



電力事業の未来を支える研究開発における 科学技術計算手法の活用

Contribution to R&D on Power Cable System by Applying Computer Simulation

丸山 悟^{*1}
Satoru Maruyama

富井 櫻子^{*1}
Sakurako Tomii

富田 雄大^{*1}
Yudai Tomita

松本 勇輝^{*2}
Yuki Matsumoto

〈概要〉

電力事業部門においては、脱炭素社会に向けた取組みや当社25中期計画の柱として、再エネ向け海底ケーブル、直流ケーブル、超高圧地中ケーブルの分野に注力しており、製品開発効率を高めるために科学技術計算を用いた設計や評価を行う取り組みを進めている。本論文では、解析による海底ケーブル鉄線鎧装損失評価、量子化学計算に基づく直流絶縁材料評価、地絡現象発生時の端末内部圧力シミュレーションについて得られた成果を報告する。これらの成果は、当社目標達成のみならず、電力ケーブル事業分野の技術発展にも寄与するものと考えている。

1. はじめに

当社25中期計画の柱として、電力事業部門においては再エネ向け海底ケーブル、直流ケーブル、超高圧地中ケーブル等を掲げており、関連技術開発を進めている。従来、電力ケーブルの設計・開発においては、モデル評価を経て実機評価を行うという実証的手法が中心であり、開発期間が長くなる傾向にあった。また実製造ラインでの試作品製造は工場稼働率を阻害する要因となるという問題もある。

一方で、自動車などの産業分野ではCAE (Computer Aided Engineering) を用いた設計が一般的に行われている。これは実機実験にかかる時間やコストの低減はもちろんであるが、実機実験に潜む危険を低減でき、安全という点でも大きなメリットがあると考えられる。

電力ケーブル分野は高電圧化・大容量化が進み、特性評価のためには、高電圧・大電流と言った危険な要素を含む実験が不可欠である。そのため、CAEベースで基本的な設計を進め、実機レベルの評価を最終的な検証のみとすることで、実験に関わるリスクの機会を低減させることができると考えられる。また、一般的に交流送電が採用されているが、電力ケーブルを構成する材料自身が交流磁場により損失を発生し、送電ロスとなることが知られている。この損失を正確に把握し、効率的な送電容量設計を行うために電磁界解析の活用も有効であると言える。

更には、材料開発を考えた時には、物質を構成する原子・分

子レベルで取り扱う必要がある。ケーブル絶縁材料開発においては、あまり扱われていなかったが、量子化学の考え方を取り入れることで、絶縁性能がどのように効率的に発現されるのかを解明することができ、論理的な材料設計に応用する試みも進んでいる。

以上のように、効率的な開発遂行のために、CAEや科学技術計算に基づくシミュレーションによる物理現象解明が今後一層重要度を増してゆくと考えられ、電力ケーブルシステム開発においても、設計・開発への適用を拡大させている。

本論文ではこれらの手法のうち、直流絶縁材料の量子化学計算に基づく材料物性の評価、地絡現象発生時の圧力シミュレーション及び海底ケーブルの鉄線鎧装損失の最適化を例に挙げて、実際の適用例と実証試験結果との整合性などを紹介する。

2. 直流絶縁材料の量子化学計算

直流電圧印加時には、ケーブル及び接続部に用いられる固体絶縁材料内部に電荷が蓄積する(空間電荷の蓄積)直流特有の誘電現象が起きるため、空間電荷が蓄積しない材料の開発が求められてきた。空間電荷の蓄積の評価方法としては、実験的に測定し、評価する方法が一般的に用いられるが、材料の開発プロセスにおいて評価候補材を準備し、すべての候補材に対し測定することは、コストや時間がかかる課題があった。

一方、材料の化学構造から電荷の動きを予測し、空間電荷特性を評価する手法として量子化学計算の活用が知られている¹⁾。本手法を用いた場合、測定前に空間電荷特性の机上検討が可能となる。当社の直流ケーブルシステムに用いられているケーブル及び接続部の主絶縁を量子化学計算から空間電荷特性の評価をアプローチした事例について紹介する。

^{*1} 電力事業部門 技術開発部

^{*2} 電力事業部門 電力技術部

量子化学計算から空間電荷特性を判定する方法について図1を用い、説明する。特性を評価する指標としては各材料について電気二重層及びトラップ準位の生成の有無、その大きさが用いられており、空間電荷特性に非常に大きな影響を与える。

図1は計算モデルのエネルギー準位の一例を示しており、エネルギー準位から、結合性軌道(以下、HOMOと記す)及び反結合性軌道(以下、LUMOと記す)、フェルミ準位と呼ばれるHOMO-LUMO間の電子が存在しない領域(禁制帯)の中央値を算出する。絶縁材料に電圧を印加する場合、試料(S)は半導電(SC)または金属(M)材料に挟まれた形態となる。半導電、金属材料のフェルミ準位を各々不動の値として設定し、試料のフェルミ準位との差を比較する(図1(a): $\Delta E(SC-S)$, $\Delta E(M-S)$)。フェルミ準位差が大きいくほど、電圧印加後に、試料と半導電/金属界面に電気二重層と呼ばれる層が生成され、導電材料から電荷が注入されやすい状態となる。つまり、電気二重層の形成のしにくさが良好な空間電荷特性へ繋がる。

