

## 第5章

## 3次元数値計算モデルによる解析

内燃機関の開発に当たっては、一層の高効率化と低公害化が強く求められているが、これらに影響する多くの燃焼関連因子の相互関係を実験的に解明するには膨大な労力と時間、コストを必要とする。そこで、内燃機関の燃焼過程をモデル化し、燃費・排気に影響を与える諸因子の関係を数値的に予測することは、実験の労力を低減するだけでなく、望ましい燃焼制御の方向性を明確にし、ひいては今後の新しい燃焼方式の開発目標に示唆を与えるものと考えられる<sup>(53)</sup>。そこでここでは、LPGの燃焼を支配する拡散燃焼での乱流混合過程や着火時の燃料噴霧の不均一性を考慮したモデルにより、希薄燃焼の領域にまで拡大して想定し、機関性能を維持しつつ有害排出成分であるNO<sub>x</sub>の低減を実現しうる燃焼形態をパラメータ・スタディにより追究する。

LPG噴霧の数値予測に関しては、3章で述べたように液相部を中心とするペネトレーションの長さやLIF法による気相部の可視化結果から数値シミュレーションコードKIVA-3を利用し、円筒形および定容燃焼器と同じ形状のメッシュで計算を行い、実験との比較・検討した。また、燃焼については、流れ場に乱流火炎伝播モデルや噴霧燃焼モデルを追加して予測計算を行うことになるが、現象が未解明であるため、それらの実験データをもとにこれらのサブモデルを改造し、実験結果との整合性を検証した。

5.1 解析方法

噴霧の数値シミュレーションには，内燃機関の研究・開発に多用されている KIVA-3 の流体コードを用いた．噴霧の解析は DDM(Discrete Droplet Method)と呼ばれる方法により液滴と周囲気体の 2 相流の解析を行い，運動量，分裂，蒸発のサブモデルを考慮している．噴霧に関するモデルは，Wave 分裂モデルを組み込んでおり，乱流モデルは k-ε モデルを用いている．使用した各燃料の物性値の計算と初期条件などを決定し，これらをもとに構築したプログラムを用いて計算し，定量的な評価を行った．計算結果を実験結果と比較して，モデルの妥当性を検証したうえで，各種実験条件での予測計算を行った．計算には，ワークステーション Dec Alpha Station 500MHz を使い，計算結果の解析には，米国 AVS(Application Visualization System)社が開発したソフトウェアを利用した．図 5.1 に実験から得られた結果をもとに数値計算の手順を示す．

