

# 熱解析



**Code\_Aster, Salome-Meca course material**

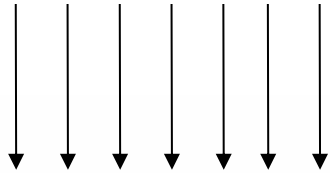
GNU FDL licence (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)



# Code\_Aster : 熱問題の主な特徴

熱解析は、力学計算の前提条件としてよく行われる

例：金属ディスクのレーザー加熱

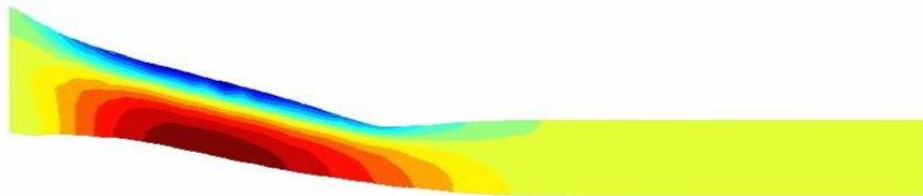


熱解析



ディスクのレーザー加熱：温度分布

応力解析

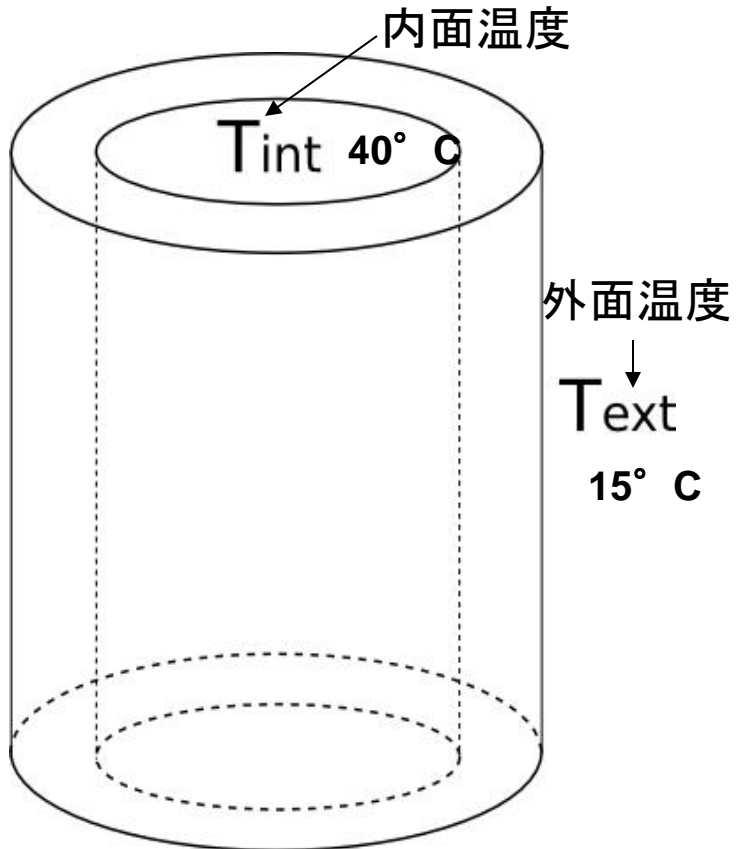


最終的な変形形状上での周方向の応力分布

# 単純な例 : 熱平衡状態に置かれる配管

▶ 無限長配管

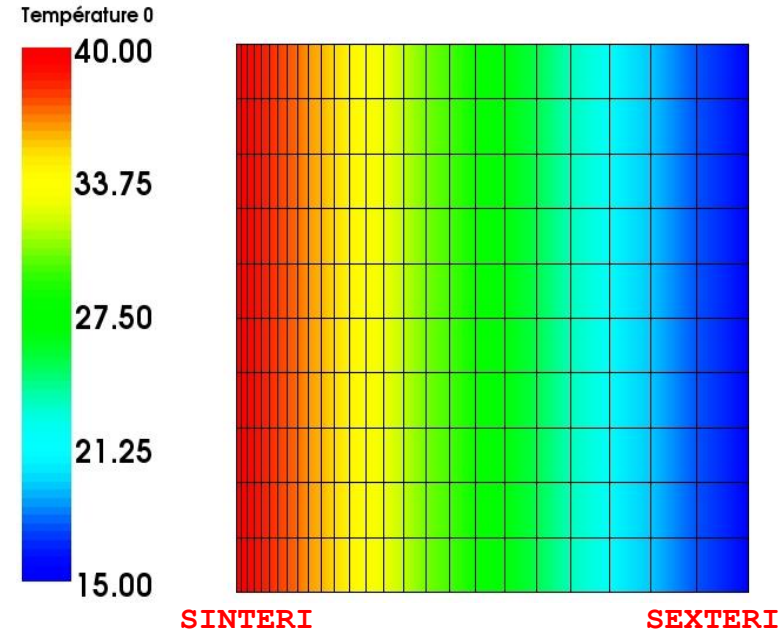
▶ 荷重 : 内外面の温度場



この配管の板厚方向  
温度分布を求めたい

# 単純な例 : 熱平衡状態に置かれる配管

```
DEBUT ( ) ;  
  
mymesh=LIRE_MALLAGE ( ) ;  
  
mymodl=AFFE_MODELE (   MAILLAGE= mymesh,  
    AFFE=_F (   TOUT='OUI' ,  
              PHENOMENE='THERMIQUE' ,  
              MODELISATION='AXIS' , ) , ) ;  
  
thmat =DEFI_MATERIAU (THER=_F (LAMBDA=6 , ) , ) ;  
  
mymat=AFFE_MATERIAU (   MAILLAGE= mymesh,  
    AFFE=_F (   TOUT='OUI' ,  
              MATER=thmat , ) , ) ;  
  
myload=AFFE_CHAR_THER ( MODELE= mymodl,  
    TEMP_IMPO=( _F (GROUP_NO='SEXTERI' ,  
                  TEMP=15 , ) ,  
              _F (GROUP_NO='SINTERI' ,  
                  TEMP=40 , ) , ) , ) ;  
  
resuth=THER_LINEAIRE ( MODELE= mymodl,  
    CHAM_MATER= mymat,  
    EXCIT=_F (CHARGE= myload , ) , ) ;  
  