更に、試料に電荷が注入された場合、トラップ準位と呼ばれる電荷が自由に動けないような機構を設けることが重要である。分子構造によっては局所的に電荷密度が集中する準位、トラップ準位(図1(b): Etrap(LUMO), Etrap(HOMO))が生成される。深いトラップ準位であるほど、電荷の移動は起きにくくなる。よって、各材料の量子化学計算結果より、試料-導電材料間のフェルミ準位差から電荷注入のしにくさ、トラップ準位の深さから電荷移動のしにくさを求め、空間電荷特性を評価することが可能となる。

当社の直流ケーブルの主絶縁として、架橋ポリエチレン(XLPE)に電荷蓄積を抑制する構造を設けた直流絶縁材料(DC-XLPE)と、直流用中間接続部の主絶縁に用いるエチレンプロピレンジエンゴム(EPDM)について、量子化学計算を用いて空間電荷特性評価を行った。

DC-XLPE, EPDMのエネルギー準位を図2に示す。図2(a)に示すように、DC-XLPEと半導電材料とのフェルミ準位差は

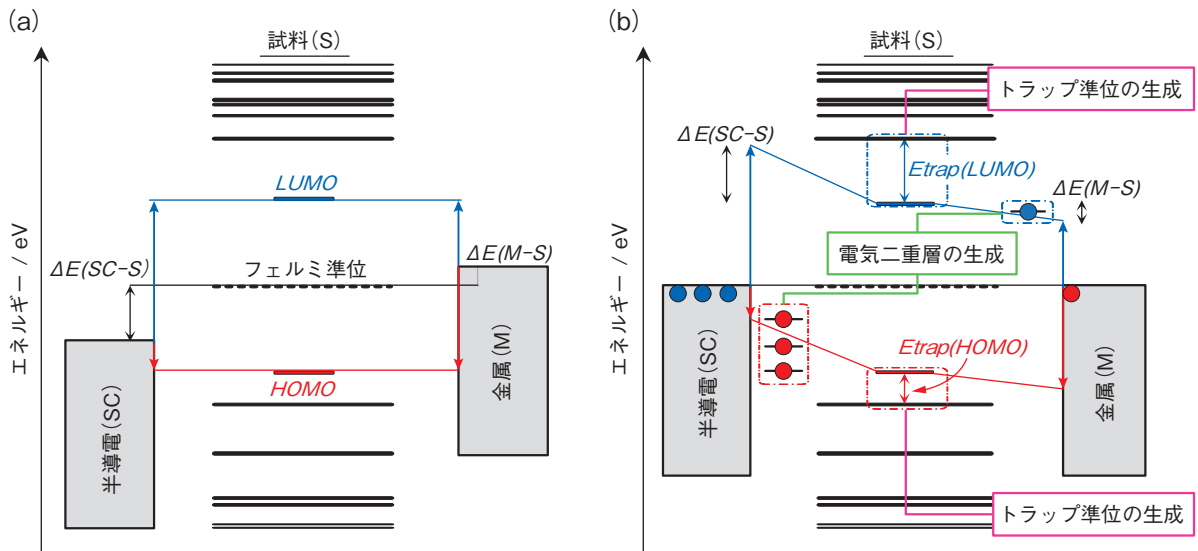


図1 空間電荷特性の判定: (a) 電圧印加前, (b) 電圧印加後
Decision of the space charge characterization: (a) before voltage application, (b) after voltage application.

