OpenFOAM(R)ソースコード入門 pt.1
熱伝導方程式の解法から有限体積法の実装について考える
後編：laplacianFoamでの実装

2016/7/23　オープンCAE勉強会＠富山

富山県立大学　中川慎二

注意

- OpenFOAMユーザーガイド，プログラマーズガイド，OpenFOAM Wiki，CFD Online，その他多くの情報を参考にしています。開発者，情報発信者の皆様に深い謝意を表します。
- この講習内容は，講師の個人的な経験（主に，卒研生等とのコードリーディング）から得た知識を共有するものです。この内容の正確性を保証することはできません。この情報を使用したことによって問題が生じた場合，その責任は負いかねますので，予めご了承ください。

概要

- OpenFOAM の利用者を対象とし，OpenFOAMのソースコードの読み方の基本を学びます。
- OpenFOAMの中で最も基本的なソルバの1つ”laplacianFoam”（熱伝導方程式を解くソルバ）を例にとります。
- 実際にOpenFOAMのソースコードを見ながら，OpenFOAMのソースコードの特徴，ソースコード解読初心者が躓きやすい点などについても，解説します。

概要

- 偏微分方程式 → 有限体積法で離散化 → セル間距離や物性値などで定まる係数列（a_E, a_W, a_P など）から行列式 → 解
- OpenFOAMでは，この部分がソルバ・レベルでは，巧妙に隠蔽されている。（知らなくても使える）
- OpenFOAMで作られる行列式は，どんなもの？どうやって作られる？Schemeを実行時に選べるのはどういう仕組みか？　を調べる

前編では…

- 1次元熱伝導方程式を有限体積法によって離散化し，行列を作成する.
- この行列を手作業で解き，温度分布が求められることを確認する.
- この過程で必要な式変形などを確認する.

*

後編では…

- 熱伝導方程式を解くソルバ “laplacianFoam” のソースコードを見ながら，上記手作業で出てきた式が，どのように実装されている（コーディングされている）かを読み解く.
- 与えた偏微分方程式から行列が作られる過程を確認する.
- しかし，行列の解法には踏み込まない.

前編のおさらいと後編のねらい

- 偏微分方程式 → 有限体積法で離散化 → セル間距離や物性値などで定まる係数列（a_E, a_W, a_P など）から行列式 → 解

- OpenFOAMでは，この部分がソルバ・レベルでは，巧妙に隠蔽されている。（知らなくても使える）
- OpenFOAMで作られる行列式は，どうなっているのか？どうやって作られるのか？Schemeを実行時に選べるのはどういう仕組みか？　を調べる

シミュレーションの流れ

- 偏微分方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}(\Gamma\, \mathrm{grad} T) + S_T$$

有限体積法

- 離散方程式

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + S_u$$

係数列の計算

- 行列

$$[A][T]=[b]$$

行列の解法

- 解

プログラムの階層構造

- Level 0, Top：
  - 偏微分方程式　ソルバー
- Level 1:
  - 離散化・有限体積法　finiteVolume
- Level 2:
  - 行列 fvMatrix, lduMatrix
- Level 3:
  - 基礎的部品　OpenFOAM
  - 単位，時間，リスト，メモリ，OS関連，並列化

laplacianFoam

Application　laplacianFoam

Description　Solves a simple Laplace equation, e.g. for thermal diffusion in a solid.

非定常　拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \mathrm{div}(\Gamma\, \mathrm{grad} T) = 0$$

$$\int_V \frac{\partial T}{\partial t} dV - \int_V \mathrm{div}(\Gamma\, \mathrm{grad} T) dV$$

$$= \int_V \frac{\partial T}{\partial t} dV - \int_S (\Gamma\, \mathrm{grad} T) \cdot \boldsymbol{n} dS = 0$$

$$[A][T]=[b]$$

laplacianFoamで使うソースコード

- ソルバ ディレクトリ

  $FOAM_APP/solver/basic/laplacianFoam

- srcディレクトリ（ソルバディレクトリ/Make/optionsで指定）
  - $WM_PROJECT_DIR/src/finiteVolume
- 全ソルバ共通 src
  - $WM_PROJECT_DIR/src/OpenFOAM
  - $WM_PROJECT_DIR/src/OSspecific/POSIX

Linuxの基礎：$付きの文字列は，変数を意味する。その中身を知りたい時は，端末にて次のコマンドを実行する。(echoコマンド)
echo $FOAM_APP

Level 0：メイン部分の概説

```
// 多くのソルバーで共通するヘッダーファイルの読み込み。OpenFOAMの基盤的な機能を有効にする。
#include "fvCFD.H"
// simple法の機能を使うためのヘッダーファイルを読み込む。
#include "simpleControl.H"
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
int main(int argc, char *argv[])
{
// 多くのソルバーで共通するヘッダーファイルの読み込み。OpenFOAMの基盤的な機能を有効にする。
    #include "setRootCase.H"
    #include "createTime.H"
    #include "createMesh.H"
// simple法のためのクラスから，simple法をコントロールするためのオブジェクトsimpleを作成
    simpleControl simple(mesh);
// 変数 温度場T，拡散係数DT，設定ディクショナリ transportProperties，を作成して，ファイルから読み込む。
    #include "createFields.H"
    // * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
    Info<< "¥nCalculating temperature distribution¥n" << endl;

// シンプル法のオブジェクトを使って，繰り返し回数をコントロールする
    while (simple.loop())
    {
        Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;

// 非直行性補正が有効な場合のみ実行。
        while (simple.correctNonOrthogonal())
        {
// 非定常拡散方程式から線形代数式を生成して，解く。
// 非定常項と拡散項をimplicit(陰的)に解く。fvm
            solve
            (
                fvm::ddt(T) - fvm::laplacian(DT, T)
            );
        }

// 結果の出力
        #include "write.H"
        Info<< "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s"
            << "  ClockTime = " << runTime.elapsedClockTime() << " s"
            << nl << endl;
    } // end of the simple loop
    Info<< "End¥n" << endl;

    return 0;
}
```

