原 著

超低周波パルス磁場を用いた
局所加温の検討 第II報
装置の改良および経直腸的加温の評価
瀬戸 明¹⁾ 日下史章²⁾ 松尾 毅³⁾

1) 昭和大学歯学部 口腔生理学教室

2) 日下医院泌尿器科, 磁気医学・物理療法研究所

3) 亀田総合病院 画像診断センター

Application of Extremely Low Frequency Pulse Magnetic Field
to Local Hyperthermia II.

—Improvement in Equipment and Evaluation of Transrectal Heating—

Akira Seto¹⁾ Chikaaki Kusaka²⁾ and Tsuyoshi Matsuo³⁾

1) Department of Physiology, School of Dentistry, Showa University

2) Kusaka Clinic of Urology, Kusaka Magnetomedicine and Physical Therapy
Laboratory

3) Diagnostic Imaging Center, Kameda General Hospital

Summary :

For more efficient local hyperthermia using ELF pulse magnetism, some improvements in a conventional pulse magnetic generator and a transrectal applicator have been performed. The conventional type of the generator to produce single pulse was improved into more effective heating. The advanced type of the generator was able to generate one-cycle pulse for every triggering on the thyristor (SCR). The conventional type of the transrectal applicator with ferrite core coil was also improved, and come into much more efficient heating effect using a silicon steel core. The inductive electromotive force (eddy currents) of the combination between one-cycle pulse and silicon steel core applicator was greater than that of the combination between single-pulse and ferrite core applicator by 729%, so for as judging from the ratio of each wave form's area on oscilloscope. In regard to the temperature elevation of the intrarectum by ELF pulse magnetic hyperthermia, the mean temperature was raised by +2.5°C in heating with the new combination method. Contrary to this, that of the conventional heating type was not more than +1.2°C at an average. Statistically, the improved type of heating was more effective ($p < 0.01$). It is concluded that the heating ability of the combination between one-cycle pulse and silicon steel core applicator is more efficient for local hyperthermia than that of the conventional heating type.

Key Words :

超低周波	Extremely low frequency
パルス磁場	Pulse magnetic field
経直腸的加温	Transrectal hyperthermia
誘導加温	Inductive heating
珪素鋼板芯	Silicon steel core

はじめに

今日一般にハイパーサーミアに用いられている加温装置は、MHz ~ GHz 級の高周波電磁波加温によるものがほとんどである。しかしながら我々は超低周波パルス磁場のもつ加温効果に着目し、家兎に実験的にハイパーサーミアを試み良好な加温成績を治めるに至った²⁾。今回、超低周波パルス磁気発生装置並びに経直腸的アプリータを、より効率の良い加温特性に改良するため、誘起電圧および直腸内温度上昇度を指標とした改良実験を行い、超低周波パルス磁気による生体加温の最適条件を検討したので報告する。

装置の改良

i) パルス磁気発生装置の改良

従来の単峰パルス式のパルス磁気発生装置²⁻³⁾の原理は、コンデンサにチャージされた電荷をサイリスタにより放電させて、パルス状の電流をコイルに流すことにより同時にパルス磁気を発生させることが基本であった。しかしながら本オリジナル回路では、コンデンサに蓄えられた電気エネルギーがコイルに流れることにより電磁エネルギーに変わり、また更に発生されたパルス磁気による電磁エネルギーが逆にコンデンサを逆極性に再充電しようとするにもかかわらず、全くこの電荷は利用されずに無駄に放電されてしまった。

今回の実験で用いられたパルスジェネレータはこの点を改良し、パルス磁気の発生により誘導される逆極性の電荷をコンデンサにもう一度再充電させるようにした。サイリスタの ON により先ず正パルス電流が得られるが、その次の瞬間、逆極性電荷がコンデンサに再充電され、最後にこの逆極性電荷も放電されてすべての電荷の放電が完

了する。したがって改良型では正パルスの次に負のパルスが得られ、全体としてほぼ 1 サイクルのパルス状電流がコイルに流れることになる。

Fig. 1 に空心コイルに流された 1 サイクルパルス波の電流波形 (1ch) と 1 回巻探りコイルに誘起された電圧波形 (2ch) を示す。サイリスタが ON した際のコイル電流波形は、ほぼ 1 サイクルの波形で周期は約 0.3ms である。一方誘起電圧は上下と 3 回振れる波形となり、ちょうど空心コイル電流波形の微分波となっている。したがってこの 1 サイクルパルス波の電流は、従来の単峰パルス電流に比較してエネルギー効率がよい。

