

湖沼底泥の改良と有効利用

Improvement and effective use of lake and marsh bottom mud

吉野広司¹・畑野俊久²・斉藤悦郎³・望月美登志³・石山雄三²

Hiroshi Yoshino, Toshihisa Hatano, Eturo saito, Mochizuki Yoshitoshi, Yuzo Ishiyama

¹正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

²工修 株式会社フジタ 土木本部 (〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2)

³正会員 工修 株式会社フジタ 土木本部 (〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2)

Abundant supply of nutrient salts from the waters in the rivers and lakes and marshes leads to abnormal increase in the growth of blue-green algae in summer that thrives under such nutritional environment, thereby resulting to the deterioration of water quality and posing problems to our social life. This paper reports the results of the study on the improvement of and effective use of bottom mud rich in nutritive salts that is mainly responsible for the deterioration of water quality and contamination of water bed sediments. In particular, this paper reports the clear indication of an increase in the strength of the beneficiated soil simultaneous to the reduction in the speed of elution of nutritive salts resulting from the application of highly water absorbent beneficiation materials to the water bed sediments at Lake Suwa, Lake Biwa. This paper further introduces actual examples of the effective use of the beneficiated soil as base material for schoolyards, grounds, crop fields, lake front formation and cultivation of reeds.

Key Words : Lake, marsh, bottom mud, Improvement, Paper sludge ash, Effective use

1. はじめに

河川や湖沼の水域における栄養塩は、水循環の中で植物プランクトンにより利用され、次いで動物プランクトン、底生動物、魚等に捕食、排泄されながら水中にて変化を繰り返している。その中で、栄養塩の一部は懸濁有機物として底泥に沈降・堆積し、それらは分解された後に、再び水中に溶出している。湖沼水域において過剰な栄養塩類の供給が起きると、夏期に、これらを栄養分とするアオコが異常発生することになり、水質悪化の大きな原因として、社会生活上の問題となっている。そこで、水質汚濁防止対策や、底質汚濁防止対策などの水質浄化事業の一環として、底泥の浚渫が実施されているが、多量に発生する浚渫土砂の処分、または改良の困難さと有効利用先や受け入れ先の確保において困難な問題を抱えている。

本論文では、河川湖沼の水質・底質汚濁の主な原因である栄養塩類を含有する浚渫した底泥の改良と有効利用方法について研究開発を実施してきた成果を述べる。詳しくは、高含水な底泥に対し、環境に配慮した吸水性を特徴とした改良材を用い、環境面と施工性の良い改良土とすることで湖沼周辺における有効利用先の拡大を図るための改良工法を開発した。土質改良材（以下、PS灰改良材）は、製紙スラッジ灰を基材とし、この材料が有する細砂に相当する粒子サイズと、物理的な高吸水性を有する

特徴を利用することで、軟弱な地盤、高含水な土砂や底泥の改良を行う方法とした。ここでは、今回、このような改良材を湖沼の底泥に適用した結果、実務的に求められた技術的課題、栄養塩類を多く含む底泥への改良効果、施工方法、有効利用事例等について述べる。

実工事では、富栄養な諏訪湖の浚渫土に、本材料を用いた環境に配慮した底泥改良を行うことで、改良土を様々な用途へ有効利用先を拡大した事例を紹介する。琵琶湖では、ヨシ原の減少が問題視されていることから、底泥をヨシ育成の基盤材として有効利用することを考え、改良材の適用性を検討した成果を紹介する。

2. 底泥改良の課題と必要条件

栄養塩類を含む底泥は、天日乾燥による含水比低下では非常に多くの時間や用地を必要とし、化学的な改良を行うと有機物や多量の窒素やリンを含むために改良強度が得られにくいことや悪臭を放つ等の問題が生じる。有効利用先の拡大を図るためには、その周辺地域で様々な用途に利用可能な底泥の改良工法が求められる。以下に、これまで諏訪湖や琵琶湖等の底泥改良へ適用するに際して、求められた改良方法、改良土の性状、品質や施工条件を記す。特に近年では、環境負荷の少ない動植物への影響を与えないことへの重要性が高くなっている。

