

粘性土の侵食と堆積に関する一考察

——沖縄県国頭マージを事例として——

澤井 健二

EROSION AND DEPOSITION PROPERTIES OF COHESIVE SOIL

—— IN CASE OF KUNIGAMI MARGE IN OKINAWA, JAPAN ——

By Kenji SAWAI

Synopsis

In this study, the property of erosion and deposition of cohesive soil was studied for the case of Kunigami Marge in Okinawa, Japan.

According to the test using the method developed by the author et al, the erodibility of Kunigami Marge is summarized as $u_{*c} = 4 \text{ cm/s}$ and $E/u_* = 0.8 \times 10^{-5}$.

Deposite property of Kunigami Marge depends not only on the concentration of soil but also on the property of the solvent. Namely, Kunigami Marge deposits forming a distinct borderface under the concentration higher than 3% in weight. Although it deposits faster in distilled water than in marine water under high concentration, it takes longer time in the former than in the latter to complete the deposition.

According to the microscopic observation, this is explained by the size distribution of flocs, which is controlled by the electro-chemical properties of interface of soil particles and solvent.

1. 緒 言

粘性土はその粘着力のために、砂質土に比べて大きな侵食抵抗を示すことが多いが、ひとたび侵食されると、きわめて流送されやすく、流れのない場においても、沈降するのに相当の時間を要する。また、媒液の性質や濃度によっては、フロックを形成し、沈降特性が大きく変化することがある。

沖縄県中部には、国頭マージと呼ばれる赤土が広く分布し、パイナップルの栽培に適した土壌として、農業に利用されているが、傾斜畑地では、激しい侵食を受けて、農地保全上の問題を提起する一方、侵食された土砂が河川、さらには海域へ流出し、水質の悪化や、流出土の堆積によるサンゴ礁への悪影響など、環境問題を引き起こしている。最近では、さらに急激なリゾート開発がこれに拍車をかけ、その影響の的確な予測と適切な対策の樹立が必要とされている。

2. 国頭マージの侵食の実態

国頭マージは、沖縄県国頭郡に広く分布する非固結堆積岩を母材とする洪積世堆積土で、赤色土に属し、土層の深い細粒質土壌である¹⁾。中ないし強酸性を呈し、パイナップルの栽培に適した土壌として、以前

から農耕に利用されてきたが、パイナップルが十分に成長するまでは、土壌侵食が激しく、リルやガリーが形成されるとともに、あたかも水に溶けるかのごとく、10 cm 余の穴状のくぼみを呈して流出する。また、パイナップルは一度植栽すると、数年間は収穫ができるが、その後は、土中の酸性分が少なくなり、収穫量が減少する。そこで、数年毎に上層の土を取り除いて下層の新鮮な土を露出させ、新たな植え付けが行われるとともに、使用済みの土は谷間に埋められている。さらに、沖縄県では、近年、リゾート開発に伴う土地造成が急ピッチで進められ、土壌侵食とそれに伴う土砂流出に拍車がかけられている。

侵食された土砂は、粒径が細かいことから、容易に下流へ運搬され、海域にまで達して海水を汚濁させ、さらに、それが海底に堆積して、この地域の貴重な資源であるサンゴを窒息させたり、景観をそこねたりする環境問題を引き起こしている。

3. 国頭マージの侵食特性

土壌の侵食特性を論じる上で、農地保全の研究分野では、標準試験区を設け、流亡土量を実測することが行われている。国頭マージについては、琉球大学農学部で翁長教授が、沖縄本島のほぼ中央に位置する金武町屋嘉部落に試験地を設け、傾斜度別、植生別に観測値を得ている。その報告^{1,2)}によれば、試験地土壌の物理性は Table 1 のように要約される。土性区分としては、粘質ロームに分類されるが、粘土鉱物はカオリナイトが多く、次にパーミキュライトあるいはイライト類が含まれる。

流亡土量は、昭和 52 年 6 月から昭和 53 年 4 月までの 11 ケ月間に傾斜 8° の裸地で 140 t/ha (3.6 cm)、傾斜 5° の裸地で 111 t/ha (2.5 cm)、傾斜 3° の裸地で 40 t/ha (1.4 cm) が観測されている。

澤井³⁾は、昭和 55 年 6 月に、同試験地において、著者ら⁴⁾の考案した内筒回転式土壌侵食試験を行ったが、その結果は、 $u_{*c} = 4 \text{ cm/s}$ 、 $E/u_* = 0.8 \times 10^{-5}$ と要約される。ここに、 E は侵食速度、 u_* は摩擦速度、 u_{*c} は限界摩擦速度である。

