

# 沖縄に分布する土壌等の沈降特性

比嘉榮三郎・満本裕彰

## The Sedimentation Characteristics of the main soils in Okinawa

Eisaburo HIGA and Hiroaki MITSUMOTO

**要旨:** 沖縄県の主要土壌となっている国頭マージ, 島尻マージ, ジャーガル及びジャーガルの母岩であるクチャについて, 土壌懸濁液の初期濃度の違いによる沈降様式の比較検討を行った. この結果, 初期濃度の違いにより単粒子沈降, 凝集性沈降, 界面沈降, 圧密沈降の4種類の沈降様式が確認された. ただし土壌等によっては凝集性沈降, 圧密沈降の領域がない土壌もあり, それぞれの土壌等によって異なる沈降パターンを示した. また, 国頭マージの河川水, 海水中での沈降速度を比較した場合, 初期濃度が 5,000~10,000mg/l の範囲ではむしろ河川水のほうが沈降が早くなる結果となった. 本県土壌等の沈降特性を知ることは, 開発事業などでの赤土等流出防止対策をより効果的に実施するために, 今後役立つものと思われる.

**Key words:** 沈降, 国頭マージ, 島尻マージ, ジャーガル

### I はじめに

本県では古くから土壌を母材別に分類してきた経緯があり, 国頭マージ, 島尻マージ, ジャーガルの3種類の土壌型に大別されている.

しかしながら「赤土流出」による環境汚染が社会問題になると, 土壌侵食・流出に関する研究は主に国頭マージを中心に行われてきた. 沈降特性も国頭マージ関連が多く, 他の土壌等についてはあまり報告されていない.

国頭マージの沈降速度に関しても, 河川水中に比べ海水中での沈降速度が速いとか遅くなるとか報告書<sup>1, 2)</sup>によって異なる結論となっている.

また, 濁水流出が環境問題となっている現在, 降雨時に発生する濁水濃度が最も高いクチャ(島尻層群泥岩, ジャーガルの母岩)の流出については他の土壌以上に大きな問題を含んでいる.

そこでこれらの土壌等について, 濁水の初期濃度の違いによりどのような沈降特性を示すのか比較検討を行ったので報告する.

### II 試験方法

試験濁水は, 降雨時に流出源で採水した濁水を試験濁水とした.

ただし, 島尻マージの試験濁水は, 次のように土壌を

蒸留水で分散して調整した.

土壌100gを500ml容有詮メスシリンダーに入れ, 蒸留水でメスアップ後上下転倒かく拌し, 1分間静置, 上層水の300mlを分取し, 63 $\mu$ mの標準篩でろ過して試験濁水とした.

#### 1. 初期濃度が100~10,000mg/l の範囲

有詮 500ml容メスシリンダーに試験濁水を入れ, 蒸留水または海水でメスアップし上下転倒後静置した. その後一定経過時の懸濁液を液面より13cmの位置から採取し濁水の濁度を測定した.

濁度は東京電色社製積分球光電散乱光度計MODEL T-2600Dで測定した.

#### 2. 初期濃度が2万~20万mg/l の範囲

有詮 100ml容メスシリンダーに試験濁水を入れ, 蒸留水などでメスアップし上下転倒後静置した. その後, 一定経過時の上層水と土粒子群の界面の高さを測定した.

### III 結果

#### 1. 土粒子の沈降様式

今回の室内試験では, 土壌懸濁液の初期濃度の違いにより4種類の沈降様式<sup>3)</sup>が確認された.

初期濃度の低い方から単粒子沈降, 凝集性沈降, 界面沈降, 圧密沈降に分類され, その特徴は次のとおりである.

単粒子沈降は、土粒子が分散状態のまま沈降するタイプで粒径の小さい粘土粒子などはなかなか沈降しない。

凝集性沈降は、土粒子が短時間でフロックを形成し沈降するため明瞭な界面は形成されないが、沈降が速く上層水は短時間の内に清澄になる。

界面沈降は、フロックが一樣な速度で沈降するもので、上層水と沈降土粒子群との間には明瞭な界面が形成される。

圧密沈降は、個々の土粒子が相互に接触しながら沈降するため、界面沈降に比べ沈降速度はさらに遅くなる。

このように4種類の沈降様式が確認されたが、土壌によっては初期濃度が100~20万mg/lの範囲で凝集性沈降や圧密沈降が確認できないものがあり、それぞれの土壌によって異なる沈降パターンを示した。

なお、今回の試験では、沈降様式の分類は目視による観察で行った。判定の基準は、単粒子沈降と凝集性沈降の区別は早期のフロック形成と上層水の濁りの有無により、凝集性沈降と界面沈降の区別は明瞭な界面形成の有無により、界面沈降と圧密沈降の区別は沈降速度により行った。

2. 蒸留水、海水中での沈降パターン

(1) 蒸留水中での沈降パターン

蒸留水中での土壌懸濁液の初期濃度と沈降様式の関係を示したのが表1である。

一般的に酸性を示す国頭マージでは、懸濁液の初期濃度の違いにより単粒子沈降、凝集性沈降、界面沈降、圧密沈降と4種類の沈降様式が確認された。

初期濃度が1,000mg/l以下の場合、フロックの形成は緩やかで小さいため、沈降速度は遅く単粒子沈降を示す。

初期濃度が5,000~30,000mg/lの範囲では、沈降開始後4~5分経過すると土粒子が凝集し始め、フロックを形成しながら沈降するがまだ界面は不明瞭なため凝集性沈降を示す。初期濃度が4万~18万mg/lの範囲では、沈降開始後すぐに明瞭な界面を形成し沈降するため界面沈降となる。初期濃度が20万mg/l以上になると、界面沈降に比べ界面の沈降がさらに遅くなり圧密沈降へと移行する。

このように国頭マージでは4種類の沈降様式に分類されるが、それぞれの沈降様式の間で沈降速度が大きく異なる。単粒子沈降は4種類の沈降様式の中では最も沈降が遅いが、凝集性沈降へと移行すると4種類の沈降様式の中では最も沈降が速くなる。凝集性沈降から界面沈降へと移行すると今度は逆に沈降は遅くなり、圧密沈降へと移行するとさらに沈降が遅くなる。

これまでも報告<sup>4)</sup>してきたが、アルカリ性を示す石垣市明石西の土壌懸濁液や降雨時に採水した濁水でアルカリ性を示すサンプルでは、同じ国頭マージでありながら沈降が遅いという特徴をもっている。

通常の国頭マージでは、初期濃度が高くなると単粒子沈降から凝集性沈降へと移行するが、これらの土壌懸濁液では濃度が高くなっても凝集性沈降に移行せず単粒子沈降からすぐに界面沈降へと移行する。

ジャーガルでは、懸濁液の初期濃度の違いにより単粒子沈降、界面沈降、圧密沈降の3種類の沈降様式を示した。初期濃度が6万mg/lとかなり高くなってもフロックの形成は緩やかである。粒径の大きな土粒子が先に沈降しているのが目視でも確認できるが、粒径の小さい土粒子はなかなか沈降せず単粒子沈降を示す。初期濃度が8万mg/lになっても上層水はやや濁り国頭マージ程界

表1. 初期濃度の違いと沈降様式の関係 (蒸留水)。

mg/l	国マ	島マ(酸)	島マ(アル)	ジャ	クチャ	グチャ大里
20万	●	○	○	●	●	—
18万	○	○	○	●	●	—
16万	○	○	○	●	○	—
12万	○	○	○	○	○	—
10万	○	○	○	○	○	●
8万	○	○	○	○	○	●
6万	○	○	○	□	□	●
4万	○	△	□	□	□	●
3万	△	△	□	□	□	○
2万	△	△	□	□	□	○
1万	△	△	□	□	□	□
5000	△	△	□	□	□	□
1000	□	□	□	□	□	□
500	□	□	□	□	□	□
100	□	□	□	□	□	□