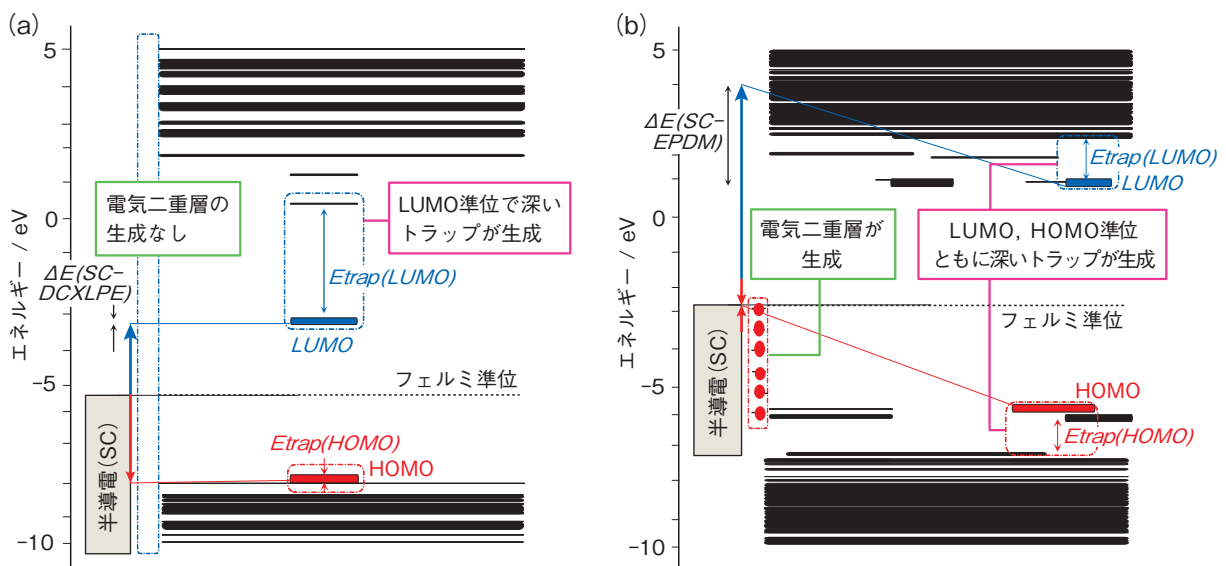


図2 エネルギー準位: (a) DC-XLPE, (b) EPDM
Energy potential of DC-XLPE and EPDM: (a) DC-XLPE, (b) EPDM.

非常に小さく、電気二重層が生成されず、電荷注入が起きにくい材料であることが判明した。更に、LUMO準位に非常に深いトラップ準位が生成されていることで、電荷の移動も抑制する構造であり、非常に良好な空間電荷特性と言える。

次に図2(b)に示すEPDMの場合、EPDMと半導体材料とのフェルミ準位差は大きく、電気二重層が多く形成されるため、電荷注入が起きやすい材料であることが判明した。しかしながら、LUMO準位、HOMO準位ともに比較的深いトラップ準位が生成されていることで、電荷の移動は抑制されており、空間電荷特性に良い影響を与えていると考えられる。

また、電荷密度の割合を三次元にマッピングし、電荷密度を可視化した結果を図3に示す。図3(a)に示すDC-XLPEの場合、負電荷の大きなトラップ構造が特長である。エネルギー準位からも深いトラップが確認されており、電荷蓄積を抑制する構造が有効に働いていると考えられる。図3(b)に示すEPDMの場合、DC-XLPEほど深いトラップは生成されていないが、部分的に正電荷のトラップ構造が形成されていた。これは二重結合を有するジエン構造が空間電荷特性に良好な影響を与えていると考えられる。

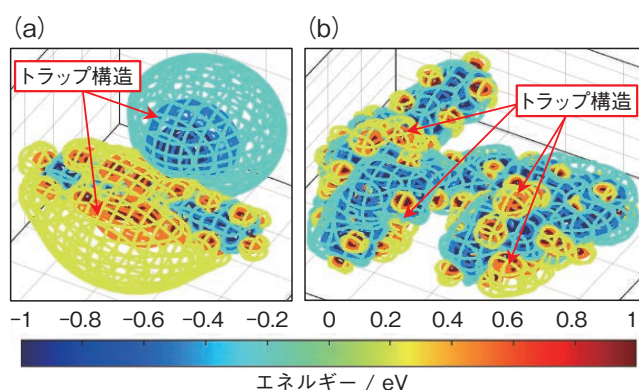


図3 三次元静電気ポテンシャル: (a) DC-XLPE, (b) EPDM
3D electrostatic potential of DC-XLPE and EPDM:
(a) DC-XLPE, (b) EPDM.

量子化学計算を用いて、直流ケーブルシステムに用いられるケーブル・接続部の絶縁材料の空間電荷特性を評価し、良好な空間電荷特性を有することが確認された。本材料を使用したケーブル及び接続部は、直流525 kV級海底ケーブルシステムPQ試験、直流525 kV級陸上ケーブルシステムPQ試験を実施し、第三者機関の認証を得られており、直流ケーブルシステムの絶縁材料として良好な結果が得られている^{2), 3)}。

今後の材料開発プロセスにおいて、量子化学計算と測定を組み合わせた複合的な評価を進めることで、開発スピードの促進に貢献できると考えている。

3. 終端接続部地絡時の数値解析(最大圧力の推定)

電力ケーブルの大容量化に伴い、絶縁破壊等による事故発生時の被害の拡大や復旧作業の長期化が懸念されている。その中で、電力ケーブルの終端接続部は内部に絶縁油を充填させる構造が主流となっており、もし終端接続部内部で地絡事故が発生

した場合、がい管の破損による周辺機器への被害や漏油による環境汚染被害が予想される。そのため、事故発生時の被害低減を目的とした、終端接続部に放圧機構を設ける需要が出始めている。放圧機構の搭載のためには性能実証のための地絡試験が必要だが、安全及び環境対策の観点から、試験コストが大幅にかかるため、試験コスト削減のため、数値解析によって地絡試験を再現し、設計検討のための試験回数を減らすことが求められる。そこで、地絡発生時の発生圧力に注目し、内部圧力推定技術確立のため、地絡模擬試験を実施し、得られた結果からパラメータを設定して内部圧力推移を計算した。

