



## 研究論文

# 実験データと理論計算データを融合した 統合輸送解析システムの開発

## Development of the Integrated Transport Analysis System Unifying Experiment and Simulation Data

江本雅彦, 鈴木千尋, 鈴木康浩, 横山雅之, 關 良輔, 居田克巳  
EMOTO Masahiko, SUZUKI Chihiro, SUZUKI Yasuhiro, YOKOYAMA Masayuki,

SEKI Ryosuke, and IDA Katsumi

自然科学研究機構 核融合科学研究所

(原稿受付: 2014年2月3日 / 原稿受理: 2014年7月7日)

実験データと理論計算データを融合した統合輸送解析システムを開発した。このシステムにより、従来、別物として取り扱われてきた、LHDの実験データと理論計算データを統合化し、ユーザは両者を区別することなくデータを取り扱うことができるようになった。このシステムにより、平衡計算および、その平衡に基づくNBI加熱分布評価、エネルギー・運動量バランス解析に至る一連の解析作業をパッケージ化することが可能となり、LHD実験適用型統合輸送解析コードTASK3Dの運用に大きな貢献を果たし、原理的にLHDの全放電、電子温度分布計測がなされた全てのタイミングに対してエネルギー・運動量バランス解析を実施することができるようになった。

### Keywords:

transport analysis, unified system, numerical simulation, database, TSMAP

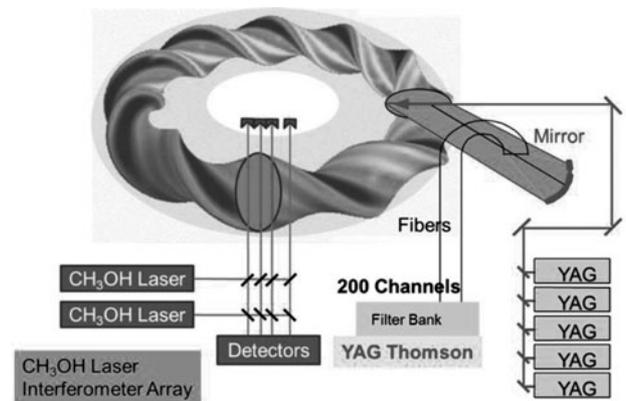
### 1. 序論

核融合プラズマを記述する統合シミュレーションコードの開発は、国内のTASK3D[1]やTOPICS-IB[2]だけでなく、EUのJETTO[3]や米国のTRANSP[4]等、世界中で行われており、予測シミュレーションだけでなく実験解析にも用いられている。LHD実験に対応したシミュレーションコードの開発では、シミュレーション側からの視点に重点が置かれており、これらのコードに精通していない研究者が、実験データの解析を行うのは不便であった。例えば、輸送解析ではプラズマパラメタが一定であるとみなせる時間領域のみを対象とした静的な解析が主として行われ、プラズマ実験で得られた全プラズマ放電時間を対象とした動的な解析を行うには、必要な全ての実験データをシミュレーションコードが必要とするデータ形式に変換する必要がある。このような解析はあまり行われてこなかった。

この理由の一つは、実験データとシミュレーションコードが必要とするデータ形式は異なっており、シミュレーションコードを実行するには、必要とされる複数の収集データから必要な形に変換する必要があるため、非常に手間がかかるためである。例えば、TASK3Dでは、入力パラメタとして、径方向を実効半径  $r_{\text{eff}}$  で表した座標系（以下、規格化座標系）で与える必要がある。ここで実効半径  $r_{\text{eff}}$  は  $r_{\text{eff}} = a_{\text{eff}}\rho$  で定義される。また、 $\rho$  は規格化小半径で、規

格化トロイダルフラックス  $s$  を用いて  $\rho = s$  で表され、 $a_{\text{eff}}$  は実効プラズマ小半径で、プラズマ体積  $V$  とプラズマ幾何中心  $R_0$  を用いると、 $V = 2\pi R_0 \pi a_{\text{eff}}^2$  の関係にある。