● 圧密沈降    △ 凝集性沈降  
○ 界面沈降    □ 単粒子沈降

表2. 初期濃度の違いと沈降様式の関係 (海水中)。

mg/l	国マ	島マ(酸)	島マ(アル)	ジャ	クチャ	グチャ大里
20万	●	○	○	●	●	—
18万	○	○	○	●	○	—
16万	○	○	○	●	○	—
12万	○	○	○	○	○	—
10万	○	○	○	○	○	●
8万	○	○	○	○	○	●
6万	○	○	○	○	○	●
4万	△	△	△	△	△	●
3万	△	△	△	△	△	●
2万	△	△	△	△	△	○
1万	△	△	△	△	△	△
5000	△	△	△	△	△	△
1000	□	□	□	□	□	□
500	□	□	□	□	□	□
100	□	□	□	□	□	□

● 圧密沈降    △ 凝集性沈降  
○ 界面沈降    □ 単粒子沈降

面は明瞭ではないが、この濃度付近から界面沈降に移行している。初期濃度が16万mg/l以上になると界面の沈降がさらに遅くなり圧密沈降へと移行する。

ジャーガルではかなり高濃度まで単粒子沈降を示すため国頭マージのような凝集性沈降の領域はなく、すぐに単粒子沈降から界面沈降へと移行する。

また、界面沈降から圧密沈降へと移行する濃度も、国頭マージに比較すると若干低くなっている。

島尻マージの場合、土壌pHは酸性側の5.0付近からアルカリ側の8.5付近まで範囲が広い。このため土壌pHにより沈降パターンも大きく2つに分かれる。

酸性を示す島尻マージでは、初期濃度の違いにより単粒子沈降、凝集性沈降、界面沈降、圧密沈降と4種類の沈降様式が確認され、国頭マージの沈降パターンと同じような傾向を示した。

凝集性沈降は、初期濃度が5,000~4万mg/lの範囲内ではほぼ国頭マージと同様な濃度範囲となったが、界面沈降から圧密沈降へと移行する濃度は国頭マージよりも高く、初期濃度が25万mg/l以上であった。

アルカリ性を示す島尻マージでは単粒子沈降、界面沈

降、圧密沈降と3種類の沈降様式が確認され、ジャーガルと同じような沈降パターンを示した。酸性の島尻マージでは凝集性沈降がみられたが、アルカリ性の島尻マージでは単粒子沈降からすぐに界面沈降へと移行した。

クチャの場合も初期濃度の違いにより単粒子沈降、界面沈降、圧密沈降と3種類の沈降様式が確認され、ジャーガルと同じような沈降パターンを示した。

しかし大里産のクチャでは、初期濃度が4万mg/lと他のクチャや土壌に比較してかなり低い濃度から圧密沈降へと移行し、特異な特徴を示した。

(2) 海水中での沈降パターン

海水中での土粒子の沈降パターンを示したのが表2である。

国頭マージでは、海水中でも単粒子沈降、凝集性沈降、界面沈降、圧密沈降の4種類の沈降様式が確認され、それぞれの沈降様式に移行する濃度は蒸留水とほぼ同じ初期濃度であった。

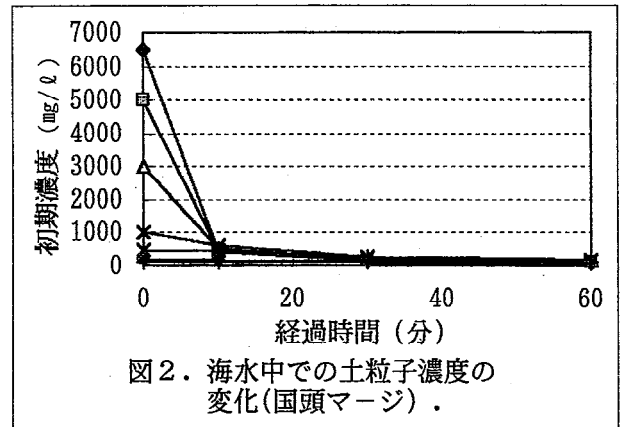
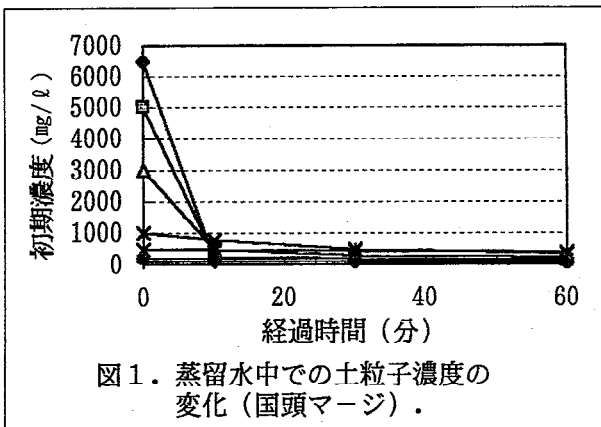
これは国頭マージの沈降パターンが、塩類の有無にあまり左右されず初期濃度に強く影響されることを示している。

表3. 国頭マージの蒸留水での土粒子濃度の経時変化.  
単位:(mg/l)

濃度	10分	30分	60分	4時間	8時間	16時間	24時間
6,500	136	90	73	38	26	12	7
5,000	261	162	121	46	25	11	8
3,000	474	292	215	71	37	17	8
1,000	770	483	356	338	238	47	42
500	498	441	385	376	237	79	75
200	198	187	176	97	70	47	44
100	96	90	85	46	36	29	21

表4. 国頭マージの海水中での土粒子濃度の経時変化.  
単位:(mg/l)

濃度	10分	30分	60分	4時間	8時間	16時間	24時間
6,500	430	140	82	36	25	10	8
5,000	441	181	140	45	26	10	8
3,000	514	204	146	54	31	11	6
1,000	623	262	178	52	23	8	7
500	468	264	170	40	16	5	4
200	198	157	118	26	13	3	3
100	95	82	70	25	10	4	3



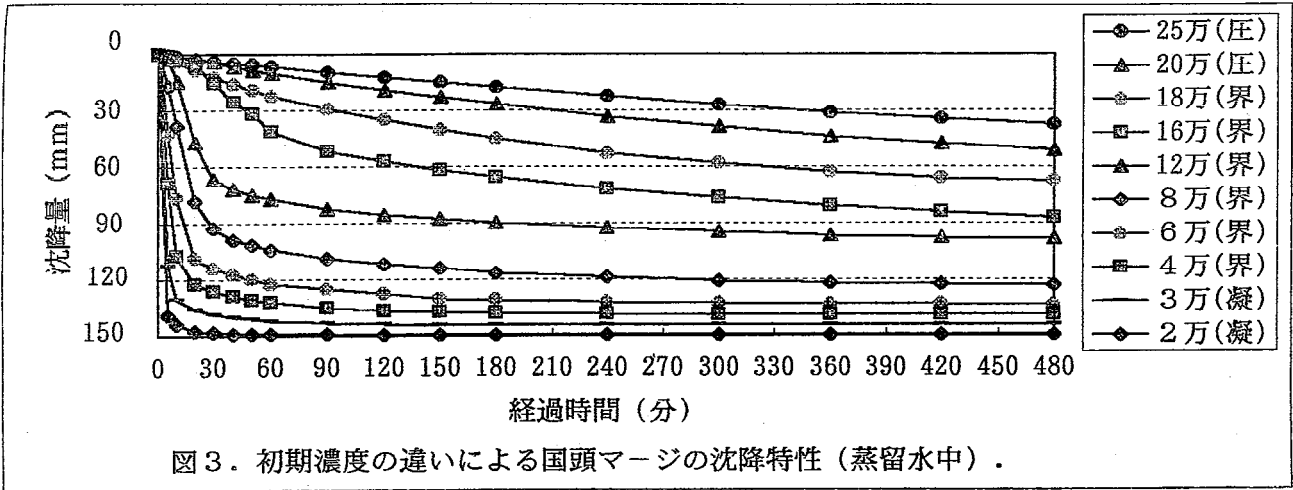


図3. 初期濃度の違いによる国頭マージの沈降特性 (蒸留水中)。

ジャーガルの場合蒸留水中では凝集性沈降の領域がなかったが、海水中では初期濃度が 5,000~3 万mg/ℓ の範囲で確認された。海水中での沈降パターンは、国頭マージとほぼ同じような傾向を示した。

