

氏 名	ひら しま ゆき や 平 島 幸 也
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 61 年 4 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 38 年 3 月 神奈川大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	液体窒素の電気伝導と絶縁破壊の光学的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 穴山 武 東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学助教授 後藤 幸弘

論 文 内 容 要 旨

本論文は液体窒素の電気伝導と絶縁破壊の光学的研究による成果をまとめたものであり、その内容は全 5 章より構成されている。各章の要旨は次の通りである。

第 1 章 序 論

液体中の電気伝導と絶縁破壊（伝導・破壊）機構は、液体の構造が気体ほど単純でなく、また、固体ほど規則性が無い為に、気体中や固体中の場合に比べ、未解決の部分が多い。他方、極低温液体は、構造が比較的単純であり、液化の過程で不純物が排除されることや、破壊に伴う生成物がない等により液体の伝導・破壊現象の研究に適している。また、液体は各種電力機器の絶縁材料として用いられており、特に極低温液体は極低温ケーブル等の開発途上にある電力機器の絶縁寒剤として用いられる。従って、極低温液体の伝導・破壊現象の研究は、電気工学の分野において重要なばかりでなく、物理学の分野においても重要である。

気体の破壊機構は霧箱中で単一電子なだれ現象の写真観測を手掛かりにストリーマ理論が確立された。また、固体の破壊機構は透明結晶中の結晶格子と絶縁破壊経路の方向性の写真観測から電子の衝突電離作用に基づく真性破壊理論が確立された。従って、液体においても、光学的観測法による研究は絶縁破壊機構を解明する上で重要な役割を担うものと考えられる。

近年、シュリーレン法やシャドー法による研究が盛んに行われ、液体中の全路破壊は破壊前駆現

象に伴う現象図形が電極間を橋絡した後その内部で発生することが明確に成ってきた。しかしながら、記録された現象図形内部については、諸説があり明確ではない。また、現象図形が形成される電子的過程についても十分に議論が行われていない。従って、本研究は電力機器等の開発の基礎的データとして役立たせると共に、これらの関係を明確にし、液体の伝導・破壊現象の問題の解決に新しい知見を得ようとするものである。

上述の観点から、本研究は液体窒素の電気伝導と絶縁破壊現象を光学的手法を用いて観測し、現象図形の内部構造、高電界電子伝導機構および絶縁破壊機構を解明した。本章には液体の電気伝導・絶縁破壊に関する研究の歴史的考察についても記述してある。

第2章 光学的観測法の測定感度と現象図形の同定法についての研究

液体中の絶縁破壊前駆現象をシュリーレン法やシャドー法で記録した現象図形の内部については、(1)気相状態、(2)高温液体状態および(3)プラズマ状態が考えられている。この問題は絶縁破壊機構を解明する上で重要であるが、現象図形と各状態との関係は明確に成っていない。その主な理由は、シュリーレン法やシャドー法では屈折率の定性的な変化についての情報しか得られないからである。

そこで筆者は、液体窒素中の破壊前駆現象、液体中に局部的に存在する高温状態および気泡を、同一の光学系を用いたシャドー法、ナイフエッジ・シュリーレン法、リングエッジ・シュリーレン法およびマッハ・ツェンダー法で観測した。また、各観測法についての検出感度ならびに光学的観測法で得た現象図形内部の判別法を明らかにした。その特徴を表1に示した。すなわち、現象図形の輪郭は屈折率の検出感度により決まる。また、液体中に局部的に存在する高温状態と気泡ではその内部を透過してくる光量に大きな差があり、現象図形は表1に示したように異なる図形で記録される事が明確になった。以上の結果から、従来報告されている現象図形は全て気相状態に記録したものである事が分かった。

表1 光学的観測法についての比較

観測法	シャドー法	ナイフエッジ シュリーレン法	リングエッジ シュリーレン法	マッハ ツェンダー法
測定値	定性的測定	定性的測定	定性的測定	定量的測定
感度の指向性	なし	あり	なし	なし
屈折率の情報	2次微分	勾配	勾配	変化量
屈折率の変化 量の検出感度	3×10^{-4}	4×10^{-5}	2×10^{-5}	1×10^{-6}

