

## 因島4号ブチルゴム絶縁海底ケーブル(その2)

—— ブチルゴム混和物の吸水特性 ——

In'noshima No. 4 Butyl Rubber Insulated Submarine Cable (Part 2)  
— Water Absorption on Butyl Rubber Compounds —

潮見公安\* 井清哲夫\* 久方方\*\*  
Kimiyasu Shiomi Tetsuo Isei Tadashi Hisamoto

庄司博\*\*\* 渡辺茂隆\*\*\*  
Hiroshi Shoji Shigetaka Watanabe

### 内容梗概

各種ゴム混和物の浸水中における吸水量および電気的特性の変化を測定して、ブチルゴムが最もよい耐水性を示し、また配合によつて耐水性が非常に異なることを明らかにした。ゴム混和物に吸収される水はきわめて微量であるが、これが電気的特性に及ぼす影響は無視できないので海底ケーブルの設計には特別の考慮を必要とする。代表的なブチルゴム混和物について蒸溜水中、模擬海水中および5気圧水圧中に浸水した場合の変化を測定したが大差はなかつた。次にシート状ゴム試料の吸水速度から Fick の式の簡略式を用いてブチルゴム中の水の拡散定数  $k$  を計算し、30~70°C の温度範囲で  $1.4 \times 10^{-9} \sim 3.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  なる値を得た。これより  $k$  の活性化熱を求めると 5.5 kcal/mol となる。これらの定数を用いてゴム混和物の常温 (20°C) における浸水中の水の拡散状態を計算し、各種サイズのゴム絶縁ケーブルの長期間浸水使用中における水の吸収状態を推定できるように図示した。

本報告にはブチルゴム混和物の浸水中における吸水機構および特性変化の概略を簡単に述べる。

### 〔I〕 緒 言

ブチルゴム絶縁高電圧ケーブルはそのすぐれた特性が広く認められ、国内、国外を問わず需要が急激に増大し、20~30 kV の電力ケーブルの分野に SL ケーブルに代つて進出が著しい<sup>(1)(2)(3)</sup>。生産量の増大に伴い、困難なブチルゴムの加工および配合の技術もますます進歩し、非常に安定した特性を示すブチルゴムケーブルが製造できるようになつている。したがつてケーブルの使用電圧および最高許容温度も次第に高くなる趨勢にある<sup>(1)</sup>。また、用途も拡大され発電所の主幹ケーブル、電気機器の耐熱口出線などには広く常用されており、ドレッジャーケーブルへの応用も米国で実用化されている<sup>(4)</sup>。中でも注目されるのは海底ケーブルへの利用である。

従来、海底電力ケーブルには SL ケーブル、天然ゴム絶縁ケーブルが使用されていたが、前者は油の流下、保守の困難などの欠点があり、後者はオゾン亀裂を生ずるなどの懸念があつた。ブチルゴムは天然ゴムに比べて耐オゾン性が格段にすぐれており<sup>(5)</sup>、また吸水量も少なく<sup>(6)</sup>海底ケーブル用絶縁ゴムとして好適な特性をもつているが、新しい合成ゴムなので使用実績に乏しい。

筆者などはブチルゴム混和物の浸水中における特性変化を詳細に検討して、海底ケーブル用混和物に適する配合を得、22 kV 海底ケーブルを製造した。このケーブルは瀬戸内海の因島~向島間に布設されてすでに稼働中であり、すぐれた特性を発揮している。

### 〔II〕 各種ゴム加硫物の耐水性比較

浸水中におけるゴム混和物の吸水は天然ゴムについて相当古くから検討されている<sup>(7)(8)(9)</sup>。ゴムは防水用被覆として古くから使用されており、布、紙などに比較すれば非常に耐水性のすぐれていることは周知の事実であるが、なお微量の水を吸収し、これが電気的特性に及ぼす影響は無視できない。しかし、最近種々の合成樹脂、合成ゴムが使用されて天然ゴムよりは一層確実な防水被覆が得られるようになった。弗素樹脂、ポリエチレン、ブチルゴムなどは特に吸水性の少ないものとして知られている。しかし、これらはすべて高分子なので、これらの巨大分子の間隙に水のような小分子が入り込むのを完全に防ぐことはできない。

筆者らはまず、各種ゴムの浸水中における特性変化を実測して比較した。実験は配合剤の影響をできるだけ避けるために、加硫剤のみを配合したシート状純ゴム配合加硫物を浸水して吸水量および電気的特性の変化を測定した。その結果を第1図および第2図に示す。

第2図の電気的特性を測定した試料は厚さ 0.5~0.8 mm のシート状加硫物で、これを 50°C の蒸溜水中に浸漬して任意時間放置後に取り出し、表面の付着水分を濾紙でぬぐつて測定に供した。電気的測定はゴム混和物の一般的試験方法にしたがつて行つた。

これらの測定結果からわかるように、合成ゴムは天然ゴムに比較して吸水量および浸水中の特性変化が少なく、合成ゴムの中でもブチルゴムの吸水量が最も少ない。

\* 中国電力株式会社  
\*\* 日立電線株式会社電線工場 工博  
\*\*\* 日立電線株式会社電線工場



天然ゴムの吸水量の大きいのは微量に含まれる蛋白質そのほかの親水性不純物のためであろう。天然ゴムのこれらの不純物を除いて精製した脱蛋白ゴムは吸水量が1/2~1/3になることが知られているが、生ゴムの安定性が悪く、またコストも高いので現在では実用的ではない。GR-S