島尻マージの場合、蒸留水中では土壌 pH により国頭マージ類似タイプとジャーガル類似タイプの2つの沈降パターンに分かれたが、海水中では土壌 pH に関係なく国頭マージと同じような沈降パターンを示した。

クチャもジャーガル同様、海水中では 5,000~3 万 mg/ℓ の範囲で凝集性沈降を示し、国頭マージと同じような沈降パターンを示した。

このように海水中では、国頭マージ、島尻マージ、ジャーガル及びクチャとも同じような沈降パターンを示し土壌の種類や土壌 pH にほとんど影響を受けないことが明らかになった。

ただし、大里産のクチャでは、他の土壌等に比べ界面沈降や圧密沈降に移行する濃度がかかなり低くなるが、その原因については今後の研究課題となった。

3. 沈降速度の比較

(1) 蒸留水、海水中での沈降速度の比較

1) 国頭マージ

前述したように国頭マージは蒸留水、海水中でほぼ同じような沈降パターンを示す。しかし同じ沈降様式であっても蒸留水と海水中での沈降速度を比較すると若干の違いがみられる。

初期濃度が100~10,000mg/ℓ の範囲での蒸留水および海水中での土粒子濃度の経時変化を示したのが図1、2と表3、4である。この土粒子濃度の経時変化から、次のように沈降速度 (濃度減少速度) を求めた。

$$\text{沈降速度 (mg/ℓ/分)} = (A - B) / \text{経過時間 (分)}$$

A: 初期濃度 (mg/ℓ)

B: 経過時間後の濃度 (mg/ℓ)

初期濃度が 1,000mg/ℓ 以下の場合、海水中では凝集がゆっくりと進みフロックを形成するため、蒸留水に比べ海水中での沈降が若干早くなる。このため沈降開始後 3~4 時間経過すると海水では土粒子が沈降し上層水が透明に近くなるが、蒸留水中では微細な土粒子が沈降せずコロイド状となる。

初期濃度が 3,000mg/ℓ の場合、10分までの初期段階は蒸留水のほうが若干沈降は速くなるがそれ以降は海水が速くなる。沈降開始後すぐに蒸留水ではフロックを形成し始めるが、フロックはあまり大きくならないの対し、海水ではフロックの形成は遅れるが成長が速くすぐに大きくなるためこのような結果となる。24時間後の濁水濃度は蒸留水、海水ともほとんど同じになる。

初期濃度が 5,000mg/ℓ 以上になると、沈降開始後60分までの土粒子濃度は蒸留水が低く海水よりも沈降が速くなる。蒸留水中では肉眼で確認できるほどフロックが成長するのが速くすぐに凝集沈降が起こるのに対し、海水中ではフロックの形成が緩やかであり大きくならない。このため60分までは、蒸留水中での沈降が速くなる。60分以降の土粒子濃度は蒸留水、海水ともほぼ同じような数値で推移し両者間に差がみられなくなる。

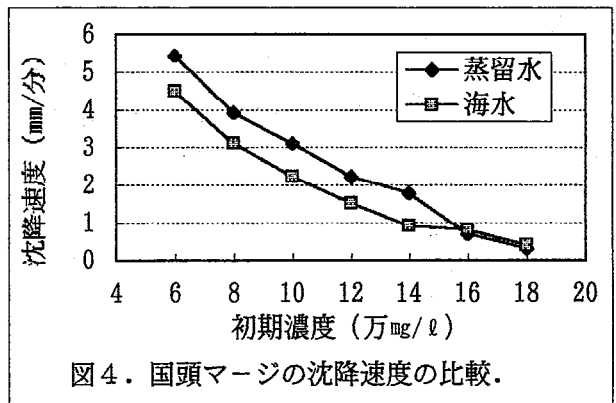


図4. 国頭マージの沈降速度の比較。

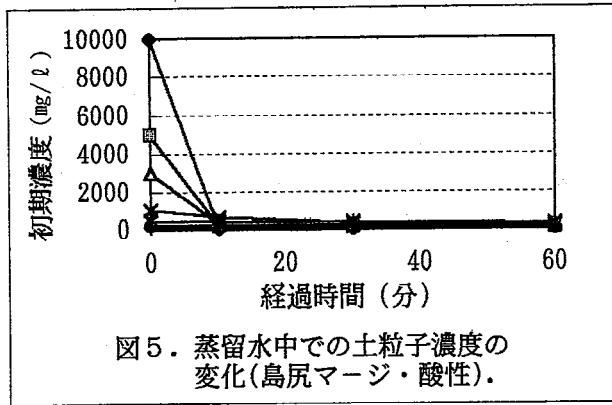


図5. 蒸留水中での土粒子濃度の変化(島尻マージ・酸性).

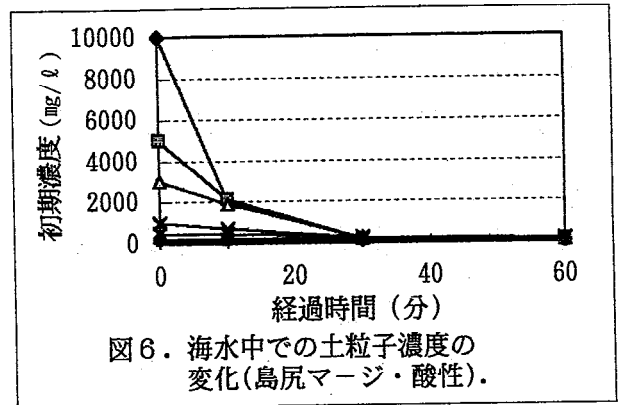


図6. 海水中での土粒子濃度の変化(島尻マージ・酸性).

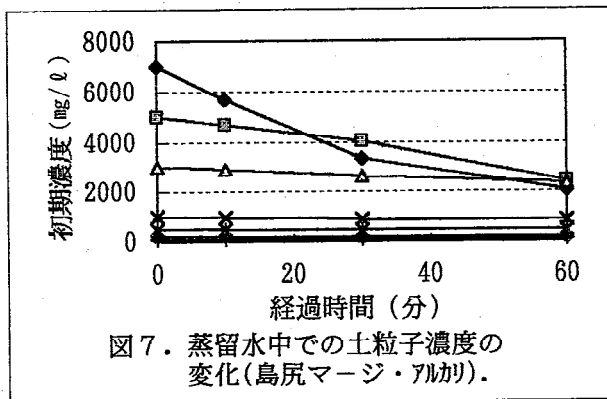


図7. 蒸留水中での土粒子濃度の変化(島尻マージ・アルカリ).

