

平成21年5月18日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560798
 研究課題名（和文） ニューラルネットワークによる翼型性能推定法の開発とプロペラ設計支援ツールへの応用
 研究課題名（英文） Development of prediction method for propeller blade performance by neural network and application to propeller design support tool
 研究代表者
 安東 潤（ANDO JUN）
 九州大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：60211710

研究成果の概要：原型プロペラの幾何形状およびその他幾つかの設計パラメータを入力するだけでキャビテーション等の制約を考慮しつつプロペラ性能が最高となるようなプロペラ幾何形状を自動的に求めようとする設計支援ツールに、様々な翼型の境界層計算結果を学習させたニューラルネットワークにより翼型の粘性抗力係数を短時間に推定できるような翼型性能の簡易推定法を組み込んで、計算時間の増大を招くことなくツールの信頼性を高めた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：船舶流体力学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：翼型, プロペラ, ニューラルネットワーク, 粘性抗力, 境界層理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、船舶から排出される二酸化炭素の削減と燃料消費量の抑制が強く求められるようになってきており、船舶の省エネルギー化の要請がますます高まっている。船の推進性能を左右するプロペラの高性能化が重要となるが、プロペラ設計は、基本的には MAU チャートや各社で整備されている設計図表に基づいて行われているのが現状であり、設計図表の範囲を超えた高性能なプロペラ性能の開発は困難と思われる。

(2) 船型開発は、推進性能・復原性能・操縦

性能・耐航性能等をすべて考慮して行われるものである。しかしながら、それぞれの分野を専門とする技術者が分担して開発がなされた時代は我が国の造船業界では終焉を迎えており、多くの造船会社では少人数で船型開発を行わざるを得ない状況にある。プロペラ設計が重要かつ困難な状況におかれていても、少人数で複数の性能を並行して検討せざるを得ず、プロペラ設計に十分な時間を費やすことは難しい。したがって、他の性能の検討と並行して高性能のプロペラ設計が行えるような環境整備が望まれる。

2. 研究の目的

(1) プロペラ設計者は、より高性能のプロペラを設計するために、プロペラ設計図表を用いて求めた原型プロペラの翼形状やピッチ分布等のプロペラ幾何形状を変更してプロペラ性能を計算し、その結果を見ながら何回も同じ操作を繰り返しつつ、性能が優れたプロペラを模索するという対話的作業を行っており、多大な時間を要す。これに対し、初めに原型プロペラの幾何形状およびその他幾つかの設計パラメータを入力するだけでキャビテーション等の制約を考慮しつつプロペラ性能が最高となるようなプロペラ幾何形状を自動的に求めようとする設計支援ツールがあれば、より高性能のプロペラが見出される可能性があるだけでなく、本計算を実行している間、設計者は他の性能の検討を行う時間を確保できるものと思われる。申請者は既にプロペラ設計支援ツールの根幹となる部分は開発しており、プロペラの改良に成功した実績を持つ。しかしながら、改良に至らなかったケースもあり、本研究ではその問題点を克服して、信頼性の高いプロペラ設計支援ツールを完成させることを目的とする。

(2) プロペラの改良が成功しなかったケースにおいて考えられる主たる原因は、プロペラ設計支援ツールにおいて用いているプロペラ性能の評価計算の部分がポテンシャル理論に基づいており、粘性の影響はプロペラ翼断面の粘性抗力係数を経験式で与えていることにあると考えている。本ツールのように最適化手法を用いてプロペラ改良を自動的に行うには、プロペラ性能の評価の部分に要する計算時間は短くしなければならず、粘性の影響はプロペラ翼断面の粘性抗力係数を経験式で与えることにより簡易的に考慮せざるを得ない。しかしながら、翼型と粘性抗力係数の間の相関を正しく表現できるようにしておかないと、計算上は性能が良くなる方向に向かっているはずなのに、実際は逆に悪い方向に向かっていることになる。プロペラの改良が成功しなかったケースでは、翼型と粘性抗力係数の間の相関が正しく表現できていなかったものと思われる。

