

応力解析汎用プログラム“HISTRAN”の概要と適用例

Outline and Some Applications of “HISTRAN,” General Purpose Computer Program for Stress Analysis

有限要素法による、静的、弾性応力計算汎用プログラム“HISTRAN”(Hitachi Structure Analysis System)を開発し利用してきた。“HISTRAN”は9種類の応力解析プログラムと自動分割プログラム(14種類)、図形化プログラム(9種類)、温度分布計算プログラム(2種類)などで構成され、問題に応じて最も適した要素や解法の選択ができ、また、汎用性と利用しやすさの両面を備えたものである。

“HISTRAN”は開発以来既に2年有余を経過し、その信頼性が確認されている。本稿は“HISTRAN”の概要と原子力機器、火力機械、産業機械などの各種製品に対する適用例について紹介する。

佐川 健* Ken Sagawa
 中沢 優** Masaru Nakazawa
 清水 翼* Tasuku Shimizu
 岡本紀明** Noriaki Okamoto
 明神昭紀* Teruki Myōjin
 高橋陸郎* Rikurō Takahashi

1 緒 言

有限要素法は複雑な形状に対して適応性が良いため、機械構造物の応力解析に盛んに利用されている。日立製作所は今まで有限要素法を利用した各種弾性問題の応力計算プログラム、弾塑性、クリープ、座屈、接触など、非線形問題の解析プログラム^{(1)~(4)}及び有限要素分割プログラム⁽⁵⁾の開発を進めてきた。

特に弾性応力解析に関しては、社内で統一的に利用できる汎用プログラムをもつことは極めて有用であり、また必要であるという考えから、新しくプログラムの開発を行ない、これをシステム化した。このシステムは、Hitachi Structure Analysis Systemを略称し“HISTRAN”と命名された。

“HISTRAN”の開発に当たっては、実用性に重点を置き、全体を構造形式別のプログラムを総合するシステムとし、各種の自動分割や図形化の機能を備えるものとするなど、使用しやすさの面に特に留意した。また、種々の要素の定式化や数値解析法の検討を行なうなど、計算精度の向上と計算時間の短縮にも重点を置いた。以下、システムの概要と幾つかの適用例について論述する。

2 “HISTRAN”の機能と特徴

“HISTRAN”は各種の問題に対して入力から出力まで一貫した取扱いができるようになっている。入力は自動分割化を、出力には図形化を極力図るようにした。一例として、厚肉圧力容器の熱応力を計算する場合について考えると次のようになる。中実体問題用プログラムをシステムの中から選び、有限要素自動分割のためのデータ、熱的境界条件データ及び構造境界条件データを入力すると、温度分布、変形及び応力分布の計算結果が同時に出力されるようになっている。更に、温度分布図や応力分布図などをプロッタで描かせることもできる。

“HISTRAN”の応力計算プログラムは単一プログラムではなく、表1に示すような問題別プログラムを幾つか総合したものである。すなわち、二次元、軸対称、中実体、殻、骨組などの単一要素から成る構造物、及びこれらの要素の組合せから成る構造物に対するものを含む。従って、問題によって最も効率の良いものを選択できる。なお、“HISTRAN”で使用している要素を表2に示した。例えば、同表の六面体要素はいわゆる Isoparametric Element とされるものである。

表1 “HISTRAN”の応力計算プログラム “HISTRAN”は表記の問題別プログラムを総合するシステムである。

No.	適用構造, 又は問題	内 容 ・ 用 途
1	骨組構造物	三次元トラス及びラーメン構造物の一般的な解析
2	薄肉骨組構造物	反り変形も考慮した薄肉梁構造物の解析
3	二次元問題	平面応力と平面ひずみ問題の解析, 及び立体薄板構造物の部分的な詳細計算
4	板曲げ問題	平板曲げ問題の解析, 及び立体薄板構造物の部分的な詳細計算
5	軸対称体	回転体などの軸対称問題の一般的な解析
6	軸対称殻	軸対称問題の内殻構造物専用
7	中実体	三次元中実体, 厚肉殻構造の解析
8	立体薄板補強構造物	立体薄板構造物, 及び補強構造物の解析
9	汎用	平板, 軸対称体, 中実体, 薄板構造物, 厚肉殻, 骨組構造物など。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所機械研究所

表2 有限要素ライブラリ “HISTRAN”で使用されている構造解析用及び温度解析用有限要素の種類を示す。

No.	平板膜要素	平板曲げ要素	軸対称要素	中実体/厚肉シェル要素	梁要素	温度用要素
1	u, v 	w, w_x, w_y (変形形要素)	u, v, w 	u, v, w 	$u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 	T
2	u, v, u_x, u_y, v_x, v_y 	w, w_x, w_y (ハイブリッド形変位要素)	u, v, w 	u, v, w 	$u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 	T
3	u, v 	w, w_x, w_y (ハイブリッド形応力要素)	u, v, w 	u, v, w 	$u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z, \theta_x', \theta_x''$ 	T
4	u, v 	w, w_x, w_y 	v, w 	u, v, w 	—	T
5	u, v 	w, w_x, w_y 	—	—	—	—

