ファジー推論による CV ケーブルの絶縁診断 エキスパートシステム

正員 金 古 喜代治 (東海大)

正員 菅 野 泰 (東海大)

正員 小 野 幹 幸 (藤倉電線)

Expert Systems on Insulation Diagnosis of XLPE Cables by Fuzzy Inference

Kiyoji Kaneko, Member, Yasushi Sugeno, Member (Tokai University), Motoyuki Ono,
(Fujikura Ltd.)

This paper presents an expert system on insulation diagnosis of medium voltage XLPE cables. Many diagnostic methods have been proposed for the deterioration of XLPE cables. However, most methods can not be used to the insulation diagnosis as live-line methods. The authors built the system whose knowledge base includes a live-line diagnostic method. In the system, fuzzy inference is used as an inference engine to reflect the knowledge and experience of experts for their diagnosis under the conditions, and its rules are formed based on their actual knowledge and heuristic experience. Moreover, residual breakdown voltages can be also estimated by the method of the fuzzy inference in the proposed system. Finally, it is shown that the resultant diagnosis of the system agrees well with that of experts.

キーワード: CV ケーブル, 絶縁劣化診断, エキスパートシステム, ファジー推論, 残存破壊電圧

1. ま え が き

CV ケーブル (架橋ポリエチレン絶縁ケーブル) は昭和 35 年から製造され、敷設が容易で保守が簡単なことから、初期には主として 3~6 kV 配電用ケーブルに広く採用されてきた。その後、ケーブル製造技術の向上と共に、多くの改良が加えられて高電圧化と高ストレス化が急速に進み、超高压ケーブルも開発されるようになってきた。しかし、初期に製造されたケーブルや劣悪な環境の下で長期間敷設されていたケーブルの中には、水トリーによる劣化が進展して絶縁破壊を引き起こす場合がある。そのためにケーブルの絶縁劣化を検知するための診断技術が検討されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。

しかしながら、CV ケーブルの絶縁劣化判定基準は劣化現象に及ぼす要因が複雑多岐にわたっていることや敷設環境、製造形式などに左右されるために、明確な基準がいまだに確立されていない。従って、各社では専門家の長年にわたる経験と独自の判定基準に基づいて絶縁診断を行っているのが現状である。一方、電

力設備の大規模化や高度化に伴う急速な電力技術の進歩によって、専門技術者や経験豊富な現場の熟練者を確保することが困難な状況になってきている。最近、電気設備機器の分野において、エキスパートシステムを用いた設備診断法の有効性が認められ、急速に実用化⁽³⁾⁽⁴⁾が進んでいる。エキスパートシステムによる配電用 CV ケーブルの絶縁診断例としては、これまでに二、三の報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾が見られるが、構築されたシステムによる診断結果と専門家による判定結果との比較評価については十分な検討がなされていないようである。

著者らは、前報⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾において 6.6 kV 配電用 CV ケーブルの絶縁診断エキスパートシステムにファジー理論を導入することにより、プロトタイプシステムを構築して現場の専門技術者による診断結果と比較した結果、高い一致率を得ることができた。本論文では、主に活線状態下における絶縁劣化診断エキスパートシステムを目指して、前報のファジー推論部におけるメンバーシップ関数を見直してチューニングすると共に、更に残存破壊電圧の推定機能や How 機能などを

付加したシステムの構築を行ったので報告する。

2. 絶縁診断の知識ベースと劣化判定基準

CV ケーブルの絶縁劣化診断に関しては、これまでに種々の試験方法が提案されているが、前述したように現在のところ統一的な判定基準を確立するには至っておらず、ケーブル製造メーカやユーザ側において独自の判断で評価を行っている。そこで、著者らは本エキスパートシステムの構築に際して、これまでに各所から提案されている絶縁診断の判定基準⁽¹⁰⁾を検討して、これに現場における専門家とのヒアリングを通して得られた知見を加えて知識ベースを構築した。

本エキスパートシステムにおいては、現場における劣化診断実績や交流破壊電圧との相関性などを考慮して、次の4項目の劣化診断試験法による測定値を入力データとして採用した。

