

潮流と降雨によって流送されるマングローブ湿地帯の
底質の堆積特性

Shahbudin Saad* · 浅野敏之** · Mohd Lokman Husain***

1. はじめに

マングローブ海岸は、東南アジアをはじめ熱帯・亜熱帯の沿岸域を特徴づけるものである。この海岸は、地形条件・底質条件・外力条件・環境条件など多くの面でわが国で通常見られる海岸とは全く異なる性質を有している。その地形は、マングローブの地上根が錯綜する平坦な氾濫原(swamp)と、狭小で分岐の多い水路部(creek)で構成される。この地形上の潮汐流動については、最近いくつかの研究がなされているが(例えば Wolanski, 1985; 浅野・瀬戸口, 1995; 松田, 1997), 水理学的な問題に限っても不明な部分が多く残されている。

また、マングローブ海岸は生物形成海岸の一つであり、波や流れの外力に対し繁茂状況が変化する。そのことが流れに対する粗度抵抗の変化や底質堆積による地形変化をもたらし、海水流動形態にフィードバックされる。したがって、そこでの流れは単に力学過程だけで決定されるのではなく、マングローブの生物学的応答も問題となってくる。

地球温暖化による海面上昇が塩性湿地やマングローブ生態系に及ぼす影響を及ぼすかは、検討すべき重要な問題である。これについては、海岸工学の立場から検討が行われているが(浅野 1994)、定量的な影響評価を行うためには、マングローブ群落内の底質堆積速度と海面上昇速度との相対関係を理解しておく必要がある。そのためには、まず現地における底質堆積量の信頼できるデータの取得が望まれる。

本研究は、マレーシア半島東岸のマングローブ湿地帯で2年間にわたって現地調査された底質底盤の堆積高と底質粒子の測定結果から、マングローブ湿地帯に特徴的な底質の堆積機構を明らかにしようとしたものである。24ヶ月にわたる多点の現地観測結果は、これまであまり報告されておらず、貴重であると思われるので以下に報告する。

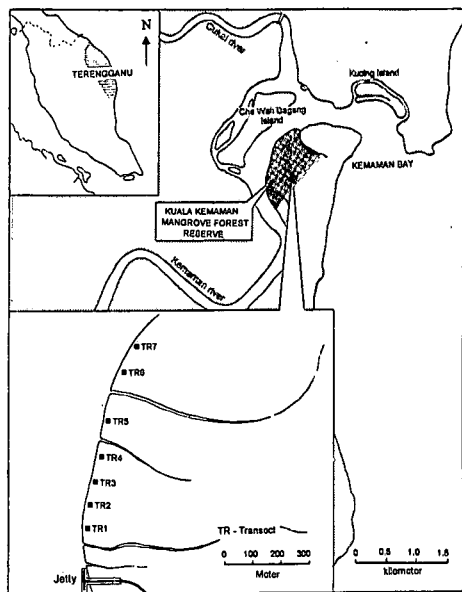


図-1 Kemaman 地区の観測点

2. 現地の概要

現地調査は、マレーシア半島東岸 Kuala Terengganu 市の 170 km 南方に位置する Kemaman 地区の 81 ha のマングローブ湿地帯において、93 年 9 月から 95 年 8 月までの 2 カ年にわたって行われた (図-1)。場所は kemaman river と呼ばれるエスチュアリー の右岸部分に相当する。図-2 に測線上の横断地形を示す。図からわかるように、現地は 1/500~1/125 の緩やかな横断勾配で広がる低湿地である。図の横軸は、マングローブが生育している最前面 (マングローブエッジ) を原点とし、内陸側に取った距離を示している。この地区ではマングローブがほぼ天然の状態で残されており、Terengganu 林野庁からマングローブ保護地に指定されている。

底質輸送の外力として、潮汐をはじめ観測期間の風・降雨・気温・日射量等の気象条件を取り上げ、1981～1994のデータを解析した。データの入手先は、マレーシア気象サービス局、排水灌漑局などである。

