

# M12 溶接変形・残留応力解析における 効率的モデル化に関する検討

八木 利起 (指導教員 柴原・伊藤)

Study on Efficient Modeling on Analysis of Welding Deformation and Residual Stress

by Toshiki Yagi

## Abstract

Recently, Thermal-elastic-plastic FE analysis is widely used to predict welding residual stress. However, if the object to be analyzed is large or complicated, the work for mesh division for the analysis requires enormous time cost and human cost. In this way, the cost of mesh division is serious problem.

In order to obtain accurate residual stress distribution, fine mesh divisions should be necessary in plastic area. However, the other regions are roughly divided due to the limitations of computing time and memory consumption. In addition, the distorted elements cause the inaccurate results. Therefore, it is necessary to make the elements well-regulated shape near the welding line.

Superimposed mesh method (S-FEM) has been actively developed. In S-FEM, since it is possible to generate the meshes independently in global and local region, the cost of mesh generation can be remarkably reduced. In addition, it is also superior method in terms of accuracy since the interaction of global and local model is reflected in the formulation. However, S-FEM has been not applied to welding residual stress and deformation problem because the phenomena of welding problem is complicated. Then, in this study, S-FEM is formulated for thermal elastic plastic analysis and applied to the analysis of welding residual stress and deformation problem.

As a result, it is shown that the analysis accuracy of the proposed method is almost the same as the existing method.

## 1. 緒 言

船舶を代表とする溶接構造物の組立では、溶接の施工に伴い、溶接部近傍には高い引張応力が発生する。この応力は一般的に溶接残留応力と呼ばれ、疲労破壊、応力腐食割れの要因とされ、時には脆性破壊を引き起こす場合もある。さらにこの応力に釣り合うために発生する圧縮応力は部材が薄板の場合、座屈変形を発生させる場合があり、組立工程に大きな影響を与えることがある。したがって、残留応力場を予測することは、溶接施工上、極めて重要である。

現在、溶接残留応力の予測には有限要素法を主とした数値解析が広く用いられている。有限要素法を用いる場合、解析対象の構造物を微小な単純形状、すなわち、要素に分割する必要がある。しかしながら、解析対象が大規模、もしくは、複雑な形状になると、解析に必要な要素分割作業に膨大な人的、時間的コストを要するため、このメッシュ生成コストが非常に問題となる。

解析精度を向上させるために、詳細な要素分割を行う必要があるが、解析時間やメモリ消費量の制限により、着目される応力集中部などの領域以外は、比較的粗い要素分割で解析モデルが生成される。また、生成する要素は品質の良い、すなわち要素の形状がある程度整っている必要がある。詳細な要素分割から比較的粗い要素分割との整合性をとる必要があるが、その境界周辺の要素分割において、要素の形状を崩さないように両者を繋げる必要がある。溶接力学解析では、残留応力を高精度に求めるために、塑性ひずみが発生する領域に対しては詳細な要素分割が必要になるため、このような整合性をとるために、メッシュ生成コストは非常に増大する。よっ

て、溶接線の交差部や多層溶接の溶接金属部等では、整合性をとる必要がある境界が存在するため、その要素分割の難度が非常に高いのが現状である。

このように、溶接解析では、モデルの整合性をとるために粗細ある要素分割となるが、全体モデルを比較的粗いメッシュで解析(グローバル解析)し、溶接線近傍では詳細なメッシュで解析(ローカル解析)することが可能ならば、境界上における整合性を無視できるため、メッシュ生成コストを大幅に低減できると言える。このようなアプローチは、グローバル・ローカル解析、あるいはマルチスケール解析と呼ばれ、Moteによって研究が開始されて以来、計算力学では多くの研究がなされており、近年重合メッシュ法(S-FEM)を用いたマルチスケール解析が注目されている。Fish<sup>1-2)</sup>により初めて提案されたこの手法は、グローバルモデルとローカルモデルを独立にメッシュ生成し、それらを重ね合わせ、その両モデルを同時に解析するという手法である。両モデルのメッシュの整合性を考慮する必要がないのでモデル化が非常に容易となり、グローバルモデルとローカルモデルにおける相互の影響が定式化に反映されているため、精度の面においても優れた手法である。しかしながら、プログラムが非常に複雑であるため、重合メッシュ法による非線形解析はほとんど研究されていないのが現状である。