(1) 直流漏れ電流法 ケーブル絶縁体に直流の高電圧を印加し、漏れ電流の絶対値および時間変化を測定するもので、局所的劣化の検出に適しており、最も診断実績の豊富な試験法である。直流漏れ電流法は、各所において種々の判定基準値があるが、本システムにおいては $0.01\ \mu\text{A}$ 以下を良好、 $0.01\sim 1.0\ \mu\text{A}$ の範囲を要注意、 $1.0\ \mu\text{A}$ 以上を不良としている。

(2) 直流成分法 直流成分法は交流課電下において水トリーの整流作用により生じる充電電流中の直流分を測定するもので、活線状態で劣化診断が可能であり、測定用電源が不要であることから最近注目されている試験法である。本試験法の判定値は $1\ \text{nA}$ 以下を良好、 $1\sim 20\ \text{nA}$ を要注意、 $20\ \text{nA}$ 以上を不良とした。

(3) 直流電圧重畳法 この試験法は、活線下において直流電圧 $50\ \text{V}$ を重畳して、ブリッジ法によりケーブルの絶縁抵抗ならびにシース絶縁抵抗を測定するものであり、データの蓄積は少ないが、将来的に有望な活線診断法⁽¹¹⁾であると考えられるので採用した。本試験法により測定された値が $10,000\ \text{M}\Omega$ 以上を良好、 $2,000\sim 10,000\ \text{M}\Omega$ を要注意、 $2,000\ \text{M}\Omega$ 以下を不良と判定した。また、シースの損傷した箇所から水が浸入して水トリー劣化事故が発生するケースがあることから、シース絶縁抵抗に関しては $10\ \text{M}\Omega$ 以上を良好、 $1\sim 10\ \text{M}\Omega$ を要注意、 $1\ \text{M}\Omega$ 以下を不良と判定した。

(4) 誘電正接法 固体絶縁体が吸湿したり、水トリーが発生すると誘電正接 $\tan\delta$ の値が増大することを利用した試験法であり、絶縁体の平均的な劣化を検出するのに適している。この試験法は、直流漏れ電

流法についてデータの蓄積が豊富である。 $\tan\delta$ の判定基準値については 0.1% 以下を良好、 $0.1\sim 2.0\%$ を要注意、 2.0% 以上を不良と判定した。

3. 本システムの構成と機能

本システムは、図1に示すような手順で絶縁劣化診断を実行する。システムは汎用性を考慮してパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801 RA) の MS-DOS (Ver. 3.3) 上で構築した。本システム内において知識処理を実行しているメインプログラムの部分は、カーネギーメロン大学において開発されたエキスパートシステム構築用の言語 OPS 83⁽¹²⁾ を用いて記述し、ファジー推論部における数値計算を含めた推論処理や、メニュー画面、残存破壊電圧の推定画面などのグラフィック表示には OPS 83 とリンク性の良い C 言語 (Microsoft C, Ver. 5.1) を用いた。人工知能用のコンパイラ言語である OPS 83 は実行処理速度が高速で、人工知能特有のルール形表現だけでなく、従来の手続き形プログラミングも可能であり、知識の追加変

図1 本システムの診断の手順
Fig.1. Flowchart of expert system on insulation diagnosis.

更が容易で柔軟な記述ができ、推論エンジンのチューニングに関しても簡単であるという特長がある。

〈3・1〉 劣化診断データの入力 本システムを起動させると図2(a)～(c)に示すような診断データの入力画面が表示され、以下に示す各項目を入力する。

[診断条件の入力]

診断日 : 1990 -10-21

定格 [k v] : 6.6

型式 : 1
(1. CV/2. CVT/3. 3CV)

半導電層型式 : 2
(1. T-T/2. E-T/3. E-E)

布設年 : 1970

布設環境 : 1
(1. 直埋/2. タクト/3. ビット/4. マンホール/5. トンネル
6. 立ち下がり/7. 常時浸水/8. その他)

(a) 入力画面1

[定期診断]

