

電力ケーブル用クラフト絶縁紙の熱劣化特性

—絶乾状態における機械的特性の変化—

Thermal Ageing Properties of Insulating Paper for Power Cables
—Changes in Mechanical Characteristics at Absolute Dried Condition—

下山田 富保* 齋 藤 明*
Tomiyasu Shimoyamada Akira Saito

内 容 梗 概

電力ケーブル用絶縁紙の使用状態は絶対乾燥状態で用いられるので、この機械的強度がケーブル製造および布設上に大きく影響する。

油入ケーブル用紙3種とコンデンサ用紙1種について100~140°C×120時間真空乾燥し、マイクロクリスタリンワックスを含浸して絶乾時の機械的特性の変化を測定した。

耐折強度、横方向の伸度、破裂強度が著しく変化することが認められ、ケーブルの屈曲による紙切れは特に破裂強度の著しく低下する紙に多いことが認められた。

1. 緒 言

ケーブル材料として重要な位置を占めるクラフト絶縁紙の使用状態における特性を詳しく理解することは、製品の品質を向上するばかりでなく、材料の進歩改善を促し、さらに一段と製品品質を向上する意味においてたいせつなことである。電力ケーブル用紙は乾燥されて絶対乾燥状態（以下絶乾状態と略す）において使用される点、一般の包装用クラフト紙と非常に異なる。したがって絶乾状態における機械的特性の変化を把握することは特にケーブル製造上および布設上に重要なことである。

われわれは前報^{(1)~(5)}において主として加熱による化学的劣化と電気的特性の劣化について報告してきたのであるが、本報ではケーブルの機械的特性の問題が後述の理由から重要なのかんがみ、絶乾状態における電力ケーブル紙の見掛上の機械的強度の劣化問題を報告したいと思う。

従来の絶縁紙の機械的強度の劣化に関する報告は、加熱後の試料を再吸湿させて試験しているので本報の結果と異なる。絶乾状態で測定した諸強度は意外に低く見掛上の劣化の大きいことに注意しなければならない。

2. 電力ケーブル用紙の使用状態

紙の強度は使用目的によってそれぞれ日本工業規格に規定されているが、その測定値はJIS P. 8111に定める標準条件（相対湿度 $65 \pm 2\%$ 、温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ）で静的荷重による強度で表わす。

このような条件で測定された紙の強度は使用目的に対して必ずしも満足する結果が与えられていないことが多い例で知られている。たとえば重包装用クラフト紙では引張、破裂、引裂の各強度の3項目を規定しているがこれらの静的荷重による破壊強度試験では実際使用中の

瞬間的な衝撃荷重による結果と一致しないことが報告されている⁽⁶⁾。

ケーブル用絶縁紙にあっても特別な使用状態にあることを考慮に入れなければならない。すなわち張力をもって導体に絶縁紙テープをスパイラルに巻く紙巻工程では切断しないように抄紙方向に引張強度と伸度および横方向の引裂強度のいずれも大きいことが従来から必要とされているが⁽⁷⁾、実際には衝撃的破壊強度が重視されなければならない。

さらにケーブル用絶縁紙は電気特性を向上させるためセルローズ繊維の劣化を避けながら含有水分を除去する真空乾燥工程がある。この絶乾状態で含浸混和物が含浸され、ついで被鉛されて製品となる。

したがってケーブル紙の機械的特性は前述のJIS標準試験条件におけるよりも絶乾状態の機械的特性が実際にケーブルの電気的、機械的特性に大きく影響することになるので、絶乾時の特性を重視することの方がよりいっそう重要であると考えられる。この意味から電力ケーブル紙に望まれる理想的物理特性は

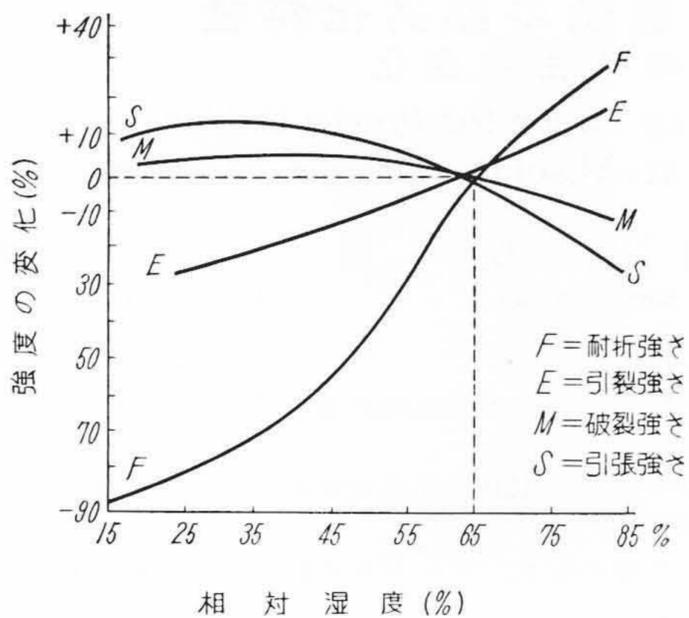
- (1) 乾燥状態の機械的強度が大きいこと
- (2) ジメンション（縦、横、厚さ）の安定度が大きいこと
- (3) 縦および横方向の機械的諸強度差が小さいこと
- (4) その他の物理特性が均一であること

などであると考えられるが、特に高電圧ケーブル紙について研究改善することが必要である。

3. 紙の種々の強度と相対湿度との関係

International Critical Tableによれば第1図に示すように紙の種々の強度は相対湿度によって変化することが知られている。電力ケーブル紙は実際には絶乾状態で使用されるので、その機械的特性は前述のように標準試験条件のRH 65%より、むしろ絶乾状態における機械的

* 日立電線株式会社電線工場



第1図 種々の強度と相対湿度との関係

特性がケーブル製造上実際に必要な強度である。

紙の物理特性はパルプの成分、叩解条件および抄紙条件によって同一でないから、第1図の値から絶乾状態における強度変化はおよその傾向は知り得ても、ケーブルの機械的特性を向上させるためには実測によって絶対値をつかむことが必要である。

