

## 熱硬化性樹脂のモータステータ内3次元流動解析

佐伯 準 \*

### 1. はじめに

モータは電力・産業・家電・交通分野で広く用いられているエネルギー変換機器であり、近年はHEV (Hybrid Electric Vehicle) 車用途への需要も増えている。モータは通常、ステータ (固定子) の金属コアの周りに規則的にコイルが巻かれており、コイルの固定と絶縁性を確保するために所定部を樹脂で封止する。ここでは接着性や耐熱性が要求されるため熱硬化性樹脂を用いるのが一般的である。樹脂の種類とモータ構造の組み合わせにより、モールドやドリップ、減圧含浸などの各種封止法がある。

モータは小型化と性能向上のために狭い隙間にコイルが密に配置される方向にあり、樹脂封止を確実に技術が強く求められている。近年、熱硬化性樹脂の流動解析技術が発展してきている<sup>1)~6)</sup>が、モータコイルのような複雑な障害物を厳密に取り扱うと計算時間が膨大になり、現実的な時間では解が得られないという問題が生じる。ここでは、筆者らが開発した熱硬化性樹脂の流動解析手法と汎用熱流体解析ソフト FLOW-3 D<sup>®</sup>を組み合わせ、モータコイルのような障害物を含む領域内での迅速な計算を行う手法を検討した。

### 2. 樹脂パラメータの検討

粘度式は筆者らが提案した時間と温度の関数となる次のモデル<sup>2), 3), 7), 8)</sup>を用いた。

$$\eta = \eta_0 [(1+t/t_0)/(1-t/t_0)]^C \quad (1)$$

$$\eta_0 = a \exp(b/T) \quad (2)$$

$$t_0 = d \exp(e/T) \quad (3)$$

$$C = f/T - g \quad (4)$$

ここで、 $\eta$  : 粘度、 $t$  : 時間、 $T$  : 温度、 $\eta_0$  : 初期粘度、 $t_0$  : ゲル化時間、 $C$  : 粘度上昇係数、 $a, b, d, e, f, g$  : 樹

表1 樹脂物性値

粘度式モデルのパラメータ	$a$ (Pa·s)	1.35 E-8
	$b$ (K)	8707
	$d$ (s)	1.6 E-4
	$e$ (K)	6400
	$f$ (K)	935.4
	$g$ (—)	0.265
密度 (kg/m <sup>3</sup> )		3100
比熱 (J/(kg·K))		800
熱伝導率 (W/(m·K))		5.0

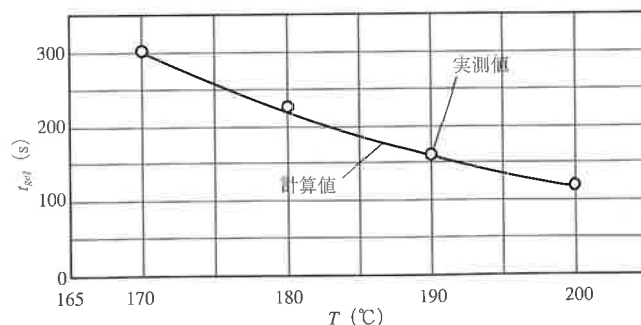


図1 ゲル化時間の比較

脂固有のパラメータである。

対象樹脂は高熱伝導性を有するエポキシ複合材料<sup>9)~11)</sup>1種とした。各種流動・硬化性試験結果を基に樹脂パラメータを設定した。これを熱物性値と併せて表1に示す。

図1にゲル化時間の比較を示す。計算値は熱板ゲルタイム法で得られた実測値とよく一致している。図2に粘度 $\eta$ の時間変化の推算値と実験値との比較を示す。実測値は高化式フローテスター (島津製作所製) を用い、計算値はその条件でのノズル中央部の粘度をシミュレーションした結果である。計算値は実測値とよく一致している。

### 3. モータ固定子の構造

充填解析に用いたモータステータの概略を図3に示す。HEV 駆動用程度の大きさのモータを想定した大きさとした。ステータの外形は円筒形状であり、ここでは図に記載

\* Saeki, Junichi  
(株)日立製作所生産技術研究所生産システム第二研究部  
横浜市戸塚区吉田町 292 (〒244-0817)  
2008. 4. 11 受理

