

モルディブにおける2004年12月26日 インド洋津波の現地調査結果

4月1日 土木学会報告会

藤間功司(防衛大)

富田孝史(港空研)

本多和彦(〃)

嶋原良典(防衛大)

信岡尚道(茨城大学)

半沢 稔(テトラ)

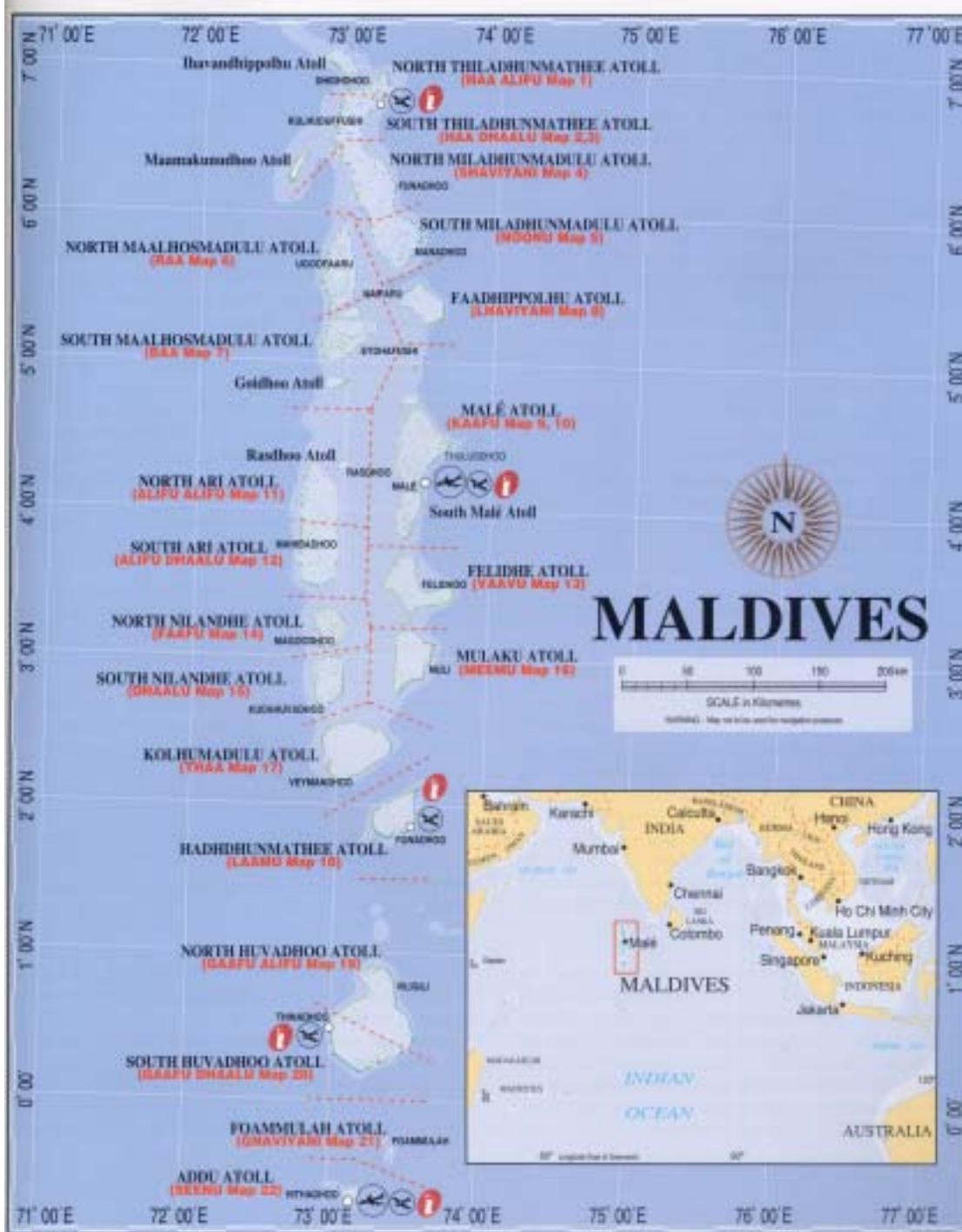
藤井裕之(アイ・エヌ・エー)

大谷英夫(大成建設)

折下定夫(パシフィックコンサルタンツインターナショナル)

辰巳正弘(若築建設)

越村俊一(人と防災未来センター)



- インドの南端から450kmほど離れた島国
- 1192の島
- 26の環礁 (島々の花輪)
- 全長860km
- 人口28万人
- 主な産業: 漁業と観光

左図: Atlas of the Maldivesより



- 島の地盤高: 最高でも平均海面上1.8m程度
- 島の大きさ: 1-2km程度
- 環礁内の水深: 50m程度
- 環礁の大きさ: 50km程度
- 接近した環礁間の水深: 300-500m
- 環礁から10km沖では水深2000-3000m

左図: Atlas of the Maldivesより

被害の概要

- 死者82名, 行方不明26名(外国人の死者は4名)
- 被害を受けた建物は4,000箇所、12,000人以上が家を失った
- 12月26日に限れば、全人口27万人中3万人が避難
- リゾート全87箇所のうち19箇所が大きな被害
- 26の島で停電
- 188の島で一時的に通信不能
- Male' 国際空港も約10時間閉鎖

- 津波来襲時の潮位: $\pm 10\text{cm}$ 程度 = ほぼ平均満潮時なら？

Kandholhudhoo (Raa atoll)
Island health center
(Video by Mr. Ahmed Waheed)



1月10日の報道では、
13の島で避難

Filladhoo

Kandholhudhoo

Mathiveri

Madifushi

Kolhufushi

Muli

Naalaafushi

Veyvah

Gemendhoo

Vaanee

Vilufushi

Mundoo

Vilingili

移住した人も

調査目的

- インド洋津波の全体像解明
 - 波源からアフリカの中間に位置
 - 大きな波形変形をしていない
- モルディブでの津波の特徴, 被害特性
- 海岸構造物の津波に対する効果の解明
- モルディブでの津波対策の提言
 - 防災施設, 防災教育, 復旧・復興

調査項目

- マレ島の浸水域
- 空港島の被害調査・痕跡高調査
- モルディブ全域での被害調査・痕跡高調査

調査日程

- 1月31日: Male' に集合
- 2月1日午前: 関係機関とmeeting
- 午後: Male' 浸水域調査
- 2月2日: 2グループに分かれ調査
 - Hulhule Island (Male' International Airport) & Fulhumale' Island
 - Kyodhoo (Vaavu atoll), Muli (Meemu atoll) and Ribudhoo, Gemendhoo (Dhaalu atoll)
- 2月3日: 3グループに分かれ調査
 - Hanimaadhoo, Kulhudhuffushi (Haa Hhaalu Aoll)
 - Kaddhoo-Fonadhoo-Manndhoo-Gan (Laamu Atoll)
 - Hittadhoo-Maradhoo-Feydhoo-Gan (Seenu Atoll)
- 2月4日午前: 2グループに分かれ調査
 - Three Resort Islands (Laguna, Vaadhoo and Embudhoo in South Male' Atoll)
 - Male' 地盤高測量
- 午後: final meeting

