

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1110

December 2005

インド洋津波によるスリランカ、モンディブ、インドネシアの被害現地調査報告と数値解析

富田 孝史

本多 和彦

菅野 高弘

有川 太郎

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 数値計算によるインド洋津波 .....	4
2.1 数値モデル .....	4
2.2 計算条件 .....	5
2.3 分散性の効果 .....	5
2.4 座標系の影響 .....	6
2.5 非線形性の効果 .....	6
2.6 STOCによる計算結果 .....	6
2.7 津波到達時間に関する観測結果との比較 .....	7
3. スリランカにおける現地調査 .....	19
3.1 調査概要 .....	19
3.2 津波被害 .....	19
3.3 津波到達時刻と来襲津波の数 .....	24
4. モルディブにおける現地調査 .....	24
4.1 調査概要 .....	24
4.2 津波被害 .....	25
4.3 津波到達時刻と来襲津波の数 .....	31
5. インドネシアにおける現地調査 .....	31
5.1 調査概要 .....	31
5.2 津波被害 .....	32
6. まとめ .....	35
謝辞 .....	36
参考文献 .....	36

# Field Investigation on Damages due to 2004 Indian Ocean Tsunami in Sri Lanka, Maldives and Indonesia with Tsunami Simulation

**Takashi TOMITA\***  
**Kazuhiko HONDA\*\***  
**Takahiro SUGANO\*\*\***  
**Taro ARIKAWA\*\***

## Synopsis

The Indian Ocean Tsunami on December 26, 2004 caused the devastating disaster in the coastal areas along Indian Ocean. The many types of tsunami damage were observed in this event.

- The coastal low-lying areas were vastly flooded and eroded by the tsunami.
- The tsunami destroyed houses, buildings, coastal vegetation, and infrastructures like harbors, roadways and railways.
- A number of fishing boats, large vessels and oil tanks were flushed away by tsunami action.
- A number of people including tourists were also killed. Lack of knowledge on tsunamis may delay evacuation which some of them should make.

On the other hand, coastal and harbor structures like breakwaters, seawalls, embankments etc. and rigid coastal houses reduced the tsunami, resulting in reduction of tsunami damage.

Comparing numerical results calculated by the numerical models which are the linear long wave model, linear dispersive wave model, and nonlinear long wave model in the spherical coordinate system or Cartesian coordinate system, and our developing numerical model named STOC, we can use our numerical model STOC for the Indian Ocean Tsunami.

**Key Words:** tsunami, damage, field survey, numerical simulation, disaster reduction

---

\* Tsunami Research Director, Tsunami Research Center

\*\* Project Researcher, Tsunami Research Center

\*\*\* Head, Structural Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5052 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:tomita@pari.go.jp

# インド洋津波によるスリランカ，モルディブ，インドネシア の被害現地調査報告と数値解析

富田 孝史\*  
本多 和彦\*\*  
菅野 高弘\*\*\*  
有川 太郎\*\*

## 要 旨

2004年12月26日のスマトラ沖地震に伴ったインド洋大津波では，つぎのような様々なタイプの被害が発生した．

- ・ 沿岸の低地が広い範囲にわたり浸水した．
- ・ 一部のコンクリート造の建物が残存したが，木造やレンガ造の建物は大破した．
- ・ 沿岸にある道路，橋梁，鉄道，港湾，空港が被災した．
- ・ 海岸や沿岸の陸地が侵食され，地形が変化した．
- ・ 船舶，オイルタンク，コンテナなどが漂流し，被害を拡大した．
- ・ 地震の発生から津波の到達するまでに避難時間があった地域においても多くの人が津波に飲み込まれた．
- ・ 沿岸の住民だけでなく多くの観光客も被災した．

一方，港湾や海岸の施設，沿岸における堅牢な建物，盛土が津波被害の低減に役立ったことが示された．

インド洋津波に関する数値計算を各種数値モデルにより実施し結果を比較したところ，低緯度において津波が伝播したので，球面座標系の影響は大きくなくデカルト座標系でも十分な精度で計算できること，波の分散性も大きくないことが分かった．このため，港湾空港技術研究所においてこれまで開発してきた高潮津波シミュレータ STOC がインド洋津波の被害の詳細計算に使用できることが判明した．

キーワード：津波，被害，現地調査，数値計算，防災

---

\* 津波防災研究センター主席津波研究官

\*\* 津波防災研究センター特任研究官

\*\*\* 地盤・構造部構造振動研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5052 Fax：046-844-1274 e-mail:tomita@pari.go.jp

## 1. まえがき

2004年（平成16年）12月26日のスマトラ島西方沖を震源としたマグニチュード9.0（9.3という解析結果もある（Stein and Okal, 2005））の地震はインド洋に大津波を発生させた。津波被害は広範囲に及び、インド洋沿岸のみならずアフリカ東海岸にも広がった。この津波及び地震による死者・行方不明者は、インドネシアで死者126,602人、行方不明者94,638人、スリランカで38,938人と4,100人、インドで10,749人と5,640人、タイで5,305人と2,932人など（2004年3月21日、ロイター報道）というように、死者・行方不明者が20万人を超える史上最悪の災害となった。

津波の被害を把握するため、さらに津波の痕跡がなくなる前にその高さを測量して、津波の遡上高さなどに関するデータを得るために、調査員の安全確保および被災直後の救援活動などの妨げにならないよう配慮しつつ、できるだけ早く現地調査を行う必要がある。このため、発災後から世界中の多くの各種機関が現地調査を行っており、港湾空港技術研究所でも、12月30日からタイに向かった秋田大学の松富英夫教授を団長とするタイ現地調査チームに平石哲也波浪研究室長が参加した（平石ら、2005）。その後、スリランカにおいて現地調査を行うために、富田孝史高潮津波研究室長（当時）および有川太郎海洋・水工部主任研究官が1月3日に現地に向けて出発した。この現地調査では、京都大学防災研究所の河田恵昭教授および安田誠宏助手並びに東北大学の今村文彦教授に参加をいただいた。さらに、1月31日からは、防衛大学校の藤間功司教授を団長とするモルディブ現地調査団に、富田孝史および本多和彦高潮津波研究室研究官（当時）が参加した。また、2月27日からの土木学会によるインドネシア現地調査団（団長、防災科学研究所の後藤洋三川崎研究所長）に菅野高広構造振動研究室長および富田孝史が参加した。

本資料は、スリランカ、モルディブおよびインドネシアにおいて行った津波による浸水の痕跡高さや住民からのヒアリングの結果を取りまとめたものである。それぞれの調査の概要については第3、4および5章において示す。ただし、モルディブおよびインドネシア調査においては、調査団は複数の班に分割されたので、港湾空港技術研究所の職員が直接実施した調査について、ここに記すことにする。しかし、直接的に実施していない調査であっても重要な結果については、調査報告書を参照した旨を明記の上、本資料にも記述することとした。なお、ここに示されないその他の調査結果については各調査団から公表される調査報告書など（例えば、Imamura et al.,

2005; Fujima et al., 2005a, 2005b）を参考にさせていただきたい。

また、津波の全体的な特徴の把握および今後の詳細な数値計算を行うための基礎資料として、数値計算を行った。後藤（1991）は、太平洋を横断して我が国に伝わる津波のように大洋を渡る遠地津波の場合では、球面座標系の使用により計算精度が向上すること、および、非線形項よりも分散項の方が大きな効果を持つことを示したので、本資料においては、インド洋津波について球面座標系および分散項の影響などについての検討を第2章で行った。

## 2. 数値計算によるインド洋津波

インド洋津波の伝播シミュレーションを各種数値モデルを使って行ない、それらの計算結果を比較することで、分散性の効果、座標系の影響および非線形性の効果等に関する検討を行った。

### 2.1 数値モデル

以下に示す津波の理論方程式と座標系を組み合わせた4つの数値モデルおよび港湾空港技術研究所津波防災研究センターにおいて開発を行ってきている高潮津波シミュレータSTOC（富田・柿沼、2005）を用いて津波伝播シミュレーションを行なった。

- ・ 線形分散波方程式，球面座標系
- ・ 線形長波方程式，球面座標系
- ・ 線形長波方程式，デカルト座標系
- ・ 非線形長波方程式，デカルト座標系
- ・ STOC，デカルト座標系

上記の数値モデルのうちSTOC以外のモデルに関しては、すべて津波計算モデルとして津波予測などの実務計算においてよく使用されるモデルである。具体的には、連続式および運動方程式を水表面と海底の境界条件を用いて鉛直方向に積分し、静水圧近似の仮定のもとに導かれる連立方程式が数値モデルの基礎方程式である。そのうち、波高水深比（ $H/h$ ）が非常に小さいと仮定したモデルが線形モデルとなり、相対水深（ $h/L$ ）が非常に小さいと仮定したモデルが長波モデルとなる。

STOC（Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas）は、3次元流動モデル（STOC-IC）、多層レベルモデル（STOC-ML）および3次元VOFモデル（STOC-VF）を必要に応じて適宜結合するモデルである。STOC全体の基礎方程式は3次元の運動を記述するレイノルズ方程式と連続式である。ただし、本資料では外洋

を伝播する津波を対象としたのでSTOC-MLを用いた。STOC-MLは、海域を鉛直方向に幾つかの層に分割し、各層内で静水圧近似を適用して、圧力の数値計算を省略したものである。このため、流動の鉛直構造は分割した層の数に依存することになるが、計算負荷が小さいので大領域の計算に適している。今回の計算では、大洋における津波では長波の仮定により近似できるので、海域を1つの層とした。

## 2.2 計算条件

2004年12月26日のインド洋津波では、インド洋沿岸で特に甚大な被害が発生した。そのため、今回の津波伝播シミュレーションでは、インド洋を対象とした計算領域を設定した。

水深データは米国の NOAAのNational Geophysical Data Center (NGDC) が公開している 2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) を利用した。対象領域を、南緯7度～北緯23度、東経72度～東経102度の範囲とした。

この対象領域の水深分布を図-2.1に示す。

上記の水深データは2分間隔の格子データとなっているため、球面座標系モデルではそのまま用いることが可能であるが、デカルト座標系の数値モデルにおける計算では座標変換が必要である。そこで、ETOPO2のデータをUTM座標（基準：東経87度）に変換し、その結果を補間することでデカルト座標系の数値モデルに入力する水深データを作成した。

波源モデルに関しては、表-2.1に示す断層パラメータを用いて Mansinha and Smylie (1971) の方法により地表の鉛直変位量を求め、この鉛直変位を津波による海水位の変位として津波伝播計算の初期条件と設定した。これにより求めた初期水位を図-2.2に示す。この図からも分かるように、震源の西側には押し波初動の津波が伝達し、東側は引き波初動となっている。

表-2.1 断層パラメータ

断層	N (°N)	E (°E)	d (km)	$\theta$ (deg)	$\delta$ (deg)	$\lambda$ (deg)	L (km)	W (km)	U (m)
南	2.5	95.75	7	329	15	110	330	150	11
中央	5.0	94.00	7	340	15	110	570	150	11
北	10.0	92.00	7	5	15	110	300	150	11

計算格子間隔は、球面座標系の数値モデルとデカルト座標系の数値モデルとの解像度が概ね一致するように、球面座標系モデルのケースでは2分間隔とし、デカルト座標系モデルのケースでは3645mとした。いずれのケースにおいても格子数は901×901と設定した。ただし、後述するように、分散性の効果の検討を行なう際には、計算格

子間隔を4分間隔と設定し、格子数は451×451とした。この空間格子の配置に関しては、すべてStaggered Gridを用いた。

計算モデルの特徴を検討するためには、計算条件を可能な限り統一しておいた方が良い。しかし、今回使用した球面座標系の数値モデルには海底が干出する場合を処理するスキームが組み込まれていないので、海域の最小水深を50mと設定し、また、遡上を扱わないようにした。

対象とする計算時間は地震発生から12時間までとし、計算時間間隔は差分スキームの安定条件を満たすように2.0sと設定した。

異なる数値モデルの計算結果を比較するため、すべての数値モデルにおいて統一した代表地点の水位の時系列変化を60s毎に出力した。選択した代表地点を図-2.3に示す。断層を横断するように設定した測線上の代表地点を西側から Point\_01, Point\_02 と順番に設定し、一番東側は Point\_11 である。また、この測線に沿った断面図およびそれぞれの代表地点の水深を、それぞれ図-2.4および表-2.2に示す。50m以浅の沿岸部を対象としていないが、参考として、沿岸部の7都市に隣接する海域の格子点の水位に関する時系列に関しても比較を行なった。

表-2.2 各地点の水深

地点	水深 [m]
Point_01	393
Point_02	3855
Point_03	3792
Point_04	3746
Point_05	3725
Point_06	2828
Point_07	4052
Point_08	50
Point_09	2447
Point_10	928
Point_11	74

## 2.3 分散性の効果

分散性の効果を検討するため、球面座標系で記述された線形分散波方程式モデルと線形長波方程式モデルの計算結果の比較を行なった。

線形分散波方程式モデルは2段階混合差分法を用いているため、格子間隔の下限（水深の $2/\sqrt{3}$ 倍）を規定している安定条件を満たさなければならない（後藤, 2003）。したがって、この安定条件を満たすために、この分散項の有無による計算結果の比較に関しては、計算格子間隔

を4分間隔とした。この計算格子サイズの場合の最小解析波長は約15kmである。この波長を持った津波の周期は水深によって変化し、例えば、今回の計算における最小水深50mの場合では11分、水深4000mでは1.2分になる。

最大水位に関する線形分散波方程式モデルの計算結果および線形長波方程式モデルの計算結果を、それぞれ図-2.5(a)および図-2.5(b)に示す。両者の計算結果には明確な差異は認められない。

次に、図-2.6(a)および図-2.6(b)に代表地点における水位の時系列変化に関する計算結果を、また、表-2.3に最大水位、津波到達時刻および第1波の極大時刻の計算結果を示す。最大水位に関しては、計算領域の左端に位置するMale'では10cm弱の差が見られるが、その他の地点では5cm以下の差異しか認められない。また、津波の到達時刻および第1波の極大時刻に関しては、すべての地点において1分間の差異程度しか認められない。

2段階混合差分法を用いた2次元線形分散波モデルは、インド洋を対象とした今回の計算領域（最大水深は約6000m）においては約7000m以上の格子間隔をとる必要がある。この条件の下では、線形分散波モデルと線形長波モデルとの差異は認められない。しかし、他の差分スキームによる2次元線形分散波モデルを用いて格子間隔による分散性の影響を検討する必要がある。

## 2.4 座標系の影響

数値モデルの座標系による影響を検討するため、球面座標系で記述された線形長波方程式モデルの計算結果と、デカルト座標系で記述された線形長波方程式モデルの計算結果の比較を行なった。

球面座標系モデルでは2分間隔（赤道上では約3710m、北緯20度では約3490m）の計算格子を用いている。この解像度と同程度になるように、また、今後ネスティングを行なう際に使用しやすいように、デカルト座標系モデルでは3645m間隔の計算格子を用いた。そのため、水位の時系列変化を出力している代表地点に関しては、完全に一致している格子とはなっていない。

最大水位に関する球面座標系モデルの計算結果およびデカルト座標系モデルの計算結果を、それぞれ図-2.5(c)および図-2.5(d)に示す。両者の計算結果には明確な差異は認められない。

次に、図-2.7(a)および図-2.7(b)に代表地点における水位の時系列変化に関する計算結果を、また、表-2.4に最大水位、津波到達時刻および第1波の極大時刻の計算結果を示す。津波の到達時刻および第1波の極大時刻に関しては、沿岸部の都市では最大でも2分程度の差異で

あり、Point\_01~Point\_11では最大で1分程度の差異しか認められない。しかし、津波が到達してから約2時間前後までは両者の計算結果に差異を認められないが、それ以降になると少しずつ差異が見られる。この差異は、各地点において反射波が到達するような時刻前後から差異が生じ始めていることから、座標系の差異により沿岸に到達する津波の入射角とその反射波の反射角が異なることによる反射の影響の差異、両モデルが用いている陸域と海域との境界における処理のスキームの差異が影響していると考えられる。

## 2.5 非線形性の効果

非線形性の効果を検討するため、デカルト座標系で記述された線形長波方程式モデルと非線形長波方程式モデルの計算結果の比較を行なった。

最大水位に関する線形長波方程式モデルの計算結果および非線形長波方程式モデルの計算結果を、それぞれ図-2.5(d)および図-2.5(e)に示す。両者の計算結果には大きな差異は認められない。

次に、図-2.8(a)および図-2.8(b)に代表地点における水位の時系列変化に関する計算結果を、また、表-2.5に最大水位、津波到達時刻および第1波の極大時刻の計算結果を示す。水深50mのPoint\_08や沿岸部の点および水深74mのPoint\_11といった浅海部を除いた代表地点では、最大値に関しては1cm以下の差異しか認められず、第1波のみを対象とした場合では、Point\_8やPoint\_11においても差異は無くなる。このため、第1波の到達時刻および極大値の発生時刻に関しては同一の時刻となった。

今回の計算からは水深100mよりも浅い海域では、非線形性を考慮することによって10%以上の差異が現れる場所が出てくるが、逆に首藤（1986）が記述しているように水深200m以深では非線形性を無視しても良さそうである。

