



高精度位相操作パルス磁場勾配電子スピン共鳴装置の試作

16550003

平成 16 年度~平成 17 年度 科学研究費補助金

(基盤研究 (C)) 研究成果報告書

平成 19 年 3 月

研究代表者 大庭 裕範

東北大学 多元物質科学研究所 助教授

平成 16 年度~平成 17 年度 科学研究費補助金 (基盤研究 (C))

研究成果報告書

課題番号 16550003

高精度位相操作パルス磁場勾配電子スピン共鳴装置の試作

研究組織

研究代表者 大庭 裕範 (東北大学 多元物質科学研究所 助教授)

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	2,500,000	0	2,500,000
平成 17 年度	1,200,000	0	1,200,000
総計	3,700,000	0	3,700,000

## 研究発表

### 1). 投稿論文

Novel Excited Quintet State in Porphyrin: Bis(quinoline-TEMPO) yttrium-tetraphenylporphyrine Complex, Luca Maretti, Saiful. M. Islam, Yasunori Ohba, Takashi Kajiwara, and Seigo Yamauchi, *Inorg. Chem.*, 44, 9125-9127 (2005)

A New Series of Radical-Triplet Pair System: Modulation of Radical-Triplet Interaction by a Counter Ion, Luca Maretti, Saiful. M. Islam, Takashi. Kajiwara, Ryo Miyamoto, Yasunori Ohba, and Seigo Yamauchi, *Mol. Phys.*, 104, 1619-1626 (2006)

### 2) 口頭発表

#### 国際会議

Y. Ohba, Y. Sugawara, S. Yamauchi  
A W-band Pulsed EPR Spectroscopy  
*2nd Sendai-Berlin Joint Seminar on Advanced ESR, Japan, Sendai, (2004.10.7-2004.10.9)*

S. Yamauchi, M. Ishibashi, I. Saiful, Y. Iwasaki, Y. Ohba, S. Karasawa, N. Koga  
Recent Progress in Studies of the Excited Multiplet States by advanced EPR  
*2nd Sendai-Berlin Joint Seminar on Advanced ESR, Japan, Sendai, (2004.10.7-2004.10.9)*

Y. Sugawara, Y. Ohba, S. Yamauchi  
Separation and Characterization of Five Fullerene bis-Adduct Isomers linked with two Nitroxide radicals  
*2nd Sendai-Berlin Joint Seminar on Advanced ESR, Japan, Sendai, (2004.10.7-2004.10.9)*

L. Maretti, S. Islam, T. Kajiwara, Y. Ohba, S. Yamauchi  
Time-Resolved EPR Studies on the Excited States of a New bisradical-yttrium Porphyrin Complex  
*2nd Sendai-Berlin Joint Seminar on Advanced ESR, Japan, Sendai, (2004.10.7-2004.10.9)*

I. SM Saiful, Y. Iwasaki, Y. Ohba, S. Yamauchi  
Assignment of the Central Peaks in Excited triplet Porphyrin-Radical systems by Means of X- and

W-band Time-resolved EPR

*Asia-Pacific EPR/ESR Symposium 2006, Russia, Novosibirsk, (2006.8)*

S. Nakazawa, S. Yamauchi, Y. Ohba

Optimization of the Coupler and Dielectric Resonator for Ku-band Pulsed ESR Spectroscopy by  
Numerical Analysis of Electromagnetic Field

*Sendai-Berlin- Novosibirsk Joint Seminar on Advanced ESR, Russia, Novosibirsk, (2006.8)*

## 国内学会

山内清語, 石橋美保, Luca Maretti, Saiful Islam, 大庭裕範, 唐澤 悟, 古賀 登  
金属ポルフィリンラジカル系励起多重項研究の最近の展開  
第17回配位化合物の光化学討論会, 湯布院, (2004. 8. 7-2004. 8. 9)

山内清語, 岩崎洋平, 大庭裕範, Bahlul Sayed Awen, 大内秋比古  
N-芳香環連結フラレンの電荷移動励起三重項状態(2)  
化学系7学協会連合東北地方大会, 盛岡, (2004. 9. 17-2004. 9. 19)

サイフル イスラム, 大庭裕範, 山本雅英, 任田康夫, 谷 敬太, 山内清語  
時間分解 ESR によるカルバゾール励起 2 量体の電子構造の解析  
光化学討論会, つくば, (2004. 11. 1-2004. 11. 3)

松島進一, 加藤昌子, 大庭裕範, 山内清語  
時間分解 ESR による白金ビスキノリン錯体励起三重項状態の解析  
配位化合物の光化学討論会, 日本, 松島, (2005. 8. 3-2005. 8. 5)

大庭裕範, 山内清語  
数値計算法によるパルス ESR 用誘電体共振器の設計  
化学系7学協会連合東北地方大会, 日本, 仙台, (2005. 9. 23-2005. 9. 25)

Saiful Islam, 大庭裕範, 山本雅英, 任田康夫, 谷 敬太  
時間分解 ESR によるカルバゾール二量体の面間相互作用  
分子構造総合討論会, 日本, 東京, (2005. 9. 27-2005. 9. 30)

Luca Maretti, Marilena Ferbinteanu, Fanica Cimpoesu, Takashi Kajiwara, Saiful S. M. Islam, Yasunori Ohba, Seigo Yamauchi

Spin Coupling in the Supramolecular Structure of a New Tetra- (quinoline-TEMPO)-Yttrium Complex

第44回電子スピンサイエンス学会年会, 日本, 仙台, (2005. 10. 24-2005. 10. 26)

山内清語, Islam Saiful, 大庭裕範, 小堀康博, 森部真也, 米村弘明, 山田 淳  
フェノチアジン-C<sub>60</sub>連結化合物の分子内光誘起電子移動反応におけるイオン対の高周波ESR  
スペクトル

日本化学会第86春季年会, 日本, 船橋, (2006. 3. 27-2006. 3. 30)

マレットィ ルカ, イスラム サイフル, 大庭裕範, 山内清語  
イットリウムポルフィリン-ラジカル置換体の励起多重項状態: カウンターイオンの効果  
光化学討論会, 日本, 仙台, (2006. 9. 10-2006. 9. 12)

サイフル イスラム, 岩崎洋平, 高橋克明, 大庭裕範, 山内清語  
時間分解高周波 ESR による励起多重項状態の研究  
分子構造総合討論会, 日本, 静岡, (2006. 9. 20-2006. 9. 23)

山内清語, イスラムサイフル, 高橋克明, 大庭裕範  
高周波 ESR 法による金属ポルフィリン励起状態の解析  
平成 18 年度化学系学協会東北大会, 日本, 秋田, (2006. 9. 22-2006. 9. 24)

大庭裕範, 中澤重顕, 風間 俊治, 水田幸雄  
Ku バンドパルス EPR の試作 I  
第45回電子スピンサイエンス学会年会, 日本, 京都, (2006. 11. 14-2006. 11. 16)

中澤重顕, 大庭裕範  
Ku- バンドパルス EPR の開発 II  
第45回電子スピンサイエンス学会年会, 日本, 京都, (2006. 11. 14-2006. 11. 16)

Islam SM Saiful, Katsuaki Takahashi, Ryo Miyamoto, Yasunori Ohba, Seigo Yamauchi  
Observations of Excited Multiplet states in Frozen Solution for Excited Triplet  
-Radical Pairs by means of W-band Time-Resolved EPR  
第45回電子スピンサイエンス学会年会, 日本, 京都, (2006. 11. 14-2006. 11. 16)

中森太郎, 大庭裕範, 山内清語

フラーレン二付加体異性体の分離と EPR による同定

第 45 回電子スピンスイエンズ学会年会, 日本, 京都, (2006. 11. 14-2006. 11. 16)

山内清語, 高橋克明, イスラム サイフル, 大庭裕範, 作田絵里, 喜多村 昇

ホウ素架橋アントラセン類の電荷移動励起三重項状態

第 45 回電子スピンスイエンズ学会年会, 日本, 京都, (2006. 11. 14-2006. 11. 16)

## 研究成果

### 1. 序

パルスEPR（電子常磁性共鳴、Electron Paramagnetic Resonance）は常磁性化合物の分子構造、電子状態、動的性質、分子間の相互作用などを研究する上で有力な測定法である<sup>(1)</sup>。様々な磁氣的相互作用を明確に分離して選択的に観測出来ることから、通常の連続波法（cw法）にくらべて、実験結果の解釈を容易にし、また、観測結果の精度を向上できる利点がある。また、パルス法の特徴である2次元法導入することによって、相互作用の分離する際に、その実験のデザインの自由度と多様性を拡張することができる。このパルスEPRにはNMR（核磁気共鳴、Electron Paramagnetic Resonance）と同様のCOPSYなどの2次元法に加えて、EPRに独特なものとして、核との相互作用（核変調効果ESEEM）を選択的に観測できるHyperfine Selective Spectroscopy (HYSCORE) とパルス電子核二重共鳴（ENDOR）、電子スピン間の双極子相互作用を選択的に観測できる電子電子二重共鳴（DEER、PELDOR）と二量子遷移EPR（DQC）などがある。さらに、パルスEPRの10ナノ秒の時間分解能を生かして、光励起状態や化学反応における過渡的な短寿命化学種を観測できる。

上述のような相互作用の分離において位相操作と呼ばれる技術が必須である。この手法はいくつかのマイクロ波パルスを用いてそれぞれのマイクロ波の位相を変え、異なるマイクロ波位相の組み合わせに対するEPR信号の線形結合を取ってコヒーレンス経路を選択し、特定の応答を抽出する。特に多量子遷移の観測ではこの位相操作が重要である。しかしEPRで用いるマイクロ波では周波数が高く波長が短い（mm～cm）ために、その位相を正確に制御することが技術的に難しい。この困難を解決する一つの方法はパルス磁場勾配である。マイクロ波パルスの中に磁場勾配をパルスの挿入することによって、特定のコヒーレンス経路を選択的に観測することが出来る。

NMRの例で分かるように、パルス磁場勾配は磁気共鳴の重要なToolであり、EPRにおいても分子拡散の直接測定、緩和測定、飽和移動法、二重共鳴法などにおけるより効率的なEPRの飽和にも応用でき、パルスEPR法の可能性を大きく広げるものであると期待できる。しかしながら、EPRにおけるパルス磁場勾配はイメージング、拡散定数測定<sup>(2,3)</sup>がある程度で殆ど応用例が無い。この中で、マイクロ波パルスと同等の幅でパルス列中に組み合わせた実験は拡散測定の例であるが、EPRとしては非常に特殊な低周波数のもの（250MHz）かまたはXバンド（9GHz）のものでもパルス磁場の立ち上がり時間が100nsと遅く、緩和時間が非常に長い特殊な系にしか応用できない。均一なパルス磁場を用いたものとしてはField Jump法の報告があるが<sup>(4,5)</sup>、これもパルス磁場の立ち上がり時間が100nsと遅く、一般的な系への応用は難しい。

このように、さまざまな応用の可能性をもつパルス磁場勾配をパルス EPR に導入することが望まれる。本研究の目的はマイクロ波パルス列と組み合わせることができ、コヒーレンス経路の選択に使用できる、従来よりも 1 桁短い 10ns の立ち上がり時間をもつパルス磁場勾配の発生装置を開発することにある。

## 2. パルス磁場勾配の磁気共鳴への応用

### 2. 1 パルス磁場勾配による多量子コヒーレンスの観測<sup>(6-8)</sup>

スピンのエネルギー準位間の遷移について、量子数の差が 0、1、2、... のものをそれぞれ 0、1、2 量子コヒーレンスなどと呼び、量子数の差をコヒーレンス次数という。2 量子以上のコヒーレンスは 2 つ以上のスピンの関与しなければ存在しないためスピン間の相互作用のみを含み、その選択的な観測ができる点で有用である。しかし、選択律から磁気共鳴で直接観測できるのは 1 量子コヒーレンスのみであり、多量子コヒーレンスは、これを直接観測することは出来ない。パルス法では複数のマイクロ波パルスを用いて多量子コヒーレンスを生成し、生成した多量子コヒーレンスをさらにマイクロ波パルスを用いて 1 量子コヒーレンスに戻すことによって間接的に多量子コヒーレンスを観測することが出来る。この際生成する多量子コヒーレンスは可能なコヒーレンス全てを含むため、以下に述べる位相操作によってマイクロ波パルス列によるコヒーレンス移動の経路を選択して、特定の量子数のみを選択する。

多量子コヒーレンスのコヒーレンス次数  $p$  の差を  $\Delta p$ 、 $k$  番目のマイクロ波パルスの位相を  $\phi_k$  とすると、 $N$  個のパルス列によって生じた信号のうち、 $\Delta p_0, \Delta p_1, \dots, \Delta p_{N-1}$  のコヒーレンスを経由した成分は次の位相因子を持つ。

$$\exp\left(-i\sum_k \Delta p_k \phi_k\right) \quad (1)$$

マイクロ波パルスの位相を  $2\pi m/N$  ( $m$  は整数) づつずらした場合には、この位相因子は  $N$  次元の離散フーリエ変換の位相因子と同じになることに注目すると、一連の位相変化をもったパルス列によって観測した信号のフーリエ変換によって、特定のコヒーレンス経路を抽出できることが分かる。これを位相サイクルというが、系に存在する最大のコヒーレンスを  $M$  次として、すべてのコヒーレンスを選択的に観測するには  $N=2M$  でなければならない。現在のパルス EPR 装置は  $N=4$ 、すなわち 90 度刻みの位相制御が一般的であり、2 量子遷移の識別までしか出来ない。3 量子以上を識別するには  $N>4$  が必要となるが、このような小さな位相を正確に制御することは、マイクロ波帯では技術的に難しい。

上記の位相制御の技術的困難を解決し、特定のコヒーレンスを取り出すためにパルス磁場勾配を用いる方法があり、NMRでは一般的に用いられている。図1に示したように、コヒーレンス経路の特定の位置において、特定のコヒーレンスを選択する方法である。図1において、 $i$ 番目の静磁場  $z$  軸方向の磁場勾配パルス  $G_i(B_z^{(i)}(\mathbf{r}, t))$  をかけると、そのとき存在する  $p$  次コヒーレンスは試料中のスピンの位置によって  $z$  軸磁場が異なり自由誘導周波数が違うために、 $z$  座標に依存した位相を持つ。

$$\Phi_i^p(\mathbf{r}) = p \frac{1}{\hbar} \int_{\Delta t_i} g\beta B_z^{(i)}(\mathbf{r}, t) dt \quad (2)$$

ここで  $\mathbf{r}$  は試料中での空間座標、 $\Delta t_i$  は  $i$  番目の磁場勾配パルスの持続時間である。試料全体で見ると、 $\mathbf{r}$  に依存した位相の違いによって干渉し、信号強度が減少する。次に、図1のマイクロ波パルス MW により  $p$  次のコヒーレンスを  $p'$  次へ移動した後、全く同じ磁場分布を持つ  $i+1$  番目の磁場勾配パルス  $G_{i+1}$  を加えると新たな次数  $p'$  に応じた位相が加わる。同じ幅の磁場勾配パルスを用いた場合を考えると、 $p=p'$  の場合のみコヒーレンスは収束するので観測でき、その他の経路を経るコヒーレンスは干渉して消えて観測されない。一般的には磁場勾配パルスの幅をかえることでも選択が可能であり、

$$\Phi_i^p(\mathbf{r}) = -\Phi_{i+1}^{p'}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

となるようにとれば、任意のコヒーレンス経路を選択できる。

コヒーレンス経路の選択に必要な磁場勾配強度を見積もるために、今  $p=2 \rightarrow -1$  の信号  $S_{2,-1}$  を消して  $p=1 \rightarrow -1$  の信号  $S_{1,-1}$  を取り出す場合を考える。試料中の磁場勾配  $G$  は均一とし、静磁場  $z$  方向の試料の長さを  $Z$  として磁場勾配による信号の位相を計算すると、

$$\int_V \Phi_i^p(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = pg\beta G \Delta t_i \frac{1}{\hbar} Z \quad (4)$$

