

## 船体表面の粗さを測定する際の 測定基準と最新の測定器

Kevin de Kreij<sup>\*</sup>

翻訳および補足解説：Cotec Corp<sup>\*\*</sup>

本誌 2013 年 2 月号<sup>1)</sup>に、船体表面の粗さが運航コストに大きな影響を及ぼし、その管理が海運などの船舶航行における地球環境保全=いわゆるエコシップの重要で最も現実的な切り札になろうとしていることを、海外からのレポートで紹介した。それから短期間のうちにその認識は世界共通のものとなり、すでに日本の関係企業においてもこの分野でフロントに立つための研究開発が本格化している。その成果は、航行時の摩擦抵抗を極小化した優れた船底塗料などとして報道されている。

船体表面の状態がこれほどまでに航行コストに大きな影響を及ぼすという認識が共有されるようになったその背景には、船体表面の管理方法について英国の公的機関により精力的に研究が行われ、その影響が客観的な再現性をもって評価できるようになったことがある。そしてその研究の中軸ともなったのが、独特とも言える測定装置の開発である。今後の船舶表面の凹凸管理に関する研究を後押しし、その成果を具体化するのに欠かせない船舶表面の粗さ測定器であるが、現在は民間企業に引き継がれ、大きな進化を遂げ、世界で普及を見せている。日本でも塗料メーカーを中心にその最新モデルの採用が相次ぎ、現場指導も始まったことを受け、今一度その開発の背景、原点となった測定装置、そして最新モデルについての海外レポートを紹

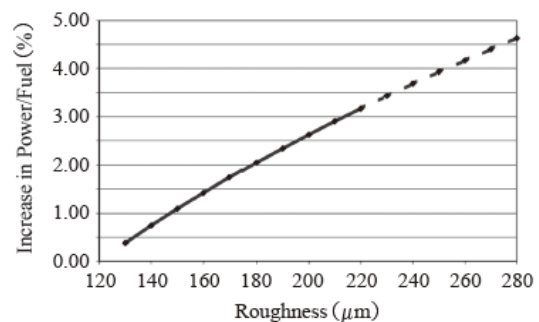
介したいと思う。

### 1. 船体表面粗さ管理の重要性

船体表面の粗さ管理の重要性が認識されたのは、それが燃費に大きく影響するという科学的実証データが公表されたからである。航海時に水流と接する船底の表面粗さが大きくなると、ただちに摩擦抵抗が高まり、船の推進を妨げ燃費の悪化を招く。第 1 図は、船体表面の粗さがいかに燃費に影響するかを表している。

船体表面の粗さが増大する要因には、主に次の二つのタイプがある。それは物理的なものと生物的(付着)なものである。そのいずれもが、マクロ的そしてミクロ的特徴を伴っている。

マクロの物理的要因は鋼板の湾曲、鋼板の重



第 1 図 優れた船舶の基準と言われる高速航行速度を維持するのに必要な推進力・燃料と船体粗さの関係の代表的例

注 縦軸：必要な推進力・燃料の増加(120μm 時を 0 とする増加割合)、横軸：船体表面の粗さ。

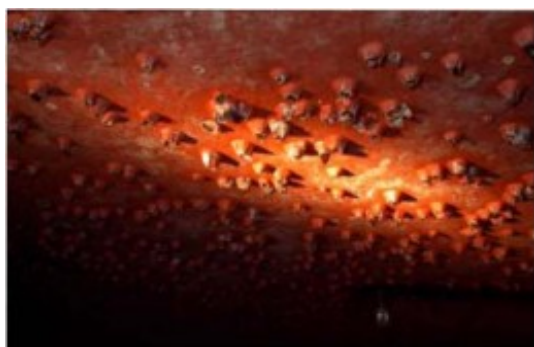
<sup>\*</sup> Kevin de Kreij Thermimport Quality Control 社(オランダ)

<sup>\*\*</sup> もとよし ゆうき コーテック(株)