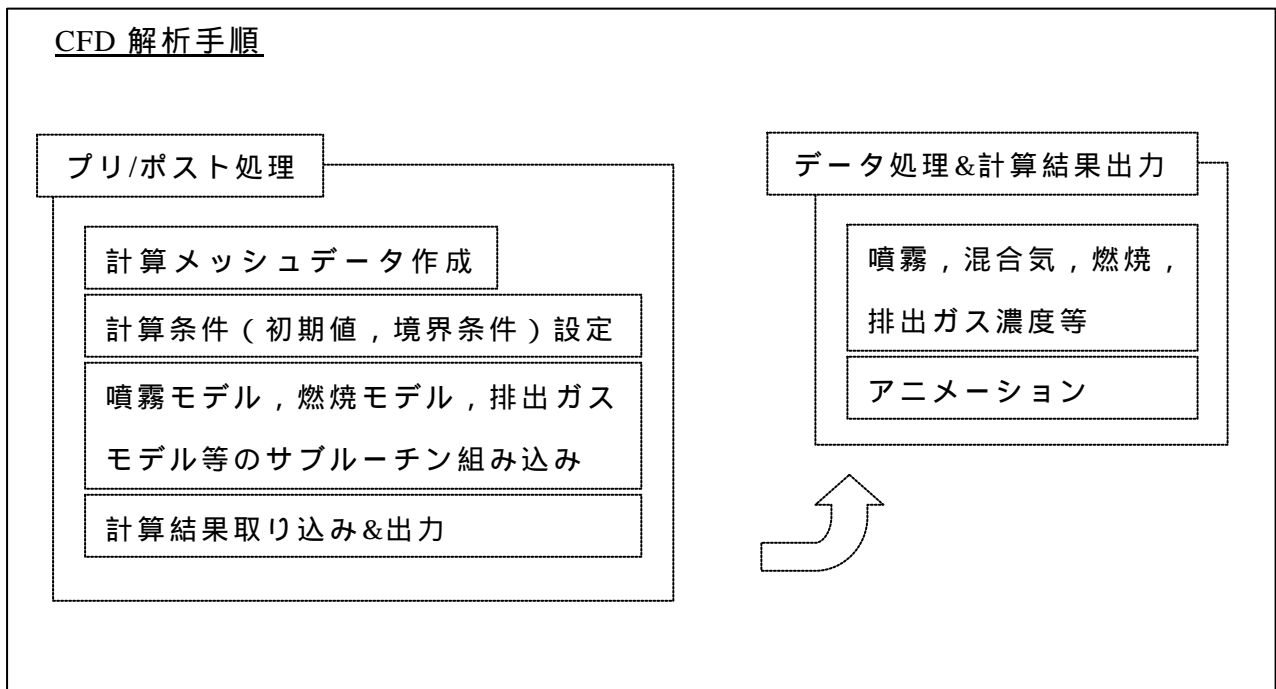


図 5.1 噴霧・燃焼の数値計算の手順<sup>(2)</sup>

KIVA-3コードは極座標変換法を採用しているため，曲面を含むような複雑な燃焼室壁面形状に対し，効率よくメッシュ系を構成することが可能である．非定常現象の解析では，時間を微小タイムステップで区切り，各セルに計算を行い，各特性値を変化させている．格子の位置も時間の関数として表され，それにALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)法と呼ばれる格子形状を形成する<sup>(54)</sup>．

液滴の分裂機構については Reitz らの Wave Breakup モデルを組み込んでいる．蒸発を伴う噴霧の計算は等しい特性値を持った粒子の集合体である液滴群を仮定し，それらを離散的に扱う Discrete-Particle-Technique が用いられる．噴霧粒子の半径やその他の特性値の決定には，乱数を用いて未知数の決定を独立に行うことのできる Monte Carlo 法を用いる．噴霧粒子が周囲流体と相互に与える影響は，質量・運動量・エネルギー保存則によって計算され，粒子の持つ乱れエネルギーもその中に含まれる．また，粒子同士の衝突や合体も考慮することができる．KIVA-3コードを用いて噴霧蒸発過程のシミュレーション計算を行うための流れを図 5.2 に示す．

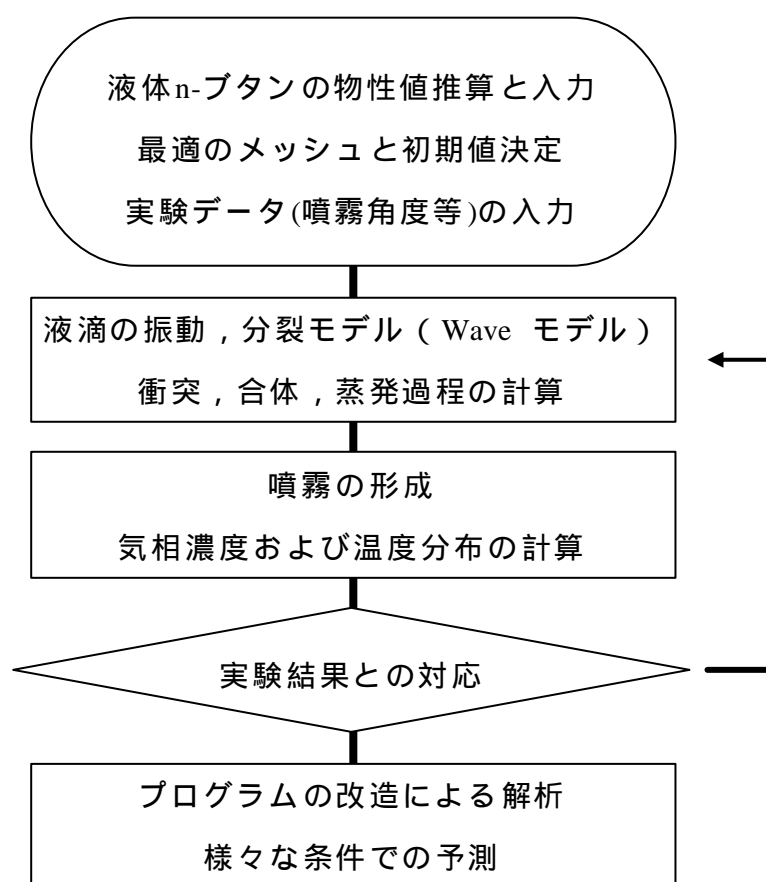


図 5.2 噴霧蒸発過程の数値計算の流れ

5.1.1 燃料物性値の推算

KIVA-3コード内では液体状態のLPGの物性値が与えられていないため、推算式を導入して各種物性値を求めた。KIVA-3コードの燃料入力データに組み込んだLPGの組成はn-ブタン100%として定め、表5.1に各物性値を示す。また、蒸気圧、粘度、蒸発潜熱は温度による依存性が高いため各温度に対する値を計算して組み込んだ。

