

JAERI-M

84-186

LEDランプを用いたトムソン散乱測定
装置の感度較正

1984年10月

柳沢 一郎*・山内 俊彦

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

LEDランプを用いたトムソン散乱測定装置の感度校正

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

柳沢 一郎*・山内 俊彦

(1984年9月13日受理)

本研究は、標準光源として発光ダイオード(LED)を用いた、JFT-2Mトカマク用同時6点空間分布トムソン散乱測定装置の効率的で十分な精度を持つ感度校正手法の確立を目的としたものである。

まず、LED法による感度校正系の製作、LED発光スペクトルの測定、データ処理用のソフトウェアの製作を行い、感度校正を実施した。この結果、従来のタングステン標準電球を用いた方法に比べ、はるかに効率的に感度校正を行なえる事が示された。

次に、得られた感度校正データを用いて、JFT-2Mプラズマの電子温度の測定を行なった。測定から得られた散乱光スペクトルデータの妥当性を、 χ^2 検定により判定した結果、LED法により得られた感度校正データが、S/N比10~20程度のショットノイズレベルでは十分な精度を持つ事が確認された。

* 外来研究員；三菱原子力工業(株)

Relative Sensitivity Calibration of
Thomson Scattering Device using LED Lamp

Ichiro YANAGISAWA* and Toshihiko YAMAUCHI
Department of Thermonuclear Fusion Research
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 13, 1984)

A new relative sensitivity calibration method for Thomson scattering device using LED lamp has been developed.

Thomson scattering device for simultaneous six position measurements in JFT-2M tokamak was calibrated and it was shown that the efficiency of the calibration was improved remarkably compared with the conventional method using W-standard lamp.

The accuracy of the relative sensitivity calibration constants obtained by the LED method was evaluated by χ^2 -test of the scattered power spectrum of JFT-2M plasma and the results showed that the calibration constants had enough accuracy under the scattered power spectrum data with S/N of 10~20.

Keywords: Relative Sensitivity Calibration, LED, Thomson Scattering, Plasma, JFT-2M Tokamak, Efficiency, Accuracy.

* On leave from Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

目 次

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. 序 | 1 |
| 2. LED法による感度校正の利点 | 1 |
| 3. 感度校正係数の電子温度・密度への影響 | 3 |
| 3.1 トムソン散乱法による電子温度・密度測定の原理 | 3 |
| 3.2 感度校正係数 | 3 |
| 3.3 電子温度・密度の算出 | 7 |
| 3.4 感度校正係数の誤差の電子温度・密度への影響 | 7 |
| 4. LED法による波長チャンネルの相対感度校正 | 13 |
| 4.1 LED法による校正系 | 13 |
| 4.2 LEDの発光スペクトルの測定 | 18 |
| 4.3 感度校正データ処理プログラムの概要 | 20 |
| 4.4 データ処理方法 | 20 |
| 5. 感度校正の結果 | 23 |
| 5.1 LED法による感度校正の結果 | 23 |
| 5.2 電子温度の測定 | 23 |
| 6. 感度校正値の評価とその誤差要因の検討 | 26 |
| 6.1 感度校正値の評価 | 26 |
| 6.2 感度校正の誤差要因の検討 | 30 |
| 7. 結 論 | 31 |
| 謝 辞 | 31 |
| 参考文献 | 32 |
| Appendix A KANDOプログラム使用マニュアル | 33 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Merits of LED Method for the Relative Sensitivity Calibration of Thomson Scattering Device | 1 |
| 3. Effects of Sensitivity Calibration Constants on Electron Temperature and Density Calculations | 3 |
| 3.1 Principle of Electron Temperature and Density Measurements by Thomson Scattering Method | 3 |
| 3.2 Sensitivity Calibration Constants | 3 |
| 3.3 Fundamental Equation for Calculations of Electron Temperature and Density | 7 |
| 3.4 Effects of Sensitivity Calibration Constants on Electron Temperature and Density | 7 |
| 4. Relative Sensitivity Calibration of the Wavelength Channel using LED | 13 |
| 4.1 Experimental Arrangements | 13 |
| 4.2 Measurements of LED Spectrum | 18 |
| 4.3 Outline of KANDO Program | 20 |
| 4.4 Data Processing Method | 20 |
| 5. Results of Relative Sensitivity Calibration and Electron Temperature Measurement | 23 |
| 5.1 Results of Relative Sensitivity Calibration by LED Method .. | 23 |
| 5.2 Electron Temperature Measurements of JFT-2M Plasma | 23 |
| 6. Discussions on Relative Sensitivity Constants and Error Factors | 26 |
| 6.1 Evaluation of Calibration Constants | 26 |
| 6.2 Error Factors in Relative Sensitivity Calibration | 30 |
| 7. Conclusions | 31 |
| Acknowledgements | 31 |
| References | 32 |
| Appendix A User's Manual for KANDO | 33 |

1 序

トカマクプラズマの実験では、プラズマのエネルギー輸送¹⁾等の現象を解析するために、電子温度・密度の空間分布を精度良く測定することが必要とされている。このためにJFT-2Mトカマクにおいても、プラズマ中の6空間点の電子温度・密度を一放電で測定するトムソン散乱測定装置を使用している。

まず、レーザ散乱法により電子温度・密度を測定する前に、測定系の感度校正が必要となる。その感度校正を正確に行なえば精度良い結果が得られる。もちろん、迷光対策等により測定時のS/N比の改善も行ってゆかねばならないが、ごく最近のJFT-2Mトカマクでは、迷光レベルは高いものの、高性能ハイパスフィルターの適用により短波長側測定領域の迷光量をノイズレベルまで落とす事に成功している。さらに、同じ波長チャンネルで測定する場合には、プラズマの電子温度が高い程、感度校正の誤差が、測定結果に大きく響いてくる。このため、今後のJFT-2Mプラズマでの電子温度の上昇やS/N比の改善などを考慮すると、感度校正を正確に行なう事が、精度良いデータを得るためには必須となつてこよう。

一方、実験の効率化を図るためには、感度校正は短時間に容易に行なえる事が望ましい。具体的には、測定中に感度較正值に疑問を生じた場合にも、トムソン散乱測定装置のアライメントをくずす事なく、実験中に感度校正ができる事が望ましい。

本研究は、以上のような背景をもとに、JFT-2Mトカマクで用いられている同時6点空間分布トムソン散乱測定装置の効率的で精度の良い感度校正手法の確立を目的としたものである。

本報告書では、まず第2章にてLED法による感度校正手法の特徴を述べる。第3章では、感度較正值に含まれる誤差の電子温度・密度への影響を明らかにし、感度校正の重要性を示す。第4章では、LED法による感度校正系と、データ処理プログラムについての説明を行なう。第5章では感度校正の結果と、それを用いて測定した電子温度分布を示す。第6章にて感度校正の誤差について論じる。第7章にて結論をまとめる。

2 LED法による感度校正の特徴

プラズマ中の電子温度・密度をレーザ散乱法で求めるためには、光学系・分光器・検出器などから構成される測定装置全体の感度校正が必要となる。

JFT-2Mトカマクでのトムソン散乱測定装置の感度校正には、これまで標準電球（タングステンフィラメント、使用電流35A）が使用されてきたが、この場合には、

- 1) 空間6測定点毎に、標準電球の位置合わせを行なう必要がある。そのため、感度校正ごとに、測定系のアライメントを行なう必要がある。
- 2) 感度校正の測定を空間6測定点毎に繰り返す必要がある。

1 序

トカマクプラズマの実験では、プラズマのエネルギー輸送¹⁾等の現象を解析するために、電子温度・密度の空間分布を精度良く測定することが必要とされている。このためにJFT-2Mトカマクにおいても、プラズマ中の6空間点の電子温度・密度を一放電で測定するトムソン散乱測定装置を使用している。

まず、レーザ散乱法により電子温度・密度を測定する前に、測定系の感度較正が必要となる。その感度較正を正確に行なえば精度良い結果が得られる。もちろん、迷光対策等により測定時のS/N比の改善も行ってゆかねばならないが、ごく最近のJFT-2Mトカマクでは、迷光レベルは高いものの、高性能ハイパスフィルターの適用により短波長側測定領域の迷光量をノイズレベルまで落とす事に成功している。さらに、同じ波長チャンネルで測定する場合には、プラズマの電子温度が高い程、感度較正の誤差が、測定結果に大きく響いてくる。このため、今後のJFT-2Mプラズマでの電子温度の上昇やS/N比の改善などを考慮すると、感度較正を正確に行なう事が、精度良いデータを得るためには必須となつてこよう。

一方、実験の効率化を図るためには、感度較正は短時間に容易に行なえる事が望ましい。具体的には、測定中に感度較正值に疑問を生じた場合にも、トムソン散乱測定装置のアライメントをくずす事なく、実験中に感度較正ができる事が望ましい。

本研究は、以上のような背景をもとに、JFT-2Mトカマクで用いられている同時6点空間分布トムソン散乱測定装置の効率的で精度の良い感度較正手法の確立を目的としたものである。

本報告書では、まず第2章にてLED法による感度較正手法の特徴を述べる。第3章では、感度較正值に含まれる誤差の電子温度・密度への影響を明らかにし、感度較正の重要性を示す。第4章では、LED法による感度較正系と、データ処理プログラムについての説明を行なう。第5章では感度較正の結果と、それを用いて測定した電子温度分布を示す。第6章にて感度較正の誤差について論じる。第7章にて結論をまとめる。

2 LED法による感度較正の特徴

プラズマ中の電子温度・密度をレーザ散乱法で求めるためには、光学系・分光器・検出器などから構成される測定装置全体の感度較正が必要となる。

JFT-2Mトカマクでのトムソン散乱測定装置の感度較正には、これまで標準電球（タングステンフィラメント、使用電流35A）が使用されてきたが、この場合には、

- 1) 空間6測定点毎に、標準電球の位置合わせを行なう必要がある。そのため、感度較正ごとに、測定系のアライメントを行なう必要がある。
- 2) 感度較正の測定を空間6測定点毎に繰り返す必要がある。

3) 光源強度が強すぎるために、空間分解ファイバーと標準電球の間に減衰用のNDフィルター(約1%)を配置しなければならない。フィルター透過率の誤差が感度較正值に影響を与える。

4) 絶対感度算出のためには、各空間測定点毎に観測立体角の補正を行なう必要がある。この補正の際に誤差が生じうる。

などの繁雑さや問題点が避けられなかった。

今回、我々が用いた手法は、ラマン散乱法により各空間測定点の第1波長チャンネルについての絶対感度を求めておき、他の波長チャンネルについては、LEDを用いた標準光源法により相対感度を求めるというものである。

本報告書では、LED法による相対感度の較正手法についての報告を行ない、ラマン散乱法の詳細については言及しないが、ラマン散乱法により絶対感度較正を行なう事により、標準光源手法では容易でなかった立体角補正等の繁雑さを省ける事になる。²⁾

LEDを標準光源として用いる感度較正法(以下、LED法と呼ぶ)は、それ自体、標準電球を用いた感度較正に比べ多くの利点を有している。

発光ダイオード(LED)は、PN接合により発光中心のある領域(発光領域)に少数キャリアを注入し発光させるものである。数mA~50mAの電流で実用的な明るさが得られ、駆動電圧も~2Vと低い。また市販されている発光ダイオードは発光部の直径が3mm程度の大きさである。

小型でかつ光量も適当であるため、LEDを空間分解ファイバー入口前面に、空間測定点毎に配置し、6点同時に感度較正を行なう事が可能である。

LEDを標準光源として用いることによる利点は、以下の通りである。

1) 空間6測定点毎に、標準光源の位置合わせを行なう必要がなく、また感度較正毎に測定系のアライメントを行なう必要もない。

このため、感度較正の準備作業時間が短かくてすみ、実験中に感度較正を行なうことも可能となる。

2) 同時に空間6測定点の感度較正を行なう事ができる。このため同様な統計精度を得るための測定時間が従来の1/6となる。

3) 光源強度が適当なため、空間分解ファイバーとLEDの間にNDフィルターを配置する必要がなくなり、このNDフィルターの透過率補正に起因する誤差を避ける事ができる。

4) LEDの駆動電圧、電流も小さく電源装置が不要になり(乾電池で充分)、またLED自体も安価(1個数10円程度)であるため、経済的である。

以上のように、LEDを標準光源とする感度較正手法(LED法)は、従来のタングステンランプによる感度較正に比べ、効率的で安価であるというメリットを有する。

3. 感度校正係数の電子温度・密度への影響

本章では、トムソン散乱法³⁾による電子温度・密度の評価方法について述べ、感度校正係数を定義し、その誤差の電子温度・密度への影響を検討し、感度校正の重要性を示す。

3.1 トムソン散乱法による電子温度・密度測定の実理

レーザー光のトムソン散乱による観測方向への散乱光スペクトル $P_s(\lambda)$ は、

$$P_s(\lambda) = P_L \cdot n_e \cdot \frac{d\sigma_{eT}}{d\Omega} \cdot S(\lambda, T_e) \cdot dz \cdot d\Omega \quad (3.1.1)$$

で与えられる。ここで、

P_L : レーザー出力

n_e : 電子密度

$\frac{d\sigma_{eT}}{d\Omega}$: トムソン散乱の微分散乱断面積

dz : 測定長

$d\Omega$: 観測立体角

$S(\lambda, T_e)$: 散乱光スペクトル密度関数

スペクトル密度関数 $S(\lambda, T_e)$ は、電子速度分布がマクスウェル分布のとき、

$$S(\lambda, T_e) = \frac{A}{\sqrt{T_e} \cdot \sin(\theta/2)} \cdot \exp - \frac{B}{T_e} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \quad (3.1.2)$$

で与えられる。ここで、

T_e : 電子温度

λ_0 : ルビーレーザー光波長 (6943 Å)

$\Delta\lambda$: $\lambda_0 - \lambda$

θ : 散乱角

$A = 2.0538 \times 10^{-2} \sqrt{eV} / \text{Å}$

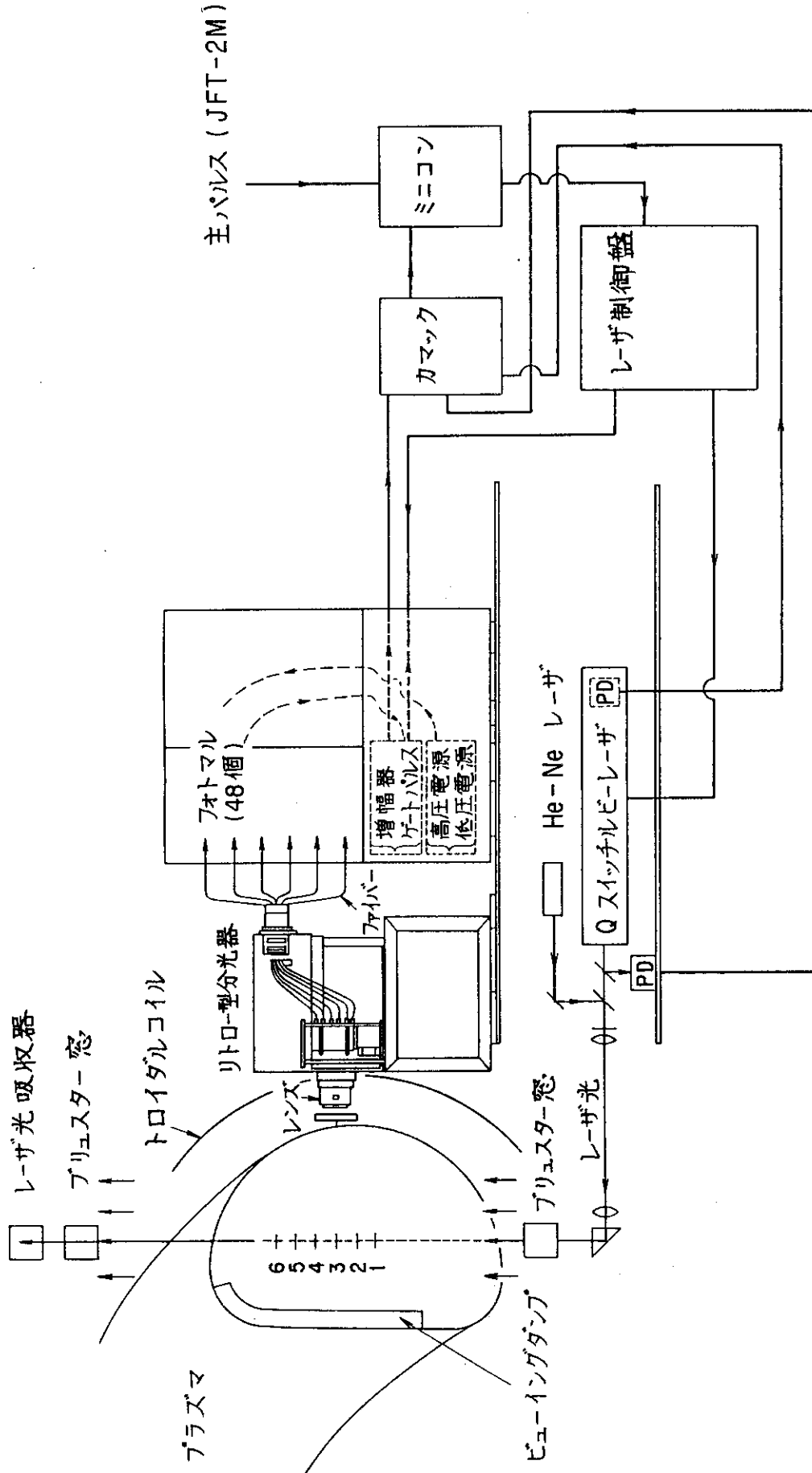
$B = 6.388 \times 10^4 eV$

なお、相対論効果を考慮した散乱光のスペクトル密度関数は参考文献2) - 4) に述べられている。

散乱光スペクトルを測定する事により、(3.1.2)式より電子温度 T_e が求まり、さらに散乱光の絶対強度が分かれば、(3.1.1)式より電子密度 n_e が求まる。

