

題目  
**高電圧ナノ秒パルスが拓く新技術**  
 -環境保全応用から絶縁材料評価まで-



愛媛大学大学院 理工学研究科  
 電子情報工学専攻  
 門脇一則

講義内容

研究概要・これまでの経緯

パルスパワーの定義と基礎理論

高電圧パルス放電を用いた排ガス処理

耐インバータサージ絶縁の信頼性

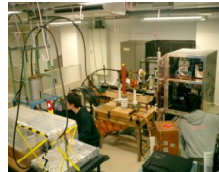
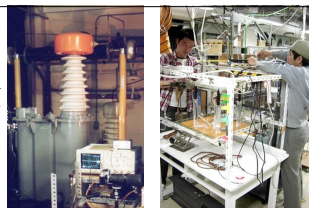
キーワード：高電圧パルス, 極性反転, 空間電荷,  
 ストリーマ放電, プラズマ化学反応

研究室紹介

固体および液体誘電体の絶縁破壊  
 機構解明と劣化診断に関する研究

パワーデバイスの電気  
 絶縁に関する信頼性技術  
 開発とその適用

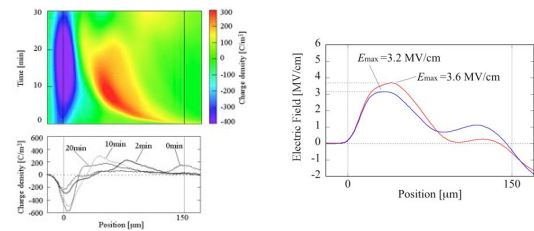
高電圧ナノ秒パルス放電を利用  
 した環境保全技術開発



研究背景

絶縁破壊の研究から環境保全応用へ

空間電荷の蓄積が、絶縁破壊現象を複雑にしている。



パルス静電応力法による測定結果の一例  
 ポリエチレン中の空間電荷分布 (左) と電界分布 (右)

・空間電荷が形成され始める前の短時間領域  
 での現象に着目するため、高電圧ナノ秒パ  
 ルスの発生技術が構築された。



ここから

- ・極性反転パルス放電の環境保全応用
- ・繰り返しインパルスによる絶縁劣化の研究

新技術誕生のきっかけ

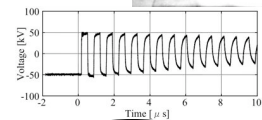
昔 (8年以上前)

電力用高電圧ケーブルの絶縁設計に  
 関する研究をしていたときのこと

- $V_0$ で充電された同軸ケーブルの一端を直接接  
 地すると、もう一端の電圧は、 $-V_0$ から $+V_0$   
 へ急激に反転する。



- ・通常のインパルス試験よりも  
 低い電圧で、ケーブルの部分  
 放電劣化が引き起こされる。
- ・見方を変えると・・・
- ・低い電圧でも放電(衝  
 突電離)してくれる。



排ガス処理に  
 利用したらいいんじや  
 なかるか・・・

**パルスパワー（パルス電力）の定義**

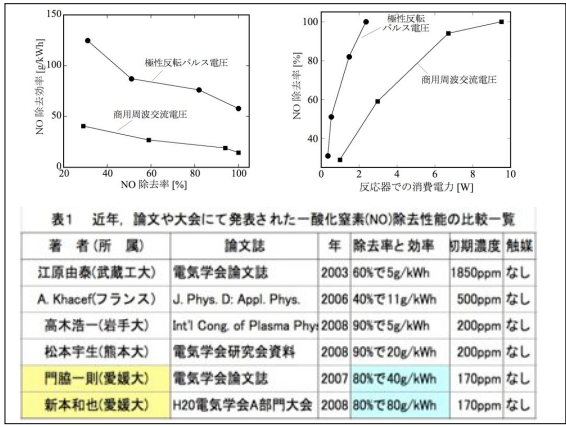
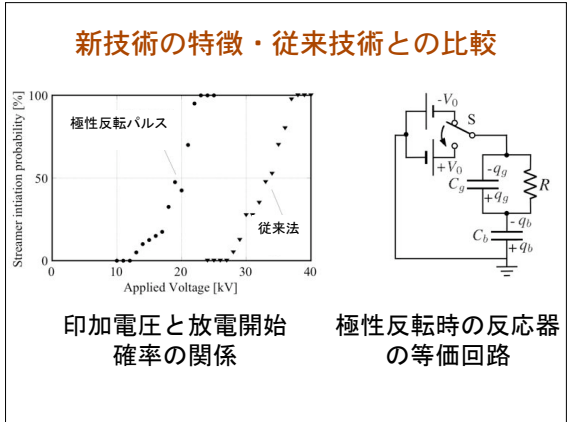
静電エネルギー、磁気エネルギーあるいは運動エネルギーなどの形で貯蔵されたエネルギーを時空的に圧縮することにより得られる大電力のことを、総称してパルスパワーと言う。

