

## 中性子スピンエコー分光器の計算機制御システムの開発

小林秀樹・武田隆義<sup>1)</sup>・瀬戸秀紀<sup>1)</sup>・好村滋洋<sup>1)</sup>・  
永井道宏<sup>\*</sup>・長尾道弘・忠岡敏博

広島大学大学院生物圏科学研究科

<sup>1)</sup> 広島大学総合科学部物質生命科学コース

## Development of Computer Control System for Neutron Spin Echo Spectrometer

Hideki KOBAYASHI, Takayoshi TAKEDA<sup>1)</sup>, Hideki SETO<sup>1)</sup>, Shigehiro KOMURA<sup>1)</sup>,  
Michihiro NAGAI<sup>\*</sup>, Michihiro NAGAO and Toshihiro TADAOKA

*Graduate school of Biosphere Sciences, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 724, Japan*

<sup>1)</sup> *Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 724, Japan*

**Abstract :** We have developed a computer control system for a neutron spin echo spectrometer (NSE) which has been constructed at C<sub>2.2</sub> cold neutron guide port of JRR-3M, JAERI. This system controls the current of coils, the measurements by counters and the pulse-motor-drivers using a personal computer. The current of the coils is controlled using GP-IB or the D/A converters equipped in the I/O box connected to the personal computer. The current can be inverted using a current inverter controlled by the computer. The computer gets the data from a He<sup>3</sup> detector or one dimensional position sensitive detector (1D-PSD) and saves them into hard- or floppy- disks, prints out them or transfers to another computer connected through RS-232C which analyzes the data. The computer programs for this system called NSEC are made of an assembly of the several simple programs (command) which can be rearranged easily. An NSE measurement can be carried out automatically using the Batch files composed of the commands. This system is very convenient for NSE measurements.

**Keywords :** Computer Control System, Neutron Spin Echo, Neutron scattering

### 1. はじめに

中性子スピンエコー法 (NSE) とは F. Mezei により提唱された中性子非弾性散乱法の一つであり、

---

1994年9月1日受付; 1994年10月3日受理

<sup>\*</sup> 現在の所属: JMS (株)

中性子非弾性散乱法の中でも遷移エネルギーに関して最高の分解能をもつ分光法である[2][3]。我々は東京大学物性研究所が設置する中性子スピネコー分光器を設計し、茨城県那珂郡東海村の日本原子力研究所研究用原子炉 JRR-3 M の冷中性子導管 C<sub>2-2</sub> ポートに開発、建設中である。建設中の装置で測定できる現在のダイナミック・レンジは散乱ベクトル  $Q=0.005\sim 0.2\text{\AA}^{-1}$ 、エネルギー  $E=10\text{neV}\sim 30\mu\text{eV}$  であり、原子の運動に比べて大きい系のゆっくりした振る舞い、すなわち空間領域  $10\sim 10^3\text{\AA}$ 、時間範囲  $10^{-6}\sim 10^{-10}\text{s}$  にわたる、物質の動的な振舞いを明らかにすることができる。これを用いて、磁性体、金属水素化物、液晶、高分子、生体膜等におけるセミマイクロな原子、分子集団のダイナミクスを研究することを目指している [5][6]。

中性子スピネコー分光器では、各種の駆動機構や電流の制御を同時に行いながら測定する。特に歳差磁場コイル、 $\pi/2$ コイルなど多数のコイルがあり、これらのコイルの電流を最適値に設定する必要がある。このための計算機制御システムを開発し、中性子スピネコー実験に供した結果、多岐にわたる測定法に臨機応変に対応でき、非常に便利であることがわかったので、この計算機制御システムについて報告する。この論文ではまず中性子スピネコー法の原理および計算機制御される部品について説明する。次に計算機制御システム、プログラムの順で報告し、最後に測定例を示す。

## 2. 中性子スピネコー法の原理

中性子スピネコー法ではスピンの回転の位相をエネルギーの物差しに用いることによって、幅広い波長分布の中性子に対してスピネコー収束を利用して中性子強度を落とさずに、neV 程度の非常に高いエネルギー分解能で非弾性散乱が測定できる [2][3]。

磁場  $\mathbf{B}$  での中性子スピンはラーマー歳差運動により、その回転の位相差  $\varphi$ 、

$$\varphi = \gamma |\mathbf{B}| t_s, \quad (1)$$

を生じる。ここで  $t_s$  は歳差磁場中での中性子の滞在時間である。磁気角運動量比  $\gamma$  は、

$$\gamma = 2\gamma_n \mu_N / \hbar = 1.8324 \times 10^8 [\text{T}^{-1}\text{s}^{-1}], \quad (2)$$

である。ただし  $\gamma_n = 1.913$ 、 $\mu_N$  は核磁子、 $\hbar = h/2\pi$ 、 $h$  はプランク定数である。この位相差  $\varphi$  は磁場  $\mathbf{B}$  を中性子経路  $L$  に沿って積分した磁場積分  $D$ 、

$$D = \int_L |\mathbf{B}| dl, \quad (3)$$

に比例し、位相差  $\varphi$  は、

$$\varphi = \gamma D / v = \gamma D m_n \lambda / h, \quad (4)$$

である。ここで、 $v$  は中性子の速度、 $m_n$  は中性子の質量、 $\lambda$  は中性子の波長である。この位相差  $\varphi$  は磁場積分  $D$  を大きくすると速度  $v$  に非常に敏感であり、中性子スピネコー法ではこの位相差  $\varphi$  を中性子のエネルギーの物差しに用いるので非常に高分解能分光が可能になる。実験では位相差  $\varphi$  は、中性子スピンを偏極解析することにより、 $(1+\cos\varphi)/2$  に比例する強度として検出される。

中性子が磁場積分  $D_1$  の経路  $L_1$  (第一歳差磁場コイル) を通過した後、 $\pi$ コイルにより中性子スピンの回転の位相を反転させ、さらに磁場積分  $D_2$  の経路  $L_2$  (第二歳差磁場コイル) を通過すると

全体の位相差  $\varphi_{\text{net}}$  は、

$$\varphi_{\text{net}} = -\gamma D_1/v + \gamma D_2/v, \quad (5)$$

となる。ここで、 $D_2 = D_1$  のとき、全体の位相差  $\varphi_{\text{net}}$  は 0 になる。すなわち、元のスピン状態に戻る。これを中性子スピネコーという。これは中性子の速度  $v$  によらないので速度分布幅  $\delta v$  をもった中性子ビームでもスピネコーが起こり、即ちスピネコー収束が起こる。

経路  $L_1$  と経路  $L_2$  との間に試料が入り、試料によりエネルギー遷移  $\hbar\omega(v_1, v_2)$ ,

$$\hbar\omega(v_1, v_2) = m_n(v_1^2 - v_2^2)/2, \quad (6)$$

があったとすると、中性子の速度が  $v_1$  から  $v_2$  に変化し、位相差

$$\varphi_{\text{net}}(v_1, v_2) = -\gamma D_1/v_1 + \lambda D_2/v_2, \quad (7)$$

を生じる。経路  $L_1$  又は  $L_2$  に対称コイルを挿入し、これに電流を流し  $D_1$  又は  $D_2$  を変化させることによってこの新たな位相差を補償することができる。この電流値から精密に  $\hbar\omega$  が求められる。入射中性子の速度  $v_1$  および散乱中性子の速度  $v_2$  のそれぞれの速度分布の平均速度を  $v_{1a}$  および  $v_{2a}$  とする。平均速度からのずれに基づく諸量を、

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{net}}(v_1, v_2) - \varphi_{\text{net}}(v_{1a}, v_{2a}), \quad (8)$$

$$\Delta\omega = \omega(v_1, v_2) - \omega(v_{1a}, v_{2a}), \quad (9)$$

$$\Delta v_1 = v - v_{1a}, \quad \Delta v_2 = v - v_{2a}, \quad (10)$$

とおき、 $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\omega$  を  $v_{1a}$ 、 $v_{2a}$  のまわりで展開し、 $\Delta v_1$ 、 $\Delta v_2$  の 2 次以上の項を無視すると、

$$\Delta\varphi = (\gamma D_1/v_{1a}^2) \Delta v_1 - (\gamma D_2/v_{2a}^2) \Delta v_2, \quad (11)$$

$$\Delta\omega = (m_n v_{1a}/\hbar) \Delta v_1 - (m_n v_{2a}/\hbar) \Delta v_2, \quad (12)$$

となる。スピネコーの条件、

$$D_1/v_{1a}^3 = D_2/v_{2a}^3, \quad (13)$$

を満たすとき、 $\Delta\varphi$  は  $\Delta\omega$  に比例し、

$$\Delta\varphi = t\Delta\omega. \quad (14)$$

ここで、比例定数  $t$  は時間の次元をもち、

$$t = (\gamma D_1/v_{1a}^3) (\hbar/m_n) = (\gamma D_2/v_{2a}^3) (\hbar/m_n), \quad (15)$$

である。すなわち、 $\Delta\phi$  は  $t\Delta\omega$  のみに依存し、個々の  $v_1$  と  $v_2$  に依存しない。このことから、中性子スピネコー法では、幅広い波長分布をもった中性子ビームを用いて、試料によるエネルギー遷移  $\hbar\omega$  を高エネルギー分解能で測定できる。従来の測定法では  $v_1$ 、 $v_2$  を別々に決定し、式(6)から  $\hbar\omega$  を求めるので、分解能を上げようとすると急激に強度が減少するという欠陥がある。

準弾性散乱の場合 ( $\omega(v_{1a}, v_{2a}) = 0$ )、スピネコー条件 ( $D_1 = D_2 = D$ ) でのエコーシグナル

強度  $E_{\text{NSE}}(\mathbf{Q}, t)$  は、

$$E_{\text{NSE}}(\mathbf{Q}, t) = A \int_{-E}^{\infty} S(\mathbf{Q}, \omega) [1 + \cos(\Delta\varphi)] d\omega. \quad (16)$$

$$= A \int_{-E}^{\infty} S(\mathbf{Q}, \omega) [1 + \cos(\omega t)] d\omega. \quad (17)$$

