

構造解析におけるスーパーコンピューティング

高野 直樹

①

構造解析におけるスーパーコンピューティング

高野 直樹

目 次

	頁
1 章 緒言	1
1. 1 背景と目的	2
1. 2 論文の構成	4
2 章 スーパーコンピュータの現状と動向	6
2. 1 スーパーコンピューティング	7
2. 2 多彩なスーパーコンピュータ	9
2. 3 スーパーコンピュータとネットワーク環境	10
3 章 スーパーコンピュータ用構造解析プログラムの現状と課題	14
3. 1 スーパーコンピュータの利用状況と問題点	15
3. 2 汎用プログラムの現状と問題点	17
3. 3 スーパーコンピュータ用構造解析プログラムに対する要求と課題	20
4 章 スーパーコンピュータ用高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の開発	22
4. 1 高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の開発方針	23
4. 2 高速化アルゴリズム	26
4. 2. 1 ベクトル・パラレルコンピューティングによる高速化技法	26
4. 2. 2 内積形式のスカイライン法	28
4. 2. 3 剛性マトリックスの作成	39
4. 2. 4 固有値解析	40
4. 3 高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の機能と特徴	43

4. 4	高速性・大規模性の検証	45
4. 4. 1	大規模解析	45
4. 4. 2	ギガフロップ問題の解析	48
4. 4. 3	ギガフロップ問題のベンチマークテスト	57
4. 4. 4	各種解析における高速性の検証	61
4. 4. 5	最新主力マルチプロセッサによるベンチマークテスト	67
4. 5	トランスピュータへの適用	78
4. 5. 1	トランスピュータ	78
4. 5. 2	トランスピュータによるパラレルコンピューティング技法	81
4. 5. 3	トランスピュータによる解析例	83
4. 6	高並列・超並列コンピューティングへの展望	97
5 章	スーパーコンピュータ用超大規模ソルバ FEM3D/I の開発	100
5. 1	研究方針	101
5. 2	有限要素法による構造解析へのICCG法の適用	102
5. 3	ICCG法とスカイライン法のベンチマークテスト	108
5. 4	ICCG法による大規模構造解析	114
5. 5	ICCG法とSCG法の比較	125
5. 6	EBE-SCG法によるパラレルコンピューティング	133
5. 7	考察	138
6 章	スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化	140
6. 1	プリ・ポストプロセッシングの重要性	141
6. 2	3次元構造物の六面体による自動要素分割	143
6. 2. 1	自動要素分割の重要性と現状	143
6. 2. 2	断面法の概要	145
6. 2. 3	断面法による自動要素分割手順	148
6. 2. 4	断面法の適用例	154
6. 2. 5	考察	173

6. 3	トラッキング・ステアリング	175
6. 3. 1	ポストプロセッシングの高度化	175
6. 3. 2	トラッキング・ステアリング	176
6. 3. 3	トラッキング・ステアリングシステムの開発	178
6. 3. 4	適用例	182
6. 3. 5	考察	191
7 章	考察と展望	192
8 章	結言	204
	参考文献	207
	研究業績	214
	謝 辞	221

第1章 緒言

本書は、*（ここに著者の意図や背景が記述されている）*。本書の目的は、*（ここに目的が記述されている）*。本書の構成は、*（ここに構成が記述されている）*。

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

（ここに本文の最初の段落が続く）

1 章 緒 言

1. 1 背景と目的

構造設計において、有限要素法 (FEM) をはじめとする計算力学の重要性はますます高まっており、適用分野やユーザ層の拡大、解析の高度化が進んでいる。この背景には近年のハードウェア、ソフトウェアの著しい進歩がある。特に、ハードウェアに関しては、スーパーコンピュータ、ミニスーパーコンピュータ、グラフィックススーパーコンピュータ、エンジニアリング・ワークステーション (EWS)、パーソナルコンピュータなど多彩な高性能コンピュータが登場している。中でも、4～8プロセッサの低並列コンピュータの開発が盛んに行われ[加藤89a]、主流となりつつある。さらに、これらのコンピュータをLANで結合したネットワーク環境が普及しつつある[三好91][矢川92]。

一方、ソフトウェアに関しては、現在FEMによる構造解析の分野で用いられている汎用プログラムの多くが1970年代のメインフレームの時代に開発されたものであり[加藤89b]、最近のハードウェアの進歩、多様化に対応しきれなくなっている点もある。特に、スーパーコンピュータにおける高速化技法であるベクトルコンピューティング、パラレルコンピューティング、ベクトル・パラレルコンピューティング用にチューニングが行なわれてきたが、不十分である。また、適用分野やユーザ層の拡大といった面からも、設計者にとって使いやすい新しいFEMシステムが要望されている[大坪92][木村91]反面、こうした汎用プログラムは使い方が繁雑であるため設計者が使いこなすことができない、といった問題点もある。

そこで著者は、このようなハードウェア、ソフトウェアの現状を背景に、最近のスーパーコンピュータに適した新アルゴリズムと実用的なソフトウェアの開発を行ってきた。本論文では著者が開発したベクトル・パラレルコンピュータ用高速・大規模ソルバ SUPER SOLVEにおける高速・大規模アルゴリズムと実際問題に対する高速性・大規模性について述べる。

さらに、ソルバを用いた次世代FEMシステムとして、コンピュータ・ネットワーク環境下でFEMの各プロセスを効率良く分散処理するFEMシステムの開

発を行ってきた。これは単にスーパーコンピュータにより大規模問題をいかに高速に解くかということにとどまらず、大規模なデータを作成するためのプリプロセッシングや、膨大な解析結果を効率良く処理するためのポストプロセッシングも含め、スーパーコンピューティングに関する研究を行ったものである。そこで、高速・大規模ソルバ SUPER SOLVEを中心とした次世代FEMシステムにおけるスーパーコンピューティングについて総合的に議論する。

1. 2 論文の構成

まず、本研究を行なうに至った動機を明確にするため、1. 1にも述べたように、ハードウェアとソフトウェアの現状と問題点について詳しく述べる。

2章では、「スーパーコンピュータの現状と動向」と題し、ハードウェアとコンパイラについて述べ、次世代のコンピュータ環境に適した有限要素解析プログラムとはどうあるべきかを考える。

3章では、「スーパーコンピュータ用構造解析プログラムの現状と課題」と題し、ユーザの立場から考察したスーパーコンピュータの利用状況と問題点を述べ、現在多く使用されている汎用プログラムの現状と問題点を整理する。これらを総合的に判断し、次世代のスーパーコンピュータ用構造解析プログラムに対する要求と課題をあげる。これは、本研究における目的の一部になるとともに、スーパーコンピュータ用のプログラム一般にあてはまる課題となっている。

以上の現状調査をふまえて、4章では本論文の主眼である「スーパーコンピュータ用高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の開発」について述べる。4. 1では、SUPER SOLVEの開発方針を明確にする。これは、3章の結びにあげたスーパーコンピュータ用構造解析プログラムに対する要求と課題に加え、FEMによる構造解析を念頭においてユーザの立場から実用性を追加したものである。4. 2では、高速化・大規模化アルゴリズムを具体的に述べ、4. 3では開発したSUPER SOLVEの機能をまとめる。4. 4では現在多く普及しているスーパーコンピュータを用いて高速性・大規模性・実用性を様々な角度から検証する。4. 5では、パラレルコンピュータの一つであるトランスピュータに適用した結果を述べる。トランスピュータは4. 4で述べたスーパーコンピュータとアーキテクチャが異なるので別に述べる。結びに、4. 5では高並列・超並列コンピューティングへの展望を述べる。

5章では、SUPER SOLVEのモジュールの一つとして開発した超大規模ソルバ FEM3D/I について述べる。本章では、反復解法の構造解析への適用について

幅広く検討している。ICCG法、SCG法によるベクトルコンピューティングに加え、EBE-SCG法によるパラレルコンピューティングに関し考察した。結びとして、4章の結果もふまえてFEMによる構造解析におけるスーパーコンピュータ用ソルバについて整理した。

6章では、「スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化」と題し、プリ・ポストプロセッシングと高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE を含めた総合的なスーパーコンピューティングについて議論する。トピックスとしては、CAD・CAE の統合化、六面体による自動要素分割、およびトラッキング・ステアリングの3点について述べる。

7章では、高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE と、CAD・CAE の統合化、六面体による自動要素分割、およびトラッキング・ステアリングを統合した次世代CAEシステムについて展望する。ここでの最終的な目的は“設計ツール”の開発である。本論文で開発した新技術は、“設計ツール”構築のための必須技術であることを述べる。

第2章 スーパーコンピュータの現状と動向

2章 スーパーコンピュータの現状と動向

2.1 スーパーコンピューティング

本章では、FEMによる構造解析におけるスーパーコンピュータの利用状況と問題点について述べる。スーパーコンピュータにおける高速化手法には、以下のような項目が含まれる。

- (1) ベクトルコンピューティング
- (2) ベクトル・パラレルコンピューティング（低並列）
- (3) パラレルコンピューティング（低並列，高並列，超並列）

ベクトルコンピューティングによる高速化手法は、国産スーパーコンピュータの HITAC S-820 シリーズ、FACOM VP-2000 シリーズなどのようなシングルプロセッサのベクトルコンピュータをはじめ、現在すべてのスーパーコンピュータで採用されている。これらのスーパーコンピュータは、近年4～8プロセッサを備えたマルチプロセッサに移行しており、主流となっている。これは、シングルプロセッサのスーパーコンピュータのマシンサイクルが数nsにまで短縮され、パイプラインピッチの限界に近づきつつある[唐木87]ことが理由の一つとしてあげられる。米国では既に CRAY X-MP (1982年) 以来採用されており、この後継機種 CRAY Y-MP (1988年) は8CPU構成である。国産でも NEC SX-3、HITAC S-3800 などが最近発表され、米国のレベルに肉迫、陵駕している。また、ミニスーパーコンピュータ CONVEX C3800 シリーズやグラフィックススーパーコンピュータ TITAN3000 などもマルチプロセッサ方式を採用しており、ベクトル・パラレルコンピューティング技法は現在最も普及している。メモリ方式としては共有メモリ方式をとっており、自動ベクトル化コンパイラ、自動パラレル化コンパイラが使用可能である。ただし共有メモリ方式の場合、CPU数がどこまで増加していくのか、今後の動向が注目される。

また、近年RISCやスーパースカラの比較的安価で高速なプロセッサが開発され、これを多数用いるパラレルコンピュータも注目を集めている[高橋87]。プ

ロセッサ数としては、数台～数十台の低並列コンピュータから、数万台の超パラレルコンピュータまでであるが、百台～千台程度の高並列コンピュータが現実的なようである。これには、コネクションマシン（最大 65536 CPU）、Ncube、トランスピュータなどがある。このようなパラレルコンピュータはローカルメモリ方式をとっており、現状では自動パラレル化コンパイラがないため、プログラム中にパラレル化、通信のための命令を記述しておく必要がある。超パラレルコンピュータは、特に AI、人間の脳における情報処理などの応用分野で注目されつつあるが、計算固体力学の分野における活用も近未来に実現されると思われる。

なお、以後、ベクトル・パラレルプロセッシングが可能なものはマルチプロセッサと呼ぶことにし、単なるパラレルコンピュータとは区別することとする。

2. 2 多彩なスーパーコンピュータ

前述の通り、CRAY, HITAC Sシリーズ, FACOM VPシリーズ, NEC SXシリーズに代表されるスーパーコンピュータに加え、最近ではミニスーパーコンピュータ、グラフィックススーパーコンピュータが登場してきた。ミニスーパーコンピュータの例としてはCONVEX, ALLIANT, FPSなどがあげられる。

LINPACKベンチマークテストでは、一世代前のスーパーコンピュータを上回る性能を示すものもあり、価格面もあわせて考えると、使い易いシステムとなっている。また、高速演算能力だけでなく、高度なグラフィックス性能も兼ね備えたグラフィックススーパーコンピュータも普及しつつある。この例としてはTITAN, Silicon Graphicsなどがあげられ、上記のミニスーパーコンピュータもグラフィックス機能を強化しつつある。さらに、IBM 3090シリーズも複数CPUで、かつVF (Vector Facility) を装備しており、これらもすべて含めて広義のスーパーコンピュータを考えることにする。

特徴的なことは、いずれも前節で述べた共有メモリ型のベクトル・パラレルコンピュータリングにより高速性を実現しているという点である。したがって、ソフトウェア面でも、ベクトル・パラレルコンピュータ向けの新しいアルゴリズム、ソフトウェアの開発が要求される。また、こうした多彩なスーパーコンピュータに汎用的に使用できるソフトウェアが望まれる。

2. 3 スーパーコンピュータとネットワーク環境

今後、スーパーコンピュータの使い方としては、図2. 1に示すようにネットワークにより統合化された環境が今後の主流である[三好91]。前述の多彩なスーパーコンピュータを核として、高性能化が進むEWS, GWSよりなるネットワーク環境である。ネットワーク上のコンピュータとして代表的なものを挙げると、

- (a) スーパーコンピュータ
- (b) ミニスーパーコンピュータ
- (c) グラフィックススーパーコンピュータ
- (d) メインフレーム
- (e) EWS, GWS
- (f) パーソナルコンピュータ

などがある。

特に、(e)のEWS, GWSはRISCの採用により上位機種に迫る勢いで高性能化している。例えば、1991年3月に発表されたHP Apollo 9000シリーズ700は7.6MIPS (10^6 instructions per second) を実現しており、グラフィックス性能だけでなく、演算サーバとしても2次元解析や中規模の3次元解析はEWS上で十分に行なうことができる。

(f)のパーソナルコンピュータに関しても、最近32ビットの機種が主流となりつつあり、2次元解析や簡単な3次元解析を気軽に行なうことができる。また、パーソナルコンピュータにトランスピュータを付加して用いると、EWSあるいはメインフレームクラスの高速性を得ることができる。

ここでキーポイントの一つはOS (Operating System) としてUNIXを使用するという点である。スーパーコンピュータの中には既にUNIXを採用しているものもあり、その他の機種もUNIXに移行しつつある。これにより、図2. 1のようなマルチベンダ環境においても、透過性 (Transparency) がよく、スーパーコンピュータをあたかもEWS感覚で自在に操ることができる。従来のバッチ方式ではなく、インタラクティブに使用することが可能となるのである。

著者の所属する東京大学工学部精密機械工学科 三好俊郎教授研究室におけるコンピュータ・ネットワーク環境を図2. 2に示す。研究室内ではUNIXをベースとする透過性(transparency)のよいコンピュータ環境が実現されている。ネットワーク上のコンピュータは上述した通りそれぞれに特性があるため、FEMの各プロセスをそれに最も適したコンピュータで分散処理することによりFEMの効率化を図ることができる。すなわち、プリ・ポストプロセッシングはEWS, GWSで行い、解析はスーパーコンピュータで行う分散処理が有効となる。プリ・ポストプロセッシングを含めた機能分散処理については6章で展望を述べる。

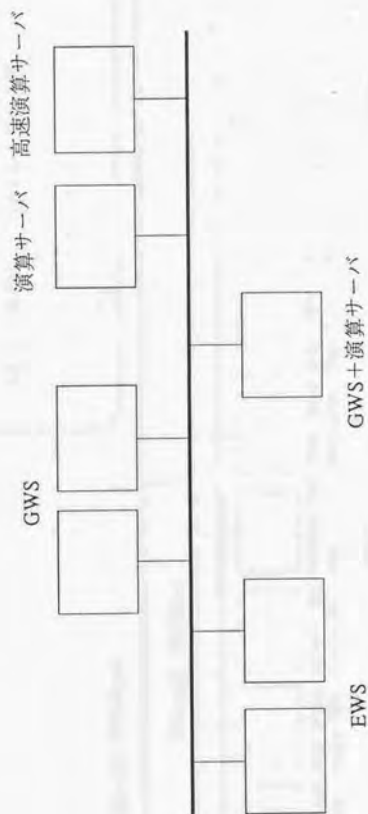


図 2. 1 コンピュータ・ネットワーク環境

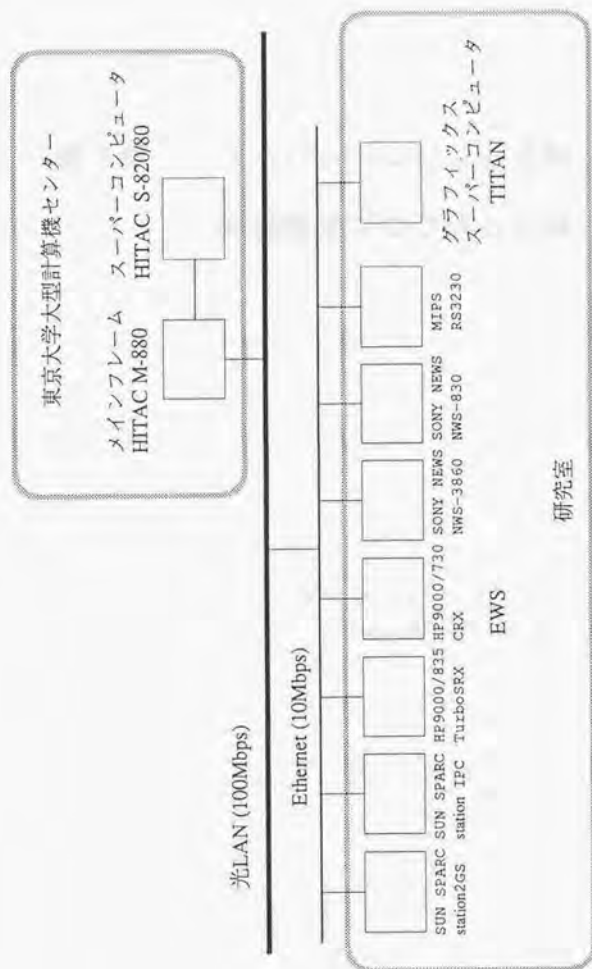


図 2. 2 三好教授研究室におけるコンピュータ・ネットワーク環境

第3章 スーパーコンピュータ用

構造解析プログラムの現状と課題

第3章 スーパーコンピュータ用 構造解析プログラムの現状と課題

3章 スーパーコンピュータ用構造解析プログラムの現状と課題

3. 1 スーパーコンピュータの利用状況と問題点

ベクトルコンピュータの場合、FEMによる構造解析においては必ずしもハードウェアのベクトル性能を十分に利用していないのが現状である。しかしながら、ユーザ側もこの点に問題意識を持ち始め、ソフトウェアベンダとともにチューニングを行っているところである。逆に言えば、ベクトルコンピュータの性能を十分に引き出せるソフトウェアがないため、コンピュータメーカは高価なベクトルパイプライン・ユニットを搭載せず、次機種はパラレルコンピュータに切り替える、といった傾向もあるのではなかろうか。これは、ハードウェア先行型の危険な指向であり、ユーザはハードウェアの短サイクルの機種更新に振り回される結果となっている。

次に、マルチプロセッサについて述べる。マルチプロセッサの場合、運用状況を調査すると、1ジョブ当たり複数のプロセッサを割り当ててベクトル・パラレルコンピューティングを行っているユーザはあまりなく、多くのジョブを処理する際のスループットを向上するために用いている例がほとんどである。この背景には、ベクトル・パラレルコンピューティングを効率よく行えるソフトウェアがないことが理由としてあげられ、大きな問題点となっている。

また、パラレルコンピュータについてはベクトルプロセッシングが不可能でもパラレルコンピューティングだけ行えばよいのであるが、現状では自動パラレル化コンパイラがないため、マシン専用プログラムでないとパラレル化できないのが問題である。このようなパラレルコンピュータ用プログラム開発の遅れの一方、ハードウェアの開発は進んでおり、最近発表されたSun SPARCstation 10のようにEWS（エンジニアリング・ワークステーション）にも広まってきている。

このようにパラレルプロセッシングは徐々に広まり、関心を集めているが、ソフトウェアの欠如が問題となっている。スーパーコンピュータ用プログラムに対する要求として、ベクトルプロセッシングの場合は90%以上のベクトル化率が一応の目標であったが、パラレルプロセッシングの場合、Amdahlの法則から計

算すると99%以上の並列化率が得られないと高並列、超並列コンピュータの有効利用は難しい。1970年代にメインフレームを対象に開発された汎用プログラムは、メモリの使い方などの点で最新のスーパーコンピュータに合致せず、かつプログラムが巨大であるために抜本的なチューニングはあまり望めないといえよう。特にローカルメモリ方式の並列コンピュータの場合、自動並列化コンパイラがない現在、インストールには多大の労力を要する。

最近、高性能EWSが低価格で提供され、FEMによる構造解析の分野でもダウンサイジングが進んでいる。これは、ユーザがコストパフォーマンスに注目している現われであり、また、設計者をはじめとするユーザ層の拡大により使いやすさが重視されようになったためである。ネットワーク環境も整いつつあり、ユーザが解析内容に応じて最適なコンピュータを効率的に利用しようとしているのである。高価なスーパーコンピュータの発展のためにも、スーパーコンピューティングを本当に効率よく行なえるような新しいソフトウェアの開発は、急務なのである。

3. 2 汎用プログラムの現状と問題点

前述の通り、コンピュータのハードウェアは著しい進歩を遂げ、スーパーコンピュータ、ミニスーパーコンピュータ、グラフィックススーパーコンピュータ、EWSなど多彩な高性能コンピュータが登場している。

一方、ソフトウェアに関しては、現在FEMによる構造解析の分野で用いられている汎用プログラムの多くが1970年代のメインフレームの時代に開発されたものであり、最近のハードウェアの進歩、多様化に対応しきれなくなっている点もある。

特にハードウェアの傾向であるベクトル・パラレルコンピューティングに関し、汎用プログラムのチューニングも行われてきているが、必ずしも十分とはいえない。このことが本研究を行なうに至った最大の動機であり、また本研究の意義がある点であるため、次節でその理由を詳しく述べる。

高速性という点に関して著者がこれまでに汎用プログラムを使用して感じたことを以下に記す。

(1) NASTRAN

世界中で最も多く普及している汎用プログラムである。例えば航空機のジェットエンジンの型式承認においては、NASTRANによる有限要素解析が義務づけられていたり、NASTRANで解析した結果ならば世界的に信用される、という程に有名なプログラムである。NASTRANは1991年度に東京大学大型計算機センターにMSC/NASTRANがインストールされた。東京大学大型計算機センターには、スーパーコンピュータ HITAC S-820/80があるが、インストールされたMSC/NASTRANはベクトル化コンパイルはされていない。著者にはその真の理由はわからないが、現実に東京大学大型計算機センターですら、最新のスーパーコンピュータを使いこなせていないというのは事実である。

著者はNASTRANによる3次元接触解析を実施したことがあるが、標準の実行環境では、実行中にNASTRANが必要とするテンポラリファイルが巨大であるため、実行できなかった。

(2) MARC

MARCもNASTRANとともに普及率では汎用プログラムの中で3本

の指に入る有名なプログラムである。NASTRAN が線形解析を得意とするのに対し、MARC は非線形解析プログラムとして有名である。著者は、MARC を用いてゴム材料の 3 次元大変形解析を行なった。この問題は、ゴム材料をムーニーリブリンモデルとして扱い、ポストバックリング、接触を含んだ複雑な問題である。非線形解析は増分法により解くが、この解析では約 300 ステップを要し、グラフィックススーパーコンピュータ TITAN を用いて 3～4 日を必要とした。グラフィックススーパーコンピュータ TITAN はベクトル・パラレルコンピューティングが可能なマルチプロセッサであったが、MARC がこれに対応していなかったのである。また、この解析にも膨大なテンポラリファイルが必要となり、3～4 日の実行中は TITAN を一人で占有していたのである。

(3) DYN3D

DYN3D は上述の 2 つが静的解析プログラムであるのに対し、衝撃解析の分野で代表的なプログラムである。著者らは、DYN3D のベクトル・パラレル性能を詳細に調査している。これは文献[高野90b]にまとめられている。結論として、スーパーコンピュータ CRAY 用に開発されているだけあって、ベクトル性能はそこそこであるが、パラレル性能は全く発揮されなかった。

以上は著者のささやかな経験の一部であるが、ベクトル・パラレルコンピューティングによる高速性ととともに、精密化という要求のもと、大規模性も重要である。従来の汎用プログラムは、開発当時のコンピュータのメモリ環境が前提となっているため、NASTRAN、MARC の例で紹介した通り、大規模解析では膨大なテンポラリファイルを多用するなどの欠点も見受けられる。

最後に、プログラムを使用するユーザの立場から述べると、マニュアルを全て読み、機能を憶えなければ使いこなせない、しかし、マニュアルは膨大で消化しきれない、という使いにくさがあった。これを解決する手段として、データ作成のためのプリプロセッシングだけでなく、解析プログラムで工夫できるところもあることに気づく。つまり、汎用プログラムは、例えば固有値解析を行なう場合にもサブスペース法やランチョス法など何種類かの解法が用意されており、通常はプログラムのデフォルトの解法を使用するのであるが、選択のためのデータ入

力があるのである。これは、一見親切なプログラムであるようだが、ユーザには実際不必要なのである。ユーザからすれば、精度のよい解が得られることが第一に重要であり、ユーザの要求を満足してくれる最適な解法が一つ用意されていればよいのである。こうした汎用プログラムの使いにくさは、有限要素法の普及を妨げるものである。有限要素法はこれまでの解析者（アナリスト）から設計者の手に渡りつつあるといわれている[三好91]が、上述の問題を解決しなければ汎用プログラムを使いこなせる設計者は出てこないであろう。

こうした経験を生かし、本研究を行ない、高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE を開発した。次節以降で SUPER SOLVE の開発方針について述べる。

3. 3 スーパーコンピュータ用構造解析プログラムに対する 要求と課題

以上の背景を鑑み、次世代のFEMによる構造解析ソルバに対する要求項目として、以下のようなことがあげられる。

(1) ベクトルコンピューティングが可能であること。

ベクトルコンピュータがすでに多く普及していること、またマルチプロセッサにおいてもベクトルコンピューティングが基本となっていることが理由である。

(2) ベクトル・パラレルコンピューティングが可能であること。

マルチプロセッサが主流となっていることが理由である。ただし、マルチプロセッサが導入された場合、必ずしも複数プロセッサを使えるとは限らないため、ベクトルコンピューティングだけでも高速化が可能である上に、ベクトル・パラレルコンピューティングによりさらに高速化が可能である必要がある。

(3) パラレルコンピューティングが可能であること。

ベクトルコンピューティングを行わず、パラレルコンピューティングだけでも高速化が可能である必要がある。

(4) スカラ速度の低下がないこと。

ベクトルコンピュータが開発された初期において、スカラ速度(演算量)を犠牲にしてもベクトルコンピューティングによる加算率を高め、高速化を図ることが行われたが、こうした思想は自動ベクトル化コンパイラの進歩や、ネットワーク環境の普及、ダウンサイジングといった現状に合致しなくなった。スーパーコンピュータが混雑している時にはEWSで実行した方が応答時間が速いことすらある。

これら4つの要求は、コンピュータのアーキテクチャに依存せず同一のソフト

ウェア，アルゴリズムで満足する必要がある。さもなくば，ハードウェア，ソフトウェアともに資産の有効利用は望めない。

第4章 スーパーコンピュータ用高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の開発

本稿では、スーパーコンピュータ上で動作する高速・大規模ソルバ「SUPER SOLVE」の開発経緯と、その特徴について述べる。このソルバは、線形計画問題の求解に特化したもので、大規模な問題に対しても高い効率で計算を行うことが可能である。開発には、スーパーコンピュータの特性を活かすための高度な最適化技術が用いられている。また、ユーザーフレンドリーなインターフェースも提供されており、研究者やエンジニアが簡単に問題を設定し、求解結果を確認できる。このソルバの開発は、スーパーコンピュータの性能向上と、大規模な最適化問題の解決に大きく貢献している。以下に、開発の背景と具体的な技術的挑戦について詳しく説明する。

スーパーコンピュータの急速な発展に伴い、大規模な最適化問題を効率的に求解する需要が高まっている。従来の汎用コンピュータでは、大規模な問題の求解に十分な時間とメモリを必要とする。一方、スーパーコンピュータは、その並列処理能力と大容量メモリによって、このような課題を克服する能力を有している。しかし、スーパーコンピュータの特性を最大限に活用するためには、専用のソフトウェアを開発する必要がある。この「SUPER SOLVE」の開発は、まさにそのような挑戦の産物である。

開発の初期段階では、問題の規模と複雑性を分析し、どのようなアルゴリズムが最も適しているかを検討した。線形計画問題の求解には、シンプレックス法や内点法などのアルゴリズムが一般的であるが、大規模な問題に対しては、これらのアルゴリズムの改良や、新しいアルゴリズムの導入が必要となる。また、スーパーコンピュータの並列性を活かすためには、アルゴリズムを高度に並列化し、メモリアクセスの効率化を図ることも重要な課題であった。

開発チームは、これらの課題を克服するために、高度な最適化技術と並列処理技術を活用した。具体的には、問題の構造を分析し、計算を細粒度で分割し、複数のプロセッサに分散して実行させることで、求解時間を大幅に短縮させた。また、メモリの効率的な管理とアクセスの最適化も重要な要素であった。これにより、大規模な問題に対しても、従来のコンピュータよりもはるかに高速で求解を行うことが可能となった。

さらに、ユーザーが問題を簡単に設定し、求解結果を確認できるように、使いやすいインターフェースを開発した。これは、研究者やエンジニアが、このソルバを効果的に活用するための重要な要素である。最終的に、開発された「SUPER SOLVE」は、スーパーコンピュータ上で動作する高速・大規模ソルバとして、広く利用されるようになった。

4章 スーパーコンピュータ用高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の開発

4. 1 高速・大規模ソルバSUPER SOLVE の開発方針

本章ではFEMによる構造解析におけるベクトル・パラレルコンピュータ向きの高速・大規模アルゴリズムと実例への適用について具体的に述べる。

3. 3の(4)にも指摘した通りスカラ最適化を図ると、FEMによる構造解析において最も演算量を必要とするのは剛性方程式の求解部である[高野90a]。汎用プログラムでしばしば計算負荷が重くなる剛性マトリックスの作成部は、ソリッド要素、シェル要素などの要素種類によらず演算量を軽減することができる。これは、後述の筆者が開発した次世代ソルバ SUPER SOLVE において実証されている。一方、剛性方程式の求解部は、全体の演算量の70~90%をしめる。例として、図4. 1に解析の流れの概略と、各処理部分の全体の計算時間に占める割合を示す。図中の値はクランクの3次元弾性解析(要素数1024、節点数5825、自由度数17475)における結果である。平均バンド幅は自由度数の約2%であり、バンド幅が非常に小さい問題である。通常バンド幅は自由度数の数%~10%程度となる。バンド幅が大きい問題や大規模解析では、剛性方程式の解法に要する計算時間の割合は増加し、80%~90%を占める。剛性マトリックスの作成に要する計算時間は高々23%程度である。これは一般に短いループ長の多重DOループとなる剛性マトリックスの作成を後述の手法により高速に行っているからである。したがって、まず第一に剛性方程式の解法のパラレルコンピューティング技法を確立する必要がある。

この場合、以下の条件が必要であろう。

まず、3. 3で提示した4つの要求項目を満たす高速解法であることが必要であるので、これを再記する。

- (1) ベクトルコンピューティングが可能であること。
- (2) ベクトル・パラレルコンピューティングが可能であること。
- (3) パラレルコンピューティングが可能であること。
- (4) スカラ速度の低下がないこと。

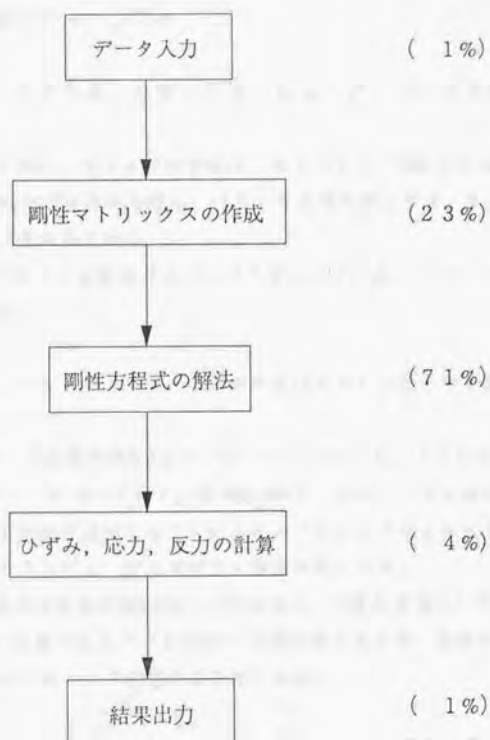
これらの詳細は前述の通りである。これらに加えて、以下の条件が必要である。

- (5) 問題の種類によらず、数値安定が保証されること。

パラレルコンピューティングに期待するのは、現在計算時間が長くなる非線形解析などの高速化である。極論を言えば、今後超並列コンピュータが登場してきた時に線形解析を解くようなことは、宝のもちぐされであろう。また、大規模問題も後述の通り現状で実用的な規模の問題は超並列コンピュータなど用いずとも解析できる。一方、非線形解析は既存のスーパーコンピュータを用いても1日～数日のオーダーで計算時間がかかる問題もある。超並列コンピューティングを議論する場合には、暗黙に非線形解析が前提であるといっても過言ではない。最近ニーズの多い接触解析やゴム材料など、複雑な問題に対しても安定した解が得られることが前提である。この点から、反復法よりも先にまず直接法が検討されるべきである。

- (6) 大規模問題にも適用可能であること。
- (7) 汎用的に使用できるよう機能の充実を図ること。
- (8) 汎用プログラムなど既存のプログラムへのインストールが容易であること。

以上の点を考慮し、次世代ソルバに適した解法として、内積形式のスカイライン法[高野89b]を紹介する。



() : 全体の計算時間に占める計算時間の比率。
解析例は, 1024 要素, 5825 節点, 17475
自由度のクランク。剛性マトリックスの
平均バンド幅は約 390。

図 4. 1 有限要素解析の処理の流れと計算時間の内訳

4. 2 高速化アルゴリズム

4. 2. 1 ベクトル・パラレルコンピューティングによる高速化技法

ベクトルコンピューティングの手法は、以下の2点に要約される。

- (1) 最内側DOループの比率を増し、ベクトル化率を高くする。また、最内側DOループのループ長を長くする。
- (2) 並列パイプライン方式のスーパーコンピュータにおいては、ベクトル演算器を並列稼働する。

一方、パラレルコンピューティングの手法は大きく2通りの手法がある[高野90a]。

- (3) 多重DOループの最内側DOループをベクトル化する。パラレル化はできる限り外側のDOループについて行う。最内側DOループについて上述のベクトルコンピューティング手法を適用することによりグラニュラリティが大きくなり、ベクトル・パラレルコンピューティングとも性能は向上する。
- (4) ベクトル化可能な最内側DOループのDOループ長を分割しパラレル化も行う。この方法は(3)に比べるとベクトルループ長が短くなるが、容易にベクトル・パラレルコンピューティングを行うことができる。

これまで、ベクトルコンピュータ向けの剛性方程式の解法に関する研究は多くあり、高速性という点からスカイライン法[村田85][三好86][小国91]、パラレルスカイライン法[三好87][小国91]などが代表的な解法として挙げられる。パラレルスカイライン法は、多重パイプラインを活用するように改良した解法である。また、パラレルスカイライン法を外部記憶装置を用いるアウトコアソルバに拡張することにより、大規模解析を行うことも可能である[斉藤87][村田88][小国91]。

しかし、パラレルコンピューティングに適した解法については研究がはじまったところであり、これまでに発表されたものは長所とともに短所が多くあり、実用的、汎用的に使用できるものはまだ発表されていない。これまでに発表された解法を列挙すると、multi-color SOR法[Adams82][横川89]、サブストラクチャ法[Ortega85]、m-step PCG法[Adams85]、SCG法[Noor87]、サブストラクチャ

法とSCG法を組み合わせた hybrid scheme [Omid87a] [Omid87b] [Farhat87], 領域分割法[曾根田89][矢川92]などの反復法系統の解法が主である。

しかしながら, 前節で述べた通り, 本研究においては直接法の適用を第一に考えている。直接法では Gauss-Jordan 法がパラレルコンピュータに適しているとされている[岸87]が, Gauss-Jordan 法は計算中に上三角部分が密になるため, 大規模疎行列には適さない。その他には 係数マトリックスを WZ分解する QIF(Quadrant Interlocking Factorization) 法[Evans79][Evans80][Evans81] が紹介されている。Evansはアルゴリズムの紹介のみにとどまり数値実験結果がないため, 数値安定性や実際の計算効率がどの程度になるかが課題である。これについて著者が数値実験を通して考察した結果, 対称バンドマトリックスには適用可能であるがスカイライン型の記憶方法が不可能であるため大規模疎行列には適さないこと, さらに演算量が通常の解法よりも膨大に増加する(スカラ速度の低下)ことが明らかとなり, 不適切と判断した。

そこで, 筆者らは内積形式のスカイライン法[高野89b]を開発したので, 次に詳しく述べる。

4. 2. 2 内積形式のスカイライン法

スカイライン法はベクトルコンピュータ向きの解法として広く使用されているが、これは縁どり形式と呼ばれるアルゴリズムを採用しており、ベクトルコンピュートイングには適しているが並列コンピュートイングは困難である。そこで、ベクトルコンピュートイングとパラレルコンピュートイングをともに効率良く行なうため、内積形式のスカイライン法を開発した。

スカイライン法のアルゴリズムは、

(1) 三角分解 ($U^T D U$ 分解)

(2) 前進代入

(3) 後退代入

よりなるが、(1)の三角分解には全ての計算時間が費やされる。具体的に式で示すと、剛性方程式(4.1) に対し式(4.2) のように分解する。 $[U]$ は上三角マトリックス、 $[D]$ は対角マトリックスである。

$$[K][\delta] = \{f\} \quad (4.1)$$

$$[K] = [U]^T [D] [U] \quad (4.2)$$

三角分解を行うことにより式(4.1) の剛性方程式は式(4.3) のように表わされ、これは式(4.4)、(4.5) を通じて求めることができる。 $[D]^{-1}$ は対角成分の逆数をとるだけでよい。式(4.4) は前進代入、式(4.5) は後退代入により解くことができる。

$$[U]^T [D] [U] [\delta] = \{f\} \quad (4.3)$$

$$[U]^T \{y\} = \{f\} \quad (4.4)$$

$$[U] [\delta] = [D]^{-1} \{y\} \quad (4.5)$$

式(4.2) の三角分解は式(4.6)、(4.7) により $[D]$ 、 $[U]$ マトリックスを計算するものである。

$$D_i = K_{ii} - \sum_{m=t}^{i-1} U_{mj}^2 D_m \quad (4.6)$$

$$U_{ij} = (K_{ij} - \sum_{m=t}^{i-1} U_{mi} U_{mj} D_m) / D_i \quad (4.7)$$

$j > i$, $j=2, \dots, n$, n は自由度数,

t はスカイラインマトリックスの各列の非零成分の中で最小行番号を表わす。

中でも演算量が多いのは式(4.7)の $[U]$ マトリックスの計算である。ある U_{ij} を計算するのに必要な参照成分は図4.2の通りであり、この参照成分は U_{ij} の分解以前に求めておく必要がある。

