ディーゼル機関—可能性と問題点

The Diesel—Promises and Problems

Prof. Dr. Meinrad K. Eberle
Swiss Federal Institute of Technology

要 約

ディーゼル機関は出力の向上、燃料の経済性及び排気排出に関して更に開発の余地を残している。最優先課題として、信頼性を高め、次の段階に進むための足場を固めなければならない。熱効率の大幅な向上は、より複雑な構造の採用によってのみ達成し得る。今後、進歩した分析用機器が益々重要な役割を演ずるようになる。当を失した設計によってもたらされる損失は益々増大し、この厳しい競争において企業の存立を危うくするであろう。

1. 序 説

この論文の目的は、過去20年間におけるディーゼル機関の発達の幾つかの側面に光を当て、また特に、ディーゼル機関の発達、一層の改革を目指して、今後進むべき方向の幾つかを示すことにある。新たな優先的課題として登場した“生態学的影響”—経済性と同等の重要度を持つ課題—についても多少言及することになる。

この論文中に述べられている意見は、約20年間ディーゼル機関製造業に直接かかわり、現在は、大学に籍を置いている者の見解、すなわち、業界から独立した個人的見解である。それ故、私の意見の幾つかは割り引きして頂くべきかと思う。

経済性と信頼性に優れているため、ディーゼル機関は非常に優秀な船舶用原動機であり、見通し得る将来その主導的役割を維持し続ける可能性は極めて高いが、生態学的影響上問題がない訳ではない。

1970年代に入って、それまで進められて来た緩やかな開発のペースが、燃料価格の高騰と競争の激化からにわかに変化を余儀なくされるに至った。この間、更にエンジン開発を追求する業界固有のポテンシャルは、1990年代の信頼性向上段階に向けられた。この先何らかの技術

革新が起こらない限り、我々は製品の改良について話合って行き、そこには常に多少の変革の余地が存在している。

生態学的影響の問題に移ろう。ディーゼル機関は高温下で燃料を燃焼させることによる生得の高い効率を備えているが、同時に、給気が窒素を酸化させる結果、一酸化窒素を排出する。そしてこの一酸化窒素の排出規制は、港湾、湖沼、河川等の地域及びすべての発電施設で近年益々きびしくなっている。過去余りにも長い間、ディーゼル機関はもともと清浄な機関であると考えられてきた。そして、多くの競争相手を駆逐してきたディーゼル機関も今日困難に直面しており、もし画期的な措置が講じられなければ、消滅さえもし兼ねない。その一方、ディーゼル機関は熱効率が高く、この点は、地球の気象変化の問題—CO₂ 排出やその他のガスによる温室効果—に関しては有利である。

2. 最近の20年間

図1 a, b 及び c はスルツァー製の大口径低速2ストローク機関を例に取り、船用ディーゼル機関の発達を要約している。ここに示されていると同様の傾向が他のすべてのメーカーの（極く少数を除いて）2または4ストローク機関について認められている。

1960年代から70年代初頭までは、ディーゼル機関の性能諸元の変化が極めて緩やかな時期で、この間の効率の上昇は僅かであった。エンジンの設計者達は—2ストローク機関の場合—ターボ過給の問題と苦闘しており、また機関の信頼性向上に関心を抱いていた。有限要素解析法が出現したことによって、後者の分野で多くの前進を見た。1970年代に起こった2度のオイルショックは、すべての状況を一変させた。効率の向上が最優先事項となり、研究開発努力のすべては、不況下の競争を勝ち抜くことに向けられた。

我々は喜んでディーゼル機関生得の構造的な可能性を

Fig. 1a Two-stroke large bore diesel engine development (Sulzer), thermal efficiency

Fig. 1b Two-stroke large bore diesel engine development (Sulzer), brake mean efficiency pressure

その一層の開発のために使い尽くし、更にそれ以上を追求した。

1985年頃以降、効率曲線がほとんど水平になったことは興味ある事実である—これは、少なくとも在来的な手段による限度が達成されたことを示している。燃料価格がもう一度急上昇した時—これが起こる見通しは非常に強い—どの程度まで誇大な目標が掲げられるのかに興味を持たれる。

3. 今後の10年間

そして我々は第3の10年間、即ち1990年代を迎え

Fig. 1c Two-stroke large bore diesel engine development (Sulzer), maximum firing pressure

