

# モルディブにおける高潮災害の現地調査

宇 多 高 明\*

## 1. ま え が き

インド洋に位置するモルディブ諸島では1987年4月10日より14日までの間、高潮が発生し、首都のマレ島を中心として浸水被害が生じた。浸水と折からの高温多湿によってコレラが発生し、2次災害が生ずるに至った。

モルディブは熱帯に位置し、約1200の島から成っている。これらの島の周りには広大なサンゴ礁が発達し、天然に形成されたリーフのため外洋からの入射波は減衰し、リーフ上の波高は低くなる。そのため高波浪による災害の頻度は高くはないと考えられていた。それにもかかわらず高潮によりかなりの被害が出た。モルディブの首都のあるマレ島は元々その面積は108 haと小さいものであった。

しかし近年の人口集中のため新たな土地が必要となり、1979年以降、リーフ外縁近くまで急速に埋め立てが進んだ。リーフは幅が広いので消波に対して有効なのである。しかしマレ島では、十分な消波構造物も建設せずに埋め立てを進めたため被害が大きくなった。

我が国においても沖縄県を中心とする亜熱帯地方にはサンゴ礁が発達している。これらの保全を考える上で、上述のモルディブの例は有効な資料となるはずである。そこで本報告では、4月と8月に実施した現地調査<sup>1)</sup>の結果をとりまとめた。また、調査の結果得られた興味ある事実として、高潮による新島の形成が挙げられる。これは高波浪によって砕かれたサンゴ塊が波の作用により集積したものである。本報ではこの点についても現地データをもとに論ずる。

## 2. モルディブの地理

### 2.1 モルディブ諸島の地理

モルディブはインド洋上の北緯7°から南緯0°45'の間、東経72°31'から73°48'の間に点在する約1200

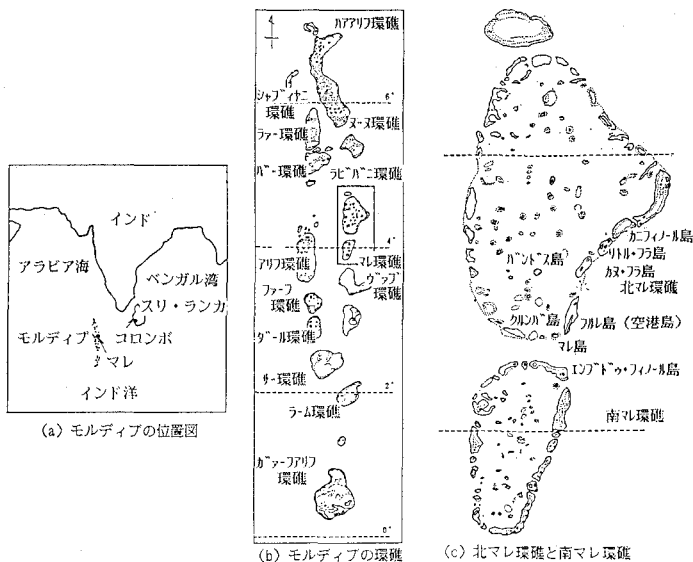


図-1 モルディブの位置図

のサンゴ礁の島からなる(図-1(a))。群島の大きさは、南北が820 km、東西が130 kmである。インドとの最短距離は480 km、首都マレからスリランカのコロンボまでは640 kmの距離である。図-1(a)に示すモルディブの主要部分を拡大すると図-1(b)となる。環礁群が全体として1つの大きなループを描いている。その中の個々の環礁が再び一つのループを形成する。図-1(b)中、首都マレのある北マレ環礁の拡大図を図-1(c)に示す。マレ島は北マレ環礁の南端に位置する小さな島である。またその隣には、空港のあるフルレ島がある。北マレ環礁自体、多くの環礁によってできている。このようにモルディブ諸島は、フラクタル幾何学における自己相似性と良く似た特性を持った環礁群である。島数は約1200あるが、そのうち人間が住んでいるのは約200の島々である。

