

音響測深データに現れる Wobble の識別と成因の整理[†]

堀之内龍一*

Wobble analysis in multibeam bathymetric data[†]

Ryoichi HORINOUCHI*

Abstract

Bathymetric data acquired with multibeam echosounders can exhibit systematic, periodic, low-amplitude artefacts even when depth errors remain within specified tolerances. These “wobbles” generate visually misleading small-scale bathymetric patterns and therefore are non-negligible for geomorphological and geological interpretation. Wobbles are primarily associated with vessel motion and might also relate to water density structure (i.e., sound speed structure), yet prior studies that systematically address their causes and taxonomy are limited. Drawing on Hughes Clarke (2003) and other literature references, this report outlines a classification and causal framework for wobbles and, using Quality Positioning Services B.V.’s (QPS) hydrographic processing software, Qimera, as an example, introduces post-processing tools that enable analysis and correction of such artefacts in bathymetric data.

1 はじめに

近年、リアルタイムの音響データクオリティのモニタリング及び設定最適化機能を備えたソナー (R2Sonic LCC, 2025) や、Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator (CUBE; Calder, 2003) をはじめとした自動ノイズ除去技術の開発により水路測量分野におけるマルチビーム測深機の海底地形データは飛躍的な進歩を遂げてきた。しかしながら、こうした最新の技術をもってしても海底地形データにアーティファクト (真の海底地形ではない、虚構のあるいは見かけの構造) が残存することがある。水深誤差として深刻なエラーをもたらす訳では無いものの、系統的・周期的・動的

なアーティファクトが海底地形データに現れることがあり、このようなアーティファクトを “Wobble” と総称する。Wobble は、時間に依存して変化する (動的) こと及び船体動揺に係る要素 (船体前後方向軸に対する回転運動; ロール, 船体右舷左舷方向軸に対する回転運動; ピッチ, 鉛直軸に対する回転運動; ヨー, 一定時間内の平均船体前後方向運動; サージ, 一定時間内の平均船体右舷左舷方向運動; スウェイ, 一定時間内の平均鉛直運動; ヒープ) のいずれかと相関してデータに影響を及ぼすことから動的残差とも呼ばれ、鉛直基準や潮汐データの誤った適用等のために現れる静的な (つまり、時間変化しない一定

[†] Received August 22, 2025; Accepted September 10, 2025

* 大洋調査課 及び ニューハンプシャー大学 沿岸海洋マッピング及び合同水路測量センター Offshore Survey Division / Center for Coastal and Ocean Mapping and Joint Hydrographic Center, University of New Hampshire

の) 水深エラーとは区別される。Wobble は真の海底地形の上に重畳される形でグリッド化されたデータに現れ、陰影図において、波状アーティファクトに直交する方向から浅い仰角を取って描画した際、特に強調されて可視化される特徴がある。この見かけ上の海底地形は、植生や海洋生物生息地等の重要な特徴に係る視覚的な認識や判別を阻害するだけでなく、海底地形データを用いた生態学等のクラスタリングにも影響を及ぼすことが調べられている (Lecours, 2017)。海底地形データを取り扱い、時に地形学あるいは地質学的解釈を必要とされる当部においても一考に値する概念であるが、まとまった解説が掲載されている先行研究は非常に限定的である。そこで本報告では、Hughes Clarke (2003) 等を参考に、代表的な Wobble の成因や分類について概説を行うとともに、Quality Positioning Services B.V. 社 (以下、QPS 社とする) の海底地形データ処理ソフトウェア Qimera (Quality Positioning Services B.V., 2014) に実装されている、船体動揺や水中音速度構造に起因するアーティファクト補正の機能についても簡単に紹介する。

2 Wobble の成因と整理

2.1 海底地形データにおける Wobble の現れ方

本節では、Wobble の海底地形データ中の現れ方、つまり Across-track (測線横断) 方向に整列して現れる波状構造 (「肋骨状」"Ribbing" とも言う) について端的に述べる (Fig. 1)。スワス内の Wobble の現れ方は 4 タイプに大別され、これらは次節で述べるとおり、Wobble の成因を調べる際に有用な情報となる。