ている。我々が掲げるべき優先課題は下記のようなものである；

- ・信頼性の見地から現在の機関の性能諸元を強化すること。
- ・出力と経済性の面で、次ぎの段階に進むための基礎を築くこと。
- ・機械工学と電子技術とを結び付けること。
- ・生態学的影響を重要課題とすること。
- ・解析分野での課題の解決に努めること。

信頼性の向上；すでに図示した通り、ディーゼル機関の性能諸元は1970年代後半と80年代前半に急速に変化した。そして経験が教える通り、このような変化に適応出来るようになるには2年を要する。今日、ましてや今後は、船舶の乗組員による保守を必要とせず、船舶の運航に必要な人員が少なくて済む、より信頼性の高い機関が要求される。今後はより高い能力を備えた少数の乗組員による運航が望まれている。

出力と経済性の面で、次の段階に進むための基礎を築くこと；この課題に関しては多少説明を要する。現在の知識と経験をもってしては（信頼し得る機関を作る方向で）極く緩慢な変化しか果たせそうにない。そして、信頼性の向上は確かに可能だが、しかも、もし経済性の面でもっと成果を挙げることが重視された場合は、設備投資と開発作業に従来より遥かに多大の費用が必要となる。これに関しては文献1)に幾つかの考えが示されており、その中の一、二、の点をこの論文で採り上げたい。

“高度化された機関配置”について述べるに先立って、機関出力—プロペラ回転速度条件にいて一言しておきたい。これは中速機関の場合には何等問題がないが、この論文で専ら論じられるプロペラ直結形低速機関については条件が存在する。

一般に、低い機関速度で高出力を求める傾向がある。

このマーケットは、大出力の2ストローク低速機関の行程・内径比は1種類では最早充分でないとする方向に向かって動きつつある。行程・内径比は、総合的な経済性上の理由から、4を超えることはないだろうと見るのが恐らく妥当な線であろう。将来に関しては二つのことが言える。

その第一として、何らかの新アイデアが生み出されない限り、ディーゼル機関の効率を高める余地はほとんど残されていない。確かに、ターボチャージャを含めた全体的な効率は高めることができ、従って複合度を更に高めることにより良い燃料比を実現することは可能である

ろう。そして、より性能の良いターボチャージャを用いることによって機関効率をほぼ一定に保ちながら出力を増やすことが可能であろう。これらのことは、“改良”的な進歩だと考えられ、先に言及した信頼性向上努力と平行して行われるべきものである。

第二として、もし我々がもっと先に進みたいと望むのであれば、何らかの新しいアイデアを用いる必要があり、そのための研究・開発がこれに伴わなければならない。

我々は燃料の価格が政治的な理由で大きな変動を繰返しながら最終的には必ず上昇するものと考えることがで

explanation:

BC: bottoming cycle
 BMEP_{tot}: total brake mean effective pressure
 Eco: economy-rating
 P_{ac}: pressure after charge air cooler
 PWR: power-rating
 TC: turbocompound
 } overall efficiency of turbocharger
 }_{tot} total thermal efficiency

Fig. 2a Thermal efficiency, brake mean effective pressure and excess air number for various concepts of two-stroke diesel engines

explanation:

BC: bottoming cycle
 BMEP_{tot}: total brake mean effective pressure
 Eco: economy-rating
 P_{ac}: pressure after charge air cooler
 PWR: power-rating
 TC: turbocompound
 } overall efficiency of turbocharger
 }_{tot} total thermal efficiency

Fig. 2b Thermal efficiency, brake mean effective pressure and excess air number for various concepts of four-stroke diesel engines

きる。これを念頭に置いた場合、複合方式というアイデアは今後更に追求して行くべきである。圧力レベルを変えずに出力を増大する適切な方法の一つは、空気過剰率の引下げを通じて“ホット”エンジンを駆動する行き方である¹⁾。燃焼を節減するために複合方式が必要であろう。

図2a及び2bはそれぞれ、2ストローク低速ディーゼル機関及び4ストローク中速ディーゼル機関が、ターボ複合“ホット”エンジン方式(“hot”, TC)でどのような結果が得られるかを示している。これは圧力を増大させずに出力を増大させ、しかも機関の総合的な効率を高めることさえできる、かなりコスト面で有効な方法である。その上、もし複合ターボチャージャのタービンと平行して行われた場合、タービンは“可変”面積であるというプラス面を備えている。