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^2(\Gamma T) = 0$$

OpenFOAMでの偏微分方程式の離散化
PG-35　Table 2.2

C++の基礎：#include “ファイル名” の部分には，指定したファイルの中身がそのまま貼付けられる。そのファイルの存在する場所は，コンパイル用設定で指定している。

行列

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + S_u$$

$$[A][T]=[b]$$

$$\begin{bmatrix} a_{p1} & -a_{E1} & 0 & 0 \\ -a_{W2} & a_{P2} & -a_{E2} & 0 \\ 0 & -a_{W3} & a_{P3} & -a_{E3} \\ 0 & 0 & -a_{W4} & a_{P4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u1} \\ S_{u2} \\ S_{u3} \\ S_{u4} \end{bmatrix}$$

- 偏微分方程式の各項から，これら行列に入る係数が出てくる。
- 項毎に行列を作り，まとめることで，最終的に解きたい行列式を作成する。

行列

$$\begin{bmatrix} a_{p1} & -a_{E1} & 0 & 0 \\ -a_{W2} & a_{P2} & -a_{E2} & 0 \\ 0 & -a_{W3} & a_{P3} & -a_{E3} \\ 0 & 0 & -a_{W4} & a_{P4} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} S_{P1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{P2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{P3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{P4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -a_{E1} & a_{E1} & 0 & 0 \\ a_{W2} & -a_{W2} - a_{E2} & a_{E2} & 0 \\ 0 & a_{W3} & -a_{W3} - a_{E3} & a_{E3} \\ 0 & 0 & a_{W4} & -a_{W4} \end{bmatrix}$$

非定常項

拡散項

$$\begin{bmatrix} S_{BC0} + S_{u1} \\ S_{u2} \\ S_{u3} \\ S_{BC5} + S_{u4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u1\_ddt} \\ S_{u2\_ddt} \\ S_{u3\_ddt} \\ S_{u4\_ddt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{BC0} \\ 0 \\ 0 \\ S_{BC5} \end{bmatrix}$$

非定常項

拡散項

境界条件

よく使うクラス

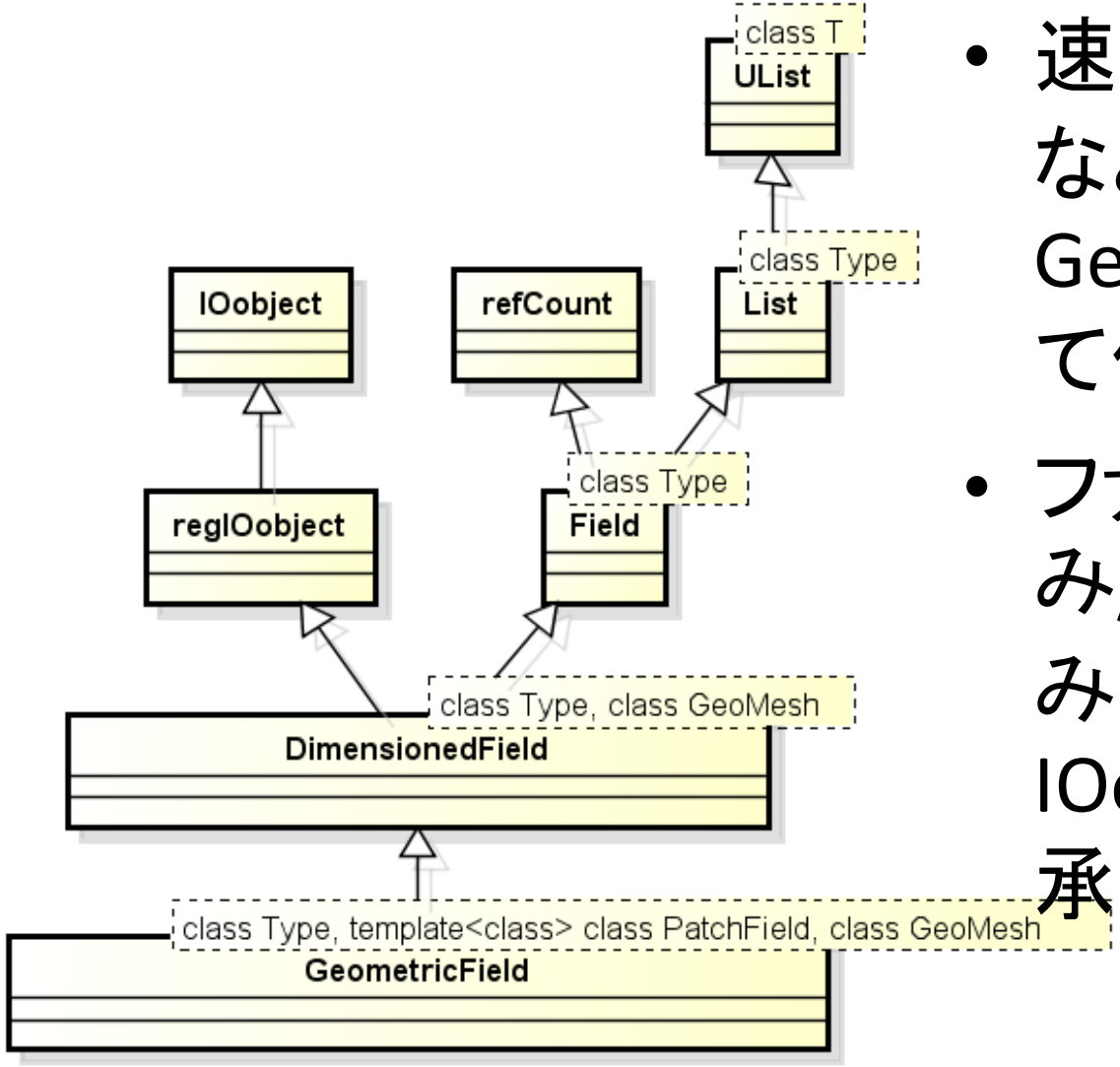
	非フィールド値 場所によらず一定	フィールド値 場所によって値が変わる	
		セル面での値	セル体積（中心）での値
スカラー	dimensionedScalar dimensioned<scalar>	surfaceScalarField GeometricField<scalar, fvsPatchField, surfaceMesh>	volScalarField GeometricField<scalar, fvPatchField, volMesh>
ベクトル	dimensionedVector dimensioned<vector>	surfaceVectorField GeometricField<vector, fvsPatchField, surfaceMesh>	volVectorField GeometricField<vector, fvPatchField, volMesh>

