



技術論文

HCCI 燃焼における 炭化水素燃料性状の影響

Effects of Hydrocarbon Fuel Properties in an HCCI engine

飯田 実 Minoru Iida 森川 健志 Takeshi Morikawa Tanet Aroonsrisopon
Volker Sohm Philipp Werner David E. Foster

●研究開発センター コア技術開発室 / Engine research center / University of Wisconsin-Madison

Abstract

From among the topics of joint research we are conducting with the University of Wisconsin concerning HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) engines, we report here on the results of research concerning the effects of hydrocarbon fuel properties. An HCCI engine was run using five different types of hydrocarbon fuels in order to test such things as heat generation and range of running capability. The results showed that the order of heat release and relative position in terms of operating range comparison is dependent on the engine speed range, even for fuels with the same octane rating. Neither Research nor Motor octane rating alone is sufficient to explain these results. However, the linear form of these two parameters explains quite well the timing of heat generation when running an HCCI engine. Therefore, when comparing HCCI running performance using gasoline fuels, it is necessary to take into account the both Research and Motor octane rating as one of the fuel properties. Also, we found that due to the dependence of the octane rating indices on the intake air temperature, HCCI engine running performance is more robust with regard to changes in fuel when the intake temperature is in the higher range. Here we introduce the results of our research.

要旨

ウィスコンシン大学との共同研究として行ってきた HCCI（予混合自着火）エンジンの研究のうち、今回は炭化水素燃料性状の影響について報告する。5種の炭化水素燃料により HCCI 運転を行い熱発生・運転可能範囲を比較した。その結果、同程度のオクタン価燃料間の比較でも、熱発生順序や運転可能当量比の相対的位置はエンジン回転数に依存することがわかった。これらを説明するためには、リサーチ・モータオクタン価単独では不十分である。そこでそれらを組み合わせて定義したオクタン価指標を用いたところ、HCCI 運転での熱発生時期をうまく説明できた。よってガソリン系燃料を用いた HCCI 運転の比較においては、燃料の性状としてリサーチ・モータオクタン価を組み合わせて考慮する必要がある。またオクタン価指標の吸気温度依存性から、吸気温度が高い条件のほうが燃料の変化に対する HCCI 運転のロバスト性は高いことがわかった。

1 はじめに

石油資源の枯渇や二酸化炭素による温室効果、また酸性雨などの問題から、高効率かつ低公害のエネルギー源を求める声は年々高まっている。既存のエネルギー源を考えると、火花点火エンジンの空燃比制御を厳密に行い、各種触媒を用いた場合非常に低公害なエネルギー源となるが、スロットルによるロスや希薄火炎限界・ノッキングにより高効率化は制限される。一方直噴ディーゼル機関は、上記

のような火花点火エンジンの問題がないため、高効率なエネルギー源であるが、不均一な燃料分布中での燃焼のため、NO_x（窒素化合物）とすすのトレードオフから逃れることは非常に難しい。HCCI 機関は、直噴ディーゼル機関なみの高効率を持ちつつ¹⁾、NO_x とすすの排出量が極端に少ないと期待されている。

HCCI 燃焼は希薄な混合気を自着火させるものなので、燃焼過程が基本的に化学反応機構に支配されており、熱力学的状態に非常に敏感である。さらに、HCCI 燃焼で放出される熱量は火花点火燃焼におけるノッキングと同等なので、HCCI 燃焼を理解・制御するためには自着火過程を理解する必要がある¹⁾。自着火過程に影響する運転パラメータに関しては多くの研究例がある²⁻⁷⁾が、最近では温度や燃料・新気の不均一性が HCCI 運転に影響すること⁸⁻¹⁰⁾が知られている。

ガソリン系燃料の耐ノック性に関する指標としては、一般的にオクタン価が使われている。オクタン価の正確な定義は ASTM（米国材料試験協会）procedures D-2699 and D-2700 によるが¹¹⁻¹³⁾、表 1 に示す 2 種の計測法とそれにより決まる値（RON と MON）がある。これらは代表的な燃料については計測されており、化学種によりその値やその差（センシティビティ）が異なることが知られている。

最近の Kalghatgi の研究によれば¹²⁾、燃料のアンチノック性は RON・MON と運転条件による。つまり RON・MON 単独ではアンチノック性はあらず、代わりにオクタン指標 octane index (OI) = RON-KS を用いる必要がある、と提案している。ここで K はエンジンと運転条件に依存する量であり、混合気の熱力学的履歴を示す指標と考えられる。

