差分法ＤＥＱＳＯＬにおける流体解析機能

3C−3

五百木伸洋[1]　佐治みゆき[2]　金野千里[2]
（株）日立製作所　ソフトウェア工場[1]　中央研究所[2]

１．はじめに

偏微分方程式向き数値シミュレーション言語ＤＥＱＳＯＬは、物理現象を支配する方程式レベルの記述から数値計算用のＦＯＲＴＲＡＮプログラムを自動生成するシステムであり、解析手法には、差分法、バウンダリ・フィット法、有限要素法の３種類がある[1)]。ＤＥＱＳＯＬのシステム構成図を図１に示す。

ＤＥＱＳＯＬは、当初、拡散系の問題を適用範囲として開発を進めてきたが、現在では流体問題に適用するための機能拡張を検討している。前回の報告では有限要素法ＤＥＱＳＯＬの拡張機能の概要について示したが[2)3)]本報では、差分法ＤＥＱＳＯＬの拡張機能について報告する。

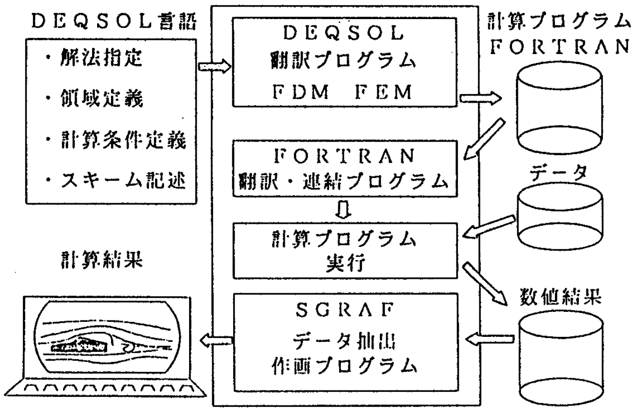

図1　ＤＥＱＳＯＬシステムの構成

２．　流体解析の特徴

流体問題の多くは、次に示すＮａｖｉｅｒ−Ｓｔｏｋｅｓ方程式によって記述される。

$$\dot{U}_i + U_j U_{i,j} + P_{,i} - (1/Re)\, U_{i,jj} = 0 \qquad \text{（運動方程式）} \qquad (1)$$

$$U_{i,i} = 0 \qquad \text{（連続の式）} \qquad (2)$$

ここに、Ｕは流速、Ｐは圧力、Ｒｅはレイノルズ数を表す。流体解析では、（１）式の左辺第２項の移流項と左辺第３項の取り扱いが問題となる。これら２項は、数値計算上次に示す問題の原因となっている。

① 圧力に対し１階微分であるため、圧力が振動する。

② 移流項の影響が大きい流れでは、計算が不安定になる。

そのため、流体解析では上記２つの問題を防ぐために次に示す離散化手法を用いるところに特徴がある。

① スタガード格子　② 風上差分[4)]

３．　拡張機能

ＤＥＱＳＯＬでは、２で示した２つの離散化手法を実現するために次に示す機能を導入した。

（１）　定義点設定機能

この機能は、変数または定数の定義点を指定する機能であり、格子点上、格子線上、格子中央のいずれかに定義点を設定することができる。この機能を用いて図２に示すスタガード格子を設定する場合のＤＥＱＳＯＬ記述例を図３に示す。

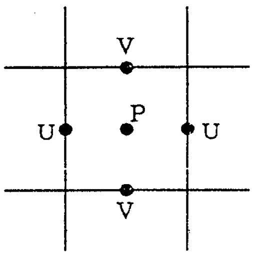

図２　スタガード格子

```
STGGRD   X   FOR  V
         Y   FOR  U
         XY  FOR  P;
```

図３　ＤＥＱＳＯＬ記述例

（２）　風上差分機能

この機能は、１階微分で記述された項に対し、その空間方向への離散化の手法として風上差分が指定できるという機能である。風上差分の手法としては、表１に示す５種類の離散化方法を指定できる。図４に（１）式の移流項の離散化に対し１次精度風上差分を指定する場合と保存形移流項に対しＱＵＩＣＫ法を指定する場合のＤＥＱＳＯＬ記述例を示す。

Development of FDM-DEQSOL Fluid Mechanics Version
Nobuhiro IOKI,　Miyuki SAJI　and　Chisato KONNO
Hitachi,Ltd

表１　指定可能な風上差分手法

項番	風上差分名称	指定可能な移流項の形	指定名称
1	１次精度風上差分	保存形・非保存形	ＵＰ１
2	２次精度風上差分	保存形・非保存形	ＵＰ２
3	ＡＧＡＲＷＡＬ法	非保存形	ＵＰＡ
4	ＱＵＩＣＫ法	保存形	ＵＰＱ
5	河村・桑原スキーム	非保存形	ＵＰＫ

