

AI手法によるメッシュ生成システムと鍛造変形解析ソルバーの統合

中西広吉，高田修，堀之内成明，矢野裕司，明石忠雄，松岡直樹

A Knowledge-Based Mesh Generation System for Forging Simulation

Koukichi Nakanishi, Osamu Takata, Nariaki Horinouchi,
Hiroshi Yano, Tadao Akashi, Naoki Matsuoka

要 旨

数値解析作業にはメッシュ生成，解析，解析結果の評価の3つのプロセスがある。このうち，メッシュ生成プロセスは，質の良いメッシュ生成のために，対象分野の多くの経験や知識と多くの工数を必要とする。特に，鍛造加工時の変形解析では，変形に伴うメッシュのつぶれなどの問題を回避するため，変形途中でのリメッシングが多数回必要となり，メッシュ生成の自動化は不可欠である。

そこで，本研究では，車体空力解析，エンジン筒内流解析，塑性変形解析におけるメッシュ生成のプロセスを分析した。その結果，各分野において個々の知識などは異なっているが，基本的な考

え方及び知識の使い方などが同じであることが分かり，共通に使えるツールの構築が可能であると判明した。この分析に基づいて，分野ごとに知識を実装することにより，様々な分野に容易に適用できるメッシュ生成システムの設計を行い，知識ベース処理による2次元メッシュ生成システムを作成した。これと既開発の剛塑性有限要素解析ソルバーとを統合化した鍛造変形解析システムを開発した。本システムの利用により，工程設計者にとってのメッシュレス鍛造変形解析が可能となり，解析作業時間の大幅な短縮がなされ，工程設計期間の短縮に寄与した。

Abstract

We have developed a knowledge-based system for automatically generating two-dimensional meshes, which is easily applicable to various fields of computational dynamics with structured meshes. We analyzed and modeled experts' mesh generation procedures in the simulation processes of forging deformations, vehicle aerodynamics and engine in-cylinder flows. This paper outlines the mesh generation system focusing on the implementation techniques of search and inference, and then shows the functional ability of this system applying to the forging simulation. The characteristics of this system are as

follows. (1) Plural solutions can be efficiently obtained at the same time in the search phase, using the global dependency and local dependency. (2) The meta-level inference method and its knowledge representation method are very applicable to various fields of analyses. In the rigid-plastic deformation analysis, remeshing is needed. We have applied this mesh generation system to forging simulation, and found it promising for practical use. It was clarified that appropriate sub-region shapes and meshes in the deformed workpiece were generated at each stroke.

キーワード

メッシュ生成，人工知能，知識ベース，鍛造，シミュレーション

1. はじめに

設計作業の中で，CAE (Computer Aided Engineering) 技術を適用する範囲は，急激に拡大してきている。CAE技術の主要素として数値解析があり，その一連の作業はメッシュ生成（プリプロセス），解析（計算），解析結果の評価（ポストプロセス）の3つのプロセスからなる。3つのプロセスの中で，メッシュ生成プロセスでは，質の良いメッシュを生成するために，対象分野の経験や知識を多く必要とする。そのため，経験の浅いユーザでは対処することが困難であった。また，熟練したユーザであっても試行錯誤のため多くの工数を要する。従って，メッシュ生成を自動化するニーズは高い。特に，鍛造加工時の変形解析では，初期メッシュ生成だけでなく，変形に伴うメッシュのつぶれなどの問題を回避するために変形途中でのリメッシングが多数回必要となり，自動化は不可欠である。

自動メッシュ生成の研究として，AI (Artificial Intelligence) のアプローチや，数理アルゴリズムによるアプローチによる，いくつかのシステム^{1)~5)}が開発されている。しかし，それらは，AIシステムにおいては，異なる解析手法への拡張性や複雑形状への適用性などに問題がある。また，数理アルゴリズムによるものでは，利用のためのノウハウが必要となる。そのため実用化には至っていない (Fig. 1)。

当所では，車体空力解析，エンジン筒内流解析，塑性変形解析をはじめとする数値解析を行っている。これらの解析におけるメッシュ生成のプロセ

ス进行分析した結果，各分野において個々の知識などは，異なっているが，基本的な処理の流れ，知識の使い方などが同じであることが分かった。そのため，共通に使えるツールの構築が可能であると判明した。

