Review

Microwave Surgeryの新たな飛翔 —マイクロ波を用いた手術デバイスの開発と実用化—

谷 徹 来見 良誠 仲 成幸 森川 茂廣 出村 公一

A new evolution of the microwave surgery : Development of a new surgical device using microwave and its application

Tohru Tani, Yoshimasa Kurumi, Shigehisa Naka, Shigehiro Morikawa and Koichi Demura

Abstract

Microwaves do not interfere with magnetic resonance imaging (MRI), since these wave frequencies differ from each other. We have found that the microwaves have a special mechanism to fix living tissues around the temperature of 60 °C, and that the microwave device can be used as a surgical instrument under MRI. These characteristics have offered us a new horizon of the surgery under the MR monitor imaging. Thus, it is an evolution not only for the microwave devices but also for the microwave surgery (a surgery using microwave). Several new devices were developed, such as a bipolar tissue coagulator (fixer), scissors, a microwave knife, and a regional hyperthermia device. These new devices are introduced in this paper.

Key words : microwave, MR imaging, bipolar scissor, ultrasound mess, hyperthermia

Accepted on Mar. 25 2007

滋賀医科大学外科学講座 〒520-2192 滋賀県大津市瀬田月輪町

Department of Surgery, Shiga University of Medical Science

Address : Seta Tsukinowa-cho, Ohtsu-city, Shiga, 520-2192, Japan

緒 言

1. 歴史

マイクロ波を用いた医療機器は、本研究会の創設者である田伏克惇先生を中心とした研究チームにより、マイクロ波アンテナを針状にした凝固治療具として我が国で開発され、肝腫瘍の凝固治療は保険収載もされ、臨床治療として実施されている¹⁾。本デバイス以外には鏡視下で使える針状電極があるが、医療用具として使用されているのはこれらに限られていた。凝固を目的としない場合は加温装置が健康用具として開発、市販されている。

アブレーション療法としてラジオ波焼灼療法 (RFA) やクライオ療法が出現し、マイクロ波凝固療法は温度が高いとの認識に加え、一般的にモニターに使われる超音波画像では凝固開始後のモニターができないこと、一度の凝固域が小さいことにより、敬遠される傾向さえあった。

2. MRとの出会い

我々は垂直型のオープンMRを用い、MR画像をモニターとして外科的手技が実施可能な環境を有していた。

この環境下で、マイクロ波はMR画像の周波数と合わず画像に干渉することがないため、極めて有力な手術支援機器の可能性を秘めていることが判明した。更に、MR画像は生体の構造のみならず様々な代謝物質の画像化、物理・化学的な変化を画像化することが可能である。例えば温度画像もその1つであり、非観血的に組織内の温度を立体画像化することが可能である²⁾。従来の治療手技では凝固中の温度がモニターできなかったのに対し、我々は垂直型オープンMRを用いて3次元MR画像下にほぼリアルタイムで、凝固中の組織温度と治療域を確認しながら治療することが可能となった³⁾。

3. 凝固か固定か

また、マイクロ波治療では、HE染色で見た場合、凝固した領域も細胞が生き残っているという見解が過去に散見された。我々はこの事実に対しても、マイクロ波凝固した組織をホルマリンで固定することなく細胞内の酵素活性をもって染色することに成功した⁴⁾。これによりマイクロ波による組織変化は炭化ではなく組織の脱水固定、正確には細胞の脱水固定であることが判明した (図1)。したがって、従来は組織の炭化を目標としていた

図1 肝マイクロ波凝固 (ACP染色比較, 1ヵ月後)

HE染色では生細胞のように見える。

マイクロ波凝固療法は、組織固定を目標として実施しても治療結果に何ら変わらないことが示唆された。

こうしてマイクロ波デバイスにとって、マイクロ波でないと不可能な手術環境が約束された。しかも、従来の治療法で達し得なかった、モニター下に治療領域も確認しながら遂行できる治療法が確立できるチャンスが訪れた。我々は、MR環境下で使えるマイクロ波やレーザー、クライオ、共焦点超音波のうち、外科医が必要とするデバイス開発に結びつくマイクロ波を用いたデバイス開発を推し進めることにした（図2）。

