

帆装船用複合帆の空力特性

海上安全研究領域操縦制御研究グループ ＊藤原敏文、上野道雄、二村 正
環境エネルギー研究領域次世代動力研究グループ 平田宏一

1. はじめに

化石燃料の大量使用等により地球の温暖化に伴う環境破壊が懸念されている。大気中の二酸化炭素の増加が1つの要因とされており、船舶から二酸化炭素の排出を削減することも望まれる。

環境負荷の少ない推進手段としては、自然エネルギーの利用が有効である。現状では、エネルギー効率の観点から風を推進力として利用することが最も有効であると言える。

1980年代には、オイルショックによる燃料価格の高騰が発端となり、図-1のような帆装船が建造された^{1)~3)}。また、帆装時の運航特性について検討が行われた^{4)~6)}。ただし、設置した帆は、主として円弧形状の矩形型硬帆であり、構造的に単純であるが、風により得られる推進力は、必ずしも大きいものではなかった。

近年では、揚力係数 3.2 の高揚力帆が提案されているが⁷⁾、帆の構造が非常に複雑なこともあり実用するに至っていない。

今回、環境負荷低減の観点から有効に風を推進力として利用するために、実船への設置を念頭におき、帆装用帆の検討を行った。本稿では、その中の代表的な帆の空力特性についての実験結果を報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試模型

従来の帆に比べて高揚力を発生させる形状の検討を行うため、図-2及び図-3に示す模型を製作した。両模型とも揚力を発生する翼型マスト（硬帆）、前部の円弧型スラット、後部の矩形型及び三角型セール（軟帆）から構成される複合帆である。広範に渡るアスペクト比の影響を調べる目的と実験上の閉塞影響の制約から、帆断面は同じであるが、高さ 1m

（高マスト型）と 0.5m（低マスト型）の2種類の模型を製作している。

三角型複合帆については、既に公表された実験結果⁸⁾が存在し、その結果と比較を行うためにも同じ仕様である NACA0030 型硬帆、0.1m 弦長の円弧型スラットとした。

軟帆は、高マスト型の場合、5種類の矩形型、1種の三角型帆を用意した。低マスト型の場合は、横幅や形状の異なる6種類の軟帆を用意した。

2. 2 実験状態

実験は、海上技術安全研究所変動風水洞にて行った。実験状態を図-4に示す。ターンテーブルに検力計及び帆模型を設置し、風向角を変化させながら力及びモーメントの計測を行った。風は、一定風速 8m/s の状態で実験を行った。風洞固有の状態として床面から 0.1m に渡って境界層が発達しているが、計測対象とする帆は、床面から 0.25m 上方にあり一様風速の中に設置されている。弦長方向の平均長さを代表長さとしたときのレイノルズ数は、約 2×10^5 である。

2. 3 実験結果の整理方法

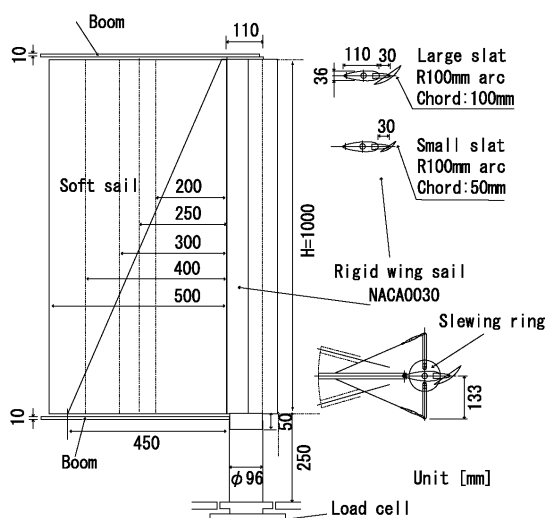
座標系を図-5に示す。風向角 α は、硬帆を基準とし、スラット及び軟帆を支えるブームの位置は、硬帆を基準とした偏角で定義する。

揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D 、モーメント係数 C_M は、次式のように定義する。