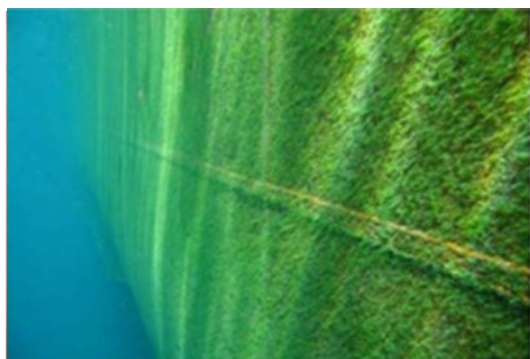
ね目や継ぎ目、溶接や溶接品質、損傷や腐食などが、また生物的要因は、典型的なものとして動物と植生による汚れがある(第2, 3図参照)。

ミクロの物理的要因は鋼板の性状、軽度の腐食そして塗装条件に起因している可能性がある。また、ミクロの生物的要因は、典型的には粘着物に起因している(第4図参照)。

そして、以上に挙げた船体表面の粗さの主な増大要因が摩擦抵抗を高め、コスト増につながる



第2図 貝類の付着



第3図 植生の付着



第4図 海洋生物による粘着質の付着

ることから、経済的側面と環境的側面に影響する。このため、船体の表面粗さを考慮した船体管理がますます重要となり、測定装置によって船体表面の粗さを測定し、客観的な摩擦抵抗を算出することが不可欠となったのである。

## 2. 船体表面粗さ計 (Hull Roughness Analyzer) の開発経緯

測定装置の開発の船出は、BSRA (英国造船研究協会) によって1950年に行われた、Lucy Ashton号における船体表面の抵抗実験まで遡(さかのぼ)る。この実験により船体表面の状態が船のパフォーマンスに与える影響の大きさが客観的に判明した。それ以来、BSRAは船体表面粗さを適切に測定できる装置の開発に注力してきた。そして、長年の開発の結果、本レポートで紹介するプロトタイプが誕生した。

ちなみに、BSRAはその後民営化され、BMT社 (British Marine Technology) に改組され、さらなる改良が進められた。この測定装置の基本的な測定原理は、船体の表面に測定部の車輪を接して直線に動かし、表面の凹凸をトレースする針により粗さを測定し、そのデータを表示するユニットへ送るというものである。

なお、BMT社が採用した測定針の先端形状は球状である。このBMT社の船体表面粗さ計の設計思想が、後述する最新の船体表面粗さ計に後に受け継がれることになる。

第5図に、BMT社の船体表面粗さ計を示す。

### (1) 測定器の理論根拠

このBMT社の船体表面粗さ計の開発には、英国ニューキャッスル大学の教授で、船舶のパフォーマンスと船体およびプロペラの粗さの影響に関する権威である、Dr. Robert L. Townsinの研究結果が大きく反映されている。

特に、3年間にわたる47隻の船における延べ147回にものぼる調査を基に、1980年に発表された“Speed, power and roughness: the economics of outer bottom maintenance”は、現在の船体表面粗さ管理のバイブル的存在となった。

この論文の概要を以下に紹介する。

#### ① 測定の対象

- ・ 損傷のない船体の塗膜の粗さの測定。
- ・ 表面に局地的な傷があり、素地が変形して



第5図 BMT社の船体表面粗さ計

いるような場所は測定するのを避ける。

② 測定の意義

- 塗装された船体表面の粗さがもたらす摩擦抵抗を評価することができる。
- 新たに塗装した塗装面の品質を評価することができる。
- 再塗装する前と後の測定結果を比較することにより、塗装の品質評価が行える。

③ 測定の方法

- 測定者はできる限り広範囲において、左舷(さげん)と右舷、船底部など、水に浸(つ)かる船体表面の100箇所の測定をする。
- 測定はドライドックにおいて、移動クレーンなどを用い行われる。
- 損傷のない塗膜面を測定する際、1回(1箇所)の測定で測定部を動かす距離は腕の長さを超える程度で、すなわち1mを超えない程度が適切である。
- 測定部を動かす際にはできる限り流線に沿って水平に行う。
- 測定箇所ごとに平均船体粗さ(MHR)の値を $\mu\text{m}$ 表記で求める。そして、それぞれの値がどの場所の値かわかるようにする。
- 約100箇所のMHR値の平均値を出すことにより、船体全体の平均粗さ(AHR)の値を求める。
- 統計グラフなどを用い、再塗装をする前と後のAHRを比較するとよい。また左舷と

