

(論文)

チタン合金の鍛造プロセス設計のための超音波探傷性の予測技術

Technique for Predicting Ultrasonic Detectability in Process Designing of Titanium Alloy Forgings



伊藤良規*¹
Yoshinori ITO



高松弘行*² (博士(工学))
Dr. Hiroyuki TAKAMATSU



木下敬之*³
Keiji KINOSHITA

Critical rotating parts such as aircraft engine disks require high reliability and therefore are subjected to ultrasonic testing. Titanium alloy forgings, however, are known to generate backscattering signals that are attributable to their microstructure, which hinders the detection of the signals from defects. In order to provide titanium alloy forgings with excellent ultrasonic flaw detectability, Kobe Steel is developing a technique for predicting the backscattering signals attributable to the microstructure of the forgings deformed in β region. A study was conducted to correlate the ultrasonic signals generated from microstructures of β -forged titanium alloys, and a verification was made by FEM analysis. The results indicate that the colony-microstructure, aggregates of primary α -platelets, provokes the backscattering of ultrasonic waves. It has been revealed that the prediction using a microstructural model based on the shape and thickness of β -grains tends to agree well with the experimental results. The findings are applicable to the process design of titanium alloy forgings with excellent flaw detectability.

まえがき = チタンおよびチタン合金は比強度に優れることから航空機用部材に広く用いられている。なかでも、 β 域で鍛造されたTi-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti-6246) 合金は強度靱性 (じんせい) バランスに優れ、航空機エンジンのディスク部材などの重要回転体に用いられている。重要回転体は高い機械的特性が要求されることに加え、その損傷が重大事故を引き起こすことから、とくに高い信頼性が要求される。例えば、窒素などの侵入型元素が濃化したハード α などの欠陥がチタン合金鍛造材内部に存在すれば早期の疲労損傷を引き起こすことから¹⁾、欠陥形成を防ぐために製造管理を徹底すると同時に、超音波探傷による内部欠陥検査を実施する。

超音波探傷検査は、欠陥から反射する超音波信号を元に内部欠陥のサイズなどを判断するが、チタン合金鍛造材は材料組織に起因して発生する後方散乱信号 (以下、材料ノイズという) が大きく、微小欠陥から生じる信号が材料ノイズに埋もれてしまうことによって微小欠陥信号の検出が妨げられ、超音波探傷検査が難しいことが知られている²⁾。

そのため、超音波探傷性に優れたチタン合金鍛造材を提供するためには、チタン合金鍛造材から発生する材料ノイズを予測し、それを抑制するために材料組織を制御することが必要である。これまでに、チタン合金における材料ノイズの発生挙動に及ぼす組織の影響について、様々な基礎検討がなされている^{3)~8)}。チタン合金を β 域から比較的遅い速度で冷却した場合、板状の一次 α が

形成される。その厚さはミクロンオーダーであるが、隣接して配列する板状一次 α は同一の結晶方位を有し、数百ミクロン以上の粗大なコロニー組織を形成し得る。

超音波は弾性定数 (伝播する音速) の異なる境界面で反射するが、 α 相チタンの結晶構造は六方晶で弾性異方性が強いので、コロニー組織など、異なる結晶方位を有する領域 (“マクロゾーン” などとも称されるが、これらの領域も含めて本稿では “コロニー組織” という) の境界面が超音波の反射源となり得る。これまでに、Gintyらが平坦 (へいたん) なコロニー組織の境界面が強い反射源になること³⁾、また、Panettaらが伸長したコロニー組織が材料ノイズの異方性の原因になること⁷⁾を報告している。さらに、音響の後方散乱理論を基に、組織から発生する材料ノイズ強度を予測する試みがなされている^{9), 10)}。

このように、チタン合金の材料ノイズ発生にかかわる基礎的な挙動が明らかになっているが、実鍛造材は複雑形状をなし、その内部に形成される組織は均質ではない。また、超音波探傷検査の際、入射信号のフォーカス条件や角度条件などに様々な条件を用いて探傷することを鑑みると、実鍛造部材の材料ノイズ予測は困難であった。そこで、工業的に適用可能な材料ノイズの予測技術構築を目的に、種々の鍛造圧下率により組織形態を変化させたTi-6246合金の β 鍛造材を用いて材料ノイズ発生に及ぼす組織の影響を検討し、FEM解析による検証を試みた。本稿においてその概要を報告する。

