

# RI 密度検層による諏訪湖の底質環境の評価

梅崎健夫<sup>1</sup>, 河村 隆<sup>1</sup>, 吉村 貢<sup>2</sup>

<sup>1</sup>信州大学工学部, <sup>2</sup>ソイルアンドロックエンジニアリング(株)

## Evaluation of Sediment Environments in Lake Suwa using RI-density Log

T. Umezaki<sup>1</sup>, T. Kawamura<sup>1</sup> & M. Yoshimura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Shinshu University & <sup>2</sup>Soil and Rock Engineering Co., Ltd.

キーワード：諏訪湖, 底質環境, ラジオアイソトープ (RI), 現地調査, 密度検層

Keywords: Lake Suwa, Sediment environment, Radio isotope, Site investigation, Density log

### 1. はじめに

諏訪湖などの閉鎖性水域に堆積する底質には、環境に影響を及ぼす栄養塩類や有機物などが含まれることが多い。そのため水域の富栄養化が生じ、アオコの発生や悪臭などの環境問題を引起こしている。諏訪湖では、その対策の一つとして、底質を除去するために浚渫し、囲繞堤に埋立処分することが実施されている。底質の堆積量は場所ごとに異なっており、理論的に推定することも困難である。したがって、より効率的な浚渫・埋立を実施するためには、底質の堆積状況を的確に把握するための現地調査が必要である。

本文では、図-1 に示すように、ラジオアイソトープ (RI) から放出されるγ線を利用した RI 密度検層を用いた新たな調査手法を提案する。本手法は、広範囲の調査を簡便に実施することが可能であり、場所ごとに堆積環境の異なる底質調査に適している。まず、室内試験<sup>1), 2)</sup>において RI 密度検層の測定精度を検証する。そして、諏訪湖で実施した船上調査の結果について考察する。

### 2. 沈降堆積・自重圧密試験における RI 密度検層の精度検定<sup>1), 2)</sup>

山口県宇部港から採取した浚渫土(土粒子密度 $\rho_s=2.662\text{g/cm}^3$ , 液性限界  $w_L=66.3\%$ , 塑性指数  $I_P=33.9$ )を写真-1 に示すように分級させて試料とした。2mmふるいを通させた浚渫土に海水(海水密度 $\rho_w=1.025\text{g/cm}^3$ )を加えて初期含水比  $w_0=800\%$  ( $\approx 12.1w_L$ )で十分に攪拌した。写真に示すように、円筒容器に投入すると、沈降し分級が生じる。

写真-2 および図-2 に示すアクリル製円筒容器(内径 20cm, 外径 21cm) 内に、 $w_0=1006.5\%$ の試料を投

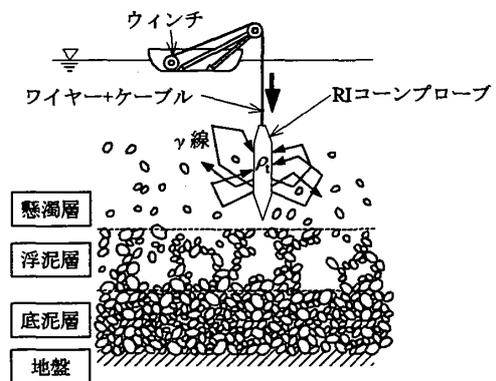


図-1 RI 密度検層を用いた底質調査手法

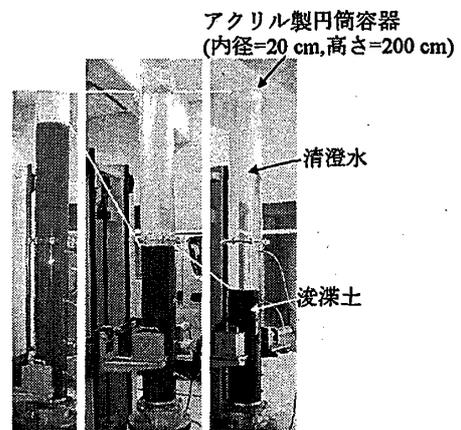


写真-1 沈降堆積・自重圧密試験

入し、沈降堆積・自重圧密試験を実施した。円筒容器を挟むように配置した線源部と検出部からなる透過型 RI センサーの下方向走査(1mm/s)により密度分布を測定した。透過型 RI センサーは、セシウム 137 (<sup>137</sup>Cs, 半減期 30 年)の線源とヨウ化ナトリウム (NaI) シンチレーション検出器で構成される。RI の密封線源は低レベルであり、その取扱いにおいて放射線防止法等の法的規制を受けない。上部板と下部板は、密度分布を精度良く測定するために、試料の密度と同

