

空気循環槽による船舶の摩擦抵抗低減

1. はじめに

船の抵抗低減は、船舶流体力学分野における永遠の課題であり、W. Froudelにより船舶抵抗の科学的分析法が確立されて以来、綿々とその研究が続いています。高速で急増する造波抵抗については、様々な方法でその低減が行われ、大きな成果をあげてきました。一方、流体の粘性に起因する摩擦抵抗の低減については、浸水表面積にほぼ比例することから、ドラスティックな低減は難しいと考えられてきました。

そうした中で、近年、国際間のバラスト水移動による環境問題に加え、摩擦抵抗を大きく減らすためにバラスト水をなくすことが考えられました。大型タンカーや大型鉄鉱石運搬船などでは、片荷航海となるため、空荷状態では大量のバラスト水を積載してプロペラ没水深度を十分にとる必要がありました。日本造船技術センターではいち早くノンバラスト船の開発に取り組み、三角形に近い船体断面にすることによって、貨物量に伴う喫水変化を抑えることで、空荷状態でも十分なプロペラ没水深度を確保できるノンバラスト船を開発しました。

また大阪府立大学でも、ノンバラスト船の開発に取り組みました。こちらはポッド推進器自体を上下可動にして、空荷時のプロペラ没水深度を確保するものでした。このアイデア自体は、日本造船技術センターのノンバラスト船の当初のコンセプトにも入っていましたが、実用化に向けた本格的な研究が行われたのはこれが初めてでした。NKをはじめとして9社の造船会社および造船関連企業が参加したプロジェクトして大きな成果を挙げたユニークな開発研究です。

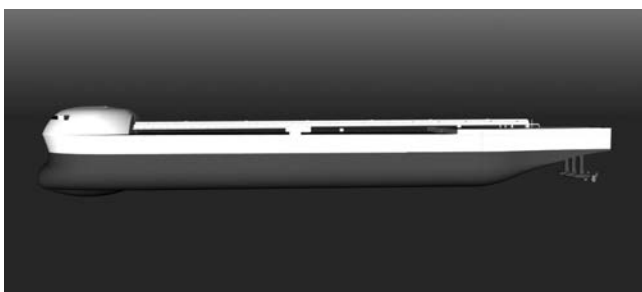


図-1 大阪府立大学を中心に開発されたノンバラストタンカー

このように、摩擦抵抗低減という共通研究テーマをかかげる日本造船技術センターと大阪府立大学が、次の共通研究テーマとして選んだのが空気潤滑法の1つである船底空気循環槽に

よる大幅な摩擦抵抗低減の実用化です。

昨年度、日本造船技術センターは大阪府立大学に委託共同研究として、船底空気循環槽に関する研究を依頼しました。以下は、その成果の概要です。

2. 空気潤滑法の研究レビュー

空気を使った摩擦抵抗低減については、W. Froudeがその可能性に言及していると伝えられています。また、約150年前には、空気による抵抗低減に関する特許がとられているとも伝えられています。1918年には、米テラー水槽から、空気膜を使った船舶の抵抗低減に関する報告書が出されています¹⁾し、ずいぶん古くから多くの造船技術者が空気を使った摩擦抵抗低減に興味をもっていたことがわかります。

近年においても、研究は各地で行われ、様々な特許も申請されていることが調査の結果わかりました。その多くは船底から空気を噴出し、空気膜または空気泡で船底を覆って、水との摩擦力を減らすものです。実際の船では船底に薄い空気膜を広く形成することが難しかったため、空気の泡で船底を覆う方法が、日本および欧州で実用化されていることはご存じの通りです。実質的に3~10数%の省エネ効果が実現しています。

もうひとつの実用化例が、高速滑走艇におけるエア・キャビティ船です。一般的には、図-2に示すように船底にステップを作り、そこに空気を注入して、ステップ背後の船底に厚い空気膜を形成して摩擦抵抗を減らします。このエア・キャビティ・システムを、排水量型の大型船にも適用しようという試みが、世界各地で行われています。