(3) 本研究ではこの問題を克服するために、ニューラルネットワークにより翼型の粘性抗力係数を短時間に推定できるような翼型性能の簡易推定法を開発する。そして、開発済みのプロペラ設計支援ツールで用いていた粘性抗力係数の経験式の代わりに翼型性能の簡易推定法を組み込み、ツールの信頼性を高めてプロペラ設計のレベル向上に寄与することを目指す。また、プロペラ設計支援ツールの信頼性をさらに高めるために、船尾伴流

の不均一流中のキャビテーション発生範囲を簡易的に推定する方法を開発し、これをツールに組み込む。また、不均一流中のプロペラキャビテーションをパネル法により厳密にシミュレートする方法の開発も行う。

3. 研究の方法

(1) 本プロペラ設計支援ツールにおいては、人工知能研究の分野で有用性が注目されている UNDX という交叉法に基づく実数値遺伝的アルゴリズムを用いてプロペラ性能最適化問題を解いている。以下、図1に示したプロペラ性能最適化の計算の流れにおけるステップごとに説明する。

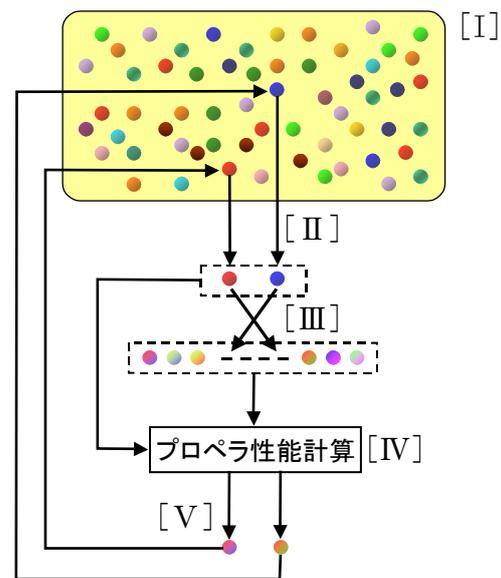


図1 プロペラ性能最適化の計算の流れ

ステップ [I] 初期集団の生成

プロペラは幾つかの半径位置において、ピッチ、スキュー、レーキ、翼型のコード長、翼型のオフセットデータを与えることにより、その幾何形状を表現することができる。これらの分布を適当な数式で表すこととし、数式に含まれる係数を変化させてやれば、さまざまなプロペラ幾何形状を表すことができる。ここで数式に含まれる係数を設計変数と呼ぶこととし、変化させる設計変数（数式の係数）が n_D 個あるとすれば、1 個のプロペラは n_D 個の設計変数を成分とする n_D 次元の実数ベクトルを持つ個体とみなすことができる。計算開始時に設計変数をランダムに変化させ、異なった幾何形状のプロペラを N_P 個生成しておく。これら個体の集合を初期集団という。

ステップ [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。

ステップ[III] 交叉

ステップ[II]で選択された両親に対して UNDX と呼ばれる交叉法を適用すると2個の子個体が生成される。この操作を N_C 回繰り返すと $2 \times N_C$ 個の子個体が生成される。つまり、幾何形状の異なる $2 \times N_C$ 個のプロペラが得られたことになる。

ステップ[IV] 子個体の評価

九州大学で開発したパネル法 SQCM による定常プロペラ性能計算法により、ステップ[II]で選択された2個のプロペラおよびステップ[III]で得られた $2 \times N_C$ 個のプロペラの性能を計算する。SQCM はポテンシャル理論に基づく方法なので、翼型の粘性抗力係数を経験式で与えることにより粘性の影響を考慮している。本研究では、新たに開発するニューラルネットワークによる翼型性能推定法をこの部分に組み込むことにより、本プロペラツールの信頼性を高める。

ステップ[V] 生存選択

ステップ[IV]で性能を計算したプロペラのうち、性能が最も優れたものおよびそれを除いた残りの中からルーレット選択によってさらに1個選択する。そして、これら2個の個体とステップ[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ステップ[II]からステップ[V]までの操作を繰り返す。

(2) ニューラルネットワークを用いて翼型の粘性抗力係数を短時間に推定できるような翼型性能の簡易推定法を開発し、プロペラ設計支援ツールに組み込む。具体的には以下のとおりである。

