

絶縁体電極の技術解説

(1) 絶縁体電極の動作原理

通常、電極は電気を流して使うものであり、導電性物質でできている。絶縁体を電極として用いても電気を通さないのでは役に立たない。しかし、絶縁体膜の分極を用いることで低周波電気刺激用の電極をつくることができる。

図1に示すように、絶縁体の薄い膜の表面と裏面に導電層を形成し、電圧を印可すると絶縁体膜の内部では分極が起こり絶縁体膜の表面には正と負の電荷が現れる。電源（電池）からこの電荷を打ち消すように電流が流れる。電流は絶縁体膜の中には流れないが、あたかも絶縁体膜を通して電流が流れたように見える。この見掛けの電流は変位電流と呼ばれている。

図1の構成はポリプロピレンフィルムなどを用いたフィルムコンデンサーと全く同じものである。この構成から、一方の導電層を排除して絶縁体膜の一表面を露出させた構成のものを絶縁体電極と定義する。またこのとき絶縁体膜を絶縁体電極膜と呼ぶことにする。

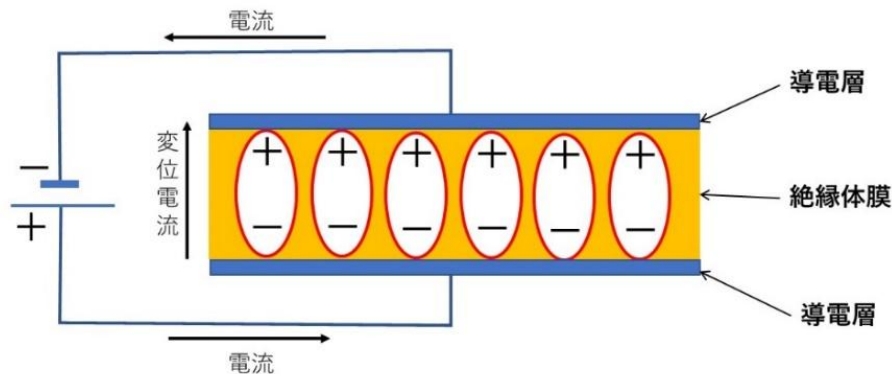


図1．絶縁体膜の分極と変位電流

一対の絶縁体電極を水中で離間して対面させ、電極間に波高値電圧 $E[V]$ の矩形波電圧を印可した様子を図2に示す。導電部は防水被覆（不図示）されているものとする。

矩形波電圧が印可されると絶縁体電極膜は分極し、その結果、絶縁体電極膜の表面にプラスやマイナスの電荷が発生することで水中に電界が形成される。この電界により水中に電流が流れる。

等価回路的に見た場合、両側の絶縁体電極膜は合成静電容量 C [ファラッド] のコンデン

サーと考えられ、水の抵抗である $R[\Omega]$ と直列接続された形になっている。この回路に $E[V]$ の電圧を印可すると、瞬間的に E/R の大きさのピーク値をもつ充電電流が流れるが直ぐに指数関数的に減衰する。