注： u, v, w, T などは、節点パラメータを示す。

る。無次元化座標 ξ, η, ζ をパラメータにして、基本図形を実際の要素形状に写像するという方法で積分を行ない、剛性マトリックスを作成している。要素内部の変位分布は ξ, η, ζ により次のように表わせる。例えば、 X 方向変位 U について示すと、

$$U = \sum_{i=1}^3 N_i U_i + \sum_{j=1}^3 N_j^* \alpha_j \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i)$

で、 i は8個の節点を示すもので、 (ξ_i, η_i, ζ_i) は基本図形上の節点に対応する頂点の座標である。また、

$$N_1^* = 1 - \xi^2, N_2^* = 1 - \eta^2, N_3^* = 1 - \zeta^2$$

であり、変位に二次分布のモードを付加する項である。 α_j はこのモードに対応する要素固有の未定係数である。

なお、本システムには、いわゆる汎用プログラムと言われるようなものも含まれている。これら各種プログラムに対して、それぞれのマニュアルを作成し、市販の超大形プログラムのように膨大なマニュアルを読破しなければ使用できないといった不便さをなくした。

自動分割プログラムは、簡単なデータを与えて自動的に要

素分割を行ない、応力計算プログラムの入力データ（節点番号、節点座標、要素番号、要素の構成節点番号）を作成するプログラムであり、応力解析プログラムに対応して14種類ある。

図1は、これらのうちの一般構造用プログラムの適用例である。薄板補強構造物などにおける複雑な立体図形の自動分割は、二次元図形の場合と比べてはるかに困難であり、これまで汎用的なプログラムの例は見当たらない。そこで、技術者が使い慣れている三面図に着目して、これを基にした自動分割法を考案し、プログラムを作成したものである⁽⁶⁾。

“HISTRAN”の図形化プログラムはプロッタを使用したプログラムで、要素分割の状況、変形前後の状態、主応力や応力分布などを図示する合計9種類である。これらにより、分割が適切に行なわれているかどうかを調べることができ、また、得られた計算結果の概要を直ちに知ることができる。

温度分布計算プログラムには、平板(二次元問題)、又は軸対称体用及び中実体用のものがあり、それぞれ定常及び非定常計算ができる。これらを応力計算プログラムと組み合わせることにより、温度分布計算と熱応力の計算を一貫して行なうこともできる。

3 “HISTRAN”の計算精度

有限要素法による計算精度の良否は、一般に理論解のあるモデルについて計算を行ない、理論値と計算値とを比較して確認されている⁽⁷⁾。“HISTRAN”についてもこのような計算精度の検討を行ない好結果を得たが、ここでは一例だけを示

す。なお、実測値との比較検討も多数行なって、プログラムの実用性を確認した。

図2は部分球殻についての計算結果を理論解とともに示したものである。“HISTRAN”は軸対称体として計算した結果で、アメリカ航空宇宙局(NASA)開発の“NASTRAN”によるものは三角形板要素による結果⁽⁸⁾である。

