

電力ケーブル機器の 電界解析自動実行システムの開発

中村 悠一*・結石 友宏・臼井 美岐

Designer-Oriented Electric Field Analysis System for Power Cable Accessories — by Yuuichi Nakamura, Tomohiro Keishi and Miki Usui — In a power cable accessory, insulators need to prevent dielectric breakdown over a long period of time. For this purpose, electric fields generated in the accessory must be controlled so that its maximum electric field can remain small. Since the power cable accessory is composed of multiple insulators with complicated structures, the calculation of an electric field distribution requires numerical simulations using either the finite element method or other mathematical techniques.

Sumitomo Electric, with over 30 years experience of working on electric field analysis, established an analytical method that leads to a solution with high accuracy. Thus far this kind of analysis has been conducted by CAE (computer aided engineering) analysis engineers. However, it was expected that the designers can conduct the analysis themselves so that the established analytical method is integrated into the design process of a product. Therefore, we have automated all the analysis processes and developed them into a system. The system displays results calculated from input CAD (computer aided design) data through simple operation. As a result, the analytical technique has been successfully transferred to the design section.

Keywords: power cable accessories, electric field, electric field analysis, finite element method, designer-oriented system

1. 緒 言

電力ケーブル機器の設計では、機器を構成する絶縁体が長期間に渡り絶縁破壊を起こさないように設計することが求められる。これを可能にするには、電力ケーブル機器の各部に発生する電界を制御し、最大電界を十分小さな値とする必要がある。電力ケーブル機器は複数の絶縁体で構成され、形状も複雑なため、それに伴う複雑な電界分布を求めるには、有限要素法などによる数値的な解法によるシミュレーションが不可欠である。

当社では30年以上前から電界解析による電界分布予測に取り組んでおり、精度よく解を求める技術は確立されている。一方、これまでこの解析は解析専任の技術者が実施してきたが、技術的に確立された解析は設計者自身が実施することで設計工程に組み込むのが理想である。これまでも何度か技術移管に向けた取組みとして設計部門の技術者への教育などが行われてきたが、①技術習得に時間がかかる（半年以上）、②精度確保のために解析時間（作業時間）がかかるなどの問題があり実現できなかった。

そこで解析の全工程を自動化し、CAD^{*1}データから結果の表示までを簡単な操作で行えるシステムを開発することで、設計部門への技術移管を行った内容について述べる。

2. 電界解析

電界解析は、解析対象の使用周波数や物性値、位相などの条件に応じていくつかの分類に分けられる。解析を実施するには、用途に応じてそれらを選択する必要がある、それぞれ用いられる製品も異なる。

電界解析はマクスウェル方程式より得られる(1)式を用いて解析を行う。

$$\text{div}(\hat{\epsilon} \mathbf{E}) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\hat{\epsilon}$ ：複素誘電率 ($\hat{\epsilon} = \epsilon + \frac{1}{j\omega\rho}$)、 ϵ ：誘電率、 ρ ：抵抗率、 \mathbf{E} ：電界、 ω ：角周波数 ($\omega = 2\pi f$)、 f ：周波数である。表1および図1に(1)式を各用途、条件(物性値、周波数)による分類別に整理した図を示す^{(1),(2)}。

表1 電界解析の分類と用途

分類	必要な物性値	用途
静電界解析	誘電率 ϵ	交流電力ケーブル機器
複素電界解析	誘電率 ϵ 抵抗率 ρ (導電率 σ)	交流電力ケーブル機器 ・半導電性材料を使用した機器 ・三相交流の位相を考慮
直流電界解析	抵抗率 ρ (導電率 σ)	直流電力ケーブル機器

(注) 電導率 $\sigma = 1/\rho$

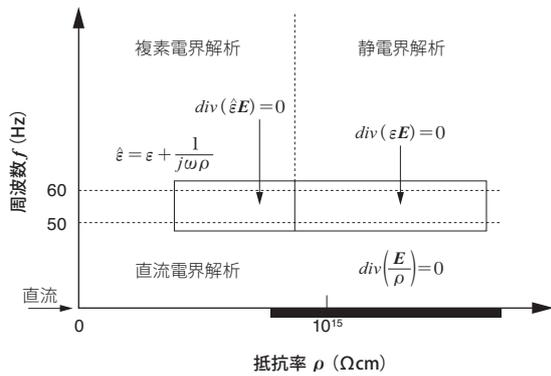


図1 電界解析の分類

静電界解析は絶縁体の誘電率のみを考慮して解析を行うが、ここで用いる誘電率は通常一定値となるため、この解析は線形解析となる。複素電界解析には2種類の解析がある。半導電性材料を使用する機器などで誘電率と抵抗率(導電率)の両方を考慮する解析と、三相交流の各相間断面の解析などで誘電率のみを考慮し三相交流電圧の位相を与える解析である。直流電界解析は絶縁体の抵抗率(導電率)のみを考慮する。この場合はほぼ全ての領域について、抵抗率が温度、電界に対する依存性を持つ非線形解析となる。

