米海軍主要 CPP システムの信頼性調査 と改修整備計画(全訳)*

Juliani Gatzoulis**

Reliability Study and Fixit Programs for Major
U.S. Navy Controllable Pitch Propeller Systems

By Juliani Gatzoulis

This paper provides a detailed reliability and availability study of major U.S. Navy Controllable Pitch Propeller (CPP) Systems. The approach was to conduct a reliability study on these CPP systems to identify problem areas and to direct corrective action funds to those areas that will achieve the best payoff. Recommendations include that higher shaft-horsepower CPP systems, associated with the newer ships, be reviewed to assure that similar problems identified in this study are not repeated.

本論文は米海軍の主要 CPP システムの信頼性保全性調査の詳細について述べたものである。そのアプローチの方法は、問題領域を解明し、修正処置予算を最も効率的に配分指示するための信頼性調査を実施することであった。結論として、新造艦船に関連する高馬力 CPP システムは、本論文に解明されたような問題点が再発しないよう、再検討すべきことを勧告している。

背 景

可変ピッチプロペラ(以下 CPP と略す)とは、プロペラの回転方向を一定にしたまま、可変な前後進の推力を得るために、プロペラボスの中の機構によってプロペラの羽根のピッチを自由に变化できるプロペラのことである。

流体による最初の CPP は 1934 年に開発され、ドイツの Escher Wyss によってレジャーボートに装備された。

この CPP は、当時使用していたカプラン式水圧タービンの伝達装置として用いられた。カプラン式水圧タービンと CPP との原理上の相違は、前者はタービンによって海水からエネルギーを受取り、後者はプロペラを通してエネルギーを海水に放出する点である。

米海軍が初めて CPP を船舶にとう載して成功したのは 1947 年であった。このプロペラを採用することによって船のえい航時や係船時にも有効に主機発生エネルギーを使用することが可能となった。それ以来の CPP 船は、逆転機関なしに船舶に装備された。CPP は主機の

負荷を推力のほかに、発電機や火災用ポンプにも分割し利用されるようになった。最近になって、船舶推進用として、高出力ガスタービンの単独または他の機関との組合せ等に関する多くの設計研究および 2, 3 の応用がみられるようになってきた。そのうちでも、最も重要なものは、一定方向回転のガスタービンを用いて前後進のプロペラ推力が得られ、しかも、最小重量、最小コスト、高効率そして高信頼度となる手段を研究することであるが、このような手段として CPP は最適であると考えられる。

船舶の立場からみると、CPP を採用することによる主な利点は、船舶をいかなる状態でも自由に操作出来ることにある。例えば、主機回転数は定常に保持したまま、プロペラのピッチを減少することによって推力減少可能であり、しかも、主機のシリンダ内の平均有効圧の増加、主機の発停、逆転をせずに発生馬力を有効に使用できることにある。さらに、同一方向に主機を回転したままでもピッチを変えるだけで後進推力を発生させることができることも利点の 1 つである。

主機関の立場からみると、CPP を採用することによって往復動機関の逆転装置、タービン船の逆転用タービンは不要となる。

このことによって、機関の重量、価格のいずれも減少し、緊急時に推力の急速切り換えを可能にする。

CPP の最も魅力的な特長は容積、重量を最小にし、一定方向回転のガスタービンを使用して後進の推力を与える信頼性の高い装置であり、さらに、CPP 船は、固定ピッチプロペラ船よりもすぐれた操縦性をもっているということである。付随的利点としては、クラッシュアスターン時の船の停止距離の縮少、全力前進から停止ま

* 原稿受付 昭和 54 年 7 月 27 日

ISME TOKYO '78 講演(昭和 53 年 11 月 13 日)

** NOAA (米国防務省、海洋気象局) メリーランド州、ロックビル市。U. S. A.

での時間短縮、荒天時のバラスト状態における最適船速の選択、載荷状態による機関のより効率的な運転、減速ギアの寿命の延長、逆転機、後進タービンとクラッチ、さらに、後進用の高出力装置が不要などの点である。