縁どり形式と内積形式の相違点は、スカイライン法における三角分解の計算順序にある[高野90a]。計算式自体は両者とも上記の式(4.6), (4.7)で表わされる。各々の分解の手順を図4.3(a), (b)に示す。

図4.3(a)の縁どり形式では、分解列を基準に分解を進めるアルゴリズム(column-wise algorithm)である。注目する分解列(j 列)中の各成分は上から順に逐次的に求めていかねばならず、図4.3(a)中 U_{ij} 以前に $U_{i'j}$ ($i' < i$)が計算されている必要がある。つまり、 U_{ij} と $U_{i'j}$ の計算は同時には計算できず、順位があるため、パラレルコンピューティングを行うことは困難である。実際の数値実験結果は例えば文献[中田92]に示されている通りである。

一方、図4.3(b)のように分解行を基準に分解を進めるアルゴリズム(row-wise algorithm)では、分解行(i 行)を計算するための参照成分はすべて計算済みである。図4.3(b)中、 U_{ij} と $U_{ij'}$ の計算はパラレル化が可能であり、 i 行目の分解行中の成分は全て独立に、同時に計算可能であり、ここにパラレル化が生まれる。またこの分解手順を内積形式と呼ぶことにする。

図4.2中の参照列の長さ(成分数)は式(4.7)中の Σ の繰り返し数にあたる。この Σ の計算はスーパーコンピュータではベクトル処理が可能であり、高速に計算される。そのため、前述の通りスカイライン法はベクトルコンピュータに適した解法として多く使用されてきた。しかし、これまで用いられてきたのはすべ

て縁どり形式のアルゴリズムであり、内積形式は用いられていなかった。縁どり形式はスーパーコンピューティングには適しているが、パラレルコンピューティングを行うのは困難である。内積形式において、式(4.7)は縁どり形式と同式であるためベクトル化可能である上、分解行のいずれの成分の計算においても縁どり形式と同じ Σ の繰返し数を有するため、ベクトルループ長が縁どり形式同じとなり、ベクトル高速性能は縁どり形式と等しいことがわかる。すなわち、ベクトル化可能な分解成分を複数同時に計算することにより、ベクトル・パラレルコンピューティングが可能となる。言い換えれば、内積形式を用いたアルゴリズムを採用すれば、従来の縁どり形式のスカイライン法の有するベクトル性能をそのまま保ち、さらに縁どり形式では行うことのできないパラレルコンピューティングを行うことが可能となる。また、ベクトルコンピューティングを行わず、パラレルコンピューティングだけでも高速化が可能であり、3. 3, または4. 1 であげた要求を満たしていることがわかる。

何故これまで内積形式のアルゴリズムが使われていなかったかを述べる。より不規則なスカイラインマトリックスである図4. 4の例では、分解行に零・非零成分が不規則に含まれ、不連続になっている。図4. 4の分解行中の非零成分はメモリに記憶していないため、処理を行わないような判定が必要となる。この判定は、参照が列基準 (column-wise) の縁どり形式では不要である。縁どり形式はスカイラインマトリックスに最も適合したアルゴリズムであり、内積形式における上述の判定は煩雑であると考えられていた。これが、これまで内積形式のアルゴリズムが使用されていなかった理由である。しかし、これは簡単な判定文 (FORTRANのIF文) 一つですむので、全く負荷にならない。

次に、FORTRANのプログラミングについて述べる。ただし、マトリックスは簡単のため対称密なマトリックスとする。縁どり形式のプログラムは以下のようになる。

```

DO 100 J=1,N
    DO 200 I=1,J-1
        S=0.0
        DO 300 M=1,I-1
            S=S+K(M,I)*K(M,J)*K(M,M)
300    CONTINUE
        K(I,J)=(K(I,J)-S)/K(I,I) (4.8)
200    CONTINUE
        S=0.0
        DO 400 M=1,J-1
            S=S+K(M,J)**2*K(M,M)
400    CONTINUE
        K(J,J)=K(J,J)-S
100    CONTINUE

```

一方、内積形式のプログラムは以下のようになる。

```

DO 100 I=1,N
    S=0.0
    DO 400 M=1,I-1
        S=S+K(M,I)**2*K(M,M)
400    CONTINUE
    K(I,I)=K(I,I)-S
    DO 200 J=I+1,N (4.9)
        S=0.0
        DO 300 M=1,I-1
            S=S+K(M,I)*K(M,J)*K(M,M)
300    CONTINUE
        K(I,J)=(K(I,J)-S)/K(I,I)
200    CONTINUE
100    CONTINUE

```

内積形式のプログラム式(4.9) 中で斜体で示した箇所が縁どり形式と異なるだけである。基本的に列 J と行 I を変更しただけにすぎない。ベクトル化が可能なのは縁どり形式、内積形式ともに DO 300, DO 400 の DO ループであり、特に DO 300 が計算の中核である。DO 300 については縁どり形式、内積形式ともに全く同一であり、ベクトル高速性能が同じであることがわかる。

パラレル化については、式(4.8)の縁どり形式では DO 300 の制御変数 M が I に依存するため、外側ループの DO 200 はパラレル化不可能である。しかしながら、式(4.9)の内積形式では、DO 300 の制御変数 M が J に独立であるため、外側ループの DO 200 がパラレル化可能となる。つまり、最内側 DO ループ (DO 300) がベクトル化可能で、外側 DO ループ (DO 200) がパラレル化可能であり、4. 2. 1 の(3)で述べた手法によりスーパー・パラレルコンピューティングが可能となる。これは、高度なスーパー・パラレルコンピューティング手法であり、高性能が得られる。

内積形式のスカイライン法の高速性の特長をまとめると、以下の2点があげられる。

(1)ベクトルコンピューティングに対しては、従来の縁どり形式と同等の性能を有する。

(2)グラニュラリティが大きく、同期点が少ないため、効率よいパラレルコンピューティングが可能である。これは、4. 2. 1 の(3)で述べたベクトル・パラレルコンピューティング手法を用いていることによる。

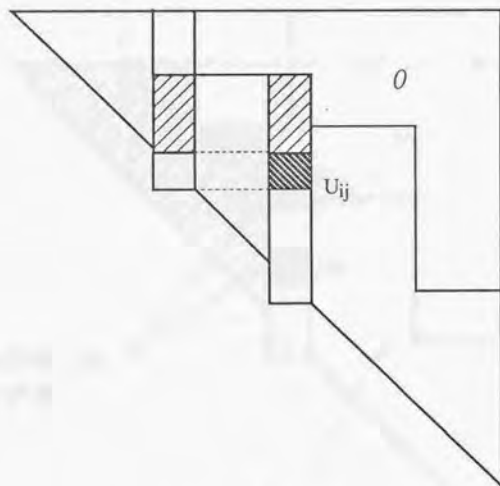
なお、実際のスーパーコンピュータへのインストールの際は、自動ベクトル化・自動パラレル化コンパイラに適合しやすく、後述の検証例では様々なスーパーコンピュータ、ミニスーパーコンピュータにチューニングなしでインストールされている。現在自動パラレル化コンパイラは開発の初期段階であるが、パラレル化のための指示文を1行挿入するだけで、ベクトル・パラレルコンピューティングが実現される。

さらに、大規模解析を行うために、内積形式のスカイライン法をアウトコアソルバとして用いる手法を開発した。縁どり形式のスカイライン法に対するアウトコアソルバは従来よりあったが[斉藤87]、内積形式のスカイライン法に対しては、これまで報告されていない。SUPER SOLVEにおいては、主記憶を多く必要と

する剛性マトリックスを図4. 5(a)のように列方向にブロック分割して格納する方法を採用し、大規模問題を高速に解析することが可能となっている。図4. 5(a)のように列方向にブロック分割する方法は上述の縁どり形式のスカイライン法におけるアウトコアソルバと同じである。このブロック分割の方法には他に図4. 5(b)のように行方向にブロック分割することが考えられる。これは、内積形式のアルゴリズムが行を基準にしていることから考案されたものであるが、実際の数値実験の結果から、高速性に優る図4. 5(a)の列方向のブロック分割方法を採用した。これは、図4. 5(b)のように行方向にブロック分割する場合にはブロックの扱いが煩雑で余分な処理 (Extra-Computations) が増大したためである。

また、解析したい問題の規模やコンピュータ環境に応じてインコアソルバおよびアウトコアソルバを自動的に選択するようにしており、使いやすさを兼ねそろえている。アウトコアソルバが選択された場合、ブロックの大きさは、これから分解するブロックと、参照ブロックの2ブロックが主記憶中に入るように自動的に決定できる。参照ブロックは外部記憶から1ブロックずつ主記憶に読み込み分解を進める。解析規模を表4. 1に示す。例えば東京大学大型計算機センターのスーパーコンピュータ HITAC S-820/80 (主記憶 480 MB, 高速外部記憶 2.5GB) において10万自由度を超える解析が可能であり、大規模性も十分である。さらに大規模な解析を行う場合には外部記憶に低速の大容量磁気ディスクを用いればよい。

最後に、内積形式のスカイライン法は従来の縁どり形式のスカイライン法と全く同じメモリ格納方式でよいから、既存プログラムの求解部だけをライブラリのように扱いモジュール交換が容易に行えるという利点も兼ね備えている。



参照成分

図 4. 2 スカイライン法における三角分解

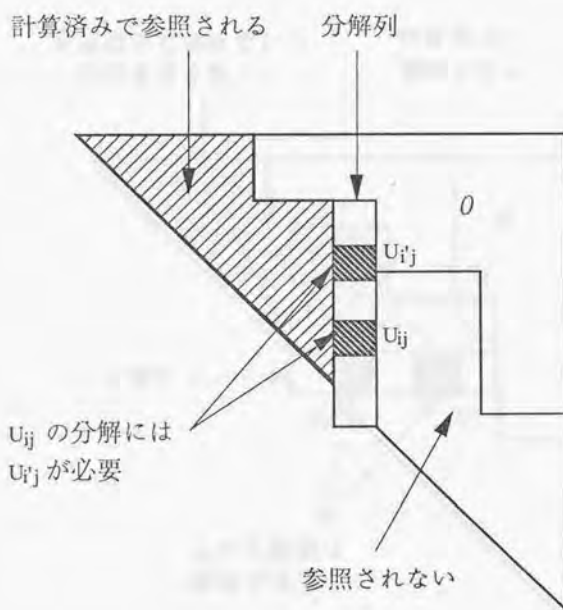


図4. 3(a) 縁どり形式のスカイライン法における三角分解

計算済みで参照されない
(対角要素を除く)

計算済みで
参照される

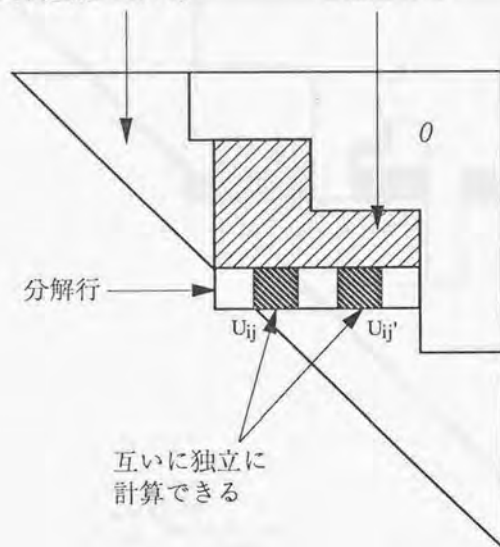


図4. 3(b) 内積形式のスカイライン法における三角分解

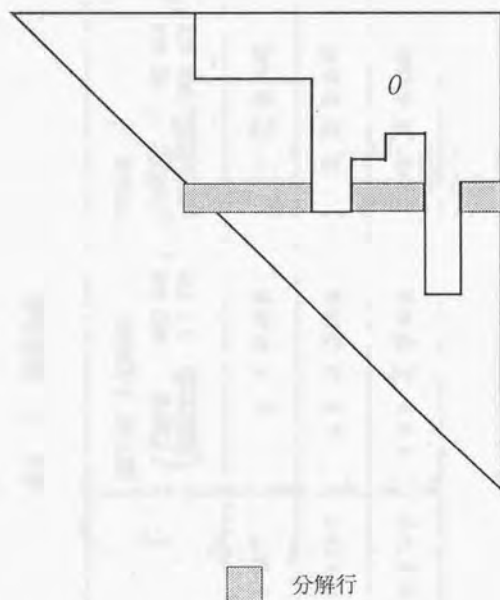


図4. 4 内積形式のスカイライン法における分解行

表 4. 1 解析規模

		HITAC S-820/80 (主記憶 480 MB 拡張記憶 2.5 GB)	TITAN (主記憶 32 MB 拡張記憶 300 MB)
スカイライ ン法 (内積形式)	インコア	4 万 自由度	1 万 自由度
	アウトコア	1 0 万 自由度	3 万 自由度
ICCG法	アウトコア	1 0 0 万 自由度	1 0 万 自由度

4. 2. 3 剛性マトリックスの作成

剛性マトリックスの作成は、

(1) 要素剛性マトリックスの作成

(2) 全体剛性マトリックスへの足し込み

よりなる。SUPER SOLVEにおいては、要素剛性マトリックスを1要素ずつベクトル・パラレルコンピューティングにより高速に計算し、全体剛性マトリックスに足し込む[高野90a]。要素剛性マトリックスの計算は4. 2. 1の(4)で述べた手法によりベクトル・パラレルコンピューティングを行う。最内側DOループのループ長を長くするため、三好ら[三好86]により提案された以下の2通りのインデックスを用いている。

(1) ガウス積分に関する三重DOループを一重化するためのインデックス。

(2) 一般に二次元配列となる要素剛性マトリックスを一次元配列にするためのインデックス。

これらの詳細については文献[三好86][村田88]にまとめられている。

4. 2. 4 固有値解析

有限要素法に現われる代表的な固有値問題には、自由振動問題と座屈問題がある。SUPER SOLVE においては、固有値解析として自由振動問題を取り扱うことができる。自由振動問題の基礎方程式は一般固有値問題の形で表され、次式のように表わされる。

$$[K][x] = \lambda [M][x] \quad (4.10)$$

式(4.1)の剛性マトリックス[K]は、通常の剛性マトリックスを用いればよい。質量マトリックスとしては、分布質量を何らかの方法で集中質量に換算して質量マトリックスを作成するLM (Lumped Mass) 法、エネルギー原理に基づいて要素の質量マトリックスを作成するCM (Consistent Mass)法がある。LM法においては、質量集中の場合と同じく、対角マトリックスの形をしている。したがって、コンピュータで計算するときは1次元配列の形で記憶させることができ、記憶容量が少なく済む。さらに、逆マトリックスを作るにも、コレスキー分解を行うにも便利である。これに対し、CM法は一般にLM法よりも精度がよいとされているが、LM法よりもかなりの手間がかかる上に、CM法のように対角項のみのマトリックスで表すことはできないため、全体質量マトリックスとして記憶する時は剛性マトリックスと同じだけの記憶容量を必要とする。したがって、SUPER SOLVEにおいては、これらの特徴を踏まえた上でLM法による質量マトリックスの作成を行うこととした。

次に、式(4.1)の一般問題の形の固有値問題を解いて、固有振動数ならびに振動モードを求める方法について説明する。固有値問題の解法には、現在次のような解法が広く用いられている[戸川75][鷺津81][Bathe82]。

- [1] ベキ乗法(power iteration method)
- [2] 逆ベキ乗法(inverse iteration method)
- [3] サブスペース法(subspace iteration method)
- [4] Jacobi法(Jacobi method)
- [5] Householder法(Householder method)
- [6] QR法(QR method)

[7] デターミナント法(determinant search method)

[8] Sturm列法(Sturm sequence method)

[9] Ranczos法(Ranczos method)

各解法の特徴を表4, 2に示す。

現在、固有値解法のうちで最もよい解法とされているのは、加速機能を付加したサブスペース法であると言われている[鷲津81]。SUPER SOLVE においては、スーパーコンピュータ用の高速アルゴリズムを求めるために、さらに高速なアルゴリズムであるRanczos法を採用している。これまでRanczos法は数値的に不安定であるという理由で対称マトリックスの固有値問題にはあまり使われていなかった。SUPER SOLVE においては、Ranczos法の持つ数値的不安定さを取り除き[藤掛87]、非常に高速な実用的アルゴリズムとしている。そこで、SUPER SOLVEにおけるRanczos法アルゴリズムについて簡単に説明する。

有限要素法における自由振動問題の式(4.1)は、標準問題の形に書き表すと次のようになる。

$$\begin{aligned} [A]\{x\} &= q\{x\} \\ [A] &= [W]^T [K]^{-1} [W] \\ q &= 1/I, [M] = [W][W]^T \end{aligned} \quad (4.11)$$

固有値を絶対値の小さいほうから順に m 個求める場合、スタートベクトル $[V_1]$ を

$$[V_1] = 1 \quad (4.12)$$

となるように適当にとり、 $k=1, 2, 3, \dots, m$ の順に

$$[V_{k+1}] = \frac{[A][V_k] - \alpha_k[V_k] - \beta_k[V_{k-1}]}{\beta_k} \quad (4.13)$$

として、ベクトル $[V_k]$ を順次作成する。

ここで、

$$\alpha_k = [V_k]^T [A][V_k] \quad (4.14)$$

$$\beta_k = [A][V_k] - \alpha_k[V_k] - \beta_k[V_{k-1}] \quad (\beta_0=0) \quad (4.15)$$

である。

このベクトル生成作業を $k=m$ まで行ったとすると、 $[V]$ は互いに直交し、その副産物として $[A]$ マトリックスの固有値のうち絶対値の大きいほうから m 番目までの固有値を有するマトリックス $[T]$ を得る。 $m \ll ([A]$ の次数)であるから、ランチョス法による三重対角化は、ハウスホルダー法やギブンス法などによる三重対角化と比較して計算量が少なく済むため、高速化が可能となる。

表 4. 2 固有値解析手法

解 法	解法手順	問題の形式	適用可能な マトリックス	適用 可能な 問題の 規模	演算中の マトリックスの 組密性の 保持	得られる 固有値 (n :自由度)	備 考
ベキ乗法	繰り返し法	標準、一般	対角化可能	中	粗	最大固有値	
逆ベキ乗法	繰り返し法	標準、一般	対角化可能	中	粗	最小固有値	
Rayleigh-Ritz 法に基づく 繰り返し法	Rayleigh-Ritz 法に基づく 繰り返し法	標準、一般	実対称	大	粗	複数個 $< n$	
Jacobi法	相似変換 (対角化)	標準、一般	実対称	小	粗	n	マトリックスの 三重対角 化のみ
Householder法	相似変換 (三重対角化)	標準	対称	大	密となる	—	
QR法	相似変換 (上三角化)	標準	主に三重対角 あるいは Hessenberg行列	小	粗	n	
行列式法	行列式の零点	標準、一般	任意	小	粗	1	固有値のみ 計算
Sturm列法	区間内の 固有値の数	標準、一般	実対称	中	粗	1	

4. 3 高速・大規模ソルバSUPER SOLVEの機能と特徴

剛性方程式の求解部に内積形式のスカイライン法を採用したほか、4. 1で述べた全要求項目を満足する高速・大規模ソルバSUPER SOLVEを開発し、その有効性を実証してきた。

SUPER SOLVEは、特殊用途のための専用プログラムではなく、実用的な汎用ソルバとして用いることができるよう機能強化を行っている。SUPER SOLVEの解析機能には線形解析、非線形解析（弾塑性解析、大変形解析）、固有値解析、熱伝導解析があり、2次元、軸対称、3次元の各解析が行える。要素ライブラリとして、ソリッド、シェル、ビーム、トラス、バネといった一般的な要素が網羅されている。機能一覧を表4. 3に示す。

このような機能強化を行うと、プログラムが膨大なものとなり、肥大化するという欠陥に陥りやすい。汎用プログラムには肥大化の傾向が見受けられ、そのため、表面的なチューニングしか行えず、抜本的な高速化が行えないという欠点もある。SUPER SOLVEではこのような考察をふまえ、機能拡充による肥大化、速度低下を避けている。

また、汎用プログラムのように実行時にテンポラリファイルを多用しないようにし、使いやすさにも配慮がなされている。

表 4. 3 SUPER SOLVE の機能一覧

	要素種類	解析種類	材料モデル	境界条件
2 次元解析	平面応力	線形解析		単点拘束 多点拘束 傾斜支持 (局所座標系)
	平面ひずみ	非線形解析 (弾塑性解析, 大変形解析)	線形弾性材料 弾塑性材料 (多直線近似)	集中荷重 分布荷重 物体力 (自重, 遠心力) 強制変位 温度固定 熱伝達 熱流束 発熱 輻射 潜熱
3 次元解析	ソリッド シェール ビーム トラス ばね	固有値解析		
	軸対称シェール 軸対称ソリッド	熱伝導解析 (定常・非定常解析)		

4. 4 高速性・大規模性の検証

4. 4. 1 大規模解析

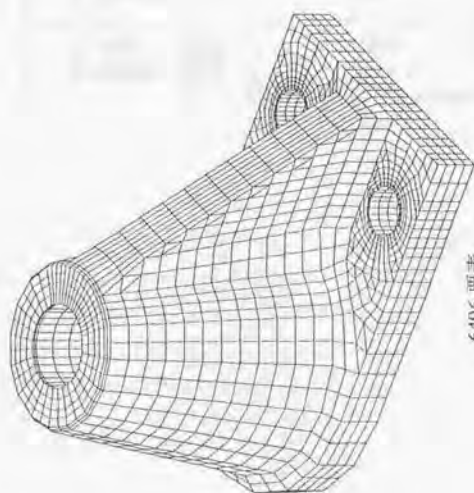
SUPER SOLVEの大規模性の検証と、現在のスーパーコンピュータを用いてどの程度の大規模解析が行えるかを示すため、HITAC S-820/80において約10万自由度の大規模弾性解析を行った。HITAC S-820/80は、シングルプロセッサのベクトルコンピュータであり、ピーク性能は約2 GFLOPSである。

解析例として、図4. 6に示す機械部品とブレードをとりあげた。機械部品は要素数6496、節点数34614、ブレードは要素数6368、節点数35172であり、いずれも10万自由度を越える大規模な問題である。用いた要素は20節点および15節点の2次要素である。

解析結果を表4. 4に示す。いずれの解析も主記憶を262 MBに限定して解析を行った。計算時間(CPU Time)は、機械部品の解析で2277秒、ブレードの解析は1596秒であった。この計算時間中、剛性マトリックスの作成に要した時間は、機械部品・ブレードの解析ともにわずか20秒程度であり、大半が剛性方程式の解法に費やされていた。この剛性方程式の解法は内積形式のスカイライン法によりベクトルコンピューティングが行われている。

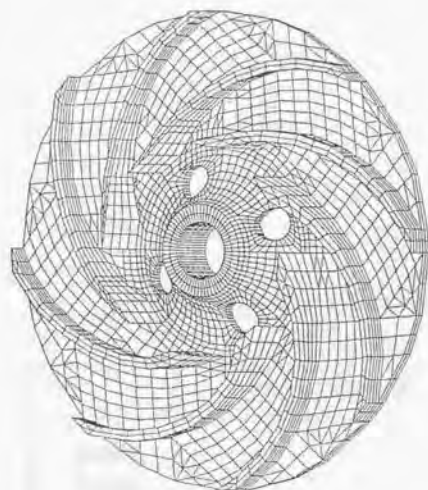
これから以下のことがわかる。

- (1) 10万自由度程度の大規模解析が現在のスーパーコンピュータで十分に解析可能である。
- (2) SUPER SOLVEはベクトルコンピューティング性能、大規模性ともに優れているといえる。



6496 要素
34614 節点
103842 自由度

(a) 機械部品



6368 要素
35172 節点
105516 自由度

(b) ブレード

図 4. 6 大規模解析例

表 4. 4 HITAC S-820/80による大規模解析結果

	機械部品	ブレード
要素数	6496	6368
節点数	34614	35172
自由度数	103842	105516
平均バンド幅	4658	3785
ブロック数	17	14
計算時間 (s)	2277	1596
主記憶 (MB)	262	262
外部記憶 (MB)	1942	1612

4. 4. 2 ギガフロップ問題の解析

ベクトル・パラレル性能の検証として、CRAY Y-MP/832において計算速度を測定した。使用したCRAY Y-MP/832は、主記憶256MBであり、8CPU構成のマルチプロセッサである。米国ミネソタ州のCRAY社に設置されているCRAY Y-MPシリーズの第一号機であるCRAY Y-MP/832を国際専用回線により使用した。最大性能は、1 CPUで312MFLOPSであり、8 CPUでは約2.5GFLOPSである。実際のアプリケーションでは、このような高性能を実現することは難しく、ベクトル・パラレルコンピューティングを効率的に行うことができるアルゴリズムを用いなければならない。そこで、CRAY Research Inc.では実際のアプリケーションで1 GFLOPSを達成しようという試みを全世界的に公募しており、ギガフロップ問題とよばれる。本研究においてもこれに挑戦した。解析においては、コンパイラには手を加えないことが規程されており、通常のコンパイラによる自動ベクトル・パラレル化機能のみを使用しギガフロップ性能を達成することとなっている。

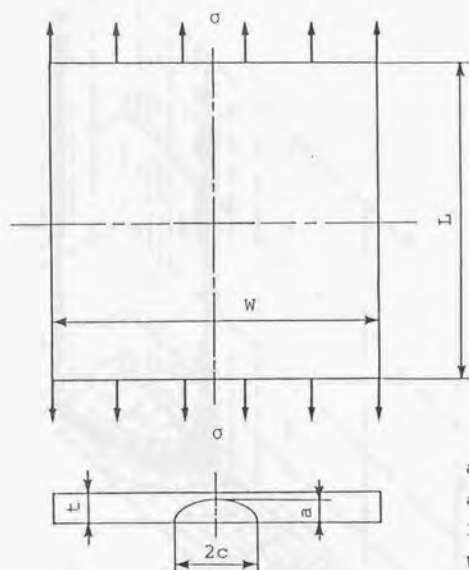
本研究では解析例として、図4. 7に示す3次元表面き裂の弾性解析を行った。3次元表面き裂の応力拡大係数の解析は破壊力学上重要な問題の一つである。対称性を考慮し全体の1/4部分について図4. 8の要素分割を行った。要素として15節点および20節点の2次要素を用いており、要素数784、節点数3926である。き裂材端部に一樣引張り応力を負荷し、弾性解析を行った。

解析結果を表4. 5に示す。6 CPUで1 GFLOPSを越す浮動小数点演算速度が得られており、8 CPUでは約1.3 GFLOPSの性能が得られている。図4. 9はCPU数とSpeedupの関係を示している。同様に、CPU数と性能(FLOPS値)の関係を図4. 10に示す。SUPER SOLVEの結果は、パラレルコンピューティングの理想であるLinear Speedupに近いものとなっており、ベクトル・パラレルコンピューティングが効率良く行われていることがわかる。また、6 CPUを用いた解析で1 GFLOPS以上の性能が得られていることがわかる。

精度の検証のため、図4. 11にはき裂前縁における応力拡大係数の分布を示

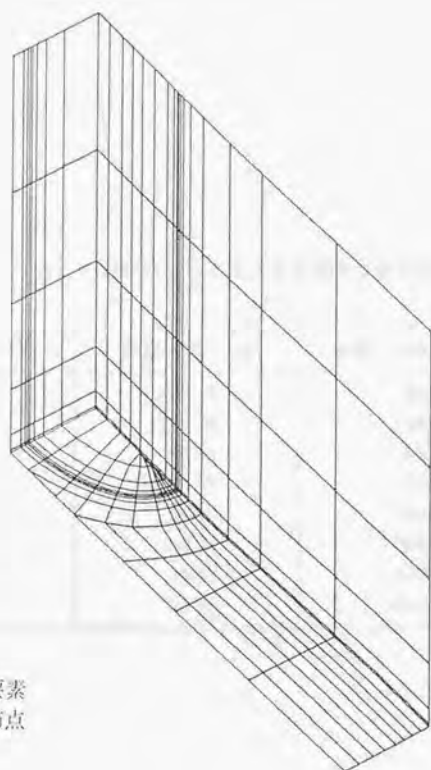
す。本解析結果は、離心角 ϕ が大きい範囲ではRaju-Newman[Raju79]による結果と良く一致している。本解析結果では、自由表面近傍においてBoundary Layer Effectが現れている。これは、Raju-Newmanも指摘している通り、自由表面近傍で細かい要素分割を行い、詳細な解析を行ったためである。図4.12にはき裂近傍における応力分布を示す。

なお、本研究により、三好俊郎教授（東京大学）、加藤毅彦氏、芦沢芳夫氏（日本クレイ）と著者のグループは、米国CRAY社の1989 Gigaflap Performance Awardsを授賞した。ギガフロップ問題の定義として、CRAY社の1989年ギガフロップ問題(1989 Gigaflap Performance Award) は、実用的な問題の解析において1 GFLOPSの性能を実現することを条件としている。また、特殊なコンパイラは使用せず、通常のコンパイラ（CFT77）を使用する。ギガフロップ性能はCRAY スーパーコンピュータの Hardware Performance Monitorを用いて測定し、浮動小数点演算回数を Wall-clock Time（経過時間）で除した値で定義される。なお、著者らを含め、欧米から20組42名が授賞したことを付記する。



$$\begin{aligned} a/t &= 0.8 \\ a/c &= 0.6 \\ 2c/W &= 0.25 \\ W=L &= 320\text{mm} \end{aligned}$$

図 4. 7 3次元表面き裂



784 要素
3926 節点

図 4. 8 3次元表面き裂の要素分割

表 4. 5 CRAY Y-MP/832 による 3 次元表面き裂の解析結果

プロセッサ数	経過時間 (s)	性能 (MFLOPS)
1	229.17	202
2	119.10	389
3	80.45	576
4	62.37	742
5	51.54	890
6	44.54	1040
7	39.58	1170
8	36.28	1276

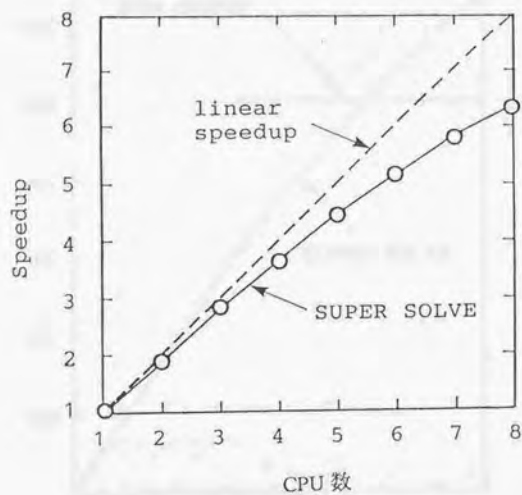


図4. 9 CPU 数と Speedup の関係

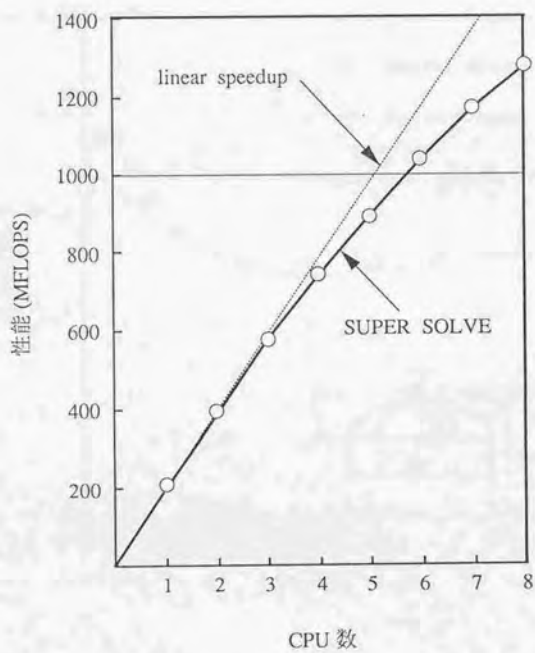


図 4. 10 CPU数とフロップ性能の関係

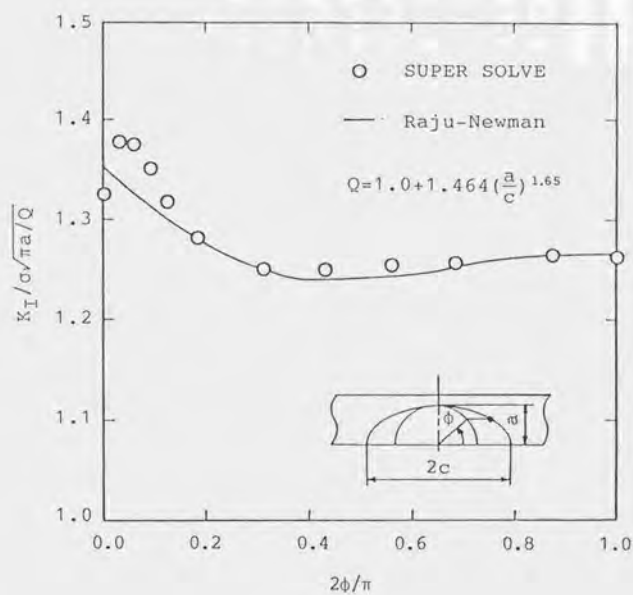


図4.11 き裂前縁における応力拡大係数の分布

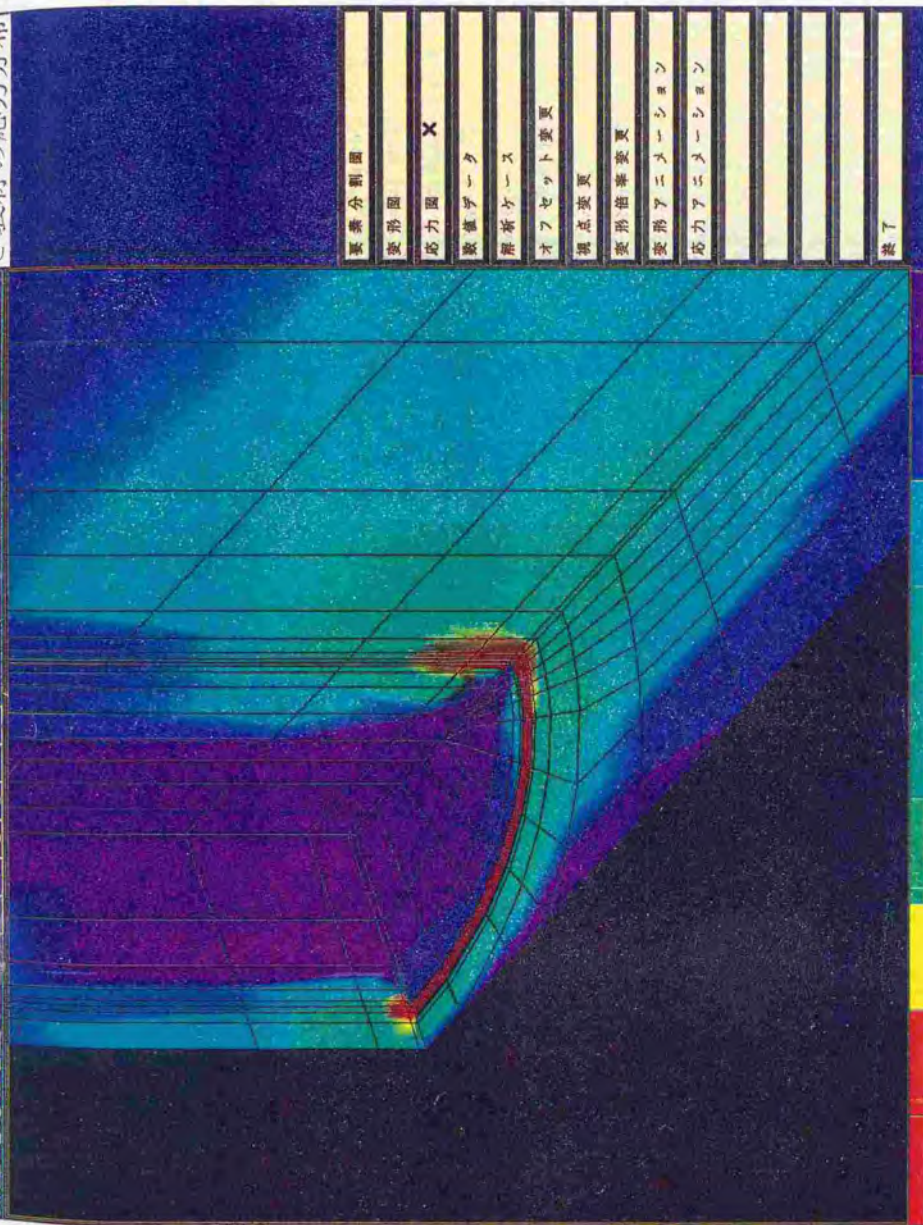


図 4.12 き裂近傍における応力分布

4. 4. 3 ギガフロップ問題のベンチマークテスト

4. 4. 2で述べたCRAY Y-MPによるギガフロップ解析で用いた3次元表面き裂の問題をミニスーパーコンピュータCONVEX C240においても解析した。使用したCONVEX C240は4 CPU構成のマルチプロセッサであり、ベクトル・パラレルコンピューティングを行うことができる。経過時間 (Elapsed Time) をCRAYと比較して表4. 6に示す。また、CONVEX C240におけるCPU数とSpeedupの関係を図4. 13に示す。図よりわかるように、CONVEX C240においても効率的にベクトル・パラレルコンピューティングがなされている。

次に同じ3次元表面き裂の問題をHITAC S-820/80において解析した。解析結果を表4. 7に示す。スカラ処理した場合とベクトル処理した場合の速度向上率である加速率は3.3倍、ベクトル化率は99%を超える高い数字が得られた。これにより、HITAC S-820/80においても効率的なベクトルコンピューティングが行われていることがわかる。

以上の結果から、SUPER SOLVEは用いるコンピュータのアーキテクチャを問わず有効である。したがって、ネットワーク上の様々なコンピュータを使用する場合、1つのプログラムで各コンピュータの特性を引き出すことができる。SUPER SOLVEはネットワークコンピューティングに適したソルバであるといえる。

表4. 6 CONVEX C240 による3次元表面き裂の解析結果

プロセッサ数	経過時間 (Speedup)	
	CRAY Y-MP/832	CONVEX C240
1	229 (1.00)	1724 (1.00)
2	119 (1.92)	901 (1.91)
3	80 (2.86)	629 (2.74)
4	62 (3.69)	490 (3.52)
5	52 (4.40)	—
6	45 (5.09)	—
7	40 (5.73)	—
8	36 (6.36)	—

