

# 1 $\mu$ s パルス電圧印加時の絶縁油中の 沿面放電から得られた破壊遅れ

正員 山田 弘 (岩手大)

正員 佐藤 淳 (岩手大)

正員 藤原 民也 (岩手大)

## Breakdown Time Lag obtained from Surface Discharge Propagation on Solid Dielectrics in Insulating Oil under 1 $\mu$ s Rectangular Pulse Voltage Application

Hiroshi Yamada, Member, Tadashi Sato, Member, Tamiya Fujiwara, Member (Iwate University)

Breakdown time lag obtained from surface discharge propagation on a solid dielectric in insulating oil with point-to-plane electrode configuration was studied using a photo-optical current measuring system and a 1 micro-second rectangular high voltage pulse generator. The time lag was directly measured from prebreakdown current. The time lag for negative point is greatly decreased by the presence of solid dielectric surface, compared with that for positive point. The time lag for negative point is longer than that for positive one except at extremely higher electric field condition. At the higher field, the time lag is found to be almost the same for both point polarities. Very little effect of dielectric materials or their thickness on the time lag is observed for both point polarities. On the basis of these results, a new breakdown propagation model involving polarization effect and auger process is proposed.

キーワード：破壊遅れ，沿面破壊，ns 破壊，ストリーマ速度，破壊前駆電流

### 1. まえがき

液体絶縁物を含む絶縁系には支持物として必然的に固体絶縁物も含むため、液体と固体の界面が絶縁上の弱点となることがある。このような実用的見地からのみならず沿面破壊現象は物理・化学的にも従来より興味ある対象である<sup>(1)-(6)</sup>。液体の絶縁系に固体を加えることには次のような長所もある。針対平板電極構成は比較的低い印加電圧により 100 MV/m 程度の電界をつくるのが可能なため、液体の破壊機構の研究ではよく用いられてきた。これに薄い固体絶縁物を加えることにより、針先端に更に高い電界を生じさせることができる。すなわち、液体の高電界領域での破壊機構の究明には固体の沿面破壊を調べるのが一つの方法といえる。また、三次元的破壊の進展を二次元に制限

できるため観測、解析が容易になり<sup>(6)-(10)</sup>、沿面に細溝を設ければ一次元的扱いも可能である<sup>(11)</sup>。以上のことをふまえ、ここでは応答性に優れ、雑音の極めて少ない光電変換系と 1  $\mu$ s のパルス高電圧を用い、油中の各種固体誘電体の沿面放電に伴う破壊前駆電流を測定し、その波形より破壊遅れを求めている。これより ns から  $\mu$ s 領域の絶縁液体の破壊機構に関する考察を進めている。

### 2. 実験方法

実験装置は既報告<sup>(12)</sup>の場合と基本的に同じであり、テストセル、高電圧パルス発生器、電流測定系の三つからなる。テストセルは内容積 160 cm<sup>3</sup> の黄銅製円筒形で、4 箇所を観測用窓をもつ。電極構成は針対平板であり、針電極は電解研磨された先端曲率 5  $\mu$ m 程

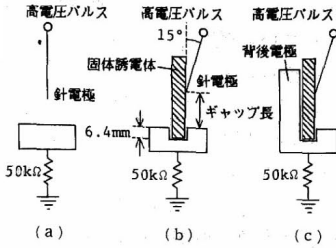


図1 電極系  
Fig. 1. The electrode configurations.

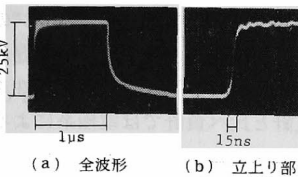
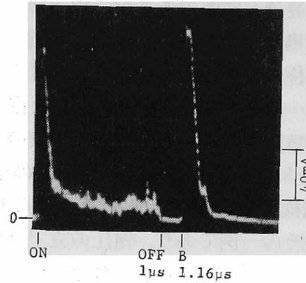


図2 印加電圧波形  
Fig. 2. Applied voltage trace.

