



脳内の情報処理のしくみを追い求めて

——武者研究室～電子システム専攻——



武者利光教授

武者教授といえば「1/f ゆらぎ」に関する研究の世界的権威であるということは、その気さくなお人柄ともども知っている人も多いと思う。

その武者教授が人間の脳に関する大変面白い研究をされていることを最近知った。そして今回教授の研究

室を訪れる機会を得、いま研究を進めておられる「脳内信号の追跡」のお話や1/f ゆらぎ発生のメカニズムのこと、さらに教授の研究に対するお考えなど、さまざまなこととお伺いすることができた。



脳の中の電気信号の位置を知るには

我々人間(多くの動物も同じ)の体内の情報伝達には、ホルモンなど化学的手段も用いられるが、最も一般的に使われているのは迅速な電気的手段、すなわち神経である。神経回路もその結合部では化学物質で伝達を行っているから純粋な電気回路とも違うのだが、人間は電氣的パルスの制御で動いているとってまず間違いない。

例えば触覚をみると、皮膚の下で感覚細胞が刺激の強さに応じた密度(間隔)の電流パルスを発し、この情報が神経軸索という細胞によって脳まで伝えられる。脳において、パルスはシナプス(注1)によって脳細胞から脳細胞へと運ばれ、最終的

には大脳皮質の体性感覚野と呼ばれる皮膚感覚などをつかさどっているところに終端する。そこでさまざまな情報処理が行われることによって「モノに触った」ということが分かるのである。

脳内では、電気信号は非常に複雑な神経回路の中を伝達する。この複雑さが変化に富んだ人間の活動を生み出しているのだが、この信号パルスの流れを3次元的に把握しようというのが教授のグループが進めている研究である。

通常、脳細胞の内部は外部に対して負の電位に保たれている(分極状態)。この脳細胞に細胞膜を通してイオン電流がパルス状に流入し分極状態が一時的に消失する(脱分極)状態が細胞の電氣的な興奮である。興奮はすぐ収まり、内部の電位も元に戻る(再分極)のだが、このとき活動電位と呼ばれるパルス状の正電位が発生する(図1)。従って、脳内の電気信号パルスは脳細胞の興奮による活動電位として伝わっていくのである。この活動電位パルスによって細胞外部の組織に微小電流が流出する。この流出した電流は再び細胞内に戻るため、この電流源、すなわち