Table 1 Physical property of Kunigami Marge

Specific Weight	2.70	Porosity	54%
Plastic Limit	24%	Conductivity	$5.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
Liquid Limit	47%	Dispersion Ratio	42.0
Plastic Index	23	Erosion Rate	61.8

4. 国頭マージの堆積特性

既に述べたように、国頭マージは、多くの粘土分を含有し、一旦侵食されると容易に沈降せず、海域へ流出する。海域に流出した微細土砂は、やがて海底に堆積するが、その沈降過程では、単に流体力と重力だけでなく、電気化学力等の作用を受け、条件によってその挙動が微妙に変化する。

昨年、NHK によって報道された九州特集「崩れゆく楽園・沖縄の自然は今」によれば、この地域の土壌を、真水と海水の入ったビーカーに等量入れ、十分に攪拌した後、3 時間静置すると、真水の場合よりも海水の場合の方が、上澄みが澄んでいたと報告されている。すなわち、真水の場合よりも海水の場合の方が沈降が速かったということになる。

しかし、粘土粒子の沈降速度は、単に土壌や溶媒の種類だけでなく、その濃度にも依存すると考えられるので、本研究ではその特性をさらに詳細に検討することにした。

4.1 国頭マージの界面沈降特性

濃度がかなり高い場合の、溶媒による国頭マージの沈降速度の違いを調べるため、平成元年8月17日に防災研究所化学分析室において、次のような実験を行った。

溶媒としては、海水、河川水、蒸留水、食塩水、分散剤溶液の5種類を用意し、500 ml用のメスシリンダ（深さ約20 cm）内で、土壌サンプル25 gと溶媒500 mlを十分に攪拌した後（初期重量濃度3.7%）、静置し、界面沈降状況を観察した。

土壌サンプルは、同年7月28日に沖縄県国頭郡恩納村と名護市の境界付近の丘陵地で採取されたもので、実験時まで自然含水状態（含水比約30%）を保つため、ビニール袋に入れて密封保存しておいた。海水のサンプルは、同年8月11日に石川県尼御前海岸で採取し、ポリエチレン容器内に保存しておいたものである。河川水は、実験当日に、宇治川の隠元橋直上流右岸で採取した。食塩水は、塩化ナトリウムの3%溶液、分散剤溶液は、ヘキサメタリン酸ナトリウムの0.2%溶液を用いた。

その結果、分散剤溶液の場合以外は、いずれも明確な界面沈降を呈し、界面の低下速度は蒸留水中の場合が最も速く、約6分で圧縮沈降に移行した。ついで、河川水、食塩水、海水の順で沈降が遅くなり、分散剤中の場合には、40分以上経過しても粗粒分の沈降が確認されたのみで、肉眼による観察では、懸濁状態の変化は検出されなかった。宇治川の河川水の場合には、蒸留水の場合に比べて沈降がやや遅くなるものの、大きな差異は見られなかった。Fig. 1は、回分沈降曲線を示したものであるが、食塩水の場合には約30分で圧縮沈降に移行し、尼御前の海水の場合には約50分で圧縮沈降に移行するものと判断される。

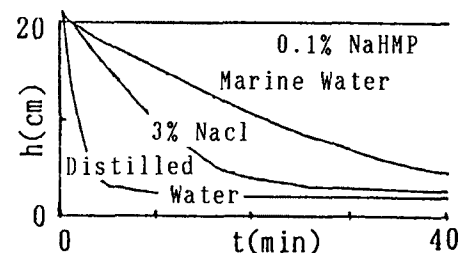


Fig. 1. Deposit curve of Kunigami Marge in several solvents.

このように、国頭マージの界面沈降特性は溶媒によって異なるが、ここで得られた結果は、海水中よりも河川水の方が沈降が速いということであり、「海水に接すると粒子の沈降が速められる」という先の報道とは逆になっている。ただし、一口に「海水」と言っても、地域あるいは時期によってその性質が異なることも考えられるので、土砂サンプルの採取地に近い沖縄県恩納村部瀬名地区周辺の海水を取り寄せ、類似の実験を行ったところ、尼御前の海水の場合よりも沖縄の海水の場合の方がかなり沈降が速く、3%食塩水の場合に近い結果が得られたが、蒸留水の場合に比べると、はるかに遅かった。河川水についても、当然、場所と時期によって水質が異なるので、その影響を確かめておく必要があるが、沖縄総合事務局で現地の河川水、海水および蒸留水を用いて行われた類似の沈降実験⁵⁾においても、やはり蒸留水中での界面沈降が最も速く、ついで、河川水、海水の順となっており、かつ、蒸留水と河川水との差異がさほど顕著でないのに対して、海水中での界面沈降はそれらに比してきわめて遅くなっている。

