化学動力学に基づく3次元数値シミュレーションによる
ガソリンHCCI機関の着火・燃焼過程の予測*脇坂 知行** 藤本 英史***
伊藤 和真**** 高田 洋吾**Prediction of Ignition and Combustion Process in Gasoline HCCI Engine
by Three-dimensional Numerical Simulation Based on Chemical Kinetics

By Tomoyuki Wakisaka, Hidefumi Fujimoto, Kazuma Ito and Yogo Takada

Gasoline homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines, in which a very lean homogeneous mixture is burned at a high compression ratio, can operate with a high thermal efficiency, and can reduce NO_x emission. Therefore, the HCCI engine is a possible candidate as a next-generation engine. In this study, the authors newly proposed a reduced elementary reaction scheme for gasoline PRF, and simulated the ignition and combustion process and the combustion products in a gasoline HCCI engine by three-dimensional numerical analysis using the authors' GTT code, which was linked to the CHEMKIN subroutines with the proposed elementary reaction scheme. As a result, the ignition timing, the cylinder gas pressure, the rate of heat release, and the emissions of NO and CO₂ at various air-fuel ratios and engine speeds were accurately predicted.

1. 緒言

近年、環境問題や資源の枯渇が全地球規模で進行する中、内燃機関に対して排気の清浄化や燃費の向上が強く求められている。これらの要求に応えるには、燃焼過程の最適化を行うことが必要であり、数値解析により燃焼過程を精度良く予測することができれば、内燃機関の設計を効率的に行う上で大いに役立つと考えられる。

ガソリン予混合圧縮着火(HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition)機関は、高圧縮比のもとで均一な超希薄混合気を燃焼させることにより、高効率で低NO_xの燃焼を実現できることから、次世代機関として実用化が期待されている。しかし、高負荷側ではノッキングにより、低負荷側では失火により、運転領域が制限されるという問題を抱えている。これは、混合気の着火・燃焼特性が予混合気の化学反応過程に強く依存するので、自由度の高い着火時期の制御が困難であるからである。したがって、着火および燃焼の制御には、シリンダ内の化学反応過程を把握することが重要になる。

本研究では、ガソリンHCCI機関における着火・燃焼過程を化学動力学を用いて精度良く予測することを目的としている。しかし、何百、何千にも及ぶ素反応ステッ

ブを考慮し、3次元数値シミュレーションを行うことは、長大な計算時間を必要とするため、非実用的である。そこで、著者らは今回新たに、ガソリン用標準燃料(以下、ガソリンPRFと記す。PRF: Primary Reference Fuel)に対する独自の簡略化素反応スキームを構築した。そして、著者らのGTTコード^①に化学動力学モデルを組み込んだ3次元燃焼解析コードGTT-CHEM^②に、そのスキームを適用することにより、ガソリンHCCI機関の着火・燃焼過程と燃焼生成物について、様々な空燃比、機関回転速度のもとで数値シミュレーションを行い、実験結果との比較・検討を行った。

2. 解析手法

GTTコードには、離散液滴モデル(DDM)に基づいて、液滴の分裂、液滴相互の衝突・合体、噴霧の壁面衝突・液膜形成、液滴・液膜の蒸発に対するサブモデルが組み込まれており、実機条件での噴霧挙動の計算が可能である。圧縮着火機関における着火・燃焼過程の計算には、着火モデルとしてSchreiberらの5-Step簡略反応スキーム^③、燃焼モデルにはReitzらのモデル^④を用いて来たが、反応過程を詳細に解析するためには、詳細な化学動力学モデルを用いる必要がある。そこで、本研究では、GTTコードに、汎用化学反応計算コードであるCHEMKIN-II^⑤のサブルーチンを直接リンクさせることにより、化学動力学を考慮した3次元CFDコードGTT-CHEMを構築した。化学反応計算のソルバーにはCHEMKIN-IIライブラリに含まれる

