有機絶縁材料のトラッキング劣化過程で発生する放電の発光スペクトル特性

正員 吉村 昇 (秋田大)
正員 西田 眞 (秋田大)

正員 高橋 康弘 (秋田大)
正員 能登 文敏 (秋田大)

1. ま え が き

トラッキング破壊は絶縁材料表面上の電位差のある部分に炭化導電路（トラック）を形成し、絶縁性を失う現象と定義されている⁽¹⁾。トラッキング破壊の直接的原因となるのは微小発光放電の熱であると考えられており⁽²⁾、トラッキング破壊に至る機構を検討するうえで、放電の基本的性状とその炭化劣化に及ぼす影響について明らかにすることが重要な課題である。

従来、材料表面で発生する放電については、電流波形に着目した検討が行われてきたが⁽³⁾、最近では光学的手法を用いることによって放電とトラッキング劣化との関連を明らかにすることが試みられている⁽⁴⁾。著者らは、カラーフィルタを用いた分光法により放電光の波長分布を測定し、各種放電の分類を行なった⁽⁵⁾。更に、特定波長範囲の光パルス発生数の経時変化を測定することから、トラッキング劣化のプロセスの変化について検討し、その結果の一部を既に報告した⁽⁶⁾。しかしながら、トラッキング劣化過程で発生する放電の詳細な発光スペクトル、特に炭化劣化を著しく促進するシンチレーション⁽⁶⁾と材料の種類との関係は必ずしも明らかとなっていない。

一般に、発光スペクトルは放電の発生方法、発生状態、周囲媒質（例えば、ガスや電極材質）などによって変化することが特徴である⁽⁷⁾。このため、トラッキング劣化を材料の種類、すなわち分子構造の観点から論ずるうえで、劣化過程で発生する放電の発光スペ

クトルを明らかにすることが多くの情報を与えるものと期待される。

本論文では、主として IEC 587 耐トラッキング性試験法⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いた場合に、材料表面で発生する放電の発光スペクトルを詳細に測光し、主に次の三つの項目について検討した。

- (1) トラッキング劣化過程で発生する放電の発光スペクトル特性
- (2) 材料の種類と発光スペクトルの関係
- (3) 発光スペクトルに及ぼす試験法の影響

2. 実験装置、方法および試料

〈2・1〉 実験装置 本研究で用いたトラッキング試験法は、IEC publication 587⁽⁸⁾⁽⁹⁾に規定された試験方法に準拠しており、試験回路および電極配置を図1と図2にそれぞれ示す。IEC 587 試験法は、IEC 112⁽¹⁰⁾試験法で判定される材料に比較して、よりかくな条件下での屋外高電圧用として使用される材料の耐トラッキング性を判断するための試験法として用いられるものである。

発光スペクトルを測光するため、試験電圧としては1.5~6 kVの範囲で適宜選択して使用した。なお、本論文では特に断わりがない限り、電源周波数として50 Hz（商用周波数）を使用した。各電圧における試験回路の直列抵抗値および汚損液の流量の関係を表1に示す。電極には厚さ約0.5 mmのステンレス鋼を用

Light Emission Characteristics of Discharge Associated with Tracking Deterioration of Organic Insulating Materials. By Noboru Yoshimura, Member, Makoto Nishida, Member, Yasuhiro Takahashi, Member & Fumitoshi Noto, Member (Mining College, Akita University).

吉村 昇: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

西田 眞: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

高橋康弘: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科 (現在, (株)富士電

機総合研究所)

能登文敏: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

S: 電源スイッチ, VT: スライダック,
T: 変圧器 (100V/6, 600V), V: 電圧計,
Sp: 試料, F: 過電流リレー

図1 試験回路

Fig. 1. Experimental setup.

図 2 IEC 587 試験法の電極配置

Fig. 2. Assembly of the electrode for the IEC 587 test method.

表 1 試験電圧、汚損液の流量および直列抵抗値
Table 1. Set value of test voltage, contaminant flow rate and series resistance.