**直流や交流と比べてパルスは省エネルギー**

電圧を加え直し、電流を流し放しては電気のムダ遣い

プラズマを形成するのに要する時間はたった**10<sup>-8</sup>秒**

その時間だけ電圧を加えればよい → パルス放電

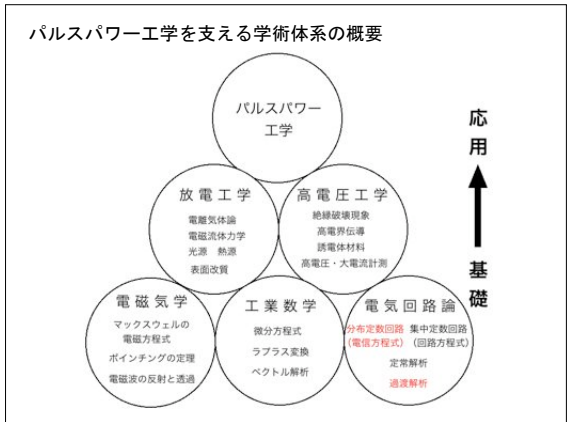


**パルスパワー（パルス電力）の定義**

静電エネルギー、磁気エネルギーあるいは運動エネルギーなどの形で貯蔵されたエネルギーを時空的に圧縮することにより得られる大電力のことを、総称してパルスパワーと言う。

**ナノ秒パルスが拓く分野**

- 材料評価技術（パルス静電応力法、圧力波パルス検出法）
- 大気圧非平衡プラズマ応用（排ガス処理、水処理）
- 大電流放電応用（X線源、物体加速（レールガン））
- 光関連技術（光源開発、レーザ応用）
- 薄膜作成技術（パルスイオンビーム蒸着法）



大電力の供給をナノ秒領域で制御するには

パルス形成線路上における進行波（電磁波）の伝搬機構を理解することが重要である。

コンデンサ 同軸ケーブル 抵抗

ポイントその1  
エネルギーは、導体線間の空間を伝搬する（同軸ケーブルの場合はポリエチレン絶縁層）。

ポイントその2  
電圧と電流の波（進行波）が線路に沿って伝わる（同軸ケーブル中での速度： $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）

同軸ケーブルを等価回路で書き表すと、至る所にコンデンサが存在する。

← 単位長 →

理想的な同軸ケーブルの場合、 $R_1 = 0$  かつ  $R_2 = \infty$

ポイントその3  
充電されたケーブルの端部を負荷に接続すると、進行波の伝搬により、エネルギーが瞬時に供給される。

分布定数線路の基礎方程式

過渡現象時の電圧を  $e(x,t)$ 、電流を  $i(x,t)$  とすると

$$-\frac{\partial e(x,t)}{\partial x} = RI(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Ge(x,t) + C \frac{\partial e(x,t)}{\partial t}$$

ラプラス変換法を用いて整理すると、波動方程式の形となる

$$\frac{d^2 E(x,s)}{dx^2} = \gamma^2(s) E(x,s) \quad \frac{d^2 I(x,s)}{dx^2} = \gamma^2(s) I(x,s)$$