Fig. 2 Schematic view of the bottom of a fast ACB

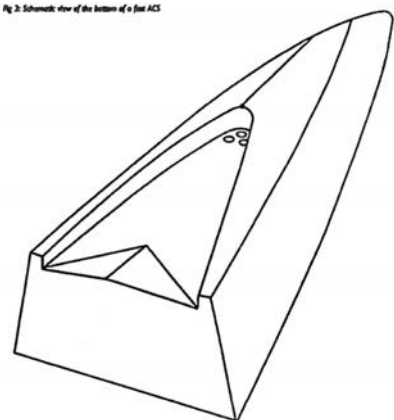


図-2 高速滑走艇のエアー・キャビティ・システムの1例⁹⁾

1966～1989年に、このエアークャビティシステムを排水量型船舶に適用するための先駆的な研究がロシア(旧ソ連)で精力的に行われ、河川用バージ数隻にも搭載され、12～27%の抵抗低減に成功しています²⁾。

同様に、エアークャビティシステムを、排水量型のタンカーやバルカーに適用する試みが、オランダのDKグループでも行われ、同社ではタンカーおよびバルカーで10～15%、コンテナ船で5～9%の抵抗削減が可能としています。また、このシステムの実船(81m、3000DWの小型バルカー)による試運転が2008年に行われたと伝えられています。

欧州ではEUプロジェクトSMMOTHの中で、エアークャビティシステムの大型船への応用が研究されており、その中のオランダでのPELSプロジェクトではMARINIにおいて研究が行われ、その研究成果が報告されています。それによると、空気泡またはエアークャビティで3～10%の抵抗低減が達成でき、システムが船体運動へ及ぼす影響は小さいと結論しています³⁾。

3. 船底空気循環槽

船底に空気を溜める槽を設けて、空気の連続的な供給を必ずしも必要としないタイプの方法を、ここでは空気循環槽(Air Circulating TankまたはAir Cavity Tank、略してACT)と呼ぶことにします。

古くは、1968年にCrundy⁴⁾が、船底に凹んだ空気槽を設けて、空気槽の最も船首側から空気を供給して、最も船尾側から空気を吸い込んで、空気を循環させる図-3のような船を考案し、1971年に特許を取得しています。

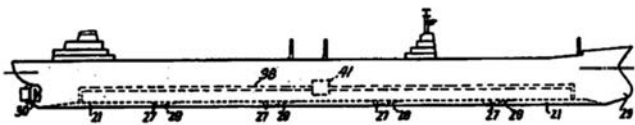


図-3 空気循環槽のCrundyの特許⁴⁾

2003年、DK Groupは、船底に複数の空気槽をもち、それぞれに空気を供給する空気槽の特許を出願しており、その中に2重底部に空気槽をもつタイプのものも記述されています⁵⁾。

同様の表面の窪みに空気を溜めて抵抗を減らすアイデアは、日本でも三菱重工(1994)、高原(1996)、小池造船海運(2005)、IHI(2008)によって特許申請が行われています。

スウェーデンのステナ・バルク社⁶⁾は、Airmax Air Cushion Systemと名付けた船底空気槽を開発し、2010年3月には15m、25トンの、実船の1/12縮尺を想定した実験船を建造して、海上での試験を実施しています。同システムでは、作動中には空気の供給が連続的に行われているようで、20～30%の抵抗低減が期待されていると伝えられています。



図-4 ステナ・バルク社の開発する Air Maxの想像図と実験船⁶⁾

大阪府立大学では、2013年、船底に矩形の空気循環槽を設けて、空気を溜め、その槽内で空気を循環させることによって空気流出を防ぎ、イーズトリム状態で、フルード数が0.15以下であれば、空気槽による浸水表面積減少率のさらに0.7掛け程度の摩擦抵抗低減が可能であることを示しました⁷⁾。同研究では、当初、槽内に水平な分離版を設置し、さらに槽内の空気循環を加速するためのファンを設置して実験をしましたが、空気槽がある程度深ければ、こうした加速装置がなくても船底流の摩擦力で槽内の空気

循環が十分に発生することがわかりました。さらに、空気槽の空気が減った状態でも、空気槽下面の水面の波の発生を防ぎ、かつ空気槽後端の壁に水流が当たることによる抵抗増加を防ぐことのできるようにするため、前後端に半円弧型のガイドを取り付けることを考案し、それによって多少の空気流出があっても抵抗低減効果が持続的に機能するようになりました⁸⁾。また、この空気槽ではトリム時および船体運動時にも、摩擦抵抗低減効果があることもわかりました。さらに、2万TEUの超大型コンテナ船に空気循環槽を設置して、摩擦抵抗を50%削減した超省エネコンテナ船も提案しています⁹⁾。