① 2次元翼型まわりの粘性流れ計算法として、境界層の積分型解法のコンピュータプログラムを作成する。境界層の積分型解法においては、境界層外端の流速分布が必要であるので、九州大学で開発したパネル法 SQCM を使用する。Abbott 著の Theory of Wing Sections に示されている翼型と揚力係数・抗力係数の実験結果と比較して、本プログラムの妥当性を検証する。

② ニューラルネットワークで用いられる手法にはさまざまなものがあるが、本研究では誤差逆伝播法を採用し、コンピュータプログラムを作成する。原型として選定した適当な翼型の最大キャンバーを変化させて①の粘性流れ計算法により揚力係数および抗力係数を求めておく。そして、最大キャンバーと揚力係数を入力、抗力係数を出力とするニューラルネットワークを構築し、粘性流れ計算法による直接計算の結果と比較してニュー

ラルネットワークの妥当性を検証する。

③ プロペラ設計支援ツールにニューラルネットワークを用いた粘性抗力係数の簡易推定法を組み込む。また、計算時間は長大となることが予想されるが、プロペラ設計支援ツールに境界層計算法を直接組み込んだ計算プログラムも作成し、改良プロペラが得られるまでの計算時間を比較する。

(3) プロペラ設計においては、船尾伴流中の不均一流れの中での非定常キャビテーション性能の把握が重要であるので、プロペラ設計支援ツールのさらなる高度化を目指し、パネル法による非定常プロペラ性能計算法によって得られた翼表面圧力分布から、キャビテーションの発生範囲を推定できるような簡易的な非定常キャビテーション性能推定法を開発し、プロペラ設計支援ツールに組み込む。また、不均一流れ中のプロペラキャビテーションをパネル法により厳密にシミュレートする方法の開発も行う。

4. 研究成果

(1) ニューラルネットワークを用いた翼型性能の簡易推定法の妥当性と、プロペラ設計支援ツールに組み込んだ結果について以下に示す。

① 2次元翼型まわりの粘性流れ計算法として、境界層の積分型解法のコンピュータプログラムを作成し、Abbott 著の Theory of Wing Sections に実験値が示されている NACA4412 を対象として計算を行った。レイノルズ数を 6.0×10^6 とし、迎角を変化させて揚力係数 C_l および抗力係数 C_d を求め、実験値およびこれまでプロペラ設計支援ツールで用いていた経験式と比較して図2に示す。境界層計算の結果は実験値と良く一致している。一方、経験式による計算結果の誤差は大きい。

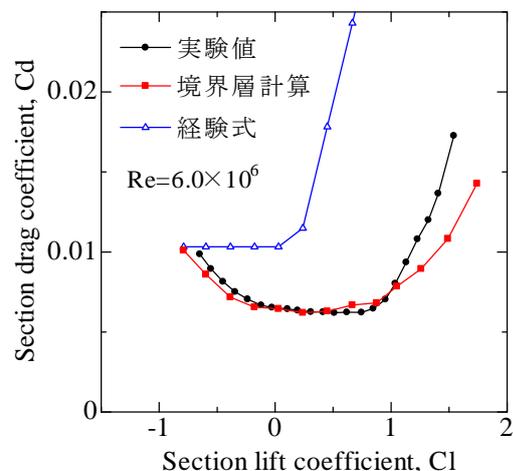


図2 抗力係数の比較 (NACA4412)

② 翼厚分布を NACA66、キャンバー形状を NACA a=0.8 Mean Line とした基本翼型について、迎角、最大翼厚およびレイノルズ数を固定して最大キャンバーの値をランダムに変化させ、粘性流れ計算法によって抗力係数を求めて学習データとした。このとき、粘性計算の前段階としてポテンシャル計算も行い、揚力係数も求めておいた。学習データの個数は 2,000 個とした。そして、最大キャンバーと揚力係数を入力、抗力係数を出力とする学習データを本研究で開発したニューラルネットワークに学習させ、結合荷重を求めた。結合荷重に最大キャンバーと揚力係数を作用させて得られた抗力係数(Network output)と学習に用いた抗力係数(Learning data)の相関を図 3 に示す。ニューラルネットワークによる学習が充分であることが分かる。