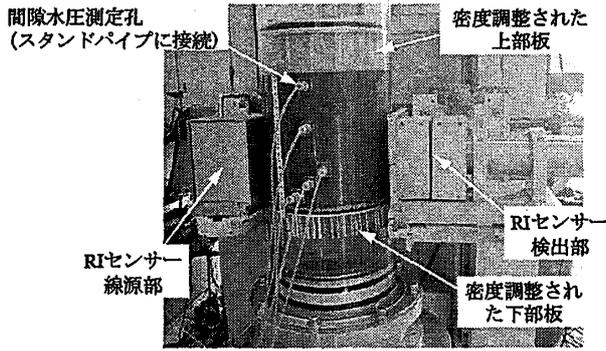


写真-2 沈降堆積・自重圧密試験における RI 密度検層

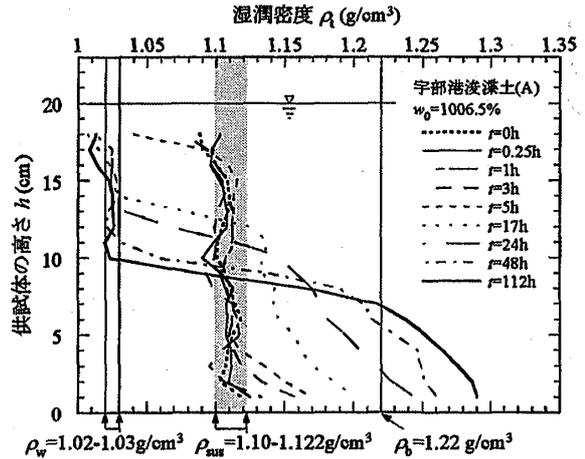


図-3 RI 密度検層による湿潤密度分布の一例

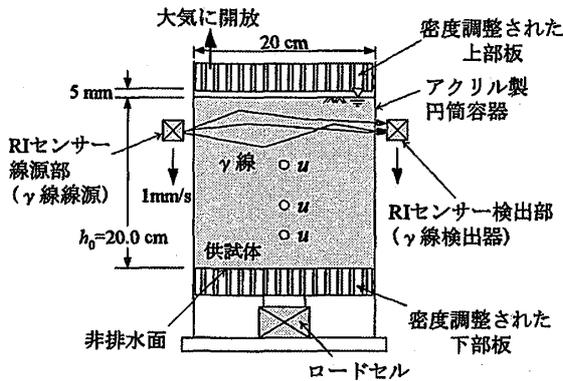


図-2 RI センサーを用いた沈降堆積・自重圧密試験の概要

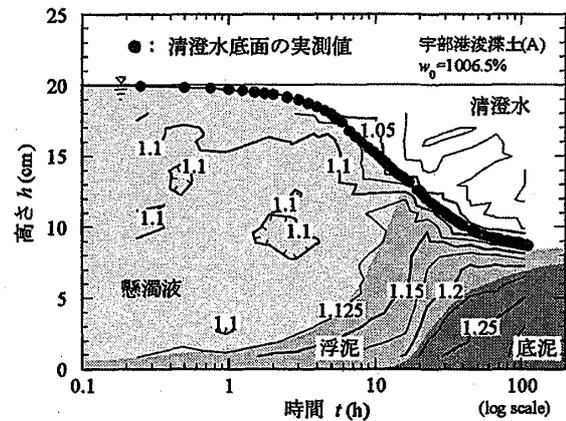


図-4 沈降堆積・自重圧密試験における等密度線と界面境界線の一例

程度に調整している。また、間隙水圧  $u$  を所定の高さにおいて測定した。試験装置の詳細は文献 1), 2) を参照されたい。

図-3 に RI 密度検層から得られた供試体の高さ  $h$  方向の湿潤密度  $\rho$  分布の経時変化の一例を示す。図中の  $\rho_w$  および  $\rho_{sus}$  は、密度分布の形状から決定した清澄水(海水)および懸濁液の密度である。図中には、清澄水と底泥の境界における密度  $\rho_0 = 1.22 \text{ g/cm}^3$  も示した。この値は、別途実施した沈降試験 ( $w_0 = 1010.4\%$ ,  $h_0 = 27.8 \text{ cm}$ ) において実測したものであり、自重圧密が無視できる条件において、沈降堆積が収束したときの値である。経過時間  $t = 112 \text{ h}$  における密度分布は  $\rho_0$  付近において屈曲しており、RI 密度検層によって求めた密度分布の屈曲点は、清澄水と底泥の境界とほぼ一致している。