一般解  $E(x,s) = A(s)e^{-\gamma(s)x} + B(s)e^{\gamma(s)x}$

$$I(x,s) = \frac{A(s)e^{-\gamma(s)x} - B(s)e^{\gamma(s)x}}{Z_0(s)}$$

(1) Principle in the Single Pulse Generator

終端がインピーダンス整合された単一パルス形成線路の弱点

↓

パルスの波高値が充電電圧の半分しかない

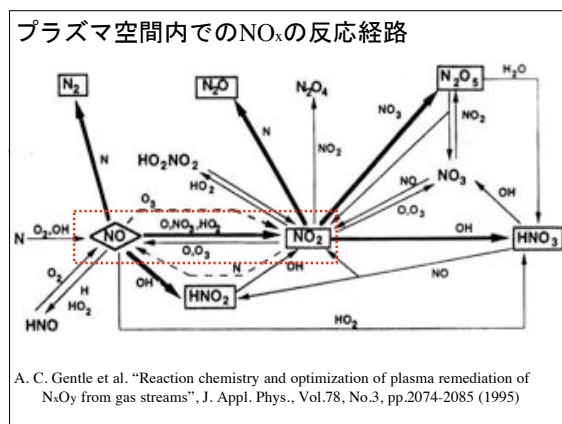
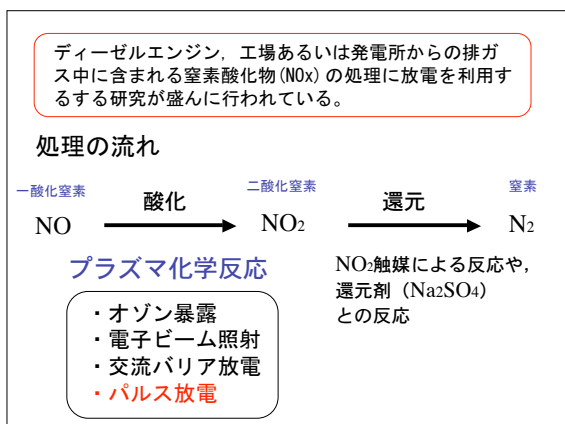
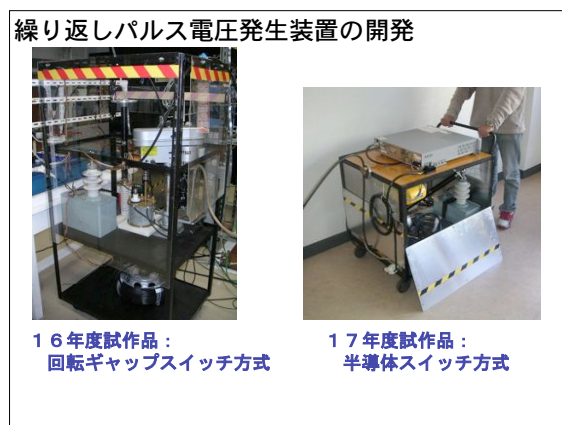
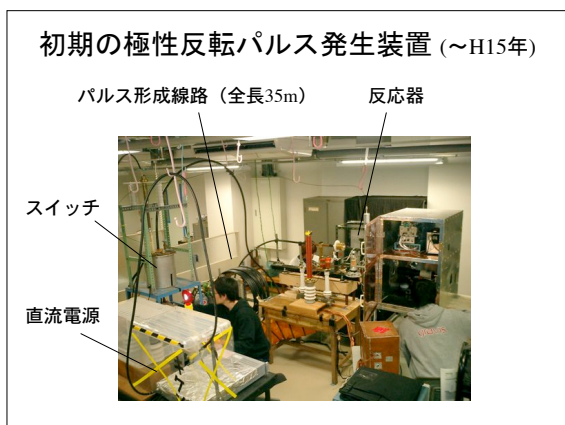
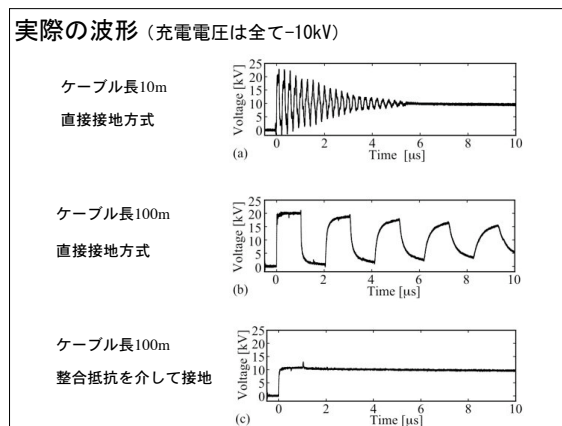
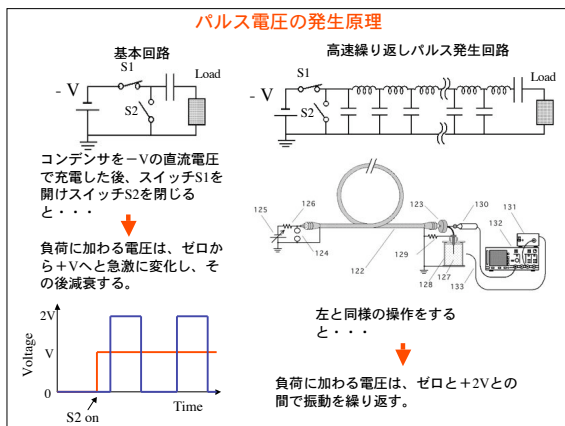
極性反転繰り返しパルス発生回路の場合

