

分離反復連成解法による 大規模破壊力学シミュレーション

遊佐泰紀

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

学籍番号: 37-106368

受験番号: 236001

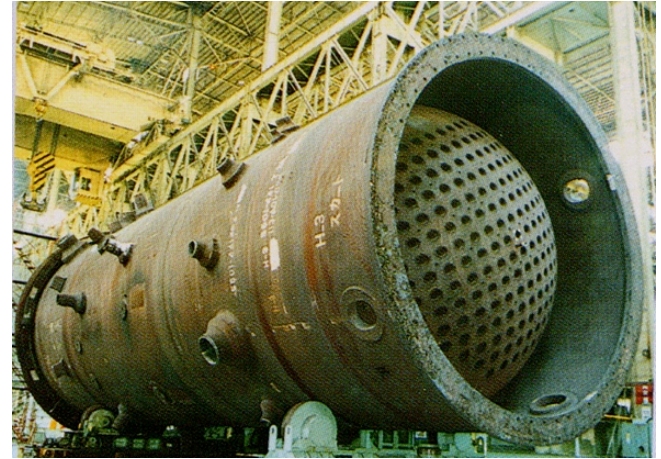
指導教員: 吉村忍, 教授

アウトライン

- 背景
- 提案手法: 分離反復連成解法
 - 既存手法との立ち位置の比較
 - アルゴリズムと実装
- 数値実験: 三次元疲労き裂進展解析
 - 分離反復連成解法の反復特性
 - 既存手法との精度の比較
 - 既存手法との計算時間の比較
- 結論
- 博士後期課程の研究計画

複雑形状構造物に発現する複雑な現象

- 現実の構造物は複雑形状
 - スーパーコンピュータや PC クラスタを用いた大規模解析
- 発現する現象も複雑
 - 破壊現象
 - 弾塑性・クリープなどの材料非線形現象
 - 大変形・大ひずみなどの幾何学非線形現象
 - 接触・摩擦などの境界非線形現象
 -



BWR 圧力容器 (IHI ウェブサイトより)



Boeing 787 のエンジン (Aerospaceweb.org より)

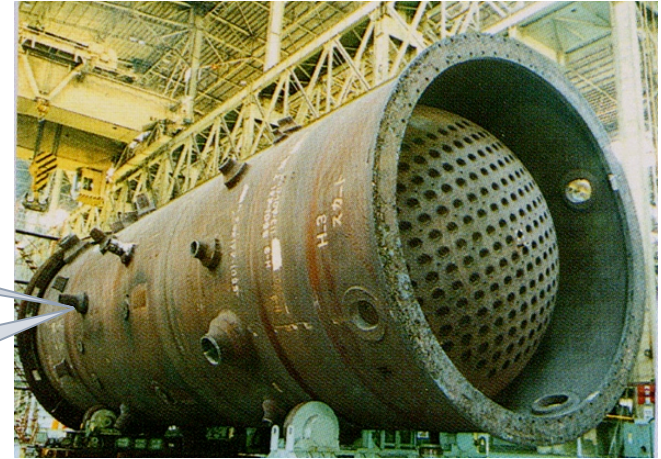
局所的に発現する現象

- いくつかの重要な現象は局所的に発現する。

- 破壊
- 弾塑性
-

き裂先端近傍

構造不連続部



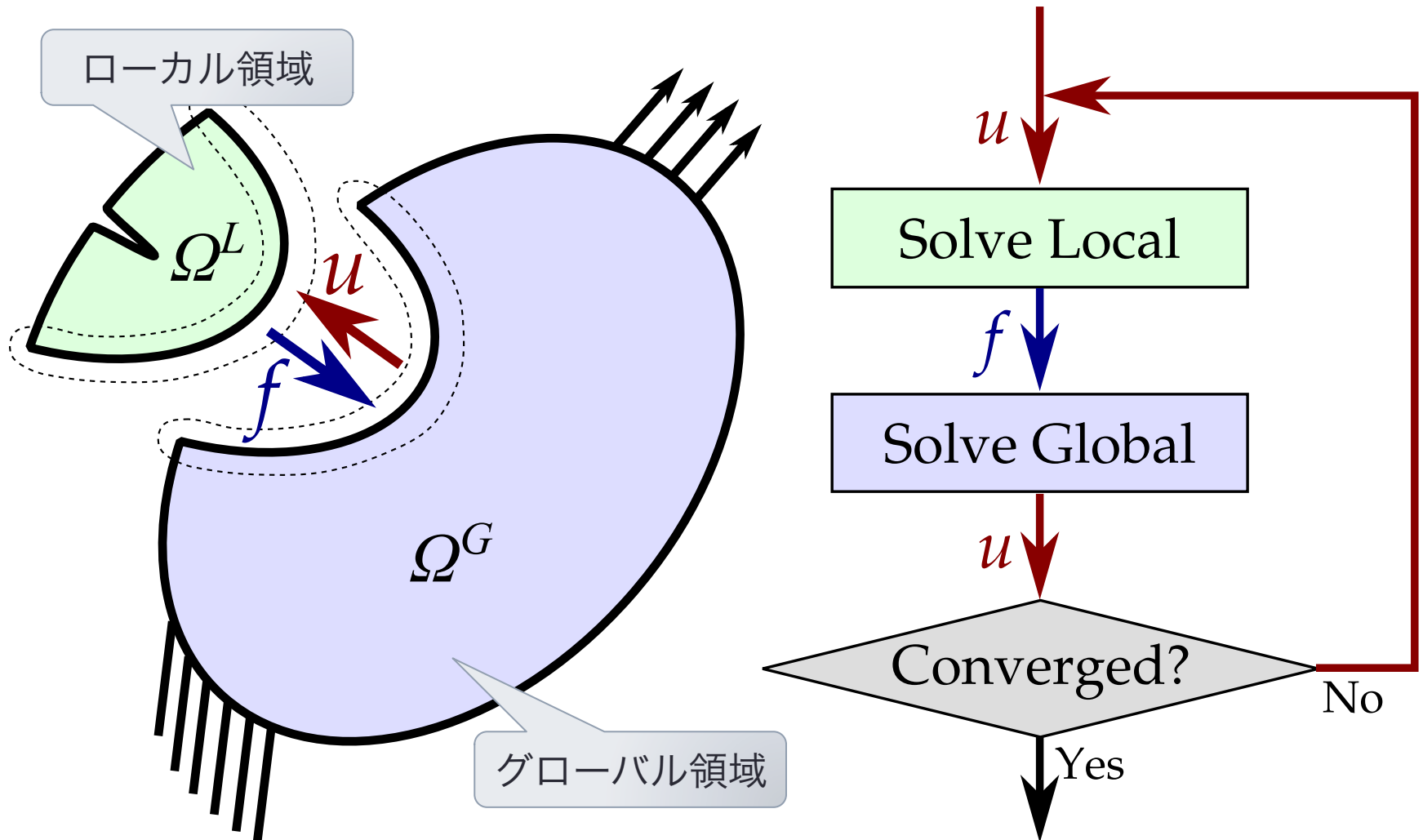
BWR 圧力容器 (IHI ウェブサイトより)

- このような問題に適した数値解法を提案し、解析例として破壊力学解析を行う。

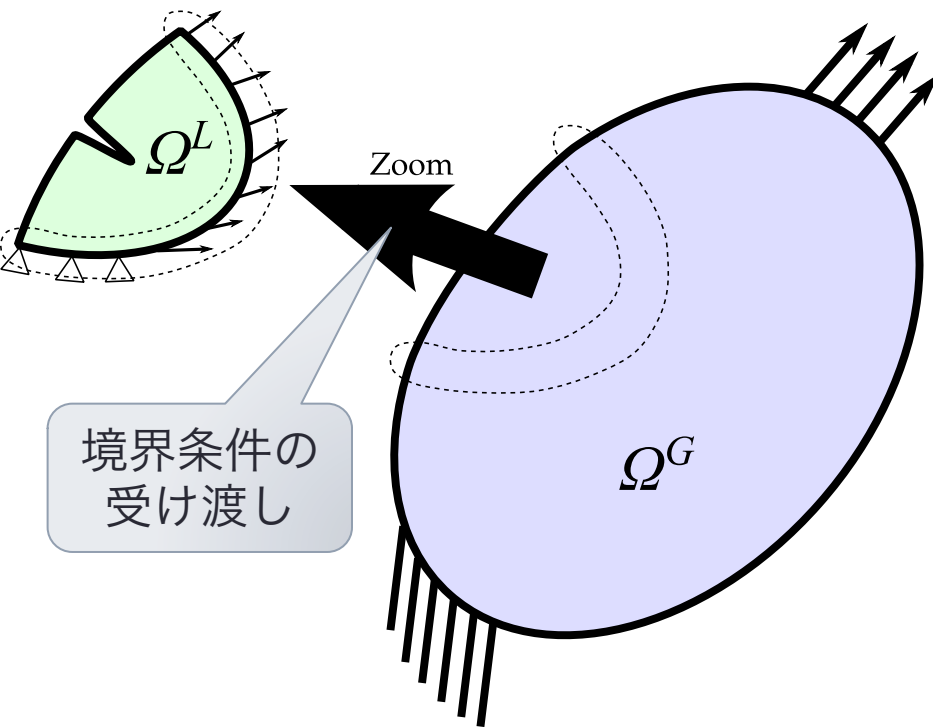


Boeing 787 のエンジン (Aerospaceweb.org より)