図-3 に Kamaman 地区の月別平年降水量を示す。北

- ・ 学生会員 MS 鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程
- ・ 正 会 員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科
- ・ 〃 Ph.D. Assoc. Prof. University Pertanian Malaysia

東モンスーンの季節は、11月・12月・1月で、図より降水量も大きくなることがわかる。最大は12月で、降雨量が770 mmに達している。わが国では三重県尾鷲の9月の月平均降水量658 mmが最大であるが、それを上回る降雨があることになる。以下では、11月、12月、1月をモンスーン季（記号 M）と呼び、それ以外の期間を非モンスーン季（記号 NM）と呼ぶことにする。

図一4は、現地の月別の日照時間と蒸散量を示したものである。モンスーン季では日照時間・蒸散量共に少なく、非モンスーン季の特に4～6月に大きいことがわか

る。

現地の風は11月から1月および5月から7月に強く、風向は北東と南西がほぼ半分づつとなる。北東風は現地海岸に波が来襲する方向となるが、強風時における平均的な風速は5.5 m/s～7.8 m/s程度である。

潮差は大潮時で2.4 m、小潮時で0.7 m、平均潮差は1.8 mと公表されている。図一2のswampの横断地形からわかるように、潮汐変動と共にswamp上では冠水・干出を繰り返すことになる。

3. 測定方法

毎月1回低潮時に、116箇所のサンプリング・ポイントで地盤高の測定と底質のサンプリングを行った。底質の堆積厚さは、観測点にアクリルプレートを埋め込み、その上に堆積する底泥厚を測深した。1つの計測ポイントで6個のデータを取り、その平均値をデータとして採用した。

得られたサンプルから粗粒分については乾燥ふるい法で、細粒分についてはレーザー回折器を用いて粒径を調べ、粒度分布の標準偏差やskewness, kurtosis等の統計諸量を計算した。サンプルされた土壌中の有機物成分は20%に希釈した過酸化水素水を加えることで除去し、無機成分についてのみ解析することにした。フロック形成した粒子群はリン酸ナトリウムの20%溶液を付加して分散させた。

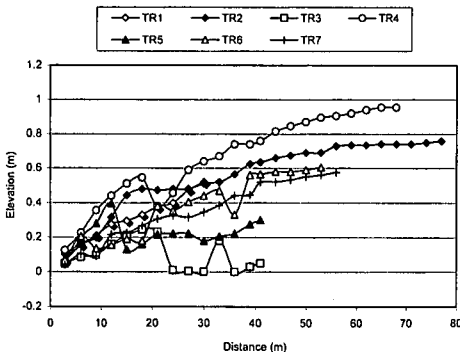
4. 結果並びに考察

4.1 底質堆積量

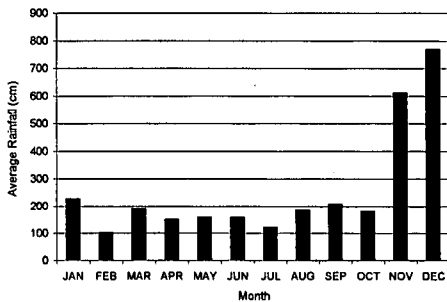
表一1に、マングロープ前面部・中央部および後背部で測定された底質の堆積量をまとめて示す。表中には、第1年度（1993-1994）、第2年度（1994-1995）の値、及びその平均値が示されている。全測定領域内の平均堆積量は、第1年度で1.46 cm/year、第2年度で0.66 cm/year、両年度の平均値として1.06 cm/yearが得られた。

