

377.5

K-11

1-51

九州工業大学大学院博士論文

縦断放電点火（TDI）法による
内燃機関の燃焼改善に関する研究



九州工業大学大学院工学研究科博士後期課程
設計生産工学専攻

平 島 繁 紀

	頁
第 I 章 総 論	1
§ 1. 本研究の目的	1
§ 2. 本研究に関する従来の研究	3
§ 3. 本研究の指針	6
第 II 章 内燃機関用代替燃料と点火	10
§ 1. メタノール	10
§ 2. 天然ガス	11
第 III 章 希薄燃焼と点火	14
§ 1. 希薄燃焼の意義と問題点	14
§ 2. 希薄燃焼研究の現状	16
第 IV 章 縦断火花放電点火方式	20
§ 1. T D I 点火方式	20
§ 2. 2 サイクルエンジンへの適用	22
§ 3. 天然ガスエンジンへの適用	24
§ 4. T D I 点火方式の問題点	24

第 V 章	実 験 1.	(2 サイクルエンジン)	30
§ 1.	実 験 装 置		30
§ 2.	モ ー タ リ ン グ 試 験		33
§ 3.	無 負 荷 運 転 性 能		40
3.	1.	無 負 荷 運 転 時 燃 焼 圧 力 変 動 の 比 較	40
3.	2.	無 負 荷 回 転 速 度 の 比 較	40
3.	3.	無 負 荷 運 転 限 界 の 比 較	44
§ 4.	排 出 ガ ス 特 性		46
4.	1.	N O _x の 排 出	46
4.	2.	H C の 排 出	47
4.	3.	C O の 排 出	49
第 VI 章	実 験 2.	(天 然 ガ ス エ ン ジ ン)	51
§ 1.	実 験 装 置		51
§ 2.	無 負 荷 運 転 性 能		57
2.	1.	無 負 荷 回 転 速 度 の 比 較	57
2.	2.	無 負 荷 運 転 限 界 の 比 較	59
2.	3.	無 負 荷 運 転 時 の 燃 焼 圧 力 変 動 比 較	62
§ 3.	負 荷 運 転 性 能		65
3.	1.	半 負 荷 運 転 限 界 の 比 較	65
3.	2.	半 負 荷 運 転 時 P - t 線 図 の 比 較	67
§ 4.	排 出 ガ ス 特 性		70
4.	1.	無 負 荷 運 転 時 の 排 出 ガ ス 特 性 比 較	70
4.	2.	負 荷 運 転 時 の 排 出 ガ ス 特 性 比 較	73

第 VII 章	水素添加 C N G による運転特性	75
§ 1.	無負荷運転性能	75
1. 1.	無負荷回転速度の比較	75
1. 2.	無負荷運転限界の比較	77
§ 2.	負荷運転性能	80
2. 1.	半負荷運転限界の比較	80
2. 2.	半負荷運転時 P - t 線図の比較	80
§ 3.	排出ガステキ	84
第 VIII 章	熱発生率の比較	86
§ 1.	熱発生率の計算	86
§ 2.	点火方式変更による熱発生率	89
2. 1.	量論値での熱発生率比較	89
2. 2.	燃料希薄域での熱発生率比較	89
§ 3.	水素添加有無による熱発生率	93
3. 1.	量論値での熱発生率比較	93
3. 2.	燃料希薄域での熱発生率比較	97
第 IX 章	T D I 点火方式の初期燃焼期間の解析	101
§ 1.	活性種生成率の比較	103
1. 1.	シュミレーション条件	104
1. 2.	計算手法	105
§ 2.	着火反応温度の比較	109
2. 1.	火炎核のシュミレーションモデル	109

2. 2.	着火反応温度の解析計算	110
2. 3.	着火反応温度の比較	113
第 X 章	総括	123

誤差の評価について

参考文献

謝辞

付録

1. 熱発生率計算プログラム
2. 素反応化学式
3. 燃焼温度数値解析プログラム

第 I 章 総 論

第 I 章 総 論

§ 1. 本研究の目的

自動車に代表される内燃機関を取りまく環境の推移として、70年代初頭の排出ガス規制ならびにオイルショックは、一時期それまでのパワー重視から燃費低減へと方向を変えさせていたが、排出ガス規制については三元触媒の導入により一応の解決が得られ、その後の石油の安定供給確保によって再び高出力、高トルクを追求するようになった。

しかしながら、90年代になってさらに地球規模での環境破壊が指摘されるようになり、今後予想される世界的な自動車台数の増加や NO_x をはじめとするこれまでの排出ガス規制に加え CO_2 による地球温暖化など環境問題への対応から、さらにクリーンで経済的な燃料の選択と燃焼技術の追求が要求されるようになってきた。

このような自動車を取りまく社会環境の推移の中で、過去の反省を生かし、ガソリンなどこれまでの化石燃料に代わる代替燃料の研究が活発化している。これまでのところガソリンに代わる燃料として、メタノール、天然ガスの利用が注目されている。一方 CO_2 および有害排出ガスの低減が同時に達成されることから、再び希薄燃焼に関する研究が盛んに行われるようになってきている。

しかし、両者に共通する問題点として、点火や火炎伝

播の不確実性による燃焼効率の低下、さらに不完全燃焼によってもたらされる有害排出ガスなどが挙げられる。

これら代替燃料や希薄混合気による火花点火機関の運転において、安定した燃焼を行うための点火手法が提案されており一部実用化されているが、それぞれの手法において問題を残している。

本研究では、これら代替燃料もしくは希薄混合気を使用する火花点火機関の点火手法の一つとして、既存のエンジンの大幅な変更を行わずに従来の高電圧発生装置を使用して、燃焼室を縦断する火花によって着火を行う新しい点火方式 (Transverse Discharge Ignition Method :TDI Method) を提案した。その上で、この点火方式を実機エンジンに適用し運転実験を行いながら、従来の点火方式による運転性能および排出ガスの比較を行った。

また、本研究では火花点火機関用の石油代替燃料として天然ガスに注目した。天然ガスはオクタン価が高いなど、他の炭化水素系代替燃料と比較して潜在的優位性を有するが、その燃焼速度が遅く機関の性能低下につながる。そこで天然ガスによる運転性能改善策として、天然ガスに燃焼速度の早い水素を添加した調整ガスを用いて運転実験を行い、今回提案した点火方式への変更による実験と合わせてその燃焼促進効果の比較、検討を行った。

さらに、新点火方式の初期燃焼期間における燃焼促進効果を解析するため、両点火方式の球状火炎核モデルを

想定した。その上で、火炎核中の活性化学種濃度の計算を行い、その活性種濃度差による着火能力を計算プログラムにより数値解析的に予測し、点火方式の変更による燃焼促進の比較を行った。

§ 2. 本研究に関する従来の研究

火花点火機関（オットーサイクルエンジン）において、最適な点火はエンジンの性能、効率を左右するのみならず、燃焼によってもたらされる排出ガスにも影響を及ぼす。さらに地球環境の保護や資源確保の立場から、将来的に従来の化石燃料の依存度を軽減するため、希薄燃焼や代替燃料への移行が進み、これまでとは違った燃焼を行う必要性から最適な火花点火を考えなければならない。

本研究は、このような見地から火花点火機関に関する新しい点火方式を提案しているが、これまでに行われている火花点火に関する研究について述べると共に、本研究との関わりについて言及する。

2.1. 高エネルギー点火

電気火花による可燃性の燃料-空気混合気の点火を行うとき、その電気火花のエネルギーを増加させることによって点火しうる混合比の範囲が広くなり、燃焼初期の火炎形成にも影響を及ぼすことが考えられる。

酒井ら⁽¹⁾の研究によれば、点火エネルギーを大きくすることで混合気の初期燃焼期間を短縮することができ、

希薄混合気の場合の失火を減少させることが可能であると報告している。また、この中で内燃機関における点火プラグの冷却作用が失火の要因となることも述べている。

熊谷、木村らは希薄混合気の着火性の向上について、火花間隙を広げることは、燃料希薄のような場合の初期燃焼期間において効果がある⁽²⁾が、火花電圧が高くなり点火系の耐電圧の問題から限られた間隙値が定まるとしている。

2.2. 多点放電点火

火花点火機関に一般に用いられている点火コイルの火花は合成火花と呼ばれており、コイルの誘導作用による誘導火花と、コイルと点火プラグ間に浮遊する容量成分による容量火花とに分類される。点火能力の上でどちらの火花が優れているかは、火花の放電間隙長（スパークギャップ）や放電エネルギーの大きさ、混合気の性状などにより状況を異にしていると言える。

河野らは、この容量火花による点火能力について報告している⁽³⁾。この中で、同一の火花エネルギーであっても、単独火花よりも適当な放電時間間隔をおいた2回火花が点火能力において勝っている理由を、簡単な熱的モデルによって説明している。このように、火花点火機関において1回の点火で火炎の発生と伝播を行うよりも複数の点火プラグによる点火（多点点火）の方が優れているとしている。この結果をもとに実機エンジンに適用し

た例として、2本の点火プラグを燃焼室の中心近傍に配した自動車用エンジンが実用化された。また、燃焼室の周辺部に点火プラグを設けて点火を行い、中心に向け火炎伝播させるサラウンドコンバッション (SCP) (4) も多点点火の適用例である。

2.3. 長時間放電点火

高エネルギー付加の方法として、電圧および電流の大きさは従来のみままで、その付加時間を長くして点火性能を向上させる方法が考えられる。

松下は、火花放電点火においてそのエネルギー付加によっては、アーク電流を増加しても希薄燃焼限界はほとんど変化しないが、アーク時間を長くすることによってその限界が拡大する (5) と報告している。また、中井らは、流動を伴う場合の燃焼の安定性に長時間放電の効果が大きい (6)、(7) ことを報告している。

これらの研究結果を総括すると次のようになる。

火花点火による燃焼過程において、点火エネルギーが影響を及ぼすのは初期燃焼期間、つまり点火から火炎伝播が開始されるまでの期間であって、この後に続く火炎伝播期間は混合気の種類により定まるとされている。従って、点火から燃焼の終了までの時間短縮がオットーサイクル機関の効率改善につながるとするならば、特に希薄混合気のような火炎伝播が遅い場合には、いかに着火遅れ期間を短縮するかが鍵となる。この改善策として高エ

エネルギー付加による短縮が考えられてきた。そこで、火花点火機関における高点火エネルギーの付加方法として

1. 点火火花エネルギーそのものを大きくする。
2. 点火火花エネルギーは従来通りでも数回に分けて供与する。
3. 点火火花エネルギーの付加時間を延長する。

が考えられ、いずれの方法も高エネルギーの付加によって初期燃焼期間の短縮を図ろうとするものである。

本研究で提案するT D I点火方式も点火エネルギーを高くするという点では同じであるが、放電間隙を大きくすることによる効果について着目している。なお、次項において本研究における新点火方式の提案理由と指針について述べることにする。

§ 3 本研究の指針

前述のように火花点火機関における火花点火手法に関して多くの研究が行われてきたが、これらの研究結果をもとに本研究では新しい点火手法を提案した。その経過及び理由として、

1. 新方式は、既存機関の大幅な構造変更を行わない。
2. 燃焼室を縦断する長い火花（ロングスパーク）によって火炎伝播距離が短くなり、燃焼期間の短縮が図れ効率の向上につながることを考えられる。
3. ロングスパークによる放電ギャップの拡大は高エ

エネルギー（高電圧）を必要とするが、ギャップに見合うだけの高電圧発生装置により燃焼促進が考えられる。

以上のような理由により T D I 点火方式を提案するに到ったが、これまでの研究は、いわば点火エネルギーの供給方法の違いによるものであるといえる。つまりその根底には、点火から火炎核の形成までの燃焼初期（燃焼準備期間）に電氣的エネルギーの助成によっていかに早く強力な火炎核を形成するか、即ち熱エネルギー的な取扱い方を重視しながらの研究であった。しかし電気エネルギー即ち熱エネルギーとするならば、極論すれば点火するかしないかの点火確率は付加されたエネルギーの大小で決定されることになる。

しかし火花点火機関での燃焼においても、点火エネルギーの付加によって生成される活性化学種の挙動を抜きにしてその燃焼現象を言及することはできない。確かに放電ギャップの拡大は必然的に高電圧の付加につながる。しかしながら、その効果とは別にロングスパークと吸入混合気との化学作用や、それによってもたらされる活性化学種が火花点火機関の燃焼に及ぼす影響について着目する必要がある。高点火エネルギーの付加やその付加方法についての報告は前述した通りであるが、これまで本方式のようなロングスパークによる化学種の寄与についての報告はあまりされていないようである。

今回対象となる着火法においては、従来法と比べて高エネルギーを必要とするが、それでも燃焼による発熱量の数千分の一以下であり、点火エネルギー自体が発熱量の負担になるものではない。

以上述べた理由から、本研究はこの新しい点火方式を2サイクルおよび4サイクル機関に適用し、従来方式と新点火方式との運転性能および排出ガステ性の比較を行うことにする。尚、適用にあたっては、次のような理由から適用方法、使用燃料、及び実験項目を決定した。

1) 2サイクルエンジンでは、動弁機構がないという構造上の利便性からピストンヘッドへの直接放電を試みることにする。使用燃料は、現在火花点火機関の主たる燃料であるガソリンを使用した。また、2サイクルエンジンは特に無負荷運転時の燃焼が不安定であることから、この点火方式の適用効果の検証を行うため、無負荷運転性能比較を中心に実験を行う。

2) 4サイクルエンジンは主たる火花点火機関であり、放電が動弁に干渉しにくく、構造変更が比較的容易であることからサイドバルブ式を採用した。放電はシリンダブロックに直接放電させる方式を採るものとする。使用燃料は、本方式が燃速の向上を主たる目的とするため、燃焼速度の遅い天然ガスを用い、希薄燃焼及び水素添加による運転性能比較を行う。

天然ガスは現在もっとも注目されている代替燃料の一

つであるが、燃焼速度の低さの克服は課題であり、T D I方式の応用は興味深いと考える。尚、本研究は今回提案したT D I方式の概念の有効性を確認するものであり、また、実験室レベルで製作変更可能な高電圧発生装置の出力に限界があること、さらに通常、希薄燃焼が用いられるのは部分負荷までであること等から負荷性能比較の実験は半負荷運転とした。

次に、両点火方式の火炎核モデルを仮定し、その中で生成される活性種とその活性種の可燃混合気に対する着火能力への寄与について解析を行い、本方式の検証を行うことにする。

第 II 章 内燃機関用代替燃料と点火

第 II 章 内 燃 機 関 用 代 替 燃 料 と 点 火

本章では、火花点火機関用の燃料としてガソリンに代わる代替燃料として注目されているメタノールと天然ガスの特性について述べると共に、本研究で提案する新点火方式との関わりについて述べる。

§ 1. メタノール

ガソリンはベンゼンや多環芳香族など炭化水素化合物の混合物であるの対し、メタノールは部分的に酸化されたHCの単体（含酸素燃料）であることからクリーンな燃料というイメージがある。メタノールはガソリンよりもオクタン価が高く、火花点火機関における着火遅れ時間が短いことから燃焼期間が短縮され⁽¹⁾、希薄混合気での燃焼性が良い。またメタノールを燃料とした内燃機関からの排出ガス特性として、排出ガス中のCO、HCの排出が少なく、断熱火炎温度も低いのでNO_xの排出はガソリンより低い⁽²⁾。

しかしながら、ガソリンと比べて単位重量あたりの発熱量が半分程度しかなく、単位距離当たりの燃料消費量が大きくなる。さらに低温始動性が悪く、腐食など材料に対する影響、メタノール取扱い上の安全性を考慮しなければならない。また、ガソリンを燃料とする従来の有害排出物以外にホルムアルデヒドの排出が多いといわれ

ている。

自動車用火花点火機関の燃料としては、M100（メタノール100%）とM85（メタノール85% + ガソリン15%）を対象としたフリートテストが行われ一部実用化されているが、低温始動性と安全性の面でM85が現実的である。

また、メタノールはオクタン価が高いことからディーゼルタイプエンジンで使用する事が考えられている⁽³⁾が、軽油に比べセタン価が非常に低いことから何らかの着火補助手段が必要になる。火花点火による希薄燃焼およびプラグアシストによる圧縮着火の場合、特に低負荷燃焼が不安定であり、これを点火エネルギーの増加によって改善させようとする研究報告⁽⁴⁾がある。この場合でも点火エネルギーの増加は低負荷燃焼改善に効果があり、ギャップの拡大によってさらに改善が期待される。

本研究は、火花点火機関における着火向上を目的としているが、プラグアシストによるメタノールディーゼルエンジンへの適用は充分可能である。

§ 2. 天然ガス

内燃機関の代替燃料として注目されているものの一つとして天然ガス（CNG：Compressed Natural Gas）が挙げられる。天然ガスはメタンを主成分（90 Vol.%）とする調整ガスで、その燃料特性として等価リサーチオクタン価（RON値）が約130と高く、単位発熱量あた

りの二酸化炭素排出量がガソリンと比較して約25%低いという優位性を有する代替燃料である。さらに天然ガスを燃料としたエンジンでは、燃料がガスとして供給されることから、吸入空気量の低下が希薄化によって少し（量論空燃比あたり約9.5 Vol.%）緩和される利点もある（5）。

しかしながら、天然ガスはその燃焼速度が他の内燃機関用燃料と比較して遅く（6）、効率の向上と排出ガス浄化を目的とする希薄燃焼ではさらに低下することになり機関の性能低下を招くことになる。従って、火花点火機関用の代替燃料として天然ガスを用いる場合、オクタン価が高いことから圧縮比を上げ、機関の効率を高める必要がある。さらに希薄燃焼を行うためにはより燃焼速度を向上させる手法が必要となる。

その方法として、ガソリンによる希薄燃焼を行う際の点火手法（次章に後述）をそのまま移行して、天然ガス本来の燃焼速度の遅さを改善することなどが考えられている。また前述のように現在供給されている天然ガスはもともとメタンを主成分とする調整ガスであり、この調整時にメタンの燃焼を促進のため酸素を（7）、さらにはエタン、プロパンを添加したCNGを燃料とする研究も行われている（8）。

本研究は、天然ガスの優位性を引き出すための研究でもあり、点火方式の変更によって希薄燃焼や天然ガス使

用時の燃焼速度の向上を目的としている。さらに天然ガス本来の燃焼速度の遅さを補うため、水素を添加したCNGによる燃焼促進についても触れている。

第 III 章 希薄燃焼と点火

第 III 章 希薄燃焼と点火

内燃機関、特に火花点火機関において希薄燃焼（リーンバーン）による運転は燃費向上をもたらし、その結果として CO_2 の低減につながる手段として注目されている。本章では、希薄燃焼のもつ意義とこれまでの研究の現状および本研究との関わりについて述べる。

§ 1. 希薄燃焼の意義と問題点

燃料希薄による運転によって、機関の燃料消費量が低減されることは周知の通りであるが、それ以外に注目すべきことは、希薄燃焼による機関の効率向上が期待されることである。表 1 (1) は正味熱効率に影響を及ぼす因子と具体的向上方法を示したものである。

次式で示されるように圧縮比を一定とすれば、理論熱効率は

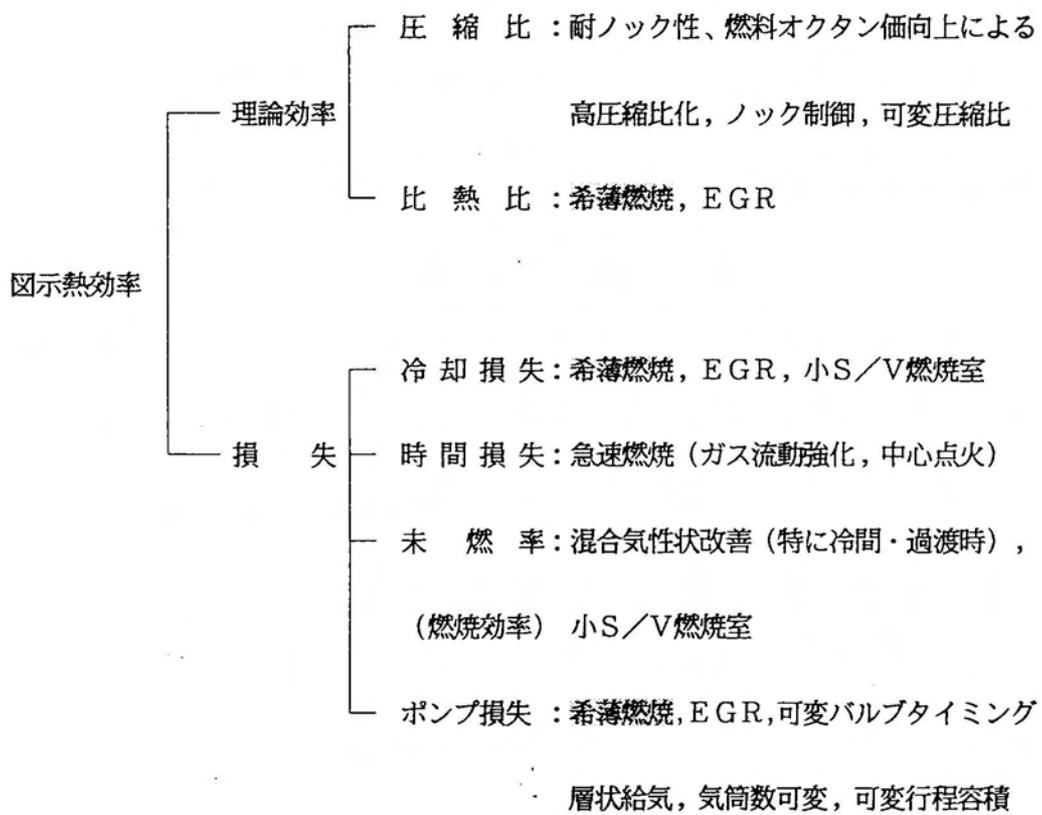
$$\eta_{th} = 1 - 1/\varepsilon^{\kappa-1} \quad (1)$$

η_{th} : 理論熱効率 ε : 圧縮比

κ : 比熱比

(1)式で示されるように、希薄燃焼は比熱比を大きくすることにより理論熱効率が向上する。また作動ガス量の増加によってポンプ損失が低減され、かつ燃焼温度が低下するため冷却損失が低減することによって図示熱効率

表 1 正味熱効率に影響を及ぼす因子 (1)



の向上が期待される。

また希薄燃焼による排出ガスの清浄化という見地からすれば有害成分としてのCO、HCの低減は言うまでもなく、希薄燃焼運転のねらいはNO_xをいかに大幅に減少できるかということにある。なぜならば、現在使用されている三元触媒の浄化ウィンドは、ほぼ理論混合比でしかその効果が得られないからである⁽²⁾。

以上のような理由から希薄燃焼がさらに注目されるようになってきたが、希薄燃焼の最大の問題点は燃料希薄域での安定した機関の運転性の確保にある。つまり、混合気が希薄になるにつれ火炎伝播速度が遅くなり、燃焼が完了する以前にピストン下降によるガス膨張のため温度が下がり消炎現象がおこる。これを回避するために点火時期をはやくすると、吸入混合気が十分に圧縮されず温度上昇のないまま点火されてしまい点火ミス（失火）が発生する。点火ミスはそのまま未燃ガスとしてHCの排出を増加させ、燃料消費およびトルク変動の増加につながる。このように希薄燃焼による運転には安定した燃焼を得る手法が必要となる。

§ 2. 希薄燃焼研究の現状

このような希薄燃焼の安定限界の拡大を実現させる方法に関する研究が活発に行われているが、その代表的な手法とその問題点について述べることにする。

2.1. スワールによる火炎伝播の促進

混合気中に乱れを存在させることによって燃焼速度が増大する機構は、乱れの強さとそのスケールに依存する。

次式(2)は、リンクドフレームモデルでの火炎伝播速度を示したもので(3)、(4)、

$$S_r = S_u \{1 + (2U' / S_u)^2\}^{1/2} \quad (2)$$

S_r : 乱流火炎速度 S_u : 層流火炎速度

U' : 乱れ強度

乱れ強度 U' と乱流火炎速度 S_r は、ほぼ一次(線形)の関係にあるとみなせる。また混合気中の乱れスケールが大きい場合には乱れによって火炎面が変形され、火炎面面積が増加することから燃焼が促進される(5)と考えられる。

このような乱れによる燃焼促進の一例としてスワールがある。スワールの掛け方としては、吸気系に S C V (Swirl Control Valve) やバルブリフトを制御する方法、吸気ポートの形状によるものなどいくつかの方法が実用化されているが、いずれも燃焼室内へ流入する混合気にスワールもしくはタンブル流れ(6)を起こさせるもので、公表値として希薄混合比を 22~24 に設定している(7)。しかしながら、一方でスワールによる燃焼促進の問題点として、これを起こさせるための付帯装置が必要であり、動弁機構が複雑となるため機械損失が増加する。また、必要以上の乱れ強度は希薄燃焼時の消炎を起

こし、かえって希薄燃焼限界を悪化させ、また燃焼室壁面への熱損失も増える結果となる⁽⁸⁾。

2.2. 吸入混合気の成層化による燃焼

均一混合気による希薄燃焼では希薄化が進むにつれ点火が困難になる。そこで層状給気、つまり点火プラグの近くに濃い混合気を、その他の部分には希薄混合気を供給し、全体として希薄燃焼を行う成層燃焼方法がある。

しかしながら、成層化による燃焼は火炎中心の点火プラグの近傍に濃い混合気が存在し、ここでの温度が高くなることから NO_x の排出上不利である⁽⁹⁾ことが指摘されている。希薄化によって CO 、 HC の有害成分は理論上低減できるとしても、前述のごとく従来の三元触媒による浄化は、浄化可能なウインドが異なるため期待できず、希薄域での NO_x 専用触媒の必要性がでてくる。

2.3. プラズマジェット等による着火

第I章で言及した高エネルギー点火の範疇に、希薄燃焼時の燃焼安定を図る方法の一つとして燃焼強化点火法(ジェット点火)がある。これらについては様々な研究が行われているが、その代表的な点火方法としてはプラズマジェット点火⁽¹⁰⁾、パルスジェット点火⁽¹¹⁾、パフジェット点火⁽¹²⁾、燃焼ガスジェット点火⁽¹³⁾などが挙げられる。

これらの手法は、概ね副燃焼室もしくはキャビティを有し、その中でややリッチな混合気に着火を行って火炎

(プラズマ)を発生させ、その高速噴流にのせて主燃焼室に吹き込み、乱流効果による燃焼促進を図ろうとする手法である。特にプラズマジェットにおいては噴流の吹き込み時に、プラズマによる熱または活性化学種の散布による効果があるとされている。しかしながら、副室を用いるこれらジェット点火法は、副室からの火炎の噴出により熱損失の増大につながる⁽¹⁴⁾ことが指摘されており、実機への適用などについては問題点を残していると思われる。

第 IV 章 縦断火花放電点火方式
(Transverse Discharge
Ignition Method)

第 IV 章 縦断火花放電点火方式

第 I 章で述べたように、希薄混合気の着火性向上策の一つとして高エネルギー火花による点火方法がある。本研究で提案する希薄燃焼を実現する方法は、既存のエンジンの大幅な構造変更を行わず、従来の高電圧発生装置を用いた点火方式変更のみで希薄燃焼を実現させようとするものであるが、原理的にはこの高エネルギー火花による着火方法に属する。

§ 1. T D I 点火方式

従来の火花点火機関の着火は、燃焼室の頂上部に設けたスパークプラグの中心電極と接地電極間のスパークによって行うのが一般的であるが、今回試みた方式は、高エネルギーを図 1-(a), (b)に示すような中心電極のみを有するスパークプラグに印加し、ピストンもしくはシリンダブロックを接地側として、燃焼室を縦断する長いスパークによって着火を行うものである。以下、この方式を Transverse Discharge Ignition Method: T D I 点火方式と称することにする。なお本研究では、これまでの接地電極を有するスパークプラグを用いた点火方式を従来点火方式 Conventional Method: C O N V. 方式と表記し区別することにする。

このような接地電極のない長いスパークによる着火に

よって火炎核の生成状況は従来のものと異なり、しかも燃焼室をほぼ中央部から縦断することにより火炎伝播距離が短縮され⁽¹⁾燃焼速度も速くなると予想される。また、必然的に放電ギャップ（図5中のG寸法）が拡大され、この間に存在する吸入混合気の分子がスパークに遭遇する確率も増大することになり、特に希薄混合気においても着火性が向上する⁽²⁾ことが期待できる。さらに、特に希薄混合気の着火において従来のスパークプラグを用いた場合では、中心電極や接地電極の吸熱によって火炎核が消滅する冷却作用（クエンチング）が起こりやすくミス着火をおこし易い⁽³⁾。本方式では、その接地電極がなくギャップが広いことから、十分な高エネルギーの供給が確保されるならば吸熱によるクエンチングが低減され着火性が向上すると考えられる。また Zieglerらによるプラグの接地電極の向きが着火性に影響を及ぼすという報告⁽⁴⁾があるが、本方式では前述のように混合気の流れの中に直接スパークさせることからこの影響は少ない。

以上については、本方式における電気火花の供給エネルギーを増加させることによる熱的な点火改善効果を狙ったものであるが、一方で燃焼改善の化学的背景としての活性化学種の寄与が考えられる。本方式のように、従来よりも長いスパークが燃焼室を縦断することにより、吸入混合気と放電の間で従来と異なった化学種の挙動が起

こゝろが予想される。

これらの理由によつて、希薄混合気の使用時においても良好な着火が行えると思われる。

この点火方式の適用機関として、シリンダヘッドに動弁機構がなく、T D I方式への構造変更が容易であることから2サイクルエンジンと4サイクルサイドバルブエンジンを使用したか、前述のように燃焼室を縦断するよゝなスパークが確保されるならば、原理的にはどのよゝなエンジンにも適用が可能である。特に、作動室内に電極を露出させることが許されないバンクェルサイクルへの応用も興味深い。

§ 2. 2サイクルエンジンへの適用

2サイクルエンジンは4サイクルエンジンに比べ出力が大きく、部品点数が少ないことから小型、軽量化がはかれるといつた特徴を有している。それにもかかわらず、低速、軽負荷時の運転性が不安定であることから自動車用原動機としての利用面では4サイクルエンジンに一步譲つた形となっている。その理由として2サイクルエンジン特有の掃気の不完全から残留ガスによる不整燃焼があげられる。またこの掃気過程時の新気の吹き抜けは未燃ガスとしてのH C排出増加や燃料消費を増すことにつながる。

さらに地球環境の保護の立場から2サイクルエンジン

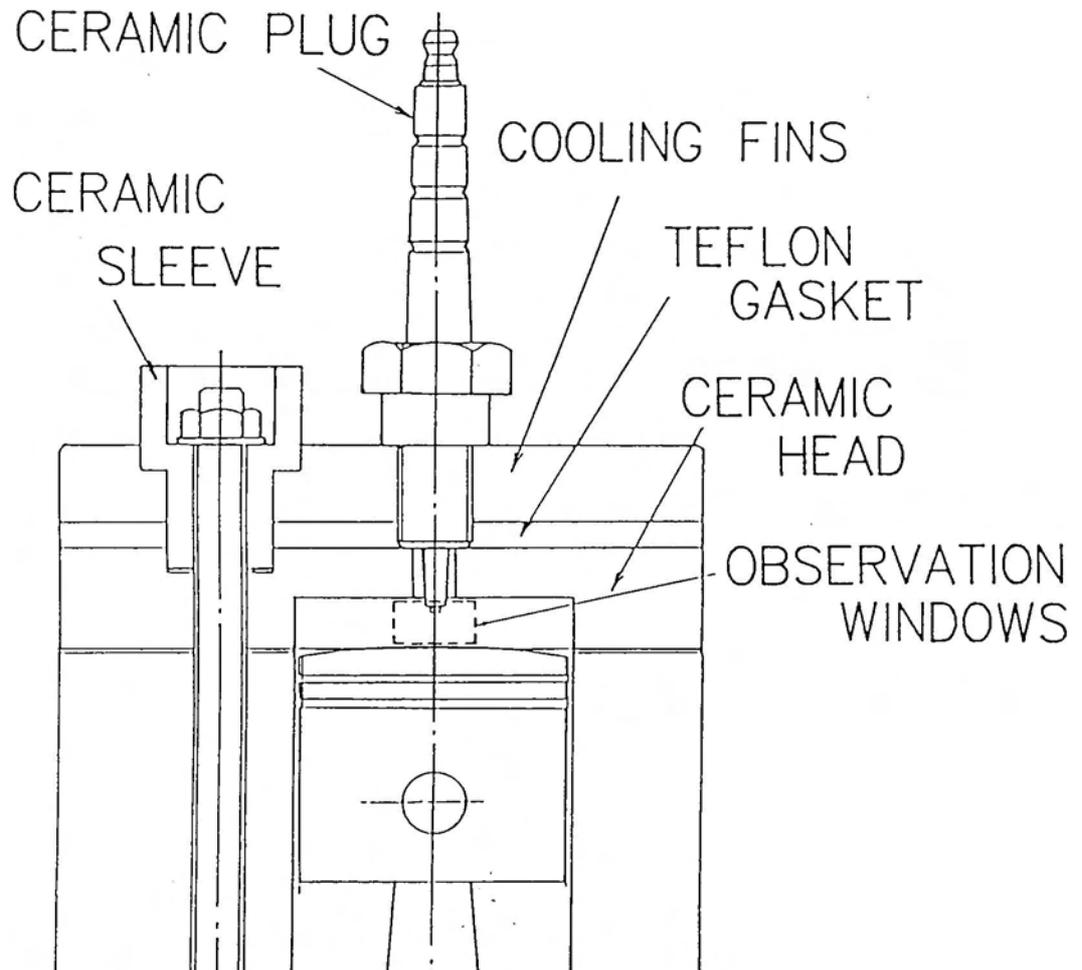


図 1-(a) T D I 点火方式概念図
(2 サイクルエンジン適用例)

においても、有害排出ガスや CO_2 の排出低減に傾注しなければならぬ時期にきていると思われる。

そこで本研究では、2サイクルエンジンの低速、軽負荷時の燃焼改善を目的として、TDI点火方式の2サイクルエンジンへの適用を行った。図1-(a)はその適用例を示したものである。

§ 3. 天然ガスエンジンへの適用

火花点火機関の代替燃料としての天然ガスの燃料特性については、第II章において述べた通りである。その中で天然ガスは、その燃焼速度が遅いことから燃料希薄による運転（リーンバーン）と同じ燃焼特性を示す。従って、天然ガスエンジンでは燃焼効率の向上のため圧縮比を上げるのが一般的であるが、もう一つの改善策として火花点火エネルギーを増加させ天然ガスの燃焼速度を向上させることが考えられる。

その改善策として本研究では、TDI点火方式を天然ガスエンジンに適用することを考えた。図1-(b)は、TDI点火方式を4サイクル・サイドバルブエンジン（天然ガスエンジン）に適用した例を示したものである。

§ 4. TDI点火方式の問題点

本方式のような放電ギャップの増加はパッシェンの法則に従って高電圧が要求されることになる。特に、2サ

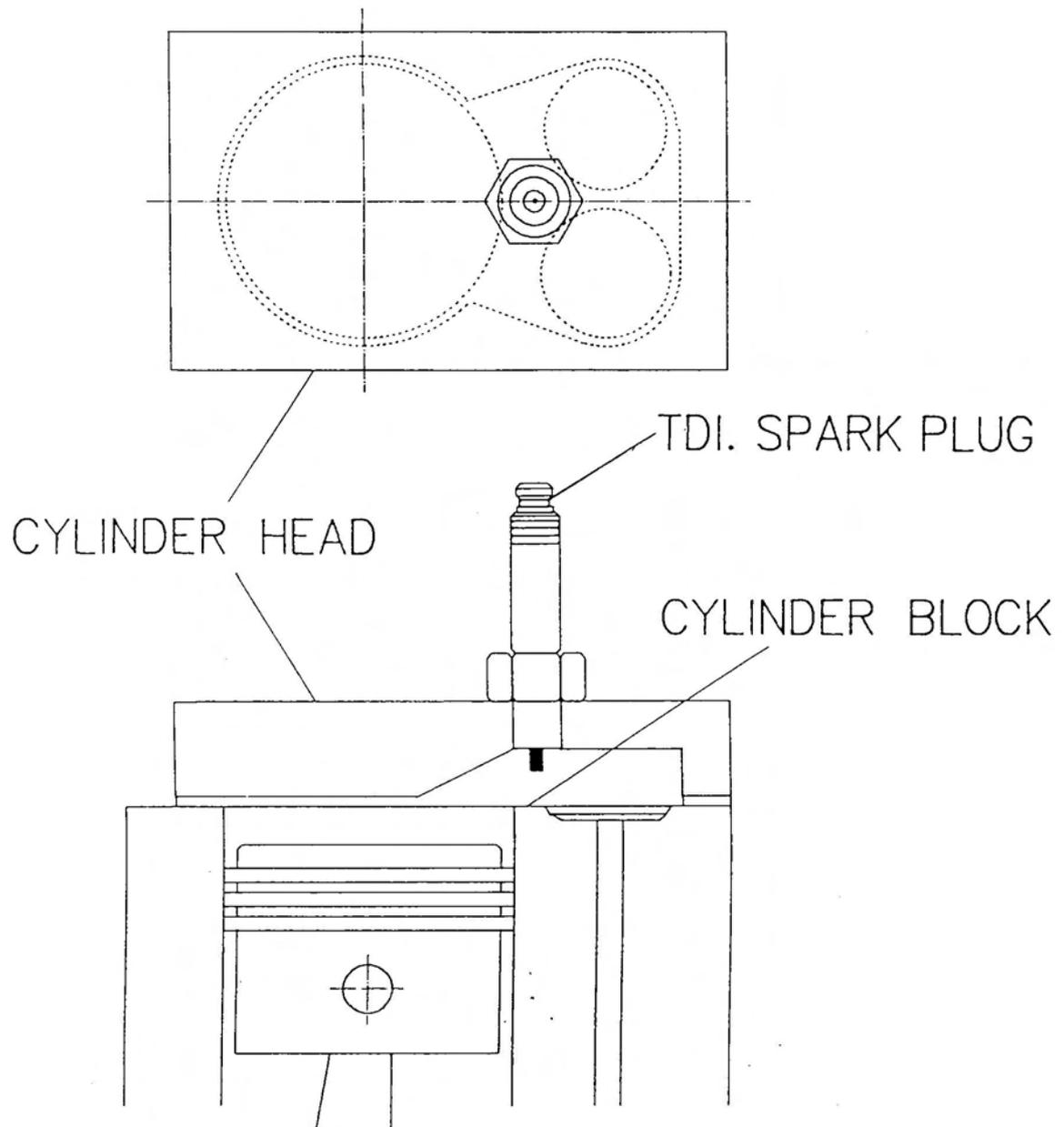
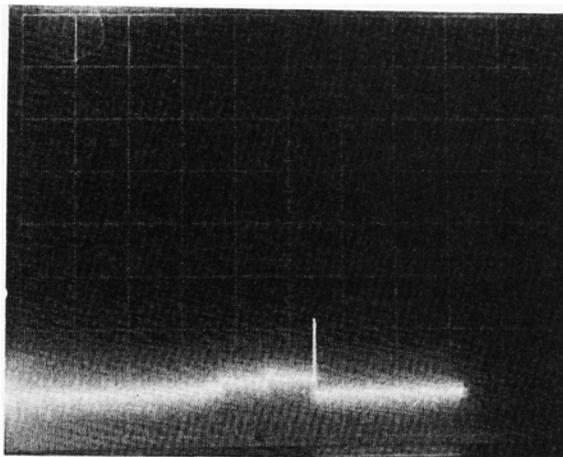


図 1 - (b) T D I 点火方式概念図
(4 サイクル適用例)

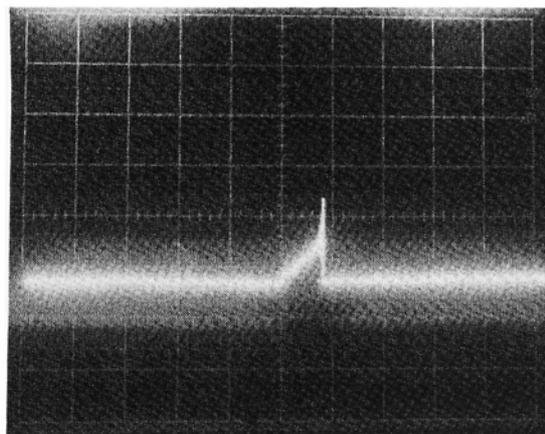
クルエンジンへの適用では図1-(a)のように直接ピストンに放電を起こさせる場合には、点火時期によって実ギャップGがさらに広がることになる。今回のような火花点火機関の高電圧発生を行う装置としてはイグニッションコイルを用いるのが一般的であるが、これによる点火火花の成分としてはコイル自身の誘導成分と放電ギャップによる容量成分に分別され⁽⁵⁾、合成火花とも呼ばれる。スパークプラグの放電ギャップを大きくすると容量成分が増大し、点火能力が低下するという報告⁽⁶⁾もある。また容量成分火花はその放電時間が短く⁽⁷⁾、低速運転用機関には不向きであるとされている。図2-(a), (b)は、従来方式とTDI方式での2次電圧および電流の比較を示したものであるが、TDI方式(GAP=4mm時)では、従来方式に比べ電圧値は数倍の要求電圧を示しており放電持続時間も短くなっている。