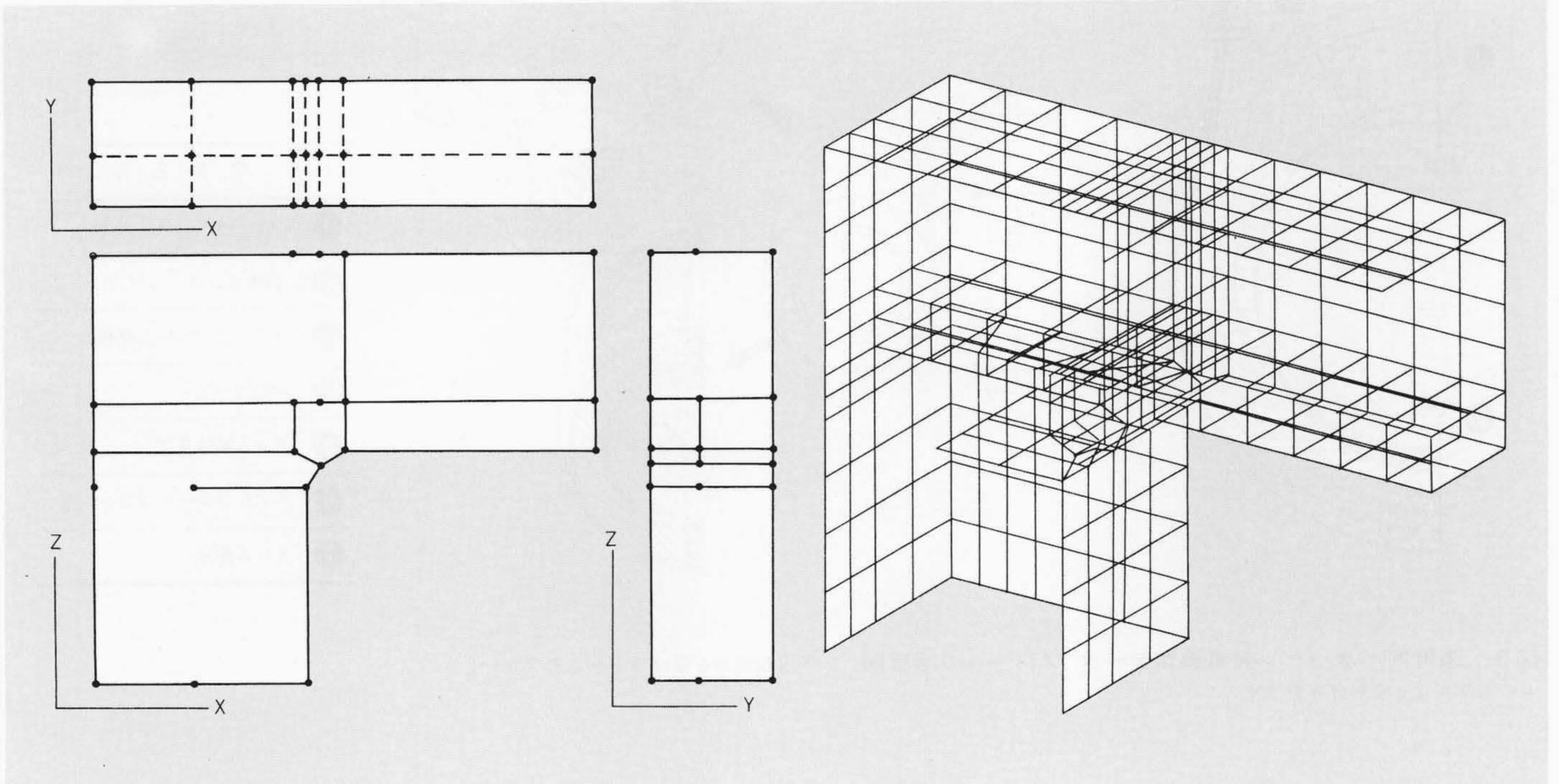


図1 三面図による自動分割プログラムの適用例 橋形クレーン隅角部の要素分割図の一例を示す。

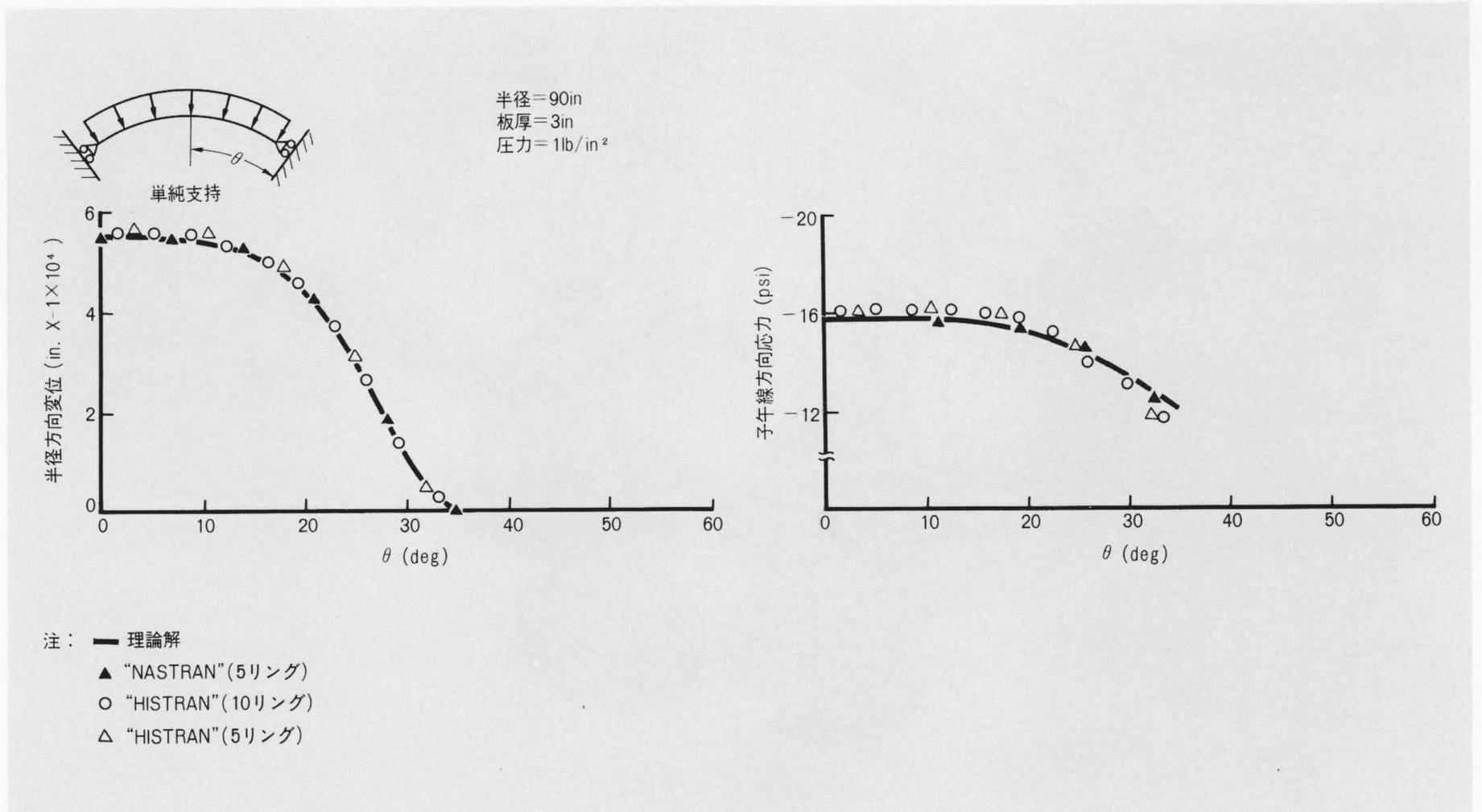


図2 部分球殻による計算精度の検討 “HISTRAN”, “NASTRAN”の計算結果と理論値との比較を示す。

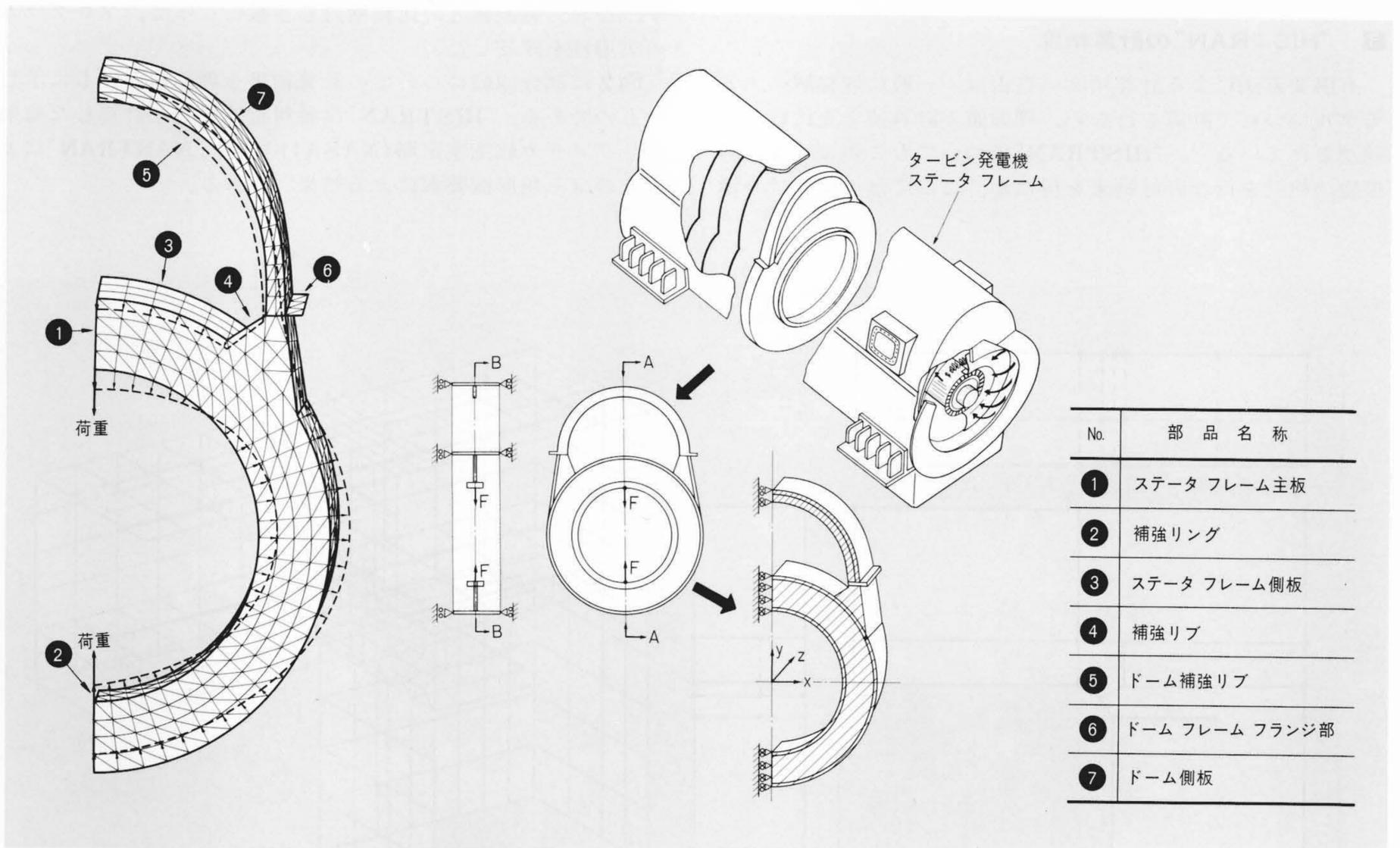