IMPR_RESU (           FORMAT='MED' ,  
    RESU=_F (RESULTAT= resuth , ) , ) ;  
  
FIN ( ) ;
```



# 解くべき問題

**AFFE\_MODELE** ( ... PHENOMENE = 'THERMIQUE' ... )

現象

熱

熱伝導方程式:

$$\rho C \dot{T} - \lambda \Delta T - s = 0$$

線形 (**THER\_LINEAIRE**)

**OR**

非線形 (**THER\_NON\_LINE**)

**AND**

定常

**OR**

非定常

材料特性が温度に依存するか、熱流束の境界条件が非線形であれば、非線形問題になる

温度依存か？

時間依存か？

# 利用可能な有限要素

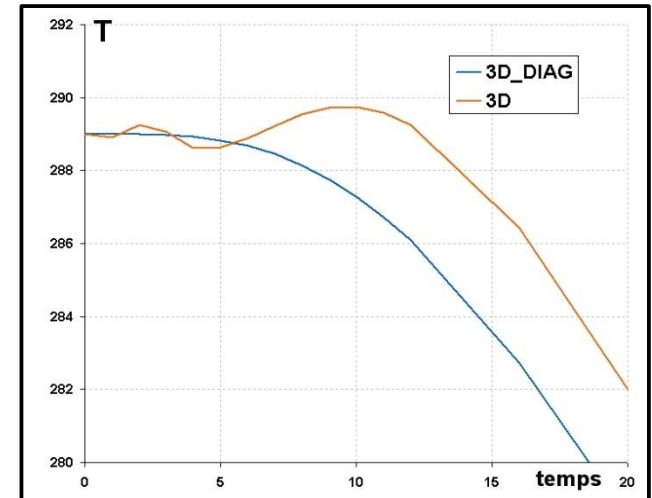
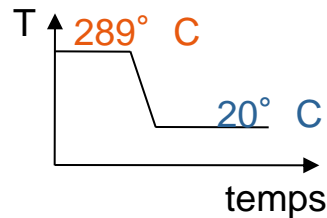
**AFFE\_MODELE** ( ... PHENOMENE = 'THERMIQUE'  
... MODELISATION = 'XXXX' ... ) )

**3D / AXIS / PLAN**

**3D\_DIAG / AXIS\_DIAG / PLAN\_DIAG**

- \* 熱衝撃過程における平滑化
- \* 2次元での2次要素の分割
- \* 3次元モデルでの分割を利用できないこと

急速冷却の例:



**COQUE / COQUE\_PLAN / COQUE\_AXIS (linear)**

- シェル
- \* 薄肉熱伝導シェル要素(構造要素)
  - \* 厚さ方向の温度分布 : 3自由度(表面, 裏面, 中心の温度)

# 材料の挙動

## DEFI\_MATERIAU

少なくともこれら2つの物性値を与える:

熱伝導率	$\lambda$
比熱	$\rho C_p$

材料の熱的特性の3つの主なモデル化:

<b>THER</b>	線形等方性
<b>THER_ORTH</b>	線形異方性 (3方向の熱伝導率を定義)
<b>THER_NL</b>	非線形挙動: 解析者は $\rho C_p(T)$ or $\beta(T)$ and $\lambda(T)$ を定義する必要がある

### + 他の特殊な材料

- \* コンクリート: 乾燥, 水和 ... など
- \* 金属: 相変化, 硬さ ... など

# 境界条件と荷重 (1)

▶ AFFE\_CHAR\_THER (...)

▶ AFFE\_CHAR\_THER\_F (...)