- ・改良直後に運搬、盛土が可能な改良土の締固め強度
- ・利用先に合わせ、容易に強度調整が可能
- ・水域環境に影響を与えない（改良土は中性の範囲）
- ・改良による粉塵が少ない、悪臭が発生しない
- ・改良土は植生が良好
- ・改良土の栄養塩類の溶出抑制（溶出速度の低減）

3. 土質改良材と底泥の性状

PS灰改良材は、写真-1、表-1に示すように、高温再焼成処理したPS灰を基材とするもので、主成分はシリカとアルミナによる硬い結合結晶となっている砂状の粒状体である。また、粒子は多孔質で高吸水能力を有する。この材料を用いた土質改良材の大きな特徴は、吸水作用と砂状の粒度により瞬時に泥土を施工性の良い改良土とする点である。さらに化学的に安定し、土壌環境基準の溶出は基準内、改良土は対象土にもよるが、中性の範囲を得ることが可能である。

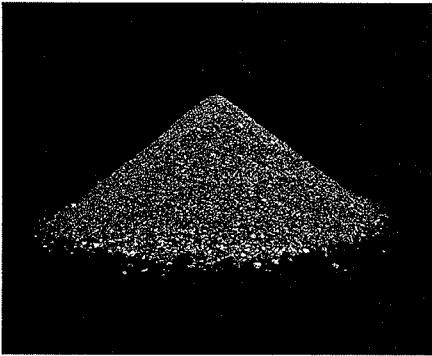


写真-1. PS灰改良材の概観

表-1. 改良材の概要

外状	灰白色粉体	
化学的性状	主成分	シリカ・アルミ主体
物理的性状	粒度	砂状
	密度	2.40g/cm ³
	かさ比重	0.60g/cm ³
	吸水率※1	39%

※1：吸水試験JIS A 1109に準拠

諏訪湖および琵琶湖内湖の底泥物性を表-2および図-1示す。諏訪湖は富栄養湖に分類され、栄養塩類の濃度が高い底泥表層50cmを浚渫し、囲繞堤内で天日乾燥による含水比の低下を施していたものである。琵琶湖内湖は、現地において底泥を直接採取したものである。このように、湖沼の底泥は、シルトや粘土分が多く、液性限界以上の性状を有する上に、栄養塩類が多いために改良することは非常に困難である。本PS灰改良材は、物理的な吸水改良を行うために、このような高含水な底泥改良に有効と考え研究開発、実工事への適用を進めてきている。

表-2. 底泥の性状

湖沼名	諏訪湖	琵琶湖内湖
湖沼型	富栄養湖	貧栄養湖
泥土の採取場所	浚渫土	底泥
密度(g/cm ³)	2.489	2.655
含水比(%)	204.6	80.0
液性限界w _L (%)	181.0	52.4
塑性限界w _p (%)	84.7	29.5
塑性指数I _p	96.4	22.9
pH	6.1	7.2

※諏訪湖の物性は施工実績の平均値を示す。

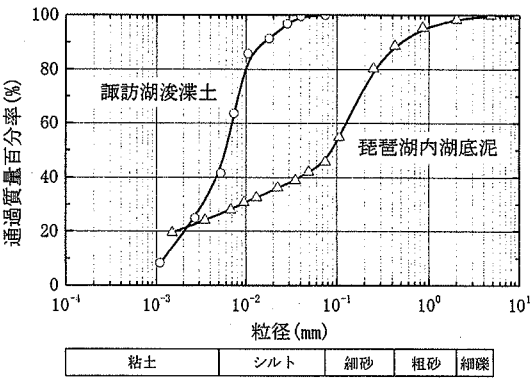


図-1. 粒度分布

4. 諏訪湖浚渫土への適用事例

諏訪湖は、長野県のほぼ中心に位置し、全周約16km、面積約13km²、最大水深約7mである。流入河川は31河川である一方、流出河川は天竜川の1河川のみである。富栄養化は明治後半の製糸業の盛んなころから始まったとされ、特に高度成長期の1955年頃から急激に悪化し、水質浄化事業は1969年から取り組み初められる。1978年まで水質悪化は続きピークとなるが、その後、徐々にではあるが水質が改善されつつ現在に至っている。そのような中、これまで浚渫された多量の底泥の良い改良方法が見つからず、囲繞堤に堆積した状態という課題を抱えていた。本章では、浚渫された底泥にPS灰改良材を適用し、有効利用した事例を述べる。

