

後良川マングローブ域における波浪の減衰

間木道政¹⁾・松田義弘¹⁾・池田吉用¹⁾・黒川忠之¹⁾

Wave reduction in a mangrove area near the mouth of Shiira River on the Iriomote Island, Japan.

Michimasa MAGI¹⁾, Yoshihiro MAZDA¹⁾, Yoshichika IKEDA¹⁾, Tadayuki KUROKAWA¹⁾

Abstract : Sea waves and their reductions along wave propagation were observed at a coastal plain near the mouth of Shiira River, Iriomote Island, Japan. The reduction rate of wave height in an area where mangroves (*Rhizophora stylosa*) are densely vegetated is one order larger than that in non vegetation area. This shows that mangrove vegetation has the significant effect of drag force on the wave reduction. Comparison of these results with the observations at a mangrove area in Tong King Bay, Vietnam, suggests that the wave reduction depends on 1) the tidal level (water depth), 2) the period and height of the incoming waves, 3) the species of mangroves, 4) the vegetation density and the age of the vegetation, and 5) the width of the vegetation area.

Key words : wave reduction, drag force, mangrove forest, Iriomote Island, fringe forest type

はじめに

東南アジアでは、外海に面した広大なマングローブ林 (fringe forest type ; Lugo and Snedaker, 1974) を伐採し、泥土で土手を築きエビ・カニの養殖池に転用している。例えば、フィリピンではマングローブを伐採し、投機的かつ粗放的な養殖池漁業が経営されており、建設後数年たつと池の栄養度が低下し生産性が落ちるため、その場所は放置され、新たにマングローブ林を伐採して養殖池を造っている (安食・宮城, 1992)。ベトナムにおいても、このようなマングローブ林の破壊と養殖池の急速な拡大は、沿岸魚類の量や種類の減少、台風や高潮による陸岸の侵食・破壊などの被害の増加を引き起こしている (Hong and San, 1993)。これに対して上記の国々では官・民の協力により、マングローブ生態系の回復と、台風などからの陸岸の保護、養殖池漁業の正常な発展を目的として、養殖池の前面に大規模なマングローブ植林活動が行われている (マングローブ植林行動計画, 1994)。

しかしながら、マングローブ域の物理過程に関する研究の歴史は極めて浅い (Wolanski et al., 1992; 松田, 1993)。特にマングローブ樹林による流体抵抗に関して

は、Wolanski et al. (1980)、金澤・松田 (1994)、Mazda et al. (1996) が riverine forest type (Lugo and Snedaker, 1974) のマングローブ域 (*Bruguiera* spp., *Rhizophora* spp.) で潮汐周期の波を対象として論じているのみで、fringe forest type の場での、また波浪周期の波を対象としての報告は、著者らによるベトナム・トンキン湾に面したマングローブ域 (*Kandelia candel*) におけるもの (Mazda et al., 1995, 間木ら, 1996) を除いて見あたらない。

本論文では、fringe forest type のマングローブ樹林での波浪減衰機構の解明を目的として、沖縄県西表島において実施した現地調査の予備的な解析を紹介し、さらに、上記のトンキン湾での知見と比較する。

観 測

1995年7月4日に西表島・後良川河口マングローブ域で水位測定および植生調査を行なった。調査海域を Fig. 1 に示した。このマングローブ域は外海に面した fringe forest type に属し、海岸沿いにマングローブ樹木が50m~100mの幅で繁茂している。その前面にはフラットな砂泥域が沖合まで延びている。測定点は沖側より Stn. A1 (砂泥域: 0 m地点)、Stn. A2 (砂泥域

1) Graduate School in Marine Science and Technology, Tokai University Orito 3-20-1, Shimizu, Shizuoka, 424/Japan
東海大学大学院海洋学研究科 静岡県清水市折戸3丁目20番1号

