

B-12 海面上昇の統合的影響評価と適応策に関する研究
(1) 沿岸自然環境と生態系への影響評価と適応策に関する研究
② 沿岸生態系への影響評価と適応策に関する研究

国土交通省国土技術政策総合研究所

沿岸海洋研究部 海洋環境研究室

独立行政法人港湾空港技術研究所

琉球大学農学部

九州大学農学部

古川恵太

井上徹教

馬場繁幸

河口定生

〈研究協力者〉	タイ国 カセサート大学	Sanit Aksonkoae
	タイ国 王立林野局	Sonjai Havanond
	タイ国 王立林野局	Sopon Havanond

平成12~14年度合計予算額 12,759千円
(うち、平成14年度予算額 4,142千円)

【要旨】 沿岸生態系として、海面上昇の影響を受けやすいと考えられる干潟、マングローブ林を対象として、脆弱性の特性および適応策の評価方法についての検討を行った。脆弱性は、地形的脆弱性、外力変化に対する脆弱性、生物的脆弱性、生態学的脆弱性、社会経済学的脆弱性などに整理され、それぞれ、代表的な状況についてモデル化された。抽出された脆弱性をもとに、大規模なマングローブ林と干潟域が存在するタイ国のラノン地域ガオ川流域を対象として、具体的に脆弱性マップの取りまとめを行うとともに、適応策を評価するための評価システムの提案を行った。マングローブ林では、海面上昇の影響を待たずに、エビ池への転用による林の消失が問題となっている。今後、マングローブ林における海面上昇時の適応策のひとつとして有望な、エビ池のマングローブ林への再生を、過去に行われた再生実験事例のフォローアップ調査を今回行うことで、詳細に検討することができた。その結果、海面上昇への適応策として、エビ池のマングローブ林への再生が有望であることが示された。

【キーワード】 マングローブ林、干潟、エビ池、影響伝播、自然再生

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)¹⁾、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、日本は0.03%で、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370,000ヘクタールであったマングロ

ープ林が1995年には170,000ヘクタールへと半減している。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²⁾。その結果、減少をつづけていたマングローブ林の面積は1996年以降増加に転じ、最近行われた調査（2000年）では、約48,000ヘクタール増加していると推計されている^{3)、4)}。このように、脆弱な生態系ではあるが、条件さえ整えば、再生可能であることが示されている。

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。

マングローブ林を再生していくことへの要請は、今後ますます強くなってくると考えられる。現在、経験的に行われている植林適地の選定についても、これから予想される地球温暖化による影響も考慮して、より戦略的な取り組みが必要になるであろう。そのためには、マングローブ林を成立させている様々な環境条件をモデル化し、外的環境変化によって、どのような応答を示すのかを解き明かすとともに、具体的な適応策の検討が必要となってきた。

2. 研究目的と方法

上記のような背景のもと、本研究では、マングローブ生態系の地球温暖化に対する「脆弱性の特性の解明」と、「影響評価方法の確立」さらには、「適応策の検討」を目的とした。

脆弱性の特性の解明は、マングローブ林のもつ脆弱性を様々な角度から検証し、なにが支配的な現象であるのか検討するとともに、それぞれに対して、可能な限りモデル化を進めることとした。マングローブ林における影響伝播は、潮汐の干満により浸水・干出を繰り返す海水の流動に強く支配されていると考えられる。そうした流動現象は、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オ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が必要となる。そこで、本研究では、タイ国のラノン地方ガオ川流域（全長約7km、面積約2,000ヘクタール）および、西表島ナダラ川流域（全長400m、面積約6ヘクタール）において現地観測を行い、地形、水理、生物、物質循環に関する測定を行った。

影響評価は、脆弱性マップの取りまとめおよび脆弱性の特性を考慮した適応策の評価システムの提案に分けて実施することとした。脆弱性マップは、空間的な配置が判るように収集した地形図、航空写真、GPS測量成果、縦断・横断測量成果、植生踏査結果などを元に、平面地形図、縦断面、横断面図、植生図、写真を組み合わせたものとした。脆弱性の特性を考慮した適応策の評価システムは、抽出された脆弱性の特性を参考に影響伝播のシナリオを作成し、汀線変化対策、侵食対策、淡水供給対策の3つの側面について提案を行った。

適応策の検討については、エビ池に転用されたマングローブ林の再生について検討することとした。ラノンにおいて、過去に行われた再生実験事例を研究するとともに、追加の現地観測を行い、地形条件、植生の長期的な変化、水質・土壌の条件などを取りまとめ、再生の実行可能性に

ついて検討した。

3. 結果・考察

(1) マングローブ生態系の脆弱性の特性

マングローブ林は、図 1-2-1 に示すように、陸と海のバッファゾーンに位置し、干潟や汽水域にマングローブという耐塩性の植生が存在する独特の生態系である。クリーク沿いに発達する R 型マングローブ林および、海に面した F 型マングローブ林が代表的な形態であるが、図 1-2-1 では、R 型および F 型が連続して発達している様子が見て取れる。

このマングローブ林に外的環境がどのように影響を及ぼしているのかということをも模式的に表すと、図 1-2-2 のようになる (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り、地質の変化とともに地盤高の変化が起り、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。

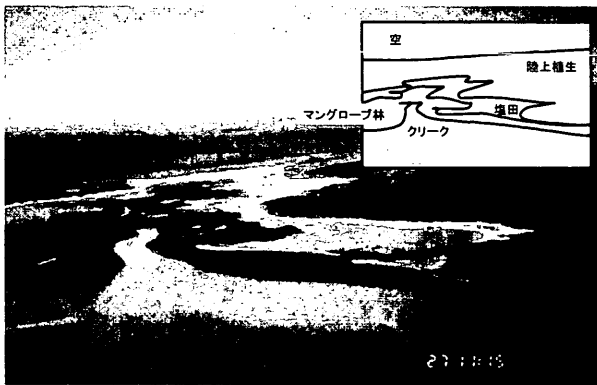


図 1-2-1 陸と海のバッファゾーンに位置するマングローブ林

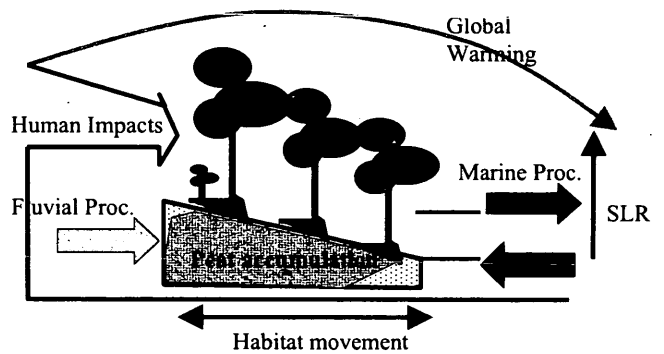


図 1-2-2 マングローブ林を取り巻く各種過程の概念図 (Miyagi, 1998 を修正)

こうした状況下において、マングローブ林には、地形的脆弱性、外力変化に対する脆弱性、生物的脆弱性、生態学的脆弱性、社会経済学的脆弱性があると考えられる。

① 地形的脆弱性

マングローブ林が成立するのは、潮汐により氾濫が起こる中潮位 (MWL) から高潮位 (HWL) の間で、泥分の多い地形と言われている。泥分が多いということは、安定勾配が緩やかであることを示し、図 1-2-3 に示すように、R 型マングローブ林においては、クリーク岸から立ち上がった勾配が、林内に入るとともに、ほぼ水平に近くなる。クリーク岸のバンクは、クリークから供給される砂泥の堆積により維持されており、数 10m おきにある 2 次的なクリークから局所的に侵食、排水されている。

