視覚教育訓練支援システム*

吉 田 修** 吉 田 能 成**

Visual Education and Upgrade Supporting System

By Osamu Yoshida, Yoshinari Yoshida

The IEM VENUS is designed for the trainees and engineers in shipping world to learn fundamental knowledge and basic operation know-how of machinery system in engine room visually, theoretically and practically. The system supports the engineers to achieve the skills mentioned below, without purchasing expensive actual machines. Moreover, the system can simulate variety of diesel engine operations, safely and easily by means of the diesel engine simulator, COMLEX.

The basic requirements of technical skill to keep safe operation, which is expected for those who are in charge of ship's engine room are as follows;

- ・ Engineers must understand machinery's function, structure and performance.
- ・ Engineers must understand the functional relations among the machinery.
- ・ Engineers must read a performance curve of individual machine and system.
- ・ Engineers can hold a consultation with a shore support people and manufacture about technological matters.
- ・ Engineers can evaluate a machinery's shop test performance.
- ・ Engineers can give a proper guide to the crew.
- ・ Engineers can process a report of performance data.

The system offers;

1) Engineers can understand machinery basic function, mechanism and structure visually. Fundamental performance curves which engineers study form to judge machinery condition and carry maintenance work properly are illustrated and explained.

2) Typical system piping diagrams which are classified into three layers by functions i.e. basic, stand by, automatic and safety functions to understand step by step are illustrated and explained as well as actual piping diagrams.

3) The system allows engineers to understand tangibly marine diesel engine performance by the diesel engine simulator, "COMLEX".

1. はじめに

船舶の経済的且つ安全運航は合理的な設備と、適切な運転がなされることにより達成される。す

べての安全運転は推進力の確保が前提になっている。その船舶機関部の運転に携わる人材の育成は水産高校、高等商船専門学校、商船大学あるいは海員学校、航海訓練所、保安大学校、海技大学校等で体系的に行われている。また6級から1級までの海技士(機関)が船舶職員法に基づく国家資格として認定される。一方、造船基本設計に関わる人

* 原稿受付 平成9年12月10日

** 正会員 株式会社アイイーエム (江東区豊洲2-1-1)

たちの教育システムは国家資格認定制度のようなものはないが、造船各社のノウハウに基づくOJT (on the job training)を中心とした人材の育成を計っている。多くのこれらの機関はコンピュータシステムを導入しており、そのシステムを生かすも殺すもそれに入れられている教育用ソフト次第とすることになる。このような環境下で用いることを目的にIEM-ビーナス (VENUS: Visual Education and Upgrade Supporting System)を開発した。そのシステム基本概念と出力例について解説する。

2. 基本開発概念

- 本システムは乗組員向けと造船所向けとに区分する。
その差は、乗組員向けに対してはSTCW条約 (International Convention on Standards of Training, Seafarers) の趣旨に基づき機関の運転モードの切り替え、運転監視、及び火災浸水等の非常時対応等を織り込む。造船所向けに対しては基本設計の考え方、ヒートバランス、機器要目の決定の仕方が織り込まれている。この部分を除き同一のものとする。
- 教育支援システムであり、船員養成機関の教官または造船所の指導担当者による教育を前提としているが、生徒、学生の自習も可能とする。
- 取り組みやすいように、機器類や系統図はポンチ絵でまとめる。
- 内容は原理的理解が出来るようにすることに併せて、具体的には過去海技士試験6級から1級問題を解析しそれらに解答が出来る程度のものとする。
- システム・機器の記載範囲は特殊な物を除いて一般商船機関部に搭載されている物はすべて含む。
- 使用言語は日本語と英語を標準とするがウィンドウズ95でサポートされている言語であればカスタマイズ可能とする。

3. システム構成

標準のシステムを図1に示す。要求仕様を満たすコンピュータシステムを現有していればハードウ

図1 IEMビーナスシステム図

ェア部分はそれに置き換えることも可能である。

3.1 ハードウェア システムのハードウェアの標準要目は下記の通りであるがClock数等は現有設備の物でスピードを我慢すれば133MHzでも運転は可能である。

CPU	: 32bit
Clock	: 200MHz以上
RAM	: 32MBite以上
Hard Disk	: 1GBite以上
CRT	: カラー1024×768
Printer	: カラー360dpi以上

