第41巻　第3号〔通巻第141号〕

ISSN 0385-9630

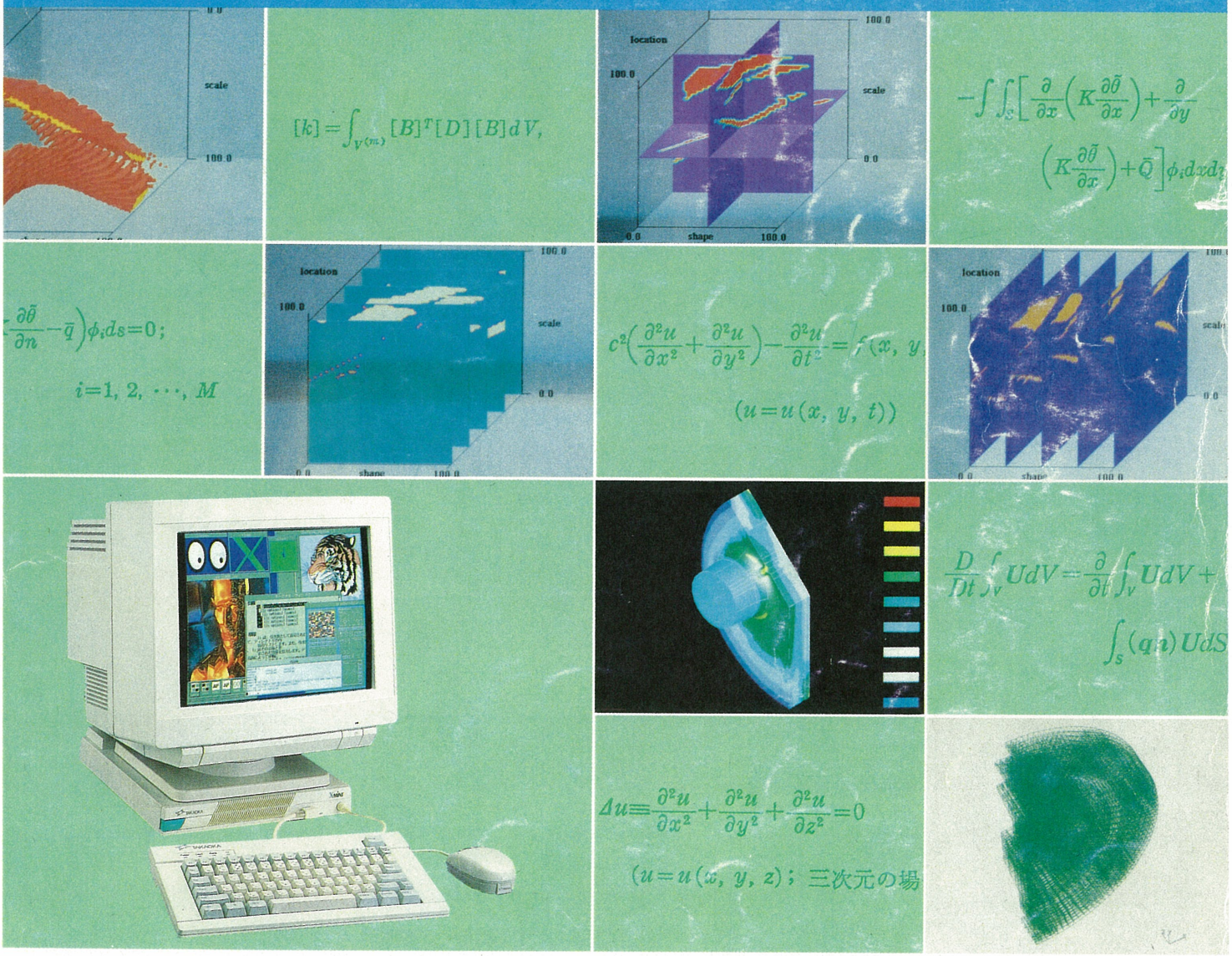
高岳レビュー

1994

No. 3

TAKAOKA REVIEW　Vol. 41 Series No. 141

●数理解析技術特集　●情報システム特集



TAKAOKA 高岳製作所

高岳レビュー

第41巻　第3号〔通巻第141号〕
平成6年9月

——目　　次——

〈巻頭言〉

計算工学の可能性 ……三井斌友… 1(137)

数理解析技術特集

〈総　論〉

高岳における数理解析技術 ……広瀬英雄… 3(139)

〈分野から見た解析〉

実機試験にかわる 変電機器に適用される耐震解析 ……中山寿也，小竹　孝
足立雅彦，伊藤忠慶… 7(143)

しきい値を推定する 電力機器における信頼性解析 ……広瀬英雄…12(148)

EMTPによる 最近の電力系統解析 ……中山寿也，大羽良明…16(152)

〈機器から見た解析〉

材料非線形を考慮した モールド機器の応力解析 ……野田武司，虫賀正男…20(156)

ATPを用いた 電力貯蔵システム用交直変換装置の動作解析 ……大島正明，原田英二
高山勝見，黒澤　章…23(159)

〈アプリケーションから見た解析〉

最適設計に適した P法有限要素法による電界・応力解析 ……小竹　孝…28(164)

身近になったFEA Algorによるパソコン CAE ……野田武司，岡原　淳…34(170)

情報システム特集

〈総　論〉

情報システム特集にあたり ……水谷和久…39(175)

〈XMiNT〉

世界初！ フットワーク自在の ノート型モノクロXウィンドウターミナル XMiNT NOTE …下川隆司
棚村　睦，小寺健治…40(176)

省スペースを実現した プラズマディスプレイ一体型Xウィンドウターミナル XMiNT FII …土屋欣宏
龍尾謙二，土井　裕…44(180)

コストパフォーマンスに優れた SPARC版Xウィンドウターミナル XMiNT CSL/MSL ……林　裕　人
龍尾謙二，渡邊史昭，土井　裕…48(184)

千葉大学殿納入 スーパーコンピュータクラスタ環境で生きる
Xウィンドウターミナル XMiNT CSL ……萩原秀和，長濱　仁，松武菜穂美…52(188)

慶応義塾大学殿納入 SPARC版Xウィンドウターミナル XMiNT CSL ……牧村佳彦…58(194)

〈ネットワーク商品〉

ネットワークプリンタ Pstation納入事例 ……片山直樹…62(198)

大切なデータを電源トラブルから守る オートシャットダウン機能付UPS ……中野靖弘，加藤博美…65(201)

〈用語集〉

用語解説 ……61(197)

商標について ……64(200)

特許ニュース

アレスタ内蔵配電機器 ……11(147)

マイクロコンピュータのリセット回路 ……15(151)

ニュースフラッシュ

東北電力株式会社殿小関変電所納入
縮小形配電用変電所設備 ……37(173)

6600V電力用コンデンサ設備 ……38(174)

木材整形加工への光ファイバ温度計の採用 …47(183)

社外発表一覧　その1 ……19(155)
その2 ……22(158)
その3 ……33(169)

表紙写真説明 …… 2(138)

TAKAOKA REVIEW Vol. 41 No. 3 〔Series No. 141〕
1994/9

— CONTENTS —

Special Edition for Applications of Mathematical Analysis

Perspective of Computational Engineering ……Taketomo Mitsui… 1(137)
Applications of Mathematical Analysis at Takaoka Electric ……Hideo Hirose… 3(139)
Seismic Response Simulation of Power Substation Apparatus……Toshiya Nakayama
Takashi Kotake, Masahiko Adachi, Tadayoshi Ito… 7(143)
Reliability Analysis for Electrical Power Apparatuses ……Hideo Hirose…12(148)
Current Electric Power Network Analysis ……Toshiya Nakayama, Yoshiaki Oba…16(152)
Finite Element Analysis Technique of Epoxy Resin Products ……Takeshi Noda
Masao Mushiga…20(156)
Analysis of Operation of Power Conditioning Systems for
Power Storage Systems ……Masaaki Ohshima, Eiji Harada
Katsumi Takayama, Akira Kurosawa…23(159)
Electric Field and Stress Analysis by P-Finite Element Method ……Takashi Kotake…28(164)
Personal Finite Element Analysis by Algor ……Takeshi Noda, Jyun Okahara…34(170)

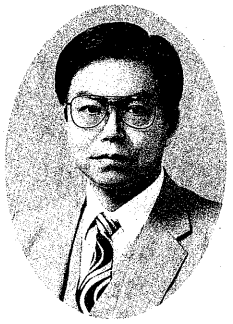
Special Edition for Information Systems

On the Occasion of Issueing Special Edition for
Information Systems ……Kazuhisa Mizutani…39(175)
Notebook-type Monochrome X Window Terminal XMiNT NOTE ……Ryuji Shimokawa
Atsushi Tanamura, Kenji Kodera…40(176)
X Window Terminal with Built-in Plasma Display XMiNT FII……Yoshihiro Tsuchiya
Kenji Tatsuo, Yutaka Doi…44(180)
SPARC Version X Window Terminal XMiNT CSL/MSL ……Hirohito Hayashi
Kenji Tatsuo, Fumiaki Watanabe, Yutaka Doi…48(184)
XMiNT CSL System Most Effective in the Super Computer
Cluster Environment ……Hidekazu Hagiwara, Jin Nagahama
Nahomi Matsutake…52(188)
SPARC Version X Window Terminal XMiNT CSL
at Keio University ……Yoshihiko Makimura…58(194)
Takaoka's Printer "Pstation"……Naoki Katayama…62(198)
UPS with the Function of Automatic Shutdown ……Yasuhiro Nakano, Hiromi Katou…65(201)

本誌はエコマーク認定の再生紙を使用しています。

計算工学の可能性

Perspective of Computational Engineering



三 井 斌 友* Taketomo Mitsui*

コンピュータが，その誕生から僅かに50年足らずで，科学・技術はいうに及ばず人間・社会にも大きなインパクトを与えるに至ったことは，驚くべき事実であろう。いまやコンピュータの分布は〝垂直〟にも，すなわちコンピュータのサイズによって超大型スーパーコンピュータからパーソナルコンピュータまで，広範囲になる一方，〝水平〟にも広がっている。地球上水平にコンピュータの活用が広がり，それらがネットワークで結合されるばかりでなく，事務所・工場・研究室から家庭まで広い範囲にコンピュータの姿が見られるようになった。

そうしたコンピュータの活用の広がりは，特に生産技術において次第に新しい手法・考え方を生じさせ，普及を促していると筆者はみている。計算工学—これが新しい概念・方法である。実は，先行して計算物理学・計算流体力学・計算化学・計算力学といった「計算何々学」がしばらく前から提唱され，実践されてきている。たとえば，最も先行したと考えられている計算物理学では専門雑誌 Journal of Computational Physics が1966年に創刊されているから，歴史は存外古いのである。そうした動向の上にいよいよ計算工学が独自の分野として成立しつつあると考えられる。

こうした計算工学の典型を挙げてみよう。自動車産業では，乗用車の走行時車体回りの空気の流れの解析は，新車設計時の基本過程である。走行性能・安全性はいうに及ばず車室内の快適性にも強く影響するこの解析のために，初期には模型による風洞実験が繰り返されてきた。しかし，乗用車の車体形状は航空機などと比べてもずっと微細な部分が多く，しかもそうした構造が強く影響する流れ解析は，風洞実験ではなかなか摑めないところも多かった。これに対して，最近では3次元流れのコンピュータ・シュミュレーションが大規模に用いられ，特に剝離や再付着を伴う乱流場を実現することが可能な手法が開発され，風洞実験をずっと下回るコストで，十分な流れ解析結果が得られるようになっている。

自動車産業ではほかにも車室内の騒音振動解析において，新しい手法の開発によって十分信頼できる結果が計算によってえられる事例も報告されている（萩原一郎：自動車の騒音振動問題における新しい数値解法，『応用数理』3巻4号（1993））。

電子工業では，VLSI 設計が大きな問題である。たとえば MOS トランジスターでのウェーファープロセスは，溶融した基盤の中への不純物の制御された拡散過程とみることができる。集積度の高い VLSI を設計し，生産過程にのせるために決定的に重要なこの技術も，計算で実現し，コストダウンに役立っていることが報告されている。

すなわち計算工学とは，生産・開発に必要な未解決問題を数理的に定式化し，そのコンピュータによる解法を創出し，シミュレーションを実行してえられた結果を様々な視点から検討し，目的に役立てて，物理的実験に代わる解析手法を提供するものである。そこでは共通して**図**にみるようなステップがあり，しかもこれが循環している。このような工学を可能にしたモーメントとして，次のことがあげられよう。

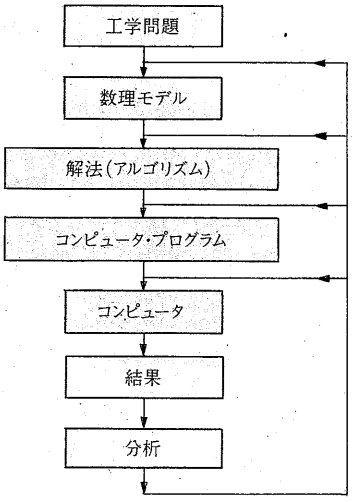


図　計算工学のプロセスとその循環

まず何といってもコンピュータの能力の向上と普及がある。それはハードウェア(機械としてのコンピュータ)においてだけでもきわめて急速で，コンピュータの行う仕事当たりのコストを確実に逓減させている。次に挙げ

*名古屋大学 人間情報学研究科 教授

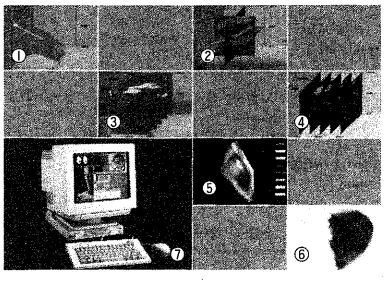
られるのは，アルゴリズムすなわちコンピュータでの実行を前提とした解法の発展・蓄積である。そしてソフトウェア（コンピュータ利用技術）の発展も，欠くことができない要素である。プログラミング言語環境はもちろん，図形処理ソフトウェアがどれほど計算結果の解析を容易にしたかを思い浮かべれば，すぐに首肯できよう。

それでは，計算工学の将来にまったく問題がないかといえば，それほど楽観視はできないであろう。これを推し進めようとする動きの一方で，批判もある。第一の批判は，計算工学が自立していないあるいは自立できないとするものである。なるほど，数理モデルを作るまでは種々の物性パラメータは記号のままでよいが，コンピュータ・シミュレーションにかかろうとするならば，量を求めるために物性パラメータの値が必要であり，それは実験・測定で与えられる。しかしこのことは，いわば科学的推論のすべてにわたって言えることであり，実際の現象との対照を必要とするすべての方法論に対して成り立つことである。計算工学もその例外ではなく，やはり他の分野や確立された他の方法論との協同作業となるであろう。むしろ，実験ではえられないパラメータを設定したシミュレーションを行うことによって，新しい見地を開く可能性も秘めているのではなかろうか。

次はコンピュータシミュレーションの信頼度の問題である。既存のシミュレーションプログラムにデータだけ放り込んで，出てきた結果の妥当性を問われても「さあ」という返事であれば，疑われても当然であろう。手法(アルゴリズム）についての知識，とくにその適用範囲や安定性の問題についての見識が問われるのが，計算工学の時代の技術者である。さらに，アルゴリズムの信頼度を定量的に表現できる方法—自己保証計算法（self-validating algorithms）といわれる—が課題となっている。

また，計算工学のためにコンピュータ資源を有効利用することも，実用的な課題となるであろう。いまや職場にも工場にもワークステーションが多数導入されているが，それらを構内ネットワーク（LAN）で結合し，並列分散処理を行わせる可能性は開けている。こうすれば計算コストは一層下がり，スーパーコンピュータがなくともそれに匹敵する仕事を，一晩のうちに実行できる下地はできている。問題は，そのための手法（並列アルゴリズム）と通信ソフトウェアの発展であろう。

多くの試行錯誤はあったが，計算工学は着実に進んで来たし，これからいっそう広い範囲に適用されていくと思われる。しかし，そのためには解決を迫られている課題も多いし，なによりも計算工学に習熟した人材を養成しなければならない。



表紙写真説明

数値計算結果の3次元出力例

①～④：数理統計学で用いられる尤度関数の最大値を求めるために使う数値計算手続きの初期値で，最終的な解が得られる点の集合。

⑤：GISに用いられる絶縁スペースの3次元応力の解析結果。この計算はP法有限要素法を用いている。

⑥：GISに用いられる絶縁スペーサの3次元応力解析を行うためのメッシュ例。

XMINT CSL

⑦：SPARCチップ採用によるコストパフォーマンスに優れたウィンドウターミナルXMINT CSL。
XMINT CSLの詳細については本号に掲載されている。

特集　数理解析技術

高岳における数理解析技術

広　瀬　英　雄*

内　容　梗　概

高岳製作所においては，コンピュータを用いて，特に電力機器に関わる物理的な現象を表現し，機器の構造的な信頼性を把握することに努めている。特長的なことは，計算工学 (Computational Engineering) に長けた専門家を一つの部署〝数理情報研究室〟に集め，各機器に基本的には共通な問題を効率的に解くことができる体制を備えていることである。本稿では具体的な諸問題と数理情報研究室との関わりを例示しながら，高岳製作所における数理解析技術の取り組みの一端を説明する。

Applications of Mathematical Analysis at Takaoka Electric

Hideo Hirose*

Synopsis

Takaoka Electric has been doing analysis of physical properties and the reliability of electric power apparatuses. A distinguishing feature of our organization, Mathematics Information Laboratory, is such that experts in computational engineering are gathered to the laboratory and they solve a variety of problems efficiently which are common in power equipment. This article breifly describes our activities in mathematical and computational analyses.

