



図2 擬似コードとテンプレートプログラム  
Fig.2 Algorithm templates are expressed by classified pseudo codes.

また、feelfem のこのプログラム生成方式では、生成できる数値計算アルゴリズムの拡張も容易です。各アルゴリズムは疑似コードの順列で表現されているわけですが、すでに登録された疑似コードを用いて新たな数値計算アルゴリズムを登録することができます。たとえば、行列に関する例では、行列のデータ構造に必要なインデックス情報を生成するという疑似コードのステップは、固有値問題など行列を扱うすべてのアルゴリズムに対して使われます。このステップに関するプログラム生成機能は、各データ構造ごとに1つだけ存在すればよいことになります。

## 2.2 feelfemの入力例

feelfem では、有限要素法の問題は自然な数式による表記によって指定することができます。図3は3次元線形構造解析に対する入力例です。有限要素法の計算を構成するパラメータはそれぞれが自然な表記で指定可能です。図の例では、geom ブロックに領域に関する名称が宣言され、メッシュジェネレータによって使用されます。element ブロックによって補間関数が、quadrature ブロックによって数値積分法の定義が可能です。var ブロックでは、fem 文によって補間関数を指定した変数が、ewise 文では要素間で連続性を仮定しない変数が宣言されます。応力問題の偏微分方程式を指定する部分は、scheme ブロック内の solve 文ですが、そこでは変分形式で偏微分方程式が境界条件とともに記述されています。

図3の例で生成されるプログラムのプログラム構造・データ構造を指定している箇所が、

ProgramModel feelfem90vec ;

と、solve 文のなかの、

solver MUMPS ;

です。それぞれ、ベクトル処理向きの要素行列アセンブルを行うFortran90プログラムを生成すること、行列解法としてMUMPSと呼ばれる並列直接解法を利用すること（こ

の指定から行列データ構造も決定される）を指定しています。feelfem ではこの箇所を変えるだけで、異なる並列アルゴリズム、線形ソルバーのプログラムを生成することができます。

## 3. feelfem による数値計算ソフトウェア環境

数値計算分野のソフトウェア環境は、ライブラリ拡充の取組みから始まりました。しかし並列計算が不可避になり、単なるライブラリでは対応できなくなった今日、数値計算ソフトウェアの効率的な開発のために世界中で様々な試みがなされています。主なものとして、並列計算データ構造の上に作られた高級ライブラリ PETSc<sup>2)</sup>、非構造メッシュのアダプティブなメッシュ制御やマルチグリッドソルバーなどの機能モジュールを提供する UG<sup>3)</sup>などを挙げることができます。また、有限要素法の諸手続きをC++のクラスライブラリとして抽象化したものにDiffpack<sup>4)</sup>があります。これらのツールとfeelfemは背反するものではありません。feelfemの目的は、これらのツールのライブラリ的な再利用可能技術をプログラムモデル、データ構造モデルとして格納する枠組みを提供することです。そして、定型的な有限要素法の離散化を数式処理によって代行することにより、バグが存在しないプログラムを提供します。feelfemでは対応できない離散化手法を用いる問題でも、その問題に近い、バグのない複雑なデータ構造を扱うプログラムを生成できるので、ユーザは並列処理に伴う複雑なプログラムのデバッグから開放され、より建設的な研究開発に専念できると考えられます。