3.2 ソフトウェア システムソフトは「概要」、「機器機能及び構造」、「システム系統図(諸管系統図)」、「運転モード」とに区分される内部ファイルデータとディーゼルエンジン性能シミュレータより成る。

4. 項目別開発概念と出力例

4.1 「概要」 機関システムを理解する上で特に必要な工学的概念をやさしく本質的に理解できるようにする。特に船舶機関部での技術用語あるいは業界用語である、「重い(軽い)プロペラ」、「トルクリッチ」、「プロペラの3乗特性」等々を解説する。「トルクリッチ」の解説例を図2に示す。図中左側に説明図があり右側に解説がある。図からは

図2 術語「トルクリッチ」の画面

文字が読みとりにくいので「画像内容例」として下記する。

“トルクリッチ

自動車で坂道にさしかかった時、運転手は変速機をギヤダウンする。これで同じタイヤの回転速度に対しエンジンの回転数は多くなる。すなわちエンジンの回転数(爆発回数)が増えたので1回当たりの出力は前と同じでも回転数の増えた分だけ出力は増大する。燃烧室の負荷はあまり変わらない。動力の吸収側であるタイヤの回転速度と動力の供給側であるエンジンの回転速度が変速機のおかげで別々の比率に選択できる。艇子で言えば荷重に合わせて支点の位置を自在に変えていることを示している。ところが一般的に船のエンジンは固定ピッチのプロペラがエンジンに直結されている。(減速機がついている物でも可変速でなければ直結と同じことである。)すなわち、船が汚れても(抵抗が増えるから坂道を上ることと同じ)同じプロペラ回転速度(最終的には船速)を保とうとする。しかしプロペラとエンジンは直結されており、エンジン側だけの回転数を増やすことは出来ない。エンジンの出力はトルクと角速度($2\pi \times \text{回転数}/60$)を掛け算した物であるから、角速度を増せないでトルクの方を増やさねばならず、その為1回当たりの投入燃料が増える(燃料リッチ)。トルクと投入燃料量/行程とは比例関係にあるから、この状態をトルクリッチ(=燃料リッチ)と呼びエンジン燃烧室が過酷運転になっていることを示す。トルクリッチが引き起こすエンジントラブルは、シリンダライナ壁温が上昇しライナとピストン間の潤滑

油膜が壊されることによる焼き付き問題、排気ガス温度上昇による排気弁の焼損問題であり、またシリンダ内最高圧力の上昇による主軸受けへの過負荷の問題である。トルクリッチになる要因は船体の汚れのほかに、プロペラの汚れが定常的な物としてある。また一時的な物としては荒天による推進抵抗の増加がある。

定常的な抵抗増加に対しては予めプロペラの吸収動力を小さく設計しておきエンジンが軽く回れるようにしておく。このようなプロペラを軽いプロペラと呼び、質量が軽いのではなく吸収動力が少ないという意味である。経年変化により重いプロペラになる(汚れて質量が重くなるのではなく摩擦抵抗が増えて吸収動力が増えるという意味)。

この防止対策として、就航船のプロペラについては、次の様な方法がある。

1. 建造時にトルクリッチを考慮してプロペラの設計を行う方法 これは航海速力の計画におけるシーマジンと同様の性質のもので、実際運航状態における回転数の低下量として、一般には3%から5%程度だけ機関の常用回転数より高い回転数となるようにプロペラを設計する。しかし回転数の高いプロペラは効率が低下するので、それは最小限にする。
2. プロペラの先端部を計算量だけ削除し、プロペラ直径を小さくする。これはプロペラ直径が小さくなった分だけプロペラ面積が減少し推力も小さくなり、プロペラは軽くなり、負荷トルクは減少し、回転は上昇し、機関はトルクリッチの状態から解放される。これは、機関は同一燃料ハンドル位置で、回転数、出力はもとの状態に戻り、効率の良い運転も保持できるが、プロペラ直径を小さくした分プロペラ効率が低下しているので船速はもとの状態にはもどらない。
3. プロペラのピッチを小さくする。プロペラを加熱し焼き曲げする方法がとられる。