*¹ 技術開発本部 材料研究所 *² 技術開発本部 生産システム研究所 *³ 鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン工場

1. 実験方法

実験では、 β トランサスが約965°CのTi-6246合金ピレットを用い、 β 単相域に加熱後、一軸のアップセット鍛造を行い、パンケーキ状鍛造材を得た。圧下率は0%、33%、50%、67%、および83%の5条件とし、圧下率が67%までの条件は、鍛造材の形状がおおよそ直径200mm、厚さ60mmとなるように圧下率条件に応じて形状の異なる初期素材を準備した。圧下率83%の条件のみは、アップセット鍛造時の素材の座屈を防ぐ目的で圧下率67%と同じ形状の初期素材を用いたため、鍛造材形状はおおよそ直径280mm、厚さ30mmである。鍛造は恒温鍛造で行い、所定圧下率のアップセット鍛造の後、室温までファンによる強制空冷を行った。その後、溶体化処理と、時効処理を施し、組織観察と超音波探傷試験を行った。

組織観察は光学顕微鏡を用い、鍛造材の中心と外周を直線で結んだ中間位置で、厚さ中央部を観察し、観察面は鍛造方向と半径方向に平行な断面とした。鍛造と同じ熱履歴のみを加えた場合（圧下率0%）、等軸の β 粒が認められる（図1）。その粒界には連続で直線的な粒界 α が形成され、 β 粒の内部には板状一次 α が形成されている。鍛造を施すことで β 粒の形状は等軸から扁平（へんぺい）に変化し、圧下率の増加に伴って扁平な β 粒の厚さが薄くなる（図2）。また、連続した直線的な粒界

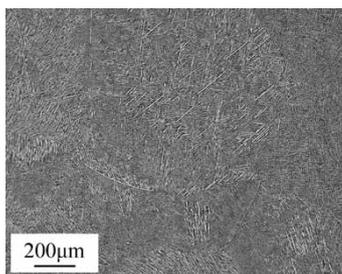


図1 加熱履歴のみ加えた圧下率0%のTi-6246合金の光学顕微鏡組織
Fig. 1 Optical microstructure of Ti-6246 specimen without deformation

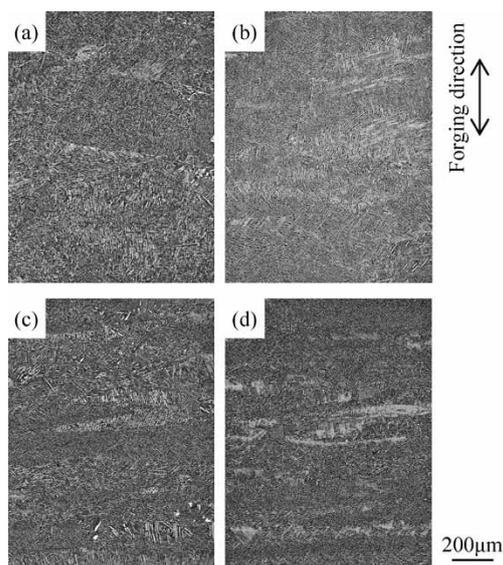


図2 β 鍛造を施したTi-6246合金の光学顕微鏡組織（圧下率 (a) 33%、(b) 50%、(c) 67%、(d) 83%）
Fig. 2 Optical microstructures of Ti-6246 specimens deformed above β transus (reduction in height of (a) 33%, (b) 50%, (c) 67% and (d) 83%)

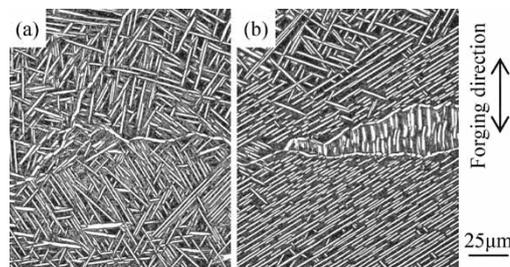


図3 β 鍛造を施したTi-6246合金の光学顕微鏡組織（高倍率）（圧下率：(a) 33%、(b) 67%）

Fig. 3 Higher magnified optical microstructures of Ti-6246 specimens deformed above β transus (reduction in height of (a) 33% and (b) 67%)

