

図 9 は、最大磁界強度を年齢に対してプロットした散布図である。年齢は溶接作業従事年数と高い相関を示すことから、磁界強度、すなわち肺内の溶接ヒューム沈着量は、作業年数とは必ずしも相関しないことが示唆される。このことは作業者による作業強度の違いに加えて、作業の方法や呼吸保護具の使用の有無など、種々の要因によって、実際に作業者が曝露される量が大きく異なってくることを示しており、作業種や作業年数、作業環境測定値などから計算によって行う曝露評価は、厳密な曝露評価には必ずしも十分ではない可能性を示唆している。

作業者を肺磁界強度の強さによって 3 つのグループに分類し、そのグループ間で作業者の慢性呼吸器症状の有症率を比較した結果を図 10 に示した。症状のうち、慢性せき(年に 3 ヶ月以上毎日のように続くせき)では、症状を有するものの割合、すなわち有症率が肺磁界強度が大きいグループほど高い値を示し、有意な量反応関係が認められた。またスパイロメトリーによる肺機能検査では、ほとんどの作業者が正常範囲にあり、例えば一秒率では低下を表す 70%を下回るのは数名に過ぎなかったが、一方その正常範囲の中で、一秒率の値は肺磁界強度が増加するにつれて有意に減少する傾向が認められた(図 11)。この傾向は回帰分析によって統計的に有意であることが示され、とくに年齢の高いものほど顕著に認められた(図 12)。また同様の有意な影響が呼吸器時定数分析の指標でも認められている。肺磁界強度との有意な関連が認められたこれらの指標は、いずれも閉塞性換気障害、すなわち呼気・吸気の流れが阻害されるような変化に関連する指標であり、いわゆるじん肺が、肺活量の低下に現れるような拘束性換気障害を主体とすることを考慮すると興味深い結果である。

以上の結果は、溶接ヒュームの累積曝露によって引き起こされる生体の変化が、とくに胸部レントゲン上の変化がなく、また通常の判定基準では肺機能上異常とは認められない作業者においても、肺磁界強度との有意な関連を持って把握され得ることを示しており、肺磁界測定の有用性が示されたものと考えられる。

これらの作業者のうち、約 40 名について、4 年後に追跡測定を行ったところ、2 回の測

定値は図 13 に示すように、きわめて高い相関を示す一方、大部分の作業者で 2 回目の肺磁界強度が 1 回目に比べて大きく減少した。各作業者の減少率を 1 回目の測定値に対してプロットしたのが図 14 である。この減少は、追跡期間中に作業工程や工場レイアウトの変更が行われ、作業の休止も含め、曝露量が大幅に減少したことが影響した結果と考えられるが、言い換えれば、呼吸保護具の使用などで、十分な曝露対策を行えば、一旦沈着したヒュームも呼吸器外へ排出されることを示す結果である。一方 4 年後においても、肺磁界強度とスパイログラム上の閉塞性指標との有意な関連は依然として認められたことから、一旦生じた生体反応は、沈着ヒューム量とは異なり、容易には改善しないことを示していた。したがって、溶接作業の管理においては、曝露の低減こそがきわめて重要であることが改めて示唆される。

以上のように、溶接作業における肺磁界測定は、その時点の曝露評価、また累積的なヒュームの沈着量の評価に利用可能であり、胸部エックス線検査で変化が出現する以前に、呼吸器症状や肺機能と有意に関連することから、作業者の健康教育にも利用することができ、曝露評価、健康リスク評価に基づく溶接じん肺の一次予防に有用であることが確認された。

2. 肺磁界測定装置の小型化による可搬型測定装置の開発

ア. 肺磁界装置の改良

肺磁界の測定器を小型化して可搬性を高め、容易に持ち運びができるようにすれば、職業性の粉じん曝露が実際に起こる作業の現場で測定することができるようになり、これまでの集団を対象とした管理を一步進めて、個々の作業者の曝露量に応じたりスク管理、作業管理、健康管理に役立てることができる。また従来の標準型の装置と同程度に感度を保つことができれば、溶接作業以外の磁性粉じん曝露作業にも利用の可能性を広げることができる。われわれがまず試作した携帯用計測装置は図 15 に示すように、以下の部分から構成される。各部はいずれも容易に持ち運びできるよう小型で軽量に製作されており、一般の 100 ボルト電源で作動する。

(1)携帯用小型磁化器：胸壁上から肺の測

定部位を磁化する。

(2)高感度フラックスゲート磁束計：残留磁気をリアルタイムで測定する。

(3)記録器：磁気強度の経時的变化を記録する。

(4)コンピュータシステム：肺内蓄積粉じん量と分布を演算し推定する。

測定にあたっては、被検者にベルトなど金属部分があるものを身体からはずしてもらった後、磁化器を胸壁の計測場所にあてることで肺を一定強度で外部磁化する。続いて架台に固定された磁束計のプロープと被検者の胸部を近づけたり遠ざけたりを繰り返す。肺内に磁性体が存在し、外部磁化による残存磁界があるときは、この動きに応じて磁界強度の変化が観察されるはずである。強度変化の大きさは肺内に存在する磁性体の磁性に比例し、同種の粉じんが沈着していると仮定できる場合は、変化の強弱は粉じんの沈着量に比例すると考えてよい。当該磁性体の一定量を別にキャリブレーションしておくことで、粉じん量の絶対値に換算することができる。またこの手技を定められたいくつかの部位で繰り返すことによって、肺内蓄積粉じん量と分布が推定できる。

イ. 溶接作業におけるパイロット測定

試作した簡易型・携帯型肺磁界測定器を用いて、5名の被検者について測定を行った。被検者のうち4名はアーク溶接作業従事者で、残りの1名は、粉じん作業に従事しているが、溶接作業に従事した履歴はなく、また粉じんも磁性のない粉じん作業であった。

図16は本装置における手持ち式の磁化器によって、被検者の胸部を外部磁化している様子である。フラックスゲート磁束計は折り畳み式の三脚上に取り付けられ、被検者の身長に合わせて、あらかじめ高さを調節しておく(図17)。外部磁化後、被検者は速やかに磁束計の前に立ち、検者の指示に従って、磁束計に胸部を近づけたり遠ざけたりする動作を反復する(図18)。磁束計の出力はペンレコーダーに記録され、被検者の肺内に磁性粉じんが存在すると、図19に示すようなチャートが得られる。チャートの細かい変動はバックグラウンドの磁性強度の変化で、この場合はナノテスラ未満のオーダーである。これに対して大きな変動は、胸部の前後方向の反復運動にと

もなって生じている変動で、被検者の肺内に沈着している溶接ヒュームの残留磁界が検出されている。この場合は、数ナノテスラオーダーの変動が認められており、バックグラウンドノイズとの識別は容易である。

各被検者の測定値のうち最大値をそのものの肺磁界強度として、作業歴等とともに表1に示した。溶接作業の履歴がない1人の被検者では、ノイズレベルを超える肺磁界は検出されなかった。また4人の溶接作業者のうち、作業歴の最も短い被検者では、同様に肺磁界は検出されなかった。残りの3人では、ノイズレベルを超える肺磁界が測定され、その強度は数ナノテスラのレベルであった。またこれらの簡易法による測定結果は標準法とおおむね良好な一致を示した。

本法の各パーツは容易に手で持てる程度に小型化され(図20全景)、同時に100ボルトの通常電源で動作するので、作業現場でも容易に計測が可能である。1回の測定に要する時間は5分程度であり、非侵襲的で繰り返し計測も可能である。

3. 可搬型測定装置の改良と測定条件の標準化

初めに試作した装置は、十分な感度を有し、実用に耐えるものであることを確認したが、同時に、パイロット調査でいくつかの改善点も明らかになった。それらの点について工学的な面から検討を行い、下記のように改善することで、測定を標準化し、精度を高め、結果の利用可能性の向上を図った。

ア. 改良型携帯用計測装置の概要

磁化コイルと磁束計プロープを測定台に固定することにより、測定条件が毎回変化することがなくなり、測定結果の再現性が向上し、肺内粉じんの量および分布を精度よく求めることが可能になる。

今回改良した計測システムは差動型プロープ付きのフラックスゲート型磁束計、肺内粉じんを磁化するための磁化器、被験者計測台、計測位置を測定するための光センサ、測定値を記録するデジタルオシロスコープで構成される。記録計をデジタルオシロスコープに変えた理由として、ペンレコーダ自身がノイズを発生するためである。計測システムの概観を図21に示す。

イ. 磁化器の特性

まず、本計測では肺内粉じんを磁化するために体内に一定方向の磁界を加えなければならない。一定方向の磁界を発生させるために、磁化器用電源のコンデンサーに250[V]の直流電圧を充電し、磁化コイルに約30[A]の電流を約20[ms]間流す。その時の、コイルが作る磁束密度と距離の関係を図22に示す。ここで、磁化コイル中心から外周方向への距離をR[cm]、コイル表面から離れる距離をh[cm]としている。これによって、肺内の磁性粉じんを50mTの強度で磁化することが可能である。