また、本質的防止対策として回転数は一定でも吸収動力が可変であるCPP(controllable pitch propeller:可変ピッチ翼)の採用がある。

4.2「機器」

- a) 機関部に搭載される機器を、
 - エネルギー変換を行う機器
 - 質の変換を行う機器

● ツール

に区分し「機能」として機器の目的機能を示し「入力」が何で「出力」が何であるのかを明確にする。「概要」で船舶に用いるという観点からの一般知識を述べ「ワードタンク」で術語を解説する、さらに詳細なあるいは海技士試験を受験にそなえて「ステップアップ」に過去の試験問題を中心にした解説をする、主機の動作原理画像例を図3に示す、本システムはカラー画像を採用しており画面では入力赤、出力は青で示している、図からは説明文が読みにくいので説明内容の例として下記する。

図3 「機器」主エンジンの説明画面

“キディーゼルエンジン

機能：燃料の有する化学的エネルギーをシリンダー内で空気中の酸素と化合させ熱エネルギーとし、これによって生じた高温高压のガスを膨張させピストンを押し下げ、機械的エネルギーに変換する。
(エネルギー変換装置)

入力：燃料(A,B,C重油、軽油等)及び空気(酸素)

出力：クランク軸端より動力，排気ガス熱エネルギー（損失），冷却水熱エネルギー（損失）

エネルギーバランス：燃料油の低位発熱量×供給
燃料量＝軸動力＋排気ガス排出熱量＋冷却水排出
熱量

〔概要〕

現在一般商船に使用されている主機関はディーゼル機関、蒸気タービンであり、将来増加すると思われるものにはガスタービンがある。この中でも最も多く使用されているのが、ディーゼル機関である。一般商船に使用されているディーゼル機関には、回転数が90RPM前後の低速ディーゼル機

関(2サイクルクロスヘッド型機関)と回転数が300RPM～1000RPM前後の中速ディーゼル機関(4サイクルトランクピストン型機関)がある。低速ディーゼル機関は大・中型タンカー、ばら積貨物船、大・中型一般貨物船、プロダクトキャリア等の一般商船用として広く使用されている。中速ディーゼル機関は低速型に比して、重量・容積が小さいので、カーフェリー、客船、ロールオン／ロールオフ型貨物船など容積が特に重要な船に使用されている。特に機関室の高さに制限のあるカーフェリーには中速ディーゼル機関が最適な主機関である。低速ディーゼル機関はプロペラに直結して使用されるのが普通である。中速機関は回転数が高いので、普通減速歯車を介して、プロペラを回す。減速歯車を介してプロペラを回すので、プロペラ回転数を自由に選べる長所がある。

「ワードタンク」

***過給機** 2サイクルエンジンは吸入行程と排気行程が同時に行われるので、吸気圧力は必ず排気側より高い圧力が必要、高圧空気を作り出すための機械、エンジン始動時には排気エネルギーで回る過給機ではエンジン始動できないので、電動過給機をつける、同じシリンダ容積に圧縮した空気を送ることにより多くの酸素を供給できるので多くの燃料を燃やせることになる、すなわち同じシリンダ体積で大出力が得られることから4サイクルエンジンにも設備される。

*クロスヘッド 低速エンジンになるとピストンストロークが長くなりクランクの回転円も大きくなり、連接棒がシリンダライナに当たってしまう。当たらないようにすると長い連接棒が必要になり背の高いエンジンになってしまう。背を低くするために幾何学上の制限から設ける。またクロスヘッドを設けることにより燃焼室でのガス圧力をピストンが受けたときピストンはシリンダ方向の荷重のみを受け、シリンダの半径方向の荷重はクロスヘッドが受けてくれることによりピストンとシリンダライナ間で、摩擦力は理論的にはない。(ピストンリングの背面にガス圧がかかりリングとライナは摩擦する)潤滑上、非常に有利になる。