Fig. 1 Wave forms of one-cycle pulse current (1ch) and its corresponding induced electromotive force detected on one turn air-core coil (2ch), observing on a dual-trace oscilloscope

ii) 経直腸的アプリータの改良

従来のフェライト芯のアプリータ^{2,4)}をハイパーサーミア用に透磁率の高いより磁束飽和密度の高い珪素鋼板芯に改良した。なお今回は外形寸法は比較のため、従来のフェライト芯と全く同じものにした。

評価方法

i) コイル電流および誘導起電力波形の測定

単峰パルス (Single pulse) と 1 サイクルパルス波 (One-cycle pulse), およびフェライト芯 (Ferrite core) と珪素鋼板芯 (Silicon steel core) 経直腸的アプリーケータの 4 つの組合せを設定した。アプリーケータに流れるコイル電流は回路に直列に 0.1Ω の抵抗を介してその両端にかかる電圧波形を観察した²⁾。一方誘導起電力 (渦電流; Eddy current) はアプリーケータの周囲に半径 20mm の 1 回巻探りコイルを配置し、探りコイルの両端にかかる誘起波形をオシロスコープから読み取った。

ii) 直腸内温度上昇度の測定

単峰パルスと 1 サイクルパルス波, およびフェライト芯と珪素鋼板芯アプリーケータの加温効果の相違を, 人直腸内温度上昇度を指標として求めた。測定群は以下の 4 群である。

I. 単峰パルス—フェライト芯アプリーケータ群

II. 単峰パルス—珪素鋼板芯アプリーケータ群

III. 1 サイクルパルス波—フェライト芯アプリーケータ群

IV. 1 サイクルパルス波—珪素鋼板芯アプリーケータ群

加温条件は 280V, 8 Hz, 30 分とした。直腸内温度測定はアプリーケータ挿入前と, 挿入して 30 分間パルス磁気加温を施行した後にアプリーケータを肛門から抜いて, その直後の温度を測定した。そしてその両者の差分を算出して温度上昇度を求めた ($n=12$)。

評価結果

i) コイル電流と誘導起電力

i - i) 単峰パルス群 (Fig. 2)

従来の単峰パルス磁気発生装置に, フェライト芯の経直腸的アプリーケータを接続した場合のコイル電流および誘起電圧波形が Fig. 2 - A, 珪素鋼板芯アプリーケータを接続した場合のそれが Fig. 2 - B である。いずれも 2 現象ストレージオシロスコープ上の波形であり, 1 ch はコイル電流波

Fig. 2 Wave forms in acting as single-pulse mode, observing on a dual-trace oscilloscope

A : A wave form of the ferrite core applicator current (1ch), and its corresponding induced electromotive force (eddy current, 2ch).

B : A wave form of the silicon steel core applicator current (1ch), and its corresponding induced electromotive force (2ch).

The wave form's area of the eddy current (2ch) under the condition of silicon steel core applicator being connected, was wider than that of the ferrite core applicator by 220%.

形, 2 ch はその誘導起電力 (渦電流; Eddy current) である. コイル電流波形面積はフェライト芯のものに比較してやや珪素鋼板芯の方が広いが, 大きな相違はなかった. これに対して誘導起電力波形 (2 ch) は明らかに珪素鋼板芯の方が幅広く, 珪素鋼板芯の誘起エネルギー効率の高いことが証明された.

i - ii) 1 サイクルパルス波群 (Fig. 3)

Fig. 2 同様, フェライト芯が Fig. 3 - A, 珪素鋼板芯が Fig. 3 - B であり, 1 ch はコイル電流

波形, 2 ch はその誘導起電力 (渦電流; Eddy current) 波形である. 1 サイクルパルス波ではコイル電流は空心コイルの場合 (Fig. 1) ほどきれいな 1 サイクルを描かず非対称波形であった. しかしながらここでも珪素鋼板芯はフェライト芯と比べてコイル電流の波形面積はやや広がった. 一方誘導起電力波形 (2 ch) は, 波高は変わらないが波形面積は珪素鋼板芯の方が遙かに大きく, 珪素鋼板芯の効率の高さを証明した.

