



マルチフィジックス連成解析の実際



サイバネット システム 株式会社

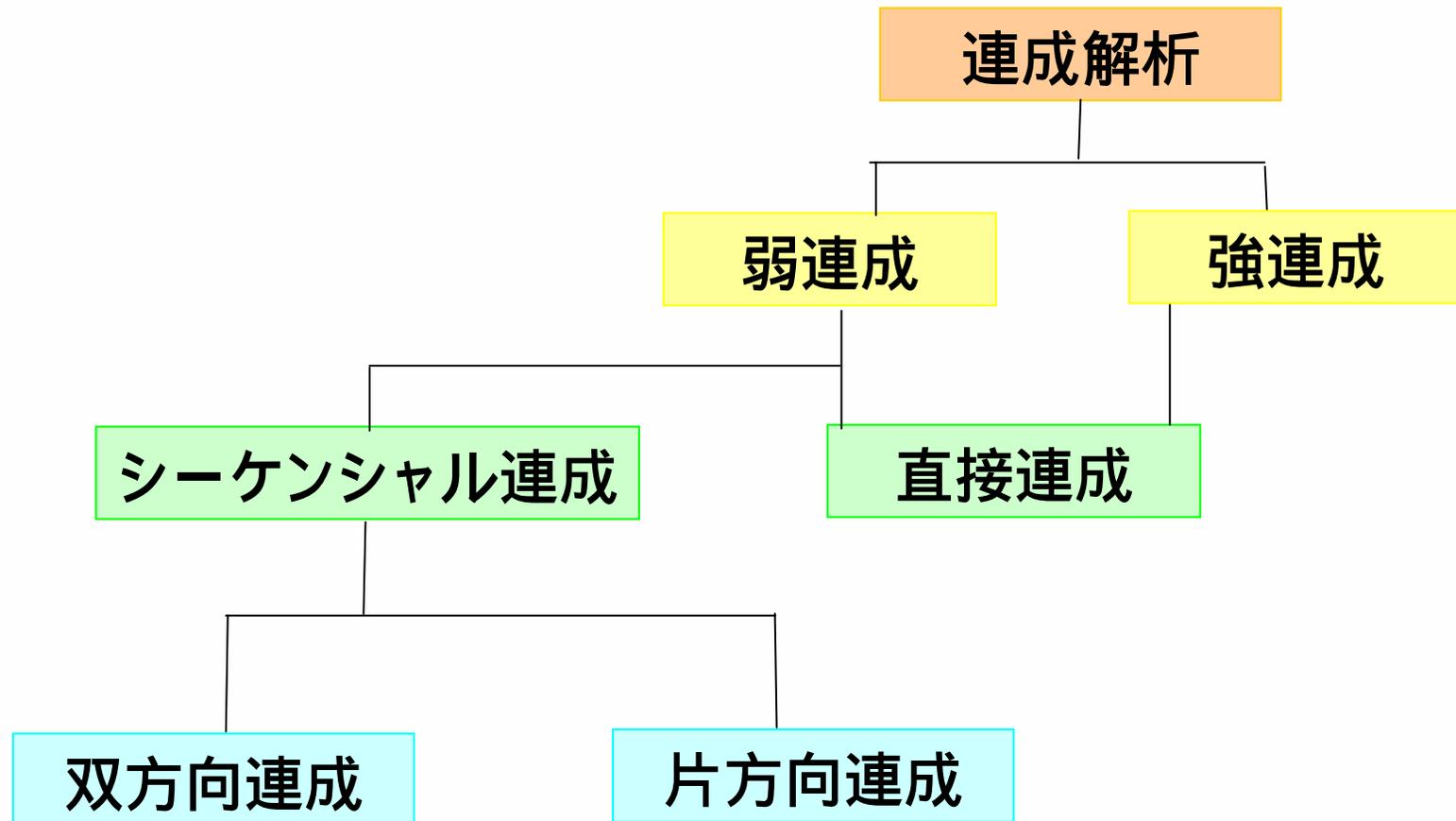
メカニカルCAE事業

- 温度分布が時々刻々と変わるボイラーは、いつ最大応力が発生するの？
- 電流がどう流れているか分からない金属板の回りに、どんな磁場が発生しているの？
- 電圧のかかっている薄い電極板は、静電引力でどの程度たわむの？

- 温度分布が時々刻々と変わるボイラーは、いつ最大応力が発生するの？
 - ボイラー内壁と外壁の温度差が応力を生み出す。
 - いつ最大温度差が発生する？
 - 過渡伝熱解析が必要
 - いつ最大応力が発生する？
 - 熱歪みを考慮した構造解析が必要

- 電流がどう流れているか分からない金属板の回りに、どんな磁場が発生しているの？
 - 金属板内に電流が分布する。どこに高い電流密度が発生する？
 - 電流解析
 - 電流による磁束の発生。
 - 磁場解析

- 電圧のかかっている薄い電極板は、静電引力でどの程度たわむの？
 - 電圧がかかってどれくらいの静電引力が発生するの？
 - 静電場解析
 - 力によりどれくらいたわむのか。
 - 構造解析



- 弱連成

- ある場の解析と別の場の解析をそれぞれ行う。
 - マトリクス演算は別々。
 - 荷重値・材料定数・形状をアップデート

$$\begin{bmatrix} [K_{11}(\{X_1\}, \{X_2\})] & [0] \\ [0] & [K_{22}(\{X_1\}, \{X_2\})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1(\{X_1\}, \{X_2\})\} \\ \{F_2(\{X_1\}, \{X_2\})\} \end{Bmatrix}$$

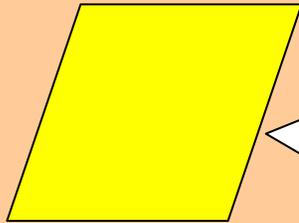
- 強連成

- 複数の場の解析を同一マトリクスの計算で行う。

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \end{Bmatrix}$$

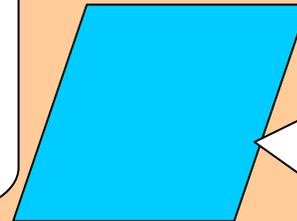
シーケンシャル連成

解析場1の計算



解析場1の
要素
自由度:DOF1

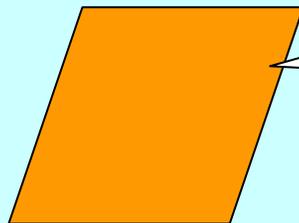
解析場2の計算



解析場2の
要素
自由度:DOF2

直接連成

解析場1、解析場2同時計算



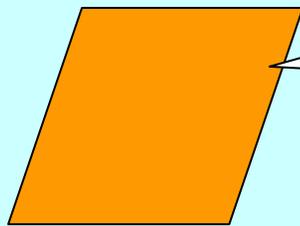
解析場1と解析場2の自
由度をもった要素
自由度:DOF1,DOF2

弱連成

$$\begin{bmatrix} [K_{11}(\{X_1\}, \{X_2\})] & [0] \\ [0] & [K_{22}(\{X_1\}, \{X_2\})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1(\{X_1\}, \{X_2\})\} \\ \{F_2(\{X_1\}, \{X_2\})\} \end{Bmatrix}$$

直接連成

解析場 1、解析場 2 同時計算



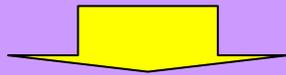
解析場 1 と解析場 2 の自
由度をもった要素
自由度: DOF1, DOF2

