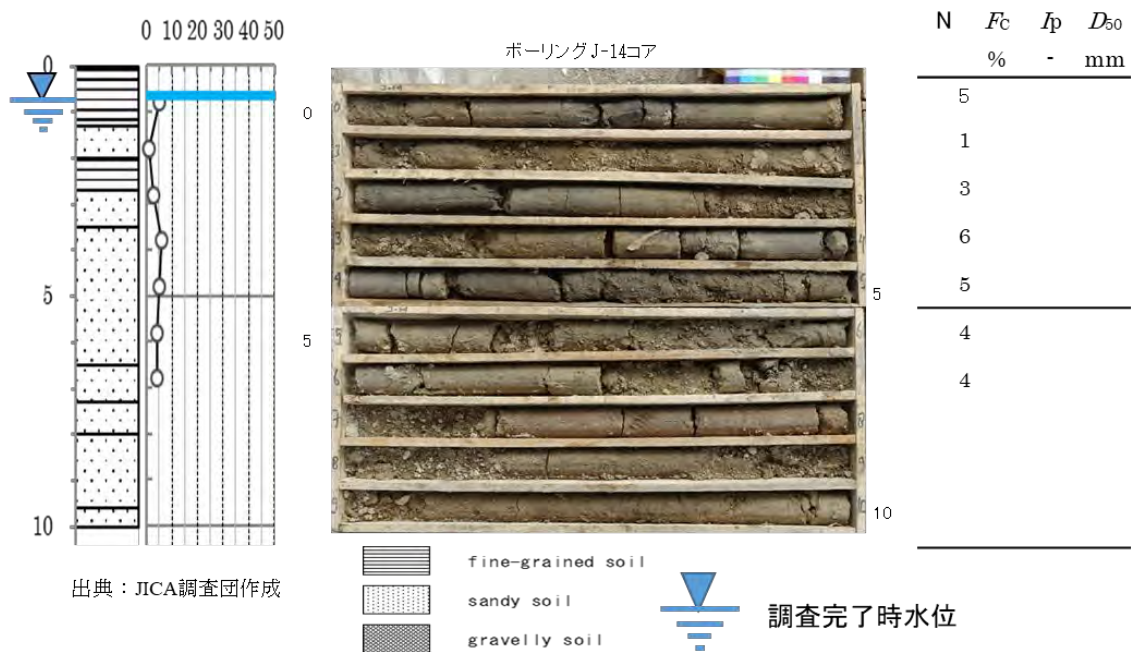
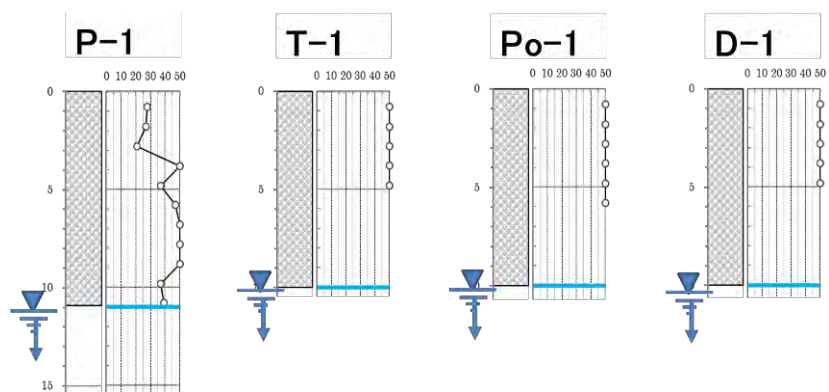
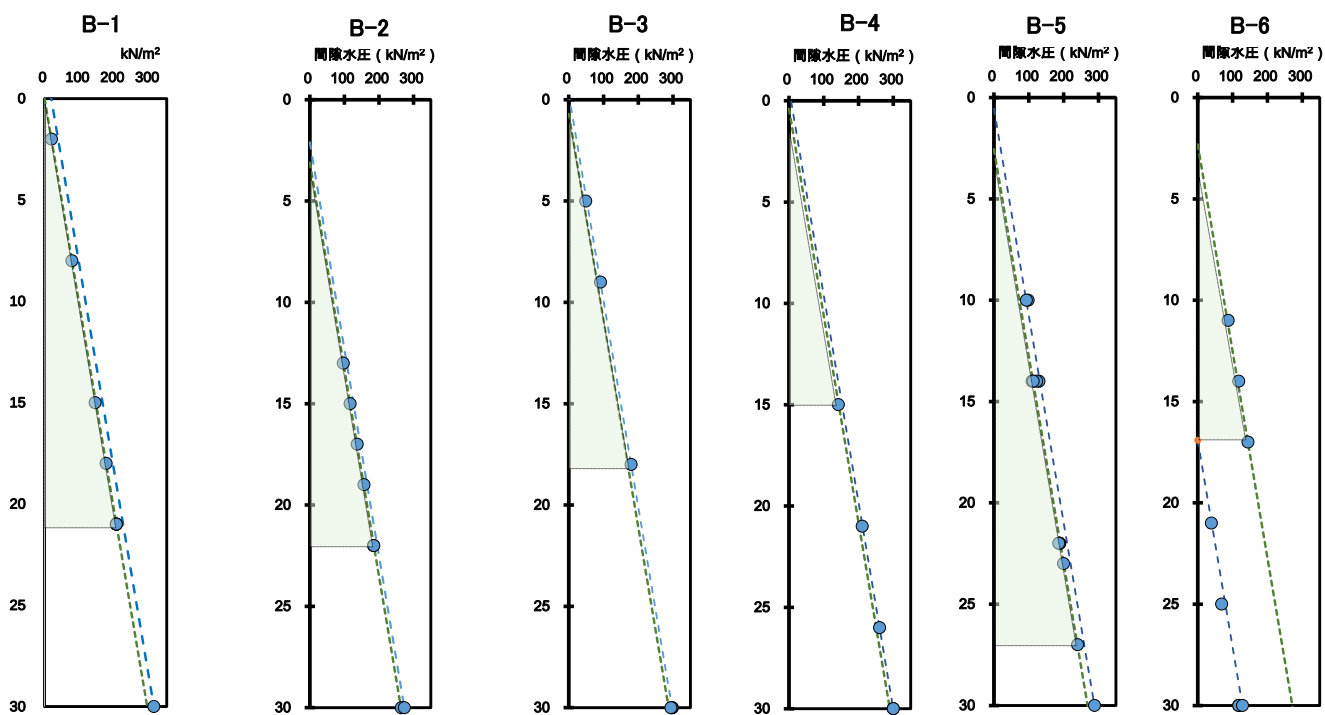


