

# 誘電加熱の一考察(その2)

## —— 選択加熱の研究 ——

澤 崎 正 廣

### An Approach to The Dielectric Exothermic Reaction No. 2 a Study of The Exothermic Reaction on Selection.

Masahiro SAWAZAKI

In the Memoir of the Fukui Institute of Technology No. 1, I reported on the fundamental theory of the dielectric exothermic reaction, the present report is to describe the experiment on dielectric exothermic reaction and then considering the human body as a very simple model, studied how these tissues show exothermic behaviors. I finally suggested in general terms how these fundamental experiments will be applied to medical treatment.

## は し め に

研究紀要第1号で誘電加熱の基礎理論を記述したが、本号では誘電加熱特性を実験的に調べ、さらに選択加熱理論にもとづいて人体を非常に簡単なモデルに仮定して、それぞれの組織はどのような発熱特性を示すかを調べ、これらの基礎実験より治療器への応用概念を研究したので報告する。

## 1 実験方法

自然界に存在する誘電体物質の組成はすべて極めて複雑な構成をなしているが、これら自然界に存在する物質を分析することは非常に困難であるから、本実験では簡単な電解液を数種選び、これらに超高周波電界を印加したときの加熱特性を調べ、さらにそれらの電解液を複層化して選択加熱特性理論が成立つことを確認するため次のような実験を行なった。

### 1-1 電解液の加熱特性試験

電解液に高周波電界を照射すると、誘電加熱され発熱することは誘電加熱特性理論で記述した。ここでは周波数を 2450 [MHz] の極超短波にした場合の加熱特性を示し、またこれは定性的に Pözdold の理論にしたがうものであることを実験した。実験に用いた電解液は  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  および  $\text{NaOH}$  の種類を選び、各電解液の濃度は 1% とし、そのときの各液の温度上昇率  $\Delta T/\Delta t$  を求める。また  $\text{NaCl}$  は次の実験のため、各種濃度の温度上昇特性をも調べた。なおこれらの水溶液は直径 8.4cm, 高さ 10cm のガラス製円筒容器にいずれも 500cc

ずつ満したのち、それぞれに周波数  $f=2450$  [MHz], 出力電力 700 [W] の極超短波を円筒軸方向に平等に照射する。発振器は入力 3 [KVA], 最大出力 1.2 [KW] のマグネトロンを用いたもので、高周波出力は電磁ラップで取り出され、水溶液の面と垂直に（円筒軸方向）入射して実験した。

### 1-2 二層体水溶液の加熱特性試験

水溶液の複合誘電体を高周波で加熱するとき、その特定層を選択的に加熱するには、(i) 誘電率  $\epsilon$  と誘電体力率  $\tan \delta$  は一定のまま、周波数を適当にするか、(ii) 周波数を一定にしたまま、その溶液の濃度を適当に選べばよいということは、Pözold の理論および選択加熱理論のところで紹介した。ここでは複合層を蒸留水と各種濃度の  $\text{NaCl}$  の2層とし、これらに極超短波を照射したときの加熱特性について実験した。実験方法は1-1と同様直径 8.4cm, 12.9cm の円筒状ガラス容器を図2(A)および(B)のように配置し、その内側層あるいは上部層に 500cc の水を、また外側層および下部層に各種濃度の  $\text{NaCl}$  水溶液を同量満したうえ、 $47\text{cm} \times 35\text{cm} \times 39\text{cm}$  の加熱箱の中へ納め、周波数  $f=2450$  [MHz], 出力 700 [W] の極超短波を液面と直角に照射する。

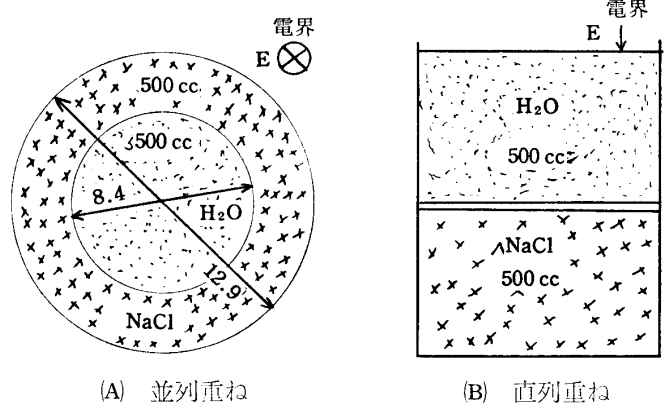


図2 容器の配列

### 1-3 三層体の人体モデルでの加熱特性

複合誘電体に高周波電界を加えて、その内の一層のみを選択的に加熱できることは1-2の実験より立証された。ここでは人体を並列三層体のモデルと仮定し、 $f=2450$  [MHz] の超高周波電界を照射したときの加熱特性を求めた。実験は図3のような円筒状並列三層体に液面に直角に照射した。この三層体は直径 8.4cm, 12.9cm, 17.9cm のガラス製円筒状容器を順に組み込んだもので、その最内層（中心層）には臓物を仮想した 0.1%  $\text{NaCl}$  溶液を、中間層には脂肪を、最外層には水をそれぞれ 500cc ずつ満たし、人体組織を簡単にモデル化している。

