

CFD-構造強度解析におけるデータの受渡し及び処理システムの構築

陳 錦祥* 小河 昭紀* 橋本 良作* 吉田 豊明** 福山 佳孝*

*宇宙航空研究開発機構・航空環境技術開発センター, **東京農工大学大学院・機械システム工学専攻

Construction of Delivery of the Data
in CFD- Structural strength Analysis and Processing System

by

CHEN Jinxiang OGAWA Akinori HASHIMOTO Ryosaku YOSHIDA Toyoaki and FUKUYAMA Yoshitaka

ABSTRACT

In order to construct a database of structural strength for a virtual turbine made of single crystal Ni-base superalloy, an interface and a stress evaluation system were proposed. Then the thermal stress and its properties of the 1400°C virtual turbine vane were analyzed based on this interface and the stress evaluation system. As the results, (1) the constructed interface with the quasi-three dimensional interpolation by resolution of plane coordinates and interpolation in two dimensions is of both the simplicity of calculation and wider use, and high precise. (2) In the data processing system, the evaluation parameters were visualized and the distributions corresponding to the multi objectives of stress evaluation were made clear. Thus it is indicated that the present data processing system is effective one for the structural strength database of the virtual turbine.

1. はじめに

ガスタービンエンジンの入口ガス温度(TIT)が高いほど、熱効率がよく、高性能のエンジンが実現でき、更にCO₂の低減、地球温暖化の防止にも有効である。そのため、ガスタービン高温化に関する研究は従来から活発に行われている^{(1),(2)}。「新世紀耐熱材料」もこのような背景で進んでいるプロジェクト(以下、本プロジェクト)であり、TITを1800°Cに向上させる画期的な高融点超合金、1700°Cに向上させるNi基の単結晶超合金、及び無冷却で1500°Cに向上させるセラミックスが開発されている^{(3),(4)}。通常、開発される新材料で製作したタービンについては、実機実験の評価が必要となるが、高額な経費と長い期間を必要とする。本プロジェクトでは一部の実機実証が行われているが、任意の材料をガスタービンに適用した場合の性能、寿命、CO₂排出量などをコンピュータで算出、評価をする“仮想タービン”の構築も行っている。JAXAではこの仮想タービンのCFD・冷却特性(以下、CFD)及び構造強度のデータベースを構築している^{(5),(6)}。構造強度データベースの構築において、CFDにより算出した静翼メタル表面温度などのデータを構造強度解析に適用するデータの受け渡し(インターフェース)及び有限要素法の解析結果である節点に依存している膨大なデータを処理して、構造強度を評価しやすい指標化のシステム(以下、データ処理システム)が必要となる⁽⁷⁾。本論では汎用的なインターフェースの構築を重点とし、1400°C級仮想タービン静翼の熱応力解析に対してインターフェースとデータ処理システムの応用例について

述べる。

2. モデル及び解析条件

2.1 解析モデル

本プロジェクトで想定した仮想タービンの形状に基づき、作成した第1段静翼モデルとその断面図をFig. 1に示す。このモデルはピンフィン部分を同体積の隔壁として簡略化した。材料はNi基単結晶超合金TMS-75である。この合金は面心立方晶であり、ヤング率は異方性があるため、x, y, z軸を結晶軸に一致させると、材料の独立な弾性定数は c_{11} , c_{12} , c_{44} 計3個になる⁽⁸⁾。また、実測データにより、熱伝導率、比熱及び熱膨張係数において異方性がほとんどないため、各方向の平均値を用いることにする。