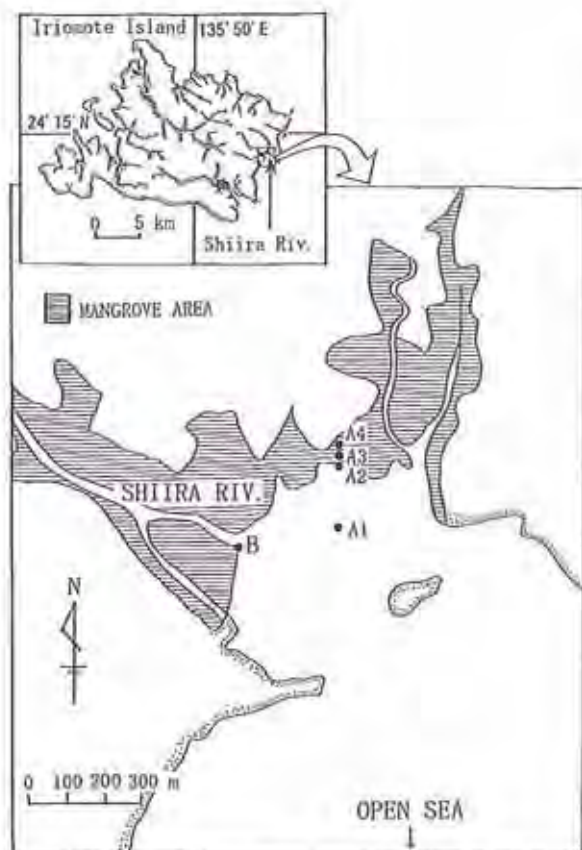


Fig. 1 Location map of observation stations near the mouth of the Shiira River on Iriomote Island, Japan.

とマングローブ繁茂域との境界:190m地点), Stn. A 3 (マングローブ林内:215m地点), Stn. A 4 (マングローブ林内:245m地点)の4点であり, それぞれに水位計(離合社製メモリー式水位計:RMD)を設置した. 測定時間間隔は, Stns. A 1, A 2は2秒間隔でStns. A 3, A 4は4秒間隔で行なった. Stns. A 2, A 3間の地形勾配は6.8/1000, Stns. A 1, A 2間の地形勾配は0.4/1000である. Fig. 2に1995年6月20日から7月10日にかけての石垣港における推算潮位を示した. この海域の潮汐は半日周潮型であり, 測定期間は小潮期である7月4日の08時00分から16時00分までの8時間であった.

地形的には水位観測点の南側が開けており, 沖に小さな島と岬があり, その北側で波の回折が見られたが, 測定海域では波浪の進行方向は0度方向(北向き)であった. 波の周期はStn. Bで測定したところ, 09時30分頃に1.7秒, 12時00分頃に0.6秒であった.

後良川河口域はヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) が群落をなしており, 林内はその支持根で密集錯綜している. また所々にマヤブシキ (*Sonneratia alba*) およびヒルギダマシ (*Avicennia marina*) の独立樹とそのまわ

りに針状の地上根の分布が見られる. Stns. A 3, A 4において, これらのマングローブ樹木および地上根の各部の大きさ(サイズ)を測定した.

結 果

1. 水 位

水位の測定結果をFig. 3に示した. 全ての測点において潮汐周期の水位変動に重なって, この海域の固有振動(セイシュ)と思われる30~50分周期の変動および更に短い周期の変動がみられる.

水位記録に移動平均処理を行い短周期成分を取り出したものをHとしてFig. 4に示した. Fig. 4によれば, 短周期の波の波高(H)は砂泥域の測点であるStns. A 1, A 2では潮位の上げはじめで小さく(2cm), 10~11時頃から増大しはじめ, 満潮から下げはじめで最大となり(3~4cm), その後徐々に小さくなっている. これに対して, 林内のStns. A 3, A 4の波高は極めて小さくなっている(0.8cm).