## 2.6 STOCによる計算結果

デカルト座標系において定式化された基礎方程式に基づいたSTOCの適用性を検討するため、既存のデカルト座標系における非線形長波方程式モデルとの比較を行なった。

最大水位に関する線形長波方程式モデルの計算結果およびSTOCの計算結果を、それぞれ図-2.5(e)および図-2.5(f)に示す。両者の計算結果には明確な差異は認められない。

次に、図-2.9(a)および図-2.9(b)に代表地点における水位の時系列変化に関する計算結果を、また、表-2.6に

最大水位、津波到達時刻および第1波の極大時刻の計算結果を示す。Point\_08では地震発生から1時間半後から両者の間に差異が現れ始めるが、その他の地点では大きな差異を認められない。とくに、第1波や第2波までの波形では、すべての地点の水位変化に差異は認められない。

以上のことから、今回のインド洋津波を対象とした津波の外洋伝播に関しては、STOCが適用可能であると判断できる。なお、両計算結果の比較において、地震後1時間半してから差異が現れ始めたPoint\_08は、津波の初期波形において上昇する位置にあり、周りに点在する島々からの反射波などが複雑に干渉する地点であることをここに付記する。

### 2.7 津波到達時間に関する観測結果との比較

デカルト座標系で記述した線形長波方程式モデルによる津波伝播のスナップショットの計算結果を図-2.10に示す。スリランカ西部にあるColomboでの検潮記録によると、津波の最初の極大値は地震発生から180分後に到達するのにに対し、水深50m未満の沿岸を水深50mとして行った数値計算では170分となった。また、モルディブのMale'では地震発生から210分後に第1波における極大値が到達しているのに対し、計算結果では205分であった。ColomboやMale'の前面海域は急深な地形であるために、このように観測結果と計算結果は良く一致した。

一方、タイの沿岸、例えば、Phuketの北に位置するKuraburiにおいては、地震後190分後に引き波の極値が観測されたのに対し、今回の計算では145分後にそれは出現

した。試しに最小水深を50mから20mに浅くして津波の伝播計算を実施したところ、引き波の極値の出現時間は165分となった。タイ前面の海域のように浅い水深の海域が広がっているところでは地形の再現性が今回の計算結果のように到達時刻に大きな影響を及ぼすので、できるだけ詳細な地形データが必要である。

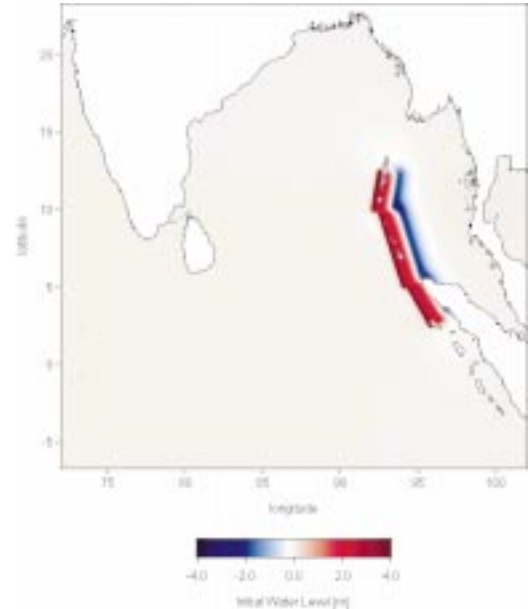


図-2.2 初期水位

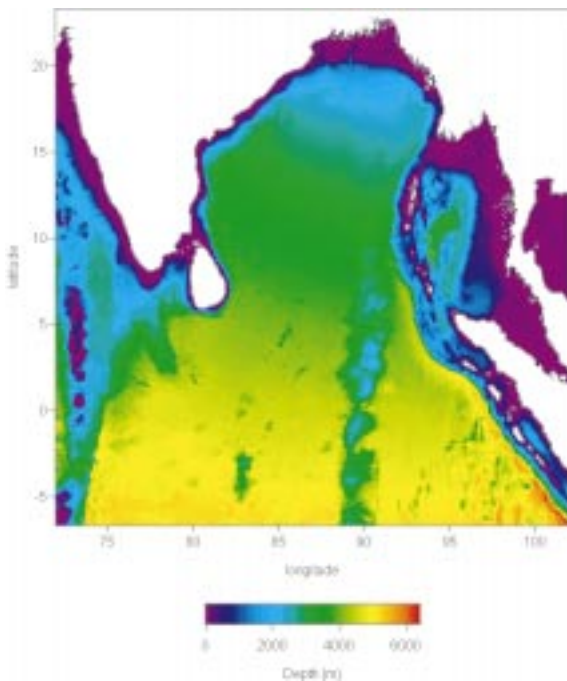


図-2.1 対象領域の水深分布

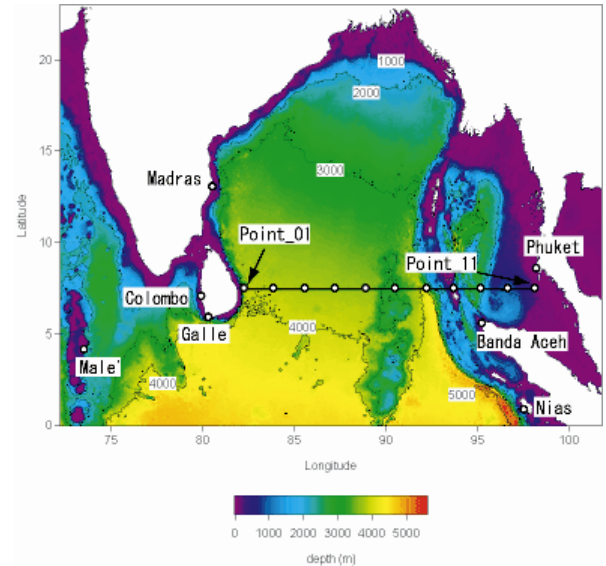


図-2.3 時間波形結果出力地点

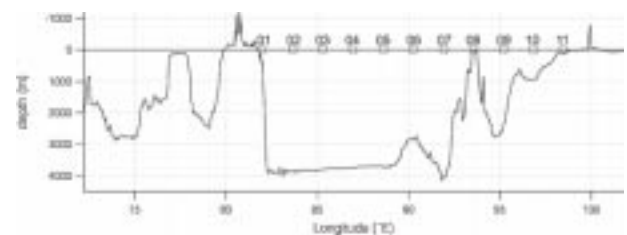


図-2.4 断面図



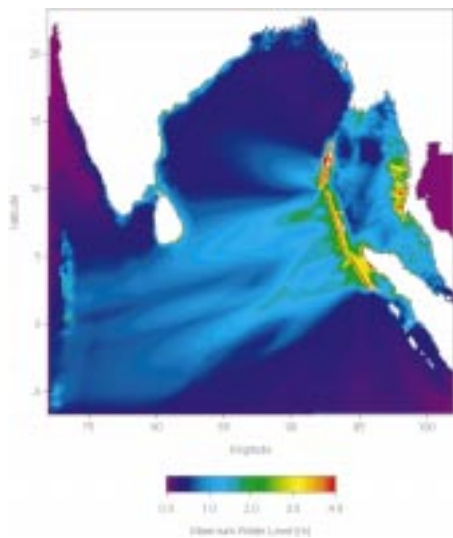


図-2.5(a) 線形分散波モデル, 球面座標系 (4分)

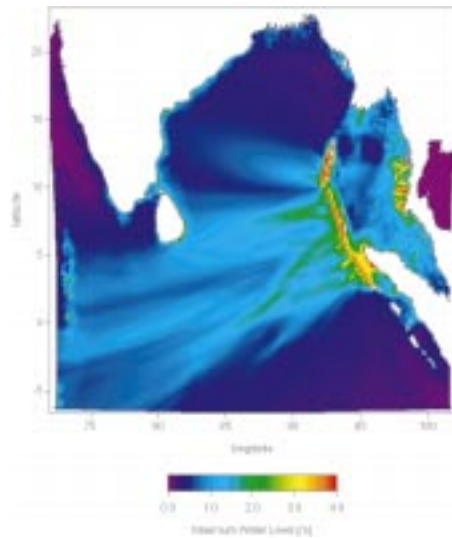


図-2.5(d) 線形長波モデル, デカルト座標系 (3645m)

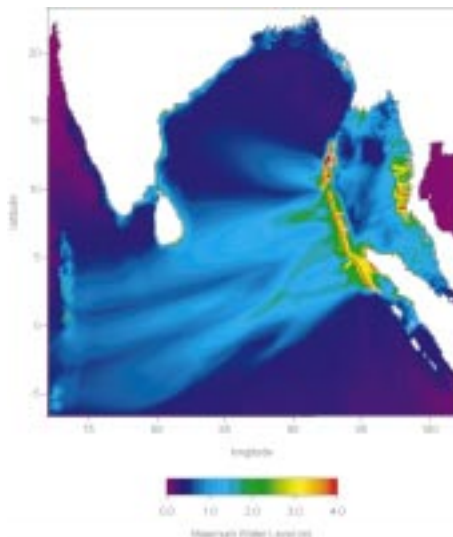


図-2.5(b) 線形長波モデル, 球面座標系 (4分)

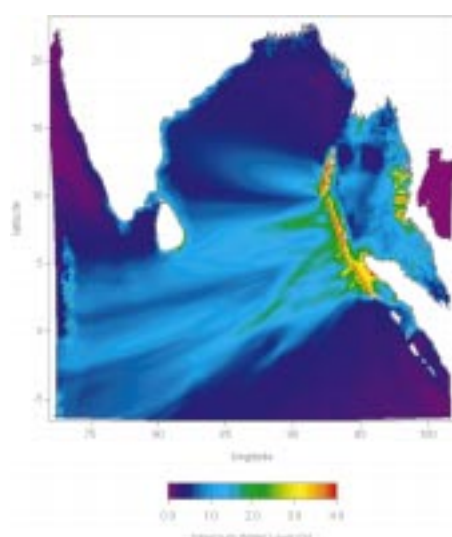


図-2.5(e) 非線形長波モデル, デカルト座標系 (3645m)

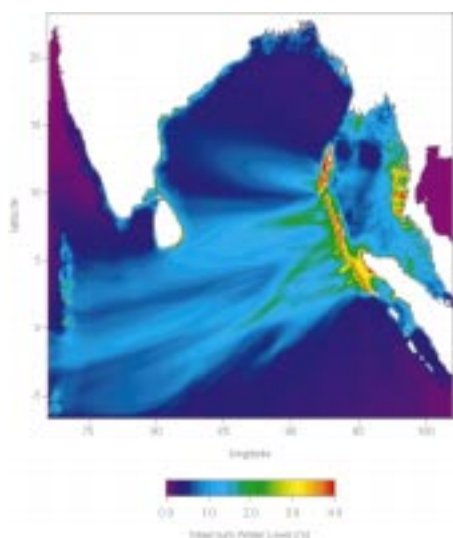


図-2.5(c) 線形長波モデル, 球面座標系 (2分)

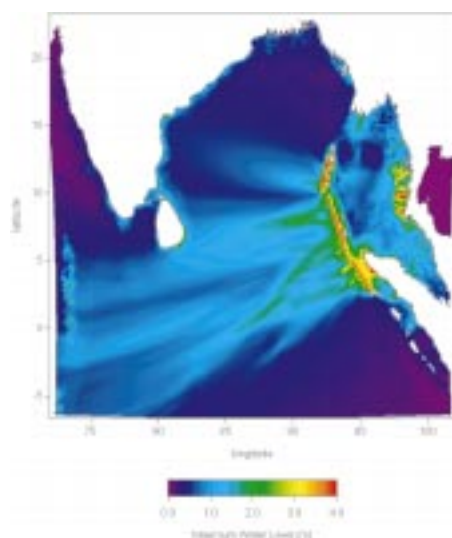


図-2.5(f) STOC, デカルト座標系 (3645m)

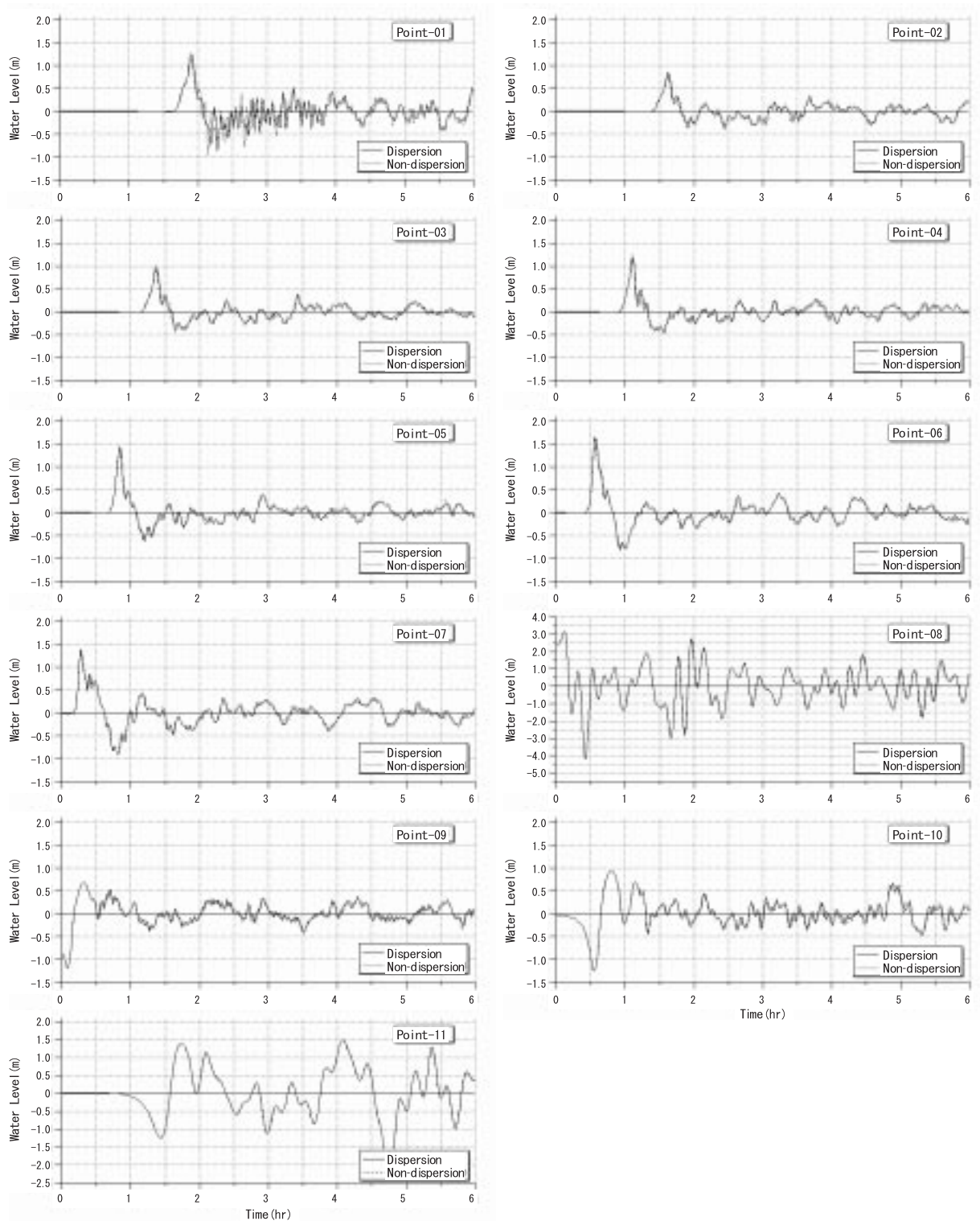


図-2.6(a) 分散項の効果 (Point\_01~Point\_11)

