

— 報告 —

トランスポンダーを用いたドレッジの リアルタイムモニタリングにもとづく海洋底岩石採取

町田 嗣樹^{1,2*}, 松浦 由孝³, 阿部 なつ江⁴, 石井 輝秋⁵

ドレッジを用いた海底岩石の採取の際、ドレッジを目的の場所に確実に着底させることが重要である。しかし、これまでのドレッジオペレーションでは、ドレッジの位置（緯度・経度）を具体的に把握することが困難であった。我々は、海洋地球研究船「みらい」のMR08-06Leg-1b航海において、観測ワイヤーに小型トランスポンダーを取り付け、ドレッジ位置のリアルタイムモニタリングを試みた。船に搭載されている音響航法装置のモニター画面にトランスポンダーの位置を表示させることによって、事前の調査で岩石の露出が予想された測線に沿ってドレッジが曳航するように的確な操船を行うことができた。以上のシステムによって、安全かつ確実に岩石試料を採取することに成功した。さらに、その後の解析により、曳航時のドレッジの具体的な動き方も明らかになった。

キーワード：ドレッジ，トランスポンダー，海底岩石採取

2010年12月24日受領；2011年6月9日受理

- 1 東京大学海洋研究所 新世紀を拓く深海科学リーダーシッププログラム
- 2 早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科
- 3 株式会社マリン・ワーク・ジャパン
- 4 独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域
- 5 公益財団法人深田地質研究所

*代表執筆者：

町田 嗣樹
早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科
〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1
03-5286-3318
m-shikit@aoni.waseda.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Report —

Rock sampling from the ocean floor using transponder-based real-time monitoring of the dredge system

Shiki Machida^{1,2*}, Yutaka Matsuura³, Natsue Abe⁴, and Teruaki Ishii⁵

When using a dredge system for rock sampling from the ocean floor, it is important that the dredge system reach the desired location. However, using current systems it is difficult to know the exact position (latitude and longitude) of the dredge system. To better constrain the dredge position, we attached a small acoustic transponder to the observation wire, and attempted real-time monitoring of the dredge system's location during cruise MR08-06Leg-1b of the global ocean research vessel *Mirai* (R/V *Mirai*). Using the transponder's real-time location as displayed on the monitor screen of the acoustic navigation system on shipboard, we could precisely steer the vessel to direct the dredge along a path where rock exposures were expected by previous research. With this system we succeeded in collecting rock samples safely and reliably. Furthermore, subsequent analysis of information provided by the transponder allowed even more precise movement during towing of the dredge system.

Keywords: dredge, transponder, rock sampling from the ocean floor

Received 24 December 2010 ; Accepted 9 June 2011

- 1 Hadal Environmental Science/Education Program, Ocean Research Institute, the University of Tokyo
- 2 Department of Resources and Environmental Engineering, School of Creative Science and Engineering, Waseda University
- 3 Marine Works Japan LTD.
- 4 Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 5 Fukada Geological Institute

*Corresponding author:

Shiki Machida

Department of Resources and Environmental Engineering, School of Creative Science and Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

Tel. +81-3-5286-3318

m-shikit@aoni.waseda.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

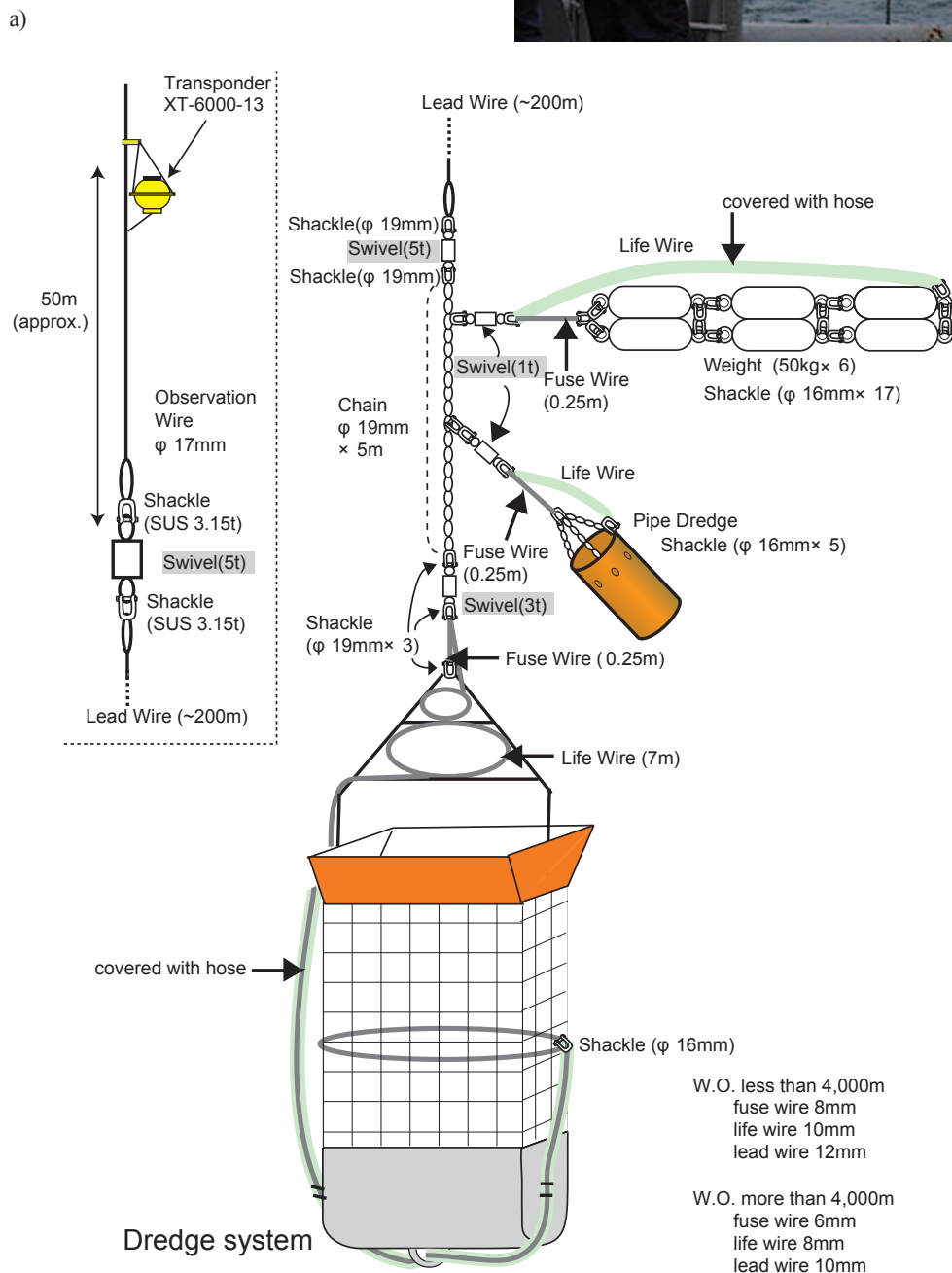
海底岩石試料の採取にあたりドレッジを用いる最大のメリットは、広域をカバーする系統的なサンプリングを簡便かつ低コストで行うことができることにある。したがって、ドレッジは、海洋研究の初期の段階から、有用な岩石採取法として多くの研究航海において採用されてきた。ドレッジを用いた岩石採取で重要な点は、ドレッジを(1) 目的の場所に、(2) 確実に着底させることである。(2) に関して従来の一般的なドレッジオペレーション(例えば、深海調査研究船「かいれい」、ハワイ大学研究船「モアナウエーブ」など)では、張力計の波形と張力を見てドレッジの着底と離底を判断する。着底時は、張力が顕著に低下する(観測ワイヤー繰出し分の自重のみになる)のが認められるため、明確に着底したことがわかる。一方、離底時の張力は、観測ワイヤーの自重およびドレッジシステムを合計した重量とほぼ等しく、離底前後の明確な張力の変化が認められないことが多い。したがって、離底に気づかずにオペレーションを続けてしまうことも少なくない。このような状況を回避するために、精密音響測深機(PDR: the Precision Depth Recorder)が搭載された研究船(例えば、学術研究船「白鳳丸」や「淡青丸」、ウッズホール海洋研究所研究船「アトランティスII」、スクリップス海洋研究所研究船「メルビル」など)では、観測ワイヤーに取り付けたピンガーと船上のPDRを利用することにより、ピンガーの海底からの高さ(ピンガー高度)をモニターし、ドレッジの着底や離底を把握することができる。これとは対照的に、前記(1)、すなわち、ドレッジが目的の場所に着底したか否か、さらには、ドレッジが実際にはどこに着底し、今現在どこにあるのかを把握することは、技術的に多くの限界があると言わざるを得ない。オペレーターがドレッジの緯度・経度を予測する際は、(ア)現在の船位と直下水深、ワイヤー長、ワイヤー傾角、および(イ)着底時の船位、直下水深、ワイヤー長、などが判断基準となる。オペレーションの経験を積みれば大まかなドレッジ位置の予測が可能となるが、不確実性は非常に高い。さらに、投入から着底後、離底に至るまでの一連のオペレーションを通じて、オペレーターがドレッジの正確な位置を常に把握し続けることは、多くの困難が伴い事実上不可能に近い。石塚(印刷中)の試算によると、ワイヤーを水深に比べて過剰に出さないオペレーションを行うことを前提として、船位とドレッジの位置の誤差は、水深の3分の1程度になることが示されている。一方、海底地震計や海底電位差磁力計を海底に設置する際は、地震計や磁力計に取り付けられたトランスポンダーと船に搭載された音響航法装置のトランスデューサーもしくは携帯型のトランスデューサー間で音響信号を送受信

