



日本財団
The Nippon Foundation

助成事業

革新的プロペラ設計法の研究開発

－ 革新的プロペラ設計法研究会 －

2009 年度 成果報告書

2010 年 3 月

財団法人 日本船舶技術研究協会

研究組織

(順不同)

九州大学

(株)川崎造船

ツネイシホールディングス(株) 常石造船カンパニー

住友重機械マリンエンジニアリング(株)

(株)アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド

三井造船(株)

(財) 日本船舶技術研究協会

目次

1. はじめに -----	1
2. これまでの研究成果 -----	2
3. 青雲丸通常型プロペラの単独性能 -----	4
4. 革新的プロペラ設計法による青雲丸通常型プロペラの改良 -----	6
4.1 プロペラ性能最適化の計算の概要 -----	6
4.2 改良型プロペラの性能評価 -----	9
4.3 まとめ -----	19
5. おわりに -----	20

1. はじめに

地球温暖化防止の観点からの CO₂ 削減に対する社会的要請、NO_x 規制強化に伴う燃費悪化（CO₂ 排出量増大）に対する懸念、原油価格高騰等により、環境保護・経済性の両面において、船舶の省エネルギー化に対する要請が高まっている。プロペラ性能は、船の推進性能に大きな影響を及ぼすため、プロペラ設計は船舶の省エネルギー化実現のカギを握る主要な技術的要素である。

プロペラ設計技術の進歩を目指して九州大学では、プロペラ設計チャート等を用いて設計されたプロペラを原型として、遺伝的アルゴリズムを用いて原型プロペラを上回る性能の改良プロペラを得ることのできる革新的なプロペラ設計法を開発した。

本手法のさらなる高度化のため、2007年5月に九州大学と複数の造船会社から構成される「革新的プロペラ設計法研究会」を発足させ、本研究会参加各社の原型プロペラの試改良により本手法の課題を抽出した。2008年度には抽出された課題を考慮して本手法を修正し、本研究会参加各社の原型プロペラの改良を再度行って、その効果を確認した。

2009年度は本研究の最終年度であり、本手法によって改良されたプロペラの模型試験を行い、本手法の有効性を確認する。

2. これまでの研究成果

2007 年度および 2008 年度に実施した研究の概要を以下に示す。

[2007 年度]

1) 革新的プロペラ設計法においてプロペラ性能計算法として用いる SQCM と呼ばれるパネル法の計算精度の確認を行った。本研究会参加各社のプロペラに対する SQCM による性能計算の結果と実験結果との比較より、SQCM の計算精度について以下のようなことがわかった。

- 1) 推力係数およびトルク係数は高荷重域で誤差が大きくなる傾向にあるが、プロペラ設計点付近の計算精度はおおむね良好である。
- 2) ピッチや展開面積比の違いがプロペラ性能に及ぼす影響を正しく表現できている。
- 3) トルクが過大評価される傾向にある。

2) 革新的プロペラ設計法により本研究会参加各社の原型プロペラの試改良を行った。得られた改良プロペラの性能確認の結果、以下のような課題が抽出された。

- 1) 所定の推力を発生しつつ、プロペラ効率を向上させ、かつ原型プロペラと同程度のキャビテーション性能を保つことが可能であることが確認できた。しかし、キャビテーションシミュレーションの結果より、クラウドキャビテーションやバブルキャビテーションの発生が懸念されるケースもあった。
- 2) 推力を原型プロペラと同じとし、キャビテーションの発生範囲を原型よりも抑えるという条件を課した場合、推力とキャビテーションに関する条件は満足させることができたが、プロペラ効率は原型プロペラより低下する結果となった。

[2008 年]

2007 年度に抽出された革新的プロペラ設計法の課題を考慮し、以下のような修正を行った。

【設計変数】

設計変数である半径方向のピッチ、最大キャンバーおよび各半径位置でのコード方向の最大キャンバー位置を 3 次関数によって変化させると不自然な形状が見受けられたので、2 次関数によって変化させることを標準とする。

【キャビテーションの制約】

- ・ 2007 年度は Holden 法による船尾変動圧の計算値とプロペラ翼表面上の負圧のピーク値を用いたが、2008 年度はプロペラ翼表面上の負圧のピーク値は用いないこととする。なお、Holden 法による船尾変動圧の計算値は引き続き用いる。

- ・ 翼のコード方向中央付近に負圧のピークが現れるとクラウド・キャビテーションやバブル・キャビテーションの発生が懸念されるので、バック面の圧力が翼前縁で最小となるような制約を課す。
- ・ フェイス・キャビテーション対策として、一様流中での $0.7R$ 付近のフェイス面の圧力最小値が原型の値より低くならないような制約を課す。

革新的プロペラ設計法に上記のような修正を施し、本研究会参加各社の原型プロペラの改良を再度行った。各改良プロペラの性能確認の結果、本手法はほぼ満足のゆくものと判断された。

以上を踏まえ 2009 年度は、航海訓練所の青雲丸 I 世(これ以降、単に「青雲丸」と称する)に装備されていた通常型プロペラを原型として本手法により改良を行い、模型試験を実施して改良の効果を検証することとなった。

なお、革新的プロペラ設計法において最適化手法として用いている UNDX に基づく実数値遺伝的アルゴリズムおよびプロペラ性能計算法として用いているパネル法 SQCM については、革新的プロペラ性能研究会 2007 年度研究成果報告書を参照されたい。

3. 青雲丸通常型プロペラの単独性能

本研究において原型プロペラとして採用する青雲丸通常型プロペラの主要目を表 3.1 に示す。プロペラ単独性能試験は三井造船昭島研究所大水槽で実施された。

表 3.1 青雲丸通常型プロペラの主要目

直径 [m]	0.2500
ピッチ比	0.9500
展開面積比	0.6500
翼厚比	0.0480
ボス比	0.1972
翼数	5
スキュー角 [deg.]	10.5
レーキ角 [deg.]	6.0
翼断面	MAU

SQCM によるプロペラ性能計算法を用いて青雲丸通常型プロペラの単独性能の計算を行った。図 3.1 にプロペラ単独性能の計算結果を試験結果と比較して示す。

図 3.2 に推力係数、トルク係数およびプロペラ効率の計算結果を試験結果で除して求めた誤差を示す。推力係数については前進係数が 0.75 付近で誤差は最小となる。また、前進係数の低い領域および高い領域では誤差は 5%を超えている。トルク係数の誤差は試験を行った前進係数の中間付近で最大(約 4%)となり、前進係数の低い領域および高い領域では誤差は小さくなる。プロペラ効率については、試験を行った前進係数の中間付近で誤差が 1%程度となる領域があり、前進係数の低い領域および高い領域で推力係数と同様に誤差が大きくなる。

