

酸素富化空気駆動火花点火機関の研究

梶谷修一*, 澤 則弘*, 西村顕人**

(平成3年8月20日受理)

A Study of Spark Ignition Engine Operated with Oxygen Enriched Charge

Shuichi KAJITANI*, Norihiro SAWA*, and Kaneto NISHIMURA**

ABSTRACT—Effects of the enriched oxygen charge on the combustion characteristics of spark ignition engine were investigated experimentally.

As a result, a heat release lag duration, which is defined as a duration between the spark timing and start of heat release, was shortened with operations of oxygen enriched charge. And the variation of a heat release lag was decreased effectively.

Furthermore, the mean effective pressures and the brake thermal efficiencies with the operations of oxygen enriched charge were increased as compared with those of natural air charge operation. This result was completely opposite to that of previous reports in this field. This experimental result lead a new aspects of the combustion technique of engine operation with high thermal efficiency and low harmful exhaust emissions.

1. 緒 論

火花点火機関の熱効率の向上は古くからの課題であるが、近年は放出二酸化炭素量の低減という地球環境面から、希簿燃焼による高熱効率化方式が再び注目されている。一般に均一混合気による希簿燃焼は ① 作動ガスの流動強化, ② 点火エネルギー及び点火数の増加, ③ 圧縮比の増加, ④ 作動ガスの酸素濃度を高めることなどに

よって達成できる。

作動ガスの流動強化は作動ガスと壁面間の熱伝達の促進による冷却損失の増加をもたらす一方希簿混合気では図示平均有効圧の変動の低減に効果がある事⁽¹⁾, 圧縮比の増加はノック発生を助長するので点火エネルギー増加及び点火数の増加によって希簿燃焼を達成することが考

*茨城大学工学部 機械工学科 (日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

**茨城大学大学院工学研究科機械工学専攻 (日立市中成沢町)

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

えられ、国井⁽²⁾らや中村^(3, 4)らによって多点火機関の研究が行なわれ、最近山本⁽⁵⁾らによって有害排気成分の低減を目的としてサラウンドコンバッションプロセス (SCP) が提唱されている。一方、定容容器を用いた和田⁽⁶⁾らの基礎的研究では定容容器の周囲に18個の点火源のある極端なSCPは急激な火炎面積と圧力上昇率の増加をもたらし、点火数4の時に山本らの実験 (山本らは6個) と相似する圧力経過となっている。これは火炎面の合体が原因でありSCPにおいても最適点火数が存在することを示唆している。またSCPでも希薄側では燃焼室内の混合気の不均一に起因する火炎伝播の不安定が存在し、燃焼変動が増加するなどの問題を残している。

一方、ボイラーやキューボラ等にその適用が考えられている作動ガスの酸素濃度増加は ① 火炎温度の上昇、② 燃焼性の向上、③ 燃焼排ガス量の減少等による効果が知られており⁽⁷⁾、これらの効果を利用することにより燃焼性の劣る燃料 (分解系や重質油及び石炭燃料など) に対してもHCや煤塵の増加、着火性の不良などの問題を解決し、さらに排気ガス量の減少に伴う排熱損失の低減は省エネルギーへの期待をもたせる。かかる観点から酸素富化空気駆動圧縮点火機関の研究が行われ、微粒子および燃料消費率の低減効果が報告^(8, 9, 10)されている。更に、火花点火機関への酸素富化空気供給はCO、HC濃度、正味熱効率の低減およびNOx濃度の増加^(11, 12)が報告されているが不明の点も多い。

そこで本報告では酸素富化空気駆動の火花点火機関の性能、燃料特性及び排出ガス組成 (特に未燃焼成分であるCO、HC) に及ぼす影響について検討した。以下その結果を述べる。

2. 供試機関及び実験方法

2.1 供試機関及び実験装置

実験に用いた機関はサイドバルブ式単筒空冷4サイクルガソリン機関で内径×行程 90×68mm、排気量433cc、圧縮比6.35である。図1に供試シリンダヘッドを示す。

容量200リットルのサージ・タンクからの吸入空気及び吸気管の上流約120cmから供給したガソリン (日石ダッシュレーサー、オクタン価100) は吸気管にシース・ヒータをまいて加熱した。この際、混合気温度は吸気管内の中央及び壁面下部に設置した熱電対で計測し、その温度は45℃とした。

