

## 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 中村康範 小堀修身 小松定夫

2年目の平成4年度の研究結果をまとめるとコンピュータシミュレーションに関するものが3件、実験研究に関するものが2件である。

コンピュータシミュレーションに関する研究のうち2件は、塑性加工に関するものである。

1件は、板金プレス加工における“しわ”の防止ないしは予防に関するもので、オハイオ州立大学のスーパーコンピュータを用い、大型異形の板金プレス加工中に発生する“しわ”の防止のため“しわ”押え力を成形加工の進行に応じて増加させて“しわ”発生を抑制するシミュレーションの開発に関するもので、他の1件は、深しぼりに関する研究で、既に論文として発表している。

コンピュータシミュレーションの研究のうち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数値解析を行っている。

実験研究では、船体構造用材TMCP鋼の疲労特性に関する基礎的研究としてTMCP鋼の疲労に対する切欠感受性に関する実験を行ない、実船に発生した疲労き裂はTMCP鋼の切欠感受性とは余り関係はないとの知見を得ている。

超音波法による応力測定、材料評価に関する実験研究は、昨年度に引続いてマシナブルセラミックスの音弾性効果測定を行ない、その結果は中間報告ではあるが、既に論文としてまとめられている。

以上長期的共同研究の2年目では、各分担研究の進行状況は順調であり、数年後にはかなりの研究成果が期待できるものと思われる。

(小川清六)

### 分担研究報告

弾塑性増分理論による応力一歪解析

楯裂俊夫 (工学部機械工学科)

自動車ボディー、フロントパネル、ドアパネルなどのプレス加工では、成形品にしわ、破断が生じるトラブルがある。特に、ドアの取っ手近傍には、細かいしわが生じ、自動車のモデルチェンジ毎に、その対策のために多くの労を要する。そのため、本年度は特にしわの問題について研究した。その結果を日本塑性加工学会第43回塑性加工連合講演会および第2回日中

板金プレス成形シンポジウムにて発表した。その内容について以下に報告する。

大型異形の板金プレス加工で、ボディーしわによる面ひずみは成形上の大きな課題である。従来は材料の成形性を高める方向で研究が進められてきたが、これもほぼ限界に達し、最近では、成形途中でしわ押え力の強弱を調整してボディーしわを制御する技術が報告されている。しかし、しわ押え力をどのように制御すべきかは、しわが発生する場所、しわの形状、成形深さ、板厚などによって異なり、新たに生じる問題である。

そのため、理論的に根拠のあるしわ押え力のパターンに関する知見を得ることを目的として、実験、シミュレーションを行った。実験では、ダイス穴径80mmの工具を用い、ブランク径、しわ押え力を変えて深絞り加工し、円錐壁部に生じるボディーしわの発生限界を調べた。

しわ押え力 (11.5KN) を一定にして、種々のブランク径に対してしわが発生するポンチストロークを求め、横軸にブランク径を、縦軸にしわが発生したポンチストロークをとり、実験値をプロットすると、実験値は直線で近似できることがわかり、これをボディーしわ限界線と名付けた。

計算に用いたプログラムは著者の一人が以前に開発した差分的有限要素法による理論を発展させ、OHIO 州立大学のスーパーコンピューター (CRAY) 用に修正したものであり、“DRAW-B2” と名付けられた。“DRAW-B2” が、さらに加工中しわ押え力を変える場合の解析ができるよう改良された。初期のプログラムは、しわ押え力による摩擦力はフランジ部外縁に作用する外力 (SRF) に置き換えられ、SRF を外縁部の半径方向変位の関数として扱っていたが、加工中にしわ押え力を変える場合の解析には、SRF はポンチストロークの関数として扱うのが都合よく、改良された “DRAW-B2” では、ポンチストロークがある値に達したときしわ押え力を増加させ、SRF を上昇させることができる。円錐壁すなわちダイスにもポンチにも接していない材料部分の要素に着目し、実験で得られたしわ限界のポンチストロークでの応力状態を計算した。その結果、円周方向圧縮力をしわ発生の一つのパラメータにとれる可能性が示された。そして、加工中円周方向圧縮力がしわ発生の限界値に達する前に、しわ押え力を増加してしわ発生が抑制できるシミュレーションが行えた。

