

# 決定木とワイブルべき乗則とを組み合わせた 電力ケーブルの劣化要因分析とその余寿命推定

廣瀬 英雄<sup>\*</sup>, 鶴 康太郎<sup>\*\*</sup>

## Deterioration Factor Analysis and Remaining Lifetime Estimation of Electric Power Cables using the Combination of the Decision Tree and the Weibull-power-law

Hideo Hirose<sup>\*</sup>, Kotarou Tsuru<sup>\*\*</sup>

**要旨:** 電力ケーブルなどの電力機器の、経年に対する絶縁破壊ストレスの劣化モデルとしては、これまで混合ワイブルべき乗則が用いられてきた。これは、サンプル採取した埋設中の電力ケーブルに上昇法試験を行って破壊ストレスを求め、経年と破壊ストレスの関係をべき乗則で表し、劣化速度の大きさに応じたべき乗則を混合したものである。しかし、サンプル採取時には経年の他にも多くの物理的な特性値が計測されていたにもかかわらず、そこでは劣化モデルにそれらの特性値を取り込むことは出来ていなかった。また、パラメータ推定は極めて困難であった。ここでは、計測されたさまざまな特性値を説明変数として積極的に利用し、その中から主たる劣化要因を決定木によって分類することを試みる。その結果を用いた上で、ワイブルべき乗則により余寿命推定を行う。劣化の程度が大きい場合とそうでない場合に2分類する要因を決定木により求めた結果、劣化を決定する大きな要因は最大水トリー長であることが分かり、これは専門家が経験的に指摘する要因と同様であった。また、それを分けるしきい値として最大水トリー長=395 $\mu$ mが求められた。更に、劣化進展度合いの大きいデータを対象にした余寿命の推定値とその信頼度を求める方法を示した。提案する方法でのパラメータ推定は混合ワイブルべき乗則に比べて計算が容易であるという特徴を持つ。

**キーワード:** 余寿命推定, 決定木, ワイブルべき乗則, CV ケーブル,

**Abstract:** The mixed Weibull-power-law model has been used as the deterioration model of the electric apparatuses such as power cables. The method uses the various power-law relationships in a mixed model corresponding to their deterioration speed between the years of use and the breakdown stresses observed by using the step-up tests to working cables under the ground as samples. However, only the years of use are used among many kinds of physical properties as the explanation variable, and parameter estimation is extremely difficult. In this paper, we propose a new method to find the principal deterioration factors using the decision tree method, then we estimate the remaining lifetime of the cables using the Weibull-power-law. We have found that one of the principal factors could be the maximum length of the water-tree as many experts predict by their experiences. Its

\* 九州工業大学 情報工学部 システム創成情報工学科

〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4 hirose@ces.kyutech.ac.jp

\*\*九州工業大学 情報工学部 システム創成情報工学科

〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4 tsuru@ume98.ces.kyutech.ac.jp

threshold value is obtained as 395 μm. We also show the method to estimate the remaining lifetime to heavily deteriorated cables. The computational difficulty in parameter estimation is dramatically reduced.

**Keywords:** remaining life time estimation, decision tree, Weibull-power-law, CV cables

1 はじめに

加速寿命試験は、製品が正常稼働する期間を保証するために製品出荷前に工場で行う試験である。さまざまなストレスに対する寿命の変化を経験則として利用し、使用ストレス下での寿命をextrapolationにより求めている。経験則にはべき乗則がよく知られており、寿命にはワイブル分布がよく適合するため、寿命推定にはワイブルべき乗則が用いられている [5,6]. 例えば、ストレスをVとしたべき乗則、

$$\mu = kV^{-n} \dots\dots\dots (1)$$

を組み込んだワイブル寿命分布は、

$$F(t; V) = 1 - \exp\{-(k^{-1}V^n t)^\beta\} \dots\dots\dots (2)$$

と表すことができるので、複数の一定ストレスを同時にかけて寿命試験を行う場合の尤度関数は、

$$L = \prod_{s=1}^l \left\{ 1 - F(t_s; V_s) \right\}^{r_s} \prod_{i=1}^{r_s} f(t_i; V_s) \dots\dots\dots (3)$$

と表される。ここに、(1)式で、μはワイブル分布における尺度パラメータに相当し、nはストレスに対する寿命の度合いを表し、kは定数である。また、(2,3)式で、tは使用時間、βはワイブル分布の形状パラメータ、lはストレスレベルの数、t<sub>s</sub>はストレスV<sub>s</sub>での試験打ち切り時間、r<sub>s</sub>はストレスV<sub>s</sub>でt<sub>s</sub>までに故障しなかったサンプル数、r<sub>s</sub>はストレスV<sub>s</sub>でt<sub>s</sub>までに故障したサンプル数、t<sub>i</sub>は故障時刻、Fは分布関数、fは密度関数である。寿命試験には、低ストレスでの長時間試験を避けるため、ストレスを連続的に上昇させて故障した時刻を見る方法や、段階的に上昇させ、破壊したストレスを記録する方法もある。後者の場合、(3)式を自然に拡張して、cumulative exposure modelによる確率分布関数

$$F(t_j) = 1 - \exp\{-\alpha(t_j)^\beta\},$$

$$\alpha(t_j) = k^{-1} \cdot \Delta t \cdot (V_1^n + V_2^n + \dots + V_j^n) \dots\dots\dots (4)$$