初めに、地絡事故発生時の地絡エネルギーと発生圧力の関係を把握するため、縮小モデルによる地絡模擬試験を実施し、がい管の耐久性の確認とピーク圧力の検証を行った。

地絡模擬試験では入力するエネルギーと発生圧力の関係を単純化する目的で、火薬を使用して圧力を発生させた。試料は66 kV級の終端接続部で使用するポリマー複合がい管であり、圧力発生源として、がい管の底側に火薬を入れるカートリッジを4本接続し、それぞれ内部で火薬を燃焼させ、燃焼ガスががい管内部に印加させた(図4)。火薬装填量は地絡発生時の地絡電流のエネルギーの第一ピーク値から算定し、各カートリッジに黒色火薬1.5 g、無煙火薬5.0 gを装填し同時に点火させた。今回の試験では安全のため、内部は絶縁油の代わりに水を充填させている。内部圧力はがい管上部に接続した圧力センサーで測定した。更に、放圧機構を取り付けた場合の圧力推移を確認するため、上部封止板に0.6 MPaで弁が破裂するラプチャディスク(rupture disk)を接続した試料とラプチャディスクを接続していない試料を準備し、ラプチャディスクの有無による最大圧力と圧力推移を比較した。

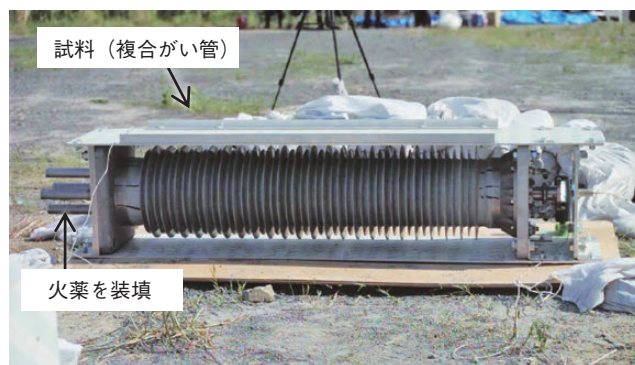


図4 地絡模擬試験試料
Sample for ground fault equivalence test.

試験結果を図5に示す。実線がラプチャディスクを接続していない試料、破線がラプチャディスクを接続した試料である。ラプチャディスクなしの試料では最大12.0 MPaまで上昇したが、がい管及び封止部に損傷は見られず、封止性が保たれていた。一方、ラプチャディスクありの試料においては圧力上昇と同時にラプチャディスクが動作し、充填した水を放出した。これにより最大圧力は9.0 MPaとなり、15 ms以降放圧効果が顕著に見られている。また、ラプチャディスク有りの試料でも試料内部及び封止部に損傷は見られなかった。

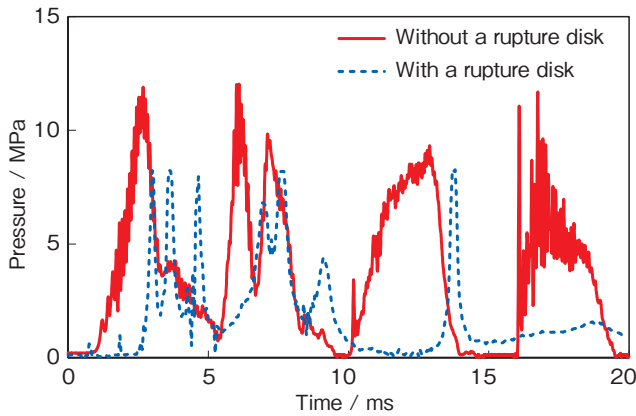


図5 地絡模擬試験時の内部圧力変化
Measurement results of internal pressure in hollow insulation at ground fault equivalence test.

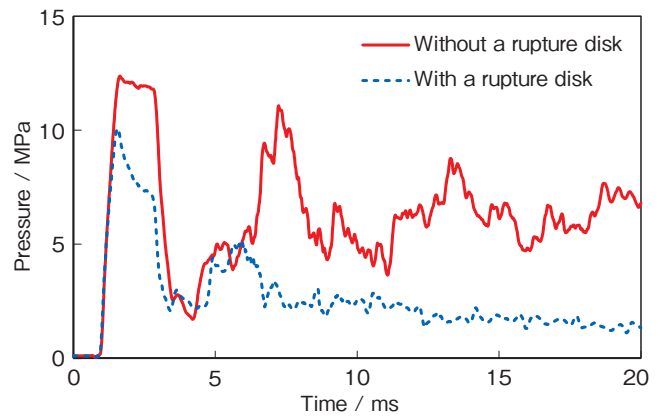


図6 地絡模擬試験再現解析結果
Simulation results of internal pressure in hollow insulation.