表 5.1 各燃料の物性値<sup>(3)</sup>

	n-ブタン(液体)	プロパン(液体)
分子量	58.124	44.097
臨界温度(K)	425.16	369.82
生成熱(kcal)	-23.55	-19.69
液体密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.501	0.668
表面張力(dyn/cm,350K)	14.75	15.15
拡散係数	0.0875	0.0987
拡散指数	1.8	1.8
エンタルピ(kJ/g)	(1)参照	
蒸発潜熱(kJ/g)	(2)参照	
蒸気圧(dynes/cm <sup>2</sup> )	(3)参照	
粘度(g/cm・sec)	(4)参照	

(1) エンタルピ

低沸点液体燃料のエンタルピは気体のそのものと同じであることから既存JANAFから求められた気体状態の数値を用いる。

(2) 蒸発潜熱<sup>(55)</sup>

蒸発潜熱については、リデールの式5.1を利用して標準沸点での値を求めたうえ、ワッソンの式5.2により各温度に対する値を計算した。その結果を図5.3に示す。

$$L_b = 1.093RT_c \left( T_{br} \frac{\ln P_c - 1}{0.930 - T_{br}} \right) \quad (5.1)$$

$$L_2 = L_1 \left( \frac{1 - T_{r2}}{1 - T_{r1}} \right)^n \quad (5.2)$$

R : 気体定数

T<sub>r</sub> : 臨界温度

T<sub>c</sub> : 臨界温度

n : 一般に 0.38

P<sub>c</sub> : 臨界圧力

T<sub>r1</sub> : 沸点の対臨界温度

T<sub>br</sub> : 沸点の対臨界温度

T<sub>r2</sub> : ある温度の対臨界温度

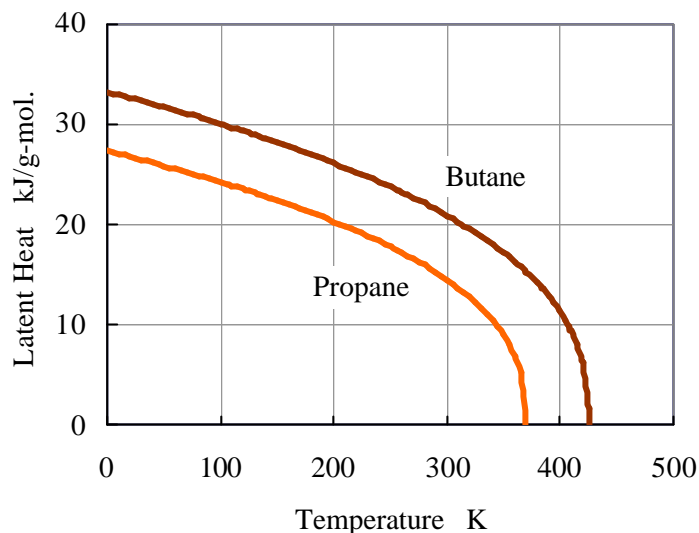


図 5.3 蒸発潜熱の温度依存性

(3) 蒸気圧<sup>(55)</sup>

蒸気圧はアントワンの式 を利用して求めた .ここで各係数 A ,B ,C を次の表に示す .

$$\ln P_v = A - B / (T + C) \quad (5.3)$$

	A	B	C
Propane	15 . 726	1872.46	-25.16
n -Butane	15 . 67	2154.9	-34.42

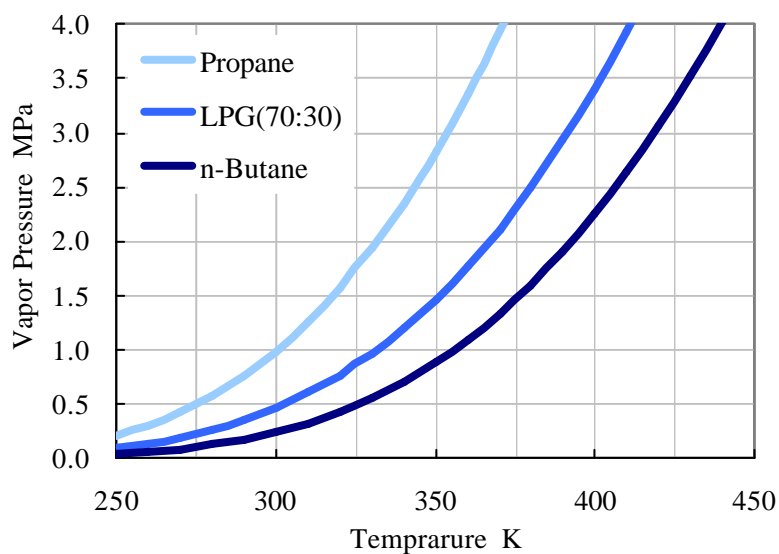


図 5.4 蒸気圧線図