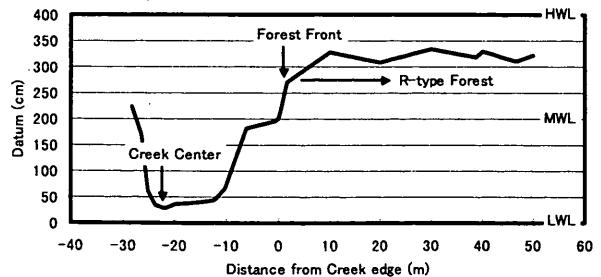


図 1-2-3 R 型マングローブ林の断面図 (ラノン、St. 3 付近)

このように、林床は水平であるが、シャコ塚や2次的なクリークによって微細な地形の凸凹が存在し、動的に平衡が成立しているように見える。F型マングローブ林においては、前面に干潟が広がっていることが多いが、図1-2-4に示すように、パイオニア種が育成する汀線近傍のA領域においては、下に凸の侵食地形となっており、*Rizophora*種が育成を始めるB領域においては上に凸の堆積地形となっている。その後、砂丘上のバンクをへてR型マングローブ林同様に水平な林床に接続する。

こうした水位に対応した地形は、河川やクリーク、海域から運ばれてくる砂泥の堆積と侵食、そして林内部での生物活動に起因する有機堆積物の生成のバランスにより維持されている。したがって、砂泥を供給する河川や、クリーク、干潟などの配置が重要であり、開発によりこうした広域の砂泥輸送システムが変化すると影響を受ける可能性がある（図1-2-5にラノン地域のマングローブ林の配置を、図1-2-6にガオ川流域の拡大図を示す）。

したがって、マングローブ林は平面的・鉛直的な地形および、配置に大きく依存した生態系であり、個別の生態系の保全・再生のため広域から、局所的な条件までを検討する必要があることが判った。

② 外力変化に対する脆弱性

マングローブ林に作用する物理的な外力として大きなものは、潮汐による潮流と波浪、そして淡水流入である。潮汐は河口部からクリークをさかのぼりながら周囲の林内に氾濫し、マングローブの稠密な根による抵抗を受けて上げ潮時と下げ潮時で非対称な潮汐変動を示す。こうした潮流の非対称性等は、浸水する林の面積、マングローブによる流れへの抵抗などに支配されていることが示されており、林を構成する樹種の変化や林の埋め立て、転用などにより変化を受けることとなる。こ

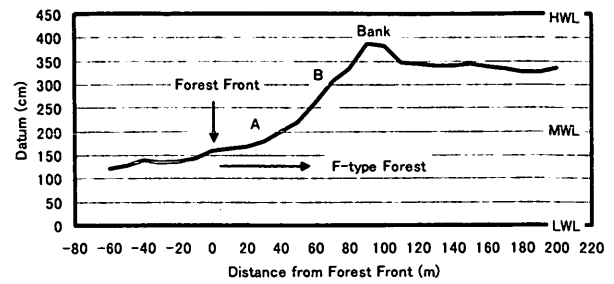


図 1-2-4 F型マングローブ林の断面図
(ラノン、St.1 付近)

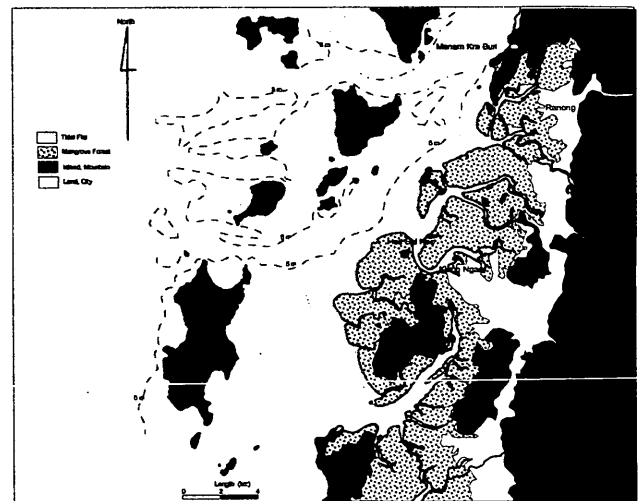


図 1-2-5 ラノン周辺のマングローブ林の平面配置

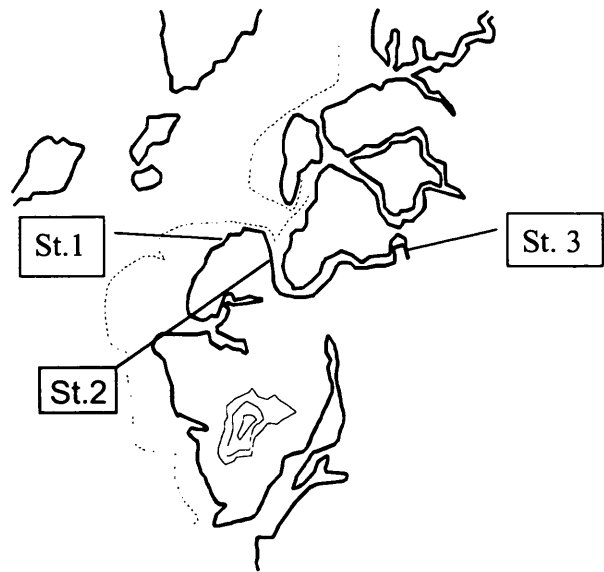


図 1-2-6 ラノン、ガオ川流域の拡大図と測点配置

うした潮流の変化は、簡易な水深方向に積分した2次元の流動モデルにより推測することが可能である⁵⁾。

こうした潮流による物質の移送の様子を、ガオ川 St.2 の測点において観測した。観測は、乾季の1999年の1月から3月の期間と、雨季の1999年10月から12月の期間に行った。雨季における観測例を図1-2-7に示す。時々刻々の潮流を推定し、実測の濁りを掛け合わせることで、潮流により輸送される泥の量が推定できる。そうして推計したのが表1-2-1の潮汐によるフラックスである。

ところで、図1-2-7の上図と中図を比較すると、降雨量の多いときに濁りが大量に発生していることが判る。その場合には、降雨量から淡水流入量を推定し、その淡水の流出による濁りの下流方向へのフラックスを見積もって潮汐によるフラックスと合わせることで正味の輸送量が推定できる。

降雨量と淡水供給量については、ボックスモデルを用いて解析した。ガオ川を上流域と下流域の2つに分け、下流域を $i=2$ 、上流側を $i=3$ とし、それぞれの領域において氾濫体積を V_i 、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

$$C_3(V_3 + q) = C_2 \cdot V_3 \quad (1-2-1)$$

となる。 $V_3=100000 \text{ m}^3$ として、上下流の塩分濃度の実測値(図1-2-8)を代入すると、図1-2-9のように淡水供給量が推定できる。

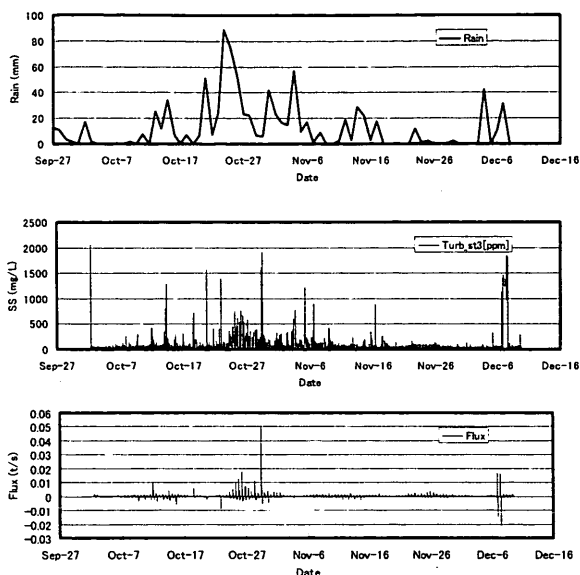


図1-2-7 ラノン、ガオ川河口における雨季の砂泥の輸送(上:降雨量、中:濁り、下:輸送量、上流向きが正)

表1-2-1 ラノン、ガオ川河口における砂泥の輸送の推定(上流向きが正)