一方 HCCI における燃料性状の影響についてもいくつかの研究例がある。HCCI とノッキング現象の共通性から、オクタン価は HCCI 運転領域や熱発生時期などと何らかの関係があることが予想されるが、HCCI 運転領域との関係は複雑との報告例もある¹⁴⁾。

そこで当研究では、オクタン価や RON と MON の差であるセンシティビティを HCCI 燃焼の指標に使えないかを検討した。さらに上記の OI をいくつかの運転条件に依存する量として実験的に求め、その運転条件依存性を考察した。

表 1. オクタン価計測法比較^{11~13)}

Engine parameter	Research method	Motor method
Engine speed	600 rpm	900 rpm
Inlet temperature	52° C	149° C
Inlet pressure	Atmospheric	Atmospheric
Spark advance	13° BTDC	19 to 26° BTDC

2 実験

今回の研究に用いた実験装置についてはすでに報告済み⁶⁾なので、概略を報告する。図 1 に用いた実験装置を示す。実験には Cooperative Fuels Research (CFR) エンジンを用いた。表 2 にエンジン諸元を示す。

吸気は圧縮されて供給されている工場エアを制御弁にて吸気チャンバ圧力 100kPa として使用した。吸気温度は、3kW のエアヒータを用いて加熱・制御した。

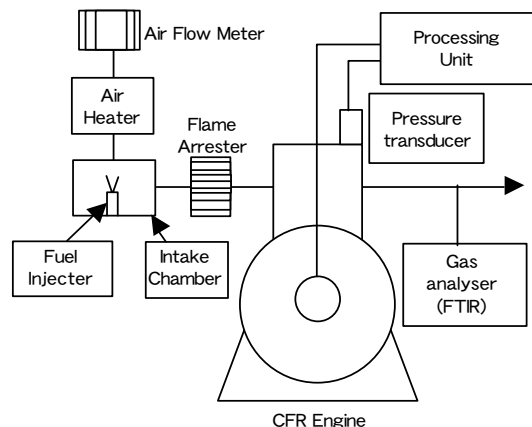


図 1. 実験装置

今回の実験で用いた燃料諸元を表 3 に示す。表中の PRF91.8 と 70 はイソオクタンとノルマルヘプタンの混合燃料である。BIN-1 と BIN-2 は、ガソリン相当の多成分燃料であり、他の燃料に比べセンシビティが大きい（RON と MON の差が大きい）のが特徴である。これは燃料中に多量に含まれる芳香族の影響と思われる。

筒内圧力ピックアップは、Kistler model 6061B（水冷）を用いた。筒内圧データは、クランク 1 回転あたり 720 パルスのエンコーダを用いてサンプリングし保存した。この同一条件で 100 サイクル連続した筒内圧データをもとに、IMEP（図示平均有効圧）や燃焼のパラメータを計算した。

燃焼のデータをもとに、HCCI 運転が可能な領域を決定した。実際の運転は低負荷側では失火がおこり、その結果 IMEP の変動が大きくなる。そこで今回は IMEP の共分散 IMEPCOV が 10% になる点を低負荷限界とした。また負荷を上げていくと熱発生が急激になりすぎ、通常の火花点火運転で見られるノッキングに近い状態となる。このとき、熱発生が急激になるに従い筒内圧力上昇率も高くなる。そこで高負荷限界は最大圧力上昇率が 10 bar/CA となる点とした。

3 結果と考察

3.1 筒内圧と熱発生率

図 2 と 3 に上記 4 種のオクタン価が 90 程度である燃料の筒内圧・熱発生波形を示す。図 2 には n-butane、PRF91.8、BIN-1 と BIN-2 の 600 rpm 吸気温度 380K 当量比 0.20 のデータ、図 3 は n-butane、BIN-1 と BIN-2 の 1,800rpm 吸気温度 380 当量比 0.22 のデータである（この条件では PRF91.8 は HCCI 運転不可能であった）。これらから、4 種の燃料の熱発生の挙動は異なることがわかる。またこの 2 つを比べることにより、熱発生が