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \end{Bmatrix}$$

強連成

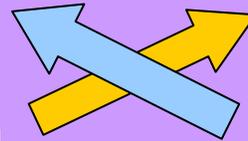
シーケンシャル連成

解析場1モデル作成



解析場1計算結果

双方向連成



解析場2モデル作成



解析場2計算結果

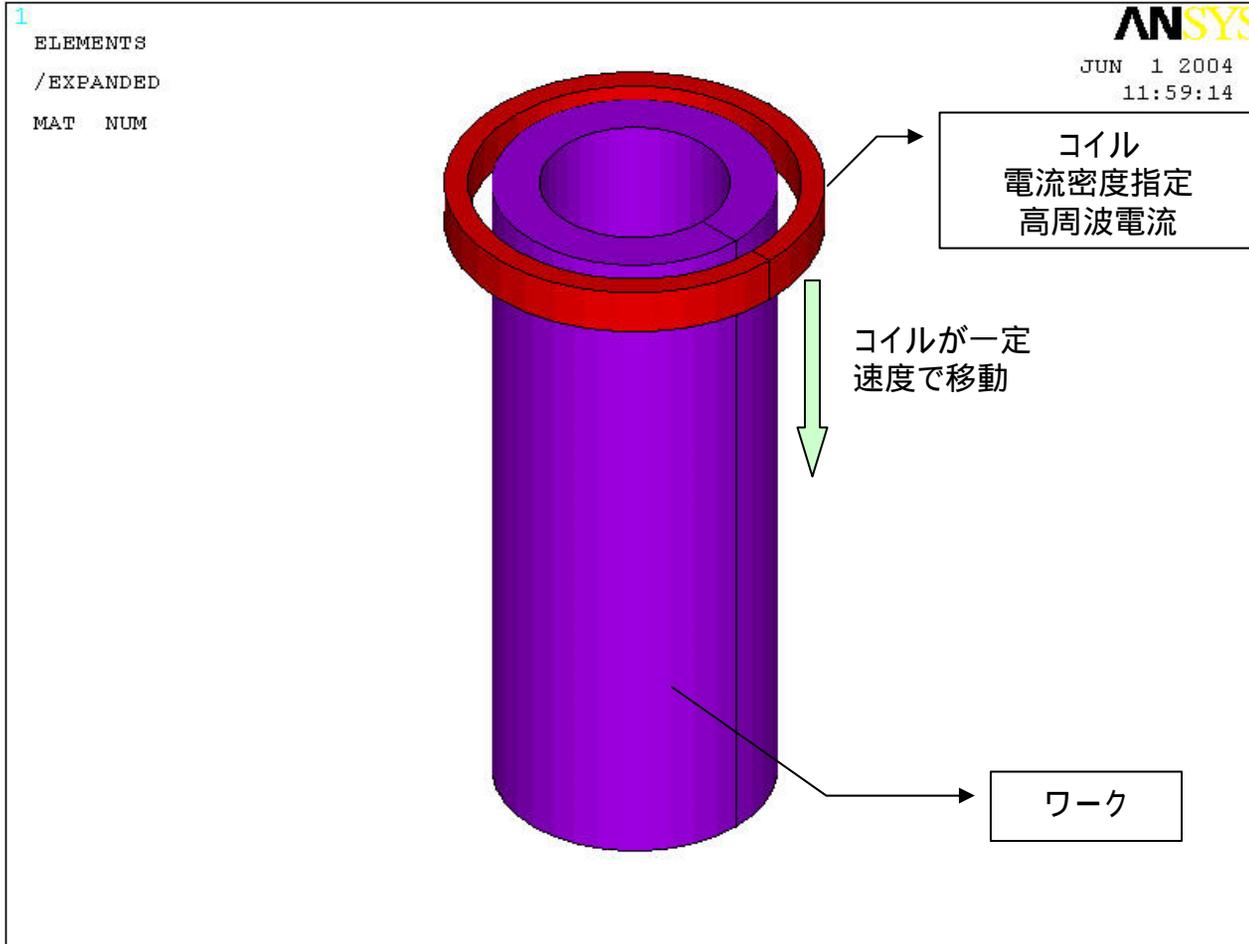
双方向連成の難しさ

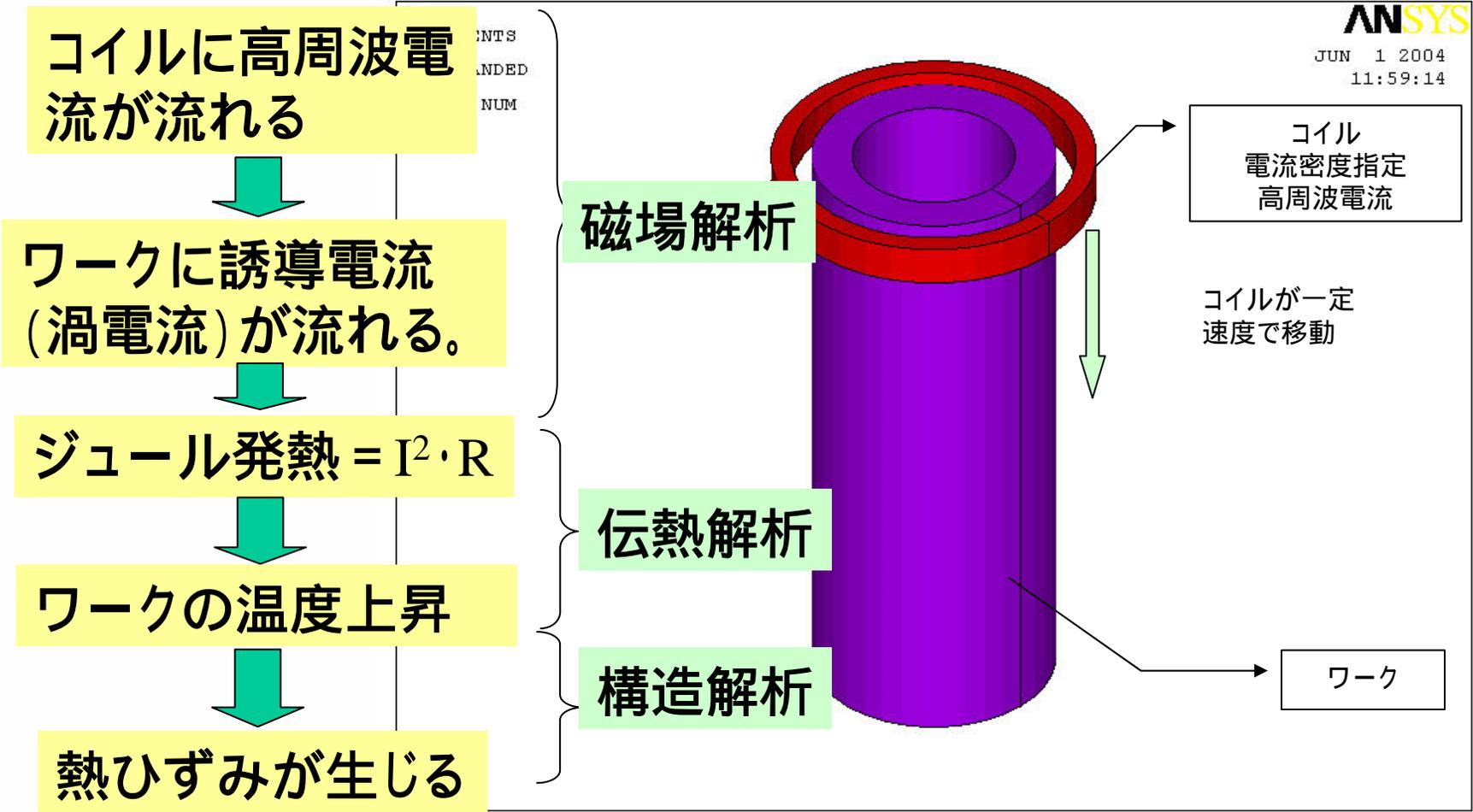
- ・何回繰り返しせばよいのか？
- ・時刻歴になるとより複雑になる。



解析事例

この例題は直接連成可能なモデルであるが、
シーケンシャルの双方向連成を利用した方法を紹介する。







鉄則1
モデルはシンプルに！

3Dモデルより2Dまたは軸対称

鉄則3
材料特性はしっかり把握！

高温になる場合、
温度による物性変化を確認すべき

鉄則2
現象もシンプルに！

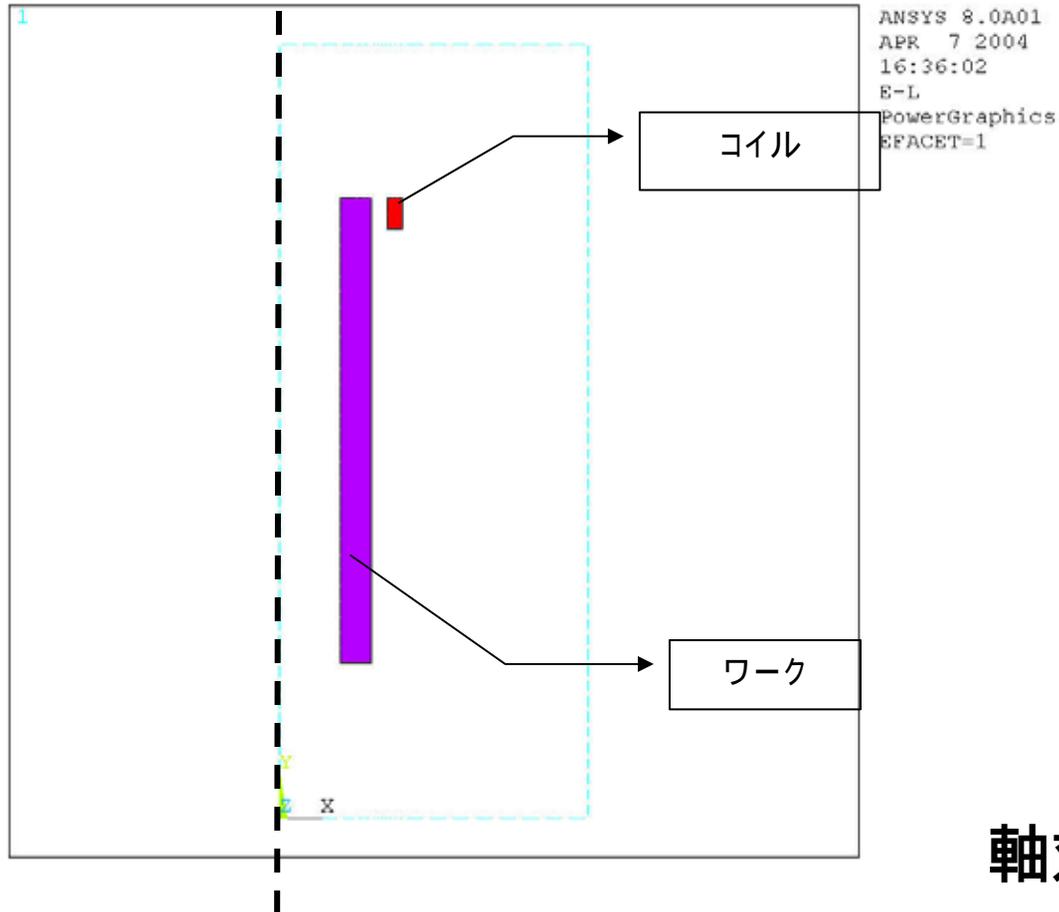
単一場の解析を把握
(モデル作成、境界条件、
材料特性)

磁場-熱連成解析
(コイルの移動無視)

磁場-熱-構造連成
(コイルの移動無視)

磁場-熱-構造連成
(コイルの移動含む)

対称軸



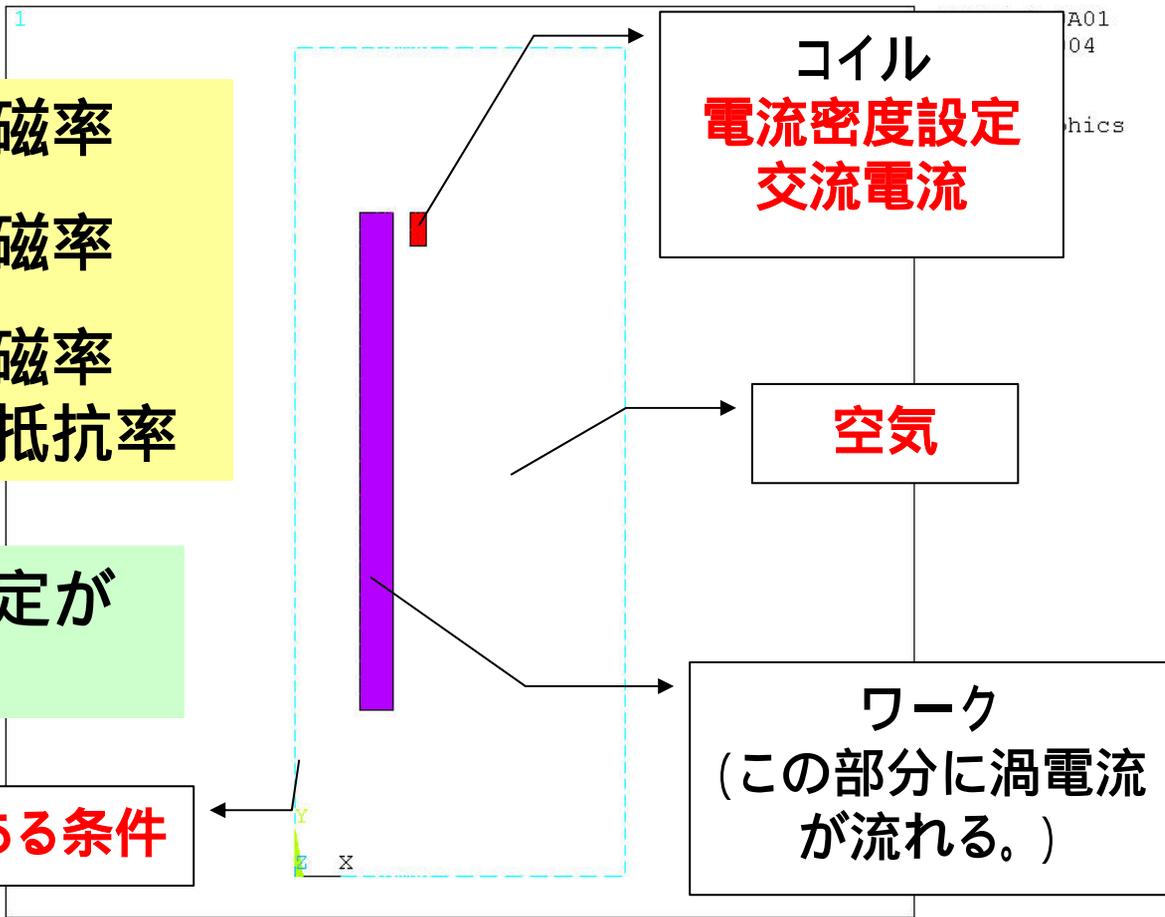
軸対称モデル

磁場解析モデル

空気	比透磁率
コイル	比透磁率
ワーク	比透磁率 電気抵抗率

時間積分効果の設定が必要

磁束が平行である条件



磁場解析モデル

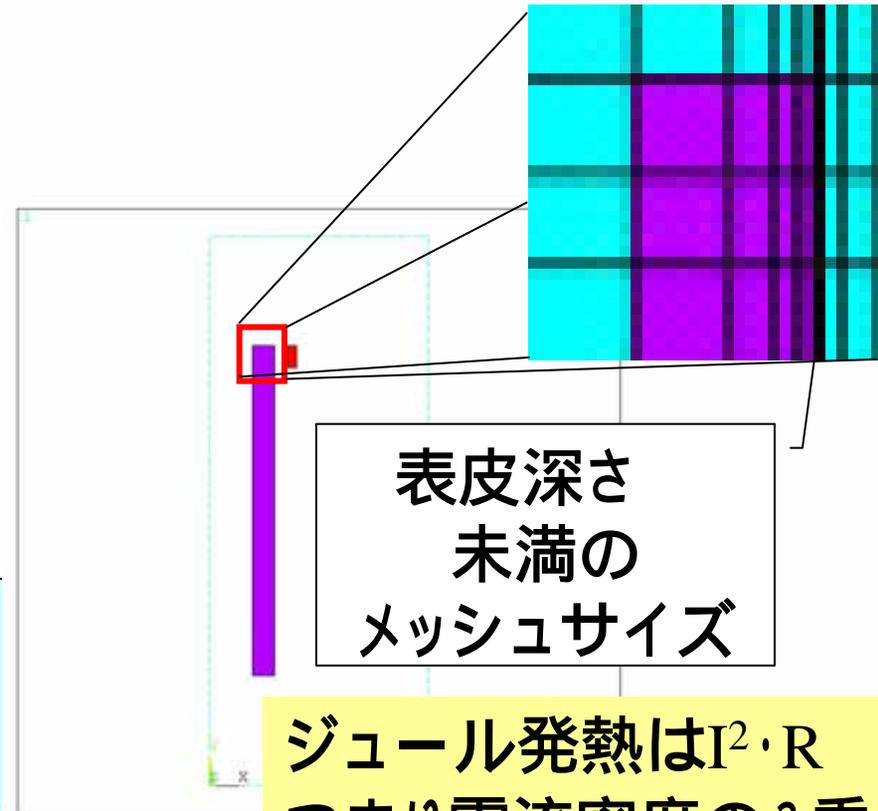
渦電流は表皮部分に
流れやすい。
この表皮深さは
材質・周波数に大きく
依存する。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}$$

f : 周波数

μ : 透磁率 (MKS単位系)

σ : 電気伝導度 (MKS単位系)



