

CAEによる大型タービン翼ニアネットシェイプ鍛造技術の開発

Forging Process Design Using Forging Simulator for Turbine Blades

技術本部 太田 高裕*¹

高砂製作所 川合 渉*² 難波 孝行*³

馬越 龍太郎*⁴ 大山 宏治*⁵

近年発電プラントの大容量化・高効率化に伴い、タービン翼の大型化が進んでおり、要求される精度も高度化している。鍛造におけるニアネットシェイプ化をねらって、タービン翼の鍛造技術に対応したCAEシステムを開発した。本システムは設計データから三次元数値解析用データを作成し、数値解析により鍛造変形をシミュレーションするシステムである。モデル試験により解析手法の精度を検証し、現在実翼の鍛造に適用している。CAEにより設計と並行して金型の検討に着手できるコンカレントエンジニアリングが可能となった。また、数値解析より出力された材料流動などの情報を基に、迅速に金型形状・素材形状などの鍛造条件を決定できるため、大型タービン翼製作の短納期化を達成できる。

Steam turbine blades require high-precision manufacture. To optimize near-net shape forging, e. g. die and work design, the metal flow pattern and forging force must be predictable. We developed a CAD/CAM and CAE system using a forging simulator for turbine blades. In scaled-down model blade forging, the shape and forging force predicted by the simulator using rigid-plastic FEM we are very similar to those in experiments. CAE has the advantages of reducing material waste and lead time, because die and work design are optimized more quickly by the simulator than in experiments.

1. ま え が き

近年発電プラントの大容量化・高効率化に伴い、タービン翼の大型化が進んでおり、要求される精度も高度化している。当社では既に高効率タービン翼として46インチISB (Integral Shroud Blade)を開発・実用化している⁽¹⁾が、今後より大型のタービン翼が要求されると考えられる。

このような大型タービン翼を短納期、高精度で製作するため、当社ではタービン翼のニアネットシェイプ鍛造技術の開発に取り組んできた。鍛造でニアネットシェイプ成形を行うことにより、材料費の削減、機械加工工数の削減が可能となる。また、工作部門と設計部門が連携することにより、設計と並行して金型の検討に着手できるコンカレントエンジニアリングが可能で納期の短縮にも寄与できる。

これまで鍛造技術は個人的な経験やノウハウに頼る部分が非常に大きかったといえる。一方、近年コンピュータと数値解析技術の進歩により、大変形複雑接触問題である鍛造の数値解析技術が進歩してきており、三次元鍛造シミュレーション技術も実用化段階になっている。そこで、数値シミュレーションを用い、金型形状や素材形状などの鍛造プロセスの設計に対する評価を定量的かつ系統的に行い、鍛造プロセスの最適化をねらって、数値解析により鍛造変形を数値シミュレーションするCAEシステムを開発したので報告する。

2. タービン翼鍛造の概要

タービン翼の鍛造工程を図1(a)に示す。素材は丸棒であり、荒地鍛造機で製品の断面積ごとに体積配分された段付き形状に鍛伸される。荒地鍛造機は素材を回転及び軸方向に移動するとともに、ストローク制御された4個のハンマーにより、材料を所定の形状に鍛伸する自由鍛造機である。荒地加工された素材を大気炉で加熱後、翼形状に機械加工された1種類の金型で成形される。型鍛

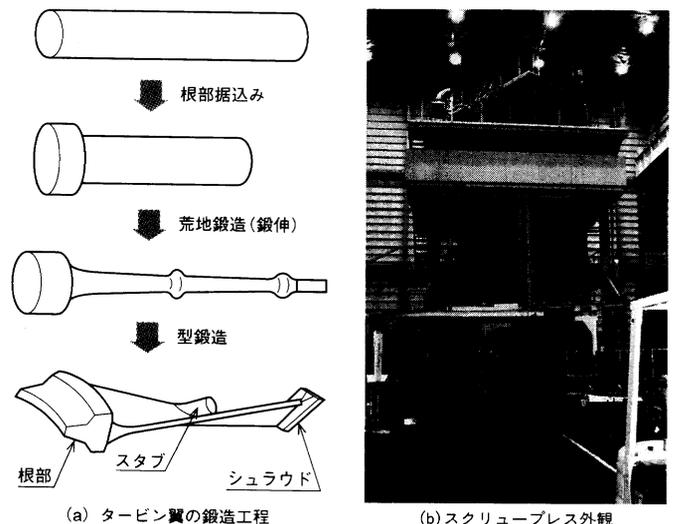


図1 タービン翼の鍛造工程及び使用したスクリープレス外観
素材を自由鍛造で荒地に成形後、型鍛造を行う。
Forging process for turbine blades and screw press