となる。 $S_{1,-1}$  は完全に収束するとしてその信号強度を 1 と置くと、 $S_{2,-1}$  の強度は

$$\sin\left(g\beta G \Delta t_i \frac{1}{\hbar} Z\right) \quad (5)$$

となる。磁場勾配パルス幅として 100 ns、 $g=2$ 、試料の  $z$  軸方向の長さ 0.2 cm として必要な磁場勾配の大きさを見積もると

$$g\beta G\Delta t_i \frac{1}{\hbar} Z = \pi \quad (6)$$

の条件より、G は約 9 G/cm となる。

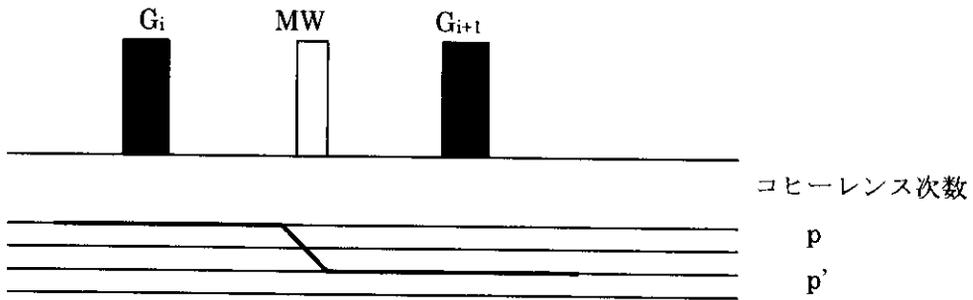


図1 磁場勾配パルスによるコヒーレンスの選択  
 $G_i$ 、 $G_{i+t}$ は磁場勾配パルス、MWはマイクロ波パルス

## 2. 2磁場勾配パルスによる磁化の飽和

縦緩和測定や飽和移動実験、過渡的ラジカル種と定常ラジカルのEPRスペクトルの分離観測などで、磁化を飽和するために図2に示すような多数のパルスの繰り返しを用いる。図2は飽和パルスによって基底状態の常磁性種を飽和させ、そのあとレーザーパルスによって生じた励起状態や光化学反応中間体を選択的にスピンエコーで観測する例である。一般にz軸方向の縦緩和時間 ( $T_1$ ) はxy面内の横緩和時間 ( $T_2$  または  $T_2'$ ) よりも2桁長いことを利用し、図2(A)のように、z軸磁化をxy面に向かって倒し、xy面内の磁化成分が緩和してなくなる  $T_2$  程度まってまたパルスで残りのz軸磁化をxy面に向かって倒すということを繰り返して、z軸磁化を消している。これに対し(B)では磁場勾配Gを挿入することによって  $T_2$  より短時間にxy面内の磁化を消去できる。高出力のマイクロ波アンプのデュリティに制限があるため、パルス列を短縮することは実験上重要である。

磁場勾配によるxy磁化の減衰時間  $T_2'$  は磁場勾配によるスペクトルの幅で決まるから

$$\frac{1}{T_G} \approx \frac{g\beta GZ}{h} \quad (7)$$

程度の時間と考えることが出来る。多くの低温固体において、 $T_2$ は 500 ~ 1000 ns程度であるから、これを 1/10 の 50~100 nsに短縮するために必要な磁場勾配は、 $Z$ を 0.2cmとすると 30~60 G/cmである。

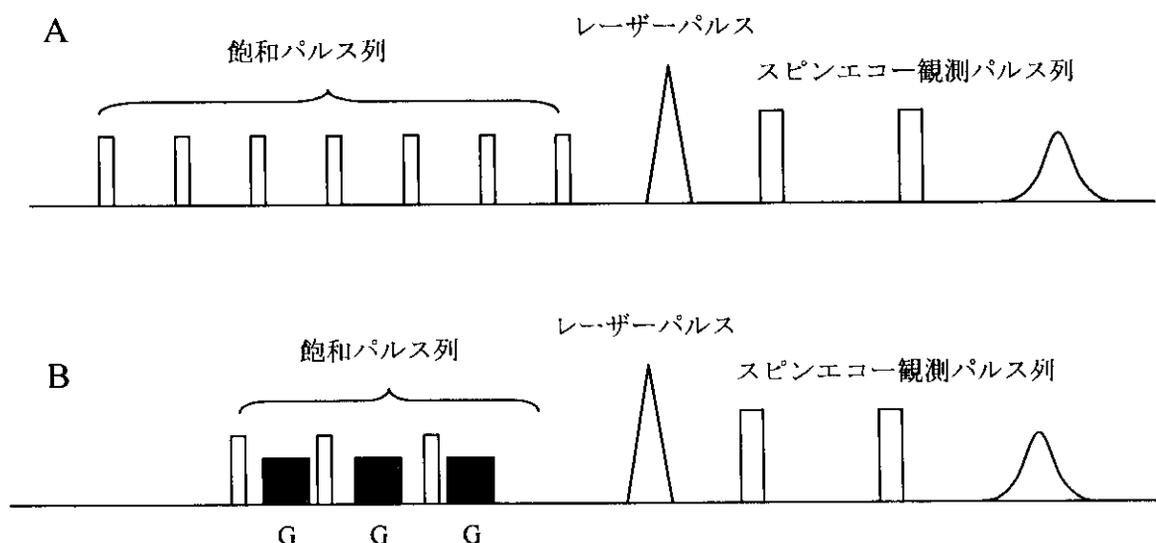


図2 飽和法による光誘起過渡ラジカルの選択的測定のパルス列  
マイクロ波パルス列のみ (A) および磁場勾配パルスを用いた場合 (B)

## 2. 3 磁場勾配パルスによる拡散現象の観測<sup>(2, 9)</sup>

常磁性分子が試料中で併進拡散運動を行う場合、 $z$ 軸方向にとった静磁場が不均一であると拡散によってスピンの位置が変わるために共鳴周波数が変化する。コヒーレンス経路選択の場合と同じように、共鳴周波数の変化はコヒーレンスの位相の変化となり、併進運動が無い場合に比べると共鳴信号強度が減少する。この減少分より、分子の拡散速度を決定することが出来る。最も簡単な方法は静的な磁場勾配を加えた場合の信号強度の減少を観測する方法であるが、より有効な方法は図3に示したように、Hahn エコーのマイクロ波パルスの中に二つの磁場勾配パルスを入挿する方法である。静的な磁場勾配とくらべて、

図3のパルス磁場勾配には以下のような利点がある。

- a) エコー観測時に磁場勾配が無いためスペクトルの分解能が高い。
- b) マイクロ波パルスをかけるときに磁場勾配があると、これによって広がったスペクトルを励起するためにより強いマイクロ波パルスが必要となるが、図3のパルス列ではその必要が無い。
- c) パルス化することによってより強い磁場勾配を使うことが出来る。
- d) 拡散現象が起こっている時間が明確である。
- e) 拡散によるスピンスピン相互作用と磁場勾配の効果を識別できる。

またパルス EPR 法の特徴である高い時間分解能を生かして、化学反応中間体のような短寿命化学種の拡散現象を観測できることは、化学反応のダイナミクスを研究する上で有用な手段となりうる。

緩和時間測定に必要な磁場勾配の大きさは拡散速度が系によって大きく違うため一概には定めがたいが、原理的に遅い拡散を見るには大きな磁場勾配が必要とされる。固体伝導体について、130G/cmの磁場勾配を用いて  $6.4 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/sの拡散定数を測定したの報告例がある<sup>(2)</sup>。

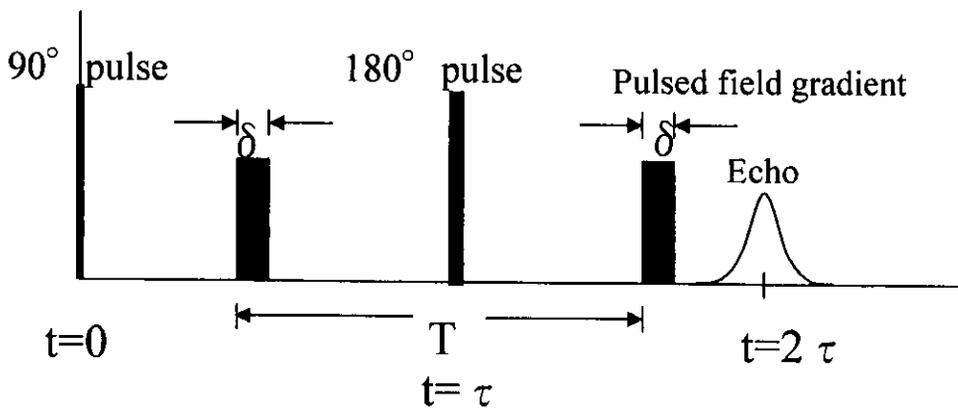


図3 拡散速度測定のパルス列

### 3. 磁場勾配コイルと EPR 共振器

高速でパルス磁場を生成する際に技術的重要なことは

- 1) 高圧電源の高速スイッチング
- 2) 磁場発生用コイルへの効率的な電流の供給
- 3) 効率的な電流の磁場への変換
- 4) コイルの電流への応答速度の高速化
- 5) 周囲の金属と磁場の相互作用の最小化

である。1は高速、高圧、高電流の FET トランジスタが市販で容易に入手可能であり問題は無い。2、3、4に対してはコイルのインダクタンスを出来るだけ小さくする必要がある。また、5に対しては強い過渡的な磁場の生じるところに金属を使わないことが必要で、さらに最近の技術としては動的に磁場を打ち消す active shielding という手法も開発されてきている。

本研究では出来るだけコイルを小さくすることでこれらの条件を満たす方針を採った。コイルが小さいことによってサンプルと電流の距離が短くなり、試料位置の磁場は大きくなり、またインダクタンスも小さくなるため、上記2~5の条件を同時に満たすことが出来る。以下に高速パルス磁場勾配に適切なコイルの設計のための基本的な条件とこれに使用することの出来る EPR マイクロ波共振器の選定基準について述べる。

### 3. 1. 磁場勾配コイルの大きさ

2節で見積もったように、本研究の目的には 10~100 G/cm の磁場勾配画必要である。ここではまず解析が容易な単純なヘルムホルツコイルを考えて、大まかなコイルの大きさを決める。1組のヘルムホルツコイルがその中心に発生する磁場は次の式で表される。

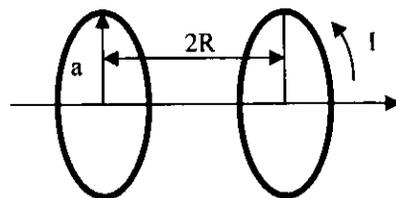


図4 ヘルムホルツコイル

$$B = n \frac{\mu_0}{4\pi R^3} IS \quad (8)$$

ここでnはコイルの巻き数、2Rは二つのコイルの中心間の距離、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ は真空の透磁率、Iは電流、Sはコイルの面積である。電流としては10~30A程度の電源が大きさ、価格

などの点で手ごろであるので 10A として見積もる。コイルの半径と R を 0.5cm、巻き数を 4 とすると発生する磁場約 40G 程度と我々に必要な磁場を生成できることがわかる。

過渡的特性に対してはコイルのインダクタンスが重要である。上記のコイルの自己インダクタンス  $L_1$  は

$$L_1 = \mathcal{L} \frac{\pi \mu_0 a^2 n^2}{2R} \quad (9)$$

ここで  $\mathcal{L}$  は長岡係数で  $a/R=1$  のとき 0.688 であり、 $L_1$  は  $1 \times 10^{-7}$  H となる。一方二つのコイル間の相互インダクタンス  $L_2$  は

$$L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} f a \quad (10)$$

ここで  $f$  はコイルの構造で決まる値で、

$$k^2 = \frac{(2R)^2}{(2a)^2 + (2R)^2} \quad (11)$$

の値について計算されている。上記のコイルでは  $k^2 = 1/2$  で  $f = 0.525$  であり、 $L_2 = 5 \times 10^{-10}$  H となってこれはほぼ無視できる。したがってこのヘルムホルツコイルのインダクタンスは  $1 \times 10^{-7}$  H となる。10 ns でスイッチングするためには 20 MHz 程度の周波数を通す必要がある。このインダクタンスによる 20 MHz におけるインピーダンスを計算すると 12  $\Omega$  である。したがってこれに 10~30 A の電流を流すには 120~360 V 程度の電圧でよいことになり、これは容易に実現可能な値である。また、線間容量などとの共振は高速のスイッチングに好ましくなく、共振点は使用する帯域よりも高周波数にあることが望ましい。このような寄生容量を見積もることは非常に難しいが、共振点が 50 MHz 以上という条件で最大の許される容量を見積もると約 100 pF となりこれも困難な値ではない。したがってコイルの大きさとして 0.5 cm 程度のものであれば所要のパルス磁場を発生できることがわかる。

### 3. 2. EPR 共振器の選択

通常の EPR で用いられる空洞共振器の大きさは大体  $1 \times 1 \times 3$  cm 程度であるが、マイクロ波との相互作用を避けるためにコイルを共振器内に置くことは出来ない。コイルの大きさは 3. 1 節で述べたものよりはるかに大きくなる。このため、本装置では EPR 共振

器として Loop Gap Resonator (LGR)、誘電体共振器 (DR) の二種類を試みた。

### (1) Loop Gap Resonator

Xバンドで用いられる LGR は通常スリットを持った金属円筒で図5のような形、大きさを持っている。試料はこの円筒内におかれるが、金属壁表面の渦電流のためパルス磁場は内部に入らない。そこで横方向に細いスリットを 5 個程度入れてパルス磁場を導入することを試みた。また、金または銀メッキした石英管で LGR とすることも可能である。この場合は使用するマイクロ波周波数での表皮深さよりも厚く、パルス磁場の周波数成分の表皮深さよりも薄いめっき膜を作ることによって、マイクロ波に対しては共振器として働き、パルス磁場は透過するようすることが可能である。

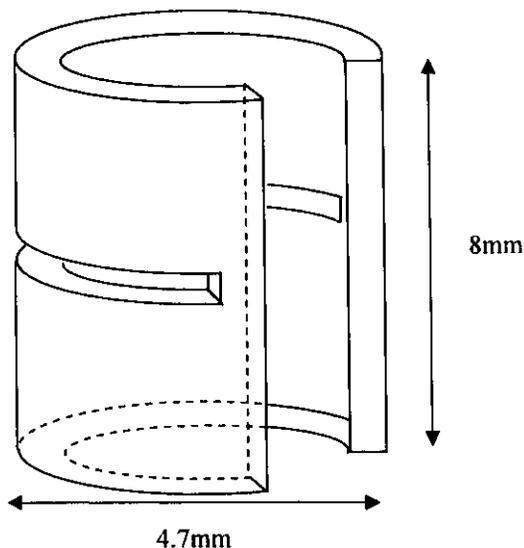


図5 LGR (Loop Gap Resonator)

### (2) 誘電体共振器

誘電体共振器は誘電率の大きなものを用いることによってその大きさを小さくすることが出来る。絶縁体の誘電体はパルス磁場程度 ( $\sim 20\text{MHz}$ ) の周波数に対する影響は殆ど無く、容易にこれを透過するが、マイクロ波に対しては空気との界面で反射するため共振器として働くことが出来る。ここでは 5 mm 程度の大きさで Xバンドマイクロ波と共振するという条件および試料をその中心におく必要から、比誘電率 20 程度の誘電体で作った図6のような円筒形を選択した。

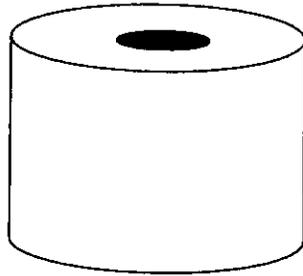


図6 DR (Dielectric Resonator)

### 3. 3 磁場勾配の設計と数値解析

3.1節でヘルムホルツコイルを用いてコイルのおおよその大きさを決定した。実際に磁場勾配を生成するにはより均一度の高い磁場勾配を得るために図7に示したような四重極コイルを用いた。このコイルにより発生する磁場は Biot-Savart の法則を用いて、コイルの線素片の電流から空間の各点に生じる磁場を電流経路について数値的に積分して計算した。

微小線素片  $d\vec{l}$  による空間のある点 P における磁場  $d\vec{B}$  の Biot-Savart のベクトル形の表現は、

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (12)$$

となる。ここで  $\vec{r}$  は線素片と点 P を結ぶベクトルである。コイル全体から点 P に生じる磁場は、(12) 式をコイル上の電流経路全体にわたって数値積分して計算した。計算プログラムは付録1に載せた。計算において線の太さは無視している。得られた各座標の磁場の値から差分近似を用いて計算した磁場勾配を図8に示した。