試験電圧 (kV)	汚損液の流量 (ml/min)	直列抵抗値 (kΩ)
1.00 ~ 1.75	0.075	1
2.00 ~ 2.75	0.15	10
3.00 ~ 3.75	0.30	22
4.00 ~ 4.75	0.60	33
5.00 ~ 6.00	0.90	33

い、図2に示すようにフィルタペーパー（8枚重ね）と共に、ステンレス鋼製ネジにより試料に取付けた。上部電極（高圧側）と下部電極（接地側）間距離は50mmであり、試料は地面に対して45度に傾けて設置した。

汚損液には 0.1 ± 0.002 重量%の NH_4Cl に 0.02 ± 0.002 重量%のトリトン X-100（界面活性剤）を加えた水溶液を使用した。汚損液の流量は、試験電圧に合わせて表1に示す値に設定し、上部電極下面のろ紙部分に注入した。用いた汚損液の抵抗率は 23°C で約 $396 \Omega \cdot \text{cm}$ である。

なお、発光スペクトルに及ぼす試験法の影響を検討するため、電極として白金を用いる IEC 112 試験法についても一部試験を行なった。

〈2・2〉発光スペクトルの測定方法 発光スペクトル

の写真測光には、ツェルニターナマウンティング光学系を有する平面回析格子分光器（GE-50 A 型、島津製）を使用した。スペクトル測定のための光学系構成を図3に示す。試料表面の電極間中央部から集光レンズまでの距離を100mm、集光レンズと視野レンズとの距離を90mmにそれぞれ設定し、スリット結像法により発光スペクトルを測定した。発光スペクトルは、試料表面で発生する放電光を入射スリット（スリット幅0.1mm）を通して直接分光器に入射して写真撮影を行なった。写真撮影用フィルムはコダックレ

1. ステンレス電極 2. 試料 3. 光 4. 集光レンズ
5. 視野レンズ 6. スリット 7. 主鏡 8. 回折格子
9. カメラ 10. フィルム 11. 分光器

図 3 光学系の構成図

Fig. 3. Arrangement of optical measurement system.

コーディングフィルム 2475 で、DK-50 により処理温度 20°C で8分間（露光指数約3,200）の現像処理を行なった。用いたフィルムの測光可能波長範囲は約300~700nm（カタログ値⁽¹¹⁾）である。

発光スペクトルは、ハルトマン隔板を用いて、測定光と並べて基準光を入射し、基準光のスペクトルから直線内挿法によって同定した⁽⁷⁾。基準光には主に鉄アークスペクトルと水銀灯スペクトルを使用した。なお、鉄アークは針端曲率半径 $5\mu\text{m}$ の鉄針（オグラ宝石精機製）をギャップ2mmで対向し、この間に印加電圧1.6kVを課電し発生させた。また、水銀灯には Quartz Mercury Lamp（島津製 NSA-725）を使用した。また、鉄アークおよび水銀スペクトルはアークスペクトル写真集⁽⁷⁾および国際天文連合（IAU）が第2標準として採用している鉄の波長⁽⁷⁾から求めた。なお、必要に応じてトラッキング試験に用いた電極と同一のステンレス鋼を棒状として、アークを発生させたステンレスアーク、直径5mmの炭素棒（レアメタリック製、99.9%）を電極とした炭素アークおよび白金を電極とした白金アークスペクトルについても検討した。ステンレス鋼、炭素および白金アークの発生条件は鉄アークの場合と同一である。

〈2・3〉試料 トラッキング試験に用いた試料は、ポリ塩化ビニル樹脂、ポリスチレン樹脂、紙基材フェノール樹脂積層板、ポリメチルメタクリレート樹脂（以下、PVC、PS、PL、PMMAと記す）の4種類である。試料の大きさは $50 \times 100 \text{ mm}^2$ で、厚さは1.5~6mmである。なお、PVC、PS、PMMAは製造工程中あるいは経時による劣化を少なくする目的で添加する安定剤⁽¹²⁾以外の添加剤を含んでおらず、いずれも無色透明である。これに対して、PLには難燃剤が添加されており、黄色を呈している。また、試

料はエタノールを含ませたガーゼで表面をぬぐった後、乾布で拭き実験に使用した。

3. 実験結果

〈3・1〉 IEC 587 試験法における放電の発生状態

IEC 587 試験法の場合、試料表面で発生する放電の性状は、時間の経過に伴い一般的に図4に示すように変化する。すなわち、試験開始直後には電極間で主に紫色あるいは桃色を呈する放電（以下、コロナ放電と称する）が図4(a)に示すように発生する。コロナ放電は流下する汚損液に沿って発生し、コロナ放電の繰返しによって接地電極近傍に炭化物が析出した。一度炭化物が析出すると、その周辺で図4(b)に示すような黄赤色あるいは白色の放電（以下、シンチレーションと称する）が発生し、炭化劣化が促進された。なお、炭化劣化の進展に伴って、ジュール熱によ