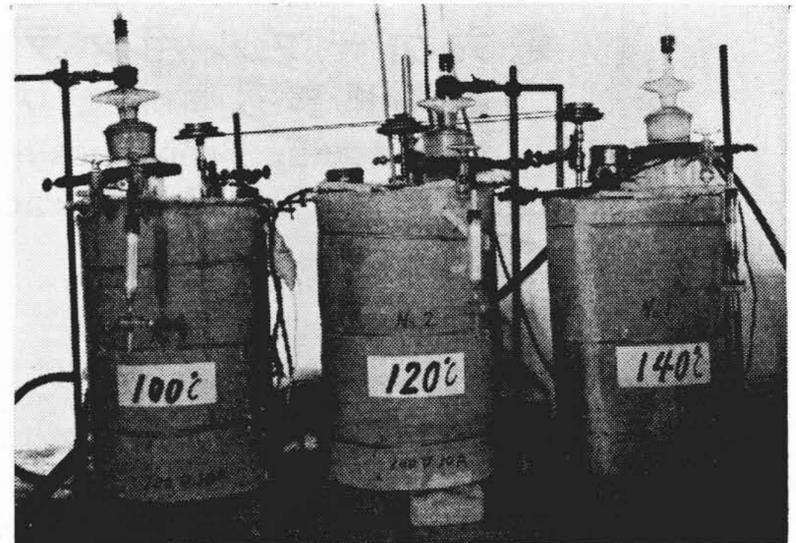
第1図について明らかなことは乾燥されると引張、破裂、引裂および耐折の各強度のうち耐折強度は湿度に対し鋭敏に左右される。次に引裂強度も変化を受けやすい。引張強度は乾燥されていくぶん強くなることが示されている。また同時に測定される伸度は耐折強度と同程度に大きく変化することも注意しなければならない。

したがってこれらの変化に対し電力ケーブルの機械的特性を向上させるためには、ケーブル紙の絶乾状態における機械的特性中特に耐折強度、引裂強度、破裂強度、引張強度および伸度などの絶対値に対し検討することが重要である。

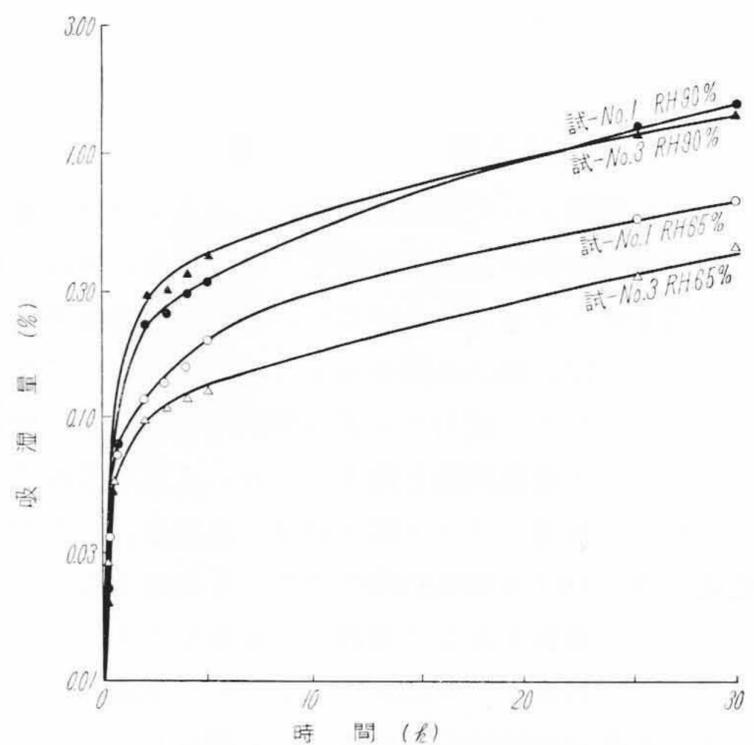
4. 実験の方法

4.1 絶乾状態の各種強度の測定法

絶乾状態の機械的特性があまり報告されていないのは絶乾状態に試片を保つことの煩雑な点にあると思われる。ここでは絶対乾燥に達せしめるため第2図に示す真空乾燥装置で100, 120 および 140°C に 0.5 mmHg に 24~120 時間保って乾燥し、乾燥後は乾燥空気を通じた



第2図 真空乾燥装置



第3図 ミクロクリスタリンワックス処理紙の吸湿特性

から容器の真空を破り、ただちに 180°C に溶融しておいた粘性に富むミクロクリスタリンワックス(軟化点70°C)に一瞬間浸漬して湿気を遮断した。さらに前述の試料を一試片ずつワックス中に浸漬し付着量が均一になるように引き上げ、デシケータ中に保存した。次に恒温恒湿の測定室で3時間以内に全測定が終るようにした。

ミクロクリスタリンワックスに浸漬した試片の RH 65 および 90%における吸湿時間特性を示すと第3図のように3時間以内であれば、実ケーブルの油浸紙水分と同程度であるから絶乾状態の測定値に影響しないことをあらかじめ確かめた。

第1表 試料の物理的特性

試料 (No.)	厚さ (mm)	密度	重さ (g/m ²)	引張強さ(kg/mm ²)		伸び (%)		引裂強さ (g/16枚)		破裂強さ (kg/cm ²)	耐折強さ (回)		平均重合度 DPw	気密度 (sec/100 cc)
				縦	横	縦	横	縦	横		縦	横		
1	0.122	0.75	101.38	8.70	3.11	3.9	8.8	117	168	4.60	2,980	670	1,460	464
2	0.100	0.73	83.02	9.72	2.35	3.0	7.75	72	109	3.76	3,590	240	1,430	358
3	0.070	0.86	66.76	11.00	2.89	2.7	10.1	97	108	3.20	1,090	410	1,310	1,551
4	0.061	0.69	47.07	6.80	3.72	2.3	8.65	31	38	2.46	2,020	1,670	1,270	2,811