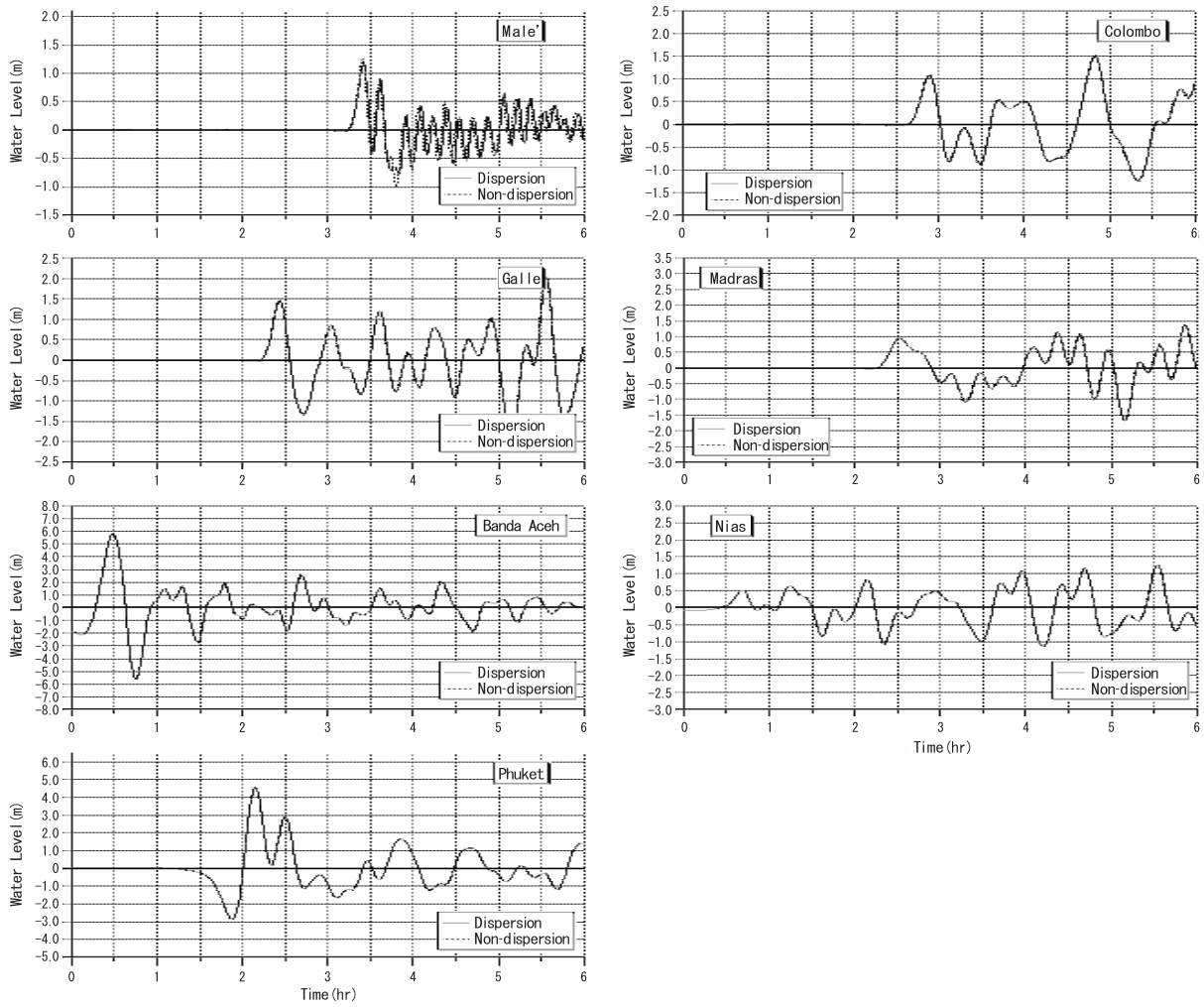


図-2.6 (b) 分散項の効果 (代表地点)

表-2.3 分散波理論モデルと長波理論モデルとの比較

(a) 最大水位

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
分散波理論 [m]	1.23	0.83	0.97	1.20	1.43	1.66	1.39	3.17	0.69	0.94	1.49	1.17	1.50	2.03	1.37	5.81	1.26	4.57
長波理論 [m]	1.27	0.85	1.02	1.26	1.45	1.66	1.35	3.17	0.69	0.94	1.47	1.26	1.52	2.06	1.35	5.82	1.24	4.55
差 [m]	0.04	0.02	0.05	0.06	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.09	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02
誤差 [%]	3.15	2.35	4.90	4.76	1.38	0.00	2.96	0.00	0.00	0.00	1.36	7.14	1.32	1.46	1.48	0.17	1.61	0.44

表-2.3 分散波理論モデルと長波理論モデルとの比較 (つづき)

(b) 到達時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
分散波理論 [min]	102	87	72	57	43	28	12	0	0	11	59	197	161	135	139	0	0	79
長波理論 [min]	102	87	72	57	43	28	12	0	0	11	59	197	161	136	139	0	0	79
差 [min]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
誤差 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

(c) 第1波目の極大値出現時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
分散波理論 [min]	115	98	83	67	51	34	17	7	19	48	104	205	174	146	152	29	41	129
長波理論 [min]	114	97	82	66	50	34	16	7	20	48	105	205	174	146	152	29	41	129
差 [min]	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
誤差 [%]	1	1	1	2	2	0	6	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0

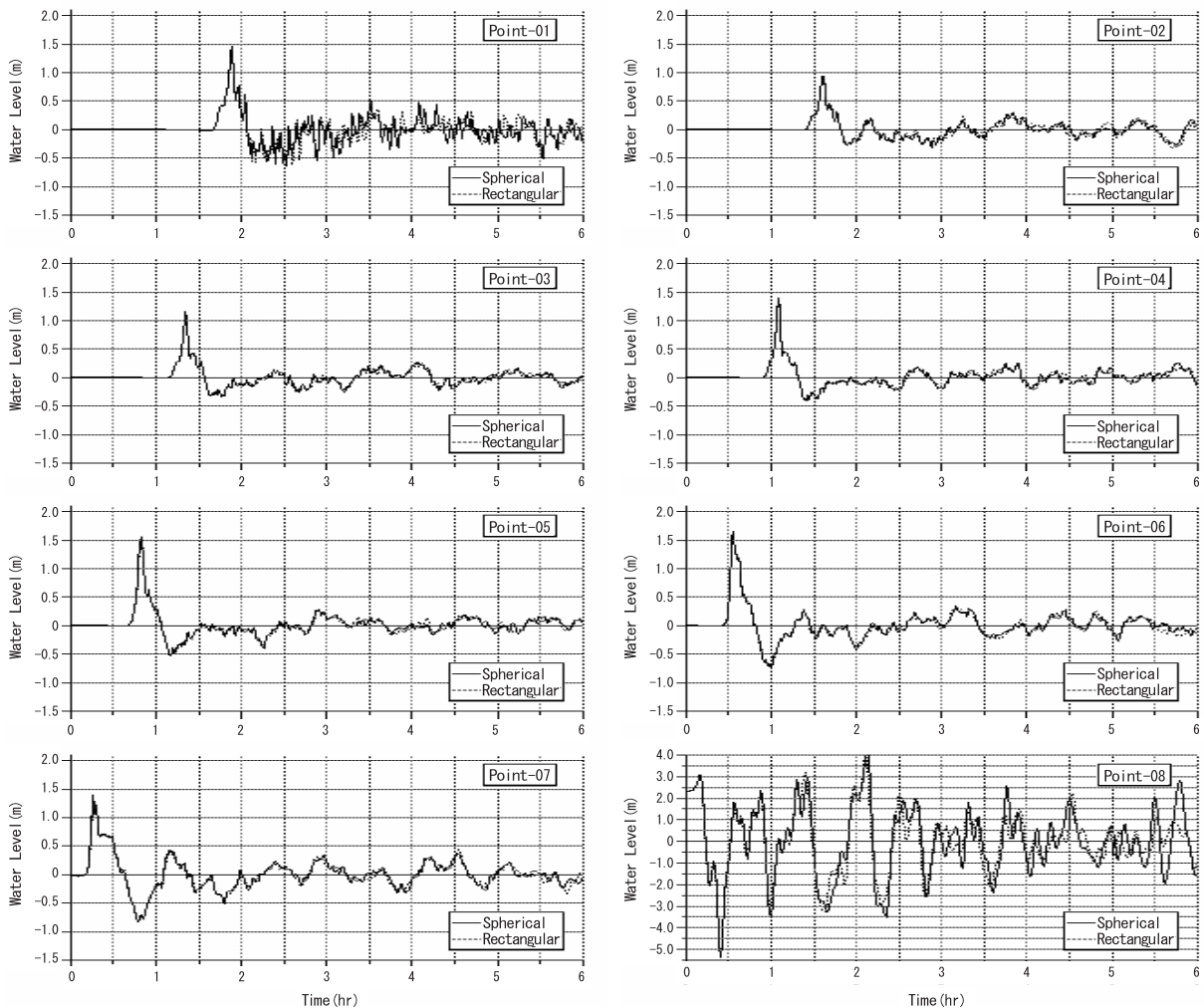


図-2.7(a) 球面座標系とデカルト座標系の比較 (Point\_01~Point\_11)

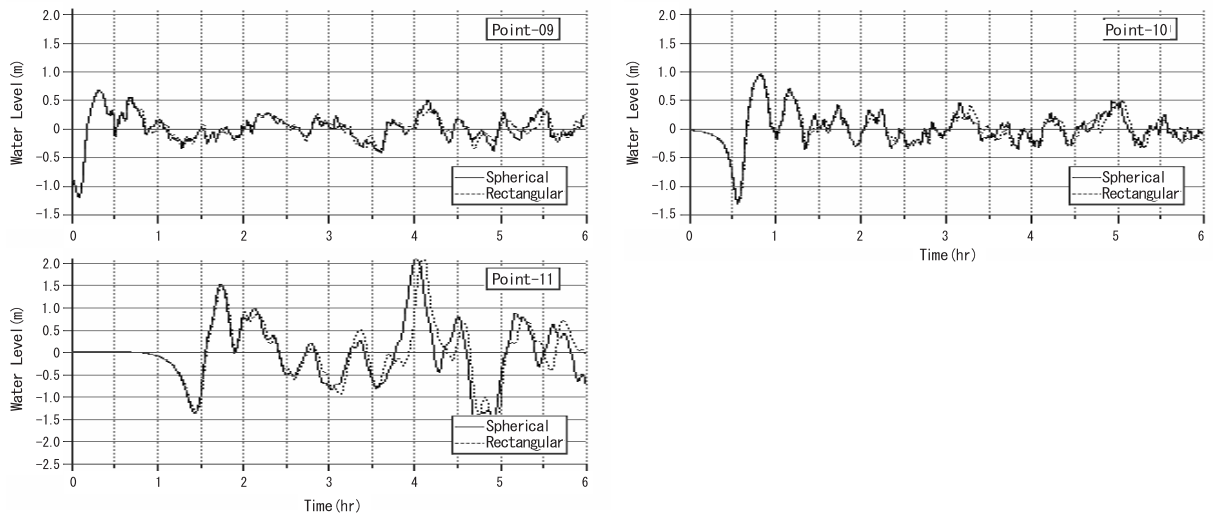


図-2.7(a) 球面座標系とデカルト座標系の比較 (Point\_01~Point\_11) (つづき)

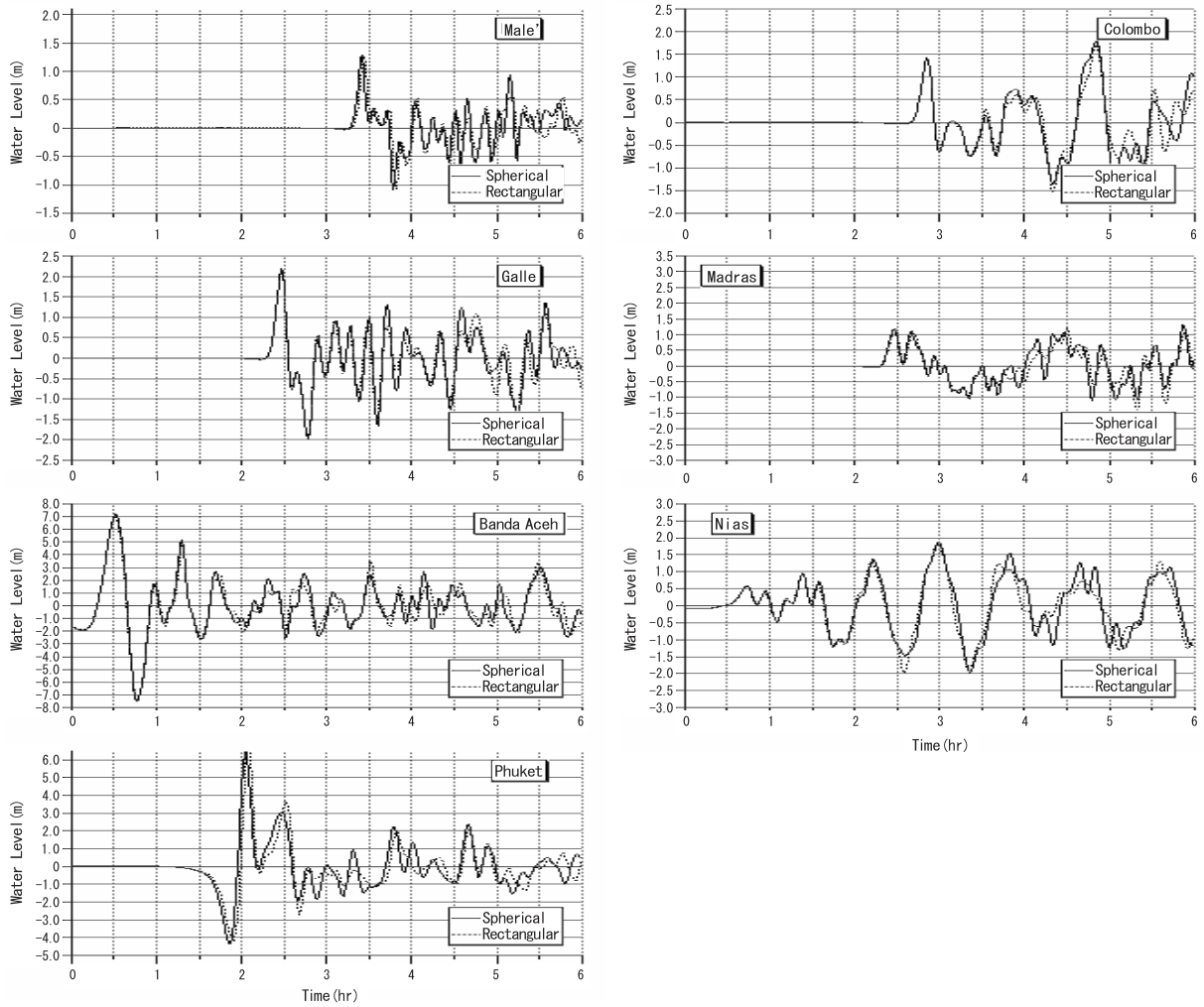


図-2.7(b) 球面座標系とデカルト座標系の比較 (代表地点)

表-2.4 球面座標系モデルとデカルト座標系モデルとの比較

(a) 最大水位

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
球面座標系 [m]	1.47	0.94	1.16	1.40	1.51	1.64	1.36	4.33	0.69	0.95	2.10	1.29	1.79	2.19	1.31	7.20	1.85	6.46
デカルト座標系 [m]	1.43	0.96	1.15	1.39	1.58	1.67	1.40	3.89	0.68	0.97	2.21	1.27	1.70	2.17	1.21	7.02	1.84	6.94
差 [m]	0.04	0.02	0.01	0.01	0.07	0.03	0.04	0.44	0.01	0.02	0.11	0.02	0.09	0.02	0.10	0.18	0.01	0.48
誤差 [%]	2.80	2.08	0.87	0.72	4.43	1.80	2.86	11.31	1.47	2.06	4.98	1.57	5.29	0.92	8.26	2.56	0.54	6.92

(b) 到達時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
球面座標系 [min]	102	87	72	57	43	29	13	0	0	12	59	198	162	139	140	0	0	78
デカルト座標系 [min]	103	87	72	57	43	29	13	0	0	12	60	200	162	139	141	0	0	79
差 [min]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	1
誤差 [%]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	1

(c) 第1波目の極大値出現時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
球面座標系 [min]	113	97	81	65	50	33	16	10	19	49	104	205	171	148	148	31	44	123
デカルト座標系 [min]	113	97	81	65	50	33	16	10	19	50	105	206	171	148	148	31	44	125
差 [min]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	2
誤差 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	2

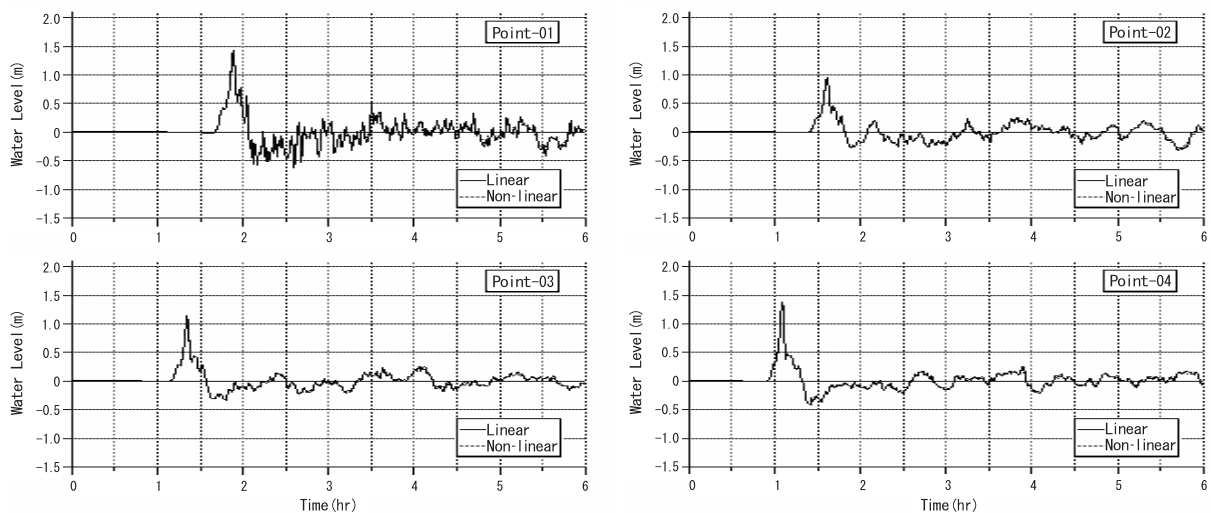


図-2.8(a) 非線形項の効果 (Point\_01~Point\_11)