***** 簡易測定 *****

ケーブル抵抗 [MΩ] ==> 2000
シース抵抗 [MΩ] ==> 8

***** 目視点検 *****

1. シースにトラッキング発生	Yes	None	Unk
2. シースに目撃の穴	Yes	None	Unk
3. シースに軟化変形が認められる	Yes	None	Unk
4. シースが膨張している	Yes	None	Unk
5. シースが変色している	Yes	None	Unk
6. シースに腐食・変色している	Yes	None	Unk
7. シースに動物の食い痕がある	Yes	None	Unk
8. 端子にトラッキング発生	Yes	None	Unk
9. 端子部に著しい変色あり	Yes	None	Unk
10. 端子部に亀裂発生	Yes	None	Unk
11. 端子部が変形してテープ封鎖の恐れ	Yes	None	Unk

→ キーで選択、CR キーで決定

(b) 入力画面2

[測定値の入力]

直流もれ電流 [μ A] = 0.092

t a n δ [%] = 0.5

直流成分 [nA] = 15.0

直流成分 (一括) [nA] =

直流電圧重畳 [MΩ] = 7500.0

シース抵抗 [MΩ] = 5.64

入力終了 再入力

↑ ↓ キーで入力項目を選択.

(c) 入力画面3

図2 診断データ入力画面
Fig. 2. Picture of input data.

これらの入力項目のうちで、少なくとも一つ以上の劣化診断法による測定値と製造年、診断年月日の入力を行うと絶縁劣化診断が実行される。

(i) 製造敷設状況: ケーブルの製造形式 (T-T/E-T/E-E, CV/CVT), 敷設環境 (直埋/ダクト/ビット/マンホール/架空/その他), 製造年, 診断年月日

(ii) 目視点検: 簡易測定によるメガ抵抗値, シース抵抗値に加えて日常点検時の目視点検による参考データ

(iii) 測定値: 直流漏れ電流, 直流成分, 誘電正接, 直流電圧重畳, シース抵抗

〈3・2〉 劣化診断 本システムでは、図2(a), (b)のようにケーブルの使用年数、製造形式、敷設環境、定期診断時の目視点検結果などを入力する。次に、(c)図の各絶縁診断項目の測定データを入力することにより、主に製造敷設条件と目視点検の結果を参考にして水トリー劣化、絶縁体の吸湿、シース劣化などの仮説が生成される。更に、生成された仮説を可能性の高いと思われる順に検証する。これら一連の知識処理については診断形のエキスパートシステムに適している OPS 83 の「仮説-検証形」⁽¹³⁾ により行っている。このような仮説検証を行う場合には、表1に示すようにケーブル絶縁体の有している「絶縁抵抗特性」および「誘電特性」とケーブルシースの劣化を表す「シース抵抗特性」の3グループに分けて、ファジー推論を実行して中間結論を導き出し、これらの中間結論から最終的な劣化診断の判定結果を求める。

〈3・3〉 劣化診断の結論画面 本システムでは、推論が終了すると図3に示すような判定画面が表示され、ケーブルの劣化状態および劣化形態に関するファジー推論のメンバシップ関数の判定グレード結果を表示する。また、ユーザに対してケーブルの処理 (未劣化であり、継続使用可/軽度の劣化であり継続使用可/撤去を検討/撤去を勧告など) を助言する。更に、ユーザが診断の過程を理解しやすいように中間結論に対するグレードを示す。ユーザの劣化診断内容に

表1 中間結論グループ

Table 1. Group of intermediate results.

中間結論	属する測定法
絶縁抵抗特性	<ul style="list-style-type: none"> 直流漏れ電流法 直流成分法 直流電圧重畳法
誘電特性	<ul style="list-style-type: none"> 誘電正接法
シース抵抗特性	<ul style="list-style-type: none"> 直流電圧重畳法

図 3 結論画面
Fig. 3. Picture of the resultant diagnosis.