上の行は，typedefで定義された別名
下の行が本来の定義

typedef

- 既存の型に　新しい名前(別名)を付ける
- コードが見やすくなる
- テンプレートなどを含んだ長い名前の型・クラスも，短く理解しやすい名前を付けることができる

GeometricFieldクラスの継承関係



- 速度U，圧力p，温度Tなどのデータは，GeometricField型として保存されている。
- ファイルへの書き込み/ファイルからの読み込みなどは，IOobjectクラスから継承している。

TとDTの定義：createFields.H

```
volScalarField T
(
    IOobject
    (
        "T",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
```

volScalarField T(IOobject, mesh);
Tという名前で，volScalarFieldクラスのオブジェクトを作成する。引数を2つ渡してコンストラクタ指定。

dimensioned(Istream & is)
Construct from Istream.
Definition at line 91 of file dimensionedType.C.

dimensionedScalar DT();
DTという名前のdimensionedScalarクラスのオブジェクトを作成する。引数はIstream& 。読み取った値で初期化する。

```
dimensionedScalar DT
(
    transportProperties.lookup("DT")
);
```

transportPropertiesオブジェクトのlookup関数を使って，transportPropertiesディクショナリのDTという項目の値を読み込む。transportPropertiesは、IOdictionaryクラスのオブジェクト。
IOdictionary transportProperties
lookup関数の戻り値は，ITstream&

transportPropertiesの定義：createFields.H

```
IOdictionary transportProperties
(
    IOobject
    (
        "transportProperties",
        runTime.constant(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ_IF_MODIFIED,
        IOobject::NO_WRITE
    )
);
```

設定ファイル（ディクショナリ）クラスの
オブジェクトとして，
transportPropertiesを宣言している。

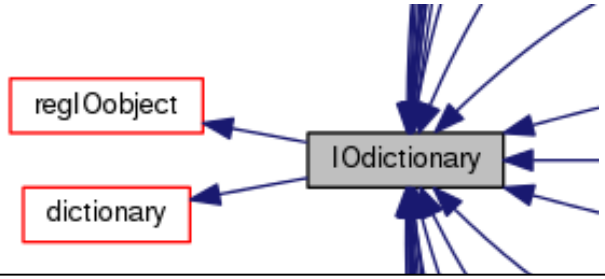
IOdictionary Class Reference

Public Member Functions inherited from dictionary

ITstream & lookup (const word &, bool recursive=false, bool patternMatch=true) const

IOdictionary.H

```
54 class IOdictionary
55 :
56  public regIOobject,
57  public dictionary
```



dictionary.H

```
316  ITstream& lookup
317  (
318          const word&,
319          bool recursive=false,
320          bool patternMatch=true
321  ) const;
```

dictionary.C

```
446 Foam::ITstream& Foam::dictionary::lookup
447 (
448          const word& keyword,
449          bool recursive,
450          bool patternMatch
451 ) const
452 {
453     return lookupEntry(keyword, recursive, patternMatch).stream();
454 }
```

Class ITstream

Description: Input token stream.

class ITstream: public Istream,public tokenList

laplacianFoam.C メインループ

```
while (simple.loop())
{
    Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;

    while (simple.correctNonOrthogonal())
    {
        solve
        (
            fvm::ddt(T) - fvm::laplacian(DT, T)
        );
    }

    #include "write.H"

    Info<< "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s"
        << "  ClockTime = " << runTime.elapsedClockTime() << " s"
        << nl << endl;
}
```