2. 有義波高

マングローブ樹林による防波効果, 即ち防災面での検討を目的とする場合, 平均波高よりも有義波高(1/3最大波高)を用いるのが妥当であろう. 上に述べた如く, 目視観察によれば襲来波の周期は0.6~1.7秒であるが, 2秒(または4秒)間隔の測定値はこの襲来波の時系列からのランダム抽出値と見ることができる. 従って, 測定値から有義波高を直接算出することはできないが, ランダムに抽出された値の標準偏差は実波形の標準偏差と同じであると考えてよいであろう. そこで, Fig. 4に示された短周期変動データより標準偏差(σ_n)を求め, 次式に従って有義波高を算出した(土木学会, 1971).

$$H_{1/3} = 4.00 \cdot \sigma_n \quad (1)$$

ここで, $H_{1/3}$ は有義波高である. 以後, 有義波高を単に波高と呼ぶ.

Fig. 5に各測点での波高の変化を示した. 波高はStn. A 1で最も大きく, Stns. A 2, A 3の順で小さくなる. Stns. A 1, A 2, A 3での波高は上げ潮による水位の上昇に従って増大し満潮から約1時間後に最大となり, その後下げ潮で小さくなっている.

検 討

1. 波高減衰率

沖から進入してくる波の進行方向に沿った25m当たりの波高減衰率(r)は, 沖側測点の波高を H_1 , 陸側測点の波高を H_2 とすれば式(2)で定義される.

$$r = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \cdot \frac{25}{\Delta x} \quad (2)$$

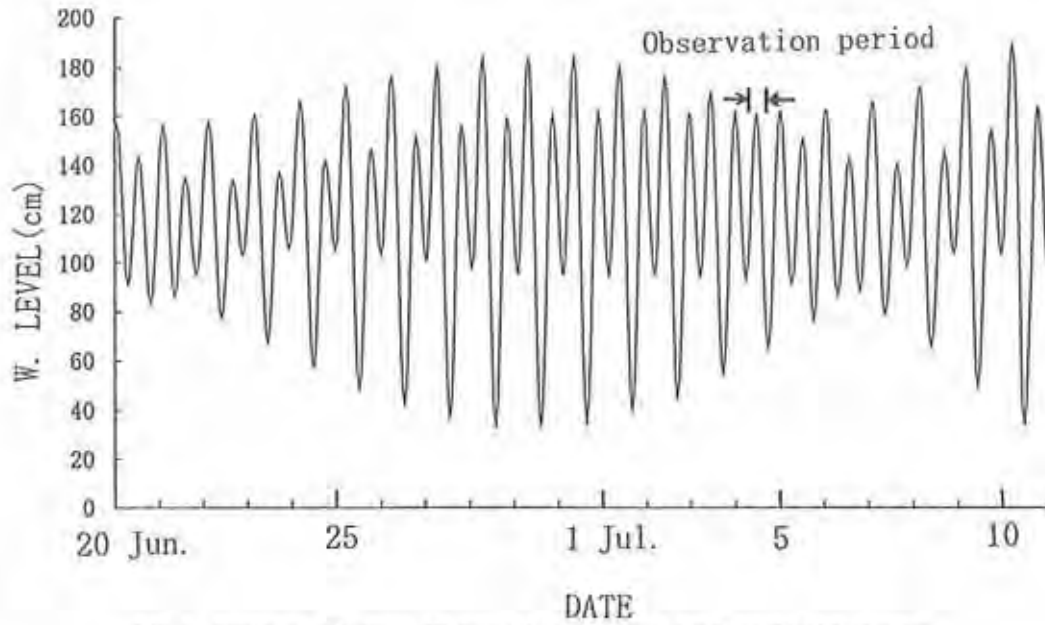


Fig. 2 Predicted tide level (20 Jun. -10 Jul. 1995) at the Ishigaki Tide Station.