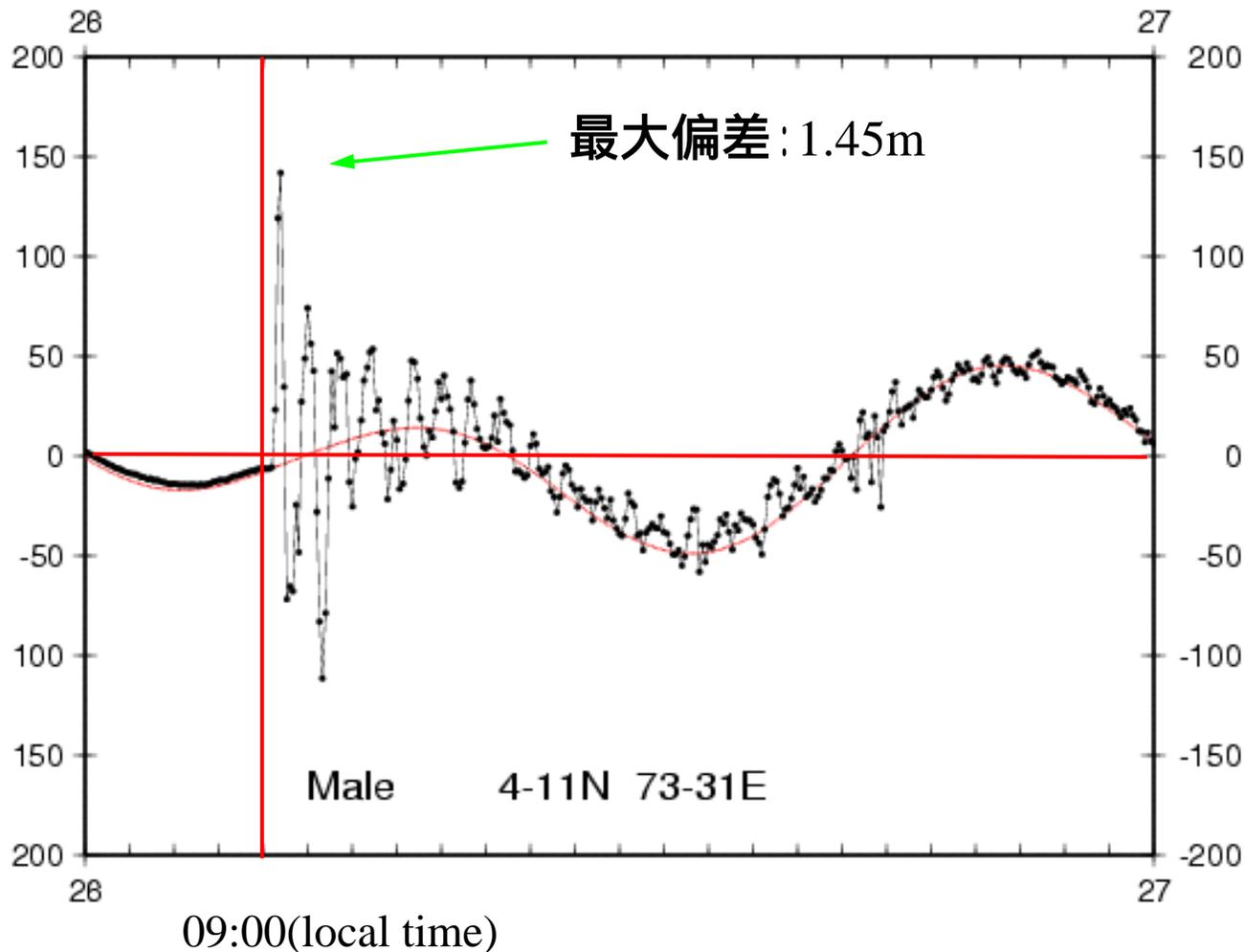
マレ島浸水域調査



マレ島基礎知識

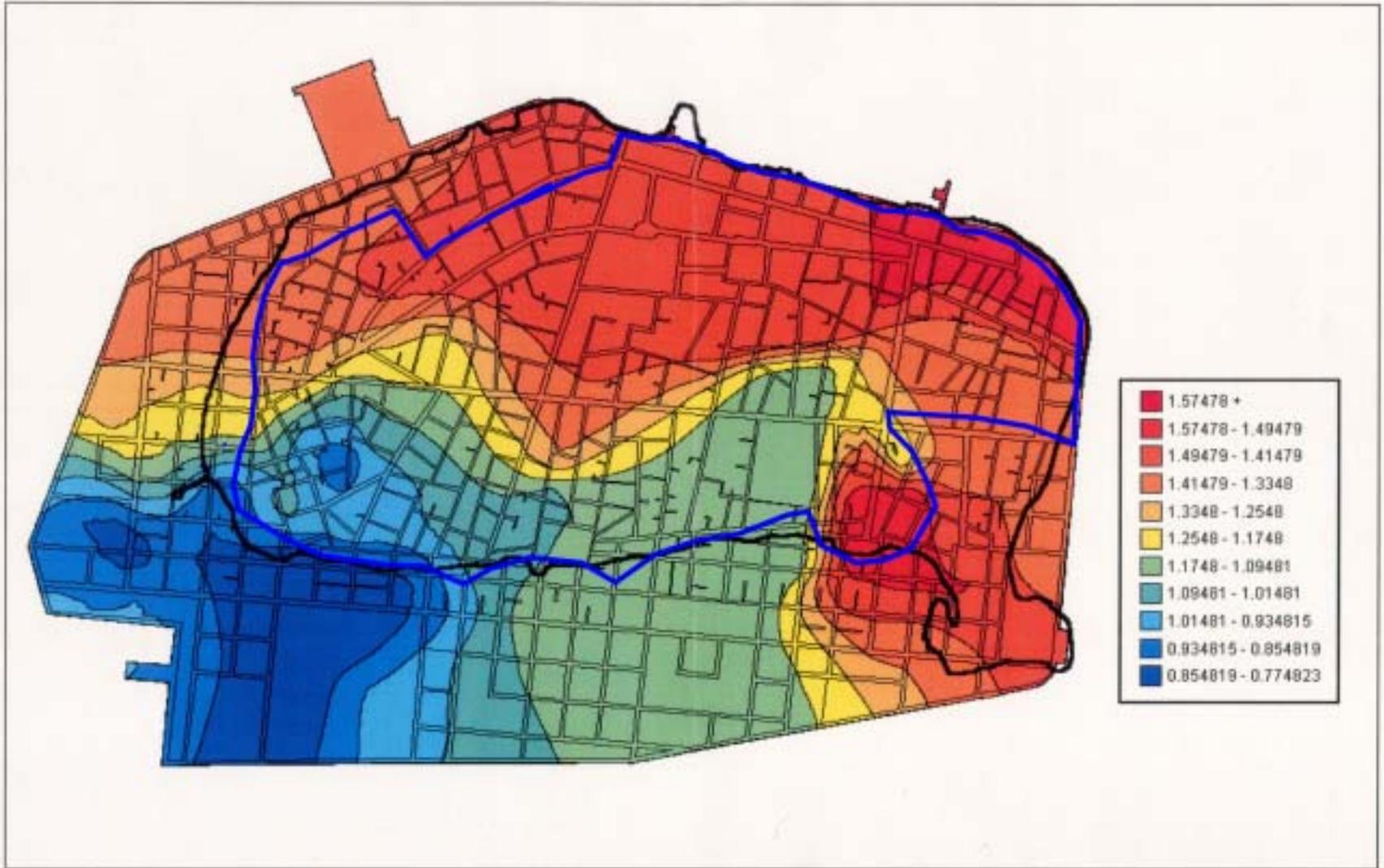
- **モルディブの首都:人口7万人以上(モルディブ人口の1/4)**
- **1970年代後半からリーフを埋立て**
 - 島の面積 1.8km^2 のうち, 0.8km^2 は埋立地
 - 現在,リーフエッジまで埋立て済み
- **護岸天端高は平均海面から1.86(西岸) ~ 2.16m(東岸,南岸)**
 - 一部, 2.56m, 3.36mの部分も
 - 防波堤, 離岸堤に守られている部分では1.46m程度
 - 岸壁(係留壁)では1.16m(北岸,南岸)
- **津波到達時の潮位はほぼ平均**

マレ島潮位記録(測定位置は空港, 環礁内)



time	tide(cm)
09:08	-6.44
09:12	-5.53
09:16	23.12
09:20	119.13
09:24	141.99
09:30	34.70
09:34	-71.67





Elevation contour map and street map of Male' overlaid (elevations are given in Metres). (Male' height points acquired from DGPS and interpolated using MapInfo software)

— Inundation Area

— Original Male'

実測浸水域図

- 島の60%が浸水していた
- 浸水域と埋立地はかなり一致している
 - 埋立地は、周囲と同程度の守りでは守れない
 - 島の原型に比べて浸水域が食い込んでいる場所がある　メカニズムは？

波動としての外力に構造物で対抗する3原則(首藤による)

1. 外力の高さより高い構造物.
2. 外力の一部を流入させるが, 流入後の広い水面積で受け止め, ならすため, 水位を低く抑えられる.
3. 波エネルギーを摩擦などで減少させ, 内側に伝わっていく能力を抑える.

津波来襲時のマレ島 (@MTV)





北岸 (@MTV)

今回の津波に対するマレ島の 海岸構造物の効果

- 護岸天端高と津波水位が同程度だった
 - 主として津波の上に乗ったうねり・風波成分が越波
 - 津波成分が一部流入した可能性も
- 岸壁からは津波本体が越流
- 防波堤・離岸堤・消波ブロックはエネルギー減衰にあまり寄与していないと考えられる



護岸による堰き止め効果が効いた

Male'島の浸水計算 (大谷氏@大成建設による)

- Delft3D
 - 2次元非線形長波方程式
 - Male'の検潮記録に合うよう境界からの入射波を設定
- 護岸・離岸堤などの構造物データ
 - 設計図面
 - 実測
- 地盤高データ
 - モルディブ政府提供の図面
 - 実測

Computation area

Whole area $34.4\text{km} \times 29.15\text{km}$

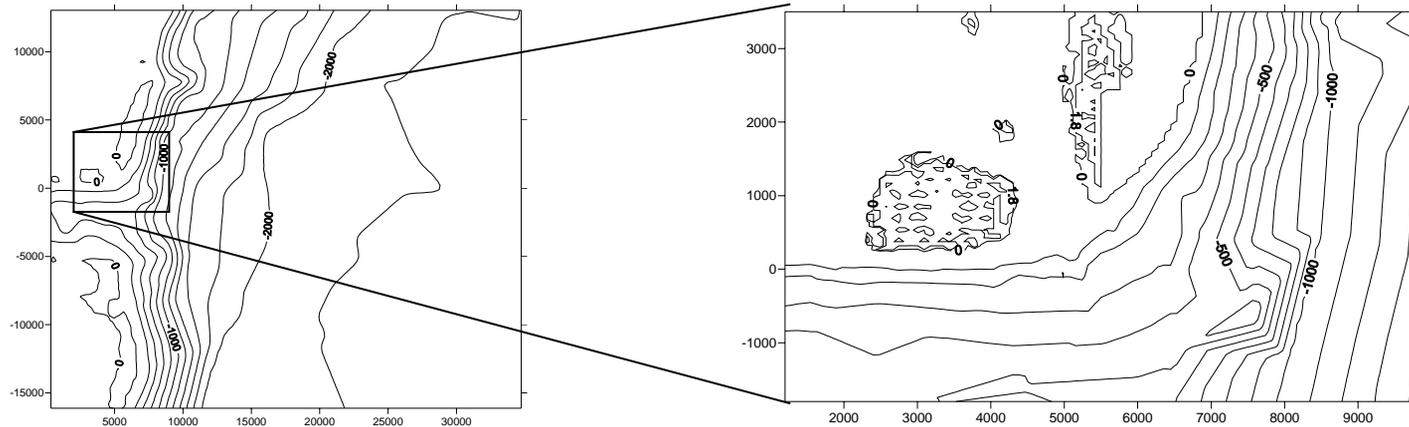
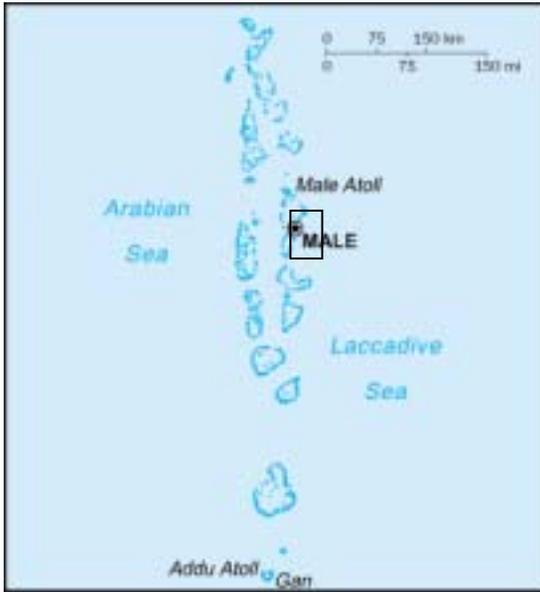
$\Delta x=430\text{m}$, $\Delta y=530\text{m}$

High resolution area $8.6\text{km} \times 5.3\text{km}$

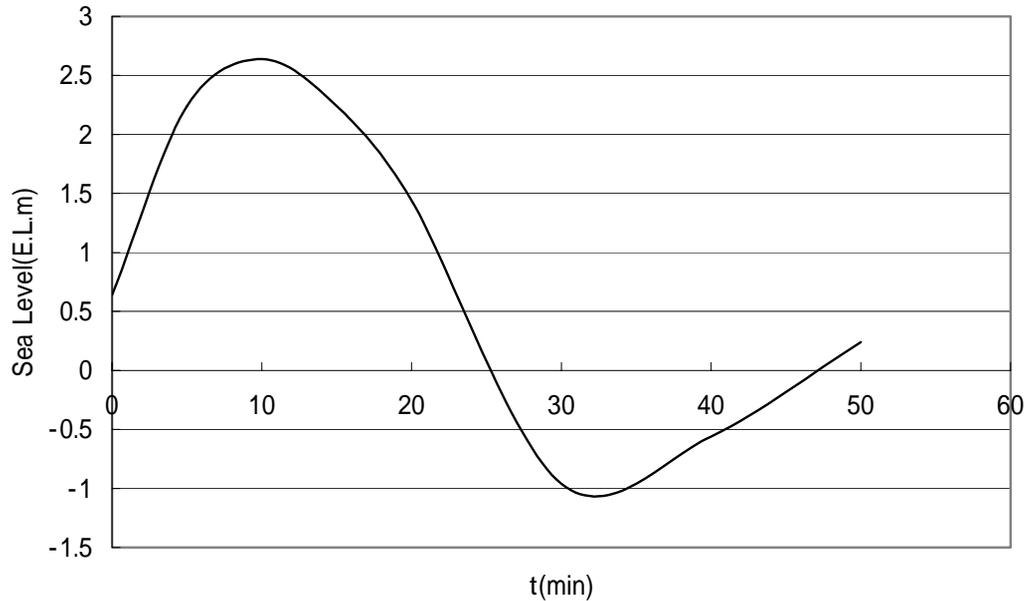
$\Delta x=20\text{m}$, $\Delta y=20\text{m}$