ここで、 $\mathbf{Q}$  は散乱ベクトル、 $t$  はフーリエ時間であり、(15) から、

$$t = (2\gamma_n \mu_N m_n^2 / \hbar^3) \lambda^3 D, \quad (18)$$

$$t [\text{s}] = 1.8635^{-10} \lambda^3 [\text{\AA}^3] D [\text{Tm}], \quad (19)$$

通常  $E_{\text{NSE}}(\mathbf{Q}, t)$  の測定では、 $\mathbf{Q}$  は散乱角  $2\theta$  を変化させ、 $t$  は  $D$  (すなわち、磁場歳差コイルの電流値) を変化させて行う (波長  $\lambda$  を変えた測定も行う)。 $A$  は偏極率等を含む測定定数、 $S(\mathbf{Q}, \omega)$  は散乱関数、 $E$  は入射中性子のエネルギーである。準弾性散乱の場合、 $S(\mathbf{Q}, \omega)$  で問題となる  $\hbar\omega$  に対して  $|\hbar\omega| \ll E$  であり、また  $|\hbar\omega| \ll k_B T$  なので  $S(\mathbf{Q}, \omega) = S(\mathbf{Q}, -\omega)$  とすると、(17) 式は、

$$E_{\text{NSE}}(\mathbf{Q}, t) = A \int_{-\infty}^{\infty} S(\mathbf{Q}, \omega) [1 + \exp(i\omega t)] d\omega, \quad (20)$$

$$= A [I(\mathbf{Q}, t) + I(\mathbf{Q}, 0)]. \quad (21)$$

となり、 $E_{\text{NSE}}(\mathbf{Q}, t)$  は、中間相関関数  $I(\mathbf{Q}, t)$  にほぼ比例する。なお、 $I(\mathbf{Q}, t)$  は、

$$I(\mathbf{Q}, t) = N^{-1} \sum_{kl} \langle \{ [\exp(i\mathbf{Q} \cdot \mathbf{r}_k(t))] \exp[-i\mathbf{Q} \cdot \mathbf{r}_l(0)] \} \rangle, \quad (22)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} G(\mathbf{r}, t) \exp(i\mathbf{Q} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (23)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} S(\mathbf{Q}, \omega) \exp(i\omega t) d(\hbar\omega). \quad (24)$$

ここで、 $\langle \dots \rangle$  は温度  $T$  におけるアンサンブル平均、 $G(\mathbf{r}, t)$  は時間と空間に関する相関関数である。すなわち、中性子スピンエコー法では  $S(\mathbf{Q}, \omega)$  ではなく  $I(\mathbf{Q}, t)$  が直接測定できる。例えば、粒子がブラウン運動により拡散係数  $D$  で拡散しているような系では、 $I(\mathbf{Q}, t)$  は、

$$I(\mathbf{Q}, t) = I(\mathbf{Q}, 0) \exp(-\Gamma t), \quad \Gamma = DQ^2. \quad (25)$$

これはローレンツ型の散乱関数  $S(\mathbf{Q}, \omega) = (\pi\hbar)^{-1} \Gamma / (\Gamma^2 + \omega^2)$ 、と同等である。

### 3. 中性子スピネコー分光器の概略

建設中の分光器のデザインの詳細は文献[5]、[6]を参照されたい。この装置の特徴は中性子スピネコー運動のための一対の OFS (Optimal field shape 最適磁場形状) コイル、位置敏感検出器 (PSD)、収束型ポライザー、大面積アナライザーを備えていることである。全体の概略図を図1に示す。ポライザー、プリセッションコイル、アナライザー、検出器などの台及び導管Gはダンシングフロアの上を空気浮上機構で自由に移動でき、モノクロメーター、ポライザー、試料、アナライザーでの反射角  $\theta$  及び散乱角  $2\theta$  は計算機制御される。

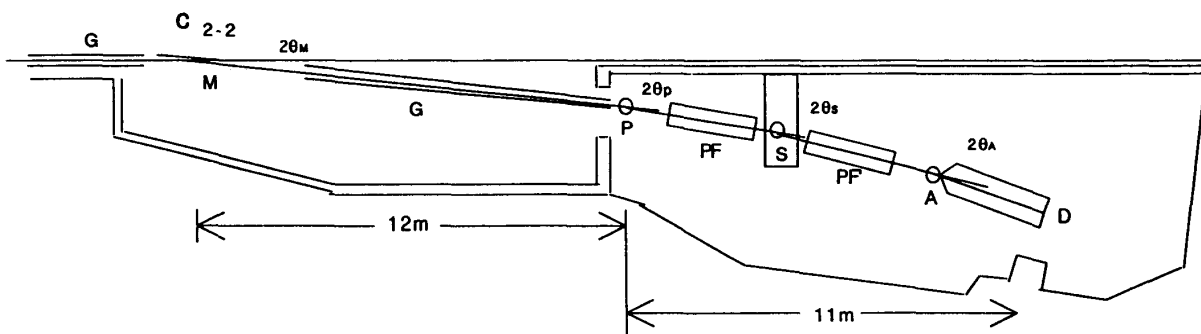


図1 中性子スピネコー分光器の全体図

$C_{2-2}$ :  $C_{2-2}$  冷中性子管孔、M: モノクロメーター、G: 中性子導管、P: ポライザー、PF: プリセッションコイル、S: 試料、A: アナライザー、D: 検出器

原子炉の冷中性子源で発生した冷中性子は全反射しながら  $C_2$  冷中性子導管を通り、 $C_{2-2}$  ポートに設置したモノクロメーター M で Bragg 反射し単色化される。更に導管 G を通り、ポライザー P に達する。中性子はそのスピンをポライザー P により鉛直 (y) 方向に偏極された後ガイド磁場によりゆっくりと進行 (z) 方向に向き、次に  $\pi/2$  コイルで突然水平 (x) 方向に倒され、第一プリセッションコイル PF で発生した z 方向の歳差磁場 B のまわりに、ラーマー歳差運動を行う。次に  $\pi$  コイルにより中性子のスピスが反転した後、試料 S で散乱される。次に第二プリセッションコイル PF' で再びラーマー歳差運動を行った後、 $\pi/2$  コイルを通過する。このとき通過前の中性子偏極の x 成分は通過後は z 成分となり、ラーマー歳差運動の影響を受けず z 成分は保たれる。この z 成分はガイドコイルで y 方向に向いた後、アナライザー A でスピスが y 方向 (up) を向いた中性子のみが選択され、検出器 D で検出される。

次に電流制御する主なコイルについて説明する。

#### (1). プリセッションコイル (歳差磁場コイル)

歳差磁場コイルは OFS コイルで、その磁場分布は  $B(z) = B_0 \cos^2(\pi z/L)$ , ( $-L/2 < z < L/2$ ,  $L = 2.6\text{m}$ ) である。装置の分解能を与える最大磁場積分  $D_{\max} = 0.22\text{Tm}$  (電流100A) である。磁場積分の不均一  $\Delta D$  があると中性子の経路によってラーマー歳差運動の位相角が異なり、スピネコーシグナルが消失する。各種補正コイルにより、ビーム断面積  $40\phi\text{mm}$  に対して、 $\Delta D/D = 2 \times 10^{-6}$  を目指している。電流は DC 0 ~ 100 A 可変で、電流安定度は 100 A で 1mA/hr 以内、電流リップルは 100 A で 0.3mA/rms 以内である。電流設定間隔は 10mA であり、コンピューターインター

フェースは IEEE-488 (GP-IB) である。

## (2). スパイラルコイル (フレネル型スパイラルコイル)

プリセッションコイルで生じた中心線からの距離  $r$  の 2 乗に比例した磁場積分不均一  $\Delta D$  を補正する。このコイルは板状の導体の中心からの距離  $r$  が回転角  $\theta$  の平方根に比例する場所を絶縁した螺旋状のコイルで、中性子ビームに垂直に置かれる。