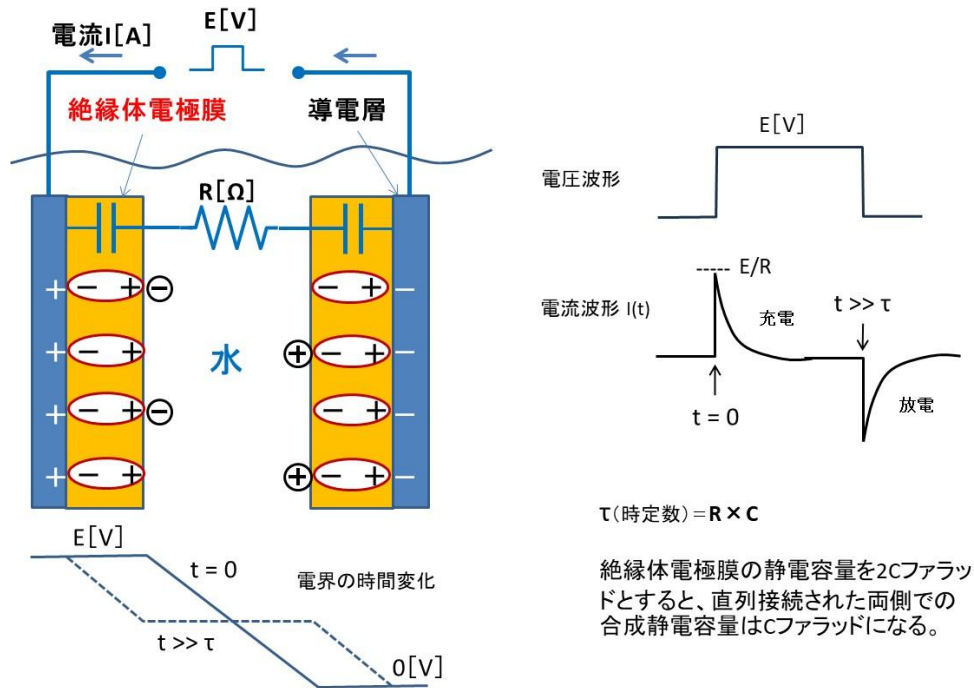


図2．絶縁体電極の動作原理

充電電流の時間変化を $I(t)$ としたとき、 $I(t)$ は次式のようにになる。

$$I(t) = E/R \cdot \exp(-t/CR) \quad \text{-----} \quad (1)$$

ピーク電流値 (E/R) が $1/e$ (e は自然対数の底 2.718) の値になるまでの時間は時定数 τ (タウ) と呼ばれ、 τ は (1) 式から C と R の積で与えられる。合成静電容量 C を大きくすることで τ を大きくでき長い時間電界を形成することができる。 R を大きくすることでも τ を大きくできるがピーク電流値が小さくなる。

$I(t)$ は絶縁体電極膜が満充電になるまで流れるが、満充電になるとそれ以上は流れない^(※1)。この時、電圧降下は絶縁体電極膜の中だけで起こるため水の中の電界傾斜はなくなり水の中での電流はゼロになる。満充電後は放電をしてやることで絶縁体電極膜に蓄積された電荷を放出でき、再び $E[V]$ を印可することで $I(t)$ を流せるようになる。放電時には逆

方向の電界が形成され逆方向に電流が流れる。

(※1) 交流の場合、周波数に比例してコンデンサーのインピーダンス ($1/j\omega C$: ω は角周波数 $2\pi f$, j は虚数単位、 C は静電容量) が下がり電流が流れやすくなる。また、樹脂フィルムの静電容量は周波数依存性を示す。

(2) 絶縁体電極の特徴

このように絶縁体電極は満充電になるまでの短い時間、及び、放電時の短い時間だけ、水の中に電界を形成できる。導電性電極を水中に入れて電圧を印可した場合、条件によっては導電性電極の表面と水との間で電子の授受が起こり、水の電気分解やイオンの溶出などの電気化学反応が起こる恐れがある。一方、絶縁体電極の場合、原理的には水との間で電子授受が起こらないことから、水の電気分解やイオン溶出などが実質的に起こらない形で水中に電界を形成することができる。(実際には、絶縁体の抵抗値は無限大ではないので微少な真電流が流れる。これにより微少な電気化学反応が起こる可能性は有る)