関数名

引数名

行列式を作成（各項ごとの行列を作成した後，加減算）し，解く

非定常項
引数：volScalarField
fvmDdt.C

拡散項
引数: dimensionedScalar と volScalarField
fvmLaplacian.C

どちらも戻り値
tmp<fvMatrix<Type> >

src¥finiteVolume¥finiteVolume¥fvm¥

fvmDdt.C

テンプレートクラスを使う宣言

戻り値の型

関数名

引数

関数の中身

戻り値

scalar

参照渡し：vf は，読み出し側変数の別名となる。同一のものを操作することになる。これを変更すると，もとの変数の内容も変わる。

volScalarField T

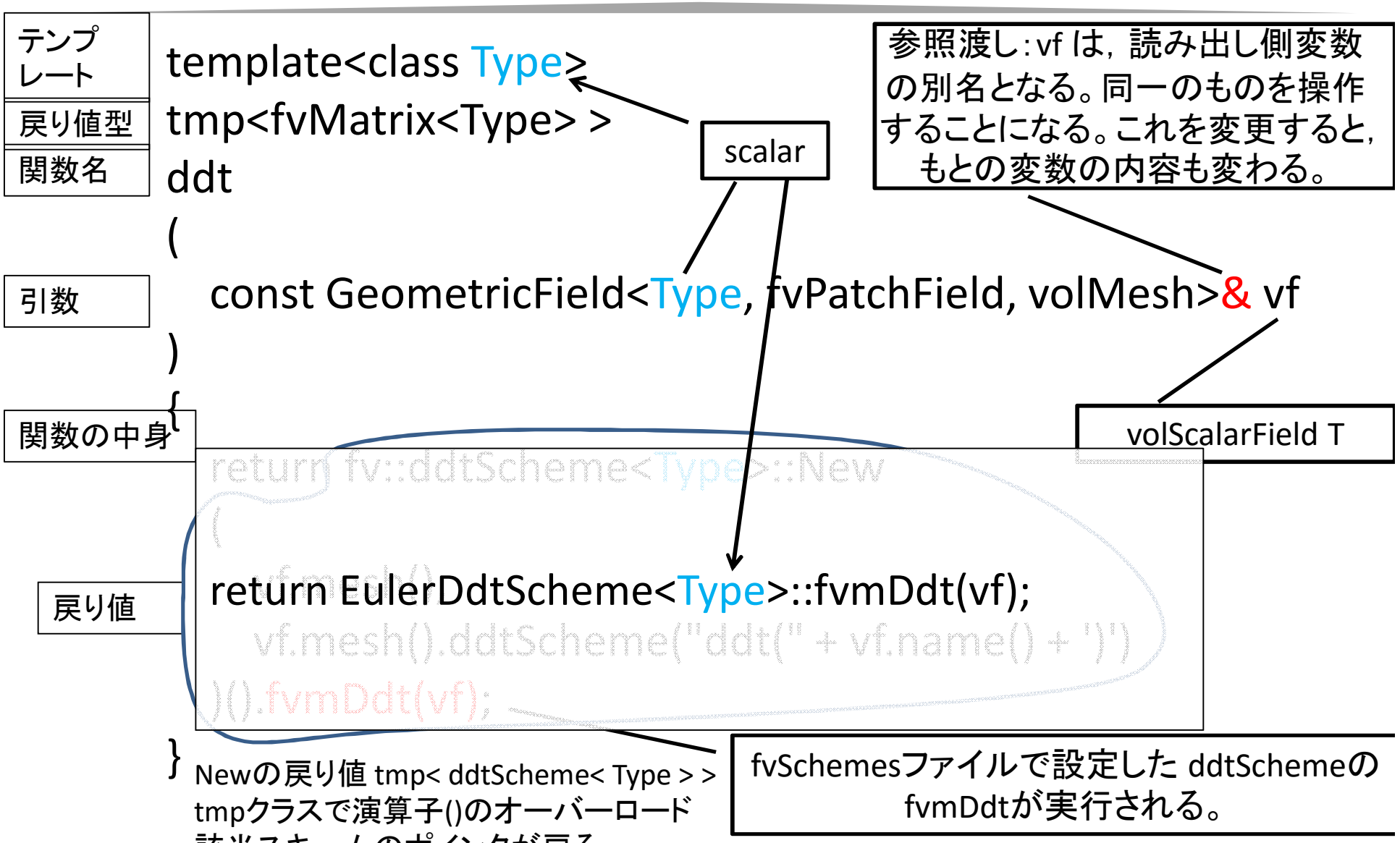
```
template<class Type>
tmp<fvMatrix<Type> >
ddt
(
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf
)
{
    return fv::ddtScheme<Type>::New
    (
        vf.mesh(),
        vf.mesh().ddtScheme("ddt(" + vf.name() + ')')
    )().fvmDdt(vf);
}
```

Newの戻り値 tmp< ddtScheme< Type > >
tmpクラスで演算子()のオーバーロード
該当スキームのポインタが戻る

fvSchemesファイルで設定した ddtSchemeの fvmDdtが実行される。

src¥finiteVolume¥finiteVolume¥fvm¥

fvmDdt.C



Run-Time Selection

- OpenFOAM guide/runTimeSelection mechanism – OpenFOAMWiki

  http://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/runTimeSelection_mechanism

- Run-time type selection in OpenFOAM - the type name system – sourceflux

  http://www.sourceflux.de/blog/runtime-type-selection-openfoam/

ddtScheme

- Euler, localEuler, CrankNicholson, backward, steadyState など（UserGuide 4.4.6）
- src/finiteVolume/finiteVolume/ddtSchemes にソースコードがある