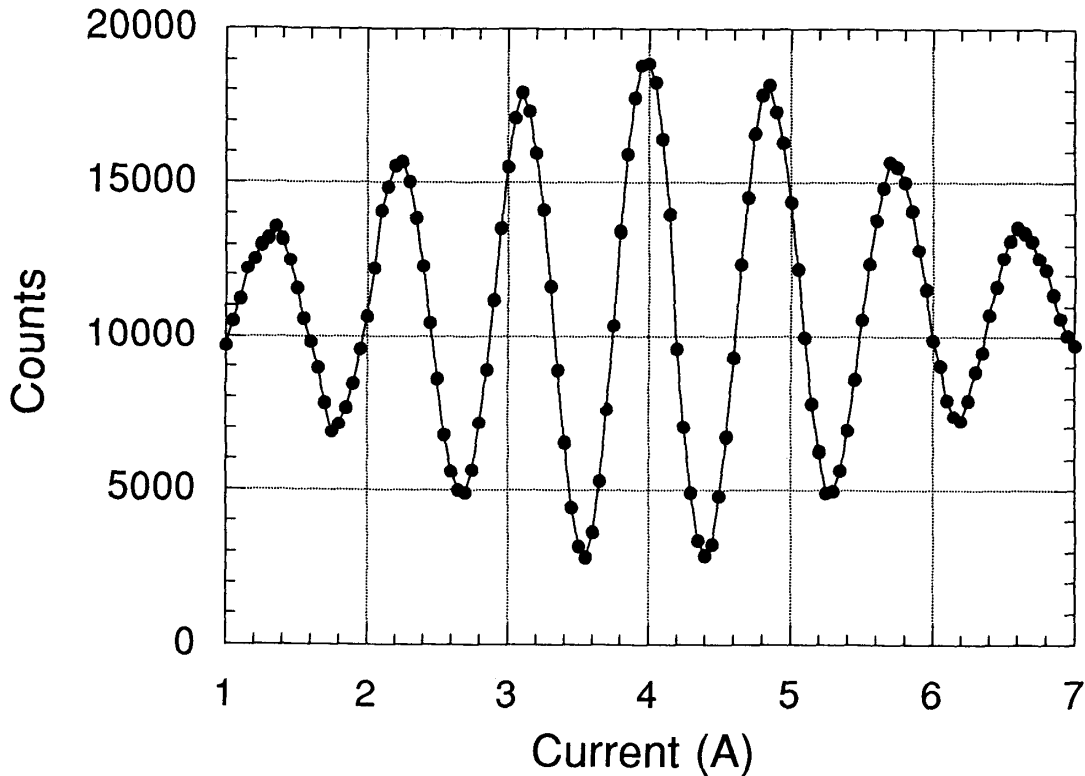


図2 中性子スピネコーシグナル  
横軸は対称コイル電流、縦軸は中性子計数値

## (3). 対称コイル (シンメトリコイル)

第一歳差磁場コイル及び第二歳差磁場コイルの上に巻いたコイルで、第一歳差磁場積分  $D_1$  または第二歳差磁場積分  $D_2$  を変化させる。通常のスピネコー実験では、図2の様に対称コイルの電流を変化させてエコーシグナルを観測する。すなわち  $D_i$  ( $i$ は1又は2) を変化させると、式(5)から位相差  $\varphi_{\text{net}}$  が変化し、 $(1 + \cos \varphi_{\text{net}})$  で振動する。ただし、 $\varphi_{\text{net}} = 2n\pi$  を満足する電流値は  $n = 0$  以外のとき中性子の速度に依存し、その依存度が  $n$  の増大とともに大きくなるので、エコーシグナルの振幅は減少する。すなわち、エコーシグナル振幅の最大のところがエコー条件  $\varphi_{\text{net}} = 0$  ( $D_1 = D_2$ ) である。

D/A コンバーター (DAC) 及び直流電源の電流値設定精度不足の改善のために、またコイルの発熱を避けるために、対称コイルを二系統にしてある。すなわち、多数回巻いたコイル (COARSE) で  $D_1 = D_2$  近傍に調整し、少数回巻いたコイル (FINE) の電流を変化させてエコーシグナルを測定する。

## (4). $\pi$ コイルと $\pi/2$ コイル

図3に  $\pi$ コイル及び  $\pi/2$ コイルの幾何学的配置を示す。 $B_1$  は  $\pi$ コイル又は  $\pi/2$ コイルの電流値

で決まる。 $B_0$  はプリセッションコイル及び各種補正コイルの電流値を制御して  $z$  方向に発生させる。中性子がコイル中を飛行する距離は  $d = d_0/\cos\beta$  で、飛行時間  $t_s = d/v = d\lambda/m_n h$  となる。ただし  $d_0$  はコイルの厚さ、 $\beta$  はコイルの傾き角である。その時の合成磁場  $B$  は  $B = (B_0^2 + B_1^2 - 2B_0B_1 \sin\beta)^{1/2}$  である。波長  $\lambda$  [Å] の中性子がコイル中を通過する際に蓄積する歳差角  $\varphi$  は、式 (1) より次のようになる。

$$\varphi [\text{rad}] = 4.632 \times 10^4 B [\text{T}] \lambda [\text{Å}] d_0 [\text{m}] / \cos\beta. \tag{26}$$

スピンベクトル  $\mathbf{P}_i = (P_x, P_y, P_z)$  が  $\pi$  コイル又は  $\pi/2$  コイルによって  $\mathbf{P}_f$  に変えられるとき、コイルによるスピンの回転演算子  $\tilde{T}$  は  $\mathbf{P}_f = \tilde{T}\mathbf{P}_i$  と定義され、次のようになる [1]。

$$\begin{aligned} \tilde{T} &= \begin{pmatrix} \sin\theta & 0 & \cos\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos\theta & 0 & \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin\theta & 0 & -\cos\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\theta & 0 & \sin\theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta \cos\theta & -\sin\theta \sin\varphi & \sin\theta \cos\theta (1 - \cos\varphi) \\ \sin\theta \sin\varphi & \cos\varphi & -\cos\theta \sin\theta \\ \sin\theta \cos\theta (1 - \cos\varphi) & \cos\theta \sin\varphi & \sin^2\theta + \cos^2\theta \cos\varphi \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{27}$$

ただし  $\theta$  は合成磁場  $B$  の傾き角である。

a)  $\pi$  コイル ( $\beta \neq 0$ )

$\pi$  コイルは中性子スピンを  $z$  軸に垂直な軸のまわりに角度  $\pi$  回転させ、 $z$  軸まわりの回転の位相を逆転させる ( $\varphi_{\text{net}} \rightarrow -\varphi_{\text{net}}$ )。  $\pi$  コイルで発生する磁場  $B_1$  を、

$$B_1 [\text{T}] = 6.7824 \times 10^{-3} / (d_0 [\text{m}] \lambda_0 [\text{Å}]) \tag{28}$$

に、コイル外での磁場  $B_0$  を、

$$B_0 = B_1 \sin\beta \tag{29}$$

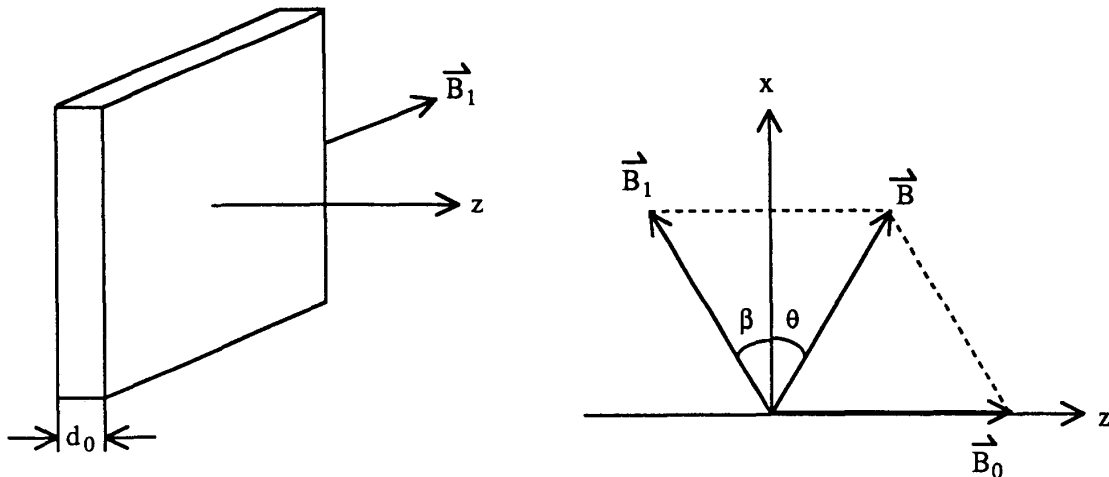


図3  $\pi$  コイルおよび  $\pi/2$  コイルの幾何学的配置

補正コイルを用いて、  $\pi/2$  コイル位置に中性子ビーム ( $z$ ) 方向に磁場  $B_0$  を発生させる。次に厚さ  $d_0$  の  $\pi/2$  コイル内に  $B_1$  を発生させると、コイル内の合成磁場  $B$  は  $B = B_0 + B_1$  となる。

に調整すると  $\theta = 0$  となり、また  $\lambda = \lambda_0$  に対しては  $\varphi = \pi$  となり、式 (27) より中性子の偏極 ( $P_x, P_y, P_z$ ) は、

$$(P_x, P_y, P_z) \rightarrow (P_x, -P_y, -P_z) \quad (30)$$

となる。すなわち、 $z$  軸まわりの回転の位相が逆転する。

#### b) $\pi/2$ コイル ( $\beta = 0$ )

$\pi/2$  コイルは中性子スピンを  $z$  軸から角度  $\pi/2$  回転させることによってスピネコーに利用する  $z$  軸まわりのラーマー歳差運動を開始または終了させる。 $\pi/2$  コイルで発生する磁場  $B_1$  およびコイル外の磁場  $B_0$  を、

$$B_1[\text{T}] = B_0[\text{T}] = \frac{4.7959 \times 10^{-3}}{\lambda_0[\text{\AA}] d_0[\text{m}]} \quad (31)$$

に調整すると  $\theta = \pi/4$  となり、また  $\lambda = \lambda_0$  に対しては  $\varphi = \pi$  となり、式 (27) より、

$$(P_x, P_y, P_z) \rightarrow (P_z, -P_y, P_x) \quad (32)$$

となる。すなわち、 $z$  成分は  $x$  成分に、 $x$  成分は  $z$  成分になる。また、 $\pi/2$  コイルの電流を逆転した場合  $\theta = -\pi/4$  となり、式 (27) より、

$$(P_x, P_y, P_z) \rightarrow (-P_z, -P_y, P_x) \quad (33)$$

となる。

$\pi/2$  コイルの電流の方向を逆転すると、式 (32)、(33) からわかるように  $\pi/2$  回転するスピンの向きが逆向きになる、すなわちスピンの回転の位相を  $\pi$  だけずらす。アナライザの前の  $\pi/2$  コイルの電流を順方向に流した場合の中性子測定強度を  $I^+$ 、逆方向の場合の測定強度を  $I^-$  とすると、式 (16) での  $\Delta\varphi$  は  $I^-$  の場合  $\Delta\varphi + \pi$  となり、式 (16)、(17)、(20)、(21) から、

$$I^+ - I^- = 2 AI(\mathbf{Q}, t) \quad (34)$$

となる [2]。すなわち、対称コイルの電流をスキャンして振動するエコーシグナルを測定しなくても、スピネコー条件で  $I^+$  と  $I^-$  を測定するだけで式 (34) からエコーシグナルの振幅すなわち、中間相関関数  $I(\mathbf{Q}, t)$  が求まる。このことは測定時間の短縮また統計誤差の減少に非常に有利である。なお、スピネコー条件を満たす対称コイルの電流値は散乱断面積の大きい標準試料であらかじめ求めておく。このため、この分光器ではアナライザ前の  $\pi/2$  コイルの電流を反転しながら測定できるように設計した。