一方、LHDはプラズマ形状が複雑であり、測定されるプラズマ断面は測定器毎に異なるため（図1）、規格化座標



### Laser Diagnostics in LHD

図1 計測毎に異なるプラズマ断面：YAGレーザを用いたトムソン散乱計測では、プラズマの横長断面を計測しているのに対し、CH<sub>3</sub>OH遠赤外レーザを使った計測ではプラズマの縦長断面を測定している。

系への変換作業が必要となるが(図2), これには, プラズマの平衡を求め, 全計測で統一で一貫性のある変換作業が必要である。

また, シミュレーション実行には複数の物理データを必要とするが, 物理データ間には依存関係があり, ある物理データが更新された場合には, 依存する物理データの更新が必要となる。後述する TSMAP[5]では平衡を決定するため, トムソン散乱計測による電子温度分布を利用しているが, 例えば, 暫定値として登録されていたトムソン散乱計測による温度分布の値が, その後の校正により更新された場合は, 平衡が変わるため, 規格化座標系での様々な物理分布のデータの更新が必要となり, 数値計算で利用する全てのデータを更新する必要がある。

本研究は実験データと数値計算を統合化し, 実験データからシミュレーションコードが必要とするデータを自動作成し, 全実験データでの数値計算を行えるような枠組みを作るものである。このためには, 1. 物理データアクセスへの改善, 2. 座標変換, 3. 依存データの自動更新が必要となる。次章では, これらの機能を実現するために開発したシステムについて説明を行う。

## 2. 実験データと数値計算の統合

### 2.1 物理データの提供

LHD 実験では100を超える計測装置が取り付けられ, LABCOM システム[6]によってデータ収集および提供が行われている。ところが, このシステムに登録されている

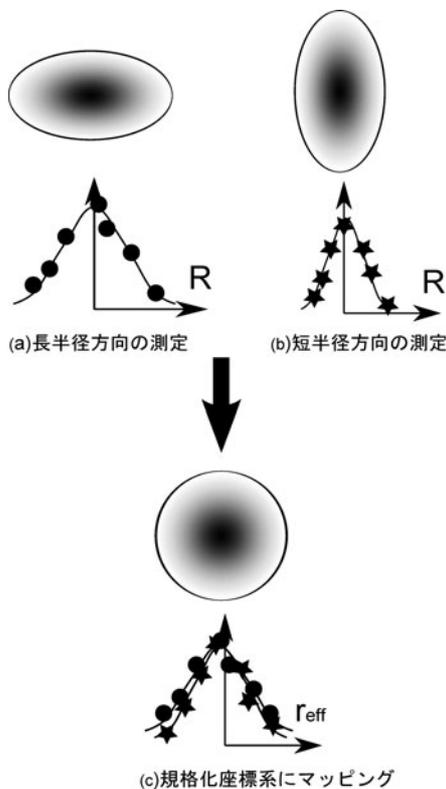


図2 座標変換: (a)長半径方向の測定と (b)短半径方向の測定から絶対値校正を行うには (c)のように規格化座標系へのマッピングを行う必要がある。

のはデジタイザから取得された生のデータのため, 計測した研究者以外には, 物理的に意味のあるデータに変換することは困難である。LHDで収集された全ての物理量のデータを統一的なインタフェースを用いて参照できるようにするという目的で開発されたのが, 解析サーバシステムである[7]。このシステムでは, スプレッドシート等, 多様なツールを利用して読み込むことができるよう, 物理量に変換したデータを解析データフォーマットというカンマ区切りのテキストファイルとして提供している。解析サーバシステムは, 図3に示すようにファイルサーバとリレーショナル・データベース (RDB) から構成されており, ファイルの保存場所, ファイルサイズ, 登録時刻等のメタ情報をRDBで管理し, ファイルそのものはファイルサーバに保存している。また, クライアント・サーバ間の通信は gsoap [8]を利用した, HTTPによるSOAP[9]を使用している。このシステムを利用することで, LHD 実験で収集または解析を行った様々な結果を, 解析サーバシステムのクライアントプログラムやライブラリを利用することで統一された方法で取得できるようになった。