表 2. エンジン諸元

Compression ratio	16.55
Bore	82.6 mm
Stroke	114.3 mm
Displacement	612 cc
Connecting rod length	254 mm
Exhaust Valve Open	ATDC140
Exhaust Valve Close	ATDC5
Intake Valve Open	ATDC10
Intake Valve Close	BTDC146

表 3. 燃料性状

Fuel	RON	MON	LHV (MJ/kg)	芳香族 (体積比)
n-butane	91.8	89	45.74 ^c	0%
PRF 91.8	91.8	91.8	44.35 ^d	0%
BIN-1	94.1	86.8	43.09 ^d	35.1%
BIN-2	93.0	86.2	43.07 ^d	31.1%
PRF 70	70.0	70.0	44.49 ^d	0%

PRF : primary reference fuel の略、イソオクタンとノルマルヘプタンの混合物

BIN : ガソリンにノルマルヘプタンを混合したもの

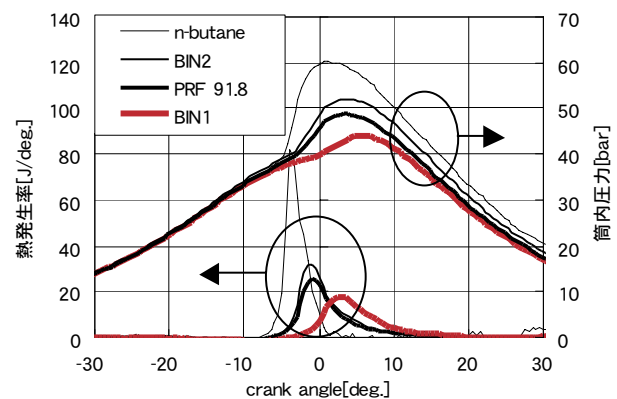


図 2 熱発生率と筒内圧力比較
600rpm 吸気温度 380 K、当量比 0.2

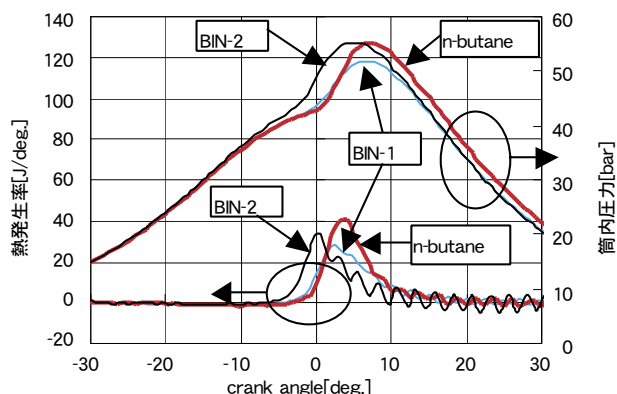


図 3 熱発生率と筒内圧力比較
1,800rpm 吸気温度 380 K、当量比 0.22

おきる燃料の順序はエンジン回転数に依存することがわかる。つまり図2の条件では、n-butaneの熱発生が最初でその後BIN-2・PRF91.8・BIN-1の順であるが、図3の条件ではBIN-2に続きBIN-1・n-butaneがほぼ同時と、n-butaneの熱発生が一番最後になっている。さらにPRF91.8については、図2の条件ではBIN-2に近い熱発生位置だったが、図3の条件ではHCCI運転が成立しなかった。

上記のようなエンジン回転数の変化に伴う熱発生の変化の原因は、熱力学的な履歴の差と考えられる。つまり、1,800rpmにおけるタイムスケールは600rpmの条件の1/3であるため、圧縮・膨張過程においてある温度・圧力である時間も1/3となり、その結果燃焼に大きな差を生じたと考えられる。またタイムスケールの変化の影響は、燃料ごとに異なるということがわかる。オクタン価テスト法との対比で言えば、モータ法のほうがより高回転でのテストであるため、図3の条件はRONの条件よりMONの条件に近い、と考えられる。

次に同一燃料による運転での熱発生の吸気温度依存性を見る。最初にPRF91.8の900rpm当量比0.29における熱発生率を図4で比較する。これを見ると、吸気温度を380→360→340Kと低下させたときの熱発生位置の変化は小さいが、320Kになると大きく遅角している。また低温酸化反応によると思われる熱発生も観測されたが、非常に小さいレベルであった。一方、図5に示すBIN-2の900rpm当量比0.29における熱発生率は、吸気温度を380→360→340Kと低下させると熱発生位置は大きく遅角し、またその変化量は温度変化に対しほぼ等間隔である。低温酸化による熱発生は観測されなかった。このように、PRF91.8とBIN-2は同一条件での熱発生の吸気温度依存性が大きく異なることがわかる。

