

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5854381号
(P5854381)

(45) 発行日 平成28年2月9日(2016.2.9)

(24) 登録日 平成27年12月18日(2015.12.18)

(51) Int.Cl.		F I	
H05H	1/00	(2006.01)	H05H 1/00 A
G01N	21/21	(2006.01)	G01N 21/21 Z
G01J	5/58	(2006.01)	G01J 5/58
G21B	1/05	(2006.01)	G21B 1/00 A

請求項の数 6 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2011-274818 (P2011-274818)	(73) 特許権者	505374783
(22) 出願日	平成23年12月15日(2011.12.15)		国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
(65) 公開番号	特開2013-125699 (P2013-125699A)		茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地
(43) 公開日	平成25年6月24日(2013.6.24)		1
審査請求日	平成26年11月5日(2014.11.5)	(74) 代理人	100100549
			弁理士 川口 嘉之
		(74) 代理人	100090516
			弁理士 松倉 秀実
		(74) 代理人	100113608
			弁理士 平川 明
		(72) 発明者	今澤 良太
			茨城県那珂市向山801番地1 独立行政 法人日本原子力研究開発機構 那珂核融合 研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 算出装置、算出方法、算出プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

プラズマに入射するレーザーの偏光の方位角、楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角、楕円率角を取得する取得部と、

前記プラズマに入射するレーザーの偏光の前記方位角、前記楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の前記方位角と前記楕円率角とに基づいて、前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布のうち1つ以上を算出する算出部と、
を備える算出装置。

【請求項2】

プラズマに入射するレーザーの偏光の方位角、楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角、楕円率角を取得する取得部と、

前記プラズマに入射するレーザーの偏光の前記方位角、前記楕円率角、所定のパラメータを含む所定の数理モデルに基づいて前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角および楕円率角をシミュレートし、当該方位角および当該楕円率角と前記取得部が取得した前記プラズマを通過したレーザーの偏光の前記方位角および前記楕円率角とに基づいて算出される指標値が所定値未満になるまで前記パラメータの値の変更を繰り返し、前記指標値が前記所定値未満の時の前記パラメータの値に基づいて前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布のうち1つ以上を算出する算出部と、
を備える算出装置。

【請求項3】

10

20

コンピュータが、
プラズマに入射するレーザーの偏光の方位角、楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角、楕円率角を取得するステップと、
前記プラズマに入射するレーザーの偏光の前記方位角、前記楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の前記方位角と前記楕円率角とに基づいて、前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布のうち1つ以上を算出するステップと、
 を実行する算出方法。

【請求項4】

コンピュータが、
前記プラズマに入射するレーザーの偏光の前記方位角、前記楕円率角、プラズマに入射するレーザーの偏光の方位角、楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角、楕円率角を取得するステップと、

前記プラズマに入射するレーザーの偏光の前記方位角、前記楕円率角、所定のパラメータを含む所定の数理モデルに基づいて前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角および楕円率角をシミュレートし、当該方位角および当該楕円率角と前記取得部が取得した前記プラズマを通過したレーザーの偏光の前記方位角および前記楕円率角とに基づいて算出される指標値が所定値未満になるまで前記パラメータの値の変更を繰り返し、前記指標値が前記所定値未満の時の前記パラメータの値に基づいて前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布のうち1つ以上を算出するステップと、
 を実行する算出方法。

【請求項5】

コンピュータに、
プラズマに入射するレーザーの偏光の方位角、楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角、楕円率角を取得するステップと、
前記プラズマに入射するレーザーの偏光の前記方位角、前記楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の前記方位角と前記楕円率角とに基づいて、前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布のうち1つ以上を算出するステップと、
 を実行させる算出プログラム。

【請求項6】

コンピュータに、
プラズマに入射するレーザーの偏光の方位角、楕円率角、前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角、楕円率角を取得するステップと、

前記プラズマに入射するレーザーの偏光の前記方位角、前記楕円率角、所定のパラメータを含む所定の数理モデルに基づいて前記プラズマを通過したレーザーの偏光の方位角および楕円率角をシミュレートし、当該方位角および当該楕円率角と前記取得部が取得した前記プラズマを通過したレーザーの偏光の前記方位角および前記楕円率角とに基づいて算出される指標値が所定値未満になるまで前記パラメータの値の変更を繰り返し、前記指標値が前記所定値未満の時の前記パラメータの値に基づいて前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布のうち1つ以上を算出するステップと、
 を実行させる算出プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、プラズマ内部の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布を算出する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

核融合プラズマにおいてプラズマ内部の磁場分布を非接触で測定する方法として、レーザーの偏光を利用する方法がある。直線偏光したレーザーがプラズマに入射されると、プラズマとレーザー（電磁波）との相互作用により、その偏光面が回転するとともに楕円化

10

20

30

40

50

する。この方法では、レーザーの偏光面の回転角に基づいて、磁場分布を算出する。具体的には、複数のレーザーをプラズマに入射し、それらの偏光面の回転角と整合するようにプラズマ内部の磁場分布を推定することにより、磁場分布を算出する。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献1】F. HOFMANN, G. TONETTI, "TOKAMAK EQUILIBRIUM RECONSTRUCTION USING FARADAY ROTATION MEASUREMENTS", NUCLEAR FUSION, Vol. 28, No. 10, pp. 1871-1878(1998).

【非特許文献2】G. Braithwaite, et al., "JET polari-interferometer", Rev. Sci. Instrum., Vol. 60, No. 9, pp. 2825-2834(1989). 10

【非特許文献3】Ch. Fuchs and H. J. Hartfuss, "Cotton-Mouton Effect Measurement in a Plasma at the W7-AS Stellarator", PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol. 81, No. 8 (1998).

