

JAERI-Research

99-021



JP9950179



# フーリエ変換分光法による ELM 付き H モードプラズマの電子温度分布測定

－非熱的放射パルス除去－

1999 年 3 月

諫山明彦・伊世井宣明・石田真一・佐藤正泰・児玉武弘\*・岩間尚文\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

フーリエ変換分光法による ELM 付き H モードプラズマの電子温度分布測定  
－非熱的放射パルス除去－

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

諫山 明彦・伊世井宣明・石田 真一

佐藤 正泰・児玉 武弘\*・岩間 尚文\*

(1999年2月3日受理)

フーリエ変換分光装置により ELM 付き H モードプラズマの電子温度分布を測定するため、  
非熱的放射パルスを除去するソフトを開発した。補正した干渉信号を用いて得られる電子温  
度分布は、ELM のない時刻でフーリエ変換分光装置の値を用いて相対較正した回析格子型  
分光装置の値と ± 5% 程度の誤差で一致した。計算時間は現在実験で用いられているソフト  
と比べ 10% 程度長くなるだけであり、放電間処理に十分対応できる。

Measurement of Electron Temperature Profile of ELMY  
H-mode Plasma by Fourier Transform Spectroscopy  
— Removal of Non-thermal Emission Pulses —

Akihiko ISAYAMA, Nobuaki ISEI, Shinichi ISHIDA,  
Masayasu SATO, Takehiro KODAMA\* and Naofumi IWAMA\*

Department of Fusion Plasma Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 3, 1999)

In order to measure electron temperature of ELMY H-mode plasma by the Fourier transform spectrometer, the software to remove non-thermal emission pulses is developed. Electron temperature obtained from the modified interferogram agrees well with the result of the grating polychromator. The difference between the result of the Fourier transform spectrometer and that of the grating polychromator is estimated to be less than  $\pm 5\%$ . Since calculation time is only 10% longer than that needed for the existing software, the calculation can be finished during the shots.

**Keywords:** Electron Cyclotron Emission, Electron Temperature Profile, Edge Localized mode, H-mode, Non-thermal Emission, Fourier Transform Spectrometer, JT-60U, Plasma, Tokamak

---

\* Toyama Prefectural University

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. JT-60U における ECE 測定装置 .....	2
2.1 フーリエ変換分光装置 .....	2
2.2 回折格子型分光装置 .....	2
3. 非熱的放射パルス除去 .....	3
3.1 ELM 付き H モード中の干渉信号 .....	3
3.2 干渉信号中の非熱的放射パルスの影響 .....	4
3.3 非熱的放射パルス除去の手順 .....	5
3.3.1 全体的な流れ .....	5
3.3.2 ハイパスフィルタ .....	6
3.3.3 非熱的放射の検出および除去 .....	8
3.4 計算結果 .....	9
3.5 コラプス発生時の対応 .....	9
3.6 計算時間の評価 .....	10
4. まとめ .....	11
謝 辞 .....	12
参考文献 .....	13
付録1 フーリエ変換分光法の原理 .....	33

## Contents

1. Introduction .....	1
2. ECE Diagnostic Systems in JT-60U .....	2
2.1 Fourier Transform Spectrometer .....	2
2.2 Grating Polychromator .....	2
3. Rejection of Non-thermal Emission Pulse .....	3
3.1 Interferogram during ELMy H-mode .....	3
3.2 Effect of Non-thermal Emission Pulse on Interferogram .....	4
3.3 Procedure for Rejection of Non-thermal Emission Pulse .....	5
3.3.1 Overall Algorithm .....	5
3.3.2 High-pass Filter .....	6
3.3.3 Detection and Rejection of Non-thermal Emission Pulses .....	8
3.4 Results of Calculation .....	9
3.5 Procedure for Minor Collapse .....	9
3.6 Evaluation of Calculation Time .....	10
4. Summary .....	11
Acknowledgements .....	12
References .....	13
Appendix 1 Principle of Fourier Transform Spectroscopy .....	33

## 1. 序論

電子サイクロトロン放射 (Electron Cyclotron Emission, ECE) はサイクロトロン運動する電子から発せられる放射であり、その物理機構は古くから知られていた[1]。そのためECE測定法は1970年代中頃からトカマクプラズマの電子温度計測の手段として用いられ[2]、現在では電子温度計測の標準的方法になっている。

JT-60Uには、フーリエ変換分光装置[3]、回折格子型分光装置[4]、ヘテロダインラジオメータ[5]の3つのECE測定装置がある[6]。このうち、フーリエ変換分光装置では、液体窒素を用いて絶対較正することにより電子温度分布を測定している。回折格子型分光装置、ヘテロダインラジオメータはフーリエ変換分光装置の値を基に相対較正することにより電子温度の値を得ている。しかし、周辺局在モード (Edge Localized Mode, ELM) 付きHモードプラズマを測定する場合、フーリエ変換分光装置の時間分解能より小さい時間幅でパルス状の非熱的放射が発生し電子温度が測定できなくなる。

ELMはHモードプラズマの周辺部における温度や密度の急峻な勾配によって駆動される不安定性である[7]。ELM付きHモードプラズマはプラズマの性能を大きく劣化させることなく核融合反応で生じた不純物をプラズマの外へ排出できるという長所を持っているので、国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)においては標準的な運転モードと考えられている[8]。JT-60UにおいてもELM付きHモードの特性を調べるための実験が多く行われていて、1997年には規格化ベータ値が2.0、Hファクタが2.2のELM付きHモードを5秒間、規格化ベータ値が1.7～2.0、Hファクタが2.0のELM付きHモードを9秒間維持することに成功している[9, 10]。このように長時間にわたり、フーリエ分光法による電子温度測定ができないのは深刻な問題であり、早急に測定方法を確立する必要がある。

本論文は、フーリエ変換分光装置によりELM付きHモードプラズマの電子温度測定を行うために開発した処理ソフトウェアに関して述べたものである。ソフトウェア作成に当たっては既存のハードウェア、ソフトウェアを大きく変更することなく行えるよう留意した。また、JT-60Uのショット間に計算を終了できるように簡素なア

ルゴリズムを採用した。

本論文の構成は次のようになっている。第2章でJT-60UにおけるECE測定系を述べる。第3章で処理ソフトのアルゴリズム、計算結果について述べ、精度を確認するため回折格子型分光法の結果と比較を行い、また、計算時間を測り、JT-60Uの定型処理に対応できるかを評価する。第4章では本論文のまとめを記述する。

## 2. JT-60UにおけるECE測定装置

JT-60UにおけるECE測定装置としては、フーリエ変換分光装置、回折格子型分光装置、ヘテロダインラジオメータがある。ここでは、本論文で使用したフーリエ変換分光装置、回折格子型分光装置について概説する。

### 2.1 フーリエ変換分光装置 (Fourier Transform Spectrometer System, FTS) [3, 6]

フーリエ変換分光装置は、マイケルソン干渉計を用いて測定したECE光の干渉信号を計算機でフーリエ変換することによりECE光のスペクトルを算出している。周波数分解能は3.66GHzであり、典型的な空間分解能は5cmである。本計測装置では、液体窒素を用いて絶対較正を行うことにより電子温度分布を得ている。フーリエ変換分光法は1つの検出器により電子温度分布が得られるという特徴がある。多チャネル計測系で長時間計測を行った際、各検出器の特性の違いによりスペクトルが歪むことが懸念されるが、フーリエ分光法ではそのようなことはない。本計測装置の時間分解能は約25msであり、MHD不安定性のように時間的に速く変化する現象を観測するには不向きで、回折格子型分光装置およびヘテロダイン・ラジオメータが用いられる。

### 2.2 回折格子型分光装置 (Grating Polychromator System, GPS) [4]

回折格子型分光装置は、回折格子に当てられた光の反射角が周波数により異なることを利用し、入射ECE光を周波数分解している。検出素子は20個あり、冷凍機を

用いて4.2Kに冷却されている。冷凍機からのノイズを検出し除去するため3個の検出素子はノイズ測定用に用いられていて、残りの17個がECE測定用に用いられている。データ収集系は2系統あり、時間分解能 $20\mu\text{s}$ で15sec間収集する系統と、最大 $1\mu\text{s}$ で数100msec間収集する系統がある。回折格子の格子定数を変えることにより、実空間におけるチャンネル間隔を変えることができる。現在、JT-60Uの実験で用いている回折格子の格子定数は2.0mmおよび1.6mmの2種類である。典型的なチャンネル間隔は、前者の場合約8cm、後者の場合約6cmである。回折格子型分光装置は、鋸歯状振動、ベータコラプス前の電子温度揺動など時間的に速く変化するMHD不安定性を観測するのに用いられるほか、フーリエ変換分光装置を用いて相対較正を行うことにより時間分解能が高い電子温度分布を測定するためにも用いられている。

### 3. 非熱的放射パルス除去

#### 3.1 ELM付きHモード中の干渉信号

図1に典型的なELM付きHモード実験の放電波形を示す。図1(a)にはプラズマ電流および中性粒子ビーム(NB)入射パワーを、図1(b)にはフーリエ変換分光装置で計測したプラズマ中心部の電子温度を、図1(c)には回折格子型分光装置で計測した電子温度を、図1(d)にはD $\alpha$ 線の発光強度をそれぞれ示す。なお、図1(c)はELMのない時刻でフーリエ変換分光装置を用いて相対較正している。

$t=5.5$ 秒のNB入射後、約800ms後の6.3秒にプラズマはELM付きHモード状態に移行する。回折格子型分光装置の各検出器では、回折格子板の設定角度により決まる周波数のECE光を直接受信するため、ELM発生時に生じる非熱的放射がパルス状に受信される。一方、フーリエ変換分光装置では可動ミラーをスキャンしたときの干渉信号をフーリエ変換して初めて電子温度が得られる。すなわち、可動ミラーをスキャンしている間(約25ms)はプラズマの電子温度が変化しないことを前提としている。そのため、不規則に非熱的放射パルスが検出器に混入すると、得られる電子温度分布は大きく歪んでしまう。この現象はELM付きHモードの間、可動ミラースキャ

ン中に非熱的放射パルスが混入するたびに発生する。図1(b)からわかるように、実験中はELM付きHモードの間のほとんどの時刻においてフーリエ変換分光装置から電子温度分布を得ることができない。

図2に非熱的放射パルスの混入していない干渉信号およびそれをフーリエ変換して得られる電子温度分布を示す。図2(a)において可動ミラーの位置が約400のときに見られる振幅の大きい点が光路差がゼロになる位置に相当し、この場所から離れるにつれ振幅が小さくなっている。図2(b)の電子温度分布はR=3.3mの位置がプラズマ中心に相当する。R=2.7mより内側では第3次高調波ECEの周波数の領域と重なるため、通常は電子温度測定には使用しない。

図3に非熱的放射パルスが混入した干渉信号およびそれをフーリエ変換した得られる電子温度分布を示す。図3(a)において可動ミラーの位置が170, 470, 770のときに非熱的放射パルスが混入している。ELM付きHモードプラズマ観測時には、干渉信号よりもはるかに大きい非熱的放射パルスが混入していることがわかる。図3(a)の干渉信号をフーリエ変換すると図3(b)のようになるが、この場合は電子温度分布を得られないことがわかる。したがって、電子温度分布を算出するためには非熱的放射パルスを除去する必要があるが、パルスの個数や位置は時刻によりまちまちであり、決まった位置の干渉信号のみを除くだけではパルスは除去できない。そのため、まずパルスを検出することから始める必要がある。

### 3.2 干渉信号中の非熱的放射パルスの影響

本節では、干渉信号における非熱的放射パルスの影響を調べるために、非熱的放射パルスが混入していない干渉信号にパルスを加え、パルスの強度・位置により電子温度分布がどのように歪むか調べる。

図4にパルス位置が一定の下で強度を変えたときの例を示す。パルスを印加しないときの干渉信号および電子温度分布は図2に対応する。図4よりパルス強度が大きくなるとともに電子温度が歪むのがわかる。図4(b)に示される程度の歪みであればフィッティングを施すことにより電子温度分布が推測できるが、図4(d)に示され

る歪みであれば、電子温度分布を正確に評価するのは難しいと思われる。図4(f)に示される歪みのときは分布を推測するのも難しい。

図5にパルス強度が一定の下で位置を変えたときの例を示す。パルスが光路差=0の位置に近づくにつれ歪みが大きくなる。これは、干渉信号をフーリエ変換する際、光路差=0から離れるにつれ小さくなるような重み関数を掛けている（この操作はアポダイゼーションと呼ばれる）からである。図5(a)で印加したパルスの大きさは図4(c)と同一であるが、後者の方が光路差=0の位置から離れた位置にパルスがあるので、電子温度の歪みの程度は図4(b)と同程度である。図4の場合と同じように、図5(b)に示される程度の歪みであれば電子温度を推測できるが、図5(f)からは電子温度分布を推測するのも困難である。

