光切断方式による噴霧到達距離の測定*

(第2報, 噴射条件およびノズル形状による影響)

許 敏^{*1}, 廣 安 博 之^{*2}

Optical Measurement of Tip Penetration of a Diesel Fuel Spray (2nd Report, Effects of Operating Conditions and Nozzle Geometry)

Min XU and Hiroyuki HIROYASU

This study investigated the effects of operating conditions and nozzle geometry, including injection pump speed, valve opening pressure, injected mass, nozzle hole diameter and length-to-diameter ratio L/D as well as nozzle sac volume, etc., on the spray tip penetration measured by a light sheet interception method. It is clarified that spray tip penetration mainly depends on initial injection pressure before the jet breaks up, and on the injection rate after its breakup, respectively. The nozzle geometry and ambient pressure also impact the spray tip penetration to a great extent.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Injection Nozzle, Diesel Spray, Spray Tip Penetration, Light Sheet Interception

1. ま え が き

噴射ノズルから噴出した燃料噴霧の到達距離は、噴霧特性を表す重要なパラメータの一つである。特に直接噴射式ディーゼル機関では、数msといった短い時間内に、燃料噴霧を燃焼室内に均一に分散させ、かつ早急に可燃混合気を形成させるかが重要な課題である。適切な噴霧到達距離を選択することにより噴霧の壁面衝突を避け、しかも壁面近くの空気を十分に利用して、良好な可燃混合気が得られる。また、最近の小形高速直噴式ディーゼル機関においては、混合気の形成を促進するために壁面衝突の効果を利用している。その場合においても衝突前の噴霧挙動を把握することが重要である。

噴霧の時間的、空間的な分布は主として噴射条件、ノズル内部形状および雰囲気条件の影響を受ける⁽¹⁾。理想的な噴霧特性を得るためには、それらの諸要因による噴霧特性への影響を明らかにすることが必要である。しかし、ディーゼル噴霧は多数のパラメータが絡み合う間欠的な非定常噴霧であるため、各パラメータ

の影響の単独評価が容易ではない。そのため、従来の研究においては準定常噴霧の到達距離に関する研究がほとんどであった。Schweitzer⁽²⁾は噴射圧、雰囲気密度と噴孔径の影響を調べ、噴霧到達距離の式を導いた。Parksら⁽³⁾はそれに加えて雰囲気温度の影響を詳しく調べた。和栗⁽⁴⁾、Dentら⁽⁵⁾は到達距離が時間の0.5乗に比例すると指摘した。さらに、廣安ら⁽⁶⁾は噴射初期に注目して、到達距離は分裂前は時間に比例し、分裂後は時間の0.5乗に比例することを明らかにした。Vardeら⁽⁷⁾は高圧噴射の場合に噴射圧、雰囲気圧力およびノズル噴孔長さ L と噴孔径 D の比 L/D が到達距離に及ぼす影響を調べた。また、吉川ら⁽⁸⁾は実機において、 L/D による到達距離の変化が機関性能および排気性状に及ぼす影響について調べた。

これまで、噴霧到達距離の測定法として最も多く使われてきた高速度写真撮影法は、可視化容器が必要のうえ、多大の費用と時間がかかるため、噴射条件などを広範囲にわたって変化させて到達距離を測定することは困難である。そのため、特に実際のディーゼル噴霧のような非定常噴霧の到達距離については、系統的な研究はほとんど行われていない。

そこで、本研究では、前報⁽⁹⁾に報告した光切断方式による噴霧到達距離の簡易測定法を用いて、噴射条件

* 原稿受付 平成2年7月23日。

^{*1} 正員、広島大学大学院 (〒724 東広島市鏡山1-4-1)。

^{*2} 正員、広島大学工学部。

(噴射ポンプ回転数, ノズル開弁圧力, 燃料噴射量)およびノズル形状(噴孔径, L/D)を変化させ, 実際のディーゼル機関に使われている単孔ホールノズルから噴射された非定常噴霧の到達距離を測定した。また, 最近機関性能を改善するため用いられているミニサックノズルとノーサックノズルを取り上げ, それらの噴霧到達距離についても調べた。さらに, 各条件下におけるノズルの針弁リフト, 噴射圧と噴射率も測定し, それらの噴射特性と噴霧到達距離の関連を考察し, 到達距離に及ぼす要因を検討した。