図2に当社内における、3種類の各解析の過去数年間の実施実績を示す。

静電界解析(特に一般的な形状の電力ケーブル機器)が最も多く、全体の約85%を占めている。電力ケーブルは商用交流で運転される場合が多く、そのほとんどは抵抗率が十分大きい絶縁体のみで構成され、相間位相差等も問題にならないことが多いためである。

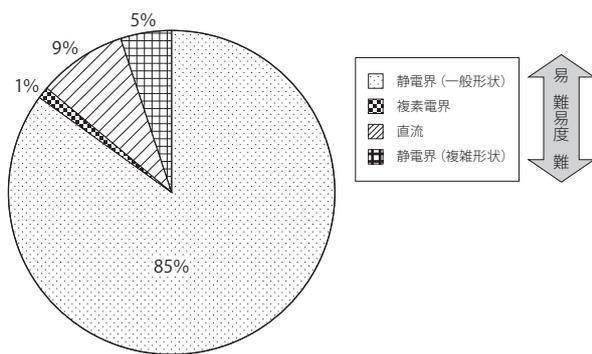


図2 当社内の電界解析実施実績

3. 電界解析の技術移管

解析技術を設計部門に移管するのは、表2に示すような2つの目的がある。設計部門としては、設計工程に解析を

取り込み、設計サイクルの短縮、費用削減を目指すこと、解析部門としては技術者が新たな解析技術の開発に時間を取れるようにすることである。

①技術習得、②解析時間の2つの問題をクリアし、電界解析技術を設計部門に移管して上記の目的を達成するため、電界解析の全工程を自動化し、簡単な操作で解析結果を表示できるシステムを開発したので、その内容について述べる。

表2 解析技術を移管する目的

部門	目的
設計部門	設計工程に解析を取り込み、設計サイクルの短縮、費用削減を目指す
解析部門	技術者の持つ時間を確立された解析技術の実行から、新しい・より高度な解析技術の開発、実施に向ける

3-1 自動化の意義 電界解析を設計に用いるには、高い電界の発生する領域の値を特に精度よく求め、評価することが必要である。電極表面や絶縁体界面上といった高い電界の発生する可能性がある領域の電界分布、最大電界を解析結果として出力し、設計に用いる。これらの値を精度よく求めるために、有限要素法による電界解析では、高い電界の発

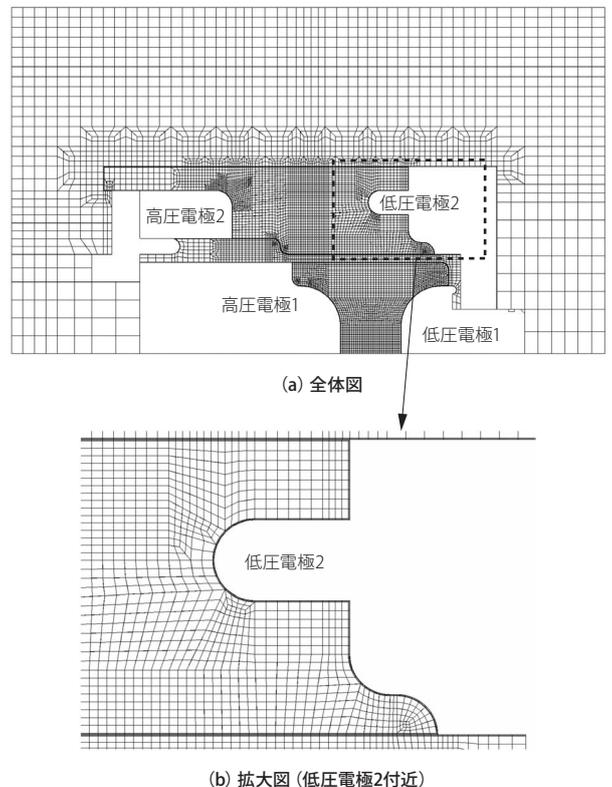


図3 要素分割図(試験用電極)

生ずる電極表面や絶縁体界面に対して、法線方向に薄い要素分割を行う必要がある。電界解析で行う要素分割の例として、**図3**に試験用の電極モデルの要素分割図を示す⁽²⁾。