注1：シナプス

脳細胞の接合部位。脳細胞の興奮という情報は、ここでの化学的作用によって次の脳細胞へと伝達される。

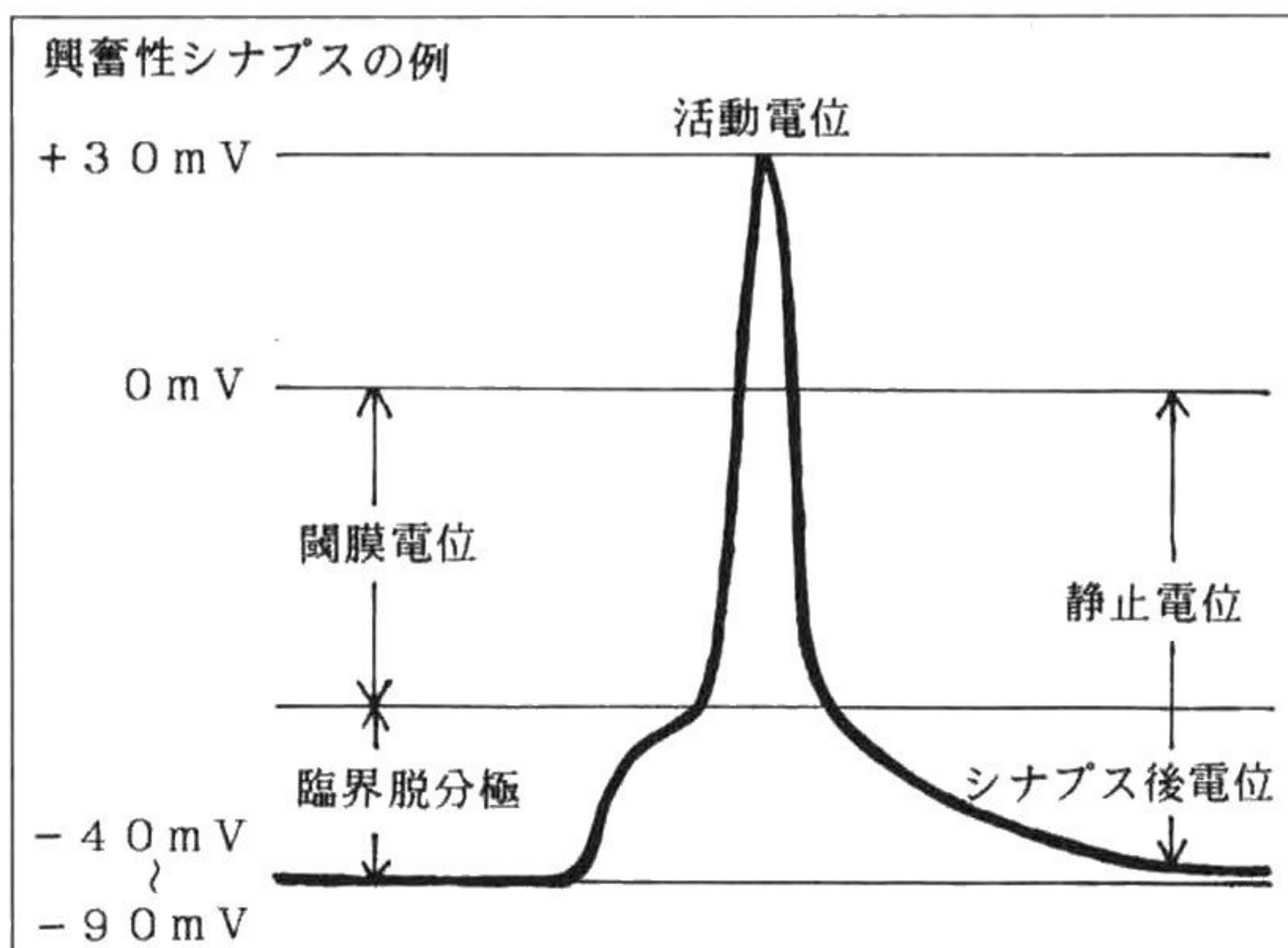


図1

細胞外を基準とした
細胞内電流の変化

細胞の電氣的興奮は近似的に「電流双極子(注2)」と見なすことができる。

この組織に流れ出た電流は脳内に電位変化をもたらし、この電位変化は頭皮上でもわずかながら観測される。この電位分布を測定し、細胞の

電氣的興奮を電流双極子と見なしたときに測定結果を最もよく近似する電流双極子の位置・方向を求めることにより、その時活動していたシナプスの位置や電流の流れる方向が推定できるのである。

注2：電流双極子

極めて接近して存在している2点の間を電流が流れているものを、電流双極子という。電流の大きさを I 、2点の間の距離を δ としたとき、電流の流れる向きに大きさ $M=I\delta$ のベクトル量を考え、これを電流双極子の双極子モーメントと呼ぶ。これを用いると、電流双極子のまわりの電位分布を比較的容易に表すことができる。



電気信号の動きを測定する。

現在行われているこの研究は、大学内でのオリジナリティーの高い研究の成果を実用化できるように企業に資金援助を行っている科学技術庁の「新技術事業団」という団体のプロジェクトに参加中で、使われている装置もこのプロジェクトによって共同開発されたものである。

この装置は、頭の外形と頭皮上の電位を測定する測定装置(写真1)、測定結果を記録するマルチチャンネルデータレコーダ、そして位置推定のコンピュータからなっている。

この位置推定の方法であるが、頭の形は複雑であるため、解析的には扱えない。そのため数値計算によって求めるが、解析的でないために頭皮上の電位分布から電源の位置を求める(逆方向問題)のはその逆(順方向問題)に比べてかなり難しい。まず適当な位置・方向を持った電流双極子を仮定し、その電源のつくる頭皮上の電位分布と実際の電位分布との残差(誤差の2乗)を調べ、それが最少になるように試行錯誤的に電源

の位置・方向を動かす、といった操作を行うのである。しかし、この最適な電流双極子が必ずしも測定された電位分布に近い形をしているとは限らない。実際の電源が局在していないときには、電位分布は電流双極子のつくるものとはかなり異なった形になる。そのため電流双極子のつくる電位分布が実際のものに近いかどうかの指標を設け、求めた電流双極子が適当かどうか常にチェックする必要がある。だいたい20~30回の操作を繰り返すことによって最も測定結果をよく近似する双極子電源の位置を求めることができるのだが、この計算を行って1つの結果を求めるのに、10MIPS(1MIPS=1秒間に整数演算を100万回行う速さ)というかなり速いワークステーションを使用しても2~3秒はかかる。従って信号パルスの動きを刻一刻追跡するため、データレコーダに記録した電位分布の測定データを短い時間間隔(現在は0.5ms)で読み出し、1つ1つ計算している。