なお、実際の干渉信号では、非熱的放射パルスの混入位置、頻度、強度はまちまちなので、図4(a)に示される程度の非熱的放射パルスでも検出できるようにしておく必要がある。

### 3.3 非熱的放射パルス除去の手順

#### 3.3.1 全体的な流れ

図6に非熱的放射パルスが混入した干渉信号の例を示す。干渉信号の位置が50～80および630～640のときに非熱的放射パルスが混入している。干渉信号の位置が50～80のときの非熱的放射パルスのようにパルスの幅が広い場合、非熱的放射パルスの前後（図6のパルスの左右）で干渉信号値にギャップが生じる。これは電子温度を反映したものではなく、計測装置のアンプの積分回路に起因するものであるので、この部分の変動が小さくするようになる必要がある。また、非熱的放射パルスの後にはフーリエ変換分光装置の積分回路に起因する時定数の長いノイズが乗る。この部分は干渉信号に時定数の長いノイズが重畠しているので、時定数の長いノイズを除くことにより電子温度の情報が得ることができる。そこで、①非熱的放射パルス前後の不連続、および②時定数の長いノイズをハイパスフィルタにより除くことにする。詳細は第3.3.2節で述べる。

ハイパスフィルタを印加した後、非熱的放射パルスを除去する。干渉信号に混入した非熱的放射パルスを検出するために、対象とする時刻より1ステップ前（約50ms前）の干渉信号を参考にし、その値と大きく異なっていれば非熱的放射パルスと判定するようとする。図7に模式図を示す。図7(a)において、 $t=t_0$ では干渉信号に非熱的放射パルスが混入していない。 $t=t_0+\alpha$ に $I=I_0$ で非熱的放射パルスが混入し、 $t=t_0+2\alpha$ では $I=I_0$ に非熱的放射パルスは検出されていない。このようなときに、 $I=I_0$ の信号値の時間変化を見ると、図7(b)のようになる。干渉信号は電子温度の変化に対応して変化するが、非熱的放射パルスは電子温度の変化に比べ十分速く変化するため区別することができる。詳細は第3.3.3節で述べる。

フーリエ変換分光法は、干渉信号をフーリエ変換することにより入射光の周波数スペクトルを得る方法であるため、干渉信号を取得している間はプラズマの電子温度が変化しないことが前提となる。したがって、非熱的放射パルスのように干渉信号を取得している間に強度が大きく変化するデータから熱的および非熱的電子温度に関する情報は得られないので除去する必要がある。今回は上記手法により非熱的放射パルスを検知し、その部分には1ステップ前の干渉信号を当てはめることにした。パルスを除いた干渉信号だけを用いてフーリエ変換する方法も考えられるが、パルスの影響を受けていない部分の場所・データ数がELMの種類や時刻により異なり、計算が複雑になるので採用しなかった。

### 3.3.2 ハイパスフィルタ

ハイパスフィルタは、

$$y = 1 - 1/\{1 - (x/a)^b\} \quad (1)$$

という関数形のものを用い、フーリエ変換した干渉信号に掛けることにより低周波成分を除去している。なお、上式で $a$ ,  $b$ は定数であり、最適になるよう調整する必要がある。 $a$ は式(1)の値が急激に変化する値に対応し、 $x \ll a$ では、 $y=0$ ,  $x \gg a$ では $y=1$ となる。図8～12には同一の干渉信号に対し、式(1)の $a$ ,  $b$ を変化させたときの干渉信号の変化を示している。各図の(a)は元の干渉信号である。ただし、ノ

イズを小さくするため、大きな非熱的放射パルス（縦軸の値が6000以上）は予め除去している。各図の(b)はハイパスフィルタの概形である。各図の(c)は干渉信号をフーリエ変換した後、ハイパスフィルタ印加し、その後逆フーリエ変換したものである。実際にデータ処理を行う際はこの値が次の処理段階に送られる。各図の(d)は干渉信号をフーリエ変換した後、ローパスフィルタ

$$y=1/\{1-(x/a)^b\} \quad (2)$$

を印加し、その後逆フーリエ変換したものである。この値はハイパスフィルタ印加により除去される信号値を表している。実際にデータ処理を行う際にはローパスフィルタを印加することはないが、ハイパスフィルタにより除去される信号値を視覚的に理解するために掲載した。

図8には、式(1)において $a=10$ ,  $b=10$ としたときの干渉信号を示す。図8(d)に示すように、 $I=270$ 付近の大きな非熱的放射パルスの後のギャップ部は緩やかになっている。また、 $I=700$ 付近の非熱的放射パルスの影響により、図8(c)の $I=700$ 付近が変化している。本処理段階の目的は時定数の長いノイズを除くことであるので、このように非熱的放射パルスの影響を受けた場合、次の段階で、非熱的放射パルスを除く際の誤差となってしまうので、極力小さくする必要がある。

図9には、式(1)において $a=50$ ,  $b=10$ としたときの干渉信号を示す。図9(c)に示すように、 $I=270$ 付近の大きな非熱的放射パルスの後のギャップ部はほぼ完全に補正されている。また $I=700$ 付近も、非熱的放射パルス以外の部分で除去されたものは少ない。このため、“時定数の長いノイズを除く”という観点からは、 $a$ が大きい方がよいと言える。しかし、この場合は、図9(d)の $I=400$ 付近に時定数の長いノイズ以外の信号が乗っている。これは電子温度の情報を含んだ干渉信号であり、これを除去することは最終的な電子温度を過小評価することになる。したがって、できるだけ適切に時定数の長いノイズを除き、なおかつ $I=400$ 付近の干渉信号を除去しないように $a$ を選ぶ必要がある。

次に、 $a$ を固定し、 $b$ を変化させた場合のフィルタの効果を見る。図10には $a=25$ ,  $b=2$ としたときの干渉信号を示す。この場合は図と同じように、高周波成分も一部

切り落としてしまうため、 $I=400$ 付近の電子温度の情報を含んだ干渉信号も除去している。

図11には $a=25$ ,  $b=50$ としたときの干渉信号を示している。この場合、 $I=400$ 付近の電子温度の情報を含んだ干渉信号は除去されない。しかし、図11(d)に示すように、 $I=270$ 付近の不連続部分の前後で“うねり”が生じている。これはある周波数以下の部分の重みを急激に小さくしたためである。

以上から、 $a$ ,  $b$ の値には最適値があることがわかる。図12には $a=25$ ,  $b=10$ の場合の干渉信号を示す。図12(d)に示すように、電子温度算出に不可欠な $I=400$ 付近の干渉信号を残しつつ、時定数の長いノイズを除去できていることがわかる。以下の計算では $a=25$ ,  $b=10$ としている。

### 3.3.3 非熱的放射の検出および除去

非熱的放射パルスを検出するには、各位置の干渉信号（図2(a)などの横軸）の時間変化を見て、変化の割合および変化量がともに設定値を超えた場合に非熱的放射とみなすようにする。干渉信号が変化する時間スケールは電子温度が変化する時間スケールと同程度と考えられ、コラプスが発生したときのような場合を除き、非熱的放射混入時の変化に比べ十分遅いので容易に判別できる。図13には、図1で示した放電において光路差 = 0 となる位置近辺 ( $I=415$ ) の干渉信号の時間発展を示す。図13(a)はハイパス・フィルタ印加前、すなわち生信号の変化である。図13(b)はハイパス・フィルタ印加後、図13(c)は非熱的放射パルス除去後のものである。図13において、 $t=5.6$ 秒から信号値が緩やかに変化しているが、これはNB入射による電子温度の増加に対応している。図13(b)の $t=6.8$ 秒で信号が急激に変化しているが、これが非熱的放射パルスに起因するノイズに対応する。このように、多くの場合非熱的放射パルスに起因するノイズは電子温度を反映した干渉信号の変化に比べ急激に変化するので容易に判別することができる。このノイズの部分は電子温度に関する情報を含んでいないので、1時刻ステップ(50ms)前のデータを当てはめる。図14に非熱的放射パルスを除く前（ハイパス・フィルタ印加後）と除いた後の干渉信

号を示す。図14(b)には図14(a)で見られていたノイズが除去されていることがわかる。また、図4で加えたパルスよりもノイズは十分小さくなっているといえる。

上記の非熱的放射パルス除去にあたり、前段階で施したハイパス・フィルタが非常に有効に機能していることが図13からわかる。図13(a)では“非熱的放射パルスの後の減衰時間の長いノイズ”があるため、 $t=6.6\sim7.8$ 秒における干渉信号の変化がわかりにくくなっているが、図13(b)では数カ所の部分を補うだけでおおよその変化の様子をつかむことができる。

### 3.4 計算結果

図15に修正した干渉信号およびそれをフーリエ変換して得られる電子温度分布を示す。第3.1節で示したような歪みはなくなめらかな分布が得られていることから、非熱的放射パルスの影響は小さいと考えられる。補正の妥当性を見るために、ELM発生前にフーリエ変換分光装置の値を用いて相対較正した回折格子型分光装置の値と比較する。図16には、フーリエ変換分光装置および回折格子型分光装置による $t=6.65$ 秒における電子温度分布を示す。また、図17に、プラズマ中心より強磁場側、プラズマ中心付近、プラズマ中心より弱磁場側の位置に相当する位置の電子温度の時間変化を示す。電子温度分布およびその時間発展において、フーリエ変換分光装置と回折格子型分光装置は良い一致を示しており、補正が妥当であったことがわかる。両測定装置の結果を比較する際は測定原理に起因する誤差が含まれるので、回折格子型分光装置の結果が必ずしも真の値とは言えないが誤差はおおよそ±5%程度以内と見積もることができる。

### 3.5 コラプス発生時の対応

今回の処理ソフトは、JT-60Uの実験運転の際で使用することを想定しているため、より多くのタイプの放電に対応できる必要がある。ここでは、ELM付きHモード実験の際に発生するコラプスが発生したときにも対応できる処理方法に関して述べる。

今回の処理ソフトでは、これまでの節で述べたように、干渉信号に急激な変化が現われたときは非熱的放射と見なし、1つ前の時刻の干渉信号の値を割り当てていう処理をしている。したがって、コラプスが発生し実際に電子温度が急激に変化した場合もコラプスと判定してしまう可能性があるので両者を区別する必要がある。通常、コラプスは電子温度の急激な減少として認識できる。しかし、ハイパス・フィルタを印加すると、非熱的放射パルスの前後に正ばかりではなく負の大きな値も出てくるので、干渉信号の増加・減少というだけでは区別できない。ここでは非熱的放射パルスとコラプスを次のようにして区別することにした。干渉信号のある位置（例えば図2(a)の横軸）の時間発展を見た場合、非熱的放射パルスはある時刻に発生した後はしばらく発生しない（図18(a)），修正回数は1回で済む。場合によっては同じ位置に連続してパルスが混入するが、その場合でも数回同じ値を当てはめることで対処できる。一方、コラプスの場合、一度誤った判定をすると長時間コラプス前の値を当てはめ続けることになる（図18(b)）。このようになった場合は判定が誤っていたと見なし、コラプス発生時刻において、非熱的放射パルスかコラプスかを判別する閾値を変更し、信号値の置き換えを行わないようとする。このような処理を行った結果を図19(a)に示す。この場合は、図19(b)の回折格子型分光装置の結果からわかるように、 $t=6.0$ 秒にコラプスが発生し電子温度が急激に減少している。補正後のフーリエ変換分光装置の値は、図19(a)に示すように、コラプス発生後も誤動作せずに電子温度分布を算出できている。

### 3.6 計算時間の評価

実際の実験で使用する場合、精度が高いことに加え、計測結果を早期に把握して次の放電に役立てるために計算時間が短いことも重要である。本方式は、JT-60Uの放電間隔（15分間）に処理できるように、処理時間を短くすること考慮してソフトを作成した。各処理における計算時間は次のとおりである。

データ読み込み（15秒間分、300 time slices）：約2秒

フィルタリング（10秒間分、200 time slices）：約2秒

フーリエ変換	: 約20秒
--------	--------

なお、計算は富士通S-4/20 (CPU: Hyper SPARC RT625(200MHz))を用いて行った。今回作成したアルゴリズムは上の“フィルタリング”の部分のみであり、フーリエ変換部は現在実験時に用いられているルーチンを利用している。すなわち、今回のルーチンを入れることによる計算時間の増加は10%程度であり、放電間処理に十分対応できる。また、1時刻の計算時間は0.01秒程度であるから、将来実時間処理にも対応できると考えられる。

次期装置においては運転時間が長くなり、データ量も膨大になる。今回、自動処理が可能であることが示せたことで、このような場合にも対応できるという見通しが得ることができたといえる。

#### 4. まとめ

JT-60Uでは、フーリエ変換分光装置、回折格子型分光装置、ヘテロダインラジオメータを用いて電子温度分布の測定を行っている。フーリエ変換分光装置では絶対較正を行い、回折格子型分光装置とヘテロダインラジオメータはフーリエ変換分光装置を基にして相対較正をしている。ITERの標準的運転モードであるELM付きHモードでは、フーリエ変換分光装置の時間分解能より小さい時間幅でパルス状の非熱的放射が発生し電子温度が測定できない。ELM付きHモードプラズマの電子温度を測定するために、時間分解能より小さい時間幅で干渉信号に混入した非熱的放射パルスを除去するソフトを開発した。

