

弾塑性板材及び剛塑性ブロック成形用革新シミュレーターの開発

岐阜大学 工学部 機械工学科

教授 後藤 學

(平成5年度研究開発助成 AF-93004)

1. 研究の背景と目的

現在、塑性変形を対象とする数値シミュレーション技術が確立されつつあるが、特殊な変形における変形形状の予測や精度に関する改善はまだ十分ではない。また、実際の現象を精度良く再現可能な数値シミュレーション用モデルの開発の必要性が高まっている。

そこで、本研究では材料どうしの接触を含んだ塑性変形における特異な現象を忠実に再現するシミュレーターの開発を目的の一つとした。さらに、薄板(箔)でできたハニカム構造体の衝撃座屈現象について、数値シミュレーション用モデルを開発することも目的とした。

2. 研究概要

本研究では、著者が開発した弾塑性有限要素法(FEM)プログラム: GOLDAに対して、材料どうしの接触を取り扱うことができるようにプログラムの改良を行い、実験で発現した変形挙動が予測不可能と思われる特異現象(2種類)について数値シミュレーションを行った。そして、その計算結果を実験と比較し、FEMプログラムによる変形挙動の予測精度の検証を行うとともに特異現象の原因究明を行った。

最初に取り上げた現象は、直方体のブロックを積層して平面ひずみ状態で圧縮するとき、積層境界面でうねりが生じるといふ変形挙動である。次に取り上げた現象は、その境界面が鋸歯状になっている場合、同じく平面ひずみ圧縮すると鋸歯の形状はつぶされていくのではなく、ほぼ相似形を保ちながら成長するという変形挙動である。

さらに、汎用動的陽解法FEMソフトを援用するハニカムの衝撃座屈変形解析を行うための、最適計算用モデルを考案し、それを用いる場合に計算で予測される変形形状や荷重の精度を実験と比較した。この時、別途行った実験と対応する数種類の数値シミュレーションを行い、計算結果の精度に関して十分に検討した。

以下、各研究テーマ毎に記述するが紙面の都合上、要点を述べるに留める。また、結言は各研究毎に記す。

3. 直方体ブロックの積層平面ひずみ圧縮における特異変形挙動の数値シミュレーション^(発表論文¹⁾)

3.1 特異変形挙動について

主な特異変形挙動について、ここに記しておく。

軟質及び硬質の純銅(Cu-O,H)でできた直方体のブロック状試験片(5×10×10mm)を用いて、図1に示すように

積層して平面ひずみ圧縮すると、積層境界面にうねりが生じることあった。また、台形ブロック状試験片を用いて、境界面で上下が対称形状になるように積層して圧縮する場合、うねりが生じなかった。これらの現象について、数値シミュレーションを行った。

3.2 計算方法

著者が開発した種々の解析実績のある r-min 法に基づく大変形用の弾塑性有限要素法コード: GOLDAを、変形する材料どうしの接触を取り扱えるように改良して使用した。用いた塑性構成式は J2G(J2-Gotoh's flow theory)^{1)~3)}で、これは後続負荷面上に尖点を許容することができ、ひずみ集中化現象の取り扱いに適したものである。尖角 θ_0 は以下の式で表される。

$$\theta_0 = (\pi/2) - \rho \bar{\epsilon}^p; \quad \bar{\epsilon}^p = \int d\bar{\epsilon}^p \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}^p$ は全塑性ひずみで、 ρ は尖り生成の程度を規定する材料定数である。 ρ については、いずれの計算でも0.8とした。

