濤沸湖における湖口周辺砂州の 表面波探査を活用した堆積形成史の復元

Sedimentation History of the Sand Bars in the Entrance of Tofutsu Lake Evaluated by Means of MASW

渡部要一¹·佐々真志²·林 宏一³·小林耕一⁴

Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Koichi HAYASHI and Koichi KOBAYASHI

At the entrance of the Tofutsu Lake, which is one of the lagoons located along the Okhotsk Sea in Hokkaido, sand bars have been significantly developed. The objective of this study is to evaluate the sequential sedimentation history of the sand bars by means of MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) technology. We found out that the sedimentation stratigraphy under the sand bars were significantly different from muddy to sandy, even though the sand bars apparently consisted of the same sandy material. From the shear wave velocity structure obtained in this study, we successfully restored the sequential sedimentation process. Also, the sedimentation history was consistent with an old aerial photograph and memories of local inhabitants.

1. はじめに

北海道オホーツク海沿岸には,多くのラグーン(潟湖) が存在している.その中の一つ,網走市と小清水町との 境界部に位置する濤沸湖(図-1)では,湖口側から湖奥 に向かって堆積する砂州の発達が著しい.

湖口からすぐ下流にある河口付近において侵食防止を 目的として河道が直線護岸化されたことにより,台風等 による時化が満潮時と重なるとオホーツク海から海岸の 砂が湖に逆流しやすくなり,湖口に砂州が発達したので はないかとの指摘もある.しかしながら,詳しい原因は 未だに明らかにされてはいない.砂州の発達により湖口 が閉塞されてしまうと,漁船等の航行の障害となるばか りでなく,湖水位の上昇,塩分濃度の低下,魚道閉塞, 水質悪化などが生じ,湿地としてラムサール条約に登録 された濤沸湖の自然環境そのものが変化してしまうこと も危惧されている.

砂州発達原因の究明には水理学的なアプローチが不可 欠であるが、これとは別に、本研究では、海岸工学分野 における地球物理学的なアプローチとして表面波探査を 実施することにより、発達した砂州の堆積形成史の復元、 すなわち、今日の砂州の状況がどのような順序で形成さ れてきたかを解き明かすことを目的としている.

ここで用いた表面波探査手法は、多チャンネル型表面波 探査(MASW)と呼ばれるものであり、Parkら(1999)や

1	正会員	博(工)	(独)港湾空港技術研究所 地盤·構造部
2	正会員	博(工)	土質研究チーム リーダー (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
3		博(工)	土質研究チーム 主任研究官 応用地質(株) 技術本部 技術研究所
4			網走漁業協同組合総務部長

Hayashi · Suzuki (2004) により開発された. 筆者らは, これまでに多様な土質の干潟地盤においてMASWによる 探査を実施してきており,同手法が干潟土砂の堆積構造 の効率的把握にきわめて有効であるとの知見を得ている (渡部・佐々, 2006;渡部ら, 2007; Watabe · Sassa, 2008).

2. 調查内容

調査は大潮に当たる2008年7月3日(木)と4日(金) の2日間にわたって,砂州の干出時間帯に実施した.北 海道のオホーツク海沿岸では大潮時に1日あたり1回の 潮汐変動となるのが特徴である.調査期間中の周辺海域 における干満の潮位差は約1.4mであったが,湖口が狭い ために湖内の潮位変動はこれよりも小さくなる.

調査地点周辺の地図を図-1に示す。湖口から河口まで の距離はわずか400m程度である。鉄道や道路は湖を締 め切る海岸砂州上を通っている。MASWによる探査は、 図-2に示すように、河口砂州上に設定したA~Fの6測線 で実施した。湖口から湖奥に向かった砂州の縦断方向に





図-2 湖口砂州の干出範囲とMASW測線

設定した測線が主であるが、測線Bの一部は砂州を横断 する方向にも設定した.図-2上には、砂州上に繁茂した 草地の範囲、ならびに、ほぼ干潮時に捉えた砂州の位置 をGPSで捉えて描いてある.また、各測線に沿った標高 を水準測量で計測しており、後で示すせん断波速度構造 の断面図に反映させた.測線Cは砂州上の小規模な小高 い草地上に、測線Eは砂州ではなく草地(牧場)となっ ている湖畔の陸地上に設定した.

概念図(図-3)に示すように、24個のジオフォン(高 感度地震計)を1m間隔に取り付けたランドストリーマ ー(稲崎、1998)を測線に沿って牽引し、4m移動する毎 に、端部のジオフォンから約0.5m前方の地盤表面をカケ ヤで鉛直に叩いてレーリー波と呼ばれる表面波を発生さ せ、通過する波形をジオフォンで記録した.なお、前方 を叩くか後方を叩くかは作業上の都合であり、調査結果 に影響はしない.図-4(a)はカケヤで地盤表面を叩いて いる起振作業の状況、および図-4(b)はランドストリー マーの牽引作業と水準測量の状況である.

