

スマトラ沖地震津波によるスリランカでの被害 に関する現地調査-河川被害を中心として-

FIELD INVESTIGATION OF DISASTERS IN SRI LANKAN RIVERS CAUSED BY
SUMATRA EARTHQUAKE TSUNAMI

田中 仁¹・中川 一²・石野和男³・矢野真一郎⁴・Bandara Nawarathna⁵・
安田 浩保⁶・渡邊康玄⁷・長谷川和義⁸

Hitoshi TANAKA, Hajime NAKAGAWA, Kazuo ISHINO, Shinichiro YANO, Bandara
NAWARATHNA, Hiroyasu YASUDA, Yasuharu WATANABE, and Kazuyoshi HASEGAWA

1フェロー会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

2正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

3正会員 工博 大成建設(株)技術センター主席研究員 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

4正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

5正会員 Ph.D. 大成建設(株)技術センター客員主任研究員 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

6正会員 博(工) (独)北海道開発土木研究所研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

7正会員 博(工) (独)北海道開発土木研究所室長 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

8フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

The magnitude 9.0 2004 Indian Ocean Earthquake triggered a series of lethal tsunamis on December 26, 2004 that killed over 225,000 people, making it the deadliest tsunami in recorded history. In order to investigate this tsunami and related damages from the hydrological and hydraulic aspects, the Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering, Japan Society of Civil Engineers (JSCE) delegated its members whose majors are coastal hydraulics, river engineering, hydraulic engineering and hydrology as a tsunami investigation team by JSCE. In this paper, results of filed investigation are shown mainly for disasters in rivers. The present survey results will be useful for future planning of tsunami disaster prevention in Sri Lanka, as well as in Japan, where near future occurrence of tsunami disaster is highly expected.

Key Words : Sri Lanka, Sumatra Tsunami, Tsunami disaster, river, field investigation

1. はじめに

平成16年12月に発生したスマトラ沖地震に伴うインド洋大津波により、スリランカでは甚大な被害が発生した。そこで、水工学委員会ではこれまでに十分な調査がなされていない、河口部での津波被害、津波の河川遡上の実態について調査を実施した。これらの成果は当該地域での今後の防災計画に生かされるばかりではなく、近い将来に大規模な津波の来襲が予想されている我が国における防災にも資するものと考えられる。また、津波防潮堤などにより防護された沿岸部に比べて、河口部は津波に対する脆弱性を有しており、特に河口・河川部を対象とした調査の意義は極めて高い。

なお、派遣先としてスリランカを選定したのは、地震動の影響がなく、津波の影響を純粋に調査できること、政府調査団を含めて各調査団がインドネシア・アチェ州

に調査の主力を置いていることによる。

2. 調査対象

スリランカ沿岸域の津波高さに関してはすでに様々な調査がなされている¹⁾。これによれば、震源地のスマトラ沖に面した東海岸では10mを超す波高である。南東海岸から南西部にかけて徐々に波高を減ずるが、この地域には比較的大きな都市部・リゾート地が集中するために、人的・物的に大きな被害が発生している。そこで、本調査においては図-1に示された河川、地域を調査対象とした。なお、スリランカ南西部では2003年5月に大規模な豪雨災害が発生した。そのため、土木学会水工学委員会では災害調査団を組織し、同流域を含む三河川の調査を実施している²⁾。今回の調査対象はこの豪雨災害調査の対象と重複するものが多い。

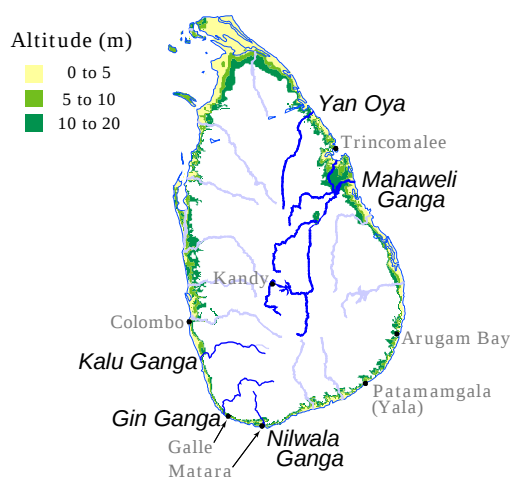


図-1 調査対象河川

表-1 調査対象河川の形態と津波遡上状況の比較

河川名	河口砂州		河口水深	両岸の状況	津波の遡上距離	津波の減衰率
	規模	形態				
カル川	大	安定	深い	氾濫原は狭い	約20km	小
ギン川	小	安定	浅い	広大な氾濫原、樹木は少ない	5～6km程度	大
ニルワラ川	大	安定	深い	広大な氾濫原を樹木が被覆	約8km	中
ヤン川	中	不安定	浅い	樹木が密生	3～4km程度	大
マハベリ川	中	不安定	浅い	広大な氾濫原を樹木が被覆	不明(約3km地点には未到達)	大