- 今回は，最もシンプルな Euler (implicit)を考える。
  - クラス名　EulerDdtScheme

Euler implicit

$$\int_V \frac{\partial T}{\partial t} dV = \frac{(T_P V_P)^{new} - (T_P V_P)^{old}}{\Delta t}$$

$$= \frac{(V_P)^{new}}{\Delta t} T_P - \frac{(T_P V_P)^{old}}{\Delta t}$$

T_Pの係数に追加

生成項に追加
（現時刻での温度とは
無関係）

EulerDdtScheme.C

line 329

```
template<class Type>
tmp<fvMatrix<Type> >
EulerDdtScheme<Type>::fvmDdt
(
    const GeometricField<Type, fvPatchField,
volMesh>& vf
)
{
    tmp<fvMatrix<Type> > tfvm
    (
        new fvMatrix<Type>
        (
            vf,
            vf.dimensions()*dimVol/dimTime
        )
    );

    fvMatrix<Type>& fvm = tfvm();

    scalar rDeltaT = 1.0/mesh().time().deltaTValue();

    fvm.diag() = rDeltaT*mesh().Vsc();

    if (mesh().moving())
    {
        fvm.source() =
rDeltaT*vf.oldTime().internalField()*mesh().Vsc0();
    }
    else
    {
        fvm.source() =
rDeltaT*vf.oldTime().internalField()*mesh().Vsc();
    }

    return tfvm;
}
```

$\frac{(T_P V_P)^{old}}{\Delta t}$

行列の生成項に（旧時刻での値×セル体積／タイムステップ）を入れる。Told*Vcell/Δt

$\frac{(V_P)^{new}}{\Delta t} T_P$

行列の対角成分に（セル体積／タイムステップ）を入れる。Vcell/Δt

行列

$$\begin{bmatrix} a_{p1} & -a_{E1} & 0 & 0 \\ -a_{W2} & a_{P2} & -a_{E2} & 0 \\ 0 & -a_{W3} & a_{P3} & -a_{E3} \\ 0 & 0 & -a_{W4} & a_{P4} \end{bmatrix} =$$

ソースコード
solve (fvm::ddt(T) - fvm::laplacian(DT, T));

$$\begin{bmatrix} S_{P1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{P2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{P3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{P4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -a_{E1} & a_{E1} & 0 & 0 \\ a_{W2} & -a_{W2} - a_{E2} & a_{E2} & 0 \\ 0 & a_{W3} & -a_{W3} - a_{E3} & a_{E3} \\ 0 & 0 & a_{W4} & -a_{W4} \end{bmatrix}$$

ここまでで設定済み
非定常項

これから設定
拡散項

$$\begin{bmatrix} S_{BC0} + S_{u1} \\ S_{u2} \\ S_{u3} \\ S_{BC5} + S_{u4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u1\_ddt} \\ S_{u2\_ddt} \\ S_{u3\_ddt} \\ S_{u4\_ddt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{BC0} \\ 0 \\ 0 \\ S_{BC5} \end{bmatrix}$$

今回は考えない：境界条件に応じた値が入る

設定済み
非定常項

今回は考えない：拡散項
非直交性補正では値が入る

Laplacian 拡散項

- schemeの選択肢は，Gauss だけ（UserGuide 4.4.4） ただし，下記補間方法の選択肢がある
  - Gauss <interpolationScheme> <snGradScheme>
- 拡散係数の補間(interpolation) 方法の選択肢は，linear, upwind, limitedLinear, vanLeer, MUSCL など（UserGuide 4.4.1.2, Table 4.6）
  - 隣接するセル中心での値から，面での値を補間する
- 面垂直方向勾配(snGrad)の補間方法の選択肢は，corrected, uncorrected, limited ψ, bounded, fourth など（UserGuide 4.4.2, 4.4.4, Table 4.9）
  - 隣接するセル中心での勾配の値から，面での値を補間する
- src/finiteVolume/finiteVolume/laplacianSchemes にソースコードがある
- 今回は，最もシンプルな場合を考える。補間の詳細については触れない。

拡散項

$$\int_S (\Gamma \,\mathrm{grad}T)\cdot \boldsymbol{n}dS = \sum_f \left[(\Gamma \,\mathrm{grad}T)\cdot \boldsymbol{S_f}\right] = (\Gamma \,\mathrm{grad}T)_e \cdot \boldsymbol{S_{f\_e}} + (\Gamma\, \mathrm{S}\, \mathrm{grad}T)_w \cdot \boldsymbol{S_{f\_w}}$$

$$= \left(\Gamma \frac{dT}{dx}\right)_e S_{f\_e} - \left(\Gamma \frac{dT}{dx}\right)_w S_{f\_w} = \Gamma_e \left(\frac{dT}{dx}\right)_e S_{f\_e} - \Gamma_w \left(\frac{dT}{dx}\right)_w S_{f\_w}$$