- タイプ 1: スワス端からもう一方の端へ線形に傾く様に現れる構造
- タイプ 2: スワス全体の上昇または下降する様な構造
- タイプ 3: スワスの両側で位相が異なる非線形の傾きを生じる構造
- タイプ 4: スワスの両側で位相が同じ非線形の傾きを生む構造

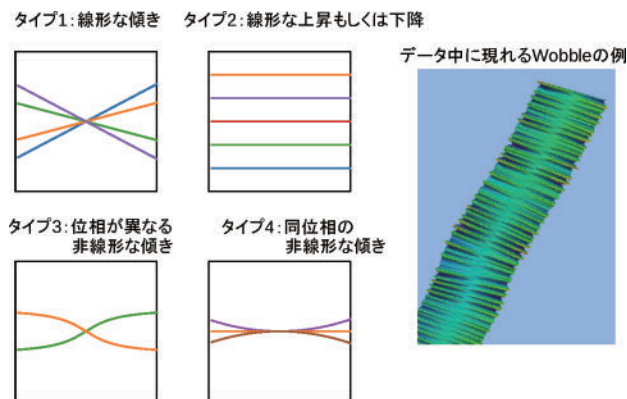


Fig. 1. Four schematic types of wobble manifestation in the across-track direction (left) and an example of wobbles in bathymetric data (right). Colored solid lines in the four panels on the left show the sounding patterns for different vessel attitude states.

図 1. Across-track (測線横断) 方向における Wobble の現れ方に係る 4 タイプの模式図 (左図) と海底地形データ中の Wobble の例 (右図)。左の 4 つの図中の様々な色の実線はそれぞれ、船体が異なる姿勢を取った際のサウンディングの様相を示している。

2.2 Wobble の成因に係る 8 つの分類

本節ではその成因に係り、代表的な Wobble の分類を試みる (Fig. 2)。

2.2.1 (A) モーションセンサーのスケールリング

モーションセンサーの入力と出力の割合をスケールファクターと言い、分類 (A) はこのスケールリングに起因する Wobble であり、航跡直下ではその振幅がゼロだが、スワス端に向かって直線的に振幅が増加するため、前節で確認したスワスへの現れ方においてはタイプ 1 に分類される (Fig. 2A)。かつて使用されていたアナログモーションセンサーでは多く確認されたものの、デジタル化されたモーションセンサーが主流となった現在ではほとんど問題にならない。

2.2.2 (B) モーションセンサーの出力時間遅れ

モーションセンサーが内部計算にかかる時間は無限小でないため、モーションデータ (ピッチ、ロール、ヨー) が出力されるまでの時間が遅延と

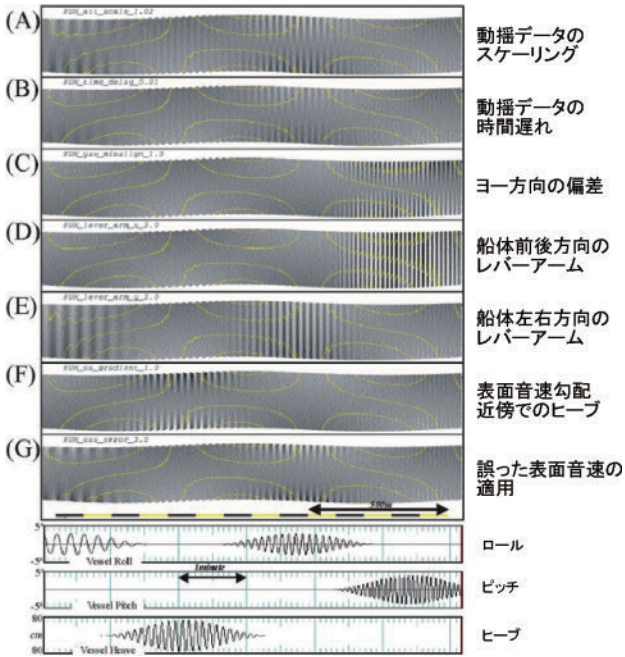


Fig. 2. Eight categories of wobbles regarding mechanisms (modified from Hughes Clarke, 2003, Fig. 6). The yellow lines in the six upper panels indicate bathymetric contour lines. The three lower panels show time series of roll, pitch, and heave, respectively.