(経過時間の単位 s)

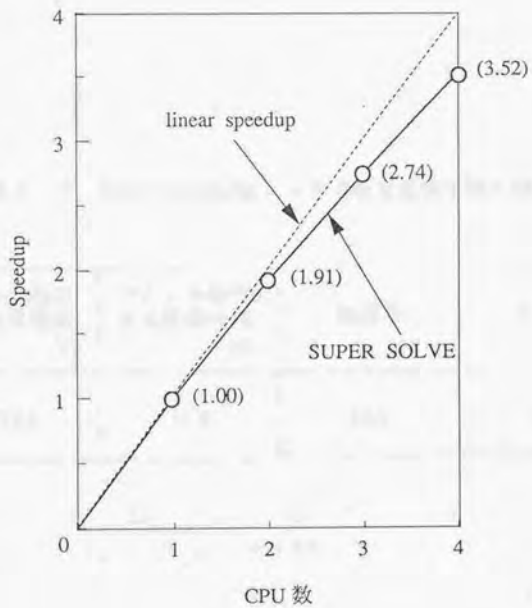


図 4. 13 CONVEX C240における Speedup

表4. 7 HITAC S-820/80 による3次元表面き裂の解析結果

スカラ処理に よる計算時間 (s)	ベクトル処理に よる計算時間 (s)	加速率	ベクトル化率 (%)
1702.8	51.0	33.4	99.3

4. 4. 4 各種解析における高速性の検証

4. 4. 1～4. 4. 3までの解析はいずれもソリッド要素を用いた弾性解析であった。汎用プログラムにおいて、シェル構造解析では剛性マトリックスの作成に多くの計算時間がかかるという傾向がある。SUPER SOLVEにおいては、剛性マトリックスの作成部をはじめ、剛性方程式の解法以外のあらゆる部分も高速化を図っているため、この問題が解決されている。ここでは、SUPER SOLVEの汎用機能の中で代表的な機能の高速性について述べる。

以下の4通りの解析をTITAN3000において行った。これらの例題では、精度の検討も同時に行っている。

(a) シェル構造解析

(b) 弾塑性解析

(c) 大変形解析

(d) 固有値解析

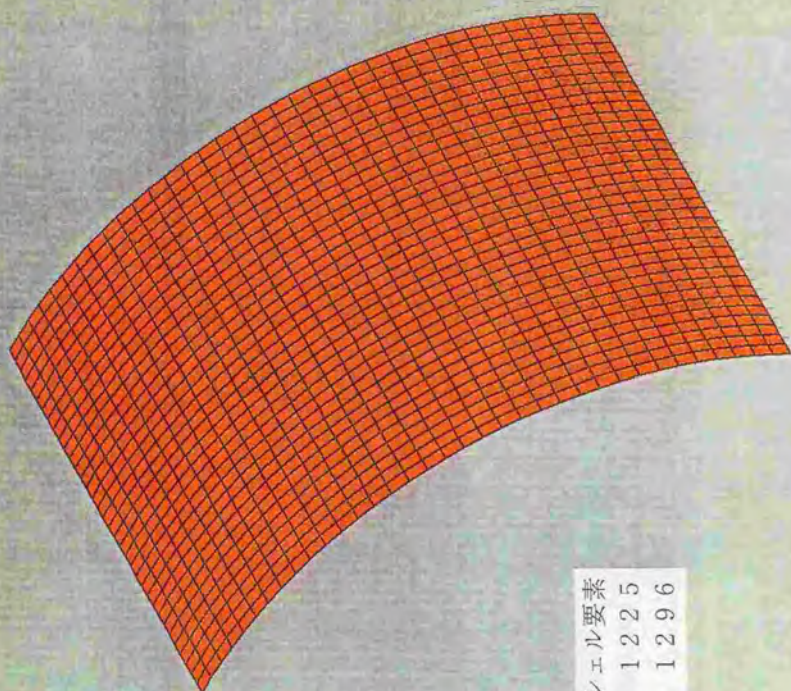
(a) シェル構造解析は図4. 14に示すシェル構造の弾性解析を行った。要素として、4節点のアイソパラメトリックシェル要素を用い、要素数1225、節点数1296である。シェル要素やビーム要素は、1つの節点が6自由度を持つ。したがって、節点数のわりに解析規模は大きくなる。さらに、要素剛性マトリックスの作成がソリッド要素に比べて複雑であるため、この部分の高速化も重要な課題となる。

(b) 弾塑性解析は、増分法により行い、Marcalの方法を採用している。弾塑性解析の検証例として、図4. 15のクランクシャフトの解析を行った。要素として4節点四面体要素を用いており、要素数5813、節点数1766である。解析は10ステージの増分解析を行った。4節点四面体要素は最近、自動要素分割が可能であることから、使用されることもある。図4. 15の要素分割は市販のプリプロセッサ KSWAD/PREPOST (クボタコンピュータ製) [長福90]を用いて作成している。

(c) 大変形解析は、増分の各段階で座標を更新するupdated Lagrange型の定式化を採用した。弾塑性解析で用いた図4.15のクラックシャフトを用いて大変形解析を行った。解析は、10ステージの増分解析を行った。

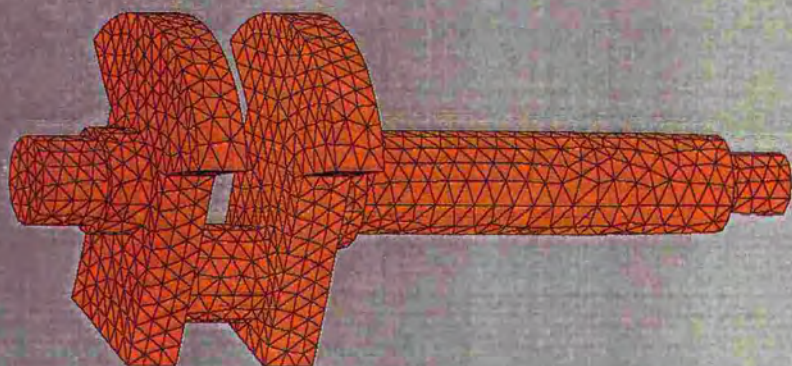
(d) 固有値解析は、ランチョス法による高速アルゴリズムを採用している。検証例として図4.16に示す単純支持板の自由振動解析を行った。要素として8節点アイソパラメトリックシェル要素を用い、節点数1281、要素数400の規則的な要素分割を行った。

これらの各汎用機能の解析結果を表4.8にまとめる。これらの解析はいずれも、(1)～(3)で述べたソリッド要素による弾性解析よりも複雑な計算となる。TITAN3000によるソリッド要素の弾性解析における加速率は、約2倍程度となることがこれまでの検証によりわかっている。したがって、表4.8は良好な結果を示しているといえる。特に、固有値解析では他より高い加速率が得られており、ランチョス法の有効性が示された。なお、シェル構造解析および固有値解析においては、解析解と比較した精度の検証も行ない、問題ないことを確認している。



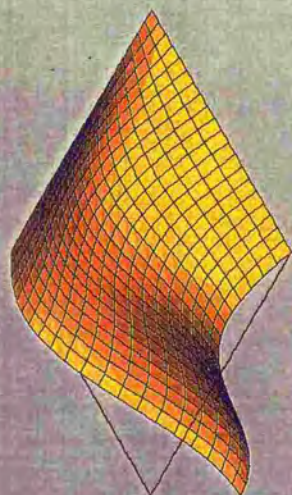
4 節点シェル要素					
要素数	1	2	2	5	
節点数	1	2	9	6	

図 4. 14 シェル構造解析例

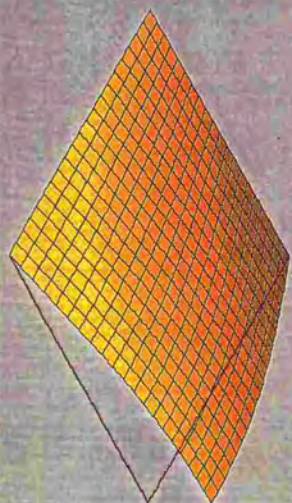


4 節点四面体要素			
要素数	5	8	13
節点数	1	7	6

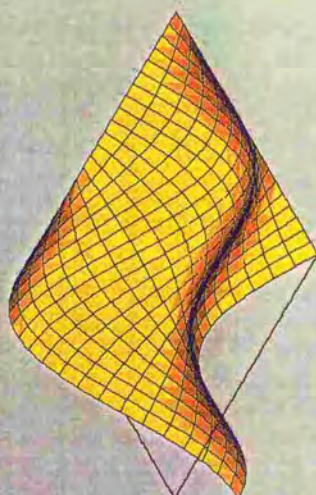
図 4. 15 4 節点四面体要素を用いたクラクシフトの要素分割



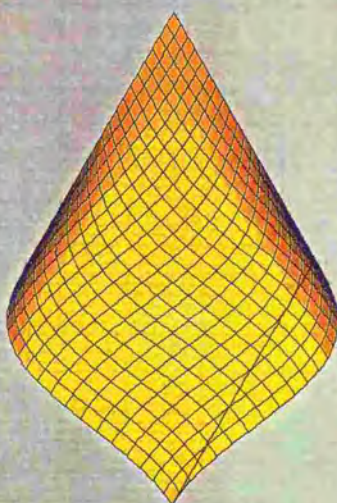
1 次の固有モード



2 次の固有モード



3 次の固有モード



4 次の固有モード

図 4. 16 固有値解析例

表 4. 8 各種解析における高速性の検証結果

	要素数	節点数	スカラー処理に よる計算時間 (s)	ベクトル処理に よる計算時間 (s)	加速率
シェル構造解析	1225	1296	217	116	1.87
弾塑性解析	5813	1766	3505	1485	2.40
大変形解析	5813	1766	3576	1540	2.32
固有値解析	1281	400	1616	547	2.95

(TITAN3000)

4. 4. 5 最新主力マルチプロセッサによるベンチマークテスト

社団法人 日本機械学会 研究協力部会 RC-98「計算固体力学の高度化とその応用に関する研究分科会（主査：三好俊郎 東京大学 教授，会期：平成2年5月～平成4年4月）」第1小委員会（委員長：三好俊郎 東京大学 教授）において，最新の主力マルチプロセッサによる SUPER SOLVE のベンチマークテストを行った。使用したコンピュータは CRAY Y-MP8/2（2 CPU 構成），CRAY Y-MP2E（2 CPU 構成），CONVEX C3820（2 CPU 構成），CONVEX C3860（6 CPU 構成）である。ただし，実際の運用状況の理由から CRAY は 1 ジョブ当たり 1 プロセッサしか使用できなかった。

本ベンチマークテストの主旨は以下の通りである。

- (1) 汎用プログラムに匹敵する機能を有する SUPER SOLVE の最終版を用いたベンチマークテストを行なう。プログラムは約 30,000 ステップの長さである。
- (2) これまで，ベンチマークテストは小規模問題しか扱っていなかった[三好89]が，実用的な範囲で大規模解析を行なう。また，非線形解析も取り上げる。

ベンチマーク問題は次の2例とした。

[例題1：クランクシャフトの大規模弾性解析]

クランクシャフトの弾性解析は約 10,000 節点の大規模解析である。要素として 20 節点六面体 2 次要素と 15 節点五面体 2 次要素を用い，要素数 2153，節点数 9808，自由度数 29424 である。要素分割は，CAD で作成したソリッドモデルに対し，6 章で述べる断面法による自動要素分割を行なっている。ソリッドモデルを図 4. 17 に，要素分割と応力分布を図 4. 18 に示す。

[例題2：ロッカアームの弾塑性解析]

ロッカアームの弾塑性解析は，日常頻繁に行われる約 6,000 節点程度の規模の非線形解析における性能評価を行ったものである。要素として 20 節点六面体 2 次要素と 15 節点五面体 2 次要素を用い，要素数 1028，節点数 5713，自由度数

17139 である。弾塑性解析はMarcalの方法による増分解析法を用い、総ステージ数を10とし、各ステージで2回の反復を行っている。また、ラジアルリターン法による応力補正を行なっている。例題1のクランクシャフト同様、CADで作成したソリッドモデルに対し、6章で述べる断面法による自動要素分割を行なっている。ロッカアームのソリッドモデルを図4.19に、要素分割を図4.20に示す。図4.21は相当応力分布を示しており、図4.21(a)は1ステージ目、同図(b)は10ステージ目の相当応力分布であり、図中赤色で示された塑性域が広がっていく様子がわかる。

まず、主記憶 250 MB の標準的な環境に制限して解析した結果を表4.9に示す。250 MB の主記憶は通常の実行環境である。この場合、クランクシャフトの大規模解析ではアウトコアソルバが選択された。一方、通常頻繁に用いられる規模のロッカアームはインコアで解析できた。表4.9の計算時間は、CRAYにおいては多重ジョブ環境で実行したため経過時間(Elapsed Time)の測定が困難であるのでCPU Timeを示している。一方、CONVEXはアウトコアソルバを用いた場合の低速磁気ディスクとの入出力を含んだ経過時間を示している。

表より、計算時間がマシンのピーク性能に比例していることがわかる。これは、SUPER SOLVEがマシンの性能を十分に引き出しているためである。プログラムはマシンごとにチューニングしておらず、自動ベクトル・パラレルコンパイラによりベクトル・パラレルコンピューティングが実現されている。

CRAYの解析においては、Hardware Performance MonitorによるMFLOPS値を測定した。また、スカラ処理した場合とベクトル化した場合の速度向上比である加速率の測定も行った。これらはいずれも高い値を示しており、ベクトルコンピューティングが効率よくなされていることがわかる。また、解析規模が大きくなる程、性能は高くなることが示された。さらに、4.4.2で述べたギガフロップ解析と1CPUで同じフロップ性能が得られている。今回のベンチマークテストでは機能拡充を図り、実用的なプログラムとなっているが、このような汎用化を行なった後も、高速性は維持されていることが示された。

CONVEXにおいてはベクトル・並列コンピューティングを行っている。並列化によるSpeedupは高い値が得られ、並列コンピューティングも効率よく行われているといえる。

次に、CONVEX C3860 を用いたベンチマークテストについて述べる。今回使用したCONVEX C3860 は主記憶が4GB まで使用可能であったため、約2GB を使用して、クランクシャフトもインコアで解析を行なった。さらに、剛性マトリックスの作成部において CONVEX 用のベクトル・パラレル化命令（コンパイラ・ダイレクティブ）を追加し、さらに高速化を図った。使用したCONVEX C3860 のピーク性能は6 CPU で 720 MFLOPS である。

経過時間 (Elapsed Time) と Speedup を表4、10 に示す。表より、非常に高い Speedup が得られていることがわかる。特に、大規模解析のクランクシャフト（約 10,000 節点）では6 CPU で 5.42 という Speedup が得られた。また、ロッカアームの解析においても2 CPU で 1.92、6 CPU で 4.97 の Speedup が得られた。図4、22 はこの Speedup を図化したものであり、Linear Speedup に近い結果となっており、Speedup の曲線は直線的であり、さらに CPU 数が増えてもパラレル性能は十分に発揮されることがわかる。

以上の結果から、本研究で開発した高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の有効性が実証された。

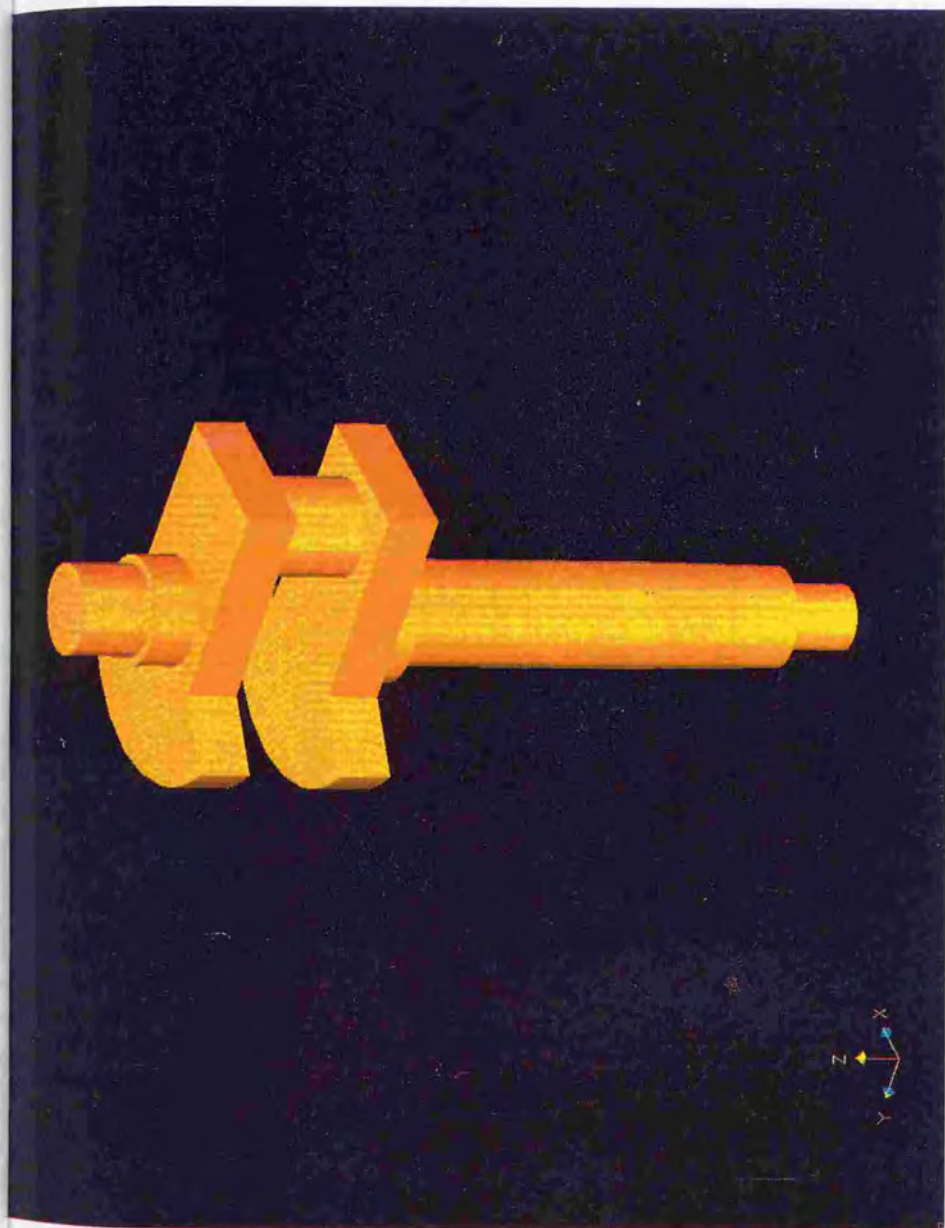
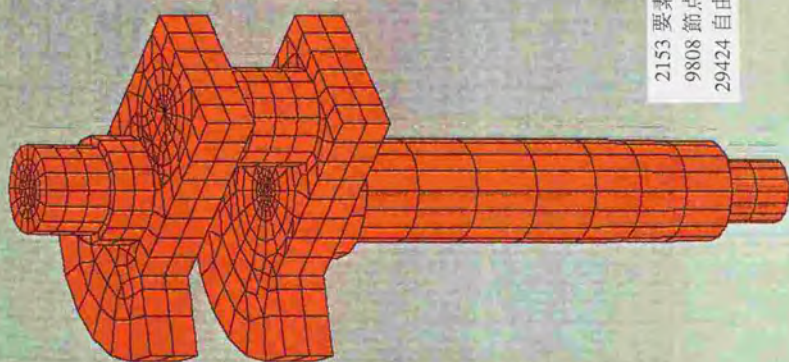
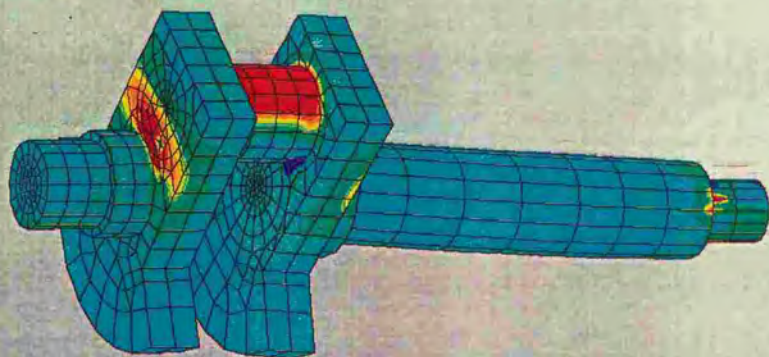


図 4. 17 クランクシャフトのソリッドモデル



2153 要素
9808 節点
29424 自由度

(a) 要素分割



(b) 応力分布

図4.18 クランクシャフト

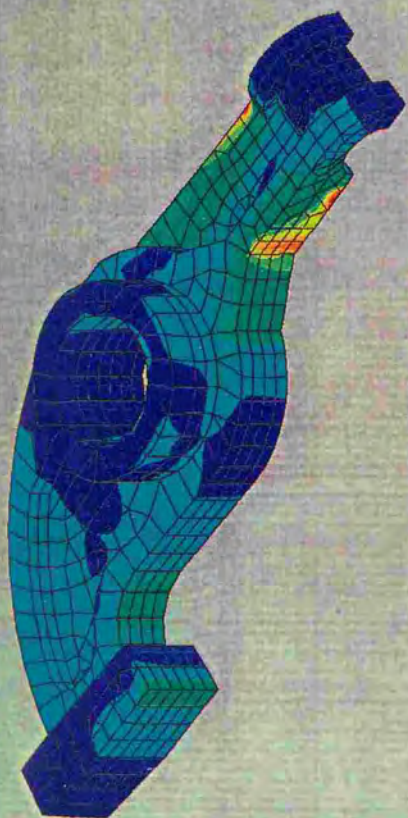


図 4. 19 ロッカアームのソリッドモデル

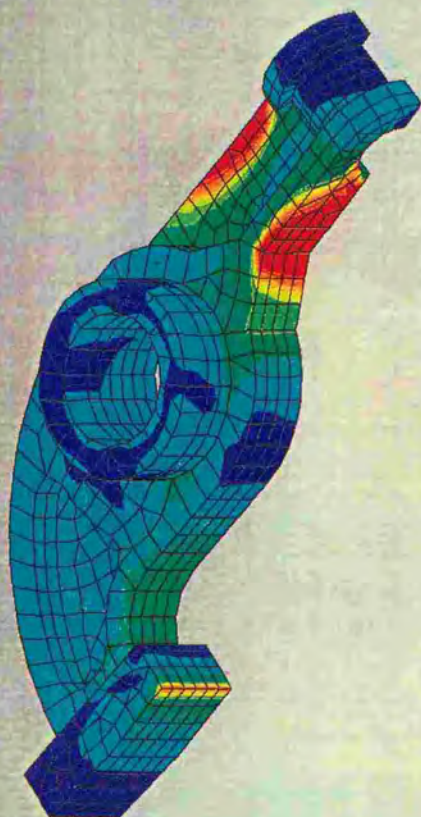


1028 要素
5713 節点
17139 自由度

図 4. 20 ロッカアームの要素分割



(a) 10 ステージ



(b) 100 ステージ

図 4. 21 ロッカアームの相当応力分布

表4. 9 ペンチマークテストの結果

		クラウンシヤフト の弾性解析 29424 自由度 計算時間 *1 (s)	ロッカアーム の弾塑性解析 (10ステージ) 17139 自由度 計算時間 *1 (s)
CRAY Y-MP8/2	1 プロセッサ 500 MFLOPS	1914 SSD 217 MFLOPS *2	5252 152 MFLOPS *2
CRAY Y-MP2E	1 プロセッサ 500 MFLOPS	1708 SSD	5274 加速率 4.9 *3
CONVEX C3820	1 プロセッサ 125 MFLOPS	7066 磁気ディスク	11437
	2 プロセッサ 250 MFLOPS	4413 磁気ディスク Speedup 1.6	6441 Speedup 1.8

*1 CRAYは多重ジョブ環境下で実行し計算時間はCPU Timeを表す。
CONVEXによる計算時間はElapsed Timeを表す。

*2 CRAY Hardware Performance Monitor (HPM) により測定した性能。

*3 ベクトル処理した場合とスカラ処理した場合の計算時間の比。

表4. 10 CONVEX C3860 によるベンチマークテストの結果

(a) 例題1 (クランクシャフトの弾性解析)

	経過時間 (s)	Speedup
1 CPU	5633	1.00
2 CPU	2875	1.96
4 CPU	1497	3.76
6 CPU	1040	5.42

(b) 例題2 (ロッカアームの弾塑性解析)

	経過時間 (s)	Speedup
1 CPU	11150	1.00
2 CPU	5813	1.92
4 CPU	3181	3.51
6 CPU	2243	4.97

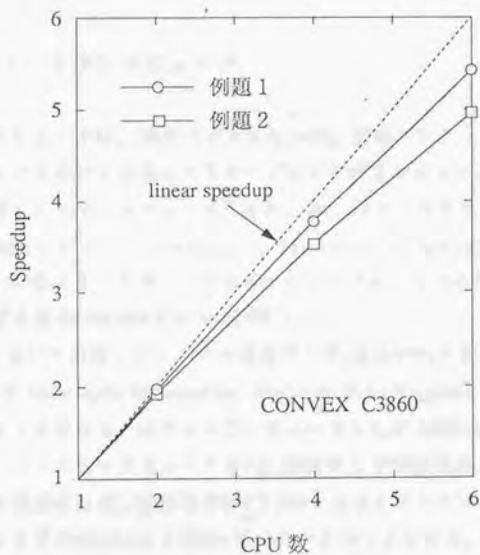


図4. 22 CONVEX C3860 によるベンチマークテストの結果

4. 5 トランスピュータへの適用

本節においては、トランスピュータを用いた疎結合並列コンピュータによる有限要素解析の高速化手法について述べる。

4. 5. 1 トランスピュータ

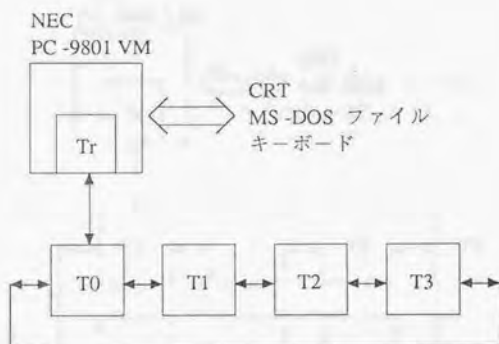
トランスピュータは、32ビットプロセッサ、通信リンク、内部メモリ、タスクスケジューラなどを内蔵した1チップマイクロコンピュータである。本研究において使用したトランスピュータT800は、64ビットFPU (Floating Point Unit) を内蔵しており、10 MIPS、1.5 MFLOPS (20 MHz動作時) の演算性能を有する¹⁾。各トランスピュータは4本のシリアル・リンクを有しており、データ転送速度は最高20Mbpsである[奥川91]。

本研究において使用したシステム構成の一例[高野89b]を図4. 23に示す。これはMIMD (Multiple Instruction, Multiple Data Stream) 型の疎結合パラレルコンピュータである。ホスト・コンピュータとしてNEC PC-9801VMを使用した。ルート・トランスピュータはPC-9801および周辺機器とのインタフェースとしてのみ機能させる。計算はT0~T3の4台のトランスピュータで行う。これらはT800 (20MHz) と2MBのローカルメモリよりなる。4台のトランスピュータはリング状に結合した。リング結合内での通信は両方向の通信を使用している。リング結合を採用した理由は、

(1) 本研究では高々数十台程度の低並列コンピュータを対象としているため、データ通信の距離 (distance) が遠くなるなどの問題がない。

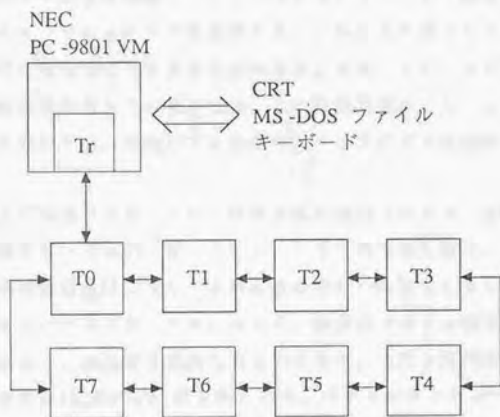
(2) プログラムの管理が容易である。

などによる。実際、distanceを短縮する結合方式も試みたが、通信の判定が複雑になるため全体の計算時間の短縮化にはつながらなかった。逆に、リング結合を採用することにより、トランスピュータの台数に制限はなく、容易に増設ができる柔軟なシステムとなっている。上図の他に、図4. 24のように8個リング状に結合したシステムにおいても性能評価を行なっている[高野90c]。なお、言語としてOccamを使用した。



Tr: ルート・トランスピュータ T414, 1MB DRAM (IMS B010)
 T0~T3: トランスピュータ T800, 2MB DRAM (IMS B404)

図4.23 トランスピュータを用いた
 パラレルコンピュータシステム



Tr: ルート・トランスピュータ
T0~T7: トランスピュータ T 800

図4. 24 8台のトランスピュータより成る
パラレルコンピュータシステム

4. 5. 2 トランスビュータによるパラレルコンピューティング技法

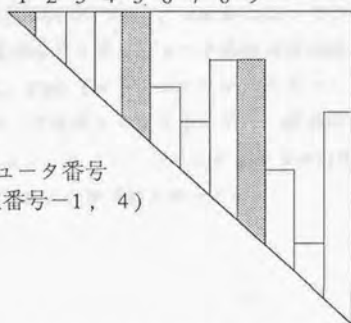
図4. 25 には、内積形式を用いる場合の各プロセッサへの計算負荷の分散方法[Farhat88][高野89a]を示す。ここでは4台のトランスビュータを用いる場合を示している。図のように全体剛性マトリックスをローカルメモリに分散して記憶し、各トランスビュータにおいて三角分解する。これにより各トランスビュータにおける計算負荷をほぼ等しくすることができる。また、トランスビュータ台数の変化に対する柔軟性も有している。なお、この負荷分散は、4. 4で用いたマルチプロセッサにおいては、自動パラレル化コンパイラにより自動的に行なわれている。

さらに、4. 2では述べなかったが、内積形式の改訂コレスキー分解において3行3列同時分解を行い高速化を図っている。3行3列同時分解は、三好ら[三好87a]が開発した高速化技法であり、3次元構造解析の特徴を生かし、並列パイプライン方式のスーパーコンピュータにおいて、複数のベクトル演算器を並列に動作させることにより、高速性を実現したものである。3行3列同時分解のアルゴリズムの詳細は文献[三好87a]に示されている。パラレルコンピュータの場合、内積形式の改訂コレスキー分解における3行3列同時分解は同期点を1/3に減らし、グラニュラリティを大きくする効果がある。これにより、3行3列同時分解を行わない場合に比べ、約2.5倍の高速性能が得られた。

3次元熱弾塑性解析プログラムSUPER SOLVEをトランスビュータ上でOccamにより開発し、その計算速度について評価した。トランスビュータ台数によりプログラムの変更はなく、柔軟性を有している。

トランスピュータ
節点番号

0 1 2 3 0 1 2 3 0
1 2 3 4 5 6 7 8 9



トランスピュータ番号
 $= \text{mod}(\text{節点番号}-1, 4)$

図4.25 ローカルメモリへの負荷分散

4. 5. 3 トランスピュータによる解析例

(1) 3次元弾塑性解析

図4. 26に示すクランクの軸方向圧縮の弾塑性解析を行った[高野89b][高野90c]。要素として20節点アイソパラメトリック要素を用い、節点数は981、要素数は128である。クランクの先端面に強制変位増分 0.095 mmを与え、解析は10ステージ行った。荷重-変位曲線を図4. 27に、本解析に要した計算時間を表4. 11に示す。計算時間は4並列のトランスピュータの場合約35分、8並列の場合約23分であった。本解析は、EWS (エンジニアリング・ワークステーション) の SUN 3/260を用いると約4時間程度を要する。また、M-682Hを用いても数分程度を要する。比較的安価なトランスピュータにより3次元弾塑性解析を実用的な時間内で机上で容易に行うことが可能となった。

(2) MARC との比較

本研究で開発したトランスピュータによる有限要素解析システムの性能評価のとして、同一問題を汎用コード MARCを用いて汎用コンピュータ HITAC M-660Hにより解析した結果と計算時間および精度を比較した[高野90c]。

解析例として表4. 12に示す3例を取り上げた。表には、解析の種類、使用要素の種類、要素数および節点数を示す。解析例中、機械部品Aおよび機械部品Bの要素分割図を図4. 28(a), (b)に示す。いずれも実用的な問題であり、計算時間の点から従来汎用コンピュータを用いて解析を行っていた。

計算時間 (CPU Time) を表4. 13に示す。汎用コンピュータと比較した場合、本システムでは約1/2の計算時間で解析を行うことができた。

精度については、変位、応力、反力をMARCによる結果と比較し、良好な結果を得た。

また、計算時間とともに経過時間 (Elapsed Time)も実用上重要である。汎用コンピュータは通常マルチユーザで多重ジョブ環境で用いるため、本解析例においても経過時間は数時間を要することがあった。また、汎用コンピュータではジョブの実行待ち時間もあるため、ユーザがジョブを投入してから、実際に結果を

得るまでには膨大な時間を要した。一方、本システムの場合はシングルユーザ環境であり、経過時間は計算時間と等しいため、実際の作業能率は大幅に向上した。

(3) 3次元熱弾塑性解析

熱弾塑性解析として、図4.29(a)に示す定常熱弾塑性解析と、同図(b)に示す非定常熱弾塑性解析が可能である。前者の場合は比例的な温度増分を与え、後者の場合は時間ステップ毎に温度分布を与える。

ここでは、図4.30に示す円孔を有する積層板の熱弾塑性解析を行なった。図4.31に示すように、対称性を考慮し、全体の1/8部分を解析した。要素として15節点および20節点アイソパラメトリック要素を用い、要素数66、節点数436である。これは、4台のトランスピュータを用いた場合とトランスピュータを1台のみ使用した場合のパラレル性能(Speedup)を評価するために、1台のトランスピュータが有するローカルメモリサイズの制限内で解ける規模の問題である。

本解析では、材料定数の温度依存性を考慮した。材料定数を表4.14に示す。なお、この材料定数は実際の具体的な材料ではなく、架空のデモ例であり、図4.30中斜線を施した材料2は、線膨張係数が材料1の10倍とした。降伏応力は図4.32に示す通り温度依存性を考慮した。ただし、材料1、2とも弾完全塑性体とした。

温度分布は領域内で一様とし、図4.33に示すように0℃から50℃まで上昇させた後、再び0℃まで下降させた。したがって、本解析は除荷、再降伏を含んだ複雑な解析となる。温度増分は10℃とし、10ステージの熱弾塑性解析を行なった。各ステージにおいて Marcal の反復を2回ずつ行なった。

表4.15に計算時間と Speedup を示す。4台のトランスピュータによる計算時間は約32分であった。1台のみを用いて解析した場合と比較し、パラレルコンピューティングにより約3倍の速度向上が得られた。

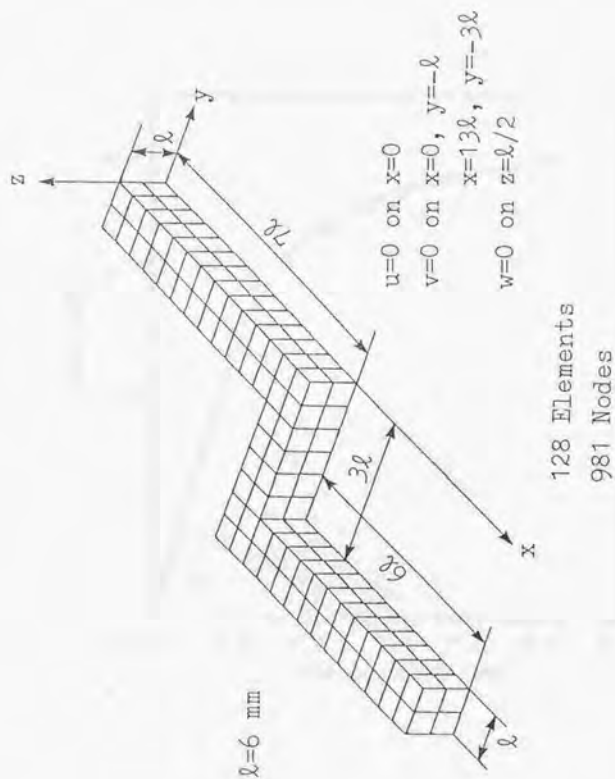


図 4. 26 クランク

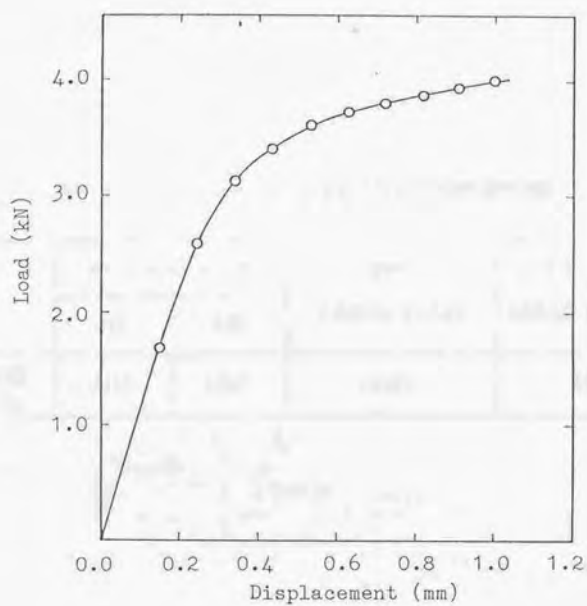


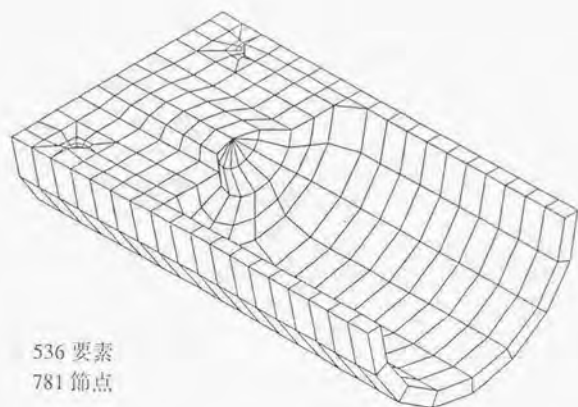
图 4. 27 荷重—变位曲线

表4.11 トランスピュータによるクランクの弾塑性解析時間

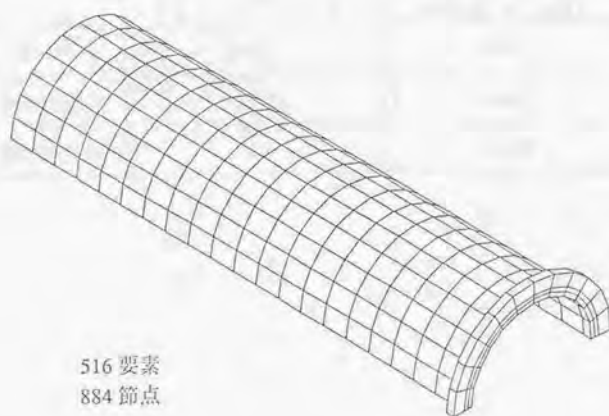
	トランスピュータ		EWS	メインフレーム
	4台	8台	NSSUN 3 / 260	HITAC M - 682H
計算時間 (s)	2115	1365	14486	138