ここで注意すべきは、BIN-2の燃料成分である。表3に示したように、BIN-1・2は芳香族を30%以上含んでいる。芳香族は一般的に負の温度係数（NTC）領域を持たないとされており、着火の温度依存性が単純と考えられる。BIN-2は上記の性質を持つ芳香族を多量に含むため、その熱発生の温度依存性は、NTC領域を持つPRF91.8に比べ単純であると説明できる。逆にPRF91.8の示した熱発生率の複雑な温度依存性は、パラフィンが一般的に持つNTC領域が原因と考えられる。

このように、HCCI燃焼での熱発生には燃料の低温での反応機構が大きく影響することが示された。今回の例のように低温酸化反応による熱発生がほとんど観測されなくても、NTC領域の熱発生への影響は無視できないと考えられる。

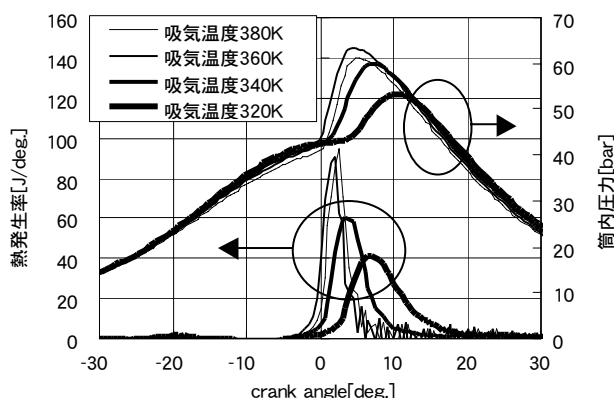


図4 熱発生率と筒内圧力比較
PRF91.8 900rpm 当量比 0.29

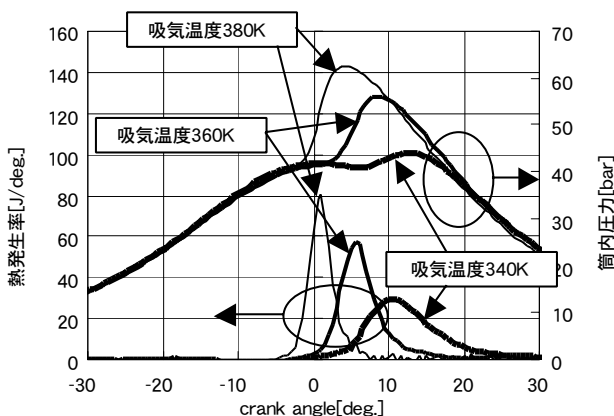


図5 熱発生率と筒内圧力比較
BIN-2 900rpm 当量比 0.29

3.2 HCCI 運転領域

図 6-8 に吸気温度をそれぞれ 340・360・380 K としたときの 5 種の燃料の HCCI 運転領域を負荷と当量比について示す。吸気温度による影響は、予期されるとおり高温になるに従い希薄側となる。

興味深いのは、運転領域は燃料により大きな影響を受けることである。まず PRF 70 による運転領域は、他の RON が 90 前後の燃料に比べかなり希薄側にあるが、これはその低いオクタン価から考えて理解できる。また低吸気温（340K）において、他の燃料が示しているようなエンジン回転数依存性がほとんど現れないことが特徴的である。

特筆すべきは、RON が 90 前後の 4 種の燃料もかなり異なるエンジン回転数依存性を示していることである。これら 4 種の燃料のエンジン回転数依存性を詳細に見ると、次のようなことがわかる。たとえば、吸気温度 340K において BIN-2・PRF91.8・n-butane の運転領域は、エンジン回転数上昇に伴い過濃側へシフトするが、BIN-2 に比べると、PRF91.8 の運転領域はエンジン回転数上昇に伴い希薄側へシフトしていている。

