

B-12 海面上昇の影響と総合評価に関する研究

(3) マングローブ林に対する地球温暖化の影響予測に関する研究

研究代表者 運輸省 港湾技術研究所 海洋環境部 主任研究官 古川 恵太

運輸省 港湾技術研究所

海洋環境部
(委託先)

海水浄化研究室
琉球大学農学部

桑江 朝比呂
馬場 繁幸

平成9～11年度合計予算額 21,459千円
(平成11年度予算額 6,970千円)

〔要旨〕タイ国ラノンにおけるケーススタディをもとにマングローブ林に対する地球温暖化の影響予測に関する検討を行った。現地調査は平成9年12月の予備調査に始まり、海洋観測機器による連続観測およびマングローブ林の構造調査を平成11年12月まで継続的に行い、潮汐振幅の伝播・波による底泥の再懸濁・淡水供給による塩分変化といった物理過程の影響伝播に関するモデル化を行った。それにより様々な影響伝播経路が各種モデル化によりその構造が説明されるとともに、マングローブ林が海面上昇や降雨パターンの変化により受ける影響を予測する手法の整理を行った。

〔キーワード〕 沿岸生態系、マングローブ林、潮汐振幅、塩分輸送、林構造

1. はじめに

沿岸域の生態系の中でも脆弱な生態系として位置付けられているマングローブ林は（IPCC, 1995）、地球温暖化を原因とした海面上昇、降雨パターンの変化、二酸化炭素量の増加といった外的環境要因の変化による影響を強く受けることが予想される。

1995年の報告によれば、世界のマングローブ林の総面積はおよそ20万km²であり、東南アジアに27%、オセアニアに8%、中東に6%、アフリカに27.6%、南北アメリカに31.4%が分布している。ちなみに、日本のマングローブ林は0.03%の割合を占め、その内70%が西表島に存在する。これらのマングローブ林は急速に減少しつつあり、タイ国を例にすると、1960年代に3700km²であったマングローブ林が1995年には1700km²と半減している。その主な原因は水産養殖（エビ池）への転用や沿岸地域開発、スズ採掘、塩田への転用などである。

タイにおいては、こうした人間活動による直接的なマングローブ林への影響を軽減するために、マングローブ林の全面的な伐採禁止法案を策定したり、UNESCOによるNatural Wildlife Reserveの指定を受けたりしてマングローブ林保全を行っている。しかし、その一方で地球温暖化という間接的な人間活動の影響については、具体的な検討がなされていないと言っても良い状態である。それは、地球温暖化の影響がどのようにマングローブ林に影響するのかといった、影響伝播の機構やその規模が明らかになっていないことが、ひとつの原因であると考えられる。

物理的な影響伝播をモデル化し、その外的環境変化がどのように生態系に影響していくのかを解き明かし、影響の規模の評価を行う手法の確立が強く望まれている。

2. 研究目的

本研究では、マングローブ生態系における、地球温暖化の「影響伝播の解明」と、「影響評価方法の確立」を目的とした。

影響伝播の解明は、主に地球温暖化による海面上昇や降雨パターンの変化といった物理的な外力変化がどのように変化するかを予測するためのモデル化を目指す。物理現象のモデル化ではあるが、マングローブ林における水理現象は、マングローブの根による波・流れの減衰や、深くて曲線的なクリークと満潮時に浸水する平坦なスポンプなど複雑な地形条件に支配されており、一般的な解が得られていないため、現地観測による支配現象の抽出、パラメータの同定やモデルの校正などが必要となる。

影響評価は、影響伝播モデルにより予測される物理環境の変化と、マングローブ生態系との相互関係を導くことにより行う。特に関連の深いと見られる相互関係を抽出し、それを支配する物理環境の変化を予測することが、影響評価に他ならないと考えるからである。しかし、地域特性等を反映した絶対値としての変化を予測することよりも、より一般的な場の評価手法とするために、相対値としての変化を予測できる方法の開発を目指した。

3. 研究方法

地球温暖化を含む、外的環境がマングローブ林に影響を及ぼす状況の概念図を図-1 に示す (Miyagi, 1998)。河川過程、海洋過程を通してマングローブ林への物質供給が行われると共に、マングローブ林自体の生産により林内の土砂堆積が起こり、地質の変化とともに地盤高の変化が起こり、生育場の移動等が起こるのである。これらの過程に加えて、人的活動の圧力や地球温暖化による海面上昇が作用している。

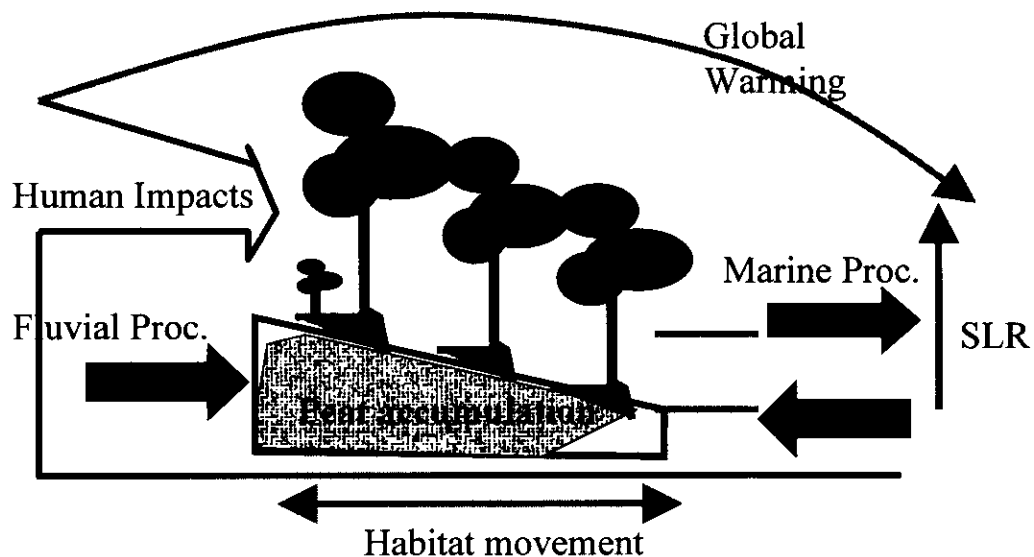


図-1：マングローブ林を取り巻く各種過程の概念図 (Miyagi, 1998 による)

こうした現象の時間スケールを考えると、地形の変化や地球温暖化の影響は、100 年程度の時間スケールを持つ一方、海洋過程や河川過程は比較的短期間 (数時間～数ヶ月) の現象であるし、

地質学的変化は、非常に長い時間の現象であることが判る。

いままで、地球温暖化の影響を検討するために、より長期の変化（地質学的変化）を元に検討することが多く行われてきた（Miyagi, 1998 など）。本研究では、逆のアプローチを試みる。すなわち、影響の伝播を個別にモデルするために、短い時間スケールの現象を積み上げて地球温暖化の影響を検討する方法である。

個々の現象をモデル化する精度が直接、予測精度に反映されるので、こうしたモデル化には実際の現象での検証が不可欠である。そのために、ケーススタディとして、現地における長期観測と林構造の調査を行い、マングローブ林を取り巻く環境のモデル化を進めることとした。