造は最大荷重245 MN級のスクリープレスを用いて実施している。タービン翼の鍛造では、鍛造品の板厚が薄く鍛造中の金型との接触による温度低下が問題となるため、短時間に鍛造可能なスクリープレスが最も適している。スクリープレスでは1度に大きな変形エネルギーを鍛造品に与えることができるので、高効率で高精度な鍛造が可能である。用いたスクリープレス外観を図1(b)に示す。

型鍛造の典型的な変形様式を図2に示す⁽²⁾。変形初期は型による変形拘束は小さいが、変形の進行とともに型への接触量が増加して拘束が大きくなる。この段階の変形様式は図2に示すように“据込み”、“広げ”、“盛上げ”等に分類できる。タービン翼の鍛造ではプロファイルは“広げ”、スタブは“盛上げ”、根部は“据込み”

*1 高砂研究所製造技術開発センター

*4 タービン技術部主席

*2 工作部ブレード課長

*5 タービン技術部タービン設計課主席

*3 工作部ブレード課

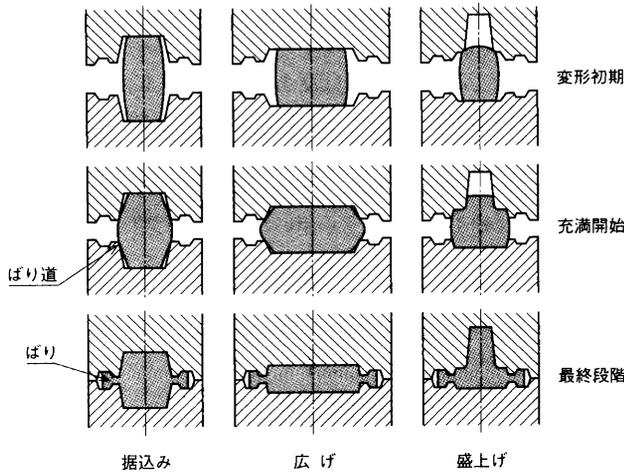


図2 型鍛造における変形様式の模式図 ばりの発生とともに、荷重が上昇し型内に材料が充満する。
Schematic deformation pattern of die forging

である。“広げ”は滑り距離が大きく加工面圧・変形が摩擦の影響を受けやすい。“盛上げ”は材料のばり道への流入抵抗とばり道での摩擦拘束による圧力増大によって起るが、拘束が小さいと盛上げが不十分で、形状欠陥が生じる。ばり体積が小さいと欠肉になりやすく、ばり体積が大きすぎると歩留りが悪くなる。以上のように、鍛造精度を向上させるためにはばりを効率良く発生させる金型と素材など鍛造プロセスの設計が不可欠となる。

タービン翼の型鍛造は通常仕上げ型の1型で行う設計としている。タービン翼鍛造における問題点の一つに型ずれがある。型ずれはタービン翼の形状に起因するもので、鍛造時に発生する水平方向の反力のアンバランスにより発生する。型ずれ量の大小はプレスの運動学的特性や構造、型構造、金型形状（彫込み形状）などにより変化する。このため、型ずれ量を最小とするためには、プレスの特性・構造を十分考慮したうえで、金型形状の最適化が重要となる。

3. タービン翼鍛造の数値解析

タービン翼鍛造の数値解析は翼の代表断面を二次元（平面ひずみ）で解析を行ったものが報告されている⁽³⁾。しかしながら、現在の効率の良い翼はねじりが大きく、加工初期に型内で素材位置がねじれるように移動する。この素材の移動は二次元解析では計算できないため、変形形状解析精度が悪くなる可能性が高い。このため、ねじりの大きなタービン翼に対しては三次元解析が必要となっている。

鍛造の変形は100%以上と非常に大きく、弾性変形（約0.1%以下）はほぼ無視できるので、素材は剛塑性体として取扱った。また、剛塑性体とすることにより、数値解析における1ステップの変形量を大きくでき、計算時間を短くできるため、解析の効率化に有利である。