右舷、船底部のAHR値を比較することを推奨する。

(2) 船体表面粗さ管理で用いるパラメータ

Rt(50)パラメータで、測定針で船体表面を50mmの長さでトレースした際の凹凸を決定し、また船体表面をいくつかのセクションに分け、そのセクションの代表的な場所でRt(50)を1m程度連続して測定した平均粗さをMHR(Mean Hull Roughness)パラメータとして表し、各セクション面のMHRをさらに総合して平均値化したものを全体平均船体粗さAHR(Average Hull Roughness)パラメータとして表すというのが全体の構図である。個々のパラメータについて順に見てみたい。

① 粗さのパラメータ Rt(50)

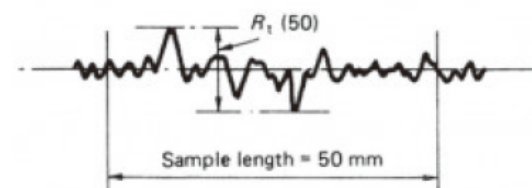
船体表面粗さを測る際に基本となるパラメータはRt(50)であり、BSRA/BMT社の長年にわたる船体粗さ計の開発の中でこのパラメータは生まれた。これは船体表面上の直線50mmにおける最大の“山と谷”(粗さ)を測定することを基準とし、測定値は $\mu\text{m}$ で表すことを定めたものである(第6図参照)。

このRt(50)測定基準は、二つの重要な点において有益な指標となる。一つ目は、品質管理における船体表面の仕上げ状態とその維持状態の評価。二つ目は、船のパフォーマンスへの船体表面の粗さの影響を計算する目的においてである。

② セクションの平均粗さ(MHR)パラメータ

船のパフォーマンスを評価するうえで、摩擦抵抗に対する船体粗さの影響を検証するためには船体表面のさらに詳しい情報が必要となる。なぜなら、Rt(50)は表面のほんの一部のポイントにおける山谷に基づくパラメータであり、摩擦抵抗を考えるうえで船体表面の性状を表すためには不十分であるからである。

そこで、もう一つのパラメータとして、ある



第6図 Rt(50)パラメータ



セクションの表面粗さを表すための MHR (平均船体粗さ) が生まれた。MHR とは船体をいくつかのセクションに分けた時に、それを代表する場所で一定の距離で Rt(50) を連続して測った数値の平均値である。一般的には、各セクションを代表する場所で 1 回測定して得られた MHR によって、それぞれのセクションの平均粗さとしている。

第 7 図に、MHR 値を求める公式を示す。この式における  $h_i$  が Rt(50) において測定された場所の 50mm ごとの値である。

実際の測定では、最新の船体表面測定器の項で紹介するように、測定ユニットを 600mm 直線状に走行させる。それにより Rt(50) が 12 点連続して測定されることになり (600mm = 50mm × 12 回)、12 点の Rt(50) の平均値が MHR として表示される。

### ③ 全体平均船体粗さ (AHR) パラメータ

そして、船体全体の MHR の値を一つにまとめたのが AHR (全体平均船体粗さ) である。この AHR の値は、一般的にすべての船が 100 ~ 120 のセクションからなるという前提で、それぞれのセクションごとの MHR を求め、その平均を計算したものである。第 8 図に示すのが、先の Dr. Townsin が提示する AHR を測定する公式である。

新しく建造された船の典型的な AHR の値は約 120 $\mu\text{m}$  と言われており、この値は腐食や生物付着によって 300 ~ 400 $\mu\text{m}$  になるという。

このように、船体全体の粗さを評価するためのパラメータを使用することにより、摩擦抵抗

$$\text{MHR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$$

第 7 図 MHR パラメータの公式

$$\text{AHR for vessel} = \frac{\sum_{j=1}^m w_j (\text{MHR})_j}{\sum_{j=1}^m w_j}$$