本研究では，この分析に基づいて，分野ごとに知識を実装することにより，様々な分野に容易に適用できるメッシュ生成システムを設計し，知識ベース処理による2次元メッシュ生成システム⁶⁾を開発した。これと既開発の剛塑性有限要素解析システム⁷⁾とを統合化^{8)~11)}し，AI手法によるリメッシング機能を有す鍛造変形解析プログラムを開発した。

2. メッシュ生成システム

2.1 メッシュ生成の手順

ベテラン（専門家）が四角形メッシュを生成する際によく用いられるプロセスを，Fig. 2に示すプロセスとしてモデル化した。まず，分割対象を副領域（sub-region）と呼ぶ小領域に分割する（Dividing into sub-regions）。これは，例えば，Fig. 3左に示すような凹形状の領域を四辺領域としてみなしてメッシュ生成すると，メッシュがねじれたり領域からはみだす場合があるので，適切な分割線を入れて，2つの小領域に分割してそれぞれの四辺領域をメッシュ生成することに相当する。この適切なメッシュが生成できるように分割した小領域を副領域と呼ぶ。副領域に分割する際，いくつかの分割パターンを候補と

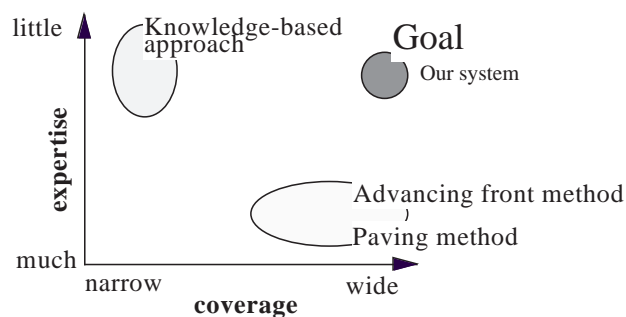


Fig. 1 Feature of our developed mesh generator system.

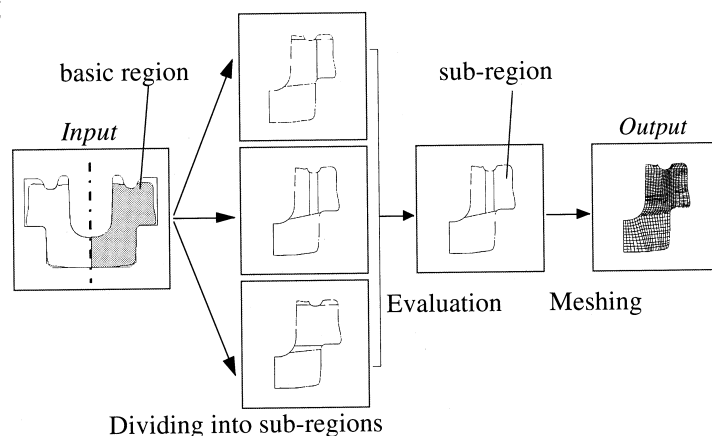


Fig. 2 Procedural flow of mesh generation.

して立案することにより質の高いメッシュを生成する。その時、形状などを評価してその中からひとつの案に絞る (Evaluation)。さらに、隣接する副領域間の整合性を図るように全副領域について、トランスファイナイト法のような格子生成法を適用し、メッシュを生成する (Meshing)。

2.2 データ表現

形状データはオブジェクトとして表現し、Fig. 4に示すクラスを用意した。形状を表現する最小単位は、直線、円弧、スプラインなどの4種類をもつセグメントと点である。その集まりとして、対象領域、基本領域、副領域及び境界セグメントを構成する。

