

PS-1 QCM を用いた省エネダクト付プロペラの性能評価ツールの開発

流体設計系 *白石 耕一郎、上入佐 光、小山 鴻一

1. はじめに

EEDI 規制により、船舶の省エネ化への要求は年々高まっている。当所においても、プロペラ前方に取り付ける省エネダクトの開発を行っている¹⁾。その省エネダクトの評価は、水槽試験もしくは CFD 計算に依存している。しかしながら、それらの方法は、試験費用や計算時間がかかるため、効率的に省エネダクトの設計が可能となる計算ツールが必要となっている。そこで、著者らは揚力面理論をベースとした QCM (Quasi-Continuous vortex lattice Method) を用いた省エネダクト付プロペラの性能評価手法の開発を行っている²⁾。QCM を用いることによって、省エネダクトの性能を短時間でロバストに評価することが可能となる。また、QCM はポテンシャル理論にもとづいているため、ダクトとプロペラのそれぞれの影響、両者の相互影響を明確に分けて評価することができるという特徴がある。本論文では開発中の性能評価手法について説明し、船尾伴流中で省エネダクト付プロペラが作動する場合のプロペラ性能計算の結果について報告する。

2. 計算方法

QCM は Lan によって開発された揚力面の一計算法である³⁾。QCM の特徴は、翼面上の渦分布を翼弦方向には連続分布とし、翼幅方向には階段状として扱っており、Cauchy の特異性が考慮されており、解の収束が速く、精度が高い点である。本研究では、QCM を用いて船尾伴流化における省エネダクト付プロペラの性能の推定を行う。まず、ダクトとプロペラの座標系と省エネダクトの形状を図-1 に示す。省エネダクトの断面は翼型となっており、その断面は円周方向に同一であるとする。

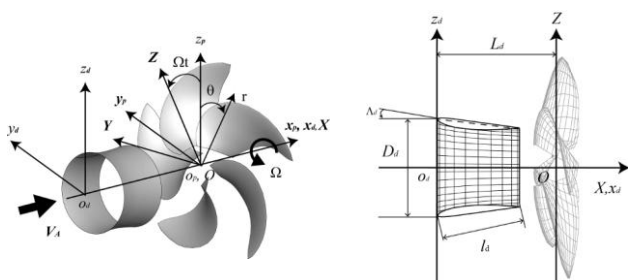


図-1 省エネダクト付プロペラの座標系 (左図) と省エネダクトの形状 (右図)

QCM における渦を配置する点であるローディングポイントと境界条件を満足させる点であるコントロールポイントの配置方法として、金丸らの方法を採用している⁴⁾。具体的には、プロペラをコード方向及び半径方向にセミサークル法を用いて分割する。一方、ダクトのコード方向は、プロペラと同様でセミサークル法に基づいた渦の配置を行うが、ダクトの円周方向については等分割とする。本研究の計算対象とした青雲丸の CP (Conventional Propeller) のコントロールポイントとローディングポイントの配置と計算で使用したダクトにおけるコントロールポイントとローディングポイント配置を図-2 に示す。

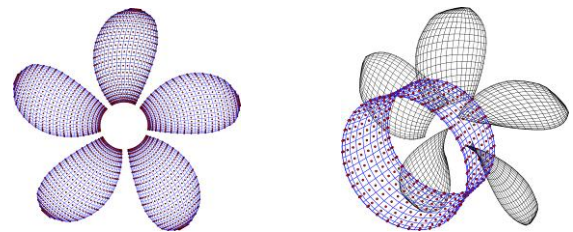


図-2 QCM におけるローディングポイントとコントロールポイントの配置。(左図:プロペラ, 右図:ダクト)

QCM をプロペラ及びダクトに適用させる場合、それぞれの後縁から放出される後流渦の形状を設定する必要がある。プロペラによる誘導速度に基づきその変形を計算する方法も開発されているが、計算時間の増大と計算の不安定化を招く可能性があるため、本研究では、予めその形状を与える方法を採用した。ダクトの後流渦は、ダクト後縁から主流方向に直線に流れるとしている。境界条件は、プロペラ及びダクトのキャンバー面について鉛直方向の流れはないという仮定にもとづき次式のように定められる。

$$\mathbf{V}_p \cdot \mathbf{n}_p = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{V}_d \cdot \mathbf{n}_d = 0 \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{V}_p はプロペラキャンバー面上の Resultant Velocity, \mathbf{V}_d はダクトキャンバー面上の Resultant Velocity, \mathbf{n}_p と \mathbf{n}_d はそれぞれプロペラ及びダクトキャンバー面上の法線ベクトルである。なお、 \mathbf{V}_p と \mathbf{V}_d は次式で表される。