図3 適用例(1)タービン発電機ステータ フレームの解析例 界磁電磁力を受けるドーム形フレームのモデル化と変形分布を示す。

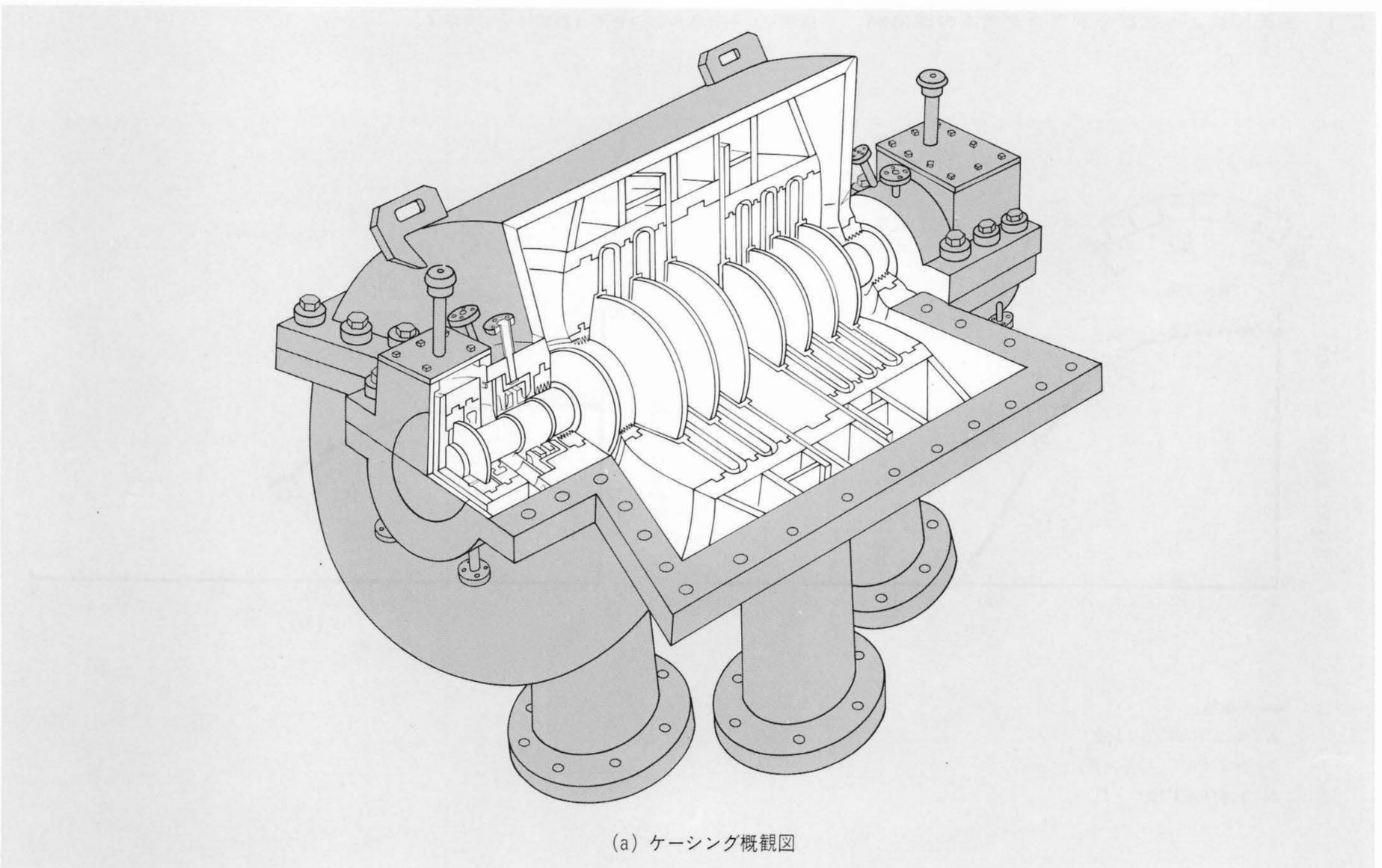


図4 適用例(2)ターボ圧縮機ケーシングの解析例 内圧を受けるリブ付ケーシングの最適補剛法の検討を示す。

4 適用例

“HISTRAN”の多数の実績の中から、適用例として幾つかを取り出し、以下に紹介する。

図3は、タービン発電機のドーム形フレームの解析例を示すものである。発電機ステータフレームの軸方向1ピッチを切り出し、構造の対称条件によって同図に示すようにモデル化を行なった。外力は界磁電磁力で、これをここでは二つの集中力として与えた。フレーム円環部の変形に対するドームの影響をみるために、ドームのある場合とない場合の計算を行ない、その効果を明らかにした。また実機の縮小モデルで実験を行ない、計算結果と実験結果とがよく一致することを確認した。