4.2 沈降特性に及ぼす濃度の影響

前節で国頭マージの界面沈降特性について論じたが、これは重量濃度3.6%というかなり高濃度状態からの沈降特性であった。しかし、わが国の河川では、このような高濃度の土砂が流出することはまれであり、むしろもっと低濃度ではあっても長時間に及ぶ土砂流出が環境保全上問題となることが少なくない。

そこで、土砂濃度による沈降特性の相違を調べるために、次のような実験を行った。

まず、自然含水状態で保存しておいた国頭マージのサンプルを、空気乾燥状態にして軽く摺りつぶした後、88 μ フルイを通過した粒子を試料とし、22.5 gの蒸留水、沖縄の海水、尼御前の海水、および0.4%ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液を溶媒として、直径3 cmのカメラフィルム用透明プラスチックケースに重量濃度0.075%、0.22%、0.34%、2.99%、および13.0%の溶液を作成し、十分に振とうさせた後、静置して、沈降状況を観察した。その結果、いずれの溶媒でも、界面沈降が生じたのは、濃度13%の場合

のみであった。前節の実験において、濃度3.7%の懸濁液では界面沈降が生じたことから、国頭マージの界面沈降の発生限界濃度は3~3.5%程度であると判断される。

界面沈降が生じると、界面よりも上の上澄み部分の土砂濃度はきわめて小さくなり、溶媒が蒸留水の場合には、上澄み液の濃度は界面の通過直後に既に0.1%以下となっている。溶媒が海水の場合にも、界面沈降が生じると、上澄み液の濃度がかなり低下するものの、界面通過直後では、蒸留水を溶媒とする場合ほどには下らない。ところが、ある程度時間が経過すると、溶媒が蒸留水の場合と海水の場合とで、上澄み液の濁度に逆転が生じ、海水の場合の方が上澄み液の濁度が低くなる。(先の沖縄総合事務局の実験では、静置後2~5時間を境に逆転が生じている。)

次に、界面の生じない3%以下の濃度の場合について、濁度の時間変化を詳細に観察すると、同じ溶媒に対してでも、ある時間の経過後には、初期濃度の高かった懸濁液の濁度が、初期濃度の低かった懸濁液の濁度よりも低くなる場合のあることがわかった。たとえば、溶媒が蒸留水の場合、初期濃度2.99%の懸濁液と0.22%の懸濁液とでは、静置後数分のうちに、濁度が逆転する。すなわち、一定時間静置後の濁度が最大となるような初期濃度が存在し、しかもそれが界面沈降の発生限界濃度よりも低いのである。そのように一定時間経過後の濁度が最大となる初期濃度は、溶媒によっても異なり、厄御前の海水の場合には、3%以上の濃度でピークが生じるようであるが、沖縄の海水の場合には、やや特異な傾向が現れ、初期濃度が0.34%において、一定時間経過後の濁度が最小となった。

このように、溶媒や初期濃度によって、濁度の時間変化が異なるのは、フロックの形成、とりわけフロック径の分布特性の相違によるのではないかと考えられる。

4.3 国頭マージの凝集特性

高濃度の粘土懸濁液におけるフロックの形成は、肉眼でも確認できるが、フロックの形状や大きさなど、その構造を把握することは、容易でない。粘性土の粒度分布を調べる標準的な方法としては、液相重力沈降法の一つとしての比重浮ひょう法がJISで規格されているが、これは、元来、個々の土粒子の粒度分布を調べるための規格であって、フロックの大きさを調べるためのものではない。したがって、フロックが形成されないよう、適当な分散剤を用いることになっている。しかしながら、本研究で知りたいのは、個々の粒子の大きさでなく、フロックの構造であるから、分散剤を用いたのでは意味がなくなる。また、比重浮ひょう法はある程度高濃度の懸濁液を用いなければ、精度のよい測定ができず、本研究のように、濃度によるフロック径の違いを調べるのには、不適である。

一方、光の透過度の時間変化から粒度分布を求める方法では、逆に濃度があまり高いと計測が行えない。したがって、種々の初期濃度に対する、濃度の時間変化を調べるには、ピペット法のように、懸濁液の所要の部分から直接サンプルを採取する方法がすぐれているように思われる。