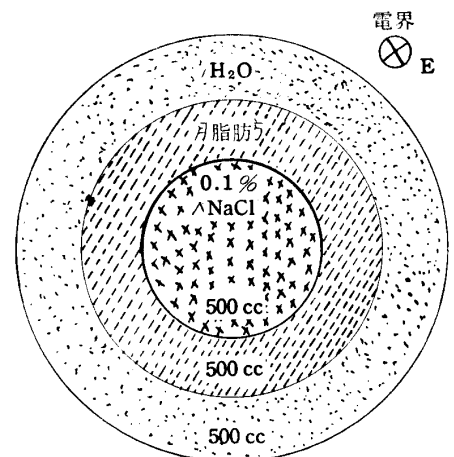


図3 三層人体模型

## 誘電加熱の一考察

### 1-4 三層体人体モデルでの周波数特性

この実験は1-3とまったく同じ方法で行なったが、1-3の実験だけでは適正な治療を行なうことは不可能である。というのは治療部によって誘電率が異なりそのままですぐに選択加熱を行なって治療することは出来ない。そこで治療部に合った周波数を探す意味で、1~2450[MHz] までいろいろ周波数を変化させ、その温度上昇特性を調べた。実験方法については2450[MHz]と同様であるが、その他の周波数については  $R_3N-100-6A$ 、出力 1[KW] の超高周波発振器（陽極同調自励発振器）を用いた。発振周波数は共振回路の都合上、0.5, 1, 5, 10, 30, 40 [MHz] しか行なうことができなかった。また実験に用いた容器は最内層 9.6cm, 中間層 13.8cm, 最外層 17.2cm のガラス製容器を用い、それぞれの容器の中へ 200cc の 0.1%  $NaCl$ , 脂肪, 水を納めた。なお1-1, 1-4の測定に用いた温度計はアルコール温度計である。

## 2 実験結果

### 2-1 電解液の加熱特性

図4は誘電加熱した時間  $t$  をパラメータにとり、 $NaCl$  水溶液の濃度にもなう温度上昇  $T$  を示したもので、濃度が0.1%以下のある点で水溶液の温度上昇が最高となっていることがわかる。なお濃度が0%なる水溶液とは500cc 全部が蒸留水であることに相当する。

図5は  $NaCl$  水溶液の濃度をパラメータにとり、加熱時間  $t$  と温度上昇  $T$  との関係を示したもので、水溶液の温度上昇は加熱時間に比例して増すことがわか

