

UPACSによる流体・熱伝導連成解析について

山根 敬、榎本俊治、高木亮治、山本一臣
(航空宇宙技術研究所 CFD 技術開発センター)

Coupled Simulation of Flow and Heat Conduction by UPACS

by

Takashi Yamane, Shunji Enomoto, Ryoji Takaki, Kazuomi Yamamoto

National Aerospace Laboratory of Japan

ABSTRACT

UPACS, *Unified Platform for Aerospace Computational Simulation*, is a project to develop a common CFD platform since 1998 at National Aerospace Laboratory of Japan. The project aims not only to overcome the increasing difficulty in recent CFD code programming on parallel computers for aerospace applications, but also to accelerate the development of CFD technology by sharing a common base code among research scientists and engineers. The first version of the UPACS has been released in 2000 with the capability to solve compressible flows using the multi-block structured grid method and it has become to be able to treat overset grids and solve rotating cascade flows. The UPACS is being extended toward multidisciplinary problems such as the coupling of flow simulation with heat conduction and the simultaneous calculations of flow around turbine blade and heat conduction inside blade material has become possible.

1 はじめに

2000年に最初のバージョンを発表したCFD共通基盤プログラムUPACS (Unified Platform for Aerospace Computational Simulation) [1] は、マルチブロック構造格子による並列計算が可能な外部圧縮性流体解析プログラムとしてスタートしたが、2001年度にはターボ機械の回転翼列問題および重合格子を使用した流体解析が可能となり、適用範囲がいっそう広がった。

一方、航空分野の設計において、流体解析、構造解析、そして熱伝導解析はすでになくはならないツールとなっているが、現在ではそれら性質の異なる数値解析を蜜に練成させる多分野統合解析によって、より高精度な数値解析の実現が期待されている。

本研究では、UPACSを多分野統合問題へ適用する第一歩として、流体解析と熱伝導解析を同時に実行し連成させることを目指した。

- 様々なコンピュータ環境で動作可能
- 簡単な境界条件設定、ブロック接続の自動化
- GUI ツール (計算パラメタ設定、境界条件設定)
- 計算中に簡単なグラフィック表示

UPACSによる計算手順を示したのが図1である。利用者は、ブロック毎の格子ファイル、境界条件設定ファイル bc.input、パラメータデータベース input.txt を用意し、前処理プログラム createConnect3D を動かせばブロック間の接続情報が自動的に生成されて数値解析の準備が整う。しかしながら、ブロック数が非常に多くなると境界条件の設定が煩雑になる。そこで境界条件を設定するための GUI、BCEditor を2000年度に開発した (図2)。bc.input で境界条件を設定しなくても createConnect3D を実行後、BCEditor を起動すると、図のように未定義の境界面がハイライト表示され、容易に境界条件を設定できる。

2 UPACSによる流体・熱伝導連成解析の実現方法

2.1 UPACSの特徴と新しい機能

UPACSについてはこれまでも幾度も紹介しているが、以下の様な特徴を持っている [1][2]。

- マルチブロック構造格子、重合格子
- FORTRAN90によるモジュールプログラミング
- MPIによる並列計算

2.2 ブロック毎の流体と熱伝導の切替

UPACSの最大の特徴であるマルチブロック構造格子法により、計算空間を複数のブロックに分割することで並列計算を可能にするとともに、ブロックどうしの接続に柔軟性を持たせることで複雑形状への適応力を単一ブロック格子に比べて飛躍的に向上させている。UPACSで流体・熱伝導連成解析を可能にする改造を行う際にも、この特徴を最大限に活用した。

UPACSではそれぞれのブロック内部の計算は、他のブロックから独立して行われる。そこでまずブロック内の熱伝導解析を行うサブルーチンを作成した。保存量としては温度をあらゆる変数だけがあれば良いが、流体解析部分のデータ構造との共通化のために、流体解析の5変数に変換している。これによ