3.2 感度校正係数

JFT-2Mで使用している6点同時測定用トムソン散乱測定装置⁵⁾の構成を第1図に示す。



第1図 JFT-2Mトムソン散乱測定装置の構成

測定系はルビーレーザー系、受光部（集光レンズ）、分光器、フォトマル等から構成される。

レーザービーム ($\lambda_0 = 6943 \text{ \AA}$) は直角プリズムを通り、下方から垂直上方のプラズマ中に入射される。散乱光は集光レンズにより、空間分解ファイバー入口面に結像される。受光光学系はプラズマ中の A~F の 6 点 (5 cm 間隔) での測定ができる構造となっている。空間分解ファイバーを通った光は、リトロ型分光器により分光され、各測定点毎に 6~10 チャンネルの光ファイバーによりフォトマルへ導びかれる。フォトマルの出力信号は、ゲート積分器を通りデジタル値に変換される。

まず、散乱光強度とゲート積分器出力値の関係を導びき、絶対感度 C_i と相対感度 C_{Ri} を定義する。ここで添字 i は波長チャンネルを示す。

プラズマから、集光レンズにより集められる散乱光強度 (全波長について積分したもの) W_s は

$$W_s = P_L \cdot n_e \cdot \frac{d\sigma_{eT}}{d\Omega} \cdot dz \cdot d\Omega \quad (3.2.1)$$

で与えられる。

この時、 i 番目の波長チャンネルの絶対感度 C_i を、次式で定義する。

$$C_i = \frac{N_i}{W_s \cdot S(\lambda_i, T_e) \cdot \Delta\lambda_i \cdot \Delta t_L} \quad (3.2.2)$$

ここで、 N_i はゲート積分器出力、 $\Delta\lambda_i$ は各チャンネルの波長巾、 Δt_L はレーザー光のパルス巾である。

また、各波長チャンネル毎の相対感度 C_{Ri} は第 1 チャンネルの感度を基準とし、

$$C_{Ri} = \frac{C_i}{C_1} \quad (3.2.3)$$

と定義する。

以下に、ラマン散乱法による絶対感度の決定と、標準光源法による相対感度の決定について述べる。

(1) ラマン散乱法による絶対感度の決定

真空容器内に水素や重水素ガスをつめて、ラマン散乱光の測定を行なう事により、各測定点の第 1 チャンネルの絶対感度を較正する事ができる。本手法の利点は、測定系の感度と同時に、観測の立体角、測定長、ビグネッティングの補正も同時に行なえる点にある。

第 1 チャンネルの中心波長を反ストークスラマン散乱光の波長 $\lambda_0 = 6776 \text{ \AA}$ (又は 6671 \AA) に合わせ、ラマン散乱光を測定する。その時のレーザー出力を P_R 、中性ガス圧を n_R 、ラマン散乱の微分断面積を $\frac{d\sigma_R}{d\Omega}$ とすると、ゲート積分器出力 N_{R1} は、

$$N_{R1} = P_R \cdot n_R \cdot \frac{d\sigma_R}{d\Omega} \cdot d\Omega \cdot dz \cdot C_1 \cdot \Delta t_R \quad (3.2.4)$$

で与えられる。ここで、 Δt_R はラマン散乱測定時のレーザーパルス巾である。

これより

$$d\Omega \cdot dz = \frac{N_{Ri}}{P_R \cdot n_R \cdot \frac{d\sigma_R}{d\Omega} \cdot C_1 \cdot \Delta t_R} \quad (3.2.5)$$

これと (3.2.1), (3.2.2) 式より

$$\begin{aligned} N_i &= P_L \cdot n_e \cdot \frac{d\sigma_{eT}}{d\Omega} \cdot \frac{N_{Ri}}{P_R \cdot n_R \cdot \frac{d\sigma_R}{d\Omega} \cdot C_1 \cdot \Delta t_R} \\ &\quad \cdot S(\lambda_i, T_e) \cdot \Delta\lambda_i \cdot C_i \cdot \Delta t_L \\ &= \left(N_{Ri} \cdot \frac{d\sigma_{eT}}{d\Omega} / P_R \cdot n_R \cdot \frac{d\sigma_R}{d\Omega} \cdot \Delta t_R \right) \\ &\quad \cdot \left(\frac{C_i}{C_1} \right) \cdot P_L \cdot n_e \cdot S(\lambda_i, T_e) \cdot \Delta\lambda_i \cdot \Delta t_L \\ &= C_{RAM} \cdot C_{Ri} \cdot P_L \cdot n_e \cdot S(\lambda_i, T_e) \cdot \Delta\lambda_i \cdot \Delta t_L \quad (3.2.6) \end{aligned}$$

ここで, $C_{RAM} = \left(N_{Ri} \cdot \frac{d\sigma_{eT}}{d\Omega} / P_R \cdot n_R \cdot \frac{d\sigma_R}{d\Omega} \cdot \Delta t_R \right)$ は, ラマン散乱法により決まる感度校正係数で, これは第1チャンネルの絶対感度 C_1 と次式の関係を持つ。

$$C_{RAM} = C_1 \cdot \frac{d\sigma_{eT}}{d\Omega} \cdot dz \cdot d\Omega \quad (3.2.7)$$

(2) LED法による相対感度の決定

LEDのスペクトル密度関数を $S_{LED}(\lambda_i)$, 空間分解ファイバーに入射する全光量を W_{LED} とすると, i 番目の波長チャンネルのゲート積分器出力 N_i は

$$N_i = W_{LED} \cdot S_{LED}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \cdot C_i \cdot \Delta t \quad (3.2.8)$$

で与えられる。ここで Δt はゲート時間巾である。 W_{LED} , Δt が波長チャンネル毎に変わらないとすれば, ある測定点に対する波長チャンネルの相対感度 C_{Ri} は

$$\begin{aligned} C_{Ri} &= \frac{C_i}{C_1} \\ &= \frac{N_i \cdot S_{LED}(\lambda_1) \cdot \Delta\lambda_1}{N_1 \cdot S_{LED}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i} \quad (3.2.9) \end{aligned}$$

で与えられる。故に, 相対感度は, LEDのスペクトル関数とチャンネル波長巾の比がわかっているならば, 第1チャンネルに対する各チャンネルのゲート積分器出力比を測定する事により決定される。

3.3 電子温度・密度の算出

前節で定義した感度校正係数を用いて電子温度・密度を導出する手順を述べる。

(3.2.6)式より,

$$\frac{N_i}{\Delta\lambda_i \cdot C_{Ri}} = C_{RAM} \cdot P_L \cdot n_e \cdot S(\lambda_i, T_e) \cdot \Delta t_L \quad (3.3.1)$$

ここで, N_i : i チャンネルのカウント数

$\Delta\lambda_i$: i チャンネルの波長巾

C_{Ri} : i チャンネルの1チャンネルに対する相対感度

C_{RAM} : ラマン散乱法により決まる規格化定数

P_L : レーザー光出力

n_e : 電子密度

$S(\lambda_i, T_e)$: トムソン散乱スペクトル密度関数

(3.3.1)式へ(3.1.2)式を代入し, 両辺の対数をとると,

$$\begin{aligned} \ell_n(Y_i) = \ell_u \left(C_{RAM} \cdot P_L \cdot n_e \cdot \Delta t_L \cdot \frac{A}{\sqrt{T_e}} \cdot \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right) \\ - \frac{\Delta\lambda_i^2}{T_e} \cdot \frac{B}{\lambda_0^2 \cdot \sin^2(\theta/2)} \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

ここで,

$$Y_i = \frac{N_i}{\Delta\lambda_i \cdot C_{Ri}} \quad (3.3.3)$$

(3.3.2)式を用いると, $\ell_n(Y_i)$ と $\Delta\lambda_i^2$ を

$$y = a + bx \quad (3.3.4)$$

の関数形にフィッティングする事により, T_e , n_e を決める事ができる。ここで $y = \ell_n(Y_i)$ $x = \Delta\lambda_i^2$ である。

T_e , n_e はフィッティング係数 a , b により次式で与えられる。

$$T_e = \frac{B}{\lambda_0^2 \cdot \sin^2(\theta/2) \cdot b} \quad (3.3.5)$$

$$n_e = \frac{\sin(\theta/2)}{C_{RAM} \cdot P_L \cdot A} \cdot \sqrt{T_e} \cdot e^a \quad (3.3.6)$$

3.4 感度校正係数の誤差の電子温度・密度への影響

T_e , n_e が (3.3.5), (3.3.6)式で与えられる時に, 感度校正係数 (特に C_{Ri}) に含まれる誤差が T_e , n_e の結果にどのような影響を与えるかを検討する。

N個の波長チャンネルから得られた測定結果より、 $y_i = \ell_n(Y_i)$ 、 $x_i = \Delta \lambda_i^2$ を (3.3.4) 式の関数形に最小2乗フィッティングする事により、フィッティング係数 a, b を決めるとする。

各チャンネルのフィッティングの重みを σ_i^2 とすると、

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{\Delta} \left(\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} \right) \\ b &= \frac{1}{\Delta} \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sigma_i^2} \right) \\ \Delta &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \end{aligned} \right\} (3.4.1)$$

により、a, b は与えられる。⁶⁾

i チャンネルの相対感度 C_{Ri} が真値から δC_{Ri} だけ変化した時の a, b の変分は、

$$\begin{aligned} \delta a &= \left(\frac{\partial a}{\partial C_{Ri}} \right) \delta C_{Ri} \\ &= \left(\frac{\partial a}{\partial y_i} \right) \left(\frac{\partial y_i}{\partial Y_i} \right) \left(\frac{\partial Y_i}{\partial C_{Ri}} \right) \delta C_{Ri} \\ &= \left(\frac{\partial a}{\partial y_i} \right) \left(\frac{1}{Y_i} \right) \left(-\frac{Y_i}{C_{Ri}} \right) \delta C_{Ri} \\ &= - \left(\frac{\partial a}{\partial y_i} \right) \left(\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}} \right) \end{aligned} \quad (3.4.2)$$

$$\begin{aligned} \delta b &= \left(\frac{\partial b}{\partial C_{Ri}} \right) \delta C_{Ri} \\ &= \left(\frac{\partial b}{\partial y_i} \right) \left(\frac{\partial y_i}{\partial Y_i} \right) \left(\frac{\partial Y_i}{\partial C_{Ri}} \right) \delta C_{Ri} \\ &= - \left(\frac{\partial b}{\partial y_i} \right) \left(\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}} \right) \end{aligned} \quad (3.4.3)$$

で与えられる。ここで (3.3.3) 式と $y_i = \ell_n(Y_i)$ の関係式を用いた。

T_e の変分 δT_e は、(3.3.5), (3.4.3) 式より

$$\frac{\delta T_e}{T_e} = - \frac{\delta b}{b} = - \frac{T_e}{\alpha} \cdot \left(\frac{\partial b}{\partial y_i} \right) \left(\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}} \right) \quad (3.4.4)$$

で与えられる。ここで

$$\alpha = \frac{B}{\lambda_0^2 \cdot \sin^2(\theta/2)}$$

である。

n_e の変化分 δn_e は, (3.3.6), (3.4.2), (3.4.4) 式から

$$\begin{aligned} \frac{\delta n_e}{n_e} &= -\frac{\delta C_{RAM}}{C_{RAM}} + \frac{\delta T_e}{2T_e} + \delta a \\ &= -\frac{\delta C_{RAM}}{C_{RAM}} + \left\{ -\frac{T_e}{2\alpha} \cdot \left(\frac{\partial b}{\partial y_i} \right) - \left(\frac{\partial a}{\partial y_i} \right) \right\} \left(\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}} \right) \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

で与えられる。

ここで, $\frac{\partial a}{\partial y_i}, \frac{\partial b}{\partial y_i}$ は (3.4.1) 式より

$$\frac{\partial a}{\partial y_i} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^N \frac{x_j^2}{\sigma_j^2} - \frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^N \frac{x_j}{\sigma_j^2} \right) \quad (3.4.6)$$

$$\frac{\partial b}{\partial y_i} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^N \frac{1}{\sigma_j^2} - \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^N \frac{x_j}{\sigma_j^2} \right) \quad (3.4.7)$$

以上の式を用いれば, 感度較正係数に含まれる誤差が T_e, n_e にどのように影響するかを評価できる。

次に, 現在の測定系のうち, 空間測定点 A について定量的に評価してみる。第 1 表にフォトマルチチャンネルの中央波長値と波長巾を示す。

フィッティングの重み σ_i^2 としては, 代表波長点でのトムソン散乱光強度の逆数を使用した。トムソン散乱光強度は (3.1.2) 式を用いて計算した。

第 2 図は, A 点の第 1, 第 2, 第 3, 第 5, 第 6 の 5 つの波長チャンネルを用いてフィッティングした場合の電子温度の $\frac{\delta C_i}{C_i}$ に対する感度係数 $\left(-\frac{T_e}{\alpha} \cdot \left(\frac{\partial b}{\partial y_i} \right) \right)$ を電子温度に対してプロットしたものである。

電子温度が増大すると感度係数も増大する。最も敏感なのは短波長側の第 6 チャンネルであり, $T_e = 1500 \text{ eV}$ の時に感度係数は約 -1.4 となっている。すなわち, 第 6 チャンネルの相対感度が真値に比べ 10% 高かったとすると, 他のチャンネルの相対感度が真値であったとしても, T_e は約 14% 低く評価される事になる。

第 3 図は, 電子密度の $\frac{\delta C}{C}$ に対する感度係数 $\left(-\frac{T_e}{2\alpha} \cdot \left(\frac{\partial b}{\partial y_i} \right) - \left(\frac{\partial a}{\partial y_i} \right) \right)$ を電子温度に対してプロットしたものである。 $T_e < 700 \text{ eV}$ では, 長波長側で, $T_e > 700 \text{ eV}$ では, 短波長側チャンネルの方が敏感である。感度係数の絶対値が 1 より小さいため, 電子密度への相対感度の誤差の影響は, C_{RAM} の誤差の影響に比べ小さいと言える。

これらの感度係数は, フィッティングに用いるチャンネルの選択にも影響をうける。

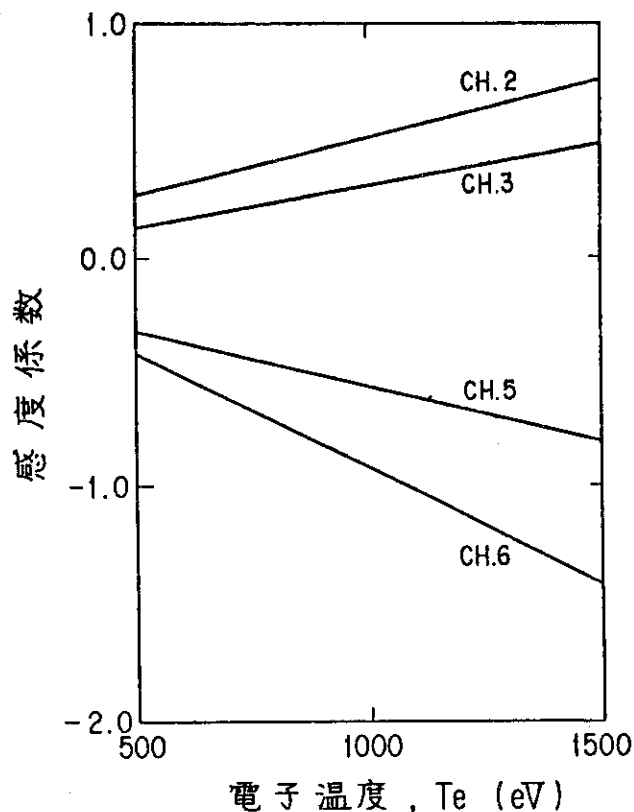
第 4 図は, 第 2, 第 5, 第 6 の 3 チャンネルでフィッティングを行なう場合の結果を示したものである。