空気と別途供給する酸素は吸気管内負圧を利用して吸入させ、その量は、20リットルのサージ・タンクで圧力

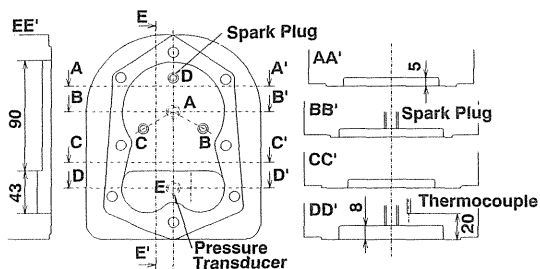


Fig. 1 Combustion chamber configuration

変動を低減させ、浮子式面積流量計で測定した。この際、体積効率を一定とするため、供給酸素体積量に相当する吸入空気体積量を減じた。

排出ガス濃度としてはCO濃度、HC濃度を非分散形赤外分析装置 (堀場製作所 (株) 製 MEXA-324G) を用いて測定した。

指圧波形は歪計式圧力変換装置、A/D変換装置 (株式会社オートニクス製 APC-204) を介しパソコンで記録し、熱発生率等を計算した。なお機関はすべて機関速度25rps、体積効率約62%一定で運転した。

2.2 酸素富化空気供給時の空気過乗率

燃料が完全燃焼する最小酸素を O_0 とすると通常の空気 (酸素濃度21Vol%, 23.3Wt%) を供給する時の理論空気量 $(Lst)_{21}$ は $(Lst)_{21} = O_0 / 0.233 = 14.5$ [kg/kg] となる。当然この値は燃料組成で異なる。酸素富化空気 (22Vol%, 24.4Wt%) 及び (23Vol%, 25.5Wt%) ではそれぞれ $(Lst)_{22} = 13.8$ [kg/kg]、 $(Lst)_{23} = 13.3$ [kg/kg] となる。従って酸素濃度21, 22, 23Vol%の空気が L_{21} , L_{22} [kg] 供給された時の空気過剰率 λ_{21} , λ_{22} 及び λ_{23} は、それぞれは $L_{21} / (Lst)_{21}$, $L_{22} / (Lst)_{22}$, $L_{23} / (Lst)_{23}$ となる。

一方酸素濃度21, 22及び23%の空気のもアあたりの質量はそれぞれ28.84, 28.88及び28.92 [g/mol]であり、実験は体積流量一定で実験で行っているので $\lambda_{22} / \lambda_{21} = 1.05$, $\lambda_{23} / \lambda_{21} = 1.09$ となる。従って同一 λ では酸素富化時の方が供給燃料量が多い。

3. 実験結果及び考察

酸素富化時の機関性能, 特に出力, 熱効率に及ぼす影響を検討するには, 酸素濃度毎に異なるMBT点火時期で比較することが望ましい。一方, 点火時期が異なると点火栓近傍の作動ガスの微視的状态, すなわち温度, 圧力, 空燃比, 作動ガスの流動状態は微妙に異なるので燃焼初期における着火現象, その後の火炎伝播等の燃焼現象は異なってくる。そこで本報告ではまず酸素富化時の燃焼に及ぼす影響を検討する目的から点火時期を -25°C ABTDCに固定し, 更に機関回転速度, 体積効率, それぞれ25rps, 62%と固定して実験を行った。

3.1 作動ガスの酸素濃度の機関性能, 未燃焼ガス濃度に及ぼす影響

図2に吸入空気の酸素濃度を21% (大気状態), 22%, 23%と変化させた時の λ とPme [MPa], B.T.E. [%] Th [°C], Te [°C], 排出ガス中のCO濃度 [%] 及びHC濃度 [ppm]を示す。

酸素富化を行なうと希簿域におけるPme, B.T.E.の増加は著しく酸素濃度23%の場合, $\lambda = 1.2$ 近傍で酸素濃度21%のPme, B.T.E.と比較するとPmeは0.07MPaから0.39MPaに, B.T.E.は3.5%から18.8%と大幅に増加する。これらの結果はA.A.Quader⁽¹³⁾, H.P. Willumitら⁽¹⁴⁾の結果とは逆の傾向である。これは, A.A.Quader, H.P.Willumeitらが負荷一定で実験を行った結果と考えられる。すなわち後述するが供給空気の酸素濃度が高まると火炎伝播速度は増加し, 燃焼期間は短縮し等容度は高まり, 機関出力は増加する。このため負荷一定にするためには体積効率を下げざるを得ない。このため残留ガス量が増加し, 作動ガスの比熱は増加し作動ガス温度の低下をもたらす。これらの事が影響し酸素富化空気を提供すると体積効率を一定とした本実験とは逆に正味熱効率は低減したものと考えられる。