プロペラ改良を行う推力係数 $K_T=0.219$ に対応する前進係数 $J=0.604$ 付近ではプロペラ効率に関する誤差は 1%程度で安定している。

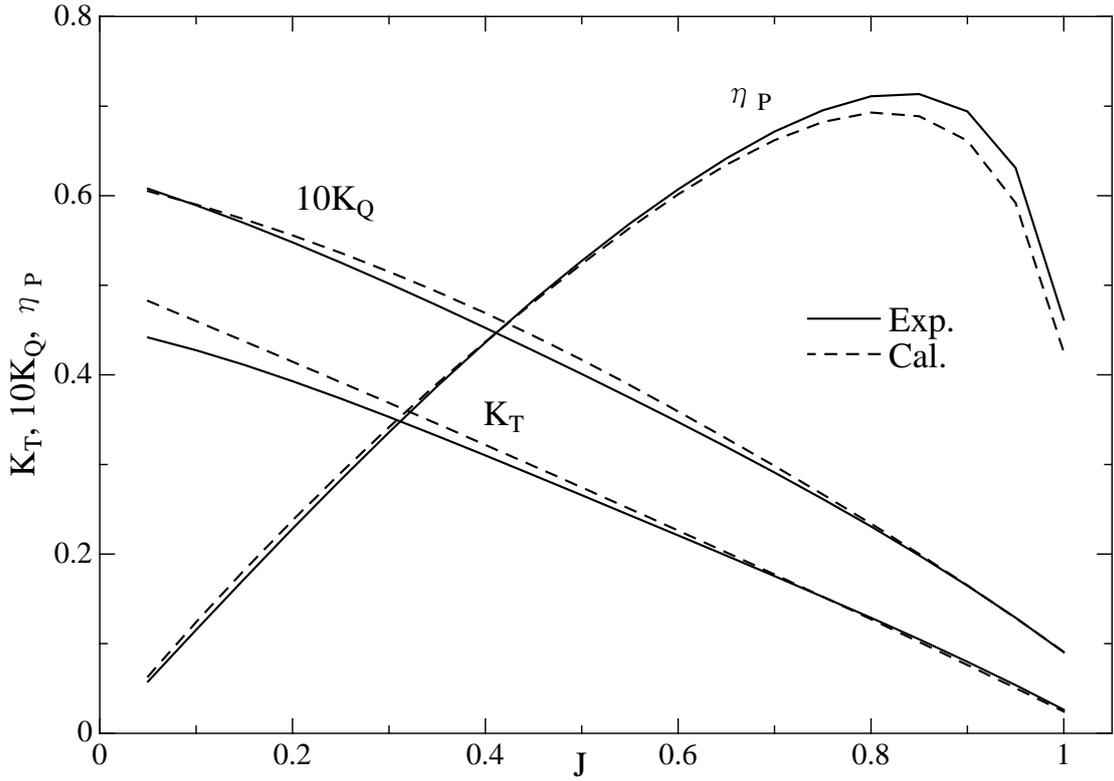


図 3.1 プロペラ単独性能の比較

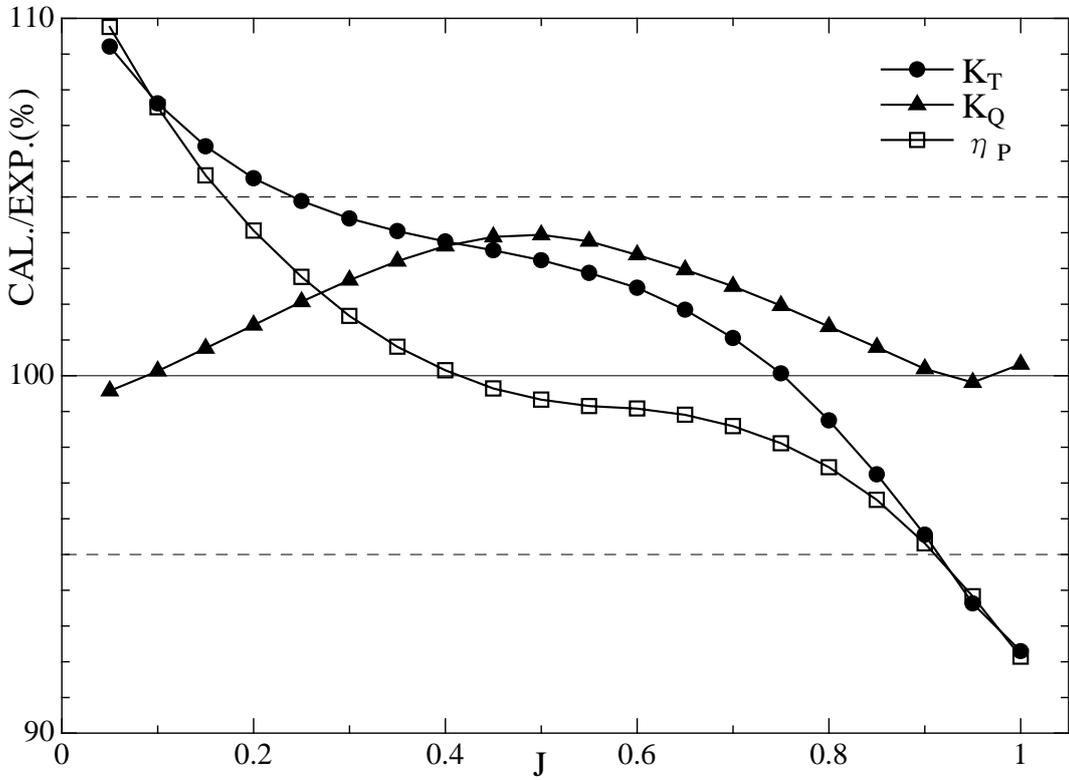


図 3.2 推力係数、トルク係数およびプロペラ効率の誤差

4. 革新的プロペラ設計法による青雲丸通常型プロペラの改良

4.1 プロペラ性能最適化の計算の概要

ここでは、2008年度に行った革新的プロペラ設計法の改善点を含め、本手法の概要を述べる。最適化問題は、設計変数、目的関数および制約条件により構成されるので、まずはこれらについて以下に示す。

[設計変数]

本手法においては、スキュー、レーキ、コード長および最大翼厚の半径方向分布は原型プロペラのものを変更せずそのまま使用する。翼数も原型と同じである。ただし、改良型プロペラにおいては、原型プロペラの翼型は使用せず、キャンバー分布が NACA $a=0.8$ 、翼厚分布が NACA 66 の翼型をすべての半径方向位置で採用した。図 4.1 に、これらのコード方向の分布を示す。それぞれの最大値で無次元化されたものが与えられているので、実際には各半径位置でのキャンバーおよび翼厚の最大値をこれらの分布形状に乗じて使用する。改良型プロペラで使用する翼型を基本翼型と呼ぶ。

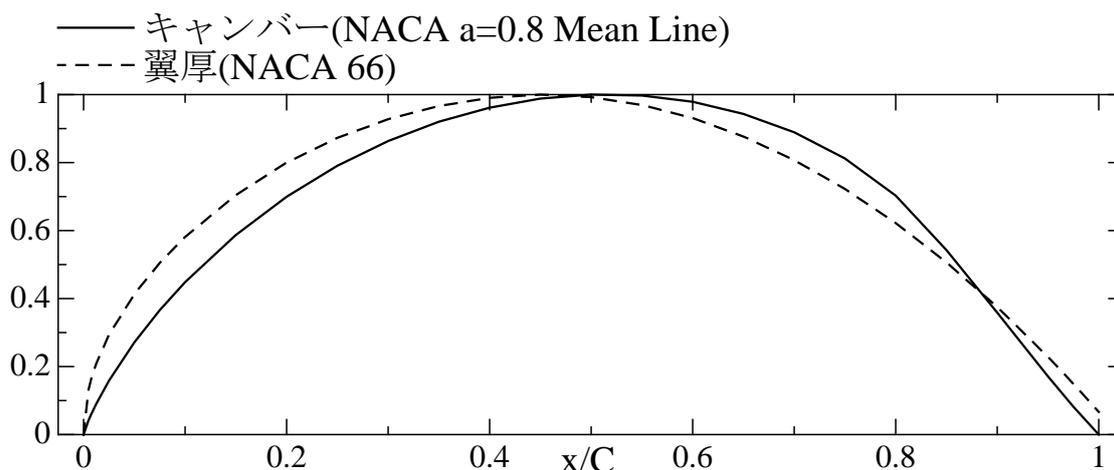


図 4.1 基本翼型のキャンバーおよび翼厚分布

なお、キャンバー分布については、最大位置をコード方向に適宜移動させることとし、コード方向の最大キャンバー位置を設計変数として取り扱う。コード方向の最大キャンバー位置が Δ_{\max} だけ移動することに伴い、キャンバー分布形状は図 4.2 のように変更される。これに加え、今回の改良においては、半径方向のピッチ分布および最大キャンバー分布を設計変数とする。設計変数である半径方向のピッチ、最大キャンバーおよび各半径位置でのコード方向の最大キャンバー位置を 2 次関数で表すことにし、具体的には、翼根部、50% 半径位置および翼端部におけるそれぞれの値を設計変数とする。したがって、設計変数の個数は 9 個である。