この地絡模擬試験を有限要素法による数値解析で再現を行った。地絡現象は短時間で急激に圧力が変化するため、衝撃波の衝突を考慮した状態方程式を解く必要がある。解析ソルバーとしてLS-DYNAを使用し、本解析ではがい管内部の流体の圧力 p を式(1)のMie-Grüneisen状態方程式を用いて求める⁴⁾。

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\Gamma_0}{2} \right) \mu \right]}{\left[1 - (s-1)\mu \right]^2} + \Gamma_0 E \quad (1)$$

ここで ρ_0 は密度、 c_0 は音速、 μ は体積圧縮率、 s は衝撃波速度と物質粒子速度の関係式の係数、 Γ_0 はGrüneisen定数であり表1の値を設定した。また、 E は物質の内部エネルギー密度であり、再現解析では高圧ガスが、がい管内部に流入する瞬間を開始時間とし、カートリッジ内部の初期圧力が8.85 MPaになるように初期エネルギー密度として表1の値を設定した。

表1 再現解析のパラメータ
Parameter for simulation.

記号	値	単位
ρ_0	1.00×10^3	kg/m ³
c_0	1450	m/s
μ	1.00×10^{-9}	
s	1.79	
Γ_0	1.65	
E	22.1×10^6	J/m ³

解析結果を図6に示す。ラプチャディスクなしの結果が実線であり、ラプチャディスク有りの結果が破線である。ラプチャディスク無しのモデルでは最大圧力が12.3 MPaとなり、模擬試験のピーク圧力とほぼ一致しており、2回目以降の圧力ピークもほぼ同一のタイミングで発生している。一方でラプチャディスク有りのモデルと模擬試験結果を比較すると模擬試験結果が9.0 MPaのピーク圧力なのに対して、解析結果が10.2 MPaとなり、発生タイミングも解析結果の方が早くなっている。この差異が生まれた原因は地絡模擬実験において、4本のカートリッジから流入される圧力ガスの流入タイミングが揃わなかったためと考えられる。

ラプチャディスク無しの条件と比較すると、適切な初期条件を与えることで、試験結果と定性的に合うことが確認できたため、解析精度を上げていけば、数値解析による圧力推定は地絡試験の安全対策検討等において有効な手段となることが期待される。

本解析手法を用いて、500 kV級の終端接続部の地絡試験時の圧力推定を行った。モデルは図7のように長さ7.5 m、直径600 mmのがい管内部にシリコン油が充填されたモデルを作成し、Mie-Grüneisen状態方程式を表2のパラメータで計算した。地絡発生位置は終端接続部内部のストレスコーン直下で発生し地絡電流30 kAが0.25秒間印加されることを想定した。また、中央のケーブルとストレスコーンの変位及びがい管表面の変位は無視した。解析モデルとして、ラプチャディスクを接続したモデルと接続していないモデルを作成し、ラプチャディスクを接続したモデルでは地絡模擬試験と同じ面積のラプチャディスクを4個設定し、ラプチャディスク位置で0.6 MPa到達時に開放状態となり、内部のシリコン油を放出するように設定した。

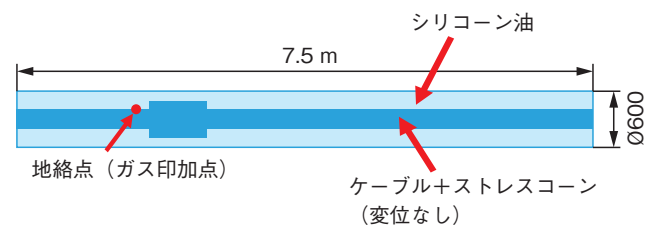


図7 500 kV級終端接続部数値解析モデル概要
Schematic figure of simulation model at ground fault in 500 kV hollow insulation.

表2 500 kV終端接続部地絡解析のパラメータ
Parameter for simulation of 500 kV termination.

記号	値	単位
ρ_0	9.85×10^2	kg/m ³
c_0	985	m/s
μ	9.85×10^{-8}	
s	0	
Γ_0	1.65	

解析した結果を図8に示す。実線がラプチャディスクなしのモデルの解析結果であり、破線がラプチャディスクありのモデルの解析結果である。今回の解析では地絡点から地絡ガスが供給され続けるため、ラプチャディスクなしの条件においては圧力が上昇し続け、0.25秒時に18 MPa以上になることが推定された。一方、ラプチャディスクありの条件では圧力上昇と充填油放出による圧力低減効果がバランスし、最終的に6.2 MPaで収束した。前述の地絡模擬試験結果を考慮すると、ラプチャディスクを接続したモデルにおいてはがい管の損傷の可能性は低く、ラプチャディスクによる被害低減効果が期待される。