図 3-7 (26) ボーリング第一次調査結果 (Jono Oge 地区)



出典：JICA 調査団作成

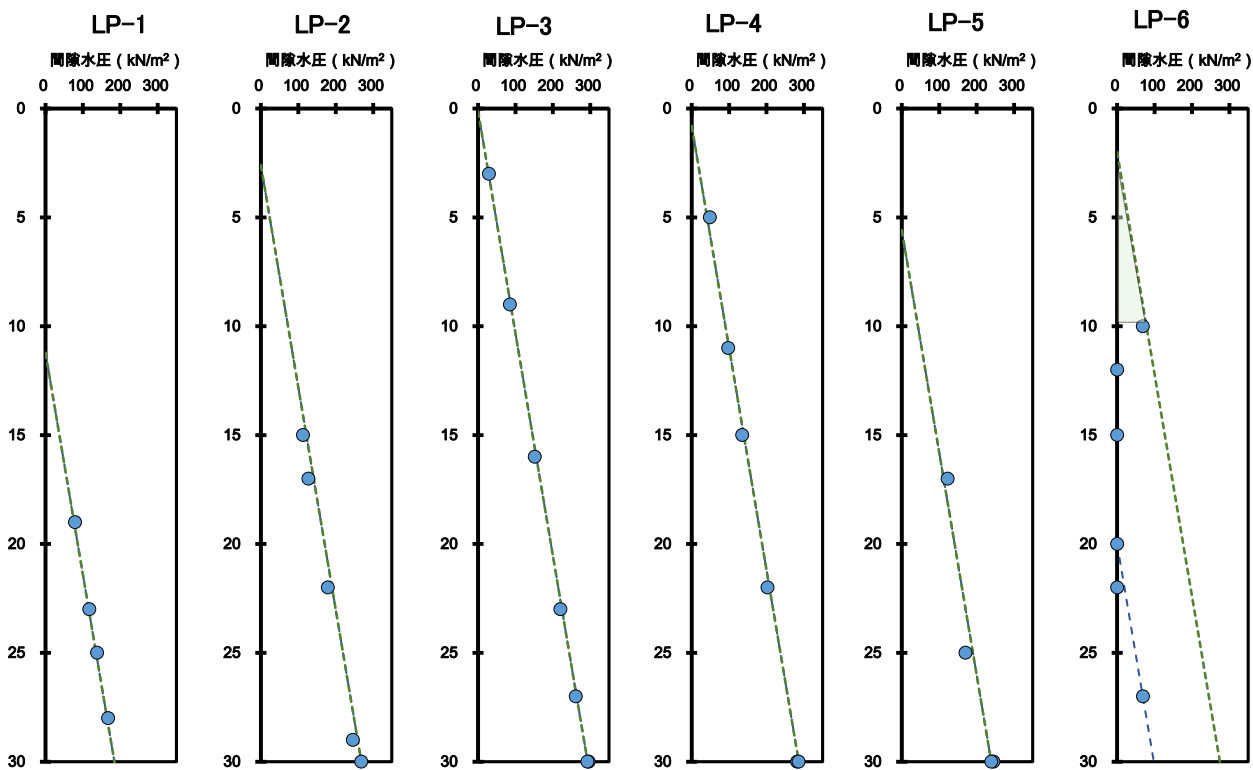
図 3-7 (27) ボーリング第一次調査結果 (移転計画地)