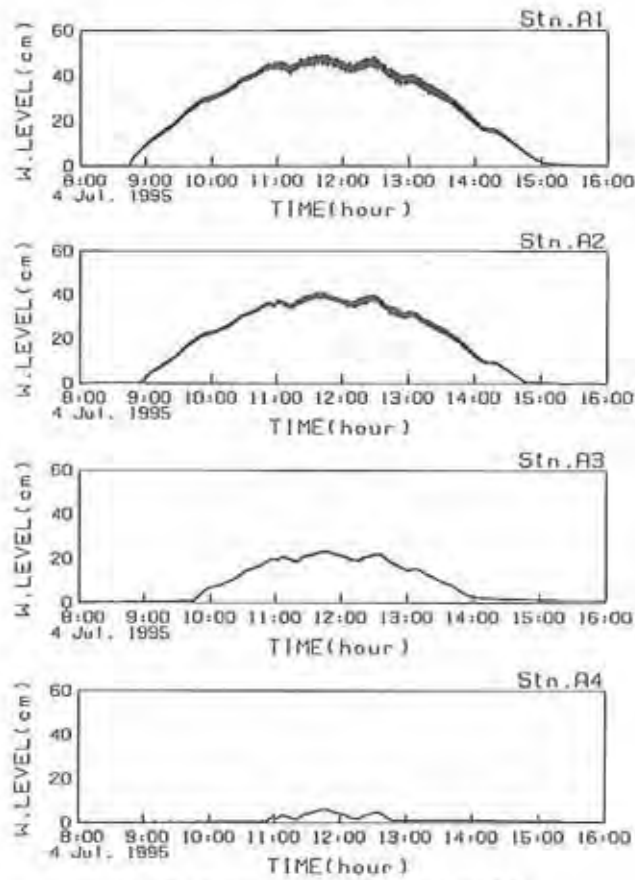


Fig. 3 Water levels at Stns. A1 to A4.