し、通信距離と方位から着底点の緯度・経度・水深を決定するのが一般的である。海洋研究開発機構が所有する研究船では、深海調査研究船「かいれい」、深海潜水調査船支援母船「よこすか」、海洋調査船「かいよう」、海洋地球研究船「みらい」に音響航法装置が搭載されているが、これらの音響航法装置では、トランスポンダーの位置および水深をモニター画面に表示することができ、船橋や後部操舵室など船内随所で確認することができる。さらに、音響航法装置を用いた測位の精度は、例えば海洋地球研究船「みらい」でSuper Short Base Line (SSBL)方式を採用した場合、実測で水深約2500 mの海域で約20 mであるので、ほぼリアルタイムに正確な位置が画面表示されていると言ってよい。また、SSBL方式の場合は、Long Base Line (LBL)方式やShort Base Line (SBL)方式と異なり、船底に設置された受波器アレイを用いて測定しているため、トランスポンダーを海底に設置または回収するなどの作業が不要であるという利点がある。

このような状況を踏まえると、ドレッジを用いた岩石採取の際にも、可能な限りドレッジ本体に近い位置に安全にトランスポンダーを取り付けることができれば、ドレッジのおおよその位置をオペレーション時にリアルタイムで把握することが可能となる。尚、筆者の一人(石井)等は白鳳丸KH92-3航海でSSBLトランスポンダーをドレッジの上500 mの位置の観測ワイヤーに装着し、オペレーション時のドレッジのリアルタイムモニタリングを試み、その有用性を確認した(Ishii et al. 1993, Fig. 18-2-1A&B参照)。さらに、それ以前には、ピンガーとトランスポンダーを組み合わせたシステムを用いた事もある(Ishii et al. 1988)。しかし当時は、装置が高価であった事、扱いに人手が掛かる事等の理由から、その後はピンガーのみの仕様でドレッジを行う事としたと云う経緯がある。そこで我々は、海洋地球研究船「みらい」のMR08-06Leg-1b航海において、今後の本格導入を視野に入れたトランスポンダーによるドレッジのリアルタイムモニタリングを試み、その有用性を再確認し、導入に当たる問題点を認識することができた。本小論では、MR08-06Leg-1b航海のドレッジオペレーションにより明らかになった、投入から着底、曳航から、離底に至るまでの一連のドレッジの動き方の特徴を記載し、以上を踏まえたドレッジオペレーションの留意点をまとめ、トランスポンダーを用いたドレッジのリアルタイムモニタリングの有用性について述べる。

2. ドレッジおよびトランスポンダーのシステム構成

本航海で採用したドレッジシステム (Fig. 1a) は、海洋研究開発機構の定める標準仕様にほぼ準じている。この標準仕様は、東京大学海洋研究所が30年余りの歳月をかけて度重なる改良を加えて確立したORI-TI Type ドレッジ (石井, 2003, 図2) をベースとしている。ドレッジ本体の上に5 mのチェーンを取り付け、さらに、観測ワイヤー



b)

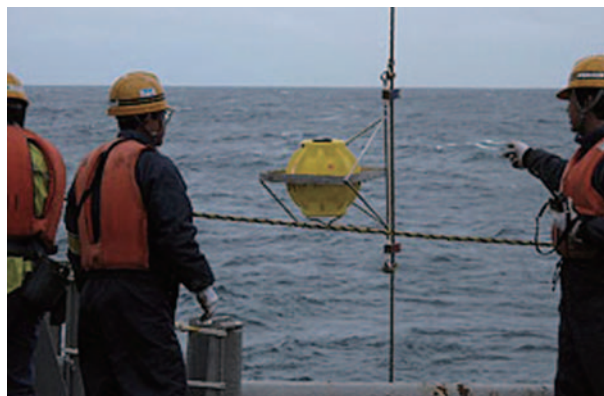


Fig. 1. a) Diagram of the dredge system, and b) photo of the transponder for monitoring.

図1. a) ドレッジの構成およびb) モニタリングに用いたトランスポンダー。

とチェーンの間に200 mのリードワイヤーを取り付けた。チェーン中部には約20 kg（取り付けチェーン含む）の小型パイプドレッジ、さらにチェーン上部に錘が取り付けられている。錘の重さは、ORI-TI TypeやJAMSTECの標準仕様では200 kgである。しかし、本航海で岩石採取を試みた海域は、常時うねりが高い荒れた海域であったため、着底時の張力変化がうねりによる張力の変化なのか、実際の着底による張力の変化なのかを確実に確認できるように300 kgの錘（50 kgの錘を6つ結びつけたもの）を採用した（Fig. 1a）。うねりが小さい穏やかな海況であれば、200 kgでも問題はない。また、ドレッジ本体、小型パイプドレッジ、および錘には、仕様書に準じた破断強度のヒューズワイヤーがそれぞれ1本ずつ取り付けられている（Fig. 1a）。ORI-TI Typeでは、ドレッジ本体にヒューズワイヤーを3本用いている。しかし、これまでのオペレーションにおいて、これら3本のヒューズワイヤーは期待するほどの効果を発揮しないことが多かった。そのため、ドレッジ本体のヒューズワイヤーも必要最小限の数に留めることとした。一方、命綱は、JAMSTEC標準仕様のものを、仕様書の通りにドレッジ本体に取り付けた（Fig. 1a）。ただし、この命綱の仕様に関しては、トランスポンダーを用いたリアルタイムモニタリングの結果等を踏まえて、後ほど問題点を指摘する。

測位に用いたトランスポンダーは、BENTHOS社製のXT-6001である（Fig. 1b）。仕様は、Table 1にまとめた。また、使用した周波数は、質問信号が13.0 kHz、応答信号が13.5 kHzである。トランスポンダーは、リードワイヤーとの接合部から50 m上の観測ワイヤーに取り付けた。その結果、ドレッジ本体とトランスポンダー間のワイヤーに

沿った距離は約255 mとなる。ワイヤーに取り付けるにあたり、トランスポンダーにはSUS製のフレームが取り付けられた（Fig. 1b）。船とトランスポンダー間の音響送受信は、船底に取り付けられている送受波器を用いて行っており、船尾よりおよそ63 mの左舷側に送波器が、右舷側に受波器がそれぞれ取り付けられている。この点を起点として、受波したトランスポンダーからの応答信号にもとづき船上局で方位・深度・水平距離に変換し、その後緯度・経度を算出している。トランスポンダーの測位は着水直後から開始し、測位結果を常時音響航法装置のモニター画面に表示して（Fig. 2）、ドレッジの位置の把握を行った。



Fig. 2. Monitor screen of the acoustic navigation system installed aboard R/V *Mirai*. We can confirm the positions of R/V *Mirai* and the transponder.

図2 海洋地球観測船「みらい」の船内に設置されている音響航法装置の画面。トランスポンダーおよび「みらい」の位置をリアルタイムに確認することができる。

Table 1. Transponder specifications (from product specification and as listed at <http://www.benthos.com/undersea-pingers-locators-transponders-XT6001-TR6001.asp>). Positional and azimuth accuracies depend on water depth and accuracy of transducer installed the ship.

表1. トランスポンダーの仕様。製品仕様書より抜粋。概要は、BENTHOS社のホームページ（<http://www.benthos.com/undersea-pingers-locators-transponders-XT6001-TR6001.asp>）にも記載されている。位置および方位精度については、水深および船底トランスデューサーの精度に依存する。

Maximum Depth Rating	All units are factory tested to 22,000 feet (6700 meters).
Minimum Detectable Signal	Less than 85 dB re 1 μ Pa.
Source Level Output	Greater than 192 dB re 1 μ Pa at 1 meter from 9.0 to 13.0 kHz.
	Greater than 185 dB from 7.5 to 8.5 kHz., 13.0 to 17 kHz.
Transmit Pulse Length	10 ms $\pm$ 1% is standard.