1. まえがき

そう昔のことではない。コンピュータによって計算された結果は金科玉条のように扱われ，また著名なアプリケーション(例えばNASTRAN)による解析結果は何よりも正しい値として受け入れられたいびつな時代があった。コンピュータが高価であり，普通の技術者がコンピュータに接する機会も少なく，また数値計算のアルゴリズムも今日程開花していない時期である。しかしその後，コンピュータを用いて物理現象を模擬するコンピュータシミュレーション技術が段々と普及向上するにつれ，数値計算に対する認識も変わってきた。コンピュータの(現実問題に対する) 急速な処理能力と計算アルゴリズムとの発達により，実機を用いての試験よりも安価に，またはるかに自由度の大きい模擬的な試験がコンピュータ上でできるようになり，その効用が広く認められてきたからである。最近では，新しい商品をお客さまに納めるにあたっては，実機を用いての試験結果のみでは不十分で，必ずコンピュータシミュレーション結果がお客さまから要求されている。この最近の現象を計算に携わらない人から見ると，「実験よりもコンピュータシミュレーションの方が合理的であるから」と考えがちであるが，一方これを，各機器の設計開発に直接関わり合いながら計算に携わる側から見ると，全く異なった見解が得られる。つまり，「コンピュータシミュレーションとは，すでに完成されている (微分) 方程式やその解法を用いて，実機による試験を代用することではなく，実際の物理現象を逐一モデル化しながら，そのモデルの妥当性を実験結果と照らし合わせて検証し，物理現象の背後に潜んでいる本質的な要因を引き出しその主要因(あるいはパラメータ)を経験的に得ることである」と筆者は考えている。つまり，「完成された理論のトレースではなく，理論構築の一つの手段であり，コンピュータシミュレーションでなければ得られないような体験を得ることである」と。

このことを可能にするよう環境としては，(1)計算に携わる人が実際に解くべき問題をよく知っていること，あ

*技術本部 技術開発センター 数理情報研究室長

るいは機器（対象）をよく知っていること，(2)解くべき問題に対する基礎的な解決能力のある人が集まっていること，(3)ライブラリー，アプリケーション，可視化ツールなどのソフト的な環境と，高速大容量の計算ができるハード的な環境が身近にあること，が望ましい。例えば，遮断器を設計する技術者自らが，遮断器の中枢であるノズルの形状を決めるために実験とシミュレーション両方からアプローチして実際に設計するという方法があるのに対して，シミュレーションを行う技術者が「流れ」，「プラズマ」という物理現象をつかさどる方程式に熟知しており，数値計算の立場から遮断器の設計者に助言するという方法もある。後者のような体制をとると，そのメリットとして，少ない技術者でありながら，異なった機器や一見異なった問題にたいしても，方程式の変数の解釈を変えたり，パラメータの値の範囲を変えたりすることで，数多くの現象を統一的に把握することができ，また，そうすることによって，新しい問題に対しても一つ高い視点から問題を眺めることが可能になり，数値計算に携わる人の間で相互的な刺激が生まれ，組織の発展性に通じると考えることもできる(1)。

高岳製作所では，コンピュータを使った数理的な（新しい）問題はいったん「数理情報研究室」に集まるように自然に組織化されており，そのことにより社内外で発生する諸問題に効率的に対処できるようになっている。本稿では，高岳製作所における数値計算をいくつかの切り口から概観しながら，高岳製作所における数理解析技術に対する姿勢を紹介する。

また，ここで簡単に紹介した内容のうち，最近の高岳製作所における数値計算の事例やアプリケーションの利用例などは少し詳しく本号中後に続く論文で紹介されている。

2. 高岳製作所で行っている数値計算

高岳製作所で現在行っている数値計算を，(1)分野からみた数値計算，(2)機器からみた数値計算，(3)アプリケーションからみた数値計算，(4)プラットホームからみた数値計算，の四つの断面から概観し，高岳製作所の数理解析技術に対する取り組みを紹介する。これら四つの関連は**図1**に要約して示される。

2.1 分野からみた数値計算；理論

はじめに高岳製作所で行っている数値計算をその適用分野から見てみたい。主として変電設備を対象にしているがそればかりとは限らない。次にあげる分野が高岳製作所で今まで行ってきた主な計算の分野である。

(1) 電磁界計算，(2) 応力，耐震計算，(3) 熱伝導計算，(4) 流れの計算，(5) 電力系統における過渡現象の計算，(6) 統計的信頼性の計算

通常，ある電力機器に関して，上の項目での検討は単独ではなくいくつか複数個が同時に要求される。例えば，遮断器では開極状態での電界計算，開極過程での流れの計算，過渡回復電圧などの系統計算，遮断による振動の計算，という具合である。（複雑な計算の場合）数理情報研究室ではそれぞれの計算分野に得意な人が機器設計者と入念に打ち合わせ計算をすすめ，設計者に助言するという方法をとる。ただし，あまり複雑でないルーチン化した計算は設計者自らが簡易のFEA（Finite Element Analysis，有限要素解析）ツールを用いて行う場合もある。簡易FEAツールの紹介，教育は数理情報研究室が担当する。

各分野にはその分野で主たる（偏微分）方程式が存在する。(1)ではマックスウエルの方程式，(2)ではニュートンの運動方程式，(3)ではポアソンの方程式，(4)ではナビエストークスの方程式，(5)では波動方程式などである。(4)の分野は(3)の分野や(1)の分野と密接に関連する。従って，上記の分野を横断的に理解することは重要な意味がある。(6)はやや特殊ではあるがエントロピーの概念など情報理論との関連も深い。統計データを扱う際にも，重要なことはデータ解析者が生のデータについてよく知っていることである。

本特集号では，分野別の論文として，耐震解析，系統の過渡現象計算と，系統的信頼性の分野が挙がっている。

2.2 機器からみた数値計算；対象

高岳製作所は主に，(1)変圧器，遮断器，断路器，配電盤，GISなどの変電設備に関連する機器から，(2)小型モーター，搬送機器，画像を用いた検査機器などの（工場）自動化にまつわる製品，(3)光を用いた電磁界，温度，加速度などの計測器，(4)X端末など，多岐にわたる商品群を扱っている。これらのうち，重量物に関しては応力，耐震計算が，電気的な絶縁に関しては電界計算が常時要求されるが，その他の計算の分野も必要に応じて要求される。最近では，一つの機器に対して，電流場の計算，それによる発熱，対流の計算，空気との熱伝達などを連成にした一連の解析も要求されている。

本特集号では，対象から眺めた論文として，モールド商品の応力計算と，電力貯蔵システムの動作解析を挙げている。

2.3 アプリケーションからみた数値計算；方法（ツール）

高岳製作所では離散化を伴った数値計算には，数値計算に取り組んだ初期の頃から，効率的な計算を進めるために（もし入手可能であれば）著名なアプリケーションを導入するという方法をとってきた。また，よくみられるようにどのアプリケーションを使って計算を進めたかを漠然とさせるのではなく，常に解析手段はオープンにする方法を採っている(2)。

電界，熱伝導，線形応力解析などの比較的簡単な解析手段には，15年以上もSDRC社製のIDEASを利用している。また，2次元，3次元の場のメッシュ作成にもIDEASは有効である。非線形の応力解析にはHKS社製のABAQUSを，耐震解析には（データ作成が困難であることを承知で）MSC社製のNASTRANを用いてい

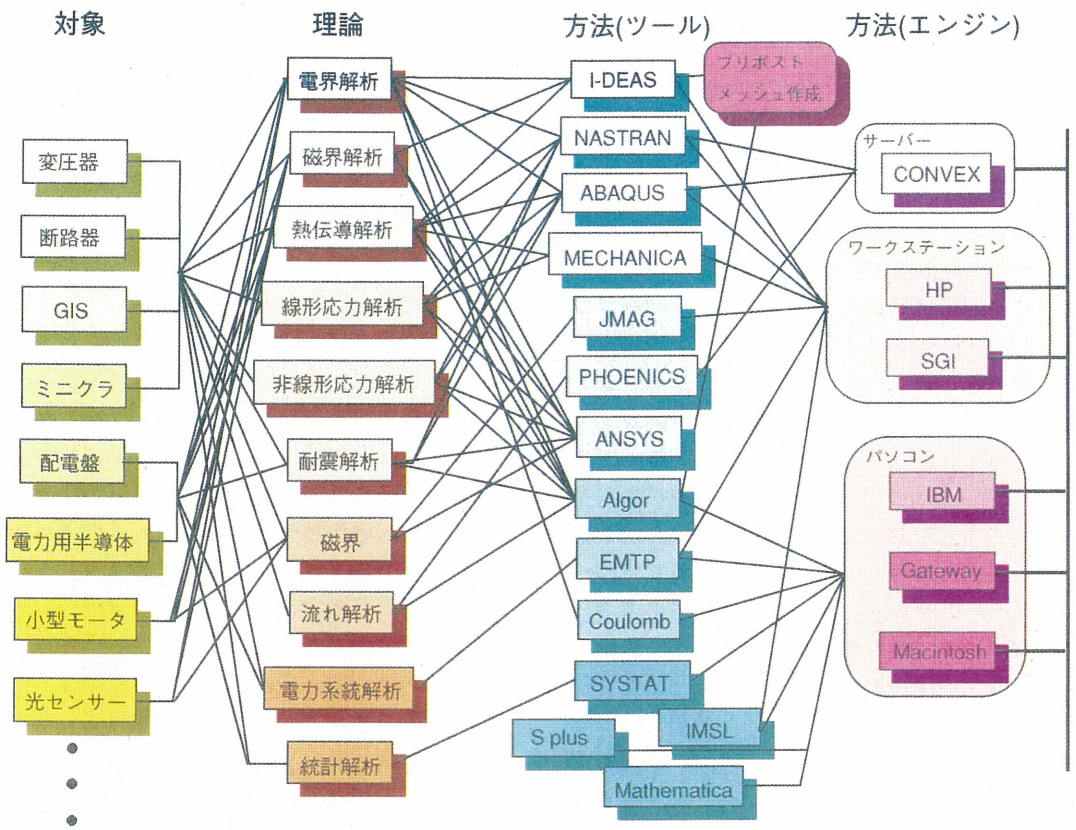


図1　数値計算における対象，理論，方法の関連図

る。磁界解析には今のところ日本総研社製のJMAGを用いているが，リニアモーターカー用コイルに発生する磁界の計算などには自社で開発したソフトを用いている。遅い流れや対流を伴う伝熱の計算には（複雑であれば）PHOENICSを用いているが，簡単な場合には本号で紹介しているパソコン用FEAツール，Algorを用いている。しかし，遮断器内ノズル部の高温高速状態での流れの計算では，移動場という条件に加えて，マックスウエルの方程式，ナビエストークスの方程式を連成させ，コントロールボリューム法という離散化手段をとるので，市販のアプリケーションでは対応できず，このときは自社でソフトを開発して計算を進めている[3]（解析例は図2参照）。MECHANICA（Mechanica StructureとMachanica Thermal）は最近注目され始めたp法によるFEA解析ツールであるが，高岳製作所では熱伝導解析，応力解析の分野で形状最適設計に利用している（本号参照）。その他，オールマイテイーな用途向けにANSYSが用意されている。電力系統における過渡現象解析には今や世界的に普及してきたEMTPを利用している（本号参照）。自社でソフト開発を進めるにあたっては，Visual Numerics社製のIMSLライブラリーなどを利用している。

確かに市販のアプリケーションを利用することでソフト開発に費やすコストは削減できる。しかし，そのアプリケーションを動かしている基本的アルゴリズムやアプリケーションの機能的限界を熟知せずに盲目的に計算を進めると計算誤りを犯す危険性がある。これを防ぐ意味で，数理情報研究室では場合に応じて簡単なアプリケーションの雛形を自ら作ることを奨励している。結果的ではあるが，これらのうち開発後十分使用に耐えるソフト

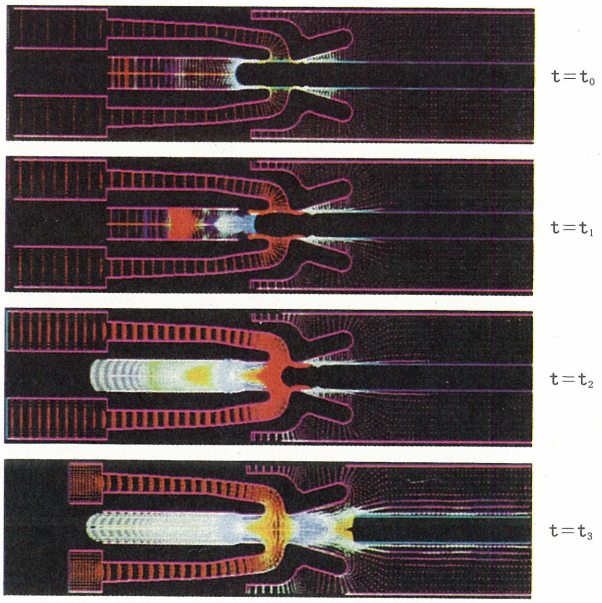


図2　遮断器内ノズル部の流れ解析例

（暖色は圧力の高い部分を，寒色は低い部分を示す。
矢印は流れの方向と流速を示す）

となり，他の市販のアプリケーションと協調しながら使われているものもある[4,5]。

本特集号では，アプリケーションから眺めた論文として，MECHANICA，Algorを挙げている。

2.4 プラットホームからみた数値計算；方法（エンジン）

ここでプラットホームというのはFEAのアプリケーションが走行するハード的な環境を指す。プラットホームはほぼ5年単位でドラステイックに変わっている。

初期のころは勿論，汎用コンピュータ，スーパーコンピュータが主たるプラットホームであった。大規模な線形方程式を我慢できる時間内で解くことのできるマシンはそれだけしかなかった。ユーザーは限られ，計算コストは高く，計算プロセスは不透明であった。自由度は1,000未満の解析であった。

1980年代に入ってエンジニアリング用ワークステーションが日本にもおそるおそる導入される。計算サーバーとグラフィックターミナルが一体となったワークステーションがネットワークで結ばれたコンピュータシステムは，その後の設計開発環境を一変する予感を与えた。高岳製作所ではいち早くワークステーションを整えることを進め，主にIDEAS用のプラットホームにあてた。アポロコンピュータからシリコングラフィックス，そしてHPへとプラットホームは変わるが，一貫してその時代の最適なエンジニアリング用ワークステーションがFEA解析のプラットホームに使われている。自由度は数千から数万までに上がる。

途中，ワークステーションの一向に上がらない性能とスーパーコンピュータの魅力との隙間を縫ってミニスーパーというプラットホームが出現する。高岳製作所でも流れ解析専用のサーバーとしてCONVEX社製のC201を導入した。自由度は10万程度を扱う。

1990年代に入ると，パソコンの性能向上とアプリケーションの豊富さからパソコンでFEAが実行できるようになる。日本ではまだまだパソコンを本格的に使ったFEAは認知されていないが，アメリカでは早くからこの時代の到来を予測し取り組んでいるベンダーが多くいる。高岳製作所ではこの動きに同期して，IBM純正をはじめIBMコンパチ（Mitac, Gateway等）のマシンを順次揃え，例えば，ATP（EMTP）用，EDSA（電力系統故障解析）用，Algor（汎用FEA）用，Coulomb（境界要素法を用いた電界計算）用向けのプラットホームとして使っている。その他，解析結果の可視化用マシンとしてマッキントッシュを利用している。パソコン用の解析システムを構築することで一挙に（FEA）解析ユーザーが増え，設計開発レベルの向上を図ったものである。

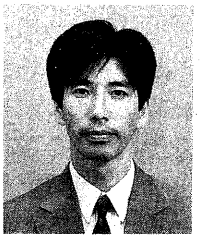
このように高岳製作所では，アプリケーションの種類，計算の規模を見ながらその都度最適な計算環境（プラットホーム）を決めている。今後は，高速な計算サーバー（通常パラレル）と多数のワークステーションがネットワークで密に結ばれたチームコンピューティングが実現すると予想される。また，パソコンとワークステーションとの境界も段々薄れ，個々のマシンよりもネットワークの重要性が一層叫ばれることになると思われる。解析結果をリアルタイムに可視化するための光通信の重要性も見逃せない。

3. あとがき

1991年にはアメリカのSIAM（Society for Industrial and Applied Mathematics）に相当する学会「日本応用数理学会」が誕生した。1992年4月には東京大学大学院数理科学研究科が発足，1994年4月には九州大学に大学院数理学研究科が発足している。いずれもその設立の理念に，数学，物理学，情報科学，工学，経済学などを横断的に結ぶ数理学とでもいうべき分野の学界と教育研究機関の存在の必要性を説いている。これは，最近の産業，経済，社会の高度化に伴って必要とされてきつつある数理的分野の急激な台頭によるものである。20世紀初頭数学では一度捨象されたはずの数学の実用性が今また注目されているのである。背景にはコンピュータの性能の進歩とその普及があるが，これは従来の計算が速く大規模にできるようになったばかりではなく，計算が質的に大きく変貌していることを表している。この急激な変化に企業も対処していかなければならない。応用数理学会をはじめとして，Computational…と名のついた組織への参加，上記大学や類似の研究機関との交流を積極的に行うことによって相互的に役に立つ数理学の分野が確立されることと考える。企業はそこでの問題提起と結果の検証という役割を担っていくべきで，高岳製作所も数理情報研究室をはじめ今後一層Computationに注力した機能する組織としての役割を果たしたいと考えている。

参考文献

(1) 広瀬，「探しものは何ですか」，応用数理，1，64(1991)
(2) 広瀬，「EWSを用いたCAEシステム」，CAEユーザ・シンポジウム'87（㈱電通国際情報サービス）(1987)
(3) 南，広瀬，「遮断器における流体解析」，計算電気・電子工学シンポジウム，II-5，197（1988）
(4) 広瀬，南，戸田，「有限要素法による非線形非定常熱伝導解析プログラムHTTの開発とその応用」，高岳レビュー，**32**，185（1985）
(5) 広瀬，岩田，「錯綜する線路群を含む電力系統回路網の定常計算プログラムの開発」，昭和58年電気学会全国大会，No. 837（1983）



広瀬英雄
Hideo Hirose
数値計算の研究開発に従事

実機試験にかわる 変電機器に適用される耐震解析

中山寿也*
小竹　孝*
足立雅彦**
伊藤忠慶***

内容梗概

変電機器の耐震性能の検証に有限要素解析を利用したシミュレーションを適用することで，開発・設計から検査・試験に至る一連の作業期間を短縮したり，実際には試験の困難な条件での検討が可能となる。

本稿では電力機器の耐震解析技術の概要を述べるとともに高岳において耐震解析を商品の信頼性向上に有効利用している事例のいくつかを紹介する。

Seismic Response Simulation of Power Substation Apparatus

Toshiya Nakayama*
Takashi Kotake*
Masahiko Adachi**
Tadayoshi Ito***

Synopsis

Seismic response simulation using Finite Element Analysis for power substation apparatus can shorten the development period and enable one to simulate experiments under extended conditions.