計測された波形のパターンからフーリエ解析により分 散曲線(周波数と位相速度の関係)を求め,逆解析によ



図-3 MASWの概念図



(a) カケヤによる起振(測線A)



(b) ランドストリーマーの牽引 (測線D)図-4 MASWの調査状況

りせん断波速度分布を推定して断面図として描くことが できる. 地盤の種類に応じた典型的な計測データ例やデ ータの整理方法については,多様な地盤に対してMASW を適用した渡部ら(2007)やWatabe・Sassa(2008)と 同様であるので,ここでは説明を省略することにする.

3. 調査結果

各測線で得られたせん断波速度構造の断面図を図-5に 示す.地盤表面の凹凸は,水準測量により得られた標高 データに対応させて描いたものである.せん断剛性G₀は



図-5 各測線に沿ってMASWで評価したせん断波速度構造

せん断波速度 v_s の二乗に比例する,すなわち,単位体積 重量 $\rho_t \varepsilon$ 用いて $G_0 = \rho_t \times v_s^2 \varepsilon$ 表されるので,せん断波速 度構造は本質的に地盤の硬軟の分布を表している.なお, 測線Dの165~185m区間の結果が欠損しているが,これ は図-2に示した砂州の干出範囲や図-4 (b)に示した現地 状況からもわかるように,当該区間では砂州が干出せず, かつ,水深・水流があるためにMASWを実施できなかっ たためである.

測線Dの0~130mは、湖畔の陸地上に設定した測線E よりもやや硬めではあるが、よく似たせん断波速度の深 度分布となっている.測線Dのこの範囲では、内部のせ ん断波速度が200~250m/sとなっており、ともにやや硬 い密詰め状態の砂層であると考えられる.このことは、 これらの地域が海岸砂州地形の一部であったこと,すな わち,測線Dの0~130mの部分は,現在では湖口に堆積 した砂州の一部となって湖畔の陸地から離れているが, かつては,海岸砂州地形の一部として陸続きであったこ とを示唆している.

一方,測線Aの125~175m付近,測線Bの100m付近 および200m付近,測線Dの150~225m,測線Fの20~ 90mに見られるように,表層から深部まで軟らかいとこ ろは古くからの海岸砂州ではなく,澪筋の痕跡であると 考えられる.測線A,D,Fで捉えられた澪筋跡は深部まで 100m/sに満たないほどに軟らかいのに対し,測線Bでは そこまで軟らかい部分はなく,最も軟らかい部分でも 150m/s程度であることから,前者は軟弱な泥土で上流か



図-6 深度0.5mのせん断波速度分布

らの堆積物,後者は緩詰め状態の砂あるいはシルト混じ り砂で海岸から遡上した堆積物であると推察される.

測線Aの0~175mや測線Fの50~75mにおける深度 2m付近や測線Aの175~300m,測線Bの0~50m, 125 ~175m, 250~275m,測線Dの175~225m,測線Fの 0mにおける深度4m付近は,それ以深よりも硬い層が現 れている.これらは泥土の上に堆積した砂層やカキ床の 存在を示唆している.実際,周辺で湖底を掘削した際に は,無数のカキ殻の存在が確認されている.

小高い草地上に設定した測線Cは、表面直下のせん断 波速度は約80m/sと小さいのに対し、表面付近では約 150m/sと大きくなっていることが特徴的である.これは、 表層の砂がよく締まった状態にあることを示唆する結果 である.

地盤表面から深度0.5mのせん断波速度分布を測線上に 色分けして図-6に示す.砂州の表層はいずれも軟らかく, せん断波速度は100m/s以下であると評価された.また, 砂州上の草の繁茂の影響は,せん断波速度分布には特に 現れていない.深度5.5mのせん断波速度分布を図-7に示 す.測線Aや測線Bの南側,測線Dの北側はやや硬く, 200m/s以上のせん断波速度が得られた.一方,測線Aの 中央付近,測線Dの南側,測線Fの南側は非常に軟らか く,50~80m/sの小さなせん断波速度が得られた.深部 が軟らかい部分は河川堆積物(泥土)であり,澪筋の痕 跡ではないかと推察される.

せん断波速度構造として捉えた湖口砂州は複雑な堆積 構造を有しており,a)海岸砂州として堆積した密な砂 層,b)湖口からの流入砂が急速に堆積した窓い砂層,c) 内陸からの軟弱な泥質層とに分類される.表層はいずれ も軟らかい砂質土であり,外見上は区別が付かない同様 の堆積砂州であるが,内部の構造を表面波探査によって 調べてみると,下部の堆積層は上述の3種類の地層のい ずれかが堆積していた.すなわち,外見上は同じ堆積物 からなる砂州でも内部は異なる堆積構造となっていた.