さらに、TDI専用スパークプラグは従来プラグの使用状態と比較して、高エネルギーを付加されることによる絶縁対策、接地電極が無いことによる放熱低下など過酷な状況にあると言え、その耐久性を考慮しなければならない。また、放電が確実に接地側に到達するために燃焼室内は当然のこと、高電圧の供給回路においての絶縁対策が必要となる。

実機への適用に際して以上述べたような問題点をクリアする必要があるが、本方式は前述したような代替燃料

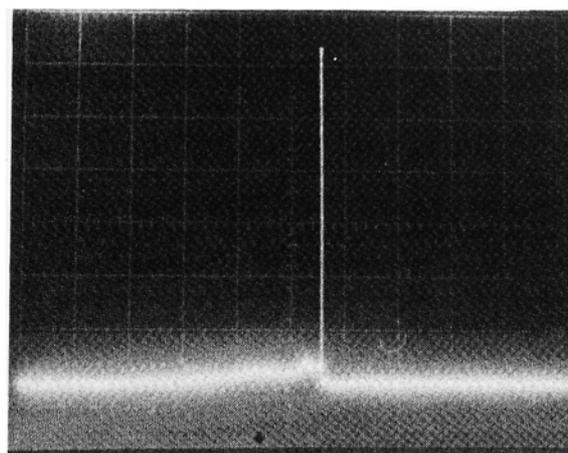


電 圧

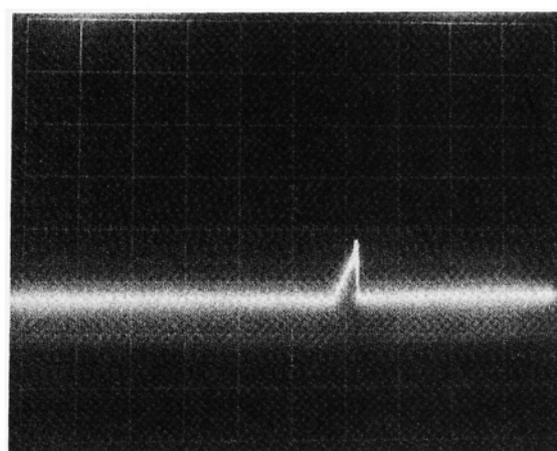


電 流

図 2 - (a) 放電電圧と電流の比較
(従来方式)



電 圧



電 流

図 2 - (b) 放電電圧と電流の比較
(T D I 方式)

による運転や希薄燃焼による安定した運転などの可能性を有している。また、ロングスパークによる活性化学種の寄与によって、従来の点火とは異なった燃焼が期待される。

本研究では、既存の高電圧発生装置と簡単な絶縁対策を施した機関を準備し、従来方式と本方式による運転を行い、以上に述べた本方式の燃焼促進効果について比較と検討を行った。

第 V 章 実 験 1 .
(2 サイクルエンジン)

第 V 章 実 験 1. (2 サイクルエンジン)

本研究では点火方式の変更を行う供試機関として、前述したような理由から 2 サイクルエンジンと 4 サイクルサイドバルブエンジンを準備した。2 サイクルエンジンではガソリンを燃料（キャブレータ仕様）とし、特に無負荷運転時の実験を主として行い、点火方式の変更による運転性能比較を行った。

§ 1. 実験装置

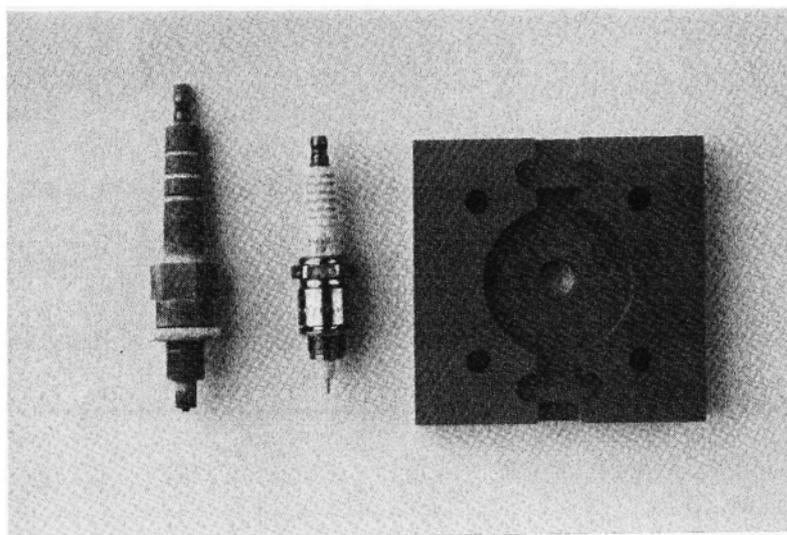
表 2 は、実験装置のベースである T D I 点火方式を適用した 2 サイクルエンジンの諸元を示す。

本方式も高電圧発生装置によって発生するスパークにより点火を行う（バッテリー点火方式）という点では従来の方式と同様であるが、ピストンに放電を起こすためには、中心電極から電極周りのヘッド部への放電を避ける必要がある。このため 2 サイクルエンジンの T D I 点火方式への変更としては、セラミックスで燃焼室を作製し、スパークがピストンヘッドに確実に到達できるようにした。図 3 にその作成したシリンダヘッドと T D I 専用プラグの写真を示す。

今回の高電圧発生装置は、両機関既設の T C I 方式から点火時期の変更がおこなえるよう、イグナイタによるセミトランジスタ点火装置に変更し、イグニションコイ

表 2 供試エンジン諸元表

Engine Type	2-Cycle MT110 MA (YAMAHA)
Number of Cylinders	1
Displacement (mL)	106
Stroke (mm)	50
Bore (mm)	52
Compression Ratio	5.8

図 3 セラミックヘッドと T D I プラグ
(2 サイクルエンジン用)

ルは表 3 に示すように、一般のコイルと比べて約 3 倍の高電圧発生能力を有するコイルへの変更をおこなったが、その他は従来のままとなっている。

図 4 は、T D I 方式への変更を行った 2 サイクルエンジンの実験装置を示したものである。

表 3 供試イグニッションコイル諸元表

Primary	Resistance	0.27	Ω
Secondary	Resistance	8.6	k Ω
Primary	Inductance	2.6	m H
Secondary	Inductance	25	H
Primary	Current	11	A
Secondary	Voltage (50 pF Load)	60	k V

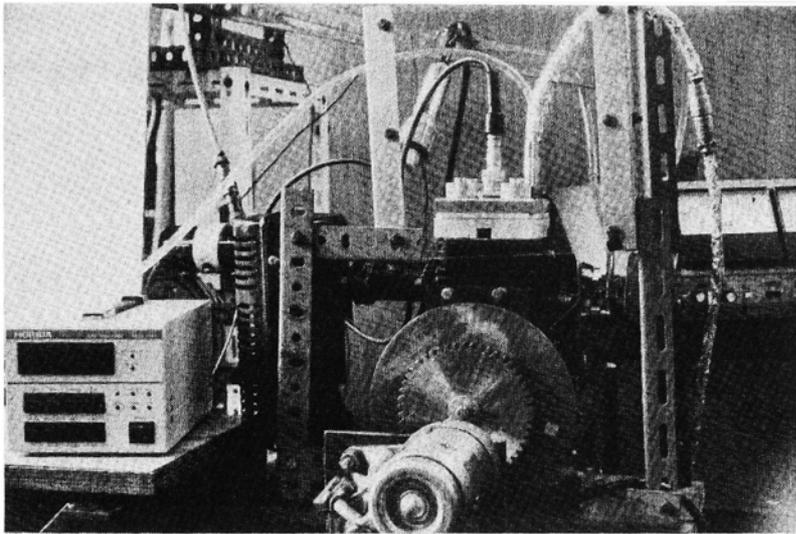


図 4 実験装置（2サイクルエンジン仕様）

また、シリンダヘッドに燃焼圧力測定用の圧力ピックアップを取り付け、筒内圧の測定を行った。

§ 2. モータリング試験

前述のように、2サイクルエンジンへのTDI方式適用は、中心電極からピストンヘッドへの放電によって行われる。そのため放電ギャップは、図5に示すようにピストンの上死点位置とTDI専用プラグの中心電極先端のギャップを設定ギャップ g とした。しかし点火時期により実際の放電ギャップ G は、設定ギャップ g に(1)式より求めたピストン変位 L_p を加えたギャップであり、

$$L_p = r(1 - \cos \theta) + \alpha r \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\alpha^2}} \right) \quad (1)$$

$$G = g + L_p = g + r(1 - \cos \theta) + \alpha r \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\alpha^2}} \right) \quad (2)$$

L_p : ピストン変位 r : クランク半径
 α : L / r L : コンロッド長さ
 G : 実ギャップ g : 設定ギャップ

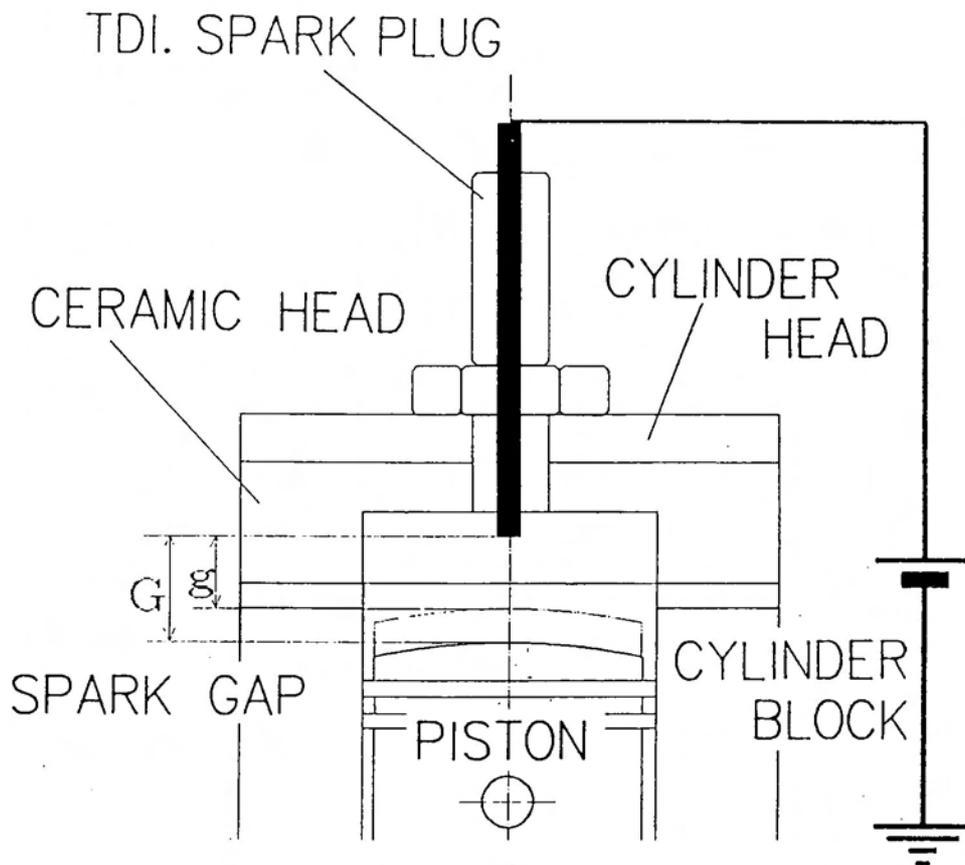


図 5 2 サイクルエンジンにおける放電ギャップ
 (設定ギャップと実ギャップの関係)

点火時期を早くするほど大きくなる。

表 4 は、各点火時期における設定ギャップ g と実ギャップ G の関係およびモータリング試験結果による放電可能範囲を示したものである。

今回の電源装置によるモータリング試験では、放電の確認をセラミックスヘッドの耐熱ガラスの覗き窓によって確認を行った。

表 4 放電ギャップと放電可能範囲

点火時期 (DEG) 実ギャップ G (mm)	設定ギャップ g (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50 $G=10.8$	◎ $G=11.8$	◎ $G=12.8$	◎ $G=13.8$	◎ $G=14.8$	△ $G=15.8$	× $G=16.8$
40 $G=7.1$	◎ $G=8.1$	◎ $G=9.1$	◎ $G=10.1$	◎ $G=11.1$	◎ $G=12.1$	△ $G=13.1$
30 $G=4.1$	◎ $G=5.1$	◎ $G=6.1$	◎ $G=7.1$	◎ $G=8.1$	◎ $G=9.1$	◎ $G=10.1$
20 $G=1.9$	◎ $G=2.9$	◎ $G=3.9$	◎ $G=4.9$	◎ $G=5.9$	◎ $G=6.9$	◎ $G=7.9$
10 $G=0.5$	◎ $G=1.5$	◎ $G=2.5$	◎ $G=3.5$	◎ $G=4.5$	◎ $G=5.5$	◎ $G=6.5$
5 $G=0.1$	× $G=1.1$	△ $G=2.1$	◎ $G=3.1$	◎ $G=4.1$	◎ $G=5.1$	◎ $G=6.1$

◎ 放電可能

△ 放電不安定

× 放電不能

なお、図 6 はその覗き窓から写した無負荷運転時の放電の様子である。この結果、T D I 方式での確実な放電可能ギャップ範囲は設定ギャップで 1 ~ 6 mm であることが確認された。更に高い電圧発生源を用いることでスパークギャップを広げることが可能であるが、今回はこの範囲での実験に限った。

次に、ファイアリング確認のためアクリル製ヘッドを製作し、これによる無負荷運転を行った。その時の燃焼写真を図 7 (従来方式による点火)、図 8 (T D I 方式による点火)、図 9 (T D I 方式による点火) に示す。

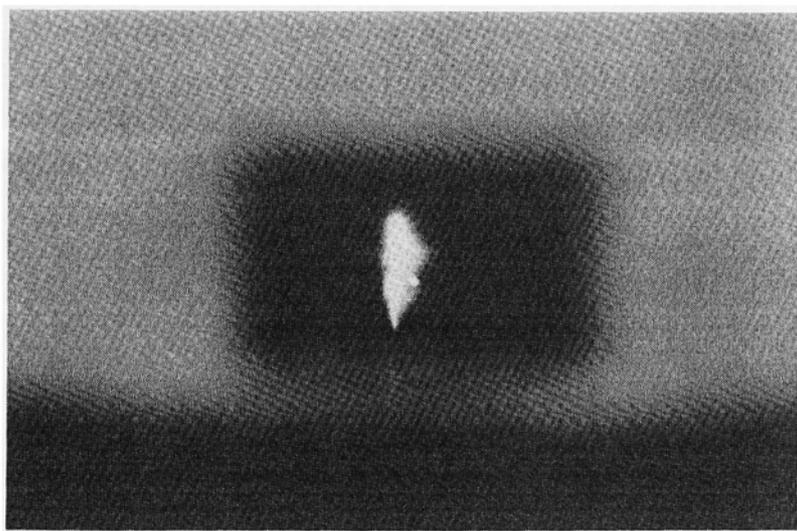


図 6 無負荷運転時の放電の様子

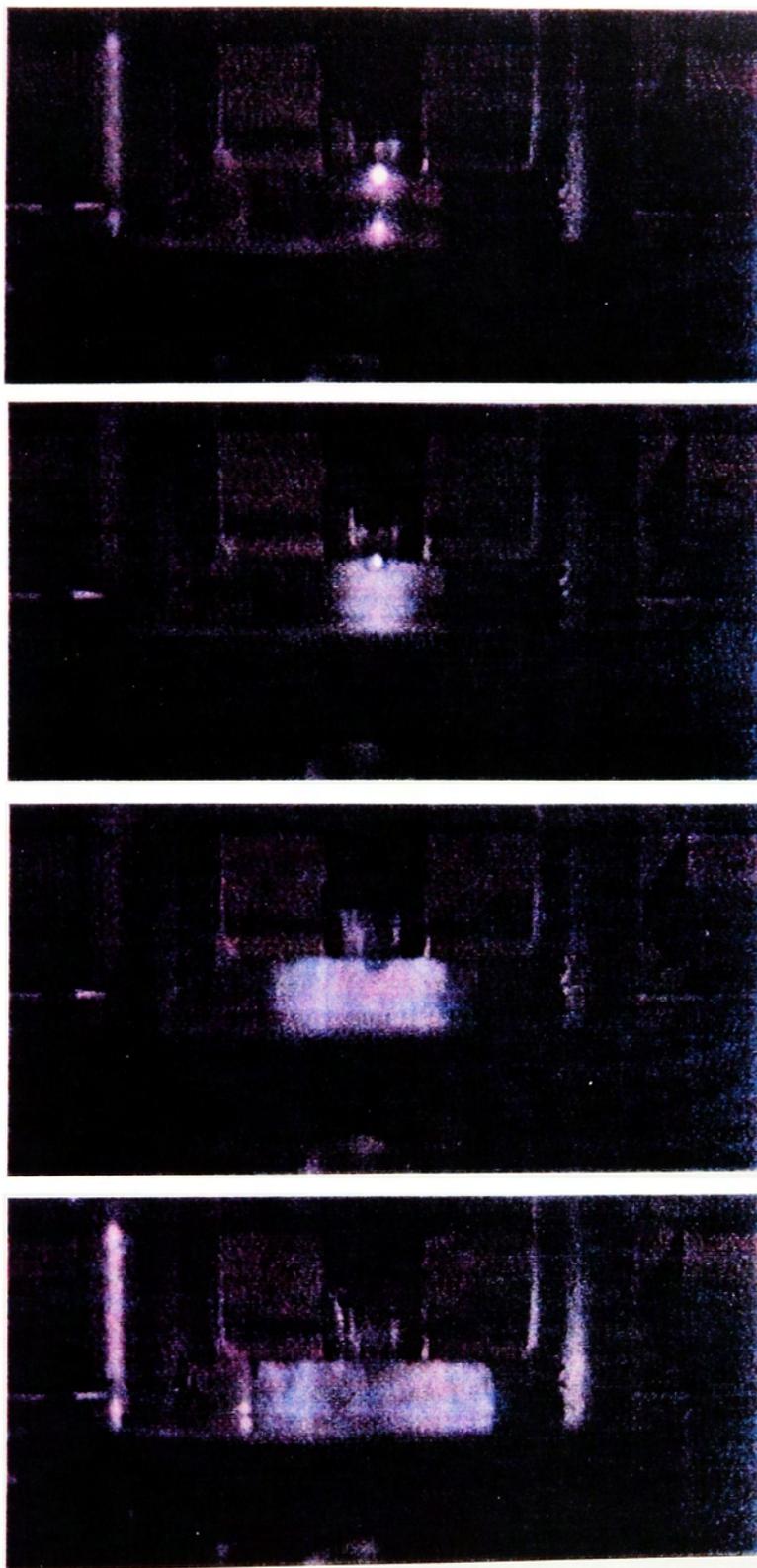


図 7 アクリルヘッドによる燃焼写真
2 サイクルエンジン、従来方式
(燃焼室横方向から撮影)

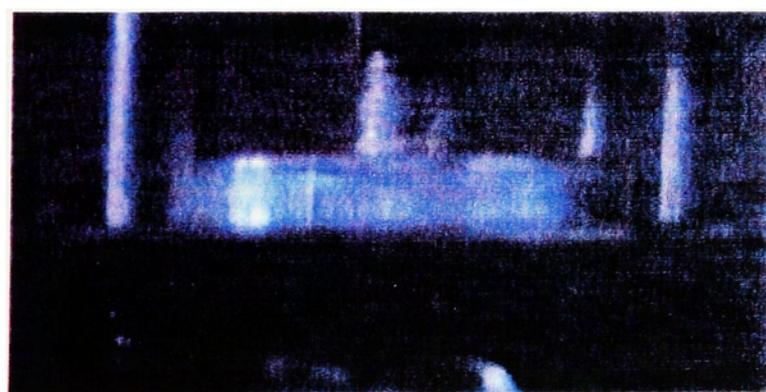
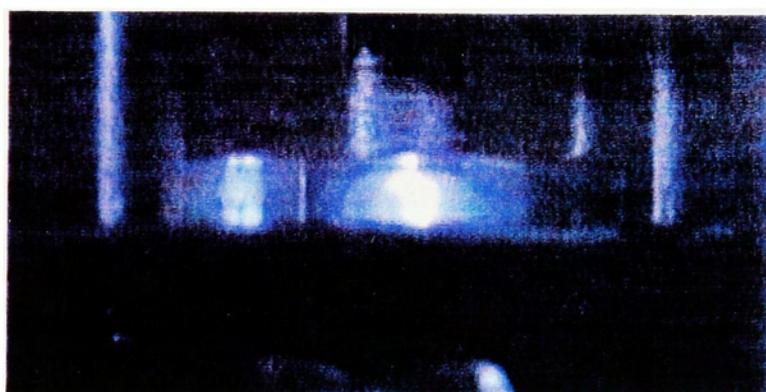
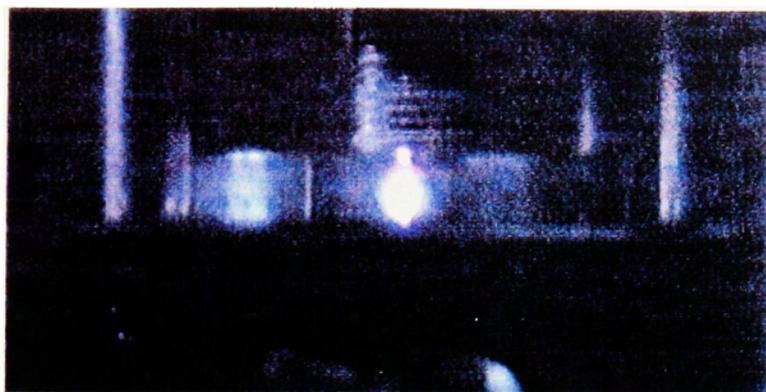


図 8 アクリルヘッドによる燃焼写真
2 サイクルエンジン、T D I 方式
(燃焼室横方向から撮影)

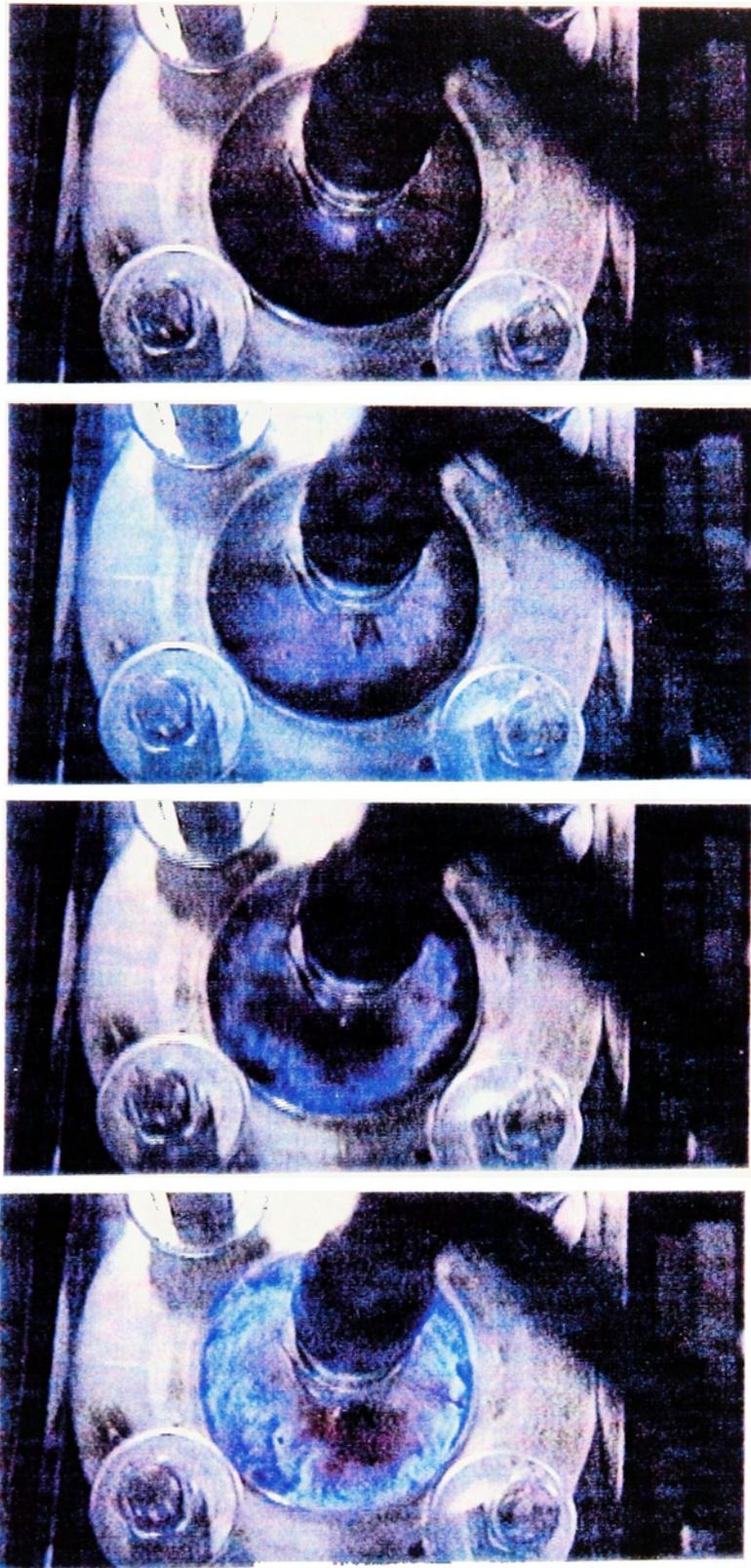


図 9 アクリルヘッドによる燃焼写真
2 サイクルエンジン、T D I 方式
(燃焼室上部から撮影)

§ 3. 無負荷運転性能

3.1. 無負荷運転時の燃焼圧力変動の比較

点火方式の変更による定性的な違いは、その無負荷運転時の回転音の違いにあった。しかも同一の運転条件において回転速度が10～20%上昇する。そこでシリンダヘッドに圧力ピックアップを取り付け、無負荷運転時の燃焼圧力の変動測定を行った。

本来2サイクルエンジンの無負荷運転は、燃焼状態としては非常に不安定であり、その圧力変動も大きい⁽¹⁾。

図10は、両点火方式での圧力変動を示したものであるが、これからもTDI方式による運転では最高燃焼圧力

P_{MAX} の変動が少ないことがわかる。即ち、従来の点火方式に比べてTDI点火方式は無負荷運転時において、より安定した燃焼が行えることがわかった。

3.2. 無負荷回転速度の比較

同一の点火時期および負荷条件下であるならば、エンジン運転時の燃焼時間の短縮はエンジン回転数の上昇となって現れる。そこで2サイクル機関を使用して点火方式の違いによるエンジン無負荷回転速度の比較を行った。

実験方法として混合気は量論値（空気過剰率： $\lambda = 1$ ）で、スロットル開度をほぼ全閉状態に固定し、点火時期とTDI方式ではスパークギャップを変えながら、エンジン回転速度の測定を行った。

本実験装置において使用しているような空冷エンジン

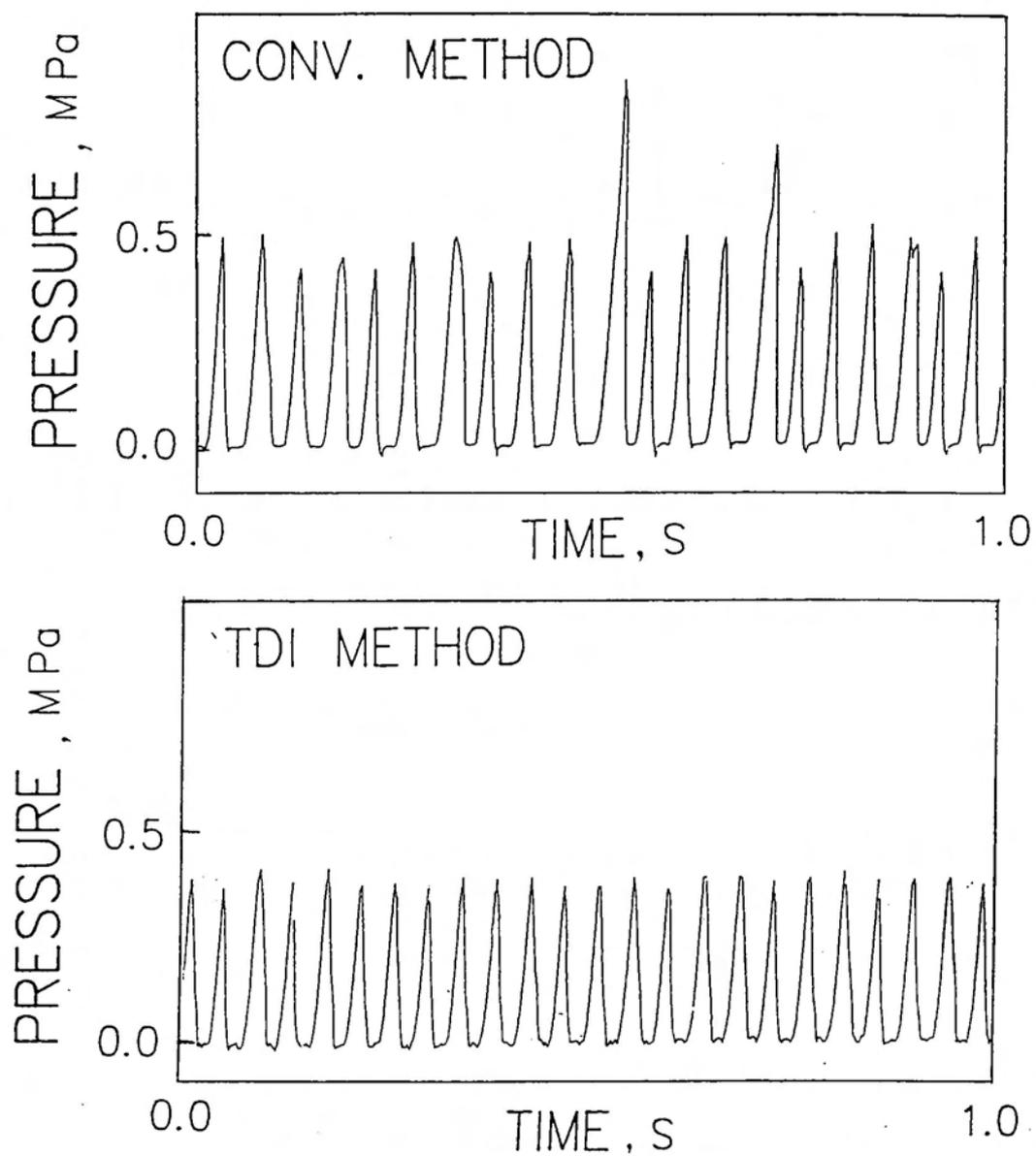


図 10 無負荷運転時の燃焼圧力変動の比較
2 サイクルエンジン
(上：従来方式 下：TDI方式)

では、特に無負荷運転の場合では冷却状態が一定せずエンジンの回転変動が著しいとされるが、本実験では回転変動の中心をその代表回転速度として比較を行った。なお、点火方式の変更はプラグの交換だけで簡単に行えるので、時間経過によるエンジン冷却は考慮する必要はなく、回転速度の再現性を確認しながら比較を行った。

図 11 は、その回転速度の変化を示したものである。点火時期を進めるにつれて回転速度も上昇するが、いずれの点火時期においても T D I 方式の方が従来方式より回転速度が上回っていることがわかる。また、T D I 方式ではその放電ギャップの拡大によって回転速度が高くなっており、それだけ燃焼期間が短縮されていることを意味する。

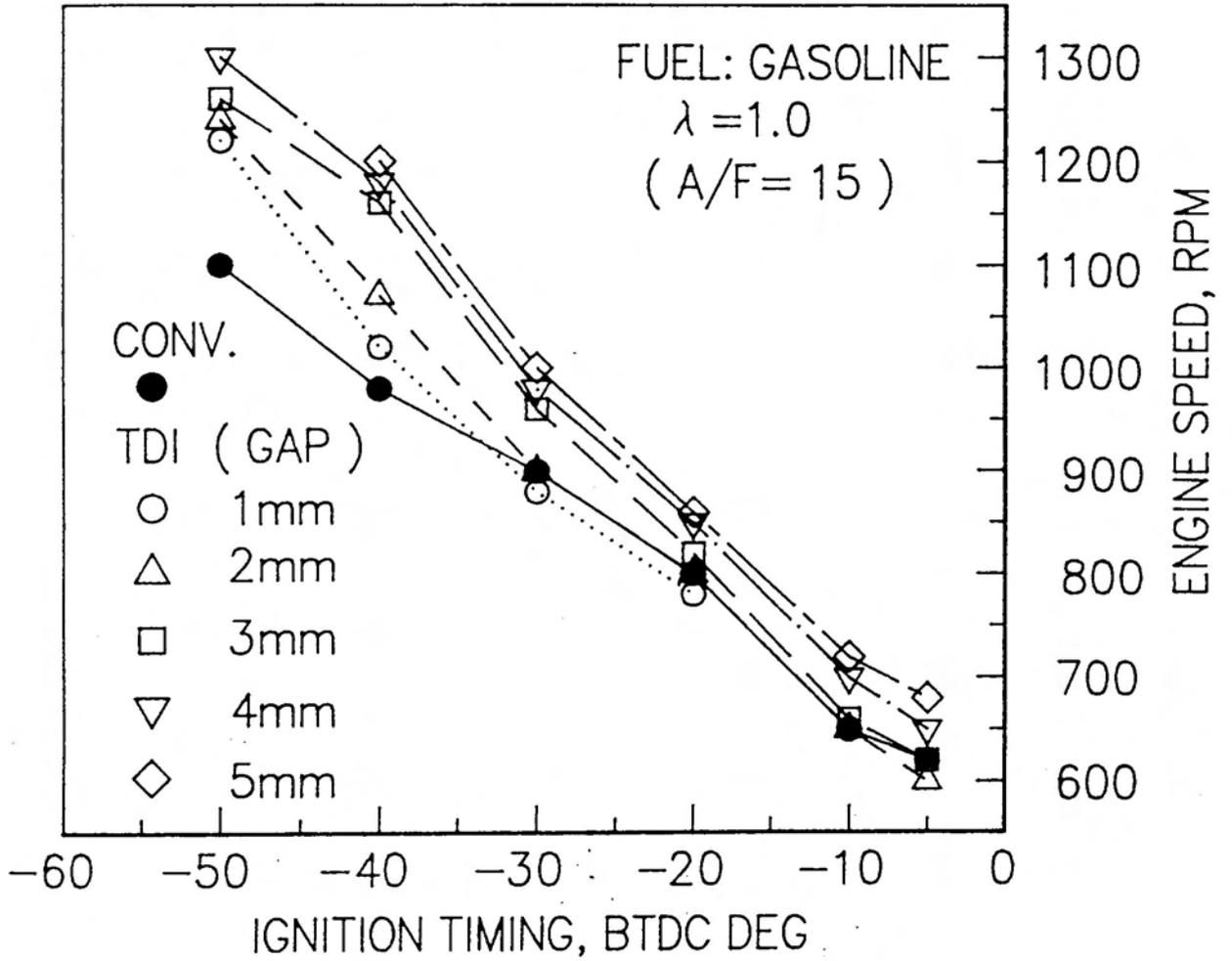


図 11 無負荷運転時の回転速度比較
 (2サイクルエンジン、ガソリン)

3.3. 無負荷運転限界の比較

点火方式変更によって期待される効果の一つに着火性の向上が考えられる。実機運転結果による着火性の評価の方法として、燃料希薄もしくは燃料過濃によるエンジンストールが起こる時点を運転限界と考え、点火方式の変更による限界比較を行った。無負荷時のエンジン回転限界はフライホイールの回転モーメントに依存するが、今回の実験ではあくまでも点火方式の違いによる比較を行ったものであり、無負荷運転条件としては同一である。

その比較方法として点火時期を固定したまま、まず空気過剰率を $\lambda = 1$ より希薄側 ($\lambda > 1$) に、また過濃側 ($\lambda < 1$) に変えながら運転限界を調べた。なお、T D I方式では放電ギャップの違いによる比較も同時に行った。

図12は、2サイクルエンジン無負荷運転時の限界を示したものである。同一の点火時期 (BTDC 40 DEG)において、破線および実線で示した従来方式の希薄、過濃側限界値よりもT D I方式の方が拡大しており、着火性が向上していることを示している。また、T D I方式でのギャップ変更による限界値の違いとしては、ギャップを広くするほど限界値が拡大していることがわかる。この結果からギャップの拡大は燃料過濃、希薄における燃焼の安定化に効果があることが分かった。

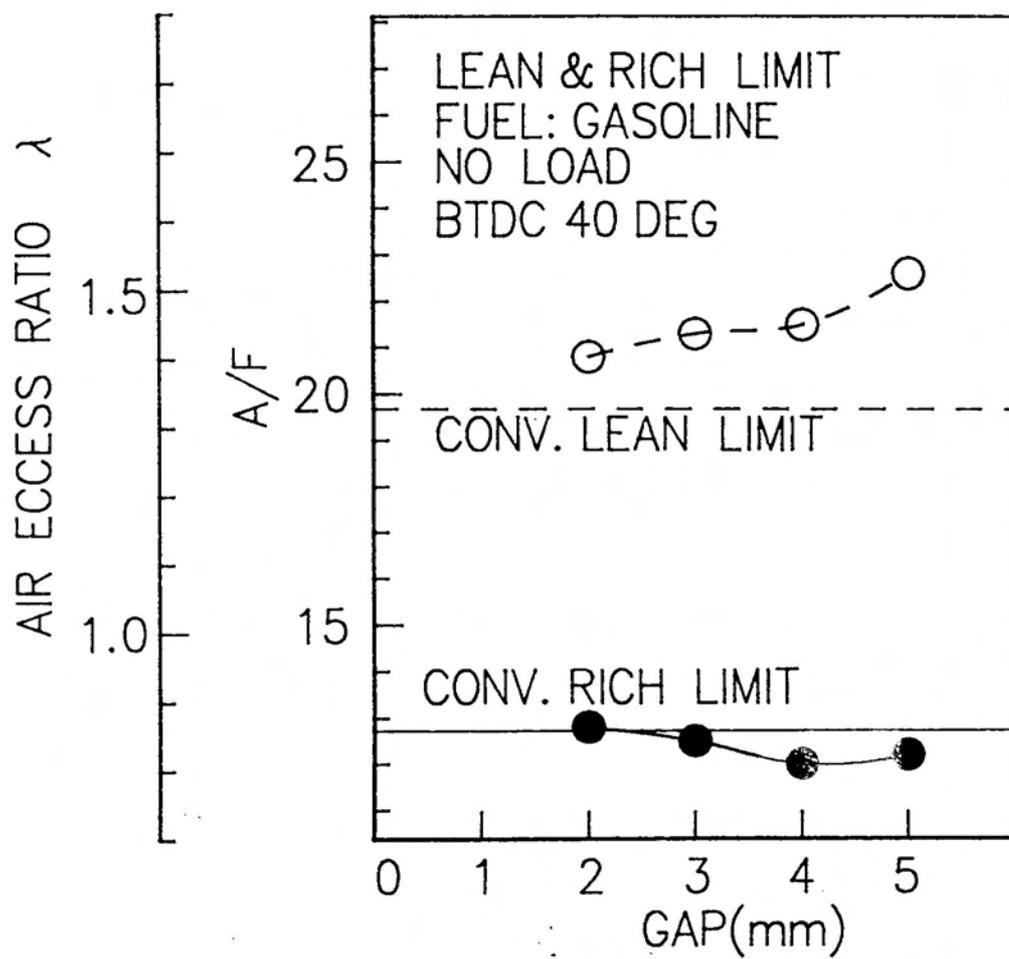


図 12 無負荷時の希薄、過濃運転限界比較
(2サイクルエンジン、ガソリン)