4-1. PS灰改良材を用いた浚渫土改良

諏訪湖における本改良材を用いた浚渫土改良の施工フローを図-2に示す。事前に実施した室内試験による含水比の違う浚渫土に対するPS灰改良材の添加量と改良土のコーン指数q_cとの関係は図-3に示す通りである。PS灰改良材の改良原理は吸水性によるため、土質性状が一樣と見なせる範囲では、現地にて含水比を測定することで必要強度を得るための添加量を決定でき、施工できる。

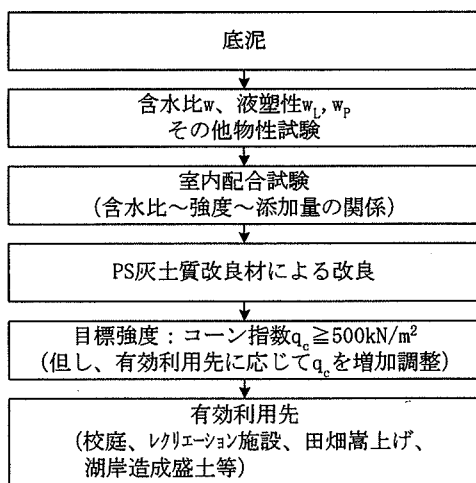


図-2. 施工フロー

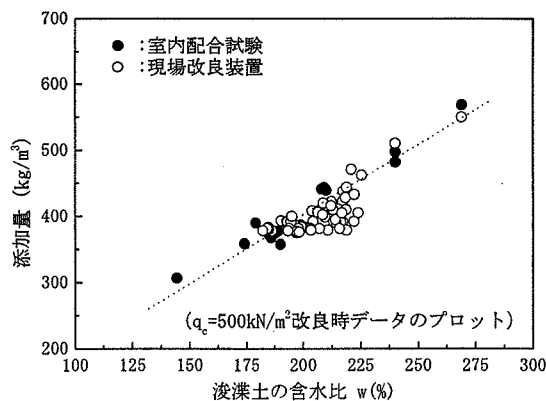


図-4. 浚渫土含水比と改良材添加量の関係

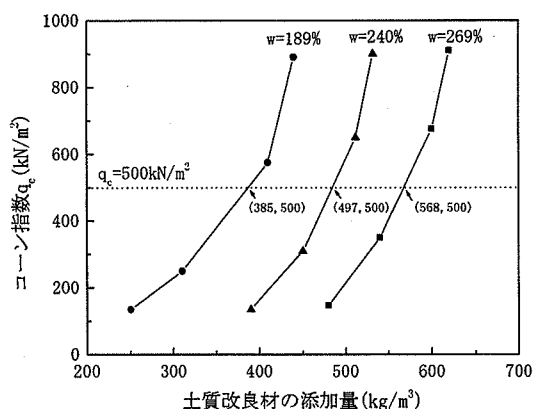


図-3. 室内配合試験例

本改良工事は、写真-2に示すように改良材サイロ、短軸のスクリーミキサ、搬送ベルトコンベヤからなる構成とし改良を実施した。図-4は、改良実績を整理したもので、利用先において標準的に必要とされる改良土のコーン指数 $q_c=500\text{kN/m}^2$ を得るときの浚渫土の含水比と添加量の関係を表している。改良土の品質管理は、このグラフを用いることで含水比の変動に対し、迅速に改良装置の添加量を設定できるものとした。



写真-2. 改良状況

サイロ（中央）、改良装置（中央下）、改良土（手前）

4-2. 有効利用事例

浚渫土を改良した後に、湖岸周辺の様々な用途へ有効利用した結果を示す。湖岸近くにレクリエーション施設の造成工事があり、植生に問題のない改良土が必要とされていたことから写真-3に示すように芝生植生への有効利用を図っている。写真-4, 5は、諏訪湖周辺は軟弱な地盤の為に沈下が大い問題を抱えており、改良土を校庭や田畑の嵩上げに有効利用したのもである。写真-6は、諏訪湖の水辺整備として周景湖岸造成盛土等へ有効利用をしたものである。