This paper will outline the seismic response simulation for power substation apparatus, and introduce some applied examples studied at Takaoka Electric.

1. まえがき

情報化社会を支える電力の安定供給の重要性はますます高まっている。それに伴い，電力機器の耐震性能は従来にも増して重要視されている。電力機器の耐震性能の検証は，試作品を加振設備で実機試験することが多いが，最近は計算機シミュレーションによる耐震解析を適用することも一般的になりつつある。耐震性の検証をシミュレーションで行うことの利点としては次のようなことが挙げられる。

(1)　寸法・重量など設計変更への対応が容易
(2)　加重・拘束条件などの変更への対応が容易
(3)　実機試験の困難な条件（寸法・重量）での検討が可能
(4)　設計段階での検証が可能であるため製品開発の行程短縮によりコストダウンにつながる。

高岳では耐震解析などの構造解析には汎用の有限要素解析（FEA）プログラムMSC/NASTRANを主に使用している。

本稿ではFEAを利用した電力機器の耐震解析の概要を述べるとともに，高岳における適用事例のいくつかを紹介する。

2. 耐震解析の概要

断路器，GISなどの変電所に設置される電力機器の耐震性を検討する際には，動的な地震力に対する応答解析

*技術本部 技術開発センター　**名古屋事業所 開発部　***仙台事業所 ミニクラッド部

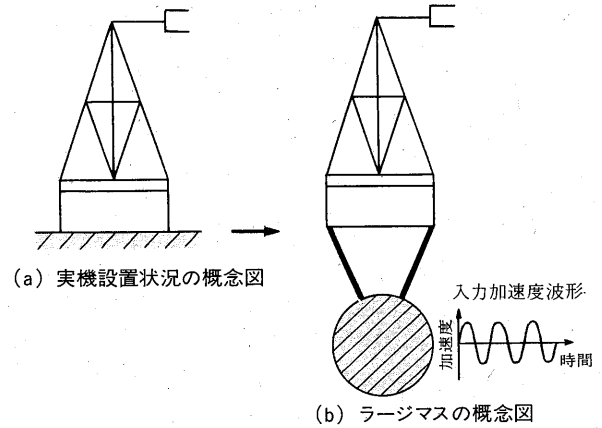
を行う。ここで用いる地震力は，エルセントロ波などの実測波形の場合もあるが，一般的にはいわゆる〝0.3G 共振正弦3波〟（一般の変電機器では加速度＝2.94m/s²(0.3G)，変圧器ブッシングでは 4.9m/s²(0.5G) を用いることが多い。

この共振正弦3波というのは，機器の固有振動数と等しい正弦波の形の加速度を入力して応答解析を行うため，擬共振法と呼ばれている手法である。ここで実地震波の卓越振動数は 0.5～10Hz の範囲にあるが，断路器など碍子形機器の固有振動数は，この範囲に存在することが多いので共振する可能性がある。擬共振法では，機器の固有振動数に等しい振動数を持つ正弦波を入力する。この場合3波で入力加速度を止めるため，完全な共振に至ることはないが，機器は実地震波入力の場合と同等以上の応答倍率を示す[(1)(2)]。なお機器の固有振動数が，上記の振動数範囲をはずれている場合には，0.5Hz または 10Hz にて加振する。

したがって振動解析では，まず機器の固有振動数を調べることから始める。FEA を用いた固有値解析により，機器の固有振動モードが多数出力されるが，ここで着目するのは上記の振動数範囲にある機器全体（特に碍子や架台脚部など発生応力が大きくなると思われる箇所）が変形する振動モードである。

次に，前述の擬共振法による応答解析を行う。MSC/NASTRAN で過渡応答解析を行う場合，ラージマス法と呼ばれる手法を用いる。ラージマス法では，**図1**のように機器架台脚を，機器全重量の 10^8～10^{12}倍の架空のラージマス（地面に相当）に剛接しておき，このラージマスに地震力を入力して応答解析を行う。

最後に応答解析の結果得られる機器に発生する応力・歪の大きさを設計許容値と比較して，耐震性を評価する。その結果，必要なら設計変更案について解析をくり返し対策を行う。



(a) 実機設置状況の概念図

(b) ラージマスの概念図

図1　ラージマス法による応答解析

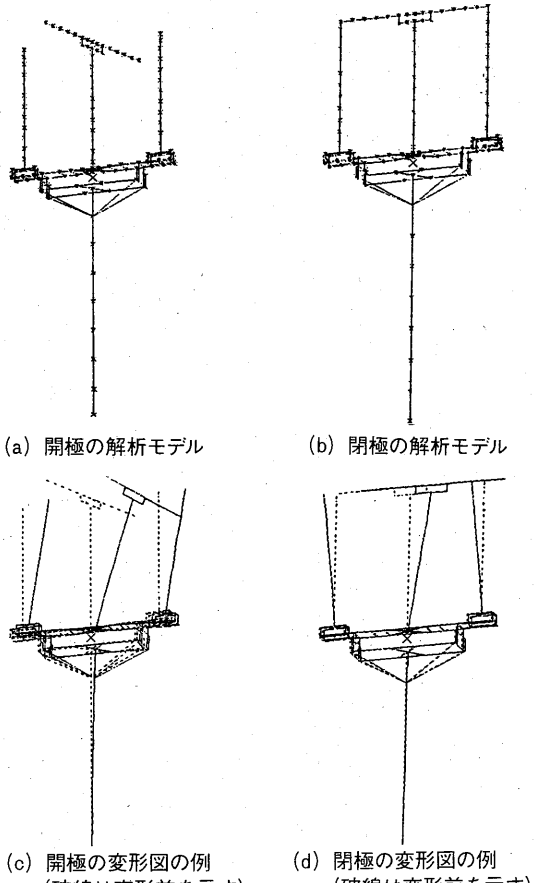
3. 適　用　例

3.1　断路器の耐震解析

断路器の場合，通常は実機加振試験でその耐震性を検証しているが，例えば導電部重量を設計変更する際に耐震性を再検討する必要が生じた場合などは，シミュレーションで対応する方が簡単であり，コスト面からも有利である。すでに主なタイプの断路器については，解析モデル化の実績があり，容易に設計変更に対応できる状況にある。

断路器には，単柱構造と三角錘支持構造のものがあり，FEA モデルは，**図2**，**図3**に示すように主に等価な剛性を持つ梁要素を組合せてモデル化している。断路器の架台については固有振動数が本体に比べ高く，また断路器の耐震性の着目点はほとんどの場合本体の碍子下端である。したがって，断路器架台は**図2**，**図3**のような1本の梁に置き換えることが多い。なお断路器の閉極状態での耐震性を検討する場合には，接触部の相対変位を計算し，接触部がはずれるほどの大きなずれが生じる場合は対策を行う必要がある。

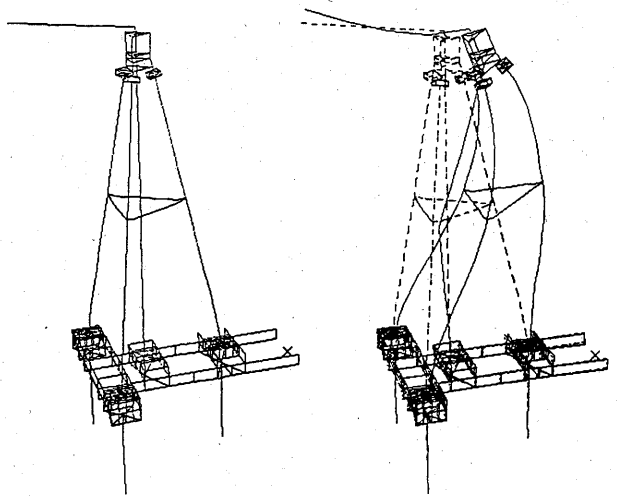
図4は，単柱構造の断路器（片極のみ）にアルミリード線を取付けた場合（リード線の反対側は固定）の耐震解析結果の変位図である。この場合リード線の幾何学的非線形性を無視して解析することはできないので，大変形問題を扱うことのできる汎用 FEA ツール ABAQUS を使用している。この例では，リード線に電流センサを取付た場合にリード線張力が増すことによる断路器本体の耐震性への影響を検討し，機器の安全性を検討することができた。



(a) 開極の解析モデル　(b) 閉極の解析モデル

(c) 開極の変形図の例（破線は変形前を示す）　(d) 閉極の変形図の例（破線は変形前を示す）

図2　単柱構造断路器の FEA モデル



(a) 解析モデル
(片極のみ)

(b) 固有振動モードの例
(破線は変形前を示す)

図3　三角錘支持構造断路器の FEA モデル

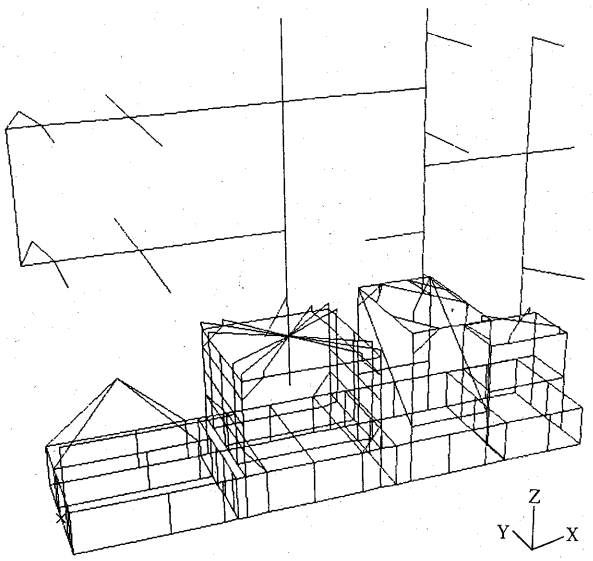
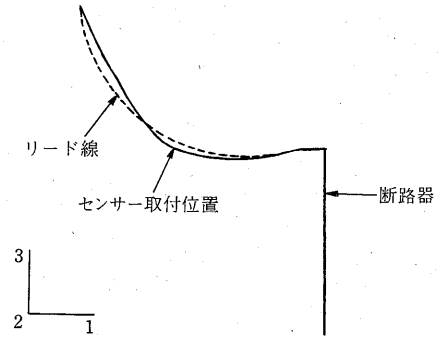
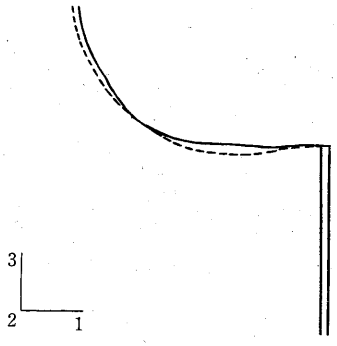


図5　GIS 耐震解析モデルの例



(a) 初期荷重による変位



(b) 断路器頂部変位最大時の変位

図4　リード線付断路器の耐震解析（破線は変形前）

3.2　GIS の耐震解析

GIS の場合，タンク部の剛性が非常に高いため，耐震性検討の着目点は主に架台脚部である。したがって**図5**のように GIS の耐震解析モデルはタンク部を含め全体を等価な剛性を持った梁要素で構成することが多い。架台にも梁要素を用いるが，断路器の場合に比べ詳細にモデル化している。

タンク部に発生する局部的な応力を計算する場合には，計算機の能力やコストの問題から2段階に分けて計算する。まず**図5**のような梁要素による GIS 全体のモデルを用いて過渡応答解析を行い，タンク各点の相対的な最大変位を求めておく。次に**図6**に示すように当該のタンク部のみの詳細解析モデルを作成し，これに先に求めておいた変位を強制変位として与えて静解析を行うことで，局部的に発生する応力を算出することができる。

図7は，GIS を多回線連結した場合の耐震性を検討した解析モデルである。このような大型機器の耐震解析は，シミュレーションによらざるを得ない。この例では**図8**に示すように，回線数の増加に伴い，GIS の左右方向(**図7**のY軸方向）の固有振動数はしだいに上昇し，発生する応力は低下することを確認している。

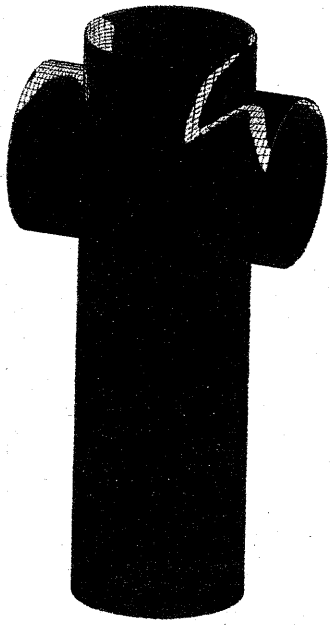


図6　GIS タンク部詳細解析モデルの応力分布

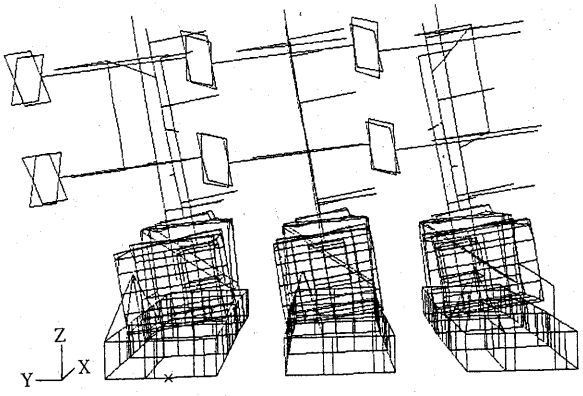
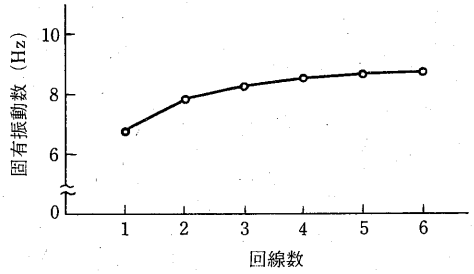
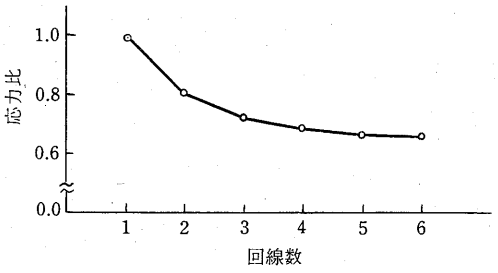


図7　GIS 3回線連結時の左右方向(Y方向)の振動モード例



(a)　回線数と固有振動数の関係



(b)　回線数と応力の関係
(応力は1回線時の値に対する比で示す)

図8　回線数の影響

3.3　ミニクラッドの応力解析

図9は，30MVA配変対応縮小型固体絶縁開閉装置ミニクラッドについて行った耐震解析モデルの例である。モデル化にあたっては固定部と基礎ベースを梁および板要素とした。収納される可動部はそれ自体の剛性が十分に高く，固定部全体としての剛性への影響は少ないものと考え，それぞれの重心点へ質量を集中させ断路部，挿入装置部，ホイール部で支持した。またモールド品については，各箱間で自在継手接続となっていること，および20MVA縮小形ミニクラッド開発時の実機耐震試験において安全率が100以上と極めて裕度が高い結果が得られていることから，それぞれの重心点へ質量を集中させた。

ミニクラッドの耐震解析においては，基礎ベース底部，側板連結部，固定部底板などの発生応力とともに，基礎ベースアンカーボルトの引抜力を計算し，許容値に対する安全率を求めている。

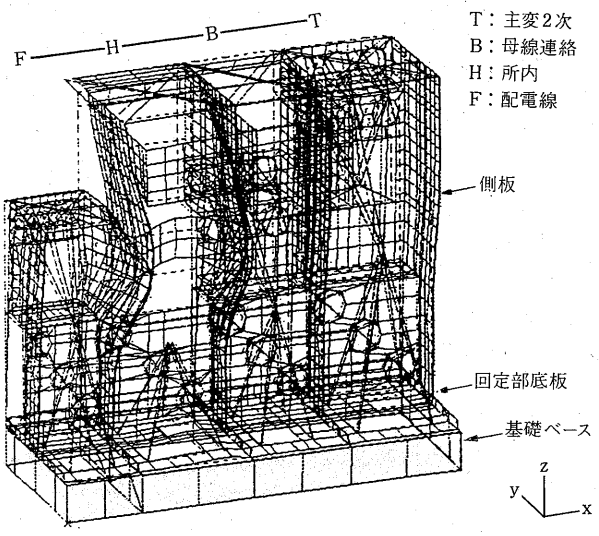


図9　ミニクラッドの固有振動モードの例

4．今後の課題

計算機の処理能力が急速に向上していることにより，解析可能なモデルの規模（自由度）も飛躍的に増大している。したがってこれまで梁に置き換え簡素化していた部分を板やソリッドを用いてモデル化することも可能となりつつある。その場合形状作成などのFEAの前処理の手作業に多くの時間を要するが，CADで作成した形状データを変換してFEA用のデータとして利用できれば，解析作業が容易になると考えられる。しかし，現状では，CADデータからFEAデータへ変換する場合に，CADデータには耐震解析等の力学的な観点から見ると意味のない穴や部材の寸法までが表現されてしまうため，FEAに必要なデータのみを残すように作業者の手で修正してやる必要がある。今後こういったCADデータからの変換処理のような前処理機能が進化すれば，FEAは一段と普及するものと考えられる。