目 的

米国海軍は、ガスタービン船からなる大艦隊を所有し、これらは以前使用していた推進プラントよりかなり高出力のCPPを備えている。数年前、CPPシステムをとう載しはじめた時期では、CPPの信頼性はまだ十分明らかにしていなかったため、米国の国防省上層部はこのCPPシステムに大きな関心を寄せた。海軍省内NAVSEA(Naval Sea Systems Commands)の一部局がこの関心に呼応して信頼性調査を実施した。すなわち、現存の主要CPPシステムの問題点を把握し、最も効果的な領域に対して修正処置予算を指示するための調査であった。

本論では、現在調査中のプログラムとすでに提案したFIXIT*プログラムを含めて、4種類のタイプの船舶に関するCPPの信頼性、保全性そしてアベリビリティ(R/M/A)**についての重要な結果について述べる。それによって、CPPシステムの問題は解明され、修正処置の基準が部所に提示された。さらに、CPPシステムのFIXITプログラムにおいて米海軍予算の使用の要点および新しいタイプの艦船に対する設計の要点などを取り扱っている。

調査範囲

このR/M/A調査は31か月間にわたる4種類のタイプのCPPシステムの解析を含むものである。ここで評価の対象となった四つのタイプの艦船はつぎのようである。

- ・タイプⅠ：このタイプの全艦船数は最初から就役していた100隻であり、そのうちの62隻はこの調査期間中、実働状態にあった。タイプⅠの艦船のCPPシステムは、同一クラスあるいは異なるクラスの間でも変化が多いのであるが、その問題や用途、使命などが同じであるから、ここにまとめて取扱うことにした。
- ・タイプⅡ：このタイプは15隻で最初から就役し、すべてが調査期間中実働状態にあった。
- ・タイプⅢ：このタイプは18隻であり最初から就役し、すべてが調査期間中実働状態にあった。
- ・タイプⅣ：このタイプは17隻であり、最初から就役し、すべてが調査期間中実働状態にあった。

調査方法

本論文に示される調査解析を実施するためには、相当量のデータの手計算と多勢の技術者の参加が必要であ

た。そしてステップ・バイ・ステップ法を用いた。

・CPPシステムは、4種類に分類され、さらにそれぞれ主要サブシステムに分解された。これによって運転データを分類して、サブシステムごとの故障分布を明示することができた。

・信頼性、保全性、アベリビリティ(R/M/A)と部品補給データを集録した。データには、システムの故障や不具合報告、保守データ、運転時間、補給データなどを含めた。

・R/M/Aに関する統計には、MTBF, MTTR, ML D (平均補給遅れ時間)やアベリビリティを含み、それらはデータから求められた。

・データからCPPシステムに関する問題点が指摘されそれらの原因が評価され、即時のおよび長期的修正処置について特定の勧告がなされた。それは造船所によるCPPシステムの造船所オーバホール間隔内における適正な運転性能を向上するためのものである。

これらのアプローチは、問題を明確にするのに極めて有効であった。そして、問題の評価における設計技術者の能力と相まって修正プログラムと予算措置に有力な指針を与えた。

故障報告データの使用は、CPPシステムの運転停止ひん度を評価する場合の一つの手段である。本調査では、Failures(故障)、Casualties(事故)、Malfunctions(機能異常)などは同義語とみなされ、それらに関連するきびしさの程度のみが異なるものとされた。故障は装置の機能異常が艦船の運転を阻害したり、規定の職務の遂行能力を奪うようなとき、船から故障報告が発行された。しかし、ある場合には、異常が生じて船が運転可能であったり、職務中またはその中間で、必要な修理が船内で実施可能であった場合は、故障報告がなされないこともあった。

R/M/A 統計

ここで使用した主要なR/M/A統計は下記のようなものである。すなわち、これらの統計は基準化されたデータであり、基本的な情報を与える。これによって各種のCPPの間の設計比較が可能であり、R/M/Aの立場からCPPの弱点を見いだすことが出来るものである。さらに、システム全体の信頼度を最も落しているサブシステムを抽出する統計が得られている。