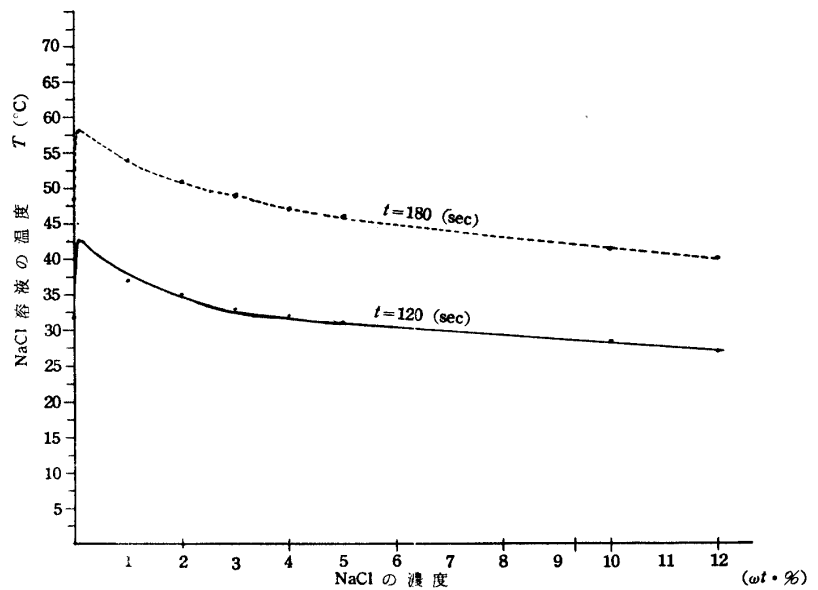


図4  $NaCl$  の各濃度に対する温度特性曲線

る。この図より濃度 1%における温度上昇率  $\Delta T/\Delta t$  の値を求めると、 $0.32^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  となる。同様に他の五種類の水溶液について測定を行なっても、 $T$  は  $t$  に比例し濃度 1%における温度上昇率を求めると、これらの値は第1表に示すとおりになる。これより  $f=2450[\text{MHz}]$  の超高周波に対する加熱速度は実験に用いた水溶液中では、 $KCl$  が一番大きく、次いで  $KMnO_4$  となり、 $NaOH$  が一番小さいことがわかる。

第1表

水溶液の種類	温度上昇率( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )
Na Cl	0.32
K Cl	0.35
H Cl	0.32
Ca Cl <sub>2</sub>	0.30
K Mn O <sub>4</sub>	0.34
Na OH	0.23

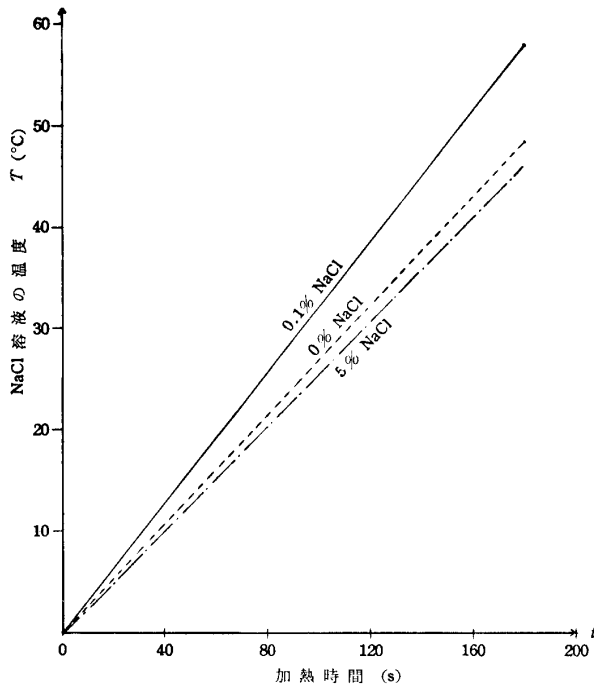


図5 NaCl溶液の加熱特性

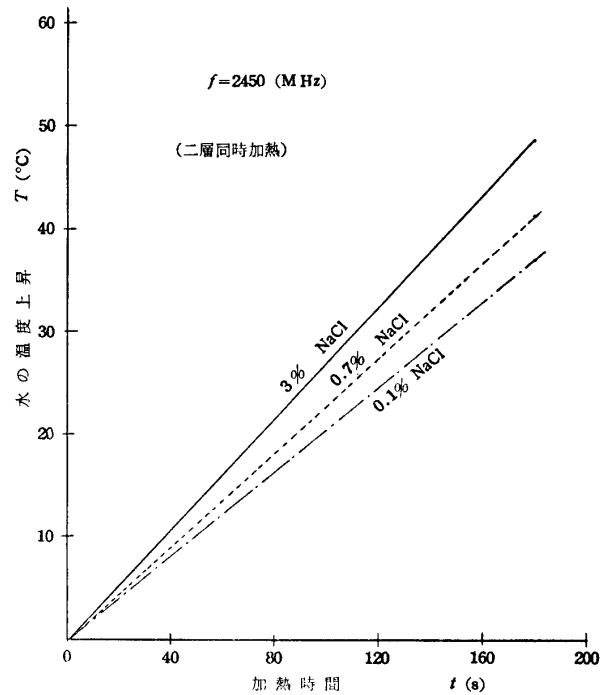


図6 水の加熱特性

## 2-2 二層体水溶液の加熱特性結果

i) 濃度をパラメータとし、加熱時間にともなう水および  $\text{NaCl}$  溶液の温度上昇は2-1に報告した特性と同じ傾向で、各層の温度は加熱時間に比例して上昇する。

ii)  $\text{NaCl}$  の濃度をパラメータとしたときの水層の加熱時間とその温度上昇との関係は図6のとおりで、外層となっている  $\text{NaCl}$  溶液の濃度を増す毎に内層に入っている水の温度上昇は速められる。この事実は注目に値することで選択加熱が実際行なわれていることを示すものである。たとえば180secの加熱に対して、 $\text{NaCl}$  溶液が0.1%濃度のとき水の温度は38[°C]であるが、