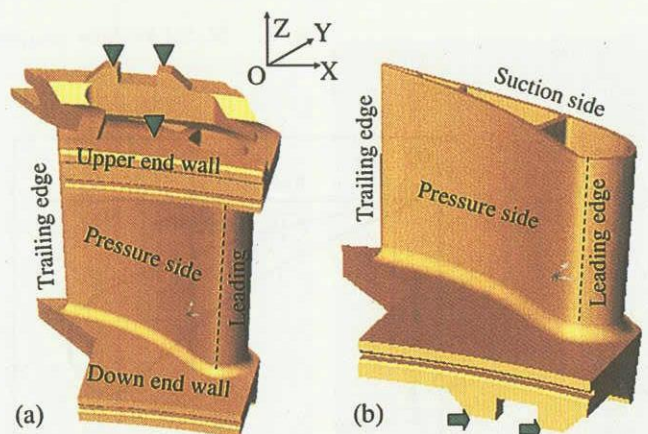


Fig. 1 (a) Analysis model, (b) inner construction

2.2 境界条件

1400℃級実機静翼の熱環境に基づき、本プロジェクトのCFD計算結果である翼内外表面のメタル温度 (Fig. 2) を用い、次節で構築するインターフェースより熱荷重として定義する。また、拘束は解析結果へ強く影響しているが、本論では静翼の温度による熱応力の変化に着目するため、拘束からの影響をできるだけ避けるように拘束する：上部エンドウォールの▲印を付いたサーフェース (Fig. 1 (a), Upper end wall) 上の節点は X, Y 方向に並進できるが、その他の4自由度は拘束した。下部エンドウォール (Down end wall) ↑印を付いたサーフェース上の節点は Z 方向に並進できるが、その他5自由度は拘束とした。解析コードは Nastran for Windows Visual 2003 であり、全モデルを四面体要素でメッシュ化し、要素数は 106042、節点数は 33318 でモデル化した。

3. インターフェースの構築・解析結果及び考察

3.1 インターフェースの構築

Fig. 2 (a), (b) に示した温度は翼面にあるメッシュ節点の三次元の座標値及び各節点の温度 T_c の形 (X, Y, Z, T_c) で記述している。一方、強度解析で用いるモデルは CFD と同一で、同じ三次元の翼面を有し、各節点は節点番号・座標値・温度 (ID, X, Y, Z, T_x) の形で記述している。この温度 T_x は CFD 解析結果から読みとるが、強度解析と CFD 解析での取り扱いコードが異なるため、それぞれ分割したモデルの節点数・節点の位置は一致していない。そこで、CFD の温度 T_c を強度解析モデルの各節点へ転換するインターフェースを構築することが必要となる。本論ではつぎ

のデータ転換方法を考案した。

この方法は強度解析モデルの翼面にある節点ごとに、近傍の CFD 節点の空間座標を比較し、内挿によりデータ転換を実行する。ここに、強度解析モデル上にある節点 E (IDE, Xe, Ye, Ze, Te) (以下、節点 E) を取り上げる。Fig. 3 の概念図を用いて転換方法を説明する。Fig. 3 (a) はノズルの翼外表面の輪郭であり、Fig. 3 (b) は節点 E (星印) と隣接している CFD 節点 (丸印) を検出する方法を表している。

まず、ノズル翼外表面の形状より、XY 平面にある輪郭カーブの曲率が大きい部分が存在する (Fig. 3 (a))、縦 (Z) 方向には平坦である (Fig. 1 (a) に参照) ので、三次元内挿する問題を XZ または YZ 平面での二次元内挿とその内挿平面の選択に分解できると考えられる。内挿平面の選択とは、節点 E を含む微少の曲面を XZ 及び YZ 平面へ投影し、投影面積が広い方の平面で内挿すれば、内挿の精度が高いため、この平面を内挿平面とする。例を挙げると、節点 E が Fig. 3 (a) に示した E1 位置にあるとする。選択されたカーブを X 軸及び Y 軸へ投影した直線 E1x が E1y より長い場合、この曲面は XZ 平面への投影面積が広いので、内挿平面は XZ 平面となる。逆に、節点 E が Fig. 3 (a) E2 位置にある時、E2y が E2x より長いので内挿平面は YZ 平面となる。内挿平面を決めてから内挿する前に予備として節点 E を座標原点 O にし、4 つの象限にある、原点までの空間距離が一番近い CFD 節点 (以下、隣接節点) を各一点検出する必要がある。詳細には、最初検索する直径 D1 を与え、Fig. 3 (b) に示すような番号 1~4 の CFD 節点はこの直径に囲まれるので、この四つの節点を検出される。この場合、