例えば右の手首に電極対を置いて電圧パルスを加えると正中神経という神経が刺激を受け、その電圧パルスは軸索を伝わって大脳皮質に達する。この時、手首に電圧パルスを加えてから12.5msほどで信号が脳に達するので、12.5ms~19.0msの間の信号の動きをこの装置で追ってみる。

頭皮上の電位分布を測定する時、外部刺激による電位変化(誘発電位)は普通非常に小さいため、常時脳内

に存在する電位(自発脳電位)に埋もれてしまい、そのままでは観測できない。しかし誘発電位は自発脳電位と異なり、外部刺激に同期していて測定の際にはほぼ同じ波形を示す。従って、200回~1,000回の測定結果の加算平均をとることにより十分なS/N比(信号と雑音の比)を得ることができるのである。

このようにして測定結果より必要なデータを取り出し、信号の位置を

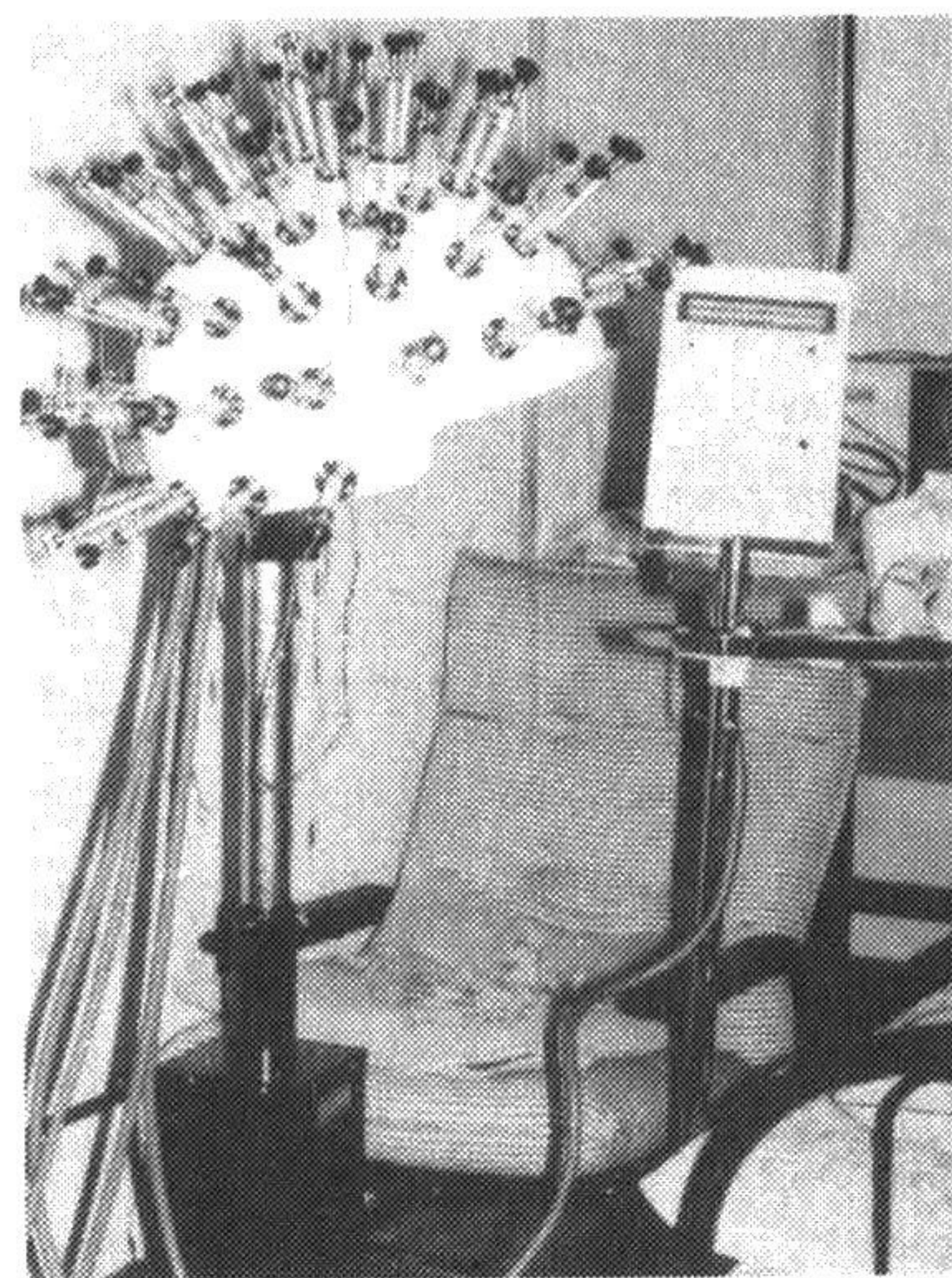


写真1 測定装置

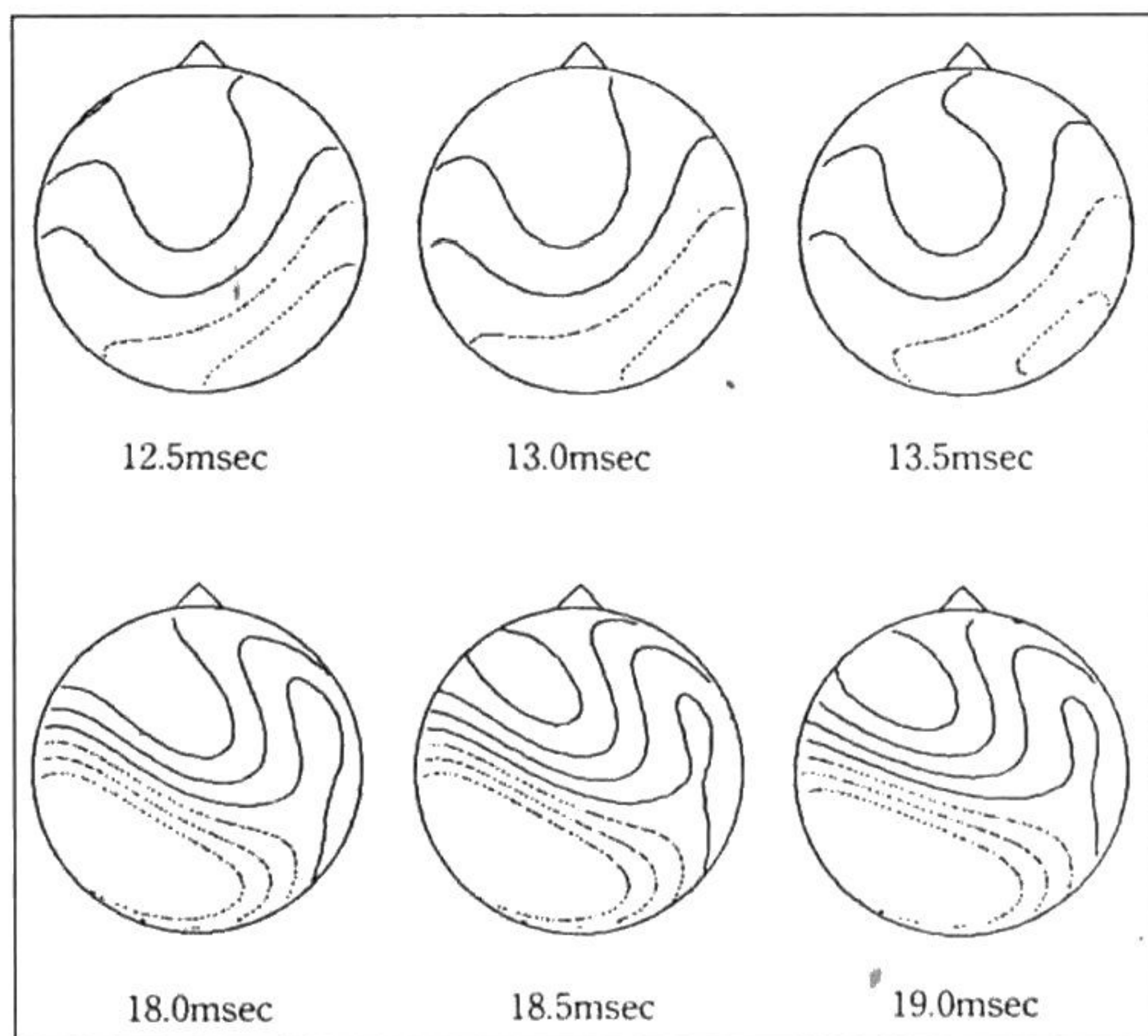
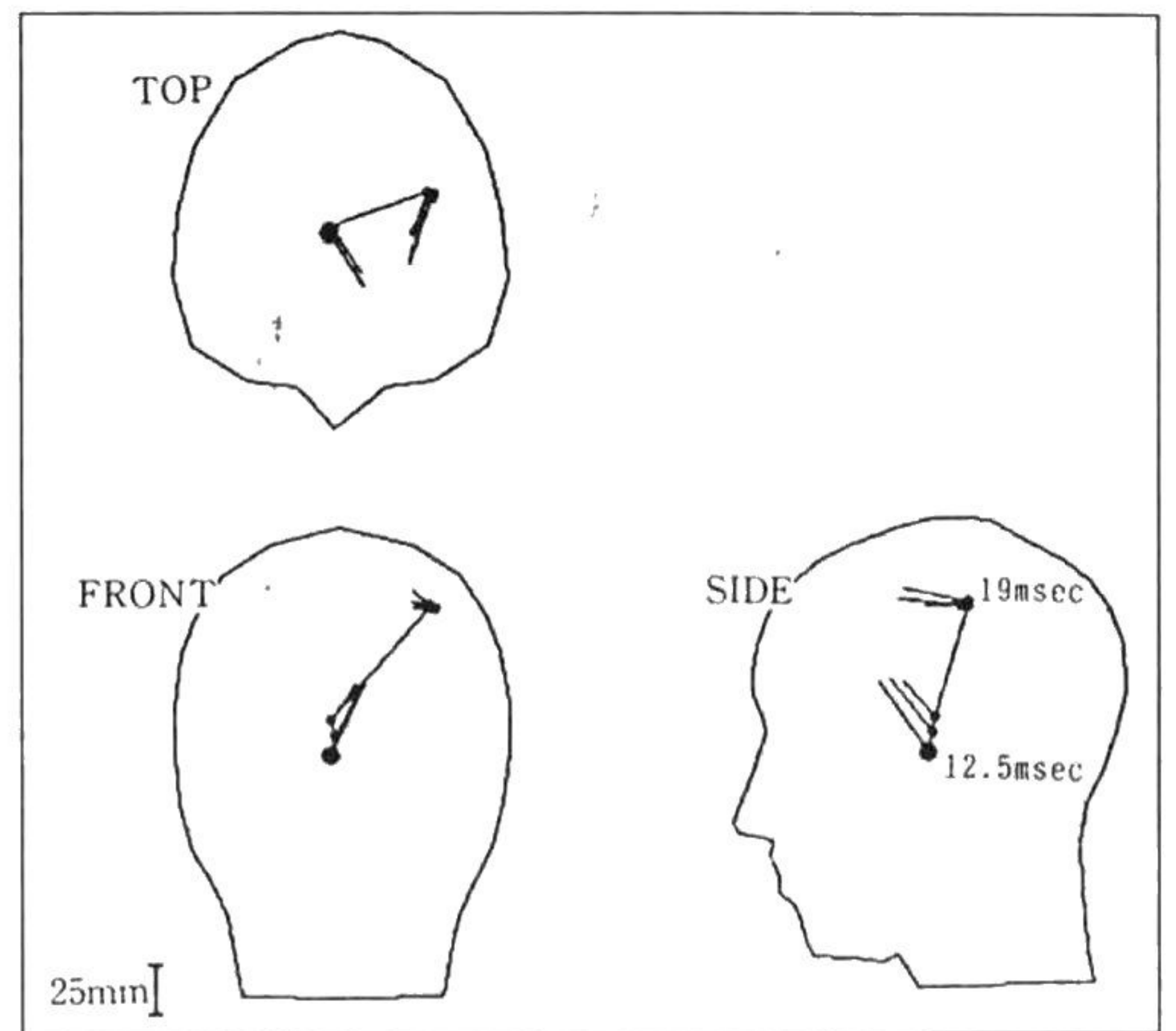


