

なたね油燃料の小形ディーゼル機関への適用

—軽油燃料による機関性能との比較—

浜崎 和則・田中 義弘・亀田 昭雄

鋏光 一明*・上村 正毅*

(受理 昭和61年5月31日)

AN APPLICATION OF RAPE-SEED OIL FUEL TO A SMALL DIESEL ENGINE — COMPARISONS OF GAS OIL AND RAPE-SEED OIL ON ENGINE PERFORMANCE —

Kazunori HAMASAKI, Yoshihiro TANAKA, Akio KAMEDA,
Kazuaki KUWAMITSU,* and Masaki KAMIMURA*

Studies of adapting diesel engine to vegetable oil fuels are being continued with a view to developing energy sources. For the purpose of application of rape-seed oil to small diesel engines, a precombustion chamber four-cycle diesel engine was operated with gas oil and rape-seed oil as alternate fuels. Experimental variables included engine speed and power. The effects of these variables upon engine thermal efficiency, specific fuel consumption, charging efficiency, air-fuel ratio, exhaust gas temperature, and cylinder pressure was investigated.

Engine performance characteristics for the rape-seed oil fuel were studied and compared with baseline values for normal diesel fuel operation.

1. 緒 言

エネルギー開発の点から近年内燃機関用代替燃料の研究が進められている。その中でディーゼル機関に植物油を使った研究¹⁻⁶⁾がいくつか見られ注目されている。植物油は軽油に比べ発熱量が低く、高粘度で低揮発性のため、機関を運転する場合には機関性能、排ガス、始動性、カーボンデポジットの堆積などが問題となるが再生産できる点で有利である。本研究では小形ディーゼル機関を用い、供試燃料である軽油と代替燃料であるなたね油で発火運転し、両者を比較検討することにより、なたね油の機関性能に及ぼす影響を調べた。

2. なたね油について

2・1 なたね油の利点

なたね油は日本国内で自給生産出来る植物油のなか

でアルコールより発熱量がかなり高く、他の植物油にも劣らない。国内で自給生産出来る主な植物油の高発熱量の測定値を表1に示す。発熱量測定には鳥津製作所製CA—3型燃研式自動ポンプ熱量計を使用した。なたねは寒さにも強く乾燥に対しても抵抗力があり、あまり肥よくでない土地でも栽培可能である。そのうえ、水田の裏作としても栽培でき日本各地で栽培可能である。生産性を高めることが可能で、搾油率32%と大豆の搾油率18%に比較して高いことがわかっている。^{4,7)}表2に全国および鹿児島県におけるなたねの栽培面積と生産量を示す。鹿児島県の生産量は1985年で全国の39.2%になり全国一である。温暖な気候や休耕地を利用するなどして栽培面積の拡大をすれば生産量の増加は十分考えられ、なたね生産最盛期の1971年の生産量を上回ることも可能である。以上のように、なたね油はわが国にとって石油の代替燃料となる可能性が高く、特に鹿児島県にとっては農業振興、エネルギー開発の点から恩恵が大きく、ディーゼル機関燃料としての基礎研究を進めることは意義あ

*鹿児島大学大学院機械工学第二専攻

ることと考える。

表1 植物油の高発熱量

植物油名	高発熱量 kcal/kg
なたね油	9490
ひまし油	8880
オリーブ油	9420
大豆油	9390
ごま油	9370
つばき油	9430

表2 全国と鹿児島県におけるなたねの栽培面積と生産量

年	全国栽培面積 ha	県栽培面積 ha	対全国割合 %	全国生産量 t	県生産量 t	対全国割合 %
1971	13700	6930	50.6	22800	11500	50.4
1972	10800	5690	52.7	15900	7340	46.2
1976	3740	1530	40.9	6210	2030	32.7
1977	3140	1260	40.1	5190	1790	34.5
1980	2470	1130	45.7	4140	1810	43.7
1981	2310	1100	47.6	3740	1780	47.6
1982	2090	957	45.8	3760	1600	42.6
1983	1980	856	43.2	3220	1180	36.6
1984	1710	705	41.2	2700	1180	43.7
1985	1570	631	40.2	2730	1070	39.2

(1986年九州農政局鹿児島統計情報事務所調べ)