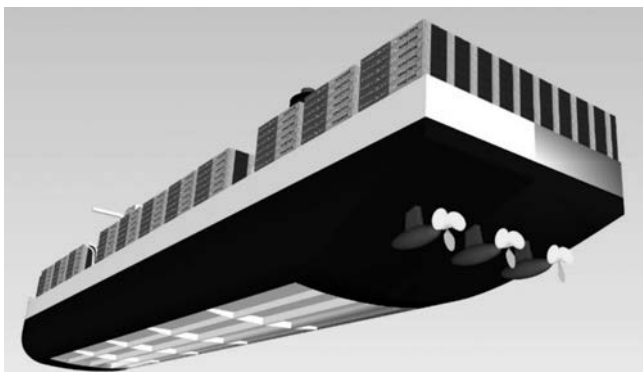
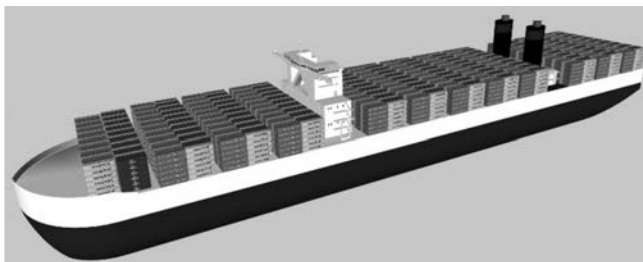


図-5 大阪府立大学提案の摩擦抵抗50%減の超大型コンテナ船の想像図⁹⁾

4. タンカー船型での模型実験

大阪府立大学での研究は、単純な形状のバージ状模型船について行われていたので、本受託研究では既存のタンカー船型の船底に空気循環槽を設置した時に同様な摩擦抵抗低減効果が得られるかを確かめることにしました。

模型実験に使用したのは2mのタンカー模型で、空気循環槽は前後2連結型で、縦方向には3枚のロンジ壁があり、さらに空気槽両側端には、横側面からの空気流出を防ぐため船底より5mmだけ下方に突き出したビルジキール状の側壁を設けています。同空気槽は透明のアクリルで作製され、模型の上部から空気槽内の空気が観測できるようになっています。

模型実験は、大阪府立大学の船舶試験水槽(長さ70m、幅3m、水深1.6m)で行いました。

空気循環槽は図-6～8からわかるとおり、船体中央付近の平行部の船底に0.64mにわたっています。なお、船底の平坦部で空気

槽を取り付けることのできる面積はまだ余裕がありましたが、模型の改造上の制限から比較的限られた部分への取り付けとなっています。満載喫水時(10cm)における空気循環槽による浸水表面積減少率 η_{sl} は、槽内の空気が100%溜まっている状態で約18%、空荷喫水時(4.7cm)では約25%です。

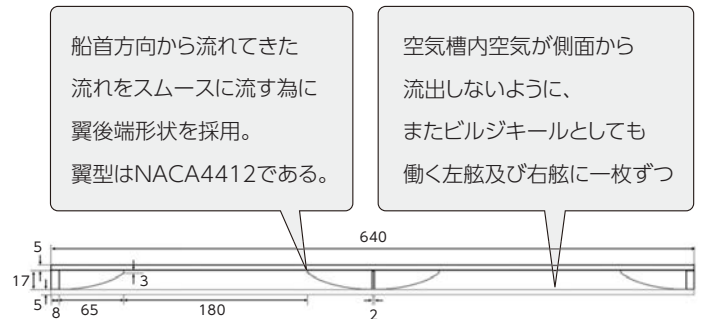


図-6 模型実験に使用した空気循環槽の形状(寸法:mm)