表4.12 解析例

	解析種類	使用要素	要素数	節点数
煉瓦	熱応力解析	20 節点 ソリッド 2 次要素	64	501
機械部品 A	弾性解析	8 節点 ソリッド 1 次要素	536	781
機械部品 B	弾性解析	8 節点 ソリッド 1 次要素	516	884



(a) 機械部品 A

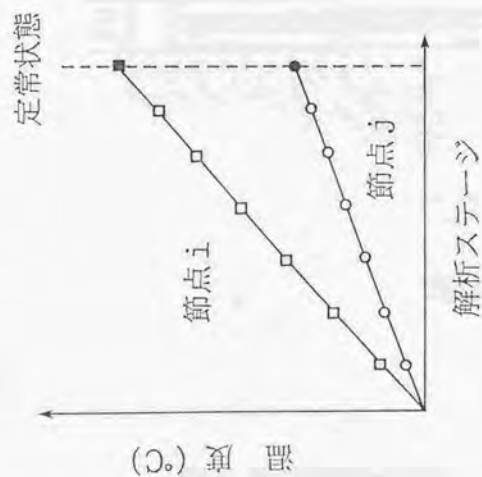


(b) 機械部品 B

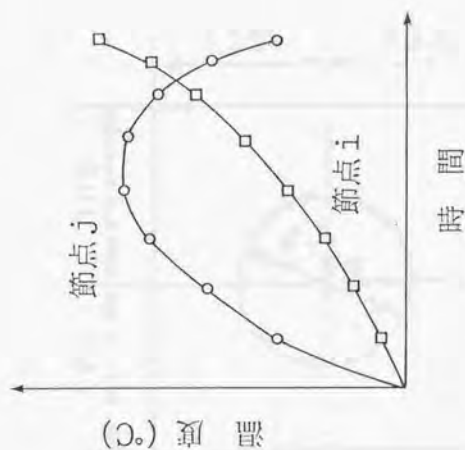
図 4. 28 機械部品の要素分割

表4.13 MARC との計算時間の比較

	本システム	MARC (Ver. K2)
	8 トランスピュータ	メインフレーム HITAC M - 660H
煉 瓦	400.4	526.8
機械部品 A	72.5	180.3
機械部品 B	95.4	192.6

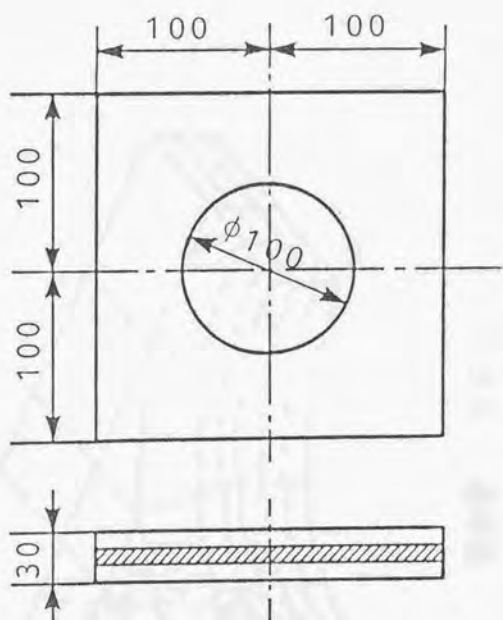


(a) 定常熱弾塑性解析における
温度増分 (比例的温度増分)



(b) 非定常熱弾塑性解析における
温度増分 (任意温度分布)

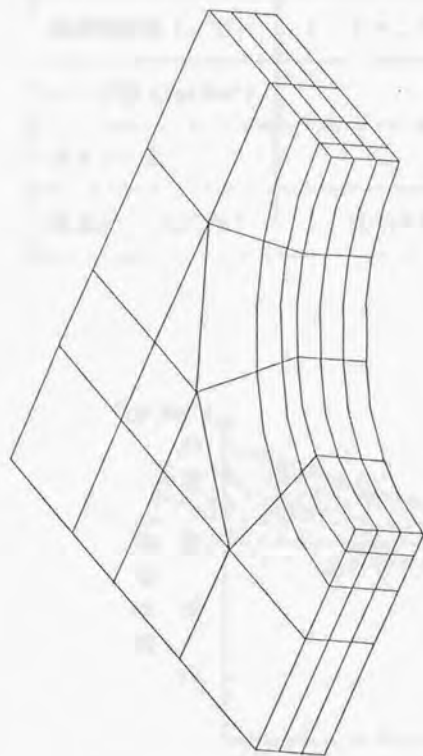
図 4. 29 熱弾塑性解析手法



□ 材料 1

▨ 材料 2

图 4.30 热弹塑性解析例



要素数 6 6
節点数 4 3 6

图 4. 31 要素分割

表 4. 14 材料定数

	材 料 1	材 料 2
線膨張係数 ($/^{\circ}\text{C}$)	1.1×10^{-5}	1.1×10^{-4}
ヤング率 (kgf/mm^2)	21000	
ポアソン比	0.3	
降伏応力 (kgf/mm^2)	温度依存性を考慮 (下図)	

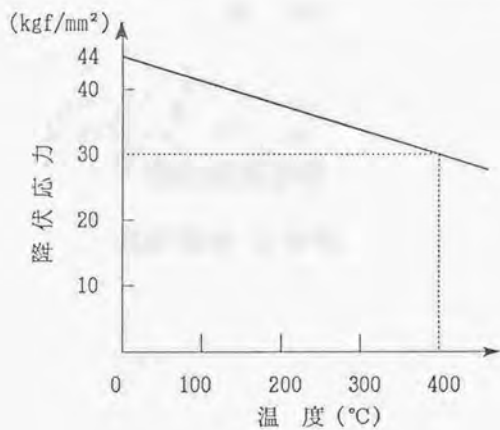
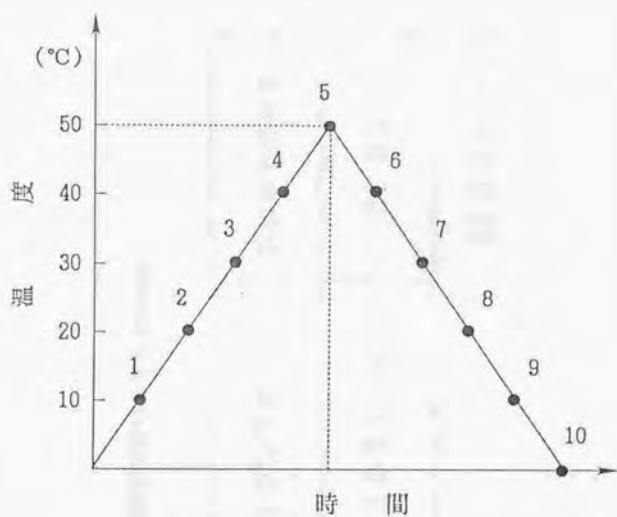


図 4. 32 降伏応力の温度依存性



- ・ 一樣な温度分布
- ・ 温度増分 10°C

図 4. 33 温度履歴

表 4. 15 熱弾塑性解析における Speedup

1トランスピュータ	4トランスピュータ	Speedup
5872. 6s	1931. 8s	3. 03

(10ステージ)

4. 6 高並列・超並列コンピューティングへの展望

ベクトル・パラレルコンピューティングによる高速・大規模構造解析のアルゴリズムと実際の適用例について述べた。マルチプロセッサ方式のスーパーコンピュータは現在多く普及しており、今後とも主流である。主力マルチプロセッサによるベンチマークテスト、トランスビュータを用いたパラレルコンピュータによる解析結果などから、ベクトル・パラレルコンピューティング技法の有効性を示した。しかしながら、前節までに述べた SUPER SOLVE、および内積形式のスカイライン法は数台、十数台から高々100台程度までの低並列コンピュータを対象として開発したものである。4. 4. 5のベンチマークテストから、低並列コンピュータであれば5,000～10,000節点の実用上最も解析頻度の高い規模の問題でパラレル性能はプロセッサ数の増加に対して直線的に向上することが実証された。しかしながら、100台～10,000台クラスの高並列・超並列コンピュータ[高橋87]へのSUPER SOLVEを適用は、勿論可能ではあるが、Speedupはさほど高くなりず、あるプロセッサ数で頭打ちになると予想される。

この点に関し、高並列・超並列コンピュータではそもそもマシン専用プログラムしか実行できないのであるから、自動パラレルコンパイラのある低並列コンピュータと高並列・超並列コンピュータではプログラムの使い分けがあつてよいと考える。パラレルコンピュータと言っても、メモリ設計が根本的に異なるのであるから、それぞれに最適なアルゴリズム、プログラムも異なっていてしかるべきである。むしろ、高並列・超並列コンピュータを使用する意義、価値のある解析対象は何か、逆に、高並列・超並列コンピュータでないと解析できない対象は何か、という考察を抜きにして高並列・超並列コンピューティングを議論しても無意味である。

高並列・超並列コンピュータを使用する場合、従来のスーパーコンピュータ、EWSなどに対して、高速性、大規模性のみならず、実質的なランニングコストの点でも優位性が得られないと効果がない。高並列・超並列コンピュータは高価であるため、導入に見合う成果が得られなければ、アプリケーションの充実している低並列マルチプロセッサの方が得であるのは自明である。

大規模性という点では、4. 4. 1に示した通り、10万自由度程度の静的解析は現在のスーパーコンピュータで日常的に行うことが可能である。また、著者

らは反復法の一つであるICCG法、SCG法の構造解析への適用についても研究を行っており、これらを用いれば50万~100万自由度の大規模解析が可能である。これについては5章で述べる。大規模性という点では、高並列・超並列コンピュータの必要性は希薄である。

しかし、高速性という点で、接触解析、衝撃解析などの長大な計算時間を要する非線形解析[下牧90][中島90][三浦90]において、高並列・超並列コンピューティングへの期待が高まる。逆に、今後高並列・超並列コンピューティングを議論する際には、接触解析、衝撃解析などの非線形解析を行うことが前提となる、といっても過言ではない。

これまで、FEMによる静的線形解析における高並列・超並列コンピューティング技法については、領域分割法[矢川92]の有効性が報告されている。しかしながら、領域分割法は、複雑な非線形解析において共役勾配法の収束性が必ず問題になる他、接触問題、MPC(Multiple Point Constraint: 多点拘束)など適用不可能な問題があり、本研究の目的である次世代汎用ソルバの開発には適当でない。

この他、EBE-SCG(Element-by-Element Scaled CG)法が候補としてあげられる。これについては、著者が調査を行っており、詳細は5章で述べる。結論としては、演算量が大幅に増大するのでプロセッサ数が多くなれば利点がでると予想されるが、基本的には「スカラ速度の低下のないこと」という条件を満足できないので、注意を要する。勿論反復法であるため、収束性の問題もはらんでいる。

そこで、本論文で取り上げた静的非線形解析のほかに、著者はパラレルコンピューティング用衝撃解析プログラムの開発を行っている。衝撃解析は上述の通り、接触・大変形・弾塑性といった複雑な非線形現象をとまなう解析が多く、現在スーパーコンピュータを用いても長大な計算時間がかかる。例としては、自動車のフルスケールカーの衝突解析があげられる。

著者が着手した衝撃解析に関する研究は、自動車のフルスケールカーの衝突解析などを主なターゲットとし、高並列・超並列コンピュータにより従来のスーパーコンピュータに優る高速性・大規模性を得ることを目的としている。

衝撃解析アルゴリズムには時間積分の方法の違いにより陰解法と陽解法の2種類がある。陰解法ではNewmark-β法などの時間積分法を用いるため、本論文の主眼である静的解析と同様に連立一次方程式の求解が必要となる。一方、陽解法

では時間積分として中心差分などを用いるため、代入計算だけで解を得ることができ、高速に解析できる点で有利である。実際、衝撃解析が普及した最大の理由は陽解法を用いた DYNAS3D が開発されたことによる[林88]。衝撃解析の平行コンピューティング技法としては、陰解法に対して領域分割法と併用し報告されている[大石91]が、接触解析に適用できない領域分割法を使用することは得策でない上、陰解法を用いた衝撃解析は非実用的である。以上の考察に基づき、陽解法による衝撃解析における超並列コンピューティングについて研究を行なっているところである。

今後の構造解析におけるスーパーコンピューティングとしては、大規模な静的非線形解析、および中規模な衝撃（動的）解析は適度なプロセッサ数（低並列）のマルチプロセッサを使用し、大規模な衝撃（動的）解析を高並列・超並列コンピュータで行うといった使い分けがでてくると思われる。構造解析の分野においては、将来スーパーコンピュータの大半が高並列・超並列コンピュータにおきかわることはなく、マルチプロセッサ型のスーパーコンピュータとの共存が望ましいと考える。

第5章 スーパーコンピュータ用 超大規模ソルバ FEM3D/I の開発

5章 スーパーコンピュータ用超大規模ソルバ FEM3D/Iの開発

5.1 研究方針

本章では、高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE のモジュールの一つとして、ICCG法による解法について述べる。ICCG法の最大の特徴は大規模性にある。ここではまず、ICCG法を有限要素法による構造解析に適用する場合のアルゴリズム[高野89a]と、スーパーコンピュータによる大規模解析結果からICCG法の適用性、大規模性、計算速度を示す。

SUPER SOLVEは、前述の通り、次世代の多彩なコンピュータ環境に適合し、高度な要求に対応するため、次世代FEMソルバとして開発した汎用高速・大規模ソルバである。SUPER SOLVEは、剛性方程式の解法として内積形式のスカイライン法を標準装備し、約10万自由度までの大規模解析をサポートしているが、さらに超大規模解析に対する要求に応えるためにICCG法による解析モジュールをあわせて開発した。

本章においては、少ない記憶容量でも大規模解析が可能であるICCG法により、数10万～100万自由度クラスの超大規模解析を行う超大規模解析ソルバFEM3D/I [高野89a]を開発した。ICCG法を用いた FEM3D/I はベクトルコンピュータ用に開発したものである。

さらに、ICCG法のみならず、FEMによる構造解析への反復解法の適用性について幅広く検討した。具体的には、SCG法およびEBE-SCG(Element-by-Element SCG)法を取り上げた。SCG法についてはベクトルコンピューティングを対象とし、EBE-SCG法についてはパラレルコンピューティングを対象としている。特にEBE-SCG法は、高並列・超並列コンピューティングへの展望を明らかにするために調査したものである。

結びとして、本論文の本題である内積形式のスカイライン法と反復解法の比較を行なった。

5. 2 有限要素法による構造解析へのICCG法の適用

有限要素法による構造解析にICCG法を適用する場合のアルゴリズム[高野89a]について述べる。ICCG法は反復法の一つであり、前処理として不完全コレスキー分解を行った後、共役勾配法(CG法: Conjugate Gradient法)を適用する方法である。スカイライン法に代表される直接法ではスカイラインの内側の成分をすべて記憶する必要があるのに対して、ICCG法は剛性マトリックスの非零成分のみを記憶すればよい。解析に必要なメモリが少なく、大規模性に優れるという利点に加え、前処理を施し反復回数を減らすことにより高速に解析が行える。

ICCG法はMeijerink [Meijerink77]により提唱され、差分法による流体解析に当初適用され、その有効性が実証されたが、有限要素法による構造解析にICCG法を適用する場合には、差分法において提唱されたアルゴリズムのままでは適用不可能であることがわかった。著者は、この点について検討した結果、図5.1のアルゴリズムを提唱し、有限要素法による構造解析に初めてICCG法を適用した[高野89a]。また、著者は使用する要素種類により性質が異なることを唯一人指摘し、整理している[高野89a]。

図5.1ではまず、式(5.1)に示すスケーリング[戸川77]を行ない、剛性マトリックスの対角項をすべて1にそろえた後、ICCG法を適用する。

次に、不完全コレスキー分解の方法を式(5.2)に示す。式(5.2)では対角項のみを分解する。著者は、有限要素法による構造解析において、重み(const)を乗じる分解方法を初めて提唱した。本手法は、現在標準的な分解方法として使用されている。この重みは使用する要素種類により値が異なることがわかった。3次元ソリッド要素の場合には、

- (1) 4節点四面体要素の場合 1.0
 - (2) 6,8節点アイソパラメトリック要素の場合 1.5
 - (3) 15,20節点アイソパラメトリック要素の場合 2.0
- を用いばよい。さらに、シェル要素についても検討を行ない、
- [4] 3節点三角形要素の場合 1.5
 - [5] 4,8節点四辺形アイソパラメトリックシェル要素の場合 2.0

を用いればよいことを示している。この重みは、対角項が負になることを防ぐためのものである。重みが 1.0 の場合が Meijerink の式[Meijerink77]と一致することから、4 節点四面体要素の場合は差分法により離散化された規則格子のマトリックスと性質が類似であることがわかる。この重みは、すべての対角項が負にならないような重みの中で 1.0 に近い値を選択することとし、各種データにおいて重みを様々に変化させたパラメトリックスタディの結果決定した。ただし、上記の値を用いても対角項が負になる場合には、上記の値を初期値として重みを増分することにより簡単に適用できる。この場合、対角項のみを分解する不完全コレスキー分解に要する計算時間は非常に短いため時間のロスもなく問題ない。さらに、この操作はプログラミングが容易であるため、自動的に処理され、結局ユーザは重みを全く意識する必要がないため、実用的であるのが特徴である。弾塑性解析へ適用する場合には塑性域が広がるにつれて剛性マトリックスの性質が変化するため、各増分ごとに重みを自動的に決定するようにし、ユーザの負担を除く手法を開発してきた。

前処理の不完全コレスキー分解が終了後、式 (5.3), (5.4) の反復を行なう。収束判定は相対残差が 1.0×10^{-6} 程度で打ち切るとよい。

ICCG法は少ない記憶容量で解析を行うことが可能であるが、さらにアウトコアソルバとして用いる手法を開発し、超大規模解析を可能とした。アウトコアソルバの場合は、剛性マトリックスを内積形式のスカイライン法と同様に列方向にブロック分割する。反復法においてアウトコアソルバを用いると、各反復毎に外部記憶との入出力が生じ、非現実的とされていたが、スーパーコンピュータは高速な半導体記憶装置を外部記憶に使用しているものが多く、後述の実証例の通り問題ないことが明らかとなった。

解析規模について、スカイライン法と比較した一例を、図 5. 2, 表 5. 1 に示す。表 5. 1 は表 4. 1 を再記したものである。図 5. 2 は、東京大学大型計算機センターにおいて主記憶 28.5 MB, 拡張記憶 128 MB を使用できるという環境を考慮して作成した図である。3次元弾性問題の場合、スカイライン法では約 6,000 節点程度の問題しか解析できないのに対し、ICCG法では約 20,000 節点まで解析可能となる。現在は、東京大学大型計算機センターにおいて主記憶 480 MB, 拡張記憶 2.5 GB に増設されており、表 5. 1 の通り 100 万自由度の超大規模解析が可能である。

スケーリング

$$\left. \begin{aligned} K\delta &= f \\ P^{-1/2} K P^{-1/2} x &= P^{-1/2} f \\ \delta &= P^{-1/2} x \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

前処理 (不完全コレスキー分解)

$$\left. \begin{aligned} Ax &= b \\ A &= U^T D U + R \quad (R \neq 0) \\ u_{ii} &= (const) \times a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} u_{ki}^2 d_k \quad (i > 1) \\ u_{11} &= a_{11} \\ u_{ij} &= a_{ij} \quad (i \neq j) \\ d_i &= u_{ii}^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

共役勾配法による反復

(1) x_0 を初期ベクトルとして

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= b - Ax_0 \\ p_0 &= (U^T D U)^{-1} r_0 \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

とおく。

(2) $k = 0, 1, 2, \dots$ について以下の反復を行う。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_k &= \frac{((U^T D U)^{-1} r_k, r_k)}{(p_k, A p_k)} \\ x_{k+1} &= x_k + \alpha_k p_k \\ r_{k+1} &= r_k - \alpha_k A p_k \\ \beta_k &= \frac{((U^T D U)^{-1} r_{k+1}, A p_k)}{(p_k, A p_k)} \\ p_{k+1} &= (U^T D U)^{-1} r_{k+1} + \beta_k p_k \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

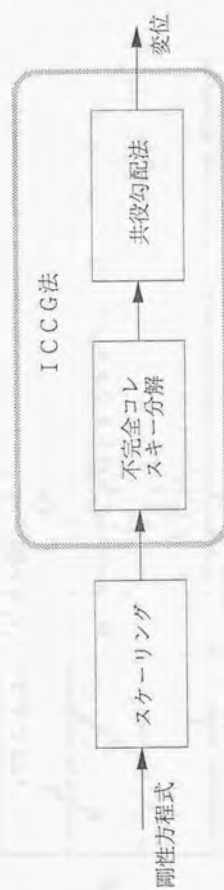


図5. 1 ICCG法のアルゴリズム



図 5. 2 解析規模

表 5. 1 解析規模

		HITAC S-820/80 (主記憶 480 MB 拡張記憶 2.5 GB)	TITAN (主記憶 32 MB 拡張記憶 300 MB)
スカイライ ン法 (内積形式)	インコア	4 万 自由度	1 万 自由度
	アウトコア	1 0 万 自由度	3 万 自由度
ICCG法	アウトコア	1 0 0 万 自由度	1 0 万 自由度

5. 3 ICCG法とスカイライン法のベンチマークテスト

ICCG法によるスーパーコンピュータ用超大規模解析ソルバ FEM3D/I の高速化技法の有効性について検証するため、複数のスーパーコンピュータおよび汎用コンピュータを用いてベンチマークテストを行なった。このベンチマークテストは社団法人 日本機械学会 研究協力部会 RC-74 「非線形有限要素法の応用研究分科会（主査：矢川元基 東京大学工学部 原子力工学科 教授，会期：昭和61年4月～昭和63年3月）」第4小委員会（委員長：三好俊郎 東京大学 教授）におけるスーパーコンピュータワーキンググループの活動として行なわれた。

使用したプログラムは、著者が東京大学大型計算機センターのスーパーコンピュータ HITAC S-810/20 に対して開発したものである。ベンチマークテストは、スーパーコンピュータごとにプログラムを最適化することを行わず、このプログラムをそのまま用いて行なった。以下にプログラムの概要について示す。

(1) FEM3D/I

連立一次方程式の解法にICCG法を用いた3次元弾性解析プログラムである。収束の判定は残差のノルムと剛性方程式の右辺ベクトルのノルムの比 ϵ を用いて行なう。要素は15節点と20節点のアイソパラメトリック2次要素を用いている。

(2) FEM3D/S

連立一次方程式の解法に縁どり形式のスカイライン法を用いた3次元弾性解析プログラムである。使用要素はFEM3D/Iと同じである。これは内積形式のスカイライン法を用いた SUPER SOLVE の原形になったプログラムである。本ベンチマークテストではベクトルコンピュータのみを使用しているので、縁どり形式と内積形式のスカイライン法の違いによる速度の差は全くない。

ベンチマーク問題は図5.3に示す3次元表面き裂の一樣引張り（190要素，970節点）である。

FEM3D/I，FEM3D/Sによる3次元表面き裂の計算時間を表5.2，表5.3に示す。表中，左半分がスーパーコンピュータによる計算時間，右半分が汎用コ

ンピュータによる計算時間である。CRAY X-MP/3 は CRAY X-MP/4 (4 CPU 構成のCRAY X-MP) の 4 CPU のうち 3 CPU を用いて計算したことを示している。ベクトル化率の () 内は推定値である。MICRO VAX-II は EWS クラスのコンピュータである。表から以下のことがわかる。

(1) FEM3D/I を用いた場合、スーパーコンピュータは汎用コンピュータと比較して 2~45 倍の計算速度を有する。一方、FEM3D/S を用いた場合、スーパーコンピュータは汎用コンピュータと比較して 2~100 倍の計算速度を有する。

(2) FEM3D/I のベクトル化率は 93~94% である。一方、FEM3D/S のベクトル化率は 92~97% であり、ほぼ等しい。一般に、ベクトル化率が 90% を超えて初めて十分な高速性が得られると言われているため、ベクトルコンピューティングが効率よく行なわれていることがわかる。

(3) FEM3D/I のスーパーコンピュータにおけるスカラー演算時間とベクトル演算時間の比 (加速率) は 4~5 である。一方、FEM3D/S のスーパーコンピュータにおける加速率は 3~15 である。

(4) ICCG 法はメモリ効率が良いため MICRO VAX-II (主記憶 5MB) でも実行可能である。

(5) ベンチマーク問題のき裂材の引張りは、ICCG 法が不得意とする収束性の悪い問題であるにもかかわらず、スカラー演算の演算時間は FEM3D/I、FEM3D/S とほぼ等しい。

(6) FEM3D/I と FEM3D/S では、ベクトル演算時間は FEM3D/S が短い、これはスカイライン法が ICCG 法よりも加速率が高いためである。ICCG 法は前処理によって演算量を減らし高速化されているのに対し、スカイライン法は加速率が高いため高速化されている。

(7) メモリ効率は ICCG 法がスカイライン法より優れているため、超大規模問題の計算には ICCG 法が有効である。

以上の結果より，FEM3D/Iで用いた高速化技法は一般性があり，複数のスーパーコンピュータにおいて有効であることがわかる。さらに，精度についても検討を行ない，スーパーコンピュータのベクトル演算による精度低下はないことを確認している。



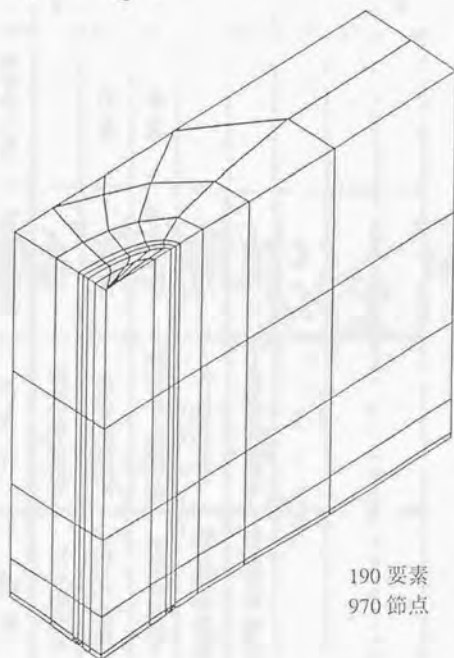
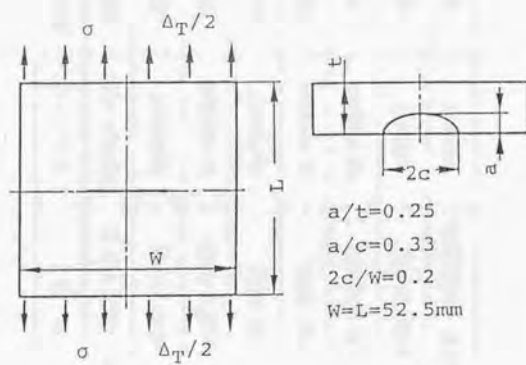


図5.3 表面き裂

表5.2 ICCG法によるベンチマークテストの結果

機種	コンパイラ	計算時間(s)	ペクトル化率	機種	コンパイラ	計算時間(s)
CRAY X-WP/1	CFT77 Rel.1.3	14.09		DEC MICRO VAX- II	FORTAN V4.6	8603.19
FACOM VP-50	FORTAN77/VP	24.26	93.22	FACOM M-380Q	FORTAN77	224.67
FACOM VP-100	VP COMP. V10/L30	21.40	94.40	FACOM M-380Q	VS FORTRAN	226.30
HITAC S-810/20	FORTAN77/HAP	16.27		IBM 3081K	FORTAN77	310.16
HITAC S-820/80	FORTAN77/HAP	6.75		IBM 3081K	VS FORTRAN	309.06
				IBM 3090-200	VS FORTRAN	99.83
				HITAC M-682H	O Fort77	57.98
				HITAC M-682H(IAP)	O Fort77	45.84

表5.3 スカイライン法によるベンチマークテストの結果

機種	コンパイラ	計算時間(s)	ベクトル化率	機種	コンパイラ	計算時間(s)
CRAY X-MP/1	CFT77 Rel.1.1.3	8.52	(92)	FACOM M-380Q	FORTRAN77	174.45
CRAY X-MP/3	CFT77 Rel.1.1.3	3.34	(92)	FACOM M-380Q	VS FORTRAN	203.12
FACOM VP-50	FORTRAN77/VP	15.02	96.09	IBM 3081K	FORTRAN77	311.41
FACOM VP-100	VP COMP. V10/L20	10.11	93.50	IBM 3081K	VS FORTRAN	337.58
HITAC S-810/20	FORTRAN77/HAP	7.30	96.60	IBM 3080-200	VS FORTRAN	101.68
				HITAC M-682H	OFORT77	61.59
				HITAC M-682H(TAP)	OFORT77	25.06

5. 4 ICCG法による大規模構造解析

前節の結果から、ICCG法の高速性については十分に示された。しかしながら、スカイライン法のような直接法では数値安定性が保証されており問題により解が得られないことはないが、ICCG法のような反復法では数値安定性は重大な問題である。特に、有限要素解析の高度化が進み、複雑かつ大規模な非線形解析に対する要求が高まっており、このような高度な要求を満足するためには、以下のような項目についてICCG法の適用性、収束性の検討を行う必要がある。

- (1) 複雑な形状、不規則な要素分割
- (2) 複数の異なる材料より成る構造
- (3) 種々の境界条件 (例えば遠心力、熱荷重など)
- (4) 応力集中問題やき裂の問題
- (5) 非線形解析

そこで、種々の問題に対し、スーパーコンピュータ HITAC S-810/20, S-820/80, およびグラフィックススーパーコンピュータ TITAN1500 (1CPU) による3次元解析を行った結果を表5. 4に示す。この内、1.の片持はり、2.の表面き裂(A)の要素分割を図5. 4(a),(b)に示す。表面き裂(B)は、前節のベンチマークテストで使用した要素分割と同じデータ(図5. 3)を用いて、弾塑性解析を行なったものである。4.のクランク、5.の機械部品の要素分割を図5. 4(c),(d)に、6.のブレードの遠心力による弾性解析の結果を図5. 4(e)に示す。使用した要素は15, 20節点のアイソパラメトリック要素である。表5. 4の解析では上記検討項目の(2)が含まれていないが、これについては片持はりの先端側と支持側でヤング率が100倍程度異なる中小規模の解析において検討を行い、問題ないことが示されている[高野88]。

表1の解析より以下のことがわかる。

(1) 上記検討項目に対し、ICCG法の適用性が示された。収束するまでの反復回数は問題により異なり、自由度の約 1/100 から1/10 程度である。3.の表面き裂(B)の弾塑性解析では、荷重-変位曲線(図5. 5)の傾きが急変する全断面降伏前後で反復回数が増大した(図5. 6)。なお、図5. 6中、□印はMarcalの反復の一回目の計算に要するICCG法の反復回数、■印は同様に2回目の計算に要するICCG法の反復回数を示している。1ステージ目は弾性計算であり、反復回数は410回である。2ステージ目から17ステージの範囲では反復回数が減少している。これは、ICCG法が反復法であるため前段階の階を初期値として用いることにより収束が速くなるためである[高野88]。

(2) 主記憶、外部記憶(SSD)とも100MB以下で、7万自由度程度の大規模解析を高速に行うことが可能である。5.の機械部品を細分割したモデル(37184要素、188605節点、565815自由度)でも必要な外部記憶は約1GBである。東京大学大型計算機センターのHITAC S-820/80では外部記憶が2.5GB 使用可能であるため、50万自由度以上の超大規模解析が可能である。

(3) 3.の表面き裂(B)、5.の機械部品および6.のブレードについてスカイライン法との比較を行った結果を表5. 5に示す。一般にICCG法による計算速度はスカイライン法に劣るが、問題によってはICCG法の方が高速に解析できる場合もあることがわかった。特に、6.の遠心力による解析では、低速な磁気ディスクを外部記憶として用いたアウトコアソルバのスカイライン法の方が、インコアソルバのICCG法より計算時間、経過時間とも短い結果となった。

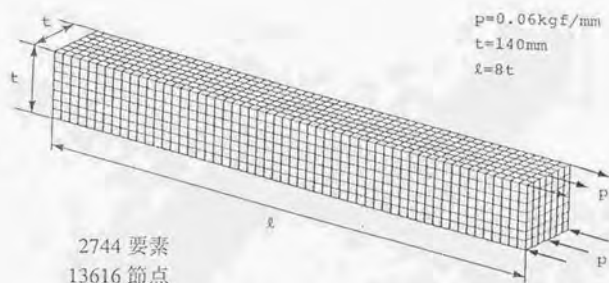
さらに、4.と同一のクランクに対して8節点アイソパラメトリック要素を用いた弾性解析も行なった。要素分割は20節点アイソパラメトリック要素の場合と同様に規則的であるが、さらに細かく分割し、要素数16,000、節点数19,481、自由度数58,443とした。スーパーコンピュータ HITAC S-820/80 による計算時間はわずか 131 秒、反復回数は 218 回であり、2次要素よりも1次要素の方が

収束が速いことがわかる。この結果は次節で詳しく述べる。

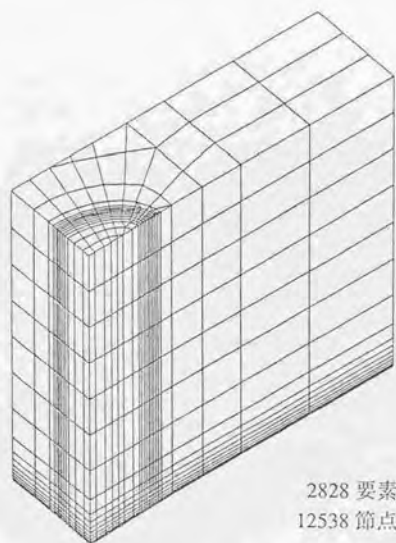
また、2.の表面き裂(A)において応力拡大係数を変位法と外挿法を併用し求めた。き裂前縁における応力拡大係数の分布を図5、7に示す。図には、Raju-Newmanによる値[Raju79]もあわせて示す。本解析における結果は、離心角が大きい範囲ではRaju-Newmanの値と良く一致している。しかし、自由表面近傍で特異な挙動を示しており、Boundary-layer effect [Raju79]によるものと思われる。このような特異な挙動は破壊力学上重要であるが、本解析のように自由表面近傍で非常に細かい要素分割を行ない、詳細な大規模解析を行なうことにより明らかになる。

表5.4 ICCG法による各種解析結果

	解析 種類	要素数	節点数	使用コン ピュータ	計算時間 (s)	反復回数	主記憶 (MB)	外部記 憶(MB)	ソルバ の種類
1. 片持はり	弾性	2744	13616	HITAC S-810/20	494	334	15	66	7777
2. 表面き裂 (A)	弾性	2828	12538	HITAC S-810/20	712	669	14	76	7777
3. 表面き裂 (B)	弾塑性	190	1038	HITAC S-810/20	917 30stages	34~1177 (/stage)	6	0	7777
4. クランク	弾塑性	3456	17605	HITAC S-810/20	1764 4stages	153~478 (/stage)	43	86	7777
5. 機械部品	弾性	4548	24347	HITAC S-820/80	344	551	94	0	7777
6. ブレード	弾性	796	5248	TITAN 1500-1	20178	2410	19	0	7777

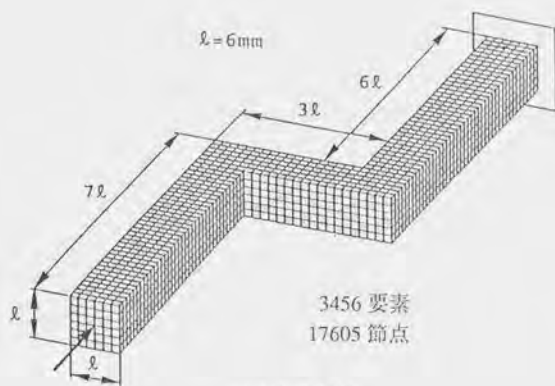


(a) 片持はり

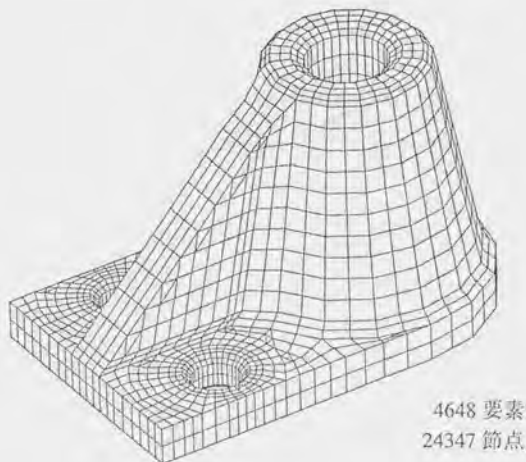


(b) 表面き裂(A)