表皮深さ
未満の
メッシュサイズ

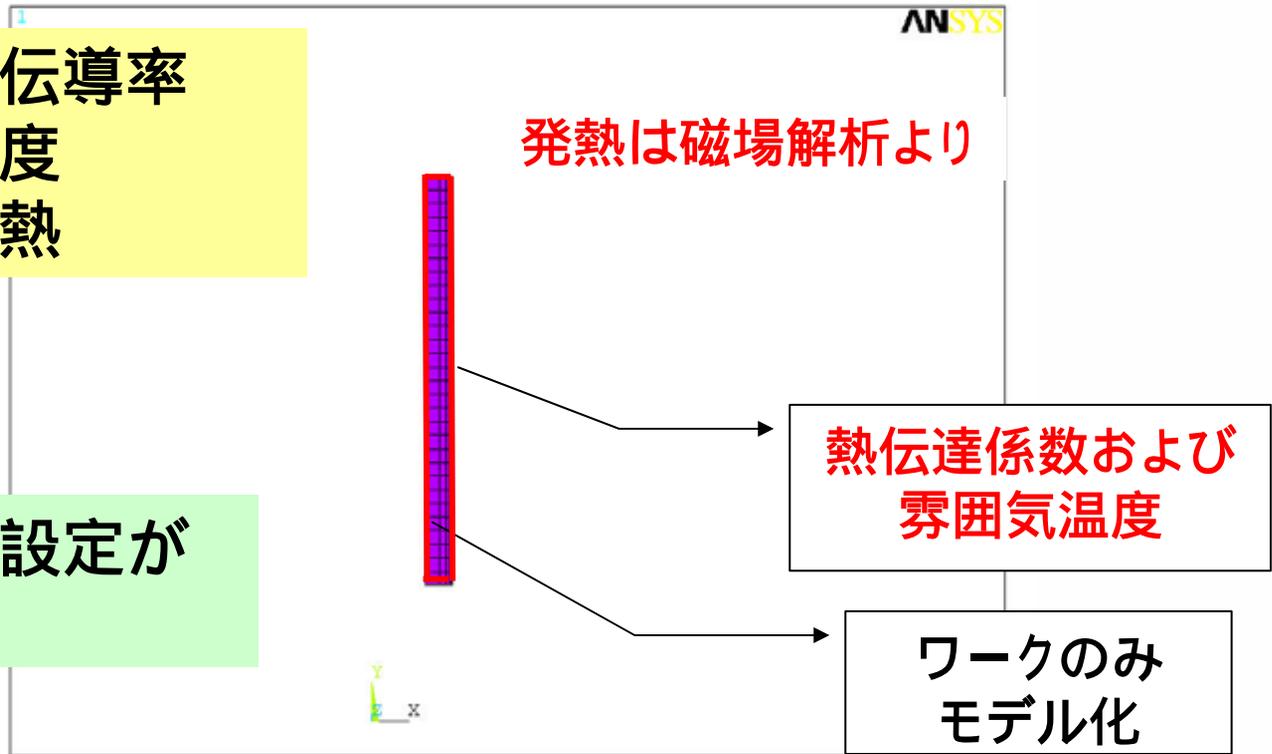
ジュール発熱は $I^2 \cdot R$
つまり電流密度の2乗に
比例する。このメッシュを
忠実にモデル化するか
どうか、カギとなる。

伝熱解析モデル

ワーク

熱伝導率
密度
比熱

時間積分効果の設定が必要



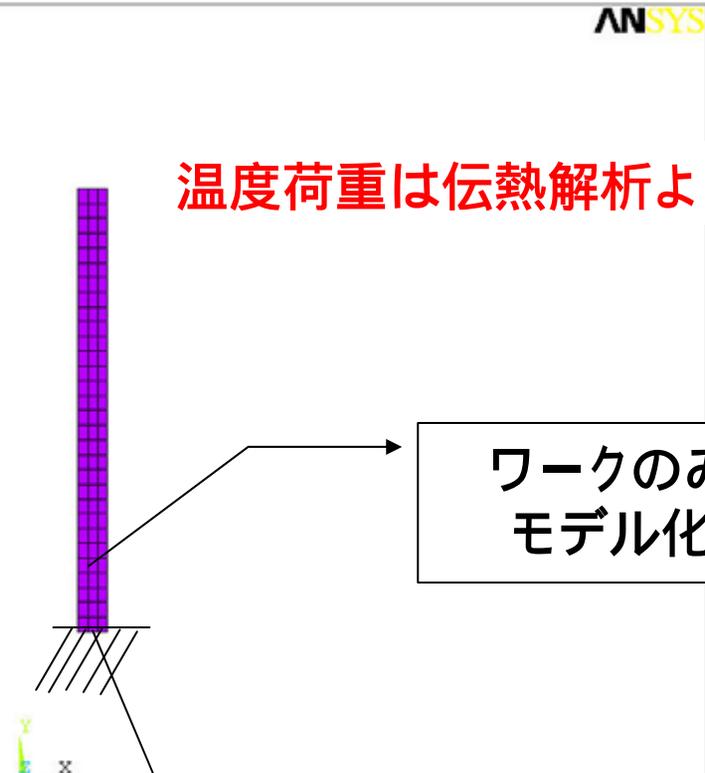
構造解析モデル

ワーク

ヤング率
ポアソン比
線膨張係数
S-Sカーブ

時間積分効果は必要なし

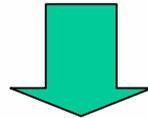
大変形オプション ON



ワークのみ
モデル化

固定条件

常温から高温約1000度への温度変化



温度変化が激しいので温度依存の材料特性を入力すべきである。

EX)

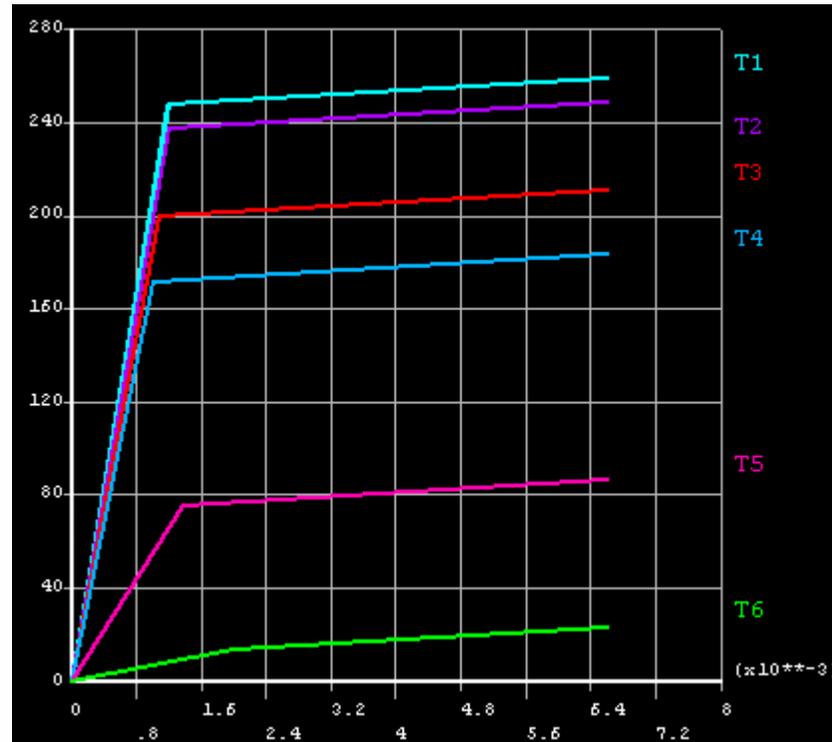
比透磁率 キュリー点を超えると比透磁率 = 1 に変化する

電気抵抗率 常温との差が約10倍ほど

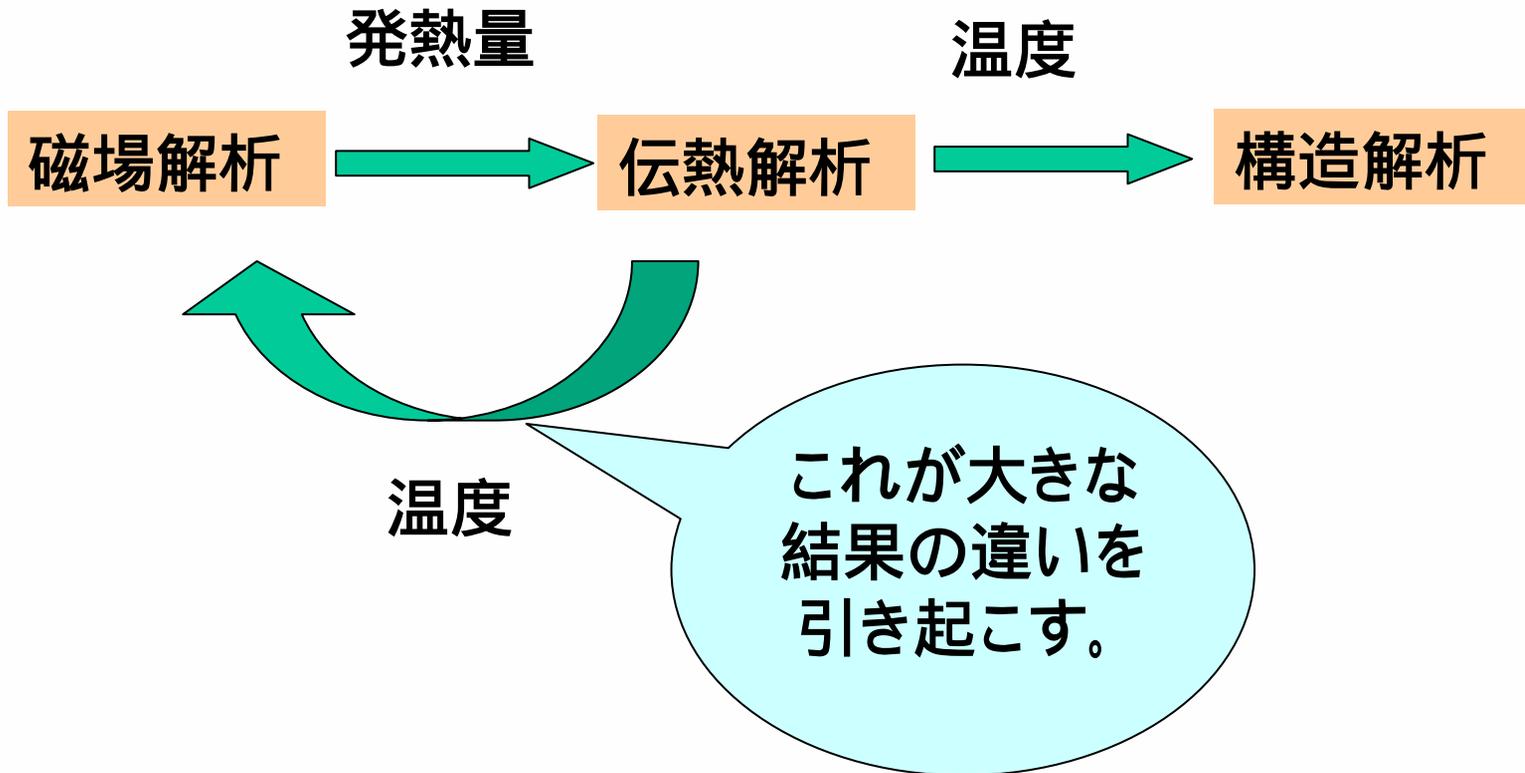
各材料ごとに温度依存性を確認すべきである。

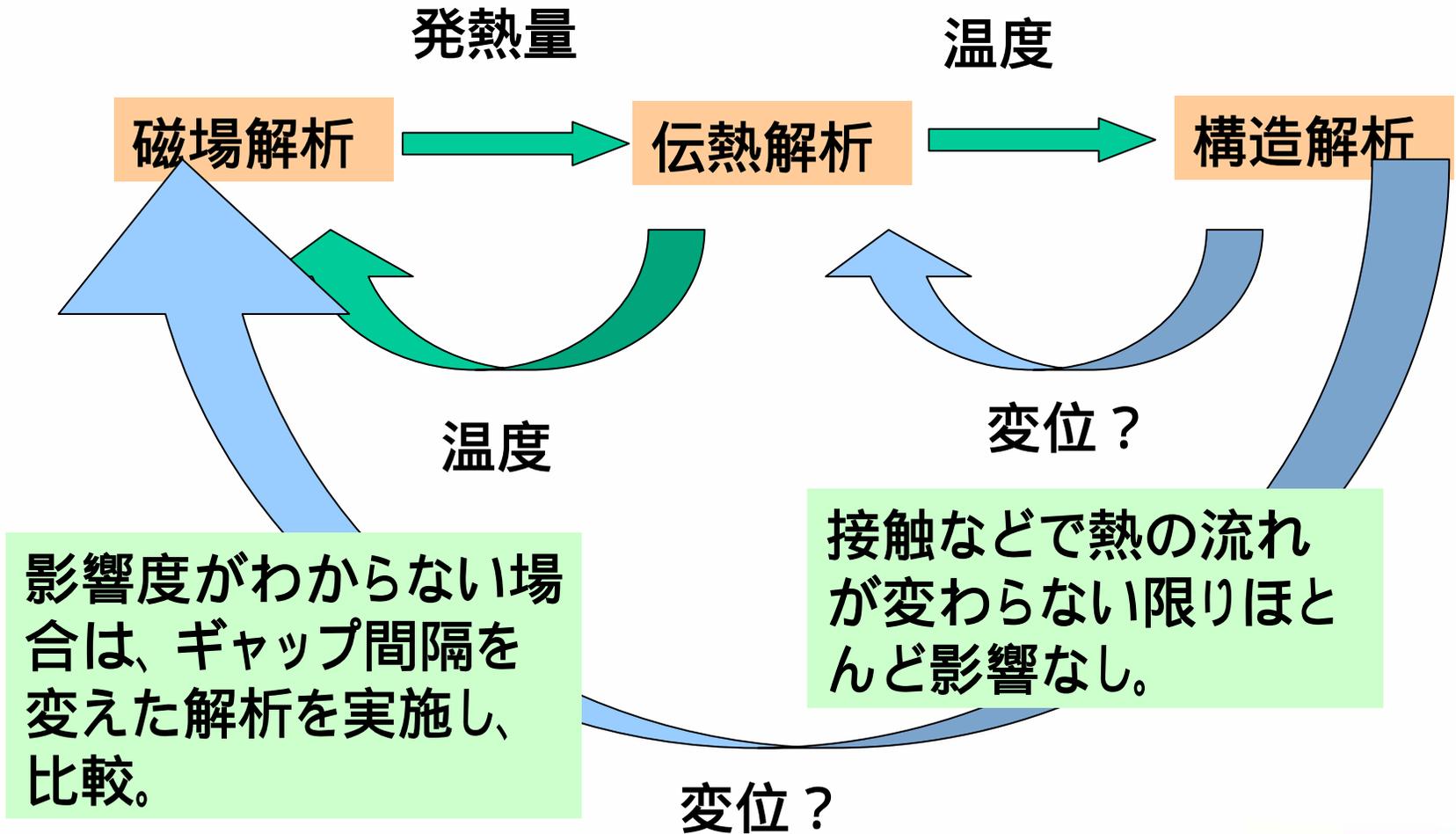
焼入れの場合、相変態を考慮すべきである。しかし、今回利用したANSYSにはその機能がないため、その部分は省略している。