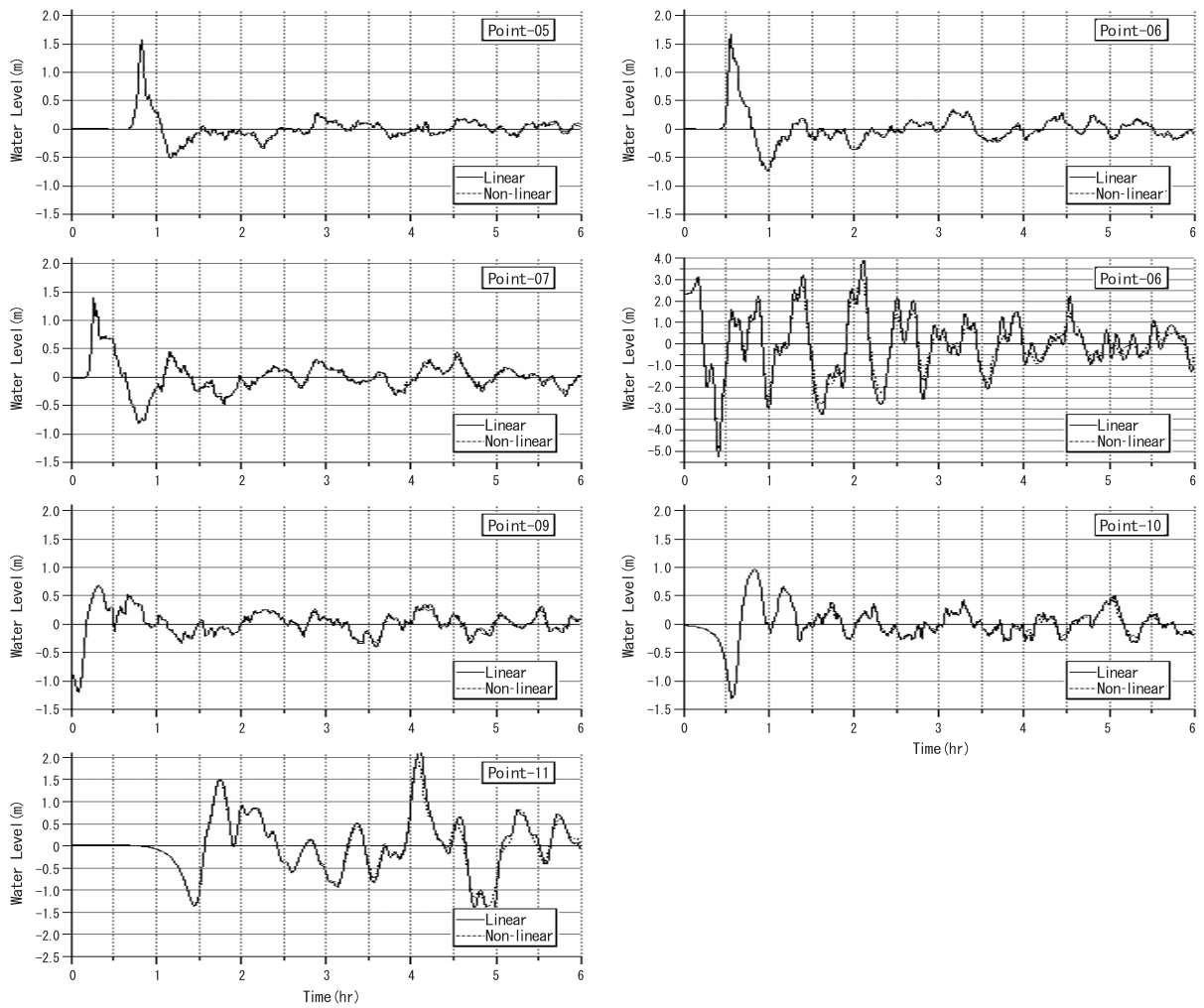


図-2.8(a) 非線形項の効果 (Point\_01~Point\_11) (つづき)

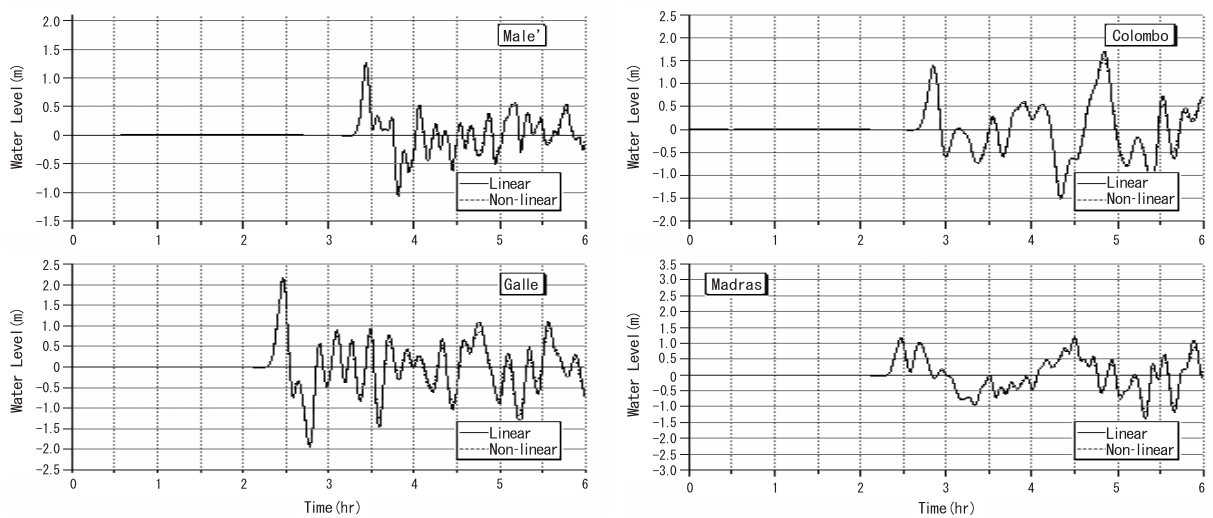


図-2.8(b) 非線形項の効果 (代表地点)

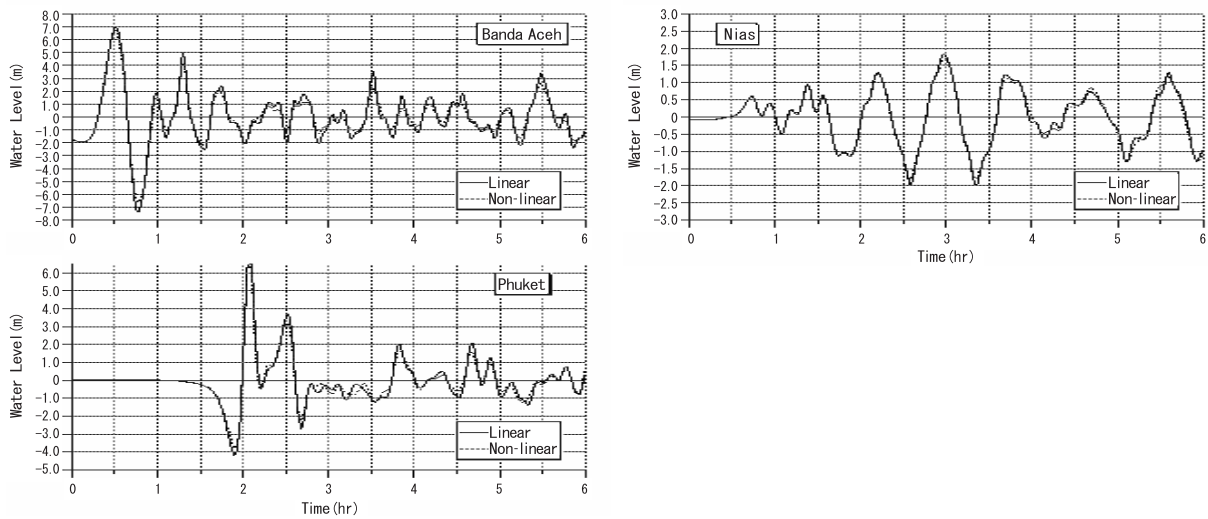


図-2.8 (b) 非線形項の効果 (代表地点) (つづき)

表-2.5 線形長波理論モデルと非線形長波理論モデルとの比較

(a) 最大水位

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
線形長波理論 [m]	1.43	0.96	1.15	1.39	1.58	1.67	1.40	3.89	0.68	0.97	2.21	1.27	1.70	2.17	1.21	7.02	1.84	6.94
非線形長波理論 [m]	1.43	0.95	1.15	1.39	1.58	1.67	1.40	3.10	0.68	0.97	1.98	1.26	1.55	2.16	1.16	6.76	1.71	6.95
差 [m]	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.23	0.01	0.15	0.01	0.05	0.26	0.13	0.01
誤差 [%]	0.00	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.48	0.00	0.00	11.62	0.79	9.68	0.46	4.31	3.85	7.60	0.14

(b) 到達時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
線形長波理論 [min]	103	87	72	57	43	29	13	0	0	12	60	200	162	139	141	0	0	79
非線形長波理論 [min]	103	87	72	57	43	29	13	0	0	12	59	200	162	139	141	0	0	79
差 [min]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
誤差 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0

(c) 第1波目の極大値出現時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
線形長波理論 [min]	113	97	81	65	50	33	16	10	19	50	105	206	171	148	148	31	44	125
非線形長波理論 [min]	113	97	81	65	50	33	16	10	19	50	105	206	171	148	148	30	44	124
差 [min]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
誤差 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1



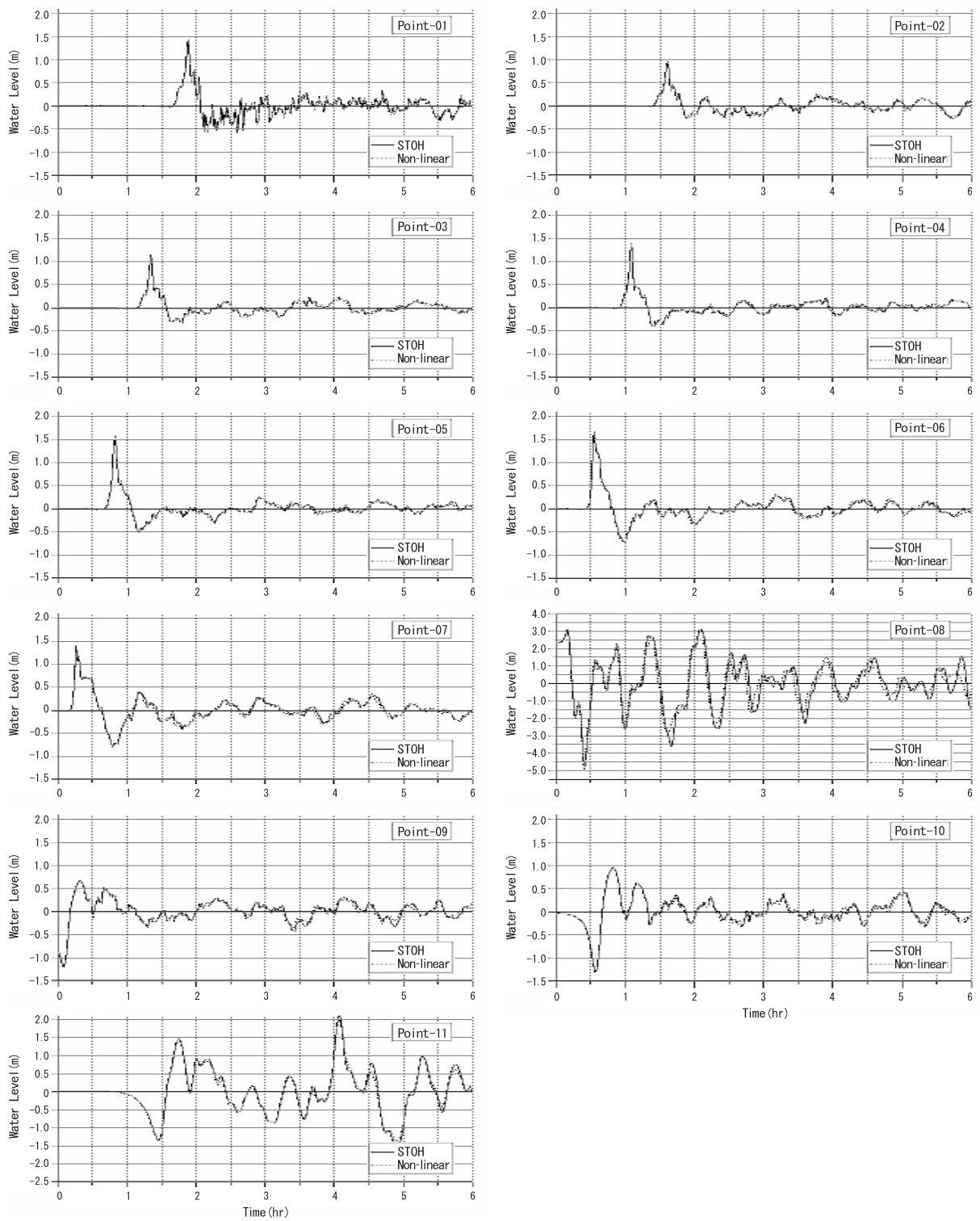


図-2.9(a) STOC の計算結果 (Point\_01~Point\_11)

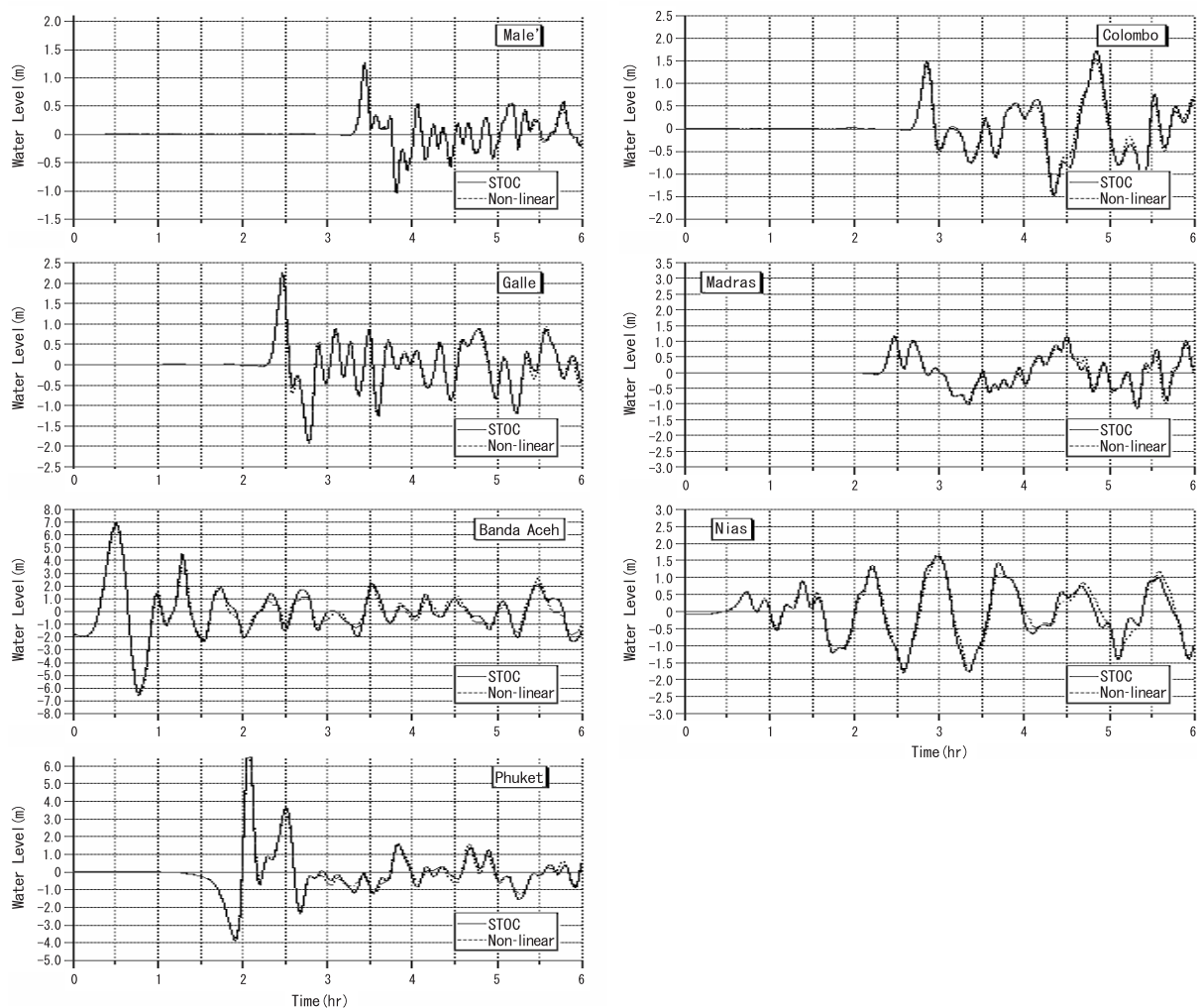


図-2.9(b) STOC の計算結果 (代表地点)