図4(a)は、ターボ圧縮機の溶接構造ケーシングの概観図である。ケーシングは従来鋳造品であったが、最近と同図に示すような製罐品に改造するよう計画している。また同図(b)はケーシングに内圧を加えたときの計算結果の一例を示すもので、ケーシングの変形状況図である。このような計算によって、ケーシングの剛性を把握することができる。また、ケーシングの剛性に対するリブの形状や寸法の効果についても検討を行なった。

客車車体の側構体を異方性板に置換するなどして車体のモデル化を行ない、等分布荷重による車体のたわみを計算し、車体の剛性の検討を行なった。図5は部材の剛性の効果をみるために計算値と実測値とを比較した一例である。電気機関車車体についても同様のモデル化を行ない、連結時に作用する車端圧縮荷重を外力とする応力解析を行なった。その結果、

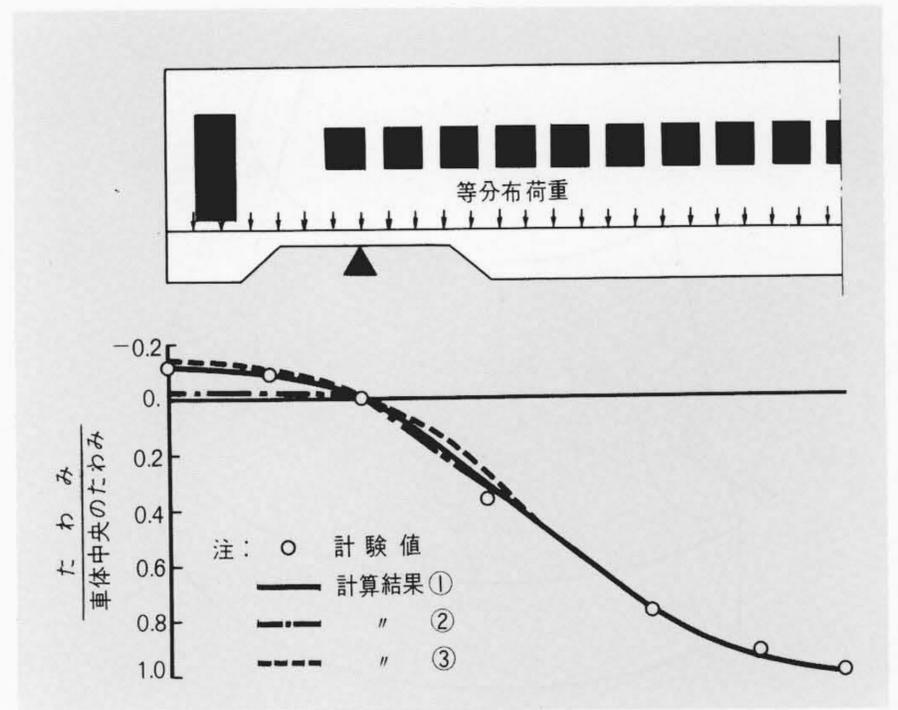
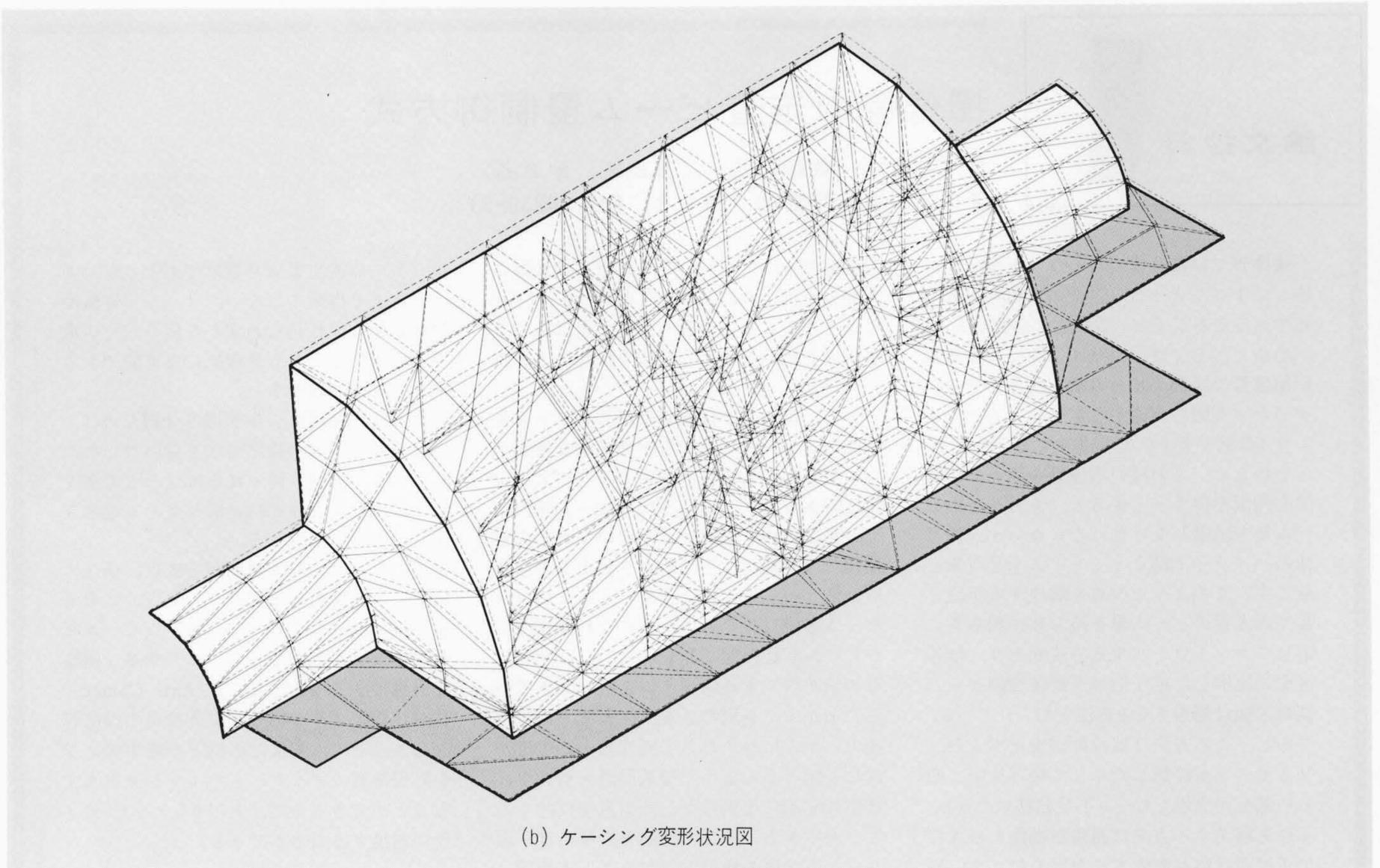