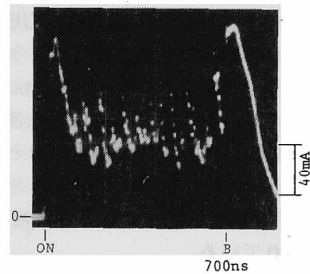
度のタングステン線、平板電極は7×20 mmの黄銅製である。

用いた三つの電極系を図1に示す。(a)図は固体誘電体を含まないトランス油だけの場合、(b)図は固体誘電体シートの表面に針端が接し固体の背後に電極がない場合、(c)図は(b)図に加えて固体の背後に電極をもつ場合である。(b)図と(c)図では、針電極が鉛直な固体の表面と約15°の角度でその先端が接触している。方形波パルス発生器は自己整合形であり<sup>(13)</sup>、針側に正または負の高電圧が印加される。パルス電圧の立上りは15 ns、パルス幅は1 μsである。

図2(a)に正の25 kVの電圧波形、(b)図にその立上り部を示す。電流測定系は発光ダイオード(LED)、ライトガイド、光電子増倍管からなる。LEDは針電極側に接続され針電極に流れる電流成分のみをとらえるように工夫されている。全路破壊後の大電流を制限し、LEDを保護するため平板電極とアース間には50 kΩの高周波抵抗が接続されている。LEDからの信号はライトガイドを経て光電子増倍管に導かれ、再び電気信号に変えられ、デジタルメモリーまたはオシロスコープに送られる。デジタルメモリーのサンプリング速度は5 nsである。この電流測定系の応答速度は約10 nsであり、デジタルメモリーの入力電圧と放電電流120 mAまで比例関係を保つ。用いた固体誘電体はポリイミド、ポリエチレンテレフタレート(PET)、絶縁紙である。絶縁紙は真空脱気し内部の気泡を除くように努めた。また背後電極のない場合で



印加電圧：-25 kV、ギャップの長さ：1.6 mm  
図3 背後電極をもたない250 μm絶縁紙の負極性沿面破壊前駆電流  
Fig. 3. Current trace for negative point and 250 μm thick paper without back electrode.



印加電圧：-25 kV、ギャップの長さ：1.8 mm  
図4 背後電極をもつ250 μm絶縁紙の負極性沿面破壊前駆電流  
Fig. 4. Current trace for negative point and 250 μm thick paper with back electrode.

も誘電体シートが鉛直に保たれるよう配慮した。実験は室温大気圧下で行われた。

### 3. 実験結果

〈3・1〉 破壊前駆電流 破壊前駆電流の基本的形状は正針と負針の場合とで異なるないので、負極性の例として厚さ250 μmの絶縁紙を用いた場合の波形を図3と図4に示す。図3は背後電極のない場合、図4は背後電極をもつ場合であり、どちらも同程度のギャップの長さに25 kVが印加されている。電流0のレベルを記号0で示し、またパルス電圧の立上り時、立下り時、全路破壊時をそれぞれ記号ON、OFF、Bで示す。どちらの場合も電圧印加直後に注入電流と吸収電流からなる大きな電流ピークが現れる。その後多数の小さなピークを伴う前駆電流が続き全路破壊時に電流が急増する。B点以後は光電子増倍管内の空間電荷効果により波形は正しい電流値を示さない。一般に固体誘電体に加わることにより正針よりも負針の場合の

前駆電流の発達が顕著であるが、12.5 kV 印加での電流は正針の場合が大きい。しかし、印加電圧を 25 kV とし背後電極をもつ場合には図 4 に示すように負極性前駆電流は一層発達し、正針でのそれと区別ができない程度となる。またベンゼンやトルエンの液体だけの場合に認められる電圧の立下り以後での全路破壊<sup>(12)</sup>が、背後電極があるときは負針でも起こりやすくなる。図 3 はその一例であり、電圧の立下りから 160 ns 後に全路破壊に至っている。これは固体表面の存在により負性の前駆放電チャネル（光学的じょう乱部、ストリーマ）が進展しやすくなり、電圧波尾の残留電圧によりこのチャネルが継続進展しギャップを橋絡したためと思われる。

**〈3.2〉 破壊の時間遅れ** 全路破壊が起こると破壊前駆電流の急増が認められるので、電圧印加より全路破壊に至るまでの時間を測ることにより破壊遅れを求めることができる。測定誤差は±10 ns である。この破壊遅れとギャップの長さとの関係を図 5～図 9 までに示す。用いた固体誘電体と電極系をそれぞれの図の下に示した。それぞれの図で 1 プロットは 5 回から 10 回の測定平均値を示す。ばらつきの幅は各図に縦のバーで示されている。