いずれにせよ、これらはStokesの沈降速度式に基づいて、濃度の時間変化から粒度分布を推定しようとするものであり、重力沈降のかわりに遠心沈降を用いたとしても、粒度分布を求めるのにかなりの時間を要する。

これに対して、各時点における粒度分布を直接に調べる方法としては、顕微鏡による観察や、レーザー光の回折角度分布を調べる方法などがある。レーザー回折式の粒度分布計測は、ほとんど瞬間的に粒度分布を求められる利点があるが、光の透過度を計測する場合と同様に、適用できる濃度範囲が狭く、本研究の用途には適さない。そこで、本研究では、顕微鏡による方法を用いることにした。

すなわち、種々の溶媒と濃度における懸濁液から、ピペットでごく少量のサンプルをとってスライドグラスに載せ、顕微鏡写真を撮ってフロックの状況を調べることにした。この場合、カバーグラスを用いると、フロックが破壊されるので、用いなかったが、そのため、サンプルがレンズ状になり、中央部と周辺部で厚さが変わることは避けられなかった。濃度の低い場合には、中央の比較的厚さが大きくかつ一様な部分で観察することができたが、濃度の高い場合には、厚さの大きい中央部分では光が透過せず、周辺部

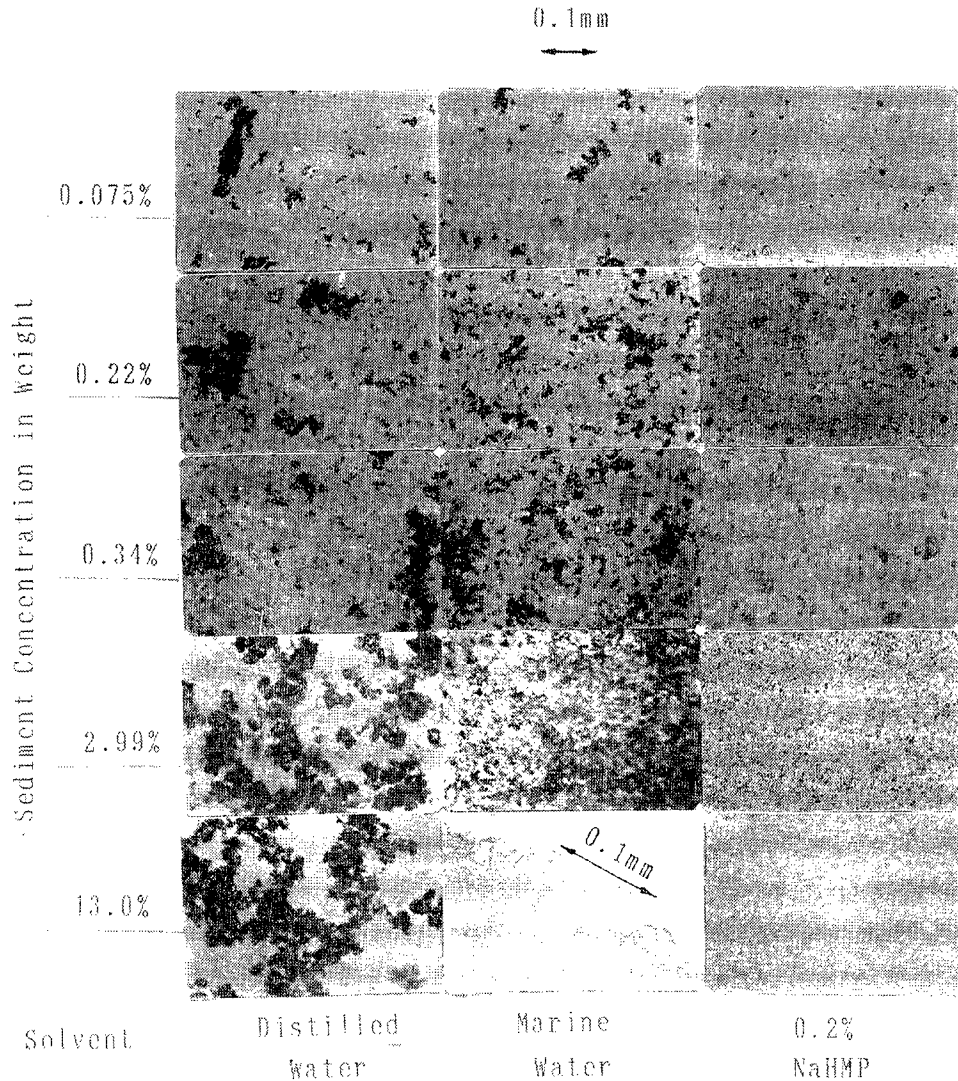


Photo. 1. Microscopic image of flocs.