2・2 なたね油の規格と組成

ディーゼル機関燃料としてなたね油を使用する場合、種子から採取したまま精製していないなたね原油ではその成分において地方によりかなり差がある。したがって、本実験では地方によって品質差がなく、どこでも入手しやすいと言う理由で「植物油脂の日本農林規格」にあるなたね油類の規格によるなたね油を使用した。表3に日本農林規格によるなたね油類の規格を示す。表4になたね油の脂肪酸組成^{8,9)}を示す。

表3 なたね油類の規格

事項	等級			
	種類名	なたね油	精製なたね油	なたねサラダ油
一般状態	—	なたね特有の香味有し精澄	精澄で香味良好なもの	精澄で舌触り良く香味良好
色 (ロンボンド法 (133.4mmセル))	—	—	黄 20 以下 赤 2.0 以下	黄 15 以下 赤 1.5 以下
水分およびきょう雑物	0.20% 以下	0.1% 以下	同	同
比重 (15°C)	0.906~0.917	同	左	同
屈折率 (15°C)	1.470~1.474	同	左	同
冷却試験	—	—	—	5時間30分精澄
酸価	2.0 以下	0.20 以下	同	0.15 以下
けん化価	169 ~ 182	同	左	同
よう素価	95 ~ 114	同	左	同
不けん化物	1.5% 以下	同	左	同

2・3 なたね油および軽油の諸元

表5になたね油および軽油の諸元を示す。なたね油の低発熱量は表1の値より Kerl-Steuer の式¹⁰⁾から計算した水分の潜熱を差し引いて求めた。

表4 なたね油の脂肪酸組成

脂肪酸名	分子式	重量割合%
ミリスチン酸	C14H28O2	0.1
パルミチン酸	C16H32O2	4.0
パルミトオレイン酸	C16H30O2	0.1
ステアリン酸	C18H36O2	1.3
オレイン酸	C18H34O2	17.4
リノール酸	C18H32O2	12.7
リノレイン酸	C18H30O2	5.3
アラキシン酸	C20H40O2	0.9
エイコセン酸	C20H38O2	10.4
エイコサジエン酸	C20H36O2	0.3
ベヘン酸	C22H44O2	0.7
エルカ酸	C22H42O2	45.6
ドコサジエン酸	C22H40O2	0.1
リグノセリン酸	C24H48O2	0.2
セラコレイン酸	C24H46O2	0.6
その他		0.3

表5 なたね油および軽油の諸元

	軽油	なたね油
低発熱量 kcal/kg	10300	8800
理論空気量 kg/kg	14.37	12.63
燃り点 °C	-4.0	5.0
比重 15°C	0.837	0.918
動粘度 15°C, cst	7.5	97.7
表面張力 20°C, mN/m	32.32	36.90
平均分子量 g/mol	226.0	951.4
炭素 W %	87.5	77.5
水素 W %	12.5	12.1
酸素 W %	0.0	10.4

3. 実験装置および方法

実験装置概略を図1に示す。供試機関は予燃焼室式横形水冷四サイクルディーゼル機関で、主要諸元を表6に示す。吸入空気量は、層流型空気流量計で測定し、

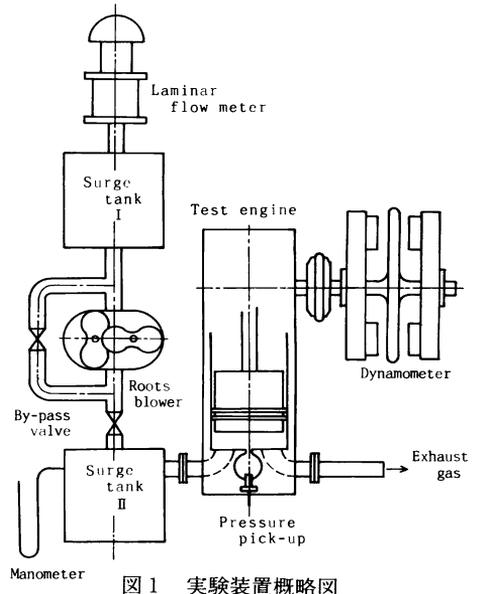


図1 実験装置概略図

表6 供試機関諸元

機関名	YANMAR NS-50G
内径×行程 mm	75×75
行程容積 cm ³	331.3
定格出力	3.31kW(4.5ps)/2000rpm
圧縮比	22.1
噴射ポンプ	Deckel 5B5
噴射ノズル	YDN-4SK1
噴射圧力 MPa	14.9