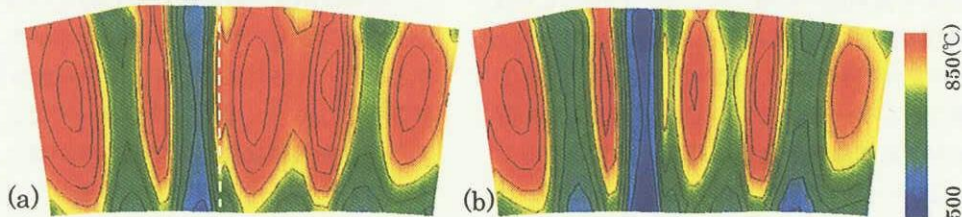


Fig. 2 Metal surface temperature in outside (a) and inside (b)

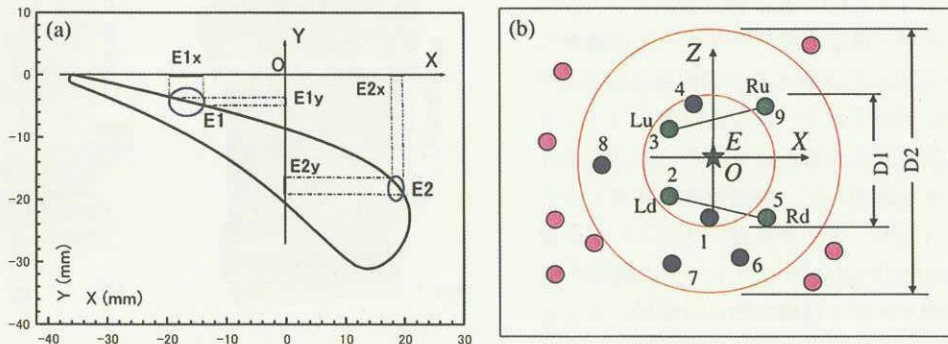


Fig. 3 Interface construction method. (a) Selection of interpolation plane, (b) detection of CFD nodes, ☆: the FEM node E, ○: CFD node.

隣接節点として第2象限の節点3と第3象限の節点2しか取れないため、検索直径をD2までに拡大し、第1象限と第4象限も隣接節点(それぞれ節点9と節点5)を取れるまで続ける。すると、節点Eは後述する二次元内挿が行える。この方法は三次元形状と空間の距離とも考慮してから、さらに二次元で内挿するものであり、ここに“準三次元内挿法”と呼ぶことにした。

つぎに、内挿方法を述べる。Fig. 4 (a) は節点Eと隣接節点との位置関係を例示し、4つの隣接節点をそれぞれLd (Left, down), Ru (Right, upper)などで記述する。また、隣接節点LdとRdが繋ぐ直線と節点EのX=X_E直線の交点Dとすると、このD点のZ座標値Z_D及び温度T_Dは座標X軸に対する線形内挿より決められる。例を挙げると、温度T_Dは節点LdとRdのそれぞれ温度T_{LD}及びT_{RD}から式(1)により求める。

$$T_D = T_{LD} \cdot (1 - \eta_D) + T_{RD} \cdot \eta_D \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 $\eta_D = X_{EL} / X_D$ 、X_{EL}とX_Dの意味はFig. 4 (a)に示した。

同様の方法で、Fig. 4 (a)にあるU点のZ座標値Z_U及び温度T_Uも求められる。すると、Z軸に対して、再度線形

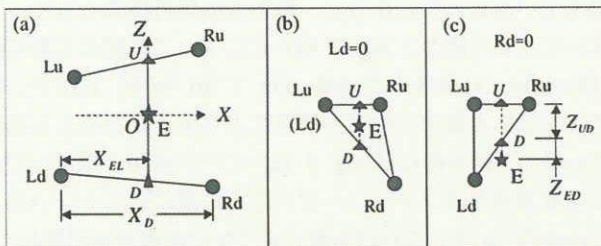


Fig. 4 Interpolation method. (a) Four CFD nodes(●), (b), (c) three CFD nodes, the E located in triangle inside (b) and in triangle outside (c).