3. トランスポンダーの記録から読みとれるドレッジシステムの動き

各ドレッジ地点でのドレッジシステム投入から揚収までのトランスポンダー位置と船位の時間変化をFig. 3に示す。Fig. 3より明かなように、本航海では、すべてのドレッジ地点において、事前に決定した測線にはほぼ沿ってドレッジシステムを確実に着底させ曳航することができた。以下に、3カ所の代表的なドレッジ観測点を例に取り、もう少し詳しく投入から離底までの一連のオペレーションにおけるドレッジシステムの動きの特徴についてまとめる。また、以下で取り上げるドレッジ観測点の詳細をTable 2にまとめた。

3.1. ドレッジシステム投入から着底直前まで

ドレッジシステム投入から着底までの間、船を定点保持すれば、ドレッジシステムは船尾のほぼ真下に着底する (Fig. 4a)。本航海では操船により、ドレッジ着底時の船尾とトランスポンダーとの水平距離を、概ね50 m以内に収めることができた。また、潮流や風などの影響で船の位置が移動した場合や、船がごく低速度 (0.1-0.2 knot) で移動した場合 (Fig. 4b) は、たとえワイヤー繰り出し時であってもドレッジシステムは船の移動に合わせて追尾している。一方、潮流などによる水の抵抗等の影響でドレッジシステムと船の距離が離れてしまった場合 (Fig. 4c) は、船を移動させてもトランスポンダーと船との相対的な位置は変化しないことが多いことが分かった。

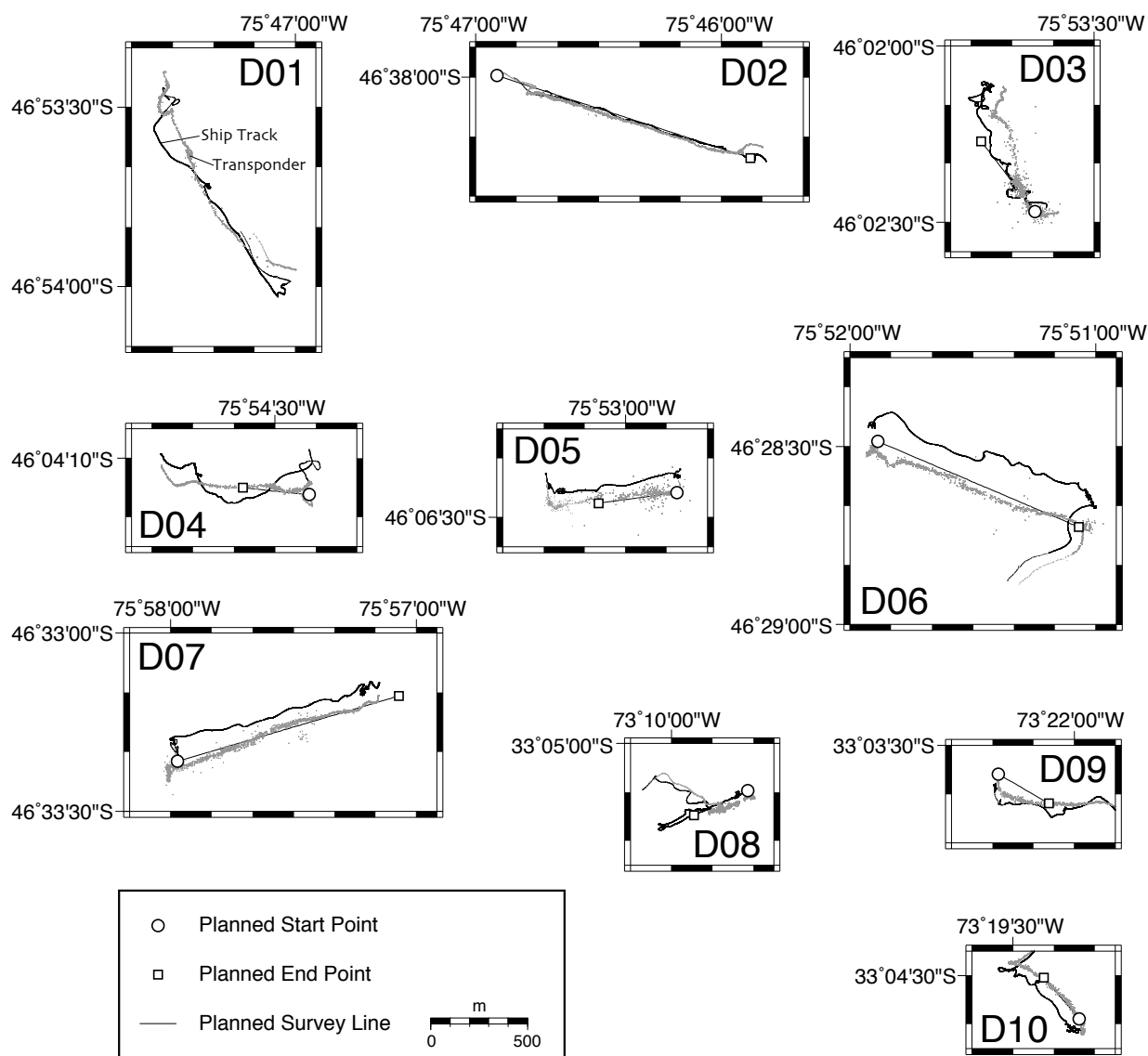


Fig. 3. Planned survey lines and trajectories of R/V *Mirai* (black) and the transponder (gray) for dredge sites.

図3. ドレッジ観測点の予定測線と海洋地球観測船「みらい」およびトランスポンダーの軌跡。

3.2. 着底から曳航時

Fig. 5に、観測点毎のドレッジシステム着底直前から離底直後までの各パラメータの時間変化を示した。示されているパラメータは、トランスポンダーと船の水平距離、開始点とトランスポンダーの水平距離（S-T距離：算出法はFig. 5キャプションに記載）、ワイヤー張力、船の対地速度、そしてワイヤーの繰り出しおよび巻き込み速度である。ここで開始点とは、ドレッジシステムが着底した時点でのトランスポンダーの位置を意味する。つまり、着底時のS-T距離は0である。全ての観測点の記録に共通して認められた点は、ドレッジシステムが着底し船が目標点に向けて動き出すと、(1) 初めはS-T距離が単調に増加し、(2) やがてS-T距離は100 m前後でほぼ一定となるということである。また、(1) の間のワイヤー張力は着底時とほとんど変わらないが、(2) になると徐々に張力が増加する。そして、(3) 張力の増加率が低下すると、再びS-T距離が増加し始める。このようなS-T距離と張力の対応関係から、(1)の間は、着底後に繰り出した分の観測ワイヤーのたわみが船の前進によって解消される段階であり、(2) の時に徐々にドレッジシステムに張力がかかり始め、(3) になって初めてドレッジシステムが移動を開始したものと考えられる。以上の観察から明らかになった重要な点は、船が目標点に向けて動き出してもドレッジシステムはしばらく着底点に留まっており、ある程度の距離まで船が離れてから動き出すということである。言い換えれば、水平方向の力ベクトルがドレッジシステムに働かない限り動き出すことはないということを示しており、極めて自然なことと言える。(2) の段階のS-T距離は、オペレーション時の水深および船舶の操船に大きく依存すると考えられる。

本航海では、船の前進のみでドレッジシステムを引く際の船の対地速度は0.5 knot (0.257 m/s) とし、ワイヤー巻

き込み時には船を定点保持させ0.2 m/sで巻き込んだ。ただし、実際のS-T距離の時間変化（Fig. 5）からは、定点保持時の方が若干ドレッジの移動速度が速いことが分かる。これは、定点保持時にも船はごく低速度で移動していることに起因すると考えられる。

3.3. 離底時

冒頭で述べたように、ドレッジが離底する前後は、着底時の様な明瞭なワイヤー張力の変化は認められないのが一般的である。さらにFig. 5bをみると、S-T距離についても着底時の様な明瞭な張力との関連性は認められないことが分かる。つまり、離底前後でS-T距離の増加率（＝トランスポンダーの移動速度）が顕著に変化することは無く、しばらく時間がたった後のワイヤー巻き込み速度の増加に応じてS-T距離の増加率が上昇している（Fig. 5b）。したがって、離底時のドレッジの動き方は、海底にスタックしている場合を除き、完全にワイヤー巻き込み速度および船の対地速度に依存していると言って良い。本航海のオペレーションおよび操船の場合、ほぼ全ての観測点において（ただし、ドレッジシステムがスタックしたD08を除く）、離底時のトランスポンダーと船の水平距離は200 m程度（またはそれ以上）であった。

4. ドレッジオペレーションの留意点

トランスポンダーを用いたモニタリングの結果より明らかになったドレッジシステムの動き方の特徴を踏まえて、ドレッジオペレーション時の留意点を一般的な事項も含めて以下にまとめる。また、オペレーション時のチェックリストを本論末尾のAppendixに示した。

Table 2. Details of dredge sites.

表2. ドレッジ観測点の詳細.