は吸水量が少ないが耐オゾン性が弱いので<sup>(5)</sup>、高電圧ケーブルの絶縁ゴムとしては適当でない。

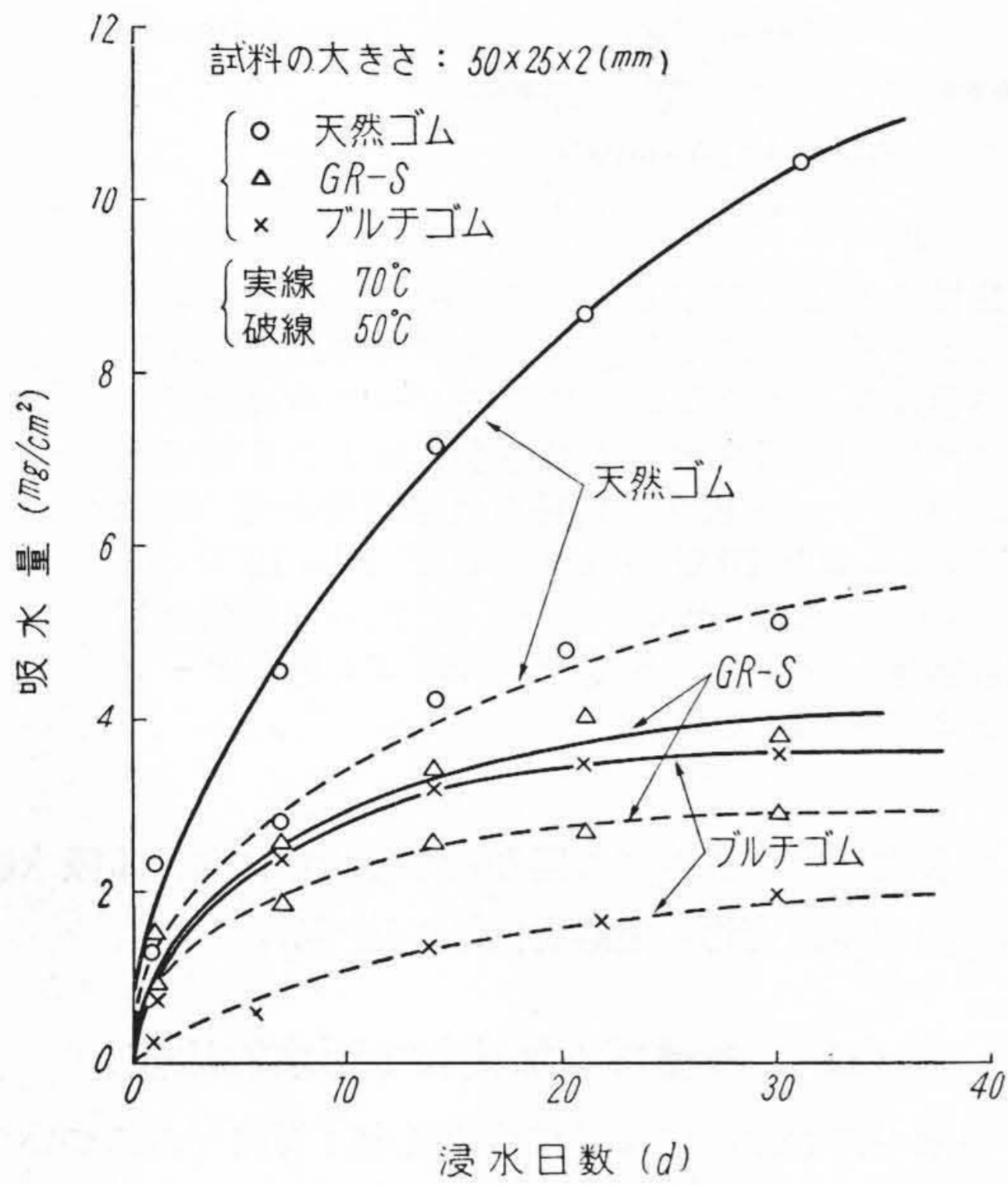
以上の結果から、海底に使用する高電圧ゴムケーブルの絶縁ゴムとしてはブチルゴムが最も適していることがわかる。

### 〔III〕 絶縁用ブチルゴム混和物の浸水中の特性変化

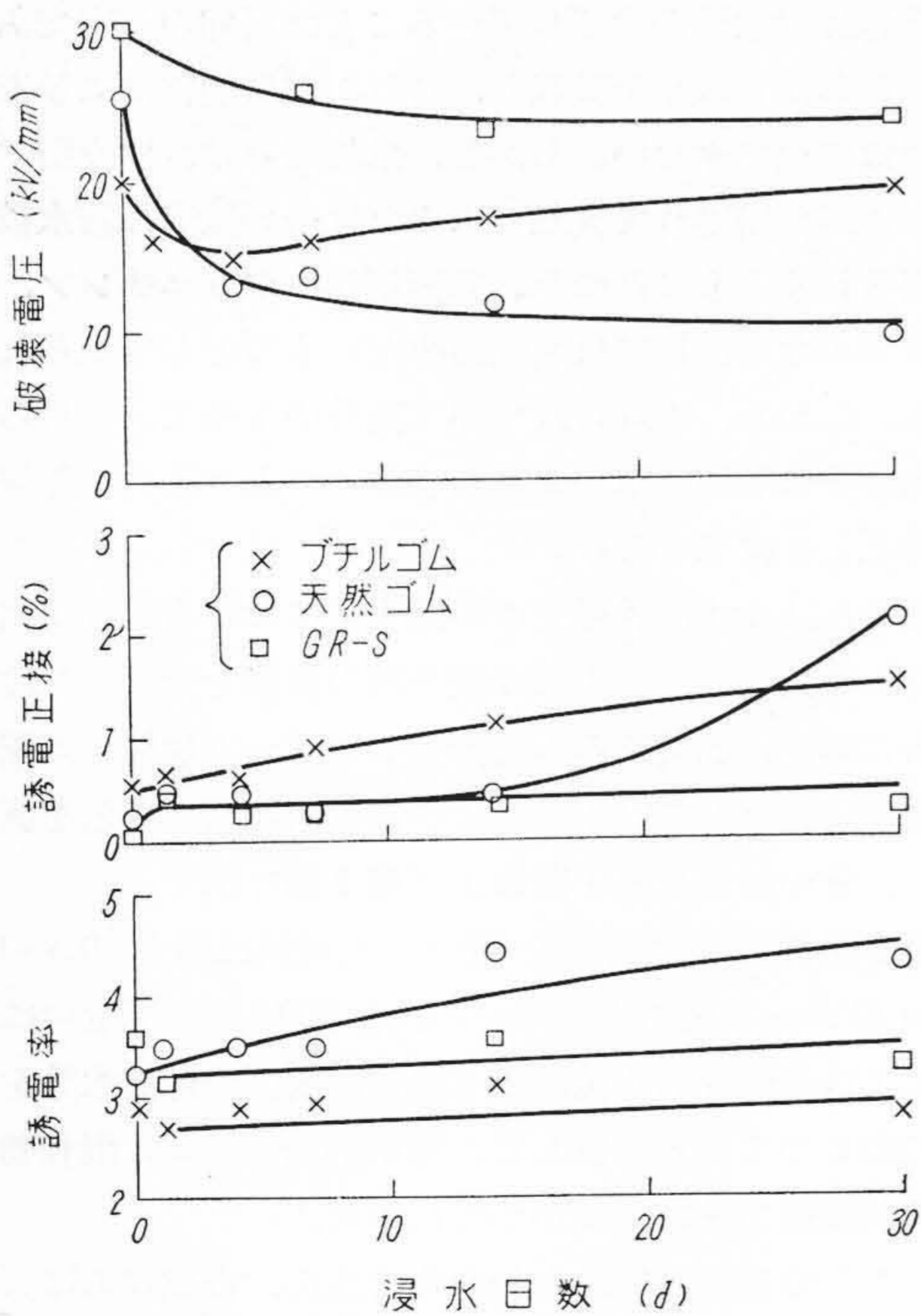
前節では充填剤を配合しない純ゴム配合についての吸水性を述べたが、実際にゴム混和物として使用するにはさらに充填剤および操作油、着色剤などを加えなければならない。一般に実用されるゴム混和物のゴム量は30~60%であり、そのほかの大部分は充填剤である。ゴム混和物の吸水性はこれらの配合剤によつて非常に違つてくるので以下に実用混和物の吸水性を検討した結果の一例を述べる。