内挿より節点Eの温度T_Eが求められ、当該節点に関するデータ転換は達成できる。

通常、節点Eの周りは隣接節点が四つ揃っており、上記の内挿が行えるが、節点Eがモデルの端部にある場合、隣接節点が3点(Fig. 4 (b) (c)), まれには3点以下しか取れないケースもある。3点ケースの場合、Fig. 4 (b)のように隣接節点LdとLuは重なると想定し、式(1)より内挿が行える。ただし、節点Eが三角形に囲まれていない場合(Fig. 4 (c)), 式(1)は同じに適用されるが、形式は外挿となる。外挿条件として節点Eが三角形に充分近い(Fig. 4 (c) : Z_{ED}/Z_{UD}<1)と課している。

続いて、この内挿を実行するインターフェースについて述べる。メインプログラム及び内挿(Interpolation)サブルーチンのフロチャートをFig. 5に例示す。Fig. 5 (a)メインプログラムでメッシュ節点数などのパラメータを①で入力し、節点の座標、温度などを記録するファイルデータの出力はメイン②及び⑤, サブルーチン⑪Open Data, ⑮Write Result, 及びある項目(例えば、隣接節点と節点Eの距離)よりデータを順番にすることはメイン③, サブルーチン⑫Orderより実施する。前述した内挿平面を決める、隣接節点の検出、及び内挿することはメイン④, サブルーチン⑬Comparison, ⑭Interpolationより完成する。Fig. 5 (b)はサブルーチンInterpolationのフロチャートを示す。Fig. 5 (a)にあるサブルーチンComparisonより検出されたCFD節点(以下、検出節点)数をFig. 5 (b) ①のLnで記述し、隣接節点の総数を②のN_{xz}(=Ld+Rd+Lu+Ru)で表す。ここに、前述した隣接節点の定義より、各象限にあるLd, Rdなどの変数は隣接節点の有無による1または0しか取れないこととなる。各象限の隣接節点と同時に取れなかった(N_{xz}<4)⑤, かつ、検出節点数Lnが不十分⑥の場合、検出節点の採取直径D1を拡大してサブルーチンComparisonよりもっと多い検出節点を取り込み、再度サブルーチンInterpolationを実行する。Lnが充分多くても、N_{xz}<4となった場合⑦は節

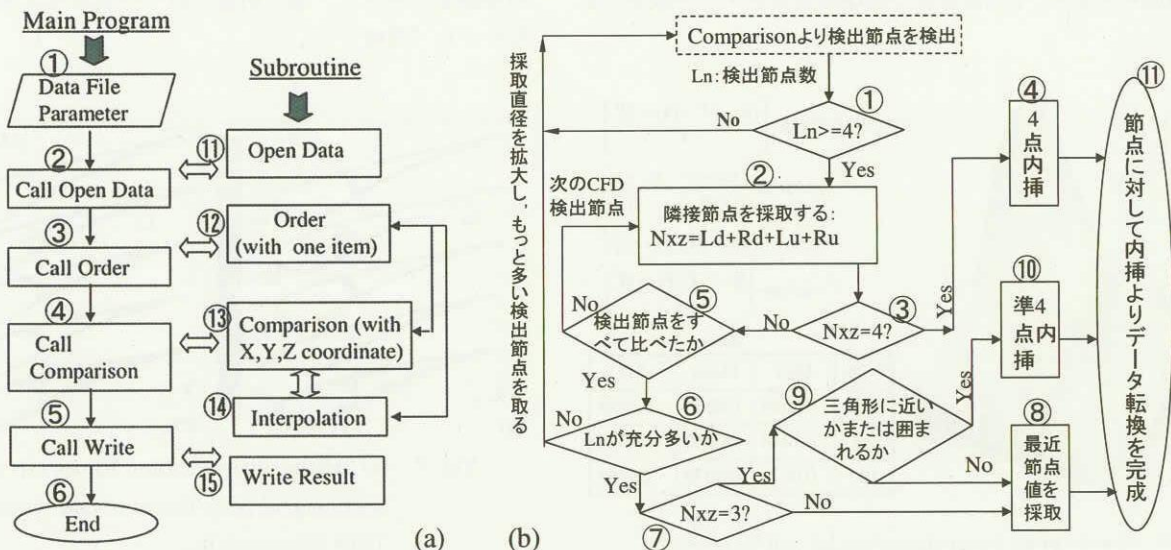


Fig. 5 (a) Main program, (b) interpolation subroutine of interface flow chart.