	期間	潮汐によるフラックス	降雨によるフラックス	全フラックス
乾季	1999年1月	334t	-6t	328t
	1999年2月	372t	-5t	367t
雨季	1999年10月	337t	-172t	165t
	1999年11月	90t	-49t	41t

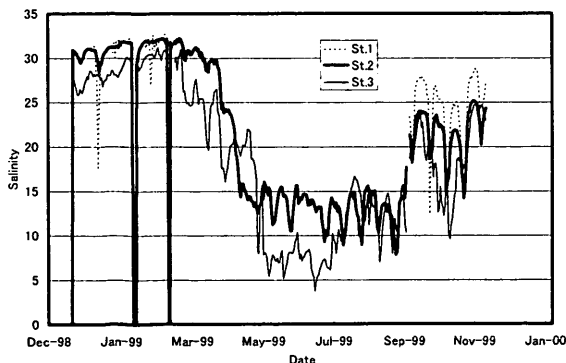


図1-2-8 ラノン、ガオ川における年間塩分変動

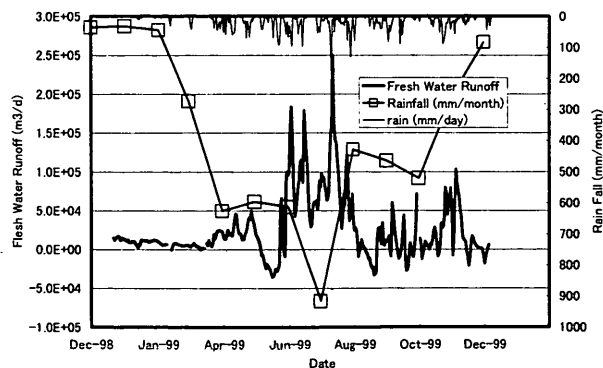


図1-2-9 ラノン、ガオ川における淡水供給量の推定結果

推定された淡水供給量と月間降水量の関係を整理したものが、図 1-2-10 である。近似式を用いることによって、月間の降水量から簡易に淡水供給量が推定できることが判る。こうして、1999 年の 1、2 月、10、11 月の淡水供給量を推定し、降雨時の平均的な砂泥含有量である 250mg/L を用いると、表 1-2-1 の降雨によるフラックスが計算できる。乾季の 1、2 月は、圧倒的に潮汐によるフラックスが卓越し、マングローブ林が砂泥をトラップする効果があることが示されている。一方、10 月においては、潮汐によるフラックスの半分程度の砂泥フラックスがクリークから海域に向かって輸送されている。このことから類推すると、砂泥の濃度データがないものの、7 月などでは 10 月の倍以上の降雨があることから、砂泥をマングローブ林から海域へ放出する期間となっていることが予想される。

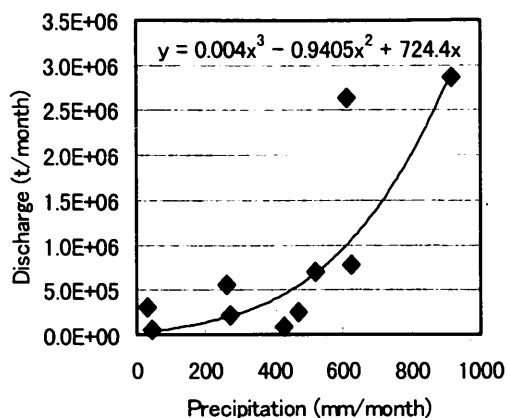


図 1-2-10 ラノン、ガオ川における月間降水量と淡水供給量の関係

この他に、短周期の波が林内に直接作用することによる侵食・堆積の進行も考えられる。西表島において観測された波高と波による懸濁物の濃度、舞い上がった懸濁物が潮流によって林内に導入される懸濁物について観察した(図 1-2-11)。波浪が大きくなる状況において砂泥の流出(マングローブ林→前面海域)、波浪がおだやかな状況において砂泥の流入(前面海域→マングローブ林)が短期的な変動として見られた。表 1-2-2 に波高の平均値と林に入る浮遊懸濁物量、林から出て行く浮遊懸濁物量、その差(正味)の輸送量を整理した表を示す。これを図化すると、図 1-2-13 のようになり、高波浪時は、浮遊懸濁物量が増加することで輸送量が増大すること、低波浪時は輸送が(+)となり林内に浮遊懸濁物を蓄積する方向にあり、高波浪時は輸送が(-)になり林から浮遊懸濁物を放出する方向での輸送が卓越することが示された。

これらの関係を整理すると、波高がおよそ 4 cm を超えた時点で、輸送形態が変化しており、常時の穏やかなときに浮遊懸濁物を林内に堆積させ地盤高をあげ、高波浪時に砂泥が侵食されて地盤高が下がるといった機構で地形が維持されていることが推察される。したがって、現在、これらのバランスが取れていると仮定すると、海面上昇などにより推進が増大することは、図 1-2-14 に示されたように波エネルギーが増大することになり、より侵食傾向が進む可能性があるということである。

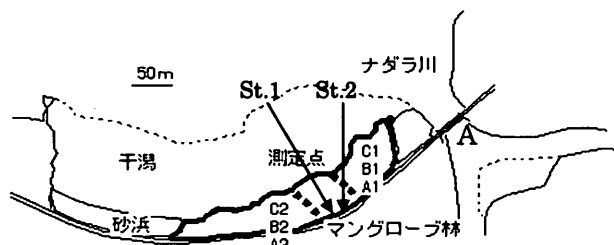


図 1-2-11 西表島ナダラ川周辺の F 型マングローブ林における測定点

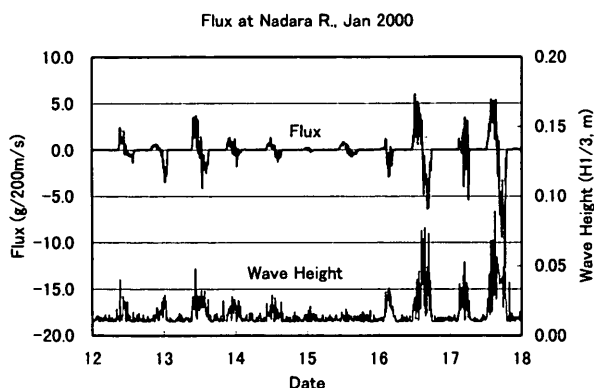


図 1-2-12 F 型マングローブ林における波高と懸濁物フラックス(正がトラップ)

表 1-2-2 短期的な波浪による砂泥輸送形態の変化

Date	H1/3	In	Out	Flux
2000/2/12 11:00	0.012	8.1	5.2	2.9
2000/2/12 23:30	0.015	3.7	14.1	
2000/2/13 12:00	0.04	14.6	15.3	-0.7
2000/2/14 0:30	0.024	5	2.6	2.4
2000/2/14 13:00	0.012	4.8	4.4	0.4
2000/2/15 1:30	0.014	0.6	0.5	0.1
2000/2/15 14:00	0.012	5.1	3.9	1.2
2000/2/16 2:30	0.028	2.7	9	
2000/2/16 15:00	0.08	30.5	35	-4.5
2000/2/17 3:30	0.04	4.8	6.6	-1.8
2000/2/17 16:00	0.09	34.9	58.2	-23.3

(m) (g/s) (g/s)

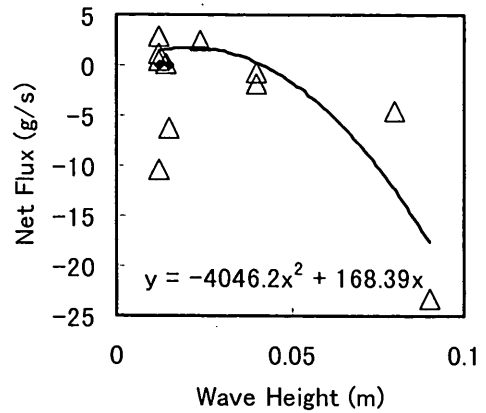


図 1-2-13 短期的な波浪による砂泥輸送形態の変化

③ 生物的脆弱性

マングローブは、地盤高さ（海水の浸水時間）、海水の塩分、水温などにより住み分けられているといわれている。そのことを示すためには、林分の詳細な構造調査が必要である。また、環境調査を同時に行うことによって、マングローブの必要とする環境条件の検討が行える。しかし、林分は通常数年から数十年かけて発達してきており、短期的な環境条件とは必ずしも対応していない可能性があることに注意しなければならない。