“ホット”エンジンの運転を望むなら、下記の作業をマスターしなければならないことは明らかである：

- ・燃焼スペースを囲んでいる部材の温度を正確に制御すること。
- ・高性能な燃焼システムを設計すること。
- ・クランクシャフトの寸法を極めて注意深く分析し、振動を抑止すること；これらの検討の結果、制限的な諸要素を把握することができる。
- ・タービンに入る前の高温に起因するタービンの汚損を避けること。

より複雑で、かつ費用がかかるが、より大きな効率の向上が得られる解決方法は、“ホット”エンジンをボットミングサイクル(蒸気BC)と共に使用する方式であろう。これらの結果は図2a及び2bに示されている。

“ホット”エンジン方式を採用し、これにボットミングプラントを使用すると、結果的に機関の正味有効圧力(BMEP)は増大する。その結果、部分負荷の問題がより増大するだろう。このことは、ターボ過給システムのための解決法が緊急に要求されることを意味し、可変静翼の使用が考えられる。問題の幾つかは複合方式を併用することによって解決される(図2a及び2bに示されているケース)。

図2a及び2bには他の多くのケースも示されている。性能が高いターボチャージャを使った場合どのような利益があるか、また、増大が許される諸圧力が示されている。

たしかに、これらは従来見掛けない値だが、しかし不可能なものではない。BMEPがどの程度まで高くても良いかは、我々が充分慎重に検討しなければならない別な問題である。

負荷に対するフレキシビリティの問題について一言しておきたい。著者は、機関のフレキシビリティ(システムフレキシビリティ)が大幅に高められる必要があると確信している。将来のマーケットは非常に不安定なものになって行くと思われるので、機関定格の引下げ

—燃料節約のために—が再び時代の要求になる可能性がある。

ボットミングプラントという用語で、我々は基本的に複合サイクル動力装置を考えている。通常思いうかぶのはガスタービンと蒸気タービンの組合せであるが、今ここで論ずるケースはディーゼル機関と蒸気タービンの組み合わせ(ターボチャージャにガスタービンが含まれているにしても)である。ここで皆さんは、「このような複雑な装置を検討する位なら、何故ターボ装置複合サイクルでもっと良い結果が得られないのだろうか？」という疑問を抱かれるかも知れない。図3は、この種装置の概要を示した線図—燃焼による熱の供給を行わない密閉蒸気サイクル—である。

図4は複合サイクルプラントと2ストローク低速ディーゼル機関(いずれも出力約25MW)の低速運転時の熱効率(軸端での機械的エネルギーを供給燃料エネルギーで除した値)を示している。

Fig. 3 Schematic arrangement gas turbine/steam turbine, combined cycle

Fig. 4 Effective thermal efficiencies for combined cycle gas/steam turbine compared to two-stroke low speed diesel, approx. 25 MW, constant speed

この比較図は、船舶に搭載した場合の複合サイクル装置がディーゼル推進装置より効率が劣ることを明らかに示している。

事実、複合サイクル装置の熱効率は、出力が 100MW レベルを超えると 50% 以上になるが、低負荷時の効率低下が著しい。その上にこの装置は価格の高い燃料を使用するし（開放サイクルガスタービン用に）、しかし劣らず重要な問題として、この装置は海運業にとって関心のある出力レベルではコスト効率が明らかに低い。しかし複合サイクルは排気排出の面から見ると非常に優れている。この点については後に言及する。

話をディーゼルに戻して、ほんとうに興味の持てる解決法はシリンダー内再生方式を用いる方法であろう。これは、最も難しい仕事だが、効率の面から見た場合最も有効である¹⁾。

図 2 a 及び b は一決して決して包括的な資料ではないが、一この方式の持つ可能性を或る程度把握するのに役立つ。非常に多くの組合せが可能であり、その選択はコスト効率、信頼性、その他について極めて慎重な分析を行った上で行われることになる。

最後にセラミックスについて述べたい。少なくともヨーロッパと米国では、内燃機関へのセラミックスの使用に関する熱意はほとんど消滅している。極く大まかな試算の結果でさえ、気筒内壁にセラミックスを使用した場合燃料の経済性の面でほとんど意味が無いことを示しており、また内燃機関においては、セラミックスを保護被覆材として使うことは（どれ程有効であろうとも）実現の可能性に乏しい。この論文ではこの問題についてこれ以上述べる紙面が無い。