### 2.2 座標変換の必要性

解析サーバを使うことで, 物理データの統一化を行うことができるようになったが, これらは個々の計測器が観測している物理座標における物理量であり, 輸送解析等の数値計算で利用するには, 規格化座標系での物理量に変換する必要がある。また, Thomson 散乱計測では, 電子密度の分布を得ることが出来るが, これを絶対値に変換するには FIR 計測による電子密度の線積分の値によって絶対値校正する必要があり, このために座標変換が必要となる。これは, LHD ではプラズマ形状が複雑であり, 観測しているプラズマ断面は計測毎に異なるためである。例えば, Thomson 散乱計測ではプラズマの横長断面を測定しているのに対し, FIR 干渉計ではプラズマの縦長断面を測定している。

#### 2.2.1 平衡データベース

実座標から規格化座標系への変換を行うために, VMCC [10]コードを用いて平衡データベースの作成を行った。VMCC コードは, プラズマ中の全エネルギーを変分原理に

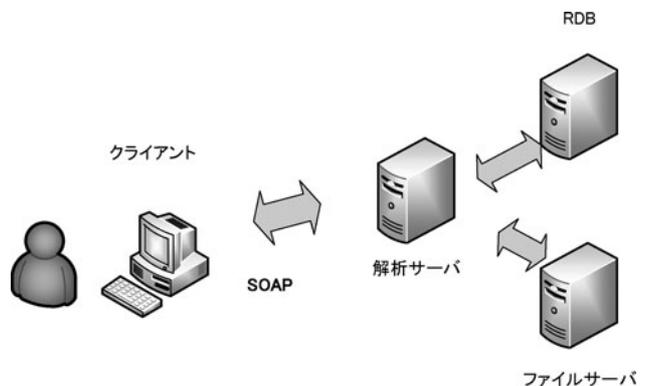


図3 解析サーバ概要: 解析サーバはメタデータを格納するRDBとファイルサーバからなる。クライアントとの通信はSOAPを利用して行う。

より最小化することで、MHD 平衡を求めるものである。このデータベースは、ある磁場配位とプラズマ形状における磁気面形状を磁気座標系  $(s, \theta, \phi)$  で表し、そのフーリエ係数を格納している。但し、 $s$  は規格化されたトロイダルフラックス (プラズマ境界で  $s = 1$ )、 $\theta$  はトロイダル方向、 $\phi$  はポロイダル方向を表す。

ヘリカルコイルが作る磁場配位は3つの物理量、 $R_{ax}$  : 磁気軸位置、 $B_q$  : ヘリカルコイルとポロイダルコイルの四重極成分の比、 $\gamma$  : ヘリカルコイルのピッチパラメタ、で決定できる。ただし、 $\gamma = M/n \cdot a_c/R$  で、 $M, n$  はコイルの周期数と極数、 $a_c$  は小半径、 $R$  は大半径である。また、VMEC の計算にはプラズマ圧力および電流の分布をトロイダルフラックス  $s$  の多項式として与える必要があるが、計算の高速化のため、幾つかの分布について前もって磁気面形状を計算しておき、実際の実験で得られた分布を用いる場合は、あらかじめ計算した近傍の値から補間して求めるようにした。ここで、プラズマ圧力については表1にあげる5種類の分布関数を使用した。また、プラズマ電流については、ホローな電流分布も考慮し、表2に示す11種類を使用した。また、それぞれの分布関数の形状をピーキングファクターという1つのパラメタで表すことで、探索を高速に行っている。ただし、ここで用いたピーキングファクターは  $s$  の全領域で積分し平均した値と中心値の比である。

全ての磁場配位の組み合わせで変換テーブルを作るには、表3に示す計7つのパラメタ空間上で行う必要があり、1つの磁場配位あたり、7865 ( $= 11 \times 5 \times 13 \times 11$ ) 通りの計算が必要となる。データベースの作成にあたり、実験でよく使う磁場配位から計算を始めており、2013年末現在で25パターン、約20万点の計算が終了している。計算量が膨大なため、2009年当時、大型汎用機を用いた計算が、1磁場配位あたり、20~30日かかっていた。(ただし、これは計算速度が遅いためではなく、むしろ、ユーザが多くジョブの実行時間の割り当てが少ないことによる。) この計算を高速化するために、PC 6台、計28CPUコアを用いて並列に計算させることにより、5日に計算を短縮する

表1 圧力分布関数と圧力ピーキングファクター(pf).