§ 4. 排出ガス特性

2サイクルエンジンの無負荷運転において、点火方式の違いによって排出ガスにどのような影響が現れるかを調べるために、排気ポート直後の排出ガスの測定を行った。

両点火方式によるエンジンの運転条件は、点火時期：BTDC 30 DEG、エンジン回転速度：1000 RPMの無負荷運転としている。なお、2サイクルエンジンではガソリンを燃料とするため燃料・空気の混合比を空燃比（A / F）で表記している。

4.1. NO_xの排出

NO_xの測定は、常圧式化学発光法によるNO_x分析計を用いて、測定用スリーブからサンプリング・チューブで排出ガスを導入して行った。

測定においては点火方式の違いにより、A / F値を変更しながらサンプリングを行った。図13は両点火方式における測定結果を示したものである。

今回の実験ではNO_xの発生は全体的に100 ppm前後と少なく、点火方式の変更による顕著な効果はみられなかった。この理由として、供試機関が2サイクル火花点火機関であることから、掃気行程による排出ガスの希釈および内部EGR効果により、本来その発生量は低いこと⁽²⁾、さらに今回の実験では圧縮圧力が低く、燃焼温度も低いアイドル運転に限定しているためにNO_x

の発生が抑制されたものと考えられる。

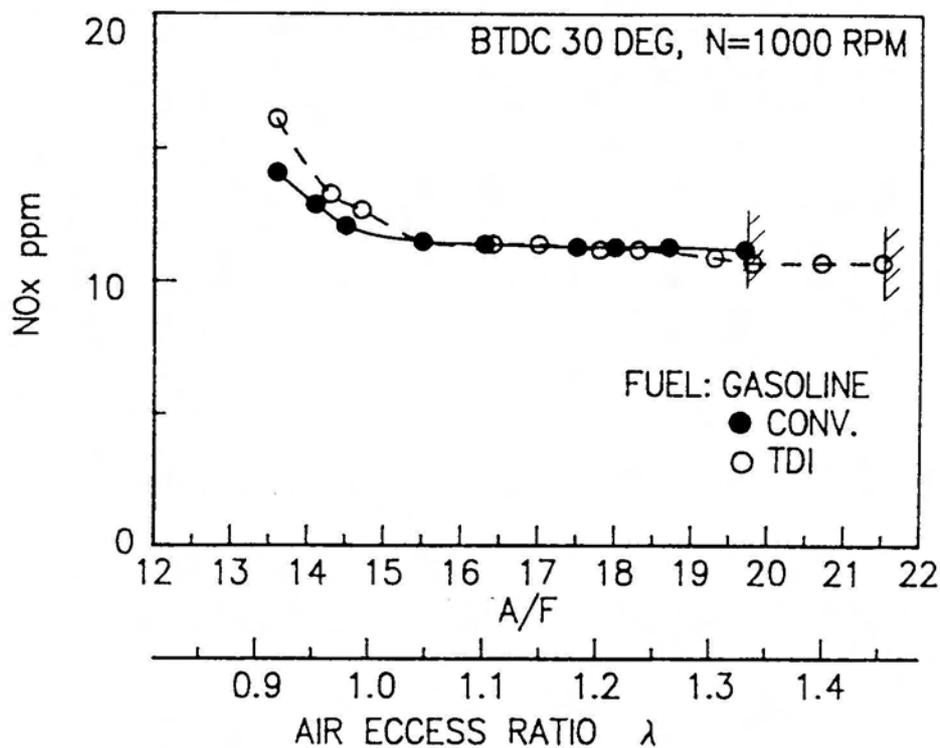


図 13 NO_x 排出量測定結果
(ハッチングは希薄運転限界を示す。)

4.2. HC の排出

二サイクル火花点火機関は、掃気時の新気の吹き抜け作用によって、四サイクル機関と比べて、HCの排出が非常に多い⁽²⁾とされる。そこで、点火方式の変更によってHCの排出がどの程度改善されるか、実験を行って考察した。

HCの測定は、測定用スリーブから排出ガスをサンプリングし、ガスクロマトグラフ(FID)によって分析

した。その測定結果を図14に示す。

今回の実験結果から、TDI方式による効果としてHCの排出量は、A/F値が小さい燃料過濃域では従来方式とほぼ同じである。しかしながら、特筆すべき点として、A/F値が大きい燃料希薄域において、依然その排出量が低いことがある。本来、火花点火機関の燃料希薄域におけるHCの発生量は、希薄混合気によるミス着火によって増加する傾向がみられるが、今回の点火方式は着火性が良好であり、その結果HCの低減に寄与すると考えられる。

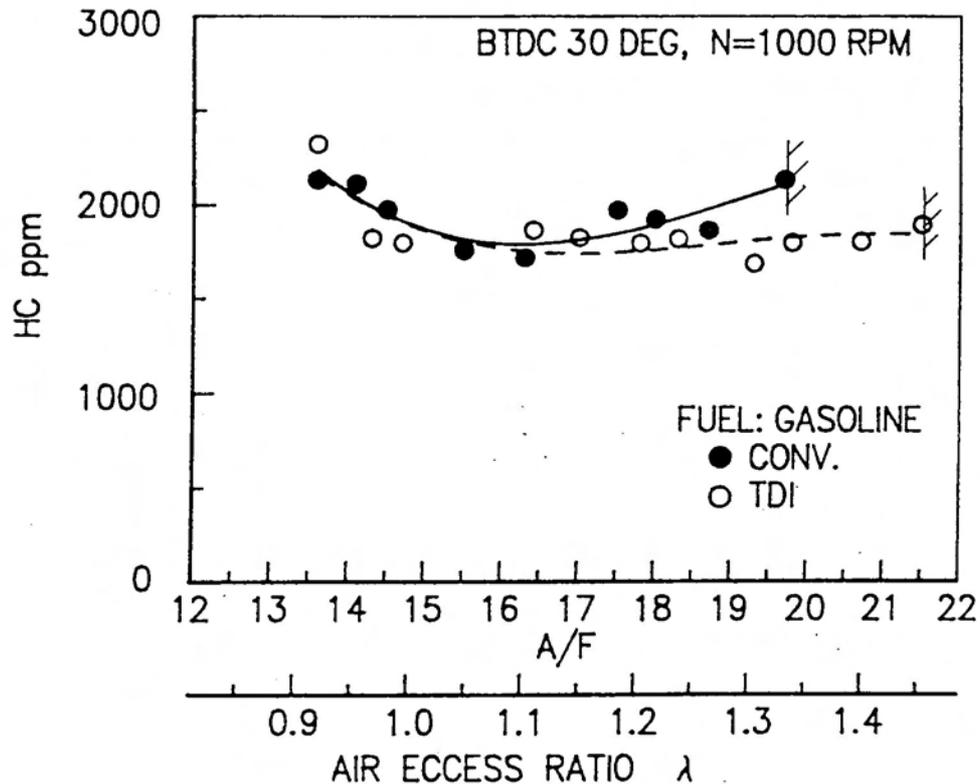


図 14 HC 排出量測定結果
(ハッチングは希薄運転限界を示す。)

4.3. COの排出

燃料希薄域の燃焼によって、必然的にCOの排出が低減されるであろうことは容易に推測できる。しかし、実際の運転では、燃料希薄域での未燃、ないしは不完全燃焼が生ずるためCOの排出は増加する⁽²⁾傾向にある。今回のTDI点火方式を採用することによって、前述のように、燃料希薄域での着火性に優れていることから、COの排出低減に効果があると思われる。

この効果について確認するために、排出ガス中のCOの測定を行った。測定はNO_x、HCと同様に測定用スリーブからサンプリングし、非分散赤外線分析計（NDIR）を用いて行った。その測定結果を図15に示す。TDI方式では、従来方式と同程度の排出量か若干の低減がみられるにとどまったが、燃料希薄域での不完全燃焼によるCO増加はみうけられなかった。

2サイクルエンジンにおけるTDI方式への点火方式変更は、無負荷運転条件ということもあって排出ガスに及ぼす効果が顕著には現れていない結果となったが、燃料希薄域での安定した無負荷運転が実現され、それだけHC、COの低減が可能であると考えられる。

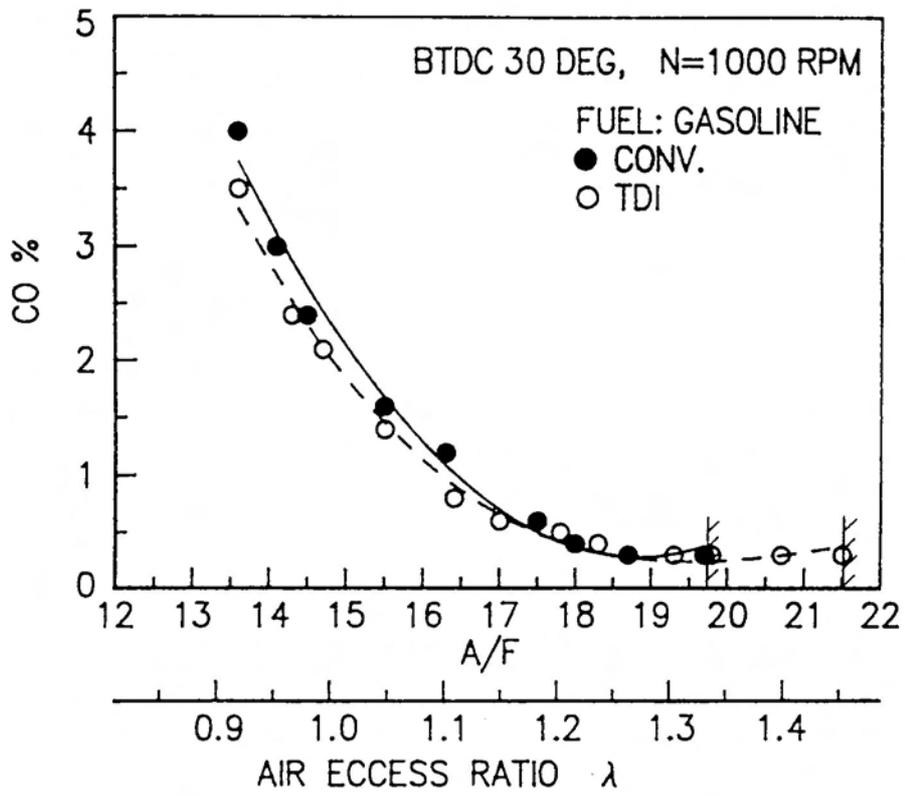


図 15 CO 排出量測定結果
(ハッチングは希薄運転限界を示す。)

第 VI 章 実 験 2 .
(天 然 ガ ス エ ン ジ ン)

第 VI 章 実 験 2. (天然ガスエンジン)

4 サイクルサイドバルブエンジンでは、天然ガスを燃料とし、点火方式の変更を行いながら無負荷運転および負荷運転時の実験を行った。

なお、負荷装置としては電気動力計を使用した。

§ 1. 実 験 装 置

天然ガスエンジンとして使用した機関の主要諸元を表 5 に示す。

4 サイクルエンジンにおける T D I 点火方式への構造

表 5 供試エンジン諸元表

Engine Type	4Stroke G150 (MITUBISHI)
Number of Cylinders	1
Displacement (mL)	192
Stroke (mm)	53
Bore (mm)	68
Compression Ratio	6.2

変更としては、既製のシリンダヘッドからT D I専用プラグの取付位置を変更したアルミニウムヘッドを作製しこれを用いた。前述したように、天然ガスはその燃料特性としてのオクタン価が高いことから、圧縮比を上げ燃焼速度が遅いことによる機関の効率低下防止を図ろうとする⁽¹⁾。しかし今回のサイドバルブエンジンでは、バルブリフトのクリアランスの制限から燃焼室容積を小さくすることが難しく、ガソリンベースの圧縮比のままとした。

図16はそのヘッドと専用プラグを示したものである。

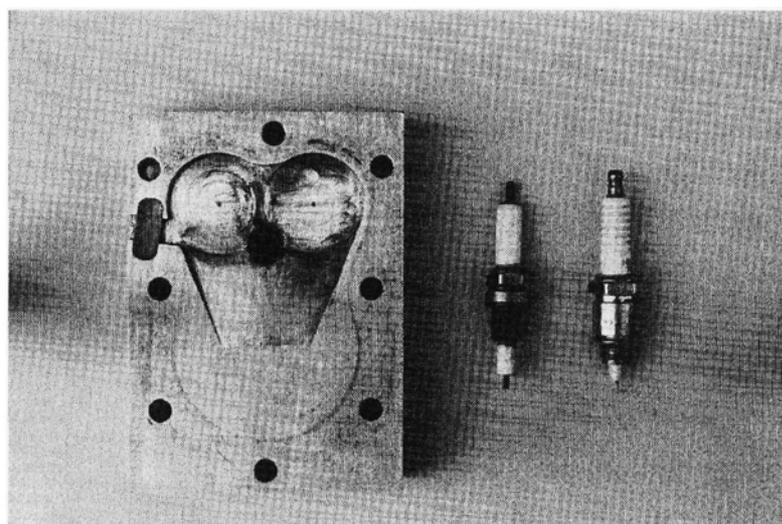


図 16 アルミニウムヘッドとT D I専用プラグ
(4サイクルエンジン用)

4 サイクル、サイドバルブエンジンへの T D I 点火方式の適用は図 15 に示すように、その燃焼室の構造および形状からシリンダヘッドに取り付ける専用プラグを吸排気バルブの真上になる位置に設置した。このことによって、中心電極から両バルブの間のシリンダブロック間に、燃焼室を縦断する放電火花により点火を行う方法を採用した。従って、放電ギャップは 2 サイクルエンジンでの適用とは異なり、図 17 に示す通り設定ギャップがそのまま実ギャップ G となっている。

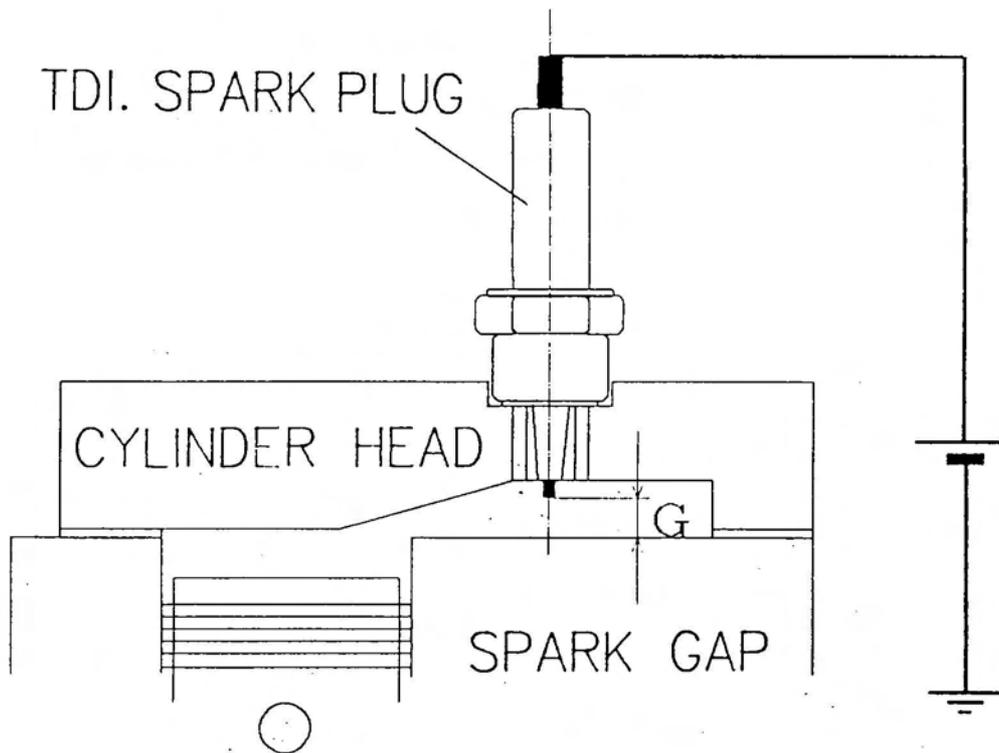


図 17 4 サイクルエンジンにおける放電ギャップ

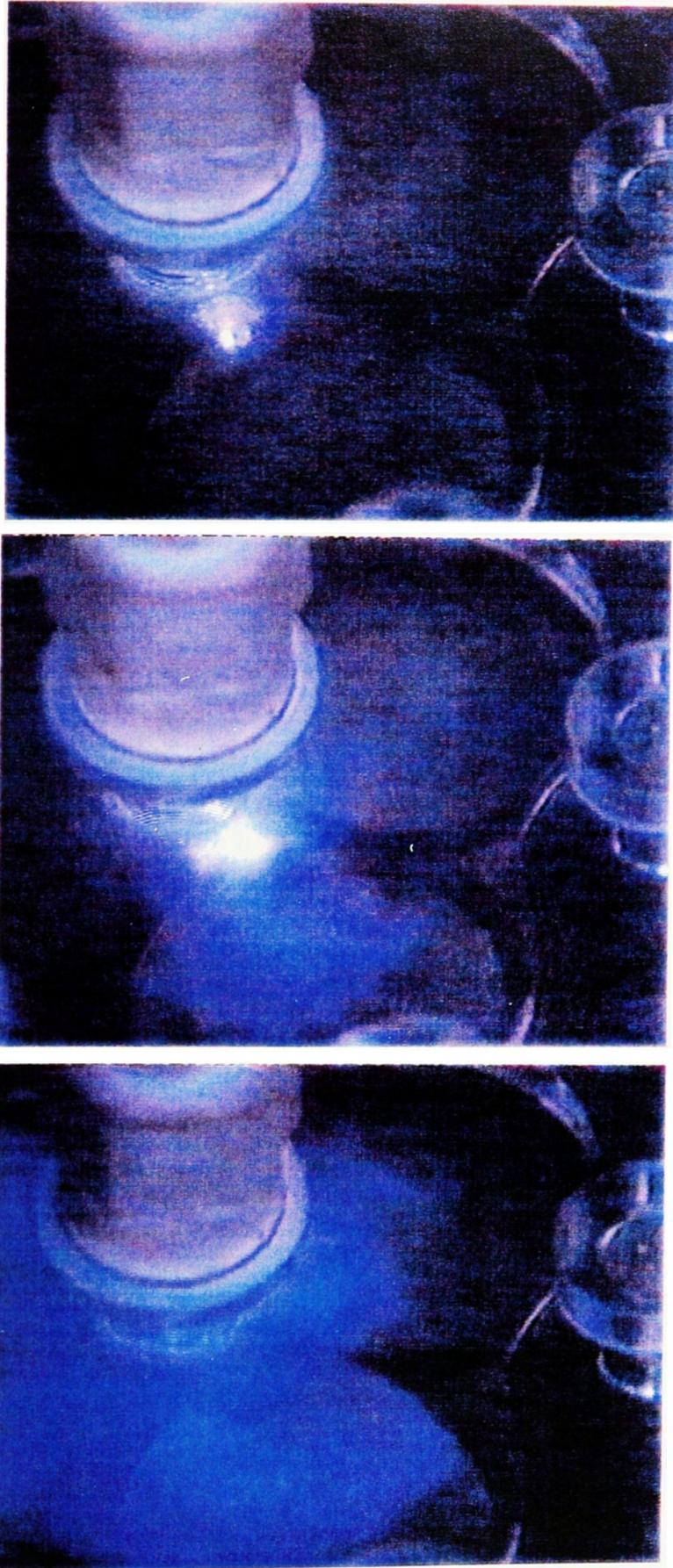


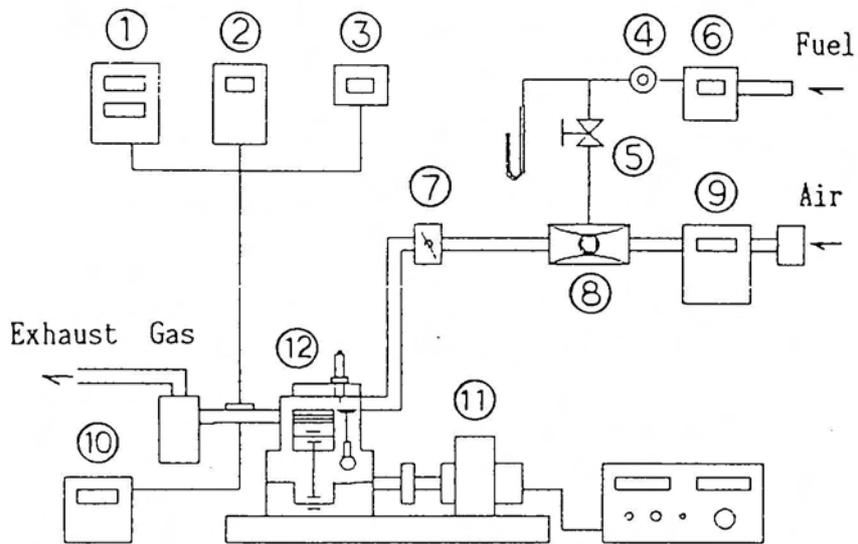
図 18 アクリルヘッドによる燃焼写真
4サイクルエンジン
(燃焼室上部から撮影)

なおギャップの変更は、プラグとシリンダヘッド間に調整用のシムを敷きながら行った。

高電圧を供給する高電圧発生装置は、2サイクルエンジンで使用したセミトランジスタ・イグナイタおよびイグニッションコイルと同一のものを使用している。従ってモータリング試験でのギャップによる放電限界は2～5 mmであった。

4サイクルエンジンにおいてもファイアリングの確認を行うため、アクリル製のシリンダヘッドを作製した。図18はそのアクリルヘッドによる無負荷運転時の燃焼写真を示したものである。

図19に4サイクルエンジンの負荷実験装置を示す。



1	HC,CO-Meter	7	Throttle-Valve
2	NOx-Meter	8	Venturi-Mixer
3	CO ₂ -Meter	9	Air-Flow-Meter
4	Zero-Governor	10	λ -Meter
5	Needle-Valve	11	Dynamometer
6	Fuel-Flow-Meter	12	Engine

図 19 実 験 装 置

(天然ガス：CNG、4サイクルエンジン)

§ 2 無負荷運転性能

点火時期および負荷条件が同一であるならば、エンジン運転時の燃焼時間の短縮は、エンジン回転速度の上昇となって現れる。そこで、点火方式の違いによるエンジン無負荷運転性能の比較を行った。

2.1. 無負荷回転速度の比較

スロットル開度 5% に固定し、点火時期および T D I 方式ではスパークギャップを変えながら、天然ガスを燃料とした無負荷運転を行い、エンジン回転速度の測定を行った。図 20 は、天然ガス ($\lambda = 1.0$) での無負荷回転速度の測定結果を示している。

両方式において、点火時期を進めるほどエンジン回転速度は上昇し 35 度付近で最高回転となるが、T D I 方式ではいずれの点火時期においても回転速度が従来方式より上回っていることがわかる。また、T D I 方式ではその放電ギャップの拡大によって回転速度が高くなっており、それだけ燃焼期間が短縮されていることを意味する。

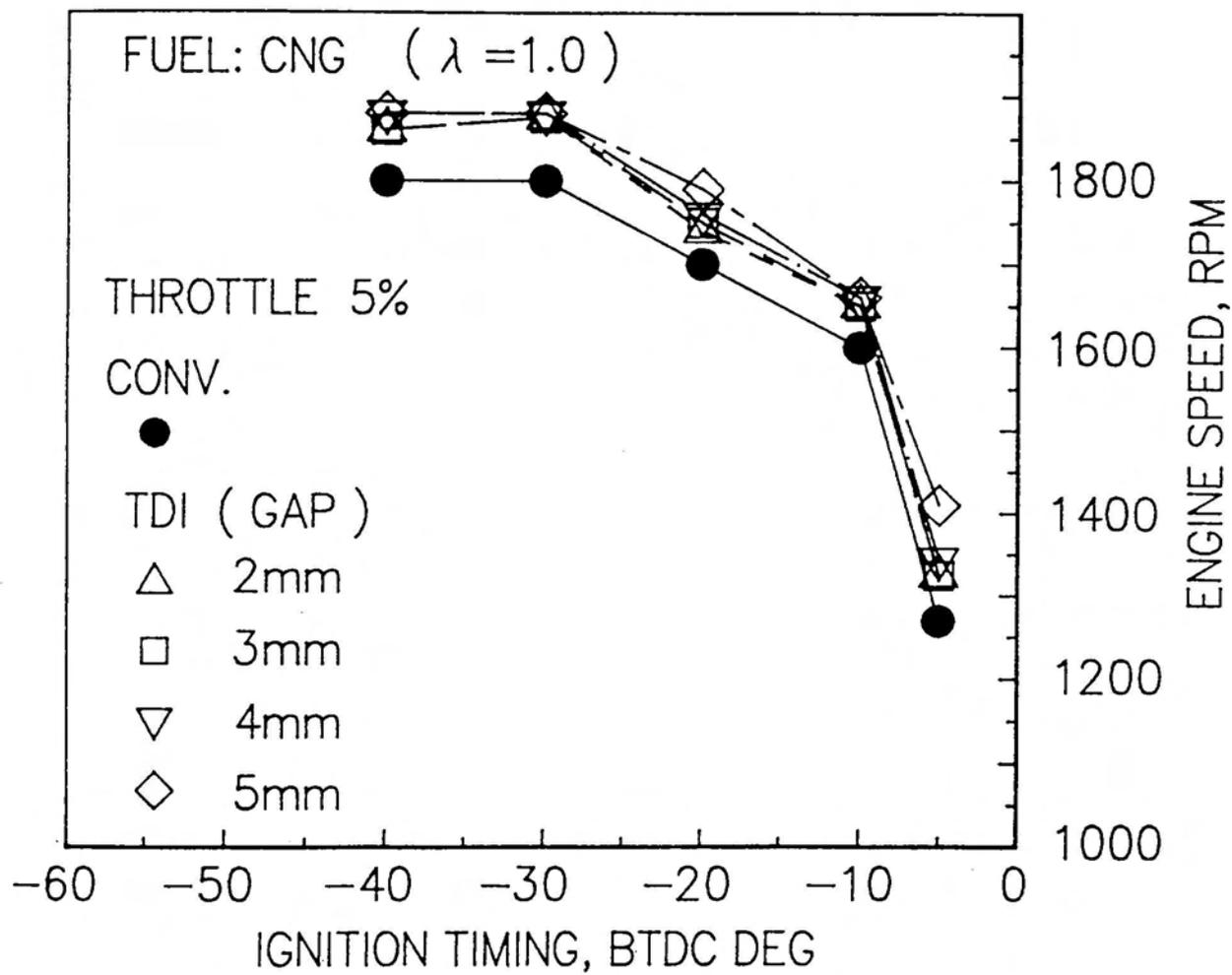


図 20 無負荷回転速度の比較

(CNG : $\lambda = 1.0$)

2.2. 無負荷運転限界の比較

本研究では希薄混合気に対する着火性を、実機運転結果による評価の仕方として燃料希薄によるエンジンストールが起こる時点を希薄燃焼限界と考え、点火方式変更による無負荷運転限界の比較を行った。その方法として、点火時期を変えながら、まず空気過剰率を $\lambda = 1$ より希薄側 ($\lambda > 1$) に、また過濃側 ($\lambda < 1$) に変えながらエンジンの無負荷試験を行い、運転限界の比較を行った。尚、T D I方式では放電ギャップの違いによる比較も同時に行った。

図 21 にその希薄側運転限界を示す。これによると、波線で示した従来方式の希薄燃焼限界値よりも T D I方式の方が希薄側にあり、それだけより希薄な混合気による運転が可能であることを示している。ギャップ変更による限界値の違いとしては、ギャップを広くするほど上限値が拡大しているが、3mmとした場合が最も拡大する傾向を示している。

図 22 は、過濃側での運転限界を比較したものであるが、興味深い結果として燃料過濃域での運転限界も広がることが確認された。このことは T D I方式がより着火性に優れていることを示している。

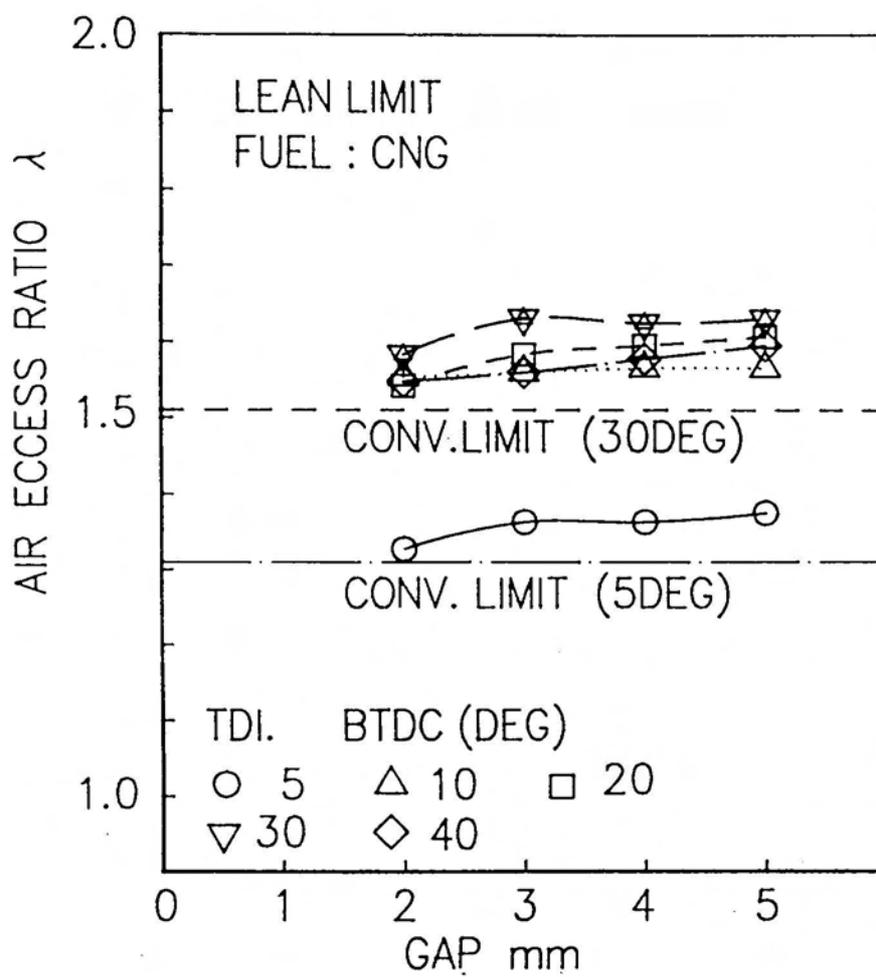


図 21 無負荷運転限界の比較

(C N G : 希薄限界)

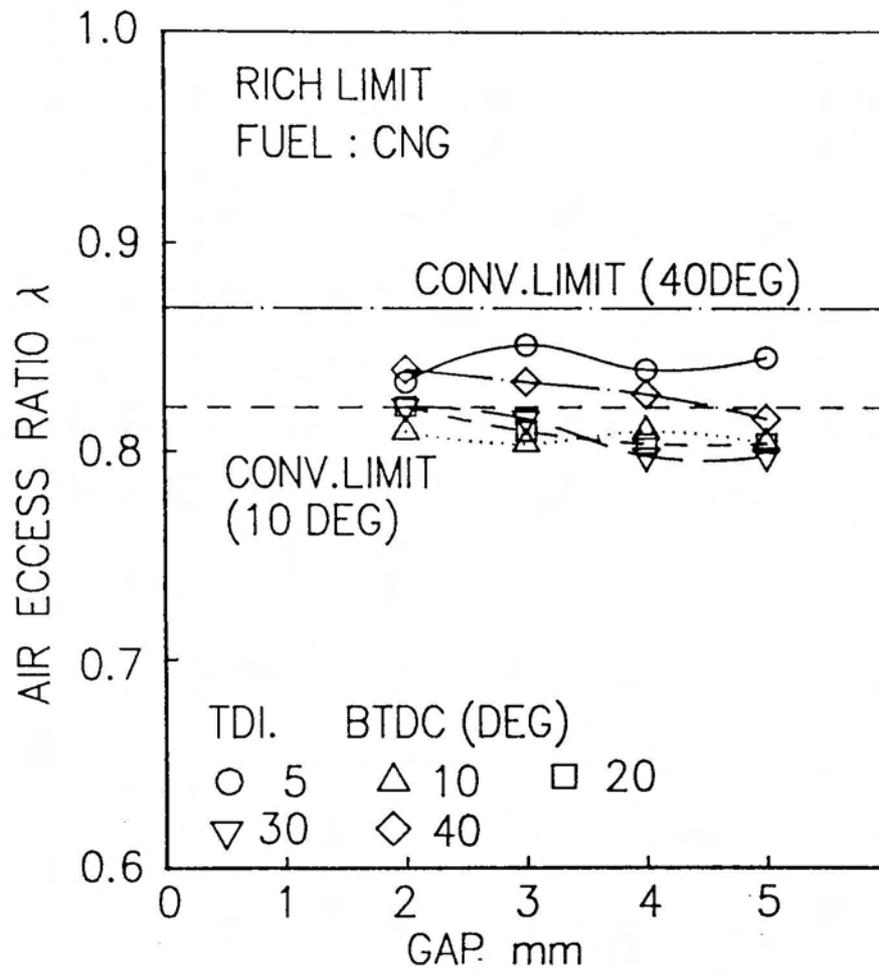


図 22 無負荷運転限界の比較

(C N G : 過濃限界)

2.3. 無負荷運転時の燃焼圧力変動比較

天然ガスは前述のように燃焼速度が遅く、2サイクルエンジンに比べ無負荷運転時の安定性が良いとされる4サイクルエンジンでも、天然ガスによる無負荷運転時には運転変動が考えられる。2サイクルエンジンでの実験において燃焼圧力変動の比較を行い、点火方式をTDI方式に変更することによって無負荷運転時の燃焼安定性に効果があることが確認されているが、今回の実験装置を用いた実験においてもその無負荷運転時での燃焼圧力変動の比較を行った。

図23はその様子を示した一例であるが、無負荷運転特有の不整燃焼が現れている。しかし従来方式に比べTDI方式ではその変動率は少なく、安定した無負荷運転が可能であることが分かる。

さらに、筒内圧の測定において燃焼時のP-t線図の比較を行った。図24は、その無負荷運転時（量論値： $\lambda = 1.0$ ）のP-t線図を示す。無負荷運転はスロットルバルブがほぼ全閉状態にあつて吸入効率の良くないことから最高燃焼圧力 P_{MAX} も大きくないが、点火方式の違いによる圧力上昇の差は確認できる。

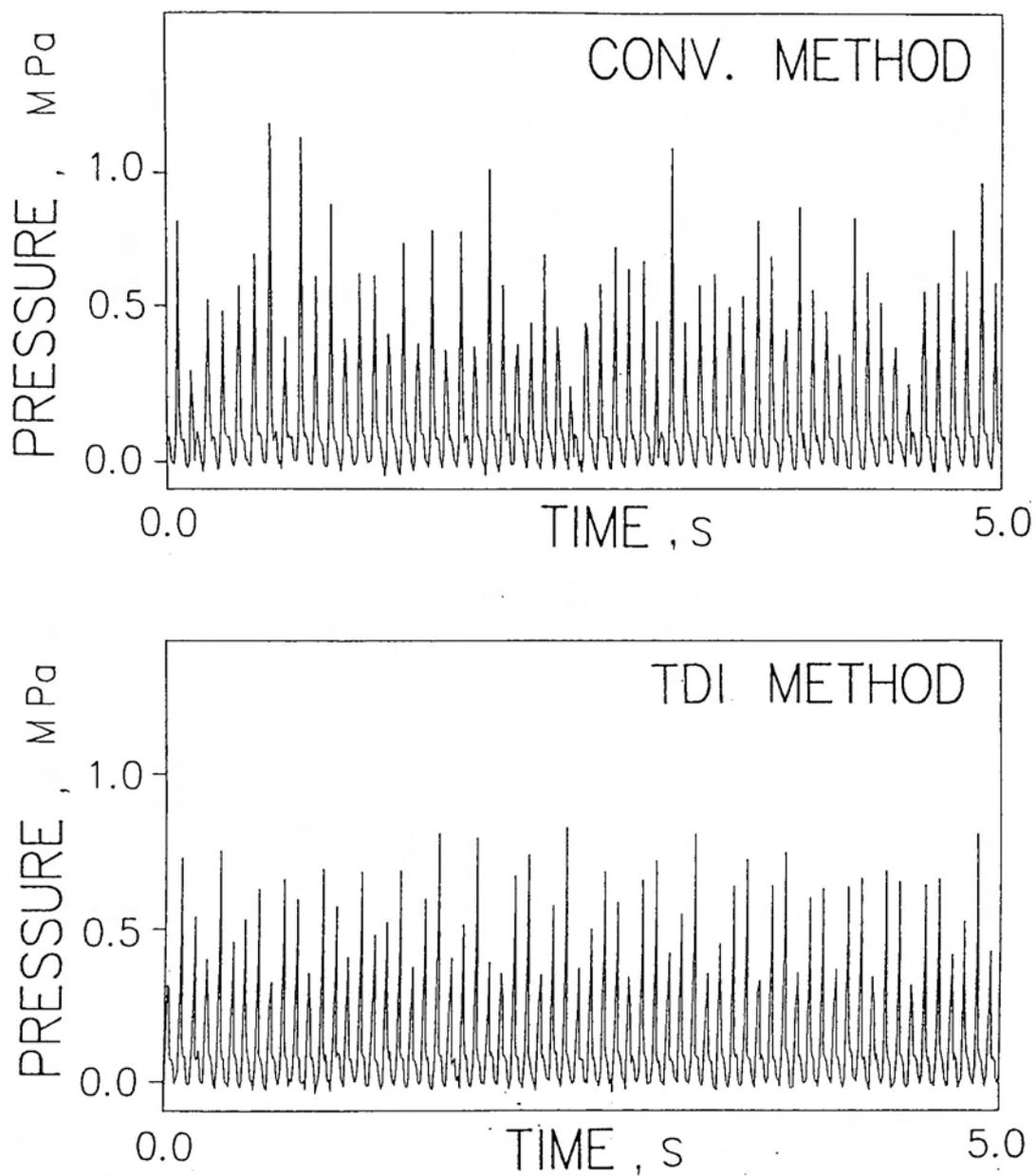


図 23 無負荷運転時の燃焼圧力変動比較
4 サイクルエンジン
(C N G : $\lambda = 1.0$)

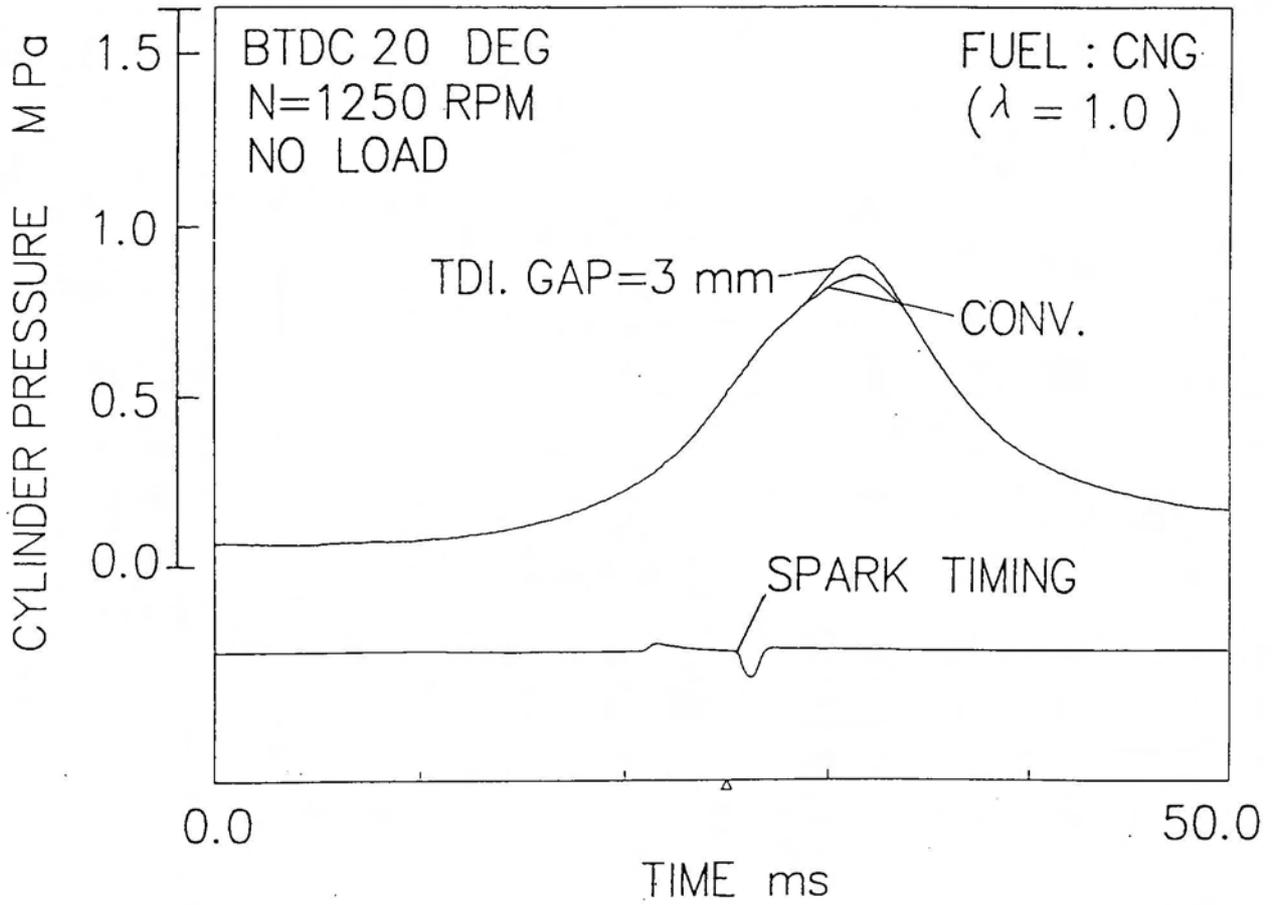


図 24 無負荷運転時 P - t 線図の比較
(C N G : $\lambda = 1.0$)