4.2 試料

用いた試料の物理特性を第1表に示す。

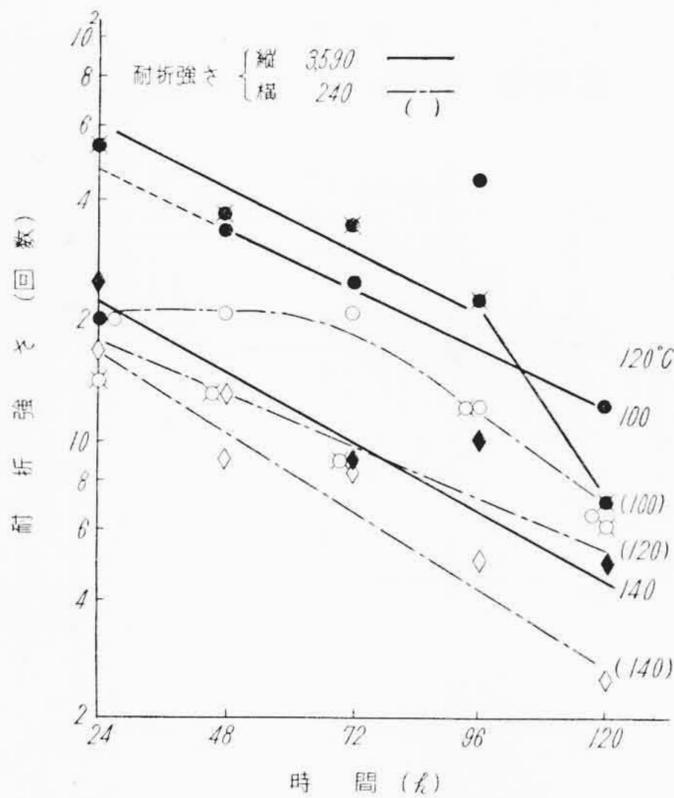
4.3 各種強度の測定器

引張強度はショッパー引張試験器, 引裂強度はエレメントルフ引裂度試験器, 破裂強度はミュレン破裂度試験, および耐折強度は MIT 耐折度試験器を用いて RH 65%, 20°Cの恒温恒湿中で測定した。

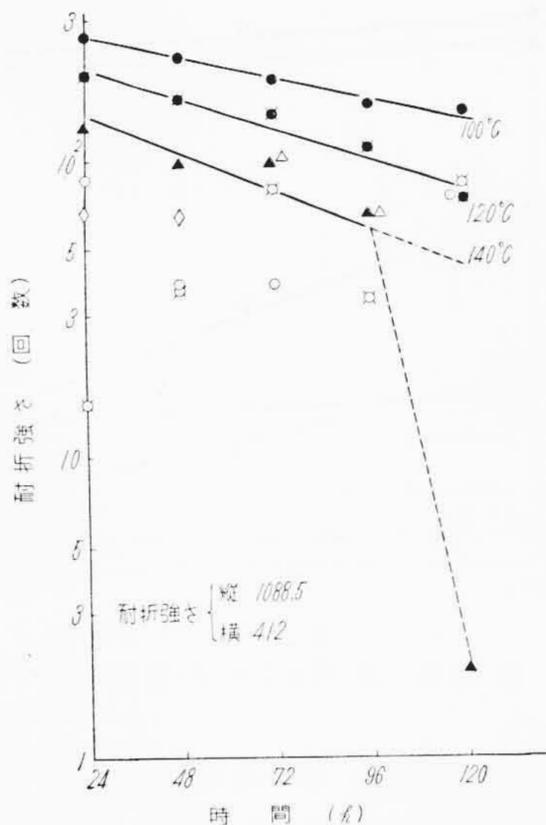
5. 実験結果

5.1 耐折強度の変化

試-No. 1 と 2 は縦, 横ともに各温度において乾燥時



第4図 試-No. 2 耐折強さ-温度変化



第5図 試-No. 3 耐折強さ-温度変化

間が多いほど, 耐折強度を減少する傾向を示す。原試料の耐折強度に対し-99%以上の変化率を示し, 各温度に120時間加熱乾燥されると数回で破断する。第4図は試-No. 2 の場合を代表例として示した。

試-No. 3 (絶乾耐折強度を改善した絶縁紙) の場合の結果を第5図に示したが, 横方向の絶乾耐折強度の測定値ははなはだしくばらつくので単にプロットするに留めた。

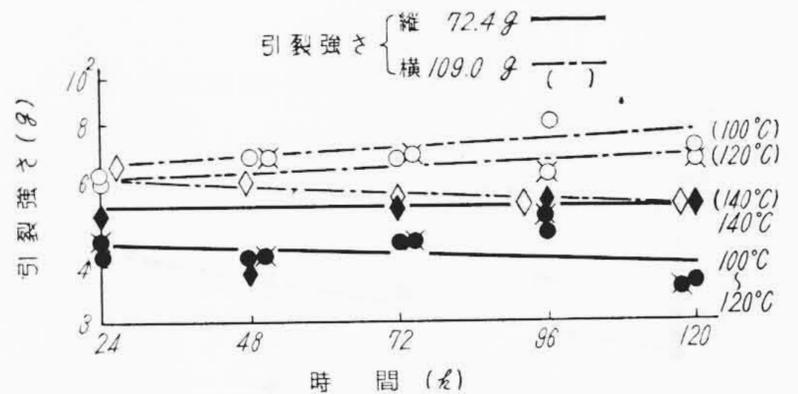
長網で抄紙した試-No. 4は叩解度の高い紙であるが, No. 3 と同様に長繊維であるため No. 1~2 に比べて絶乾強度は高く 140°C×120時間で平均縦70回, 横100回であった。また縦方向の100°C×120時間の変化率は-94%, 120°C×120時間のそれは-99.9%でほかの試料より熱劣化されやすいことを示した (図示省略)。