関する詳細な情報の要求に対しては、本システムが最終結論を導くのに使用した推論規則のルール名を表示するための How 機能を付加している。

4. 本システムのファジー推論機構

本システムの知識ベースは四つの劣化判定項目を主体として構成されている。これらの各判定項目は「良好」、「要注意」、「不良」の三つの劣化グレードに分けている。例えば、直流成分法における判定基準は、その測定値が 1 nA 以下を良好、1~20 nA の範囲を要注意、20 nA 以上を不良と判定している。しかし、このように「良好」と「要注意」、「要注意」と「不良」の判定境界にある明確な数値で分けることは、判定境界付近の前後における劣化程度の判断が不適切になる。現状における判定基準自体に種々の考え方があり、大まかな目安を与えていることを考慮すれば、判定の結果はかなり不明確になるものとする。従って、この場合「1 nA 程度から 20 nA 程度までが要注意」というように、ある幅をもたせて解釈するほうが自然である。一般に、専門家のもっている知識には事実や法則に基づく客観的なものと定性的で経験的な知識とがあり、劣化判定を行う専門家はこの両者を組合せることによって、それに見合った判定結果を下している。そこで、著者らは事象の重なり合ったあいまいな領域や知識を表現するのに適しているファジー理論を用いて CV ケーブの絶縁診断のための推論規則を構成した。

ファジー推論規則は「if…(前件部) then…(後件部)」のような形式で階層的に記述される。推論規則におけ

図 4 ファジー推論のメンバシップ関数
Fig. 4. Membership function of fuzzy inference.

る前件部と後件部については、図 4 に示すようなメンバシップ関数で表される。各メンバシップ関数には「GOOD」、「NOTICE」、「CAUTION」、「WARNING」、「NO-GOOD」というように、言語的な表現に対応して五つのラベルが付けられている。絶縁劣化診断においては、ケーブルの経済的な運用の観点から、特に「要注意」の領域に対する取扱いが重要である。本システムでは、単に「要注意」と判定されている領域の範囲について、軽度の劣化を「NOTICE」、中度の劣化を「CAUTION」、劣化が進行している場合を「WARNING」というように、各々ラベルを付けて 3 段階に分けて判定した。また、各メンバシップ関数の形状については、既存の判定基

準⁽¹⁰⁾に準拠してシステムを構築した後に、専門家が下した診断結果とそのヒアリングを繰返して、中間結論を導く各推論規則の前件部についてチューニングを行った。

本エキスパートシステムはファジー制御において用いられている推論手法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を採用しており、各々のファジー推論規則に対して劣化診断の情報が入力されると、ファジー関係の合成則によって推論が実行される。すなわち、 n 個のファジー合成規則 L^i ($i=1, 2, \dots, n$) があるときには

$$L^i: \text{if } X_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } X_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } Y \text{ is } B_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

の or 結合で表せる。いま、 i 番目のファジー関係 R_i は $R_i = A_{i1} \times A_{i2} \times B_i$ で記述される。ここで、各々 A_{i1} , A_{i2} , B_i は i 番目の前件部と後件部のファジー集合である。従って、推論規則全体では $R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n$ となる。いま、推論規則の前件部に A_1^0 , A_2^0 が入力されるとファジー論理による結果は次式で与えられる。

$$B^0(y) = \max[R(x_1, x_2, y) \wedge A_1^0(x_1) \wedge A_2^0(x_2)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

CV ケーブルの絶縁劣化診断では、診断情報としてファジー集合 A_1^0 , A_2^0 の代わりに確定した測定データ x_1^0 , x_2^0 が与えられるから

$$\begin{aligned} B^0(y) &= R(x_1^0, x_2^0, y) \\ &= R_1(x_1^0, x_2^0, y) \vee R_2(x_1^0, x_2^0, y) \vee \dots\dots \\ &\quad \vee R_n(x_1^0, x_2^0, y) \\ &= [A_{11}(x_1^0) \wedge A_{12}(x_2^0) \wedge B_1(y)] \\ &\quad \vee [A_{21}(x_1^0) \wedge A_{22}(x_2^0) \wedge B_2(y)] \vee \dots\dots \\ &\quad \vee [A_{n1}(x_1^0) \wedge A_{n2}(x_2^0) \wedge B_n(y)] \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