*原稿受付 平成20年7月2日

**正会員 大阪市立大学 大学院工学研究科 機械物理系専攻
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

***学生会員 大阪市立大学 大学院工学研究科 後期博士課程

****大阪市立大学 大学院工学研究科 前期博士課程

Fig.1 Fuel oxidation reaction mechanism⁽⁸⁾ in a gasoline PRF reduced reaction scheme

SENKIN⁽⁶⁾を用いた。

3. ガソリンPRF簡略化素反応スキームの構築

3.1 詳細素反応スキームの簡略化 GTT-CHEMコードを用いれば、化学動力学に基づく詳細な3次元燃焼シミュレーションが可能となるが、1CPUのPCによる計算では、何百、何千にも及ぶ素反応ステップを考慮することは、計算時間が長大となるため実用的ではない。したがって、化学反応の予測精度を犠牲にすることなく、素反応メカニズムを簡略化した化学動力学モデルを構築することが必要となる。そこで著者らは、これまでにジメチルエーテル (DME) について簡略化素反応スキームを提唱し、DME-HCCI 機関における3次元燃焼シミュレーションを行ってきた⁽²⁾。

本研究では、ガソリンHCCI機関について化学動力学に基づく実用的な3次元燃焼シミュレーションを行うために、ガソリンに対する簡略化素反応スキームを構築した。

簡略化のためのベースとなる素反応スキームには、Golovitchev ら⁽⁷⁾により提唱されたイソオクタン $\text{i-C}_8\text{H}_{18}$ (84 species, 412 reactions) とノルマルヘプタン $\text{n-C}_7\text{H}_{16}$ (57 species, 290 reactions) の各素反応スキームを結合することにより著者らが構築したガソリンPRF素反応スキーム (101 species, 592 reactions)⁽²⁾を使用した。Golovitchev らの各素反応メカニズムは、米国 Lawrence Livermore 国立研究所で開発された素反応式数が数千にも及ぶ素反応メカニズム⁽⁸⁾から簡略化されたものであるが、素反応式数が数百におよぶため、計算負荷は大きい。したがって、化学種数 101、素反応式数 592 のガソリンPRF素反応スキームを以下、詳細素反応スキームと呼ぶこととする。

ガソリンPRF簡略化素反応スキームにおける燃料 ($\text{i-C}_8\text{H}_{18}$, $\text{n-C}_7\text{H}_{16}$) の酸化メカニズムの概略は、文献⁽⁸⁾を参考に図1のように示される。燃料の酸化反応は、 O_2 または OH による水素引き抜き反応により始まり、そこで生成したアルキルラジカル ($\dot{\text{R}}$) が、高温では直接熱分解しオレフィン (C_nH_{2n}) となり、低温では酸素付加を受けヒドロペルオキシラジカル (RO_2) となる。高温では、オレフィンが分解していくことにより酸化反応は進み、低温では、異性化や第2回目の酸素付加を受けケトン、アルデヒド、 OH が生成され、連鎖反応

が進行していく。その後の反応経路については、SENKINにより感度解析を行い、主要な反応を抽出して構築した。その結果、化学種数 47、素反応式数 62 の独自のガソリンPRF簡略化素反応スキーム (表2) を構築することができた。

3.2 0次元エンジンシミュレーションによる検証

ガソリンPRF簡略化素反応スキームを、CHEMKIN-IIを用いた0次元エンジン燃焼シミュレーションにより検証した。機関諸元を表1に示す。なお、吸気上死点を 0 deg.ATDC とし、計算は圧縮行程 215 deg.ATDC から開始した。

簡略化素反応スキームと詳細素反応スキームを用いた場合について、空燃比 $A/F = 28.7, 40.3$ の2条件におけるシリンダ内ガス圧力経過を図2に、燃料と代表的化学種の濃度経過を図3に示す。

