低出力レーザー照射効果に対する2, 3の考察 Several Considerations for Effect of Low-power Laser Irradiation

中山 斌義

近畿大学理工学部電気工学科

〒577 大阪府東大阪市小若江3-4-1

TEL 06-721-2332 FAX 06-727-4301

Takeyoshi NAKAYAMA

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology,

Kinki University

3-4-1 Kowakae, Higashi-osaka, Osaka 577, JAPAN

要 旨

医療分野及び低出力レーザー治療分野において使用されるレーザー装置の最近10年間の推移を調べた。水の光照射による分解で知られる本多・藤嶋効果、プラズマ壁相互作用における相乗効果及び脳の α 波を活性化するハイパーソニック効果を取り上げ、低出力レーザー照射効果について理工学の立場から考察した。

キーワード：低出力レーザー、本多・藤嶋効果、相乗効果、ハイパーソニック効果

Abstract

Medical laser apparatus used in the field of medicine and low-power laser treatment have been surveyed for last ten years. From a viewpoint of science and engineering, the effect of low-power laser irradiation has been discussed by considering the Honda-Fujishima effect in electrochemical photolysis of water, synergistic effect in surface phenomena related to plasma-wall interaction and hypersonic effect in audio engineering.

Key words : Low-power laser, Honda-Fujishima effect, Synergistic effect, Hypersonic effect

1. はじめに

低出力レーザー照射による治療効果が極めて顕著であることは、1968年のMesterによる発見以来、長期間にわたる非常に多くの研究結果が示している。しかしながらその作用機序については未だ不明な点が多い。また治

療方法についても、使用するレーザーの種類、照射方法、照射環境等についてそれほど確立されていないように思われる。

現在までの低出力レーザー治療に関しては本やいくつかの雑誌に特集記事としてまとめられている¹⁻⁵⁾。ここ

表1 日本レーザー医学会大会における原著講演中に見られるレーザーの種類とその推移

媒質	レーザーの種類		1986年	1991年	1996年
個 体	Alexandrite		0	0	2
	OPO (波長可変)		0	0	3
	Ruby		1	2	7
	Ti : Al ₂ O ₃		0	1	1
	YAG	Er : YAG	0	2	3
		Ho : YAG	0	1	2
		KTP : YAG	0	3	4
		Nd : glass	1	0	0
		Nd : YAG	34	24	18
	半導体		10	16	17
	計		46	49	57

液 体	Dye	Ar-Dye	13	1	0
		DCM Dye	0	2	0
		Excimer-Dye	1	4	4
		Kr-Dye	1	0	0
		N ₂ -Dye	2	1	0
		Nd : YAG-Dye	0	2	0
	計		17	10	4

気 体	Ar ⁺		13	13	1
	CO		1	2	0
	CO ₂		16	2	3
	Excimer	ArF Excimer	0	1	5
		KrF Excimer	2	6	2
		XeCl Excimer	0	4	0
	Gold		1	1	2
	He-Cd		0	1	1
	He-Ne		4	3	3
	Kr ⁺		0	1	0
	N ₂		2	0	0
	計		39	34	17

合 計			102	93	78

では医学分野以外の人間から低出力レーザー治療効果の研究へ近づく道が無いかを探る。

本報告では、まず医療分野で使用されるレーザーの動向と低出力レーザーの現状を見る。次に、対象が人間と言う複雑な生命体であるため理工学実験のように実験条件が簡単に制御出来ないことは承知の上で、理工学分野から3つの現象を例に挙げて低出力レーザーの照射効果について考えることにする。

2. 治療機器としての低出力レーザーの現状

1996年11月に第17回日本レーザー医学会大会が開催された。この大会で発表された講演から、医学分野で使用されているレーザー装置の種類とここ10年の推移を見るために、5年前(第12回, 1991年)と10年前(第7回,

1986年)の装置を調べたものを表1に示す。但し、装置の調査は原著講演に限った。これは特別講演、パネルディスカッション等では種々の研究を引用してあり特定の装置に限定できないからである。