図2
正中神経に刺激を与えた時に頭皮上に現われる各時ごとの電位分布

図2の結果より推定された電流双極子の位置をモーメントの動き

図3



計算してみると、12.5ms～13.5msでは電源は脳幹部（およそ延髄から中脳のあたり）にあり、電流は上向きである。18.0ms～19.0msでは電源は

り、電流は体の前の方を向いている（図2・3）。結果を断層写真と重ね合わせてみると、信号が延髄を登ってきて大脳髓質（大脳の内部）を通り、大脳の表面にある皮質の脳溝の

内側にある体性感覚野の手首に相当する部分に出てきたことが分かるのである。



研究の応用

「てんかん」という病気がある。これは脳細胞の部分欠損などが原因となり、その周辺部の脳細胞が異常に興奮して電氣的に発振し、これが脳内に一斉に広がって脳の信号処理がストップしてしまうという病気である。今のところこの病気を治療する最も有効な手段は発振を起こす脳細胞を切除してしまうことであり、そのためには発振源（焦点という）の正確な位置を求める必要がある。現在、MRI（核磁気共鳴造影法）やX線CT（コンピュータ断層写真）などの画像による異常の発見に加えて、脳と頭蓋骨の間やあるいは脳内に直接電極を挿入して、発作時や通常の時にも絶えず発生している強いパルス（スパイク）を測定することにより

てんかんの診断

焦点の確認をしている。しかしこの方法には頭蓋骨に穴を開けて電極を入れなければならない、また電極を入れたその場所以外の情報が分かりにくいという欠点がある。

そこで教授の研究室では、前に説明した装置が脳内の電気信号の位置を求めるものであることからこの装置を「てんかん」の診断に利用しようと、いろいろな病院で臨床データを集めている。装置が開発された初期には脳内の導電率を一定として計算していたため、推定結果は不満の残るものであった。しかしこれまでの測定により導電率の不均一（頭蓋骨などの導電率が他より小さいことが原因）を補正するためのデータを集めることができたため、現在では

推定の精度は5mm以内と大変向上してきた。もうしばらく臨床試験を積み重ねていけば「てんかん」の新しい強力な診断法として広く出回るであろう。現にいくつかの大学の医学部から研究用として引き合いがあったそうである。「いずれは日本のあちこちの病院でこの装置が使われるようになり、世界にも広がっていくだろう」と教授は話しておられた。

このシステムの利用法として、教授は今述べた「てんかん」の診断の他に、脳の構造を調べるといった基礎医学的な研究、そして教授が一番興味を持っておられる「脳内の情報処理はどのように行われているか」といったことの研究などを挙げられる。



脳の情報処理のしくみを探る

脳内の情報処理に関して、教授はこの装置を使ってさまざまな興味深い実験をされている。例えばα波が脳のどこから出ているかを調べてみたところ、脳内に電源を2つ仮定す

ると測定された電位分布をよく満たすことが分かった。この2つの電源の位置は、瞑想をしているときは一定せず点々と動いているが、音楽を聞いたり暗算をしたりして脳を活動

させると一点に集まってくるのである（次ページ図4・5）。脳の精神的活動とα波の発生とには、まだ解明されていないが何か密接な関わりがあるようである。

研究室では、 α 波の他にも睡眠中や会話中の脳内信号についてなど、さまざまな実験を計画している。脳内の情報処理については分かっていないことが多いのでまだ手探り状態だが、人間の感情や動作などあらゆる生命活動を支配している脳のしくみが少しずつでも分かっていくということは、私達人間を考える上で欠かせないことであり、非常に興味深いことに思える。「まだ誰もやってないことを見付けたいと思ってるんだけどね」と笑っておっしゃる教授の何気ない一言の中に、常に独創的な研究を続けてこられた教授の研究に臨まれるお考えが集約されているように思えた。

