

## 非線形構造力学

Non-linear structural mechanics

主任研究員：小川清六

分担研究員：楯列俊夫 太田 修 小堀修身 中村康範

塑性加工に関する研究では弾塑性増分理論による応力、ひずみ解として、塑性加工時の“しわ”発生に対して昨年度は、コンピュータシミュレーションによる研究結果を報告した。

本年度は、コップ側壁に傾斜を与えた円錐状容器を用いたモデル実験により、テーパ角度“しわ”押え力、ブランク径、ポンチストロークについて“しわ”発生の限界を調べ、弾塑性増分理論による計算結果との比較検討を行った。その研究結果は、英文論文として別紙の如く既に発表している。

鋼骨組の弾塑性安定問題に関する研究では、腰くびれ横揺れ崩壊挙動に関する実験を行ない、昨年度に横揺れ崩壊挙動の数値解析から得られた崩壊挙動特性を実験的に確認すると共に3種類の腰くびれ横揺れ崩壊現象の存在を実験的に示した。

溶接構造物の強度と変形に関する研究では、本年度は昨年度からの継続として船体構造用材として用いられているTMCP鋼すみ肉溶接止端部に発生する疲労き裂発生原因を疲労試験により実験的に検討したが、実験に用いた荷重非伝達型十字すみ肉継手試験片では、従来型高張力鋼との間には疲労強度の差は認められなかった。従って試験片形状あるいは疲労試験の荷重条件の検討が必要であるとの結論が得られた。

超音波法による材料評価に関する研究では、本年度はセラミックス材について実験を行ったが、その研究結果は、別紙窒化珪素についての中間報告として詳しく報告されている。

以上、非線形構造力学に関する研究は、3年目を迎え可成りの研究成果が得られている。

なお、中村研究員は平成5年度は海外留学中であった。（小川清六）

### 溶接構造物の強度と変形

小川清六（工学部交通機械工学科）

溶接構造物の強度と変形に関する研究課題として船体構造用材としてTMCP鋼を用いた実船で比較的若い船齢で従来型の鋼材では認められなかった疲労き裂がすみ肉溶接止端部に多数発生している。その原因を調べるために基礎的実験として2年目の平成4年度にはTMCP鋼の疲労に対する切欠感受性を従来鋼の50キロ級（490N級）高張力鋼のそれと比較検討する実

験を行った。その結果母材の疲労に対する切欠感受性には両者に殆ど差は認められず、TMCP鋼のすみ肉溶接止端部に発生する疲労き裂の原因は、TMCP鋼母材の特性に起因するものではないとの知見を得た。

継続研究3年目の平成5年度では、TMCP鋼ならびに従来型高張力鋼について、実船すみ肉溶接部に模した十字すみ肉継手試験片（荷重非伝達型すみ肉溶接）を用いて軸荷重片振引張疲労試験を行い、両材継手の疲労強度の比較を行った。破断は、いづれも予想通りすみ肉溶接止端部で発生したが、疲労強度特性には両材の間には殆ど差は認められなかった。従って、十字すみ肉継手試験片では実船すみ肉溶接部に表われる両材の疲労強度の差は求めることはできなかった。

TMCP鋼すみ肉溶接止端部に発生する疲労き裂の原因を検討するためには荷重伝達型すみ肉継手試験片とする等試験片形状、あるいは疲労試験の荷重条件等を検討する必要があると考えられる。来年度以降はこの点に着目して研究を進める予定である。

### 弾塑性増分理論による応力、ひずみ解析 楯列俊夫（工学部機械工学科）

金属板から軸対称のコップ状容器へ成形する加工は、自動車のボディー、ドアパネルなど複雑な形状のプレス加工の基礎となるものである。自動車メーカーでは自動車の外板を成形するのに、ボディーしわなどの成形不良のため、試作段階で何度も型の修正を行い、莫大な費用と時間をかけなければならないのが現状である。

そのため、円筒状容器への加工は実際の加工上の問題と解析結果とを結び付ける最もよい方法であり、これまでに多くの研究がなされてきている。しかし、実際問題では、成形された曲面に生じるしわの発生に対する対策が重要な課題となる。この種のしわは円筒状容器の成形実験では生じず、コップ側壁に傾斜を与え円錐状に、いわゆるテーパ側壁にすることによってしわ発生がモデル実験によって再現できることがわかった。モデル実験では、ダイス穴径とポンチ径とのクリアランスを板厚とほぼ同じにすることによって円筒壁を有する容器が成形される。一方、ポンチ径をダイス穴径に比べかなり小さくするとテーパ壁を有する容器が成形される。

本年度はまず種々のテーパ角度について実験し、しわ押え力、ブランク径、ポンチストロークについてしわ発生の限界を調べた。次に、しわが発生した時点での応力状態を、弾塑性増分理論によって計算し、しわ発生に対する応力値のデータベースを蓄積することが可能になった。