調査を実施したスリランカ南西部の主要3河川および東部の2河川について、各河川の特徴と津波の遡上をまとめたものが表-1である。津波の遡上は、河口砂州の規模よりは、河道両岸の氾濫原の規模や堤防の有無、植生の状態に依存しているようであった。

3. カル川における津波遡上・被害状況

カル川は流域面積2,690km²、幹川流路延長約100kmを有する河川である。源流の山岳地帯から河口までの標高差は約2,250mであるが、上流端から始めの36kmで標高2,250mから14mにまで急激に落下していることから、その流路の大半は勾配が1/5,000程度の緩勾配河川である。このため、河口から上流へ向けて長距離にわたる津波の河川遡上が発生したものと期待された。また、河口部には3kmにも及ぶ砂州が発達しており、砂州自体ならびに砂州上に繁茂する植生による津波の減勢に着目した。なお、同河口部での津波来襲前および来襲時の衛星画像が日立ソフトにより公開されている¹⁾。

現地調査では特に砂嘴上の状況、および河口部に位置する橋梁の状況を調べた。まず、砂嘴上の様子を写真-1



写真-1 砂嘴上の越波による洗掘

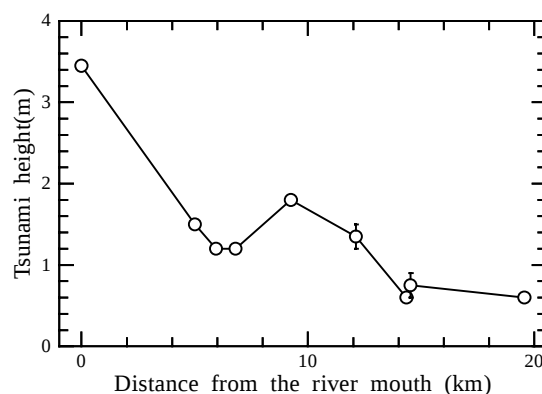


図-2 河口を遡上した津波の波高

に示した。上記衛星画像によれば、津波来襲後に砂嘴地形に大きな変化は認められないが、現地踏査によれば写真-1のように越波の跡が認められた。ただし、越流による土砂の河口内への押し込みの規模は大きなものではなく、写真-1に見られるように、植生の流失も部分的なものであった。河口に近いカルタラでの浸水深は3.5m¹⁾であり、一方、現地での測量によれば砂嘴の高さはほぼ2.6m(潮位補正済み)であった。よって、津波来襲時には最大で0.9m程度の越流水深であったものと推測される。同様な越波は津波でなくとも高波浪時に見られるものであり、主にバリアーアイランドの消長との関連でこれまでも多くの調査・研究がなされている³⁾。写真-1に見られた地形変化はそれらにきわめて類似している。

河口開口部から約2.5kmの位置には橋梁が横断している。ただし、この橋梁は全く被害を受けていない。著者ら¹⁾の橋梁被災調査にも見られるとおり、中小の河川では橋梁被害が顕著であったが、大河川ではそれが見られない。スリランカの西海岸に限定すれば、洪水対応の対策が津波時にも効果的に機能したと判断された。ただし、後述の通り、スリランカ東海岸でははるかに高い110mを超える波高が各所で観測されている。このような激しい津波の波力により、例えば、アルガムベイでは橋梁取り付け部の盛土が流失したり橋脚の洗掘により床版がずれたりなどの大きな被害が出ている。

前述のとおり、カル川は河床勾配が穏やかであるために、河川遡上が認められた。聞き取りにより得られた波の高さを図-2に示した。カル川沿いには多くの砂利採取箇所が見られ、そこで働く作業員が津波の河川遡上を目撃していた。このうち、0kmでの値は海岸に面した地点



写真-2 ギン川の河口砂州



写真-3 ギン川の河口上流の氾濫原

での値を示している．これに対し，河口内の津波高さは最大でもおおそ半減したものになっている．このうち，12km地点では大きな波の直後に小さな波が3，4度に渡って遡上したとの証言があり，ソリトン分裂の存在を示唆しているが，それ以上の確証は得られていない．最上流地点では波動としての形態は持たず，緩慢な水位の上下が観察された．