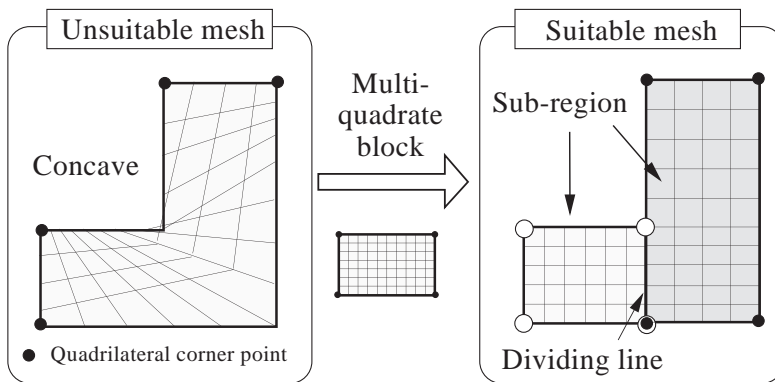


Fig. 3 Process of driving into sub-regions.

2.3 案の探索手法

副領域分割の処理を進めた時の案生成 (探索) の流れをFig. 5に示す。数字は、生成された基本領域の番号を示し、で囲まれた番号は、副領域とみなされた基本領域を示す。小文字のアルファベットは基本領域において選択された分割線の始点の名前を、大文字は終点を示す。システムはまず、知識ベースにより、基本領域1 (1 : basic region 1) において2つ (a, b) の分割始点を求める。次に、基本領域1について始点aから[6, 7]と[8, 9]など複数の分割パターンが生成される。システムではn個のパターンを同時に求めることができる。例えばnを2とすると、[6, 7]と[8, 9]が選ばれる。7と8

が副領域であると仮定すると、基本領域6と9について探索を進める。次に、9について進める。9について分割始点bから[10, 11], [12, 13]という分割パターンが生成される。以下6組 ([8, 10, 11], [8, 12, 13], [7, 14, 15], [7, 16, 17], [7, 18, 19], [7, 20, 21]) の分割パターンが生成される。

上記の様に、一つの基本領域に関して複数の分割パターンが生じる。単純に探索すると、組み合わせ爆発を引き起こす。こ

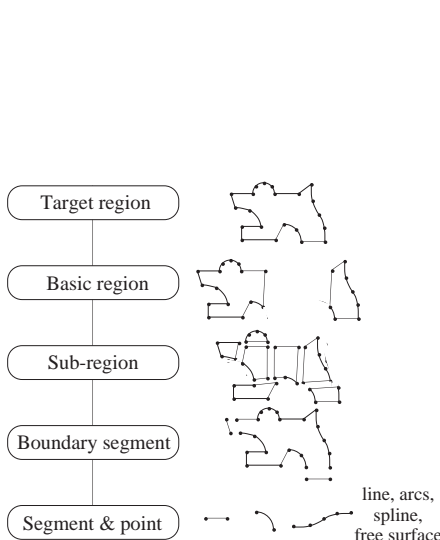


Fig. 4 Class hierarchy and data representation.

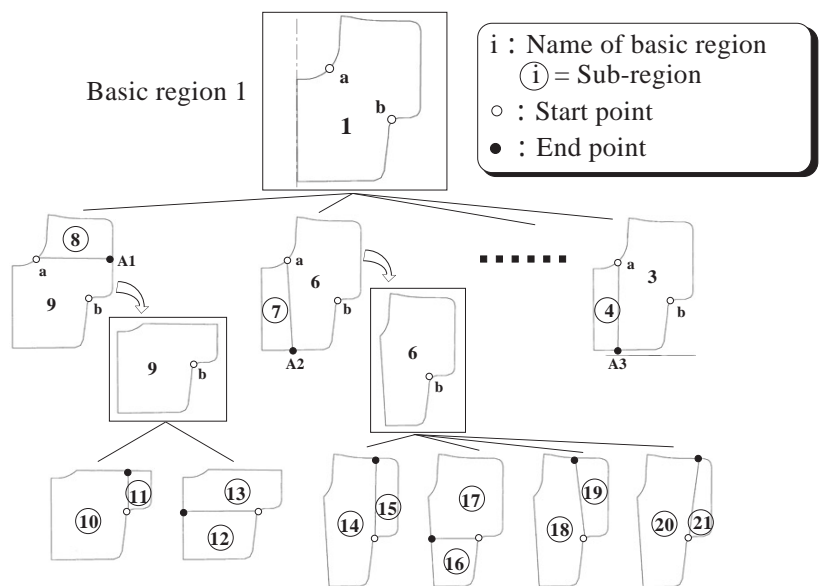


Fig. 5 Search spaces.