図-7 ACTを取り付けた状態でのタンカー模型の側面図

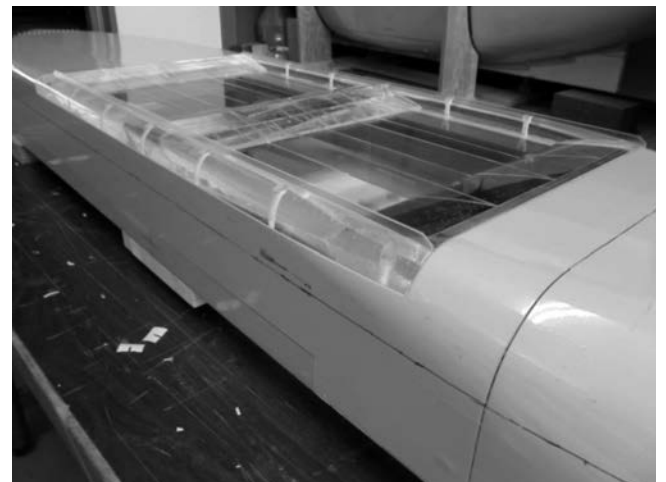


図-8 空気循環槽付タンカー模型の船底写真

静水中での抵抗試験は、満載喫水状態と空荷喫水状態の2状態で、航海速力15ノットに相当するフルード数0.134で行いました。模型船は、空気循環槽(ACT)を取り付けた状態と、ない時の状態での抵抗を測り、その比から抵抗低減率 η_R を求めました。結果を表-1に示します。満載喫水状態では抵抗低減率 η_R が8%、空荷喫水状態で10%となりました。また、実際の航走中の浸水表面積減少率 η_s はそれぞれ11%、16%となり、それをベースとした空気循環槽の効率 η は0.65～0.70となります。この値は、先に大阪府立大学で計測された矩形空気循環槽の結果にほぼ近く、実用船型でも大きな摩擦抵抗の低減が得られることが確認できました。

d	η_{S0}	η_S	η_R	η	η_0
10.0cm(満載)	0.187	0.114	0.080	0.701	0.428
4.7cm(空荷)	0.247	0.155	0.101	0.652	0.409

η_{S0} : 浸水表面積減少率(空気満杯時) η : 空気層効率(= η_R/η_S)
 η_S : 浸水表面積減少率(航行時) η_0 : 空気層効率(= η_R/η_{S0})
 η_R : 抵抗減少率

表-1 静水中における空気循環槽の効率の計測結果

前述したように模型船の改造上の問題から、本実験における空気循環槽の大きさが制限されていましたが、船底の平らな部分全体に空気循環槽を設置するとした場合、空気循環槽による浸水表面積は本模型船のものの約2.1倍までとることができ、抵抗低減率は満載状態で25%、空荷状態で34%程度となることが期待されます。

次に、波浪中の実験も行いましたが、模型が小さいことと、さらに空気槽面積が小さいことから有意な差異を求めることができませんでした。この波浪中での空気循環槽の性能については、今後のさらなる研究が必要との結論になりました。

5. CFD計算

空気循環槽の中での空気の流れ、槽からの空気流出、空気と船底流との境界にできる波など、空気循環槽にはその特性を把握するために必要な様々な流体现象がありますが、これを実験で求めることは時間も労力もかかります。そこで、既に実用化の域に達しているCFD計算の可能性を探ることにしました。

CFD計算には、市販の汎用ソフトであるFluentを使用しました。計算時間を短縮するため対象は2次元モデルとし、自由表面を対称軸としたダブルモデルとしています。ただし空気槽を設けていない船型は完全な上下対象モデルですが、空気槽を設けた船型は、上部に空気槽を設けることが空気の浮力に関係できないため、空気槽はモデル下半面のみとなり、上下非対称なモデルとなっています。なお、空気槽を設けることで、浸水表面積は約35%減少しています。