【非特許文献4】T. Akiyama, et al. "CO2 laser polarimeter for electron density profile measurement on the Large Helical Device", Rev. Sci. Instrum., Vol. 74, 2695(2003).

【非特許文献5】R. Imazawa, et al. "A new approach of equilibrium reconstruction for ITER", Nucl. Fusion, Vol. 51, 113022(2011).

【発明の概要】 20

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

レーザーの偏光面の変化(回転と楕円化)は、レーザー光路上の磁場分布および電子密度分布の情報を有しているが、この変化量からプラズマ内部の磁場分布および電子密度分布の両方を同時に求めることは困難である。そのため、どちらか一方の情報を別の方法で得る必要があった。つまり、偏光計の測定値から磁場分布を算出するには、電子密度計測装置(干渉計、反射計、トムソン散乱計など)によってプラズマ内部の電子密度分布を得ておく必要がある。このような例として非特許文献1および非特許文献2が挙げられる。一方、偏光計の測定値から電子密度分布を算出するには、プラズマ内部の磁場分布を得ておく必要がある。このような例として非特許文献4が挙げられる。また、非特許文献2および非特許文献3は、事前に得ている磁場分布を利用し、偏光計の測定値から計測視線上の電子密度の線積分量を計測したものである。 30

【0005】

プラズマとレーザー(電磁波)との相互作用において、電子温度の寄与(相対論効果)は小さいためこれまで無視されてきた。しかしながら、核融合反応が発生するような高温なプラズマでは相対論効果は無視できない。つまり、偏光計の計測値から磁場分布や電子密度分布を求める際に、相対論効果を考慮する必要がある。電子温度計測装置(トムソン散乱計、電子サイクロトロン放射計など)によって電子温度分布を得ておく必要がある。磁場分布を求める際に、相対論効果を考慮した例として非特許文献5が挙げられる。

【0006】 40

したがって、プラズマ内部の磁場分布を求めるには電子密度分布が必要とされ、電子密度分布を求めるには磁場分布が必要とされる。即ち、プラズマ内部の磁場分布と電子密度分布とを同時に求めることは困難である。そして、高温なプラズマでは相対論効果を考慮するために、さらに電子温度分布も必要となる。

【0007】

本発明は、プラズマ内部の磁場分布、電子密度分布および電子温度分布が未知の場合でも、偏光計の計測値から磁場分布、電子密度分布および電子温度分布を含むプラズマ内部の物理量を同定することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】 50

本発明は、上記課題を解決するために、以下の手段を採用する。

【0009】

即ち、本発明の1つの態様は、
 プラズマを通過したレーザーの偏光面の方位角、楕円率角を取得する取得部と、
 前記方位角と前記楕円率角とに基づいて、前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、
 電子温度分布のうち少なくとも1つを算出する算出部と、
 を備える算出装置である。

【0010】

本発明の他の1つの態様は、
 プラズマを通過したレーザーの偏光面の方位角、楕円率角を取得する取得部と、
 所定のパラメータを含む所定の数理モデルに基づいて前記プラズマを通過したレーザー
 の偏光面の方位角および楕円率角をシミュレートし、当該方位角および当該楕円率角と前
 記取得部が取得した前記方位角および前記楕円率角とに基づいて算出される指標値が所定
 値未満になるまで前記パラメータの値の変更を繰り返し、前記指標値が前記所定値未満の
 時の前記パラメータの値に基づいて前記プラズマ中の磁場分布、電子密度分布、電子温度
 分布のうち少なくとも1つを算出する算出部と、
 を備える算出装置である。

10

【0011】

開示の態様は、プログラムが情報処理装置によって実行されることによって実現されて
 もよい。即ち、開示の構成は、上記した態様における各手段が実行する処理を、情報処理
 装置に対して実行させるためのプログラム、或いは当該プログラムを記録した記録媒体と
 して特定することができる。また、開示の構成は、上記した各手段が実行する処理を情報
 処理装置が実行する方法をもって特定されてもよい。

20

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、プラズマ内部の磁場分布および電子密度分布の両方が未知の場合でも
 、磁場分布、電子密度分布および電子温度分布を含むプラズマ内部の物理量を同定するこ
 とができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】図1は、一般の楕円に対する楕円率、楕円率角および方位角の例を示す図である
 。

30

【図2】図2は、本実施形態の算出装置の例を示す図である。

【図3】図3は、情報処理装置の例を示す図である。

【図4】図4は、算出装置の動作フローの例を示す図である。

【図5】図5は、本実施形態の算出装置の算出結果の具体例（磁場分布）を示す図である
 。

【図6】図6は、本実施形態の算出装置の算出結果の具体例（電子密度分布）を示す図で
 ある。

【図7】図7は、本実施形態の算出装置の算出結果の具体例（電子温度分布）を示す図で
 ある。

40

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下、図面を参照して実施形態について説明する。実施形態の構成は例示であり、開示
 の構成は、開示の実施形態の具体的構成に限定されない。開示の構成の実施にあたって、
 実施形態に応じた具体的構成が適宜採用されてもよい。

【0015】

〔実施形態〕

（機能概要）

本実施形態の算出装置は、プラズマ内部に入射される直線偏光したレーザーとプラズマ

50

との相互作用によるレーザーの偏光に基づいて、プラズマ内部の磁場分布、電子密度分布、電子温度分布を算出する。ここで、プラズマは所定領域内に閉じ込められている。レーザーは、プラズマの所定領域の境界の所定の位置（始点とする）から入射され、始点と異なるプラズマの所定領域の境界の所定の位置（終点とする）から出射される。このレーザーの始点および終点を通る直線を視線ともいう。また、プラズマに入射されるレーザー自体を視線ということもある。さらに、始点から終点へ方向を視線方向ともいう。1つのプラズマに対して、始点および終点の異なる複数の視線が設定され得る。偏光計は、始点から直線偏光したレーザーを入射し、終点で偏光したレーザーを検出する。本実施形態の算出装置は、所定領域内に閉じ込められているプラズマ内部の磁場分布等を算出する。