れを解決するために、本システムでは同時に複数の分割パターンを生成するための探索制御機構⁶⁾を備えている。また、得られた複数案の中から最適なものを選択する機能を有している。本システムでは、複数の評価項目についての重み付き積和により得られた案の総合的な評価を行っている。現在、評価項目として、副領域を構成する辺の中の分割線数 (Fig. 6A), 副領域の4頂点角度(B), 副領域を構成する4辺の対辺比(C), 分割線の傾き(D)がある。本システムが選んだ案 (Fig. 6 selected plan) は、ベテランが選択したものと同様なものが得られている。

2.4 推論方式と知識表現

メッシュ生成過程は、大まかな処理の流れが決まっており、ある処理をした後に次にどの処理をすれば良いかが予め分かっている。このような対象に対して、メタルールによって適用すべきルール・ワーキングメモリ及び競合解消戦略を指定するメタ推論法を提案⁶⁾し、実装している。現在、5つの競合解消戦略が有り、その一つの例をFig. 7に示す。これは、ワーキングメモリ内の先頭のル

ールを取り出し、先頭のルールの条件部を満たすかを調べ、条件を満たしていれば、そのルールの結論部を実行する。もし、満たさないときは、次のルールについて処理を進める。この操作の全てのワーキングメモリ内のデータについて処理する。

Fig. 8にメタルール及びビルールの表現例を示す。この例は、分割始点を求めるルールを表わしている。

2.5 システム構成

メッシュ生成部は、推論部およびメタ推論部 (探索制御部) から構成される。推論部では、分野固有の知識を記述する知識ベースを、メタ推論部では、分野に依存しない標準的な手順を記述するメタ知識ベースをもつ (Fig. 9)。

3. 鍛造変形解析ソルバーとの統合

3.1 鍛造変形解析とリメッシングプロセス
updated-Lagrange型有限要素法による鍛造変形解析では、Fig. 10に示すように、大変形に伴う計算要素の歪みや金型への入り込みが生じる。この

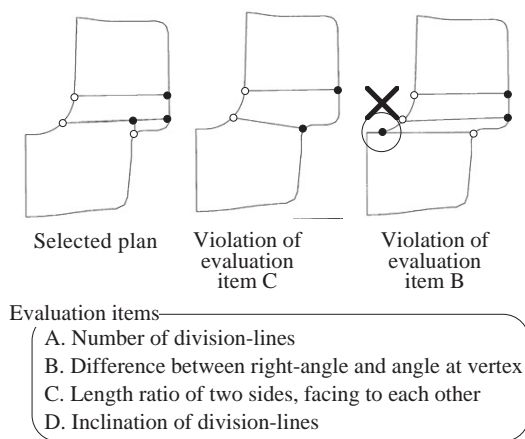


Fig. 6 Plan selection.

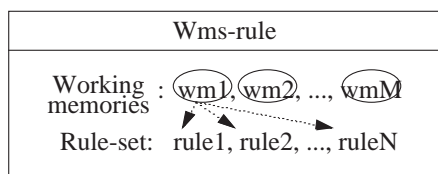


Fig. 7 An example of conflict resolution strategy.

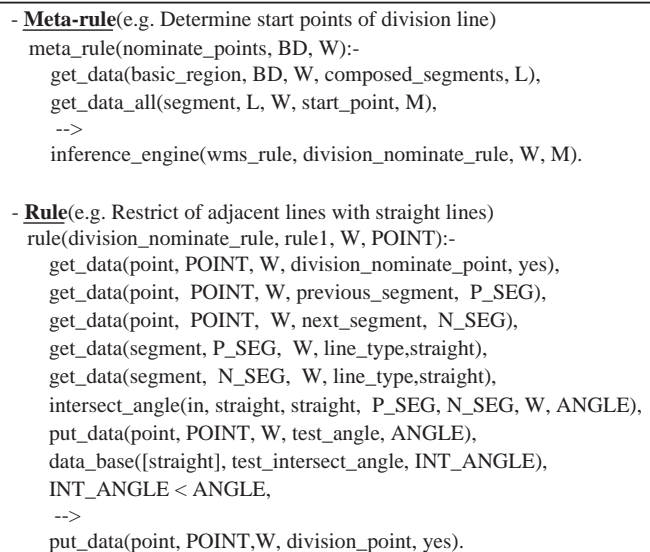


Fig. 8 Examples of knowledge representation.