そこで、解析時間短縮のため、三次元解析手法として圧縮性材料特性を採用した剛塑性有限要素法コードで計算を行った。金型は剛体として取扱ったが、金型の変形は加工反力を基に弾性解析を行うこととした。

前述したように、型鍛造ではばりの発生が重要な役割をしている。一方、ばり部は数100%もの大変形であるため、有限要素法では変形の進行とともに要素がつぶれるという問題点がある。このため、解析中に数回リメッシュを行い、改めて計算を再開した。

4. CAEシステムの概要

4.1 システムの構成

タービン翼の形状は設計部門のCAD（Pro/Engineer）で設計される。この形状データを工作部門のCAD/CAM（CATIA）に送信して金型設計を行う。設計した金型形状は数値解析用の形状データ（STL形式）に出力するとともに、NC加工用のデータ作成にも用いる。システムの構成を図3に示す。

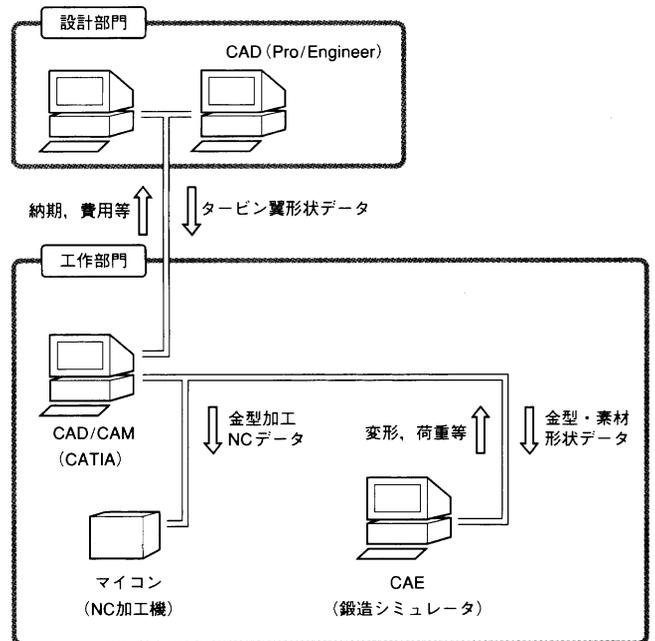


図3 CAEシステムの構成 CADで作成した形状データにより解析データ及びNC加工データを作成する。
System construction

4.2 解析手順

金型形状はCATIAから出力されたSTLファイルの形状を用いた。入力用のデータは専用プリソフトで作成した。入力情報として、金型と素材形状、素材の変形抵抗、型と材料間の摩擦状態、ストローク、加工速度、各ステップの時間増分など解析に必要なデータを入力する。

数値解析にはEWSを用いて、鍛造シミュレータで計算した。計算結果は各ステップごとのメッシュ情報、材料流動ベクトル、成形荷重、面圧分布、応力・ひずみ分布など鍛造結果を評価する情報が出力される。

出力された情報は専用ポストソフトで処理した。これにより従来、ブラックボックスであった金型内での材料流動の可視化や金型の面圧分布が評価できる。金型の変形については、面圧を基に金型の弾性計算を行い、変形量を金型形状にフィードバックすることも可能である。これらの情報を基に、対象タービン翼に適した素材形状、金型形状の評価を行い、最適化を図ることができる。

5. モデル試験による解析手法の検証

数値解析手法を検証するため、40インチ翼の1/10モデル試験を実施した。実験では鍛造プロセス中の温度変化を無視できるように、供試体の材質として軟質鉛を用い、室温で試験を行った。

鉛は融点が328°Cと低く、室温で再結晶を起すため、熱間加工の模擬材としてよく用いられる。

5.1 実験方法

対象翼を40インチ翼として、素材形状、金型形状をすべて相似で1/10に縮小した。素材形状は図1に示したように段付き形状である。試験には荷重などの情報を容易に取得するため、100tf油圧プレスを用いて、1mm/sの等速度で鍛造試験を実施した。

鉛の変形特性を調べるため、φ20×H20mmの円柱に対して、10mm/min、100mm/min、1000mm/minの等速度で圧縮試験を実施した。端面と圧縮工具の間には潤滑剤は用いなかった。