ペラの推力が目標値に近づき、かつ効率が向上した改良プロペラが得られることが分かった。境界層計算法を直接組み込んだツールは多大な計算時間を要することも確認できた。

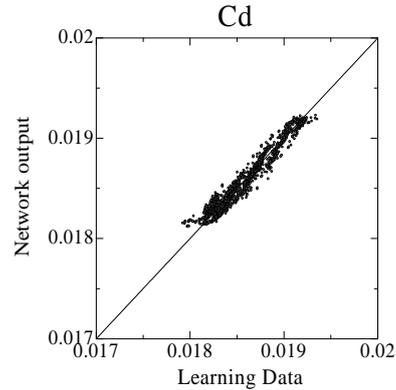


図 3 学習データによる出力

③ ②で構築したニューラルネットワークの妥当性を検証するために、最大キャンバーの値をランダムに変化させ、再度 2,000 個の翼型を生成し、上記と同様に揚力係数および抗力係数を求めておいた。一方、学習によって得られた結合荷重を用いて、再度生成した 2,000 個の翼型の最大キャンバーおよび揚力係数を入力として抗力係数を求めた。両方の抗力係数を比較したところ図 4 に示すように良く一致しており、構築したニューラルネットワークの妥当性が確認できた。結合荷重さえ求めておけば、抗力係数は瞬時に求まるため、プロペラ設計支援ツールのプロペラ性能評価計算法と組み合わせても計算時間の増大は招かず、粘性の影響まで考慮した信頼性の高いツールとなることが期待できる。

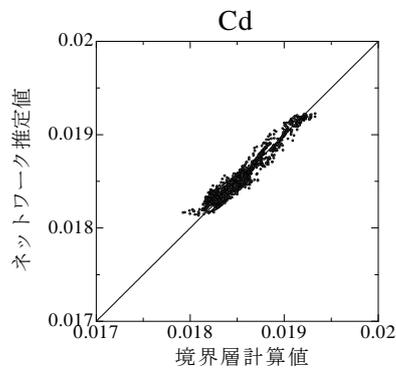


図 4 未学習データによる出力

④ ニューラルネットワークによる翼型性能の簡易推定法をプロペラ性能計算法に組み込んでいくつかのプロペラの性能を計算し、公表されている実験値と比較して妥当性を確認した。そして翼型性能簡易推定法をプロペラ設計支援ツールに組み込んだ。また、計算時間は長大となることが予想されるが、プロペラ設計支援ツールに境界層計算法を直接組み込んだ計算プログラムも作成した。適当なプロペラを原型プロペラとして選定し、原型プロペラと同程度のキャビテーション発生範囲となるような制約条件を課し、経験式で翼型の粘性抗力係数を求める従来のツールと本研究で開発した翼型性能簡易推定法を組み込んだツールおよび境界層計算法を直接組み込んだツールにおいてプロペラの推力が目標値に近づくまで計算を行い、計算時間を比較した。その結果を図 5 に示す。また、改良プロペラの効率の変化を原型プロペラの効率との比の形で図 6 に示す。翼型性能簡易推定法を組み込んだ計算は、簡単な経験式を用いた場合と同程度の計算時間でプロ

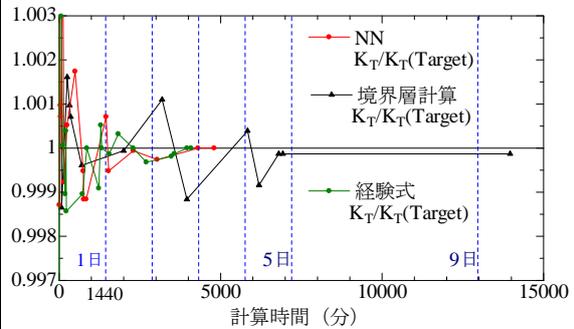


図 5 推力と計算時間の比較

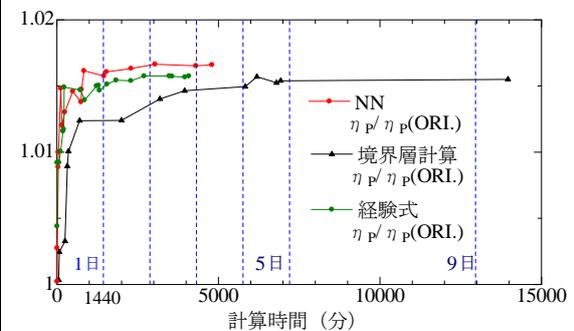


図 6 プロペラ効率と計算時間の比較

(2) プロペラ設計支援ツールのさらなる高度化を目指し、プロペラ設計における制約条件として重要な、船尾伴流中でのキャビテーション発生範囲を考慮できるようにした結果について以下に示す。