### 2.2 マレ島の埋立計画

モルディブの国土面積は、佐渡島の約半分の298 km<sup>2</sup>である。その人口は1985年3月現在で181,453人である。首都はマレ島にあり、小さな島に46,334人(1985年3月現在)が居住している。近年になって急速

\* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

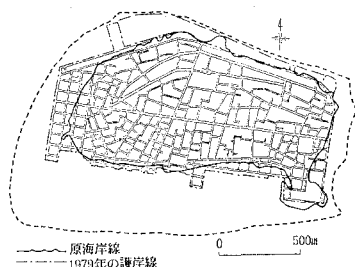


図-2 埋め立て以前のマレ島の形状

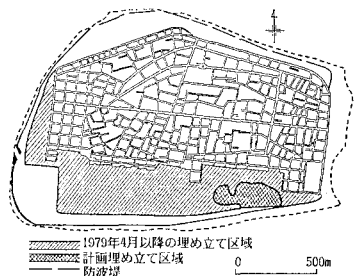


図-3 1979年以後のマレ島の埋め立て実績

に埋め立てが進んだが、人工的な埋め立てが行われる以前の島の面積は 108 ha と小さかった。人口集中が続くため、マレ島では過去から積極的に埋め立てが行われてきた。まず、1979 年以前に 14.9 ha の埋め立てが行われた(図-2 参照)。図中の太い実線が原海岸線を表わし、一点鎖線は 1979 年現在設置されていた護岸位置を表わす。しかしその後も人口増加が続き、土地の不足を招いた。そこで内務・社会事業省が大規模な埋め立てを開始した。埋め立ては主として島の南部を中心に行われ、サンゴ礁の外縁近傍まで埋め立てが進められた(図-3)。1985 年 11 月までに 51.8 ha が造成された。これは埋立計画全体 59.7 ha の 87% に当たるものである。埋め立てに要する土砂量は約 85 万  $m^3$  であったが、その大部分はマレ島の北部の港湾の浚渫土砂が使われた。1979 年以後の埋め立て面積の経緯をまとめると、表-1 のようである。1980 年、1983 年には 10 ha 以上の埋め立てが行われた。このプロジェクトは 1986 年を完成期限とする計画で進められた。

### 3. 高潮災害の状況

高潮は 4 月 10 日夜 9 時頃から始まった。翌 4 月 11 日も高潮が続いたが、晴天であったために、青年海外協力隊員の手により朝 11 時頃にビデオ撮影が行われた。4 月 12 日になると海水は引き始めたが、外海の潮位は依然として高かった。最終的には 4 月 14 日朝頃まで異常潮位が続いた。一般にこの時期は風向きが東から西向きに変わる時期にあたる。空港のあるフルレ島での観測によると、4 月 9 日～13 日の風向風速は表-2 のようであ

る。表に示すように、災害発生時の風はそれほど強いものではなかった。スリランカの気象庁の報告によると、スリランカ周辺では潮位が著しく変化した証拠はなく、モルディブにおける高潮は局所的な現象と報告されている。

マレ島の浸水域のうちとくに状況が明らかになっている南岸の浸水域をまとめると図-4 となる。島の南部を中心に全島の浸水した。浸水域の面積は全

表-1 埋め立て土砂量の経年変化

| 年             | 埋立面積 (ha) |
|---------------|-----------|
| 1979 (4 月以降)  | 0.2       |
| 1980          | 13.6      |
| 1981          | 8.4       |
| 1982          | 8.4       |
| 1983          | 12.5      |
| 1984          | 1.3       |
| 1985 (11 月まで) | 7.4       |
| 1979～1985     | 51.8      |

表-2 フルレ島の空港での風向風速データ

| 日時       | 風向 | 風速 (m/s) |
|----------|----|----------|
| 4 月 9 日  | SW | 1.0～5.1  |
| 4 月 10 日 | SW | 1.5～4.6  |
| 4 月 11 日 | W  | 2.0～8.1  |
| 4 月 12 日 | W  | 2.5～8.1  |
| 4 月 13 日 | NW | 4.6～7.6  |