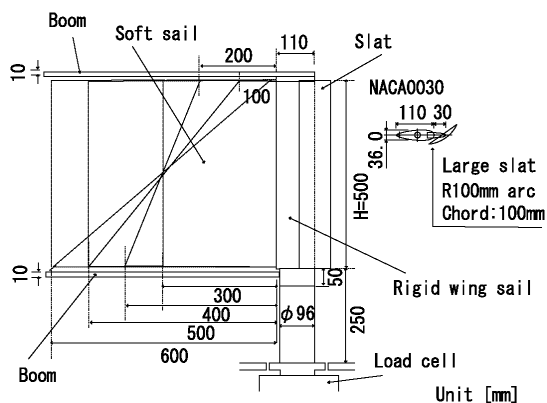
$$\begin{aligned} C_L &= L / (0.5 \rho_A U^2 S) \\ C_D &= D / (0.5 \rho_A U^2 S) \\ C_M &= M / (0.5 \rho_A U^2 S C) \end{aligned} \quad (1)$$



図－1 運航実績のある帆装船の例「新愛徳丸」¹⁾

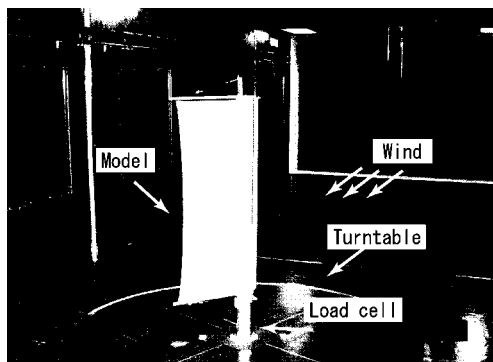


図－2 高マスト型供試模型

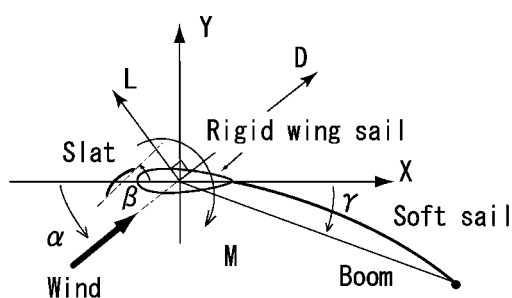


図－3 低マスト型供試模型

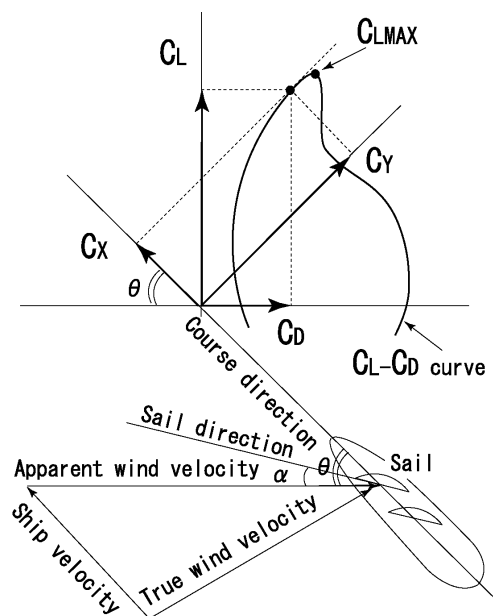
ここで、 ρ_A は空気密度(kg/m^3)、 U は風速(m/s)、 S は代表面積(m^2)、 C は代表長さ(m)である。スラット、硬帆、軟帆の関係により投影面積が変化するが、ここでは実験状態でのスラットと硬帆の投影面積（硬帆基準の投影面積）と軟帆面積の和を代表面積



図－4 実験状態



図－5 座標系



図－6 揚力・抗力係数 (C_L, C_D) と推進力・横力係数 (C_X, C_Y) の関係

とした。このとき、 C 及びアスペクト比 (AR) は、 H を硬帆高さとするとき次式のように表される。

$$C = S / H \quad (2)$$

$$AR = H^2 / S$$

最終的な結果は、帆単独の性能を比較するために、それぞれの実験値から硬帆の下にある支柱に働く力を除いている。

また、船の推進力係数を C_X 、横力係数を C_Y 、相対風向角を θ とすると次の関係式が成り立つ。

$$C_X = C_L \sin \theta - C_D \cos \theta \quad (3)$$

$$C_Y = C_L \cos \theta + C_D \sin \theta$$

それぞれの風圧係数と推進力の関係を図－６に示す。

３．実験結果

実験内容の一覧を表－１に示す。これより、それぞれの実験結果を示す。

３．１ 高マスト型帆の空力特性

図－２の高マスト型帆に関する風向角ごとの C_L 、 C_D 、 C_M を図－７に示す。軟帆の横幅を変化させることにより AR の影響について調査した。既報の結果⁹⁾により、最大揚力が発生する状態としてスラット角 β は 35deg 、ブーム角 γ は 30deg に設置した。凡例中の数値は、 AR 値を示す。