Bottom friction: sea bottom $n=0.025$

Male' town $n=0.025$

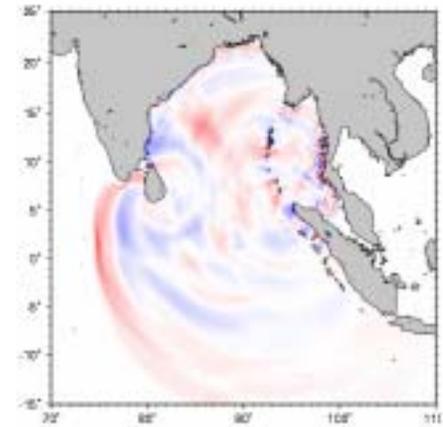
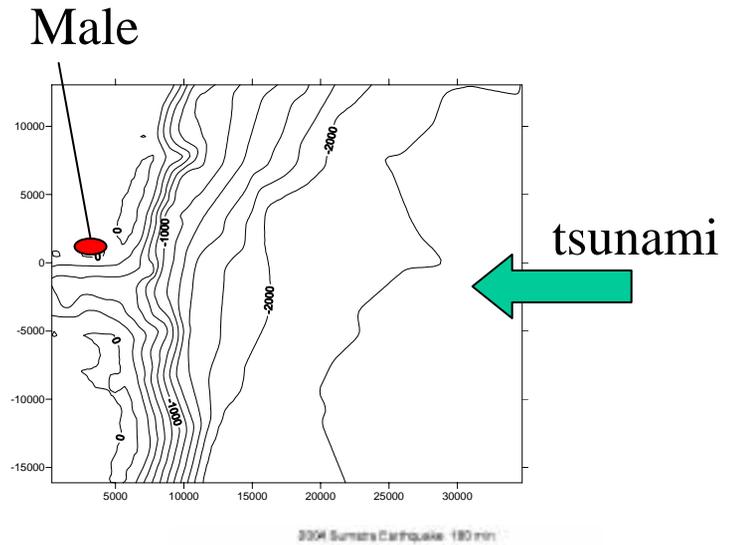


Boundary condition



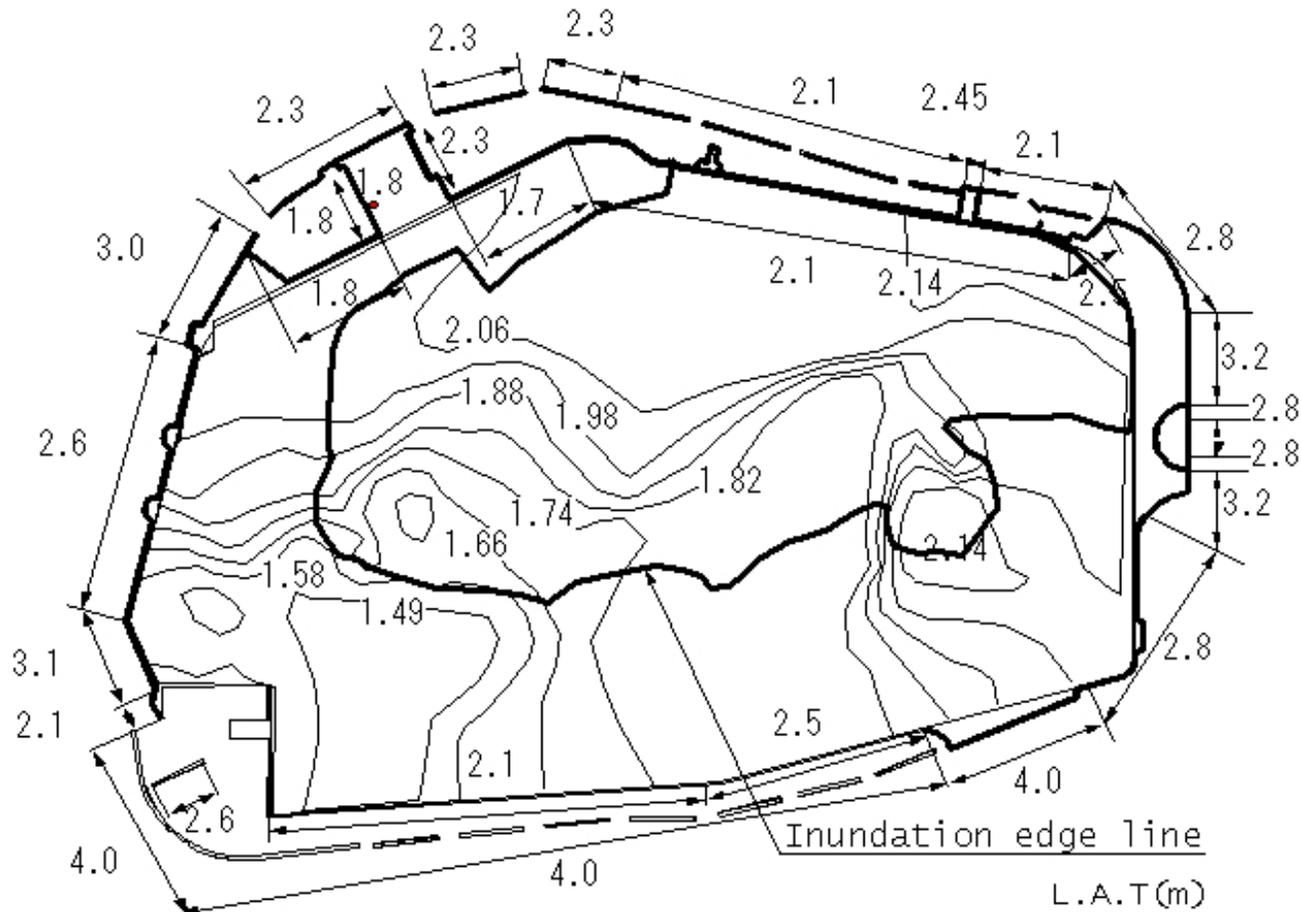
Assumed tsunami height

$$\Delta\eta=2\text{m}$$



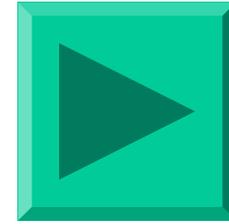
by S Koshimura

Seawalls and Breakwaters

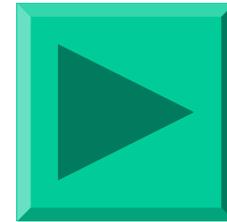


The location of the sea walls and the breakwaters in Male'

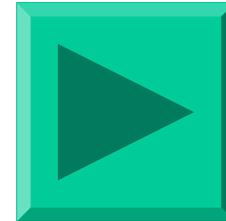
Large Area



Male' without seawall



Male' with seawall



Ref: Male' with seawall / without detached breakwater



数値計算結果

- 護岸・離岸堤を考慮したケースでは実測の浸水域に近い結果が得られた
- 護岸・離岸堤を取り除いたケースでは北側の一部を除き全島浸水

津波に対する海岸構造物の効果

- もしMale' 島に護岸・離岸堤がなければ,
 - ほとんど全島が浸水被害
 - 多くの船が打ち上げられ, 損害を受ける
 - 流速が増大し, 建物の被害が増える
- インド洋津波に対し, Male' 島の海岸構造物は有効に機能した

マレ島は津波に対し安全なのか？

- 地震・津波の大きさとしては今回のイベントが最大と考えてよいだろう
- 空港が防波堤として機能した可能性 津波の来襲方向がもう少し南よりだったら？
- 津波来襲時が満潮だったら？