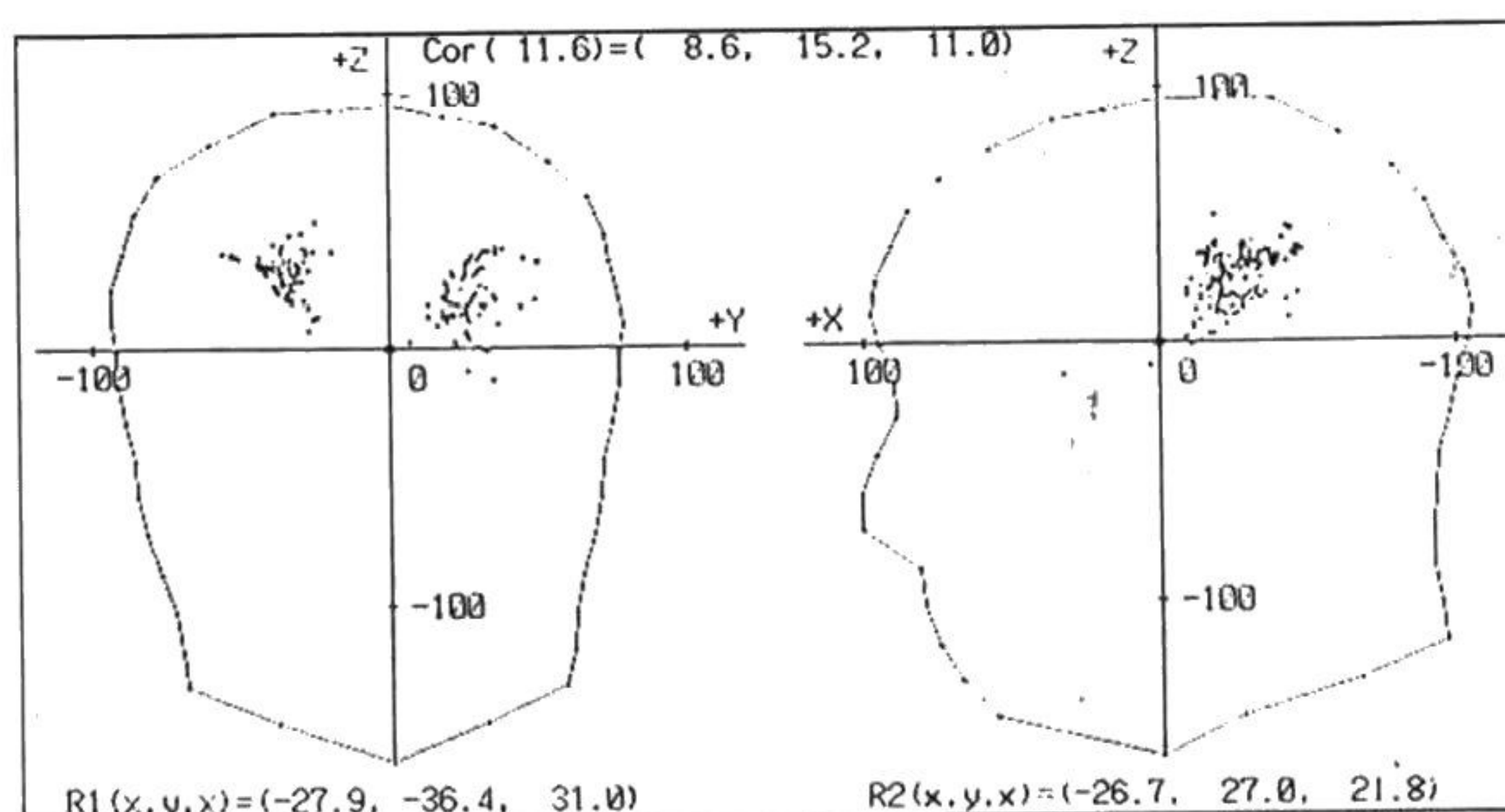


図4
安静時の α 波の電源

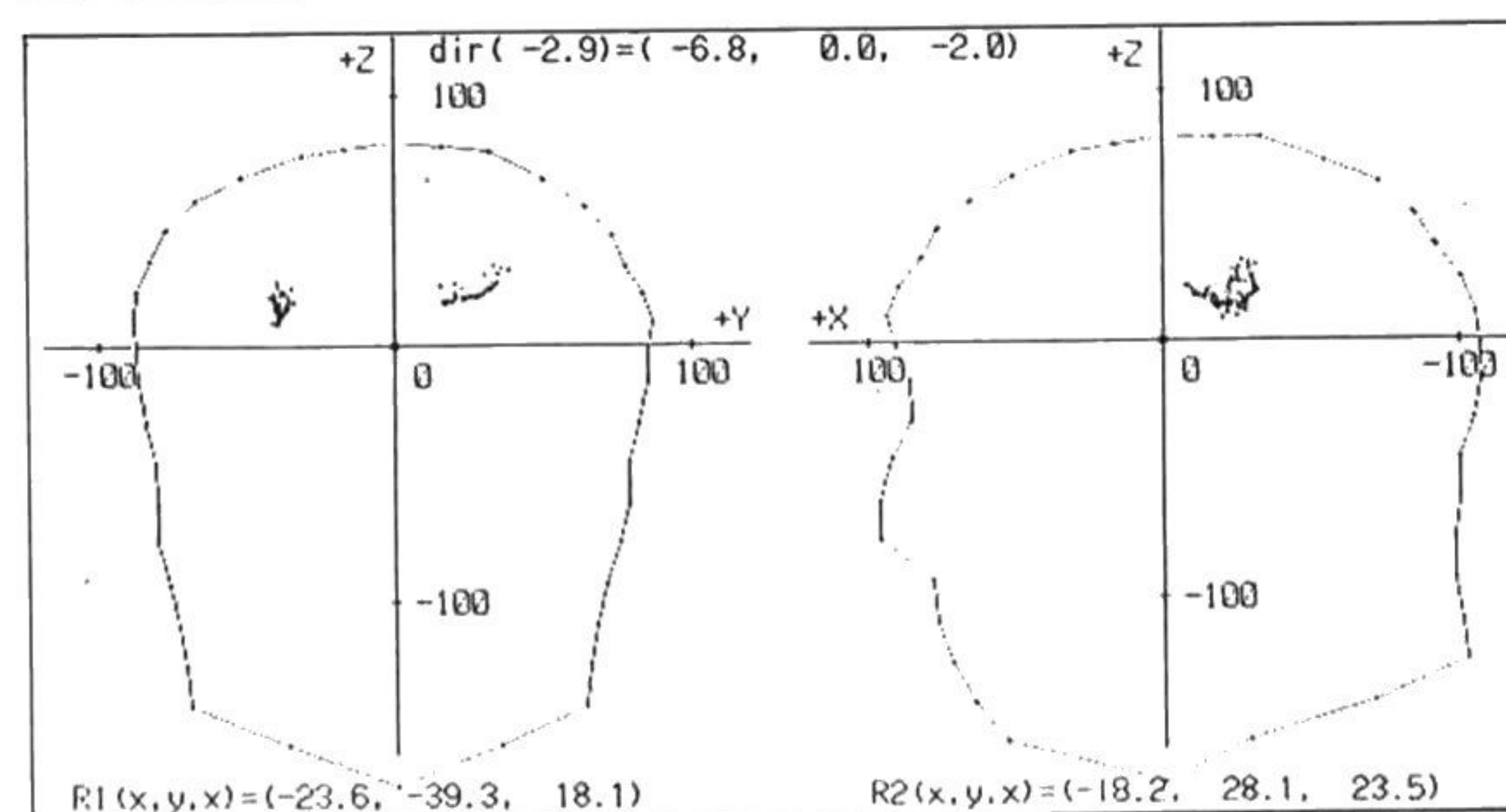


図5
音楽を聞いている時の α 波の電源



「 $1/f$ ゆらぎ」について

前にも書いたが、教授は以前から「 $1/f$ ゆらぎ」について研究されている(注3)。教授はこの方面に関して世界の第一人者であり、「 $1/f$ ゆらぎシンポジウム」という国際会議の発起人でもある。教授のお話によると、自然界でみられるいろいろな $1/f$ ゆらぎのうちかなりのものについて、それらに共通してこの現象がみられる原因ともいえるべきものが見えてきたそうである。

教授の研究室では5年ほど前からレーザー光を水晶の結晶に当て、透過した光の散乱を調べるという実験を続けている。この散乱に寄与しているのは原子運動の波動的な部分で phonon というが、散乱光のゆらぎを見ると励起している phonon の励

起状態のゆらぎが分かる。最近になってこれが $1/f$ ゆらぎであることがつかめそうだ。また、地球の磁気圏から大きく離れた所の宇宙線、すなわち phonon の流れも $1/f$ ゆらぎをしている。この他にもいろいろな事例が見付かったが、これらの事実から教授は、 $1/f$ ゆらぎを引き起こしているものは銀河系の磁場の $1/f$ ゆらぎではないか、と推測されている。