ベクトルの内積

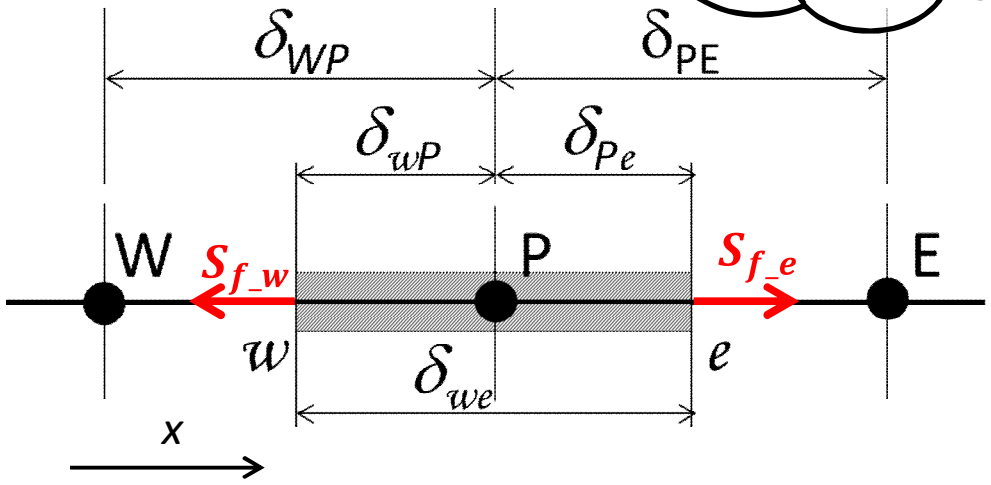
スカラー値の積

$\boldsymbol{S_{f\_w}}$ が逆向きなので，負

前編同様の1次元・直交を想定

snGradScheme

interpolationScheme



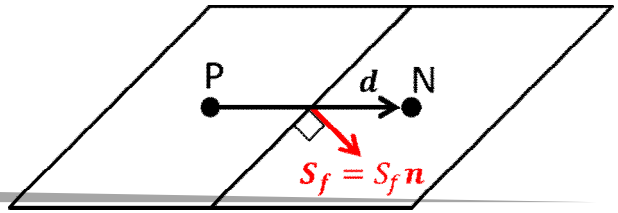
$\boldsymbol{n}$ control volume界面での単位面積ベクトル
大きさ：1，方向：面に垂直

$\sum_f$ control volumeの全ての界面での和

$\boldsymbol{S_f} = S_f \boldsymbol{n}$

control volume界面での面積ベクトル
大きさ：面積S_f，方向：面に垂直

拡散項



面f におけるΓの値(scalar)．面を挟むセル中心の値から補間する．interpolationScheme

面f の面積

面f における$(\mathrm{grad}T)$の値(vector)と単位面ベクトルとの内積＝面f に垂直な成分
snGradScheme

$$\int_S (\Gamma\,\mathrm{grad}T)\cdot \boldsymbol{n}dS = \sum_f \Gamma_f\left[(\mathrm{grad}T)_f \cdot \boldsymbol{n}\right]S_f$$

$$= \sum_f \left[\Gamma_f (\mathrm{grad}T)_f \cdot (S_f \boldsymbol{n})\right]$$

$$= \sum_f \left[\Gamma_f (\mathrm{grad}T)_f \cdot \boldsymbol{S_f}\right]$$

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_f = \frac{T_N - T_O}{\delta_f} = \frac{T_N - T_O}{|C_N - C_O|}$$

T_N temperature of neighbor cell
T_O temperature of owner cell
C_N position vector: center of neighbor cell
C_O position vector: center of owner cell

↑基準：直交の場合．非直交の場合には，補正項を追加．

$\sum_f$　control volumeの全ての界面での和

$\boldsymbol{n}$　control volume界面での単位面積ベクトル
大きさ：1，方向：面に垂直

$$\boldsymbol{n} = \frac{\boldsymbol{S_f}}{S_f}$$

$\boldsymbol{S_f} = S_f \boldsymbol{n}$
control volume界面での面積ベクトル
大きさ：面積S_f，方向：面に垂直

laplacian( ) 多数のオーバーロード

引数の数と種類によって多数あり

ソースコード　fvm::laplacian(DT, T)

template<class Type >

laplacian (const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf, const word &name)

laplacian (const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf)

laplacian (const zero &, const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf, const word &name)

laplacian (const zero &, const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf)

laplacian (const one &, const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf, const word &name)

laplacian (const one &, const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf)

laplacian (const dimensioned< GType > &gamma, const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf, const word &n

laplacian (const dimensioned< GType > &gamma, const GeometricField< Type, fvPatchField, volMesh > &vf)

laplacian (const GeometricField< GType, fvPatchField, volMesh > &gamma, const GeometricField< Type, fvPatchField, volM

laplacian (const tmp< GeometricField< GType, fvPatchField, volMesh > > &tgamma, const GeometricField< Type, fvPatchFi

他多数

Foam::fvm Namespace Reference の一部

引数の 数と種類が合わない？

- 関数を検索するとき，「引数の数と種類が一致するものがない！」と困惑することがある。
- 引数のデフォルト値を，関数宣言時（*.H）に与える場合，使用時に省略可能であることに注意。
- デフォルト値を記入するのは宣言時だけであり，定義時（*.C）には不要であることに，さらに注意。

GeometricField.C

```
188 Foam::GeometricField<Type, PatchField, GeoMesh>::GeometricField
189 (
190  const IOobject& io,
191  const Mesh& mesh,
192  const dimensionSet& ds,
193  const word& patchFieldType
194 )
```

