ハイリースキュードプロペラの 翼応力実測解析*

穂森 繁弘**・馬場 宣裕**・佐々木康夫**

Full-Scale Stress Measurements and Analyses
on a Highly Skewed Propeller

By Shigehiro Homori, Nobuhiro Baba, Yasuo Sasaki

In recent years, the highly skewed propellers tend to be used for the prevention of the growth of ship vibration and noise. On the other hand, however, the blade strength of the highly skewed propeller under the ship operating condition has not been measured up to the present time, in spite of the need for the judgement on the blade strength. Therefore, the authors measured the blade stresses of the highly skewed propeller which was fitted on a Pure Car Carrier.

After analyzing the measured data, it has been found that the maximum principal stress induced on the pressure surface of the blade at the point of 0.4 R with 90% camber length from leading edge became maximum in value when the propeller chip clearance became minimum.

Furthermore, the measured principal stress mode within one revolution has been compared with the calculated result by the FEM analysis and the both have a similar tendency in the mode.

1. 緒 言

近年、船尾振動及び騒音の軽減を目的として、Highly Skewed Propeller (以下、HSPと略記する)の採用が検討され、今後、実船に数多く使用されることが予想される。HSPの性能及び船体振動の起振力としてのサーフェスフォースとシャフトフォースに関する実験研究は比較の数多く行われているが^{1,2,3)}、実船に装着されたHSPの実働中のプロペラ翼に発生する応力に関しては、必ずしも実態が把握されていないようである。周知のとおりHSPのプロペラ翼応力に関しては、その形状から曲げとねじりが複雑に作用する応力分布を呈する事が指摘され、水槽実験における船尾伴流中の模型プロペラ翼の応力計測例が発表されている^{2,4,5)}。これらの報告では、供試模型プロペラの設計条件に相違があるにもかかわらず、Conventional Propeller (以下、CPと略記する)における応力分布とは異なり、全ての場合について翼根部から0.5 R付近の翼後縁部において応力が大きな値を示すことが指摘されている。筆者らは、これを実船で確認するために比較的大形のHSPを装着した自動車専用船の試運転時に、総合実船計測の一環として、プロペラ翼応力及び軸力(トルク、スラスト)の計測を行ったので、

測定結果の一部について、その概要を紹介する。又、HSPの翼強度を検討する際、プロペラ翼の応力分布を把握することが不可欠であることから、筆者らが開発した実働時のプロペラ翼応力解析プログラムNKPBSAP(NK Propeller Blade Stress Analysis Program)による解析結果と計測結果との比較検討を行ったので、その概要についても併せて報告する。

2. 実船計測概要

2.1 実験船の主要目 実船計測を行った船は、自動車専用船で、表1に船体、機関及びプロペラの主要目を示す。

2.2 計測方法 プロペラ翼のひずみゲージ貼付位

表1 Principal particulars of ship

	Particulars	
	Type	Aft. Engine
Hull	LxBxD	166m×27m×11.9m
	Full Load Draft	8.220 m
	Block Coefficient	0.5269
	Gross Tonnage	11,000GT
	Sea Speed	17.4Knot
Main Engine	Type	2Cycle S.A. Sup.Cha. D.
	No. of Cyl. x Bore x Stroke	8×550mm×1380mm
	Max. Cont. Rating	12000PS×155rpm
	Type	Highly Skewed
Propeller	No. of Bladex Dia. x Pitch	5×4700mm×4137mm(0.7R)
	Skew Angle	45.8Deg.
	Material	KA18C3

* 原稿受付 昭和57年11月1日

昭和57年秋季学術講演(昭和57年10月27日)

** 正会員 日本海事協会技術研究所(三鷹市新川6-20-1)

図1 ひずみゲージ貼付位置

置は、図1に示す通りで、前進面の0.3R, 0.4R, 0.5R, 後進面の0.5R, 0.7Rの計5箇所に3軸ひずみゲージを貼付した。ひずみゲージの貼付後の防水処理及びリード線の翼面上の固定防水処理は、何れもSR-126部会で用いられた方法を採用した⁶⁾。リード線の機関室への取り込み方法は、まず図2に示すプロペラキャップのグリス注入口から翼面に貼付したアクティブゲージのリード線を取り入れ、キャップ内のプロペラ軸端面に貼付したダミーゲージとでブリッジを構成した後、中空軸としたプロペラ軸の中心孔を通して、プロペラ軸フランジ端面に設けた溝状のスリットからリード線を取り出す方法とした。又、トルク及びブラストは、中間軸にひずみゲージを貼付し、ねじり及び軸方向ひずみを検出し、プロペラ翼からのひずみ検出と共にFMテレメータにより計測し