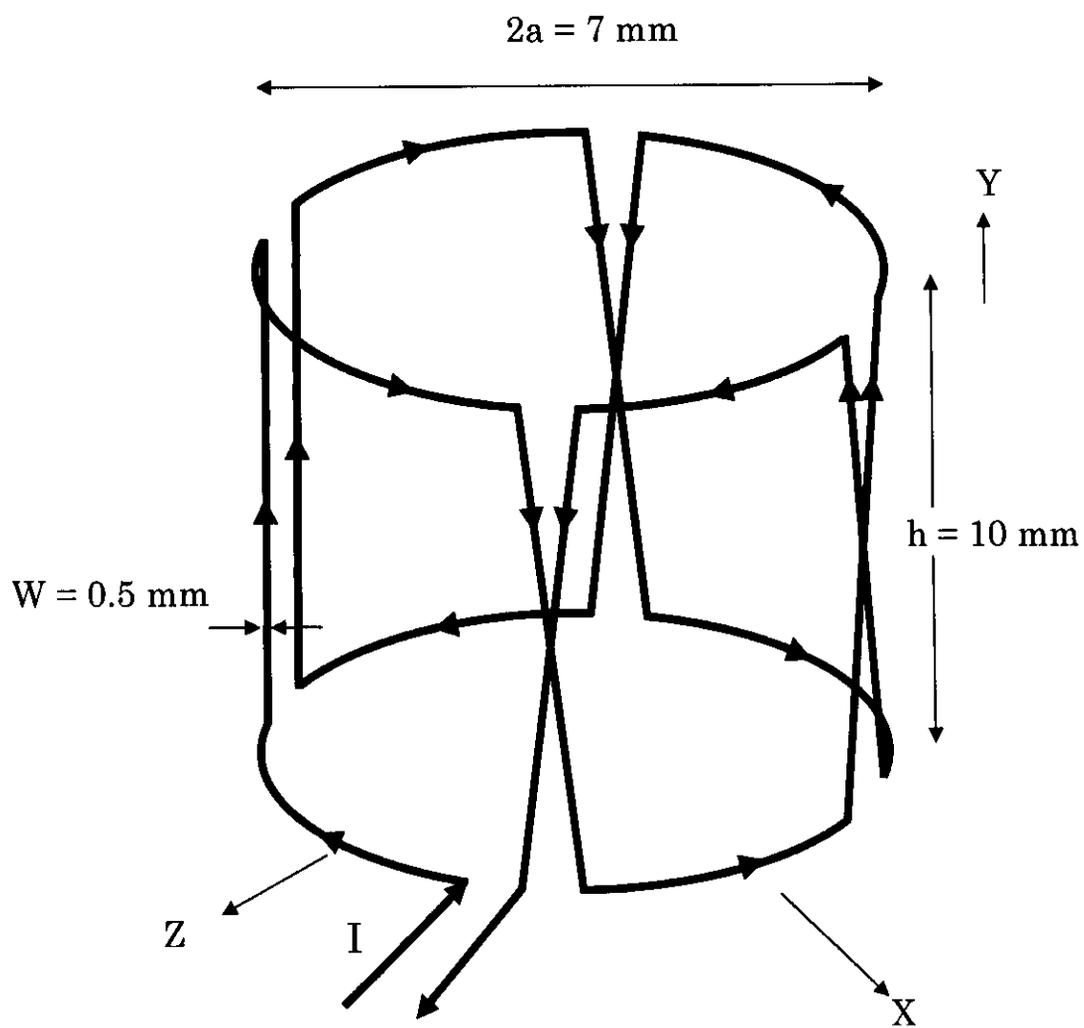


図7 四重極コイル

$I$ は電流、矢印はその流れる方向

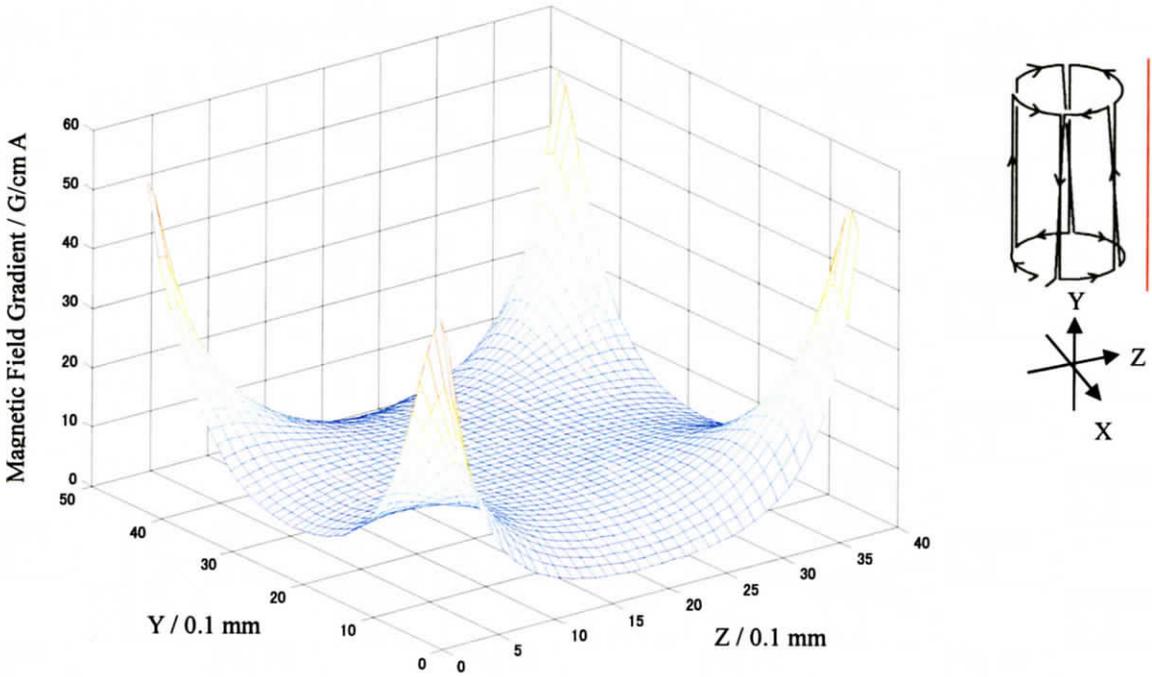


図8 四重極コイルによる磁場勾配の空間分布

図8のデータから試料領域として磁場勾配コイルの中心からxz面内で半径1.5mm、y軸方向で5mmの円筒領域を考えて表1の結果結果を得た。コイルに流す電流を10~30Aにすれば必要な磁場勾配を得ることができることがわかった。また、勾配の均一度は±18%程度である。

表1. 四重極コイルによる試料内の磁場勾配 (G/cm/A)

xz平面内の最大磁場勾配	15.4
xz平面内の最小磁場勾配	11.2
試料内の最大磁場勾配	16.1
試料内の最小磁場勾配	11.2

四重極コイルのインダクタンスの解析は電流を供給する線からの寄与などがあり、正確に行うことは困難である。ここでは直線、円に対する解析的な表現を用いて、式(13)からおおよその見積もりとして計算した。

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{4\mu_0}{\pi} \left[ -2(w+h) + 2\sqrt{h^2 + w^2} \right] \\
 & + \frac{4\mu_0}{\pi} \left[ -h \log\left(\frac{h + \sqrt{h^2 + w^2}}{w}\right) - w \log\left(\frac{w + \sqrt{h^2 + w^2}}{h}\right) + h \log\left(\frac{2h}{a}\right) + w \log\left(\frac{2w}{a}\right) \right] \\
 & + \frac{2\mu_0}{\pi} w \left[ \log \frac{w + \sqrt{w^2 + h^2}}{h} - \sqrt{1 + \frac{h}{w} + \frac{h}{w}} \right] \\
 & + \frac{2\mu_0}{\pi} h \left[ \log \frac{h + \sqrt{h^2 + \sqrt{w^2 + h^2}}}{\sqrt{w^2 + h^2}} - \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{h}\right)^2} + \frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{h} \right] \\
 & - \frac{2\mu_0}{\pi} h \left[ \log \frac{h + h\sqrt{2}}{h} - \sqrt{2} + 1 \right] \tag{13}
 \end{aligned}$$

ここで第一、第二項は個々線の自己インダクタンス、残りの項は線間の相互インダクタンスである。得られた結果は $L=9.6 \times 10^{-7} \text{H}$ であった。この値は3.1節の見積もりよりも約1桁大きいため必要な電圧も一桁大きくなる。これをさけるためには適当な大きさの容量を組み合わせて、高周波のインピーダンスを下げることにした。この容量は生成する磁場強度、およびスイッチング時間を見ながら、実際のコイルで実験的に決める必要がある。

#### 4. パルス磁場発生装置

##### 4. 1 パルス磁場駆動電源

パルス磁場駆動電源はゼネラル物産に特注して試作した。今回試作したパルス磁場駆動電源の仕様を以下に示す。また回路図を図9に示す。

- 1) 出力電流 25A ピーク
- 2) 負荷インダクタンス 200nH 以下
- 3) 立ち上がり時間 10nsec 以下
- 4) パルス幅 10nsec~100nsec
- 5) パルス繰り返し周期 200nsec 以上。

ただし、パルスデューティ比5%以下

- 6) パルス平坦度 パルス幅100nsec 時 5%
- 7) パルス入力 5V 振幅CMOS レベル、正論理、50 オーム
- 8) 電源 低圧：12V 高圧：500V

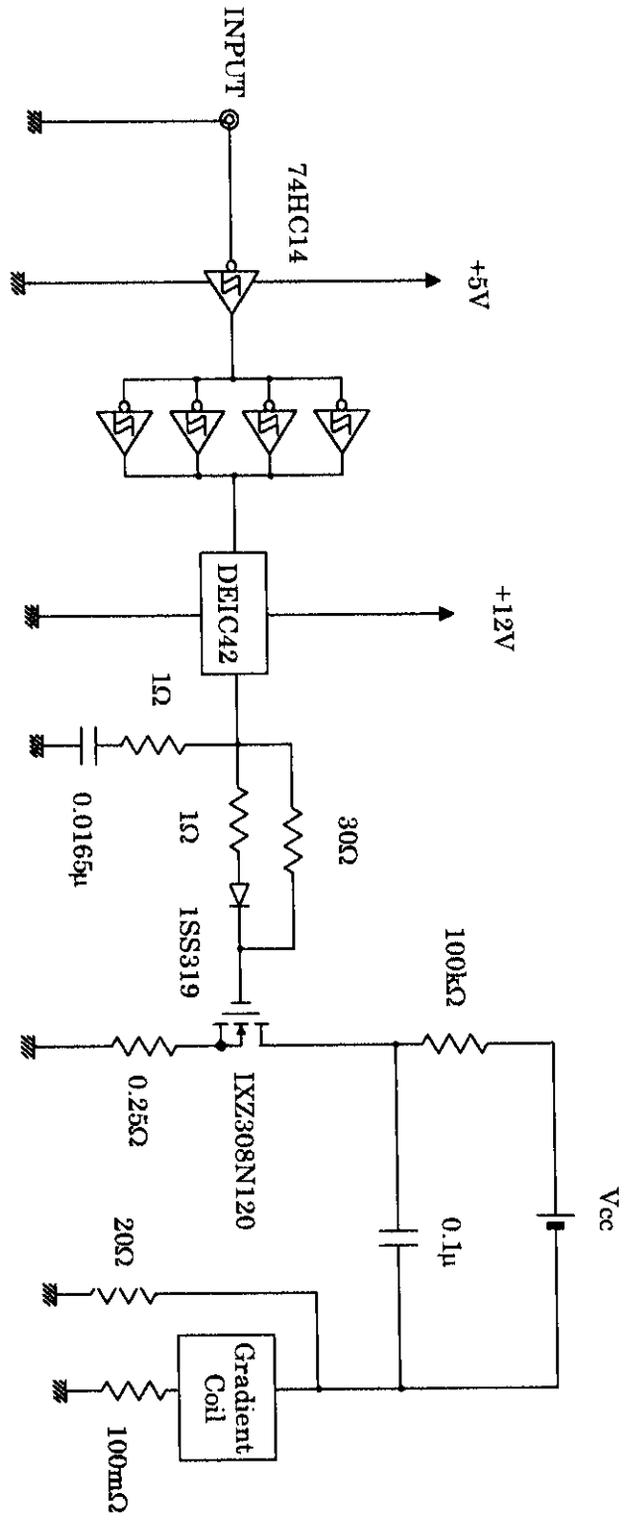


図9 磁場勾配コイル駆動電源

#### 4. 1 実測と計算の比較

実際に試作した四重極コイルについて (1) 定常電流による磁場勾配、(2) 共振によるインダクタンス、(3) パルス電流によるパルス磁場それぞれの測定を行った。

##### (1) 定常電流による磁場勾配の測定

過渡的な磁場の絶対値を測定するのは困難なため、定常電流で定常磁場を作り、ホール素子によるガウスメータを用いてコイルの中心線上 (図 8 の  $z$  軸) における磁場を測定し、計算結果と比較した。計算と実測の磁場を図 10 に示す。図中の  $z = 0$  はコイルの中心、白丸が測定値、 $\times$  が計算値である。これより計算は実測を良く一致している。今回用いたプログラムで磁場勾配をは精度良く計算できることが示された。

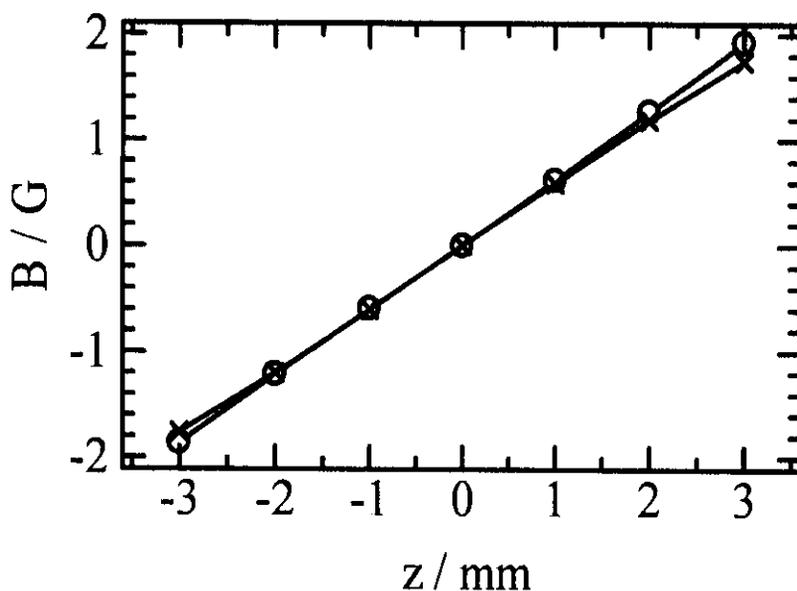


図 10 四重極コイルによる磁場の空間分布

##### (2) 共振によるインダクタンスの測定

試作したコイルのインダクタンスを決定するために、容量既知のコンデンサー820pFを

コイルに並列に挿入し、その共振周波数を測定した。実測の共振周波数は 12.2MHz であった。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (14)$$

の関係から計算したインダクタンスは  $2.07 \times 10^{-7} \text{H}$  であり、計算値の約 1/4 とかなり小さい。計算との不一致の原因の一つとして、コイルの線間の容量が考えられ、これはコイルに並列に入った容量を実質的に大きくすることから、実測のLが計算より小さいことを説明する。しかし、820pFの3倍は線間容量としては大きすぎる。コイルの寸法が小さいことを考えると、電流の空間分布も影響をしているものと考えられる。より正確な計算を行うにはこれらの効果をいれ、Maxwellの方程式に基づいた計算をする必要がある。しかし、実際のパルス磁場のスイッチング時間は駆動回路とのマッチングにも大きく左右されるため、インダクタンスはスイッチング時間のおおよその見積もりが出来れば十分である。したがって、このような計算も十分に有用であると考えられる。

#### 4. 2 パルス電流によるパルス磁場の測定

試作したパルス磁場駆動回路を用いてコイルを励起し、図 11 に示すようにして、発生する磁場を直径 1mm のサーチコイルを用いて検出した。サーチコイルに誘起される電圧  $V$  は、サーチコイル面に直行した磁場の時間変化分によるものである。

$$V = L \frac{dB}{dt} \quad (15)$$

したがって、実際に発生している磁場を時間で微分した値が検出されることから、立ち上がり、立下りのみが観測される。

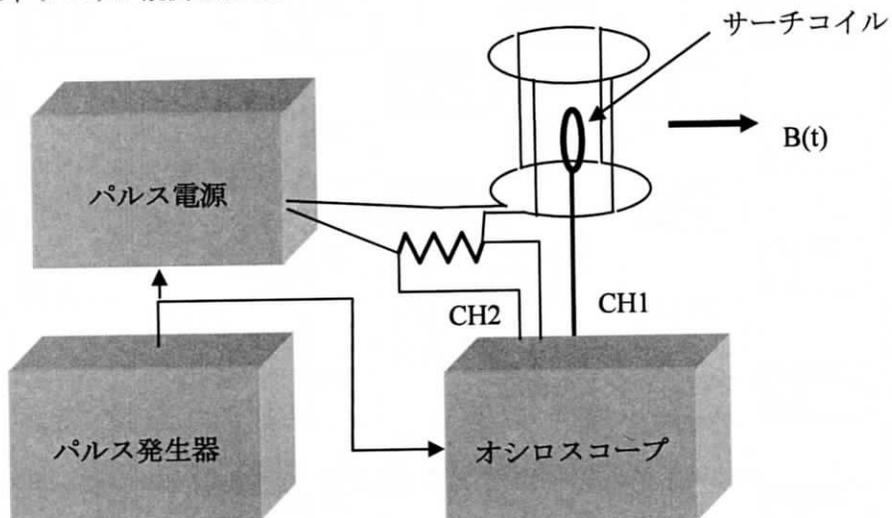


図 11 サーチコイルによるパルス磁場の測定

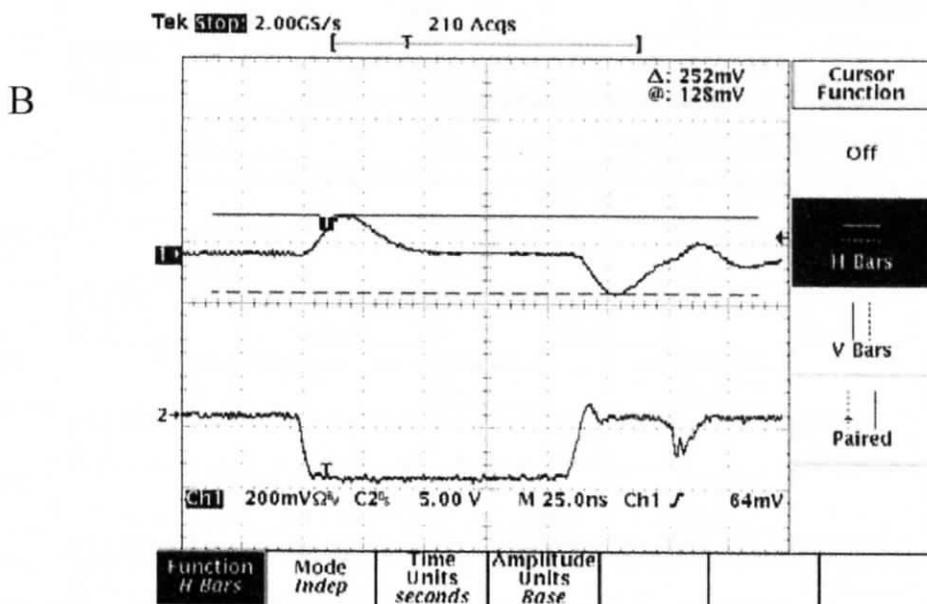
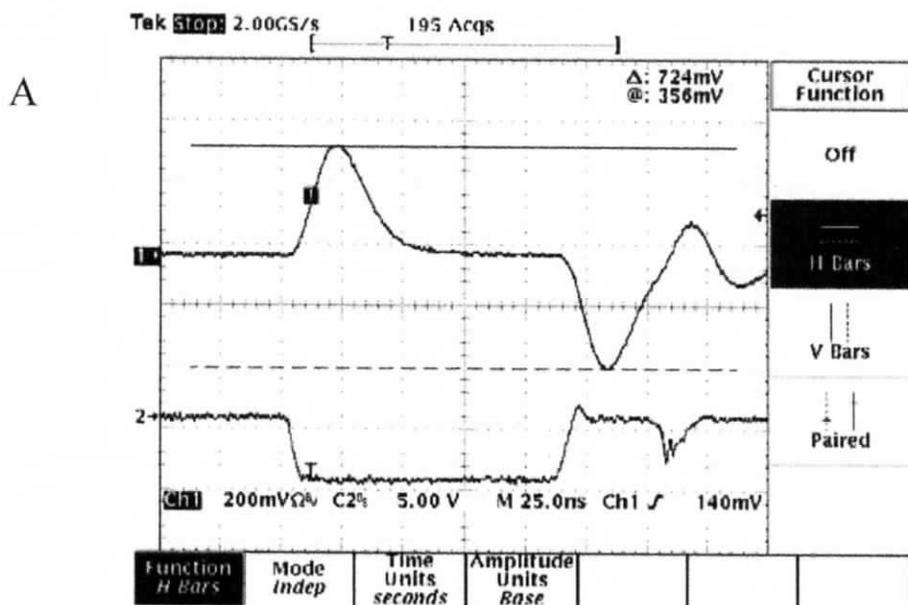