図 5 は厚さ 250 μm の絶縁紙を用い正の 25 kV を印加した場合の破壊遅れを三つの電極系について比べたものである。図中の各プロットを結んで得られる直線の傾きの逆数は放電進展速度に対応する。三つの電極系のいずれの場合もギャップの長さ 0.7 mm 付近を境に二つの速度領域があることが推測される。針電極先端から 0.7 mm 付近で前駆放電の進展速度が変わり、それぞれの進展領域では放電の進展速度が一定に保たれていると思われる。Devins らは、油だけの場合に

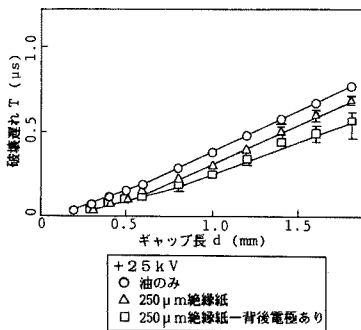


図 5 正針の場合の電極配置の相違による沿面破壊遅れとギャップの長さとの関係  
Fig.5. Configuration effect for positive point; the dependence of time to actual breakdown on gap spacing.

正の放電進展速度が進展途中で非連続的に変わる観測結果を報告している<sup>(6)</sup>。三つの電極系のうち、油だけの場合の破壊遅れが最も大きく、背後電極のある場合が最も小さいが、それらの差は顕著ではない。ギャップの長さ 0.6 mm 以下では背後電極付加の効果はなく、背後電極がない場合とある場合は同じ遅れを示す。これは、針端電界が 1.6 GV/m を超えると放電チャネル先端の電荷密度がどの電極系でも同程度になり、その進展速度も変わらなくなるためと考えられる。

図 6 は図 5 と同じ三つの電極系に対し負極性について調べた結果である。負針でもギャップの長さが大きくなるに従い破壊遅れは増すが、破壊遅れのばらつきが大きいいため正針ほど明りょうな直線性を示さない。しかし、正針と比べ負針では電極系による違いが著し

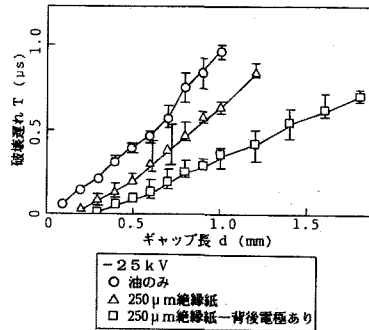


図 6 負針の場合の電極配置の相違による沿面破壊遅れとギャップの長さとの関係  
Fig.6. Configuration effect for negative point; the dependence of time to actual breakdown on gap spacing.

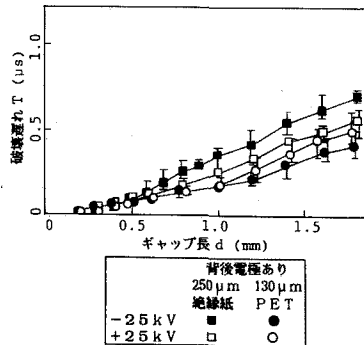


図 7 背後電極をもち 25 kV を印加した場合の沿面破壊遅れに対する極性効果  
Fig.7. Polarity effect on time to actual breakdown under 25 kV application with back electrode.

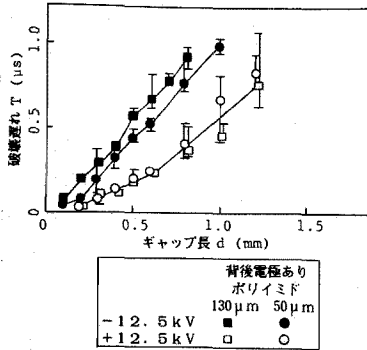


図 8 背後電極をもつ場合の沿面破壊遅れに対するポリイミドの厚さ効果

Fig. 8. Thickness effect of polyimide on time to actual breakdown with back electrode.