そこで本研究では溶接問題を対象にメッシュ生成コストを軽減することを目的とし、重合メッシュ法を用いた熱弾塑性解析 FEM の提案を行った。

## 2. 解析理論

### 2.1 重合メッシュ法の定式化

以下では、重合メッシュ法の基礎方程式を導出する。本章では重合メッシュ法における各運動量に対する過程から、離散化された釣り合い方程式を導くまでの過程を示す。

3次元の全体領域  $\Omega$  を考える。この領域  $\Omega$  内において変位場  $\{u^G\}$  が定義されているものとする。また、領域  $\Omega$  の部分領域として  $\Omega^L$  を定義する(Fig. 3.1 を参照)。すなわち、

$$\Omega^L \subset \Omega \quad (2.1)$$

全体領域  $\Omega$  の境界を  $\Gamma$  とする。この  $\Gamma$  は幾何学的境界条件の課される境界  $\Gamma_u$  と力学的境界条件の課される境界  $\Gamma_t$  の和集合となっている。

$$\{u\} = \{\bar{u}\} \quad \text{on } \Gamma_u \quad (2.2)$$

$$\{\sigma\} \cdot \{n\} = \{\bar{t}\} \quad \text{on } \Gamma_t \quad (2.3)$$

$$\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t \quad (2.4)$$

また、領域  $\Omega$  と領域  $\Omega^L$  の境界を  $\Gamma^{GL}$  とし、境界  $\Gamma$  と境界  $\Gamma^{GL}$  が重なる部分の境界を  $\Gamma'$  とする。

以下では、各変数の右上添え字 G, L はそれぞれ領域  $\Omega$ , 領域  $\Omega^L$  に関する量であることを意味するものとする。領域  $\Omega$  内、領域  $\Omega^L$  内ではそれぞれ独立の変位場  $\{u^G\}$ ,  $\{u^L\}$  が定義されており、領域  $\Omega^L$  内では、実際の変位は両モデルの変位の和で定義されるものとする。すなわち、

$$\{u\} = \{u^G\} + \{u^L\} \quad \text{in } \Omega^L \quad (2.5)$$

である。また、境界  $\Gamma^{GL} \notin \Gamma'$  上での  $C^0$  連続性を保証するため、次式のような条件を課す。

$$\{u^L\} = 0 \quad \text{on } \Gamma^{GL} \notin \Gamma' \quad (2.6)$$

(2.6)式を偏微分すると、ひずみも両モデルのひずみの和で表される。すなわち、

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^G\} + \{\varepsilon^L\} \quad \text{in } \Omega^L \quad (2.7)$$

領域  $\Omega$ ,  $\Omega^L$  をそれぞれ有限要素に分割すると、変位場・ひずみ場は適当な形状関数を用いて離散化され、

$$\{u^G\} = [N^G] \{d^G\} \quad (2.8)$$

$$\{u^L\} = [N^L] \{d^L\} \quad (2.9)$$

$$\{\varepsilon^G\} = [B^G] \{d^G\} \quad (2.10)$$

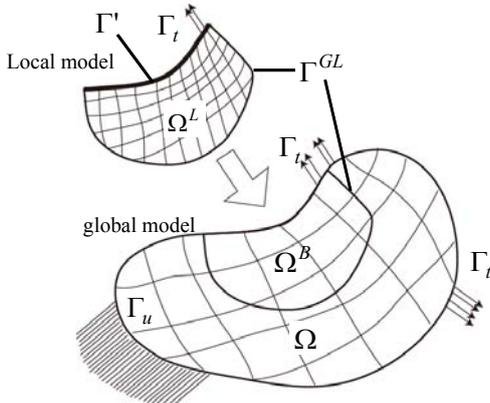


Fig. 2.1 The diagram overlaying the local mesh to the global mesh

$$\{\varepsilon^L\} = [B^L] \{d^L\} \quad (2.11)$$

と表される。ここで  $N^G, N^L$  は  $C^0$  の連続な形状関数、 $\{d^G\}$ ,  $\{d^L\}$  は節点変位、 $\{B^G\}$ ,  $\{B^L\}$  は変位-ひずみマトリックスである。なお、ここでの離散化に際してはそれぞれが完全に独立に行われるものとする。すなわち、一般に両メッシュの節点・境界が一致する必要はない。