【0016】

直線偏光したレーザーがプラズマに入射すると、プラズマと電磁波との相互作用により、レーザーは楕円偏光になる。本実施形態の算出装置は、プラズマを通過したレーザーの楕円偏光の方位角および楕円率角を使用して、磁場分布、電子密度分布、電子温度分布を算出する。レーザーの楕円偏光の方位角および楕円率角は、偏光計によって計測されうる。

【0017】

ここで、レーザー伝搬方向をz方向とするデカルト座標系xyzを想定し、x軸と楕円偏光の楕円の長軸の方向とのなす角を方位角という。x軸は核融合装置におけるトロイダル磁場の方向にとる。楕円偏光の楕円の長軸の長さbと短軸の長さaとの比を楕円率という。また、楕円率は、楕円率角の正接（タンジェント）である。即ち、楕円率をE、楕円率角をεとすると、次の関係がある。

【0018】

【数1】

$$E = \tan \varepsilon = \frac{a}{b}$$

図1は、一般の楕円に対する楕円率、楕円率角および方位角の例を示す図である。図1の例では、楕円ELに対して、長軸の長さがb、短軸の長さがa、楕円率角がεとなる。また、方位角はθとなる。

【0019】

（構成例）

図2は、本実施形態の算出装置の例を示す図である。算出装置100は、第1取得部102、第2取得部104、演算部106、比較部108、格納部110を有する。これらの機能部のうち、いずれか2以上の機能部が、1つの機能部として動作してもよい。例えば、第1取得部102および第2取得部104が、1つの取得部として動作してもよい。また、これらの機能部のうち、1つの機能部が複数の機能部として動作してもよい。

【0020】

第1取得部102は、格納部110に格納される偏光計等によって計測されたレーザーの偏光の方位角、楕円率角、当該レーザーの始点および終点の位置情報、プラズマ領域の境界の位置情報（プラズマ領域の形状の情報）を取得する。これらの情報は、外部の装置（例えば、偏光計など）などから直接取得されてもよい。これらの情報は、演算部106、比較部108で使用されうる。

【0021】

第2取得部104は、格納部110に格納される数理モデルを取得する。取得された数理モデルは、演算部106で使用される。

【0022】

演算部106は、第1取得部102で取得されたプラズマ領域の境界の位置情報、第2取得部104で取得された数理モデル等に基づいて、レーザーの偏光の方位角、楕円率角を演算する。演算部106は、比較部108の比較結果により、数理モデルにおけるフリ

10

20

30

40

50

ーパラメータを変更して、演算を繰り返す。

【 0 0 2 3 】

比較部 1 0 8 は、数理モデルにより算出される物理量と、第 1 取得部 1 0 2 により取得される物理量とを比較する。これらの物理量の差が所定の値以上である場合、演算部 1 0 6 による物理量の算出が繰り返される。

【 0 0 2 4 】

格納部 1 1 0 は、偏光計等によって計測されたレーザーの偏光の方位角、楕円率角、当該レーザーの始点および終点の位置情報、当該レーザーの波長を対応づけて格納する。使用されるレーザーの波長が1種類の場合は、当該レーザーの波長が独立して格納されてもよい。また、格納部 1 1 0 は、プラズマ領域の境界の位置情報を格納する。境界の位置情報は、例えば、プラズマ領域の形状を覆う面の集合として与えられる。また、プラズマ領域の形状が、円筒座標系において、回転方向に依存しない場合、プラズマ領域の境界の位置情報は、円筒座標系における R Z 面の閉曲線として与えられてもよい。また、当該閉曲線は、2 座標 (R , Z) の関係式として与えられてもよい。2 座標の関係式として、例えば、 $(R - a) ^ 2 + Z ^ 2 = b ^ 2$ (a , b は、正の定数。b > a であれば、ドーナツ形状) が挙げられる。また、当該閉曲線は、複数の点の座標と、これらを結ぶ線分の集合による閉曲線 (多角形) として与えられてもよい。トカマクプラズマでは、例えば、プラズマがドーナツ状の形状の真空容器内に閉じ込められる。

【 0 0 2 5 】

格納部 1 1 0 は、1 又は複数の物理量から所定の物理量を算出する数理モデルを格納する。数理モデルは、所定の物理量を算出するための他の物理量の間数、物理量と物理量との関係を示す方程式等である。数理モデルにより、1 又は複数の物理量から所定の物理量が算出される。数理モデルは、例えば、複数の物理量の間数、複数の物理量間の間数を示す連立方程式の係数行列、複数の物理量間の間数微分値、空間微分値等の間数を示す連立方程式の係数行列、所定の物理量を他の 1 以上の物理量の一次式、多項式で示した時の係数等として、格納部 1 1 0 に格納される。また、数理モデルは、複数の物理量間の間数を示す微分方程式または偏微分方程式として格納部 1 1 0 に格納される。当該微分方程式等は、フーリエ変換、ウェーブレット変換、ラプラス変換等されて、代数方程式として格納部 1 1 0 似格納されてもよい。当該間数等に所定の物理量を代入することにより、求める物理量が得られる。格納部 1 1 0 に格納される数理モデルの例として、例えば、G S (Grad-Shafranov) 方程式、ストークス (Stokes) 方程式が挙げられる。また、格納部 1 1 0 に格納される数理モデルの例として、トロイダル電流密度、電子密度、電子温度と、ポロイダルフラックスとの関係がある。