圧力分布関数	pf
$(1-s^4)^2$	1.41
$(1-s^4)(1-s)$	2.14
$(1-s)^2$	3.00
$(1-s)^3$	4.00
$(1-s)^4$	5.00

表3 平衡データベースパラメタ一覧.

パラメタ	説明	範囲	分割数	単位
$R_{ax}$	磁気軸位置	3.50-4.00	11	m
$B_q$	四重極磁場	-50~200	6	%
$\gamma$	ピッチパラメタ	1.129~1.262	8	-
$p_0$	ピークベータ値	0~10	11	%
pf	圧力ピーキングファクター	1.41~5.00	5	-
$I_p$	1 Tあたりのトロイダル電流値	-150~150	13	kA/T
Ipf	電流ピーキングファクター	-12.60~4.00	11	-

ことができた。

このデータベースを利用するために、PV-Wave.FORTRAN,C等の各種コンピュータ言語から呼び出せるライブラリを提供している。ユーザはこのライブラリを利用し、上記7つのパラメタと実座標の配列を渡すと、実座標に対応する規格化座標の配列を得ることができる。検索処理の実装は先の解析サーバシステムをベースとした、クライアント・サーバ方式を採用しており、検索処理はすべてサーバ側で行っている。

VMECによる計算結果はサーバ側にファイルとして保存しており、一方、入力パラメタ等のメタ情報はRDBに保存している。サーバはクライアントから受け取ったパラメタに一致する入力パラメタをRDBから検索し、一致するものがみつければ、ファイルの内容をクライアントに返す。完全に一致するパラメタが存在しない場合は、パラメタ空間における近傍の値を用いて、補間したデータを返す。必要とする座標の多くは既存の計測器が観測を行っている視線方向の座標なので、変換の高速化のため、主要な計測器の視線方向の座標については、あらかじめ計算しておき、その結果を視線データベースとして利用している。

### 2.2.2 最適な平衡の決定

前節で述べたデータベースを利用して、プラズマにおける平衡を求めるプログラム TSMAP[6]を作成した。TSMAPはプラズマのピークベータ値と圧力ピーキングファクターを変更しながら、与えられた磁場配位で、Thomson 散乱計測で得られた電子温度分布を規格化座標系へマッピングし、プラズマの内側の電子温度と外側の温度との差が最小になる形状パラメタを探索し、そのプラズマにおける平衡を求めるプログラムである(図4)。Thomson 散乱のデータを利用するのは、この計測が常時

表2 電流分布関数と電流ピーキングファクター(Ipf).

電流分布関数	Ipf
$(1-s)^3$	4.0
$(1-s)^2$	3.0
$(1-s)$	2.0
$(1-s^4)^2$	1.41
$(1-s^4)^2 - 0.6(1-s)^3$	0.71
$(1-s^4)^2 - 0.9(1-s)^3$	0.21
$(1-s^4)^2 - 1.2(1-s)^3$	-0.49
$(1-s^4)^2 - 1.5(1-s)^3$	-1.49
$(1-s^4)^2 - 1.8(1-s)^3$	-3.06
$(1-s^4)^2 - 2.1(1-s)^3$	-5.91
$(1-s^4)^2 - 2.4(1-s)^3$	-12.60