5.2 引裂強度の変化

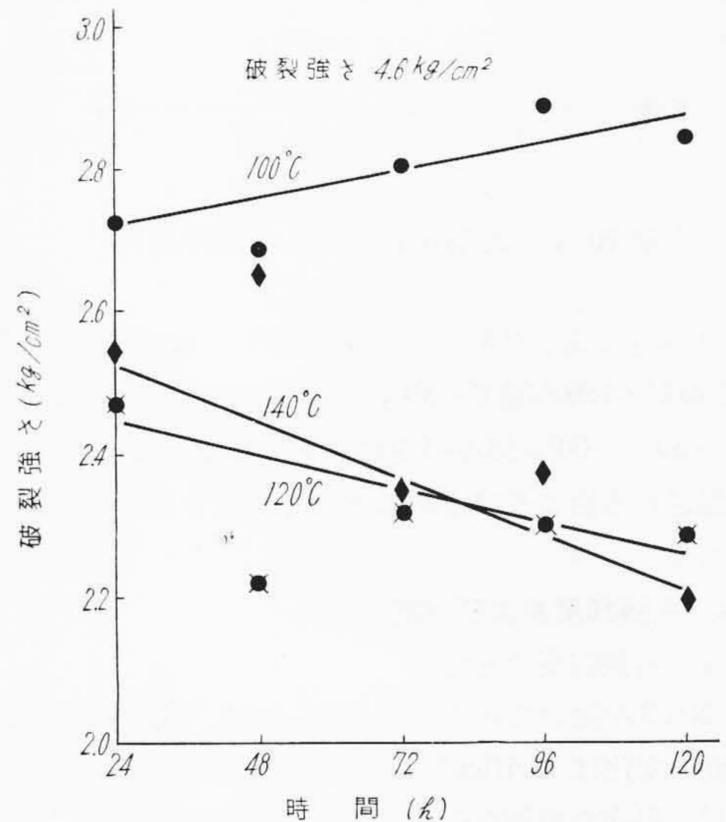
いずれの試料も引裂強度の変化率は-30%前後で第1図の Critical Table の値とほぼ同様の变化率を示す。その代表例として No. 2 の場合を第6図に示した。