(3) 電気刺激用電極として用いたときのメリット・デメリット

一対の絶縁体電極を水中にある人体皮膚に当接し電気刺激用電極として用いた場合、以下のようなメリットが考えられる。

1. 電流集中が起こらない

絶縁体電極は絶縁体電極膜が膜面全面に亘って均一に分極することで均一に分布した電気刺激を発生させる。従って、電流が流れ易い所に集中するという現象が起こらない。

この結果、以下の様なメリットがある。

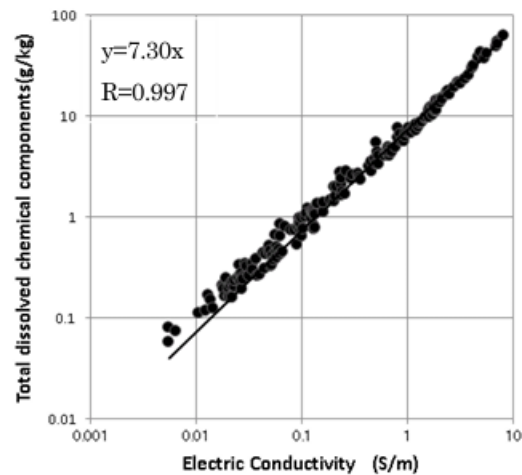
- ① 皮膚の汗腺、毛孔、傷部や粘膜など電流の流れ易い箇所への電流集中が起り難い。
- ② 温泉や入浴剤入りのお風呂など電気伝導率の高いお湯の中でも使用できる場合が多い。

導電性電極の場合、入浴剤入りのお風呂の様にお湯の電気伝導率が少し高く(例えば 0.03S/m 以上に) となると電流がお湯の方に集中しやすくなり人体に流れる電流が小さくなるため刺激強度が弱くなる場合がある。更に 0.1S/m 以上の温泉水では刺激が顕著に弱くなる場合がある。

絶縁体電極では電気刺激が均一に分布し、皮膚に密着している部分の刺激はそのまま皮膚に伝わるため 0.8S/m 程度の電気伝導率までは刺激強度が保たれるが、それを超えると弱くなる。

下図、兵庫県立健康生活科学研究所の資料によると、兵庫県の温泉井戸 176 箇所の電気伝導率データでは 0.8S/m を超える温泉が 3 割近くは有りそうである。これら

の温泉では絶縁体電極であっても刺激強度が少し弱くなるか或いは顕著に弱くなると思われる。



兵庫県立健康生活科学研究所『温泉水の泉質変化の把握のための電気伝導率の活用』より抜粋。
県内 176 の温泉井戸の溶存物質の量（縦軸）と電気伝導率[S/m]（横軸）の関係を対数プロットしたものの。

一方、下図の宮城県の温泉データで見ると殆どの温泉が 0.8S/m 以下であることが分かる。温泉の電気伝導率は地域による差があるようである。

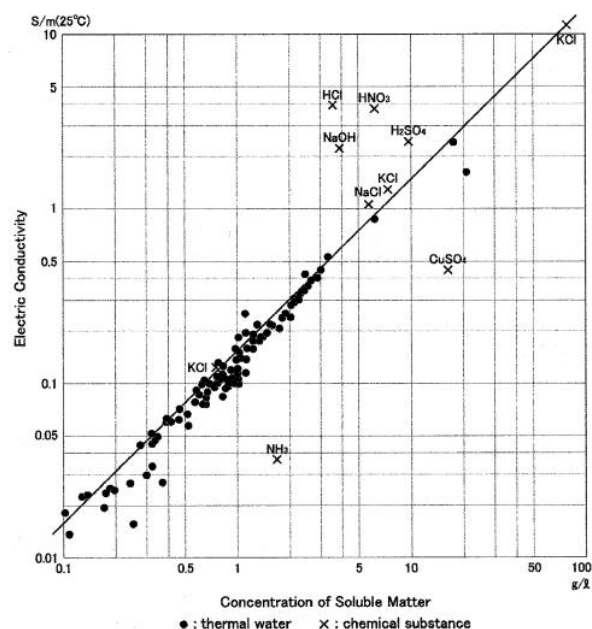


Fig. 1 Relation between Concentration of Soluble Matter and Electric Conductivity.

図 1 溶存物質量と電導度の関係

“温泉井の電導度検層” 温泉科学 54 巻、2004 より抜粋。

宮城県の温泉の溶存物質（横軸）と電気伝導率（縦軸）の対数プロット。

2. 電極表面が絶縁体フィルムで覆われており電気化学的に不活性で肌に優しい
絶縁体電極の表面は絶縁体膜で覆われており、原理的に水の電気分解による pH の変化や電極物質の溶出、アレルギー反応などが起こり難く、皮膚の炎症などを起こし難い。
3. 満充電になるとそれ以上は電流を流さない。物性的に電流制限が掛かる。
絶縁体電極はコンデンサーと同じように、満充電になるとそれ以上は直流電流を流さない。何らかの原因で直流が漏洩することがあっても安全なパルスエネルギー（120mJ）の範囲で電流を阻止する。