【 0 0 2 6 】

算出装置 1 0 0 は、パーソナルコンピュータ (P C , Personal Computer) 、 P D A (Personal Digital Assistant) のような汎用のコンピュータまたはワークステーション (W S , Work Station) 、サーバマシンのような専用のコンピュータを使用して実現可能である。また、算出装置 1 0 0 は、コンピュータを搭載した電子機器を使用して実現可能である。また、算出装置 1 0 0 は、スマートフォン、携帯電話、カーナビゲーション装置のような専用または汎用のコンピュータ、あるいは、コンピュータを搭載した電子機器を使用して実現可能である。

【 0 0 2 7 】

図 3 は、情報処理装置の例を示す図である。コンピュータ、すなわち、情報処理装置は、プロセッサ、主記憶装置、及び、二次記憶装置や、通信インタフェース装置のような周辺装置とのインタフェース装置を含む。主記憶装置及び二次記憶装置は、コンピュータ読み取り可能な記録媒体である。

【 0 0 2 8 】

コンピュータは、プロセッサが記録媒体に記憶されたプログラムを主記憶装置の作業領域にロードして実行し、プログラムの実行を通じて周辺機器が制御されることによって、所定の目的に合致した機能を実現することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 9 】

プロセッサは、例えば、CPU (Central Processing Unit)、GPU (Graphical Processing Unit) や DSP (Digital Signal Processor) である。主記憶装置は、例えば、RAM (Random Access Memory) や ROM (Read Only Memory) を含む。

【 0 0 3 0 】

二次記憶装置は、例えば、EPROM (Erasable Programmable ROM)、ハードディスクドライブ (HDD、Hard Disk Drive) である。また、二次記憶装置は、リムーバブルメディア、即ち可搬記録媒体を含むことができる。リムーバブルメディアは、例えば、USB (Universal Serial Bus) メモリ、あるいは、CD (Compact Disk) や DVD (Digital Versatile Disk) のようなディスク記録媒体である。

10

【 0 0 3 1 】

通信インタフェース (I/F) 装置は、例えば、LAN (Local Area Network) インタフェースボードや、無線通信のための無線通信回路である。

【 0 0 3 2 】

周辺装置は、上記の二次記憶装置や通信インタフェース装置の他、キーボードやポインティングデバイスのような入力装置や、ディスプレイ装置やプリンタのような出力装置を含む。また、入力装置は、カメラのような映像や画像の入力装置や、マイクロフォンのような音声の入力装置を含むことができる。また、出力装置は、スピーカのような音声の出力装置を含むことができる。

【 0 0 3 3 】

算出装置 100 を実現するコンピュータは、プロセッサが二次記憶装置に記憶されているプログラムを主記憶装置にロードして実行することによって、第1取得部 102、第2取得部 104、演算部 106、比較部 108 としての機能を実現する。また、プログラムが実行される際に使用されるデータは、主記憶装置または二次記憶装置に格納される。プログラムが実行される際に使用されるデータは、通信インタフェースに接続されるネットワークを介して入力されても、ユーザ等によって入力装置等により入力されてもよい。

20

【 0 0 3 4 】

格納部 110 は、例えば、主記憶装置、二次記憶装置によって実現される。

【 0 0 3 5 】

一連の処理は、ハードウェアにより実行させることもできるが、ソフトウェアにより実行させることもできる。

30

【 0 0 3 6 】

プログラムを記述するステップは、記載された順序に沿って時系列的に行われる処理はもちろん、必ずしも時系列的に処理されなくても、並列的または個別に実行される処理を含む。

【 0 0 3 7 】

(動作例)

図4は、算出装置 100 の動作フローの例を示す図である。

【 0 0 3 8 】

算出装置 100 の第1取得部 102 は、格納部 110 から、偏光計等によって計測されたレーザーの偏光の方位角、楕円率角、当該レーザーの始点および終点の位置情報、当該レーザーの波長、プラズマ領域の境界の位置情報を取得する (S101)。第1取得部 102 は、複数の視線についての方位角、楕円率角、始点および終点の位置情報を取得する。第1取得部 102 は、各視線についての、始点および終点における、方位角および楕円率角を取得する。始点における、レーザーの偏光の方位角および楕円率角は、例えば、プラズマに入射するレーザーの方位角および楕円率角として取得される。第1取得部 102 は、外部装置である偏光計から直接、レーザーの偏光の方位角、楕円率角、当該レーザーの始点および終点の位置情報を取得してもよい。プラズマ領域の境界は、最外殻磁気面ともいう。ここでは、プラズマ領域の境界面は、円筒座標系において、回転方向に依存しない形状をしているとする。即ち、プラズマ領域の境界面は、円筒座標系において、回転方

40

50

向に依存しないRZ面の閉曲線与えられる。また、第1取得部102は、格納部110から、真空トロイダル磁場情報 $R_0 B_{\phi 0}$ (R_0 : 径方向位置、 $B_{\phi 0}$: R_0 での真空トロイダル磁場)を取得する。真空トロイダル磁場 B_{ϕ} は、次の式で表される。

【0039】

【数2】

$$B_{\phi} = \frac{R_0 B_{\phi 0}}{R}$$

算出装置100の第2取得部104は、格納部110から、数理モデルを取得する(S102)。具体的には、第2取得部104は、格納部110から、トロイダル電流密度 j_{ϕ} 、電子密度 n_e 、電子温度 T_e の各式、GS方程式、ストークス方程式等を取得する。

【0040】

算出装置100の演算部106は、ステップS102で取得した情報に基づいて、ポロイダルフラックス、磁場を演算する(S103)。トロイダル電流密度 j_{ϕ} 、電子密度 n_e 、電子温度 T_e をポロイダルフラックスの関数として、次のように表される。ここでRは、半径方向の座標である。トロイダル電流密度 j_{ϕ} 、電子密度 n_e 、電子温度 T_e の具体例については、後に示す。