図2 船尾構造概略

た。テレメータ方式による計測方法は、図2に示す中間軸の円周上に、FMテレメータの発信器とバッテリー及び発信アンテナを取り付け、一方、軸の回りを囲む固定受信アンテナからのリード線を計測室に設置したFM受信器に導くことによりゲージ出力を受信する方法とした。なお、計測データは、アナログ式データレコーダに収録し、データ解析の基準とするために、中間軸に1回転1パルスを発する回転マークを設け、計測データと共にデータレコーダに同時収録した。

計測は36 rpmから159 rpmまでの間を2~5回転おきに漸次回転数をあげ、それぞれ所定の回転数において回転が安定した状態で行った。

計測は3日間にわたって行ったが、計測中の海象状況はきわめて穏やかであり、風力階級は3以下で、ローリング、ピッチング共にほとんどなく、理想的な気象・海象状態であった。

3. 計測結果と考察

3.1 トルク変動 計測されたトルク変動と、プロペラ翼応力変動との対応関係は現在解析中であるが、ここではトルク変動の回転次数比解析結果について述べる。

図3に中間軸における軸回転数に対するねじり応力変動分布とねじり応力から換算した軸馬力を示す。図から分るように中間軸におけるトルク変動の主成分は、3次、4次、5次、8次及び11次であり、主軸系のねじり振動計算による固有振動数が1節で320.7 rpm、2節で1375.6 rpmであることから、3次、4次、5次、8次は1節振動

図3 中間軸におけるねじり応力変動分布と軸馬力

で、11次が2節振動であることが分かる。又、本船の搭載主機が8シリンダであることから、8次のねじり応力成分が、他の次数成分より極端に大きな値となっている。回転が上昇するに従い、5次の変動成分が漸増し、150 rpmを越えた範囲でその値が大きくなる傾向にある。これは、本船に装備されたプロペラが5翼であることから、低回転域ではトルク変動がねじり振動により大きく影響を受けるが、高回転域ではプロペラによる影響が漸増してくるものと推定される。この傾向はCPを装備した船でのプロペラ翼応力、軸力の実測例でも報告されている。なお、図中に示す中間軸における軸出力は、ほぼ基本設計計画どおりであった。

3.2 プロペラ翼応力 図4は、翼前縁面より0.4 Rの前縁から90%翼弦長位置でのCSOに相当する156 rpmにおける代表的な応力波形について、プロペラ2回転間の最大主応力の大きさと、その方向の変化を示したものである。図の横軸は、プロペラ翼が、上側に位置する時に、GL (Generator Line)が船体の中心線となす角度をプロペラ回転方向を正として表わしたものである。縦軸は最大主応力値とその方向を示す。

最大主応力の方向は、図1に示す計測点における半径方向基準線からの角度が後縁側に向う方向を負としている。

図の最大主応力波形から、プロペラ翼が上側の位置、即ち横軸の0°の位置から180°の位置まで回転して行く間、約45°および160°の近傍でそれぞれ3.62 kg/mm²及び3.3 kg/mm²の極値を持ち、前者は回転に対し急激に変化しているが、後者は緩やかに変化する特徴を示している。CPの応力計測例^(4,7,8)でも、極値を生じる位置は異なるが、類似の応力波形が示されている。しかし、CPの応力波形と比べ、本計測結果では、二つの極値の差が小さく、プロペラの1回転における応力分布が平均化する傾向にある。これはプロペラが回転する際、スキュー形状に起因して、各半径の翼素が時間的なずれを生じながら伴流中を通過することに原因するものと思われる。次に、最大主応力値が最も大きくなる位置は、既述のように翼が船の中心線を通過後、GLが中心線と約45°の時である。HSPのスキュー角度が45.8°であることから

図4 0.4 R、前縁より90%翼弦長位置における最大主応力(実測値)

ら最大主応力が最も大きくなるのは、プロペラチップクリアランスが最小となる近傍であると言える。次に、最大主応力の方向であるが、すべて負の値となっており、図1に示す計測点における半径方向基準線より常に後縁側を向いている。このような傾向は、定性的には、該部での曲げに対し、スキュー形状に起因するねじりが影響しているためと思われる。

4. 計測値と有限要素モデルによる解析値の比較

プロペラ翼応力解析プログラムシステムNKPBSAPを用いて、HSPの応力解析を行った。図5に示すように、プロペラ翼を翼弦方向に11分割、半径方向に14分割する要素分割として解析を行った。荷重計算に用いた伴流分布は模型試験による本船のバラスト状態のものであり、笹島の方法で、実船の伴流分布に修正したものである。解析時の幾何学的境界条件は、0.194 Rの翼弦上の節点を完全固定とした。なおプログラムの概要については付録を参照されたい。