次に, 酸素濃度が増加すると燃焼は活発になり, 作動ガス温度が増加し, 燃焼室壁面温度Thは増加する。当然, 燃焼が早く終了するので排気温度Teは低減する。

CO濃度の最低値を与える λ は酸素濃度21%で $\lambda = 0.95$, 22%で $\lambda = 1.0$, 23%で $\lambda = 1.15$ と希簿側に移行し, 同様にHC濃度の低い値の範囲も希簿側に移行し, 酸素濃度23%では $\lambda = 1.4$ 近傍までHC濃度は250ppmと非常に低い値となる。

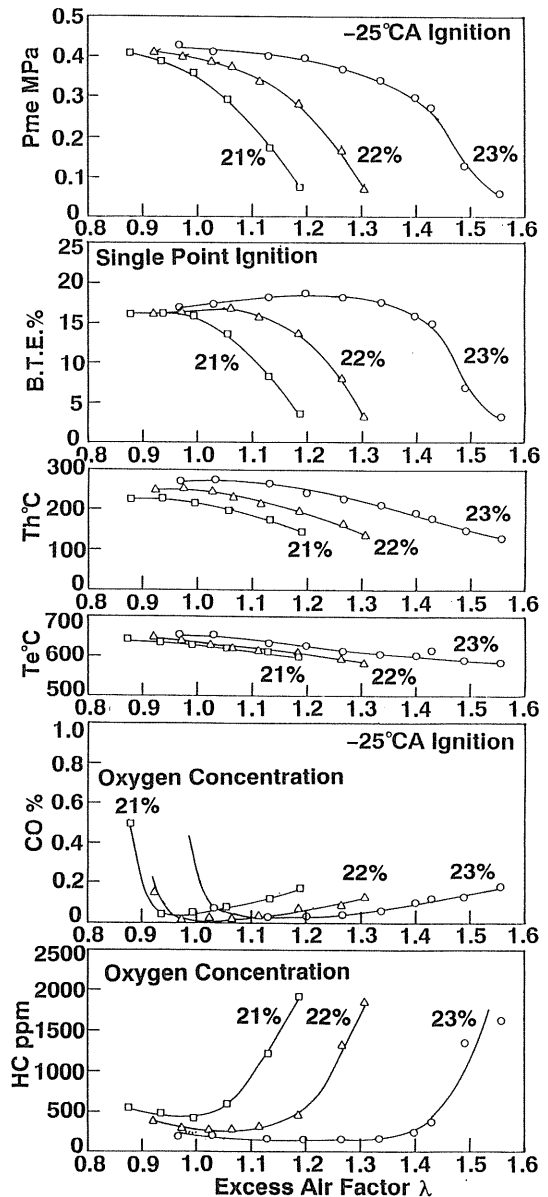


Fig. 2 Effect of enriched oxygen charge on the engine performances and exhaust gas emissions

3.2 作動ガスの酸素濃度の燃焼及びその変動に及ぼす影響

燃焼室内に供給される混合気は一般に不均質で, その空熱比は時間的, 空間的に変動している。そのため点火栓近傍に可燃限界をはずれた混合気が存在すれば失火し,

希薄あるいは濃厚な混合気が存在すれば着火遅れ期間（火花点火の時刻と燃焼開始時刻までの期間であるが、本報告では火花点火の時刻と発熱が正になる時刻までの期間、すなわち発熱遅れ期間 θ_{lag} で測定した）は長くなる。これらは θ_{lag} の変動として現れる。ここで、酸素富化空気の供給は混合気の単位体積当りの酸素濃度の増加、すなわち着火及び燃焼特性の向上をもたらすものと思われる。