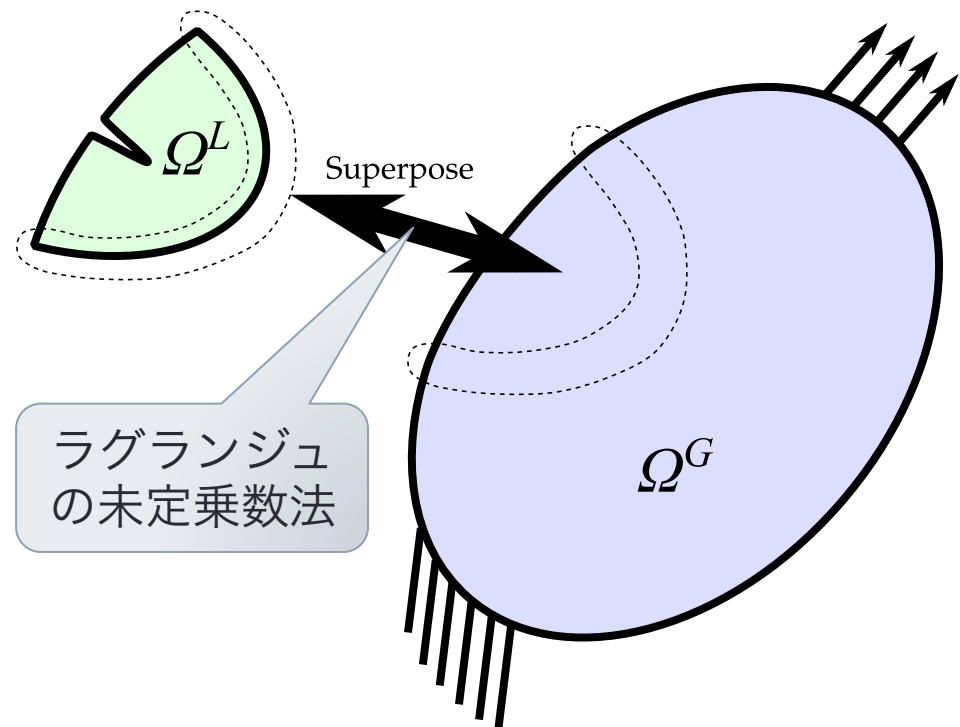
分離反復連成解法の概要



大規模破壊力学解析の既存手法

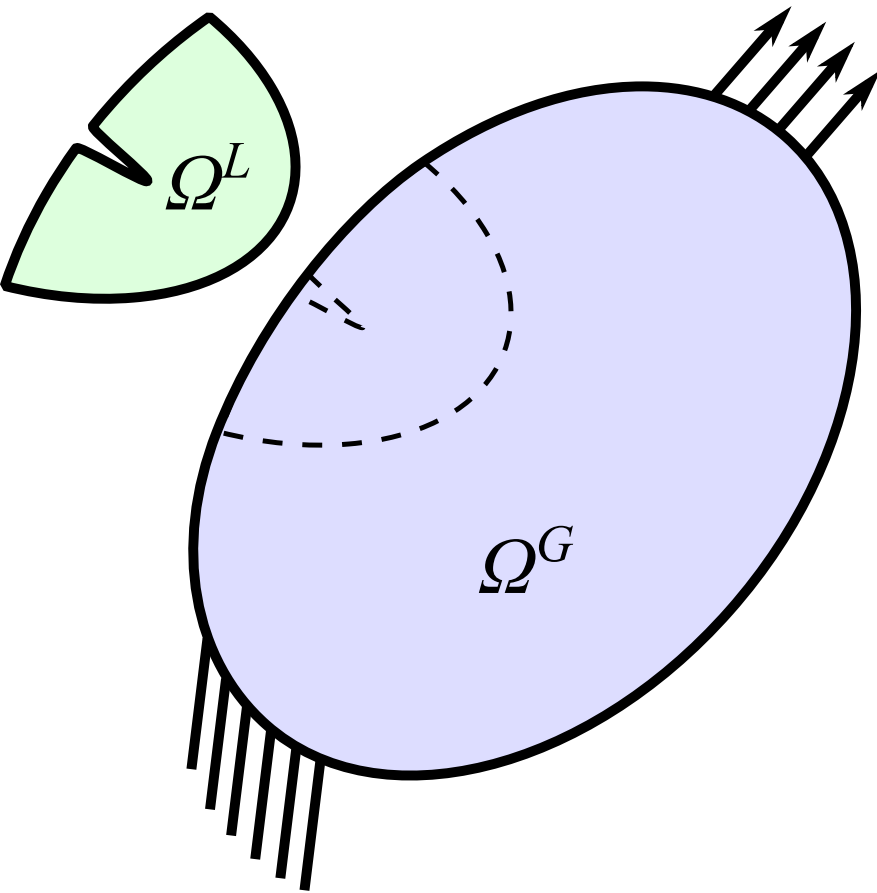


ズーミング法

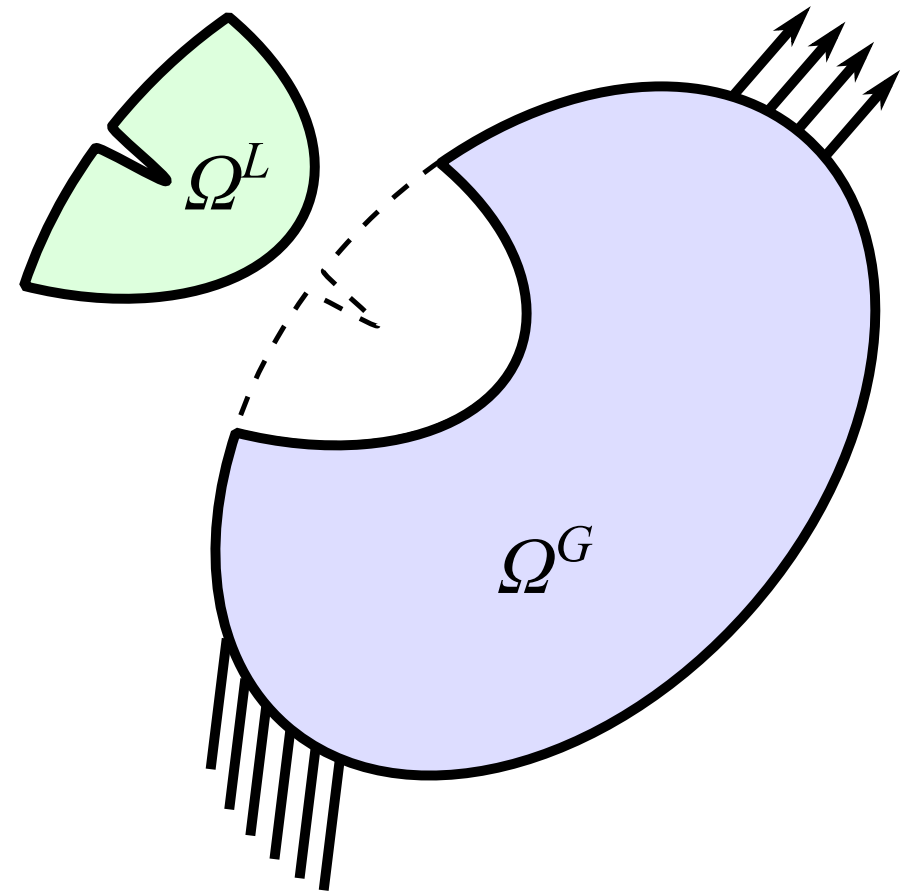


重合メッシュ法

モデルの空間的分割方法の違い

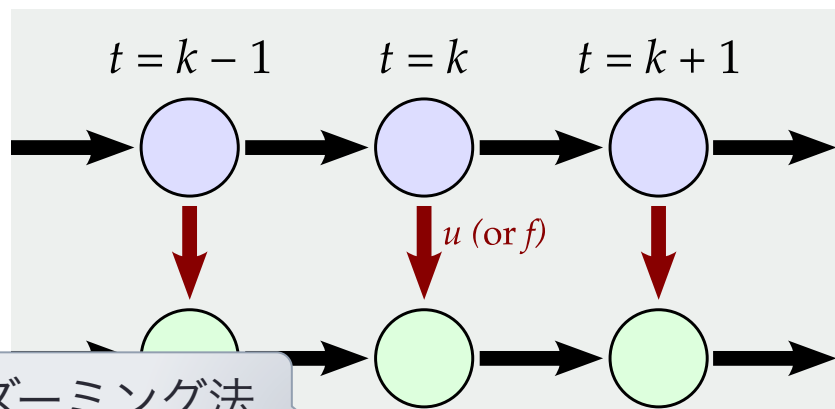


Overlapping 型の分割
(ズーミング法、重合メッシュ法)

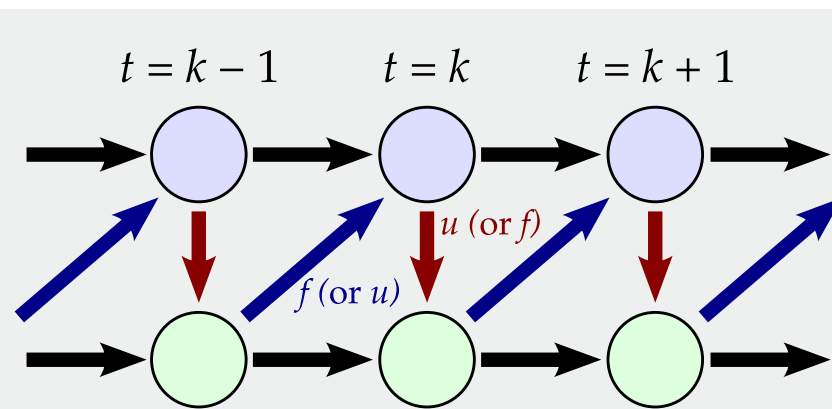


Non-overlapping 型の分割
(本手法)