さらに、しわ押え部を平面からわずかに傾斜をもった円錐状にすることによるしわ抑制への効果についての実験した。前報で、円筒状容器への成形には、そのようなしわ押えを用いることによって、成形性がかなり向上することを報告した。しかし、今回の実験で傾斜をもったしわ押えによる成形は、しわの抑制に対しては逆効果であることがわかった。またこの現象に

についても弾塑性増分理論による数値計算により定量的に考察を行った。

専門誌に論文掲載

著者：T. TATENAMI and Y. SEKI

論文名：EFFECT OF CONTROLLING BLANK HOLDING FORCE ON SUPPRESSING WRINKLE  
IN SHEET METAL FORMING

誌名：Advanced Technology of Plasticity 1993 ——Proceeding of the Fourth International  
Conference Technology of Plasticity

Abstract

Wrinkling limit in sheet metal forming is experimentally studied and simulated by a differential F.E.M. which is developed with the consideration of bending and unbending effect at the die lip and punch corner radius. When a circular blank is formed into an axisymmetric tapered wall cup, body wrinkling at tapered wall is investigated for various kinds of blank size, blank holding force and punch stroke.

Moreover, circumferential compressive stresses on cup wall are calculated, when body wrinkling takes place. And it is found that occurring wrinkle will be possible to be predicted by the value of circumferential compressive stress when it is used as an auxiliary method of accumulating manufacturing data. The results of this report will give good suggestion to decide the blank holding forth which is changed to suppress wrinkling during deformation.

### 鋼骨組の弾塑性安定問題

太田 修 (工学部土木工学科)

#### 腰くびれ横揺れ崩壊挙動に関する実験

同一鋼板から切り出した同一製作条件下の1張間2層対称骨組模型の2層左右節点に3個の異なる定鉛直荷重の組み合わせ ( $P_L$ ,  $P_R$ ) (但し  $P_L > P_R$ ) を載荷させた後、1層梁中央点鉛直変位  $V_M$  を漸増させる変位制御試験を行った。試験の目的は、第一に1992年度に行った腰くびれ横揺れ崩壊挙動に関する数値解析から得た以下に示す挙動特性が実際に在ることを確かめ、分岐状現象が存在することの礎石とすること、第二にそのような挙動特性が如何なる発生の機構を保有するか変形のみならず縁ひずみあるいは曲げモーメントの側面から実験的に明らかにすることにある。定鉛直荷重 ( $P_L$ ,  $P_R$ ) をパラメータとする数値解析から予測された、1層梁中央点鉛直反力の臨界点付近、臨界点後の崩壊過程は、i) 2層横揺れ変位増分が  $P_R$  側に進行する、ii) 2層横揺れ変位増分が  $P_L$  側に進行する、iii) 1層横揺れ変位増分が進行方向を逆転し  $P_L$  側に進行するといういずれかの突然の状態変化に特徴付けられて区別され、これらの崩壊モード別の分布は  $P_S - P_a$  平面上に挙動特性別にプロットすることによって表された。ここに、 $P_S$ ,  $P_a$  は  $P_L$ ,  $P_R$  の対称成分、逆対称成分である。 $P_S$ ,  $P_a$  をそれぞれ共通な値、

パラメータ値として、各々の崩壊モードを代表する3個の一般化された定鉛直荷重 ( $P_s$ ,  $P_a$ ) の値を選択して、これを一次変換して試験の載荷条件となる定鉛直荷重 ( $P_L$ ,  $P_R$ ) の値を決定した。試験は太田充紀と共に行い、その結果は、共著で、「鋼骨組の腰くびれ横揺れ崩壊過程における終局的変形」と題して、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)1993年9月に発表した。試験の概要は、1) 試験体はSS41の16mm鋼板よりワイヤーカット、3体製作。2) 無載荷試験体の鉛直状態は  $P_L$ ,  $P_R$  載荷時に生じる頂部水平変位を数値解析予測値と合致させることで実現。3) 載荷順序は① $P_L$ ,  $P_R$ 、② $V_M$ 。4)  $P_L$ ,  $P_R$  の載荷にはトーナメント方式による重錘、 $V_M$  の載荷にはトーナメント方式によるスクリュウジャッキを使用。5) 計測量は1層梁中央点鉛直反力、500kgf のL.C.を使用。 $V_M$  および1、2層左右節点の水平変位、 $\pm 5 \sim \pm 12.5$ mmのD.T.F.を使用。各柱頭部、1層梁両端および中央部の各々の断面の上下縁ひずみ、標点間距離3mmのW.S.G.を使用。等々である。まとめとして、i)、ii)、iii)の挙動特性に特徴付けられる三種類の腰くびれ横揺れ崩壊の存在が実験的に示された。特にiii)の場合、1層横揺れ変位増分は腰くびれ変形を経た後に生じるという意味で新しい種と見なしてよい。断面の平面保持の仮定および応力ひずみ関係をbi-linear型とする仮定に基づいて、計測縁ひずみから得られた各断面の曲げモーメントの負荷、除荷、劣化の挙動過程が、腰くびれ変形過程および1層、2層の横揺れ変形過程にそれぞれの挙動特性別に関係付けられた。これらの関係は分岐状現象を解明する資料として役立つ。