## 2.2 熱、残留応力場における重合メッシュ法の定式化

熱、残留応力場では、応力ひずみ関係式は弾性、塑性に関係なく、ひずみ増分と温度増分で与えられるため、次式のように表される。

$$\{\Delta\sigma\} = [D] \{\Delta\varepsilon_e\} = [D] \left\{ \{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\varepsilon_p\} - \{\Delta\varepsilon_T\} \right\} \quad (2.12)$$

ただし、 $\{\Delta\varepsilon\}$  は全ひずみ、 $\{\Delta\varepsilon_e\}$  は弾性ひずみ、 $\{\Delta\varepsilon_p\}$  は塑性ひずみ、 $\{\Delta\varepsilon_T\}$  は熱ひずみを表す。

以上の過程を仮想仕事の原理に代入して、離散化された釣り合いの方程式を導く。仮想仕事の原理式に(2.12)式を代入すると、次式で表される。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \{\partial\varepsilon\}^T \{\sigma\} d\Omega = & \\ & - \int_{\Omega} \{\partial\varepsilon\}^T [D] \{\Delta\varepsilon\} d\Omega + \int_{\Omega} \{\partial\varepsilon\}^T [D] \left( \{\Delta\varepsilon_p\} + \{\Delta\varepsilon_T\} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \{\partial u\}^T \left( \{\bar{b}\} + \{\Delta\bar{b}\} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} \{\partial u\}^T \left( \{\bar{t}\} + \{\Delta\bar{t}\} \right) d\Gamma \end{aligned} \quad (2.13)$$

また  $\{\bar{b}\}$ ,  $\{\bar{t}\}$  はそれぞれ規定された体積力、表面力、 $[D]$  は物体の応力-ひずみマトリックスである。(2.5)式、(2.7)式及びおよび(2.8)式~(2.11)式を(2.13)式に代入して展開し、仮想変位の任意性からそれらの係数を考慮し、整理すると、以下の離散化した釣り合い方程式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}^G & \mathbf{K}^{GL} \\ \mathbf{K}^{GLT} & \mathbf{K}^L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}^G \\ \mathbf{d}^L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}^G \\ \mathbf{f}^L \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \mathbf{R}^G \\ \mathbf{R}^G \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

ただし、

$$\mathbf{K}^G = \int_{\Omega^G} [B^G]^T [D^G] [B^G] d\Omega + \int_{\Omega^L} [B^G]^T [D^L] [B^G] d\Omega \quad (2.15)$$

$$\mathbf{K}^L = \int_{\Omega^L} [B^L]^T [D^L] [B^L] d\Omega \quad (2.16)$$

$$\mathbf{K}^{GL} = \int_{\Omega^L} [B^G]^T [D^L] [B^L] d\Omega \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{f}^G = & \int_{\Omega^G} [N^G]^T \{\bar{b}^G\} d\Omega + \int_{\Gamma_t^G} [N^G]^T \{\bar{t}^G\} d\Gamma \\ & + \int_{\Omega^G} [B^G]^T [D^G] \left( \{\Delta\varepsilon_p^G\} + \{\Delta\varepsilon_T^G\} \right) d\Omega \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$+ \int_{\Omega^G} [B^G]^T [D^L] \left( \{\Delta\varepsilon_p^L\} + \{\Delta\varepsilon_T^L\} \right) d\Omega$$

$$\mathbf{f}^L = \int_{\Omega^L} [N^L]^T \{\bar{b}^L\} d\Omega + \int_{\Gamma_t^L} [N^L]^T \{\bar{t}^L\} d\Gamma \quad (2.19)$$

$$+ \int_{\Omega^G} [B^L]^T [D^L] \left( \{\Delta\varepsilon_p^L\} + \{\Delta\varepsilon_T^L\} \right) d\Omega$$