計算結果の例をいくつか紹介します。図-9は、矩形の空気循環槽において、ステップ的に一定速度を与えて計算を行った場合の計算開始直後からの空気流出の様子です。

図-10は、矩形空気循環槽の有無による摩擦抵抗の計算値です。空気循環槽の設置で減少した浸水表面積分だけ、摩擦抵抗が減少していることがわかります。

図-11には、矩形からガイド付きに改良した空気循環槽のCFD計算結果の一例を示しています。空気槽の中での空気の循環流、境界に発生する波の様子などがわかります。

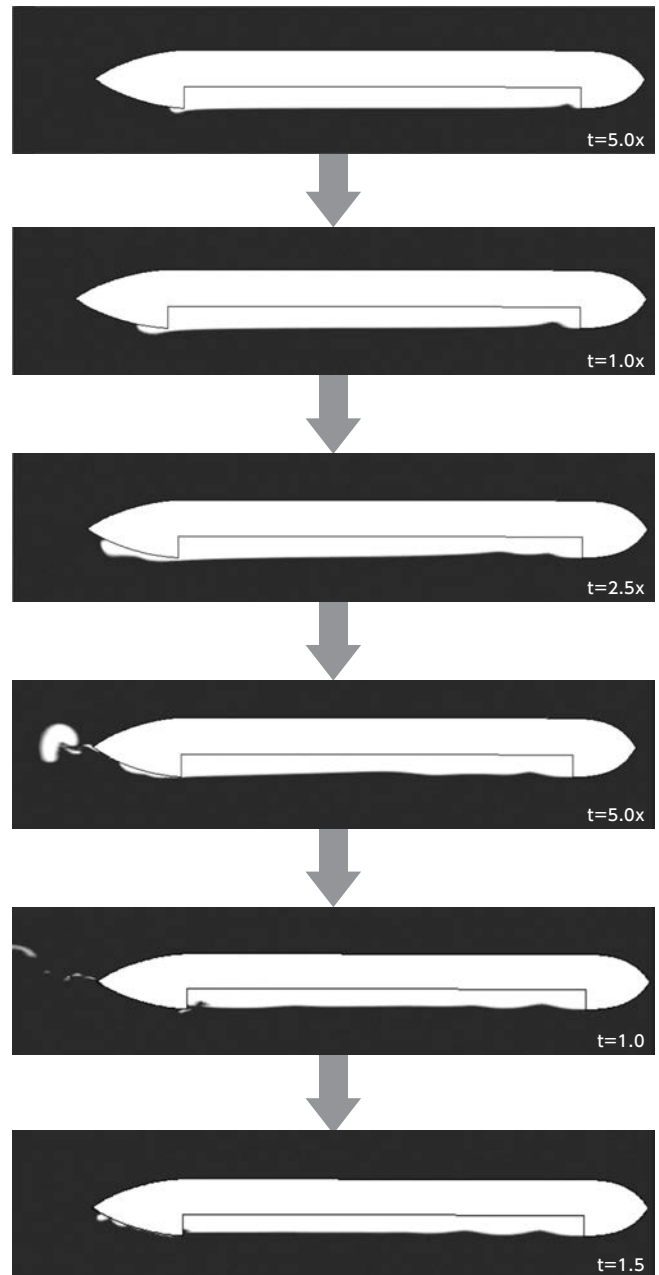


図-9 CFD計算による矩形空気循環槽からの空気流出 (t: 計算開始からの時間)