第 8 図 AHR パラメータの公式

を考慮した立体的な船体表面の形状を解明することができるのである。

以上の船体表面粗さを測る基準は、広く海事業界で認知され標準として運用されている。このような背景から、現在 NACE (防蝕技術協会) の TG461-Standard for Hull Roughness Measurements on Ship Hulls in Dry Dock で規格化の動きがみられ、さらに ISO も基準化の検討に入ろうとしていると報告されている。

## 3. 最新の船体表面粗さ計について

### (1) 特徴

BMT 社は、パラメータ基準と測定方法が確立したことでそのミッションがいったん終了したと考えたようで、自社で測定装置を製造することも取りやめたが、もう少しその経緯を見たい。そもそも、BMT 社の船体表面粗さ計は、ニューキャッスル大学とティーズサイド大学の共同研究によって生み出されたものである。特に既述のように、ニューキャッスル大学の船舶性能研究グループ (Ship Performance Group) は 147 回の船体調査によって船体表面粗さの測定基準というソフトを確立した。

一方、ティーズサイド大学における船舶性能研究グループによる研究は、コンピュータ上で統計分析を行うための測定データを提供するデジタル式船体表面粗さ計というハードを確立した。2012 年の SMM<sup>\*1)</sup> (Hamburger) においてオフィシャルに紹介され、来場者にデモンストレーションを行うことになったように、BMT 社と研究機関の共同研究によって誕生した粗さ計の正統な後継機として承認され、さらに NACE の防錆部門の 2014 年アワードにノミネート<sup>\*2)</sup> されたことからわかるように、オリジナルの設計思想を忠実に受け継ぎながらもエレクトロニクスおよび情報処理技術と融合させ進化させたのが、次に紹介する最新モデルである (第 9 図参照)。

注 \*1) : 隔年で開催される海運業の主要な国際的フォーラム・展示会。

\*2) : NACE International が刊行する MP Magazine において、The Corrosion Innovation of the Year Award 2014 の Material Performance 部門にノミネートされたことが発表された。



第9図 最新の船体表面粗さ計

当然のことながら、BMT社の船体表面粗さ計と同様に Townsin による船体粗さの測定の指針を忠実に反映させた船体表面粗さ計であり、Rt(50)のパラメータによって船のAHR値を測定するために設計されている。

この最新の船体表面粗さ計はBMT社の粗さ計と比べ、大幅に軽量小型化され、ドック内外での作業性も格段に向上している。

## (2) 構造および機能

### ① ユニット構成

第10図に、最新の船体表面粗さ計の構成部品を示す。

図の右側④が測定を行うセンサーユニットで、左側③が測定したデータを保管するコント

ロールユニットであり、どちらも片手で操作が可能となっている。

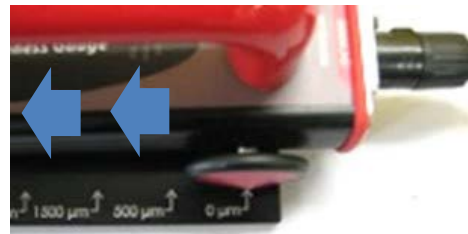
また、USBでパソコンと接続することによって、測定データをExcelシートにエクスポートしデータ管理ができるようになっている。

### ② 測定手順

#### ① 校正

船体表面粗さ計は、測定精度を保障するために校正用プレートで定期的に精度確認を行うことが推奨されている(第11図参照)。

校正用プレートには $0\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、 $1500\mu\text{m}$ 、 $2500\mu\text{m}$ の表示があり、順次、測定ユニットの車輪の中央を合わせていく。最初は $0\mu\text{m}$ の矢印地点に合わせ、コントロールユニットの校正のメニューで“スタート”を押すとコントロールユニットに実測値が表示される。その値が0もしくは近似値であれば“OK”を選択する。続いて $500\mu\text{m}$ の矢印地点に合わせ同様に調整す