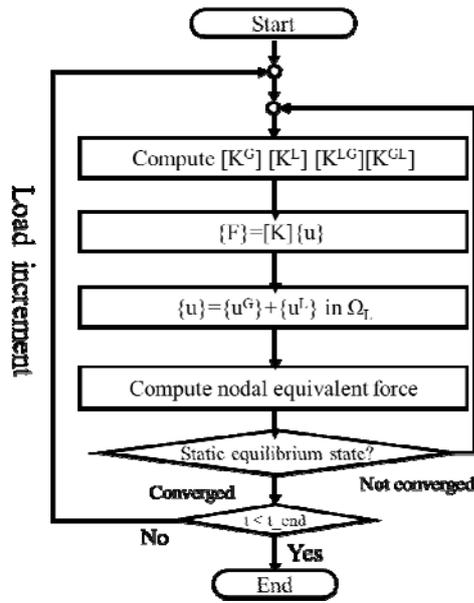


Fig. 2.2 Flow chart of computational procedure of the overlaying mesh finite element method.

$$\mathbf{R}^G = \int_{\Omega^G} [\mathbf{N}^G]^T \{ \Delta \bar{b}^G \} d\Omega + \int_{\Gamma_r^G} [\mathbf{N}^G]^T \{ \Delta \bar{t}^G \} d\Gamma - \int_{\Omega^G} [\mathbf{B}^G]^T \{ \sigma^G \} d\Omega - \int_{\Omega^L} [\mathbf{B}^G]^T \{ \sigma^L \} d\Omega \quad (2.20)$$

$$\mathbf{R}^L = \int_{\Omega^L} [\mathbf{N}^L]^T \{ \Delta \bar{b}^L \} d\Omega + \int_{\Gamma_r^L} [\mathbf{N}^L]^T \{ \Delta \bar{t}^L \} d\Gamma + \int_{\Omega^L} [\mathbf{B}^L]^T \{ \sigma^L \} d\Omega \quad (2.21)$$

である。

弾塑性解析において、増分の中点で降伏が始まる場合、剛性マトリクスの組立に用いた弾性関係から応力を求めるのでは精度が悪いため、応力を補正する必要がある。本研究では、Newton-Raphson 法による反復計算を導入した。以上の手順を Fig.2.2 に示す。ただし、弾性解析の場合は、繰り返し計算を行う必要はない。

### 3. 解析結果

#### 3.1 ビードオンプレート問題への適用

本節では、Fig. 3.1 に示す溶接条件で、基礎的な溶接問

題であるビードオンプレート溶接問題に重合メッシュ法を適用し、熱弾塑性解析を行った。

ここで、ローカルモデルにおける温度場の取り扱いについて、グローバルモデルが持つ温度場をローカルモデルに付与することで解析を行った。

Fig.3.1 に示すビードオンプレート問題において、その対称性を考慮して、1/2 モデルで解析を行った。そのグローバルモデル、ローカルモデル、そして参照用モデルを Fig.3.2 に示す。(a)グローバルモデルは、要素数：400 節点数：693 であり、詳細な要素分割が必要な溶接部近傍も比較的粗く要素を分割している。(b)ローカルモデルは、要素数：1,800 節点数：1,248 であり、形状は 100×20×10(mm) である。このローカルモデルをグローバルモデルの溶接部を覆うように重合させる。最後に(c)は提案手法の参照解として用意したモデルであり、ローカルモデルと同サイズの要素を使用している。要素数：2,418 節点数：3,400 であり、モデル全体を詳細に要素分割している。また、同図(a), (b)において、溶接線方向の要素分割はそれぞれ、20、39 分割であり、グローバルメッシュとローカルメッシュを重ね合せた際、両メッシュにずれが生じるよう生成した。これは、重合メッシュ法により、両メッシュのメッシュパターンを同じにする必要はなく、独立して自由にメッシュを生成できるため、メッシュ生成における