※X 軸：間隙水圧 (kN/m^2)、Y 軸：深度 (m)

出典：JICA 調査団作成

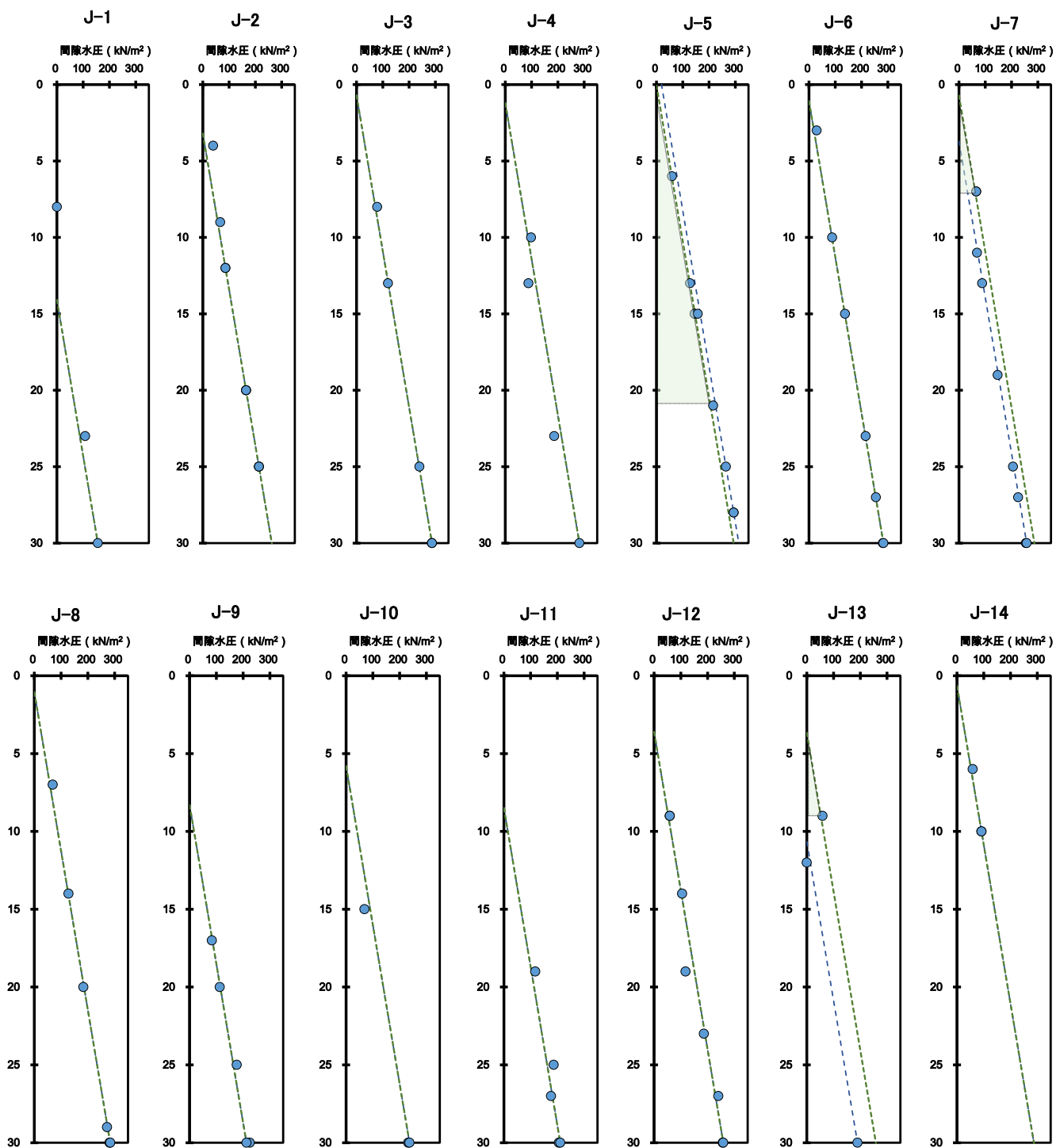
図 3-8(1) ボーリング第一次調査結果・間隙水圧分布 (Balaroa 地区)