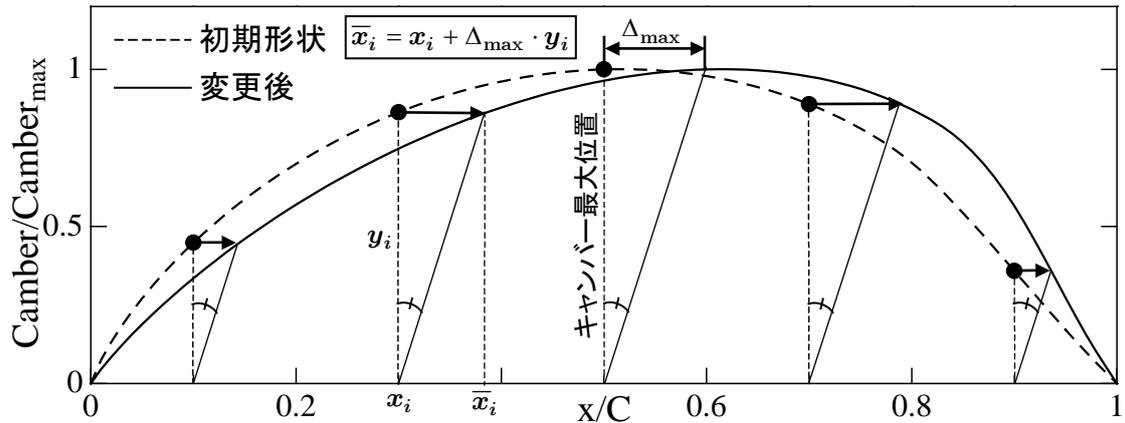


図 4.2 キャンバー形状の変更方法

[目的関数]

所定の推力を発生させつつプロペラ効率を最大化するために、プロペラ効率 η_0 を直接的に目的関数とするのではなく、目標とする推力係数 K_T^{Target} との差に応じたペナルティ関数をプロペラ効率に掛け合わせて目的関数とする。目的関数 F およびペナルティ関数 P を以下のように表す。

$$F = P \times \eta_0 \quad (4.1)$$

$$P = \exp\left(-\left|K_T - K_T^{\text{Target}}\right| / K_T^{\text{Target}}\right) \quad (4.2)$$

本手法においては、(4.1)式で表される目的関数の最大化問題を解く。

[制約条件]

キャビテーションの発生範囲に関する制約条件は以下のとおりである。

1) Holden 法による船尾変動圧の計算値

原型プロペラについて Holden 法により船尾変動圧の値を求め、改良型プロペラのキャビテーションの発生範囲を原型プロペラのものと同等とする場合は、原型プロペラについて求めた値を制限値として考慮する。今回は、原型プロペラの船尾変動圧の計算値と同じ値を制限値として与えた。

2) バック面の圧力分布について

翼のコード方向中央付近に負圧のピークが現れるとクラウド・キャビテーションやバブル・キャビテーションの発生が懸念されるための対策であるが、バック面において圧力が最小となる位置が翼前縁以外にある場合、その圧力係数の絶対値がキャビテーション数を超えることを許さないという制約を課した。

3) フェイス・キャビテーション対策

基本的には、原型プロペラについて求めた一様流中でのフェイス面の圧力最小値より低

くならないような制約を課すが、原型プロペラの値をそのまま制約として用いると厳しすぎる場合があるので、今回は試改良計算の結果、最終的には65%半径位置でフェイス面の圧力最小値が負にならないという制約を課した。

以上を踏まえ、プロペラ性能最適化の計算の流れを以下に示す。

[I] 初期集団の生成

プロペラの半径方向のピッチ分布、最大キャンバー分布および各半径位置でのコード方向の最大キャンバー位置に関する設計変数をランダムに生成し、それぞれの分布を得る。さらに、原型プロペラのスキュー、レーキ、コード長および最大翼厚分布と基本翼型のコード方向のキャンバーおよび翼厚分布を考慮することにより、プロペラ形状を得る。

得られたプロペラについて SQCM によりプロペラ性能計算を行うとともに、上記[制約条件]において示した船尾変動圧、バック面の圧力分布およびフェイス面の圧力最小値が課された条件を満足していれば初期集団の個体として採用し、そうでなければ破棄する。このとき、プロペラの推力係数が目標値以下であっても採用する。

制約条件が満足された個体(プロペラ)が N_p 個生成されるまで上記の操作を繰り返す。

[II] 複製選択

集団からランダムに交叉のための2個の親個体(両親)を選択する。

[III] 交叉

[II] で選択された両親に対して UNDX による交叉を適用し、2個の子個体(プロペラ)を得る。得られたプロペラについて SQCM によりプロペラ性能計算を行うとともに、上記制約条件を確認する。制約条件が満たされていれば評価の対象として採用し、そうでなければ破棄する。採用されたプロペラについては(4.1)式により目的関数を求め、記憶しておく。

評価の対象と成り得るプロペラが $2 \times N_c$ 個生成されるまで上記の操作を繰り返す。

[IV] 生存選択

[II] で選択された2個の親個体および [III] の交叉により生成された子個体のうち、制約条件が満足されたプロペラにおいて、目的関数が最大の個体および除いた残りの中からルーレット選択によってさらに1個を選択する。そして、これら2個の個体と [II] で選択した2個の親個体を入れ替える。

ある停止条件が満たされるまで [II] から [IV] までの操作を繰り返す。なお、 $N_p=50$ 、 $N_c=15$ とした。

4.2 改良型プロペラの性能評価

青雲丸通常型プロペラを原型として 4.1 節に示した最適化計算法を用いて改良型プロペラを得た。本節では水槽試験により改良型プロペラの性能評価を行った結果を示す。

図 4.3 および 4.4 に原型および改良型プロペラのピッチおよび最大キャンバー分布を示す。ピッチはプロペラ直径で無次元化し、最大キャンバーは各半径位置におけるコード長 C で無次元化したキャンバー比の形で示している。原型プロペラの最大キャンバーはピッチ面からの高さとしている。原型プロペラのピッチ分布は半径方向に一定であるが、改良型のピッチ分布は 70%半径位置付近が最小となる放物線形状である。翼端部のピッチは改良型の方が原型より小さい。改良型プロペラのキャンバー比は翼根で原型よりも小さいが、70%半径位置より翼端側では原型よりも大きい。改良型プロペラのキャンバー比は 75%半径位置付近で最大となっており、ピッチが最小となる位置にほぼ対応している。