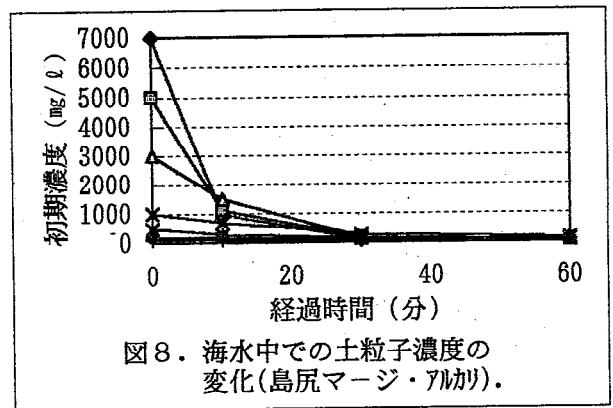


図8. 海水中での土粒子濃度の変化(島尻マージ・アルカリ).

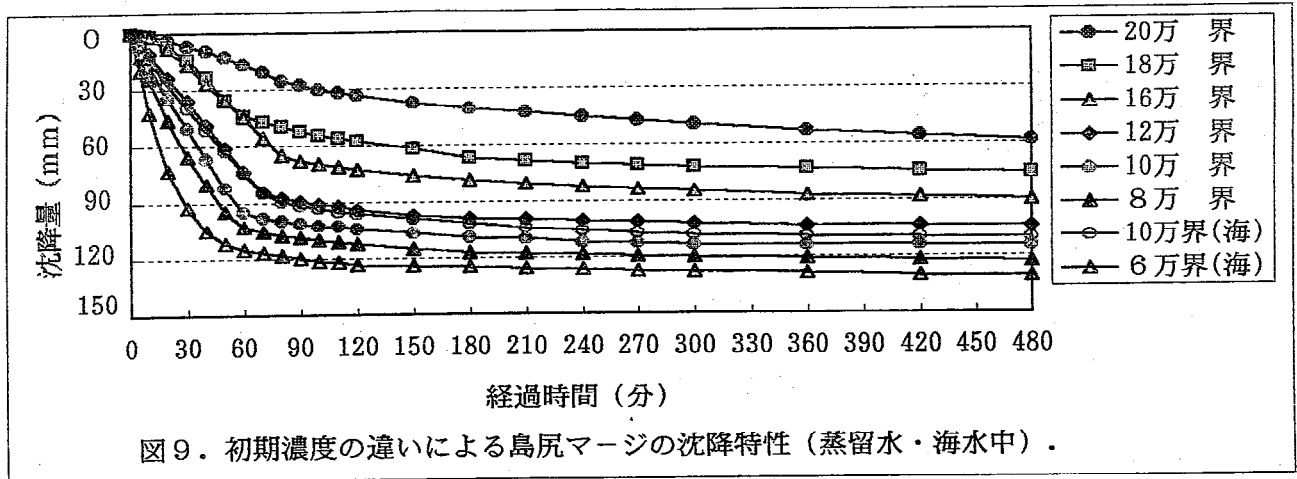


図9. 初期濃度の違いによる島尻マージの沈降特性(蒸留水・海水中).

このように蒸留水中では、初期濃度が高くなる程フロックの成長が早く、粘土粒子などの微細な土粒子もフロックの中に取り込まれるため沈降が早くなる。これに対し初期濃度がそれほど高くないと粘土粒子などが凝集せずに浮遊するため沈降も遅くなる。

これまで国頭マージの沈降は、海水のほうが河川水よりも早くなるとされているが、今回、河川水を用いた室内試験でも蒸留水と同じような結果が得られた。

つまり、初期濃度が5,000~1万mg/lの範囲では河川水のほうが沈降は速くなる。初期濃度が1,000~5,000

mg/lの範囲では、初期段階で河川水がそれ以降は海水のほうが沈降が速くなる。初期濃度が1,000mg/l以下では、海水のほうが沈降が速くなる。

このように土粒子の初期濃度の違いにより海水での沈降が早くなったり遅くなったり、これまでの結論とは異なる結果となった。

一方、界面沈降、圧密沈降を示す濃度範囲での沈降量と経時時間の関係を示したのが図3である。

土粒子は沈降開始後すみやかに界面を形成し等速沈降を開始するため、この等速沈降を示す部分の傾きから沈

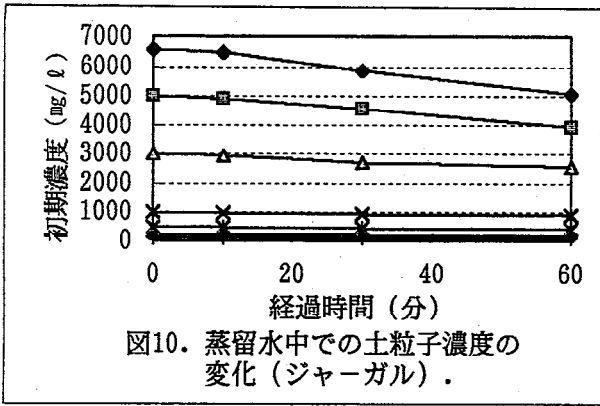


図10. 蒸留水中での土粒子濃度の経時変化 (ジャーガル).

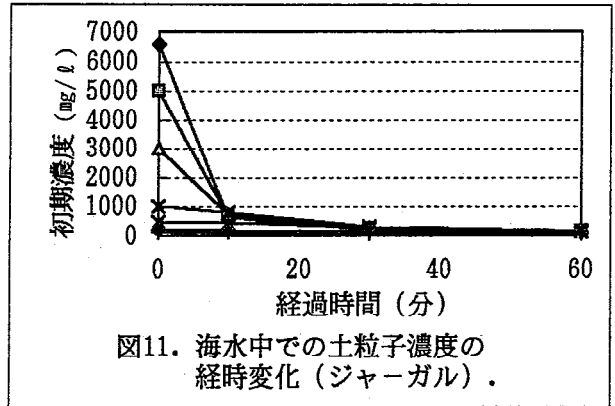


図11. 海水中での土粒子濃度の経時変化 (ジャーガル).

表5. ジャーガルの蒸留水での土粒子濃度の経時変化. 単位: (mg/l)

濃度	10分	30分	60分	4時間	8時間	16時間	24時間
6,600	6,470	5,840	5,060	1,850	980	420	280
5,000	4,870	4,540	3,910	2,550	1,150	380	250
3,000	2,930	2,710	2,570	1,580	950	194	150
1,000	981	940	891	655	580	373	256
500	493	460	419	356	225	195	135
200	199	191	177	103	85	65	49
100	98	93	87	57	48	39	29

表6. ジャーガルの海水中での土粒子濃度の経時変化. 単位: (mg/l)

濃度	10分	30分	60分	4時間	8時間	16時間	24時間
6,600	616	214	127	40	15	8	5
5,000	660	254	160	41	18	6	4
3,000	716	256	156	42	22	7	6
1,000	813	312	165	41	21	7	5
500	462	270	147	42	22	8	6
200	192	159	125	21	22	6	5
100	96	83	68	17	15	5	3

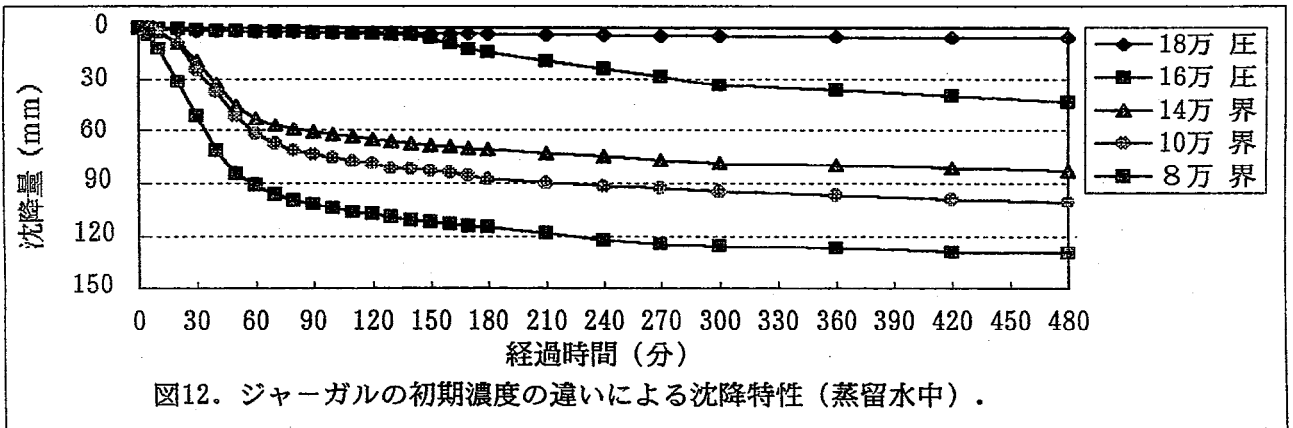


図12. ジャーガルの初期濃度の違いによる沈降特性 (蒸留水中).