点Eを端部節点とする。隣接節点の節点数が決められたら、この節点数と対応して、④⑧⑩のいずれかにより内(外)挿する。このように、CFDデータを強度解析へ適用するインターフェースが構築される。

最後、構築したインターフェースの特徴において3点ほど言及する。(1)市販の解析ソフトへインポートするフォーマットのファイルを作成し、節点ごとに解析境界条件を与える特徴を持っている。(2)汎用性がある。前述では縦(Z)方向には平坦であるという事実を前提としたが、この前提は節点Eを含む微少の曲面をXY平面へ投影面積が一番狭いと解釈できる。すると、節点Eを含む微少の曲面を三つの座標平面へ投影した面積を比べて、一番広い座標平面を内挿平面とすれば、その前提と無関係となり、Fig.6に示すような一般的なモデルにも適用される。(3)算法が簡単であり、精度は遜色ない。内挿方法に対して、専門的な報告が多数あり^{(9),(10)}、ここで一例として、本論の内挿方法とある程度近い、Franke氏ら⁽⁹⁾の分散的な大規模なデータからのスムーズ内挿方法Iと比較してみる。この方法は本論での節点E(x,y)に相当する内挿点と近い節点を18個(デフォルト値)検出し、これらの節点から節点E(x,y)までの距離の影響を考慮して、最小二乗の方法で、Q(x,y)の2次関数での6個の係数を求め、関数を作成してから内挿を行った⁽⁹⁾。Franke氏らはFig.6に示す関数f(x,y)により作成されるサーフェースに対して、ランダムに25, 33, 100ポイントの3セットの離散的なデータを発生させ、それぞれ均一な33*33格子の節点に内挿を行った。内挿による最大誤差、平均誤差及び標準偏差(SD)は同図右下に示した。比較するため、上記同様な節点に対してFig.6に示すサーフェースの3次元座標(Z=f(x,y))を読み出し、CFDデータに相当する(X,Y,Z,Tc), Tc=f(x,y)を想定してから準三次元内挿法で内挿を行った。準三次元内挿法による誤差はFranke氏らの誤差(Fig.6)の倍率としてTable1に示す。準三次元内挿法は最大誤差において大きい傾向があるが、平均誤差及び標準偏差はポイント数が100

のセットを除いて、小さくなっている。そこで、本論の内挿方法は簡単であるが、他の内挿方法より精度も遜色ない。

また、本研究の場合、CFDの節点分布がランダムではなくて、規則的になっていて、細かいメッシュに分割しているので、準三次元内挿法により転換したデータの精度は高いことも予想される。

Table 1 Ratio of errors between the present interface and Franke et al. method.

Points	Max	Mean	SD
25	1.82	0.67	0.98
33	1.05	0.67	0.94
100	3.36	1.22	1.98

3.2 定常伝熱・熱応力解析の結果及び考察

上記のインターフェースにより静翼メタル表面の温度を熱荷重として定義した定常伝熱解析結果、静翼三次元の温度分布をFig.7(a)に示す。最高温度(1028℃)は静翼前縁に近い翼外表面(↑印)にあり、最低温度(523℃)は隔壁の根元(↓印)にあることがわかった。また、比較的高温(△)と低温(▲)のところも標示してある。最高温度はNi基単結晶TMS-75の設計許容温度(950℃)より約80℃越えていることがわかった。熱応力の解析結果として、フォンミーゼス応力をFig.7(b)に示す。この図より最大値(529MPa)は後縁の上端部(Fig.7(b)←印)にあり、これは主に応力集中しやすい構造により生じたと考えられる。このほか、基本的にはFig.7(a)に白い矢印で標示している高温領域ではフォンミーゼス応力は高めになっていることが認められた。これは高温の近くでは温度変化が激しく、すなわち温度勾配が酷くなり、熱応力が大きくなるからである。また、Fig.7(a)に黒い矢印▲で示すリブの低温領域でも高い応力が生じていることが観察された。その原因は温度の低いリブと比べ、温度が高い翼面がZ軸方向に大きい熱膨張が発生し、強く引張られているからであることが分かった(図略)。