表-1：マングローブ林生態系を取り巻く現象とその時間スケール

現象	影響	時間スケール
海洋過程		
波浪	砂泥の巻き上がり	数秒～数時間
潮汐	砂泥の輸送	数時間～数日
河川過程		
淡水供給	雨季乾季での塩分環境の変化	数日～数ヶ月
土砂輸送	土砂供給・地形変化	数ヶ月～数年
生産		
泥炭堆積	地盤高変化、植生変化	数年～数十年
人的影響		
用地の転換	成育場所の喪失	数年～数十年
地球温暖化		
海面上昇		
降雨パターンの変化	水深の変化 塩分環境の変化	数年～数十年
地殻変動		
海進	水深の変化・堆積環境の変化	数十年～数百年 数十年～数百年 数百年～数千年

調査項目としては、気象条件・海洋過程（潮汐振幅、波浪、砂泥の巻き上がり）・河川過程（河川流量、砂泥の移送量、塩分濃度、淡水供給）・森林構造（種構成、樹高・直径分布）・地形（地盤高、堆積物、微地形）等とし、河川の影響を強く受ける林と海洋の影響を強く受ける林において比較調査を行った。

4. 観測結果と考察

(1) ケーススタディサイトの選定

タイ国におけるマングローブ林は東タイ・タイ中部・南タイ（タイ湾側）・南タイ（アンダマン海側）に分布している（図-2）。タイ湾側は、潮位差が約1 m程度の **Micro Tidal** 域、アンダマン海側は、潮位差が約4 m程度の **Macro Tidal** 域となっている。より現象を拡大して観察するために候補地点をアンダマン海側の南タイとし、最終的に王立林野局のマングローブ研究センターのあるラノン（Ranong）のガオ川（Khlong Ngao）流域をケーススタディサイトとした。

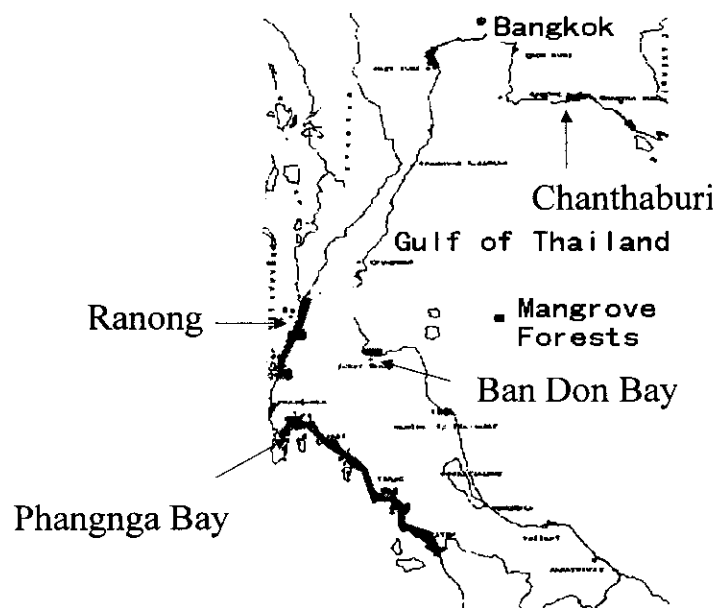


図-2：タイ国における主なマングローブ林の分布

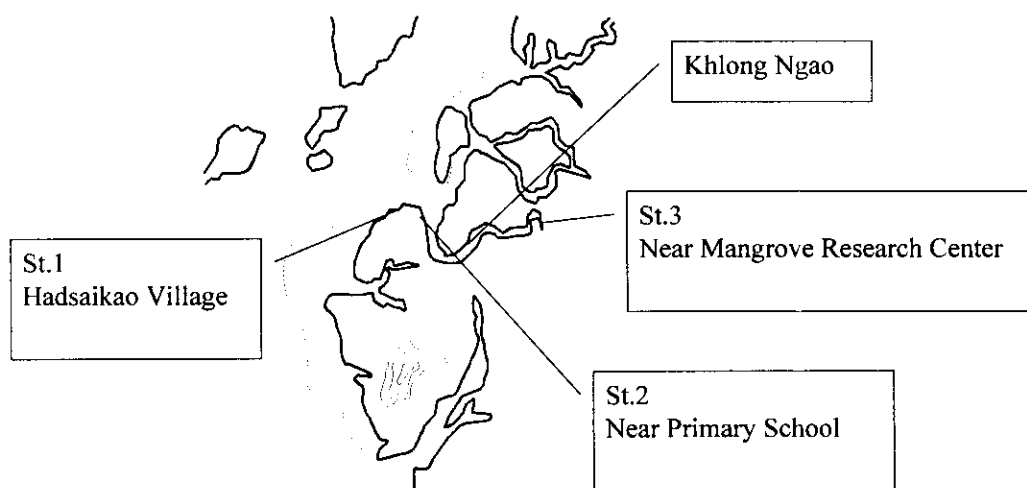


図-3：ラノン、ガオ川流域の調査地点図



写真-1：ラノン、ガオ川流域の空撮（東から西を望む方向）

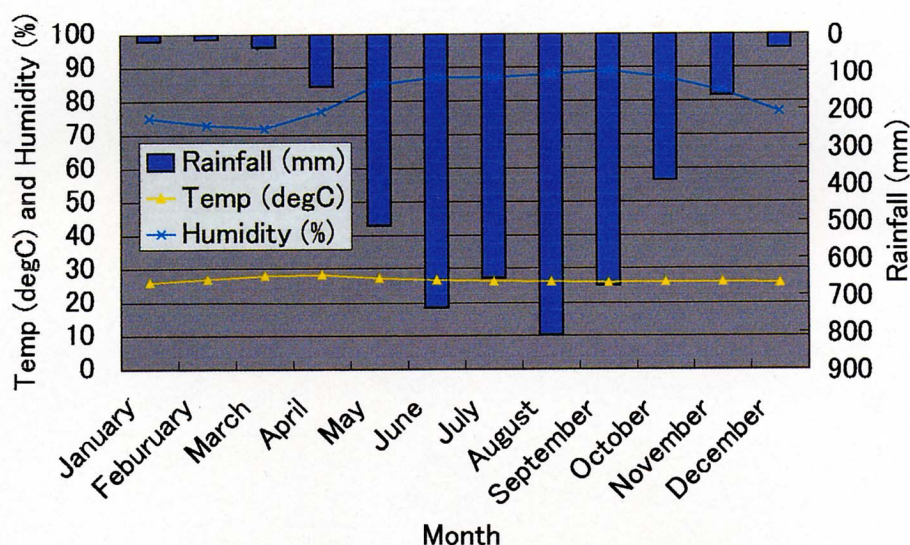


図-4：1961-1990年のラノンにおける月別平均気象

写真-1 は、ラノン、ガオ川一帯の空撮写真であり、およそ5 kmの延長のガオ川とその周囲に広がるマングローブ林が撮られている。写真上方はアンダマン海であり、写真下方にはエビ池が見られる。ガオ川中流域はかつてスズ採掘が行われていたが、現在はこの一帯を Bio-sphere Reserve として指定し、自然環境の保全が図られている。

図-3 には、今回調査をおこなった測点を示している。St.1 は、ハッサイカオと呼ばれ、原生状態に近い海に面した林となっている。この測点では、主に海からの影響を抽出するために海洋機器による計測と幅10 m、汀線に直角方向に200 m延長のベルトトランゼクトにより林の構造調査