電子温度に対して最も敏感な第 6 チャンネルの感度係数が, 5 チャンネルによりフィッティ

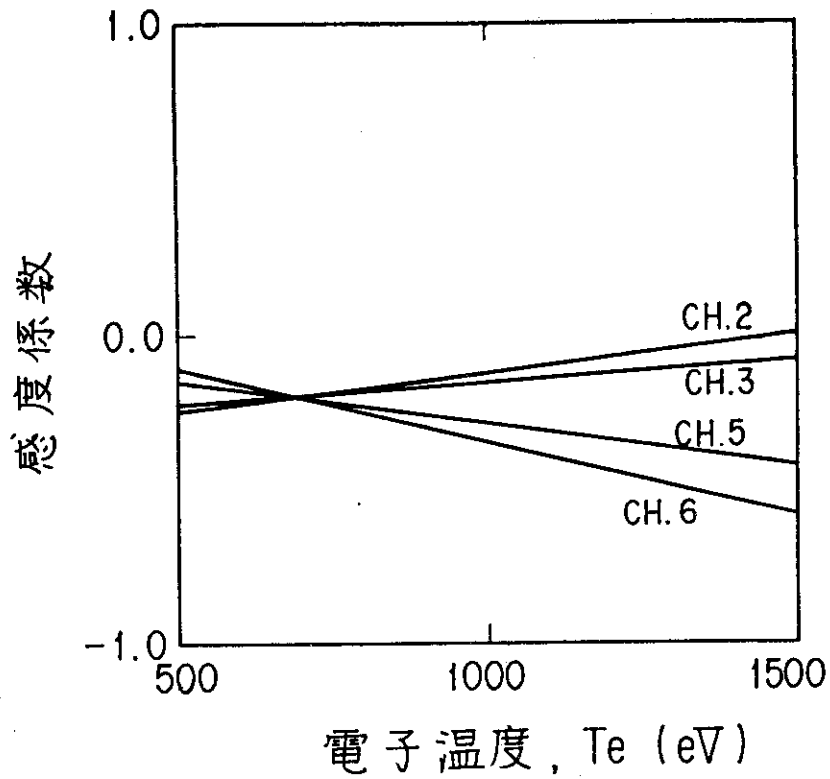
第1表 フォトマルチャンネルの中央波長値(λ_i)と波長巾($\Delta \lambda_i$)

(単位: Å)

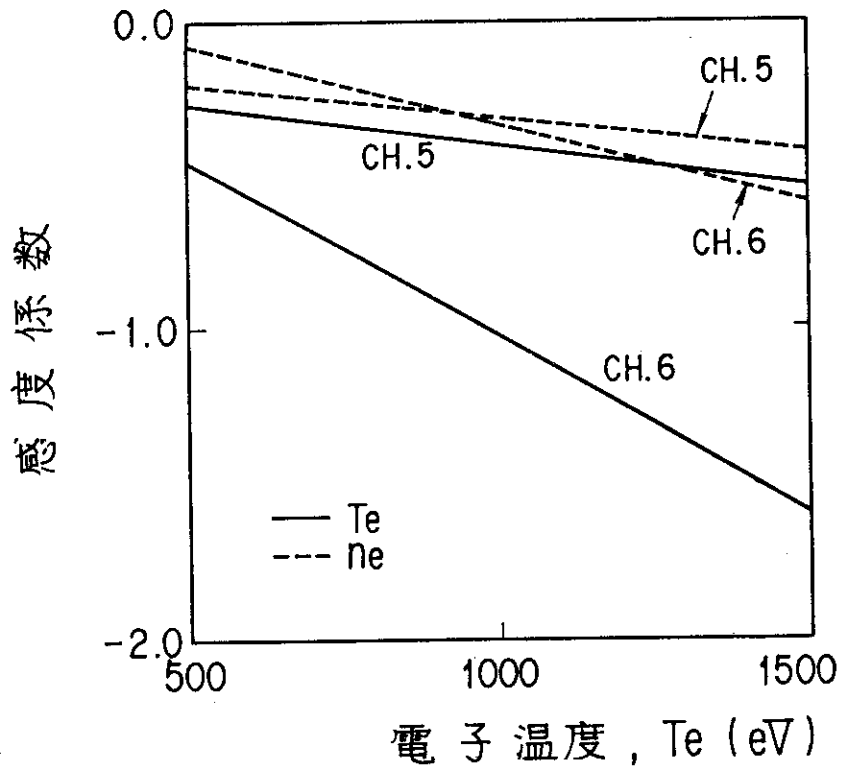
| | 1 | 2 | 3 | 4(H α) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| A | 6829.7 (74.3) | 6755.3 (74.5) | 6681.0 (74.2) | 6594.0 (99.9) | 6435.1 (104.9) | 6329.1 (106.5) | 6222.9 (106.4) | 6095.7 (148.1) | 5946.5 (150.3) | 5747.3 (248.0) |
| B | 6829.4 (74.5) | 6755.3 (73.7) | 6681.2 (74.5) | 6593.8 (100.3) | 6441.1 (104.6) | 6335.6 (106.6) | 6228.6 (107.4) | 6101.0 (147.7) | 5951.3 (151.8) | 5750.8 (249.2) |
| C | 6832.5 (74.9) | 6757.2 (75.6) | 6682.1 (74.7) | 6595.2 (99.0) | 6442.2 (105.4) | 6336.5 (105.9) | 6229.8 (107.5) | 6101.5 (149.1) | 5950.6 (152.2) | 5750.0 (249.0) |
| D | 6827.7 (73.3) | 6753.8 (74.5) | 6679.5 (74.0) | 6593.3 (99.2) | 6438.5 (104.7) | 6333.7 (104.9) | 6227.7 | | | |
| E | 6846.4 (56.6) | 6789.6 (56.9) | 6732.6 (57.2) | 6674.5 (58.9) | 6595.1 (99.9) | 6439.9 | | | | |
| F | 6848.1 (56.7) | 6791.1 (57.1) | 6734.1 (57.1) | 6676.3 (58.4) | 6596.0 | | | | | |



第2図 空間測定点Aの5つの波長チャンネルを用いたフィッティングの場合の電子温度 $\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}}$ に対する感度係数
(第1波長チャンネルを相対感度 C_{Ri} の基準チャンネルとした)



第3図 空間測定点Aの5つの波長チャンネルを用いたフィッティングの場合の電子密度の $\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}}$ に対する感度係数
(第1波長チャンネルを相対感度 C_{Ri} の基準チャンネルとした)



第4図 空間測定点Aの3つの波長チャンネルを用いたフィッティングの場合の電子温度・密度の $\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}}$ に対する感度係数
(第2波長チャンネルを相対感度 C_{Ri} の基準チャンネルとした)

ングする場合に比べ増大しており、 $T_e = 1500 \text{ eV}$ で約 -1.6 となっている。

以上の結果を以下にまとめる。

- ① 電子温度の $\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}}$ に対する感度係数は、電子温度の上昇に伴って、ほぼニアに増

大する。

A 点の波長チャンネル配置で、もっとも敏感なのは短波長側の第 6 チャンネルで、その感度係数は $T_e = 1500 \text{ eV}$ で -1.4 である。また、感度係数はフィッティングチャンネルの選択、チャンネル数にも影響をうけ、チャンネル数が少なくなると感度係数は増大する。

- ② 電子密度の $\frac{\delta C_{Ri}}{C_{Ri}}$ に対する感度係数は、 $\frac{\delta C_{RAM}}{C_{RAM}}$ に対する感度係数 ($=1.0$) に比べ小

さい。

ただし、電子温度の上昇に伴ない、感度係数は増大し、 $T_e = 1500 \text{ eV}$ で第 6 チャンネルの感度係数は -0.6 となる。

以上の結果からわかるように、高温のプラズマを測定する場合や、少ない波長チャンネルでフィッティングを行なう場合に、電子温度・密度を精度良く評価するためには、特に感度較正をしっかりと行なう必要がある（現在の JFT-2 M トカマクのトムソン散乱測定装置の波長チャンネル配置では短波長側波長チャンネルの感度較正が重要である。）。

レーザ散乱法による電子温度・密度の誤差要因としては、感度較正の他に①迷光、②ショットノイズ、③プラズマ光のばらつき等が考えられる。特に迷光については、これまでの JFT-2、JFT-2 M プラズマの測定時の S/N 比劣化の主要因であったが、ごく最近の実験では、迷光レベルは高いものの、高性能ハイパスフィルターの適用により迷光量をノイズレベルにまで落とす事ができた。このような S/N 比の改善等も考え合わせると、今後、感度較正の重要性はますます高まるものであろう。

4 LED法による波長チャンネルの相対感度較正

本章では、LED法による波長チャンネルの相対感度較正法について述べる。4.1で、較正系について述べ、4.2で実験に使用したLEDの波長特性の測定について述べる。4.3と4.4感度較正時のデータ処理方法について述べる。

4.1 LED法による較正系

第5図に(a)LED法による感度較正実験配置図、(b)トムソン散乱測定装置光学系の配置、(c)フォトマルの信号処理ブロック図を示す。

可視発光ダイオードには各種材料を用いたものが市販されているが、ここではGaP 赤色発光ダイオード(東芝TLR102)を使用した。このピーク波長は 7000\AA 、半値巾は 1000\AA であり、トムソン散乱測定装置の較正に必要とされる波長領域(現在 $6300\text{\AA}\sim 6900\text{\AA}$)をカバーしている。このLEDの特性値を第2表に示す。

LEDは空間測定点A~F用に6個使用し、電流値の制御がしやすいようにそれらを直列に結線している。

電源には乾電池(FM-5/3V×4本)を直列に使用している。フィルターを使用しないで測定する場合には、抵抗を入れて電流値を下げて使用する。

LEDの一般的な特性を以下に説明する。⁷⁾

(1) 発光強度の電流依存性

第6図に主なLEDにおける発光強度と順方向電流の関係を示す。GaP 赤色発光ダイオード以外は発光強度は順方向電流値の2乗に比例して増大する。GaP 赤色発光ダイオードでは比較的低電流で発光強度の飽和が生じている。いずれにしても発光強度が電流値に敏感であるため、測定中の電流値の変化に注意する必要がある。

(2) 発光強度の温度依存性

LEDは、発光再結合の確率が温度に依存する。第7図に示すように接合部の温度上昇により発光強度が低下する。このため、標準光源としてLEDを安定に使用するためには、パルス発光動作が望ましい。

(3) 応答速度

発光ダイオードの応答速度は、発光中心がキャリアを捕獲、解離する速さで決まる。GaP 赤色発光ダイオードの場合で約 100 nsec と、一般のランプに比べきわめて速い。

(4) 電流・電圧特性

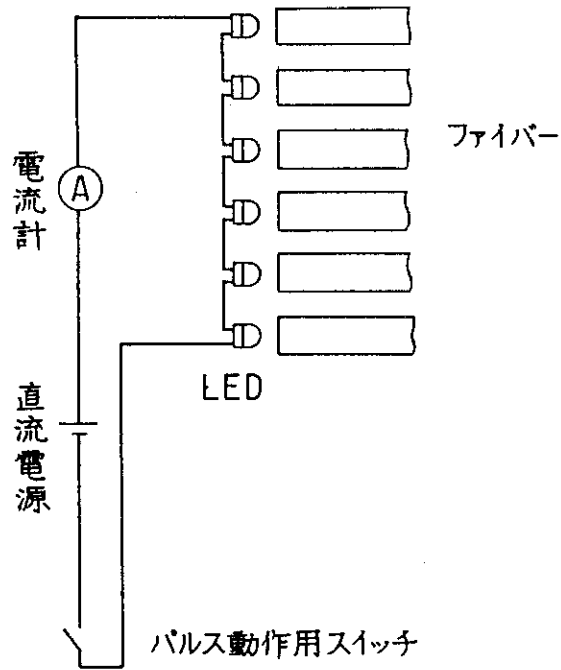
LED も一般のダイオードと同様に整流性をもつ電流・電圧特性を示す。順方向の立ち上り電圧は、材料によって異なるが、GaP 赤色発光ダイオードの場合は、第8図からわかるように、約1.8Vである。

電源電圧としては、この立ち上がり電圧に接合の動作抵抗にかかる電圧を加えた値（約2V程度）以上必要である。

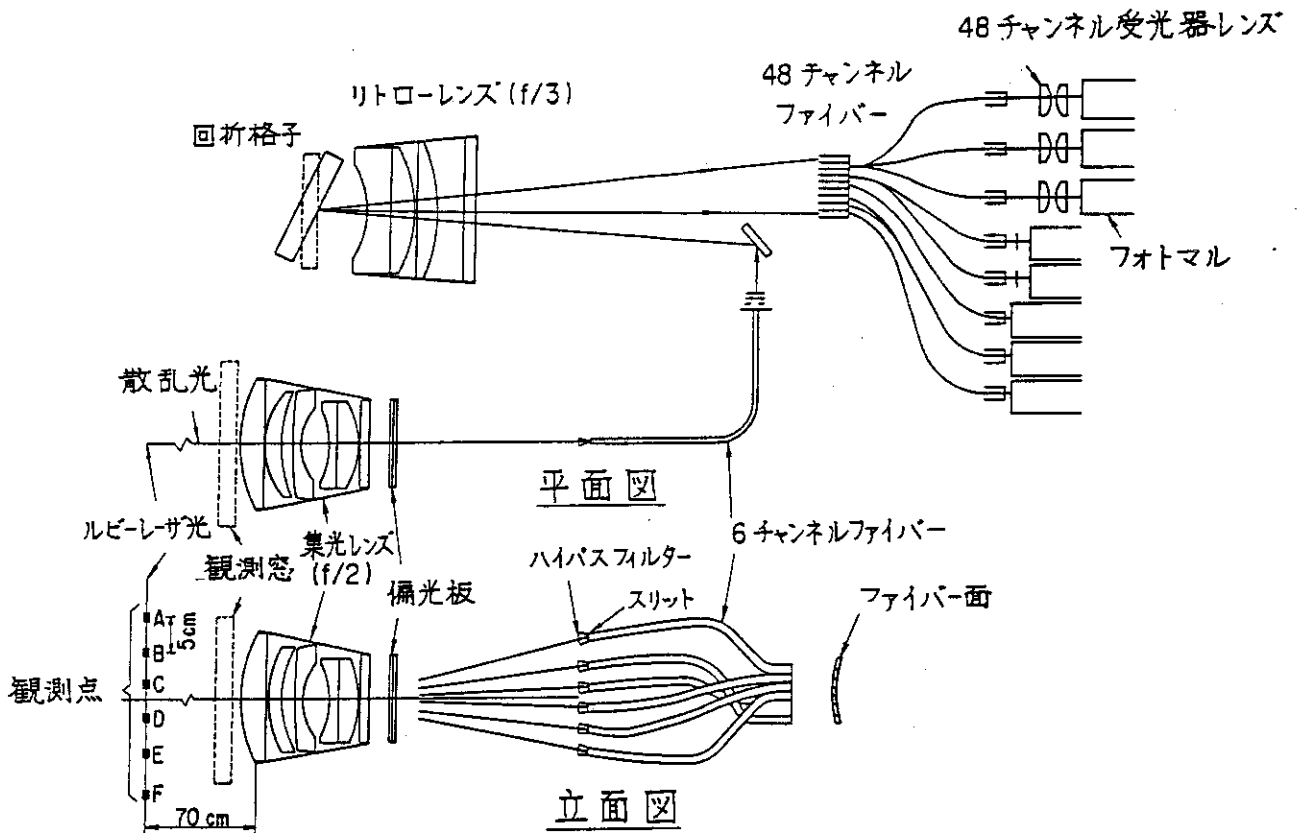
(5) 配光特性

第9図にLEDの配光特性の例を示す。LEDには、エポキシ樹脂に光拡散剤を混入して広い指向性にしたものがある。無指向性の感度校正光源は光源とファイバー面との位置合せによる誤差を生じにくい利点を持つ。

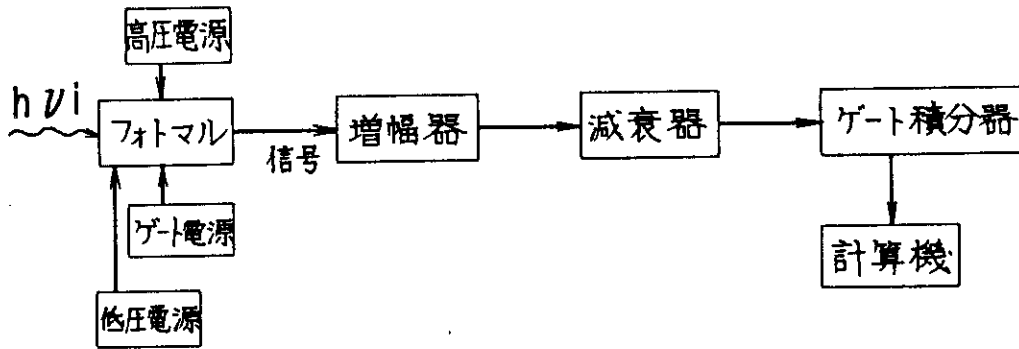
トムソン散乱測定装置受光部



第5図(a) LED法による感度較正実験構成図



第5図(b) JFT-2Mトムソン散乱測定装置光学系の配置

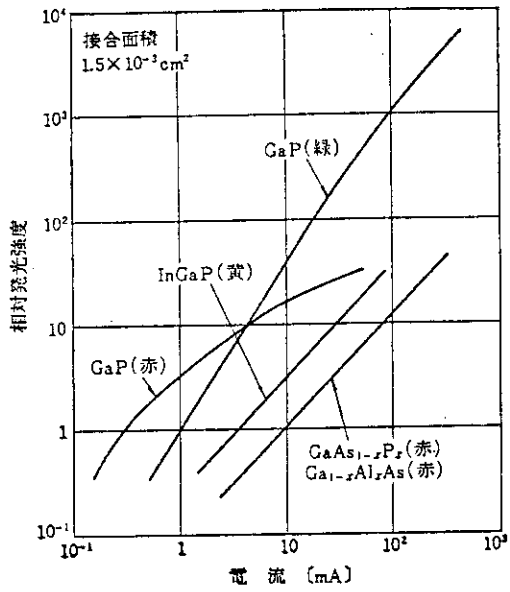


第5図(c) フォトマル信号処理ブロック図

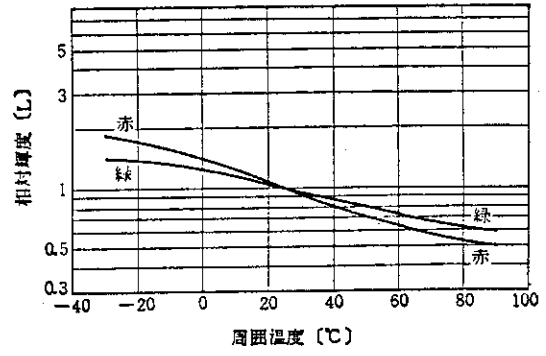
第2表 GaP 赤色発光ダイオード (TLR102) の特性

GaP 赤色発光ダイオード (TLR102, 東芝) ($T_a=25^\circ\text{C}$)