▶ 境界条件(ディリクレ)

時間と位置の関数としての温度分布の指定	TEMP_IMPO
節点温度の間の線形関係	LIAISON_DDL LIAISON_GROUP LIAISON_MAIL



## 境界条件と荷重 (2)

### ◆ 荷重(ノイマン)

自然対流(フーリエの法則)	ECHANGE	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = h(t) \cdot (T_{ext} - T)$
壁間の熱交換	ECHANGE_PAROI	$\lambda_1 \frac{dT_1}{dn_1} = h(T_2 - T_1)$
面に垂直な熱流束: 一定もしくは 時間と位置の関数	FLUX_REP	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = f(t, x)$
面に垂直な非線形熱流束: 温度の関数  非線形のみ	FLUX_NL RAYONNEMENT	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = f(T)$
熱源	SOURCE	$s(x, t)$

# 適正な問題定義

◆ 定常解析の場合 : YES

◆ 過渡解析の場合 : NO

■ 条件不足: 初期時間での温度

◆ THER\_LINEAIRE, または THER\_NON\_LILNE と ETAT\_INIT を用いる  
4つの可能性

定常解析の結果	<code>STATIONNAIRE = 'OUI'</code>
一定温度	<code>VALE = T<sub>0</sub></code>
既知の温度場	<code>CHAM NO = ...</code> 例えば, <code>CREA_CHAMP</code> を用いて定義
別の熱解析の結果	<code>FLUX_NL</code> <code>RAYONNEMENT</code> 結果の出力 ( <code>EVOL_THER = resu</code> ) 時間の指定 ( <code>NUME_ORDRE</code> or <code>INST</code> )

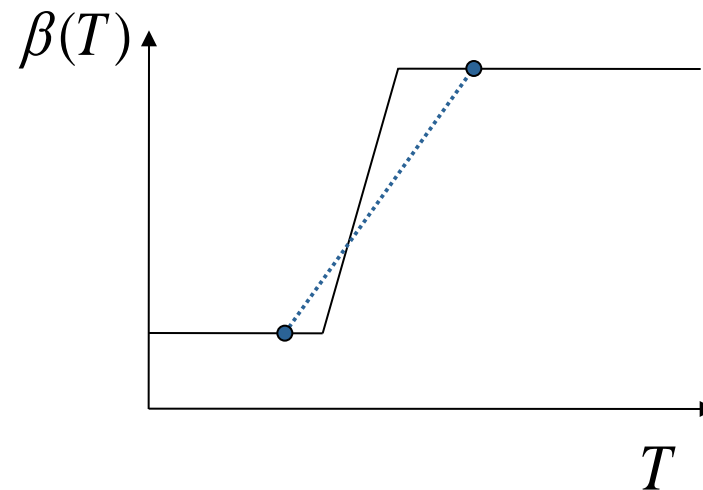
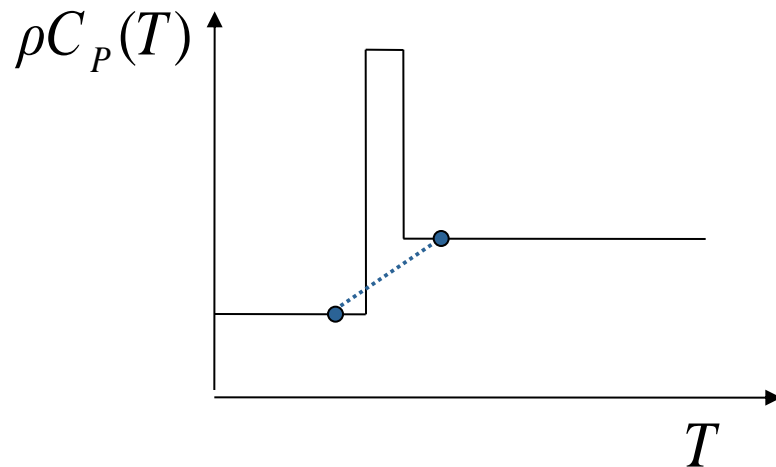
# 解法

▶ 線形熱解析: **THER\_LINEAIRE**

▶ 非線形熱解析: **THER\_NON\_LINE**

非線形エンタルピ  $\beta(T)$  に対する  
ニュートン法

相変化の処理が数値的に簡便



# 熱解析を用いる上での注意

## ▶ $\theta$ 法による時間離散化

$$\frac{\rho C}{\lambda \cdot \Delta t} (T_{n+1} - T_n) = \theta \Delta T_{n+1} + (1 - \theta) \Delta T_n$$

- $\theta = 0.57$  が適度なデフォルト値
- `PARM_THETA` によって、 $\theta$  の値を変えられる

## ▶ 時間と空間の再分割時の不整合に注意

- 材料の時間と距離に関連して

$$\Delta t \leq \frac{\rho C (\Delta x)^2}{(6\theta)\lambda}$$

## ▶ 必要なときは非線形計算の収束を加速

- 接線剛性マトリックスの頻繁な更新
- 線形サーチクライテリア
- 収束判定 (反復回数, 残差など)