測定したすべての  $\rho$  分布から求めた等密度線と界面沈降曲線の一例を図-4 に示す。  $\rho_w$  と  $\rho_{sus}$  の値をしきい値とすることにより、清澄水、懸濁液、浮泥および底泥の状態を明瞭に区分することができ、清澄水底面の実測値はこの区分と良く一致している。

### 3. 諏訪湖の底質環境調査

2005 年 11 月 28 日に長野県諏訪湖において小型船上から、サンプリング (TTS)、三成分コーン貫入試験 (CPT) および RI 密度検層 (RI-DL) による底質環境調査 (図-5) を実施した<sup>3)</sup>。小型船上に仮設支柱を組んだ簡単な設備である (図-5(a))。シンウォールチューブには、重りがボルトとナットで設置されている (図-5(b))。TTS では、シンウォールチューブを自由落下に近い速度で落下させ (図-5(c)) 湖底に貫入し、ウィンチによって引揚げることにより試料を採取した (図-5(d))。シンウォールチューブには、ピストンなどの治具は何も設置していない。CPT および RI-DL では、RI コーンプローブ<sup>4)</sup> (図-5(e), (f)) をワイヤーで吊るし、10cm/s 程度の速度で落下させ湖底に貫入した (図-5(c))。三成分コーンおよび RI センサー一部の直径は、 $\phi = 3.56 \text{ cm}$  および  $\phi = 4.86 \text{ cm}$  である。図-6 には、地点ごとの調査方法を示した。

試料採取後、図-7 に示すように、シンウォールチ

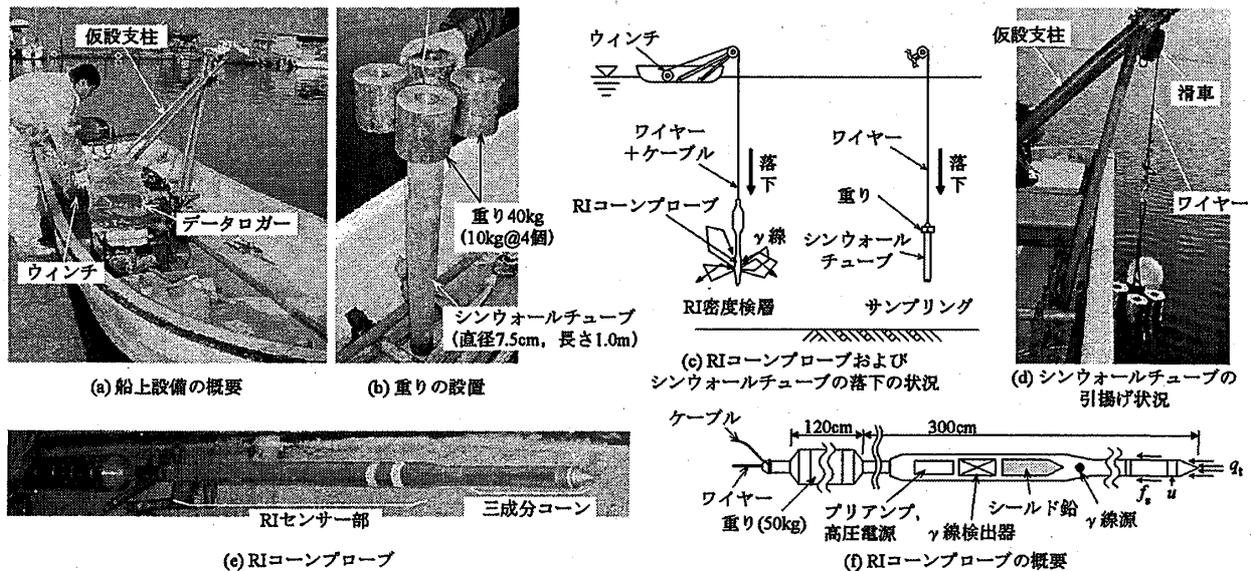
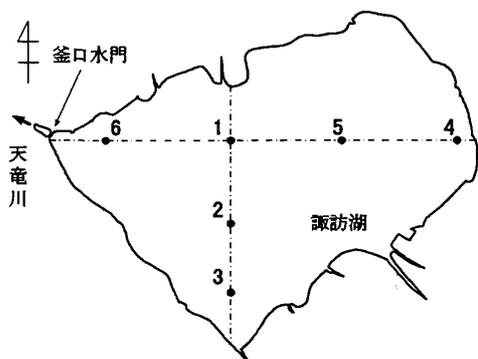