## 超音波法によるセラミックス材の評価

小堀修身 (工学部機械工学科)

### 1. はじめに

金属材料の応力や組織の評価法として超音波を利用する研究が注目されている。これは、応力を受けている材料中では音波の伝播速度や偏り方向が応力によって変化する現象(音弾性効果)を利用するものである。超音波はほとんどの固体中を伝播できること、波の種類を選択できることなどの利点から実物に対する非破壊的な測定に適していると考えられるが、一般性のある測定法がまだ確立されていない段階である。それは実用材料は集合組織が主因と考えられる異方性を有していて、音弾性測定ではこれと音弾性効果とを分離して求めることが必要なためである。最近では応力測定とは別に材料の塑性変形や圧延の程度によって成長する集合組織の進展を積極的に評価する研究も行われている。

セラミックスは、金属やプラスチックに比べて耐熱性、電気絶縁性、耐摩耗性に優れた性質を持っている。これは、金属に替わり得る新材料として注目され、その特性を調べる研究も盛んになっている。その中でも窒素珪素は、特に機械的強さや耐食性などの点で注目され工業的需要も増大している。それにとまってこれら製造中の焼成過程における条件等による残留応力の発生、粒子の配向による異方性の程度などを定量的に把握する方法も要求されている。

ここでは、窒素珪素に対して超音波法による実験を行った。試料は日本特殊陶業(株)より提供を受けた窒素珪素 EC-141セラミックスである。はじめに試料に垂直に超音波横波を入射し音速の測定結果から横波の偏り方向と初期異方性を調べ、つぎに試料温度による音速の変化を調べた。また試料に単軸圧縮力を負荷して音弾性効果の測定を行った。負荷に平行および垂直方向に波の振動方向を固定して入射した横波の音速はいずれも応力に比例して直線的に変化する。これらの結果を金属と比較して類似点を検討した中間報告である。

## 2. 超音波の伝播速度測定

超音波の音速を高精度で測定するシングア라운드法を用いた (Fig. 1)。同期パルスによりパルサーがパルス電圧を発生し、トランスデューサから試料中へ超音波パルスが入射され、一連の反射波が同じトランスデューサで受信される。この内の一つの反射波信号がゲート回路で選択され、トリガー回路で単一パルスに変換される。これが一定の遅延時間を経て同期パルスを発生して同じ過程が繰り返される。繰り返しの周期 (シングア라운드周期)  $T_s$  はトリガーレベルからの立ち下がりゼロクロス点間の時間である。Fig. 2にしめすようにこれは試料中の伝播時間  $T$  と受信から発信までの遅延時間  $T_d$  の和である。異なる反射回数  $n$ 、 $n'$  の反射波に対するシングア라운드周期の差 ( $T_{s2} - T_{s1}$ ) は波が試料を  $(n' - n)$  往復する伝播時間であり試料厚さ  $L$  として音速  $v$  は

$$v = 2L(n' - n) / (T_{s2} - T_{s1}) \quad (1)$$

で得られる (反射法)。ここでは UVM-2 型シングア라운드型音速測定装置 (超音波工業製) を使用し、主として第 2 および第 3 反射波を用いた測定を行った。

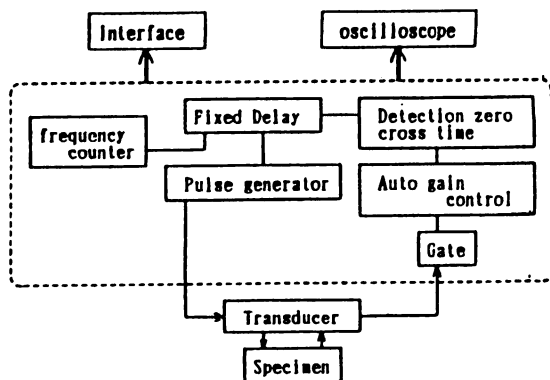


図 2. 2 シングア라운드測定ブロック線図

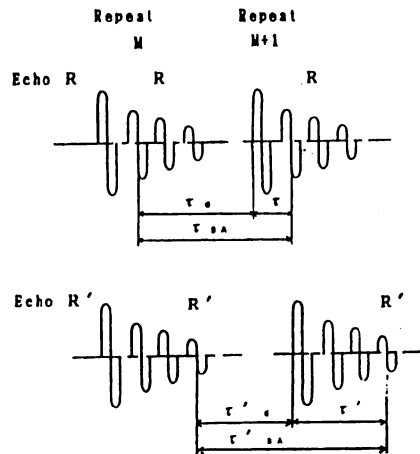


図 2. 3 シングア라운드周期

## 3. 横波の偏り方向と初期異方性の測定

横波超音波は材料の異方性主軸方向に偏って伝播するのでセンサーの回転によって音速に最

大値、最小値が現れる。圧延金属板の板厚方向入射では、圧延方向に最大これと直交方向では最小となる周期的音速分布が得られる。窒素珪素に対してもこの方法を用いて偏り方向を調べるために次の実験Ⅰ、実験Ⅱを行った。超音波の送受センサーとして、有効直径12mmのKGK 5C10NY（横波用）である。センサーの振動方向の基準を定めそこを0°に一致させてから20°おきに回転させた。