表-2.6 非線形長波理論モデルと STOC との比較

(a) 最大水位

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
非線形長波理論 [m]	1.43	0.95	1.15	1.39	1.58	1.67	1.40	3.10	0.68	0.97	1.98	1.26	1.55	2.16	1.16	6.76	1.71	6.95
STOC [m]	1.43	0.95	1.15	1.40	1.57	1.67	1.40	3.10	0.68	0.96	2.12	1.27	1.72	2.25	1.17	6.91	1.62	7.65
差 [m]	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.14	0.00	0.17	0.09	0.01	0.15	0.09	0.69
誤差 [%]	0.14	0.42	0.44	0.43	0.45	0.24	0.21	0.06	0.59	0.94	6.56	0.40	9.88	4.04	0.85	2.11	5.49	9.09

(b) 到達時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
非線形長波理論 [min]	103	87	72	57	43	29	13	0	0	12	59	200	162	139	141	0	0	79
STOC [min]	103	87	72	57	43	29	13	0	0	12	60	200	162	139	141	0	0	79
差 [min]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
誤差 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0

表-2.6 非線形長波理論モデルと STOC との比較 (つづき)

(c) 第1波目の極大値出現時刻

	Point											Male'	Colombo	Galle	Madras	Banda Aceh	Nias	Phuket
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11							
非線形長波理論 [min]	113	97	81	65	50	33	16	10	19	50	105	206	171	148	148	30	44	124
STOC [min]	113	97	81	65	50	33	16	10	19	50	105	206	171	148	148	30	44	124
差 [min]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
誤差 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

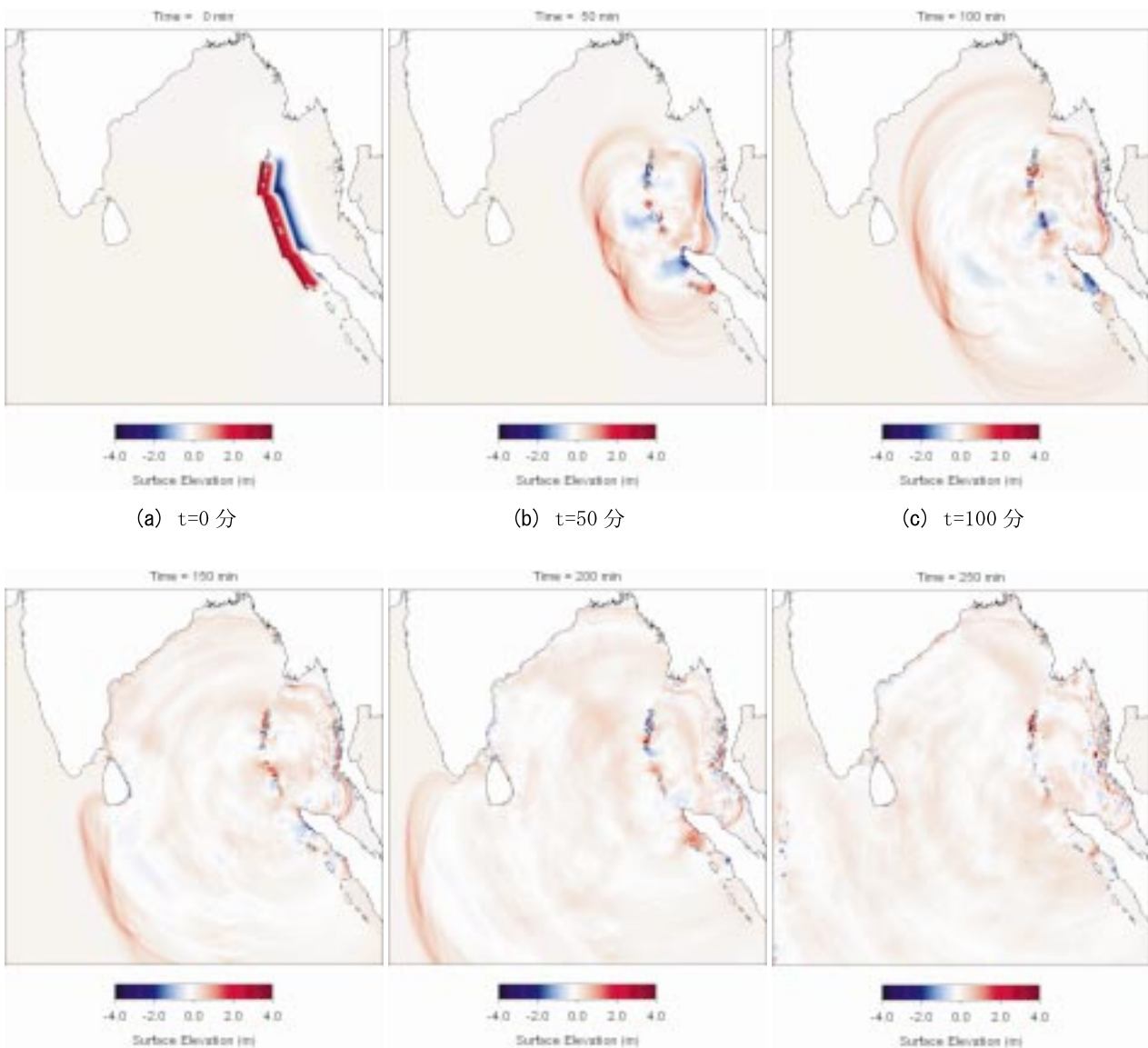


図-2.10 津波の伝播 (線形長波モデル, デカルト座標系)

### 3. スリランカにおける現地調査

#### 3.1 調査概要

・調査員

港湾空港技術研究所	富田孝史	室長
	有川太郎	主任研究官
京都大学防災研究所	河田恵昭	教授
	安田誠宏	助手
東北大学	今村文彦	教授

・現地協力者

日本港湾コンサルタント	市菌敏郎	所長
若築建設	辰巳正弘	所長

・調査日程

- 1月3日：
  - スリランカ到着
- 1月4日：
  - 日本港湾コンサルタントにて情報収集
  - モラトゥワ大学 Hettiarachchi 教授と面談
  - コロombo港, モラトゥワ調査
- 1月5日：
  - ウェリガマ, コガラ, ゴール, ドダンドゥーフ調査
- 1月6日：
  - ヒッカドゥーフ, カハワ, アンバラングダ, ベルワラ, ペイヤガラ, パナドゥラ調査
- 1月7日：
  - Hettiarachchi 教授などのスリランカ研究者に対し現地調査報告および日本の津波への取り組みへの紹介
  - 横浜国立大学柴山教授を団長とする調査団への情報伝達
  - スリランカ出国
- 1月8日：
  - 帰国

#### 3.2 津波被害

図-3.1は調査地点における調査時の海面を基準として測量した津波の痕跡高さを取りまとめたものである。津波の来襲方向から見ると調査地域は島の反対側に位置するが、津波は島の背後にも回り込んで海岸に来襲した。津波痕跡高さから判断すると、スリランカの南西海岸に来襲した津波高さは平均的には4~5mであったと考えられる。この津波により広い範囲の沿岸低地が浸水し、多くの人的被害が発生した。

以下に各調査地点における具体的な地形と合わせて津波の痕跡高さを示す。

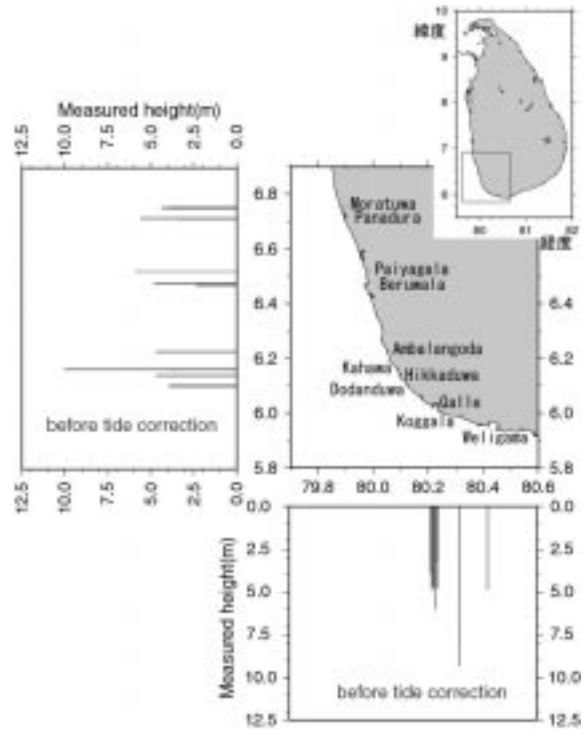


図-3.1 スリランカ南西海岸における津波の痕跡高さ (スリランカ調査団の測量結果を秋田大学松富教授団長のタイ調査団のメンバーである電力中央研究所の松山昌史氏がタイの結果と同様な形式で図化したものである)

##### (1) モラトゥワMoratuwa

図-3.2および図-3.3は、モラトゥワにおける一連の海岸において護岸があるところ(写真-3.1)と無いところ(写真-3.2)における津波の痕跡高さを示したものである。護岸が前面にある場合では海面上4.40mの高さに水跡があった。一方、前面が砂浜になっているところでは3.80mを境にそれより上では窓ガラスが割れずに残り、それよりも下の板壁が抜けてしまっていた。すなわち、津波の遡上高さとして海面上3.80mであると考えられる。両者の比較において、護岸の有無による津波遡上高さの差異は顕著ではない。

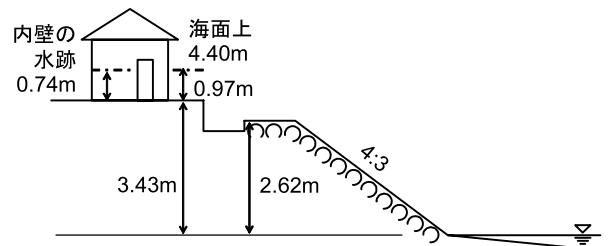


図-3.2 護岸背後の痕跡高さ



写真-3.1 図-3.2の周辺状況（撮影：富田）



写真-3.3 壁に残る水跡（撮影：富田）

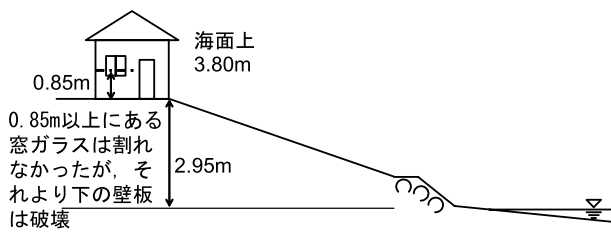


図-3.3 海岸背後の痕跡高さ



写真-3.4 床が破壊した建物（撮影：富田）



写真-3.2 図-3.3の周辺状況（撮影：富田）



写真-3.5 侵食された護岸背後の地盤（撮影：富田）

(2) パナドゥラPanadura

海から86m、横の川から24mの所に位置する建物の壁の海面上3.34m（地上から1.45m）の高さに水跡が残っており、さらに屋根の一部がなくなっていた（写真-3.3）。その高さは海面上5.59m（地上から3.70m）であった。

また、津波の揚圧力により床板が破壊したと思われる建物もあった（写真-3.4）

(3) ペイヤガラPaiyagala

海面から1.8m程度の高さの地盤上において建設途中であった建物の2階の内壁に水跡（海面上5.95m）が残っていた。この建物の海側では、写真-3.5に示すように護岸背後の地盤が約0.7m侵食され、植生も根から倒れていた。

(4) ベルワラBeruwara

防波堤で防護されたベルワラ漁港では、海面上1.0mの高さの岸壁背後にある荷さばき施設の壁の海面上2.35m（地盤上1.58m）の高さに水跡が残っていた。この高さは、後述する漁港の外の海岸における痕跡高さよりも2.47mも低い。この低い津波により漁港施設に大きな被害がなかったことに加え、背後地区では、写真-3.6に示すように他の場所では津波後に残存しなかったレンガ造りの

建物が残っていた。すなわち、防波堤などの港湾の施設が津波を低減させ、背後地域を防護したことの現れであると考えられる。



写真-3.6 漁港背後のレンガ造りの家（撮影：富田）

ベルワラ漁港に隣接する北側の海岸では、写真-3.7に示すように漁船が海岸に乗り上げていた。住民の話では海岸に打ち上げられた漁船はベルワラ漁港から津波により引き出されたものであるとのことであった。この場所における津波の痕跡は見つけられなかったが、海岸から50m離れ、海岸に面した道路から緩やかに上る斜面の途中にある店舗の話では、店舗の敷石まで津波が来襲したとのことであり、その高さは海面上4.82mであった。



写真-3.7 海岸に打ち上げられた漁港内にあった漁船（漁船背後はベルワラ漁港の防波堤）（撮影：富田）

(5) アンバランゴダ Ambalangoda

アンバランゴダでは、勾配1/10の海岸に続く沿岸の集落において海岸線に面した家々が津波により被害を受けた。そこでは、海岸から50m離れた所にある家屋の内壁の海面上4.72m（地上3.22m）の高さに水跡があった。

集落の背後には幹線道路とそれに平行して鉄道が通っており、道路は大きな被害を受けていなかったが、鉄道は写真-3.8に示すように、鉄道の基礎地盤が津波による

洗掘を受け、さらに線路が大きく曲がるなどの被害があった。図-3.4に示すように、鉄道の海側の建物には被災の様子は認められなく、橋の脇（写真-3.8の奥の線路が高くなっているところ）周辺において洗掘が激しいことから、この津波による洗掘は海岸から来襲した津波によるものではなく、湖沼から海に接続する水路を遡上した津波もしくはその戻り流れによるものであると考えられる。なお、このスリランカ南西海岸を走る鉄道はここだけではなく他の幾つかの場所でも被害が発生していた。



写真-3.8 線路の基礎地盤の洗掘（撮影：富田）

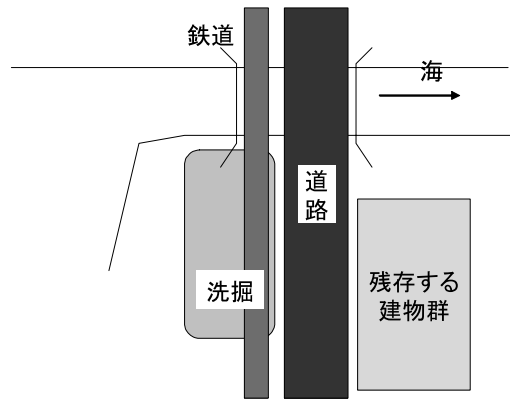


図-3.4 写真-3.8の周辺の概要

(6) カハワ Kahawa

図-3.5は、カハワにおける津波の痕跡高さの測量結果である。海岸から228m離れたヤシの木に付着した津波により流された海産物の高さは、海面上10.04mであったが、近傍にあった2階建ての建物に残っていた水跡は、海面上4.08mであった（写真-3.9）。局所的に津波は高くなることや、ヤシの木は強い水流によりたわむ場合があることなどを考慮すると、この地域にも他の南西海岸と同様に平均的には4～5m程度の高さの津波が海岸に押し寄せたと考えられる。この場所では、水際線から188m内陸のと

ころを走る列車が津波の第1波による浸水により停車し、その列車に沿岸の住民が逃げ込んだ。しかし、その後押し寄せた津波の第2波がその列車を押し流したため、1000名以上の犠牲者が出る大きな被害が発生した（写真-3.10）。

図-3.5からわかるように、この地域は海岸から内陸に向かって下り勾配（傾斜角1/400）になっている。この下り勾配の影響により流速が増大することなどが模型実験から検討されている（富田ら、2005）

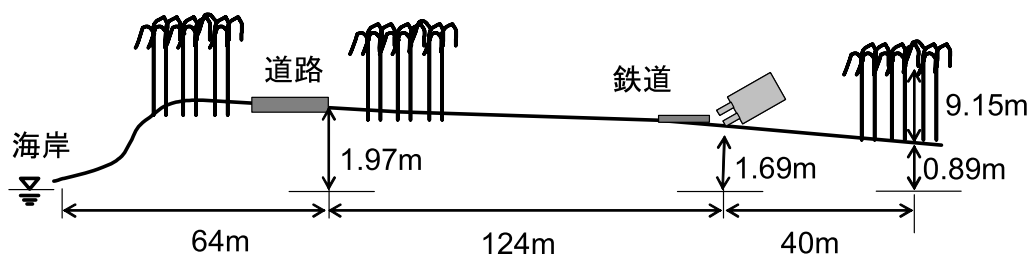


図-3.5 Kahawaにおける津波痕跡



写真-3.9 建物に残る津波の水跡（撮影：今村）



写真-3.10 津波により被災した列車（撮影：安田）

#### (7) ヒッカドゥワHikkaduwa

ヒッカドゥワ漁港では、写真-3.11に示すように防波堤のうへに漁船などが打ち上げられており、漁港内では建物の2階で膝下程度にあたる海面上4.73mの高さの内壁に水跡があった。ただし、周辺の海岸で見られたような破壊的な状況は漁港内では認められなかった。