次にFEAの限界を認識する必要がある。解析モデルは実機を100%表現できるわけではない。機器の構造が複雑であれば，それだけ現実とモデルとの違いが生じる。例えば部材の接続部の拘束条件のモデル化において，解析モデルで用いる完全固定やピンジョイントなどは，実際にはバネや摩擦がある場合が多く，理想的な拘束条件を安易に用いると思わぬ誤差を生じることがある。したがって，FEAは万能ではなく，モデル化による誤差を含んでいることを常に考慮して評価する必要がある。実際の現象をどうモデル化するか，どういった手法で解くか，その結果として得られる値をどう評価するかという，エンジニアリングノウハウの蓄積が解析技術者には要求される。

解析モデルの精度を上げるためには基礎的な実測データの蓄積は欠かせない。また実験モード解析を併用するなどして，固有振動数や応答解析に用いる減衰定数の精

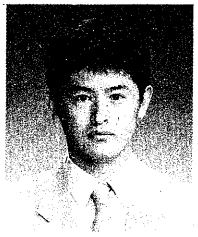
度を上げることも必要である。計算と実測との整合は重要な作業であり，今後は両者を統合した解析・評価システムが必要となる。

5. あとがき

高岳における電力機器の耐震解析の概要を述べ，適用事例のいくつかを紹介した。以上のような計算機シミュレーションによる解析技術は，今後ますます適用される機会が増えると思われる。実機試験によるデータの蓄積も当然ながら重要であるが，解析技術により商品の品質をさらに高めることが需要家各位からの要望であると考えられる。今後ともそれに応えられるよう解析技術力の向上に努力していく所存である。

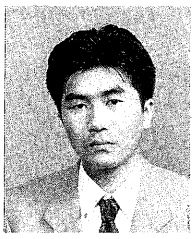
参考文献

(1) 日本電気協会：変電所等における電気設備の耐震対策指針，JEAG5003 (1980)
(2) 電気協同研究：変電機器の耐震設計，**34**，No. 3 (昭53.10)

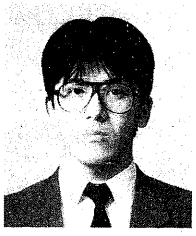


小竹 孝
Takashi Kotake
数値計算の研究開発
に従事

足立雅彦
Masahiko Adachi
断路器の開発業務
に従事



伊藤忠慶
Tadayoshi Ito
ミニクラットの開発設計
に従事



中山寿也
Toshiya Nakayama
数値計算の研究開発
に従事

特許ニュース

アレスタ内蔵配電機器

特許　第1721314号

発明者　永吉秀明
舟橋　孝

この発明は，アレスタ内蔵機器の試験作業の簡素化を図る構成に関する。

耐電圧試験では，アレスタの動作開始電圧より高い電圧を印加するため，内蔵されたアレスタを切離し再接続するという煩雑な作業を行う必要があった。

この発明は，図のアレスタ内蔵変圧器に示すように，分岐線にアレスタを接続し，接地側は共通接続して開閉器を介した後タンクに接地したものである。開閉器を開にすることで，アレスタが直列接続となり，かつ対地より切離されることから耐電圧試験が可能となり，試験作業を簡素化することができる。

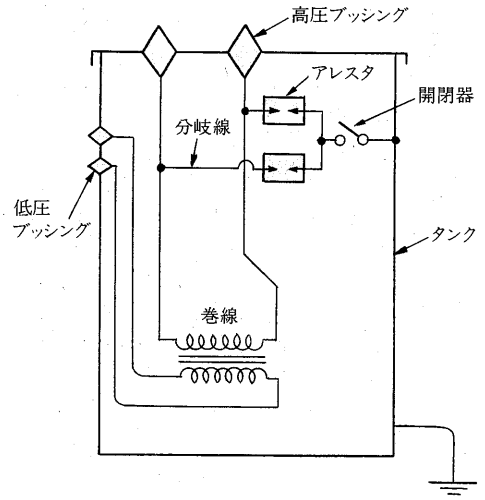


図　アレスタ内蔵変圧器

特集　数理解析技術

しきい値を推定する 電力機器における信頼性解析

広　瀬　英　雄*

内　容　梗　概

電力機器の信頼性を，機器が破壊するかしないかの境界ストレス（しきい値）を推定するという観点から，(1)短時間，あるいは単発でのストレスに対する機器の耐力，(2)長時間ストレスに対する機器の耐力という二つの場合について述べた。短時間ストレスの見地からは，ワイブル分布の位置パラメータの推定法の困難さとその解決法について，一方長時間ストレスの見地からは，経験則で表される破壊ストレスのしきい値推定法について述べた。

Reliability Analysis for Electrical Power Apparatuses

Hideo Hirose*

Synopsis

From a viewpoint of estimating the threshold stress at which electrical apparatuses break down, the reliability for power apparatuses are discussed in the two cases; (1) in short term or unit stress cases, maximum likelihood (location) parameter estimation in the Weibull three-parameter model is difficult and the difficulties are circumvented by using nonlinear mathematical programming algorithms, (2) in long term stress cases, threshold stress below which the breakdown is unlikely to occur can be estimated by using empirical deterioration models and usual two parameter-Weibull models.

1. まえがき

「信頼性」とはいったい何だろうか。「信頼性」という言葉ではなく，「信頼できる」とか「信頼を裏切らない」といった言葉を使ってみると少し分かりやすい。「信頼」とは，対象は人であれモノであれ，人が期待しているあるコトに対してそのことが思い通りに（あるいはそれ以上にうまく）いくこと，またその通りにいかない場合があってもすぐに期待する状態に変われることを指している，と筆者は考える。機械の場合，ある一定の保証期間壊れては困るし，また万一壊れたら，取替えか修繕によりすぐに元の状態に復帰することが要求されている。これが「信頼性」の意味である。

設計に携わるエンジニアは，機器を構成するコンポーネントや各エレメントの耐力に試験データをもとにしたある基準を設け，その基準に従って機器の設計を行う。この基準は機器が一定期間機能することを保証する性質をもつ必要がある。(一つ一つのコンポーネントの組み合わせから成り立つ機器全体の耐力としての信頼性については，本号の論文中，有限要素解析などのところで述べているので，ここではそのもととなる〝基準〟に関して述べる。)

一方，最近では，電力機器の状態を常時観察し，異常が確認されたらそのことを監視オペレーターに知らせたり，あるいは自動的に想定される故障を回避するシステム作りが盛んである。このシステムは上記の場合で言えば後者に相当し，「予知システム」と呼ばれている。

本稿では，この予知システムに関する議論は別稿にゆずるとして，前者にあたる「コンポーネントやエレメントのある条件下でのストレスに対する耐力の確率的把握」について最近の成果を交えながら考察する。考えられているストレスとしては，(a)応力，(b)電界，(c)熱，(d)湿度などがあげられる。ストレスに対する耐力を把握することとは，機器が破壊するかしないかの境界の点を推定する問題になる。この点は「しきい値 (threshold)」と一般に呼ばれている。このしきい値には，破壊応力，絶

*技術本部 技術開発センター 数理情報研究室長

縁破壊電圧といった述語が対応するが，単発，あるいは短時間のストレスに対するしきい値と，重なるストレスを受けながらの長時間のストレスに対してのしきい値には大きな違いがある。ここではこれら両方について，得られた試験データからこれらしきい値をどのように評価するかということについて議論する。

2．短時間ストレスに対する破壊値の推定

破壊のメカニズムが微視的には分かっておらず，統計的にしかデータ処理ができないとき，極値（extreme-value）の漸近分布で破壊値の確率分布を扱うのが常道である。その漸近分布には，(1)ワイブル（Weibull）分布，(2)グンベル（Gumbel）分布，(3)フレシェ（Fréchet）分布の三つが知られており[1]，電気系，機械系でよく用いられる分布はワイブル分布である。ワイブル分布の中でも，位置パラメータ（location parameter）を陽に表した次の確率分布関数，

$$F(x;\eta,\beta,\gamma)=1-\exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right\},(\eta>0,\beta>0,0\leq\gamma\leq x)$$

が破壊確率モデルとして標準的に用いられている。ここに，η，β，γ はそれぞれ，尺度，形状，位置パラメータである。

機器設計者にとって最も関心のあるパラメータは位置パラメータである。このパラメータ（threshold）は，文字通り，機器が破壊するかしないかの境界を表している。ところが，この値を破壊したデータのみを使って求めるのはそれほど容易ではない[2]。破壊するかしないかの境界にはデータがないからである（**図1**参照）。従って，推定された位置パラメータは極端に信頼度が低いという結果が出る[3]。あるいは，最尤推定により位置パラメータの推定を行うと，かなりの確率で $\gamma<0$ や $\gamma\to-\infty$ といった現象に出会うことが分かる[4]。このことは何もワイブル分布に限らず，信頼性を扱う他の確率分布であるガンマ分布，対数正規分布，逆ガウス分布などでも同様の問題が生ずる。この不都合を回避するため，あらかじめ位置パラメータの分布を $\gamma\geq 0$ として合理的に与えておき，推定値が負の値にならないようにするベイズ（Bayes）の方法[5]や，データを点データとしてではなくグループデータとして解釈する方法[4,6]（こうすると，正則条件が自動的に満たされ取り扱いが簡単になる），さらに，それに似た方法でMPS（Maximum Product of Spacings）を用いた方法[7]も提案されている。

しかし，もともと推定精度のそう高くない位置パラメータの推定にこだわらず，小さな破壊確率（例えば0.1%）の点（x_p，$p=0.01$）の推定ならば，ベイズの方法などを使わなくても議論は比較的簡単になる。ここに，ワイブル分布の場合，

$$x_p=\gamma+\eta\,|\log(1-p)|^{1/\beta}$$

である。ただ，パラメータ推定は基本的に必要である。従って，パラメータ推定の方法を追求することは現在でも重要な意味をもつ。問題なのは，パラメータ推定に相当の困難が伴う[8]ことであるが，最近では安定的に（極値の漸近分布の中の一つであるワイブル分布として）パラメータ推定値を求めることのできる方法が考案され始めている。ホモトピー法，あるいは連続法（*Continuation Method*）はその一つで，ホモトピー法が大域的収束性の特長をもつというアルゴリズムを応用すれば困難なパラメータ推定も比較的容易に解決される[9,10]。

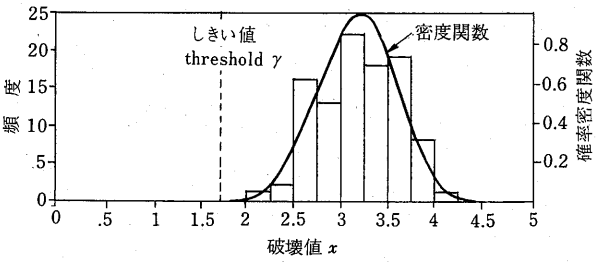


図1　破壊データの分布としきい値との関係

2.1　ホモトピー法を用いたワイブルパラメータの推定法[9,10]

最尤推定値を求めることは，ワイブル分布から作られる尤度関数の極値（最大値）を求める非線形計画法の問題の一つに等しい。ここに，尤度関数は

$$L=\prod_i \frac{dF(x_i;\eta,\beta,\gamma)}{dx_i}$$

である。

最大値探索の問題を $\partial\log L/\partial\theta=0$，$(\theta=(\eta,\beta,\gamma)^T)$ の零点探索の問題に置き換え，ある自明な解をもつ関数 $g(\theta)=0$ と，ここで問題にしている $h(\theta)=0(h(\theta)=\partial\log L/\partial\theta)$ とを連続的に接続することにより，自明な解から求める解を連続的に追跡するのがホモトピー法の考え方である。従って，ある自明な関数 $g(\theta)=0$ の設定が必要になる。任意の点での対数尤度関数の傾き K から $h(\theta)-K=0$ という自明な関数を作ってもよいが，より推定を容易にするため，$g(\theta)$ としてはワイブル分布の極限分布に相当するグンベル分布を用いることもできる。また，分布関数としてはじめからワイブル，グンベル，フレシェ分布を同時に表す一般化極値分布を使えば $\gamma\to-\infty$ の不都合は解消される。

図2はある破壊データに対する一般化極値分布の尤度関数である。暖色は尤度が大きいことを表している。一見，初期値をどこにとっても最大値に収束するように思えるが，実はニュートン法を用いると**図3**のような非常にいびつな（収束する）初期値の点の集合が得られる（最尤推定値は図の中心に位置する）。ニュートン法がいかに不安定かが分かる。一方，ホモトピー法ではこの場合初期値の心配はない。

ニュートン法である初期値 θ_0 から逐次 θ_i を求める手

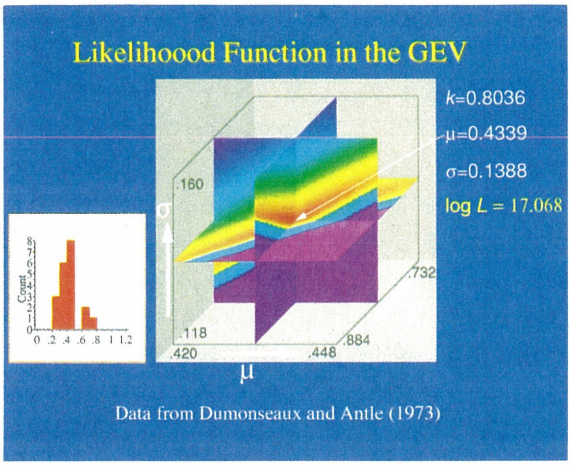


図 2　尤度関数の例（一般化極値分布）

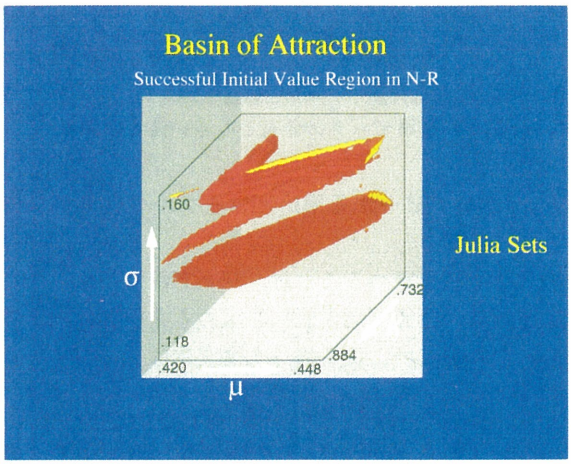


図 3　ニュートン法を用いた場合の収束する初期値の集合

続きを，

$$\theta_{i+1} = \theta_i - J_i^{-1} \cdot h(\theta_i)$$

として進めるが（J はヤコビアン），ホモトピー法でも結果的にはこの手続きと非常によく似た次の手続きが用いられる。

$$\theta_{j+1} = \theta_j - \delta \cdot J_j^{-1} \cdot h(\theta_0)$$

従って，従来から使われているアルゴリズムがほとんどそのまま生かされることになる（δ は小さな正数）。

3．長時間ストレスに対する破壊値の推定

短時間あるいは単発ストレスに対する破壊確率分布が分かっていても，度重なるストレスに対してのモノの寿命は，その短時間ストレス下での破壊確率からのみ計算されるほど単純ではない。一定ストレス下での平均寿命とストレスとの関係の物理的なモデルはまだ明らかになっているとは言えず，いまだに経験則が使われている。熱劣化に対してのアレニウスの法則，電圧劣化に対しての逆 n 乗則や指数則がそれらである。例えば，逆 n 乗則は

$$\mu(V) = KV^{-n}$$

と表される。ここに，$\mu(V)$ はストレス V を与えたときの平均寿命である。

しかし，ポリエチレンや CV ケーブルなどの絶縁材料で長時間の加速劣化試験を行ったり，使用中のケーブルを撤去した後の絶縁破壊電圧を測定したりしてみると，破壊に至るストレスにはあるしきい値があり，そのストレス以下では（長期にわたっても）全く破壊しないと思われるデータが数多く報告されている。従って，そのしきい値を V_0 と仮定すれば，例えば逆 n 乗則では

のモデルを立て，一定ストレス下では寿命はワイブル分布（位置パラメータは 0）に従うという仮説と組み合わせて使うことが可能となる。

このモデルを用い，パラメータ推定を最尤推定法を用いて行えば，たとえすべてのストレス下でのワイブル形状パラメータは一定値であるという仮定がなくても，使用ストレス下での平均寿命 $\mu(V_S)$ としきい値 V_0 は推定できる[11]。例えば，SF_6 ガス絶縁トランスに使用されている PET フィルムのしきい値 V_0 を推定した例が**図 4** である。

また，一定期間使用した後の絶縁物の絶縁破壊電圧の推定も似たような取り扱いが可能で，しきい値を推定することができると思われる。さらに，加速劣化試験結果から推測される機器の寿命と，機器使用後の絶縁破壊電圧結果から推測されるそれとの整合性も今後整理されるであろう。

