予防保全・故障診断システムの現状*

—三菱SUPER PLANTの概要—

橋 本 明** 河 辺 龍 一**

present situation of preventive maintenance and diagnosis system
—Summary of Mitsubishi SUPER PLANT—

by Akira Hashimoto, Ryuichi Kawabe

Recent further reduction in crew manning makes it difficult to maintain and repair the machinery on board ocean vessels. Condition based maintenance and diagnosis for machinery plant has become very important under such circumstances.

In order to meet those circumstances, "SUPER PLANT" has been developed by Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. using advanced electronic technology and artificial intelligence. SUPER PLANT supports engine operation/maintenance and assists the work of skilled engineers in coping with the increased work loads, and by doing so contributes to nautical safety.

1. ま え が き

近年、船舶運航コストの低減を目的とした混乗船の増加に伴い、オフィサークラスの作業量の増大や業務分野の多様化等の状況が生じている。また、少人数化も併せて進行しているため、航海中の機関部の的確な保守、整備は困難な状況となりつつある。その結果、船舶の安全運航や、機関部の信頼性の維持が一層重要な課題となっている。

一方、大型タンカーの座礁・衝突事故による海洋汚染問題も地球環境保護の観点からクローズアップされ、船殻二重構造化等の環境保全に対する規制が強化されてきている。

海難事故を防止し、船舶の安全運行を維持するためには、座礁・衝突の回避や荷役時の誤操作防止、エンジントラブルの予知等を含む総合的な運航業務への支援が重要である。

そこで、三菱重工業(株)は最新の高度な電子・制御

システム技術を駆使し、少ない人員で安全、かつ効率的な運航が出来るよう三菱高度運航支援システム (SUPER ASOS : SUPER ADVANCED SHIP OPERATION SUPPORT SYSTEM) を開発、実用化した。

本システムは、航海、機関、荷役の各部門毎に独立した以下のシステムから構成されている。

- ① ワンマンブリッジ支援システム
(SUPER BRIDGE)
- ② 機関部診断・保守支援システム
(SUPER PLANT)
- ③ ワンマンカーゴオペレーション支援システム
(SUPER CARGO)

これらのシステムは、人工知能技術による座礁・衝突予防、機関部状態診断や荷役作業計画支援のもと、安全な航海を実現し、乗組員の業務負担を大幅に軽減するのに貢献する^{1) 2) 4)}。

本稿では、このSUPER ASOSのうち機関部プラントの監視・診断及び保守作業支援により安全運航に寄与するSUPER PLANTの概要について紹介し、特に、状態診断機能により予防保全を可能とし

*原稿受付 平成6年6月16日

*正会員 三菱重工業(株)長崎造船所(長崎市鮎の浦町1-1)

図1 SUPER PLANTのシステム構成

ている点について報告する。

2. SUPER PLANT概要

2.1 SUPER PLANTの目的と特徴

“1. まえがき”でも述べたように、近年の船舶の混乗化、少人数化がエンジニアへの負担増をもたらし、安全運航や的確な保守の維持が大きな課題となってきた。その対策としては陸上からの運航支援も考えられるが、SUPER PLANTのようなオンボードシステムによる連続的な運転支援の方が实际的である。このような状況からSUPER PLANTは以下のような目的を実現すべく開発、実用化した。

- (1) 機関室内各種プラントの運転状態の監視の容易化を図る。
- (2) 異常状態の徴候を検知することによりトラブルを未然に防止する。
- (3) 機器の汚れや劣化、故障の診断を行いタイムリーな保守作業を支援する。
- (4) ハンディターミナルやポータブル振動計を利用してローカルデータ収集作業の負担を軽減すると共に、収集データのシステム化による有効活用を図る。

図1にSUPER PLANTのシステム概念図を示

す。本図に示すようにSUPER PLANTは次の3つのサブシステムを統合化して形成されている。

- ① ディーゼル機関故障予知診断システム (ENGINE DOCTOR)
- ② 機関室総合診断システム (PLANT DOCTOR)
- ③ 船内事務管理システム (DATA MANAGER)

ENGINE DOCTORは高性能センサーによりディーゼル機関のピストンリング摩耗状況、筒内燃焼状態等について機関を運転状態のまま直接監視し、更に人工知能技術を用いた診断を行い、乗組員に適切なガイダンスを与える。