#### (8) ドダンドゥワDodanduwa

沿岸の漁村が被災した。沿岸の家屋のなかの壁の海面上3.88mの高さに水跡が残っていた。また、住民の話によると、橋の上（海面上3.0m）を走っていたオートバイ2台が津波により押し流されたとのことであった。

#### (9) ゴールGalle

写真-3.12は、ゴール港における港湾施設の被災状況を示したものである。この地点は、防波堤背後で港湾の最も奥まった場所であり、護岸の一部が被災していた。防波堤は1～2m程度の直径の石を積み上げた形式のもので、



写真-3.11 防波堤に乗り上げた漁船（撮影：富田）

若干の変形が認められるが大きな被害は発生していなかった。またこの他では、岸壁などの被災は見あたらなかった。この周辺にある倉庫の内壁には海面上5.28m（陸上3.04m）の高さに水跡が残っており、さらに内陸に190m

離れたところにある港湾事務所の外壁には海面上6.03m（陸上2.70m）の高さに水跡があった。また、岸壁には、写真-3.13に示すように、浚渫船（1169トン）が乗り上げていた。こういった津波痕跡高さなどから、この周辺には5～6mの津波が来襲したと考えられる。



写真-3.12 港湾の施設の被災（撮影：市菌）



写真-3.13 岸壁に打ち上げられた浚渫船（撮影：市菌）

ゴール港の東にある海岸における津波痕跡高を図-3.6および図-3.7に示す。これらの場所は海岸に沿って20m程度しか離れておらず、海岸からの距離については、海岸の建物が残存する場合に海岸からの距離を測量していないが海岸を走る道路との関係や地図から推察するとほぼ同程度であると考えられる。両者の比較から分かるように、海側の建物の状況により陸上の浸水高さは3倍以上異なっている。図-3.6の痕跡を測量した地点から海側を見たときの状況を写真-3.14に、同様に図-3.7に対応するのが写真-3.15である。写真-3.14では、連続して建物が残っているのに対し、写真-3.15では沿岸の建物が大破して海が見通せる状況である。

ゴール港の西側に位置する海岸では、海岸から54m離れた所にある家屋の内壁に水跡があった。その高さは、海面上4.71m（地盤上1.75m）であった。



図-3.6 海側に建物が残存した場所の痕跡高さ

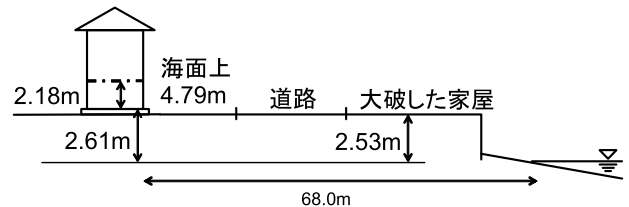


図-3.7 海が見通せる場所の痕跡高さ



写真-3.14 図-3.6に示した海沿いの残存した建物（撮影：富田）



写真-3.15 図-3.7に示した大破した建物（撮影：富田）

また、ゴールのバスターミナル周辺では、建物の内壁の海面上3.93m（陸上2.30m）の高さに水跡が残っていた。この場所において津波来襲時に撮影されたビデオ映像では、津波による浸水は西側から始まり、その後東側からの強い流れが襲った。バスターミナルの西側（図-3.8）には写真-3.16に示すような河川があり、河川を遡上した津波が最初の浸水をもたらしたと考えられる。



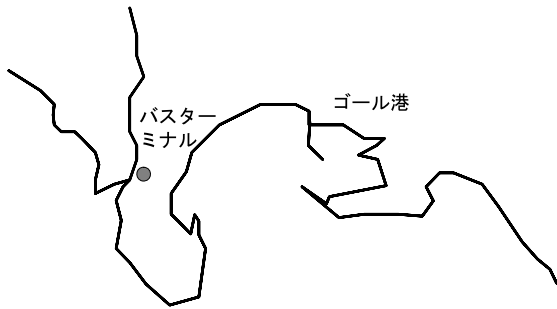


図-3.8 ゴールの概略 (図の上が北)



写真-3.16 バスターミナル脇の河川 (撮影：河田)

(10) コガラKoggara

コガラ沿岸では、海岸から64m離れた建物の屋根に痕跡があり、その高さは海面上9.3mであった。

(11) ウェリガマWeligama

図-3.9に示したように海岸脇をはしる道路から斜面を登ったところにある店舗の人が目撃した津波の遡上位置の高さは、海面上4.86mであった。

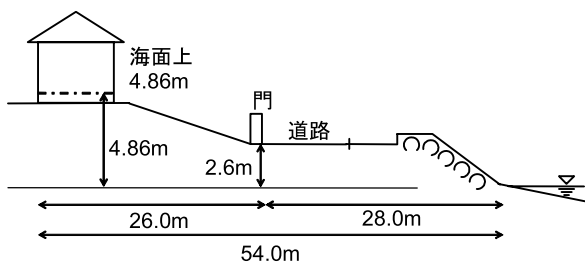


図-3.9 ウェリガマでの津波痕跡高さ

3.3 津波到達時刻と来襲津波の数

住民からのヒアリング結果を総合すると、スリランカ南西海岸には津波は3度来襲した。モラトゥワでは、現地時間9:30AM (世界標準時3:30UTC) に津波の第1波が、その30分後に第2波が来襲し、第2波目が一番大きかったとのことであった。この話に基づくと、津波の第1波目はスマトラ島沖で0:59UTC頃に発生した地震から2時

間半後にスリランカ南西部に達したことになる。モラトゥワより北に約20km離れたコロombo港の検潮所では、3:50UTCに津波による海面上昇が始まり、海水位変動の極大値は4:00UTCに出現している。すなわち、津波の伝達時間は180分である。位置的なずれ以上に津波の出現時刻に差があるように思われる。ただし、検潮記録では欠測のため津波の周期は把握できなかったが、このヒアリング結果より約30分程度であったことが分かる。

南部のゴールでは、津波の第1波目は顕著でない押し波として来襲し、それに伴う引き波は顕著であったとの証言があった。さらに、ゴールの高台から津波を目撃した人の話では、第1波目の引き波によりゴール港の防波堤沖にあるブイ (写真-3.17) の有る水深12m地点の海底が露出し、その後に大きな第2波が来襲したとのことであった。



写真-3.17 ゴール港と沖のブイ

4. モルディブにおける現地調査

4.1 調査概要

津波は、震源から2000km離れ、南北に800kmにわたる環礁に1190の島から成るモルディブにも来襲した。環礁の島々であるために標高は最大で1.8mと低い国土であるのに対し、津波の高さは1~3m程度の範囲で分布していたことが調査から判明した。この津波によるここでの死者・行方不明者は108名である。島によっては全島が津波による浸水被害を受けており、標高の低い島での避難対策を考えさせられる国である。

・調査員

防衛大学校	藤間功司	教授 (団長)
	嶋原良典	助手
港湾空港技術研究所	富田孝史	室長
	本多和彦	研究官
茨城大学	信岡尚道	助手
(株)テトラ	半沢 稔	氏
(株)アイ・エヌ・エー	藤井裕之	氏

(株)大成建設 大谷英夫 氏  
(株)パシフィックコンサルタンツ・インターナショナル  
折下定夫 氏

・現地協力者

(株)若築建設 辰巳正弘 氏  
永野陸弘 氏  
杉田依久 氏

・調査日程

1月31日:

モルディブ到着

2月1日:

外務省で打ち合わせ

国家災害管理センターで打ち合わせ

交通省で打ち合わせ

環境建設省で打ち合わせ

マレ Male'島の浸水域調査

2月2日:

グループ A:

モルディブ国際空港で情報収集

同空港およびフルフマレ Hulhumale'調査

グループ B:

バアブ Vaavu 環礁ケヨドゥー Keyodhoo 調査

メエム Meemu 環礁ムリ Muli 調査

ダアル Dhaalu 環礁リブドゥー Ribudhoo, ゲメンド  
ゥー Gemendhoo 調査

2月3日:

グループ A:

セエヌ Seenu 環礁ヒッタドゥー Hittadhoo, マラド  
ゥー Maradhoo, フェイドゥー Feydhoo, ガン Gan 調  
査

グループ B:

ラムー 環礁カドゥー Kaddhoo, フォナドゥー  
Fonadhoo, マンドゥー Manndhoo, ガン Gan 調査

グループ C:

ハダール Haa Dhaalu 環礁ハニマドゥー  
Nanimaadhoo, クルフドゥフシ Kulhudhuffshi 調査

2月4日:

グループ A:

南マレ Male'環礁ラグナ Laguna ビーチリゾート,  
バドゥー Vadoo アイランドリゾート, エンブドゥ  
Embudu ヴィレッジ調査

グループ B:

マレ Male'島調査

国家災害管理センターにてモルディブ政府に向け  
て現地調査報告と津波対策の紹介

モルディブ出国

2月5日:

帰国

## 4.2 津波被害

### (1) 概況

モルディブは南北に800kmの範囲に広がる島々で構成されており、1~3mの津波が来襲した(藤間ら, 2005)。調査結果(Fujima et al., 2005a)によると、津波の高さは環礁の外側の島の方が内側の島よりも高くなるという傾向は必ずしも認められず、例えば、ダアル環礁の北西内部にあるリブドゥーでは、津波来襲時の海面から3.18mの高さに水跡が残っていた。同環礁の東端にあって沖合からの津波が来襲するゲメンドゥーでの津波の痕跡高さは3.17mであった。

### (2) マレ Male'

モルディブの首都Male'島も津波により浸水した。しかし、死者は発生しなかった。浸水状況を把握するために島内を歩き回って浸水域図を作成した。図-4.1(Fujima et al., 2005a)は、モルディブ政府から提供された図に破線による閉曲線で浸水域の境界を書き加えたものである。図中の実線の閉曲線はマレ島の元の島の形(埋め立て前の形)であり元の図に記載されていたものである。

調査の結果、浸水域の境界は概ね地盤高MSL+1.1mの所にあり、道路を横断する高さ10cmほどの凸状の車止め(速度抑制対策)などが境界を形成していたことが判明した。このことは、海岸を越波・越流した海水の総体積がMSL+1.1mラインまでの低地の体積と一致した結果であると考えられる。

マレ島の北側の一部は浸水被害を免れているが(写真-4.1)、これは天端の高い護岸(MSL+1.9m)によって津波による越波・越流が防止されたためである。調査団の

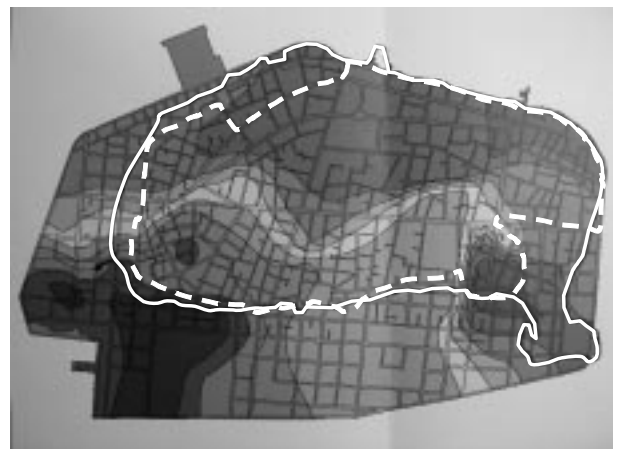


図-4.1 マレ島における浸水域(図の上が北)



写真-4.1 マレ島北東部の護岸（提供：Mr. Todd Rempel）

一員が護岸や離岸堤の有無の条件を変えて行った数値計算（大谷ら，2005）から，護岸や離岸堤の存在が浸水を低減させたことは明らかになった。ただし，今回の津波が平均潮位の際に来襲したのに対し，もし平均潮位よりも0.5m程度高い満潮時に来襲してれば，護岸や離岸堤があってもマレ島全島が浸水する結果となった。

また，浸水境界と島の元の形を比較すると，両者の形は非常によく似ており，埋め立て地が主に浸水されたことが分かる。

### （3）国際空港島

国際空港島は，平均潮位上1.7m以上の高さがあるが，西側では局所的に1mよりも低いところがある。また，高波が来襲する場所であるため，高波による越波を防ぐために護岸が，津波来襲前から整備されていた。外海に面する護岸の高さは平均潮位上2.0m～2.7mである。

モルディブ空港株式会社からのヒアリング結果によると，津波により空港の2/3が浸水し，滑走路が約10時間閉鎖された。この閉鎖は津波による土砂流入や様々な漂流物があったためである。さらに，滑走路のライトが回復するのに18時間要した。写真-4.2から写真-4.5は津波来襲時の空港である。



写真-4.2 浸水した国際空港の全景  
（提供：Mr. Todd Rempel）



写真-4.3 浸水した国際空港の東部  
（提供：Mr. Todd Rempel）



写真-4.4 陸上に遡上した海水の流出  
（提供：Mr. Todd Rempel）



写真-4.5 国際空港の浸水時の状況  
（提供：Mr. Todd Rempel）

図-4.2は、国際空港島において測量した津波痕跡高さをまとめたものである。これより、来襲した津波の高さはおおよそ2mであったことがわかる。Point 7（図中【7】として記載、以下同じ）からPoint 9は、空港島の北側および東側に位置する内水域の最も奥に位置する場所であり、そこでは空港島において最も高い津波の痕跡が見つかった。これは、東（図の右側）から来襲した津波が空港島北東部にある水深の浅い環礁上の海（図の濃い灰色の部分）を通過し、それから空港島の北に位置する比較的水深の深い内水域を南に伝播し、それが内水域の奥部で反射して津波が増大したためであると考えられる。すなわち、局所的な地形及び水深が津波の挙動に大きな影響を及ぼしている。

図-4.3は、津波による構造物の被害を取りまとめたものである。最も被害が出たのは、図中の上方に示したフルフマレとの連絡道路と空港島に挟まれた内水域に面する場所であり、津波が高かった場所に一致する。

空港島の隣接するフルフマレ（図-4.2においてPoint

12-1や12-2がある島）では、セメントバックによる護岸が写真-4.6に示すように所々被災していた。海岸から15m離れた所まで津波により押し流されたセメントバックもあったが、ほとんどの護岸が海側に向けて倒壊しており、津波による引き波が破壊の主要因であったと考えられる。

国際空港島とフルフマレを結ぶ連絡道路の両側は、写真-4.7に示すように津波により侵食されていた。また、津波による力は、海に面しない内陸の壁も破壊した（写真-4.8）。海に面した護岸も写真-4.9や写真-4.10に示すように破壊された。こういった破壊は、内水域の最も奥部において発生しており、前述したように水域奥部で高くなった津波がこういった被害を発生させた。なお、写真-4.10に護岸の内部が見えるように、護岸はさんご石を積み上げその表面をコンクリートで固めたものである。