### 鋼骨組の弾塑性安定問題

太田 修 (工学部土木工学科)

研究の必要性および目的については、既に [1] で報告している。

腰くびれ横揺れ崩壊挙動に関する数値解析

a) 1 張間 2 層の対称鋼骨組模型の第 2 層左、右節点にそれぞれ定鉛直荷重  $P_L$ 、 $P_R$  を作用させ、b) 模型の第 1 層梁中央点鉛直変位を漸増させる数値解析を、増分法に基づく一次元複合非線形有限要素法 [2] を用いて行った。

一般化定鉛直荷重を次の一次変換によって対称定鉛直荷重  $P_s$  と逆対称定鉛直荷重  $P_a$  で表す。

$$P_s = \frac{P_l + P_r}{2}, \quad P_a = \frac{P_l - P_r}{2} \quad \text{ここに } P_l > P_r$$

$P_s$ ,  $P_a$  をパラメータとする同一骨組模型の各々の数値解析から、左右の柱が骨組内部に引き込まれる腰くびれ変形過程および定鉛直荷重の小さな側 ( $P_r$  側あるいは低軸力側) へ第 1 層横揺れ変形が生成される過程を経て第 1 層梁中央点鉛直反力の臨界点付近、臨界点後の挙動において、以下のような終局的変形挙動が観察された。i) 第 2 層横揺れ変位増分が  $P_r$  側に進行する。ii) 第 2 層横揺れ変位増分が定鉛直荷重の大きな側 ( $P_l$  側あるいは高軸力側) に進行する。iii) 第 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。生成された崩壊モードに基づき崩壊モードの分布を、図のように  $P_s$  を縦軸に、 $P_a$  を横軸にとり表した。 $N_p$  は部材の降伏軸力である。定鉛直荷重の組み合わせにおいて i) と ii) の境界付近、ii) と iii) の境界付近、また i) と iii) の境界付近にはそれぞれ特別な定鉛直荷重の組み合わせが存在していることを想像させ、そのような定鉛直荷重の不均衡は骨組の解析を通じて唯一の非対称因子であるにもかかわらず釣合径路において非対称分岐点が存在していることを想像させる。前者の分岐状挙動は実験研究 [3] で既に見出されているが、後の二者については初めて予測された。これらの挙動は、“弾塑性構造系では 2 種類の拮抗する作用を及ぼす非対称因子が共存しそれらの大きさが特定の割合をとるとき、系は対称系とは異なる分岐挙動を呈する場合がある” という非対称分岐の一つのプロトタイプとは異なる現象である。なお、 $P_r/N_p \doteq 0.33$  に固定し、 $P_s/N_p \doteq 0.16, 0.095, 0.03$  の場合の試験が計画されている。

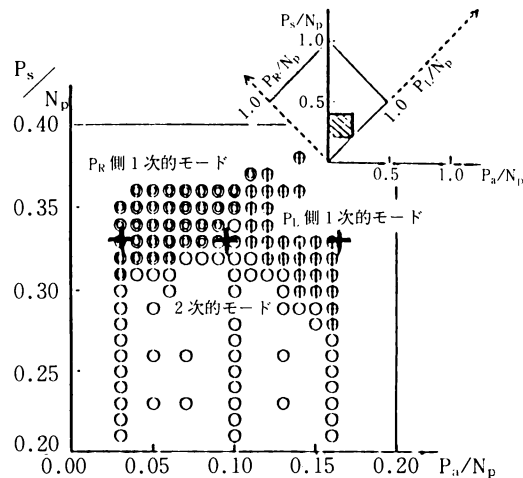


図 数値解析による崩壊モード分布

文献 [1] 太田 修、「鋼骨組の弾塑性安定問題」非線形構造力学 (長期的共同研究組織中間報告1991年度)、大阪産業大学産業研究所報、No. 15, P. 205, 1992.

[2] 中村恒善, 石田修三、「弾塑性骨組の静的および動的たわみ解析」、骨組構造解析要覧 (成岡・中村共編), 第 9 章, P. 185, 培風館, 1975.

- [3] 中村恒善, 太田 修, 上谷宏二、「鋼骨組の腰くびれ横揺れ崩壊に関する実験的研究」、日本建築学会論文報告集, No. 315, P. 48, 1982.