I. マイクロ波デバイスの開発

1. 多機能、単一操作

マイクロ波の極めて強い止血能力を活かしたデバイスとして、我々はどの外科医もが同様レベルの手術ができる外科手術実現のため、今も将来も最も期待される無出血の組織切断器を開発することとした。市販のデバイス

では組織を把持する切断部位は多くの場合鉗子型になっており、切断には刃による操作を別に行う必要がある。我々は組織を把持し、凝固、切開する操作を別々ではなく一連の操作で行う機構を考えた。つまり、先端の把持できる刃が互いに滑り、カーブをした刃が金属の弾性によりしなる能力を利用して組織を切断する構造を考案した（図3）。ケリー様鉗子形にしたことより、組織を剥離開排したり、把持、凝固、切断することが1本のデバイスで可能となった。また、凝固切断作業が一連の操作となり一度の動作で行うことができるようになった。切断した組織は予測通り炭化ではなく組織凝固となっていた（図4）。

2. 強力なシーリング力

最終的な試作品（MWCX, 図3）では、ブタの腹腔内臓器として大網動脈、脾動静脈、腎動静脈、門脈や腸管の切断に加え、膵臓、肝臓、脾臓の部分切除がすべて無止血で、一度の結紮止血もせずに実施可能であった。

図2 マイクロ波の選択（MR下デバイス化）

図3 MWCX刃先写真

A：スライディング型，B：ハサミ型

腎動静脈，脾動静脈切断手技については複数のブタに実施したが，全例が術後出血なく生存できた．Lateral thermal injuryは初期の試作品では4 mm近いが，今後は凝固条件の改善により短縮できると考えられる(図4)．

3. 組織固定

組織固定がマイクロ波による組織変性機序の本体であるが，デバイスに固着した組織は炭化して煙を出す．したがって，刃に組織が固着しない工夫が必要である．これによりマイクロ波のデバイスではミストが出ない，煙が出ない切離条件を得ることができる．切離時間については十数秒と，臨床市販されている類似機器と比べてまだ若干劣るが，実際のシーリング又は凝固はより強力で，組織固定はより早い時期に起こっている可能性があり，更なる改良が必要と思われる．

4. 関連デバイス

MWCXを基本とし，ポピュラーな形のハサミ型マイクロ波組織凝固切断器も試作した．更に，鏡視下用もシャフトを長くして実現した．細い導線になり発熱の可能性もあったが，内視鏡用の鉗子もマイクロ波で作製し，組織の凝固切断，切開も可能であった．更に，本来最も早くから応用されていたバイポーラとしての機能から，バイポーラ摂子を試作した．同じアンテナ構造を利用し，マイクロ波による組織を切開するメスが電気メスの代わ

図4 イヌ脾切断部ACP染色写真：切断部組織の固定

Bar = 1 mm

りとして試作が可能となった．これらデバイスについては，より臨床に近い能力を付与するにはまだ改良を要するが，組織凝固切断器や鉗子及びメスがすべてマイクロ波デバイスとして完成できた場合には，発生装置は1台で済み，手術室のスペースは極めて広くなり有利となる．また，超音波と異なり，マイクロ波ではシャフトの形や長さにおける制限もほぼなく，内視鏡の軟性ケーブルで鉗子試作に成功したように，シャフトも屈曲した構造が可能である．

更に，MR画像下では温度が確認できる能力を利用し，局所温熱療法器を試作できた．

5. 局所温熱療法

温熱療法については，癌細胞を狙った温熱療法では42.8℃にて最もよい結果が得られることが判明しているが，現実に実用化されている治療法では組織温度を確認する術がなく，凝固療法と同様に，温熱療法にもかかわらず加温温度も領域も確認できない，いわゆるEBMに基づかない治療のままであった．今後MR下で行えることを想定した場合，局所温熱療法器の出現は侵襲が極めて大きい拡大リンパ節郭清に代わる治療法として応用可能と考える(図5)．例えば，胃癌の拡大郭清や肺癌のリンパ節郭清などがその適応と考えられる．