機械工学と電子技術の合体；今日までのところ電子技術は、船用機関の運転の簡略化と信頼性の向上の目的に広く使われていない。1970 年代の初めに人々は、保守作業を必要に応じて港内停泊中にだけ行うことを目的に、当時の最新の監視技術を使用した予測的保守方式の検討を開始した。

しかしその後、マーケットの不振に加えて燃料の節減が最優先課題として登場し、更にマイクロプロセッサが導入されるに及んで、1970 年代の監視システムは旧式化してしまった。しかし著者は遠からぬ将来これが再び復活する可能性があると考え、たぶん人々は改めてこの種の相互作用システムを検討すると思われ、以下そのアイデアの一つを照会する。

アムステルダム・のシェル研究所は、スルツァーディーゼル社及びスイス連邦技術研究所との協力の下に、極めて高いシリンダーライナー表面温度、極めて高い圧力、少ないシリンダーオイル給油量、硫黄含有量の多い燃料の使用という条件の下で運転される 2 ストロークディーゼル機関の、シリンダー内壁の摩耗又はスカフティング限度を知るための調査を実施した。

実験に使用したのはスルツァー 2 ストローク、単流掃

気低速ディーゼル機関で、諸元は下記の通りである：

気筒：0.56m、行程長：1.65m、運転時BMEP：16
バー、最高燃焼圧力：160バー、
気筒壁表面最高温度（最上位ピストンリング上側
で）：約230℃。

図 5 に見る通り、腐食摩耗がシリンダーライナー温度に大きく左右されることがはっきり示されている。一定のシリンダーライナー温度を超えると、それ以上温度が上がっても摩耗率は凝着摩耗が起これない限り変化しない。

図 5 に示されているデータは、各点が、薄層活性化技術を使つての 10 時間の連続運転試験で得られたものである。明らかに、我々は機関を×印の付された“曲折点”で運転すべきである。この点は、摩耗率が低く、凝着摩耗の発生の可能性からも遠い、最も安全な点である。現在は機関を×区域で運転するための、相互作用的な温度制御機構を作る方法の調査が行われている。この調査は文献²⁾に述べられている。

生態学的影響の重視；生態学的な影響の問題は余りにも長い間無視されて来た。確かに我々は煙の発生を押さえようと努めて来たが、今日では、これだけでは不十分である。

図 6 に示す通り、窒素酸化物 (NO_x) の排出については、ディーゼル機関には非常に問題がある。図 6 から CO₂ 値が低いほど NO_x 値が高まることが知られている。

この図はスイスで認められている試験方法（これらの試験法は米国のそれと殆ど同じである）によって、各種の動力装置からの CO₂ と NO_x の排出量を測定した結果で、前記の状況をはっきりと裏付けている。ディーゼル機関固有の長期的な利点、即ち CO₂ 排出が少ない事を考慮した場合、地域的な大気汚染問題の惹起を理由にその使用を禁止すべきでないことは確かである。

X preferred point of operation

Fig. 5 Steady state wear rate, thin layer activation

Fig. 6 NO_x— and CO₂—emissions of various power plants

地球上の多くの地域で、オゾン (O₃) 或いは窒素酸化物 (NO₂) に関してその国の大気性状基準 (これがすべてに備わっていると) が満たされていないことを指摘する必要はない。O₃の発生についていえば、ディーゼル機関はそれほどひどくはない。だが非メタン炭化水素 (NMHC) に対する NO_xの比率では、ディーゼル機関の排気の NO_xレベルは高い。たとえば定置式のディーゼル動力装置の一つを比較例にとった場合、ディーゼル機関はたぶん NO₂を 10~15 g/kWh 排出するが、連続燃焼システムを備えたガス/蒸気タービン複合サイクルであれば、この排出値はおよそ 0.4 g NO₂/kWh に低下する。これは、高出力レベル—即ち 50MW 以上—でディーゼル機関が高度の競争にさらされることを意味する。NO_xと微粒子の排出を減らす方法としては、機関の用途に応じて種々の手段がとられている。表 1 は機関の用途と問題の重大さの度合いを示している。

原則として下記の制御方法を—単独に、或いは組合せて—用いることが出来る：

- ・ 燃焼プロセスの変更
- ・ 閉ループ電子制御システム
- ・ 排気の後処理
- ・ 燃料品質の改善

これらの方法のすべては、種々の度合いで使用でき、或いはすでに用いられている。外航船舶も使用対象の一つであるが、誰にも理解出来る通り、この種の船舶は大気汚染問題が発生する地域内で長期間運行しないため、排出抑制手段を要求される程度が最も低い。