Fig. 3 Wave forms in serving as one-cycle pulse mode, observing on a dual-trace oscilloscope
A : A wave form of the ferrite core applicator current (1ch), and its corresponding induced electromotive force (eddy current, 2ch).
B : A wave form of the silicon steel core applicator current (1ch), and its corresponding induced electromotive force (2ch).
The wave form's area of the eddy current (2ch) with silicon steel core applicator joined, was broader than that of the ferrite core applicator.

i - iii) 4 群の電氣的比較 (Fig. 4)

単峰パルス (Single pulse) と 1 サイクルパルス波 (One-cycle pulse), およびフェライト芯 (Ferrite core) と珪素鋼板芯 (Silicon steel core) アプリケータの 4 つの組合せから, 波形面積を指標として各コイル電流および誘導起電力比を比較した結果, Fig. 4 のようになった. 単峰パルスフェライト芯の組合せを 100% として, 他の組合せ

のコイル電流および誘導起電力の百分比を求めた場合, いずれも 1 サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリケータ群が最も優れた値を示した. 特に誘導起電力比では単峰パルスフェライト芯と比較して波形面積にして 729% 増と顕著な値を示し, 1 サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリケータの組合せが経直腸的ハイパーサーミアに最も適していることが認められた.

Pulse Mode	Current	Core Type of Applicator	
		Ferrite	Silicon Steel
Single Pulse	Coil Current	100 %	115 %
	Eddy Current	100 %	220 %
One-cycle Pulse	Coil Current	153 %	163 %
	Eddy Current	287 %	729 %

Fig. 4 Matrix score of the current ratio in each wave form's area

The eddy current ratio of the combination between one-cycle pulse and silicon steel core applicator was even greater than that of the combination between single-pulse and ferrite core applicator by 729%.

ii) 直腸内温度上昇度の比較 (Fig. 5, 6)

4 群の組合せによる各直腸内温度上昇度の平均 ± 1 標準偏差を Fig. 5 に示す。また各群の組合せによる t 検定結果を Fig. 6 に示す。第IV群である 1 サイクルパルス波—珪素鋼板芯アプリーケータ群の直腸内温度上昇度は、平均 $+2.5^{\circ}\text{C}$ であり、この組合せの時が最も加温成績が良好であった。t 検定でも第 I 群の単峰パルス—フェライト芯に比較して $P < 0.01$ の水準で有意な上昇と判断された。また第II群と第IV群では第IV群が $P < 0.01$ の確率で有意な上昇と認められ、また第III群と第IV群では同じく第IV群が $P < 0.05$ の確率で有意な上

昇と判断された。このうち第II群と第IV群はアプリーケータは珪素鋼板芯使用で共通で、パルスが単峰パルス (第II群) か 1 サイクルパルス波 (第IV群) かの違いであり、この組合せで第IV群が $P < 0.01$ で有意な上昇というのは、1 サイクルパルス波が加温により有効であることを意味している。また第III群と第IV群では、使用パルスは 1 サイクルパルス波で共通で、アプリーケータがフェライト芯 (第III群) か珪素鋼板芯 (第IV群) かの違いであるが、この t 検定結果でも $P < 0.05$ で第IV群が有意な上昇であることは、珪素鋼板芯が生体加温により適していることを意味している。

Groups	Mean	S.D.
I. Single Pulse + Ferrite Core	$+1.2^{\circ}\text{C}$	0.37°C
II. Single Pulse + Silicon Steel Core	$+1.3^{\circ}\text{C}$	0.32°C
III. One-cycle Pulse + Ferrite Core	$+1.4^{\circ}\text{C}$	0.51°C
IV. One-cycle Pulse + Silicon Steel Core	$+2.5^{\circ}\text{C}$	0.49°C

Fig. 5 Comparison between each temperature elevation difference of the intrarectum after the ELF pulse magnetic transrectal hyperthermia was completed.

Combinations	t-test
I - II	N.S.
I - III	N.S.
I - IV	P<0.01
II - IV	P<0.01
III - IV	P<0.05

Fig. 6 Results of t-test in each group combination on the intrarectal temperature elevation difference

考 察

超低周波パルス磁気を用いて、従来の MHz 級の RF 波誘導加温と同様な局所加温を試みる我々の実験は、1 サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリータの組合せにより、より一歩実用に近づいたといえる。