**NEWTON**

**CONVERGENCE**

# ポスト処理のオプション

## ▶ THER\_LINEAIRE / THER\_NON\_LINE の結果得られるもの

- デフォルトでは, 節点温度のみ

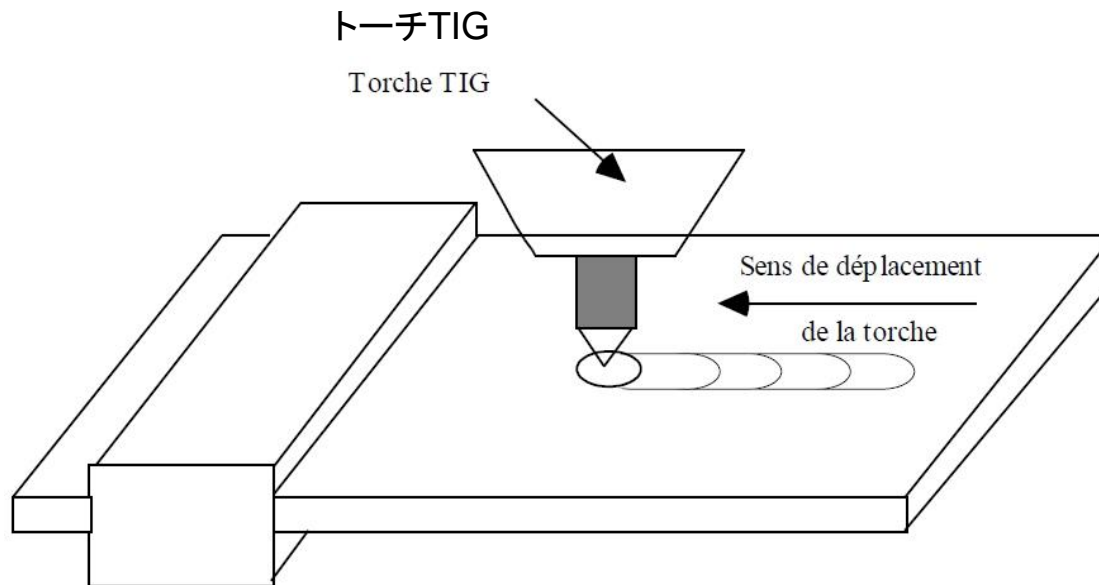
## ▶ 熱流束の求め方

- `THER_NON_LINE ( ... OPTION ... )` を使用
  - `FLUX_ELNO` (節点, 要素値)
  - `FLUX_ELGA` (積分点値)
- `CALC_ELEM` あるいは `CALC_NO` を使用
  - `FLUX_NOEU` (節点値)

# 冶金学的問題

## ▶ 可能性 :

- 動くフレームの計算 (溶接) : `THER_NON_LINE_MO`
- 強制対流熱伝達を伴う溶接 `AFFE_CHAR_THER (...CONVECTION...)`
- 硬さや相変化を計算する場合 `CALC_META`

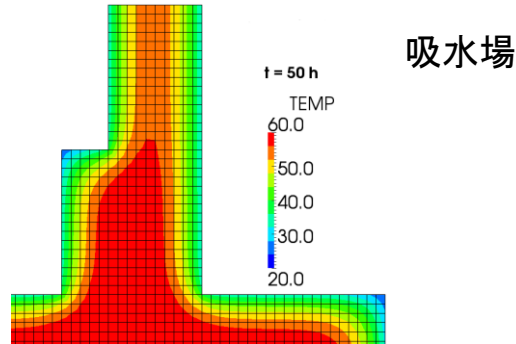


# 熱的吸水・乾燥

▶ 共通使用：一方向連成解析:

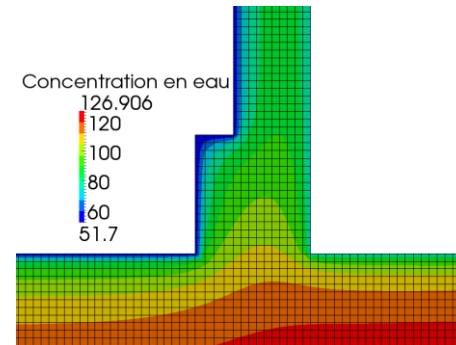
コンクリートの吸水計算

温度場



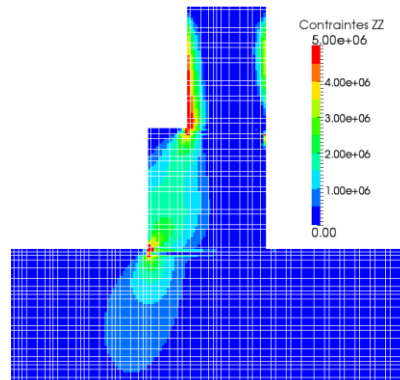
コンクリートの乾燥の計算

含水率の分布



コンクリートの乾燥収縮の  
応力解析

応力場



変位, ひずみ...