図2より、簡略化素反応スキームを用いても詳細素反応スキームを用いた場合の圧力経過をかなり良好に再現できていることがわかる。また図3より、濃度経過に関しても、 HCHO , CO の履歴に若干差異が見られるものの、各化学種の履歴を良好に再現できていることがわかる。以上より、本簡略化素反応スキームは詳細素反応スキームを良好に再現可能であることがわかる。

3.3 遺伝的アルゴリズムを用いた反応速度定数のチューニング 遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm)⁽⁹⁾は、生物の遺伝と自然淘汰による進化のメ

Table 1 Engine specifications

Bore × Stroke	$\phi 86 \text{ mm} \times 86 \text{ mm}$
Compression ratio	16.0
Fuel property	ON 91 Gasoline (ON: Octane number)

Fig.2 Calculated results of the cylinder gas pressure with the reduced and detailed reaction schemes for the zero-dimensional simulation of the combustion in a gasoline HCCI engine

Fig.3 Calculated results of the concentration of typical chemical species with the reduced and detailed reaction schemes for the zero-dimensional simulation of the combustion in a gasoline HCCI engine

カニズムを工学的にモデル化したものである。GA では、生物の進化過程における遺伝的操作、すなわち、個体の遺伝子の選択、交叉、突然変異により、比較的短時間で準最適解を得ることが可能である。

3.2 節で、0 次元エンジン燃焼シミュレーションにおいて、本簡略化素反応スキームは詳細素反応スキームによる結果を良好に再現可能なことを示した。しかし、定積容器における着火遅れ時間で比較すると、図 4 に示すとおり、高温域で実験結果⁽¹⁰⁾を再現することができなかった。ただし、図中の詳細素反応スキームは GA によりチューニング済みである⁽²⁾。そこで、簡略化素反応スキームにおけるアレニウス型速度定数表示

$$k_i = A_i T^{\beta_i} \exp(-E_i/RT)$$

の前指数因子 A_i の値を、着火遅れ時間の実験結果にて

Fig.4 Calculated and experimental⁽¹⁰⁾ results of ignition delay for gasoline PRF of ON=90 ($\phi=1.0$)

Fig.5 Calculated results of the concentration of typical chemical species with the reduced and detailed reaction schemes for the zero-dimensional simulation of the combustion in a gasoline HCCI engine

きただけ合致するように、GA を用いてチューニングを行った。その結果、図 4 に示すように実験値に精度良く沿わせることが可能となった。このときの代表的化学種の濃度経過の計算結果を図 5 に示す。図 5 において、簡略化素反応スキームの場合と詳細素反応スキームの場合とを比較すると、各化学種の生成・消滅時期に若干の差異が認められるものの、図 4 に示す定積容器での着火遅れ時間で比較すると、簡略化素反応スキームの方がより実験値に近いので、チューニングした簡略化素反応スキームは妥当な素反応スキームであると考えられる。

最後に、今回構築したガソリン PRF 簡略化素反応スキームの詳細を表 2 に示す。表の各素反応式における A_i の値は、GA によるチューニング後の値である。ただし、柴田らによれば、同一リサーチオクタン価であるレギュラーガソリンと PRF 90.5 (イソオクタン 90.5 体積%とノルマルヘプタン 9.5 体積%より構成されるリサーチオクタン価 90.5 の標準燃料) の二つの燃料を比較すると、レギュラーガソリンの方が、低温酸化反応が遅延化し、その発熱量も小さくなることが報告されている⁽¹¹⁾。本研究では、素反応スキームの燃料に、イソオクタンとノルマルヘプタンを混合した PRF を使用しているので、低温酸化反応が過剰に起こってしまう恐れがある。そこで、低温酸化反応の発熱量を抑制するために、表 2 に示す簡略化素反応スキームの第 6 式、第 40 式、第 44 式の前指数因子 A_i (表 2 において、記号*で示す値) を次のようにさらにチューニングした。