マングローブ林の住み分けは、図 1-1-15 に示されるように、基本的には汀線やクリークから地盤高が高くなるにつれて、*Sonneratia* 種、*Avicennia* 種などのパイオニア種から、*Rhizophora* 種、*Ceriops* 種を経て、*Lumnitzera* 種などに続くといわれている⁶⁾。

また、マングローブ林には、地付の生物も多く生息している。沖縄アナジャコやトビハゼの仲間は、塚を作り林床に生息している。塚の頂部は満潮面より上にあり、塚の下部は満潮時に水面下に没する。どちらも、塚の内部の泥を外部に排出する。それが、林床の底質の耕運に役立っていると考えられている（写真 1-2-1）。

④ 生態学的脆弱性

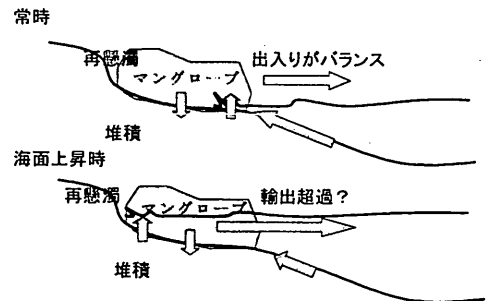


図 1-2-14 短期的な波浪による砂泥輸送形態の変化の模式図



写真 1-2-1 沖縄アナジャコと塚

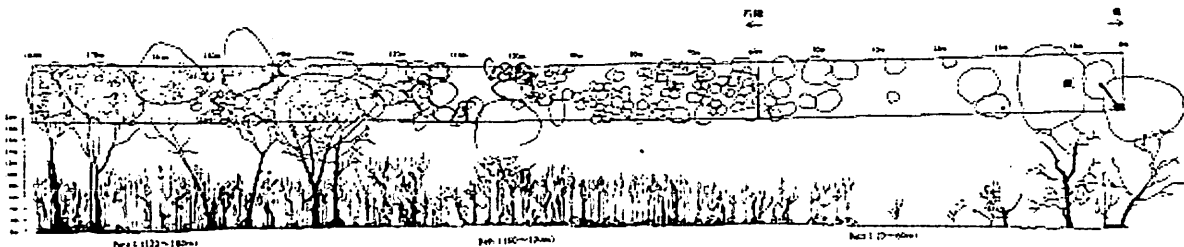


図 1-2-15 F型マングローブ林の住み分け（右が汀線、左が林分）

物理的な潮流による水の出入りは、懸濁物の移送に関与しているだけでなく、栄養物質の輸送、熱・溶存酸素 (D0) などの収支を左右し、生態系としての機能の維持に役立っていると考えられる。西表島のナガラ川河口において行った観測結果をもとに、林内での生態系の特性、物質循環の様相などを検討する。

調査地点は図 1-2-11 の A 点であり、2001 年 12 月 11 日 - 14 日において、流速・水温・塩分・水深・栄養塩・TP・TN・DTP・DTN・D0・pH・SS・Chl. a の各項目を測定した (図 1-2-16)。以下に、水温と D0 の観測結果についてのみ紹介する。

水温の時間変化の様子を、図 1-2-17 に示す。水温データを見ると、昼間の上潮時には急激な上昇を見せた後漸減していく。これに対し、夜中の上潮時には急激に減少した後漸増していく。また、下げ潮時には振動があるが、平均的にはほぼ一定の水温となる。干潮周りでは振動も無くほぼ一定で推移している。

図 1-2-18 左に D0 の鉛直分布の時間変化の様子を示す。下げ潮時から干潮時にかけての D0 濃度はいずれの水深においても 3.9mg L^{-1} から 4.5mg L^{-1} でほぼ一定である。これに対し上げ潮時には 6.3mg L^{-1} から 7.2mg L^{-1} と比較的高い値で推移している。図 1-2-18 右には D0 飽和度の鉛直分布の時間変化の様子を示す。下げ潮時から干潮時にかけては飽和度約 50% 前後、上げ潮時には 80% から 90% 程度で推移していることがわかる。

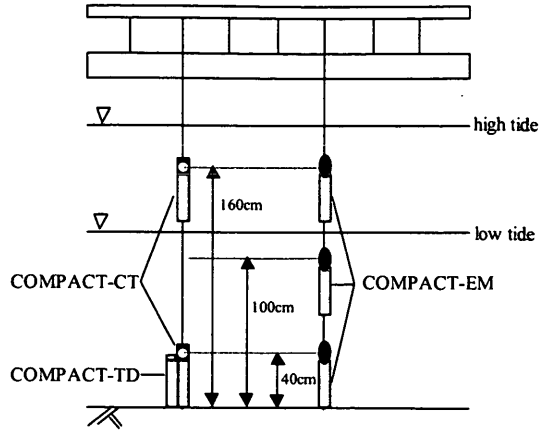


図 1-2-16 ナガラ川河口部における観測状況 (図 1-2-11、A 点での係留)

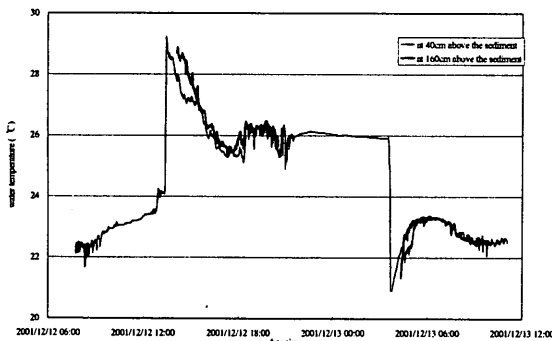


図 1-2-17 ナガラ川河口部における水温変化の観測結果

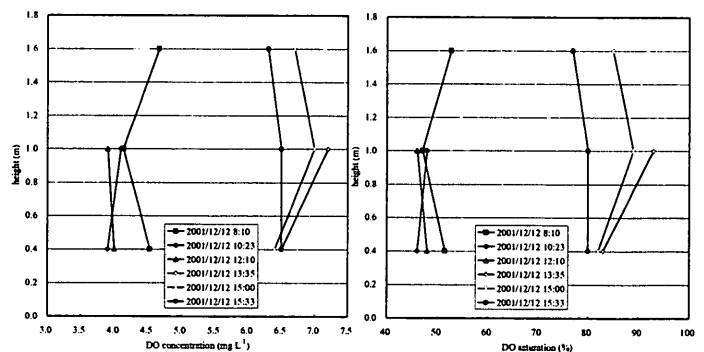


図 1-2-18 ナガラ川河口部における D0 変化の観測結果 (左: 濃度、右: 飽和度)

12 日 13 時 21 分に 24.06°C であった底層水温は同 13 時 25 分には 29.22°C にまで上昇していた ($5.16^{\circ}\text{C}/4$ 分)。逆に 13 日 3 時 31 分に 25.97°C であった底層水温は同 3 時 43 分には 20.91°C にまで減少していた ($5.06^{\circ}\text{C}/12$ 分)。一般に、マングローブ林などによる日陰がない干潟では温度の変化は大きいと考えられる。これと比較して、ナガラ川河口域に存在するようなマングローブ林内の干潟は、比較的に日射による温度変動を受けにくいと考えられる。このような状況下で、10 分前後で 5°C 以上変化するような温度インパクトは、短波・長波放射による温度変化とともに考察に加える必要がある。今後は上述の急激な温度変化が (底生) 生物の代謝活性に与える影響の有無について検討する余地があるものと思われる。