例)



温度依存の応力-ひずみ曲線





磁場解析
時間積分効果
あり

伝熱解析
時間積分効果
あり

構造解析
時間積分効果
必要なし

時刻歴解析

周波数解析

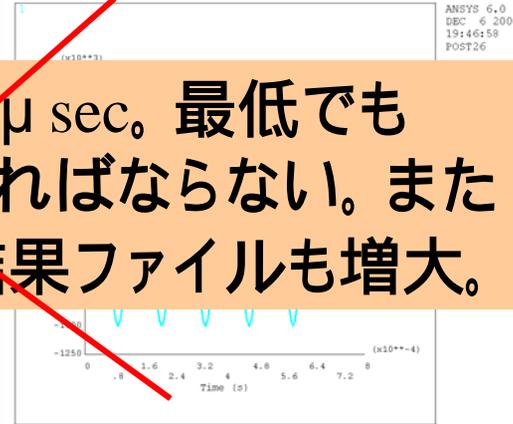
時刻歴解析

静的解析

どちらを選択？

励起
場合
る必
要の
り。

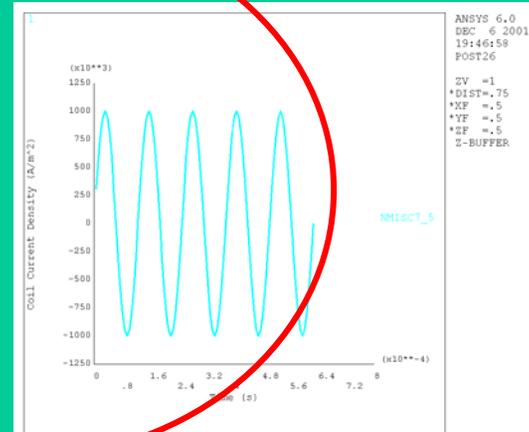
高周波なので1周期数 μ sec。最低でも
1 μ sec 毎に計算しなければならない。また
ステップ数が多くなり結果ファイルも増大。