Site No.	Topography	Range of Water Depth (m)	Range of Wire Out (m)	Collected Samples	
				Rock Type	Total Weight (g)
MR08-06D02 (Figs. 4b and 5b)	Landward Slope of Trench	2810 - 2338	2616 - 2040	Sedimentary, Volcanic, and Plutonic Rock	51,800
MR08-06D04 (Figs. 4c and 5c)	Mid-Ocean Ridge Axis	3000 - 2968	2790 - 2739	Basalt	37,400
MR08-06D08 (Figs. 4a and 5a)	Fault and Knoll	4113 - 3981	3964 - 3766	Basalt and Mud	16,300

a) MR08-06D08

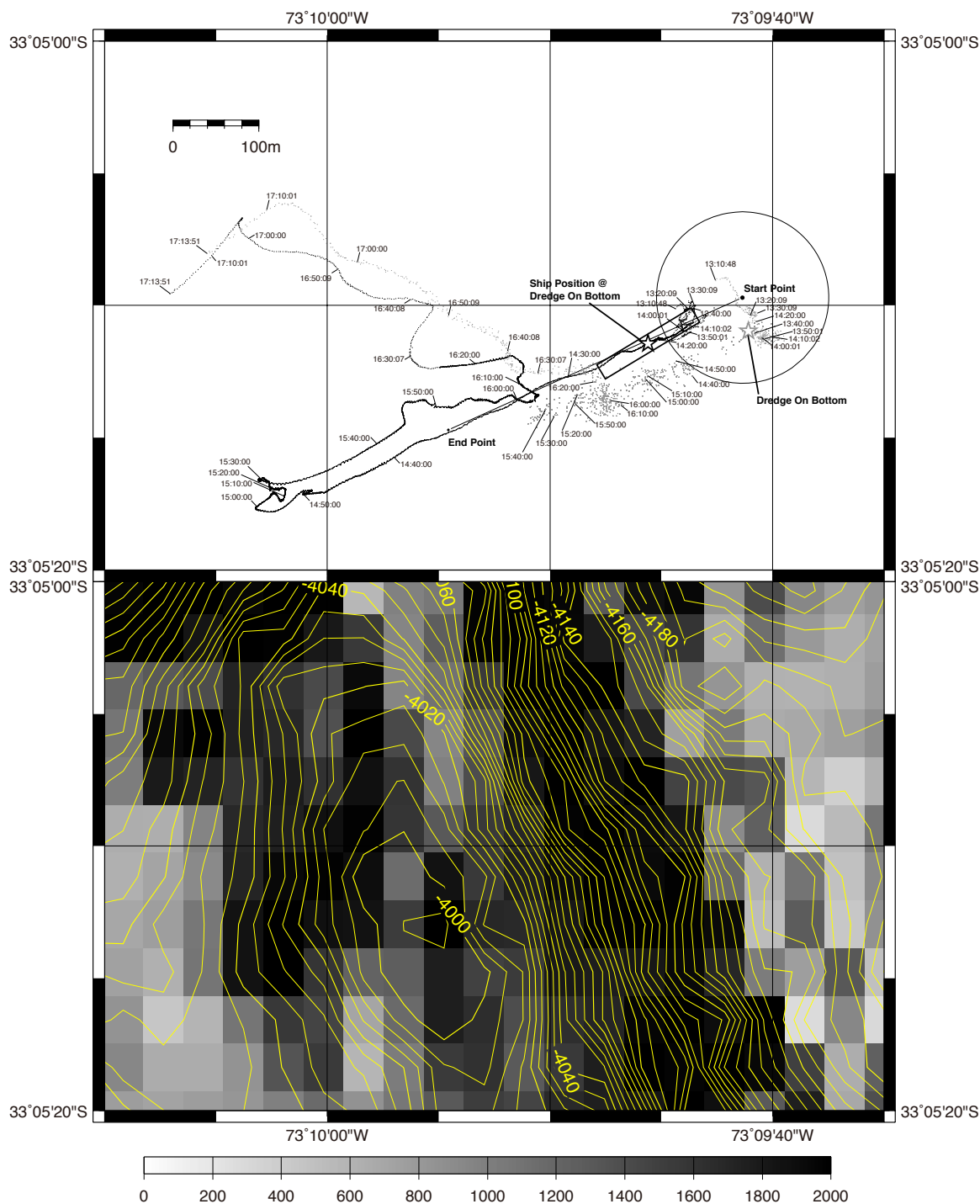


Fig. 4. Detailed trajectories of R/V *Mirai* (black dots) and the transponder (gray dots) (upper figure), and topography and acoustic backscatter intensity (lower figure), around the position of the dredge first contacted the seafloor (on bottom) at a) site MR08-06D08, b) site MR08-06D04, and c) site MR08-06D02. The radius of the circle centered on the start point is 100 m. The planned survey line extends from the start point to the end point. Time scale (correspond to horizontal axis of Fig. 5) is attached along trajectories of R/V *Mirai* and the transponder. Stars denote the positions of the ship and the transponder when dredge on bottom. The square shows the hull when dredge on bottom, and expresses the azimuth and the size of the ship.

図4. 着底地点付近 (a) MR08-06D08サイト, b) MR08-06D04サイト, c) MR08-06D02サイト) における海洋地球観測船「みらい」(黒) およびトランスポンダー (灰) の軌跡 (上図) と海底地形および音響後方散乱強度 (下図)。開始予定点 (Start Point) を中心とした円の半径は100 mであり、開始予定点から伸びる実線は予定測線を示す。船およびトランスポンダーの軌跡には、時間の目盛り (Fig. 5の横軸に相当) を付した。星印は、ドレッジ着底時の船およびトランスポンダーの位置を示す。四角は、ドレッジ着底時の船体を示しており、船の方位と大きさを表現している。

b) MR08-06D02

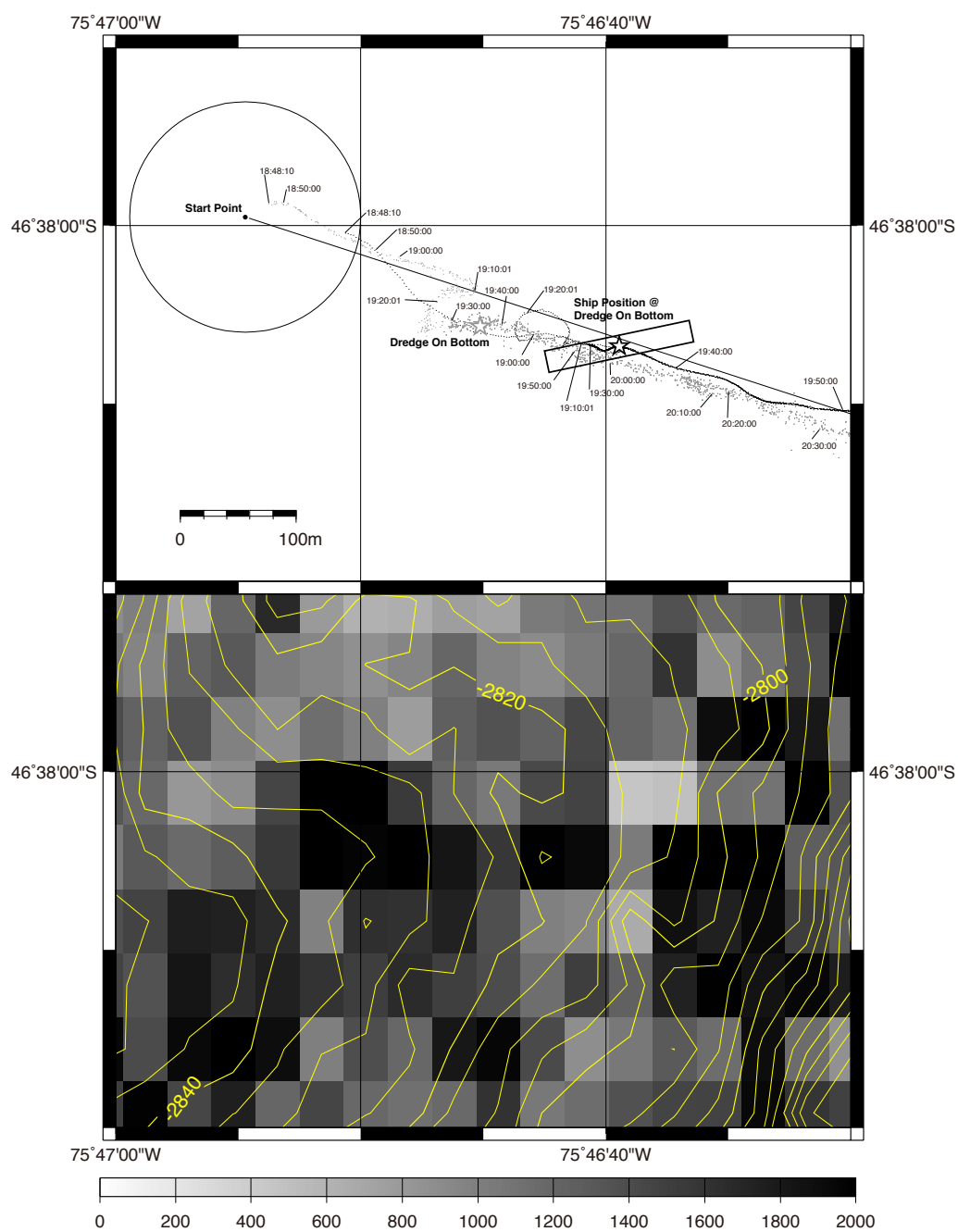


Fig. 4. (continued)