また、上述の水温の急上昇（急減少）の後の漸減（漸増）は沖合いの浅水部または沖合いの干潟との熱のやり取りによって冷却（加熱）された水塊の流入によるものと考えられる。ここで、上潮時である12日12時51分から同17時14分にかけて（水位は80cm上昇）の底層の流速を単純に積分すると約542m、13日3時26分から同6時46分にかけて（水位は62cm上昇）の底層の流速を単純に積分すると約427mとなり、当該水域の熱収支を考える上では約500m程度沖合いまで考慮する必要があることがわかる。

さらに、下層の水温を見ると、干潮時水位が低いレベルで保たれているときは、昼間の方が夜間よりも水温が低い。これは、それ以前に入ってきた水温に影響を受けるためと考えられる。このようにマングローブ林に覆われ堆積物が直接日射に曝されないような干潟では、そこでの日射・放射以上に外海からの熱の移流が重要であることが示唆される。

図1-2-18から、下げ潮時から干潮時にかけてはマングローブ林内における生物活性によりD0濃度の低下した水塊及び基底流出水が流出してきているものと思われる。これに対して、上げ潮時には外海の影響を受けた水塊が流入している様子が見てとれる。

上記の考察から、将来的に海面上昇が起こった際最も影響を受けると考えられるのは、マングローブ林内の熱収支と考えられる。まず、海面上昇に伴い前面海域の浅場における水温変動は緩和されることが予想される。このため前述したような約5℃にわたる急激な水温の上昇及び下降も緩和されることが考えられる。一方、海面上昇によりマングローブ林内に流入する水量は増加すると考えられるので、それに伴う熱フラックスそのものは増大すると考えられる。これにより、水温の昼夜逆転現象が促進されるかもしれない。この効果が当該水域生態系に正負いずれの影響を与えるのかは不明であるが、当該水域特有の水温環境の特性が弱められることが予想される。

次に考えられるのは、水深の増加、外海水（高塩分水）流入の増大により鉛直混合が弱くなり、底層における溶存酸素低下がおこる可能性である。現状ではマングローブ林近辺において上げ潮時に十分な鉛直混合が行われていると考えられるが、それでも流出水のD0濃度は 4 mg L^{-1} 前後と決して高くはない。鉛直混合の弱まりは直接的に堆積物表層のD0濃度低下を招く可能性があるため、特にマングローブ林内のベントスに対して影響を及ぼす可能性がある。

④ 社会経済学的脆弱性

マングローブ林は、様々な機能を持つ。Aksonkoe, S. (2002b)⁴⁾はマングローブ林の機能として、

- ・ 木材資源供給の機能
- ・ 生物棲息場を提供する機能
- ・ 食糧生産の機能
- ・ 海水浄化機能
- ・ 薬品開発のための原料提供機能
- ・ 大気の浄化機能
- ・ 炭素固定機能
- ・ 海岸の防御システムとしての機能
- ・ 研究を推進するための場を提供する機能
- ・ 海と陸の掛け橋の機能

等が挙げられることを示した。こうした多機能なマングローブ林であるから、社会経済的にも利

用価値が高く、自然保護区としての指定や、林野の資源管理などによる利用制限が無い場合、伐採、エビ池への転用、鉱山資源の発掘といった影響を直接的に受けることとなる。

近年、環境への関心の高まりも受けて、観光資源としての価値も見なおされつつある。しかしこのことにより、観光船が起こす引き波による影響が懸念されている（写真1-2-2、図1-2-19）。

引き波による侵食の影響は、同様の地形を持つが観光船が通過するかしないかの違いだけをもつ2地点を比較することで判定ができる。図1-2-20には、川の中州において、観光船の通る側と通らない側のオヒルギの膝根の状況を示してある。明らかに観光船が通る側のほうが侵食が進んでいるように見える。そこで、波高計と流速計を係留し、夜と昼に生じる流速の変動成分の増減を観測した。この結果、にごりの発生量の変化は、観光船による引き波の発生と無関係でないことを示唆している。しかし、観光船の速度を下げることで濁り発生量を減少させることが可能と考えられる。



写真 1-2-2 観光船による引き波

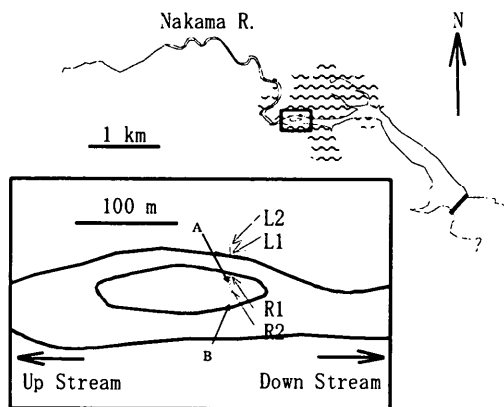


図 1-2-19 調査地点（L1、L2、R1、R2の地点で、顕著な河岸侵食が見られた）

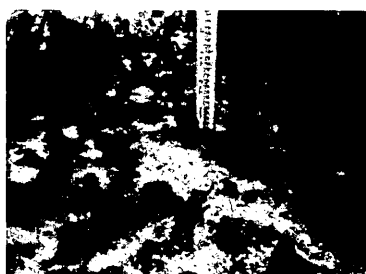


図 1-2-20 オヒルギの膝根の露出状況
上：南側河道
下：北側河道（観光船通過側）

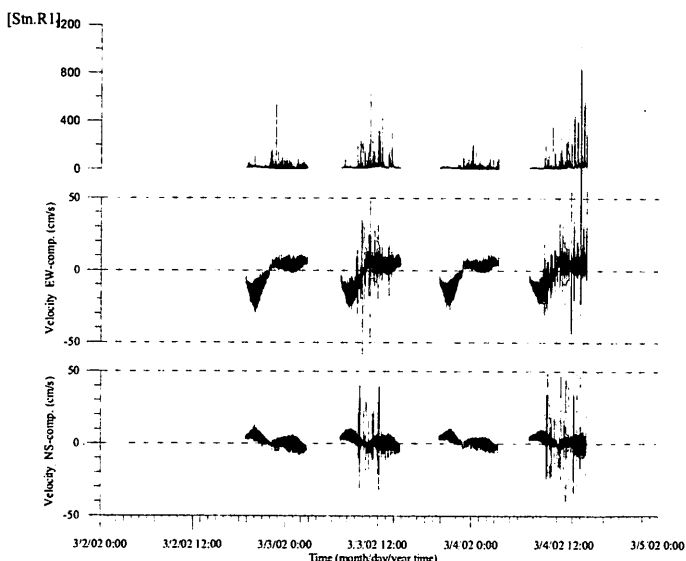


図 1-2-21 濁りと流速の観測結果
上：濁りの濃度
中：河道に沿った流速成分
下：河道に直角な流速成分

(2) 脆弱性マップの作成

脆弱性マップとして、空間的な配置が判るようにより収集した地形図、航空写真、GPS測量成果、縦断・横断測量成果、植生踏査結果などを元に、平面地形図、断面図、植生図、写真などを取りまとめた。

平面地形に関しては、写真 1-2-3 や図 1-2-22 のように、既存の資料を活用し、できるだけマングローブ林の全体像がつかめる資料を収集した。

断面図は、マングローブの立地条件を判定する指標である高度との関係を直接示すことができるので、重要な情報となる。しかし、数千分の1程度の地形図では、1/100-1/1000 といった緩やかな勾配を持つ0-数mの地盤高の領域の縦断面図を得ることは難しい。現地での測量により縦断面図を得る方法が唯一の情報源となっている。



写真 1-2-3 衛星画像の例 (Bio Sphere Reserve の区分が重ねてある)