電極表面には電位境界条件を設定するため電極内部は電界がゼロとなり分布はないので、電極内部の要素分割は行わない。絶縁体領域は全領域について要素分割を行うが、要素分割の方法として、**(a)**全体図のように高圧電極と低圧電極の間の電圧がかかる部位については細かい分割を行い、特に電極表面上と各絶縁体界面上については、法線方向に非常に薄い要素を設定している。高精度の結果が得られる細かい要素の例として低圧電極表面上の要素分割図を**(b)**拡大図に示す。

ここで例に示したような要素分割を行うには、精度が必要な部位とそうでない部位を見極めた上で粗密の差をつけるための知識、経験が必要であり、それを得るには時間をかけて訓練する必要があった。また習熟した技術者であってもこのような要素分割を行うには、簡単な形状であっても1日程度、複雑な形状であれば1週間程度の作業時間が必要であった。さらに、複雑な形状では結果表示にも時間がかかるといった課題があり、過去には設計部門の技術者を教育する試みも行われたが、定着させるには至らず、社内解析部門である解析技術研究センター（以下、解析研と略す）が担当し、解析してきた。

そこで操作が簡単かつ短時間という条件を満たす方法として、電界解析の全工程を自動化するシステムを電力ケーブル機器の設計を主に行っている(株)ジェイ・パワーシステムズ（以下、JPSと略す）の電力機器部と共同で開発した。

これまで解析研で実施してきた解析と自動化してJPSで解析を実施した場合での解析フローの違いについて**図4**に示す。

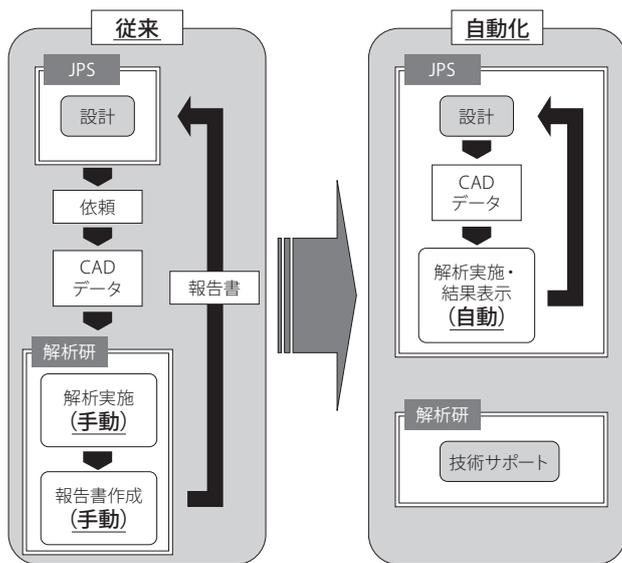


図4 解析フローの違い

3-2 自動化の方法 自動実行システムを開発するに当たり、自動化を行う対象を社内で最もニーズの高い静電界解析に限定し、その他の解析については状況に応じて別途開発を行うこととした。

これまで解析研で実施してきた電界解析では、設計用のCADデータから形状を汎用ソフトに読み込み、汎用ソフト上で要素分割、物性値や境界条件などの解析条件の設定、計算実行後の結果表示処理を行っていた。この工程を可能な限り自動的に実行するため、手動操作が必要な物性値、境界条件の指定および結果表示については専用ソフトを新規開発し、これまで最も手間と時間のかかっていた要素分割については、全てを自動的に実行できるようにした。