補正した干渉信号を用いて得られる電子温度分布は、ELMのない時刻でフーリエ変換分光装置の値を用いて相対較正した回折格子型分光装置の値と±5%程度の誤差で一致した。計算時間は現在実験で用いられているソフトと比べ10%程度長くなるだけであり、放電間処理に十分対応できる。また、アルゴリズムの簡便性から将来実時間処理にも対応できると考えられる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり研究の機会を与えて下さった、炉心プラズマ研究部 船橋昭昌部長、安積正史前部長、炉心プラズマ研究部 二宮博正次長、炉心プラズマ第1実験室 菊池満室長、炉心プラズマ第2実験室 芳野隆治室長に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Bekefi G. : in *Radiation Processes in Plasmas*, John Wiley and Sons, Inc., New York (1966).
- [2] Costley A. E., Hastie, R. J., Paul J. W. M. and Chamberlain J. : Phys. Rev. Lett., 33, 758 (1974).
- [3] Sato M., Isei N. and Ishida S. : JAERI-M 93-057, "Development of Fourier Transform Spectrometer System", 359 (1993).
- [4] Ishida S., Nagashima A., Sato M., Isei N. and Matoba T. : Rev. Sci. Instrum. 61, 2834 (1990).
- [5] Isei N., Sato M., Ishida S., Uchino K., Nagashima A., Matoba T. and Oyevaar T. : Rev. Sci. Instrum. 66, 413 (1995).
- [6] Sato M., Ishida S., Isei N., Isayama A., Shirai H., Oyevaar T., Teranishi M., Iwama N. and Uchino K. : Fusion Engineering and Design, 34-35, 477 (1997).
- [7] Zohm H. : Plasma Physics and Controlled Fusion, 38, 105 (1996).
- [8] Shimomura Y, Aymar R., Chuyanov V., Huguet M. and Parker R. : to appear in *Fusion Energy*, Proc. 17th Int. Conf. Fusion Energy , Yokohama (International Atomic Energy Agency, Vienna)
- [9] Kamada Y., Yoshino R., Ushigusa K., Neyatani Y., Oikawa T., Naito O., Tokuda S., Shirai H., Takizuka T., Ozeki T., Azumi M., Hatae T., Fujita T., Takeji S., Matsukawa M., Koide Y., Fukuda T., Ishida S., JT-60 team: in *Fusion Energy*, Proc. 16th Int. Conf. Fusion Energy , Montreal, 1996 (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1997) vol 1, p 247
- [10] Kamada Y., Isayama A., Oikawa T., Sakamoto Y., Hosogane N., Takenaga H., Kusama Y., Fujita T., Takeji S., Ozeki T., Ishii Y., Tokuda S., Ushigusa K., Naito O., Ishida S., Koide Y., Fukuda T., Takizuka T., Shirai H., Hatae T. and The JT-60 team : to appear in *Fusion Energy*, Proc. 17th Int. Conf. Fusion Energy , Yokohama (International Atomic Energy Agency, Vienna)

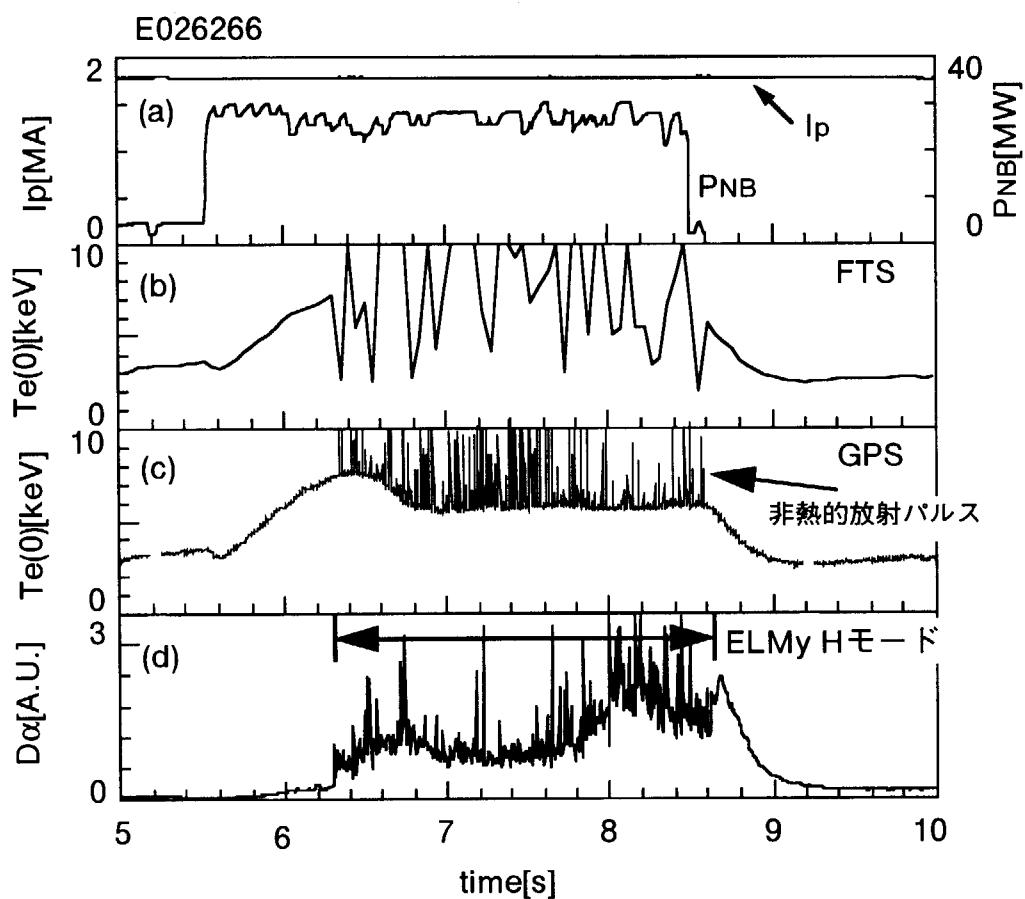


図1：典型的なELMy Hモードの放電波形。

- (a) プラズマ電流およびNB入射パワー,
- (b) フーリエ変換分光装置で計測したプラズマ中心付近の電子温度,
- (c) 回折格子型分光器で計測したプラズマ中心付近の電子温度,
- (d) D  $\alpha$  線の発光強度.