いま入力 x_1^0 , x_2^0 の i 番目における規則に対する適合度

を $\omega_i = A_{i1}(x_1^0) \wedge A_{i2}(x_2^0)$ と定義すれば(3)式は次のようになる。

$$B^0(y) = [\omega_1 \wedge B_1(y)] \vee [\omega_2 \wedge B_2(y)] \vee \dots\dots\dots (4) \quad \vee [\omega_n \wedge B_n(y)]$$

更に、ここで(4)式については $B_i^*(y) = \omega_i \wedge B_i(y)$ のようなファジー集合を定義すれば

$$B^0(y) = B_1^*(y) \cup B_2^*(y) \cup \dots \cup B_n^*(y) \quad \dots\dots\dots (5)$$

とすることができる。すなわち、 n 個の推論結果 $B_1^* \sim B_n^*$ の和として表せる。ファジー理論の結果として $B^0(y)$ の代わりに確定量が必要であれば、一般に次式を用いて非ファジー化を行うことができる。

$$y^0 = \frac{\int B^0(y) y dy}{\int B^0(y) dy} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図5はファジー推論の概略を示す。まず、入力 x_1^0 , x_2^0 が与えられると各規則の適合度 ω_1 , ω_2 を計算する。次に、規則ごとの推論結果 B^* を求めて、これらを更に合成することによって B^0 (斜線部) を求めれば、その重心 y^0 が推論結果を表す。

5. 残存破壊電圧の推定

CV ケーブルの絶縁劣化診断において、残存寿命を推定することはケーブルの経済的な運用を可能にし、かつ保守管理を容易にするものとして重要な検討課題である。従来より、CV ケーブルの残存寿命推定法としては漏れ電流などの特性量から残存破壊電圧を推定する手法⁽¹⁶⁾、あるいは v - t 特性から n 乗則を用いて残存寿命を推定する手法が提案されてきた⁽⁵⁾⁽¹⁷⁾。しかしながら、これまでに報告されている CV ケーブルの v - t 特性については、試験条件が異なる上に寿命指数が $n=2.5 \sim 22$ ⁽¹⁷⁾ とかなりの範囲でばらつくことから、エキスパートシステムの寿命予測として n 乗則

図5 ファジー推論
Fig. 5. Fuzzy inference.

($n=9$) をそのまま適用する⁽⁵⁾ ことには問題があり、検討を要するものとする。

そこで、本システムでは絶縁診断の際にファジー推論から得られた結論グレードを利用して残存破壊電圧の推定を試みた。図6は次章で述べるように、本システムを比較評価するのに用いた測定データを入力した場合の結論グレード Y_g と交流破壊電圧 V_{BD} との相関関係を示すグラフである。ここで、グレード Y_g は最終結論を導くための中間結論に対するグレードを表しており、絶縁劣化が進行するのに伴って高い値を示す。同図からも明らかなように、グレード Y_g と破壊電圧 V_{BD} の間には良い相関性が認められる。特に、劣化のグレードが「NOTICE」～「NO-GOOD」に相当する範囲においては非常に良い相関性（相関係数

0.882）がある。図7はこのような相関を用いることにより、ファジー推論時の結論グレードから残存破壊電圧を推定した結果を示す。しかしながら、前述したように破壊電圧の推定値から残存寿命を推定することが現時点で困難であるために、本システムにおいては破壊電圧の推定値に応じて表2に示す基準に基づいたケーブルの処置を助言することにした。同表において基準電圧を各々35 kV、25 kV、10 kVとした理由については、「6 kV 級 CV ケーブルの場合に交流破壊電圧を35 kV以上確保できれば、向こう10年以上の残存寿命が期待できる」⁽¹⁸⁾ という考え方から、推定値が35 kV以上である場合には「継続使用可」と判断した。また、「6.6 kV CV ケーブルの破壊強度が各々6 kV/mm、2.5 kV/mmとなる場合を各々『要注意』、『不良』と判断する」との提案⁽¹⁶⁾ がなされていることから、この破壊強度を電圧に換算した値として約25 kV、約10 kVを目安にして電圧範囲25 kV～35 kVの場合を「（劣化しているが軽度であるので）継続使用可」とし、10 kV～25 kVの範囲を「撤去・補修を検討」と判断した。更に、10 kV以下の電圧については、図6のデータからも明らかなように橋絡水トリーの発生が観察されていることから、絶縁破

図6 グレードと残存破壊電圧の関係
Fig. 6. Relation between grades and residual breakdown voltages.