図3に供給空気の酸素濃度21% (N1), 22%, 23%の熱発生率の比較の一例をそれぞれ示す。

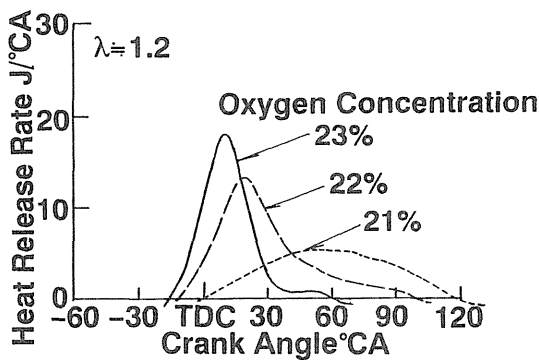


Fig. 3 Effect of enriched oxygen charge on the rate of heat release

酸素濃度の増加に伴って θ_{lag} は短く、燃焼は急激に、燃焼期間は短くなっている。この様に着火、燃焼経過の平均的特性は平均指圧波形から求まる平均熱発生率から知ることが出来る。しかし従来サイクル毎の燃焼変動は、例えば燃焼最高圧力 P_{max} の標準偏差等で評価されているが、 θ_{lag} が変化し、 P_{max} の生ずるクランク角度 θ (P_{max}) 等が大幅に変化するような場合には、図示平均有効圧 P_i 等の変動の方が適していると指摘されている⁽³⁾。一方、 P_i の変動は発熱遅れ等を含む燃焼経過の総和の変動であるから、燃焼経過を発熱遅れ、最大熱発生率、燃焼期間と更に細かく区分したそれぞれの変動を検討しなければ、酸素富化空気駆動時の影響を明確に知ることが出来ない。

そこで連続するサイクルの熱発生率を順次求め、これらから発熱遅れ期間 θ_{lag} の平均値 θ_{lag} およびその標準偏差 $S(\theta_{lag})$ 、変動率 $V(\theta_{lag})$ を求めた。その結果を図4に示す。図に示される様に酸素富化空気の供給で θ_{lag} は短くなる。 θ_{lag} に関して図を詳細にみると、 $\lambda > 1$ の領域で、酸素富化空気供給時の $S(\theta_{lag})$ は21, 22, 23%の順に小さくなる。しかし酸素富化時の

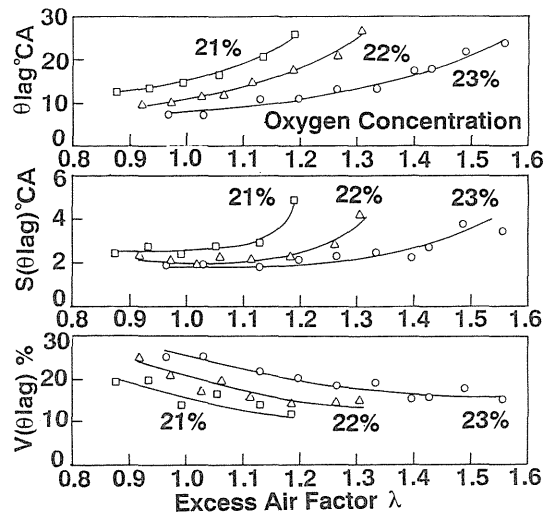


Fig. 4 Effect of enriched oxygen charge on the ignition lag (θ_{lag}), standard deviation of θ_{lag} and coefficient of variation of θ_{lag} .

$V(\theta_{lag})$ は逆に順に大きくなる。これは酸素富化時には θ_{lag} の低減が大きいためこの様な結果をもたらしたといえる。図5, 6に酸素濃度21%, 22%, 23%の時の λ と $(dQ/d\theta)_{max}$, $S[(dQ/d\theta)_{max}]$ および $V[(dQ/d\theta)_{max}]$ 及び $(dQ/d\theta)_{max}$ の発生するクランク角度 θ ($(dQ/d\theta)_{max}$), その標準偏差 $S[\theta(dQ/d\theta)_{max}]$ 及び変動率 $V[\theta(dQ/d\theta)_{max}]$ をそれぞれ示す。酸素濃度の増加に比例して $(dQ/d\theta)_{max}$ の値は大きくなり、その発生するクランク角度は上死点付近に近づく(値が小さくなる)。さらにそれらの標準偏差の値は小さくなり、急激に燃焼すると同時にサイクル毎安定した燃焼になる事を示している。