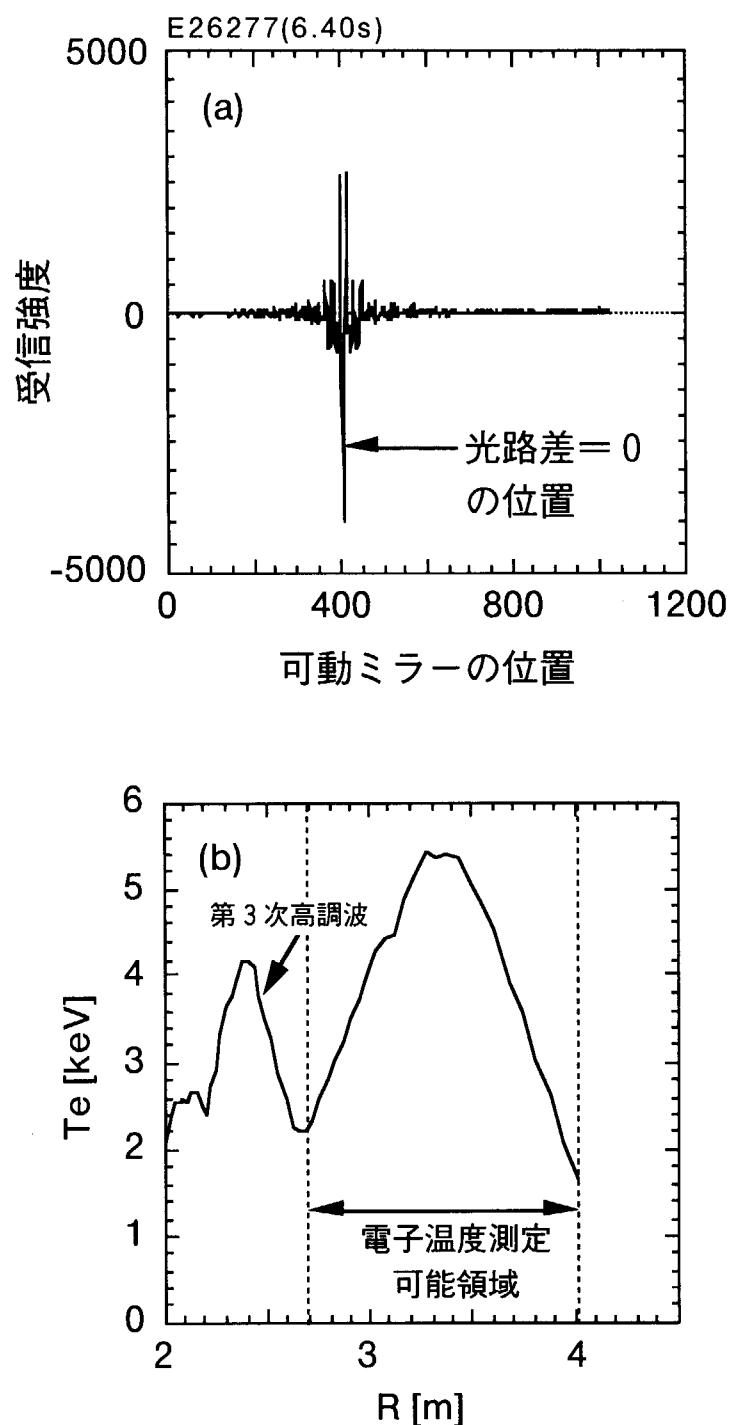


図2：非熱的放射パルスが混入していないときの(a)干渉信号  
および(b)電子温度分布。

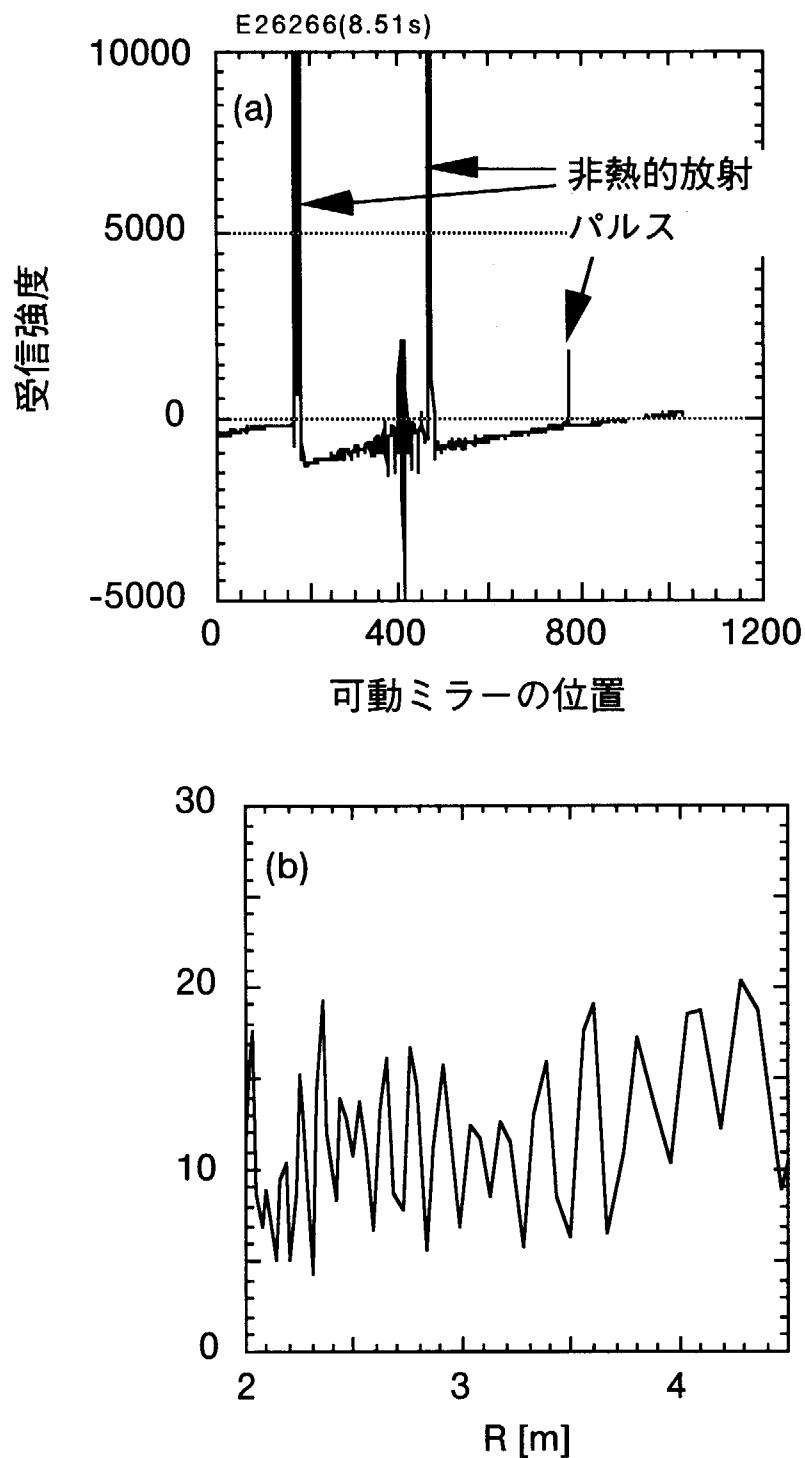


図3：非熱的放射パルスが混入したときの(a)干渉信号  
および(b)電子温度分布。

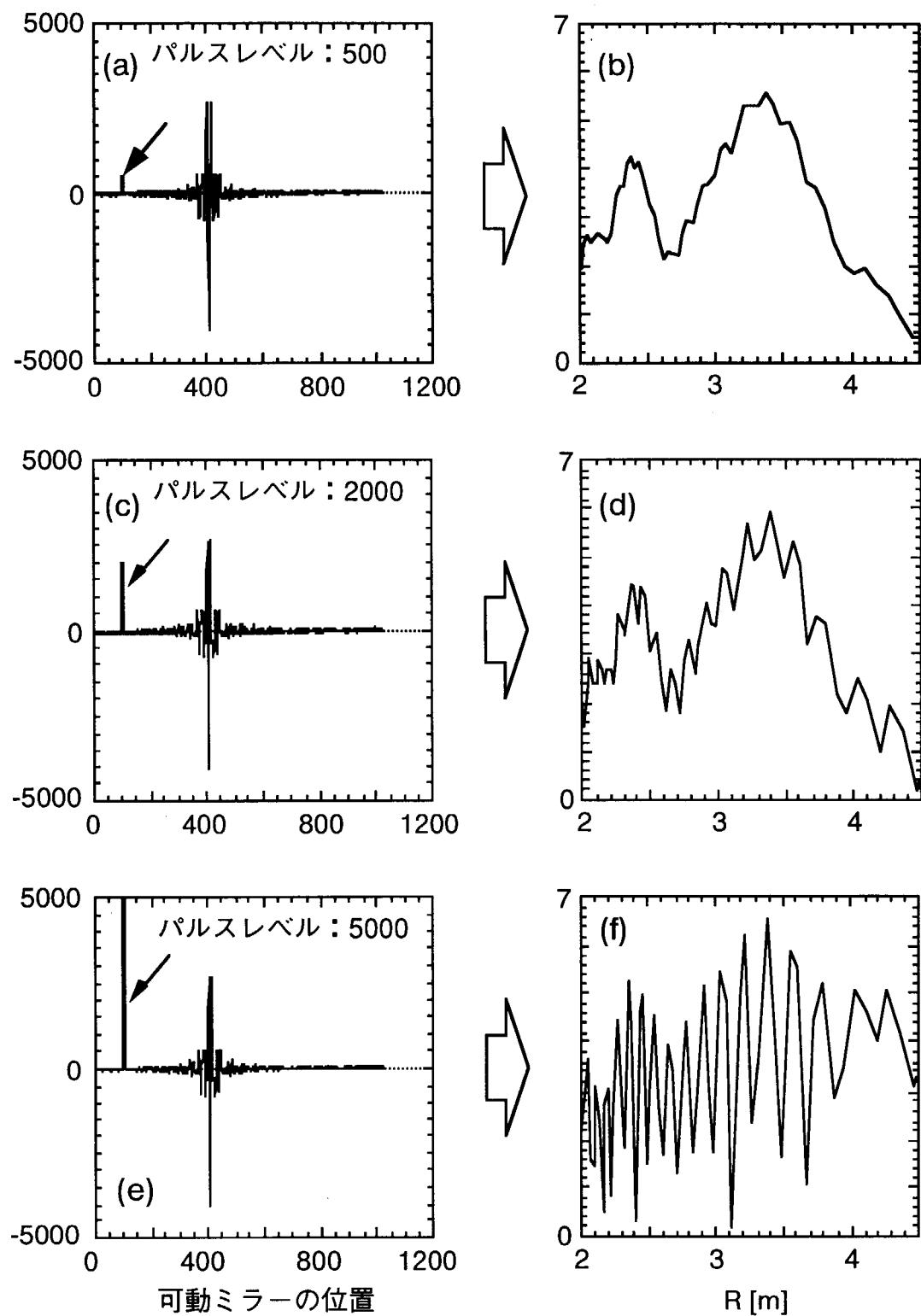


図4：パルスの大きさを変えたときの電子温度分布の変化

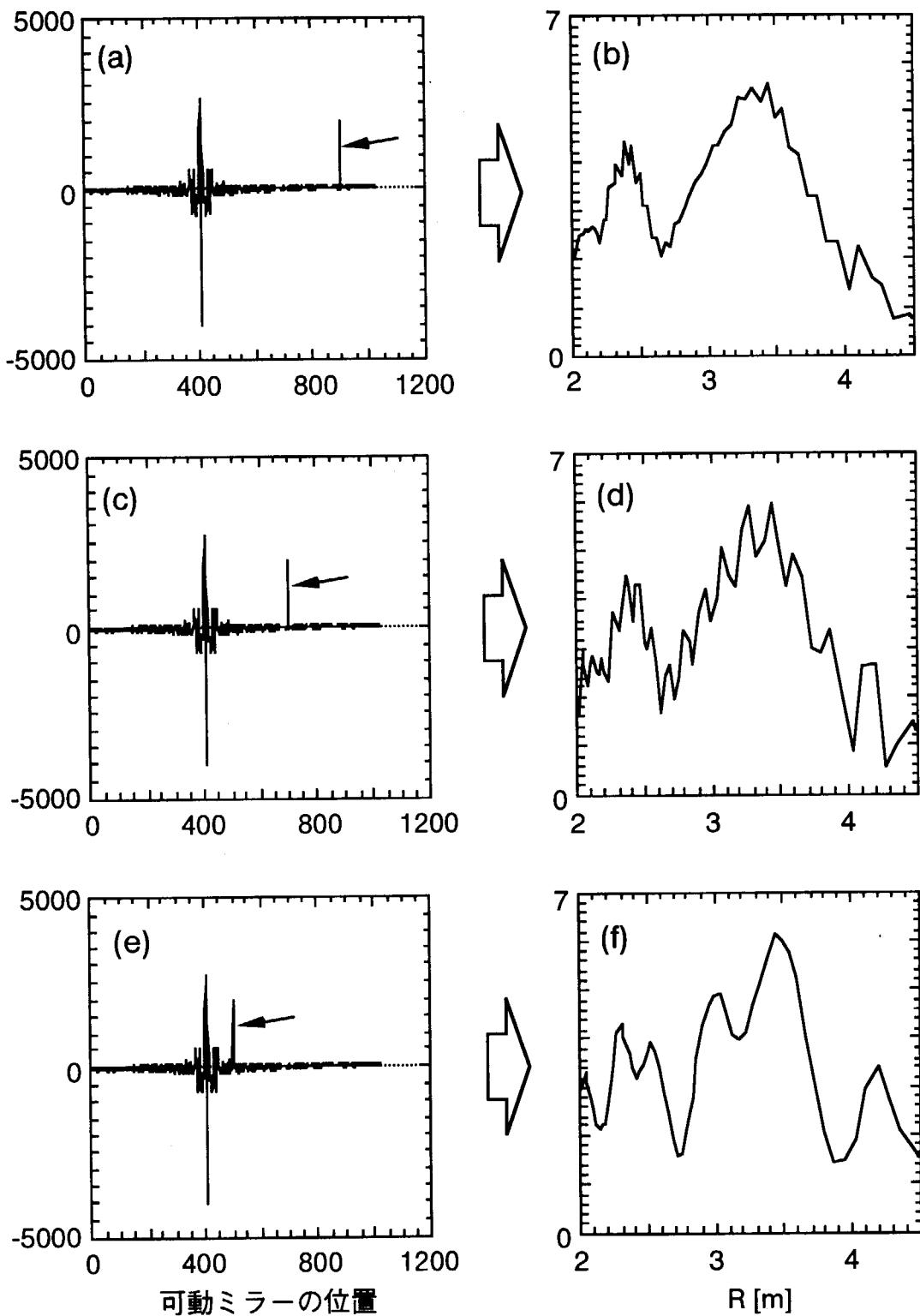


図5：パルスの位置を変えたときの電子温度分布の変化

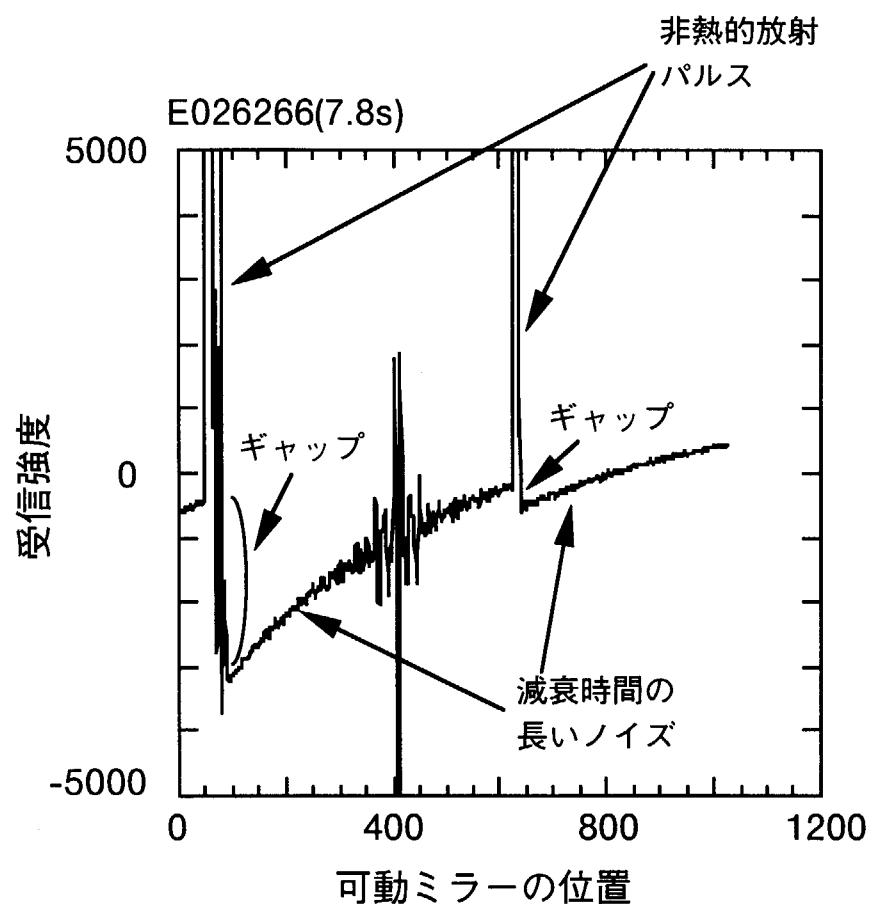


図 6：非熱的放射パルスの混入した干渉信号の例

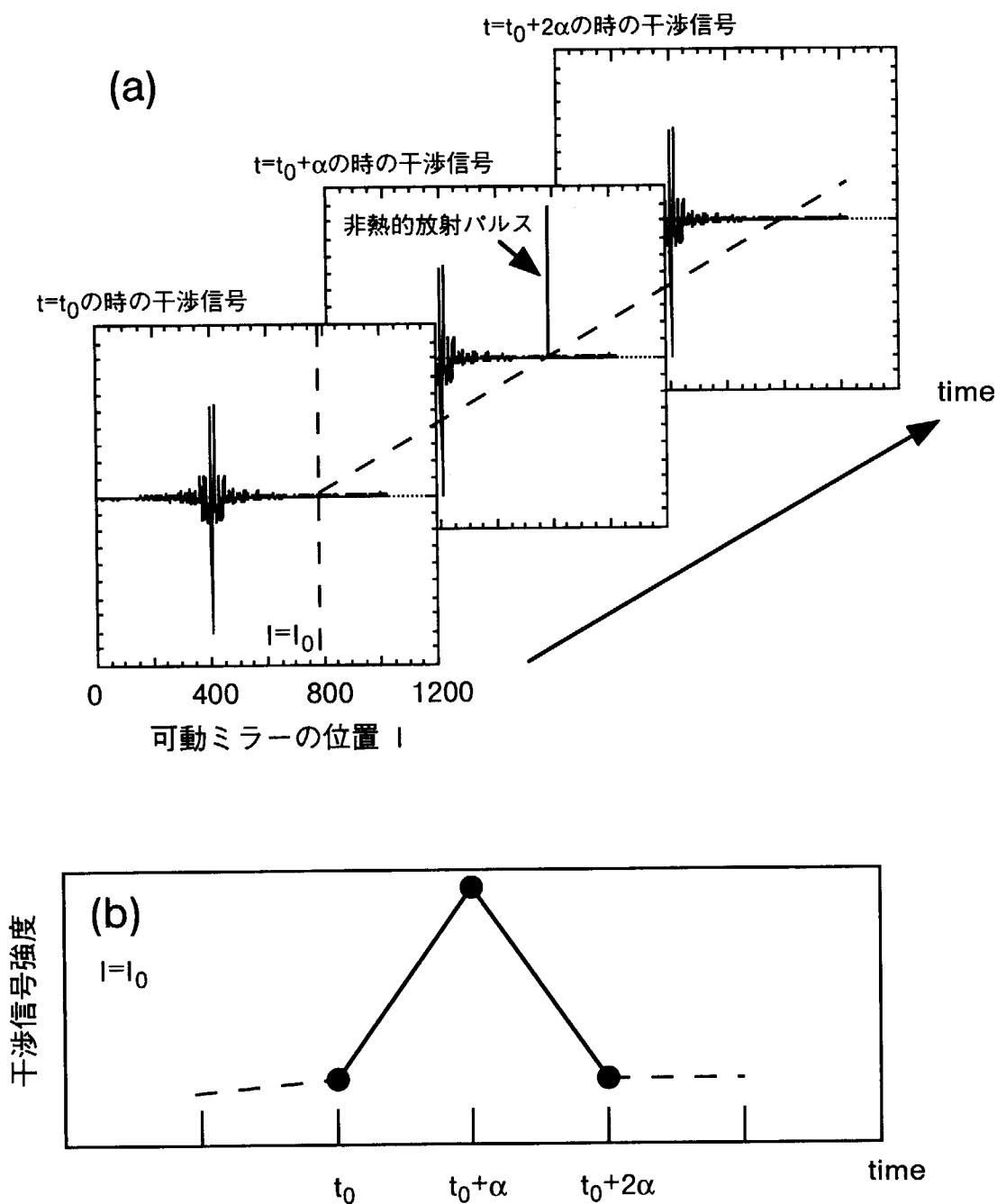


図 7 : (a) 非熱的放射パルスの検出方法の模式図. (b)  $|I|=|I_0|$ における干渉信号の時間発展.