## 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)

溶接構造物の軽量化の要求に伴ない、従来の高張力鋼に替わり制御圧延、制御冷却により強度と靱性を高め且つ溶接性の良いTMCP鋼 (Thermo Mechanical Control Process Steel) が船体構造用材として使用されるようになってきた。

しかし、最近就航年数3～4年と云った比較的新しい船体の溶接継手部に従来鋼では殆どみられなかった疲労き裂が発生し問題となっている。初年度の平成3年度にはこの溶接継手部に発生した疲労き裂について調査研究を行ない、疲労き裂は、船体縦通助骨のすみ肉溶接留端部の応力集中部に多発していることが解かった。したがって、TMCP鋼溶接継手の疲労特性を明らかにするためには、先づ基礎的研究としてTMCP鋼の疲労に対する切欠感受性を明らかにしておく必要があると考えられる。鋼材の疲労に対する切欠感受性は、基本的には引張強度に依存し高強度材ほど一般に切欠感受性は高くなる。同一強度レベルであれば切欠感受性は、靱性にも依存すると考えられる。

以上のような観点から、TMCP鋼の疲労に対する切欠感受性を明らかにしておくことがTMCP鋼溶接継手の疲労特性に関する研究を進めて行く上で是非必要であると考えられるので、本年度は、船体構造用材として使用される強度50キロ級 (引張強さ490N/mm<sup>2</sup>) のTMCP鋼および従来型50キロ級高張力鋼ならびに比較のために400N/mm<sup>2</sup>級の軟鋼材の3種類について切欠試験片の疲労試験を行った。

上記3種類の鋼材について、応力集中係数 $\alpha = 3.0, 2.5, 2.0$ の3種類の平板引張疲労試験片を作成し、島津製サーボパルサ疲労試験機を用い荷重制御の片振引張疲労試験を行ないそれぞれのS-N線図を求めて各切欠材の疲労特性を求めた。

実験の結果、従来型50キロ級高張力鋼は、高応力域で切欠感受性は高いが、TMCP鋼は、400N/mm<sup>2</sup>級の軟鋼とほぼ等しい切欠感受性を示し、母材自体の切欠感受性は、従来型高張力鋼よりも低く、船体構造部のすみ肉溶接止端部の疲労き裂は、TMCP鋼母材の特性によるものとは考えられないとの知見を得た。

## 板在のプレス成形の諸問題に関する研究

中村康範 (工学部機械工学科)

スペイン、バルセロナでの国際会議において論文発表。

Nakamura, Y. Nakamichi, E. Wagoner, R. H.

Deep Drawing Analysis of Square Cups with Coated, Rate-Sensitive Steel Sheets.

Computational Plasticity, Proceedings of the third International Conference held in Barcelona, Spain, 6th-10th April, 1992

### Summariy

*The Finite element simulation code "ROBUST" for sheet forming newly employed the rate-sensitive material model-Elastic/Viscoplastic one-. It has a capability to show that the rate sensitive material properties cause different deformations and strain distributions in the case of square cup drawing under different punch speed. The friction model of coated steel sheets, such like Electro-Galvanized(EG), Galvanized(GI), and Galvanized-Annealed(GA), have been evaluated based on experimental observation. The friction coefficients can be expressed as functions of the strain of steel sheet and the contact slide length. Numerical simulations have shown how the friction characteristic affects the strain distribution efficiently.*

## セラミックスの音弾性効果測定

小堀修身 (工学部機械工学科)

### 概要

ガラス系セラミックを試料として音弾性効果の測定を行った。板状の素材の厚さ方向に縦波、横波を入射した。横波は互いに直交する2方向に偏って伝播し、その音速差は小さい。これらの音速は応力に対して直線的に変化し、応力と垂直に偏った横波をのぞいて音弾性定数の符号は鋼、アルミと同様である。これらの値を用いて3次の弾性定数を算出した。

### 1. はじめに

セラミック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もっている。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。

ここでは一般の機械加工が可能で、加工後の焼成もせずにそのまま各種部品として使用できるマシナブルセラミックス (machinable ceramics) をとりあげ、シングア라운드法を用いて