【0041】

【数3】

$$j_{\phi} = RF(\bar{\psi}, \vec{a}) + \frac{G(\bar{\psi}, \vec{b})}{R}$$

$$n_e = H(\bar{\psi}, \vec{c})$$

$$T_e = I(\bar{\psi}, \vec{d})$$

$\bar{\psi}$: 規格化ポロイダルフラックス

ここで、トロイダル電流密度 j_{ϕ} のフリーパラメータを a_i ($i=1, \dots, NA$) (ベクトル \vec{a})、 b_i ($i=1, \dots, NB$) (ベクトル \vec{b})とする。電子密度 n_e のフリーパラメータを c_i ($i=1, \dots, NC$) (ベクトル \vec{c})とする。電子温度 T_e のフリーパラメータを d_i ($i=1, \dots, ND$) (ベクトル \vec{d})とする。ベクトル \vec{a} 、ベクトル \vec{b} 、ベクトル \vec{c} 、ベクトル \vec{d} を合わせて、ベクトル $(= (a_1 \dots a_{NA} \ b_1 \dots b_{NB} \ c_1 \dots c_{NC} \ d_1 \dots d_{ND})^t)$ ともいう。

【0042】

また、規格化ポロイダルフラックスは、プラズマ領域の境界面(最外殻磁気面)のポロイダルフラックス ψ_{edge} と磁気軸のポロイダルフラックス ψ_{ax} を用いて、次のように定義される。

【0043】

【数4】

$$\bar{\psi} = \frac{\psi - \psi_{edge}}{\psi_{ax} - \psi_{edge}}$$

また、GS方程式は、円筒座標系における半径方向の座標をR、鉛直方向の座標をZとすると、次のよう表される。

【0044】

10

20

30

40

【数 5】

$$R \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} = -2\pi\mu_0 R j_\phi$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率を示す。

【0045】

演算部 106 は、これらの式に基づいて、ポロイダルフラックス を求める。最外殻磁気面の形状は、境界条件として使用されうる。

10

【0046】

また、演算部 106 は、次の式に基づいて、磁場 B (B_R 、 B_ϕ 、 B_Z) を算出する。

【0047】

【数 6】

$$B_R(R, Z) = -\frac{1}{2\pi R} \frac{\partial \psi(R, Z)}{\partial Z}$$

$$B_\phi(R, Z) = \frac{1}{R} \sqrt{(R_0 B_{\phi 0})^2 + 2\mu_0 \int_0^{\bar{\psi}(R, Z)} G(\bar{\psi}, \vec{b}) d\bar{\psi}}$$

20

$$B_Z(R, Z) = \frac{1}{2\pi R} \frac{\partial \psi(R, Z)}{\partial R}$$

次に、演算部 106 は、ステップ S103 で求めたポロイダルフラックス、磁場等を使用して、ストークス方程式を解く (S104)。ここで、レーザーの視線の方向を z 方向とするデカルト座標系 $x y z$ を想定した場合、ストークス方程式は次のように表される。

【0048】

【数 7】

30

$$\frac{d\vec{s}}{dz} = \begin{pmatrix} C_{CM} \lambda^3 n_e B_\perp^2 \cos 2\beta \left(1 + \frac{9}{2} \frac{T_e}{m_e c^2} \right) \\ -C_{CM} \lambda^3 n_e B_\perp^2 \sin 2\beta \left(1 + \frac{9}{2} \frac{T_e}{m_e c^2} \right) \\ 2C_{FR} \lambda^2 n_e B_{//} \left(1 - 2 \frac{T_e}{m_e c^2} \right) \end{pmatrix} \times \vec{s}$$

40

ここで、ベクトル s は、ストークス (Stokes) ベクトルである。 $B_{//}$ は磁場 B の z 成分を、 B_\perp は磁場 B の z 方向に垂直な成分を、 β は B と y 軸とのなす角を、 λ は光 (レーザー) の波長を、 m_e は電子の質量を、 c は光速を表す。

【0049】

C_{FR} 、 C_{CM} は、次のように表される定数である。

【0050】

【数 8】

$$C_{FR} = \frac{e^3}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e^2 c^3}$$

$$C_{CM} = \frac{e^4}{16\pi^3 \epsilon_0 m_e^3 c^4}$$

ここで、 e は素電荷量、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

10

【0051】

ストークスベクトルは、次のように表される。

【0052】

【数 9】

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} \cos 2\varepsilon \cos 2\theta \\ \cos 2\varepsilon \sin 2\theta \\ \sin 2\varepsilon \end{pmatrix}$$

20

θ は方位角、 ε は楕円率角である。演算部 106 は、この方程式から、視線毎に、方位角、楕円率角を算出する。

【0053】

算出装置 100 の比較部 108 は、最小二乗法のコスト関数である χ^2 を計算し、所定値未満であるか否かを判定する (S105)。所定値は、格納部 110 に格納される。 χ^2 は、例えば、次のように表される。

【0054】

【数 10】

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \left\{ (\theta_k^E - \theta_k^G)^2 + (\varepsilon_k^E - \varepsilon_k^G)^2 \right\}$$