図-5 諏訪湖における底質環境調査の概要



No.	北緯, 東経	調査方法	水深 $h_w$ ※
1	36° 03'09", 138° 04'42"	三成分コーン貫入試験, RI密度検層, サンプリグ	5.7m (5.7m)
2	36° 02'37", 138° 04'42"	三成分コーン貫入試験, RI密度検層	6.2m (6.3m)
3	36° 02'11", 138° 04'42"	三成分コーン貫入試験, RI密度検層	5.9m (6.0m)
4	36° 03'11", 138° 06'34"	三成分コーン貫入試験	(1.7m)
5	36° 03'09", 138° 06'00"	三成分コーン貫入試験, RI密度検層	5.4m (5.5m)
6	36° 03'09", 138° 02'50"	三成分コーン貫入試験, RI密度検層	(2.8m)

※三成分コーン貫入試験に基づく  
( ) 内は携帯型音響測深器 (周波数: 200kHz) に基づく

図-6 調査地点の概要

ューブを専用の小型ベーンせん断試験装置に設置・固定した後、試料を少しずつ押し出しながら、所定の採取深度において、 $w$ ,  $\rho_t$ , ベーンせん断強度  $\tau_v$  を測定した。  $\rho_t$  はカッターリング (内径  $\phi=24\text{mm}$ , 厚さ  $0.5\text{mm}$ ,  $h=16\text{mm}$ ) を試料に貫入することにより測定した。カッターリングの貫入や取出しが困難な液状部分に対しては、試料をフィルムケース ( $\phi=29\text{mm}$ ,  $h=51\text{mm}$ ) に気泡が入らないように注意深く詰込んで測定した。本装置は、採取した試料を取出さずに、ベーンせん断試験を実施することができる。小型ベーンせん断試験は、ASTM D 2573-01<sup>5)</sup>における原位ベーンせん断試験基準に準じた。試料を所定の深度まで押し出し、表面を平らに成形する。小型のベーン (直径  $d=10\text{mm}$ ,  $h=20\text{mm}$ ) を試料に  $2h=40\text{mm}$  貫入させる。回転速度は  $80^\circ/\text{min}$  である。ベーンせん断強度は、ロッドのみのトルクを補正している。

写真-3 および図-8(a), (b)に深度  $z$  ごとの試料の状

態を示す。試料の上端面を湖底面とすると、湖底から深度  $z=53.5\text{cm}$  の試料が採取された。試料の色が、深度により異なっている。湖底面付近は茶色である。湖底から  $z=18.5\text{cm}$  以浅の部分では、黒色と黄土色の土が混在しており (写真-3(a), (b)および図-8(a)), アカムシ (写真-3(a), (d)) やそれが生息していたと考えられる穴を確認した。アカムシは4ヶ所においてそれぞれ1匹ずつ採取された (図-8(b))。土の色の違いはそれらの穴によって土中に酸素が供給され、土が酸化したためと考えられる。一方、 $z=18.5\text{cm}$  以深の部分では、土は一様に黒色であった (写真-3(c))。

図-8(c)~(f)に  $w$ ,  $\rho_t$ ,  $\rho_s$  および  $\tau_v$  の深度分布を示す。  $w$  および  $\rho_t$  は細かく変動している。各深度における  $w$  および  $\rho_t$  は、  $w$  が高い値を示す深度において  $\rho_t$  は低い値を示しており、互いに対応した値となっている。  $z=0\sim 45\text{cm}$  においては、  $\rho_t=1.05\sim 1.15\text{g}/\text{cm}^3$  である。写真-3に示すように、シンウォールチュー