電気絶縁用ゴム混和物の充填剤にはタルク、シリカ、炭酸カルシウム、クレーなどのような無機粉末が使用されるが、これらの中には吸湿性のものも多いので耐水性ゴムの配合には充填剤の選択に厳密な検討を要する。もちろん、充填剤以外の配合剤についても同様である。一例として、ゴム分45% (重量) で配合剤を変えた3種のブチルゴム混和物の吸水量と電気的特性の変化の状態を第3図に示す。

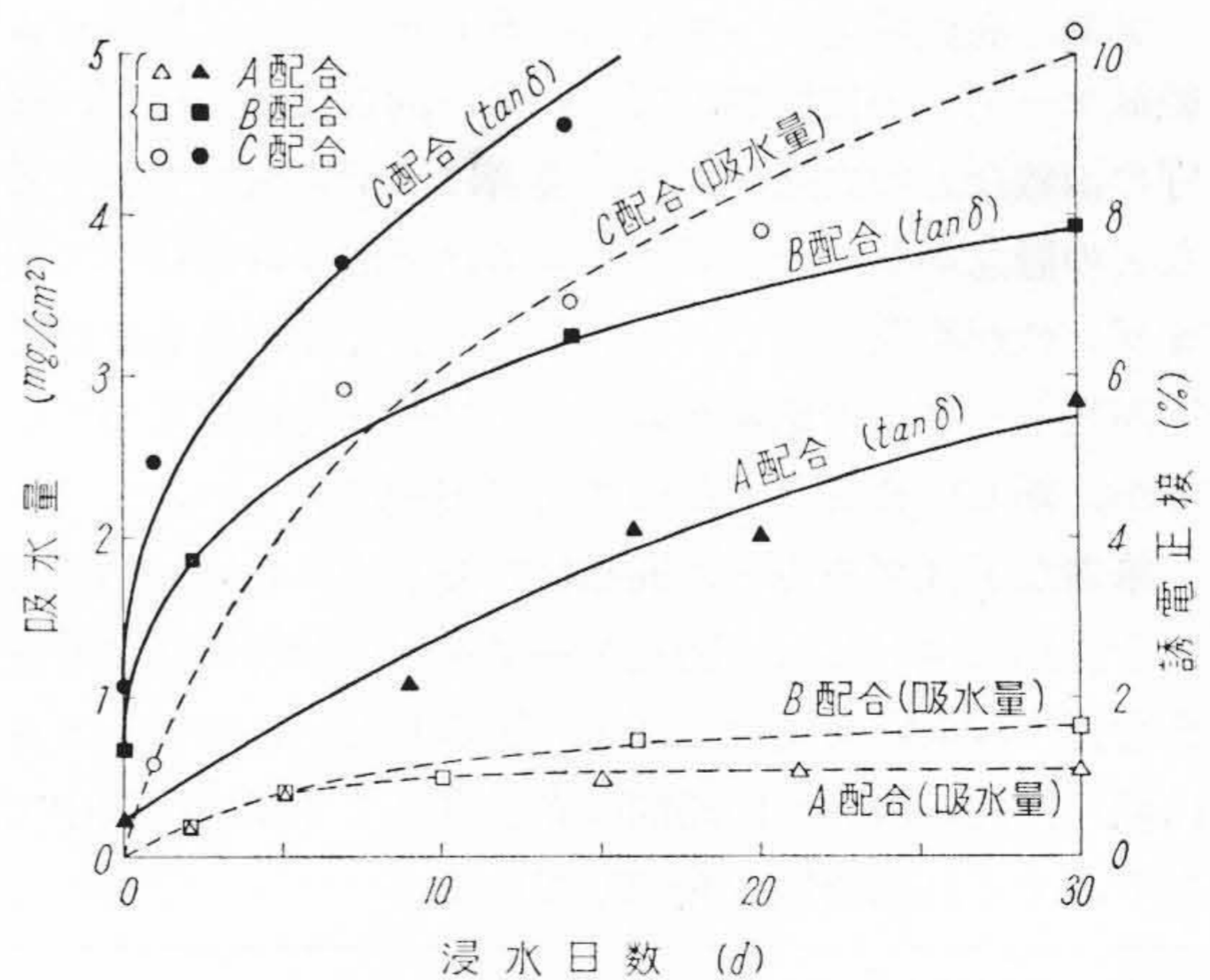
このように、同じブチルゴム混和物でも配合によつて吸水量および浸水中の電気的特性の変化が非常に違つてくる。また、吸水量がそのまま電気的諸特性の変化に比例するとは限らないのできわめて複雑である。筆者らは種々の配合剤の組合せについて数多くの実験を重ね、耐水性、電気的特性、物理的特性、加工性などすべての条件を満足できる混和物を求め、これをケーブルの絶縁ゴムとして使用した。