※X 軸：間隙水圧 (kN/m^2)、Y 軸：深度 (m)

出典：JICA 調査団作成

図 3-8(2) ボーリング第一次調査結果・間隙水圧分布 (Petobo 地区)

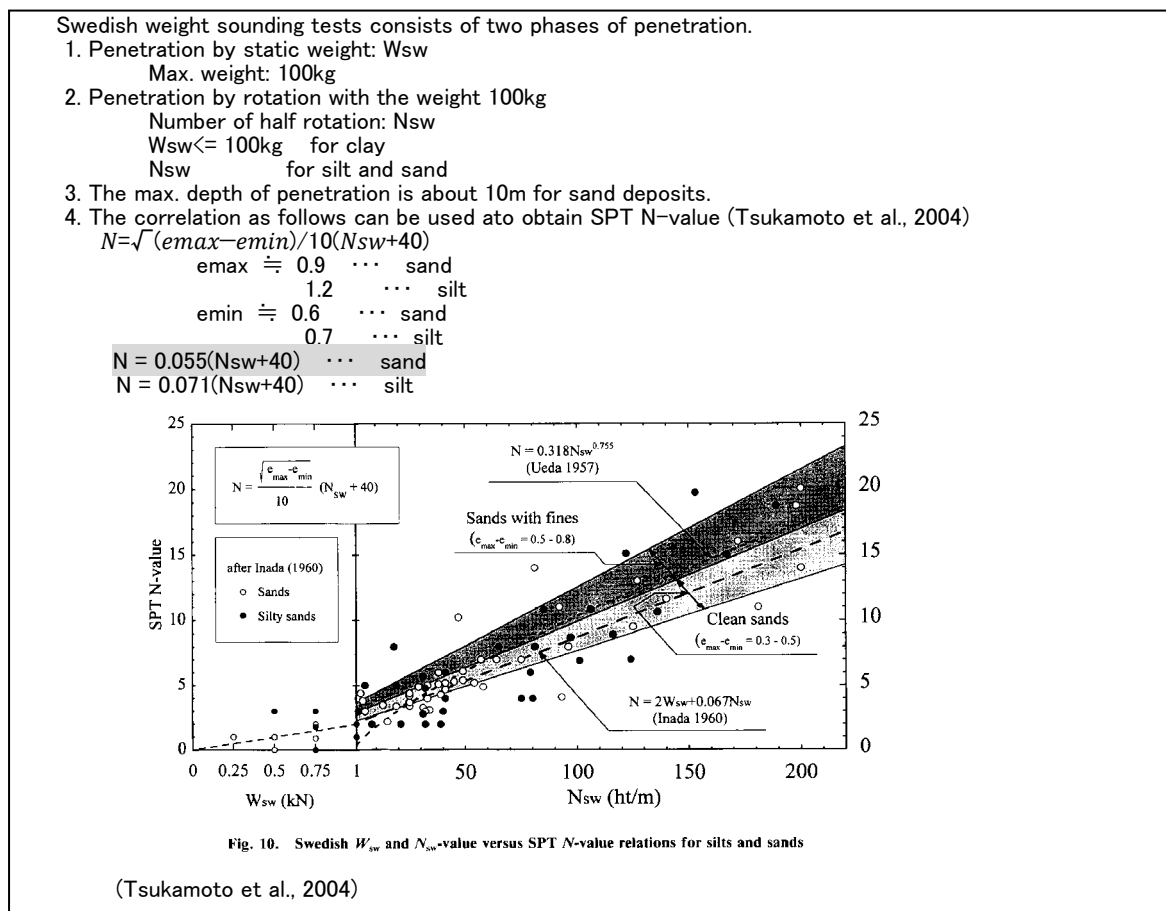


※X 軸：間隙水圧 (kN/m^2)、Y 軸：深度 (m)

出典：JICA 調査団作成

図 3-8 (3) ボーリング第一次調査結果・間隙水圧分布 (Jono Oge 地区)

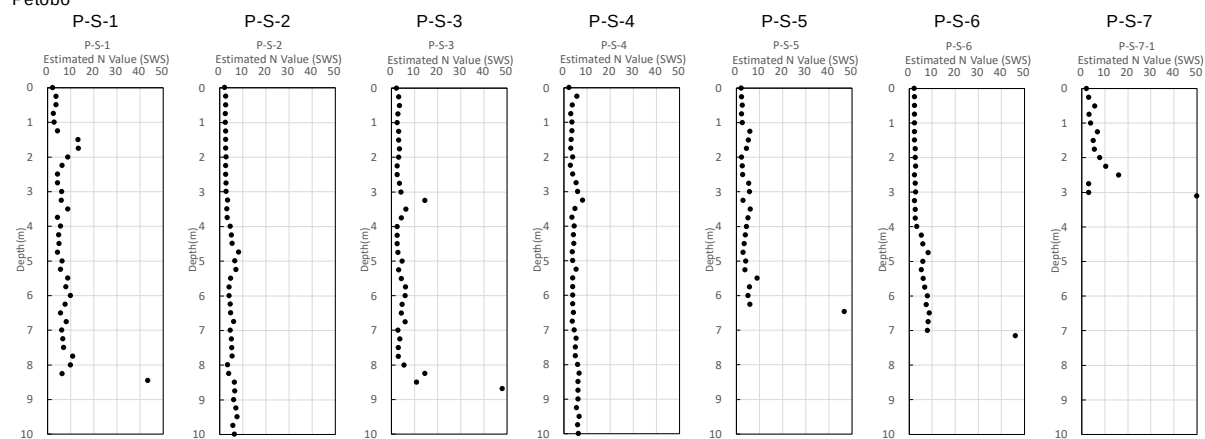
SWS の結果から N 値に換算する方法は、稲田 (1960)、上田 (1957) などの方法があるが、本検討では塚本他 (2004) の換算式で評価した。SWS の貫入量 1m あたりの半回転数の回数 (静的貫入抵抗値回/m) - N_{sw} と N 値の関係式 $N = 0.055(N_{sw} + 40)$... sand が得られている (図 3-9 参照)。SWS 結果から換算 N 値に換算した深度分布図を図 3-10、図 3-11 に示す。東北太平洋沖地震の沿岸域の評価から佐々他 (2017) により、簡易な液状化判定方法が提案されており、Palu での最大水平加速度 281gal では N 値 15 程度以下が液状化すると判定される。各所で貫入深さの限界値は異なるが、Nalodo 発生地域内で行った試験は概ね 10m まで達し、換算 N 値も液状化評価目安の 15 以下となった。これにより、Nalodo 発生地域外のボーリング調査で確認された良く締まった地盤は希で、強い液状化要素のあるルーズな堆積層が厚く (10m 程度) 堆積していることが確認できた。