る炭化路の赤熱現象〔図4(b)の白色線状に見える部分〕が見られるようになり、炭化路先端部分で発生したシンチレーションによって炭化路は高圧側電極に向けて急速に進展し、最終的にはトラッキング破壊に至った。以上のように目視上の観察によると、IEC 587 試験法を用いた場合のトラッキング劣化過程で認められる発光現象は、次の3種類に分類される。

- (i) 炭化開始前に発生するコロナ放電による発光
- (ii) 炭化路先端で発生するシンチレーションによる発光
- (iii) 炭化路の赤熱による発光

そこで、上記3種類の発光現象について個別にスペクトルの写真測光を行なった。

〈3・2〉 コロナ放電の発光スペクトル 炭化開始

前に発生するコロナ放電の分光写真例を図5に示す。図5は印加電圧 1.5 kV、露光時間5分で撮影したものであり、420~570 nm および 640 nm 以上の波長範囲ではスペクトルが確認されなかったので省略した。また試験に用いた4種試料のうち、PLは炭化が生じやすく、コロナ放電のみを分離して分光することが困難であったため、PMMA、PS、PVCの3種試料の結果のみを示した。なお、図5には図6の電極構成で発生させた気中放電（印加電圧 10 kV、周波数 1 kHz）のスペクトルも比較のため示した。

図5より、コロナ放電のスペクトルのうち、比較強い輝度を有するスペクトルの存在波長は、316.0、337.2、357.8、380.5、589.0、589.5、632.1 nm など

図4 放電光の写真

Fig. 4. Photographs of discharges.

図5 IEC 587 試験法によるコロナ放電の分光スペクトル

Fig. 5. Grating spectra of corona discharge by means of the IEC 587 test method.

図 6 気中放電を発生するための電極構成
Fig. 6. Assembly of the electrodes for arc discharge in air.

となる。これら各スペクトルのうち 589.0, 589.5 nm を除き、いずれも気中放電中でも確認され、更に試料の種類による相違は認め難い。

〈3.3〉シンチレーションの発光スペクトル 試料表面で炭化開始後、シンチレーションが発生した場合の発光スペクトルの分光写真例を図7に示す。また、比較参照用としてステンレスアーク、カーボンアーク、鉄アークそれぞれのスペクトルも合せて図7に示

図 7 IEC 587 試験法によるシンチレーションの分光スペクトル

Fig. 7. Grating spectra of scintillation discharge by means of the IEC 587 test method.

す。なおシンチレーションの場合、発光強度が著しく高いため写真測光に要する露光時間は約 10 秒とした。また、PMMA の場合炭化路は形成されず、シンチレーションが発生しなかったため、図 7 には PS, PVC, PL の 3 種試料のみの結果を示した。

図 7 より、シンチレーションの発光スペクトルは連続スペクトル（写真全体が白く見える部分）に数多くの線スペクトルが重畳して発生する様子が認められる。特に、300~440nm の波長範囲に線スペクトルが集中的に存在し、これらを同定すると鉄 (Fe), クロム (Cr), ニッケル (Ni), カルシウム (Ca), スズ (Sn), ナトリウム (Na) などの金属スペクトルであった。このため、図 7 中には各スペクトルに対応する金属の元素記号を記した。

各種の金属スペクトルのうち、例えば Sn (303.4, 317.5, 326.2, 333.1nm) は PVC で同定されるものの、PS や PL では認められず、試料によって異なる金属スペクトルが確認された。

〈3・4〉炭化路の赤熱による発光スペクトル 炭化路の赤熱はシンチレーションと混在して発生することが多いため、赤熱のスペクトルのみを分離して写真測光することは困難であった。そこで、一度トラッキング破壊を生じた試料に、600~1,000V の電圧を再課電し、モデル的に赤熱状態を発生させたときの発光スペクトルを写真測光した。炭化路の赤熱による発光スペクトルの写真測光例として、PS と PVC の場合を図 8 に示す。なお、図 8 は露光時間 3 分に設定したもので、400~570nm の波長範囲では線スペクトルは認められなかったので省略した。

炭化路の赤熱による発光には、359.0 と 388.3nm にシアンバンド (CN 帯)⁽¹³⁾に相当する線スペクトルが認められるほかには、線スペクトル (Na の D 線を除く) は確認されなかった。また、550nm 以上の長波長領域ではほぼ連続なスペクトルとなる。このように炭化路の赤熱による発光は、シンチレーションやコロナ放電に比較して線スペクトルの発生数は著しく少ない。