図 7 に示す吸気温度 360K でのデータでも、吸気温度 340K の場合と同様に燃料による差が見られる。エンジン回転数 600rpm では、RON が 90 前後の 4 種の燃料の中では、n-butane の運転領域がもっとも希薄側で、PRF70 と同等の位置にある。一方 BIN-2 の運転領域は、エンジン回転数上昇に伴い n-butane に対し希薄側へシフトしていく。また BIN-1 の 600rpm での運転領域は、PRF91.8 と同レベルにあるが、回転数上昇に伴い急激に過濃側へシフトし、1,200rpm 以上では運転できなかった。図 8 に示す吸気温度 380K でのデータでも吸気温度 360K の場合と同様の傾向が見られる。この吸気温度では、RON が 90 前後の 4 種の燃料はすべてのエンジン回転数で運転可能であった。600rpm では、n-butane の運転領域が最も希薄側であり、PRF91.8・BIN-2・BIN-1 の順に過濃側に位置している。一方 2,000rpm では、BIN-2 の運転領域が最も希薄側であり、n-butane・BIN-1・PRF91.8 の順に過濃側に位置しており、順序がかなり入れか

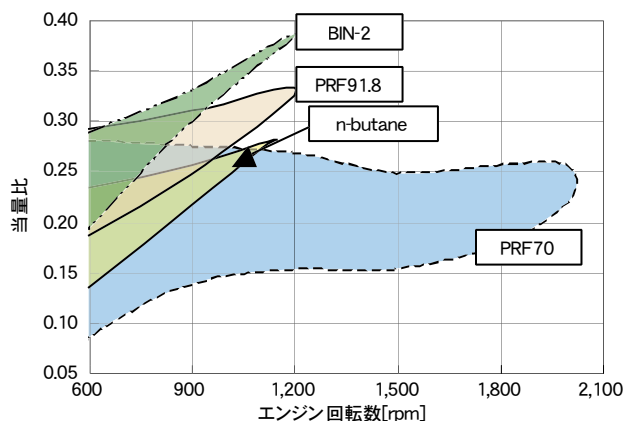


図 6 HCCI 運転領域比較（吸気温度 340K）

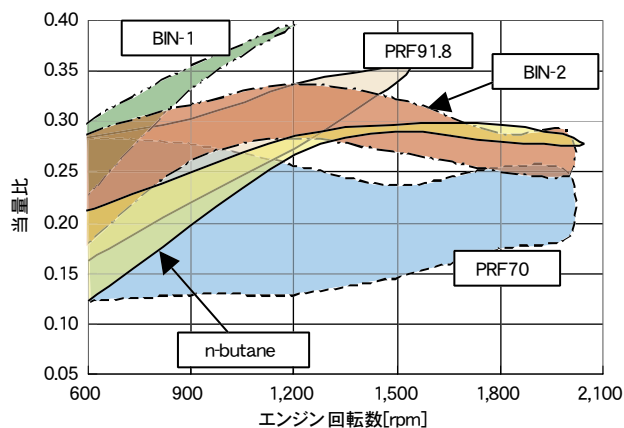


図 7 HCCI 運転領域比較 吸気温度 360K

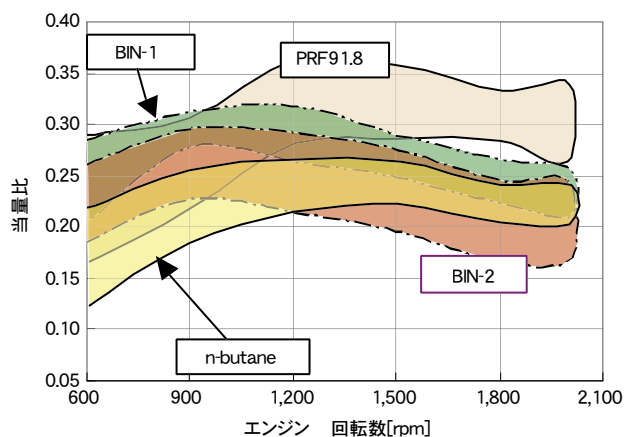


図 8 HCCI 運転領域比較 吸気温度 380K

わっている。つまりエンジン回転数により、燃料種による自着火での熱発生のおきやすさが異なる、ということである。先の熱発生波形の比較において示された燃料による影響が、運転領域の比較においても示された。