一般的に河川河口部は津波に対して脆弱性を有しており，スリランカでは河川堤防が未整備な区間も多い¹⁾．カル川に限定すれば，今回河川遡上津波による被害は見られなかった．ただし，後述のように，東海岸やこれよりも波高の低かった西南海岸沿いにおいて中小河川を中心に多くの橋梁被害が見られている．

4．ギン川における津波遡上状況

カル川，ニルワラ川の河口には，それぞれ，カルタラ市とマータラ市が存在するが，ゴール県の県都ゴールとスリランカーのマリン・リゾート地であるヒッカドゥワに挟まれたギン川の河口には都市は存在しない．ギン川は流域面積が947km²，流路長が112kmであり，大部分がゴール県を流れている²⁾．また，写真-2 に示すように，河口には長さ1.5km程度の砂州が存在するが，カル川，ニルワラ川の砂州に比べて小規模であり，水深も浅い．写真-3に示すように上流側は広い氾濫原を持ち，両岸は深い植生が広がっていた．

ギン川には，中国プロジェクトによる堤防が建設され，



写真-4 河口から9kmの架橋地点から右岸側堤防を望む

広大な高水敷が存在する．河口左岸側のギントータ地区では，2m程度の高さで浸水したが大きな被害の報告はなかった⁴⁾．横浜国大の柴山教授らの調査によると，津波はギン川の河口の橋梁地点で4mであり，河口から上流約4.6 kmの地点の河岸から24～40mの所で1.2～1.6mの高さで陸上を遡上したと報告されている¹⁾．本調査では，ギン川の河口橋梁位置から上流へ直線距離約3.4kmの塩水遡上防止堰の地点で，約30cmの高さで河道の遡上を見るときに堰は被害を受けなかったとの報告を堰の建設関係者から受けた．なお，調査時間の関係上，本調査では堰より上流の調査は行わなかった．

以上の調査結果を総合すると，ギン川は河口部でも水深が浅く広大な高水敷が存在して，それらにより津波のエネルギーが減衰するとともに，両岸に堤防や植生が存在することから大きな被害は生じなかったと推察された．

5．ニルワラ川における津波遡上状況

ニルワラ川の河口には，マータラ県の県都マータラ市が存在している．マータラの人口は2001年時点で約11万人であり，スリランカ南部の主要都市の1つである．ニルワラ川は，流域面積が1,077km²，流路長が70kmであり，マータラ県南部から北部へ流れている²⁾．また，河口砂州は十分に発達し陸地化して，砂州上には民家・ホテル・公共施設等が存在しており，海岸は砂浜であった．

河口から7km地点では，ココナツ農園が右岸側の堤外地に存在していた．この地点では，水面から60cmまで浸水したとのことであったが，大きな被害はなかったとの住民の証言を得た．河口から9kmの架橋地点では，津波の遡上は確認されていない（写真-4）．左右岸は，樹木に覆われ，広大な氾濫原が存在することから，それらにより津波は減衰したと推測される．

6．ゴール市内の津波遡上・被害状況

ゴール市はコロンボ市からほぼ南へ約116kmに位置するインド洋に面した人口約11万人の歴史都市である．旧市街地のフォート地区は高台にあり，かつ，砦に守られ



図-3 ゴール市およびその周辺での津波浸水域と現地調査地点での浸水深

表-2 ゴール県での被害概要⁵⁾

被災項目	被災規模
被災世帯数	26,728世帯
被災者数	135,389人
死者数（旅行者等を含む）	4,233人
初期避難者数（IDPキャンプ）	69,000人
初期避難世帯数（IDPキャンプ）	9,160世帯
初期IDPキャンプ数	185キャンプ
現在IDPキャンプ数	5キャンプ
現在避難者数（IDPキャンプ）	581人
道路被害額（RDA関係 ^{*1} ）	121.1百万Rs.
道路被害額（PRDA関係 ^{*2} ）	29.2百万Rs.
通信施設関係被害額	294百万Rs.
屋外施設被害数	5基
伝送施設被害数	1基
発電施設被害数	1基
交換機施設被害数	1基
電力供給施設被害額	268.53百万Rs.
その他の被害として 寺院・モスク・教会、他 病院 公立学校 ゴールカチチェリ、ヒッカドゥワおよびハ バラドゥワ区庁舎の被災 海軍キャンプ被害額 ^{*3} 地方の公的および民間のオフィスおよび貿 易センターの多くが激甚な被害	51施設 2施設 25校 191.67百万Rs.