(1) 実験Ⅰ 大判からの切り出し、無負荷

ここで用いた試料（以下A試料と呼ぶ）は、プレス成形、ガス圧焼結品で仕上がり100×100×9.8mm（Fig. 3(a)）から、40×40.03×9.389mmに切断、研削したものである（Fig. 3(b)A試料から2個切り出したうちでNo-2を利用）。試料の表面縦横に図のような区切り線を入れて測定位置とし、このうち中央部の4、5、6を主とし、他に1、7、2、8、3、9の位置でも1

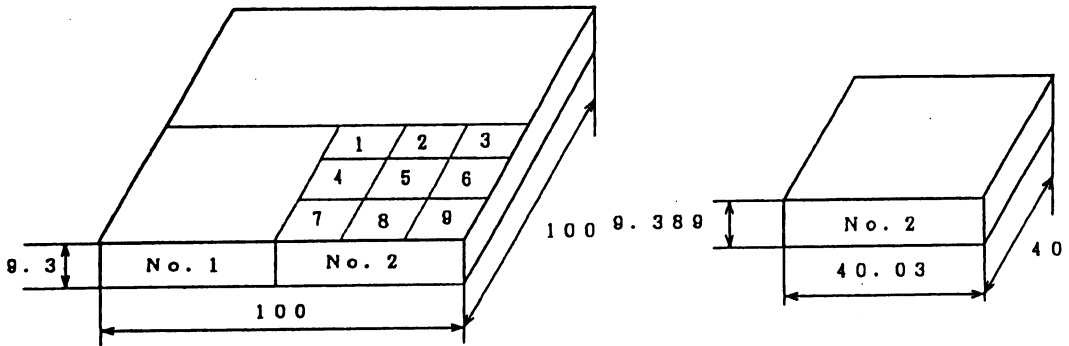


Fig. 3(a)

Fig. 3(b)

Fig. 3 A試料とその切り出し位置

～2回測定した。実験で得られた回転角による音速変化の一例として測定位置5、6の場合をそれぞれFig. 4(a)、(b)に示す。図からわかるように最大と最小のピークを有する曲線であり、この結果も含めて測定位置4、5、6での最大、最小の音速値およびそのときの回転角位置を表1にまとめて示した。

試料中央（2、5、8）ラインとこれより左側部分（1、4、7）は、おおむね100°～160°付近が最大、220°～260°付近で最小音速を示している。従ってこれらの位置では回転角の240°付近に異方性の主軸が存在していると考えられる。また最大と最小の音速値を示す角度差が120°でありもう一方の主軸は120°方向と予想される。なを対称性を考慮すれば60°、-30°方向も考えられるが、この場合は存在しない。それに対して右側部分（3、6、9）は、20°、220°付近がそれぞれ最大、最小となっていて、この位置では前述の傾向もみられないので端面の影響によるものと考えられる。音速差はどこの位置でも14～19（平均16.8）m/s程度である。この場合の異方性の程度（組織音響異方性 $\alpha$ ） $\alpha = 16.8/6164 = 0.27\%$ は、鋼の場合の音速3200m/s、音速差4～10m/s、で $\alpha = 0.3\%$ がよくみられる異方性と同程度である。なおセラミックスの共有結合体が示す異方性の種類との関係については現在検討中である。

表1. 音速値のまとめ (A 試料)

測定位置	最大音速 (m/s)	最小音速 (m/s)	音速差 (m/s)	角度差
	回転角位置	回転角位置		
4	6165.78	6151.34	14.44	160°
	160°	280°		
5	6172.43	6155.79	16.64	160°
	100°	260°		
6	6175.96	6156.60	19.36	200°
	20°	220°		

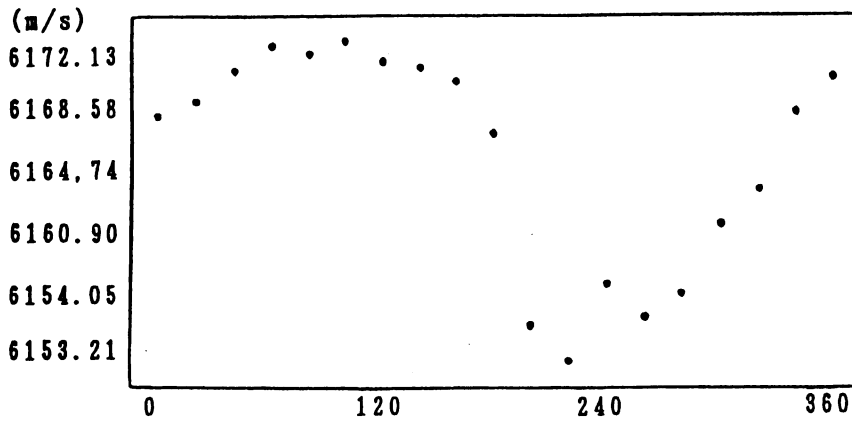


Fig. 4(a) 回転による音速分布 (測定位置 5)