降速度を求めた。

界面沈降と圧密沈降の違いは、界面沈降では転倒静置後、短時間の内に沈降の速い等速沈降部分がありその後はゆっくりとした沈降曲線になる。

これに対し圧密沈降では、試験開始8時間経過後もゆっくりと等速沈降が進むため沈降曲線は直線を示す。

初期濃度と沈降速度の関係を示したのが図4であり、初期濃度が高くなると海水、蒸留水いずれも沈降速度は遅くなる。界面沈降を示す濃度範囲では蒸留水のほうが若干沈降速度が速くなるが、圧密沈降になるとほとんど

差がなくなる。

2) 島尻マーヅ

初期濃度が 100~10,000mg/l の範囲での蒸留水および海水中での濁度の経時変化を示したのが図5~8である。

アルカリ性を示す島尻マーヅの場合、蒸留水中では初期濃度が高くなっても国頭マーヅ程沈降が早くならず海水中での沈降が早くなる。

酸性を示す島尻マーヅでは、蒸留水中でも初期濃度が高くなると凝集性沈降となるため海水よりも沈降が早く

なる。

初期濃度が8万mg/ℓ以上と界面沈降, 圧密沈降を示す範囲の沈降量と経時時間の関係を示したのが図9である。初期濃度が高くなると海水, 蒸留水いずれも沈降速度が遅くなる。界面沈降を示す範囲では海水のほうが若干沈降が速くなるがそれほど大きな差はない。

3) ジャーガル

初期濃度が100~10,000mg/ℓの範囲での蒸留水および海水中での土粒子濃度の経時変化を示したのが図10, 11と表5, 6である。

蒸留水中では初期濃度が高くなっても単粒子沈降となるため, 海水中での沈降が早くなる。

初期濃度が8万mg/ℓ以上と界面沈降, 圧密沈降を示す範囲の沈降量と経過時間の関係を示したのが図12である。

初期濃度が高くなると海水, 蒸留水いずれも沈降が遅くなる。この濃度範囲では, 沈降速度の差はほとんどない。

4) クチャ

初期濃度が100~10,000mg/ℓの範囲での蒸留水および海水中での土粒子濃度の経時変化を示したのが図13, 14である。

蒸留水中では初期濃度が高くなっても, ジャーガルと

同じように凝集性沈降は起こらず海水中での沈降が早くなる。

また, 界面沈降, 圧密沈降を示す濃度範囲の沈降量と経過時間の関係を示したのが図15である。

初期濃度が高くなると海水, 蒸留水いずれも沈降が遅くなり, 沈降速度もジャーガル同様海水中, 河川水中ではほとんど差がない。

(2) 土壌間の比較

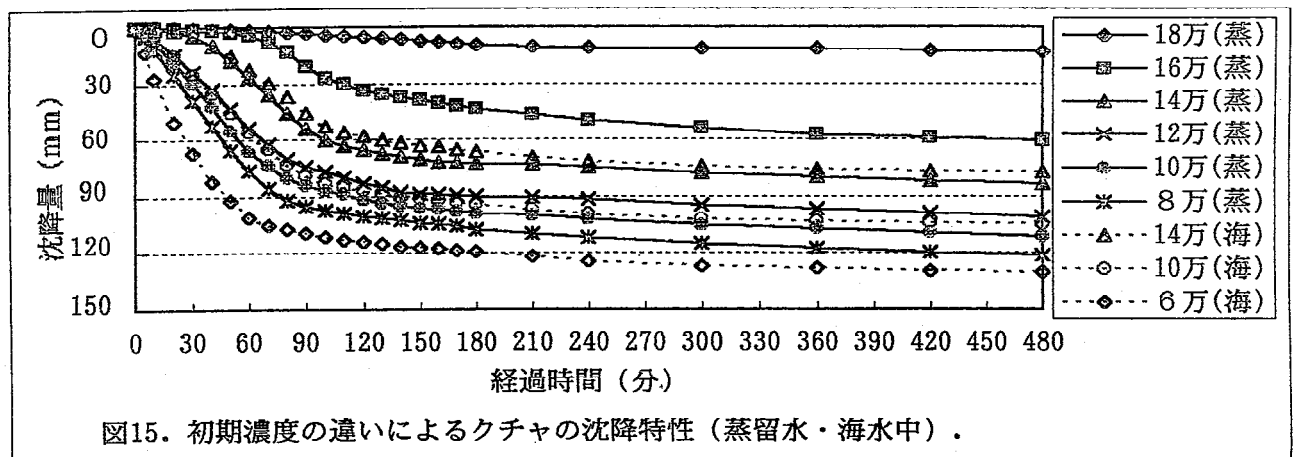
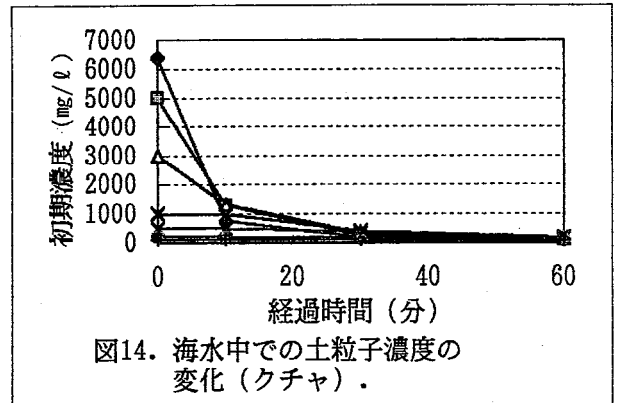
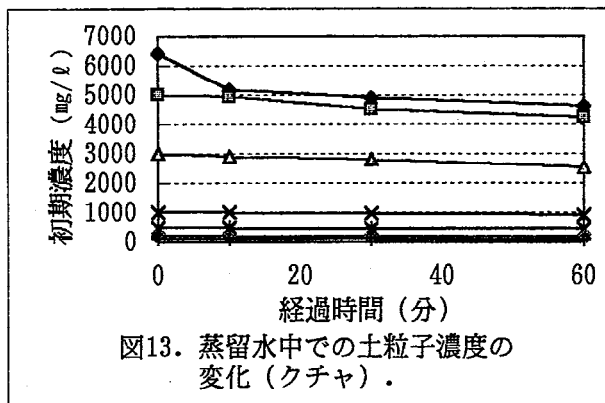
1) 初期濃度が5,000mg/ℓ以下

蒸留水中での国頭マージ, 島尻マージ, ジャーガル及びクチャの初期濃度と沈降速度(濃度減少速度)の関係を示したのが図16である。

初期濃度が1,000mg/ℓ以上における沈降速度の違いから, 沈降パターンを三つに分けることができる。

一つは, 初期濃度が1,000mg/ℓを越えると凝集性沈降に移行するために沈降速度が急速に大きくなるタイプで, 国頭マージや酸性の島尻マージがこのタイプに分類される。このタイプは同じ凝集性沈降であっても初期濃度が高くなるほど沈降速度は速くなるため, 土壌間の沈降速度を比較する場合には初期濃度を一定にすることが特に重要となる。