# 続いて行う応力解析

## ▶ 応力解析の中で温度分布の考慮方法

```
AFFE_MATERIAU ( ...  
                AFFE_VARC=_F( NOM_VARC   = 'TEMP',  
                              EVOL      = EVOTH,  
                              VALE_REF  = 20. )  
                ... )
```

## ▶ 応力解析で使うメッシュは、熱解析で使うメッシュと異なっていないなければならない。なぜなら、

- 熱解析では線形要素がよいが、応力解析では2次要素がよい
- 重要な領域が異なる => 再分割すべき領域も異なる

## ▶ 応力解析用メッシュの上に温度分布を投射する必要がある

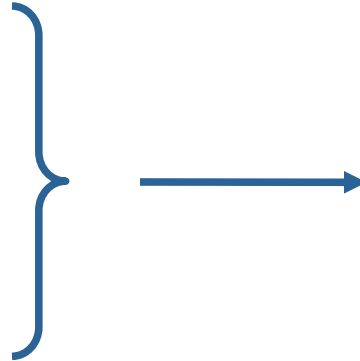
- PROJ\_CHAMP ( ... )



# 続いて行う応力解析

## 円筒の例

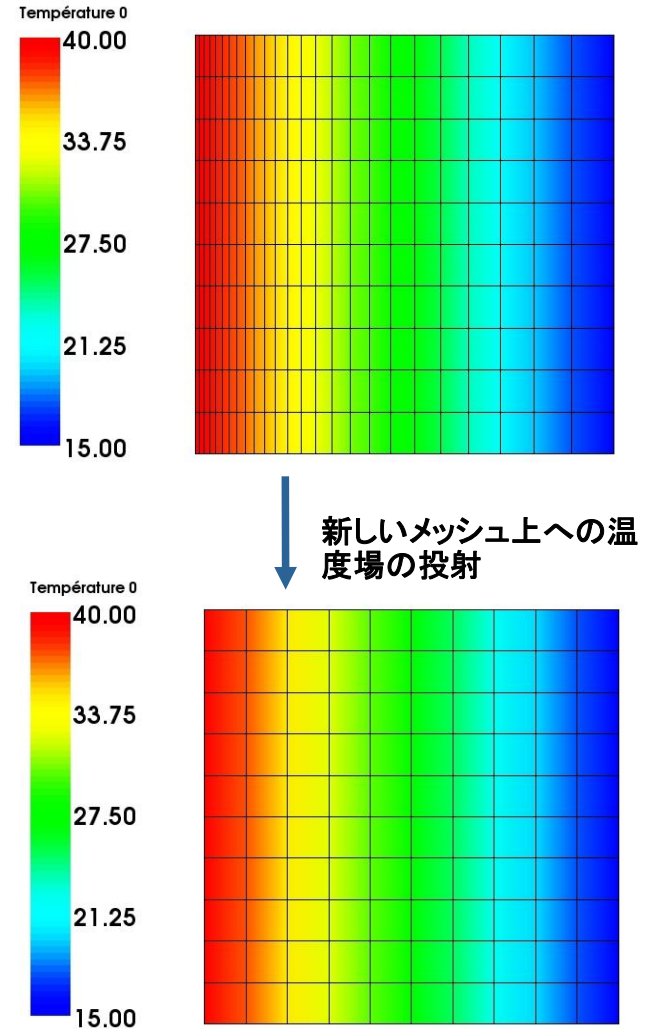
```
DEBUT ()  
thmesh=LIRE_MALLAGE ()  
thmodl=AFFE_MODELE (...)  
thmater=DEFI_MATERIAU (...)  
fthmater=AFFE_MATERIAU (...)  
thload=AFFE_CHAR_THER (...)  
thresu=THER_LINEAIRE (...)
```



応力解析で異なるメッシュを使いたいときは

```
memesh=LIRE_MALLAGE ()  
thmodl2=AFFE_MODELE (MALLAGE= memesh,  
    AFFE=_F ( TOUT='OUI ',  
              PHENOMENE='THERMIQUE ',  
              MODELISATION='AXIS ',),)  
resproj=PROJ_CHAMP ( RESULTAT= thresu,  
    MODELE_1= thmodl,  
    MODELE_2= thmodl2,)
```

...