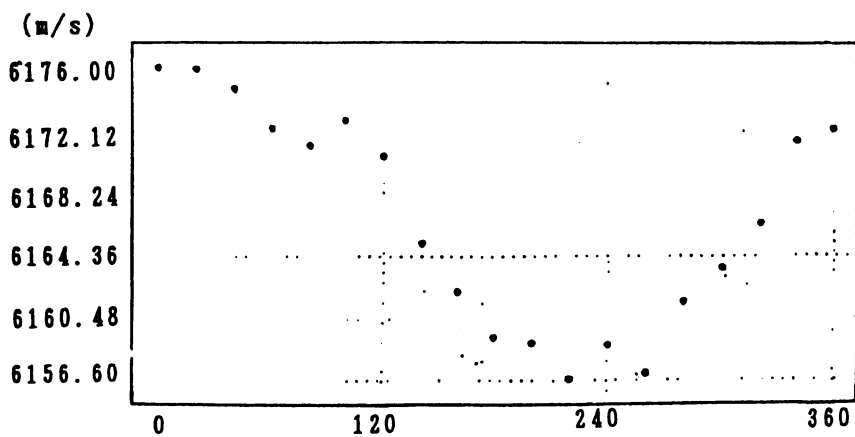


Fig. 4(b) 回転による音速分布 (測定位置 6)

(2) 実験Ⅱ 初期応力負荷

試料の初期異方性主軸方向が前述したように明確に表れないので予め試料の長手方向から初期荷重 (応力) を加えたままでセンサーの回転による横波音速変化を調べた。音弾性効果によ

れば応力の存在によって、横波の伝播方向は異方性の主軸方向と主応力軸の合成によって決まる方向に偏る。応力が十分大きいときには応力方向に偏る。ここで使用した試料（以下B試料と呼ぶ）は実験Iと同様のEC-141窒素珪素母材であるが別に焼成したものである。Fig. 5に示す様に40×40×20mmから、切り出し方向を変えた2種類（Fig. 5のNo.2およびNo.3）について実験した。焼成過程については表2（メーカ資料）にまとめる。油圧式バイスを用いて200MPaの初期応力を加え、センサーの偏り方向を長手方向に一致させて、20°間隔に360°まで回転させ、角度ごとの音速を求めた。測定結果を示すFig. 6は、回転角が、120°付近、300°付近で音速の最大のピークが、20°付近、200°付近で音速が最小となっている。この変化は回転角がおおよそ90°毎の周期で対称性を示す。この図から判断される横波の偏り方向は主応力の $\sigma_1$ 方向から約20°回転した方向( $x_2$ )及び、これと直交する方向( $x_1$ )（Fig. 7）となっている。しかし、これは偏り角の回転 $\psi$ を含んでいて、異方性の主軸方向 $\phi$ とは、 $\phi - \psi = 20^\circ$ の関係

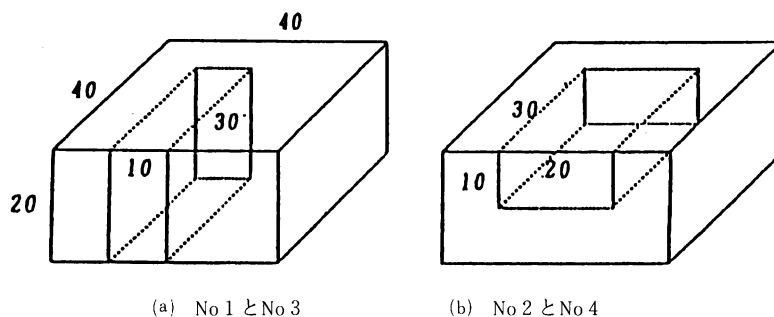


Fig. 5 B試料の切り出し位置

表2 B試料

Sample No.	1 (標準品)	2	3	4
CIP 圧力 [kg/cm <sup>2</sup> ]	1500	1500	4000	4000
縦 [mm]	30.014 ± 0.006	29.988 ± 0.003	30.018 ± 0.005	30.012 ± 0.001
横 [mm]	20.013	19.981	20.017	20.009
厚み [mm]	9.990	9.989	9.983	9.966
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	3.23	3.23	3.23	3.23