図 1 2 サーチコイルにより検出したパルス磁場  
(A) 共振器なし、(B) LGR をコイル内に挿入

サーチコイル出力をオシロスコープで観測した結果を図 12 に示した。図 12 の CH1 のトレースがサーチコイル出力、CH2 はコイルに流れている電流を抵抗 R でモニタしたものである。図 12 (A) は空のコイルの特性、(B) はコイル内に LGR を挿入した場合の測定結果である。図 (A) と (B) とともに CH2 の立ち上がり立下りは 10ns 以下であることから、コイルに流れる電流そのものは 10ns 以下でスイッチングできていることがわかる。一方、サーチコイル出力は実際にコイルの内部で生じている磁場である。立ち上がり立下りそれぞれの曲線の微分曲線の線形がほぼ対称であるから、ピークはほぼ磁場が最大値の半分になったところであるから、いずれの場合もスイッチング時間は 20ns 程度である。これは感度を上げるためにコイルの巻き数を多めにしたことによるサーチコイル固有の応答時間だと考えられる。図 (A) と (B) を比べるとサーチコイルの起電力が (B) は (A) の 1/4 程度しかないのは LGR の影響であり、スリットを通して LGR 内に透過する磁場は本研究の目的には十分な大きさではないことが分かった。試験的に用いた DR (誘電体共振器) では図 (A) と全く同様の起電力を得ることができたのでパルス磁場の実験には DR が最も適していると結論した。

## 5. 誘電体共振器

4 節で述べたように、銅製の LGR は共振器内へのパルス磁場の透過度という点で問題があった。材質として絶縁体である DR はこの点全く問題が無い。市販の EPR で用いられるのはもっぱらサファイア単結晶 ( $\epsilon_r = 10$ ) であるが、これは  $1 \times 1 \times 1 \text{cm}$  程度の大きさがあり、本研究の小型の磁場勾配コイルには使うことが出来ない。そこでより小型の共振器を作るために、 $\epsilon_r = 20$  の  $\text{MgTiO}_3$ 、 $\text{CaTiO}_3$ 、および  $\text{LaTiO}_3$  の 3 種類を試した。これらは市販のマイクロ波回路用小型共振器として用いられているもので通常ディスク状であるが、EPR 用に試料挿入孔を持つ円筒形のものを日本タングステン (株) に依頼し、試作した。

EPR 測定に用いるには、共振器自身の常磁性不純物からの信号がないことが必要である。まず、市販の共振器の原料について、不純物の量を検討するために整形前の粉末について EPR スペクトルを測定した。図 13 に一例として  $\text{CaTiO}_3$  粉末の EPR スペクトルを示した。通信に用いる共振器の場合にはわずかな不純物は問題ではないので、特に高純度の原料を用いていないため、図 13 (B) のスペクトルに示したように、かなり強い常磁性の不純物信号があることが分かった。より高純度の原料を各種試みて、最も不純物信号の弱いものとして  $\text{CaTiO}_3$  を選定した。図 13 (A) は不純物がもっとも少ない  $\text{CaCO}_3$  と  $\text{TiO}_3$  から作った  $\text{CaTiO}_3$  粉末の EPR スペクトルである。殆どの強い信号はなくなっていることが分かる。

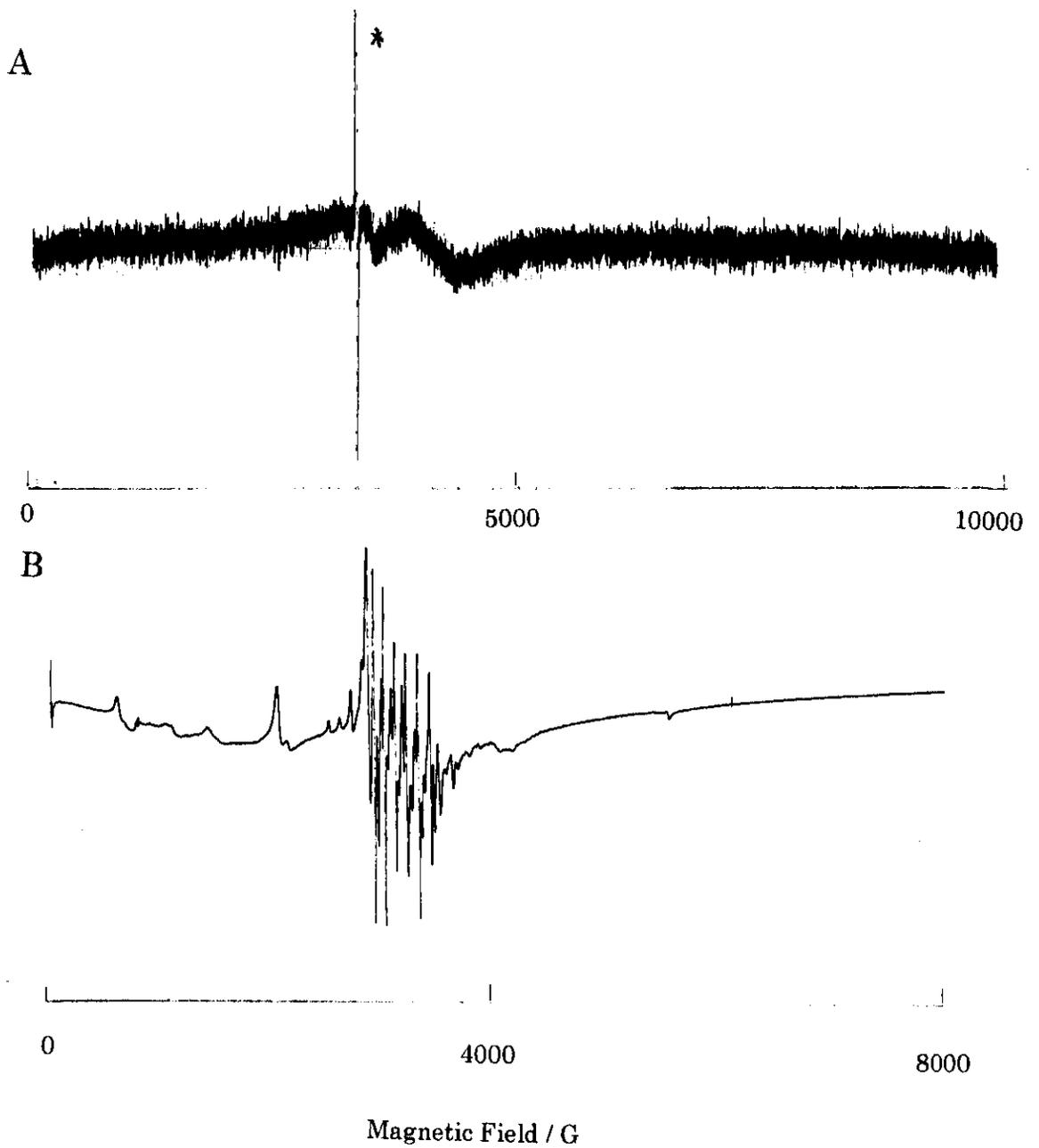


図 1 3 CaTiO<sub>3</sub>誘電体共振器原料粉末のEPRスペクトル、室温  
 市販共振器原料 (A) と高純度原料より合成したもの (B)  
 \*は強度標準として加えたNMP-TCNQラジカルの信号

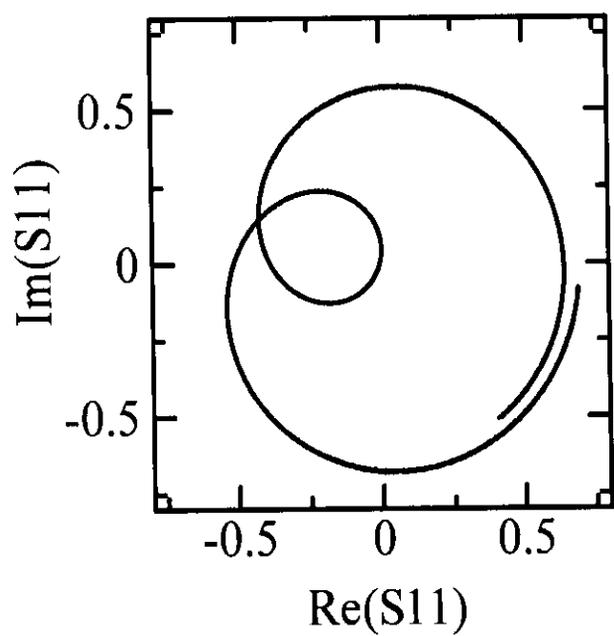
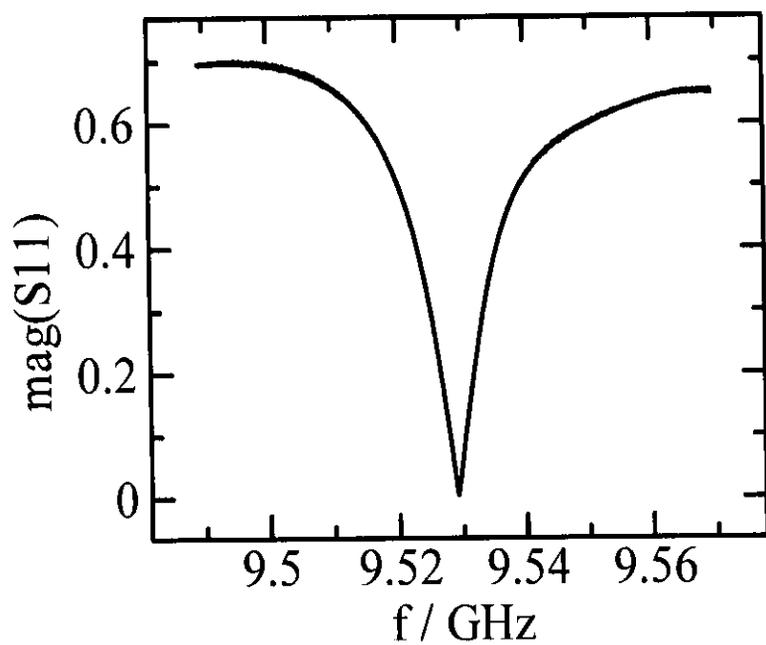


図14 CaTiO<sub>3</sub>誘電体共振器の共振特性

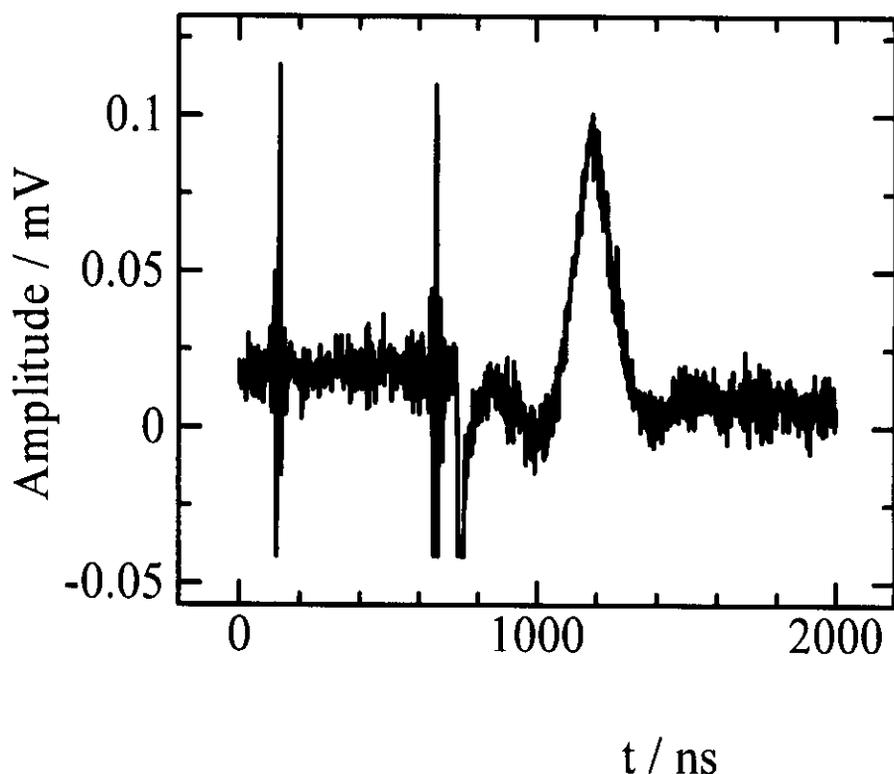


図15 CaTiO<sub>3</sub>DR共振器で測定した $\gamma$ 線照射石英E' センターの電子スピンエコー

このCaTiO<sub>3</sub>共振器を次節で述べるHe温度可変用クライオスタットに設置して測定した共振特性を図14に示す。これより共振周波数は9.5291GHz、Q値は940であった。図はこの共振器を銅製のシールドに設置して測定した、 $\gamma$ 線照射によって生じた石英中のE' センターのスピンエコー信号である。測定条件はマイクロ波周波数 9.5GHz、マイクロ波パルス幅 10ns(90°)-20ns(180°)、パルス間隔 200ns、 $Q \sim 100$ 、積算はしていない。SN比は約7であった。これより今回試作したDRは十分パルスEPR測定に使用できることを示すことが出来た。

## 6. 低温実験と光照射実験

### 6. 1ヘリウムクライオスタット

4~300Kの温度範囲におけるパルスEPR測定用ヘリウムクライオスタットを試作し

た、クライオスタットの構造を図 16 に、詳細な設計図は付録 2 に示す。図 16 で磁場勾配コイル、同軸ケーブル、試料管、EPR 共振器はステンレス製の二重管の真空層内に設置され、液体ヘリウムを下部から吹き付けて EPR 共振器およびその中の試料を冷却する。マイクロ波は同軸ケーブルから導入され、1 巻きのループもしくは弧状のアンテナによって EPR 共振器に結合される。上部のねじ機構をもつ結合度調整機構によってアンテナを上下して共振器との距離を調整し、過結合から疎結合まで結合度を変えることが出来る。このステンレス二重管は市販の Oxford 社製 EPR クライオスタットに標準で付属している石英二重管の代わりに挿入することが出来る。試作したクライオスタットは cw 測定からパルス測定にわたる安定な結合の可変性を示し、容易に測定試料を交換できることが分かった。

## 6. 2 光照射

パルス EPR は 10ns の時間分解能を持つ。光励起によって生じる過渡ラジカルや励起状態を研究することを目的としてパルスレーザー光による光照射実験はパルス EPR の重要な応用である。市販の装置では光照射用の窓を持つ空洞共振器、もしくは光を透過するサファイア単結晶から作った誘電体共振器を用いるが、本研究で用いた誘電体共振器は光を通さない。また、磁場勾配コイルがあり、側面からの光照射が難しい。そこで図 17 に示したような試料管に挿入した光ファイバを通じて試料を照射する方法を開発した。