表1 ケーブル特性値の計測項目

調査項目		
番号	直流成分(nA)	ホウタイ300-500(個)
線路名	シースImpBDV(kV)	ホウタイ500-700(個)
電圧(kV)	シースImpBDV(回)	ホウタイ700-900(個)
絶縁厚	DCBDV(kV)	ホウタイ900-(個)
サイズ(mm2)	DCBDV(分)	外導0-100(個)
種別	ACBDV(kV)	外導100-300(個)
製造社	ACBDE(kV/mm)	外導300-500(個)
製造年	ACBD(分)	外導500-700(個)
撤去年	ImpBDV(kV)	外導700-900(個)
年数	ImpBD(回)	外導900-(個)
架橋方式	絶縁体BMAX(μm)	シース水分量(ppm)
布設場所	絶縁体B(個)	テープ水分量(ppm)
水量	絶縁体MMAX(μm)	外導水分量(ppm)
布設状況	絶縁体M(個)	絶縁体内側(ppm)
負荷(A)	絶縁体AMAX(μm)	絶縁体中間(ppm)
事故歴	絶縁体A(個)	絶縁体外側(ppm)
試料長(m)	絶縁体FMAX(μm)	内導水分量(ppm)
外観調査	絶縁体F(個)	架橋度(%)
解体調査	絶縁体VMAX(μm)	加熱変形度(%)
シース抵抗(MΩ・km)	絶縁体V(個)	引張強度g/mm2)
シースAC耐圧	内導突起MAX(μm)	伸び率(%)
シースImp耐圧	外導突起MAX(μm)	老引張強度(%)
tanδ 1/2E(%)	内導トリ-MAX(μm)	老化伸び率(%)
tanδ E(%)	ホウタイリ-MAX(μm)	絶縁体内側熱履歴(°C)
C(μF/km)	外導トリ-MAX(μm)	中間熱履歴(°C)
PD1(pC)	内導トリ-0-100 μm(個)	外側熱履歴(°C)
PD2(pC)	内導100-300(個)	結晶化度(%)
PD3(pC)	内導300-500(個)	カルボニル基数(1/1000C)
残留電圧(V)	内導500-700(個)	二重基数(1/1000C)
直流漏れ1(μA)	内導700-900(個)	内導900-(個)
直流漏れ2(μA)	ホウタイ100-300(個)	ホウタイ0-100(個)
直流漏れ2(μA/km)	直流漏れ3(μA)	

を用い、パラメータβ、nを推定することができる[7]. ここに、jはストレスレベル、Δtは同じストレスをかけたときの経過時間である。

さて、電力機器には数10年の正常稼働が要求されているが、出荷後、さまざまな使用環境に長期間さらされると、機器は出荷前には想定しなかった要因により劣化し、出荷時に予測した寿命を下回ることが心配される。つまり、使用経年により様々な劣化が加わるため、加速寿命試験の結果だけでは、実際の機器の寿命を予測できないことに注意する必要がある。

また、加速寿命試験は、高いストレスをかけたときのストレスと寿命との関係から、使用ストレス下での寿命を予測しているだけであり、実際の使用ストレス下での劣化程度を調べる劣化試験ではないことにも注意しておく必要がある。つまり、ストレス

と寿命との関係がワイブルべき乗則に従うと仮定した上で、使用ストレスを $t$ 時間かけた後で上昇法試験により破壊ストレス $S$ を求めたときの $t$ と $S$ との関係は、ワイブルべき乗則とは無関係になるため、加速寿命試験から劣化程度を調べることができることはない。例えば、その典型的な一例として、ワイブルべき乗則の一つである（一定ストレスの下での寿命分布は指数分布に従う）指数べき乗則モデルを考える。このモデルで、使用中のサンプルを抜き出し上昇法により破壊ストレスを求めたと仮定すると、経年に対して劣化が全く見られない現象が観測される[3,8]。これは、指数分布のmemorylessの性質から当然の結果であるが、この関係ははじめに仮定したワイブルべき乗則とは無関係になっている。

そこで、例えば電力ケーブルの場合、出荷後に埋設された稼働中のケーブルをサンプル採取してさまざまな特性値を計測し、機器の劣化を考慮した余寿命推定に役立つようなモデルを構築したいという試みがなされた[1,9,10]。ここでは、加速寿命試験に用いられる法則のアナロジーを用いる。使用期間に対する劣化の度合いの関係がべき乗則