機関直前のサージタンクⅡはルーツブロワにより常にそのときの大気圧に保ち大気吸入状態で実験した。機関回転数を1200 rpmから2000 rpmまで200 rpmおきに変化させ、JISB 8013の試験方法により負荷を変化させて実験した。冷却水温は90℃以上になったことを確認して主燃焼室圧力、燃料消費量、排気温度などを測定した。なお負荷の制御には空冷うず電流制動形電気動力計を使用し、排気温度はシリンダ壁より16 mmの位置で測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 正味熱効率に与える機関回転数および負荷の影響

図2、図3に正味熱効率に与える機関回転数および負荷の影響について示す。図3を見ると、いずれの負荷でも機関回転数が1600 rpm以下ではなたね油の場合が正味熱効率は高く、1600 rpm付近で軽油となたね油の正味熱効率は等しい。1600 rpm以上の高速回転では軽油の場合が高くなる。いずれの負荷においても1400 rpm付近では5%程度の熱効率の改善が見られ、中低速回転においてはなたね油の方が正味熱効率の点からは有利であることが認められる。このことは図2の1400 rpmの場合を見ても明らかである。2000 rpmの高速回転になると、なたね油と軽油での明らか

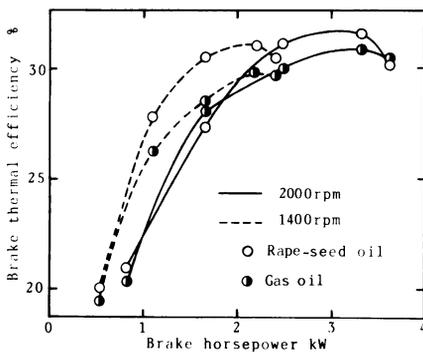


図2 軸出力の変化による正味熱効率

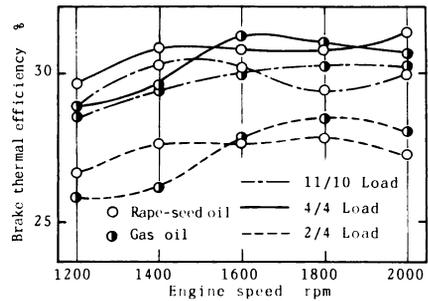


図3 機関回転数の変化による正味熱効率

な差異は認められないが、なたね油は軽油に劣るとは考えられず、3/4～4/4負荷ではむしろなたね油の方が有利であると考えられる。

4.2 燃料消費率について

図4は機関回転数をパラメータとして燃料消費率と負荷の関係を示した一例である。なたね油と軽油の場

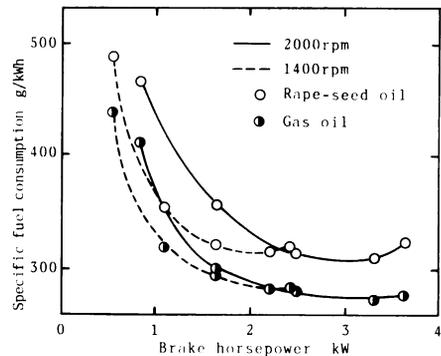


図4 軸出力の変化による燃料消費率

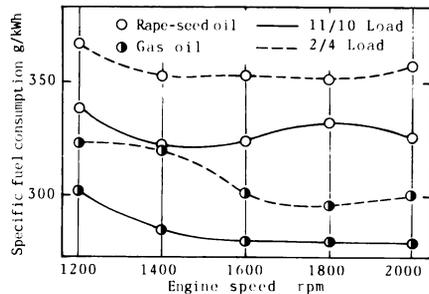


図5 機関回転数の変化による燃料消費率

合の変化の形について大きな差は見られない。いずれの機関回転数においても負荷全域にわたり、なたね油の方が燃料消費率は大きく平均して15%程度大きい。

なたね油の低発熱量は軽油の85.7%であり、正味熱効率が同じならなたね油の燃料消費率は軽油の場合より16.7%高いことになる。このことは図5より正味熱効率がなたね油と軽油でほぼ同じである1600rpmの値を比較すると、ほぼ理解される。また、図5より機関回転数の変化による燃料消費率の変化はなたね油、軽油ともほぼ同じ傾向であり、変化の割合は負荷による変化の割合ほど大きくない。