↓

往復する進行波が繰り返し極性反転するため、最大波高値は充電電圧の2倍に達する。

-V<sub>0</sub>から+V<sub>0</sub> もしくは 0から+2V<sub>0</sub> の電圧振動が、容易に衝突電離現象を引き起こす。

(2) Principle in the Reciprocal Pulse Generator



### ストリーマ放電の特徴

その先端に10eV程度の高エネルギー電子を多く有する。

↓

解離反応により、酸素ラジカルなどの活性種を生成する。

電圧印加を短時間で休止すれば、電子温度のみが高くなり分子温度は低いまま → **非平衡プラズマ**

エネルギー効率の向上が期待できる。

### 目標設定

吉岡芳夫「各種非熱平衡プラズマによる排ガス処理技術の適用法と相互比較法」  
電気学会論文誌A, Vol.122-A, No.7, pp.676-682 (2002)

表1 各種処理対象と出力1kVA当たりの要求除去効率  
Table 1 Various Application and requirement of Energy Efficiency per 1kVA Output

NO	対象	排ガス量 (Nm <sup>3</sup> /h)	NO濃度 (ppm)	NO排出量 (g/h)	除去目標NO濃度 (ppm)	除去量 (g/h)	要求除去効率 (g/kWh)
1	ディーゼル発電機	6.4	850	8.1	475	4.1	82
2	ガスタービン発電機	5	1,000	6.7	500	3.3	67
3	ガスタービン	10.2	70	1.0	10	0.8	16
4	石炭火力	3.4	300	1.4	30	1.2	24
5	トンネル掘削ガス	3,000	3	12.1	0.6	9.6	21

Noを完全除去しつつ、除去効率80g/kWhを達成する。

### Experimental Procedure

Barrier-type cylindrical reactor

- Tungsten wire
- Grass cylinder
- Copper mesh
- Silicone oil

Coaxial cable (35m)