*1 RDA：Road Development Authority, Ministry of Highwayの略。Akurala, Sinigama, Magalle, Ahangamaのコンクリート橋4橋の被災を含む。

*2 PRDA：Provincial Road Development Authorityの略。橋梁、カルバート、約50kmにわたる道路の被災を含む。

*3 建物、機器、車両、その他を含む。

ていたため、今回の津波では被災しなかったが、新市街地は海岸部に防波堤などの防災施設がなかったために、海岸から200m～500mにわたって津波の遡上による甚大な被害を受けた。

2004年12月26日午前9時26分、津波の第1波がゴール県に來襲し、その約20分後に第2波が押し寄せた⁵⁾。第2波は第1波より規模が大きく、これにより、ゴール市内の海岸域一帯は約6m浸水した。図-3はゴール県が取りまとめたゴール市における浸水域と現地調査で得た数地点（赤丸）での浸水深を示したものである。この津波の來襲により、ゴール県では死者4,233人、被災者135,389人という甚大な被害が発生した。被害の概要⁵⁾を表-2に示す。

ゴール市のバスターミナルの横を流れているパラナ川

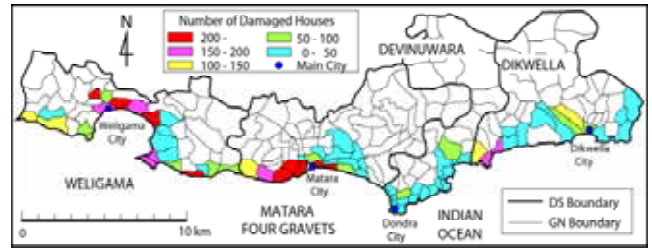


図-4 マータラ県被災4地区での被害戸数の分布

に沿って津波の痕跡から浸水深を計測したところ、ゴール県庁が取りまとめた浸水範囲の外でも浸水が生じており、この河川に沿って2km程度津波が遡上り氾濫している。また、モラゴダ川沿いでも浸水域外で30～88cmの浸水が認められ、津波は1km程度この川に沿って遡上し、局所的な氾濫が生じていた。このことは、わが国での津波氾濫対策を考える上で、中小河川での津波遡上に対しても十分配慮しなければならないことを示唆するものであり、また、津波遡上計算では中小河川も考慮したきめ細かい取り扱いが必要であることを示唆するものである。

7. マータラ市内の津波遡上・被害状況

マータラ市はコロンボ市から南へ約161kmに位置する、ニルワラ川河口域に発達した人口約65,000人の都市である。マータラ県では約51kmに及ぶ海岸線のほとんど全てで激甚な被害を受け、海岸線を有するウェリガマ地区、マータラ地区、デヴィヌワラ地区およびディックウェラ地区の4地区のみに被害が集中した。地区をさらに小区分化したGN Divisionと呼ばれる小地区の家屋被災戸数の分布を図-4に示す⁶⁾。被災戸数は各GN Division内にもともと存在していた家屋数にも依存するが、ウェリガマ地区の湾奥部とマータラ地区のマータラ市を中心とする海岸部でとくに多くの家屋が被災している。また、マータラ地区では沿岸部だけでなく陸地の奥の方まで被災したGN Divisionが見受けられる。そしてその地域はニルワラ川がほぼ貫流する地域であることから、津波がニルワラ川に沿って遡上し、内陸の低平地で局所的な氾濫を生じたことによるのではないかと推定される。同図より、4地区における津波の來襲範囲がほぼ推定できると思われる。

8. ヤ-ラの被害状況

ヤ-ラ自然公園の被害状況では、8人の日本人を含む50人が亡くなった海辺の地点を主に調査した。津波の遡上高さは、立ち木の枯れ葉の状況から、7mから7.5mと測定された。立ち木の中には2m前後の高さで破断したもの、および、ロッジおよび立ち木の周辺では最大で0.6mの砂の流失が見られた。

写真-5、写真-6に、ロッジの背後にある堤防を兼ねた道路の破壊状況を示す。この道路の背後には小規模な



写真-5 道路の破壊状況



写真-6 道路の破壊状況

溜め池が存在していた。津波により、写真-5に見られるように盛土が破断した。盛土の高さは約2.5m、破断部の幅は45mほどであった。写真-5の破断部には、津波来襲以前には存在していなかった水路が残存している。当然、調査時にこの水路を流れる流量は無く、海に接する開口部はすでに閉塞状態にあった。