5.3 破裂強度の変化

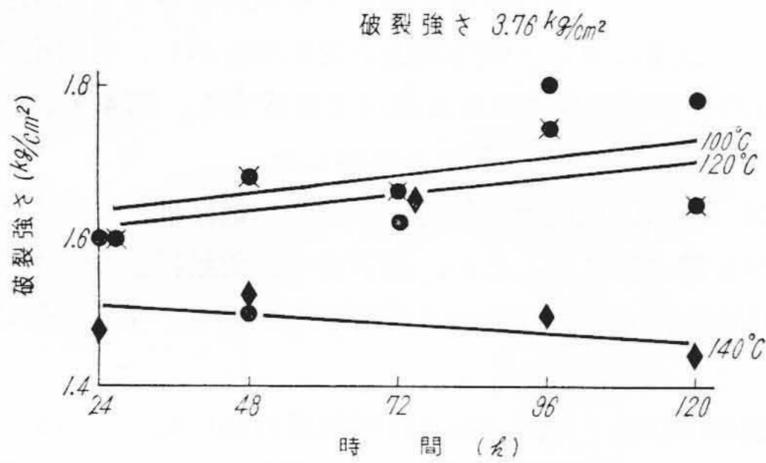
試-No. 1~4の結果を第7~10図に示した。試-No. 3



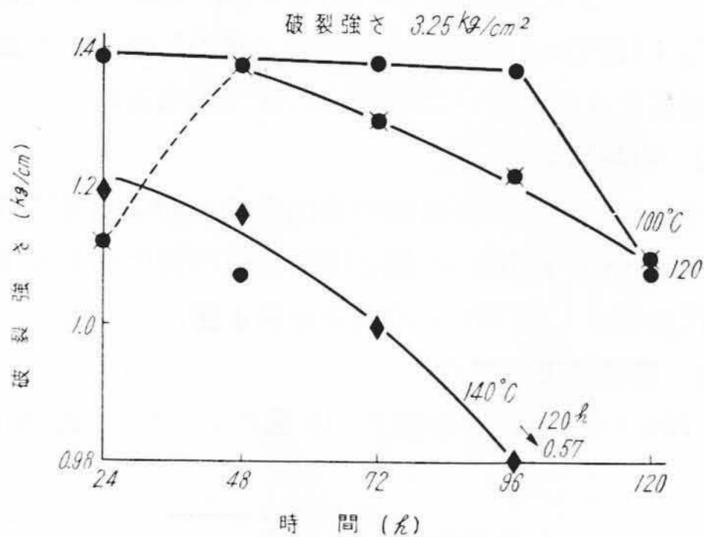
第6図 試-No. 2 引裂強さ-温度変化



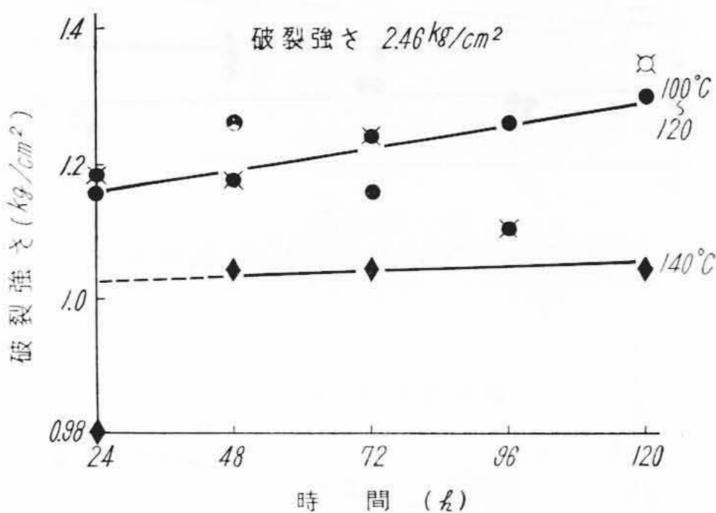
第7図 試-No. 1 破裂強さ-温度変化



第8図 試-No. 2 破裂強さ-温度変化



第9図 試-No. 3 破裂強さ-温度変化



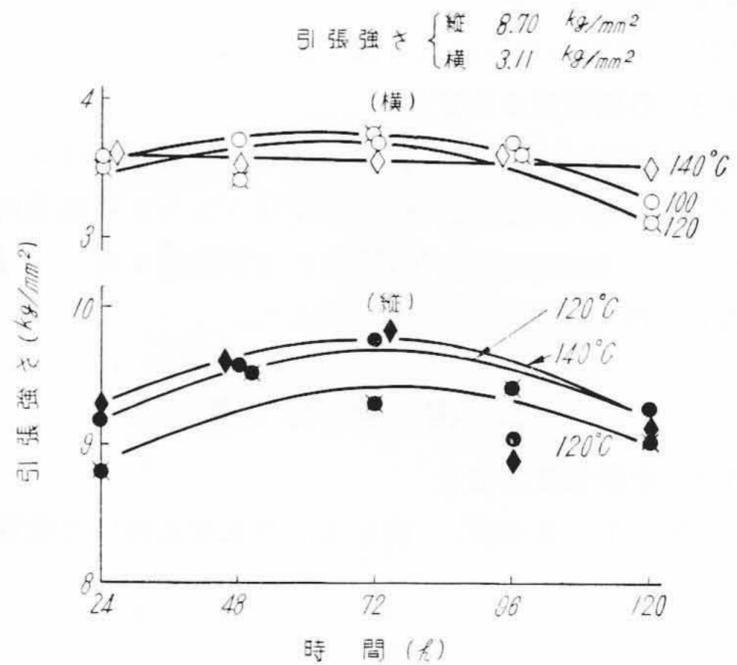
第10図 試-No. 4 破裂強さ-温度変化

の結果が特に低下が著しく $100 \sim 120^\circ\text{C} \times 120$ 時間で -70% , $140^\circ\text{C} \times 120$ 時間で -80% を示し, ほかの試料はいずれも $-50 \sim -60\%$ 程度の変化があり Critical Table から予想される値よりはるかに大きな変化を示すことは意外である。

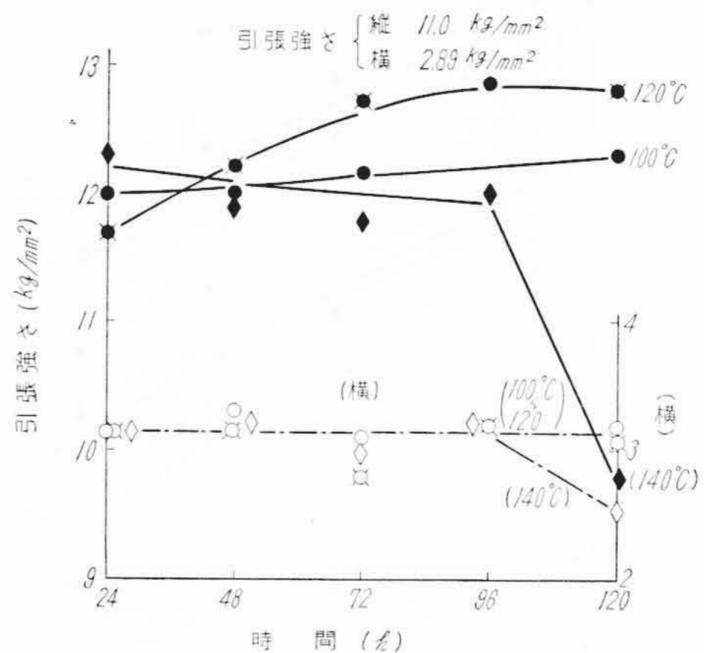
5.4 引張強度および伸度の変化

(1) 引張強度の変化

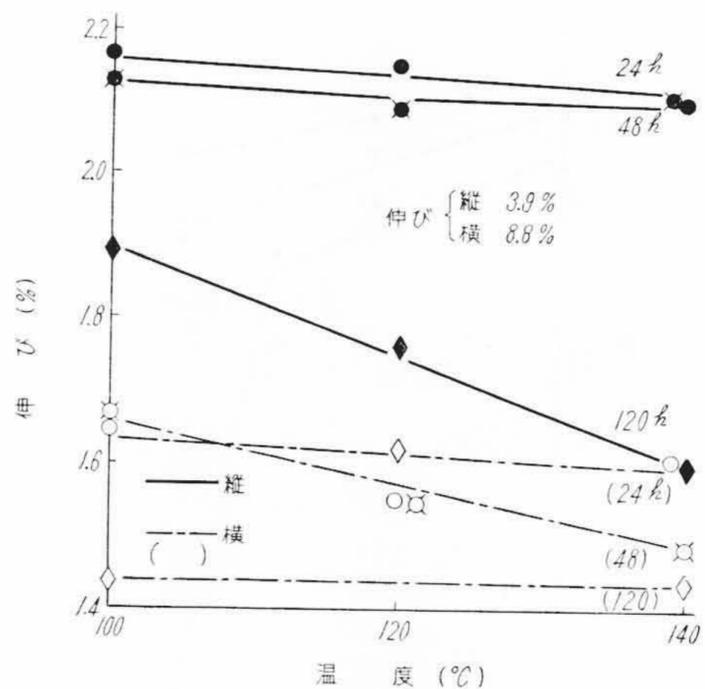
試-No. 3を除いていずれも $100 \sim 140^\circ\text{C} \times 120$ 時間の絶乾強度の変化は Critical Table の値と同様, 縦, 横平均 10% 程度の増加を示す。その代表例に試-No. 1 と No. 3 の場合を第11, 12図に示した。



第11図 試-No. 1 引張強さ-温度変化

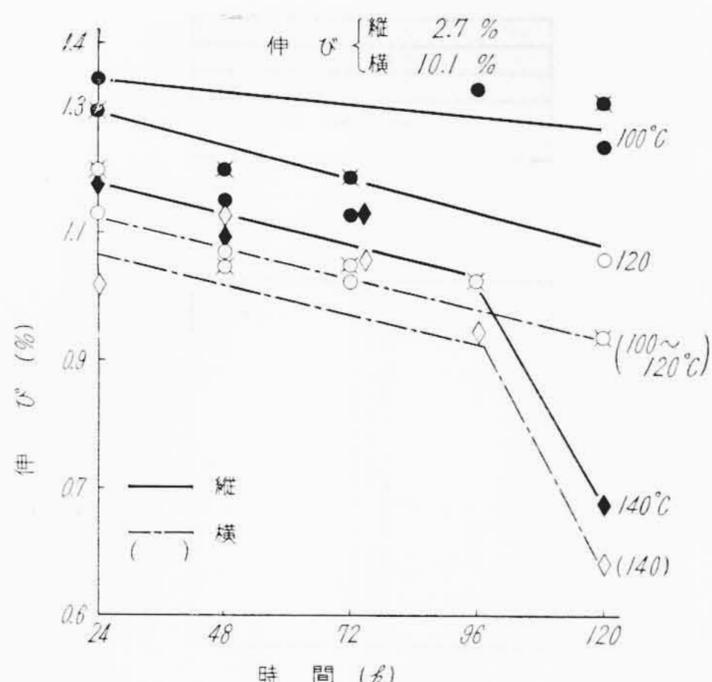


第12図 試-No. 3 引張強さ-温度変化



第13図 試-No. 1 伸び-温度変化

試-No. 3 の場合は縦, 横の絶乾引張強度が $140^\circ\text{C} \times 96$ 時間で目だつ低下 (-10%) を示すが, そのほかの場合には $+10\%$ 前後に増加する。