ウ. 測定方法の標準化

図21に示すように、測定の際被験者を計測台に乗せ、計測台を左右に等速で動かすことにより、各部位の残留肺磁界強度を計測する。計測台のレール上には光センサが取り付けられており、計測台の下部に2[cm]間隔で幅3[mm]の黒線が25本等間隔に描かれている。計測台が移動して黒線が光センサの前を通過すると、光センサよりパルスが出力される。これと並行してプローブにより検出された磁束は磁束計に取り込まれ電圧値に変換される。磁束計はデジタルオシロスコープに接続されており、光センサのパルスと測定値がデジタルオシロスコープに同時に記録される。さらに、デジタルオシロスコープに記録された測定値はメモリカードによりコンピュータに取り込ませることができる。これによって、胸部の磁界強度分布が正確な位置情報に対応して計測できる。

差動型プローブを使用することにより環境ノイズ(地磁気と都市雑音)を除去することができる。このため、非常に高感度([nT]領域)の磁束密度を計測することができ、シールドルーム外でも信号源だけを読み取ることができる。

さらにフラックスゲート型磁束計は、その場の磁束密度変化量を計測するため、プローブ自身を動かすとノイズを拾う。このため、被験者を乗せた計測台を等速で動かさなければならない。

エ. 結果表示の改良

測定された肺磁界強度を、単に数値として現すだけでなく、胸部の各部位に対応させて視覚的に表示できるようにした(図23)。被験者への結果説明の際、とくに肺内に粉じんの蓄積が見られる作業においては、粉じん吸入の防止指導等、健康障害の一次

予防のための労働衛生教育に役立てることが期待できる。

オ. 現場での計測前のシミュレーション実験

本実験では、作業者の代わりに人間の肺モデルを作り、プローブから4[cm]離して酸化鉄粉じん(Fe_3O_4)10[mg]を肺モデル内に設置した。これは、肺内に粉じんが含まれていることを仮定し、シミュレーションを行うものである。本実験研究で使用した酸化鉄粉じんを磁化する際、粉じんを磁化コイル表面からの距離 $h=4$ [cm]とし、コイルの中心($R=0$)に置き磁化した。4[cm]離すと酸化鉄粉じんに磁束密度約50[mT]を与える。

図24の結果は、計測台を往復させた時に計測されたパルスと磁化鉄粉じんの作る磁束密度を示している。このため、1つの磁化鉄粉じんが作る磁束密度を2回計測し、光センサパルスがoffになる位置約6秒を基準として左右対称の結果がでている。この結果は、本装置によって磁性粉じんが的確に検出されることを示している。なお、図右側の磁束密度の基線が多少ずれているのは都市雑音によるものである。都市雑音は地磁気と違い、時間や場所によって大きく変動する。

4. 溶接作業における作業の現場での調査

改良を加えて最終的に完成した可搬型装置を用いて、溶接作業に対する肺磁界測定を実施した。

ア. 対象者

平成18年12月5日、19年2月1、2日に、大田区の昭和島鉄鋼団地、および京浜島工業団地内の3社、計14名のおもに溶接作業に従事する作業員(溶接は行わないが、鉄鋼製品のサンダーがけ作業など、含鉄粉じん曝露作業員2名を含む)を対象に計測を実施した。対象者は全員男性で、年齢は26歳から68歳、1名を除き喫煙歴があり、9名が現在喫煙者であった。溶接作業歴は数年のものから、40年に及ぶものまで幅広く、また多くが、溶接以外に、製品のサンダーがけ、研磨などで、含鉄粉じんに曝露する可能性のある作業に従事していた。

イ. 測定の実施

図25、26は磁化器と磁化の様子を示す。磁化器を胸壁、あるいは背面に当てて磁化することで、肺内を50mTの強度で磁化す

る。磁化後被験者はすみやかに測定台に乗り、胸壁面から残留磁界強度を測定した。図 27、28 に示すように、測定台前面に取り付けられたアクリル板に密着することで、磁束計プローブとの距離を一定にしている。測定台は手で左右に移動させた。

上下の位置は、原則として乳頭を結ぶ水平面を基準に、その上下各 2 面、計 5 面を水平方向に走査して測定した（図 29、ライン 1~5）。今回は時間の制約もあり、原則として胸壁面からの測定を行ったが、一部の被験者では背面からの測定も実施した。

図 30、31 に、実際の測定で得られた磁界強度の記録図を示す。一定面を左右に移動させたときの変化がプロットされており、図中の縦線が測定台の位置を示す光センサのパルス出力を示す。これらの位置情報と磁界強度変化から、ノイズによる変動を補正して、肺内磁界強度を計算にて推定した。

ウ. 測定結果

各被験者について、溶接粉じん量に換算した測定結果を、各対象者の背景情報とともに表 2 に示す。換算には、溶接ヒュームの正確な磁化率の測定が必要になるが、今回は、各作業場で粉じんを採取することができなかったため、これまでに肺磁界を計測した約 3000 名の作業者が働いている現場で採取した粉じんの磁化率を用いた。その換算係数は、粉じん 1mg が 10cm 離れた点で発生する磁界強度を 0.035nT としている。

作業歴の長さや推定された粉じん量は必ずしも相関していなかった。溶接に伴う曝露量は、作業の密度や材料の種類、溶接方法によっても異なり、また作業者が呼吸保護具をどの程度使用するかによって大きく異なる。またいったん呼吸器に蓄積した粉じんも、1 年あたり 10-20% 程度排出されると推定されることが報告されている。また今回の対象者では、溶接以外に含鉄粉じん曝露作業を行うものが多かったことも、溶接作業歴と肺磁界強度が単純に相関しなかったことの一因であると考えられる。

学生ボランティアなど磁性粉じんに曝露していない被験者では肺磁界測定で磁界強度の変動が記録されることはないため、今回の結果は、溶接作業における肺内粉じんの蓄積を感度良く検出できることを示したものと考えられる。

D. 考察

職業環境における粒子状物質（粉じん）の吸入による生体影響として、無機性粉じんの吸入によるじん肺（pneumoconiosis）が古くから知られている。わが国では近年作業環境の改善がめざましく、古典的な粉じん作業におけるじん肺の新規発生はごく少なくなったが、溶接作業では依然として新規のじん肺発生が少なくない。また溶接ヒューム以外でも、産業の場で取り扱われる粒子状物質のサイズは、ミクロンからサブミクロンオーダーへと従来よりも微小化しており、これらの粒径の小さな粒子は、吸入された際に肺の深部に到達する可能性が高くなることから、じん肺は現在でもなお労働衛生上重要な問題であると考えられる。

標準化された胸部レントゲン写真やヘリカル CT などの画像検査、また肺機能検査は、労働衛生管理の上からも利用可能な鋭敏な検査法であるが、あくまでも粉じんの吸入によって生じた生体反応を検出する検査であって、粉じんの曝露量自体を反映するとは限らない。したがってじん肺健康診断などの二次予防の手段としては有効であっても、じん肺の発生を未然に予防する一次予防の手段としては必ずしも十分ではない。したがって、粉じんによる呼吸器障害の一次予防を進める上で、肺内に吸入され、蓄積した粉じん量の適切な指標があればきわめて有用であると考えられる。

溶接作業で発生する溶接ヒュームは、主成分が酸化鉄であり、強い磁性を有する微細な粒子である。このような物質の磁性を利用することで、その物質が肺内にどの程度存在するかを非侵襲的に調べる肺磁界測定法では、粉じんによる生体反応を測定するのではなく、粉じん量そのものを反映する指標が得られるので、健康影響の発生を未然に防止する一次予防のために有用である。とくに同一の作業環境で同一の作業を行っても、作業個人個人の曝露量が大きく異なることはしばしば経験されることであり、このような場合の個々の作業における曝露評価にきわめて有用である。また肺機能などの生体機能指標とのサブクリニカルなレベルでの関連性が認められ、健康リスク評価にも有用であると考えられる。

本格的な肺磁界計測装置は精密できわめ

て感度の高い計測を可能にするが、その一方で移動が困難であるため、計測を必要とされる作業者は、その施設まで来る必要がある。このことは被験者にとって大きな負担であり、とくにまだ障害が発生しない段階でこれを予防しようという目的で行う計測においては、利用を困難にする大きな要因であった。今回開発した可搬型測定装置は、作業の現場で容易に測定ができることを目的にしており、設置型の装置とほぼ同等の感度、精度を有するもので、曝露評価、健康リスク評価における積極的な利用が期待される。

本装置は、少なくとも溶接作業者においては、作業の現場での計測が可能であり、以下のような具体的な利用が考えられる。

ア. 健康診断／スクリーニングとしての利用
肺内粉じん沈着量の多いものをピックアップし、ハイリスク集団を抽出することができる。

イ. 労働衛生教育における利用

粉じん沈着の肺内分布を視覚的に提示することで、溶接ヒューム吸入の実態とそのリスクを認識させ、以降の作業におけるより安全な作業に関する教育に利用できる。

ウ. 精密検査としての利用

胸部レントゲン検査などで何らかの所見が見られた場合、その所見に一致して溶接粉じんの沈着が見られるかどうかを、肺磁界強度の肺内分布から検討できる。

本研究の期間内には検討できなかったが、溶接作業以外にも磁性を有する粉体を取り扱う作業が存在するので、それらの作業において、肺磁界測定法および今回開発した可搬型機器の有用性をさらに検討することが必要であると考えられる。

E. 結論

1. 標準的な手技による肺磁界測定は、溶接作業者における曝露評価、健康リスク評価に有用であることが確認された。
2. 肺磁界測定装置の各パーツの小型化、軽量化を行い、作業の現場での測定が可能で、設置型の装置とほぼ同等な感度、精度を有する可搬型肺磁界測定装置を開発した。
3. 本装置は、溶接作業等の磁性粉じん曝

露作業における曝露評価、健康リスク評価に有用であると考えられ、具体的な利用として、作業者の健康診断／スクリーニング、労働衛生教育、精密検査などが考えられる。

4. 溶接作業以外での利用の可能性については今後さらに検討する必要がある。

F. 健康危険情報

とくに記載すべきものはない。

G. 研究発表

とくに記載すべきものはない。

H. 知的財産権の出願・登録状況

I. 特許取得

H、I ともとくに記載すべきものはない。

参考文献

- Parkes, WR: Occupational lung disorders, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.
- Cohen, D: Report of the low-field group: the magnetic field of the lung. Cambridge: Francis Bitter National Magnet Laboratory: MIT, 1978.
- Nakadate, T., Aizawa, Y., Yagami, T., Zheng, Y., Kotani, M., Ishiwata, K: Occup Environ Med 1998; 55:673-3.
- Nakadate, T., Yagami, T., Zheng, Y., Kotani, M., Nishida, A.: Proceeding of BIOMAG2000. Espoo: Helsinki University of Technology, 2001: 1023-26.
- Zheng Y, Kotani M, Utsukawa Y, Nakadate T: Development of a Portable Pneumomagnetic Measurement Device. Neurol Clin Neurophysiol 2004;10(Nov 30):1-5.