液体中の破壊前駆現象への適用

プラズマ状態	観測が困難	ナイフの配置で変 る薄い陰影図形	薄く白い図形	干渉縞が僅かに 屈折する
高温液体状態	薄い陰影図形	ナイフの配置で変 る陰影図形	白い図形	干渉縞の屈曲し た図形
気泡	濃い陰影図形	濃い陰影図形 (ナイフに無関係)	輪郭を白線で浮彫 した図形	干渉縞のない陰 影図形

第 3 章 液体窒素中の高電界電子伝導現象の光学的研究

液体中の絶縁破壊前駆現象を記録した現象図形内部は電子的過程で生成される。しかしながら、電子的過程で電子が電界から得るエネルギーが明確でないため、電子なだれや気相の生成についての議論が十分に行われていない。これは、液体中の高電界電子伝導機構が不明確なことに起因しており、破壊機構の解明には高電界電子伝導機構の解明が重要となる。他方、液体窒素中の電子の移動度は、研究者により異なる値が報告されており、その伝導機構は明確でない。

そこで、絶縁破壊近傍の高電界で電子の移動度を測定し、高電界電子伝導機構を明確にする事にした。絶縁破壊近傍の高電界で電子の移動度を測定するには、ラウエ・プロット法と光学的観測法が考えられる。筆者は、液体窒素中の絶縁破壊前駆現象をリングエッジ・シュリーレン法で観測して得た伝導過程に対応した現象図形の進展速度、および光を照射しないで単独に測定した電流波形とからキャリアの移動度を求め、従来報告されている移動度を含めて伝導機構について検討した。

本実験で得た移動度はイオン移動度と考えられる値の2~3桁大きく、また、自由電子の移動度に比べ1~3桁小さい。そこで、実験結果を局在電子伝導機構に適用してホッピング距離、活性化エネルギーを求めた。得られた値は電子がホッピング伝導機構で移動している事を示し、また、電界依存性は従来報告されている全ての移動度を説明できることが明確になった。これらの事から、液体窒素中の電子伝導機構は局在準位間を quasi-free electron のように移動するか、あるいは量子力学的トンネル効果で移動する熱励起形ホッピング伝導であると結論した。この場合、電子のホッピング距離あるいはトンネリング距離は $50\sim 73 \text{ \AA}$ であり、活性化エネルギーは $0.08\sim 0.09 \text{ eV}$ である。

また、本論文で用いた光学的手法は破壊電界近傍の高電界電子伝導機構を解明する手段として有効であり、現象を直接目で見る事ができるので、伝導・破壊機構の解明には勝れている事が明確になった。

第 4 章 液体窒素中の絶縁破壊現象の光学的研究

液体中の絶縁破壊前駆現象をマッハ・ツェンダー法を用いて観測したのは本論文が最初である。この方法で得た液体窒素中の現象図形内部には干渉縞が認められなかった。また、リングエッジ・シュリーレン法等で記録した現象図形は第2章で明らかにした同定法により、内部が微細気泡の集合体である事が分かった。従って、本実験で得た液体窒素中の破壊前駆現象の伝導過程では、陰極から放射された電子がホッピング機構で伝導し微細気泡を生成するものと考えた。そこで、ホッピング伝導電子のエネルギー利得と液体分子との相互作用による電子のエネルギー損失とから気泡の生成について検討した。

その結果、電子は単一のホッピング移動で、ホッピング距離 $50\sim 73 \text{ \AA}$ にはほぼ等しい微細気泡(直径 $51\sim 82 \text{ \AA}$)を生成できる事が判明した。更に、これらの気泡は、ホッピング電子が液体分子にトラップされてから 10^{-10} s 以内の短時間に生成され得ることが理論的に推定できた。ところで本実験の電界では、電子のエネルギー利得は、電子のエネルギー損失より大きいとも考えられ、電子なだれの可能性がある。しかしながら、電流波形には電子なだれの効果が現れていないし、また、全路

破壊は微細気泡群内で発生している。これらの事から、液体窒素中の絶縁破壊機構は、陰極から放射された電子のホッピング伝導に伴い生成された微細気泡群内で発生する気泡的破壊である。さらに、ホッピング電子伝導による液体の破壊は、液体の電離による電子的破壊より、ホッピング電子により生成された気泡を介する気泡的破壊が優先する事が明らかになった。