30

ここで、 θ_k^E はステップ S104 で得られた k 番目の視線の方位角、 θ_k^G はステップ S101 で得られた k 番目の視線の方位角である。また、 ε_k^E はステップ S104 で得られた k 番目の視線の楕円率角、 ε_k^G はステップ S101 で得られた k 番目の視線の楕円率角である。 N は視線の数 (総数) である。ここで使用される方位角および楕円率角は、それぞれ、レーザーの出射側の位置における方位角および楕円率角である。 χ^2 は、規格化されてもよい。ここでは、レーザーの入射側における、第 1 取得部 102 が取得した方位角および楕円率角と、演算部 106 がステップ S104 で演算した方位角および楕円率角とは、それぞれ、ほぼ同一であるとみなしている。 χ^2 の式において、方位角、楕円率角の代わりに、レーザーの入射側の方位角と出射側の方位角との差である、レーザーの入射側の楕円率角と出射側の楕円率角との差である $\Delta\theta$ が使用されてもよい。 χ^2 の代わりに、他の指標値が使用されてもよい。

40

【0055】

χ^2 が所定値以上である場合 (S105; NO)、処理がステップ S106 に進む。

【0056】

ステップ S106 では、演算部 106 は、ベクトル \vec{s} の各成分の値を、変更する (S106)。演算部 106 は、ベクトル \vec{s} の各成分の値を、 χ^2 がより小さくなるように変更する。即ち、演算部 106 は、ステップ S104 で得られた各視線の方位角および楕円率

50

角が、ステップS 1 0 1で得られた各視線の方位角および楕円率角に収束するように、ベクトル の各成分の値を変更する。

【 0 0 5 7 】

具体的には、例えば、傾斜法が使用される。傾斜法では、ベクトル の成分 (p_i とする) に対して、無次元パラメータ q_i を次のように定義する。

【 0 0 5 8 】

【 数 1 1 】

$$q_i = \frac{p_i}{\Delta p_i}$$

10

ここで、 p_i は、定数であり、ユーザによって指定される値である。例えば、 $p_i = 1$ 等である。次に、勾配ベクトル を次のように定義する。Mは、ベクトル の成分の数である。

【 0 0 5 9 】

【 数 1 2 】

$$\gamma_i = \frac{\frac{\partial \chi^2}{\partial q_i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{\partial \chi^2}{\partial q_j} \right)^2}}$$

20

勾配ベクトル と p_i を用いて、フリーパラメータを次の式により更新する。

【 0 0 6 0 】

【 数 1 3 】

$$p'_i = p_i - \gamma_i \Delta p_i$$

30

ここで、 p'_i は更新後 (変更後) のベクトル の成分である。

【 0 0 6 1 】

また、傾斜法の代わりに、修正Marquardt法、ガウス・ニュートン法などの他の方法が使用されうる。演算部 1 0 6 は、ベクトル を変更すると、変更後のベクトル を用いて、ステップS 1 0 3以降の算出を行う。

【 0 0 6 2 】

ステップS 1 0 5において、 χ^2 が所定値未満である場合 (S 1 0 5 ; Y E S)、算出装置 1 0 0 は処理を終了する。ベクトル の各成分の値は、格納部 1 1 0 に格納される。このときのベクトル を用いて表される、磁場分布、電子密度分布、電子温度分布が、求めるものである。

40

【 0 0 6 3 】

(トロイダル電流密度の具体例)

ここで、トロイダル電流密度 j の F および G の具体例を示す。

【 0 0 6 4 】

【数 1 4】

$$(j_\phi \text{の例 1}) \quad F(\bar{\psi}, \vec{a}) = \sum_i a_i \bar{\psi}^i$$

$$G(\bar{\psi}, \vec{b}) = \sum_i b_i \bar{\psi}^i$$

$$(j_\phi \text{の例 2}) \quad F(\bar{\psi}, \vec{a}) = \sum_i a_i \bar{\psi}^i$$

$$G(\bar{\psi}, \vec{b}) = g \frac{dg}{d\psi}, \quad g(\bar{\psi}, \vec{b}) = \sum_i b_i \bar{\psi}^i$$

$$(j_\phi \text{の例 3}) \quad F(\bar{\psi}, \vec{a}) = a_1 \bar{\psi}^{a_2}$$

$$G(\bar{\psi}, \vec{b}) = b_1 \bar{\psi}^{b_2}$$

$$(j_\phi \text{の例 4}) \quad F(\bar{\psi}, \vec{a}) = a_1 \bar{\psi}^{a_2}$$

$$G(\bar{\psi}, \vec{b}) = g \frac{dg}{d\psi}, \quad g(\bar{\psi}, \vec{b}) = b_1 \bar{\psi}^{b_2}$$

$$(j_\phi \text{の例 5}) \quad F(\bar{\psi}, \vec{a}) = \sum_i a_i \bar{\psi}^i$$

$$G(\bar{\psi}, \vec{b}) = b_1 F(\bar{\psi}, \vec{a})$$

$$(j_\phi \text{の例 6}) \quad F(\bar{\psi}, \vec{a}) = \left\{ 1 - (1 - \bar{\psi})^{a_1} \right\}^{a_2} \left\{ 1 - a_3 \left(\frac{\bar{\psi} - a_4}{1 - a_4} \right)^2 \right\}$$

$$G(\bar{\psi}, \vec{b}) = b_1 F(\bar{\psi}, \vec{a})$$

【0 0 6 5】

(電子密度の具体例)

ここで、電子密度 n_e の具体例を示す。

【0 0 6 6】

【数 1 5】

$$(n_e \text{の例 1}) \quad n_e = \sum_i c_i \bar{\psi}^{i-1}$$

$$(n_e \text{の例 2}) \quad n_e = c_1 + c_2 \bar{\psi}^{c_3}$$

$$(n_e \text{の例 3}) \quad n_e = c_1 + c_2 \left\{ 1 - (1 - \bar{\psi})^{c_3} \right\}^{c_4}$$

【0 0 6 7】

10

20

30

40

50

(電子温度の具体例)