データの計算に関しては2通りあり、一つは全部の故障データ(劣化も含む)を採用して計算することであり、もう一つは重大故障だけ使用することである。きびしさの度合は3段階、すなわち、実質的運転可能(まあまあ可能)、限界の運転可能(やっと可能)、および運転不能に分類されるが、これらの分類は船側の指示によるものである。

MTBF (Mean Time Between Failures)

MTBFは次式によって計算する。

* FIXIT Program, 本文の表題をはじめ文中にしばしば引用されている。固有の意味の詳細は聞きもらしたが「艦艇の改修計画」をいうらしい。以下ではそのまま「FIXITプログラム」とした。

** Reliability, Maintainability and Availabilityの略。

$$MTBF = \frac{(\text{船の総運航時間}) \times (\text{CPP台数} / \text{船舶})}{(\text{全故障数})}$$

MTBFは、最良のCPPシステムの信頼性指標である。四つのタイプの艦船に対して提案したFIXITプログラムは、比較的低いMTBFに基づいて決定される。

MTTR(Mean Time To Repair)

MTTRの計算は次式による。

$$MTTR = \frac{(\text{ETTRの総計})}{(\text{故障数})}$$

ここでETTRは推定修復時間である。

このETTRは各故障報告、機械経歴報告および修復技術的判断による情報に基づいて推定される。機械の経歴報告は選択された印刷情報である。また、保全に要するマンアワ(人数×時間)も報告されている。機械の経歴に関する報告は、本調査のすべての故障に関して利用できるようになっている。

MTTRは、CPPシステムの設計変更が保全性を改良するのに妥当であるかどうかについての情報を提供する。

平均補給遅れ時間(Mean Logistics Delay—MLD—)

補給データは、報告された故障とそれに対応する緊急修理データ(CASCOR)を検討し、且つ、補給遅れを招来した故障に対する部品や資材の待ち時間に注目して得られたものである。補給遅れデータにはつぎのようなあいまいな限界がある。すなわち、保全が意識的に延期されたり、緊急修理が機器試運転による点検完了まで一時

保留されるか、もしくは部品到着以前に保全が開始されるなどの場合を含むということである。

ここで用いた補給遅れの統計は平均遅れ時間(MLD)であり、次式によって計算される。

$$MLD = \frac{\text{部品} / \text{資材入手時間総計}}{\text{部品} / \text{資材所要の故障回数}}$$

ある故障に対しては、長時間の補給遅れも生じたことを指摘しなければならない。この場合の理由をみると、即刻に新替部品を要求していないとか、故障を検出して、所要の部品、資材を決定するのに時間がかかるなどである。

MLDは修理部品や補給品が船内に保管されていない場合のみ重要となってくる。補給遅れ計算結果(表3)から明らかなように、大部分の故障においては、補給遅れは見られなかった。このデータは、補給支援の効果を示す指標ともなる。

アベイラビリティ

アベイラビリティは、システムが任意の時点で正常に動作している確率の指標である。換言すると、システムの運転状態にある時間の総使用時間に対する割合である。本調査ではアベイラビリティはMTBF, MTTR, MLDなどを合成したものである。アベイラビリティの計算は次式による。システムの任務達成能力に影響を与える重大故障データのみを用いて計算する。すなわち、

$$\text{アベイラビリティ} =$$

$$\frac{MTBF}{MTBF + MTTR + (MLD) \times (PCRLD)}$$

表1 船舶のタイプ別による故障とR/M/Aの集計について

船舶のタイプ	故障総数		MTTR (時間)		MTBF (時間)		FIXIT プログラム 計算後の推定 MTBF (時間)		総運転時間	アベイラビリティ
	全故障数	重大故障数	全故障数	重大故障数	全故障数	重大故障数	全故障数	重大故障数	全故障数	重大故障数
タイプ I	63	30	15.0	19.4	5,753	12,081	19,075	40,270	181,215	0.99798
タイプ II	13	1	12.5	8.0	10,042	130,530	26,106	130,530	65,265	0.99994
タイプ III	48	5	17.1	20.8	2,190	21,022	35,037	105,112	52,556	0.99787
タイプ IV	2	3	33.0	***	53,825	107,650	—	—	53,825	1.00000
合 計	126	36	15.9	19.3	5,601	19,603	24,335	70,572	352,861	0.99859