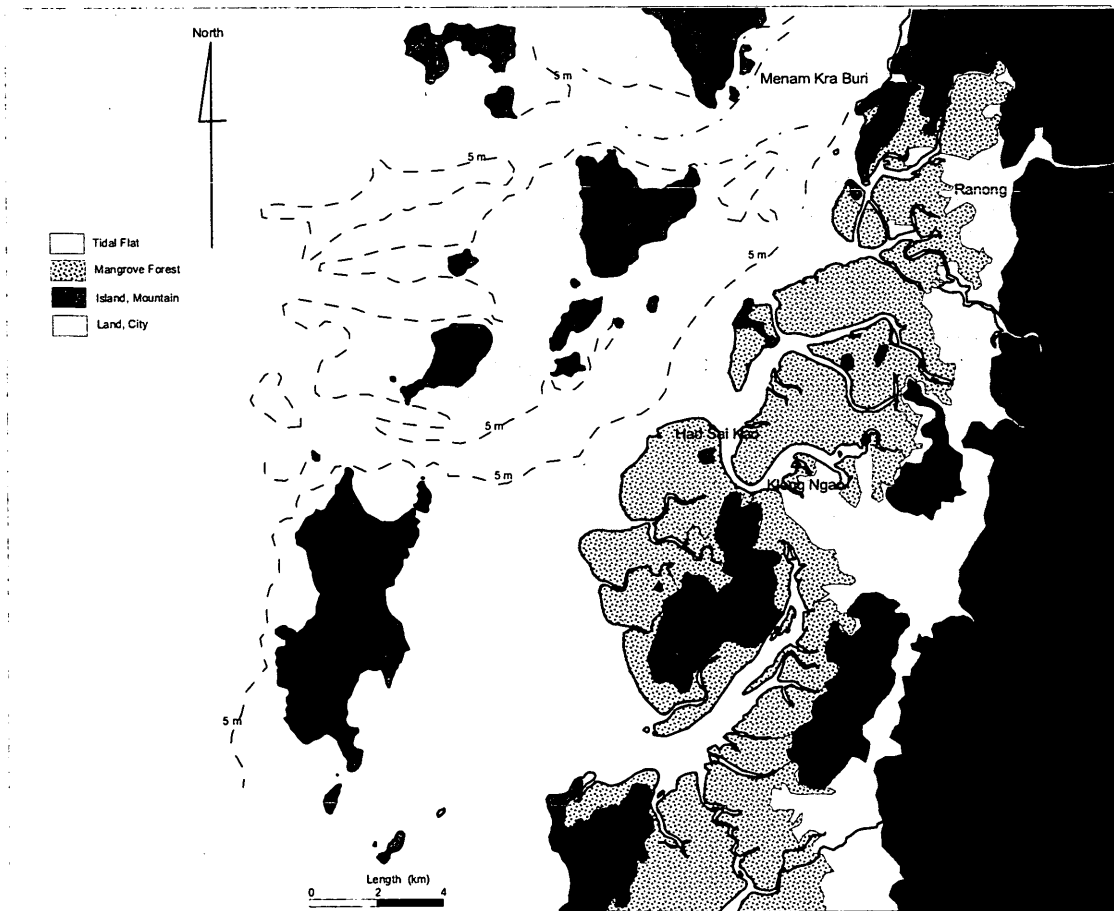


図 1-2-22 マングローブ林の領域図

また、マングローブ林の特徴であるクリーク網については、GPS による測量を行うことでトレースするとともに、水質の測定値等とオーバーレイすることで広域的な環境勾配を可視化した（図 1-2-23）。

植生図としては、各測点にもうけられたベルトトランゼクトにおける樹種、樹高、胸高直径、樹幹図、プロット等を記録したものを、補助的に写真も添付することとした。

図 1-2-24 に例として、ラノン、ガオ川の脆弱性マップのイメージを掲載する。

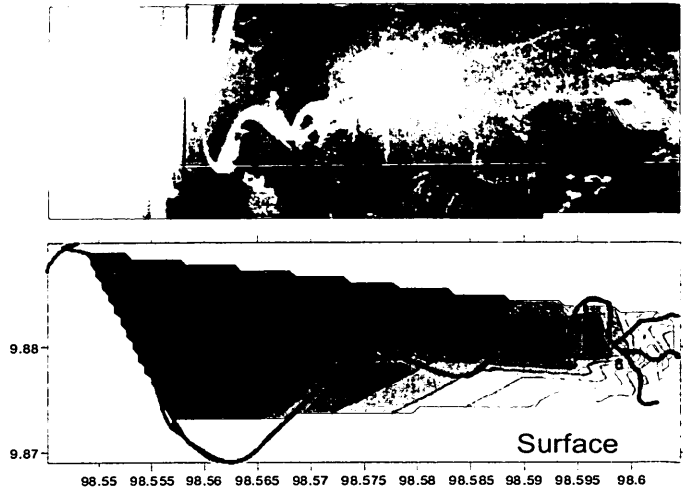


図 1-2-23 クリーク網

(上：航空写真、下：GPS によるクリーク網の測量成果と表層 D0 のオーバーレイ)

Innundation and Salinity Distribution (Ronong, Thailand)

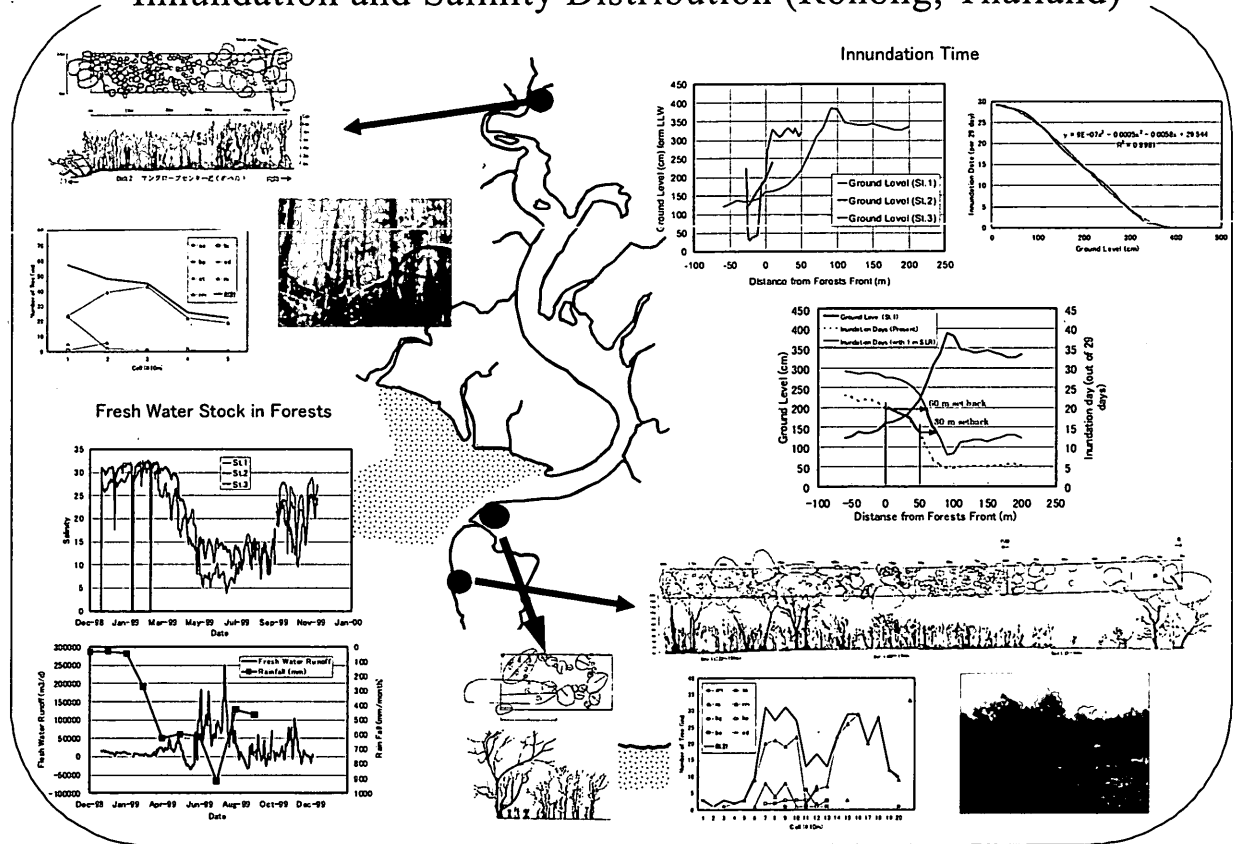


図 1-2-24 マングローブ林の脆弱性マップの例

(3) 適応策の評価システム

抽出された脆弱性の特性を参考に影響伝播のシナリオを作成し、評価法の検討を行った。表 1-2-3 に示すように、今まで抽出されてきた脆弱性の特性毎に様々な評価方法が考えられるが、