図4. (続き)

c) MR08-06D04

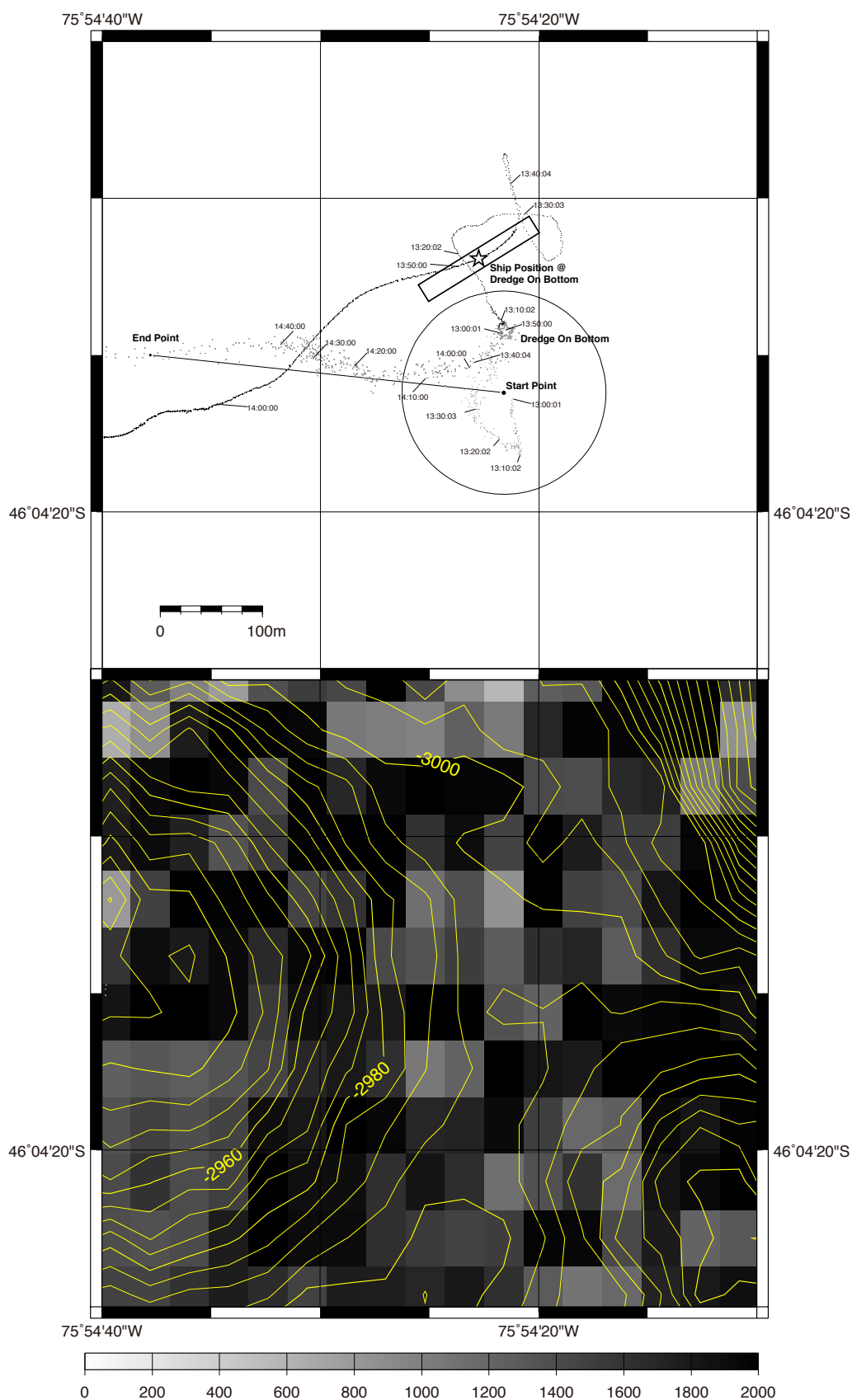
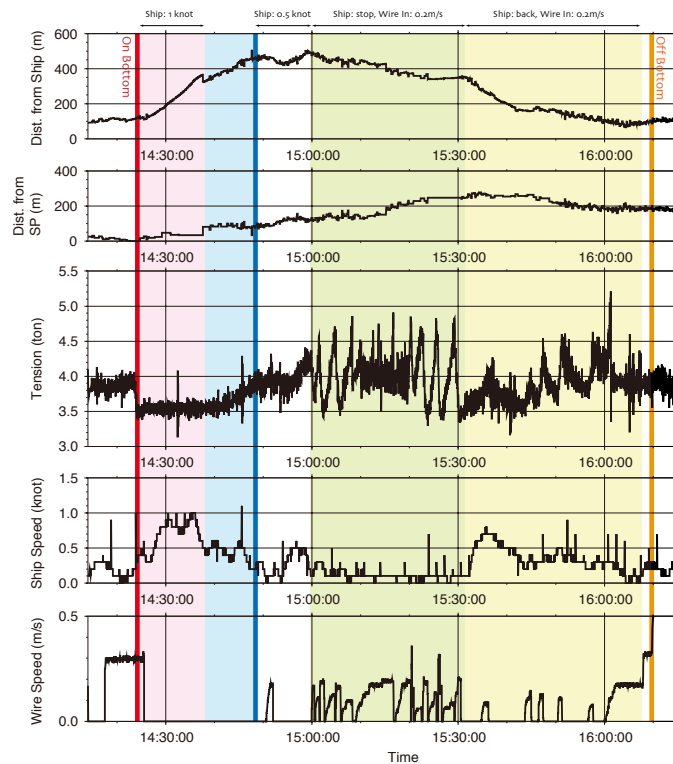


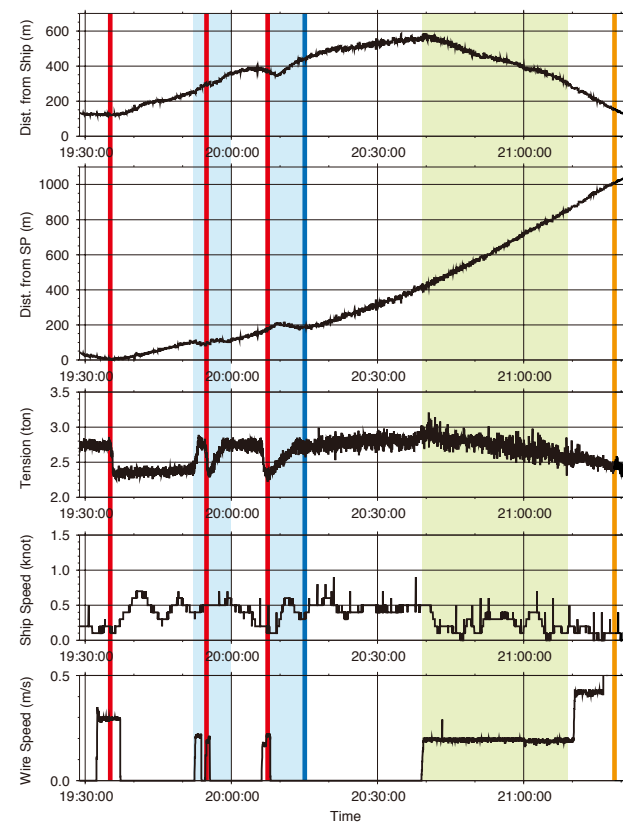
Fig. 4. (continued)

図4. (続き)

a) MR08-06D08



b) MR08-06D02



c) MR08-06D04

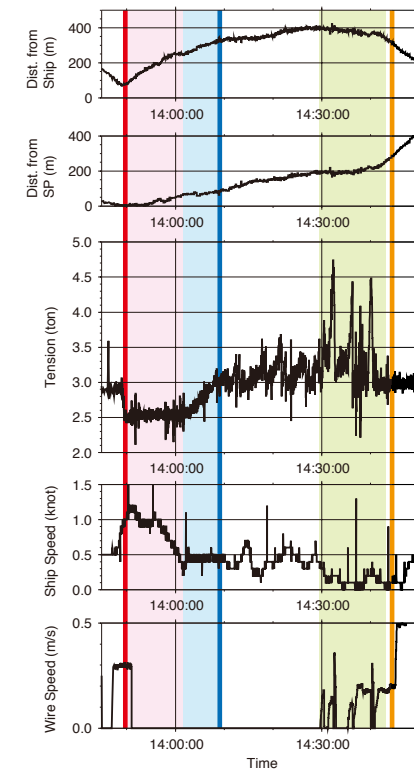


Fig. 5. Time series of parameters during dredging operation. Dist. from Ship, distance from the transponder to the ship (calculated by an acoustic navigation system); Dist. from SP, distance from the transponder to the start point, that is, the position of the transponder at the time the dredge first contacted the seafloor (on bottom), ($D = \sqrt{(6378.137 * (\text{lon}.S - \text{lon}.T))^2 * \cos(\text{lat}.S))^2 + (6378.137 * (\text{lat}.S - \text{lat}.T))^2 * 1000}$, where $\text{lon}.S$ and $\text{lat}.S$ are longitude and latitude of the start point in radians, and $\text{lon}.T$ and $\text{lat}.T$ are longitude and latitude of the transponder in radians); Tension, tension of observation wire; Ship Speed, ground speed of ship; Wire Speed, speed of observation wire in or out. Red, blue, and orange solid lines indicate the time the dredge on bottom, the time dredge migration begin, and the time the dredge is lifted off the bottom (off bottom). Red, blue, green, and yellow colored patterns indicate the time when ship move forward in 1 knot, the time when tension of observation wire increase, the time when the ship keep position with observation wire in, and the time the ship move back with observation wire in.