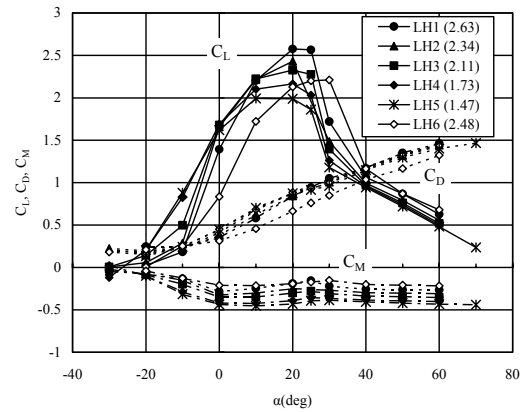
C_L については、 AR の影響を大きく受ける。最大揚力係数 C_{LMAX} は、 $LH1$ の場合で 2.6 を得た。^{Hansen⁷⁾や Abbott¹⁰⁾}らが示した複数のフラップを有する航空機に利用されるような翼型では C_{LMAX} が 3 を超えている例がある。しかし、荒天時に収納可能な軟帆を使った帆装用帆の C_{LMAX} としては、非常に大きな値であると言える。 C_D は、このレイノルズ数域において圧力抵抗が支配的となり、 AR を変化させても大きく変化しないことが分かる。 C_M は負の値を取り、状態ごとにほぼ一定値である。

同じ AR であれば、三角型帆に比べて矩形型帆の方が C_{LMAX} は大きい。構造面の簡便さでは三角型帆の方が優れているが、限られた弦長で帆の投影面積を大きくできる点及び揚力値の観点から、矩形型帆は、帆装船用帆の有望な案の一つであるといえる。

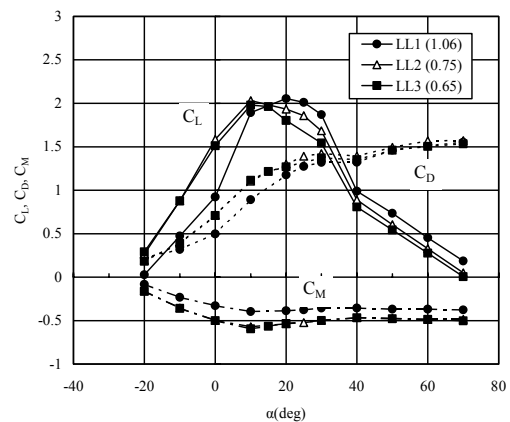
表－１ 実験一覧

Subject	Case	Slat	RSH	SS	AR	Figure
Aspect ratio (High mast)	LH1	L	1000	Sq-200	2.63	Fig.-7
	LH2			Sq-250	2.34	
	LH3			Sq-300	2.11	
	LH4			Sq-400	1.73	
	LH5			Sq-500	1.47	
	LH6			Tri-450	2.48	
Aspect ratio (Low mast)	LL1	L	500	Sq-300	1.06	Fig.-8
	LL2			Sq-500	0.75	
	LL3			Sq-600	0.65	
Form of SS (Low mast)	LL1	L	500	Sq-300	1.06	Fig.-9
	FLL1			Trape-400	1.06	
	FLL2			Trape-500	1.06	
	FLL3			Tri-600	1.06	
Parts	LH6	L	1000	Tri-450	2.48	Fig.-11
	PH1	L	1000	non	-	
	PH2	non	1000	Tri-450	-	
	PH3	non	1000	non	-	
Slat	LH6	L	1000	Tri-450	2.48	Fig.-12
	SH1	S	1000	Tri-450	2.64	

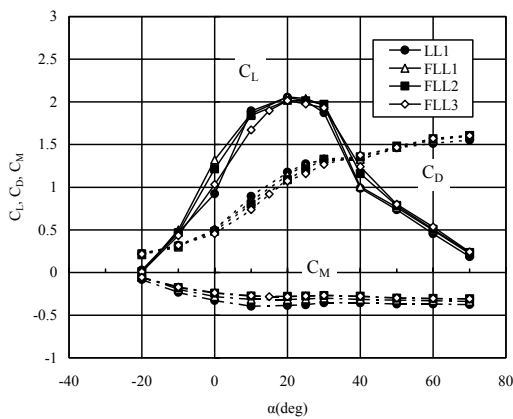
RSH; Height of Rigid Sail [mm], SS; Soft Sail, AR; Aspect Ratio, L; Large Slat, S; Small Slat, non; non-existence [SS Column] Sq; Square Sail, Tri; Triangular Sail, Trape; Trapezium Sail, Number; Base length of the Soft Sail [mm]