ような離散化誤差は解析精度の低下や計算の続行を不能とする。これを回避するために、解析途中でのリメッシングが必要となる。

3.2 鍛造変形解析ソルバーとメッシュ生成システムの統合

開発したメッシュ生成システムを、既開発の剛塑性有限要素ソルバーと統合させて、AI手法によるリメッシング機能をもつ鍛造変形解析システムを開発した。その全体構成をFig. 11に示す。専用開発したプリプロセッサから計算情報を入力すると、ソルバーは、まず、初期メッシュ生成を行い、剛塑性有限要素法による変形計算を1ステップ分実行する。その計算結果から、リメッシングの可否を判定し、必要と評価されれば、メッシュ生成システムによりリメッシングを行う。必要がなければ変形計算を継続する。目的とする変形まで計算が終了すれば、ポストプロセッサにより解析結果を評価する。ソルバーとメッシュ生成システムの統合は、メインプログラムから、そ

れぞれを呼び出す形で行った。その詳細を、Fig. 12のフローチャートで示す。リメッシングの要否判定が要となった場合、分割対象である被加工材形状を前ステップの要素と型形状から抽出し、そのデータをメッシュ生成部に受け渡す。メッシュ生成データにリゾーニング処理（新旧メッシュシステム間のデータの再配分）などを施して、ソ

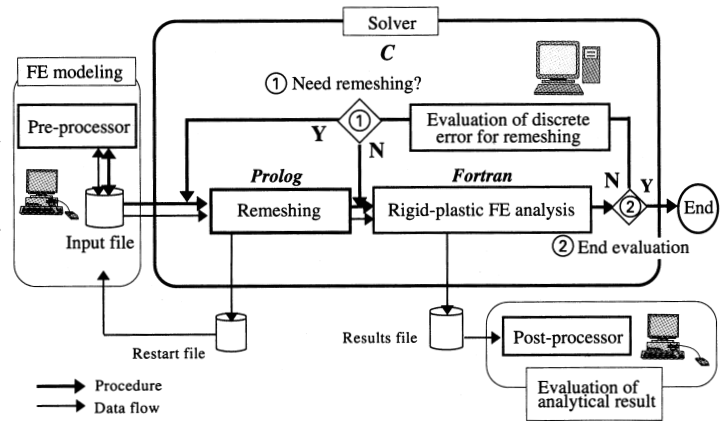


Fig. 11 Outline of developed system.

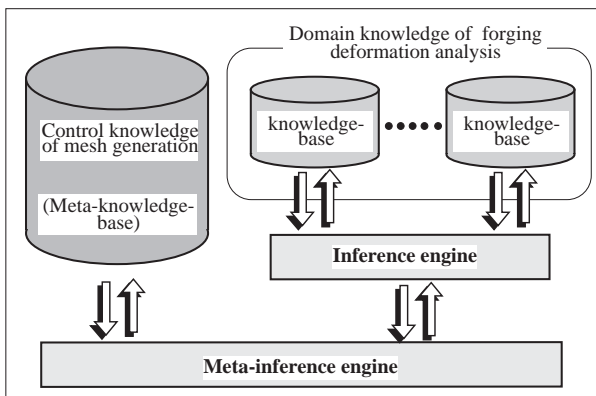


Fig. 9 Configuration of mesh generation system.

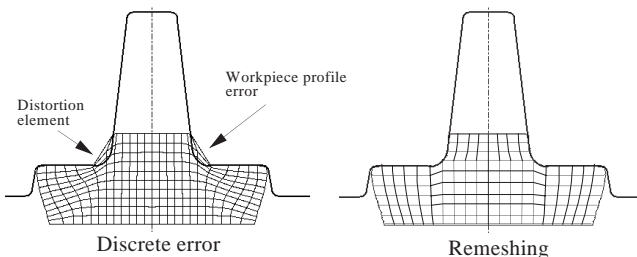


Fig. 10 Necessity of remeshing in forging deformation analysis.