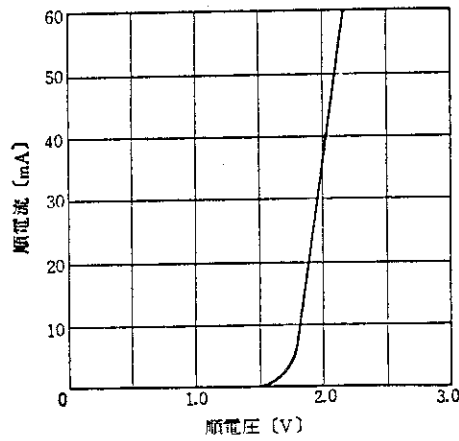
| 項目 | 記号 | 条件 | 最小 | 標準 | 最大 | 単位 |
|---------|-----------------|--------------------|----|------|-----|---------------|
| 順電圧 | V_F | $I_F=20\text{ mA}$ | — | 1.95 | 2.6 | V |
| 逆電流 | I_R | $V_R=4\text{ V}$ | — | — | 0.5 | μA |
| 光出力 | P_o | $I_F=10\text{ mA}$ | 60 | 180 | — | μW |
| 輝度 | L | $I_F=10\text{ mA}$ | — | 60 | — | fL |
| ピーク発光波長 | λ_p | $I_F=10\text{ mA}$ | — | 700 | — | nm |
| スペクトル幅 | $\Delta\lambda$ | $I_F=10\text{ mA}$ | — | 100 | — | nm |



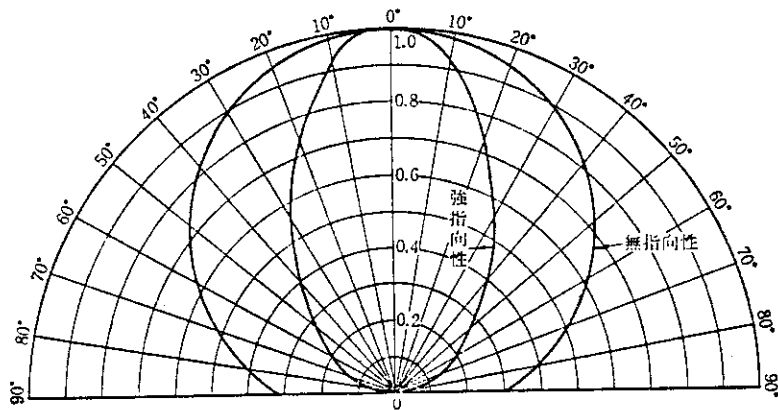
第 6 図 LED 順電流 - 発光強度特性



第 7 図 GaP 発光ダイオード輝度の温度依存性



第 8 図 順電流 - 電圧特性 (GaP 赤)



第 9 図 配光特性の例

4.2 LEDの発光スペクトルの測定

LEDを標準光源として使用するためには、その発光スペクトルを精度良く知らねばならない。今回実験に使用したTLR102の発光スペクトルはカタログに示されているが、①使用電流値が異なる、②個体差が考えられる、③目盛が粗くて精度がでない等を考慮すると、その値をそのまま測定に使用するのは不十分であると判断された。そこで使用した6個のLEDの発光スペクトルを分光器を用いて測定した。

測定系を第10図に示す。

分光系とフォトマル感度の較正は標準電球(Wランプ)を用いて行なった。

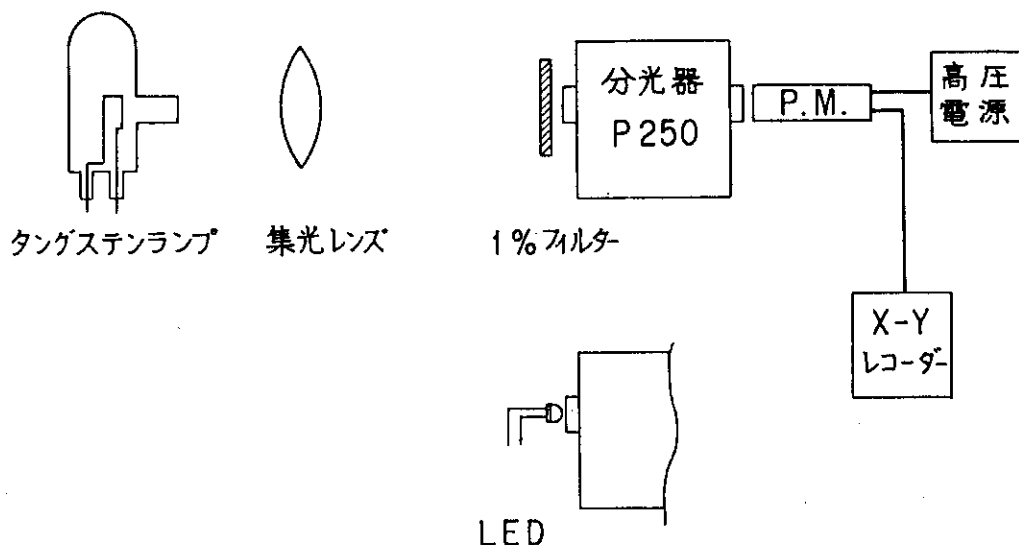
結果を第11図、第12図に示す。これは7000Åでの発光強度を1.0と規格化した場合の発光スペクトルである。第11図はLED電流値が2.53mAの場合、第12図はLED電流値が0.43mAの場合である。電流値による発光スペクトルの変化はわずかであると考えられる。

感度較正に使用するためには、各波長チャンネルでの代表発光強度を評価する必要がある。これは以下のように決めた。

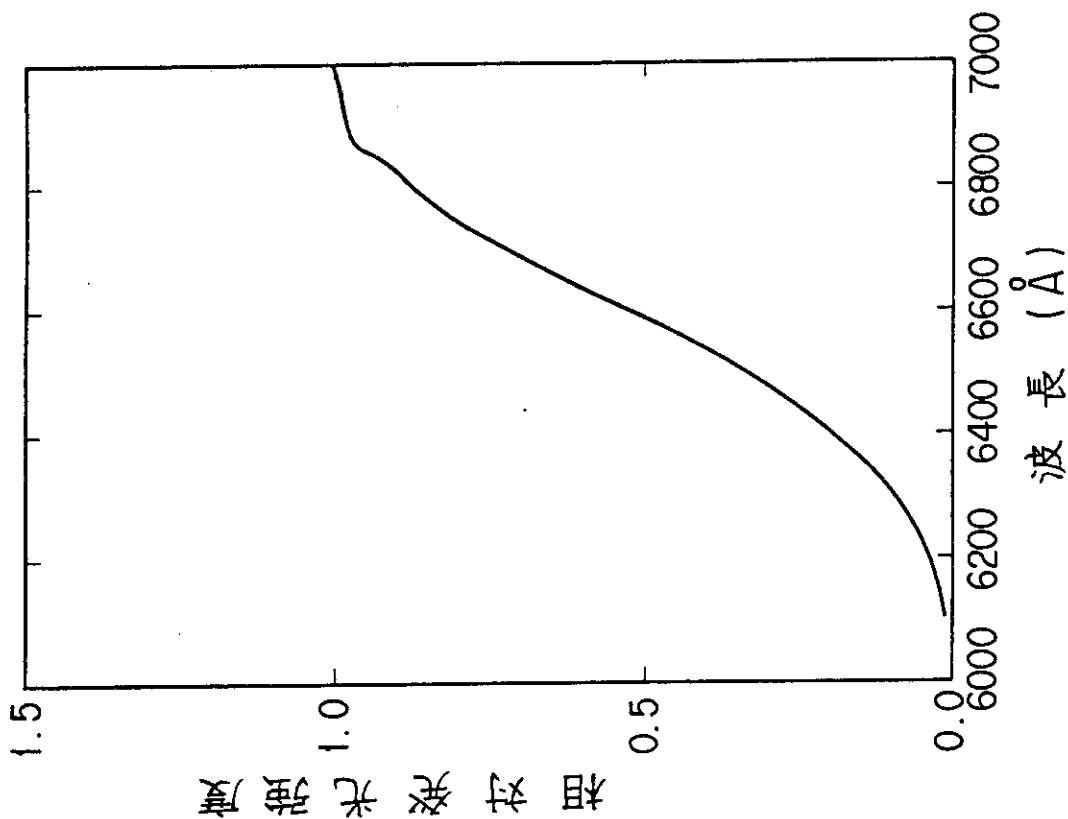
iチャンネルの波長上限を λ_u 、下限を λ_l 、中心波長を λ_0 とする時、iチャンネルでの代表発光強度 $S(\lambda_i)$ は、

$$S(\lambda_i) = \frac{S(\lambda_u) + 2S(\lambda_0) + S(\lambda_l)}{4}$$

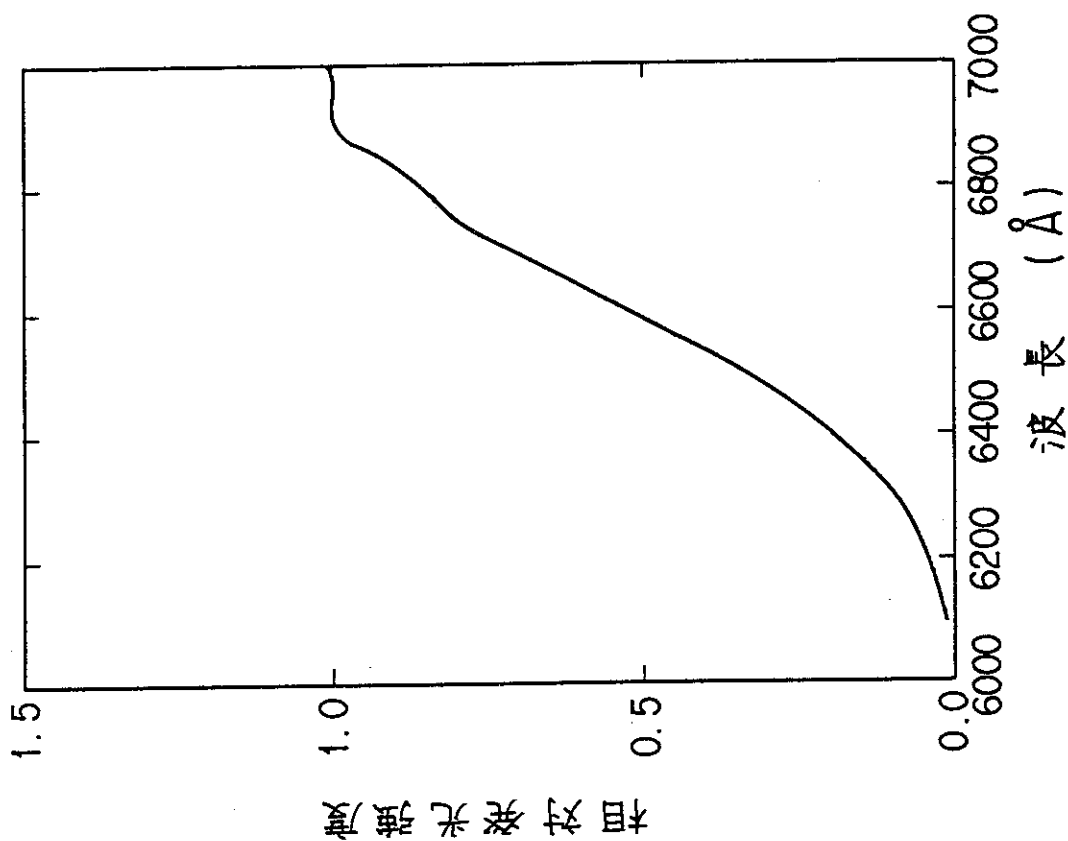
により求めた。



第10図 LED発光スペクトル測定系構成図



第12図 LED (東芝TLR102)発光スペクトル
 $I = 0.43 \text{ mA}$



第11図 LED (東芝TLR102)発光スペクトル
 $I = 2.53 \text{ mA}$

4.3 感度校正データ処理プログラムの概要

ここでは、JFT-2 Mトカマクの同時6点空間分布トムソン散乱測定装置の感度校正用データ処理プログラム「KANDO」について述べる。

本プログラムは、CAMACモジュールを使用し、感度校正データの収集・演算・出力を一括して行なうものであり、LED法による感度校正をさらに効率的に行なうためのものである。その特徴を以下に述べる。

- ① 複数台のCAMACモジュールの使用により、全ポジション、全チャンネルのデータ収集を同時に行なえる。
- ② 感度校正に必要な諸データを内蔵し、データ収集と同時に感度校正値を算出することができる。
- ③ グラフィック出力により、データのばらつきを測定後速やかに判定しうる。
- ④ データの採用の可否の判定を行ないながら、データ収集が行なえる。
- ⑤ 収集したデータはフロッピーディスクへ書き込まれ、必要な時に速やかに読み出す事ができる。

4.4 データ処理方法

感度校正により最終的に必要とされるのは、A～Fの空間6測定点の各チャンネルの相対感度とフォトマルでの1光電子当りのカウント数である。本節では、KANDOプログラムでこれらの結果を得るために行なっているデータ処理方法について説明する。

感度校正の手順は以下の通りである。空間分解ファイバー入口面にLED光源をセットし、まず測定系のノイズ測定を行なう。次にLED光源のスイッチをオンとし、統計的変動を充分小さくするだけの測定を繰り返す。この時測定系のリニアリティを確認するためには、これらの測定を、光源の光量を変えて（可変フィルターによりフィルター透過率を調節する）同様なデータをとる。

感度校正値の測定という目的では、後に議論するように可変フィルターによる測定を行なわずとも、充分な統計精度を出す事が可能であるが、本プログラムは、可変フィルターによる測定を行なう事を前提として作成されたものであり、以下の説明でも可変フィルターを用いた測定について述べる。

4.4.1 ノイズの処理

LED光源による測定を行なう前に、測定系のバックグラウンドノイズの測定を行なう。このノイズデータは主記憶領域にストアされその後の測定においては、減衰器の補正を行なう前のゲート積分器出力データから差し引かれる。

これは、全ノイズが、積分器の零点のフローティングに起因するものであり、減衰器の倍率に関係しないからである。

4.4.2 1光電子当りのゲート積分器出力

フォトマルでの1光電子当りのゲート積分器出力 W_i は、測定時のショットノイズを推定するために使用される。

フォトマルでの光電子発生数を N_{Pi} 、ゲート積分器出力を N_i とすると、

$$N_i = N_{Pi} \cdot W_i \quad (5.2.1)$$

なる関係がある。フォトマルでのショットノイズは発生光電子数により決まる。ゲート積分器出力の標準偏差 σ_i は、次式で与えられる。

$$\sigma_i = \sqrt{N_{Pi} \cdot W_i} \quad (5.2.2)$$

(5.2.1)、(5.2.2)式より、1光電子当りのゲート積分器出力 W_i は、

$$W_i = \frac{\sigma_i^2}{N_i} \quad (5.2.3)$$

により求まる。

実際の測定では、統計的変動を測定するのに十分な回数(30回程度は必要である)測定を繰り返し、その時のゲート積分器出力の平均値を N_i 、その分散を σ_i^2 とする。さらに、光量を変えて同様なデータを取り、 W_i を以下の様に最小2乗法により求める。

$Y = \sigma_i^2$ 、 $X = N_i$ とすると、(5.2.3)式より

$$Y = W_i X \quad (5.2.4)$$

なる関係が予想される。そこで

$$\delta = \sum_j (Y_j - W_i X_j)^2 \quad (5.2.5)$$

を最小化するように W_i を決める。ここで添字 i は波長チャンネルを、 j は光量を変えた測定を示す。

W_i は次式にて与えられる。

$$W_i = \frac{\sum_j N_{ij} \cdot \sigma_{ij}^2}{\sum_j (N_{ij})^2} \quad (5.2.6)$$