§ 3. 負荷運転性能

4 サイクルエンジンでは実験装置として電気動力計を設置し、これを用いた負荷運転を行った。

3.1. 半負荷運転限界の比較

部分負荷（半負荷）運転時についての希薄運転限界の様子を図25に示す。負荷の掛け方としては、電気動力計による定トルク制御を行い、無負荷試験と同様に燃料希薄によるエンジンストールの時点を希薄運転限界とした。なお、結果は点火時期を BTDC 20 DEG に固定して行ったものである。特に放電ギャップが 3mm の場合、入値で約 0.1 拡大されているが、それよりも広い場合と狭い場合では従来方式の限界値と大差はない。これは、今回の高電圧発生装置の能力に起因するものと考えられる。つまり無負荷時に比べギャップ拡大の効果が現れていないのは、負荷が加わりエンジン回転速度が高い運転状態であるため圧縮圧力が上昇し、現高電圧発生装置の起電力ではギャップの拡大によって放電しにくくなったためと考えられる。

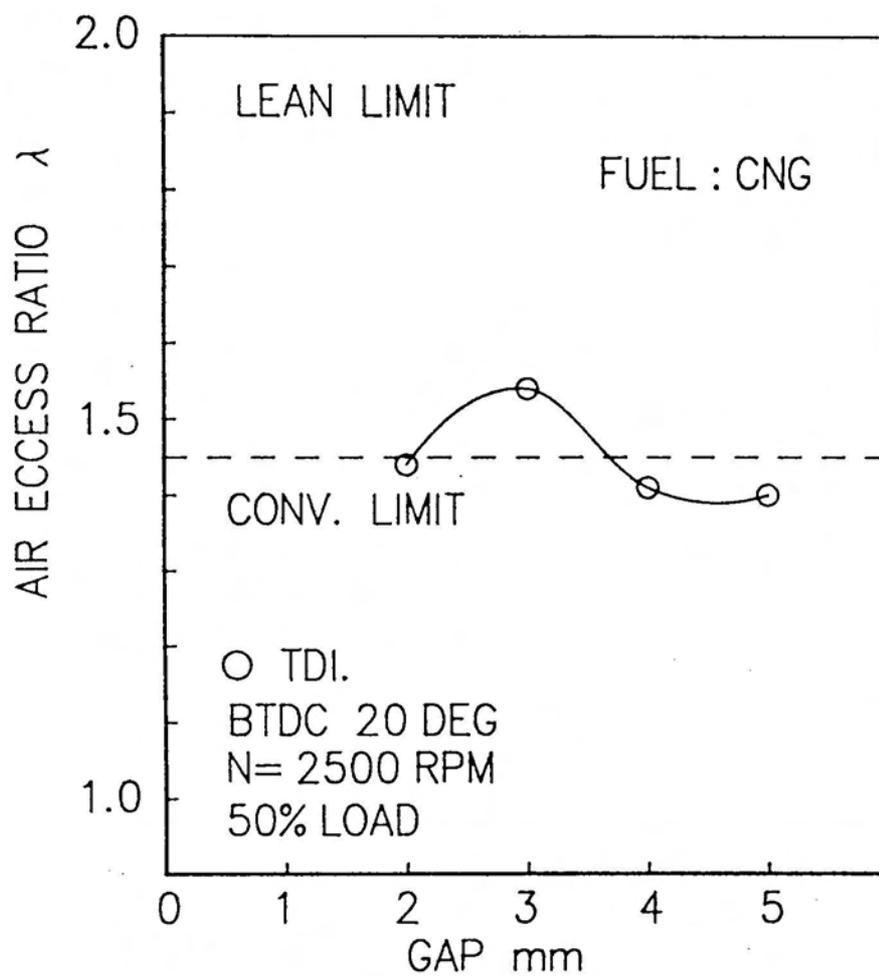


図 25 半負荷運転限界の比較
(燃料 : C N G)

3.2. 半負荷運転時 P-t 線図の比較

火花点火機関において、点火から最大燃焼圧力に至るまでの燃焼時間が短縮されることによって、機関効率の改善がはかれる。特に燃焼速度が遅いとされる天然ガスを燃料とし、さらにその希薄混合気による運転を行うためには燃焼速度をいかに速めるかが鍵となる。実機で、燃焼室内の燃焼速度の測定を厳密に行うのは難しいことから、これを確認する方法として、燃焼時の圧力上昇変化の比較を行った。

実験は、部分負荷の条件として、点火時期を BTDC 20 DEG、エンジン回転数 2500RPM、半負荷で行った。図 26 は、両点火方式での天然ガスの量論 ($\lambda = 1.0$) における部分負荷運転時の P-t 線図を示す。図より、点火方式の違いによる圧力上昇率の差が確認できる。この結果からも、TDI方式の適用によって燃焼速度が速くなっていることが確認できた。

図 27 は、天然ガスでの燃料希薄域 ($\lambda = 1.4$) における圧力上昇の違いを示したものである。圧力上昇率の差は量論の場合ほど大きくないが、TDI方式の効果が現れている。

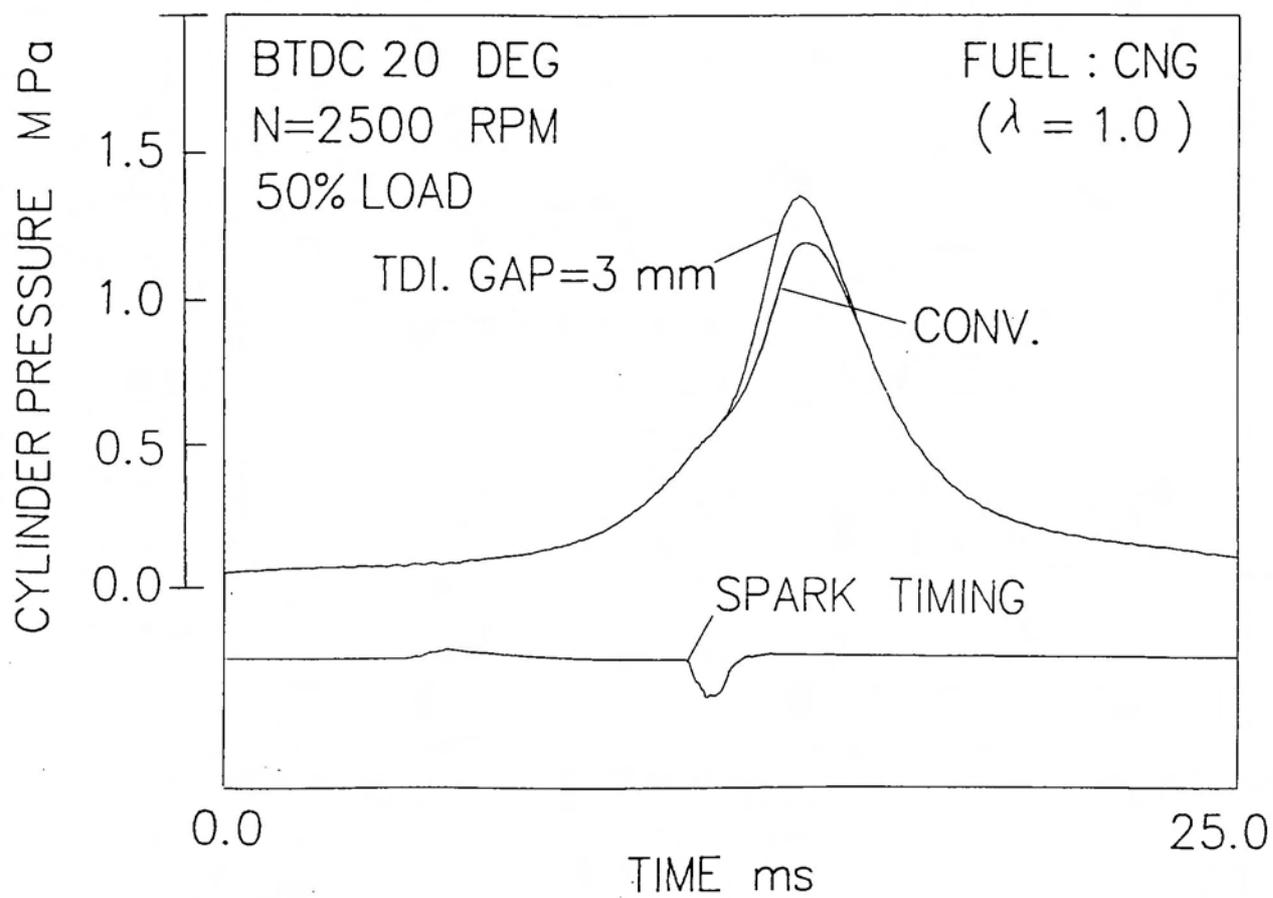


図 26 半負荷運転時 P - t 線図の比較
(C N G : $\lambda = 1.0$)

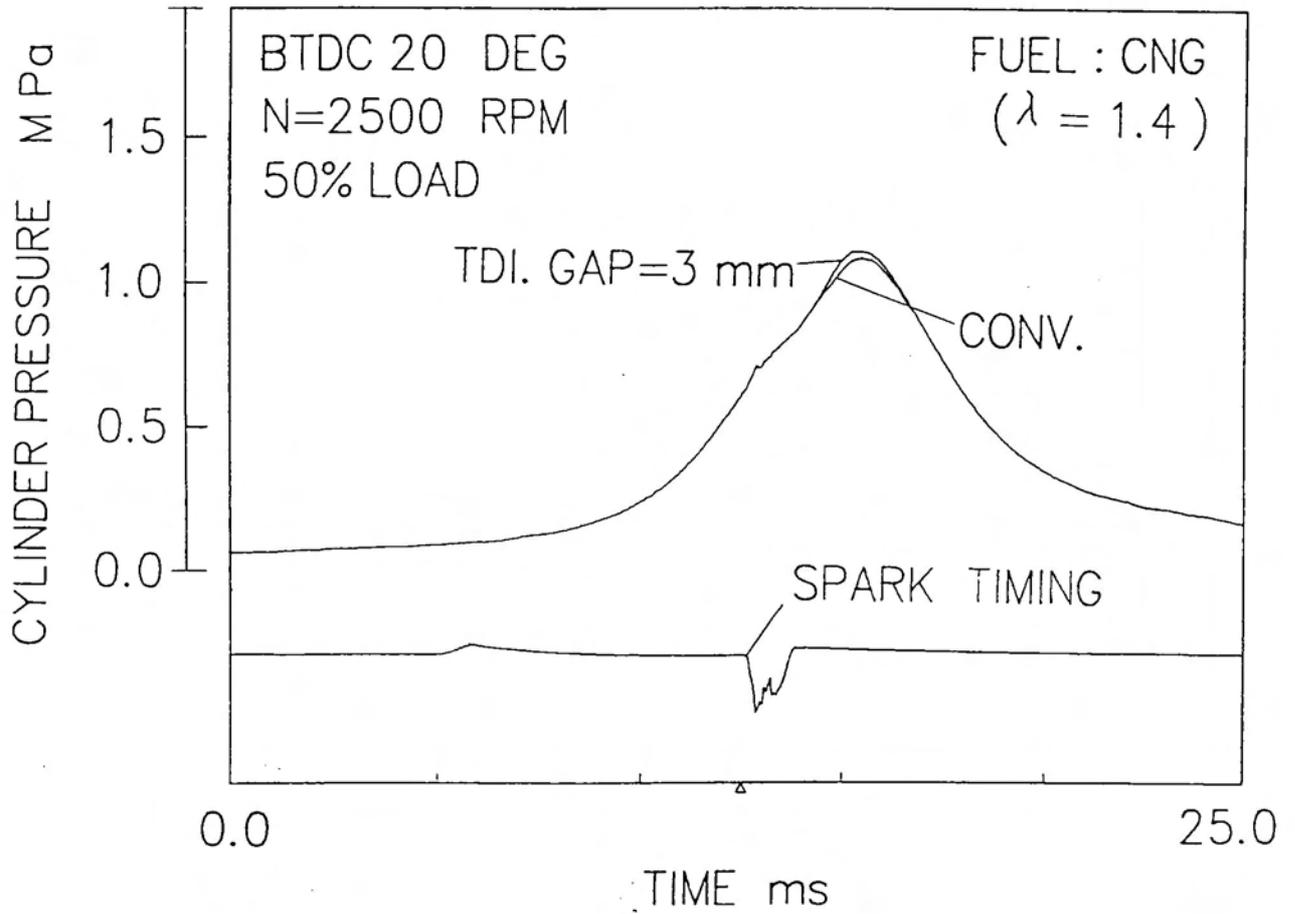


図 27 半負荷運転時 P - t 線図の比較
(C N G : $\lambda = 1.4$)

§ 4. 排出ガス特性

天然ガスはその燃料特性として、 CO_2 の排出が他の炭化水素系と比べて少ないことは第II章で述べた通りである。点火方式の変更が天然ガスを燃料とする火花点火機関の排出ガスにどのような影響を及ぼすのか興味深いところであるが、無負荷および負荷運転時の排出ガス測定比較を行い、点火方式との関連について考察を行った。

4.1. 無負荷運転時の排出ガス特性比較

スロットル開度5%の無負荷運転時の排出ガス測定結果を示す。図28は NO_x とHCについて点火方式の比較を行ったものである。

NO_x の排出については一般に、混合比が量論付近でその排出が最大となるが、TDI方式と従来方式の違いによる NO_x の排出量に顕著な差は認められない。この理由として、無負荷運転時であることから燃焼温度が低く、両者の差が現れなかったものと思われる。

HCについては、TDI方式では量論付近での排出量がやや少なく、燃料希薄域でも低減傾向を示しており燃焼の安定性が良いことを示している。

同じくCO、 CO_2 の排出結果を図29に示す。天然ガスはメタンを主成分とする炭化水素燃料であるから、その燃焼式から理論的にCO、 CO_2 の排出量は決まることになる。従って、燃料希薄域での不完全燃焼が防止されるならばCOの排出は抑制される。点火方式の変更に

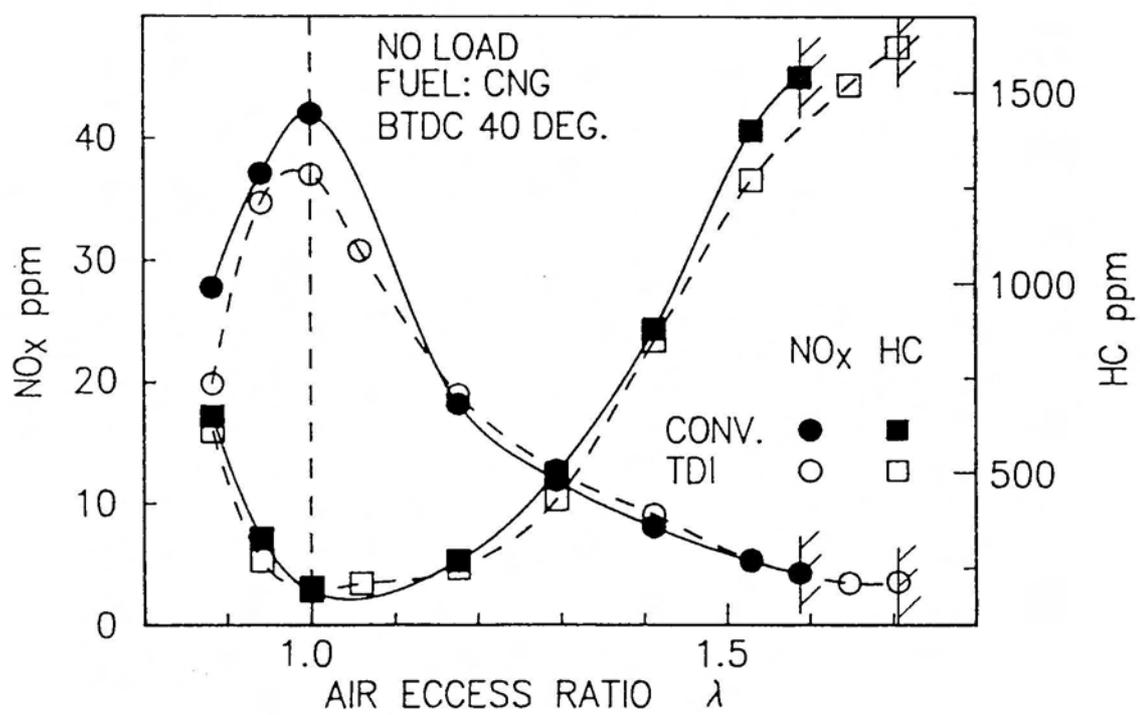


図 28 NO_x、HC の排出比較
(CNG: 無負荷運転時)

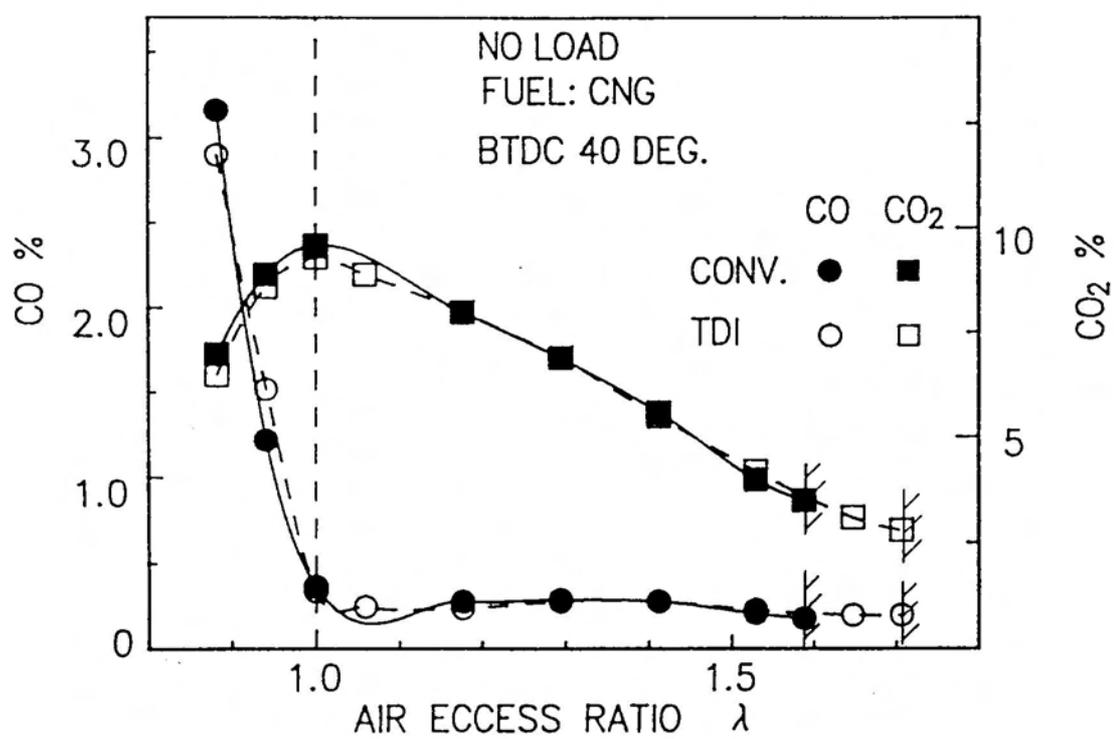


図 29 CO、CO₂ の排出比較
(CNG: 無負荷運転時)

よって希薄域側で安定した燃焼が行われ、さらにCOの抑制が期待される。

4.2. 負荷運転時の排出ガス特性比較

負荷運転時の排出ガス特性について、点火方式の変更と合わせて比較、検討を行った。

測定時の運転条件は前項と同じく、半負荷、エンジン回転数 = 2500 RPM、点火時期 : BTDC 20 DEG としている。図30は半負荷運転時の測定結果を示したものであるが、無負荷運転時の排出ガス測定結果との違いとして顕著であるのは、NO_xの排出である。これは負荷運転に起因する温度上昇と考えられる。

点火方式による比較としては、TDI方式では燃料希薄域での燃焼安定していることから、希薄側でのCO、HCの排出が少ない。しかしNO_xは従来方式に比べ約40%増加傾向を示している。

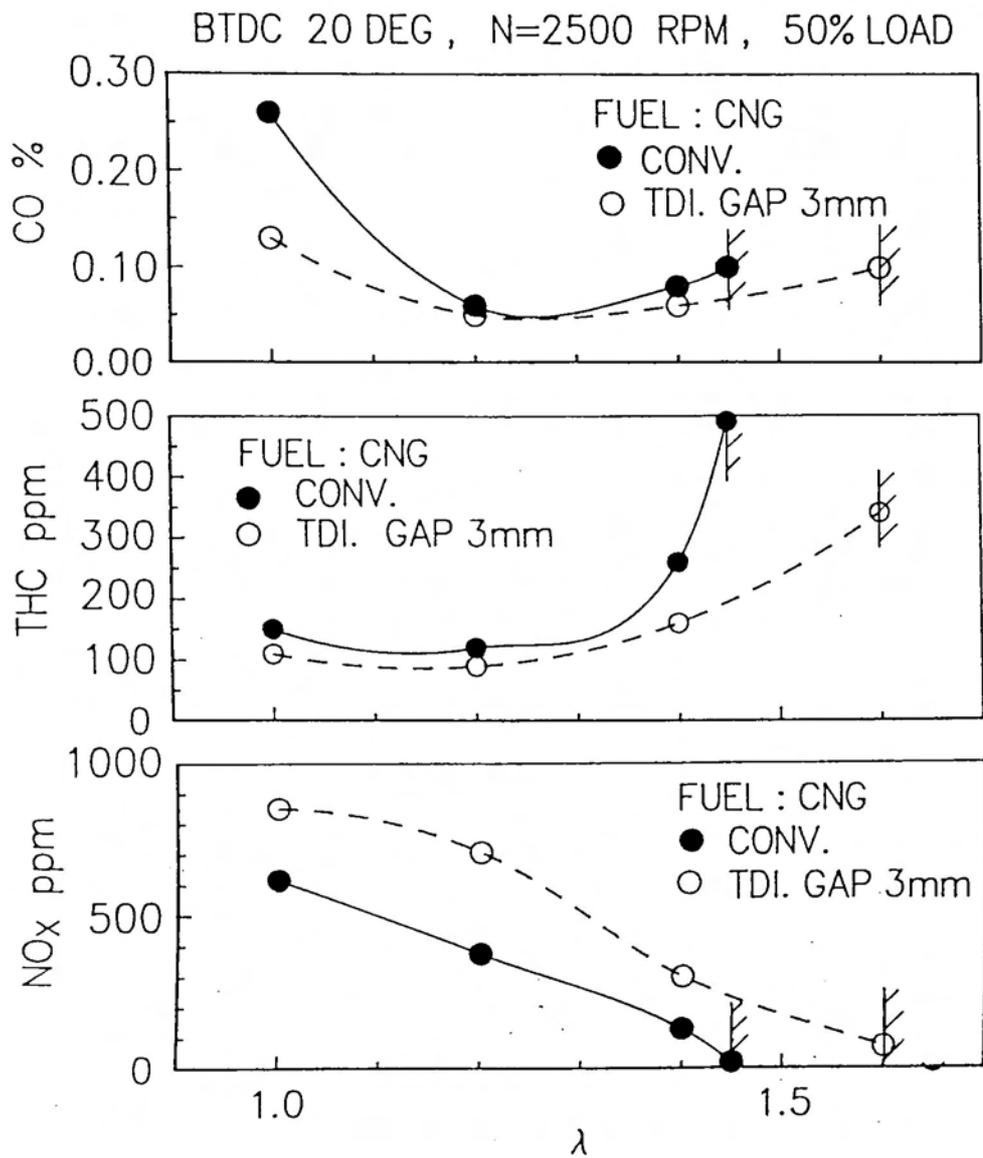


図 30 負荷運転時排出ガスの比較
(燃料 : C N G)

第 VII 章 水素添加 C N G による運転特性

第 VII 章 水素添加 C N G による運転特性

水素は可燃範囲が広く、気体燃料の中では最大の燃焼速度を有する。これを少量天然ガスに添加することで、特に希薄燃焼時の燃焼速度低下を防止できる可能性がある。そこで、今回はメタンに容積割合で水素を 20% 添加した圧縮天然ガスを準備して実験を行った。20% の水素添加は、メタンの層流燃焼速度を約 50% 増加できるが⁽¹⁾、混合気容積あたりの発熱量は 0.2% 程度の低下でしかないので出力の差の原因とはならない。実際のエンジン燃焼室内での燃焼は乱流燃焼であるが、水素の添加によって層流燃焼速度が速くなることで乱流時の燃焼速度も速くなると考えられる。さらに 20% の水素添加によって、常温、大気圧下の可燃限界は、ルシャトリエの式によれば⁽²⁾、メタンのみの場合と比べ、その下限値が約 6% 拡大することから、燃料希薄側での燃焼安定性が幾分改善されることも考えられる。

本研究ではこの水素添加天然ガスによる運転を行い、その燃焼促進効果についても点火方式の変更の効果と合わせて比較を行った。

§ 1. 無負荷運転性能

1.1. 無負荷回転速度比較

図 31 は水素添加天然ガスによる無負荷回転速度の測定

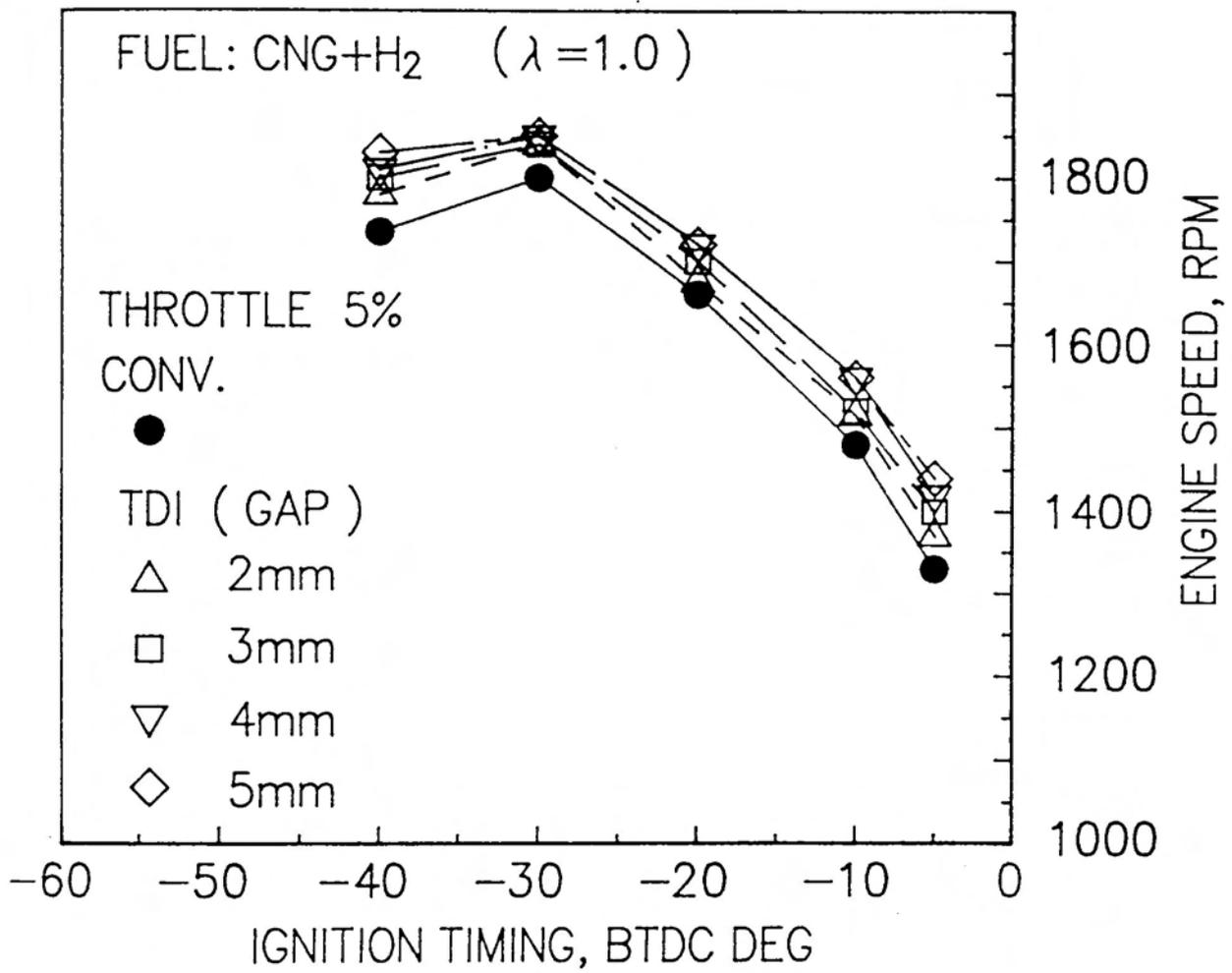


図 31 無負荷回転速度の比較
(水素添加CNG: $\lambda = 1.0$)

結果を示したものである。運転条件は、無添加天然ガスによる運転性能との比較を行うことから同じ条件で行った。実験結果からでは天然ガスのみの場合と比べて水素添加による回転上昇は顕著には現れていない。これは無負荷運転という燃焼状態としては不安定な状況であることから、水素添加の効果がはっきりと現れなかったものと思われる。しかし、点火方式の違いによる回転速度の差は明らかである。

1.2. 無負荷運転限界の比較

水素添加天然ガスによる無負荷運転限界の比較を行った。運転条件は実験2の天然ガスによる場合と同一条件で行っている。その実験結果を図32に示す。

天然ガスでの運転限界と同様、点火方式変更の効果が現れておりギャップの拡大によって希薄限界が拡大する傾向を示している。また、水素添加の特徴として従来の点火方式でも希薄限界が拡大しており、水素の添加は希薄燃焼限界の拡大に効果がある。

図33は燃料過濃側での運転限界を示しているが、やはり水素の添加によって燃料過濃側の限界も広くなることが分かる。このことは燃焼状態が不安定である希薄、過濃混合気での燃焼安定が期待される。

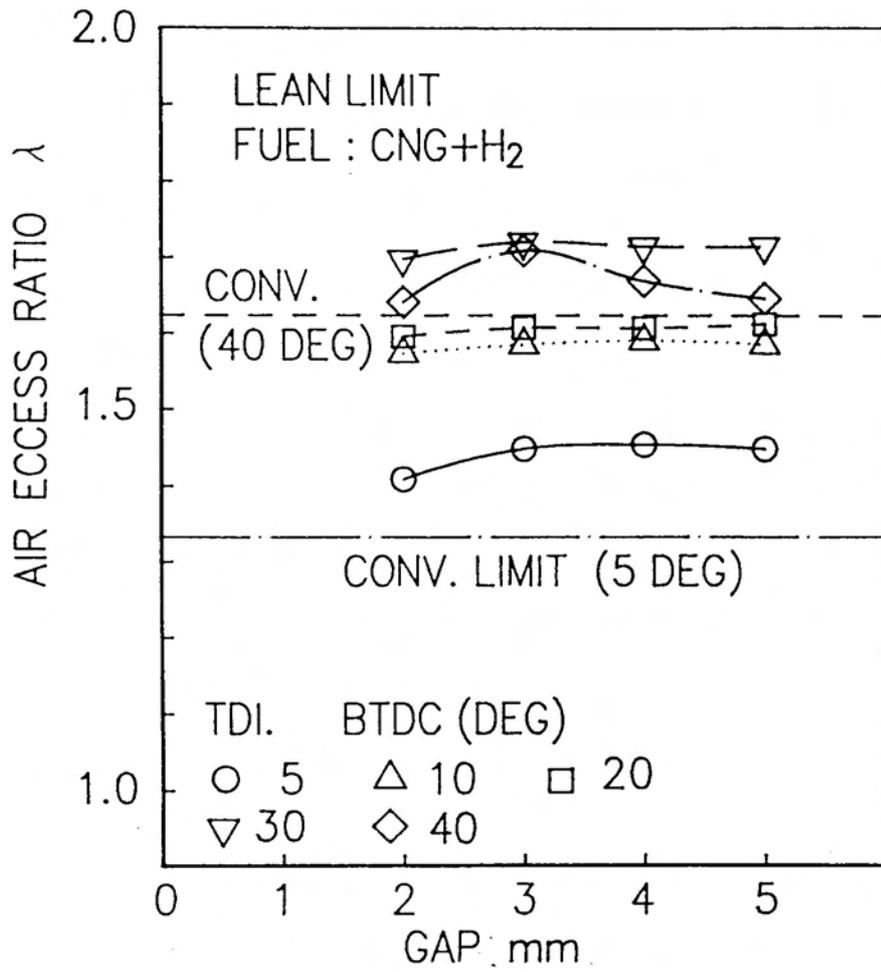


図 32 無負荷運転限界の比較
(水素添加 CNG : 希薄限界)

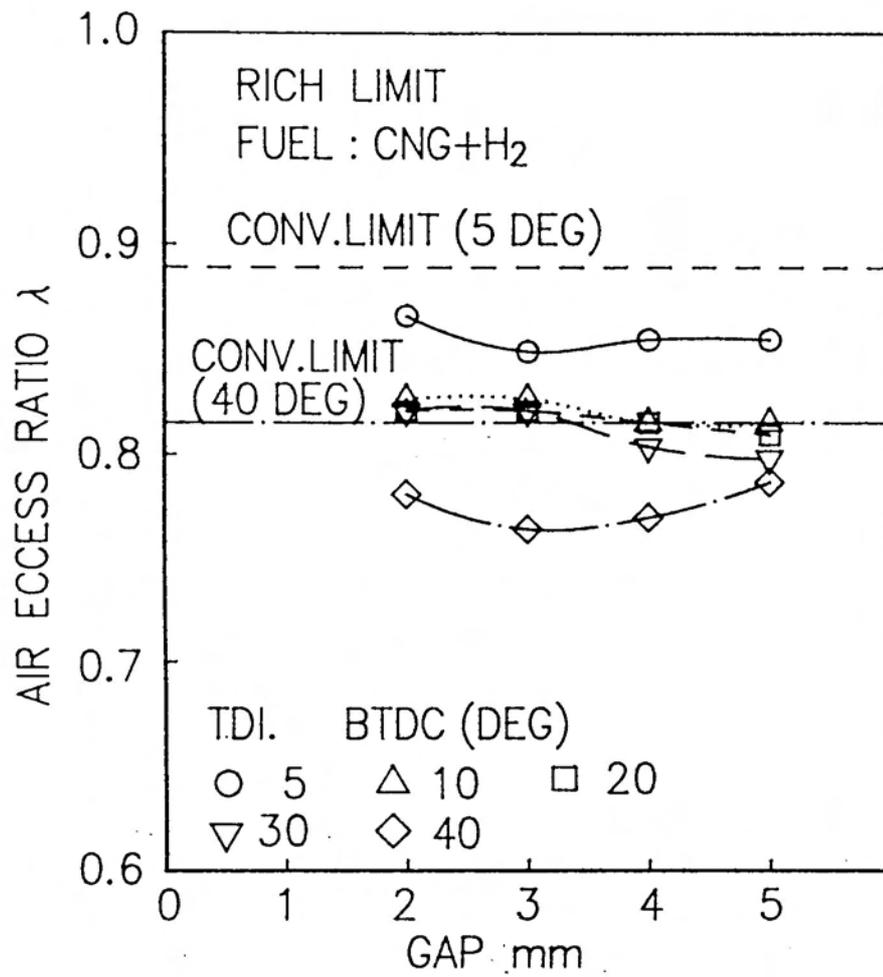


図 33 無負荷運転限界の比較
(水素添加CNG:過濃限界)

§ 2. 負荷運転性能

2.1. 半負荷運転限界の比較

水素添加した天然ガスによる負荷運転を行い、天然ガスだけの運転性能比較を、点火方式の変更と合わせて行った。なお、負荷運転条件は水素添加の効果と比較するため天然ガスによる負荷試験と同一条件で行った。

図34は、水素添加天然ガスを使用した場合の希薄運転限界の比較を示したもので、水素の添加によって従来方式でも天然ガスだけの場合に比べて希薄域が、空気過剰率で約0.1の拡大ができ、さらにTDI方式の採用で希薄化が可能となる。

ギャップの効果としては、やはり3mmで一番効果が出ており、天然ガスのみ負荷運転限界と同じ結果を示していることから現高電圧発生装置の限界と思われる。

2.2. 半負荷運転時P-t線図の比較

水素添加による燃焼速度改善の効果を確認するために、負荷運転時の筒内圧測定を行い、P-t線図の比較を行った。

図35は、水素添加天然ガスを燃料($\lambda = 1.0$)とした場合の実験結果であるが、水素添加によってさらに dP/dt は大きくなり最高燃焼圧力 P_{max} も増大している。

図36は、天然ガスでの燃料希薄域($\lambda = 1.4$)における圧力上昇の違いを示したものである。圧力上昇率の差は量論の場合ほど大きくないが、TDI方式の効果が現れ

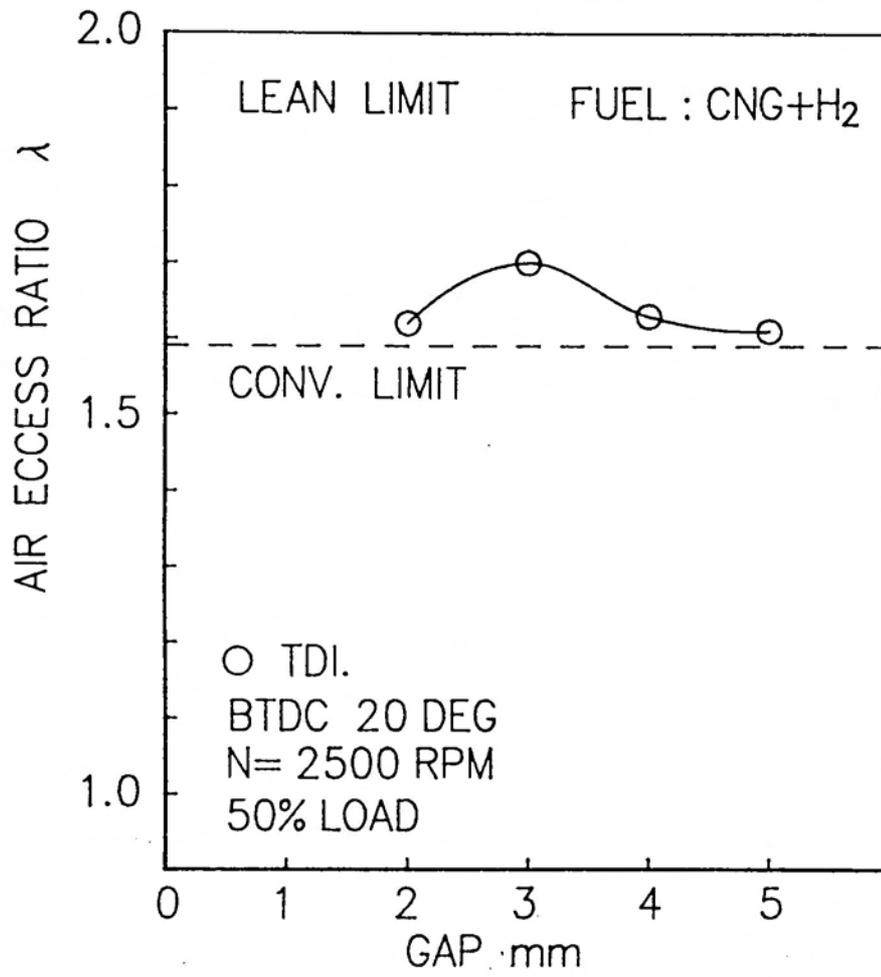


図 34 半負荷希薄運転限界の比較
(水素添加 C.N.G.)