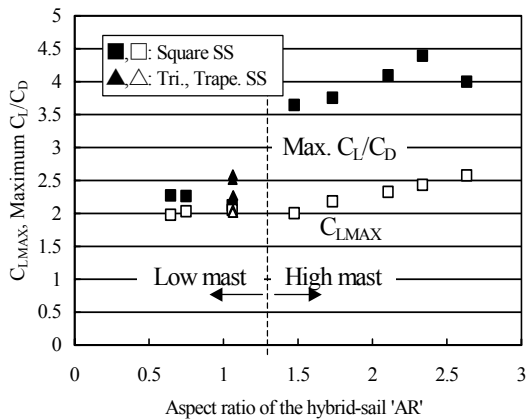
図－７ 高マスト型帆の空力特性
($AR=1.47\sim 2.63$, $\beta=35\text{deg}$, $\gamma=30\text{deg}$)



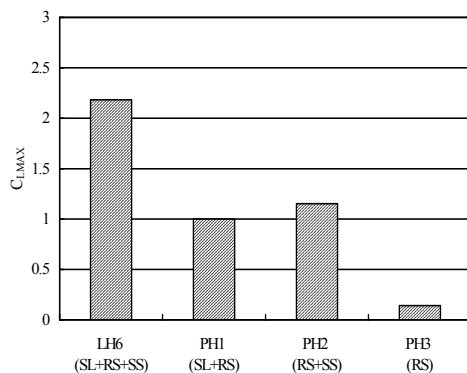
図－８ 低マスト型帆のアスペクト比を変化させた場合の空力特性 ($AR=0.65\sim 1.06$, $\beta=35\text{deg}$, $\gamma=30\text{deg}$)



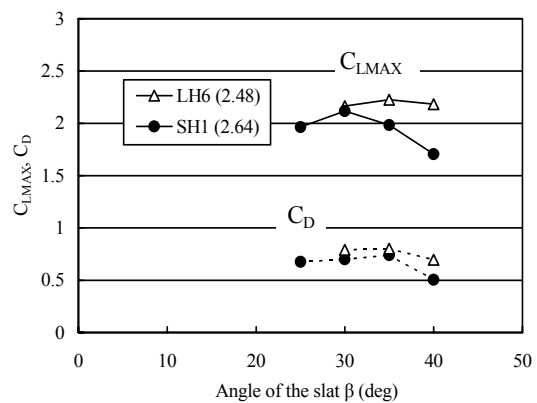
図－９ 低マスト型帆の軟帆形状を変化させた場合の空力特性 ($AR=1.06, \beta=35\text{deg}, \gamma=30\text{deg}$)



図－１０ 最大揚力係数及び最大揚力傾斜 ($\beta=35\text{deg}, \gamma=30\text{deg}$) [SS; Soft Sail]



図－１１ 最大揚力係数に及ぼす要素部材の影響 ($\beta=35\text{deg}, \gamma=30\text{deg}$) [SL; Slat, RS; Rigid wing Sail, SS; Soft Sail]



図－１２ スラットの大きさの影響 ($\gamma=30\text{deg}$)

３．２ 低マスト型帆の空力特性

低マスト型帆の AR を変化させた場合の実験結果を図－８に示す。軟帆形状は矩形で、横幅を 0.3m 、 0.5m 、 0.6m と変化させ実験を行った。 AR は、それぞれ 1.06 、 0.75 、 0.65 である。 CL_{MAX} は、どの状態でも約 2 である。

次に、 AR は同じであるが、軟帆形状を矩形、台形、三角形と変化させた場合の結果を図－９に示す。表－１中の軟帆(SS)欄中の数値は、軟帆の底辺横幅をミリメートルで示す。今回の実験では、軟帆形状による大きな傾向の違いは得られなかった。このことは、軟帆翼端での剥離現象の違いが空力特性に大きな影響を与えなかったと考えられる。