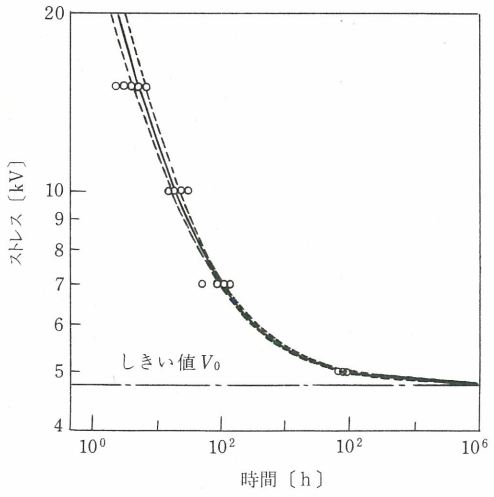


図 4　加速劣化試験によるしきい値の推定

4. あとがき

電力機器における信頼性という問題を，機器が破壊するかしないかの境界ストレス（しきい値，threshold）を推定するという観点から，最近の研究成果を交えて議論した。短時間ストレスの見地からは，ワイブル分布の位置パラメータの推定法の困難さとその解決法について，一方長時間ストレスの見地からは，経験則で表される破壊ストレスのしきい値推定法についてごく簡単に概観した。

これらの議論の一端が読者にとってインフォーマテイブであれば幸いである。

参考文献

(1) 広瀬,「ワイブル分布の周辺」, 応用数理, **1**, 312(1991)

(2) Hirose,「On Some Failure Data Cases Related to the 3 Parameter Weibull Distribution and Gumbel Distributions」, *Stanford Technical Report, Dept. of Statistics, Stanford University* (1990)

(3) 広瀬,「3パラメータワイブル分布の推定値の信頼度」, 電気学会論文誌A, **110**, 903 (1990)

(4) Hirose, Lai,「Inference from Grouped Data in Three-Parameter Weibull Models with Applications to Breakdown Voltage Experiments」, *Technometrics,* submitted

(5) Smith, Naylor,「A Comparison of Maximum Likelihood and Baysian Estimators for the Three-Parameter Weibull Distribution」, *Applied Statistics* **36**, 358 (1987)

(6) Atkinson, Pericchi, Smith,「Grouped Likelihood for the Shifted Power Transfomation」, *Journal of Royal Statistical Society B*, **53**, 473 (1991)

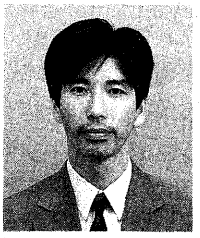
(7) Cheng, Amin,「Estimating Parameters in Continuous Univariate Distributions with a Shifted Origin」, *Journal of Royal Statistical Society B*, **45**, 394 (1983)

(8) Hirose,「Percentile Point Estimation in the Three Parameter Weibull Distribution by the Extended Maximum Likelihood Estimates」, *Computational Statistics and Data Analysis,* **11**, 309 (1991)

(9) Hirose,「Parameter Estimation in The Extreme-Value Distributions Using The Continuation Method」, 情報処理学会論文誌, to appear (1994)

(10) Hirose,「A Succeful Maximum Likelihood Parameter Estimation in Skewed Distributions Using the Continuation Method」, *Proceedings of International Confereuce on Statistics in Industry, Science and Technology,* 303 (1994)

(11) Hirose,「Estimation of Threshold Stress in Accelerated Life-Testing」, *IEEE Transactions on Reliability,* **42**, 650 (1993)



広瀬英雄
Hideo Hirose
数値計算の研究開発に従事

特許ニュース

マイクロコンピュータのリセット回路

特許　第1829433号

発明者　柳沢由喜夫
藤井威徳

この発明は，マイクロコンピュータを応用した装置のリセット回路に関する。

この発明においては，図に示すように，電源電圧を検出する分圧回路と，基準電圧発生回路と，分圧回路の出力電圧および基準電圧発生回路の出力電圧を比較するコンパレータと，電源およびアース間に接続されたCR積分回路と，CR積分回路の充電電荷を放電するダイオードと，コンパレータの出力およびCR積分回路の出力の論理和をとるOR回路とから構成する。また，ダイオードをコンパレータの出力端子に接続することにより，瞬間的な電源電圧の低下に対しても常に一定パルス長のリセット信号を得るようにする。

このように構成することにより，電源電圧がマイクロコンピュータの動作が保証される最低レベル以下となった場合には，連続的なリセット信号を得て，マイクロコンピュータを停止させることができる。また，電源の立上がり時および電源電圧が瞬間的に低下した場合には，一定パルス長のリセット信号を得て，確実なリセット動作を行わせることができる。

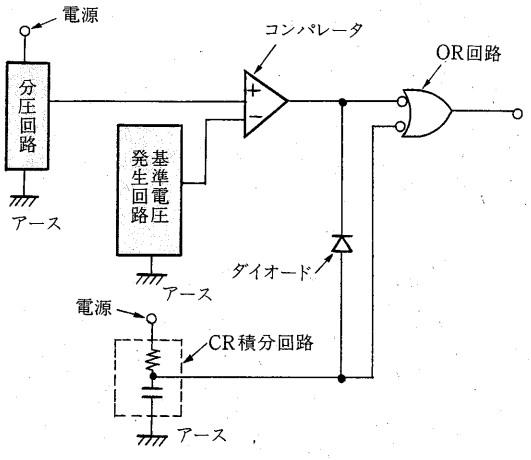


図　リセット回路

特集　数理解析技術

EMTPによる 最近の電力系統解析

中山寿也*
大羽良明*

内容梗概

電力系統解析ツールとして，EMTPは広範囲な系統現象の解析に適用できる。現在EMTPは，ATPやDCG版EMTPなどに分かれて開発が続けられているが，今後はパソコン版またはUNIXワークステーション版が主流になるものと考えられる。本稿では，EMTPの動向と高岳製作所におけるEMTPの適用事例について紹介する。

Current Electric Power Network Analysis

Toshiya Nakayama*
Yoshiaki Oba*

Synopsis

As an electric power system analysis tool, EMTP is applicable to analysis for the extensive electric power system phenomena. EMTP has been developed continuously by both the ATP group and the DCG-EMTP group. From now, it can be taken that the personal computer version or the UNIX workstation version will be much more widely used.

This paper outlines some simulation analysis at Takaoka Electric.

1. まえがき

電力系統解析には，サージ解析，安定度解析，高調波解析などの多方面の分野があり，大規模・複雑化した電力系統の計画・運用のためにますます重要な技術となっている。系統解析ツールとして種々の手法があるが，その汎用性と高機能性からEMTP (Electro-Magnetic Transients Program)は，世界的に最も広く利用されている解析ソフトウェアである。高岳においてもEMTPに関しては10数年来の使用実績があり，サージ解析を初めとして様々な系統解析に使用している(1)。本稿では，EMTPの動向および高岳製作所における適用例について紹介する。

2. EMTPの動向

現在国内で利用可能なEMTPには，主にBPA-EMTP, ATP(Alternative Transients Program)，DCG (Development Coordimtiom Group)-EMTPの3種類があり，高岳では，それぞれについて使用実績がある。これらのEMTPの開発経緯については文献(2)に詳しいので，ここでは概略について説明する。

BPA-EMTP (以下BPA版)は，BPA (米国エネルギー省ボンネビル電力庁) で開発されたソースコード公開，無償提供の系統解析ソフトウェアとしてEMTPを世界的に広めたプログラムである。BPA版は日本EMTP委員会 (委員長：同志社大学雨谷教授) を通して入手できるが，BPA-EMTPとしての開発は10年前に中止されている。BPA版は入力データ作成が煩雑であることおよび，バージョンにより異なるバグがあるなど初心者には扱い難い問題もあるが，最も古くから導入されたEMTPとしてデータの蓄積があり，国内では現在もかなりのユーザ数があると考えられる。

現在，日本EMTP委員会を通じて新しく無償配布されるEMTPは，ATPである (ただしソースコードは非公開でロードモジュールの提供のみである)。ATPにはCAD形式で入力データを作成することとができるプロ

*技術本部 技術開発センター

グラム(GRAPHICAL INTERFACE FOR ATP)が付属しており,EMTP特有のデータフォーマットに不慣れな初心者には有効である。ATPは，それまでのEMTPが主にメインフレームでの運用を中心としていたのに対し，当初よりパソコン（IBM 386/486系）をターゲットマシンとして開発されてきた。最近パソコンのコストパフォーマンスが大幅に良くなったこともありATPのユーザ数は急激に伸びている。なおATPにはMODELSと呼ばれる新しいサブルーチンが追加され,従来からのTACSなどに比べユーザ独自の回路素子モデルを自由に作り込むことが可能となっており，今後の普及が期待できる。

DCG-EMTP（以下DCG版）は，EMTPの開発とバグ修正を参加メンバーの有償で継続することを目的として作られたEMTPで，国内では日本EMTP-DCG委員会（委員長：電力中央研究所町田理事）を通してメンバーにのみ配布（ソースコード含む）されている（学術向けに限り無償という動きもあり)。DCG版には，会話形式で入力データを作成する〝EMTPIN〟というプログラムが付属している。DCG版はBPA版を基にしてプムグラム構造の改編を行っており，バグが修正されたり新機能が追加された箇所もあるが，これまでのところ新たなバグの作り込みや,CPU時間が比較的長い等の問題もある。今年リリース予定のV3.0でひとまず新機能の開発作業は終了し，今後は，対象とするハードウェアをメインフレームからUNIX機へ変更する作業が中心となる予定である。

高岳製作所では，従来より主にワークステーションでBPA版を使用してきた[3]が，最近ではパソコン上でATPを利用するユーザが設計・開発部門で増加している。DCG版は今後UNIXバージョンが中心になるので,UNIXワークステーションのユーザ間に急速に広がることが予想される(ATPにもUNIXバージョンがあるが，パソコン版ATPに比較して信頼性に劣るものと考えられる)。

3. EMTPの適用例

3.1 雷サージ解析

EMTPの開発がサージ解析を目的として始められた経緯もあり,雷サージ解析,開閉サージ解析にEMTPを適用した例は多く見られる。本稿では特に解析例は示さないが,高岳製作所では変電所に納入するGISの設計において避雷器の必要性を検討する際などに雷サージ解析を行っている。解析手法としては電気学会の雷サージ解析関連の委員会[4]において詳細なEMTP解析モデルが提案されており，最近はその詳細な解析手法が用いられる機会が増えている。

以下にこの解析手法の特長を示す。

(1) 送電線の線路定数は全ての架空線地と電力線の周波数依存効果を考慮した多相のSemlyenモデルまたはMartiモデルを用いる。

(2) 鉄塔は多相回路解析に対応して4段モデルを用いる。

(3) アークホーンの逆フラッシオーバには，リーダ進展とアーク特性を模擬するリーダモデルを用いる。

以上の詳細モデルはUHV送電を対象とした絶縁合理化の検討に関連して提案されてきた経緯があり，高精度な過電圧解析が可能である。

これに対し架空地線1条と電力線は逆フラッシオーバ相のみを考慮した2相回路モデルや，周波数依存効果は無視した通常の分布定数モデル（K. C. Leeモデル）を用いても，得られる最大電圧としては十分な精度を持つとの報告がある[5]。またアークホーンのリーダモデルは取扱いが煩雑であるため，非線形インダクタンスフラッシオーバモデルなどの新しい模擬手法が提案されている[6]。このように，最近はより簡素化した解析モデルが適用される傾向にある。

なおアークホーン間をあらかじめ短絡しておく〝短絡モデル〟と呼ばれる従来からの手法は，発生する過電圧が高くなる傾向であるが，これは絶縁設計の上では安全側であると考えられ，現在でもよく用いられている。

3.2 変圧器励磁突入電流解析

変圧器を無負荷で投入した場合に投入位相や残留磁束によっては，過大な突入電流が発生し，系統に影響を及ぼすことがある。ここでは，特高需要家の受変電設備において，変圧器の励磁突入電流が発生した場合に，系統電圧および接続されている高調波フィルターに与える影響を検討した例を示す。**図1**に系統構成を示す。この例では，受電用変圧器（3台並列）の2次側母線に高調波フィルターおよび変圧器（2台並列）が接続されており，遮断機を投入することで，この変圧器を無負荷で励磁させる。

EMTPでは,変圧器の励磁特性の非線形カーブを与えることで，励入電流の模擬が可能である。**図2**，**図3**に

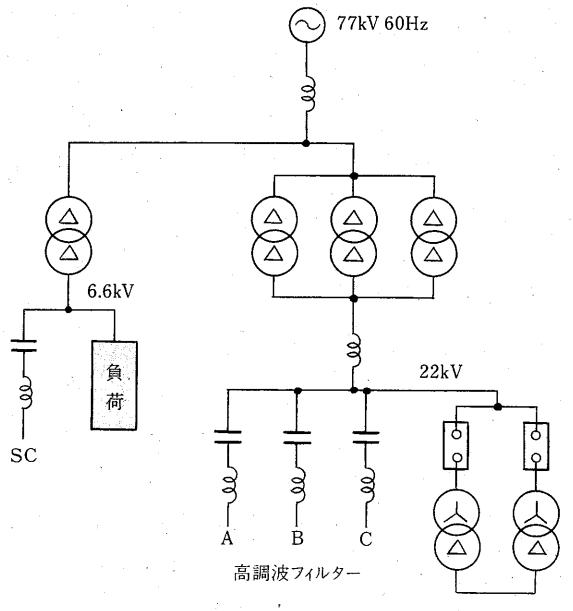
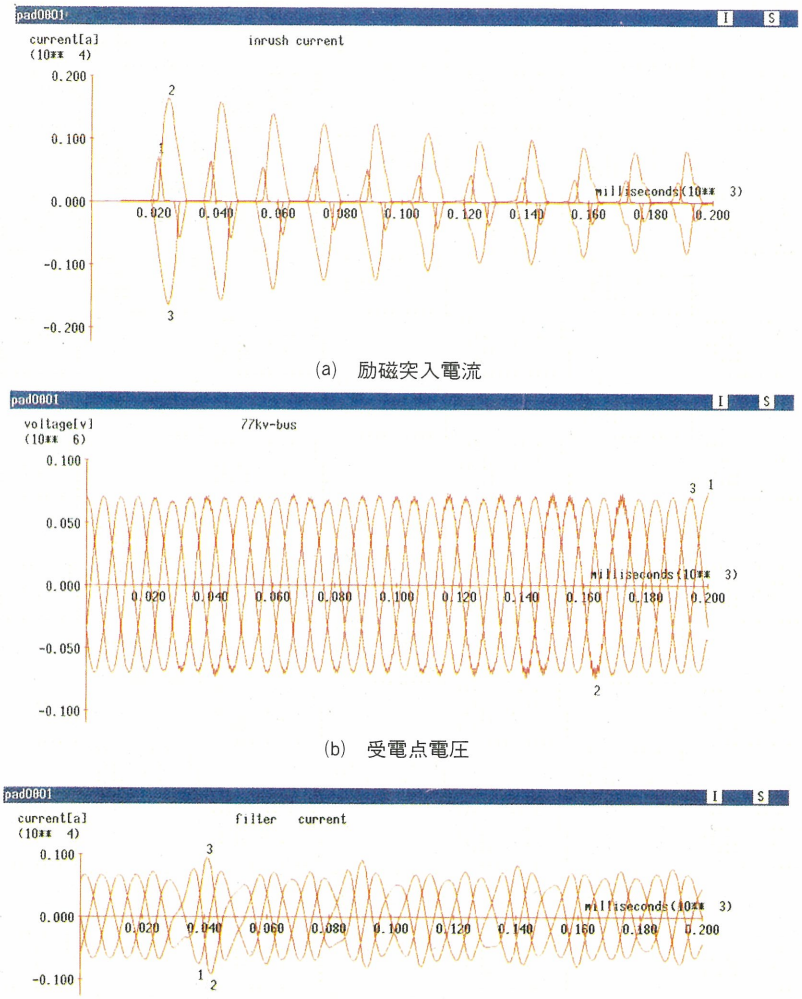


図1 系統図



(a) 励磁突入電流

(b) 受電点電圧

(c) 高調波フィルターB電流

図2 変圧器励磁突入電流解析
BPA-EMTP M39 apollo 版の画面出力例

図3 変圧器励磁突入電流解析
DCG-EMTP V2.1 Windows の画面出力例

励磁突入電流波形および受電点電位とフィルタ電流の変動波形の例を示す。高岳製作所ではこのような解析を受変電設備の計画段階で実施することで，系統に接続される機器の安全性を検討している。

3.3 送電線の誘導計算

併架送電線において停止回線には活線側からの誘導により定常的に誘導電圧・電流が生じている。送電線の接地装置の設計等で誘導の大きさを知る必要がある場合にEMTPの定常計算機能を用いてこれを算出することができる。この場合の線路定数の作成には，EMTPの持つ線路定数計算用の支援ルーチンであるLINE CONSTANTSおよびCABLE CONSTANTSを用いて，π型多相線路モデルを自動生成することができるので容易

表1 誘導電圧・電流の計算条件

	架空地線	上位回線	下位回線
線種	AS160	TACSR810	TACSR810
導体数	1	6	2
亘長（km）	10	10	10
電流（A）	—	10,730	停止
電圧（kV）	—	500	停止

CASE1：上位系2回線活（逆相配列），下位系2回線停止
CASE2：上位系1回線活，1回線停止（非接地），下位系2回線停止

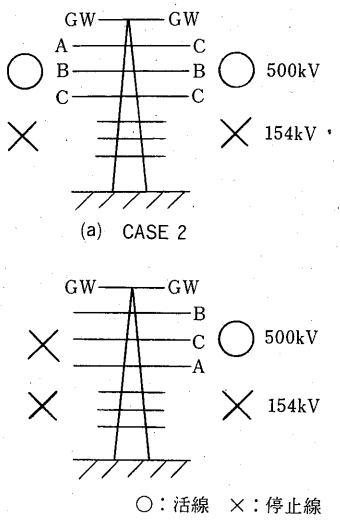


図4 誘導電圧電流の計算ケース

表2 誘導計算結果（最大誘導相のみ）

計算手法	静電誘導電圧 (kV)		電磁誘導電流 (A)		電磁誘導電圧 (kV)	
	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2
EMTP 計算値	37.5	58.2	317	978	1.12	7.77
文献(7)計算値	38	58	295	917	1.2	7.9