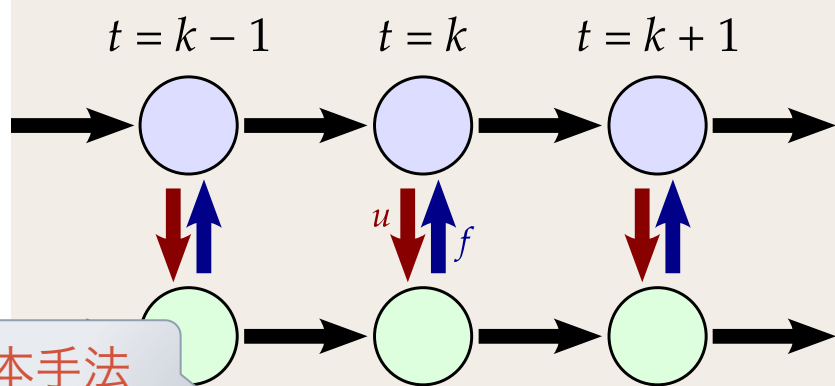
マルチフィジックス連成解析の視点での 大規模破壊力学解析手法の分類



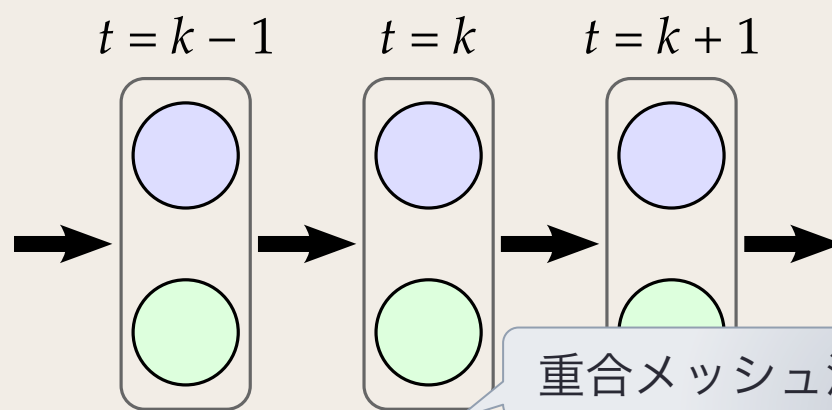
分離型片方向解法



分離型双方向時差解法



分離型双方向反復解法



一体型解法

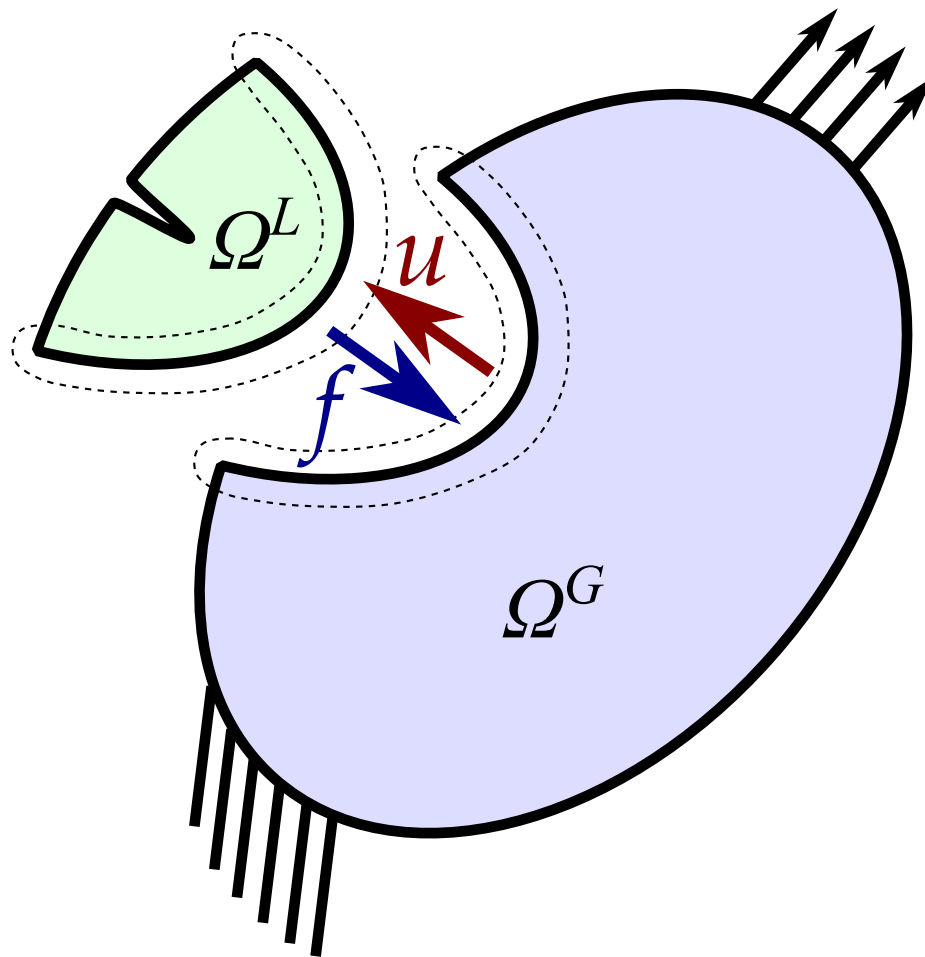
大規模破壊力学解析手法の立ち位置

		Overlapping (領域が重なり合う)	Non-overlapping (領域が重なり合わない)	
分離型	片方向	ズーミング法	N/A	弱連成
	双方向 時差	N/A	N/A	
	双方向 反復	重合メッシュ法を反復法 で解く解法 [鈴木ら (1999)]	本手法	強連成
一体型		重合メッシュ法	(通常の有限要素法)	

本手法と既存手法の違い

- **ズーミング法**
 - 精度 Δ 経験に依存
 - 計算時間 \odot
- **重合メッシュ法**
 - 精度 \bigcirc
 - 計算時間 Δ ただし、剛性行列が悪条件なので大規模化困難
- **通常の有限要素法による詳細解析**
 - 精度 \bigcirc
 - 計算時間 Δ
- **分離反復連成解法**
 - 精度 \bigcirc ズーミング法よりも高精度
 - 計算時間 \bigcirc 通常の有限要素法よりも高速、かつ大規模化容易

Aitken 補外による動的緩和付きブロック Gauss-Seidel 法のアルゴリズム



$$k \leftarrow 0; \omega^{(0)} \leftarrow 0.1; \mathbf{u}^{(0)} \leftarrow \mathbf{0}; \mathbf{f}^{(0)} \leftarrow \mathbf{0}$$

$$\tilde{\mathbf{u}}^{(0)} \leftarrow K_G(\mathbf{f}^{(0)}); \mathbf{r}^{(0)} \leftarrow -\tilde{\mathbf{u}}^{(0)}$$

while $\|\mathbf{r}^{(k)}\| / \|\mathbf{r}^{(0)}\| > \tau$ do

$$\mathbf{f}^{(k+1)} \leftarrow K_L(\mathbf{u}^{(k)})$$

ローカル解析

$$\tilde{\mathbf{u}}^{(k+1)} \leftarrow K_G(\mathbf{f}^{(k+1)})$$

グローバル解析

$$\mathbf{r}^{(k+1)} \leftarrow \mathbf{u}^{(k)} - \tilde{\mathbf{u}}^{(k+1)}$$

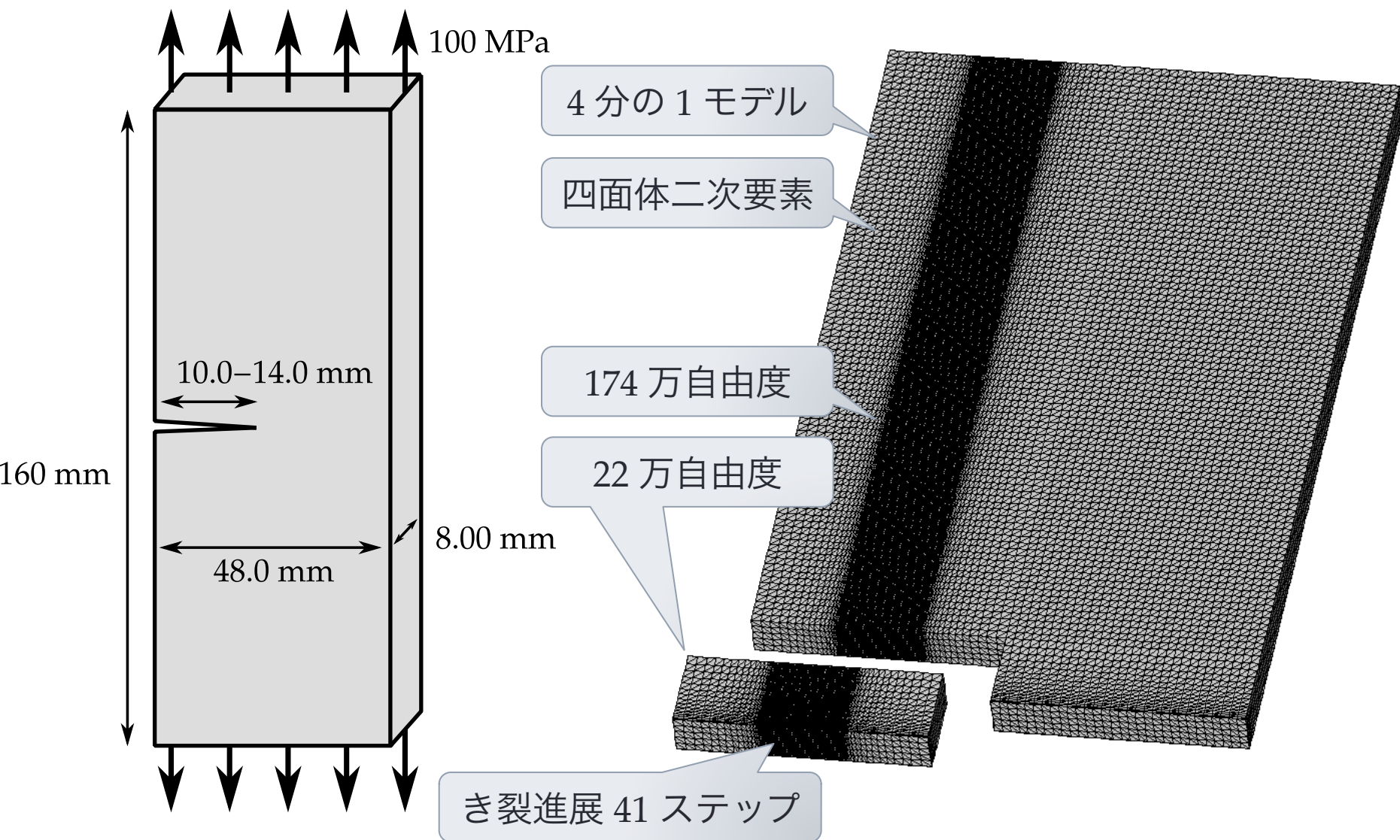
$$\omega^{(k+1)} \leftarrow -\omega^{(k)} \frac{\mathbf{r}^{(k)\top} (\mathbf{r}^{(k+1)} - \mathbf{r}^{(k)})}{\|\mathbf{r}^{(k+1)} - \mathbf{r}^{(k)}\|^2}$$