表一1 各観測領域における底質堆積量（単位 cm）

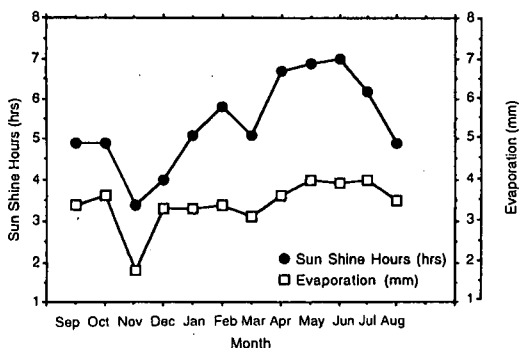
Zonation	Average	Maximum	Minimum	Range
1993/94				
Front mangrove	1.83	5.14	-1.78	6.92
Middle mangrove	1.18	5.02	-3.85	8.87
Back mangrove	1.38	4.68	-0.96	5.64
1994/95				
Front mangrove	0.90	5.18	-2.44	7.62
Middle mangrove	0.42	4.28	-3.12	7.40
Back mangrove	0.66	3.56	-1.66	5.22
2 year Average				
Front mangrove	1.37	5.47	-0.91	6.38
Middle mangrove	0.80	3.71	-1.31	5.02
Back mangrove	1.02	3.04	-0.35	3.39



図一2 観測測線上の地盤高



図一3 現地における月別平均降水量



図一4 1日当たりの日照時間と蒸散量の月変化

この結果について以下に定量的な検討を行う。

マレーシア国内で同様な観測結果が報告されていないので、同国内での他地域の堆積量との比較はできない。そこで諸外国のマングロープ水域あるいは塩性湿地帯での底質堆積の観測結果を文献調査し、その結果をまとめたものが表-2である。本観測の第1年度の堆積量 1.46 cm/year は、オランダの Eastern Scheldt で観測された 1.5 cm/year (Oenema and DeLaune: 1988) に次いで大きいものである。低い方の値である第2年度の結果 0.66 cm/year は、DeLaune et al. (1978) の Louisiana 州の塩性湿地内での観測結果 0.75 cm/year や Leonard et al. (1995) のフロリダ州中西部の塩性湿地の観測結果 0.76 cm/year に近い。全体として本観測で得られた底質堆積量は、既往の報告結果の範囲内にあるが、その中ではやや大きめの値であることがわかる。やや大きめの底質堆積量が得られた理由として、測定領域が潮汐による流動と、降雨による河川水の増水の、2つの冠水効果を受けること、さらに低湿地の最前面には完全には成熟していない若年期のマングロープが繁茂しており、この底質捕捉効果が大きいことが挙げられる。

このようにマングロープの成長と土壌の堆積はリンクし、スオンプの前面にはより若い世代のマングロープが繁茂する空間が形成される。このように、沿岸域の地形変化の問題も、こうした生物形成海岸においては自然システムとして捉える必要がある。

表-2 マングロープ水域・塩性湿地における底質堆積量に関する既往の観測結果

Study	Method	Accretion Rate (cm/yr)	Location
Chapman and Ronsaldson (1958)	Brick-dust marker	0.1	New Zealand Salt marsh
Bird (1971)	Stakes	0.8	<i>Avicennia</i> forest Southern Australia
Harrison and Bloom (1977)	Artificial marker horizon	0.2~0.5	Connecticut, <i>S. patens</i> marsh
Armentano and Woodwell (1975)	^{210}Pb	0.47~0.63	Long Island, NY, Flax pond, <i>S. alterniflora</i>
Spenceley (1977, 1982)	Grids of Stakes	-1.1~0.46	<i>Avicennia</i> North Eastern Australia
DeLaune et al. (1978)	^{137}Cs	1.35 0.75	Barataria Basin, LA
Stevenson et al. (1985)	^{210}Pb	0.17~0.36	Chesapeake Bay
Oenema and DeLaune (1988)	^{137}Cs	1.0 1.5	Rattekaai, salt marsh St. Annaland, salt marsh
Lynch et al. (1989)	^{210}Pb and ^{137}Cs isotopes	0.3	Mexico, mangrove
Woodroffe (1990)	Radiocarbon	0.6	Northern Australia mangrove
French and Spencer (1993)	Artificial marker horizon	0.56	Norfolk, U. K
Leonard et al. (1995)	Sediment traps	0.12~0.76	West-central FL. <i>J. roemerianus</i> (Cedar Creek)
This study	Artificial marker horizon	0.64~1.46	East coast of Peninsular Malaysia mangrove