***低位発熱量** 燃料を燃やすと発熱するが、燃やした時に水が出来る。出来た水には蒸気の状態と液体の状態があるが、エンジンのシリンダの中では出来た水が液体の状態になるまでとどまってい

れないので、水は蒸気の状態で排出されてしまうと考えると、燃料が持っている総発熱量から水を蒸気に換えるための蒸発潜熱分だけ差し引いた熱量を低位発熱量とする。エンジンでは低位発熱量を基準にするがボイラー等では総発熱量を基準に考えるのが一般的。

以下詳細略

〔ステップアップ〕

*ユニフロー掃気の利点及び不利な点

*ディーゼル機関の機械効率

*ピストンにクロムめっきを施した場合の利点及び使用上に注意

等々、説明文及び項目略 “

b) 機器の運転状態を定量的に理解する能力を修得する1つのアプローチとして、出力/入力が効率であることを理解出来るようにする。また機器の性能を評価する物指の代表として陸上運転データの読み方を示し、このバランスが正常な時には幾ら位でどの程度下がったら異常なのか定量的に物を計る(評価する)物指を持てるようにする。主機の特長曲線画像例を図4に示す。

図4 「機器」性能曲線の説明画面

その説明文例を下記する。

“主機関性能曲線

主機関の性能特性は左図に示すパラメータで表現される。パラメータの持つ意味を上から順次説明する。

過給機速度：陸上試運転時の値と比較することにより給排気系の汚れの状態、過給機の軸受け等の損耗状態がわかる。過給機が2台以上ある場合はその差を比較することにより更に的確に運転状態

の判断が付く。

エンジン速度：固定ピッチプロペラの場合海上公試運転時の燃料ラックと回転数の関係から船体及びプロペラの汚れの状態が判る。一般に、同一燃料ラック位置で海上公試運転時に比べ3.5～4.5%エンジン速度が低下した場合にはトルクリッチであり運転注意である。

Pmax：シリンダ内最高ガス圧力は直接的には主軸受の荷重負担能力になるが、規定値より高いと燃焼室は潤滑の問題、ピストンリングよりのガス漏れ等様々な悪影響をもたらす。Pmax増大の原因は燃料の噴射時期、燃料油の燃焼性、VIT (Variable Injection Timing)の付いている機種にあっては荒天時には回転速度と燃料噴射量に基づく噴射時期のミスマッチにより起こる。

Pcomp：機関負荷が上昇するに従って、排ガス量は増大するのでターボチャージャー回転数が上昇し、掃気圧が上昇する。それ故、Pcompは機関負荷の増大と共に上昇する。

ある負荷でのPcompが減少傾向にある時、次の要因が考えられる。

ピストンリングからの空気漏れ

ピストンクラウンの焼損

シリンダライナ磨耗

排気弁の焼損

バルブ開閉時期のずれ

排ガス温度：エンジンに関する主要な異常は排ガス温度の変化として現れる。その為、排ガス温度は重要な要素である。排ガス温度に影響を与える主要な要素を次に示す。

燃料噴射系異常

シリンダ内の異常(ブローバイ等)

空気冷却器の汚れ

荒天時の運転

ターボチャージャー汚れ

燃料油の性状

Pscav.：機関負荷が上昇するに従って、排ガス量は増大するのでターボチャージャー回転数が上昇し、掃気圧が上昇する。ある負荷における掃気圧の減少は、燃焼室内の熱負荷増大の原因となる。エアフィルターの汚れ、空気冷却器及びターボチャージャーの汚れは、掃気圧に大きな影響を及ぼす。

燃料消費率：燃料消費率は、エンジンの常用出力

である85%から90%付近で最も低くなるよう設定されている。”

c) 機器の機能原理が分かるようにポンチ絵で構造を示しているが、実物はどうなっているのかという観点から、よく船舶に搭載されているメーカーのカタログから抜粋した機器の断面図を中心に掲載する。(掲載の基準は構造や仕組みがわかりやすく、印刷が美しい物ということとし、製品の優劣等と直接は関係しない。)画像例は略す。

d) 造船所版は上記の内容に加えて、ヒートバランス、蒸気バランス空気バランスの求め方を示し、さらにこのバランスに従って各機器の要目を決定する手法を示している。画像例は略す。