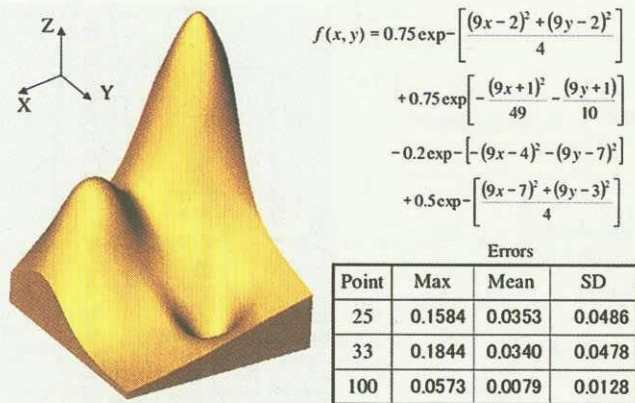


Fig. 6 Franke et al. interpolation model and its errors⁽⁹⁾.

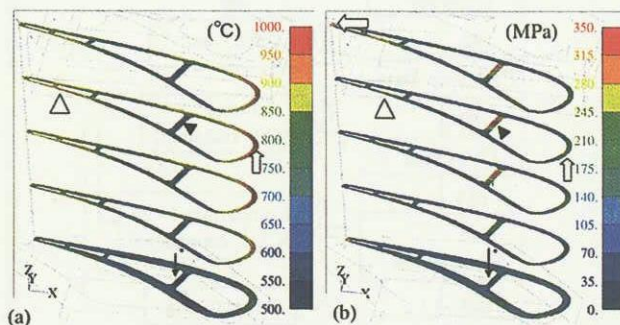


Fig. 7 (a) Temperature, (b) Von Mises stress in section and from the analysis results of TMS-75 superalloy.

3.3 応力の評価 (データ処理システムの応用例)

ここでは仮想タービンの構造強度の評価を実施する際に必要となるデータ処理システムを構築した。このデータ処理システムは解析結果の膨大なデータを評価しやすいフォーム(データベース)にし、実用性が高く、次の機能を有している。(1)市販の解析ソフトでは存在しない指標を可視化する。(2)ユーザの使用目的に応じる評価指標パラメータを作成する。例えば、モデル部位別の評価指標の集計(頻度図)、統計パラメータの作成、モデル仮想断面(任意平面とモデルの交差面)にあるデータ抽出及びそのデータ処理。(3)多解析ケースのデータを一括に処理する。この節ではデータ処理システムの応用例として上記機能の一部を述べる。

市販の解析ソフトでは存在しない指標の可視化 異方性の合金材において、材料強度を完全評価するのは困難である。ここで良く用いる、フォンミーゼス応力をその部位のメタル温度における0.2%耐力で無次元化した値(以下、耐力割合)を評価指標とすることにした。静翼有効部の耐力割合をFig. 8に示す。この図はデータ処理システムを用い、解析コードを活かして可視化したものである。Fig. 8に△

印で示したように耐力割合が前縁などの温度が高いところでは、高いフォンミーゼス応力(Fig. 7 (b))を有していることがわかった。

モデル部位別の評価指標の集計と可視化 Fig. 9 (a)は静翼の高さ方向ではば5段の等分(例えば、図中H10は翼有効部の高さ方向0%~20%間にある節点)、Fig. 9 (b)は腹側の翼内、外表面(InP, OutP)及び背側の翼内、外表面(InS, OutS)に大別にし、それぞれのサーフェースにある節点の耐力割合の頻度(%)を示す。Fig. 9 (a)より静翼高さ方向において、耐力割合は翼有効部の上半部が大きくなっていくことが認められた(←, ▲印)。これはFig. 7 (a)に示す900℃以上の高温領域はほとんど上半部にあり、高温部の耐力が低いからであると考えられる。Fig. 9 (b)より静翼部位別において、比較的に高い耐力割合(0.5以上)は主に翼外表面に存在している(=矢印)ことが見られた。