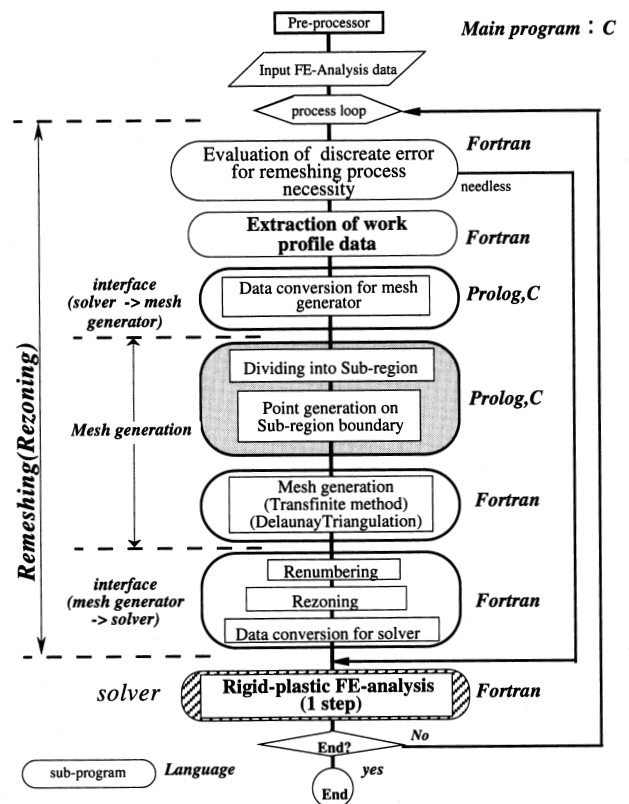


Fig. 12 Flow of forging simulation.

ルバー用データに加工し，1ステップの剛塑性FEM計算を行う。

リメッシングの自動要否判定のための評価項目をFig. 13に示す。この機能は，解析精度をシステム内で保証するためには重要なものである。項目には，金型の円弧セグメント上で要素辺がなす中心角度，金型への入り込み量，要素に含まれる金型形状表現点数，要素の対辺比である。

4．適用事例

4．1 対象工程

対象とした工程をFig. 14に示す。これは，熱間密閉鍛造により成形されるアイドルギヤ成形工程

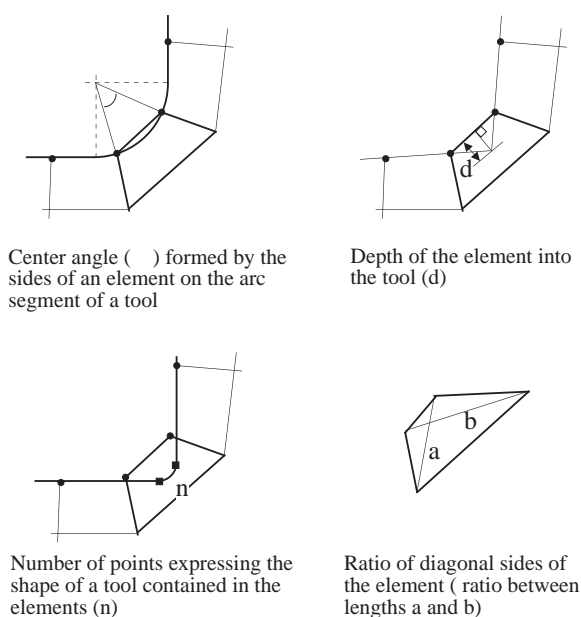


Fig. 13 Evaluation items of discrete error in remeshing.