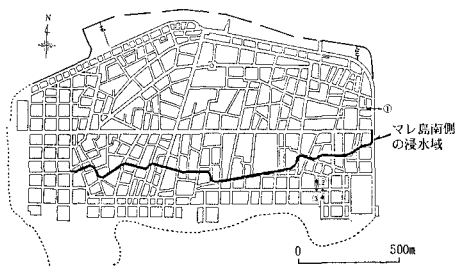


図-4 マレ島の浸水域

島の 48% に達した。もともと島は、サンゴ礁として形成されたため、島の標高は高くなく、平均海面上約 1.5 m 程度である。そこで広い区域で浸水が生じた。興味ある点は、浸水域の広がり方が埋め立て以前の海岸線形状(図-2 参照)とほぼ一致することである。人為的に埋め立てられた部分の高潮に対するぜい弱性を露呈している。また、高潮により埋め立て土砂の約 20% が侵食された。流出土砂量は、約  $3.62 \times 10^5 m^3$  に達し、その被害額は 1200 万ルフィア(約 1.3 百万ドル)であった。全土がサンゴ礁でできたモルディブでは土砂を得ることは容易ではなく、埋め立て土砂が流出したことは大きな問題となった。

マレ島、フルレ島以外に調査を行った 5 島のうち、エンブドゥ・フィノール島は、南マレ環礁内に、またクルンパ、バンドス両島は北マレ環礁に、そしてリトル・フラ、カヌ・フラ島は北マレ環礁の外縁に位置する。それらの島の被害状況を比較すると、北マレ環礁内に位置する 2 島では被害が小さかった。一方、図-1(c)においてマレ島より北東方向に延び環礁外縁を形成する一連の島々では大きな被害がみられた。また個々の島々の中で

も島の南部、南東部に被害が集中していた。これらの被害状況より判断すると、高波はほぼ南東方向より来襲したものと考えられる。

高潮の発生原因には種々の要因が考えられる。潮位、波浪観測データ等がないので、定量的検討は難しいが、2, 3の検討を行ってみる。まず、モルディブの東約 640 km に位置するスリランカのコロンボにおける 1956～1962 年の間の潮位データによれば<sup>2)</sup>、大潮のときの潮差は 75 cm 以内、小潮時で 25 cm 以内となっており、また、通常 3～4 月に大潮となる。今回の高潮は 4 月 10 日より始まったから、時期的には大潮に当たっていたと考えられる。一方、高潮状況を撮影したビデオや写真をもとに、目視で判断すると来襲波高は少なくとも 2 m 以上はある。高潮により平均海面が上昇するとともに、リーフの岸側まで波浪が侵入したが、この場合砕波に伴う水位上昇も生じていたと考えられる。水位上昇量のオーダーは波高の 10% 程度と考えられるから、波高 2 m の波が来襲したとすれば、約 20 cm の海面上昇は生じた可能性がある。一方、強風や気圧の急変によって生じる高潮に関しては、気象データによると当日強風は吹いておらず、異常な気圧低下も報告されていない。このことから局地的に高潮が発生したと考えることは困難を伴う。したがってビデオで捕えられた高波は局所的なものではなく、遠地で発生した波が伝播したものと考えられる。しかし、天体潮と砕波に伴う水位上昇だけは高水位のすべてを説明することも困難である。そのほか海流による影響も考えられる。モルディブ周辺の海流はモンスーンの影響を受け、11～4 月は北東モンスーンにより西向きの海流が、また 5～10 月には東向きの海流が卓越する<sup>2)</sup>。したがって北東モンスーンによる西向きの海流に変化が生じ、それが環礁東縁付近での水位上昇に結び付いた可能性もある。

#### 4. マレ島及びコロンボ港における潮位観測

災害直後の 4 月 24 日～5 月 2 日の間での緊急現地調査では時間的制限より、高潮痕跡を調べることや、災害状況の写真撮影を行うことが限界であり、主として定性的な災害状況把握に止まった。しかし、高潮災害の防止の見地からは測量等により定量的に諸データを集める必要がある。この場合最も問題となるのは、基本データを集める際必要となる潮位や波浪の観測が行われていないことであった。とくに潮位観測は島の基本水準面を定める上で重要であるにもかかわらず、長期間にわたる観測は行われておらず、したがって基本水準面は設定されていなかった。そこで基本水準面と平均水面を設定するために同国のマレ島及びスリランカのコロンボ港に水圧式自記験潮器を設置して潮位観測を実施した。コロンボ港