マングロープ林が、地球温暖化による海面上昇によって受ける影響は、海面上昇速度とマングロープ湿地内での底質堆積速度との比によって支配される。ここで得られた底質堆積速度は、海面上昇速度より十分大きく、マングロープ生態系の維持能力を有していると考えられる。

4.2 底質堆積量の季節変動

図-5は、底質堆積量を月ごとに示したものである。2月と3月を除き正の堆積量が得られている。極大値は11月から1月付近にあり、モンスーン季に相当する。これは、主として河川の増水によってスオンプの内陸側まで浸水し、そこで浮遊底質が堆積するものと考えられる。降雨によって斜面上の土壌が流出し、内陸側からエスチュアリーへ輸送される機構も考えられるが、その寄与の程度は今後明らかにする必要がある。こうした土砂流送の機構は、流域の地形特性やマングロープの繁茂特性と複雑に関係し、これらの十分なデータが得られていない現段階では不明の点が多い。

一方、堆積量の最小値は非モンスーン季に相当する2月、3月に認められ、負の値が得られている。赤道に近いこの地域では、地盤高の低下には図-4に示した日射に伴う蒸散を考慮する必要がある。すなわち、地盤高は底質輸送だけで決まるのではなく、日射による土壌水分の蒸散とそれに伴う体積減少も大きく関係する。

4.3 底質堆積量とマングロープエッジからの距離との関係

図-6は測定点のマングロープエッジからの距離を横軸に、底質堆積量を縦軸に取って示したものである。図-6(a)は、各月の測定値をすべて平均した値を示しており、図-6(b), (c)はそれぞれモンスーン季・非モンスーン季について示したものである。すべての結果から、底質の堆積量はマングロープエッジからの距離とともに減少することがわかる。これは、マングロープ前面部は標高が低いために潮汐の冠水時間が長いことが主要な理由である。さらに前面部の底質はスラリー状態にあり、ぬ

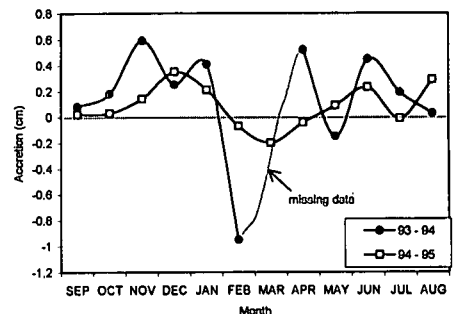


図-5 底質堆積量の月変化

かるんだ底面状態は底質堆積が起りやすいとの指摘もある (Reed, 1989). 一方, 後背部も潮汐によって冠水・干出を繰り返す領域内にあるが, 冠水時間が短いため水中の細かい底質が沈降・堆積するには十分ではない。

4.4 底質粒子の特性

スオンプ内の表面底質のサンプリングは図-1 に示した測線上で, 1994 年の 5 月, 6 月, 7 月と 11 月, 12 月および 1995 年の 1 月に実施した。前者は非モンスーン季, 後者はモンスーン季に相当する。

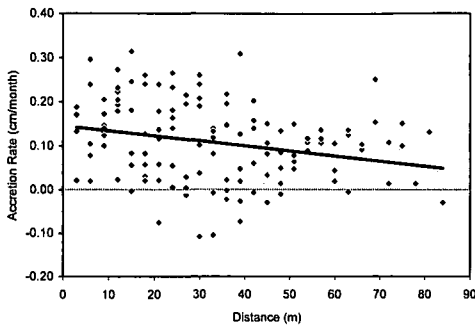
すべてのサンプリングポイントで採取された底質の平均粒径は 4.71ϕ (0.038 mm) で coarse silt に分類される。

その分布の範囲は 3.47ϕ (0.090 mm) から 5.45ϕ (0.023 mm) で, 比較的均一であると言える。ここで, ϕ は次式で定義される粒径スケールである。