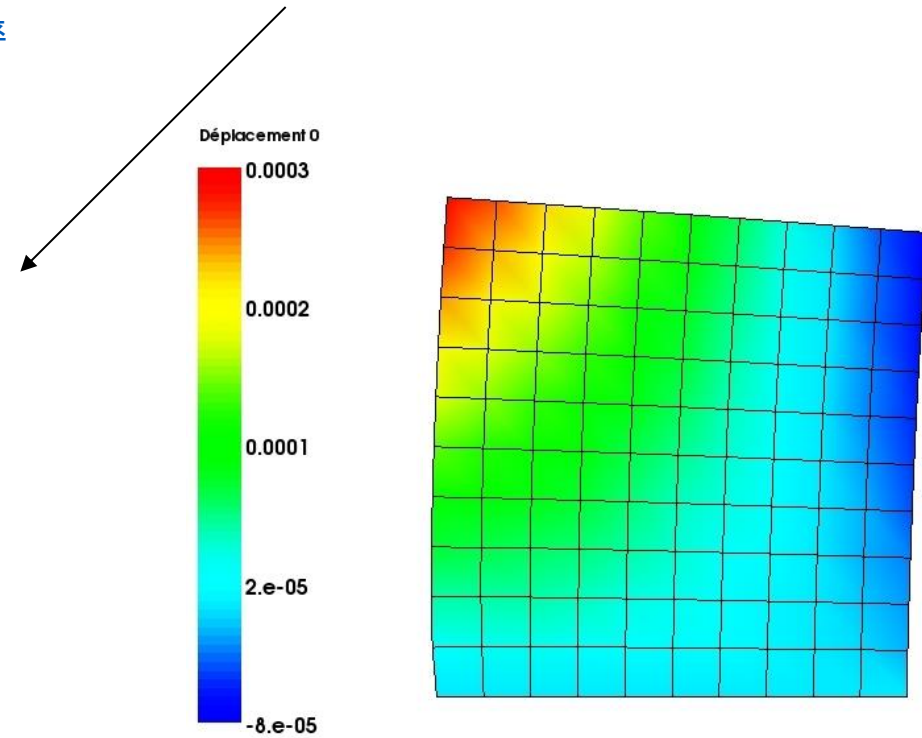


# 続いて行う応力解析

## 円筒の膨張の応力解析

```
mymod1=AFFE_MODELE( MAILLAGE=mymesh,  
    AFFE=_F( TOUT='OUI',  
             PHENOMENE='MECANIQUE',  
             MODELISATION='AXIS',),)  
  
steel=DEFI_MATERIAU( ELAS=_F( E=2.1e11, ←弾性率  
    NU=0.2, ←ポアソン比  
    ALPHA=12e-6, ) ) ←熱膨張率  
  
mymat=AFFE_MATERIAU( MAILLAGE=mymesh,  
    AFFE=_F( TOUT='OUI',  
             MATER=steel, ) ,  
    AFFE_VARC=_F( TOUT='OUI',  
                  NOM_VARC='TEMP',  
                  EVOL=projres,  
                  VALE_REF=20, ) , )  
  
mecload=AFFE_CHAR_MECA( MODELE=MODME,  
    DDL_IMPO=_F( GROUP_NO='FACEB',  
                 DX=0,  
                 DY=0, ) , )  
  
mecres=MECA_STATIQUE( MODELE=mymod1,  
    CHAM_MATER=mymat,  
    EXCIT=_F( CHARGE= mecload, ) , )  
  
IMPR_RESU(...)
```

温度場+参照温度



# 解析的温度場

円筒の厚さ方向の温度分布の解析解:

$$T_{inte} - \ln\left(\frac{X}{R_{inte}}\right) \frac{T_{exte} - T_{inte}}{\ln\left(\frac{R_{exte}}{R_{inte}}\right)}$$

```
DEBUT ();
// Thermic calculation
thmesh=LIRE_MAILLAGE()
thmodl=AFFE_MODELE(...)
thmater=DEFI_MATERIAU(...)
fthmater=AFFE_MATERIAU(...)
thload=AFFE_CHAR_THER(...)
thresu=THER_LINEAIRE(...)
// Projection
memesh=LIRE_MAILLAGE()
thmodl2=AFFE_MODELE(...)
resproj=PROJ_CHAMP(...)
```

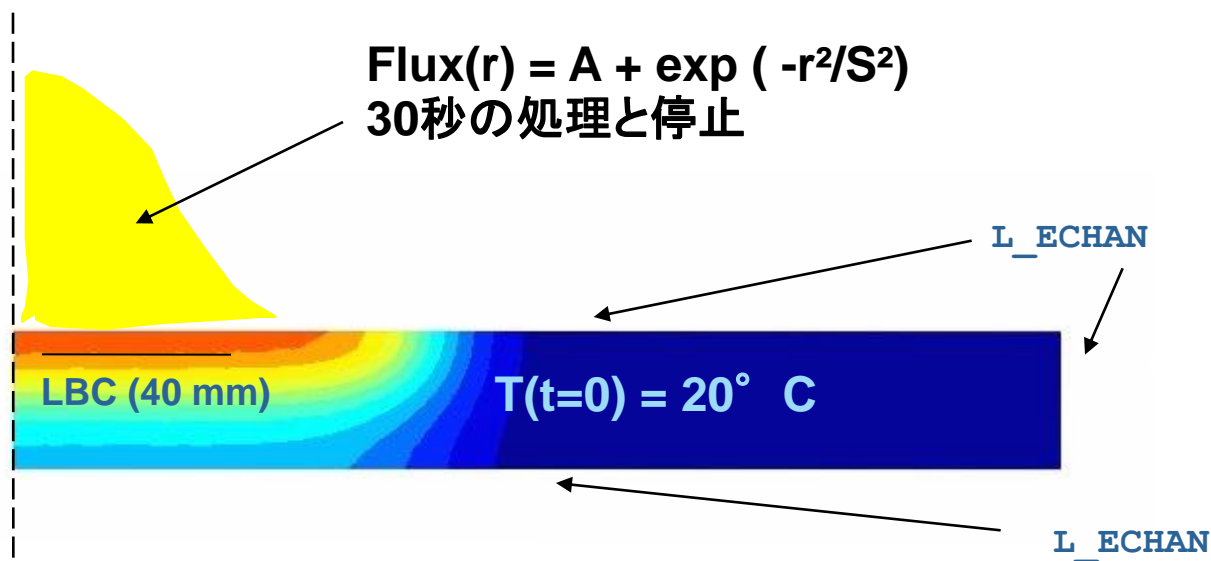
```
// Mechanic calculation
memodl=AFFE_MODELE(...)
steel=DEFI_MATERIAU(...)
memat=AFFE_MATERIAU( MAILLAGE=memesh,
    AFFE=_F( TOUT='OUI',
            MATER=steel, ),
    AFFE_VARC=_F(TOUT='OUI',
                NOM_VARC='TEMP',
                EVOL= resproj,
                VALE_REF=20, ), )
meload=AFFE_CHAR_MECA(...)
meresu=MECA_STATIQUE(...)
IMPR_RESU(...)
FIN()
```

```
memesh=LIRE_MAILLAGE()
T0 = FORMULE (VALE='40-log(X/20)*(40-15)/log(21/20)',
             NOM_PARA=('X',), )
fT0 =CREA_CHAMP( TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_F',
                OPERATION='AFFE',
                MAILLAGE= memesh,
                AFFE=_F( TOUT='OUI',
                        NOM_CMP='TEMP',
                        VALE_F=T0, ), )
```

```
thresu=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',
                TYPE_RESU='EVOL_THER',
                NOM_CHAM='TEMP',
                AFFE=_F(CHAM_GD=fT0,
                        INST=0, ), )
```