表-3 マレ島、コロンボ港における主要四分潮の半潮差の比較

単位: m

| 主 要<br>四分潮 | マ レ 島      |               | コ ロ ン ボ 港  |            |        |        |        |      |
|------------|------------|---------------|------------|------------|--------|--------|--------|------|
|            | 本調査団<br>観測 | 日本海上保安庁<br>資料 | 本調査団<br>観測 | スリランカ港湾局観測 |        |        |        |      |
|            |            |               |            | 1953 年     | 1954 年 | 1955 年 | 1956 年 | 平 均  |
| O 1        | 0.04       | 0.05          | 0.02       | 0.04       | 0.02   | 0.03   | 0.03   | 0.03 |
| K 1        | 0.11       | 0.10          | 0.09       | 0.08       | 0.08   | 0.08   | 0.07   | 0.08 |
| S 2        | 0.13       | 0.11          | 0.14       | 0.10       | 0.12   | 0.12   | 0.12   | 0.12 |
| M 2        | 0.23       | 0.20          | 0.14       | 0.17       | 0.17   | 0.18   | 0.16   | 0.17 |

主要四分潮 O 1: 主太陰日周潮 S 2: 主太陽半日周潮

K 1: 日月合成日周潮 M 2: 主太陰半日周潮

に験潮器を設置した理由は次のようである。すなわち、コロンボ港はマレ島から最も近い港であり、また 20 数年間の既往潮位データを有しているの、ここをマレ島の標準港とみなすことができることである。つまり、コロンボ港の既応のデータと今回の観測記録との関連を明確にすれば、コロンボ港およびマレ島における潮位観測記録に基づいてマレ島の基本水準面と平均水面を設定することができる。

最初に、1987 年 8 月 9 日～9 月 15 日の間の両港における潮位観測データをもとに主要四分潮の半潮差を求めた。結果を表-3 に示す。潮汐の調和分解は 30 日分のデータを利用してダーウィン法により行った。また、コロンボ港湾局より入手した既応潮位データのうち、比較的欠測率の低い 1953～1956 年の潮位データをもとに調和分解を行った結果も表-3 に示した。表-3 の主な要点は次のようである。①マレ島およびコロンボ港における潮型は互いに良く似ているが、マレ島の潮時はコロンボ港より 1 時間 28 分進んでいる。②コロンボ港の潮高に対するマレ島の潮高の比は 1.24 である。③コロンボ港の既往潮汐データ (1953～1956 年) の平均潮位は今回の 1 ヶ月間の平均潮位よりも 8 cm 高い。

結局、今回のマレ島における潮位観測により、防波堤上に設けた仮 B.M. より鉛直下方 3.44 m にある験潮記録基準面から平均水面までの高さは 2.93 m であること、また、主要四分潮の半潮差の和は 0.51 m であることがわかった。ところで、今回の観測は 30 日間の記録にすぎないから、長期的に平均水面の変動があると平均水面の設定誤差が大きくなる。そこで先に求めたコロンボ港における過去 5 年間 (1952 年 4 月～1957 年 12 月) の平均水面と今回の平均水面との差 (～8 cm) より、マレ島でもこれと同様な水位差があるとして補正を行った。この結果、基本水準面は験潮記録基準面より 3.01 m となった。また、基本水準面 (D.L.) は平均水面下 0.51 m であって、これは基準面上に換算すれば +2.50 m となる。