4.4.3 相対感度の決定

i チャンネルの絶対感度は、(3.2.8)式より

$$C_i = \frac{N_i}{W_{LED} \cdot S_{LED}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \cdot \Delta t \cdot T_F} \quad (5.2.7)$$

で与えられる。ここで T_F はフィルター透過率である。

プログラム内では、まず

$$C'_i = C_i \cdot W_{LED} \cdot S_{LED}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \cdot \Delta t = \frac{N_i}{T_F} \quad (5.2.8)$$

を最小2乗法により求め、相対感度 C_{Ri} は

$$C_{Ri} = \frac{C_i}{C_i'} = \frac{C_i'}{C_i'} \cdot \frac{S_{LED}(\lambda_1) \cdot \Delta\lambda_1}{S_{LED}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i} \quad (5.2.9)$$

により求める。

i チャンネルの感度較正值 C_i' は、 i 番目の測定でのゲート積分器出力の平均値を y_j 、フィルター透過率を x_j とする時、

$$\delta = \sum \left[\frac{(y_j - C_i' x_j)^2}{\sigma_j^2} \right] \quad (5.2.10)$$

を最小化するように決める。

これより C_i' は

$$C_i' = \frac{\sum_j \left(\frac{x_j y_j}{\sigma_j^2} \right)}{\sum_j \left(\frac{x_j^2}{\sigma_j^2} \right)} \quad (5.2.11)$$

で与えられる。

ここで、 σ_j^2 はゲート積分器出力の統計的変動の分散値であり、 y_j が N 回の測定の平均値とすれば、

$$\sigma_j^2 = \frac{y_j W_i}{N} \quad (5.2.12)$$

で与えられる。

5 感度校正の結果

5.1 LED法による感度校正の結果

LED法による感度校正結果を第3表に示す。

測定条件は、

| | |
|---------|------------|
| LED動作電流 | 0.48mA |
| 動作 | パルス(約0.5秒) |
| 測定間隔 | 約4分 |
| 測定回数 | 30回 |
| フィルター | なし |

である。

第3表に示したのは、(a) 平均カウント数、(b) 積分器出力の標準偏差、(c) ショットノイズ、(d) 相対感度、(e) 1光電子当りの積分器出力である。なお、信号取り込みは、実際の測定と同様に、プラズマ背景光と、レーザー信号の2成分に分けており、それぞれの結果を示している。30回の測定結果をくり返すことにより、ショットノイズは1~3%の値になっている。

プラズマ背景光測定時とレーザー信号測定時は、ゲートの時間差があるだけで同様の測定をくり返しているものと考えてよい。2つの信号での相対感度は、ショットノイズの範囲ではほぼ一致している。

測定間隔を4分間としたため、装置のセッティング開始から測定終了まで約3時間を要している。測定間隔は30秒程度にちぢめる事も可能であり、この場合には、約1時間程度で感度校正を行なう事が可能である。

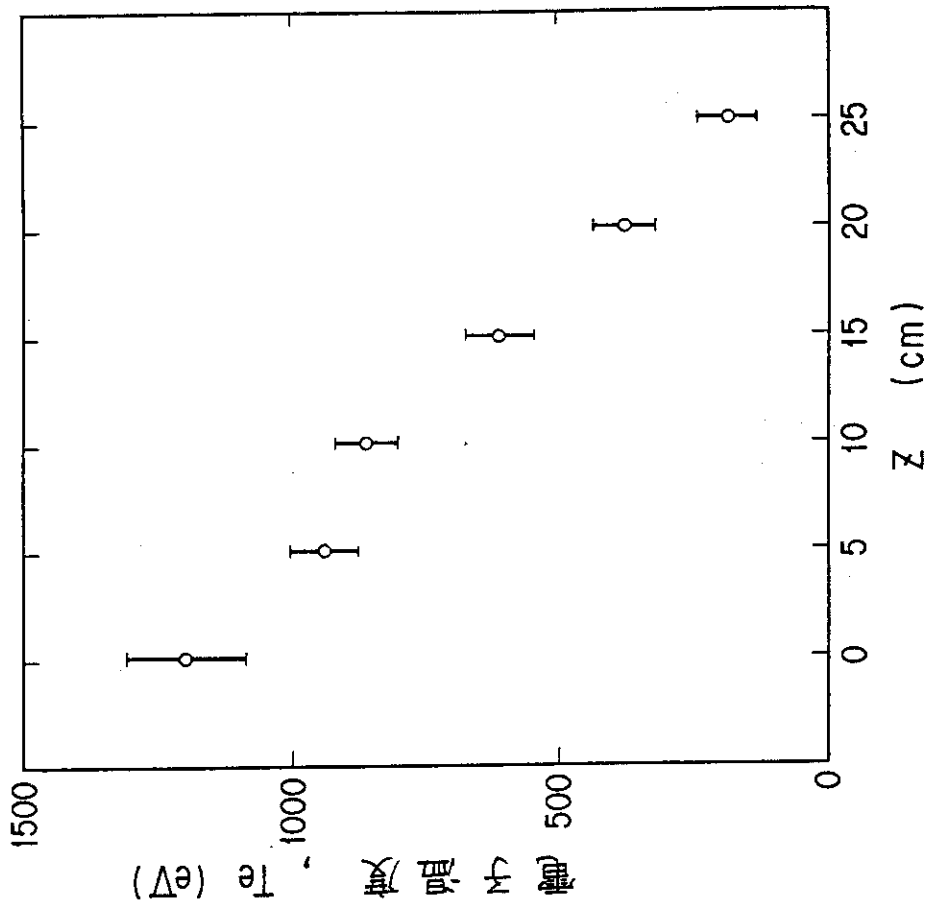
5.2 電子温度の測定

5.1で求めた相対感度を用いて、JFT-2Mプラズマの電子温度の測定を行なった。今回の測定では、迷光を減らすためのハイパスフィルターを使用したため、第1波長チャンネルは使用せず第2波長チャンネルから第5波長チャンネルの4波長点(F点のみは3点)のデータのみを採用した。

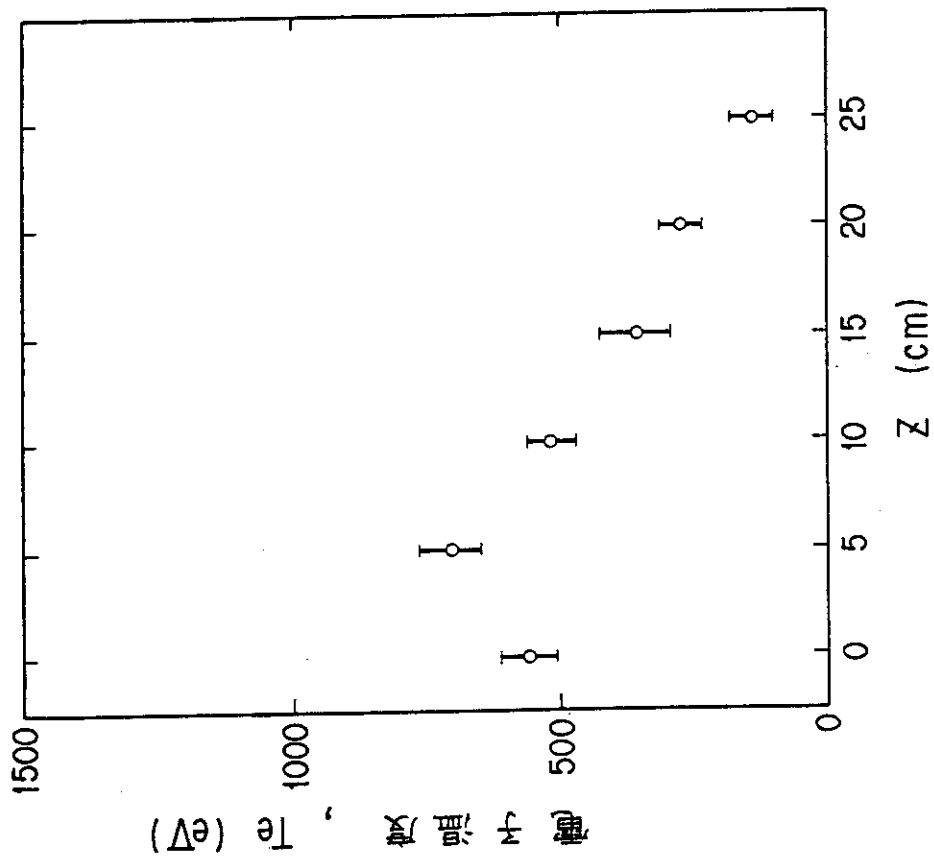
測定時のプラズマ条件は、 $I_p = 180 \text{ kA}$ 、 $B_T = 12.5 \text{ kG}$ である。ベースプラズマと、NBIとICRFの組み合わせ加熱時のプラズマの電子温度分布を第13図と第14図に示す。今回の測定時は、プラズマの密度が、 $\bar{n}_e = 2 \times 10^{13} \text{ 1/cm}^3$ と比較的 low、測定データのS/N悪かった。このため、ベースプラズマの測定時には8ショット、加熱プラズマの測定では15ショットのデータの平均化処理により、電子温度を求めている。

第 3 表 L E D 法による感度較正結果

| (a) *** AVERAGE *** | | (d) *** RELATIVE SENSITIVITY CI *** | | | | | |
|---------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| * SIGNAL * | | * SIGNAL * | | * SIGNAL * | | * SIGNAL * | |
| C.N. | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | C.N. | 1 |
| A | 6.49533E 02 | 3.54800E 02 | 2.94767E 02 | 2.77767E 02 | 2.56700E 02 | A | 1.00000E 00 |
| B | 4.57733E 02 | 3.50167E 02 | 3.24267E 02 | 1.85233E 02 | 1.46433E 02 | B | 1.00000E 00 |
| C | 2.50467E 02 | 1.89300E 02 | 1.53667E 02 | 6.59333E 01 | 7.41333E 01 | C | 1.00000E 00 |
| D | 3.86300E 02 | 3.75733E 02 | 6.00467E 02 | 1.65900E 02 | 8.56000E 01 | D | 1.00000E 00 |
| E | 1.72333E 02 | 1.75233E 02 | 2.30900E 02 | 1.87533E 02 | 1.22800E 02 | E | 1.00000E 00 |
| F | 2.79467E 02 | 3.38533E 02 | 2.53500E 02 | 1.92033E 02 | 1.00000E 00 | F | 1.00000E 00 |
| * PLASMA * | | * PLASMA * | | * PLASMA * | | * PLASMA * | |
| C.N. | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | C.N. | 1 |
| A | 6.56200E 02 | 3.51800E 02 | 3.04700E 02 | 2.76366E 02 | 2.57200E 02 | A | 1.01026E 00 |
| B | 4.81333E 02 | 3.52433E 02 | 3.28767E 02 | 1.85767E 02 | 1.41733E 02 | B | 1.02908E 00 |
| C | 2.44400E 02 | 1.90267E 02 | 1.59533E 02 | 6.44000E 01 | 7.43667E 01 | C | 9.75779E-01 |
| D | 3.82033E 02 | 3.72900E 02 | 5.79200E 02 | 1.61667E 02 | 8.54000E 01 | D | 9.88556E-01 |
| E | 1.77533E 02 | 1.69167E 02 | 2.30267E 02 | 1.77867E 02 | 1.32033E 02 | E | 1.03017E 00 |
| F | 2.82067E 02 | 3.43233E 02 | 2.44167E 02 | 1.93267E 02 | 1.00000E 00 | F | 1.00930E 00 |
| * SIGMA *** | | * SIGMA *** | | * SIGMA *** | | * SIGMA *** | |
| C.N. | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | C.N. | 1 |
| A | 4.84821E 01 | 2.32409E 01 | 2.20391E 01 | 3.05659E 01 | 4.12059E 01 | A | 3.61878E 00 |
| B | 3.63939E 01 | 2.03139E 01 | 2.86176E 01 | 2.14489E 01 | 2.02991E 01 | B | 2.83178E 00 |
| C | 2.47581E 01 | 2.03563E 01 | 1.77733E 01 | 1.27740E 01 | 2.59228E 01 | C | 2.44729E 00 |
| D | 2.9977E 01 | 2.41511E 01 | 3.99504E 01 | 1.89946E 01 | 1.13432E 01 | D | 2.32944E 00 |
| E | 1.06039E 01 | 1.34441E 01 | 1.60899E 01 | 1.6442E 01 | 1.92989E 01 | E | 6.52466E-01 |
| F | 2.15430E 01 | 3.23142E 01 | 2.25832E 01 | 1.81450E 01 | 0.00000E 00 | F | 1.66067E 00 |
| * PLASMA * | | * PLASMA * | | * PLASMA * | | * PLASMA * | |
| C.N. | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | C.N. | 1 |
| A | 6.42358E 01 | 2.55485E 01 | 2.60590E 01 | 2.44018E 01 | 4.00568E 01 | A | 5.28807E 00 |
| B | 2.43905E 01 | 2.82294E 01 | 2.60411E 01 | 2.69223E 01 | 2.53840E 01 | B | 1.23593E 00 |
| C | 2.39079E 01 | 1.78287E 01 | 1.60685E 01 | 1.27298E 01 | 2.18435E 01 | C | 2.33873E 00 |
| D | 2.11334E 01 | 2.57334E 01 | 3.05490E 01 | 1.62088E 01 | 1.53456E 01 | D | 1.16906E 00 |
| E | 1.53327E 01 | 1.28498E 01 | 2.26137E 01 | 1.65423E 01 | 1.53231E 01 | E | 1.32422E 00 |
| F | 2.48193E 01 | 3.44378E 01 | 2.50716E 01 | 1.92174E 01 | 0.00000E 00 | F | 2.18388E 00 |
| * SHOT NOISE *** | | * SHOT NOISE *** | | * SHOT NOISE *** | | * SHOT NOISE *** | |
| C.N. | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | C.N. | 1 |
| A | 8.85158E 00 | 4.24318E 00 | 4.02378E 00 | 5.58055E 00 | 7.52307E 00 | A | 6.28807E 00 |
| B | 6.64459E 00 | 3.70879E 00 | 5.22483E 00 | 3.91600E 00 | 3.70609E 00 | B | 1.23593E 00 |
| C | 4.52019E 00 | 3.71653E 00 | 3.24495E 00 | 2.33220E 00 | 4.73280E 00 | C | 2.33873E 00 |
| D | 5.47680E 00 | 4.40936E 00 | 7.29391E 00 | 3.46792E 00 | 2.07097E 00 | D | 1.16906E 00 |
| E | 1.93599E 00 | 2.45454E 00 | 2.93394E 00 | 3.00229E 00 | 3.52347E 00 | E | 1.32422E 00 |
| F | 3.93320E 00 | 5.89973E 00 | 4.12310E 00 | 3.31281E 00 | 0.00000E 00 | F | 2.18388E 00 |
| * PLASMA * | | * PLASMA * | | * PLASMA * | | * PLASMA * | |
| C.N. | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | C.N. | 1 |
| A | 1.17278E 01 | 4.66449E 00 | 4.75697E 00 | 4.45514E 00 | 7.31334E 00 | A | 5.28807E 00 |
| B | 4.49307E 00 | 5.15395E 00 | 4.75443E 00 | 4.91531E 00 | 4.63446E 00 | B | 1.23593E 00 |
| C | 4.35496E 00 | 3.25505E 00 | 2.93369E 00 | 2.32413E 00 | 3.98806E 00 | C | 2.33873E 00 |
| D | 3.85841E 00 | 4.69825E 00 | 5.57745E 00 | 2.95927E 00 | 2.79969E 00 | D | 1.16906E 00 |
| E | 2.79936E 00 | 2.34603E 00 | 4.12867E 00 | 3.02019E 00 | 2.79760E 00 | E | 1.32422E 00 |
| F | 4.53137E 00 | 6.29746E 00 | 4.57743E 00 | 3.50861E 00 | 0.00000E 00 | F | 2.18388E 00 |



第14図 NBI (500kW) と ICRF (100kW) 組み合わせ加熱時の電子温度分布



第13図 ベースプラズマの電子温度分布

6. 感度較正值の評価とその誤差要因の検討

本章では、まず、トムソン散乱法により電子温度・密度を求める際の誤差の伝播を整理する。次に今回得られた相対感度の妥当性を散乱スペクトルのフィッティングの良さから評価する。最後に、感度較正時の誤差要因を定性的にはあるが検討を行ない、今後の問題点を指摘する。

6.1 感度較正值の評価

トムソン散乱法により、電子温度・密度を求める際の誤差要因とその伝播を第15図に示す。図中で C_i' は(5.2.8)式で定義される量である。

誤差要因としては①感度較正時に生じるもの、②プラズマ計測時に生じるものに分けて考える事ができる。

電子温度・密度は第2章で述べたように、測定で得られた散乱光スペクトルより決められる。散乱光スペクトルは理論的には、(3.3.2)式に従がいフィッティングされるはずである。しかしながら、実測値は上記のようなプラズマ計測時や感度較正時に生じた誤差により、かならずしもきれいにはフィッティングされない。