PLANT DOCTORは機関室内の各種機器の状態を連続的に監視し、種々の形式で表示すると共に診断を実行する。状態監視・診断に必要なデータの取り込みはエンジンモニターからのデータ通信、ハンディターミナル、ポータブル振動計によるデータ入力、及びENGINE DOCTORとのデータ通信を任意に組み合わせて実施することが可能であり、各種プラントに柔軟に対応することができる。

DATA MANAGERは船内での予備品管理と、船内機器の運転時間及び診断結果に基づく保守作業のスケジュール管理を行い、乗組員の船内事務作業の効率化を促進する。

図2 SUPER PLANTのハードウェア構成

2.2 ハードウェア構成 SUPER PLANTシステム全体のハードウェア構成を図2に示す。SUPER PLANTの3つの各サブシステムは独立したコンピュータシステムとなっており、PLANT DOCTORを中心に必要なデータの収集、分配を行っている。したがって、客先ニーズに合わせ各サブシステム単独、あるいは2つのシステムの組合せによりそれぞれの機能を実現することも可能である。各サブシステムのハードウェア構成の特徴は以下の通りである。

(1) ENGINE DOCTOR 筒内圧センサーやピストンリング摩耗センサー等の特殊センサーの信号処理用に高速のA/D変換ボードを採用し、リアルタイムの信号の解析処理を可能としている。

(2) PLANT DOCTOR エンジンモニター、ハンディターミナル、ポータブル振動計とのデータ通信や、SUPER PLANT内の他サブシステムとのデータ通信にRS-232Cを採用し、これらの多チャンネルのデータ通信を効率良く実行するため、インテリジェント型の通信制御ボードを採用している。

(3) DATA MANAGER ファイルサーバと

複数台の端末をネットワークシステムにより結合し、データの一元管理を行うと共に、船内の必要な場所で各種事務業務の支援を可能としている。

なお、各コンピュータシステムは全て32ビットマイクロプロセッサを内蔵したIBM-PC/AT互換機を採用している。

3. 各サブシステムの機能

3.1 ENGINE DOCTOR ENGINE DOCTORは筒内圧センサー、燃料噴射圧センサー、ピストンリング摩耗センサー、排気弁吹き抜けセンサー等の高性能のセンサーによりディーゼルエンジンを運転状態のまま直接監視する。各センサーによる計測データに対し各種解析計算が実施され、監視データとして表示すると共に、診断のための標準特性データとの比較が行われる。その結果により推論が実行され、診断結果が表示される。併せて保守ガイダンスの表示も行う。このようなデータフローの概要を図3に示す。

ENGINE DOCTORの特殊センサーによる各モニタリング機能の概要を以下に記す。

(1) 筒内燃焼状態モニター 筒内圧力と燃料噴射圧力を同時に計測し、 P_{max} 、 P_{comp} 、 P_{mi} 、 IHP 等を解析計算後、次のような形式で表示する。

- ① P (筒内圧、燃料噴射圧) - θ (クランク角度) 線図 ($-180 \sim +180^\circ$, $\sim 90 + 90^\circ$, 燃料噴射期間の3種類)
- ② P (筒内圧) - V (シリンダ容積) 線図
- ③ トレンドグラフ (P_{max} , P_{comp} , P_{mi})

なお、上記各解析値や線図のデータはシステムへ登録でき、最新計測データの表示画面と過去の登録データと重ね書き表示が可能である。図4に $P-\theta$ 線図の画面例を示す。

(2) ピストンリング摩耗モニター 複数の近接スイッチを組合せたセンサーユニットをシリンダーライナー下部に取り付け、ピストンがセンサーの前面を上下する際のピストンリングの形状信号より摩耗量を算出する。本方式ではピストンリングに特に加工を施す必要が無く、標準のピストンリングで摩耗量の計測が可能である。算出した各ピストンリングの摩耗量について最新の計測値の棒グラフ及びトレンドグラフを表示する。

