

図2 単盤型電磁石装置の中心軸上磁界分布の比較

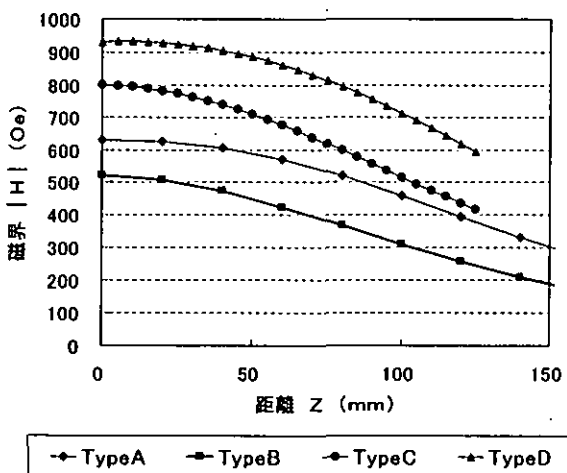


図3 単盤型電磁石装置の磁極表面から10cm離れたところでの横方向の磁界分布の比較

図2, 3に明らかに示されているように今年度開発した単盤型電磁石装置は前年度より著しく発生磁界の効率が高くなっている。

Type.BとType.Dは、通常の内視鏡室に設置してある100V、15Aのコンセントからの電力供給で使用可能な仕様にな

っている。

2. 動物実験1 (7月11日実施)で操作性が劣った原因についての分析

7月11日に実施した動物実験で、前年度に使用した磁気発生部よりも操作性が劣った原因は、図4に示す装置を使用してType.AとType.Bの単盤型電磁石に対する磁性ステンレスアンカーの牽引力の実測を行った結果より説明することができる。

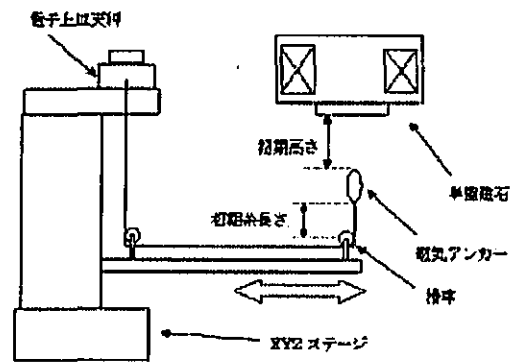


図4 牽引力を実測した装置の模式図

磁性ステンレスアンカーに接続された糸は、2つの滑車を経由して、下部にもフックを備えた電子上皿天秤と接続されている。

磁気アンカーに磁気が作用し、上方に挙上される力が働くとき、電子上皿天秤によりこのときの挙上力を直読することができる。

図5に、初期状態で、磁極表面と磁気アンカーの最上部との距離が10cmのときにおける、横方向移動距離と牽引力の関係について、Type.AとType.Bの単盤型電磁石について比較を行った結果を示す。い