第11図 校正用プレート上での校正確認作業



- ① コントロールユニット用のドッキングコネクタケーブル(黒色がPC接続用、赤色が測定ユニット接続用)
- ② データ管理を行うソフトウェアが入ったUSB
- ③ 測定条件を設定しデータを処理するコントロールユニット
- ④ 車輪と先端が丸い測定針から成る測定ユニット
- ⑤ 校正プレート

第10図  
最新の船体粗さ計の  
構成部品

る。そして、 $1500\mu\text{m}$ と $2500\mu\text{m}$ でも行い、すべての数値が近似値であれば同期させ、校正確認作業は終了となる(第12図参照)。

② バッチ名の登録

測定の前に、コントロールユニットにおいて測定結果を保存するバッチと呼ばれる保存場所の名前をつける。本船体表面粗さ計は最大8バッチまで保存が可能で、1バッチ当たり120個のMHR(平均船体粗さ)の値を保存することができる(第13図参照)。

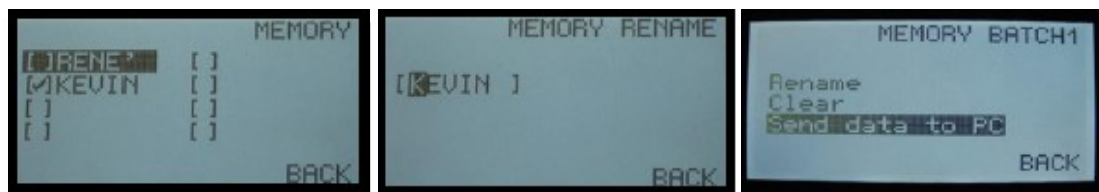
③ 測定の実施

測定ユニットを直線状にゆっくりと動かす。この際Rt(50)のパラメータが使用されるが、1

回の測定につき12点の測定を行う。つまり、船体表面の50mmの範囲の最大の“山と谷”(粗さ)を12点測るということである。したがって、12点の測定をした場合の測定距離は合計600mmとなり、第2章(1)の③測定の方法で紹介した、1回の測定が1mを超えないという測定基準を満たすことになる。この600mmの範囲で測られた測定値が1セットとなり、MHR(平均船体粗さ)値が表示される。また、同時にMHRの総平均値であるAHR(全体平均船体粗さ)値も表示されていく。

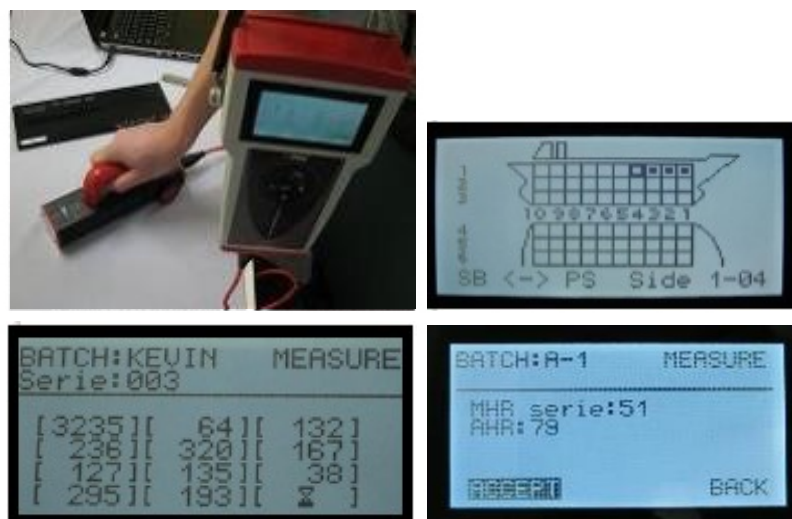
第14図に、測定経過が表示された例を示す。そして、正常に測定されていればACCEPT