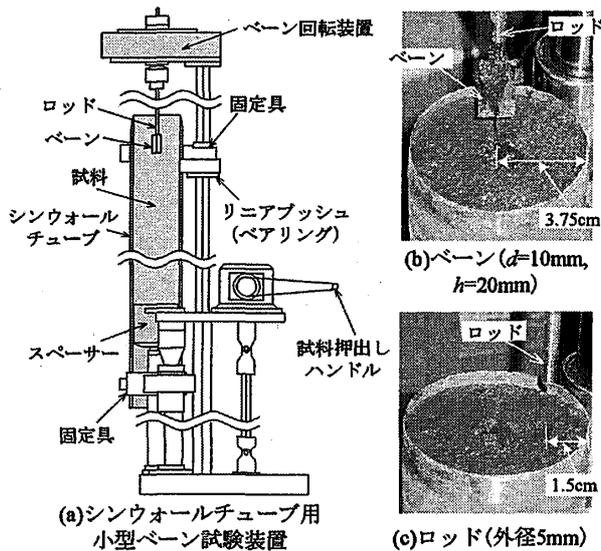


図-7 採取試料の押し出しおよび小型ベーンせん断試験装置の概要

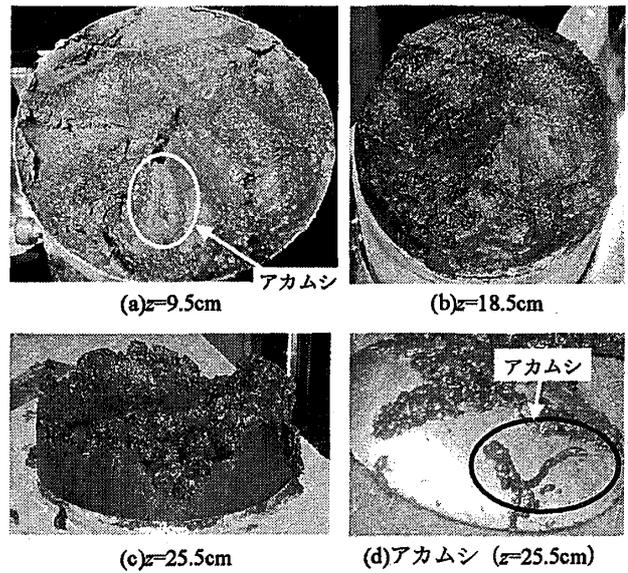


写真-3 採取した試料の状態

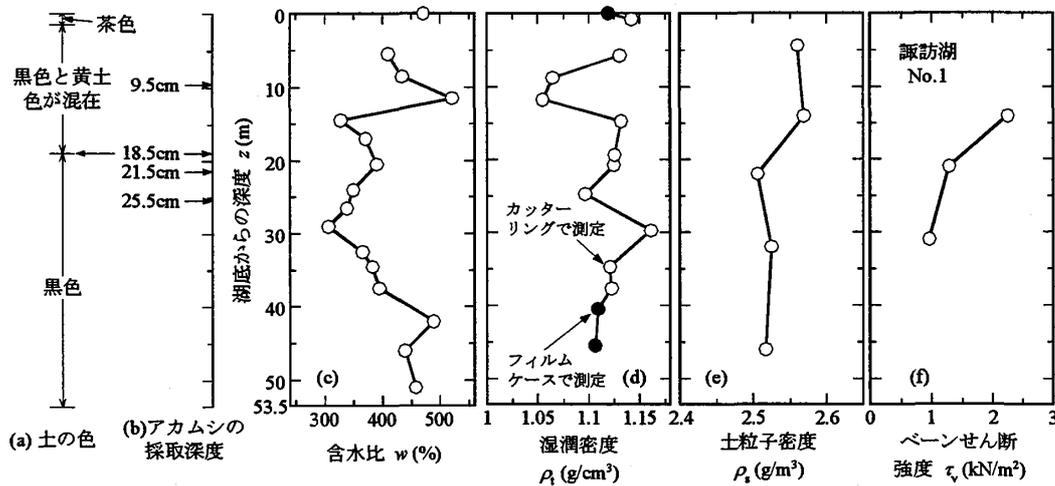


図-8 採取した試料に対する室内試験結果の一覧

ブから押し出した試料は自立することから、底泥の状態と考えられる。一方、沈降堆積・自重圧密試験の結果である図-3 や有明海の底質調査<sup>6)</sup>において測定されている浮泥は、 $\rho_s = 1.2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 程度であり、諏訪湖で採取された底泥の $\rho_s$ は非常に小さい。 $\rho_s$ の平均値は $\rho_s = 2.536 \text{ g/cm}^3$ であり、深さ方向に若干減少する傾向を示す。また、 $\tau_v$ の平均値も $\tau_v = 1.5 \text{ kN/m}^2$ であり非常に小さい。ただし、 $\tau_v$ の値は、 $\rho_s$ や $w_n$ の分布と反して深さ方向に減少しており、測定値はばらばらしている。

図-9 に測点 No.1 における三成分コーン貫入試験および RI 密度検層の結果の一覧を示す。ここで、 $q_t$ : 先端抵抗、 $f_s$ : 周面摩擦、 $u_0$ : 静水圧、 $BG$ : 自然  $\gamma$  線量、 $\rho_d$ : 乾燥密度、 $\rho_m$ : 含水量、 $w_n$ : 自然含水比である。 $u$  が  $u_0$  分布から変化する深度を湖底と定義