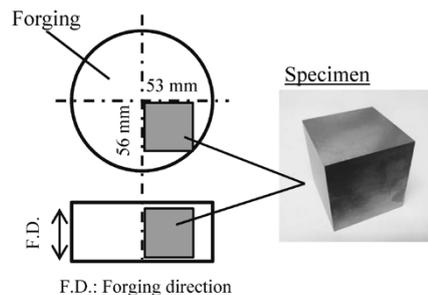


図4 超音波探傷用試験片の採取位置

Fig. 4 Location of specimens excised from forgings for ultrasonic inspection

α は分断されて不連続な形態に変化し、また、いずれの鍛造材にも10~100 μ m程度の長さの板状一次 α が β 粒内に形成されている（図3）。

このような組織を有するそれぞれの鍛造材から直方体形状の試験片を切り出し、超音波探傷試験に供した。圧下率が67%までの鍛造材からは53mm（半径方向） \times 56mm（半径方向） \times 53mm（鍛造方向）の、圧下率83%の鍛造材からは53mm（半径方向） \times 56mm（半径方向） \times 26mm（鍛造方向）の試験片を図4に示す位置から切り出した。

超音波探傷試験には、平均周波数が5、10、15MHzのフラット探触子を用い、それぞれ20dB、30dB、40dBの条件で、水浸法にて試験面に対して垂直方向にパルス波を送受信し、表面エコーと第1底面エコー間の信号を評価した。送受信方向は鍛造方向に平行方向と垂直方向の2条件とし、今回の探傷では減衰補正を行わなかった。さらに、FEMベースの弾性波解析によって実験結果の検証を行った。

2. 実験結果と考察

2.1 鍛造材から発生する材料ノイズ

周波数5MHzの探触子で鍛造方向に平行方向の探傷により受信した超音波信号のプロファイルを図5に示す。本実験では、欠陥を含まない鍛造材を評価しているため、図中に明示する表面エコー（Surface echo）と第1底面エコー（Bottom echo）との間が材料組織から生じた信号、つまり材料ノイズである。本図では複数回の測定で得たデータから算出した二乗平均平方根値（RMS値）を図示している。材料ノイズは圧下率0%の場合には厚さ方向全域で小さい（図5（a））が、圧下率が高く

なるに従って急激に大きくなる傾向が認められる。また、試験片の厚さ方向に一定ではなく中央付近で最大値を示し、あたかも欠陥があるかのようなピークを示す(図5(d), (e))。

つぎに、図5に示すプロファイルを基に、表面エコーと第1底面エコーの中間位置で全体の25%の区間の信号強度を平均化し、各鍛造材の平均材料ノイズとした。周波数10MHzと15MHzでの測定プロファイルからも同様に求め、鍛造圧下率による変化を図6に整理した。材料ノイズの強度は鍛造時の圧下率と、探傷時の周波数に強く依存することが明らかである。つまり、周波数が10MHzと15MHzで探傷した場合、材料ノイズは圧下率の増加に伴って圧下率が83%まで単調に増加するが、これに対して、周波数が5MHzの場合には、圧下率67%までは単調に増加してピークを示し、さらなる圧下率の増加に伴って材料ノイズの減少が認められる。

つぎに、材料ノイズの異方性を検討するため、周波数5MHzで鍛造方向に垂直の方向に探傷を行った。その結果を図7に示す。鍛造方向と平行な方向の探傷とは異なり、圧下率条件にかかわらず発生する材料ノイズが非常に小さいことが分かる。つまり、材料ノイズの強度は探傷方向に強く依存し、とくに圧下率67%近傍の条件において、その異方性が顕著となることが明らかとなった。