二つ目は, 初期濃度が1,000mg/ℓを越えても沈降速



度はほとんど変化しないタイプで、ジャーガル、クチャ、アルカリ性の国頭マージがこのタイプになる。

この二つの中間型として、初期濃度が 3,000mg/l 以上になるとゆっくりと凝集が進み沈降速度が速くなるタイプで、島尻マージやアルカリ性を示す国頭マージの一部サンプルにみられる。

このように初期濃度が 1,000mg/l を越える場合の沈降速度は、国頭マージや酸性の島尻マージが早く次に島尻マージでジャーガルやクチャ、アルカリ性の国頭マージは沈降が最も遅くなり、懸濁液の pH に大きく左右される。

これに対し初期濃度が 1,000mg/l 以下になると国頭マージや、酸性の島尻マージもゆっくりと凝集が進むようになり他の土壌等との沈降速度の差は小さくなる。

さらに初期濃度が 200mg/l 以下になると、酸性の島尻マージが単粒子沈降を国頭マージもかなり沈降が遅く

なるため土壌間の沈降速度の差はさらに小さくなる傾向を示す。

海水中における、土粒子の初期濃度と沈降速度の関係を示したのが図17である。

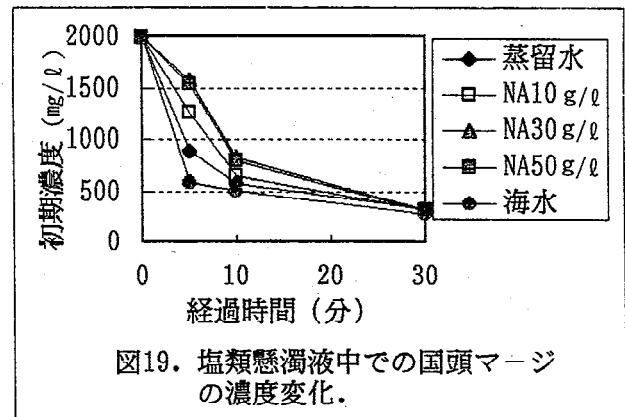
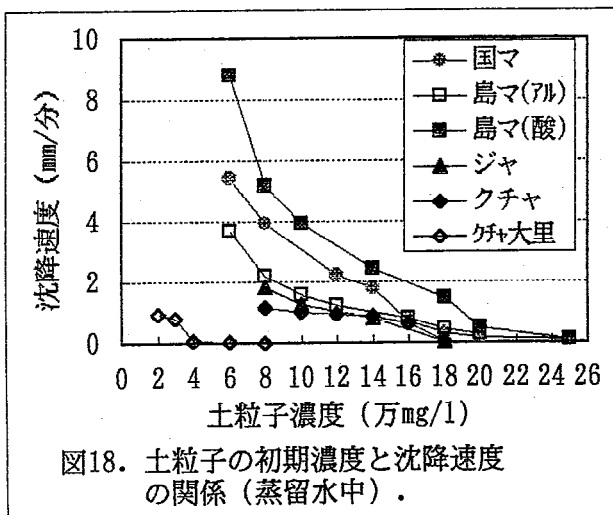
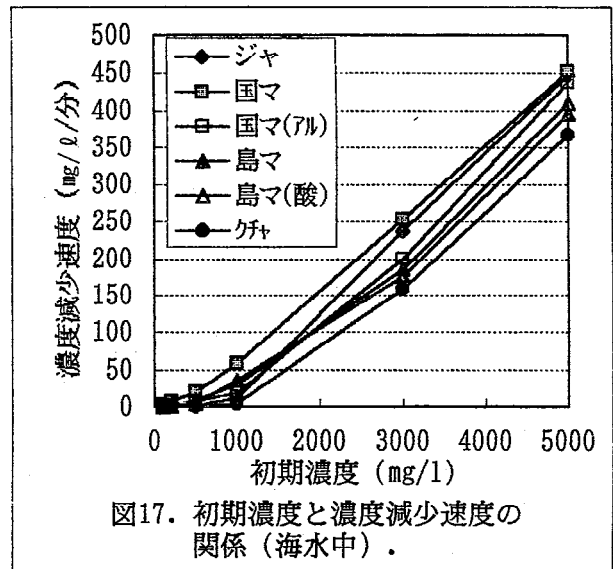
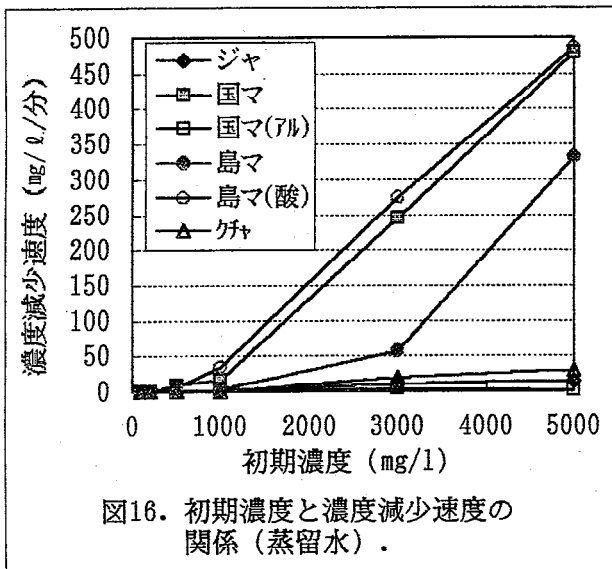
初期濃度が 1,000mg/l 以上では、すべての土壌が凝集性沈降となるため、蒸留水よりも土壌間の沈降速度の差は小さくなる。

しかし海水中では、初期濃度が 200mg/l 以下になっても単粒子沈降にならず、ゆっくりと凝集沈降が進むため蒸留水に比べるとむしろ土壌間の沈降速度の差は大きくなる傾向にあり、若干国頭マージや酸性の島尻マージの沈降速度が速くなる。

2) 界面沈降を示す濃度範囲

蒸留水中での国頭マージ、島尻マージ、ジャーガル及びクチャの沈降速度を図18に示した。

初期濃度が 8~16万mg/l の濃度範囲では、国頭マージ





ジヤ酸性の島尻マージのほうがジャーガル、クチャ、アルカリ性の島尻マージに比べ若干沈降速度が速くなる。

海水中でも国頭マージや酸性の島尻マージのほうが沈降は早くなる傾向にあるが、蒸留水に比べ土壌間の差がかなり小さくなる。

(3) 沈降速度に影響を与える因子

土粒子の沈降速度は土粒子の初期濃度、CEC（陽イオン交換容量）、粒度分布や懸濁液のpH、塩類濃度などに影響される。

1) 塩類の影響

海水のほうが河川水に比べ沈降が早くなるのは、塩類が存在すると土粒子の電気二重層が小さくなるために土粒子間の反発力が減少し凝集しやすくなるためだと言われている。

しかし、海水と蒸留水での沈降速度を比較した場合、土粒子の初期濃度が高くなると蒸留水での沈降が早くなるという逆の結果が得られた。

そこで塩類（塩化ナトリウム）の存在が沈降速度にどのような影響を与えるのか国頭マージ、島尻マージ、ジャーガル及びクチャの懸濁液を用いてこれまでと同様に沈降試験を行い結果を図19～21に示した。

土粒子の初期濃度が1,000mg/l以上になると国頭マージや酸性の島尻マージでは、塩類懸濁液のほうが蒸留水よりも若干沈降が遅くなり、同じ塩類懸濁液でも塩濃度が高くなるほど沈降が遅くなる傾向にある。これは蒸留水に比べ塩類懸濁液では、土粒子のフロック形成が遅いうえに大きく成長するのが阻害されているからである。