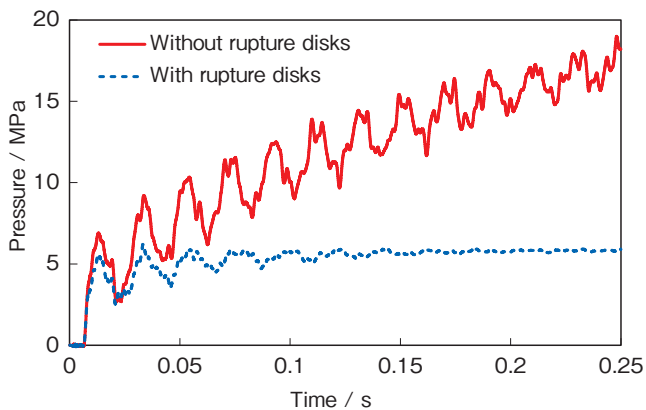


図8 500 kV 級終端接続部圧力推定結果
Simulation results of internal pressure at ground fault in 500 kV hollow insulation.

本解析手法を応用することで、高電圧・大容量化に対応できる終端接続箱の地絡設計を効率的に行うことが可能となる。

4. 海底電力ケーブル鉄線鍍装ロスの解析

洋上風力発電などに適用される海底電力ケーブルにおいても、高電圧化大容量化が進んでいる。3芯海底電力ケーブルの代表的な写真を図9に示した。海底電力ケーブルの特長としては、海底への布設張力分担、外傷防止の目的から最外層に鍍層が設けられており、通常亜鉛メッキ鉄線が用いられている。これは、次のような課題につながる。

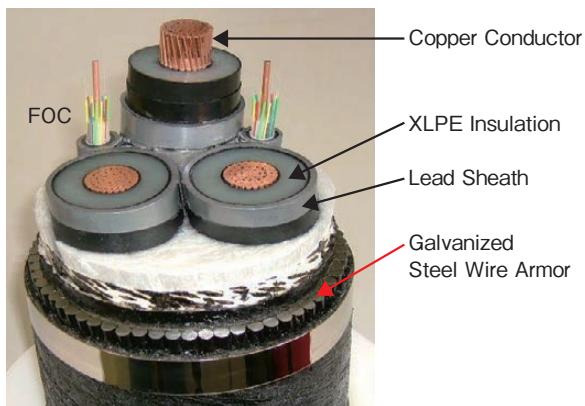


図9 三芯海底電力ケーブル構造例
An example of 3 core submarine cables.

3芯海底電力ケーブルが実際に運用される際には導体部分に電流が流れることで電力送電が実現する。その際にケーブル内では発熱(損失)が発生しており、この損失を正確に見積もることが実際の電力ケーブルのサイズ設計にあたって非常に重要となる。すなわち、実際のケーブルサイズ設計は、この見積もられる損失に対してケーブル導体部分の上限温度(一般的に90℃)を制約とすることで導体サイズ決定がされるため、この際の損失を大きく見積もってしまうことが必要以上に大きなサイズ設計(過剰設計)に繋がってしまう。特に、海底電力ケーブルでは、前述の通り鍍層材料として亜鉛メッキ鉄線を用いる。鉄は磁性材料であるため、導体電流が形成する電磁場の誘導を受けて、渦電流や回路電流を発生させ、これが熱損失(以下、鉄線損失)となる。この鉄線損失の計算は、国際規格IEC⁵⁾の式で求めることが一般的に行われているが、特に大導体、大電流になるほど鉄線損失を過大評価していることが定性的には示唆されてきた⁶⁾。すなわち、より正確な損失を定量的に把握することが出来るようになれば、把握した損失をサイズ設計に反映させることでより最適化されたサイズ選定が出来、従来のケーブルよりもサイズダウンした設計が可能となる。このような背景から、当社では鉄線損失を正確に把握するための社内評価に取り組んでおり⁷⁾、その内容について以下に記す。

鉄線損失の評価を行うため、有限要素解析(FEM解析)を用いることとした。実際の海底電力ケーブルを用いて鉄線鍍層に発生する電流損失を実測することも可能であるが、測定のための準備作業や測定評価に時間がかかってしまう。その点、解析評価は、あらゆる設計パラメータを振って損失評価や考察が可能となり、短時間で結果を導けるというメリットがある。ここで対象とする3芯海底電力ケーブルの基本構造としては、まず電力送電のために電流が流れる導体の周りに絶縁層や鉛被が覆われた電力コアと呼ばれるものが存在し、その電力コア3芯が長手方向に撚り合わされた周りを(当開発で対象としている損失発生箇所でもある)鉄線鍍層が長手に撚りピッチを持ちながら覆われた構造となっている。加えて、実際の運用時は3相交流送電、すなわち、3芯それぞれの導体部分を流れる交流電流の位相が120度ずつずれていることもあり、ケーブル内の電磁気学的なメカニズムは非常に複雑なものとなっている。今回対象とする鉄線損失は、このケーブル内の電磁気的な要素として発生している損失であるため、有限要素解析による評価が有用であると考えた。