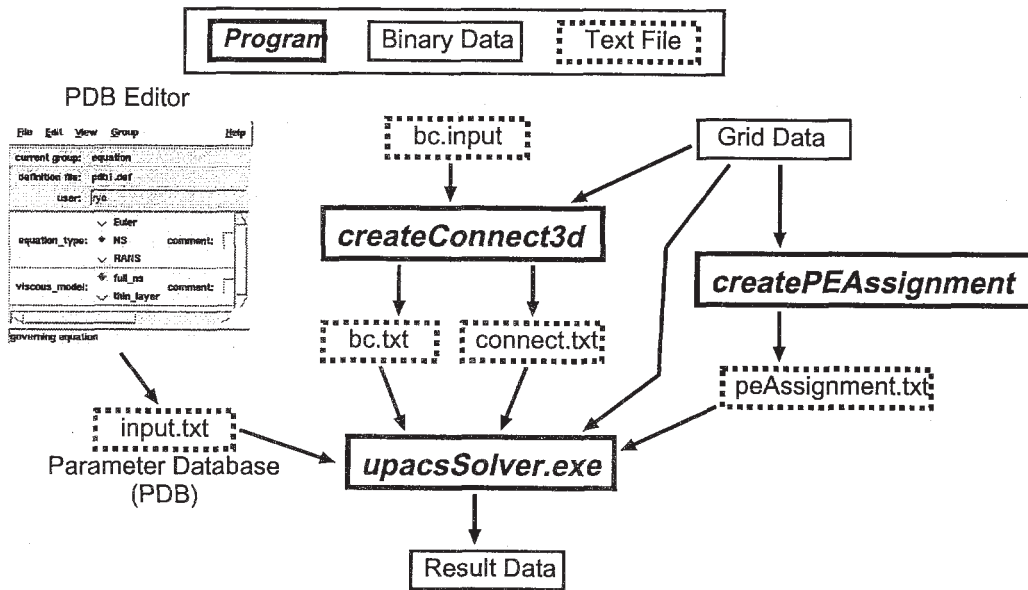


図 1: UPACS による計算手順

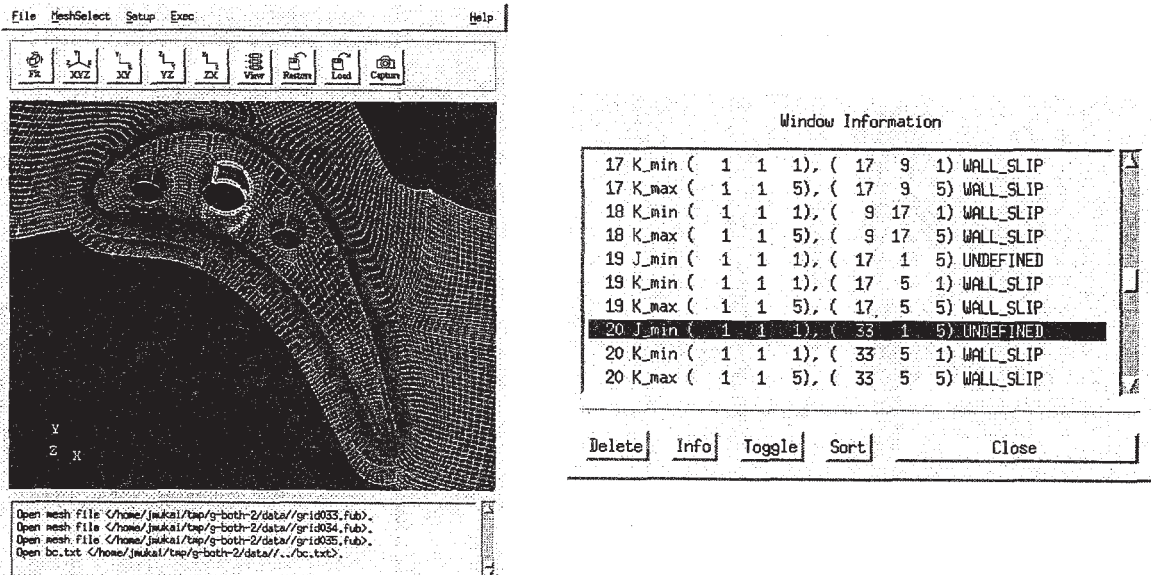


図 2: 境界条件設定用 GUI : BCEditor

Flow Only

```

program main
.....
call MPL_init
call doAllBlocks(initialize1)
call doAllBlocks(transfer,"grid")
call doAllBlocks(initialize2)
.....
do i=1,iteration_max
call doAllBlocks(step)
call mpl_reduce(residual,"sum")
call doAllBlocks(transfer,"q")
end do
.....
call doAllBlocks(finalize)
call MPL_end
end program