を行った。St.2 は、ガオ川下流部に位置し、河川過程の測定を行う測点として海洋機器による調査のみを行った。St.3 は、河川上流部に位置する林で、河川過程の影響を抽出するための海洋機器による計測と、幅 10 m、河川の流路に直角方向に 50 m 延長のベルトトランゼクトにより林の構造調査を行った。

なお、St.1 は、海に面した林である Fringe Type Mangal (F 型マングル) であり、St.3 は、クリークに接する氾濫原 (スオンプ) を持つ Riverine Type Mangal (R 型マングル) である。

(2) 海洋観測機器による長期観測と林構造の調査

① 海洋観測機器による調査

海洋観測機器による調査は、

- ・ 1997 年 12 月 19 日～22 日の予備観測
- ・ 1998 年 12 月 17 日～19 日の短期観測
- ・ 1998 年 12 月 20 日～1999 年 3 月 15 日の長期観測 (乾季)
- ・ 1999 年 3 月 16 日～10 月 2 日の長期簡易観測
- ・ 1999 年 9 月 27 日～10 月 2 日の短期集中観測
- ・ 1999 年 10 月 3 日～12 月 6 日の長期観測 (雨季)
- ・ 1999 年 12 月 7 日～12 月 9 日の短期集中観測

の合計 7 回行った。

この期間の気象条件は、図-5 に示されるように、例年に比べ雨の多い条件であった。また、St.1・3 における長期の塩分濃度の変化は、図-6 のように降雨に対応していることが判る。詳細は、後述するが、雨季に塩分低下、乾季に塩分上昇という長い周期の変化に加えて、降雨時の一時的な塩分濃度の減少と回復の過程が現れている。

海洋観測機器は、基本的に林内に設置した (写真-2)。機器は、波高計、超音波流量計、電磁流速計、濁度計、クロロフィル計、塩分水温計、水深水温計等を適宜配置した。この中で、濁度計およびクロロフィル計は、光学的に濁りやクロロフィルからの反射光や蛍光を測定する機器であるので、測定面にワイパーを配する機器を用い、長期の間の係留を可能とした。

1998 年 12 月 20 日～1999 年 3 月 15 日の乾季における長期観測の観測結果を St.毎に図-7～9 に、濁りの観測結果をまとめて図-10 に示す。図-7 の濁度の記録は、振りきれてしまってピークが明瞭ではないが、12 月 30 日、1 月 10 日、2 月 12 日、2 月 24 日、3 月 11 日前後に高濃度の濁りが発生していることが判る。同時期の波高の記録を見ると、濁りが発生している時期に合わせて若干波高の増大が見られる。したがって、これらの濁りは波による底質の巻上げが原因で発生している可能性がある。なお、この時期、1 月 14 日、2 月 12 日、3 月 3 日に降雨が記録されている。そこで、この濁りの移送状況を拡大して表示したのが図-11 である。濁りの濃度は、上流に行くにしたがって小さくなり、かつ、上げ潮時・下げ潮時の水深が浅いときに濃度の上昇が見られる。これは、水深が浅い時の波や流れのせん断力による巻上げが起こっていると同時に、上流方向への移送があることを示唆しており、乾季における土砂移送の起源が海にある可能性がある。

基本的に、潮汐による砂泥の輸送や淡水と海水の海水交換が卓越した場であるが、F 型マングルである St.1 周辺での波浪の影響、R 型マングルである St.3 周辺での降雨による塩分低下といった時間的に大きく変動する影響が重ね合わされている場であると特徴づけられる。

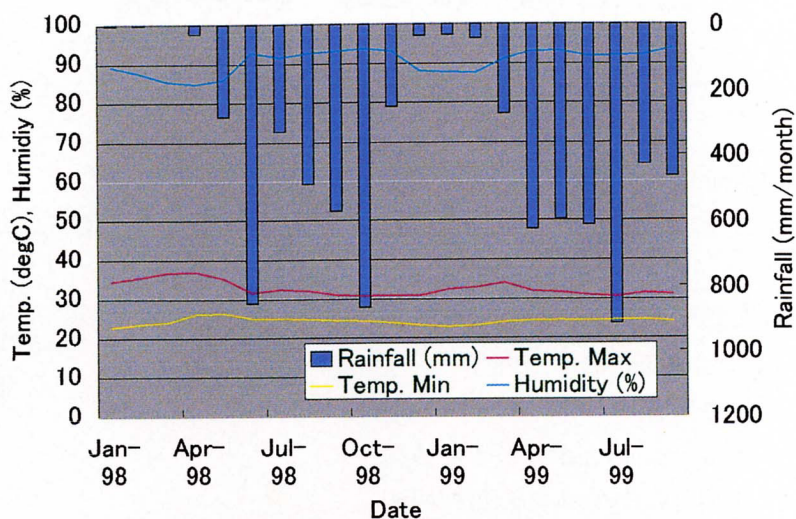


図-5：観測期間におけるラノンの気象条件

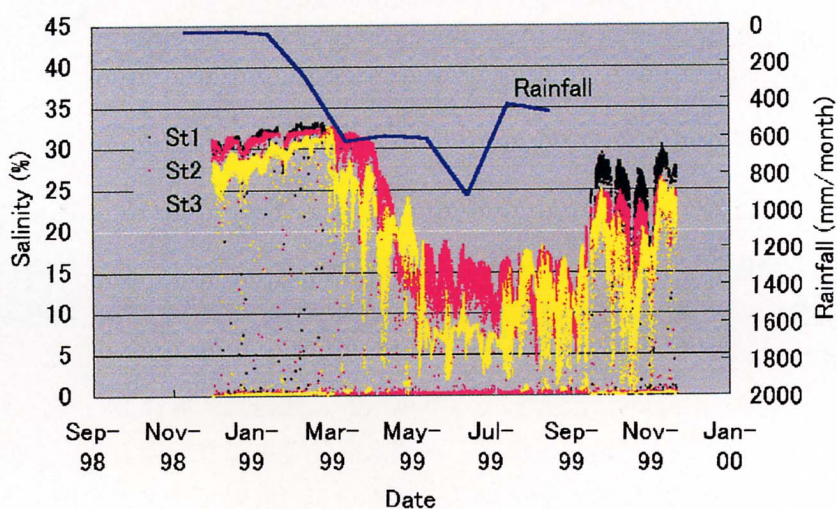


図-6：St.1~3における長期の塩分濃度変化

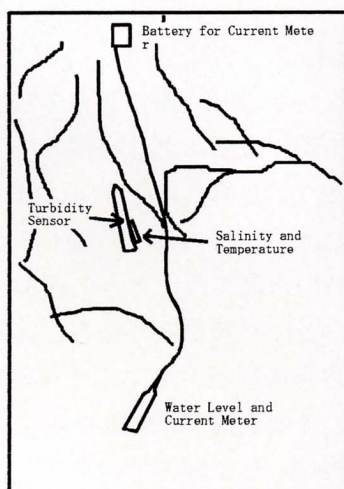


写真-2：機器設置状況 (St.1、干潮時)