$$\mathbf{V}_p = \mathbf{V}_{p,l} + \mathbf{V}_{pp,\gamma} + \mathbf{V}_{dp,\gamma} \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_{d,I} + \mathbf{V}_{pd,\gamma} + \mathbf{V}_{dd,\gamma} \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{V}_{p,I}$ はプロペラへの流入速度ベクトル、 $\mathbf{V}_{pp,I}$ はプロペラの馬蹄渦がプロペラ自身に誘起する速度ベクトル、 $\mathbf{V}_{dp,I}$ はダクトの馬蹄渦がプロペラに誘起する速度ベクトル、 $\mathbf{V}_{d,I}$ はダクトへの流入速度ベクトル、 $\mathbf{V}_{dd,\gamma}$ はダクトの馬蹄渦がダクト自身に誘起する速度ベクトル、 $\mathbf{V}_{pd,\gamma}$ はプロペラの馬蹄渦がダクトに誘起する速度ベクトルを示す。本方程式を解くことによって、プロペラとダクトの γ 分布を求める。なお、本研究ではハブの影響は小さいとして、ハブは考慮していない。また、吹き出し及び前縁推力は本研究では考慮していない。これらの影響を考慮した計算方法は今後の課題である。

3. 数値計算例

本研究で開発した計算法の有用性を検証するために青雲丸のプロペラ CP (Conventional Propeller) に省エネダクトを取り付けた場合の船尾伴流中省エネダクト付プロペラ性能計算を実施した。省エネダクトの有無で比較することで、ダクトがプロペラに及ぼす影響を調査した。本計算では、右近らが実船計測を行った青雲丸 I 世の CP と伴流を使用した⁵⁾。省エネダクトの要目を表-1 に示す。

表-1 省エネダクトの要目

Diameter: D_d (m)	1.8
Length: l_d (m)	1.0
Attack Angle: Λ_d (deg.)	3.0
Distance of Between Propeller and Duct: L_d (m)	1.5
Shape of a Cross Section	NACA

ローディングポイントとコントロールを配置する際のプロペラの分割数はコード方向及び半径方向共に 20 分割とした。ダクトの分割数はコード方向に 10 分割、円周方向に 36 分割とした。プロペラのスラスト係数 $K_{T,p}$ 、ダクトのスラスト係数 $K_{T,d}$ 、プロペラのトルク係数 K_Q 、そしてプロペラとダクトのスラストを合わせたスラスト係数 $K_{T,t}$ について比較を行った。

伴流中計算における試験状態は、ダクトの影響を見るために青雲丸 CP については、一様流中と伴流中で計算を行っている。一様流中の流速は、伴流中の試験状態と同じになるように定めている。

ダクトによるプロペラへの誘導速度（主流方向成分）を図-3 に示している。図-3 の左図は一様流中の CP の結果を示し、右図に伴流中における CP の計算結果を示している。また、各スラスト係数及びトルク係数の計算結果を表-3 に示している。

図-3 からダクトによって、ダクト内側の主流方向の

流速は加速され、外側は減速されているのが分かる。また、表-3 より、ダクトによって生じるスラストは僅かであることが分かる。一方、ダクトによる流速の増加の効果の方が大きく、ダクトを取り付けることによって、スラストとトルク共に減少していることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、QCM を用いた船尾伴流中で作動する省エネダクト付プロペラの性能評価手法を示した。そして、船尾伴流中の省エネダクト付プロペラの性能計算を行い、ダクトの有無で比較を行った。その結果、開発した計算法によって省エネダクトの影響を評価できることを確認した。今後は、水槽試験結果と比較し、計算法の精度向上を図っていく予定である。

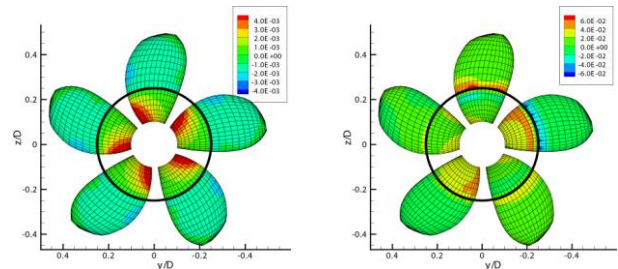


図-3 省エネダクトによるプロペラへの誘導速度。
(左図：一様流中、右図：船尾伴流中)

表-2 スラスト係数とダクト係数の比較結果

	$K_{T,p}$	$K_{T,d}$	$K_{T,t}$	K_Q
CP w/o Duct	0.1882	-	0.1882	0.3064
CP w/ Duct	0.1869	0.0000	0.1869	0.3050

参考文献

- 川島ら：プロペラ型省エネデバイスの研究，海上技術安全研究所報告，第 14 巻，第 2 号，2014, pp. 89-104.
- 白石ら：QCM を用いた省エネダクト付プロペラの性能評価に関する研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 20 巻，2015, pp. 415-418.
- Lan, CE.: "A Quasi-Vortex-Lattice Method in Thin Wing Theory," Journal of Aircraft, Vol. 11 No 9, 1974, pp. 518-527.
- 金丸ら：後流渦の変形を考慮した非定常プロペラ性能解析，日本船舶海洋工学会論文集，第 6 号，2007, pp. 267-279.
- Ukon, Y. et al.: "Measurement of Pressure Distribution on Full Scale Propellers", Proceedings of the Propellers/Shafting' 91 Symposium, the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1991, No. 13, pp. 1-15.