ずれも、定格電流を通電したときの特性である。

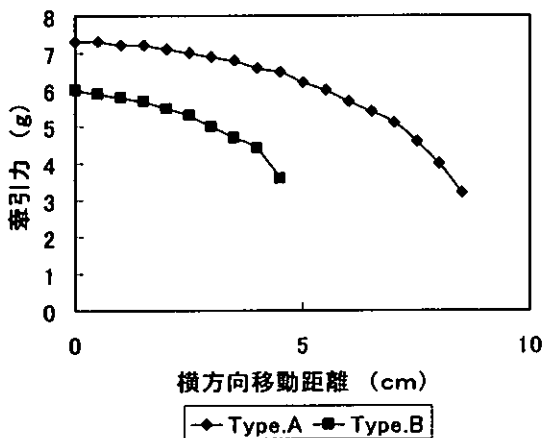


図5 初期高さ10 cmにおける牽引力と横方向移動距離との関係の比較

図5において、実線で示されている位置よりもさらに横方向に移動したとき、磁気アンカーは挙上を保持できず落下した。

磁気アンカーはほぼ磁極の中心に向かって挙上されるため、横方向に移動すると、次第に糸を斜めの方向に牽引するようになる。このとき、牽引力のベクトルの重力方向の成分が、磁気アンカーの重量よりも小さくなると挙上が保持できなくなるため、真上に挙上される場合よりも、斜めに挙上される場合のほうが突然落下しやすいと考えられる。また、横方向に移動していくと牽引力が弱まり、すると糸の張力が弱まるために糸が縮み、するとさらに磁極との距離が遠くなるというフィードバックの作用が働いていることも影響していると思われる。これらのことは、実際に粘膜を挙上する際にも同様なことが起っているものと思われる。

ここで、Type.Bの単盤型電磁石について、図5の特性を見てみると、わずか5 cm移動すると挙上を保持できなくなっている。

このことは、斜め方向の牽引が限定されるだけでなく、磁極下10 cmのところでも真上に挙上を行う際にも、磁極の中心を、患部の直上にかなり正確に配置しなければならないことを示している。

さらに、前年度の動物実験の結果からは、磁極下10 cmでの挙上を想定したが、今年度の動物実験の結果において、恐らく磁極下12 cm以上での挙上が必要であったと思われる。

図2に示されるように、磁極からの距離が遠くなるほど、Type.Bの単盤型電磁石は、Type.Aの単盤型電磁石よりも発生磁界が小さくなるので、図5に示されるような特性の差はより顕著になると考えられる。

したがって、7月11日に実施した動物実験でType.Bの単盤型電磁石の操作性が劣った理由は、磁力不足で、磁気の及ぼす範囲が狭いためであると考えられる。

また、図6に定格電流を通電したときの、単盤型電磁石中心軸上の磁気アンカーの牽引力の変化について、Type.AとType.Bの電磁石の比較を行った結果を示す。測定は図4の装置でXYZテーブルを上下に移動させることにより行った。

図6に明らかに示されるように、Type.Bの電磁石では、磁極表面に向かって急激に牽引力が増加するので、磁気の及ぼす範囲だけでなく、安全性の面からも、磁気発生部をあまり小型化することについては、問題があると思われる。

また、実際の臨床においては、体重40

k g程度の子豚の場合よりも、さらに離れた距離での挙上が必要なことも想定されることから、磁気アンカー誘導装置の実用化にあたっては、磁気発生部の大型化が必要であると考えられた。

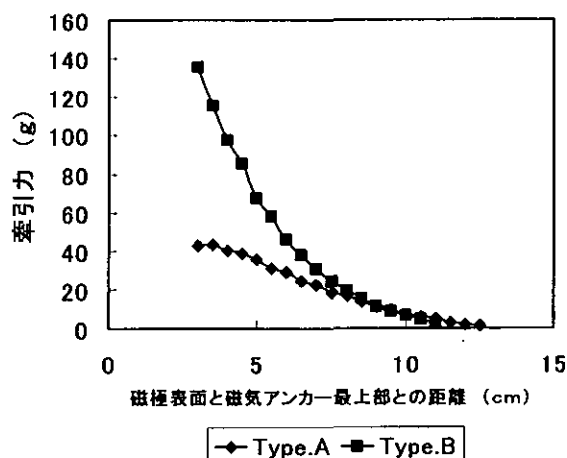


図6 単盤型電磁石中心軸上の牽引力と距離との関係の比較

3. 誘導方法についての考察

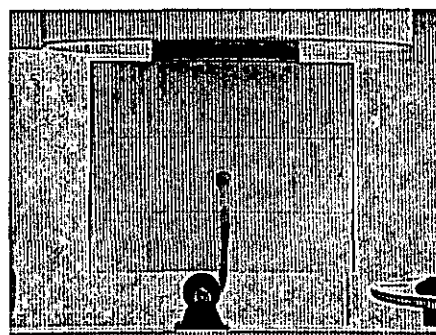
単盤型電磁石の支持部に設けられた首振り機構で磁気アンカーの牽引方向を制御することについては、問題がある。