この道路の破壊で特徴的な点は、海側の法面だけが損傷を受けていた点である。上述の海に向かう水路の形成は、戻り流れによる流体力の大きさを物語っており、海側の法面侵食も戻り流れによるものと考えられる。寄せ波時には、盛土高さよりさらに高い水位までほぼ瞬時に上昇し、越流の形態を示さなかったであろう。引き波時には貯水池内に貯留された海水が越流を伴って排出され、道路の海側法面を侵食しつつ、ついには盛土を破断させて水路を形成したものと推測される。このような機構は、戻り流れによる橋梁の被災機構⁴⁾に一致するものである。

9．東海岸河川における津波の河川遡上

スリランカの東部海岸は、潮流が強く漂砂が顕著なために河口砂嘴が発達していることが多い。このため、河

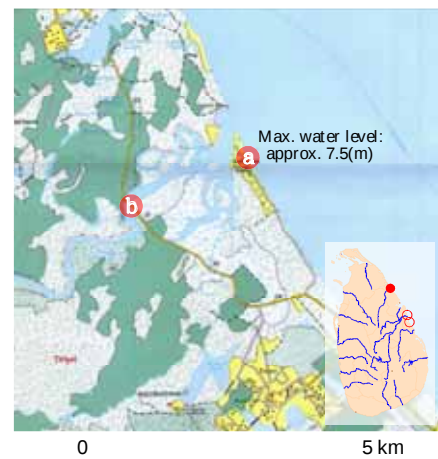


図-5 ヤン川河口域（図中のb地点までは河口からおよそ3.5km．この区間の河岸はマングローブを主とした植生が密生している．

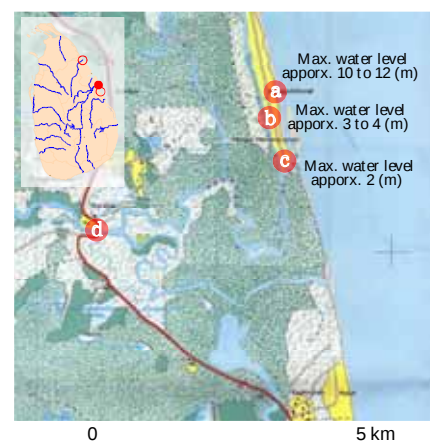


図-6 マハウェリ川河口域（図中のc地点からd地点まではおよそ3.2km．）

口近傍の水深は極端に浅いなど、我が国の一般的な河川の下流域とは状態が大きく異なる。この地域に河口を有する河川のほとんどは、海岸沿いのラグーンを経由して海に接続するものがほとんどで、単純な河口形状を呈する河川は非常に少ない。今回調査の対象としたヤン川とマハベリ川は、それぞれ図-5、図-6に示したように比較的単純な形状の河口を有する数少ない河川のひとつである。

(1) ヤン川における津波遡上・被害状況

図-5中にaで示した海岸一帯における津波の最大水深はおよそ7m程度にまで達していたことが明らかになった。その一方で、河口部の河岸において植生の倒伏や土砂の堆積・洗掘などの痕跡は認められるものの、その規模は海岸沿いの遡上状況に比して顕著なものではなかった。この理由は次のように考えることが出来る。海岸線沿いは障害物を何も有さないのに対し、河口部近傍の水深は砂嘴の影響を受けて非常に浅くなっている。すなわち、津波は河道へ浸入したものの、その強力なエネルギーがここで散逸してしまうために、河口から上流に向

かう長距離の溯上が出来なかったものと推測される。

住民からの聞き取りの結果、図-5中にbで示した河口から3.5kmの地点における津波の浸入に伴う河川の水位上昇は最大で0.5m程度、場所によっては河床が4m程度上昇したことが分かった。この河川の河口付近での津波の最大水位とこの地点の地盤標高から考えると、この地点での水位上昇量は小さいと言える。河口からこの地点までの河岸にはマングローブが密生しているうえ、河口部の水深は極めて浅く、これら二つが遡上距離の抑制に大きく関与していたものと推測される。しかし、現時点では、これを十分に説明し得るだけの知見は乏しいうえ、他の可能性も否定できない。津波の河川遡上に対する植生や河口地形の寄与度などの今後の検討に期待したい。