の厚さの薄いところで観察せざるを得なかった。

Photo. 1 は、前節の沈降実験に用いた懸濁液をよく攪拌して、すばやくプレパラートを作り、撮影したものである。

これを見ると、溶媒および濃度によるフロックの形成状況の違いがよくわかる。まず、ヘキサメタリン酸ナトリウムを溶媒とする場合には、粒子がよく分散しているが、蒸留水の場合には、濃度が低い時にはフロックがあまり見られないものの、濃度が高くなるにつれてフロックの形成が顕著になっている。

海水（尼御前）の場合には、その中間的な様相を呈し、いくぶんフロックが形成されているが、そのサイズは比較的小さくなっている。

5. 粘性土の堆積機構

粘性土の堆積過程は、構成粒子の沈降速度分布と流れ場の特性が与えられれば、浮遊砂の堆積過程と同様に、拡散方程式を用いて解析することができる。ところが、既に述べたように、粘性土の沈降速度は、

どのようなフロックが形成されるかによって大きく異なるから、それを把握することが重要である。

前節までに示した国頭マージの複雑な沈降特性は、フロックの粒径分布を考慮することにより、合理的に説明することができる。すなわち、大きなフロックは小さなフロックに比べて速く沈降するため、大きなフロックと小さなフロックが混在している場合には、大きなフロックが沈降してしまうまでは急速に濁度が低下するが、その後、さらに濁度が低下するには、長時間を要することになる。真水の中での国頭マージの沈降は、これに相当するものと考えられる。

一方、それらの中間の大きさのフロックを有する懸濁液では、最初は、大きなフロックを有する懸濁液に比べて濁度の低下が遅れるが、小さなフロックが混じっていなければ、やがては先の場合と濁度が逆転する可能性がある。海水中での国頭マージの沈降は、これに相当するものと考えられる。

ただし、これは、懸濁液の攪拌静置後まもなくフロックの粒径分布が定まり、その後の沈降過程においては、新たなフロックの形成や破壊がないものとしての考察である。しかしながら、実際には、フロックの状態が時間とともに変化する可能性がある。

フロックの形成には粒子の衝突が関与しており、静水中よりも適度な強さの乱流中の方がフロックは発達しやすいが、いずれにしてもそれにはある程度の時間を要する。一般に、媒質の濃度が高いほど、形成されるフロック径も大きくなる傾向にあるが、濃度が時間とともに変化すれば、それによってもフロックの状態は時間的に変化するようになる。また、流れが存在すれば、形成されたフロックが破壊されることも生じ得る。

さらに、フロックの形成が電気化学的な現象であることから、イオンの添加や除去によっても変化が生じ、その制御には種々の可能性が秘められている反面、その予測や解析はきわめて複雑なものとなるであろう。

このような水流中の粘性土の浮遊特性を、水理学的観点から系統的に論じた、従来の代表的な研究としては、Mehta & Partheniades^{6,7)}によるものが挙げられる。彼らは、カオリナイト、ベイマッドならびにそれらの混合物をある一定の掃流力で浮遊させた後、掃流力を減少させて、別の一定値に保持した実験から、濃度の時間変化特性、ならびに相対平衡濃度（最終濃度/初期濃度）と掃流力の関係を定式化している。しかし、その適用範囲は、掃流力が比較的大きくて、かつ濃度が比較的小さい場合に限られる。

楠田・海田⁸⁾はさらに掃流力を段階的に減少させる実験を行い、最初から掃流力を大幅に減少させた場合に比べて、濃度低下速度が減少する傾向にあることを見いだしている。

真水と海水とのどちらで粘土粒子が凝集しやすいかについては、海水の方が凝集しやすいと説明されることが多いが、凝集の程度は、粘土の組成によっても異なっている。Yen⁹⁾らによれば、モンモリロナイトは、蒸留水中ではほとんど凝集せず、海水に接すると凝集して、10倍以上の粒径（フロック径）をもつようになるが、カオリナイトは、蒸留水中において顕著に凝集して、分散媒中の粒径の10倍以上のフロック径を有し、海水に接してももはやそれ以上にはフロック径が増加しない。