また、Fig. 10は翼長さ方向にそって評価指標の変化曲線を例示している。ここで、横軸Lは翼面長さ方向の無次元化値であり、前縁を0、後縁を100%にし、腹側はマイナス、背側はプラスとした。図より翼面長さ方向の耐力割合

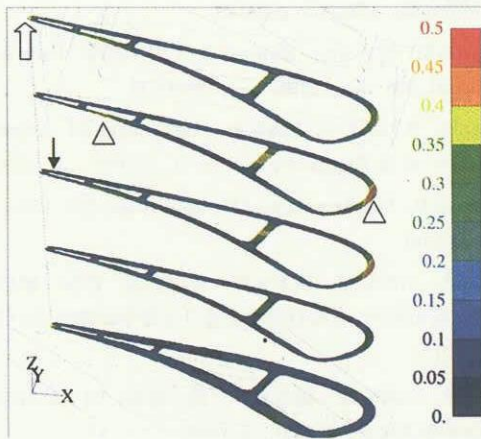


Fig. 8 Ratio of Von Mises stress normalized by proof stress $\sigma_{0.2}$ for TMS-75 superalloy.

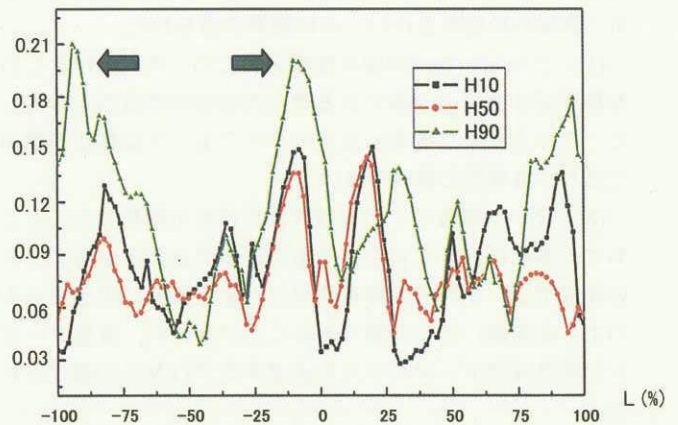


Fig. 10 Ratio of Von Mises stress normalized by $\sigma_{0.2}$ at various heights of Z axis.

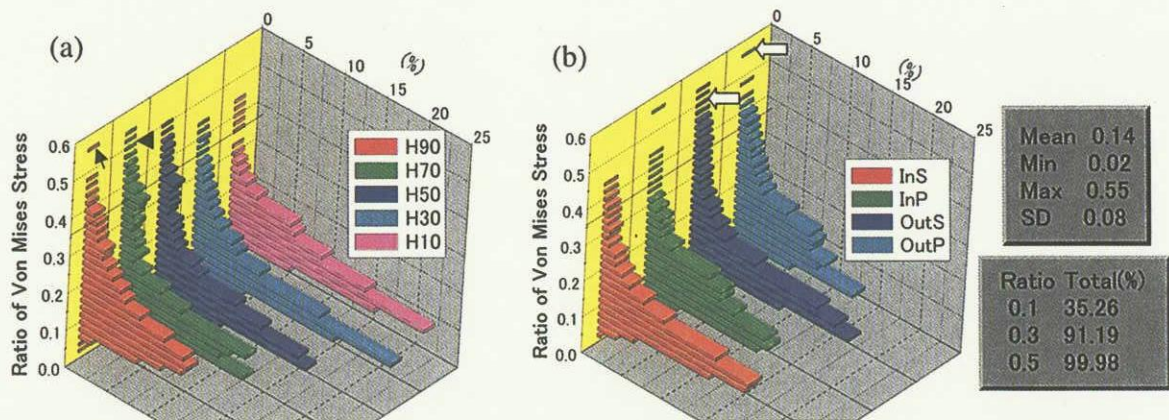


Fig. 9 Frequency distribution for ratio of Von Mises stress normalized by $\sigma_{0.2}$. (a) at various heights of Z axis (for example, H10 indicates the nodes located on 0%~20% height), (b) at various surfaces (for example, InS indicates inside surface of suction side).