Ref: Male' with seawall / high tide



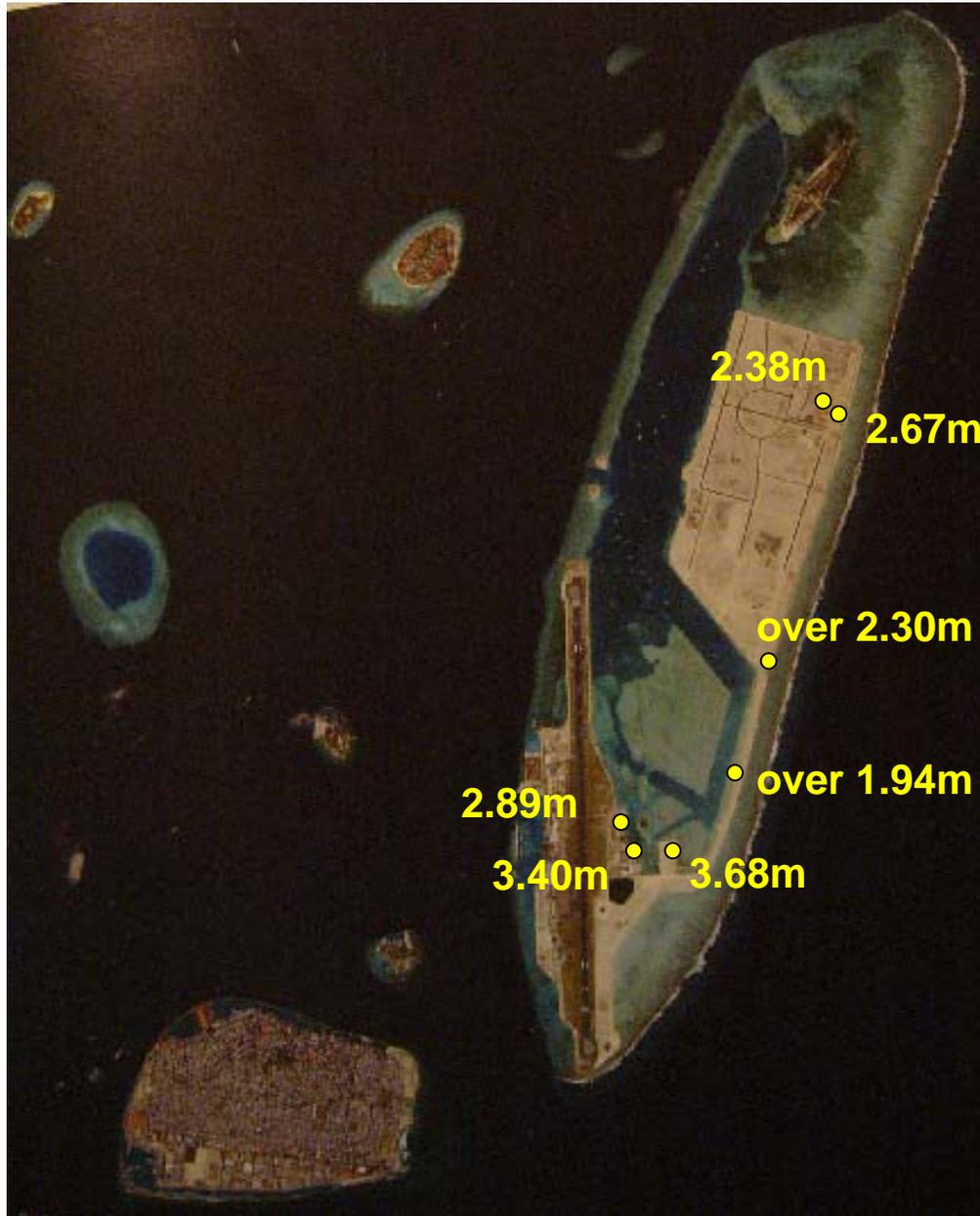
津波危険度評価が必要

空港の被害



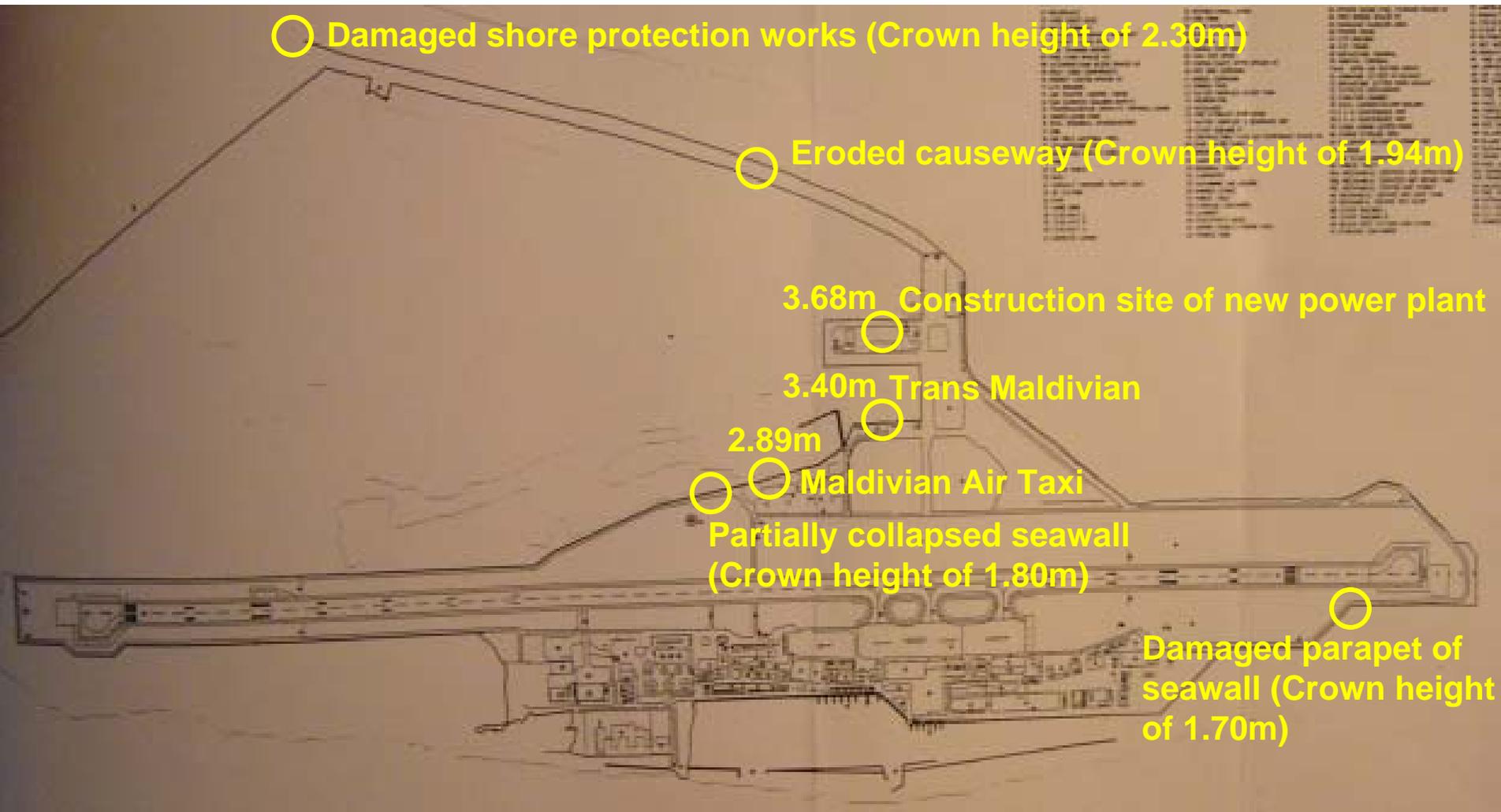
From Mr. Todd Rempel, Maldivian Air Taxi (Pte) Ltd.

Male' International Airport



- 3 tsunamis
- 1st tsunami around 9:20
- 2nd tsunami biggest
- A few minutes interval between 1st and 2nd tsunamis

Male' International Airport

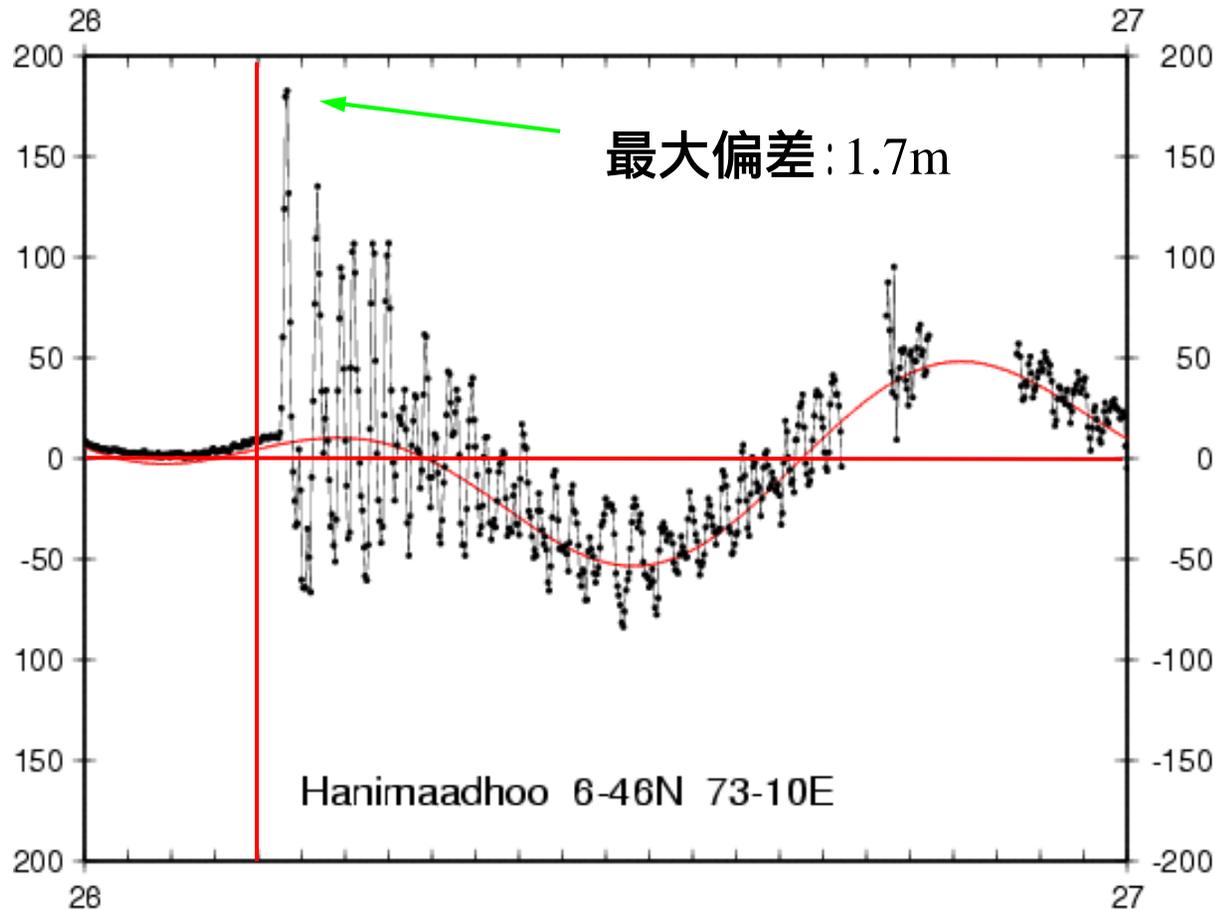


モルディブ広域

- モルディブ全域での津波高が得られるよう訪れる島を選定
- 島の中で、3箇所程度の痕跡高を計測

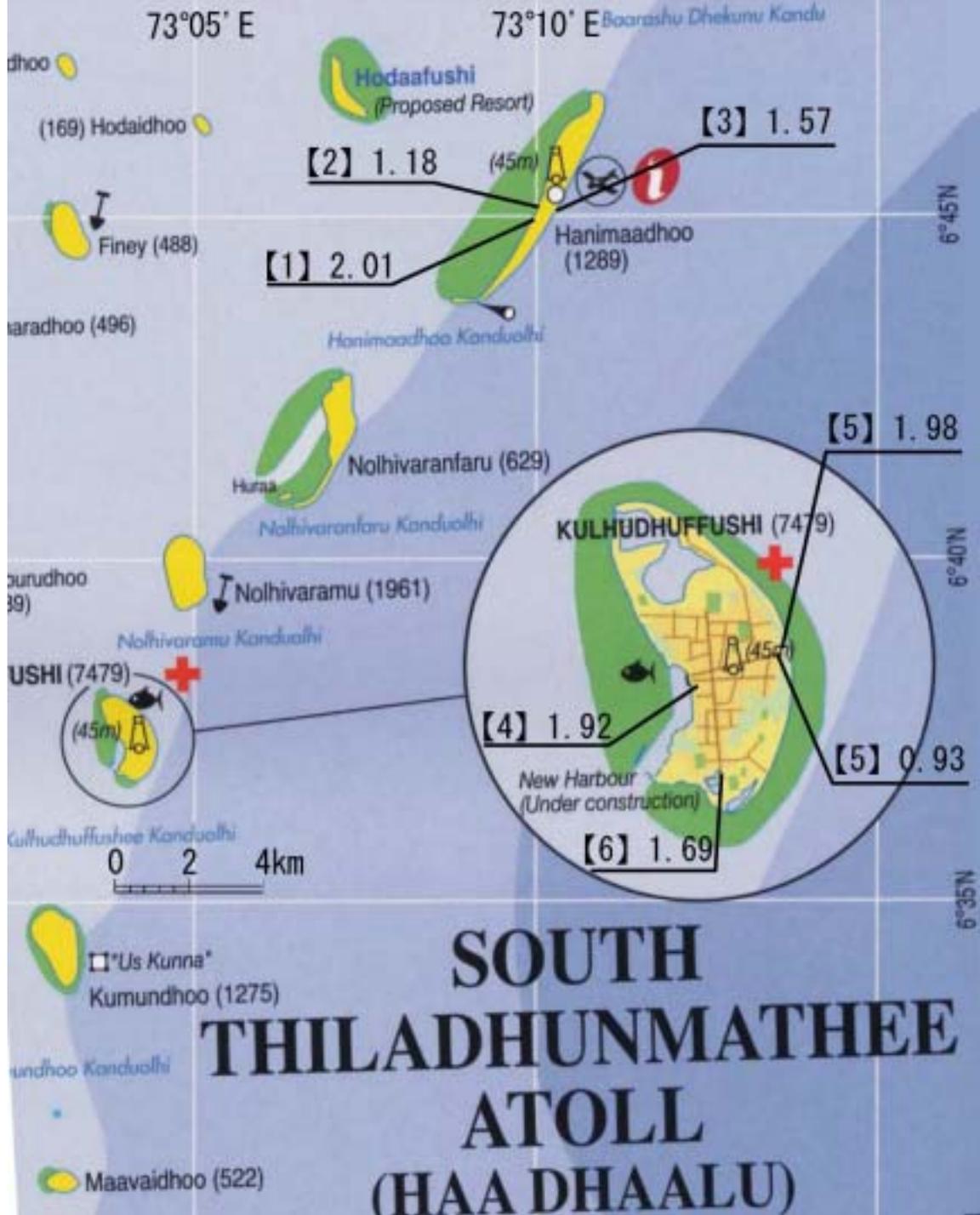


Hanimaadhoo, Kulhudhuffushi (Haa Dhaalu atollの東端; リーフは西側に発達)



time	tide(cm)
09:16	10.05
09:20	12.80
09:24	24.99
09:28	60.34
09:32	124.05
09:36	179.83
09:40	182.57
09:44	131.67
09:48	67.66
09:52	20.72
09:56	-6.71

- Hanimadhoo: 顕著な被害はなく, 明確な痕跡なし
- 検潮記録: 1.8m(西側と思われる),
- Kulhudhuffushi: 東側からは浸水せず, リーフの発達した西側で大きな被害
- 南側では「静かに水位が上がった」
- Kulhudhuffushi南側: 1.7m
- 環礁の中側と外側で痕跡高に有意な差はない