解析に際しては、図10のように実ケーブル構造で電磁界の影響を受ける金属部分(導体・金属鉛被、鉄線鍍層部)をモデル化して、有限要素解析を行った。また、図10においては、当モデルで計算したときに得られたケーブル要素の電流密度分布から算出した損失密度分布の一例を示してある。

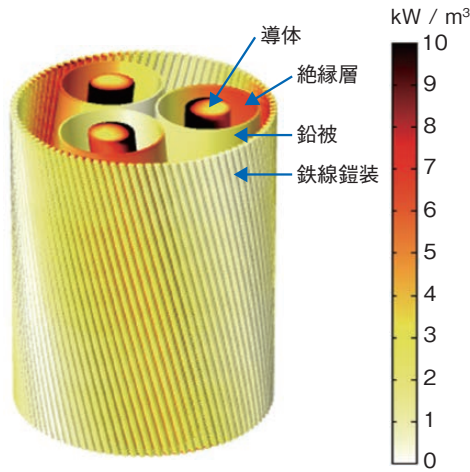


図10 3次元有限要素解析による損失密度分布例
An example of loss density distribution in 3D FEM.

このモデルを用いて、ケーブル設計パラメータとして重要な導体サイズを変化させたときの鉄損損失について評価した。ここで、鉄線損失は、IECにおいては λ_2 (鉄線損失率: 導体損失に対する鉄線損失の比率)の形で表現されるため、本検討においても、 λ_2 を用いて評価することとした。解析によって得られた導体サイズによる λ_2 の変化を図11に示した。ここで、IEC式で得られた値を λ_{2_IEC} 、解析で得られた値を λ_{2_FEM} として示すが、それらの乖離を示すために($\lambda_{2_FEM}/\lambda_{2_IEC}$)も併せて示す。図より、 λ_{2_FEM} はいずれの導体サイズにおいても、 λ_{2_IEC} に対して小さい値となり、その比率は60~70%程度と導体サイズによらずほぼ一定であった。

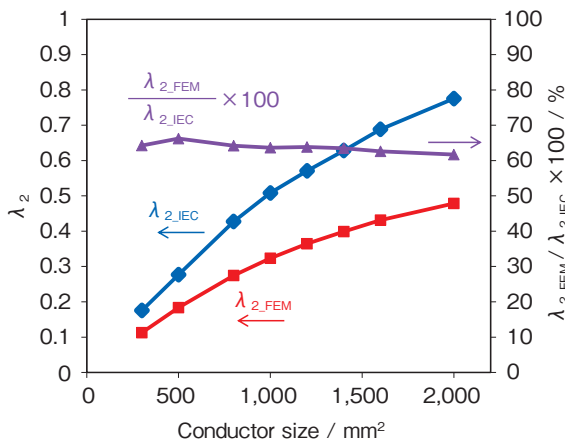


図11 IEC式とFEM解析による λ_2 の比較
Comparison between FEM analysis and IEC equation in armour loss rate λ_2 .

しかし、計算される λ_2 値の差は導体サイズが大きい方が大きい。そこで、導体サイズ1,000 mm²以上のケースについて、 λ_{2_IEC} と λ_{2_FEM} を用いて許容電流計算を行った結果を図12に示す。図に示す通り、 λ_{2_IEC} を用いた場合2,000 mm²の導体サイズが必要となるケースにおいても、 λ_{2_FEM} を用いると1,700 mm²程度の導体サイズで設計出来ることがわかる。すなわち、 λ_{2_IEC} の評価が過大であるなら、よりコンパクトなケーブル設計が可能になると言える。

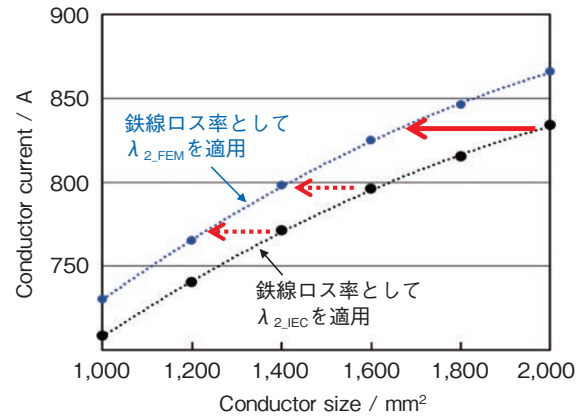


図12 λ_2 が設計導体サイズに与える影響
Difference of conductor design due to λ_{2_IEC} and λ_{2_FEM} .