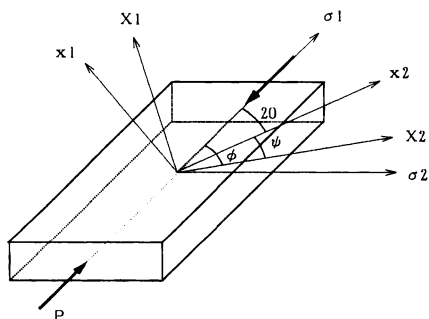


Fig. 7 主応力軸方向と偏り方向



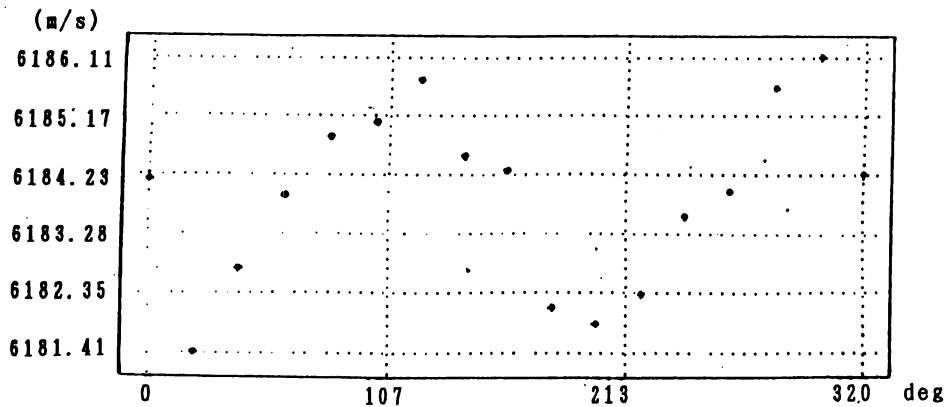


Fig. 6 回転による音速分布 (B試料 No 2,  $\sigma = 200$  MPa)

になっている。このB試料 No 2 は、 $\sigma = 0$  の実験では異方性の主軸方向が明確に表れていない。

一方、B試料 No 3 の  $\sigma = 0$  の実験では Fig. 8 に示すように回転角  $140^\circ$ 、 $310^\circ$  に明確な最大と、 $40^\circ$ 、 $220^\circ$  に最小の音速値が現れている。この傾向は Fig. 6 と類似している。この試料の 200MPa 初期応力下の実験では逆に音速のピーク値が判定しにくい結果となっている。この違いについても検討中である。

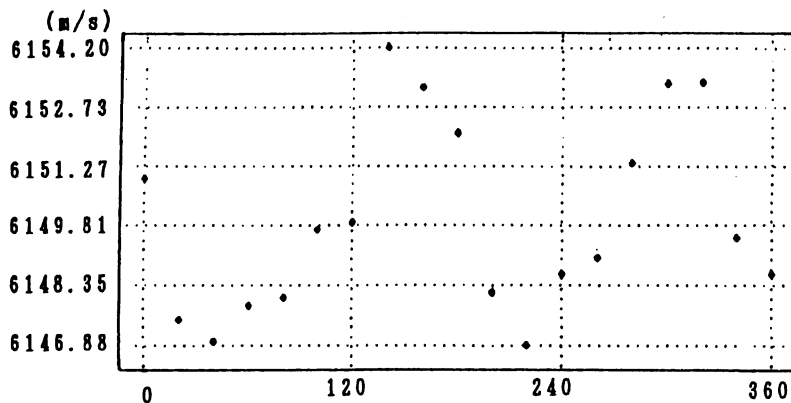


Fig. 8 回転による音速分布 (B試料 No 3,  $\sigma = 0$ )

#### 4. 温度による音速変化

窒素珪素中を伝播する音速の温度依存性について調べた。ここで使用した試料は Fig. 6 の No 1 標準品 (B試料 No1) である。実験では試料を発砲スチロールの箱の中に入れ、サーモセンサーを試料の側面につけ温度を見ながらドライヤーでコントロールして  $18^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$  までの温度変化を与え、 $0.5^\circ\text{C}$  毎の伝播時間測定を行った。温度上昇は  $0.05/\text{min}$  程度である。横波の偏り方向を長手方向およびこれと直交方向の実験結果をそれぞれ Fig. 9、Fig. 10 に示す。音速は温度に比例して変化し

$$\Delta V_\beta / V_\theta = L_\beta \theta, \quad (\beta = 1, 2) \quad (2)$$

が成り立っている。ここに  $V_0$  は初期音速  $\Delta V_\beta = V - V_0$ 、 $\beta$  は偏り方向を示す。窒素珪素の比例定数 (音速の温度係数  $L_\beta$ ) をまとめて表 3 に示す。表には、比較のため鋼、アルミニュー

μの値も併記した。記号↔と↓はそれぞれ試料の長手方向に平行(β = 1)および垂直(β = 2)である。鋼、A 1の温度係数Lは負、したがって温度と共に速度は低下するが窒素珪素の場合Lは正、よって温度と共に速度は上昇することがわかる。また温度係数や1℃あたりの速度変化の絶対値は、鋼やA 1に比べて窒素珪素の方が大きいのがわかる。