図2. Wobbleの成因に係る8つの分類 (Hughes Clarke (2003) の Fig. 6を編集). 上部6つの図内に見られる黄色の線は等高線を示し、下部の3つの図はそれぞれ、ロール、ピッチ、ヒーブの時系列図である。

してデータに影響を及ぼす場合がある。この際、海底地形データにおいて Wobble はタイプ1で現れ、ロールの出力遅れが最も顕著な傾向にある (Fig. 2B)。今日ではデータ出力は迅速かつ頻繁なレートで行われるため、分類 (B) の Wobble もまた稀である。

2.2.3 (C) ヨー方向の不適切なアライメント

ソナーヘッドとモーションセンサーのアライメントを行う方法であるパッチテストでは、ソナーヘッドとロールセンサーの偏差及びピッチセンサーの偏差を調べる一方、ロール軸及びピッチ軸のヨー方向の偏差は考慮されない。そのため、パッチテストでのアライメントが適切であったとしても、必ずしもヨー方向にアライメントし



Fig. 3. Schematic of soundings when the vessel undergoes heave motion near the surface sound speed gradient.

図3. 表面音速勾配付近を船体がヒーブ運動した際のサウンディングの模式図。

ているとは限らず、ロール軸あるいはピッチ軸がヨー方向に偏差を持つ場合、互いの測定値に影響を及ぼしあう効果 (「クロストーク」と言う) が生じ、海底地形データには Wobble が現れる。この際、データへの現れ方は前節のタイプ1となる (Fig. 2C)。

2.2.4 (D) 船体前後方向または (E) 船体右舷左舷方向のレバーアームエラー

ポジショニングセンサーのオフセットに誤った値が適用された場合 (例えばプラスマイナスの符号を誤って入力してしまうなど)、静的及び動的エラーの両方を引き起こす。動的なエラーはいわゆる “Induced heave” と呼ばれ、スワス内では全体の上下動、つまり前節で紹介したタイプ2としてデータ内に現れる (Figs. 2D, E)。

2.2.5 (F) 表面水中音速の成層構造

表面水中音速の鉛直プロファイルに大きな勾配がある場合、音線屈折を受け、スワス端に向かって屈曲する “Smily” あるいは “Frown” と呼ばれる特徴的なサウンディング構造となる (Fig. 3)。そのような音速鉛直勾配近傍で船体が鉛直運動する場合、海底地形データにはタイプ4 (両スワス端の位相は同じであるが、スワス端へ向かう傾き具合は非線形) の現れ方で Wobble が生じる (Fig. 2F)。

2.2.6 (G) 誤った表面水中音速の適用

ソナーが何らかの理由で実際の表層水中音速と

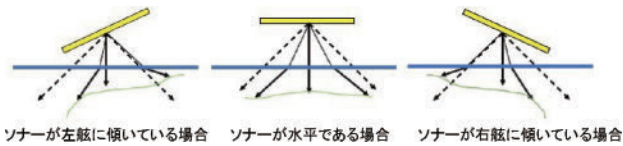


Fig. 4. Schematic of acoustic ray paths and soundings when an incorrect surface sound speed is applied and the vessel undergoes roll motion.

図 4. 誤った表面音速を適用し、船体がロール運動した際の音線とサウンディングの模式図。

は異なる値をビームステアリングに用い、かつソナーが船体運動によって水平ではない場合、屈折により音線に非線形な歪みが生じる (Fig. 4)。この種の Wobble は別名 “Don Dinn Effect” と呼ばれる。Wobble の形状としては両端が傾く形状のため (A) に最も近く、ロールとの相関がある点でも類似しているが、(G) はタイプ 3 に分類される非線形な現れ方のため、スワス端にしたがって (正確にはビームステアリング角にとともに) (A) よりも急激にその振幅が大きくなる (Fig. 2G)。