ここでは、①汀線変化対策、②侵食対策、③淡水供給対策の3つの側面について検討を行った。

① 汀線変化対策

地形が変化しないと仮定すると、海面上昇によって汀線が後退する。その後退距離は、海面上昇に対応する地盤高さにあたる位置として単純に計算するのではなく、一旦、地形条件と潮汐モデルを用いて浸水時間として整理すると異なる地点なども含めて比較検討がしやすくなる（図 1-2-25）。

その結果算出されるセットバック量を参考に、その分の余地が残っているのであれば、海面上昇後に林が移動することを許すように、バッファゾーンとして余地を残すことが対策となると考えられる。

一方で、セットバックを保証する余地が無い場合には、原位置で海面上昇に適應する必要があり、土盛り等を含めた地形改変の必要性が出てくる（図 1-2-26）。

② 侵食対策

海面が上昇すると、相対的に水深が深くなり、波の減衰が少なくなるので、マングローブ林の波浪による侵食が懸念される。

まずは、地形条件、波浪減衰モデル、砂泥輸送モデル等を用いて、海面上昇後の波浪条件の予測を行い、波浪外力が超過するかどうかを判定する。例えば、図 1-2-13 で示されたような、波高と砂泥輸送フラックスを関連付けることができているならば、波浪の外力が超過しているかどうかの判断ができる。その後、原因が船舶であれば、航行制限を実施することを検討し、原因が風波やうねりであれば植林や波高減衰のための方策を検討する必要がある。

表 1-2-3 脆弱性の特性格別の評価手法

	マングローブ林	
	脆弱性	評価方法
地形的特性	標高 勾配 大きさ	地形図、浸水時間 縦断・横断測量成果、 地図、GPS測量成果
外力変化	波 降雨	土砂輸送 塩分分布
生物学的特性	多様性	住み分け
生態学的特性	物質循環 土壌生成	循環速度 土壌生成速度、生物との相互作用
社会・経済特性	伐採 エビ池転用 航行船舶 資源利用	規制 再生可能性 引き波による侵食 残存資源量

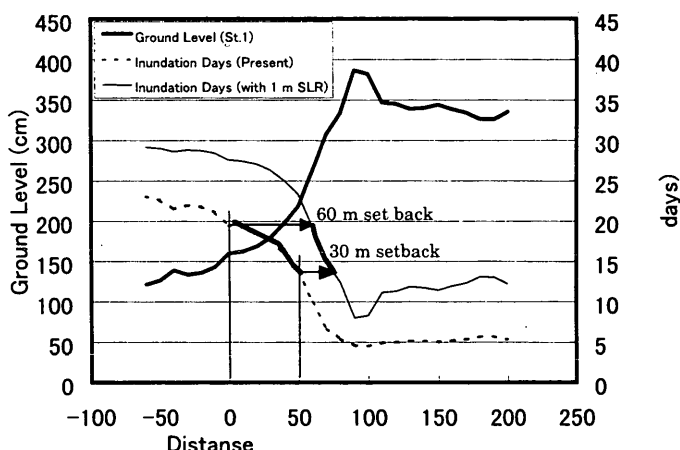


図 1-2-25 汀線変化対策の検討例

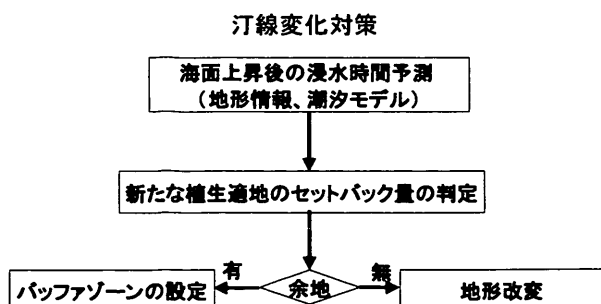


図 1-2-26 汀線変化対策の評価システム

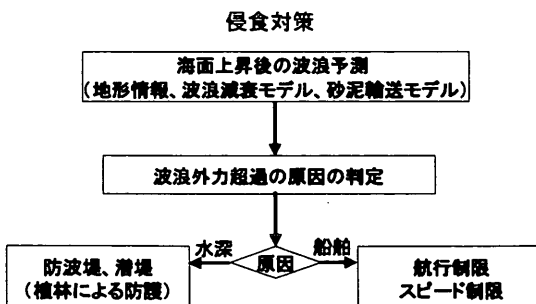


図 1-2-27 波浪による侵食対策の評価システム

③淡水供給対策

熱帯地方の汽水域では、乾季に塩分濃度が上昇し、雨季に塩分濃度が下降するといった、ダイナミックな塩分変化が生じている(図1-2-8)。こうした塩分分布は、地形情報、水文モデル、塩分輸送モデルなどを用いて推定することが可能である。海面上昇による海水交換の変化や、降雨パターンの変化などを考慮して新たな塩分分布が求めれば、林が成立する適地を示すことができる。そうした適地が残っておればその場所に植林等をして積極的に保全していくというシナリオも考えられる。適地が存在しない場合には、洪水調節や淡水供給対策が必要となるかもしれない(図1-2-28)。

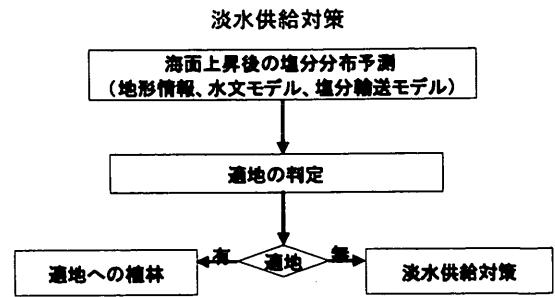


図 1-2-28 淡水供給対策の評価システム

(3) 適応策の検討

評価システムとしては、提案されても具体的な適応策の検討にあたっては、様々な関係する条件を考慮しなければならない。それは、それぞれの検討地に特有の問題を含んでいるかもしれない。ここでは、適応策のひとつとしてエビ池に転用されたマングローブ林の再生(復元)について検討することとした。

市場価値の高いエビの養殖池は、陸側に近いマングローブ林に造成され、初年度から2年目までは高収量が得られるが、その後、急激な土壌の強酸性化により放棄される。本研究では、放棄エビ池の周辺に排水門を付した堤防を築き、その跡地のポルダーにマングローブを25年前に植林したplotの内、植栽の成功した区、枯死した区(タイ国ラノン県)のおおの2ヶ所で、土壌断面100cmをつくり、10cm深さ毎の土壌酸性を比較した(表1-2-4参照)。

マングローブ植栽が成功した区の生および風乾土壌のpH値は、枯死区より各0.7、0.9単位低かった。さらに、風乾中に微生物酸化過程で生じた硫酸によるpH減少はマングローブ生育区で大きいことから、マングローブ植栽が順調である土壌では、硫黄酸化細菌の FeS_2 酸化が速やかであることが示唆された。それらによる土壌に残存する FeS_2 の減少と、 FeS_2 から放出されたFeと生成産物の硫酸による土壌塩基の溶出が促進されてEC値が上昇した。さらに、過酸化水素の FeS_2 酸化による最終pHは、枯死区で低くなり、過酸化水素処理によるpH減少も枯死区で大きかった。

このエビの養殖池跡は25年前に植林実験が行われたが、2000年後半に不法伐採されてしまったので、伐根と現在残っているものから材積の計算を行った。前提条件・観察結果として、