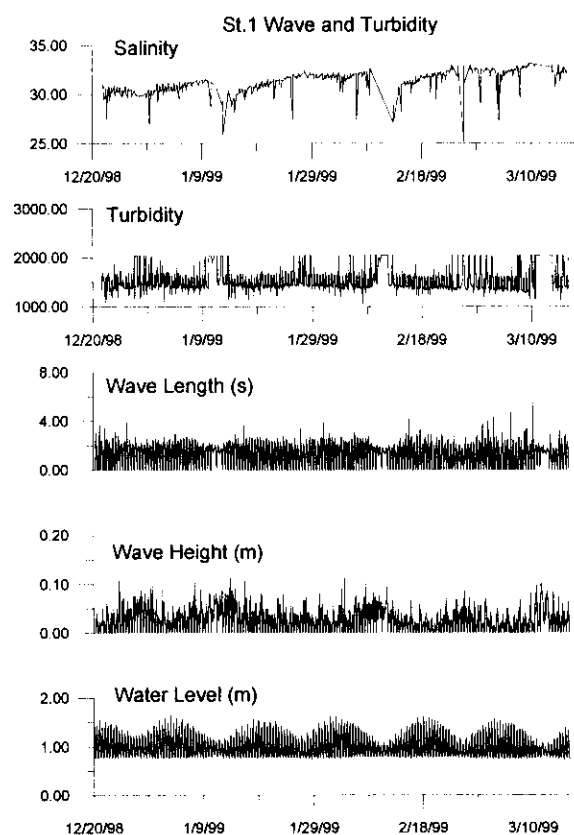


図-7 : St.1 における観測例
St.3 Upstream

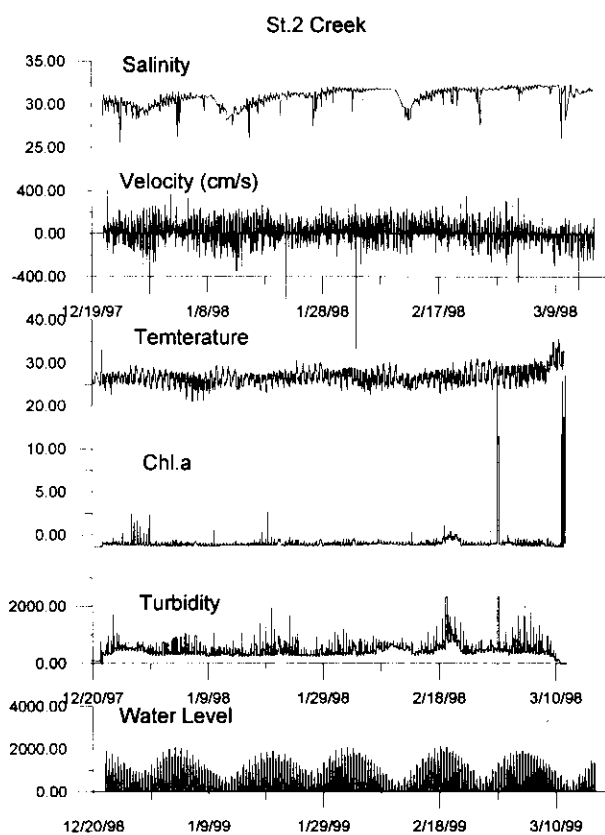


図-8 : St.2 における観測例

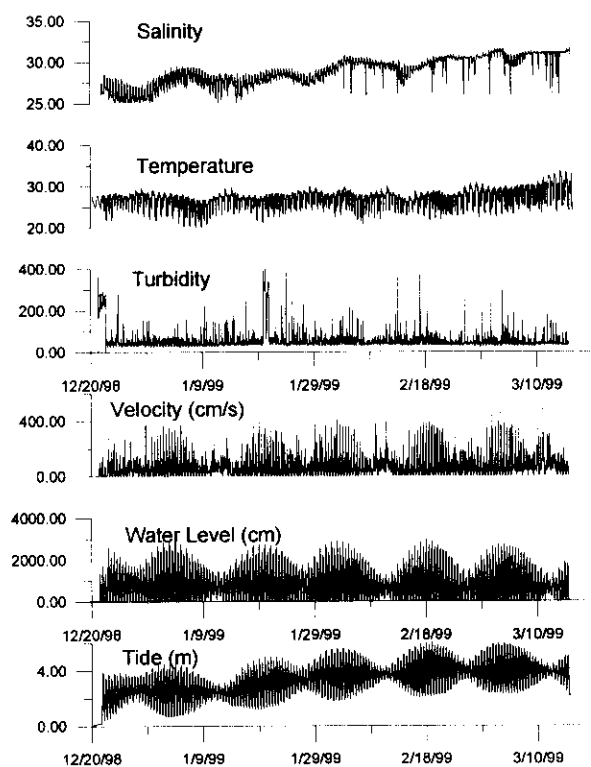


図-9 : St.3 における観測例

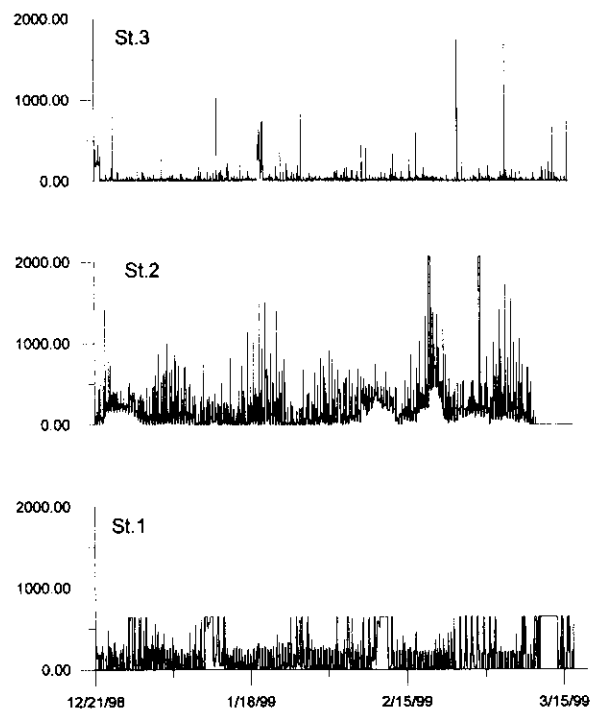
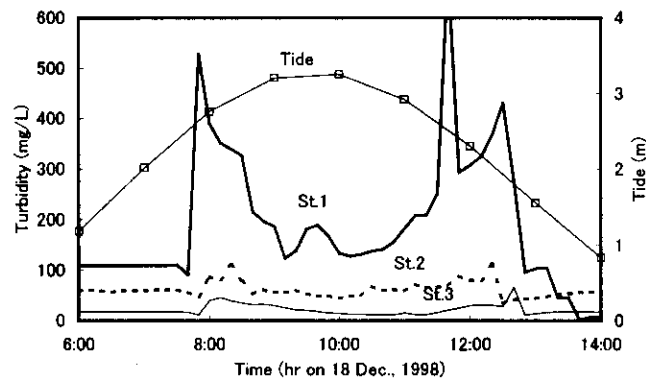
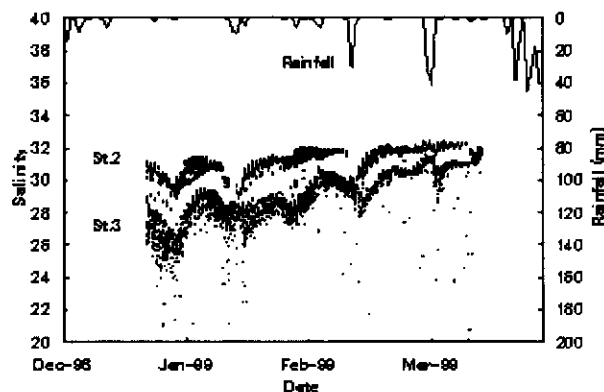