図5. ドレッジオペレーション時におけるパラメータの時間変化。Dist. from Ship：トランスポンダーと船との距離（音響航法装置によって算出される）、Dist. from SP：トランスポンダーと開始点（ドレッジ着底時のトランスポンダーの位置）との距離（ $D = \sqrt{(6378.137 * (\text{lon}.S - \text{lon}.T))^2 * \cos(\text{lat}.S))^2 + (6378.137 * (\text{lat}.S - \text{lat}.T))^2 * 1000}$ ， $\text{lon}.S$ と $\text{lat}.S$ は開始点の緯度と経度のラジアン， $\text{lon}.T$ と $\text{lat}.T$ はトランスポンダーの緯度と経度のラジアン）、Tension：観測ワイヤーの張力，Ship Speed：船の対地速度，Wire Speed：観測ワイヤーの繰り出し又は巻き込み速度。赤の実線はドレッジが着底した時点、青の実線はドレッジが移動を開始した時点、オレンジの実線はドレッジの離底を確認した時点をそれぞれ示す。赤で塗られた範囲は船が1 knotで前進している時間帯、青で塗られた範囲は張力が増加している時間帯、緑で塗られた範囲は船を定点保持させて観測ワイヤーを巻き取っている時間帯、黄で塗られた範囲は観測ワイヤーを巻き取りながら船を後進させている時間帯を示す。

4.1. ドレッジシステム投入から着底まで

ドレッジシステム投入から着底までに船の定点保持を心がけ、潮流による水の抵抗が無ければ、ドレッジシステムは船尾のほぼ真下に着底する。ここで注意しなければならないのは、チェーンを含めたドレッジシステム全体が完全に垂直に着底することによって、チェーンに取り付けられた錘やチェーン自身などがドレッジ本体に絡む危険性があることである。したがって、着底時に船は、目標点に向かってごく小さい対地速度で動いていることが望ましい。

一方、潮流や風などの影響で船の位置が移動した場合や、潮流による水の抵抗の影響でドレッジシステムと船の距離が離れてしまった場合は、着底前に通常行うワイヤー繰り出し停止の時間を多めに取り、船尾とドレッジシステムの水平距離が短くなるのを待つ必要がある。しかし、前述したように後者の場合は船とドレッジシステムの相対的な位置関係は変化しない場合も多いので、不必要に長時間繰り出しを停止することは避けるべきである。トランスポンダーを使用していない時の目安として、船が定点保持（もしくは低速度で移動）しているにもかかわらず着底水深とワイヤー長が大きく異なる場合は、ドレッジシステムは何らかの原因で流されている可能性が高い。

ドレッジシステム着底後は、観測ワイヤーを30-50 m繰り出して停止させる。

4.2. 曳航時

ドレッジシステムが海底を移動する際に移動速度が1 knotを超えると、ドレッジシステムが海水の抵抗により浮き上がり離底してしまうことが多くなる。離底した場合は、船を定点保持させて錘の重さによって下降し再着底するのを待つことが望ましいが、着底までに多くの時間がかかることは想像に難くない。ここで、船を定点保持させることなくワイヤーを繰り出して再着底させることも可能であるが、この方法では、時間の短縮にはなるものの、不必要にワイヤーを繰り出すことになり、結果として観測ワイヤーまで着底させてしまう危険性が生じる。したがって、ドレッジシステムの離底そのものを回避するために、曳航時は常時ドレッジシステムの対地速度が1 knot以下（0.5 knot程度）になるように船の速度およびワイヤーの巻き込み速度を調節することが必要である。ただし、今回のモニタリングにより明らかになったとおり、船が目標点に向かって動き出してもドレッジシステムはすぐには動きださないので、着底直後から船を低速で動かすことは時間を無用に消費するだけである。そこで、曳航開始時は速めの対地速度（1 knot程度）で船を目標点に向かって動かし、ドレッジシステムの動き出しが予想できた段階で船の速度を対地0.5 knot程度とする方法が最善である。本航海では上

記の方法を採用することにより、ドレッジ動き出しまでの時間を大幅に短縮することができた（Fig. 5）。ドレッジシステムが動き始めるのは、着底によって低下した張力が増加した後、増加率が減少し、同時にトランスポンダーと船との距離の差の変化がほとんどみられなくなった時点と判断されることは前述した通りである。したがって、船の対地速度を落とすのは、張力が増加し始めたこと、また、トランスポンダーと船との距離の差の変化がほとんど見られなくなったことが確認できた時点でよいだろう。張力に関しては、張力計のペンレコーダーの記録を注意深く観察すれば容易に確認できる。また、トランスポンダーと船との距離の差は、音響航法装置画面上に表示されるので容易に確認できる。

曳航中は、観測ワイヤーを巻き込むと直ちにドレッジシステムは離底する。よって、始点と終点の標高差が数100 m程度であれば、ドレッジシステムの揚収を前提とする場合以外ではワイヤーを巻き込む必要はない。標高差が大きい場合は、船の直下水深と観測ワイヤーの繰り出し長とを照らし合わせ、リードワイヤーの先端を多く着底させないように注意し、必要に応じてワイヤーを巻き込む。その際は、船を定点保持させて、ドレッジシステムの対地速度が1 knotを超えないようにゆっくりと（例えば、0.2 m/s=0.4 knot）巻き込む必要がある。ピンガーを使用している場合は、ピンガー高度に応じてワイヤー巻き込みを行う。

4.3. 揚収に先立つドレッジシステムの離底

曳航時のドレッジシステムは、常に船の後方に位置している。したがって、目標地点までドレッジシステムを到達させて離底し揚収するためには、船は設定した目標地点を通過し、測線に沿ってさらに前進させなければならない。そのためには、船が目標地点上にいる時にドレッジシステムが何メートル後方にあるか（もしくはより具体的にどの位置にあるか）を知ることが重要である。以上に加えて、今回のモニタリングにより明らかになった離底時のトランスポンダーと船の水平距離が200 m前後離れていること、つまり船の直下でドレッジシステムが離底することがほとんど無いことも考慮して、最終的な船の位置を決定する必要がある。観測ワイヤーを巻き込む際は、曳航時の巻き込みと同様に船を定点保持させ、ドレッジシステムの対地速度が1 knotを超えないように注意する。

冒頭で述べたとおり、ワイヤー張力は離底前後で明確な変化は認められないことが多い。しかし、ペンレコーダーによる張力計の記録の波形やペンレコーダーの動き方を注意深く観察することにより、離底をある程度予想することができる。すなわち、ある瞬間を境にペンレコーダーの波形が正弦波に近い動きを示すようになる（船の動揺による）

ので、その時点でドレッジが離底したと判断する。これは従来のドレッジオペレーションでも行っていることであるが、必ずしも明確に波形やペンレコーダーの動きの変化を認めることができるとは限らないことに注意すべきである。また、今回のモニタリングにより明らかになったように、離底前後のトランスポンダーの移動速度も明瞭な変化が認められない (Fig. 5) ことを踏まえると、トランスポンダーも離底したか否かの判定には有用ではない。つまり、現状でドレッジの離底を確実に把握することができるのは、ピンガー—PDR システムのみであるということになる。ピンガー高度に基づいて離底を確認する場合、ピンガー高度がピンガーとドレッジ本体との距離よりも長くなった時点で離底とすることができると、より安全を期すならば、ワイヤー長が直下水深よりも短くなった時点で完全離底とすべきである。その他、トランスポンダーの移動速度が速くなった (急速に船に近づいている) 場合も、離底と見なしてよいだろう。