船用機関は—たぶん軽度の変更が加えられて—陸上での排出規制の基準になると思われるのは複合サイクル機関である。これは、ディーゼル機関からの NO_x 排出量

Table 1 Characterization of different diesel applications

	MoO		Problem		
	dyn	st	N	NO _x	P
Cars	++	+	++	++	++
Buses/ Trucks	++	++	++	++	++
Locomotives	+	++	+	+	+
Inland Ships	+	++	+	+	+
Power Stat.	0	++	+	++	+
Ocean Going Vessels	0	++	0	0	+

Explanation of abbreviations:

MoO = Mode of Operation
 dyn = dynamic
 st = steady
 N = Noise
 P = Particulates

++ very important
 + important
 0 not important

が、恐らく 1/20 以下に低減されなければならないことを意味する。この値は極めて有効な後処理の結果に相当する。ディーゼル排気の処理の場合は、NO_xの制御はアンモニア又はより有効な尿素を使用した、シリコン制御整流素子 SCR システムで行う。有効と思われるがまだ長期的な経験は得られていない。もしこれからの機関が盛んに使用された場合、その制御が非常に重要な問題になる。

後処理以外の諸手段も用いる必要がある。本論文ではスペースの都合上これ以上触れないが、多少詳しい情報が文献3)に述べられている。

NO_xの排出を低減し得る有効な手段の一つは 3 元触媒を使った化学反応処理装置付きガソリン機関で、小出力機関に用いられている方法である。

CO₂と NO_xの排出量の間で適正な妥協点を見出すという観点から (図 6 参照)、NO_x排出許容レベルを緩和し、それに応じてディーゼル機関にある程度の効率をもたせることは実際的な方法であろう。

解析分野での課題の解決；内燃機関ファミリーの中でも大型ディーゼル機関の業界は、他社製品について研究し得る手段を持っていると長年考えられて来た。その典型的な例は、これまで常に行われてきた (そして今も行われている) 「機関を製図板の上から (今日でなら CAD システムから) 販売する」方法である。自動車業界の人達は、試行錯誤方式に頼ることを軽視していた。今日では

もうそのようなことは無いが、著者の知る限りでは、大型ディーゼル機関分野で用いられている熱力学モデルは一燃料効率計算を除いて一不完全であり、この面では、小型機関自動車用のメーカーの方が進んでいるように見受けられる。それ故、熱伝達、燃焼及び排気排出の予測のためのより優れたモデルの開発に、大いに力を注ぐ必要がある。

熱伝達については、セラミックスの使用が考えられ始める以前から、長年弱点として認識されていた。局所的に変動する金属表面温度が解っていないことが、信頼性の問題を考える上での重要な問題の一つである。そしてもし機関の経済性を更に高めたいと望むのであれば、これら信頼性に関連ある問題が十分に解決されなければならない。

大型ディーゼル機関の実際の運転で経験された問題点の解決のため、更には、機関効率の向上を計るため、そして最後に“セラミック機関”について誤った推定がなされていることのために、機関内部の熱伝達の物理的に正確なモデルの作成を目的としたかなり大掛りなプログラムが開始された。これは、熱伝達が金属の表面温度を大きく左右する現象であるためである。

以下は熱伝達についての幾つかの新しい結果を示す実験の概要である。

文献4)に実際の実験装置と最初の実験結果が発表されており、次いで文献5)でより詳細な分析が行われた。単流掃気式大型2ストローク機関のシリンダヘッドの一部で、局所的瞬時金属表面温度、乱流境界層内の局所的瞬時ガス温度特性、及び熱輻射が計測された。境界層温度は、新たに開発された光ファイバセンサーで計測さ

Fig. 7 Various temperatures in a large bore two-stroke diesel engine operating at a BMEP of 15.5 bar, an engine speed of 2.5s^{-1} and an excess air ratio of 2.1

れた。計測は種々のエンジン負荷で、他の諸条件を一定にして行われた。

図7、8及び9にまとめられている主な計測結果は、少なくとも大口径機関に関する限り、輻射の問題を切離して考慮することが重要であることを示している。この実験結果は（我々が望んでいる）実用上十分に簡単な一連の数式の形にまとめられつつある⁹⁾。更なるテスト

Fig. 8 Heat transfer coefficient for steel wall and standard process based on temperature at the outer edge of the turbulent boundary layer