(a)において $|I|=|I_0|$ における干渉信号の時間発展を見ると、(b)のようになる。 $t=t_0+\alpha$ において非熱的放射パルスが混入しているときには、その時刻の干渉信号強度は他の時刻の信号に比べて非常に大きくなるため、検出することができる。

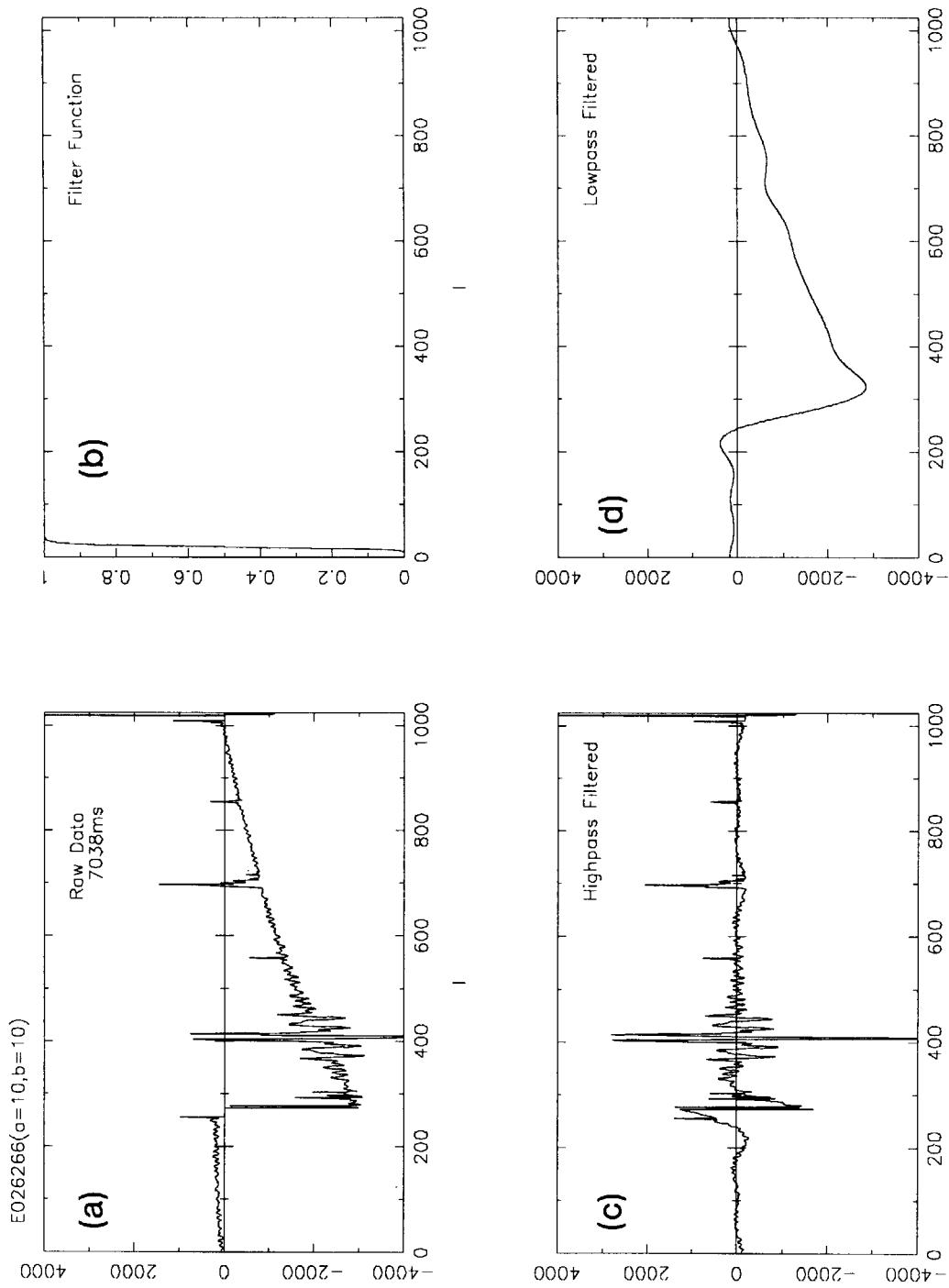


図 8 :  $a=10, b=10$  のときの干渉信号およびフィルタ関数  
 (a) ハイパス・フィルタ印加前の干渉信号, (b) フィルタ関数,  
 (c) ハイパス・フィルタ印加後の干渉信号, (d) ローパス・フィルタ印加後の干渉信号

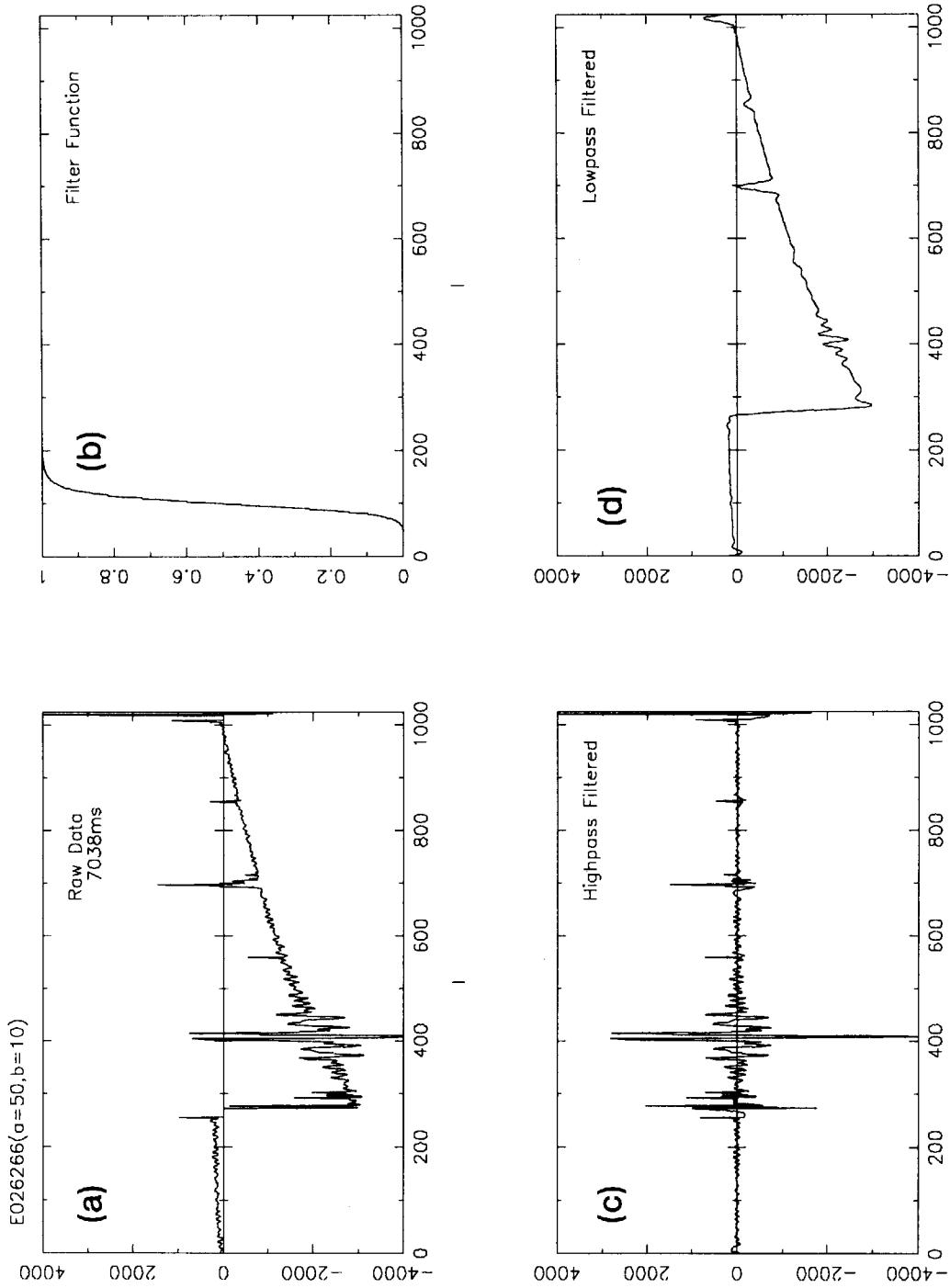


図9 :  $a=50$ ,  $b=10$ のときの干渉信号およびフィルタ関数  
 (a) ハイパス・フィルタ印加前の干渉信号、(b) フィルタ関数、  
 (c) ハイパス・フィルタ印加後の干渉信号、(d) ローパス・フィルタ印加後の干渉信号