Gas in

Flow rate 1.0 - 6.0 l/min

Components NO 170ppm, O<sub>2</sub> 15vol%, N<sub>2</sub> 85vol%

Gas out

### 極性反転による放電開始電圧の低減

印加電圧と放電開始確率の関係

極性反転時の反応器の等価回路

### Temporal change in discharge pattern

Charging voltage: -30kV

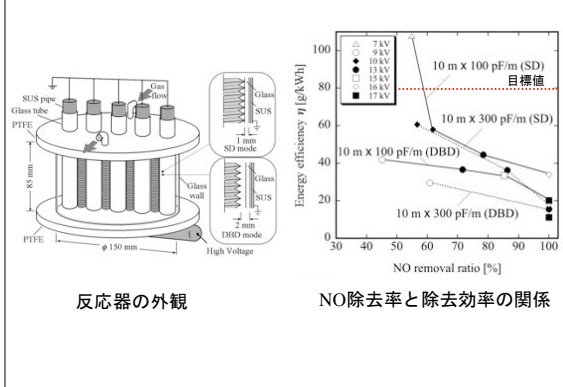
1st 2nd 3rd ... 13th 14th

NO除去率とNO除去効率との関係

エネルギー効率低下の理由  
→ 何度も繰り返しているものの、ストリーマ放電は最初だけ。

対策：パルス幅をより短く。繰り返し数を少なく。

ネジ電極の適用による反転パルス放電のマイクロ化



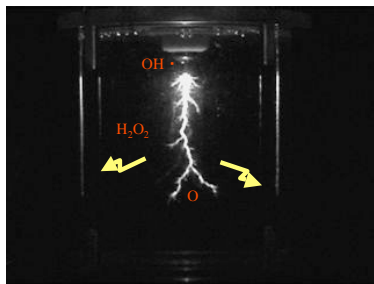
新しい水処理技術に対するニーズは高まるばかり



放電のエネルギーを利用して水をきれいにする



・残存有機溶剤などの分解  
・微生物、菌類の死滅



放電が引き起こす物理現象

- 高電界領域の形成 ( $> 10^8 \text{ V/m}$ )
- 衝撃波の伝播
- 紫外光の放射
- ラジカルの生成

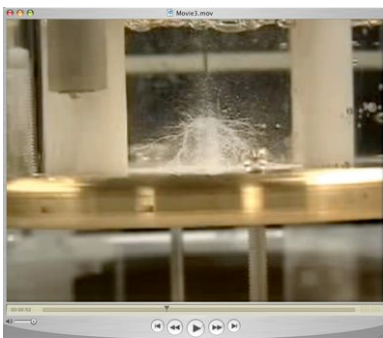
ムービーをご覧ください

ムービー-2



水中パルス放電 (波高値+60kV)

ムービー-3



水中バリア放電の検討


ムービー-4



水上沿面放電の採用



極性反転パルス電源を用いた耐インバータ絶縁性能評価システムの構築と適用



キーワード: 矩形波パルス, PWM制御, インバータサージ, 絶縁劣化, 部分放電

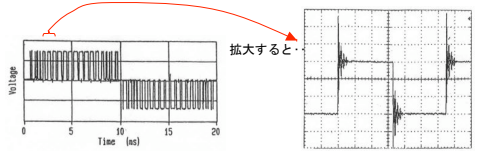
愛媛大学の電気自動車

サージ: 津波のような破壊力のある突然やってくる大波  
電気工学の分野では「インパルス」

雷サージ: 雷電流による誘導起電力 ( $-L di/dt$ )  
発生頻度  $10^4$ から $10^6$ 回/年

インバータサージ: 高速スイッチングによるパワーエレ素子の制御時 (PWM方式など) に生ずる

ハイブリッドカーに限らず多くの機器で問題となっている。  
発生頻度  $10^9$ から $10^{11}$ 回/年



出典: 森他, 電気学会研究会資料DEI-98-29(1998) 出典: 土屋他, 電気学会研究会資料DEI-98-29(1998)

ハイブリッドカーや電気自動車に用いられるインバータ駆動モータの場合, **インバータサージ**と呼ばれる急峻なパルス電圧が高頻度で発生する。このような状況下を想定した絶縁試験規格は無い。

IEC(国際電気標準会議)においてヨーロッパ各国の専門家や企業により規格化が進行中。

**電気学会でも調査専門委員会が発足**  
**H21年度に, 第一次共同実験がスタート**

## 従来技術とその問題点

6研究機関による第一次共同実験でわかったこと

- ・インパルサーは極性反転パルス電圧とそっくり。
- ・部分放電現象を統計的に調べるには、特殊な電源、高価なオシロスコープとセンサが必要。しかも作業に手間がかかる。