図7(a)、(b)、(c)に具体例を示す。

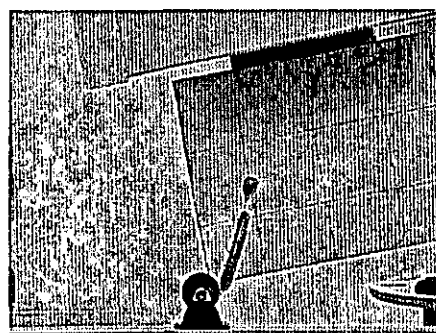
図7(a)は単盤型電磁石を使用して、磁気アンカーを中心軸上真上に挙上している様子を示している。

この状態から、単盤型電磁石の直上に設けられた首振り機構を使用して、右に首を振った様子を(b)に、左に首を振った様子を(c)に示す。

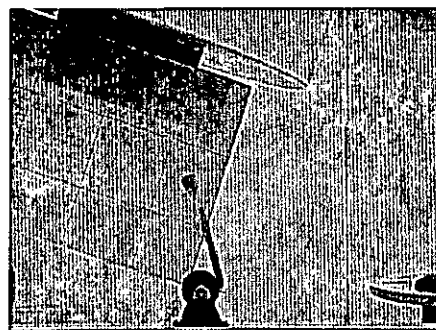
通常の制御を行う感覚では、磁気アンカーは凡そ磁極の中心に向かって牽引されるため、単盤型電磁石を右に首を振れば、磁気アンカーは左を向くと想定する。



(a)



(b)



(c)

図7 単盤型電磁石の首振り機構による誘導の具体例

ところが、図7(b)(c)に示されるように、そのような牽引方向の制御は、磁気アンカーの牽引方向の軸と磁気発生部の中心軸を一致させたまま、磁気発生部を回転させなければならないが、簡便な首振り機構では、中心軸がずれてしまい、通常感覚とは反対方向に磁気アンカーの牽引

方向は誘導されてしまう。

常に牽引方向と単盤型電磁石の中心軸を一致させるような高度な制御を行うためには、磁気アンカーの位置検出を行う必要があるし、機械的な機構も複雑になる。

また、磁極表面を傾斜させると、体表との干渉も問題になり、特に磁気発生部が大きくなると、その影響は大きくなるし、機構の作成も困難になる。

そこで単盤型電磁石の磁極の方向は真下の方向に保持し、単盤型電磁石あるいはベッドを横方向に水平に移動することで、磁気アンカーの誘導方向を制御することとした。

4. 動物実験3（12月5日実施）と動物実験4（1月30日実施）に使用した装置の詳細

今年度前半に行った動物実験の結果を基にして作成した仕様に基つき、開発および試作を行い、12月5日と1月30日の動物実験に使用して、良好な結果を得た磁界発生装置の詳細について記述する。

磁気発生部の特性については、Type.Dの単盤型電磁石として既述している。

重量165kgとかなり大型化しているが、これまで試作した単盤型電磁石の中で最も磁気の及ぼす範囲が広がっていると同時に、磁極表面に向かって牽引力が増大する特性が、Type.BやType.Cの単盤型電磁石と比較して抑えられており、なおかつ高効率で、通常の100V、15Aのコンセントからの電源供給で使用が可能である。

表面は、従来の単盤型電磁石がポールピ

ースの外周で段差があったのに対し、平坦となっている。

なお、Type.D単盤型電磁石によって、どこまで磁気アンカーに牽引力を作用させることができるかについては、6項の、「挙上可能距離についての考察」で後述する。

単盤型電磁石は、下方向の斜めの誘導も行えるように、上下に2つ設けられている。

磁気は距離で大きく減衰するので、磁気発生部をできるだけ体表面に近づける必要がある。

この装置では、上下の電磁石が一体となって上下する機構と上部の電磁石だけが上下する機構の独立した2つの機構を備えている。この機構により、ベッドの高さと、患者の体の厚みに応じて、電磁石の位置が調整できるようになっている。