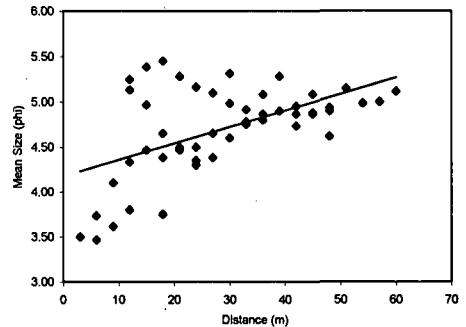
$$\phi = -\log_2 d \quad (d \text{ は mm 単位で表した粒径})$$

粒子特性は, 測線ごとにはほとんど変化せず, 以下に示すようにマングロープエッジからの距離によって支配される。

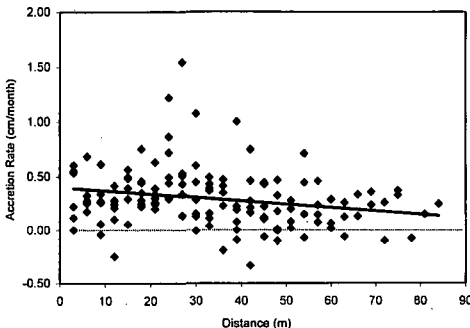
図-7(a) は, ϕ スケールで表した平均粒径とマングロープエッジからの距離の関係を調べたものである。平均粒径はマングロープ前面より内陸側に入るほど ϕ スケールが増加すること, すなわち粒径が細かくなることがわかる。これはマングロープ前面から内陸側に入るほ



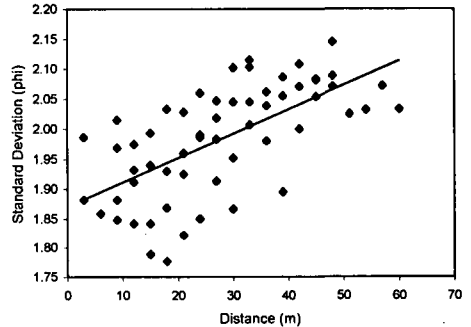
(a) 年平均値



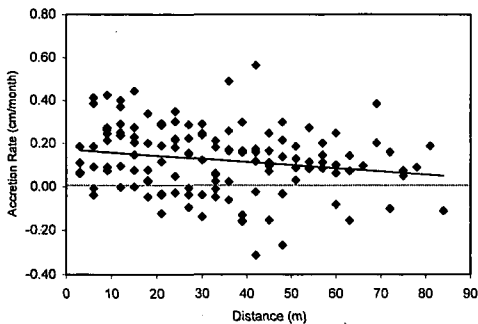
(a) 平均粒径



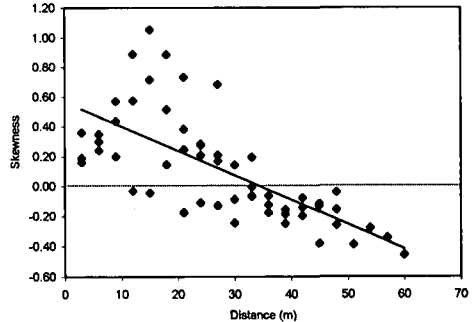
(b) モンスーン季 (11 月, 12 月, 1 月の平均値)



(b) 粒子の標準偏差



(c) 非モンスーン季 (5 月, 6 月, 7 月の平均値)



(c) skewness

図-6 底質堆積量とマングロープエッジからの距離との関係

図-7 マングロープエッジからの距離による底質粒子特性の変化

ど、マングローブの支持根により流れが減衰して、浮遊した細かな底質が沈降しやすくなるためと考えられる。一方、マングローブ前面は波や流れの作用を大きく受け、粒径の大きな粒子も動かされやすいが、マングローブの網目状の支持根や底泥表面のスラリー部に捕捉され、堆積すると考えられる。