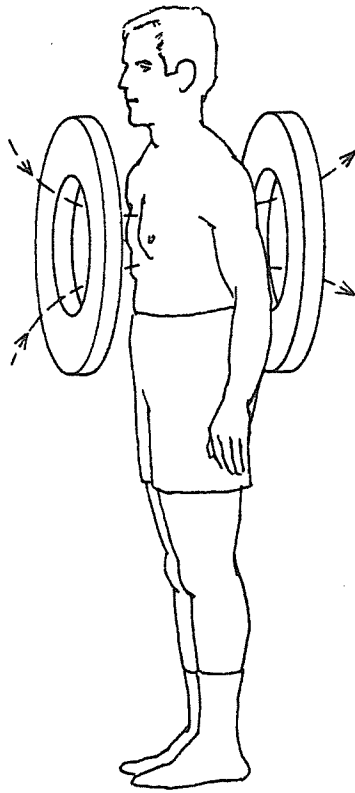


図 1 外部磁界による肺の磁化
(Cohen 1978)

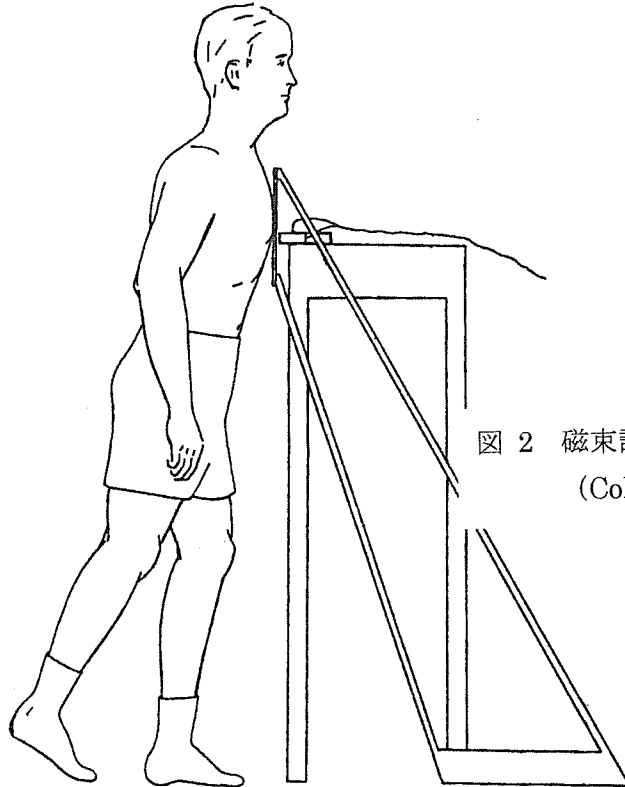


図 2 磁束計による肺磁界測定
(Cohen 1978)

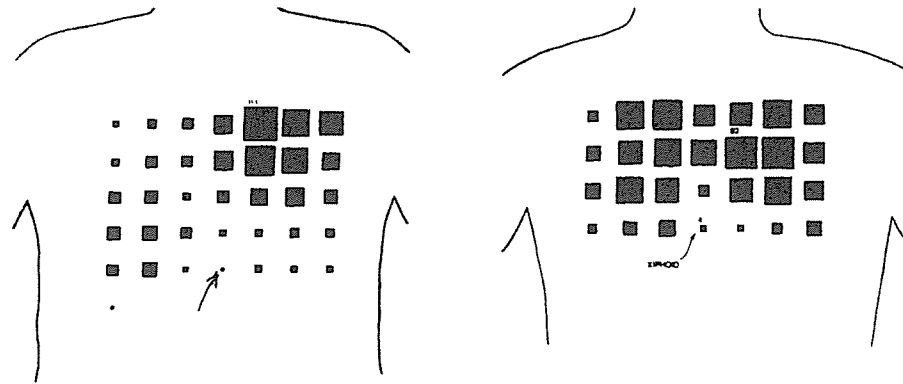


図3 磁性強度肺内分布の推定 (Cohen 1978)

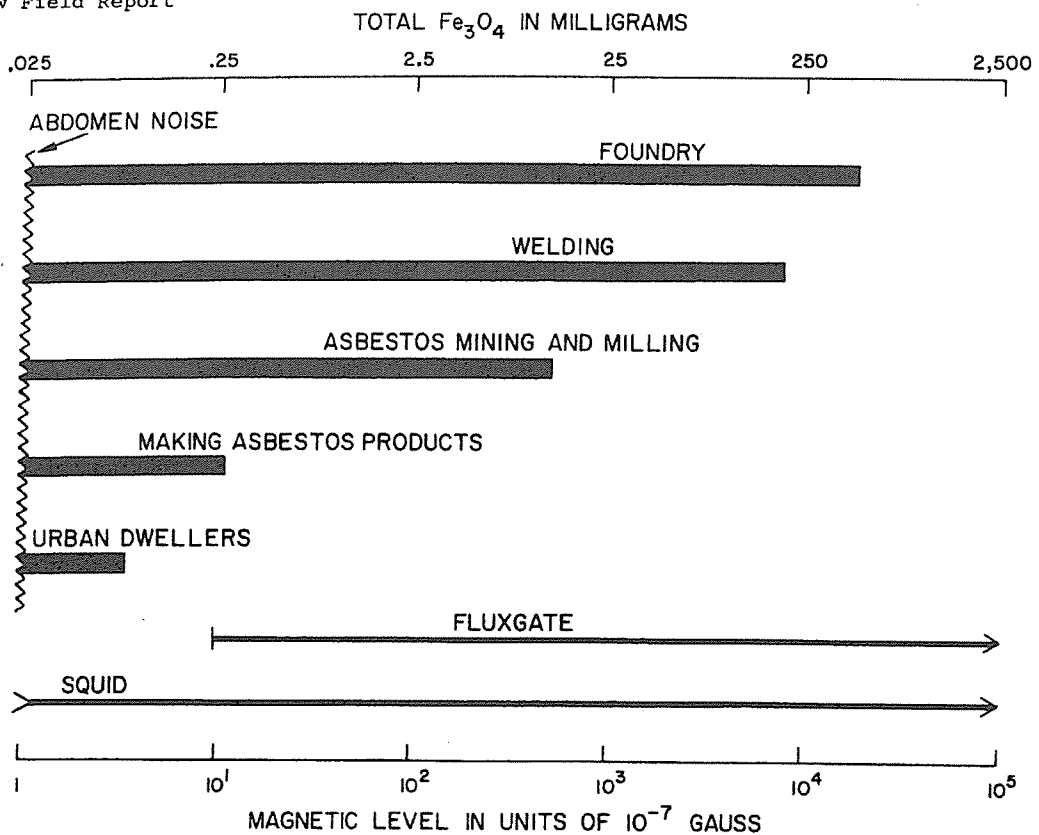


図4 種々の職業における磁性強度 (Cohen 1978)