① パネル法に基づいた、キャビテーションを発生していない非定常プロペラ性能計算法により翼表面の圧力分布を計算し、飽和蒸気圧より低いところにキャビテーションが発生しているとする簡易的な推定法とキャビテーションモデルを考慮したパネル法に基づく非定常プロペラキャビテーション計算法を開発した。プロペラ翼のうち1枚を基準翼として定め、その翼の母線が船尾伴流中で直上を向いたときのキャビテーション発生範囲を図7に示す。簡易推定法によるキャビテーションの長さは厳密なパネル法に比べ短くなっているが、半径方向のキャビテーション範囲は両者でほぼ一致している。ここで開発した簡易推定法は、船尾伴流の不均一中で発生するキャビテーションの発生範囲を定性的に推定可能と思われ、プロペラ設計支援ツールを用いた計算の中で、原型プロペラと改良プロペラのキャビテーション発生範囲の比較に使用できると判断した。

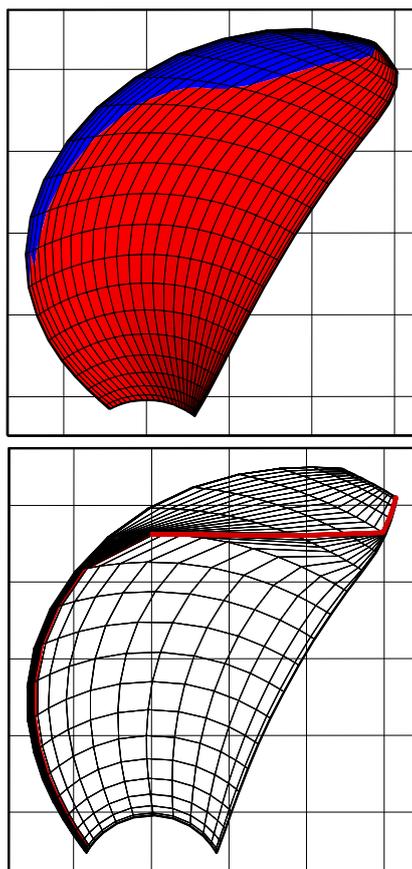


図7 キャビテーション発生範囲
(上：簡易推定法、下：パネル法)

② しかしながら、①に示した簡易推定法において、すべての翼を標準的なパネル数に分割しており、プロペラ設計ツールに組み込むにはさらに計算時間を短縮する必要がある。そこで、基準翼1枚だけ標準的なパネル分割数とし、他の翼は粗いパネル分割としたが、翼表面圧力分布の計算結果には僅かしか差が生じないことが分かった。計算時間はすべての翼を標準的なパネル数に分割した場合のわずか5%まで短縮できた。

③ このような簡易推定法をプロペラ設計支援ツールに組み込むことで、船尾伴流中のキャビテーションの発生範囲を制約条件として考慮することが現実的となり、プロペラの改良においてキャビテーションの発生範囲のコントロールが可能な、実用的なツールが開発できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 金丸崇, 安東潤, 簡便なパネル法による非定常プロペラキャビテーションの計算, 日本船舶海洋工学会論文集, 第9号, 2009年, 印刷中, 査読有
- ② 金丸崇, 安東潤, 簡便なパネル法による定常プロペラキャビテーションの計算, 日本船舶海洋工学会論文集, 第7号, 2008年, pp. 151-161, 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 金丸崇, 安東潤, 簡便なパネル法による非定常プロペラキャビテーションの計算, 日本船舶海洋工学会西部支部講演会, 2008年11月, 呉市
- ② 金丸崇, 安東潤, 簡便なパネル法による定常プロペラキャビテーションの計算, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2008年5月, 長崎市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安東 潤 (ANDO JUN)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60211710