図5 温熱療法器，加熱写真

A：小型マイクロ波温熱療法器，B：ウサギ大腿部皮下腫瘍加温

II. マイクロ波の優位性と将来

マイクロ波は電子レンジで応用されているように、本来炭化を目的とした電磁波ではない。従来考えられていたように、凝固療法というよりはむしろ組織固定療法として認識を新たにすべきと考える。したがって、臨床応用における優位性については、組織を固定化するための温度は60℃以上であればよく、炭化するだけ

表1 MWCXの特性

マイクロ波利用・手術支援機器の特徴

- ・マイクロ波は低温で組織固定する。
- ・強い止血能とシーリング能（組織固定）を持つ。
- ・煙やミストが出にくい。
- ・MR画像を障害せず，MR画像を見ながら治療可能である。
- ・手術機器の形や大きさが自在に設計できる。
- ・腸管の切断（断端のシーリング）も可能。
- ・日本の独占分野である。

MWCXの特徴

- ・把持から固定切断が一連の動作で可能。
- ・穿刺や剥離操作がケリー様にできる。
- ・小型化が可能。
- ・屈曲したシャフトも可能。

図6 センサー搭載MWCX

小立方体（矢印）がEndoscout®である。

の温度を必要としない点にあると考えられる。また、MR下で使うには競争相手がいない独占的なデバイスとなる。その一方、MRを必要としない一般手術においても応用域は広く、ミストや煙が出ないという利点から鏡視下手術には極めて強い優位性を持つと考えられる。組織切断器においても組織固定条件を厳密にすることにより、周囲への熱による障害を極めて少なくできる可能性が高い。

MWCXの優位性を表1にまとめた。市販の同様な手術支援デバイスと比べ、ミストや煙が出ず低温で、強いシーリング能が得られる点が特筆される。また、デバイスの大きさや形を自由に設計でき、種々の外科系手術支援機器が製作できる点も大きい。

MR下での発展については、我々が開発したマイクロ波デバイスによるMR画像モニター下手術では、ほぼリアルタイムに温度や作業条件、治療域を確認することが可能となっている。これに強磁場で働く位置センサーをデバイスに搭載することにより、デバイスの先端位置

がMR画像下で同定可能となる(図6)。将来、生体を透視できる3次元MR画像をモニターしながら、切る場所や方向など、処理する部分の組織構造を透視下に見ながら手術できる可能性が出てきた。

結 語

本研究会に参加させて頂いてから日の浅いうちに、先達の開発されてきた日本独自のマイクロ波による手術支

援機器を数多く改良、開発することが可能となった。MR環境下で使うことによる新しい応用の世界とマイクロ波の持つ優位性がいくつか証明できたと考え、“マイクロ波の新たな飛翔”という大それたテーマをつけて報告させて頂いた。

また、本稿で紹介した多くの新しいマイクロ波デバイス研究は科学技術振興調整費「MR画像対応手術支援マイクロ波機器の開発」の支援を受けて推進された。

References

- 1) Tabuse K : A new operative procedure of hepatic surgery using a microwave tissue coagulator. Nippon Geka Hokan **48** : 160-172, 1979
- 2) Morikawa S, Inubushi T, Kurumi Y, Naka S, Sato K, Tani T, Yamamoto I, Fujimura M : MR-guided microwave thermocoagulation therapy of liver tumor : initial clinical experiences using a 0.5 T open MR system. J Magn Reson Imaging **16** : 576-583, 2002
- 3) 来見良誠, 谷 徹, 仲 成幸, 佐藤浩一郎, 遠藤善裕, 花澤一芳, 森川茂廣, 犬伏俊郎, 野坂修一, 村田喜代史 : 多方向アクセスによるMRガイド下肝腫瘍マイクロ波凝固療法. J Microwave Surg **19** : 99-103, 2001
- 4) Mukaisho K, Sugihara H, Tani T, Kurumi Y, Kamitani S, Tokugawa T, Hattori T : Effects of microwave irradiation on rat hepatic tissue evaluated by enzyme histochemistry for acid phosphatase. Dig Dis Sci **47** : 376-379, 2002