第14図 試-No.3 伸び-温度変化

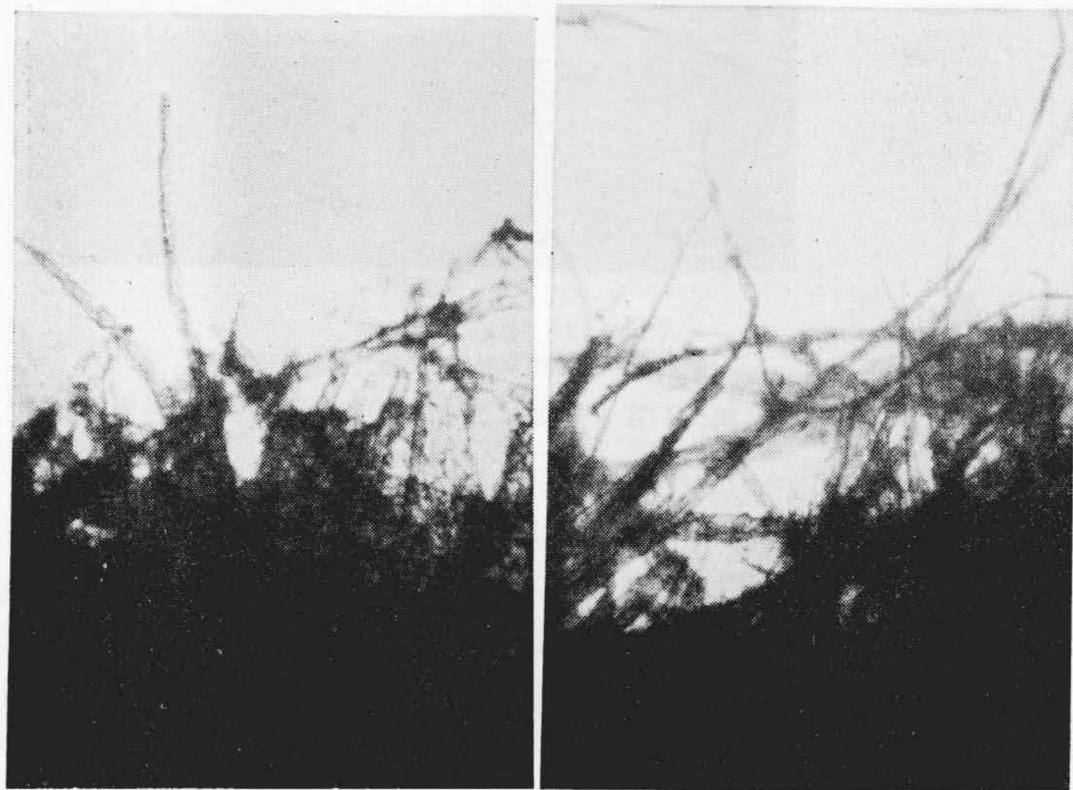
(2) 伸度の変化

伸度の変化はいずれの試料も引張強度に比べてばらつきが多いが、100~140°C×120時間の絶乾で試-No.1は縦方向-55%、横方向-83%、試-No.2は縦-30%、横-82%、試-No.3は縦-57%、横-90%(ただし100~120°C×120時間の絶乾)、試-No.4は縦-58%、横-90%に変化する。この代表例に試-No.1とNo.3の結果を第13, 14図に示したが、伸度の変化は前記のように縦方向に-50~-60%、横方向に-80~-90%の変化を示し耐折強度について著しい変化を示す。

6. 考 察

6.1 試-No.1~2の絶乾耐折強度の低い原因

試-No.1~2と試-No.3~4との間に非常に絶乾耐折



(1) 試-No.1 (2) 試-No.3

第15図 耐折強度試片の切断状態

第2表 耐折強度測定値間の変動係数

試料 (No.)	変動係数 (V)	
	縦	横
1	39.2	88.0
2	32.4	47.4
3	55.5	116.7
4	91.2	73.3
5	—	38.0
6	—	39.7
7	—	43.0
8	—	43.1

注: 変動係数 $V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100$ σ ...標準偏差 \bar{X} ...平均値

強度の差異があることが認められたので切断箇所を顕微鏡で調べたところ第15図に示すように繊維長が著しく異なることを示した。

試-No.1~2のパルプは初めから切断された状態で抄紙されたのか、耐折度試験において切断されたものか明らかでないが、耐折強度は繊維長が支配的に影響することが知られているのでおそらく第15図のように抄紙時においてすでに繊維長が異なっていたため絶乾耐折強度に著しい差異が生じたものと思われる。

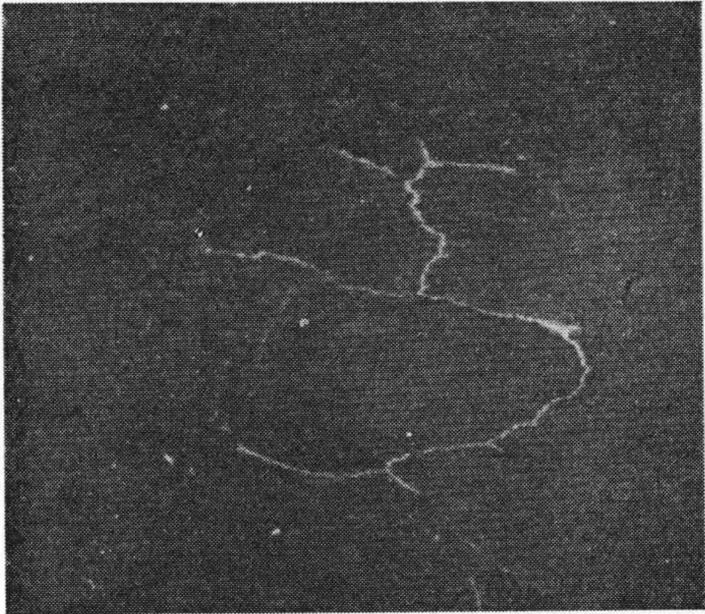
6.2 絶乾耐折強度測定値間の変動係数の比較

(紙の均一性の一比較)