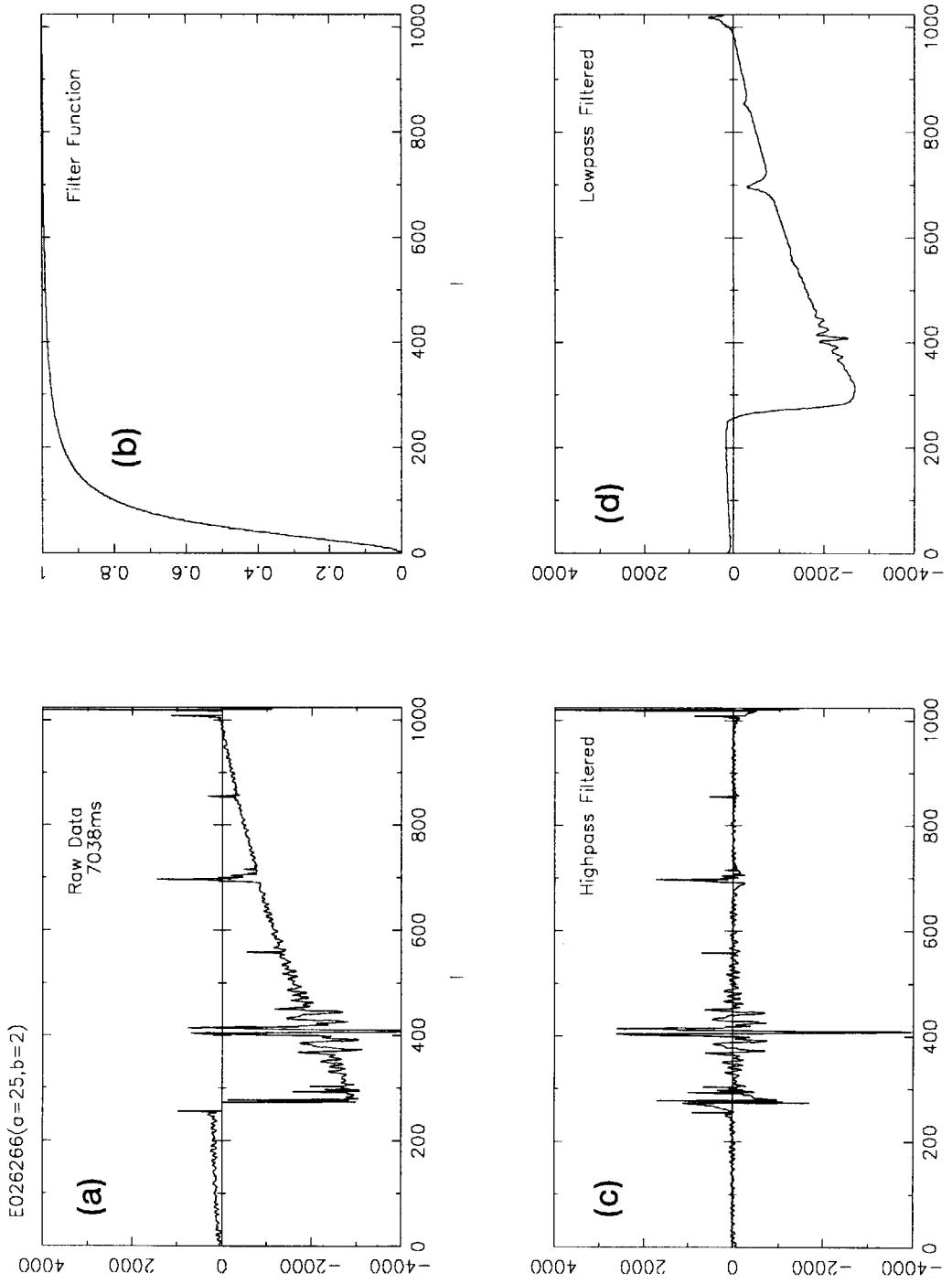


図10： $a=25$ ,  $b=2$ のときの干渉信号およびフィルタ関数  
 (a) ハイパス・フィルタ印加前の干渉信号, (b) フィルタ関数,  
 (c) ハイパス・フィルタ印加後の干渉信号, (d) ローパス・フィルタ印加後の干渉信号

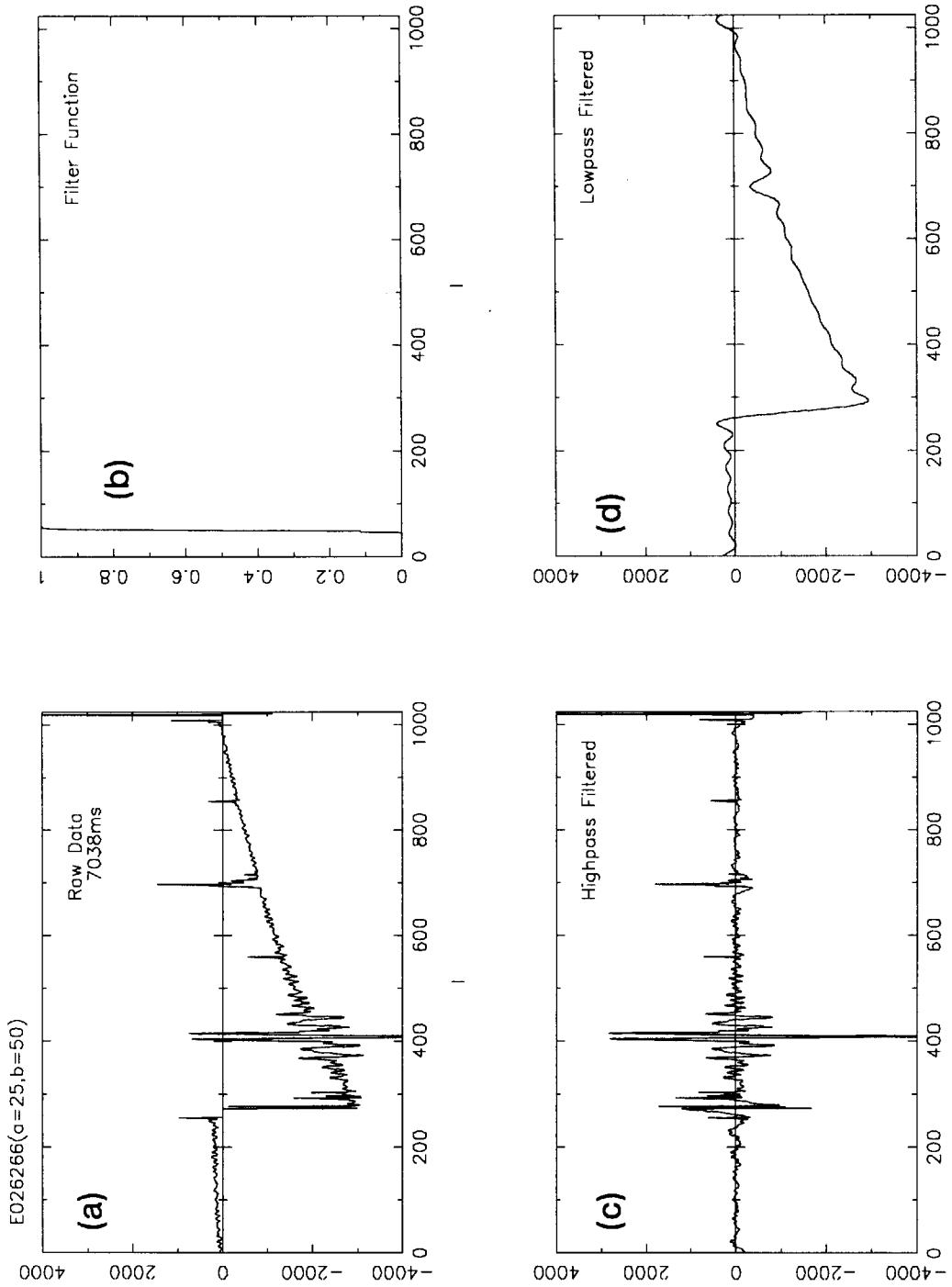


図11： $a=25$ ,  $b=50$ のときの干渉信号およびフィルタ関数  
 (a) ハイパス・フィルタ印加前の干渉信号, (b) フィルタ関数,  
 (c) ハイパス・フィルタ印加後の干渉信号, (d) ローパス・フィルタ印加後の干渉信号

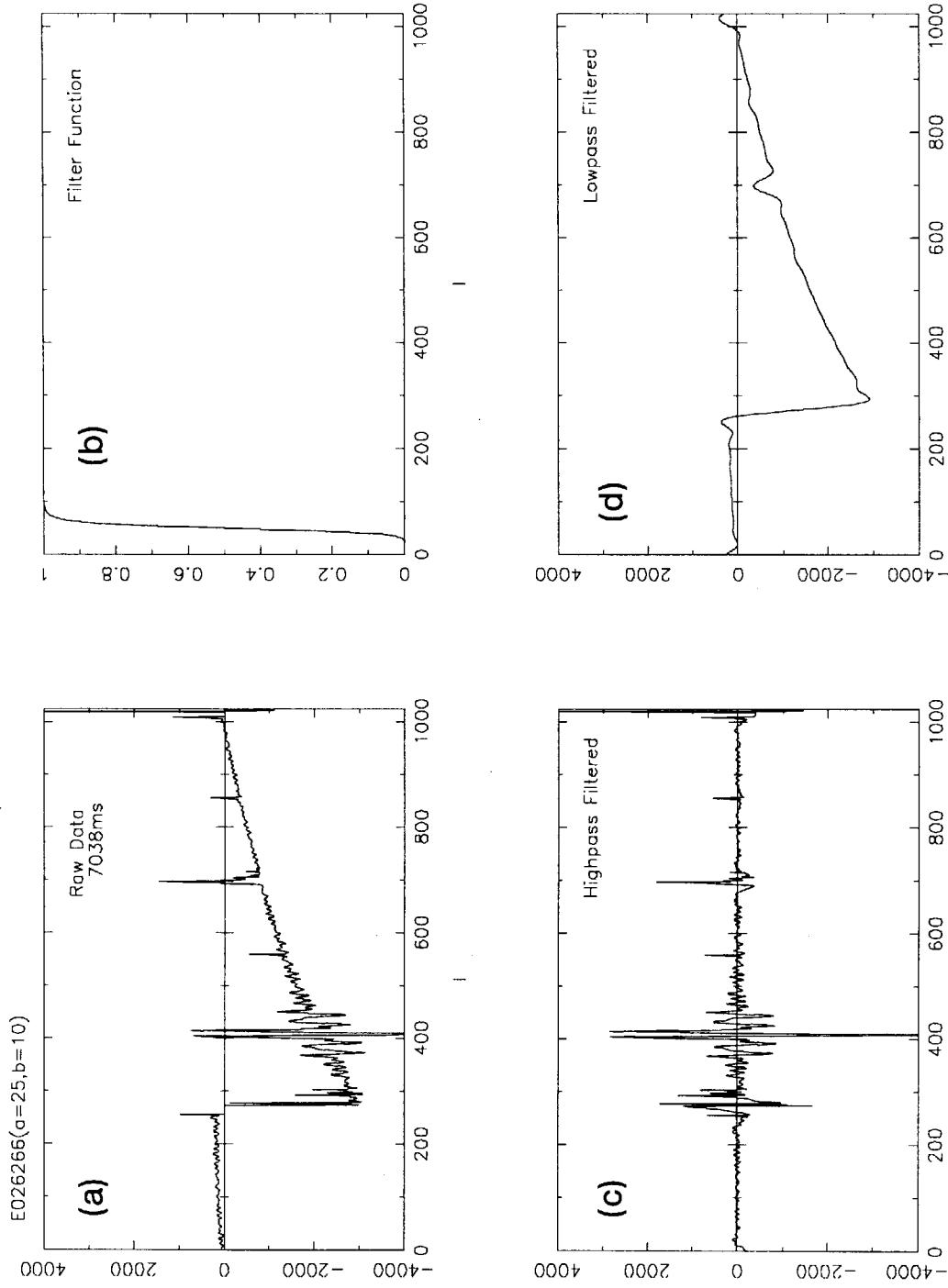


図12： $a=25$ ,  $b=10$ のときの干渉信号およびフィルタ関数  
(a) ハイパス・フィルタ印加前の干渉信号, (b) フィルタ関数,  
(c) ハイパス・フィルタ印加後の干渉信号, (d) ローパス・フィルタ印加後の干渉信号

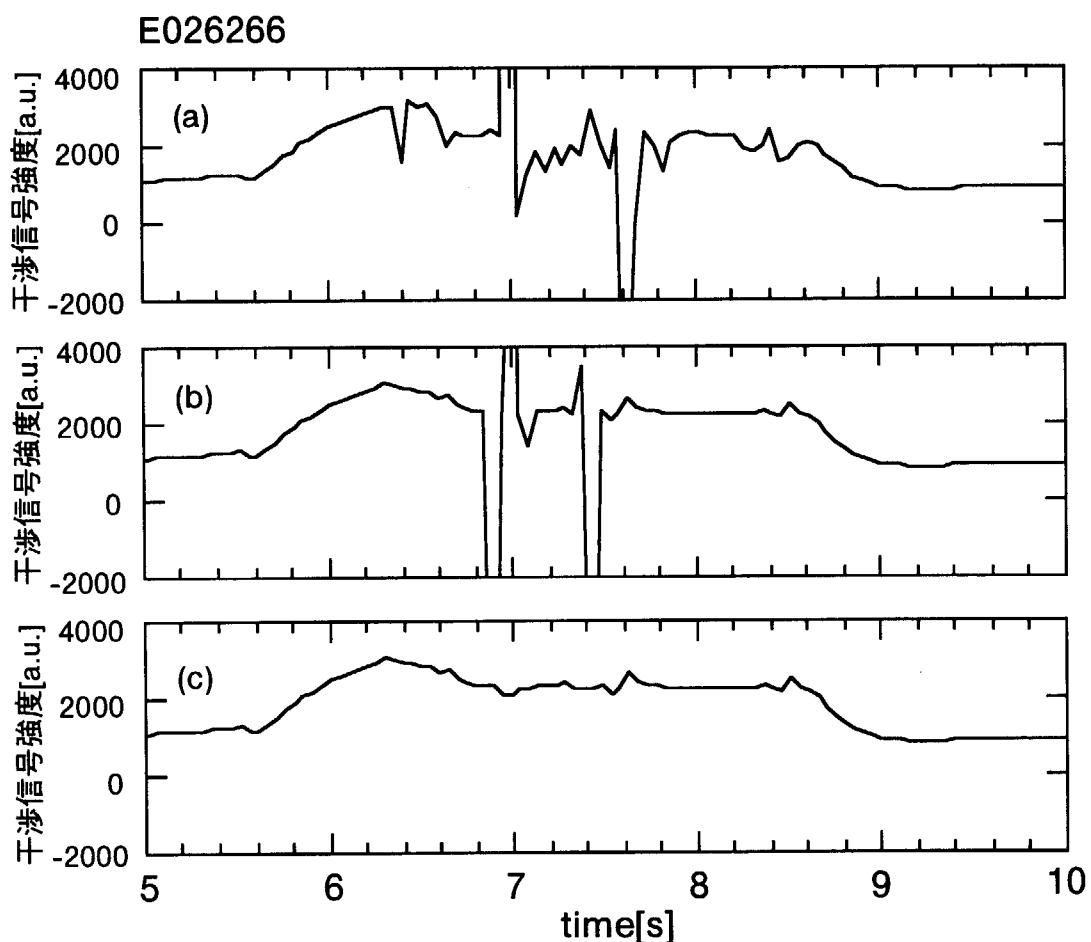


図13：光路差 = 0 となる位置近辺( $l=415$ )の干渉信号の時間変化。  
 (a) ハイパス・フィルタ印加前（生データ），(b) ハイパス・  
 フィルタ印加後，(c) 非熱的放射パルス除去後