ここで、電子温度 T_e の具体例を示す。

【0068】

【数16】

$$(T_e \text{の例1}) \quad T_e = \sum_i d_i \bar{\psi}^{i-1}$$

$$(T_e \text{の例2}) \quad T_e = d_1 + d_2 \bar{\psi}^{d_3}$$

$$(T_e \text{の例3}) \quad T_e = d_1 + d_2 \left\{ 1 - (1 - \bar{\psi})^{d_3} \right\}^{d_4}$$

10

【0069】

(具体例)

図5、図6、図7は、本実施形態の算出装置の算出結果の具体例を示す図である。トカマクプラズマを想定し、本実施形態の算出装置により、磁場分布、電子密度分布、電子温度分布を求めた。図5のグラフは、磁場分布の例を示すグラフである。図5のグラフの横軸は円筒座標系の径方向を示し、縦軸は磁場を示す。図6のグラフは、電子密度分布の例を示す図である。図6のグラフの横軸は円筒座標系の径方向を示し、縦軸は電子密度を示す。図7のグラフは、電子温度分布の例を示す図である。図7のグラフの横軸は円筒座標系の径方向を示し、縦軸は電子温度を示す。各図のグラフにおいて、点線が本実施形態の算出装置による算出結果による分布であり、実線が真の分布である。各グラフにおいて、本実施形態の算出装置による算出結果による分布は、真の分布とほぼ一致する。

20

【0070】

(本実施形態の作用、効果)

従来は、偏光計のデータからプラズマ内部の物理量の分布を推定する場合は方位角のみに着目していた。ファラデー効果の近似式を用いると、方位角は密度と視線に平行な磁場成分の積をその視線上で線積分した値となる。したがって、磁場分布が既知であるとして方位角から電子密度分布を算出するか(例えば、ヘリカル方式の核融合プラズマでは磁場が既知である)、もしくは他の電子密度分布計測装置(干渉計、反射計、トムソン散乱計など)から電子密度分布が既知であるとして方位角から磁場分布を算出するかをしていた。また、従来は偏光計のデータから簡便に電子密度を推定するために、偏光計のデータとして楕円率角を使用し、コットン・ムートン効果の近似式を用いて視線上での密度の線積分量を得ていた。

30

【0071】

本実施形態の算出装置は、(磁場または電子密度のどちらか一方の情報既知であるという前提なしに)偏光計のデータから、磁場と電子密度の分布を算出している。偏光計のデータとしては方位角および楕円率角を使用し、方位角および楕円率角をシミュレートする際はファラデー効果及びコットン・ムートン効果の近似式ではなく、ストークス方程式を使用し、精度を向上させている。楕円率角は主にトロイダル磁場と電子密度に依存するが、プラズマ発生中のトロイダル磁場は真空トロイダル磁場と大きく変わらないため、楕円率角から電子密度を推定することは方位角から推定するよりも正確である。そのため、本実施形態の算出装置は、他の電子密度計測装置(干渉計、トムソン散乱計、反射計など)の計測結果を用いることなく、磁場分布と電磁密度分布を同時に算出することが可能である。

40

【0072】

さらに、本実施形態の算出装置は、ストークス方程式において、相対論効果を考慮することにより、偏光計のデータの電子温度依存性を正確に捉えるため、従来では考えられていなかった電子温度分布の算出を可能とする。本実施形態の算出装置における電子温度分布の算出は、相対論効果の影響が表れる電子温度領域(例えば、10 keV以上)にお

50

いて、好適である。

【0073】

本実施形態の算出装置は、プラズマ内部がどのようなプラズマ状態であっても、プラズマの数理モデルが存在すれば適用可能である。

【産業上の利用可能性】

【0074】

ここで説明した算出装置100は、例えば、トカマク制御装置において適用可能である。トカマク制御装置では、偏光計などプラズマに対し非接触状態で計測したデータを拘束条件としてプラズマ内部の磁場分布などが計算される。希望するプラズマの状態が計算結果と異なる場合は、コイル電流、電磁波加熱装置、中性粒子ビーム装置などを用いてプラズマ状態が制御される。