上下の電磁石を同時に使用することは必要ないので、一台のユニポーラ直流電源を、押しボタンスイッチで切り替えて使用する。

電磁石のコイル電流の制御は、スライドボリュームによるリモコンを用いて、内視鏡の画像で磁気アンカー挙上の様子を観察しながら行うことができる。

磁気アンカーの牽引方向の制御は水平方向のスライド機構を備えたベッドを移動させることにより行うことができる。ベッドは上下機構も備えている。

電磁石には冷却水を通水する必要があるが、冷却水の断水、コイル温度の上昇など、非常時には電源を遮断するインターロック機構を備えている。

5. 磁性ステンレスアンカーの挙上方向に関する考察

動物実験において、磁性ステンレスの磁気アンカーを挙上する際に、図8に示すように、磁性ステンレスの尾部の方が磁気発生部の方を向いて挙上される例が多かった。

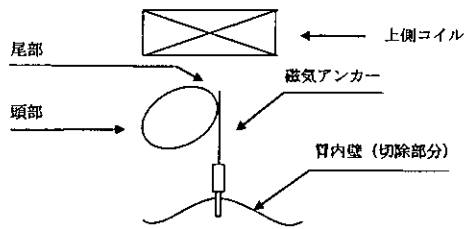


図8 尾部が挙上される模式図

図8のように挙上されると、もしも挙上中にクリップが外れたりしたときに、磁性ステンレスの尾部の鋭角な方が胃壁を直撃することになる懸念がある。

また、牽引力も、正常に頭部の方が磁気発生部を向く場合よりも、小さくなってしまふ。

一方、粘膜の切除が進んだ際に、尾部の方が挙上された方が、胃壁との距離が稼げて、患部外の胃壁に磁気アンカーが衝突して挙上ができなくなることを防ぐことができるという利点も考えられる。

磁気アンカーが挙上される際には、次項でも述べるように、まず磁気トルク（方位磁石が北を向く作用）によって、磁気アンカーの長手方向が磁極の中心方向を向き、さらに大きな磁場を作用させると、磁気勾配の作用によって、そのままの方向を保持しながら挙上が行われる。

実際に単盤型電磁石と磁性ステンレスの

磁気アンカーを使用してモデル実験を行うと以下のことが確認できる。

挙上される前における磁気アンカーの設置面が単盤電磁石の磁極の面と平行なときで、図9(a)のように、頭部が単盤電磁石の磁極の中心に近いときは、磁気アンカーは正常に頭部が単盤電磁石の方を向いて挙上され、(b)のように、尾部が単盤電磁石の磁極の中心に近いときは、磁気アンカーは図8のように尾部が単盤電磁石の方を向いて挙上される。

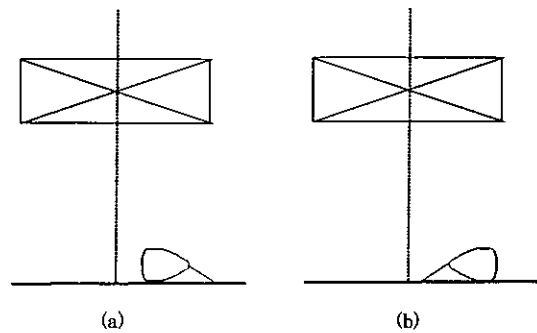


図9 底面が水平なときの挙上の説明図

一方、図9(a)のように、磁気アンカーの頭部が電磁石の中心に向いているときでも、図10に示すように底面がわずかでも頭部の方が下向きに傾斜している際には、尾部の方に強い磁場が作用して、図8のように尾部が挙上される結果となる。