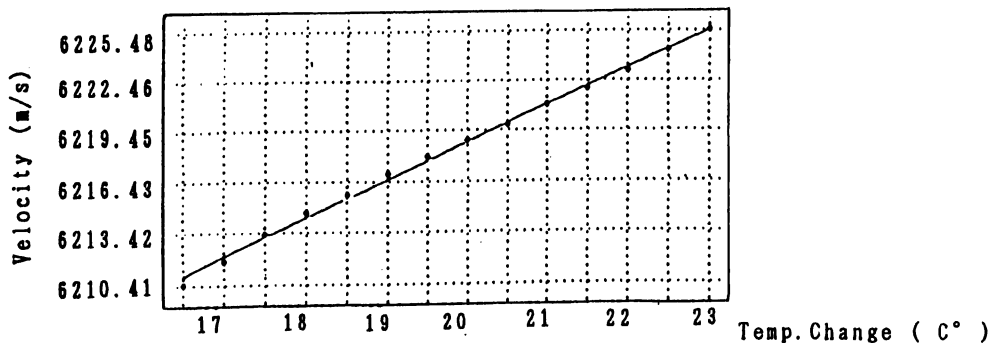


Fig. 9 温度による横波音速変化 (偏り 長手方向)

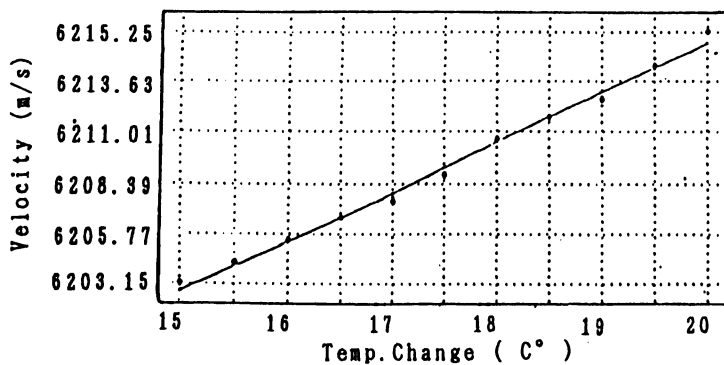


Fig. 10 温度による横波音速変化 (偏り 垂直方向)

表3 窒素珪素の音速—温度係数L

		温度係数 L ×10 <sup>-4</sup> (1/℃)	1℃あたりの速度変化 (m/s)
窒素珪素	↔	3.62	2.25
	↓	4.17	2.59
鋼	↔	-1.54	-0.50
	↓	-1.38	-0.44
A 1	↔	-2.87	-0.91
	↓	-2.68	-0.85

### 5. 応力による伝播速度変化の測定 (応力負荷実験)

応力による伝播速度変化を測定して音弾性効果の検討を行った。あらかじめ、試料に歪みゲージをはりつけ、負荷 (応力) - 歪み関係の較生曲線を描いておいた。油圧式プレスでは、明確な荷重値が測定されないため、較生曲線から得られる試料の歪みの値をもとにして試料に目的の荷重 (応力) を加えた。50MPa 毎に200MPa までの単軸圧縮応力を負荷し角段階で、音速を測定した。横波の偏り方向は、負荷と平行な方向 (0°)、及び直交する (90°) の2方向とした。いずれの方向に偏る横波の音速も応力  $\sigma$  にたいして直線的に変化している (Fig. 11 負荷と平行 (◆印)、垂直 (□印)。この関係は、音速の変化割合 ( $\Delta V/V_0$ ) を用いて

$$(V - V_0) / V_0 = K \sigma \quad (3)$$

と表することができる。こには  $V_0$  は、横波の初速である。音速が応力に比例して変化する関係式(3)は、音弾性則と呼ばれている。Fig. 11を最小2乗法による直線近似を用いてそれぞれの比例係数  $K_1$  (長手方向)  $K_2$  (長手方向に垂直) を求めると

$$K_1 = -2.27 \times 10^{-6} / \text{MPa} \quad (\text{長手方向})$$

$$K_2 = -0.13 \times 10^{-6} / \text{MPa} \quad (\text{垂直方向})$$

である。この場合初期異方性主軸が応力方向に一致していないのでこの音弾性定数には補正を必要とするが参考までにこれらを鋼と比較すると、応力 (長手) 方向 ( $K_1$ ) は符号が逆で、鋼よりも大きい (約28%)。垂直方向では、符号は一致し、大きさはほぼ同程度である。