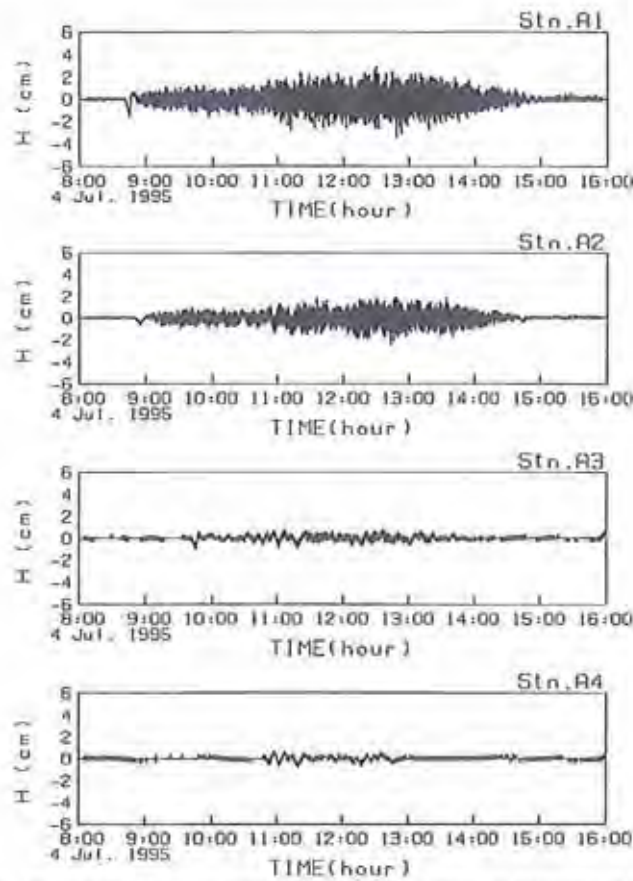


Fig. 4 Wave components with periods shorter than 10 minutes at Stns. A1 to A4

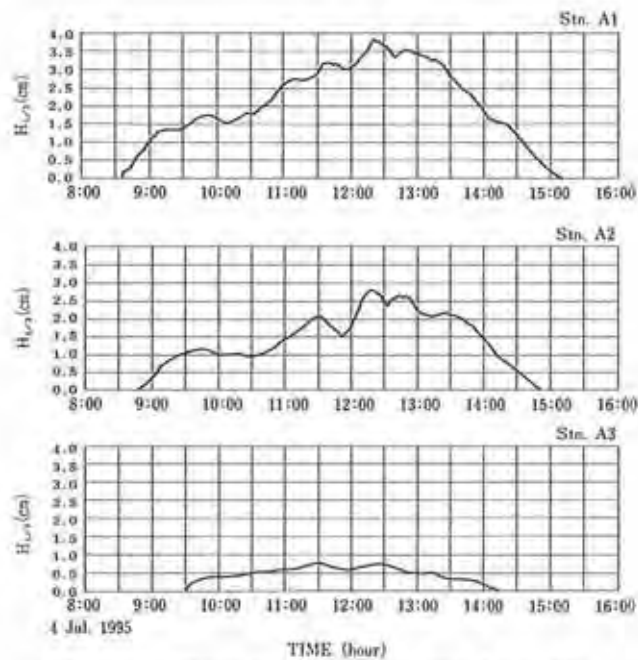


Fig. 5 Significant wave heights at Stns. A1 to A3.

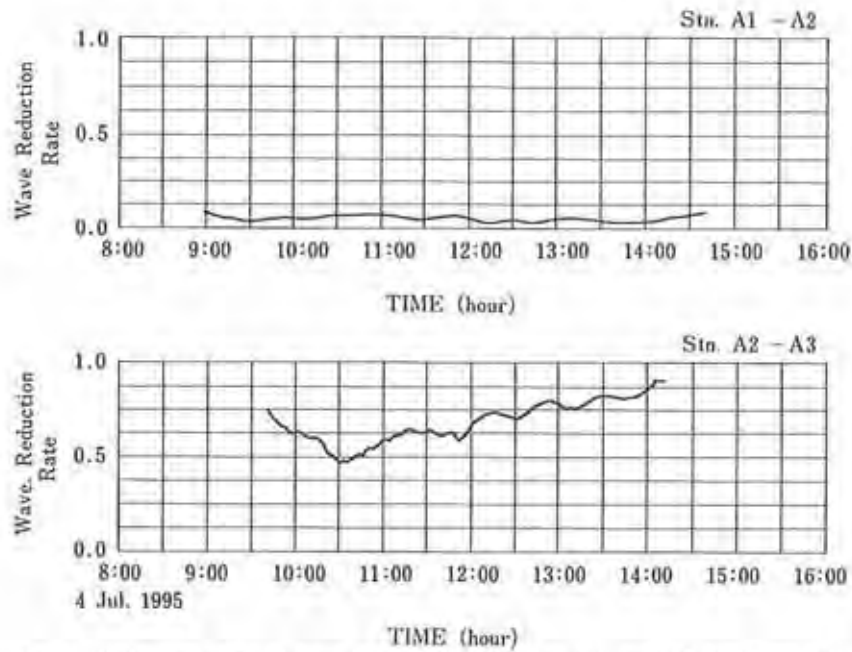


Fig. 6 Reduction rates of wave height between Stns. A 1 and A2, and Stns. A 2 and A3.