2.2 材料ノイズの支配組織因子

等軸の結晶粒組織から発生する材料ノイズは等方的である一方で、細長く伸びた結晶粒組織から発生する材料ノイズには異方性が認められることが報告されている^{6), 7)}。さらに、伝播する超音波を横切る広い界面が存在する場合に大きな材料ノイズが発生することが報告されている⁷⁾。図1および図2に示したとおり、圧下率0%と33%の鍛造材には等軸もしくはだ円形状のβ粒が形成しているのに対して、圧下率67%と83%の鍛造材には扁平なβ粒が形成されている。図6に示したように、圧下率の増加に伴って急激な材料ノイズの増加が認められたが、これはβ粒の形状変化とおおむね一致する。このことから、等軸なβ粒が鍛造により扁平に変化することで、超音波の伝播方向に垂直で広く平坦な粒界面を持つβ粒が多く形成され、大きな材料ノイズが発生すると考えられる。鍛造方向に垂直な方向には、圧下率条件にかかわらず、伝播する超音波を横切る方向にβ粒の広く平坦な粒界面はほとんど形成されない。このため、鍛造方向に垂直な方向から探傷した場合には、圧下率に依存せず材料ノイズが小さかった図7の実験結果とも傾向が一致する。このように、材料ノイズの強度変化はβ粒の形状変化と良く対応している。ただし、今回用いたTi-6246合金は室温でα相が約75%を占めるα+β二相合金である¹¹⁾。β鍛造によりβ粒が変形した後の冷却過程で板状一次αが形成され、その面積率は、その後の溶体化処理温度に依存するが、約50%を占める¹¹⁾。そのため、板状一次αの同一結晶方位の集合体であるコロニー組織が超音波の後方散乱を引き起こす主な組織因子と考えられる。コロニー組織の形状とサイズは、β鍛造とその後

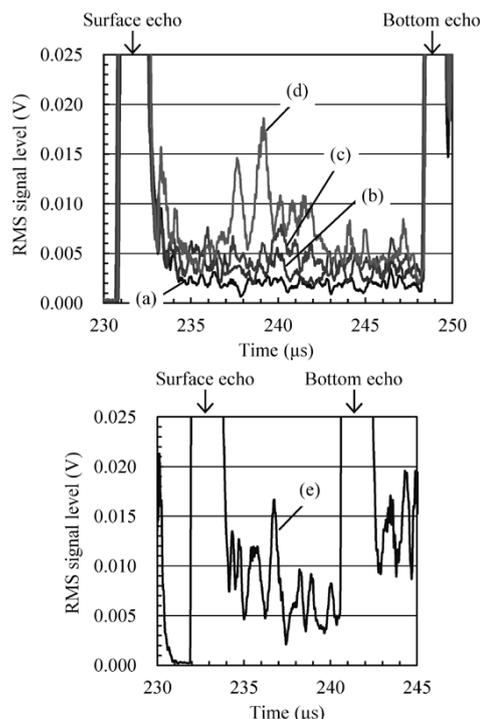


図5 超音波探傷試験(周波数: 5 MHz)による受信信号プロファイル(圧下率(a) 0%, (b) 33%, (c) 50%, (d) 67%, (e) 83%)
Fig. 5 RMS signal profiles of ultrasonic inspections at frequency of 5 MHz (reduction in height of (a) 0%, (b) 33%, (c) 50%, (d) 67%, (e) 83%)

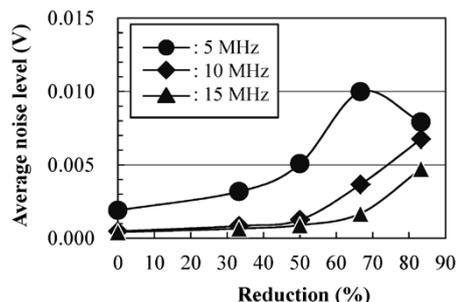


図6 鍛造方向に平行方向の探傷により発生する超音波ノイズに及ぼす圧下率の影響(周波数: 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz)
Fig. 6 Influence of reduction in height on average RMS noise levels at frequencies of 5 MHz, 10 MHz and 15 MHz