3.3 HCCI 運転とセンシティビティの関係

上記で示した、HCCI 運転での熱発生や運転領域の燃料依存性を説明するために、熱発生時期とオクタン価・センシティビティの関係を考察する。この解析は、基本的には Kalghatgi らによって行われた火花点火燃焼におけるノック限界の解析¹²⁾と類似の方法である。ここでは、火花点火燃焼における点火進角の代わりに、主燃焼の10%熱発生時期を用いる。先に定義したオクタン指標 OI は運転条件により異なり、式中の係数 K は、ある特定の運転条件が RON と MON のどちらがよりよい指標であるかを示すことになる。つまり $K=0$ であれば $OI=RON$ となり、この運転条件は RON でよく表されることがわかり、逆に $K=1$ であればこの運転条件は MON でよく表されことになる。

最初に図 9、10 に吸気温度 360K 当量比 0.25 エンジン回転数 600rpm での 10% 熱発生時期（100 サイクル平均）と RON・MON の相関を示す。図中のひしがたが実際の計測点を示す。これらの図から、RON はこの条件では 10% 熱発生時期と比較的よい相関を示し、逆に MON と 10% 熱発生時期の相関は悪いことがわかる。問題は、相関のよいパラメータが運転条件により変化してしまう、ということである。例えば、図 11 に 2,000 rpm 吸気温度 380 K 当量比 0.24 での MON と 10% 熱発生時期の関係を示す。この例では、先の例とは逆に MON が 10% 熱発生時期と比較的よい相関を示している。

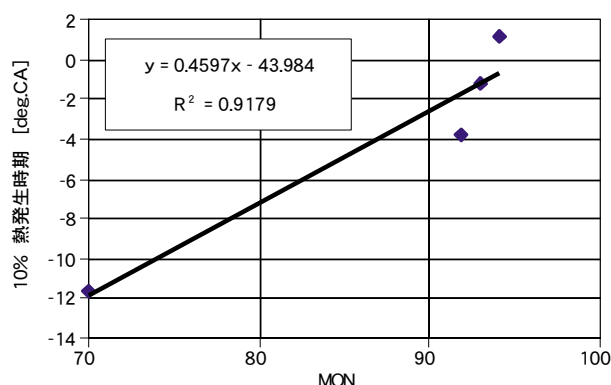


図 9 10% 熱発生時期と RON の関係
(600 rpm 吸気温度 360 K 当量比 0.25)

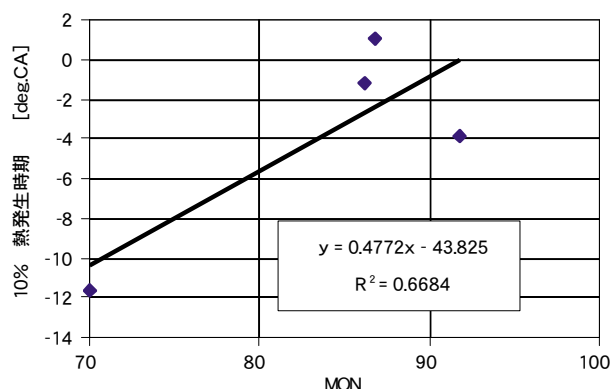


図 10 10% 熱発生時期と MON の関係
(600 rpm 吸気温度 360 K 当量比 0.25)

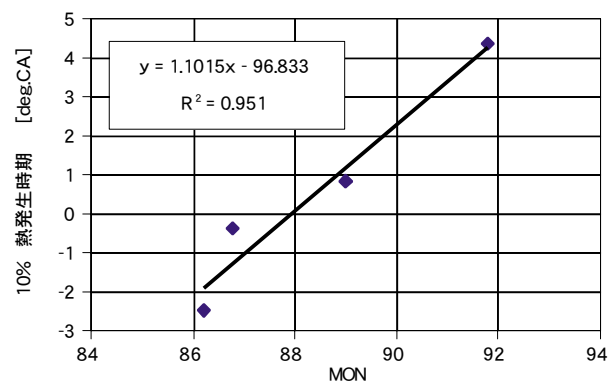


図 11 10% 熱発生時期と MON の関係
(2,000 rpm 吸気温度 380 K 当量比 0.24)