図 5. 4 解析例

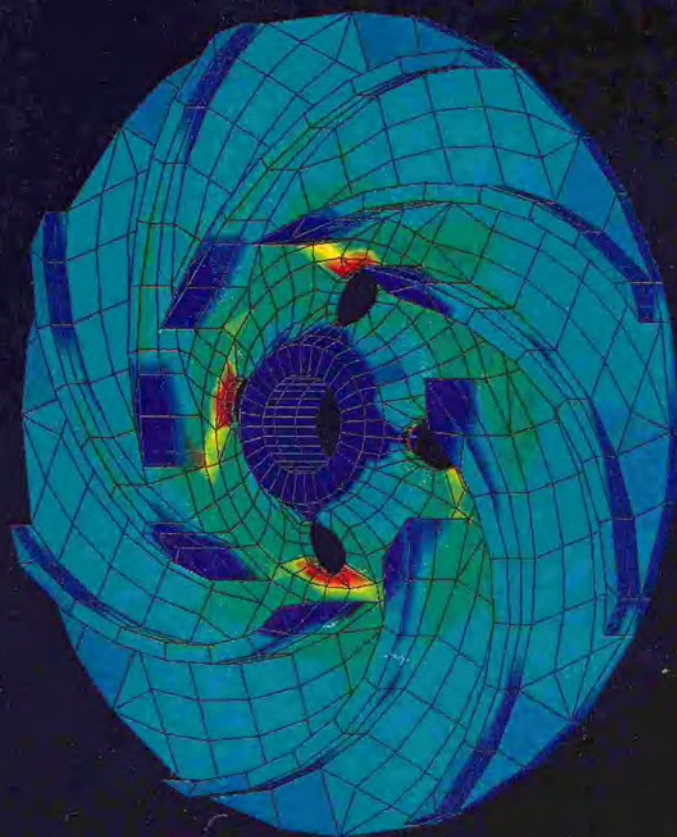


(c) クランク



(d) 機械部品

図 5. 4 解析例



X方向等重応力
Y方向等重応力
Z方向等重応力
X-Yせん断応力
Y-Zせん断応力
Z-Xせん断応力
相当応力 X

もどる

図5.4 解析例 (e) ブレード

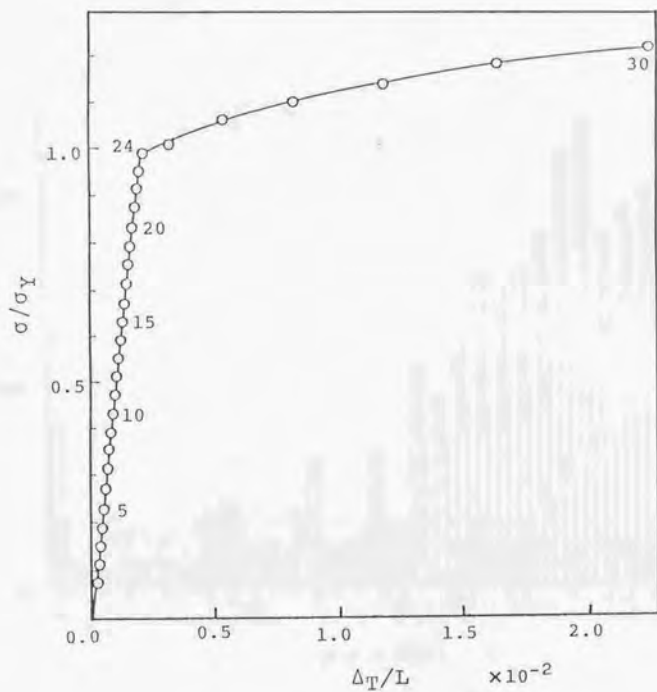


図5.5 表面き裂(B)の弾塑性解析における荷重-変位曲線

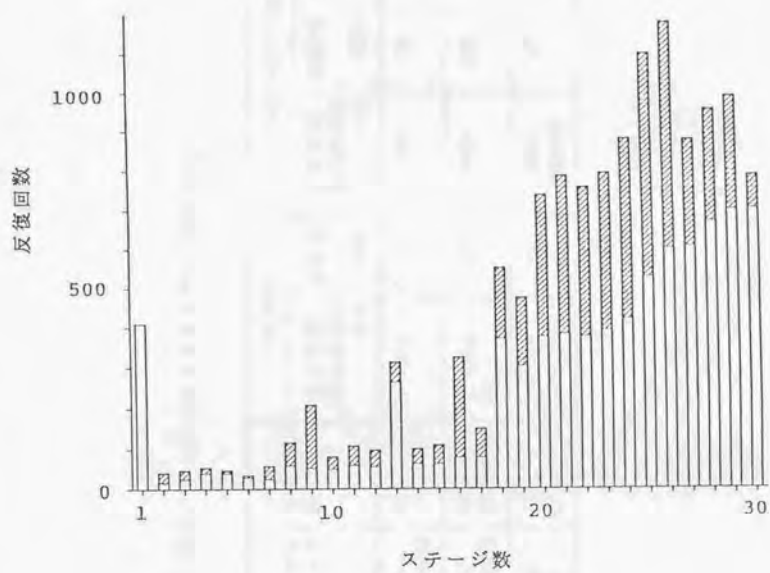


図5. 6 表面き裂 (B) の弾塑性解析における反復回数の変化

表5. 5 ICCG法とスカイライン法の比較

	使用コンピュータ	外部記憶装置	ICCG法		スカイライン法		
			計算時間 (経過時間) (s)	主記憶 (MB)	計算時間 (経過時間) (s)	主記憶 (MB)	外部記憶 (MB)
3. 表面き裂(B)	HITAC S-810/20	使用せず	917	6	466	14	0
5. 機械部品	HITAC S-820/80	半導体 記憶装置	344	94	1067	260	1100
6. プレート	TITAN 1500	磁気 ディスク	20178 (20351)	19	3090 (9065)	37	137

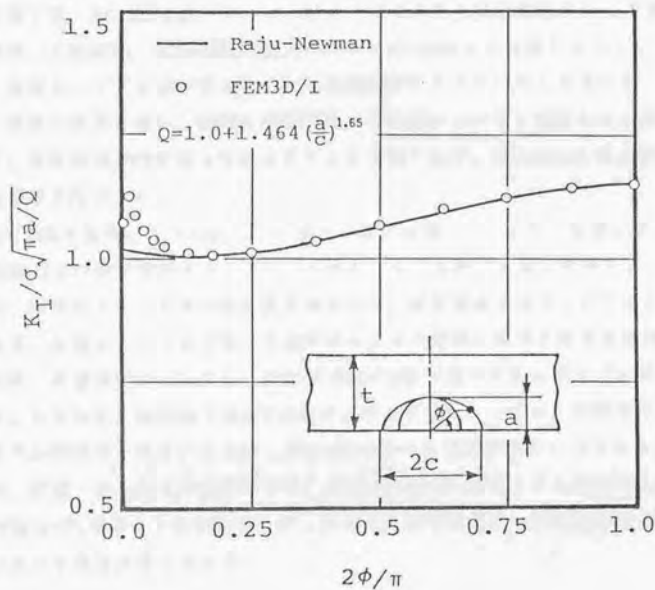


図5.7 表面き裂(A)の応力拡大係数の分布

5. 5 ICCG法とSCG法の比較

ICCG法と同様に、SCG法もスーパーコンピュータ用の反復解法として注目される。SCG法はICCG法に比べて前処理が簡単であるため、ICCG法以上の高速化の可能性が考えられる。

本節では、SCG法をスーパーコンピュータによる大規模構造解析に適用し、高速性、大規模性、計算精度の三点についてICCG法との比較を行なった。その際、要素としてアイソパラメトリック2次要素とアイソパラメトリック1次要素の二種類の要素を用い、要素と反復解法との関連についても検討した。解析例として、前出の軸方向圧縮を受けるクランクを取り上げ、約20,000節点の大規模構造解析を行なった。

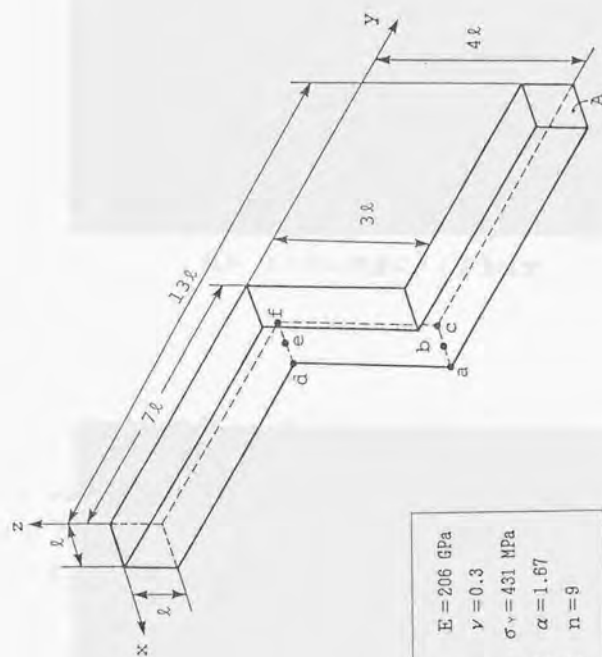
ICCG法を採用したFEM3D/Iの処理の流れは図5.1に示した通りであるが、SCG法はこの中で対角スケーリングのみを行なうものである。対角スケーリングは、剛性マトリックスの対称性を保ちつつ、対角項をすべて1にそろえる手法である。対角スケーリングは、不完全コレスキー分解に比べて簡単な前処理であるため、反復過程においても、SCG法はICCG法に比べてアルゴリズムが簡単となる。すなわち、SCG法ではICCG法における不完全コレスキー分解中の前進・後退代入が省略される。これは、ICCG法における実行中核の一つである。このため、反復一回あたりの計算時間は、SCG法ではICCG法よりも短縮される。SCG法はICCG法より収束は遅いが、全体の計算時間においてはSCG法の方が有利になる可能性が考えられる。

解析例として図5.8のクランクと取り上げ、アイソパラメトリック2次要素による弾塑性解析とアイソパラメトリック1次要素による弾性解析を行なった。要素分割を図5.9に、変形図を図5.10に、応力図を図5.11に示す。要素数は3456、節点数は17,605、自由度数は52,815である。なお、本解析はスーパーコンピュータ HITAC S-810/20で行なった。解析は4ステージ行なっている。計算時間、反復回数、および解析に必要な記憶容量の比較を表5.6に示す。ICCG法に比べてSCG法では計算時間において約1.2倍、反復回数においては約3.1倍となった。解析に必要な記憶容量は両者ともほぼ等しい。なお、本解析においては両者ともアウトコアソルバとして用いている。次に、解析精度について

検討する。図5. 8中のa～fの各節点における弾性範囲でのy方向変位を表5. 7に示す。両者の計算結果は相対誤差0.7%以下である。なお、収束判定は相対残差が 1.0×10^{-5} 未満で打ち切っている。

次に、8節点アイソパラメトリック1次要素による弾性解析を行なった。なお、本解析はスーパーコンピュータ HITAC S-820/80で行なった。要素分割は図5. 10の通りであり、要素数は16,000、節点数は19,481、自由度数は58,443である。計算時間、反復回数、および解析に必要な記憶容量の比較を表5. 8に示す。ICCG法に比べてSCG法では計算時間において約1.1倍、反復回数においては約2.8倍であり、2次要素の場合と類似の傾向を示している。しかしながら、収束は2次要素よりも速いといえる。なお、本解析においては両者ともアウトコアソルバとして用いており、解析に必要な記憶容量は両者ともほぼ等しい。解析精度は2次要素の場合と同様に、図5. 8中のa～fの各節点における弾性範囲でのy方向変位を表5. 9に示す。2次要素の場合と同様に結果は良好である。

以上の結果から、大規模性および解析精度に関しては、ICCG法とSCG法の差はなかった。高速性に関しては、要素種類によらずICCG法の方がSCG法より1～2割程度優れていることがわかった。



ヤング率	$E = 206 \text{ GPa}$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
降伏応力	$\sigma_y = 431 \text{ MPa}$
加工硬化係数	$\alpha = 1.67$
加工硬化指数	$n = 9$

図 5. 8 クランク

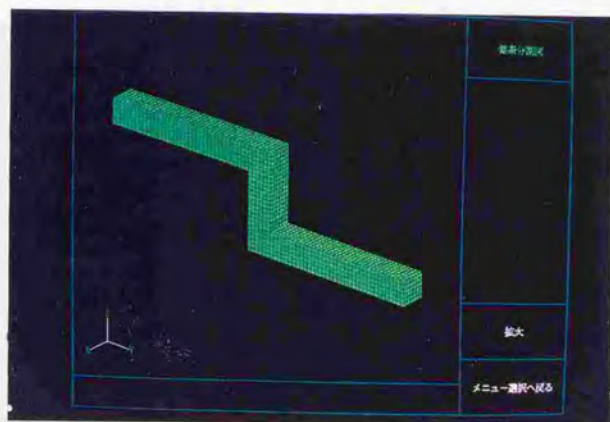
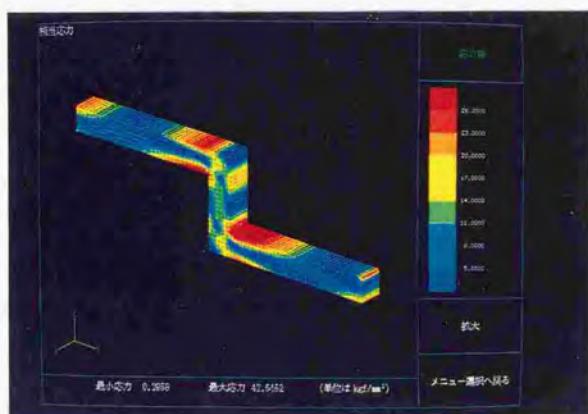


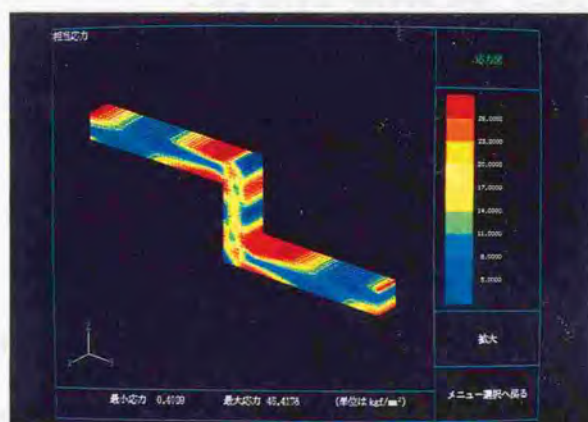
図 5. 9 2次要素による要素分割



図 5. 10 変形図



(a) 1 ステージ



(b) 4 ステージ

図 5. 11 応力図

表 5. 6 2 次要素による弾塑性解析結果

(4 ステージ)

	ICCG	SCG	SCG/ICCG
CPU Time (s)	1764	2171	1.23
Number of Iterations	1431	4391	3.07
Main Memory (MB)	42.5	42.0	0.99
SSD (MB)	86.1	86.1	1.00

(HITAC S-810/20)

表 5. 7 2 次要素による解析精度

(y 方向変位, 単位mm)

Node	ICCG	SCG
a	-0.10134	-0.10099
b	-0.10137	-0.10102
c	-0.10134	-0.10099
d	-0.01447	-0.01438
e	-0.01476	-0.01466
f	-0.01447	-0.01438

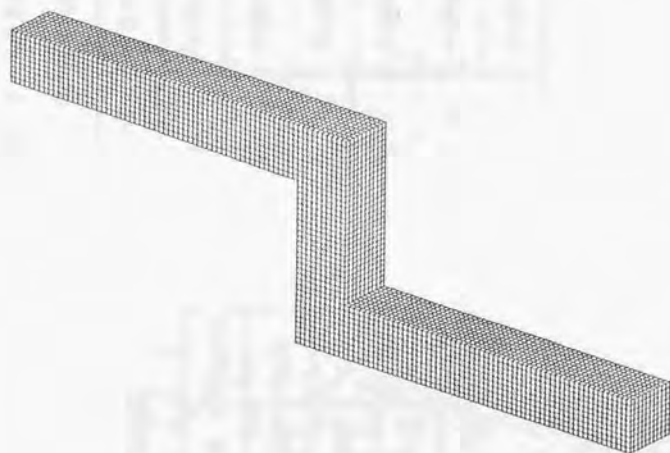


図5.12 1次要素による要素分割

表 5. 9 1 次要素による解析精度
(y 方向変位, 単位mm)

Node	ICCG	SCG
a	-0.10110	-0.10111
b	-0.10112	-0.10114
c	-0.10109	-0.10111
d	-0.01431	-0.01431
e	-0.01460	-0.01460
f	-0.01431	-0.01431

表 5. 8 1 次要素による弾性解析結果

	ICCG	SCG	SCG/ICCG
CPU Time (s)	131	144	1.07
Number of Iterations	218	602	2.76
Main Memory (MB)	27.6	27.1	0.98

(HITAC S-820/80)

5. 6 EBE-SCG法によるパラレルコンピューティング

前節で述べた通り、SCG法は高速性の点でICCG法に1~2割程度劣るが、有限要素法による非線形構造解析への適用が可能であることが明らかとなった。本節ではSCG法のパラレルコンピューティングへの適用性について議論する。

SCG法では、全体剛性マトリックスを作成せずに、要素剛性マトリックスを単位として計算を行なうことが可能である。すなわち、全体剛性マトリックスとベクトルとの積の計算を要素剛性マトリックスのみを用いて行なうことができる[奥田90]。これをEBE-SCG (Element-by-Element Scaled Conjugate Gradient) 法と呼ぶことにする。EBE-SCG法では全体剛性マトリックスを記憶する必要がなく、記憶容量が節約できるため、超大規模性を一層向上させることができる。しかしながら、演算量が増加するため、高速性の確保が適用性の可否を決するポイントとなる。

そのため、まず、並列パイプライン方式のスーパーコンピュータ HITAC S-820/80 上で小規模問題において高速化を十分に施した。その結果、EBE-SCG法による計算時間は、ICCG法、SCG法に比べて約1.5倍となった。計算時間の増加は、全体剛性マトリックスとベクトルとの積の計算を要素剛性マトリックスのみを用いて行なっているため、演算量が増加していることによる。

次に、図5.13に示す片持はりの弾性解析を取り上げる。規模は2,744要素、13,616節点、40,848自由度である。結果をICCG法、SCG法と比較し、表5.10に示す。表5.10中、演算回数はHITAC S-820/80のVECTIZERツールを用い実測した演算回数である。問題が大規模になる程演算量が急増するため、計算時間はICCG法、SCG法と比較し約2.5倍となった。一方、記憶容量に関しては、ICCG法、SCG法よりも少なくすむことが確認された。なお、今回は要素剛性マトリックスを高速な拡張記憶に記憶させ、計算時間の短縮を図っている。計算時間の短縮を最優先させたにもかかわらず、計算時間の増加は免れなかった。一方、記憶容量という点では拡張記憶への記憶は省略できるが、計算時間は一層増加する結果となるのは当然である。

以上の結果から、EBE-SCG法を用いる場合には、演算量の増加に伴う高速性の低下は不可避である。しかしながら、EBE-SCG法は高並列・超並列コンピュ

ータへのインストールが容易であるため、パラレルコンピューティングにより、演算量増加という問題を解決することが可能である。この場合、演算量が増加しているため、内積形式のスカイライン法との使い分けには十分に注意を払わなければならない。すなわち、図 5. 14 に示すように、並列度（並列コンピュータにおけるプロセッサ数）とアルゴリズム、計算時間との関係を考慮して適切な使い分けをしなければ、高度なスーパーコンピュータの性能を生かしているとはいえない。

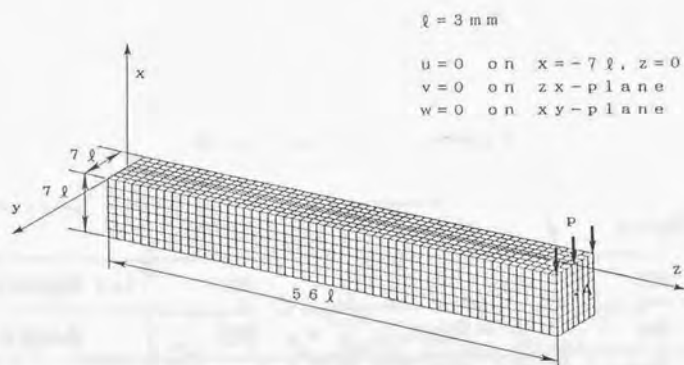


図 5. 13 片持はり

表 5.10 EBE - SCG法による解析結果

		EBE - SCG法	SCG法	ICCG法
計算時間 (s)		347	144	130
反復回数		922	922	347
演算回数	全体	1.649×10^9	0.364×10^9	N. A.
	ベクトル化可能	1.628×10^9	0.358×10^9	N. A.
	全体剛性 マトリックスと ベクトルの積	1.551×10^9	0.271×10^9	N. A.

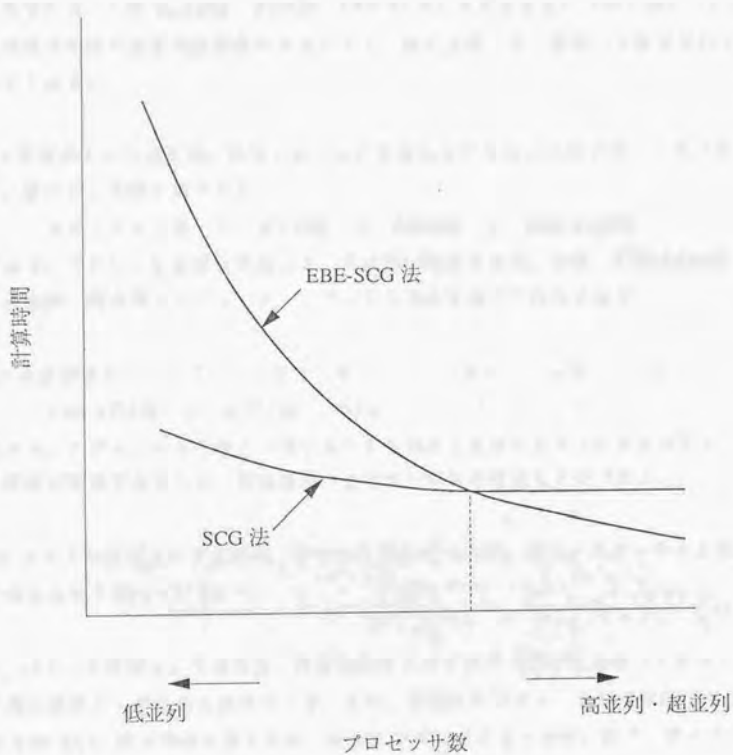


図 5. 14 並列度と計算技法の適合性

5. 7 考察

本章においては ICCG法, SCG法, EBE-SCG法の反復解法について検討した。本論文の本題である内積形式のスカイライン法と比較して, 総括した結論を以下にまとめる。

(1) 高速性という点では, 汎用ソルバとして優れているのはスカイライン法である。優れている順に並べると,

スカイライン法 > ICCG法 > SCG法 > EBE-SCG法
である。ただし, 反復法は問題によっては速い場合もある。また, EBE-SCG法は高並列・超並列コンピューティングによる高速処理の可能性がある。

(2) 大規模性という点では, 反復法は優れている。優れている順に並べると,

EBE-SCG法 > ICCG法, SCG法 > スカイライン法
である。ただし, スカイライン法においても実用上必要になる 10 万自由度までの解析が可能であるため, 大規模性の点ではいずれの解法も十分である。

(3) ベクトル性能という点では, いずれも優れているが, 特に, スカイライン法は抜きん出て優れている。

(4) パラレル性能という点では, 内積形式のスカイライン法が低並列コンピュータ用の解法としては最も優れている。また, 超並列コンピュータ用の解法としては EBE-SCG 法が最適と考えるが, 演算量の増加 (スカラ速度の低下) があるため注意が必要である。

以上の結果を表 5. 11 にまとめる。

表 5. 11 スカイライン法と反復法の比較

	高速性	大規模性	ベクトル性能	パラレル性能
スカイライン法	◎	○	◎	◎
反復法	○	◎	○	△

第 1 節 プリ・ポストプロセッシングの高度化

第 6 章 スーパーコンピューティングにおける
プリ・ポストプロセッシングの高度化

スーパーコンピューティングの高度化に伴って、プリ・ポストプロセッシングの高度化が求められている。本章では、スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化について、その重要性と課題を述べる。

スーパーコンピューティングの高度化に伴って、プリ・ポストプロセッシングの高度化が求められている。本章では、スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化について、その重要性と課題を述べる。

スーパーコンピューティングの高度化に伴って、プリ・ポストプロセッシングの高度化が求められている。本章では、スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化について、その重要性と課題を述べる。

スーパーコンピューティングの高度化に伴って、プリ・ポストプロセッシングの高度化が求められている。本章では、スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化について、その重要性と課題を述べる。

スーパーコンピューティングの高度化に伴って、プリ・ポストプロセッシングの高度化が求められている。本章では、スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化について、その重要性と課題を述べる。

スーパーコンピューティングの高度化に伴って、プリ・ポストプロセッシングの高度化が求められている。本章では、スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化について、その重要性と課題を述べる。

スーパーコンピューティングの高度化に伴って、プリ・ポストプロセッシングの高度化が求められている。本章では、スーパーコンピューティングにおけるプリ・ポストプロセッシングの高度化について、その重要性と課題を述べる。

6章 スーパーコンピューティングにおける プリ・ポストプロセッシングの高度化

6.1 プリ・ポストプロセッシングの重要性

本章では、プリ・ポストプロセッシングを含めた有限要素解析のスーパーコンピューティングについて考察し、次世代 CAE システムのあるべき姿について述べる。

前章までに述べてきた通り、スーパーコンピュータの出現により、有限要素解析は質的にも量的にも飛躍的な進歩を遂げた。スーパーコンピュータの高速性・大規模性はこれまで非常に困難であった複雑な3次元解析を1時間～1日のオーダーで行なうことが可能にした。特に、大規模性という点では、数万～百万自由度といった超大規模解析が実用的なものとなった。

しかしながら、新アルゴリズム、SUPER SOLVEのような優れたソルバの開発に伴い、プリ・ポストプロセッシングには次のような問題点が発生してきた。

- (1) 解析が1時間～1日のオーダーで行なえる反面、膨大なデータを扱うプリ・ポストプロセッシングには数日～数ヶ月の多大な手間と労力を要する。
- (2) 数万～百万自由度といった超大規模問題が実用的な時間内で解析できる反面、データ作成を行なうプリプロセッシングのみならず、その表示を行なうポストプロセッシングが困難である。
- (3) 有限要素解析が普及してきたが、プリ・ポストプロセッシングは人手により行なうため、機械設計者にとっては使いにくい点が多く残っており、いまだに有限要素法の専門家やアナリストに頼っているのが現状である。

スーパーコンピューティングという点からは、(1)、(2)の問題は重大である。さらに、(3)にあげたように設計者に使いやすい設計ツールとすることも重要な課題である。これらの問題を解決するために、プリ・ポストプロセッシングにおいて以下の3点の検討を行なった。

(1) プリプロセッシングにおいて、CAD で作成したモデルを利用し、要素分割を行なうようにし、CAD・CAE の統合化を図る。

(2) 自動要素分割により、データ作成の手間を大幅に削減する。特に、現在不可能な 3 次元構造物の六面体による自動要素分割手法を開発する。

(3) 設計者にとって重要な、形状変更と再解析を容易に行なえるよう、高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE とトラッキング・ステアリングを応用することにより、使いやすい設計ツールを構築する。

以下、6. 2 では上記(1)、(2)を解決するプリプロセッシングの高度化について述べ、6. 3 では上記(3)を解決するトラッキング・ステアリングシステムの開発について述べる。

6. 2 3次元構造物の六面体による自動要素分割

6. 2. 1 自動要素分割の重要性と現状

スーパーコンピュータを用いることにより大規模解析が可能となった反面、大規模なデータを作成するためのプリプロセスの効率化が強く要望されている。特に、3次元構造物の要素分割を人手で行うには膨大な労力と時間を要するため、自動要素分割に関する研究が盛んに行われている。現在、2次元問題やシェル構造に対しては四辺形要素による自動要素分割が可能である[吉村90][三好90]が、ソリッド構造の自動要素分割は四面体要素を用いる場合に限られている[矢川89]。四面体要素は、精度が悪いことや、要素数が多くなるなどの理由により、六面体要素による自動要素分割法を開発する意義は大きい。

3次元自動要素分割の現状として、これまでに提案されている手法を表6.1に示す。表中のデラウニー法とボロノイ法は、立体の表面と内部に節点を発生させ、その4つの節点を選んで四面体要素を生成する。八分木法は立体を内包する立方体を作成し、それを繰り返し8分割することにより要素分割を行う。

Geometry decomposition法は立体の表面に2次元自動要素分割技術を用いて三角形要素を発生させ、立体の表面から四面体を除去することにより自動要素分割を行う。表中の唯一の六面体による自動要素分割である曲線座標変換法は立体を立方体などの簡単な形状に変換する写像関数を計算し、その逆写像関数を用いて六面体要素分割を立体の形状に一致させる。

自動要素分割を行う際、注意すべき項目として、

- (1) 対象形状をいかに忠実に再現することができるか否か
- (2) 粗密をつけた要素分割が可能かどうか

という点がある。曲線座標変換法は、自由曲面などを有する複雑な形状の立体の場合に写像関数を求めるのが困難であり、上記項目(1)を満足していない。

そこで、六面体要素による自動要素分割法として新たに断面法を考案し、断面法による自動要素分割プログラムを開発した。

表 6. 1 3 次元自動要素分割の現状

自動要素分割手法	要素種類	対象形状の再現性	粗密の制御
テラウニー法	四面体要素	良い	可能
ポロノイ法	四面体要素	良い	可能
Geometry decomposition法	四面体要素	良い	可能
八分木法	四面体要素	良い	可能
曲線座標変換法	六面体要素	良くない	可能だが全体に影響が及ぶ

6. 2. 2 断面法の概要

断面法の基本的な手法は以下の通りである。

すなわち、3次元構造物にいくつかの断面をとり、断面を利用して六面体による自動要素分割を行う手法である。自由曲面などを有する複雑な形状の立体を、その断面をとることにより、断面の輪郭という簡単な情報で表現できるという利点がある。六面体要素の生成は、まず、断面上に2次元自動要素分割を行い、四角形要素を発生させる。次に、隣り合う断面の対応する要素をつなぎ合わせて六面体要素を生成する。

断面上に四辺形要素を2次元自動要素分割により生成するための基本的な技術は既開発されている[三好90]。したがって、3次元構造物の断面をどのようにとるか、またいかに効率良く断面をとるかが第一の課題となる。そこで、3次元構造物の軸線となるようなスケルトンを考え、断面はこのスケルトンに垂直な平面とする。断面の間隔を変化させることにより、生成される六面体要素の粗密をつけることができる。

また、隣り合う断面間で四辺形要素を自動的につなぎあわせて六面体要素を生成する技術を開発する必要がある。ここで、隣り合う断面の形状は同一である必要はなく、断面の形状の違いをプログラム内部で判断し、自動的に隣り合う断面間で四辺形要素の対応をとることが要求される。

要素の粗密は、断面間隔と断面上での四辺形要素のサイズを変えることにより実現される。粗密の指定はユーザが行うこととする。

また、立体の形状入力はCADにおいて行う。断面法システムではCADとのインタフェースとしてIGESを採用しており、任意のCADのデータを利用することができる。断面法ではCADの面データや線データを用いて立体の表示や断面の指定などを行う。

以上の断面法による自動要素分割の流れを図6. 1に示す。次節において、図6. 2に示すクランクシャフトを用いて自動要素分割の手順を具体的に述べる。

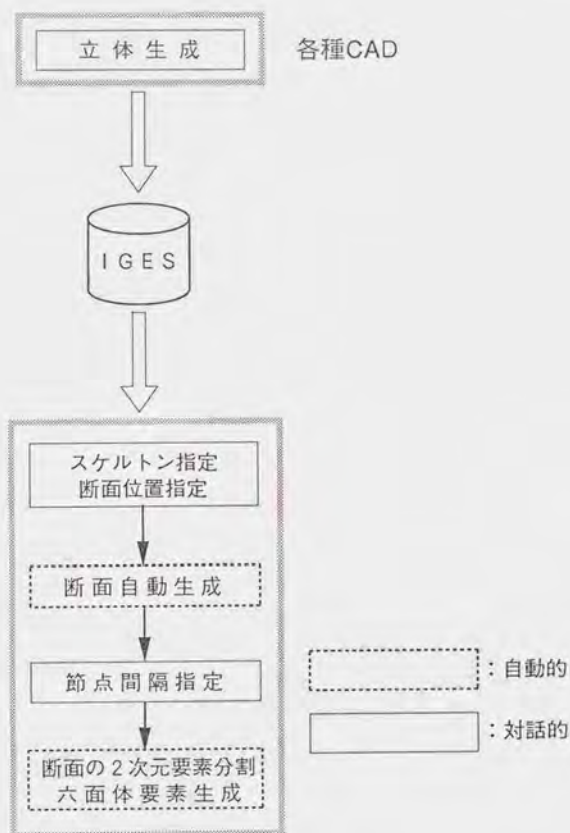


図6.1 断面法の処理の流れ

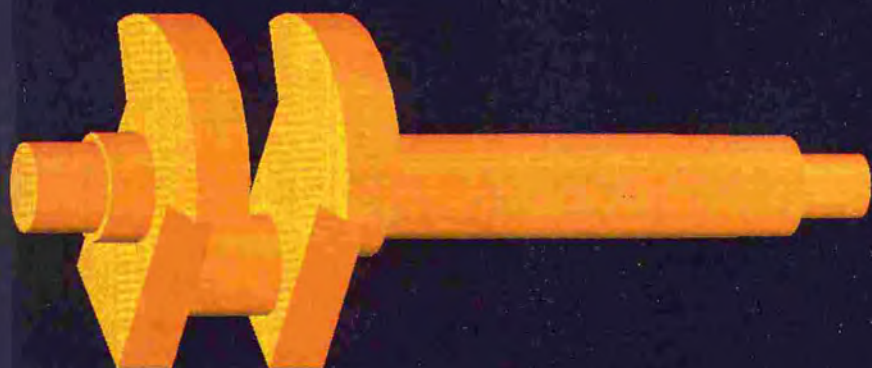


図 6. 2 クラシクシャフト

6. 2. 3 断面法による自動要素分割手順

(1) CADによるソリッドモデルの作成

まず、CADを用いてソリッドモデルを作成する。対象とするCADは、特定のCADに限定せず、任意のCADと標準的なIGESフォーマットによりインタフェースをとり、CAD・CAEの統合化を図っている。

(2) スケルトンと断面位置の指定 (図6. 3(a))

断面をどのようにとるかを定めるスケルトンを指定する。スケルトンは3次元構造物の軸となるような線であり、断面はこのこのスケルトンに垂直にとる。スケルトンの指定は、ソリッドモデルがもつ面データ(サーフェス)や線データ(エッジ)を用いて対話的に行う。スケルトンは必ずしも1本である必要はなく、複数のスケルトンが存在しても構わない。

次に、スケルトンのどの位置で断面をとるかを指定する。断面の位置はスケルトンを分割することにより指定する。スケルトンの分割の方法は次の3通りの方法がある。

- ・ 立体を構成する面とスケルトンの交点で指定する方法
- ・ 断面間を等分割、等比分割、等差分割する方法
- ・ 断面間の距離を直接入力する方法

図6. 3(a)では最上面と最下面を指定し、それらを結ぶ直線としてスケルトンを入力した。断面位置は上記の3通りの方法を組合せて指定した。スケルトンや断面位置は、コンピュータのCRT上で色分けされて表示されるので、ユーザは対話形式で入力を行う。

(3) 断面自動生成 (図6. 3(b))

以上により指定した断面位置において、自動的に断面を発生させる。

(4) 断面上の節点間隔の入力 (図6. 3(c))

断面上の2次元要素の大きさを決めるために、断面の輪郭上の節点間隔を指定する。輪郭上の節点間隔を反映して、内部の節点は自動発生させるため、輪郭上の節点間隔で2次元要素の大きさを制御できる。

まず、全断面の輪郭線上に等間隔に節点を自動生成する。この初期間隔は全断面に共通であり、自動要素分割プログラムが指示する節点間隔の範囲を目安として入力する。次に各断面での粗密の制御を対話形式で行う。断面での粗密の制御方法には次の2通りの方法がある。

- ・ 節点を削除する方法
- ・ 節点間を等分割する方法

前者は節点間隔を粗にしたい場合に用い、後者は節点間隔を密にしたい場合に用いる。断面上での粗密の制御が不要の場合は、初期節点間隔のみ入力すればよい。

(5) 断面の2次元要素分割と六面体要素生成 (図6. 3(d))

前節で述べた方法により自動要素分割を行う。断面上の2次元自動要素分割において三角形要素が発生した場合は、隣り合う断面間で三角形要素をつなぎあわせて五面体要素とする。これらの処理はすべて自動的に行われる。

この過程に要する処理時間はTITAN3000を用いた場合わずか数分であった。また、ソリッドモデルの作成後、(2)の断面間隔の入力から要素分割を終了するまでの全過程に要する処理時間も約30分程度である。ユーザの入力はすべてグラフィックス表示を利用した対話形式で行われるため使い易く、実用的である。

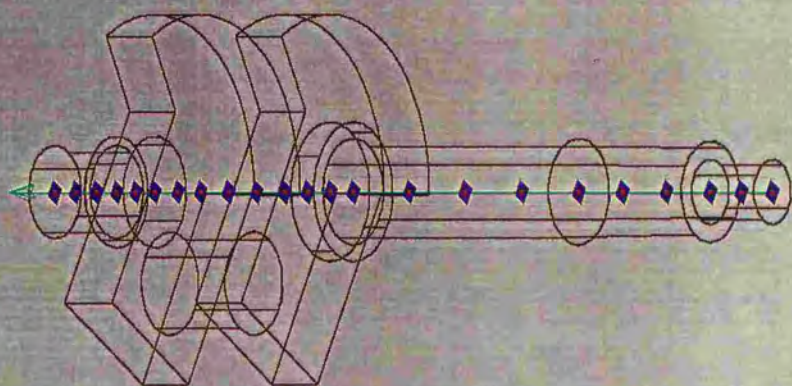


図 6. 3 クランクシャフトの要素分割手順
(a) 断面位置の指定

```
#####
##### 断面法プログラム #####
##### MSECT #####
##### 制作：三好研究室 #####
#####
```