#### c) $\pi$ コイルと $\pi/2$ コイルの配置方法

$\pi/2$  コイルを  $\pi/2$ 、 $\pi$  コイルを  $\pi$ 、プリセッションコイルを PF、試料を S で表す。

i) 試料が磁性体で試料に磁場をかけるときの配置

$$\pi/2 \rightarrow \text{第一 PF} \rightarrow \pi/2 \rightarrow \text{S} \rightarrow \pi/2 \rightarrow \text{第二 PF} \rightarrow \pi/2$$

ii) 試料の核または原子スピンのによって、中性子のスピンの向きが反転する場合の配置

$$\pi/2 \rightarrow \text{第一 PF} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{第二 PF} \rightarrow \pi/2$$

iii) 通常のスピンエコー法の場合の配置 (試料のスピン依存の散乱断面積の割合が小さい場合に使用)

$$\pi/2 \rightarrow \text{第一 PF} \rightarrow \pi \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{第二 PF} \rightarrow \pi/2$$



#### 4. コンピューター制御システム

NSE コンピューター制御システムとして、C<sub>2-2</sub> ポートに設置されたホストコンピューターのワークステーション TITAN3000 にローカルパーソナルコンピューターを接続した図4に示すシステムを構築する予定である。しかし現在は整備の途中であるため、NSEの実験は1台のパーソナルコンピューターを中心としたシステムで行ってきた。現在のNSEのシステムでは以下の機器を計算機制御している。

- (1)各種コイル (第一、第二プリセッションコイル、ガイドコイル、 $\pi/2$ コイル及び補正コイル、

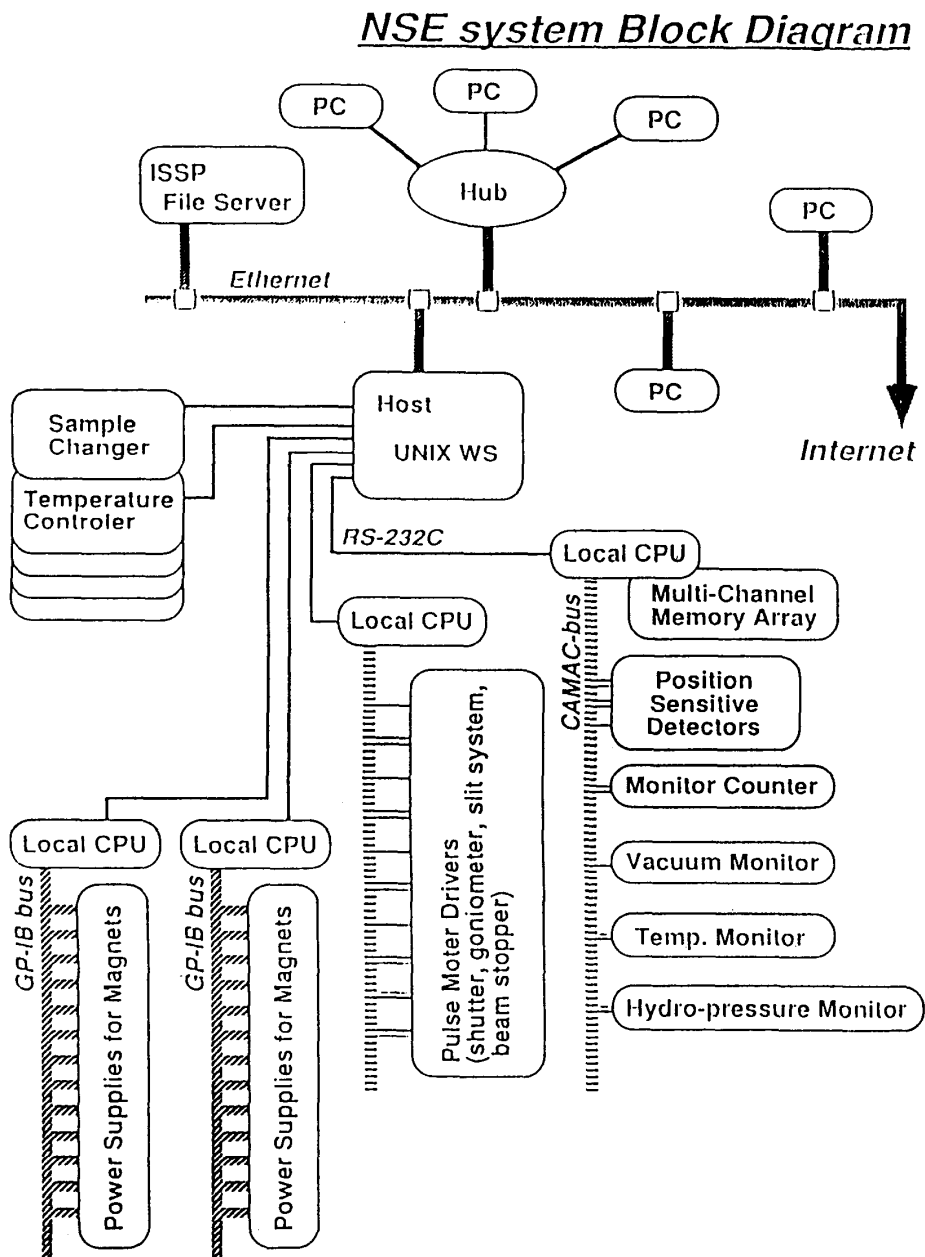


図4 計算機制御システムのブロック図

$\pi$ コイル及び補正コイル、シンメトリーコイル、スパイラルコイル) の電流制御

(2)カウンター ( $^3\text{He}$  中性子検出器、一次元位置敏感中性子検出器) からのデータ取込み及び処理

なお、駆動系は Labo 製のパルスモーターコントローラー ND2000 を計算機に接続して制御する予定である。

#### 4-1. 電流制御

各種コイルの電流制御系の概略を図5に示す。プリセッションコイルの電流制御には専用の電源を用いている。この電源は GP-IB によりコンピューターに接続され、コンピューターからの指示により電流値を設定できる。その他のコイルについては将来的には GP-IB によりコンピューターと専用の電源を直接接続しコントロールする計画であるが、現在は他から流用している電源が GP-IB に対応していないため D/A コンバーターを用いて制御している。なお、図では21個の電源をコントロールする様になっているが、現在整備途中のため14個のみのコントロールを行い、機器の不

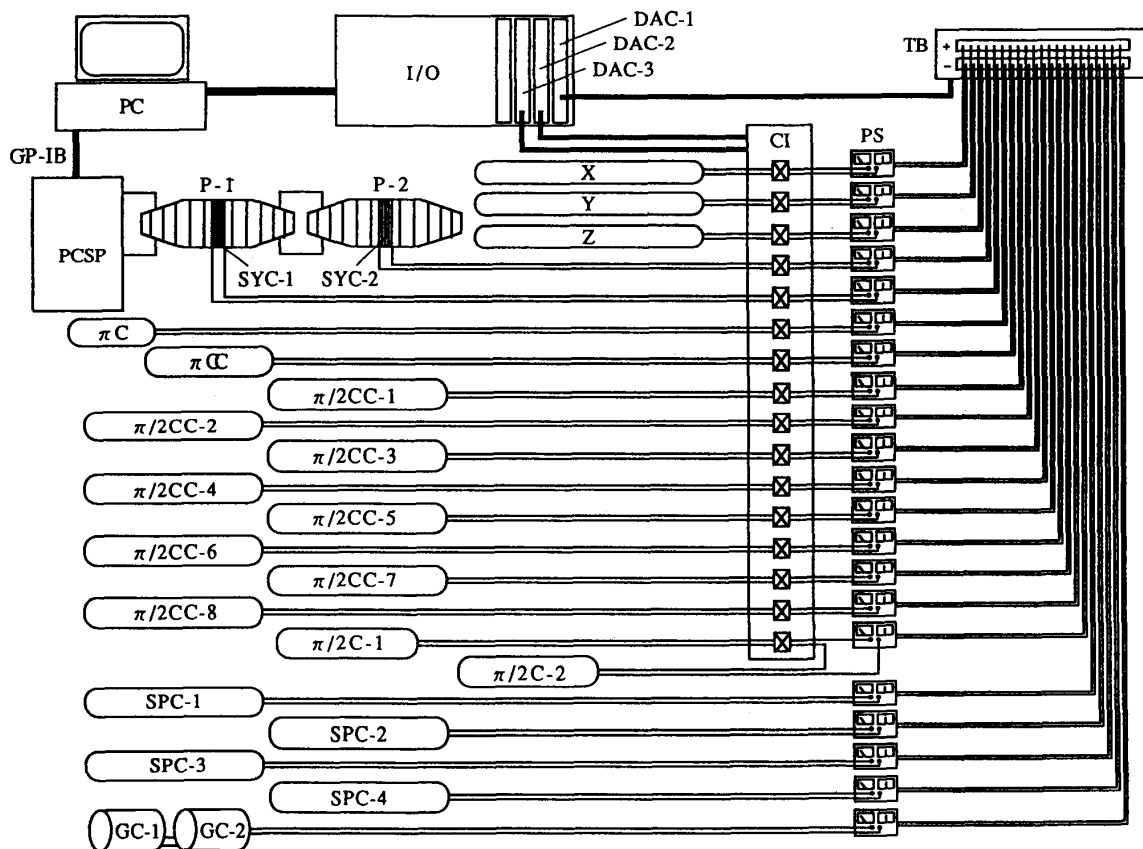


図5 電流制御系の全体図

PC: パーソナルコンピューター PC-286V、I/O: 拡張 I/O ボックス UTS-702、DAC1: D/A コンバーター AZI-3302、DAC2: D/A コンバーター AZI-214、DAC3: D/A コンバーター AZI-214、TB: 端子箱、PS: 電源、CI: 電流方向切替器、PCSP: プリセッションコイル用電源、P: プリセッションコイル、SYC: シンメトリーコイル、X: サンプル X 軸補正コイル (Y: Y 軸、Z: Z 軸)、 $\pi$ C:  $\pi$ コイル、 $\pi$ CC:  $\pi$ 補正コイル、 $\pi/2$ C:  $\pi/2$ コイル、 $\pi/2$ CC:  $\pi/2$ 補正コイル、SPC: スパイラルコイル、GC: ガイドコイル