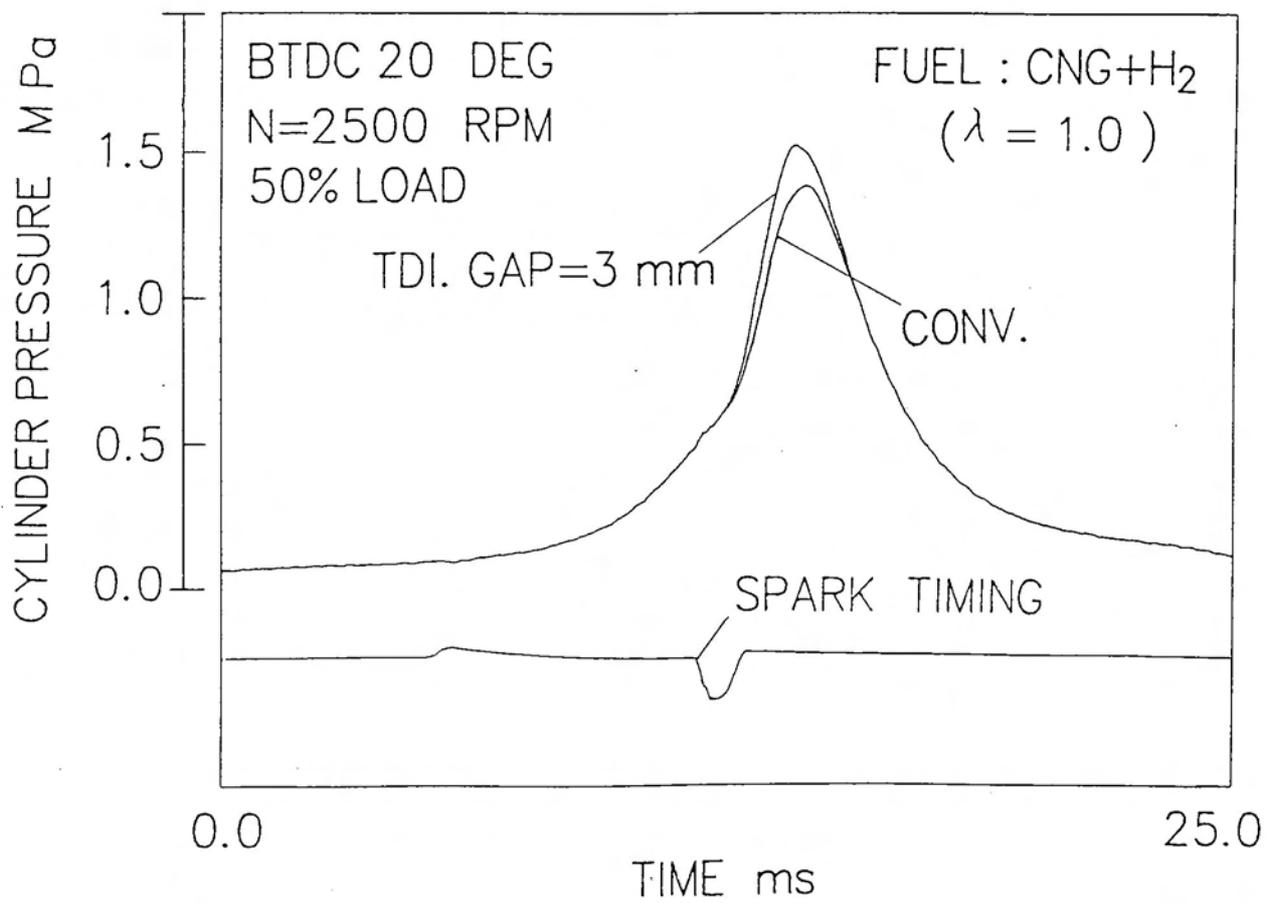


図 35 半負荷運転時 P - t 線図の比較
(水素添加 CNG : $\lambda = 1.0$)

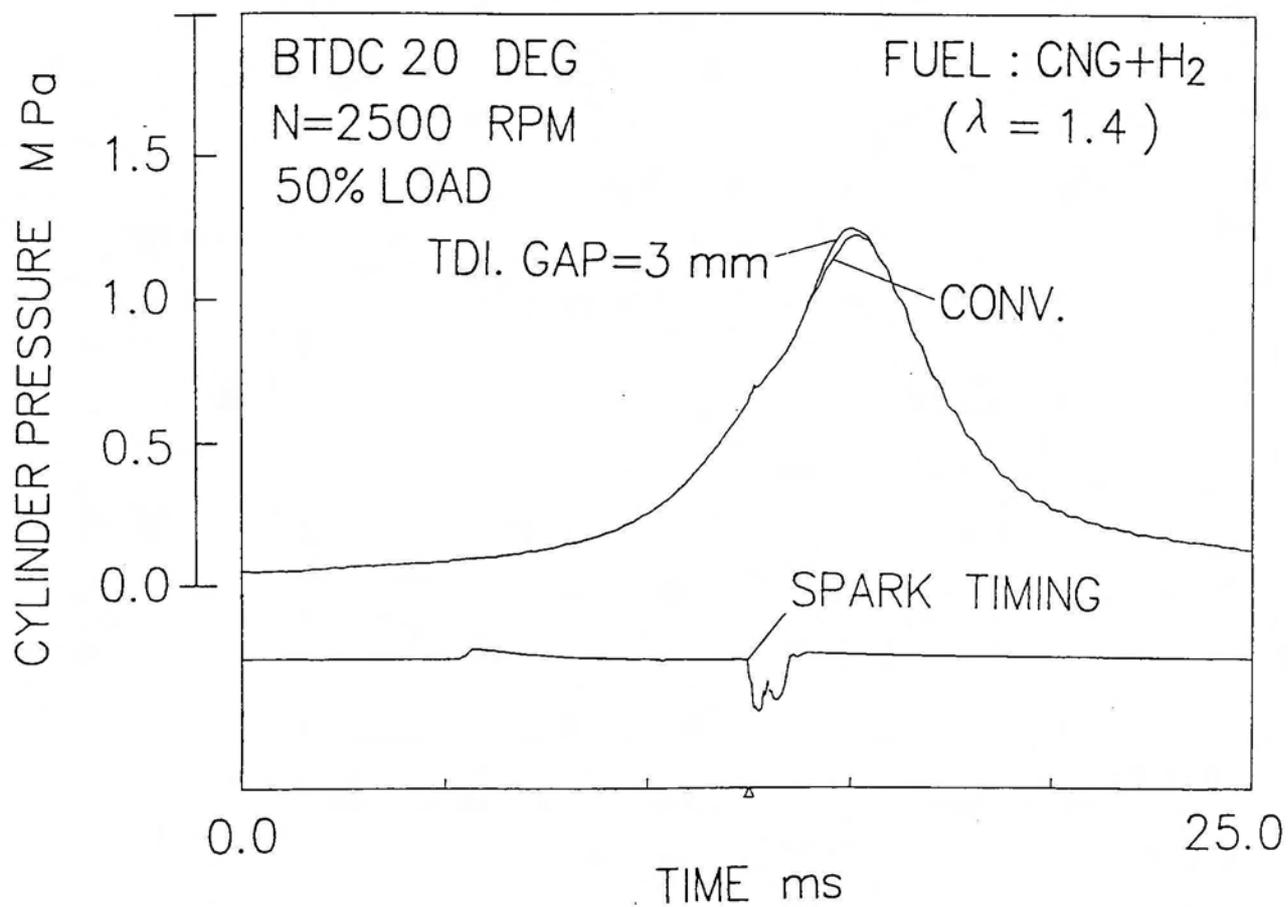


図 36 半負荷運転時 P - t 線図の比較
(水素添加 CNG ; $\lambda = 1.4$)

ている。また水素添加によってさらに dP/dt は大きくなり、量論値の場合と同じように、水素添加による圧力上昇率向上の効果は大きい。

§ 3. 排出ガス特性

水素添加による排出ガスに及ぼす影響はどうであろうか。半負荷運転時での排出ガス測定を行い、水素添加の効果について検討を行った。

図 37 にその測定結果を示す。水素添加による特徴としては、CO、HC の排出が低減されることにある。点火方式の違いによる差はほとんどなく、しかも天然ガスだけの場合と比べて空気過剰率の影響が顕著に現れていない。この結果の考察として、希薄運転限界の拡大や燃焼圧力上昇の結果が示すように、水素の添加によって燃焼安定性が促進され、不完全燃焼が抑制されていることが考えられる。今回の実験結果からすると、天然ガスの水素の添加は燃焼速度改善のみならず、有害排出ガス低減の可能性を有していると思われる。

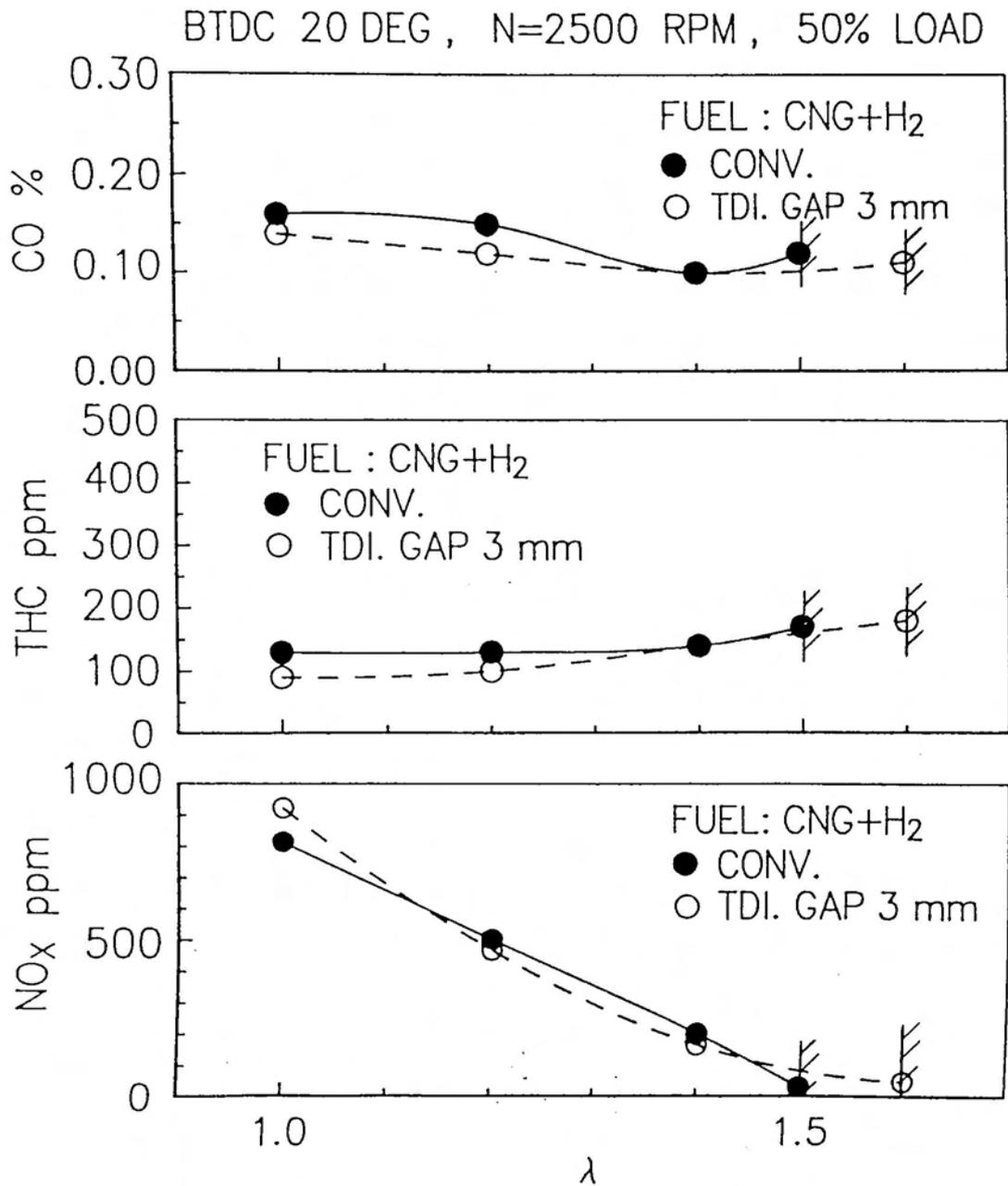


図 37 半負荷運転時の排出ガス比較
(水素添加 CNG)

第 VIII 章 熱発生率の比較

第 VIII 章 熱発生率の比較

前章の実験結果から点火方式の変更によって、ある運転条件のもとではその効果は確認された。しかし点火方式の変更が実際に機関の効率改善に寄与するのかという点で定量的な燃焼効率の評価が必要である。そこで P-t 線図から熱発生率を計算しその評価を行った。

§ 1. 熱発生率の計算

ここで行う熱発生率の解析計算法においては、次の仮定を前提条件とする。

1. シリンダ内のガスは均一性状の理想気体とする。
2. 燃焼室内の温度分布は均一であり、平均温度をとる。
3. 燃焼ガスの比熱比 κ は 1.3 とする。

そこで、

熱力学の第 1 法則のエネルギー式から、

$$dQ = dU + A p dV \quad (1)$$

において、

$$dU = GC_v dT \quad (2)$$

また、熱発生率 dQ は

$$dQ = dQ_f - dQ_L \quad (3)$$

ここに、

dQ_f : 燃料の燃焼熱、 dQ_L : 熱損失

(1), (2), (3) より

$$dQ = dQ_f - dQ_L = GC_v dT + A p dV \quad (4)$$

理想気体の状態方程式から

$$pV = GRT \quad \text{より} \quad T = \frac{pV}{GR} \quad (5)$$

シリンダ内のガス重量 G を一定として (4), (5) から

$$dQ = dQ_f - dQ_L = A \frac{\kappa}{\kappa - 1} p dV + \frac{A}{\kappa - 1} V dp \quad (6)$$

により熱発生率 dQ が求まる (1), (2), (3)。

熱発生率を求める場合、クランク角度で 1 deg. 単位でシリンダ内圧をサンプリングしてもばらつきを生じ、熱発生率曲線が振動してしまふ (4)。この計算による振動をなくすには、読みとった圧力線図を各点で多項式近似を行い平滑化を行う方法がとられる。

ガス体積 V はクランク角 θ の関数として

$$V(\theta) = \frac{1}{2} A_p L \left\{ (1 - \cos \theta) + \frac{\beta}{4} (1 - \cos 2\theta) \right\} + \frac{V_c}{\varepsilon - 1} \quad (7)$$

A_p : ピストン面積 L : ストローク

β : r/L r : クランク半径

V_c : 燃焼室容積 ε : 圧縮比

により与えられることになるが、シリンダ内圧力がクランク角 θ の関数 $p(\theta)$ として与えられるならば (6) 式よりクランク角度毎の熱発生率 $dQ/d\theta$ が求まることになる。

そこで実験より求めた $P-t$ 線図から、まずエンジン回転数にもとづくクランク角度を等分割し、 $P-\theta$ への

変換を行った。これによるデータをもとに、最小二乗法プログラムによりクランク角の多項近似式 $p(\theta)$ を求めた。(付録1: 熱発生率計算プログラム参照)

この計算プログラムを実行することで最適な $P - \theta$ 曲線と多項近似式を得ることにより(6)式から

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{A}{\kappa - 1} \left[\kappa p(\theta) \frac{dV}{d\theta} + V(\theta) \frac{dp}{d\theta} \right] \quad (8)$$

として熱発生率 $dQ/d\theta$ を求めた。

そのプログラムによる多項近似式と熱発生率の計算結果の一例を示す。

$$\begin{aligned}
 P(\theta) = & .459327661865066 \\
 & .01796204469391703 \theta \\
 & 9.926318137795162D-04 \theta^2 \\
 & 1.015050249546981D-05 \theta^3 \\
 & -2.430922466090208D-06 \theta^4 \\
 & -2.579101618892991D-08 \theta^5 \\
 & 2.603336474304672D-09 \theta^6 \\
 & -2.930998997505218D-13 \theta^7 \\
 & -1.122400203473513D-12 \theta^8 \\
 & 1.131201595047383D-14 \theta^9
 \end{aligned}$$

B:PTCC DEG (θ)	dQ/d θ (J/DEG)
-20	-43.2465
-15	-41.1792
-10	-32.2142
-5	-18.049
0	.426023
5	27.495
10	68.1599
15	120.986
20	175.959
25	219.967
30	245.536
35	254.513
40	251.533
45	234.03
50	206.411

以上述べた計算プログラムにより、前章の実験で示したP-t線図から点火方式および燃料性状の変更を行った場合の熱発生率の計算を行い、その結果の比較と考察を行った。

§ 2. 点火方式変更による熱発生率

これまでの実験結果から得られたP-t線図をもとに、計算プログラムから熱発生率を計算し、点火方式の変更によるその比較を行った。

2.1. 量論値での熱発生率比較

天然ガス、量論値での負荷運転時（図26 P-T線図）において、点火方式の違いによる熱発生率の比較を図38に示す。図に示されたように、TDI方式では従来の点火方式よりも熱発生率が高くなっている。これは量論値でのTDI方式の適用による高エネルギーが、機関の効率向上に寄与することを示すものである。

2.2. 希薄燃焼運転時の熱発生率比較

燃料希薄域運転時（図27 P-t線図）での熱発生率の比較を図39に示す。これによると、量論値での運転時と比べて点火方式変更の効果は殆ど現れていないことが分かる。この理由として、1kgのメタン-空気混合気あたりの発生熱量 q は

$$q = \frac{\eta_h H_u}{1 + \lambda G_{ath}} \quad \text{MJ} / \text{kg} \quad (9)$$

η_h : 燃 焼 効 率 H_u : 低 発 熱 量

λ : 空 気 過 剰 率 G_{ath} : 理 論 空 気 質 量

で与えられる⁽⁵⁾から、計算上では空気過剰率 $\lambda = 1.4$ の場合、量論値($\lambda = 1.0$)のメタンの燃焼時と比べてその発生熱量は約27%減となる。しかも希薄域での燃焼であることから運転状態としては不安定であり、その分燃焼効率が低下するため点火方式変更による効果が現れなかったものと考えられる。

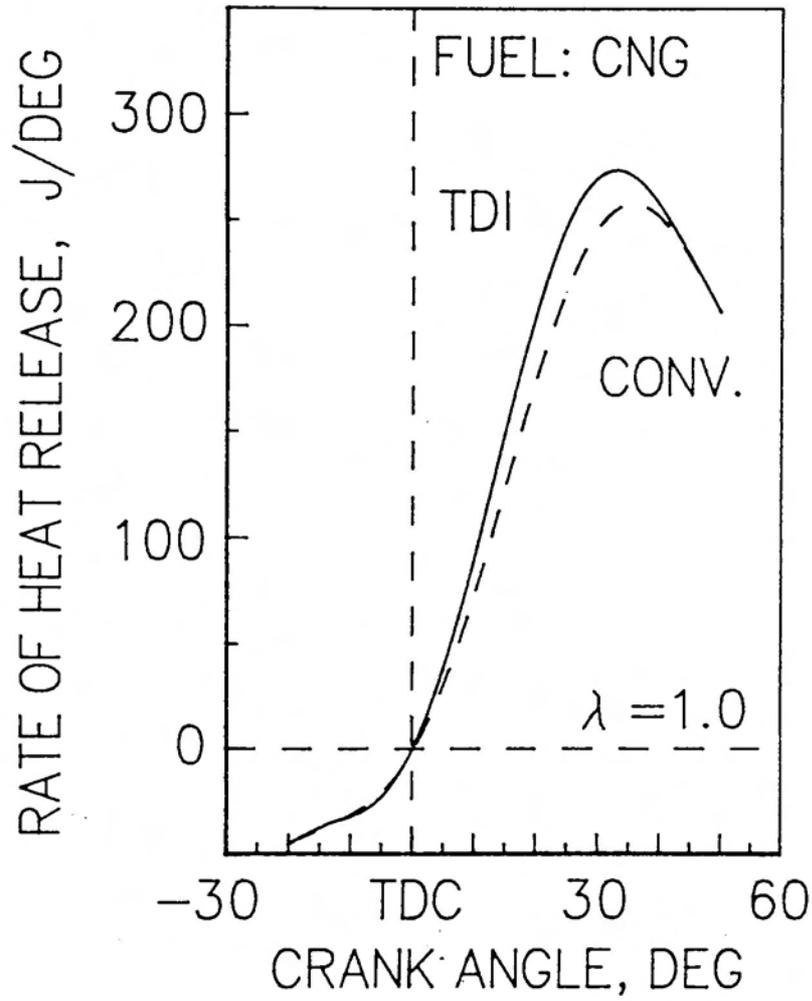


図 38 点火方式変更による量論値運転時の熱発生率比較 ($\lambda = 1.0$)
(実線 : T D I 方式、 破線 : 従来方式)

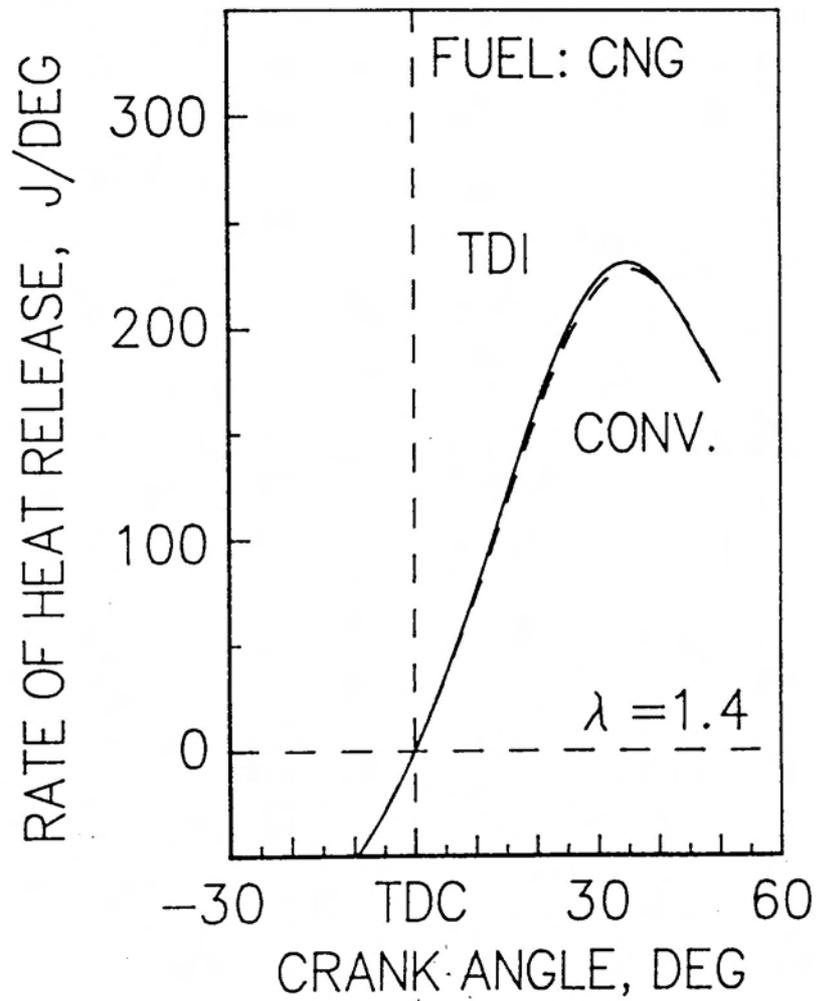


図 39 点火方式変更による希薄燃焼運転時の熱発生率比較 ($\lambda = 1.4$)
 (実線 : T D I 方式、 破線 : 従来方式)

§ 3. 水素添加有無による熱発生率

水素を天然ガスに添加することにより、実験3の結果として安定した燃焼による運転が実現されることが分かった。このことを熱発生率の比較によって確認してみることにする。

3.1. 量論値での熱発生率比較

水素を添加した天然ガスと無添加天然ガスによる量論値で負荷運転を行ったときの熱発生率の比較を行った。

図40は、従来の点火方式による運転時の熱発生率を比較したものであるが、水素の添加によって熱発生率は添加しない場合と比較して高くなっており、効率の向上が認められる。

次に、TDI点火方式による運転においても同様に水素添加の有無による熱発生率比較を行った。この場合でも図41に示すように熱発生率は水素添加によって向上することが分かる。このように量論値における運転では、水素の添加によって熱発生率の向上に顕著な差が現れることが分かった。

また、水素添加時の点火方式の違い（図35P-t線図）による熱発生率の比較のために、図40および図41から点火方式の区別による熱発生率の差を見たものを図42に示す。

このように量論値における運転では、水素無添加の場合と同様に点火方式の変更によって熱発生率の向上に効

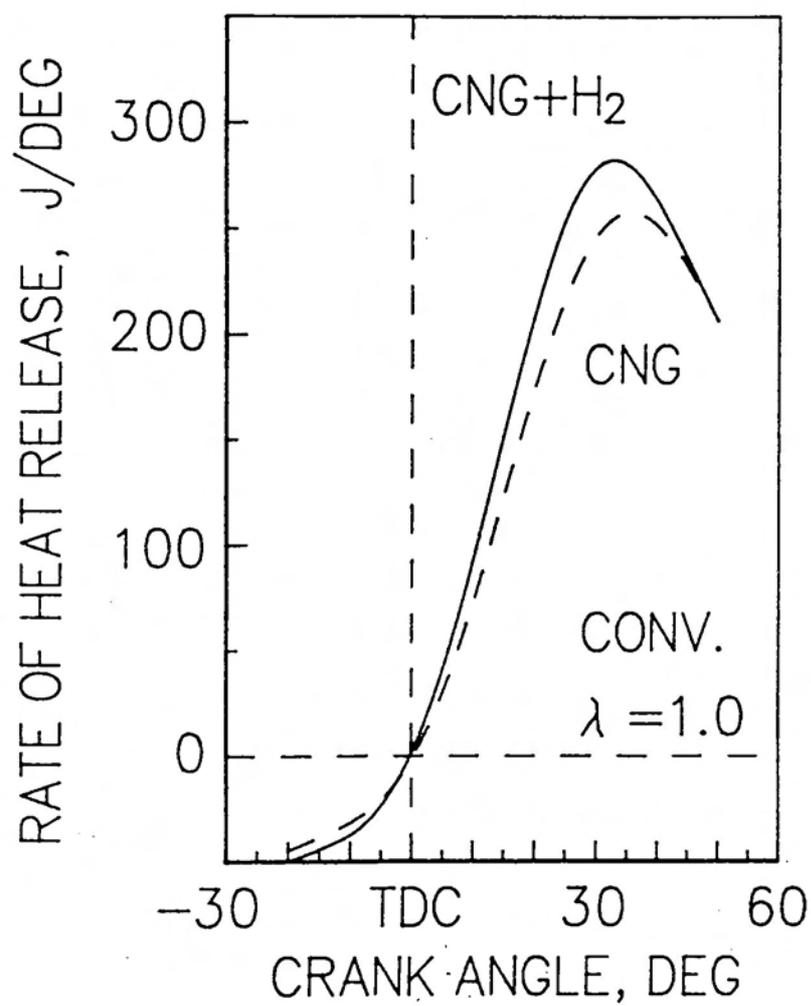


図 40 従来点火方式での水素添加有無による
熱発生率比較 ($\lambda = 1.0$)
(実線 : C N G + H ₂、 破線 : C N G)

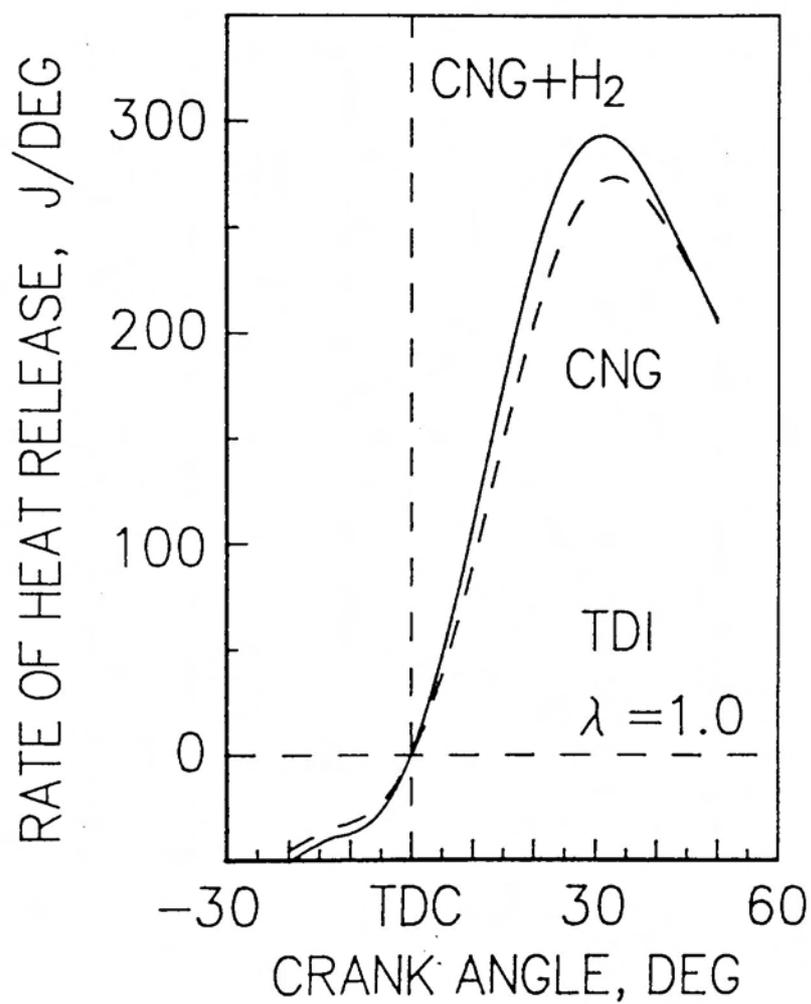


図 41 TDI 点火方式での水素添加有無による
熱発生率比較 ($\lambda = 1.0$)
(実線 : CNG + H₂、 破線 : CNG)

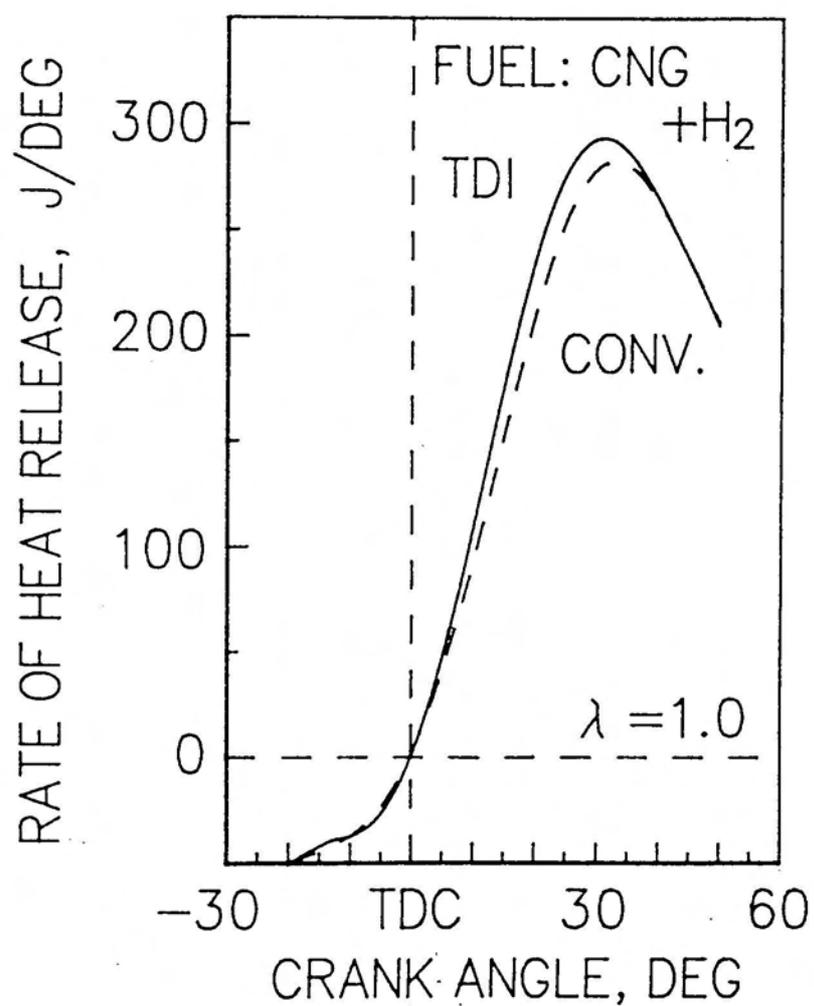


図 42 水素添加時の点火方式変更による
熱発生率の比較 ($\lambda = 1.0$)
(実線 : T D I 方式、 破線 : 従来方式)

果が現れ、水素の添加によってさらに効率向上が期待される。

3.2. 燃料希薄域での熱発生率比較

水素添加天然ガスを用いた希薄燃焼による運転時の熱発生率の比較を行った。

従来の点火方式による希薄燃焼運転時の熱発生率を図43に、T D I点火方式による熱発生率を図44に示す。

このことから分かるように、点火方式変更の有無にかかわらず燃料希薄域での水素添加の効果は顕著に現れている。しかしながら、図45は点火方式別による水素添加天然ガスの希薄域運転時（図36 P - t 線図）の熱発生率を比較したものであるが、天然ガスのみ希薄運転時と同様に、その熱発生率に差が現れておらず点火方式の変更による熱発生率向上への効果は現れていない。

この考察としては、希薄燃焼運転時には水素無添加の場合に述べたように、燃料希薄域での燃焼不安定に起因すると考えられ、点火方式変更の効果よりも水素を添加したことによる熱発生率向上の効果が大きかったものと考えられる。

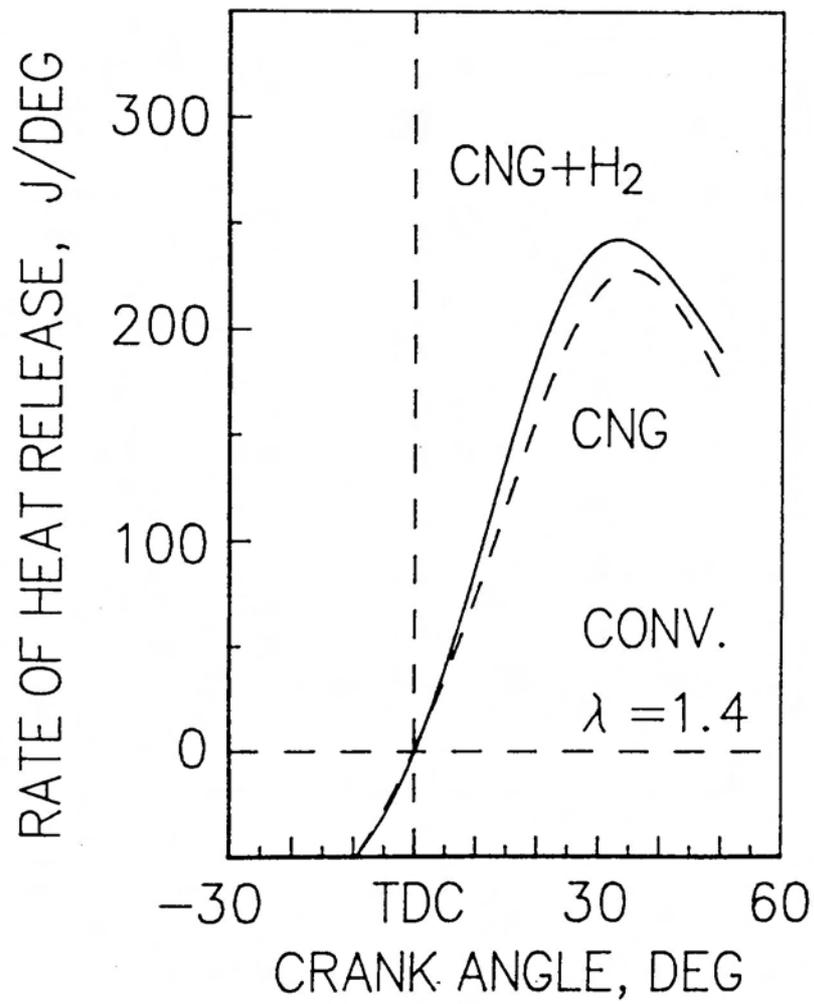


図 43 従来点火方式水素添加有無による
熱発生率比較 ($\lambda = 1.4$)
(実線 : C N G + H ₂、 破線 : C N G)

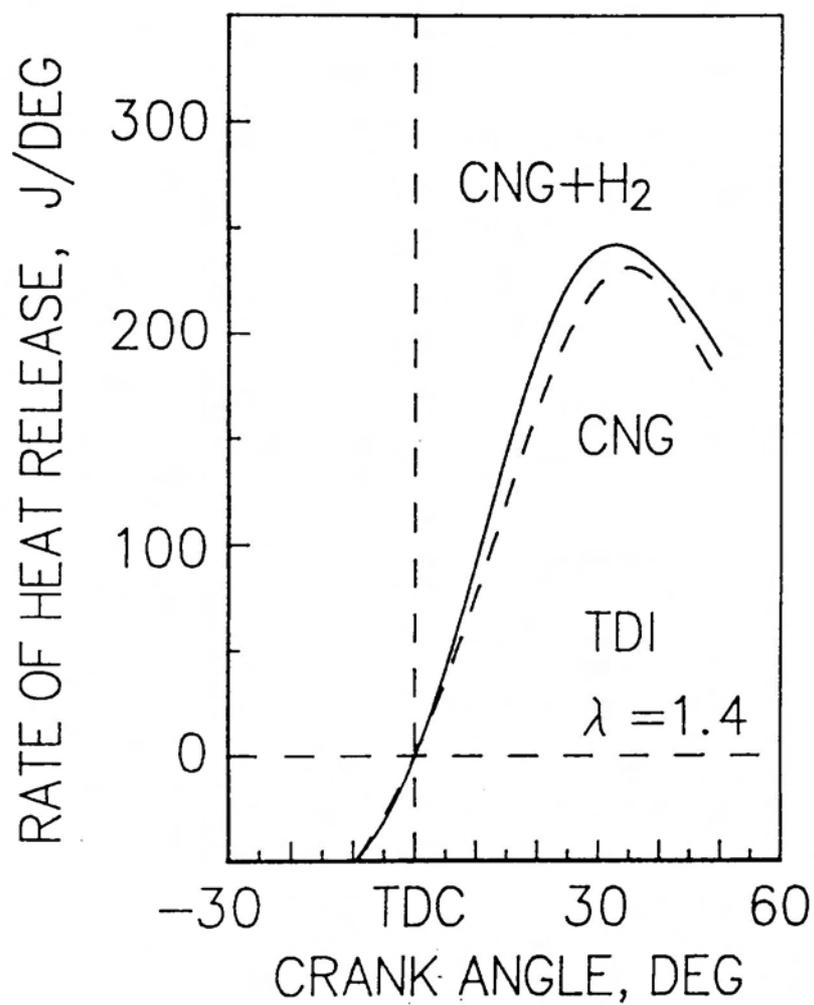


図 44 TDI 点火方式水素添加有無による
熱発生率比較 ($\lambda = 1.4$)
(実線 : CNG + H₂、 破線 : CNG)