$$\mathbf{u}^{(k+1)} \leftarrow \mathbf{u}^{(k)} - \omega^{(k+1)} \mathbf{r}^{(k+1)}$$

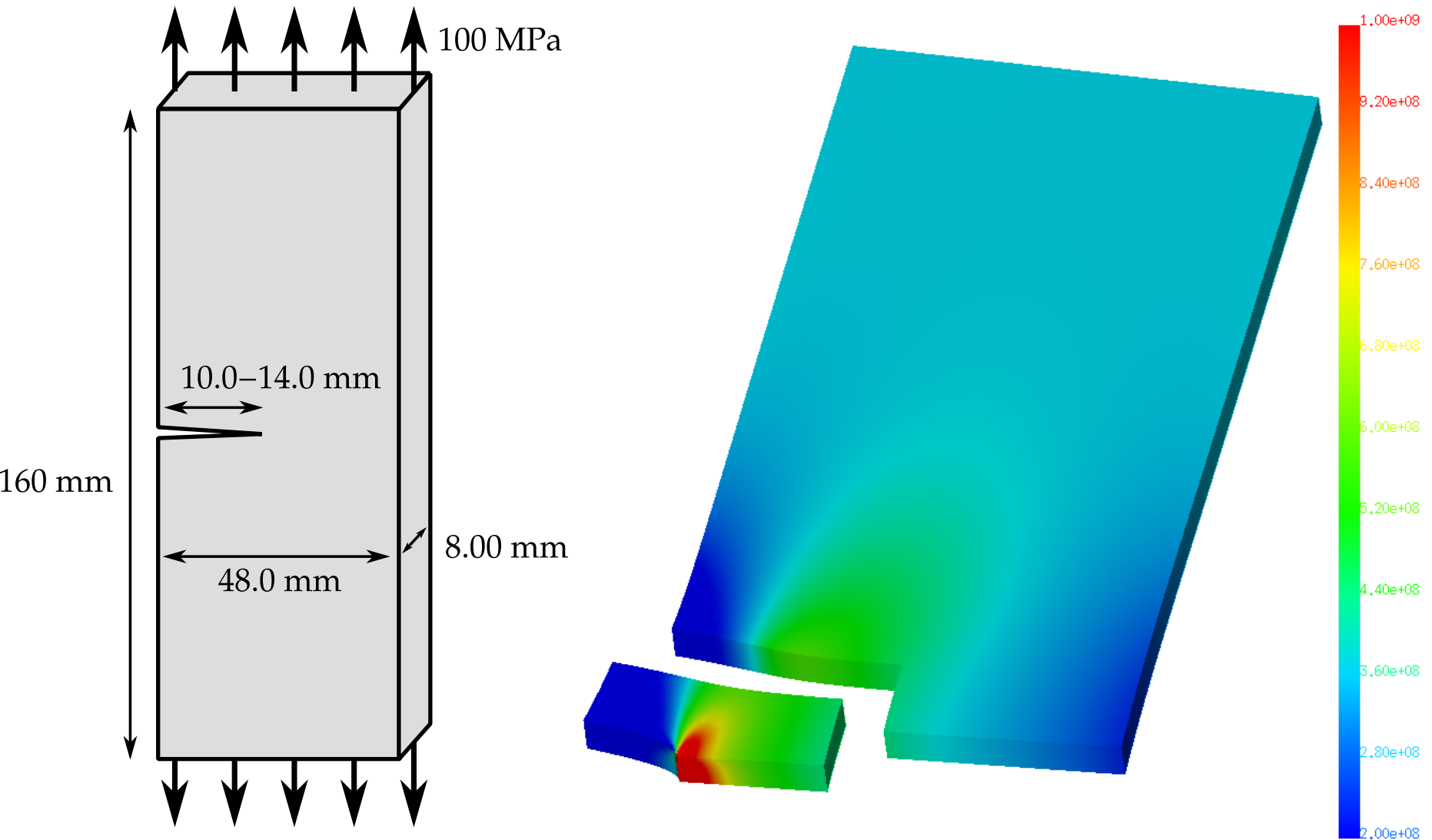
$$k \leftarrow k + 1$$

end while

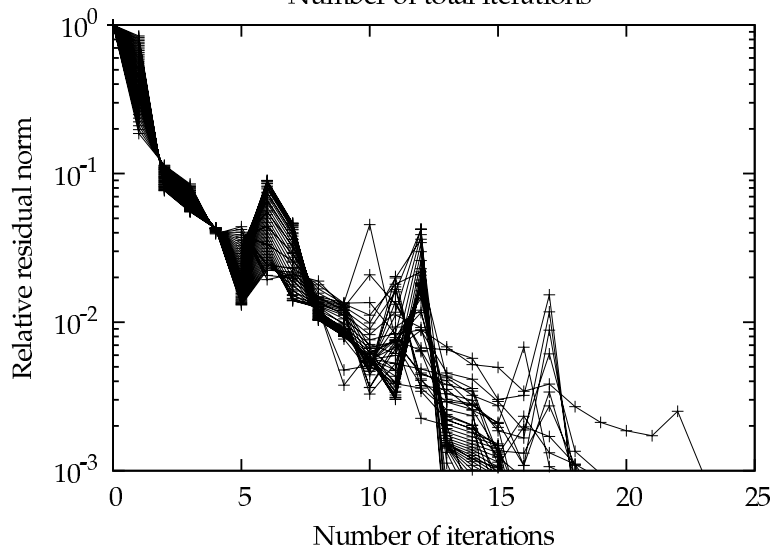
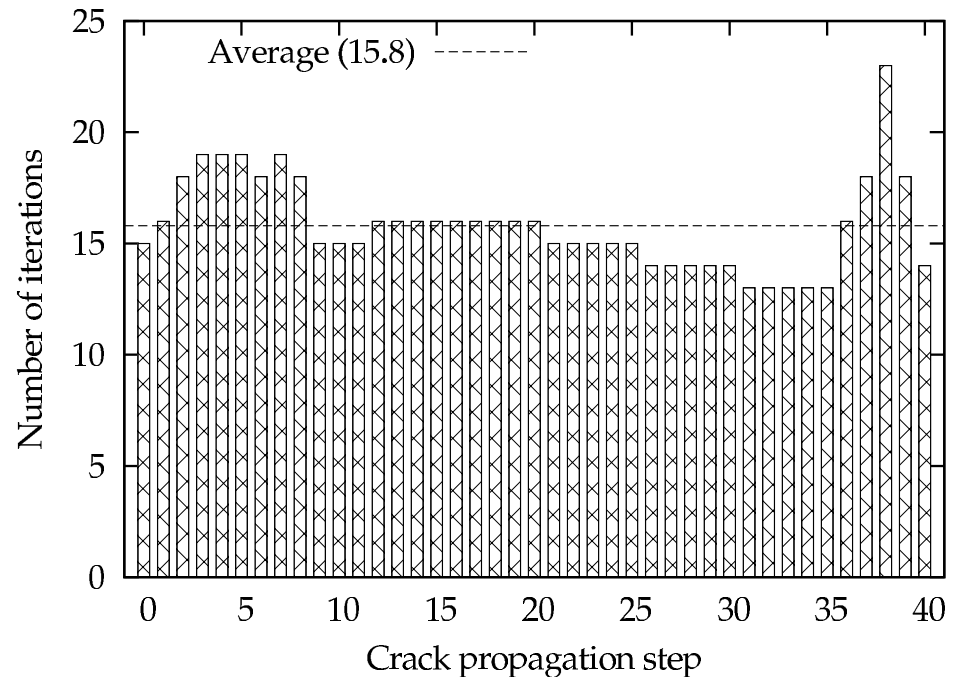
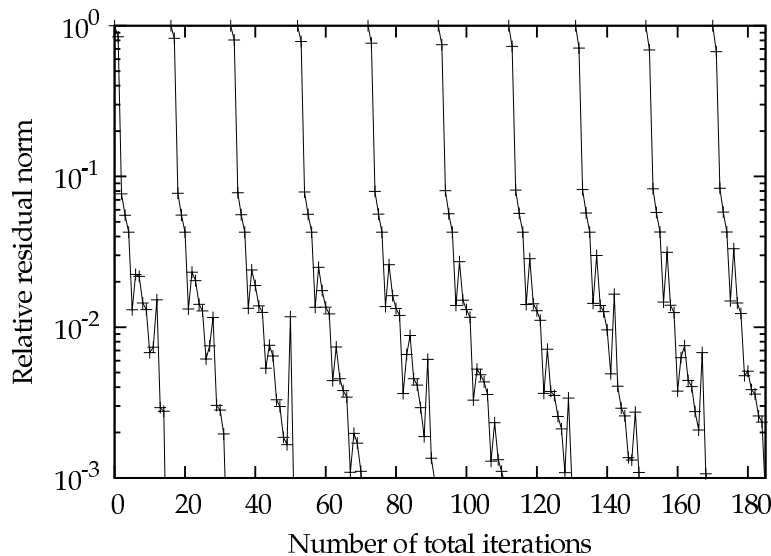
196 万自由度の疲労き裂進展解析