2. 実験装置および方法

光切断方式による噴霧到達距離の測定装置および実験装置については前報⁽⁹⁾に詳しく述べたので, ここでは概略のみを図1により説明する。発光ダイオードからの光を2枚のスリットを通してスリット光とし, 検出部を通過させフォトトランジスタに集光させた。このような10組の検出器を噴霧の軸方向に並べ設置した。燃料を0.1~3 MPaの静止常温雰囲気の中に噴射すると, 噴霧の先端が順次10本のスリット光を切断していき, それらの切断信号はA/Dコンバータを介してコンピュータで処理される。各スリット光の位置および噴射開始より切断されるまでの時間を用いて, 噴霧到達距離と時間の関係を求めた。また, 針弁リフトは光電式センサ, 噴射圧は管内圧力センサ, 噴射率はBosch式噴射率計により測定した。圧力センサによる管内圧力を, センサホルダからノズル蓄圧室まで音速で伝ばするのに必要な時間だけずらすことによって, 蓄圧室内の噴射圧とした。到達距離のサイクル変動と雰囲気圧力の影響については前報で報告したので, ここでは省略する。本論文での到達距離の測定値

図1 実験装置の概略

はすべて5回連続サイクルの平均値とした。

3. 噴射条件などの影響

3.1 噴射ポンプ回転数による影響 噴孔径 $D=0.3$ mm, 噴孔長さ ϕ と噴孔径の比 $L/D=4$ のノズルを用い, ノズル開弁圧力 $P_0=20$ MPa, 噴射量 $M_f=20$ mg/cycle とし, 噴射ポンプ回転数 $n=250, 500, 750, 1000$ rpm におけるポンプ回転数の影響を調べた。

各回転数における針弁リフト h , 噴射圧 P_i および噴射率 $\dot{M}_f$ の時間変化を図2に示す。 $n=500$ rpm 以上の場合, h はほとんど同一であるが, P_i と $\dot{M}_f$ は1 ms まで n の増大につれて増加している。 $n=250$ rpm の場合には, 針弁が遅く開き, 噴射期間も0.5 ms 長く, P_i と $\dot{M}_f$ も比較的小さくなっている。

図2 針弁リフト, 噴射圧および噴射率に及ぼすポンプ回転数の影響

図3 噴霧到達距離に及ぼすポンプ回転数の影響

雰囲気圧力 $P_a=0.1, 3 \text{ MPa}$ の場合に、各ポンプ回転数で噴射された噴霧の先端到達距離の測定結果を図3に示す。雰囲気圧力が増加すると、空気抵抗が増し、到達距離が全体的に減少する。高回転数の場合、より大きな噴射圧と噴射率で噴射されるため噴射速度が増加し、一般に到達距離も大きくなる。 $n=500 \text{ rpm}$ 以上の場合に、雰囲気圧力の増加につれて回転数の影響が次第に小さくなるが、 $n=250 \text{ rpm}$ の場合にはどの雰囲気圧力下でも、到達距離は他の場合に比べてかなり小さい値を示す。これは、 $n=250 \text{ rpm}$ の場合の噴射圧と噴射率が比較的小さいためと考えられる。

3.2 ノズル開弁圧力による影響 ポンプ回転数 $n=500 \text{ rpm}$ 、開弁圧力 $P_0=10, 20, 30, 35 \text{ MPa}$ と変化した場合の測定結果を図4, 5に示す。 P_0 が大きくなるにつれて噴射圧と噴射率がともに増加しているが、 30 MPa 以上であり大きな差が見られない。

図5に示すように、 P_0 の増大によって P_i と $\dot{M}_f$ も大きくなるため、噴射速度と運動量も増大し、到達距離が大きくなるものと思われる。その影響も P_0 が 30 MPa 以上では小さくなっている。したがって、燃料噴霧の噴射速度と運動量は噴霧到達距離と密接にかかわ

っていると考えられる。

3.3 噴射量による影響 図6, 7は噴射量 M_f がそれぞれ $20, 32 \text{ mg/cycle}$ の場合の測定結果である。噴射初期における噴射圧の差が小さいため、初期の到達距離にはあまり差が見られない。しかし、 1 ms 以後