$$\eta = Kt^m \dots\dots\dots (5)$$

に従い、同じ使用期間経過したケーブルに上昇法試験を行うと破壊ストレスはワイブル分布に従う、と仮定すると、

$$G(v; t) = 1 - \exp\{-(K^{-1}t^m v)^\alpha\} \dots\dots\dots (6)$$

が成り立つと考え、余寿命推定を行っている。ここに、(5)式で、 $\eta$ はワイブル分布における尺度パラメータに相当し、 $m$ は使用期間に対する破壊ストレスの度合いを表し、 $K$ は定数である。また、(6)式で、 $v$ はストレス、 $G$ は分布関数である。しかしながら、そのとき計測された特性値には、表1に示すとおり、 $\tan \delta$ 、水分量、ボウタイトリー長（水トリー長）など、多くの計測項目が含まれていたにもかかわらず、文献[1,9,10]の劣化モデルに使われたものは、使用年月と上昇法による破壊ストレスだけであり、その他は利用されていなかった。ここで、例えばボウタイトリーとは、絶縁体中にはじめから存在していた小さな空隙（ボイド）が長い時間の間に木の形のように進展していった状態を指し、木が大きくなると絶縁破壊に大きく影響することが物理的にも知られている。また、 $\tan \delta$ （誘電正接）は、ボイド放電の結果その値が大きくなるもので、やはり絶縁破壊

に影響する指標である[2,4]。そして、製造後時間が経って分かってきたことであるが、ケーブルを製造する際に使われた水蒸気的水分も絶縁破壊に影響している。

ここでは、経年を含む多くの特性値の中で、破壊ストレスを低減化させた主な劣化要因を、個々の物理的な試験から推測するのではなく、すべての要因が含まれた現実のデータから求めるため、決定木を用いて特性値を分類することを試みる。また、その結果にもとづき、機器の余寿命を推定し、その信頼度を求める方法について再考する。

また、文献[1,9,10]では、AICを用いて混合分布の最適数を求めていたが、未知パラメータ数は混合分布の数が増えるに従って大きくなり、それにとまって尤度方程式を解くことが極めて困難になっていた[11,12]。ここで提案する方法では、基本的には主劣化要因を見つけた後で、その劣化要因に基づくワイブルべき乗則のパラメータを推定しているため、混合ワイブルべき乗則のときの推定に比べて計算が極めて容易になっているという特徴を併せ持つ。

## 2 撤去ケーブル絶縁破壊試験データ

図1は、定格が22kV及び33kVの実際に埋設された使用中の電力用CVケーブルを地下から撤去し、上昇法試験によって破壊ストレスを求め、経年に対する破壊ストレス特性を両対数グラフにプロットしたものである[1]。縦軸は破壊電圧を定格電圧で割った

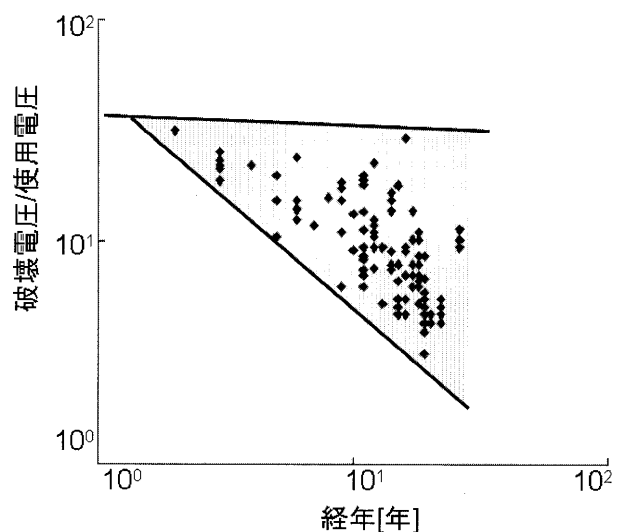


図1 22/33kV 撤去ケーブルの劣化特性[1]

値をストレス値として用いており、定格による変動が現れないように規格化している。これは、破壊電界に対応する物性値であるが、電界そのものではない。同じ定格でも絶縁層の厚さがユーザーの仕様によって異なっていたり、製造年によっても異なっていたりするため、電界で処理するよりも破壊電圧/使用電圧のほうが22kV及び33kVを同時に扱うにはより適していると考えたからである。このとき、この値は、要求される絶縁耐力が使用電圧の何倍であるかという明確な意味を持つ。文献[1,9,10]では、3相における波高値を表すため、破壊ストレスを破壊電圧/定格電圧に $\sqrt{3}$ 倍した値を用いていたが、ここでも同様に扱う。

絶縁破壊電圧試験は、22kVケーブルに対しては、対地電圧25kVで10分間耐圧できれば5kV昇圧、さらにその電圧で10分間耐圧できればまた5kV昇圧するという方法をとる。耐圧時に破壊すればその電圧を、昇圧時に破壊すれば昇圧前の電圧を破壊電圧として記録する。33kVケーブルの場合も同様に5kVの昇圧とする。横軸は経年であるが、連続値ではなく年単位で離散化されている。撤去したケーブルの試験長はすべて20mである。

図1を見ると、破壊ストレスに対する初期性能はほぼ同じであるが、長期間経つと、早くから劣化するケーブルから遅くまで劣化しないケーブルまで、かなりばらつきがあることがわかる。これが、環境要因による劣化と考えられる。先に述べたように、もし環境による経年劣化が無かった場合、初期性能は保たれ、経年による破壊ストレスの変化は見られないはずである。図には2本の直線が描かれているが、これは解析的に求められたものではなく、観測データを囲む領域を感覚的に求めてみたものである。文献[1,9,10]では、経年による劣化速度が環境によって変わると仮定して、複数の環境を想定した混合ワイブルべき乗則を用いて余寿命推定を試みている。また、AICを用いて、最適な環境数を4と結論づけている。