第1図 各種純ゴム配合混和物の吸水量比較



第2図 純ゴム配合混和物の浸水中における電気的特性の変化

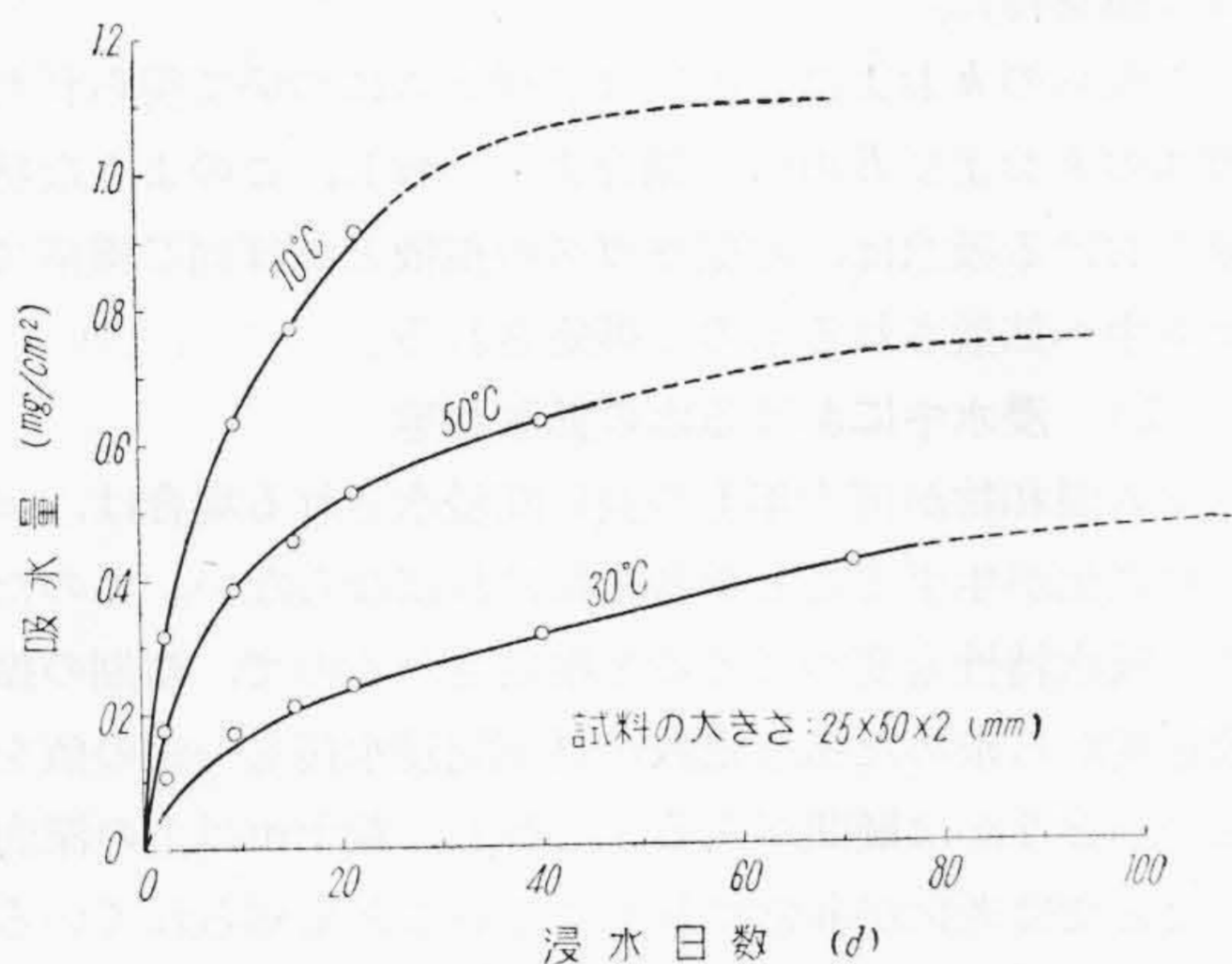


第3図 ブチルゴム混和物(ゴム分:45%)の配合の相違が耐水性に及ぼす影響

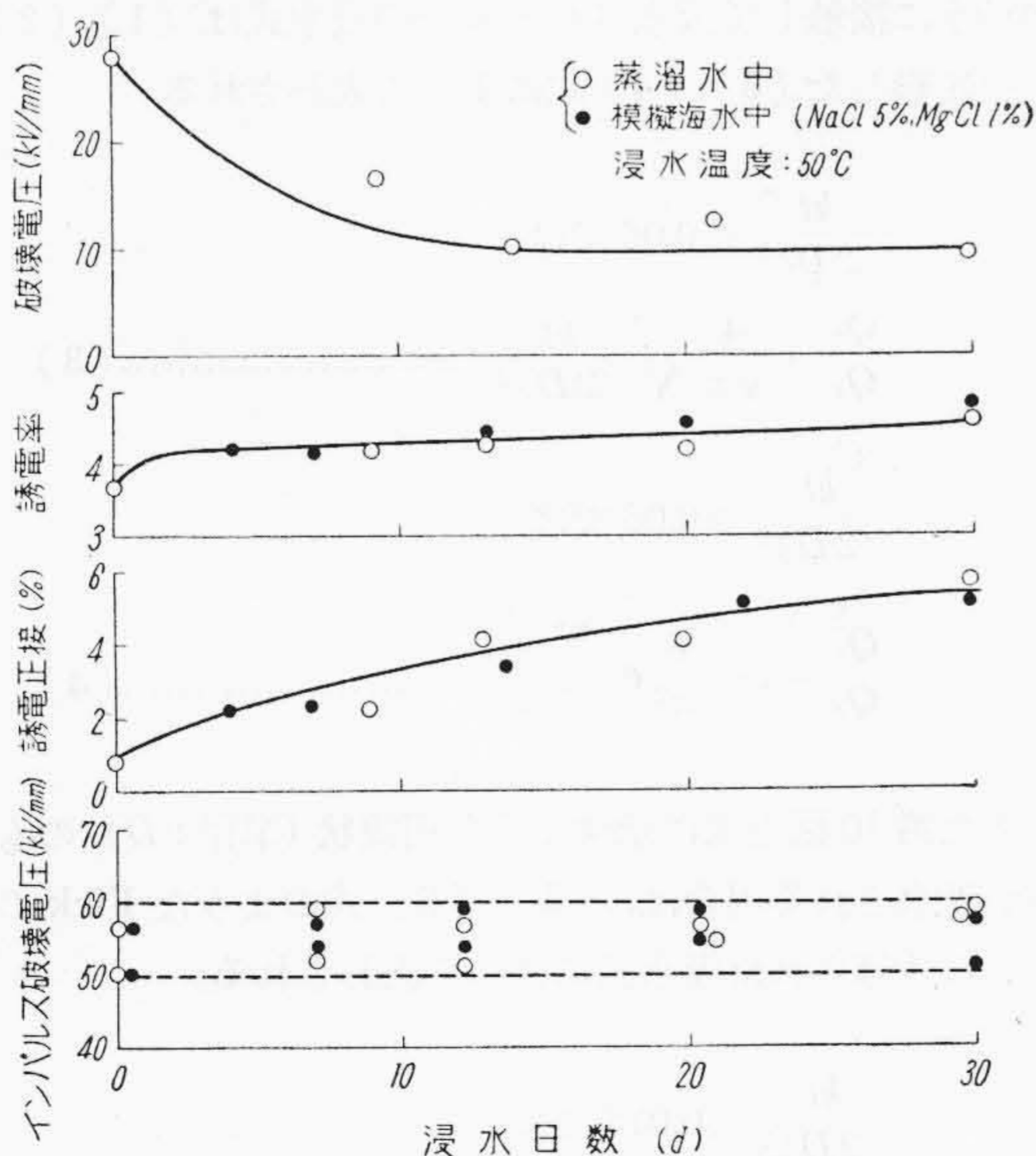


代表的なブチルゴム混和物の吸水特性および吸水による電氣的諸特性の変化を第4図および第5図に示す。

第5図は第2図と同じく厚さ0.5~0.8mmの加硫シート(絶縁用ブチルゴム混和物)を50°Cの水中に浸漬し、任意の期間後に取り出して測定した結果である。なお、特に海水中に浸漬される場合を考慮して模擬海水(食塩5%, 塩化マグネシウム1%)中に浸漬した場合の結果を充実記号で第5図中に併記した。一般に塩類を溶解した水中では浸透圧の関係で吸水量が減ることが知られているが<sup>(7)(10)</sup>、図示のようにこの程度の濃度の水中では蒸溜水の場合と大きな差は認められなかつた。吸水によつて特性変化の特に著しいのは耐電圧の変化である。これは純ゴム配合ではあまり大きいものではなかつたが第2



第4図 絶縁用ブチルゴム混和物の吸水量と温度との関係



第5図 絶縁用ブチルゴム混和物の浸水による電氣的特性の変化

図参照), 充填剤の配合によつて明確な低下が認められ、第5図の場合は大体破壊電圧は1/3になつて飽和する傾向を示す。この特性は配合する充填剤の種類によつてそれぞれ異なつた変化をなし、充填剤の特性に依存するものであることを認めているが、この機構は不明でありこの究明のためになお研究を続けている。