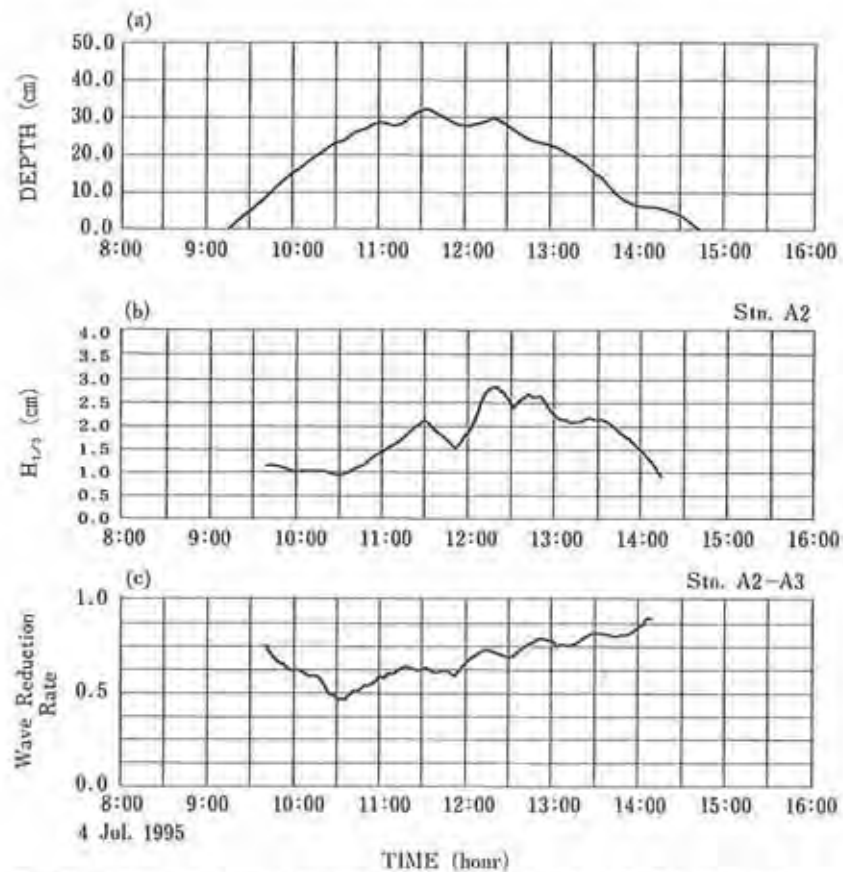


Fig. 7 Mean depth (a), significant wave height at Stn. A 2 (b) and wave reduction rate between Stns. A 2 and A 3 (c).

Table 1 Sizes of mangrove trees.

(a) Size of *Rhizophora stylosa*

	Stn. A 3		Stn. A 4	
	average	s. d.	average	s. d.
diameter of tree	4.2	—	4.5	—
the number of prop roots	15	—	15	—
height of prop root	25.8	18.83	19.8	13.68
width of prop root	30.7	22.65	30.0	23.35
diameter of prop root	2.5	0.43	2.1	0.39
the number of trees per 25m ²	21	—	45	—

s.d. : standard deviation, unit : cm

(b) Sizes of pneumatophores of *Sonneratia alba* at Stn. A 3

	average	s. d.
diameter	1.7	0.85
height	11.9	5.28
the number of pneumatophores per 1 m ²	84	—

s.d. : standard deviation, unit : cm

Table 2 Wave reduction rate

	wave period (sec)	wave reduction rate per 25m	
		non mangrove area	mangrove area
Shiira River	0.6~1.7	0.02~0.07	0.45~0.85
Tong King Bay	5 ~ 8	0.01~0.03	0.05~0.06

ここで、 Δx は波面に直角な方向での測点間距離 (m) である。Fig. 6 に砂泥域 (Stns. A 1, A 2 間) とマングローブ林内 (Stns. A 2, A 3 間) それぞれにおける 25m 当たりの波高減衰率の時間変化を示した。砂泥域での波高減衰率は 0.02 から 0.09 であるが、林内では 0.45~0.85 と砂泥域より遙かに大きい。また砂泥域での減衰率は潮位 (水深) の変化に対してほぼ一定であるが、林内では大きく変化している。