$$A_6 : 8.00\text{E}+12 \rightarrow 2.00\text{E}+12$$

$$A_{40} : 3.64\text{E}+14 \rightarrow 3.64\text{E}+16$$

$$A_{44} : 2.55\text{E}+11 \rightarrow 3.55\text{E}+13$$

このチューニングを行った結果、図 6 に示すように A_6 , A_{40} , A_{44} の再チューニング後の着火遅れ時間の計算値は、1000K 以上の高温域では、実験値より短くなっているが、エンジンの着火時期を決定するのに重要な 700 K ~ 1000 K の温度域では、実験値にほぼ合致して

Fig.6 Calculated and experimental⁽¹⁰⁾ results of ignition delay for gasoline PRF of ON=90 ($\phi=1.0$) after tuning A_6 , A_{40} , A_{44}

Table 2 Reduced reaction scheme for gasoline PRF of $ON=90$

i	Reactions	$k_i = A_i T^b \exp(-E_i/RT)$		
		A_i	b_i	E_i
1	$iC_8H_{18}+OH=C_8H_{17}+H_2O$	3.00E+10	1.1	1810
2	$iC_8H_{18}+O_2=C_8H_{17}+HO_2$	1.44E+14	0.0	49000
3	$C_8H_{17}+O_2=RC_8H_{17}OO$	9.21E+19	-2.5	0
4	$RC_8H_{17}OO=C_8H_{16}OOH$	7.30E+12	0.0	28500
5	$C_8H_{16}OOH+O_2=RC_8H_{16}OOHOO$	1.13E+20	-2.5	0
6	$RC_8H_{16}OOHOO=C_8H_{15}O_4H_2$	*8.00E+12	0.0	28500
7	$C_8H_{15}O_4H_2=OH+C_7H_{14}CHO(OOH)$	1.46E+12	0.0	7500
8	$C_7H_{14}CHO(OOH)=$ $C_6H_{13}CO+CH_2O+OH$	1.38E+16	0.0	41400
9	$C_6H_{13}CO=CO+iC_6H_{13}$	6.63E+11	0.0	9600
10	$C_8H_{17}=C_7H_{14}+CH_3$	1.20E+13	0.0	31000
11	$C_8H_{17}=iC_4H_8+iC_4H_9$	7.00E+12	0.0	27600
12	$C_7H_{14}+OH=iC_7H_{13}+H_2O$	9.04E+13	0.0	3100
13	$iC_7H_{13}=iC_4H_8+C_3H_5$	4.67E+14	0.0	30000
14	$iC_6H_{13}=iC_3H_7+C_3H_6$	2.45E+13	0.0	28200
15	$iC_6H_{13}=iC_4H_9+C_2H_4$	1.56E+14	0.0	28800
16	$iC_4H_9=C_3H_6+CH_3$	8.32E+14	0.0	32800
17	$iC_4H_9+O_2=iC_4H_8+HO_2$	2.52E+12	0.0	5000
18	$iC_4H_8=C_3H_5+CH_3$	2.73E+18	-1.0	73400
19	$iC_4H_8+OH=iC_3H_7+CH_2O$	1.90E+12	0.0	0
20	$C_7H_{16}+O_2=C_7H_{15}+HO_2$	1.80E+14	0.0	48810
21	$C_7H_{16}+OH=C_7H_{15}+H_2O$	3.60E+10	1.1	1815
22	$C_7H_{15}=C_3H_4+C_3H_{11}$	3.48E+13	0.0	28810
23	$C_7H_{15}+O_2=C_7H_{14}+O_2$	6.80E+12	0.0	0
24	$C_7H_{15}O_2=C_7H_{14}O_2H$	1.09E+12	0.0	20380
25	$C_7H_{14}O_2H+O_2=C_7H_{14}O_2HO_2$	9.26E+11	0.0	0