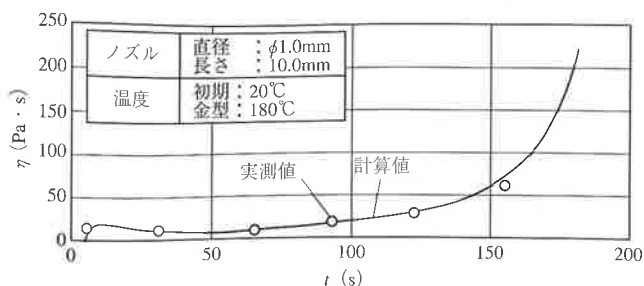


図2 粘度変化の比較

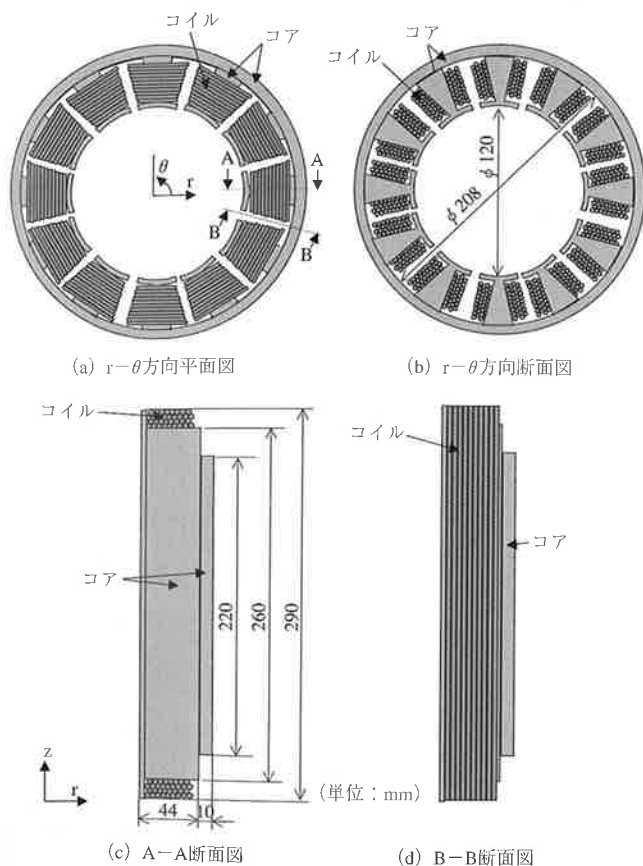


図3 モータのステータモデル

のような円筒座標系で表し、解析でもその座標系を用いた。コアの突起部は円周上に 30° ピッチで配列されており、それぞれのコアの周りに規則的にコイルが巻かれている。

#### 4. コイル隙間のモデル化

##### 4.1 予備検討

障害物が連続的に配列されているとき、障害物の間の狭い隙間の液体の流れを迅速かつ比較的高精度に予測するため、ポーラスメディアモデルがよく用いられている。これは連続した障害物と隙間を多孔質体とみなし、圧力と速度が比例する非常に遅い流れ場での運動方程式の解に開口率や隙間の形状、流体粘度に基づく係数を乗じることにより、厳密形状を定義せずに所定区間の流動挙動を迅速に計算する手法である<sup>12)</sup>。したがって、モータのように多数のコイルが規則的に並べられている場合の充填解析にも適していると考えられる。そこで、まず、その予備検討を行った。

図4に依積3本直線コイルでの解析モデルの比較と検証結果を示す。(a)は解析モデルの比較である。ここでは、コイル径がφ2.0mmでコイル隙間を0.1mmとし、上流側に所定の圧力を加えたときの流動状態を解析した。この場合、コイルに沿った流れとそれに直交して外側に漏れる流れを計算する必要がある。厳密形状モデルでは狭い隙間に合わせてメッシュを設ける必要がありメッシュ数が非常に多くなっている。計算時間は300mm流動するのに4.5日要した。実際のコイルは本数が多く複雑な配置をしているので厳密形状モデルのままでは、コイル全体解析は非現実的と判断した。一方、ポーラスメディアモデルでは対象流路全体を多孔質体とみなし、実際の現象と等価な流動抵抗値を3次元方向に与えておく方式を用いる<sup>12)</sup>。これで厳密形状モデルと同様の流量配分となるように抵抗値を調整した結果、メッシュ数は非常に少なくなり、計算時間は3分に短縮されることが分かった。これは厳密モデルの約1/2000の時間であり、ポーラスメディアモデルではコイル全体解析が可能となる。