図5 適用例(3)客車車体の等分布荷重によるたわみ曲線 計算結果①は、側構体の窓わく部を梁、その他の部分を異方性板にモデル化した場合を、②は、側構体全部を外板の有効幅を考慮した等価剛性梁にモデル化した場合を、③は、外板の部分的なゆりみを考慮して、①のモデル化において一部の板厚を薄くした場合のたわみ曲線をそれぞれ示す。

計算値と実験値とがかなりよく一致することを確認した。

原子炉格納容器は、現在の原子力発電所で最大仮想事故が発生しても、外部への放射線漏れを防止するもので、安全確保上非常に重要な機器である。図6は、格納容器本体の円錐殻部に付いた円筒ノズル部分の要素分割図である。円錐殻と



(b) ケーシング変形状況図

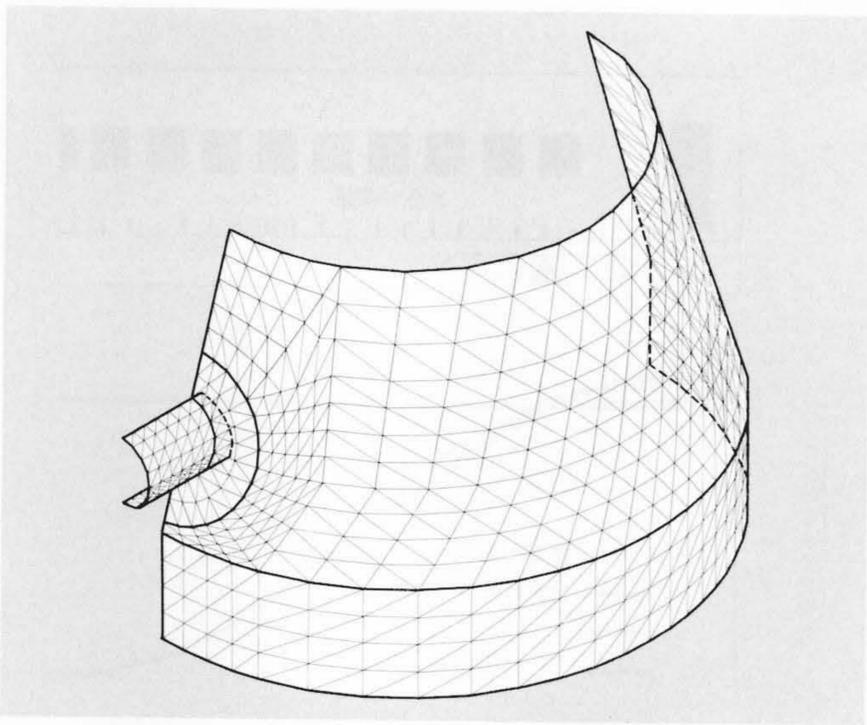


図6 適用例(4)原子炉格納容器の要素分割状況図
三面図による自動分割プログラムによる分割図を示す。

ノズルの接合部周辺の変形及び応力の解析を、内圧が作用する場合とノズル部に曲げモーメントや軸力が作用する場合とについて行なった。1/10モデルによる実験結果は、計算値と良好な一致を示した。