超低周波パルス磁気ハイパーサーミアは確かに従来の RF 加温¹⁾とは異なるタイプの加温法である。しかしながら全く性格が違うものという訳でもなく、共通点も存在する。例えばパルスの繰り返し周波数が僅か 10Hz 前後の超低周波といっても、サイリスタが 1 回 ON して流れる際のコイル電流それ自体の周波数は、数 KHz から数 10KHz 程にわたり、それに伴い誘導電流も同様の周波数で発生している。即ち数 KHz から数 10KHz の誘導渦電流 (Eddy current) が、10Hz 前後の超低周波でパルス状に生体を貫いており、これが生体加温の原理となっている。したがって生体加温そのものはやはり数 KHz から数 10KHz 級の電磁波に由来し、MHz 級の電磁波の誘導加温に準ずるものであると考えられる。ただし組織の貫通度はより低周波の KHz 級の方が良好とみられ、その意味で超低周波パルス磁気加温は、従来の RF 誘導加温とは別に存在意義がある。またパルスの繰り返し周波数を 10Hz 前後からさらに上げることにより、加温能力も一層向上するので、システムの発展性も大きい。一般に超低周波域の

パルス磁気とは周波数にして 100Hz 程度までを指すといわれている⁹⁾。しかしながら微小循環に与える影響はパルスの繰り返し周波数によって最適範囲があるものと考えられ⁹⁾、加温以外の効果 (例えば磁気鎮痛など) を求める際には、最適周波数をスクリーニングする必要がある。

今回の改良実験で 1 サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリータの組合せは、既に報告した単峰パルスフェライト芯の従来モデル^{2,4)}に比較して、誘導起電力は波形面積比にして 7.29 倍に増大した。しかしながらコイル電流は 1.63 倍しか増えず、コイル電流に比較して誘導起電力比が飛躍的に向上した。このことはエネルギー効率の改善とともに、コイル自体の自己加熱を最小限に抑え、かつ生体加温効果を上げるのに役立っている。

直腸内温度上昇を指標とした生体加温成績では、誘導起電力比からみた電氣的比較 (Fig. 4) をほぼ忠実に反映して、1 サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリータの組合せが最も直腸内温度を上昇させた ($P < 0.01$)。電氣の実験から予測された加温効率 (Fig. 4) と生物学的加温成績 (Fig. 5, 6) とがほぼ一致したことから、今後、超低周波パルス磁気ハイパーサーミアを臨床に応用する場合、1 サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリータの組合せが最も効果的であると判断された。

まとめ

本実験の結論として以下の様に要約出来る。

- 1) 従来の単峰パルスに比較して改良型の 1 サイクルパルス波は加温能力が高い。
- 2) 改良型の珪素鋼板芯アプリータは、従来のフェライト芯アプリータと比較して磁束飽和密度が高く、より加温特性に優れている。
- 3) 1 サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリータの組合せは、従来の単峰パルスフェライト芯アプリータの組合せに比較して、誘導起電力が波形面積比にして 729% にまで増大した。
- 4) 一方コイル電流は 163% 増にとどまりコイル電流に比較して誘導起電力比が飛躍的に向上し

た。

5) 人直腸内温度は1サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリータの組合せの時最も上昇した。

6) 超低周波パルス磁気ハイパーサーミアの経直腸的臨床応用には、1サイクルパルス波一珪素鋼板芯アプリータの組合せが最も効果的であると判断された。

謝 辞

我が国の磁気医学の草分けであり、私どもの磁気と生体研究に際し常に有益な御指導・御助言を賜りました、いすゞ病院元院長、常任顧問、中川恭一博士に深謝いたします。

文 献

- 1) 齊藤正男：加温装置について。末舛恵一，阿部光幸編。図説臨床[癌]シリーズ no. 18，癌と温熱療法。メジカルビュー社，東京，p11-p16，1987。
- 2) 瀬戸 明，日下史章，松尾 毅：超低周波パルス磁場を用いた局所加温の検討 第I報 装置の開発と動物モデル。日本ハイパーサーミア誌，6 (1)： 29-37，1990。
- 3) Seto, A., Kusaka, C., and Matsuo, T. : Influence of the pulse magnetic field on the excitability of the sciatic nerve in frogs (I) — Decrease in amplitude with an increase in threshold—. The Clinical Report (KISO TO RINSYOH), 23 (15) : 5859-5864, 1989.
- 4) 日下史章，瀬戸 明：超低周波パルス磁場による新しい痔核治療の試み。医学と生物学 119 (6)： 381-386，1989。
- 5) 中川正祥：磁気環境に関する衛生学的考察。産業医学 23 : 591-605，1981。
- 6) 瀬戸 明：パルス磁界の神経・循環系におよぼす影響について—特に家兎の脳波と脳血流の変動に関して—。磁気と生体研究会資料 12 (1)： 35-50，1985。