図-10 : 各 St.における濁りの観測結果



図－11：砂泥輸送過程の観測例



図－12：乾季の塩分濃度の回復過程

雨季に降雨により供給された淡水は、河川中の塩分濃度を 30 前後から 15 前後まで下げる。しかし、乾季中の蒸発、海水交換による流出などで徐々に排水され、塩分濃度が回復してくる過程が観測された（図－12）。特に、河川の上下流で 2－4 の塩分差があり、上流からの淡水供給とマングローブ林による淡水の貯留効果があることが判る。また、雨季に低下した塩分濃度がおよそ 60 日で 2－4 の塩分増加速度を持って回復していることも明瞭に観測された。

② 森林構造の調査

森林構造の調査は、

- ・ 1997 年 12 月
- ・ 1998 年 12 月
- ・ 1999 年 10 月

の合計 3 回で、St.1 および St.3 に対して行った。

St.1 と St.3 の森林構造をプロットすると図－13, 14 のようになっている。これらには、従来からいわれているマングローブの地盤高によるゾーネーションが再現されていた。すなわち、St.1 周辺においては、海に面した前面には樹高 12 ～ 15 m の *Sonneratia alba* が優先しており、そこから内陸に向けて 50 ～ 70 m に低い砂質の提列があり、その提列の海側斜面には樹高数 m の

Avicennia marina や樹高 7 – 13 m の *Rhizophora apiculata*, *Rhizophora mucronata* 等がある。堤列から内陸部分が最大樹高 25 m の *Rhizophora apiculata* を優占種とする原生状態に近いマングローブ林となっている (表-2)。

一方、St.3 周辺では、原生状態のマングローブ林はないが、天然更新した樹高 10 – 13 m の *Rhizophora apiculata*, *Rhizophora mucronata*、樹高 10 – 12 m の *Burugiera parviflora*、樹高 6 m の *Xylocarpus granatum*、樹高 10 – 12 m の *Avicennia officinalis* が生育している。*Avicennia officinalis* は比較的林縁部分に生育しており、林内の優占種は *Rhizophora mucronata*, *Rhizophora apiculata* であった。また、河川に沿った光条件の良い部分においては、*Avicennia officinalis*, *Sonneratia alba*, *Aegiceras corniculatum* が見られた (表-3)。

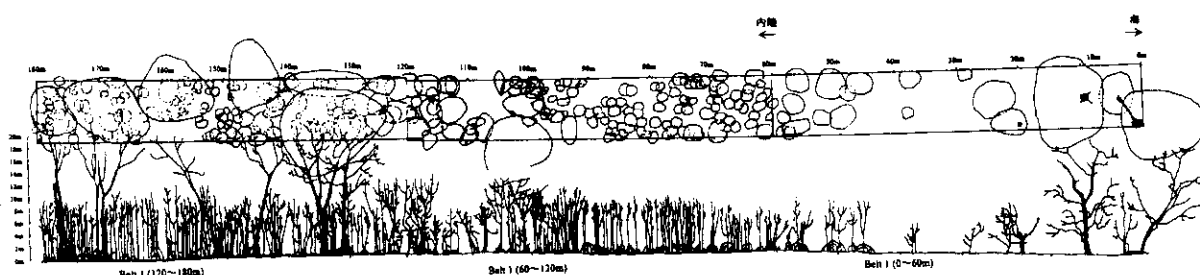


図-13 : St.1 のベルトトランゼクトの植生図 (右が海、左が内陸、全長 200 m)

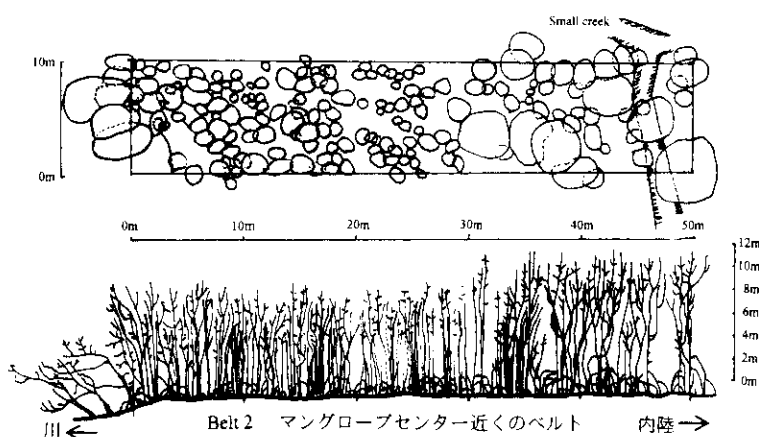


図-14 ; St.3 のベルトトランゼクトの植生図 (左が河川、右が内陸、全長 50 m)

(3) マングローブ林を取り巻く環境のモデル化

① 潮汐伝播

ガオ川上下流 (5 km 離れた地点) での潮汐振幅の観測により、振幅にして 5 % の増幅、時間にして 30 分の時間後れが観測された。まずは、このような潮汐振幅の増大や時間後れを再現できる数値モデルを構築する。

潮汐の増幅と時間後れ、および非対称性は、林内のマングローブによる大きな流動抵抗が原因となっていることが知られている (Furukawa et al, 1997; 松田, 1997)。流れとしては、あまり流速が早くない (< 50 cm/s)。したがって、流れの移流項を正確に解くことよりも、複雑な氾濫面積を正確に評価することが優先される。そこで、2 次元のボックスモデルを用いて流動のモデル化を

表一2: St.1 の森林構造 (樹種別本数、樹高、胸高直径)

Number of Tree	Plot No. (@ 10 m)																				総計
species name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<i>Aegiceras corniculatum</i>			1																		1
<i>Avicennia marina</i>			1																		1
<i>Bruguiera cylindrica</i>									1		6	1	3								11
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>										1	1	1							1		4
<i>Bruguiera parviflora</i>							2	2	3	3	3		2								15
<i>Ceriops decandra</i>												2									2
<i>Ceriops Tagal</i>							1			1											2
dead																					
none		1																			1
<i>Rhizophora apiculata</i>					3	9	20	21	19	22	2	6	7	22	26	29	20	28	12	9	255
<i>Rhizophora mucronata</i>						1	8	4	8	1	1	7			3						33
<i>Sonneratia alba</i>	3		1	2																	6
Total	3	1	3	2	3	10	31	27	31	27	13	17	13	22	29	29	20	28	12	10	331