その音弾性効果を調べた。

長方形板状に加工された試料の厚さ方向に伝播する音波は比較的良好な状態で観察された。伝播速度は鋼より10%程小さく、また異方性主軸と長手方向の間には20度のずれが存在した。縦波、横波の音速は試料長手方向に加えた圧縮力に比例して変化した。この際の音速測定では、トランスデューサーを負荷方向に固定した。これが応力による音速変化の勾配に及ぼす影響を補正して音弾性定数を求め、3次の弾性定数を算出した。

## 2. 実験と結果

試料には市販されている板状のマシナブルセラミックス（石原産業製）を用いた（図1）。これは耐熱ジグ、絶縁部品、耐食部材等に使用されている硝子系のセラミックスで、主成分  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  をそれぞれ46、17、16、10（重量%メーカー資料）を含んでいる。またこの物性値（メーカー資料）を表1に示す。表には比較のためにSi、Mg、Alに関する値も併記した。

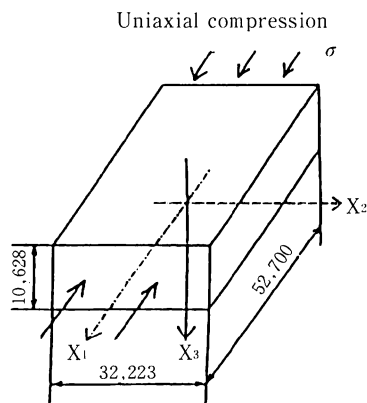


図1 試料の寸法と形状

表1 物性値

Physical constant	Unit	Ceramic (Maker data)	Si	Mg	Al
Density	$\text{g}/\text{cm}^3$	2.52	2.33	1.74	2.70
Young's Modulus	GPa	65	108	44.6	719
Strength	MPa	343	—	82.3	50~90
Poisson's ratio		0.26	0.23	0.19	0.3
Longitudinal. wave	m/s	5583	3120	4855	6120
Transverse. wave	m/s	3190	1860	3015	3184
Coeffi. of expansion	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	9.4	4.68	25.8	24

超音波横波用には圧電セラミックトランスデューサー、5C10NY (5 MHz 垂直入射、直径16mm KGK) を用い、縦波用には圧電膜 (PVDF) の素子 (直径5mm 東レテクノ) を金属ケーシングして用いた。

シングア라운드音速測定では試料中央で厚さ方向に垂直に入射した波の2回及び3回反射波を利用した。

まず無負荷時に横波トランスデューサーを試料  $X_1$  軸から1回転させながらシングア라운드測定を行った。図2がその結果である。図において $160^\circ$ 、 $340^\circ$ のピークは試料の  $X_1$  軸から20度ずれた方向に偏った横波音速  $V_{10}$ 、 $70^\circ$ 、 $250^\circ$  はこれと直交する方向に偏った音速  $V_{20}$  である。ピーク近傍を繰り返し測定した平均値は

$$V_{10} = 3189.1\text{m/s}, V_{20} = 3186.6\text{m/s}$$

である。組織音響異方性  $\alpha$  としては

$$\alpha = (V_{10} - V_{20}) / \{(V_{10} + V_{20}) / 2\} = 7.8 \times 10^{-4}$$

であり鋼と比較してもかなり小さい。

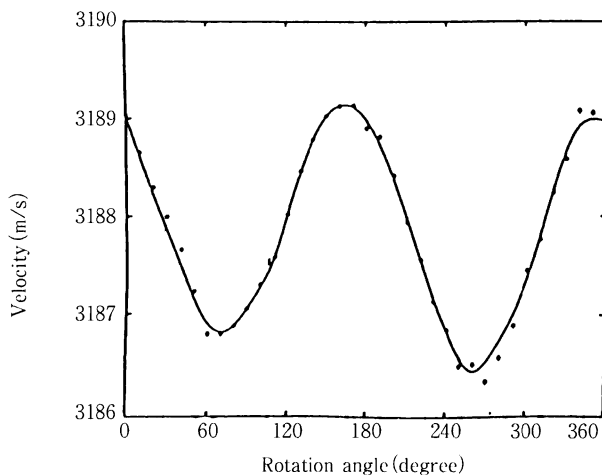


図2 トランスデューサーの回転による音速測定

縦波の初速は  $V_{L0} = 5586.6\text{m/s}$  であり、これと横波の平均音速  $V_{T0} = (V_{10} + V_{20}) / 2 = 3187.9\text{m/s}$ 、および実測した密度  $2.54\text{g/cm}^3$  から、ラメの弾性定数  $\lambda$ 、 $\mu$  はそれぞれ  $27.6$ 、 $25.6\text{GPa}$  となる。これらの値から計算されるヤング率  $E = 64.5\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu = 0.26$  はメーカー資料 (表1) とよく一致している。