３．３ 最大揚力係数及び最大揚力傾斜

図－６に示されるように最終的に船が得られる帆の推進力の大きさとしては、最大揚力係数 CL_{MAX} が、切り上がり性能としては、原点から CL - CD 曲線への接線の最大値(ここでは、最大揚力傾斜($Max.C_L/C_D$)と呼ぶ。)が重要な指標となる。

そこで、図－７～９の結果の CL_{MAX} 及び $Max.C_L/C_D$ を AR で整理すると図－１０のようになる。図中白印は CL_{MAX} を、黒印は $Max.C_L/C_D$ を示し、点線は高マスト型模型と低マスト型模型の境を参考までに示す。

この結果から、全般的に見ると AR の増加に伴い CL_{MAX} 及び $Max.C_L/C_D$ とも増加傾向にあることがわかる。ただし、低マスト型に限った場合、図－８や

図一 9 にも見られたように AR に伴う大きな変化はない。

3. 4 スラット、硬帆及び軟帆の影響

複合帆を構成する個々の要素の影響を調べるために LH6（高マスト三角軟帆型）を基本状態として、軟帆(SS)の無い状態(PH1)、スラット(SL)の無い状態(PH2)、スラット及び軟帆が無く硬帆のみの状態(PH3)での実験を行った。それぞれの状態で風向角を変化させ、その結果得られた C_{LMAX} を比較し図一 1 1 に示す。全ての実験結果は、LH6 の代表面積を使って整理した。スラット及び軟帆のいずれかが無い場合、 C_{LMAX} は、LH6 の約 1/2 になる。単純に投影面積について比較するとスラットは、軟帆の約 1/2 であることから、スラットは効果的に揚力の増大に寄与していることがわかる。

3. 5 スラットの影響

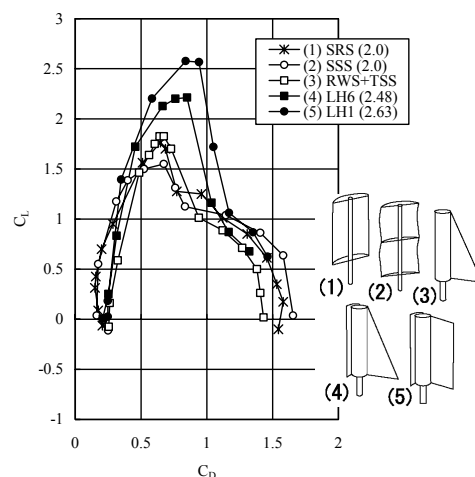
前項でスラットの影響は、非常に大きいことが明らかになった。しかし、今回想定しているスラットは、硬帆と比べて弦長が同程度と航空機で利用されるスラットに比べても非常に大きい仕様となっている。実際に製作することを想定した場合、大きさを小さくした上で、スラットの効果をできるだけ減少させないことが望ましい。そこで、スラットの大きさの影響について調査した。

ブーム角 γ は 30deg に固定し、スラット角 β を変化した場合の C_{LMAX} の結果を図一 1 2 に示す。表一 1 にも示すように LH6 の場合は、弦長 0.1m の円弧スラットを、SH1 の場合は、弦長 0.05m の円弧スラットを設置している。無次元揚力係数を求める際には、それぞれの代表面積を使って計算している。

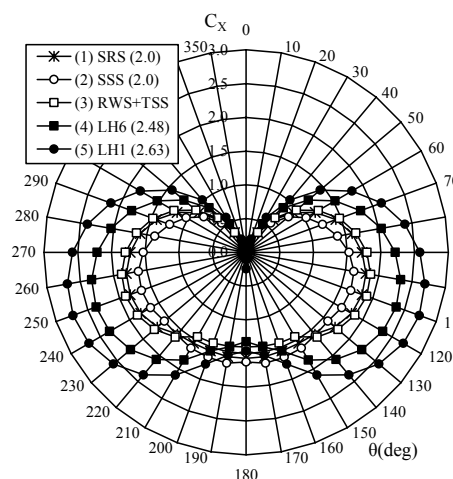
スラットが小さくなることにより C_{LMAX} も小さくなるが、最大値と比較すると SH1 の結果は LH6 に比べて 5%減少するのみであった。両状態の C_D の差も非常に小さい。AR の差異について配慮する必要があるが、スラットの大きさを 1/2 で製作した場合であっても推進効率を比べた場合、その差は非常に小さいといえる。