図一7(b)は、 ϕ スケールで表した粒子径の標準偏差を縦軸にとり、マングローブエッジからの距離との関係を調べたものである。マングローブ前面部では標準偏差が大きく、内陸部に向かうにつれて小さくなることからわかる。この結果は、マングローブ前面部は前述のように波や流れの作用を大きく受けるために、様々な粒径の底質粒子が混入しやすいことで説明できる。マングローブの内陸部では流れが弱く、浮遊底質がゆっくりと沈降するため、均等な粒径分布に近づいていく。なお、内陸部ではカニ類による巣穴形成活動による底質の攪拌効果が無視できない。この bioturbation の効果が粒径分布の均質化に寄与するかどうかは、今後検討すべき課題であろう。

図一7(c)は、同様に粒径の skewness の特性を調べたものである。skewness はマングローブエッジからの距離と共に減少し、前面部の正の skewness から後背部では負の値になることがわかる。なお、kurtosis については 1.98~3.45 の値を取るものの、マングローブエッジからの距離による明確な傾向は見出せない。

5. 結 論

(1) 測定された底質堆積量は、全領域・全測定期間の平均値として 1.06 cm/year が得られた。この値は、マングローブ湿地・塩性湿地の底質堆積量に関する既往の報告結果の範囲内にあるが、その中では比較的大きな値である。その理由として、低湿地前面には若年期のマングローブが繁茂しており、底質捕捉効果が大きいことが考えられる。

(2) モンスーン季と非モンスーン季で底質の堆積率に大きな差があり、この水域の底質輸送が潮汐による流動のみならず、降雨による流送や降雨による河川の増水

によっても支配されることがわかった。また、非モンスーン季の堆積量の減少には日射量の増加による底泥水分の蒸散も考慮する必要が示唆された。

(3) エスチュアリーに面したマングローブ前面部と、それより陸側のマングローブの支持根が密生する後部とでは、冠水時間の長短・流れの静穏度の違いによって、底質の堆積量・粒子特性が異なり、堆積量はマングローブエッジからの距離と共に減少し、平均粒径は細くなり、粒径の標準偏差は小さくなることがわかった。

(4) マングローブ前面は若いマングローブ樹木が繁茂する場所であり、そこで底質堆積量が大いことは、繁茂域がエスチュアリー側に前進していくことを示唆している。ここに、自然システムとしての生物形成海岸の特徴が現れている。

参 考 文 献

- 浅野敏之 (1994): 海面上昇・気候変動による自然沿岸域システムへの影響評価, 2.2.4 マングローブ林, 3.3.2 塩性湿地, 地球温暖化の沿岸影響, 土木学会海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会, 221 p., pp. 52-53, pp. 77-79.
- 浅野敏之・瀬戸口喜祥 (1995): 狭小水路と氾濫原で構成されるマングローブ感潮入江の流動特性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 401-405.
- 松田義弘 (1997): マングローブ水域の物理過程と環境形成, 一自然の保護と利用の基礎一, 黒船出版, 196 p.
- DeLaune, R. D., W. H. Petrick and R. J. Buresh (1978): Sedimentation rates determined by ^{137}Cs dating in a rapidly accreting salt marsh, *Nature*, Vol. 275, pp. 532-533.
- Leonard, A. L., C. A. Hine and E. M. Luther (1965): Surficial sedimentation transport and deposition processes in a *Juncus Roemerianus* Marsh, West Central Florida, *Journal of Coastal Research*, Vol. 11, pp. 322-336.
- Oenema, O. and R. D. DeLaune (1988): Accretion rates in salt marshes in the Eastern Scheldt, South-West Netherlands, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* Vol. 26, pp. 379-394.
- Reed, D. J. (1989): Patterns of sediment deposition in subsiding coastal salt marshes, Terrebonne Bay, Louisiana: The Role of Winter Storm, *Estuaries* Vol. 12, No. 4, pp. 222-227.
- Wolanski, E (1985): Numerical modelling of flows in a tidal creek-mangrove swamp system, *Proc. of 21st IAHR Congress*, pp. 82-85.