プラズマ計測時の誤差のうち大きな寄与をなすと考えられるのは①ショットノイズ、②ゲート回路及びプラズマ光のゆらぎである。これらの誤差は、多数のショットの測定結果を平均化処理する事により小さくすることができる。⁸⁾ このため、ここでは、第5章で示した電子温度分布測定時の散乱光スペクトルのフィッティング曲線のずれが、プラズマ計測時のショットノイズ以上の有意なばらつきを持つかにより、感度較正值の妥当性を検討する事とした。

第16図と第17図に電子温度測定時に得られた散乱光スペクトルを示す。第16図は、ジュールプラズマの測定結果で、8ショットの平均化処理を行なったもので、第17図は、NBIとICRFの組み合わせ加熱時のもので15ショットの平均化処理を行なったものである。実線は最小二乗フィッティングにより決められたスペクトル曲線である。

ここでは、 χ^2 検定により、バラツキの有意性を検討する。

ショットノイズレベルから見て発生確率5%以下のばらつきがある時に、ショットノイズ以外の誤差原因があるとする。

すなわち

$$\chi^2_{\nu} < 2.996 \quad \nu = 2 \text{ (A~E)}$$

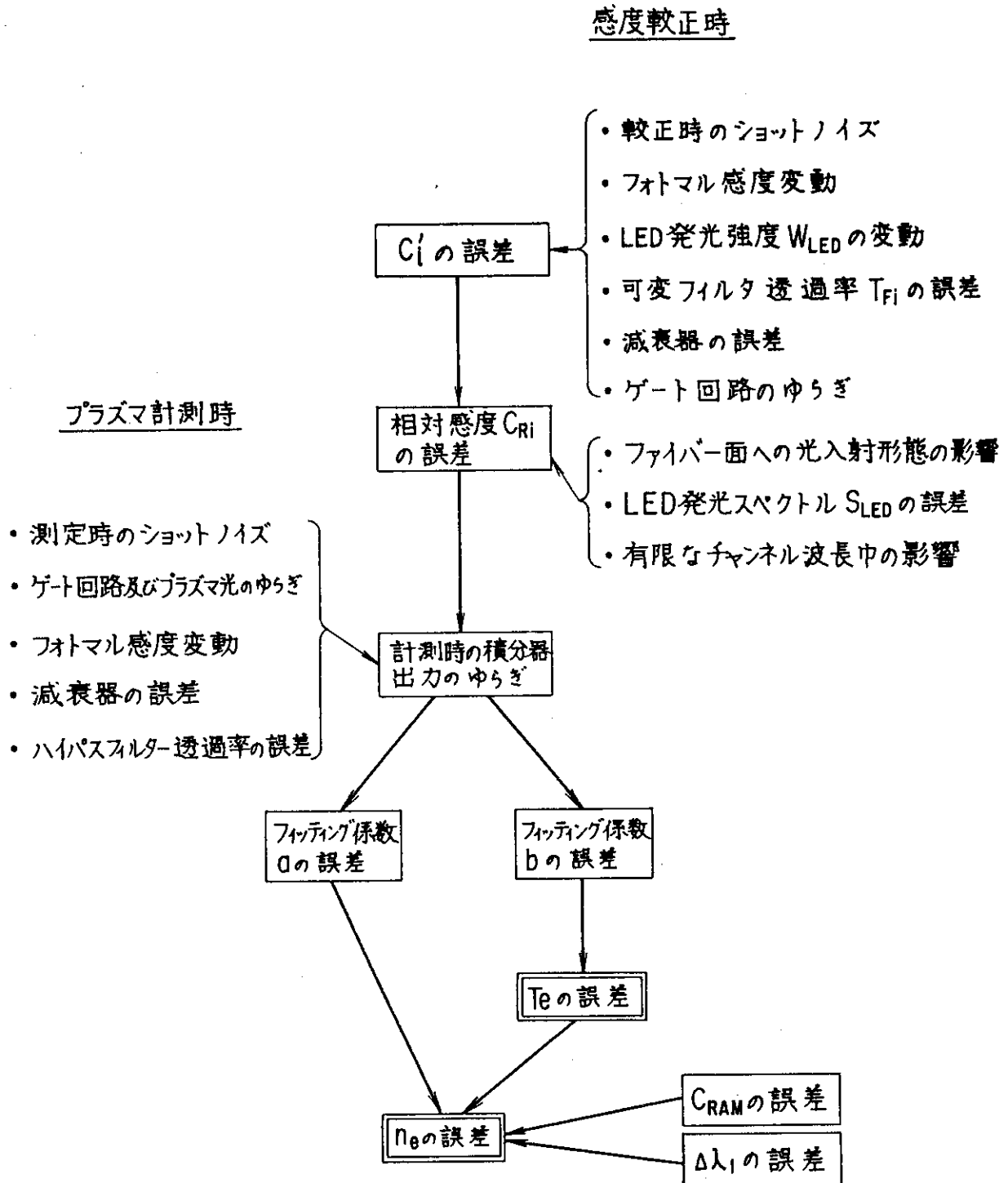
$$\chi^2_{\nu} < 3.841 \quad \nu = 1 \text{ (F)}$$

を判定基準とする。

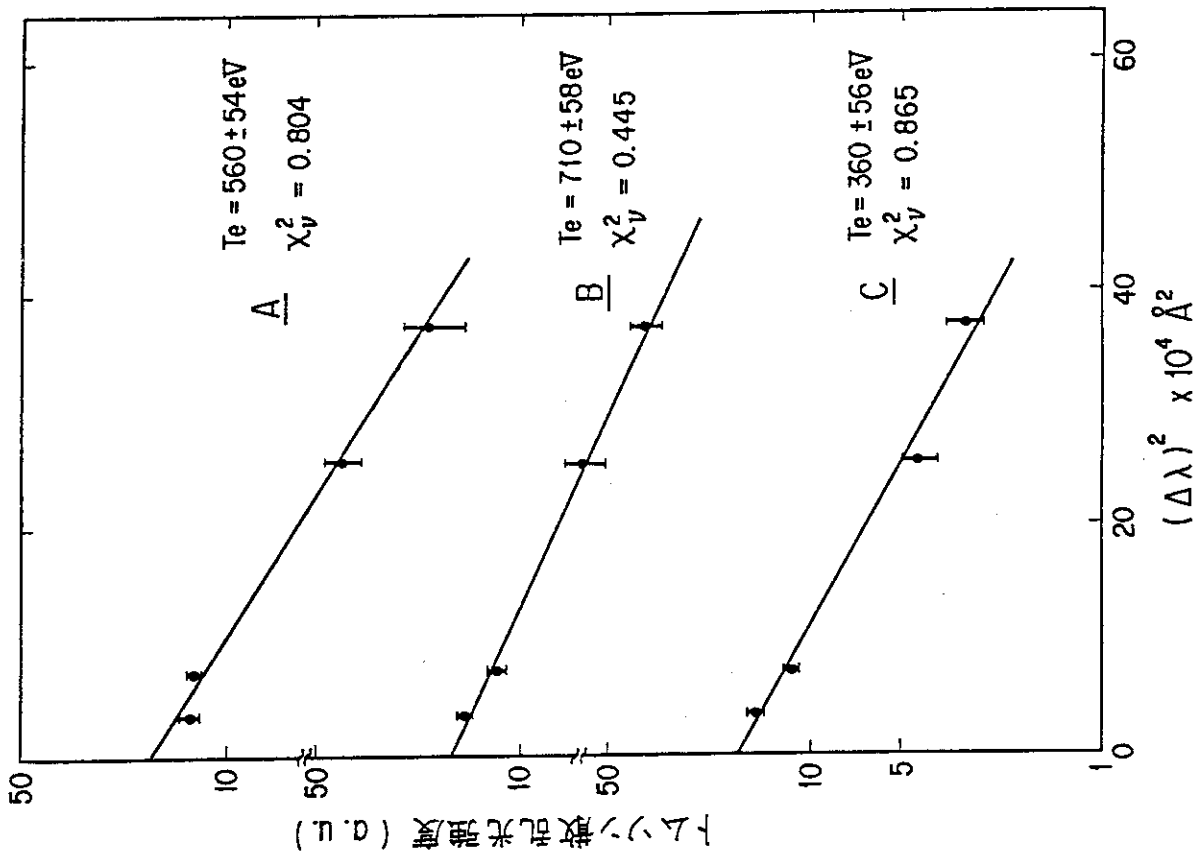
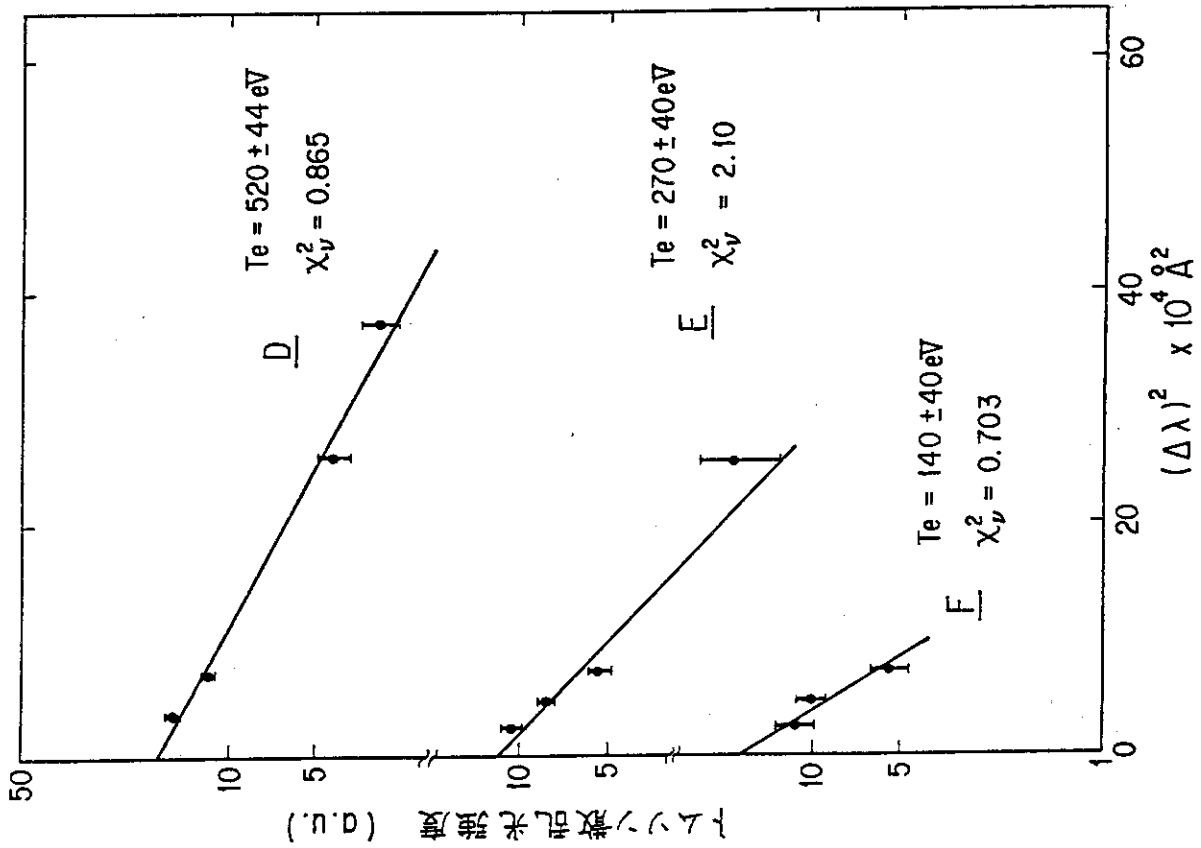
今回の測定結果では、第16図、第17図に示すようにすべてのチャンネルでこの条件を満たしている。

以上より、S/N比が10~20程度の測定を行なっている限りでは、ショットノイズ以外の理由による散乱光スペクトルのバラツキがあるとは断定できないと結論される。

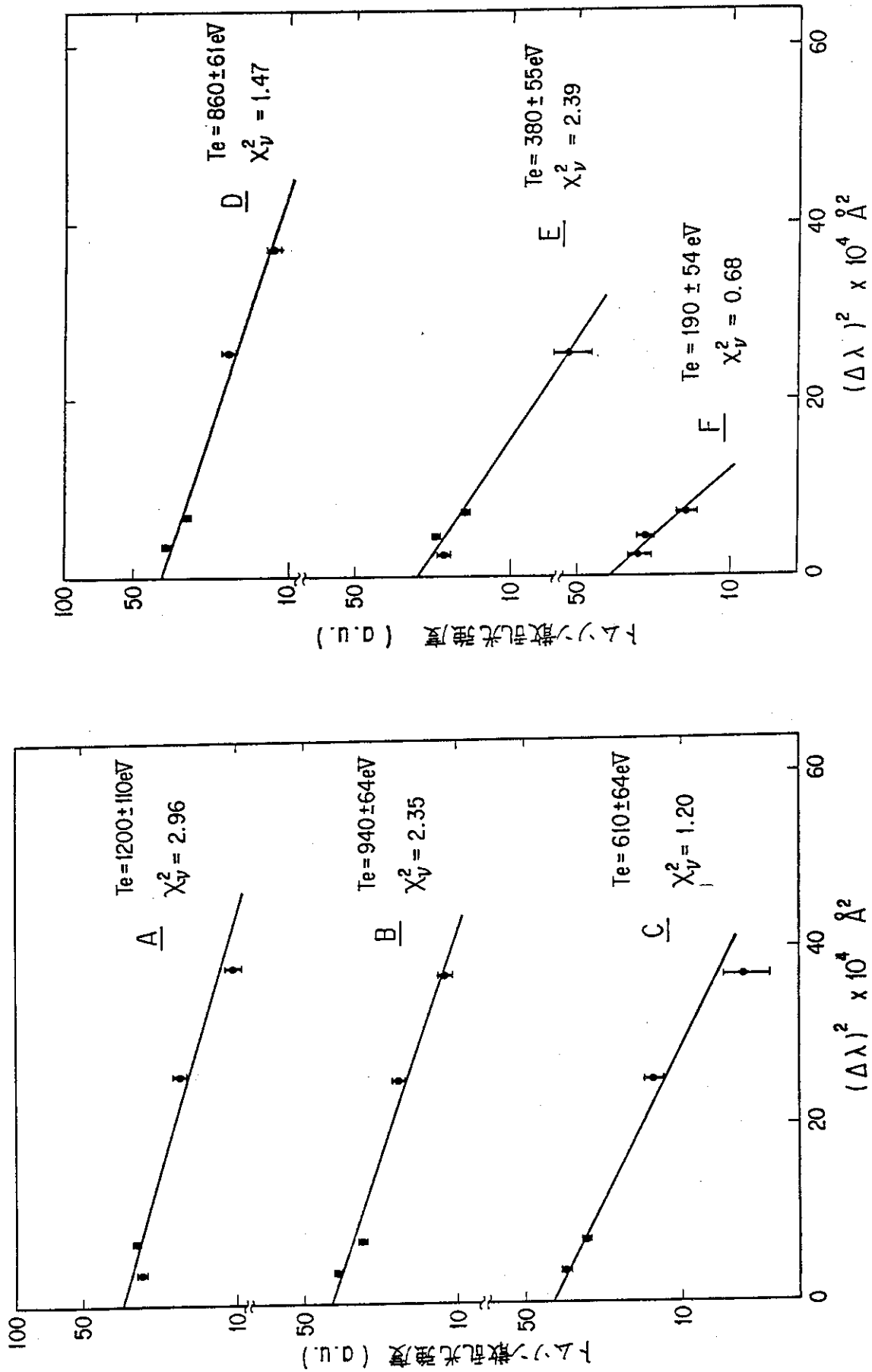
ただし、第16図と第17図を比較すると、フィッティング曲線からのずれの傾向が同様な点もあり、これらについてはさらにS/Nの向上した（プラズマ密度の高い測定）測定データにより検討する必要があるだろう。



第15図 トムソン散乱測定時の誤差の伝播



第16図 ベースプラズマ測定時に得られたトムソン散乱光スペクトル



第17図 加熱プラズマ測定時に得られたトムソン散乱光スペクトル

6.2 感度校正の誤差要因の検討

感度校正時の誤差要因としては、第15図に示したように、

- ① LEDの発光スペクトルの誤差
- ② 校正時のショットノイズ
- ③ 光源の安定性（校正中のLEDの発光強度及びスペクトルの変化）
- ④ 有限な波長チャンネル巾の影響
- ⑤ ファイバー面への光の入射形式の相違
- ⑥ 校正時のP.M. 感度の変化
- ⑦ その他、フィルター透過率の誤差

等が考えられる。

なおチャンネル巾の誤差は陽には、電子温度にはきいてこない。これは、(3.2.9)式と(3.3.1)式からわかるように、第1チャンネルの波長巾以外はキャンセルされるためである（ただし、第1チャンネルの波長巾は、第15図に示したように電子密度に効いてくる。）。

以下、これらの要因について、LED法とタングステン標準電球とを比較しながら議論してゆく。

今回の測定で使用したLEDの発光スペクトルはタングステン標準電球を用いて測定している。このためそのスペクトルは少なくともタングステン標準電球以上の誤差を含んでいる。またスペクトル測定時にはレコーダーからの読み取り誤差が1～3%程度考えられる。今後の感度校正値の精度向上のためには、まずLEDの発光スペクトルを精度良く求める必要がある。