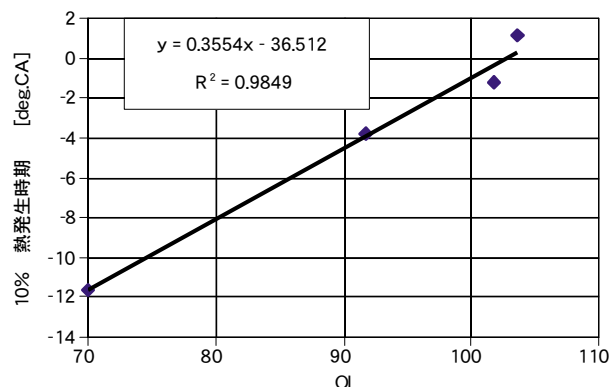


図 12 10% 熱発生時期と OI の関係
(600 rpm 吸気温度 360 K 当量比 0.25)

この問題を解決するため、オクタン指標 octane index (OI) = RON-KS を計算し、10%熱発生時期との相関を調べた。OI は、OI と 10%熱発生時期が 1 次の関係を示すと仮定し、このときの残差を最も小さくなるよう係数 K を決定することにより計算した。このように係数 K をきめると、図 12 に示すように 10%熱発生率との相関は非常によくなる。もちろん、これはその計算法からして当然である。問題はこのようなきめ方の妥当性、あるいは有用性である。

このような指標の妥当性を考える上で重要なのは、この指標が運転条件に対してどのような依存性を示すかということである。たとえばエンジン回転数は、HCCI 燃焼においては筒内ガスの熱力学的履歴のタイムスケールをきめるパラメータと考えられる。もし OI がエンジン回転数に対してよい相関があれば、OI とタイムスケールは相関があることになり、OI を用いて他の運転条件での HCCI 運転可能性について示唆を得ることができる。

そこで、OI を実験したいくつかの条件において求め、比較した。図 13 に吸気温度 360K と 380K の係数 K の回転数依存性を示す。これを見ると、係数 K はエンジン回転数と正の相関があり、係数 K はタイムスケールは相関があることがわかる。また高回転側で K が大きくなっていることは、高回転側で RON よりも MON がよい指標となることを示しており、この傾向は RON・MON の定義とも一致する。このようなことから、今回の手法は燃料性状を検討する上で程度有用であると考えられる。

また上記のデータは、燃料性状の吸気温度依存性といった観点からも見る事ができる。吸気温度が 380K では K のエンジン回転数依存性は比較的小さいが、360K では非常に大きい。これは、吸気温度により、燃料性状の影響が変化することを意味する。具体的には、吸気温度 380K の条件ではセンシティビティの高い燃料と低い燃料のエンジン回転数による差は小さい。逆に吸気温度 360K ではセンシティビティにより、エンジン回転数変化に対する振る舞いが大きく異なることになる。より一般的に言えば、吸気温度が高い条件のほうがセンシティビティの変化に対してロバスト性が高い、とも考えられる。

またこの結果から、HCCI 運転を行う燃料についても示唆をえられる。例えば、センシティビティの考慮についてである。多くの HCCI に関する研究では、イソオクタン・ノルマルヘプタン単独、あるいはそれらを混合した標準燃料が用いられているが、これらの燃料はセンシティビティが 0 である。一方、通常のガソリンは今回の例のように芳香族を含んだり、またオレフィン系を含むことが多い。これらの分子種は、一般的にセンシティビティが大きいことが知られており、HCCI 運転時のエンジン回転数依存性は標準燃料とは今回のような差があると考えられる。このように、ガソリン系燃料で HCCI 燃焼システムの応用を考える場合、燃料によるセンシティビティの差を念頭において進める必要があると考えられる。あるいは逆に、センシティビティ依存性の小さいエンジンシステムを構築する必要があると考えられる。