図6 針弁リフト、噴射圧および噴射率に及ぼす噴射量の影響

図4 針弁リフト、噴射圧および噴射率に及ぼす開弁圧力の影響

図5 噴霧到達距離に及ぼす開弁圧力の影響

図7 噴霧到達距離に及ぼす噴射量の影響

図8 針弁リフト、噴射圧および噴射率に及ぼすノズル噴孔径の影響

になると $M_f=32$ mg の場合 P_i と $\dot{M}_f$ がより大きくなるため、噴射速度と運動量が増大しており、噴射された粒子が 2 ms 以後に噴霧先端に達し、空気抵抗により減速した噴霧先端の粒子を追い越すため、 $M_f=20$ mg の場合に比べ大きな到達距離が得られる。

3.4 ノズルの噴孔径による影響 噴孔径の影響を調べるため、 $D=0.25, 0.3, 0.4$ mm の 3 種類のノズルを用いて実験を行った。その結果を図 8, 9 に示す。図 8 の噴射圧の波形によると D が大きいほど P_i すなわち噴射速度は小さくなっている。しかし、燃料噴射率は噴射速度および噴孔面積と比例しているため P_i の低下による噴射速度の低下にもかかわらず、 D の増加につれて噴射率が增大する傾向にある。噴射速度と噴射率により求めた噴射運動量も、 D が大きいほど増大することが見うけられる。また、噴射量を同じく設定したので、 D が大きいほど噴射期間が短くなる。

$P_a=1, 3$ MPa の雰囲気中における噴霧到達距離の測定結果を図 9 に示す。 $P_a=1$ MPa の場合、噴射初期には、到達距離にはほとんど差がないが、分裂後(約 0.3 ms 以降)は、 D が大きいほど到達距離も大きいことがわかる。これは、噴射初期では、噴射圧がほぼ等しいため、同じ到達距離を示すが、その後は運動量の大きい噴霧のほうが大きな到達距離を示す。すなわち、分裂後の噴霧到達距離は噴射速度よりも噴霧運動量に依存することを示すものである。また $P_a=3$ MPa の場合、約 1.8 ms 以後では $D=0.4$ mm の到達距離は $D=0.3$ mm のそれより小さくなっている。さらに、7 ms 以後では $D=0.25$ mm の到達距離よりも小さくなると推測される。これは、図 8 より $D=0.4$ mm の場合の噴射率が 1.2 ms から急に減少し、噴射が早く終了しており、その結果 1.2 ms 以降では後続の大きな運動量をもつ粒子による追越しが起こらないためと考えられる。

以上のことより、噴霧の到達距離は、液柱が分裂する以前においては噴射初期の噴射圧すなわち噴射速度によって決定されるが、分裂後は、主に噴射率すなわち噴霧の運動量に依存することが考えられる。

3.5 噴孔長さと噴孔径の比 L/D による影響 $L/D=2, 4, 5, 6$ の場合の測定結果を図 10, 11 に示す。 L/D の変化により針弁リフト、噴射圧および噴射率はあまり変化しないが、到達距離には影響を及ぼしている。 $P_a=1$ MPa の場合、分裂以前の噴霧到達距離には影響を及ぼさないが、分裂以降の噴霧到達距離は、 L/D が大きいほど大きくなる。 L/D が変化しているにもかかわらず、噴射圧が変化せず同じ噴射速度で噴射されているため、初期の噴霧到達距離は変わらない。

図 9 噴霧到達距離に及ぼすノズル噴孔径の影響

図 10 針弁リフト、噴射圧および噴射率に及ぼす L/D の影響

図 11 噴霧到達距離に及ぼす L/D の影響

噴孔が長くなると縮流した流れが噴孔内壁に再付着するため、噴孔の半径方向の速度が小さくなり、さらに噴孔内部の乱れも抑えられる。その結果、噴射された噴流が分裂しにくくなるため分裂長さが大きくなり⁽¹⁰⁾、到達距離も大きくなる。しかし、噴孔が長いほど、摩擦損失も大きくなるため、噴霧自身の持つ運動量およびエネルギーが減少する。そのため、 $P_a=3$ MPa の場合には、 L/D が大きいほど分裂後の噴霧速度が速く減衰する。データを詳しく見ると、 $L/D=2$ の噴霧先端は、 $L/D=6, 5, 4$ のノズルによる噴霧を、それぞれ噴射開始から 0.9, 4, 4.8 ms 後に追い越している。また、雰囲気圧力が高くなると、噴霧自身の初めかく乱より空気抵抗の影響をさらに大きく受け噴霧の分裂長さが短くなるため、 L/D の影響は顕著でない。