3. 6 従来型帆装用帆と今回の複合帆の性能比較

今回実験を行った複合帆と過去に実験が行われた



図一 1 3 従来型帆装用帆と今回の複合帆の C_L - C_D 曲線 [SRS; Square Rigid Sail, SSS; Square Soft Sail, RWS; Rigid Wing Sail, TSS; Triangular Soft Sail]



図一 1 4 推進力係数の比較 [SRS; Square Rigid Sail, SSS; Square Soft Sail, RWS; Rigid Wing Sail, TSS; Triangular Soft Sail]

代表的な帆装用帆の風洞実験結果を比較し、図一 1 3 に示す。帆の概要を示すと、(1)；図一 1 にも示された矩形円弧型硬帆、(2)；(1)とほぼ同型であるが帆布を骨組みに張った矩形型帆、(3)；マスト兼用の硬帆に三角型軟帆を備えた帆、(4)；参考文献 8)にも示されている三角軟帆型複合帆(LH6)、(5)；今回対象とした中で最も性能の優れた矩形型複合帆(LH1)である。(1)~(3)の AR は、およそ 2.0 である。この結

果から、スラット、硬帆及び軟帆から構成される複合帆の揚力は、非常に大きいことがわかる。

同様の結果を推進力係数 C_x に変換し、図-14 に示す。相対風向角ごとの C_x を示しており、最大推進力、風上への切り上がり性能とも今回対象とした複合帆は、矩形円弧型帆等に比べて優れていることがわかる。最大推進力係数は、相対風向角 110deg の場合に、2.7 となった。

4. おわりに

環境影響に配慮した次世代の外航帆装船舶を想定し、帆装船用複合帆の空力特性について実験的に調査を行った。

その結果、以下のような結論が得られた。

- 1) 従来から提案、設置されている帆装船用帆と比べて、今回対象としたスラット、硬帆、軟帆からなる矩形型複合帆の有効性が確認された。
- 2) 実験結果から軟帆を使った帆装用複合帆として非常に大きい最大揚力係数 2.6、推進力係数 2.7 の値を得た。
- 3) 軟帆長さを短くすることによりアスペクト比の影響について調査を行った。アスペクト比が増加するにつれて揚力も増加する結果を得た。その際に抗力係数は、大きく変化しない。
- 4) スラットや軟帆が揚力に及ぼす影響について調査した。その結果、軟帆に比べてスラットの揚力への寄与が非常に大きいことが明らかになった。
- 5) スラットの大きさが揚力に及ぼす影響について調査した。今回対象とした複合帆で、スラットの大きさを半分にした場合でも、揚力係数の減少は、5%であった。

参考文献

- 1) Matsumoto N., Inoue M. and Sudo M.; Operating Performance of a Sail Equipped Tanker in Wave and Wind, Second International Conference of Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB), pp451-464, 1982
- 2) 日本鋼管船舶計画部；省エネ帆装貨物船“扇蓉丸”および“日産丸”、船の科学 Vol.36、pp28-36、1983
- 3) 白杵鉄工所基本設計部；外航帆走貨物船“USUKI PIONEER”、船の科学 Vol.38、pp36-43、1985
- 4) Ishihara M., Watababe T. et al; Prospect of Sail-Equipped Motor ship as Assessed from Experimental Ship ‘Daioh’, Shipboard Energy Conservation Symposium, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp181-198, 1980
- 5) 須藤、井上、松本、草川；小型帆装タンカーの運航性能、日本鋼管技報 No.90、pp71-84、1981
- 6) 村山、北村、原口、菊池、田中；海上輸送における風力エネルギー利用の研究（その1、帆装船の性質および航路の最適化の研究）、船舶技術研究所報告第23巻第6号、1986
- 7) Hansen P.K.E.；Modarn Windships, phase2, Danish Environmental Protection Agency, 2000（http://www.mst.dk/udgiv/publications/2000/87-7944-019-3/html/default_eng.htm）
- 8) 野尻武生、佐野健一、八木光、井上浩男；最大揚力係数2.42の大型船舶用高性能複合帆を開発—燃料消費及び炭酸ガス排出量の削減に期待—、三井造船技報 No.178、pp.132-138、2003
- 9) Fujiwara T., Hirata K., Ueno M. and Nimura T.; On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid-Sail with Square Soft Sail, The Proceedings of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2003), Hawaii, USA, 2003
- 10) Abbott I.H. and Doenhoff A.E.V.; Theory of Wing Sections, Dover Publications Inc., 1959