足分はコイルの結線のつなぎ換えで対応している。

これらの電源の制御を行うために GP-IB 及び D/A コンバーターのボードが多数枚必要であるが、今回用いたエプソン製のパーソナルコンピューター PC-286V はボード用のスロットが 4 箇所であるため、そのままでは必要な全てのボードを装着することは出来ない。そこでこれを解決するために外付けの拡張 I/O ボックス（インターフェイス社製：UTS-702）を使用している。これを用いると最大 15 枚のボードを装着することができる。拡張 I/O ボードには現在 3 枚の D/A コンバーターを装着している。電流制御用にはインターフェース製の D/A コンバーター AZI-3302 を使用した。これは 1 チャンネル当り 12bit の精度の D/A コンバーターを 16 チャンネル持ったもので、出力電圧は 0 ~ 5 V と 0 ~ 10V を混在させて使用している。D/A コンバーターの出力は専用の端子箱を介して各電源に出力される。D/A コンバーターから取り出せる電圧の分解能は 12bit の D/A コンバーターを用いているため、0 ~ 5 V の場合  $5(V)/2^{12} = 1.22\text{mV}$ 、0 ~ 10V の場合  $10(V)/2^{12} = 2.44\text{mV}$  である。実際に電源から出力される電流値  $I$  は以下の様に表せる。

$$I = E/R - I_0 \quad (35)$$

ここで  $E$  は D/A コンバーターからの入力電圧、 $R$  は電源内部の抵抗、 $I_0$  はオフセット電流値で、 $R$ 、 $I_0$  は電源により固有の値を持っている。つまりコイルに流れる電流の分解能は、D/A コンバーターの分解能と電源の内部抵抗により決まる。今回のシステムでは例えば  $R = 0.1(\Omega)$  の場合、電流の分解能は 0 ~ 5 V で  $1.22/0.1 = 12.2\text{mA}$  となる。

コイルには正逆両方向に電流を流す必要があるが、現在用いている電源はその機能はないので、それを補うために電流方向切替器を製作し使用している。これは基準電圧  $E_0$  に対しリファレンス電圧を  $E_r$  とすると、 $E_r + E_0$  の入力でリレーが働き電流方向が切り替わり、 $E_r - E_0$  の入力でリレーが切れ電流方向が元に戻るものである。現在の切替器は 12 系統のみについて制御できるため、電圧の入力には 8 チャンネルの D/A コンバーター（インターフェイス社製：AZI-214）を 2 枚用いて行っている。リレーのオンには +10V の電圧を入力し、オフには 0 V の電圧を入力することで、電流方向の切替を行っている。ほとんどのコイルについて電流の切替を行うが、プリセッションコイル、ガイドコイル及びスパイラルコイルについては全く切替を行わない。また  $\pi/2$  コイルについては全ての  $\pi/2$  コイルの電流値を同じにしつつ、アナライザー直前の  $\pi/2$  コイルのみ切替を行うため図 5 のような配線になっている。

#### 4-2. カウンターの制御

データ収集及び解析システムを図 6 に示す。カウンターとして 1 ch (Channel) のみ測定できるポイントディテクター ( $^3\text{He}$  中性子検出器) を用いる場合と、512ch の測定ができる 1D-PSD (One-Dimensional-Position-Sensitive-Detector: 一次元位置敏感中性子検出器) を用いる場合がある。ポイントディテクターを用いる場合、データの収集には Labo 製ファーストカウンター C-2000 を用いる。C-2000 は NSE 制御用コンピューターに GP-IB で接続されており、コンピューターから測定時間の設定、測定の開始、終了などを直接制御することができる。ポイントディテクターから得られた信号は回路で処理されて C-2000 に入力され、そのデータをデータ収集プログラムにより読み出す。1D-PSD を用いる場合、得られた信号はマルチチャンネルアナライザー回路で処理されて、PC-286V のスロットに装着された MCA ボード (Labo: MCA-98B) に入力される。ボードに蓄えられたデータをデータ収集プログラムにより読みだし、処理を行う。

データ収集後、必要なデータはハードディスクにセーブされると同時にプリントアウトされる。

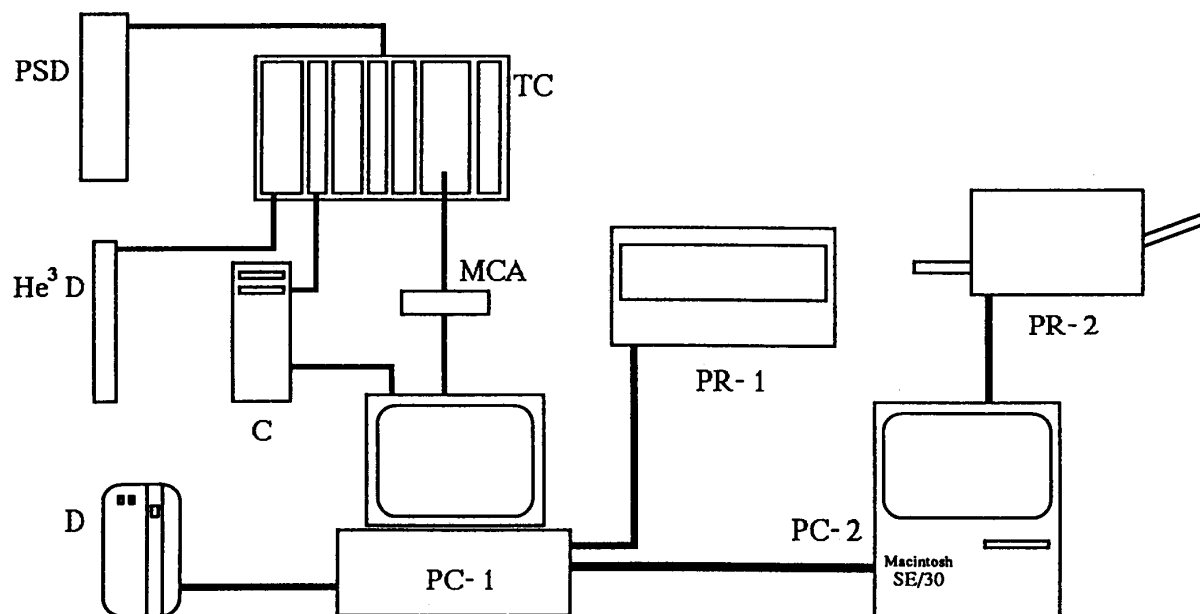


図6 データ収集及び解析系の全体図

PSD：一次元位置敏感検出器、He<sup>3</sup>D：<sup>3</sup>He中性子検出器、TC：検出器処理回路、C：ファーストカウンター C-2000、MCA：マルチチャンネルアナライザー、D：データ保存用ハードディスク、PC-1：NSE制御用パーソナルコンピュータ PC-286V、PC-2：データ解析用パーソナルコンピュータ Macintosh SE/30、PR：プリンター

更に後述する R232 フラグが ON の場合、収集されたデータは解析用コンピュータマッキントッシュ SE/30 に直接転送される。この為には、SE/30 上で通信プログラム「Versa Term Pro」を起動しておく必要がある。収集データは SE/30 のディスプレイ上に表示されるので、必要な箇所を「Copy Table」メニューでコピーし、データ解析ソフト「Kaleida Graph」上に「Paste」メニューにより貼り付けることにより、グラフ表示や任意の関数型によるカーブフィッティング等が可能になる。なお、今回の実験での RS-232C の設定は [ボーレート：9600bps、パリティ：NON、ビット長：8、ストップビット：1、XONXOFF：有り] である。

## 5. NSE 制御プログラム「NSEC」

我々は上記のように構成された NSE のシステムを制御するために、複数のプログラムを作成した。我々はこれらをまとめて「NSEC」と呼んでいる。これは1つのプログラムで全ての操作を実現しようとした場合、プログラムの実行速度の面では速くなるが、デバッグや新たな機能を追加する場合に不便であるからである。そこで基本的に単機能のプログラム（コマンド）をそれぞれの用途にあわせて作成し、複雑な処理が必要な場合にはこれらのコマンドをバッチ処理することにより実現しようとしたものである。またコマンドをバッチ処理することによりデータの自動測定も行うことができる。バッチ処理の具体例は後で紹介する。

全てのコマンドはマイクロソフト社製の QuickC 2.0 を用いて作製した。C 言語についての詳しい解説は文献 [4] などを参照されたい。全てのソースは C 言語の標準的な関数を用いて書かれているが、ファーストカウンターなど GP-IB を介した機器の制御には Labo 製の GP-IB ライブラリ「LABOM. LIB」から数種類の関数を除いたライブラリ「LABOMS. LIB」を使用した。なお GP-IB

のボードは NEC 社製純正のものを使用した。

これらのコマンドは一定のルールに基づいて作成されている。コマンドは起動した際に「NSEC.PRM」ファイルを読み込む。このファイルには電源やカウンター、実験の条件などNSEをコントロールする上で必要な情報が記録してある(図7)。そしてコマンドが終了する際に、実験で変更した項目を含めて「NSEC.PRM」ファイルにセーブする。以下では「NSEC.PRM」ファイルの解説を行う。このファイルの内容をエディタなどで変更することにより、実験の条件を変更できる。