これに対し、ジャーガルやアルカリ性の国頭マージでは逆に塩類懸濁液のほうが沈降が早く、塩濃度が高くなるほど沈降も早くなる。

初期濃度が500mg/lになると、すべての土壌で塩類懸濁液のほうが蒸留水よりも沈降が早くなる。

このように塩類の存在は土壌懸濁液の初期濃度やpH

の違いにより沈降を促進したり、逆に阻害する働きをするため、これまでのように電気二重層理論だけで沈降を単純に説明することは難しい。

これに対し海水中では、土粒子の初期濃度やpHに関係なく塩類懸濁液よりも常に沈降速度が速くなる。塩濃度が50g/lと海水中よりも高くなっても、やはり海水のほうが沈降は早い。

海水中では、塩化ナトリウムのような塩類の存在だけが沈降速度に作用しているのではなく、カルシウムなどのように土粒子の凝集を促進するイオンの存在など他の要因が沈降速度に強く影響していることを示唆している。

2) pHの影響

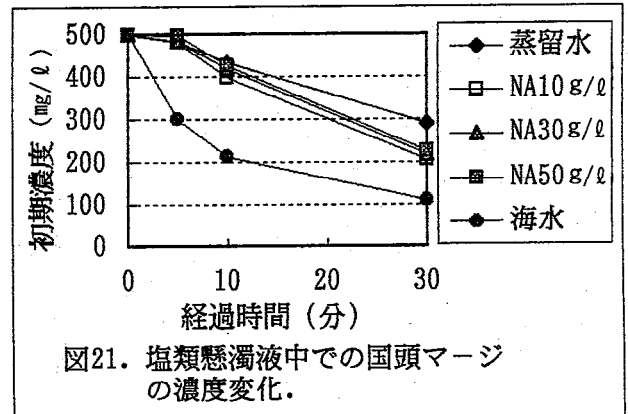
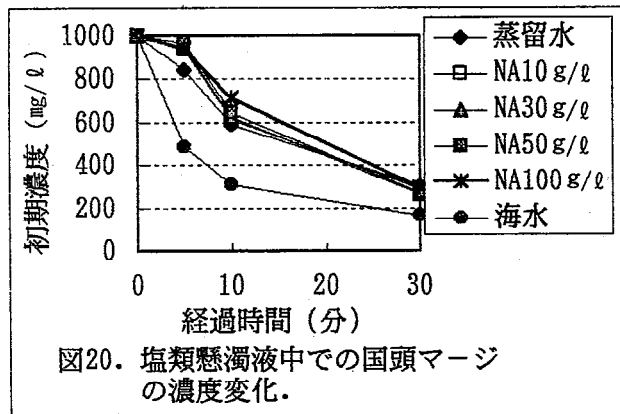
一般的に国頭マージや島尻マージの土壌懸濁液の場合、初期濃度が1,000mg/l以下になると懸濁液のpHは中性付近に、2,000mg/l以上になると懸濁している土壌の影響を受けpHは酸性かあるいはアルカリ性を示す。

ジャーガルやクチャでは土粒子の濃度が1,000mg/l以下になってもpHは8.0付近とアルカリ性を示す。

初期濃度が500mg/lの国頭マージ懸濁液のpHを8.0付近まで上げてやると沈降は遅くなり、逆にジャーガルでは懸濁液のpHを4.0付近まで下げると沈降が早くなる。酸性の国頭マージの場合、初期濃度が500mg/lでもゆっくりと凝集が進み土粒子が沈降するが、pHを8.0付近まで上げてやると土粒子は分散状態になるためである。初期濃度が200mg/l以下になるとほとんどの国頭マージ懸濁液では、土粒子が分散状態になるため沈降が遅くなるが、なかにはゆっくりと凝集が進み沈降の早いサンプルもある。

このように初期濃度が500mg/lを越える場合、土粒子の沈降速度は懸濁液のpHにより大きく変化し、酸性側になると沈降が早くなりアルカリ性になると沈降は遅くなる傾向にある。

しかしながら、土粒子の濃度がさらに低くなった場合



にpHが沈降速度におよぼす影響については、今後の研究課題となった。

### 3) CEC (陽イオン交換容量) の影響

一般に、pHが一定であればCEC (陽イオン交換容量) の値が高いほど粘土粒子表面の負電荷が大きくなるため土粒子は沈降が遅くなると言われている。

本県土壌のCECを比較すると、ジャーガルの値が最も高く次に島尻マージで国頭マージが一番低くなっている。そこで土壌pHが8.0付近を示すジャーガルと島尻マージ及び国頭マージ (石垣市明石西) の沈降速度を比較すると三土壌の中では島尻マージの沈降が早く、ジャーガルと国頭マージは沈降が遅くなりCECの大きさの順位と一致しない。

また、土壌pHが5.0付近の国頭マージと島尻マージの沈降速度を比較した場合でも、CECが若干高い島尻マージのほうが沈降が早くなるため、CECが沈降速度におよぼす影響はかなり小さいものと考えられる。

ただし、国頭マージと島尻マージのCECの差はそれほど大きくなく、また個々の土壌によってもCECの値は大きく変動することから実際にCECの測定を行って比較することが今後必要である。

### 4. 本県主要土壌の粘土鉱物組成

本県土壌等の主な粘土鉱物組成<sup>5)</sup>は、国頭マージがカオリナイト、ハロイサイトで、島尻マージはイライト、カオリナイト、ジャーガルやクチャではイライト、モンモリロナイトからなっている。

これまで自然状態に近い海水中でのカオリナイト、モンモリロナイト、イライト懸濁水の沈降様式についての報告<sup>6, 7, 8)</sup>がある。

この中で界面沈降を示す濃度範囲での沈降速度は、いずれの初期濃度でもモンモリロナイトが最も速く、次にカオリナイトでイライトは最も遅くなるとしている。

その理由として、凝集の際に形成したフロックの大きさがモンモリロナイトが最大であり、次にカオリナイト、そしてイライトは最小になることを挙げている。

また、カオリナイトの沈降速度は、いずれの初期濃度でも塩濃度の影響を受けずほぼ一定であるのに対し、モンモリロナイト、イライトの沈降速度は塩濃度の低下に伴い減少すると報告している。

これらの結果と、今回の室内試験とは以下の点で同じような結論となっている。

本県土壌でも、主要粘土鉱物がカオリナイトである国頭マージの沈降速度は、いずれの初期濃度でも塩濃度の影響を受けずほぼ一定となる。これは海水中、蒸留水中

で形成するフロックの大きさが初期濃度が同じだと同程度になるためである。

また、主要粘土鉱物がイライト、モンモリロナイトからなるジャーガルやクチャでは、先の報告と同様に土粒子の沈降は海水のほうが蒸留水よりも速くなる。

しかし、複数の粘土鉱物からなる土壌の海水中での沈降速度は、土壌間でほとんど差がなく、フロックの大きさにも差がほとんど見られなかった。

### 5. 沈降容積の比較

土壌懸濁液を一定時間静かに沈降させたときの土粒子の容積で、土粒子の大きさ、形状により変化する。

また、表面への吸着物質、表面電位などが土粒子の凝集状態に影響するため、沈降容積も変化するとされている。

それぞれの土壌懸濁液を、24時間静置した後の沈降容積を示したのが図22である。

大里村のクチャでは懸濁液の初期濃度が4万mg/lになると沈降容積が急激に増加し、70%を越えるためほとんど土粒子は沈まなくなる。

これに対し、他のクチャや土壌では初期濃度が高くなる程沈降容積も大きくなる傾向を示すが、大里のクチャほど急激な増加はみられない。初期濃度が16万mg/lまでは土壌間でほとんど差がないが、玉城のクチャや大里のジャーガルでは初期濃度がさらに高くなると、沈降容積が急に増加し60%以上となる。