である。

表1，**図4** に示す併架送電系統の誘導計算に EMTP を適用した結果を**表2** に示す。**表2** より，誘導電圧・電流の計算値は，文献(7)の値に比べ十分な精度を有している。

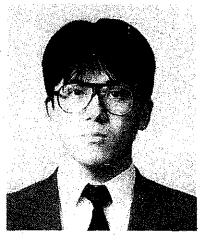
4. あとがき

EMTP の最近の動向と高岳における系統解析の例を紹介した。EMTP は，その汎用性から広範囲の系統現象の解析に適用でき，当面これに優る解析ツールは出現しないものと考えられる。

EMTP を含め解析ツールのユーザにとって，高機能化とともに操作性とコストパフォーマンスが重要な点となっている。その意味で ATP はますます広範囲で使われるようになるものと考えられ，DCG の Windows 版も期待できる。また，例えば現場の担当者が簡単な条件を与えるだけで計算結果を出力できるような，簡易パソコンソフトなども今後の1つの方向であろう。

参考文献

(1) 広瀬：「過渡現象解析プログラム EMTP の適用」，高岳レビュー，**30**，117（昭58）
(2) 雨谷：「過渡現象解析プログラム EMTP の最近の動向」，電気学会誌，**113**，936（平5.11）
(3) 広瀬，垰田：「アポロコンピュータで動く EMTP (M39)」，高岳レビュー，**31**，168（昭59.12）
(4) 変電所における雷サージの新評価法，電気学会技術報告，II部，No. 446（1992.11）
(5) 長岡：雷サージ線路モデル，日本 EMTP 委員会第1回A部門ワークショップ資料（1993.10）
(6) 長岡：「非線形インダクタンスを用いたフラッシオーバモデル」，電気学会雑誌，**111**，529(平3.5)
(7) 併架送電系統技術，電気協同研究，**33**，No. 6(昭53.3)



中山寿也
Toshiya Nakayama
数値計算の研究開発に従事

大羽良明
Yoshiaki Oba
次世代配電機器の研究開発に従事

社外発表一覧（その1）

発表者	発表先	発表テーマ	発表年月
広瀬英雄	IEEE Transactions on Reliability Vol. 42, No. 4	Estimation of Threshold Stress in Accelerated Life-Testing	93. 12
石原満宏	画像処理産業応用総覧発行：㈱フジテクノシステム	マシンビジョンによる寸法計測	94. 4

特集　数理解析技術

材料非線形を考慮した モールド機器の応力解析

野田武司*
虫賀正男**

内容梗概

モールド樹脂は例えばモールドトランスなどによく用いられており，その性質も比較的よく知られている。しかしその解析になるとモールド樹脂の持つ材料物性の非線形性が解析そのものやその結果の解釈を非常に困難なものにしている。本稿では，それらの困難に対してより実際に近い解析をするための方法についてのいくつかのトライアルと，その結果の設計へのフィードバック時の考察を行っている。

Finite Element Analysis Technique of Epoxy Resin Products

Takeshi Noda*
Masao Mushiga**

Synopsis

The dry-type Voltage-Transformer is made of epoxy resin. The poperties of epoxy resins are well-known. However, it is difficult to analyze the strength of epoxy resin products because of its material-nonlinearity. We introduce our way of analyzing molding goods made from Epoxy resins.

1. まえがき

高岳製作所の中でモールド樹脂（以下モールド）は多く使われており，モールドの一般的な物性についてもよく知られている。ところが，そのよく知られている部分というのは，常温のしかも比較的応力がかかっていない場合の物性なのである。われわれがこれまで行ってきたモールド商品の解析の経験からすれば，モールドの解析は時として，実に厄介で奥深いものである。

というのも，モールドはその配合等によってその性質が様々に変化するのであるが，一般に高温時や高負荷時には，ヤング率が低下するような特性を持つものであり，その場合には，解析を行うにあたり特別な注意が必要となるためである。例として，図1にモールドのS-S曲線の例をあげる。高負荷時には直線から大きくはずれてくるのがわかる。

もちろん，一般的なモールドの物性が保持されるような使用条件下でのシミュレーションを行う場合には，広く行われているように，金属に準じた取りあつかいをす

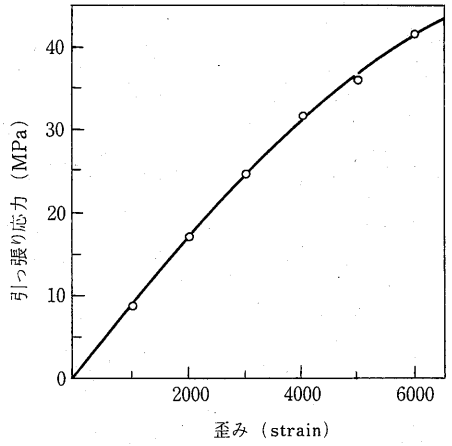


図1　Stress-Strain 曲線の例

*技術本部 技術開発センター　**タカオカ化成工業株式会社

るのは決して間違いではないが，それからはずれるような使用状態が想定される場合には，モールドの特長を反映した解析をおこなわなければならない。

ただし，エポキシモールドを用いた製品の解析にはまだ不明なことが多く，必ずしも確立された技術であるとは言い切れない部分もある。それも含めてここではモールドの応力解析について概説する。

1.1 応力の種類

材料力学の教科書[(1)]によるならば，破壊（あるいは破損）のメカニズムについては，諸説色々存在するのであるが，脆性材料に対しては，主に最大主応力を用い延性材料に対してはVon-Mises応力を用いて判断を行うことがよくなされている。(それぞれ材料力学的な破壊モデルで言う最大主応力説，せん断ひずみエネルギー説などに対応して用いられている。)

一方，材料の特性を表すデータとしては，一般に曲げ強度とか，引張り強度などが用いられることが多く，それらをどう組み合わせて評価するのか判断に困るところである。ところが，解析を行うメリットとしては，解析の時に使用した境界条件や応力条件が正しければ，応力の各値はすべて得ることができるため，使用状態で最も厳しいと思われる応力を用いた比較を行うことができるという点にある。

したがって，例えば脆性材料で曲げ方向の応力が強くかかるような場合は，使用状態における曲げ方向の最大主応力と，材料の曲げ強度を比較してやればよいし，引っ張り方向に応力が強いような場合は，最大主応力と材料の引っ張り強度の比較となるわけである。

もちろん，設計や解析する時間に非常に余裕がある場合においては，主応力およびVon-Mises応力の各方向の値すべてについて検討することが望ましいが，一般に設計する場合には，時間が限られている場合が多いため，こういったポイントを押さえた解析が重要である。

1.2 破壊強度と降伏点

以上，述べてきたように構造物の設計には構造解析は非常に有効であるのだが，ここに新しく，はたして設計段階で基準強度として，どんな値を用いるかという問題が頭をもたげてくる。くり返し荷重がかかり，しかも，その荷重による積年の変形が懸念されるような場合に，基準を破壊強度に取ってみても意味をなさないのである。例えば，金属であれば，0.2%耐力という値（または降伏点）を基準値に取るか，引っ張り（または曲げ）強度を基準値とするかは，その構造物の使用形態まで考慮して決定されねばならない。ところが，モールドの場合，一般に0.2%耐力に相当するものの取り決めが無いため，強度の基準値は各社のノウハウとされている部分に属する。一般的には先ほど述べたように物性が変化するため，使用される状態におけるモールドの性質を考慮して決定されることが多い。

2. モールド機器の応力解析例

2.1 GIS3相スペーサの応力解析

図2にGIS3相スペーサの応力解析例を示す。GISスペーサの場合，発生応力はガスの圧力によって生ずるのであるが，応力的には少し余裕のある設計となっている。そのため歪みの発生がそれほど大きくない。そのためヤング率を一定として線形応力解析を行ってやればよい。この解析においても，ヤング率に応力の低いときの値を用いて線形解析を行った。

この例のように，解析条件が応力によって付加され，しかも，その値がそれほど大きくならないことが予想されるなら，モールドを金属的に扱うこのような解析をすれば良い。

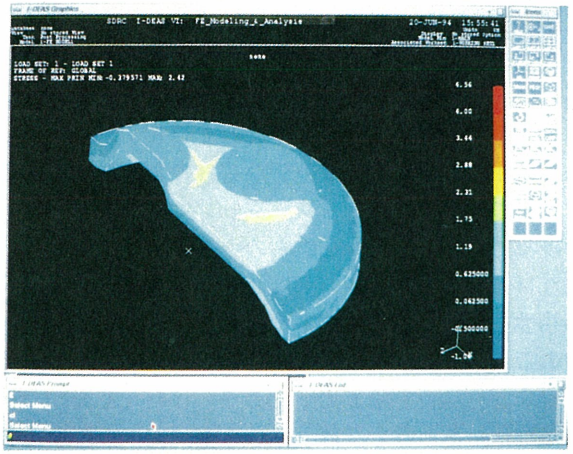


図2　GISスペーサの応力解析例

2.2 モールドコイルの解析

図3にモールドコイルの応力解析を例として示す。この場合，歪みが比較的大きく発生する領域まで使用することや，くり返し荷重が問題になること，使用温度域が広いことを考慮して，どの状態に対する解析を行っているのかを，しっかり認識した上で解析を行わなければならない。ちなみに，**図3**は高温時における解析例であり，ヤング率が低下し，かなりモールドがやわらかくなった場合の解析である。例えば，リニアモーター用モールドコイルのように，取り付け段差が問題となる場合，使用状態においては，歪み一定の条件で使用することになるので，エポキシモールドのStrese-Strain曲線を正確に解析に取り入れることは，非常に大きな意義を持つ。それゆえに，**図3**においては，エポキシモールドの持つ非線形性を考慮して解析を行ってある。その結果，非線形性を考慮しない場合に比較して実機試験との誤差が5割以上改善された。

どちらかというと，このような非線形性を考慮した解析が先ほどのGISスペーサの解析に比べて，モールドに特有な取り扱いを行った解析と言えるかもしれない。

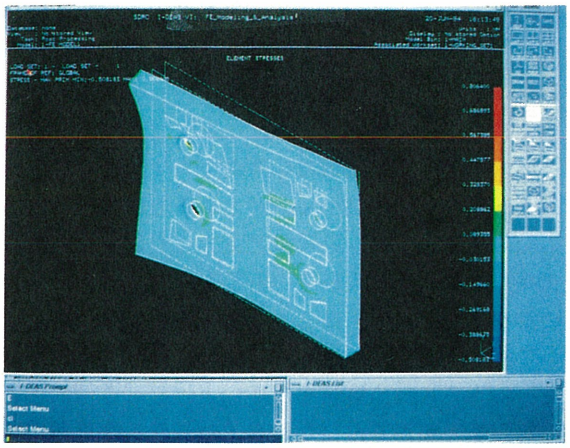


図3　モールドコイルの解析例

2.3　その他モールドの評価を行う上での注意

実は，モールドには〝なじむ〟という特長がある。例えば，モールドを階段のように段差がついた状態で，ボルトで締め付け固定してしばらく放置しておくと，しまいには形状が馴染んでしまい，その部分に発生しているはずの歪みによる応力が無くなってしまう。ところが，この現象は計算機による解析からみると，まことに厄介な現象で，決してシミュレーションに入らないという類の現象である。実は，これらの現象(〝なじみ〟または〝へたり〟)というのは，悪い面ばかりではなくて，うまくこの物性を利用すると，非常に都合のよい特性なのである。であるから，モールドの評価をするにあたって，計算機による応力解析を踏まえて，こういった計算機にのりにくい特性をあわせて評価することが，実は重要な仕事であり，解析担当者と設計および材料技術者が共同で評価をすることが大切であろう。

3．あとがき

以上，述べてきたように，モールドの解析はそのモールド樹脂の配合（とそれによって変化する物性）によって，その方法を考慮する必要がある。そればかりでなく，その使用状態や経年変化をも予測しながら解析を行わねばならない。それについても，まだ完全とは言いがたい面が多々あるのであるが，今後コンピュータの処理能力の向上とあいまって，その解析精度はますます高まっていくであろう。

参　考　文　献

(1)　平編：現代材料力学，(1970)，オーム社

野　田　武　司
Takeshi Noda
数値計算の研究開発
に従事

虫　賀　正　男
Masao Mushiga
モールド機器の開発
に従事

社外発表一覧　(その2)

発　表　者	発　表　先	発　表　テ　ー　マ	発表年月
松　尾　幸　蔵 *1堀　部　和　雄 *1森　　邦　男	農業機械学会誌 第56巻3号（1994）	二次元植物移動栽培装置による栽培実験	94. 5
広　瀬　英　雄	南山大学経営研究会	連続法による確率分布パラメータの推定	94. 6
*2梶　原　照　隆 神　藤　正　士 足　立　雅　彦	電気学会 開閉保護，高電圧合同研究会資料	マイクロ波アーク放電の生成とプラスチック分解への応用	94. 6
広　瀬　英　雄	International Conference on Statistics in Industry, Science and Technology	A Successful Maximum Likelihood Parameter Estimation in Skewed Distributions Using the Continuation Method	94. 7

*1三重大学　*2静岡大学

特集　数理解析技術

ATP を用いた 電力貯蔵システム用交直変換装置の動作解析

大　島　正　明*
原　田　英　二*
高　山　勝　見**
黒　澤　　章**

内　容　梗　概

パソコン上で動作する電力系統瞬時値過渡解析プログラム ATP（Alternative Transients Program）を用い
力系統に接続された電力貯蔵システム用交直変換装置 PCS（Power Conditioning System）の動作についての
った。

本稿では，250kW と 1MW の変換器について行った解析結果について報告する。

Analysis of Operation of Power Conditioning Systems for Power Storage Systems

Masaaki Ohshima*
Eiji Harada*
Katsumi Takayama**
Akira Kurosawa**

Synopsis

The operation of the power conditioning systems (PCS) for the power storage system connected to
network system was analyzed by running the alternative transients program (ATP) on a personal comput
paper reports the results of analyses of 250-kW and 1-MW power conditioning systems.

1. まえがき

近年，電力需要のピーク化の進展，負荷率の低下等に対して，負荷平準化は大きな課題となつている。この課題の実用的解決の方法の１つとして，貯蔵効率が高くコンパクトなナトリウム―硫黄電池（NaS 電池）を用いた電力貯蔵システム PCS（Power Conditioning System）が注目を浴びている。

この PCS とは，高効率での充放電が可能でしかも貯蔵エネルギー密度の高い NaS 電池と，電力系統に連系された双方向性交直変換器とを組合わせたシステムで，夜間の余剰電力を利用して充電を行い，それを昼間の電力需要の高い時間に電力系統に放電を行うシステムである。

このシステムは，比較的需要家と近接した変電
は需要家に設置することを目的とし，従来負荷平
ために使用されている揚水発電所と比べてその送
ト等の低減が期待できるものである。

近年のめざましいパソコンの性質の向上に伴い
ミニコンクラスの計算機を必要とされていた計算
コンを用いて比較的手軽に行えるようになってき
回は，出力容量が 250kW と 1MW の NaS 電池用
換装置について，各々の変換器に用いる半導体素
定，交流フィルターの設計に反映させるために，
（Electro-Magnetic Transients Program）の
版である，ATP（Alternative Transients Progr
用いて系統連系動作時のシミュレーションを行っ

*東京電力株式会社　**技術本部 技術開発センター

特集　数理解析技術

最適設計に適したP法有限要素法による電界・応力解析

小竹　孝*

内容梗概

高岳製作所では，P法有限要素解析ソフトウェアであるMECHANICA（構造解析用のMechanica Structure，熱伝導解析用のMechanica Thermal）を導入して，主に電力用機器の設計の基礎資料として活用している。P法の特長は，メッシュ分割が容易であり，かつ計算精度の管理が可能であること，感度解析や最適問題に適していることである。従来のH法有限要素解析とP法有限要素解析とを比較した結果，特に計算精度で問題になるような点は見当らず，H法と同様，十分機器設計に使用できることがわかった。本稿では，いくつかの適用例を紹介する。

Electric Field and Stress Analysis by P-Finite Element Method

Takashi Kotake*

Synopsis

Takaoka Electric has been using MECHANICA (Mechanica Structure for structual analysis, Mechanica Thermal for heat transfer analysis) which is based on P-Finite Element Analysis (P-FEA) for designing electric power apparatuses. P-FEA has good properties such as easy mesh generation, easy numerical error control, controlable sensitivity and optimal design. Comparing P-FEA with H-Finite Element Analysis, P-FEA can be widely used in designing electric power apparatuses.The article introduces some examples using MECHANICA.