うちの極性反転パルス電源をPC制御できるようにして、センサと組み合わせれば、安価でラクな評価装置ができるぞな……

## 繰り返しパルス印加時の部分放電検出システムの構築



放電光カウンティングシステムとの組み合わせにより、部分放電開始電圧の自動測定を実現した。

### PC制御型極性反転パルス電源の外観

- ・ 発明の名称 部分放電回数測定装置
- ・ 出願番号 特開2009-053036
- ・ 出願人 愛媛大学
- ・ 発明者 門脇一則、西本 榮

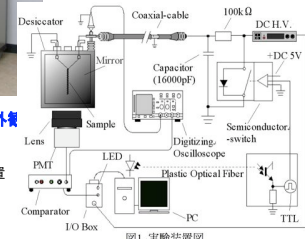


図1. 実験装置図

## 実験結果の一例

個々のプロットは100個の測定データの平均値である

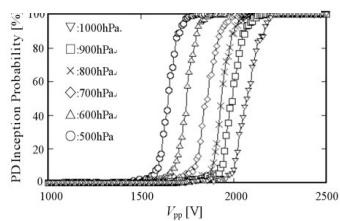


図2 □ 様々な気圧下でのサージ電圧 $V_{pp}$ と放電確率の関係

大量の部分放電データの統計処理を自動計算できる

## 繰り返しインパルスにおける絶縁寿命特性と劣化メカニズムについて

### この分野で研究されていること

1. 絶縁劣化メカニズム
  - 複合ストレス劣化のモデリング
  - 誘電損失による劣化
  - 空間電荷蓄積による劣化
2. 部分放電の進展と絶縁破壊
  - 部分放電光およびその発生頻度の時間推移
  - 部分放電の進展による劣化プロセス
3.  $V-t$ 特性、 $V-n$ 特性
  - 周波数加速性と $V-t$ 特性
  - 正弦波電圧との比較
  - $V-n$ 特性とPD発生頻度を考慮した $V-t$ 特性

### 1. 絶縁劣化メカニズム

#### 絶縁劣化の加速要因

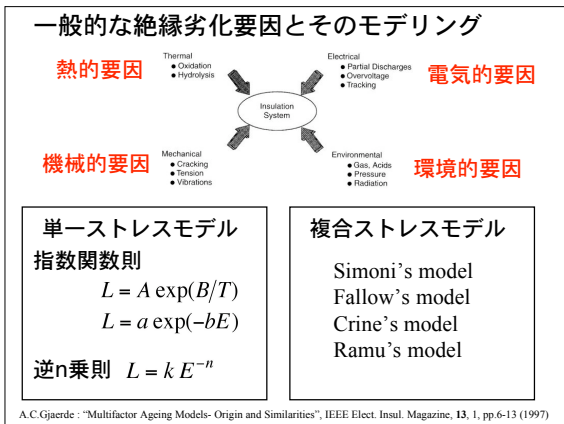
- ・ 誘電損失による熱劣化
- ・ 空間電荷蓄積による絶縁劣化
- ・ 部分放電の進展による表面劣化

➡ 単一ストレスによる劣化はむしろ稀

#### モータ巻き線の場合

電気と熱による複合ストレス劣化のモデリング





Fallow's model 指数関数同士の組み合わせ (半経験的)

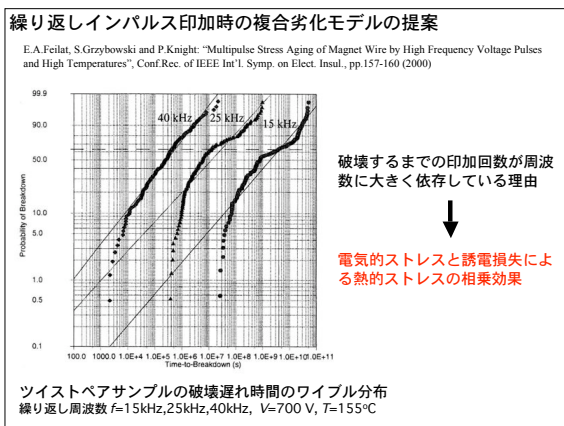
$$L(V,T) = \exp\left(A(V) + \frac{B(V)}{T}\right) \quad (1)$$

$$A(V) = A_1 + A_2 V \quad (2)$$

$$B(V) = B_1 + B_2 V \quad (3)$$

$$A_1, A_2, B_1, B_2 : const.$$

Ramu's model 指数関数とn乗則の組み合わせ (半経験的)

$$L(T,E) = c(T) E^{-n(T)} \exp\left[-B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (4)$$


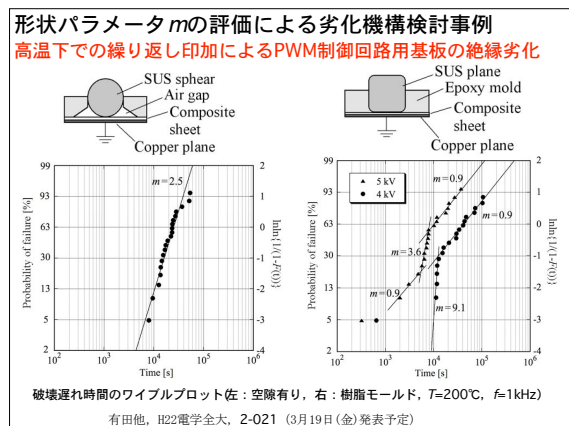
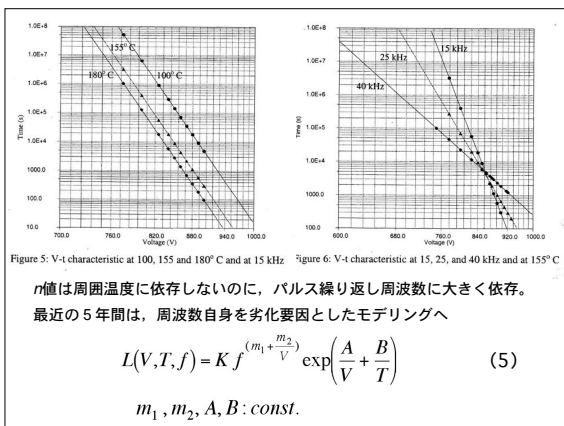
### ワイブル分布における確率分布関数f(t)と信頼度関数F(t)