マングローブ林内での波高減衰率の変化を検討するために、Fig. 7 に水深、波高、波高減衰率を並べて示した。波高減衰率は潮位 (水深) の増大とともに小さくなるが上げ潮の途中で増大に転じている。Stns. A 3, A 4 でのマングローブ樹木の各部分のサイズを Table 1 に示したが、密集した地上根の存在から理解できるように、水深が小さいほど流体 (海水) が受ける抵抗の割合は大き

い。言い換えれば、水深の増大と共に波高減衰率は小さくなると思われる。Fig. 7 (下段) に見られる上げ潮はじめ (10 時 30 分まで) での波高減衰率の低下および満潮時以後の下げ潮期間での増大は、この水深変化に対応して樹木の抵抗が変化したためと説明できる。しかし、10 時 30 分から満潮時の間は水深が増大しているにも拘わらず、波高減衰率は増大している。これは以下のように解釈される。Fig. 7 (中段) に見られるように波高は 10 時 30 分から増大している。波高が大きいほど海水は大きく流動し、従って流体抵抗は大きくなる。更に、既に述べたように、襲来波の周期は 09 時 30 分から 12 時の間で 1.7 秒から 0.6 秒に短くなっている。周期が短いほど流速変動は大きく、従って流体抵抗は大きくなる。結局、波高の増大と周期が短くなったことの効果が水深増大による効果を上回ったため波高減衰率が増大したものと考えられ

る。

上記の測定結果をトンキン湾での結果(間木ら, 1996)と比較して Table 2 に示した。後良川河口のマングローブ域とトンキン湾での襲来波の周期は表に示した如く大きく異なっている。また、植生は後良川がヤエヤマヒルギの自然林であり、トンキン湾はメヒルギの植林域である。Iwagaki and Kakinuma (1967) は、砂泥域では波高減衰を引き起こす底面摩擦力は周期が短いほど大きくなると報告しており、砂泥域での減衰率がトンキン湾より後良川で数倍も大きいのは、襲来波の周期の違いによるものと思われる。一方、林内の減衰率の相違は波の周期の違いだけでなくマングローブの植生(種類、密集度、成長度)の違いによるものと思われる。

2. 波高減衰の要因

上に述べた後良川河口マングローブ域の調査結果にトンキン湾での知見を含めると、fringe forest type のマングローブ域における波高減衰をもたらす要因として、以下の5項目が抽出される。

1) 潮位(水深)

ヤエヤマヒルギ林内では、潮位が低い時(支持根の高さより水深が小さい時)は支持根が流体抵抗となり、潮位が上昇すると樹幹部が抵抗に加わり、更に上昇して樹冠部も抵抗となる。マングローブ樹木の立体形状が鉛直方向に大きく変化しているために、流体抵抗も水深変化に従って変動する。しかし、水深の増大により流体抵抗となる樹木の浸水部分が増えて失うエネルギー量が增大しても、水深の増大によって波のエネルギー輸送量も増大するので、必ずしも波高減衰率が大きくなるとは限らないことに注意せねばならない(Mazda et al., 1995)。

2) 襲来波の周期および波高

襲来波の周期が短いほど、また、波高が大きいほど流速の変動は大きくなるので、エネルギーの損失は大きくなり、波高減衰率は大きくなると考えられる。なお、トンキン湾での測定によれば、Table 2 にみられるように短周期波(5~8秒周期)では大きな波高の減衰率が得られたが、潮汐波に対してはほとんど減衰効果は見られなかった(Mazda et al., 1995)。

3) マングローブ樹木の種類

トンキン湾で植林されたメヒルギは地上根がなく、後良川河口域に繁茂しているヤエヤマヒルギは支持根が複雑に延びている。即ち、マングローブの種類により樹木の立体形状、また地上根の形状も大きく異なるので、抵抗力としての効果は種類により大きく異なると思われる。