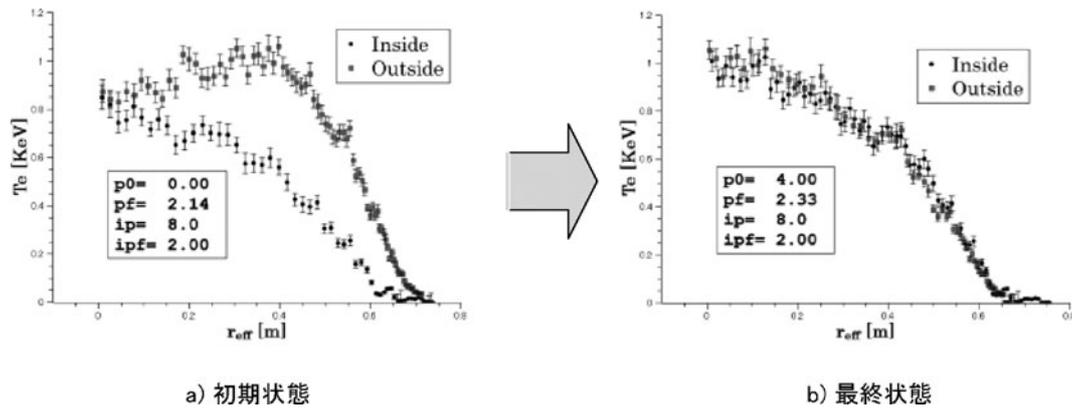


図4 TSMAPによる平衡の決定：規格化座標系にマッピングしたプラズマの内側と外側の電子温度分布の差が最小になるよう、パラメータを変えながら探索を行う。

行われており、かつ空間計測点が多くマッピングの精度が期待できるからである。ただし、トロイダル電流値はロゴスキーコイルの値から決定され、また、最終的な結果に対する電流ピーキングファクターの影響は小さいため、2.0に固定している。これによって、プラズマの平衡が決まり、実座標から規格化座標系へのマッピングができるようになった。また、これによりFIRの測定データを使ってThomson散乱で得られた電子密度の絶対値校正を行うことが可能となった。

しかしながら、典型的なショットでは、Thomson散乱計測は1ショットあたり、800フレーム以上の計測を行っており、ライブラリの合計呼び出し回数は10,000回に達する。そのため、平衡計算には10分以上かかる。一方、LHDの短パルス実験では3分周期で放電が行われるため、平衡計算が実験サイクルに追いつかない。この問題に対処するため、当初6台のクライアントPCを用意し、各PCが1ショットずつ計算を行っていた。これによって、1ショットの計算速度そのものは速くならないが、数ショット遅れで、実験の放電ペースに追いつくことが可能となった。しかしながら、ショットの解析を一刻も速く行い、次回以降の放電パラメータの設定に反映する必要があることから、一プログラムでの高速化が必要となった。

### 2.2.3 平衡計算の高速化

TSMAPの高速化を行うため、クライアント・サーバの双方で高速化を行った。

クライアント側では並列実行を行うことで高速化した。TSMAPによる平衡の計算では、個々の時刻における計算は独立しているため、それぞれの時刻における計算は並列して行うことが可能である(図5)。したがって、マルチコアCPUの計算機を利用することで、各フレーム計算を同時に実行すれば、一放電あたりの計算時間が短縮することが可能である。フレーム毎に並列して計算を行うには、TSMAPのプログラムをマルチスレッドあるいはマルチプロセスを利用し、並列計算するよう書き換える必要がある。しかしながら、オリジナルのTSMAPプログラムはPV-Waveで記述されており、並列プログラムを書くのには適していない。そこで、プログラムを別の言語に移植することにした。PV-Waveでは配列の演算を普通の変数の

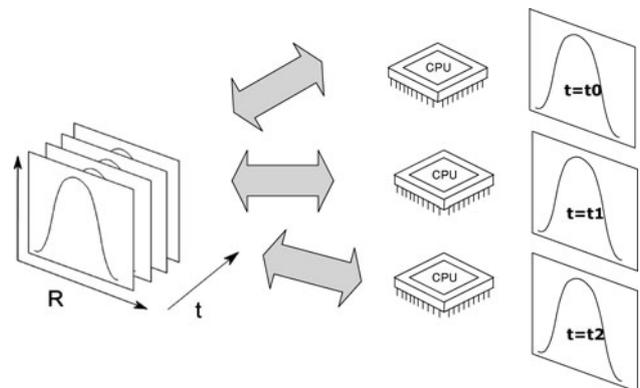


図5 並列計算によるクライアント側の高速化：時間フレーム毎にプロセスを生成し、複数のCPUを使って並列計算を行うことで高速化を行う。

様に記述することができるが、並列処理を書くことのできる言語で、このような記述が可能な言語ということから、Python[11]を選択した。Pythonでは、numpyという配列処理パッケージを利用することで、PV-Waveに似た記述ができるため、移植が比較的容易であると判断したためである。また、並列化にはmultiprocessingというパッケージを用いた。このパッケージを使い、時刻毎のループで行っている処理をそれぞれのプロセスに分割し、同時に実行することで計算時間の短縮を行った。