26	$C_7H_{14}O_2HO_2=C_7KET_{21}+OH$	2.18E+13	0.0	26700
27	$C_7KET_{21}=C_3H_{11}CO+CH_2O+OH$	7.82E+16	0.0	42400
28	$C_3H_{11}CO=C_3H_{11}+CO$	1.35E+11	0.0	28300
29	$C_3H_{11}=C_2H_5+C_3H_6$	1.69E+14	0.0	13600
30	$iC_3H_7+O_2=C_2H_6+HO_2$	2.51E+12	0.0	5000
31	$C_3H_6+O=C_2H_4+CH_2O$	6.41E+05	2.6	-1130
32	$C_3H_6+OH=C_2H_5+CH_2O$	4.00E+12	0.0	0
33	$C_3H_6=C_2H_5+CH_3$	5.09E+16	0.0	85800
34	$C_3H_5+O_2=C_3H_4+HO_2$	5.56E+12	0.0	10000
35	$C_3H_4+OH=CH_2O+C_2H_3$	1.00E+12	0.0	0
36	$C_3H_5+O_2=C_3H_4+HO_2$	6.55E+12	0.0	5000
37	$C_2H_4+OH=C_2H_3+H_2O$	2.91E+13	0.0	1230
38	$C_2H_3+O_2=CH_2O+HCO$	2.49E+13	0.0	-250
39	$CH_3O+M=CH_2O+H+M$	3.05E+14	0.0	21000
40	$CH_3+HO_2=CH_3O+OH$	*3.64E+14	0.0	0
41	$CH_3+O_2=CH_2O+OH$	1.31E+11	0.0	9000
42	$CH_2O+O=HCO+OH$	1.72E+14	0.0	4600
43	$CH_2O+O_2=HCO+HO_2$	3.15E+14	0.0	37000
44	$CH_2O+HO_2=HCO+H_2O_2$	*2.55E+11	0.0	8000
45	$HCO+O_2=CO+HO_2$	9.88E+12	0.0	0
46	$CO+OH=CO_2+H$	1.01E+08	1.3	-770
47	$CO+HO_2=CO_2+OH$	7.50E+13	0.0	23650
48	$CH_4+HO_2=CH_3+H_2O_2$	1.16E+14	0.0	18000
49	$H_2O_2+OH=H_2O+HO_2$	3.16E+13	0.0	1800
50	$H_2O_2+O_2=HO_2+HO_2$	2.36E+14	0.0	42640
51	$H_2O_2(+M)=OH+OH(+M)$	1.52E+15	0.0	48500
52	$H+O_2=O+OH$	2.28E+17	-0.8	16510
53	$H_2+O=H+OH$	1.48E+11	1.0	8900
54	$CH_4+O=CH_3+OH$	8.95E+06	2.2	6480
55	$HO_2+H=H_2+O_2$	1.72E+14	0.0	700
56	$HO_2+O=OH+O_2$	3.70E+14	0.0	1000
57	$H+O_2+M=HO_2+M$	6.81E+15	0.0	-1000
58	$HO_2+H=OH+OH$	6.20E+14	0.0	1900
59	$HO_2+OH=H_2O+O_2$	3.13E+14	0.0	1000
60	$O+N_2=NO+N$	2.20E+13	0.0	75476
61	$N+O_2=NO+O$	6.40E+09	1.0	6257
62	$OH+N=NO+H$	4.10E+13	0.0	0

Units : cm^3, cal, mol, K (The values indicated by an asterisk are tuned up as follows: $A_6 : 8.00E+12 \rightarrow 2.00E+12$, $A_{40} : 3.64E+14 \rightarrow 3.64E+16$, $A_{44} : 2.55E+11 \rightarrow 3.55E+13$)

おり、問題はないと考えられる。

4. 実機条件における燃焼シミュレーション

4.1 計算条件 解析対象とした実験機関の諸元は表1と同じである。ただし、燃焼室形状は浅皿形であり、スワール比は2である。計算格子(格子分割数 $28 \times 28 \times 18$)を図7に示す。