Kulhudhuffushi

- 東側:リーフが発達しておらず,バームあり
 - バームが津波を食い止め被害なし
- 西側:リーフが発達しバームなし
 - 回り込んだ津波により浸水被害

南マレ環礁のリゾート



Laguna Beach Resort (南マレ環礁の北端)

- 環礁内に循環流ができ、時計周り、反時計周りと目まぐるしく変化した。
 - 循環流とは、島のスケールよりずっと大きな流れ
- サンゴは被害を受けている。
- 1997, 1998年も白化被害を受けた。
- 痕跡高: 0.8-1.4m

Vadoo Island Resort (南マレ環礁の北端)

- 最初はchannel (Vadoo channel, 南北male'環礁の間) からAtoll内への流れが速かった
- その後, channelとAtoll内で流れが行き来
- 一時は棧橋と島の間海水が干上がった.
- 島の砂浜にサンゴが打ちあがった
- 水深30mに砂が溜まった
- 痕跡高: 0.7m

Vadoo Island Resort , 棧橋付近で 潜っていたダイバーの証言

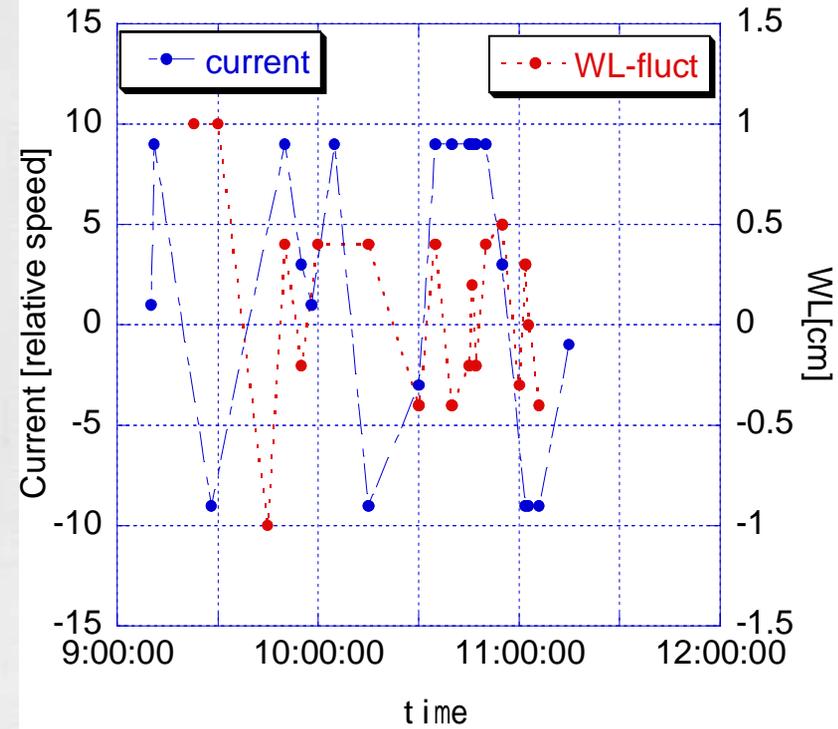
- 海に入った後1分程度で、水深5 mぐらいの所で凄く速い流れを受けた。(9時11分)
- マスクが飛んだ
- 白い砂が浮遊、懸濁した海水
- 岩につかまったが、サンゴが流れてきて危険であるため手を放し、流れに身を任せ、Atoll内の流れの弱いところに移動しexitした。Atoll内で流れが遅くなることは、日頃の経験でわかっていた。
- お客さんと一緒に潜っていた場合、死者がでてもおかしくなかった。 **朝9時という来襲時刻が幸運だった**
- 数100kgの岩が動いた。

Observed by Vadoo Island Resort

E→W 3/5
1741

06:30 06
09:10 N→S SLOW
09:11 N→S STRONG X3 水白!!
09:13 EXIT
09:23 水位 1m 上がる
09:28 S→N STRONG X3
09:30 水位が 下がり 1.5L 減る
09:45 水位が 1m 下がる
09:50 N→S STRONG X3 水位 40cm 上がる
09:55 N→S STRONG 水位 20cm 上がる
09:58 N→S SLOW
10:00 N→S 3 水位 40cm 下がる
10:05 N→S STRONG X3
10:08 水位 20cm 上がる
10:15 S→N STRONG X3 水位 40cm 上がる
10:30 S→N STRONG 水位 40cm 上がる
10:35 N→S STRONG X3 水位 40cm 上がる
10:40 N→S STRONG X3 水位 40cm 上がる
10:45 N→S STRONG X3 水位 30cm 上がる
10:46 N→S STRONG X3 水位 20cm 上がる
10:47 N→S STRONG X3 水位 20cm 上がる
10:50 N→S STRONG X3 水位 40cm 上がる
10:55 N→S STRONG X3 水位 50cm 上がる
11:00 ~~S→N~~ 3 水位 30cm 上がる
11:02 S→N STRONG X3 水位 30cm 上がる
11:03 S→N STRONG X3 水位 MAX
11:06 S→N STRONG X3 水位 40cm 上がる
11:15 S→N SLOW

vadoo_resort 26/12/2004



上図: by 信岡

Vadoo Island Resortで聞いた証言， Vadoo channelでは

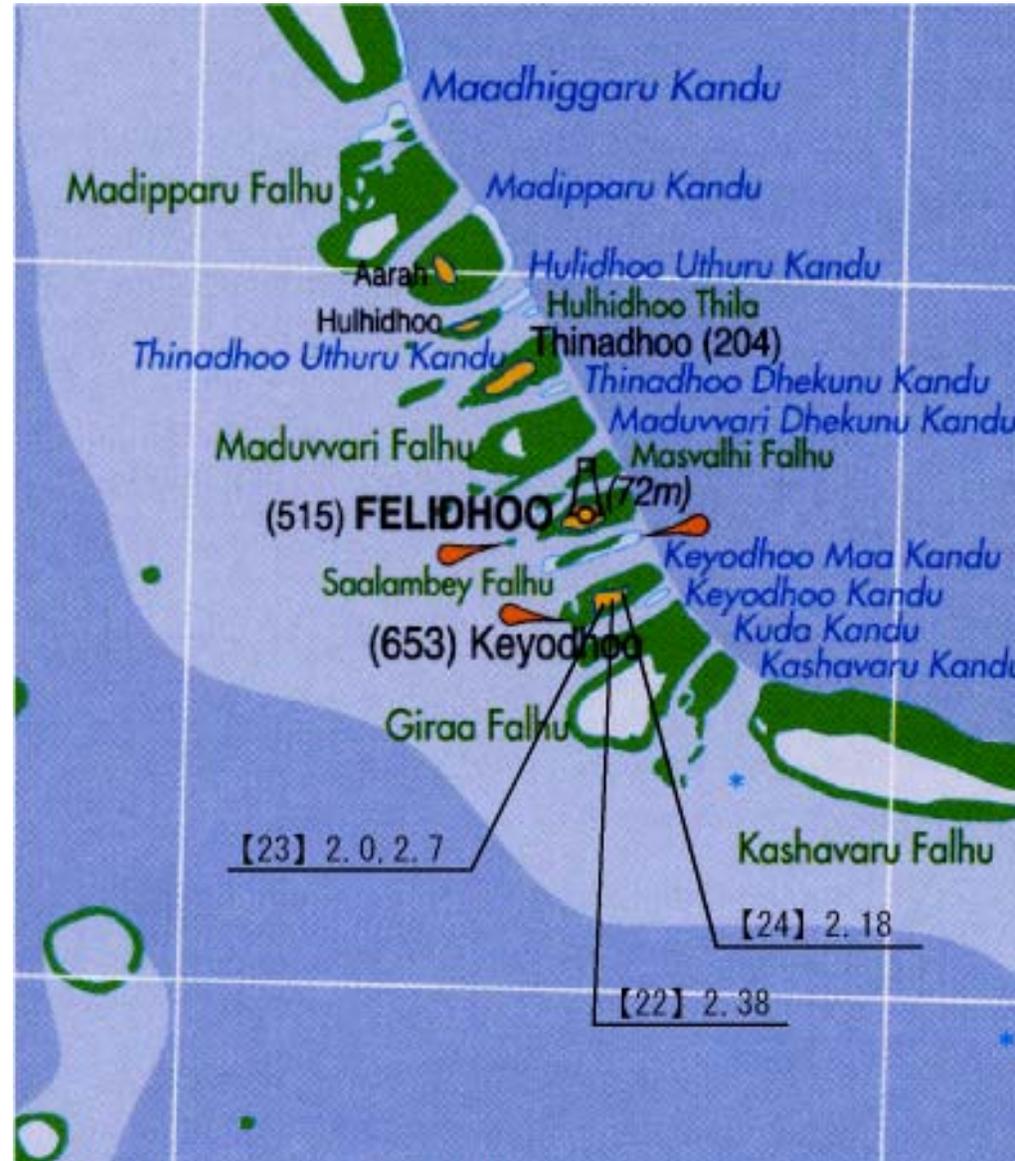
- 濁り水が水深の浅い所から水深15mぐらいに、流れ込んできた。(2~3mの透視距離)
- 水深15m以下は透視距離が14~16mであった。
- Vadoo channel 中央では透視距離が長かった。9:20~10:00頃に潜っていたが、流れが強くなるといったことは感じなかった。
- 2週間ほど、透視距離が悪かった。1月中旬ころ、例年程度に回復。例年10mが8m
- モルディブの砂(シルトと想定)が浮遊
- 緑色の藻、沼などで見られるものの塊が一時見られた(1月)
- 小さな枝サンゴ・浜サンゴが転がり落ちていた
- 大きな枝サンゴも半分程度、ダメージを受けたところがある。直径1m程度のものは被害が無かった。
- これらはVadoo channel内で場所的違いは見られない
- サンゴに砂がかぶっている。トップリーフから15m程度まで
- 津波直後にいなくなった魚は、数日後に戻ってきて、種類、数とも津波前と変化なし。

Embudu Village (南マレ環礁の内側)

- 津波は始め、北から来た。次に島の南側水位があがった。
- 南側にエネルギーが溜まっていった感じがした。
- 海水がmilk色になった
- 南側のサンゴは砂をかぶっている。
- 痕跡高：1.2-1.3m

Keyodhoo (Vaavu atoll 東端)

- 1波目は東から来た,
2波目は周囲から同時に浸水してきた
- 痕跡高: 2.0-2.7m
- 痕跡高に, 方向による差は見られない



Muli (Meemu atoll 東端)