4. 測光結果の検討

〈4・1〉3 種発光現象に伴うスペクトルの特徴

前章の結果から、コロナ放電、シンチレーションおよび炭化路の赤熱にはそれぞれ特有のスペクトルの存在することが明らかとなった。これら 3 種発光現象に伴うスペクトルの特徴をまとめると次のようになる。

(1) コロナ放電 コロナ放電の発光スペクトルは気中放電の結果にはほぼ対応し、試料間での相違は認められない。

(2) シンチレーション 3 種発光現象のうち最も多くの線スペクトルが認められ、試料によって存在するスペクトルが異なる。また、広範囲な波長にわたる連続スペクトルを有している。

(3) 炭化路の赤熱 CN 帯スペクトル以外 (Na の D 線を除く) の線スペクトルは確認されず、550nm 以上の長波長領域で連続スペクトルとなる。また、試料による差異は認めにくい。

そこで、これら 3 種発光現象に伴うスペクトルについて、次節以下で詳細に検討する。

〈4・2〉コロナ放電による発光スペクトル 炭化開

図 8 炭化路の赤熱の分光スペクトル

Fig. 8. Grating spectra of heat radiation of carbon path.

始前に発生するコロナ放電から得られたスペクトルのうち、316.0, 337.2, 357.8 および 380.5nm の波長に存在する線スペクトルは、窒素分子の発光遷移の一つである N_2 2nd positive 帯として知られている波長⁽¹⁴⁾と一致している。更に、632.1nm に存在する線スペクトルは酸素分子の発光遷移として報告されている⁽¹⁵⁾ スペクトルのうち、最も発光強度の高いスペクトルと対応する。一方、589.0nm と 589.5nm はナトリウムの D 線である。

一般に、空気中でのコロナ放電光は N_2 2nd positive の帯系列に所属するスペクトルが最も強く現われると報告されており⁽¹⁶⁾、この結果は本研究で得られた結果と対応している。従って、IEC 587 試験法における炭化開始前に発生するコロナ放電は、IEC 112 試験法での報告と同様⁽⁶⁾、汚損液間あるいは汚損液と電極の微小間隔での空気絶縁破壊によって発生することを示している。

また、コロナ放電の写真測光時の露光時間はシンチレーション測光時に比較して著しく長いにもかかわらず、各試料間の発光スペクトルには相違が認められない。このことは、シンチレーション発生時に比較してコロナ放電のみが発生している状態下では、単位時間あたりの炭化劣化が生じにくいことを示している。

また、コロナ放電光に含まれる D 線は、汚損液中に不純物として含まれるナトリウム (Na) による影響と考えられる。

〈4.3〉シンチレーションで発生する金属スペクトル シンチレーションには数多くの金属スペクトルが認められた。そこで、各試料において認められた金属スペクトルをまとめて表2に示す。なお、同表中に記したスペクトルの強度は写真測光の結果からおおよその目安として定めたものである。

表2より、3種試料に共通して確認される金属スペクトルは Fe, Ca, Na であり、Cr と Ni は PS と PVC で、Sn は PVC のみから同定されるにすぎない。また、PL では Cr と Ni と思われるスペクトルが認められるが、それぞれの金属について、1本の線スペクトルのみしか観測されなかった。このため、PL から Cr と Ni を同定するのは困難である。このように、各試料で発生するシンチレーションから同定される金属スペクトルは異なっている。

シンチレーションから金属スペクトルが同定される原因として、次の4項目のいずれかが考えられる。

- (i) 大気中にゴミやチリとして存在する金属の影響
- (ii) 電極に用いた金属の影響

表2 シンチレーションでの金属スペクトル
Table 2. Metal spectra of scintillation discharge.