4. 多孔ノズルの噴霧到達距離の測定

多孔ノズルから噴出された噴霧中の 2 本を選び、それぞれの噴霧の進行方向に沿って 7 本のスリット光を噴霧軸と垂直の面に設置した。噴孔出口付近に空間の制限があるため、2 組の光ファイバプローブを用い、噴射始めの信号を検出した。

使用した四孔ノズルの内部構造を図 12 に示す。ノズル軸と鋭角をなす噴孔を噴孔 1 とし、それとほぼ 90° をなす噴孔を噴孔 3 とする。それらを用いて噴孔入口の面取り R の有無、針弁先端の形状、サック室の容積そして有無などの要素による到達距離に及ぼす影響について調べた。

4.1 単孔ノズルと多孔ノズルの比較 同じ噴孔径の単孔ノズルの場合と比較するため、多孔ノズルの場合の実験はすべて単孔ノズルの場合と同じ噴射ポンプを用い、同じ運転条件および雰囲気条件で行った。ただし、4 噴孔のため総噴射量は単孔ノズルの 4 倍、80 mg とした。

図 13, 14 に単孔ノズルと多孔ノズルの測定結果の比較を示す。多孔ノズルの場合、針弁の開弁速度が遅く、噴射期間が長い、0.5 ms まで噴射圧は単孔ノズルの場合とほとんど変わらないが、0.5~1.5 ms 間の噴射圧および 1.7 ms までの噴射率は単孔の場合よりかなり小さくなっている。多孔ノズルの場合には、総流路面積が大きいため、針弁が開くと圧力の減衰が単孔の場合より速くなる。そのため、針弁の開弁速度が小さくなり、初期の噴射率が小さくなる。また、針弁が全開した後再度圧力の上昇が単孔の場合より遅れて起こり、そのピーク値もかなり小さくなるため、噴射率も小さい値を示す。

前述したように、噴霧到達距離が噴射率すなわち噴

霧の運動量に依存する。多孔ノズルでの噴射率が小さいため、その噴霧到達距離は図 14 に示すように単孔ノズルの場合よりかなり小さくなっている。よって、

図 12 供試四孔ノズルの詳細

図 13 単孔ノズルと多孔ノズルの針弁リフト、噴射圧および噴射率の比較

図 14 単孔ノズルと多孔ノズルの噴霧到達距離の比較

多孔ノズルと単孔ノズルとは流路面積が異なるため、噴射条件および噴霧特性も違い、単孔ノズルを用いて得られた結果を同一条件での多孔ノズルに当てはめることは不適当である。

多孔ノズルの噴孔1と噴孔3の到達距離については、部分的に微小な差が見られるが、これは両噴孔の位置および方向の違いにより、内部流れが相違するものと考えられる。しかし、雰囲気気圧の増大につれてその差は小さくなる傾向にある。

4.2 噴孔入口の R の影響 ミニサック A ノズルはミニサック B のノズルの噴孔入口の鋭い角を除去し、微小な R 部ができたタイプで、流量係数が改善されている。その両ノズルを用いて得られた結果の比較を図 15, 16 に示す。噴射初期 0.5 ms までに、ミニ

サック A ノズルの針弁がゆっくり上がっていくが、その後急に上昇する。それに対して B ノズルのほうが噴孔の抵抗が大きいので、初期の流出および針弁リフトが抑制されるが、燃料が流出し始めると針弁の上昇および噴射率の増大は A ノズルとほとんど同じとなる。針弁が全開した主噴射期間に、A ノズルの噴孔流量係数が B ノズルより大きいので、噴射率もより大きくなっている。同じ噴射量を得るために B ノズルの場合の噴射期間が長くなり、噴射率の降下が遅れる。

噴霧到達距離にも、噴射始めから 0.6 ms までに両者の差がほとんど見られないが、その後分裂段階に入ると、A ノズルのほうが大きくなっており、これは噴射率の結果と一致している。すなわち、噴孔入口に R 部を付けることにより、流量係数の改善が得られ、噴