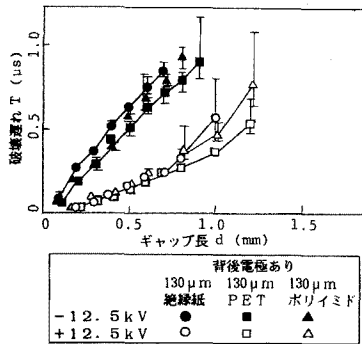


図 9 背後電極をもち厚さ 130 μm の場合の沿面破壊遅れに対するシートの材質効果

Fig. 9. Material effect on time to actual breakdown for a thickness of 130 μm with back electrode.

い。また、背後電極がある場合の曲線はギャップの長さ軸と交わっている。このことから、電圧印加直後の極短時間内に針近傍に導電性領域が形成されることがわかる。同様の結果が 50 cSt シリコン油でも報告されている<sup>(12)</sup>。

破壊遅れの極性効果を調べるために、250 μm の絶縁紙と 130 μm の PET に背後電極を加え、25 kV を印加した結果を図 7 に示す。どちらの固体でも極性による遅れの差がごくわずかであり、特に PET の場合、1.0 mm 以下のギャップの長さでは正針も負針も同じ遅れを与える。初期針端電界が 2.2 GV/m 以上では負針における放電チャンネルの形状とその中の電荷密度が正針でのそれらと同様となり、進展速度も同程度になるためと考えられる。このように針端電界が高い場合以外は一般に負針での破壊遅れは正針でのそれ

よりも大きい。

図 8 に背後電極のあるときのポリイミドの厚さの効果を示す。印加電圧はいずれの極性でも 12.5 kV の一定である。負針では厚さによる効果がわずかに認められるが、正針では厚さによる効果が明瞭ではない。特にギャップの長さ 0.7 mm 以下では厚さの効果は現れない。これは、負針での放電進展速度は針端電界の影響を受けやすいが、正針ではある程度の針端電界の変化により進展速度は影響されないと考えられる。

厚さを一定の 130 μm とし絶縁紙、PET、ポリイミドの三つの固体誘電体について破壊遅れに及ぼす材質の効果を図 9 に示す。この場合の印加電圧は両極性とも 12.5 kV である。図 8 の場合と同様に負針では固体材質の効果がわずかに認められるが、正針ではほぼ同じ破壊遅れが得られる。特に正針のギャップの長さ 0.8 mm 以下での破壊遅れは三つの固体の間でほとんど変わらない。絶縁紙の誘電率は PET のその約 2 倍であり表面の荒さもかなり異なることから、針端電界が 1 GV/m 以上のある値を超えると放電進展速度に対する固体材質の影響は無視できる程度になると思われる。

#### 4. 考 察

油だけの場合と比べ、誘電体が存在すると前駆放電チャンネル内の電荷密度が増加し、背後電極をもつ場合にはこの放電チャンネル先端の電界が更になると考えられる。いずれの電極系でも正の放電では、まず針端での油構成分子から電子の引抜きが起これ、正イオンをつくる。続いて、この正イオンが背後の分子から電子を引抜き、いわゆる電界電離<sup>(14)</sup>が起きていると思われる。このようにして形成された放電チャンネルの先端では連続的に同様の引抜きが起これチャンネルが伸びる。このような進展機構では必然的に放電チャンネル内のプラズマ密度は高くなる。これに対し、負針では針端からの電子放出により放電が開始し、続いてこの電子と中性の油分子との相互作用によりその分子の電離が起これ放電が進展する。この負極性の場合、分子の外郭が電子雲で構成されていること、分子による自由電子の捕獲が起これやすく後続の自由電子を離散させやすいことから、放電領域内の電荷密度は正針の場合に比べ小さくなりやすい。0.8 GV/m 以下の針端電界では、このことが負針の放電進展速度を正針のそれよりも小さくし、負針の破壊遅れを大きくする理由と考えられる。しかし針端電界が 2 GV/m を超えると負針でも注入電子のエネルギーが十分高くなり、放電先端での電離効率を高めるため放電チャンネル内の電荷

密度は正針でのそれに近づき、その結果として放電進展速度が大きくなり破壊遅れの減少をもたらす。そのため、図7に示すように、2GV/m程度の針端電界での破壊遅れは極性によらない結果を与えたと考えられる。