#### 5. マレ島南岸の詳細地形測量と浸水位調査

3 節で述べたように、マレ島では南岸で浸水が著しか

った(図-4 参照)。南岸域ではリーフ端近傍まで埋め立てが進められたが、埋め立て土砂を得ること、および航路得ることを目的として、サンゴ礁を掘削し、同時に得られるサンゴ塊を積み重ねて離岸堤が建設されつつあった。この離岸堤は消波にかなり効果を有した可能性があり、今後の高潮対策を考える上で重要と考えられた。そこで南岸地域の詳細な地形測量を実施した。結果を図-5に示す。高さの基準は D.L. 0m としている。リーフ端より約 100 m 付近に細長い水路が掘られており、その深さは最大 5 m に達する。離岸堤はリーフ端より約 40 m 付近に位置する。このリーフ端より外側は約 45° と急な斜面を形成しており、入射波はリーフ端近傍で砕波する。

浸水位の調査は 1987 年 8 月に実施した。高潮災害の生じた 1984 年 4 月 10 日から 15 日の間に撮影された写真および住民からの情報をもとに痕跡調査を実施した。痕跡高さはレベルとスタッフを用いた水準測量法によって測定した。調査地点は図-5に示す 3 地点である。各地点の痕跡高は A 地点が D.L. +1.73 m, B 地点が D.L. +1.60 m, C 地点が D.L. +1.63 m であった。痕跡水位はマレ島の東端に近い A 点で最も高く、次いで西端寄りの C 点, 最後に中央の B 点となっている。高潮の来襲方向はほぼ南東方向であるから、マレ島南岸にはほぼ一様に外力が働いたと考えられる。それにもかかわらず痕跡高に差異が生じた理由は次のようである。まず、A 点ではリーフ端まで低い護岸を除けば波浪減衰効果を持つ施設が何もなかったために、波浪の作用を受け易かった。B 点では図-5に示すようにサンゴ塊を掘削して積み上げた離岸堤がリーフ端近傍にあったため、これにより波浪エネルギーが減衰し、結局浸水位が低くなったと考えられる。

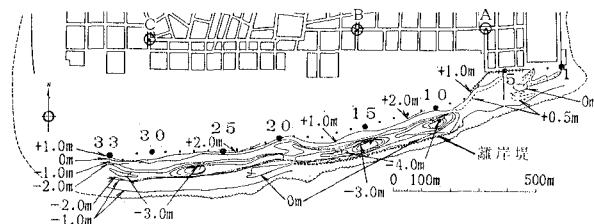


図-5 マレ島南岸の地形

## 6. 新島 (Udhafushi 島) の形成

今回の高潮時、北マレ環礁内において波の作用により新島が形成された。サンゴ礁上においてサンゴ砂、サンゴ塊より形成された島はリーフの消波効果により一般に安定している。しかし以下で論ずる地形変化は、サンゴ礁上にまったく新たに島が形成されたものである。このような事例を調べることは、サンゴ礁上の島の形成機構