1. まえがき

有限要素解析（FEA; Finite Element Analysis）は，汎用ツールやハードウェアの進歩により，十数年前の導入当初に比べれば，格段に使い易くなっている。しかし，解析の専門家でない一般の設計者が，時折FEAを使いたいときに，次のような問題があった。

(1) CADからFEAに形状がうまく変換できないので，形状作成に時間がかかる。

(2) メッシュ分割の作業が煩雑である。

(3) どのようなメッシュ分割をしたらよいのかが，その精度も含めてわからない。

(1)の問題については，さまざまな努力がなされ，ある特定のCADについては，かなり高機能のデータ変換が可能となっている。しかし，解析に必要な形状とCADの形状とは異なるため，何らかの手作業が必要である場合があった。次に，(2)，(3)の問題については，細かいメッシュ分割作業が必要で，かつ精度の管理（誤差評価）が可能なアダプティブP法と呼ばれる手法が，最近，開発されている。このP法を用いた汎用FEA解析ツール（Rasna社製のMECHANICA）が少し前に使用可能となり，国内では熱狂的に支持されて，急激に広まった感がある。また，この解析ツールは，最適化問題にも優れていることから，解析の専門家にとっても十分に魅力的なものである。そこで，高岳製作所においては，従来より，I-DEASやNASTRANなどのH法を用いてさまざまな機器の解析を行ってきた[6],[7]が，今回新しくMECHANICA（構造解析用にMechanica Structure，熱伝導解析用にMechanica Thermal）を導入した。

本稿では，アダプティブP法FEAの概要と，導入に際して行った従来のH法有限要素解析との比較を行い，また，実際の問題への適用例を紹介する。

*技術本部 技術開発センター

2. MECHANICAの理論的背景

2.1 P法有限要素法とは

P法有限要素法は，CAE用の構造解析・設計ツールとして脚光を浴びているが，この章ではその理論について述べる。有限要素法において，解の精度をあげるためには，要素の分割を細かくしていく方法（H法）が一般に行われてきた。この他に，要素内で仮定している変位に高次関数を適用する方法（P法）も提案されていたが，有限要素法の世界では，精度の向上のために変位関数の次数を上げるのはあまり有効でなく，要素サイズを小さくするのがもっとも有効であると長い間信じられてきた。しかし，Babuska[3]によって変位関数の次数を上げることも有効であることが証明され，P法が脚光を浴びるようになった。

H法とP法の原理を簡単に示すと次のようになる。**図1**のようなグラフを関数近似しようとするとき，折線で近似するのがH法の考え方である。分割を小さくすれば良い近似になっていき，したがって精度もあがる。P法では，2つの1次関数といくつかの多次関数（この場合は2次と3次）の和で表す（**図2**参照）多次式を変位関数に使用する試みは以前からあり，中間節点を持つ要素がそれである。しかし，インプットデータ作成が複雑になる他に，種々の技術的問題点があり，現実にはあまり使われていない。そこで，要素分割は不変のままで，中間節点も作らず，解の精度を管理することを目的にして考案されたのがP法である。

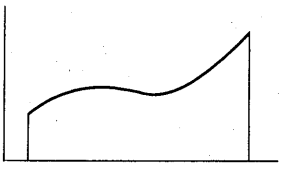


図1　近似する曲線

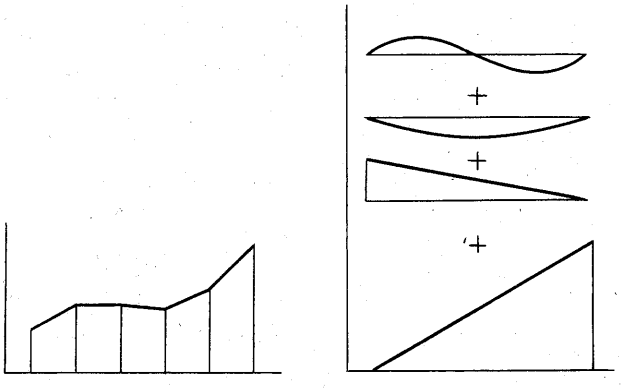


図2　H法とP法の原理

P法を適用するためには，中間節点なしに変位関数の次数を上げられる要素が必要で，これにはZienkiewicz等[1]が開発したhierarchical要素をもちいている。Peano[2]がこれを改良して，現在のP要素ができあがった。

2.2 Adaptive P法とは

P法有限要素をもちいて，精度を監視しながら辺あるいは面上の変位の次数を反復しながら上げていくのがAdaptive P法である。

辺上あるいは要素上の変位関数の上げかたにはいろいろの方法がある。すべての辺あるいは要素の変位関数を同時に上げてゆく方法も考えられるが，精度が十分でている領域では変位関数を上げる必要はないので，MECHANICAでは計算時間を短縮するため，次のような方法をとっている。（**図3**参照）

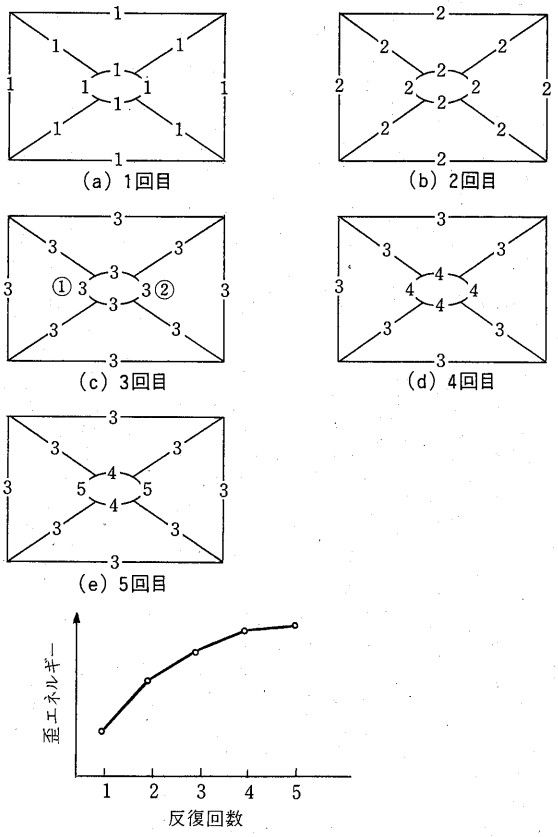


図3　adaptive P法

(1)　1回目はすべての辺上の変位を1次式として初期計算を行う。

(2)　すべての辺上の変位を1，2次式の組み合わせとして2回目の計算をする。

(3)　(1)と(2)の結果を比較して，収束していればその辺上の近似はこれで十分だからそのままとし，収束していない辺上の変位を1，2，3次式の組み合わせとして計算する。

(4)　(2)と(3)の結果を比較して，収束していればその辺

上の近似はこれで十分だからそのままとし，収束していない辺上の変位を1，2，3，4次式の組み合わせとして計算する。

(5) これを繰り返しての相対誤差がユーザの要求以下になるまで続ける。

2.3 P法の収束性

Babuska[3]によってP法の収束性が証明されている。P法とH法の収束性の比較については，いくつかのデータが発表されている[4][5]が，P法は自由度に対する収束の速さがH法の2倍であると言われている。詳細は文献を参照されたい。

2.4 P法の長所と短所

2.4.1 P法の長所

(1) 粗い要素分割でよいため，データ入力の作業が大幅に節減できる。また，応力集中箇所をとくに細かく分割するといった配慮が不要である（もちろん配慮したほうが計算時間は速くなるが)。

(2) 計算精度が管理できるため，安心して解析結果を利用できる。

(3) 同一の計算精度を得るのに，十分な細かい分割の有限要素法にくらべて，要素数が大幅に少ないため形状変化をともなう感度解析や最適問題と結び付けやすい。

2.4.2 P法の短所

(1) 非線形問題（とくに弾塑性問題）には適さない。

(2) 計算時間の推定ができない。

3. H法とP法の比較

ここでは，電界解析における有限要素法のH法とP法の計算精度の比較を行った。ソフトウェアは，H法にはSDRC社のI-DEAS（ワークステーション版）とALGOR社のAlgor（パソコン版），P法にはRasna社のMechanica Thermalを使用した。

(I-DEAS，Algorは，汎用解析用のソフトウェアであるが，I-DEASはその中の〝HEAT TRANSFER〟（熱伝導解析)，Algorはその中の〝ELECTRO STAT〟（電界解析)を使用した。また，Mechanica Thermalは熱伝導解析用のソフトウェアである。しかし，なぜI-DEASとMechanica Thermalを電界解析に使用できるのかというと，電界を求める偏微分方程式と熱伝導を求める偏微分方程式とはアナロジカルである。ここに，支配方程式は次のとおりである。

電界の支配方程式　：$\mathrm{div}(\varepsilon\ \mathrm{grad}\phi)=0$

(ϕ：電位　ε：比誘電率)

熱伝導の支配方程式：$\mathrm{div}(K\mathrm{grad}T)=0$

(T：温度　K：熱伝導率)

計算モデルには，簡単に解析的な解が求められるモデルの2種類（同一材料のみの場合，異なる材料が混存する場合）を選んだ。

モデル1は，同一材料のみの場合で，同軸円筒モデルである。充電部（円筒の内周部）に1V，接地部（円筒の外周部）に0Vの境界条件を入力し，材料特性として，比誘電率は$\varepsilon_1=1.0$とした（**図4**参照)。

モデル2は，異なる材料が混存する場合で，同軸円筒モデルである。充電部(円筒の内周部)に1V，接地部(円筒の外周部）に0Vの境界条件を入力し，材料特性として，比誘電率は$\varepsilon_1=100$，$\varepsilon_2=10$とした（**図5**参照)。

モデル1，モデル2ともに，計算は2次元軸対称で行った。それぞれの電位の計算結果を**表1**，**表2**に示す。（計算結果の出力点は，**図4**，**図5**を参照のこと）

表1，**表2**より，モデル1，モデル2の両方において，H法のI-DEAS，Algor，P法のMechanica Thermalのそれぞれの電位計算結果は，非常によく一致している。また，H法（I-DEAS，Algor）でのモデルの要素数に比べて，P法（Mechanica Thermal）でのモデルの要素数は，非常に少なくなっていることがわかる。

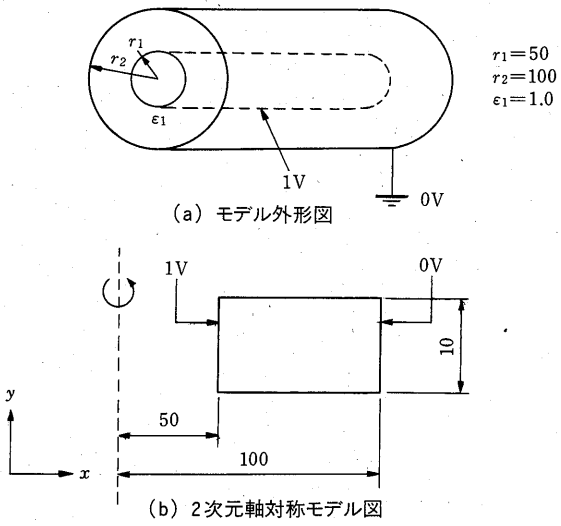


図4　モデル1（同一材料のみの場合）

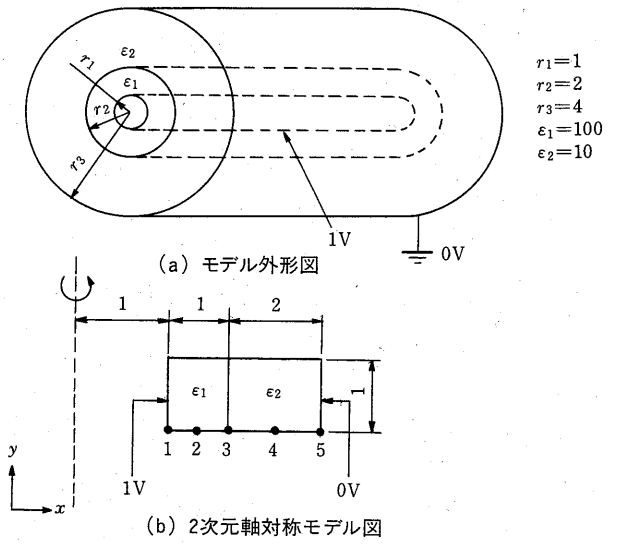


図5　モデル2（異なる材料が混存する場合）

表1　モデル1での電位計算結果比較　[V]

x	理論値	I-DEAS (要素数 20)	Algor (要素数 20)	Mechanica Thermal (要素数 1)
50	1.0000000	1.0000	1.00000	1.00000
55	0.8624966	0.8625	0.86253	0.86261
60	0.7369656	0.7370	0.73703	0.73693
65	0.6214884	0.6216	0.62156	0.62136
70	0.5145733	0.5146	0.51465	0.51446
75	0.4150376	0.4151	0.41511	0.41503
80	0.3219281	0.3220	0.32199	0.32201
85	0.2344653	0.2345	0.23451	0.23457
90	0.1520032	0.1520	0.15204	0.15204
95	0.0740061	0.07401	0.07402	0.07394
100	0.0000000	0.00000	0.00000	0.00000

表2　モデル2での電位計算結果比較　[V]

調査点	厳密解	I-DEAS (要素数 48)	Algor (要素数 48)	Mechanica Thermal (要素数 2)
1	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
2	0.94682	0.94686	0.94686	0.94674
3	0.90909	0.90908	0.90909	0.90909
4	0.37731	0.37768	0.37770	0.37730
5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

4. MECHANICAによる解析例

P法有限要素法(MECHANICA)による解析例を紹介する。

4.1 Mechanica Structure

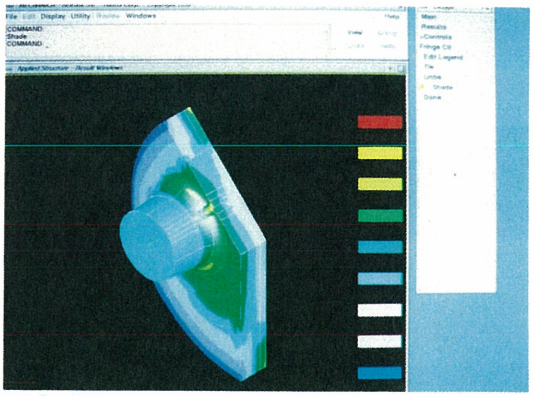
Mechanica Structureによる絶縁スペーサの3次元応力解析を行った。荷重条件は，スペーサの凹面方向から加圧し，拘束条件は，スペーサの外周を6自由度すべて固定した。この条件で計算を行ったときの最大主応力応力分布図と変位図を**図6**に示す。相間部分で最大値がでているのがわかる。また，このフルモデルの要素数は312要素であり，3次元であるにもかかわらず，非常に少なくなっている。これをH法を用いてモデルを作成しようとすると，おそらくP法の数十倍の要素数になるであろうと予想される。このことから，モデル作成の時間が短縮されることが予想される。

4.2 Mechanica Thermal

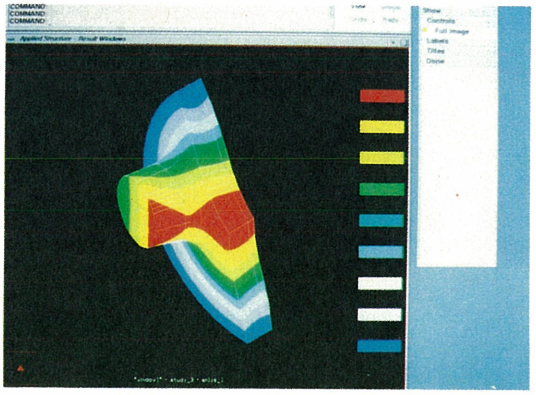
Mechanica Thermalによるモールド変圧器の2次元軸対称電界解析を行った。境界条件は，高圧コイル側を充電部，低圧コイル側を接地部とした。この条件で計算を行ったときの電位分布図と電束密度分布図を**図7**に示す。また，H法のI-DEASで作成したときのメッシュ分割図との比較を**図8**に示す。これら2図より，メッシュ分割数の差が一目瞭然である。

4.3 最適設計

最適設計を行うための解析モデルを**図9**に示す。ここ

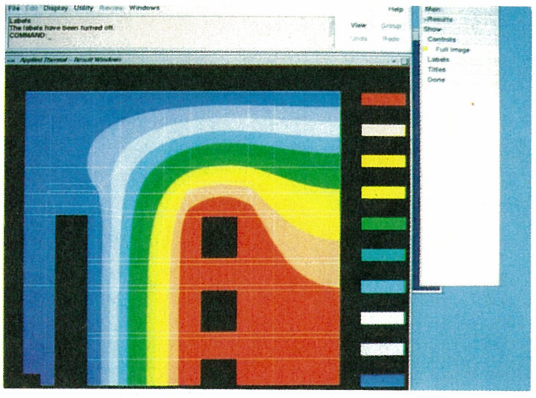


(a)　最大主応力応力分布図

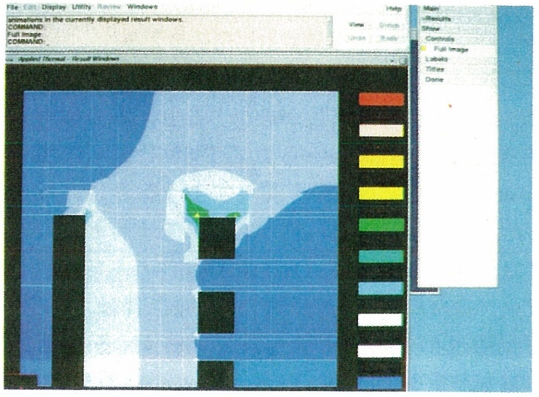


(b)　変位図

図6　最大主応力応力分布図と変位図

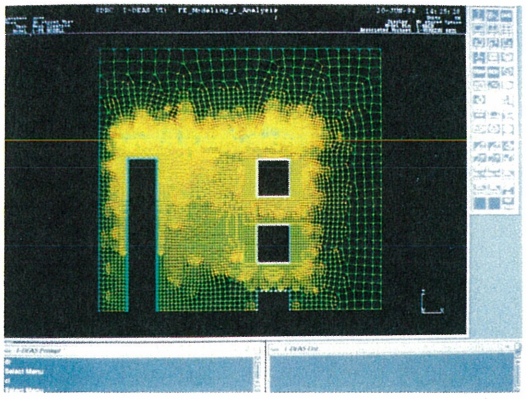


(a)　電位分布図

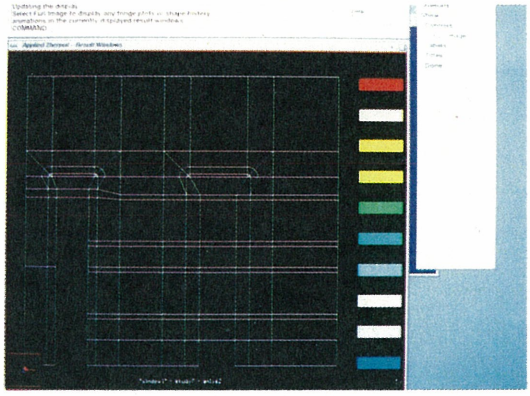


(b)　電束密度分布図

図7　電位分布図と電束密度分布図



(a) I-DEAS



(b) MECHANICA

図8 メッシュ図の比較

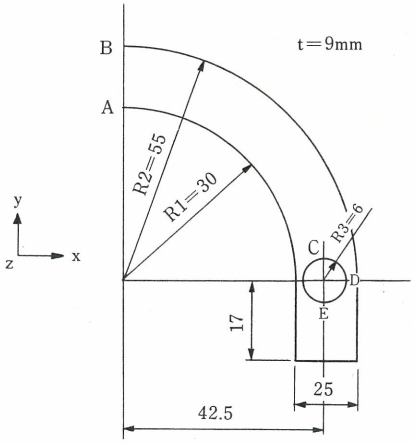


図9 最適設計用解析モデル

では，このモデルが質量が最小となり，さらに応力値の制約条件（Von Mises応力≦196MPa）や設計変数（45mm≦R2≦55mm）を満たすような形状の最適化を行った。モデルは，対称性から1/2モデルとした。拘束条件は，辺ABのX軸方向を対称条件として拘束し，点Aは全自由度固定とした。また，荷重条件は，辺CD，DEのそれぞれに1043.7Nずつ合計2087.4NをX軸方向に引っ張り荷重を加えた。Von Misesの応力分布に関し，初期検討モデルでの分布と最適化後の分布を**図10**に示す。このことから，最適化を行えば，Von Mises応力は