次に、深海中にケーブルを布設する場合を考慮して水圧の影響を検討した結果を第6図に示す。

第6図は第5図と同じゴム試料片を水圧5気圧の水を満したオートクレーブ中に浸漬して任意時間放置後、特性変化を測定した結果である。なお、比較のため、常圧30°Cの水中に浸漬した場合の吸水量の増加を点線で第6図中に併記した。この場合の吸水量は常温常圧の場合の吸水量とほとんど一致し、この程度の水圧(50mの海底に相当)によつて特に吸水が促進されることはない。したがつて、破壊電圧などの変化も浸水温度を上げて吸水を促進した場合に比べて非常に緩慢である。

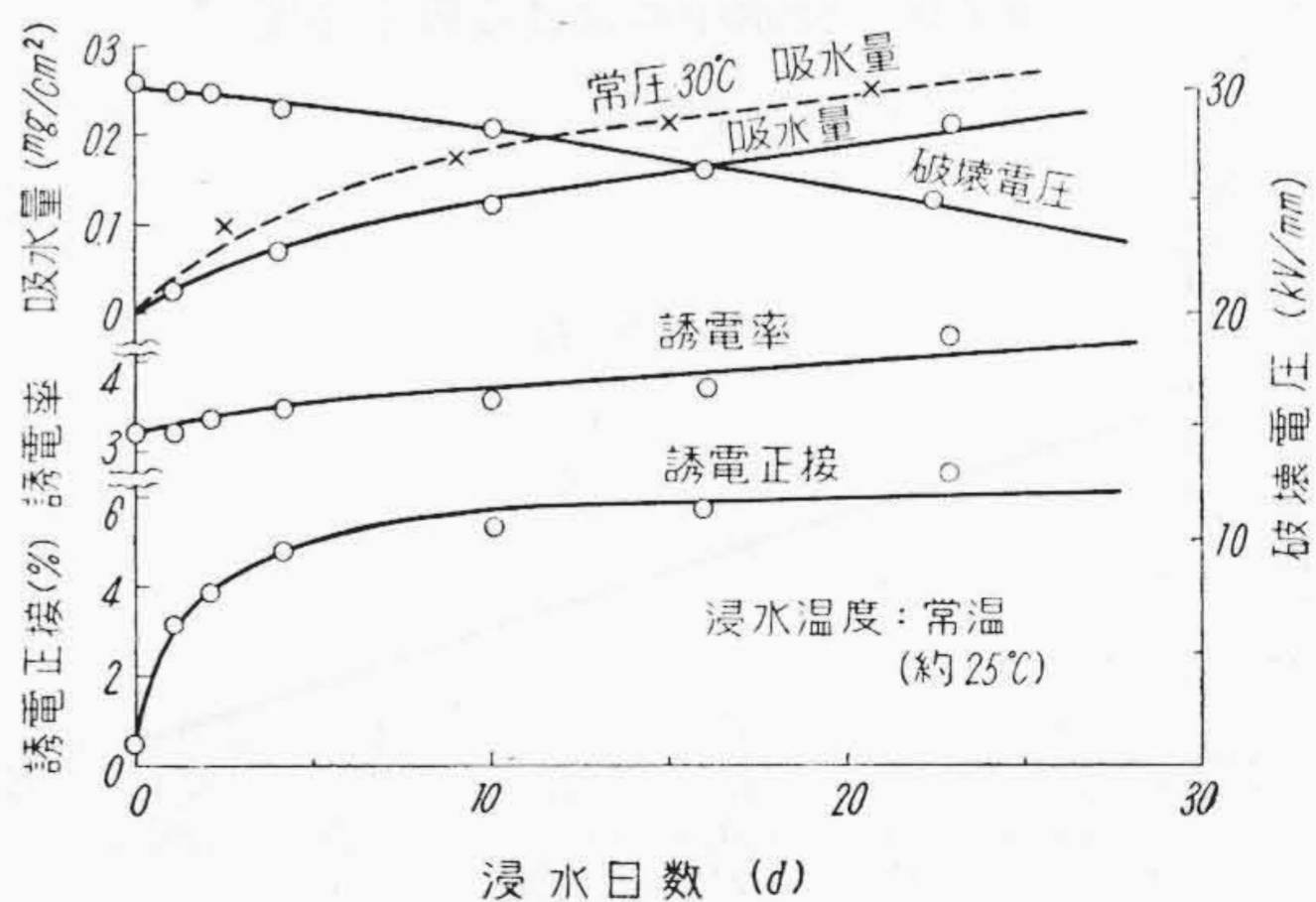
以上、ブチルゴム絶縁用混和物の吸水は配合方法によつて大きな差を示し、適当な配合によつて吸水量を微量にすることはできるが、それでもなお、この微量の吸水がゴム混和物の電氣的特性に及ぼす影響が大きいことを認めた。したがつてブチルゴム絶縁海底ケーブルは十分吸水した場合のブチルゴムの特性を把握した上で設計しなければならない。