第12図  
コントロールユニット  
における校正実測値の  
表示例

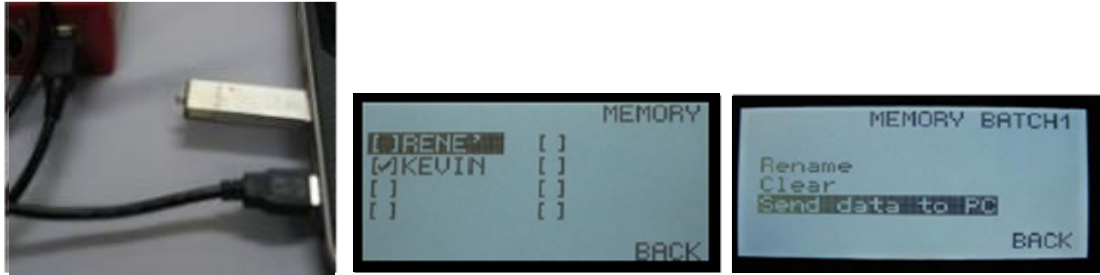


第13図 コントロールユニットにおけるバッチ名の登録画面

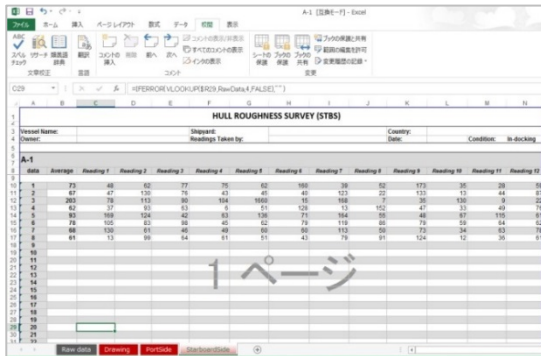
第14図  
測定時のコントロールユ  
ニットにおける測定値と  
イラスト図の表示例







第 15 図 測定データ送信の際の PC 接続と送信画面



第 16 図 エクセルシート上での測定データ管理

を選択する。続いて船体イラスト図が表示されるので、測定した位置をイラスト上に指示する。指示した後は再び測定を開始する。

④ パソコンへの測定データ送信

付属の USB を PC に接続し、ソフトウェアをダウンロードした後、コントロールユニットと PC を付属のドッキングコネクタでつなぐ。

そして、データを送りたいバッチをコントロールユニットで選択し、send data to PC を押してパソコンに送る(第 15 図参照)。

また、第 16 図に示すように、エクセルシート上で測定したデータの管理を行うことができる。エクセルシートでは測定した船の測定場所とその 12 点ごとの測定数値、およびその平均である MHR、そして全体の平均船体粗さ値である AHR が表示される。

現在船体表面粗さ計は、ジョータングループ、PPG インダストリーズ、アクゾノーベルなどのグローバル企業、さらに日本の大手塗料メーカーの意見や協力を得て、測定器本体やデータ

管理方法のいっそうの改善が進められている。

たとえば、日本では粗面化による塗り替え時期の見極めより、塗装施工の品質管理の用途に重点がおかれる。日本の最新のセルフスミージング型船底塗料は塗装直後の塗膜は柔らかいため、最新モデルでは測定針の押し圧を、これまでに蓄積されたデータとの整合性が確保される範囲で弱めている。

また、日本のラボ実験での要望に応(こた)え、Rt(50)パラメータの規定である 50mm の測定距離を 1mm から 99mm まで任意に設定できるようにした。ほかにも、細かい配慮としては、やはり日本のドック現場の要望を取り入れ、本体に専用カバーが付属するようになった。今後もこれらの改善・改良が鋭意進められるそうである。また、時期をみて続報を得るようにしたい。

《参考文献》

- 1) Kevin de Kreij : 「船体表面の平滑性が失われることへの影響を検証・考察する」, 塗装技術, 52 (2), (2013)
- 2) Townsin RL, Byrne D, Milne A, Svensen T : 「Speed, power and roughness : the economics of outer bottom maintenance」, The Royal Institution of Naval Architects, 1980 年
- 3) Chuah K.B., Dey S.K., Thomas T.R., Townsin R.L. : 「A Digital Hull Roughness Analyser」, The Royal Institution of Naval Architects, (1990 年 3 月 29 日)
- 4) John Carlton : 「Marine Propellers and Propulsion」, Butterworth-Heinemann, 3 版, (2011 年 11 月 13 日)