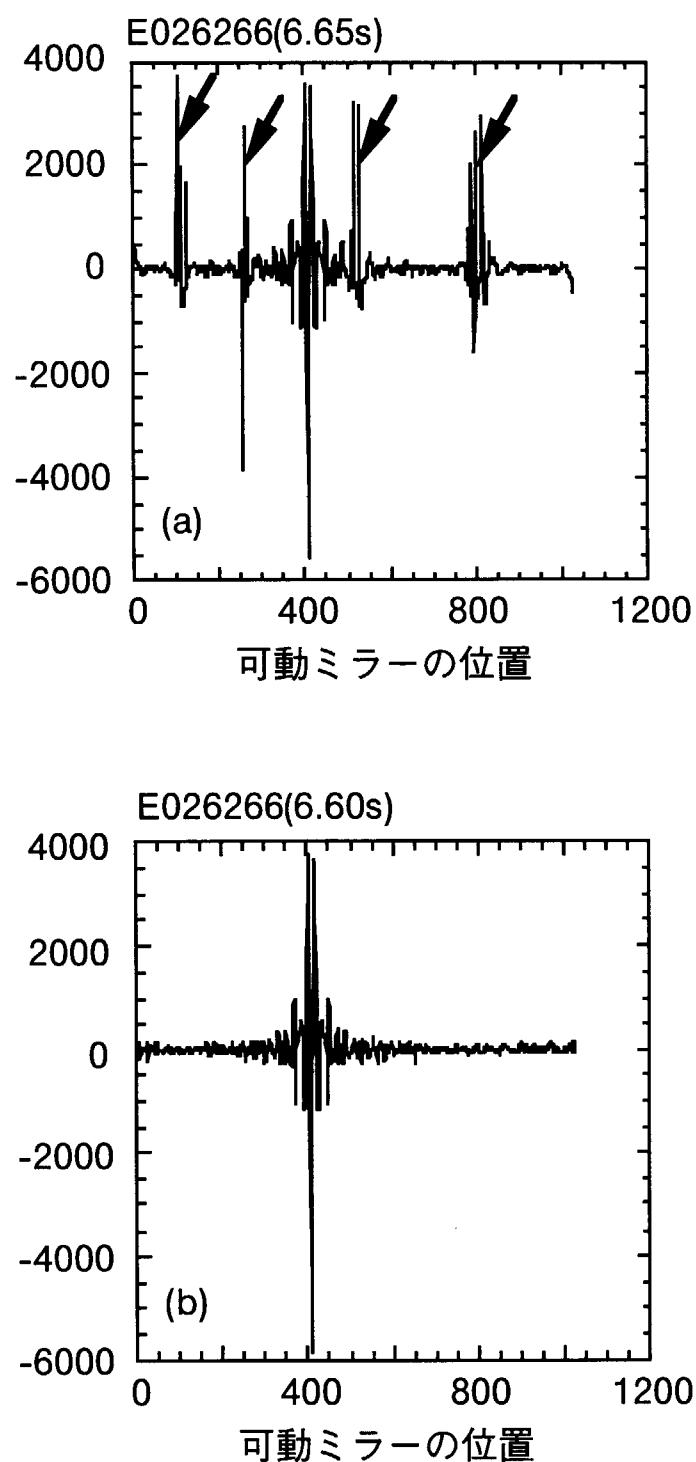


図14：(a) 補正対象の干渉信号および(b) 1時刻前の干渉信号。 (a) と (b) を比べ、設定値よりも変化が大きければ(a) の信号値を当てはめる。

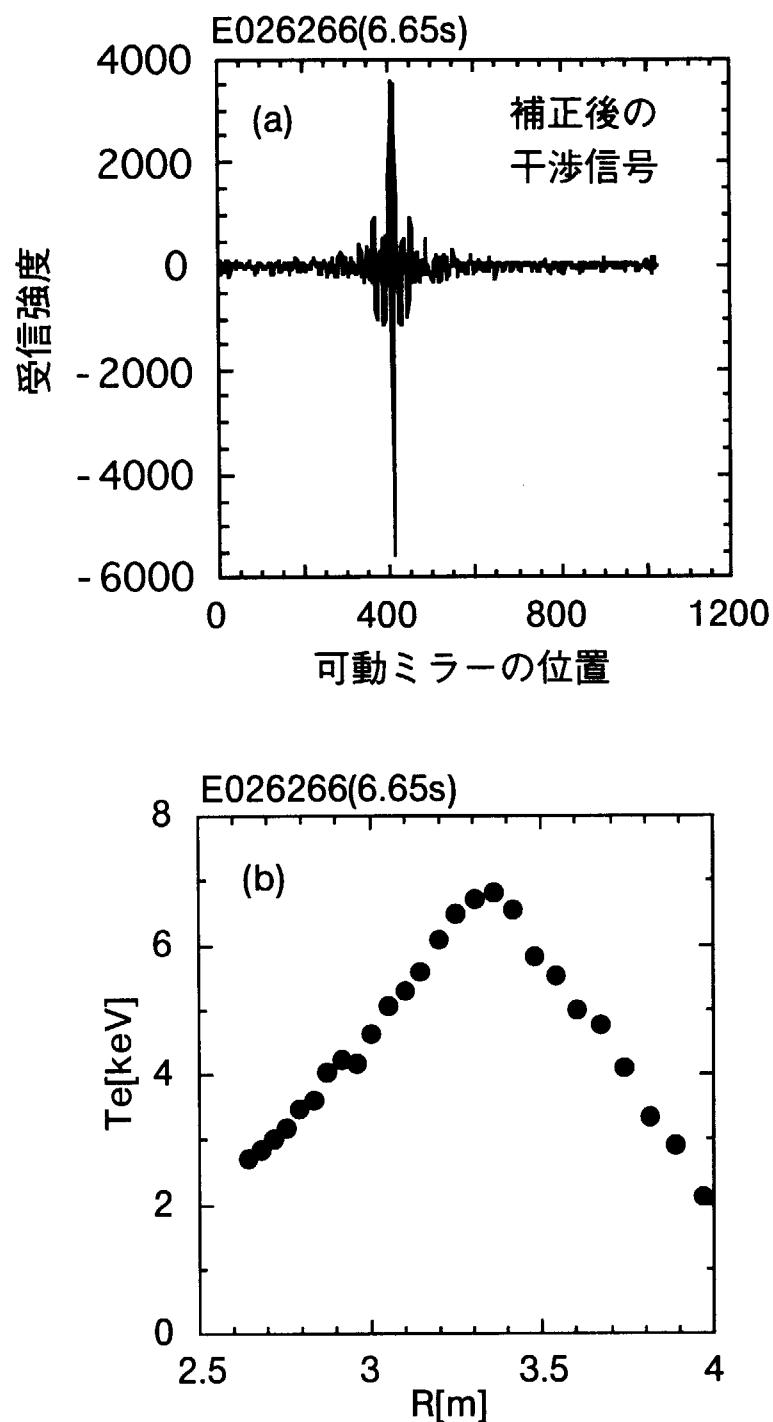


図15：(a) 補正後の干渉信号、および(b) 補正後の干渉信号をフーリエ変換して得られる電子温度分布

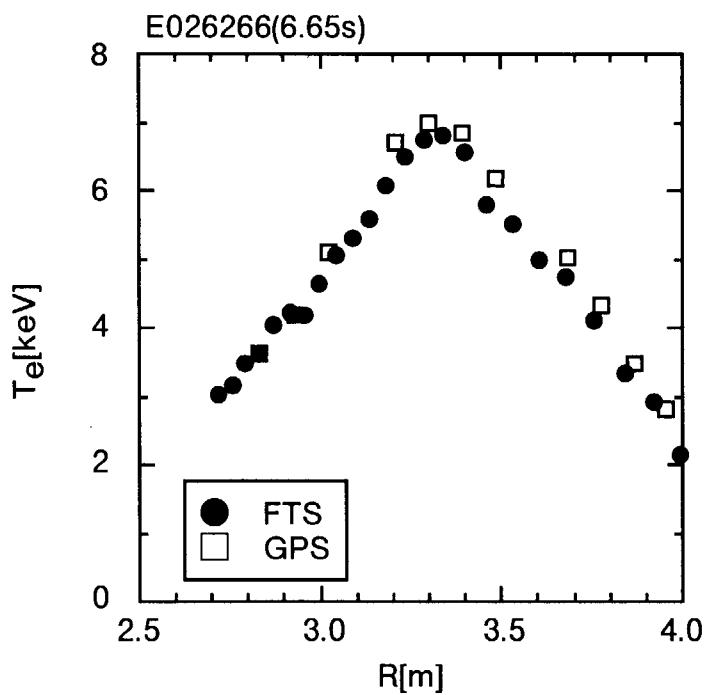


図16：フーリエ変換分光装置（FTS）および回折格子型分光装置（GPS）で測定した、図1の放電の  $t=6.65$  秒における電子温度分布

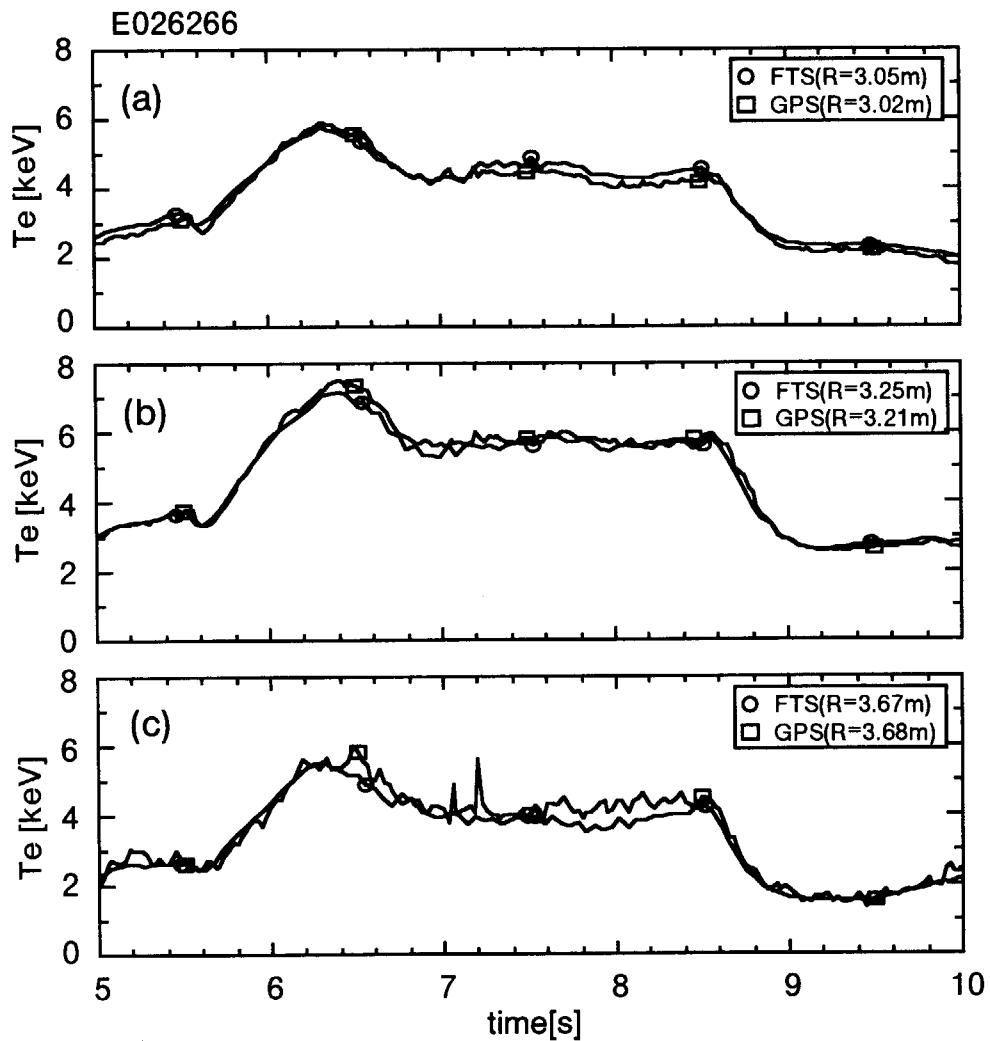


図17：フーリエ変換分光装置（FTS）および回折格子型分光装置（GPS）で測定した電子温度分布の時間発展。(a)はプラズマ中心より強磁場側、(b) プラズマ中心付近、(c) プラズマ中心より弱磁場側の電子温度に対応する。