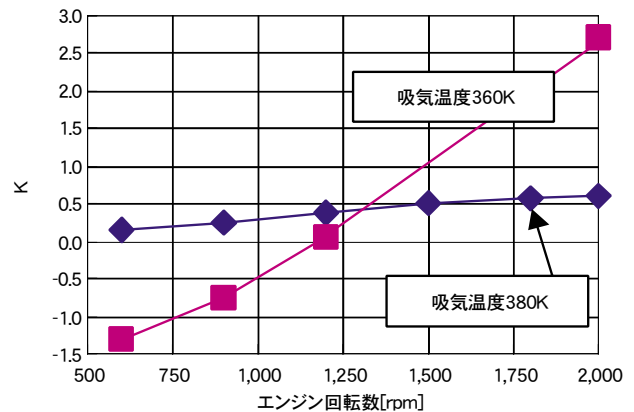


図 13 エンジン回転数と係数 K の関係

今回提案した方法では、OI を求めるために同一運転条件でいくつかの燃料のデータを得る必要がある。一方 HCCI 運転可能域はすでに見たように狭く、また運転領域同士の重なりも広くない。そのため、OI を求められる点が限られてしまうという問題点がある。ただ今回のデータをもとにすれば、燃料の RON・MON に対する HCCI 運転領域はある程度予測できる。つまりそのような予測の上で燃料を作りテストを行えば、より広い領域で OI がどのように振舞うかを調べられると思われる。また今回使った燃料は、炭化水素のみでしかもオクタン価が 70-95 程度の範囲のもののみであるため、たとえば含酸素燃料などがどのように振舞うのかなども興味のあるところである。

4 おわりに

CFR エンジンを用いて 5 種の燃料の HCCI 運転をおこない、エンジン回転数・吸気温度依存性を調べた。その結果、以下の結論を得た：

- (1) 低温酸化反応による熱発生がほとんど観測されなくても、HCCI 燃焼での熱発生には燃料の低温での反応機構が影響する。
- (2) オクタン価が 90 程度である 4 種の燃料での熱発生順序は、エンジン回転数により変化した。また HCCI 運転可能な当量比領域の相対的な位置もエンジン回転数により変化した。
- (3) HCCI 運転を表す指標としては、RON・MON とともに単独では不適當である。RON と MON を組み合わせて定義される OI を用いると、今回得た HCCI 運転での熱発生時期をうまく説明できた。
- (4) ガソリン系燃料を用いた HCCI 運転領域の比較においては、燃料の性状としてオクタン価のみでなくセンシティビティを考慮する必要がある。
- (5) 吸気温度が高い条件のほうが、センシティビティの変化に対して HCCI 運転のロバスト性が高い。

なおこの研究にあたり、Department of Energy (USA)、Kasetsart University (Thailand)、and DAAD (Germany) の支援を受けたことを記し、謝意を表する。

■参考文献

- 1) Westbrook C., Chemical kinetics of hydrocarbon ignition in practical combustion systems, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 1563-1577, 2000.
- 2) Najt, P. M. and Foster, D. E., "Compression-ignited Homogeneous Charge Combustion", SAE Technical Paper, No. 830246, 1983.
- 3) Aroonsrisopon, T., "An Experimental Investigation of Homogeneous Charge Compression Ignition Operating Range and Engine Performance with Different Fuels" M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Wisconsin-Madison, 2002.
- 4) Aroonsrisopon, T., Morikawa, T., Iida, M., and Foster, D. E., "Comparison of HCCI Operating Ranges for Combinations of Intake Temperature, Engine Speed and Fuel Composition", submitted to 2002 Future Car Congress.

- 5) Hayashi, M., "The Effect of Charge Thermodynamics on Performance and Autoignition on a HCCI Engine" M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Wisconsin-Madison, 2000.
- 6) Iida, M., Hayashi, M., Foster, D.E., and Martin, J., "Properties of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine with n-Butane Fuel", accepted for publication in ASME Journal for Gas Turbine and Power, 2002.
- 7) Christensen M. et al., "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio", SAE Technical Paper, No. 1999-01-3679, 1999.
- 8) Aceves S. M. et al., "A Multi-zone Model for Prediction of HCCI Combustion and Emissions", SAE Technical Paper, No. 2000-01-0327, 2000.
- 9) Noda, T. Foster, D., "A Numerical Study to Control Combustion Duration of Hydrogen-fueled HCCI by Using Multi-zone Chemical Kinetics Simulation", SAE Technical Paper, No. 2001-01-0250, 2001.
- 10) Richter M. et al., "The Influence of Charge Inhomogeneity on the HCCI Combustion Process", SAE Technical Paper, No. 2000-01-2868, 2000.
- 11) Leppard, W.R., "The Chemical Origin of Fuel Octane Sensitivity", SAE Technical Paper, No. 902137, 1990.
- 12) Kalghatgi, G.T., "Fuel Anti-Knock Quality - Part I. Engine Studies", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3584, 2001.
- 13) Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07-028637-X, 1988.
- 14) Duret, P., Gasoline CAI and Diesel HCCI: the way towards Zero Emission with Major Engine and Fuel Technology Challenges", SAE 2002-32-1787, 2001.