位置パラメータ  $\gamma$       形状パラメータ  $m$

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right]$$

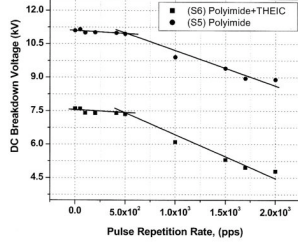
尺度パラメータ  $\eta$

尺度パラメータ  $\eta$  に、式(1)から求めた平均寿命  $L(V,T)$  を代入して、各周波数における V-t 特性を解析的に求めている。



・空間電荷蓄積による絶縁劣化

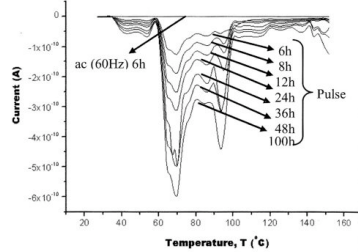
S.U.Haq, S.H.Jayaram and E.A.Cherney: "Evaluation of Medium Voltage Enamelled Wire Exposed to Fast Repetitive Voltage Pulses", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol.14, No.1 pp.194-202 (2007)



一定回数のパルス印加後における直流破壊電圧とパルス繰り返し周波数との関係

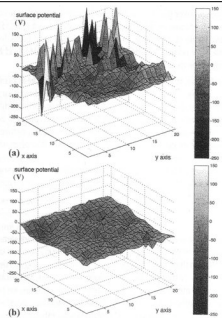
高頻度と低頻度では劣化のメカニズムが異なる

➔ 高速繰り返し印加による空間電荷注入



繰り返しパルス印加後の熱刺激電流

S.U.Haq, S.H.Jayaram and E.A.Cherney: "Evaluation of Medium Voltage Enamelled Wire Exposed to Fast Repetitive Voltage Pulses", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol.14, No.1 pp.194-202 (2007)

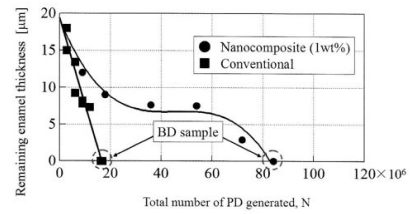


繰り返しパルス印加後のフィルムの残留電位  
(a)  $dV/dt = 5 \text{ kV}/\mu\text{s}$  (b)  $dV/dt = 100 \text{ V}/\mu\text{s}$

J.P.Belleme, P.Castelan and T.Lebey: "The Effect of Pulsed Voltages on Dielectric Material Properties", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol.6, No.1 pp.20-26 (1999)

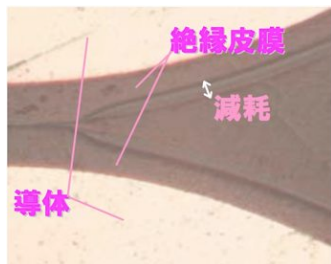
2. 部分放電の進展と絶縁破壊

長寿命化のためには、部分放電による侵食の抑制が最重要課題であるとの報告が多数



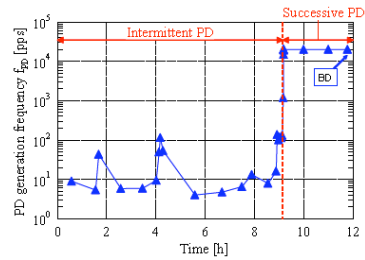
PD発生回数と皮膜残留厚さとの関係

N.Hayakawa and H.Okubo: "Lifetime Characteristics of Nano-composite Enamelled Wire under Surge Voltage Application", IEEE Elect. Insul. Magazine, Vol.24, No.2, pp.22-27 (2008)