10	1	0	1	0	'ExpCycle, PrintFlag, RS232C_Flag, FileFlag, PaiFlag														
0	8	1200	'CounterType, CounterAddress, PresetTime																
0	1	1	100	1	10.00	0	0	0	0	PS #0:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	1	30	0.03	0.00	0	2	4123	1	PS #1:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	2	30	0.03	1.00	1	2	4123	2	PS #2:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	3	30	0.03	5.00	0	2	4123	3	PS #3:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	4	30	0.03	2.50	0	2	4123	4	PS #4:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	5	10	0.50	0.00	0	2	4123	5	PS #5:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	6	10	0.50	0.00	0	2	4123	6	PS #6:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	7	10	0.50	5.10	1	2	4123	7	PS #7:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	8	10	0.50	0.00	0	2	4123	8	PS #8:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	9	10	0.50	0.00	0	2	4223	1	PS #9:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	10	10	0.50	0.00	0	2	4223	2	PS #10:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	11	10	0.50	0.00	0	2	4223	3	PS #11:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	12	30	0.03	0.00	0	2	4223	4	PS #12:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	13	30	0.03	0.00	0	2	4223	5	PS #13:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	14	30	0.03	0.00	0	2	4223	6	PS #14:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	15	30	0.03	0.00	0	2	4223	7	PS #15:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	16	30	0.03	0.00	0	2	4323	8	PS #16:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	17	30	0.03	0.00	0	2	4323	1	PS #17:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	18	30	0.03	0.00	0	2	4323	2	PS #18:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
1	4096	19	30	0.03	0.00	0	2	4323	3	PS #19:	Type, Address, Channel, MaxPower, Rs, Current, F_flag, F_type, F_address, F_channel								
3	5	9	1	2	4	7	8	6	-1	-1	7	10	11	12	13	-1	-1	14	15

PS Number of.... Sym.1 Coil, Sym.2 Coil, Prec.Coil, GuideCoil,  
SpiralCoil 1-4, PaiCoil, PaiCoil Cor.,  
Pai2-1Coil, Pai2-1Coil CorA-B,  
Pai2-2Coil, Pai2-2Coil CorA-B.

図7 NSEC.PRMの内容(本文参照)

1行目は実験サイクル、プリンターフラッグ、RS232Cフラッグ、ファイルフラッグ、 $\pi$ フラッグが記述されている。以下に記号の意味を説明する。

**実験サイクル**：実験のサイクル数を記録。このサイクル数はデータセーブの際にファイル名になる。(例：サイクルが20の時 ファイル名「000020.NSE」)

**プリンターフラッグ**：1の場合データはプリントアウトされ、0の場合にはプリントアウトされない。

**RS232Cフラッグ**：1の場合データはRS-232Cポート(マッキントッシュなど)に出力され、0では出力されない。

**ファイルフラッグ**：1の場合データはファイルに保存され、0では保存されない。

**$\pi$ フラッグ**： $\pi$ コイルに接続している電源の番号を記述。

2行目にはカウンターの情報が記述されている。

**カウンタータイプ**：0でポイントディテクタ、1で1D-PSDを使用。

**カウンターアドレス**：C-2000のGP-IBアドレスを記述。

**プリセットタイム**：測定時間を秒単位で記述。

3行目から22行目には電源制御のための各種データが記述されている。電源は20台まで対応し、そ

それぞれの条件を PS # 0 ~19まで1行ごとに記述している。

**Type**：使用している電源とのインターフェースにより数字で区別している。

0：プリセッションコイル用電源、インターフェースは GP-IB

1：D/A コンバーター AZI-3302 を使用する場合

2：D/A コンバーター AZI-214 を使用する場合

これは違う種類のインターフェースでは制御するルーチンが異なり、プログラムでそれぞれの D/A コンバーターに対応したルーチンを選択して処理を行う必要があるためである。従って更に新しいインターフェースを使用する場合には新しい番号を割り当てると同時に、それに対応したルーチンを作る必要がある。

**Address**：GP-IB 使用の場合は GP-IB のアドレス、D/A コンバーター使用の場合は D/A コンバーターのボード上で設定した I/O ポートのアドレスを記述する。

**Channel**：D/A コンバーターでは1つのボードで複数のチャンネルを個別に制御できる。電源制御の際に使用しているチャンネルの番号を記述する。

**MaxPower**：使用している電源の許容最大電流値 (A) を記述する。この値以上の電流値をユーザーが要求した場合、プログラムで自動的に拒否をする。

**Rs**：使用している電源の内部抵抗 ( $\Omega$ )。

**Current**：現在電源に流れている電流値 (A) を表示。ただし、実際に流れている値と常に対応しているわけではない。例えば突然パソコンがハングアップして起動しなおした場合、D/A コンバーターの出力はリセットされ 0 V になり電流値も 0 A になるが、「NSEC. PRM」に書かれている電流値はハングアップする直前の電流値がそのまま記述されており未対応の状態になる。この様な未対応の状態になった場合、電流の設定をしなおすか「AR」コマンドを実行することで、電源に流れている電流と「NSEC. PRM」に記述されている電流が対応する。

**F\_flag**：フリッパーのフラッグで、0 ならば順方向、1 ならば逆方向に電流が流れる。

**F\_type**：フリッパー制御に使用している D/A コンバーターの種類を数字で記述。数字の対応は「タイプ」の項を参照すること。

**F\_address**：フリッパー制御に使用している D/A コンバーターのボード上で設定している I/O ポートのアドレスを記述。

**F\_channel**：フリッパー制御に使用している D/A コンバーターのチャンネルを記述。

23行目はコイルがどの電源に接続されているかを記述する。24行目に記述されているコイルの名前の順番で数字の列は並んでいる。-1 はどの電源にも接続されていないことを示し、その他の数字はその番号の電源が接続していることを示している。例えば、シンメトリーコイル 1 は 3 番の電源、 $\pi$  補正コイルは電源につながっていないことになる。

プログラムは「NSEC. PRM」ファイルをまず環境変数「TMP」で指定したディレクトリから探し、無い場合はプログラム本体の置かれているディレクトリを探し、更にない場合はエラー表示を行ってプログラムを終了する。この場合、上で示したディレクトリに新たに「NSEC. PRM」を作製もしくは他から転送する必要がある。環境変数「TMP」で指定したディレクトリを RAM ディスクなどの高速デバイスに指定し「NSEC. PRM」ファイルをそこに保存すれば、コマンドを高速に実行させることができる。

## 6. コマンド

NSEC を構成する単機能プログラムをコマンドと呼ぶ。以下ではコマンドの使い方などの説明をする(表1)。なお、コマンドの直後で [ ] で囲まれたものは起動パラメータである。

表1 コマンドの一覧表

- コマンドグループ A : 全ての装置に関するコマンド
- AC : 全てのパワーサプライの電流値を表示する。
  - AE : 全てのパワーサプライの電流を 0 にする。
  - AP : パラメータファイル中の全てのパラメータを表示する。
  - AR : 全てのパワーサプライの電流をパラメータファイルの値にする。
- コマンドグループ P : プリンタ出力を制御するコマンド
- PO : プリンタ出力を ON にする。
  - PF : プリンタ出力を OFF にする。
- コマンドグループ F : ファイル出力を制御するコマンド
- FO : ファイル出力を ON にする。
  - FF : ファイル出力を OFF にする。
- コマンドグループ R : RS232C 出力を制御するコマンド
- RO : RS232C 出力を ON にする。
  - RF : RS232C 出力を OFF にする。
- コマンドグループ C : 1 回測定のコマンド
- C1 : 1 回測定して終了する。
  - C2 : 1 回測定し、キー入力するまで待つ。キー入力があれば更に 1 回測定する。
  - C3 : [ESC] キーが押されるまで連続的に測定する。
  - C4 : コメントを入力してから 1 回測定し、キー入力するまで待つ。  
キー入力があれば更に 1 回測定する。
- コマンドグループ D : フリップして測定するコマンド
- D1 : フリッパー up で 1 回、down で 1 回の 1 セット測定して終了する。
  - D2 : C2 のフリップ測定用。
  - D3 : C3 のフリップ測定用。
  - D4 : C4 のフリップ測定用。
- コマンドグループ S : 条件を変えながら連続測定(スキャン)するコマンド
- S1 : コイルの電流値を変化させながら連続測定する。回数指定可能。
  - S2 : C2 の連続測定用。
  - S3 : C3 の連続測定用。
  - S4 : Depolarization の測定をする。
- コマンドグループ U : 一次元 PSD を用いて連続測定(STEP SCAN)するコマンド
- U1 : S1 と同じであるが、1 次元 PSD を用いる。
- コマンドグループ M : マグネット(電源)のコントロールをするコマンド
- MS : 指定した電源の電流値を設定する。
  - MF : フリッパーの向きを反転する。
  - MT : 全ての電源の電流値を MT. TBL の内容に従い、設定する。
- コマンドグループ B : その他のコマンド
- BC : 実験サイクルを変更する。

表2 コマンド AC の表示例

1 st Symmetry	Coil	3	5.000
2 nd Symmetry	Coil	5	0.000
Precession	Coil	0	0.000
Guide	Coil	1	0.000
Spiral	Coil 1	2	1.000
Spiral	Coil 2	4	2.500
Spiral	Coil 3	7	5.100
Spiral	Coil 4	8	0.000
Pi	Coil	6	0.000
Pi	Coil Cor.		
1 st Pi/2	Coil		
1 st Pi/2	Coil Cor. A	7	5.100
1 st Pi/2	Coil Cor. B	10	5.100
2 nd Pi/2	Coil	11	5.100
2 nd Pi/2	Coil Cor. A	12	5.100
2 nd Pi/2	Coil Cor. B	13	5.100
File	Flag ----->	0	
Printer	Flag ----->	1	
RS232c	Flag ----->	0	
Pi Coil	Flag ----->	6	

## (1) コマンドグループ A : 装置全体に関するコマンド

## AC (All Currents)

各コイルに接続されている電源の番号と電流値の一覧を表示する(表2)。但しパラメータファイルの内容を表示しているだけであるから、実際に流れている電流値とは異なる場合がある。また、フラッグの状態も同時に表示する。

## AE (All End)

全てのパワーサプライの電流値を0にする。

## AP (All Parameters)

パワーサプライのアドレスやタイプ、カウンターのアドレス、各種フラッグ等、パラメータファイル「NSEC. PRM」の内容を全て表示する(表3)。左半分は電源のパラメータで、電源の番号順に並んでいる。内容は左から、