次に油圧式バイス (最大2000kgf) を用いて試料を  $X_1$  軸方向に圧縮し、応力30MPaまでの負荷、除荷過程での音速測定を数回繰り返した。このとき横波に関してはトランスデューサー方向を  $X_1$ 、 $X_2$  軸方向に固定した。その結果の平均値を図3-5に示す。図中の記号▲と●はそれぞれ負荷、除荷を表す。音速のバラツキは  $\pm 0.3\text{m/s}$  以内である。圧縮応力によって縦波音

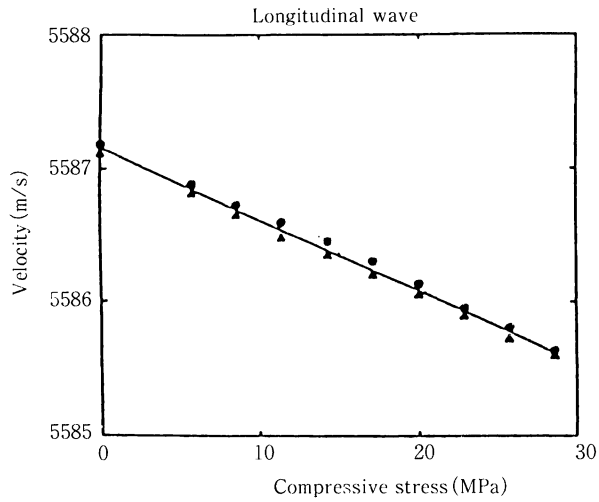


図3 圧縮応力による縦波音速の変化

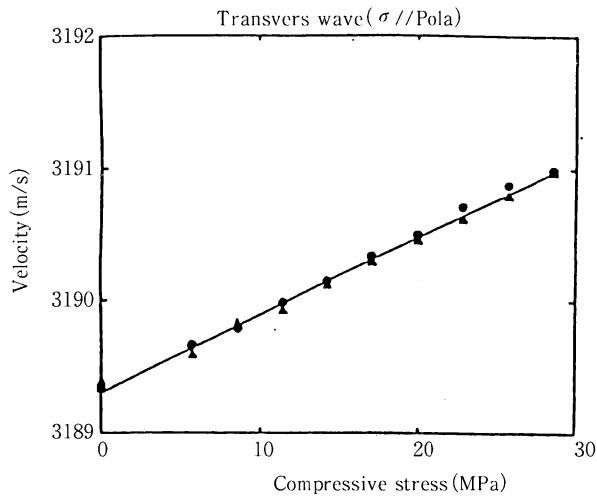


図4 圧縮応力による横波音速  $v_t$  の変化 ( $\sigma //$  偏り方向)

速は増加し (図3)、横波音速はいずれの偏り方向についても減少している (図4, 5)。音速変化はいずれも直線的で見かけの音弾性定数  $K'$  は

$$(V - V_0) / V_0 = K' \sigma$$

縦波  $K_1' = 5.1 \times 10^{-6} / \text{MPa}$

横波 ( $\sigma // \text{Polar}$ )

$$K_1' = -18.3 \times 10^{-6} / \text{MPa} \quad (1)$$

横波 ( $\sigma \perp \text{Polar}$ )