津波の来襲方向から見て島の裏側に当たる国際空港の西側でも被害が発生しており、コンクリートブロックによる上部工が倒されていた（写真-4.11）。

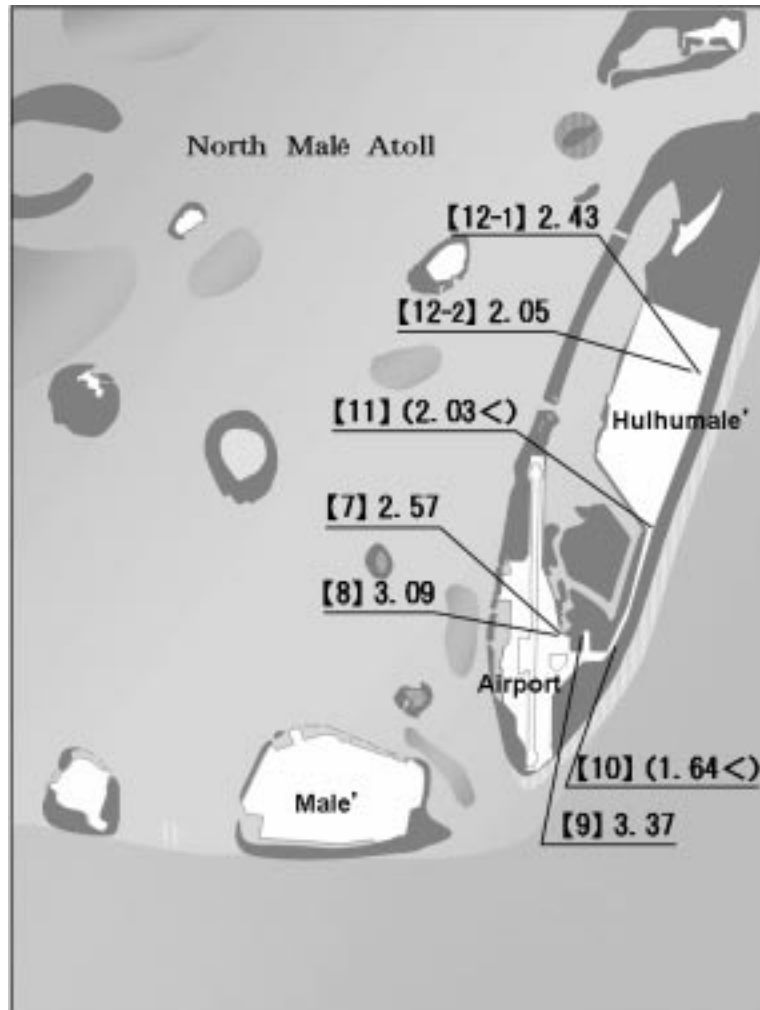


図-4.2 国際空港島（【7】等がある島）とフルフマレにおける津波痕跡高さ（図の上が北）

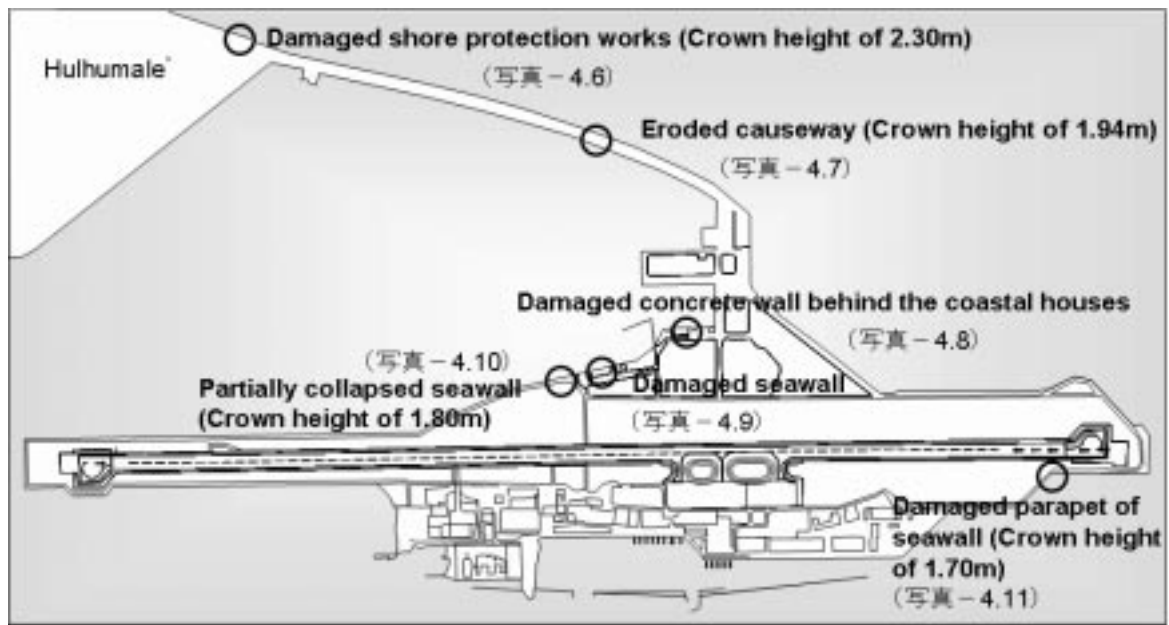


図-4.3 国際空港島における被害



写真-4.6 被災したセメントブロックの護岸（撮影：本多）



写真-4.7 両端が侵食された連絡道路（撮影：本多）



写真-4.8 破壊した内陸の壁（撮影：本多）



写真-4.9 破壊した護岸（撮影：本多）



写真-4.10 崩壊した護岸（撮影：富田）



写真-4.11 倒壊した護岸上部工（撮影：本多）

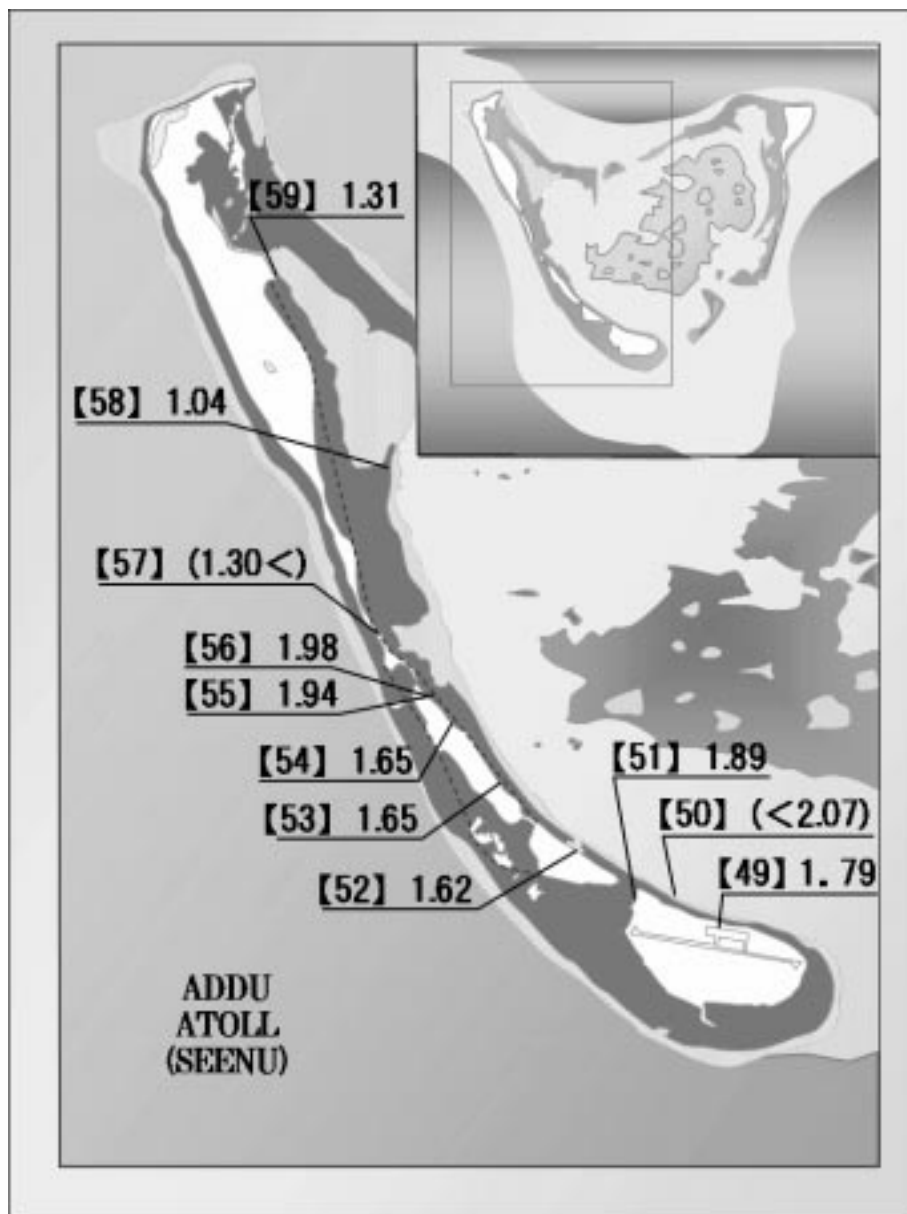


図-4.4 セエヌ環礁における津波の痕跡高さ（図の上が北）

(4) セエヌ環礁

モルディブの最も南にあるセエヌ環礁は、南緯0°35'40" ~ 0°42'30", 東経73°04'30" ~ 73°14'43"に位置し、図-4.4 (Fujima et al., 2005) の右上のような形状をしている。環礁の南側の島々の調査を富田, 本多, 半沢で行った結果、外洋に面した側ではなく環礁の内側の海面に面したところで津波の浸水があった。津波の痕跡高さは図-4.4にまとめたようであり、これより海岸に來襲した津波の高さは

2m程度以下であったと推察できる。

津波來襲当時、若築建設の杉田依久氏が海面変動を標尺により直接測っており、その結果によると押し波は1m程度であるのに対し、引き波は-1.5mであった(図-4.5および図-4.6両図ともFujima et al., (2005) より)。この引き波により、護岸が前に引き出され(写真-4.12)、船舶も座礁して被災した(写真-4.13)。

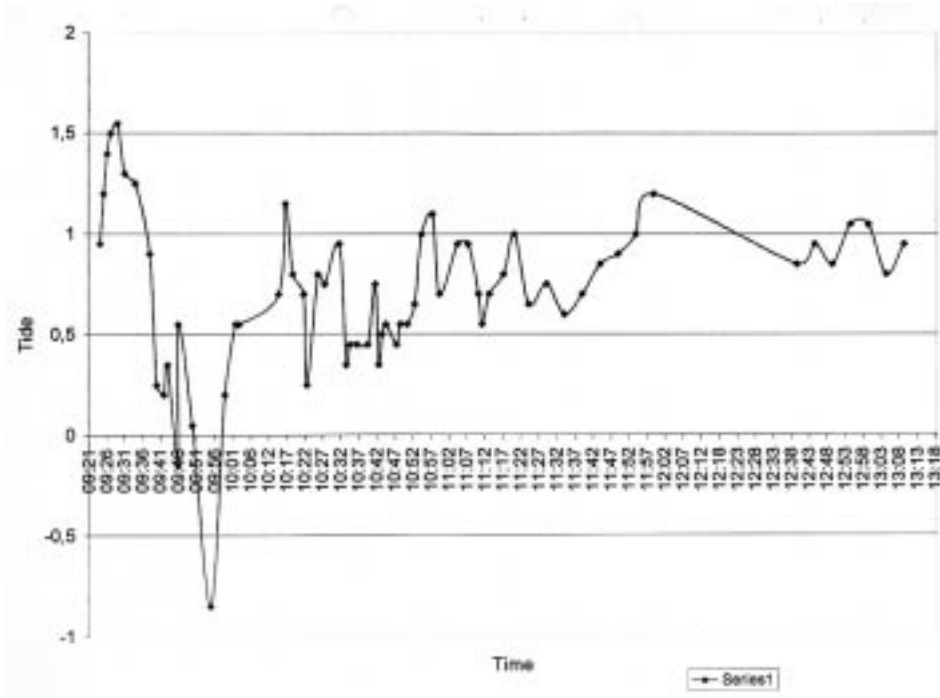


図-4.5 杉田氏による海面変動の観測結果 (CDL基準)

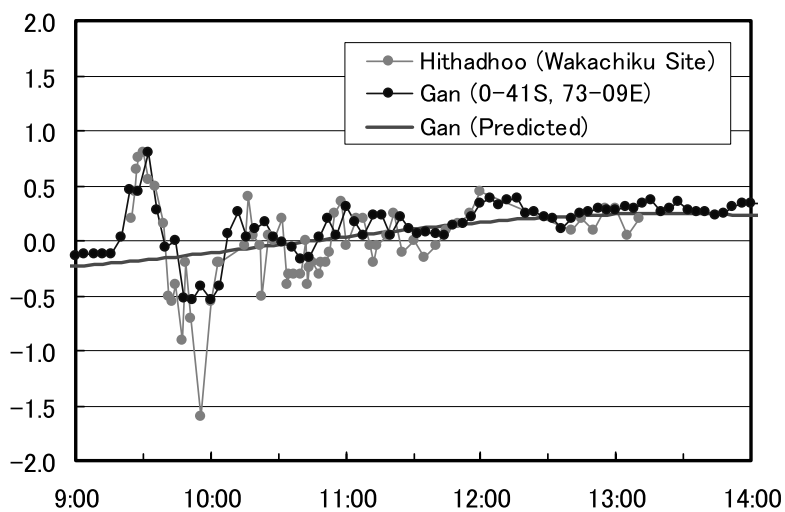


図-4.6 杉田氏の観測結果, 検潮記録, 推定天文潮位 (MSL基準, 半沢氏とりまとめ)



写真-4.12 前に引き出された護岸（撮影：半沢）



写真-4.13 座礁した船舶  
(修理工場前に移動後：撮影：富田)

### 4.3 津波到達時刻と来襲津波の数

国際空港島における図-4.2のPoint 8および9で津波を観察した人の話によると、津波は3波あり、第1波は現地時刻9:20頃（世界標準時4:20UTC）に東から来襲し、第2波は第1波の数分後に来襲して最も高かった。

国際空港島の西側には、検潮所があり津波が観測されている（図-4.7）。この観測結果では、津波の第1波の極大値は世界標準時4:30UTC頃出現しており、証言とほぼ一致している。しかし、第1波と第2波の関係は観測と証言では大きく異なっており、観測結果では津波の第1波と第2波の時間間隔は40分であり、さらに第1波が最も高い津波となっている。すなわち、検潮所で観測された津波の第1波は観察された津波の第2波に相当し、観察された津波の第1波は、空港島周辺の浅瀬や空港島などでの反射波による複雑な津波の干渉によって発生したのではないかと思われる。こういった現象の理解のためには詳細な数値計算が必要である。

なお、空港島で観測された津波の第1波も南のガンにおいて標尺で測られた津波の第1波もほぼ同時刻に極大値が出現している。このことから南北に細長いモルディブではあるが、ほぼ同時刻に津波が来襲したことがわかり、津波の波向きはモルディブにほぼ直角であったようである。この特徴は、図-2.10(e)に示した数値計算結果ともよく一致している。

また、国際空港島では、津波の第1波よりも前の8:45頃に内水域の水面がクリーム色に泡だったことが観察された。これは、津波によって海水面の変動が極大値に達する前でも海水面の上昇に伴った圧力の上昇があり、それが珊瑚礁でできた島の内部の水道を伝わって上記の噴水のような現象を引き起こしたものと考えられる。

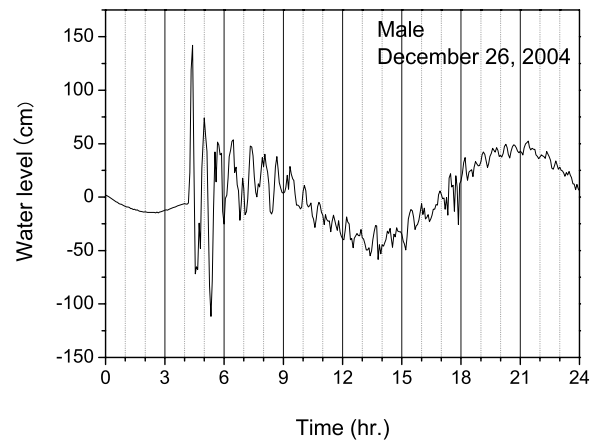


図-4.7 国際空港島における検潮記録に基づいた津波波形（世界標準時による表記、ハワイ大学海水位センターによるデータに基づく）

## 5. インドネシアにおける現地調査

### 5.1 調査概要

1月21～29日の間、スマトラ島北端のバンダアチェ Banda Aceh市および隣接する西海岸を現地調査した都司嘉宣助教授（東京大学地震研究所）を団長とする調査団の報告によると、西海岸では局所的には海面から35mの高さに津波遡上の痕跡があり、Banda Acehの北海岸ではモスクの壁に海面から12mの高さに水跡が残っていた。さらにバンダアチェ市は、海岸から2～3km離れた市街地でも5mを超える痕跡があった場所であり、津波被害の最も厳しい場所である。

#### ・調査員

防災科学技術研究所 後藤洋三 所長（団長）  
早稲田大学 濱田政則 教授（副団長）



東海大学	アイダン	オメル	教授
土木研究所	運上茂樹		上席研究官
港湾空港技術研究所	菅野高広		室長
	富田孝史		主席津波研究官
国土地理院	中島秀敏		課長
日水コン	竹内幹雄		氏
鹿島建設	古川直樹		氏
五洋建設	S. F. ウォン		氏
土木学会	柳川博之		氏

・現地協力者

飛鳥建設	鈴木智治	氏
------	------	---

・調査日程

2月27日：  
メダン着

2月28日：  
バンダアチェ入りの準備  
メダン調査

3月1日  
バンダアチェ着  
バンダアチェ調査

3月2～4日  
バンダアチェ、周辺海岸、西海岸調査

3月5日  
バンダアチェ発ジャカルタ着

3月6日  
ジャカルタ発

## 5.2 津波被害

菅野と富田は、バンダアチェやその周辺の津波被害を調査した。図-5.1は国連人道問題調整事務所(United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs)の人道情報センター(Humanitarian Information Center)が発表しているバンダアチェの津波被害を取りまとめた地図である。海岸から2～3kmまでの範囲は壊滅的な被害を受けており(写真-5.1および写真-5.2)、5kmまでの範囲が浸水被害を受けた。

図-5.2は、バンダアチェの北の海岸から2.5km離れた所(図-5.1に丸印をつけた地域)にある高校およびその隣接する中学校周辺の衛星写真(Digital Globeにより公表)に津波の痕跡高さを加筆したものである。津波後も残存した高校のコンクリート造りの建物は図中左下にある逆「く」型のものであり、中学校はその上に位置する直線上の建物である。海に接続する水際線からこの地点までの地盤の高さを測量したところ、海岸から2.5km離れたこの場所の地盤高は、津波来襲時の天文潮による海水位(津

波が来襲しなければそのときに起こったと推定される海水位)から1.3～1.6mしか高くない低地である。この地区にある建物の側壁には地盤上4.0～4.4mの高さ(津波来襲時の海水位からは5.7m～6.1m)に水跡があった。その海側で地盤高1.4mの場所(図-5.2の右上)では、建物の外壁の地盤上5.1mの高さに水跡が残っていた。このことから、低く平らな沿岸が高さ4mを超える水流により破壊されたことがわかる。