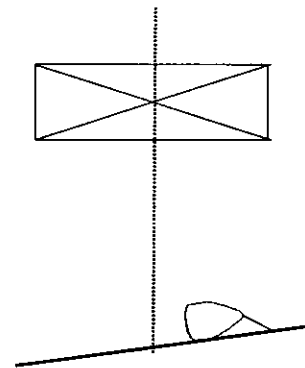


図10 底面が傾斜している時の説明図

一般に、底面が傾斜している場合の方が多く、また磁性ステンレスの磁気アンカーは頭部の方が重たいので、磁気アンカーの頭部の方が傾斜の下方向を向きやすいと考えられる。

したがって、磁気アンカーが挙上される際には、尾部の方が単盤型電磁石の方に向かって挙上される場合が多くなると考えられる。

6. 挙上可能距離についての考察

動物実験を重ねた結果、磁気アンカー誘導装置の性能の指標として、どこまで磁極から離れたところでの磁気アンカーの挙上が可能であるかということが重要であることがいっそう明確になってきた。

そこで、Type.D の単盤型電磁石において、これまで動物実験で使用してきた磁性ステンレス性の磁気アンカーと希土類ネオジム永久磁石について、どこまで挙上が可能かを調べた。

実験方法は、次の2通りである。

(ア) 磁気アンカーが挙上されている状態で単盤電磁石の中心軸上で次第に磁気アンカーを遠ざけていき、挙上が保持できる限界の単盤型電磁石の磁極表面と磁気アンカーの上部の先端との距離を測定する。(図11(a))

(イ) 磁気アンカーを、磁極面の下方の水平面に、先端が単盤型電磁石の中心軸上に位置するように設置する。単盤型電磁石に通電したときに、磁気アンカーの挙上が行われる限界の単盤型電磁石の磁極表面と磁気アンカーを設置した水平面との距離を測

定する。(図11(b))

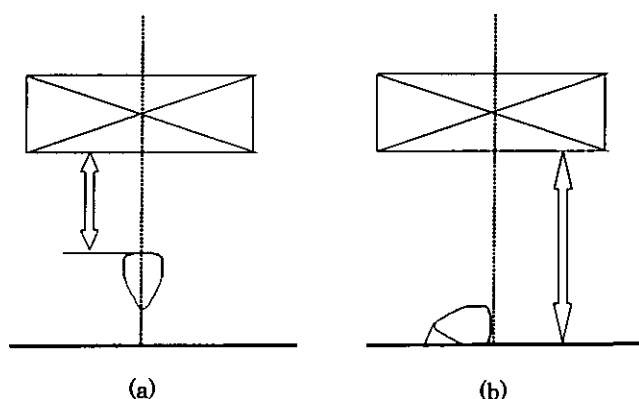


図11 挙上可能距離測定の様式図

使用した磁性体は次の3種類である。

- ① 磁性ステンレス製磁気アンカー
流滴型 (重量 5.8 g)
- ② ネオジム希土類永久磁石
 $\phi 2.9 \times 3.8 \text{ mm} \times 3 \text{ コ}$ (重量 0.57 g)
- ③ ネオジム希土類永久磁石
 $\phi 2.9 \times 3.8 \text{ mm} \times 6 \text{ コ}$ (重量 1.15 g)

また、それぞれの場合について、負荷として 2.3 g および 5.0 g の非磁性材料のおもりを磁性体の周囲に装着した状態でも測定を行った。

Type.D の単盤型電磁石への通電電流は、定格電流である 30 A である。

実験 (ア) の測定結果を表 2 に、実験 (イ) の測定結果を表 3 に示す。

表 2 実験 (ア) の測定結果

荷重 (g)	(cm)		
	磁性ステンレス	ネオジム磁石 (0.57g)	ネオジム磁石 (1.15g)
0	16	29	28
2.3	14.5	16	20
5	13	13	16

表3 実験（イ）の測定結果

(cm)			
荷重(g)	磁性ステンレス	ネオジム磁石(0.57g)	ネオジム磁石(1.15g)
0	18	—	—
2.3	16	17	22
5	15	14	18

実験（イ）の測定結果は、いずれも実験（ア）の測定結果よりも、磁性体の長さ程度大きな値となったが、実際に挙上される様子を観察したところ、次のように説明することができる。