更に、鉄線ロスは磁界の影響による損失であるから、その他の金属材料の影響も考慮される必要があると考え、鉄線損失の鉛被厚みに対する依存性を同様の有限要素解析により調べた。結果を図13に示す。本検討においては、導体1,400 mm²に固定し、鉛被厚のみを変化させた(275 kV 3x1,400 mm²海底ケーブル、鉛被外径 ϕ 280 mm)。図中、 λ_{2_IEC} はIEC計算式による値であり、鉄線部分のみに着目しているため鉛厚によらず一定の値となる。一方、 λ_{2_FEM} は λ_{2_IEC} に比べて小さい値を示しており、また鉛厚の増加に伴い値が減少する傾向が得られた。この結果に関しては、鉛被部分の厚み変化に伴い、ケーブル内ならびに鉄線部分の電磁気的状態が変化した事が要因と考察している。すなわち、IEC式では鉄線部分の損失は鉛被厚の設計とは独立した式となっているが、解析の結果から両者は相互に影響しているものと考えられる。

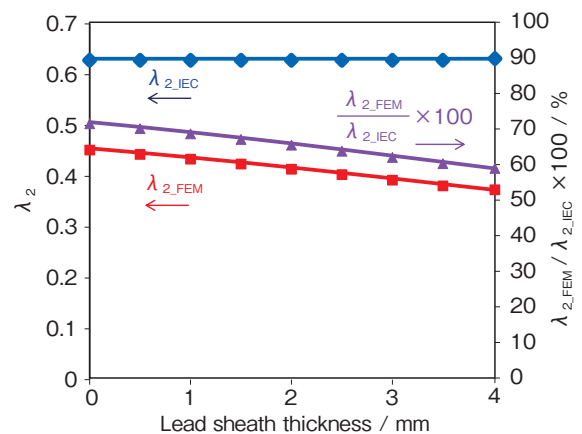


図13 鉛被厚が λ_2 に与える影響
The dependence of λ_2 on the lead sheath thickness.

以上の通り、FEM解析を行った結果より従来適用していたIEC式による鉄線ロス係数は過大評価されている可能性があることや、金属被の厚さも影響しているということが分かってきた。このような要素も設計要素に取り込むことで、より正確な損失評価に繋がり、ケーブルサイズの最適設計(軽量化、コンパクト化)によるコストダウンに繋げることが出来ると考えている。

なお、ここで得られた解析結果については、実際の三芯海底ケーブルを用いた損失測定による妥当性を確認しているが、本論文においては割愛し、別稿にて紹介する予定である。

5. おわりに

以上、電力ケーブルシステムに関連した設計・開発に科学技術計算を応用した一例を紹介した。

現在、計算機能力も非常に高くなっており、高精度化した電磁界解析や、一昔前では出来なかった高度なシミュレーションも可能となっており、分子レベルでの材料開発から、爆発的な現象の解析まで多岐にわたり、ケーブルシステム開発に貢献している。このように、従来実験ベースで行われてきた電力ケーブルシステムの開発に科学技術計算を取り入れることで、開発効率をアップし、タイムリーな製品開発を進めていることを理解いただけたと思う。

また本論文では扱わなかったが、海洋分野では海洋システムの動的解析を行う専用のシミュレーションソフト(例えばオルカフレックス)があり、欧州では海洋システム設計を行うツールとして一般的に取り入れられ、スタンダードになりつつある。これは、海洋における実規模の検証はもとより、想定する事象が多く実験モデルを構築することも困難なためである。海洋システムシミュレーションソフトは、国内の洋上風力件名においても、風車に接続するケーブルの挙動解析(特に浮体式、ダイナミック仕様では必須)や布設解析に適用され始めている。

最後に、物事の本質を正しく理解する上で、実機実験がなくなることは無いであろうが、工業製品が大型化、複雑化するに連れて、CAEやシミュレーション技術を用いた製品開発が不可欠になってくることも事実である。それらを融合させ、効率的な製品開発を進めることで、当社25中期を達成させるとともに、これらの技術開発が当該分野での技術発展を通じて、費用削減や開発期間短縮等の社会的貢献に寄与すると考えている。

参考文献

- 1) T. Takada, T. Tohmine, Y. Tanaka, and J. Li: Space Charge Accumulation in Double-Layer Dielectric Systems – Measurement Methods and Quantum Chemical Calculations, IEEE EI Magazine, Vol. 35, No. 5 (2019), 36-46.
- 2) N. Shigemori, M. Yagi, and T. Tabuchi: Development of 350 kV and 525 kV HVDC extruded cable system, Jicable'19 (2019), A9-5.
- 3) 古河電工HP>ニュースリリース>直流525kV級ケーブルシステムの長期課通電試験が完了(参照日2022年12月14日)
https://www.furukawa.co.jp/release/2021/ene_20210430.html
- 4) Mark L.Wilkins: Computer simulation of dynamic phenomena, Springer, 2009.
- 5) IEC 60287-1-1, 2006, Electric cables-Calculation of the current rating-Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses-General.
- 6) J.J. Bremnes: "Power loss and inductance of steel armoured multi-core cables: comparison of IEC values with "2,5D" FEA results and measurements", Cigre 2010, (2010), B1-116.
- 7) Y. Matsumoto, et al.: "3D FEM analysis of armour loss in three core submarine cables", Jicable' 19 (2019), C8-1.