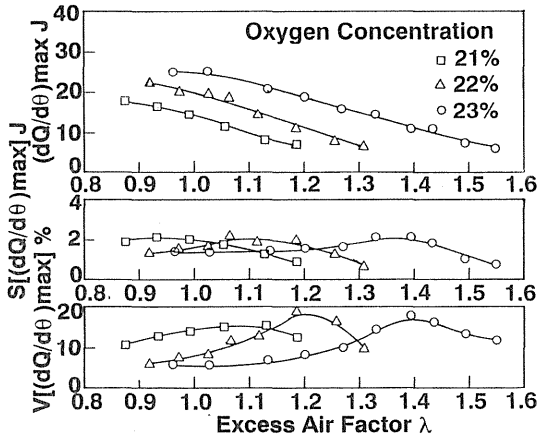


Fig. 5 Effect of enriched oxygen charge on the maximum rate of heat release $(dQ/d\theta)_{max}$, standard deviation of $(dQ/d\theta)_{max}$ and coefficient of variation of $(dQ/d\theta)_{max}$,

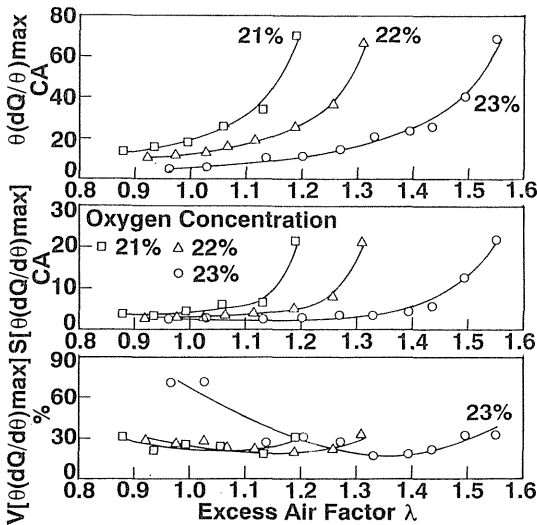


Fig. 6 Effect of enriched oxygen charge on the crank angle where $(dQ/d\theta)_{max}$ took place $\theta(dQ/d\theta)_{max}$, standard deviation of $\theta(dQ/d\theta)_{max}$, and coefficient of variation of $\theta(dQ/d\theta)_{max}$,

図7に主燃焼期間 θ_c , その標準偏差 $S(\theta_c)$ およびその変動率 $V(\theta_c)$ を示す。ここで燃焼期間は発熱が正の期間で定義し, 各サイクルの発熱生率からはほぼ燃焼が終了したと考えられる期間を主燃焼期間 θ_c とした。従って希薄運転になると θ_c の値を明確にすることが出来なかった。

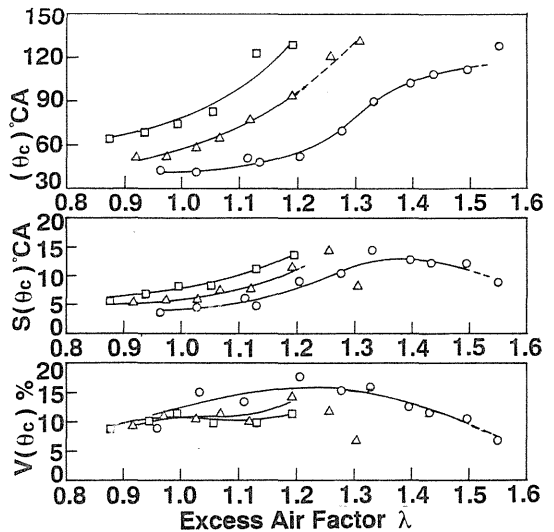


Fig. 7 Effect of enriched oxygen charge on the combustion duration θ_c , standard deviation of θ_c , and coefficient of variation of θ_c ,

酸素富化すると燃焼期間は大幅に短縮し, かつサイクル毎の変動も低減している。特に酸素富化時の燃焼期間の短縮及びその変動の低減は大きく, 酸素濃度23%では $\lambda = 1.4$ 以上の希薄域でも酸素濃度21% ($\lambda = 1.0$)の時の燃焼期間及びその標準偏差とほぼ同じ値である。

このような $(dQ/d\theta)_{max}$ 及び燃焼期間等の変動は結果として次に述べる等容度の変動となる。

図8に酸素富化時の等容度 η_{g1} , その標準偏差 $S(\eta_{g1})$ 及び変動率 $V(\eta_{g1})$ をそれぞれ示す。酸素富化時はいずれの λ においても酸素濃度が増加すると η_{g1} は増加し, $S(\eta_{g1})$, $V(\eta_{g1})$ は低減している。これら $(dQ/d\theta)_{max}$, θ_c 及び η_{g1} の変動の減少はサイクル毎の燃焼変動の低減に対応し, 特に希薄域の燃焼変動の低減, 例えばバルク・クエンチング現象(すなわちパーシャル・バーン)が少ないこと等が考えられ図2, 3に示した未燃焼成分, すなわち