図 4.5 に、改良型プロペラの各半径位置におけるコード方向の最大キャンバー位置を示す。翼端に近いほど、最大キャンバー位置が翼後縁側に移動していることがわかる。

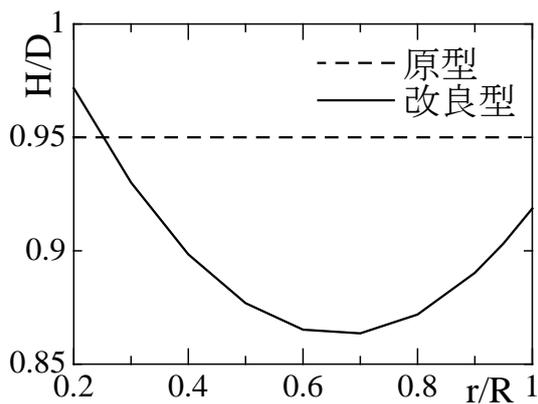


図 4.3 ピッチ分布

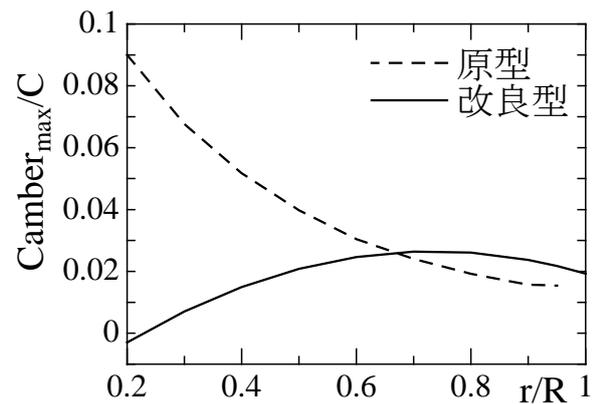


図 4.4 最大キャンバー分布

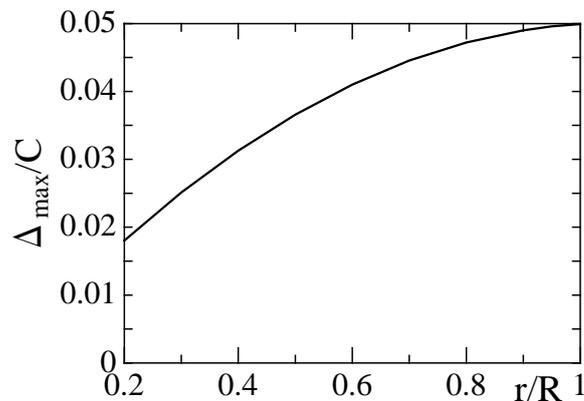


図 4.5 改良型プロペラの最大キャンバー位置

図 4.6 に、30, 50, 70 および 90%半径位置における原型および改良型プロペラの翼型を示す。図 4.4 に示された最大キャンバー分布のとおり、改良型プロペラは原型に比べ翼根近くでキャンバーが小さく、翼端付近でキャンバーが大きいことがわかる。

図 4.7 に、SQCM で計算した原型および改良型プロペラの単独性能を示す。改良型プロペラの効率は、 $J=0.604$ において原型より 2.1%向上している。

図 4.8 に、計算で得られた原型および改良型プロペラの半径方向の推力係数分布を示す。およそ 65%から 95%半径位置の範囲で改良型プロペラの方が大きな推力を発生していることがわかる。

図 4.9 に、30, 50, 70 および 90%半径位置における原型および改良型プロペラの翼表面圧力分布の計算値を示す。縦軸は、各半径位置における翼素への相対流入速度を用いて無次元化した圧力係数である。改良型プロペラにおける翼正面と背面の圧力差は翼後縁側で大きくなっており、翼後縁側で揚力を受け持っていることがわかる。また、改良型プロペラにおいては翼前縁での負圧のピークが現れていない。

図 4.10 に、三井造船昭島研究所大水槽で実施された原型および改良型プロペラの単独性能試験結果を示す。改良プロペラの推力係数 K_T およびトルク係数 K_Q は、 $J=0.6$ 付近で原型を下回っている。逆に、プロペラ効率 η_0 については改良型プロペラの方が高くなっている。

図 4.11 に、 K_T/J^2 ベースで原型および改良型プロペラの効率を示す。 $J=0.604$ における原型プロペラの推力係数を用いて K_T/J^2 の値を算出すると 0.5994 となる。この K_T/J^2 の値において原型および改良型プロペラの効率を比較すると、改良型の方が原型よりも効率が 2.4%向上している。

図 4.12 に、三井造船昭島研究所キャビテーション水槽で実施されたキャビテーション試験において撮影されたキャビテーションの写真を示す。試験状態は、原型および改良型プロペラともに推力係数 $K_T=0.219$ 、キャビテーション数 $\sigma_N=2.78$ である。これは実機においては満載状態でプロペラ回転数 $N=171\text{rpm}$ に相当する。図中には、基準翼の Top 位置を 0° として、プロペラ回転方向に $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 320^\circ, 330^\circ, 340^\circ, 350^\circ$ の位置での原型および改良型プロペラの基準翼に発生するキャビテーションの写真を比較して示している。推力の大きさは原型および改良型プロペラで同じであるが、キャビテーションの発生量は改良型プロペラの方が少ないことがわかる。

図 4.13 に、船尾変動圧力分布の比較を示す。試験状態は、キャビテーション観察時と同じである。図中には変動圧力波形の blade frequency 成分の片振幅を $\rho n^2 D^2$ で無次元化した値を示している。変動圧力振幅の blade frequency の 1 次成分は、最大位置において改良型プロペラの方が約 45%減少しており、高次成分についても改良型プロペラの方が全般的に減少していることがわかる。