```

Coupled with Heat Conduction

```

program main
.....
call MPL_init
call doAllBlocks(initialize1)
call doAllBlocks(transfer,"grid")
call doAllGroups(initialize_flow, initialize_heat)
.....
do i=1,iteration_max
call doAllGroups(step_flow, step_heat)
call doOneGroup(flag, flow_only_procedure)
call mpl_reduce(residual,"sum")
call doAllBlocks(transfer,"q")
end do
.....
call doAllBlocks(finalize)
call MPL_end
end program

```

図 3: プログラムの流れの比較

り、流体解析と同じ可視化プログラムが使用可能になる。それとは反対に、既存の流体解析部分では、後述する理由で通常の5変数とは別に温度も独立した変数として陽に持たせることとした。

次に、ブロックをグループに分けて、所属グループによって異なるフラグを持たせ、その値によって実行する解析サブルーチンを切り替えることができるように改造した。流体グループならば0、熱伝導グループならば1をセットしている。図3は流体のみと熱伝導との連成の場合のUPACSソルバーのプログラムの流れの比較で、オリジナルのUPACS(図の左)ではインターフェースサブルーチン“doAllBlocks”がブロックと複数CPUの割り当てを処理して各ブロックに実行するサブルーチンを引き渡すことで並列計算を実現しているが、すべてのブロックで同じサブルーチンを実行する。そこで連成計算を実現するためにグループフラグによって実行するサブルーチンを切り変えるためのインターフェース“doAllGroups”と、特定のグループフラグを持つブロックのみでサブルーチンを実行させるインターフェース“doOneGroup”を作った(図右)。これらを組み合わせて、流体解析と熱伝導解析をブロック毎に同時並列に実行することが可能となった。また、ブロックとCPUの割り当ては、グループフラグの指定とは独立しておこなえる。

2.3 流体ブロックと熱伝導ブロックの接続境界

連成解析でもっとも重要な部分は接続境界である。

流体ブロックと熱伝導ブロックの接続部分を模式的に表したのが図4で、有限体積型スキームを採用しているUPACSでは各計算セルの中心で物理量が定義されており境界値は陽には存在しない。そこで流体の壁面境界では仮想セルを生成しているが、本研究の連成境界ではこの仮想セルとして接続相手である熱伝導ブロックのセル形状を使用する。この仮想セルに、壁面(図中の×の点)での値が物理的に正しくなるように密度、速度、圧力の値を外挿している。これらの物理量から状態方程式を使って温度値も自動的に決まるが、流体解析に含まれる熱伝導項の計算には、流体解析の壁面境界条件を満たすように仮想セルに設定した値ではなく、熱伝導ブロックの熱伝導解析の結果に基づく値を使わなければ壁面の熱流束が正しく計算でき

ない。このため前述のように流体ブロックの変数に別の変数として温度を追加する必要が生じた。一方、熱伝導ブロックの計算に必要な仮想セルには、対応する流体側セルから温度値および粘性係数から計算される熱伝導係数をコピーすればよい。

流体ブロックと熱伝導ブロックの接続境界で満たすべき熱的条件は以下の2条件である。

1. 温度が連続
2. 流体側と熱伝導側の熱流束が一致

これを図4右のようにセルの温度 T_1, T_2 、境界壁面温度 T_w 、セルの熱伝導係数 k_1, k_2 、セル中心から境界壁面までの距離 l_1, l_2 で表すと、

$$\frac{Q}{A} = k_1 \frac{T_1 - T_w}{l_1} = k_2 \frac{T_w - T_2}{l_2}$$

ここに Q は熱流束、 A はセル境界面の面積である。この式から T_w を消去すると、

$$\frac{Q}{A} = \frac{k_1 k_2 (T_1 - T_2)}{k_1 l_2 + k_2 l_1}$$

となる。このようにして、連成境界でも壁面温度 T_w を陽に扱わないことが可能である。上記の熱的条件は、実際には流体ブロックと熱伝導ブロックの接続境界だけでなく、流体どうし、熱伝導どうしのすべてのセルの接続面においてもあてはまるため、連成境界においては仮想セルへのデータ転送後の変換のみを行えばよいことになる。こうして求められた計算空間の各セルの全境界面の熱流束の合計をセルの熱容量で割ることで温度の時間変化量が求められる。