チャンネル内の電化密度が同程度であることは別に、図7の結果は2GV/m以上の針端電界における破壊現象が両極性で同じ基本機構を含むことを示唆する。負針と正針で同じ破壊機構をもつモデルの一つとしてKaoによるオージェ電子を介する電離過程が提案されている<sup>(15)</sup>。このモデルでは絶縁物中に低密度領域が形成され、その中でオージェ電子による衝突電離が起こる。一方、分子の電子付着性が高いハロゲン原子を含む液体の放電進展速度は他の液体よりも1オード大きく、特に負極性の放電進展速度に対するハロゲン原子の存在効果が顕著である<sup>(16)</sup>。このような実験結果をKaoのモデルは定性的によく説明する。ただし観測された電流波形から電圧印加より、50 ns後には既に電離領域が形成されていると思われるので、50 nsよりも更に短い時間内にどの電圧印加条件下でも低密度領域が形成される考えには疑念が残る。またKaoのモデルでは連続的にオージェ電子を生み出すのに必要なエネルギーの由来がはっきりしない。このエネルギーの由来を説明する機構の一つとして高電界下で分子分極現象が介在するものが考えられる。Girardinioらは液体中の放電チャンネル先端の電界は10GV/mに達することを報告している<sup>(17)</sup>。この値を用いると分極によるエネルギーは分子1個当たり1eVオードになり得る。ここで負針の場合について考えれば、液体中に動く電子は準自由状態にあり、その行程で数分子にエネルギーを与えこれを励起した後、分子に捕らえられる。この中性分子は既に先行電子による励起や分極によりエネルギーを得ており、その構成電子は高い励起状態にある。捕獲された電子がオージェ過程の中で低いエネルギー準位に遷移することにより、励起電子を自由電子に変えることが考えられる。この電子の遷移が多段階に起これば1個の電子捕獲に対し2個以上の電子放出が可能である。このようにして中性分子が正イオンになると、この正イオンは後発電子による励起や再分極により高いエネルギー状態を保つため、電子との再結合が妨げられ電離後のプラズマは安定となる。見方を変えれば、このような電離機構は分子内部での電子励起とクーロン相互作用による電離とみなすことができる。以上の過程では低密度領域内での電子加速を含まないので、低密度領域が形成されることなく破壊進展が可能である。分極による蓄

積エネルギーの大きさは極性によらず、また針端電界が2GV/m以上の場合には電離に必要なエネルギーの大部分がこの分極エネルギーでまかなわれるとすれば、電離効率が両極性でほぼ等しくなり、放電進展速度に極性差が現れないことが期待できる。

液体分子の励起準位は非連続的であるので、この分子に捕獲される電子のもつエネルギーのある範囲では電離確率が変わらない。このため、電界のある範囲内では放電進展速度が固体誘電体の種類、その厚さ、表面の荒さにより影響を受けにくく、図8および図9に示されるよう破壊の遅れが明りょうに変化しない結果が得られると考えられる。

## 5. むすび

光電変換法による破壊前駆電流測定系と、パルス幅1 $\mu$ sの方形波高電圧を用いて高い精度で破壊の遅れを求めることに成功した。本論文の特徴を要約すると次のようである。

(1) 0.8GV/m以下の針端電界では、油中沿面の破壊前駆電流は負針よりも正針の場合が大きい。

(2) 油中沿面放電の進展速度は一般に負針よりも正針の場合が大きい。しかし、針端電界が2GV/m以上では極性により進展速度はほとんど変わらない。

(3) 固体沿面を加えることにより正針の放電進展速度はわずかに増すのに対し、負針の場合の放電進展速度は大きく増加する。

(4) 各々の極性で、厚さ100 $\mu$ m程度のポリイミドではその厚さにより沿面放電の進展速度はほとんど変わらない。

(5) 各々の極性で、100 $\mu$ m程度の厚さが同じ絶縁紙、ポリエチレンテレフタレートとポリイミドの沿面放電の進展速度はほとんど変わらない。

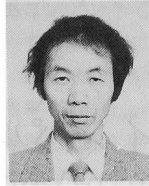
(6) 正針では電界電離により、負針の場合はオーガ過程を介して放電が進展すると思われるが、どちらの極性でも電離に要するエネルギーの一部は電子分極により供給される機構が考えられる。

(平成2年2月26日受付)