本研究で対象としたガソリン HCCI 機関における実験では、燃料(リサーチオクタン価 91 のガソリン)は吸気ポート上流のサージタンク内に噴射されているため、計算開始クランク角度(215 deg.ATDC)では、燃料は完全に蒸発して空気と均一に混合し、燃焼室全体に一樣に分布していると仮定して計算を行った。また、計算における計算開始クランク角度における初期乱れエネルギー k_{ini} は、下式⁽¹²⁾により与えた。

$$k_{ini} = 0.74(4rn/60)^2$$

ここで、 r はクランク半径、 n は機関回転速度である。実験は様々な空燃比 A/F 、機関回転速度 n で行われており、実験と同一の条件で計算を行った。計算条件を表3に示す。Case 1~5は機関回転速度が 1000 rpm 一定で空燃比を変化させた場合であり、Case 6~8は空燃比が28.5付近で機関回転速度を変化させた場合である。いずれの場合も、シリンダ壁面温度は同一(400 K)とした。また素反応スキームには、前述のチューニングしたガソリン PRF 簡略化素反応スキームを使用し、化学反応計算は、計算領域を分割して4台の計算機により並列処理を行った。

4.2 初期条件推定法 GTT - CHEM による3次元エンジン燃焼シミュレーションで設定するシリンダ内ガスの初期温度・圧力・組成を0次元エンジン燃焼シミュレーションにより推定した。その推定法について以下に説明する。

まず、1 サイクル目においてシリンダ内は新気のみで満たされるとする。このとき、確実に圧縮着火を起

Fig.7 Computational grid for the test engine

Table 3 Simulation conditions

Case	1	2	3	4	5
Engine speed	1000 rpm				
A/F	40.3	34.0	33.2	30.8	28.7

Case	6	7	8
Engine speed	1250 rpm	1350 rpm	1450 rpm
A/F	28.4	28.2	28.9

こさせるために、初期温度は適度の高い温度に設定する。この条件で膨張行程下死点 (540 deg.ATDC) まで計算を行い、下死点での化学種組成を残留ガス組成とし、温度を残留ガス温度とする。

次サイクルでは、圧縮開始時期 (215 deg.ATDC) において新気と残留ガスは均一に混合するものとする (新気の組成は大気標準組成とし、温度は実験により得られた吸気温度とする)。このときの混合割合は、シリンダの上死点隙間容積に残留ガスが存在するものとして、残りの容積は体積効率に従って新気が充填されるものとする。この混合割合に従って、次サイクルでの初期ガス組成を計算する。また、残留ガスのエンタルピーと新気のエンタルピーにより混合ガスの温度を決定し、この温度に下式で示されるシリンダ壁からの加熱による新気の温度上昇⁽¹³⁾ ΔT_g を考慮したものを初期温度とする。

$$\Delta T_g = \frac{1}{3}(T_{wall} - T_g)$$

ただし、 T_{wall} はシリンダ壁面温度、 T_g は新気の温度である。

初期ガス圧力については、体積効率 100% の時にシリンダ内は実験により得られた吸気マニフォールド圧力になるとし、体積効率が 100% 以下の場合は、気体の状態方程式に従って初期圧力が低下するものとした。

以上の操作を、圧縮着火時期がある一定の時期で安定するまで繰り返す。本研究では、4 サイクル計算を行った。

4.3 計算結果

4.3.1 空燃比および機関回転速度の変化が着火・燃焼過程に及ぼす影響 機関回転速度が 1000 rpm 一定で空燃比を変化させた場合、および空燃比が 28.5 付近で機関回転速度を変化させた場合におけるシリンダ内ガス圧力および熱発生率の計算結果と実験結果の比較を図 8、図 9 に示す。

