

セメント運搬船を用いたマイクロバブルの実船実験

輸送高度化研究領域 *児玉 良明、堀 利文、牧野 雅彦、川島 久宣

1. はじめに

マイクロバブル(microbubbles)は微細な空気泡を船体表面から注入して流すことにより摩擦抵抗を低減させるものであり、大きな抵抗低減効果をもつこと、環境に優しいことから、船舶に有望な省エネルギーデバイスとして研究が進められている。

海技研では、小型高速流路を用いた基礎的実験から始めて、400m曳航水槽における最大長さ 50m の長尺平板模型船を用いた超大型実験¹⁾を実施し、3年前に(社)日本造船研究協会(当時)により実施された航海訓練所練習船「青雲丸」を用いた実船実験²⁾に参加するなど、約 10 年に亘りマイクロバブルの実用化に向けた研究を進めてきた。今回、東海運(株)との共同研究により、セメント運搬船を用いてマイクロバブルの実船実験を実施したので報告する。

2. 実験対象船

実験にはセメント運搬船「パシフィックシーガル」を用いた。その写真を図 1 に、要目を表 1 に示す。



図 1 セメント運搬船「パシフィックシーガル」

表 1 船の主要目

垂線間長 $L_{pp}=120.0\text{m}$ 、幅(型) $B=21.4\text{m}$
深さ(型) $D=9.90\text{m}$ 、満載喫水 $d=7.215\text{m}$

連続最大出力 (MCO): 5,280PS

航海速度 $V=12.4\text{kt}$ 、総トン数: 7,809 ton

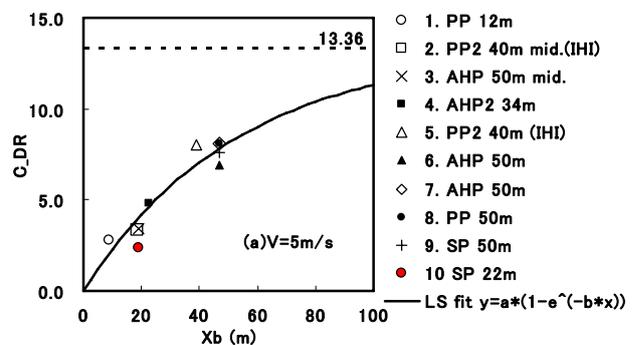
セメント運搬船は積荷の性質上箱形の船型であり、船底に気泡を保持しやすく、またセメント搬送用のブロワーを気泡吹き出し用空気源に転用することができるなど、マイクロバブルに適した船種であると考えられる。

3. 無限に長い平板での抵抗低減率

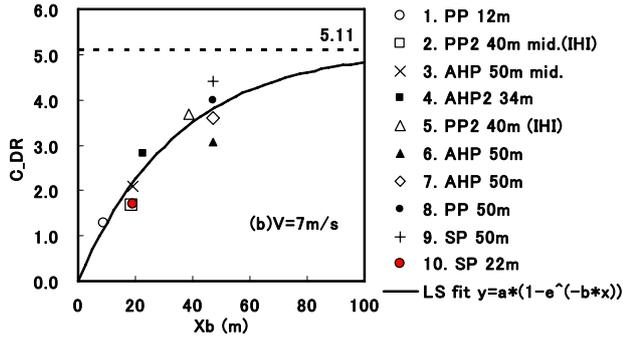
実船における抵抗低減率を以下のように推定した。先ず、過去に行われた長尺平板模型船の実験データを次式で定義される抵抗低減係数 C_{DR} を用いて図 2 に示す。

$$C_{DR} \equiv \frac{(-\Delta D)}{\frac{1}{2}\rho Q_a V} \quad (1)$$

ただし $(-\Delta D)$ は抵抗低減量、 Q_a は空気吹き出し量 (m^3/s)、 V は船速、 x_b は長尺平板模型船の気泡で覆われる部分の長さである。“IHI”はWatanabeら³⁾によるもの、それ以外は海技研によるものである。“PP”は多孔質板を、“AHP”は配列多孔板(孔径 1mm)を、“SP”はスロット板(スロット幅 5mm)を用いた場合を表す。