し、湖底までの深度を水深  $h_w$  とする。 $u$  の分布には貫入速度が影響していると考えられる。採取した試料の $\rho_s$ と RI 密度検層から算定した $\rho_s$ は、ほぼ一致している。このように、原位置において高い精度で $\rho_s$ を測定することができる。 $\rho_s$ の深度分布は、湖底と定義した深度よりも 30cm 程度上方から増加しており、この部分は浮泥の状態であると考えられる。浮泥と底泥の区分は厳密に定義されていないが、湖底面を浮泥と底泥の境界であると定義すると、この境界においては $\rho_s = 1.06 \text{ g/cm}^3$ である。このようにして、三成分コーン貫入試験および携帯型音響測深器(周波数: 200kHz)から求めた水深を比較して図-6 に示す。両者の差は、0~10cm 程度である。

底泥は有機物を含んでいる場合があり、 $\rho_s$  は  $1.7 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$  程度に大きく異なる場合がある。RI 密

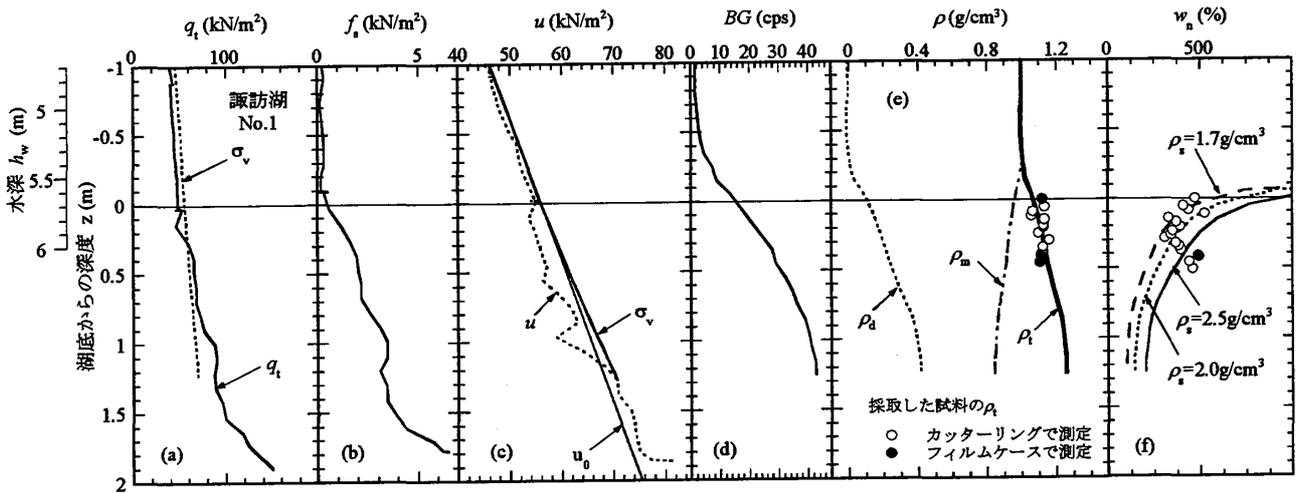


図-9 三成分コーン貫入試験およびRI密度検層の結果の一覧（諏訪湖 No.1）

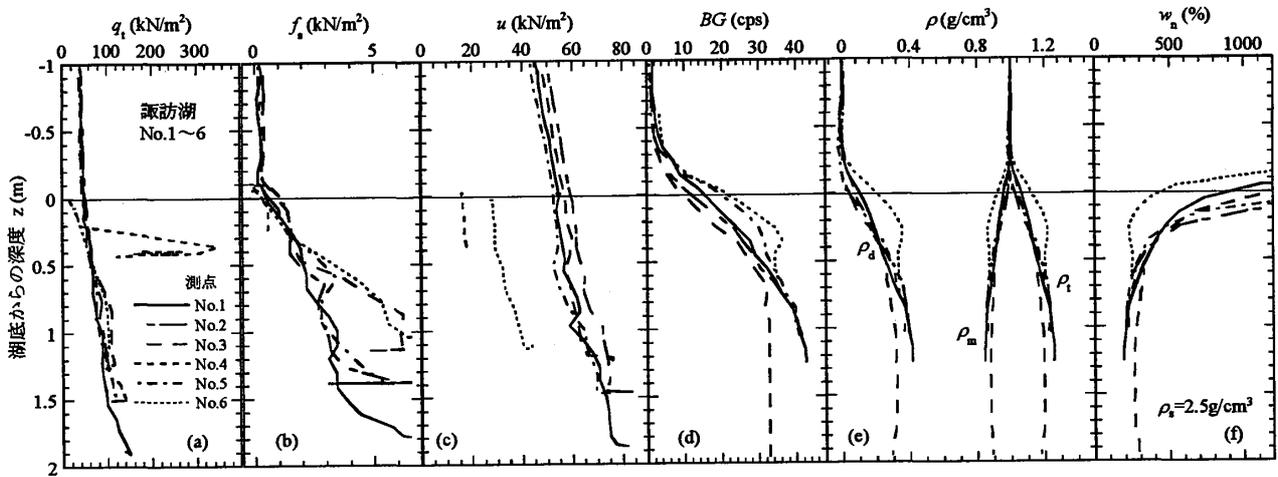


図-10 三成分コーン貫入試験およびRI密度検層の結果の一覧（諏訪湖 No.1～6）

度検層より求められる $\rho$ を用いて算定した $w_n$ は、飽和度 $S_r = 100\%$ を仮定した場合、 $\rho_s$ の値によって変化する。調査地点の $\rho_s$ は、図-8に示したように $\rho_s = 2.5\text{g/cm}^3$ 程度であり、この値を用いてRI密度検層より算定した $w_n$ は、 $z=50\text{cm}$ 付近においてほぼ一致しているが、それ以浅においては異なっている。さらに、 $w_n$ の算定法や $\rho_s$ の測定精度について検討する必要がある。