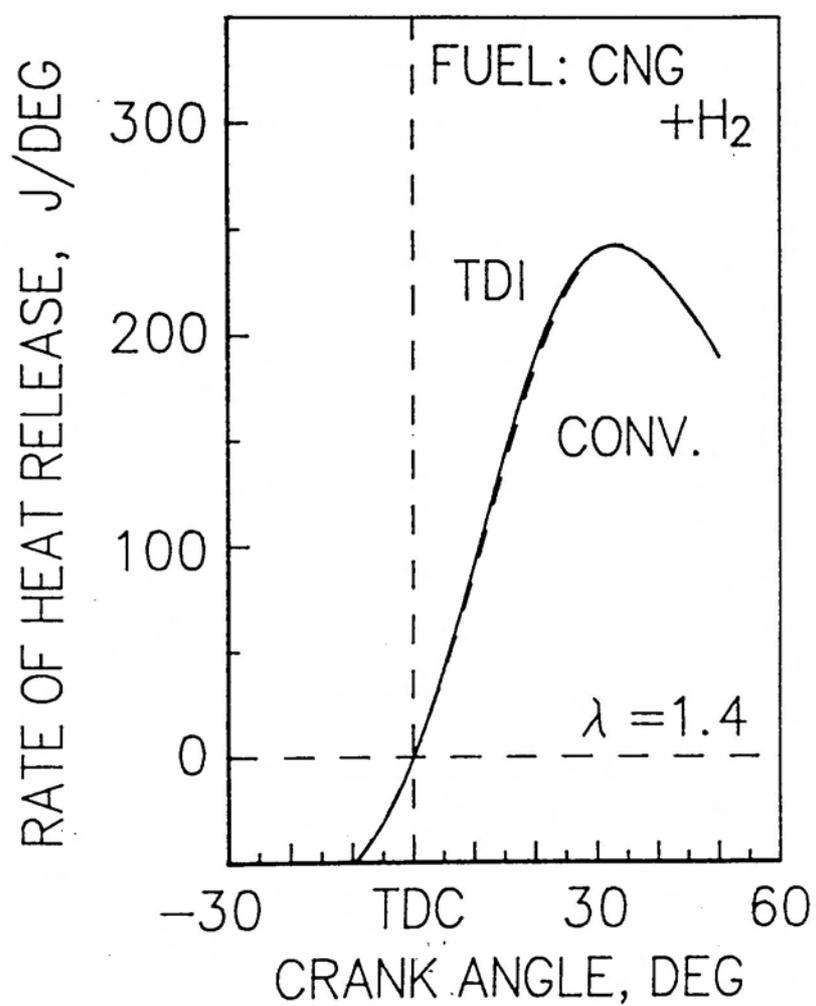


図 45 水素添加時の点火方式変更による
熱発生率の比較 ($\lambda = 1.4$)
(実線 : T D I 方式、 破線 : 従来方式)

第 IX 章 T D I 点火方式の
初期燃焼期間の解析

第 IX 章 T D I 点火方式の初期燃焼期間の解析

高エネルギーによる点火方法の効果については、これまでの実験結果をふまえて述べてきた通りである。しかし、点火という現象は物理的、化学的な現象であるから、ただ単に付加されたエネルギーの量で点火の可否が決定されるわけではない。そこには当然のことながら活性化学種の寄与についての論議が必要となる。プラズマジェット等による点火が、熱、または活性化学種の散布という点で点火性に効果があると考えられ、現在も多くの研究が行われているのはこの点に起因する(1)、(2)、(3)。

本研究において提案した T D I 点火方式では、火花放電ギャップを拡大させることによって、必然的に付加エネルギーの増大をもたらす。つまり絶縁破壊瞬間のプラズマ柱は従来の点火方式のそれと比較して長くなり、この時のプラズマ中の活性化学種の生成状況も自ずから従来の場合と異なる。やがて、そのプラズマ柱は火炎核を形成し火炎伝播へと移行するが、燃焼過程における創始段階としてのこの期間が、やがては燃焼終結までのプロセス全般にかかわるものと考えられる。

そこで本章では、点火方式の変更によるプラズマ中の活性化学種の生成状況を比較するため、ある創始段階の火炎核モデル(図46)を仮定し、断熱火炎プログラムによる平衡計算を行い、さらにその計算結果をもとに点火

方式の違いによる活性化学種の量が燃焼初期に及ぼす影響を数値解析的に予測し点火能力の比較を行った。

d : プラズマ柱直径 (0.5 mm)
 D : 初期火炎核直径 (3.0 mm)
 G : ギャップ

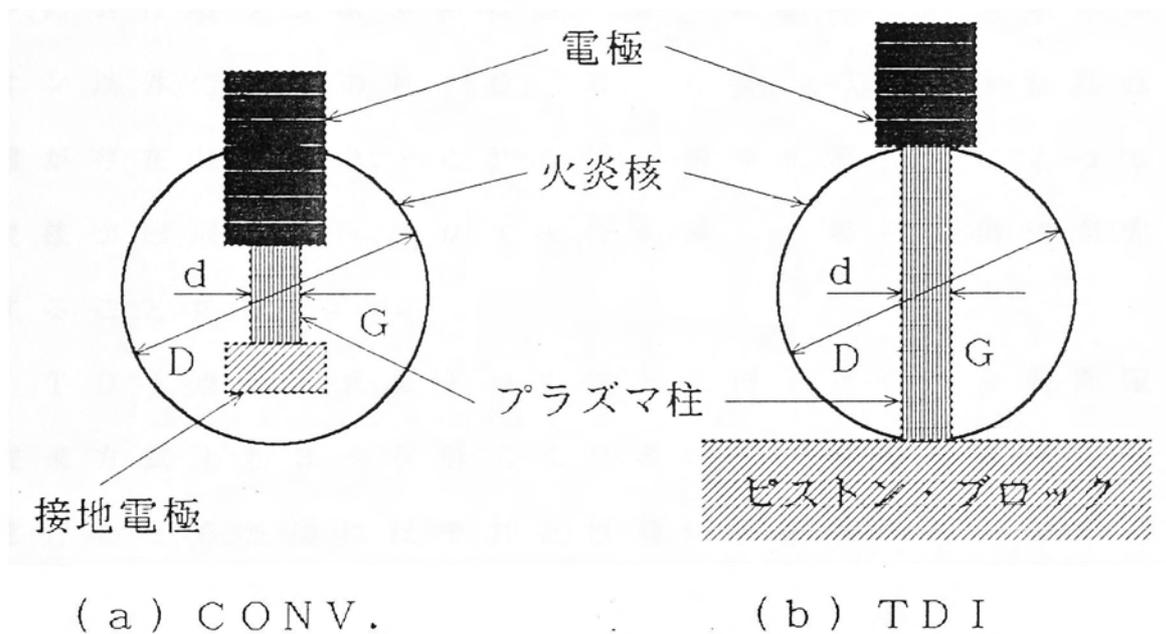


図 46 火炎核モデル

§ 1. 活性種生成率の比較

従来の点火方式による点火の場合でも、スパークプラグの約 1mm の間隙において、最初の絶縁破壊（ブレイクダウン）の瞬間（～ 10 ns）には、温度が 60,000 K、圧力は数 10 MPa の柱状のプラズマが生成され、その後アーク放電、グロー放電に移行する⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。その間生成されたプラズマは外部への熱伝達と放散によってプラズマ表面では数 1000 K 程度まで減少するが、燃料混合気中におけるプラズマ中には、高度に励起された原子やイオン以外に多数の N、O、H、OH、C などの活性化学種が存在しており、これら活性種の化学作用によって火炎核が形成され、やがて火炎伝播へと移行し燃焼が完結することになる。

T D I 点火方式によって点火を行う場合、放電間隙が従来方式より 3～5 倍広くなるから、絶縁破壊即ち放電を行わせるためにはそれだけ高い火花エネルギーを付加させねばならない。しかしその供給が確保されるとするならば、広い間隙に発生するプラズマ柱は長く、その中に生成される活性種も増加するため火炎核の成長も促進されることが考えられる。

それを準定量的に確認するために、図 46 に示したようなメタン／空気混合気に火花エネルギーを付加した火炎核モデルを仮定した。その上でプラズマ柱の中で生成される各種活性種の生成状況を断熱火炎プログラム（NASA -

SP273) を用いて平衡計算を行い、火花エネルギーの違いによる生成量の比較を行った。

今回使用した断熱火炎プログラムは、反応が平衡に達した状態での温度、圧力、反応生成物等を計算するものであり、非平衡状態を予測できるものではない。しかし今回検討される放電からプラズマの発生および火炎核の形成までの時間はおよそ放電の開始から 10^{-3} 秒内外⁽⁶⁾ であるのに対し、メタン/空気系ではラジカル NO など一部を除き、燃焼促進に寄与する活性種の生成は 2500K 以上では 10^{-4} 秒以下でほぼ反応が平衡に達したものと考えてよいことが知られている⁽⁷⁾。プラズマアーク柱ではこの条件が充分満たされており、従って平衡計算により得られる各化学種の量的オーダーは正しく、少なくとも比較は可能である。

1.1 シュミレーション条件

図 45 (a) に示したような放電エネルギーによるプラズマ柱内の活性種の生成状況を得るために、メタン/空気の理論混合気中への放電モデルを考える。放電による付加エネルギーは、断熱火炎プログラムの入力条件として、生成エンタルピの増分として与えることにする。以下その方法を示す。

放電ギャップ 1mm 当たりの付加エネルギーは、今回実測された値と一般に報告されている放電エネルギーから、

$$E / G = 30 \text{ mJ} / \text{mm}$$

放電エネルギー： E (m J)

放電ギャップ： G (m m)

とする。

また、プラズマ・アーク柱の太さ d をいくつかの報告から (4)、(5)、

$$d = 0.5 \text{ mm} \quad \text{とする。}$$

一般的な S I エンジンの圧縮比 8 を用い、スパーク時の周囲圧力 P は、上死点時の圧縮圧力とみてよいから、

$$P = 1.22 \text{ MPa} \quad (12 \text{ atm}) \quad \text{を用いる。}$$

そのときの初期温度 T_i は、圧縮上死点温度 673 K に放電柱とシリンダ壁からの加熱を加味して、ここでは

$$T_i = 1100 \text{ K} \quad (827 \text{ }^\circ\text{C})$$

として計算を試みる。

1.2. 計算手法

今、プラズマ部体積を円柱体積 v_c として直径 d を 0.5 mm、ギャップ G を 1 mm にとれば、

$$v_c = \pi d^2 G / 4 = 0.196 \text{ mm}^3$$

$P = 12 \text{ atm}$ とするため、 v_c に含まれるモル数 n は

$$\begin{aligned} n &= v_c \times 12 \quad (\text{Nmm}^3) / 22.4 \times 10^6 \quad (\text{mm}^3) \\ &= 0.105 \times 10^{-6} \text{ mol} \end{aligned}$$

ここに放電エネルギーが注入されることになるので、アーク部 1 モル当たりへの付加エネルギーは、

$$\begin{aligned} E / n &= 30 \times 10^{-3} \text{ J} / (0.105 \times 10^{-6}) \text{ mol} \\ &= 285.7 \times 10^3 \text{ J} / \text{mol} \end{aligned}$$

$$(\quad = 68 \times 10^3 \text{ cal/mol})$$

となる。しかし、放電エネルギーが全てアークとしての付加エネルギーとなるとは考えにくいから、その変換効率を60%として計算を行うことにした。今回このエネルギーは酸素のみに与える形としたが、方法はこれに限らない。

具体的には空気中の酸素の体積分率は0.21を用い、

$$\begin{aligned} E/n &= 68 \times 10^3 / 0.21 \times 0.6 \text{ cal/mol} \\ &= 194.4 \times 10^3 \text{ cal/mol} \\ &= 46.3 \times 10^3 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

を酸素の生成エンタルピに加算した。

一方、初期温度が1100 Kであることから、各反応物質の初期生成エンタルピは常温のそれ ΔH°_f に

$H^\circ_{1100} - H^\circ_{298}$ を加えて入力した⁽⁸⁾。従って、入力する初期生成エンタルピ h_o は、

$$\begin{aligned} h_o &= 0 + 6266 + 194400 = 200666 \text{ cal/mol} \\ &= 47777.6 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

となる。またメタン及び窒素の初期生成エンタルピはそれぞれ、

$$\begin{aligned} h_M &= -17895 + 10887 = -7008 \text{ cal/mol} \\ &= -1668.6 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_N &= 0 + 5917 = 5917 \text{ cal/mol} \\ &= 1408.8 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

以上の試算によって得られた生成エンタルピを断熱火炎プログラムに入力し実行した計算結果を表6に示す。

表6 断熱火炎プログラムによる計算結果

NASA Lewis - Chemical Equilibrium and Transport Properties
of Complex Chemical Systems Program (SP-273, Rev 1985);
by Sanford Gordon & Bonnie McBride

REACTANTS	CNG		ΔH_f , cal/mol		Temp. K	
	mol%					
CH4	100.0 M		-7008.00	G	1100.000	F
N2	79.0 M		5917.00	G	1100.000	0
O2	21.0 M		200666.00	G	1100.000	0

O/F= 17.1272 Equivalence ratio= 1.0000

Thermodynamic properties

p, Mpa	1.2159		
p, atm	12.000		
p, psia	176.35		
T, deg K	3986.8		
rho, g/cc	.000839		
Number of species-	Gas: 122;	Condensed:	6
Enthalpy of all species:			
h, cal/g	1509.05		
Enthalpy of gases only:		(lhc)	
h, cal/g	1509.05		
m, mol wt	22.885		
(dlv/dlp)t	-1.05314		
(dlv/dlt)p	1.7838		
cp, cal/(g)(K)	1.4036		
gamma (s)	1.1678		
son vel, m/sec	1300.6		

Mole fractions

C	1.1780-8	CO2	7.5267-3
CH	1.3236-9	C2	3.937-14
CH2	3.060-10	C2H RAD	6.235-13
FORMALDEHYDE	2.0768-8	ACETYLENE	1.641-13
FORMIC ACID	1.4149-8	KETENE	1.179-13
CH3	6.126-11	C2H3 RAD	9.407-17
HYDROXYMETHYLENE	3.787-12	METHYL CYANIDE	3.114-18
METHYLOXIDE	2.251-13	CH3CO RAD	7.399-17
CH4	1.951-12	CH2CHO RAD	2.816-17
METHANOL	6.987-14	ETHYLENE	2.104-18
CN	1.4399-7	ACETALDEHYDE	7.230-19
NCN RAD	5.588-11	ACETIC ACID	1.264-19
CNN RAD	2.435-12	(FORMIC ACID)2	1.483-22
CO	7.1165-2	ETHYL RAD	1.968-21

ETHYL OXIDE RAD	9.557-25	HCO RAD	2.9022-6
ETHANE	9.853-24	HNCO	4.7047-8
AZOMETHANE	2.145-32	HNO	1.1921-5
ETHANOL	1.607-24	HNO2	2.7588-7
DIMETHYL ETHER	5.290-26	HNO3	3.541-11
CNC RAD	3.432-13	HO2	4.8295-5
CYANOGEN	5.715-14	H2	4.4328-2
CCO RAD	7.723-11	H2N2	5.664-10
C3	5.578-19	H2O	4.0271-2
C3H3 RAD	4.485-22	H2O2	1.0016-6
CYCLOPROPENE	7.792-26	N	3.6739-4
ALLENE	2.615-24	NCO	7.5069-8
PROPYNE	2.654-24	NH	2.0877-5
C3H5 RAD	1.053-26	NH2 RAD	2.9000-6
CYCLOPROPANE	6.905-31	NH3	3.7773-7
PROPYLENE	5.914-29	NO	3.2898-2
PROPYLENE OXIDE	3.726-32	NO2	1.0599-5
N-PROPYL RAD	1.654-32	NO3 RAD	8.243-11
I-PROPYL RAD	9.074-33	N2	5.7543-1
PROPANE	1.146-34	HYDRAZINE	1.882-14
1-PROPANOL	1.903-35	N2O	5.2394-6
CARBON SUBOXIDE	4.509-15	N2O4	6.282-17
C4	1.526-26	N2O5	5.542-20
BUTADIYNE	1.101-25	N3	9.6796-9
BUTAN-1EN-3YN	4.916-30	O	6.1001-2
2-BUTYNE	1.518-35	OH	5.1404-2
CARBON SUBNITRID	6.360-26	O2	2.1423-2
C5	8.325-32	O3	4.3821-8
H	9.4084-2		
HCN	2.7759-7		

Total moles .04370
Moles of gas .04370

Additional products which were considered but whose mole fractions were less than $.10000E-37$ for all assigned conditions

§ 2. 着火反応温度の比較

断熱火炎プログラムによる計算結果をもとに、燃焼促進に寄与するとされる⁽⁹⁾ラジカル O、OH、H についてその可燃混合気に対する着火能力の数値解析を行い、点火方式の違いによる比較を行った。

2.1. 火炎核のシュミレーションモデル

放電エネルギーの付加によって形成されたプラズマ柱は、やがて火炎核を形成するが、この火炎核を、図 46 (a) に示したような直径 D を 3mm とする球状火炎核モデル (体積 $V = 14.14 \text{ mm}^3$) と想定しこのとき上記の計算結果より得られたラジカル O、OH、H が球状火炎核体積 V に均一に拡散された状態を反応計算の初期条件とする。この値はそれぞれモル分率で

$$\begin{aligned} m_{\text{O}} &= 6.1001 \times 10^{-2} \times v_{\text{c}} / V \\ &= 6.1001 \times 10^{-2} \times 0.196 / 14.14 \\ &= 0.08 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{OH}} &= 5.1404 \times 10^{-2} \times 0.196 / 14.14 \\ &= 0.07 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{H}} &= 9.4084 \times 10^{-2} \times 0.196 / 14.14 \\ &= 0.13 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

となる。

一方、TDI 点火方式では放電間隙を従来方式の 3 倍 (従来方式を 1mm、TDI 方式を 3mm) とし、付加エネルギーを 3 倍の 90 mJ 供給することにより、この間で均

一な放電が確保され、放電間隙に比例したプラズマ柱が発生し、やがて図46(b)のモデルのような球状の火炎核が形成されるものとする。従って、TDI点火方式でのプラズマ柱体積 v_T が3倍となるため、生成される酸素ラジカルOも3倍となるから同一直径Dの球状火炎核中のラジカルO、OH、Hの濃度はそれぞれ、

$$M_O = 0.08 \times 10^{-2} \times 3 = 0.24 \times 10^{-2}$$

$$M_{OH} = 0.07 \times 10^{-2} \times 3 = 0.21 \times 10^{-2}$$

$$M_H = 0.13 \times 10^{-2} \times 3 = 0.39 \times 10^{-2}$$

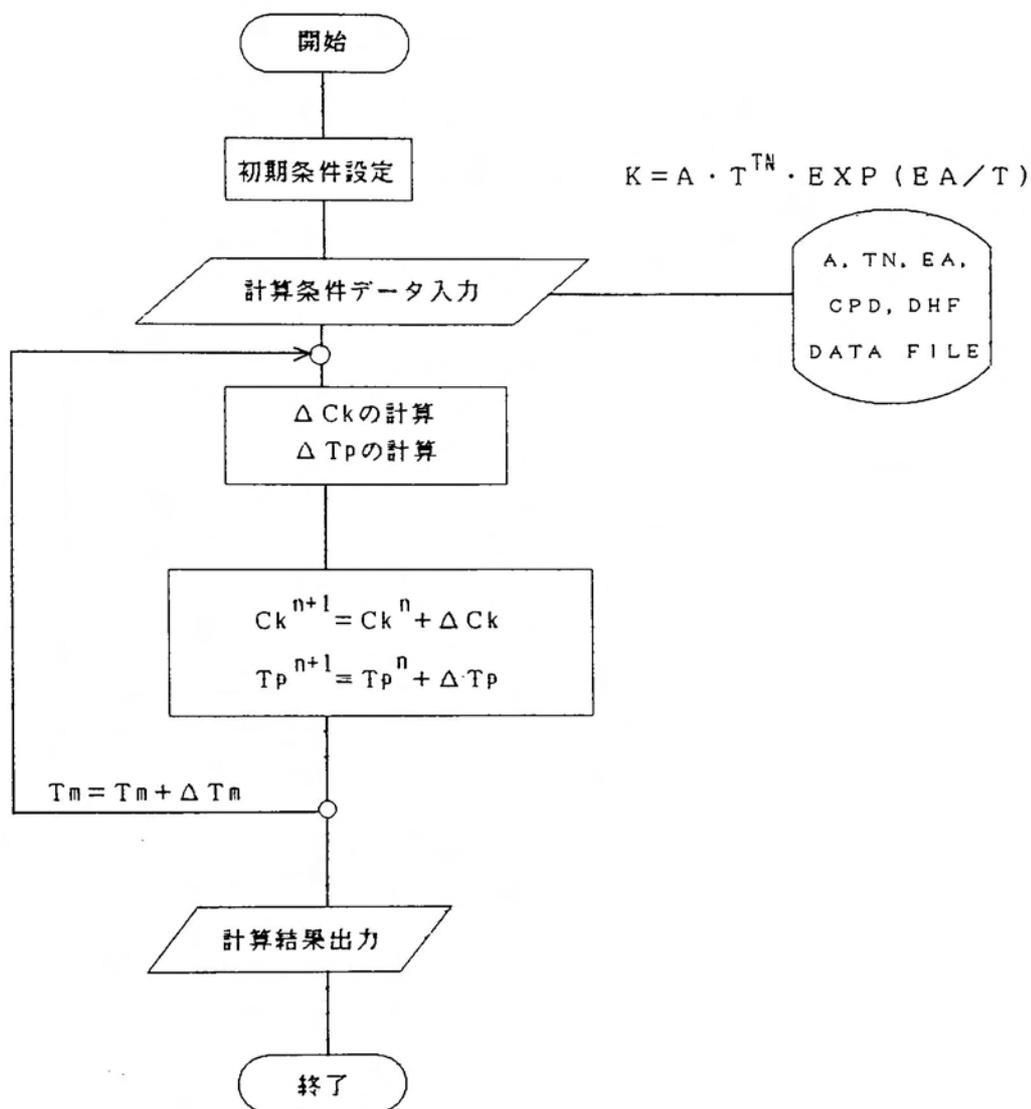
となる。

2.2. 着火反応温度の解析計算

前述のシュミレーション結果から、球状火炎核モデル内部のラジカルO、OH、Hの濃度が得られ、点火方式の違いによるその濃度差が反応に如何に影響を与えるかを計算により推定する。

そこで、これらのラジカル濃度の差による放電から直径3mmの火炎核モデルに至るまでの着火能力の比較として、燃焼反応進行の時間経過と検査領域温度の数値解析を行った。

今回使用した数値解析プログラムは、メタン/空気混合気の素反応59種を考え、その各化学種の保存方程式およびエネルギー式を連立させ、検査火炎核内の燃焼温度の時間的変化を解くものである。初期条件として先に得られた活性種の量を用いることで、反応後の温度をタイ



- n : 時間ステップ
 C_k : k 番目の化学種のモル濃度
 T_p : 温度
 ΔC_k : k 番目の化学種のモル濃度の増分
 ΔT_p : 温度の増分
 T_m : 時間
 ΔT_m : 時間きざみ

図 47 燃焼温度解析プログラム・フローチャート

ムステップ 10^{-9} 秒で計算するものである。

以下にその基礎式について述べる。

K種の化学種を含む I 個の素反応は、一般型で示すと



ここで、 ν_{ki}^j 、 ν_{ki}^i は量論係数を、 x_k は化学種 k をあらわす。

また、化学種 k の生成速度は、

$$\omega_k = \sum_{i=1}^I (\nu_{ki}^i - \nu_{ki}^j) q_i \quad k=1, \dots, K \quad (2)$$

ここで、 q_i は反応 i の反応速度で、

$$q_i = k_{fi} \prod_{k=1}^K [x_k]^{\nu_{ki}^j} - k_{bi} \prod_{k=1}^K [x_k]^{\nu_{ki}^i} \quad (3)$$

$[x_k]$: 化学種 k のモル濃度

k_{fi} : 反応 i の正反応速度定数

k_{bi} : 反応 i の逆反応速度定数

また、各素反応の速度定数は

$$k_i = A_i T^{B_i} \exp(-C_i/T) \quad (4)$$

ここで、 A_i : 前指数因子

B_i : 温度指数

C_i : 活性化温度

である。

以上の式と、エネルギーの式、

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = - \sum_{k=1}^K h_k M_k \omega_k \quad (5)$$

ここで、

$$h_k = h_k^{T_0} + \int_{T_0}^T C_{p,k} dT \quad (6)$$

M_k : 化学種 k の分子量

h_k : 化学種 k の比エンタルピ

$C_{p,k}$: 化学種 k の定圧比熱

$h_k^{T_0}$ は温度 T_0 における化学種 k の標準生成熱を連立させて計算する。

また、 $C_{p,k}$ は JANAF Thermochemical Tables⁽⁸⁾ で各温度について与えられているデータを最小二乗法を用いて、298Kから3,000Kの間で温度についての4次の多項式に近似して用いた。尚、数値積分には差分法を用いている。

今回使用した解析プログラムのフローチャートを図47に示す。なお、付録2、3にメタン/空気混合気の素反応及び解析プログラムを添付する。

2.3. 着火反応温度の比較

火花点火による燃焼において、着火の可否はその時に形成される火炎核の温度に大きく依存する。本章における解析は、点火からその検査火炎核になるまでの時間と温度変化をシュミレートしたものであるが、その点火方式の違いによる火炎核モデルのシュミレーション結果に

ついて述べることにする。

前述のように、火炎核形成時の化学作用に寄与する活性種として、ラジカル O、OH、H が挙げられる。そこで、これらラジカルの貢献度を比較検討するため、平衡計算によって得られた各活性種濃度を用いて、火炎核モデル中に、a. O、OH、H の各ラジカルを含む場合、b. ラジカルを含まない場合、c. ラジカルが O のみの場合、d. ラジカル OH のみの場合、および e. ラジカル H のみの場合の 5 種類に分け、両点火方式についてそれぞれ場合の着火反応温度を計算した。表 7 に、a ~ e の場合分けとその時の各ラジカル濃度を示す。

表 7 計算時のラジカル濃度

P = 1.22 MPa

T_i = 1100 K

分類	ラジカル濃度 (モル%)		
	O	OH	H
C O N V.			
a	0.08	0.07	0.13
b	*	*	*
c	0.08	*	*
d	*	0.07	*
e	*	*	0.13
T D I			
a	0.24	0.21	0.39
b	*	*	*
c	0.24	*	*
d	*	0.21	*
e	*	*	0.39

* 印はラジカル濃度 0% を示す。

2.3.1. 点火方式の違いによる比較 図48は、両点火方式モデルにおける、a. の場合について着火反応温度の変化を示す計算結果である。

いずれの点火方式の場合でも、約2600Kに達したところで平衡に達し反応が終了することを示している。さらに、T D I方式モデルでは従来方式に比べると、その平衡に達するまでの時間が約40%短縮されている。この結果から、点火方式の違いによって活性種の濃度差を生じ、これが着火過程が平衡に達するまでの時間を短くするものと考えられる。

このa. の場合の比較は、放電によって実際のメタン/空気混合気中に形成される火炎核モデルを想定するもので、本研究の実験結果を検証する一つの根拠となりうるものである。

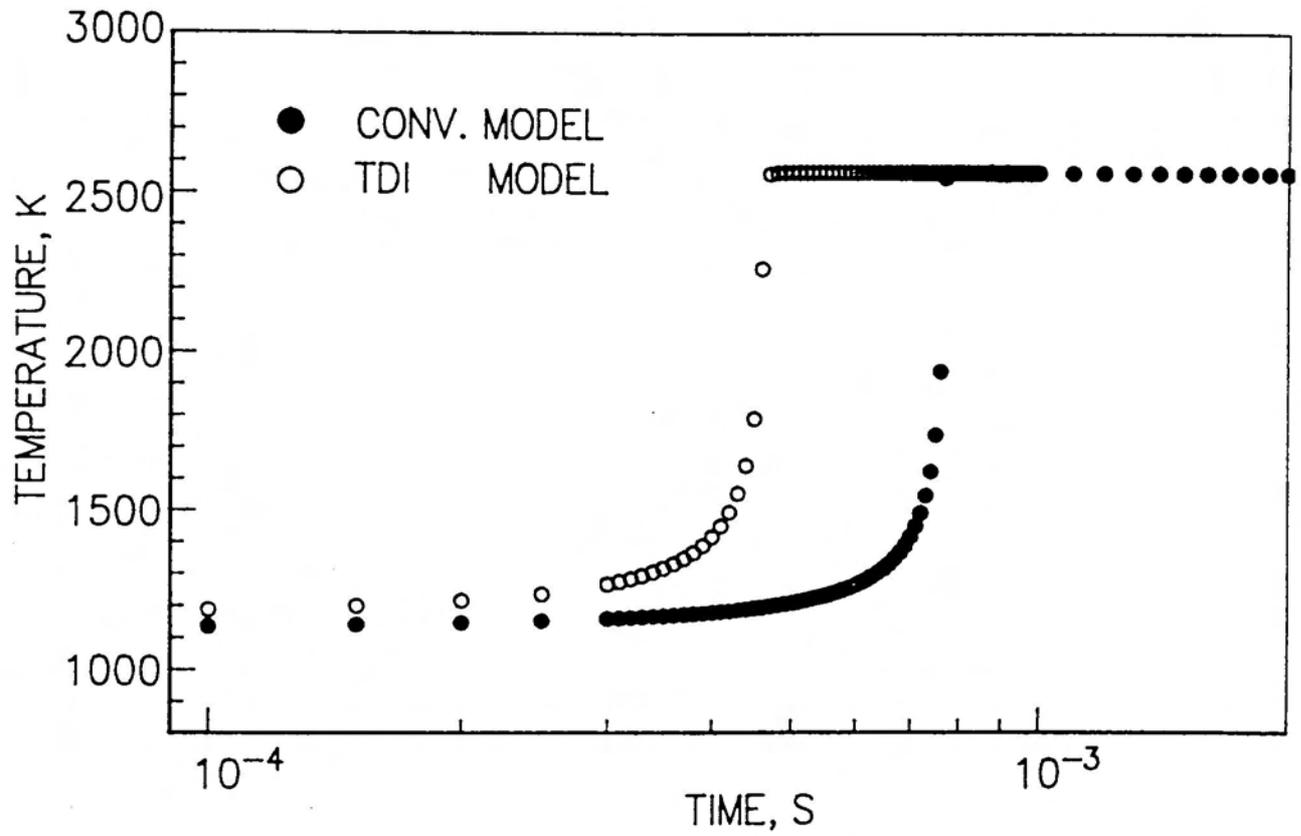


図 48 点火方式による着火温度変化の比較

2.3.2. 各ラジカルによる着火温度の変化 ラジカルの濃度によって着火温度が平衡に達する時間が短縮されることが分かったが、ラジカル O、OH、H の内、どのラジカルの貢献度が大きいのか b ~ e の場合について計算を行いそれぞれのラジカルの効果について検討してみる。

図 49 は従来方式、図 50 は T D I 方式での火炎核モデルについて、その結果を示したものである。

ラジカルの無い場合では、平衡に達するまでの時間は約 3 μ S であるのに対し、ラジカルを含む場合は約 1 μ S に短縮されている。しかし、各ラジカルの貢献度についてみた場合、ラジカル H のモル濃度は O、OH のそれより約 2 倍多いにもかかわらずラジカル O のみの場合と比べて差は少なく、単位モル分率当たりの貢献度はラジカル O が大きいといえよう。

T D I モデルの場合についても同じ傾向を示しており、さらにラジカル O、OH、H の濃度が従来方式モデルより高いことよって平衡に達するまでの時間が短縮されることが分かった。

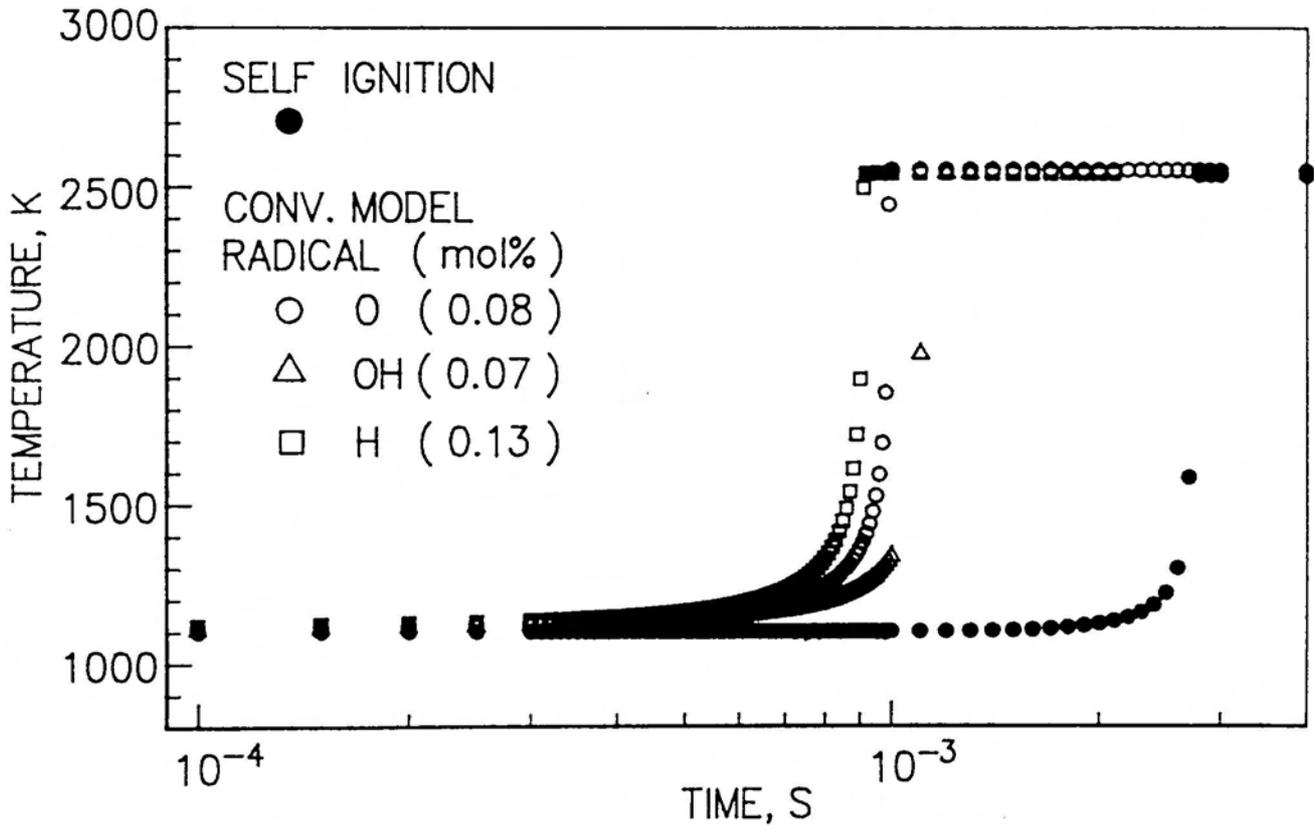


図 49 各ラジカルによる着火反応温度の変化
 (従来方式火炎核モデル: ●は放電による
 ラジカル増分のない自発火の場合)

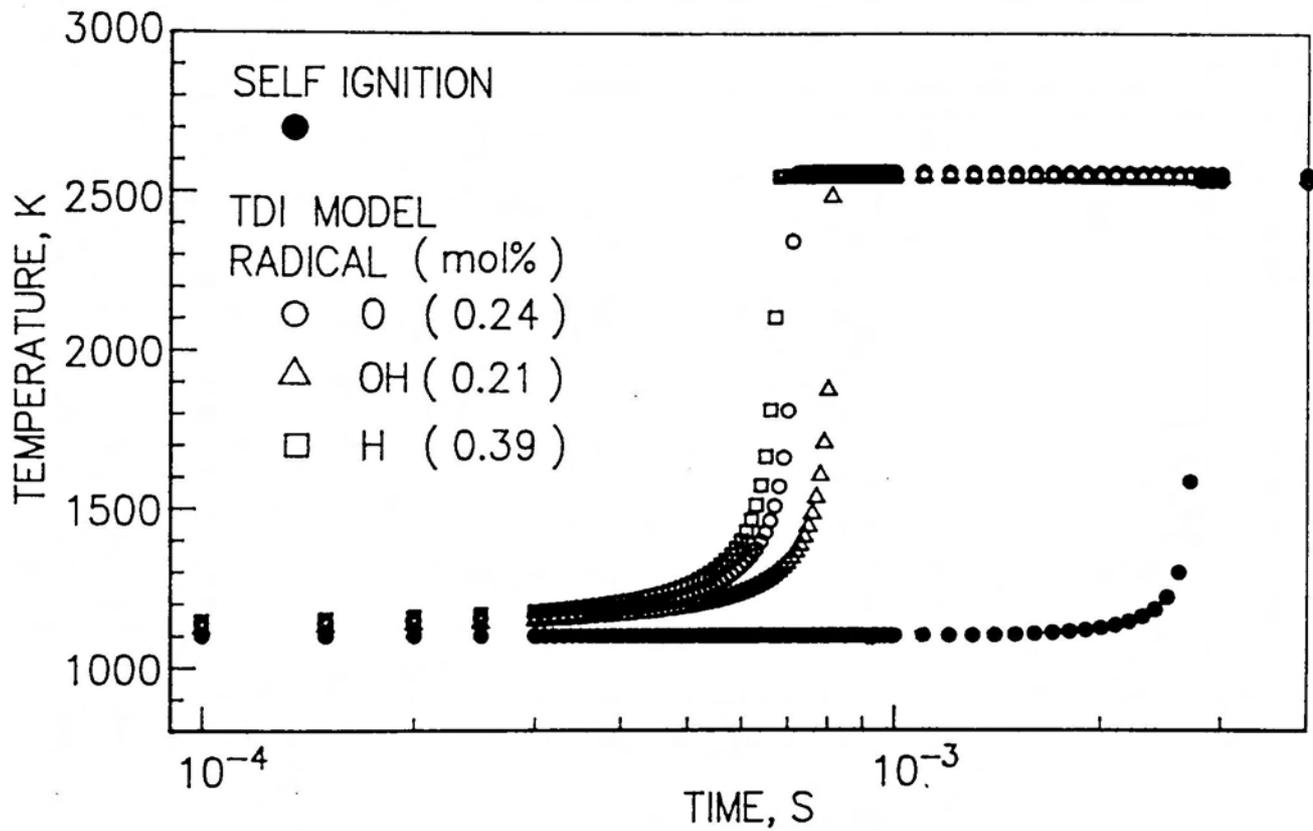


図 50 各ラジカルによる着火反応温度の変化
 (T D I 方式 火 炎 核 モ デ ル : ● は 放 電 に よ る
 ラ ジ カ ル 増 分 の な い 自 発 火 の 場 合)

2.3.3. 複数ラジカルの相互作用 前項の計算結果から、各ラジカルの個々の反応促進効果が示された。そこで、次にこの二つのラジカルの相互作用について検討するため、ラジカルOとOHを含む場合について計算を行い、それぞれが単独である場合との比較を行った。

図51は従来方式のモデルを、図52はTDI方式モデルについての比較を示している。このことから、単独のラジカルの場合より、複数のラジカルがある場合の方が効果が大きくなることが分かる。このことは図48で示した、ラジカルO、OH、Hの3種を含む場合ではさらに温度平衡までの時間が速くなることと符号する。

以上述べたように、火炎核モデル中の活性種の種類、及びその濃度の違いによる着火反応の温度変化を計算によって準定量的に見積もった。その結果、TDI方式のような高エネルギー付加による放電によって火炎核形成時に活性種の濃度が増加し、初期段階の燃焼促進に効果があることが検証出来た。

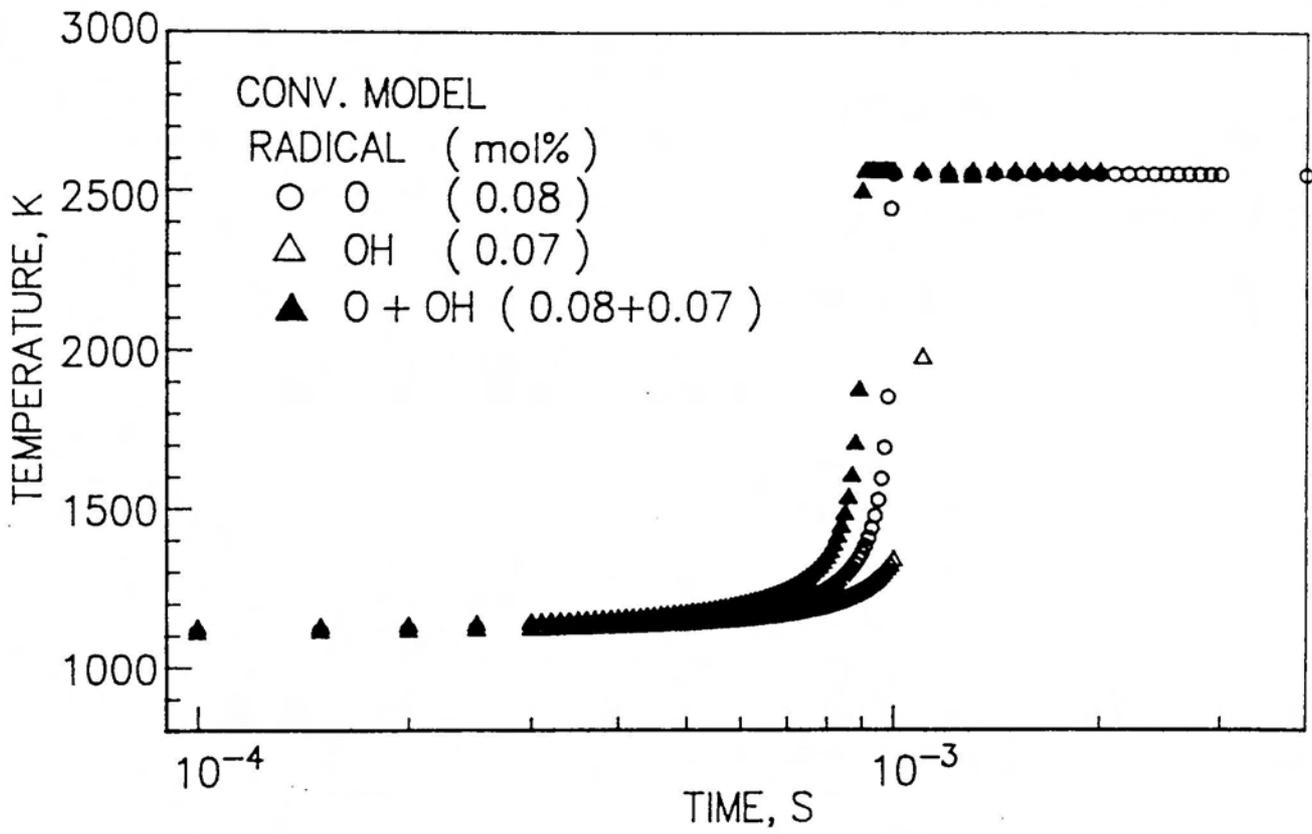


図 51 ラジカル O、OH の相互作用の比較
 (従来方式火炎核モデル)