実験（イ）の場合、電磁石に通電する電流を徐々に上げていくと、接続されている糸に牽引力が生じる前に、磁気トルク的作用によって、長手方向が磁極の中心を向くように立ち上がる。このときの磁性体の先端の位置と電磁石の磁極の距離は実験（ア）における測定結果の距離に相当する。電流が定格電流に到達し、挙上が可能になると、磁性体は浮上し、糸に張力が働くようになる。

電磁石の磁界分布と磁性体の磁化率や残留磁束密度を使用して牽引力を計算した結果を図12に示すが、実験結果とのよい一致が得られている。

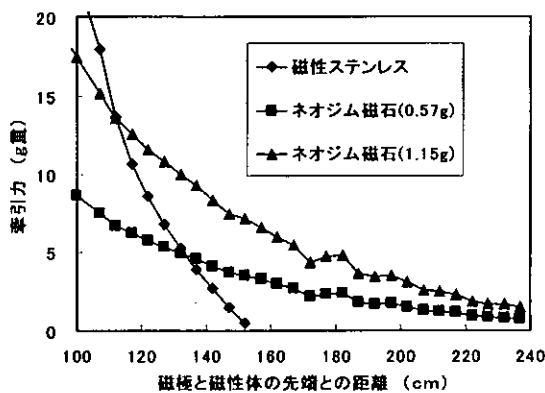


図2 牽引力の計算結果

磁性ステンレスアンカーの磁気モーメントの外部磁界に対する比例係数は、振動試験型磁力計による実験から求めた0.243 (emu/Oe) を、ネオジム磁石の残留磁束密度はカタログ値から1.3(T)を使用して計算した。

ネオジム磁石を使用した場合、重量が軽いのに比して、大きな牽引力が得られ、また遠方でも挙上が可能であり、磁極に近づいた時の牽引力の増加も磁性ステンレスに比較して小さい、挙上される向きが着磁されており磁性ステンレスのように尾部方向が磁極の方向を向く心配がない、などの利点がある。

しかし、その一方で、

- ① 生体への希土類元素などの毒性の問題
- ② 遠方では自分自身の挙上はするものの、粘膜を挙上する力が不十分である場合に、挙上力を制御することが難しい面があること
- ③ 複数の磁石を導入したときに、磁石が複雑に結合し、取出しが困難になる恐れが懸念されること

などの課題がある。

磁性ステンレスの磁気アンカーの場合、磁気アンカー自体が挙上されるぎりぎりの電流を保持すれば、大体において、粘膜の挙上を行うには十分な5g重程度の牽引力が得られているので、制御が容易な面がある、また、下方の牽引では、自重により、磁気を作用させなくても、粘膜の切除面の展開を行うことができる、生体への毒性の心配が少ない、取出しが確実にできる、など利点も多い。

D. 結論

胃の内視鏡的粘膜除去術を補助するため、微細鉗子に連結された磁性体を誘導する磁界発生装置について、早期の実用化を目指した研究を行った。

動物実験を行った結果より得られた知見を分析し、より実用的な装置を開発した。

磁気発生部を大型化することにより磁気の及ぼす範囲を広げるとともに、磁気アンカーの誘導はベッドを水平に移動することにより行う装置を開発・試作し、その有効性を動物実験により検証することができた。

今回の開発の過程で得られた知見は、より高度な磁気誘導装置を開発する上でも重要であると思われる。

実際の臨床に適用する際には、臨床においても牽引力の到達範囲が十分に確保できるより最適化された構造の磁界発生装置の開発や、磁気アンカーの尾部が牽引されないよう磁気アンカーの寸法の最適化など残された課題も複数あるが、磁気アンカー誘導装置の早期の実用化を行うことにより、低侵襲な医療の実現に貢献したい。