{*** は重大故障なし
— は適用できず

表2 部品と装置別による故障とR/M/Dデータの集計について

部品/装置	故障数		割合		MTBF (時間)		MTTR (時間)		アベイラビリティ
	全故障数	重大故障数	全故障数	重大故障数	全故障数	重大故障数	全故障数	重大故障数	
プロペラボス部分	6	0	4.8	0.0	117,620	---	46.7	—	1.00000
軸系と制御棒(弁棒)装置	0	0	0.0	0.0	---	---	—	—	1.00000
サーボモータ装置	2	2	1.6	5.5	246,480	246,480	18.0	18.0	0.99993
制御システム	37	19	29.4	52.8	19,074	37,143	17.9	23.4	0.99916
油圧系	78	15	61.9	41.7	9,043	47,048	12.6	14.3	0.99960
ボスの噴油装置	3	0	2.4	0.0	32,632	---	11.3	—	1.00000

表3 全船舶における部品補給遅れ時間データの集計

故障度合	補給遅れを必要とする故障の割合	平均補給遅れ時間 (時間)					
		プロペラボス	サーボモータ	コントロールシステム	油圧系	ボス噴油装置	油の成分
実質的運転可能	30.4	NLDR	NLDR	950.7	528.4	775.0	317.4
限界の運転可能	22.2	NLDR	NLDR	38.5	50.0	NLDR	44.2
運転不能	0.0	NLDR	NLDR	NLDR	NLDR	NLDR	NLDR
合計	27.3	NLDR	NLDR	585.8	464.6	775.0	508.2
重大故障	19.0	NLDR	NLDR	38.5	50.0	NLDR	44.2

$$MLD = \frac{\text{故障修理用資材を得るまでの総時間}}{\text{部品を得るまで時間を要する故障数}}$$

注意；補給おくれデータはここで解析した126件の故障のうち77件にみられた。

NLDR = 部品補給遅れの報告なし。

であり、ここでPCRLD^{*)}は、部品補給遅れを伴う故障の全故障に対する割合である。さらに、上式は簡単にして

$$\text{アベアラビリティ} = \frac{\text{運転時間}}{\text{運転時間} + \text{故障修理のための休止時間}}$$

となる。

結果

データ解析の結果を表1～表3に示す。以上のことから次のような一般的知見を得た。

- 圧倒的多数の故障が船内、洋上修理可能部品に関連して起こった。故障数126件のうち、8件のみが艦船のドライドックを伴うものであった。この8件の故障はすべて羽根の油シールからの漏れであった。調査期間中、CPPのボス部、軸系や給油系などの基本機構には故障は見られなかった。

- CPPシステムの問題の大部分は油圧系に生じた。この油圧系関係の故障のうち、4分の3はポンプやポンプ駆動関係の不具合であった。

- 重大故障については、主にCPPの制御システムの故障が多数を占めた。現在使用中の制御システムは極めて多様であるから、どの原因も際立ったものではなかった。

- 部品補給遅れに関する計算結果は表3であり、故障件数のうちの72.7%の中には、補給遅れ時間はみられなかった。さらに重大故障のうちの81%に補給遅れはなかった。そして平均補給遅れ時間(MLD)は44.2時間であった。表3で100時間を越える補給遅れは修理が都合で実行可能となるまで延期された場合である。

- 4種類の船舶のうち、3つのタイプの船舶Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに対してCPPシステム改良のプログラムが準備された。

ただし、タイプⅣの船の故障は、強いてそのようなプログラムを必要とするほど大きいものとは考えられなかった。そして、FIXITプログラムは、とくに、汚損の除去、システムの近代化、予防保全の改善などを通して油圧系や制御系修理、改良に重点をおいて構成した。それ