$$K_2' = -5.6 \times 10^{-5} / \text{MPa}$$



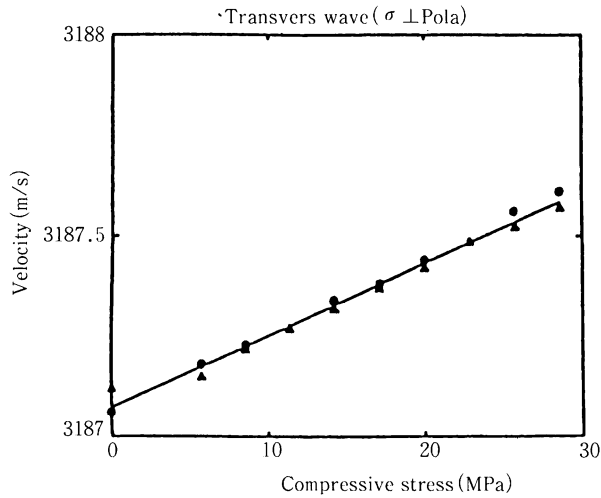


図5 圧縮応力による横波音速 $V_2$ の変化 ( $\sigma \perp$ 偏り方向)

となっている。 $K_1' > 0$ ,  $K_1' < 0$ は鋼やアルミと同じであるが、 $K_2' < 0$ はこれらと逆になっている<sup>(1)</sup>。(ただし鋼、アルミにおいても $K_2'$ の符号は確定的ではないように思われる。)

### 3. 考察

この単軸圧縮試験では、応力方向と異方性方向のずれ $\phi = 20^\circ$ によって横波の偏り方向が応力と共に回転する。シングア라운드測定ではこれに追従して横波のトランスデューサーを回転させることが困難であり、今回はトランスデューサー方向を応力方向とこれに垂直方向に設定した。弱い直行異方性体の音弾性則を仮定すると、ゼロクロス法によるシングア라운드測定では、この場合の横波音速と応力の関係が次式で近似される<sup>(2)</sup>。

$$K_1' = (C_{AT} + C_A \cos 2\phi) / 2 + C_A \phi \sin 2\phi$$

$$K_2' = (C_{AT} + C_A \cos 2\phi) / 2 + C_A \phi \sin 2\phi$$

これより、異方性主軸方向と単軸応力方向が一致している場合の見かけの音弾性定数 $K_1''$ 、 $K_2''$ は

$$K_1'' = (C_{AT} + C_A) / 2 = -19.9 \times 10^{-6} / \text{MPa}$$

$$K_2'' = (C_{AT} - C_A) / 2 = -4.1 \times 10^{-6} / \text{MPa}$$

となる。これらから、試料厚さの変化 $\nu/E\sigma$ を除いた真の音弾性定数 $K = K'' - \nu/E$ を求め(表2)、音弾性定数を計算した結果を表3に示す。 $\nu_2$ の値は表に併記したアルミ<sup>(3)</sup>の1/2になっている。セラミックスの一例として窒化珪素<sup>(4)</sup>に比べると2次、3次の弾性定数に違いがみられる。

表 2 初速、音弾性定数  $(V-V_0)/V_0=K'\sigma$

	Velocity (m/s)			Acousto elastic const. ( $10^{-6}/\text{MPa}$ )		
	$V_{L0}$	$V_{T1}$	$V_{T2}$	$K_L$	$K_1$	$K_2$
Ceramics	5586.6	3189.4	3187.1	5.1	-23.9	- 8.1
Aluminium <sup>(1)</sup>	6390	3240		15.2	-32.8	13.4
Maker data	5583	3190				

表 3 2次および3次弾性定数

	Second and third order Elastic const. (GPa)				
	$\lambda$	$\mu$	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$
Ceramics	27.6	25.8	- 26.2	-129.1	- 46.9
Aluminium <sup>(3)</sup>	50.0	25.5	71.5	- 91.1	- 79.4
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>(4)</sup>	113.31	111.25	228.72	- 56.67	-111.25

参考文献

- (1) O. Kobori and Y. Iwashimizu. Proceedings of the IUTAM Symposium. ed. S. K. Datta et al., pp. 339-343(1990), North-holland
- (2) 岩清水、中田、機械学会関西支部講演論文集 No. 924-1 pp. 28-30(1992)
- (3) H. Fukuoka and H. Toda, Achives of Mechanics, vol. 29.5, pp. 673-686(1977)
- (4) 荒井、土田、金田、音弾性研究会 No. 7 pp. 55-61(1991)

弾塑性連成不安定現象に関する研究  
小松定夫 (工学部土木工学科)

本誌 1P に論文掲載