写真-3. レクリエーション施設への有効利用
(芝生の植生)



写真-4. 校庭嵩上げへの有効利用



写真-5. 田畑嵩上げへの有効利用 (左の田)



写真6. 周景湖岸造成盛土への有効利用
(歩行者道, 芝, 砂利の下層に改良土を用いている)

4-3. 栄養塩類の溶出抑制

写真-6に示したように、湖岸へ改良土を利用する際には、浚渫改良土からの栄養塩類の溶出を抑制することが必要であり、以下に示す試験方法を実施し、溶出特性について検証した。

(1) 栄養塩類の溶出試験方法

溶出試験には、(社)底質浄化協会「底質の調査・試験マニュアル」平成15年3月の栄養塩類溶出試験(窒素、リン)に準拠したカラム溶出試験方法を採用した。この試験は、湖沼における底泥に含有された栄養塩が液中に溶出する過程を実際の水域環境に近い条件下で再現する方法である。溶出試験装置は図-5に示す構成とし、円筒形の直径14cmに浚渫土は静かに投入し、改良土は締固めエネルギーA法にて厚さ30cmで作成した。改良土と覆砂の効果も合わせて検討した。

改良土は周景湖岸造成盛土へ有効利用することから、カラム試験条件は嫌気条件とし、直上水の高さは50cmとし、ポンプにて循環、恒温室20℃で実施した。実験ケースを以下に示す。

【実験ケース】

- ① 浚渫土
- ② 改良土 $q_c=500\text{kN/m}^2$
- ③ 改良土 $q_c=500\text{kN/m}^2$ +覆砂厚さ15cm
- ④ 改良土 $q_c=500\text{kN/m}^2$ +覆砂厚さ30cm

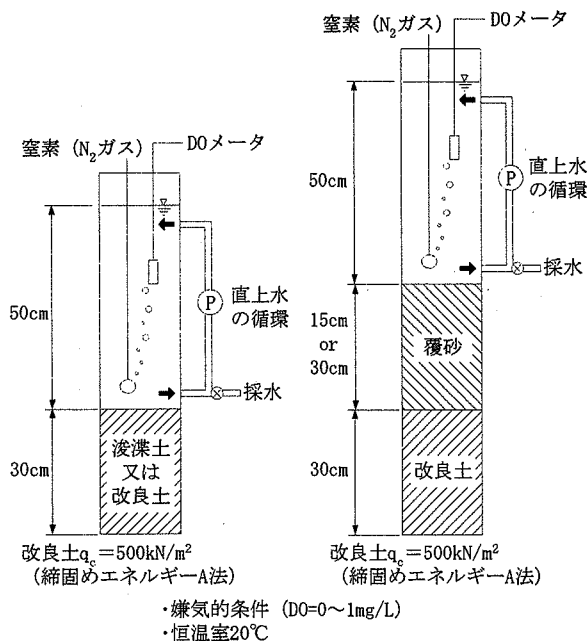


図-5. カラム試験装置

(2) 栄養塩類の溶出量

カラム試験の結果、全窒素（以下TNとする）の溶出量を図-6に、全リン（以下TPとする）の溶出量を図-7に示す。図-6より、浚渫土に比較し改良土のTN溶出量は小さく、顕著な違いが見られた。また覆砂による抑制効果も見られ、より効果的に溶出量を低減できている。図-7のTP溶出量の結果は、40日経過後を見ると浚渫土よりも改良土の方が、さらに覆砂を行うことにより溶出量が小さくなっている。しかし、溶出速度（傾き）の差は僅かである。

(3) 溶出速度

水域への水質汚濁物質の溶出速度を低減すること、すなわち長期的にゆっくりと溶出させることで富栄養化の防止に寄与できるものと考え、溶出速度は、底質の表面から1日当り、単位面積当り、何mgの溶出物質が出てくるかを表す指数 ($\text{mg/m}^2/\text{d}$) で表され、溶出量曲線の勾配である。