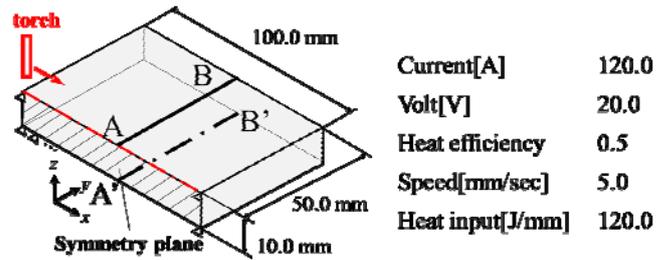


Fig. 3.1 Bead-on-plate welding and welding condition

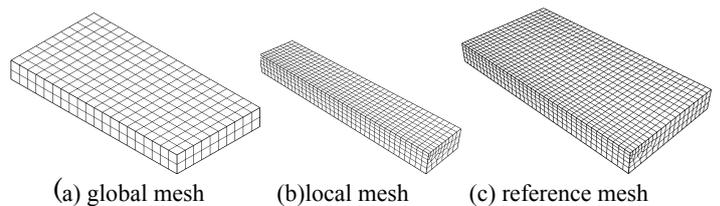


Fig.3.2 Reference model, global model, and local mode

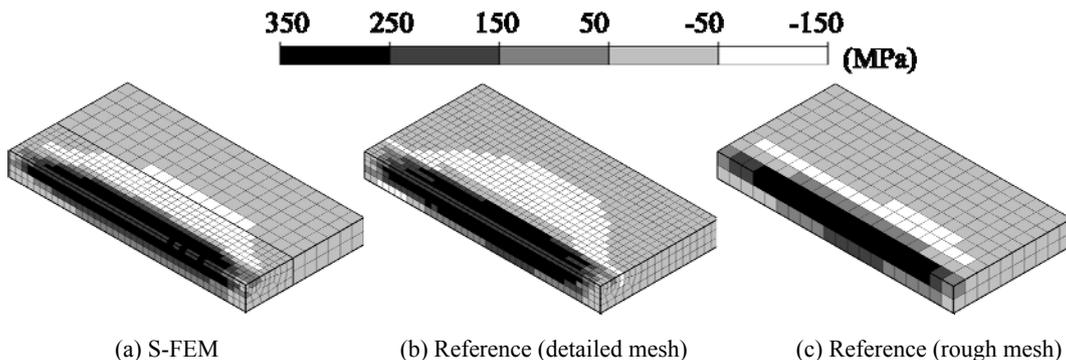


Fig.3.3 Comparison of stress  $\sigma_x$

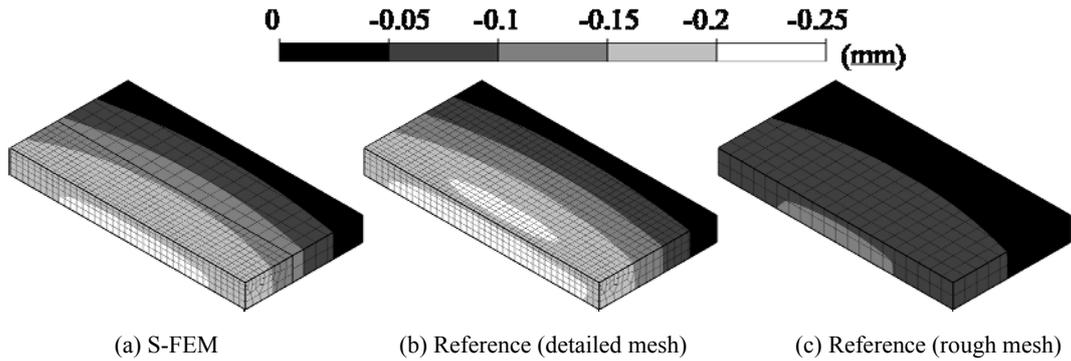


Fig.3.4 Comparison of displacement in the z direction

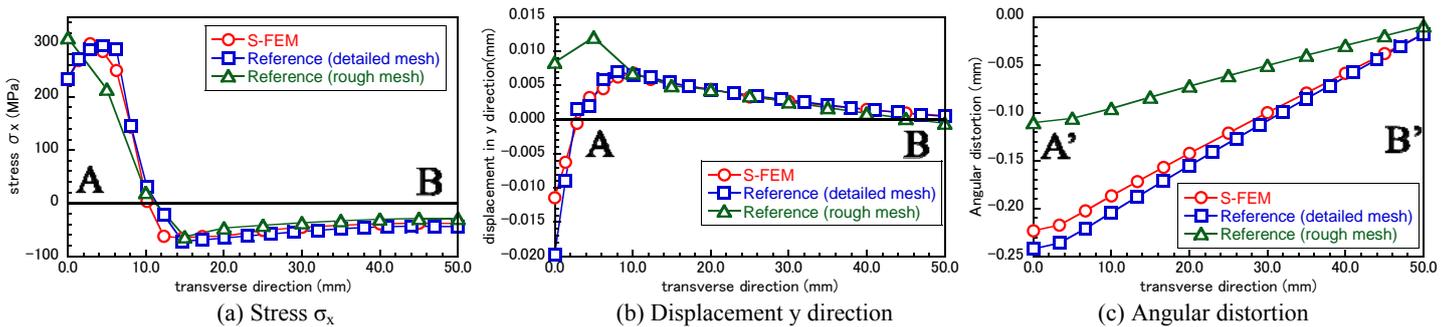


Fig.3.5 Comparison of proposal technique and previous method

柔軟性は格段に飛躍すると言える。

次に、重合メッシュ法を用いた熱弾塑性解析結果と参照解の熱弾塑性解析結果において、溶接線方向応力と z 方向変位を Fig. 3.3, 4 にそれぞれ示す。(a)は重合メッシュを用いた熱弾塑性解析による解、(b)は詳細に要素分割したメッシュでの参照解、そして、(c)は比較的粗く要素分割したメッシュでの参照解である。(b)、(c)は参照解として、静的陰解法 FEM による結果であり、それぞれ Fig.3.1(c)、(a)を用いた解析となる。同図より、提案手法と詳細メッシュにおける従来手法の解析結果が定性的に一致していることが確認できる。また、比較的粗い要素分割の結果では、他の解析結果と大きく異なることが確認できる。同図(a)で用いたグローバルメッシュと(c)で用いた粗いメッシュは同じメッシュであるが、詳細な要素分割のローカルメッシュを重ねあわせることで、解の精度が向上するのが確認できる。そして、Fig. 3.4(a) より、グローバルモデルとローカルモデルとの境界では、両者を重ね合っているため、メッシュパターンが不連続になっているが、z 方向変位は連続であることが確認できる。このことは本手法により、グローバルモデルとローカルモデルとの整合性を考慮しなくても、熱弾塑性解析が可能であることを示している。