図-10に全測点における同様の結果の一覧を示す。いずれの $\rho$ 分布も、測点ごとに湖底より10～30cm程度上方から増加しており、この部分が浮泥であると考えられる。BGの値は土の種類によって異なることが知られており、各測点における底質の種類も異なっていると考えられる。釜口水門に近いNo.6のBGおよび $\rho$ の分布は、特に他の測点と大きく異なっている。RI密度検層により、広範囲の地点における詳細なデータが短時間で簡便に得られる。各測点のデータの比較により、浮泥や底泥の堆積深度の詳細な

定量評価が可能である。三成分コーン貫入試験から得られた $q_t$ の深度分布は、湖底面下20cm程度までほぼ同じ挙動を示し、その後増加する。最も水深が浅く湖岸に近いNo.4の $q_t$ は、急激に増加する。 $f_s$ の分布は、湖底面上10cm程度までの浮泥部分ではほぼゼロであり、その後ほぼ単調に増加する。湖岸に近いNo.3、6の $f_s$ は、他測点の分布とは異なる。

図-11に測点No.1～3、5および6における湖底付近の湿潤密度分布を拡大して示す。No.5を除く他の測点における湖水の部分の $\rho$ は、水の湿潤密度 $\rho_w = 1.0\text{g/cm}^3$ にほぼ一致しており、このことからRI密度検層の測定精度の高さが窺える。しかし、No.5においては、 $\rho_w = 1.0\text{g/cm}^3$ よりも小さい部分があり、No.5の $\rho$ 分布においては、この程度の測定誤差を考慮して考察する必要がある。

図-12に、浮泥および底泥の堆積状況を示す。この図は、図-11から求めたものであり、 $\rho_w = 1.0\text{g/cm}^3$ の深度から三成分コーン貫入試験より推定される湖

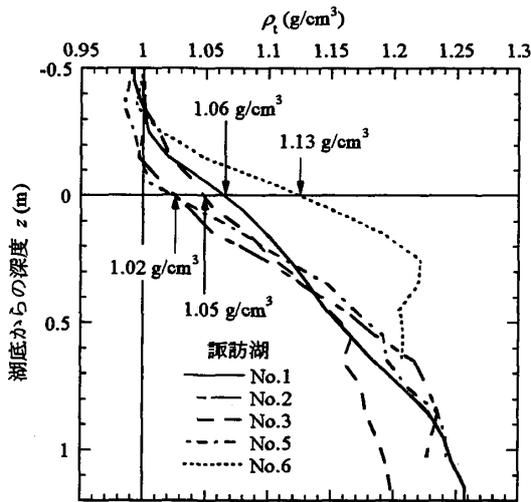


図-11 湿潤密度の分布 (諏訪湖 No.1~3, 5, 6)