最初のき裂進展ステップの計算結果



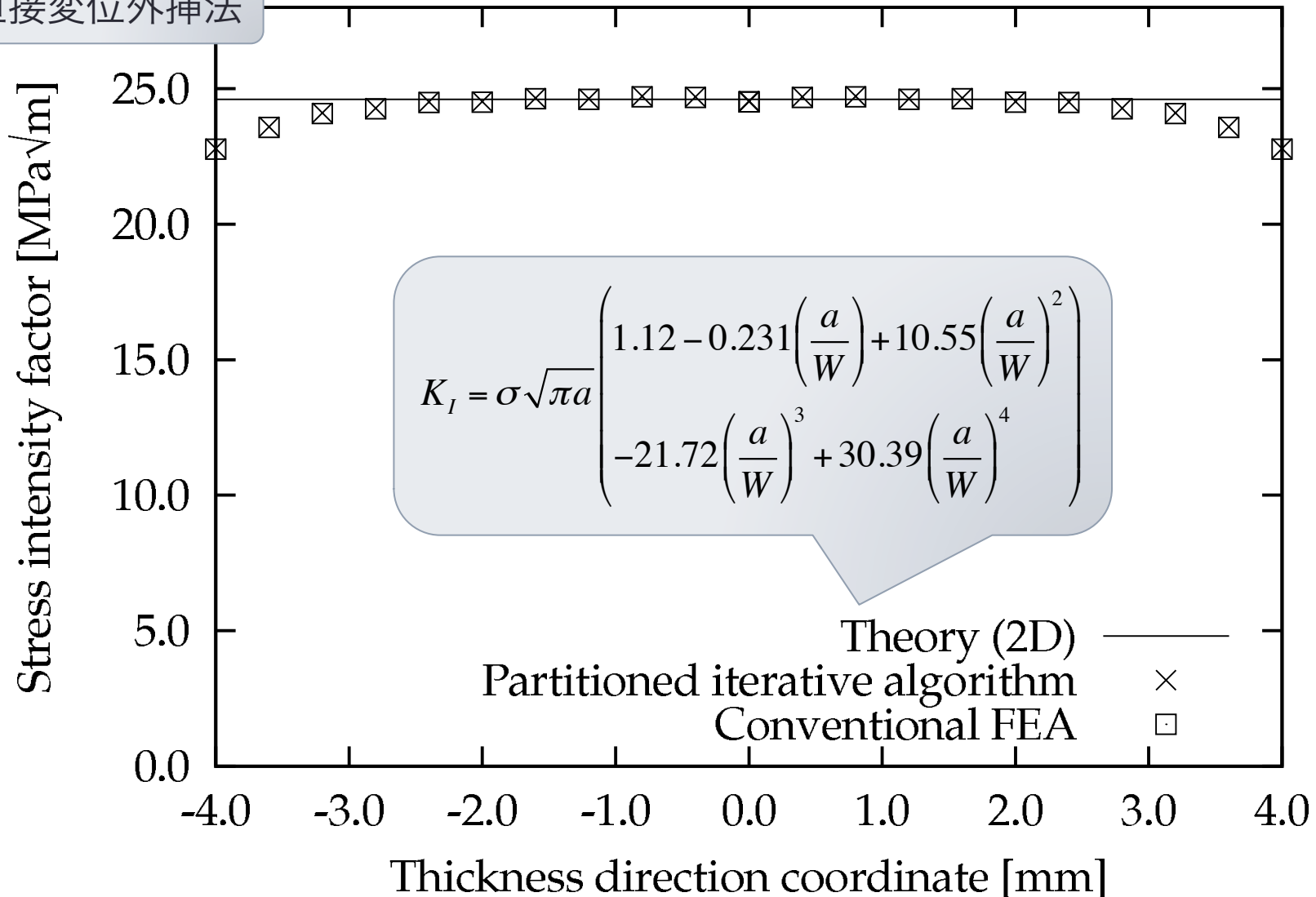
分離反復連成解法の反復特性



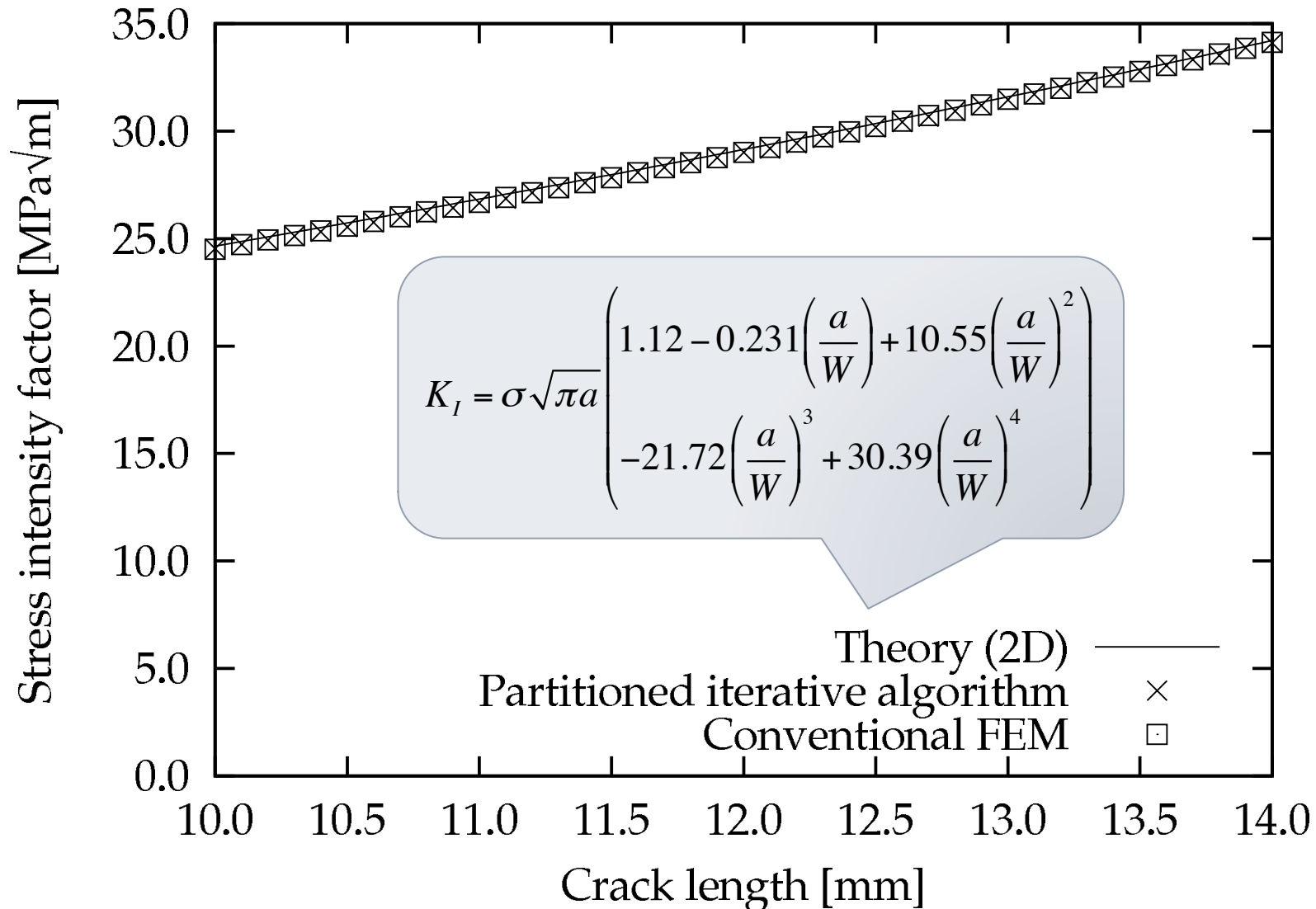
- き裂長に関わらず概ね同じ反復回数で収束した。
- 反復回数は平均 15.8 であった。

応力拡大係数による精度比較 (1/2)