形状データ読み込み

ファイル名を入力してください
shaft_111

断面間隔データ読み込み

ファイル名を入力してください
Sect1
shaft2

読み込み完了

面指定順序決定

③点指定順序決定

等分割

等差分割

等比分割

ランダム分割

等サイズ分割

面割サイズ分割

断面削除

◎

視点変更その他

断面図表示終了

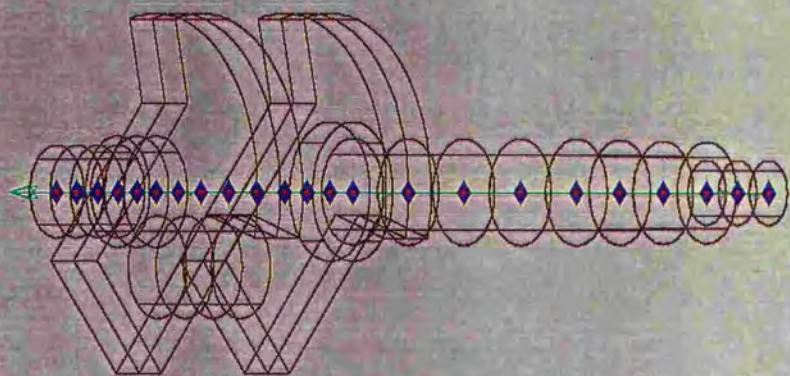


図 6. 3 (b) 断面自動生成
クランクシャフトの要素分割手順

クランクシャフトの要素分割手順

ファイル名を入力してください
start.in

断面自動生成データ読み込み
ファイル名を入力してください
start.in

読み込み完了

図 1 軸

現在の角点は(5, 00, 3, 00, 4, 00)
新しい始点のX座標は？
新しい始点のY座標は？
新しい始点のZ座標は？

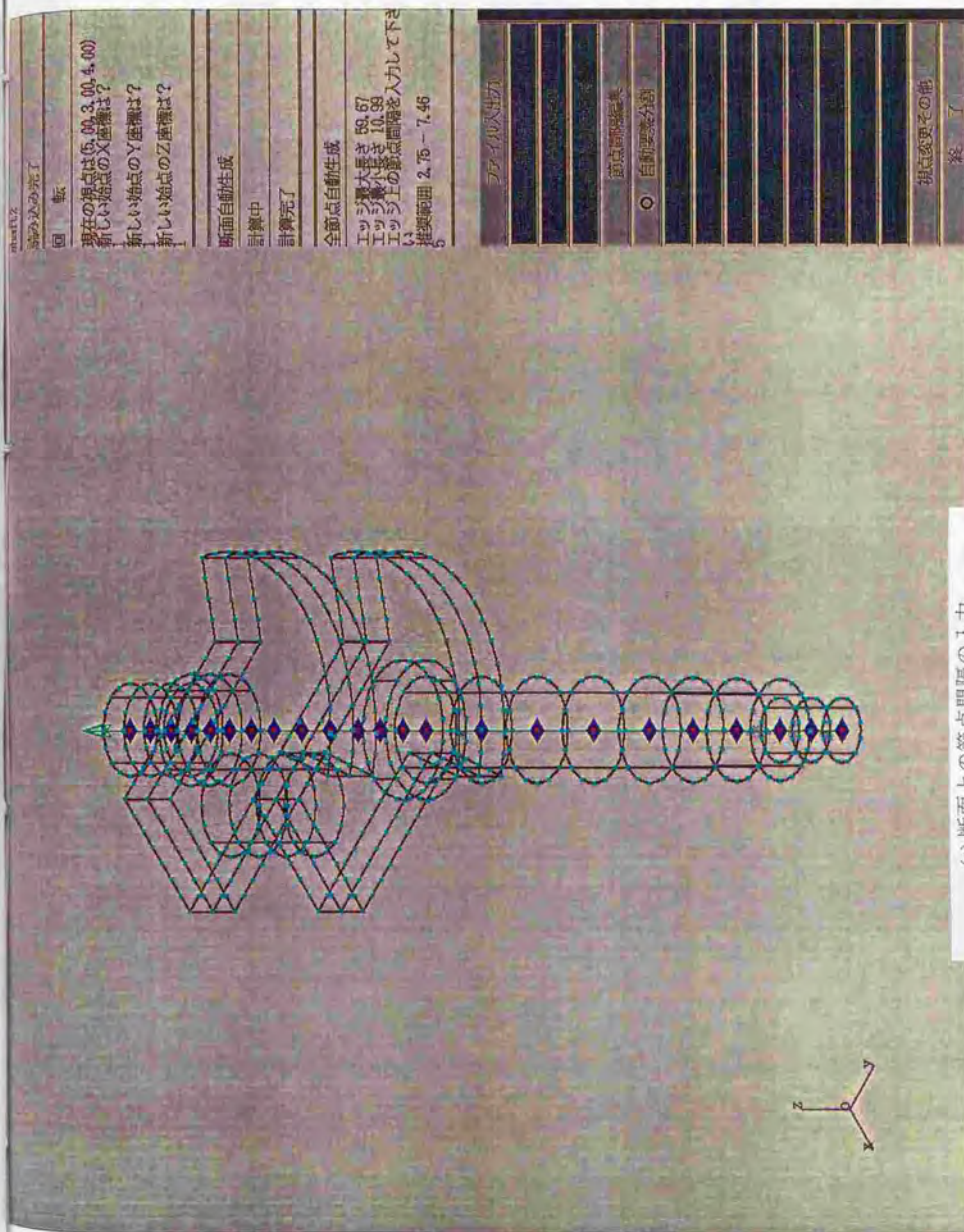
断面自動生成
計算中
計算完了

ファイルの読み込み

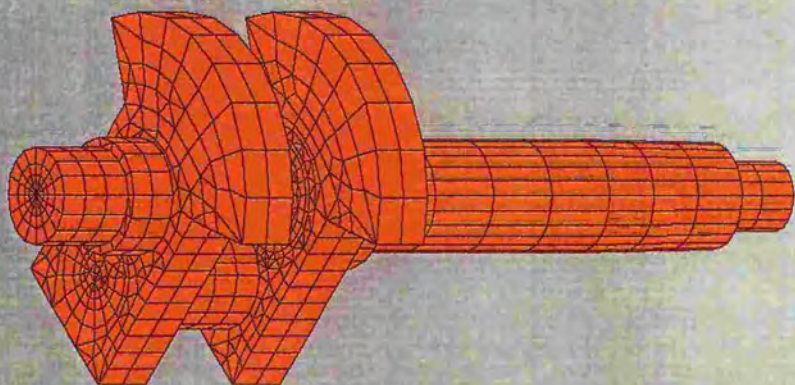
○ 断面自動生成

現在変更その他

終了



(c) 断面上の節点間隔の入力
図 6. 3 クラシックスファクトの要素分割手順



(d) 六面体要素の自動生成
図 6. 3 クランクシャフトの要素分割手順

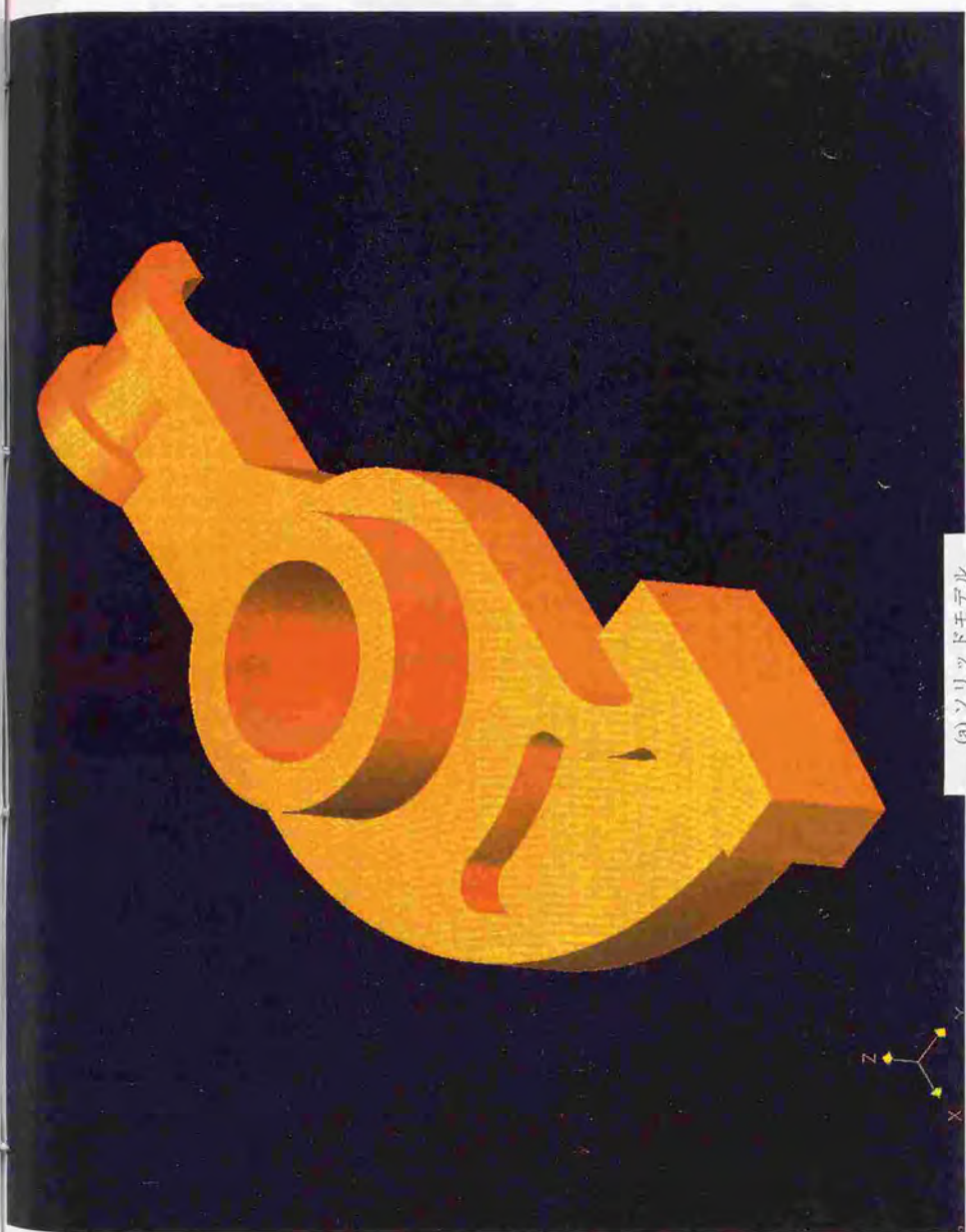
6. 2. 4 断面法の適用例

自動車のエンジン部品であるロッカアームのソリッドモデルを図6. 4 (a)に示す。図6. 4 (b)は断面を指定した様子を示しており、2本のスケルトンを指定し、異種断面をとった例である。この場合には、異種断面の有効範囲を示すための境界断面（図6. 4 (b)中の赤色で示された面）の指定も行う。この境界断面上で要素の整合性を保つように自動的に処理されるため、複雑な3次元構造物に対しても、前述のクランクシャフトと同様の手順で自動要素分割を行うことができる。図6. 4 (c)が生成された要素分割である。

ロッカアームと同様に2本のスケルトンを指定して自動要素分割を行った例を図6. 5、図6. 6に示す。ともに円柱形状が含まれているため、その軸をスケルトンに用いている。

図6. 7の例はスケルトンを3本とっている。図6. 8は、図6. 9のピストン冠部を例にとり、要素の粗密をつけた一例である。図6. 8よりわかる通り、局所的に要素の粗密をつけることが可能である。

図6. 10はr部を有する形状の例である。この例では1本のスケルトンで自動要素分割が行われている。断面間隔を細かくすることによりr部の形状が適切に表現されている。



(a) ソリッドモデル

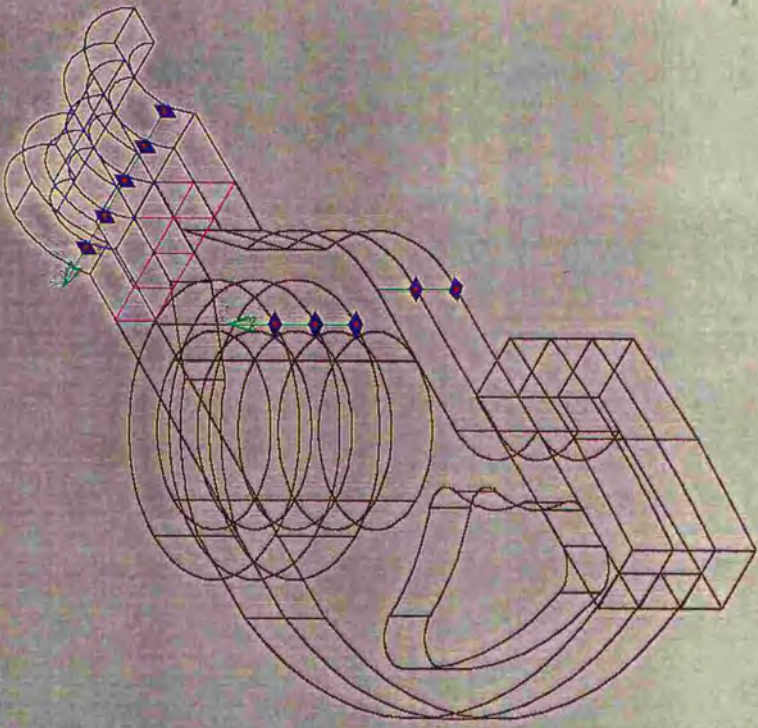
図 6、4 ロックアーム

この補助線に属する節点を入力しな
下さい

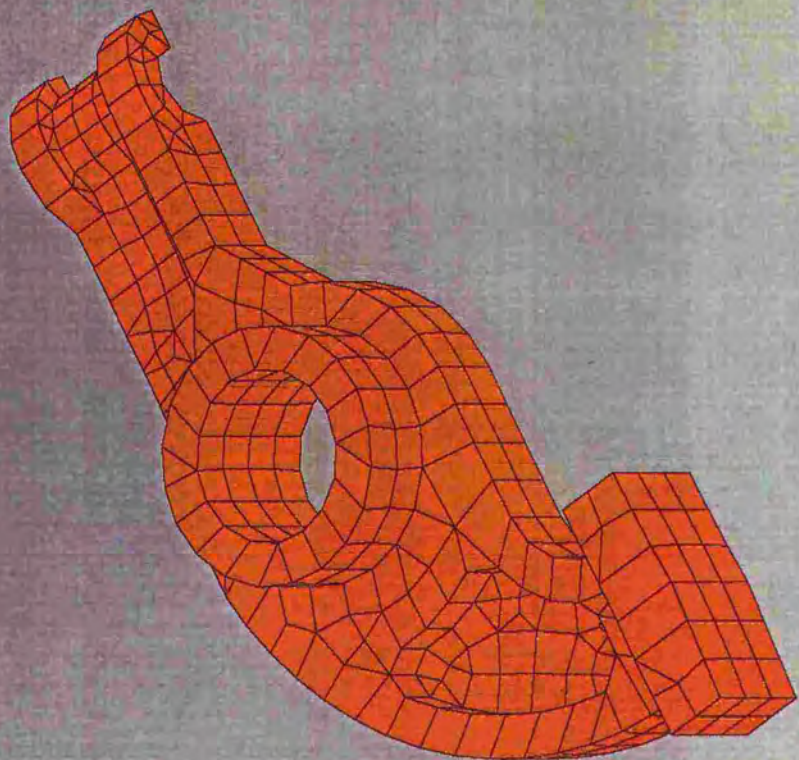
	左	右	中央	次候補
………	指正	決定	中止	
………	の節点でいいですか			

一方の補助線を入力して下さい	断面自動生成	計算中	計算完了
左			
右			
中止			
決定			

上 清
明大聖賢その傳
○ 節取問答集
○ 節取問答集



(b) 断面と接合面

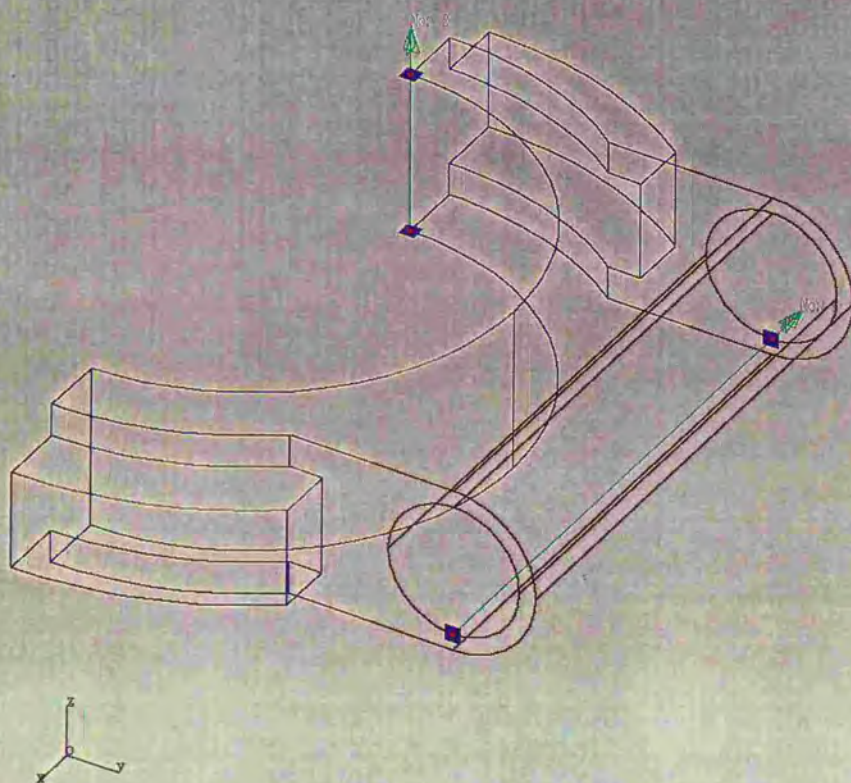


(c) 要素分割
図 6. 4 ロックアーム



(a) ソリッドモデル
図 6.5 機械部品A

No. 1
No. 2



(b) スケルトン
図 6. 5 機械部品A

現在の原点は(0.00, 3.00, 4.00)
新しい始点のX座標は?
0
新しい始点のY座標は?
3
新しい始点のZ座標は?
4

拡大

何倍に拡大しますか?

1.2
拡大の中心をマウスでピックアップしてください

縮小

何分の1に縮小しますか?

1.1
縮小の中心をマウスでピックアップしてください

移動

新しい端面の中心をマウスでピックアップしてください

稜線指定補助線入力

面指定補助線入力

補助線削除

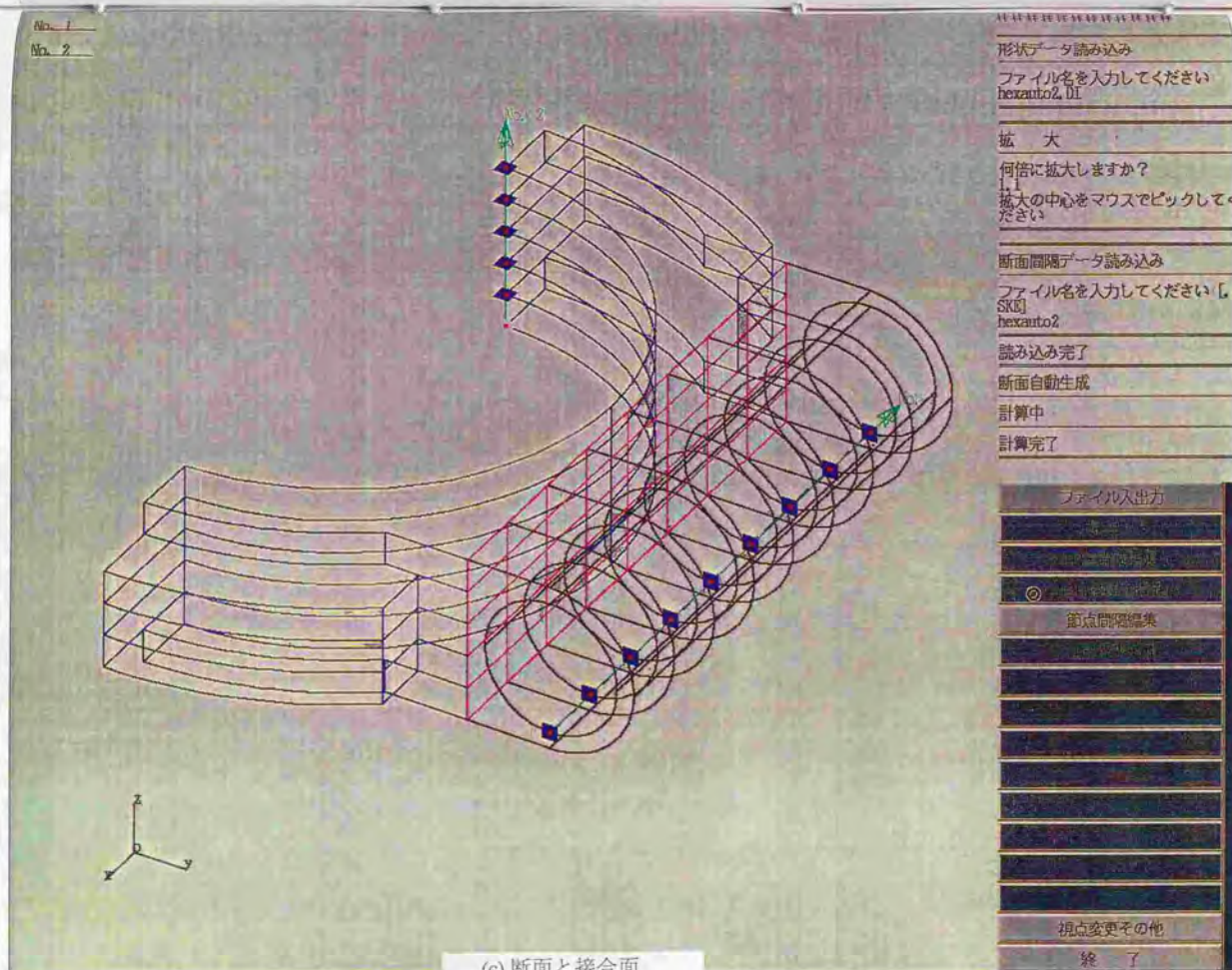
☒ 稜線指定接合面入力

面指定接合面入力

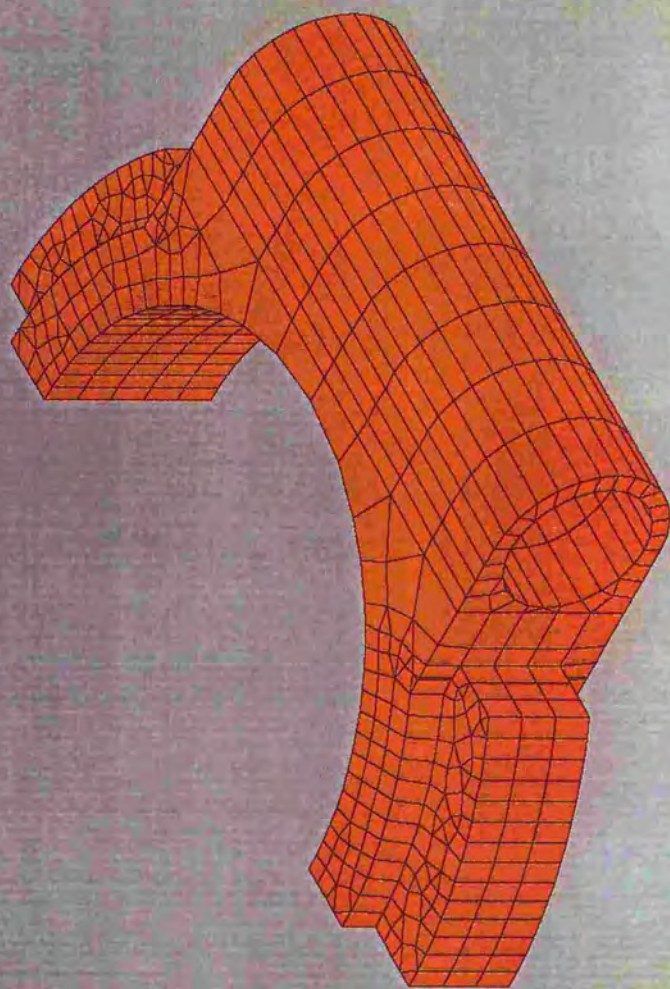
3点指定接合面入力

視点変更その他

補助線入力中止



(c) 断面と接合面
図 6. 5 機械部品A

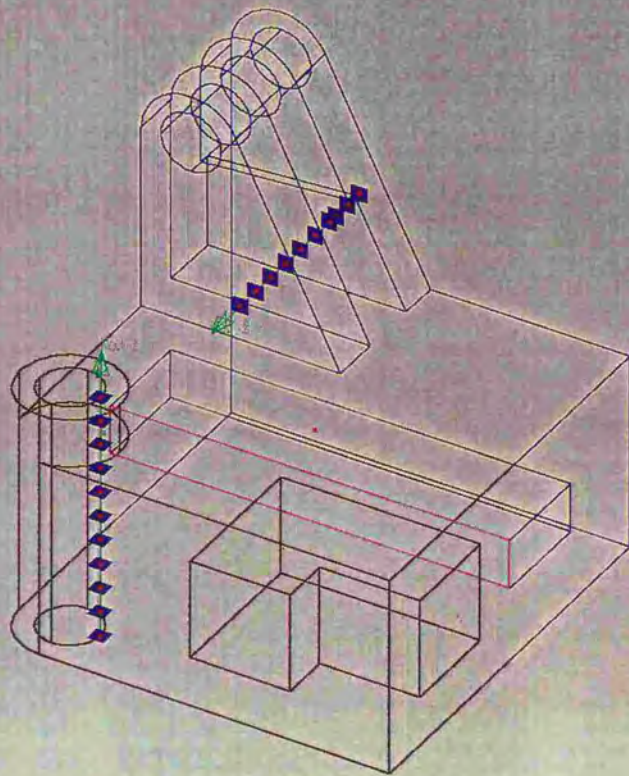


(d) 要素分割

图 6.5 机械部品A



(a) ソリッドモデル
図 6. 6 機械部品B



(b) スケルトンと接合面
図 6. 6 機械部品B

断面図層データ読み込み

ファイル名を入力してください。[
SKE]
buhinzu3

読み込み完了

圖 版

現在の視点は(5.00, 3.00, 4.00)

新しい始点のX座標は？

新しい始点のY座標は？

新しい始点のZ座標は？

1

もとの位置に戻す

縮 小

何分の1に縮小しますか？

1.2 縮小の中心をマウスでピックしてください

ファイル入出力

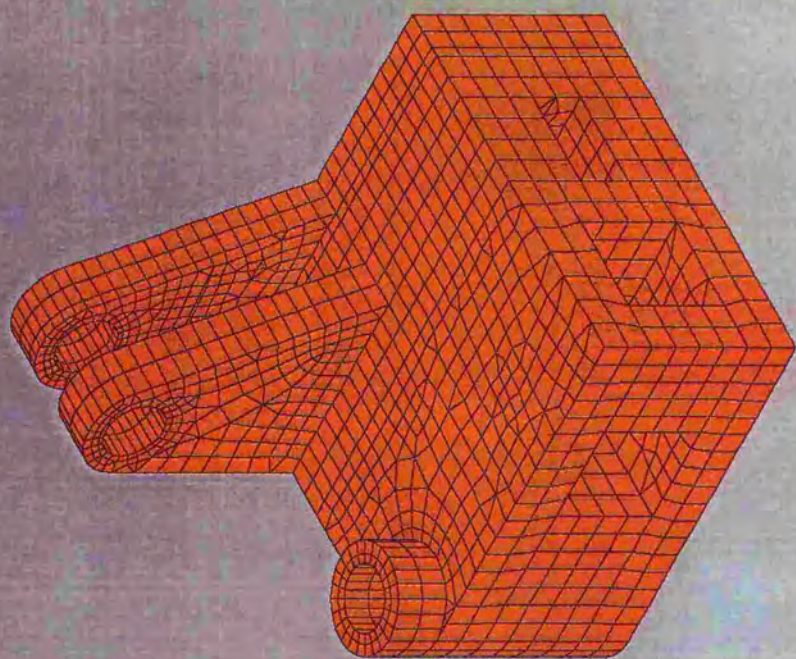
補助線入力

新亞研究集

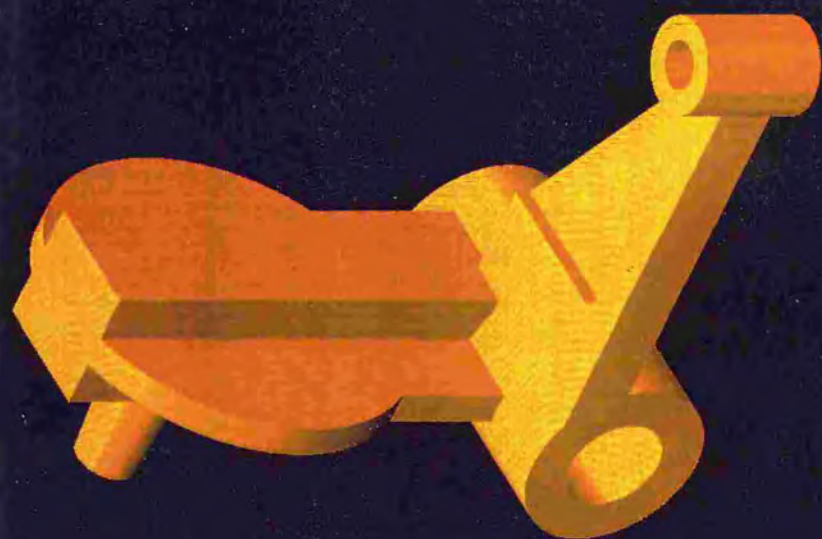
9 全自動断面生成

視点変更その他

終於了



(c) 要素分割
图 6.6 机械部品B



(a) ソリッドモデル
図 6. 7 機械部品C

多助

新しい画面の中心をマウスでピク
してください

移助

新しい画面の中心をマウスでピック
してください

断面間隔データ読み込み

フアイル名を入力してください。[
[SKE]
peace

読み込み完了

遊園

大 坑

示

卷之六

もとの位置に戻す

○ 補時線領域表示切替

複線の情報

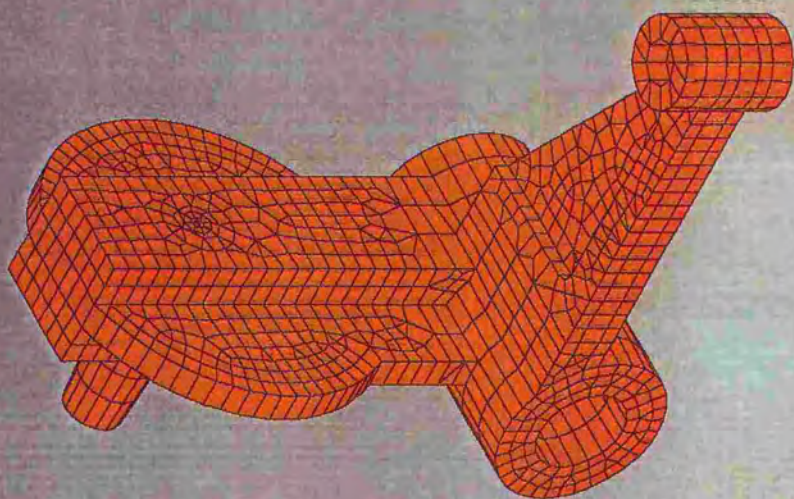
曲面の形状表示

要素分解パラメータ

前のメニエール原る



(b) スケルトンと接合面



(c) 要素分割
图 6.7 机械部品C

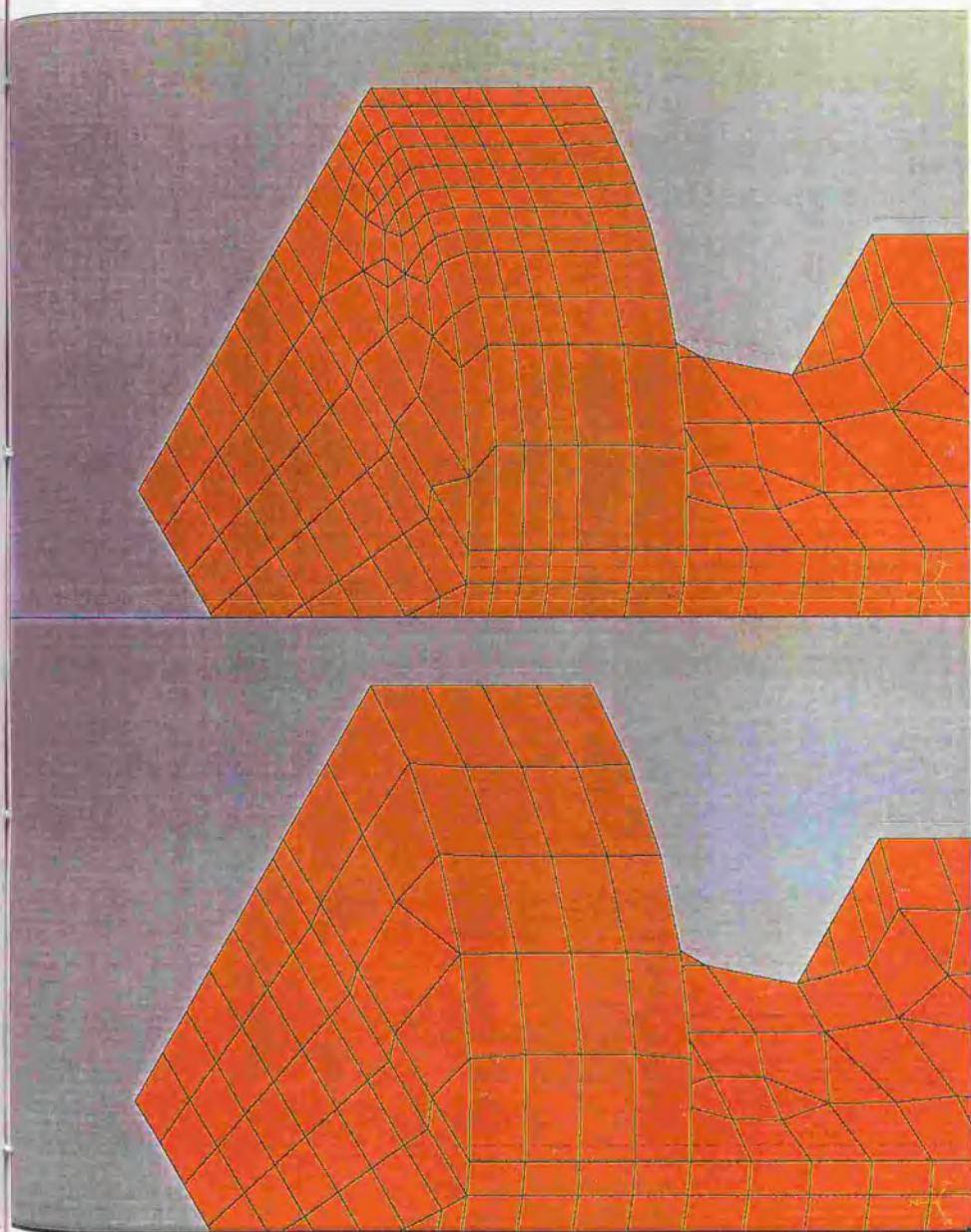
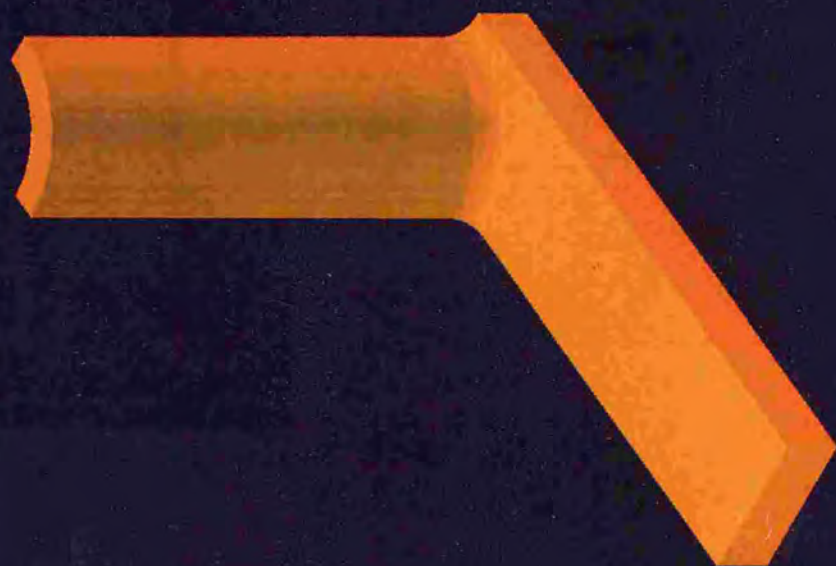


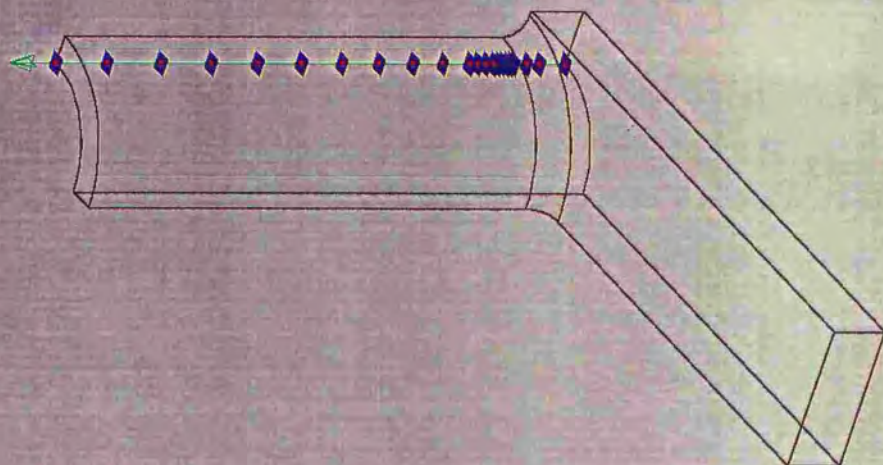
図 6. 8 ピストンの要素分割と要素の疎密



図6.9 ピストンのソリッドモデル

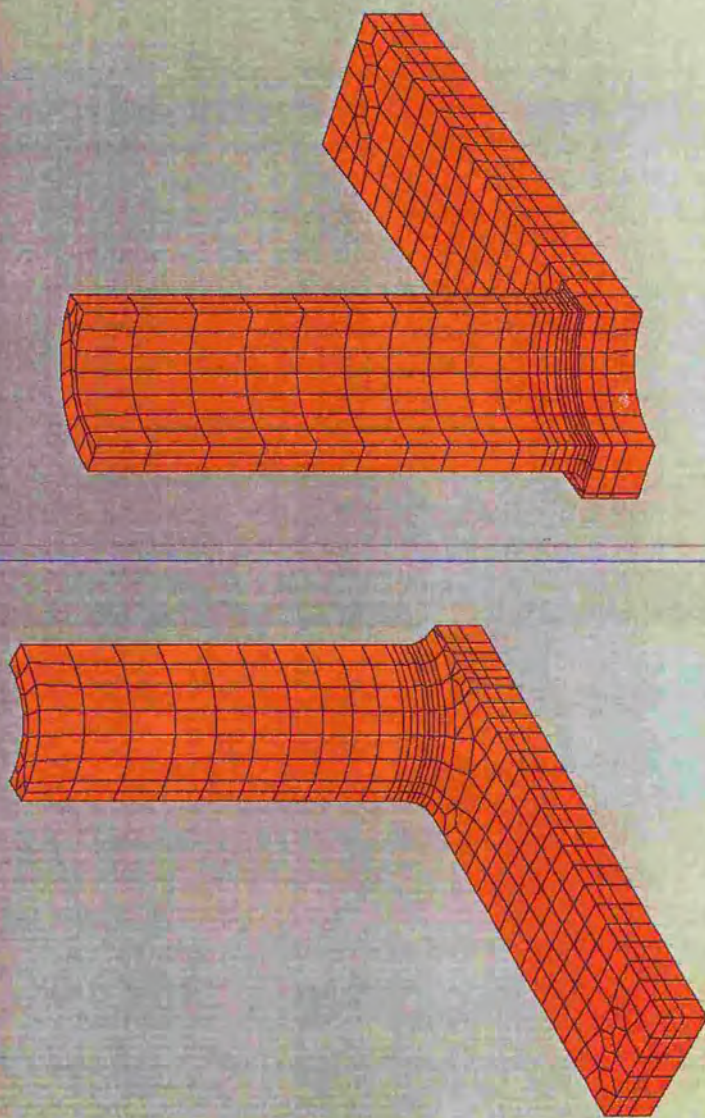
(a) ソリッドモデル
図 6. 10 r 部を有する形状





(b) スケルトンと断面間隔の指定
図 6. 10 r 部を有する形状

断面間隔データ読み込み	ファイル名を入力してください [SUG]
縮 小	何分の1に縮小しますか?
移 動	新しい断面の中心をマウスでピックしてください
断面間隔データ読み込み	ファイル名を入力してください [SUG] hexauto33
読み込み完了	
ファイルの出力	
初期値の読み込み	
断面間隔の編集	
全自動断面生成	
視点変更その他	
終 了	