2.3 その他の系統的アーティファクトの例

上記に分類した以外にも系統的かつ動的なアーティファクトを誘発する要因には様々なものが存在し、例えば下記に挙げる要因が海底地形データ中に系統的アーティファクトを発生させることもある (Hughes Clarke, 2018; Hughes Clarke, 2017; Hughes Clarke, 2003)。

- 船舶の側面に設置しているポールシステム等を使用した場合に見られるモーションセンサーとソナーヘッドの間のレバーアームの非剛体的変形
- スワス内におけるボトムディテクションの振幅判定と位相判定の境界
- 水深に対応したソナーの取得モード (例えば “Shallow” や “Deep” 等) に応じて生じるスワス内におけるセクター毎の波形 (CW 波あるいは FM 波) の境界

また海洋物理学的現象がアーティファクトの主要因となるケースでは、海面のうねりを船体が乗

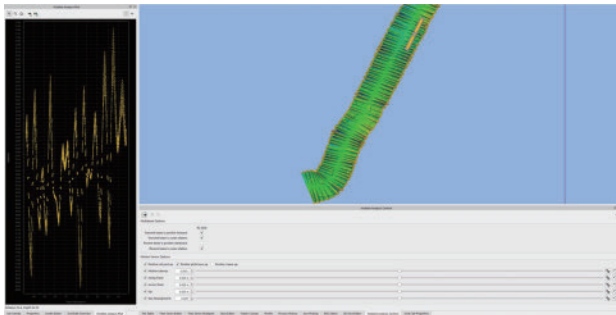
り越えることで見かけの波状アーティファクトが海底地形データに重畳される例や、海中の密度成層構造によっては海洋内部に内部重力波やケルビンヘルムホルツ不安定といった周期性を持つ波状の海水密度擾乱が発生し、音線屈折を通じて影響を及ぼすことで、海底地形データに波状アーティファクトが現れる例もある。

3 海底地形データに現れるアーティファクトに対するポストプロセッシングツールの例

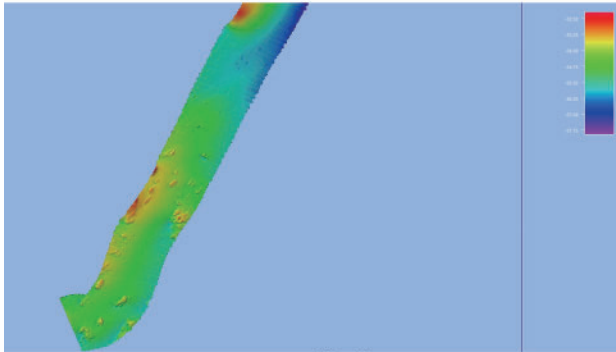
本章では QPS 社の海底地形データプロセッシングソフトウェア Qimera に実装されているポストプロセッシングツールを例示する。これらのツールは前章で紹介した Wobble に限定せず、動揺や音速度構造に起因して現れる静的及び動的アーティファクトの補正にも有効であると考えられる。多くの水路測量従事者に知られている、動揺に係る 4 つの要素 (ソナーヘッドとヘディングセンサーのヘディング値の偏差、ソナーヘッドとピッチセンサーのピッチ値の偏差、ソナーヘッドとロールセンサーのロール値の偏差、ソナーヘッドとポジションセンサーの時刻非同期) を確認し、静的なエラーを補正するツール、いわゆる「パッチテストツール」も海底地形データに重畳されるアーティファクトの補正に有効なツールであるが、本稿では取り上げない。パッチテストの詳細については他の文献を参照されたい (例えば R2Sonic, LCC, 2020 等)。

3.1 Wobble Analysis ツール

本ツールでは、その名のとおり Wobble の要因となり得るモーションセンサーに係る様々な設定を操作することができる。新たに設定した値はツール上の画面表示に即座に反映され確認することができる。モーションセンサーに係る変更可能項目には、レイテンシー、オフセットの符号及び絶対値、ヨー方向のアライメントがあり (Fig. 5)、前節で紹介した Wobble の分類と照らし合わせると、レイテンシーの調整は分類 (B) の Wobble の補正に、オフセットの調整は分類 (D)