の状況がわかりやすくなっていることが示された。

統計パラメータの作成 翼有効部全体の耐力割合の統計パラメータ（平均値、極値及び標準偏差）とある耐力割合までの頻度の和を Fig. 9 右側にまとめている。これより一番高い耐力割合は 0.55 であり、静翼有効部の 99.98%以上のところでは耐力割合 0.50 以下にあることがわかった。

このように、構築したデータ処理システムは多ケース（文献 [11] , [12]で応用した）、モデル各部位、多評価目的に対応する応力評価が必要とするデータを作成でき、仮想タービンの構造強度に関する指標を可視化できるとともに、その分布状況などを全面的に把握できるので、データ処理システムとして有効性が示された。また、このインターフェースにより CFD データを構造解析に適用できること、及びこのデータ処理システムにより 1700℃仮想タービン構造強度のデータベースも作成した。

4. 結 論

本論は仮想タービン構造強度のデータベースを作成するために、CFD データを構造解析に適用するインターフェースを構築するとともに、このインターフェース及びデータ処理システムを 1400℃級仮想タービン静翼の熱応力の解析・評価への応用を行い、次の結果が得られた。

(1) 三次元の内挿問題を座標平面での二次元内挿とその座標平面の選択に分解できる準三次元の内挿方法を考案した。この方法より構築したインターフェースは算法が簡単であり、汎用性と精度が良い。

(2) データ処理システムは評価指標を可視化できるとともに、多評価目的に対応する応力評価が必要となるデータを作成でき、それらの分布状況などを全面的に把握できるので、多機能、かつ有効であることが示され、仮想タービンの構造強度データベースを構築するプロセスが確立された。

本研究は新世紀耐熱材料プロジェクトの一環であり、プロジェクトリーダー原田広史氏からのご指導を頂いた。本論の一部データは物質・材料研究機構の横川忠晴氏、東芝の佐伯祐志氏、宇宙航空研究開発機構の松下政裕氏、西澤敏雄氏からご協力・提供頂いた。紙面を借りて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 原田広史, 岡崎正和, 材料, 51-7, (2002), 836-842
- 2) 新田明人, 材料, 51-5, (2002), p.587-593
- 3) Y. F. Gu, Y. Yamabe-Mitarai, S. Nakazawa, H. Harada, Scripta Materialia, 46-2, (2002), p. 137-142
- 4) Hiroaki N., Ogata, S. and Kitagawa H., Material Science Research International, 5-4, (1999), p.253-257
- 5) 原田, 横川, 尾高, 吉田, 小河, 野崎, 佐伯, 特願 2001-155459
- 6) Yoshida T., Harada H., Fukuyama Y., Ogawa A., Nozaki O., Nishizawa T., Matsushita M. and F. Zhou, 2nd International Symposium of High Temperature Materials 21, (2001), p.64-65
- 7) 陳錦祥, 小河昭紀, 橋本良作, 吉田豊明, 日本ガスタービン学会誌, (2004), p.34-39.
- 8) Miyazaki N., and Shiozaki, Y., JSME International Journal, 39-4, (1996), p. 606-611
- 9) Franke R. and G. Nielson, International Journal For Numerical in Engineering, 15-11, (1980), p. 1691-1704
- 10) Franke R., Mathematics of Computation, 38-157, (1982), p. 181-200
- 11) 陳錦祥, 小河昭紀, 橋本良作, 吉田豊明, 西澤 敏雄, 松下政裕, 福山佳孝, 日本材料学会第 5 3 期学術講演会, (2004), p. 1210122
- 12) 陳錦祥, 小河昭紀, 橋本良作, 福山佳孝, 日本材料学会第 5 3 期学術講演会, (2004), p. 86-87