この方法では光ファイバ端が試料に非常に近いため有効に試料に光を照射でき、通常窓を通じた場合の 3~5 分の 1 のレーザー光ですむことが分かった。また光軸あわせはレーザー光を光ファイバへ導入する部分のみですむ。これは室温部で行うため、窓を用いた実験のように共振器およびクライオスタット内の試料に外部から光軸を合わせるよりもはるかに容易であった。付録に添付した論文はこの方法による測定を光励起多重項の測定に応用した例を報告したものである。

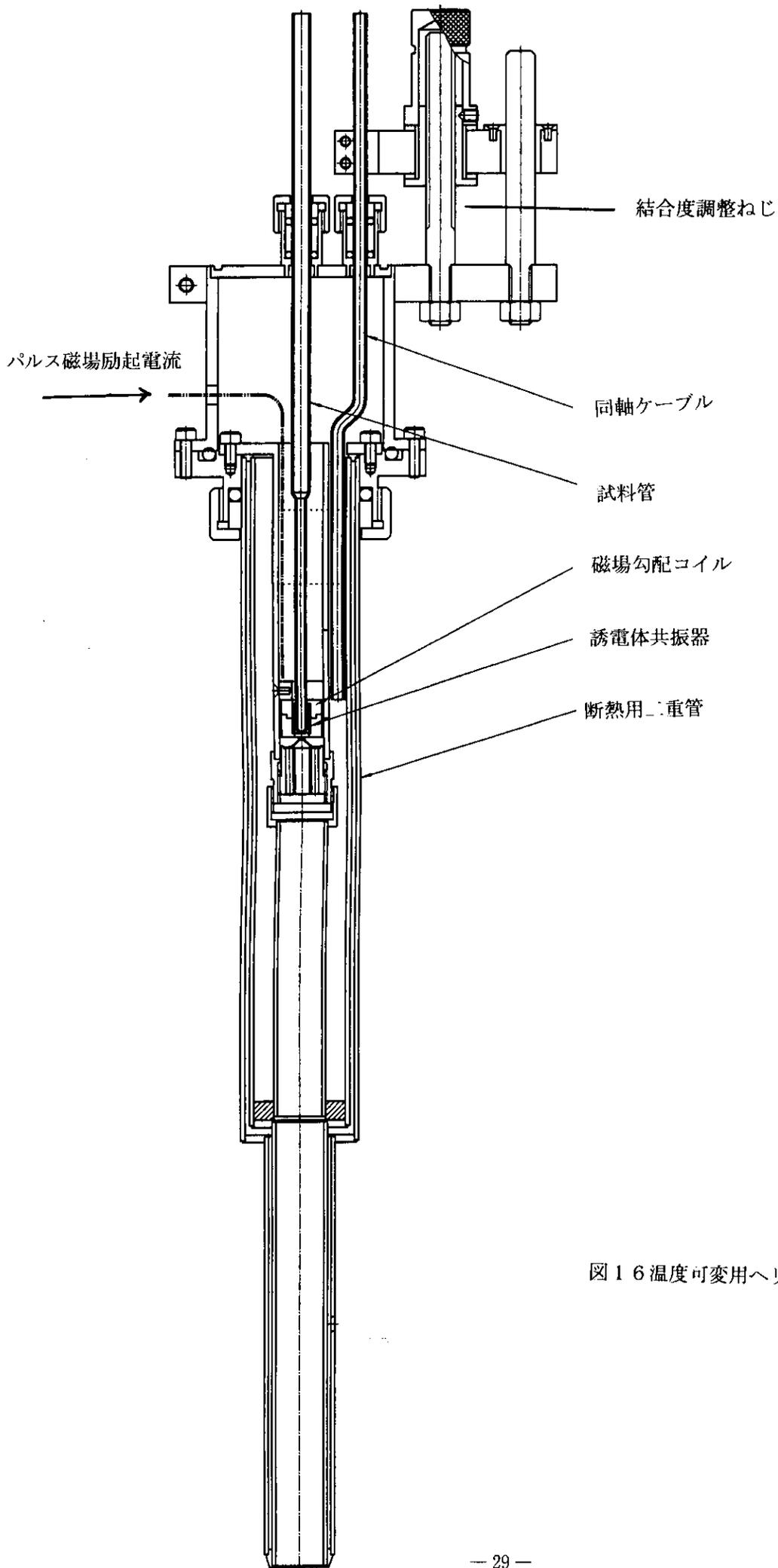


図16 温度可変用ヘリウムクライオスタット

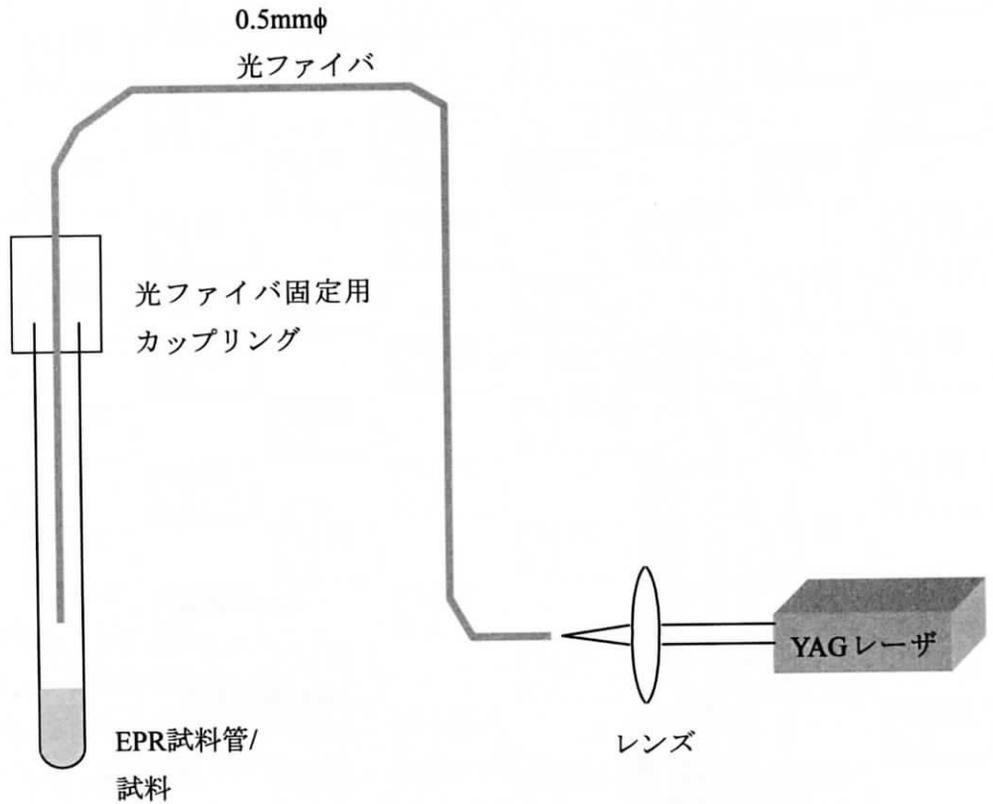


図 17 パルスレーザーによる光照射測定用実験配置

## 7. 装置の問題点と今後の改良点

今回開発した装置についてその問題点と今後の改良点を次にまとめる。

### 1) パルス磁場駆動電源

コヒーレンス経路の選択において、パルス磁場勾配を反転して加えることがより精密な実験において要求される。このための電源は電流方向を反転する必要があり、今回試作したものよりかなり技術的に難しいものとなる。予備的な検討を行ったが、将来実現は可能であるとの見通しである。

拡散測定などの応用への拡張を考えた場合、より強い磁場勾配を用いることによってより小さな拡散速度を測定できる。これはコイルの駆動電圧を増加する、コイル巻き数を

増やす、コイルを小型化するなどの方法が考えられるが、コイルの巻き数を増やすと過渡特性が悪化すること、コイルの小型化は使用できる試料の量を制限すること等からコイルの駆動電圧を増加することが望ましい。現在使用している高圧電源はさほど高い値ではなく、1kV以上のものが容易に入手可能であるのでこの改良は容易であると考えられる。

## 2) 応答速度の改良

実際の共振器では外部シールドなどの渦電流による過渡特性の悪化がある。これを避ける方法として、外部シールドを薄く鍍金したガラス、セラミックスなどの絶縁体でつくする方法がある。これはコイルに最も近いシールド部分に使うと有効であるが、さらに、ステンレス製の断熱層（二重管）を鍍金したガラスに変えることも考慮する価値があると考えている。

技術的にはより困難であるが、近年開発された動的シールド法を取り入れることは興味ある開発テーマである。これはコイル外部に漏れる磁場を外部に設置したシールド用コイルで打ち消す方法で、定常的な磁場については実現されている。また、(1)に述べた磁場勾配の反転は動的に過渡磁場の影響を消去し、過渡特性の改善を行ううえでも有用である。

## 3) EPR 共振器

今回試作した共振器はまだ不純物信号が残存しており、今後さらに高純度の原料を探索することは重要である。また、共振周波数は磁場勾配コイル、外部シールド形状、試料などに影響されるため、今回は共振器の試作を試行錯誤的に行った。近年数値解析技術が進み、現実的な構造に対する共振器特性を計算で求めることができるようになっている。この方法を設計に取り入れることにより、見通し良く、より高性能の共振器を作ることが出来るようになると思われる。

## 8. まとめ

パルス EPR でコヒーレンス経路の選択を可能にするパルス磁場発生装置のためのパルス磁場駆動電源、共振器、低温クライオスタット、光照射装置の開発を行い、下記の成果をあげた。

- 1) パルス磁場勾配発生用四重極コイルの設計. 効率よく均一な磁場勾配を発生する四重極コイルを設計した. コイルが発生する磁場の空間分布を計算する数値解析プログラムを作成し、コイルの大きさや形の最適化設計を行った.
- 2) パルス磁場駆動電源の試作. コイルを駆動しパルス磁場を発生するための高速電流パルス用の電源装置を設計し、試作した. 駆動電源単体の性能として 10ns 以下のスイッチングスピードを得ることができた. さらに、パルス磁場の反転を行うためのパルス磁場駆動装置のために予備的な検討を行った.
- 3) 磁場勾配コイルの試作. 設計に基づき、磁場勾配発生用四重極コイルを試作した. 静的なコイルの特性を評価するために定常電流で発生磁場強度を測定し、シミュレーション結果と良い一致を得た. 2 で試作したパルス発生器でコイルを実際に駆動し、生成したパルス磁場を測定した結果は、立ち上がり立下りは約 20ns となり、パルス EPR 測定に十分な性能を得た.
- 4) EPR 共振器の開発. パルス磁場を試料に効率的に照射できる誘電体共振器を開発した. 種々の誘電体材料を検討し、常磁性不純物の少ない、ほぼ実用になる共振器を開発できた.
- 5) 低温クライオスタットの設計と試作. 低温でのパルス EPR 測定用のヘリウムクライオスタットを設計し試作した. このクライオスタットでは誘電体共振器を用いて結合度を過結合から疎結合まで容易に帰ることが出来、また、試料交換も容易に出来る.

以上、高速のパルス磁場駆動電源、小型の四重極コイル、誘電体共振器を用いることにより、X バンド ESR 装置で従来の報告より一桁高速のパルス磁場勾配を生成することに成功した。高速のパルス磁場勾配を実用化するのに基本的な性能を達成し、今後、高精度の位相操作を可能にする装置を開発する見通しを立てることができた。今回試作した装置は位相操作以外にも飽和測定、拡散測定などにも応用が可能であり、また、コイルの巻き方の変更で空間的に均一な、勾配を持たないパルス磁場を生成することも可能である。これは磁場ジャンプ法による二重共鳴などの測定法にも用いることが出来、パルス EPR の応用範囲を大きく広げることが出来ると期待される。

## 文献

- 1) A. Schweiger, G. Jeschke, Principles of Pulsed Electron Paramagnetic Resonance, Oxford University Press, Oxford, 2001.
- 2) G. G. Maresh, M. Mehring, J. U. von Schutz and H. -P. Werner, J. Chem. Phys. **91**, 4543-4547 (1989).
- 3) Callaghan P. T., Coy A., Dormann E., Ruf R. and Kaplan N. J. Magn. Reson. **A111**, 127-131 (1994).
- 4) I. V. Kulik, Yu. A. Grishin, S. A. Dzuba, I. A. Grigryev, S. V. Klystaskaya, S. F. Vasilevsky and Yu. D. Tsvetkov, Magn. Reson., **157**, 1-8 (2002).
- 5) M. Willer, J. Granwehr, J. Forrer and A. Schweiger, J. Magn. Reson. **133**, 46-52 (1998) (6) C. P. Slichter, Principles of Magnetic Resonance, Chap. 9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- 7) R. R. Ernst, G. Bodenhausen and A. Wakaun, in Principles of Nuclear Magnetic Resonance in One and Two Dimensions, Oxford University Press, Oxford (1987).
- 8) T. Parella, Pulsed Field Gradients: a New Tool for Routine NMR, Magn. Res. Chem., **36**, 467-495 (1998).
- 9) Tanner and Stejskal, J. Chem. Phys. **49**, 1768 (1968).

## 付録 1. 四重極コイルによる磁場分布の計算プログラム (Visual BASIC Ver. 5)

```
VERSION 5.00
Begin VB.Form Form1
    Caption           = "Form1"
    ClientHeight      = 9120
    ClientLeft        = 60
    ClientTop         = 450
    ClientWidth       = 11160
    LinkTopic         = "Form1"
    ScaleHeight       = 9120
    ScaleWidth        = 11160
    StartUpPosition  = 3 'Windows の既定値
Begin VB.TextBox Text19
    Height            = 270
    Left              = 2520
    TabIndex          = 91
    Text              = "Text19"
    Top               = 2760
    Width             = 855
End
Begin VB.TextBox Text17
    Height            = 270
    Left              = 1680
    TabIndex          = 90
    Text              = "Text17"
    Top               = 2760
    Width             = 735
End
Begin VB.TextBox Text4
    Height            = 270
    Left              = 600
    TabIndex          = 89
    Text              = "Text4"
    Top               = 2760
    Width             = 855
End
Begin VB.TextBox Text3
    Height            = 375
    Left              = 3480
    TabIndex          = 87
    Text              = "Text3"
    Top               = 5880
    Width             = 975
End
Begin VB.TextBox Text1
    Height            = 495
    Left              = 7680
    TabIndex          = 85
    Text              = "Text1"
    Top               = 960
    Width             = 975
End
Begin VB.TextBox Text48
    Height            = 615
    Left              = 5160
    TabIndex          = 83
    Text              = "Text48"
    Top               = 4320
    Width             = 735
End
Begin VB.TextBox Text47
```

```

    Height      = 495
    Left        = 4320
    TabIndex    = 82
    Text        = "Text47"
    Top         = 4320
    Width       = 615
End
Begin VB.TextBox Text46
    Height      = 615
    Left        = 3480
    TabIndex    = 81
    Text        = "Text46"
    Top         = 4320
    Width       = 735
End
Begin VB.TextBox Text45
    Height      = 615
    Left        = 2520
    TabIndex    = 80
    Text        = "Text45"
    Top         = 4320
    Width       = 615
End
Begin VB.TextBox Text44
    Height      = 615
    Left        = 1680
    TabIndex    = 79
    Text        = "Text44"
    Top         = 4320
    Width       = 735
End
Begin VB.TextBox Text43
    Height      = 615
    Left        = 600
    TabIndex    = 72
    Text        = "Text43"
    Top         = 4320
    Width       = 975
End
Begin VB.TextBox Text42
    Height      = 495
    Left        = 5280
    TabIndex    = 57
    Text        = "Text42"
    Top         = 3120
    Width       = 855
End
Begin VB.TextBox Text41
    Height      = 495
    Left        = 4440
    TabIndex    = 56
    Text        = "Text41"
    Top         = 3120
    Width       = 855
End
Begin VB.TextBox Text40
    Height      = 495
    Left        = 3600
    TabIndex    = 55
    Text        = "Text40"
    Top         = 3120
    Width       = 735
End
Begin VB.TextBox Text39
    Height      = 375

```

```

Left          = 2520
TabIndex     = 54
Text         = "Text39"
Top          = 3120
Width        = 975
End
Begin VB.TextBox Text38
Height       = 375
Left        = 1560
TabIndex    = 53
Text        = "Text38"
Top         = 3120
Width       = 855
End
Begin VB.TextBox Text37
Height       = 375
Left        = 600
TabIndex    = 52
Text        = "Text37"
Top         = 3120
Width       = 855
End
Begin VB.TextBox Text33
Height       = 375
Left        = 9480
TabIndex    = 47
Text        = "Text33"
Top         = 1800
Width       = 975
End
Begin VB.TextBox Text31
Height       = 375
Left        = 7680
TabIndex    = 46
Text        = "Text31"
Top         = 1800
Width       = 855
End
Begin VB.TextBox Text30
Height       = 375
Left        = 9480
TabIndex    = 44
Text        = "Text30"
Top         = 2760
Width       = 975
End
Begin VB.TextBox Text29
Height       = 375
Left        = 8520
TabIndex    = 43
Text        = "Text29"
Top         = 2760
Width       = 975
End
Begin VB.TextBox Text28
Height       = 375
Left        = 7560
TabIndex    = 42
Text        = "Text28"
Top         = 2760
Width       = 975
End
Begin VB.TextBox Text27
Height       = 495
Left        = 6000