(3) 排気弁吹き抜けモニター 排気ポートに加

図3 ENGINE DOCTORのデータフロー概要

図4 P-θ線図画面例

速度センサーを取り付け、燃焼に伴う排気ポートの振動波形を計測する。計測した振動波形の中の爆発燃焼期間中のデータについてFFT処理を施し、オクターブバンドグラフ形式で表示する。排気弁に吹き抜けの現象が発生すると、特に高周波成分にその影響が現れるので、オクターブバンドグラフ上で正常状態の時のデータと比較することにより、排気弁吹き抜けの徴候を検知することが可能である。

上記の各モニタリングデータに加え、ライナー温度、排ガス温度、掃気温度等の計測データも活用して、診断が実行される³⁾。

3.2 PLANT DOCTOR PLANT DOCTORは機関室内の各種機器の状態を連続的に監視し、種々の形式で表示すると共に人工知能技術

を用いた診断を実行する。本システムは以下の4つの機能から構成される。

(1) 総合監視機能 機関室内の監視装置であるエンジンモニターと、後述のM0チェック機能におけるハンディターミナルからのプロセスデータに対し以下の表示を行い、プラント状態を容易に把握可能としている。

① アラームレベルチェック 各モニタリング点についてHigh-High, High, Low, Low-Lowの4点の警報点を設定することができ、異常状態の徴候を早期に捉えることが可能である。

② トレンドグラフ表示 各モニタリング点毎に最大8種類のデータを同一画面上に表示可能であり、表示データの組合せは任意に変更することができる。それにより、関連するデータを同時に表示することでプラントの運転状態の推移を把握することができる。また、時間軸は最大1000日間の日単位、30時間の時間単位、60分間の分単位の3種類を選択可能としており、長期的、短期的両方の状態の変動をつかむことができる。図5にトレンドグラフ表示画面例を示す。

③ 性能カーブ表示 現在の運転点をあらかじめ登録していた標準特性カーブと重ねて表示し、データの標準特性からの変位を示すと共に、具体的偏差の値も表示する。運転点は実際値と、標準特性データと同じ外部環境に合わせた換算値の両方の値

図5 トレンドグラフ表示画面例

図6 性能カーブ表示画面例

を表示する。特性カーブは標準値に加え、High-High, High, Low, Low-Lowの各アラームレベルに相当するカーブも登録しておくことができ、現在の運転点におけるアラームレベルも表示する。図6に性能カーブ表示の画面例を示す。

(2) 状態診断機能 総合監視機能から得られた解析結果を基に、専門家のノウハウを蓄積した診断知識ベースにより推論を実行する。なお、診断手法の詳細については後述する。

(3) M0チェック機能 ハンディターミナルを用いて予め登録していた計測路順に従って、機関室内のローカルデータを収集し、無人化運転前のプラント状態のチェックを行う。収集データはホストコンピュータに送信後、アラームデータの確認や過去のデータとの比較が可能となる。図7にM0チェック機能の運用形態を示す。本機能の主な特徴は以下の通りである。

- ① 機関室内の各フロア毎に巡回順序を登録し、最大3台のハンディターミナルにそれぞれ巡回

図7 M0チェックシステムの処理フロー

するフロアを割り振ることができる。

- ② ハンディターミナル上で前回値を表示すると共に、アラームレベルのチェックを行い、入力ミスを防止している。
- ③ ハンディターミナルで収集したデータは、ホストコンピュータに吸い上げた後、最大60日分のデータと横並びで比較表示できる。また、アラームデータは色分けして識別可能とし、更にアラームデータのみを選択表示も可能である。
- ④ 収集データはフロッピーディスクへストアすることができ、例えば、各次航毎にフロッピーディスクへデータを落としていくことでM0チェックデータの管理が容易になる。

なお、M0チェック機能により収集したデータの中で指定した項目については、総合監視機能にも送ることができ、状態診断のためのプロセスデータとしても活用することができる。

(4) 回転機器軸受診断機能 ポータブル振動計を用いて、機関室内のポンプ、ファン等の回転機器の軸受の振動を計測することにより、軸受の状態を診断し、的確な交換時期の判定を可能とする。本機能はM0チェック機能と同様に、予め登録していた巡回順序に従いデータを収集後、ホストコンピュー