この方法により、クライアント側の並列化によりクライアント側の処理を高速化できたが、複数のクライアントからの同時リクエストが増大することになり、サーバ側の拡張も必要となった。サーバ側は、元々マルチプロセスで動いているため、複数クライアントからの同時リクエストを処理することは可能であるが、同時に実行されるプロセス数がCPUコア数を超えることがあるため、複数のサーバを用意し、同時実行できるプロセス数の増加を測った。これにはLVS (Linux Virtual Server) を利用することで仮想的に複数のPCでのサービスを1台のPCで行っているかのようにしている(図6)。現在、仮想サーバはLVSサーバ1台と3台の12コア(24スレッド同時実行可能)の実サーバから構成されている。クライアントからLVSサーバにリクエストがあると、LVSサーバは最も接続数の少ない実サーバにリクエストを転送し、そのサーバから直接クライアン

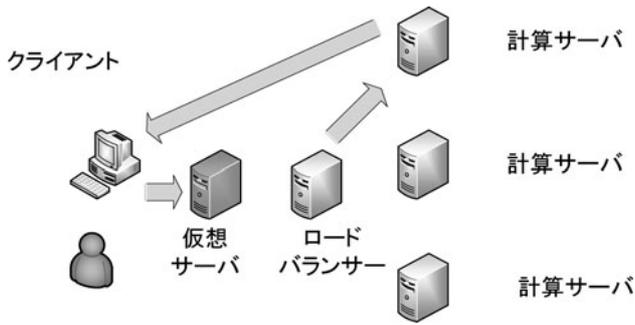


図6 LVSによるサーバ側の高速度化：LVSを利用し、3台の物理PCを1台に見せかけることで、クライアント側の変更なしに増大したクライアントリクエストに対応する。

トに計算結果を返すという方式（ダイレクト・ルーティング）をとることで、クライアントからのリクエスト数の増加に対応した。

以上のような高速化手法を用いることにより、TSMAPの実行時間は10分あまりから25秒にまで短縮することが可能となり、実験シーケンス中での処理が可能となった。

### 2.3 自動解析

TSMAPで行った平衡計算の結果を利用して、規格化座標系における物理量を計算するには、TSMAPによる平衡データを解析サーバに登録する必要がある。放電サイクル中に迅速に解析を行うためには、TSMAPの平衡計算が終わり、平衡データが登録されると、すぐにこのデータを利用する解析プログラムを実行する必要がある。また、ある実験データが解析データとして登録された後に、データの校正やプログラムの改良等により、更新が行われることがあるが、この場合には依存するデータの更新も必要となることがある。例えば、TSMAPが実行時に利用するデータが更新された場合、TSMAPの平衡データの更新が必要となり、さらに、この平衡データに依存するデータの更新も必要となる。図7は計測データから、輸送解析に必要なデータを作成し、結果を格納するまでのデータの流れを图示したものであるが、左端の thomson のデータが更新された際には、TSMAPの再計算により平衡が変わるため、それに依存する10以上のデータが更新される必要がある。そのため、筆者らはデータ間の依存関係を管理し、自動的にデータを登録・更新する AutoAna システムの構築を行った[12]。

処理の流れは図8に示すようになる。

AutoAna システムは、1. ジョブキューサーバ、2. ジョブ登録デーモン、3. ジョブ実行デーモンの3つのコンポーネントから構成される。

解析サーバにデータが登録されると、IP マルチキャストを利用してネットワーク上の PC に新たなデータが登録されたことを通知する。ジョブ登録デーモンはこの通知を受けると、そのデータから作成されるべきデータがあるかどうかチェックし、そのデータの登録プログラムが実行可能であれば、ジョブキューサーバに登録プログラムのジョブを投入する。