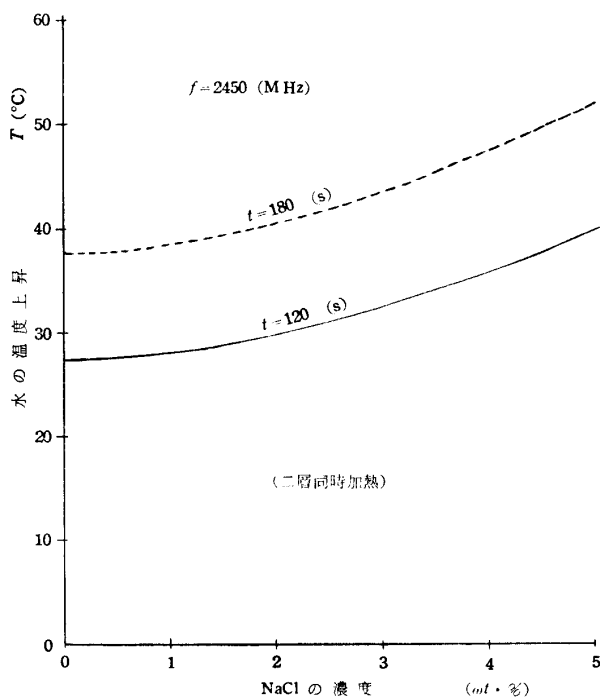


図7

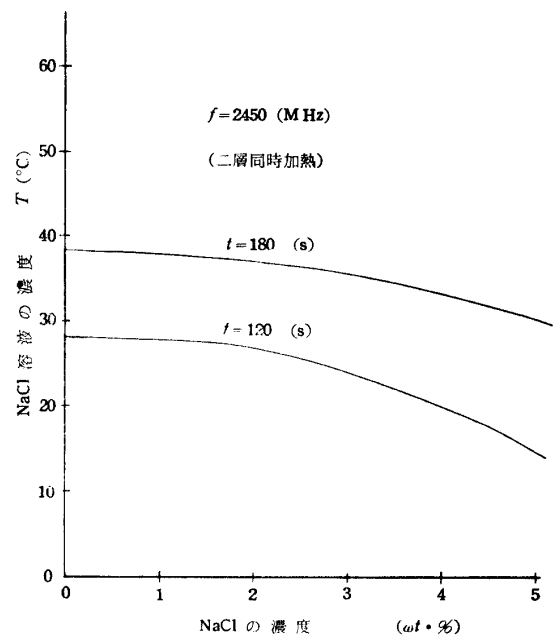


図8

3%濃度にすると水の温度は 47.5[°C] になる。

iii) 加熱時間  $t$  をパラメータにしたとき,  $\text{NaCl}$  の濃度ともなう水の温度は図 7 のとおりで, 濃度が増すにつれて水の温度は上昇している。

iv)  $t$  をパラメータにしたとき,  $\text{NaCl}$  の濃度ともなう  $\text{NaCl}$  溶液の温度は図 8 のとおりで, 濃度が増すにつれて  $\text{NaCl}$  溶液温度上昇は減少している。