(a) $V=5\text{m/s}$



(b)V=7m/s

図2 長尺平板模型船での抵抗低減量

"10"は本日発表した結果である。実線は指数型関数を最小自乗法fitしたものであり、 x_b が無限大の漸近値を与える。低速の方が抵抗低減率が大きく、これは気泡の乱流拡散効果がより小さいためと思われる。なお、平板の幅が"IHI"では0.6m、海技研では1.0mと小さいため、底面を流れる気泡が側面から流出し、抵抗低減率がそれだけ低下したと思われるが、その補正は行われておらず、実船では幅が広いいため低減率は大きめと思われる。

4. パシフィックシーガルの予想省エネ率

省エネ率を表す式を示す。気泡吹き出しの有無により船速 V が変わらないとする。

$$V_{\text{bubble}} = V \quad (2)$$

気泡による船の抵抗低減量 ($-\Delta D$) は

$$(-\Delta D) \equiv D - D_{\text{bubble}} \quad (3)$$

気泡による船の馬力低減量 ($-\Delta W$) は

$$(-\Delta W) \equiv W - W_{\text{bubble}} = (-\Delta D)V \quad (4)$$

名目的な省エネ率(馬力低減率) r_{nominal} は

$$r_{\text{nominal}} = \frac{(-\Delta W)}{W} = \frac{(-\Delta D)}{D} \quad (5)$$

気泡吹き出し動力 W_{pump} を考慮した正味の省エネ

率 r_{net} は

$$r_{\text{net}} = \frac{(-\Delta W) - W_{\text{pump}}}{W} = r_{\text{nominal}} - r_{\text{pump}} \quad (6)$$

表2に予想省エネ率と関連パラメータを示す。空気供給にはブロワ1台を用いた。吹き出し空気量の制御はブロワのON/OFFのみによって行った。船速は12kt($V=6.2\text{m/s}$)であり、抵抗低減率は最小自乗法で求めた指数曲線の $x_b=90\text{m}$ 位置における値を船速方向に内挿して求めた。

z_a は吹き出し位置の水深である。実験は満載状態で行われ、気泡吹き出し装置は本来なら平らな船底に設けるべきであるが、ブロワの圧力制限から船側に設けた。

r_{nominal} は、船の抵抗をCFD計算で推定して求めた。バブルによる抵抗低減量 ($-\Delta D$) は、 V と Q_a と C_{DR} の値より定まるが、この関係は気泡が壁に沿って流れることを前提としており、例えば一カ所から大量の空気を吹き出すと、気泡は船体表面から離れ、抵抗低減量は減少するため、気泡吹き出し装置を設計するときは注意する必要がある。

W_{pump} は吹き出し部の静水圧(水深)、動圧、管路の圧損により発生するが、圧損は管路径を大きくして小さくできるので、静水圧が大部分である。このようにして正味5.4%の馬力低減率が推定され、この値から、主機及び発電用補機の燃料消費率及び燃料価格(C、A重油)を考慮した、主機燃費に対する正味の省燃費率5.0%が推定された。

表2 パシフィックシーガルの予想省エネ率

$Q_a = 43 \text{ m}^3/\text{分}$	$r_{\text{nominal}} = 7.4\%$
$C_{DR} = 7.6$	$r_{\text{pump}} = 1.94\%$
$z_a (\text{m}) = 3.5$	$r_{\text{net}} = 5.4\%$

5. 実験準備

実船実験のためのドック工事は定期検査のためのドック入りを利用して行われた。空気配

管は、セメント搬送用管路を船首まで延長した。管路の途中は逆 U 字型に水面上に立ち上げ、閉鎖用のバルブを設けた。

長さ 5m の気泡吹き出し装置が、満載喫水下約 4m の船首船側に、吹き出した気泡が船底に流入すると実船レイノルズ数状態の CFD 計算により予測され且つバウスラスタ孔を避けて両舷に取り付けられ、片舷 4カ所ずつの船体貫通配管により空気が供給された。貫通配管のそれぞれにバルブが設けられ、流量調節・開閉を可能とした。図 3 に気泡吹き出し装置を、図 4 に空気配管システムを示す。