#### [IV] 浸水されたゴム混和物中における水の拡散状態

##### (1) 拡散定数

前項にはシート状試料片が吸水した場合の特性変化について述べたが、本項では水のゴム混和物中における拡散速度および状態について二、三検討した結果を述べる。

ゴム混和物の浸水中における吸水を湿気の拡散現象として取り扱い、前記の実験結果第4図に Fick の式を適用して水の拡散定数を求めた。



第6図 絶縁用ブチルゴム混和物の5気圧水中における特性変化



厚さ  $d$  の板状試料が水中に浸漬された状態で吸水する場合、Fick の式は十分の精度をもつて次の簡略式で置換できる<sup>(11)</sup>。

$$\frac{kt}{d^2} < 0.06 \text{ では}$$

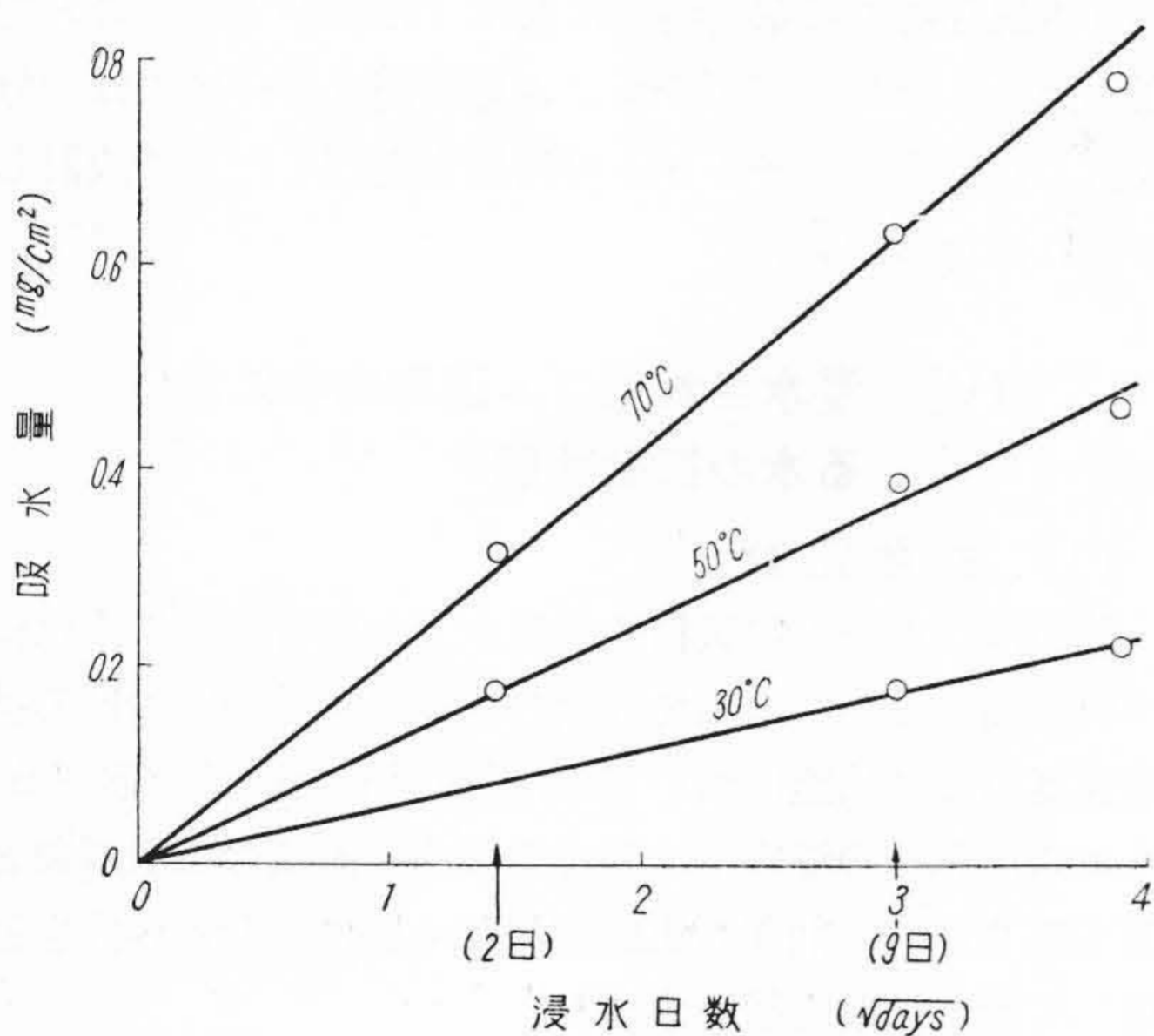
$$\frac{Q_t}{Q_s} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{kt}{d^2}} < 0.555 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{kt}{d^2} > 0.06 \text{ では}$$

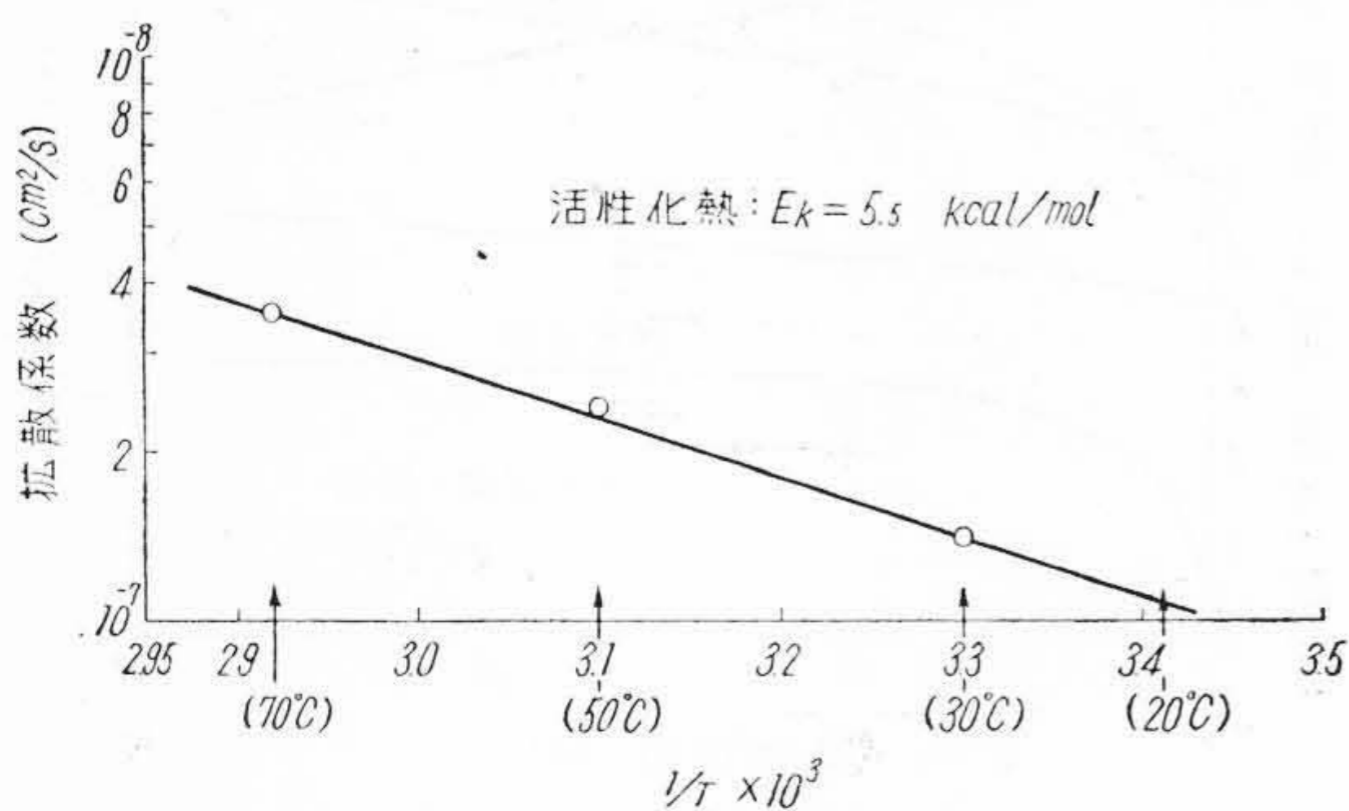
$$\frac{Q_t}{Q_s} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\pi^2 \frac{kt}{d^2}} > 0.552 \dots \dots \dots (2)$$

- $Q_t = t$  時間後の吸水量
- $Q_s =$  飽和時における吸水量
- $k =$  拡散定数
- $d =$  試料の厚さ

すなわち、吸水初期においては (1) 式が成立し、後期においては (2) 式が成立する。第4図にて得られた実測結果の初期部分の吸水量と浸水期間の平方根との関係を求めると第7図に示すようになる。すなわち、直線



第7図 浸水中における吸水速度



第8図 拡散定数と温度との関係

関係が成立して (1) 式が実験結果によく適合することがわかる。ゆえに第4図の結果を (1) 式に適用して拡散定数  $k$  を計算すると

$$k_{30^\circ\text{C}} = 1.39 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$k_{50^\circ\text{C}} = 2.04 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$k_{70^\circ\text{C}} = 3.46 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$