### 2-3 三層体の人体モデルでの加熱特性試験結果

図 9 は  $f=2450$  [MHz] において, 加熱時間ともなう各層の温度上昇を示したもので, 中心層

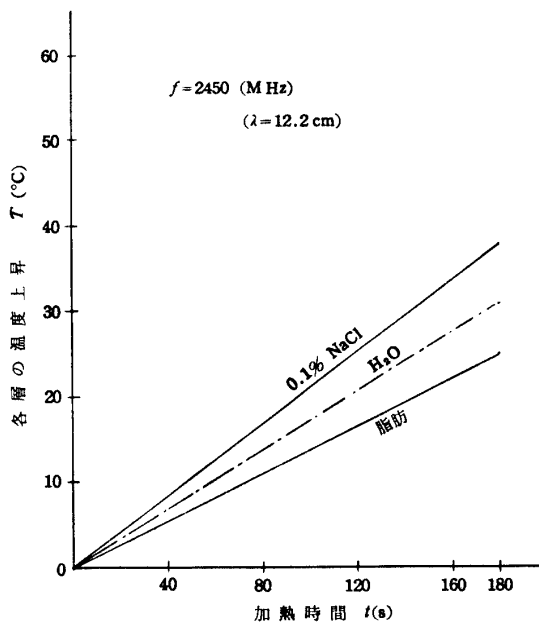


図 9 三層同時加熱特性

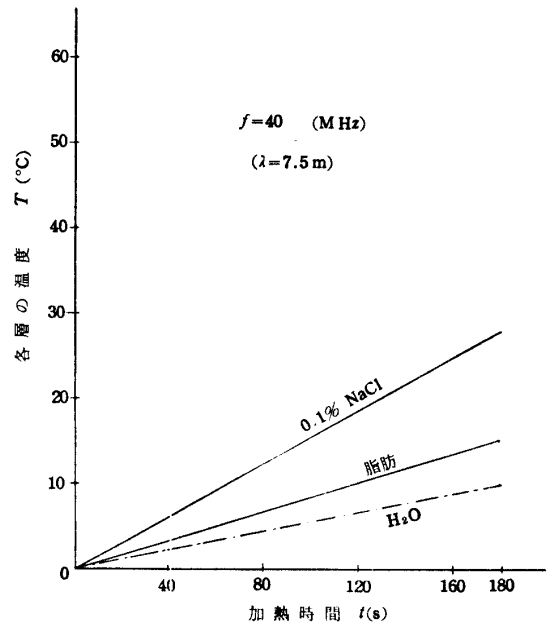


図10 三層同時加熱

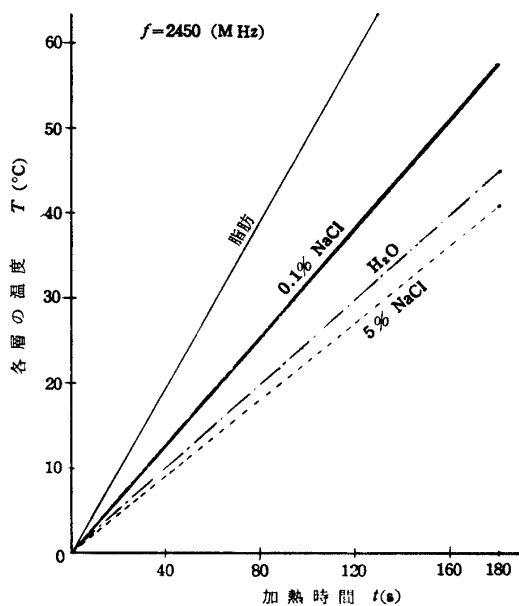


図11 各層単独加熱

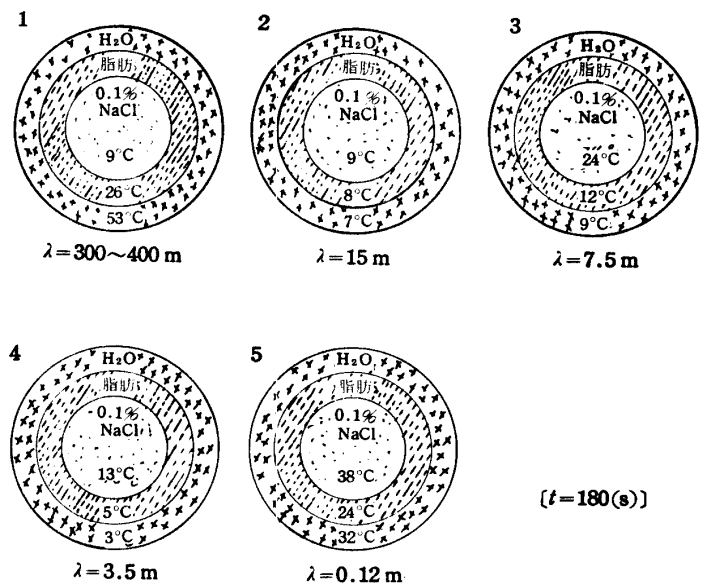


図12 各波長における三層体の温度

の 0.1%  $\text{NaCl}$  の温度上昇が最高となっている。図10は参考までに  $f=40[\text{MHz}]$  で同様にして行なった場合の結果であるが、この場合ガラス容器の直径は内層より、8.6cm, 14.5cm, 17.8cm またその容積はいずれも 400cc である。

図11は  $f=2450[\text{MHz}]$  で、 $\text{NaCl}$ 、脂肪、水を図9と同じ状態でそれぞれ単独に加熱したときの特性であって、三者同時に加熱した図9の場合と大分異なっている。

図12は  $\lambda=300\sim 400\text{m}$ , 15m, 3.5m において行なわれた従来の結果と本研究で行なった  $\lambda=12.2\text{m}$ , 7.5m の結果と比較したもので、三層体加熱特性は周波数の変化することによって異なることを示している。