試験結果の真応力-真ひずみ曲線は図4に示すようになり、ほとんど加工硬化を示さず、ひずみ速度依存性を示す。実機のタービン翼材質は17-4PH鋼(ステンレス鋼)で、約1000°Cに加熱されて鍛造される。変形抵抗を比較すると、1000°Cでは17-4PH鋼も加工硬化をほとんど示さず、ひずみ速度依存性を示す。そこで、以下の式(1)で相似則を適用した。

$$荷重 P = 実験荷重 P' \times (スケール倍)^2 \times (17-4 PH 鋼の変形抵抗) / (鉛の変形抵抗) \quad (1)$$

変形抵抗はひずみ速度に依存するが、対象物とスケールモデルの比率が同じであれば、ひずみ速度を加工速度と置換えても変形抵抗の比率は成立つので、式(1)のようにした。スクリュープレスを用いて、加熱したφ80×80mmの17-4PH鋼を圧縮した結果を図4に示す。図4中にφ20×20mmの鉛の圧縮試験結果を式(1)に従って、計算した結果を示すが、ほぼ17-4PH鋼の圧縮結果と一致することを確認した。

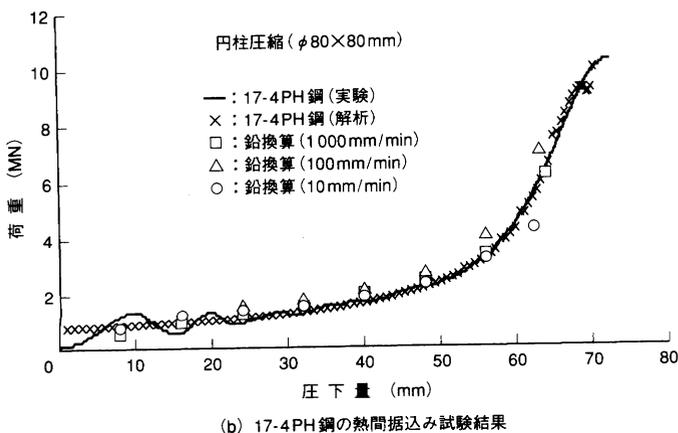
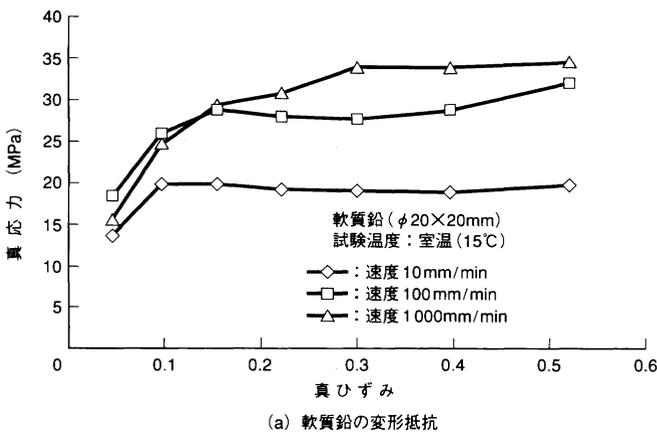


図4 実験に用いた鉛の変形抵抗と17-4PH鋼の熱間据込み試験結果への数値解析技術の適用例 スケール則及び数値解析により加工力を予測可能である。
Flow stress of lead and results of hot upset test for 17-4 PH steel

金型はダイホルダ内に設置される。金型はプレス荷重(Z方向荷重)及び横荷重(Y方向荷重)を計測するため、計測用ピンを介して固定した。それぞれにはひずみゲージ(4ゲージ法)を張付け、加工中に発生するひずみを動ひずみ計で計測した。

5.2 解析モデル

モデル試験を模擬するため、金型形状、素材形状はCAD上で、すべて1/10に縮小したデータを用いた。金型は剛体、素材は剛塑性体としている。素材は四面体ソリッド要素でモデル化し、節点数は約10000である。

素材の変形抵抗には図4(a)に示した鉛の応力-ひずみ曲線を用いた。加工速度は1mm/s一定とした。

5.3 実験結果と解析結果の比較

図4(b)にはφ80×80mmの17-4PH鋼を熱間で据込みした場合のストローク vs. 荷重曲線を示した。図4中には数値解析の結果も示しているが、単純な円柱の据込み試験では実験結果とほぼ一致することを確認できた。