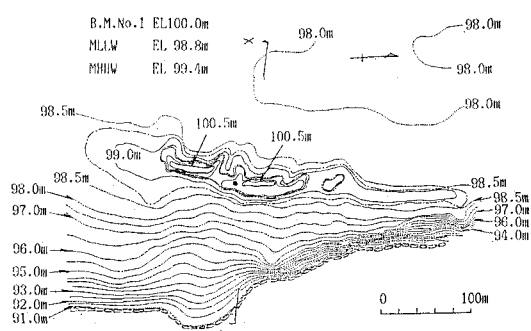


図-6 新島 (Udhafushi 島) の地形

や安定性を理解する上で役に立つと考えられる。

新島は、北マレ環礁内のバンドス島の北東約 6.5 km の地点 (北緯 4°17'25", 東経 73°31'25") で形成された (図-1 (c) 参照)。形成された島の地形図を図-6に示す。地盤高は新島上に設けた B.M. No. 1 の高さを 100.00 m と仮定し、m 単位で各地点の高さを示した。B.M. No. 1 は MLLW +1.2 m の高さにある。この地点の MHHW は MLLW +0.60 m にあり、したがって EL 99.40 m が MHHW に等しい。以下では EL 99.40 m を連ねた線を平均汀線とする。新島の形成された付近の海底地形は次の特徴を有している。まず、島の東側はリーフ端が近く、急激に深くなっている。リーフ端までの距離は北側ほど短い。一方、島の西側はほとんど平坦であり、地盤高は EL 約 98 m である。平均汀線をもとに島の形を調べると、島は 2 個形成されている。両島の南北、東西方向の最大投影距離を調べると、北島は 25 m × 18.5 m, 南島は 164.5 m × 60.5 m となっている。南側の島がその広さ、高さとも北側の島に比較してはるかに大きい。両島の周辺には南北方向に細長い浅瀬が存在する。また、南島には 2 つのピークがあり、その高さはいずれも EL 100.50 m (MHHW +1.1 m) である。これらのピークは、各々南北両端部において尾根状に高さが低くなっている。それらの尾根の伸びる方向は、北西または西向きである。このような地形は、高潮に伴う高波浪がほぼ南東方向から来襲したことを表す。

島の代表断面形として、図-6 の X-X 断面を選んでその断面形を図-7に示す。この断面では東側斜面に対し西側斜面の方が急である。汀線と頂点を結ぶ平均勾配は前者が 1/10.7, 後者が 1/4.6 となっている。断面図には新島が形成される前の断面形も示し

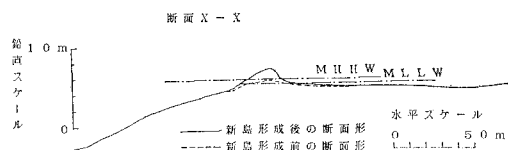


図-7 新島の代表的断面形



写真-1 新島の状況

た。島の形成以前にも小高い丘があり、その高さは MHHW  $-0.2\text{ m}$  であった。図-7 ではサンゴ塊が堆積した部分のみが表示されており、侵食部分は明らかでない。この原因は、サンゴ塊がかなり広い区域より集められたことにより、深浅測量データから侵食区域を明らかにすることが困難であったためである。次に、新島の状況を写真に示す。写真-1 は島の東岸を南向きに撮影したものである。大量のサンゴ塊が打ち上げられていることが明らかである。

結局、ほぼ南東方向から来襲した高波浪がリーフ端で碎波し、それによる波力によりサンゴが碎壊され、さらにサンゴ塊の粒径が大きいために、岸向き漂砂が卓越することにより浅海域に移動して新島が形成されたと考えられる。

## 7. 結 論

モルディブにおける高潮災害の緊急調査結果の要点を

以下に記す。

- ① モルディブの首都のあるマレ島では高潮により島の総面積の約 48% が浸水し、約  $36\text{ 万 m}^2$  の埋め立て土砂が流失した。浸水域の分布は 1979 年以前のサンゴ礁埋め立て以前の原海岸線とはほぼ一致しており、サンゴ礁を急速に埋め立てた部分の高潮に対するぜい弱性が明らかになった。
- ② マレ島では過去、精度の高い潮位観測は行われておらず、基本水準面は設定されていなかった。そこで、マレ島とコロombo港での同時潮位観測を約 1 ヶ月間実施した。この結果、マレ港の基本水準面 (D.L.) が平均水面下  $0.51\text{ m}$  であることがわかった。
- ③ マレ島の代表 3 地点の浸水痕跡調査によると、最高痕跡は D.L.  $+1.73\text{ m}$  であった。
- ④ 高潮の作用によりサンゴ礁に新島が形成された。新島は 2 つからなり、その南北、東西方向の最長投影長さは、 $25\text{ m} \times 18.5\text{ m}$ 、および  $164.5\text{ m} \times 60.5\text{ m}$  であった。また、島の高さは、MHHW  $+1.1\text{ m}$  であった。島は数十 cm の大きさのサンゴ塊から成っており、リーフ外縁での碎波によりサンゴが砕かれ浅海域に運ばれて推積して形成されたものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 宇多高明・佐合純造：モルディブにおける高潮災害の緊急調査，土木技術資料，Vol. 29, No. 10, pp. 44~49, 1987.
- 2) Bernard Swan: An introduction to the coastal geomorphology of Sri Lanka, A publication of the national museums of Sri Lanka, p. 182, 1983.