図8 DATA MANAGERのシステム構成

タ上でデータの評価、解析を行う。本機能の主な特徴を以下に示す。

- ① ホストコンピュータ上で設定した計測条件や巡回順序は、予めポータブル振動計に送信されるため、乗組員はポータブル振動計上に表示される計測順番に従って、容易にデータを採取していくことができる。
- ② 計測データはホストコンピュータに送信された後、アラームレベルの判定や、トレンドグラフ表示を行う。
- ③ 指定した項目についてはオーバーオール振動レベルに加え、スペクトラム解析したデータとしても計測可能であり、より精密な軸受診断が可能である。更に、周波数解析した結果を時間軸に沿って順番に表示した3次元表示により各周波数成分毎の振動レベルの推移が把握可能である。

3.3 DATA MANAGER DATA MANAGERは複数のパソコンをネットワークにより統合し、船内での予備品管理と船内機器の保守作業のスケジュール管理を行い、乗組員の船内事務作業の効率化を促進する。図8にDATA MANAGERのシステム構成を示す。各機能の概要は以下の通りである。

(1) 予備品管理機能 船内に常備すべき予備品の名称や数量等のデータベースに基づいて、乗組員が適宜実施する予備品の在庫管理、予備品の受入／払い出し処理、部品発注処理等の作業を支援し、予備品管理業務の合理化が可能となる。

(2) 保守作業計画管理機能 船内の保守作業の項目、作業内容、作業インターバル等のデータベ

スに基づいて、乗組員が船内機器の保守作業計画を立案し、管理する業務を支援する。保守作業計画は、保守整備マニュアルや、機器の稼動時間に基づく時間基準保全（TBM：Time Based Maintenance）に加え、前記ENGINE DOCTORと、PLANT DOCTORの診断結果と連携した状態基準保全（CMB：Condition Based Maintenance）としての立案もできる。更に、この作業計画に対し、保守作業指示書の作成、作業履歴の管理等を行う。

(3) データ通信機能 衛星通信を利用して陸上側へデータを送信することにより、保守作業指示や予備品の発注等の陸上からの業務支援が可能となる。

(4) ユーティリティ 予備品管理や、保守作業計画管理のための各種データベースの管理、データのバックアップ等を行う。

4. 状態診断

従来、船舶の運行業務の大部分は、乗組員の長年の経験と勘による判断と処理に頼っていたが、近年の船舶の少人数化、混乗化の動きは、ベテラン乗組員の業務負担の増大や、乗組員全般の処理能力の低下という状況をもたらしている。このような状況に対処するため、個人の経験や勘による判断・処理業務を人工知能（AI：Artificial Intelligence）技術に応用した状態診断システムを導入することにより支援することが期待されるようになった。そこでENGINE DOCTORとPLANT DOCTORでは、AI技術に応用したオンライン・リアルタイムのエキスパートシステムとして状態診断機能を実現し、機器の異常状態の予知診断を可能とした。以下にこの状態診断の手法の概要について説明する。

4.1 推論機構概要 図9にPLANT DOCTORの総合監視部から状態診断部にかけてのデータフローを示す。なお、ENGINE DOCTORも基本的に同一の処理フローである。

エンジンモニターからの各種センサーデータやハンディターミナルからの計測データは、標準特性カーブとの偏差等を求める評価関数処理により、個々のデータの正常／異常の程度が数値化され、機関部データベースに格納される。なお、標準特性カーブは海上運転や工場試験時の計測データに基づいて、評価関数データベースの中に登録する。

診断は、理論や経験により算出された、要因と結

図9 PLANT DOCTORのデータフロー

図10(1) 標準特性カーブ1

果の結びつきの度合いを蓄積したフレーム推論知識ベースに基づき、機関部データベースから入力されたデータを用いた推論により導き出される。

4.2 ファジィモデル 上記評価関数処理では、各プロセスデータの正常/異常の程度を数値化する手法としてファジィモデルを用いている。これは人間の感覚や言葉の持つ曖昧さを定量化し処理するためのもので、具体的には以下の手順で行っている。

- (1) 図10(1)のように各プロセスデータについて標準特性カーブ及びメンバシップ関数を決定する。
- (2) 計測データ (X, F) を標準特性カーブ上にプロットし、X座標が同一のLL, LOW, 標準特性, HIGH, HHの各カーブ上のY座標の値をそれぞれA, B, C, D, Eとする。(図10(2))
- (4) A, B, C, D, Eをメンバシップ関数の