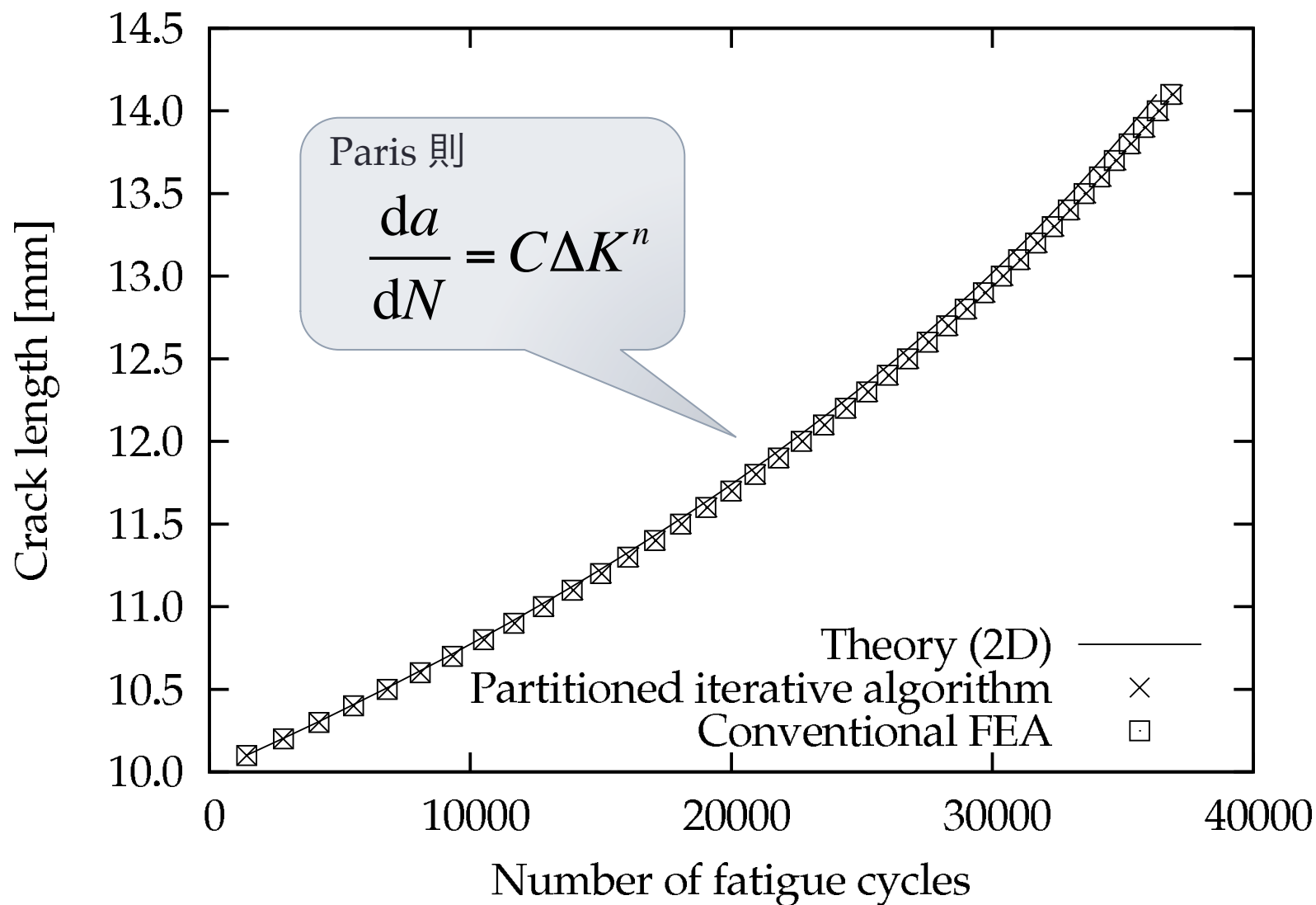
直接変位外挿法



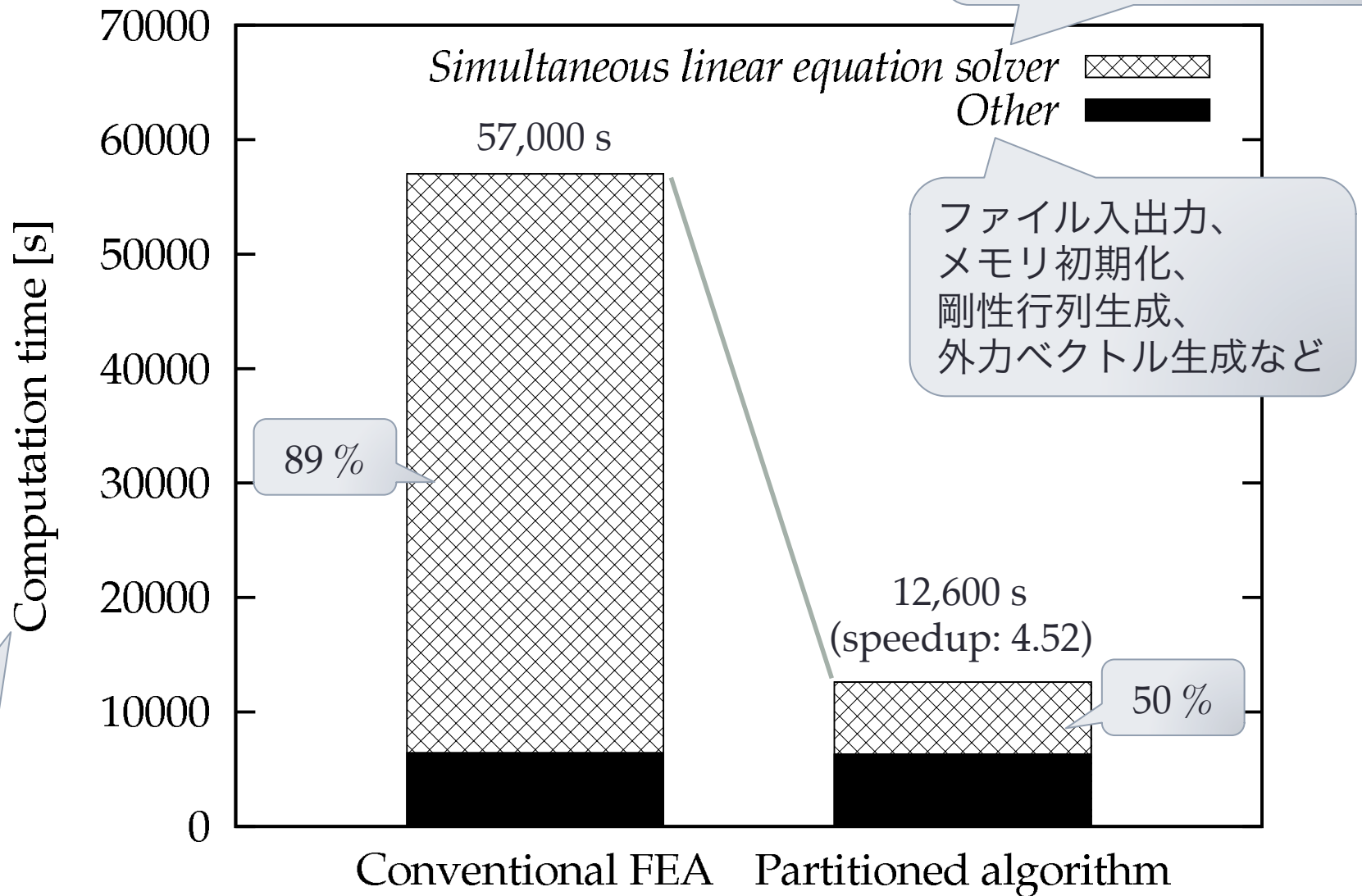
応力拡大係数による精度比較 (2/2)



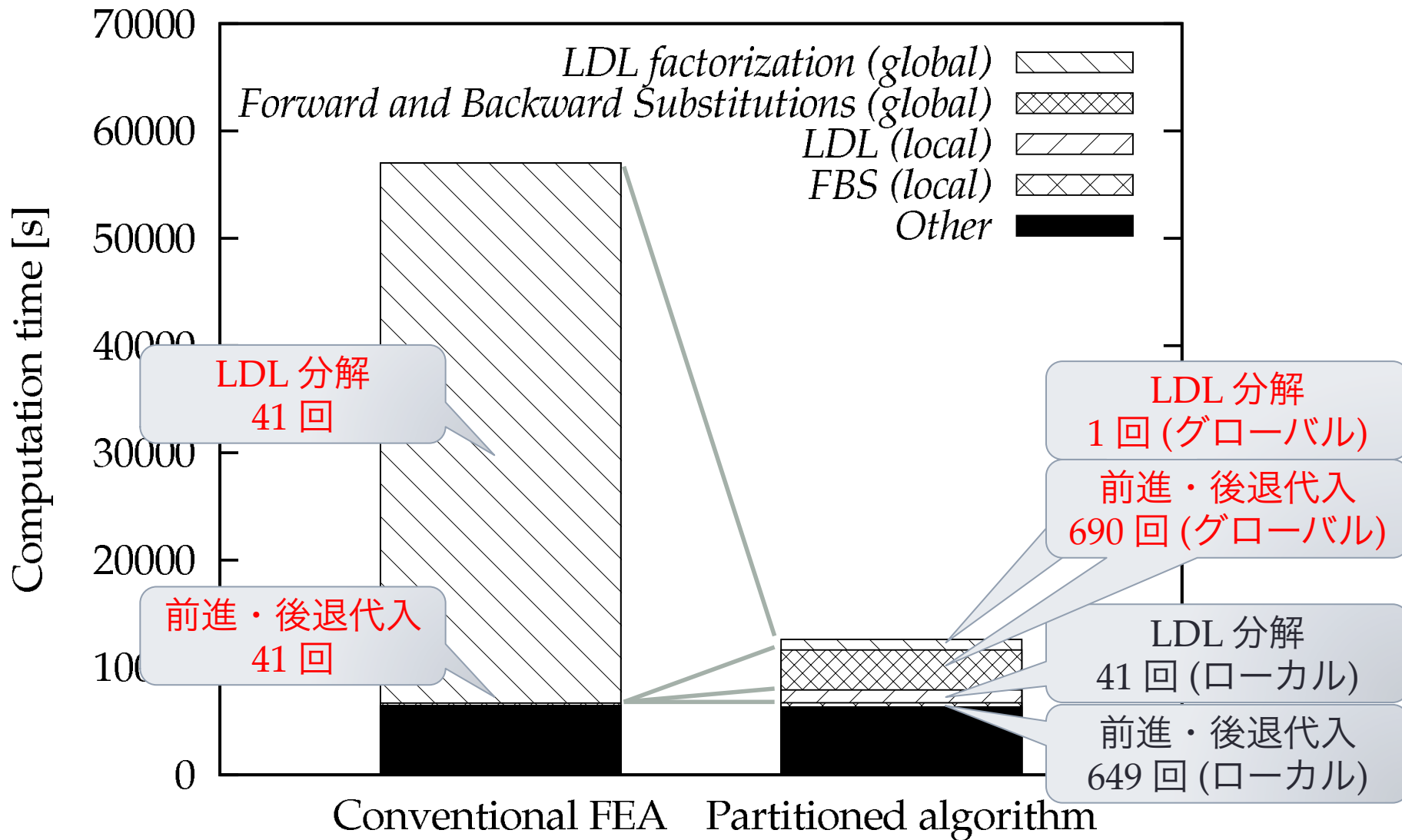
疲労サイクル数による精度比較



計算時間の比較 (1/2)