この表を見ると明らかに液体、気体レーザーは減少してきており固体レーザーの使用が増加している。これは操作や保守の容易さの違いにも起因していると思われる。固体レーザーではYAGや半導体が大きな比重を占めているが、YAGは10年前に比較すると2分の1程度になっており、逆に半導体のレーザーが2倍近くになっている。また波長可変レーザーが比較的少ないのが目に付く。半導体レーザーの比重が大きいのは低出力レーザー治療に使用されるためであるが、細胞レベルの新しい研究が進んだ結果とも思われる。

表2 低出力レーザー分科会での講演中に見られるレーザーの種類とその推移

レーザーの種類		波長領域	1986年	1991年	1996年
Dye	Ar-Dye	可視可変	1	0	0
	Kr-Dye	可視可変	1	0	0
Ar ⁺		緑, 黄	0	0	1
Gold		赤	0	1	1
He-Ne		赤	2	3	1
Nd:YAG		赤外	1	2	1
半導体		赤外	2	6	4
合 計			7	12	8

図1 レーザー装置の出力と工学及び医学分野における代表的なレーザー応用例

表2は1986, 1991, 1996年の「低出力」分科会において発表された講演から, そこで使用されているレーザーの種類を調べたものである。この分科会では発表件数が比較的少ないがだいたいの傾向を把握することは出来る。

いわゆる低出力レーザー医療分野で使用されているレーザーは, 表2でも判るように半導体レーザー, He-Neレーザー, YAGレーザーが主流である。これは簡便さ, 小型軽量, 安価, 患者に与える威圧感の少なさ等を考えれば当然かもしれない。しかし治療効果の作用機序を考える場合他のレーザーも使用した方が良いのではなからうか。低出力とは元来装置に付くべき名称である。治療では照射強度(照射エネルギー密度), 照射時間, 照射形態(パルス光か連続光か)が問題にされるのであるから, たとえ高出力レーザーを使用しても照射面での強度が低ければ低出力レーザー照射時と同様な効果が得られるはずである。これは地震震源の大きさを表すマグニチュードと注目する場所での震度は異なるようなものである。

低出力レーザー治療に使用されるレーザーの光はほとんど赤色か赤外領域の長波長の光である。他の波長のレーザー光(可視, 紫外領域)を低強度で照射した場合に得られる治療効果は赤外領域のレーザー照射効果と同じであるのだろうか?

図1はレーザー装置の出力と工学分野と医学分野における応用例を簡単に現したものである。低出力レーザーの工学分野における応用は主として信号処理である。医学分野における低出力レーザー応用は, 疼痛治療, 血行改善, 骨芽細胞成長促進等に対してであり明らかに加工応用ではない。反応促進に対するきっかけを与える信号の役目を果たしていると見れば工学分野における低出力レーザー応用(信号処理)と共通している。

3. 理工学分野の現象から見た低出力レーザー照射効果への提言

ここでは光触媒効果, イオンエッチングの雰囲気ガスによる効果, 人に高周波音域を含む音楽を聞かせた時に出る脳波, の3つの現象を取り上げ, 低出力レーザー照

図2 本多-藤嶋効果。(a)硫酸溶液中に置かれた TiO_2 電極に太陽光を照射すると TiO_2 電極側から O_2 が、Pt電極側から H_2 が発生する。(b)水の光分解の原理を示す。 TiO_2 のバンドギャップ以上の光を照射すると、価電子帯にホール (h^+)、伝導帯に電子 (e^-) が生成し、これらが各電極表面で硫酸溶液中の H_2O と反応して O_2 と H_2 が発生する。(文献7より)

射効果を検討してみる。

3-1 光触媒効果 (本多-藤嶋効果)