B-Hカーブの場合温
度依存性が設定でき
ない。

熱解析でもこの時間
ステップで計算する
？

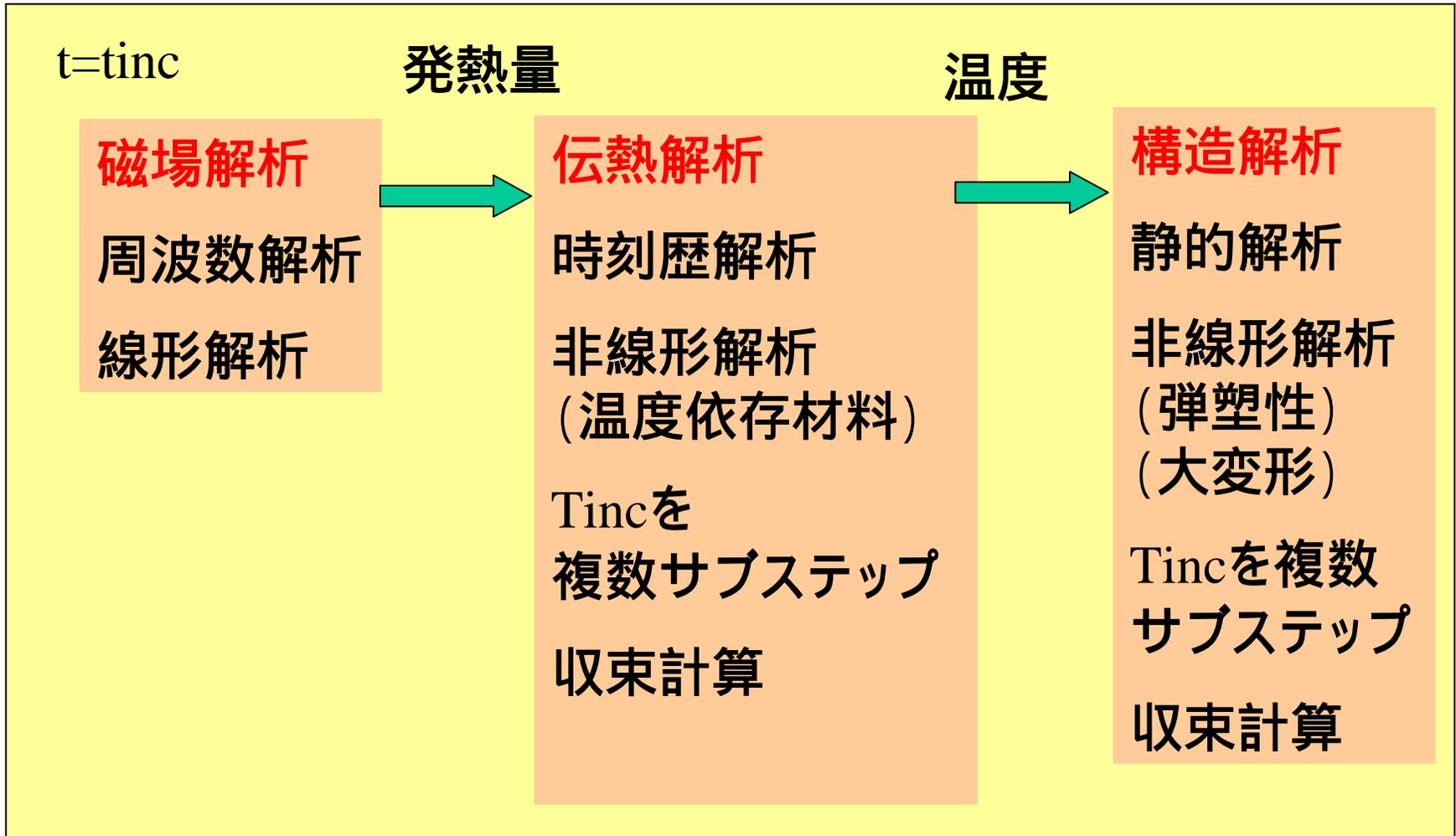
励起条件が調和関数



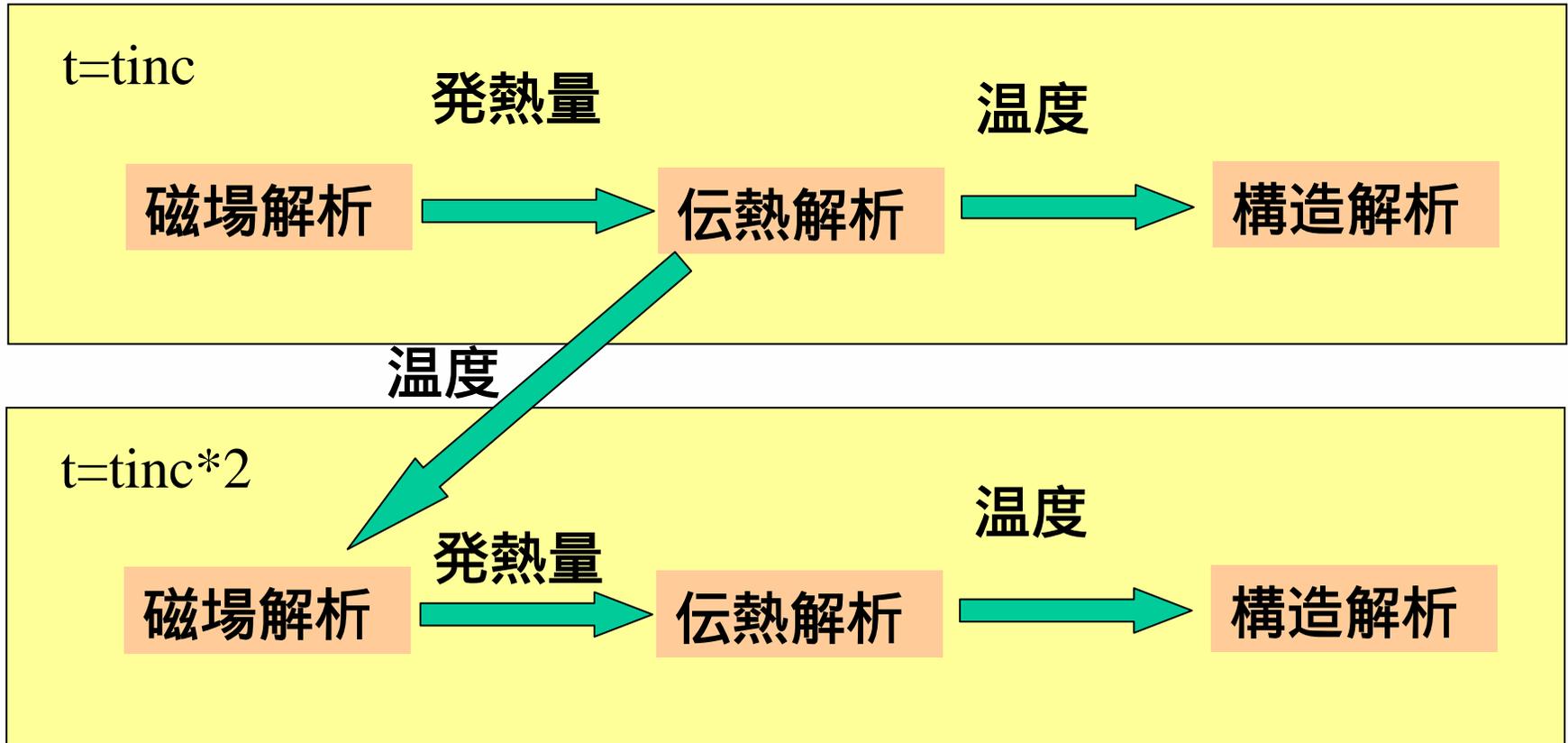
B-Hカーブの場合温度依存性が設定できない。

高周波なので1周期数 μ sec。時間平均で十分。

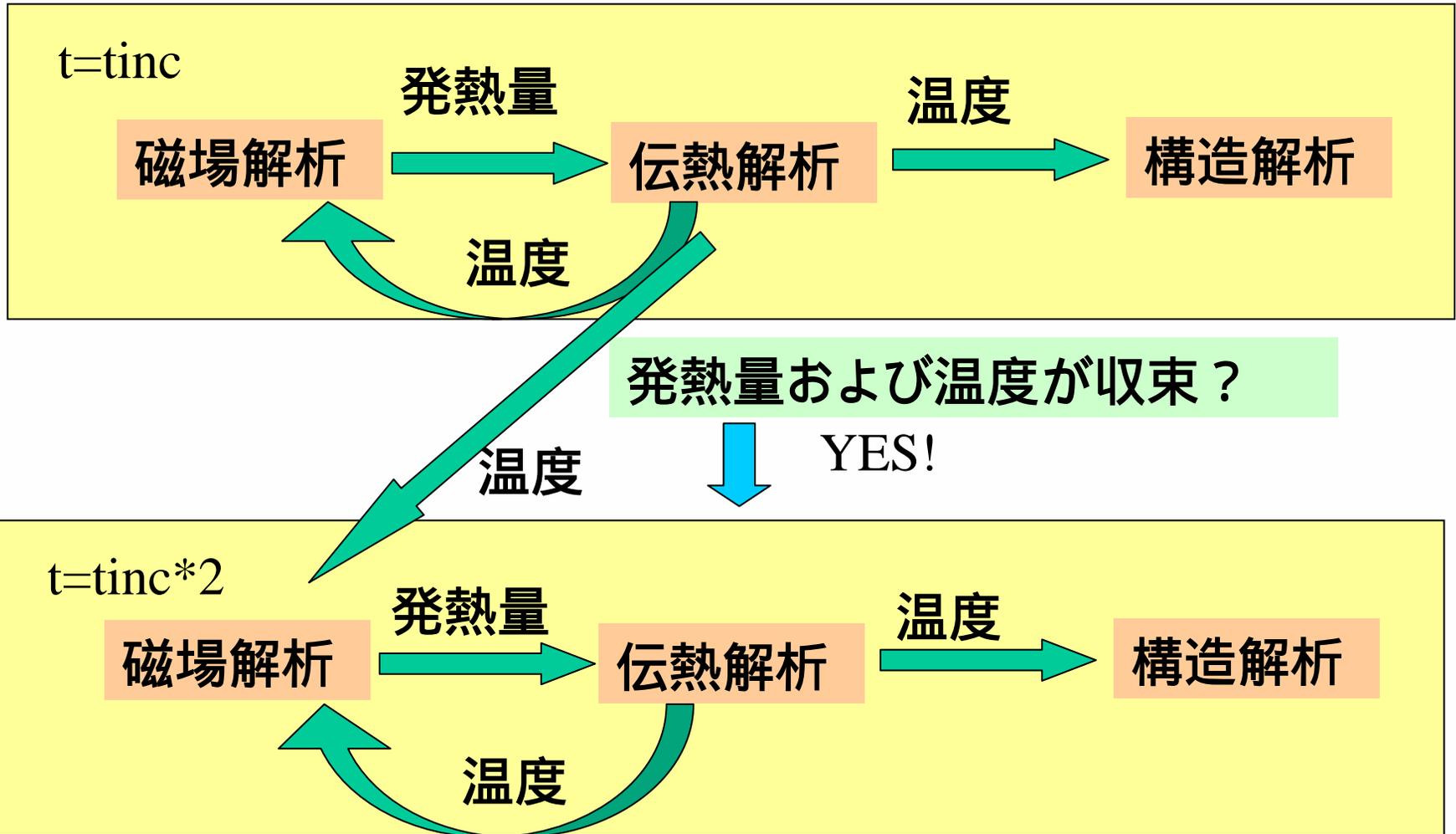
解析時間が速い。



ケース1) プログラミングが可能な範囲

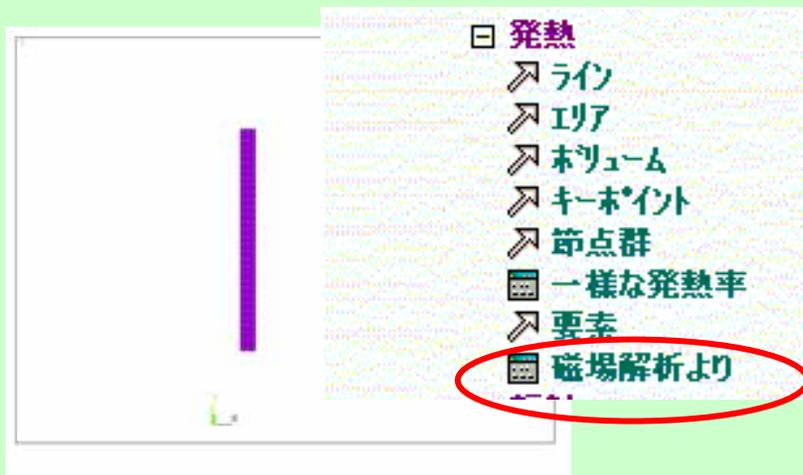


ケース2) プログラミングでは大変

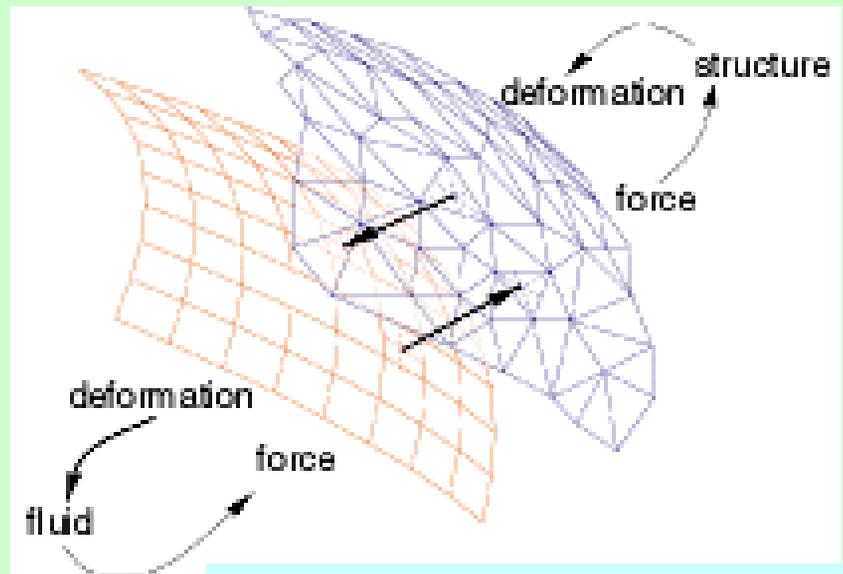


使用するアプリケーションの機能に依存する。
ANSYSでは。。。。

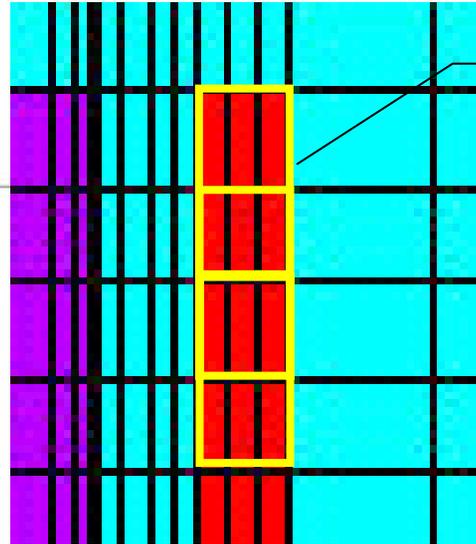
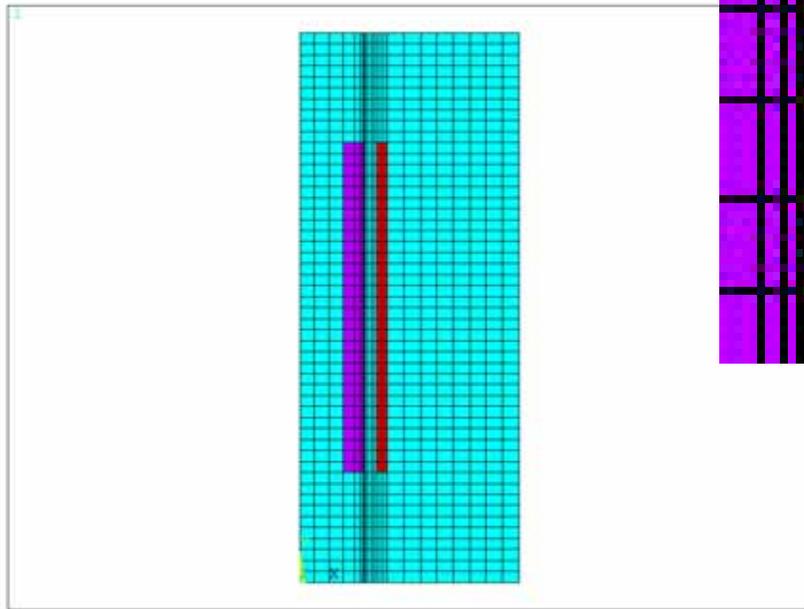
メッシュは同じで使用
する要素タイプを変更
した場合



メッシュが異なる場合



MultiField Solverの利用

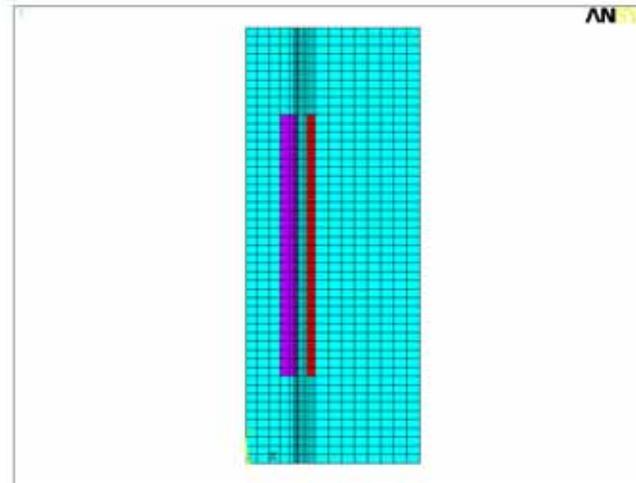


電流位置

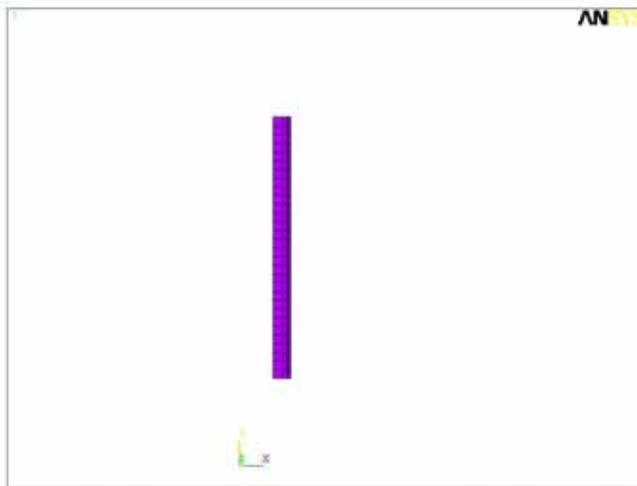
コイルと空気の材料特性は
同じなので電流密度を与え
る位置を移動させるのみ

1つのデータベース上に3つの場のモデルを重ねて作成

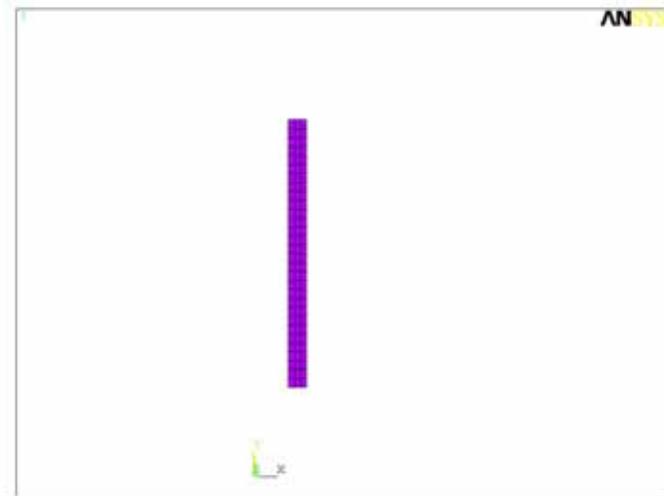
磁場解析用



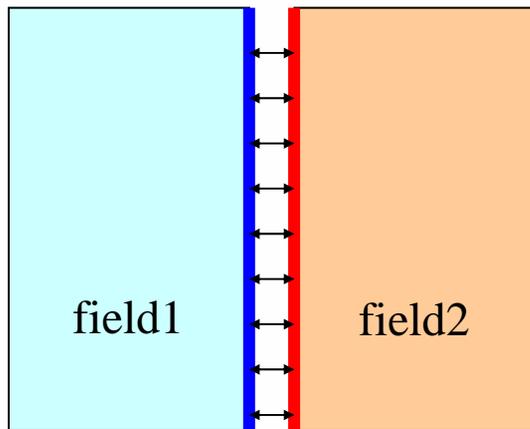
熱解析用



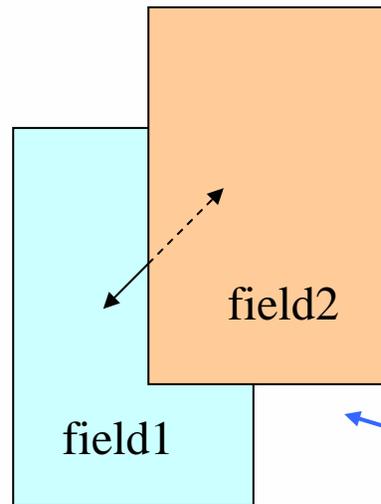
構造解析用



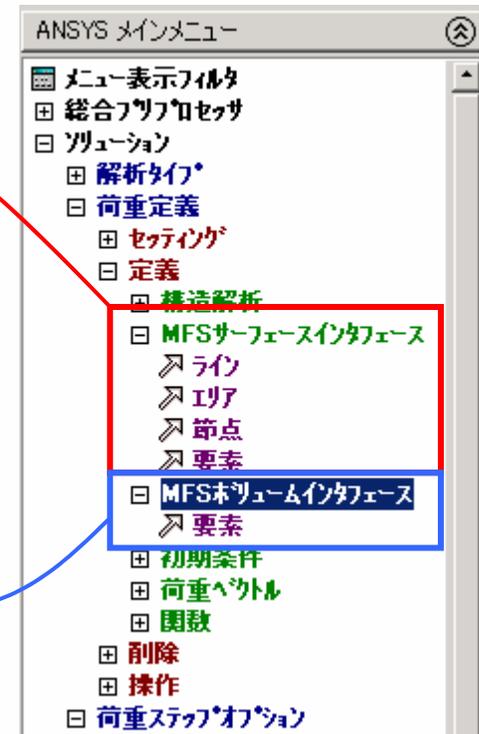
- 接する面 (surface) 間における荷重転送
- 重なる体積 (volume) 間における荷重転送