### 3 決定木における劣化要因分析

最近、説明変数が多い時の線形回帰分析での不都合を回避するため、経年死亡率を環境に応じて分類しながら、それぞれの分類されたグループの中で単

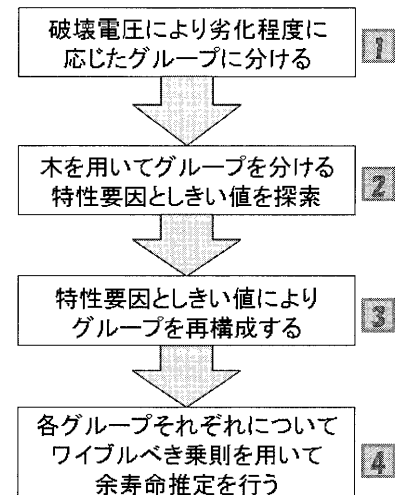


図2 劣化要因分析から余寿命推定までの手順

純な回帰を行うことで、より精密な死亡率曲線を求める方法が提案されはじめている[13,14]. *logistic regression tree*はその代表的な方法の一つである。これは、*response*として0/1の2値情報を用いており、回帰と木を同時に用いている。

さて、電力ケーブルの劣化特性はまだ詳細には解明されていない。撤去ケーブルデータの場合、破壊電圧を目的変数とすると、これは多値離散データや連続データとなり、生死のような2値情報ではない。そこで、ここでは、一定期間使用したケーブルの劣化度合いに応じて何らかの方法であらかじめ複数のグループに分け、それぞれのグループを決定する要因について木を用いてまず探り、次いでその要因に従うグループを再構築し、そのグループ内ではそれぞれのワイブルべき乗則に従っていると仮定して余寿命推定を行う。つまり、木と回帰とをシリーズに行うことを考える。このプロセスを図2に示す。

以下で、1) 劣化程度が大きいグループと小さいグループの2つに分けた場合、2) 劣化程度を文献[1,9,10]に従って4グループに分けた場合について考察する。

#### 3.1 劣化程度を2グループに分類した場合

ケーブルは使用環境に応じてケーブル特性が変わり、そのため破壊電界の大きさに大きな差が出ているものと推察される。そこで、劣化程度が少ないケーブルと大きいケーブルとの間にどのような特性の違いがあるかを見るために、図3のように最小2乗法

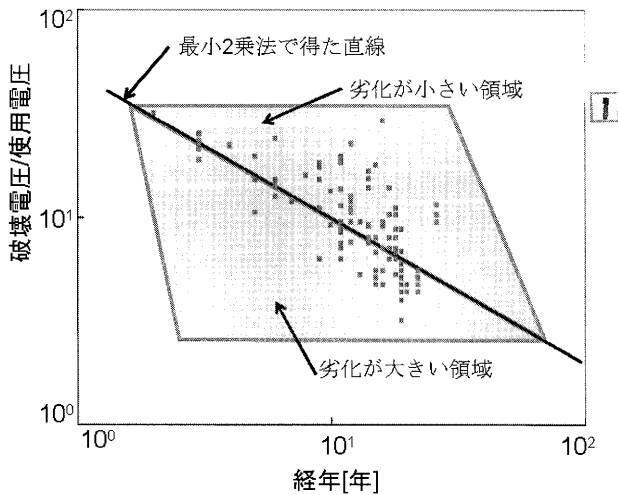


図3 経年による劣化程度のカテゴリ

で引いた直線の上側 (劣化が少ない) と下側 (劣化が大きい) との2値に分け、これを2分する要因を、決定木を用いて探索した。つまり、はじめから破壊・非破壊の2値が得られている訳ではないすべての破壊ストレスを、劣化の程度によって、あるしきい値から上では破壊、下では非破壊の2値に分けられると仮定したのである。ここでの破壊・非破壊とは、あるストレス以上で破壊する確率が  $p$  以上になるときに破壊、そのストレス以下で破壊する確率が  $p$  以下になるときに非破壊という意味で用いている。例えば  $p=0.5$  である。実際のresponseとしての2値は与えられていないため、あるしきい値を設けて、2値のresponseを与えている。この方法がここで新しく提案する方法の一つになる。

決定木を用いてこのように分類した結果、図4のように、最上位の分岐点で、 $\tan \delta = 0.0345$  をしきい値として劣化程度が2分されることが分かった。図の各ノードに、劣化程度の大小で2分されたデータの割合を、括弧内にそのデータ数を示した。図は、ノード0での劣化程度の大きいサンプル数71 (反応0) と小さいサンプル数53 (反応1) が、最小2乗法によって  $\tan \delta$  の値をしきい値として分類されていることを示している。ノード0は、劣化が大きいサンプルを多数含むノード2と、劣化が小さいサンプルを多めに含むノード1に分けられ、ノード2では、全体の半数以上で劣化程度が大きいと判断されている。つまり、劣化程度の大小により全体を約6対4に分け