図 3 気泡吹き出し装置

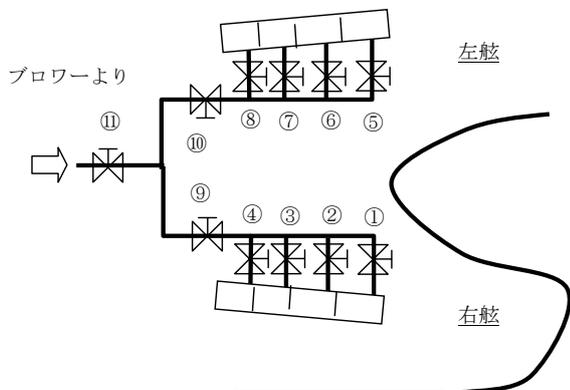


図 4 空気配管システム

計測装置をすべて右舷に取り付けた。青雲丸の実船実験に用いたものと同じ形式のせん断力センサを、吹き出し部から約 20m 下流の船底平坦部の同じ x 位置に、1 つは船体中心面から 8.0m の位置に (τ_1)、もう 1 つは 5.5m の位置に (τ_2) 取り付けた。気泡観測用の合計 12 個の水中 TV カメラを船体表面に取り付けた。3 つは気泡吹き出し装置の観測用に、5 つは船底に、2

つは船側に、2 つはプロペラ観測用に取り付けた。船底の 5 つのうち 2 つをせん断力センサ上を流れる気泡の観測に用いた。さらにプロペラ軸に歪みゲージを貼り付け、スラストとトルクを計測した。対水速度は、船に備えられている超音波式流速計を用いて計測した。

6. 実験の実施

(1) 第 1 回実船実験

2005 年 2 月下旬に、満載状態(出港時喫水は Fore=6.63m, Aft=7.40m)で、大分県佐伯港から鹿児島港までの通常航海中に行われた。風速 2~5m/s、波高 1.5m、横揺角 ± 1.5 度であった。実験結果を表 3 の 12ktA' と 13ktA' 状態に示す。状態名の "12kt" 等は平均速度を、"A'" はバルブ開閉状態を表し、最初バブルをすべて全開にしたところ、船側を流れる気泡が非常に多かったので、気泡が船底に流入しやすいと思われる前方(下方)のバルブのみを開けた。ただしプロワの電流値制限のため③⑦バルブを 1 回転だけ開けた。

標準状態である速度 12kt 状態では、 τ_1 位置では約 40% もの摩擦低減効果が得られたが、2.5m 内側の τ_2 位置では逆に約 10% 増加した。また、さらに内側に取り付けられたカメラでは気泡が全く観測されなかった。気泡の多くが船側を流れ、船底に流入した気泡は船側近くに集中したと思われる。気泡吹き出しにより船速が 1% 低下したので、計測値を同一速度状態に換算した。その結果スラストは変化せず、これは船体抵抗が低減しなかったことを表す。この原因は気泡の大部分が船側を流れ、一部に顕著な摩擦低減が見られるものの、気泡が摩擦増加に働いた部分もあるためと思われる。またトルク及び主機燃費が 3~4% 増加しており、青雲丸の実船実験で見られたように、気泡の流入によりプロペラ効率が低下したと思われる。

次に、船底に流入する気泡を増やすため、13kt に船速を上げた状態で計測を行った。この状態では τ_1 が 60% も減少し、 τ_2 も増加から減少(4%)に転じ、気泡状態がやや改善されたと思われる。ただしトルク、スラストには大きな変化は無い。