となる。この場合、飽和値  $Q_s$  は、あまり長期間ゴムを浸水させたまま放置するとゴムの老化が併発して正確な吸水量が得られなくなるので、第4図に示すように外挿値によつて求めた。これらの各温度における拡散定数と絶対温度の逆数との関係を求めると第8図に示すように直線関係となる。すなわち、Arrhenius の式が成立して、拡散定数の活性化熱  $E_k$  が計算され、5.5 kcal/mol なる値を得た。

これらの  $k$  および  $E$  の値は各種ゴムについて得られたガスの  $k$  および  $E$  の値と割合よく一致し、このような状態における吸水は、湿気やガスの拡散とほぼ同じ機構でゴム中へ拡散されるものと推定される。

(2) 浸水中における水の拡散状態

ゴム混和物が何十年もの長い間浸水される場合は、ゴムの老化が生ずることを考えなければならない。このため、吸水特性も変つてくると推定されるので、初期の拡散速度から求めた拡散定数が長期間浸水後も一定の値を保つかどうかは疑問がある。しかし、数十m以上の深海中などでは老化が非常に起りにくいことも知られているので、一応、一定の拡散定数を保つものとして長期間浸水中の吸水状態を検討した。

第9図上部に示すような、板状試料 (厚さ:  $D$ ) の片面が水に接触して吸水される場合の吸水式は (1), (2) 式を変形した (3), (4) 式によつて表わされる。

$$\frac{kt}{(2D)^2} < 0.06 \text{ では}$$

$$\frac{Q_t}{Q_s} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{kt}{(2D)^2}} \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{kt}{(2D)^2} > 0.06 \text{ では}$$

$$\frac{Q_t}{Q_s} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\pi^2 \frac{kt}{(2D)^2}} \dots \dots \dots (4)$$

また第10図上部に示すような円筒状 (半径:  $D$ ) のものが吸水される場合は、(5), (6) 式のような Fick の式から誘導された吸水式によつて表わされる。

$$\frac{kt}{(2D)^2} < 0.015 \text{ では}$$

$$\frac{Q_t}{Q_s} = 4.532 \times \sqrt{\frac{kt}{(2D)^2}} \dots \dots \dots (5)$$



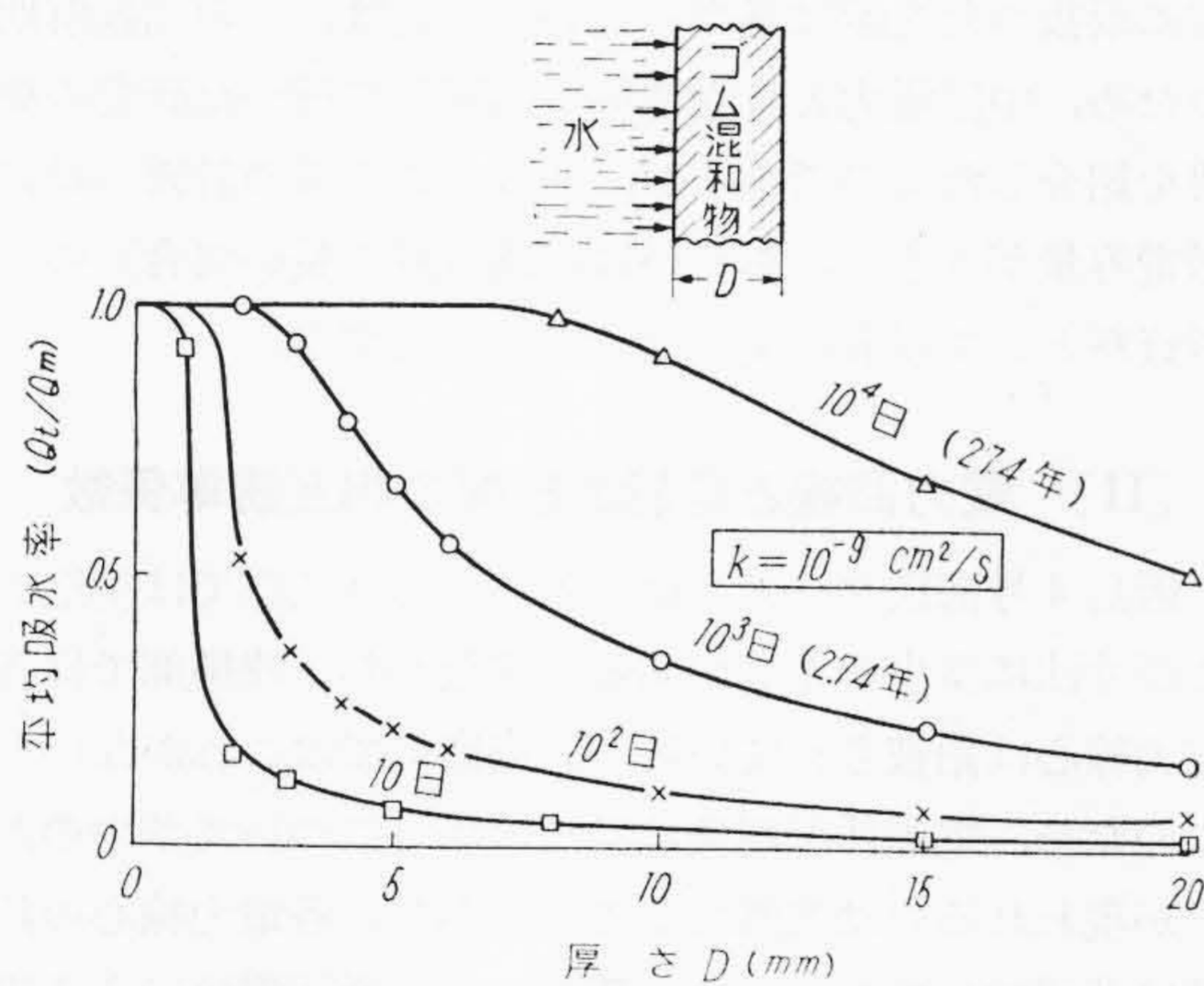
$$\frac{kt}{(2D)^2} > 0.015 \text{ では}$$

$$\frac{Q_t}{Q_s} = 1 - 0.691 \times e^{-23.2 \frac{kt}{(2D)^2}} \dots\dots\dots (6)$$