(c) 要素分割
図 6.10 r 部を有する形状

6. 2. 5 考 察

最後に断面法による自動要素分割の今後の課題について述べる。

まず、生成される要素の質について考える。現在は、生成される要素に五面体要素（三角柱要素）と六面体要素が混在している。これは、断面の2次元自動要素分割において三角形が残っているためである。断面の2次元自動要素分割は、エッジの節点間隔を参照して断面に節点を自動発生させ、これらの節点を用い、まず三角形のみで分割する。次に、三角形2つを合わせて四角形にする、という手法を用いている。ここで、四角形がゆがまない、あるいは偏平にならないような場合のみ三角形2つを合わせて四角形に変換するため、三角形が残る。この2次元自動要素分割のアルゴリズムを改良し、四角形だけで分割できれば、六面体だけで分割できるようになる他、要素形状のゆがみという問題も解消されるため、今後の課題として検討を続ける。

次に、スケルトンが複数ある場合、スケルトン同士の関係をプログラム中にルール[酒井92]として記述している。接合面において自動的に要素が整合されるのもこのルールのおかげである。現在あるルール以外の形状では、自動要素分割を行うことができない（プログラムはエラーストップする）。今後このルールを拡張していくことにより、扱える形状は広がっていくため、検討を続ける。同様に、ノズル付きパイプなどの複雑な曲面に対して平面断面がとりにくい形状には断面法そのものが適用できないので、特殊形状パターンと断面法の併用ができるように拡張していく。

しかしながら、断面法によりこれまで全く不可能であった六面体要素を用いた自動要素分割の基礎を築くことができた点で本研究の成果は意義がある。特に、スケルトン、断面間隔の指定方法などのユーザインタフェースを考案し、その有効性を示すことができた。

その結果、スーパーコンピュータにより可能となった大規模解析用のデータ作成の手間が大幅に削減される。従来要素分割に1日～数日程度要していた形状でも、断面法を用いることによりわずか30分程度で要素分割がすむ。したがって、一度解析を行った後、形状を変更して再解析したい場合、従来はデータを作り直すのは多大な労力を要したが、断面法では非常に短時間でデータの再作成が行え

る。この点を重視し、スーパーコンピュータ用大規模・高速ソルバSUPER SOLVEと断面法による自動要素分割を統合した次世代FEMシステムについて7章で述べる。

第2章 有限要素法の基礎と応用

有限要素法は、連続体の問題を離散的な要素に分割し、各要素の形状関数を用いて変位を近似し、全体の平衡条件を満たすように要素の接合部で変位を連続させることによって、連続体の問題を有限次元の線形方程式の求解に帰着させる数値解析手法である。本章では、有限要素法の基礎となる変位法と力法、およびその応用として、弾性体の静的解析、動的解析、非線形解析、熱解析、流体解析、電磁気解析、構造最適化解析などを紹介する。

有限要素法の基礎となる変位法と力法は、連続体の問題を有限次元の線形方程式の求解に帰着させる数値解析手法である。本章では、有限要素法の基礎となる変位法と力法、およびその応用として、弾性体の静的解析、動的解析、非線形解析、熱解析、流体解析、電磁気解析、構造最適化解析などを紹介する。

有限要素法の基礎となる変位法と力法は、連続体の問題を有限次元の線形方程式の求解に帰着させる数値解析手法である。本章では、有限要素法の基礎となる変位法と力法、およびその応用として、弾性体の静的解析、動的解析、非線形解析、熱解析、流体解析、電磁気解析、構造最適化解析などを紹介する。

有限要素法の基礎となる変位法と力法は、連続体の問題を有限次元の線形方程式の求解に帰着させる数値解析手法である。本章では、有限要素法の基礎となる変位法と力法、およびその応用として、弾性体の静的解析、動的解析、非線形解析、熱解析、流体解析、電磁気解析、構造最適化解析などを紹介する。

6. 3 トラッキング・ステアリング

6. 3. 1 ポストプロセッシングの高度化

有限要素解析におけるポストプロセッシングは、解析結果を可視化することにより解析結果の理解を援助するものであり、グラフィックススーパーコンピュータ、GWS、EWSなどの優れたグラフィックス機能を有するコンピュータの登場により質の高い可視化が実現されてきた。しかしながら、解析の後処理として位置づけられているのが現状である。

これに対し、有限要素法を設計のためのツールとして用いるには、有限要素解析結果にもとづき形状変更などを行い、再解析を行う、といった繰り返しの解析作業が効率的に行われる必要がある。そのためには、従来のポストプロセッシングを高度化し、形状変更・再解析のための柔軟なシステムが要望される。

近年、サイエンティフィック・ビジュアライゼーションの重要性が注目され、トラッキング・ステアリングという技術が関心を集めている[Rosenblum89][日経92]。トラッキング・ステアリングの例として対話型デバイスシミュレーションシステム[吉田90]などがあるが、有限要素法による構造解析の分野における実用例はまだない。また、現在報告されているトラッキング・ステアリングシステムは、解析の効率化を図るためのものであり[吉田90]、形状変更などの設計変更まで行えるシステムはまだない。

そこで、汎用ビジュアライゼーション・ツールAVS[吉川91][吉川92]と前述の高速解法SUPER SOLVEを用い、トラッキング・ステアリングシステムを開発した。

6. 3. 2 トラッキング・ステアリング

トラッキングは、非線形解析を増分的に行う場合、解析の途中経過をリアルタイムにグラフィックス表示し、モニタしながら、解析が正しく行われていない場合には解析を中断する手法である。ステアリングはトラッキングをさらに高度化し、解析の途中で解析条件や種々のパラメータを変更し、解析を続行する手法である。

現在報告されているトラッキング・ステアリングシステムは、ソルバとビジュアライゼーションをネットワーク環境下で分散処理することにより実現されている[Phillips89][Ruhle90][吉田90]。ソルバはスーパーコンピュータに代表される高速演算サーバで実行し、ビジュアライゼーションはグラフィックス性能の優れたEWSやGWSで行うというものである。

ここで開発を行うトラッキング・ステアリングシステムは、EWSやGWSの1台のコンピュータでソルバとビジュアライゼーションをともに実行することを基本としている。また、高度な使い方として上述のような分散処理も同時に可能となっている。この様子を図6.11に示す。

また、ステアリングにおいて変更できるパラメータは、現在報告されているものの多くは流体解析[Bancroft89]における解析パラメータが多く、解析結果をもとに形状変更を行うことに応用している例は見受けられない。ここでは、形状変更・再解析を容易に行うことを最終目的としたトラッキング・ステアリングシステムの開発を目指す。

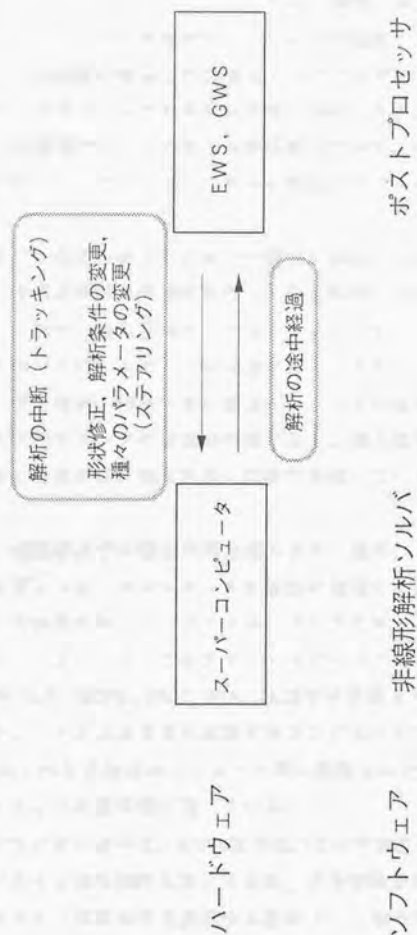


図6. 11 トラッキング・ステアリングと分散処理

6. 3. 3 トラッキング・ステアリングシステムの開発

トラッキング・ステアリングシステムの開発には、高速ソルバとビジュアルイゼーション・ツールの両者のソフトウェアが必要となる。ここで用いたAVS3はネットワーク環境に対応した汎用ビジュアルイゼーション・ツールであり、トラッキング・ステアリングの実現に有効である。また、前述のSUPER SOLVEは高速性、大規模性をともに有する汎用解法であり、これらを用いることによりトラッキング・ステアリングシステムを開発することが可能となる。

現在までに開発が終了した部分の機能を表6. 2に示す。解析機能としては線形解析と非線形解析（弾塑性解析、大変形解析）が可能である。トラッキング機能として、解析の途中経過をリアルタイムにグラフィックス表示し、解析の一時停止、中断およびリスタートが可能である。ステアリング機能として、現在、拘束条件、荷重条件、材料定数の変更と、シェルの板厚、ビームの断面形状などの簡単な形状パラメータの変更が可能である。形状変更については7章で詳述するが、前節の自動要素分割を併用し効率化を図っている。

図6. 12にシステム構成の概念図を示す。図中、ソルバモジュール、ステアリングモジュール、コントローラを独自に開発した。SUPER SOLVEの組込みは、AVS関数を用いて、ファイル、ユーザとのインターフェイス部を中心に変更を行った。また、AVSはグラフィックススーパーコンピュータ TITANのほか、CONVEX、MIPS、DEC、SGI IRISなど多彩なコンピュータにインストールされ、本システムはAVSが起動するコンピュータで動作できる。SUPER SOLVEはこれら多彩なコンピュータ用に開発されたソルバであり、ネットワーク環境における分散処理に適している。

ステアリングにおいて、SUPER SOLVEは剛性方程式の解法として内積形式のスカイライン法を採用しているため、その特徴を生かして解析の効率化を図れる。すなわち、荷重条件を変更する場合は、三角分解を一度行っておけば、荷重条件の変更後は前進・後退代入から計算を始めればよく、極めて短時間に解を求めることができる。拘束条件を変更する場合は、数値積分を必要とする要素剛性マトリックスの計算は一度行うだけでよい。また、材料定数などの変更において

も、変更された要素の要素剛性マトリックスのみを計算し直すことにすれば、解析時間は短縮される。形状変更を行う場合も同様である。この実現のため、ソルバは剛性マトリックスの作成部、剛性方程式の解法部などモジュール化を図ることが必要となる。

ステアリング・モジュールは、表6. 2の各機能の制御および入力を行うためのモジュールである。A V Sは汎用のビジュアライゼーション・ツールであり、用途としてはポストプロセッシングが主である。しかし、境界条件の変更などは、従来ブリプロセッサにおいて行われてきたものである。したがって、ステアリング・モジュールにおいては、境界条件などの変更、入力のために、使いやすいユーザインターフェイスを付与する必要がある。特に、形状変更をいかに行うかが最大の問題となる。これには、C A Dや前節で述べた自動要素分割技術が有効である。

表 6. 2 トラッキング・ステアリングシステムの機能

機 能	線形解析	非線形解析 (弾塑性, 大変形)
解析の中断(stop)		○
解析の一時停止(pause)		○
リスタート ^{*1}		○
荷重条件変更+再解析	○	○
拘束条件変更+再解析	○	○
シェル・ビーム形状データ変更 ^{*2} +再解析	○	○
材料定数変更+再解析	○	○
増分変更+リスタート		○
荷重条件変更+リスタート		○
拘束条件変更+リスタート		○

*1 リスタートは増分解析の途中（任意のステージ数）から解析を続行することを意味し、再解析は解析を再度始めから行なうことを意味する。ともに解析を中断した後に用いる機能であり、解析の一時停止(pause)とその解除とは異なる。

*2 シェルの板厚、ビームの断面形状データを意味する。

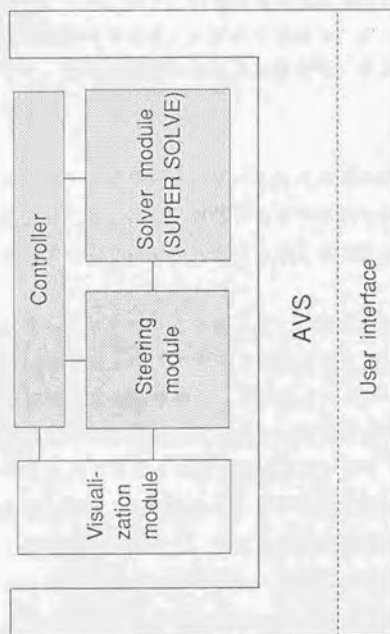


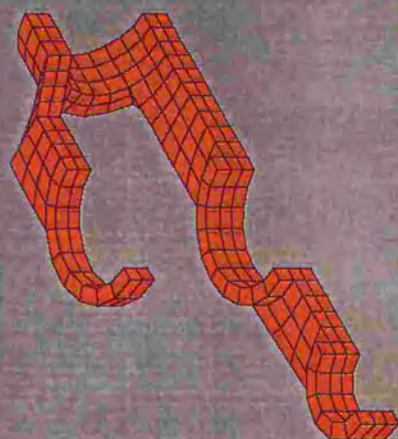
図6.12 トラッキング・ステアリングシステムの構成

6. 3. 4 適用例

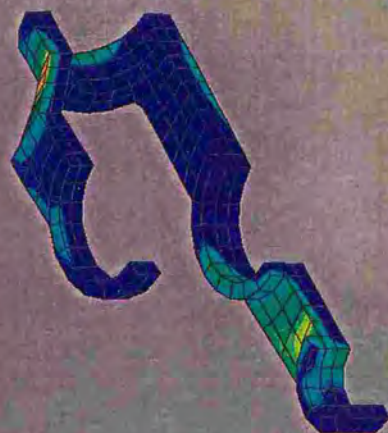
まず、トラッキングの例を示す。図 6. 13には自動車部品のヨークの大変形・弾塑性解析への適用例を示す。解析は 20 ステージの増分解析を行っており、その途中経過を示している。実際にはコンピュータの CRT 上で応力分布などがカラーグラフィックス表示され、ソルバとビジュアライゼーションがリアルタイムに処理される。また、図 6. 14は自動要素分割の例として紹介したロッカアームの弾塑性解析結果である。いずれの場合も、ユーザは解析結果の評価に集中することができ、従来の解析中心の進め方から、ポストプロセッシング中心の使い方となってきた。

次に、ステアリングの例を示す。上述の非線形解析において増分の中で塑性域が急激に進展した場合には、解析の途中で解析を中断し、荷重増分を細かくしてリスタートをすることにより、解析を正しく実行することができた。

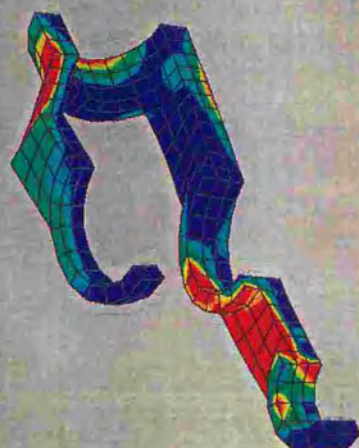
さらに重要なステアリングの例として、形状変更を行ない、再解析した例を示す。図 6. 15は r 部と円孔を有する機械部品の要素分割である。これは、図 6. 16に示す手順で自動要素分割により作成されたデータである。しかしながら、図 6. 15の形状では r 部と円孔が近いために応力集中が見られた。そこで、図 6. 17のように円孔位置を変えて形状修正することにより応力集中を緩和し、最適な設計を行なうことを試みた。この結果、図 6. 18に示すように応力を低くすることができた。ただし、現在のところ形状変更をトラッキング・ステアリングシステム内で行うことはできないため、CAD でソリッドモデルの変更を行った後、前節の断面法による自動要素分割で再度要素分割を行った。これにより、形状変更にも比較的容易に対応できることがわかった。そこで、次項の考察を受け、7章で CAD、自動要素分割とも統合した FEM システムについて述べる。



(a) 変形前



(b) 10ステージ



(c) 15ステージ

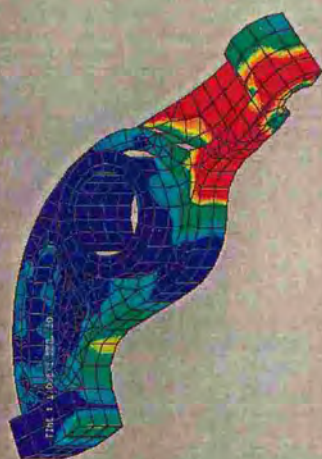


(d) 20ステージ

図 6.13 ヨークの大変形・弾塑性解析



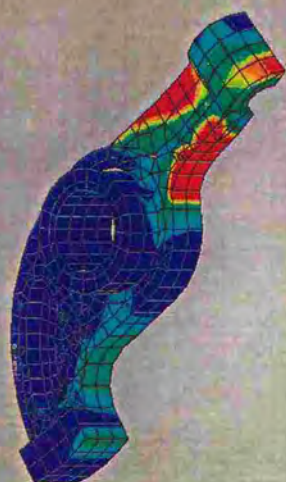
(b) 4 ステージ



(d) 10 ステージ



(a) 変形前



(c) 6 ステージ

図 6. 14 ロツカアームの弾塑性解析

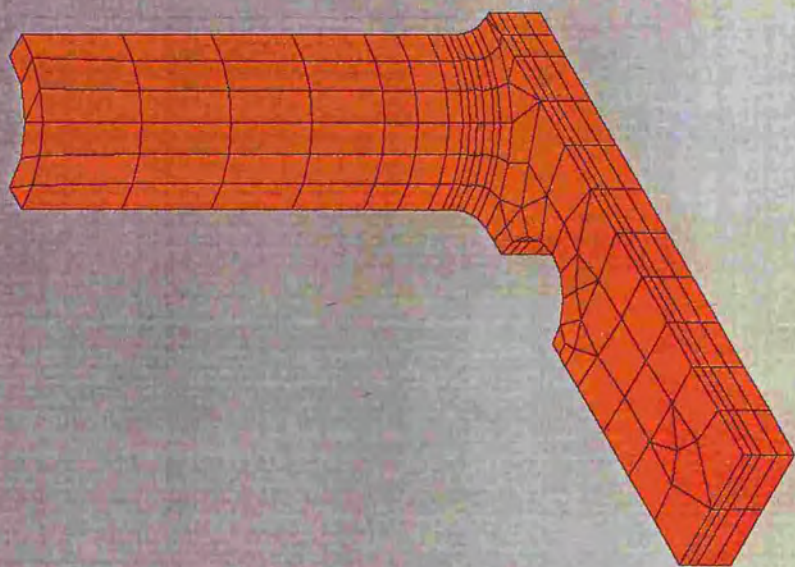
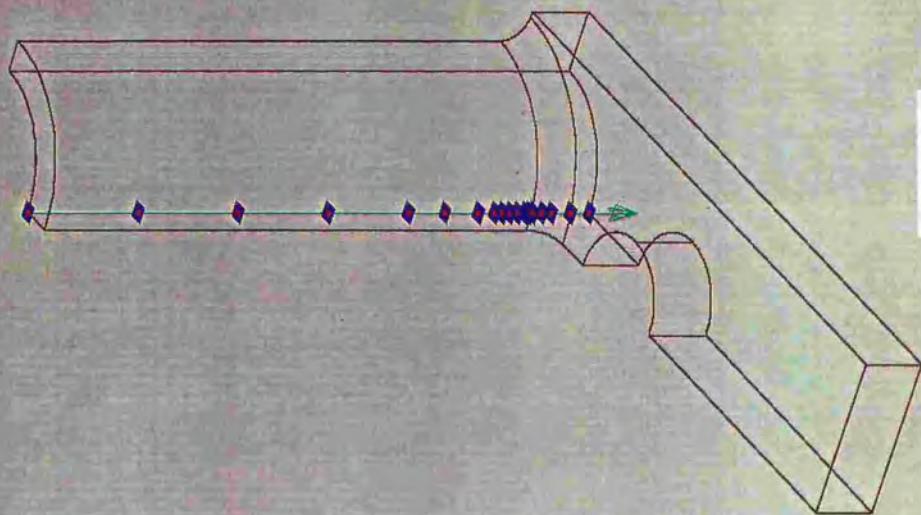


図 6. 15 r 部と円孔を有する機械部品



(a) スケルトン

図 6. 16 r 部と円孔を有する機械部品の自動要素分割

断面法プログラム
MSECT
制作：三好研究室

形状データ読み込み

ファイル名を入力してください
demo1.111

断面間隔データ読み込み

ファイル名を入力してください
SEG
video1

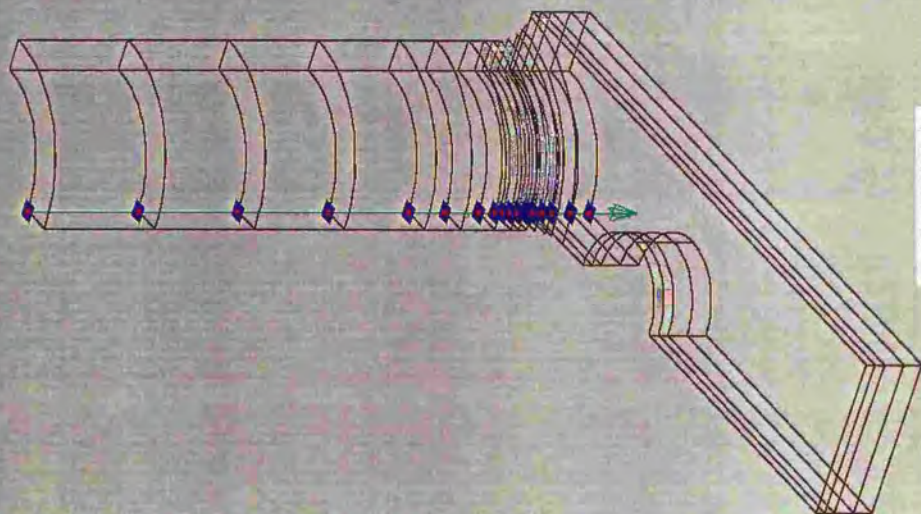
読み込み完了

断面図の読み込み

断面図の読み込み

指定変更その他

ファイルの読み込み



(b) 断面自動生成

図 6. 16 r 部と円孔を有する機械部品の自動要素分割

断面データ読み込み

ファイル名を入力してください

demo1.01

断面データ読み込み

ファイル名を入力してください

demo1.01

断面データ読み込み

ファイル名を入力してください

demo1.01

読み込み完了

断面自動生成

計算中

計算完了

ファイルの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

断面データの出力

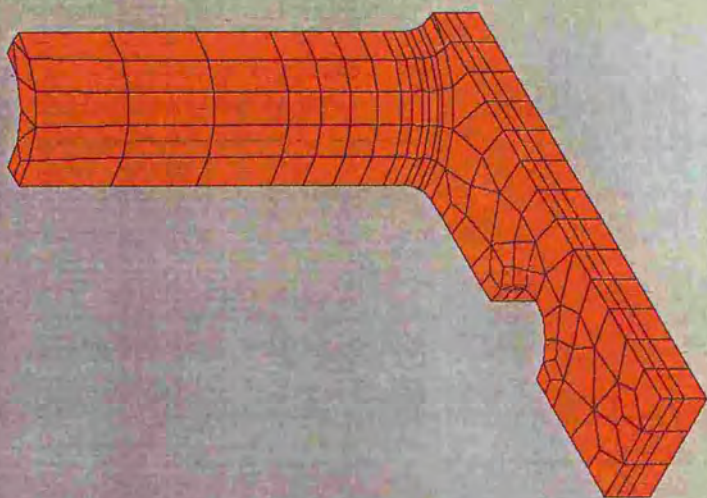
断面データの出力

断面データの出力

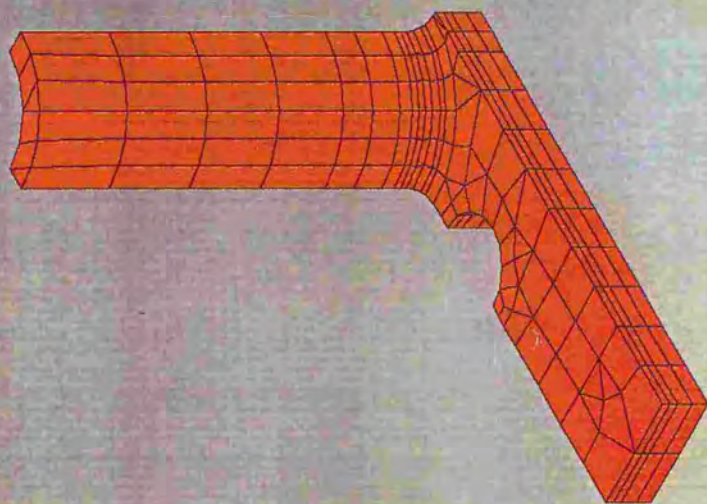


(c) 断面上の節点生成

[illegible]



(b) 変更後



(a) 変更前

図 6. 17 形状の変更 (円孔位置の移動)

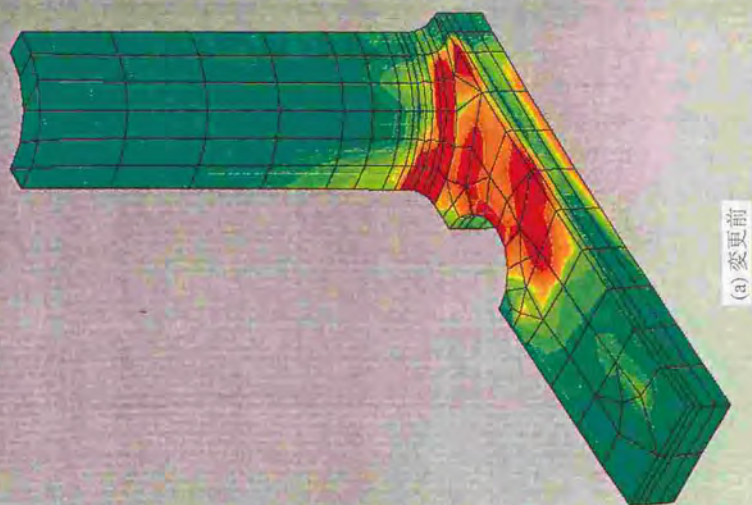
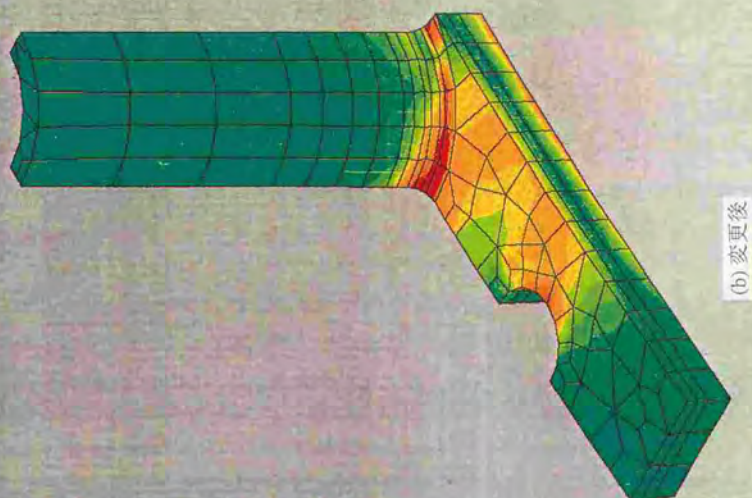


図6.18 応力分布の変化

6. 3. 5 考 察

本研究では、最近注目を集めているトラッキング・ステアリング技術を構造解析に初めて応用した上、形状変更までもステアリングに加えるという新しい提案をした。

現在は、グラフィックススーパーコンピュータ TITAN 1台 (メモリ64MB) 上でソルバ、ビジュアライゼーションとも行っているため、1000節点以下の小規模問題にとどまっており、解析規模の点では難がある。これは、ビジュアライゼーション・ツールとして採用した AVS が多くのメモリを必要とするからである。しかしながら、トラッキング・ステアリングを使いやすいものにするには優れたユーザインタフェースが要求されることから、この点で秀でた AVS の選択は正しかったと考える。今後は、図6. 11でも示した通り、CRAY, CONVEXなどのスーパーコンピュータ (高速演算サーバ) とGWS, EWS よりなるコンピュータ・ネットワーク環境で分散処理することにより、より大規模な解析が、より高速に行うことができることを実証することは課題の一つである。

また、前項の円孔位置を変更した例のように、形状をステアリングするには、要素分割の変更の簡便さが最大のポイントとなる。これには、IGESによるCAD・CAEの統合化 (6. 2 節)、断面法による自動要素分割 (6. 2 節)、スーパーコンピューティングによる高速・大規模ソルバ (4 章, 5 章)、トラッキング・ステアリング (6. 3 節) のすべての個別技術を統合することが重要である。これにより、設計の過程において、形状を様々に変えて設計者が満足するような最適設計を行なうことが可能となる。

そこで、上述した個別技術を統合し、次世代FEMシステムについて次章で述べる。

第7章 考察と展望

7章 考察と展望

前章までで、ソルバ、プリ・ポストプロセッシングにおけるスーパーコンピュータの個別技術の開発について述べた。具体的には、以下にまとめられる。

ソルバ

- 4章 内積形式のスカイライン法による高速・大規模ソルバ
- 5章 ICCG法による超大規模ソルバモジュール

プリプロセッシング

- 6.2節 IGESによるCAD・CAEの統合化、
断面法による自動要素分割

ポストプロセッシング

- 6.3節 トラッキング・ステアリング

特に6.3節の最後に、形状修正をステアリングすることを提案し、簡単な例題でその概念を示した。これはFEMを従来の解析ツールとして用いるだけでなく、設計ツールとして用いることを目的としたものである。

設計ツールとして用いるために必須条件として、まず、スーパーコンピュータ用アルゴリズムと実用的なプログラムを開発し、高速・大規模な解析を実現した。次に、CAD・CAEの統合化と、要素分割の手間の削減のために自動要素分割技術を確立した。また、設計者が解析結果を見ながら、境界条件や材料定数などをパラメータとしたパラメトリックスタディを行ったり、形状を変更してその効果をFEM解析で確かめるといった手順を簡便に行うためのフレームとしてトラッキング・ステアリング技術を応用した。

本章では、以上の個別技術を統合し、プリ・ポストプロセッシングを含めた有限要素解析の全体、さらには、設計において形状変更などを行い再解析するといった手順を、高速に、手軽に行うことができることを目的とした、設計ツールとしての次世代FEMシステムを提案し、将来像を展望する。

まず、有限要素解析の処理の流れを従来と本論文で提唱するシステムを比較し、図7. 1, 図7. 2に示す。本論文で提唱するシステムの特徴を以下にあげる。

(1) CAD・CAEの統合をIGESにより実現している。

(2) 六面体による自動要素分割を初めて実現し、ある程度実用化のめどがついた。

(3) 高速・大規模ソルバSUPER SOLVEを用いることにより、解析が高速に行われるため、ユーザの待ち時間が少なくユーザの負担が軽減される他、設計において多くの解析を行う場合に計算時間の問題が解消される。また、アーキテクチャによらず多彩なコンピュータにおいてすべからく優れた性能を発揮するため、ネットワークコンピューティングが効率よく行なえる。

(4) 高速ソルバとビジュアルイゼーションを同時に処理し、解析の途中経過をモニタできる。トラッキングにより、ソルバをインタラクティブに制御できるため非線形解析において無駄な解析を減らし効率化が図れる。

(5) ステアリング技術を応用しているため、ユーザは解析結果の評価に集中することができ、解析結果にもとづき設計者が形状修正を行い再解析したり、パラメトリックスタディが容易に行なえる。

特に、(5)のステアリングに関し、従来システムとの比較を図7. 3, 図7. 4に示す。

従来システムでは、形状変更のみならず、境界条件、材料定数などを変更するにもブリエロッサを用いなければならず、解析が煩雑になっていた。本論文で提唱するシステムでは、境界条件、材料定数などのパラメータ変更はブリエロッサを用いなくてもステアリングシステム内で処理できるため、解析手順の煩雑さがなく、設計者が解析結果の評価に集中することができる。

さらに、形状変更はCADと自動要素分割により容易に行うことができる。最近のCADはフィーチャベースのCADに移行しつつあり、Rの変更などのパラ

メトリック機能が強化されているため、形状変更を最も容易に行うことができる。CADを利用せず、従来のようにFEMのプリプロセッサで形状変更をするには、節点ベースで操作するしか手段がなく、極めて煩雑な作業となる。

また、断面法による自動要素分割はCADで作成したソリッドモデルを用いるため、CADデータがCAE、CAMで統一して利用できる。要素分割に要する時間も極めて短時間ですむ。

今後は、図7.4の形状修正をより容易にするため、断面法の機能充実と適用可能な対象範囲を広げることが課題である。この内後者については6.2で述べた通りであるが、特に形状修正を容易にするための機能充実として、形状の局所的修正を行なった場合、変更前のスケルトンや断面位置の情報を再利用できるようにする予定である。これにより、形状修正を行なった場合の自動要素分割の手間がさらに省けると同時に、形状変更に関係ない部位の要素分割は変更前と同じにすることができる。これは重要な項目であり、形状変更による結果の変化を見える場合には要素分割の影響がないようにする必要がある。現状の四面体要素による自動要素分割ではこれが困難である。

この改良はまだ不完全であるが、断面法におけるスケルトンに用いているエッジ、サーフェスが形状変更されない場合には既に適用できる。この例を図7.5～図7.7に示す。図7.5、7.6は対称性から全体の1/2を解析していることを示しており、図7.7が全体図である。

図7.5(a)では十分な剛性を保持しているが、軽量化を図るために、同図(b)～(f)のような形状修正を行った。これは、想定した荷重条件に対して、変形量と応力がある基準以下に保ち（すなわち、剛性がある基準を満たすようにする）、できるだけ軽量化するというものである。応力は主応力を評価している。

まず初期設計として(b)のような穴を導入する。ここでは角部の応力が高いため、丸めを施した。(c)では $r=5$ 、(d)では $r=8$ の丸め操作を行ったが、依然として応力が基準を越えるため、(e)、(f)では穴そのものを小さくするとともに、 $r=8$ の丸めを施してある。これにより目的を達成することができた。最終設計としては、さらに応力集中のない穴角部についても $r=4$ の丸めを施してある。

図7.6は、この内、 r なしの場合、 $r=5$ の場合、および最終設計の場合の

3通りの設計過程において、応力が低減されていく過程を示している。

図7.7は、 $r=5$ の場合と最終設計の場合の全体図を示している。

この設計の例においては、スケルトンや断面位置の情報を再利用できるため、自動要素分割は極めて簡単である。また、要素の大きさ（要素の粗密）もほぼ一定に保たれるという利点もある。当然、形状変更はCADにより簡単に行える。1回の形状修正と自動要素分割にかかる時間は10～30分程度、解析時間は約45秒であり、上の5ケースの検討を行うのに1日あれば十分であった。