4) マングローブ樹木の密集度および成長度

マングローブ域のように樹木および地上根が密集している場では、流体に働く抵抗の効果は、樹木一本一本の単体に作用する抵抗の和としてではなく、樹木間の相互作用を考慮した群体としての抵抗を考えなければならない。即ち、樹木の密集度が重要と考えられる。また支持根、地上根を含めて立体形状を変化させる樹木の成長度も考慮しなければならない。

なお、潮汐周期の波に関しては Mazda et al. (1996) が樹木の種類、樹木の密集度への抵抗係数の依存性を論じている。

5) マングローブ樹木の分布面積

波の進行方向の植生面積が広いほどマングローブ樹木による波高減衰は積算されてその効果が大きくなる。

おわりに

西表島・後良川河口域での現地調査を行い、予備的な解析により、マングローブ樹林での波浪の減衰を確認する事ができた。これにトンキン湾の結果を含めて、fringe forest type のマングローブ域における波高減衰を引き起こす要因を取り出した。しかし、トンキン湾での著者らの報告を除いてマングローブ域の防波効果の定量的な知見は見当たらず、現在のところ、これらの各要因を分離し、それぞれについて定量的な検討を行うにはデータが十分でない。今後、データの蓄積に努め、マングローブ樹林の防波効果の定量化、定式化を進めたい。

謝 辞

本研究の一部は東海大学海洋研究所の部門研究費を用いて行われた。また、現地調査は沖縄国際マングローブ協会の所有するマングローブ研究所を基地として行われた。関係機関および関係の各位に深く謝意を表す。

引用文献

- 安食和宏・宮城豊彦(1992): フィリピンにおけるマングローブ林開発と養殖池の拡大について。人文地理, 44(5): 620-633.
- 土木学会(1971): 水理公式集, 土木学会, 東京, 616 pp.
- Hong, P. N. and H. T. San (1993): Mangroves of Vietnam. IUCN, Bangkok, Thailand, 173 pp.
- Iwagaki, Y. and T. Kakinuma (1967): On the bottom friction off five Japanese coasts. Coastal Engineering in Japan, 10, 13-22.
- 金澤延幸, 松田義弘(1994): マングローブ河川における潮汐流の非対称特性。海の研究, 3, 1-11.
- Lugo, A. E. and S. C. Snedaker (1974): The ecology of mangroves. Annual Review of Ecology and Systematics, 5, 39-64.
- 間木道政, 松田義弘, 向後元彦, Phan N. Hong

- (1996): ベトナム・トンキン湾デルタにおけるマングローブ植林による防波効果. 東海大学紀要海洋学部, 41, 153-166.
- マングローブ植林行動計画 (1994): ベトナムにおけるマングローブ植林協力基礎調査報告書. マングローブ植林行動計画, 東京, 138 pp.
- 松田義弘 (1993): マングローブ域における物理学的研究の現状. 東海大学紀要海洋学部, 35, 169-184.
- Mazda Y., M. Magi, M. Kogo and Phan N. Hong (1995): Preliminary analysis on the physical processes in mangrove planted areas. Proceedings of The 2nd Scientific Workshop: Mangrove Rehabilitation and Planting in Vietnam, Do Son, Hai Phong, Vietnam, 7-10 October 1995, 116-133.
- Mazda Y., E. Wolanski, A. Sase, D. Ohtsuka and B. King (1996): Drag force due to vegetation in mangrove swamps. *Estuar., Coast. and Shelf Sci.*, (in press).
- Wolanski, E., M. Jones, J. S. Bunt (1980): Hydrodynamics of a tidal creek-mangrove swamp system. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 31, 431-450.
- Wolanski, E., Y. Mazda and P. V. Ridd (1992): Mangrove hydrodynamics. *In*, Coastal and Estuarine Studies 41. Tropical Mangrove Ecosystems, eds. A. I. Robertson and D. M. Alongi, American Geophysical Union, Washington, DC., 43-62.