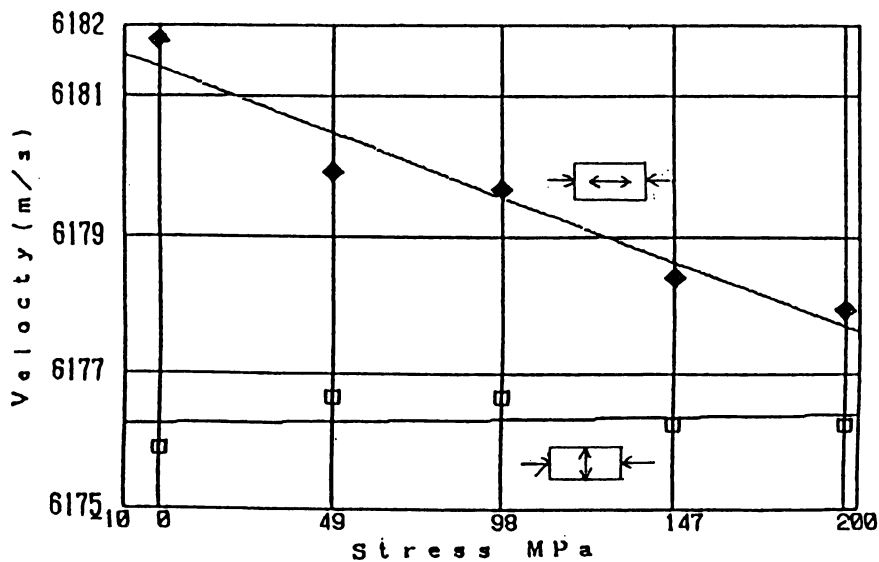


Fig. 11 応力による音速変化 (B試料 No2)

## 6. 参考 (試料の弾性定数)

試料中央に、直交2軸の歪みゲージをはりつけ、圧縮荷重を加えて応力—歪み曲線を求めた (Fig. 12)。これらから得られるヤング率Eおよびポアソン比 $\nu$ は、

$$\begin{aligned} E &= 322.2 \text{ GPa} \\ \nu &= 0.30 \end{aligned} \quad (4)$$

である。これは、表4の値とよく一致している。また、等方性を仮定してラメ (Lamé) の定数 $\lambda$ 、 $\mu$ は、

$$\begin{aligned} \lambda &= \nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu) = 191.6 \text{ GPa} \\ \mu &= E / 2(1 + \nu) = 123.9 \text{ GPa} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。これらの値は、メーカーが公表している値とよく一致している。

また、この場合の密度 $\rho = 3.23 \text{ g/cm}^3$ を用いると縦波と横波の初速は、

$$\begin{aligned} V_{LO} &= 11664.3 \text{ m/s} \\ V_{TO} &= 6193.7 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、本研究で用いた横波の平均音速とよく一致している。

横波の音弾性則(3)式の係数 $K_1$ 、 $K_2$ は、 $\lambda$ 、 $\mu$ と3次の弾性定数 $\nu_2$ 、 $\nu_3$ を使って表されるが、窒素珪素セラミック材の音弾性定数に関する文献は、ほとんど見あたらない。従ってこれを $\nu_2$ 、 $\nu_3$ について解いて検討すると

$$\begin{aligned} \nu_3 &= 2\mu^2(K_1 - K_2) - \mu \\ \nu_2 &= 4\mu^2(1 - 2\nu) \{ 2\nu K_1 + (1 - \nu)K_2 \} \end{aligned} \quad (7)$$

である。本研究で得られたE、 $\nu$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ を用いてこれを求めると表4になる。表には、文献による値も併記したが $\lambda$ 、 $\mu$ および $\nu_3$ に相違がみられる。文献のセラミック材の焼結等の相違については明確になっていない。

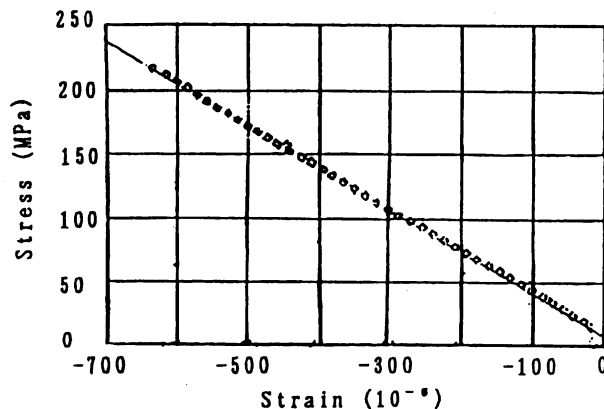


Fig. 12 圧縮応力—歪線図

表 4 2次および3次の弾性定数

	$\nu_2$	$\nu_2$	$\lambda$ (GP.)	$\mu$ (GP.)	E(GP.)	$\nu$
本研究	66	22	192	142	322	0.30
文献(7)	-61	49	132	111	304	0.27

参考文献

- (1) Salama, K., and Ling. C. K, J. Appl. phys., 51-3 (1980)
- (2) 小堀、岩清水 機論 54-498、A (1986)
- (3) 平尾 音弾性研究会 資料 No.2 (1989.3)
- (4) 鳥山、岩清水、小堀 日本機構学会論文集 第506号 A編 (1988.10)
- (6) 福岡、非破壊検査、VOL.33 第9号 pp 633 (1984)
- (7) 荒居、土田、坂入、N.D.I 音弾性研究会 No.8 pp 23 (1992.3)