(a) 初期モデル

(b) 最適化モデル

図10 初期モデルと最適化モデルのVon Mises応力分布図

196MPa，R2＝48.65mm，質量が95.5kgとなった。一方，初期の設計では，Von Misesの応力は124MPa，R2＝55mm，質量は139.9kgであった。

5. あとがき

H法と同様に，P法の計算結果もまた理論解と非常によく一致しており，P法でも十分に使えることが確認できた。また，P法を使うことにより，モデル作成が容易になる場合もあり，モデル作成時間も短縮されるようになった。H法とP法とを問題によって使い分け，P法を最適設計にも使っていきたい。

今後は，Auto CADなどのCADとの連携や他の解析ソフトウェアとのインターフェイスなどという問題点を解決しながら，合理的に短期間で，誰にでも使えるFEAシステムを目指したいと考えている。

参考文献

(1) O. C. Zienkiewicz & R. L. Tailor : The Finite Element Method (Forth Edition) MacGraw-Hill, 1989

(2) A. G. Peano : Hierarchies of conforming finite element for plane elasticity and plate bending, Comp. Math. with Appl., 2, 1976

(3) I. Babuska & M. Dorr : Error estimates for the combined h and p versions in the finite element method, Numer. Math., **25**, 257, 1981

(4) O. C. Zienkiewicz & A. Craig : Adaptive Refinement, Error Estimates, Multigrid Solution, and Hierarchic Finite Element Method Concepts, Chapter 2 of 'Accuracy estimates and adaptive refinements in finite element computations', John-Wiley, 1989

(5) B. A. Szabo : Estimation and Control of Error Based on p Convergence, Chapter 3 of 'Accuracy estimates and adaptive refinements in finite element computations', John-Wiley, 1989

(6) 広瀬他：「有限要素法による非線形非定常熱伝導解析プログラムHTTの開発とその応用」，高岳レビュー，**32**，185（昭和61年）

(7) 広瀬：「EWSを用いたCAEシステムと解析事例の紹介」，CAEユーザ・シンポジウム'87

小竹　孝
Takashi Kotake
数値計算の研究開発に従事

社外発表一覧（その3）

発表者	発表先	発表テーマ	発表年月
加藤敬一 山田康久 鈴木浩文 松尾幸蔵	平成6年電気学会 電力・エネルギー部門大会	SF_6ガス中アークによるGIS容器内圧力上昇	94. 7
*3竹内信彦 *3根尾定紀 鈴木浩文 加藤敬一	平成6年電気学会 電力・エネルギー部門大会	外部アンテナによる変電所内部分放電検出	94. 7
東原　隆	日本学術振興会 先端材料技術第156委員会第4回研究会	—高電圧機器分野におけるモールド機器— エポキシ基材成形品とその要求される性能	94. 7
*4大槻久夫 *4中道好信 *5高柳雅巳 *6横家　力 *7山田幸雄 *8牧野喜郎 *9甲　謙二 山田剛彦	平成6年電気学会 産業応用部門全国大会	浮上式鉄道用多頻度動作高信頼性真空開閉器の開発	94. 8

*3中部電力株式会社　*4財団法人 鉄道総合研究所　*5東海旅客鉄道株式会社　*6日本鉄道建設公団　*7株式会社 明電舎
*8富士電機株式会社　*9日新電機株式会社

特集　数理解析技術

身近になったFEA Algorによるパソコン CAE

野田武司*
岡原　淳**

内容梗概

最近では設計時に有限要素法を用いた解析（FEA）を行いながら設計をすすめていく手法がかなり一般的に用いられるようになった。しかしながら大型計算機やワークステーションの上で動く有限要素法解析ソフトの価格は高く，技術者にFEAを使ってもらう上での一番の障害であった。高岳製作所ではそのような障害を取り除くためパソコンによるFEAについての調査・研究を行い一定の成果を得ている。今回はそのパソコンFEAについて概説する。

Personal Finite Element Analysis by Algor

Takeshi Noda*
Jyun Okahara**

Synopsis

Many engineers want to use FEA techniques for mechanical desingn. Recently, the ability of PCs is further improved. So, we decide to use FEA software running on PCs. It is advantageous to use Algor when we want to analyze moderate problem within 10,000 Elements.

1. まえがき

最近では設計者にとってCADツールは機械および回路図面を書く上ではなくてはならないツールとなった。それは何もそのでき上りの美しさだけでなく，そのデータの可搬性においても手書きのものとは比べ物にならないほど利便性があるからである。一方昨今では製品設計をする場合にあらかじめ計算機でシミュレーション（CAE）を行ってその設計の妥当性を確認するケースも非常に多くなってきている。当然この両者の間でのデーターの交換性という問題は重要な問題となってくる。

最近の傾向として，「CADは高価なワークステーションではなく安価な（そして機能も充実しつつある）パソコン上で」という動きがある。特に高岳製作所の場合，CAD端末をできるだけ多くというニーズからCADはほとんどパソコンCADである。ところがCAEのソフトは未だに高価なワークステーション上で動くものがほとんどであるため，CADに比較して使用できるマシンに大幅に制約が生ずるのが現状であった。

そこで高岳製作所では設計技術者がCADと同じ感覚で使用でき，このCADとCAEのギャップを埋めるようなパソコン上で動くCAEソフト（米ALGOR社のCAEソフトAlgor）の試験的導入と技術者教育での教育の実施を行っている。

今回は，このAlgorでの解析事例について紹介する。

2. Algorの動作するプラットホーム

1994年4月現在AlgorはIBMまたはその互換パソコン（ただしCPUはi386SX以上でありCo-processor搭載）およびDEC（DECstation），HP（HP9000），IBM（Power Station），SGI（Iris），Sun（Sparc）の各ワークステーションで動作可能である。価格的にはパソコン版はWS版よりも廉価であり，最近のパソコンの能力向上もあってWS版との機能およびスピード面でのデメリットはあまりない。それに大規模な計算はやはりサーバークラスのマシンを用いて，大規模解析に適したソフトウェア（例えばMSC社のNASTRAN）で行うのでAlgorではある程度までの規模が計算できればよい。ま

*技術本部 技術開発センター　**小山事業所 電力用コンデンサ開発プロジェクトチーム

た何よりもCADの動いている同じパソコンの上で動作できるというのは大きなメリットである。

3. Algorによる解析の実例

3.1 電界解析 — GIS内部の3次元電界解析

図1は，GIS内部の3次元電界解析をAlgorで行ったものである。要素数10,000ほどのこの計算を行うのにi486SX（66MHz）のCPUを持ったマシンで40分程度の時間を要する。

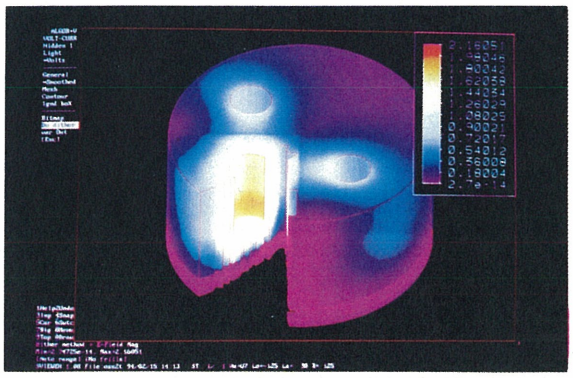


図1　GISの内部電界解析例

3.2 構造解析 — 絶縁スペーサの3次元応力解析

図2は，絶縁スペーサの3次元応力解析である。要素数約9,000のソリッド要素を用いて解析を行った。実際この程度の大きさがAlgorで解析を行う上限であると考えられる。これ以上の大きさのモデルは，設計者が行うよりも解析専門の技術者が行うべきであろう。このモデルを計算する上で要したディスク容量は約300MB，解析時間は300分程度であった。なお計算に高次要素は用いておらず，すべて1次要素である。

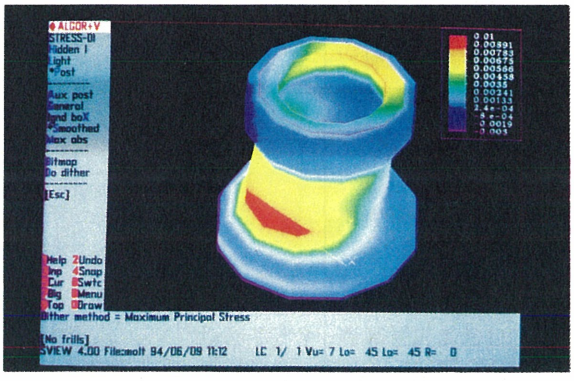


図2　絶縁スペーサの応力解析例

3.3 熱応力解析 — 取り付け台座の3次元熱応力解析

図3は，取り付け台座の3次元熱応力解析である。周囲の温度が20度から100度へと変化した場合についての解析を行った。また，対象条件を考慮して1/4モデルでの解析を行っている。要素はソリッド要素で要素数はおよそ10,000である。解析時間は150分であった。

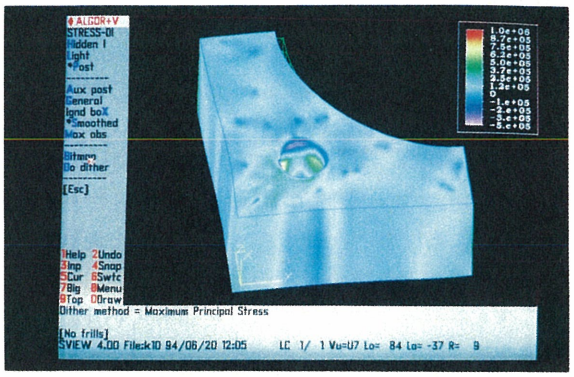


図3　取り付け台座の熱応力解析計算例

3.4 熱伝導解析 — トランスの熱伝導解析

図4は，トランスの熱伝導解析である。解析は中央断面における2次元解析とした。

要素は2次元シェル要素を用い，要素数は約2,000。解析時間は15分であった。

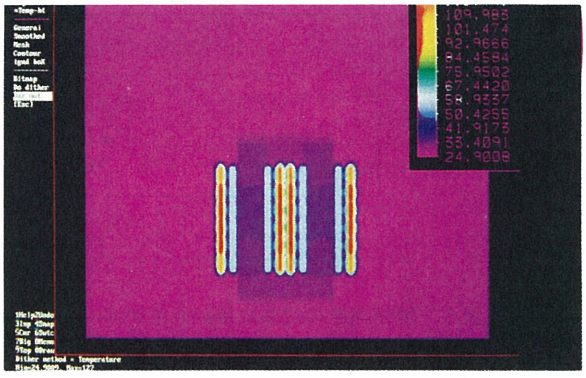


図4　トランスの熱伝導解析計算例

3.5 流体解析 — シート巻きトランスのガス流解析

図5は，シート巻きトランスのガス流解析である。Algorの流体解析パッケージには温度がファクターとして入らないので，温度依存部分は考慮していない。要素数は約2,500で解析時間は10分である。

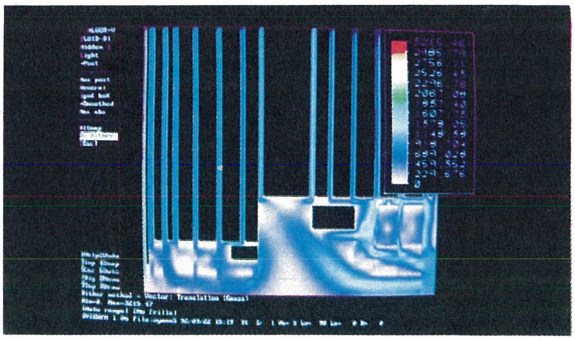


図5　シート巻きトランスのガス流解析例

4. Algorの解析速度

Algorの解析速度がどの程度のものかを知るために，

他の代表的な構造解析ソフトであるMSC社製NASTRANやSDRC社製I-DEASとの比較を行った。それぞれのソフトの動作しているプラットホームはNASTRANがConvex C201, I-DEASがIRIS 4D 310/GTX, Algorが Mitac 4060G（66MHz ODP付き）である。なお解析には**図6**に示すスパナのモデルをI-DEASで作成したものを用い，それをNASTRANおよびAlgorのデータに付属のツールをもちいて変換して解析した。なお解析には3次元ソリッド要素（1次）を用いている。

結果を**表1**に示す。モデルが小規模なのでConvex上で動作しているNASTRANには不利なデータとなってしまったが，AlgorはI-DEASと比較してもほとんど遜色なく，このようなケースではNASTRANよりも高速であるという結果を得た。もちろんモデルの規模が大きくなってくればこの結果は当てはまらないが，Algorが小規模解析用途として用いられることを考えれば立派な成績であろう。

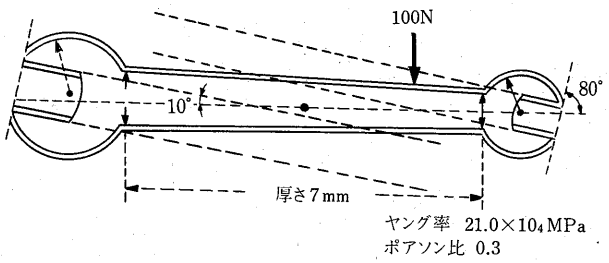


図6　解析速度の比較に用いたモデル

表1　解析ソフトによる処理時間

	NASTRAN	I-DEAS	Algor
解析時間	15.0min	7.0min	9.1min

5. Algorの解析精度

ここではAlgorの解析精度を検証するために，理論解のあるモデルについてAlgorとI-DEASで解析を行った。**図7**にそのモデルを，解析精度を**表2**に示す。ここで，AlgorおよびI-DEASでは解析に1次要素を用いて計算を行っている。

表2からも明らかなようにAlgorの計算精度が特に悪いという結果はでていない。

また比較的大規模な計算を行った場合の解析精度のチェックの意味で**図6**のスパナの例についての最大変位の比較を**表3**に示す。この結果からも特にAlgorの計算精度は問題ないという結論を得た。

6. あとがき

今回Algorに使用したマシンは台湾製の廉価なマシンで，今となっては特に計算が速いというマシンではない。にもかかわらず小規模な問題の範囲ではあるがこのような実用範囲内の性能を示したということは，CADのパソコンへのダウンサイジングとともにこのようなCAEソフトも同じパソコンにインストールしておいて，必要に応じて解析で確認しながら設計していく方向への強い時流を感じさせるものであった。とはいっても大規模で緻密な計算も一方で要求されていくであろうから，CAEの2局化が今後すすんでいくということになるであろう。

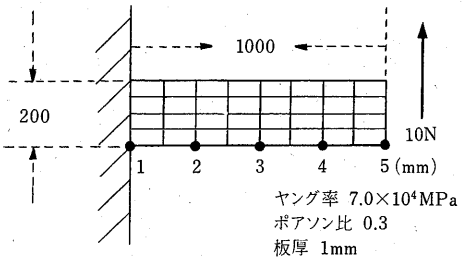


図7　解析精度の比較に用いたモデル

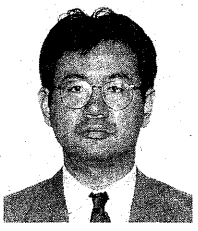
表2　各ソフトでの精度　　変位（mm）

節点番号	Algor	NASTRAN	I-DEAS	理論解
1	0	0	0	0
2	6.597E-3	6.557E-3	6.557E-3	6.140E-3
3	2.302E-3	2.287E-3	2.287E-3	2.232E-3
4	4.612E-2	4.583E-2	4.583E-2	4.520E-2
5	6.598E-2	7.215E-2	7.215E-2	7.143E-2

表3　最大変位値の比較

	Algor	I-DEAS	NASTRAN
最大変位	0.07083	0.07028	0.07059

付記；Algorについては高岳製作所情報システム事業部が国内の代理店となっています。



野田武司
Takeshi Noda
数値計算の研究開発に従事

岡原　淳
Atsushi Okahara
電力用コンデンサの開発に従事