4.4. 海底にスタックした時

船の進行のみで曳航する場合も勿論であるが、特に観測ワイヤーを巻き込む際は、ドレッジシステムが海底にスタックする危険性が極めて高くなる。スタックした際の対処は、石井 (2003) や石塚 (印刷中) に記載された方法に従って、以下のように行う。

船を曳航してきたルートに沿って後進させ (この時、船の反転は原則禁止)、張力が緩んだらワイヤーを巻き取り、これを繰り返す。また、張力をかけた状態から急速に巻き出し、その後直ちに巻き取ることも有効である。トランスポンダーを使用している場合は、ドレッジシステムがどこでスタックしているかは容易に把握することができるので、船尾をトランスポンダーの真上に来るように操船し、その地点でワイヤーを巻き取ることによってドレッジシステムを真上に吊り上げるようにすると外れやすい (Fig. 4a)。それでも外れない場合は、曳航した方向と逆の向きに船を前進させ、ドレッジシステムを (逆向きに) 引くことも有効である。ただし、石井 (2003) や石塚 (印刷中) でも言及されているが、「ドレッジは海底にスタックするものである」との前提のもと、躊躇せずにヒューズワイヤーを切断する程度に曳くことは良質な新鮮な試料を採取するため必要であり、その結果としてドレッジ本体を亡失することも想定せねばならない。

5. トランスポンダーを用いたドレッジモニタリングの有用性と今後の課題

トランスポンダーを用いたドレッジモニタリングによって、リアルタイムにドレッジの位置を把握することができるようになったことに加えて、ドレッジの具体的な動き方も明確に把握できるようになった。今回のモニタリングで明らかになった中で最も重要な点は、船が目標点に向けて動き出してもドレッジシステムはしばらく着底点に留まっており、ある程度の距離まで船が離れてから動き出すことである。このことは、今までのトランスポンダーを用いないドレッジオペレーションにおいても張力計の波形等から経験的にある程度予想されていたが、本航海でのモニタリングによって証明することができた。

この他に、以下の様な不測の事態においても、トランスポンダーによるドレッジモニタリングは極めて有用である。例えば、何らかの理由で着底直前のドレッジシステムの位置がドレッジを行うのに不適当な場所 (例えば、音響後方散乱強度が低い) になってしまった (流された) 場合でも、船の移動が低速度であればドレッジシステムは安全に追尾するので、船を適切な場所まで移動させ着底させる、すなわち着底点を調整することができる。また、流された地点が音響後方散乱強度の強い場所であり目的の岩石が採取される可能性が高いと判断されれば、船を移動させることなくそのまま着底させることも選択肢となりうる。一方、離底の際には、ドレッジシステムが後方にあることを考慮して、ドレッジシステムの位置に応じて最終的な船の位置を決める必要があることは前述したとおりである。この時にも、トランスポンダーを使用することによってドレッジシステムの位置を確かかつ容易に知ることができるので、目標とする地点までドレッジシステムを曳航してから離底させることが可能になる。さらに、ドレッジシステムが海底にスタックした際も、トランスポンダーによってドレッジシステムの位置が把握できるので、船尾をトランスポンダーの真上に来るように操船し、その地点でワイヤーを巻き取るなどのオペレーション (Appendix および 4.4 章を参照) をすれば、安全に外れる可能性が飛躍的に増す。以上のような事態は、本航海に限らず航海中に必ずと言っていいほど頻繁に生じるものである。今までのトランスポンダーを用いないドレッジオペレーションでは、(ア) サンプルが全く採取されず空でドレッジが回収される (空振り)、または (イ) 岩石は採取されず泥のみが採取されるなどの場合があり、(ウ) ヒューズワイヤーや命綱 (ライフワイヤー) を切断しドレッジ本体や錘などを亡失することも少なくなかった。特に (ア) や (イ) は、ドレッジが実際には目的とする地点を曳航していなかったことに起因すると

思われる。一方、本航海では、10回全てのオペレーションでドレッジシステムを一つも亡失すること無くサンプルを採取することに成功した。これは、海洋地球研究船「みらい」の高度な操船技術によるところが大きいことは言うまでもないが、トランスポンダーを用いたドレッジモニタリングを行った結果、適切な場所でのサンプリングと適切なオペレーションが可能になったことによることも重ねて強調したい。

本航海では、Fig. 1aに示したようなORI-TI式ドレッジ(石井, 2003)を基にしたJAMSTEC標準仕様にはほぼ従ったドレッジシステムを用いた。仕様では、命綱をドレッジ本体のバスケットの底部を通すようになっている。このシステムは、ドレッジが海底にスタックしヒューズワイヤーを切断した際に、ドレッジを引く向きを大幅に変えて外れ易くするのが目的である。しかし、ドレッジのバスケットの部分も逆さになり、その状態で数千メートル以上巻き上げられるため、折角バスケット内に押し込まれ採集された試料も水流により流され、網目以下の細粒岩石試料の大半を亡失してしまう。小惑星探査機「はやぶさ」による小惑星「イトカワ」からのサンプルリターン例でも分るように、細粒な砂粒でも科学的・地質学的解析には非常に重要な意味を持っている。つまり、たとえ少量の泥、砂や小礫などの採集であっても、それらにもとづいて海底地質の全体像を把握することができるのである。ドレッジによる岩石採取で重要なのは、ドレッジを亡失させないことであるのは確かである。しかし、海底にスタックした際などに亡失を想定せねばならないこと(4.4章)を踏まえれば、亡失と同等またはそれ以上に、空でドレッジが回収されること(空振り)を回避することも重要視せねばならない。したがって、空振りが懸念される命綱に関するJAMSTEC標準仕様は、海底試料採集装置としての決定的な欠陥であると言わざるを得ない。先述したように、トランスポンダーを用いたリアルタイムモニタリングを行っていれば、ドレッジの引く向きを変えることは操船によって極めて容易に行うことができ、亡失は回避できる。実際に、先述した本航海のD08のケース(Fig. 4a, Fig. 5a)では、安全にドレッジを外すことができ、良質な試料を多数採取することができた(Table 2)。したがって、トランスポンダーによるモニタリングを行う際は特に、ORI-TI Type(石井, 2003)のような、命綱をドレッジ本体のチェーン部中央にて胴締めするのみのシンプルな仕様を採用すれば充分である。さらに、トランスポンダーによるモニタリングを行えない場合も、空振り回避を重視するためにORI-TI Typeの仕様を採用できるようにすべきである。

潜水調査船(しんかい6500など)を用いた岩石採取の場合、岩石分布の詳細な調査・観察に基づく系統的な試料

採取を行うことは容易であるが、調査時間や試料を保管するバスケットの容量等の問題で、一潜航で採取可能な試料の量には限界がある。一方、ドレッジを用いた岩石採取では、一カ所のドレッジサイトから多くの試料が採取される場合があり、(1)その中から種類の全く異なる試料が得られ、ドレッジ内の配置から地質層序が予想できる(石塚、印刷中)ほか、(2)同類の試料の組成変化が見出される(町田・折橋、印刷中)場合がある。この様にして得られた多量の地質・岩石データによって、陸上の地質・岩石学に匹敵する高解像度の解析が可能となり、より緻密な海洋地球科学の展開に繋がる。従来では、ドレッジによって岩石が採取された場所、つまり岩石の分布が保証された場所において潜水調査を行うという流れが一般的であった。しかし、トランスポンダーを用いたリアルタイムモニタリングを行えば、潜水調査によって詳細な地質調査を行った「当にその場所」でドレッジシステムを曳航し確実に岩石を採取することが可能であるので、潜水調査における試料不足を補うという今までにないドレッジの役割も生まれることになる。このような、潜水調査とドレッジによる試料採取の有機的な組み合わせは、費用対効果(もしくは時間対効果)の良い海洋調査には必要不可欠だろう。

本航海のオペレーションで筆者らが唯一不便を感じたのは、トランスポンダーの海底からの高さ(トランスポンダー高度)が不明な点であった。前章で述べたとおり、ドレッジの離底を判定するためにはピンガーシステムが不可欠である。例えば、ピンガーのように自身の高度もモニターすることのできるトランスポンダーを開発し用いる、または、ピンガーとトランスポンダーを併用することで、ピンガーシステムを用いる場合と同様の判断基準によって、ドレッジシステム曳航時にワイヤーを巻き込むタイミングを判断したり、ドレッジシステムの着離底を確実に判断したりすることができるほか、トランスポンダー自体を着底させてしまう危険性が回避されることが考えられる。一方、トランスポンダーの位置(緯度・経度)および深度、船舶の位置および直下水深、船舶とトランスポンダーの水平距離は、船内LANから取得することができるため、各々の値から計算によってトランスポンダー高度を算出することは可能である。たとえば、ピストンコアラー着底前の姿勢修正(海底面直上約50m)や深海用熱流量プローブ、ヒートフローピストンコアラーに取り付けた温度センサーのキャリブレーションを実施する(なるべく海底面直上が望ましいため)場合などは、手計算でトランスポンダー高度の算出を行っている。また、張力計では着離底が判断し難い時(水深が深い、錘の重さが軽いなど)やダブルチェックという観点から、手計算での算出を行う場合もある。ただし、計算に多くの時間がかかるため、逐次算出する必要のあるド