4・3 充てん効率と機関回転数および負荷の関係

図6は負荷をパラメータとして、機関回転数を変化させた場合の充てん効率の例である。いずれの負荷でも機関回転数1640rpm付近でなたね油と軽油の充てん効率が逆転している。つまり1600rpm以下では軽

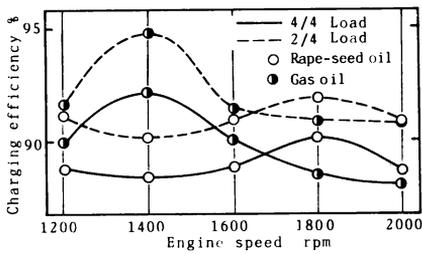


図6 機関回転数の変化による充てん効率

油の場合が、1700rpm以上の高速回転ではなたね油の場合が充てん効率が高い。軽油の場合1400rpmを頂点として2000rpmの高速回転で充てん効率は最低となるのに対し、なたね油の場合1800rpmを頂点として低速回転で充てん効率は最低となる。機関回転数に対する両者の充てん効率の傾向が異なるのは燃料の違いにより、シリンダ内の燃焼状態が異なり燃焼室およびシリンダ壁温の違いによって吸排気系における慣性効果が効果的に作用する機関回転数が異なってくるからであろう。図7は機関回転数をパラメータとして

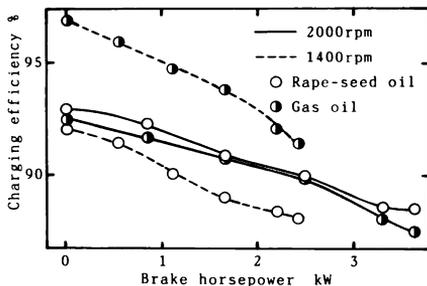


図7 軸出力の変化による充てん効率

負荷を変化させた場合の充てん効率の例である。供試機関の定格回転数である2000rpmの場合、いずれの負荷でもいくらかなたね油の方が高い値を示している。しかし1400rpmの場合、軽油の方が5%程度充てん効率が高い。これは図6からも分かるように中低速回転でなたね油より軽油の場合が充てん効率が高く、特に軽油の場合は1400rpmが最適慣性特性数¹¹⁾を与える機関回転数であると推測される。しかし、いずれの機関回転数でも負荷が増加するにつれ充てん効率が低下する傾向はなたね油、軽油とも同じである。

4・4 空燃比による燃焼状態の考察

図8は負荷をパラメータとして機関回転数を変化させた場合の空燃比を示す。負荷が一定であれば機関回転数の変化にかかわらず、なたね油軽油とも空燃比はほぼ一定であると考えられる。また、機関回転数の全域にわたり、いずれの負荷でもほぼ一定の割合でなた

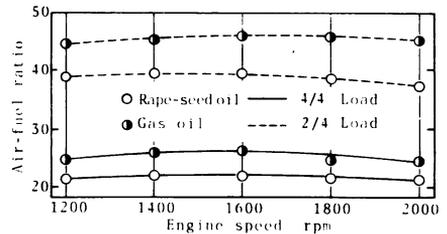


図8 機関回転数の変化による空燃比

ね油は軽油の場合に比べ空燃比が小さい。いま、液体燃料について次式¹²⁾より理論空気量L₀を計算する。

$$L_0 = 4.31 (8C/3 + 8H + S - O) \quad \text{kg/kg}$$

ただし1kgの燃料中に含まれる炭素、水素、酸素、硫黄の重量をそれぞれC,h,O,S,kgとする。表5の組成を用いて計算すると、軽油ではL₀=14.37kg/kg、なたね油はL₀=12.63kg/kgとなる。そこで、軽油

表7 空気過剰率

		2/4Load	4/4Load	11/10Load
2000rpm	G	3.11	1.67	1.47
	R	2.96	1.66	1.43
1800rpm	G	3.16	1.67	1.48
	R	3.06	1.66	1.44
1600rpm	G	3.19	1.78	1.53
	R	3.08	1.68	1.49
1400rpm	G	3.19	1.76	1.57
	R	3.12	1.71	1.52
1200rpm	G	3.07	1.68	1.46
	R	3.06	1.68	1.46