5 結 言

“HISTRAN”の特徴的な概要について述べ、その適用例を簡単に紹介した。“HISTRAN”は実用性に重点を置き開発を行なったが、今までの使用状況からみて、その目的を十分に

達成している。しかし、今後“HISTRAN”のなおいっそうの活用には使用実績の積重ね、ノウハウの伝承を含めたユーザー教育及びシステムのメンテナンスが重要である。

終わりに、東京大学教授川井忠彦氏に、有限要素法の基礎から応用までについて、非常に有益な御指導をいただいた。ここに厚くお礼申しあげ次第である。また、本プログラム開発に当たって終始御指導、激励を得た日立製作所大内田久氏をはじめとする運営委員会の各位に対し深謝する。

なお本プログラムは、筆者らと同じく応力計算グループ員であった各位と協同で開発されたものであることを付記する。

参考文献

- (1) H. Miyata, S. Shida, S. Kusumoto: “The Simple Method of Evaluation of Stress Intensity Factor Using the Finite Element Method”, Proc. of the 1974 Symposium on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, (1974)
- (2) 初田, 早山, 橋本: 「熱処理による残留応力と変形の解析」, 日本機械学会講演論文集, No. 750-11 (昭50-10)
- (3) 岡本: 「有限要素法による非線形接触問題の解析」, 日本機械学会講演論文集, No. 750-2 (昭50-4)
- (4) 小久保, 山本: 「外圧を受ける球殻の座屈」, 日本造船学会論文集, 第133号, p. 143 (昭48-6)
- (5) 徳増, 明神: 「図形処理における自動分割法について」, 情報処理学会第12回大会 (昭46-9)
- (6) K. Sagawa: “Automatic mesh Generation for Three Dimensional Structures Based on Their Three Views”, Proceeding of the 1973 Tokyo Seminar
- (7) 川井忠彦, 川島矩郎, 三本木茂夫: 「薄板構造解析」, コンピュータによる構造工学講座II-7-A, 培風館 (昭48-6)
- (8) NASTRAN “Demonstration Problem Manual”, NASA (1970-9)

論文抄録

撮像管の走査ビーム量制御方式

日立製作所 佐藤和弘・江藤良純, 他2名
テレビジョン学会誌 29—8, 642 (昭50-8)

撮像管では被写体のハイライト部分に対応して生じたターゲット上の電荷を十分中和できる走査電子ビームを流す必要がある。

しかし、ビジコンやサチコンなど光導電形撮像管の場合、ビーム量を増加させるとターゲット面に到達する電子ビームのフォーカス状態が悪くなり、解像力の低下を招く。

そのため、この種の撮像管を用いて高解像度画像を得ようとする、あらかじめビーム量を制限しなければならないが、被写体のハイライト部などでビーム不足現象を起こす。このような欠点を解決する手段として撮像管のビーム量を被写体の明るさに応じてコントロールする方法があり、信号電流に比例した電圧信号を撮像管のビーム制御電極に帰還させる方法が知られている。しかし、この方法は被写体に変化するか、又はカメラが移動したりして被写体中に明るい部分が出現しビーム不足状態になると、それを解消する方向に回路が動作する課程で正帰還回路が形成され発振を起こす。帰

還回路のループゲインを1以下にすればこの発振を抑えることはできるが、ループゲインを左右する撮像管の諸定数にばらつきがあるため系全体の安定性を保つことが難しい。

一方、筆者らが提案した新しいビーム量制御方式は、ビジコンなどの光電変換面からの戻りビーム電流を利用する点に大きな特徴がある。ここでいう戻りビーム電流とは、撮像管の走査ビーム電流のうち光電変換面で信号電流として消費されたもの以外の余剰ビーム電流のことをいう。この戻りビーム電流は、その値が0になれば撮像管がビーム不足を起こしていることを意味し、その値が増加すればビームを押しすぎていることがすぐ判別できる。従って、信号電流のいかにかわらず戻りビーム電流が常に一定となるような帰還回路を形成すれば信号電流に比例したビーム量を供給することができる。ここで問題となるのは、戻りビーム電流の検出方法である。撮像管に

戻りビーム検出電極を設けてもよいがコスト上あまり得策ではない。メッシュ電極や加速電極に流れ込むわずかな戻りビーム電流を検出することも原理的には可能であるが、事実上問題が多い。

本方式の実現を一步前進させ得たのは、戻りビーム電流の検出方法を見いだしたことであり、容易に得られるカソード電流と信号電流とから等価的に戻りビーム電流を作り出すことができる。

この新しいビーム量制御方式は、前述の信号電流帰還方式と異なり、原理的に負帰還回路を構成できるので、安定なビーム制御を行なうことができる。また簡単な回路で実現できるうえ、ACT (Anti-Comet-Tail) 管のような特殊な電極構造の撮像管を必要とせず、解像度の低下を極力抑えながら撮像管のダイナミックレンジを拡大することができるので、あらゆるテレビカメラに利用することができる。