図5 プロペラ翼要素分割

図6から図9に解析結果の一例を示す。図6は0.4 Rの応力計測点に対応する位置の要素で、プロペラ1回転における応力変化を示したものである。図から最大主応力値は約3 kg/mm²、変動応力振幅値は約0.9 kg/mm²、1回転間における平均応力は約2.3 kg/mm²となっている。

又、プロペラ位置が0°から180°の間で二つの極値を持ち、0°近傍の極値が最大値となる波形の傾向は実船計測結果と一致しているが、最大応力値と変動応力振幅値及び応力波形自体は、図4に示す実船計測値と隔たりがある。この隔たりの原因については、次のような事に主因があるものと思われる。すなわち、荷重計算に用いた非定常揚力面理論は、CPを対象としたものであり、理論展開に際して、スキュー形状を考慮していないため、翼面の圧力分布が実

図6 0.4 R, 前縁より90%翼弦長位置における最大主応力(計算値)

際の分布と異なっており,これを節点荷重に変換して解析した事により,計測値と異なる結果となったものと思われる。

次に図7,図8及び図9に有限要素解析により得られた翼前進面上の最大主応力分布,最大主応力の等高線,翼の変位を示す。図7に示すように最大主応力は,翼根部の最大翼厚点近傍で最大値を示しており,又,翼根部から0.8 R付近の範囲の翼後縁部においてかなり大きな値となっている他,0.85 R前後の翼前縁部においても,最大主応力が大きくなっているが,このような傾向は,スキュー量が極端に少ないCPでは生じておらず⁶⁾,HSP

図7 翼前進面の最大主応力分布

図8 翼前進面の最大主応力の等高線

図9 翼の変形モード

特有のスキュー形状に起因する曲げねじりによる影響であると推定される。

図8は最大主応力値を等高線で示したものであり,CPの場合と異なり,翼後縁部でもかなり大きな値となっており,かつ翼前縁部でも0.85 R付近で最大主応力値が増大している状態が明瞭にうかがえる。このように,従来のCPと対比して,最大主応力の分布形状が異なるので,スキュー形状及びそれにより誘起される応力状態によっては,翼の曲げねじりに起因し,座屈を生じる恐れもあるので,スキュー形状に応じて,翼の座屈強度の検討も必要になってくるものと思われる。

図9はプロペラ実働時の変形を,プロペラ回転面に平行な方向に三次元透視図で示したものである。図から翼がややねじられる傾向にある事が分かる。

5. 結 言

HSPの実働時のプロペラ翼応力を把握するために,HSPを装着した自動車専用船の試運転時にプロペラ翼応力を計測し,応力変動の解析を行った結果,次の事が分かった。

プロペラ翼前進面上の0.4 Rで翼前縁より90%翼弦長の位置における応力計測結果から,

(1) プロペラ1回転間に,計測位置で最大主応力が,最も大きな値となるのは,チップクリアランスが最も小さくなる位置,すなわちGLが船体中心と約45°をなす近傍であった。

(2) 計測点における最大主応力方向は,プロペラ1回転中,常に翼後縁側に向いている。

(3) プロペラ1回転間の応力波形は,CPと対比して,

応力分布が平滑化する傾向にある。これはスキュー形状に起因し、各半径の翼素が位相差を持って伴流中を通過することによるものと考えられる。

(4) 有限要素法による応力解析結果から、各半径の翼素に注目すると、翼根部から 0.8 R 付近の範囲の翼後縁部で、最大主応力が大きな値を示す。又、0.85 R 付近の翼前縁部でも最大主応力値が増大している。

現在、軸力(トルク、スラスト)と翼応力との関係を解析中であるが、スキュー形状を考慮に入れた翼荷重を用いた有限要素法による応力解析結果が求められた時点で、報告の機会を得たい。又、本船の航洋時における総合実船計測も予定されているので、それらの実測結果が得られた時点で、航洋時のプロペラ翼応力の評価についても検討する予定である。

本実船計測に際し、多大のご協力を頂いた神原汽船、常石造船及び神戸製鋼所の関係各位に深堪の謝意を表すると共に、静的翼応力計測試験結果を提供して下さい。ナカシマプロペラの関係各位に厚く御礼申し上げます。又、プロペラ翼へのひずみゲージ貼付方法に関し、種々ご教示頂いた船舶技術研究所機関性能部長植田氏、三菱重工業(株)長崎研究所推進性能研究室長谷林氏及び同研究室主務笹島氏に厚く御礼申し上げます。