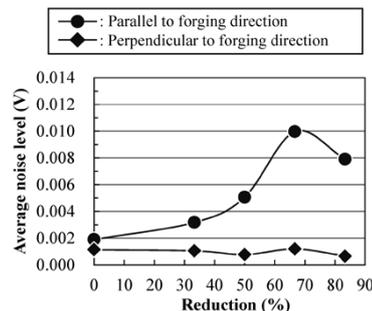


図7 超音波ノイズに及ぼす圧下率と探傷方向の影響(周波数: 5 MHz)
Fig. 7 Influence of reduction in height and direction of ultrasonic inspections on average noise levels

の冷却過程で決まる。本稿では詳細を示していないが、冷却条件をほぼ一定とした場合、コロニー組織の形状とサイズは板状一次α形成前のβ粒の形状と強い相関を有すると考えられ、材料ノイズの強度変化がβ粒の形状変化と良く対応したと考えられる。

以上の結果から、Ti-6246合金のβ鍛造材において、

広く平坦な粒界面を有する扁平な β 粒が形成されることで、同様に鍛造方向に垂直方向に広がった境界面を有するコロニー組織が形成され、大きな材料ノイズが発生すると考えられる。この考えを基にすると、平坦な β 粒の粒界面形成に必要な圧下率以上に鍛造を施した場合には、圧下率条件にかかわらず大きな材料ノイズが発生すると考えるべきであるが、周波数5 MHzの探傷にて生じた材料ノイズは圧下率67%でピークを示し、それ以上の圧下にて減少が認められることから、材料ノイズの発生は β 粒の粒界面形状のみでは単純に説明できず、他の因子を考慮しなければならないことを示している。

材料ノイズのピークは周波数5 MHzの探傷でのみ観察され、周波数10 MHzと15 MHzの探傷では認められなかった実験結果に着目すると、この現象は探傷に用いる超音波の波長に依存していると考えられる。Gigliottiらは⁸⁾、 $\alpha + \beta$ 域で鍛造したTi-6242合金に対して超音波探傷性を評価し、超音波の後方散乱の原因となるコロニー組織のサイズと超音波の周波数の影響を検討している。すなわち、一般的な鍛造材には粒径 $10\mu\text{m}$ 程度の一次 α 粒の集合体であるコロニー組織が残存し大きな材料ノイズが発生するが、特殊な超微細化プロセスにてコロニー組織を十分に微細化した鍛造材では、材料ノイズが大きく低減すると報告しており、超音波の波長（周波数5 MHzの場合は $1,200\mu\text{m}$ ）に対してコロニー組織を相対的に十分小さくすることで超音波の散乱メカニズムが変化する^{注)}ためと実験データを基に考察している。本実験で認められた材料ノイズの強度変化もGigliottiらの報告⁸⁾と同じメカニズムによると考えられ、数値解析を用いた検証を行った。

2.3 数値解析による検証結果

高圧下率の鍛造材に認められた扁平な β 粒組織に形成される板状一次 α のコロニー組織の形状は β 粒の形状と厚さに相関すると仮定し組織のモデル化を行った。つまり、扁平な β 粒組織と同様に平坦な境界面を有するコロニー組織が形成するとし、この組織を模擬するため、無限長の直線状粒界が平行に配列した図8の多層粒界モデルを用い、粒界の垂直方向から超音波を送受信した。隣り合う直線状粒界に挟まれた領域をコロニー組織とみなし、粒界の平均間隔（コロニー組織の平均厚さに相当）は25, 50, 100, 200, $400\mu\text{m}$ の5条件を検討し、平均間隔から $\pm 10\%$ の範囲でランダムな間隔の粒界を配列させた。

コロニー組織を形成する α 相のチタン内の超音波の音速は結晶方位に依存し、六方晶の底面の法線方向に平行に伝播した場合に最大速度を、法線方向に垂直に伝播した場合に最小速度を示す。文献により値が異なるが、それぞれ $6,332\text{m/s}$ と $6,003\text{m/s}$ ¹³⁾、並びに $6,014\text{m/s}$ と $5,494\text{m/s}$ ¹⁴⁾という報告がある。ここでは、平均 $6,000\text{m/s}$ に対して $\pm 5\%$ の範囲のランダムな値を各コロニー組織内の音速