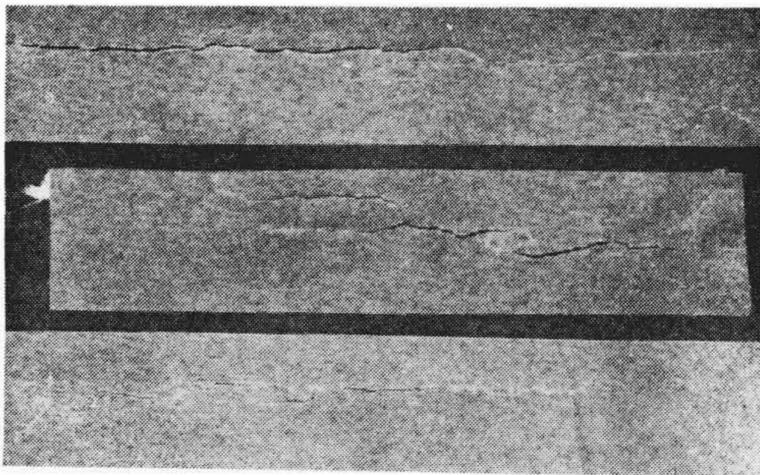
耐折強度試験法はJIS P 8115に規定されているが、測定値間のばらつきが大きく平均値を求めても果して真の値を表わすか疑問と考えられている。しかし試験法の意義について考えると耐折強度は一定箇所の折り曲げ点に集中して負荷されるので掴み部分の耐折強度を直接に表わしていることになる。

したがって測定値間のばらつき度は紙の均一度(繊維配列によって影響を受ける)を示すことになるので、ばらつきの変動係数を求めることにより紙の均一性の一比較手段にすることができる。この考え方によって各試料の100°C×24時間の絶乾強度測定値間の変動係数を計算すると第2表のようになる。

第2表から試料間の耐折強度の変動係数に大きな差が見られるのは抄紙条件および抄紙技術の相異によって変化すると考えられるので、変動係数から均一性に富む紙であるかどうか一応判定できると考えられる。このような意味で試料間の均一性を比較すると試-No.3は最も劣り、試-No.2がすぐれていることがわかる。またここには詳細報告できなかった試-No.5~8は横



第16図 破裂強度試験における紙切れ状態



第17図 ケーブルの屈曲による紙切れ状態

方向の変動係数が小さく繊維配列のさらにすぐれた絶縁紙であることを示している。

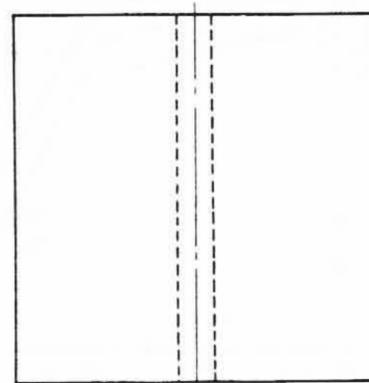
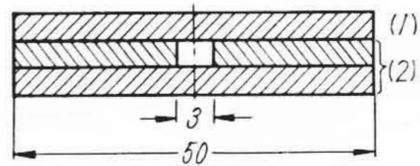
6.3 絶乾強度と屈曲による紙切れの関係

(屈曲による紙切れ機構の一考察)

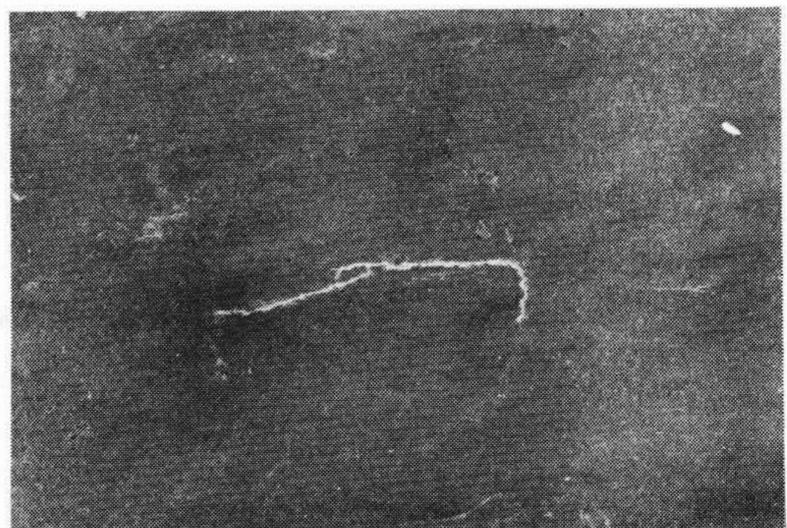
電力ケーブル用紙の絶乾状態の機械的特性は標準条件のそれに比べて、われわれの考えていた値よりもはるかに小さいものとなり、ケーブル製造上またケーブル布設にあたっていかに慎重に取り扱わなければならないかを物語っている。種々の絶乾強度のうちどのような強度が屈曲を受けたケーブルのいわゆる紙切れ現象と特に深い関係があるか考察を行った。すなわち

(1) 従来のケーブル紙(試-No.1)は絶乾時の耐折強度が著しく低いので、この点を改善した試-No.3を紙巻した実際のケーブルについて比較実験した結果、紙切れは試-No.1の方が少なく、No.3が多かった。このことは紙切れは耐折強度に大きく左右されないことを示すものである。