```

```

    TabIndex      = 34
    Text          = "Text27"
    Top          = 2040
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text26
    Height       = 375
    Left        = 4800
    TabIndex    = 33
    Text        = "Text26"
    Top        = 2040
    Width      = 1095
End
Begin VB.TextBox Text25
    Height       = 375
    Left        = 3840
    TabIndex    = 32
    Text        = "Text25"
    Top        = 2040
    Width      = 975
End
Begin VB.TextBox Text24
    Height       = 375
    Left        = 2520
    TabIndex    = 31
    Text        = "Text24"
    Top        = 2040
    Width      = 1215
End
Begin VB.TextBox Text23
    Height       = 375
    Left        = 1560
    TabIndex    = 30
    Text        = "Text23"
    Top        = 2040
    Width      = 975
End
Begin VB.TextBox Text22
    Height       = 375
    Left        = 600
    TabIndex    = 29
    Text        = "Text22"
    Top        = 2040
    Width      = 975
End
Begin VB.TextBox Text18
    Height       = 375
    Left        = 5880
    TabIndex    = 27
    Text        = "Text18"
    Top        = 120
    Width      = 1335
End
Begin VB.TextBox Text16
    Height       = 375
    Left        = 4920
    TabIndex    = 24
    Text        = "Text16"
    Top        = 120
    Width      = 975
End
Begin VB.TextBox Text15
    Height       = 375
    Left        = 3840
    TabIndex    = 23

```

```

    Text          = "Text15"
    Top           = 120
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text14
    Height        = 375
    Left         = 9600
    TabIndex     = 21
    Text         = "Text14"
    Top          = 480
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text13
    Height        = 495
    Left         = 6360
    TabIndex     = 18
    Text         = "Text13"
    Top          = 1080
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text12
    Height        = 375
    Left         = 2760
    TabIndex     = 17
    Text         = "Text12"
    Top          = 1080
    Width        = 1215
End
Begin VB.TextBox Text2
    Height        = 375
    Left         = 600
    TabIndex     = 15
    Text         = "Text2"
    Top          = 1080
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text11
    Height        = 375
    Left         = 8520
    TabIndex     = 13
    Text         = "Text11"
    Top          = 480
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text10
    Height        = 375
    Left         = 5160
    TabIndex     = 9
    Text         = "Text10"
    Top          = 1080
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text9
    Height        = 375
    Left         = 1800
    TabIndex     = 8
    Text         = "Text9"
    Top          = 1080
    Width        = 975
End
Begin VB.TextBox Text8
    Height        = 375
    Left         = 3960
    TabIndex     = 7
    Text         = "Text8"

```

```

    Top          = 1080
    Width        = 1095
End
Begin VB.TextBox Text7
    Height       = 375
    Left        = 1800
    TabIndex    = 4
    Text        = "Text7"
    Top         = 120
    Width       = 975
End
Begin VB.TextBox Text5
    Height       = 375
    Left        = 720
    TabIndex    = 3
    Text        = "Text5"
    Top         = 120
    Width       = 1095
End
Begin VB.TextBox Text6
    Height       = 375
    Left        = 2760
    TabIndex    = 1
    Text        = "Text6"
    Top         = 120
    Width       = 1095
End
Begin VB.CommandButton Command1
    Caption     = "計算"
    Height     = 495
    Left      = 8040
    TabIndex  = 0
    Top       = 0
    Width     = 2535
End
Begin VB.Label Label4
    Caption    = "同上"
    Height    = 255
    Left     = 0
    TabIndex = 92
    Top     = 2760
    Width   = 615
End
Begin VB.Label Label1
    Caption    = "C8"
    Height    = 495
    Left     = 2640
    TabIndex = 88
    Top     = 7560
    Width   = 1215
End
Begin VB.Label Label3
    Caption    = "1マス何m"
    Height    = 375
    Left     = 7680
    TabIndex = 86
    Top     = 1440
    Width   = 2895
End
Begin VB.Line Line26
    X1       = 2160
    X2       = 2040
    Y1       = 7440
    Y2       = 7200
End

```

```

Begin VB.Line Line25
  X1      = 1920
  X2      = 2040
  Y1      = 7560
  Y2      = 7200
End
Begin VB.Line Line20
  X1      = 2400
  X2      = 2280
  Y1      = 6840
  Y2      = 7080
End
Begin VB.Line Line19
  X1      = 2160
  X2      = 2280
  Y1      = 6960
  Y2      = 7080
End
Begin VB.Line Line24
  X1      = 1080
  X2      = 960
  Y1      = 6960
  Y2      = 6720
End
Begin VB.Line Line23
  X1      = 840
  X2      = 960
  Y1      = 6960
  Y2      = 6720
End
Begin VB.Line Line22
  X1      = 720
  X2      = 600
  Y1      = 7080
  Y2      = 7320
End
Begin VB.Line Line21
  X1      = 480
  X2      = 600
  Y1      = 7080
  Y2      = 7320
End
Begin VB.Label Label58
  Caption = "C7 と C8"
  Height = 615
  Left    = 0
  TabIndex = 84
  Top     = 4320
  Width  = 735
End
Begin VB.Label Label57
  Caption = "LzMIN 値"
  Height = 375
  Left    = 5160
  TabIndex = 78
  Top     = 5160
  Width  = 1215
End
Begin VB.Label Label56
  Caption = "LyMIN 値"
  Height = 495
  Left    = 4200
  TabIndex = 77
  Top     = 5160
  Width  = 1335

```

```

End
Begin VB.Label Label155
    Caption       = "LxMIN 值"
    Height        = 375
    Left          = 3480
    TabIndex      = 76
    Top           = 5160
    Width         = 1335
End
Begin VB.Label Label154
    Caption       = "LzMAX 值"
    Height        = 495
    Left          = 2400
    TabIndex      = 75
    Top           = 5160
    Width         = 1455
End
Begin VB.Label Label153
    Caption       = "LyMAX 值"
    Height        = 375
    Left          = 1440
    TabIndex      = 74
    Top           = 5160
    Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label152
    Caption       = "LxMAX 值"
    Height        = 375
    Left          = 480
    TabIndex      = 73
    Top           = 5160
    Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label150
    Caption       = "C7"
    Height        = 495
    Left          = 2640
    TabIndex      = 71
    Top           = 5760
    Width         = 375
End
Begin VB.Line Line18
    X1            = 2280
    X2            = 2040
    Y1            = 7440
    Y2            = 8160
End
Begin VB.Line Line17
    X1            = 2280
    X2            = 2040
    Y1            = 6000
    Y2            = 6960
End
Begin VB.Line Line16
    X1            = 2040
    X2            = 2040
    Y1            = 6960
    Y2            = 8280
End
Begin VB.Line Line15
    X1            = 960
    X2            = 600
    Y1            = 7320
    Y2            = 8160
End

```

```

Begin VB.Line Line14
  X1      = 960
  X2      = 600
  Y1      = 5880
  Y2      = 6720
End
Begin VB.Label Label49
  Caption = "C5 と C6"
  Height  = 375
  Left    = 0
  TabIndex = 70
  Top     = 3120
  Width   = 615
End
Begin VB.Label Label48
  Caption = "C6"
  Height  = 375
  Left    = 1560
  TabIndex = 69
  Top     = 6480
  Width   = 495
End
Begin VB.Label Label47
  Caption = "C5"
  Height  = 255
  Left    = 1560
  TabIndex = 68
  Top     = 8160
  Width   = 735
End
Begin VB.Line Line13
  X1      = 2280
  X2      = 2280
  Y1      = 6000
  Y2      = 7440
End
Begin VB.Label Label46
  Caption = "C4"
  Height  = 495
  Left    = 120
  TabIndex = 67
  Top     = 8280
  Width   = 975
End
Begin VB.Label Label45
  Caption = "C3"
  Height  = 375
  Left    = 120
  TabIndex = 66
  Top     = 6240
  Width   = 495
End
Begin VB.Line Line12
  X1      = 960
  X2      = 960
  Y1      = 5880
  Y2      = 7320
End
Begin VB.Label Label44
  Caption = "C2"
  Height  = 495
  Left    = 720
  TabIndex = 65
  Top     = 5640
  Width   = 615

```

```

End
Begin VB.Label Label43
    Caption      = "C1"
    Height       = 375
    Left         = 960
    TabIndex     = 64
    Top          = 7320
    Width        = 735
End
Begin VB.Line Linel1
    X1           = 600
    X2           = 600
    Y1           = 6720
    Y2           = 8160
End
Begin VB.Label Label42
    Caption      = "LzMIN 値"
    Height       = 375
    Left         = 5280
    TabIndex     = 63
    Top          = 3840
    Width        = 1215
End
Begin VB.Label Label41
    Caption      = "LyMIN 値"
    Height       = 495
    Left         = 4320
    TabIndex     = 62
    Top          = 3720
    Width        = 1335
End
Begin VB.Label Label40
    Caption      = "LxMIN 値"
    Height       = 375
    Left         = 3480
    TabIndex     = 61
    Top          = 3720
    Width        = 1335
End
Begin VB.Label Label39
    Caption      = "LzMAX 値"
    Height       = 495
    Left         = 2400
    TabIndex     = 60
    Top          = 3600
    Width        = 1455
End
Begin VB.Label Label38
    Caption      = "LyMAX 値"
    Height       = 375
    Left         = 1440
    TabIndex     = 59
    Top          = 3600
    Width        = 1215
End
Begin VB.Label Label37
    Caption      = "LxMAX 値"
    Height       = 375
    Left         = 480
    TabIndex     = 58
    Top          = 3600
    Width        = 1215
End
Begin VB.Label Label36
    Caption      = "サンプル(Px, Py, Pz)"

```

```

Height      = 735
Left        = 8280
TabIndex    = 51
Top         = 3720
Width       = 1575
End
Begin VB.Line Line10
X1          = 7200
X2          = 10560
Y1          = 1680
Y2          = 1680
End
Begin VB.Line Line9
X1          = 10560
X2          = 10560
Y1          = 1680
Y2          = 3840
End
Begin VB.Line Line8
X1          = 9720
X2          = 10560
Y1          = 3840
Y2          = 3840
End
Begin VB.Line Line7
X1          = 8280
X2          = 7200
Y1          = 3840
Y2          = 3840
End
Begin VB.Line Line6
X1          = 7200
X2          = 7200
Y1          = 1680
Y2          = 3840
End
Begin VB.Label Label135
Caption     = "同上"
Height     = 495
Left       = 120
TabIndex   = 50
Top        = 1080
Width      = 735
End
Begin VB.Label Label134
Caption     = "C1 と C 2"
Height     = 975
Left       = 120
TabIndex   = 49
Top        = 240
Width      = 615
End
Begin VB.Label Label133
Caption     = "サンプル空間 最大(x、y、z) Yを固定"
Height     = 735
Left       = 7800
TabIndex   = 48
Top        = 2160
Width      = 2175
End
Begin VB.Label Label132
Caption     = "サンプル空間 最小(x、y、z)"
Height     = 735
Left       = 7800
TabIndex   = 45

```

```

    Top          = 3360
    Width        = 2175
End
Begin VB.Label Label131
    Caption      = "LzMIN 値"
    Height       = 375
    Left         = 6240
    TabIndex     = 41
    Top          = 2520
    Width        = 1215
End
Begin VB.Label Label130
    Caption      = "LyMIN 値"
    Height       = 495
    Left         = 4800
    TabIndex     = 40
    Top          = 2520
    Width        = 1335
End
Begin VB.Label Label129
    Caption      = "LxMIN 値"
    Height       = 375
    Left         = 3720
    TabIndex     = 39
    Top          = 2520
    Width        = 1335
End
Begin VB.Label Label128
    Caption      = "LzMAX 値"
    Height       = 495
    Left         = 2520
    TabIndex     = 38
    Top          = 2520
    Width        = 1455
End
Begin VB.Label Label127
    Caption      = "LyMAX 値"
    Height       = 375
    Left         = 1560
    TabIndex     = 37
    Top          = 2520
    Width        = 1215
End
Begin VB.Label Label121
    Caption      = "LxMAX 値"
    Height       = 375
    Left         = 600
    TabIndex     = 36
    Top          = 2520
    Width        = 1215
End
Begin VB.Label Label120
    Caption      = "C3 と C4"
    Height       = 735
    Left         = 0
    TabIndex     = 35
    Top          = 2160
    Width        = 1095
End
Begin VB.Label Label118
    Caption      = "LzMIN 値"
    Height       = 375
    Left         = 5880
    TabIndex     = 28
    Top          = 600

```

```

    Width          = 1215
End
Begin VB.Label Label16
    Caption        = "LyMIN 值"
    Height         = 495
    Left           = 4920
    TabIndex       = 26
    Top            = 600
    Width          = 1335
End
Begin VB.Label Label15
    Caption        = "LxMIN 值"
    Height         = 375
    Left           = 3840
    TabIndex       = 25
    Top            = 600
    Width          = 1335
End
Begin VB.Label Label14
    Caption        = "N"
    Height         = 495
    Left           = 9840
    TabIndex       = 22
    Top            = 840
    Width          = 1575
End
Begin VB.Label Label13
    Caption        = "LzMAX"
    Height         = 495
    Left           = 2760
    TabIndex       = 20
    Top            = 1560
    Width          = 1095
End
Begin VB.Label Label12
    Caption        = "LzMIN"
    Height         = 495
    Left           = 6240
    TabIndex       = 19
    Top            = 1080
    Width          = 1095
End
Begin VB.Label Label2
    Caption        = "LxMAX"
    Height         = 495
    Left           = 600
    TabIndex       = 16
    Top            = 1560
    Width          = 1215
End
Begin VB.Label Label11
    Caption        = "电流 I (A)"
    Height         = 255
    Left           = 8640
    TabIndex       = 14
    Top            = 960
    Width          = 1935
End
Begin VB.Label Label10
    Caption        = "LyMIN"
    Height         = 375
    Left           = 5040
    TabIndex       = 12
    Top            = 1560
    Width          = 1455

```

```

End
Begin VB.Label Label9
    Caption       = "LyMAX"
    Height        = 495
    Left          = 1800
    TabIndex      = 11
    Top           = 1560
    Width         = 1335
End
Begin VB.Label Label8
    Caption       = "LxMIN"
    Height        = 615
    Left          = 3960
    TabIndex      = 10
    Top           = 1560
    Width         = 1335
End
Begin VB.Label Label7
    Caption       = "LyMAX 値"
    Height        = 495
    Left          = 1800
    TabIndex      = 6
    Top           = 600
    Width         = 975
End
Begin VB.Label Label5
    Caption       = "LxMAX 値"
    Height        = 375
    Left          = 720
    TabIndex      = 5
    Top           = 600
    Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label6
    Caption       = "LzMAX 値"
    Height        = 495
    Left          = 2760
    TabIndex      = 2
    Top           = 600
    Width         = 1455
End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Private Sub Command1_Click()

Open "D:\V.B.2\磁場勾配コイルによる磁場勾配計算\ビデオサバー、.txt" For Output As #1
Dim Px As Integer
Dim Py As Integer
Dim Pz As Integer
Dim ZenBx As Double
Dim ZenBy As Double
Dim ZenBz As Double
Dim ZenB As Double
Dim MAS As Double

Bmax = 0
Bmin = 10000
MAS = Val(Text1.Text)

i = Val(Text11.Text)
LxMAX = Val(Text2.Text)

```

```

LxMIN = Val(Text8.Text)
LyMAX = Val(Text9.Text)
LyMIN = Val(Text10.Text)
LzMAX = Val(Text12.Text)
LzMIN = Val(Text13.Text)
N = Val(Text14.Text)
dLx = (LxMAX - LxMIN) / (N - 1)
dLy = (LyMAX - LyMIN) / (N - 1)
dLz = (LzMAX - LzMIN) / (N - 1)

```

```

C1 = Val(Text15.Text)
D1 = Val(Text16.Text)
E1 = Val(Text18.Text)
C2 = Val(Text5.Text)
D2 = Val(Text7.Text)
E2 = Val(Text6.Text)
C3 = Val(Text22.Text)
D3 = Val(Text23.Text)
E3 = Val(Text24.Text)
C4 = Val(Text25.Text)
D4 = Val(Text26.Text)
E4 = Val(Text27.Text)
C5 = Val(Text40.Text)
D5 = Val(Text41.Text)
E5 = Val(Text42.Text)
C6 = Val(Text37.Text)
D6 = Val(Text38.Text)
E6 = Val(Text39.Text)
C7 = Val(Text43.Text)
D7 = Val(Text44.Text)
E7 = Val(Text45.Text)
C8 = Val(Text46.Text)
D8 = Val(Text47.Text)
E8 = Val(Text48.Text)

```

```

LxMIN2 = Val(Text4.Text)
LyMIN2 = Val(Text17.Text)
LzMIN2 = Val(Text19.Text)

```

```

dLx2 = (LxMAX - LxMIN2) / (N - 1)
dLy2 = (LyMAX - LyMIN2) / (N - 1)
dLz2 = (LzMAX - LzMIN2) / (N - 1)