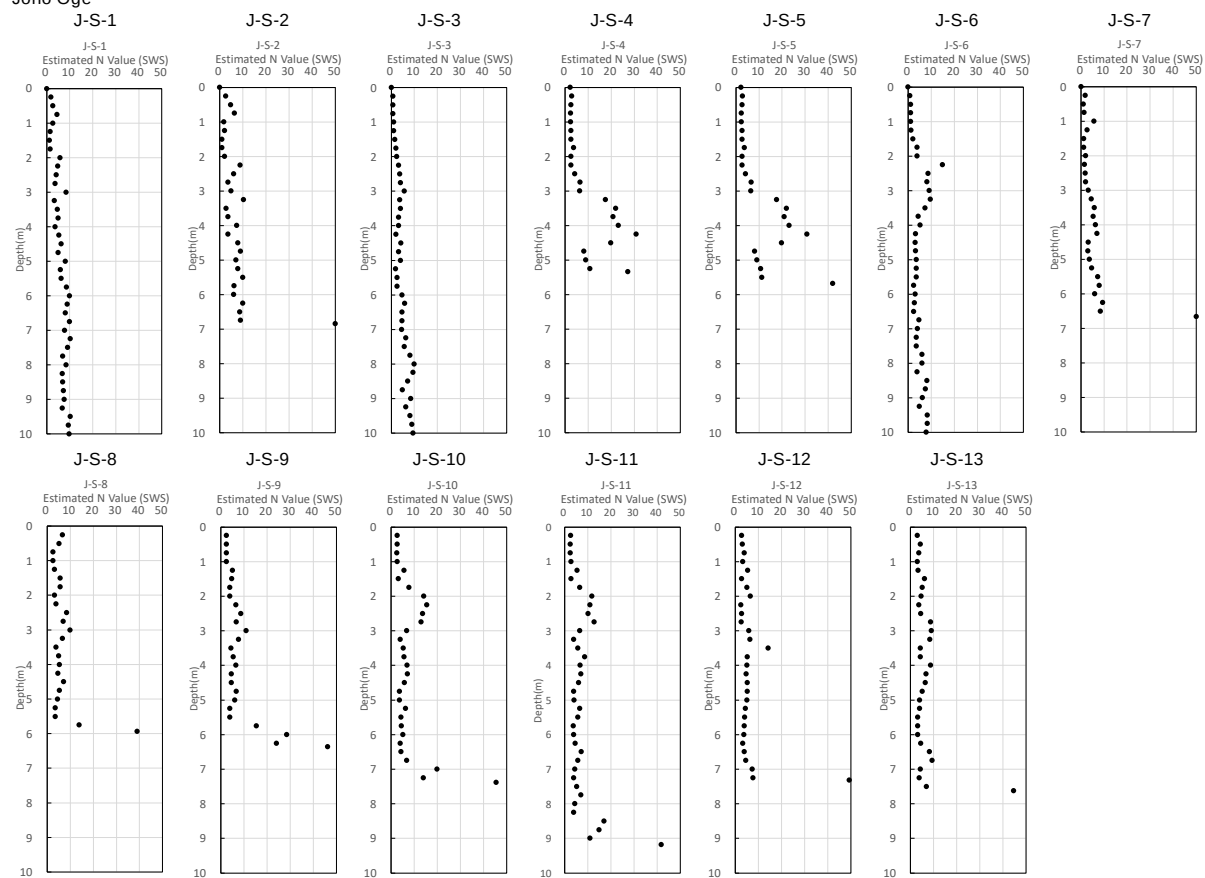
出典：石原委員長提供資料

図 3-9 SWS から N_{spt} 値への換算式

Petobo



Jono Oge

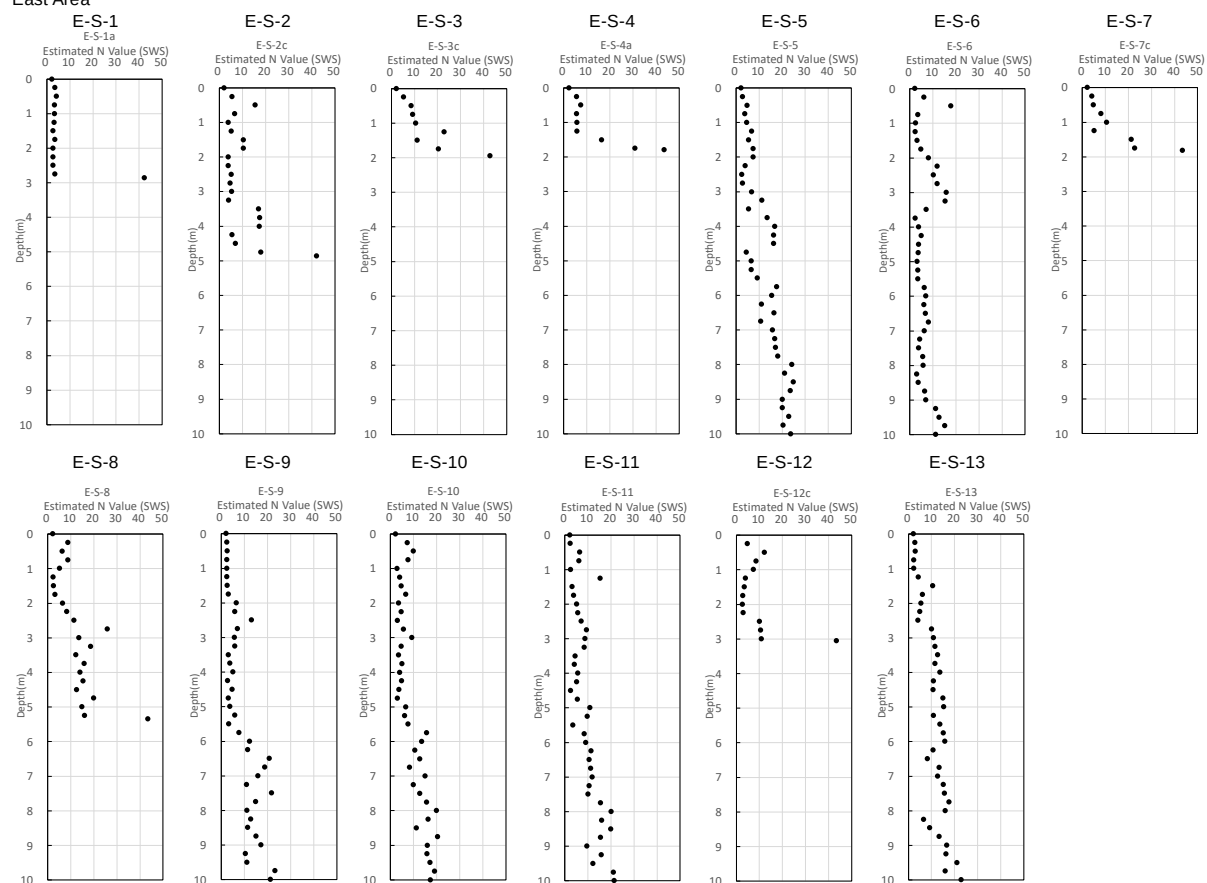


※X 軸：Estimated N Value (SWS)、Y 軸：Depth (m)

出典：JICA 調査団作成

図 3-10 SWS による換算 N 値 (Petobo 内部・Jono Oge 内部)

East Area



※X 軸：Estimated N Value (SWS)、Y 軸：Depth (m)

出典：JICA 調査団作成

図 3-11 SWS による換算 N 値 (Jono 0ge 内部 1/2)