これらの図より、空燃比を超希薄側に変化させた場合 ($A/F = 28.7 \rightarrow 40.3$)、また、機関回転速度を高速側に変化させた場合 ($n = 1000 \rightarrow 1450$ rpm)、着火時期が遅れ、シリンダ内ガス圧力および熱発生率のピーク値が減少するという現象が計算によりほぼ定量的に再現できていることがわかる。

なお、計算開始から 540 deg.ATDC までの 1 ケースの計算は、AMD Opteron プロセッサ(1.8 GHz)を 4 CPU 用いて並列化することにより、約 32 時間で行うことができた。

4.3.2 空燃比および機関回転速度の変化が燃焼生成物に及ぼす影響 機関回転速度が 1000 rpm 一定で空燃比を変化させた場合、および空燃比が 28.5 付近で機関回転速度を変化させた場合における燃焼生成物 CO_2 および NO の計算結果と実験結果の比較を図 10 に

示す。

この図より、空燃比が増大するに従って CO_2 の生成量が減少するという現象、および機関回転速度 $n = 1450$ rpm の高速側では、他の回転速度の場合と空燃比がほぼ同一であるにもかかわらず、着火時期が遅延化することにより燃焼が緩慢になり、 CO_2 生成量が減少するという現象

Fig.8 Effect of the air-fuel ratio on the cylinder gas pressure and the rate of heat release

Fig.9 Effect of the engine speed on the cylinder gas pressure and the rate of heat release

が計算によりほぼ定量的に予測できていることがわかる。また、空燃比の増大および機関回転速度の上昇につれて、燃焼が緩慢になり、NO生成量が減少するという現象が、計算によりかなり良好に再現できていることがわかる。

5. 結 言

本研究により得られた知見は以下のとおりである。

1. 化学反応の予測精度を殆ど犠牲にすることなく、素反応メカニズムを簡略化することにより、ガソリン機関を対象とした独自のガソリン PRF 簡略化素反応スキームを構築することができた。この簡略化素反応スキームを用いることにより、ガソリンHCCI機関に対して化学動力学に基づく詳細な3次元燃焼シミュレー

Fig.10 Effect of the air-fuel ratio and the engine speed on the exhaust emissions

ションを実用的な計算時間で行うことが可能となった。

2. 残留ガスを考慮して初期条件を推定し、GTT-CHEMコードに独自のガソリン PRF 簡略化素反応スキームを適用することにより、ガソリンHCCI機関における着火時期、シリンダ内ガス圧力および熱発生率の経過、CO₂およびNOの排出量に及ぼす空燃比と機関回転速度の影響を精度良く予測することができた。

謝 辞

本研究で使用了実験データは、マツダ株式会社から提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Wakisaka, T., et al., COMODIA 90, (1990), p.487.
- (2) Kim, S-K., Ito, K., Yoshihara, D., Wakisaka, T., JSME International Journal, Ser.B, Vol.48, No.4, (2005), p.717.
- (3) Schreiber, M., et al., 25th Symp. (Int.) on Combustion, (1994), p.933.
- (4) Patterson, M. A., Kong, S.-C., Hampson, G. J. and Reitz, R. D., SAE Paper 940523, (1994).
- (5) Kee, R. J., et al., Sandia Report, SAND89-8009B, (1989).
- (6) Lutz, A. E., et al., Sandia Report, SAND87-8248, (1987).
- (7) Golovitchev, V. I., <http://www.tfd.chalmers.se/~valeri/MECH.html>.
- (8) Curran, H., J., et al, Combustion and Flame, Vol.129, (2002), p.253.
- (9) 村瀬, 小山, 石田, パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版, (1997).
- (10) Fieweger, K., et al., Combustion and Flame, Vol.109, (1997), p.599.
- (11) 柴田・他 3 名, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.105-04, (2004), p.11.
- (12) Mansour, N. N., Flows in Internal Combustion Engines, (1982), p.35.
- (13) 渡部, 改訂 内燃機関, コロナ社, (1969).