このように、粘土の種類や溶媒の種類によって凝集特性が異なるのは、粒子表面の二重層の構造が異なるためであり、拡散層内に分布するイオンの原子価と自由水溶液中の電解質濃度が低いほど二重層内の電位が高くなって、粒子間の反発力が大きくなるので、土粒子は凝集しにくくなると説明されている¹⁰⁾。また、これらの電気化学的特性に関わるパラメータとして、陽イオン交換容量やゼータ電位などが挙げられるが、十分な説明がつけられるまでには至っていない。

6. 結 語

以上、国頭マージを事例として、粘性土の侵食と堆積特性について考察を行った。得られた結果を要約すると、次のようである。

粘性土の受食性指標のひとつとして、著者らの考案した内筒回転式土壌侵食試験法を用いて原位置試験を行った結果、国頭マージの受食性は、 $u_{*c} = 4 \text{ cm/s}$, $E/u_* = 0.8 \times 10^{-5}$ と近似される。

種々の溶媒と初期濃度のもとで、国頭マージの沈降実験を行ったところ、分散剤を用いた場合を除いて、重量濃度が約 3% を超えると、界面沈降の生じることが明らかとなった。界面の低下速度は、海水の場合よりも真水の場合の方が速く、界面通過直後の上澄みの濁度は、海水の場合よりも真水の場合の方が低くなるが、ある程度時間が経過すると、海水の場合と真水の場合とで濁度が逆転する。

種々の溶媒と濃度のもとで、国頭マージの懸濁液を顕微鏡撮影したところ、条件によっては、顕著なフロックの形成されることが明らかとなった。フロックの粒度分布は、条件によって異なるが、蒸留水の場合には特に大きく成長し、肉眼で識別できるほどの大きさをもつ。

懸濁液の濁度の時間変化特性が、土砂濃度や溶媒によって異なるのは、フロックの粒度分布の差異によるものと考えられる。

フロックの形成と破壊には、流体力などの機械的作用のほかに電気化学的作用が深く関わっており、解析や予測は複雑となるが、その制御には、種々の可能性の秘められていることが期待される。今後、さらに研究を進めていきたいと考えている。

なお、本研究を行うきっかけは、芦田和男教授から与えていただいた。現地における侵食試験の実施には、琉球大学農学部翁長謙良教授に多大なるご援助をいただいた。また、沈降試験のための原地試料は沖縄総合事務局から提供していただいた。さらに粒度試験の実施に当たっては、京都大学原子エネルギー研究所原田敏夫助手ならびに防災研究所中村行雄技官にご指導・ご援助いただいた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 種田行男・翁長謙良：国頭マージの標準試験区における土壌侵食について，第 15 回自然災害科学総合シンポジウム論文集，1978，pp.422-423.
- 2) 翁長謙良：国頭マージにおける流亡土量，農業土木学会農地保全研究部会，農地保全の研究，No. 1，1980，pp.33-42.
- 3) 澤井健二：傾斜地受食性の測定法，自然災害科学総合研究班，文部省科学研究費自然災害特別研究成果，No. A-57-3，「傾斜農林地の開発に伴う自然災害の防止に関する研究（研究代表者：河村三郎）」，1982，pp.48-54.
- 4) 澤井健二・芦田和男：内筒回転式土壌侵食試験法について，京都大学防災研究所年報，第 22 号 B-2，1979，p.291-300.
- 5) 沖縄県環境科学検査センター：赤土沈降実験報告書，1989.
- 6) Mehta, A.J. and E. Partheniades: Effect on Physico-Chemical Properties of Fine Sediment on the Degree of Deposition, Proc. Int. Sym. on River Mechanics, IAHR, 1973, pp.465-476.
- 7) Mehta, A.J. and E. Partheniades: An Investigation of the Depositional Properties of Flocculated Fine Sediments, Jour. Hydraulic Research, Vol.13, No. 4, 1975, pp.361-381.
- 8) 楠田哲也・海田輝之：底泥の巻き上げと沈降，国立公害研究所調査報告，第 16 号 (B-16-181)，1981，pp.78-92.
- 9) Yen Kai, Ren Rushu and Zen Xiaochun: Some Sediment Problems on Silty Coast and Estuaries, Proc. 4th Int. Sym. on River Sedimentation, 1989, pp.754-761.
- 10) 嘉門雅史・浅川美利：新体系土工学 16 土の力学(1)―土の分類・物理化学的性質―，技報堂出版，1988，p.81.