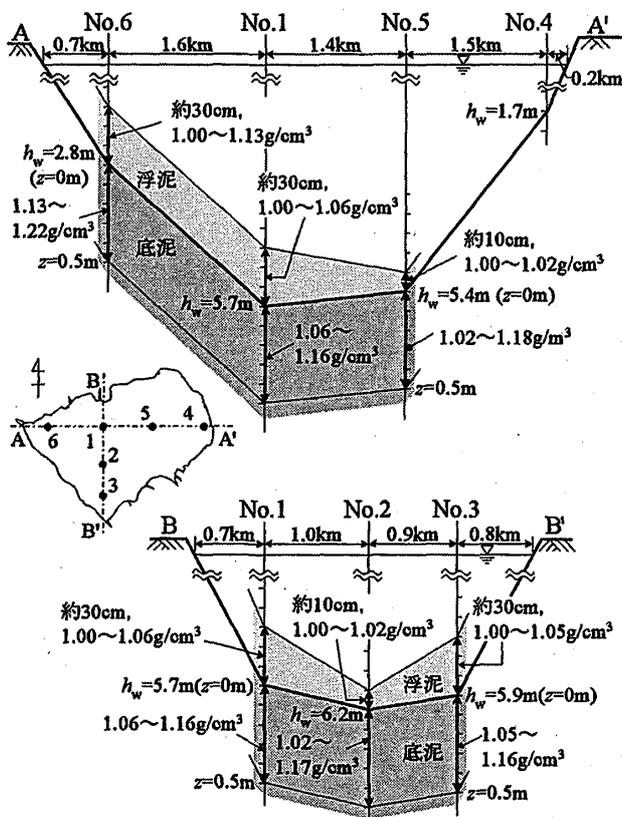


図-12 浮泥および底泥の堆積状況 (諏訪湖 No.1~3, 5, 6)

底 ( $z=0\text{m}$ ) までの部分を浮泥と定義した。浮泥の層厚は、測点 No.1, 3, 6 では 30cm 程度、No.2, 5 では 10cm 程度であり、比較的湖岸に近い部分では厚く、湖心に近い部分では薄い。浮泥の  $\rho$  は、 $\rho=1.0\sim 1.13\text{g/cm}^3$  である。一方、底泥のうち、湖底から深度  $z=0.5\text{m}$  までの  $\rho$  は、図中に示すように  $\rho=1.02\sim 1.22\text{g/cm}^3$  であり、場所ごとに異なる。RI 密度検層をさらに広範囲に実施することにより、諏訪湖全域における詳細な浮泥および底泥の堆積状況を把握する

ことができる。また、定期的を実施することにより、その変動を把握することもできると考える。

## 5. まとめ

RI 密度検層を用いた新しい底質調査手法を提案した。室内試験において RI 密度検層は十分な測定精度を有していることを示した。そして、諏訪湖において、RI 密度検層を用いた底質調査を実施し、本手法の有効性を示した。

諏訪湖においては、本調査の後に、音響測深器を用いた深浅測量により水深の調査も実施されている。音響測深器は、その周波数に対応する  $\rho$  の深度を水深として測定する。しかし、周波数と  $\rho$  の厳密な関係は明らかでない。音響測深器と RI 密度検層の結果を比較・検討することにより、原位置における周波数と  $\rho$  の定量的な関係を求めることができる。さらに、採取された試料のその他の土質試験や底質環境評価のための成分分析も実施している。これらの詳細な結果については、別の機会に報告する。

謝辞：諏訪湖の底質調査にあたり、長野県土木部河川課 三原文雄氏、金子哲也氏、長野県諏訪建設事務所 長澤 徹氏、および (株) モテキ 田中裕治氏のご協力を頂いた。付記して、感謝の意を表わします。

## 【参考文献】

- 1) 梅崎健夫, 河村 隆, 吉村 貢: RI密度検層による超軟弱浚渫粘土地盤の沈降堆積・圧密特性の評価, 環境科学年報—信州大学—, 第27号, pp.5-12, 2005.
- 2) Umezaki, T., Kawamura, T. and Yoshimura, M.: Evaluation of sedimentation and consolidation properties using RI-density log for dredging and reclamation, Proc. of IW-SHIGA2005, pp. 101-106, 2005.
- 3) 梅崎健夫, 河村 隆, 吉村 貢: RI密度検層による底質環境および埋立処分場の圧密特性の評価, 土と基礎, Vol.54, No.5, 2006 (投稿中).
- 4) Shibata, T., Mimura, M. and Shrivastava, A.K.: Use of RI-cone penetrometer in foundation engineering, Proc. of 13th ICSMFE, Vol.1, pp.147-150, 1994.
- 5) ASTM: D 2573-01. Standard Test Method for Field Vane Shear Test in cohesive Soil, American Society for Testing and Materials, 2001.
- 6) 今村 敬, 日野剛徳, 林重徳, 山西博幸, 黒木克己: 携行式超音波探査装置を用いた有明海海底泥の分布変化について, 第40回地盤工学会概要集, pp.101-102, 2005.