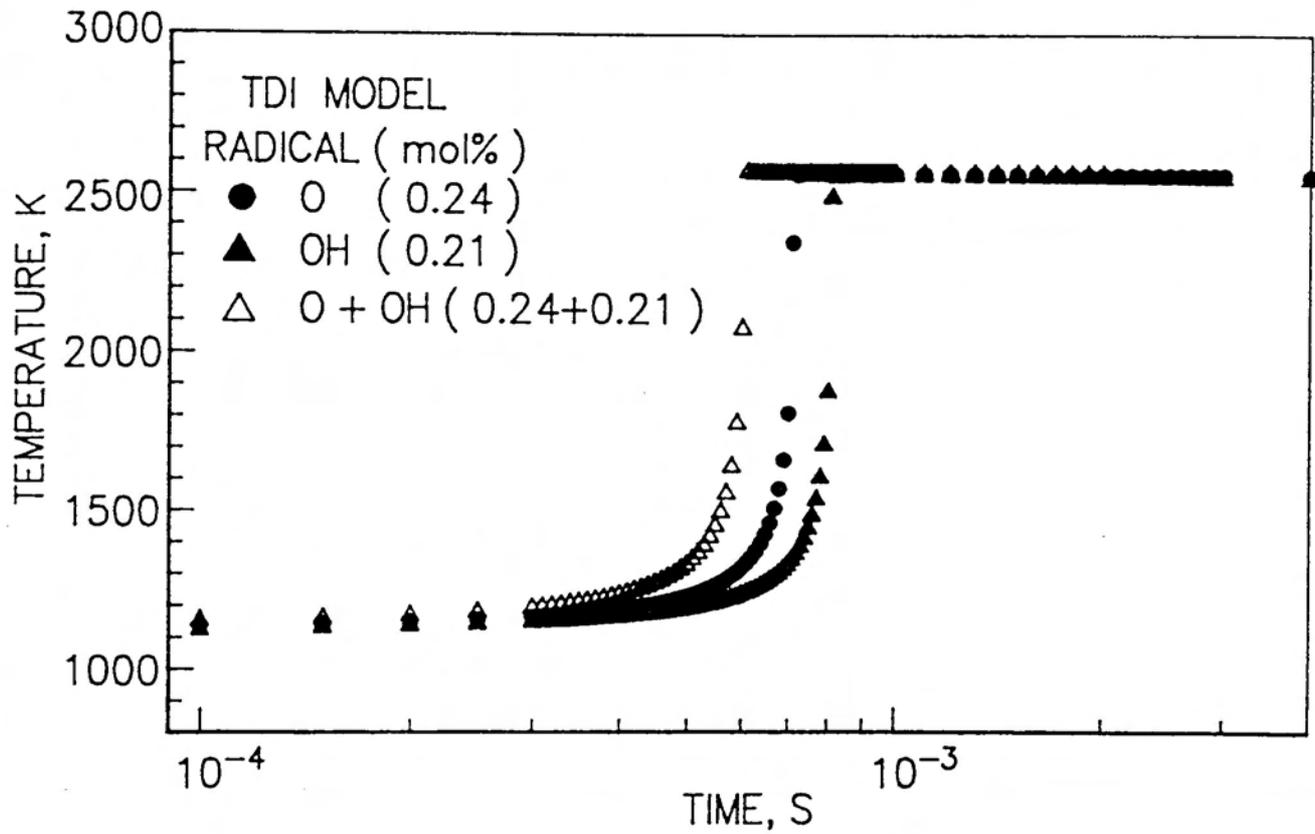


図 52 ラジカル O、OH の相互作用の比較
 (TDI 方式火炎核モデル)

第 X 章 総 括

第 X 章 総 括

火花点火機関における希薄燃焼と、その代替燃料としての天然ガスによる燃焼運転に共通する問題点として、燃焼速度の低下による機関の効率低下がある。

本研究では、希薄燃焼や代替燃料の燃焼による火花点火機関の燃焼改善策の一つとして、T D I 点火方式を提案し、この新点火方式への変更による火花点火機関の燃焼効率向上に着目した。さらに、この点火方式を二つのタイプのエンジンに適用し、運転実験を通してこの点火方式の燃焼促進効果ならびに有効性についての評価と検討を行った。

次に、天然ガス本来の燃料特性の欠点である燃焼速度の向上策として、天然ガスに水素添加を行い、点火方式の変更と合わせて運転実験を行うと共に、その燃焼促進効果についても考察を行った。

さらに、両点火方式の火炎核モデルを想定し、その中の活性化化学種の種類と濃度、それによる初期燃焼期間への貢献度を数値解析的に予測し比較を行った。

本章は、これまで述べて来た本研究の総括を行う。

1. T D I 点火方式の総括

火花点火機関における高エネルギー火花点火についてこれまで多くの研究がなされており、現在のところでは現

状の点火装置による点火エネルギー付加によって一応の満足が得られているという考え方が主流となっている。

しかし、本方式を実機に適用し従来方式による運転との比較を行った結果、エンジン運転性能比較の上で次のような効果が確認された。

- 1) T D I方式では、従来方式と比べて無負荷運転時のエンジン回転数が上昇し、それだけ燃焼期間の短縮が図られ、機関の効率向上が可能である。
- 2) T D I方式はその放電ギャップを広くすることによって、希薄、過濃限界が広がり、従来方式に比べて着火性が向上する。
- 3) 熱発生率の比較からも、T D I方式の方が燃焼促進に効果があると言える。
- 4) 排出ガス特性についても、希薄燃焼による運転限界が広がることから有害排出ガスの低減につながる。

さらに、本方式が一つの高エネルギーの付加方法にとどまらず、ロングスパークが燃焼室を縦断することによる化学作用の効果、すなわち放電時の活性化学種の寄与によって燃焼が改善され、以上のような効果が現れるとすれば大変意味深い点火方式であると考えられる。

2. 2サイクルエンジンへの適用効果

2サイクルエンジンは、低速、軽負荷時の運転性が不安定であり、2サイクルエンジン特有の掃気の不完全か

ら残留ガスによる不整燃焼が問題点とされている。また、この掃気過程時の新気の吹き抜けは、未燃ガスとしてのHC排出増加や燃料消費を増すことにつながる。

これまでの運転実験から、2サイクルエンジンへのTDI点火方式の適用によって無負荷運転時の燃焼安定性に効果が認められた。また、従来の点火方式に比べ燃料希薄および燃料過濃側で広範囲の安定した運転性が得られており、2サイクルエンジンの問題点である低速、軽負荷運転時の不整燃焼解決の一つの手段と考えられる。

3. 天然ガスエンジンへの適用効果

2サイクルエンジンの場合と同様、TDI点火方式の天然ガスエンジンへの適用は無負荷運転時の燃焼安定に寄与する。また、空気過剰率による運転限界が広範囲になり、特に量論値での運転においては良好な燃焼状態であることが確認された。しかし、希薄燃焼時には顕著に現れていない。この理由として希薄燃焼による運転時は、燃焼が燃焼初期期間ではなく火炎伝播に大きく依存すると考えられる。従って、燃料希薄混合気の燃焼において高エネルギーの効果が顕著には現れなかったものと考えられる。

4. 水素添加天然ガスの効果

熱発生率の比較において水素添加の効果は顕著に現れ

る。しかも希薄混合気による運転時の熱発生率は、点火方式の変更にかかわらず水素添加時の方が大きい。とすれば水素添加の効果は火炎伝播時に現れるということになる。水素の燃料特性としての燃焼速度の早さが、天然ガスの燃焼時に相乗効果として現れたものと考えられる。従って、天然ガスの調整時に水素の添加を行うことは天然ガスの燃焼促進に効果的である。

5. 活性種の初期燃焼期間に及ぼす影響

T D I 点火方式のシュミレーションによる解析の結果としては、メタン／空気混合気中へ付加エネルギーを増大させることによって、プラズマ中で生成されるラジカル O、OH、H の濃度が増加する。その結果、これら放電直後から着火温度上昇までの時間が短縮されることを計算によって検証した。但し、化学反応のみを考慮したモデルであり、実際のエンジン燃焼室内と状況を異にしている。つまり、吸入混合気の流れや乱流などのファクタは考慮しておらず、計算を行う際の初期条件も実機の運転状態によって異なる。しかしながら、高火花エネルギーの付加、特に放電ギャップの拡大によって活性種の生成状況が創始段階の火炎核の成長を促すことが示されており、牽いては燃焼終結までのプロセス全般に貢献することを裏付けるものと考えられる。

6. 実用化への課題

本研究では既存の機関の大幅な構造変更をしないことを前提として、既存の高電圧電源を使用して点火方式変更の効果を評価した。さらに放電ギャップを拡大させることで燃焼促進効果が向上し、放電の化学作用による効果が期待される。そのためには、機関の効率向上のためにも高圧縮された燃焼室内でも確実に火花放電を起こさせる必要性から、絶縁のための構造変更と高電圧発生装置の供給が不可欠である。これら以外にも実用化に際しては、耐久性のあるスパークプラグの開発が必要となる。

最後に、点火方式の変更によってその効果を実機による運転実験で確認しようと試みたが、火花点火機関特有の非定常な燃焼を、点火から燃焼終了までの突っ込みの形でしか評価できなかった。つまり、本方式が点火から火炎核の形成と成長にどれだけ寄与し続く火炎伝播にどのように影響を及ぼしているのか、またそれが点火から燃焼終了までの燃焼プロセスの中で、どの程度波及効果があるのか探求する必要があると考える。このためにも、さらに的を絞った燃焼基礎実験と解析を行いつつ、内燃機関の燃焼改善への適用を考えて行きたい。

誤差の評価について

誤差の評価について

1. サイクル変動による誤差について

エンジン回転数やP- τ 線図など、運転時のサイクル変動によって誤差が生じる。これによる誤差を低減する方法として、本研究では100サイクル以上のアベレージングを行い、実験結果とした。

2. 実験の繰り返しによる誤差について

排出ガス成分の測定比較などの実験は、その日の気候や計測器などのセッティングの僅かな違いによる影響を受けるため、比較すべき実験は同一日に行っている。

参 考 文 献

参考文献

第 I 章 参考文献

- 1) 酒井 忠美 : 高エネルギー火花による混合気の点火 ,
内燃機関 , Vol.9, No.103 p.11-23 (1970)
- 2) 熊谷、木村 : 点火栓の火花間隙長について , 機械の
研究 , Vol.1, No.6 p.24-25 (1949)
- 3) 河野、熊谷 : 容量火花による可燃性混合気の点火 ,
機械の研究 , Vol.26 No.5 p.39-46 (1974)
- 4) 山本 ほか : 火炎伝播形態が燃焼および排気に及ぼ
す影響 , - サラウンドコンバッションプロセスによ
る排気特性改善 - , 第9回内燃機関合同シンポジウ
ム講演論文集 105 (1991)
- 5) 松下 宗一 : リーンバーンシステムにおける混合気
形成と燃焼 , 自動車技術会学術講演会前刷集 , (1987)
- 6) M.Nakai et al : Stabilized Combustion in a
Spark Ignited Engine through a Long Spark
Duration, SAE Technical Paper 850075 (1985)
- 7) 浜井 九五ほか : ガソリンエンジンの燃焼安定化に
及ぼす火花放電特性の影響 , 第5回内燃機関合同シン
ポジウム講演論文集 205 (1985)

第 II 章 参考文献

- 1) J.A.Harrington and R.M.Pilot : Combustion and Emission Characteristics of Methanol, SAE Paper 750420
- 2) Reda M.Bata et al : Emissions From IC Engines Fueled With Alcohol-Gasoline Blends:A Literature Review, Transactions of the ASME, Vol.111, p.424-431 (1989)
- 3) M.N. Saeed et al : Combustion Phenomena of Alcohols in C.I.Engines, Transactions of the ASME, Vol.111, p.439-444 (1989)
- 4) 高田 寛 ほか : ヘビーデューティ直噴メタノールエンジンの性能および耐久性の改善, 内燃機関, Vol.31, No.396 p.24-28 (1992)
- 5) 橘 武史 : 天然ガスエンジンの希薄燃焼化, 内燃機関, Vol.32, No.399 p.25-30 (1993)
- 6) T. Iijima et al. : Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity, Combust. & Flame, Vol.65, p.35-43 (1986)
- 7) 福谷 格 : 天然ガスエンジンの性能, 内燃機関, Vol.32, No.399 p.15-24 (1993)

- 8) 片岡 克己 : ガスエンジンの燃焼特性に関する基礎研究 (各種気体燃料の定容燃焼器内燃焼過程), 第11回内燃機関シンポジウム講演論文集 102 (1993)

第 III 章 参考文献

- 1) 中村 重夫 ほか : ガソリンエンジンの熱効率向上の可能性, 自動車技術, Vol.45, No.8 p.12-17 (1991)
- 2) J.T.Kummer : Catalytic Exhaust Gas Treatment, J.C.Hilliard & G.S.Springer(Eds.): Fuel Economy in Road Vehicles Powerd by Spark Ignition Engines, Plenum p.70-81 (1984)
- 3) Irvin Glassman : COMBUSTION, Academic Press Inc. p.175-178 (1987)
- 4) 井口 哲 : リーンバーンによる効率向上の現状と課題, 自動車技術, Vol.45, No.8 p.18-24 (1991)
- 5) 木村、酒井 共著 : 内燃機関, 東京, 丸善株式会社, p.66-68 (1991)
- 6) 高田 昭夫 ほか : 縦渦層状希薄燃焼エンジンの開発, 自動車技術, Vol.46, No.1 p.68-73 (1992)
- 7) 伊東 輝行 ほか : 内燃機関の研究事情, 内燃機関, Vol.32, No.403 p.9-16 (1993)

- 8) 後藤 優一 : 超希薄燃焼における火炎速度と燃焼室壁面二次元温度分布測定法の研究, 日本機械学会論文集 (B編) No.90-1575A, Vol.57, 539 (1991)
- 9) 松下 宗一 : リーンバーンシステムにおける混合気形成と燃焼, 自動車技術会学術講演会前刷集 (1987)
- 10) L.Tozzi & E.K.Dabora : PLASMA JET IGNITION IN A LEAN-BURN CFR ENGINE, 19th Symposium(Int'l) on Combustion, Combustion Inst. p.1467-1473 (1984)
- 11) 小野 信輔 ほか : プラズマジェット点火とパルスジェット点火による希薄混合気の燃焼促進, 日本機械学会論文集 (B編), No.91-0644B, Vol.58, 546 (1991)
- 12) P.D.Fisher et al: An Investigation of Puff-Jet Ignition in an Internal Combustion Engine Fueled by Natural Gas, SAE Paper 860538 (1987)
- 13) 若井 和憲 : 希薄予混合気への点火手法の総括, 機械学会エンジンシステム部門、高効率火花点火機関の火炎伝播と着火研究分科会資料 (1992.6.20)
- 14) 山田 敏夫 ほか : 副室燃焼方式の燃焼特性 (第2報), 自動車技術会学術講演前刷集, 781A2 (1987)

第 IV 章 参 考 文 献

- 1) 金 栄吉 : 4 サイクル 火花 点火 機関 の 不整 燃焼 ,
内 燃 機 関 の 燃 焼 , 東 京 , 山 海 堂 , p.95-108 (1983)
- 2) 熊 谷、 木 村 : 点 火 栓 の 火 花 間 隙 長 に つ い て , 機 械 の
研 究 , Vol.1, No.6 p.24-25 (1949)
- 3) Heywood, J.B. : Internal Combustion Engine
Fundamentals, McGraw-Hill, p.427-450 (1988)
- 4) G.F.W.Ziegler et al : The Influence of Spark
Plug Orientation on Flame Kernel Formation in
Flowing Mixtures, 21st FISITA Congress, Belgrad,
865031 p.1225-1234 (1986)
- 5) 西 尾 兼 光 ほ か : ス パ ー ク プ ラ グ の 知 識 と 特 性 ,
東 京 , 山 海 堂 p.3-12 (1985)
- 6) 粟 野 誠 一 : 混 合 気 の 点 火 , 内 燃 機 関 工 学 , 東 京 ,
山 海 堂 p.284-285 (1973)
- 7) 熊 谷 清 一 郎 : 火 花 点 火 , 燃 焼 , 東 京 , 岩 波 書 店
p.18-50 (1980)

第 V 章 参考文献

- 1) 宮部 英也 : 2 サイクル火花点火機関の不整燃焼 ,
内燃機関の燃焼 内燃機関編集委員会編 , 東京 ,
山海堂 p.109-118 (1973)
- 2) 日本機械学会編 , 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機
構と制御法 p.160-168 (1980)

第 VI 章 参考文献

- 1) 辜 敬之 ほか : L N G 自動車に関する研究・開発 ,
自動車技術会学術講演会前刷集 912209 (1991)

第 VII 章 参考文献

- 1) 日本工業規格 JIS 2301 (1980)
- 2) 小林 清志 ほか : 燃焼工学 , 可燃限界 , 東京 ,
理工学社 p.62 (1992)

第 VIII 章 参考文献

- 1) 長尾 不二夫 : インジケータ線図とその解析, 内燃機関講義 上巻, 東京, 養賢堂 p.61 (1981)
- 2) 八田 ほか 編集 : ピストンエンジンの計測, 内燃機関計測ハンドブック, 東京, 朝倉書店 p.349-351 (1979)
- 3) 淵野 耕三 : 熱発生率 - クランク角度線図, 内燃機関実験テキスト p.75 (1992)
- 4) 斎藤 孟 : 燃焼に関するインジケータ線図の解析法, 内燃機関の燃焼に関する計測, 内燃機関編集委員会, 東京, 山海堂 p.65-66 (1973)
- 5) 五味 努 監修 : ガソリン機関の基本と性能, 自動車工学全書 4. ガソリンエンジン, 東京, 山海堂 p.40-41 (1980)

第 IX 章 参考文献

- 1) L.Tozzi & E.K.Dabora : PLASMA JET IGNITION IN A LEAN-BURN CFR ENGINE, 19th Symposium(Int'l) on Combustion, Combustion Inst. p.1467-1473 (1984)

- 2) 小野 信輔 ほか : プラズマジェット点火とパルス
ジェット点火による希薄混合気の燃焼促進, 日本機械
学会論文集 (B編), No.91-0644B, Vol.58, 546
(1991)
- 3) P.D.Fisher et al: An Investigation of Puff-Jet
Ignition in an Internal Combustion Engine
Fueled by Natural Gas, SAE Paper 860538
(1987)
- 4) R.Maly : Spark Ignition: Its Physics and Effect
on the Internal Combustion Engine, J.C.Hilliard
and G.S.Springer(Eds.): Fuel Economy in Road
Vehicles Powerd by Spark Ignition Engines,
Plenum p.91-148 (1984)
- 5) Heywood.J.B. : Internal Combustion Engine
Fundamentals, McGraw-Hill p.427-450 (1988)
- 6) 飯沼 一男 : 火花点火機関の火炎伝播課程, 自動車用
機関の燃焼と排気, 内燃機関編集委員会編, p.17-26,
東京, 山海堂 (1973)
- 7) 小林 清志 ほか : 燃焼工学, 各化学種濃度の時間的
変化, 東京, 理工学社 p.141 (1992)
- 8) JANAF Thermochemical Tables, Second Edition.
NSRDS-NBS37, U.S. National Bureau of Standerds,
(1971)

- 9) 堀沢 秀之 ほか：プラズマジェットの着火・保炎機構に関する研究，日本航空宇宙学会誌， Vol.40，
No.460 p.285-294 (1992)

謝 辞

本研究は平成2年4月から5年12月まで、九州工業大学設計生産工学、燃焼研究室に於いて行ったものである。その間、研究の立案や実施方法、まとめ等に関して直接ご指導を頂いた同大学、橋 武史助教授、津田時範助手に深く感謝致します。

この間、同研究室の江里口直君、内野稔秀君、原田毅君、諸石和利君には実験で、解析計算では笹井弘治君、平川哲也君にご協力をお願いしました。尚、実験装置、資材等に関して、西部ガス(株)総合研究所、山口英次、(株)アステック入江、川田勝三の両氏にご協力頂きました。

また、読売九州理工専門学校に勤務しながら本研究を行い得たのは、同大学大学院への入学を快諾、激励頂いた麻生忠二前校長、自動車学科、故越智賢治先生、ならびに本郷英士校長、自動車学科牛島熙也主任を始め同学科教員、岩崎勝次事務局長始め事務局職員の皆様のご協力があったればこそと感謝致しております。

最後に、本論文の審査にあたり、主査をお願い致しました九州工業大学設計生産工学、湯 晋一教授、ならびに審査頂きました原 泰毅、富田侑嗣、西 道弘の各教授に御礼申し上げます。

付録 1 . 熱発生率計算プログラム

熱発生率計算プログラム

```
500 CLS 3
600 SCREEN 3
700 WIDTH 80, 25
800 CONSOLE 0, 24, 0, 1
1000 LOCATE 10,8: PRINT"*****"
1010 LOCATE 10,9: PRINT"*          最小二乗法による熱発生率の計算          *"
1020 LOCATE 10,10:PRINT"*"
1030 LOCATE 10,11:PRINT"*      Copyright 1992, 6  Shigeki Hirashima      *"
1040 LOCATE 10,12:PRINT"*"
1050 LOCATE 10,13:PRINT"*****"
1060 '
1110 *FILENAMEINPUT
1120 ON ERROR GOTO 0
1130 PRINT :PRINT"   ファイルからデータを入力しますか？Y/N"
1140 *KAKUNIN1
1150 AA$ = INKEY$
1160 IF AA$="y" OR AA$="Y" THEN GOTO *FILEINPUT
1170 IF AA$="n" OR AA$="N" THEN GOSUB *KEYINPUT ELSE GOTO *KAKUNIN1
1180 *CONTINUE1
1190 *TEISEI1
1200 CLS 3
1210 FOR I = 1 TO NN
1220   LOCATE 5, I + 1, 1
1230   PRINT "X("; I; ")="; X0#(I)
1240   LOCATE 25, I + 1, 1
1250   PRINT "Y("; I; ")="; Y0#(I)
1260 NEXT I
1270 PRINT "": COLOR 6, 0
```

```

1280 PRINT " これでよろしいですか? 確認して下さい。Y/N"
1290 COLOR 7, 0
1300 *S
1310 AA$=INKEY$:IF AA$="y" OR AA$="Y" THEN GOTO *CONTINUE2
1320 IF AA$="n" OR AA$="N" THEN GOTO *TEISEI ELSE GOTO *S
1330 *TEISEI
1340 INPUT "訂正するデータの番号を入力して下さい。"; I
1350 PRINT "X("; I; ")="; : INPUT X0#(I)
1360 PRINT "Y("; I; ")="; : INPUT Y0#(I)
1370 CLS 3
1380 COLOR 5, 0
1390 PRINT "訂正後のデータです。"
1400 COLOR 7, 0
1410 FOR I = 1 TO NN
1420 LOCATE 5, I + 1, 1
1430 PRINT "X("; I; ")="; X0#(I)
1440 LOCATE 25, I + 1, 1
1450 PRINT "Y("; I; ")="; Y0#(I)
1460 NEXT I
1470 GOTO *TEISEI1
1480 *CONTINUE2
1500 *MENU1
1510 CLS 3
1690 GOSUB *LINLIN
1700 PRINT : PRINT
1710 *JISU
1720 INPUT " 近似式の次数を入力してください。"; N: N = N + 1
1730 IF N<=NN THEN GOTO *CONTINUE3
1740 PRINT USING "次数は###以下です。";NN : GOTO *JISU
1760 *CONTINUE3

```

```

1770 DIM A#(N, N + 1)
1780 A#(1, 1) = NN
1790 FOR I = 2 TO N
1800   FOR J = 1 TO NN
1810     A#(1, I) = A#(1, I) + X#(J) ^ (I - 1)
1820   NEXT J
1830 NEXT I
1840 FOR I = 2 TO N
1850   FOR J = 1 TO NN
1860     A#(I, N) = A#(I, N) + X#(J) ^ (N + I - 2)
1870   NEXT J
1880 NEXT I
1890 FOR I = 2 TO N
1900   J = N - 1
1910   WHILE J >= 1
1920     A#(I, J) = A#(I - 1, J + 1)
1930     J = J - 1
1940   WEND
1950 NEXT I
1960 FOR I = 1 TO N
1970   FOR J = 1 TO NN
1980     A#(I, N + 1) = A#(I, N + 1) + Y#(J) * X#(J) ^ (I - 1)
1990   NEXT J
2000 NEXT I
2010 '
2020 GOSUB *SAISYOU
2030 *MENU2
2040 CLS 3
2050 PRINT "  熱発生率・最小二乗法MENU"
2060 LOCATE 10, 2, 1

```

```

2070 PRINT "[1] 近似式の表示 "
2080 LOCATE 10, 4, 1
2090 PRINT "[2] X → Y "
2100 LOCATE 10, 6, 1
2110 PRINT "[3] Y → X "
2120 LOCATE 10, 8, 1
2130 PRINT "[4] 次数の変更"
2140 LOCATE 10, 10, 1
2150 PRINT "[5] データの確認"
2160 LOCATE 10, 12, 1
2170 PRINT "[6] 式の形式の変更"
2180 LOCATE 10, 14, 1
2190 PRINT "[7] グラフを描く"
2200 LOCATE 10, 16, 1
2210 PRINT "[8] 熱発生率の計算"
2220 LOCATE 10, 18, 1
2230 PRINT "[9] END "
2240 LOCATE 10, 20, 1
2250 PRINT "[1]～[9]から選んで下さい。"
2260 *SELECT2
2270 XXX$ = INKEY$
2280 IF XXX$>"9" OR XXX$<"1" THEN GOTO *SELECT2
2290 XXX = VAL(XXX$)
2300 ON XXX GOTO *SIKI,*Y,*X,*JC,*D,*SC,*GRAPH,*DQA,*EE
2310 PRINT XXX
2320 *JC
2330 ERASE A# : GOTO *JISU
2340 *SC
2350 ERASE A# : GOTO *MENU1
2360 '

```

```

2370 *SIKI
2380 LOCATE 5, 21
2390 PRINT "最小二乗法の式"
2400 GOSUB *LINLINSIKI
2410 PRINT "": PRINT "確認したら、何かキーを押して下さい。"
2420 *LOOP6
2430 BB$=INKEY$:IF BB$<>" THEN GOTO *MENU2
2440 GOTO *LOOP6
2450 '
2460 *Y
2470 LOCATE 5, 22
2480 INPUT "x ="; X
2490 IF XX = 2 OR XX = 4 THEN X = LOG(X)
2500 IF XX = 5 THEN X = SQR(X)
2510 Y = A#(1, N + 1)
2520 FOR I = 2 TO N
2530   Y = Y + A#(I, N + 1) * X ^ (I - 1)
2540 NEXT I
2550 IF XX = 3 OR XX = 4 THEN Y = EXP(Y)
2560 LOCATE 30, 22
2570 COLOR 4, 0
2580 PRINT "解は y = "; Y
2590 COLOR 7, 0
2600 PRINT "": PRINT "確認したら、何かキーを押して下さい。"
2610 *LOOP
2620 BB$=INKEY$:IF BB$<>" THEN GOTO *MENU2
2630 GOTO *LOOP
2640 '
2650 *X
2660 LOCATE 5, 22

```

```

2670 INPUT "y ="; Y
2680 IF XX = 3 OR XX = 4 THEN Y = LOG(Y)
2690 IF N = 2 THEN X = (Y - A#(1, 3)) / A#(2, 3)
2700 IF N<>3 THEN GOTO *J1
2710 X1 = (-1 * A#(2, 4) + SQR(A#(2, 4) ^ 2 - 4 * A#(3, 4) * (A#(1, 4) - Y))) / (2 * A#(3, 4))
2720 X2 = (-1 * A#(2, 4) - SQR(A#(2, 4) ^ 2 - 4 * A#(3, 4) * (A#(1, 4) - Y))) / (2 * A#(3, 4))
2730 *J1
2740 LOCATE 30, 22
2750 COLOR 4, 0
2760 IF N=2 THEN GOSUB *CHANGE1:PRINT "解は x = ";X
2770 IF N=3 THEN GOSUB *CHANGE2:PRINT "解は x = ";X1;" または";X2
2780 IF N >= 4 THEN PRINT "3次以上では計算できません。"
2790 COLOR 7, 0
2800 PRINT "": PRINT "確認したら、何かキーを押して下さい。"
2810 *LOOP1
2820 BB$=INKEY$:IF BB$<>" " THEN GOTO *MENU2
2830 GOTO *LOOP1
2840 '
2850 *D
2860 CLS 3
2870 PRINT "データを確認してください。"
2880 FOR I = 1 TO NN
2890 LOCATE 5, I + 1, 1
2900 PRINT "X("; I; ")="; X0#(I)
2910 LOCATE 25, I + 1, 1
2920 PRINT "Y("; I; ")="; Y0#(I)
2930 NEXT I
2940 PRINT : PRINT "確認したら、何かキーを押して下さい。"
2950 *LOOP2
2960 BB$=INKEY$:IF BB$<>" " THEN GOTO *MENU2

```

```

2970 GOTO *LOOP2
2980 '
2990 *GRAPH
3000 CLS 3
3010 XMAX = X(1): XMIN = X(1)
3020 FOR I = 2 TO NN
3030 IF X#(I) > XMAX THEN XMAX = X#(I)
3040 IF X#(I) < XMIN THEN XMIN = X#(I)
3050 NEXT I
3060 YMAX = Y(1): YMIN = Y(1)
3070 FOR I = 2 TO NN
3080 IF Y#(I) > YMAX THEN YMAX = Y#(I)
3090 IF Y#(I) < YMIN THEN YMIN = Y#(I)
3100 NEXT I
3110 LXMAX = 1.05 * XMAX: LXMIN = .95 * XMIN
3120 LYMAX = 1.05 * YMAX: LYMIN = .95 * YMIN
3130 XSPAN = LXMAX - LXMIN: YSPAN = LYMAX - LYMIN
3140 LINE (20, 20)-(20, 380): LINE -(620, 380)
3150 FOR I = 1 TO NN
3160 GX = 600 / XSPAN * (X#(I) - LXMIN) + 20
3170 GY = -360 / YSPAN * (Y#(I) - LYMIN) + 380
3180 PSET (GX, GY): CIRCLE (GX, GY), 5
3190 NEXT I
3200 FOR I = 30 TO 610
3210 X = (I - 20) * XSPAN / 600 + LXMIN
3240 Y = A#(1, N + 1)
3250 FOR J = 2 TO N
3260 Y = Y + A#(J, N + 1) * X ^ (J - 1)
3270 NEXT J
3290 GX = I

```

```

3300  GY = -360 / YSPAN * (Y - LYMIN) + 380
3310  IF (GY > 25) AND (GY < 365) THEN PSET (GX, GY)
3320  NEXT I
3330  PRINT "": PRINT "確認したら、何かキーを押して下さい。"
3340  *LOOP3
3350  BB$=INKEY$:IF BB$<>" " THEN GOTO *MENU2
3360  GOTO *LOOP3
3370  '
3380  *FILEOUTPUT
3390  LOCATE 15, 22
3400  INPUT "Xの最小値"; DXMIN
3410  LOCATE 25, 22
3420  PRINT
3430  LOCATE 15, 22
3440  INPUT "Xの最大値"; DXMAX
3450  LOCATE 25, 22
3460  PRINT
3470  *OUTFILENAME
3475  LOCATE 15, 22
3476  PRINT
3477  PRINT
3480  ON ERROR GOTO 0
3490  LOCATE 15, 22
3500  INPUT "出力するデータのファイル名?"; OUTFILENAME$
3510  ON ERROR GOTO *OUTFILEERR
3520  OPEN OUTFILENAME$ FOR INPUT AS #1
3530  ON ERROR GOTO 0
3540  LOCATE 15, 22
3550  PRINT "ファイル名が無効か、すでにそのファイルが存在しています。"
3560  PRINT " 確認したら、何かキーを押して下さい。"

```

```

3570 CLOSE #1
3580 *LOOP5
3590 BB$=INKEY$:IF BB$<>"" THEN GOTO *OUTFILENAME
3600 GOTO *LOOP5
3610 *DATAOUT
3620 ON ERROR GOTO 0
3630 XSTEP = (DXMAX - DXMIN) / 20
3640 DIM DX(20), DY(20)
3650 I = DXMIN: K = 1
3660 WHILE I <= DXMAX
3665   DX(K) = I: X = I
3670   IF XX = 2 OR XX = 4 THEN X = LOG(I)
3680   IF XX = 5 THEN X = SQR(I)
3690   DY(K) = A#(1, N + 1)
3700   FOR J = 2 TO N
3710     DY(K) = DY(K) + A#(J, N + 1) * X ^ (J - 1)
3720   NEXT J
3730   IF XX = 3 OR XX = 4 THEN DY(K) = EXP(DY(K))
3740   K = K + 1: I = K * XSTEP + DXMIN
3750 WEND
3760 FOR I = 1 TO 19
3770   PRINT #1, USING "##.###^", DX(I)
3780 NEXT I
3790 PRINT #1, USING "##.###^"; DX(20)
3800 PRINT #1, : PRINT #1, : PRINT #1,
3810 FOR I = 1 TO 19
3820   PRINT #1, USING "##.###^", DY(I)
3830 NEXT I
3840 PRINT #1, USING "##.###^"; DY(20)
3850 CLOSE #1

```

```

3860 ERASE DX, DY
3870 GOTO *MENU2
3880 '
3890 *E
3900 LOCATE 10, 22, 1
3910 COLOR 7, 0
3920 PRINT "熱発生率の計算を行いますか？ Y/N"
3930 COLOR 7, 0
3940 CC$=INKEY$:IF CC$="y" OR CC$="Y" THEN GOTO *DQA
3950 IF CC$="n" OR CC$="N" THEN GOTO *EE ELSE GOTO *E
3960 *EE
3970 CONSOLE 0, 24, 1, 1
3980 CLS 3
3990 END
4000 '
4010 *SAISYOU
4020 '*****
4030 '* *
4040 '* Gauss-Jordan Reduction Method *
4050 '* *
4060 '* *
4070 '* *
4080 '*****
4090 '連立方程式:  $A \cdot x = b$ 
4100 '行列の大きさ: N
4110 '拡大行列の格納領域: A (N,N+1)
4120 '
4130 FOR L = 1 TO N
4140 GOSUB *PBT
4150 AL# = A#(L, L)

```

```

4160  FOR K = 1 TO N + 1
4170    A#(L, K) = A#(L, K) / AL#
4180  NEXT K
4190  FOR J = 1 TO N
4200    IF J=L THEN *JUMPG1
4210    AJL# = A#(J, L)
4220    FOR K = L TO N + 1
4230      A#(J, K) = A#(J, K) - A#(L, K) * AJL#
4240    NEXT K
4250    *JUMPG1
4260  NEXT J
4270 NEXT L
4280 RETURN
4290 '
4300 'ピボット操作
4310 *PBT
4320 IPM = L
4330 APM# = ABS(A#(IPM, IPM))
4340 FOR JP = L + 1 TO N
4350   APC# = ABS(A#(JP, L)): IF APM# < APC# THEN IPM = JP: APM# = APC#
4360 NEXT JP
4370 IF IPM = L THEN RETURN
4380 FOR JP = L TO N + 1
4390   AP# = A#(L, JP): A#(L, JP) = A#(IPM, JP): A#(IPM, JP) = AP#
4400 NEXT JP
4410 RETURN
4420 '
4430 *KEYINPUT
4440 INPUT "データの数"; NN
4450 DIM XO#(NN), YO#(NN), X#(NN), Y#(NN)

```

```

4460 FOR I = 1 TO NN
4470 PRINT "X("; I; ")="; : INPUT XO#(I)
4480 PRINT "Y("; I; ")="; : INPUT YO#(I)
4490 NEXT I
4500 RETURN
4510 '
4520 *FILEINPUT
4530 ON ERROR GOTO 0
4540 PRINT: INPUT " データファイル名:"; FILENAME$
4550 ON ERROR GOTO *FILEERR
4560 OPEN FILENAME$ FOR INPUT AS #1
4570 ON ERROR GOTO 0
4580 PRINT "データを読み込んでいます。しばらくお待ちください。"
4590 NN = 0
4600 WHILE NOT EOF(#1)
4610 INPUT #1, TEMP1, TEMP2
4620 NN = NN + 1
4630 WEND
4640 CLOSE #1
4650 OPEN FILENAME$ FOR INPUT AS #1
4660 DIM XO#(NN), YO#(NN), X#(NN), Y#(NN)
4670 FOR I = 1 TO NN
4680 INPUT #1, XO#(I), YO#(I)
4690 NEXT I
4700 CLOSE #1
4710 GOTO *CONTINUE1
4720 '
4730 *FILEERR
4740 CLS 3
4750 PRINT "ファイル名が無効は無効です。"

```

```

4760 PRINT "      再度ファイル名を入力してください。"
4770 PRINT """: PRINT "確認したら、何かキーを押して下さい。"
4780 CLOSE #1
4790 *LOOP4
4800 BB$=INKEY$:IF BB$<>" THEN GOTO *ERREND
4810 GOTO *LOOP4
4820 *ERREND
4830 CLS 3
4840 RESUME *FILENAMEINPUT
4850 '
4860 *OUTFILEERR
4870 CLOSE #1
4880 LOCATE 15, 22
4890 PRINT "データを書き込んでいます。しばらくお待ちください。"
4900 OPEN OUTFILENAME$ FOR OUTPUT AS #1
4910 RESUME *DATAOUT
4920 '
4930 *LINLIN
4940 FOR I = 1 TO NN
4950   X#(I) = XO#(I)
4960   Y#(I) = YO#(I)
4970 NEXT I
4980 RETURN
4990 '
5000 *LOGLIN
5010 FOR I = 1 TO NN
5020   X#(I) = LOG(XO#(I))
5030   Y#(I) = YO#(I)
5040 NEXT I
5050 RETURN

```

```

5060 '
5070 *LINLOG
5080 FOR I = 1 TO NN
5090   X#(I) = X0#(I)
5100   Y#(I) = LOG(Y0#(I))
5110 NEXT I
5120 RETURN
5130 '
5140 *LOGLOG
5150 FOR I = 1 TO NN
5160   X#(I) = LOG(X0#(I))
5170   Y#(I) = LOG(Y0#(I))
5180 NEXT I
5190 RETURN
5200 '
5210 *ROOTLIN
5220 FOR I = 1 TO NN
5230   X#(I) = SQR(X0#(I))
5240   Y#(I) = Y0#(I)
5250 NEXT I
5260 RETURN
5270 '
5280 *LINLINSIKI
5290 CLS:LOCATE 1, 5
5300 PRINT "P( $\theta$ )="; A#(1, N + 1)
5305 LPRINT "P( $\theta$ )="; A#(1, N + 1)
5310 'LOCATE 23, 23
5320 PRINT A#(2, N + 1);" $\theta$ "
5325 LPRINT A#(2, N + 1);" $\theta$ "
5330 FOR I = 3 TO N