一方、以下の様なデメリットがある。

1. 電極表面が傷つきやすい
絶縁体電極膜はフッ素系の樹脂でできており柔軟ではあるが傷つきやすい。
2. 粘着ゲルを使用しないために固定ベルトが必要になる
3. 高価格
4. 導電性電極より刺激が弱くなる
導電性電極に比べて刺激が弱くなるため、同じ刺激強度を出すためには電圧を高くする必要がある。

以上の様な絶縁体電極の特徴を活かすことで、温泉やお風呂、足湯の中でも安全に安心して低周波電気刺激を利用することができるようになり、温浴による温熱効果と低周波電気刺激との相乗効果が得られるものと期待される。

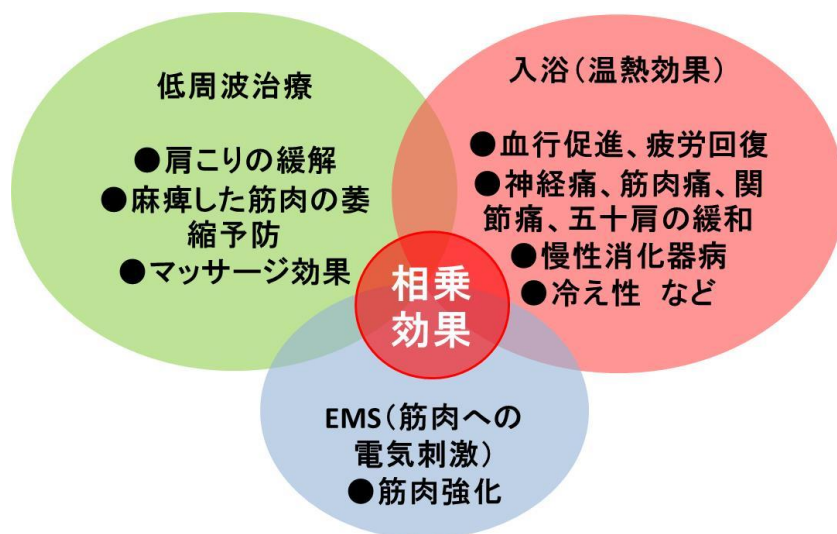


図3. 入浴低周波電気刺激による温熱との相乗効果への期待

しかし、根本的な疑問として、果たして絶縁体を電極として用いて本当に人体に低周波電気刺激を感じさせることができるのか？という点が未知であった。例えば、東北大学と東芝総合研究所の共著論文である「生体用絶縁物電極」、医用電子と生体工学第 11 巻第 3 号 161 頁では、“絶縁物電極を刺激用電極として考えた場合・・・静電容量は数 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 程度の大きな値でなければならず、このような絶縁物電極はむずかしい”と報告されている。

(4) 電気刺激用電極として使える条件の発見

フカエ・テクノロジーズでは、色々な静電容量を有する絶縁体を用いて、水中にある人体に対して色々な波高値の低周波パルス電圧を印加することで、人体が低周波電気刺激を感じることが出来る静電容量と印加電圧の関係を見出した。電極面積が 50cm^2 の場合の結果を図 4 に示す。

図 4 において横軸は絶縁体電極の電極面 1 平方センチ当たりの静電容量、縦軸は片方の絶縁体電極に印加される波高値電圧を示している。▲はその静電容量において低周波電気刺激を感じ始める電圧を示し、●は刺激が強すぎると感じ始める電圧を示している。両者の間の電圧では快適な低周波電気刺激を感じることができる。右側の図は横軸原点付近を拡大したものである。

例えば、静電容量が $2\text{nF}/\text{cm}^2$ という大きさの場合、片側の電極に対して 50V 、1 対の電極に対して 100V のパルスを印加しないと許容上限までの低周波刺激を与えることはできない、ということが分かる。

同様に、静電容量が $10\text{nF}/\text{cm}^2$ という大きさの場合、片側の電極に対して約 20V 、1 対の電極に対して約 40V のパルスを印加しないと許容上限までの低周波刺激を与えることはできない、ということが分かる。