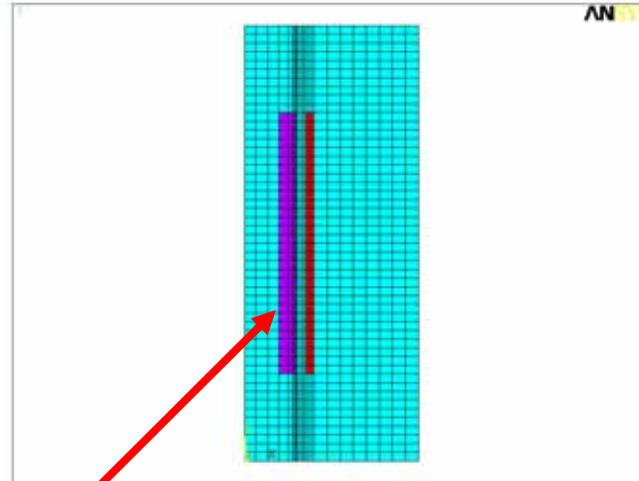
接する面間における荷重転送
(SF系コマンドにて境界番号を設定)
SF, Nlist, **FSIN**, 境界番号



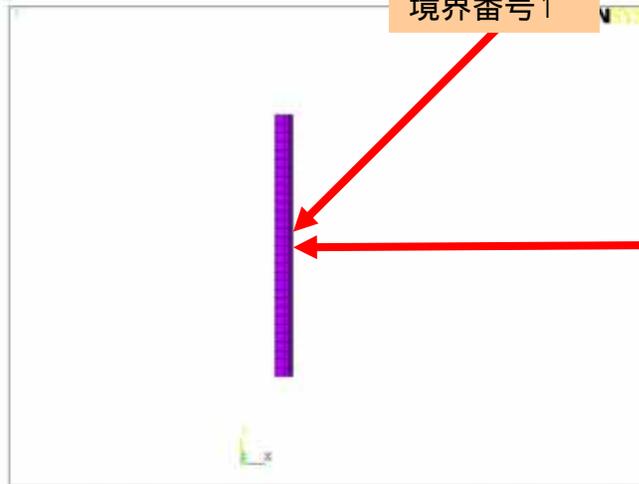
各場の要素を二重定義状態にした上での荷重転送も可能
(BFEコマンドにて境界番号を設定)
BFE, ELEM, **FVIN**, STLOC, 境界番号



磁場解析用

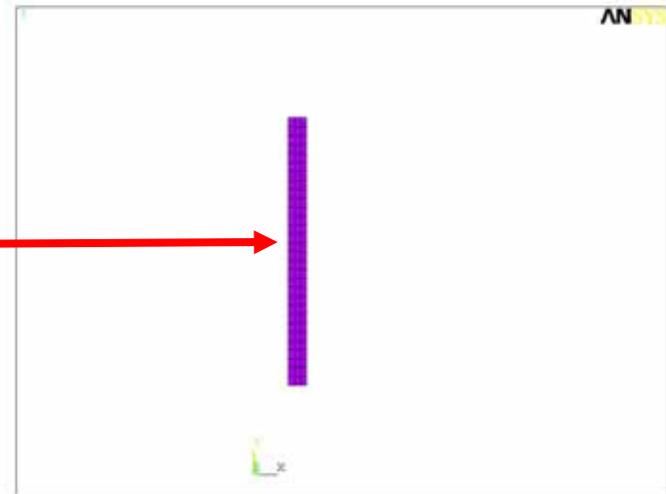


熱解析用



境界番号1

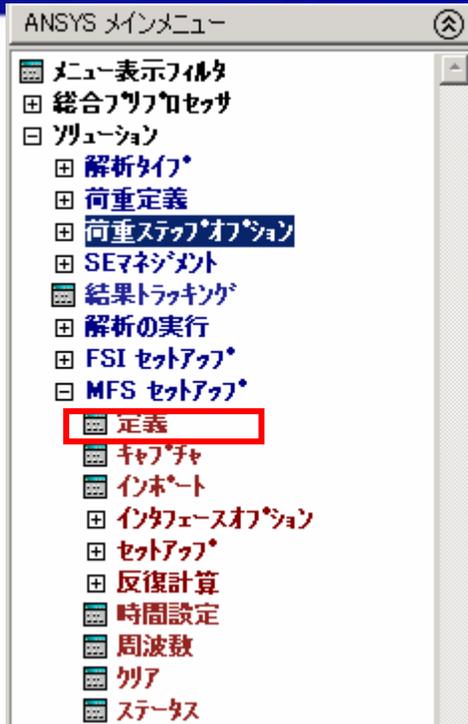
構造解析用



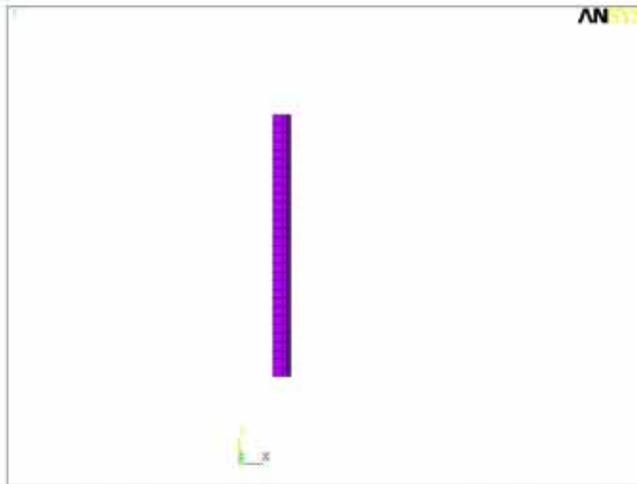
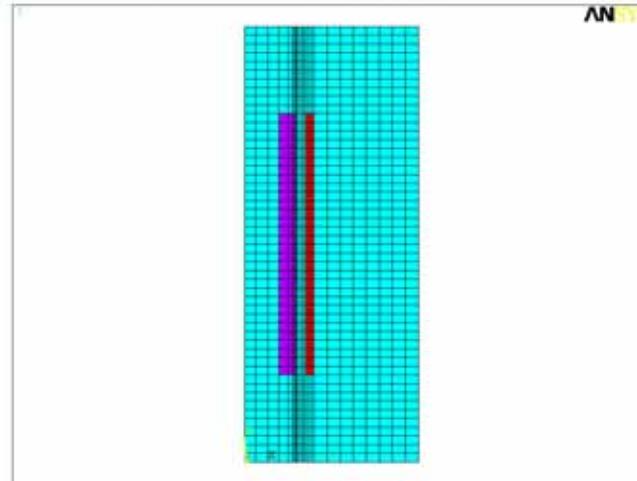
境界番号2

・同一の解析で使用される要素をグループ化する。

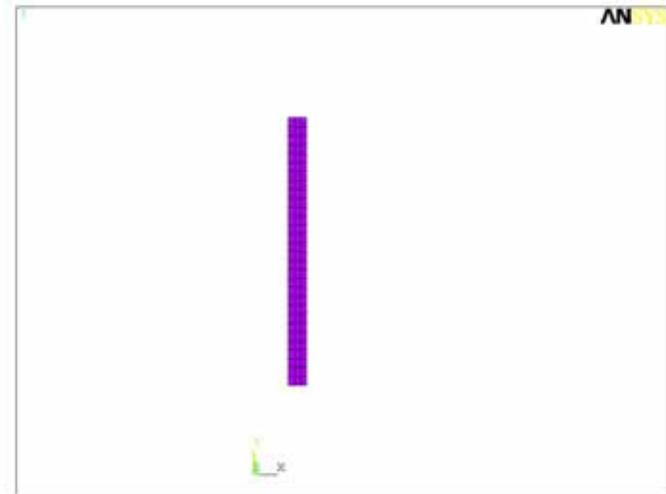
フィールド番号1	構造解析用	要素タイプ	1	PLANE182
フィールド番号2	伝熱解析用	要素タイプ	2	PLANE55
フィールド番号3	磁場解析用	要素タイプ	3	PLANE13
		要素タイプ	4	PLANE53



フィールド3：磁場解析メッシュ



フィールド2：伝熱解析メッシュ



フィールド1：構造解析メッシュ

各フィールドの解析オプションを設定した後、MFCMコマンドを利用してこれまでに設定した設定項目をコマンドファイル(デフォルトではFIELDn.cmd n:フィールド番号)に格納する。

MFCLEAR,SOLU

第1フィールドの解析オプション設定

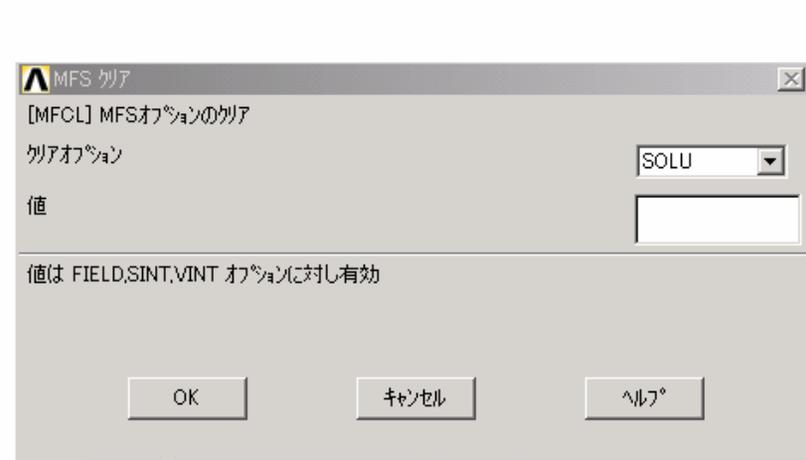
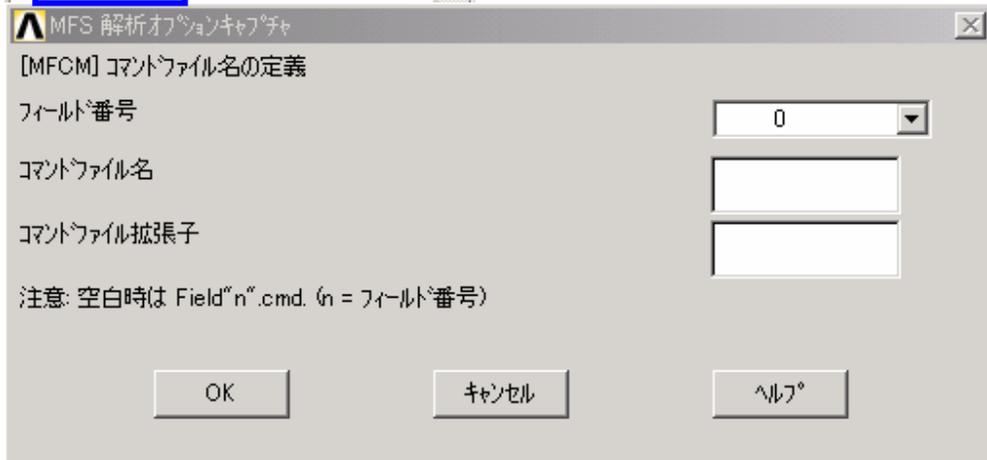
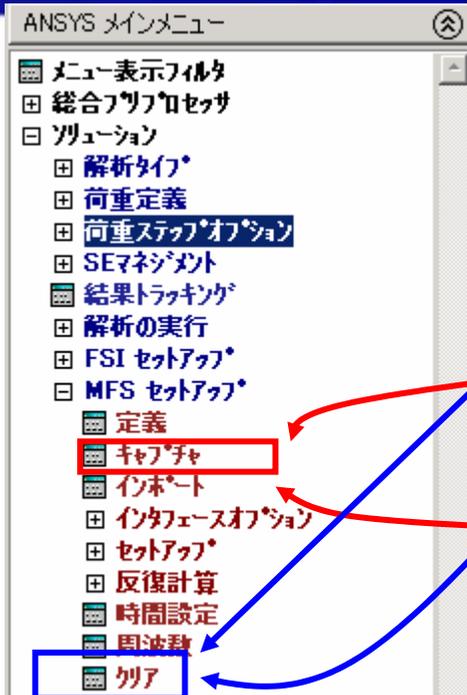
MFCM,1,ファイル名,cmd