4.3 システム系統図 システム系統図(諸管系統図)は電気の回路図と同様に読みこなす為にはかなりの学習が必要になるが、系統図の成り立ちを体系的に分解する事により、より効率的に理解できる。

まずはシステム系統図製図原理の理解である。システム系統図の書き方、読み方は系統図の右側が船首方向、左側が船尾方向となる。次にエンジンルームを四角な箱と見立てて、それを上から見て左舷側の面を上、右舷側の面を下に開いたように配置さされる。そのため右舷側の面にある機器は逆さまの形に描かれることになる。この原理で展開された上で図面におさまりがよいように多少移動する。これで自分の探している機器はどの辺に書いてあるか、また系統図に書いてある位置から右舷側に配置されているか左舷側に配置されているかおおよそのことが分かる。本システムに採用している系統図は配置の観点を離れて、機能的にシステムを下記の4層に分解する。

●基本機能層

設備の目的を達成する為に必要な最小限のパイピングシステム

●有用性機能層

機関部への要求仕様として「サービスを「連続的に」供給する」がある。もしもシステムの一部に故障が起こったとしても推進力は連続的に供給されてはならない。すなわちアベイラビリティ(有用性または可動率)の向上が必要である。船舶のアベイラビリティをあげる手段として多くの場合は、システムに冗長性(予備)を持たせることにより達成するのが普通で

ある。また海水ポンプが壊れたときに清水ポンプを代替使用する事も可能である。この目的のために新たな機器やパイピングが基本機能層に追加される。

●付加機能層

機関に求められる仕様として、また「サービスを「経済的、効率的」に供給する」がある。これを達成する対策の1つとして造水装置のようにジャケット冷却水系統から廃熱を回収するシステム等、ジャケット冷却システム本来の目的ではなく、付加機能として追加される機能層。

●自動化、安全機能層

前項の「経済性、効率化」に対する方法として自動化、安全機能の向上がある。

船舶の安全運航のために、コンシーケンシャルダメジ(ある事故があったときそれに付随して起こる事故)を防止する方法として「もし潤滑油サービスポンプが壊れてエンジンへの給油圧力が低下した場合はエンジンを危急停止する」等の安全装置がもうけられている。また経済的、効率的運航のために省人化がなされている。省人化のために多くの自動化機能が追加される機能層。

これら層別に系統図が表示されるが、一例として「自動化、安全機能」まで含んでいるシステムを図5に示す。説明文例を下記に示す。

“潤滑油サービス系統(自動化、安全機能)MO船において主潤滑油サービス系統は、万一運転機

図5 「システム系統図」潤滑油サービス系統の説明画面

が故障すると予備機が自動的に起動し主機関を継続して運転出来なければならない。また、潤滑油温度は自動的に調節し、潤滑油圧力の低下で主機の停止をするよう船級規則で義務づけられている。しかしながら、主機関の停止は船舶の漂流を意味する。従って一度は主機関を停止し環境が許せば復旧工事を行うが、船舶の衝突の危険等があれば、主機破損の危険を冒してでも運転を継続する必要がある。この機能を殺す、すなわちオーバーライド(解除)する機能が設けられる。潤滑油ポンプの形式の選定にあたっては歯車ポンプのように脈動流となるものは配管の振動に留意しなければならない。”

5. 運転モード

機関室の役割は原料に「油」、「水」及び「空気」を入力として、「動力(推進力)」、「電気(荷役用電気)」及び「蒸気(荷役用蒸気)」を出力する。それ等を要求があれば「いつでも、連続的に」且つ「経済的に」という条件の下で加工、供給する工場である。それに加えて、そこに従事する乗組員の快適な居住性確保のためのユーティリティの供給である。

「運転モード」とは基本的には「出力の需要状態の変化」であり、この需要状態の変化に対応する入力を揃えることである。」という捉え方をしている。画像例は略す。

6. ディーゼルエンジン性能シミュレータ

「はじめに」でも述べたように、「推進力の維持」は安全航行の前提である。いかなる衝突予防方策を立てても推進力を失った船は単に漂流物であり、それらは何の役にも立たず、座礁したり岸壁に激突したりという事例も多い。乗組員はエンジンについて理論的な理解のみでは機関の運転管理には不十分でそのプロセスを体感的に理解しなければならない。そのためには実機エンジンを運転して会得するのも方法であるが、各種のエンジンを設備し、運転管理者をつけて運転することは事実上不可能である。エンジンシミュレータは現実では運転できない運転条件でも運転可能であり、また運転をし損じて壊れることもない。管理者がいなくともいつでも自分一人で運転することも可能