元 素	波 長 (nm)	試 料		
		PS	PVC	PL
Sn	303.4	—	S	—
	317.5	—	S	—
	326.2	—	S	—
	333.1	—	S	—
Cr	357.9	S	S	—
	359.3	S	S	W
	360.5	S	S	—
	425.7	—	M	—
	427.5	—	M	—
	429.0	—	M	—
Ni	337.0	M	M	M
	338.1	—	W	—
	339.3	—	W	—
	341.5	M	M	—
	343.7	W	W	—
	345.8	W	W	—
	346.2	W	W	—
	349.2	W	W	—
	351.5	W	M	—
	352.5	M	M	—
Ca	393.4	W	M	S
	396.8	W	W	S
	422.8	M	W	S
Fe	302.1	—	W	W
	344.1	W	M	W
	356.5	M	M	W
	357.0	M	S	W
	358.1	S	S	W
	360.8	W	M	—
	361.9	M	M	—
	363.1	W	M	W
	372.0	W	W	W
	373.5	W	M	W
	374.9	W	M	W
	376.3	W	W	W
	382.0	W	M	W
	382.6	W	M	W
	383.4	—	W	W
	384.0	—	W	W
	404.6	—	—	W
	438.4	—	W	W
Na	589.0	M	M	S
	589.5	M	M	S

S: Strong, M: Medium, W: Weak, —: No spectrum

- (iii) 汚損液中に不純物として存在する金属の影響
- (iv) 試料表面あるいは内部に含まれる金属の影響
- (i) について: 鉄, 炭素, ステンレス鋼, 白金 (図 11 参照) などを電極としてアークスペクトルの写真測光を行なうと、電極に用いた金属 (Na を除く) 以外の金属スペクトルは認められなかった。このため、大気中にゴミやチリとして存在する金属がシンチレーションから同定された金属スペクトルの発生原因となることは考え難い。

(ii)について：IEC 587 試験法で用いる電極は、Cr と Ni を主成分⁽¹⁷⁾とするステンレス鋼である。従って、電極に用いた金属がスペクトルに影響する場合、すべての試料から Cr や Ni が同定される可能性がある。しかしながら、同一の試験条件の下で PS や PVC から Cr と Ni が同定されたのに対して、PL からはこれらの金属は同定されなかった。更に、後述するように白金を電極として用いた IEC 112 試験法で得られたシンチレーションの線スペクトルは、各試料とも IEC 587 試験法を用いて得られたスペクトルに一致している。これらの事実は、シンチレーションで金属スペクトルが発生する原因として、電極に用いた金属の影響は考え難いことを示すものである。

(iii)について：汚損液の影響を検討するため、図9に示す電極構成を用い、電極と汚損液間で発生する放電のスペクトルの写真測光を行なった。しかしながら、Na を除く金属スペクトルは観測されなかった。更に、コロナ放電からも金属スペクトルは同定されないことから、汚損液の影響は考え難い。

以上、シンチレーションから金属スペクトルが同定される原因として、(i)~(iii)の項目による可能性は少ないことが明らかとなった。従って、シンチレーションで金属スペクトルが認められるのは(iv)、すなわち材料内部に含まれる金属に起因するものと考えられる。

一般に、PVC では安定剤の一つとして有機スズ化合物系が用いられることや、重合時の触媒としてホウ素、アルミニウム、スズ、鉛などのアルキル金属化合物を使用することが報告されている⁽¹⁸⁾。このように

図9 電極と試験液間での放電用電極構成

Fig. 9. Assembly of the electrodes for discharge generation between Fe electrode and solution.

有機絶縁材料には、その製造時に用いた触媒の残査や、種々な成分を有した添加剤が混入されているのが一般的である⁽¹⁸⁾。従って、シンチレーションから同定される金属スペクトルは、これら触媒残査や添加剤によって生じたものと考えられる。また、触媒や添加剤として使用する物質が試料によって異なることが、シンチレーションの金属スペクトルに相違を生ずる原因と考えられる。

〈4・4〉シンチレーションの熱的性質 シンチレーションの写真測光時、露光時間を短く(約10秒)設定したにもかかわらず、赤熱の場合と同様、388.3nmに帯頭を有するCN帯スペクトルおよび連続スペクトルの発生が認められた。この事実は、シンチレーション自体からもCN帯スペクトルや連続スペクトルの発生している可能性を示唆している。CN帯スペクトルや連続スペクトルは熱せられたニクロム線や炭素棒などのように、高温物体の熱放射によって発生すると考えられている⁽¹⁹⁾。従って、コロナ放電に比較して、シンチレーションはかなり高温に達していることが考えられる。このようにシンチレーションが熱源となり試料の分解を著しく促進し、その結果として試料内部に混入している金属物質に対応する各種スペクトルが発生したものと考えられる。