Mean Tree Height (m)	Plot No. (@ 10 m)																				総計
species name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<i>Aegiceras corniculatum</i>			7.4																		7.4
<i>Avicennia marina</i>			27.8																		27.8
<i>Bruguiera cylindrica</i>									6.0		10.6	6.8	6.7								8.8
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>											6.5	6.6	12.0						18.3		10.9
<i>Bruguiera parviflora</i>							6.9	5.6	7.2	6.5	8.7		6.0								6.9
<i>Ceriops decandra</i>												6.2									6.2
<i>Ceriops Tagal</i>							6.3			9.7											8.0
dead																					
none		0.0																			0.0
<i>Rhizophora apiculata</i>					12.4	9.1	8.6	7.9	7.7	8.7	15.9	11.6	11.7	13.0	7.2	8.9	11.0	10.2	9.6	15.7	9.7
<i>Rhizophora mucronata</i>						11.4	6.5	7.4	8.4	8.8	5.8	7.0			7.0						7.4
<i>Sonneratia alba</i>	59.0		72.6	7.0																	43.9
Mean	59.0	0.0	35.9	7.0	12.4	9.3	7.9	7.6	7.8	8.5	10.3	8.5	9.7	13.0	7.2	8.9	11.0	10.2	9.6	16.0	9.9

Mean Diameter of Brest Height (cm)	Plot No. (@ 10 m)																				総計
species name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<i>Aegiceras corniculatum</i>			7.4																		7.4
<i>Avicennia marina</i>			27.8																		27.8
<i>Bruguiera cylindrica</i>									6.0		10.6	6.8	6.7								8.8
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>											6.5	6.6	12.0						18.3		10.9
<i>Bruguiera parviflora</i>							6.9	5.6	7.2	6.5	8.7		6.0								6.9
<i>Ceriops decandra</i>												6.2									6.2
<i>Ceriops Tagal</i>							6.3			9.7											8.0
dead																					
none		0.0																			0.0
<i>Rhizophora apiculata</i>					12.4	9.1	8.6	7.9	7.7	8.7	15.9	11.6	11.7	13.0	7.2	8.9	11.0	10.2	9.6	15.7	9.7
<i>Rhizophora mucronata</i>						11.4	6.5	7.4	8.4	8.8	5.8	7.0			7.0						7.4
<i>Sonneratia alba</i>	59.0		72.6	7.0																	43.9
Mean	59.0	0.0	35.9	7.0	12.4	9.3	7.9	7.6	7.8	8.5	10.3	8.5	9.7	13.0	7.2	8.9	11.0	10.2	9.6	16.0	9.9

表一3: St3 の森林構造 (樹種別本数、樹高、胸高直径)

Mean Tree Height (m)	Plot No. (@ 10 m)					総計
species name	1	2	3	4	5	
<i>Avicennia officinalis</i>	1					1
<i>Bruguiera cylindrica</i>	1	6				7
<i>Bruguiera parviflora</i>	23	2	1			26
<i>Ceriops decandra</i>	1			2		3
<i>Ceriops tagal</i>	1			1	1	3
dead						
<i>Rhizophora apiculata</i>	24	39	43	22	19	147
<i>Rhizophora mucronata</i>	5		1			6
<i>Xylocarpus Granaum</i>	1			1	2	4
<i>Xylocarpus mekongensis</i>		1				1
Total	57	48	45	26	22	198

Mean Tree Height (m)	Plot No. (@ 10 m)					総計
species name	1	2	3	4	5	
<i>Avicennia officinalis</i>	6.0					6.0
<i>Bruguiera cylindrica</i>	5.0	8.0				7.6
<i>Bruguiera parviflora</i>	7.8	6.8	9.0			7.7
<i>Ceriops decandra</i>	4.5			4.5		4.5
<i>Ceriops tagal</i>	5.0			9.0	7.5	7.2
dead						
<i>Rhizophora apiculata</i>	7.8	8.4	8.4	8.9	9.1	8.5
<i>Rhizophora mucronata</i>	8.8		10.0			9.0
<i>Xylocarpus Granaum</i>	7.5			9.0	10.0	9.1
<i>Xylocarpus mekongensis</i>		7.5				7.5
Mean	7.7	8.2	8.5	8.6	9.1	8.3

Mean Diameter of Brest Height (cm)	Plot No. (@ 10 m)					総計
species name	1	2	3	4	5	
<i>Avicennia officinalis</i>	14.5					14.5
<i>Bruguiera cylindrica</i>	5.2	6.4				6.2
<i>Bruguiera parviflora</i>	7.2	6.0	8.5			7.2
<i>Ceriops decandra</i>	4.8			6.0		5.6
<i>Ceriops tagal</i>	4.7			14.2	7.3	8.7
dead						
<i>Rhizophora apiculata</i>	7.2	7.6	7.2	10.6	11.5	8.4
<i>Rhizophora mucronata</i>	12.6		11.8			12.5
<i>Xylocarpus Granaum</i>	6.7			20.7	12.4	13.0
<i>Xylocarpus mekongensis</i>		8.8				8.8
Mean	7.7	7.4	7.3	10.8	11.4	8.3

行った。

ボックスモデルでは、隣り合う i, j のボックスにおいて、連続の式として

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = \sum Q_{ij} \pm q_i \quad (1)$$

が成立するように各ボックスの体積 v_i を求める。ここに、 q_{ij} はボックス内で生成・消滅する量であり、 Q_{ij} はボックス i から j に流れる流量で、

$$Q_{ij} = \frac{A}{n} h^{2/3} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

として、マニングの平均流量公式により求めることができる。ただし、 A はボックス間の断面積である。式 (1) に式 (2) を代入し水深 h について整理すると、 h に対する疎な対角行列が得られる。これを、適当な収束条件で解くことにより各ボックスでの水深が求まり、式 (2) により流量・流速を得ることができる。

ガオ川を 31 のボックスに分割した状況が図-15 に示されている。図中、St.2,3 として示されている点での水深と流速を 1 m の海面上昇のあるなしで比較した図が図-16, 17 である。