タービン翼モデルにおける、鍛造変形の解析結果を図5に示す。加工初期に材料が金型のねじれに応じて、曲げ変形が発生する。この傾向は実験でも観察されており、変形を数値解析により模擬できていることが確認できた。このような曲げ変形は断面の二次元解析では模擬が難しく、今回の三次元解析で明らかになった現象である。

図6(b)に実験結果も示しているが、変形(ばりの発生状況)はほぼ解析と一致する。特に、翼端部においては解析ではわずかに欠肉が発生している。

一方、実験においても図6(b)に示したように、わずかに欠肉は発生した。以上のように鍛造を行う上で、最も問題となる欠肉の予測も解析により可能であることが示された。

なお、欠肉については、素材の初期位置を変更することにより解決可能であることを確認しており、実翼では問題なく鍛造されている。

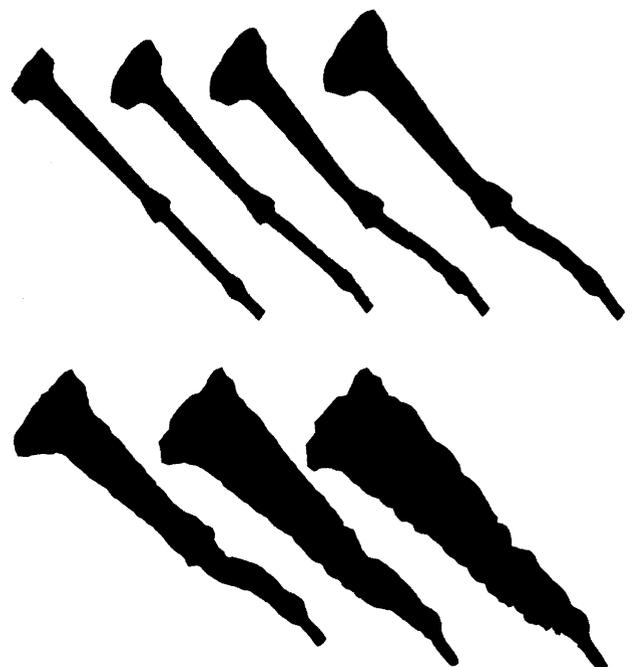


図5 タービン翼鍛造中の変形状況の解析結果 鍛造中に金型のねじりにより材料が曲げ変形する状況が可視化できる。
Analysis results of deformation during forging process

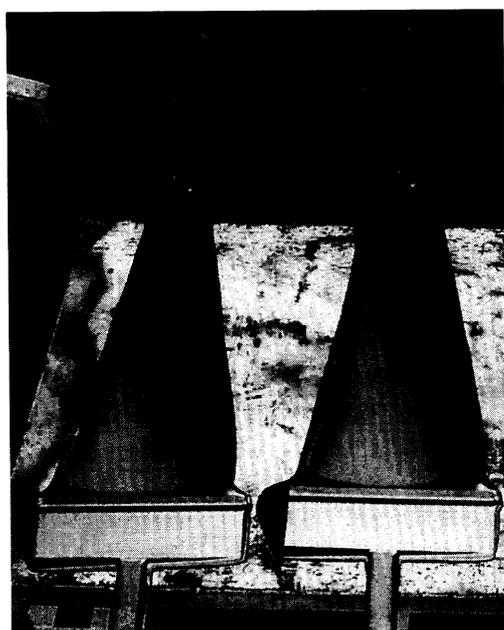
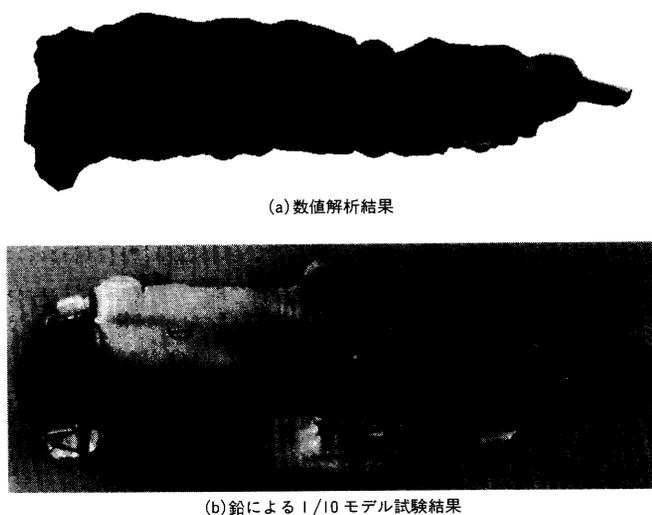