図4(b)に、上流側を加圧して依積3本コイルの流路に流したときの圧力と流量の関係を示す。検証流体として水を用い、圧力と流量の1組の関係を基にポーラスメディアモデルの抵抗値を設定した。その結果、ポーラスメディアモデルでは実験領域のすべてにわたって実測値とよく一致することがわかった。以上により、モータのコイル部はポーラスメディアモデルを用いることにした。

##### 4.2 ポーラスメディアモデルの改良

通常の多孔質体の解析ではD'Arcy則が用いられる<sup>12)</sup>。この1次元表示の式は次のようになる。

$$\Delta P = K \cdot u \cdot \rho \cdot L \quad (5)$$

ここで、 $\Delta P$ : 圧力損失、 $u$ : 速度、 $\rho$ : 密度、 $L$ : 流動距離である。 $K$ は粘度と断面固有の形状抵抗値が含まれた定数となっており、このままでは熱硬化性樹脂特有の粘度変化は取り扱いえないので、ここでは、次の形を新たに構築し、FLOW-3D<sup>®</sup>機能に追加した。

$$\Delta P = \beta \cdot \eta \cdot u \cdot \rho \cdot L \quad (6)$$

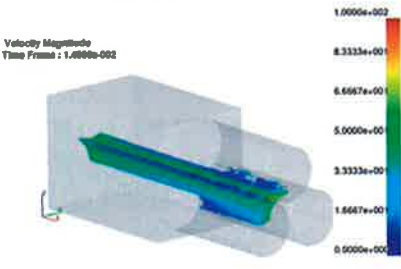
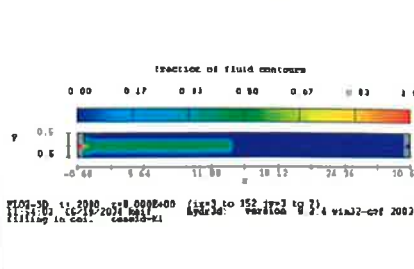
ここで $\beta$ : 断面固有の形状抵抗値、 $\eta$ : 粘度である。(6)式により粘度変化を考慮した形での解析が可能となる。

図5にコイルのモデル化を示す。コアの周りのコイルは位置により3次元方向の抵抗が異なるのでここでは領域に分け、それぞれの領域でコイル配線に沿う方向で抵抗値が小さくなるように各方向の $\beta$ の値を設定した。

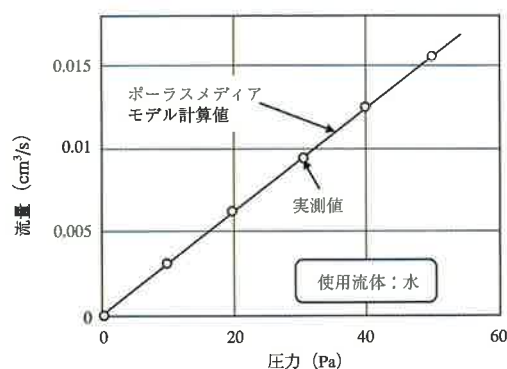
なお、解析ソフトでは、ポーラスメディア部では通常の流体の運動方程式に多孔質体流動の加速度項を加えた形として取り扱っており、多孔質体としての性質を判断しながら解析を行うことができる。また、エネルギー方程式では接触面積をセルの体積で除した接触面積率を定義して伝熱計算を行う方式となっている<sup>12)</sup>。

#### 5. 樹脂充填解析

解析では、コイル部のみをポーラスメディアとし、その他の流動部分はそのままの形状を用いた。熱硬化性樹脂用粘度式と粘度を考慮したポーラスメディアの式ならびに

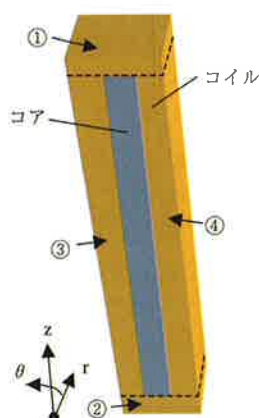
厳密形状モデル 		ポーラスメディアモデル 
メッシュ数	480,000	3,750
流動距離 300mmでの 計算時間	4.5日	3分