例えば、図7で thomson が新たに解析サーバに登録され

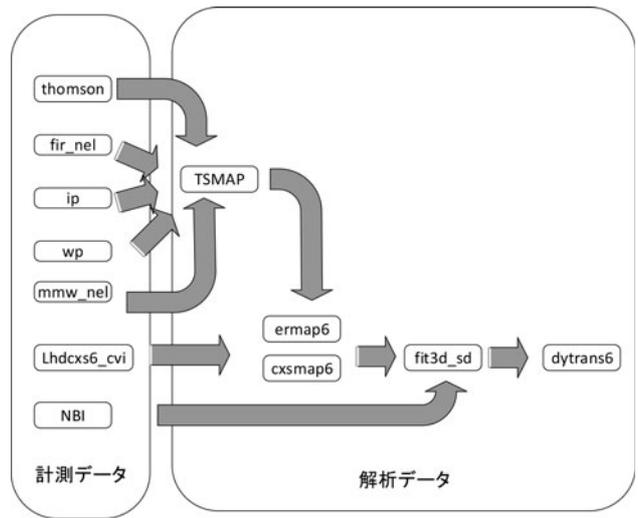


図7 物理データの依存関係：輸送解析の物理データ dytrans6 を作成するには、cxsm6、TSMAP等が必要であり、TSMAPを実行するには、thomson、ip、wp等のデータが必要となる。

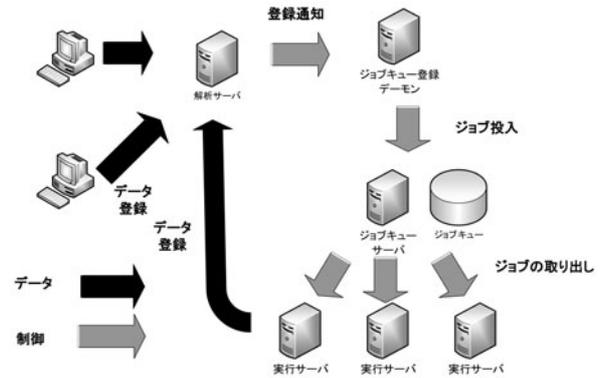


図8 AutoAna 概要：解析サーバに新規にデータが登録されると、ジョブキュー登録デーモンはジョブをキューに登録する。登録されたジョブは複数の実行サーバにより並列実行される。

たとすると、AutoAnaサーバはTSMAPが実行可能かどうかチェックする。TSMAPの実行には thomson, ip, wp, …のデータが必要であり、もしこれらのデータが揃っていれば、TSMAPの実行ジョブを投入する。次にTSMAPの計算結果が解析サーバに登録されると、このデータに依存する ermap6, cxsm6…実行可能であるかどうかチェックを行い、実行可能であれば順に解析データ登録プログラムの実行ジョブを登録していく。ジョブはFIFO(先入れ先出し)の待ち行列で管理されており、ジョブ実行デーモンは待ち行列からジョブを登録された順番に取り出し、処理して行く。AutoAnaサーバが提供しているのは、解析プログラムを起動する枠組みだけで、解析プログラム自体は、それぞれの解析に精通した研究者が作成している。これらの解析プログラムは、最低限のインタフェースを実装していれば、研究者の必要に応じてPV-WaveやFORTRAN等、様々な言語で作成することができる。

ジョブ実行デーモンは、複数のPCで動いており、同時実行可能である。2013年度の実験中は5台のPCを使い、40P

プロセスを同時に動かしていたが、この数は動的に変更可能である。例えば、解析プログラムの変更が行われた場合には、登録された過去のデータを全て計算し直す必要があり、場合によっては、数万～数十万件のデータの再計算が必要となることがある。このような場合でも、一時的にCPUの空いているPCを利用し、ジョブ実行デーモンを動かすことで、急な要求にも柔軟に対応できる。

### 3. 数値計算への貢献

本研究により、統合輸送解析ソフト TASK 3 D の運用に大きな貢献を果たした。例えば、図9は放電中における、密度で規格化した熱流束とイオン温度勾配の関係を20ミリ秒毎に図示したものである[13]。このようなパワーバランスの解析が容易に行えるようになったのは、本研究で構築したシステムにより、TSMAPに基づく平衡計算および、その平衡に基づくNBI加熱分布評価等、実験データからエネルギー・運動量バランス解析に至る一連の作業を自動化することで、全ショットにおける上記のデータが解析サーバという単一システムによって参照が可能となり、実験データと統合シミュレーションの連携が強化されたためである。