図13は波長  $\lambda=300\sim 400\text{m}$ , 15m, 3.5m において行なわれた従来の結果を、本研究で行なった  $\lambda=0.12\text{m}$ , 7.5m, 10, 30m, 60m, 300m の結果と比較したもので、三層体加熱の周波数（あるいは波長）の変化による加熱特性を表わしている。ただしこの図は 0.1%  $\text{NaCl}$  溶液の温度を基準にとりこれを 100 とした場合、他の層の温度上昇の割合を示したものである。図14はこれらのデーターをもとにして横軸に波長を縦軸に温度を取ってグラフに表わしたものである。

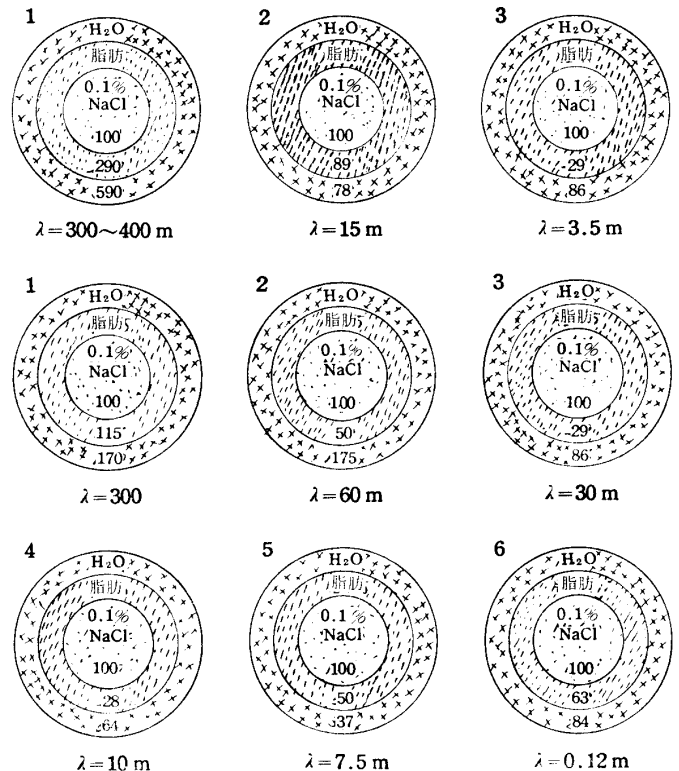


図13 各波長 ( $\lambda$ ) における三層体の温度

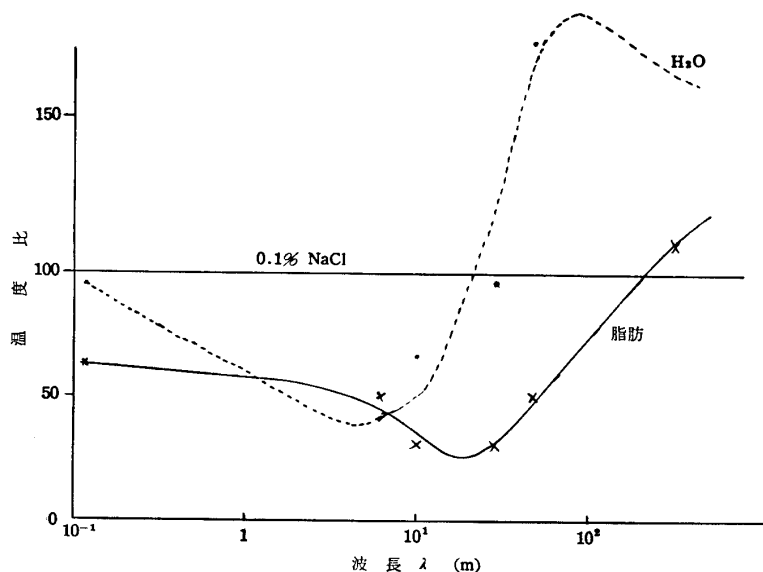


図14 各層の波長—温度比特性

## 3 考 察

1-1 の実験結果より,  $\text{NaCl}$  の水溶液については 0.1 % 以下のある濃度で最高の温度上昇をする。これは照射される超高周波の周波数  $f$  が決まると被照射体の導電率がある特定の値をとるとき, 最大の発熱をすることを表わし導電率に関して行なわれた一種の選択加熱といえることができる。なお導電率測定のため被照射体の中へ電極を挿入したが, 超高周波電界を印加すると同時に放電し非常に危険なため測定することはできなかった。第 1 表より  $f=2450[\text{MHz}]$  における温度上昇率をみると, カリウムを含む化合物の上昇率が他の物質よりも大きくアルカリ性の物質は比較的溫度上昇率が小さい。またこの実験から Pözdold の理論通り波長  $\lambda$  が短くなるほど最大発熱を生ずる導電率の値は大きい方に移行し, またその温度上昇の程度は減少することが示された。