(a) 解析モデルの比較



(b) 検証結果

図4 倭積3本直線コイルでの解析モデルの比較と検証結果



$\beta ((\text{Pa} \cdot \text{s}^2)^{-1})$		
領域	①, ②	③, ④
方向	r	1.0E7
	$\theta$	1.0E6
	z	1.0E7

図5 コイル部のモデル化と設定した  $\beta$  の値

表2 解析条件

樹脂初期温度 (°C)	75
金型温度 (°C)	175
設定充填時間 (s)	30
設定圧力 (MPa)	9.8

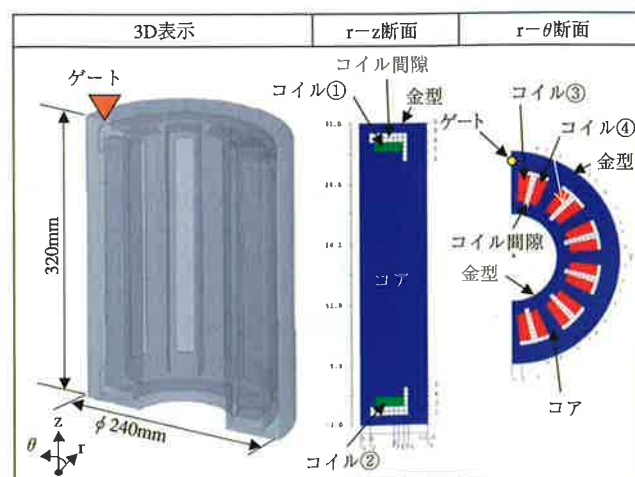


図6 解析モデル

FLOW-3D®の機能を組み合わせ3次元の充填解析を行った。

表2に解析条件を示す。ここではトランスファモールドを想定した条件とした。なお、ポーラスメディア部では表面張力の物性値も入力しているが、トランスファモールドのような外部圧力が支配的な場合は表面張力の寄与はほと