## 文 献

- (1) 岸田・佐藤・鳥山：「油中電荷図形と沿面放電に対する細溝の効果」, 電学論A, **92**, 246 (昭47-5)
- (2) 茂木・大島・本多・矢成：「油浸絶縁物の直流沿面破壊特性」, 電気学会放電絶縁材料研資, ED-80-92; EIM-80-81 (昭55)
- (3) 岸田・佐藤・鳥山：「開閉インパルス電圧による油中沿面放電」, 同上ED-80-93; EIM-80-82 (昭55)
- (4) E. F. Kelly & R. E. Hebner, Jr.: "Electrical Breakdown in Composite Insulating Systems: Liquid-Solid Interface

- Parallel to the Field", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, **EI-16**, 297 (1981)
- (5) J. D. Cross: "Breakdown Across a Dielectric Spacer in Insulating Oil and the Role of Electrohydrodynamics in Liquid Breakdown", *ibid.*, **EI-17**, 493 (1982)
  - (6) J. C. Devins & S. J. Rzad: "Streamer Propagation in Liquids and Over Liquids-Solid Interfaces", *ibid.*, **EI-17**, 512 (1982)
  - (7) S. J. Rzad, J. C. Devins & R. J. Schwabe: "The Influence of a DC Bias on Streamers Produced by Step Voltages in Transformer Oil and Over Solid-Liquid Interfaces", *ibid.*, **EI-18**, 1 (1983)
  - (8) S. Ohgaki & Y. Tsunoda: "A Study of the Positive Streamer Growth under Surface Discharge Configuration in Liquid Paraffin", *ibid.*, **EI-19**, 594 (1984)
  - (9) 中尾・伊藤・岡・吉田・酒井・田頭: 「変圧器油中固体絶縁物表面におけるインパルス沿面放電の進展に関する研究」, 電学論 A, **108**, 313 (昭63-8)
  - (10) 中尾・伊藤・岡・空・酒井・田頭: 「油中インパルス沿面放電の進展に伴う密度変化と粉像」, 同上 A, **109**, 189 (平元-5)
  - (11) 岸田・佐藤: 「油中沿面放電の進展機構」, 電気学会放電研資, ED-83-75 (昭58)
  - (12) H. Yamada & T. Sato: "High-Speed Electro-Optical Measurement of Prebreakdown Current in Dielectric Liquids", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, **EI-20**, 262 (1985)
  - (13) M. Ishii & H. Yamada: "Self-Matched High-Voltage Rectangular Wave Pulse Generator", *Rev. of Sci. Instrument*, **56**, 2116 (1985)
  - (14) J. C. Devins, S. J. Rzad & R. J. Schwabe: "Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids", *J. Appl. Phys.*, **52**, 4531 (1981)
  - (15) K. C. Kao: "New theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulators", *ibid.*, **55**, 752 (1984)
  - (16) S. Sakamoto & H. Yamada: "Optical Study of Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, **EI-15**, 171 (1980)
  - (17) P. Girdinio, P. Molino, G. Molinari, A. Viviani, G. J. FitzPatrick & E. O. Forster: "Effect of Streamer Shape and Dimension on Local Electric Field Conditions", *ibid.*, **EI-23**, 669 (1988)



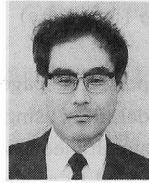
山田 弘 (正員)

昭和22年7月27日生。54年3月北海道大学大学院工学研究科博士課程満了。同年5月岩手大学工学部電気工学科助手, 57年同講師, 58年同助教授, 現在に至る。59年4月~61年3月 M. I. T. 客員研究員。工学博士。日本物理学会, 静電気学会, 低温工学会会員。



佐藤 淳 (正員)

大正15年11月6日生。昭和23年3月東北大学工学部電気工学科卒業。26年4月岩手大学工学部電気工学科講師, 39年同教授, 現在に至る。工学博士。日本物理学会, 応用物理学会, 照明学会会員。



藤原 民也 (正員)

昭和22年4月17日生。48年3月東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月一関工業高等専門学校助手。50年4月岩手大学工学部電気工学科助手, 57年同講師, 平成元年同助教授, 現在に至る。62年4月~63年3月 M. I. T. 客員研究員。工学博士。日本物理学会会員。