レッジオペレーション時には、手計算での算出は現実的ではない。

以上を踏まえて我々は、トランスポンダーを用いたリアルタイムモニタリングを今後のドレッジによる岩石採取において必須項目とすることを提案する。その際、(1) 本航海で行ったトランスポンダーの位置を音響航法装置の画面へ表示することのほかに、(2) トランスポンダーと海底との距離（トランスポンダー高度）をモニターできるようにすること、(3) 着底点を起点としたトランスポンダーの移動距離を逐次算出し、それらの時間変化を記録紙またはデータとして記録するシステムを構築することが必要であると考え。以上の記録と従来から使用している張力計のペンレコーダーによる記録とを合わせることによって、ドレッジシステムの動きをリアルタイムで詳細に、かつ容易に把握することができる。また、将来の展望として、(ア) 詳細な海底地形図（平面図）及び地形断面図（立面図）をモニター画面上に常時表示し、(イ) そのモニターには、トランスポンダーおよび船の位置、風向・風速や潮流・流速を常時表示する。(ウ) ドレッジ曳航中に海底の映像を記録（録画）する。さらには、(エ) 曳航中の海底の映像をリアルタイムモニタリングする。(オ) トランスポンダーを観測ワイヤーに複数個取り付け、それらのデータから繰り出した観測ワイヤーの形態を三次元（平面および深さ）で算出し、リアルタイムで図示することが必要である。これらを導入することによって、海洋底岩石試料採取は新たな時代へと突入し、海洋底科学に留まらず地球科学の様々な研究が、これまでにない安全かつ確実な岩石採取にもとづき、飛躍的に発展するだろう。

謝辞

MR08-06Leg1b航海では、赤嶺正治船長（現 日本郵船歴史博物館館長代理）や井上治彦一等航海士をはじめとする海洋地球研究船「みらい」乗組員の皆様、および株式会社マリン・ワーク・ジャパン、株式会社グローバルオーシャンディベロップメントの観測技術員の皆様には、ドレッジによる観測および準備に際して多大なるご支援を頂きました。同航海の乗船研究者であった東京大学地震研究所の折橋裕二博士との船上での議論が、実際のオペレーションや本論をまとめるにあたり極めて有益でした。海洋研究開発機構のA. R. L. Nichols博士に英文の校閲をして頂きました。町田は、航海乗船にあたり日本財団よりご支援を頂きました。2名の匿名査読者から有益なコメントを頂き、本論は改善されました。以上の皆様に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 石井輝秋（2003）, 海洋底物質科学研究におけるドレッジの重要性, *月刊地球号外*, 43, 54-58.
- Ishii, T., T. Furuta, M. Watanabe and M. Nakanishi (1988), First trial use of dredge pinger-transponder (DPT-1030) for dredge hauls during KH86-2. Preliminary Report the Hakuho Maru Cruise KH86-2 (K. Kobayashi, eds.), 75-76.
- Ishii, T., Y. Hanamura, Y. Ogawa, and K. Kobayashi (1993), Description of dredged samples from the Erimo and Mizunagidori seamounts during the second leg (Kushiro to Tokyo) of KH92-3 cruise. Preliminary Report the Hakuho Maru Cruise KH 92-3 (K. Kobayashi, eds.), 102-116.
- 石塚 治, ドレッジによる岩石試料採取, 海洋調査の基本－海の地質基準, 共立出版, (印刷中).
- 町田嗣樹, 折橋裕二, 無機化学分析, 海洋調査の基本－海の地質基準, 共立出版, (印刷中).

Appendix

ドレッジオペレーションチェックリスト

<着水前>

- ☐ ドレッジの目的（研究目的）を船側に説明し、理解を得る
- ☐ 事前調査によって得られた地形図等を用いて、着定点および目標点を決定
このとき、ドレッジを曳く方向は、急峻な地形に正対し、潮流や風を考慮して、後進可能な方向となるよう船側と協議する

<着水から着底直前まで>

- ☐ 船尾を開始予定点直上として定点保持（厳守）
- ☐ トランスポンダーおよびピンガー着水後、直ちに音響送受信を確認
（トランスポンダーの位置を、音響航法装置のモニター画面に表示）
- ☐ 最終的にトランスポンダーが開始予定点に来るように、随時、船の位置を調整（ただし低速度で）
- ☐ 海底直上 500 m（直下水深と観測ワイヤー繰り出し長との差が 500 m）で観測ワイヤーの繰り出しを停止
- ☐ ワイヤー張力を確認
繰り出した観測ワイヤーとドレッジシステムの水中総重量を示し、離底時の判断基準となる
- ☐ トランスポンダーの位置を音響航法装置のモニター画面で確認（最終確認）
着定点の変更が必要であれば、船の位置を低速度で移動させる

<着底から曳航開始まで>

- ☐ 観測ワイヤーの繰り出し停止後 10 分間保持し、繰り出しを再開
- ☐ ピンガーまたはトランスポンダー高度を随時確認
テンションメーターによる着離底確認が困難な場合の判断基準となる
- ☐ 着底直前に、目標点に向け航走を開始（対地速度 0.5 knot 以下）
早すぎると着底が遅れ、観測ワイヤーを不必要に繰り出すことになるので注意
- ☐ テンションメーターを注視し、急激な張力の低下により着底を確認
- ☐ 着底確認後、さらに 30 m 観測ワイヤーを繰り出す
ピンガーまたはトランスポンダー高度が 50 m を下回ったら、繰り出しを停止
- ☐ トランスポンダーおよび船の緯度・経度、船の直下水深を記録（着底点とする）
- ☐ ピンガーまたはトランスポンダー高度を記録
- ☐ 観測ワイヤーの張力を記録
この張力は、着底時のヒューズワイヤーにかかる張力を求める基準となる
ヒューズワイヤーの破断強度にもとづき、破断までにどのくらいの張力をかけることができるか（記録した張力+破断強度）を、具体的な数値として把握しておく（テンションメーターの記録紙などに記入すると良い）
ライフワイヤー（命綱）の破断は厳禁なので、同様に把握しておく
- ☐ 船の対地速度を 1 knot とする

- ☐ 観測ワイヤーの張力の上昇が認められたら、船の対地速度を 0.5 knot とする
(このときトランスポンダーの位置の変化に注意する)

<ドレッジ曳航時>

- ☐ 張力計の波形を確認
着底または移動時：ノコギリ歯状（スタック時以外、振幅は小さい）
離底時：振幅が大きく非対称な正弦波状
- ☐ トランスポンダーの位置を音響航法装置のモニター画面で確認
- ☐ ピンガーまたはトランスポンダー高度を確認

離底後に再着底させる場合

船を定点保持し、観測ワイヤーを繰り出す、または錘の重さによって下降し再着底するのを待つ（ただし、多くの時間がかかる）

大きな張力がかかった場合

1. 船が目標点に向かって動いていたら、定点保持する
2. 張力がヒューズワイヤーの破断強度に達する前に、観測ワイヤーを繰り出す
3. 張力が下がったことを確認し、観測ワイヤーを巻き込む
4. 外れるまで（張力が下がるまで）、2. および 3. を繰り返す
(観測ワイヤーのスピードは 0.5 m/s を超えないようにする)

海底にスタックし外れない場合

1. 船尾がトランスポンダーの直下に来るように、船を後進させる（反転禁止）
2. 張力が下がったことを確認し、観測ワイヤーを巻き込む
3. 張力がヒューズワイヤーの破断強度に達する前に、観測ワイヤーを繰り出す
4. 船の後進を続け、2. および 3. を繰り返す
5. 外れない場合は、破断強度以上の張力をかけてヒューズワイヤーを切断する
(観測ワイヤーのスピードは 0.5 m/s を超えないようにする)

<離底時>

- ☐ 船を定点保持させ、張力の変化に注意しながら観測ワイヤーを巻き込む
(観測ワイヤーのスピードは 0.5 m/s を超えないようにする)
- ☐ テンションメーターの記録が離底時の波形（振幅が大きく非対称な正弦波状）を示すことを確認
- ☐ 観測ワイヤーの張力を確認
着底前の張力と比較する（観測ワイヤー繰り出し長の差を考慮）
- ☐ ピンガーまたはトランスポンダーの高度が、ピンガーまたはトランスポンダーとドレッジシステムとの距離より高いことを確認

ドレッジシステムを揚収する場合

- ☐ 観測ワイヤーの繰り出し長が、船の直下水深より短いことを確認
- ☐ トランスポンダーおよび船の緯度・経度、船の直下水深を記録（離底点とする）
- ☐ 観測ワイヤー巻き込み速度を徐々に上げる