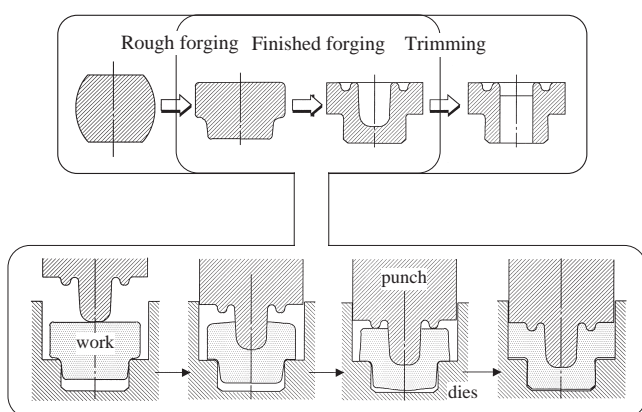


Fig. 14 Typical forging process of idle gear.

である。この内，典型的な型鍛造である仕上げ工程（第3工程）を取り上げ，開発システムによる変形解析を行った。

4．2 適用結果

Fig. 15に加工の進行に伴う，副領域分割とメッシュ生成の推移を示す。図中の太線が副領域分割線に相当する。形状の変化とともに，分割パターンが変化しており，各時点の被加工材形状にあった副領域分割，メッシュ生成が成されているのが分かる。カラーマップは，解析によって得られた相当ひずみ分布を示しており，妥当な解が得られた。

4．3 効果

工程設計者を対象として，解析作業時間と生成したメッシュの質の点で従来と比較した。従来，解析経験の浅い工程設計者では，1形状のメッシュ生成に半日程度かかり，それを再要素分割の必要回数分繰り返していた。メッシュ生成の難しい形状に対しては，場合によっては計算を断念していた。また，メッシュの質についても，総じて不良であった。一方，解析経験のある者でも，1形状のメッシュ生成に15分程度かかり，それを再要素分割の回数分繰り返していた。メッシュの質については，経験のある形状については良好であるが，経験のない形状については，試行錯誤の回数が少なければ，総じて不良であった。本システムの利用により，すべての工程設計者が最初に計算条件設定に10分程度かけるだけで，最終までの解

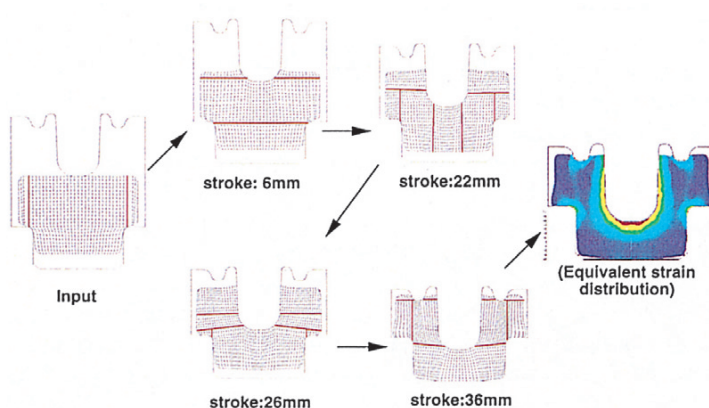


Fig. 15 Sub-region and structured meshes at various stroke

析が実施可能となった。また、生成メッシュの質は、解析経験に依存せず、良好なメッシュを利用することが可能となった。その結果、これまでは、ケーススタディ数を絞って解析を実施していたが、工程設計者が考えた工程案のほとんどを心理的制約なく実施して、よりよい工程案を探索することが容易になった。