浚渫土およびその改良土からの溶出速度を過去の現地測定値と比較し、図-8, 9に示す。図-8は、浚渫土、改良土とその上部に覆砂を施したもののTN溶出速度の比較を示している。浚渫土のみの溶出速度は、諏訪湖にて福原他ら（1981年）が測定した結果の範囲の $142\text{mg/m}^2/\text{day}$ である。これに対し、改良土の締固め強度を $q_c=400\text{kN/m}^2$ （第3種建設処理土の q_c ）とした場合では、現地で測定された溶出速度の下限值45以下の $32\text{mg/m}^2/\text{day}$ に低減される結果を得た。TPは図-9に示すように、浚渫土 $15\text{mg/m}^2/\text{day}$ に対し、現地測定の下限値の $6\text{mg/m}^2/\text{day}$ 程度に低減している。覆砂の効果は、TNでは顕著に見られるが、本試験結果でのTPは僅かである。

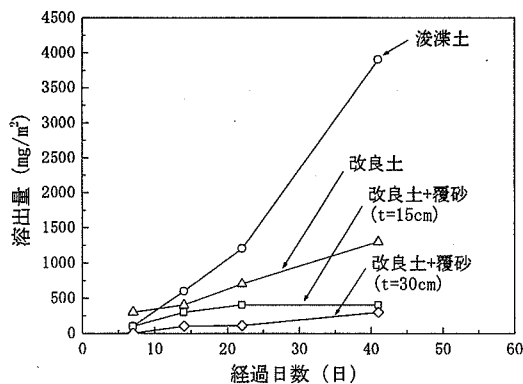


図-6. 全窒素の溶出量結果（諏訪湖）

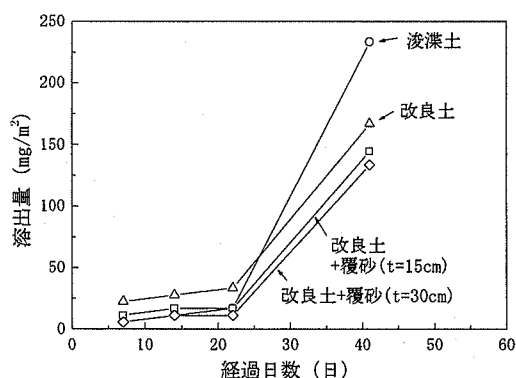


図-7. 全リンの溶出量結果（諏訪湖）

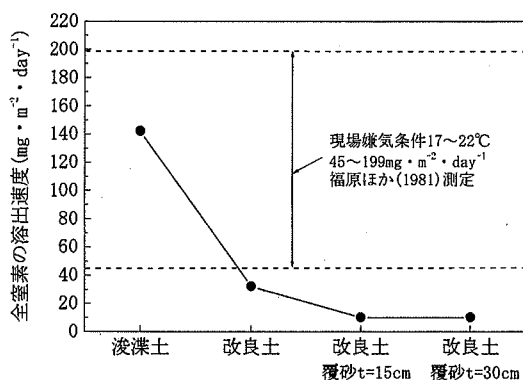


図-8. 全窒素の溶出速度（諏訪湖）

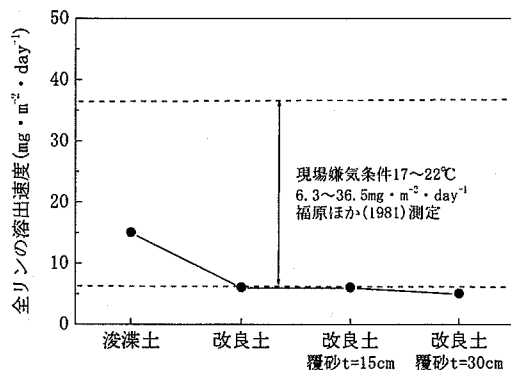


図-9. 全リンの溶出速度（諏訪湖）

5. 琵琶湖内湖底泥の有効利用

近年、琵琶湖周辺は日本でも有数のヨシ群落の生育地であるが、高度成長期による湖岸の建設などの結果、ヨシ群落が減少している報告がある。ヨシ群落の特徴は、高い増殖速度と共に窒素、リン除去機能を持ち合わせることで、鳥類、魚類、水生動物等の生息地、湖岸の侵食防止や自然景観の保全の観点も有している。したがって、減少するヨシ群落の再生は水質環境改善の重要な施策として調査研究が行われている。ここでは、栄養塩類を含む底泥を、ヨシ群落の再生基盤として有効利用することを考えた。