GeometricField.H

```
287  GeometricField
288  (
289  const IOobject&,
290  const Mesh&,
291  const dimensionSet&,
292  const word& patchFieldType = PatchField<Type>::calculatedType()
293  );
```

laplacian(DT, T)からlaplacianSchemeまで

line 179　スカラ値（dimensiondScalar）DT と スカラー場（volScalarField） T とが引数；スカラ場 gamma を作成して，すべてにDTの値を入れる.

```
tmp<fvMatrix<Type> > laplacian
(   const dimensioned<GType>& gamma,
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf
)
```

line303　DTをスカラー場（surfaceScalarField）にした gamma と スカラー場（volScalarField） T とが引数；laplacianの名前を付ける

```
tmp<fvMatrix<Type> >
laplacian
(    const GeometricField<GType, fvsPatchField, surfaceMesh>& gamma,
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf
)
```

line 271　スカラー場（surfaceScalarField） gamma と スカラー場（volScalarField） T と 名前 laplacian(DT,T) が引数；laplacianSchemeを実行する

```
tmp<fvMatrix<Type> >
laplacian
(
    const GeometricField<GType, fvPatchField, volMesh>& gamma,
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf,
    const word& name
)
```

src¥finiteVolume¥finiteVolume¥fvm¥

fvmLaplacian.C

```
template<class Type, class GType>
tmp<fvMatrix<Type> >
laplacian
(
    const dimensioned<GType>& gamma,
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf
)
{
    const GeometricField<GType, fvsPatchField, surfaceMesh> Gamma
    (
        IOobject
        (
            gamma.name(),
            vf.instance(),
            vf.mesh(),
            IOobject::NO_READ
        ),
        vf.mesh(),
        gamma
    );

    return fvm::laplacian(Gamma, vf);
}
```

line 179

引数を（ GeometricField ， GeometricField ）とするlaplacianを実行。

src¥finiteVolume¥finiteVolume¥fvm¥

fvmLaplacian.C

```
template<class Type, class GType>
tmp<fvMatrix<Type> >
laplacian
(
    const GeometricField<GType, fvsPatchField, surfaceMesh>& gamma,
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf
)
{
    return fvm::laplacian
    (
        gamma,
        vf,
        "laplacian(" + gamma.name() + ',' + vf.name() + ')'
    );
}
```

line 238

引数を（GeometricField，GeometricField，word）とするlaplacianを再実行。

src¥finiteVolume¥finiteVolume¥fvm ¥

fvmLaplacian.C

```
template<class Type, class GType>
tmp<fvMatrix<Type> >
laplacian
(
    const GeometricField<GType, fvsPatchField, surfaceMesh>& gamma,
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf,
    const word& name
)
{
    return fv::laplacianScheme<Type, GType>::New
    (
        vf.mesh(),
        vf.mesh().laplacianScheme(name)
    )().fvmLaplacian(gamma, vf);
}
```

line 271

fvSchemesファイルで設定した
laplacianSchemeのfvmLaplacianが実行される。
laplacian(Dt,T) Gauss linear corrected;

src¥finiteVolume¥finiteVolume¥laplacianSchemes¥gaussLaplacianScheme

gaussLaplacianScheme.C

line 154

```
template<class Type, class GType>
tmp<fvMatrix<Type> >
gaussLaplacianScheme<Type, GType>::fvmLaplacian
(
    const GeometricField<GType, fvsPatchField, surfaceMesh>&
gamma,
    const GeometricField<Type, fvPatchField, volMesh>& vf
)
{
    const fvMesh& mesh = this->mesh();

    const surfaceVectorField Sn(mesh.Sf()/mesh.magSf());

    const surfaceVectorField SfGamma(mesh.Sf() & gamma);
    const GeometricField<scalar, fvsPatchField, surfaceMesh>
SfGammaSn
    (
        SfGamma & Sn
    );
    const surfaceVectorField SfGammaCorr(SfGamma -
SfGammaSn*Sn);

    tmp<fvMatrix<Type> > tfvm = fvmLaplacianUncorrected
    (
        SfGammaSn,
        this->tsnGradScheme_().deltaCoeffs(vf),
        vf
    );
    fvMatrix<Type>& fvm = tfvm();

    tmp<GeometricField<Type, fvsPatchField, surfaceMesh> >
tfaceFluxCorrection
        = gammaSnGradCorr(SfGammaCorr, vf);

    if (this->tsnGradScheme_().corrected())
    {
        tfaceFluxCorrection() +=
            SfGammaSn*this->tsnGradScheme_().correction(vf);
    }

    fvm.source() -=
mesh.V()*fvc::div(tfaceFluxCorrection())().internalField();

    if (mesh.fluxRequired(vf.name()))
    {
        fvm.faceFluxCorrectionPtr() = tfaceFluxCorrection.ptr();
    }

    return tfvm;
}
```

SfGamma の面に垂直な成分（大きさ）

非直交性の補正

fvmLaplacianUncorrected を呼んで tfvm を作成。ここで行列を操作。

src¥finiteVolume¥finiteVolume¥laplacianSchemes¥gaussLaplacianScheme

gaussLaplacianScheme.C

line 44

```
template<class Type, class GType>
tmp<fvMatrix<Type> >
gaussLaplacianScheme<Type,
GType>::fvmLaplacianUncorrected
(
    const surfaceScalarField& gammaMagSf,
    const surfaceScalarField& deltaCoeffs,
    const GeometricField<Type, fvPatchField,
volMesh>& vf
)
{
    tmp<fvMatrix<Type> > tfvm
    (
        new fvMatrix<Type>
        (
            vf,

deltaCoeffs.dimensions()*gammaMagSf.dimensions()*
vf.dimensions()
        )
    );
    fvMatrix<Type>& fvm = tfvm();

    fvm.upper() =
deltaCoeffs.internalField()*gammaMagSf.internalField
();
    fvm.negSumDiag();

    境界での処理：省略

    return tfvm;
}
```