表2 ケーブルの処置基準
Table 2. Standard for treatment of cables.

基準	ケーブルの処置
35 kV 以上	継続使用可 1
25～35 kV	継続使用可 2 (軽度の劣化)
10～25 kV	撤去・補修を検討
10 kV 以下	速やかな撤去を勧告

図7 残存破壊電圧の推定画面
Fig. 7. Picture of estimation of a residual breakdown voltages.

表3 本システムと専門家の診断の比較結果
Table 3. Comparison of the resultant diagnoses by the system and experts.

		専門家の診断結果			
		良好	要注意	不良	シース不良
本システムの診断結果	GOOD	22例			
	NOTICE		12例		1例
	CAUTION		8例		
	WARNING			1例	
	NO-GOOD			3例	
	シース不良				5例

(注) 太枠内が一致

壊が起きる可能性があり、極めて危険な状態にあるものと判断してケーブルの「速やかな撤去を勧告」することとした。

本システムでは、残存寿命を推定するための補助的な機能として、ケーブルの活線下で測定した絶縁抵抗値による残存破壊電圧の推定機能が付加されている。一般に、直流高圧漏れ電流法は優れた劣化診断法であるが、測定が停電時のみに限られており、診断作業も複雑で即応性に欠ける。これに対して、藤倉電線と旭エンジニアリングにより共同開発された高圧ケーブル活線絶縁診断装置“LINDA-1000”⁽¹⁾は、活線下において高抵抗を高精度で測定することができる。本装置によって測定した活線時の絶縁抵抗値は、直流高圧漏れ電流法における3~5 kV印加時の抵抗値におおむね対応していることが知られている。従って、CVケーブルの劣化診断に際して直流高圧漏れ電流試験と交流破壊電圧試験から得られた活線下における絶縁抵抗値と交流破壊電圧特性の豊富なデータを利用して、絶縁劣化診断を総合的に行っている。

6. システムの評価

今回、著者らはファジー推論を導入してCVケーブルの絶縁劣化診断エキスパートシステムを構築した。本システムの信頼性を評価するために、実線路に敷設されていたケーブルの測定データ（測定相数：263，測定項目：直流漏れ電流，直流成分，シース抵抗，交流破壊電圧など）のうちで、専門家が絶縁劣化の判定を下している52例を基にして、本エキスパートシステムによる診断結果と専門家の判定した結果を比較した。その結果を表3に示す。本システムによる絶縁診断の結果は、専門家がシース不良と判断した例を除けば、専門家の判定と極めてよく一致していることが確

認された。

7. ま と め

本システムでは、専門家のもつ知識や判定基準のあいまい性を表現するためにファジー推論を導入して構築を行った。従来のエキスパートシステムで用いられてきたプロダクションルールでは、判定基準値の境界付近における判断が明確に分かれてしまうという欠点があった。しかし、ファジー推論においては判定基準の境界の前後で測定値に応じた判定グレードを与える利点がある。本システムの信頼性を評価するために、本システムと専門家の診断結果を比較したところ、比較的良い一致が得られた。また、ケーブルの絶縁劣化が進行している「NOTICE」～「NO-GOOD」の領域では、直流漏れ電流法と直流成分法の測定データから得られた判定グレードと交流破壊電圧との間には、高い相関性のあることが見いだされた。そこで、本システムではファジー推論時のグレードと交流破壊電圧との相関性を利用して残存破壊電圧の推定を試みた。また、活線下における絶縁抵抗値と交流破壊電圧との関係を用いて残存破壊電圧を推定し、総合的な絶縁劣化診断を行った。将来、数多くのデータを蓄積することができれば、本法は残存破壊電圧の推定法として有効な一手段になるものとする。