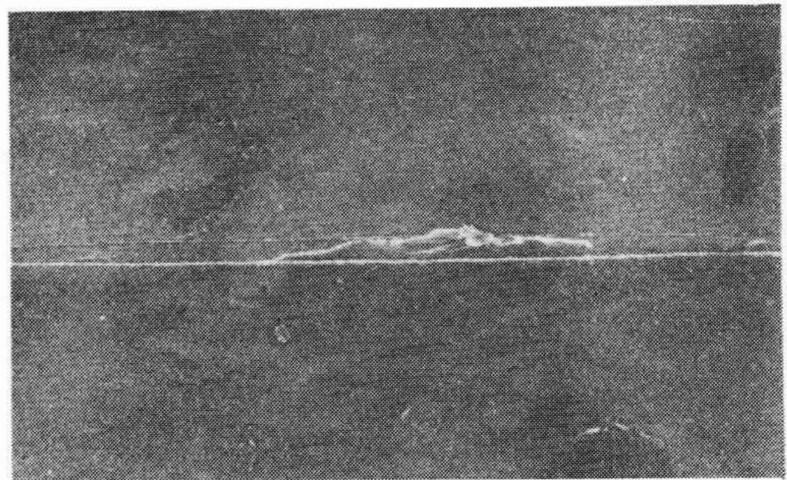
(2) ケーブルの紙切れ状態を観察すると破裂強度試験片の破断状態に最もよく相似している(第16図参照)。すなわちケーブルの紙切れは必ずテープの長さ方向(抄紙方向)であり、破裂強度試験片の破断は必ず線状に抄紙方向に裂ける顕著な特長があり、この



第18図 ケーブルの紙巻ににせてギャップを設けた破裂強度試験片



(1)



(2)

(1) (2)上の紙の破裂状態
(2) 破裂度試験による重なり目の破裂状態

第19図 屈曲による紙切れのモデル的説明図

事実ときわめてよく一致する(第17図参照)。

(3) 破裂強度は横の引張強度と伸度との関数⁽⁸⁾であるから、絶乾状態においてこれらの低下率の大きい紙は直接破裂強度に影響してくる。すなわち絶乾破裂強度が小さいことは、ケーブルが屈曲されたとき紙切れしやすい状態にあることを意味する。

(4) 以上の紙切れの状態を破裂強度試験器によって

第18図のようにケーブルの紙巻に似せてギャップを設けた試験片をつくり、再現実験した結果を示すと第19図のようになり、ケーブルの紙切れと同様に紙切れの始まりはギャップから生じ、重なり目に沿うて線状に裂けることがみられる。

以上の実験と観察から絶乾強度の機械的特性中ケーブルの屈曲による紙切れ現象に最も関係のある絶乾破裂強度の著しく低下しない電力ケーブル紙が使用者にとって最も望ましいと考える。

7. 結 言

電力ケーブル製造上また布設上に重要な関係にある電力ケーブル用絶縁紙の絶乾状態における機械的特性が標準条件 (RH 65%, 20°C) のそれよりいかに変化するかまた絶乾状態の各種強度のうちでケーブルの屈曲時に紙切れを起す絶縁層に及ぼす応力を再現する強度試験法として、どんな強度試験が最も再現性があり適切か、実験と考察の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 絶乾状態で最も変化する強度は耐折強度 (-90%以上)である。そのほか引裂と破裂強度の変化はおおよそ-50%程度であるが、破裂強度の変化は意外に大きい。
- (2) 伸度は横方向が変化率にして-80~-90%の変化をする。
- (3) しかしケーブル紙によって(たとえば試-No. 3)

横方向の伸度が-90%以上も変化する結果、破裂強度は-70~-80%も変化し、その絶対値は 1 kg/cm² 以下に低下する場合もある。

(4) 絶乾状態の破裂強度試験片に生ずる紙の横方向に線状に走る裂け方は実際のケーブルの紙切れとまったく相似している。

(5) この結果からケーブルの耐屈曲性に対する紙の強度試験法は絶乾状態の破裂強度試験法が適当していることを実験的に証明した。

(6) また絶乾状態の耐折強度測定値間の変動係数の比較により紙の均一性(繊維配列に方向性の少ないこと)の評価ができることを示し、試料間の均一性の比較、また同一紙の縦、横方向の均一性を比較した一例を示した。

終りに臨み御指導御鞭撻を賜わった東京工業大学齋藤教授、東北大学鳥山教授、日立電線株式会社久本部長、水上副部長に深謝申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 下山田, 常松: 日評 36,1823 (昭 29-12)
- (2) 下山田, 常松: 日評 37,1567 (昭 30-11)
- (3) 下山田, 常松: 日評 別冊 No. 13 45 (昭 31-3)
- (4) 下山田, 常松: 日評 39, 483 (昭 32-4)
- (5) 下山田, 佐藤: 日評 40,1235 (昭 33-10)
- (6) 上野: 高分子 7,317 (1958)
- (7) J. P. Cassey: Pulp and Paper (II) 953 (Interscience Publishers, Inc., New York (1952)
- (8) 上野: 紙の強度 209 (昭 31 丸善)



日立製作所社員社外寄稿一覧表

(その1)

(昭和33年12月受付分)

寄稿先	題 目	執筆者所属	執 筆 者
日本機械学会	ASME Trans. 文献紹介 (コンサルティングエンジニアと使用者側からみた溶接製渦巻ケーシングに対する考察)	日立工場	外岡英徳
インドニューデリー インド新聞社	Water Electrolysis	国分工場	谷崎義一
日本鉄道 車輜工業協会	特 急 あ さ か ぜ	笠戸工場	齋藤節夫
日本鉄道 車輜工業協会	特別急行列車「あさかぜ」の冷房装置	笠戸工場	田村寛 出水芳 南部誠 大江昇
日本鉄道 車輜工業協会 溶接ニュース出版局	シキ 300 形 210t 積大物車 車両用不銹鋼の溶接に関する研究	笠戸工場	矢部満 小林年 飯島弘 伊藤吉 藤吉保
印 度	ビルマ鉄道納 BNCXE 形客車車体の荷重試験と強度解析	笠戸工場	飯島弘 伊藤吉 藤吉保
日本機械学会	Fatigue Strength of a Bar with a Cotter Hole	亀有工場	吉武博之
日刊工業新聞社	旋盤作業とタレット旋盤作業の経済性の比較	亀有工場	菊地基雄
電気書院	工作機械の自動化	川崎工場	松倉寿一
日刊工業新聞社	油圧機器便覧応用編 工作機械	川崎工場	阿武芳朗

(第91頁へ続く)