非保存系移流項に対する指定

Ｕ＊ＤＸ（Ｔ）［ＵＰ１（Ｕ）］

保存系移流項に対する指定

ＤＸ（Ｕ＊Ｔ）［ＵＰＱ（Ｕ）］

図４　ＤＥＱＳＯＬ風上指定例

５．流体問題のＤＥＱＳＯＬ記述例

ここでは、差分法ＤＥＱＳＯＬを流れと熱の連成問題に適用した例を示す。解析領域は図５に示すようにＲ１，Ｒ２に示す固体壁とＲ３に示す流れ場とからなる。初期条件は、解析領域全体の温度を４０℃とし流れ場に流速はないものとする。そして、境界条件として入口から５℃の流体を流入するものとする。

時間積分として、流れに対しＳＭＡＣ法、温度に対しクランクニコルソン法を適用した場合のＤＥＱＳＯＬスキーム記述例を図６に示す。

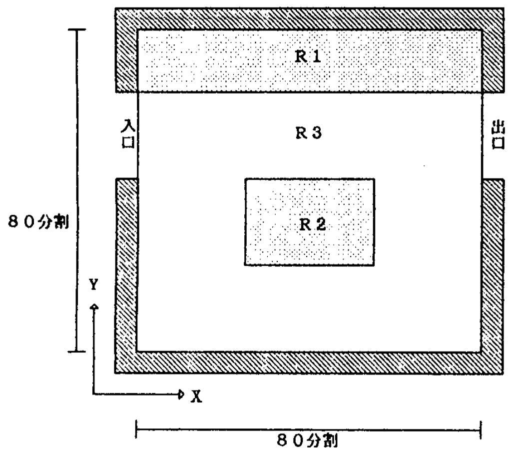

図５　解析モデル

```
STGGRD             Y FOR U.UO,UM
                   X FOR V.VO.VM
                   XY FOR P.PO.PSI.SIGM;
                    :
SCHEME;
    RE=100; RR=1/RE; VVO=VV; TOO=TN;
    ITER NT UNTIL NT GE 300 ;
      UM=UO-DLT*(DX(PO)-RR*LAPL(UO))
           -DLT*VVO..GRAD(UO) [UP1(VVO)]      AT R3;
      VM=VO-DLT*(DY(PO)-RR*LAPL(VO)-GB*(TOO-40))
           -DLT*VVO..GRAD(VO) [UP1(VVO)]      AT R3;
      SOLVE PSI OF LAPL(PSI)=-(DX(UM)+DY(VM))
             BY 'PCG' WITH(EPS(1.D-4))        AT R3;
      U=UM+DX(PSI) AT R3;
      V=VM+DY(PSI) AT R3;
      P=PO-PSI/DLT AT R3;
      VVO=VV       AT R3;
      PO=P         AT R3;
      SOLVE TN OF
        (TN-TOO)/DLT-0.5*(DIV(SIGM*GRAD(TN))
                         +DIV(SIGM*GRAD(TOO)))
        +0.5*(VV..GRAD(TN)+VV..GRAD(TOO))=0
                        BY 'PCG' WITH(EPS(1.D-5));
      TOO=TN;
      SAVE  VV,TN,P EVERY 50  TIMES;
         PRINT VV,TN,P EVERY 50  TIMES;
    END ITER;
END SCHEME;
```

図６　ＤＥＱＳＯＬ記述例

また、図６のＤＥＱＳＯＬプログラムを翻訳し生成したＦＯＲＴＲＡＮプログラムの性能を表２に示す。

表２　生成ＦＯＲＴＲＡＮの実行性能

記述	①ＤＥＱＳＯＬ	７１
行数	②ＦＯＲＴＲＡＮ	４００７
比	②／①	５５．７
実行	③Ｓ−８２０スカラ	２６１８　（秒）
時間	④Ｓ−８２０ベクトル	２３５　（秒）
ベクトル化率		９５．８
加速率　③／④		１１．１

５．おわりに

今回の検討で差分法ＤＥＱＳＯＬの流体問題適用に対する有効性を確認した。また、ＤＥＱＳＯＬの生成するＦＯＲＴＲＡＮは、高いベクトル化率を実現していることも確認した。今後は、実レベルの流体問題への適用を検討し、より有効なものにしていきたいと考えている。

参考文献

１）梅谷他；　数値シミュレーション言語ＤＥＱＳＯＬ　；　情報処理学会論文誌 Vol 26 (1985)

２）平山他；　有限要素法ＤＥＱＳＯＬの流体シミュレーション向き機能における自動離散化方式　；
情報処理学会第３７回全国大会　講演論文集　pp.40-41

３）佐川他；　有限要素法ＤＥＱＳＯＬの流体シミュレーション向き機能の検討　；
情報処理学会第３７回全国大会　講演論文集　pp.42-43

４）河合他；　高レイノルズ数における３次精度風上差分の比較　；　日本機械学会論文集（Ｂ）
５２巻　pp.2067-2071