図-7 深度5.5mのせん断波速度分布

4. 湖口砂州の堆積形成過程

干出時に砂州上で実施したMASWによる表面波探査で 得られたせん断波速度構造から,濤沸湖の湖口砂州堆積 形成過程について,以下に示すように推察された.これ ら形成過程については,図-8に模式的にとりまとめた.

- a)湖口左岸側砂州(測線D)と湖畔の陸地上の測線(測線E)のせん断波速度構造はよく類似している.これらの部分は、オホーツク海沿岸における海岸砂州地形であり、波や海流の影響で時間をかけて密詰め状態に 堆積したために、せん断波速度が大きくやや硬い堆積 層が形成されたようである.これら測線Dと測線Eの 共通点から、測線Dの砂州の北側部分は、かつては湖 畔として陸続きであったと推察される.
- b) 北側と南側の2本の澪筋の痕跡は,深部まで軟弱で,かつ,移動した形跡が無く,長期にわたり安定して存在していたと考えられる.このことは,かつては河川から湖を経て海に向かう適度な流量が確保され,澪筋内への泥の堆積を防いでいたことを示唆している.また,MASWにより推定された澪筋の痕跡の位置は,河口付近の護岸工事が行われる以前の1948年に撮影された航空写真から読み取れる澪筋位置(図-9)とよく一致することによっても裏付けられる.
- c)オホーツク海への河口部分は,侵食防止のために直線 護岸化された(図-1参照)ため,高潮高波浪時に湖口 から逆流してくる流入土砂が増加したと考えられてい る.河口から遡上した砂は急拡部となる湖口付近で急 激に流速を失い,短時間に緩詰め状態で堆積したと考 えられる.実際,澪筋痕跡部分に堆積した砂は緩詰め 状態であり(測線Bの100m付近および200m付近),上 述の密な海岸砂州部分(測線Dの北側部分や測線E)と は明瞭に区別できた.
- d)かつての本流であった北側の澪筋に向かって,最初 に海岸からの砂が遡上し堆積した.その結果,その後,



図-8 MASWの調査結果から推察された濤沸湖の湖口付近の堆積形成史

次第に南側の澪筋が本流となり,こちらにも砂が遡上 して堆積した.

- e)湖口砂州の形成による澪筋の閉塞により、澪筋内に 泥土が堆積するようになった.上流の流域開発により、 河川流量が減少したことも泥土の堆積を促進した遠因 と考えられる.
- f) 現在の本流となっている西側の澪筋から湖奥に向かっ て砂が遡上して砂州が成長している.その結果,測線F のように澪筋や深い部分に堆積した泥土の上にも砂が 堆積して砂州が発達する状況になっている.

以上のように、濤沸湖の湖口付近では、外見上は湖口 から逆流入する砂の堆積により砂州が発達してきただけ に見えるが、実際は、上流から供給される泥土を中心と した堆積物と、湖口から遡上してくる海岸の砂を中心と した堆積物とが、流況の変化に応じてせめぎ合って形成 されてきたことが、本調査の結果から明らかになった. なお、MASWの結果から推察されたこれらの記述は、古 い航空写真の記録(図-9)や地元の方の証言とも整合し たものであった.

5.まとめ

本研究では,外観上は同質材料からなる濤沸湖の湖口 砂州について,MASWによる表面波探査を実施した結果, 砂州を形成する堆積土砂の内部構造が著しく異なってい ることを明らかにした.調査結果として得られたせん断 波速度構造から,湖口砂州の堆積形成史をある程度復元 することができた.復元結果は,航空写真の記録や地元 関係者の証言とも整合するものであった.

謝辞:現地調査の実施に当たっては,網走漁業協同組合 北浜部会に多大なるご協力をいただいた.ここに記し感



図-9 航空写真(1948年)で確認される澪筋と砂州

謝の意を表す.本研究は科学研究費補助金(基盤研究 (B)課題番号18360232)を受けて実施した.

参考文献

- 稲崎富士(1998):「ランドストリーマー」を用いた都市域 での高分解能S波反射法探査,物理探査学会第98回学術講 演会論文集, pp. 114-117.
- 渡部要一・佐々真志(2006):干潟堆積構造の地球物理学的 評価と形成要因 – 砂質・泥質・砂泥二層干潟 – ,海岸工学 論文集,第53巻, pp. 1236-1240.
- 渡部要一・佐々真志・河野健二(2007):岸沖・沿岸両方向 に発達した干潟多段バー・トラフの堆積構造とその形成 要因,海岸工学論文集,第54巻, pp. 1166-1170.
- Hayashi, K. and Suzuki, H. (2004) : CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, Explor. Geophys. Vol. 35, pp. 7-13.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. (1999) : Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808.
- Watabe, Y. and Sassa, S. (2008) : Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation, Marine Geology, Vol. 252, pp. 79-88.