葉緑素によって水と炭酸ガスから炭水化物と酸素が生成される光合成は葉緑素が光触媒の役割を果たす反応であることは良く知られている。水の光触媒による分解は1972年本多と藤嶋によりNature誌に発表されて世界の注目を浴びた⁶⁾。簡単な仕組みで水素ガスが太陽光により生成される事になれば人類のエネルギー問題に大きな福音となるわけである。これは図2(a)に示されるように⁷⁾、 TiO_2 (陽極)とPt(陰極)2つの電極が硫酸溶液中に置かれており、 TiO_2 電極に太陽光を照射すると TiO_2 電極側から O_2 が、Pt電極側から H_2 が発生するものである。この原理を図2(b)に示す。すなわち、 TiO_2 のバンドギャップ(3 eV)以上の光(波長415nm以下)を照射すると、価電子帯から伝導帯に電子が励起されるため、価電子帯にホール (h^+)、伝導帯に電子 (e^-) が存在しこれらが各々のバンド(帯)の中を移動して電極表面に出てくる。電極表面で硫酸溶液中の H_2O と反応して O_2 ガスと H_2 ガスが得られることになる。これを反応式で表せば次のようになる⁶⁾。

結局全体の反応としては

となり、見かけ上は TiO_2 は反応に寄与していない。これが有名な本多-藤嶋効果である。照射する光のエネルギーは半導体電極物質のバンドギャップエネルギー以上でなければならない、反応はしきい値があることになる。上記の場合は3 eVであるが、電極材料の選び方によってはしきい値を変えることが可能である。

その後、半導体電極を使用せず、半導体またはPtやRu等の金属を担持した半導体の微粉末を用いて水を分

図3 真空中におかれたグラファイトに水素イオンを照射した時のメタンの生成。水素原子を導入することによってメタンの収率が大きく変化する。(文献11より)

図4 図3で水素雰囲気中で水素イオンを照射されているグラファイトの温度を変化させた時のメタンの収率。温度によってメタンの収率が大きく変化する。(文献11より)

解する方法が研究されている^{8, 9)}。

低出力レーザー照射効果は、生体中で光触媒の役割を果たす物質が上記のような反応を引き起こす光触媒効果の結果とは考えられないだろうか？また、光触媒的な物質の使用が治療効果を高めるようなことは無いだろうか？

3-2 イオンアシストエッチング（相乗効果）

核融合の分野ではプラズマを閉じこめる容器の材料疲労が問題となり、プラズマ-壁相互作用の研究が進んだ¹⁰⁾。プラズマ容器中では、希薄ではあるが種々の気体とプラズマ及び壁の間の複雑な反応が進行する。プラ

ズマ容器の壁（主に低原子番号の物質、例えばグラファイトやカーバイトを被服した金属）にイオンが衝突したときに水素のような気体があると壁の腐食が激しくなる。この現象がイオンアシストエッチングであり、壁表面における相乗効果（synergistic effect）と呼ばれる現象である。グラファイトCに水素イオン H^+ (60-5000eV) と水素原子 H (sub-eV) が衝突する系での結果を以下に示す¹¹⁾。

図3は真空容器中に H 原子（ H_2 分子を入れWフィラメントで分解させる。従って容器中には H_2 分子と H 原子が混在する）を導入して、グラファイトに H^+ を照射した時のメタン（ CH_4 ）の収率変化を示したものである。メタンはグラファイトのC原子と H 原子が反応して生成される。これを見ると H 原子の導入のみでもメタンの収率は上がるが、 H^+ 照射により極めて大きくなり、 H 原子の導入を止めるとその収率が半以下になる様子が良くわかる。この原因はイオン照射によりグラファイト中に格子欠陥が生じ、C原子の結合が弱くなった状態で H 原子と結合しメタンの形で放出されることによる。すなわちプラズマ容器中に H 原子があると壁の腐食が増幅されることになる。このようなイオンアシストエッチングは、 XeF_2 ガス雰囲気中に置かれたSiの Ar^+ 照射によるエッチング等の場合にも非常に顕著に観測されている¹²⁾。