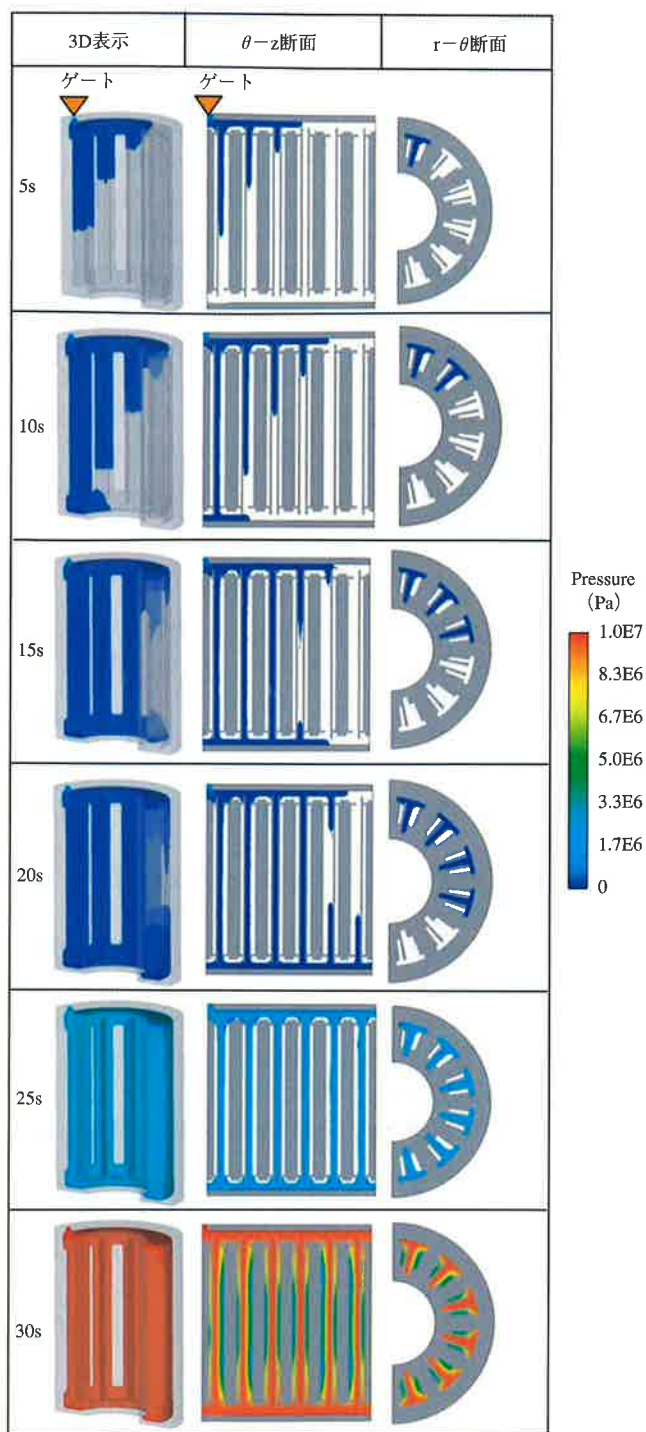


図7 樹脂充填挙動と圧力プロファイルの計算結果

んどない。

図6に解析モデルを示す。ゲートは1箇所であり、ゲートから円周方向に分岐する流れは軸対称となるので、 $r$ 軸は円筒中心を原点として金型外周まで、 $\theta$ 軸はゲートと反対側を原点とし、ゲート位置までをメッシュ分割した1/2モデルとした。 $r-\theta$ 断面ではコア、コイルは金型に囲まれている。白抜き部分のコイル間隙となる。金型を含めた全体の高さは320 mm、直径は $\phi$  240 mmである。メッシュ数は63,000である。

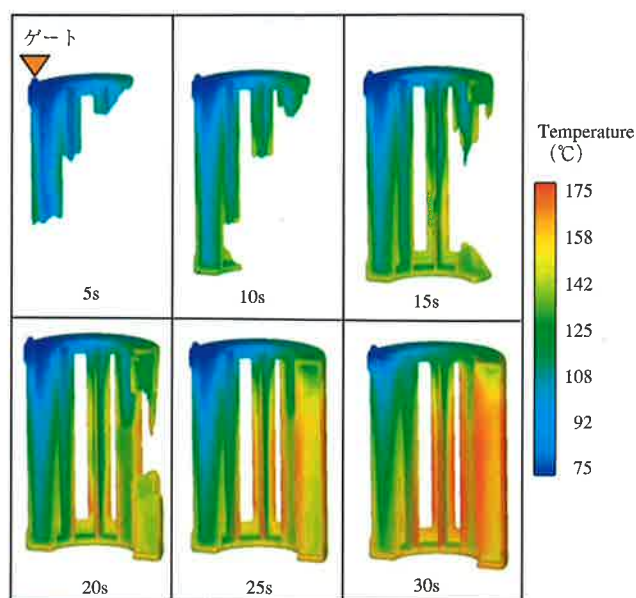


図8 樹脂充填挙動と温度プロファイルの計算結果

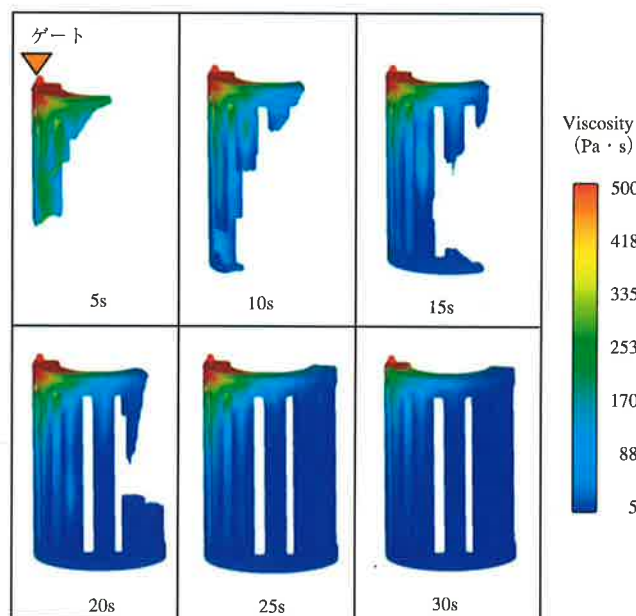


図9 樹脂充填挙動と粘度プロファイルの計算結果

## 6. 解析結果

### 6.1 樹脂充填挙動と圧力プロファイル

図7に樹脂充填挙動と圧力プロファイルの計算結果を示す。3-D表示は金型やコアとの接触面での樹脂の挙動を示す。 $\theta-z$ 断面ではコイルとコアが並んでいる箇所の $r$ 方向座標を選び、その位置で $\theta$ 方向を横に展開した状態を示している。なお、コアとコイル隙間の間に見えている筋は固体障害物ではなく、コイルをモデル化したボラスメディア領域の外周を示している。 $r-\theta$ 断面では $z$ 方向の中央部付近の状態を示している。