2.4 連成境界の計算手順

前述のように連成境界では通常のブロック接続境界と同じようにデータ転送を行った後にデータ変換を行う必要があるため、新たにブロック接続情報ファイルconnect.txtから連成境界部分を取り出す前処理プログラムcreateGroupBCを作った(図5の点線内)。これにより生成されるgroupBC.txtの情報に基づき、流体・熱伝導間のデータ変換が行われる。

以上の手順でUPACSによる流体・熱伝導連成解析が可能になった。

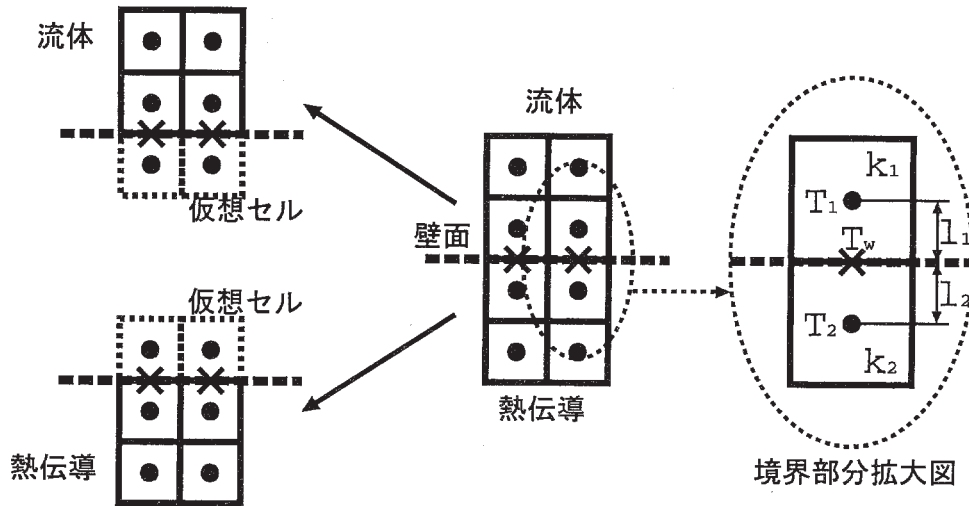


図 4: 流体ブロックと熱伝導ブロックの接続境界

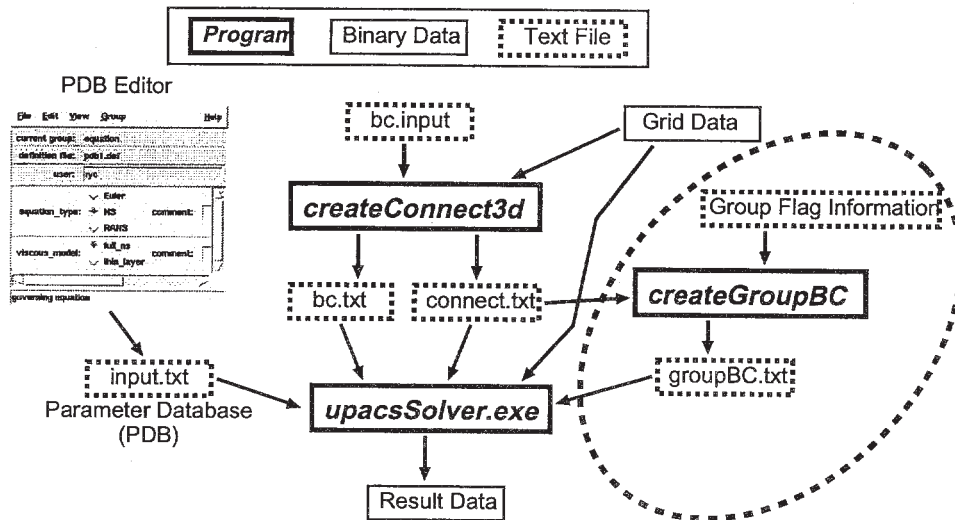


図 5: 連成解析の計算手順

3 二次元タービンの連成解析

流体・熱伝導の動作確認のため、二次元タービンに模擬的な内部冷却を付加した形状での連成解析をおこなった。翼内部に3つの円形冷却面を持つ形状を表現するために、図6のように翼周りの流れ場に14ブロック、翼内部の熱伝導部分に21ブロックを使用した。これらのブロックどうしの接続情報の設定を自動的に行うことができるのがUPACSの大きな特徴で、この形状の計算固有のプログラムの改造は必要ない。