- 東西南側にリーフが発達
- 津波は東から来て西側に通り抜けた
- 痕跡高: 東側で3.0m, 西側で2.1m, 北側で2.6m

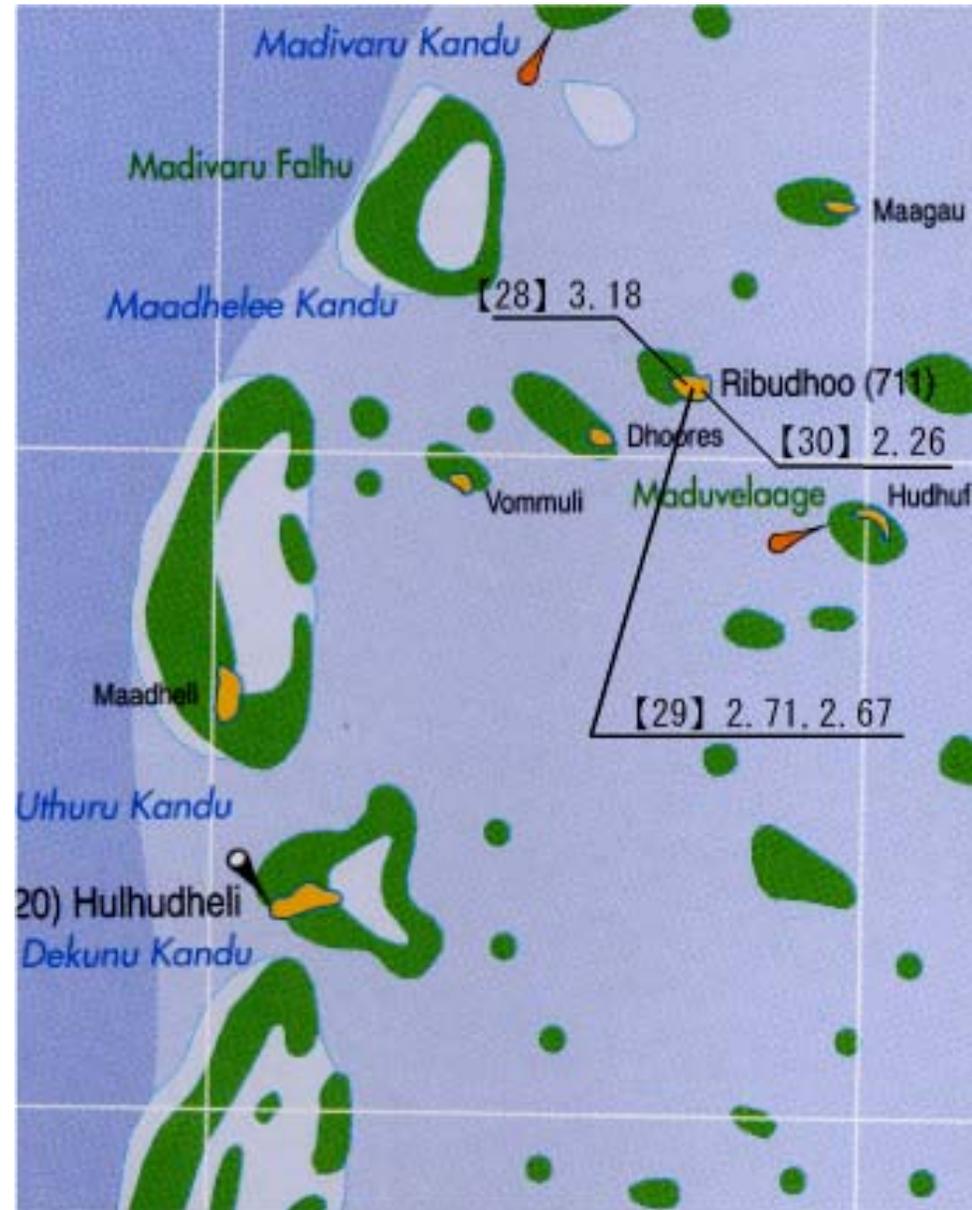


Ribudhoo (Dhaalu attol の中)

- 島の西側にリーフ
- どの方向からも同時に浸水

証言「この島には津波は来なかった。ただ海が盛り上がって浸水した」

- 痕跡高: 島の北西で3.1m, 中央で2.7m, 南東で2.3m



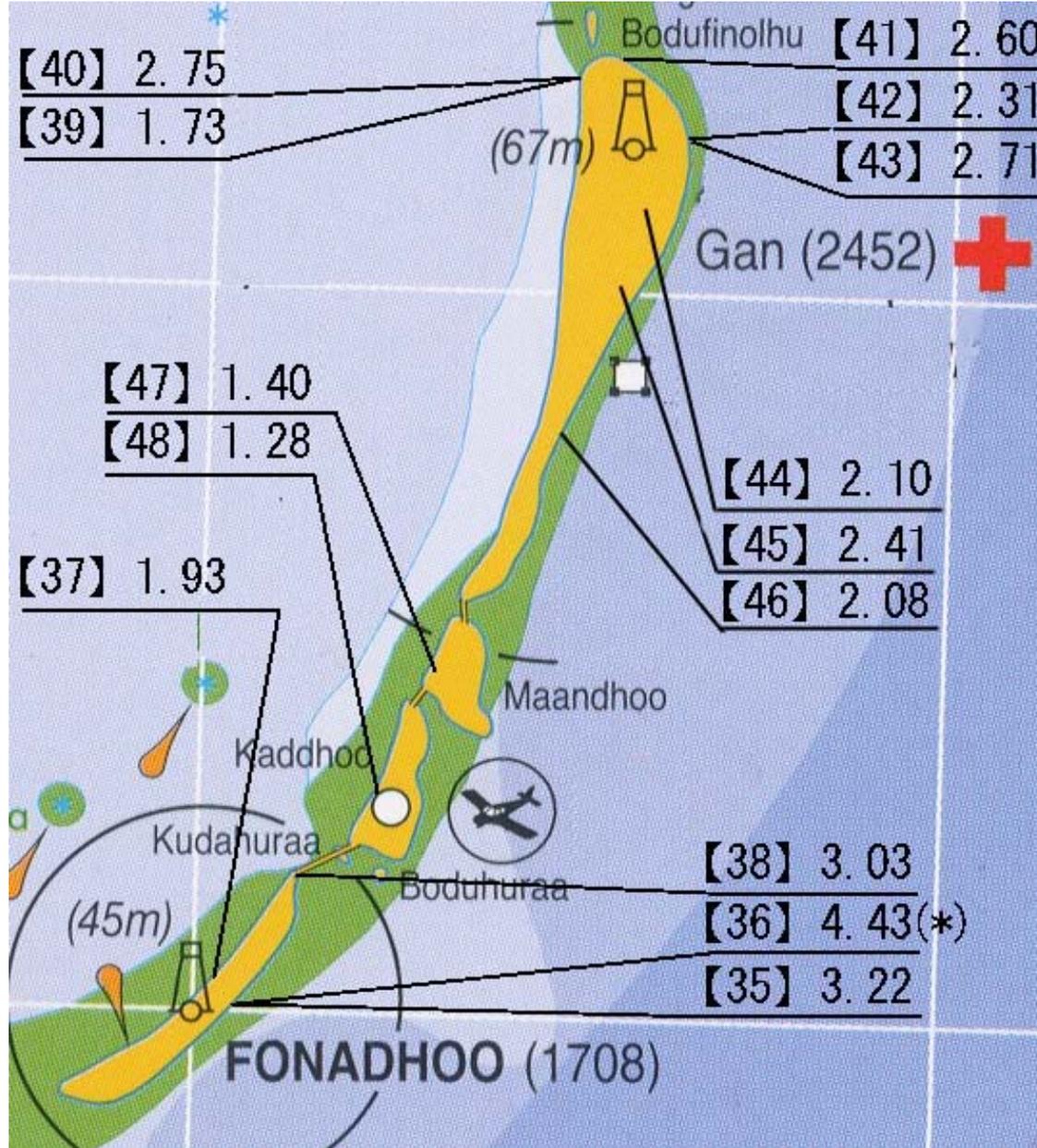
Gemendhoo (Dhaalu attol 東端)

- リーフは西側に発達
- 津波は東から来て西に通
り抜けた
- 壊滅的な被害を受け、島
民が逃げ出した
- 痕跡高：東側で3.1m、西
側で2.7m、北側で
2.7m, 3.2m
- RibudhooとGemendhooの
比較：痕跡高に優位な差
はない



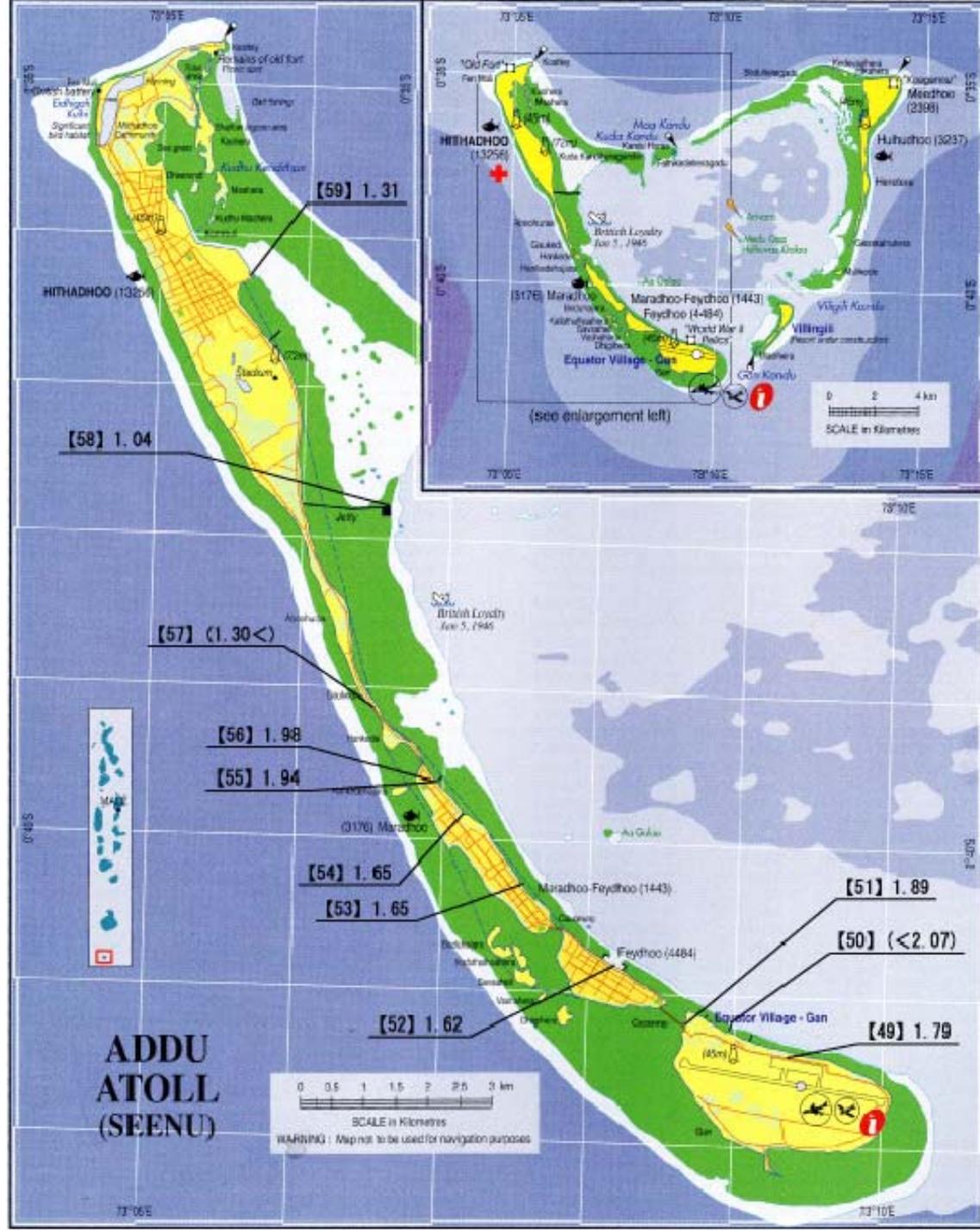
Kaddhoo- Fonadhoo- Maandhoo-Gan (Laamu atoll 東端)

- 津波は東から西へ
- 被害は島岸で発生
- 痕跡高: 1.3-3.2m
- バームのあるGanより、
リーフが発達しバーム
がないFonadhooで被害
が大きかった



Hittadhoo- Maradhoo- Feydhoo-Gan (Seenu atoll 西側)