行列の上三角に（セル間距離の逆数×ガンマΓ×セル面の面積）を入れる。Γ S/δ
対称性から，upperのみに代入。
自動的にlowerにも入る。

行列の対角成分に 周辺の係数を加える。(次のスライド)
LduMatrix::negSumDiag

src¥OpenFOAM¥matrices¥lduMatrix¥lduMatrix¥

lduMatrixOperations.C

line 48

```
void Foam::lduMatrix::negSumDiag()
{
    const scalarField& Lower = const_cast<const lduMatrix&>(*this).lower();
    const scalarField& Upper = const_cast<const lduMatrix&>(*this).upper();
    scalarField& Diag = diag();

    const labelUList& l = lduAddr().lowerAddr();
    const labelUList& u = lduAddr().upperAddr();

    for (register label face=0; face<l.size(); face++)
    {
        Diag[l[face]] -= Lower[face];
        Diag[u[face]] -= Upper[face];
    }
}
```

Diag　対角成分
Lower　下三角成分
Upper 上三角成分
l　下三角での場所を指す
u　上三角での場所を指す

$$a_P = -(-a_E) + -(-a_W)$$

対角成分と下三角，上三角とでは，符号が逆になることに注意。

src¥finiteVolume¥interpolation¥surfaceInterpolation¥surfaceInterpolation¥

surfaceInterpolation.C

```
void Foam::surfaceInterpolation::makeDeltaCoeffs() const
{
    if (debug)
    {
        Pout<< "surfaceInterpolation::makeDeltaCoeffs() : "
            << "Constructing differencing factors array for face
gradient"
            << endl;
    }

    // Force the construction of the weighting factors
    // needed to make sure deltaCoeffs are calculated for
parallel runs.
    weights();

    deltaCoeffs_ = new surfaceScalarField
    (
        IOobject
        (
            "deltaCoeffs",
            mesh_.pointsInstance(),
            mesh_,
            IOobject::NO_READ,
            IOobject::NO_WRITE,
            false // Do not register
        ),
        mesh_,
        dimless/dimLength
    );
    surfaceScalarField& DeltaCoeffs = *deltaCoeffs_;


    // Set local references to mesh data
    const volVectorField& C = mesh_.C();
    const labelUList& owner = mesh_.owner();
    const labelUList& neighbour = mesh_.neighbour();

    forAll(owner, facei)
    {
        DeltaCoeffs[facei] = 1.0/mag(C[neighbour[facei]] -
C[owner[facei]]);
    }

    forAll(DeltaCoeffs.boundaryField(), patchi)
    {
        DeltaCoeffs.boundaryField()[patchi] =
            1.0/mag(mesh_.boundary()[patchi].delta());
    }
}
```

最も単純な場合の例：
セル中心間の距離をδとする

行列

$$\begin{bmatrix} a_{p1} & -a_{E1} & 0 & 0 \\ -a_{W2} & a_{P2} & -a_{E2} & 0 \\ 0 & -a_{W3} & a_{P3} & -a_{E3} \\ 0 & 0 & -a_{W4} & a_{P4} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} S_{P1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{P2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{P3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{P4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -a_{E1} & a_{E1} & 0 & 0 \\ a_{W2} & -a_{W2} - a_{E2} & a_{E2} & 0 \\ 0 & a_{W3} & -a_{W3} - a_{E3} & a_{E3} \\ 0 & 0 & a_{W4} & -a_{W4} \end{bmatrix}$$

ここまでで設定済み
非定常項

ここまでで設定済み
拡散項

$$\begin{bmatrix} S_{BC0} + S_{u1} \\ S_{u2} \\ S_{u3} \\ S_{BC5} + S_{u4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u1\_ddt} \\ S_{u2\_ddt} \\ S_{u3\_ddt} \\ S_{u4\_ddt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{BC0} \\ 0 \\ 0 \\ S_{BC5} \end{bmatrix}$$

設定済み
非定常項

今回は考えない:
＊境界条件の項はsolve()の中で追加される。
＊拡散項の非直交性補正でも値が入る

さらに詳しく・・・

- 今回は，手作業計算と同じように，セル中心間を結ぶベクトルが面と直交する状態を想定して説明した。
- 実際には，これらが直交しない場合もある。
- その時には，面での勾配，面での拡散係数の値の算出時に，非直交性の影響を考慮する必要がある。
- 考慮の方法は，補間スキームに依存する。
- 今回は，境界条件の寄与については考えていない。実際には，境界条件に応じた値が行列に追加される。

ソースコードを読み解くために

- 変数のタイプ（クラス）を意識
  - volScalarField, dimensionedScalar？など
- Slow and steady wins the race
  - 少しずつ，理解を深める
  - 小さな部分の積み重ね
  - 繰り返す，繰り返す，繰り返す
- 基礎を学習
  - 理論とソースの両方を学ぶ

参考資料

- OpenFOAM Programmers Guide, User Guide，ソースコード
- Imperial College 博士論文など
  - Hrvoje Jasak, Henrik Rusche, Franjo Juretic などなど
  - http://powerlab.fsb.hr/ped/kturbo/OpenFOAM/docs/
- **PENGUINITIS サイト(OpenFOAMたんけんたい)**
  - http://www.geocities.jp/penguinitis2002/index.html
- 野崎さんSlideShare
  - http://www.slideshare.net/fumiyanozaki96/
  - OpenFOAM 空間の離散化と係数行列の取り扱い
- http://openfoamwiki.net/
- http://www.cfd-online.com