これを実現するため、CAE^{※2}の自動処理オーサリングソフト⁽³⁾を用いて、各工程をひとつにまとめて一連の流れで実行できるようにカスタマイズを行った。

3-3 自動実行手順 今回開発した電界解析自動実行システムの解析実行フローを**図5**に示す⁽²⁾。

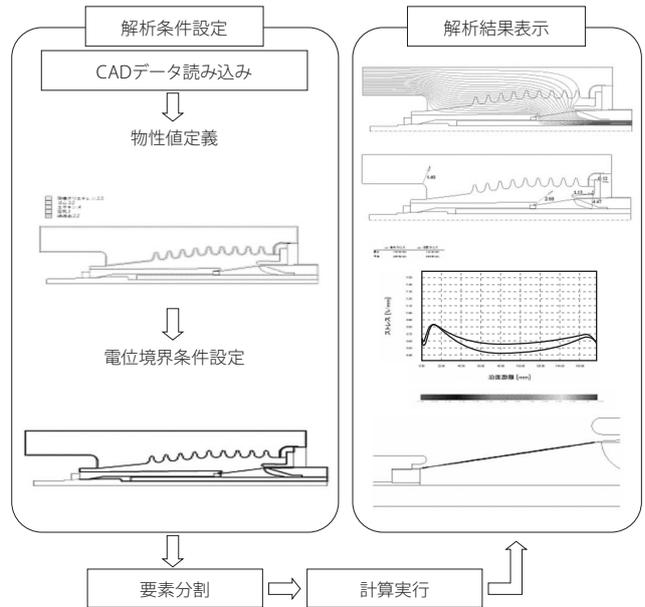


図5 自動実行システム解析実行フロー

①CADデータの読み込み、②解析条件（物性値、境界条件）の設定、③要素分割、④計算実行、⑤結果表示の手順で解析が実施される。

設計用のCADデータを用いて要素分割をするためには、要素分割を行う領域を正確に入力する必要がある、入力用のCADデータは全ての領域が閉領域で構成されている必要がある。しかし**図6**に示す設計用のCADデータの例のように、実際は開領域や不連続な線がデータ内に存在することが多いため、条件設定を行うソフトとは別にデータの不具合を抽出するソフトを別途開発し、事前に設計者がCAD

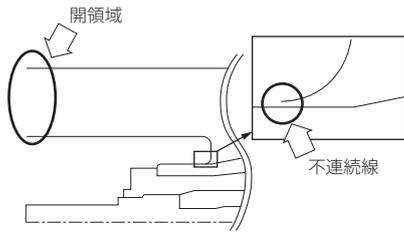


図6 解析に適さない設計用CADデータ例

ソフトにて修正できるようにした。

物性値と境界条件の指定および解析結果の表示については、GUI^{※3}上で各絶縁体領域をマウスでクリックする簡単な操作で指定できるようにした。

3-4 適用事例 開発した自動実行システムの適用事例として、図7の絶縁体支持棒付き電極のモデルを示す⁽⁴⁾。このモデルは絶縁体の丸棒にリング状の電極が付いている構造で、z軸を中心に回転した軸対称3次元形状であるが、図7では対称の断面図を表示している。絶縁体丸棒、電極の周囲は空気に囲まれているが、このような形状では絶縁体丸棒、電極だけでなく、周囲の空気についても解析領域として要素分割を行い、解析を実施する。

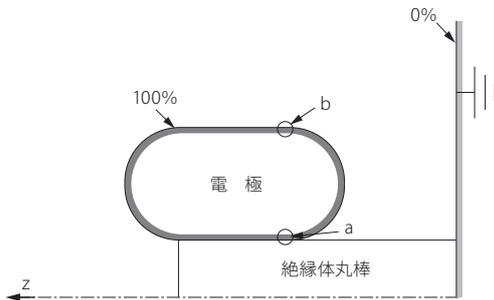


図7 電界解析モデル（絶縁体支持棒付き電極）

有限要素法の解析では、解析領域の端部に境界条件を設定する必要がある。このシステムで実施する電界解析においては電位境界条件と対称境界条件を用いている。電位境界条件は高圧の電極表面やアース部に設定し、この間の電圧分布から各部の電界分布を解析する。なお、対称境界条件は電位境界を設定する電極表面以外の全境界に設定される。

図8に解析結果の等電位線図を示す。等電位線図の5%電位ラインは、対称境界条件の影響を受けて境界に向かって垂直に曲がった結果となっている。このモデルのような開放系の問題を有限要素法で数値解析する場合、解析結果はある程度このように境界の影響を受けた結果となる。しかしこのモデルのように空気領域を広くとっていれば、絶縁体丸棒や電極上の電界にはほとんど影響しない。

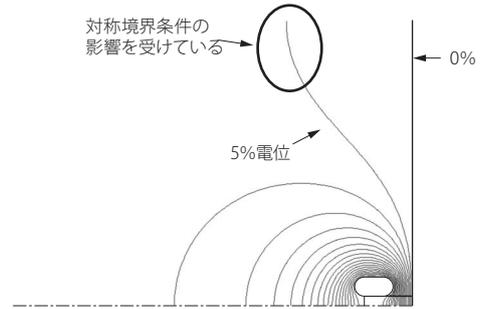
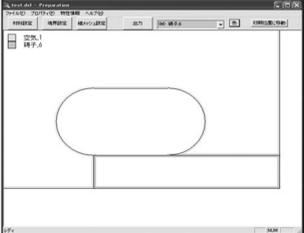
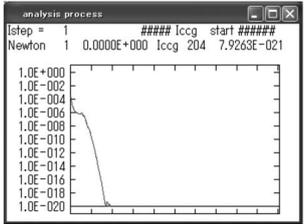
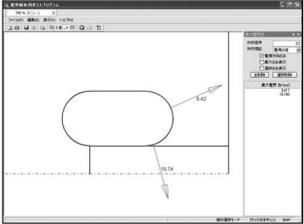
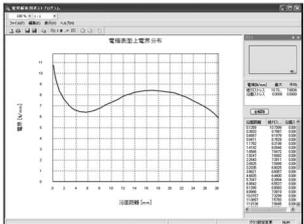