1-2 の実験結果より図 2 ④, ⑤ のどちらに超高周波電界  $E$  を印加しても温度上昇の割合が同じであるのは, 図 2 ④, ⑤ はそれぞれ図 15 ④, ⑤ のような並列および直列接続の電氣的等価回路におきかえられ, これらの等価回路には

Pözdold の理論で記述したように変位電流  $I_c$  と導電電流  $I_R$  が流れる。しかし  $f=10^6$   $[\text{MHz}]$  以上になると導電電流  $I_R$  は小さくなり, 変位電流  $I_c$  が大きくなる。従って実験に用いた  $f=2450[\text{MHz}]$  という周波数になると変位電流のみで発熱するので

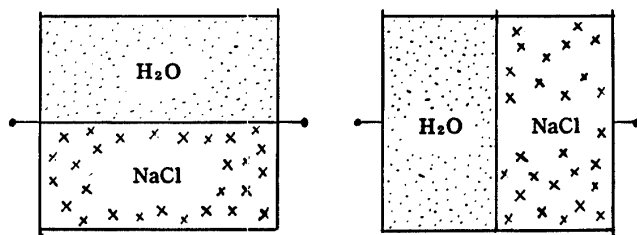


図15 電氣的等価回路

④, ⑤ どちらの加熱特性結果は同じだと考えられる。またこのことを選択加熱理論を用いて説明すると水および  $\text{NaCl}$  水溶液の  $\epsilon$ ,  $\tan\delta$  をそれぞれ  $[\epsilon_1, \tan\delta_1]$ ,  $[\epsilon_2, \tan\delta_2]$  とすれば, 各層中の誘電体損失  $W_1$ ,  $W_2$  は並列接続のとき  $W_1/W_2 = \epsilon_1 \tan\delta_1 / \epsilon_2 \tan\delta_2$ , 直列接続のとき  $W_1/W_2 = \epsilon_2 \tan\delta_2 / \epsilon_1 \tan\delta_1$  として与えられるが, 極超短波域においては  $\epsilon_1/\epsilon_2 \approx 1$  と考えられるので, 直並列接続いずれの場合も  $W_1/W_2 = \tan\delta_1 / \tan\delta_2$  となり同じ結果になる。さて  $\text{NaCl}$  水溶液の濃度を変えると,  $\tan\delta$  が変わり水における  $\tan\delta$  との結合によって印加した極超短波のもつエネルギーの分配が変わり, 水の選択加熱が現われる。この実験結果よりエネルギーの分配は  $\text{NaCl}$  の濃度が増すにつれて顕著で, 水と  $\text{NaCl}$  の層を加熱することができると考えられる。逆に  $\text{NaCl}$  層を短時間で加熱するにはあまり顕著でないが,  $\text{NaCl}$  の濃度が小さい方が水の層をあまり温度上昇させることなく加熱することができる。

1-3 の実験結果より, 図 3 は図 16 のような並列接続の電氣的等価回路となり, 三層体の各層の誘電率, 誘電体力率をそれぞれ  $[\epsilon_1, \tan\delta_1]$ ,  $[\epsilon_2, \tan\delta_2]$ ,  $[\epsilon_3, \tan\delta_3]$  とすれば, これら各層の発熱量  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  の比は  $W_1 : W_2 : W_3 = \epsilon_1 \tan\delta_1 : \epsilon_2 \tan\delta_2 : \epsilon_3 \tan\delta_3$  として与えられ, また比誘電率  $\epsilon_r$ , 誘電率  $\epsilon$  なる被加熱体を波長  $\lambda[\text{m}]$  なる超高周波で加熱するとき, 加熱電力を最大とする被加熱体の導電率  $\sigma_m[\text{U/m}]$  は  $\sigma_m = 2\pi f \epsilon = \epsilon_r / 60\lambda$  として与えられる。図 9, 図 10 とを比較すると極超短波域では最内層にある  $\text{NaCl}$  の温度上昇が顕著となり, また水と脂肪層の温度上

昇が逆転していることがわかる。このことは  $\sigma_m$  が周波数  $f$  によって変化し  $f=2450$  [MHz] では臓物を仮定した 0.1%  $\text{NaCl}$  層の  $\sigma_m$  が一番大きくかつ  $\tan\delta$  の値も  $f$  によって変化するため、 $\epsilon\tan\delta$  の値は 0.1%  $\text{NaCl}$  層が大きくなるからである。しかし  $f=40$  [MHz] になると  $\tan\delta$  の値が小さくなり  $\epsilon\tan\delta$  の値は他の水、脂肪に比べて幾分大きい、その温度上昇は鈍化している。図12の中に示された数字は各層の加熱温度であり、波長 7.5m のときは従来の結果とよく一致するが波長が 12.2cm のような極超短波域では独特の特性をもつようになる。