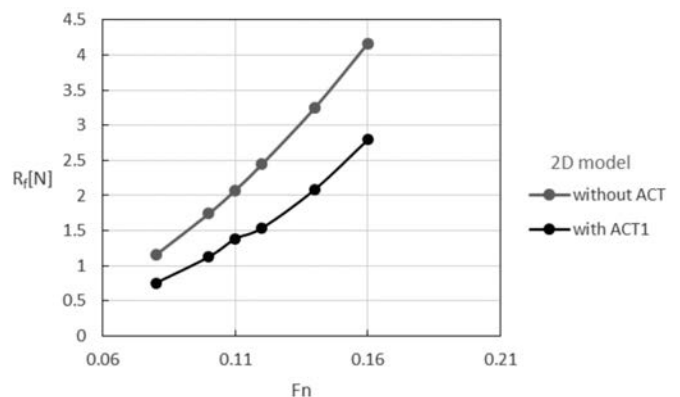


図-10 空気循環槽の有無による摩擦抵抗の違い

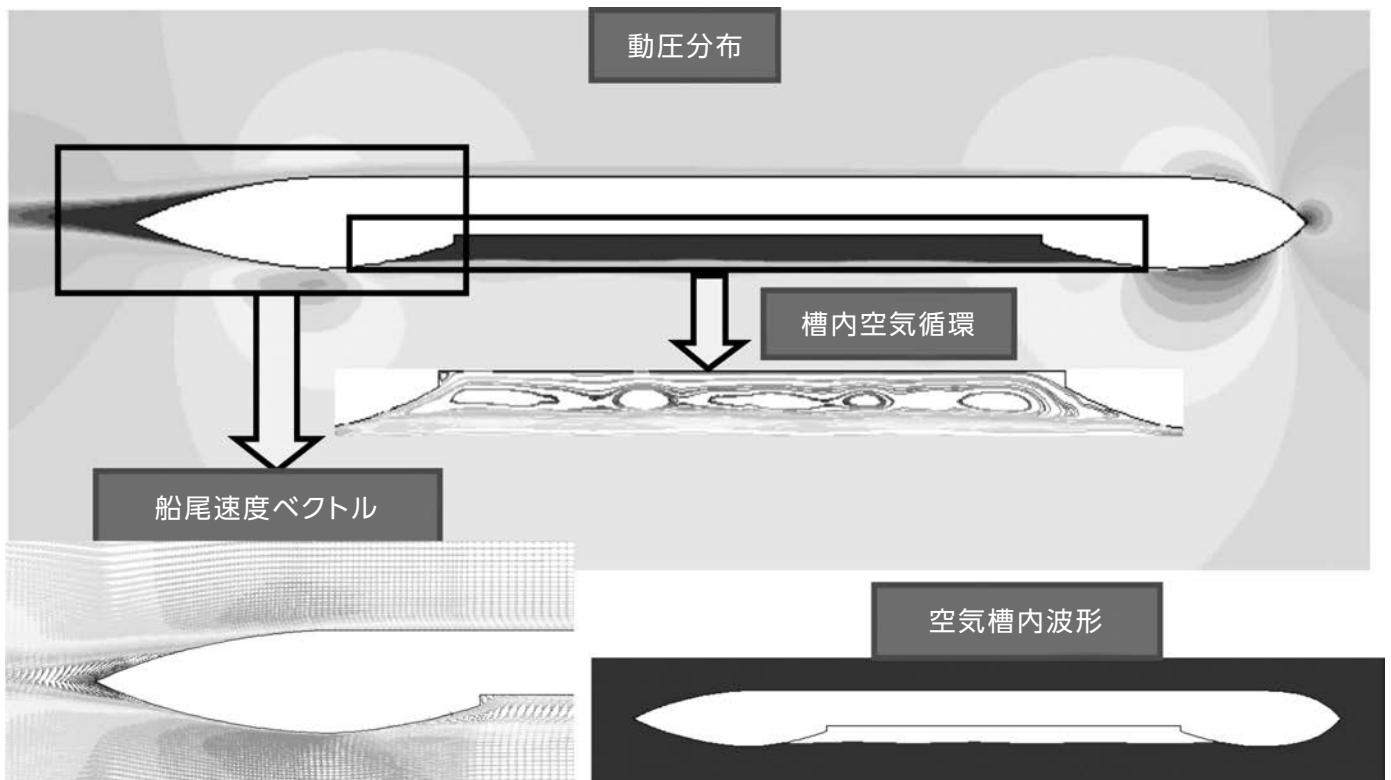


図-11 空気槽の前後端にガイドを設けた空気循環槽内の流場解析の結果(Fn=0.16)

6. 今後の計画

ご紹介したようにトリム変化や旋回中のヒールにも対応して、大幅な摩擦抵抗を低減できる船底空気循環槽を開発し、その静水中性能を確認することができました。

この4月から、造船会社9社の参加のもと、大阪府立大学と日本造船技術センターが中心となって、船底空気循環槽の実用化に向けた研究開発を3年計画で実施の予定です。

初年度には、2.5～3mの長さの模型を製作して、現在開発済の空気槽について静水中および波浪中の摩擦抵抗低減効果の確認試験を行うと共に、並行してCFDを用いた空気循環槽の最適化をします。

2年目からは、空気槽による摩擦抵抗低減率の目標を船種ごとに設定し、その目標を達成できる船型の開発を行います。船種としては、タンカーおよびバルクキャリア、コンテナ船、RORO船などを考えています。タンカー・バルクキャリアにおいては摩擦抵抗低減率を50%、コンテナ船については40%、RORO船については30%程度を目標としています。

最終年度においては、5～6mの大型模型を用いた実証実験を実施し、船底空気循環槽の実用化の目処をつけたいと考えています。

(大阪府立大学教授 池田良穂、常務理事 鷲尾祐秀)

参考文献

- 1) Robert Ernst Apple, The Feasibility of Using an Air Film to Reduce Ship Skin Friction, Master 論文、United States Naval Postgraduate School
- 2) Y. Gorbachev, E. Amromin, Ship Drag Reduction by Hull Ventilation from Laval to Near Future, ATMA2012
- 3) C. Thill et al., Project Energy-saving air-Lubrication Ships, Proc. of 2nd Seminar on Seawater Drag Reduction, Busan, 2005
- 4) John Wakelam Crundy, Ships and Boats, United States Patent No. 3,595,191 (July 27, 1971)
- 5) DK group, Air Cavity Vessel with Wedge-Shaped Cavity, Longitudinally Offset Cavities, and Roll Control, Means and Method for Constructing the same, International Publication Number WO 03/095297 A1, 20 Nov. 2003
- 6) ステナ・エアーマックスのプロモーションHP
<http://www.stenabulk.com/en/services-and-solutions/Pages/tankerevolution.aspx>
- 7) 古尾他、船底空気循環槽による摩擦抵抗低減に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第16号、2013-5
- 8) 池田他、摩擦抵抗半減を目指した船底空気循環槽の開発、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第17号、2013-11
- 9) K. Matveev, Air-cavity ships are ready for a wider market, Speed at Sea, 2003.2