なお、本実船計測に際し、困難な作業に尽力された当技術研究所機関研究室の凌志浩氏、住吉茂雄氏、城戸口秀典氏に感謝致します。

文 献

- 1) 凌 志浩・佐々木康夫; ハイリースキュードプロペラと標準プロペラにより誘起されるプロペラ起振力および船体振動に関する実船比較試験, 日本造船学会論文集, 第 151 号(1982)。
- 2) 中島 稔・菅野博志・久保博尚・板谷芳樹; ハイリースキュードプロペラの系統的模型試験および実船実験, 日本船用機関学会誌, 第 17 巻第 1 号(1982)。
- 3) T. V. Daniel and J. D. Francis; Highly Skewed Propeller for San Clemente Class Ore/Bulk/Oil Carrier Design Considerations, Model and Full Scale Evaluation, presented at the First Ship Technology and Research Symposium SNAME (1975)
- 4) 千葉規胤・中村直人; ハイリースキュードプロペラの実験的研究, 三菱重工技法, Vol.18, No.1(1981)。
- 5) 山崎正三郎・高橋通雄・早見信博・藪 忠志・藤本敏雄; Highly Skewed Propeller の研究(第 3 報), 日本造船学会論文集, 第 150 号(1981)。
- 6) 大型プロペラの翼強度に関する研究; 第 126 研究部会(1973)。
- 7) 植田靖夫・前橋正雄・塩出敬二郎・竹沢節雄・高井元弘; プロペラ翼応力の実測試験, 日本船用機関学会誌, 第 8 巻第 9 号(1973)。
- 8) 渡辺恭二・神田伸行・笹島孝夫・松尾 健; コンテナ船箱根丸による就航中のプロペラ翼応力計測, 日本船用機関学会誌, 第 9 巻第 12 号(1974)。
- 9) Terji Sjøntvedt; Propeller blade stress, application of finite element methods, Computer & Structures,

Pergamon Press Vol. 4 (1974)

付 録

プロペラ翼応力解析プログラム NKPBSAP
(NK Propeller Blade Stress Analysis
Program)の概要

本解析プログラムシステムは、プロペラ実働時の翼応力分布を正確に推定する目的で開発されたもので、汎用構造解析プログラム SAP 6 の薄肉シェル要素を使用し、入力データ作成のプリプロセッサ、解析結果を種々の形で出力するポストプロセッサから成る専用プログラムシステムである。解析には薄肉シェル要素を用いていることから、

(1) ねじりを含んだ曲げを比較的良く評価できる。

(2) 要素分割に際し、翼素形状を考慮した剛性評価を行っていることから節点数、要素数が比較的少なく済む。

などの特徴がある。薄肉シェル要素によるプロペラ翼の解析モデル化⁹⁾の妥当性をみるために、HSP の翼に点荷重を加え、発生する翼応力を計測した静的荷重試験²⁾の結果と、本プログラムシステムによる解析結果の比較を行ったが、図 A1 に示すように主応力値及びその方向ともにより一致を示している。したがって採用した薄肉シェル要素による解析は信頼性の高いものと考えてよい。

なお、解析に際しプロペラ実働時に翼に加わる荷重は、非常場揚力面理論を用いて圧力分布を算出し、これを力学的平衡条件を満たすように節点荷重に換算したものをを用いている。

〔質 疑 応 答〕

質問者 日立造船技術研究所 斎藤年正

〔質問〕 FM テレメータを用いてスラスト計測を行っているようですが、スラスト計測はトルク計測に比べ、ひずみ量も小さく、計測上困難な場合が多い。

今回の計測で、何か特別な手段を講じられたのであれば、お聞かせ願いたい。

〔回答〕 長期間にわたるスラスト計測は別として、実験期間が短期間(例えば公試運転時等)であれば、基本的には次の諸点に留意することで、大きな計測誤差は生じないと考えております。まず、使用するひずみゲージは一般に使用されている 120 オームより大きな抵抗値のものを使用する。軸回転中に遠心力で結線部分に抵抗変化を生じないように、結線部分等を完全に固定する。受信アンテナから受信器までの配線は外部からのノイズに影響されないよう適当な線を使用する。なお、以上はテレメータが、温度、遠心力等の影響をほとんど受けないものを使用することを前提にしております。

質問者 日立造船(株)造機基本設計部 浅野泰男

〔質問〕 1. 本講演でご教示されたのはプロペラ正転時

COMPARISON OF PRINCIPAL STRESS BETWEEN
CALCULATION AND EXPERIMENT

図A1 静的試験における主応力値とFEM解析による主応力値の比較

の翼応力実測結果と理解しております。

先に発表されている神戸製鋼の論文ではプロペラ逆転時に非常に大きな翼応力が発生すると発表されています。もし、よろしければプロペラ逆転時の今回の実船計測結果をご教示戴きたく、よろしくお願い申し上げます。

〔回答〕 クラッシュ・アスターンを含めアスターン時

の翼応力計測も行いましたが、データの解析はまだ行っておりません。ただ、計測時に応力波形をモニターウシロにより観察した限りでは、ご指摘のとおりかなり大きな翼応力が発生していたことは記憶しております。今後、解析が終了次第、その結果の発表の機会を得たいと考えております。