図6 コムレクス（ディーゼルエンジン燃焼シミュレータ）操作画面

である。また、現実の運転では多額の費用と時間がかかるが、シミュレータでは長くとも1ケース5分以内で完了する。このことは思考の連続性を保つ上からもきわめて重要で、深い理解が出来る。

一方、シミュレータは単に現実にあわない理論計算をしているだけという不信感があってはならない。本システムに用いるエンジンモデルは陸上運転データを用いてシステム同定されている。

運転操作画面を図6に示す。図中、右中央に次に示すエンジン運転条件を設定する。

エンジン速度：規定値よりの変化率

燃料系統：噴射量、噴射時期及び噴射系の劣化率

給気系統：給気圧力及び温度の規定量よりの変化率

冷却系統：ジャケット及びピストン冷却の変化率

これらを与えてシミュレータを走らせる。

左側のエンジンは計算完了後、燃焼過程を、「燃料噴射」、「予混合燃焼」、「拡散燃焼」、及び「残炭の燃焼」の順に図示する。

中央下にシリンダ内圧力と温度が時系列にクランク角度に対応して示される。

右下は運転条件設定の変化に対応した出力の規定値からの変化率を示す。

さらに詳細な数値データ、グラフデータとして「P- θ 線図」、「P-V線図」、「logP-logV線図」及び「計算結果テーブル」が表示される。表示例として図7に「P- θ 線図」を図8に「計算結果テーブル」を示す。本図は200mmボアの4サイクルエンジンの70%負荷運転値を既定値とし、(現実には小型のディーゼ

おわりに

本システムには各種機能のカタログから断面図等を教材としてそのままあるいは変形編集等の手を加え掲載しておりますので各社各位に感謝いたすとともに、ここでご了承いただきたいと思ひます。

図7 IEM20FAエンジンの燃料噴射時期変更による性能特性比較

入力データ			
実行ファイル名	0% 含水含有率	0	タイミンク, deg ATDC
負荷, %	700	噴射時期調整, deg	0
回転数, rpm	9000	入口冷却液温度, °C	64.8
計算刻み, deg	0.10	(シャット/カバー)	51.0
(補修中)	0.10	掃気温度, °C	49.4
(燃焼中)	0.10		
出力データ			
指示出力, kW/cyl	79	掃気成分濃度	
軸出力, kW/cyl	71	NO(13%O2換算), ppm	6.098E+02
燃費, g/kWh(g/PS/h)	215.8(158.8)	NO, g/kWh	4.884E+00
熱効率, %	39.2	スス, mg/cycle	0.000E+00
掃気効率, %	100.0	未燃分, mg/cycle	1.759E+00
給気効率, %	87.9	掃気モル分率	
Pmax, MPa(abs.)	9.8	1. CO2	4.470E-02
Pcomp, MPa(abs.)	8.5	2. H2O	5.920E-02
Pme, MPa	1.161	3. O2	1.272E-01
掃気エネルギー, J/cyl/cyc	1.053E+04	4. N2	7.526E-01
ライク壁温度, °C	119.7	5. CO	9.968E-03
カバー壁温度, °C	98.3	6. H2	1.660E-03
ピストン壁温度, °C	157.4	7. O	3.157E-04
出口冷却液温度, °C		8. OH	2.582E-03
(シャット/カバー)	68.5	9. H	3.197E-04
(ピストン)	136.8	10. NO	6.316E-04
燃料噴射, deg ATDC	-18.0	11. N	2.367E-07
点火(着火), deg ATDC	-14.4		
燃焼終了, deg ATDC			

図8 IEM20FAエンジンの運転成績結果

ルエンジンには装備されていない燃料噴射進角装置により)燃料噴射時期を2度を早めた場合と2度遅らせた場合の性能と比較している。