らのプログラムを用いて、MTBFは4倍も拡大される見込みである。

- FIXITプログラムが完了し、このプログラムを用いて修正した装置が故障しなかったと仮定して、故障報告の再評価が行われた。

こうしてFIXITプログラム後のMTBFを計算し、比較したものを表1に示す。

- ここで考察した126件の故障件数は全船から報告されたものであり、図1のように各主要コンポーネントごとに大別してある。

つぎに艦船のタイプ別のCPPシステムの解析結果はつぎのようである。

- タイプⅠ：このタイプのCPPシステムに生じた63件の故障数を主要コンポーネント別に図2に示す。ドライドックを必要とする修理件数は3件だけであった。即応的な予防保全や適当な装備手順によって、報告されたほとんどの故障は防止しうるものであると思われた。

- タイプⅡ：このタイプではCPPシステムに関する故障件数は13であり図3に示す。

図1 全艦船のタイプ別のサブシステムの故障解析

* Percentage of failures requiring logistic delays のこと。

図2 タイプⅠの艦船の故障解析

図3 タイプⅡの艦船の故障解析

図4 タイプⅢの艦船の故障解析

・タイプⅢ：このタイプではCPPシステムに関する故障件数は48であり図4に示す。修理のためドライドックを必要とする船舶は1隻にすぎなかった。

タイプⅣ：このタイプの船の隻数は17隻であり、報告された故障数は2件だけであった。そのうちの一つは油圧関係の故障であり、もう一つはプロペラボスと羽根部分の故障であった。両故障とも図1に示すように実質的運転可能と見積られた。

FIXITプログラム

本調査の結果、以下のようなCPPシステムの信頼性とアベイラビリティを改善するために、FIXITプログラムが作成された(すなわち、CPPシステムの問題点を明示し、それに対する処置の提案を行うことである)。

タイプⅠのFIXITプログラム

- 問題点：CPPシステムの信頼性が極めて低い。
対策：(1) 過去5年間にCPPシステムのオーバーホールを実施していない現役船は、完全なオーバーホールを実施すること。
(2) オーバーホールの現仕様書を再調査し、修理の行われていない限界を確認すること。新しくオーバーホール仕様書を作成し現仕様書を更新すること。さらに、部品のアベイラビリティ要求値を決定すること。
- 問題点：油圧系の汚損
対策：(1) 保全要求カード(MRC)^{*}が、フィルタエレメントの定期的取替を要求していることを確認すること。
(2) 大容量、自動表示器付の自動バイパスフィルタを取り付けること。

- 問題点：制御システムの信頼度が低い。
対策：全現役艦船に対し改造を実施すること。

タイプⅡのFIXITプログラム

- 問題点：CPPシステムの信頼度が極めて低い。
対策：(1), (2) タイプⅠに同じ。
- 問題点：油圧系の汚損。
対策：(1), (2) タイプⅠに同じ。
- 問題点：プロペラボスのオイルシールからの油漏れ。
対策：プロペラボスの油噴射装置を規格化し、更新すること。

タイプⅢのFIXITプログラム

- 問題点：ビルジによる油圧系の汚損。
対策：(1) 油タンクやポンプの圧力のかからない吸引パイプの漏れテストを実施すること。漏油箇所修理に対する手順を作成すること。
(2) 全船に油漏れテストの手順を適用するよう指令すること。
(3) 油圧系に水分が存在したら必ず定期予防保全法として油漏れテスト手順を実施するよう指令すること。