図6 鍛造形状の解析結果と実験結果の比較 翼端の欠肉状況が解析により模擬可能であり、実機では欠肉を防止できた。
Deformation shape of turbine blade by numerical analysis and experiment

図7には解析と実験のストローク vs. 荷重曲線の比較を示す。図7中にはプレス荷重 (Z 方向) 及び横方向荷重 (X 方向) を示している。ここでいう横方向荷重は金型全体の接触反力の合計である。タービン翼の鍛造では、その形状から鍛造中に金型を横にずらすような横荷重が発生する。この荷重は金型のずれを起すため、小さい方が良く考えられる。このタービン翼では横荷重はプレス荷重の約 10% 程度である。図7に示すように、プレス荷重、横荷重共に実験と解析は良い一致を示しており、荷重の予測にも数値解析を適用できることが検証できた。

5.4 実機タービン翼の鍛造

実験結果及び解析結果から 17-4 PH 鋼の熱間鍛造で、スクリープレスを用いた 40 インチ翼での鍛造荷重を予測し、245 MN 級

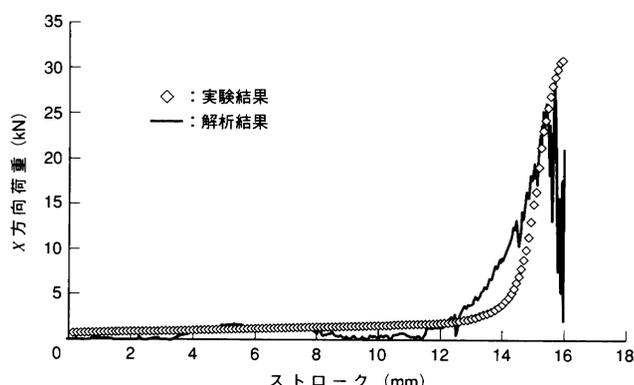
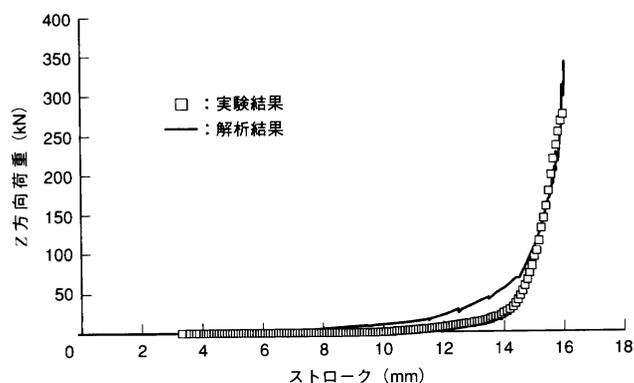


図7 ストローク vs. 荷重曲線の実験と解析の比較 数値解析により鍛造荷重が予測できる。
Comparison of forging force in experiment and analysis

スクリープレスで鍛造可能であることを確認した。数値解析により素材位置を最適化し、翼端の欠肉を防止できる条件を設定して、実翼の鍛造を行った。

鍛造後の形状を図6(c)に示すが、欠肉もなく鍛造品寸法公差 (-0 mm, +0.1 mm) 以内に鍛造可能であることを確認できた。

6. ま と め

タービン翼の鍛造への CAE の適用状況について報告してきた。数値解析による最適化の有効性は確認できており、今後鍛造プロセスの設計には不可欠となると考えられる。

今回の報告では鍛造プロセス中の温度変化を考慮しなかったが、鍛造前後のハンドリング中の温度変化も含めて解析できる手法を今後開発していく予定である。

参 考 文 献

- (1) 松隈雅治ほか, 電源開発(株)松浦2号機1000 MW 超高温タービンの設計と運転実績, 三菱重工技報 Vol.35 No.1 (1998) p.10
- (2) 日本塑性加工学会編, 鍛造, コロナ社 (1995)
- (3) 谷和人ほか, チタン合金製40インチ長翼の製造, 神戸製鋼技報 Vol.48 No.1 (1998) p.61