```

```

5340 LOCATE (37 + 17*(I - 3)), 24
5350 PRINT A#(I, N + 1);"θ^";I - 1
5355 LPRINT A#(I, N + 1);"θ^";I - 1
5360 NEXT I
5370 RETURN
5380 '
5390 *LOGLINSIKI
5400 LOCATE 10, 22
5410 PRINT USING "y = EXP{####.####}"; A#(1, N + 1)
5420 LOCATE 23, 22
5430 PRINT USING " + ####.#### X"; A#(2, N + 1)
5440 FOR I = 3 TO N
5450 LOCATE (41 + 15 * (I - 3)), 22
5460 PRINT USING " + ####.#### X^##"; A#(I, N + 1); I - 1
5470 NEXT I
5480 LOCATE (40 + 15 * (I - 1)), 22: PRINT "}"
5490 RETURN
5500 '
5510 *LINLOGSIKI
5520 LOCATE 10, 22
5530 PRINT USING "LOG(y) = ####.####"; A#(1, N + 1)
5540 B = 0
5550 FOR I = 2 TO N
5560 B = B + (I - 1) * A#(I, N + 1)
5570 NEXT I
5580 LOCATE 26, 22
5590 PRINT USING " + ####.####LOG (x)"; B
5600 RETURN
5610 '
5620 *LOGLOGSIKI

```

```

5630 LOCATE 10, 22
5640 PRINT USING "y = exp{####.####}"; A#(1, N + 1)
5650 B = 0
5660 FOR I = 2 TO N
5670   B = B + (I - 1) * A#(I, N + 1)
5680 NEXT I
5690 LOCATE 26, 22
5700 PRINT USING " + ####.####LOG (x)}"; B
5710 RETURN
5720 '
5730 *ROOTLINSIKI
5740 LOCATE 10, 22
5750 PRINT USING "y = ####.####"; A#(1, N + 1)
5760 LOCATE 23, 22
5770 PRINT USING " + ####.####  $\sqrt{X}$ "; A#(2, N + 1)
5780 FOR I = 3 TO N
5790   LOCATE (39 + 19 * (I - 3)), 22
5800   PRINT USING " + ####.####  $\sqrt{X^{##}}$ "; A#(I, N + 1); I - 1
5810 NEXT I
5820 RETURN
5830 '
5840 *CHANGE1
5850 IF XX = 3 OR XX = 4 THEN X = EXP(X)
5860 IF XX = 5 THEN X = SQR(X)
5870 RETURN
5880 '
5890 *CHANGE2
5900 IF XX = 3 OR XX = 4 THEN X1 = EXP(X1): X2 = EXP(X2)
5910 IF XX = 5 THEN X1 = SQR(X1): X2 = SQR(X2)
5920 RETURN

```

```

10000 *DQA          '熱発生率計算プログラム
10010 'CLS :PRINT
10020 PI=3.1416
10030 D=68*10^-3 : L=53*10^-3 : CR=26.5*10^-3 : CL=92.5*10^-3 : R=CR/CL
10040 E=6.2 : VC=37*10^-6 : K=1.3 : A=1
10050 AP=PI/4*D^2 :CLS :PRINT :PRINT FILENAME$ :LPRINT FILENAME$
10055 PRINT;"DEG(θ);"      dQ/dθ (J/DEG)"
10056 LPRINT;"DEG(θ);"    dQ/dθ (J/DEG)"
10060 FOR DEG=-20 TO 50 STEP 5
10070 TH=DEG*PI/180
10080 VTH=1/2*AP*L*((1-COS(TH))+R/4*(1-COS(2*TH)))+VC/(E-1)
10090 DVTH=1/2*AP*L*(SIN(TH)+R/2*SIN(2*TH))
10100 PTH=10^6*(A#(1,N+1)+A#(2,N+1)*DEG)
10110 FOR I=3 TO N
10120 P=10^6*A#(I,N+1)*DEG^(I-1)
10130 PTH=PTH+P
10140 NEXT I
10160 DPTH=10^6*(A#(2,N+1)+2*A#(3,N+1)*DEG)
10170 FOR I=4 TO N
10180 DP=10^6*(I-1)*A#(I,N+1)*DEG^(I-2)
10190 DPTH=DPTH+DP
10200 NEXT I
10230 DDQ=A/(K-1)*(K*PTH*DVTH+VTH*DPTH)
10240 PRINT ;DEG,DDQ,VTH,DVTH,PTH,DPTH
10245 LPRINT ;DEG,DDQ
10250 NEXT DEG
10260 PRINT" これでよろしいですか。 Y/N"
10270 *Q
10280 QQ$=INKEY$: IF QQ$="Y" OR QQ$="y" THEN GOTO *MENU2
10290 IF QQ$="N" OR QQ$="n" THEN GOTO 500 ELSE GOTO *Q

```

付録 2 . 素反応化学式

Fuel oxidation mechanism. Reaction rates in cm³-mole-sec-cal units. $k=AT\exp(-E_a/RT)$

		A	n	E	A	n	E
1	H + O2 = O + OH	2.188D14	0.000	16790.000	1.738D13	0.000	680.000
2	H2 + O = H + OH	1.820D10	1.000	8900.000	8.318D9	1.000	6950.000
3	H2O + O = OH + OH	6.761D13	0.000	18350.000	6.310D12	0.000	1100.000
4	H2O + H = H2 + OH	9.550D13	0.000	20300.000	2.188D13	0.000	5150.000
5	H2O2 + OH = H2O + HO2	1.0D13	0.000	1800.000	2.818D13	0.000	32790.000
6	H2O + M = H + OH + M	2.188D16	0.000	105000.000	1.413D23	-2.000	0.000
7	H + O2 + M = HO2 + M	1.660D15	0.000	-1000.000	2.291D15	0.000	45900.000
8	HO2 + O = OH + O2	5.248D13	0.000	1000.000	6.457D13	0.000	56610.000
9	HO2 + H = OH + OH	2.512D14	0.000	1900.000	1.202D13	0.000	40100.000
10	HO2 + H = H2 + O2	2.512D13	0.000	700.000	5.495D13	0.000	57800.000
11	HO2 + OH = H2O + O2	5.012D13	0.000	1000.000	6.310D14	0.000	73860.000
12	H2O2 + O2 = HO2 + HO2	3.981D13	0.000	42640.000	1.0D13	0.000	1000.000
13	H2O2 + M = OH + OH + M	1.202D17	0.000	45500.000	9.120D14	0.000	-5070.000
14	H2O2 + H = HO2 + H2	1.698D12	0.000	3750.000	7.244D11	0.000	18700.000
15	O + H + M = OH + M	1.0D16	0.000	0.000	7.943D19	-1.000	103720.000
16	O2 + M = O + O + M	5.129D15	0.000	115000.000	4.677D15	-0.28D0	0.000
17	H2 + M = H + H + M	2.188D14	0.000	96000.000	3.020D15	0.000	0.000
18	CO + OH = CO2 + H	1.514D7	1.300	-770.000	1.698D9	1.300	21580.000
19	CO + HO2 = CO2 + OH	1.514D14	0.000	23650.000	1.698D15	0.000	85500.000
20	CO + O + M = CO2 + M	5.888D15	0.000	4100.000	5.495D21	-1.000	131780.000
21	CO2 + O = CO + O2	2.754D12	0.000	43830.000	3.162D11	0.000	37600.000
22	HCO + OH = CO + H2O	1.0D14	0.000	0.000	2.818D15	0.000	105150.000
23	HCO + M = H + CO + M	1.445D14	0.000	19000.000	5.012D11	1.000	1550.000
24	HCO + H = CO + H2	1.995D14	0.000	0.000	1.318D15	0.000	90000.000
25	HCO + O = CO + OH	1.0D14	0.000	0.000	2.884D14	0.000	87900.000
26	HCO + HO2 = CH2O + O2	1.0D14	0.000	3000.000	3.631D15	0.000	46040.000
27	HCO + O2 = CO + HO2	3.981D12	0.000	7000.000	8.913D12	0.000	39290.000
28	CH2O + M = HCO + H + M	3.311D16	0.000	81000.000	1.413D11	1.000	-11770.000
29	CH2O + OH = HCO + H2O	7.586D12	0.000	170.000	2.570D12	0.000	29990.000
30	CH2O + H = HCO + H2	3.311D14	0.000	10500.000	2.630D13	0.000	25170.000
31	CH2O + O = HCO + OH	5.012D13	0.000	4600.000	1.738D12	0.000	17170.000
32	CH2O + HO2 = HCO + H2O2	1.0D12	0.000	8000.000	1.096D11	0.000	6590.000
33	CH4 + M = CH3 + H + M	1.413D17	0.000	88400.000	2.818D11	1.000	-19520.000
34	CH4 + H = CH3 + H2	1.260D14	0.000	11900.000	4.786D12	0.000	11430.000
35	CH4 + OH = CH3 + H2O	3.467D3	3.08D0	2000.000	5.754D2	3.08D0	16680.000
36	CH4 + O = CH3 + OH	1.585D13	0.000	9200.000	2.691D11	0.000	6640.000
37	CH4 + HO2 = CH3 + H2O2	1.995D13	0.000	18000.000	1.047D12	0.000	1450.000
38	CH3 + OH = CH2O + H2	3.981D12	0.000	0.000	1.202D14	0.000	71730.000
39	CH3 + O = CH2O + H	1.288D14	0.000	2000.000	1.698D15	0.000	71630.000
40	CH2O + CH3 = CH4 + HCO	1.0D10	0.5D0	6000.000	2.089D10	0.5D0	21140.000
41	CH3 + HCO = CH4 + CO	3.020D11	0.5D0	0.000	5.129D13	0.5D0	90470.000
42	CH3 + HO2 = CH4 + O2	1.0D12	0.000	400.000	7.586D13	0.000	58590.000
43	O + N2 = N + NO	7.6D13	0.000	75477.1D0	1.6D13	0.000	0.000
44	H + NO = N + OH	1.7D14	0.000	48662.9D0	4.5D13	0.000	0.000
45	O + NO = N + O2	1.5D9	1.000	38731.7D0	6.4D9	1.000	6256.6D0
46	NO + OH = H + NO2	2.0D11	0.5D0	30786.7D0	3.5D14	0.000	1469.8D0
47	NO + O2 = O + NO2	1.0D12	0.000	45286.3D0	1.0D13	0.000	595.9D0
48	NO2 + H2 = H + HNO2	2.4D13	0.000	28800.5D0	5.0D11	0.5D0	2979.4D0
49	NO2 + OH = NO + HO2	1.0D11	0.5D0	11917.4D0	3.0D12	0.5D0	2383.5D0
50	N2 + M = N + N + M	4.3D22	-1.5D0	224842.4D0	2.3D20	-1.6D0	0.000
51	HNO2 + M = NO + OH + M	5.0D17	-1.0D0	49656.0D0	8.0D15	0.000	-1986.2D0
52	NO2 + M = NO + O + M	1.1D16	0.000	65545.9D0	1.1D15	0.000	-1867.1D0
53	H2 + O2 = OH + OH	2.5D12	0.000	38981.1D0	5.7D11	0.000	29677.3D0
54	H2O + O = H + HO2	5.8D11	0.5D0	57051.6D0	3.0D13	0.000	0.000
55	H2O + OH = H2 + HO2	1.2D12	0.21D0	79185.2D0	1.7D13	0.000	25023.5D0
56	CH3 + HO2 = CH3O + OH	3.236D13	0.000	0.000	1.0D10	0.000	0.000
57	CH3 + O2 = CH3O + O	4.786D13	0.000	29000.0D0	3.020D14	0.000	730.000
58	CH3O + M = CH2O + H + M	5.012D13	0.000	21000.0D0	1.0D9	1.000	-2560.000
59	CH3O + O2 = CH2O + HO2	1.0D12	0.000	6000.000	1.288D11	0.000	32170.000

計算に用いた化学種の種類

```
*****  
** SPECIES  
**      1      H  
**      2      O  
**      3     H2O  
**      4     H2O2  
**      5     OH  
**      6     O2  
**      7     H2  
**      8     CO  
**      9     CO2  
**     10     CH2O  
**     11     CH4  
**     12     CH3  
**     13     N2  
**     14     N  
**     15     NO  
**     16     NO2  
**     17     HO2  
**     18     HCO  
**     19     HNO2  
**     20     CH3O  
**     21     M  
*****
```

付録 3 . 燃 烧 温 度 数 值 解 析 プ ロ グ ラ ム

TRANSIENT RADICAL CONCENTRATION

AIR + CH₄

WITH O , OH, H

*

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K,M,O-Z)

PARAMETER (NML=21,NRC=59)

DIMENSION K(NRC,2),CPD(NML,5),DHF(NML),VR(NRC,2)

DIMENSION DCC(NML),CC(NML),A(NRC,2),TN(NRC,2),EA(NRC,2)

DIMENSION XX(NML),HH(NML)

DIMENSION CP(NML)

DIMENSION ITM(97)

DATA ITM / 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,

& 100,200,300,400,500,600,700,

& 800,900,1000,2000,3000,4000,5000,6000,7000,

& 8000,9000,10000,100000,110000,120000,130000,140000,

& 150000,160000,170000,180000,190000,

& 200000,300000,400000,500000,600000,700000,

& 800000,900000,1000000,1100000,1200000,1300000,

& 1400000,1500000,1600000,1700000,1800000,1900000,

& 2000000,3000000,4000000,5000000,

& 6000000,7000000,8000000,9000000,10000000,11000000,

& 12000000,13000000,14000000,15000000,16000000,17000000,

& 18000000,19000000, 20000000,

& 30000000,40000000,50000000,60000000,70000000,80000000,

& 90000000,100000000,110000000,120000000,130000000,

& 140000000,150000000,160000000,170000000,180000000,

& 190000000,200000000,220000000,240000000,300000000 /

ISTP=0

IT=1

***** INITIAL CONDITIONS *****

TPO = 298.000

TP1 = 293.000

TPG = 1300.0D0

PP = 20.0 D6

* PP = 1.013250 D6

RU = 8.3143 D7

R = 8.31451 / 4.18605

PHST = 1.0000D0

	L/MIN	SEC/MIN	CM3/L	
* VAIR=	9.52D0	/60.0D0	* 1000.0D0	
VCH4 =	1.00D0	/60.0D0	* 1000.0D0	* PHST
VPJ1 =	VCH4	* 0.0800	/ 100.0D0	
* VPJ2 =	VCH4	* 0.0000	/ 100.0D0	
* VPJ3 =	VCH4	* 0.072D0	/ 100.0D0	
* VPJ4 =	VCH4	* 0.130D0	/ 100.0D0	

MAIR= PP*VAIR / RU / TP1

MCH4 = PP*VCH4 / RU / TP1

MPJ1 = PP*VPJ1 / RU / TP1

* MPJ2 = PP*VPJ2 / RU / TP1

* MPJ3 = PP*VPJ3 / RU / TP1

* MPJ4 = PP*VPJ4 / RU / TP1

KMAX0= 1.0D+17

KMAX = KMAX0

DTM =1.0D-9

TM = 0.0D0

TP = TPG

VAIR = VAIR * TPG / TP1

VCH4 = VCH4 * TPG / TP1

VPJ1 = VPJ1 * TPG / TP1

* VPJ2 = VPJ2 * TPG / TP1

* VPJ3 = VPJ3 * TPG / TP1

* VPJ4 = VPJ4 * TPG / TP1

```

*****
      OPEN ( 3,FILE='conv',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
&          FORM='FORMATTED',FILEOPT='BUFFER=10')
*****
*****

* * 0 * * *
      CC(2) = MPJ1/( VCH4 + VAIR + VPJ1 + VPJ2 + VPJ3 + VPJ4 )
* * N * * *
*      CC(14) =MPJ2/( VCH4 + VAIR + VPJ1 + VPJ2 + VPJ3 + VPJ4 )
* * H * * *
*      CC(1) = MPJ3/( VCH4 + VAIR + VPJ1 + VPJ2 + VPJ3 + VPJ4 )
* * OH * * *
*      CC(5) = MPJ4/( VCH4 + VAIR + VPJ1 + VPJ2 + VPJ3 + VPJ4 )
*****

      CC(11) =          MCH4 /( VCH4+VAIR+VPJ1+VPJ2+VPJ3+VPJ4 )
      CC( 3) = 0.01D0 * MAIR /( VCH4+VAIR+VPJ1+VPJ2+VPJ3+VPJ4 )
      CC( 6) = 0.21D0 * MAIR /( VCH4+VAIR+VPJ1+VPJ2+VPJ3+VPJ4 )
      CC(13) = 0.79D0 * MAIR /( VCH4+VAIR+VPJ1+VPJ2+VPJ3+VPJ4 )

***** READ REACTION RATE CONSTANTS ----- FF11 *****
      OPEN (11,FILE='tc333',STATUS='OLD',ACCESS='SEQUENTIAL')

      DO 33 J=1,2
      DO 33 I=1,NRC
      READ(11, * ) A(I,J),TN(I,J),EA(I,J),II
33 CONTINUE
***** READ CP , DHF -----FF11 *****
      DO 44 I=1,NML-1
      READ(11, * ) DHF(1),( CPD(I,J),J=1,5 )
44 CONTINUE

      CLOSE (11)

111 CC(21) = CC( 1) + CC( 2) + CC( 3)
&        + CC( 4) + CC( 5) + CC( 6)
&        + CC( 7) + CC( 8) + CC( 9)

```

```

&      + CC(10) + CC(11) + CC(12)
&      + CC(13) + CC(14) + CC(15)
&      + CC(16) + CC(17) + CC(18)
&      + CC(19) + CC(20)

```

```

CCC    = CC( 1) + CC( 2) + CC( 3)
&      + CC( 4) + CC( 5) + CC( 6)
&      + CC( 7) + CC( 8) + CC( 9)
&      + CC(10) + CC(11) + CC(12)
&      + CC(13) + CC(14) + CC(15)
&      + CC(16) + CC(17) + CC(18)
&      + CC(19) + CC(20)

```

```

DO 55 J=1,2
  DO 55 I=1,NRC
    TP = DABS(TP)
    K( I,J) = A( I,J)*(TP**TN( I,J))*DEXP(-EA( I,J)/R/TP )
&                                                    / KMAX
55 CONTINUE

```

```

CA      = CCC*CCC*CCC

```

```

VR( 1,1) = K( 1,1)*CC( 1)*CC( 6)      / CA
VR( 2,1) = K( 2,1)*CC( 7)*CC( 2)      / CA
VR( 3,1) = K( 3,1)*CC( 3)*CC( 2)      / CA
VR( 4,1) = K( 4,1)*CC( 3)*CC( 1)      / CA
VR( 5,1) = K( 5,1)*CC( 4)*CC( 5)      / CA
VR( 6,1) = K( 6,1)*CC( 3)*CC(21)      / CA
VR( 7,1) = K( 7,1)*CC( 1)*CC( 6)*CC(21) / CA
VR( 8,1) = K( 8,1)*CC(17)*CC( 2)      / CA
VR( 9,1) = K( 9,1)*CC(17)*CC( 1)      / CA
VR(10,1) = K(10,1)*CC(17)*CC( 1)      / CA
VR(11,1) = K(11,1)*CC(17)*CC( 5)      / CA
VR(12,1) = K(12,1)*CC( 4)*CC( 6)      / CA
VR(13,1) = K(13,1)*CC( 4)*CC(21)      / CA
VR(14,1) = K(14,1)*CC( 4)*CC( 1)      / CA
VR(15,1) = K(15,1)*CC( 2)*CC( 1)*CC(21) / CA
VR(16,1) = K(16,1)*CC( 6)*CC(21)      / CA
VR(17,1) = K(17,1)*CC( 7)*CC(21)      / CA

```

VR(18,1) = K(18,1)*CC(8)*CC(5) / CA
 VR(19,1) = K(19,1)*CC(8)*CC(17) / CA
 VR(20,1) = K(20,1)*CC(8)*CC(2)*CC(21) / CA
 VR(21,1) = K(21,1)*CC(9)*CC(2) / CA
 VR(22,1) = K(22,1)*CC(18)*CC(5) / CA
 VR(23,1) = K(23,1)*CC(18)*CC(21) / CA
 VR(24,1) = K(24,1)*CC(18)*CC(1) / CA
 VR(25,1) = K(25,1)*CC(18)*CC(2) / CA
 VR(26,1) = K(26,1)*CC(18)*CC(17) / CA
 VR(27,1) = K(27,1)*CC(18)*CC(6) / CA
 VR(28,1) = K(28,1)*CC(10)*CC(21) / CA
 VR(29,1) = K(29,1)*CC(10)*CC(5) / CA
 VR(30,1) = K(30,1)*CC(10)*CC(1) / CA
 VR(31,1) = K(31,1)*CC(10)*CC(2) / CA
 VR(32,1) = K(32,1)*CC(10)*CC(17) / CA
 VR(33,1) = K(33,1)*CC(11)*CC(21) / CA
 VR(34,1) = K(34,1)*CC(11)*CC(1) / CA
 VR(35,1) = K(35,1)*CC(11)*CC(5) / CA
 VR(36,1) = K(36,1)*CC(11)*CC(2) / CA
 VR(37,1) = K(37,1)*CC(11)*CC(17) / CA
 VR(38,1) = K(38,1)*CC(12)*CC(5) / CA
 VR(39,1) = K(39,1)*CC(12)*CC(2) / CA
 VR(40,1) = K(40,1)*CC(10)*CC(12) / CA
 VR(41,1) = K(41,1)*CC(12)*CC(18) / CA
 VR(42,1) = K(42,1)*CC(12)*CC(17) / CA
 VR(43,1) = K(43,1)*CC(2)*CC(13) / CA
 VR(44,1) = K(44,1)*CC(1)*CC(15) / CA
 VR(45,1) = K(45,1)*CC(2)*CC(15) / CA
 VR(46,1) = K(46,1)*CC(15)*CC(5) / CA
 VR(47,1) = K(47,1)*CC(15)*CC(6) / CA
 VR(48,1) = K(48,1)*CC(16)*CC(7) / CA
 VR(49,1) = K(49,1)*CC(16)*CC(5) / CA

 VR(50,1) = K(50,1)*CC(13)*CC(21) / CA
 VR(51,1) = K(51,1)*CC(19)*CC(21) / CA
 VR(52,1) = K(52,1)*CC(16)*CC(21) / CA

 VR(53,1) = K(53,1)*CC(7)*CC(6) / CA
 VR(54,1) = K(54,1)*CC(3)*CC(2) / CA
 VR(55,1) = K(55,1)*CC(3)*CC(5) / CA

VR(56,1) = K(56,1)*CC(12)*CC(17) / CA
 VR(57,1) = K(57,1)*CC(12)*CC(6) / CA
 VR(58,1) = K(58,1)*CC(20)*CC(21) / CA
 VR(59,1) = K(59,1)*CC(20)*CC(6) / CA

 VR(1,2) = K(1,2)*CC(2)*CC(5) / CA
 VR(2,2) = K(2,2)*CC(1)*CC(5) / CA
 VR(3,2) = K(3,2)*CC(5)*CC(5) / CA
 VR(4,2) = K(4,2)*CC(7)*CC(5) / CA
 VR(5,2) = K(5,2)*CC(3)*CC(17) / CA
 VR(6,2) = K(6,2)*CC(1)*CC(5)*CC(21) / CA
 VR(7,2) = K(7,2)*CC(17)*CC(21) / CA
 VR(8,2) = K(8,2)*CC(5)*CC(6) / CA
 VR(9,2) = K(9,2)*CC(5)*CC(5) / CA
 VR(10,2) = K(10,2)*CC(7)*CC(6) / CA
 VR(11,2) = K(11,2)*CC(3)*CC(6) / CA
 VR(12,2) = K(12,2)*CC(17)*CC(17) / CA
 VR(13,2) = K(13,2)*CC(5)*CC(5)*CC(21) / CA
 VR(14,2) = K(14,2)*CC(17)*CC(7) / CA
 VR(15,2) = K(15,2)*CC(5)*CC(21) / CA
 VR(16,2) = K(16,2)*CC(2)*CC(2)*CC(21) / CA
 VR(17,2) = K(17,2)*CC(1)*CC(1)*CC(21) / CA
 VR(18,2) = K(18,2)*CC(9)*CC(1) / CA
 VR(19,2) = K(19,2)*CC(9)*CC(5) / CA
 VR(20,2) = K(20,2)*CC(9)*CC(21) / CA
 VR(21,2) = K(21,2)*CC(8)*CC(6) / CA
 VR(22,2) = K(22,2)*CC(8)*CC(3) / CA
 VR(23,2) = K(23,2)*CC(1)*CC(8)*CC(21) / CA
 VR(24,2) = K(24,2)*CC(8)*CC(7) / CA
 VR(25,2) = K(25,2)*CC(8)*CC(5) / CA
 VR(26,2) = K(26,2)*CC(10)*CC(6) / CA
 VR(27,2) = K(27,2)*CC(8)*CC(17) / CA
 VR(28,2) = K(28,2)*CC(18)*CC(1)*CC(21) / CA
 VR(29,2) = K(29,2)*CC(18)*CC(3) / CA
 VR(30,2) = K(30,2)*CC(18)*CC(7) / CA
 VR(31,2) = K(31,2)*CC(18)*CC(5) / CA
 VR(32,2) = K(32,2)*CC(18)*CC(4) / CA
 VR(33,2) = K(33,2)*CC(12)*CC(1)*CC(21) / CA
 VR(34,2) = K(34,2)*CC(12)*CC(7) / CA

VR(35,2) = K(35,2)*CC(12)*CC(3) / CA
 VR(36,2) = K(36,2)*CC(12)*CC(5) / CA
 VR(37,2) = K(37,2)*CC(12)*CC(4) / CA
 VR(38,2) = K(38,2)*CC(10)*CC(7) / CA
 VR(39,2) = K(39,2)*CC(10)*CC(1) / CA
 VR(40,2) = K(40,2)*CC(11)*CC(18) / CA
 VR(41,2) = K(41,2)*CC(11)*CC(8) / CA
 VR(42,2) = K(42,2)*CC(11)*CC(6) / CA
 VR(43,2) = K(43,2)*CC(14)*CC(15) / CA
 VR(44,2) = K(44,2)*CC(14)*CC(5) / CA
 VR(45,2) = K(45,2)*CC(14)*CC(6) / CA
 VR(46,2) = K(46,2)*CC(1)*CC(16) / CA
 VR(47,2) = K(47,2)*CC(2)*CC(16) / CA
 VR(48,2) = K(48,2)*CC(1)*CC(19) / CA
 VR(49,2) = K(49,2)*CC(15)*CC(17) / CA

 VR(50,2) = K(50,2)*CC(14)*CC(14)*CC(21) / CA
 VR(51,2) = K(51,2)*CC(15)*CC(5)*CC(21) / CA
 VR(52,2) = K(52,2)*CC(15)*CC(2)*CC(21) / CA

 VR(53,2) = K(53,2)*CC(5)*CC(5) / CA
 VR(54,2) = K(54,2)*CC(1)*CC(17) / CA
 VR(55,2) = K(55,2)*CC(7)*CC(17) / CA

 VR(56,2) = K(56,2)*CC(20)*CC(5) / CA
 VR(57,2) = K(57,2)*CC(20)*CC(2) / CA
 VR(58,2) = K(58,2)*CC(10)*CC(1)*CC(21) / CA
 VR(59,2) = K(59,2)*CC(10)*CC(17) / CA

***** H *****

DCC(1) = -VR(1,1) +VR(1,2)
 & +VR(2,1) -VR(2,2)
 & -VR(4,1) +VR(4,2)
 & +VR(6,1) -VR(6,2)
 & -VR(7,1) +VR(7,2)
 & -VR(9,1) +VR(9,2)
 & -VR(10,1) +VR(10,2)
 & -VR(14,1) +VR(14,2)
 & -VR(15,1) +VR(15,2)
 & +(+VR(17,1) -VR(17,2))*2.0D0

```

&          +VR(18,1) -VR(18,2)
&          +VR(23,1) -VR(23,2)
&          -VR(24,1) +VR(24,2)
&          +VR(28,1) -VR(28,2)
&          -VR(30,1) +VR(30,2)
&          +VR(33,1) -VR(33,2)
&          -VR(34,1) +VR(34,2)
&          +VR(39,1) -VR(39,2)
&          -VR(44,1) +VR(44,2)
&          +VR(46,1) -VR(46,2)
DCC(1)= DCC(1)+VR(48,1) -VR(48,2)
&          +VR(54,1) -VR(54,2)
&          +VR(58,1) -VR(58,2)

```

***** 0 *****

```

DCC( 2) = +VR( 1,1) -VR( 1,2)
&          -VR( 2,1) +VR( 2,2)
&          -VR( 3,1) +VR( 3,2)
&          -VR( 8,1) +VR( 8,2)
&          -VR(15,1) +VR(15,2)
&          +( +VR(16,1) -VR(16,2) )*2.0D0
&          -VR(20,1) +VR(20,2)
&          -VR(21,1) +VR(21,2)
&          -VR(25,1) +VR(25,2)
&          -VR(31,1) +VR(31,2)
&          -VR(36,1) +VR(36,2)
&          -VR(39,1) +VR(39,2)
&          -VR(43,1) +VR(43,2)
&          -VR(45,1) +VR(45,2)
&          +VR(47,1) -VR(47,2)
&          +VR(52,1) -VR(52,2)
&          -VR(54,1) +VR(54,2)
&          +VR(57,1) -VR(57,2)

```

***** H2O *****

```

DCC( 3) = -VR( 3,1) +VR( 3,2)
&          -VR( 4,1) +VR( 4,2)
&          +VR( 5,1) -VR( 5,2)
&          -VR( 6,1) +VR( 6,2)
&          +VR(11,1) -VR(11,2)
&          +VR(22,1) -VR(22,2)
&          +VR(29,1) -VR(29,2)

```

& +VR(35,1) -VR(35,2)
 & -VR(54,1) +VR(54,2)
 & -VR(55,1) +VR(55,2)

***** H202 *****

DCC(4) = -VR(5,1) +VR(5,2)
 & -VR(12,1) +VR(12,2)
 & -VR(13,1) +VR(13,2)
 & -VR(14,1) +VR(14,2)
 & +VR(32,1) -VR(32,2)
 & +VR(37,1) -VR(37,2)

***** OH *****

DCC(5) = +VR(1,1) -VR(1,2)
 & +VR(2,1) -VR(2,2)
 & +(+VR(3,1) -VR(3,2))*2.0D0
 & +VR(4,1) -VR(4,2)
 & -VR(5,1) +VR(5,2)
 & +VR(6,1) -VR(6,2)
 & +VR(8,1) -VR(8,2)
 & +(+VR(9,1) -VR(9,2))*2.0D0
 & -VR(11,1) +VR(11,2)
 & +(+VR(13,1) -VR(13,2))*2.0D0
 & +VR(15,1) -VR(15,2)
 & +VR(19,1) -VR(19,2)
 & -VR(18,1) +VR(18,2)
 & -VR(22,1) +VR(22,2)
 & +VR(25,1) -VR(25,2)
 & -VR(29,1) +VR(29,2)
 & +VR(31,1) -VR(31,2)
 & -VR(35,1) -VR(35,2)
 & +VR(36,1) -VR(36,2)
 & -VR(38,1) +VR(38,2)

DCC(5)=DCC(5)+VR(44,1) -VR(44,2)
 & -VR(46,1) +VR(46,2)
 & -VR(49,1) +VR(49,2)
 & +VR(51,1) -VR(51,2)
 & +(+VR(53,1) -VR(53,2))*2.0D0
 & -VR(55,1) +VR(55,2)
 & +VR(56,1) -VR(56,2)

***** 02 *****

DCC(6) = -VR(1,1) +VR(1,2)

```

&      -VR( 7,1) +VR( 7,2)
&      +VR( 8,1) -VR( 8,2)
&      +VR(10,1) -VR(10,2)
&      +VR(11,1) -VR(11,2)
&      -VR(12,1) +VR(12,2)
&      -VR(16,1) +VR(16,2)
&      +VR(21,1) -VR(21,2)
&      +VR(26,1) -VR(26,2)
&      -VR(27,1) +VR(27,2)
&      +VR(45,1) -VR(45,2)
&      -VR(47,1) +VR(47,2)
&      +VR(42,1) -VR(42,2)
&      -VR(53,1) +VR(53,2)
&      -VR(57,1) +VR(57,2)
&      -VR(59,1) +VR(59,2)

```

***** H2 *****

```

DCC( 7) = -VR( 2,1) +VR( 2,2)
&      +VR( 4,1) -VR( 4,2)
&      +VR(10,1) -VR(10,2)
&      +VR(14,1) -VR(14,2)
&      -VR(17,1) +VR(17,2)
&      +VR(24,1) -VR(24,2)
&      +VR(30,1) -VR(30,2)
&      +VR(34,1) -VR(34,2)
&      +VR(38,1) -VR(38,2)
&      -VR(48,1) +VR(48,2)
&      -VR(53,1) +VR(53,2)
&      +VR(55,1) -VR(55,2)

```

***** CO *****

```

DCC( 8) = -VR(18,1) +VR(18,2)
&      -VR(19,1) +VR(19,2)
&      -VR(20,1) +VR(20,2)
&      +VR(21,1) -VR(21,2)
&      +VR(22,1) -VR(22,2)
&      +VR(23,1) -VR(23,2)
&      +VR(24,1) -VR(24,2)
&      +VR(25,1) -VR(25,2)
&      +VR(27,1) -VR(27,2)
&      +VR(41,1) -VR(41,2)

```

***** CO2 *****

DCC(9) = +VR(18,1) -VR(18,2)
 & +VR(19,1) -VR(19,2)
 & +VR(20,1) -VR(20,2)
 & -VR(21,1) +VR(21,2)

***** CH20 *****

DCC(10) = +VR(26,1) -VR(26,2)
 & -VR(28,1) +VR(28,2)
 & -VR(29,1) +VR(29,2)
 & -VR(30,1) +VR(30,2)
 & -VR(31,1) +VR(31,2)
 & -VR(32,1) +VR(32,2)
 & +VR(38,1) -VR(38,2)
 & +VR(39,1) -VR(39,2)
 & -VR(40,1) +VR(40,2)
 & +VR(58,1) -VR(58,2)
 & +VR(59,1) -VR(59,2)

***** CH4 *****

DCC(11) = -VR(33,1) +VR(33,2)
 & -VR(34,1) +VR(34,2)
 & -VR(35,1) +VR(35,2)
 & -VR(36,1) +VR(36,2)
 & -VR(37,1) +VR(37,2)
 & +VR(40,1) -VR(40,2)
 & +VR(41,1) -VR(41,2)
 & +VR(42,1) -VR(42,2)

***** CH3 *****

DCC(12) = +VR(33,1) -VR(33,2)
 & +VR(34,1) -VR(34,2)
 & +VR(35,1) -VR(35,2)
 & +VR(36,1) -VR(36,2)
 & -VR(38,1) +VR(38,2)
 & -VR(39,1) +VR(39,2)
 & +VR(37,1) -VR(37,2)
 & -VR(40,1) +VR(40,2)
 & -VR(41,1) +VR(41,2)
 & -VR(42,1) +VR(42,2)
 & -VR(56,1) +VR(56,2)
 & -VR(57,1) +VR(57,2)

***** N2 *****

DCC(13) = -VR(43,1) +VR(43,2)

```

&          -VR(50,1) +VR(50,2)
***** N *****
DCC(14) = +VR(43,1) -VR(43,2)
&          +VR(44,1) -VR(44,2)
&          +VR(45,1) -VR(45,2)
&          +( +VR(50,1) -VR(50,2) )*2.0D0
***** NO *****
DCC(15) = +VR(43,1) -VR(43,2)
&          -VR(44,1) +VR(44,2)
&          -VR(45,1) +VR(45,2)
&          -VR(46,1) +VR(46,2)
&          -VR(47,1) +VR(47,2)
&          +VR(49,1) -VR(49,2)
&          +VR(51,1) -VR(51,2)
&          +VR(52,1) -VR(52,2)
***** NO2 *****
DCC(16) = +VR(46,1) -VR(46,2)
&          +VR(47,1) -VR(47,2)
&          -VR(48,1) +VR(48,2)
&          -VR(49,1) +VR(49,2)
&          -VR(52,1) +VR(52,2)
***** HO2 *****
DCC(17) = +VR( 5,1) -VR( 5,2)
&          +VR( 7,1) -VR( 7,2)
&          -VR( 8,1) +VR( 8,2)
&          -VR( 9,1) +VR( 9,2)
&          -VR(10,1) +VR(10,2)
&          -VR(11,1) +VR(11,2)
&          +( +VR(12,1) -VR(12,2) )*2.0D0
&          +VR(14,1) -VR(14,2)
&          -VR(19,1) +VR(19,2)
&          -VR(26,1) +VR(26,2)
&          +VR(27,1) -VR(27,2)
&          -VR(32,1) +VR(32,2)
&          -VR(37,1) +VR(37,2)
&          -VR(42,1) +VR(42,2)
&          +VR(49,1) -VR(49,2)
&          +VR(54,1) -VR(54,2)
&          +VR(55,1) -VR(55,2)
&          -VR(56,1) +VR(56,2)

```

```

&          +VR(59,1) -VR(59,2)
***** HCO *****
DCC(18) = -VR(22,1) +VR(22,2)
&          -VR(23,1) +VR(23,2)
&          -VR(24,1) +VR(24,2)
&          -VR(25,1) +VR(25,2)
&          -VR(27,1) +VR(27,2)
&          +VR(29,1) -VR(29,2)
&          +VR(30,1) -VR(30,2)
&          +VR(31,1) -VR(31,2)
&          -VR(26,1) +VR(26,2)
&          +VR(28,1) -VR(28,2)
&          +VR(32,1) -VR(32,2)
&          +VR(40,1) -VR(40,2)
&          -VR(41,1) +VR(41,2)
***** HNO2 *****
DCC(19) = +VR(48,1) -VR(48,2)
&          -VR(51,1) +VR(51,2)
***** CH30 *****
DCC(20) = +VR(56,1) -VR(56,2)
&          +VR(57,1) -VR(57,2)
&          -VR(58,1) +VR(58,2)
&          -VR(59,1) +VR(59,2)
*****

```

```

DO 48 IS=1,NML-1
DCC(IS) = DCC(IS)          *KMAX*CA      *DTM
48 CONTINUE

```

```

DO 68 I=1,NML-1
DLT = TP - TPO
HH(I) = DHF(I) /KMAX
&      + CPD(I,1)*DLT /KMAX
&      + CPD(I,2)*DLT*DLT / 2.0D0 /KMAX
&      + CPD(I,3)*DLT*DLT*DLT / 3.0D0 /KMAX
&      + CPD(I,4)*DLT*DLT*DLT*DLT / 4.0D0 /KMAX
&      + CPD(I,5)*DLT*DLT*DLT*DLT*DLT / 5.0D0 /KMAX

CP(I) = CPD(I,1) /KMAX
&      + CPD(I,2)*TP /KMAX

```

```

&          + CPD(I,3)*TP*TP          /KMAX
&          + CPD(I,4)*TP*TP*TP      /KMAX
&          + CPD(I,5)*TP*TP*TP*TP   /KMAX

```

```
68 CONTINUE
```

```
ROHCP = 0.000
```

```
HWSWA = 0.000
```

```
DO 18 I=1,NML-1
```

```
ROHCP = ROHCP + CC(I)*CP(I)
```

```
HWSWA = HWSWA + HH(I)*DCC(I)
```

```
18 CONTINUE
```

```
DTP1 = - HWSWA / ROHCP
```

```
*****
```

```
DO 72 II=1,NML-1
```

```
CC(II) = CC(II) + DCC(II)
```

```
72 CONTINUE
```

```
DTEMP = DTP1
```

```
TP = TP + DTEMP
```

```
*****
```

```
DO 66 I=1,NML
```

```
XX(I) = CC(I)/CCC
```

```
66 CONTINUE
```

```
* -----
```

```
IF ( ISTEP.EQ. ITM(IT) ) THEN
```

```
IT = IT+1
```

```
WRITE( 3,620) TM ,TP ,DTEMP ,DTM
```

```
WRITE( 3,630) ( XX(I1) ,I1=1, 9 )
```

```
WRITE( 3,630) ( XX(I2) ,I2=10,NML-1 )
```

```
END IF
```

```
ISTEP = ISTEP + 1
```

```
IF ( TM.GE.1.0D-2) GOTO 8888
```

```
GO TO 7777  
8888 GO TO 999
```

```
7777 TM = TM + DTM
```

```
GO TO 111
```

```
620 FORMAT( ' ',4( D12.5 ,1X ))
```

```
630 FORMAT( ' ',9( D12.5 ,1X ))
```

```
999 STOP
```

```
END
```