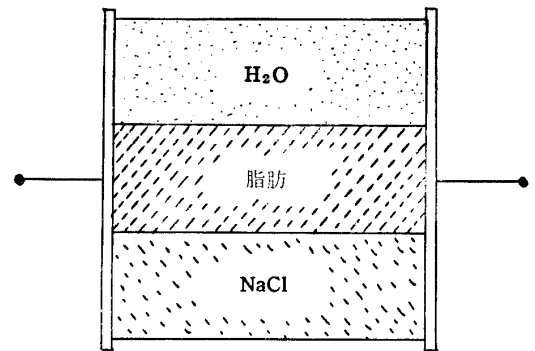


図16 電気的等価回路

1—4の三層体の周波数特性であるが図13より波長 300m と 7.5m のときは従来の結果とよく一致するが、その中間の値では水と脂肪層の温度上昇が逆転している。このことは図14をみるとさらくによくわかる。この図より最内層部 (0.1%  $\text{NaCl}$ ) を急激に加熱するには波長が 5m 程度の超高周波を加えればよく、最外層部(水)を加熱させるには波長が 200m 程度のものを用いるとよい。なお脂肪層については本実験ではもっともよい加熱作用を示す周波数がなく図より推測される範囲では波長が 1000m を越える位置に脂肪層を最も強く加熱する周波数域が存在するものと思われる。ところで最内層に位置する  $\text{NaCl}$  の濃度を増すことによって中間層の脂肪や最外層の水の温度上昇が大きくなることも、本実験によってしることができた。この選択加熱特性は注目に値する事実でありこの特性は周波数  $f$  を増すほど顕著に現われる。

#### 4 結 言

本報告では人体を 0.1%  $\text{NaCl}$  水溶液、脂肪、水といった非常に簡単なモデルに仮定して超短波を加えその発熱の状態について研究したものであるが、実際、生物体は電解質と誘電体との複雑な集積であってその熱発生は金属とか、電解質はもちろんのこと単純な誘電体発熱のように考えることはできない。超短波電界の生物体に流れる電流の一部は導電電流であり、一部は変位電流である。10<sup>6</sup> [Hz] 以下の周波数の場合には生物体には主として導電電流が流れ、周波数がそれより高くなるにつれて次第に変位電流が多くなり導電電流は少なくなる。ところでこの二つの電流が等しくなると生物体は最高に加熱され、このときの導電率  $\sigma_m$  は

$$\sigma_m = \epsilon_r / 60\lambda = 59 \times 10^{-10} f \epsilon_r$$

なる条件がみたされなければならない。人間の体についてその誘電率を測定すると、骨と脂肪を除けば、ほとんど各臓器とも変わりなく約80である。さらに各組織の誘電率を測定すればその組織を最高に加熱し得る波長が定ってくる。この考え方は超高周波を医療に応用するに当っては極めて大



## 誘電加熱の一考察

切なことである。理論的にはある導電率を有する組織は一定の波長で選択的に加熱されるが、生物体の場合には組織相互間に熱交換があり、また血液の流れによる冷却を考えると簡単にはいかない。しかし、今後解剖学が進み、人間を構成する各組織の誘電率や導電率の値をしることや、本研が進むにつれてメスなくしてガンを始め、その他の超短波治療がなされるものとする。最後に本研究に際し御指導をいただいた岐阜大学工学部の藤本教授ならびに協力者の西峯昭男氏、山口弘司氏に感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 最新の高周波応用 (CQ出版社) 著者 山本 勇 *p. 10~p. 30*
- 2) 電波応用原論 (天地書房) 著者 熊谷三郎 *p. 48~p. 57~, p. 64~p. 68*
- 3) 高周波加熱 (コロナ社) 著者 齊藤成文 *p. 284~p. 300*
- 4) 高周波加熱 (恒星社) 著者 中村 仁 *p. 17~p. 50*
- 5) 高周波加熱装置 (日刊工業新聞) 著者 熊谷三郎, 藤本三治 *p. 1~p. 24*
- 6) 昭和42年電気四学会連合大会 *p. 1067~1069* 藤本, 沢崎その他2名
- 7) 昭和42年電気四学会北陸支部連合大会 *p. 1* 藤本, 沢崎その他2名

(著者電気工学科昭和48年1月16日受理)