このように大里産のクチャも含め、沈降様式が圧密沈降に移行すると沈降容積も急激に大きくなるようである。

### 6. 赤土等流出防止対策

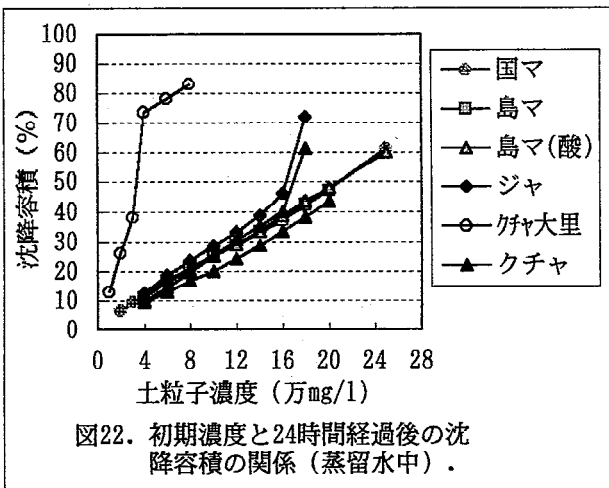
赤土等流出防止条例では、基本的な濁水処理対策として、発生した濁水は沈殿池で24時間貯留し土粒子を自然沈降させた後、濁水濃度を200mg/l以下にして放流することになっている。

しかし、大里産のクチャのように降雨時の濁水濃度が頻繁に4万mg/lを越える場合、沈殿池内の土粒子はほとんど沈まず、上澄みの濃度を200mg/l以下にして放流することは不可能となる。

実際、このクチャが産する現場では、沈殿池だけで濁水を処理することができず、現在では凝集沈殿装置を設置して濁水の処理を行っている。

この大里の開発事業のように、降雨時に発生した濁水を沈殿池だけで基準値以下に抑えることができない場合が今後も予測される。

そこであらかじめ、現地土壌等を用いて以下のように分散試験と沈降試験を行うことで、より有効な濁水処理



対策を検討することが可能となる。

・分散試験

土壌50gを1リットル容器に入れ、蒸留水(又は水道水)を500ml加え振とうかく拌する。かく拌後静置し、1分後に上層水の300mlを採取する。

採取した濁水はかなり高濃度になるから、水道水で適度に希釈し透視度計などを用いて濃度を測定する。

この濃度が、降雨時に発生する濁水の最高濃度とだいたい同じ濃度レベルになる。

・沈降試験

分散試験で得られた濁水の原液をかく拌・静置し、沈降様式と24時間経過後の沈降容積を測定する。

沈降試験は、土粒子群が界面を形成するか、凝集して短時間に沈降するか、あるいは凝集せずになかなか沈降しないかを観察する。

これまで降雨時に採水した濁水のSS濃度の調査や室内試験の結果から、一般的にクチャは界面を形成しながら沈降するか、凝集せずになかなか沈降しないかどちらかである。ジャーガルでは界面を形成して沈降するのは少なく、クチャよりもさらに沈降が遅くなることが多くなる。

国頭マージでは、ほとんどがすぐに凝集するため短時間の内に沈降するタイプが多い。

ただし、石垣市明石西などのようにアルカリ性を示す国頭マージだと、凝集は起こらずジャーガルのように沈降は遅くなる。

島尻マージの場合、土壌の団粒構造が発達しているため分散試験で得られる濁水のSS濃度は2~3千のオーダーで他の土壌等に比較し1/10程度低くなる。このため濁水処理も比較的容易に実施できる。

ただし、島尻マージでもクチャが混入(客土)されて

いたり、ジャーガルや国頭マージなど他の土壌等と混在する地域では、降雨時の濁水濃度も高くなる。このような開発事業では、浸透池の対策だけでなく他の濁水処理の検討が必要となる。

一般的に、24時間経過後も上層水が濁っていたり、土粒子の沈降容積が50%以上であれば、沈殿池による対策だけでなく、凝集沈殿装置の導入など他の対策方法の検討が必要となる。

V まとめ

これまで国頭マージの土壌流出に関する研究は多く、沈降特性も多数報告されている。

しかしジャーガルや島尻マージなど他の土壌等の沈降特性や、国頭マージでも初期濃度と沈降様式の関係などの研究がほとんどされていない。

今回の室内試験では、以下のようなことが明らかとなった。

1. 土壌懸濁液の初期濃度の違いにより単粒子沈降、凝集性沈降、界面沈降、圧密沈降の4種類の沈降様式が確認された。

2. 4種類の沈降様式間での沈降速度の比較

凝集性沈降>界面沈降>圧密沈降, 単粒子沈降

3. 同一の沈降様式内での初期濃度と沈降速度の関係

単粒子沈降は、初期濃度が高くなると沈降速度はやや速くなり凝集性沈降でも早くなる。これに対し界面沈降や圧密沈降では、初期濃度が高くなると沈降速度は遅くなる。

4. 国頭マージの海水・河川水中での沈降速度の比較

土壌懸濁液の初期濃度の違いにより、どちらの沈降が早くなるか異なる結果となる。

初期濃度が5,000~1万mg/lの範囲では河川水の沈降が早く、1,000~5,000mg/lの濃度範囲では初期の段階が河川水でそれ以降は海水が早くなり、1,000mg/l以下では海水のほうが沈降は早くなる。

5. 酸性土壌とアルカリ性土壌の沈降速度の比較

一般的に本県土壌の中でも土壌が酸性を示す場合の沈降パターンは、初期濃度が高くなると単粒子沈降から凝集性沈降へと移行しそして界面沈降に移行する。アルカリ性を示す土壌では単粒子沈降からすぐに界面沈降へと移行するため、濁水流出が問題となる濃度範囲(最高濃度が10万mg/l)では、酸性土壌の沈降が早くなる。

6. このような基礎的研究を踏まえ、現場で実施できる分散・沈降試験の開発を行い、赤土等流出防止対策を決定する際に活用できるよう検討を行った。

## VI 参考文献

- 1) 翁長謙良, 渡嘉敷義浩, 吉永安俊, 親川和人 (1994) 赤黄色土の懸濁特性に関する研究II. 農業土木学会大会講演要旨集: pp.448-449.
- 2) 徳永修三, P.アルンフェルク, 立本英機, 山口祐司 (1994) 沖縄赤土懸濁粒子の特性比較. 第28回日本水環境学会年会講演集: pp.236-237.
- 3) 近藤文義, 國武昌人, 野木芳幸, 高山昌照 (1995) カオリナイト, モンモリロナイト, イライトの沈降様式とゼータ電位. 農業土木学会九州支部講演集: pp.221-222.
- 4) 比嘉榮三郎, 満本裕彰, 仲宗根一哉, 大見謝辰男 (1998) 県内各種土壌等の侵食特性について. 沖縄県衛生環境研究所報, 32: 83-95.
- 5) 渡嘉敷義浩 (1993) 沖縄に分布する島尻マーゴおよびジャーガルの土壌特性. ペドロジスト, 37: 29-41.
- 6) 近藤文義, 國武昌人, 高山昌照, 野木芳幸 (1995) カオリナイト, モンモリロナイト, イライトの沈降速度とフロック形態. 農業土木学会九州支部講演集: pp.217-220.
- 7) 東孝寛, 高山昌照 (1994) カオリナイトのゼータ電位と分散・凝集特性. 農業土木学会大会講演要旨集: 126-127.
- 8) 近藤文義, 高山昌照, 大坪政美, 東孝寛 (1994) 有明粘土2種類の粘土鉱物組成と塩濃度による凝集・沈降特性の変化. 農業土木学会大会講演要旨集: 130-131.