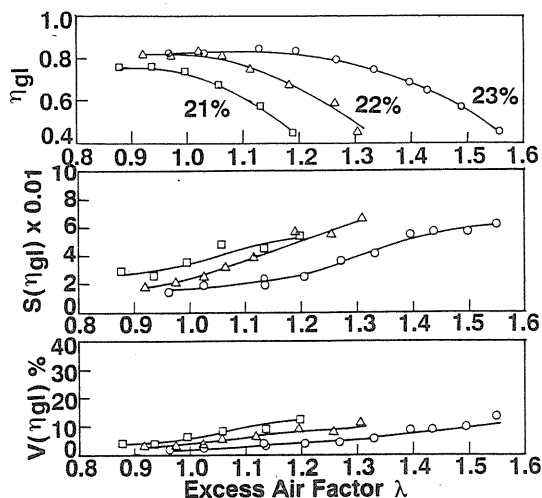


Fig. 8 Effect of enriched oxygen charge on the degree of constant volume η_{gl} , standard deviation of η_{gl} and coefficient of variation of η_{gl} .

CO, HC濃度の低減と一致する。

この様に大気比に比べ1~2%の酸素富化でも θ_{lag} , θ_c の短縮, それらの変動の低減及び $(dQ/d\theta)_{max}$, η_{gl} の増加, その変動の低減に効果がある。さらに大気中の酸素濃度を僅かに高めるには空気清浄器(エアークリーナー)に酸素富化膜を組込む等で容易に実現可能と考えられ, 希薄燃焼時の安定燃焼及び未燃焼成分の低減が達成出来る道が開かれる。

4. 結 論

火花点火機関の熱効率向上及び未燃焼成分特にCO, HC濃度の低減を目的として, 酸素富化空気の供給方式を検討した。その結果以下のことが明らかになった。

1. 酸素富化空気供給は希薄安定運転限界の拡大及び同一体積効率における正味熱効率の増加, 未燃焼成分CO, HCの低減に有効である。

2. 酸素富化空気の供給は発熱遅れ期間, 燃焼期間を短縮し, 等容度を増加させ, さらにそれらの変動を低減させる。

3. 酸素濃度の増加に比例して $(dQ/d\theta)_{max}$ の値は大きくなり, その発生するクランク角度は上死点に近づく。さらにそれらの標準偏差の値は小さくなり, 急

激に燃焼すると同時にサイクル毎安定した燃焼になる。

今後酸素富化空気駆動時の燃焼室内の温度計測, 排気HC組成の分析, NO_x濃度の測定等を行なう予定である。最後に実験及びデータ解析に当時茨城大学学生であった伊藤健二君, 永本智君(現本田技研(株)), 伊藤芳彦(現鈴木自動車工業(株)), 七尾勇一郎(現茨城大学大学院生)らの協力があったことを記し謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 浜本他 3名: 自動車技術会論文集, No.44, (1990), 26
- (2) 国井他 3名: 自動車技術会論文集, No.17, (1979), 40
- (3) 中村他 2名: 自動車技術会論文集, No.33 (1986), 18
- (4) 中村他 2名: トヨタ技術, 第34巻 第2号, (1984), 156
- (5) 山本他 2名: 自動車技術会秋期学術講演会講演論文集, 902148, (1990)
- (6) 和田他 3名: 自動車技術会論文集, No.23, (1981), 12
- (7) 宮田薫: 日石レビュー, 第28巻 第4号, (1986), 41
- (8) 佐藤他 2名: 日機論文集, 第51巻 467号, (1985), 2479
- (9) 飯田他 4名: 自技会論文集, No.40, (1989), 41
- (10) 飯田他 3名: 日機論文集, 第56巻 531号, (1990), 3573
- (11) A.A.Quader: Combustion Science and Technology Vol.19, (1987), 81
- (12) Hans-Peter Willumeit 他 1名: MTZ, 49, (1988), 149
- (13) 許斐他 2名: 自技会講演前刷集, No.729, (1979), 293