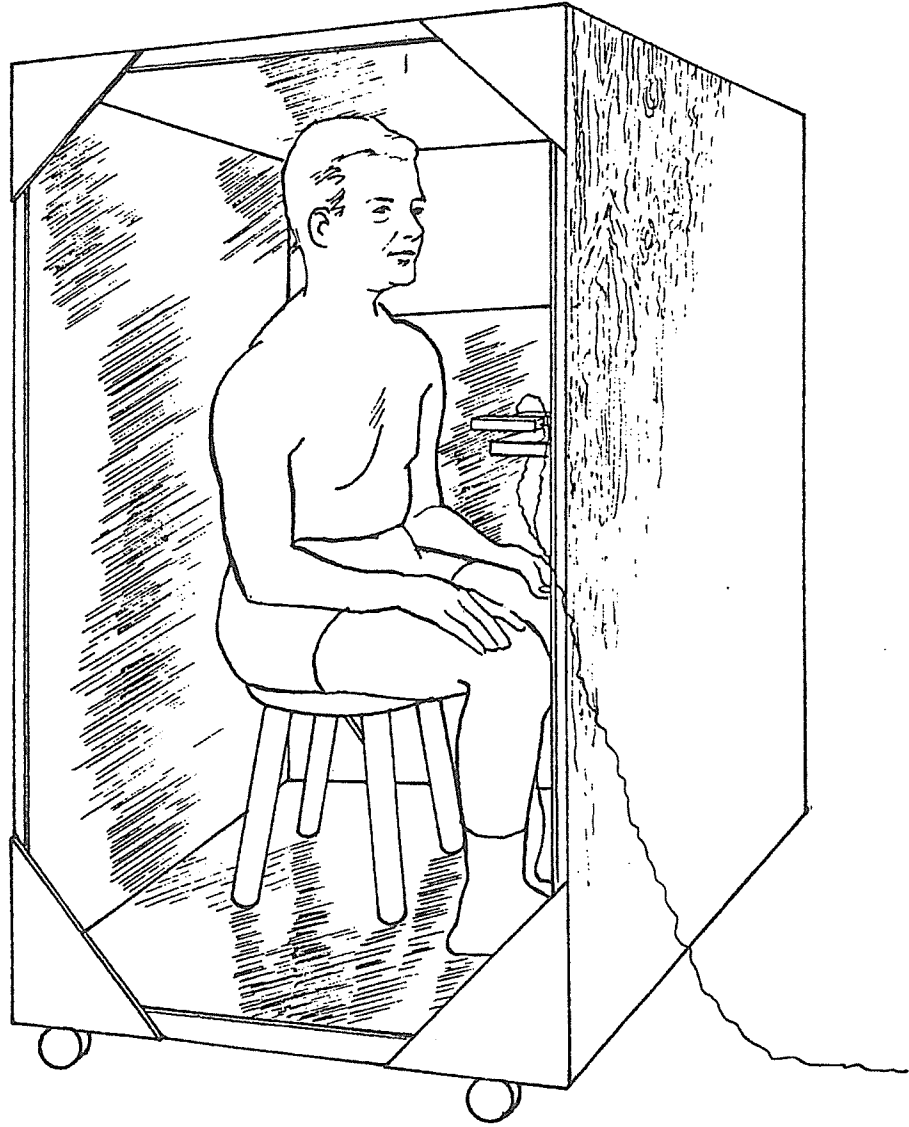


図5 磁気シールドを用いた肺磁界測定



図 6 外部磁化装置による胸部の磁化

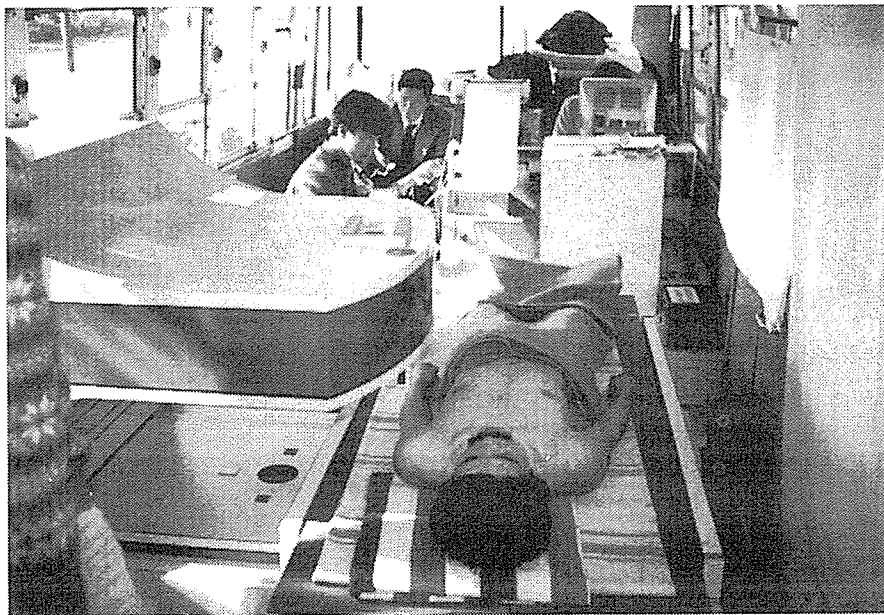


図 7 Fluxgate 型磁束計を用いた残留磁界強度の測定

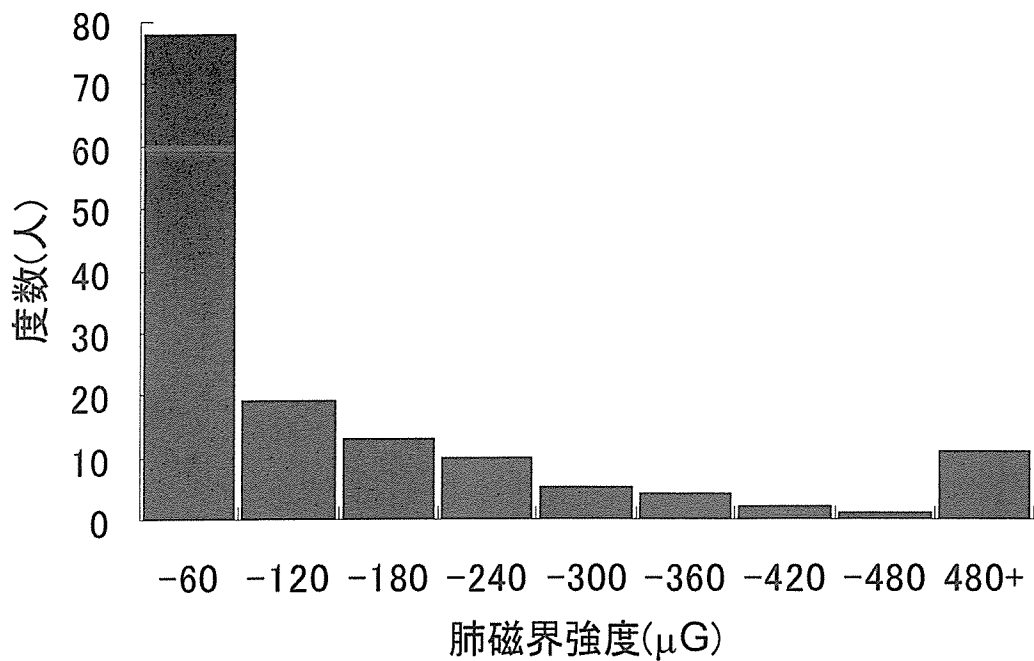


図 8 溶接作業における肺磁界強度の分布

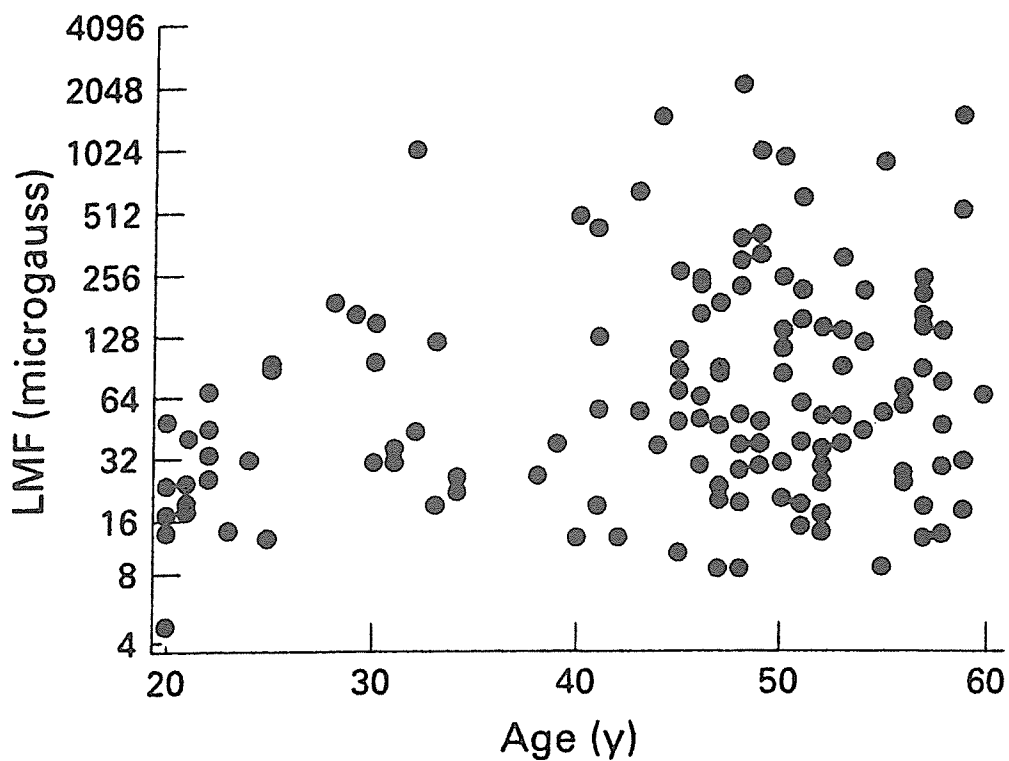


図 9 溶接作業における年齢と肺磁界強度の関連

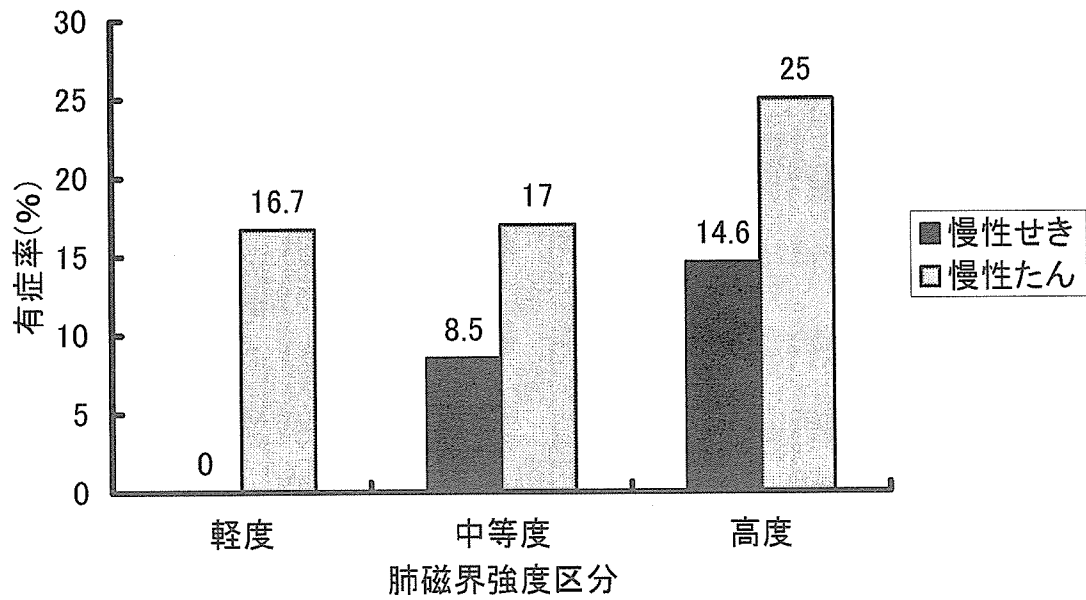