計算時間の比較 (2/2)



結論

- 大規模破壊力学問題に適した解法として分離反復連成解法を提案した。
 - 局所的な煩雑さを全体から分離できる。
- 196 万自由度の疲労き裂進展解析例では、通常の有限要素解析と同等の精度で 4.52 倍高速化した。
- グローバル領域の剛性行列が悪条件にならないので、大規模化しやすい解法であると考えられる。

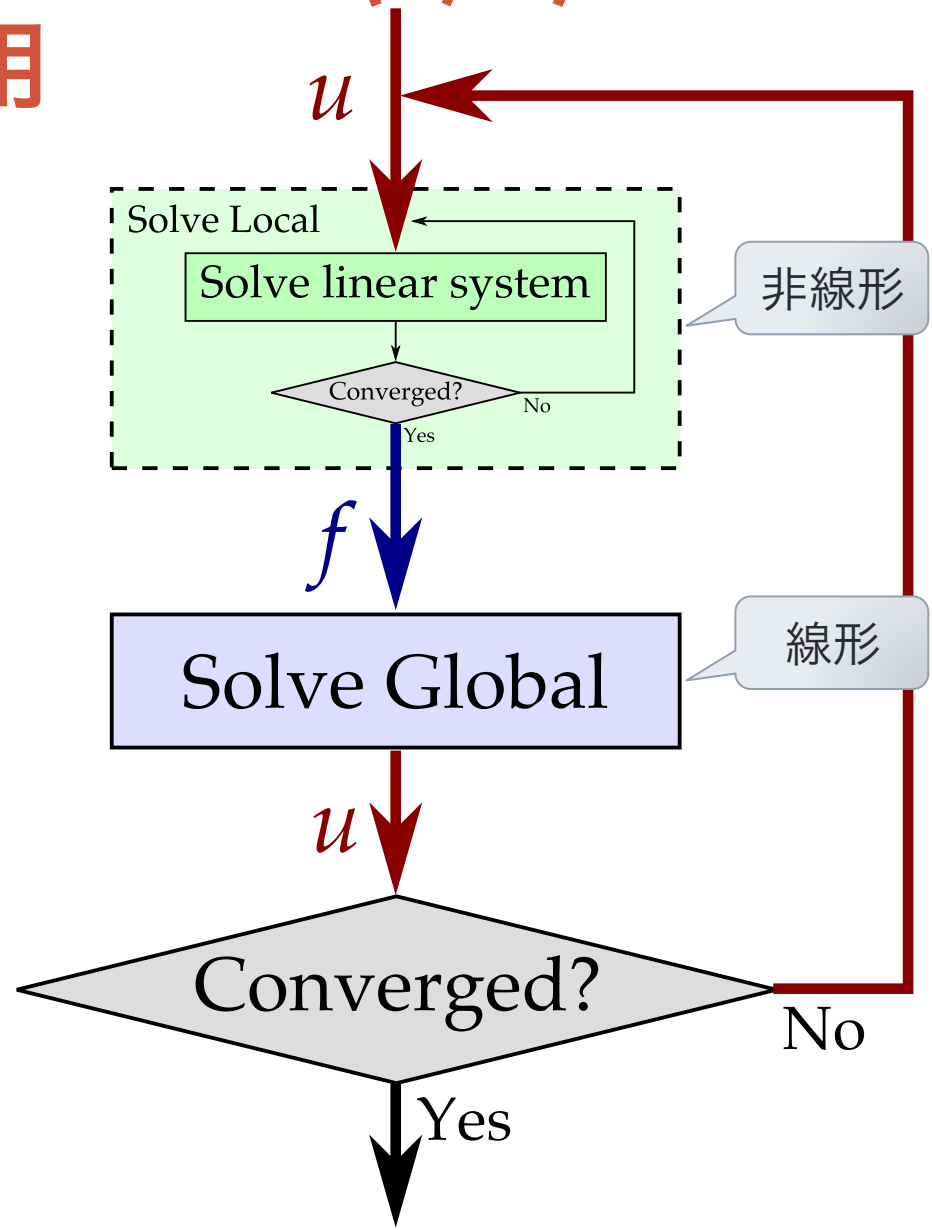
博士後期課程での研究構想 (1/2): き裂進展解析の高度化

- 計算破壊力学の分野では、より現実に近い形状のき裂の解析が行われている。
 - 破壊力学パラメータ (応力拡大係数) やき裂進展方向の評価の高度化
 - き裂進展に伴うメッシュ再分割の高度化



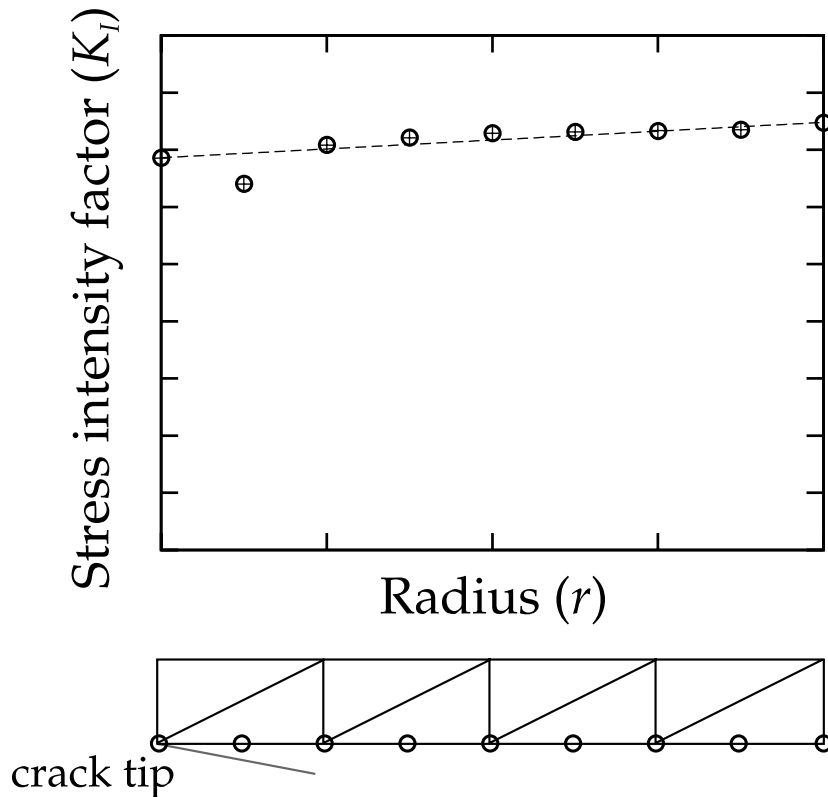
博士後期課程での研究構想 (2/2): 非線形問題への応用

- 非線形性問題に分離反復連成解法を応用する。
 - 弾塑性
 - 弾塑性き裂進展
- 増分解析や Newton-Raphson 反復がローカル領域に限定される。
- アルゴリズムは二重のループ構造になる。