G: Gas oil, L: Rape-seed oil

となたね油の理論空気量と空燃比を用いて機関回転数、負荷ごとに空気過剰率を計算すると表7のようになる。表7よりなたね油は軽油に比べ空気過剰率が小さく、したがってなたね油の場合の空燃比が軽油の場合に比べほぼ一定の割合で小さいのはなたね油の成分組成によるもので、特になたね油に10.40%（重量）の酸素が含まれているためであると考えられる。

4・5 排気温度および燃焼室圧力について

図9は負荷を変化させた場合の機関回転数の違いによる排気温度の一例を示す。1800rpmではなたね油の場合が軽油の場合よりわずかに高く、1400rpm以下の低速回転では逆になたね油の場合はわずかに低い

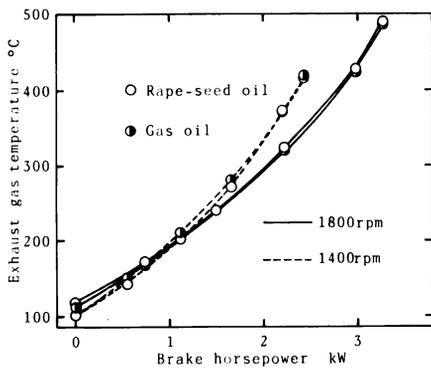


図9 軸出力の変化による排気温度

傾向がある。このことから図2の正味熱効率の傾向を考えると、機関回転数1600rpmを境にして高速回転ではなたね油の排気損失が大きいので正味熱効率は低く、逆に低速回転ではなたね油の排気損失が小さく、正味熱効率は高くなるものと推察される。図10はなたね油と軽油の場合の主燃焼室圧力波形の一例を示す。いずれの燃料でも供試機関の定格回転数である2000

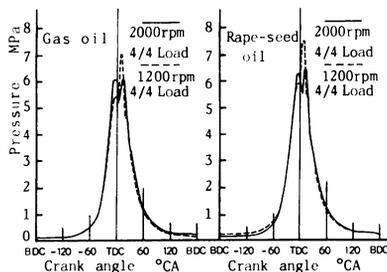


図10 主燃焼室圧力

rpmの上死点付近における圧力は低速回転1200rpmのそれよりいくらか高いが、逆に最高圧力は低速回転の方が高くなっている。最高圧力はいずれの機関回転数でもなたね油の場合が高い傾向がある。このことは4・6で述べるようになたね油の場合、軽油に比べて着火遅れが短く燃焼期間が短縮されるからであると考えられる¹³⁾。

4・6 燃料性状の違いによる機関性能への影響

燃料として軽油となたね油を比較した場合、次の点が大きき違いと考えられる。

- i) なたね油は軽油にくらべ粘度、比重、表面張力が大きい。
- ii) なたね油はその成分組成に飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸があり、酸素が重量で10.4%含まれているが軽油には含まれていない。

i) はディーゼル機関においては燃料噴霧特性（粒度分布、分散度、貫通度）に影響を及ぼし、また柵刃が間欠噴射に対して与えている平均粒径の式¹⁴⁾から粘度、比重、表面張力が大きいなたね油は粒度分布が単純な形ではなく、軽油よりも噴霧特性が悪くなると推測される。さらに、なたね油の比重、粘度はB重油のそれとかなり近い値であり重質油燃料と同じような噴霧特性が予想できる。重質油燃料に関して、矢野ら¹⁵⁾は噴霧の分散角度および到達距離についての和栗らの式¹⁶⁾を用いて検討を加えている。それによると微粒化が十分であれば到達距離、分散角とも燃料によって大差ないが、実際の機関の場合は低負荷で空気密度が大幅に低下し微粒化が悪化するため軽油と重油では噴霧に吸引される空気流に差を生じ、重油の到達距離が大きくなり燃焼室へ衝突する量が多くなると予想している。したがって、なたね油では軽油に比べ分散角が小さく、火炎長さの長い貫通力のある噴霧になると予想できる。しかし、長尾¹²⁾によれば供試機関のような予燃焼室式ディーゼル機関では十分霧化させるより、噴霧分散角の小さい単孔ノズルまたはピントル型ノズルを用いたほうが噴口近くで着火でき、最初の噴流で主燃焼室へ噴出できるので主燃焼室の燃焼が早く起るとしている。このことから考えると、なたね油の方が軽油より上記の性質にすぐれていると考えられ着火時期も早くなっていると思われる。ii) については次のようなことが考えられる。一般に軽油が燃焼する場合、メタン、エタン、エチレン、アセチレンなどの簡単な構造をもった低分子量炭化水素に分解し、