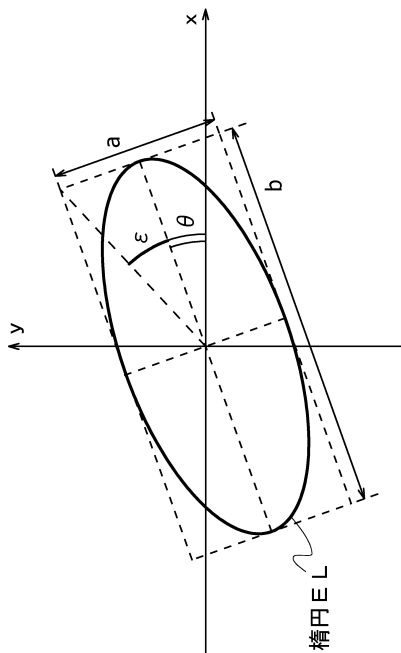
10

【符号の説明】

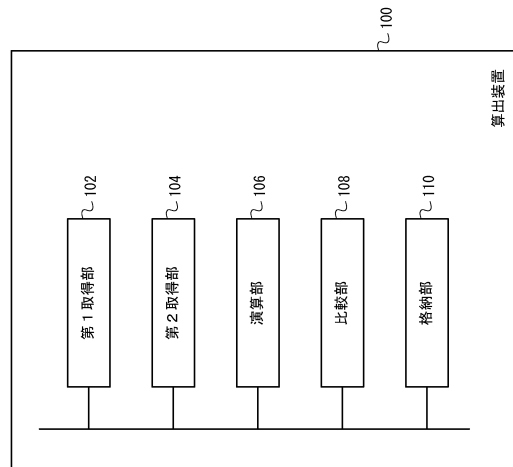
【0075】

100	算出装置
102	第1取得部
104	第2取得部
106	演算部
108	比較部
110	格納部

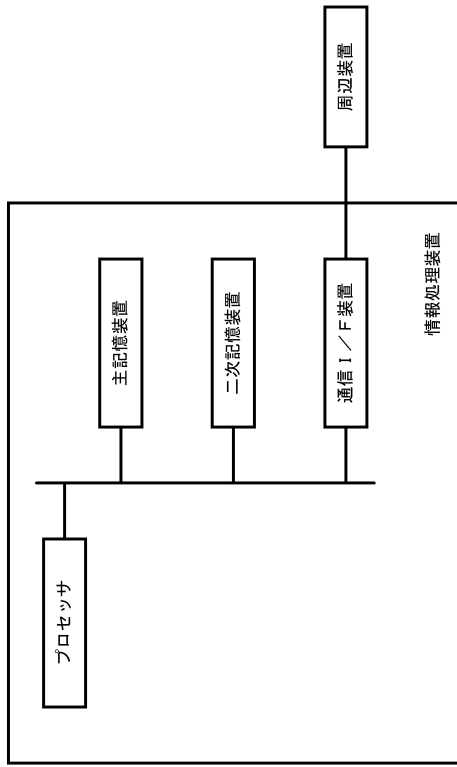
【図1】



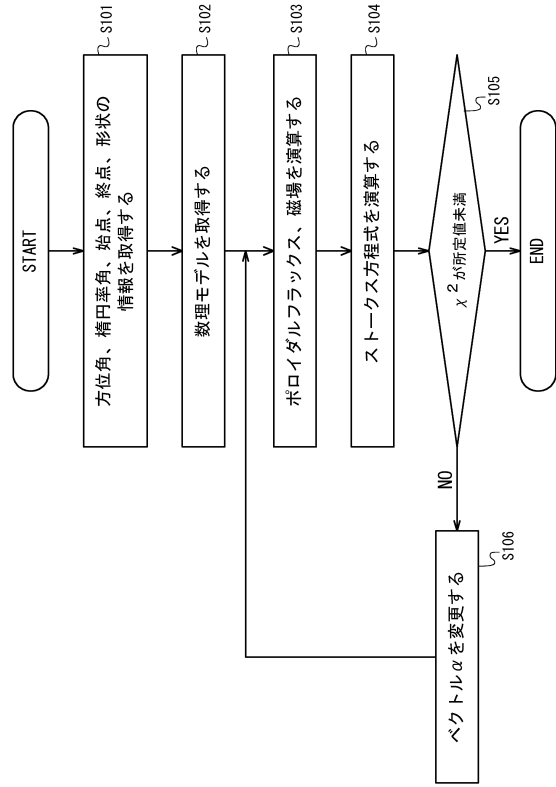
【図2】



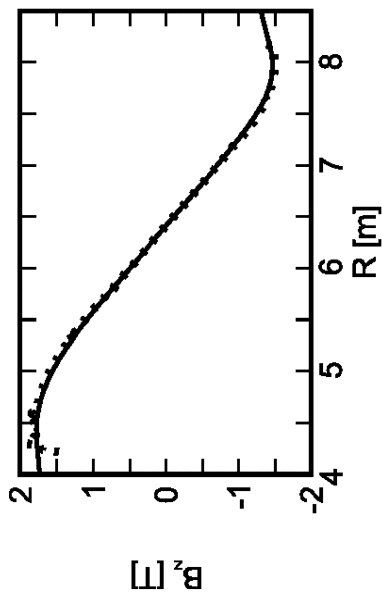
【図3】



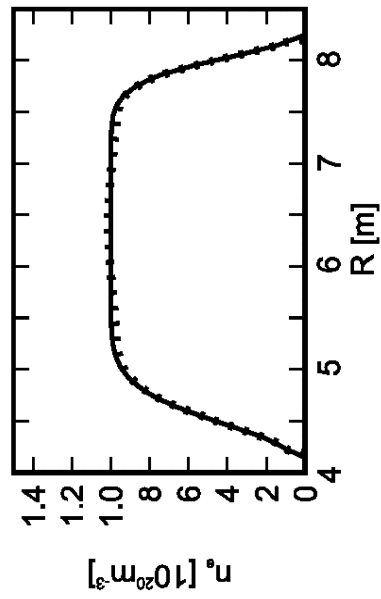
【図4】



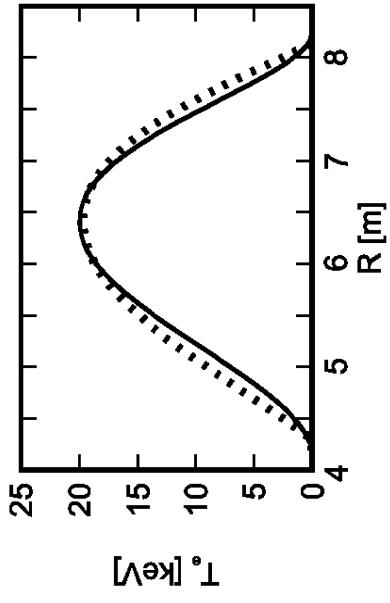
【図5】



【図6】



【 図 7 】



フロントページの続き

審査官 林 靖

- (56)参考文献 特開昭61-189440(JP,A)
特開平10-326697(JP,A)
特開2002-353199(JP,A)
特開平03-156346(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H05H	1/00 - 1/54
C23C	14/00 - 14/58
C23C	16/00 - 16/56
H01L	21/302
H01L	21/304
H01L	21/461
H01L	21/3065
H01L	21/205
H01L	21/31
H01L	21/365
H01L	21/469
H01L	21/86
G01J	5/58
G01N	21/21
G21B	1/05