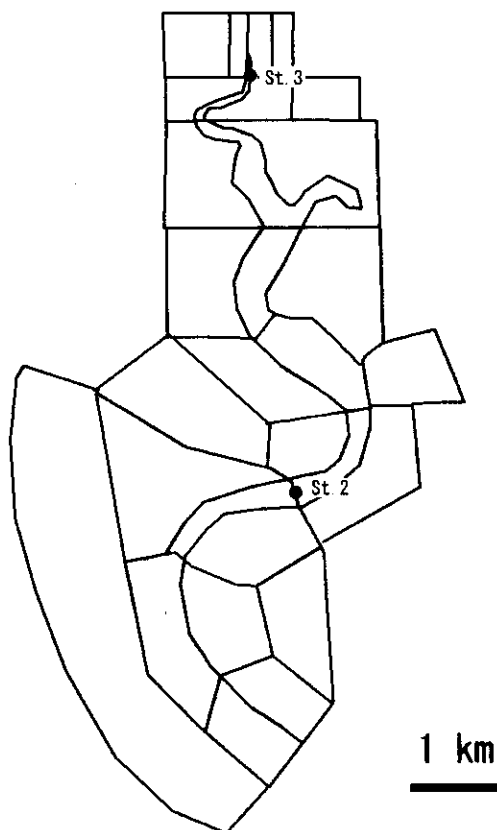


図-15：潮汐計算に用いたガオ川のボックス分割と流速出力点

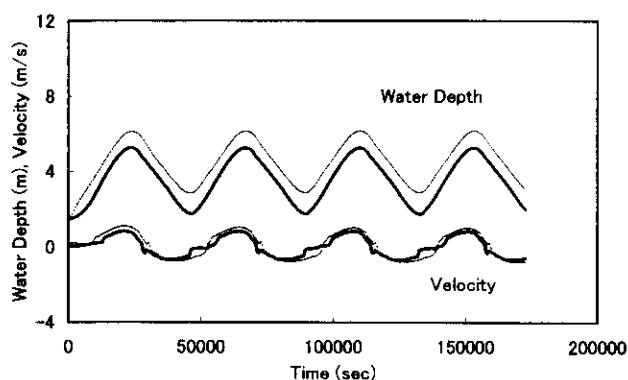


図-16 : St.3における水位と流速計算結果
太線が現況、細線が1 m海面上昇時

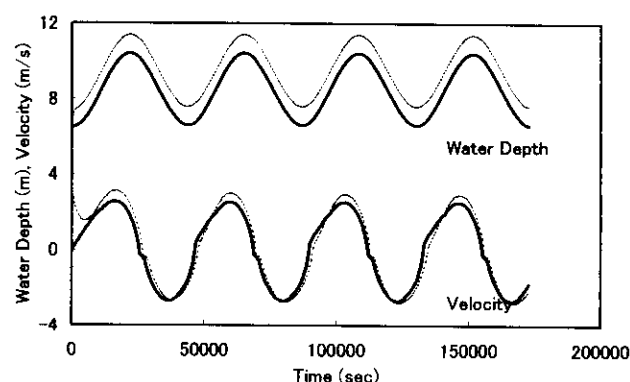


図-17 : St.2における水位と流速計算結果
太線が現況、細線が1 m海面上昇時

現況の計算結果を比較すると、潮汐振幅の増幅および、時間遅れがほぼ正確に再現されている。比較計算として実施した、1 mの海面上昇時においては、潮汐振幅は多少の変形を伴うが、ほぼ、1 mそのままの上昇量を示しており、流速は約5%増加している。したがって、潮汐に支配される減少への海面上昇の影響伝播は、

- ・ 直接の水位上昇
- ・ 水位変動の変形
- ・ 潮流流速の増加

として現れることが予測された。

② 標高と浸水時間

潮汐は通常 28 日周期の大潮・小潮の変化を持っているので、ある標高における浸水時間は、単純な計算式で計算されない。今回、ガオ川における潮位の連続観測により調和定数を得たので、ある期間の実際の潮汐を用いて、標高別の浸水時間の評価を行った。これは、前出の議論において予測された水位上昇が、生物環境に影響する要因を、水深よりわかりやすい形で表現するための試みである。

1999 年 11 月 3 日より 29 日間の潮汐振幅 (図-18) を取り出し浸水時間を計算したものが図-19 である。

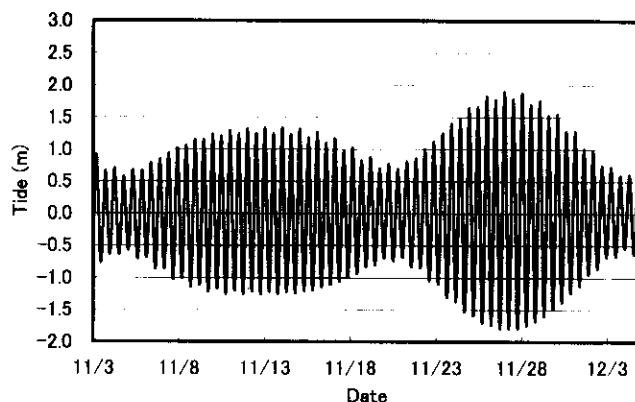


図-18 : St.1 における潮汐 (調和定数による推算値)

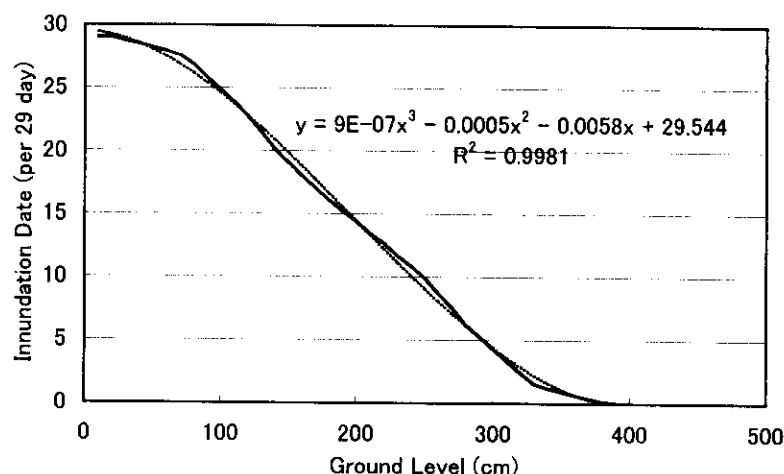


図-19：実際の潮汐を用いた標高と浸水日数（29日間あたり日数）の関係図
太線が計算値、細線が3次式による近似曲線

この定式化により、例えば、St.1のベルトトランゼクト場の標高を用いてその浸水日数を計算すると、図-20のようになる。標高で見る以上に急激な環境の変化が起こっていることが明らかになる。例えば、*Rhizophora Apiculata* は、浸水日数が15日程度より少なくなった領域に出現しており、*Bruguiera gymnorhiza* などは、浸水日数が5—7日程度より少なくなった領域で出現していることなどが判る。

標高や水深を浸水日数などで表すことにより、図-20のような環境条件を示す評価指標として利用可能であることが示唆された。

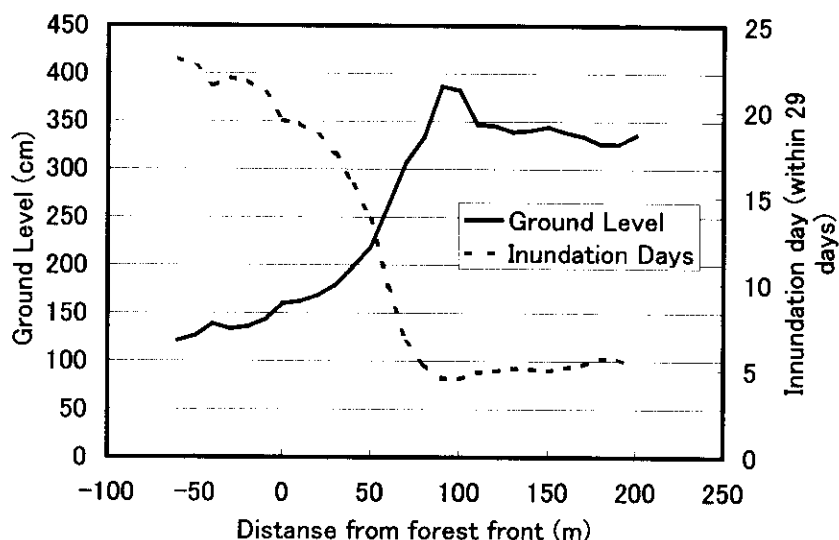


図-20：St.1ベルトトランゼクト上の標高と浸水日数

③ 淡水貯留

浸水時間とともに、生物活動の重要な支配要因である塩分に着目したモデル化を試みる。便宜的に河川を上流域と下流域の2つに分け、下流域には外海が接続している3つの領域1，2，3から