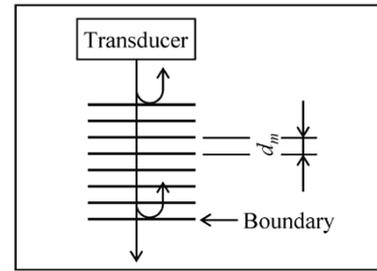


図8 多層粒界モデルの模式図
Fig. 8 Schematic of multi-layered model

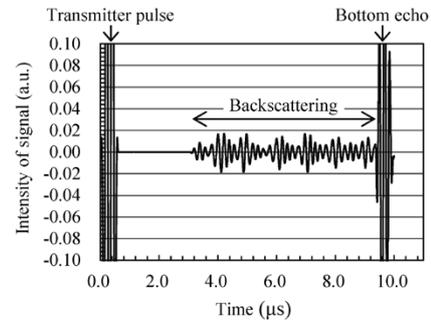


図9 多層粒界モデルの数値解析で得られた信号プロファイル（周波数：5 MHz、平均粒界間隔： $400\mu\text{m}$ ）
Fig. 9 Signal profile obtained by FEM analysis for multi-layered model (frequency: 5 MHz, mean distance between boundaries (d_m): $400\mu\text{m}$)

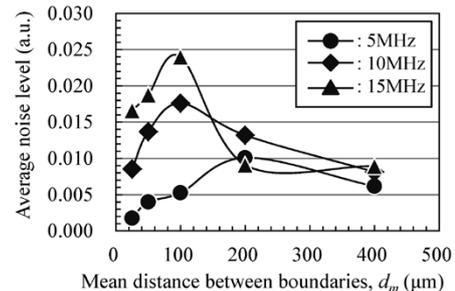


図10 超音波ノイズの予測値に及ぼす平均粒界間隔の影響（周波数：5 MHz, 10 MHz, 15 MHz）
Fig. 10 Influence of mean boundary distance on average noise levels predicted at frequencies of 5 MHz, 10 MHz and 15 MHz

に用いて解析を行った。解析結果の一例を図9に示す。図には送信波、第1底面エコー、および多層粒界モデル部から発生した材料ノイズを示している。今回の多層粒界モデルにて図5に示す実験結果と類似のプロファイルが得られることが分かる。

このような解析結果を基に、実験結果と同様の手順で平均の材料ノイズを求め、平均粒界間隔と超音波の周波数に対して整理した結果を図10に示す。発生する材料ノイズの強度は粒界間隔に依存し、いずれの周波数条件においてもピークを示す。平均粒界間隔の減少は圧下率の増加に対応するが、材料ノイズ強度が単調に増加するのではなくピーク値を示し、その時の平均粒界間隔が周波数の増加つまり波長の減少に伴い短間隔側にシフトしていることが特徴的である。今回検討した平均粒界間隔の範囲で最大値 $400\mu\text{m}$ からの減少に伴い認められる材料ノイズ強度の増加は、後方散乱源である粒界の数密度増加のためと考えられる。一方、ピークよりも間隔の短い条件範囲では、粒界の数密度の増加にもかかわらず材

脚注) コロニー組織サイズが波長に比べて十分小さい場合にはRayleigh散乱¹²⁾が支配的であるが、そのサイズが波長に近づくにつれ、Stochastic散乱¹²⁾の寄与が加わると考察している。

料ノイズ強度が減少する。これはGigliottiらが報告したとおり⁸⁾、ピークを境に散乱メカニズムが変化していると考えられ、波長に対して粒界間隔が相対的に小さくなることで粒界の後方散乱限としての作用が弱くなるためと考えられる。波長の短い高周波条件ではピークを示す平均粒界間隔が短間隔側にシフトしており、上記の考え方と定性的に一致している。ここで、図6の結果において周波数が10MHzと15MHzの探傷では材料ノイズにピークが認められなかった。これは、周波数が5MHzでは、波長が1,200 μm であることに対して、10MHzと15MHzではそれぞれ600 μm と400 μm と波長が短いためである。したがって、83%よりも大きな圧下率で加工を行い、 β 粒の厚さ、すなわちコロニー組織の厚さを小さくすることでピークを示すと考えられる。