表 1-2-4 再生エビ池での土壌環境

Items	unit	*Average(n=20) **Standard deviation		t test
		No Growth Plot	Growth Plot	
Water content	%	98.2*	< 107.6	NS(10%)
		17.6**	26.8	
EC	mS/cm	8.52	<< 10.91	1%
		2.04	2.02	
WetSoil	pH (H ₂ O)	7.2	> 6.5	1%
		0.2	0.3	
AirDrySoil	pH (H ₂ O)	5.9	> 5.0	1%
		0.4	0.5	
Wet Soil	pH (H ₂ O ₂)	1.8	< 2.1	1%
Difference of pH = WetSoil (H ₂ O) - Dry Soil(H ₂ O)		1.3	< 1.5	5%
		0.4	0.8	
Difference of pH = WetSoil (H ₂ O) - WetSoil(H ₂ O ₂)		5.4	> 4.8	1%
		0.4	0.7	
Pyrite-S	%	1.325	> 1.292	NS
		0.355	0.476	

- ・ 植栽間隔は1m×1mなので、植栽本数は10,000本/ha
- ・ *Rhizophora mucronata* の植栽
- ・ 自然間引きは38%と *Rhizophora apiculata* の林分より高い
- ・ 推定平均DBH（胸高直径）：7.8cm
- ・ 推定平均樹高：8.9m

を用いた。この結果、材積は122.9m³/haであり、幹重量では98.8t/haとなった。以上のことから、*Rhizophora apiculata*, *Rhizophora mucronata* にしても、適切な場所に植栽してやると、元の苗木の高さを仮に80cmとしても *R. apiculata* で80cm以上、太さ6mm前後の成長をすることになる。

4. 本研究により得られた成果

本研究では、マングローブ生態系の地球温暖化に対する「脆弱性の特性の解明」と、「影響評価方法の確立」さらには、「適応策の検討」を目的とし、以下の成果を得た。

脆弱性の特性の解明においては、マングローブ林のもつ脆弱性を様々な角度から検証し、なにが支配的な現象であるのか検討するとともに、それぞれに対して、可能な限りモデル化を進めた。その結果、脆弱性の特性として、地形的脆弱性、外力変化に対する脆弱性、生物的脆弱性、生態学的脆弱性、社会経済学的脆弱性などを取りまとめた。

影響評価のために、脆弱性マップを作成するとともに、脆弱性の特性を考慮した適応策の評価システムを提案した。影響伝播のシナリオ毎に、汀線変化対策、侵食対策、淡水供給対策の3つの側面について提案を行った。

適応策の検討については、25年前にエビ池に転用されたマングローブ林の再生事例について再度現地観測により照査し、再生の実行可能性が高いことが示された。

5. 引用文献

- 1) IPCC (1995): *Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific – Technical Analyses. Cambridge University Press, 878p.*
- 2) Baba, S. (2002): *Mangroves and Coastal Ecosystem Conservation Case studies in Okinawa, Japan. UNU-Iwate-UNESCO Joint Int. Conf. 'Conserving Our Coastal Environment', Tokyo, p. 25*
- 3) Aksonkoe, S. (2002): *Management and Sustainable Development of Mangroves in Thailand. UNU-Iwate-UNESCO Joint Int. Conf. 'Conserving Our Coastal Environment', Tokyo, pp. 27-38*
- 4) Aksonkoe, S. (2002b): *Coastal Environmental Issues in Thailand, 4th Tokyo Bay Symposium, pp. 43-44.*
- 5) Furukawa, K. & E. Wolanski (1997): *Currents and sediment transport in mangrove forest, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 44, pp. 401-410.*
- 6) Miyagi, T. (1998): *Mangrove Habitat Dynamics and Sea-Level Change. Research Report of a Grant-in-Aid for International Scientific Research, 107p.*

6. 国際共同研究等の状況

タイ国研究協議会登録共同研究「Impact Assessment of Sea Level Rise on Mangrove Forests」
として、タイ国カセサート大学 Sanit Aksonkoe 教授、タイ国王立林野局 Sonjai Havanond
マングローブ研究部長、タイ国王立林野局 Sapon Havanond ラノンマングローブ研究センター長な
どとともに、国土技術政策総合研究所、独法港湾空港技術研究所、琉球大学、九州大学、東北学
院大学、南山大学による国際共同研究を実施している。研究成果は、随時学会への発表を行うと
ともに、タイ国研究協議会を通して、タイ国内への成果の還元が図られている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

〈学術誌（査読あり）〉

なし

〈学術誌（査読なし）〉

なし

〈書籍〉

なし

〈報告書類等〉

① NRCT Report 0706/10502, 1-36 (2000)

“Impact Assessment of Sea Level Rise on Mangrove Forests”

② 雑誌「海となぎさ」、152号、29-34(2002)

「干潟・マングローブ林での研究と楽しみ方（古川恵太）」

(2) 口頭発表

① 古川恵太、馬場繁幸：日本マングローブ学会（2000）

「タイ国（ラノン）におけるマングローブ林の水域環境変動特性」

② 河口定生：日本土壌肥料学会（2000）

「ミナミコメツキガニのトンネル採餌による土壌微生物相の改変」

③ 河口定生、馬場繁幸、古川恵太：日本マングローブ学会（2000）

「西表島ナガラ川マングローブ林の砂泥堆積量と堆積物の肥沃度」

④ 河口定生、古川恵太、馬場繁幸、井上徹教：日本土壌肥料学会（2001）

「エビ養殖池跡地のマングローブ植栽」

⑤ 青木康哲・二瓶泰雄・矢井秀明・灘岡和夫・矢井研水・今井陽介・大見謝辰男・比嘉榮三

郎・仲宗根一哉・古川恵太：2001年度日本海洋学会春季大会(2001)

「多点集中観測に基づく吹通川マングローブ域の水環境特性の検討」

⑥ 二瓶泰雄・灘岡和夫・青木康哲・若木研水・矢井秀明・大見謝辰男・古川恵太・佐藤慶太：

海岸工学論文集、48、1211-1215（2001）

「マングローブ水域における流動・熱・水質環境特性に関する現地観測」

⑦ 古川恵太、馬場繁幸、宮城豊彦：日本マングローブ学会（2002）

「マングローブ林における短期的砂泥輸送形態の変化について」

⑧ K. Furukawa, S. Baba, S. Aksornkoe and S. Havanon: 2002 PIANC Congress, (2002)

“Effects of Sea Level Rise on Asian Mangrove Forests”

- ⑨ S. Baba: UNU-Iwate-UNESCO Joint Int. Conf. ‘Conserving Our Coastal Environment’ (2002)
- ⑩ K. Furukawa: The 3rd Meeting of Asia-Pacific Cooperation for the Sustainable Use of Renewable Sustainable in Biosphere Reserve and Similarly Managed Area (ASPACO) (2002)
“Short-term environmental variation in mangrove forests and needs of integrated coastal zone management”
- ⑪ S. Baba: The 3rd Meeting of Asia-Pacific Cooperation for the Sustainable Use of Renewable Sustainable in Biosphere Reserve and Similarly Managed Area (ASPACO) (2002)
“ISME’s Experiments and Challenges in Asia and Pacific Regions”
- ⑫ 馬場繁幸：第4回東京湾シンポジウム（2003）
「マングローブ生態系の保全・再生のNGO活動から学んだこと」
“Mangroves and Coastal Ecosystem Conservation Case studies in Okinawa, Japan.”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

8. 成果の政策的な寄与・貢献について

JICA、UNESCO などを通じた国際協力の場において、マングローブ林の保全・再生のため、本成果を基礎情報として活用するとともに、研修の実施や情報交換を通して、成果の広報・普及に努めている。現在、JICA については、マングローブ生態系コースの研修に本成果が反映されており、UNESCO については、ASPACO (Asia-Pacific Cooperation for the Sustainable Use of Renewable Sustainable in Biosphere Reserve and Similarly Managed Area) プロジェクト等を通じた技術支援、指導に本成果が活用されている。