さらに、溶接中央断面における溶接線方向応力、y 方向変位、角変形において、開発手法と参照解との比較を Fig.3.5 に示す。○は重合メッシュを用いた熱弾塑性解析による解、□は静的陰解法 FEM による詳細な要素分割メッシュの参照解、そして、△は静的陰解法 FEM による比較的粗い要素分割メッシュの参照解である。溶接線方向応力、y 方向変位は、Fig. 3.1 に示す AB 上の値、角変形は A'B' 上の値を表している。同図より、提案手法と詳細メッシュにおける従来手法における残留応力・変形ともに定量的に一致していることが確認でき

る。また、比較的粗い要素分割の結果でも、他の解析結果と大きく異なり、詳細な要素分割のローカルメッシュによって解の精度が向上することが確認できる。

以上より、参照解と比べ開発手法の溶接残留応力および溶接残留変位が定性的、定量的に一致していることから、メッシュ生成のコストを抑えることのできる重合メッシュ法を熱弾塑性問題へ適用が可能であることを示した。

#### 4. 結 言

本研究ではメッシュ生成コストを軽減することを目的とし、重合メッシュ法を用いた熱弾塑性解析 FEM の提案を行った、そして、本開発手法を基礎的な溶接問題に適用した結果、以下の知見を得た。

- 1) 重合メッシュを用いた熱弾塑性解析 FEM によって、実用的な溶接問題の解析をすることが可能となった。
- 2) 重合メッシュを用いた熱弾塑性解析 FEM による残留応力、残留変形解析結果を陰解法 FEM 解析結果とほぼ同等の精度で解析を行うことが可能であることを示した。
- 3) グローバルモデルとローカルモデルとの整合性を考慮せずに、熱弾塑性解析が可能であることを示した。

#### 参 考 文 献

- 1) J. Fish and S. Markolefas: Adaptive global-local refinement strategy based on the interior error estimates of the h-method, Int. J. Numer. Meth. Engrg, 37, 827-838(1994)
- 2) J. Fish.: The s-version of the finite element, Computer & Structures, Vol.43, No.3, 539-547(1992)