(2) ハマウエリにおける津波遡上・被害状況

ハマウエリ川はスリランカで最大の流域面積を誇る河川で、トリンコマリ湾とインド洋に面する2つの河口を有している。今回の調査では、2つの河口のうち、図-6に示したヤン川と同様に比較的単純な形状をしたインド洋に面するものを対象とした。

河口付近には図-6中のa、bで示した一帯にMudduchchenal村が存在していたが、今回の津波の来襲で完全に破壊され、現在は無人となっている。同図中にaで示した海岸線に沿ったヤシの樹林帯における津波の最大水深は10～12m程度、同図中にbで示した村内の街路樹に沿った地点での平均的な水深は3～4mに達していたものと考えられる。一方で、同図中にcで示した河道に沿った陸域の最大水深は2m程度であり、両者には大きな相違が見られた。この理由は、村内では街路樹や構造物の影響を受けて津波氾濫流の入射側の水深は大きく上昇したものの、河道沿いの領域は村内と比べ津波の流れを遮る障害物が相対的に少ないためにここでの最大水深はそれほど大きくならなかったものと考えられる。

図-6中のc付近の河岸において津波の溯上による土砂移動を調査した。その結果、河道近傍では戻り流れにより発生したと考えられる河岸の局所洗掘、河岸より50m内陸側では0.3m程度の土砂堆積が見られた。ただし、両者ともに終局状態であり、その形成過程は不明である。

(3) 我が国の事例との対比

我が国の河床勾配が1/5000程度よりも緩やかな河川では、河口における津波の最大波高が1m程度であっても河口から数km上流まで達したことが報告されている⁷⁾。これに対し、今回、調査を実施したスリランカの東部海岸地域では、河口周辺での最大波高が5m以上の津波が来襲した河川でさえその浸入痕跡が明瞭に認められたのは河口のごく近傍だけに限られていた。

津波の浸入距離に関する支配的な水理量のひとつは水深である。また、連続的な下り勾配の河川を考えた場合、河床勾配の緩急によって水深の縦断的な分布が異なり、

結果として緩勾配の河川ほど浸入距離が長くなる。つまり、津波浸入の状況は、両事例から分かるように、第一義的には河床勾配と水深の縦断的な分布の両者から捉えられると言えよう。

10. おわりに

本調査結果の概要を以下に通す。

(1) 津波河川遡上については、河口周辺の地形や河川の特성에 応じて様相が異なっていた。特に、いずれの地域の河川においても津波の河川遡上に対する河口地形と植生の支配的な影響を示唆する痕跡が数多くみられた。

(2) ゴール市においては市内を流れる小河川を遡上した津波の氾濫により局所的な被害が生じた。同様な現象は我が国においても十分に発生しうるものであり、今後、遡上計算において中小河川も考慮したきめ細かな取り扱いが必要である。

(3) ニルワラ川の河口域に発達したマータラ市旧市街では、沿岸部のみではなく陸地の奥の方まで被災した地域が見られた。このことから、津波が河川を遡上して、内陸の低平地に局所的な氾濫を生じさせたものと推測された。

謝辞：本論文の現地調査を実施するに当たり、財団法人河川環境管理財団の補助を受けた。また、調査に当たっては、(独)国際協力機構をはじめ、様々な組織・機関から種々の便宜を図って頂いた。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会水工学委員会・(財)河川環境管理財団：インド洋大津波スリランカ被害調査報告書，132p，2005。
- 2) 土木学会水工学委員会・(財)河川環境管理財団：2003年スリランカ水害調査報告書，76p，2004。
- 3) Ritchie, W. and Penland, S.: Aelion sand bodies of south Louisiana coast, in *Coastal Dunes -Form and Process-*, (edited by Nordstrom, K.F, Psuty, N. and Carter, B.), John Wiley & Sons, pp.105-127, 1990。
- 4) 応用地質株式会社：2004年12月26日スマトラ島沖地震インド洋津波被害調査速報，2005。
- 5) Hewawitharana, G.: Tsunami devastation, District experiences and the challenges ahead, Galle District, 2005。
- 6) Matara District Government: Preliminary Statistics of the Census of Population and Buildings of the Census Blocks Affected by the Tsunami - 2004, Department of Census and Statistics, 2005。
- 7) 安田浩保・渡邊康玄・藤間功司：2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川遡上，土木学会論文集，No.768/II-68，pp.209-218，2004。

(2005.9.30受付)