図 10 溶接作業における肺磁界強度と慢性呼吸器症状有症率の関連

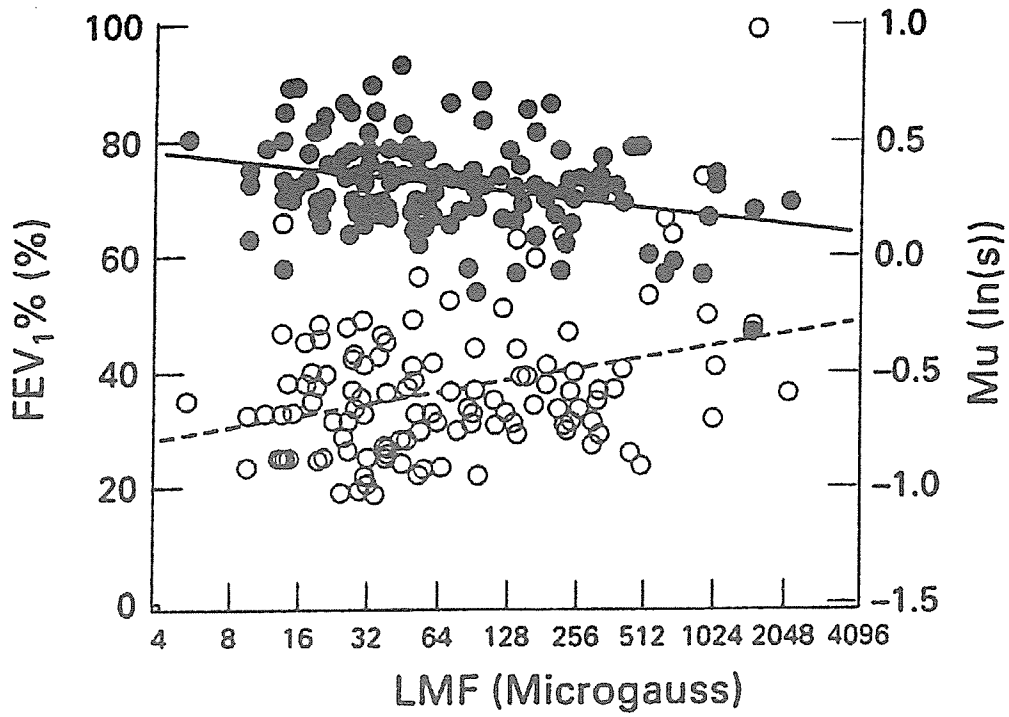


図 11 溶接作業における肺磁界強度と肺機能の関連

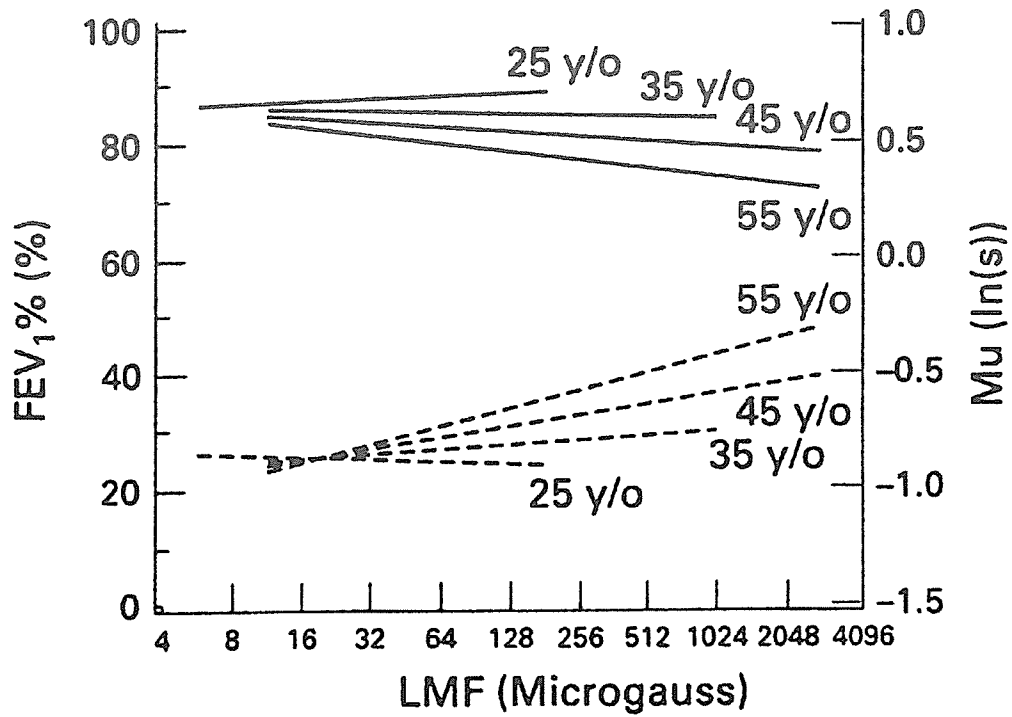


図 12 溶接作業における肺磁界強度と肺機能の関連に及ぼす年齢の影響

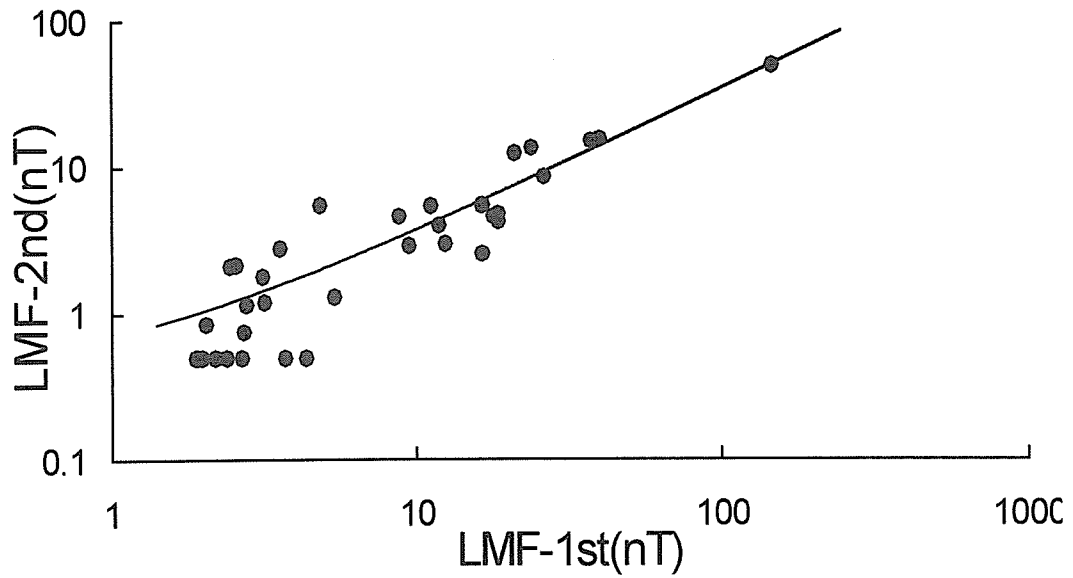


図 13 溶接作業における肺磁界強度と 4 年後の値の関連

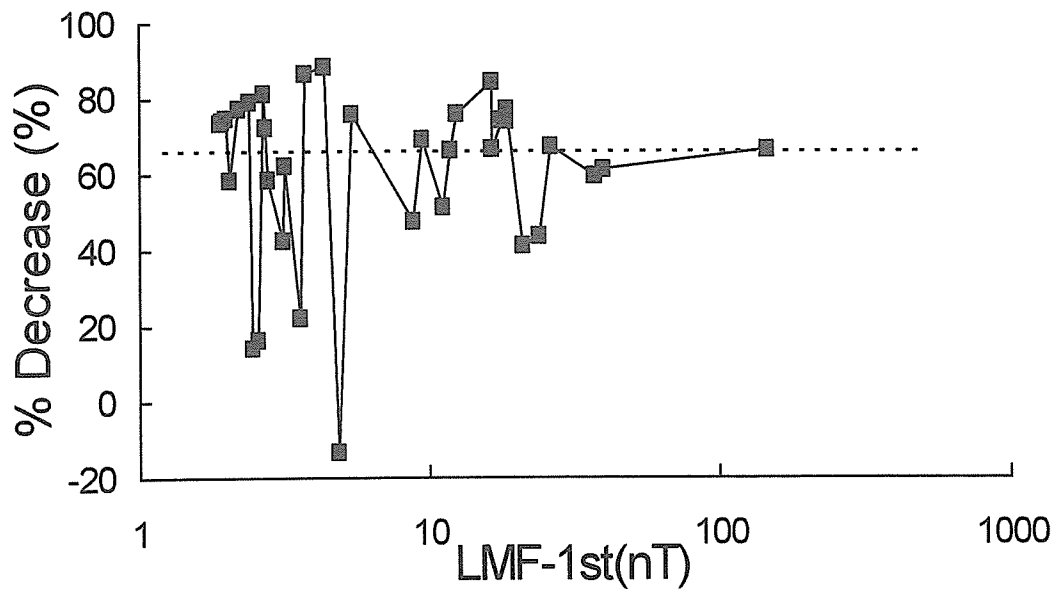


図 14 溶接作業における肺磁界強度の変化率 (減少率)