校正時のショットノイズについては、原理的には測定回数を増やす事により減らす事が可能である。この点に関しては、LED法では6点同時に校正を行なえるため短時間の測定にて、充分な統計精度を得る事ができる。今回の校正では、30回の測定で、そのショットノイズは、1～3%の値となっている。

光源の安定性では、LEDはタングステン標準電球に比べ不利と考えられる。つまり、発光特性が温度依存性を持ち、それがタングステン電球に比べ敏感だからである。今回の測定では、自己発熱による特性変化をさけるために、パルス動作としている。

有限なチャンネル巾の影響とは、波長チャンネル内での入射光のスペクトルが校正時と測定時により異なる事に起因するものである。

ファイバー面への入射形式については、タングステン標準電球とLED法とでは大きな差異がある。タングステン標準電球の光は、ファイバー面(10mm×10mm)に極所的(1mm×2～3mm)に入射する。これに対してLEDの光は表面が拡散面となっているため、ファイバー面全面に一様に入射する。一方プラズマ測定時には、ファイバー面の約2/3に散乱信号が、全体にプラズマ信号が入射する。このためフォトマルへの入射位置が異なるため感度が異なる可能性がある。

また、ファイバーへの入射角が、LED法の場合にはプラズマ測定時に比べ、大きくなる。これによりファイバー中での透過率に差が出る可能性がある。これらについては今後の検討が必要である。

較正時に長時間、フォトマルへ光を入射しつづけると、フォトマルの感度が変化する可能性がある。今回の測定時にも、フォトマルにDC的に長時間（数分）光を入射すると、あるフォトマルでは大きな感度変化が見られた。ただし、感度は、光の入射をやめてから約1日で回復していた。これは、フォトマルの入射光量過多による劣化が原因と考えられる。LED法では、パルス動作を容易に行なえるため、フォトマルに感度変化を生じない範囲の入光量で較正を行なう事ができた。

その他の要因としては、入光量を調節するために用いられるフィルターの透過率に含まれる誤差が考えられるが、LED法では、発光強度が適当なため、フィルターを使用しないで測定を行なっている。

7. 結 論

JFT-2Mトカマクの同時6点空間分布トムソン散乱測定装置の効率的で十分な精度を持つ感度較正手法の確立を目的として、標準光源として発光ダイオード(LED)を用いた感度較正を行なった。

まず、LED較正系の製作、LED発光スペクトルの測定、データ処理用のソフトウェアの製作を行ない、感度較正を実施した。この結果、従来のタングステン標準電球を用いた方法に比べ、はるかに効率的に感度較正を行なえる事が示された。

次に、得られた感度較正データを用いて、JFT-2Mプラズマの電子温度の測定を行なった。測定によって得られた、散乱光スペクトルのフィッティングの良さから、感度較正データの妥当性を確認した。これにより、 S/N が10~20程度のショットノイズレベルでは、感度較正データが十分な精度を持つと結論された。

以上より、LED法は、同時6点空間分布測定トムソン散乱測定装置の効率的で十分な精度を持つ感度較正手法として確立されたと言えよう。

今後の問題点としては、第1に、さらに測定精度を向上させるために、LEDの発光スペクトルを精度よく求める必要がある事、第2にJFT-2Mプラズマの温度上昇に伴ない、より広い波長領域をカバーできるLED光源を使用する必要がある、等があげられる。

謝 辞

種々の議論・助言をして下さった的場徹氏、川島寿人氏、河西敏氏、荘司昭朗氏らプラズマ実験研究室の諸氏、JFT-2Mトカマクプラズマの実験で助言して下さった装置技術管理室の鈴木喜八郎室長、松崎誼氏をはじめとする諸氏に感謝します。沖電気(株)制御システムの佐賀六典氏には、CAMACコードに関して助言をいただきました。常に暖かい御支援および

較正時に長時間、フォトマルへ光を入射しつづけると、フォトマルの感度が変化する可能性がある。今回の測定時にも、フォトマルにDC的に長時間（数分）光を入射すると、あるフォトマルでは大きな感度変化が見られた。ただし、感度は、光の入射をやめてから約1日で回復していた。これは、フォトマルの入射光量過多による劣化が原因と考えられる。LED法では、パルス動作を容易に行なえるため、フォトマルに感度変化を生じない範囲の入光量で較正を行なう事ができた。

その他の要因としては、入光量を調節するために用いられるフィルターの透過率に含まれる誤差が考えられるが、LED法では、発光強度が適当なため、フィルターを使用しないで測定を行なっている。

7. 結 論

JFT-2Mトカマクの同時6点空間分布トムソン散乱測定装置の効率的で十分な精度を持つ感度較正手法の確立を目的として、標準光源として発光ダイオード(LED)を用いた感度較正を行なった。

まず、LED較正系の製作、LED発光スペクトルの測定、データ処理用のソフトウェアの製作を行ない、感度較正を実施した。この結果、従来のタングステン標準電球を用いた方法に比べ、はるかに効率的に感度較正を行なえる事が示された。

次に、得られた感度較正データを用いて、JFT-2Mプラズマの電子温度の測定を行なった。測定によって得られた、散乱光スペクトルのフィッティングの良さから、感度較正データの妥当性を確認した。これにより、 S/N が10~20程度のショットノイズレベルでは、感度較正データが十分な精度を持つと結論された。

以上より、LED法は、同時6点空間分布測定トムソン散乱測定装置の効率的で十分な精度を持つ感度較正手法として確立されたと言えよう。

今後の問題点としては、第1に、さらに測定精度を向上させるために、LEDの発光スペクトルを精度よく求める必要がある事、第2にJFT-2Mプラズマの温度上昇に伴ない、より広い波長領域をカバーできるLED光源を使用する必要がある、等があげられる。

謝 辞

種々の議論・助言をして下さった的場徹氏、川島寿人氏、河西敏氏、荘司昭朗氏らプラズマ実験研究室の諸氏、JFT-2Mトカマクプラズマの実験で助言して下さった装置技術管理室の鈴木喜八郎室長、松崎誼氏をはじめとする諸氏に感謝します。沖電気(株)制御システムの佐賀六典氏には、CAMACコードに関して助言をいただきました。常に暖かい御支援および

較正時に長時間、フォトマルへ光を入射しつづけると、フォトマルの感度が変化する可能性がある。今回の測定時にも、フォトマルにDC的に長時間（数分）光を入射すると、あるフォトマルでは大きな感度変化が見られた。ただし、感度は、光の入射をやめてから約1日で回復していた。これは、フォトマルの入射光量過多による劣化が原因と考えられる。LED法では、パルス動作を容易に行なえるため、フォトマルに感度変化を生じない範囲の入光量で較正を行なう事ができた。

その他の要因としては、入光量を調節するために用いられるフィルターの透過率に含まれる誤差が考えられるが、LED法では、発光強度が適当なため、フィルターを使用しないで測定を行なっている。

7. 結 論

JFT-2Mトカマクの同時6点空間分布トムソン散乱測定装置の効率的で十分な精度を持つ感度較正手法の確立を目的として、標準光源として発光ダイオード(LED)を用いた感度較正を行なった。

まず、LED較正系の製作、LED発光スペクトルの測定、データ処理用のソフトウェアの製作を行ない、感度較正を実施した。この結果、従来のタングステン標準電球を用いた方法に比べ、はるかに効率的に感度較正を行なえる事が示された。

次に、得られた感度較正データを用いて、JFT-2Mプラズマの電子温度の測定を行なった。測定によって得られた、散乱光スペクトルのフィッティングの良さから、感度較正データの妥当性を確認した。これにより、 S/N が10~20程度のショットノイズレベルでは、感度較正データが十分な精度を持つと結論された。

以上より、LED法は、同時6点空間分布測定トムソン散乱測定装置の効率的で十分な精度を持つ感度較正手法として確立されたと言えよう。

今後の問題点としては、第1に、さらに測定精度を向上させるために、LEDの発光スペクトルを精度よく求める必要がある事、第2にJFT-2Mプラズマの温度上昇に伴ない、より広い波長領域をカバーできるLED光源を使用する必要がある、等があげられる。

謝 辞

種々の議論・助言をして下さった的場徹氏、川島寿人氏、河西敏氏、荘司昭朗氏らプラズマ実験研究室の諸氏、JFT-2Mトカマクプラズマの実験で助言して下さった装置技術管理室の鈴木喜八郎室長、松崎誼氏をはじめとする諸氏に感謝します。沖電気(株)制御システムの佐賀六典氏には、CAMACコードに関して助言をいただきました。常に暖かい御支援および

御指導をいただいた、核融合研究部田中裕二室長、田中正俊次長、小幡行雄部長、核融合推進開発センター磯康彦センター長、森茂理事に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) DIVA Group : JAERI-M 8205 (1979)
- (2) T. Yamauchi, I. Yanagisawa, H. Kawashima : Jpn. J. Appl. Phys. 23 (1984) 1435
- (3) J. Sheffield : " Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation " , Academic Press, New York (1975)
- (4) T. Matoba, T. Itagaki, T. Yamauchi and A. Funahashi : Jpn. J. Appl. Phys. 18 (1979) 1127
- (5) T. Yamauchi, K. Sano, H. Kawashima, K. Kumagai, T. Matoba : Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) 347
- (6) R. R. Bevington : " Data Reduction and Error Analysis for the Physical Science " , McGraw-Hill, Inc., New York (1969)
- (7) 電子展望編集部 : 「光半導体活用ガイド」 誠文堂新光社 (1974)
- (8) 川島寿人, 山内俊彦, 的場 徹 : JAERI-M 83-130 (1983)

御指導をいただいた、核融合研究部田中裕二室長、田中正俊次長、小幡行雄部長、核融合推進開発センター磯康彦センター長、森茂理事に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) DIVA Group : JAERI-M 8205 (1979)
- (2) T. Yamauchi, I. Yanagisawa, H. Kawashima : Jpn. J. Appl. Phys. 23 (1984) 1435
- (3) J. Sheffield : " Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation " , Academic Press, New York (1975)
- (4) T. Matoba, T. Itagaki, T. Yamauchi and A. Funahashi : Jpn. J. Appl. Phys. 18 (1979) 1127
- (5) T. Yamauchi, K. Sano, H. Kawashima, K. Kumagai, T. Matoba : Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) 347
- (6) R. R. Bevington : " Data Reduction and Error Analysis for the Physical Science " , McGraw-Hill, Inc., New York (1969)
- (7) 電子展望編集部 : 「光半導体活用ガイド」 誠文堂新光社 (1974)
- (8) 川島寿人, 山内俊彦, 的場 徹 : JAERI-M 83-130 (1983)

Appendix A

KANDO プログラム使用マニュアル

感度校正データ処理プログラム「KANDO」の使用方法を説明する。本プログラムはOKI 50/10により使用するものである。

フローチャートをA-1図に示す。本プログラムは、①LED法による感度校正データの収集、演算 ②グラフィック出力 ③フロッピーディスクへのデータの書き込みと読み出し等の機能を持っているが、ここでは、測定の順序に従がい、タイプライターへのメッセージとそれに対する入力データの説明を行なう。

A.1 LEDによる全ポジション・全チャンネル同時校正

STEP 1

- (1)
- (2) 測定の日付とショット番号を入力する。
- (3) A8, A4
- (4) 入力例 KW840116S001
- (5) フロッピーディスク上の認識番号となる。

STEP 2

- (1)
- (2) 使用するLEDの種類を入力する。
 - 1 : 赤 色
 - 2 : 黄 色
- (3) I 2
- (4) 入力例 1
- (5) 現バージョンでは、1のみ使用可。

STEP 3

- (1)
- (2) 相対感度の基準となるチャンネル番号を入力する。
- (3) I 2
- (4) 入力例 2

STEP 4

- (1) MODE? 10N 20S 30T 40C 50H 60F
- (2) 測定(計算)モードINNを入力する
- 10: ノイズ測定
 - 20: 全ポジション・全チャンネル感度測定(測定番号KK=1より)
 - 30: 測定終了
 - 40: 感度測定を継続する(KK=KK+1として続行)
 - 50: 標準電球による1ポジションの感度測定
 - 60: フロッピーディスクからのデータ読み出し
- (3) I 2
- (4) 入力例 10
- (5) このデータにより、プログラムのモードを決める。

STEP 5

- (1) NOISE
- (2) 上記のメッセージが出力され、データ受入モードに移る。データ受入モードになったら、測定用のトリガーボタンを押す。ノイズデータが収集され、計算機上にストアされる。

STEP 6

- (1) MODE? 10N 20S 30T 40C 50H 60F
- (2), (3), (5) STEP 2と同様
- (4) 入力例 20

STEP 7

- (1) FILTER No. ? MEAS. No.=1
- (2) 測定に使用する可変フィルターの番号 IFIL(KK)を入力する。
- 1: ND 0.10
 - 2: ND 0.20
 - 3: ND 0.30
 - 4: ND 0.40
 - 5: ND 0.50
 - 6: ND 0.70
 - 7: ND 1.00
 - 8: ND 2.00
 - 9: ND 3.00
 - 10: 可変フィルターを使用しない
- (3) I 2

- (4) 入力例 10
- (5) 標準電球による較正を行なう場合には、可変フィルターの他に1%と12.5%のNDフィルターを使用する。INN=50の時には、12.5%NDフィルターの透過率の波長依存性もプログラムにより補正される。

STEP 8

(1) ATTENUATOR MAGNIFICATION? YES OR NO

(2) まず減衰器倍率を変更するか、しないかを指定する。

NO : 変更しない

blank : 変更する

減衰器倍率を変更する場合は、各ポジション、各チャンネルの減衰器倍率を入力する。

(3) A2

6 (9I 2)

(4) 入力例

| | |
|---|-----|
| 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 | A 点 |
| 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 | B 点 |
| 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 | C 点 |
| 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 | D 点 |
| 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 | E 点 |
| 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1 | F 点 |

(5) 減衰器倍率の初期値は、すべて1倍となっている。

STEP 9

(1) SHOT No. = 1

(2) ショット番号のメッセージが出力され、データ受入モードとなる。データ受入モードになったら測定用のトリガーボタンを押す。感度較正データが収集され、計算機上にストアされる。

STEP 10

(1) OK? - NO?

(2) データを採用するかしないかを判定する。

NO : 採用しない

blank : 採用する

(3) A2

(4) 入力例 blank

(5) 採用しない場合は、測定番号KKでの測定データはすべてクリアーされ、STEP 5

に戻り、ショット番号IH=1からの測定を再度行なう事になる。採用する場合には、このデータは測定番号KKでの平均値、標準偏差の算出に取り込まれる。

STEP 11

- (1) OK? - NO?
- (2) 測定番号KKでの測定を終了するか、続行するかを判定する。
 NO : 続行する
 空白 : 終了する
- (3) A 2
- (4) 入力例
- (5) 測定番号KKでのショット数が充分かどうかを判断する。続行する場合は、ショット番号を1つ増やし、STEP 7へ戻る。終了する場合は測定番号KKでの平均値と標準偏差の計算ルーチンへ向かう。

STEP 12

- (1) OK? - NO?
NO - NEW Y - END
- (2) 可変フィルター変えて新たな測定を行なうか、感度計算のルーチンへ移るかを定める。
 NO : 新たな測定を行なう
 空白 : 測定を終了し感度計算のルーチンへ移る
- (3) A 2
- (4) 入力例
- (5) 感度計算を行なった後に、さらにフィルターを変えた測定を行なう事も可能である。このためにはSTEP 11で40を指定すれば良い。

STEP 13

- (1) WRITE INTO FLOPPY? 0: YES 1: NO
- (2) フロッピーディスクにデータを書き込むかを定める。
 1 : 書き込まない
 空白 : 書き込む
- (3) I 2
- (4) 入力例
- (5) 書き込まない場合はSTEP 13へ移る

STEP 14

- (1) TYPE? 1: INITIALIZE 0: CHECK
- (2) フロッピーディスクの初期化を行なうかを指定する

1 : 初期化する

0 : データの書き込み

(3) I 2

(4) 入力例 0

(5) 初期化はフロッピーディスクの最初の使用時に行なえばよい。なお、初期化を行なうとフロッピーディスク内のデータはすべてクリアーされるため注意する必要がある。

初期化した場合は、またSTEP 12に戻る。そこで0を入力すればデータがフロッピーディスクに書き込まれる。

STEP 15

(1) MODE? 10N 20S 30T 40C 50H 60F

(2), (3), (5) STEP 2と同様

(4) 入力例 30

STEP 16

(1) GRAPHIC DISPLAY OK? - NO?

(2) グラフィック出力を行なうかを入力する

NO : グラフィック出力しない

blank : グラフィック出力する

(3) A 2

(4) 入力例 blank

(5) グラフィック出力は、各ポジションの各チャンネル毎に行なわれる。

A. 2 フロッピーディスクからのデータ読み出し

A. 1のSTEP 4にて60を入力しフロッピーディスクからの読み出しモードにする。

STEP 5

(1) ID, IS?