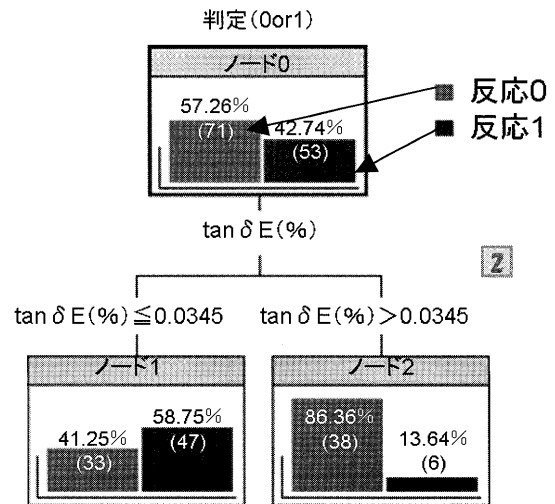


図4 経年による劣化要因の探索

た場合、ノード2中の86%は劣化程度が大きいと判断されており、このグループを用いて余寿命推定を行えば安全側の推定ができることを示している。決定木は劣化要因とそのしきい値を適切に抽出していると考えられる。一方、ノード1中では、劣化程度の大きいサンプル数は33 (反応0)、小さいサンプル数は53 (反応1) となっており、劣化程度の小さいサンプルのみを分類するようにはなっていない。決定木では、1回の分岐にGini指標を用いているため、より純粋なグループを一つだけ抽出して残りは次の段階での分岐に分類をゆだねているということからよく見られる現象である。図5に、 $\tan \delta = 0.0345$  をしきい値としてサンプルを2分したときの散布図を示す。図は上に述べたことをよく表している。

さて、この環境要因で分類したデータそれぞれに対して(6)式のワイブルべき乗則を適用すれば、最尤法によりそれぞれパラメータを推定することができ

表2 劣化程度のカテゴリ位置による尤度の変化

劣化要因で分類したグループ	劣化要因	閾値	対数尤度
全体	$\tan \delta E [\%]$	0.0345	-253.5
全体の上側A	最大水トリー長 $[\mu m]$	395	-245.6
Aの上側	直流成分 $[nA]$	2.75	-270.3
全体の下側B	絶縁体中間 (水分量) $[ppm]$	139.5	-260.2
Bの下側	絶縁体中間 (水分量) $[ppm]$	735	-254.2

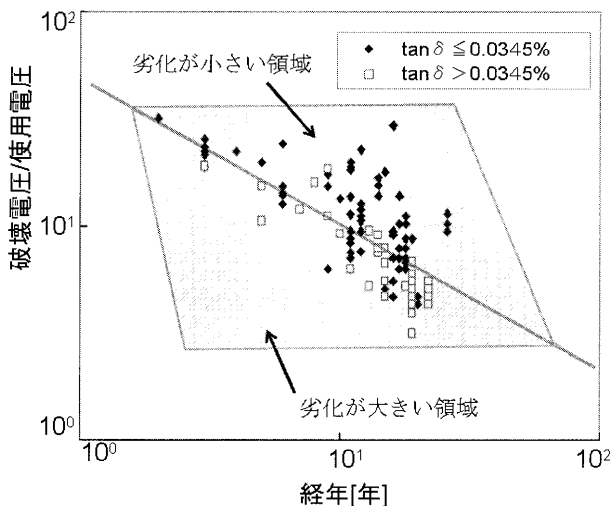


図5 劣化要因探索後の分類結果

る。また、そのときの尤度を求めることができる。ここでは、初期性能はすべて同じと考えて、(5)式のべき乗則の起点では文献[1,9,10]に示された値と同じ破壊ストレスを持つと仮定してそれを利用し、回帰直線の切片の推定 ( $K$ の推定と同等) は行っていない。つまり、未知数を、 $\alpha$ と $m$ の2個とした。そして、それぞれのグループで求められた最大対数尤度を加えたものがこのモデルの最大対数尤度とした。表2の一番上の行にこれを示す (最大対数尤度 = -253.5)。

次に、上側に分類されたもの (これを、全体の上側A、と呼ぶ) を同様に更に2つに分類して劣化がかなり小さいものとそうでないものとの分類要因を求めた。このように劣化の程度を分ける領域を変えていき、最もよく分類できる劣化要因をその都度探すということを繰り返してみた。表2にその結果を示す。表には同様なことを下側にも行った結果も併記している。また、それぞれの場合の最大対数尤度の総和を計算して、どの分類が最も適切であるかを計算した。ただし、ここでの対数尤度計算には簡便のため、破壊ストレス値は連続データとして扱っている。表から、最大水トリー長=395  $\mu\text{m}$  による分類がこの中で対数尤度最大 (= -245.6) を示すため、劣化程度を2分する劣化要因としてはこれが最も妥当であることを示唆している。その特性値のしきい値によって2グループを再構成したものにワイブルべき乗則を用いて得られた回帰直線を図6に示す。このときに得られたパラメータの推定値は、最大水