ツール使用時



ツール適用後

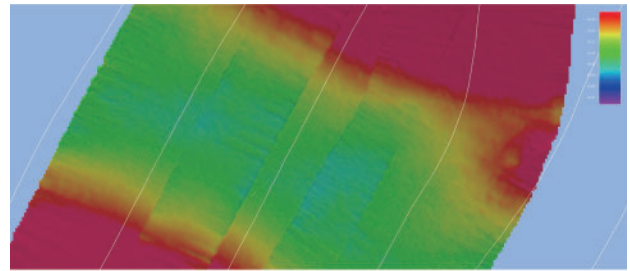
Fig. 5. Example using the Wobble Analysis Tool. The upper panel is the printed tool screen, which analyzes the area marked with a rectangle in the upper-right bathymetric view. The control bars at lower right allow adjustment of multiple parameters, e.g. motion-sensor latency. The left panel shows the Swath Editor which visualizes the soundings within the selected area. The lower panel shows the screen after applying the tool, where wobbles have been effectively eliminated.

図5. Wobble analysis toolを使用した例。上図は使用中の図で、右上の海底地形データの表示で、解析範囲を長方形で囲むことで使用する。右下に表示されているバーを操作することで、モーションセンサーのレイテンシー等、複数の項目を操作することができる。左の画面はスワスイディタで、解析範囲内のサウンディングが可視化されている。下図は使用後の画面で、Wobbleが改善されていることがわかる。

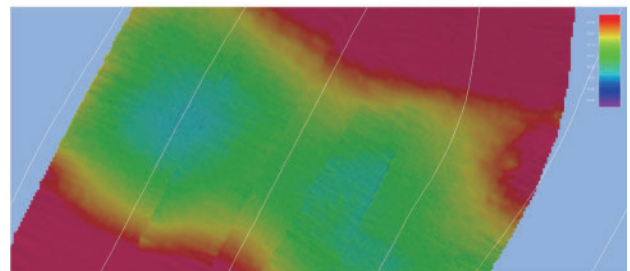
(E) に、ヨー方向のアライメントは分類 (C) に有効である。

3.2 TU Delft Sound Speed inversion ツール

本ツールはデルフト工科大学と QPS 社の協力によって開発された、自動的に音線屈折効果を補



ツール適用前



ツール適用後

Fig. 6. Example using the TU Delft sound-speed inversion tool. The white lines indicate the vessel tracks. Comparison between before and after the application of this tool shows some improvement in both the static and straight along-track artefacts, as well as the dynamic and wavy across-track artefacts.

図6. TU Delft sound speed inversion toolを使用した例。白線は航跡を示す。ツール使用前後を比較すると、Along-track（測線）方向に直線的に存在する静的なアーティファクト及びAcross-track（測線横断）方向に波状に現れる動的アーティファクトの両方が改善されていることがわかる。

正することを目的としたツールで (Beaudoin et al., 2018), 音速度構造に関するアーティファクトが生じており、適用する音速度プロファイルを別のものに変更する等の従来の方法では補正することができない場合に有効である (Fig. 6). 本ツールの原理を簡単に述べると、隣り合う測線同士の海底面検出の水深値を参照して、それらの値が最も合致するように様々な調和音速（とある水深区間で平均し一定であると仮定した音速のこと）を試すことで、最小二乗法を用いて音速及び水深値を最適化するというものである。一般的に水中音

速度構造に起因して、「スマイリーカーブ」及び「アングリーカーブ（あるいは“Frown”）」として知られているスワス端に向けて音線構造が凸状あるいは凹状となる静的アーティファクトの場合だけでなく、前章の Wobble 分類 (F) (G) の例や、乱流あるいは不安定現象により複雑な音線屈折が発生するようなドラスティックな海洋環境が誘発する動的アーティファクトにも有効であると考えられる。ただし、計算原理として隣り合う測線同士の重なりを利用して補正するため、オーバーラップが全く無いもしくは少ない測線群あるいは単独の測線には効果が得られないことと、ツール使用により音線経路計算（レイトレーシング）をし直すため、海底面として検出された位置座標も修正されてしまうことに注意が必要である。