重要なのは、本システムであれば設計者自らがFEMを使える、ということであり、“設計ツール”として有効といえる。

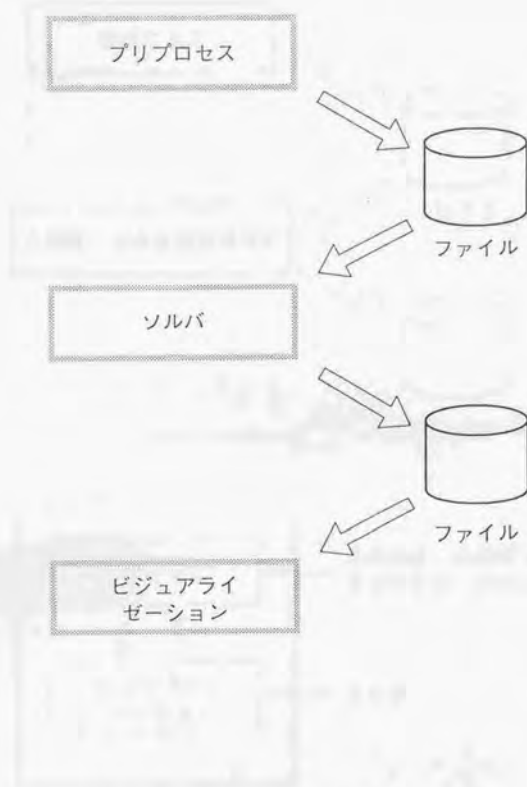


図7. 1 従来の有限要素解析の流れ

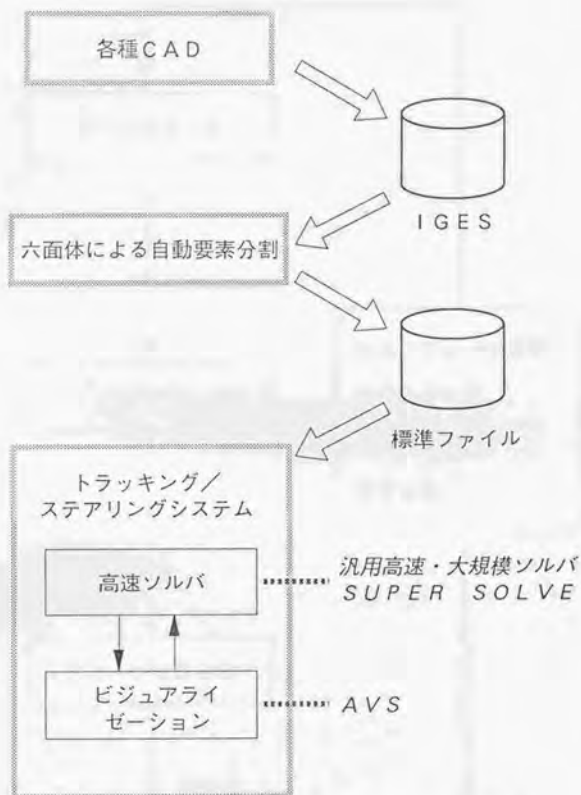


図7. 2 本論文における有限要素解析の流れ

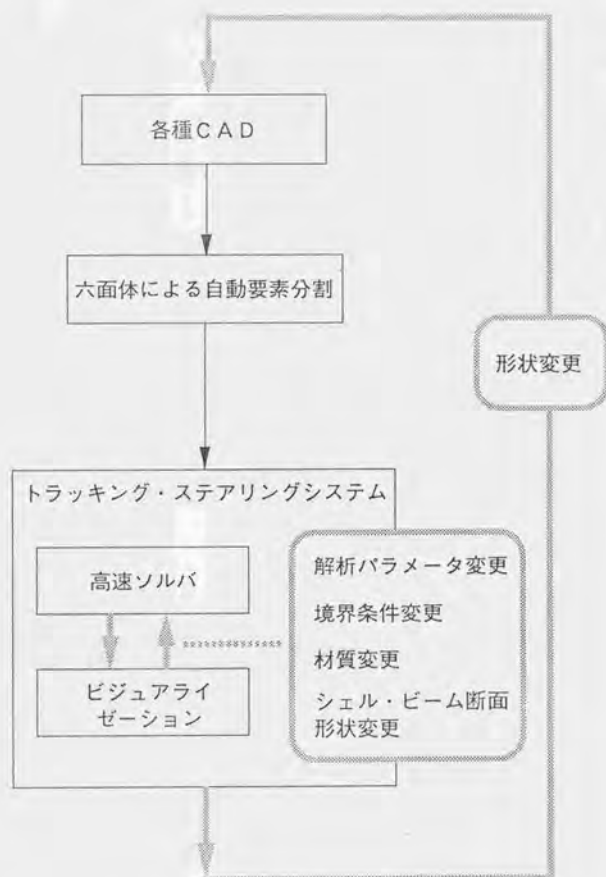


図7. 4 本論文における再解析の流れ

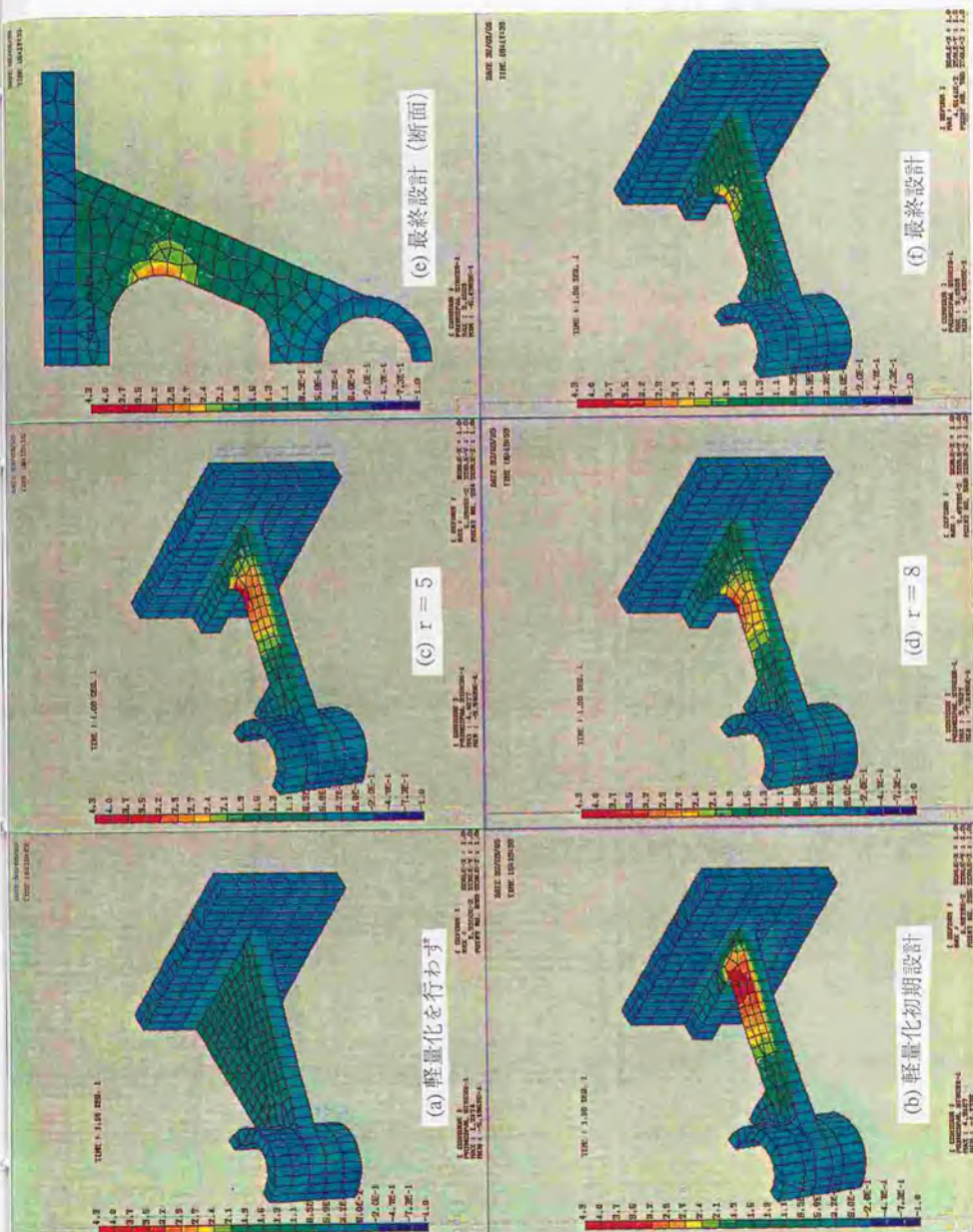


図 7. 5 最適設計例 (主応力分布)

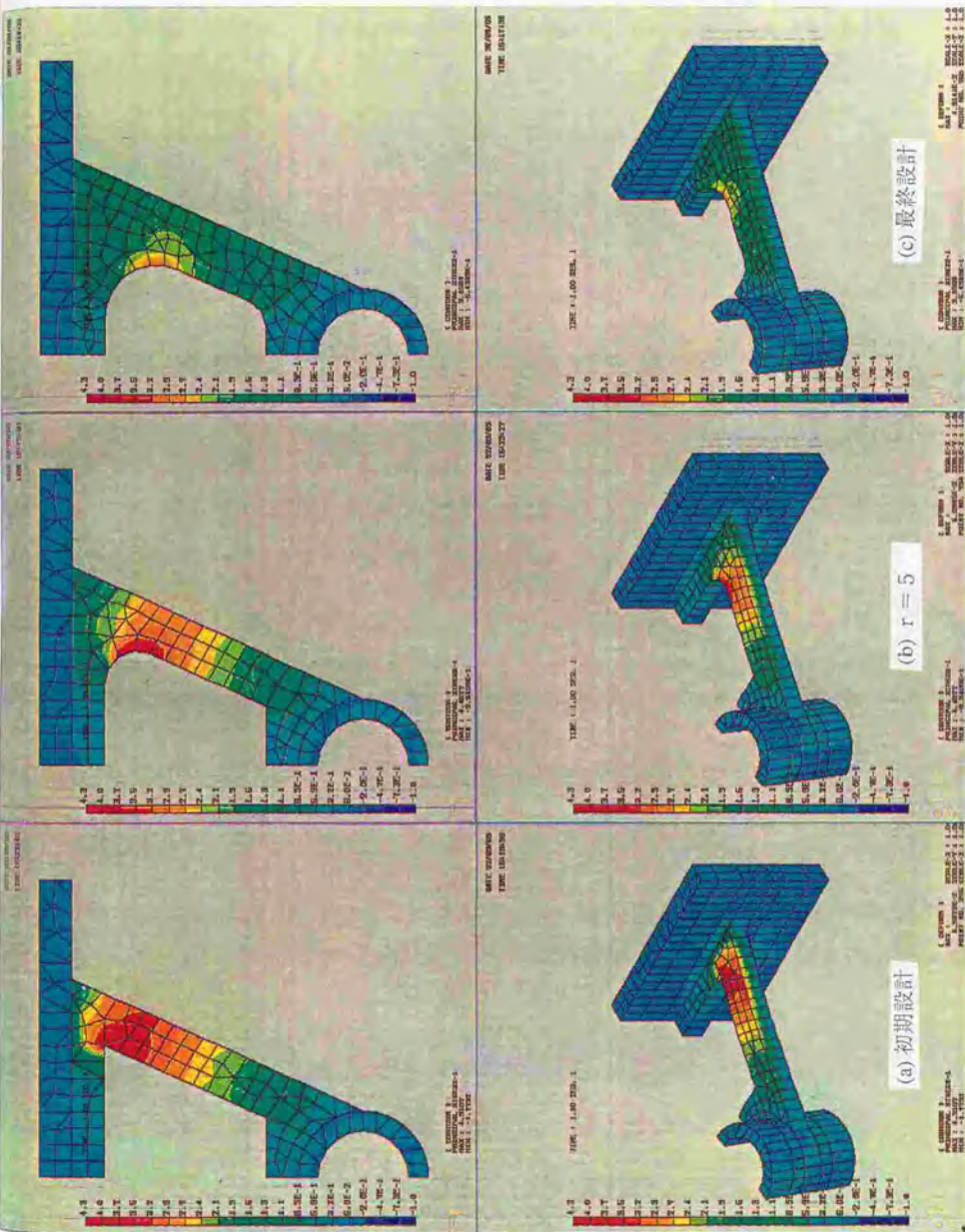
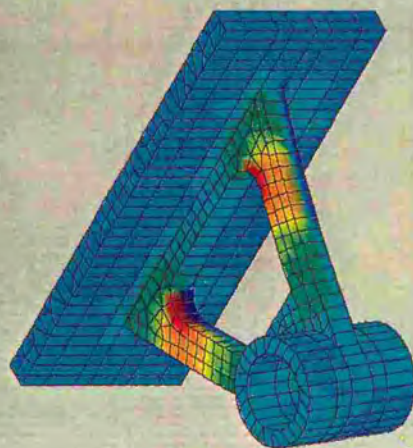
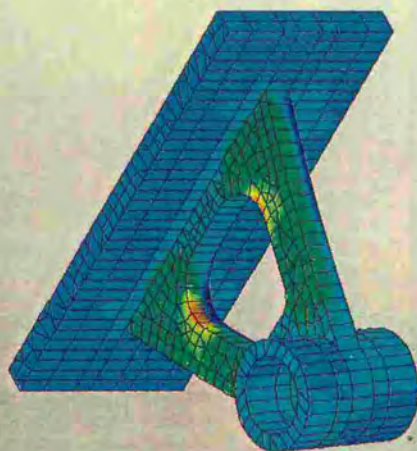
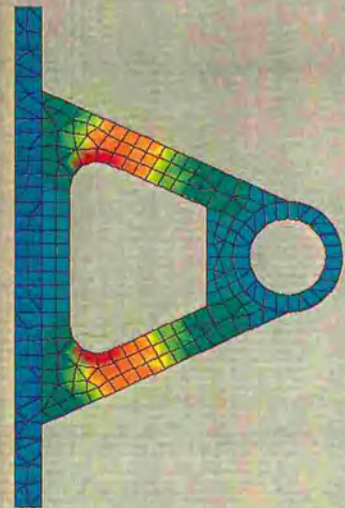
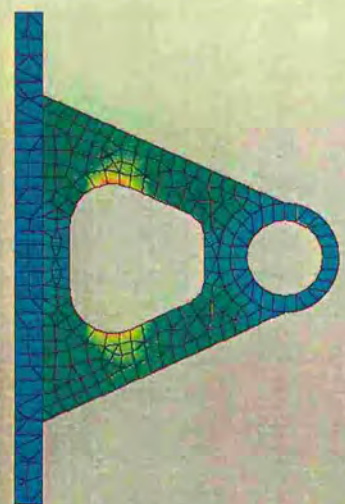


图 7.6 最適設計過程 (主応力分布)



(b) 最終設計

(a) $r = 5$

图 7. 7 最適設計過程 (主応力分布: 全体図)

第8章 結 言

第8章 結 言

8 章 結 言

本論文においては、有限要素法による構造解析におけるスーパーコンピューティングに関して、汎用高速・大規模ソルバ開発を中心に、プリ・ポストプロセスを含めて総合的に議論した。

プリプロセッサ、ソルバ、ポストプロセッサにおける個別技術として、IGESによるCAD・CAEの統合化、3次元構造物の六面体による自動要素分割、ベクトル・パラレルコンピューティングによる高速・大規模ソルバ、トラッキング・ステアリングについて述べた。

さらに、これらの先端技術を統合することにより、有限要素法を解析のツールから設計のツールにすることができしことを示した。すなわち、ステアリングを発展させることにより、解析結果にもとづき、設計者が形状修正を行い、再解析するための柔軟なシステムを構築することができる。これは、CAD、自動要素分割、高速ソルバ、ステアリングの個別技術を充実させ、統合化することにより実現された。

本研究における主な成果を以下に項目だけ簡単にまとめる。

- (1) 多彩なスーパーコンピュータとネットワーク環境に適した新アルゴリズムとして、内積形式のスカイライン法の開発を行なった。
- (2) 内積形式のスカイライン法を用いた、次世代の汎用プログラムとして実用的にも有用な高速・大規模ソルバ SUPER SOLVE の開発を行なった。
- (3) 種々の解析例、ベンチマークテストを通じて、SUPER SOLVE のベクトル性能、パラレル性能、ベクトル・パラレル性能を評価し、極めて良好な結果を得た。
- (4) SUPER SOLVE を用い、10 万自由度程度の実用上十分な大規模解析が行な

える上、さらに、ICCG法を用いたFEM3D/Iを用い、約100万自由度の超大規模解析が可能となった。

(5) 高並列・超並列コンピュータに対し、EBE-SCG法の検討を行なった他、衝撃解析におけるパラレルコンピューティングに対する考察を行なった。

(6) スーパーコンピューティングにおける膨大なデータ作成を行なうため、六面体要素による自動要素分割を行なう新手法として断面法を開発した。また、IGESによるCADとの統合化を実現した。

(7) トラッキング・ステアリングシステムを開発し、形状修正・再解析が容易に行なえることを示した。

いずれもSUPER SOLVEによる高速・大規模解析が基礎となり発展させ築き上げたシステムである。現在、多様化したコンピュータ環境において万遍なく良好な成果を上げているものは、内積形式のアルゴリズムを採用したSUPER SOLVE 唯一といってよいのではないだろうか。高並列・超並列と騒がれている中で、スーパーコンピューティングの現状を的確にとらえ、高性能であるとともに実用的レベルまで押し上げた研究として、以上の成果は有意義であり、新規性がある。

参考文献

- [Adams82] Adams, L. and Ortega, J., A multi-color SOR Method for Parallel Computation, Proc. 1982 Int. Conf. Par. Proc., p.53, (1982).
- [Adams85] Adams, L., M-step Preconditioned Conjugate Gradient Methods, SIAM J. Sci. Stat. Comput., 6-2, p.452, (1985).
- [Bancroft89] Bancroft, G. V., Plessel, T., Merritt, F., and Walatka, P., Scientific Visualization in Computational Aerodynamics at NASA Ames Research Center, COMPUTER, IEEE, pp.89-94, (1989-8).
- [Bathe82] Bathe, K. J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, (1982).
- [Evans79] Evans, D.J. and Hatzopoulos, M., A Parallel Linear System Solver, Int. J. Comput. Math., 7, pp.227-238, (1979).
- [Evans80] Evans, D.J. and Hodjdimos, A., A Modification of the Quadrant Interlocking Factorization Parallel Method, Int. J. Comput. Math., 8, pp.149-166, (1980).
- [Evans81] Evans, D.J., Hodjdimos, A. and Noutsos, D., The Parallel Solution of Banded Linear Equation by the New Quadrant Interlocking Factorization (Q.I.F.) Method, Int. J. Comput. Math., 9, pp.151-161, (1981).
- [Farhat87] Farhat, C., Felppa, C.A. and Park, K.C., Implementation Aspects of Concurrent Finite Element Computations, Parallel Computations and Their Impact on Mechanics, ASME AMD-Vol.86, p.301, (1987).

[Farhat88] Farhat, C. and Wilson, E. , A Parallel Active Column Equation Solver, *Comput. Struct.*, 28-2, pp.289-304, (1988).

[Meijerink77] Meijerink, J. A. and van der Vorst, H. A., An Iterative Solution Method for Linear Systems of which the Coefficient Matrix is a Symmetric *M*-Matrix, *Math. Comp.*, 31, pp.148-162, (1977).

[Noor87] Noor, A.K., Parallel Processing in Finite Element Structural Analysis, *Parallel Computations and Their Impact on Mechanics*, ASME AMD-Vol.86, pp.253-277, (1987).

[Omid87a] Omid, N. B., Raefsky, A. and Lyzenga, G. , Solving Finite Element Equations on Concurrent Computers, *Parallel Computations and Their Impact on Mechanics*, ASME AMD-Vol.86, pp.209-227, (1987).

[Omid87b] Omid, N. B. and Park, K. C., Solving Structural Mechanics Problems on the Caltech Hypercube Machine, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 61, pp.161-176, (1987)

[Ortega85] Ortega, J.M. and Voigt, R.G., Solution of Partial Differential Equations on Vector and Parallel Computers, *SIAM Review*, 27, pp.149-240, (1985).

[Phillips89] Phillips, R. L. , Distributed Visualization at Los Alamos National Laboratory, *COMPUTER*, IEEE, pp.70-76, (1989-8).

[Raju79] Raju, I.S. and Newman, J.C., Jr. , Stress-Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite-Thickness Plates, *Eng. Fract. Mech.* , 11-4, pp.817-829, (1979).

[Ruhle90] Ruhle, R. and Lang, U. , Scientific Applications in a Super-computer Environment, *Science and Engineering on Supercomputers* ed. by

Pitcher, E.J., Cray Research, Inc., Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, pp.91-101, (1990).

[Rosenblum89] Rosenblum, L. J., Scientific Visualization at Research Laboratories, COMPUTER, IEEE, pp.68-70, (1989-8).

[大石91] 大石・山田・吉村・矢川, 領域分割法の動的有限要素解析への適用, 日本機械学会第4回計算力学講演会論文集, 910-79, pp.137-138, (1991-11).

[大坪92] 大坪・久保田・鈴木, 次世代統合解析システムと構造最適設計法, 日本機械学会第2回デザイン・エンジニアリング・プラザ セミナー教材 次世代CAE システム, 920-37, pp.1-8, (1992-6).

[奥川91] 奥川, 並列計算機アーキテクチャ, p.155, (1991), コロナ社.

[奥田90] 奥田, SCG 法の EBE 反復による3次元構造解析, 日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集, 900-69, pp.135-136, (1990-10).

[小国91] 小国編著, 村田・三好・ドンガラ, J.J.・長谷川著, 行列計算アーキテクチャ - WS, スーパーコン, 並列計算機 -, (1991), 丸善.

[加藤89a] 加藤, スーパーコンピューティング環境におけるハードウェアの動向, コンピュートロール 特集/スーパーコンピューティング 責任編集 三好俊郎, 26, pp.7-19, (1989-3), コロナ社.

[加藤89b] 加藤・芦沢, 超大規模衝撃解析のための並列処理アルゴリズムについて, 日本機械学会講演会第2回計算力学講演概要集, 890-69, pp.34-35, (1989-11).

[唐木87] 唐木, スーパーコンピュータの現状と動向, コンピュートロール 特集/スーパーコンピュータの現在, 20, pp.2-15, (1987-10), コロナ社.

[岸87] 岸, 並列計算機 MiPAX の演算性能と並列プログラミング, 三井造船技報, 130, p.33, (1987).

[吉川91] 吉川・杉野・吉川, ビジュアル・プログラミング技術を使った可視化ツール AVS, 日経CG, 55, pp.193-203, (1991-4).

[吉川92] 吉川, AVSを用いたトラッキング・ステアリング・システム, 日本機械学会第2回デザイン・エンジニアリング・プラザ セミナー教材 次世代CAEシステム, 920-37, pp.24-30, (1992-6).

[木村91] 木村・嶋沢, 板構造解析のための解析モデルの生成, 日本機械学会第4回計算力学講演会講演論文集, 910-79, pp.25-26, (1991-11).

[斉藤87] 斉藤・坂田・清水, 高速構造解析プログラム SIMUS の開発(第1報, 三次元弾性解析の高速化), 日本機械学会論文集, 53-495A, pp.2187-2192, (1987).

[酒井92] 酒井, 3次元構造物の六面体による自動要素分割, 東京大学工学部精密機械工学科 平成3年度修士論文, (1992-3).

[下牧90] 下牧・五十嵐, スーパーコンピュータによる自動車の衝突解析, 日立評論 特集 CAD/CAM/CAE, 72-3, pp.33-38, (1990-3).

[曾根田89] 曾根田・矢川・吉村, 有限要素法の並列計算手法に関する一考察, 日本機械学会第955回講演会計算力学講演概要集, 890-1, pp.22-23, (1989-1).

[高野88] 高野, スーパーコンピュータによる大規模構造解析, 東京大学工学部精密機械工学科 昭和62年度修士論文, (1988-3).

[高野89a] 高野, ICCG法による大規模構造解析, コンピュートロール 特集/スーパーコンピューティング責任編集 三好俊郎, 26, pp.26-31, (1989-3), コロナ社.

[高野89b] 高野, トランスピュータによる有限要素解析, コンピュートロール 特集/スーパーコンピューティング 責任編集 三好俊郎, 26, pp.120-124, (1989-3), コロナ社.

[高野90a] 高野・三好, 有限要素高速解法SUPER SOLVEによるギガフロップ問題の解析 (第1報: SUPER SOLVEの高速化アルゴリズム), 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.494-495, (1990-3).

[高野90b] 高野・三好・石井・奥立, 衝撃解析コードDYNA3Dの高速化に関する研究, 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.506-507, (1990-3).

[高野90c] 高野・三好・麻生, トランスピュータによる三次元有限要素解析システムの性能評価, 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.515-516, (1990-3).

[高橋87] 高橋, 並列コンピュータの利用状況, コンピュートロール 特集/パラレルプロセッシング, 19, pp.31-38, (1987-7).

[戸川75] 戸川, 有限要素法による振動解析, (1975), サイエンス社.

[戸川77] 戸川, 共役勾配法, (1977), 教育出版.

[中島90] 中島, スーパーコンピュータによるタイヤ構造解析, 日立評論 特集 CAD/CAM/CAE, 72-3, pp.39-44, (1990-3).

[中田92] 中田, 超並列コンピュータと応用力学—並列シミュレーションマシン Cenju 上の有限要素法を例にとつて—, 第41回応用力学連合講演会公報予稿集, pp.183-184, (1992-1).

[長福90] 長福, FEMプリポストプロセッサ (KSWAD/プリポスト) の開発とその適用, 日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集, 900-69, pp.173-174, (1990-10).

[日経92] 日経CG, "インタラクティブ・ビジュアルゼーションの実用が目前に迫る", 64, pp.27-32, (1992-1).

[林88] 林・田中, 衝撃工学, p.269, (1988), 日刊工業新聞社.

[藤掛87] 藤掛, 構造問題における大規模固有値問題のランチョス法による効率的解法, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 11, pp.73-78, (1987-7).

[三浦90] 三浦・福田, 自動車設計と解析シミュレーション, p.265, (1990), 培風館.

[三好86] 三好・吉田, スーパーコンピュータによる三次元表面き裂の有限要素解析 (第1報, 三次元表面き裂の弾性解析), 日本機械学会論文集, 52-477A, pp.1348-1351, (1986-5).

[三好87] 三好・吉田, スーパーコンピュータによる三次元表面き裂の有限要素解析 (第2報, 三次元表面き裂の弾塑性解析), 日本機械学会論文集, 53-486A, pp.255-260, (1987-2).

[三好89] 三好・吉田・高野, スーパーコンピュータ用三次元構造解析プログラムのベンチマークテスト, 日本機械学会第955回講演会計算力学講演概要集, 890-1, pp.13-14, (1989-1).

[三好90] 三好・高野, 有限要素分割システムFEMEX2Dの開発, 日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集, 900-69, pp.171-172, (1990-10).

[三好91] 三好, 分散処理型FEMシステム, 日本機械学会第1回デザイン・エンジニアリング・ブラザ セミナー教材, 910-37, pp.38-43, (1991-6).

[村田85] 村田・小国・唐木, スーパーコンピュータ, (1985), 丸善.

[村田88] 村田・小国・三好・小柳, 工学における数値シミュレーション — スーパーコンピュータの応用 —, (1988), 丸善.

[矢川89] 矢川・吉村・中尾・曾根田, あいまい知識処理手法に基づく3次元自動要素分割法, 日本機械学会第2回計算力学講演概要集, 890-69, pp.87-88, (1989-11).

[矢川92] 矢川, CAE におけるスーパーパラレルコンピューティング, 日本機械学会第2回デザイン・エンジニアリング・ブラザ セミナー教材 次世代CAEシステム, 920-37, pp.9-17, (1992-6).

[横川89] 横川, SOR 法の並列ベクトル計算, 日本機械学会講演会第2回計算力学講演概要集, 890-69, p.36, (1989-11).

[吉田90] 吉田・岡・福井・吉田, 対話型デバイスシミュレーションシステムの開発, 電子情報通信学会, SDM90-107, pp.47-51, (1990-9).

[吉村90] 吉村・矢川・中尾, FEMモデリングへのAI利用, 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.472-474, (1990-3).

[鷺津81] 鷺津・宮本・山田・山本・川井, 有限要素法ハンドブック I 基礎編, (1981), 培風館.

研究業績

【投稿論文】

- [1] 三好俊郎・高野直樹・吉田有一郎, スーパーコンピュータによる大規模構造解析 (ICCG法による有限要素解析), 日本機械学会論文集, 53-492A, pp.1607-1613, (1987-8).
- [2] T. Miyoshi, N. Takano and M. Shitatori, Large Scale Structural Analysis by a Supercomputer, Quality Use of the Computer : Computational Mechanics, Artificial Intelligence, Robotics, and Acoustic Sensing. Presented at The 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference - JSME Co-sponsorship, PVP-Vol.177, pp.67-71, (1989-7).
- [3] T. Miyoshi and N. Takano, Finite Element Analysis by Transputer, Quality Use of the Computer : Computational Mechanics, Artificial Intelligence, Robotics, and Acoustic Sensing, Presented at The 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference - JSME Co-sponsorship, PVP-Vol.177, pp105-110, (1989-7).
- [4] T. Miyoshi and N. Takano, Nonlinear Large-Scale Structural Analysis by Supercomputer, SMiRT 11 Transactions Vol. B, pp.225-230, (1991-8).
- [5] T. Miyoshi, M. Shiratori, H. Okuda and N. Takano, Stress Singularities at the Interface Crack and the Edge-Bonded Dissimilar Materials, Advances in Electronic Packaging 1992, Vol. 1, Presented at the First Joint ASME/JSME Conference on Electronic Packaging, EEP-Vol.1-1, pp.551-557, (1992-4).

【講演論文】

- [6] 三好俊郎・高野直樹・吉田有一郎, スーパーコンピュータによる三次元有限要素解析, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 10, pp.287-292, (1986-7).
- [7] 高野直樹・三好俊郎・吉田有一郎, スーパーコンピュータによる大規模構造解析 (ICCG法による有限要素解析), 第6回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集, pp.115-118, (1987-6).
- [8] 三好俊郎・高野直樹・吉田有一郎, スーパーコンピュータによる大規模構造解析, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 11, pp.217-220, (1987-7).
- [9] 三好俊郎・高野直樹, 構造解析における反復解法について—ICCG法とSCG法の比較—, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 12, pp.19-22, (1988-7).
- [10] 三好俊郎・吉田有一郎・高野直樹, スーパーコンピュータ用三次元構造解析プログラムのベンチマークテスト, 日本機械学会第955回講演会計算力学講演概要集, 890-1, pp.13-14, (1989-1).
- [11] 三好俊郎・高野直樹, 並列コンピュータによる有限要素解析の高速化, 日本機械学会第955回講演会計算力学講演概要集, 890-1, pp.18-19, (1989-1).
- [12] 三好俊郎・高野直樹, 並列コンピュータによる有限要素解析の高速化, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 13, pp.71-76, (1989-7).
- [13] 三好俊郎・高野直樹, スーパーコンピュータ向き汎用高速解法, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 13, pp.145-148, (1989-7).

[14] 三好俊郎・高野直樹, スーパーコンピュータ用三次元構造解析プログラムのベンチマークテスト, 日本機械学会講演会第2回計算力学講演概要集, 890-69, pp.30-31, (1989-11).

[15] 三好俊郎・高野直樹・藤野雅俊・芦澤芳夫, スーパーコンピュータ用有限要素高速解法SUPER SOLVEの開発, 日本機械学会講演会第2回計算力学講演概要集, 890-69, pp.32-33, (1989-11).

[16] 三好俊郎・高野直樹, トランスピュータによる三次元熱弾塑性解析システムの開発, 日本機械学会講演会第2回計算力学講演概要集, 890-69, pp.46-47, (1989-11).

[17] 三好俊郎・高野直樹, ブースタによるパソコン有限要素解析の高速化, 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.467-468, (1990-3).

[18] 酒井高行・三好俊郎・高野直樹・奥立優, グラフィックススーパーコンピュータによる有限要素解析システムの開発, 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.477-478, (1990-3).

[19] 高野直樹・三好俊郎, 有限要素高速解法SUPER SOLVEによるギガフロップ問題の解析(第1報: SUPER SOLVEの高速化アルゴリズム), 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.494-495, (1990-3).

[20] 三好俊郎・加藤毅彦・高野直樹・芦澤芳夫, 有限要素高速解法SUPER SOLVEによるギガフロップ問題の解析(第2報: ギガフロップ問題の解析), 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.496-497, (1990-3).

[21] 高野直樹・三好俊郎・石井晃一郎・奥立優, 衝撃解析コードDYNA3Dの高速化に関する研究, 日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集, 900-14, pp.506-507, (1990-3).

[22] 石井晃一郎・三好俊郎・高野直樹，スーパーコンピュータによる3次元有限要素-境界要素結合解析，日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集，900-14，pp.508-509，(1990-3).

[23] 高野直樹・三好俊郎・麻生寿郎，トランスピュータによる三次元有限要素解析システムの性能評価，日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集，900-14，pp.515-516，(1990-3).

[24] 三好俊郎・高野直樹・酒井高行・奥立優，グラフィックススーパーコンピュータによる有限要素解析システムの開発，日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，14，pp.201-204，(1990-7).

[25] 三好俊郎・高野直樹・麻生寿郎，トランスピュータによる三次元有限要素解析システムの性能評価，日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，14，pp.363-366，(1990-7).

[26] 三好俊郎・高野直樹，ブースタによるパソコン有限要素解析の高速化，日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，14，pp.367-370，(1990-7).

[27] 三好俊郎・加藤毅郎・高野直樹・芦澤芳夫，有限要素高速解法SUPER SOLVEによるギガフロップ問題の解析，日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，14，pp.389-392，(1990-7).

[28] 三好俊郎・高野直樹・熊野寿誠，スーパーコンピュータ用大規模高速解法SUPER SOLVEの開発(1)，日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集，900-69，pp.127-128，(1990-10).

[29] 三好俊郎・高野直樹，スーパーコンピュータ用大規模高速解法SUPER SOLVEの開発(2)，日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集，900-69，pp.129-130，(1990-10).

- [30] 三好俊郎・高野直樹・酒井高行, グラフィックススーパーコンピュータによるプリ・ポストプロセッサの開発, 日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集, 900-69, pp.131-132, (1990-10).
- [31] 三好俊郎・高野直樹, 有限要素分割システムFEMEX2Dの開発, 日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集, 900-69, pp.171-172, (1990-10).
- [32] 三好俊郎・高野直樹, トランスピュータによる三次元熱弾塑性解析, 日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集, 900-69, pp.189-190, (1990-10).
- [33] 三好俊郎・高野直樹・大西浩司, SMT端子の強度評価に関する研究, 日本機械学会第3回計算力学講演会講演論文集, 900-69, pp.119-120, (1990-10).
- [34] 三好俊郎・高野直樹・小池秀生, 接合材・接合構造の強度評価に関する研究(接合界面の応力評価), 日本機械学会第68期通常総会講演会講演論文集, 910-17, pp.466-467, (1991-3).
- [35] 三好俊郎・高野直樹・熊野寿城, スーパーコンピュータ用大規模高速解法SUPER SOLVE, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 15, pp.75-78, (1991-7).
- [36] 三好俊郎・高野直樹, スーパーコンピュータ用超大規模解法FEM3D/I, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 15, pp.85-88, (1991-7).
- [37] 三好俊郎・高野直樹, 機能分散処理型FEMシステム, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 15, pp.509-514, (1991-7).
- [38] 三好俊郎・高野直樹・酒井高行, 3次元構造物の六面体要素による自動要素分割, 日本機械学会第4回計算力学講演会論文集, 910-79, pp.9-10, (1991-11).

[39] 三好俊郎・高野直樹, AVSによるポストプロセッシングの高度化, 日本機械学会第4回計算力学講演会論文集, 910-79, pp.119-120, (1991-11).

[40] 三好俊郎・高野直樹・熊野寿城, スーパーコンピュータ用高速汎用構造解析プログラムの開発, 日本機械学会第4回計算力学講演会論文集, 910-79, pp.139-140, (1991-11).

[41] 三好俊郎・高野直樹, 有限要素解析におけるポストプロセッシングの高度化(第1報: AVSにおける非線形構造解析モジュールの開発), 日本機械学会第69期通常総会講演会講演論文集, 920-17, pp.13-14, (1992-4).

[42] 三好俊郎・高野直樹, 有限要素解析におけるポストプロセッシングの高度化(第2報: トラッキング/ステアリングシステムの開発), 日本機械学会第69期通常総会講演会講演論文集, 920-17, pp.15-16, (1992-4).

[43] 三好俊郎・高野直樹, スーパーコンピュータ用汎用高速ソルバの開発, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 16, pp.177-182, (1992-7).

[44] 三好俊郎・高野直樹, 構造解析におけるトラッキング/ステアリングシステムの開発, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 16, pp.607-610, (1992-7).

[45] 三好俊郎・高野直樹, スーパーコンピュータ用高速・大規模構造解析ソルバのベンチマークテスト, 日本機械学会第70期全国大会講演論文集, 920-78, pp.89-91, (1992-10).

[46] 三好俊郎・高野直樹, スーパー・パラレルコンピュータ用高速・大規模ソルバの性能評価, 日本機械学会第5回計算力学講演会において講演, (1992-11).

[47] 三好俊郎・高野直樹, EBE-SCG法のパラレルコンピュータへの適用に関する研究, 日本機械学会第5回計算力学講演会において講演, (1992-11).

[48] 三好俊郎・高野直樹, 自動要素分割を用いた構造設計ステアリングシステムの開発, 日本機械学会第5回計算力学講演会において講演, (1992-11).

[49] 三好俊郎・大西浩司・高野直樹・前田拓也, コネクタのハウジング変形解析, 日本機械学会第5回計算力学講演会において講演, (1992-11).

【雑 誌】

[50] 高野直樹, ICCG法による大規模構造解析, コンピュートロール 特集/スーパーコンピューティング 責任編集 三好俊郎, 26, pp.26-31, (1989-3), コロナ社.

[51] 高野直樹, トランスピュータによる有限要素解析, コンピュートロール 特集/スーパーコンピューティング 責任編集 三好俊郎, 26, pp.120-124, (1989-3), コロナ社.

謝 辞

論文を締めくくるにあたり、卒業論文、修士論文の頃よりスーパーコンピュータの魅力を懇切丁寧にご教授頂くとともに、修士課程修了後助手として勤務し現在に至るまでの間、終始熱心にかつ有益なご指導を賜わり、また常に励まして下さいました東京大学工学部精密機械工学科 三好俊郎教授に心から感謝いたします。

本論文をまとめるにあたっては、

東京大学工学部精密機械工学科 木村文彦教授、
東京大学工学部精密機械工学科 須賀唯知助教授、
東京大学工学部精密機械工学科 富山哲男助教授、
東京大学工学部精密機械工学科 奥田洋司講師

の各先生に論文審査をお引き受け頂き、貴重なご指導、ご助言を賜りましたので、深く感謝申し上げます。特に、奥田洋司講師には、研究のみならず日常の仕事、私生活の上でもご助言、ご協力を頂きましたので深謝いたします。また、木村文彦教授には、CAD、IGESなどに関しご教示頂いたほか、社団法人日本機械学会の研究分科会でも大変お世話になりましたので深謝いたします。

著者の学生時代には研究室講師としてスーパーコンピュータの手はどきをして下さり、本研究を行なう上でも様々なご指導を頂いた吉田有一郎氏（現在、株式会社東芝）に感謝いたします。

社団法人日本機械学会の研究分科会では多くの方々に貴重なご教示を頂きました。横浜国立大学工学部生産工学科 白鳥正樹教授、東京大学工学部原子力工学科 矢川元基教授、吉村忍助教授、東京大学工学部船舶海洋工学科 大坪英臣教授には様々な貴重なご助言を賜りました。本論文中のギガフロップ問題の解析では日本クレイ株式会社 加藤毅彦氏、芦沢芳夫氏のご協力を頂きました。また、ベンチマークテストの実施にあたっては、いすゞ自動車株式会社 松田康氏、日本コンベックスコンピュータ株式会社 小山隆氏、日本電装株式会社 柘植竜也氏のご協力を頂きましたので感謝の意を表します。

山田信夫氏、大橋英一郎氏、吉川慈人氏（クボタコンピュータ株式会社）、高橋秀夫氏、長福隆司氏、中川新一氏、芋本昌裕氏（株式会社クボタ）をはじめ、両社の方々には貴重なご教示を頂きましたので感謝の意を表します。

東京大学工学部精密機械工学科 中山茂子技官，秘書の糸永美千留さん，高野淑子さんには本論文の清書を手伝って頂きましたので謝意を表します。

大学院の後輩である熊野寿城氏（現在，株式会社住友銀行）には SUPER SOLVE 開発に関し，酒井高行氏（現在，財団法人電力中央研究所）には自動要素分割に関し，共同研究を行ないお世話になりました。その他，三好研究室の多くの先輩・後輩の皆様にはそれぞれの専門分野で共同研究を行なったり，有益な助言を頂き，大変お世話になりましたのであわせて御礼申し上げます。