〈4・5〉IEC 587 試験法と IEC 112 試験法のスペクトル比較

トラッキング劣化過程で発生する放電の発光スペクトルに及ぼす試験条件および試験法の影響について検討するため、IEC 112 試験法の場合についても検討した。IEC 112 試験法(白金電極、印加電圧400V)を用い、炭化開始前に発生するコロナ放電のスペクトルの写真測光例として、PSの場合(300~390nmの波長範囲)を図10に示す。IEC 112 試験法によるコロナ放電は、IEC 587 試験法および気中放電によって得られたスペクトルとほぼ一致し、試験条件による相違は認められない。

図11に IEC 112 試験法を用い発生したシンチレーションの分光写真の例(300~480nmの波長範囲)を

図10 コロナ放電のスペクトルの比較

Fig. 10. Comparison of grating spectra of corona discharges between the IEC 112 and IEC 587 test methods.

図 11. IEC 112 試験法によるシンチレーションの分光スペクトル

Fig. 11. Grating spectra of scintillation discharge for the IEC 112 test method.

示す。IEC 112 試験法の場合も、IEC 587 試験法と同様に、数多くの線スペクトルと広範囲の波長にわたる連続スペクトルが認められる。また、IEC 112 試験法で同定された金属スペクトルは、IEC 587 試験法で得られた結果と一致し、試験条件によるスペクトルの相違は認められない。これらの結果は、トラッキング劣化過程での放電の発生機構は、試験法や試験条件の相違にもかかわらず同一であることを示すものであろう。

5. あとがき

トラッキング劣化過程で発生する放電の発光スペクトルについて、主に IEC 587 試験法を用いて検討した。本研究で得られた主な成果をまとめると次のようになる。

(1) 炭化開始前に発生するコロナ放電の発光スペクトルは気中放電のスペクトルに対応し、 N_2 や O_2 など空気中に含まれる気体分子の発光遷移によるスペクトルが確認された。

(2) 炭化開始後に発生するシンチレーションは、連続スペクトル上に数多くの線スペクトルの重畳していることが明らかとなった。これらの線スペクトルの大部分は金属スペクトルである。

(3) 試料の重合時に使用した触媒の残査あるいは添加剤として用いた物質が、金属スペクトルの発生原因と考えられる。このため、シンチレーションによって発生する金属スペクトルの種類は試料によって異なる。

(4) シンチレーションの発光スペクトルは、CN 帯スペクトルおよび広範囲にわたる連続スペクトルを有しており、強い熱放射を生じていることが明らかとなった。

本研究は昭和 57 年度文部省科学研究費（試験研究）の援助の下に行なった。

（昭和 59 年 9 月 25 日受付，同 60 年 3 月 18 日再受付）

文 献

- (1) 「IEC publication 112 による絶縁材料の耐トラッキング性」，電気学会技報 (II)，No. 115 (昭 56-6)
- (2) 吉村・西田・能登：電気評論，No. 173 (昭 56-6)
- (3) 例えば，「トラッキング現象と耐トラッキング性試験法の動向」，電気学会技報 (I)，No. 86 (昭 43-7)
- (4) 例えば，平沢・松岡・平林：電気学会絶縁材料研究，EIM-78-26 (昭 53)
- (5) 西田・吉村・能登：電学論 A，102，195 (昭 57-4)
- (6) 西田・吉村・能登：同上 A，104，41 (昭 59-1)
- (7) 浜口・黒田・根岸・佐野：アークスペクトル写真集 (昭 44) 丸善
- (8) IEC publication 587: Test method for evaluating resistance to tracking and erosion of electrical insulating materials used under severe ambient conditions (1977)
- (9) IEC SC 15A (Central Office) 44, Draft for an amendment to IEC publication 587 (1981)
- (10) IEC publication 112, Third edition (1979)
- (11) Kodak Recording Film 2475 Photographic and physical properties (1975) Eastman Kodak Company
- (12) 高分子学会編：高分子辞典，p. 453 (昭 49) 朝倉書店
- (13) David. C. Manaing: Atomic Absorption Newsletter, 5, No. 6 (1966)
- (14) 例えば，賛田・大坪・赤崎：電学論 A，100，571 (昭 55-10)
- (15) F. D. Findlay: Canad. J. Phys., 48, 2107 (1970)
- (16) 堀井・藤：電学誌，No. 88, 591 (昭 41-4)
- (17) 岩波理化学辞典，第 3 版 (昭 51) 岩波書店
- (18) 古谷：塩化ビニル樹脂 (昭 49) 日刊工業新聞社
- (19) 長瀬：基礎分光化学通論 (昭 50) 廣川書店