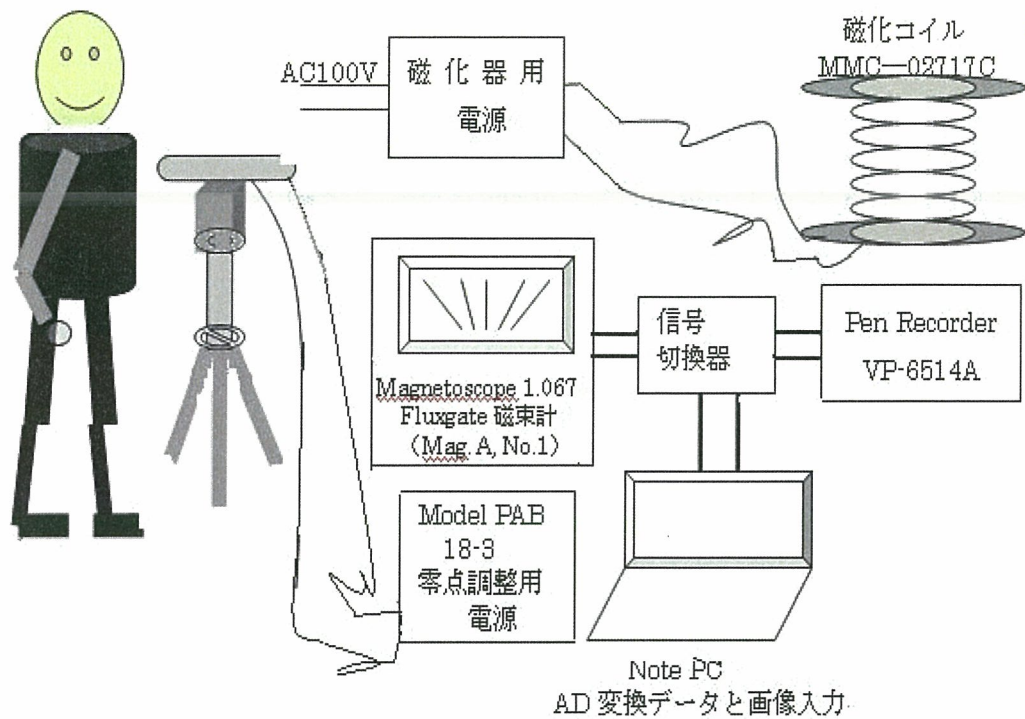


図 15 携帯型肺磁界測定装置の構成

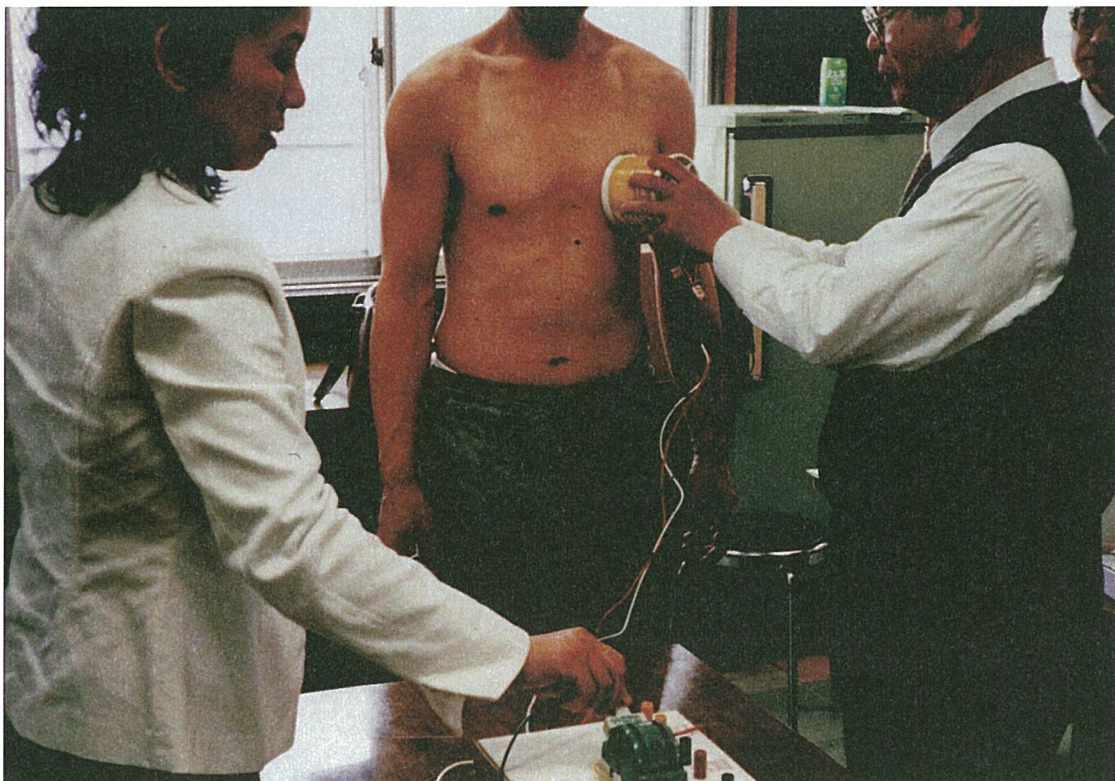


図 16 小型磁化器による肺の磁化