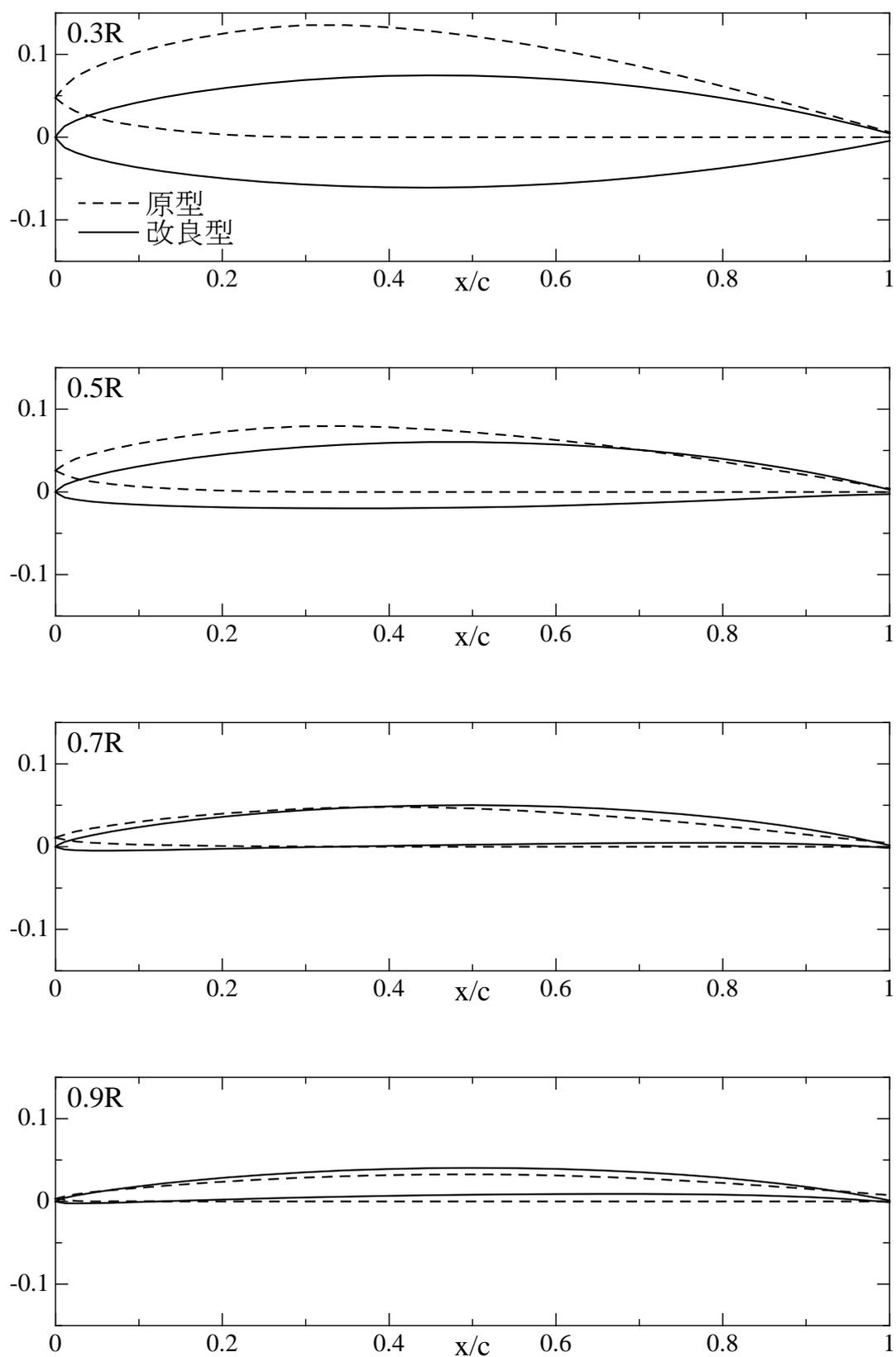


図 4.6 原型および改良型プロペラの翼型

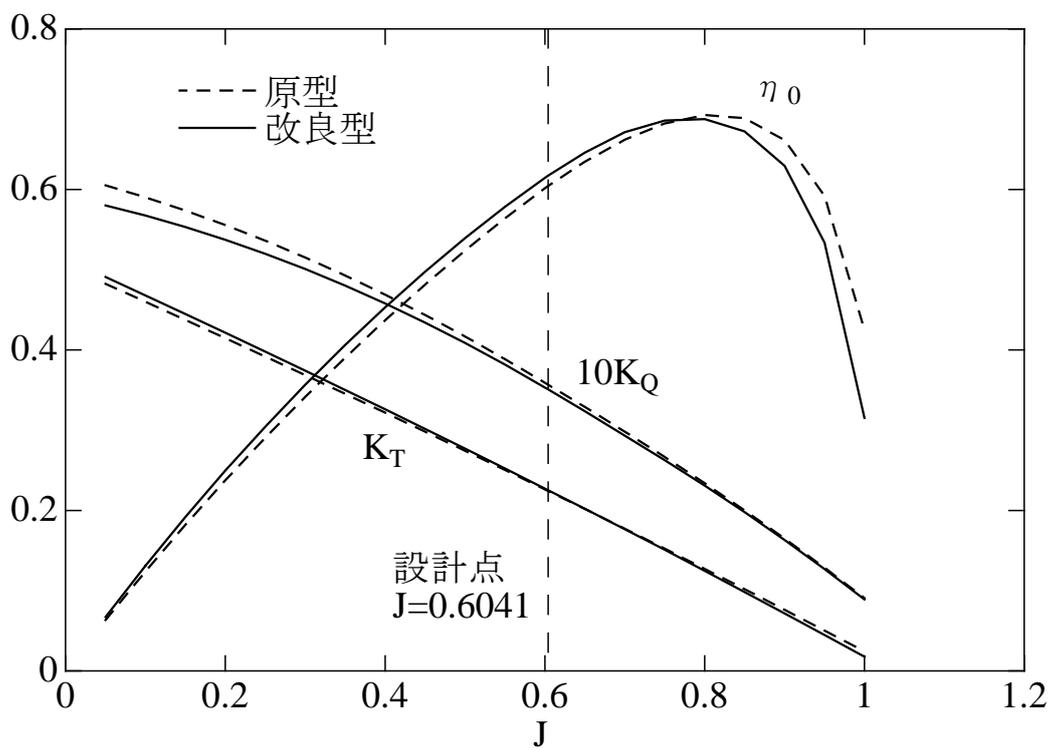


図 4.7 原型および改良型プロペラの単独性能 (計算値)

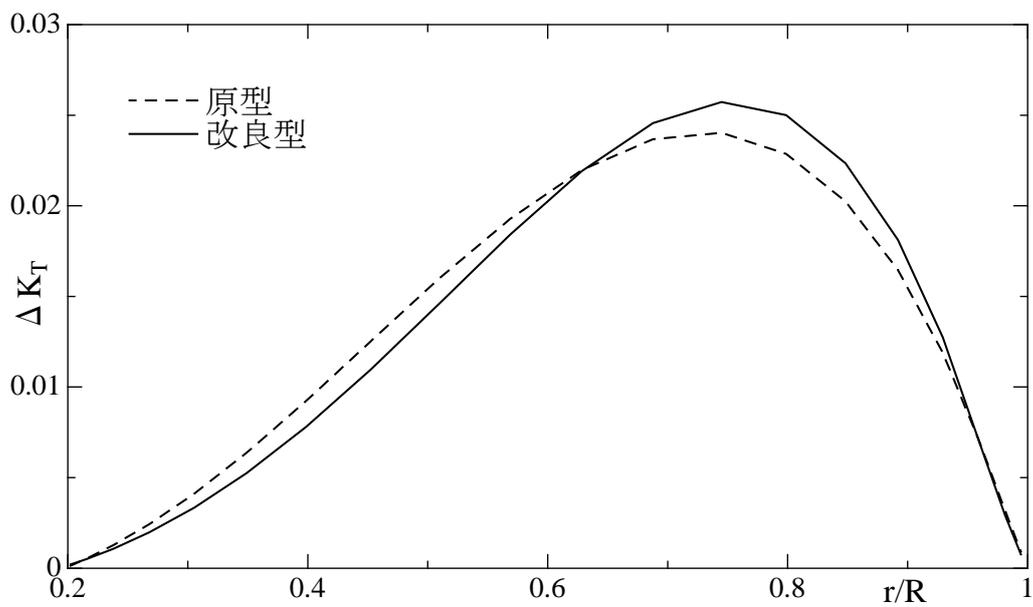


図 4.8 原型および改良型プロペラの半径方向推力分布 (計算値)