図4は H_2 の雰囲気中で H^+ (300eV) と H 原子に曝された時の、グラファイトの温度とメタンの収率の関係を示したものである¹¹⁾。800K付近でメタンの収率は最大になる。上記の様な反応は試料温度によってその進み方が極端に異なってくる。

低出力レーザーを治療に用いる場合にも照射環境により効果が極端に異なるケースがあるかも知れない。現象

図5 ガムラン音楽（インドネシア・バリ島の伝統的音楽）の周波数分布。FRSは全スペクトルを，HCSは高周波成分をカットしたスペクトルを意味する。HFCは高周波成分のみを表す。（文献14より）

を複雑にするかも知れないが、

- * 複数のレーザーを用いて温熱効果と光化学効果を同時に起こさせる照射法、または部分的に体温より高い温度環境における照射法
- * 磁場は人の健康維持に効果があると言われているが、磁場中でのレーザー照射法
- * PDTでは波長にマッチした試薬は使用されているが、照射レーザー条件（波長、照射強度、照射方法等）と最適な薬物の併用法

とかは考えられないだろうか？

3-3 ハイパーソニック効果

人間が音としてとらえることができる空気振動は20 Hzから20kHzの周波数帯域である。それ以外の低周波成分も高周波成分も人には音として知覚することは出来ない。しかし、最近低周波成分が人間に不快感を及ぼすことが明らかになり低周波公害として問題になりつつある。一方高周波成分も何らかの影響を人間に与えるのではないかと考えられている。例えば音楽の録音でコンパクトディスク（CD）がレコード盤（LP）に取って代わるようになってから、音楽愛好家の間ではLPの音の方が柔らかな感覚を受けると言われたものである。CDの録音周波数帯域は22kHzまででそれ以上の高周波は人

に聞こえないから不要とし、カットされている。LPは高周波成分を録音している。この違いが人の感覚に影響しているのではないかとされていた。

近年、音の高周波成分が人に与える影響について大橋等¹³⁻¹⁶⁾が精力的な研究を行っている。彼らは熱帯雨林や街路の音環境を高周波成分まで録音し、これを被験者に聞かせた時の脳波（ α 波）を測定して高周波成分の人間への影響を調べている。 α 波（8～13Hz）は人が快適感、リラックス感等を感じた時強く出される脳波である。前述のCDとLPを聞かせた時の違いが α 波の測定によって見事に説明がなされている¹⁶⁾。

高周波成分を人に聞かせたときの α 波の出方を測定した例¹⁴⁾を以下に紹介する。図5はガムラン音楽（インドネシア・バリ島の伝統的音楽）のパワースペクトルである。図中のFRSは高周波成分を含む全スペクトル、HCSは高周波成分をカットしたスペクトル、HFCは両者の差スペクトルを表す。スペクトルは人の可聴域を遙かに越えた40kHzまでに広がっている。このFRSとHCSとを人に聞かせた時現れる α 波の等電位図を示したものが図6である。図中の色の濃いのが α 波の強度を示している。明らかに高周波成分を含む音楽を聞かせた時の方が α 波の活性が高い事が判る。高橋等は人に聞こ

図6 図5のFRS, HCSを交互に間かせた時の脳波(α波)の等電位図。色の濃いところがα波を表す。
(文献13, 14より)

えない高周波が引き起こす生理的・心理的效果をハイパーソニック効果(hypersonic effect)^{15, 16)}と名付けている。この効果を脳内神経伝達物質の挙動と言う面から、脳深部構造の活性変化を捉えることが可能な陽電子放射断層撮影PET(positron emission tomograph)を使い脳血流を測定した。その結果高周波成分を含む音楽を聞いた場合、脳幹と左視床の血流量が増大すること、及び、視床における脳血流と頭皮表面で測定したα波との間に極めて高い相関があることを見いだしている¹³⁾。