- 東側(環礁側)で浸水被害
- 痕跡高: 1.3-2.1m
- 若築建設の現場で実測値(時系列)あり



SOURCE DATA

Admiralty surveys

- a 1962 & 1967 1:10 000 & 1:25 000
- b 1962 1:18 000

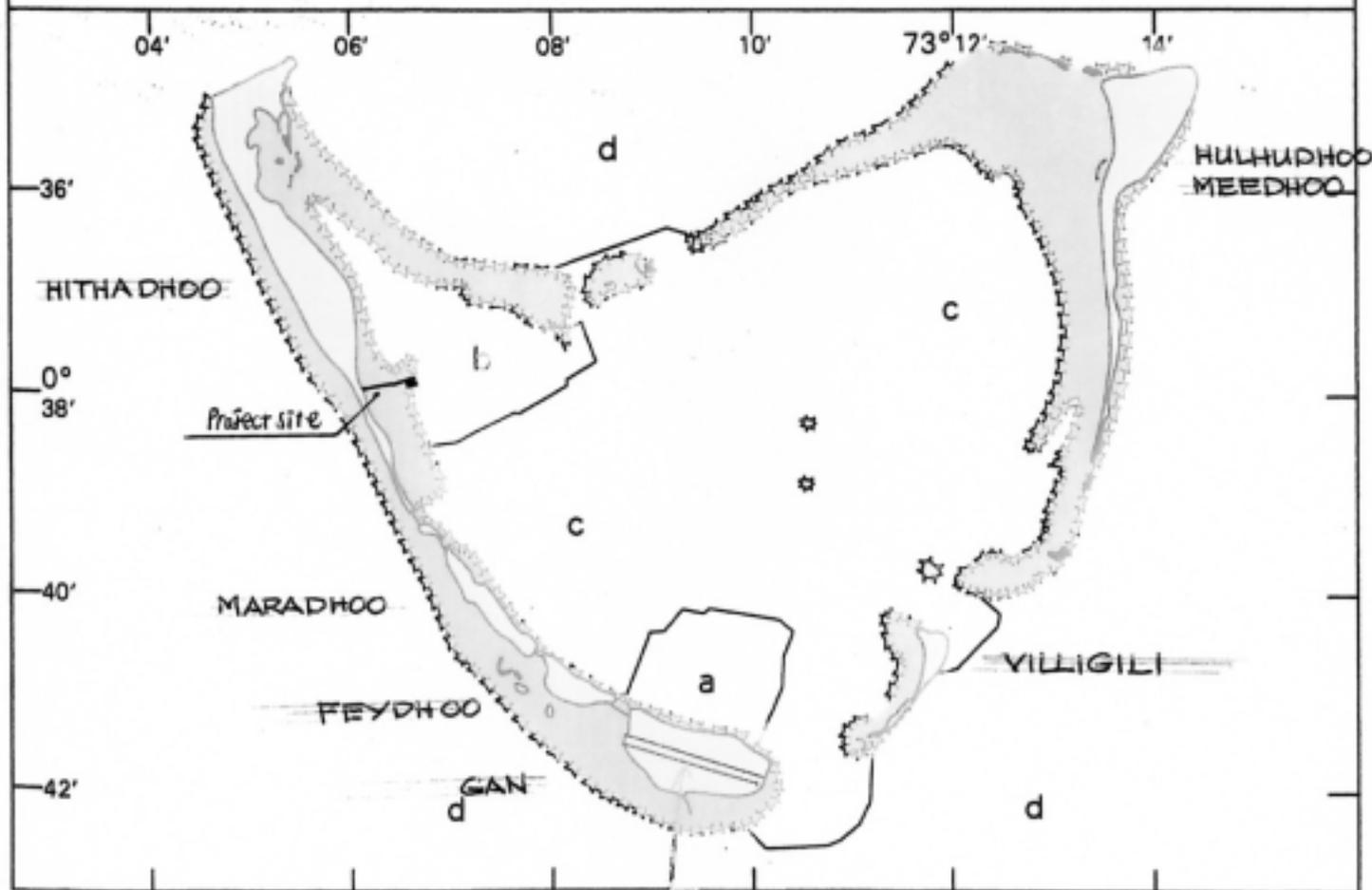
Marine Survey of India Survey

- c 1923 1:18 000
- d Miscellaneous lines of soundings.

4000

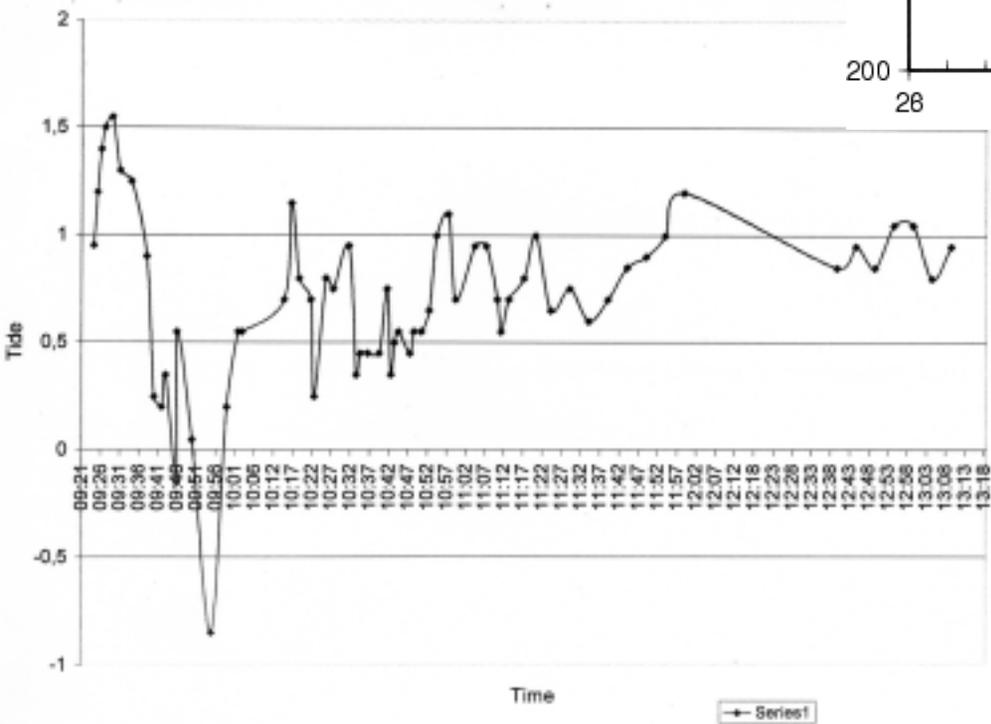
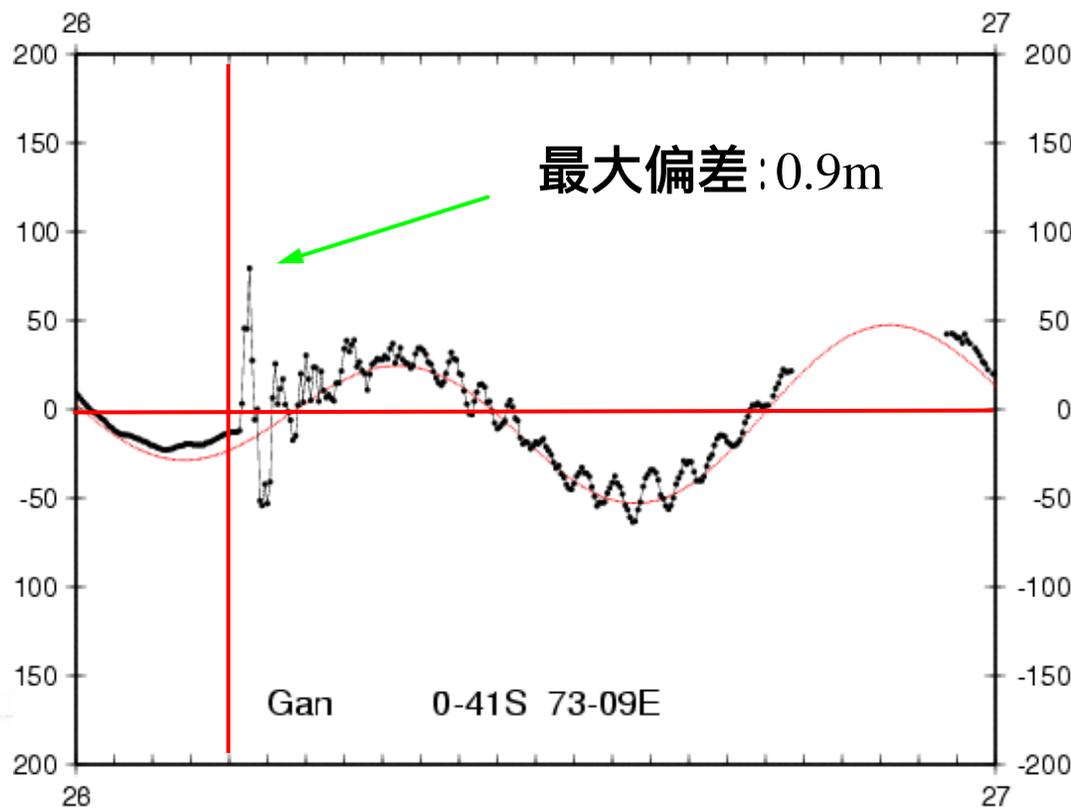
39'