MFCLEAR,SOLU

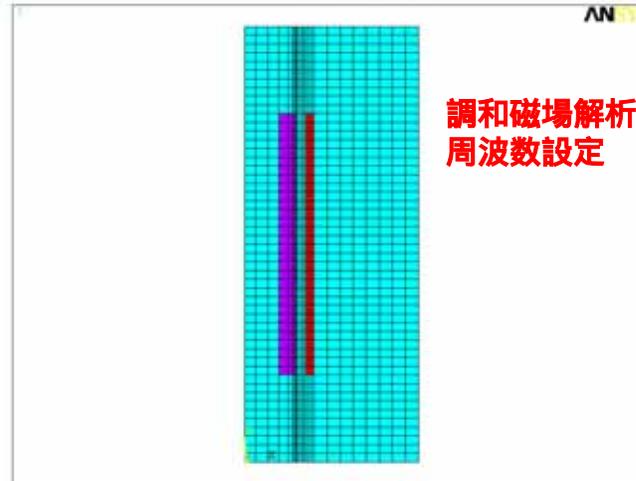
!第1フィールドで設定したオプションをデフォルト値へ変更

第2フィールドの解析オプション設定

MFCM,2,ファイル名,cmd



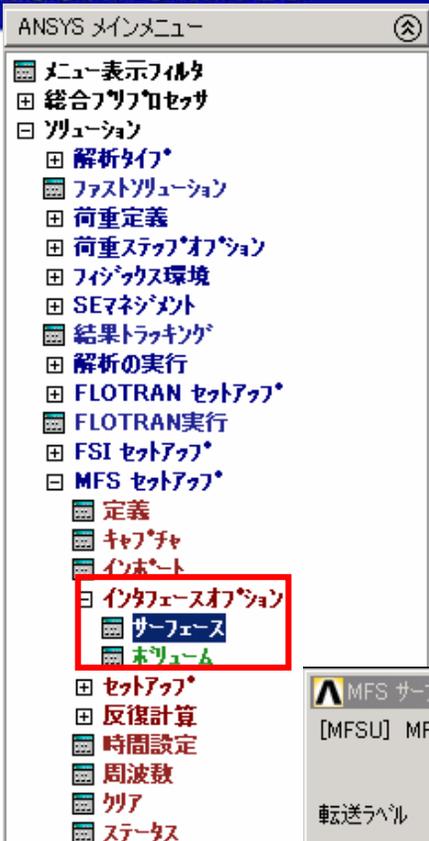
フィールド1: 磁場解析メッシュ



フィールド2: 伝熱解析メッシュ



フィールド3: 構造解析メッシュ



フィールド間の転送する荷重の種類を設定する。
例)

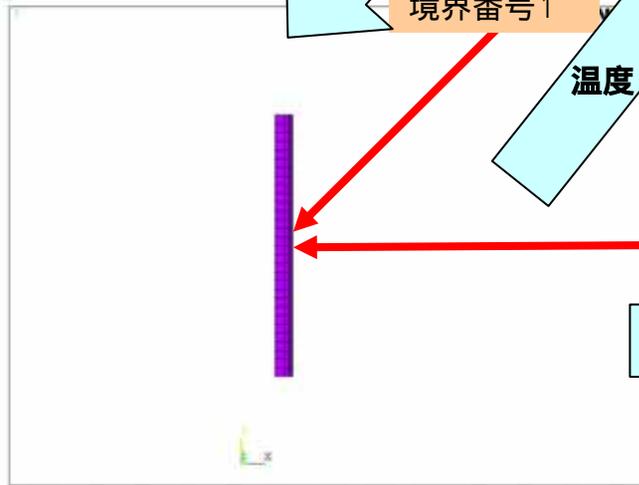
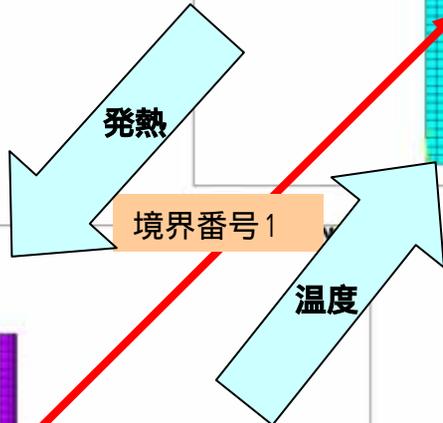
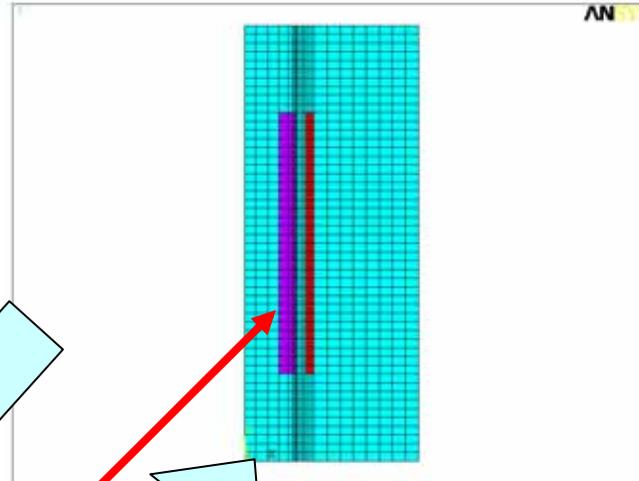
フィールド番号3 (磁場) フィールド番号2 (伝熱)
発熱 (HGEN)

フィールド番号2 (伝熱) フィールド番号1 (構造)
温度 (TEMP)

フィールド番号2 (伝熱) フィールド番号3 (磁場)
温度 (TEMP)



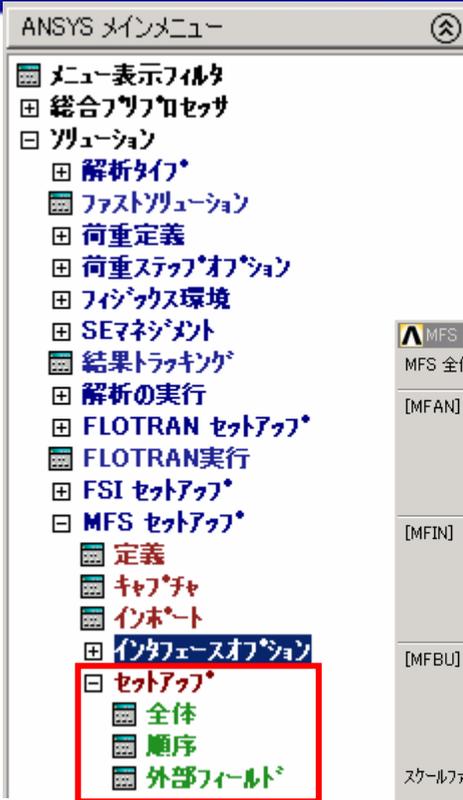
フィールド1: 磁場解析メッシュ



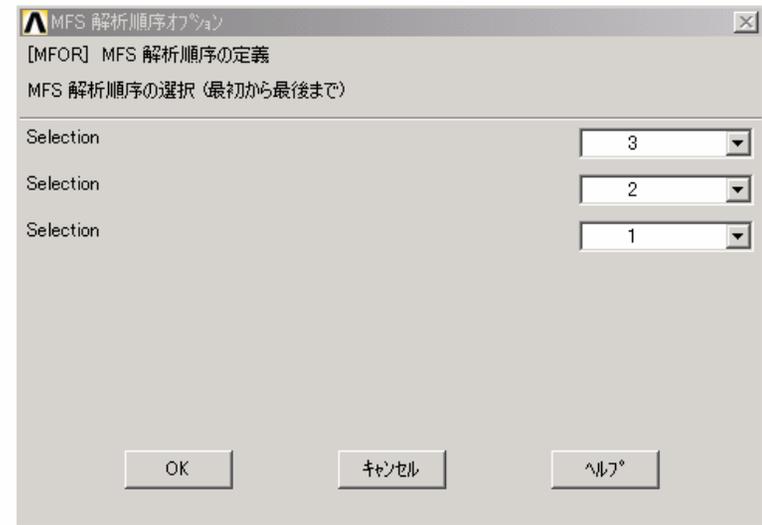
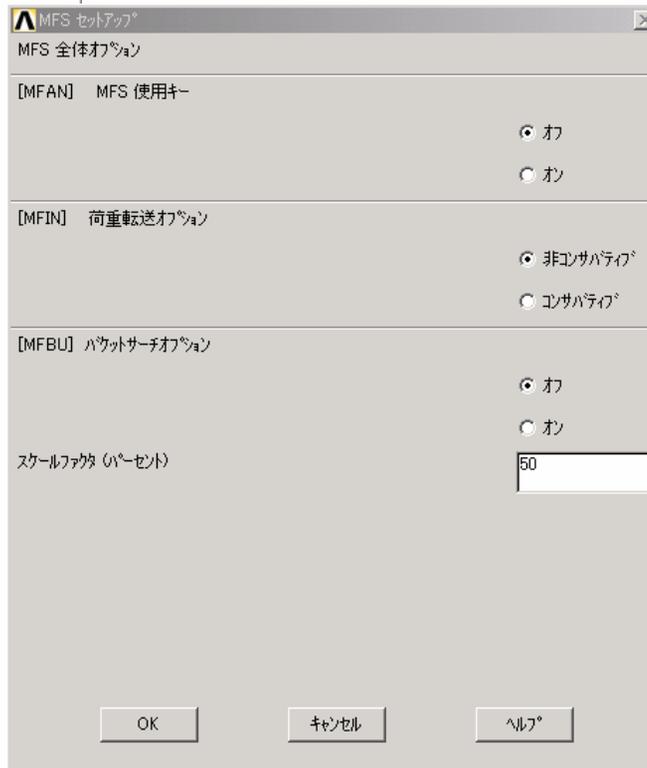
フィールド2: 伝熱解析メッシュ

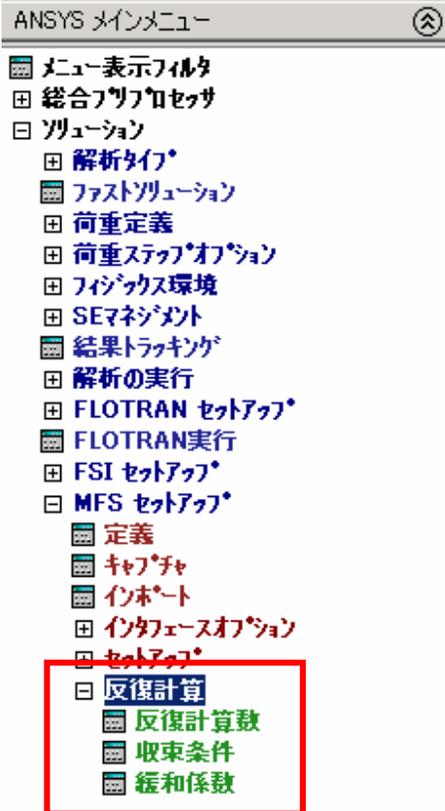


フィールド3: 構造解析メッシュ



- ・マルチフィールドソルバーのON/OFF
- ・荷重転送オプション
- ・マッピングオプション (バケットサーチオプション)
- ・解析順序など
を設定する。



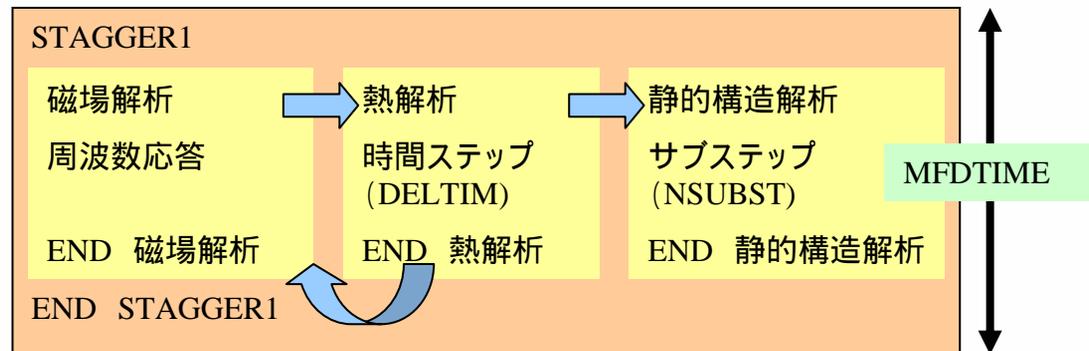


・各フィールドでの最大スタグガイタレーション数の指定

1フィールドにおいて指定した最大スタグガイタレーション数に到達するまで計算。最大スタグガイタレーションに到達するまでに収束すれば、その時点で次のスタグガ-ループへ移行する。デフォルトは10。