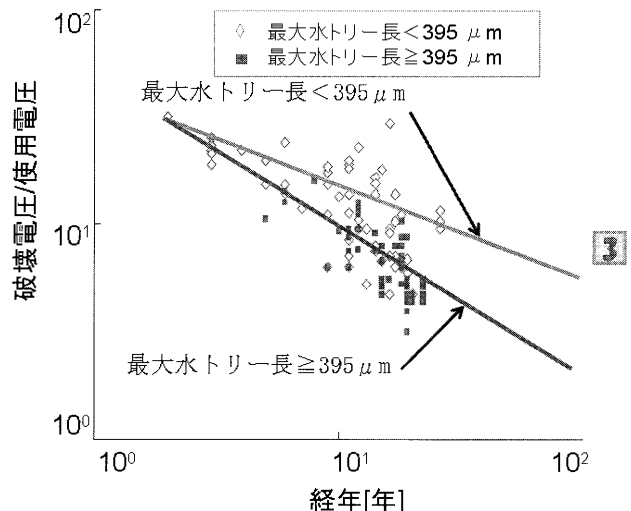


図6 2グループでのワイブルべき乗則による回帰

トリー長 $\geq 395 \mu\text{m}$ のとき  $(m, \alpha) = (0.74, 4.01)$ であった。この $m$ の値は、文献[1,9,10]で劣化程度を4つのグループに分けたとき一番劣化程度の大きいグループで求められた $m_4 = 0.78$ の値に近い。

### 3.2 劣化程度を4グループに分類した場合

経年によるケーブルの劣化程度を、文献[1,9,10]に従って、最適な4グループの混合ワイブルべき乗則に従っていると仮定して、劣化の少ない3グループと最も劣化の大きいグループとで、グループを2分し、それ以降の手続きは3.1と同様に行った。安全をはかる上で最も重要なグループは劣化の最も大きいグループだからである。

分類の結果、決定木は  $\tan \delta = 0.0345$  をしきい値として劣化程度を2分することが分かった。これは3.1で最小2乗法により全体を2分させたときに得られた劣化要因およびそのしきい値と全く同じである。つまり、サンプル全体に対して最小2乗法で得られた場合の劣化要因とそのしきい値は、混合ワイブルべき乗則で最も劣化の大きいグループ一つとその他の3個のグループとを分けたときのそれらと同一である。混合ワイブルべき乗則を用いた場合にも最尤法により適切なグループ数を決定しており、混合ワイブルべき乗則で得られた劣化の最も大きいグループをそうでないものと分けることは考察する意味があると思われるので、4節においては、最大水トリー長=395  $\mu\text{m}$  をしきい値とした余寿命推定を行うことに加え、 $\tan \delta = 0.0345$  をしきい値とした余寿命推定も行い、

これらの比較を行った。

#### 4 余寿命推定

ケーブルのクリティカルな余寿命を推定するには、すべてのケーブルを平均化したものを求めるよりも、劣化程度の大きいグループについてそれを求め、安全側の対策を講ずる必要がある。そのため、ここでは、劣化が大きいと判断されたグループ内のデータを用いて、ワイブルべき乗則により余寿命推定値とその信頼度を求めた。

今、決定木により求められたしきい値を使って分類したデータに対して、ワイブルべき乗則を(6)式と仮定し、最尤法を用いてパラメータ推定を行うと、特性破壊ストレス回帰直線を得る。特性直線とは、ワイブル尺度が1となる確率点から成る直線である。このとき、劣化程度の大きいグループでの破壊確率分布を求めた。図7は最大水トリー長=395 $\mu$ mをしきい値としたときの破壊確率分布、図8は $\tan \delta = 0.0345$ をしきい値とした破壊確率分布を表す。図で、複数の分布関数が示されているのは、使用経過時間に応じて破壊確率分布が異なっているためである。図7、8の違いは分かりにくいので、詳細に見ていくと、例えば、 $t=20$ ,  $G=0.5$ の場合、 $\tan \delta$ で分類したグループでの破壊ストレス値=5.03に対して、最大水トリー長で分類したときの破壊ストレス値=5.41であり、後者が少し高めに推定されている。分布関数だけでは分かりにくいので、特定の経年での使用ストレス下での破壊確率について数値で示したものを表3、4に示す。本来、尤度を基準とした計算結果からは、最大水トリー長で分類した表3によ