直接変位外挿法による応力拡大係数評価

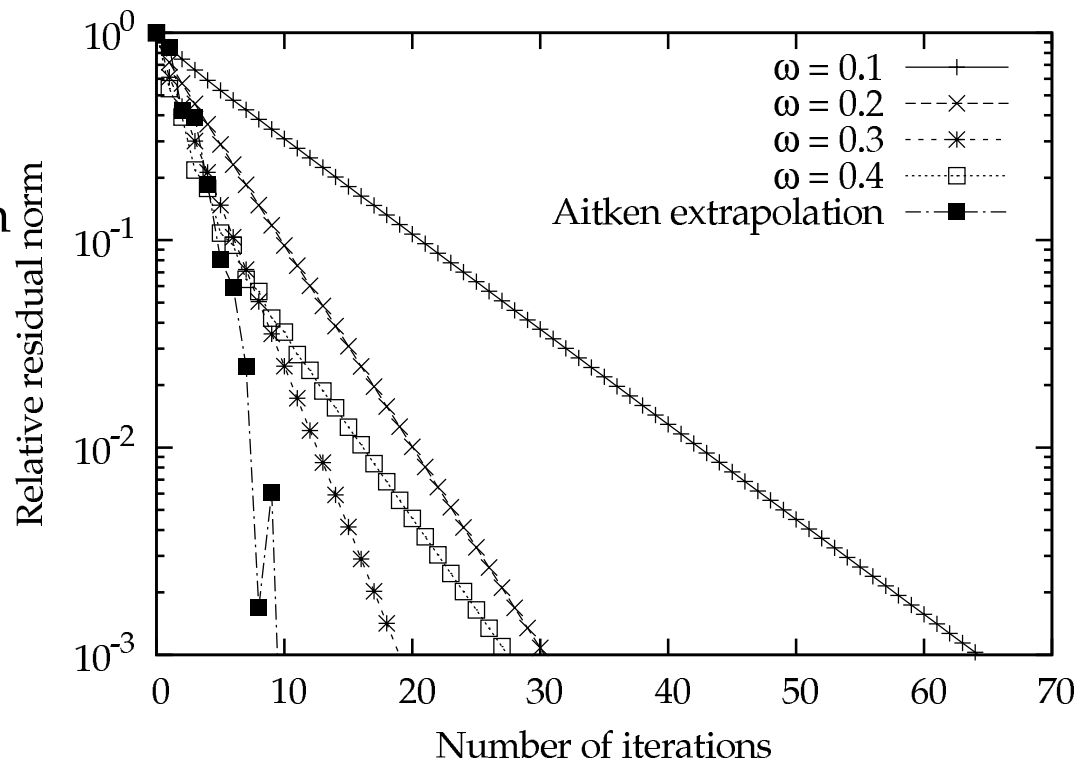
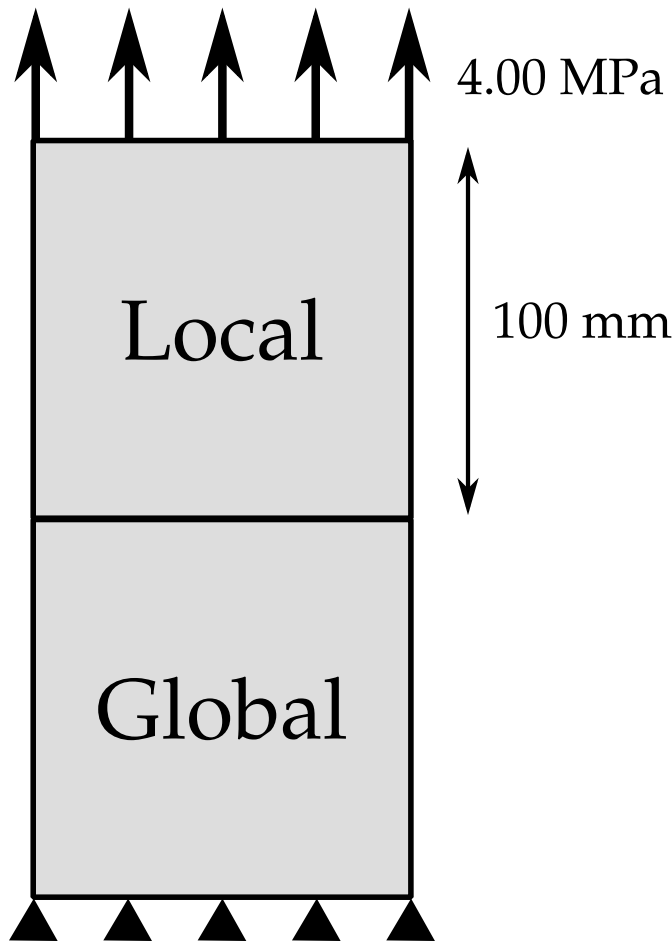
- き裂先端近傍の節点変位から応力拡大係数を求め、外挿してき裂先端の応力拡大係数を求める。



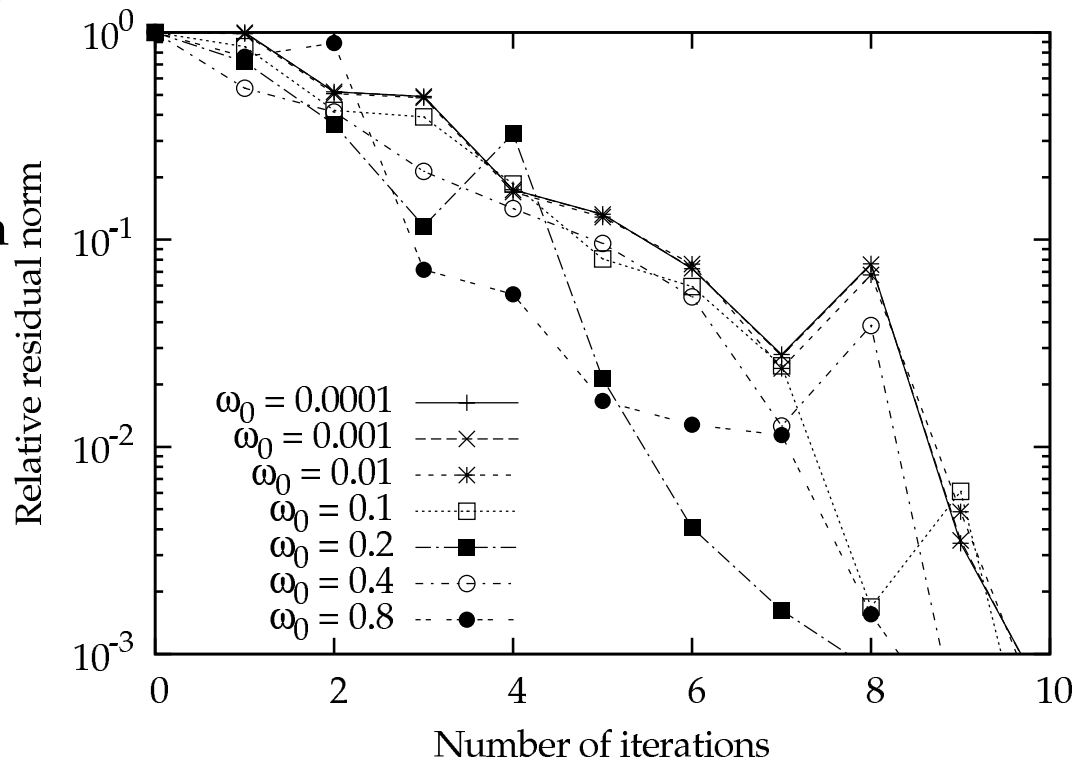
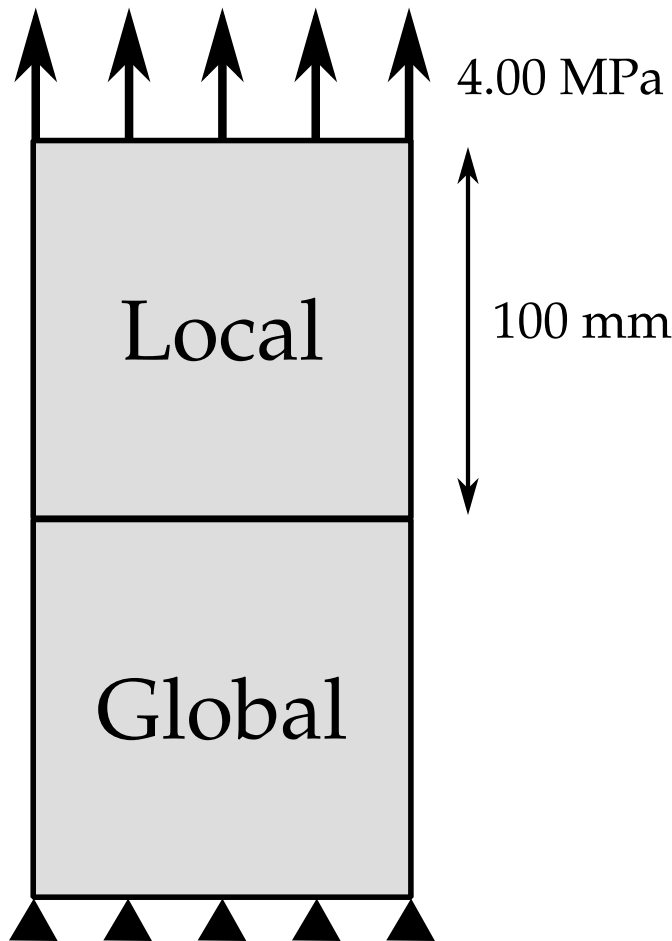
$$u_y = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

where $\theta = \pi$

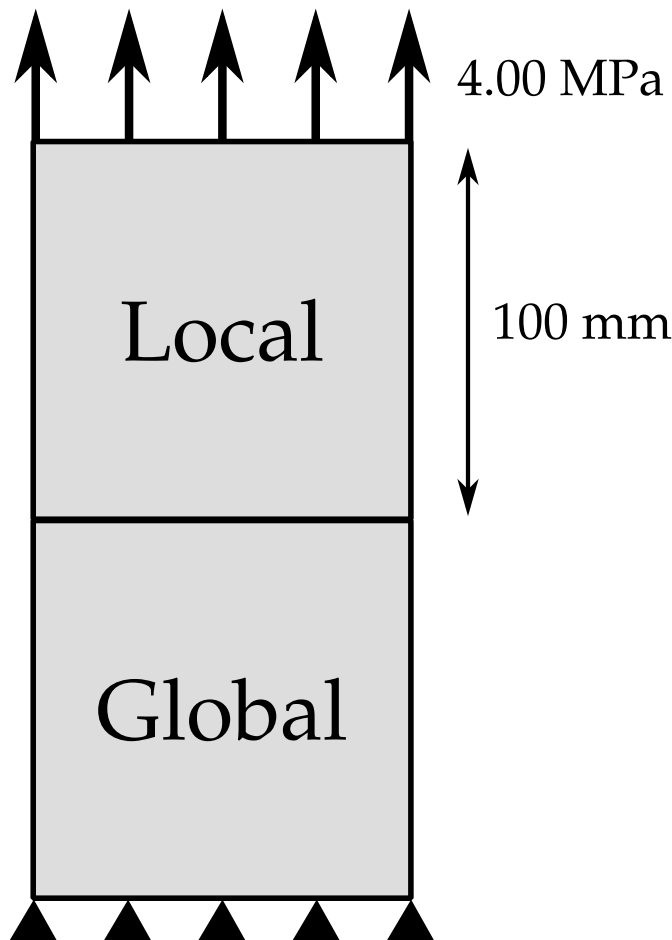
緩和係数を変化させたときの反復回数



Aitken 補外の初期緩和係数を変化させたときの反復回数



問題自由度を変化させたときの反復回数



一辺の要素分割数	総自由度	反復回数
1	36	6
2	100	10
4	324	10
8	1,156	10
10	1,764	10
20	6,724	8
40	26,244	10
80	103,684	10
100	161,604	10

ズームニング法による解析例