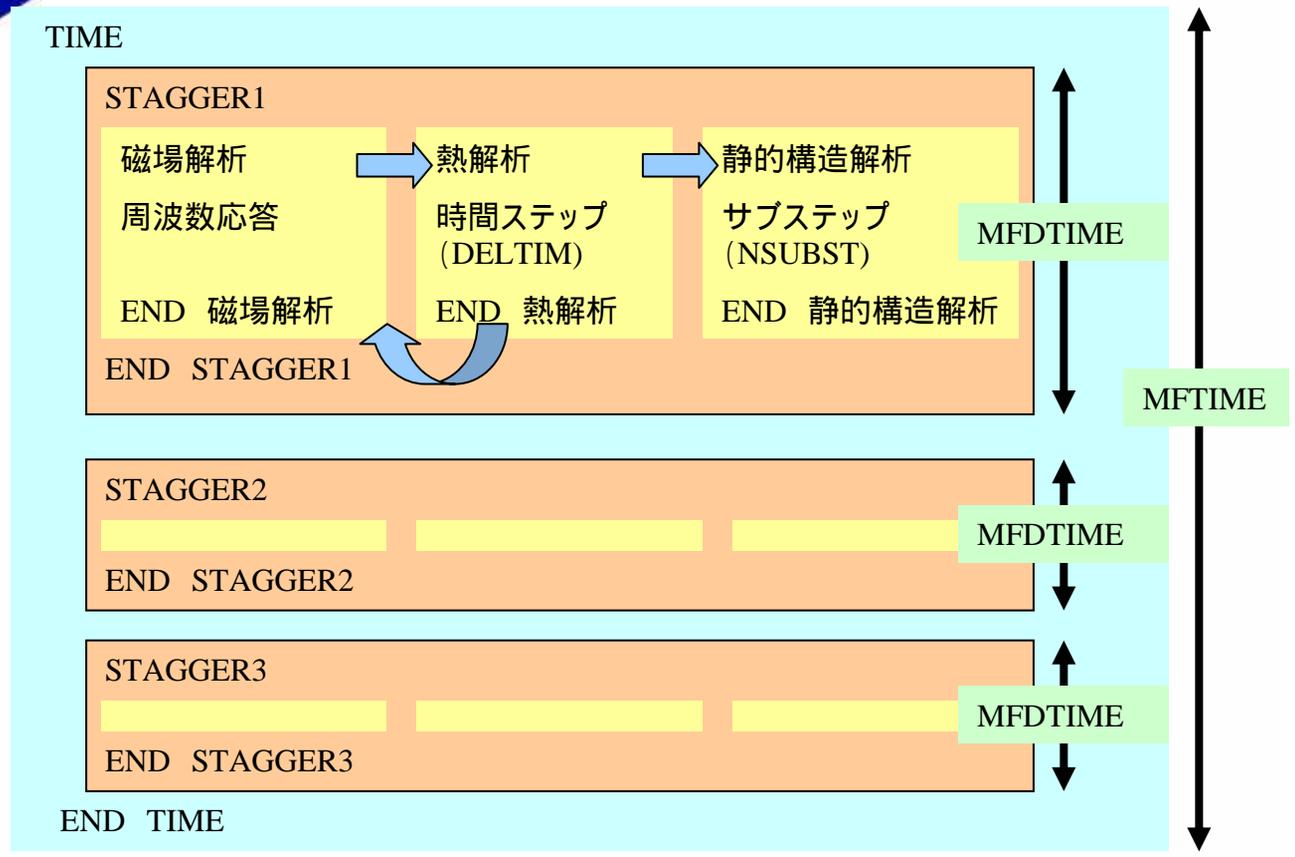
・収束条件の指定

フィールド間で転送される荷重にて収束判定を行う。デフォルトは0.001。



発熱・温度の収束判定

- ANSYS メインメニュー
- メニュー表示フィルタ
 - 総合プロファイルセッパ
 - ソリューション
 - 解析タイプ*
 - ファストソリューション
 - 荷重定義
 - 荷重ステップオプション
 - フィジックス環境
 - SEマネジメント
 - 結果トラッキング
 - 解析の実行
 - FLOTRAN セットアップ*
 - FLOTRAN実行
 - FSI セットアップ*
 - MFS セットアップ*
 - 定義
 - キャパチタ
 - インポート
 - インタフェースオプション
 - セットアップ*
 - 反復計算
 - 時間設定**
 - 固定数



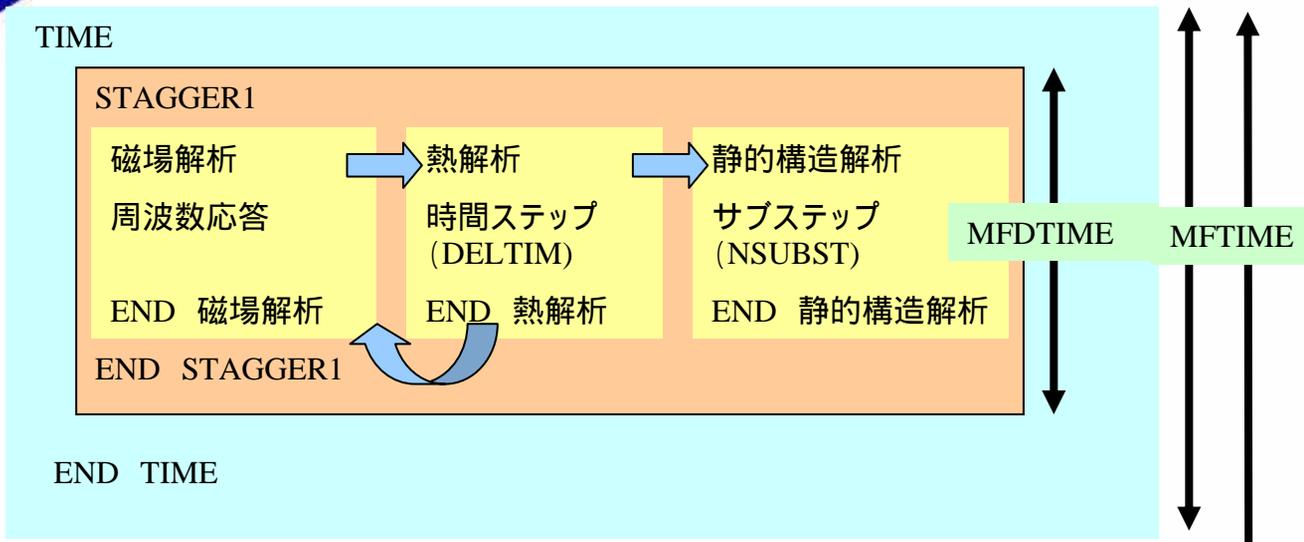
MFS 時間設定

[MFTI] MFS 終了時間

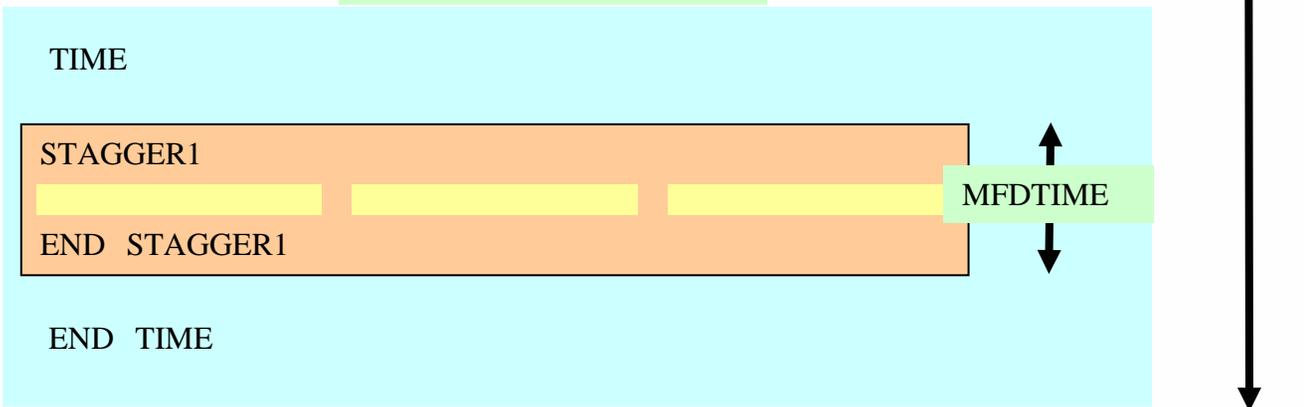
[MFDT] MFS 時間増分

[MFRS] MFS リスタート時間

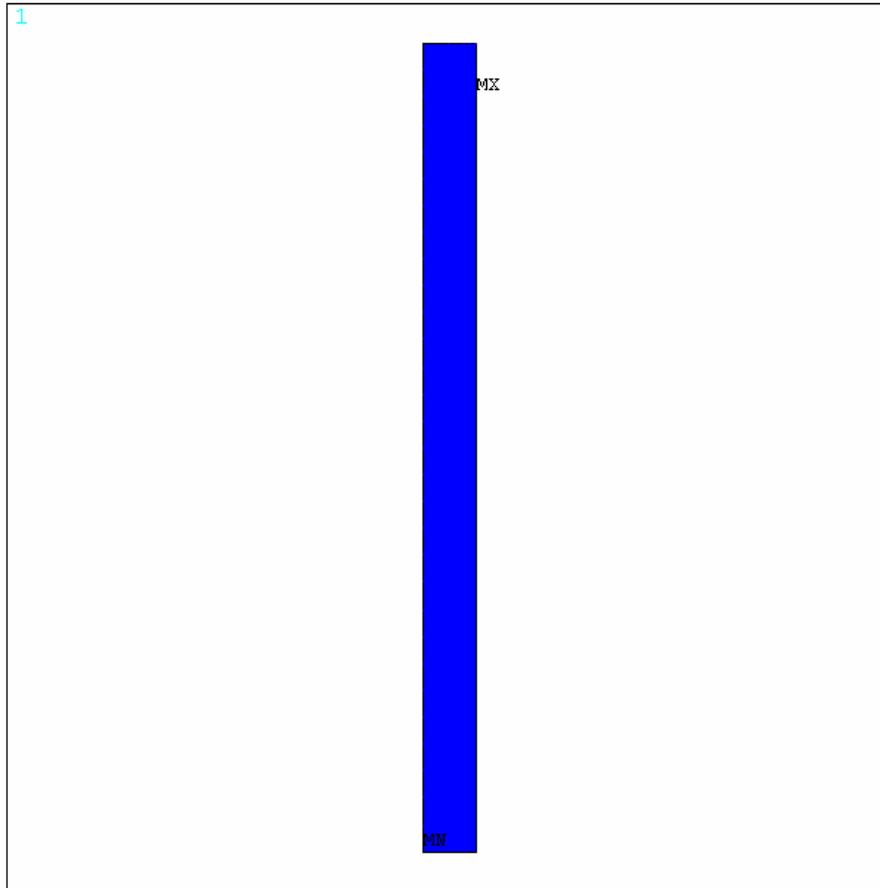
OK キャンセル ヘルプ



コイルの移動



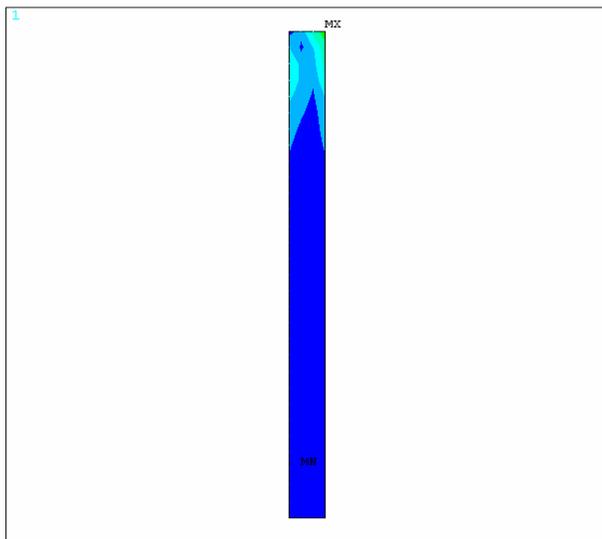
コイルの移動



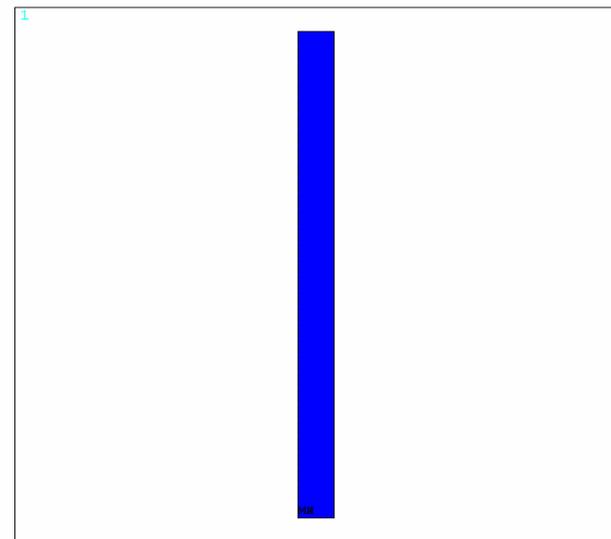
ANSYS 8.0
APR 9 2004
10:00:17
NODAL SOLUTION
TIME=.1
TEMP (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN =25.003
SMX =133.932

■	25.003
■	128.339
■	231.675
■	335.012
■	438.348
■	541.685
■	645.021
■	748.357
■	851.694
■	955.03

温度分布



相当応力分布



相当塑性ひずみ分布