$1/f$ ゆらぎは、美しさや安らぎを私達にもたらしてくれるものでもある。音楽や絵画などさまざまな芸術作品の中に $1/f$ ゆらぎが見出されている。反対に、 $1/f$ ゆらぎをしている乱数系列から音楽ができたそうなので聞かせていただいたが、なかなか自然な美しい曲だった。人間の体

内リズムはどうも $1/f$ ゆらぎに同調しているように思えた。

これらのことをまとめて東京芸大で「美しさとは何か」という講演を行ったところ、大盛況を収めたそうだった。「美しさを数学的に表せるのはとても面白い」と教授はおっしゃっていた。

注3： $1/f$ ゆらぎ

$1/f$ ゆらぎとは、そのパワースペクトルが周波数 f に逆比例するような「ゆらぎ」のことをいう。 $1/f$ ゆらぎについての詳しいことは、ブルーバックスの「ゆらぎの世界」(武者利光著・講談社)などを読んでいただきたい。

武者教授はあと2年で定年退官される。今の研究が面白くなってきたところ、と語られる教授が本学を去られるのは我々にとって非常に残念なことである。残り少ない本学での研究のより一層の御発展をお祈りしつつ、筆を置くことにする。

最後に、大変ご多忙の中、快く私

達の取材に応じて下さった武者教授に深く感謝します。

(熊野)