- Ps : 電源の番号
- ty : インターフェースの種類
- add : D/A コンバーターのアドレス
- ch : D/A コンバーターのチャンネル
- m. p : 電源の最大電流
- Rs : 電源の内部抵抗
- current : 電流値
- ft : フリッパーを制御する D/A コンバーターの種類
- fadd : フリッパーを制御する D/A コンバーターのアドレス
- fch : フリッパーを制御する D/A コンバーターのチャンネル

である。右側は実験パラメータ、カウンターパラメータ、現在使用している「NSEC. PRM」の存在するディレクトリをフルパスで表示している。



表3 コマンドAPの表示例

Power Supply Parameter										Experiment Parameter		
Ps	ty	add	ch	m. p	Rs	current	ft	fadd	fch		cycle	10
0	0	0001	1	100	1.00	+10.000	0	0	0	Prec.	PFlag	1
1	1	1000	1	30	0.03	+0.000	2	10d0	1	Guide	R232Flag	0
2	1	1000	2	30	0.03	+1.000	2	10d0	2	Spi. 1	FileFlag	0
3	1	1000	3	30	0.03	+5.000	2	10d0	3	Sym. 1	Pi Flag	6
4	1	1000	4	30	0.03	+2.500	2	10d0	4	Spi. 2		
5	1	1000	5	10	0.50	+0.000	2	10d0	5	Sym. 2		
6	1	1000	6	10	0.50	+0.000	2	10d0	6	Pi	Counter Parameter	
7	1	1000	7	10	0.50	+5.100	2	10d0	7	Pi/2C1A	type	0
8	1	1000	8	10	0.50	+0.000	2	10d0	8	Spi. 4	address	8
9	1	1000	9	10	0.50	+0.000	2	11d0	1	Prec.	preset	1200.0000
10	1	1000	10	10	0.50	+0.000	2	11d0	2	Pi/2C1B		
11	1	1000	11	10	0.50	+0.000	2	11d0	3	Pi/2. 2		
12	1	1000	12	30	0.03	+0.000	2	11d0	4	Pi/2C2A	Path (NSEC. PRM)	
13	1	1000	13	30	0.03	+0.000	2	11d0	5	Pi/2C2B	¥NSEC¥EXP¥	
14	1	1000	14	30	0.03	+0.000	2	11d0	6			
15	1	1000	15	30	0.03	+0.000	2	11d0	7			
16	1	1000	16	30	0.03	+0.000	2	11d0	8			
17	1	1000	17	30	0.03	+0.000	2	12d0	1			
18	1	1000	18	30	0.03	+0.000	2	12d0	2			
19	1	1000	19	30	0.03	+0.000	2	12d0	3			

**AR (All Recover)**

全てのパワーサプライの電流値を、パラメータファイル「NSEC. PRM」に記述されている電流の値に変更する。これは実際に電源に流れている電流値とパラメータファイルに記述されている電流値で、未対応が生じた場合に実行する。

(2) コマンドグループ P、F、R：プリンター(P)、ファイル(F)、RS-232C(R) への出力を制御するコマンド

**PO (Printer On)、FO (Fileoutput On)、RO (RS232C On)**

このコマンドを実行した後にコマンドグループAの一部、C、D、S、Uのコマンドを実行すると、画面出力がそれぞれの機器へも出力される。プログラムでは「NSEC. PRM」内のそれぞれの機器に対応するフラッグを1にしているのみである。プリンタやRS-232Cを接続していない場合にこれらの出力を行うと、処理がとまってしまうので測定を行う前には必ず確認をする必要がある。

**PF (Printer Off)、FF (Fileoutput Off)、RF (RS232C Off)**

このコマンドを実行した後にコマンドグループAの一部、C、D、Sのコマンドを実行すると、画面出力はそれぞれの機器へは出力されない。プログラムでは「NSEC. PRM」内のそれぞれの機器に対応するフラッグを0にしているのみである。

(3) コマンドグループ C：1チャンネルでの測定コマンド

**C1 (Count type 1) [Preset Time]**

カウンターの測定時間を起動パラメータで与えられた値に設定し、測定を行い結果を出力する。起動パラメータを省略した場合はそれまでの測定時間が用いられる。測定は1回のみで終了する。

**C2 (Count type 2) [Preset Time]**

C1と同じ働きをするが1回測定した後終了せずにキー入力を待ち、[ESC]の場合は終了し、それ以外のキー入力ではもう1回測定する。

**C3 (Count type 3) [Preset Time]**

C1と同じ働きをするが1回測定した後終了せずに次の測定を連続的に行う。[ESC]キー入力で終了する。

**C4 (Count type 4) [Preset Time]**

C2と同じ働きをするが各測定の前にコメントを入力できる。測定結果とコメントはそれぞれの機器に出力できる。

- (4) コマンドグループ **D** : 1チャンネルでの測定コマンドでフリップパーをUPして1回測定、DOWNして1回測定する。

**D1 (Count with flip type 1) [Preset Time]**

カウンターの測定時間を起動パラメータで与えられた値に設定し、その時間フリップパー up、フリップパー downのそれぞれについて測定し、flipping ratioと共に結果を出力する。起動パラメータを省略した場合はそれまでの測定時間が用いられる。測定は1回のみで終了する。なお、flipping ratioとはフリップパー upでの測定値をフリップパー downでの測定値で割ったもので、この値が大きいほど装置の性能がよい状態にある。

**D2 (Count with flip type 2) [Preset Time]**

D1と同じ働きをするが1回測定した後終了せずにキー入力を待ち、[ESC]の場合は終了し、それ以外のキー入力ではもう1回測定する。

**D3 (Count with flip type 3) [Preset Time]**

D1と同じ働きをするが1回測定した後終了せずに次の測定を連続的に行う。[ESC]キー入力で終了する。

**D4 (Count with flip type 4) [Preset Time]**

D2と同じ働きをするが各測定の前にコメントを入力できる。測定結果とコメントはそれぞれの機器に出力できる。

- (5) コマンドグループ **S** : 対称コイル等のステップスキャンのコマンド

**S1 (Step scan type 1) [フリップパー] [初めの電流値] [終りの電流値] [電流変化の値] [Preset Time] [電源の番号] [測定回数]**

指定したコイルの電流値を連続的に変化させながら測定を行う。全ての条件を起動パラメータにより与えることができるが、省略した場合は対話式入力によりパラメータを与える。測定中に[ESC]を入力すると測定を中断できる。

**フリップパー** : 1を入力した場合にはそれぞれの電流値でフリップパー UP, DOWNについてそれぞれ測定を行い、flipping ratioと共に結果を出力する。0の場合はフリップパーは動かさずにそれぞれの電流値で測定を行う。

**初めの電流値** : 測定開始時の電流値。

**終りの電流値** : 測定終了時の電流値。

**電流変化の値** : 電流の増減量。電流の小さい値から大きい値へ増加させる場合は正の値を入力し、大きい値から小さい値に減少させる場合は負の値を入力する。

**Preset Time** : 一回の測定時間。対話式入力で [RET] を入力した場合はそれまでの値を使用する。

**電源の番号** : 電流変化させる電源の番号を入力。

**測定回数** : ある電流値での測定回数を入力。対話式入力で [RET] を入力した場合は 1 回になる。

**S2 (Step scan type 2)** [フリッパー] [初めの電流値] [終りの電流値] [電流変化の値] [Preset Time] [電源の番号]

S1 と同じ機能をもつが、一回測定の後連続的に次の測定をせずにキー入力を待つ。[ESC] キーの場合は電流値を変化させて測定を行い、他のキーの場合は電流値を変化させずに同じ電流値で測定を行う。

**S3 (Step scan type 3)** [フリッパー] [初めの電流値] [終りの電流値] [電流変化の値] [Preset Time] [電源の番号]

S1 と同じ機能をもつが、同じ電流値での測定を [ESC] キーが入力されるまで続け、キー入力後は電流値を変化させて測定を行う。

**S4 (Step scan type 4)** [フリッパー] [初めの電流値] [終りの電流値] [電流変化の値] [Preset Time] [電源の番号]

Depolarization の測定を行う。 $\pi$  コイルの電流値を on、off させながら、電源の番号で指定した電源の電流値を連続的に変化させ測定を行い、結果を flipping ratio と共に出力する。「NSEC. PRM」の中の PiFlag で指定された番号の電源に接続されているコイルを  $\pi$  コイルとみなす。測定の前にはあらかじめ MS コマンドにより ON の時の  $\pi$  コイルの電流値を設定する必要がある。

(6) コマンドグループ **U** : 一次元 PSD を用いた対称コイルなどのステップスキンのコマンド

**U1 (mUlti channel scan type 1)** [Preset Time] [プリンター] [初めの電流値] [終りの電流値] [電流変化の値] [電源の番号]

S1 と同じであるが、一次元 PSD を用いて測定を行う。起動パラメータとして “?” のみを入力した場合、コマンドの簡単な説明をディスプレイに表示する。プリンターで入力した数字により以下の条件でプリントアウトする。

- 0 : 一回測定毎に 512ch でプリントアウト
- 1 : 一回測定毎に 8ch にまとめてプリントアウト
- 2 : 一回測定毎に 16ch にまとめてプリントアウト
- 3 : 一回測定毎に 32ch にまとめてプリントアウト
- 4 : 一回測定毎に 64ch にまとめてプリントアウト
- 9 : プリントアウトなし

ファイル出力は、0 を入力した場合は 512ch でファイル出力を行うが、1 ~ 4 の場合は 128ch にまとめて出力を行う。9 では出力を行わない。

(7) コマンドグループ **M** : コイルのコントロールをするコマンド

**MS (Magnet Set)** [電源の番号] [電流値(A)]

指定した番号の電源に接続しているコイルの電流値を指定した電流値に設定する。

**MR (Magnet Reverse)** [電源の番号]

指定した番号の電源に対応するフリッパーを反転する。

**MT (Magnet Table) [Preseccion coil current (A)]**

指定したプリセッションコイルの電流値 (A) に合わせて他のコイルの電流値を「MT. TBL」ファイルに記入された電流値に設定する。「MT. TBL」の書式は以下のとおりである。