充填開始から5 s後では、ゲートから流入した樹脂はゲート近傍の流路から順に充填を開始している。 $\theta-z$ 断面では抵抗の少ないコイル間隙を先に充填するが、ゲート近傍ではコイルの一部にも充填を開始している。10 s, 15

sと時間が経過するにしたがって充填がさらに進行する。流動先端部ではコイル間隙を先に充填するが、ゲートに近い側ではコイル内も充填が進む。20 sではさらに充填が進むが、まだ圧力は非常に低い。25 sはコイル間隙に樹脂が充填を完了したところである。この段階では上下のコイル内にも樹脂は大部分充填している。この時刻以降は抵抗の大きいコイル内のみの充填となるため圧力が上昇し始める。30 sは最終充填の状態であり、コイル間隙の部分は樹脂は設定圧まで圧力が上昇し、コイル内の最終充填位置に向けて圧力勾配ができています。設定移送時間は30 sであり、その時刻通りに充填完了している。

### 6.2 温度プロファイル

図8に樹脂充填挙動と温度プロファイルの計算結果を示す。ここでは3-D表示してある。ゲート部の樹脂の温度は75℃であり、金型温度は175℃である。5 sでは樹脂温度はまだあまり上昇していないが、時間の経過とともに金型からの伝熱により流動先端部の樹脂は温度上昇を続ける。充填完了時の30 sではゲートから遠ざかるほど温度が高くなり、一部は金型温度に達している。

### 6.3 粘度プロファイル

図9に樹脂充填挙動と粘度プロファイルの計算結果を示す。ここでは3-D表示を反転させた状態を示している。ゲートから流入する樹脂は温度が低いため粘度は高い。時間の経過とともに金型からの伝熱により温度が上昇するので流動先端に近いほど粘度は低くなる。充填完了時刻の30 sでは、ゲート近傍を除き粘度は5.0 Pa・s程度にまで下がっている。熱硬化性樹脂は温度上昇による粘度低下と反応の進行による粘度上昇が同時に起きるが、この解析では充填完了時刻では流動先端部もまだ硬化反応による粘度上昇域には入っていない。

## おわりに

本報告の3次元解析に要した時間は4 h程度であった。図4に示したようにポーラスメディアで表現した解析モデルは形状を厳密に表現したモデルに比べ、高精度で計算時間を約1/2000に短縮できることを確認済みである。したがって、今回のようなモータステータ形状の場合、もし、厳密形状モデルを用いたとすると解析時間は300日以上を要することになり、現実的な制約時間内での計算は不可能になる。本報告の手法の適用により、モータコイルのような複雑障害物を含む樹脂充填解析を高精度かつ迅速に行える見通しを得た。今後、本開発技術を基にモータや発電機などの各種樹脂含浸プロセスの最適化に取り組んでいく予定である。

## 参考文献

- 1) 佐伯準一：成形加工，**18**，280 (2006)
- 2) 佐伯準一，河野 務：成形加工 '01，273 (2001)
- 3) Saeki, J. and Kono, T. : PPS-18, 187 (2002)
- 4) 佐伯準一：成形加工，**13**，692 (2001)
- 5) 佐伯準一，河野 務，寺前俊哉：成形加工，**16**，309 (2004)
- 6) 佐伯準一，河野 務，寺前俊哉：成形加工，'03，337 (2003)
- 7) 佐伯準一，金田愛三：日本機械学会論文集，**56-B**，2343 (1990)
- 8) Saeki, J. and Kaneda, A. : *JSME Int. J. series II* **33-3**，486 (1990)
- 9) 竹澤由高：成形加工，**14**，619 (2002)
- 10) 竹澤由高：液晶，**7**，11 (2003)
- 11) 竹澤由高他：高分子，895 (2002)
- 12) FLOW SCIENCE Inc. : FLOW-3 D User's Manual