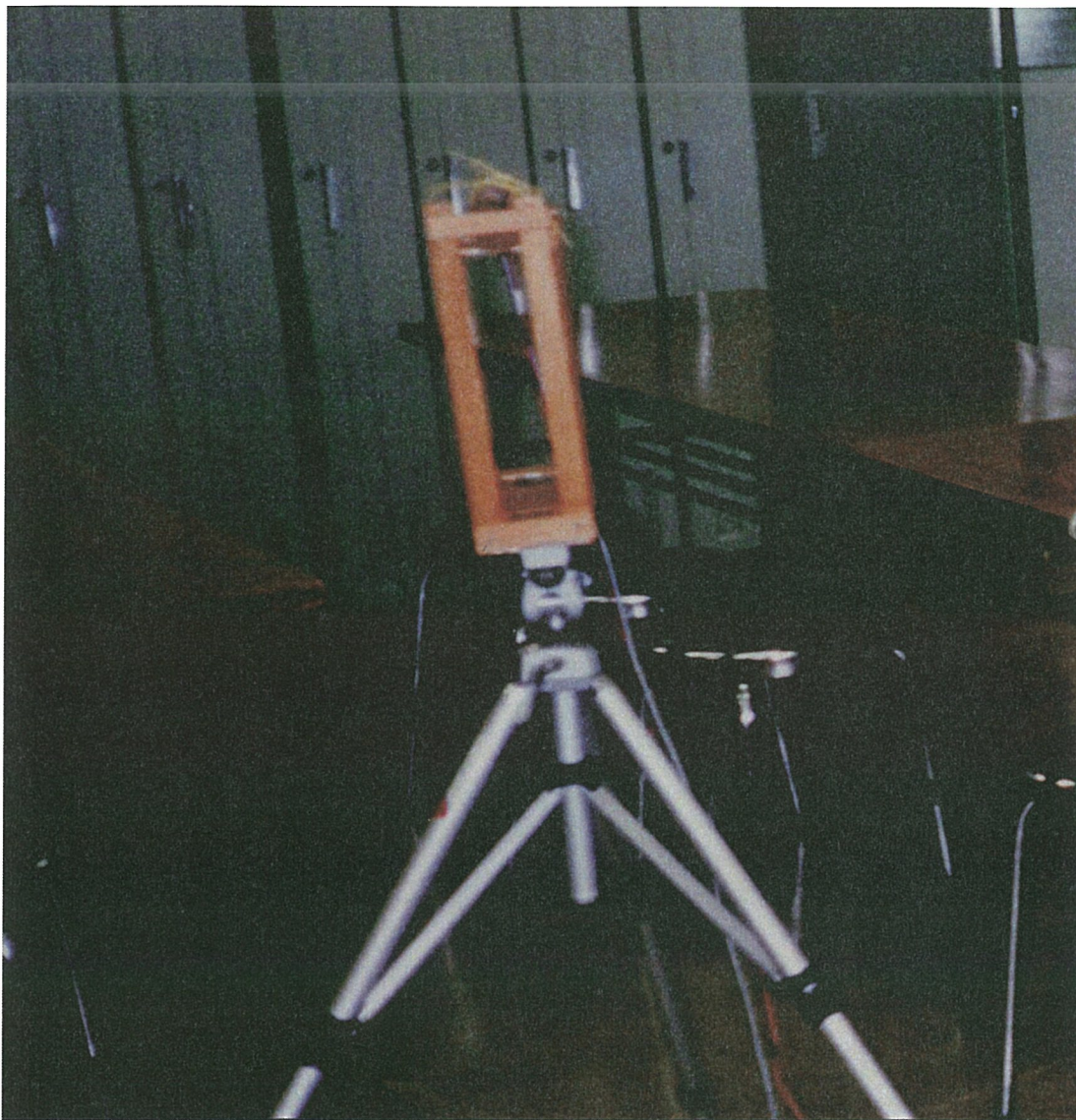


図 17 三脚にセットされた Fluxgate 型磁束計

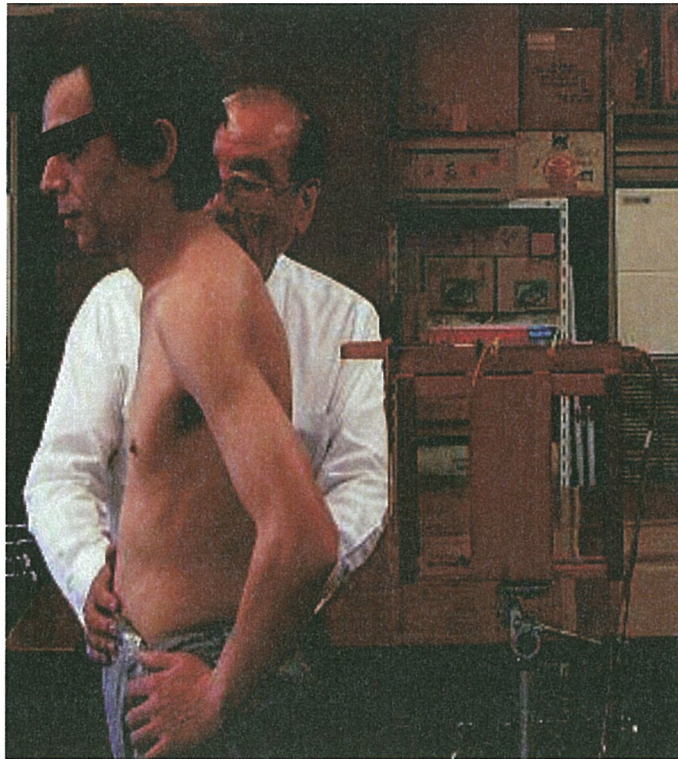
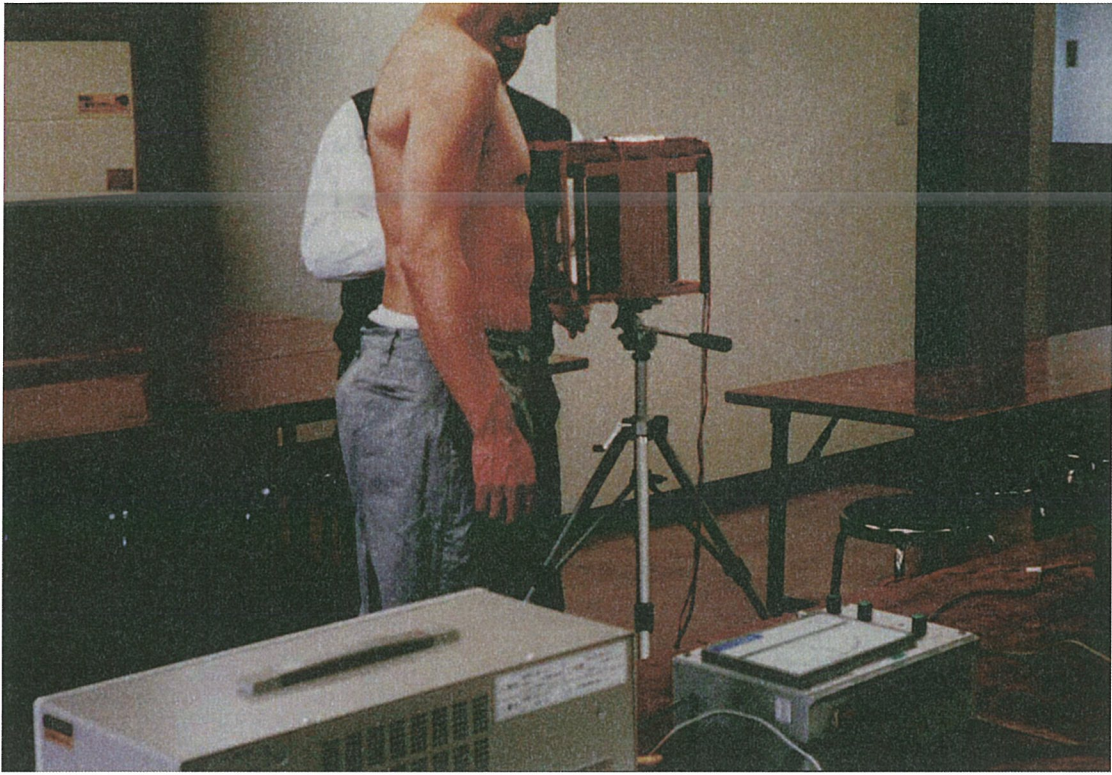