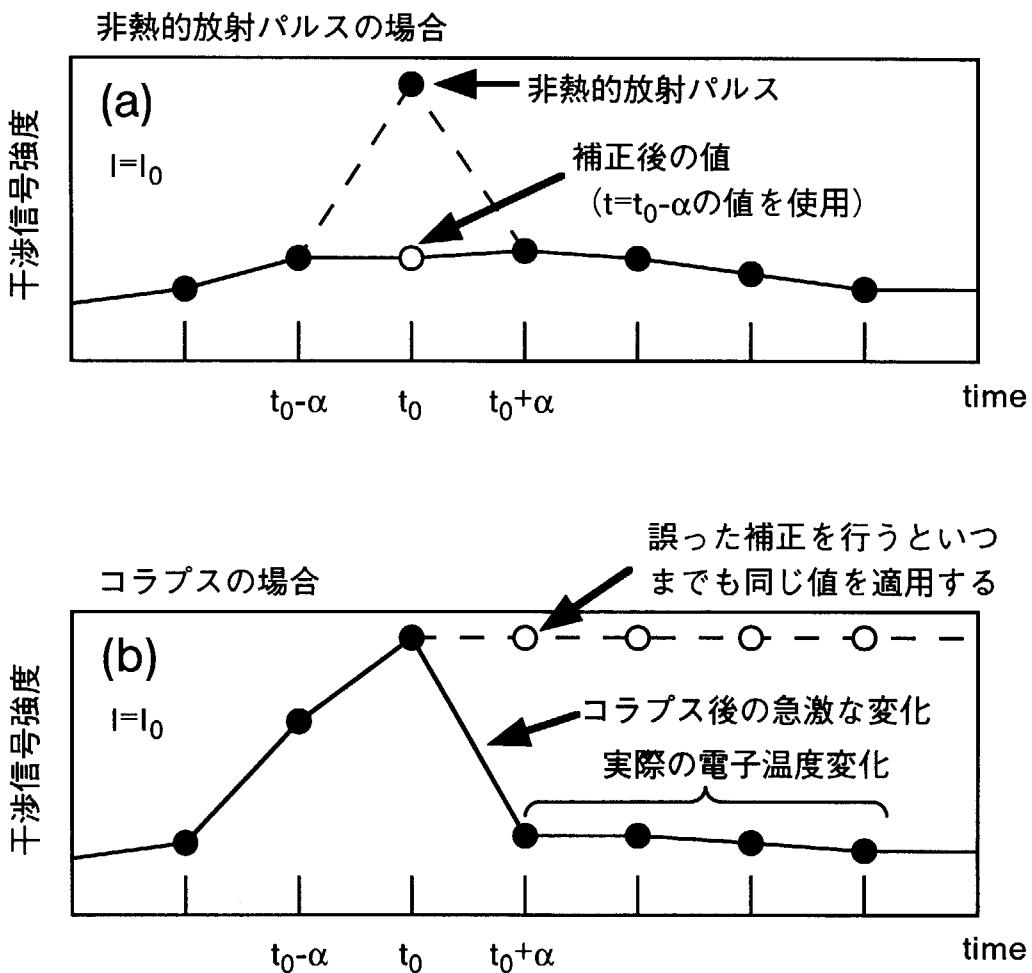


図18：(a) 非熱的放射パルス混入時、および(b) コラプス発生時の干渉信号の変化の概念図。●は計測データ、○は補正データを表す。非熱的放射パルス混入時は多くの場合1度補正を行えば( $t=t_0$ )補正を行わなくてもよい点が現れる( $t=t_0+\alpha$ )が、コラプス発生時の急激な変化で誤った判断をすると補正を行わなくてもよい点がなかなか現れない。

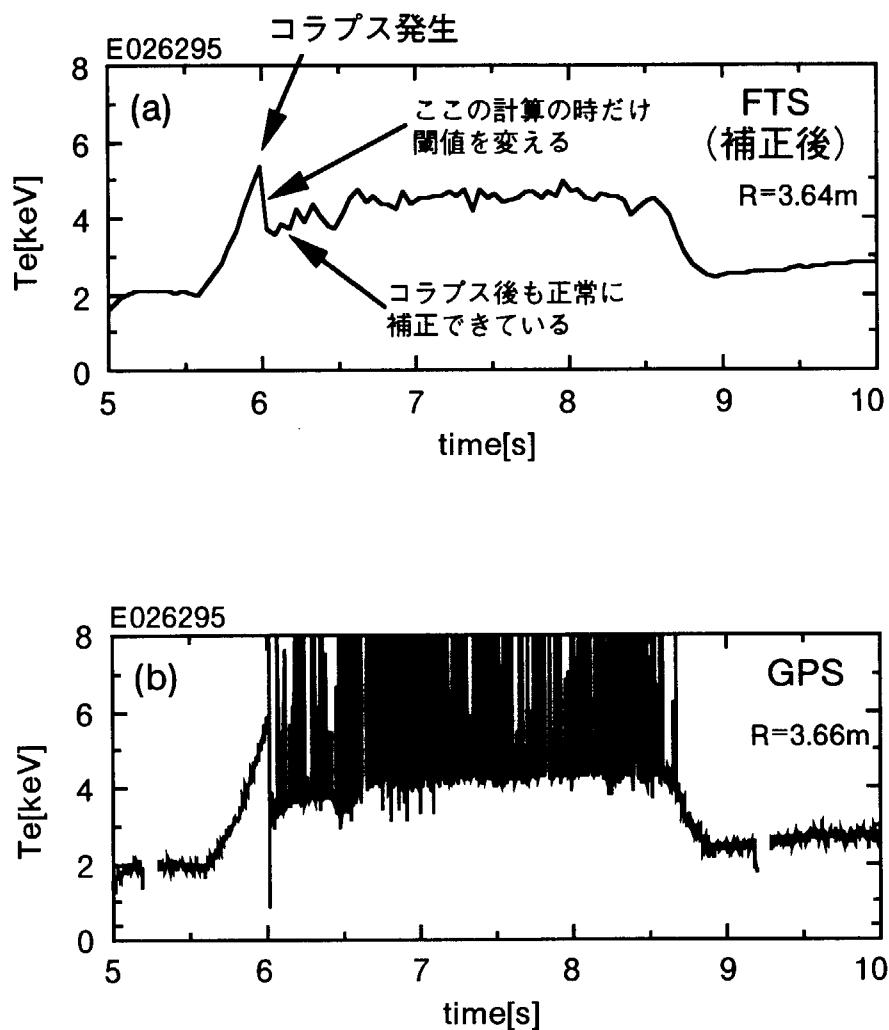


図19：コラプスが発生した放電における、(a)補正後のフーリエ変換分光装置の結果、および(b)回折格子型分光装置の結果

## 付録1 フーリエ変換分光法の原理

フーリエ変換分光法の原理を図A.1を用いて示す。振幅  $E$ , 波数  $\sigma$  の単色光がマイケルソン干渉計に入射する場合を考える。ビームスプリッタにより入射光は反射率  $r$ , 透過率  $t$  でそれぞれ固定ミラー, 可動ミラーに向かうものに分けられる。各ミラーで反射した後, 光は再びビームスプリッタにより分けられる。最終的に検出器に向かうのは, 固定ミラーで反射した後ビームスプリッタを透過した成分と可動ミラーで反射した後ビームスプリッタ成分で反射した成分であるので, 出力光の振幅を  $V$  とおくと, 次のように書ける。

$$V = rtE \left[ \exp(-2\pi i \sigma x_1) + \exp(-2\pi i \sigma x_2) \right] \quad (\text{A. } 1)$$

また, 出力光の強度を  $I$  とおくと, 次のように書ける。

$$I_0 = VV^* = 4rr^*tt^*EE^* \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi\sigma x) \right] \quad (\text{A. } 2)$$

$V^*$ ,  $r^*$ ,  $t^*$ ,  $E^*$  はそれぞれ  $V$ ,  $r$ ,  $t$ ,  $E$  の複素共役であることを表す。 $I_0$  の交流成分を改めて  $I$  とおくと, 次のように書ける。

$$I = 4rr^*tt^*EE^* \times \frac{1}{2} \cos(2\pi\sigma x) \equiv S_0(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) \quad (\text{A. } 3)$$

スペクトルが単色光ではなく, 波数  $\sigma_1 \sim \sigma_2$  を含んでいると,  $I(x)$  は

$$I(x) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} S_0(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) d\sigma \quad (\text{A. } 4)$$

と書ける。 $\sigma < 0$  の領域に対して  $S_0(-\sigma) = S_0(\sigma)$  と定義し, 積分範囲を  $-\infty$  から  $\infty$  まで拡張すると,  $I(x)$  は次のように書ける。

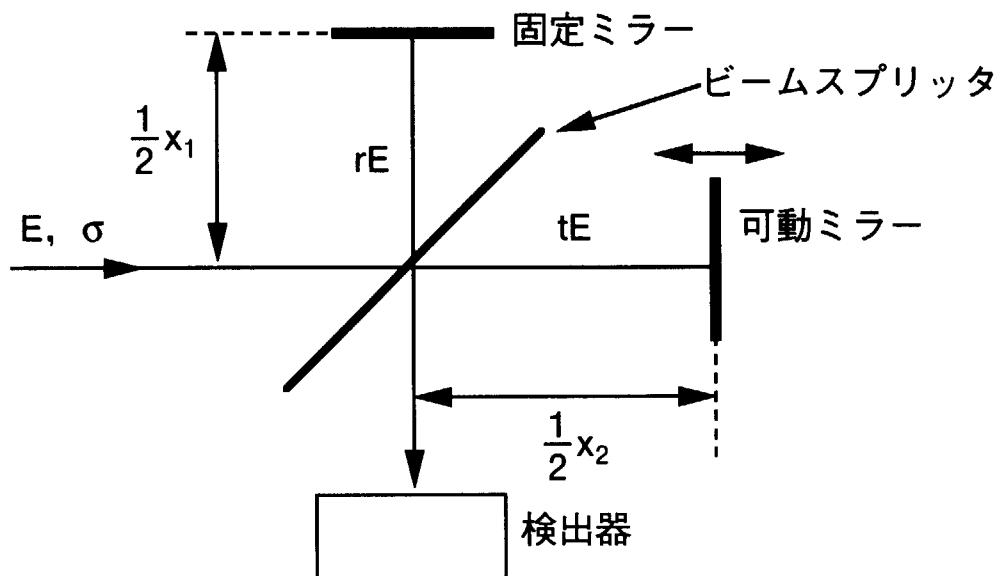
$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) d\sigma = 2 \int_0^{\infty} S(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) d\sigma \quad (\text{A. } 5)$$

ただし,  $S(\sigma) = \frac{1}{2} [S_0(\sigma) + S_0(-\sigma)]$  である。

式(A.5)より, 求めるスペクトル  $S$  は  $I(x)$  をフーリエ余弦変換することにより得られる。すなわち,

$$S(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cos(2\pi\sigma x) dx = 2 \int_0^{\infty} I(x) \cos(2\pi\sigma x) dx \quad (\text{A. } 6)$$

である。



図A.1：フーリエ変換分光器の概略図。 $r$ ,  $t$  はそれぞれビームスプリッタの反射率、透過率である。振幅  $E$ 、波数  $\sigma$  の入射光は、ビームスプリッタで分けられる。分けられた光のうち、①固定ミラーで反射した後ビームスプリッタを透過した成分と②可動ミラーで反射した後ビームスプリッタで反射した成分が検出器に向かう。

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 u の値は CODATA の 1986 年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は、JIS では流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC 関係理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHg を表2のカテゴリに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
								= 4.184 J (熱化学)	
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	= 4.1855 J (15 °C)	
9.80665		1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)	
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (PS)	= 75 kgf·m/s	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	6.58515 × 10 <sup>21</sup>		= 735.499 W	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	8.46233 × 10 <sup>18</sup>			
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>			
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>					

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
									= 4.184 J (熱化学)	
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100		1	3876	= 4.1855 J (15 °C)	
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1		2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	= 4.1868 J (国際蒸気表)	

(86年12月26日現在)

フーリエ変換分光法によるE-IM付きHモードプラズマの電子温度分布測定  
—非熱的放射パルス除去—