翻って低出力レーザー治療を考えてみると、疼痛緩和や血行促進等の照射効果を調べるにはサーモグラフィがよく使用されている。体表面温度は血行に直接関係するためこのサーモグラフィは極めて有力な測定法であるが、上述のような脳波の測定、脳の血流測定が治療効果の解明に何らかの情報を与える可能性は無いだろうか？

4. おわりに

工学分野に身を置く者から見た低出力レーザー照射効果と言うのは、まさにマジックを見せられたような心境である。しかしながら、本論文で紹介した理工学におけるいくつかの現象もその原因が不明の場合は幾分それに近い。ここではこれらの現象を通して低出力レーザー照射効果を眺めてみた。理工学の研究では種々の実験条件を変えて何度も繰り返し実験が可能である。それに比べて治療というのは対象が人であれ動物であれ生きている。

健康状態や心理状態までパラメータとして入り込むため同じ対象に対する実験でもこれを難しくしている。ただ理工学における手法が治療に応用出来ることもまた事実である。

低出力レーザー治療に携わっておられる研究者から見ると、ここで述べたようないくつかの提言や疑問などは、既に解決されているかまたは現在研究されつつあることかも知れない。いずれにしてもこの分野ではまだ未解決の問題は多く、研究対象としては魅力ある分野であることに間違いなさそうである。

謝 辞

摩訶不思議な低出力レーザー照射効果の魅力について考える機会を与えて下さった厚生会第一病院の神川喜代男博士に深く感謝致します。また、文献調査、図面の作成にあたり、労を厭わず快く引き受けて頂いた大学院生松谷貴臣氏、熊崎建二氏及び松榮宏明氏に感謝します。

文 献

- 1) 神川喜代男：低出力レーザー治療，O plus E 109, 69～74, 1988.
- 2) 神川喜代男，田和宗徳：日本臨牀45, 756～761, 1987.
- 3) 田口順子：低出力レーザー機器とレーザー療法，PTジャーナル 27, 769～773, 1993.
- 4) 石渡祐政，遊津隆義，金田明：光技術コンタクト 33, 202～210, 1995.

- 5) 劔物修 編集：半導体レーザーと痛みの治療，グロビュー社，1996.
- 6) A. Fujiyama and K. Honda : Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature* 238, 37~38, 1972.
- 7) 大西孝治：日本化学会編新化学ライブラリー「触媒 - その秘密を探る」, p. 75, 大日本図書, 1987.
- 8) T. Sakata and T. Kawai : Hydrogen production from biomass and water by photocatalytic processes, *Nouv. J. Chim.* 5, 279, 1981.
- 9) K. hashimoto, T. Kawai and T. Sakata : Photocatalytic reactions of hydrocarbons and fossil fuels with water. Hydrogen production and oxidation. *J. Phys. Chem.* 88, 4083~4088, 1984.
- 10) N. Itho and K. Kamada ed : Proc. of the Workshop on Synergistic Effects in the Surface Phenomena Related to Plasma-Wall Interactions, *Rad. Effects* 89, 1985.
- 11) A. A. Haasz, O. Auciello, P. C. Stangeby, and I. S. Youle : Ion-induced synergistic effect for CH₄ production from carbon under H⁺, H⁰ and H₂ impact, *J. Nucl. Mater.* 128 & 129, 593~596, 1984.
- 12) J. W. Coburn and H. F. Winters : Ion-and electron-assisted gas-surface chemistry-An important effect in plasma etching, *J. Appl. Phys.* 50, 3189~3196, 1979.
- 13) 大橋力：マルチメディアと脳，電子通信情報学会論文誌 79D-II, 468~475, 1996.
- 14) T. Oohashi, E. Nishina, N. Kawai, Y. Fuwamoto, and H. Imai : High frequency sound above the audible range affects brain electric activity and sound perception, *Audio Engineering Society 91th Convention preprint* 3207, New York, 1991.
- 15) 大橋力：快適な音環境の情報学，放送教育環境センサー研究紀要 7 号, 53~101, 1992.
- 16) 大橋力：音環境と人間, *JOHNS* 11, 935~941, 1995.