図 15 針弁リフト、噴射圧および噴射率に及ぼす噴孔 R 部の影響

図 17 針弁リフト、噴射圧および噴射率に及ぼす針弁先端形状の影響

図 16 噴霧到達距離に及ぼす噴孔 R 部の影響

図 18 噴霧到達距離に及ぼす針弁先端形状の影響

孔内の損失を低減させ、より大きな噴射運動量を得ることができ、その結果、分裂後の噴霧到達距離が大きくなる。

4・3 針弁先端形状の影響 通常のとがった針弁先端を切り取るとサック室内の流れおよび噴出特性が著しく変わることが明らかにされている⁽¹¹⁾。図 17, 18 に針弁先端をフラットにしたミニサック C ノズルと通常のミニサック B ノズルの噴射特性および噴霧到達距離の比較を示している。両ノズルの噴射圧はほとんど同じであるが、噴射始めから 0.8 ms まで B ノズルのシャープな噴射率の上昇に対し、C ノズルの噴射率は最初緩やかに上昇する。0.8 ms になると、針弁リフトが最大値に達し、C ノズルの最大リフトが B ノズルのそれより大きいため、噴射率は大きくなり、噴射期間は短くなる。

針弁が上昇する間に C ノズルの噴射率が B ノズルに比べ小さくなる原因は、著者らが行ったサック室内流れの可視化実験の結果より明らかである。すなわち、針弁リフトが小さいとき、弁座間の流れが速く、弁座に近いしかも流路の方向変化が大きい噴孔 3 内にキャビテーションが発生し、流量係数も小さくなり、燃料の大部分が噴孔 1 にスムーズに入り込むためである。その結果、この場合の噴射率が B ノズルの場合より小さくなっている。

図 18 に示すように、噴射初期に C ノズルの噴孔 1 より噴出した噴霧の到達距離が B ノズルの両噴孔および C ノズルの噴孔 3 より大きくなっている。したがって、C ノズルの噴孔 1 の噴射率は B ノズルの両噴孔および C ノズルの噴孔 3 の噴射率より大きくなっていることが推測できる。針弁リフトが最大になると、C ノズルの噴孔 3 内の流れが改善され、また C ノズルの最大リフトが B ノズルのそれより大きいため、C ノズルの両噴孔からの噴射率が B ノズルのものより大きくなる。到達距離の結果においても同様な傾向が見られる。雰囲気圧力が 3 MPa になると、キャビテーションが発生し難くなり、また噴孔内流れの違いも現れにくくなるため、流れの違いによる到達距離の違いがほとんど見られず、噴霧が分裂した後噴射率の大きい C ノズルの到達距離は B ノズルより大きくなっていると考えられる。

4・4 サック室有無の影響 ノーサックノズルが未燃炭化水素などの有害排出物の低減に有効であることが報告されている⁽¹²⁾。そこで、本研究ではノーサックノズルを使用した場合の噴射特性および噴霧到達距離を測定し、その結果をミニサック B ノズルの場合と比較した。図 19 に示すように、針弁リフトと 1 ms ま

での噴射圧はほとんど同じである。しかし、2 ms までの噴射率はノーサックノズルのほうが小さいが、2 ms 以後の噴射率および 1 ms 以後の噴射圧はノーサックノズルのほうが大きくなっている。特に噴射終わりにノーサックノズルの噴射圧と噴射率はサックありノズルよりシャープな降下を示し、そのため燃料の切れが良くなることが考えられる。

図 20 に噴霧到達距離の比較を示す。ノーサックノズルの場合に両噴孔からの噴霧到達距離の差がもっと顕著であり、しかも噴孔 1 の噴霧到達距離は噴孔 3 のそれより小さくなっている。高圧下でもその違いが明らかに現れている。その原因については、次のように考えられる。ノーサックノズルの場合に、両噴孔の入口が弁座面にあるため、針弁リフトが最大になっても、