また、低消費電力で高磁場を得る手段として、コンデンサにより蓄電された電力を利用したブースター装置の開発も念頭において、革新的な技術開発にも注力したい。

E. 研究発表

なし

F. 知的所有権の取得状況

1. 特許出願

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Kakizoe T	Reconstruction of the urinary tract after cystectomy for transitional cell carcinoma of the bladder	Proc Japan Acad	79	190-196	2003
Kakinuma R, Ohmatsu H, Kaneda M, Kusumoto M, Yoshida J, Nagai K, Nishiwaki Y, Kobayashi T, Tsuchiya R, Nishiyama H, Matsui E, Eguchi K, Moriyama N	Progression of Focal Pure Ground-Glass Opacity Detected by Low-Dose Helical Computed Tomography Screening for Lung Cancer	J Comput Assist Tomogr	28	17-23	2004
Kobayashi T, et al.	The magnetic anchor for more effective endoscopic mucosal resection	JJCO			2004 (in press)
山崎彩、仙道雅彦、石山和志、早瀬敏幸、荒井賢一	スパイラル型磁気マイクロマシンの3次元泳動特性解析	日本応用磁気学会誌	27	142-145	2003
西村一寛、仙道雅彦、石山和志、荒井賢一、内田裕久、井上光輝	低温フェライトめっき技術の磁気マイクロマシンへの応用	日本応用磁気学会誌	27	681-685	2003
Yamazaki A, Sendoh M, Ishiyama K, Hayase T, Arai K I	Three-dimensional analysis of swimming properties of a spiral-type magnetic micro-machine	Sensors and Actuators	A105	103-108	2003
Nishimura K, Uchida H, Inoue M, Sendoh M, Ishiyama K, and Arai K I	Magnetic micromachines prepared by ferrite plating technique	J Appl Phys	93(10)	6712-6714	2003
Furuse J, Satake M, et al.	Pilot Study of Transcatheter Arterial Chemoembolization with Degradable Starch Microspheres in Patients With Hepatocellular Carcinoma	Am J Clin Oncol	26(2)	159-164	2003

Tateishi U, Satake M, et al.	Gastrointestinal Stromal Tumor. (Correlation of Computed Tomography Findings with Tumor Grade and Mortality)	J Comput Assist Tomogr	27(5)	792-798	2003
Tateishi U, Satake M, et al.	Primary Dedifferentiated Liposarcoma of the Retroperitoneum. (Prognostic Significance of Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging Features)	J Comput Assist Tomogr	27(5)	799-804	2003
Sugiura S, Satake M, et al.	Effect of Interfacial Tension on the Dynamic Behavior of Droplet Formation during Microchannel Emulsification	J Colloid Interface Sci	269	178-185	2004
Sugiura S, Satake M, et al.	Preparation Characteristics of Water-in-Oil-in-Water Multiple Emulsions Using Microchannel Emulsification	J Colloid Interface Sci	270	221-228	2004
Sugiura S, Satake M, et al.	Effect of Physical Properties on Droplet Formation in Microchannel Emulsification	Kagaku Kogaku Ronbunshu			2003 in press
Teshima T, Ohno Y, Inoue T, Takahashi Y, Oshima A, Sumi M, Uno T, Ikeda H; Japanese PCS Working Subgroup for Lung Cancer	The Patterns of Care Study and Regional Cancer Registry for non-small-cell lung cancer in Japan	Int J Radiat Oncol Biol Phys	56	1005-1012	2003
Uno T, Sumi M, Sawa Y, Teshima T, Hara R, Ikeda H, Inoue T; Japanese PCS Working Subgroup of Lung Cancer	Process of care and preliminary outcome in limited-stage small-cell lung cancer: results of the 1995-1997 patterns of care study in Japan	Int J Radiat Oncol Biol Phys	56	626-632	2003
Sumi M, Uno T, Ikeda H, Teshima T, Inoue T, Sawa Y, Suzuki Y	The patterns of care study for non-small cell lung cancer patients treated with radiation therapy in Japan: comparison of the process between 1995-1997 survey and 1999-2001 survey	American Society for Therapeutic Radiology and Oncology 45th Annual Meeting			2003

20030613

以降は雑誌/図書等に掲載された論文となりますので、
「研究成果の刊行に関する一覧表」をご参照ください。