(2) 第 2 回実船実験

2005 年 3 月下旬に、満載状態(出港時喫水は

Fore=6.33m, Aft=7.64m)で、函館港から大阪港までの間で通常航海中に行われた。風速 4~6m/s、波高 1m、横揺角±2度であった。低気圧の通過直後ややうねりがあった。速度は 13kt 状態のみ行った。実験結果を表 3 の 13ktA 状態に示す。今回は船首喫水をやや浅くしたのでバルブ③④⑦⑧を全閉にすることができた。

前回の 13ktA'状態と比較すると、気泡吹き出しにより速度が低下しなかった、摩擦 τ_1 の低減量がやや少なかった、スラスト(すなわち船体抵抗)が 1%低下した、トルク及び主機燃費が増加しなかったなど、改善が見られる。すなわち、気泡が前回よりも多く船底に流入し且つ広がったと思われる。ただし燃費の改善には至っていない。

表 3 実船実験結果。数値は気泡の有無状態の比(有/無)。12ktA'は 5 回、13ktA'は 2 回、13ktA は 3~5 回の平均値。

下半分は、上半分の値を同じ速度状態に換算。 τ は速度の 1 乗、トルクは 3 乗、スラストは 2 乗、主機燃費は 3 乗に比例と仮定。

A': ①②⑤⑥全開、③⑦1 回転開、④⑧全閉。

A: ①②⑤⑥全開、③④⑦⑧全閉。

状態名	速度	τ_1	τ_2	トルク	スラスト	主機燃費
12ktA'	0.992	0.578	1.105	0.992	0.987	1.025
13ktA'	0.992	0.374	0.952	1.002	0.998	1.021
13ktA	0.999	0.819	0.967	0.999	0.987	1.002
12ktA'	1	0.583	1.114	1.016	1.003	1.042
13ktA'	1	0.377	0.960	1.026	1.014	1.038
13ktA	1	0.820	0.968	1.002	0.989	1.004

7. 考察

気泡が予想に反して船底に流入しなかった原因として 4 つ考えられる。

1 つ目は吹き出し圧力不足である。そのため、バルブの開閉を調節して最適な吹き出し分布を実現する余裕が無くなった。

2 つ目は気泡の軌跡を予測する CFD 計算における浮力効果の過小評価である。これは青雲丸の実船実験のときにも経験した。気泡群として

の挙動を推定できるようにする必要がある。

3 つ目は気泡吹き出し装置の近くに設けられたチェーン除けである。図 3 に見えるように、直径 6cm の円柱を半割にしたものが水平に数段取り付けられている。これにより気泡の軌跡が水平方向に曲げられた可能性がある。

4 つ目は横揺れの影響である。気泡の吹き出しは圧力に敏感に反応する。横揺れが発生した場合、下になった舷で気泡が途切れる現象が観察された。青雲丸の実験では左右舷計 6 箇所の吹き出し位置のそれぞれにコンプレッサが接続されたため横揺れの影響を受けなかったが、今回は空気源が左右舷共通であるため、横揺れ影響をもろに受けてしまった。

8. 今後に向けて

以上、マイクロバブルの実用化に直結する成果は得られなかったが、多くの貴重な実船実験データが得られた。吹き出し位置から 20m 下流で 60%もの摩擦低減効果が得られたこともプラス材料である。船底に気泡が流入すれば抵抗が低減することは依然として確実であると思われる。また、横揺れ影響を受けにくくするためにも船底から気泡を吹き出す方法が、吹き出しエネルギーは増えるが、良いと思われる。ただし、気泡が確実にプロペラに流入すると思われるので、その対策を施すことが不可欠である。

謝辞

東海運(株)の井上敏彦氏及び矢野輝氏には終始大変お世話になった。阪大の鈴木敏夫名誉教授と戸田保幸教授にはスラスト・トルク・せん断力計測を担当して頂いた。中国塗料(株)の山下和春氏には計測器接着法を、三井造船昭島研究所の上入佐光氏には計測器配置等を担当して頂いた。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高橋他、関造協誌 239 巻、(2003).
- 2) 永松他、造学論 192 巻 pp. 15-28 (2002).
- 3) Watanabe et al.、183 巻 pp. 53-63 (1998).