図 18 三脚上の Fluxgate 型磁束計による肺磁界測定

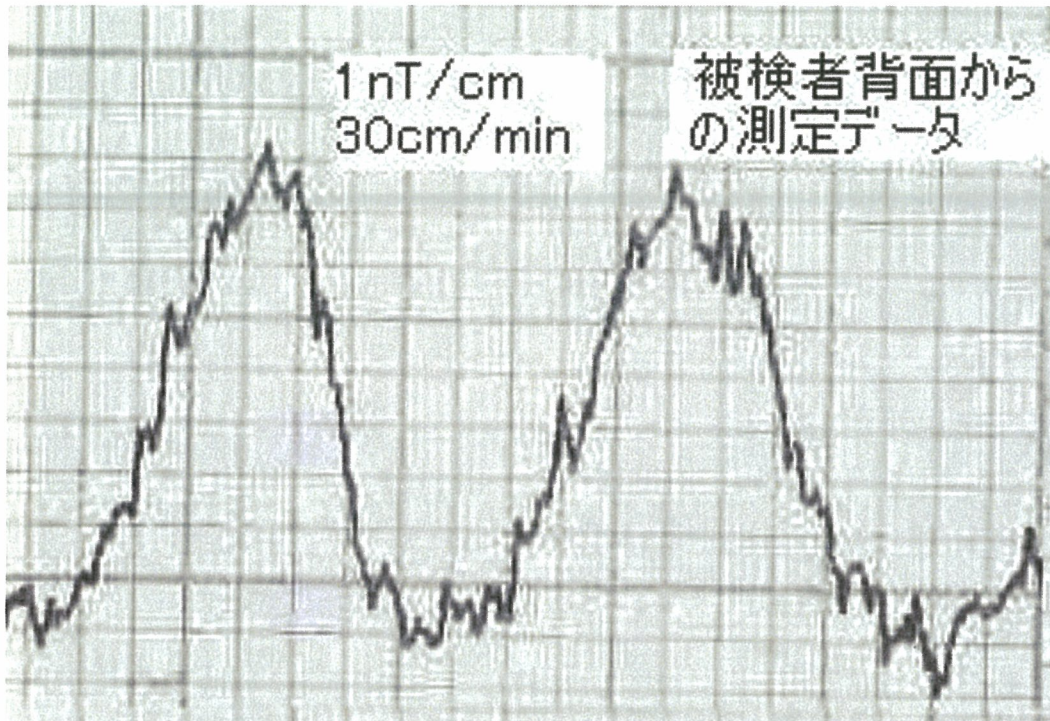


図 19 測定手技にともなう肺磁界強度の時間変化

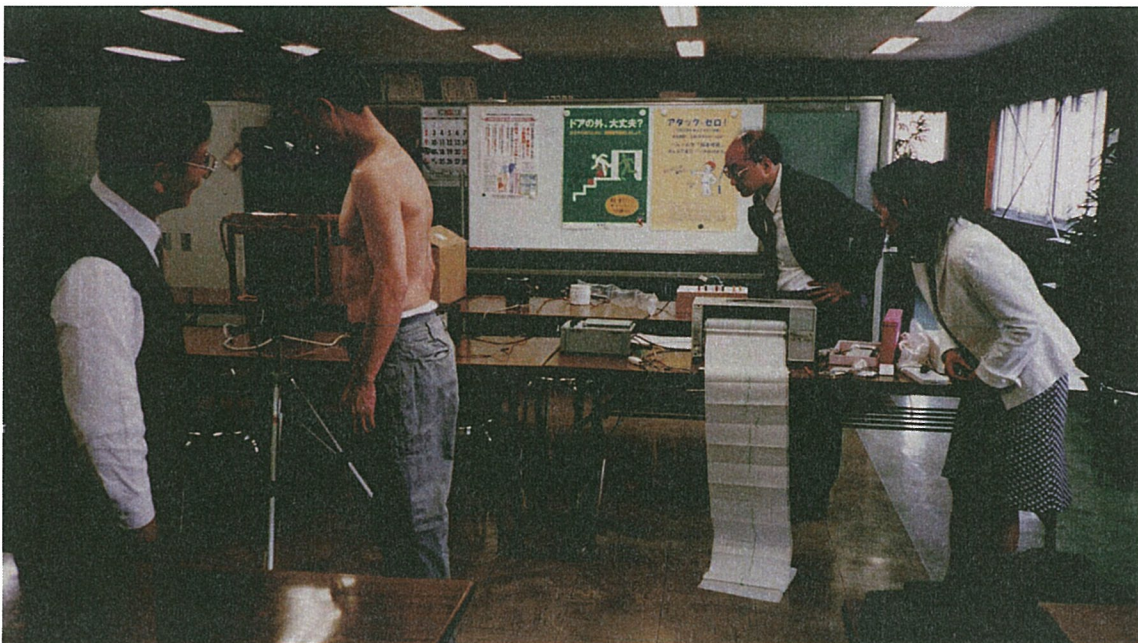


図 20 携帯型肺磁界測定装置による測定風景

表 1 携帯型測定装置(試作機)による溶接作業者の肺磁界強度パイロット調査

ID	年齢	職歴 (年)	粉じん歴 (年)	溶接歴 (年)	喫煙 (年)	磁化時間 (ms)	最大電圧 (V)	最大磁束密度 (nT)	
TN	23	7	6	6	0	100	280	前胸壁0.6以下 (測定不可)	
AM	55	6	20	0	32	100	280	前胸壁0.6以下 (測定不可)	
OJ	42	18	18	18	0	100	280	左上前胸壁 1.4	左上背中 1.8
HK	38	4	12	12	19	100	280	右上前胸壁 1.3	左上背中 1.7
MS	58	37	37	37	39	100	280	左下前胸壁 1.4	右下背中 2.0

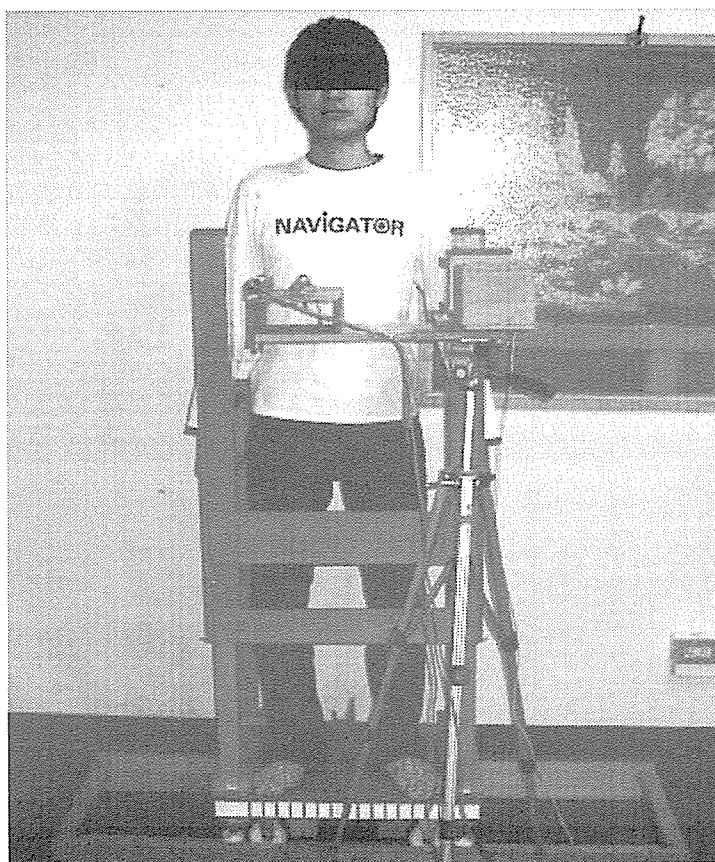


図 21 改良型肺磁界測定装置の概観

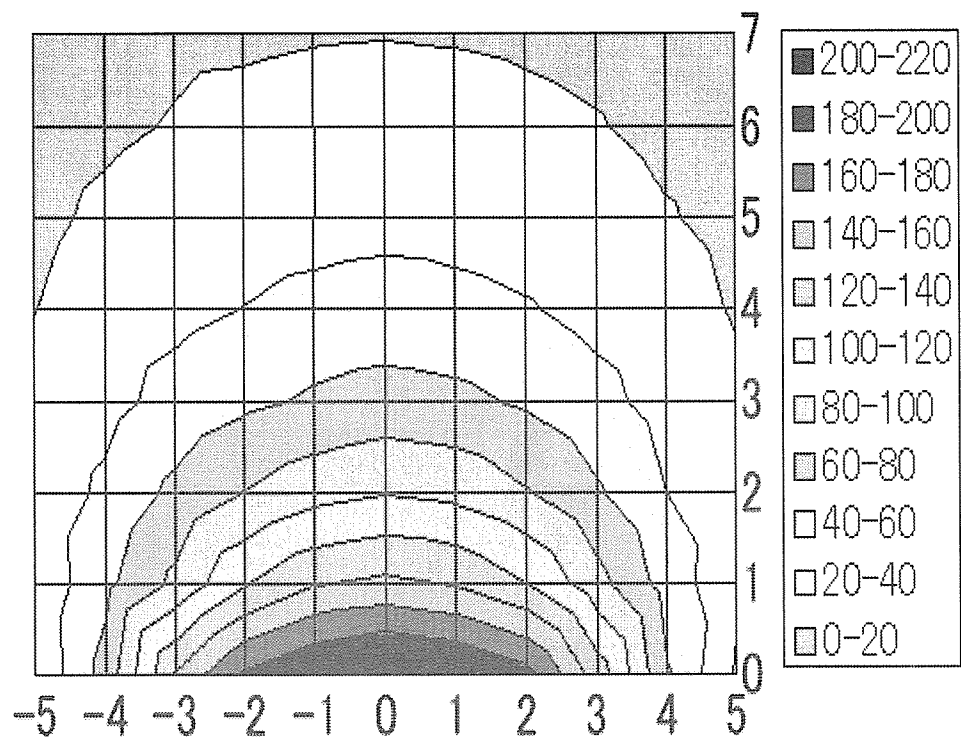


図 22 改良型肺磁界測定装置の磁化コイルの特性

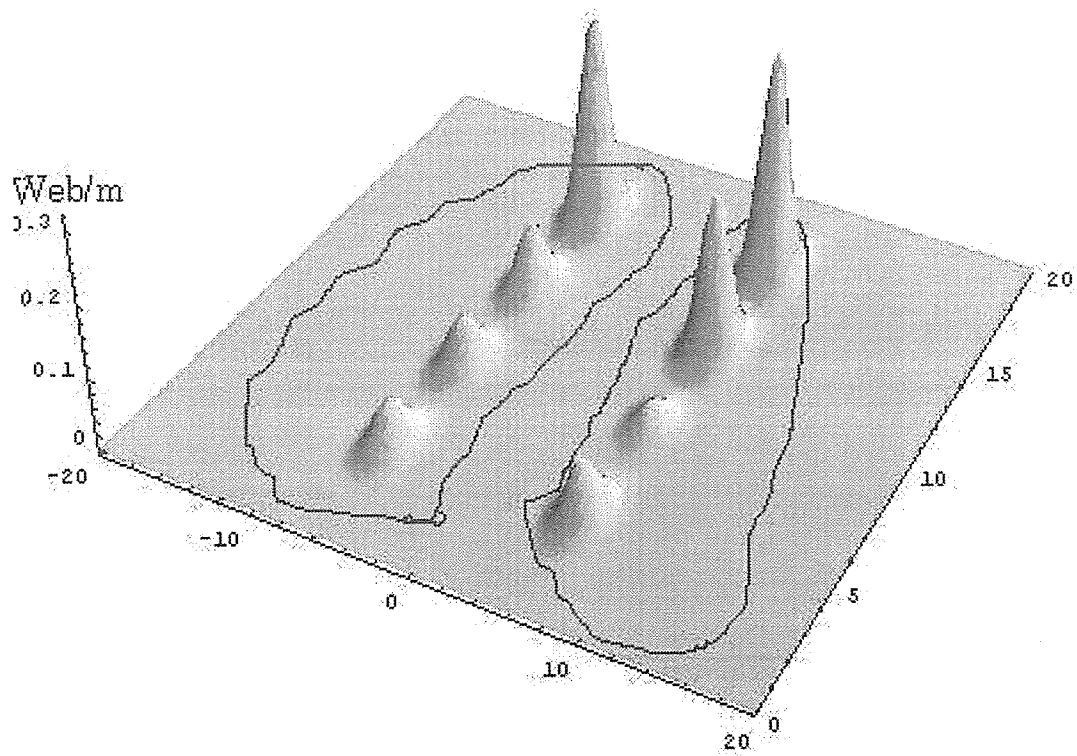


図 23 肺磁界測定結果の視覚的表示