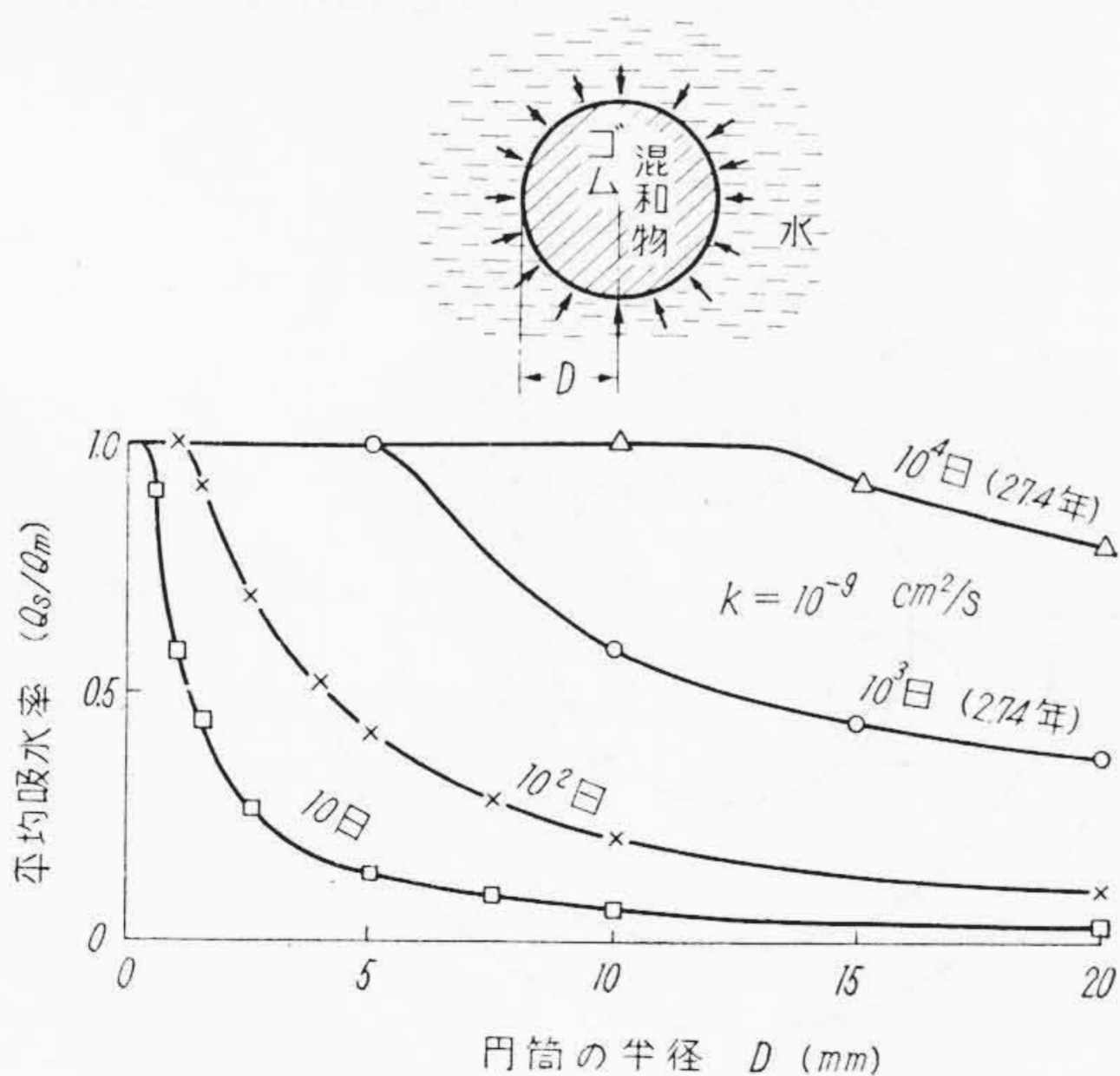
電線のように中心に金属導体が入った場合の計算は困難であるが、絶縁ゴムの厚さに比べて導体径が十分大きい場合は板状試料の(3)、(4)式で近似され、その逆の場合は円筒状試料の(5)、(6)式で近似される。また導体径と絶縁ゴムの厚さが大体同程度の場合は前掲2者の中間的な値をとる。

浸水される水の温度を大体 20°C とすると、第8図から拡散定数:  $k_{20^\circ\text{C}}$  は  $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  なる値が得られる。この値を用いて(3)~(6)式にしたがつて、種々の浸水期間におけるゴムの厚さと平均吸水率の関係を計算すると第9図および第10図のようになる。

第9図および第10図の結果から各種サイズのゴム絶



第9図 板状ゴムへの吸水状態



第10図 円筒状ゴムへの吸水状態

縁ケーブルを浸水した場合における、水の飽和までの期間および吸水状態の概略を推定することができる。すなわち、第10図で表わされる場合(絶縁厚>>導体径),絶縁ゴムの厚さが 10mm のケーブルでは3年間の浸水で飽和吸水量の約 60% の水を吸水し、飽和するまでには約20年を要することが推定される。

[V] 結 言

各種ゴムの耐水性を比較した結果、ブチルゴムが最もよい耐水性を示し、各種絶縁ゴム中で高電圧ゴム絶縁海底ケーブルの絶縁ゴムとしてはブチルゴムが最も適していることを明らかにした。次に、浸水中におけるブチルゴム混和物の電気的特性の変化を測定し、また吸水量を測定して Fick の式の簡略式を用いて水の拡散定数を求めた。

ブチルゴム絶縁体の吸水量はきわめて微量であるが、この微量の吸水が電気絶縁特性に及ぼす影響は無視できない。また、配合剤によつて吸水性は非常に違ってくる。このため、海底ケーブルおよびドレッジケーブルなどの水に浸漬された状態で使用されるようなケーブルの絶縁体にゴム混和物を使用する場合は、ゴムの配合あるいはケーブルの設計に特別の考慮が必要である。すなわち、吸水後におけるゴム混和物の電気的特性、あるいは浸水使用期間中におけるゴム中の水の拡散状態を把握しなければならない。本報にのべた測定結果および計算の結果が、これらのケーブルを使用される方々に多少の参考となれば筆者などの最も幸とするところである。

最後に本研究にたえず熱心な御指導を賜つた中国電力株式会社および日立電線株式会社の各関係者、特に永野宏郎・増岡信雄の両君に深謝申しあげる。

参 考 文 献

- (1) T. C. Corroll, A. R. Lee R.B. McKinley: AIEE (Pow. App. Syst) No. 21 1204 (1955)
- (2) W.H. Couch, G.H. Hunt, N.D. Kenney P.H. Ware: AIEE (Pow. App. Syst) No. 22 1387 (1956)
- (3) S.J. Rosch: AIEE (Pow. App. Syst) No. 21 1219 (1955)
- (4) Northern Elect. Co,: Product News, No. 31 (Apr. 1955)
- (5) 渡辺, 吉川, 庄司: 日立評論, 別冊9号 73 (昭30)
- (6) E.H. Schwartz: Rubber World, 133 672 (Feb. 1956)
- (7) D.A. Tester: J. Poly. Sci., 19 535 (1956)
- (8) 佐竹: ゴム協会誌, 8 15, 19 (昭10), 9 401, 410, 412 (昭11), 10 746 (昭12)
- (9) 大北: 同誌, 10 538 (昭12)
- (10) C.E. Mc Cormack, R.H. Baher, R.S. Raff: Ruffer Age 74 72 (1953)
- (11) 河合: 日立評論, 別冊1号 5 (昭27)