## 4. むすび

有限要素法のためのソフトウェアツールfeelfemは有限要素法のソフトウェア知識を、離散化手法とプログラム・データ構造に分けてそれぞれ独立に知識ベースとして構築

```

geom { /* interface for GiD mesh generator */
meshgrid;
problem stress3d;
dimension 3;
surface (fix,u_fix,v_fix,w_fix);
surface (press);
region (mat);
}

/* definition of quadrature */
quadrature tet3[tetra] { /* Cubic order */
double p2,p4,p6;
double w,wm;
p2 = 1.0 / 2.0;
p4 = 1.0 / 4.0;
p6 = 1.0 / 6.0;
wm = 9.0 / 20.0 / 6.0;
(p4,p4,p4) : wm;
(p2,p6,p6) : w;
(p6,p2,p6) : w;
(p6,p6,p6) : w;
}

element T2[tetra] {
(0,0,0): 1.0-r-s*(2.0*(1.0-r-s)-1.0);
(1,0,0): r*(2.0*r-1.0);
(0,1,0): s*(2.0*s-1.0);
(0,0,1): t*(2.0*t-1.0);
(0.5,0.5): 4.0*t*(1.0-r-s);
(0.5,0.5,0): 4.0*s*(1.0-r-s);
(0.5,0.5,0): 4.0*t*(1.0-r-s);
(0.5,0.5,0): 4.0*s*t;
(0.5,0.5,0): 4.0*s*t;
}

var {
fem u[T2],v[T2],w[T2];
fem fx[T2],fy[T2], fz[T2];
double c11,c12,c13;
double c21,c22,c23;
double c31,c32,c33;
double c44,c55,c66;
ewise e[tet3].nyu[tet3];
double p; /* pressure */
double c;
}

scheme {
ProgramModel feelfem90vec;
fx = 0.0; fy = 0.0; fz = 0.0;
e = 20000.0;
p = 2000.0;
nyu = 0.3;
c = e*(1.0-nyu)/(1.0+nyu)/(1.0-2.0*nyu);
c11 = c * 1.0;
c12 = c * nyu / (1.0-nyu);
c13 = c * nyu / (1.0-nyu);
c21 = c * nyu / (1.0-nyu);
c22 = c * 1.0;
c23 = c * nyu / (1.0-nyu);
c31 = c * nyu / (1.0-nyu);
c32 = c * nyu / (1.0-nyu);
c33 = c * 1.0;
c44 = c * (1.0 - 2.0*nyu)/2.0 / (1.0 - nyu);
c55 = c * (1.0 - 2.0*nyu)/2.0 / (1.0 - nyu);
c66 = c * (1.0 - 2.0*nyu)/2.0 / (1.0 - nyu);

solve[u,v,w; tu,tv,tw] {
quadrature tet3;
solver MUMPS;

weq: integral( (c11*dx(u)+c12*dy(v)+c13*dz(w))*dx(tu) +
integral( c44*(dy(u)+dx(v)) *dy(tu)) +
integral( c66*(dz(u)+dx(w)) *dz(tu)) =
integral( fx * tu ) + bintegral( Sx * tu );

weq: integral( (c21*dx(u)+c22*dy(v)+c23*dz(w))*dy(tv) +
integral( c44*(dy(u)+dx(v)) *dx(tv)) +
integral( c55*(dz(v)+dy(w)) *dz(tv)) =
integral( fy * tv ) + bintegral( Sy * tv );

weq: integral( (c31*dx(u)+c32*dy(v)+c33*dz(w))*dz(tw) +
integral( c55*(dz(v)+dy(w)) *dy(tw)) +
integral( c66*(dz(u)+dx(w)) *dx(tw)) =
integral( fz * tw ) + bintegral( Sz * tw );

dbc: u = 0, on fix,u_fix,v_fix,w_fix;
dbc: v = 0, on fix,v_fix,w_fix;
dbc: w = 0, on fix,w_fix,v_fix;
nbc: Sx = nx*p,Sy = ny*p, Sz = nz*p, on press;
}
}

```

図3 構造解析問題のfeelfemでの記述例  
Fig.3 An feelfem script example for 3D structural analysis.

- 4) Diffpack 有限要素法のC++クラスライブラリ  
<http://www.diffpack.com/>
- 5) GiD 有限要素法向けプリ・ポストプロセッサー  
<http://gid.cimne.upc.es>

## 筆者紹介



Hidehiro Fujio  
藤尾 秀洋 ひでひろ  
1990年、NEC入社。現在、NEC  
ラボラトリーズ インターネットシステム研究所主  
任。