(2) フロッピーディスクから読み出すデータの認識番号を入力するかを指定する。

NO : 入力しない

blank : 入力する

もし、入力すると指定した場合は、次に読み出したいデータのID, ISを入力する

(3) A 2

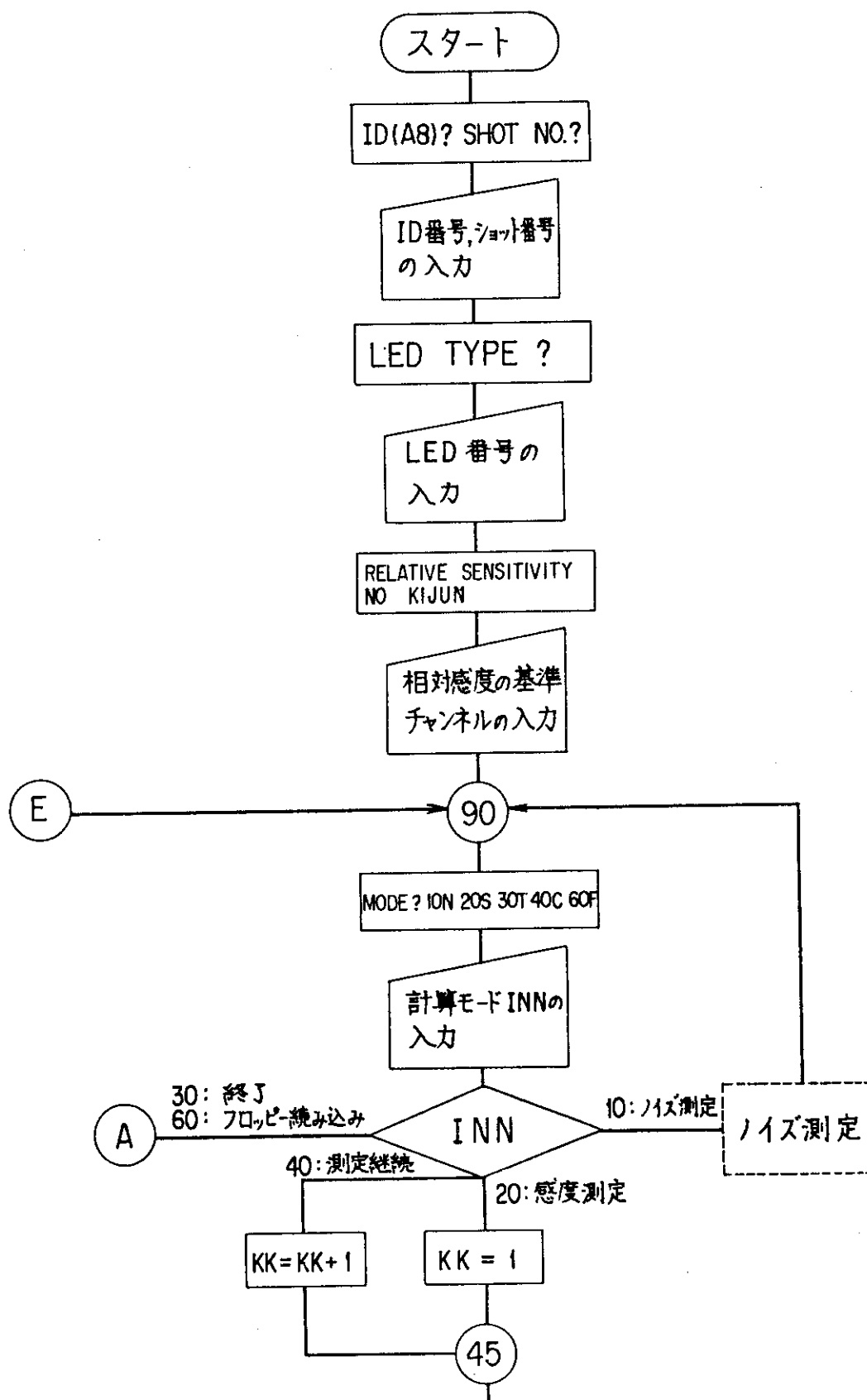
A 8, A 4

(4) 入力例 blank

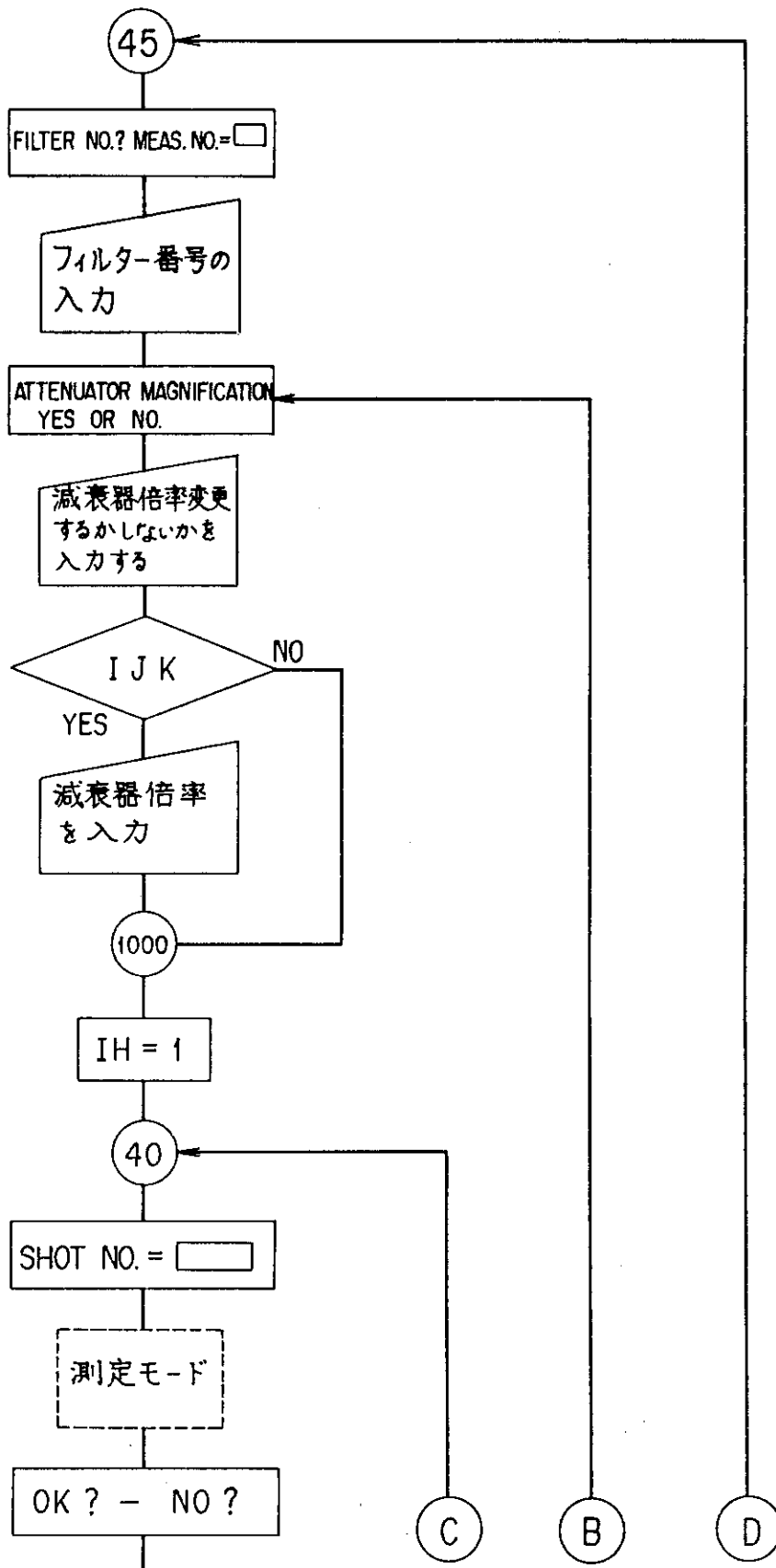
KW831104S001

- (5) フロッピーディスクからデータを読み出した後は、相対感度等を算出し、出力する。

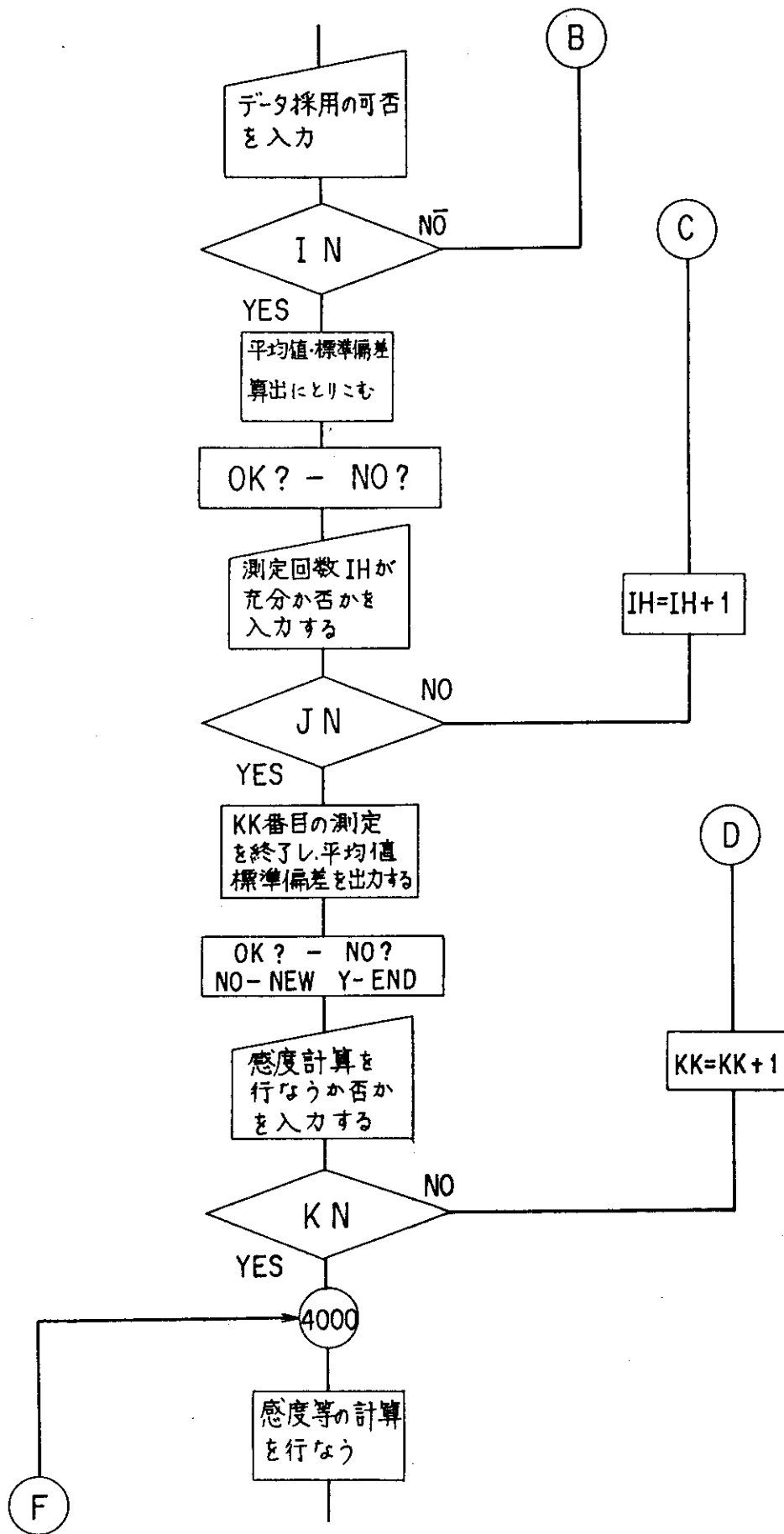
以下、A. 1のSTEP2以降と同様である。



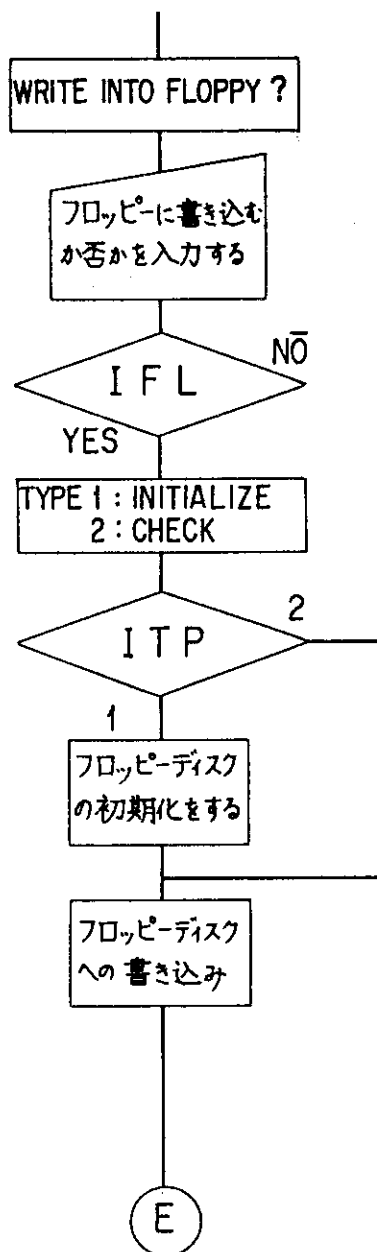
A - 1 図 KANDOプログラムフローチャート



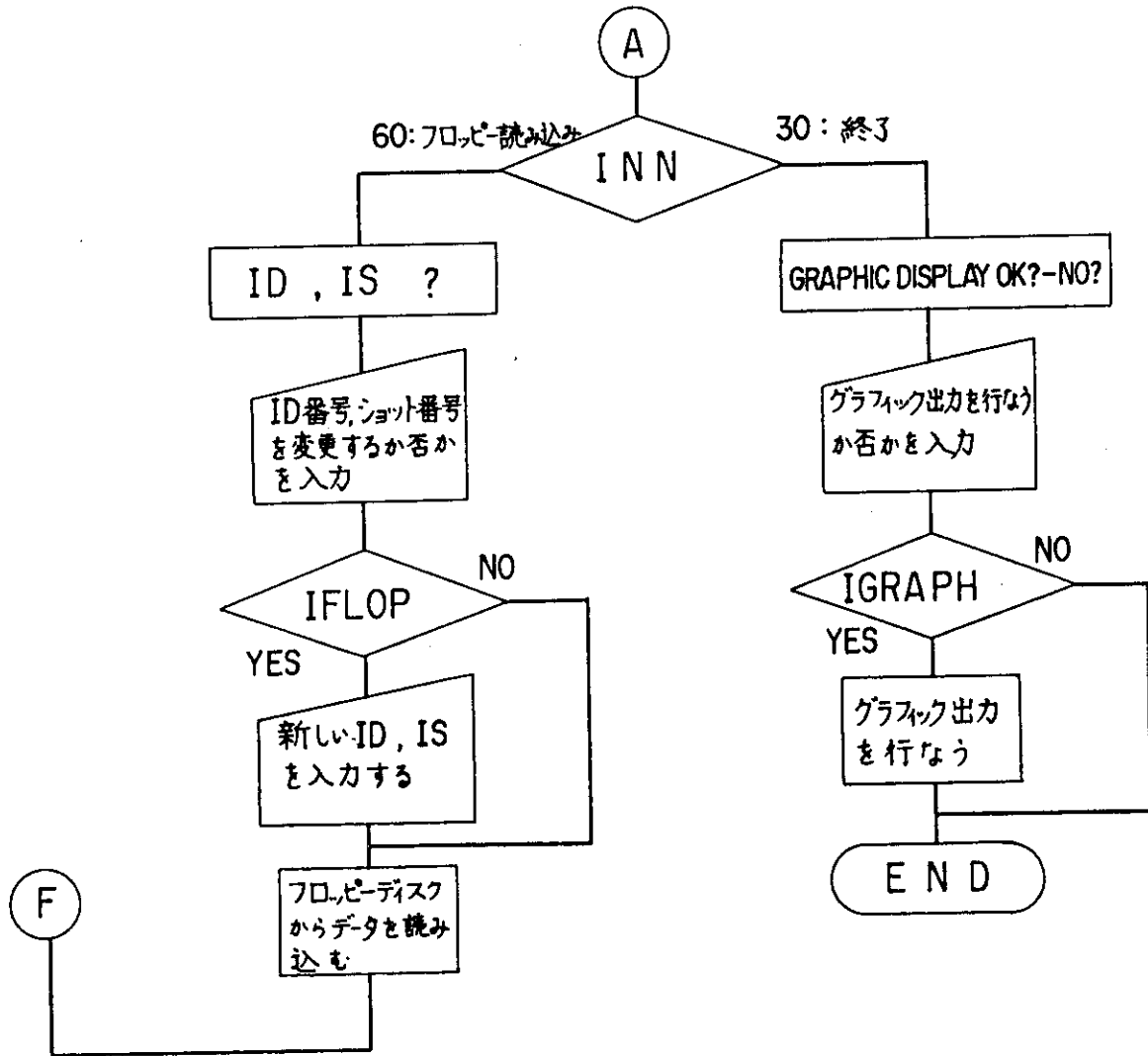
A-1図 (続き)



A-1図 (続き)



A-1 図 (続き)



A-1図 (続き)