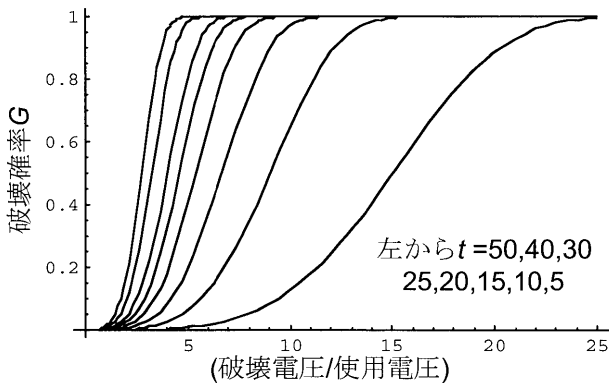


図7 劣化の大きいグループでの破壊確率分布 1

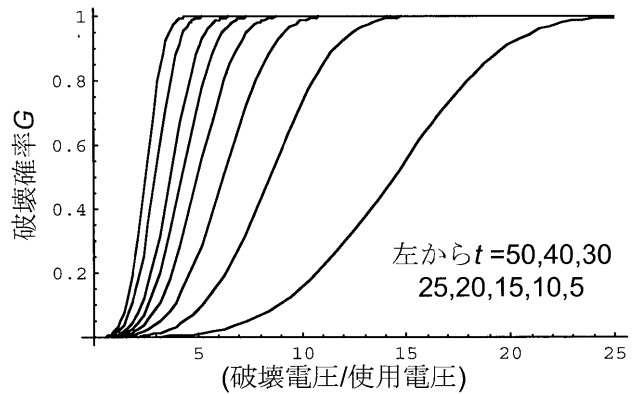


図8 劣化の大きいグループでの破壊確率分布 2

表3 劣化程度の大きいグループでの余寿命 (最大水トリー長による分類)

経年	破壊確率	標準偏差
30年	0.26%	0.17%
40年	0.61%	0.35%
50年	1.17%	0.61%

表4 劣化程度の大きいグループでの余寿命 ( $\tan \delta$ による分類)

経年	破壊確率	標準偏差
30年	0.45%	0.28%
40年	1.04%	0.58%
50年	1.99%	1.01%

る評価値を使うのが望ましいので、使用経過時間が30, 40年, 50年での破壊確率は、0.26, 0.61, 1.17%と考えるとよいが、安全側からの判断からは、表4の結果(使用経過時間が30, 40年, 50年での破壊確率は、0.45, 1.04, 1.99%)を参考にすることも重要である。なお、表には標準偏差を併記しているが、これらはFisherの観測情報行列から近似計算した。

## 5 考察

### 5.1 最小2乗法による破壊・非破壊の2値分類

ここでは、劣化程度の大きさを、最小2乗法によって求めた直線によって分けることについての妥当性について議論する。

最小2乗法による回帰直線は、もともと目的変数 $Y$ を説明変数 $X$ によって表す代表的な直線関係を求めるものである。 $Y$ が0/1の2値を持つば、最小2乗法によって推定された $\hat{Y}$ を用いて $\hat{Y} \leq 0.5$ ,  $\hat{Y} \geq 0.5$ により分類を行う方法はあるが、ここで使うように破壊ストレスを $Y$ に用いている場合、分類には普通使わない。ここでは、劣化程度の大きさを2分するストレスを仮定するために設けたしきい値を最小2乗法によって求めているが、はじめにこのしきい値自体に物理的な意味合いを付けている訳ではない。しきい値を仮に設けて分類を簡便に行った後で、劣化を支配する主要な説明変数と説明変数のしきい値とを求め、今度はその説明変数のしきい値で分類したサンプルによる回帰を行って、総合した対数尤度から適切なモデルを抽出していることになる。従って、はじめに劣化程度の大きさを2分するために設けたしきい値は最小2乗法に依らなくてもよい。例えば、[1,9,10]に示すような混合ワイブルべき乗則でもよく、そのようにして説明変数を求めた場合、3.1で求めた $\tan \delta = 0.0345$ をしきい値として劣化程度を2分する結果と同じになっている。しかしながら、混合ワイブルべき乗則からしきい値を求める方法は計算が複雑で使いこなすのが難解である。従ってここでは最小2乗法を用いている。

最小2乗法は、 $L^2$ ノルムによる距離を用いるため、外れ値によって影響を受けることが知られているが、ここで用いたサンプルデータにはそのような外れ値は見当たらず、また仮に少し影響を受けたとしても、分類後の対数尤度計算によって最終的には妥当性を検討しているため、最小2乗法から得られたしきい値そのものにはそれほど重きを置かなくてよい。

### 5.2 最小2乗法による分類結果と混合ワイブルべき乗則による分類結果

ここでは、3.2でのワイブルべき乗則のアナロジーから得られた分類結果と、サンプル全体を最小2乗法から求められた分類結果とについて議論する。

両者の結果は全く同じになっているが、これにつ

いての必然性はない。どちらの方法に依っても、同じ分類結果になる程度のしきい値の許容値の範囲にあったということであり、理論的に一致するはずのものではない。このことは、[1,9,10]の方法では説明変数を経過時間だけにとった回帰を行っているだけであり、他の説明変数を無視していることから明らかである。ここでの提案は、[1,9,10]の方法よりも計算が容易になっているだけでなく、[1,9,10]の方法のように余寿命だけを求めているのではなく、劣化に寄与する説明変数を求めた上で余寿命を求めているのであり、単なる簡易計算を提案しているのではない。性質の異なる提案を行っている。