図10(1) メンバシップ関数1

図10(2) 標準特性カーブ2

図10(3) メンバシップ関数2

NL, NM, AZ, PM, PLとすれば、メンバシップ関数は図10(3)のようになる。

- (4) Fにおけるメンバシップ関数PLとPMの値をG, Hとすると、PL, PMの程度がG及びHとなる。

4.3 診断知識ベースと推論 エキスパートのノウハウを診断知識ベースとして登録する手法としては、下表のような診断マトリックス形式を採用

表1 診断マトリックスの例

事象 原因	E ₁	E ₂	E ₃	..
C ₁	0.2	0.3		
C ₂	0.4		0.1	
C ₃			0.5	
C ₄		0.3		

用している。

ここで縦・横の項目の及びマトリックスの交点の内容は以下の通りである。

- ① 縦の項目…診断内容，すなわちトラブル・不具合の原因やその内容を記す。
- ② 横の項目…各プロセスデータに生じた事象を記す。（例えば温度が高い，圧力が低い等）
- ③ 交点…プロセスデータの事象の内容と，その原因に対する事象発生確率を記す。

上記のマトリックス形式の診断知識ベースに基づいて，ENGINE DOCTORとPLANT DOCTORでは，次のようにベイズの定理を用いて診断原因の発生確率を求めている。

ある事象Eが，互いに背反するK個の原因 $C_1 \sim C_k$ のいずれかから発生するものとし，各原因 C_i の発生する確率を $P(C_i)$ ， C_i が起こった時にこれからEが起こる確率を $P(E \setminus C_i)$ とする。今，実際に事象Eが確認された時，これが原因 C_i によると思われる条件付き確率 $P(C_i \setminus E)$ は下式で求められる。

$$P(C_i \setminus E) = \frac{P(C_i) \cdot P(E \setminus C_i)}{\sum_{j=1}^k P(C_j) \cdot P(E \setminus C_j)}$$

更に，診断結果は，次の式による確信度という尺度により5段階に評価される。（表2参照）

$$\text{確信度} = 5 \cdot \frac{P(C \setminus E) - P(C)}{1 - P(C)}$$

$P(C \setminus E) \geq P(C)$ の時)

表2 確信度表

確信度	5	4	3	2	1
意味	SURE	ALMOST SURE	PROBABLY	UNSURE	

上記のような手法により，診断が実行され，診断については図11に示すように，推論過程の表示も行う。この画面においては各プロセス変数のファジイモデルによる評価結果と診断結果の確信度は，*の数により示される。

5. あとがき

SUPER PLANTを含めたSUPER ASOSの初号機は平成5年3月に引き渡しを終えたVLCCに

図11 推論過程表示画面例

搭載され，現在本システムの支援のもと，順調に航海を続けている。また，SUPER PLANTの中のENGINE DOCTORについては，平成2年以降，一部の機能のみを適用した船も含め既に12隻の就航実績に達している。

SUPER PLANTは引き続き輸出VLCC船に搭載が予定されており，船舶の安全運行に寄与するシステムとしてSUPER PLANTのようなエキスパートシステムを応用した機関部診断・保守支援システムの必要性はこれからも一層高まっていくものと考えられる。

今後も更に新しい技術を導入し，SUPER PLANTの性能向上を図っていくと共に，より斬新で高性能なシステムを開発し，機関部の状態監視や予防保全業務を支援し，ひいては安全運行に貢献していく所存である。

文 献

- 1) 金丸英幸，船舶の運航支援技術の開発と現状，日本機械学会第1回交通・物流部門大会講演論文集P. 542
- 2) 松島和夫，新しい運航支援システム－三菱Super Bridgeシステム－，日本造船学会誌，第769号(1993-7) P. 40
- 3) M. Koga, Development of Intelligent Engine Predictive Diagnosis System, The 4th International Symposium on Marine Engineering Kobe, (1990)
- 4) 松村武雄ほか，三菱高度運航支援システムと荷役システムの紹介，日本船用機関学会誌，第29巻第四号(1994-4)