[PS0] [PS1] [PS2] ..... [PS17] [PS18] [PS19]

一つのプリセッションコイルの電流値に対する他のコイルの電流値は、一行に電源0～電源19までを並べて記入する。その際の区切りの記号 (デリミタ) は[TAB], [SPACE], [,], [:]などを使用できる。複数のプリセッションコイルの電流値に対する値を設定したい場合は、それらを複数行に分けて記入する。

**(8) コマンドグループ B: その他のコマンド****BC (Cycle change) [cycle]**

実験サイクルを起動パラメータで与えた数に変更する。起動パラメータを省略した場合は現在の実験サイクルから1を引く。

**7. 計算機制御による測定例**

計算機制御システムはスピネコー実験時ではもちろん、むしろ短時間の測定を繰り返す装置の調整時になくてはならない。調整時の制御方法は多岐にわたるが最も一般的なのが図2のような測定である。この場合、中性子の波長、散乱角、プリセッションコイルの電流によって変化する各種コイルの電流値を設定し、FINE 対称コイルの電流を scan して測定し、エコーシグナルを観測する。各種パラメータを変化させて同様の測定を繰り返して、パラメータの最適値を決定する。このような測定は前章で紹介したコマンドをバッチファイルに記述することによって測定を自動化できる。下記のバッチファイルはプリセッションコイルの電流を10、20、30A と変化させながら、4番の電源 (この場合 FINE 対称コイル) の電流を1A から7A まで0.05A ごとに60秒ずつ連続測定する例である。

```
MT 10
S1 0 1 7 0.05,60 4 1
IF ERRORLEVEL 1 GOTO END
MT 20
S1 0 1 7 0.05 60 4 1
IF ERRORLEVEL 1 GOTO END
MT 30
S1 0 1 7 0.05 60 4 1
IF ERRORLEVEL 1 GOTO END
:END
```

1行目でプリセッションコイルの電流値を10Aに設定するとともに、他のコイル群の電流値もそれにあわせて自動設定する。2行目で図2の様な連続測定を行い結果を出力する。3行目は中断時の処理である。各測定コマンドは測定の途中で[ESC]キーを入力することにより処理を中断し、DOSにリターンコード1を返す。(正常に終了した場合はリターンコード0を返す。)3行目でこのリターンコードの判定を行い、1の場合は強制的に処理をENDへ移し、それ以外の場合は次の

行の処理を行う。もしこの一文がないと測定中に処理を中断したときに、引き続き次の行の処理に移ってしまいその都度処理を中断しなくてはならなくなる。4行目でプリセッションコイルの電流を20Aに設定し、以下は繰り返しである。処理がENDまで進むとバッチファイルにはそれ以上は記述されていないので、そこで処理を終了する。この例では測定コマンドとしてS1を使用しているが、この代わりにU1などの他の測定コマンドを使用することができる。

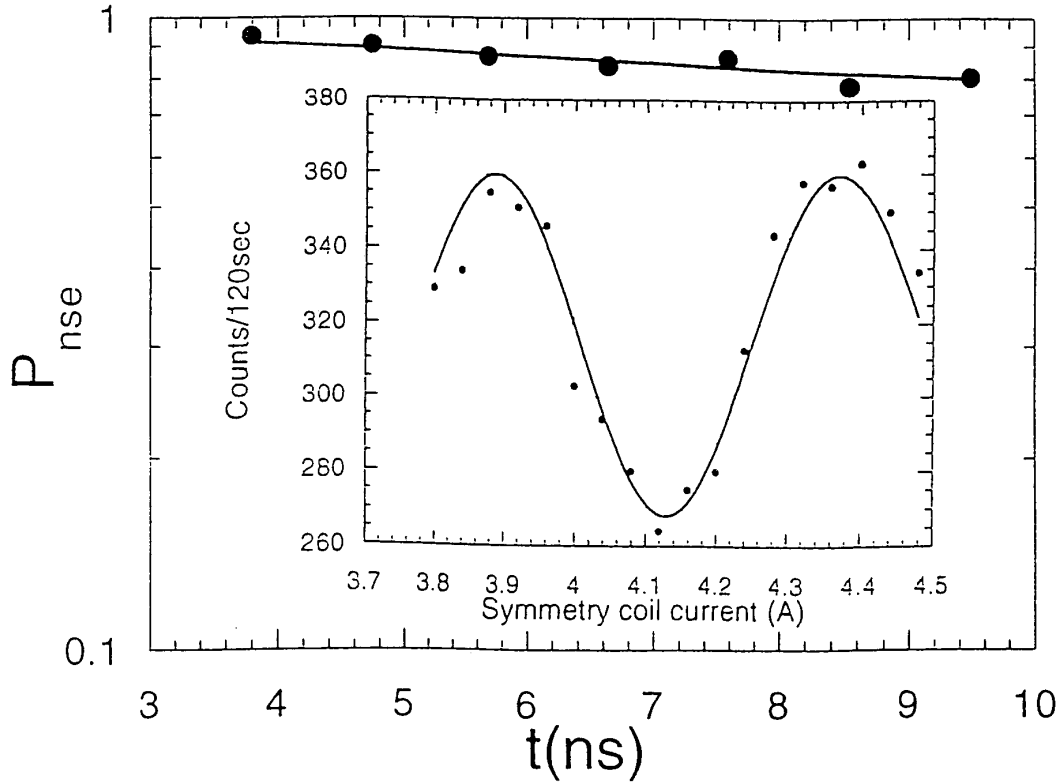


図8 D<sub>2</sub>O-n-decane-AOT系でのNSEシグナル振幅P<sub>NSE</sub>のフーリエ時間t依存性、Q=0.1Å<sup>-1</sup>、T=25℃  
挿入図：対称コイル電流でスキャンしたときのNSEシグナル強度、Q=0.1Å<sup>-1</sup>、t=8.54nsec、T=25℃

図8は界面活性剤に覆われた重水のドロップレットをn-decane中に分散させたマイクロエマルジョン系のスローダイナミクスを調べるために行ったスピンエコー実験の例である。スピンエコーシグナル強度Iを、

$$I = A \exp[-a(i-i_0)^2] \cos[b(i-i_0)] + B, \tag{36}$$

に最小二乗適合させ、エコーシグナル振幅P<sup>\*</sup><sub>NSE</sub>、

$$P^*_{NSE} = |A/B|, \tag{37}$$

を求めた。ここで、iは対称コイルの電流、Aは最大振幅強度、Bはエコーシグナルが消失したときの散乱強度である。試料から直接測定されるP<sup>\*</sup><sub>NSE</sub>を散乱ビームの偏極率Pで割って規格化した規格化スピンエコーシグナルP<sup>\*\*</sup><sub>NSE(試料)</sub> = P<sup>\*</sup><sub>NSE(試料)</sub>/Pを求めた。さらにP<sup>\*\*</sup><sub>NSE(試料)</sub>を弾性散乱の標準試料シリカゲルの規格化スピンエコーシグナルP<sup>\*\*</sup><sub>NSE(シリカ)</sub>で割って、補正されたP<sub>NSE</sub> = P<sup>\*\*</sup><sub>NSE(試料)</sub>/P<sup>\*\*</sup><sub>NSE(シリカ)</sub>を求めた。このP<sub>NSE</sub>は規格化された中間相関関数I<sub>N</sub>(Q, t)、

$$I_N(Q, t) = I(Q, t) / I(Q, 0) \tag{38}$$

に等しい。図8は散乱ベクトル  $Q = 0.1\text{\AA}^{-1}$  の例である。横軸は式(19)から求められたフーリエ時間  $t$  である。式(25)に最小二乗適合させると、 $\Gamma\hbar = 15.5\text{neV}$  が求められ、 $\Gamma = D_{\text{eff}}Q^2$  から拡散係数  $D_{\text{eff}}$  を求めると  $D_{\text{eff}} = 2.35 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}$  が求められた。なお、この  $D_{\text{eff}}$  には並進拡散のみならず変形拡散の寄与が大きい。

## ま と め

中性子スピンエコー分光器のための計算機制御システムを開発し、各種コイルの電流と中性子計測系の制御システムを、分光器の調整およびスピンエコー実験に供した。その結果、機器がまだ未完成であるにも関わらず、多岐にわたる測定法に臨機応変に対応でき、非常に便利であり有用であることが判明した。

## 謝 辞

中性子スピンエコー分光器設置に御尽力下さった東京大学物性研究所中性子散乱研究施設の藤井保彦教授、吉沢英樹助教授、早稲田大学の山田安定教授、山梨大学の伊藤雄而教授に感謝いたします。

## 文 献

1. Hayter J. B., "Matrix analysis of neutron spin echo", *Z. Physik*, **B31** (1978) 117
2. 好村滋洋, 武田隆義, 宮崎年雄, 「中性子スピンエコー法」, 日本結晶学会誌, **30** (1988) 43.
3. Mezei F. (ed.), *Neutron Spin Echo, Lecture Notes in Physics 128* (Springer-Verlag, Berlin) (1980).
4. 三田典玄著「アスキー・ラーニングシステム 入門C言語」アスキー出版局
5. Takeda T., Komura S., Seto H., Nagai M., Kobayashi H., Yokoi E., Ebisawa T. and Tasaki S., "Neutron spin echo spectrometer at JRR-3M", *JAERI-M 93-228 (JAERI-CONF2)* (1993) 959.
6. Takeda T., Komura S., Seto H., Nagai M., Kobayashi H., Yokoi E., Ebisawa T., Tasaki S., Zeyen C., Ito Y., Takahashi S. and Yoshizawa H., "Neutron spin echo spectrometer at JRR-3M", to be published in *Physica B* (1995).