# 使用例

## ディスクのレーザー処理に関する線形熱解析



自然対流による熱交換:

雰囲気温度  $T_{\text{ext}} = 20^\circ \text{C}$

熱伝達率  $h = 5 \text{ W/m}^2 \text{ C}$

# 使用例 (2)

## モデルと材料の定義

```
DEBUT ( )
```

```
mymesh = LIRE_MAILLAGE ( )
```

### # モデルの定義

```
mymodl = AFFE_MODELE (MAILLAGE = mymesh ,  
                      AFFE = _F ( TOUT = 'OUI',  
                                  PHENOMENE = 'THERMIQUE',  
                                  MODELISATION = 'AXIS', ) )
```

### # 材料の熱物性定義

```
steel = DEFINI_MATERIAU ( THER = _F ( RHO_CP = 3.6e6,  
                                       LAMBDA = 14, ) )
```

### # 有限要素モデルへの材料の割当

```
mymat = AFFE_MATERIAU (MAILLAGE= mymesh,  
                       AFFE=_F ( TOUT = 'OUI',  
                                  MATER = steel , ) )
```

## 使用例 (3)

### 荷重定義のために必要なデータの定義

#  $F(R)$  の数式による「数学的」定義

```
A = 5e6
```

```
S = 0.0138
```

```
F = FORMULE (NOM_PARA='X',VALE="(A + EXP(-X**2/S**2))")
```

#  $F(R)$  の式の解釈と変換

# (テーブル化 X ;  $F(X)$ )

# 表作成のための横軸座標定義

```
LISTR=DEFI_LIST_REEL(DEBUT = 0.,
```

```
INTERVALLE=_F( JUSQU_A = 0.04, NOMBRE = 100, ) ,)
```

# 半径の 'LISTR' の値のための関数の計算(およびテーブル化)

```
FF = CALC_FONC_INTERP( FONCTION = F,  
LIST_PARA = LISTR,  
PROL_DROITE = 'LINEAIRE',  
PROL_GAUCHE = 'LINEAIRE' )
```

# 雰囲気温度

```
T_ext = DEFI_CONSTANTE ( VALE=20., )
```

# 対流による熱交換係数

```
H = DEFI_CONSTANTE (VALE=5 ,)
```

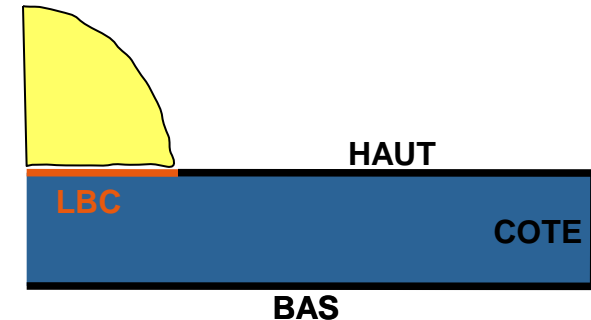
レーザがもたらす熱  
を表現するための流  
束の関数の形成

# 使用例 (4)

## 2つの荷重定義

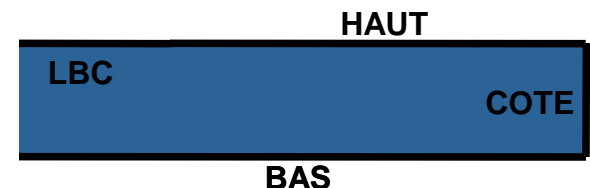
### # 加熱時の境界面(エッジ)の熱交換条件

```
thload1 = AFFE_CHAR_THER_F( MODELE=mymodl,  
                             FLUX_REP =_F( GROUP_MA = 'LBC', FLUN = FF, ),  
ECHANGE =_F( GROUP_MA = ('BAS', 'HAUT', 'COTE', ),  
COEF_H = H,  
TEMP_EXT = T_EXT, ) )
```