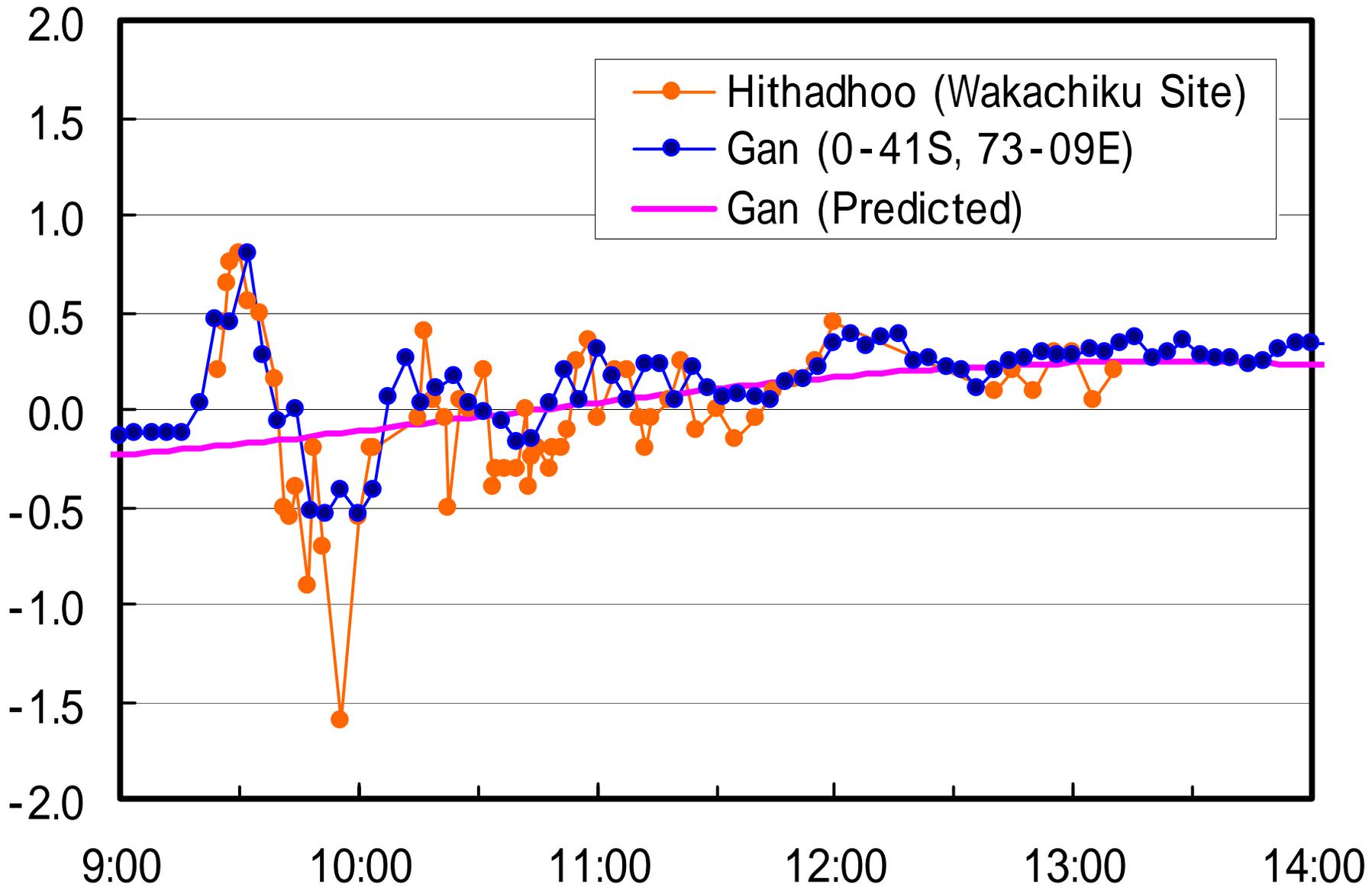
3000

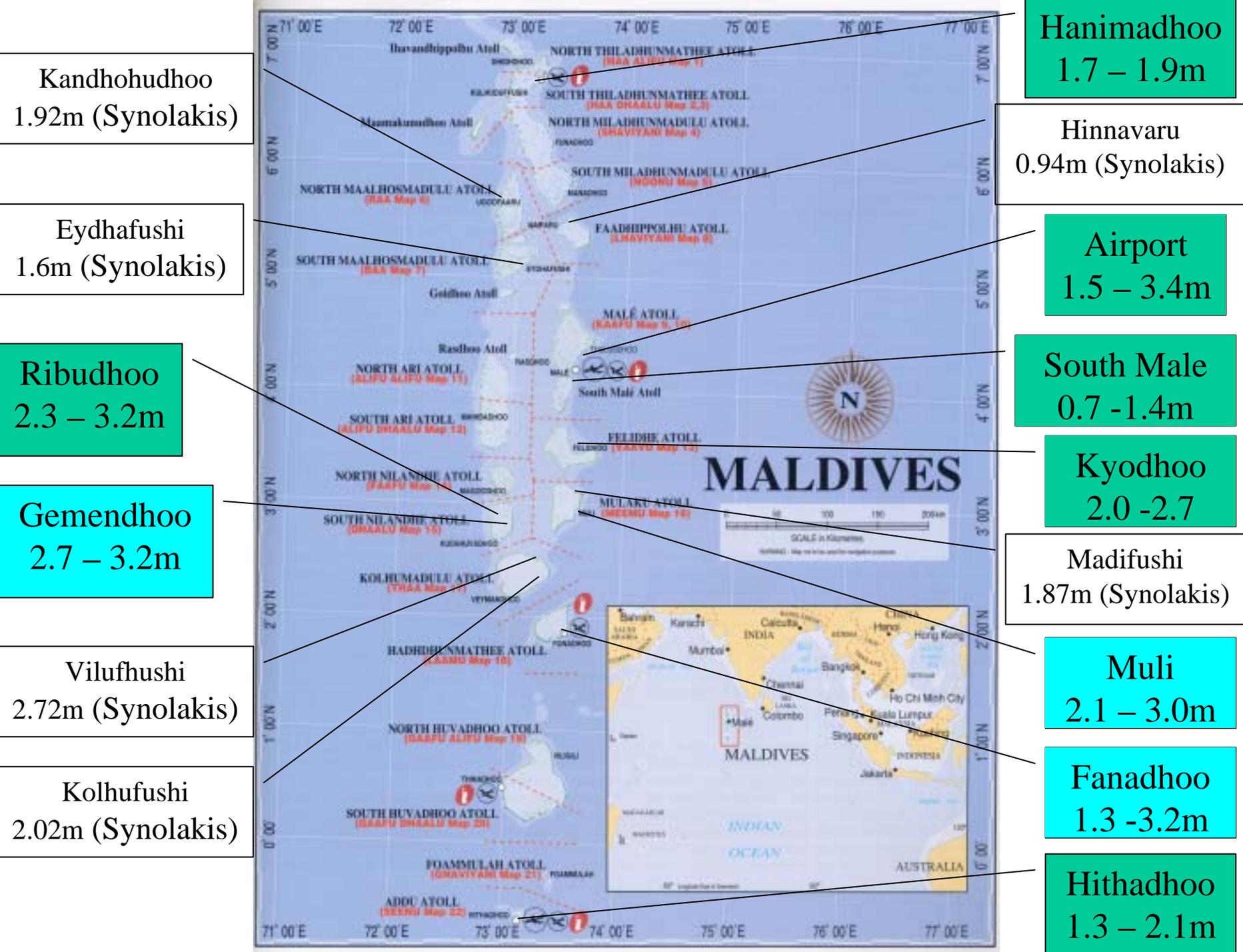


GAN AIRPORT

time	tide(cm)
09:12	-12.87
09:16	-11.96
09:22	3.28
09:26	45.65
09:30	45.34
09:34	79.48
09:38	27.36
09:42	-5.86







Kandhohudhoo
1.92m (Synolakis)

Eydhafushi
1.6m (Synolakis)

Ribudhoo
2.3 – 3.2m

Gemendhoo
2.7 – 3.2m

Vilufhushi
2.72m (Synolakis)

Kolhufushi
2.02m (Synolakis)

Hanimadhoo
1.7 – 1.9m

Hinnavaru
0.94m (Synolakis)

Airport
1.5 – 3.4m

South Male
0.7 -1.4m

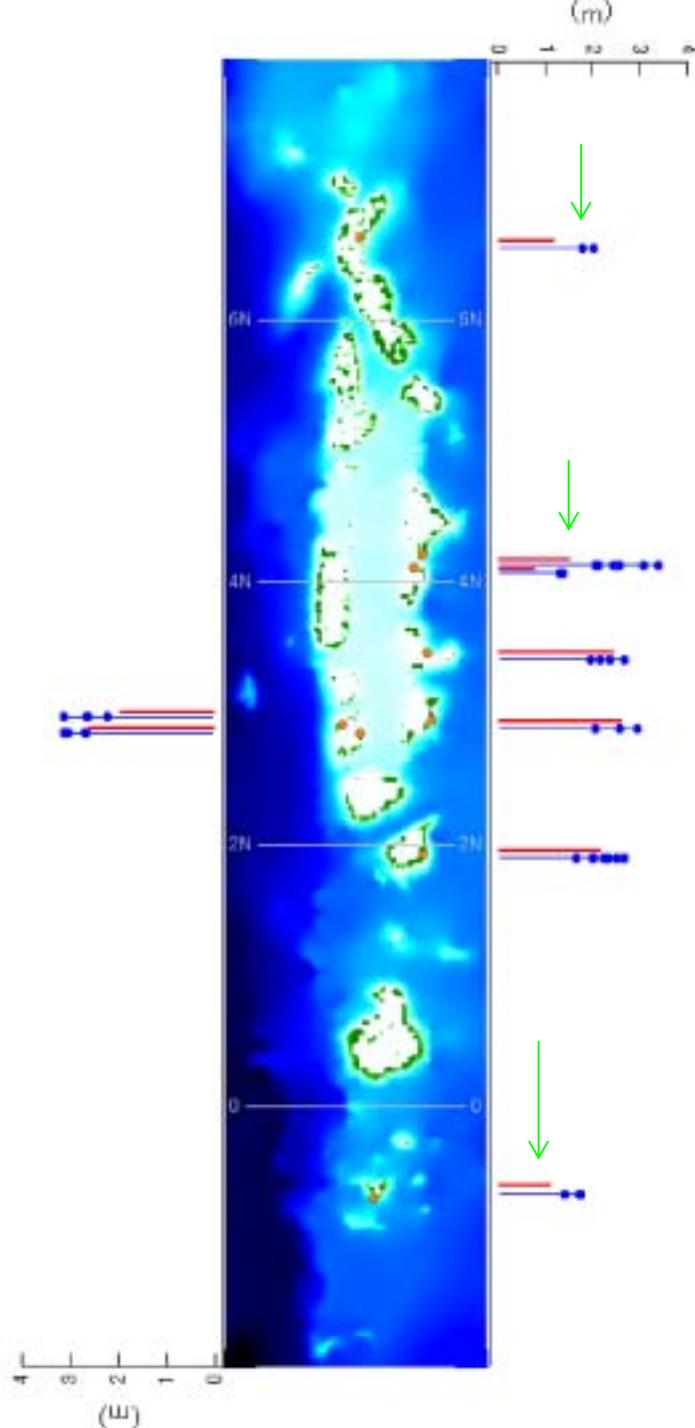
Kyodhoo
2.0 -2.7

Madifushi
1.87m (Synolakis)

Muli
2.1 – 3.0m

Fanadhoo
1.3 -3.2m

Hithadhoo
1.3 – 2.1m



計算値と痕跡高・ 検潮記録の比較

- Kulhudhuffushi : 痕跡高
検潮記録 > 計算値
 - 断層パラメタ?
 - 地形データの精度?
 - 環礁内の増幅?
- Fulhule : 計算値 検潮記
録 < 痕跡高
 - 痕跡は, 空港施設の東側で
取られたもので, 複雑な陸上
地形により変化
 - Male' 北岸の浸水状況から
は, 検潮記録 痕跡
- Gan : 計算値 検潮記録 <
痕跡高
 - 環礁内で慣性力

津波の特徴

- Vaavu環礁からLaamu環礁にかけて2-3m, その外側で1-2m
- 寄せ初動, 1波目が最大
- 環礁
 - 津波は東側から来襲しているが, 環礁内ではあらゆる方向から同時に浸水したという話も
 - 環礁の中と外で痕跡高に差はない
 - 環礁と外側との流出入で強い流れ
 - 環礁内に循環流
 - 環礁への侵入に時間がかかる
 - 北Male'環礁内の津波到達(検潮記録)は9時12分以降だが, 南Male'環礁への流入(目撃)は11分に始まっている

被害の特徴(1)

- 折下のパラドックス = リーフが発達しているところほど被害が大きい
 - リーフ上での段波化による流速増大？
 - リーフ側が高度利用されてきているため被害が目立つ？
 - 外洋サイドでリーフが発達していない場所にはバームができ、そのバームが津波を食い止めている

被害の特徴(2)

- 脆弱な構造物が被災



Keyodhoo, Maldives



26 9:57

Kulhudhuffushi, Maldives



Dhiffushi ? Filladhoo ?
Guraidhoo ? Eydhafushi ?
MALDIVES



By Evening Weekly, Maldives



Kandholhudhoo,
MALDIVES

Male', MALDIVES



Countermeasures in the Maldives

- Education
 - Understanding the basics of earthquake and tsunami
 - Understanding that they can evacuate
 - Understanding the way to evacuate
 - To high place
 - To offshore by ship
- Evacuation
 - National warning system
 - Hazard map
 - Refuge facilities
- Construction
 - Raising the ground level
 - Refuge facilities
 - Construction and maintenance of coastal facilities; seawall, breakwater, and so on
- Risk Assessment
- Experts of coastal engineering and hazard mitigation

現地報告会(2月4日)