4 まとめ

本稿では代表的な Wobble の成因と分類をまとめた。これらは平穏な海象条件においては振幅が小さい傾向があり、多くのケースで航海安全上の問題にはならないと考えられる一方、ソナーが解像できる特徴物の最小スケールよりも大きく、また、その様相も系統的でランダムに海底地形データ内に現れるわけではないため、地形学・地質学的解釈を行う際には細心の注意を払う必要がある。可能であれば、観測時の即時のデータ確認による要因調査と除去あるいはポストプロセッシング時のアーティファクト補正が望ましい。実用的なポストプロセッシングソフトウェアの一例として挙げた Qimera の諸機能からもわかるとおり、実務の場においても比較的簡単にその成因分析と補正が可能になりつつあると言える。本稿に取りまとめた情報が、水路測量従事者にとって効率的な海底地形データの取得及び適切な解釈の一助となれば幸いである。

謝 辞

本稿は筆者がニューハンプシャー大学留学中に受講した John Hughes Clarke 教授の講義内容の

一部に基づくものである。また同留学中に Semme Dijkstra 教授の講義中に取得した観測データを Wobble やソフトウェア機能紹介の際に例示した。本稿執筆を快諾してくださった John Hughes Clarke 教授及び Semme Dijkstra 教授に、ここで深く感謝の意を表するとともに、アメリカ大気海洋庁助成金 NA20NOS4000196 の支援に感謝申し上げる。

文 献

- Beaudoin J., R. Weston, T. Haji Mohammadloo, and M Snellen (2018) Automated correction of refraction residuals, HYDRO18 conference, Australian Hydrographic Society and International Federation of Hydrographic Societies, Sydney, Australia, October 30 to November 1.
- Calder B. (2003) Statistical Processing of Multibeam Echosounder Data, International Hydrographic review, Vol. 4, No. 1, 53-68.
- Hughes Clarke J.E. (2018) The Impact of Acoustic Imaging Geometry on the Fidelity of Seabed Bathymetric Models, Geosciences, Vol. 8, No. 4, Article 109.
- Hughes Clarke J.E. (2017) Coherent refraction “noise” in multibeam data due to oceanographic turbulence, United States Hydrographic Conference 2017, The Hydrographic Society of America, Galveston, Texas, USA, March 20 to 23.
- Hughes Clarke J.E. (2003) Dynamic Motion Residuals in Swath Sonar Data : Ironing out the Creases, International Hydrographic review, Vol. 4, No. 1, 6-23.
- Lecours V., R. Devillers, E.N. Edinger, C.J. Brown and V.L. Lucieer (2017) Influence of artefacts in marine digital terrain models on habitat maps and species distribution models: a multiscale assessment, Remote Sensing in Ecology and Conservation, Vol. 3, No. 4, 232-

246.

Quality Positioning Services B.V. (2014) Qimera.
R2Sonic, LCC (2025) Sonic Series Sonic 2026
Multibeam Echosounder (MBES) - R2Sonic.,
<https://r2sonic.com/products/sonic-2026/>.
R2Sonic, LCC (2020) R2Sonic LLC - Multibeam
Training: The Patch Test, <https://www.r2sonic.com/wp-content/uploads/2020/03/The-New-Patch-Test.pdf>.

要 旨

マルチビーム音響測深機により得られる測深データには、測深誤差が規定の許容範囲内であっても、周期的かつ系統的に現れる小振幅のアーティファクトが可視化されることがある。これらは“Wobble”と称され、視覚的に誤解を招く見かけの微地形構造を発生させるため、地形学・地質学的解釈等において無視できない要素である。Wobbleは、船体動揺を主として海水密度構造（海水中音速度構造）等にも関係するとされるが、その発生要因や分類について体系的に論じた先行研究は限定的である。本報告では、Hughes Clarke (2003) 等を参考にしてWobbleの分類と成因を概説するとともに、Quality Positioning Services B.V. 社（QPS社）の水路測量データ解析ソフトウェアQimeraに実装されたツールを例に、ポストプロセッシングにより海底地形データ上に現れるアーティファクトを解析・補正できる機能も紹介する。