### # 冷却時の境界面(エッジ)の熱交換条件 : 全面熱伝達あり

```
thload2 = AFFE_CHAR_THER_F ( MODELE = mymodl,  
ECHANGE=_F( GROUP_MA = ('LBC', 'HAUT', 'COTE', 'BAS', ),  
COEF_H = H ,  
TEMP_EXT = T_EXT , ), )
```



# 使用例 (5)

## 計算

### # 時間ステップの定義

```
list = DEFI_LIST_REEL( DEBUT=0., INTERVALLE=_F( JUSQU_A = 150., NOMBRE = 300, ) )
```

### # 加熱段階のための計算

```
temper =THER_LINEAIRE( MODELE= mymodl,  
                      CHAM_MATER = mymat,  
                      EXCIT          = _F( CHARGE = thload1, ),  
                      INCREMENT      = _F( LIST_INST = LIST,  
                                           INST_FIN  = 30, ),  
                      ETAT_INIT      = _F( VALE = 20.0, ) )
```

—————→ t = 30 s まで加熱  
—————→ t = 0 s でいたる所 T = 20°C

### # 冷却段階のための計算

```
temper = THER_LINEAIRE( reuse          = temper ,  
                      MODELE          = mymodl,  
                      CHAM_MATER      = mymat,  
                      PARM_THETA      = 0.60,  
                      EXCIT            = _F( CHARGE = thload2, ),  
                      INCREMENT        = _F( LIST_INST = list ,  
                                           INST_INIT = 30, ),  
                      ETAT_INIT        = _F( EVOL_THER = temper , ) )
```

—————→ 先行ステップの最後で  
T = T° C から 30 s 冷却

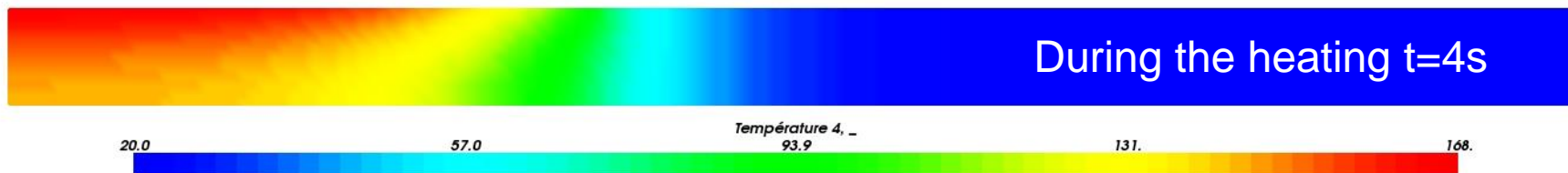
```
IMPR_RESU( ... )
```

```
FIN ( )
```

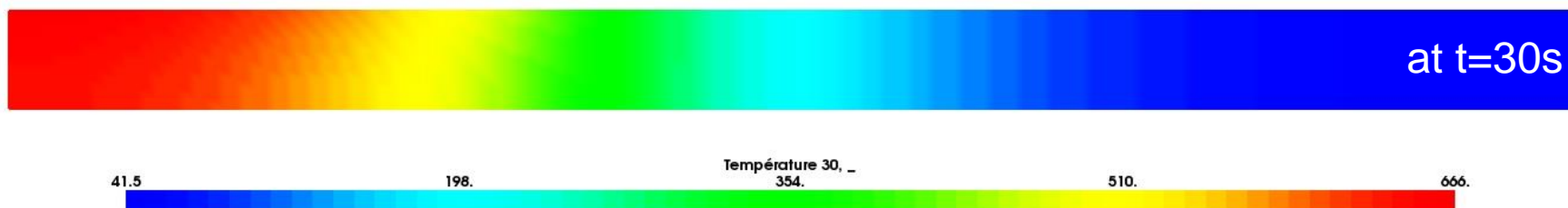


# 結果

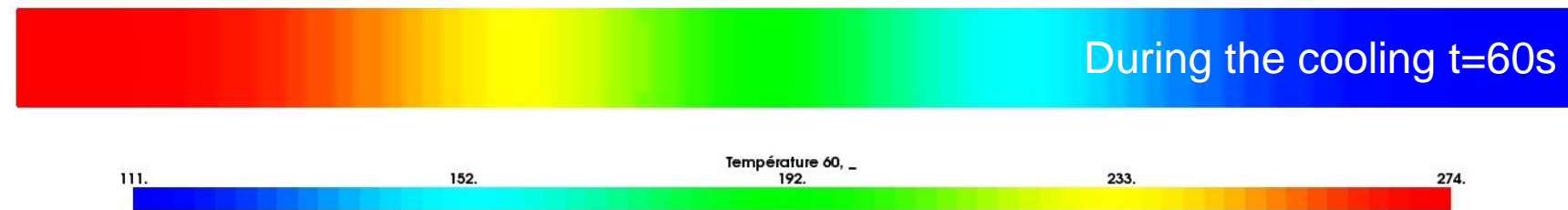
4秒加熱時



30秒保持時？



60秒冷却時



# End of presentation

Is something missing or unclear in this document?  
Or feeling happy to have read such a clear tutorial?

Please, we welcome any feedbacks about Code\_Aster training materials.  
Do not hesitate to share with us your comments on the Code\_Aster forum  
[dedicated thread](#).