```

```
Dim B() As Double
```

```
Dim GradB() As Double
```

```

Dim Pxmin As Integer
Pxmin = Val(Text28.Text)
Dim Pxmax As Integer
Pxmax = Val(Text31.Text)
Dim Pzmin As Integer
Pzmin = Val(Text30.Text)
Dim Pzmax As Integer
Pzmax = Val(Text33.Text)

```

```

ReDim B(Pxmin To Pxmax, Pxmin To Pxmax) As Double
Py = Val(Text29.Text)

```

```

Px = Val(Text28.Text)
Do Until Px = Val(Text31.Text)

```

```

Pz = Val(Text30.Text)

Do Until Pz = Val(Text33.Text)

Call sennojiba(Px, Py, Pz, C1, D1, E1, C, D, E, C2, D2, E2, dLx, dLy, dLz, rx, ry, rz,
MEB, X, Y, S, dBx, dBy, dBz, FBx, EBy, EBz, BxSUM, BySUM, BzSUM, Bix, Bly, Biz, i, MAS)

Call sennojiba2(Px, Py, Pz, C3, D3, E3, CA, DA, EA, C4, D4, E4, dLx, dLy, dLz, rx3, ry3,
rz3, MEB3, X1, Y1, S3, dBx3, dBy3, dBz3, EBx3, EBy3, EBz3, BxSUM3, BySUM3, BzSUM3, i, MAS)

Call sennojiba3(Px, Py, Pz, C5, D5, E5, CB, DB, FB, C6, D6, E6, dLx, dLy, dLz, rx5, ry5,
rz5, MEB5, X5, Y5, S5, dBx5, dBy5, dBz5, EBx5, EBy5, EBz5, BxSUM5, BySUM5, BzSUM5, i, MAS)

Call sennojiba4(Px, Py, Pz, C7, D7, E7, CC, DC, EC, C8, D8, E8, dLx, dLy, dLz, rx7, ry7,
rz7, MEB7, X17, Y17, S7, dBx7, dBy7, dBz7, EBx7, EBy7, EBz7, BxSUM7, BySUM7, BzSUM7, i,
MAS)

Call sennojiba5(Px, Py, Pz, C2, D2, E2, CD, DD, ED, C3, D3, E3, dLx2, dLy2, dLz2, rx9,
ry9, rz9, MEB9, X9, Y9, S9, dBx9, dBy9, dBz9, EBx9, EBy9, EBz9, BxSUM9, BySUM9, BzSUM9,
i, MAS)

Call sennojiba6(Px, Py, Pz, C4, D4, E4, CE, DE, EE, C1, D1, E1, dLx2, dLy2, dLz2, rx11,
ry11, rz11, MEB11, X11, Y11, S11, dBx11, dBy11, dBz11, EBx11, EBy11, EBz11, BxSUM11,
BySUM11, BzSUM11, i, MAS)

Call sennojiba7(Px, Py, Pz, C6, D6, E6, CF, DF, EF, C7, D7, E7, dLx2, dLy2, dLz2, rx13,
ry13, rz13, MEB13, X13, Y13, S13, dBx13, dBy13, dBz13, EBx13, EBy13, EBz13, BxSUM13,
BySUM13, BzSUM13, i, MAS)

Call sennojiba8(Px, Py, Pz, C8, D8, E8, CG, DG, EG, C5, D5, E5, dLx2, dLy2, dLz2, rx15,
ry15, rz15, MEB15, X15, Y15, S15, dBx15, dBy15, dBz15, EBx15, EBy15, EBz15, BxSUM15,
BySUM15, BzSUM15, i, MAS)

ZenBx = BxSUM * 2 + BxSUM3 * 2 + BxSUM5 * 2 + BxSUM7 * 2 + BxSUM9 * 2 + BxSUM11 * 2 + BxSUM13
* 2 + BxSUM15 * 2
ZenBy = BySUM * 2 + BySUM3 * 2 + BySUM5 * 2 + BySUM7 * 2 + BySUM9 * 2 + BySUM11 * 2 + BySUM13
* 2 + BySUM15 * 2
ZenBz = BzSUM * 2 + BzSUM3 * 2 + BzSUM5 * 2 + BzSUM7 * 2 + BzSUM9 * 2 + BzSUM11 * 2 + BzSUM13
* 2 + BzSUM15 * 2

ZenB = ((Sqr(ZenBx ^ 2 + ZenBy ^ 2 + ZenBz ^ 2)) / MAS)
'B(Px, Pz) = ZenBz / MAS

'Print #1, ", "; B(Px, Pz);

Print #1, ", "; ZenB;

Pz = Pz + 1

Loop

Print #1, " ; ";

Px = Px + 1

Loop

'ReDim GradB(Pxmin To Pxmax, Pxmin To Pxmax) As Double

```

```

' ix = Text28
' Do Until ix = Text31

' iz = Text30 + 4
' Do Until iz = Text33 - 3

' If Sqr(ix ^ 2 + iz ^ 2) > 15 Then
' GradB(ix, iz) = 0

' Else
' GradB(ix, iz) = -((1 / 60) * (45 * B(ix, iz + 1) - 45 * B(ix, iz - 1) - 9 * B(ix, iz
+ 2) + 9 * B(ix, iz - 2) + B(ix, iz + 3) - B(ix, iz - 3))) / (MAS * 100)
' If Bmax < GradB(ix, iz) Then
' Bmax = GradB(ix, iz)
' End If

' If Bmin > GradB(ix, iz) Then
' Bmin = GradB(ix, iz)
' End If
' End If

' Print #1, ", "; GradB(ix, iz);

' iz = iz + 1

' Loop

' Print #1, " ; ";

' Loop

' Print #1, "Bmax="; Bmax;
' Print #1, "Bmin="; Bmin;
Close #1

End Sub
Sub sennojiba(Px, Py, Pz, C1, D1, E1, C, D, E, C2, D2, E2, dLx, dLy, dLz, rx, ry, rz, MEB,
X, Y, S, dBx, dBy, dBz, EBx, EBy, EBz, BxSUM, BySUM, BzSUM, Blx, Bly, Blz, i, MAS)

BxSUM = 0
BySUM = 0
BzSUM = 0

C = C1
D = D1
E = E1

Do Until C >= C2 And D >= D2 And E >= E2
rx = Px - C
ry = Py - D
rz = Pz - E
MEB = Sqr((dLy * rz - dLz * ry) ^ 2 + (dLz * rx - dLx * rz) ^ 2 + (dLx * ry - dLy * rx)
^ 2)
X = Sqr(dLx ^ 2 + dLy ^ 2 + dLz ^ 2)
Y = Sqr(rx ^ 2 + ry ^ 2 + rz ^ 2)
If X = 0 Or Y = 0 Then

```

```

S = 0
Else
S = MEB / (X * Y)
End If

If MEB = 0 Then
EBx = 0 And EBy = 0 And EBz = 0
Else
EBx = (dLy * rz - dLz * ry) / MEB
EBy = (dLz * rx - dLx * rz) / MEB
EBz = (dLx * ry - dLy * rx) / MEB
End If
If rx = 0 And ry = 0 And rz = 0 Then
dBx = 0 And dBy = 0 And dBz = 0
Else
dBx = ((0.0000001 * i * dLy * S) / (Sqr(rx ^ 2 + ry ^ 2 + rz ^ 2)) ^ 2) * EBx / MAS
dBy = ((0.0000001 * i * dLy * S) / (Sqr(rx ^ 2 + ry ^ 2 + rz ^ 2)) ^ 2) * EBy / MAS
dBz = ((0.0000001 * i * dLy * S) / (Sqr(rx ^ 2 + ry ^ 2 + rz ^ 2)) ^ 2) * EBz / MAS
End If
BxSUM = BxSUM + dBx
BySUM = BySUM + dBy
BzSUM = BzSUM + dBz

E = E + dLz
D = D + dLy
C = C + dLx
Loop

End Sub

Sub sennojiba2(Px, Py, Pz, C3, D3, E3, CA, DA, EA, C4, D4, E4, dLx, dLy, dLz, rx3, ry3,
rz3, MEB3, X1, Y1, S3, dBx3, dBy3, dBz3, EBx3, EBy3, EBz3, BxSUM3, BySUM3, BzSUM3, i, MAS)

BxSUM3 = 0
BySUM3 = 0
BzSUM3 = 0

CA = C3
DA = D3
EA = E3

Do Until CA <= C4 And DA <= D4 And EA <= E4
rx3 = Px - CA
ry3 = Py - DA
rz3 = Pz - EA
MEB3 = Sqr((dLy * rz3 - dLz * ry3) ^ 2 + (dLz * rx3 - dLx * rz3) ^ 2 + (dLx * ry3 - dLy
* rx3) ^ 2)
X1 = Sqr(dLx ^ 2 + dLy ^ 2 + dLz ^ 2)
Y1 = Sqr(rx3 ^ 2 + ry3 ^ 2 + rz3 ^ 2)
If X1 = 0 Or Y1 = 0 Then
S3 = 0
Else
S3 = MEB3 / (X1 * Y1)
End If

If MEB3 = 0 Then
EBx3 = 0 And EBy3 = 0 And EBz3 = 0
Else
EBx3 = (dLy * rz3 - dLz * ry3) / MEB3

```

```

EBy3 = (dLz * rx3 - dLx * rz3) / MEB3
EBz3 = (dLx * ry3 - dLy * rx3) / MEB3
End If
If rx3 = 0 And ry3 = 0 And rz3 = 0 Then
dBx3 = 0 And dBy3 = 0 And dBz3 = 0
Else
dBx3 = ((0.0000001 * -i * dLy * S3) / (Sqr(rx3 ^ 2 + ry3 ^ 2 + rz3 ^ 2)) ^ 2) * EBx3 /
MAS
dBy3 = ((0.0000001 * -i * dLy * S3) / (Sqr(rx3 ^ 2 + ry3 ^ 2 + rz3 ^ 2)) ^ 2) * EBy3 /
MAS
dBz3 = ((0.0000001 * -i * dLy * S3) / (Sqr(rx3 ^ 2 + ry3 ^ 2 + rz3 ^ 2)) ^ 2) * EBz3 /
MAS
End If
BxSUM3 = BxSUM3 + dBx3
BySUM3 = BySUM3 + dBy3
BzSUM3 = BzSUM3 + dBz3
EA = EA - dLz
DA = DA - dLy
CA = CA - dLx
Loop
End Sub
Sub sennojiba3(Px, Py, Pz, C5, D5, E5, CB, DB, EB, C6, D6, E6, dLx, dLy, dLz, rx5, ry5,
rz5, MEB5, X5, Y5, S5, dBx5, dBy5, dBz5, EBx5, EBy5, EBz5, BxSUM5, BySUM5, BzSUM5, i, MAS)

BxSUM5 = 0
BySUM5 = 0
BzSUM5 = 0

CB = C5
DB = D5
EB = E5

Do Until CB >= C6 And DB >= D6 And EB >= E6
rx5 = Px - CB
ry5 = Py - DB
rz5 = Pz - EB
MEB5 = Sqr((dLy * rz5 - dLz * ry5) ^ 2 + (dLz * rx5 - dLx * rz5) ^ 2 + (dLx * ry5 - dLy
* rx5) ^ 2)
X5 = Sqr(dLx ^ 2 + dLy ^ 2 + dLz ^ 2)
Y5 = Sqr(rx5 ^ 2 + ry5 ^ 2 + rz5 ^ 2)
If X5 = 0 Or Y5 = 0 Then
S5 = 0
Else
S5 = MEB5 / (X5 * Y5)
End If

If MEB5 = 0 Then
EBx5 = 0 And EBy5 = 0 And EBz5 = 0
Else
EBx5 = (dLy * rz5 - dLz * ry5) / MEB5
EBy5 = (dLz * rx5 - dLx * rz5) / MEB5
EBz5 = (dLx * ry5 - dLy * rx5) / MEB5
End If
If rx5 = 0 And ry5 = 0 And rz5 = 0 Then
dBx5 = 0 And dBy5 = 0 And dBz5 = 0
Else
dBx5 = ((0.0000001 * i * dLy * S5) / (Sqr(rx5 ^ 2 + ry5 ^ 2 + rz5 ^ 2)) ^ 2) * EBx5 / MAS
dBy5 = ((0.0000001 * i * dLy * S5) / (Sqr(rx5 ^ 2 + ry5 ^ 2 + rz5 ^ 2)) ^ 2) * EBy5 / MAS
dBz5 = ((0.0000001 * i * dLy * S5) / (Sqr(rx5 ^ 2 + ry5 ^ 2 + rz5 ^ 2)) ^ 2) * EBz5 / MAS
End If
BxSUM5 = BxSUM5 + dBx5
BySUM5 = BySUM5 + dBy5

```

BzSUM5 = BzSUM5 + dBz5

EB = EB + dLz

DB = DB + dLy

CB = CB + dLx

Loop

End Sub

Sub sennojiba4(Px, Py, Pz, C7, D7, E7, CC, DC, EC, C8, D8, E8, dLx, dLy, dLz, rx7, ry7, rz7, MEB7, X17, Y17, S7, dBx7, dBy7, dBz7, EBx7, EBy7, EBz7, BxSUM7, BySUM7, BzSUM7, i, MAS)

BxSUM7 = 0

BySUM7 = 0

BzSUM7 = 0

CC = C7

DC = D7

EC = E7

Do Until CC <= C8 And DC <= D8 And EC <= E8

rx7 = Px - CC

ry7 = Py - DC

rz7 = Pz - EC

MEB7 = Sqr((dLy \* rz7 - dLz \* ry7) ^ 2 + (dLz \* rx7 - dLx \* rz7) ^ 2 + (dLx \* ry7 - dLy \* rx7) ^ 2)

X17 = Sqr(dLx ^ 2 + dLy ^ 2 + dLz ^ 2)

Y17 = Sqr(rx7 ^ 2 + ry7 ^ 2 + rz7 ^ 2)

If X17 = 0 Or Y17 = 0 Then

S7 = 0

Else

S7 = MEB7 / (X17 \* Y17)

End If

If MEB7 = 0 Then

EBx7 = 0 And EBy7 = 0 And EBz7 = 0

Else

EBx7 = (dLy \* rz7 - dLz \* ry7) / MEB7

EBy7 = (dLz \* rx7 - dLx \* rz7) / MEB7

EBz7 = (dLx \* ry7 - dLy \* rx7) / MEB7

End If

If rx7 = 0 And ry7 = 0 And rz7 = 0 Then

dBx7 = 0 And dBy7 = 0 And dBz7 = 0

Else

dBx7 = ((0.0000001 \* -i \* dLy \* S7) / (Sqr(rx7 ^ 2 + ry7 ^ 2 + rz7 ^ 2)) ^ 2) \* EBx7 / MAS

dBy7 = ((0.0000001 \* -i \* dLy \* S7) / (Sqr(rx7 ^ 2 + ry7 ^ 2 + rz7 ^ 2)) ^ 2) \* EBy7 / MAS

dBz7 = ((0.0000001 \* -i \* dLy \* S7) / (Sqr(rx7 ^ 2 + ry7 ^ 2 + rz7 ^ 2)) ^ 2) \* EBz7 / MAS

End If

BxSUM7 = BxSUM7 + dBx7

BySUM7 = BySUM7 + dBy7

BzSUM7 = BzSUM7 + dBz7

EC = EC - dLz

DC = DC - dLy

CC = CC - dLx

Loop

End Sub

Sub sennojiba5(Px, Py, Pz, C2, D2, E2, CD, DD, ED, C3, D3, E3, dLx2, dLy2, dLz2, rx9, ry9, rz9, MEB9, X9, Y9, S9, dBx9, dBy9, dBz9, EBx9, EBy9, EBz9, BxSUM9, BySUM9, BzSUM9, i, MAS)

BxSUM9 = 0  
BySUM9 = 0  
BzSUM9 = 0

CD = C2  
DD = D2  
ED = E2

Do Until CD <= C3 And DD <= D3 And ED <= E3

rx9 = Px - CD

ry9 = Py - DD

rz9 = Pz - ED

MEB9 = Sqr((dLy2 \* rz9 - dLz2 \* ry9) ^ 2 + (dLz2 \* rx9 - dLx2 \* rz9) ^ 2 + (dLx2 \* ry9 - dLy2 \* rx9) ^ 2)

X9 = Sqr(dLx2 ^ 2 + dLy2 ^ 2 + dLz2 ^ 2)

Y9 = Sqr(rx9 ^ 2 + ry9 ^ 2 + rz9 ^ 2)

If X9 = 0 Or Y9 = 0 Then

S9 = 0

Else

S9 = MEB9 / (X9 \* Y9)

End If

If MEB9 = 0 Then

EBx9 = 0 And EBy9 = 0 And EBz9 = 0

Else

EBx9 = (dLy2 \* rz9 - dLz2 \* ry9) / MEB9

EBy9 = (dLz2 \* rx9 - dLx2 \* rz9) / MEB9

EBz9 = (dLx2 \* ry9 - dLy2 \* rx9) / MEB9

End If

If rx9 = 0 And ry9 = 0 And rz9 = 0 Then

dBx9 = 0 And dBy9 = 0 And dBz9 = 0

Else

dBx9 = ((0.0000001 \* -i \* dLx2 \* S9) / (Sqr(rx9 ^ 2 + ry9 ^ 2 + rz9 ^ 2)) ^ 2) \* EBx9 /