この発見に基づいて特許第 6573920 号、6696084 号を取得している。これらの特許は低周波電気刺激用絶縁体電極及び応用製品に関する基本的な特許と言える。

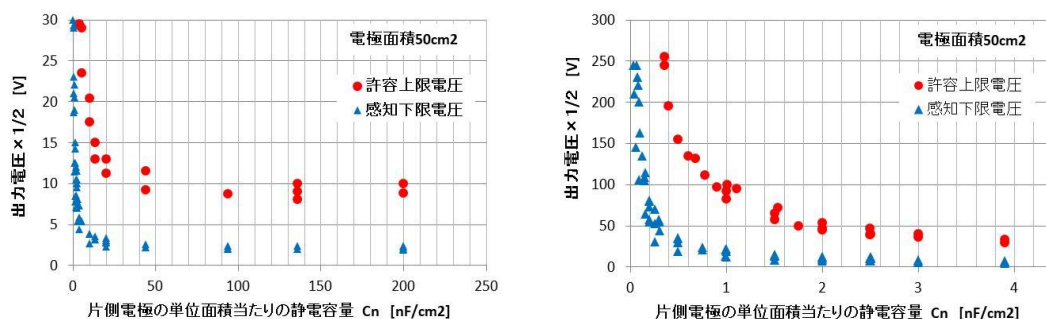


図 4. 人体が低周波電気刺激を感じる絶縁体電極の静電容量と印加電圧の関係

(5) フレキシブル電極の開発

印加電圧は低い方が望ましいが、その為には静電容量の大きな絶縁体電極膜が必要になる。電極面積 1cm^2 当たりの静電容量 $C_n[\text{nF}/\text{cm}^2]$ は、絶縁体電極膜の比誘電率を ϵ_r 、膜厚を $t[\mu\text{m}]$ としたとき、次式で与えられる。

$$C_n = 0.8854 \times \epsilon_r / t \quad \dots \dots (2)$$

静電容量を大きくするには比誘電率 ϵ_r の大きな絶縁体を用いれば良い。例えば、セラミックコンデンサーで使われているチタン酸バリウムというセラミックは比誘電率が 10000 を超えるものもある。しかし、セラミックは曲げたり叩いたりすると割れてしまう。

一方、樹脂フィルムはフレキシブルであるが比誘電率は一般的に 2 から 8 程度しかない。フカエ・テクノロジーズでは比誘電率が極めて大きいフッ素系ポリマーを用いることで静電容量と水中耐久性を両立させた絶縁体電極を独自に開発している。

(電気特性の一例)

静電容量 $2.8\text{nF}/\text{cm}^2$ (60V 矩形波パルス測定)

抵抗値 $6\text{M}\Omega/\text{cm}^2$ (60V 矩形波パルス 4 分、オンタイムデューティ 10%)

電極面積 54cm^2

(電極表面には潜在的欠陥(気泡、異物等)を補修した微少な凸部が複数存在することがある)

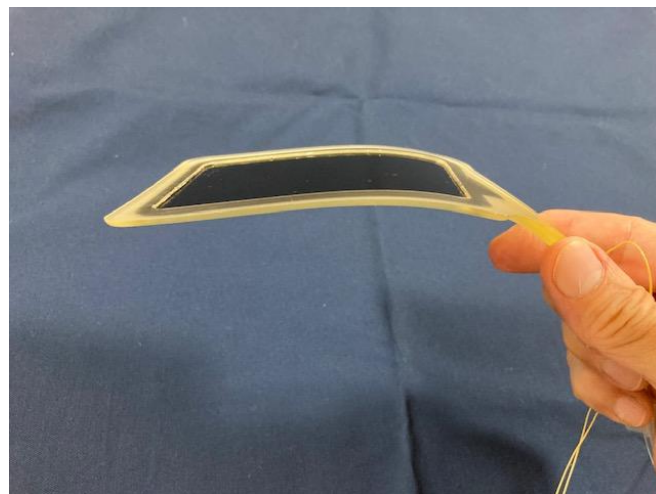


図 5. 防水型フレキシブル絶縁体電極

以上