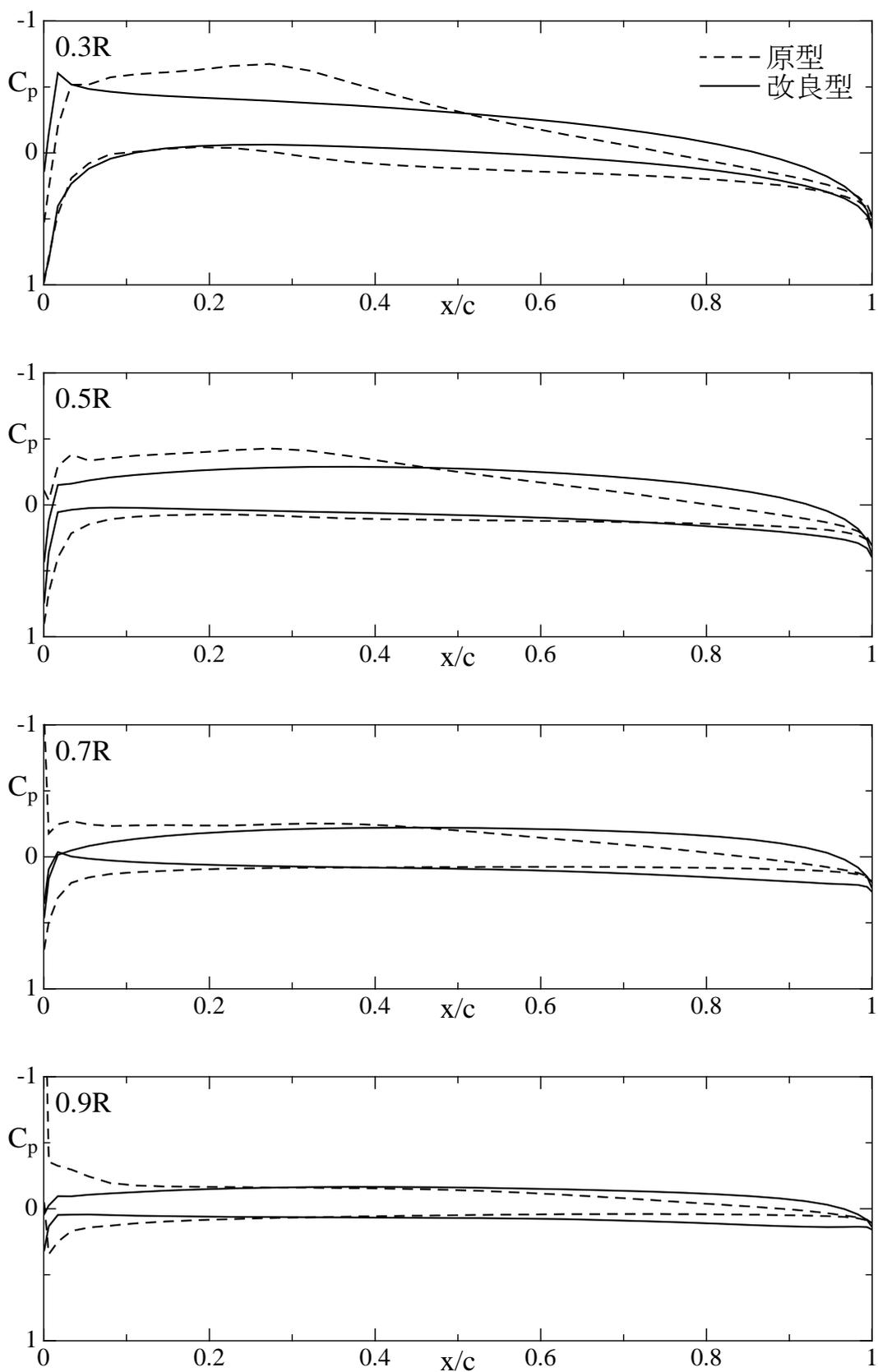


図 4.9 原型および改良型プロペラの翼表面圧力分布 (計算値)