## 6 まとめ

電力機器（主に電力ケーブル）の絶縁破壊強度に対する経年劣化をモデル化するために、ケーブルなどに固有の特性値を説明変数に、絶縁破壊強度を目的変数とした回帰に対応する新しい方法を考えた。そのために、まず地中から撤去した電力ケーブルにストレスを上昇させながら絶縁破壊試験を行い、その破壊値を求めたデータを得た。かけたストレスにしきい値（ストレスの上限）を設けると、破壊・非破壊の2値データとして考えることができるとして、これをもとに決定木による分類を行い、破壊に主に寄与する説明変数と破壊・非破壊を分ける物理的な数値を得た。分類された後のデータを用いれば、一定の経年に対する破壊確率が得られる。ここでは、安全側に対するデータ（劣化程度の大きいデータ）を用いて、ケーブルなどの寿命の予測とその信頼度について考察した。劣化に対する経験則としてはべき乗則を用いた。実際に埋設されたケーブルを撤去して試験データを得たデータを用いて解析を行った結果、専門家が指摘する要因と同様な要因が得られた。また余寿命推定値とその信頼度を得る方法を示した。ここで提案する方法によれば、従来提案されていた混合ワイブルべき乗則の計算の困難さに比べて圧倒的に推定が容易にもなった。

## 参考文献

- [1] 広瀬, 戸谷, 中川, 内田: 混合ワイブルべき乗則を用いた余寿命推定, 電気学会論文誌B,

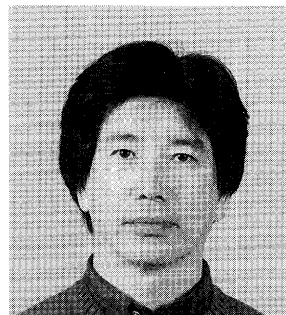


Vol.116-B, No.12, pp.1587-1594 (1996)

- [2] 電気学会技術報告「絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の実態」電気学会絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定調査専門委員会, 2000
- [3] 電気学会技術報告「電力機器絶縁診断の経済性評価調査」電気学会電力機器絶縁診断の経済性評価調査専門委員会, 2007
- [4] 河村, 田中編: 電気設備の診断技術, 電気学会, 1988
- [5] H. Hirose, A Method to Estimate the Lifetime of Solid Electrical Insulation, *IEEE Trans., Electrical Insulation*, Vol.EI-22, No.6, pp.745-753 (1987)
- [6] H. Hirose, Estimation of The Threshold Stress in Accelerated Life Testing, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.42, No.4, pp.650-657 (1993)
- [7] H. Hirose, Theoretical Foundation for Residual Lifetime Estimation, *Transactions of IEEJ*, Vol. 116-B, No.2, pp.168-173 (1996)
- [8] H. Hirose, The relation between accelerated life tests by rand-new insulation and step-up voltage tests by working insulation, "7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM2003)", pp.978-981, June 1-5, 2003, Nagoya, Japan.
- [9] H. Hirose, Lifetime Assessment by Intermittent Inspection under the Mixture Weibull Power Law Model with Application to XLPE Cables, *Lifetime Data Analysis*, Vol.3, No.2, pp.179-189 (1997)
- [10] H. Hirose, Mixture Model of the Power Law, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.46, No.1, pp.146-153(1997)
- [11] H. Hirose, Y. Komori, A consideration on the maximum likelihood estimation in a mixture regression model using the EM algorithm, *Far East Journal of Theoretical Statistics*, Vol.7, No.2, pp.111-127 (2002)
- [12] H. Hirose, Y. Komori, Maximum likelihood estimation in a mixture regression model using the continuation method, *IEICE Transactions A*, Vol.E86A, No.5, pp.1256-1265 (2003)
- [13] Wei-Yin Loh, Logistic Regression Tree Analysis, *Handbook of Engineering Statistics*, Springer (2006)

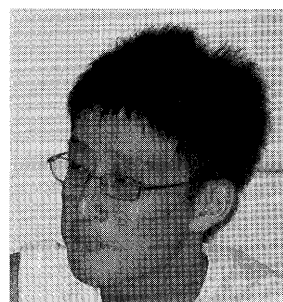
- [14] Z. Fan et. al., Classification and regression tree based survival analysis in oak-dominated forests of Missouri's Ozark highlands, *Can. J. For. Res.* 36, pp.1740-1748 (2006)

(ひろせ ひでお / つる こうたろう)



廣瀬 英雄

1977年(株)高岳製作所入社, 技術本部数値情報センター長, 首席研究員後, 1988年技術本部副技師長, 1989年スタンフォード大学統計学科研究員, 1995年広島市立大学情報科学部情報数理学科教授, 1998年九州工業大学情報工学部制御システム工学科教授, 2003年評議員, 2004年副情報工学部長. 工学博士, 信頼性工学の研究に従事, 日本信頼性学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 応用統計学会, 計算機統計学会, 日本数学会を含む国内学会会員, IEEE, ASA IMS, MPS, ISI, SIAM, ACM, AMS など



鶴 康太郎

2007年九州工業大学情報工学部制御システム工学科卒業, 九州工業大学大学院情報工学研究科情報科学専攻.

投稿受付: 2007年8月27日

改訂: 2007年11月19日