この効果は、実際の設計作業の中で解析作業時間の半減として達成され、開発期間の短縮に寄与している。

5. まとめ

多大な工数やノウハウを必要とするメッシュ生成プロセスを分析し、そのモデル化を行った。このモデルに基づき、システム設計を行い、知識ベース処理を利用したメッシュ生成プログラムを開発した。このメッシュ生成プログラムと、既開発の鍛造変形解析プログラムとを統合化するプログラムを開発し、変形解析途中での再要素分割処理の自動化を達成し、妥当な解析が行えることを確認した。本開発により、解析作業を短時間で精度良く行えるようになった。現在、設計部署にて使用しており、その効果もではじめている。今後は、ノウハウの拡充や、解析情報算出機能の拡張を行っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) Andrews, A. E. : "Knowledge-Based Zonal Grid Generation for Computational Fluid Dynamics", NASA Conf. Publ., Vol.NASA-CP-3019(1988), 73
- 2) Annenhoffer, J. F. : "Computer-Aided Block Structuring through the Use of Optimization and Expert System Techniques", AIAA-91-1585-CP(1991), 654
- 3) Blacker, T. D., Mitchiner, J. L., Phillips, L. R. and Lin, Y. T. : "Knowledge System Approach to Automated Two-Dimensional Quadrilateral Mesh Generation", ASME, Int. Computater Engineer. Conf., (1988), 153
- 4) Canvendish, J. C. : "Automatic Triangulation of Arbitrary Planar Domains for the Finite Element Method", Int. J. Numer. Methods Eng., 8(1974), 679 ~ 697
- 5) Lo, S. H. : "A New Mesh Generation Scheme for Arbitrary Planar Domains", Int. Numer. Methods Eng., 21(1985), 1403 ~ 1426
- 6) 高田修, 中西広吉, 堀之内成明, 永岡真 : "知識処理に基づいた2次元メッシュの自動生成システムの開発", 情報処理学会論文誌, 37-9(1996), 1666
- 7) 中西広吉, 団野敦 : 平成元年春季塑性加工学会講演論文集, (1989), 587
- 8) 中西広吉, 高田修, 堀之内成明, 矢野裕司, 明石忠雄 : "鍛造変形解析におけるAI手法を用いた自動再要素分割機能の開発", 第46回塑性加工連合講演会講演論文集, (1995), 243
- 9) 矢野裕司, 明石忠雄, 中西広吉, 高田修, 堀之内成明 : "鍛造変形解析におけるAI手法を用いた自動再要素分割機能の適用事例", 第46回塑性加工連合講演会講演論文集, (1995), 245
- 10) Akashi, T., Yano, H., Matsuoka, N., Ogino, M., Nakanishi, K., Takata, O. and Horinouchi, N. : "Application of CAPD-Development Aiding Technology and Application Example", Proc. of 5th Int. Conf. on Technol. of Plasticity, (1996)
- 11) Takata, O., Nakanishi, K., Horinouchi, N., Akashi, T., Yano, H. and Matsuoka, N. : "A Knowledge-Based Mesh Generation System for Forging Simulation", Proc of the 9th IEA/AIE-96

著 者 紹 介



中西広吉 Koukichi Nakanishi

生年：1960年。

所属：材料・加工基盤研究室。

分野：塑性加工，特に鍛造加工のコンピュータ支援技術に関する研究。

学会等：日本塑性加工学会会員。

平成6年度 日本塑性加工学会会田技術奨励賞受賞。

1996年 IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。

工学博士。



高田修 Osamu Takata

生年：1958年。

所属：ソフトウェア研究室。

分野：設計・生産分野における知識処理の応用に関する研究。

学会等：情報処理学会，人工知能学会，精密工学会会員。

平成6年度 日本塑性加工学会会田技術奨励賞受賞。

1996年 IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。



堀之内成明 Nariaki Horinouchi
 生年：1961年。
 所属：応用数理研究室。
 分野：自動車の空力解析，および流体解析全般に関する数値計算手法の研究。
 学会等：日本応用数理学会，情報処理学会，自動車技術会会員。
 1996年 IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。



明石忠雄 Tadao Akashi
 生年：1962年。
 所属：トヨタ自動車(株)第5生技部技術企画室CASEグループ。
 分野：部内のCASE (Computer Aided Simultaneous Engineering) の推進。
 学会等：日本塑性加工学会，日本機械学会会員。
 1996年 IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。



矢野裕司 Hiroshi Yano
 生年：1959年。
 所属：トヨタ自動車(株)第5生技部技術企画室。
 分野：ユニット系部品のCASE (Computer Aided Simultaneous Engineering) の推進。
 学会等：日本塑性加工学会会員。
 1996年 IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。



松岡直樹 Naoki Matsuoka
 生年：1968年。
 所属：トヨタ自動車(株)第5生技部技術企画室CASEグループ。
 分野：鍛造分野CAEの開発・展開。
 学会等：日本塑性加工学会会員。
 1996年 IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。