Process 2 (with reduced excess air number = "hot" engine yet maintained power of 100 %) is shifted to the right for better visualization

Fig. 9 Heat losses relative to fuel energy for different heat transfer models in comparison with measurements for all operating conditions (process 2 [with reduced excess air number II "hot" engine yet maintained power of 100 %] is shifted to the right for better visualization)

を、今回はスルツァーディーゼル社（スイス）と協力して実施することが計画されている。

図7は輻射と対流を分けることの重要性を明らかにしている。計測された輻射温度2は、2ゾーンモデルにおける、化学量的理論断熱火炎温度1と、理想的に混合された全燃焼ガス温度3の中間に存在する。6は乱流境界層の縁部での瞬時局所ガス温度で、この温度は対流に関して重要である。これまでは熱伝導は一殆どの場合一平均ガス温度4を用いて計算されていた。図8は同じケースにおける物理的に正確な熱伝達率を示す。明らかに、燃焼の後段階での総合熱伝達率曲線の急勾配の上昇は、熱輻射の増加及びこれと同期するきわめて低い推定温度変動に基本的に対応している。いずれにしても、対流の影響と輻射の影響は、共通した一般的な温度勾配を持っていないことは明らかで、このことは、物理的にみて、唯一の熱伝達率値を用いることは正しくない。燃焼ゾーン温度と熱力学的平均温度のいずれも、局所温度境界層の発生、ないしは輻射熱（4乗としての！）とシリンダー内で直接測定された諸要素を、明確に、或いは暗示的に説明し得ない。したがって、内燃機関の熱伝導プロセスを正確に説明するために、新しい適正なパラメータが導入されなければならない。

最後に、文献5)から引用した図9は、先に述べたスルツァー社の実験機関を使用して新たに開発された一群の熱伝達方程式を比較したものである。（新結果はETHと付記されており、計測はスルツァーディーゼル社によって行われた。）

高出力で燃料の経済性の高い“ホット”エンジンを、信頼出来る方法で実現するために、熱力学（燃焼特性をも含めて）のより深い理解が求められている。当業界はこの種々の機関を更に開発するために、たぶん諸大学との緊密な協力の下に、この分野で一層努力を重ねる必要がある。

条件について計測、比較した線図（プロセス2〔出力を100%に保った“ホット”エンジンで、空気過剰率を下げた状態〕は、見易いように右側に平行移動されている）

4. 結 論

今後10年間の開発目標として下記の項目を挙げることができる：

- ・信頼性を高めること
- ・設備投資と運転の両面でコスト効率を高め、フレキシビリティを増大せしめること
- ・機関を環境に悪影響の無いものにする
- ・より優れた分析用の装置を開発すること

ディーゼル機関は今日盛んに使われているが、現在の理解と知識を以てしては何等かの限界に達してしまうと言っても多分間違い無いだろう。将来は過去の単なる延長線上には存在しない。新しいアイデアが必要とされる。経済性を生態学的影響とバランスさせる見地から、ディーゼルシステム（船用その他）を出来る限り完全に近づけるために、すべての問題が検討されなければならない。ディーゼル機関は更に進歩する力を秘めている—その実現は容易ではないけれども。

文 献

- 1) Eberle, M. K. ; Paul, A. : Possible Ways and Means to Further Develop the Diesel Engine in View of Economy. CIMAC Warsaw 1987.
- 2) Eberle, M. K. ; van Helden, A. K. ; Cannon, M. J. ; Mikulicic, N. : Liner Wear of Two-Stroke Diesel Engine Operated at Very High Temperatures, Pressures and Reduced Cylinder Lubricant Feed Rates. CIMAC Tianjin 1989.
- 3) Eberle, M. K. : Diesel Engine Design for Reliability, Cost Effectiveness and Environmental Acceptability, An Outlook. Calvin Rice Lecture, ASME, New Orleans 1990.
- 4) Boulouchos, K. ; Eberle, M. K. ; Ineichen, B. ; Klukowski, C. : New Insights into the Mechanisms of In-Cylinder Heat Transfer in Diesel Engines. SAE 890573.
- 5) Boulouchos, K. ; Isch, R. : Modeling of Heat Transfer During Combustion : A Quasi-Dimensional Approach with Emphasis on Large Low-Speed Diesel Engines. COMODIA Congress Kyoto 1990.

(文責 編集委員会)