5-1. 栄養塩類の溶出抑制

内湖の底泥を改良し、ヨシ植生基盤として水域へ利用した場合の栄養塩類の溶出特性を把握するために、4-3節と同様にカラム溶出試験を実施した。

(1) 栄養塩類の溶出試験方法

ヨシ群落の育成基盤とするための地盤硬さは、既往の知見から図-10に示すような $q_c=200\text{kN/m}^2$ 以下～ 800kN/m^2 以上を生育範囲と推定されることから、この範囲の改良土を作成し、カラム溶出試験を実施した。ヨシ群落の育成する湖岸は、水深が浅いことからここでの試験条件は好気状態とした。以下に実験ケースを示す。

【実験ケース】

- ① 底泥 , ② 改良土 $q_c=300\text{kN/m}^2$
- ③ 改良土 $q_c=500\text{kN/m}^2$, ④ 改良土 $q_c=800\text{kN/m}^2$

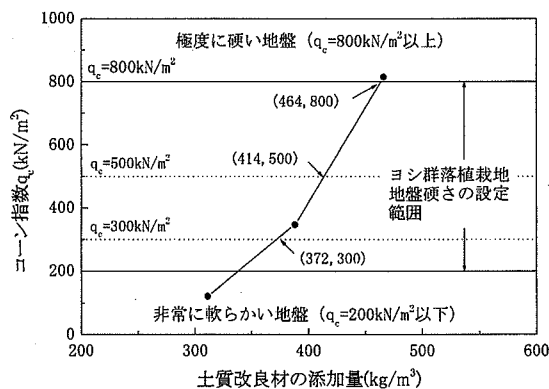


図-10. ヨシ植生基盤のための地盤硬さの設定

(2) 栄養塩類の溶出量

琵琶湖内湖の底泥、およびその改良土からの栄養塩の溶出量の結果を図-11, 12に示す。図より、TN溶出量は浚渫土よりも改良土で小さく、 q_c が大きいく程、すなわち締め固まった地盤ほど単位面積当りの溶出量が小さくなる顕著な違いが現れた。TP溶出量は、南湖全体の試験値よりも低く、底泥と改良土は同様な傾向を示している。

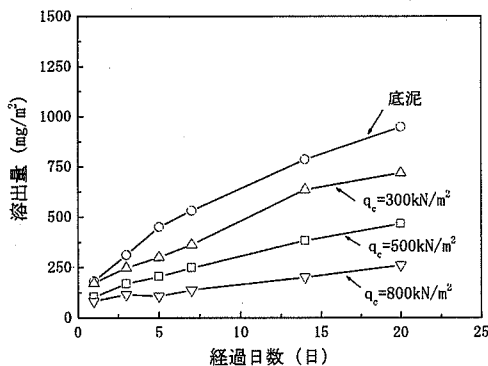


図-11. 全窒素の溶出量 (琵琶湖内湖)

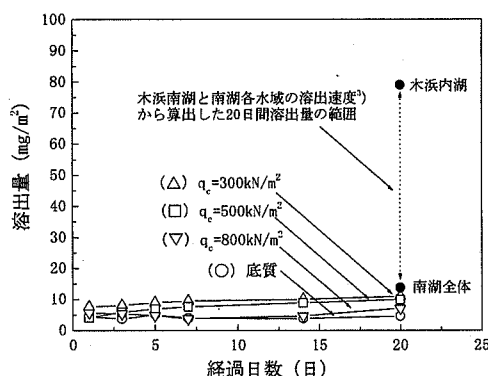


図-12. 全リンの溶出量 (琵琶湖内湖)