^{*}) Maintenance requirement card の略

- 付加対策：技術マニュアルを改め油漏れテスト手順を追加すること。
- 2. • 問題点：移送ポンプ、ピュリファイアや諸配管からの流体システムの汚損。
 - 対策：移送ポンプや配管にフラッシングを実施する。
 - 付加対策：(1) 移送ポンプと配管に対するフラッシング法を作成公布すること。
 - (2) 技術マニュアルにフラッシング法を追加すること。
 - (3) ピュリファイアの使用法に予防保全の仕方をつけ加えること。
- 3. • 問題点：油だめタンク内の油の凝縮による油圧関係の汚損。
 - 対策：コロージョンを大幅に減少させるさび抑止剤を含む新油に切換えること。
 - 付加対策：(1) 作動油から凝縮した油を取除くため、油をピュリファイアにかけること。
 - (2) 技術マニュアルに新油の項を付加すること。
- 4. • 問題点：プロペラボスの油シールによる油圧系の汚損と油漏れ。
 - 対策：プロペラボスを検査し、すべての油漏れの原因を調べること。
 - 付加対策：検査結果に基づいて対策を講ずること。
 - (詳細テスト法の提案によって原因を推定し、技術マニュアルを改訂すること。)
- 5. • 問題点：油圧系の信頼度が低い。
 - 対策：(1) 調査を行い、修正処置を作成する。
 - (2) 調査結果にもとづいて対策を講ずる。(結果を検討し、技術マニュアルを用意するかまたは改訂する)
- 6. • 問題点：制御用ポンプやモータの故障。
 - 対策：それらの問題分野に対処するための調査を実施すること。
 - 付加対策：調査から得た結果に基づいて処置すること。
- 7. • 問題点：ガバナの信頼度が低い。
 - 対策：(1) 要修理ガバナの適当な送付場所を予じめ通報しておくこと。
 - (2) 予備のガバナとその部品を確保しておくこと。
- 補足説明：上述のような油圧系の汚損を防ぐことによって、ガバナの故障が重大故障の原因とならない程度まで減少することができる。
- 8. • 問題点：プロペラボスのキャップスクリュウのエロージョンと悪化。
 - 対策：製作中のプロペラボスの検査中上記問題点の再検査を実施すること。
 - 付加対策：検査に基づき処置すること。
- 9. • 問題点：プロペラの羽根の摩耗によって、取りはずし性を改良するために修正を必要とする。
 - 付加対策：(1) 摩耗プレートに付加的にジャックス

クリューを施すこと。

(2) 摩耗した羽根を取り外すまに羽根の周辺を清掃するための指導書を作成公布すること。

(3) 上記の指導書を含めて技術マニュアルを改訂すること。

10. • 問題点：技術マニュアルに不適当な記事を含む。

• 対策：技術マニュアルを見直し、必要な改訂を施すこと。

(2) MCRカードを見直し、必要な改訂を施すこと。

• 付加対策：(1) パッキングランドに関する情報と修理許容誤差を技術マニュアルに取り入れること。

(2) 技術マニュアルの脱落や誤りを見直すこと。

本文のMTBF値やアベリラビリティ値からCPPは他の動力伝達装置より著しく信頼性が高いということがわかる。

本調査は種々のタイプの艦船に対するFIXITプログラムを作成上有効であることが実証されたばかりでなく、将来のCPPの調達仕様書を作成するための基礎資料としても有効に使用された。そして、それは将来の艦隊が装備するCPPシステムのより高度の信頼度を確保するためのこの種の実際的なR/Mアプローチに外ならないものである。

文 献

以下、本文で参照した文献を示す。それらは種々のタイプの艦船のCPPシステムに関する付随的情報を含むものである。

1. Failure Consolidated Reporting System, Navy Fleet Material Support Office, Mechanicsburg, Pennsylvania 17055.
2. Steaming hour file, NAVSHIPS Maintenance Management Branch (SHIPS 0411).
3. NAVSHIPS Instruction Books and Technical Manuals of Type I Ships.
4. NAVSHIPS Technical Manual, Maintenance Manual, Operating Manual and Instruction Book of Type II Ships.
5. NAVSHIPS Technical Manual and Propulsion Systems Information of Type III Ships.
6. NAVSHIPS Instruction Manual and Operating Manual of Type IV Ships.

勧 告

CPPシステムが高い確率で実質的運転可能状態にあるべきものとすれば、FIXITプログラム、特に定期予防保全に関するものの完全な実施を強く勧告する。

謝 辞

本信頼性調査にあたって、米国海軍省艦艇技術部の Maurice Haushildt, Joseph Allan, Bendt Hansen, Richard Petros 氏等の援助に対して深謝する。

(川崎義人, 堀籠教夫共訳)