図7は計算結果の例で、3つの円形冷却部をタービン入口温度の0.6倍の値に設定した。流体の淀み部分の高温と高速部分の低温、そして翼内部で与えた固定温度によって、翼材部の温度分布が決まっている様子がよくわかる。

4 結言

本研究でUPACSを流体・熱伝導連成解析に対応させるための改良を行い、内部冷却を持つ二次元タービン翼というやや複雑な形状でも問題なく解析が可能であることが確かめられた。

今回の計算では内部冷却面での温度を固定するという比較的安定な境界条件を与えたが、現実には内部壁面温度も冷却流体の流れ場との連成で得られるものである。そこで現実に近い熱伝達モデルを与えた計算、さらには内部冷却通路にもスパン方向に冷却空気が流れている三次元連成解析を試みる予定である。また、内部温度も固定されない場合、計算時間が非常に増大するため計算の加速手法の開発が重要となる。ただし壁面境界での値が陽に現れない有限体積型スキームでは連成境界での応答遅れによる悪影響は少ないと予想している。

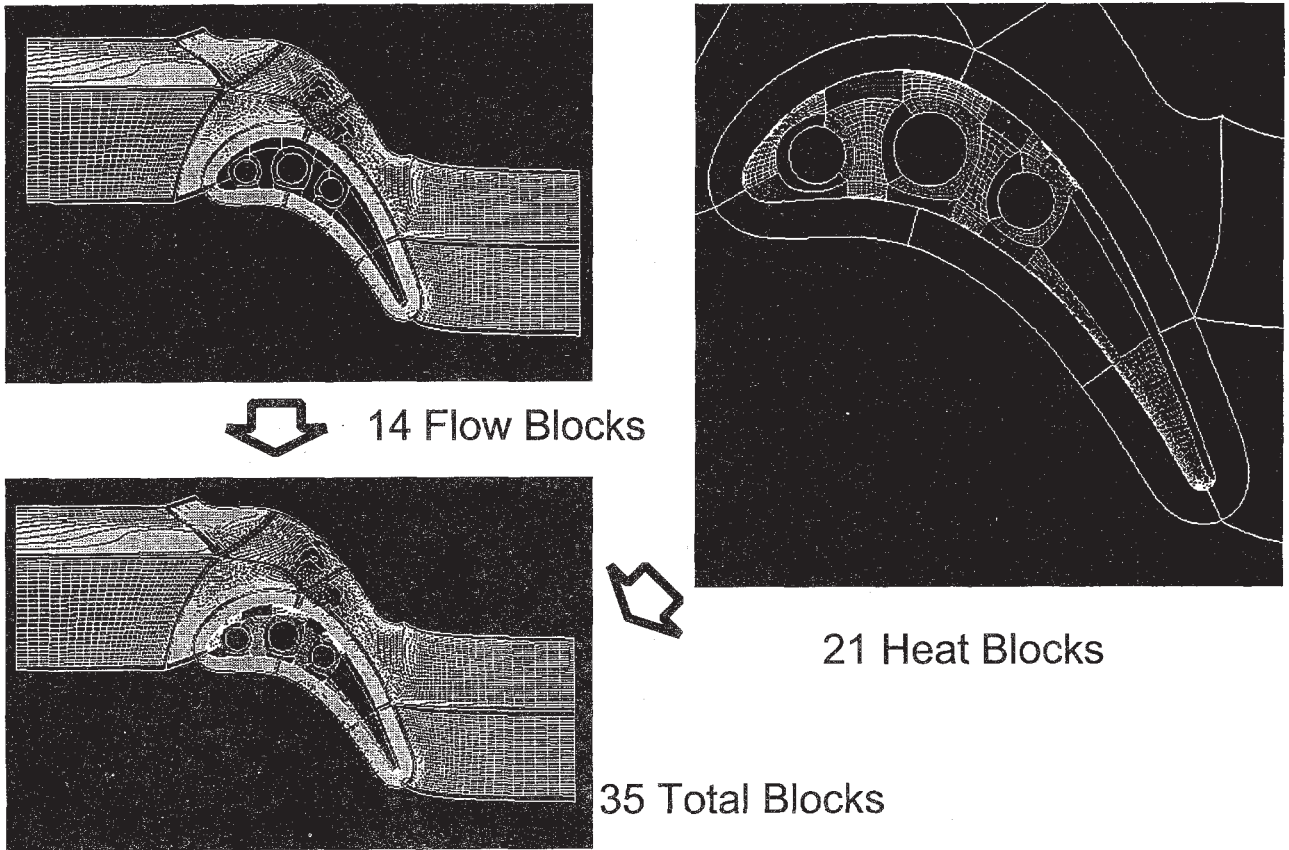


図 6: 二次元タービン連成解析の計算格子

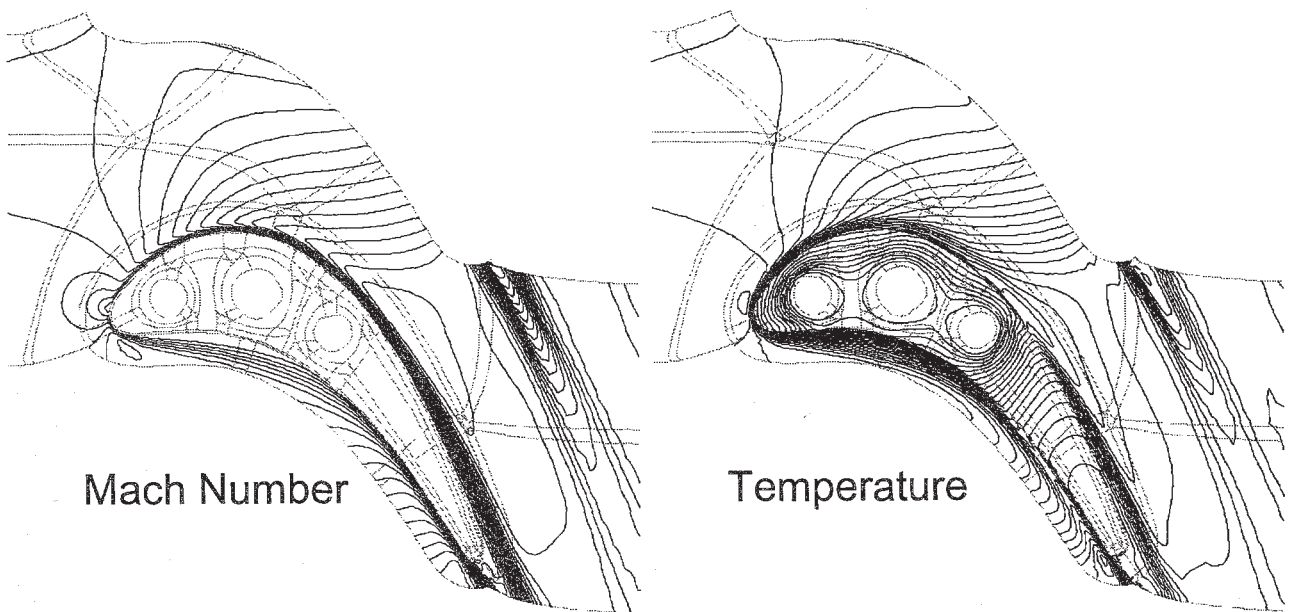


図 7: 連成解析結果

A UPACS: 2002年度の計画

本研究以外にも今年度は以下の項目について開発を進めている。

- ターボ機械動静翼干渉への対応
- 非構造格子への対応
- 重合格子用ツールの改良
- 前処理法による低速流
- 流体・構造連成の検討

B ソースプログラムの公開

UPACS は研究目的に限り、UPACS ユーザ会への入会を条件に無償でソースプログラムを公開している。現在、航技研外部のユーザ会員は約 30 名に達した。詳細は、
<http://www.nal.go.jp/cfd/jpn/upacs/index.html>
を参照のこと。

参考文献

- [1] 山本一臣、他、「並列計算プラットフォーム UPACS について」、航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 1999 講演集、航空宇宙技術研究所特別資料 SP-44
- [2] 山根 敬、他、「CFD コード共通化プロジェクト UPACS の現状」、航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2000 講演集、航空宇宙技術研究所特別資料 SP-46