なる場を想定する。それぞれの領域において体積を V_i 、海水交換量を Q_{ij} 、塩分濃度を C_i とし、河川流量を q とすると、塩分の保存則より

$$\frac{\partial C_3 V_3}{\partial t} = (-C_3 + C_2) \cdot Q_{23} - C_3 \cdot q \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_2 V_2}{\partial t} = (-C_2 + C_1) \cdot Q_{12} + (C_3 - C_2) \cdot Q_{23} + (C_3 - C_2) \cdot q \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_1 V_1}{\partial t} = (C_2 - C_1) \cdot Q_{12} + C_2 \cdot q \quad (5)$$

となる。ただし、式 (5) において、 V_1 が外海のディメンジョンを持つために、全体を V_1 で割って極限を撮ることにより、 $C_1 = \text{const}$ とする。 Q_{12} 、 Q_{23} 、 q が未知数であるが、他は実測値により既知の値として与えることができる。しかし、式 (3) と (4) のみからではすべての未知数を説くことができない。そこで、海水交換量は潮汐振幅に比例すると仮定して、 $Q_{23} = 0.5 \cdot Q_{12}$ とするならば、すべての未知数が求まる。

例えば、乾季における塩分の回復期での値で試算する。 $C_1 = 32$, $C_2 = 30$, $C_3 = 28$, $dC_3/dt = 4/60 \text{ d}^{-1}$, $dC_2/dt = 2/60 \text{ d}^{-1}$, $V_2 = 4800000 \text{ m}^3$, $V_3 = 100000 \text{ m}^3$ とすると、 $Q_{23} = 2564000 \text{ m}^3$, $q = 180000 \text{ m}^3$ となった。すなわち、海水交換による塩分輸送が卓越していることがこれによっても示された。

この計算は、潮流による物質移送に関しても同様の論法で拡張できる。ただし、物質移送の場合には、河川流量だけでなく、各ユニットからの生成・消滅項を考慮する必要がある。こうした計算をすることにより、物質の移送が、潮汐による交換過程に依存しているか、その場での生成・消滅といった局所的な現象に依存しているかといった、影響経路に関する検討方法が提供される。また、淡水供給量を明示的に与えることにより、降雨パターンの変化に伴う影響経路の変化の検討にも用いることができる。

④ 波浪による砂泥の巻き上がり

波浪はマングローブの根との相互干渉により、林内に侵入した波は速やかに減衰する。波のエネルギーの減衰率は、根の密度、水深、汀線からの距離などの関数となるはずである。しかし、マングローブ林に極端な粗密もないと仮定し、緩やかな勾配の地面の上に発達した林であれば、水深と汀線からの距離は比例すると仮定することも可能であろう。すると、波の減衰に関するパラメータは、水深のみとなる。

Massel ら (1997) は、いくつかのことになったマングローブ林での波の減衰過程の実測値を用いて、水深による整理を試みた (図-21)。ばらつきはあるものの、水深が深くなるほど波浪の減衰が少なく、水深が浅くなるほど波浪の減衰が大きいとの結果を得た。水深を汀線からの距離に読み替えれば、林内に進入した波エネルギーが進行と共に減衰していくことと等価である。

この議論を延長すれば、海面上昇による水深増加は、より大きな波エネルギーを林内に導入することになるという結論を得る。例えば 1 m の水深では、ほとんど波エネルギーの減衰が期待できない。このことは、海面上昇による水深増加は、波による底質かく乱を増大させる方向に影響が伝播することを示している。

水深の増大 → 波浪の進入 → 波浪減衰—水深モデル
 → 浸水日数の増加 → 潮汐予測モデル、浸水時間評価モデル
 → 潮汐振幅の増幅 → 流動計算モデル
 → 流速の増大 → 物質移動の促進 → 塩分移送モデル
 → 砂泥移送モデル
 → 氾濫原の相対的減少 → 潮汐の非対象化の緩和 → 流動計算モデル

図一 23 : 影響伝播経路とそのモデル化の対応

タイ国ラノンにおけるケーススタディを行い、海洋の現象としては短期・中期規模の時間スケールをもつ現象を捉え、支配的な外力条件を明らかにし、海洋観測機器による連続観測およびマングローブ林の構造調査結果を、潮汐振幅の伝播・波による底泥の再懸濁・淡水供給による塩分変化といった物理過程の影響伝播に関するモデル化を通して検討し、影響伝播経路の理解を進めた。以下に、得られた成果を列挙する。

今後は、これら影響伝播経路のモデル化により可能となった影響評価方法の精緻化、一般化を目指すとともに、これを利用し、海面上昇に対する適応策の比較検討を進める所存である。

IPCC (1995): Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific – Technical Analyses. *Cambridge University Press*, 878p.

Grant-in-Aid for International Scientific Research (No. 08041111), 107p.

Furukawa et al. (1997): Currents and Sediment Transport in Mangrove Forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44, pp.301-310

松田義弘 (1997): マングローブ水域の物理過程と環境形成. 黒船出版, 196p.

[国際共同研究等の状況]

運輸省港湾技術研究所および琉球大学は、タイ王立林野局、同局ラノンマングローブ研究センター、およびカセサート大学との共同研究として本研究をタイ研究協議会 (National Research Council of Thailand: N R C T) に申請し、2000 年 3 月までの研究許可を得、現地での観測・研究・情報交換を実施した。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- ① 古川恵太：日本海洋学会秋季大会 (1998)
「マングローブ林における砂泥輸送の観測」
- ② 古川恵太：日本マングローブ学会 (1998)
「F型マンガルでの波による底泥の再懸濁について」
- ③ 古川恵太、馬場繁幸：日本マングローブ学会 (1999)
「タイ国ラノンのマングローブ林における乾季条件下での海面上昇の影響伝播について」
- ④ 河口定生、W. Meepol、馬場繁幸：日本マングローブ学会 (1999)
「タイ国ラノンのフタバヒルギ林に造成したオキナワアナジャコ塚土壌の物質循環」
- ⑤ K. Furukawa, S. Baba, S. Aksornkhae and S. Havanon: Thai – Japanese Geological Meeting ‘The Comprehensive Assessments on Impacts of Sea – Level Rise’ (1999)
“Possible change of salinity transport dynamics at Ranong mangrove forests by sea level rise in dry – season”
- ⑥ S. Kawaguchi, W. Meepol and S. Baba: Thai – Japanese Geological Meeting ‘The Comprehensive Assessments on Impacts of Sea – Level Rise’ (1999)
“Nutrient dynamics of Mud-Lobster mounds in Rhizophora Apiculata dominated mangrove forest
- ⑦ K Furukawa: The second meeting of Coastal Environment Science and Technology of the US – Japan Natural Resources (UJNR) (1999)
“Sea level rise impacts on Asian mangrove forests”

(2) 論文発表

- ① S. Massel, K. Furukawa and R. Brinkman: *Fluid Dynamics Research*, 24, 219-249 (1999)
“Surface wave propagation in mangrove forests”
- ② K. Furukawa, S. Baba and S. Aksornkhae: *Mangrove and Salt Marsh*, (投稿準備中)
“Sea level rise impacts on mangrove forests – a case study on Ranong mangrove forests, Thailand”

- (3) 出願特許、受賞等
特になし