放電後の絶縁皮膜の顕微鏡写真

大矢, 富澤, 伏見, 山口, 岡田, 小迫, 匹田: 「インバータサージ下でのナノコンポジットエナメル線のV-I特性と部分放電劣化」, 平成21年電気学会全国大会講演予稿集, 2-052 (2009)

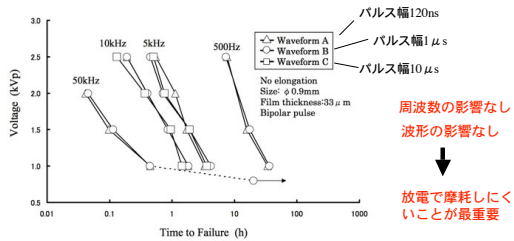


部分放電発生頻度の時間推移特性

N.Hayakawa, H.Inano, Y.Nakamura and H.Okubo: "Time Variation of Partial Discharge Activity Leading to BreakDown of Magnet Wire under Repetitive Surge Voltage Application", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.15, No.6, pp.1701-1706 (2008)

### 3. V-t特性、V-n特性

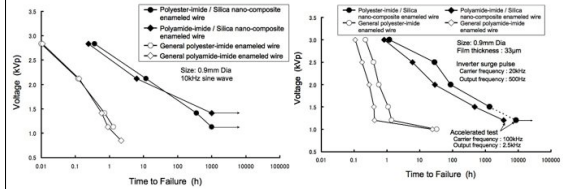
V-t曲線の傾きを緩やかにするにはどうすれば良いか？



インバータサージ課電寿命特性（繰り返し周波数とパルス幅の影響）

菊池英行：「ナノコンポジット絶縁材料を用いた耐インバータサージ性エナメル線」、誘電・絶縁材料研究会資料，DE 1-04-77，(2004)

### 正弦波とパルスの比較

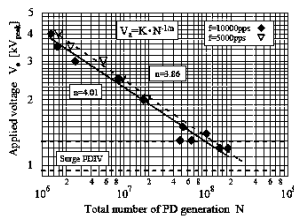


耐インバータサージ性エナメル線のV-t特性  
左：正弦波10kHz交流電圧，右：インバータサージ電圧

何故 $dV/dt$ の小さい交流での寿命の方がパルスのそれよりも短いのか？ → 部分放電発生頻度

菊池，行森，高野，「有機/無機ナノコンポジット絶縁材料を用いた耐インバータサージ性シングルコートエナメル線の特性」，誘電・絶縁材料研究会資料DE1-05-88(2005)

寿命は何回放電に曝されるかで決まっている



印加電圧 $V_a$ とPD総発生回数 $N$ の関係（V-N特性）

大塚，稲野，早川，大久保，「インバータ駆動モータ用マグネットワイヤにおける電圧印加寿命評価に関する検討」，誘電・絶縁材料研究会資料DE1-07-00(2007)

### まとめ

- 絶縁劣化メカニズム  
誘電損失による熱劣化  
空間電荷蓄積による絶縁劣化  
放電による摩擦劣化  
→複合ストレス劣化の忠実なモデリング
- 部分放電の進展と絶縁破壊  
発生頻度の推移→間欠-連続-臨界  
部分放電の進展による絶縁層の減肉が劣化の主要因
- V-t特性、V-n特性  
放電により摩擦しにくい材料開発の重要性が示唆される。  
→ナノコンポジット化による耐サージ電線  
PD発生頻度を考慮したV-n特性から，寿命は放電発生頻度に強く依存していることがわかる。

### おわりに

愛媛大学工学部電気電子工学科の高電圧工学研究室での取り組みについて、ご紹介させていただきました。

非常に短い瞬間ではあるが、エネルギーを時空的に圧縮することにより、通常では達成することのできない特殊な物理現象を引き起こすことができます。

エネルギーの有効利用が非常に重要な現代社会において、ナノ秒パルスパワーの応用範囲はますます広がるものと思います。社会に役立つ新技術の創造を目指し、チャレンジを続ける所存です。

御清聴ありがとうございました