複雑な燃焼過程を経て中間生成物である酢酸, 酪酸, シュウ酸, プロピオン酸などの飽和脂肪酸が生成され, これが分解して炭酸ガスや水蒸気となる。なたね油の成分組成は飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸であり燃焼室内の高温高圧下では噴射と同時にこれらが分解するので中間生成物が軽油にくらべ早く発生することが考えられる。そのため軽油の場合より着火遅れが短く, 燃焼期間が短縮され最高圧力が上昇すると思われる。また, なたね油は軽油にくらべ粘度が高いために始動性にいくらか問題があると考えられたが, 外気温度 0°C で増速手動により始動実験を行なったところ, 軽油にくらべ多少時間がかかるがなたね油だけで十分始動できることを確認した。しかし, 機関を始動した後暖機運転中異常燃焼があるが, 機関が十分暖まればなくなる。これについては今後解決しなければならない問題であろう。

5. 結 言

予燃焼室式小形ディーゼル機関を使って, なたね油燃料の機関性能に及ぼす影響について軽油燃料と比較研究した結果を要約すると次のとおりである。

(1) 負荷の変化にかかわらず, 高速回転では軽油の場合が正味熱効率は高いが, 中低速回転ではなたね油の場合が高い。供試機関では機関回転数 1400rpm においてなたね油の場合 5% 程度の正味熱効率の改善が見られた。

(2) 負荷の変化にかかわらず, いずれの機関回転数においてもなたね油の場合, 燃料消費率は平均して 15% 程度大きく, この差は軽油となたね油の低発熱量の差にほぼ等しい。

(3) 負荷の変化にかかわらず, 機関回転数全域にわたり, ほぼ一定の割合でなたね油は軽油に比べ空燃比, 空気過剰率が小さい。これはなたね油の成分組成に酸素が含まれているからであると考えられる。

(4) なたね油は軽油の場合に比べ高速回転で排気温度は高く, 中低速回転でなたね油の場合, 排気温度は低くなる。

(5) なたね油は軽油の場合に比べ成分組成から着火遅れが短く, 燃焼期間が短縮されると考えられるので機

関回転数全域にわたり主燃焼室最高圧力が軽油より高いのであろう。

(6) なたね油は始動性にも困難はなく, 予燃焼室式小形四サイクルディーゼル機関の代替燃料としては有望であると考ええる。

本研究は鹿児島市持留製油株式会社製のなたね油を使用して実験し, なたね油の分析結果等については資料の一部を同社より頂いた。また, なたね栽培面積と生産量については九州農政局鹿児島統計情報事務所の資料によった。ここに記して謝意を表します。終りに実験に協力された, 当時四年生の池田清和, 中嶋達夫, 村田昌信君に感謝します。

文 献

- 1) N. J. Barsic, A. L. Humke, SAE Paper, 810262(1981).
- 2) A. L. Humke, N. J. Barsic, SAE Paper, 810955(1981).
- 3) 大井・青山・大内・加藤・山岡, 燃料協会誌, 62—669 (1983).
- 4) 飯本, 農業機械学会誌, 38—4 (1976), 483.
- 5) 飯本, 農業機械学会誌, 40—1 (1977), 5.
- 6) 村山・呉・高木・宮本・近久・伊藤, 内燃機関, 25—314 (1986), 9, 山海堂.
- 7) 志賀, ナタネ, (1971), 家の光協会.
- 8) 舟橋・原・山川, 肪質1, (1970), 24, 共立出版.
- 9) 栄養学ハンドブック編集委員会, 栄養学ハンドブック, (1976), 75, 技報堂.
- 10) 黒川・佐々木, 燃料発熱量測定法, (1949), 21, 実業教科書.
- 11) 八田・浅沼, 内燃機関ハンドブック, (1960), 147, 朝倉書店.
- 12) 長尾, 内燃機関講義上巻, (1979), 166および292, 養賢堂.
- 13) 浜崎・田中・平・石神, 鹿児島大学工学部研究報告, 19 (1977), 32.
- 14) 棚沢・豊田, 東北大学工学部報告, 19—2 (1955).
- 15) 内燃機関編集委員会, 内燃機関の燃焼, (1973), 295, 山海堂.
- 16) 和栗・網谷他, 機械学会論文集, 25—156 (1959).