図8 等電位線図（5%電位刻みの等高線）

自動実行システムでの絶縁体丸棒、空気への各誘電率の設定と電極、アースへの電位境界条件の設定画面および表示される結果を表3に示す。

表3 自動実行システムの操作・表示画面

工程	操作・表示状況
① CADデータの読み込み	ファイルを選択してデータを読み込む
② 条件設定	
③ 要素分割	全て自動的に実行される
④ 計算実行	
⑤ 結果表示	<p>(a) 電極上最大電界ベクトル図</p>  <p>(b) 電極上電界分布グラフ (図7のa~b間をプロット)</p> 

4. 結 言

電力ケーブル機器に対する電界解析の全工程を一つのソフトにまとめ、自動化することができた。設計者が作成したCADデータから形状を読み込み、専用のGUIを用いて各部の物性値や境界条件を指定するだけで簡単に解析結果を見ることができるようになった。各工程での所要時間例について図9に示す。

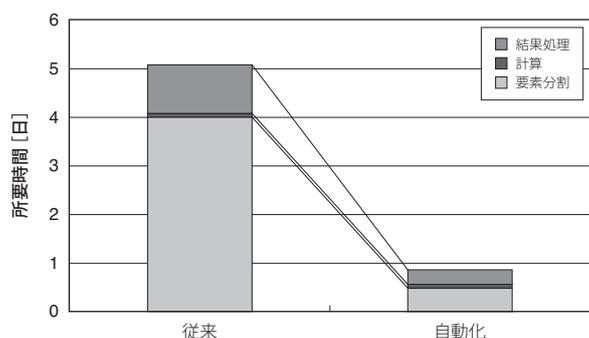


図9 解析時間の比較

従来の解析で手間と時間がかかっていた工程を自動化、簡略化することで全体としての所要時間も1/5以下になり、設計に利用しやすいソフトとなった。

手動操作が必要な工程については全て専用のソフトを開発したことでソフトの習得が容易になり、実際にJPSにて運用を開始したところ使いやすいとの評価を受けた。解析実施件数は開発時の見込みを大幅に上回り、これまで解析研でCAE解析専任の技術者が手動で実施していた際の約10倍の解析が実施されている。これだけの件数が実施された要因としては、以下の3点が考えられる。①過去に実施例のある機器については、設計部門で新規に解析を行う毎に過去の解析結果との比較を含む精度チェックを実施している。②JPS電力機器部内での実施件数が増加している(設計者が結果を見ながら、形状などの条件を変更して解析を繰り返し、最適設計に近づけることが容易になっている)。③JPS内の電力機器部以外のこれまであまり解析を行っていなかった部門(品質保証部門、製造部門など)においても実施されるようになった。特に③のJPS内他部門での実施は、時間と費用の観点からこれまでの方法ではできなかったことができるようになった結果であり、社内の解析技術普及に繋がった成果であると考えている。

用語集

※1 CAD

Computer Aided Design：コンピュータを用いて設計すること。コンピュータを用いた製図システムを指す場合が多い。

※2 CAE

Computer Aided Engineering：コンピュータを用いたシミュレーションで製品設計、製造や工程設計の事前検討を行うこと。計算機支援工学、数値解析などと呼ばれることもある。

※3 GUI

Graphical User Interface：ユーザに対する情報の表示にグラフィックを多用し、大半の基礎的な操作をマウスなどのポインティングデバイスによって行うことができるユーザインターフェイスのこと。

参考文献

- (1) 結石友宏、「電磁界解析と製品開発への応用」、SEIテクニカルレビュー、第175号、pp.1-9 (2009)
- (2) 結石友宏、中村悠一、「電力ケーブル機器設計のための電界解析の自動化」、電気評論、第95巻3号、pp.23-25 (2010)
- (3) 西浦光一、「CAEの自動処理オーサリングシステム」、日本機械学会計算力学部門ニュースレター、CMD Newsletter、No.43、pp.23-24 (2009)
- (4) 宅間董、「電界パノラマ」、電気学会、p.102 (2003)

執筆者

中村 悠一*：解析技術研究センター
電磁界解析の研究に従事



結石 友宏：シニアスペシャリスト
解析技術研究センター 主幹
博士(工学) 技術士(電気電子部門)

臼井 美岐：解析技術研究センター 主査

*主執筆者