最後に、CVケーブルの絶縁劣化診断に関するヒアリングとメンバシップ関数のチューニングに際して、多大のご協力を賜った藤倉電線(株)の関係各位ならびに本学工学部 中西祥八郎教授に感謝いたします。

(平成2年10月24日受付)

文 献

- (1) 特別高圧回転機・ケーブル絶縁の劣化診断技術調査専門委：「特別高圧回転機・ケーブルの絶縁劣化診断技術」，電気学会技報(II部)，No. 267 (昭63)
- (2) 地中送電設備管理技術調査専門委：「特別高圧CVケーブルの設備実態と絶縁診断技術の動向」，同上(II部)，No. 266(昭63)
- (3) 伊藤：「油中ガス分析による変圧器自動診断システム」，生産設備管理・産業システム情報化合同研資，PFC-87-10(昭62)
- (4) 伊藤・芳賀：「エキスパートシステムによる高圧回転機の絶縁診断」，電気学会絶縁材料研資，EIM-87-109(昭62)
- (5) 浅利・岩本・岡本・深川：「配電用CVケーブルの劣化診断寿命予測エキスパートシステム」，電学論B，110，277(平2-4)
- (6) 山中・福田・橋詰・篠田：「エキスパートシステムによるCVケーブルの絶縁劣化診断」，電気学会絶縁材料研資，EIM-90-42(平2)
- (7) 金古・中西・田部井：「ファジー理論を導入したCVケーブルの絶縁診断エキスパートシステムの構築」，電学論，A，109，504(平元-11)
- (8) 金古・中西・田部井：「CVケーブルの絶縁劣化診断エキスパートシステム」，東海大学工学部紀要，29，1(平元)

- (9) 菅野・大島・大山・金古・小野：「ファジィ理論を用いた CV ケーブルの絶縁劣化診断エキスパートシステム」, 電気学会誘電・絶縁材料研究, EIM-91-13(平3)
- (10) 固体絶縁物絶縁劣化判定試験法調査専門委：「絶縁劣化診断試験方法」, 電気学会技報(II部), No.182(昭59)
- (11) 牧・岡本・白浜・梅田・木村・新元・水沼：「高圧ケーブル活線絶縁診断装置[LINDA-1000]」, フジクラ技報, 73, 19(昭62)
- (12) C. L. フォギー (中間 監訳) : OPS 83 オフィシャルマニュアル(平2) パーソナルメディア
- (13) 田中・下井：エキスパートシステムの構築の方法(昭62) パーソナルメディア
- (14) 菅野：ファジィ制御, p. 76(昭63) 日刊工業新聞社
- (15) D. Didier & P. Henri: "Fuzzy Sets and Systems-Theory and Applications p.11(1980) Academic Press
- (16) 深川・鈴木・池田・岡本・柴田・新田：「架橋ポリエチレンケーブルの水トリー劣化とその判定法」, 電中研総報, No. 113(昭58)
- (17) 速水：CV ケーブル, p. 49(昭62) コロナ社
- (18) 清水・若原：「撤去 6 kV CV ケーブルの調査結果と劣化予知について」, 電気学会絶縁材料研究, EIM-81-4(昭61)

トシステムなどに関する研究に従事。工学博士。静電気学会, 可視化情報学会会員。

菅 野 泰 (正員)

昭和 39 年 6 月 13 日生。平成元年 3 月東海大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程に進学。現在, アイダエンジニアリング(株)に勤務。

金 古 喜代治 (正員)

昭和 12 年 12 月 20 日生。36 年 3 月東海大学工学部電気工学科卒業。40 年 3 月東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。

同年 4 月東海大学工学部電気工学科専任講師, 44 年同助教授, 53 年同教授, 現在に至る。その間, 絶縁材料の破壊現象, 電界解析, 絶縁劣化診断エキスパー

小 野 幹 幸 (正員)

昭和 15 年 10 月 27 日生。39 年 3 月九州工業大学工学部電気工学科卒業。41 年 3 月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年 4 月藤倉電線株式会社に入社。その間, 主として超高压架橋ポリエチレンケーブルの研究開発に従事。工学博士。IEEE 会員。