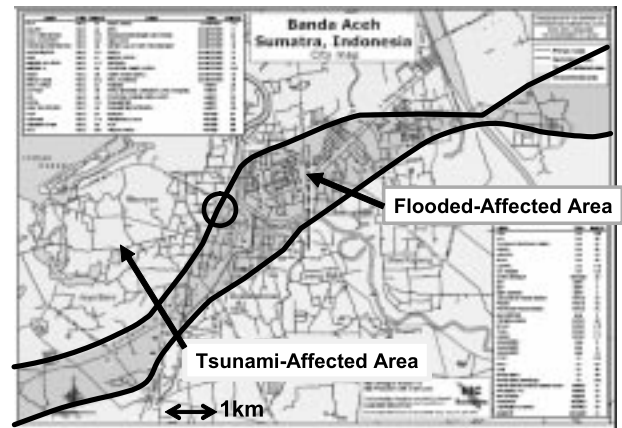


図-5.1 バンダアチェの被害マップ(HIC資料に加筆)

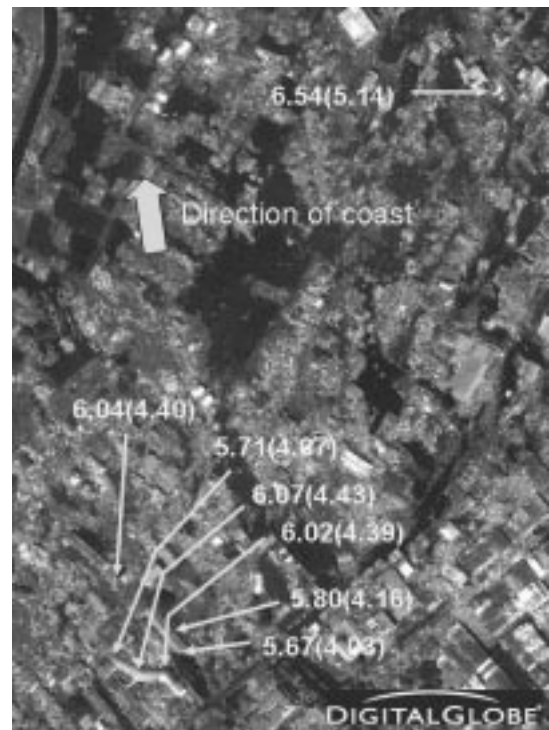


図-5.2 バンダアチェにおける津波痕跡高さ

(図中の数字は津波来襲時の海面の高さを基準にした痕跡高さ、カッコ内の数字は地盤上の痕跡高さ、Digital Globeによる衛星画像に加筆)



写真-5.1 壊滅的な破壊を受けたバンダアチェの様子  
(撮影：富田)



写真-5.2 大破したコンクリートの家屋 (撮影：富田)

しかし、海岸砂州への連絡橋の取り付け道路背後の店舗は、写真-5.3に示すように、道路に出ている2階部分以上では柱が折れ壁や屋根も残っていないが、1階部分は壁も残っていた。決して住める状況ではなく、建物内の人が津波から守られる様な状況ではないが、隣接する建物は土台を残すのみで何も残っていない状態であったことから、盛土が津波の破壊力からその背後域を防護したことを示している。



写真-5.3 盛土が防護した建物の一部 (撮影：菅野)

さらに、津波は建物を押し流すだけでなく、巨大な船舶やオイルタンクも押し流している。バンダアチェでは、フェリー用の堀込港湾に係留されていた発電用バージ（幅約20m×長さ約60m）が津波により3km内陸へ押し流された（写真-5.4）。打ち上がったバージ周辺の家屋の壁には地盤上3mの高さに津波による水跡が残っており、これはバージの喫水とほぼ同じであった。また、バンダアチェの東に位置するクルエンラヤKrueng Raya港の近郊では、直径17m、高さ11mのオイルタンクが、ほぼ海岸線に沿って約300m押し流され沿岸の町中に取り残されていた（写真-5.5）。タンクは全部で9基あり、ジェット燃料、灯油、ガソリン、軽油を貯蔵するものである。現地調査した際には1つしか流出タンクは残っていなかったが、津波により流されたタンクは全部で3つあり、それら流出した全ては空のタンクであった。流出せずに残っていたタンクには地盤上4.8～5.7mの位置に水跡が残っていたことから、およそ5mの高さの水塊が襲ったことを示している。



写真-5.4 海岸から3km離れた内陸まで流された発電用バージ (撮影：富田)

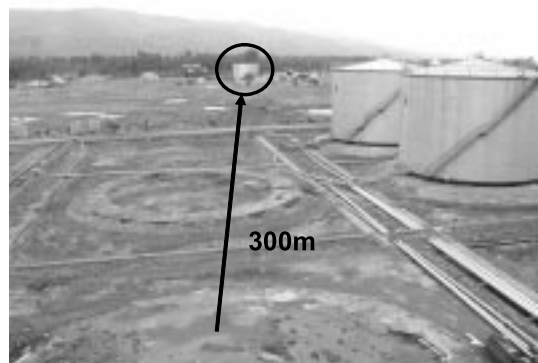


写真-5.5 300m流されたオイルタンク (撮影：菅野)



(a) 津波来襲前 (2004年12月23日)



(b) 津波来襲後 (2004年12月28日)

写真-5.6 バンダアチェの衛星写真  
(©DigitalGlobe/日立ソフト)

バンダアチェの北海岸にあるウリーレウエ Ulee Lheue 港付近の地盤は、河川によって堆積した砂丘となっており内陸部に広く低地が分布している。地震及び津波来襲後にはかなりの部分の地盤が流失しているが(写真-5.6および写真-5.7)、この原因として、津波によるものだけではなく、地震動の作用時に砂地盤内の過剰間隙水圧が上昇し液状化状態に達したことによることも想定される。現地を目撃証言によれば、地震動を感じた後10分程度で海面が沖側へ引いていき、その後3度津波が押し寄せたということであり、液状化により不安定となった地盤が引き波によって流失したものと想定される。

当該地域に地震計が設置されていなかったため地震動の大小の程度を推定することは困難であるが、目撃証言・津波による被害を受けていない構造物の損傷程度から推定すると、日本の気象庁震度階の5弱ないし5強程度と推定できる。一般的に海岸部の砂丘は、比較的密に堆積しており液状化に対しては抵抗が大きいことを考慮すると、砂丘全てが液状化したとは考え難い。

図-5.3に示すように、当該港湾は南西側から居住区域、小型船舶・漁船用船溜り、フェリーターミナル・フェリー埠頭および発電船接岸ドルフィンが整備されていた。居住区域は2t~3.5tの捨石緩傾斜護岸(図-5.4)で構成



写真-5.7 津波による侵食 (撮影：富田)

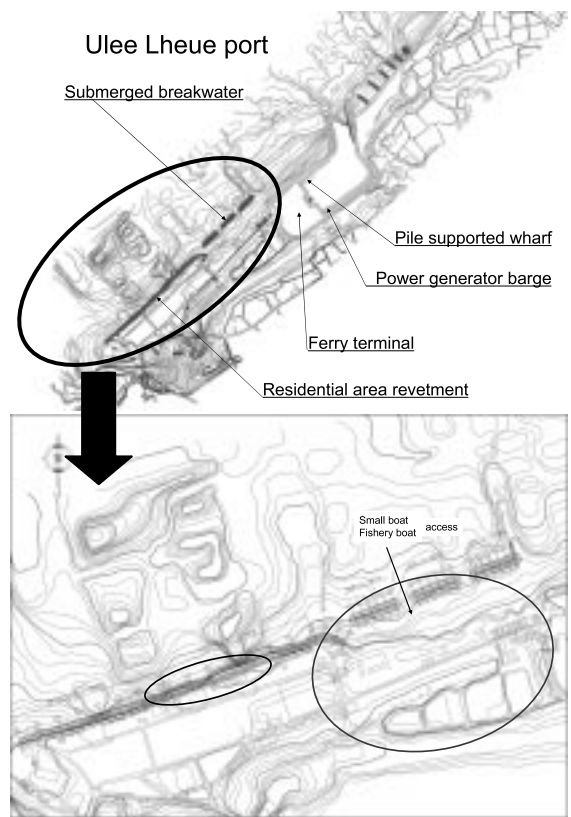


図-5.3 Ulee Lheue港の平面図

されている。この護岸は、自然地盤を掘削・捨石の設置・埋め戻しにより建設されており、流出した土砂は、埋め戻し砂部分であり、舗装された自然地盤部分及び住宅基礎部分は残っていた。最も流失の激しい、小型船舶・漁船用船溜り付近は捨石緩傾斜潜堤が施工されていたが、自然地盤部分が完全に流失しており、住宅区域とのコントラストが激しい。この二者の比較から、当該地域の地盤の流失に対して液状化の影響は、地盤の表面保護の有無と比較して小さいものと推定される。

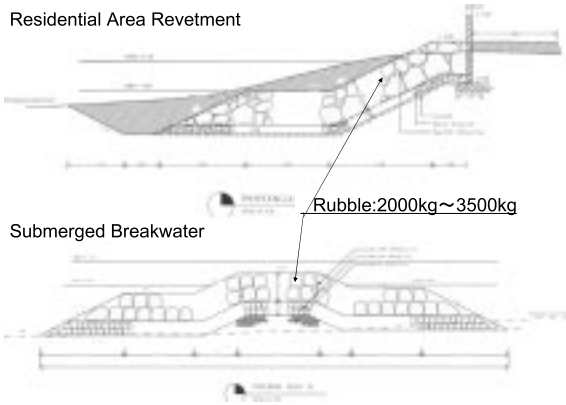


図-5.4 護岸と潜堤の断面図



写真-5.8 津波後も残った海岸の構造物（撮影：富田）とその位置（Digital Globeの衛星写真に加筆）

建設途中のフェリーターミナルは、1階部分のRC柱が破壊して2階床が地表レベルまで下がっている（写真-5.8）が、一般的なパンケーキ破壊とは異なり2階部分RC柱は柱頭部および基部部分で曲げによるかぶりの剥離が見られる程度で健全であった。これは地震動作用時に1階部分が破壊することにより地震エネルギーを2階部分へ伝達しなかったものと考えられる。1階部分がせん断破壊した場合には2階部分へも大きな影響が出るものと考えられることから、1階部分のRC柱が曲げ破壊し、ある意味で、1階部分によって免震されたものと言える。

さらに、地震後このターミナルビルには、10mもの津波が作用したが、柱のみで形成されたこの構造物は、津波による損傷をほとんど受けずに津波後も残存した。ピロティ構造が津波に対しては有利な構造であることの実例

であり、耐震性に配慮することにより津波避難施設として有効であることを示している。

## 6. まとめ

2004年12月26日のスマトラ沖地震に伴ったインド洋大津波では、様々なタイプの被害が発生した。具体的には、以下のようなものである。

- ・ 沿岸の低地が広い範囲にわたり浸水した。
- ・ 一部のコンクリート造の建物が残存したが、木造やレンガ造の建物は大破した。
- ・ 沿岸にある道路、橋梁、鉄道、港湾、空港が被災した。
- ・ 海岸や沿岸の陸地が侵食され、地形が変化した。
- ・ 船舶、オイルタンク、コンテナなどが漂流し、被害を拡大した。
- ・ 地震の発生から津波の到達するまでに避難時間があった地域においても多くの人が津波に飲み込まれた。
- ・ 沿岸の住民だけでなく多くの観光客も被災した。

一般に津波被害には、この他に津波に伴った火災による被害があるが、今回の津波では火災被害は聞いていない。過去においては、1964年のカムチャッカ地震津波、1993年の北海道南西沖地震津波で火災が発生している。

一方、港湾や海岸の施設、沿岸における堅牢な建物、盛土が津波低減に役立ったことも示された。しかし、10mを超える高さの津波が来襲したインドネシアのバンダアチェの北海岸では、海面上2m程度の天端高の護岸があったが、津波により護岸は破壊され背後地にあった住居も押し流された。このように想定外もしくは想定を遙かに上回る津波が来襲した場合には被害が発生する。また、震源に近いSimeuleu島では「ゆれたら高台に逃げろ」という言い伝えにより、70000人中7人の死者であった。こういった実例は、これからの津波対策の検討に役立つであろう。

インド湾を対象としたインド洋津波に関する数値計算を実施したところ、低緯度において津波が伝播したので、球面座標系の影響は大きくなくデカルト座標系でも十分な精度で計算できること、格子間隔が水深 $2\sqrt{3}$ 倍以上と規定される2段階混合差分法を用いた2次元線形分散波モデルにおいては分散性の効果が認められないことが分かった。

今後は港湾空港技術研究所においてこれまで開発してきたSTOCにより陸上における津波の詳細な計算や建物の破壊率などを検討していく所存である。

また、格子間隔による分散性の影響を検討するため、今後は他の差分スキームによる2次元線形分散波モデルとの比較が必要である。

(2005年8月10日受付)

## 謝辞

今回の津波被害で犠牲になれた多くの方、そのご家族や各国に深く哀悼の意を表するとともに、各国の現地調査の実施においてご協力をいただいた各国の多くの方々、国土交通省港湾局建設課国際業務室を始めとする国土交通省港湾局、港湾空港技術研究所の多くの方々々に謝意を表します。さらに、スリランカ調査に参加していただいた河田恵昭先生、今村文彦先生、安田誠宏先生、モルディブ調査団の藤間功司団長を始めとする団員の皆様、およびインドネシア調査団の後藤洋三団長を始めとする団員の皆様には現地調査において多くの協力を得るとともに調査で得られた貴重なデータをここに使用させて頂きました。また、日本港湾コンサルタントの市菌敏郎氏、若築建設の辰巳正弘氏および飛島建設の鈴木智治氏のご協力により各国において無事に調査が遂行できました。さらに、インドネシア調査において地盤高や津波の痕跡高の測量においては鹿島建設の古川直樹氏にご援助いただきました。各位に深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

大谷英夫・藤間功司・嶋原良典・富田孝史・本多和彦・信岡尚道・越村俊一・折下定夫・辰巳正弘・半沢稔・藤井裕之 (2005) : インド洋大津波によるモルディブ共和国マレ島・空港島の浸水特性とそれに及ぼす護岸・離岸堤の影響, 海岸工学論文集, 第52巻, 印刷中.

後藤智明 (1991) : 遠地津波の外洋伝播計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp.3-19.

後藤智明 (2003) : 2段階混合差分法を用いた線形分散波方程式の数値計算における打ち切り誤差, 津波工学研究報告第20号, pp.13-22.

首藤信夫 (1986) : 津波と防災, 土木学会論文集, No.369/II-5, pp.1-11.

富田孝史・有川太郎・安田誠宏・今村文彦・河田恵昭 (2005) : インド洋大津波のスリランカ南西部における津波実態・被害調査報告, 海岸工学論文集, 第52巻, 印刷中.

富田孝史・柿沼太郎 (2005) : 海水流動の3次元性を考慮

した高潮・津波シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第44巻, 第2号, pp.83-98.

平石哲也・有川太郎・南靖彦・田中政典 (2005) : インド洋地震津波の被害例について—タイにおける事例を中心として—, 港湾空港技術研究所資料, No.1106, 20p.

藤間功司・嶋原良典・富田孝史・本多和彦・信岡尚道・越村俊一・藤井裕之・半沢稔・辰巳正弘・折下定夫・大谷英夫(2005) : モルディブにおけるインド洋津波の現地調査, 海岸工学論文集, 第52巻, 印刷中.

Fujima, K., T. Tomita, K. Honda, Y. Shigihara, H. Nobuoka, M. Hanzawa, H. Fujii, H. Ohtani, S. Orishimo, M. Tatsumi and S. Koshimura (2005a): Preliminary Report on the Survey Results of 26/12/2004 Indian Ocean Tsunami in the Maldives.

Fujima, K., T. Tomita, K. Honda, Y. Shigihara, H. Nobuoka, M. Hanzawa, H. Fujii, H. Ohtani, S. Orishimo, M. Tatsumi and S. Koshimura (2005b): Survey Results of Indian Ocean Tsunami in the Maldives, Sumatra Tsunami on 26<sup>th</sup> December 2004, Proc. Special Asia Tsunami Session at APAC 2005, pp.37-48.

Imamura, F, T. Arikawa, T. Tomita, T. Yasuda and Y. Kawata (2005): Field Investigation on the 2004 Indian Ocean Tsunami in the Southwestern Coast of Sri Lanka, Sumatra Tsunami on 26<sup>th</sup> December 2004, Proc. Special Asia Tsunami Session at APAC 2005, pp.93-106.

Manshinha, L. and D. E. Smylie (1971) : The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.

National Geophysical Data Center (2005) : 2-Minute Gridded Global Relief Data, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html>

Stein, S. and E. A. Okal (2005) : Speed and Size of the Sumatra Earthquake, Nature, Vol.343, pp.581-582.

Website of the University of Hawaii Sea Level Center: <http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhscl/>

港湾空港技術研究所資料 No.1110

2005・12

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2005) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。