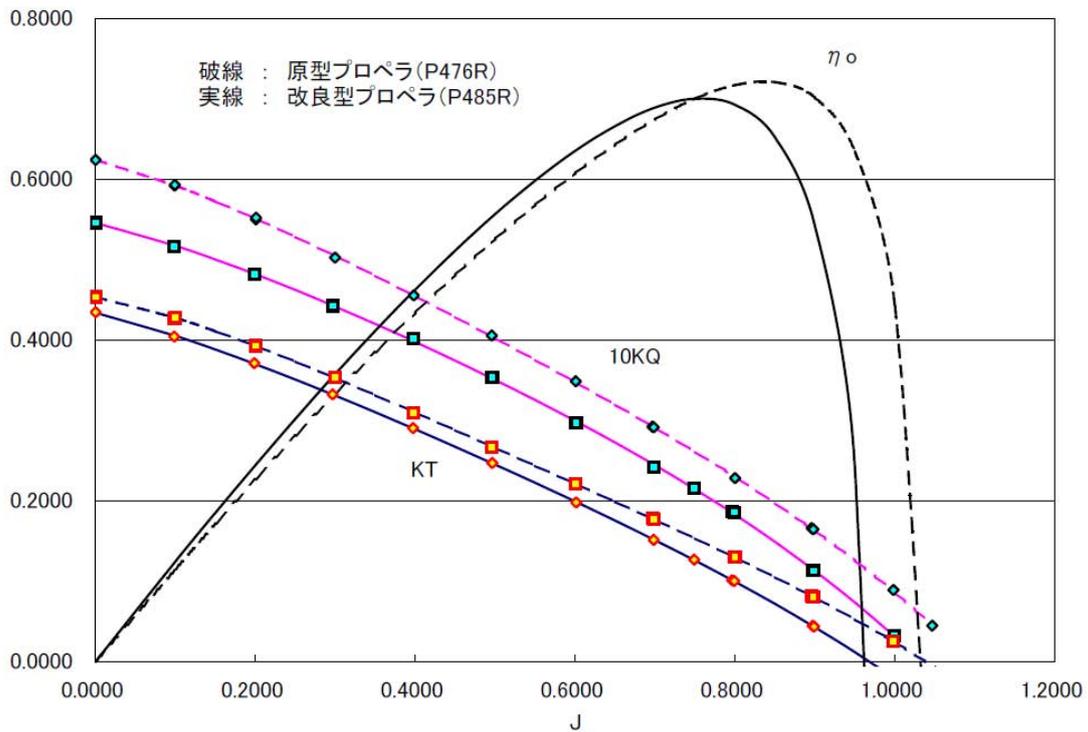


図 4.10 原型および改良型プロペラの単独性能（実験値）

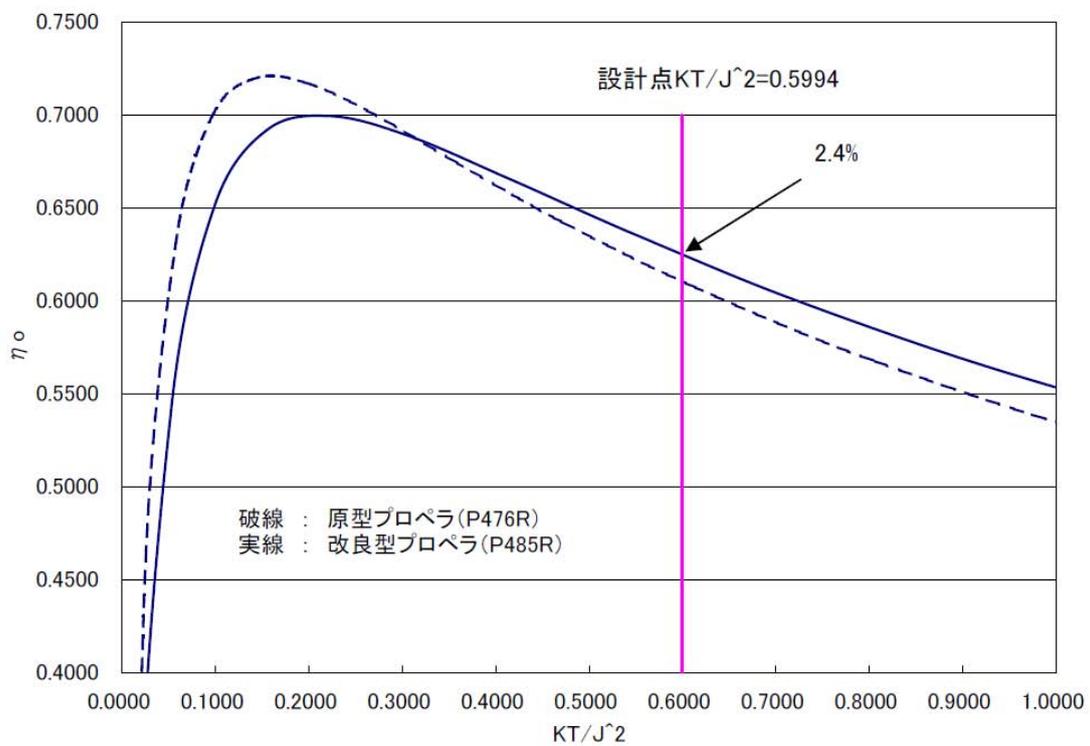


図 4.11 原型および改良型プロペラの効率の比較（実験値）

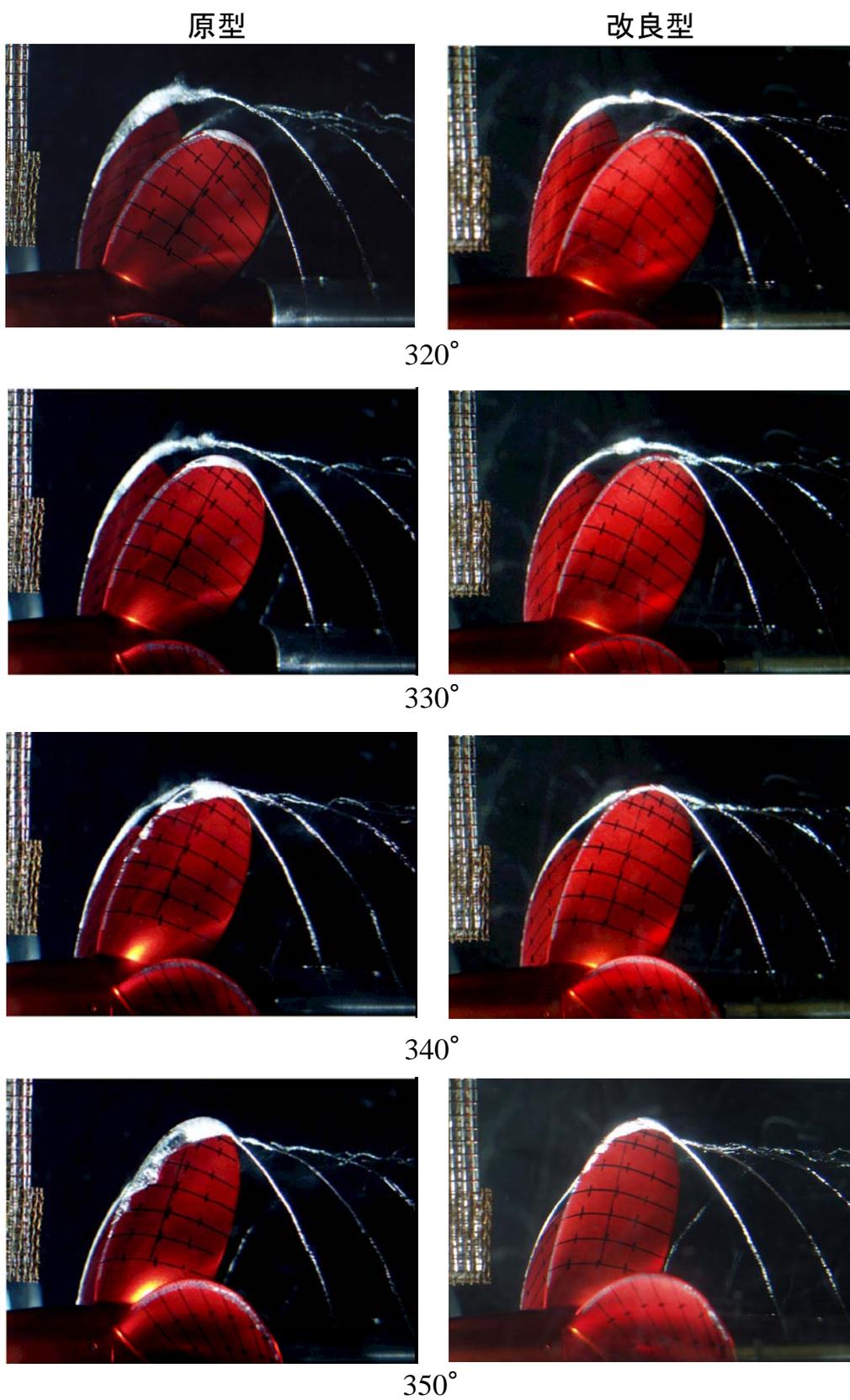


図 4.12 原型および改良型プロペラのキャビテーション観察結果

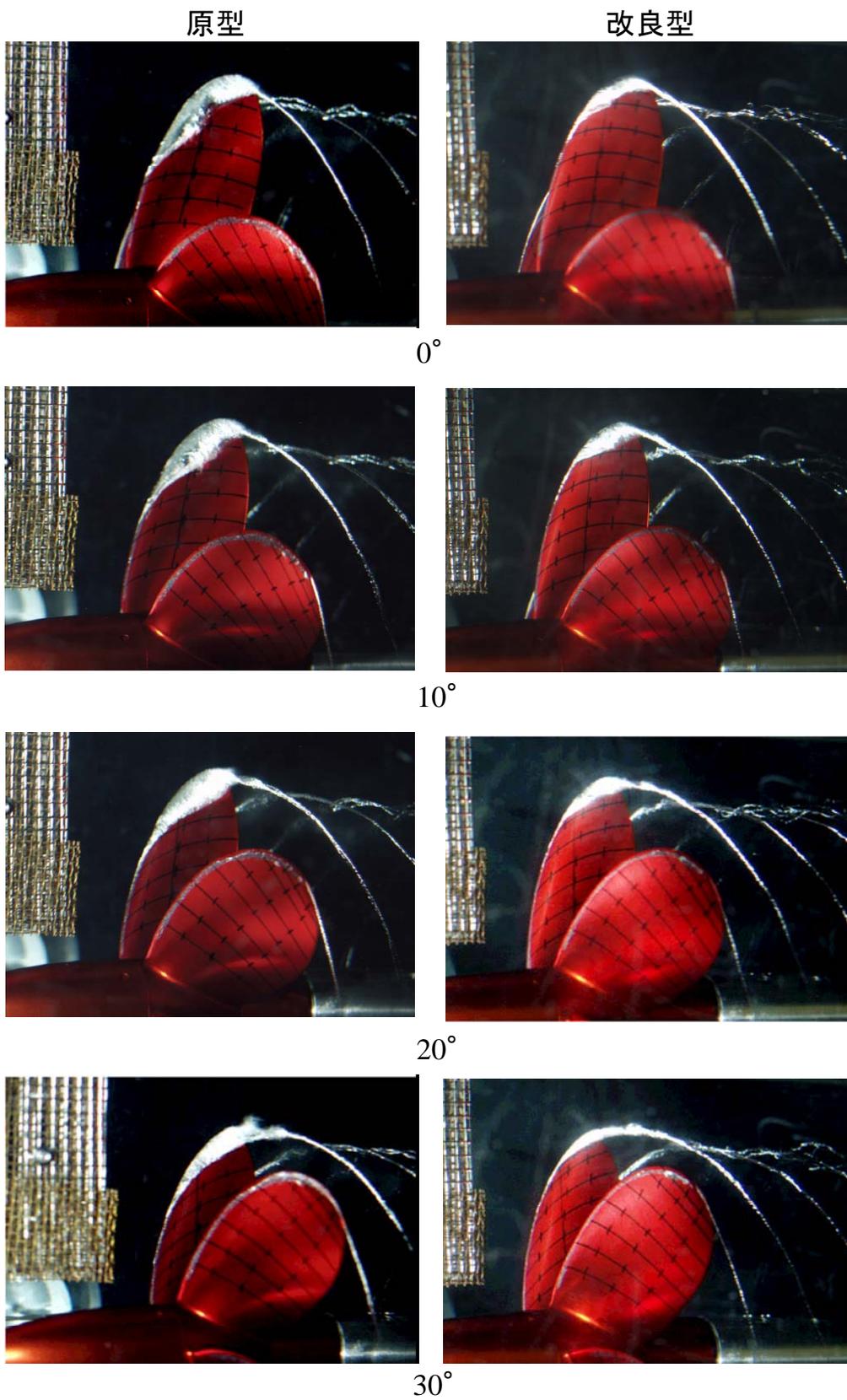


図 4.12 (続き) 原型および改良型プロペラのキャビテーション観察結果

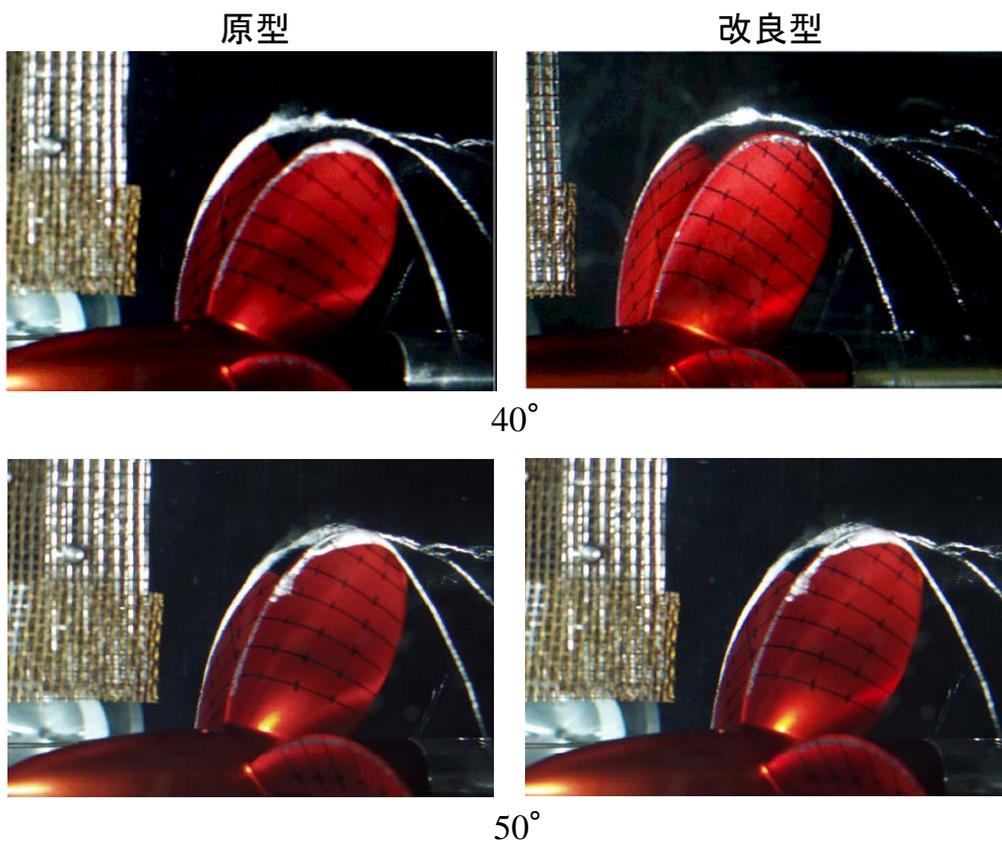


図 4.12 (続き) 原型および改良型プロペラのキャビテーション観察結果

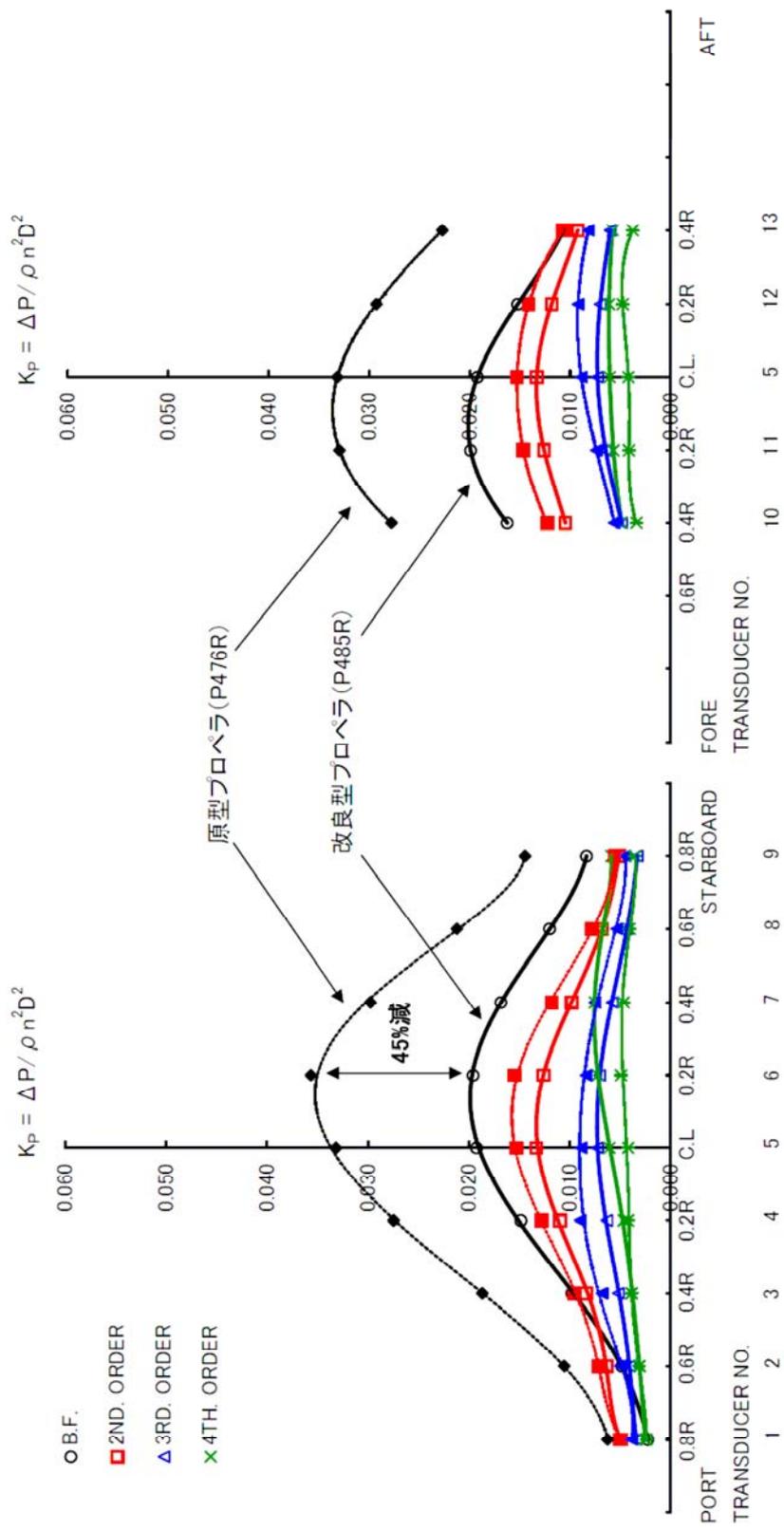


図4.13 原型および改良型プロペラの船尾変動圧力分布 (実験値)

4.3 まとめ

青雲丸通常型プロペラを原型として、革新的プロペラ設計法を用いて得られた改良型プロペラの模型試験を実施した結果、原型プロペラの設計点における K_T / J^2 と同じ値において原型および改良型のプロペラ効率を比較したところ、改良型の方が原型よりも効率が2.4%向上していることがわかった。

また、原型プロペラの設計点における推力係数において両者のキャビテーション観察を行ったところ、改良型プロペラの方がキャビテーションの発生量が少ないことがわかった。また、同状態にて船尾変動圧力を計測したところ、変動圧力振幅の **blade frequency** の1次成分が、最大位置において改良型の方が約45%減少し、高次成分についても改良型の方が一般的に減少していることがわかった。

以上より、本手法の有効性が確認できた。

5. おわりに

2007-2008 年度に行った革新的プロペラ設計法の課題抽出およびその修正を踏まえ、本手法の有効性を確認するために模型試験を行った。

本手法によって改良されたプロペラは原型プロペラより単独性能が優れ、またキャビテーションの発生量も少なく、本手法がプロペラ設計にとって有効なツールであることが確認された。

今後は、我国のプロペラ設計技術の進歩に寄与するため、本手法の普及に努めたい。また、プロペラが作動する船尾伴流の不均一流場をより厳密に考慮してプロペラ形状の最適化を行う等、革新的プロペラ設計法自体のさらなる高度化も行う予定である。



この報告書は、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

革新的プロペラ設計法の研究開発
— 革新的プロペラ設計法研究会 —

2010年（平成22年）3月発行

発行 財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂2丁目10番9号 ラウンドクロス赤坂
TEL 03-5575-6428 FAX 03-5114-8941
URL <http://www.jstra.jp> E-mail info@jstra.jp

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。