### まとめ

本システムにより、従来、別物として取り扱われてきた、LHDの実験データと数値計算を統合化した。これより、ユーザは数値計算に必要なデータを容易に入手できるようになり、実験シーケンス中における実験データを入力パラメータとした、高次の輸送解析を行うことのできる枠組みを提供することが可能となった。また、TSMAPの高速化で、時間フレーム毎に分割した並列処理を行うことによる高速化を実証することができた。この並列処理を、本システム内部で使用している、他のサブシステムに適用していくことで、実験サイクル中における解析が可能であることを示せた。

### 謝辞

このシステムの開発の機会を与えていただき、また、貴重なアドバイスをいただいたLHD実験の関係者の皆様方に感謝いたします。この研究はLHD計画予算(ULHH014)によって行われました。

### 参考文献

- [1] M. Yokoyama *et al.*, Plasma Fusion Res. **7**, 2403011 (2012).  
 [2] N. Hayashi *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 2403065 (2011).

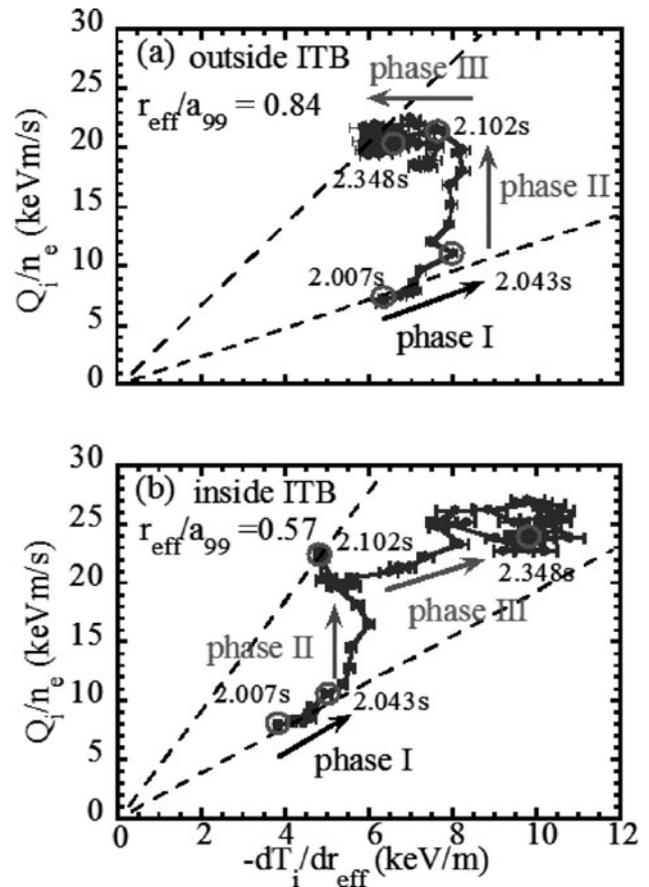


図9 (a)内部輸送障壁(ITB)の外側(規格化小半径=0.84)の領域での電子密度で規格化された熱流束とイオン温度勾配の関係 (b)ITBの内側(規格化小半径=0.57)での両者の関係(参考文献[14]より引用)。

- [3] G. Cenacchi and A. Taroni, Rapporto ENEA RT/TIB 88/5 (1988).  
 [4] <http://w3.pppl.gov/transp/>  
 [5] C. Suzuki *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **55**, 014016 (2013).  
 [6] H. Nakanishi *et al.*, Fusion Sci. Technol. **58**, 445 (2010).  
 [7] M. Emoto *et al.*, Fusion Eng. Des. **81** 2019 (2006).  
 [8] <http://www.cs.fsu.edu/~engelen/soap.html>  
 [9] <http://www.w3.org/TR/2000/NOTE-SOAP-20000508/>  
 [10] S.P. Hirshman and O. Betancourt, J. Comput. Phys. **96**, 99 (1991).  
 [11] <http://www.python.org/>  
 [12] M. Emoto *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 758 (2014).  
 [13] K. Ida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 055001 (2013).