以上の結果から、チタン合金の β 鍛造材の材料ノイズは β 粒の形状と厚さに強く影響を受けることが明らかとなった。これは、材料ノイズ強度は鍛造初期の結晶粒径と鍛造ひずみ量で予測できることを示している。この知見を基に鍛造プロセス設計技術を高度化することで材料ノイズを抑制し、信頼性を向上させたチタン合金の β 鍛造材を製造可能になると考えている。

鍛造プロセス設計のコンセプトを図11に示す。まず、変形解析により鍛造材内部の結晶粒形状を予測する。この情報に基づき、本稿で示した超音波にかかわる数値解析のモデルを作成し、所定条件の探傷で発生する材料ノイズ強度を予測する。これらの解析はFEMをベースとしており、工業的に適用可能な計算負荷で実施可能なことが特徴である。

なお、本稿では触れていないが、超音波の伝播中の減

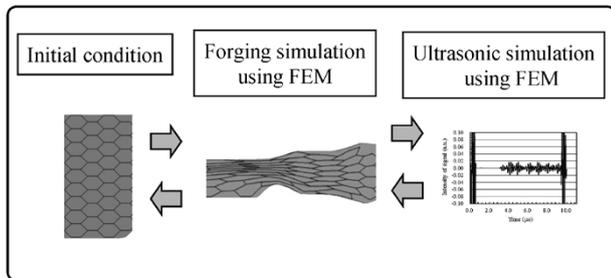


図11 超音波探傷性に優れたチタン合金鍛造材の鍛造プロセス設計コンセプト

Fig.11 Concept of process design for titanium forgings with excellent flaw detectability

衰などの影響を考慮することも可能であり、鍛造材内部の材料ノイズ強度を精度良く予測可能と考えている。あわせて、所望の機械的特性を得るプロセスウィンドウの情報を加味することで、超音波探傷性と機械的特性に優れたチタン合金鍛造部材を製造可能になると期待している。

むすび = 超音波探傷性に優れたチタン合金の β 鍛造材を提供可能とするために、Ti-6246合金の β 鍛造材を対象に、材料ノイズの発生挙動と組織の相関を検討した。その結果、材料ノイズの強度は β 粒の形状と厚さ、および超音波の波長と強い相関が認められ、FEMベースの数値解析にて現象を検証できることが明らかとなった。これは、材料ノイズの強度を鍛造初期の結晶粒径と鍛造ひずみ量で予測できることを示している。この技術を活用して鍛造プロセス設計技術を高度化することにより、材料ノイズを抑制したチタン鍛造材を製造可能になると期待される。

参考文献

- 1) J. F. Wildey. Focus on Mechanical Failures: Mechanism and Detection. 1991, p.3-12.
- 2) F. J. Margetan et al. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1992, Vol.11B, p.1717-1724.
- 3) B. Ginty et al. Titanium 80 Science and Technology. 1980, p.2095-2103.
- 4) R. K. Granville et al. British Journal of NDT. 1985, Vol.27, p.156-158.
- 5) R. B. Thompson et al. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1992, Vol.11B, p.1685-1691.
- 6) K.Y. Han et al. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1993, Vol.12B, p.1743-1750.
- 7) P. D. Panetta et al. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1998, Vol.17, p.89-96.
- 8) M. F. X. Gigliotti et al. Metallurgical and Materials Transaction. A. 2000, Vol.31A, p.2119-2125.
- 9) Y. K. Han et al. Metallurgical and Materials Transaction. A. 1997, Vol.28A, p.91-104.
- 10) O. I. Lobkis et al. Ultrasonics. 2012, Vol.52, p.694-705.
- 11) M.M. Attallah et al. Materials Characterization. 2009, Vol. 60, p.1248-1256.
- 12) E. P. Papadakis. The Journal of Acoustical Society of America. 1965, Vol.37, p.703-710.
- 13) E. S. Fisher et al. Physical Review. 1964, Vol.2A, p.A482-A494.
- 14) J. Y. Kim et al. The Journal of Acoustical Society of America. 2009, Vol.126, p.2998-3007.