MAS

dBy9 = ((0.0000001 \* -i \* dLx2 \* S9) / (Sqr(rx9 ^ 2 + ry9 ^ 2 + rz9 ^ 2)) ^ 2) \* EBy9 /

MAS

dBz9 = ((0.0000001 \* -i \* dLx2 \* S9) / (Sqr(rx9 ^ 2 + ry9 ^ 2 + rz9 ^ 2)) ^ 2) \* EBz9 /

MAS

End If

BxSUM9 = BxSUM9 + dBx9

BySUM9 = BySUM9 + dBy9

BzSUM9 = BzSUM9 + dBz9

ED = ED - dLz2

DD = DD - dLy2

CD = CD - dLx2

Loop

End Sub

Sub sennojiba6(Px, Py, Pz, C4, D4, E4, CE, DE, EE, C1, D1, E1, dLx2, dLy2, dLz2, rx11, ry11, rz11, MEB11, X11, Y11, S11, dBx11, dBy11, dBz11, EBx11, EBy11, EBz11, BxSUM11, BySUM11, BzSUM11, i, MAS)

BxSUM11 = 0

BySUM11 = 0

BzSUM11 = 0

```

CE = C4
DE = D4
EE = E4

```

```

Do Until CE >= C1 And DE >= D1 And EE >= E1

```

```

rx11 = Px - CE

```

```

ry11 = Py - DE

```

```

rz11 = Pz - EE

```

```

MEB11 = Sqr((dLy2 * rz11 - dLz2 * ry11) ^ 2 + (dLz2 * rx11 - dLx2 * rz11) ^ 2 + (dLx2 *
ry11 - dLy2 * rx11) ^ 2)

```

```

X11 = Sqr(dLx2 ^ 2 + dLy2 ^ 2 + dLz2 ^ 2)

```

```

Y11 = Sqr(rx11 ^ 2 + ry11 ^ 2 + rz11 ^ 2)

```

```

If X11 = 0 Or Y11 = 0 Then

```

```

S11 = 0

```

```

Else

```

```

S11 = MEB11 / (X11 * Y11)

```

```

End If

```

```

If MEB11 = 0 Then

```

```

EBx11 = 0 And EBy11 = 0 And EBz11 = 0

```

```

Else

```

```

EBx11 = (dLy2 * rz11 - dLz2 * ry11) / MEB11

```

```

EBy11 = (dLz2 * rx11 - dLx2 * rz11) / MEB11

```

```

EBz11 = (dLx2 * ry11 - dLy2 * rx11) / MEB11

```

```

End If

```

```

If rx11 = 0 And ry11 = 0 And rz11 = 0 Then

```

```

dBx11 = 0 And dBy11 = 0 And dBz11 = 0

```

```

Else

```

```

dBx11 = ((0.0000001 * i * dLx2 * S11) / (Sqr(rx11 ^ 2 + ry11 ^ 2 + rz11 ^ 2)) ^ 2) * EBx11
/ MAS

```

```

dBy11 = ((0.0000001 * i * dLx2 * S11) / (Sqr(rx11 ^ 2 + ry11 ^ 2 + rz11 ^ 2)) ^ 2) * EBy11
/ MAS

```

```

dBz11 = ((0.0000001 * i * dLx2 * S11) / (Sqr(rx11 ^ 2 + ry11 ^ 2 + rz11 ^ 2)) ^ 2) * EBz11
/ MAS

```

```

End If

```

```

BxSUM11 = BxSUM11 + dBx11

```

```

BySUM11 = BySUM11 + dBy11

```

```

BzSUM11 = BzSUM11 + dBz11

```

```

EE = EE + dLz2

```

```

DE = DE + dLy2

```

```

CE = CE + dLx2

```

```

Loop

```

```

End Sub

```

```

Sub sennojiba7(Px, Py, Pz, C6, D6, E6, CF, DF, EF, C7, D7, E7, dLx2, dLy2, dLz2, rx13,
ry13, rz13, MEB13, X13, Y13, S13, dBx13, dBy13, dBz13, EBx13, EBy13, EBz13, BxSUM13,
BySUM13, BzSUM13, i, MAS)

```

```

BxSUM13 = 0

```

```

BySUM13 = 0

```

```

BzSUM13 = 0

```

```

CF = C6

```

```

DF = D6

```

```

EF = E6

```

```

Do Until CF >= C7 And DF >= D7 And EF >= E7

```

```

rx13 = Px - CF

```

```

ry13 = Py - DF

```

```

rz13 = Pz - EF

```

```

MEB13 = Sqr((dLy2 * rz13 - dLz2 * ry13) ^ 2 + (dLz2 * rx13 - dLx2 * rz13) ^ 2 + (dLx2 *
ry13 - dLy2 * rx13) ^ 2)

```

```

X13 = Sqr(dLx2 ^ 2 + dLy2 ^ 2 + dLz2 ^ 2)

```

```

Y13 = Sqr(rx13 ^ 2 + ry13 ^ 2 + rz13 ^ 2)
If X13 = 0 Or Y13 = 0 Then
S13 = 0
Else
S13 = MEB13 / (X13 * Y13)
End If

If MEB13 = 0 Then
EBx13 = 0 And EBy13 = 0 And EBz13 = 0
Else
EBx13 = (dLy2 * rz13 - dLz2 * ry13) / MEB13
EBy13 = (dLz2 * rx13 - dLx2 * rz13) / MEB13
EBz13 = (dLx2 * ry13 - dLy2 * rx13) / MEB13
End If
If rx13 = 0 And ry13 = 0 And rz13 = 0 Then
dBx13 = 0 And dBy13 = 0 And dBz13 = 0
Else
dBx13 = ((0.0000001 * i * dLx2 * S13) / (Sqr(rx13 ^ 2 + ry13 ^ 2 + rz13 ^ 2)) ^ 2) * EBx13
/ MAS
dBy13 = ((0.0000001 * i * dLx2 * S13) / (Sqr(rx13 ^ 2 + ry13 ^ 2 + rz13 ^ 2)) ^ 2) * EBy13
/ MAS
dBz13 = ((0.0000001 * i * dLx2 * S13) / (Sqr(rx13 ^ 2 + ry13 ^ 2 + rz13 ^ 2)) ^ 2) * EBz13
/ MAS
End If
BxSUM13 = BxSUM13 + dBx13
BySUM13 = BySUM13 + dBy13
BzSUM13 = BzSUM13 + dBz13
EF = EF + dLz2
DF = DF + dLy2
CF = CF + dLx2
Loop
End Sub
Sub sennojiba8(Px, Py, Pz, C8, D8, E8, CG, DG, EG, C5, D5, E5, dLx2, dLy2, dLz2, rx15,
ry15, rz15, MEB15, X15, Y15, S15, dBx15, dBy15, dBz15, EBx15, EBy15, EBz15, BxSUM15,
BySUM15, BzSUM15, i, MAS)

BxSUM15 = 0
BySUM15 = 0
BzSUM15 = 0

CG = C8
DG = D8
EG = E8

Do Until CG <= C5 And DG <= D5 And EG <= E5
rx15 = Px - CG
ry15 = Py - DG
rz15 = Pz - EG
MEB15 = Sqr((dLy2 * rz15 - dLz2 * ry15) ^ 2 + (dLz2 * rx15 - dLx2 * rz15) ^ 2 + (dLx2 *
ry15 - dLy2 * rx15) ^ 2)
X15 = Sqr(dLx2 ^ 2 + dLy2 ^ 2 + dLz2 ^ 2)
Y15 = Sqr(rx15 ^ 2 + ry15 ^ 2 + rz15 ^ 2)
If X15 = 0 Or Y15 = 0 Then
S15 = 0
Else
S15 = MEB15 / (X15 * Y15)
End If

If MEB15 = 0 Then
EBx15 = 0 And EBy15 = 0 And EBz15 = 0
Else
EBx15 = (dLy2 * rz15 - dLz2 * ry15) / MEB15
EBy15 = (dLz2 * rx15 - dLx2 * rz15) / MEB15

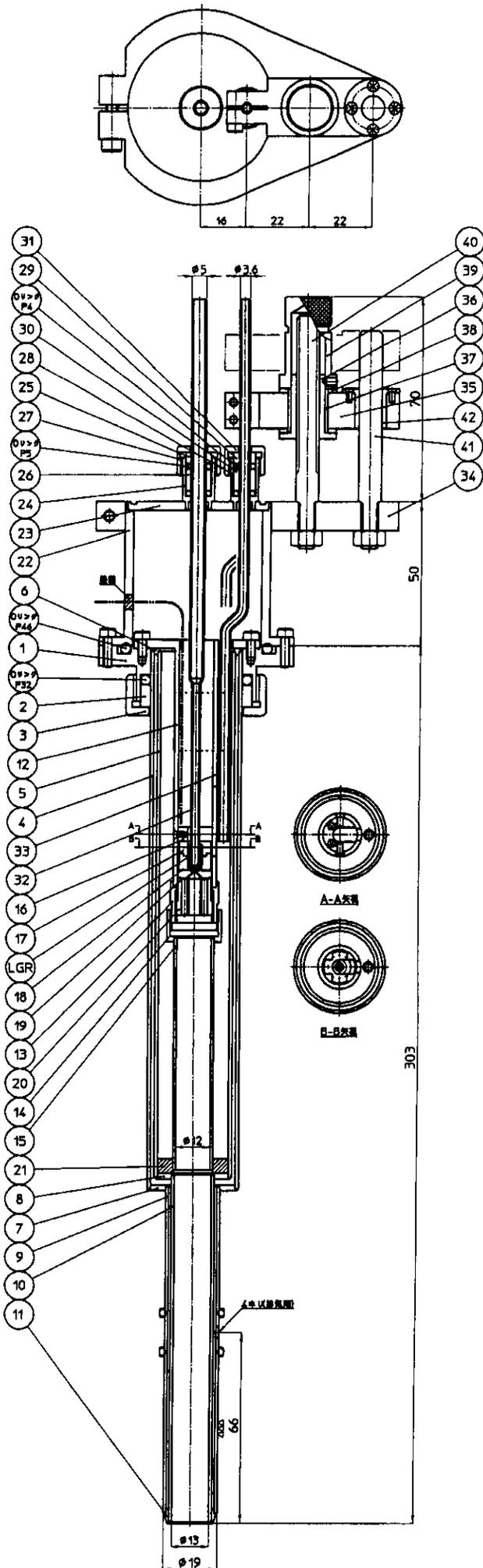
```

```

EBz15 = (dLx2 * ry15 - dLy2 * rx15) / MEB15
End If
If rx15 = 0 And ry15 = 0 And rz15 = 0 Then
dBx15 = 0 And dBy15 = 0 And dBz15 = 0
Else
dBx15 = ((0.0000001 * -i * dLx2 * S15) / (Sqr(rx15 ^ 2 + ry15 ^ 2 + rz15 ^ 2)) ^ 2) * EBx15
/ MAS
dBy15 = ((0.0000001 * -i * dLx2 * S15) / (Sqr(rx15 ^ 2 + ry15 ^ 2 + rz15 ^ 2)) ^ 2) * EBy15
/ MAS
dBz15 = ((0.0000001 * -i * dLx2 * S15) / (Sqr(rx15 ^ 2 + ry15 ^ 2 + rz15 ^ 2)) ^ 2) * EBz15
/ MAS
End If
BxSUM15 = BxSUM15 + dBx15
BySUM15 = BySUM15 + dBy15
BzSUM15 = BzSUM15 + dBz15
EG = EG - dLz2
DG = DG - dLy2
CG = CG - dLx2
Loop
End Sub

```

## 付録2 温度可変用ヘリウムクライオスタット



Oリング(パイト) P4 2個  
 P5 2個  
 P32 1個  
 P46 1個

①7 大塚メタル工業 DUフライクフリップ M8125DU 2個  
 ②8 大塚メタル工業 DUSラストワッシャー WC2ZDUNU 2個

04-188

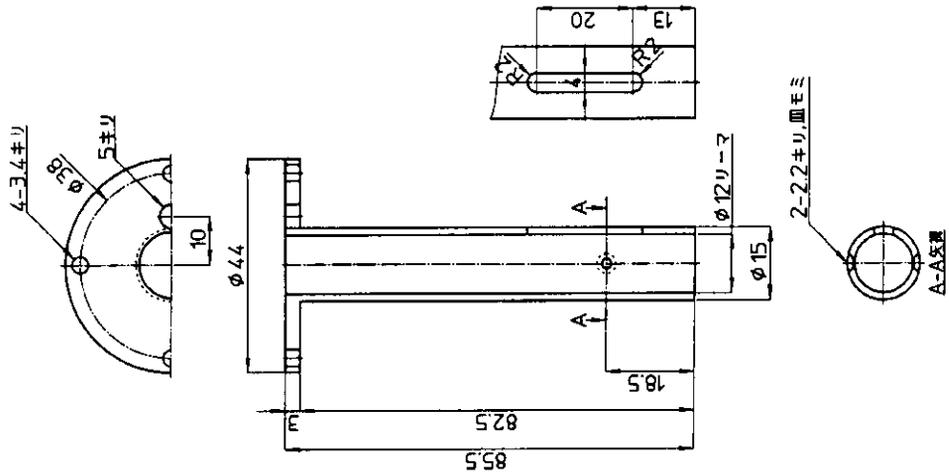
PFG-EPR装置用クライオスタット  
 反藤研 山内研究室 M2 木村 尚貴



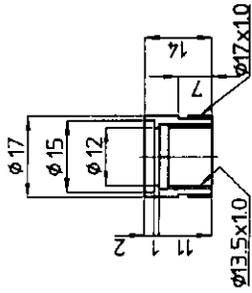




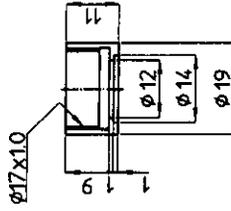
12



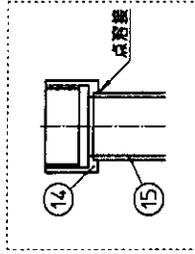
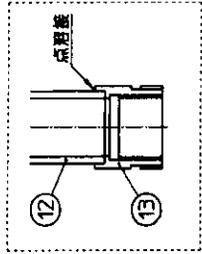
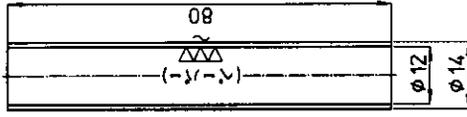
13 研磨後にネジ加工



14 研磨後にネジ加工



15 SUS304 φ14x110 シールド管専用



製造所(中略)	製造法	三角法	R	1/1
+0.1/0.5-6.0	加工番号			
製造日	年月	04-188		
製造者	名	田		
製造者	姓	田		
製造者	会社	株式会社		
製造者	住所	〒104-8588 東京都中央区		
製造者	電話	03-5561-3971		
製造者	ファクス	03-5561-3972		
製造者	ウェブサイト	http://www.pfg-epr.com		
製造者	備考			







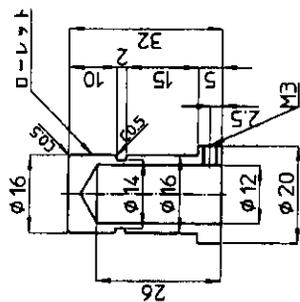






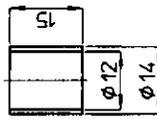


36

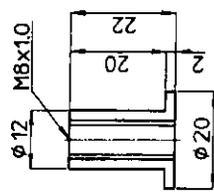


38 部品支給

※部材名 DUFライブラリ  
※127500

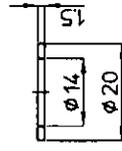


37

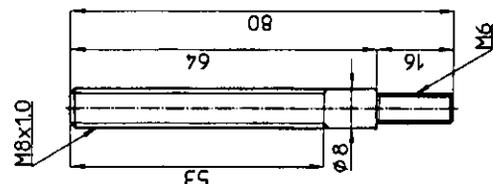


39 部品加工

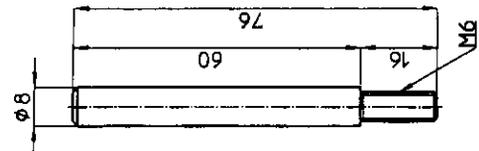
※部材名 DUFライブラリ  
※127500



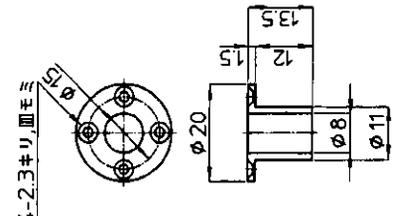
40



41 ミガキ丸棒使用



42



4-2.3キリ, 皿モミ

42	チコロ>	1	数量	1/1	図名	図番	04-188	04-188-036-042
41	SUS---	1	ミガキ丸棒使用	±0.1/0.5-6.0	製造所	日付	04-188	
40	SUS---	1	部品加工		製造所	日付		
39	---	1	部品加工		製造所	日付		
38	---	1	部品支給		製造所	日付		
37	PB	1	部品加工		製造所	日付		
36	SUS---	1	部品加工		製造所	日付		

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

發表論文

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。