第5章 結 論

本研究により、次の結論を得た。

- (1) 液体中の絶縁破壊前駆現象を光学的観測法で記録した。さらに光学的観測法の検出感度および現象図形内部の同定法を明らかにした。
- (2) 液体窒素中の破壊前駆現象図形の内部は微細気泡の集合体である。
- (3) 液体窒素中の電子伝導機構はホッピング伝導であり、この場合のホッピング伝導には①ポーラロンのような熱励起形ホッピング伝導、②熱励起形トンネル・ホッピング伝導の二通りが考えられる。電子のホッピング距離あるいはトンネリング距離は $50\sim 73 \text{ \AA}$ であり、活性化エネルギーは $0.08\sim 0.09 \text{ eV}$ である。
- (4) 本実験の電界強度 ($1.4\sim 1.7 \times 10^7 \text{ V/m}$) では、電子はホッピング距離 $50\sim 73 \text{ \AA}$ を移動し、ホッピング距離にはほぼ等しい微細気泡 (直径 $51\sim 82 \text{ \AA}$) を、 10^{-10} s 以内で生成可能であることが分かった。
- (5) 液体窒素中の全路破壊は、陰極から放射された電子が高電界中をホッピング伝導し、電子伝導に伴い生成された微細気泡群によって両電極間が橋絡した後、その気泡群内部で起こる。気泡群内部では陰極から放射された電子が、あるいは気泡群内で電離により発生した電子が電子なだれを形成し全路破壊を導く。
- (6) 液体窒素中の破壊前駆電流は電子の伝導過程と全路破壊過程の間で、電流が見掛け上一旦零になり、休止時間が存在することを見出した。
- (7) 液体窒素中の陰極からの電子放射から全路破壊に至る過程が、シュリーレン像の時間変化と電流波形とを対応させる事により説明できるようになった。

審査結果の要旨

液体絶縁物は、絶縁破壊強度が高く、固体に比べて冷却効果も大きく、破壊後の絶縁性の自己回復力が優れているために、古くから含浸材や変圧器油として広く使われてきた。

しかし、気体や固体に比較して電気伝導と絶縁破壊機構（電導・破壊機構）にはいまだ不明の点が多く、放電物理および電気機器設計上それらの機構を解明することが重要な課題となっている。

著者は、液体絶縁物の電導・破壊機構の解明を目的として、構造が比較的単純で不純物等他の因子の影響が少なく、また極低温ケーブル等の絶縁寒剤として使用される液体窒素をとりあげて、その電導・破壊機構を、各種の光学的屈折干渉法を駆使して明らかにしてきた。本論文はその成果をとりまとめたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の位置づけを行っている。

第2章では、液体絶縁物の電導・破壊現象を観測するシャドー法、ナイフエッジ・シュリーレン法、リングエッジ・シュリーレン法およびマッハ・ツェンダー法の4種の光学的観測法について検討を加え、その測定感度および得られた現象図形の同定法について論じ、液体の電子的破壊と気泡的破壊とを識別するには、定量的測定が可能なマッハ・ツェンダー法が有用であるとしている。

第3章では、液体窒素の高電界電気伝導現象について、リングエッジ・シュリーレン法による観測と電流波形測定の結果をもとに電気伝導機構について検討を行い、高電界での電気伝導は電子のホッピング伝導であると結論づけている。これは有用な知見である。

第4章では、液体窒素の絶縁破壊機構を解明するために、絶縁破壊前駆現象を第2章で論じた各種の光学的手法を用いて観測し、その結果を詳細に検討している。液体の絶縁破壊前駆現象をマッハ・ツェンダー法で観測したのは著者が最初である。観測結果に対する検討より、液体窒素の絶縁破壊は、液体の電離による電子的破壊よりも、電極から注入された電子のホッピング伝導に伴い形成される微細気泡群で電極間が橋絡された後、気泡群内で電子なだれによって発生する気泡的破壊が優先すると結論づけているが、これは重要な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、未解決の部分が多く存在する液体絶縁の電気伝導と絶縁破壊機構に関して、各種の光学的手法を用いて詳細な実験的検討を行い、光学的測定法の有用性および液体絶縁物の電導・破壊機構について、幾つかの重要な知見を得たもので、電気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。