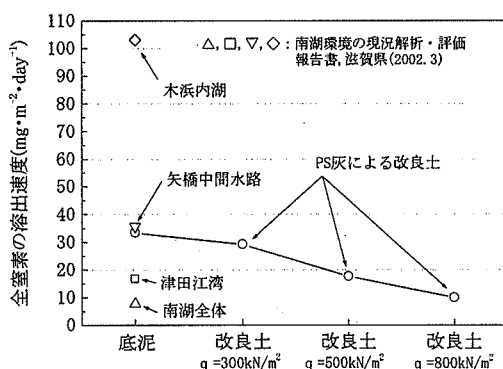


図-13. 全窒素の溶出速度 (琵琶湖内湖)

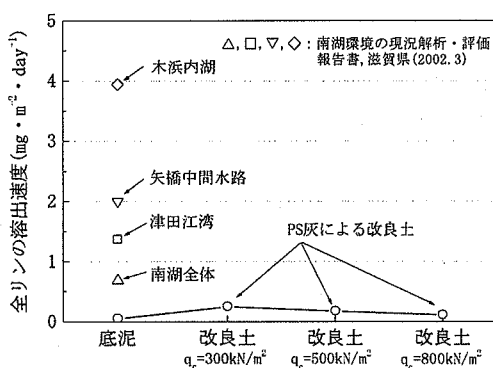


図-14. 全リンの溶出速度 (琵琶湖内湖)

(3) 溶出速度

底泥からのTN溶出速度は、図-13に示すように、南湖全体の測定値7.70 mg/m²/dayよりも大きい33 mg/m²/dayである。改良土の締固め強度 $q_c=300, 500, 800\text{kN/m}^2$ における溶出速度は、 q_c の増加に対しほぼ一次的な減少傾向が見られている。TP溶出速度は図-14に示すように、底泥において0.25 mg/m²/dayと琵琶湖の測定事例0.6～3.94 mg/m²/dayよりも小さく、改良土も同様に小さい溶出速度になっている。

5-2. 溶出抑制効果について

PS灰改良材による改良土から栄養塩の溶出速度が低減した結果について考察を加える。底泥からの栄養塩の溶出に関与する要因は、改良土中における有機物の分解と無機物の収着や化合物の形成が挙げられる。また、間隙水と直上水の間での窒素、リンの拡散移動がある。

(1) リンの溶出抑制

湖沼の研究によるリン溶出のメカニズムでは、リン酸は方解石、アルミニウム酸化物、酸化鉄への直接的な収着や、リン酸カルシウムのような不溶性の化合物を形成することが知られている。PS灰改良材中の化合物の形態と土壌の関係は複雑であるが、リンの溶出抑制には改良材の成分（石灰分や微量な鉄分等）とリンが収着、結合するため溶出抑制することが考えられる。

(2) 窒素の溶出抑制

底泥からの窒素の溶出は、生物学的な有機物の分解によるため、化学的な解決は困難と思われる。しかし、土中の窒素の拡散による移動は、本研究結果からPS灰改良材による改良土の締め固め強度（密度増加）の調整により溶出速度を低減できたと考える。

6. まとめ

栄養塩類の蓄積する湖沼等において水質浄化やアオコ等の発生による悪臭防止のために底泥を浚渫するが、その浚渫土は非常に高含水であり、栄養塩類も多く含んでいる。これを化学的な固化材により改良した場合は臭気が発生し、湖岸もしくは周辺に有効利用するには、受け入れ先や利用用途が限定されてしまう。本PS灰改良材のように、瞬時に物理的な吸水作用による改良工法は、これまで困難であった高含水、栄養塩類を含む底泥に対し環境に配慮した改良が行えるため、今後、湖沼や河川等の水域における水質浄化対策に大きく貢献できると考える。

参考文献

- 1) 西條, 三田: 新編湖沼調査法, 講談社サイエンスフィク, p114
- 2) 社団法人底質浄化協会「底質の調査・試験マニュアル」
- 3) 南湖環境の現況解析・評価報告書, 平成4年3月滋賀県

(2006. 4. 6受付)