図 19 針弁リフト、噴射圧および噴射率に及ぼすサック室有無の影響

図 20 噴霧到達距離に及ぼすサック室有無の影響

弁座面に沿う流速が依然として大きく、両噴孔の流量係数が小さい。そのため、噴射率がミニサック B ノズルの場合より小さくなる。また、可視化観察の結果、針弁リフトが非常に小さいとき、噴孔 3 内に入るのは全部弁座間の速い流れであるのに対して、噴孔 1 には弁座間の流れが一部分だけ直接に噴孔の上側の内壁に沿って流れ込むが、噴孔内流れの大部分は、弁座間の流れが針弁下のたまり容積に入り、また逆流して噴孔 1 に入ると考えられる。この部分の流れがたまり容積において減速され、噴孔 1 の噴霧到達距離の低下の原因となると思われる。針弁リフトの上昇につれて弁座間の流路は広くなり、流れが緩やかになる。そのため噴孔 1 に入る弁座間の流れが増し、たまり容積からの流れが減り、噴孔 3 にもたまり容積からの燃料が流れ込む。したがって、両噴孔に入る流れの割合がほとんど同じになる。しかし、同じ流れパターンに対して噴孔 1 の流量係数が噴孔 3 よりも大きいため、噴孔 1 の噴射率も大きくなり、噴孔 1 からの噴霧到達距離に急増加の部分が見られ、噴孔 3 からの噴霧到達距離に追いつくような傾向を示している。特に雰囲気圧力が 3 MPa の場合に、0.82 ms から噴孔 1 からの噴霧が噴孔 3 のそれよりも到達距離が大きくなる。

5. ま と め

光切断方式による噴霧到達距離の測定法を用いて、雰囲気圧力、噴射ポンプ回転数、ノズル開弁圧力、燃料噴射量、ノズル噴孔径および L/D などを変化させ噴霧到達距離を測定し、諸因子の影響について調べた結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 初期の噴射圧が大きいほど、分裂する前の液柱部分の速度が大きくなり、初期の到達距離が大きくなる。
- (2) 噴射率すなわち噴出運動量が大きいほど、分裂した後の液滴が持つ運動量も大きく、空気抵抗によって減速されにくくなり、噴霧先端の追越しが起りやすくなり、後期の到達距離が大きくなる。
- (3) 噴射ポンプの回転数が大きくなると、噴霧到達距離が大きくなる。特に回転数が小さいときの影響

が著しい。

- (4) 開弁圧力が大きくなると、噴霧到達距離が大きくなる。

- (5) 噴射量が大きくなると、噴射初期にあまり影響を及ぼさないが、後期では噴霧到達距離が大きくなる。

- (6) ノズルの噴孔径が大きくなると、噴霧運動量が大きくなり噴霧到達距離も大きくなる。

- (7) L/D が大きいノズルの場合、噴孔内壁の整流効果により噴流の初期かく乱が抑えられ、分裂時期が遅れ、分裂前の到達距離が大きくなるが、噴孔内壁と流れの摩擦による運動量の減衰も大きいため、分裂後の到達距離が逆に小さくなる。

- (8) 単孔ノズルと多孔ノズルとではその内部構造が違うため、同じ運転条件でも、噴射条件および噴霧特性が異なる。

- (9) 噴孔に R 部を付けることによって流量係数が改善され、到達距離も大きくなる。

- (10) 噴孔に入る流れの様子が到達距離に大きな影響を与える。

- (11) 雰囲気圧力が増大すると、空気抵抗が増し、到達距離に及ぼす諸因子の影響の度合いが小さくなる。

本研究の遂行に際しては、新井雅隆助教授、西田恵哉助手から多くの助言を受けた。実験には、中平泰之君の協力を得た。またザーゼル機器(株)から噴射ノズルの供給をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Hiroyasu, H., COMODIA'85, (1985), 53.
- (2) Schweitzer, P. H., *Pennsylvania State College, Bull.*, No. 46(1937).
- (3) Parks, M. V., ほか 2 名, *SAE paper*, No. 660747(1966).
- (4) 和栗・ほか 3 名, 機論, 25-156(1959), 820.
- (5) Dent, J. C., *SAE paper*, No. 710571(1971).
- (6) 廣安・新井, 自動車技術会論文集, No. 21(1980), 5.
- (7) Varde, K. S., ほか 1 名, *SAE paper*, No. 830448(1983).
- (8) 吉川・ほか 3 名, 機論, 54-502, B(1988), 1552.
- (9) 許・廣安, 機論, 55-512, B(1989), 1258.
- (10) 清水・ほか 2 名, 機論, 51-461, B(1985), 257.
- (11) 許・廣安, 機論, 53-491, B(1987), 2214.
- (12) Greeves, G., ほか 3 名, *SAE paper*, No. 770259(1977).