材料の加工硬化特性として、 n 乗硬化則を用いた。ヤング率とポアソン比に関しては、以下に示すように実験で用いた銅についての値を用いた。

ヤング率: 122.6GPa

ポアソン比: 0.34

また、工具と材料、材料どうしの境界面での摩擦係数は、0とした。なお、 n 値については変形挙動に大きく関

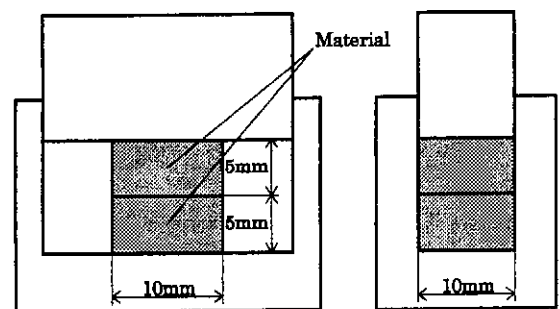


図1 積層平面ひずみ圧縮

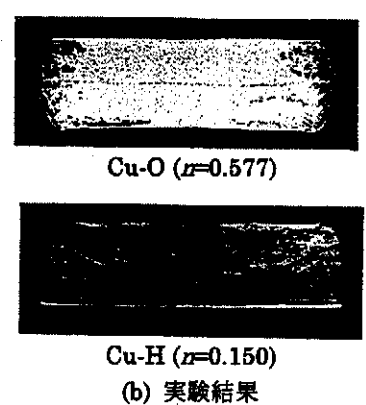
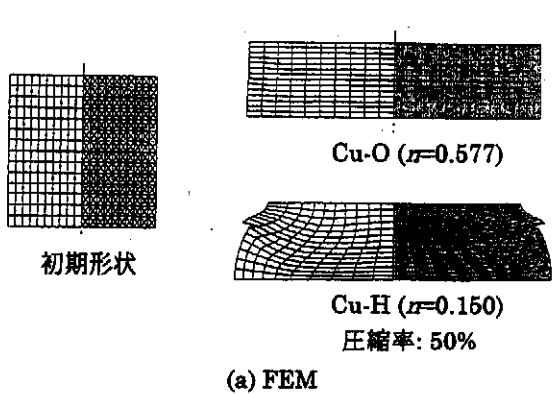


図2 2層積層圧縮時の変形挙動

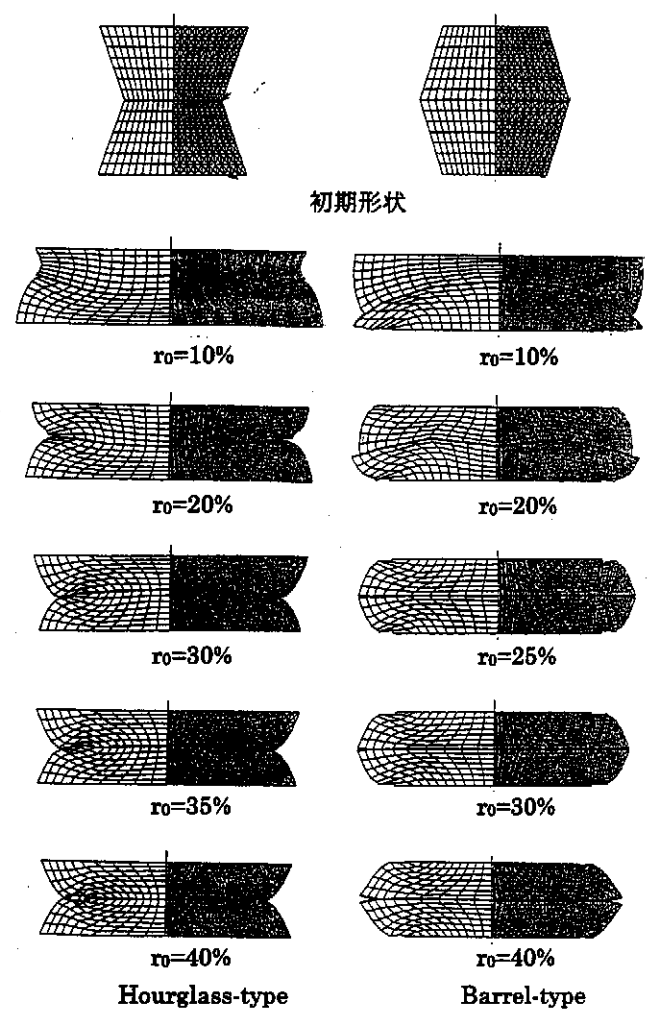


図3 台形試験片を用いたときの圧縮
 $\nu=0.15$
 $r_o = (\text{長辺} - \text{短辺}) / \text{長辺} \times 100(\%)$

与するため、後述する実験現象との比較の図中に示す。

3.3 計算結果と実験結果の比較及び考察

2層ブロックの積層圧縮について、図2に計算結果と実験結果を示す。右半分の要素中に黒い点は、要素が塑性域にあることを示す。実験材料の ν 値は、Cu-Oが0.577、Cu-Hが0.150であり、計算でもこの値を用いた。Cu-Oを想定して ν 値を大きく設定した場合、うねりはほとんど見られなかった。一方、Cu-Hを想定した計算においては、実験結果とかなり一致する形状のうねりが発生した。こうしたことから、うねりの発生は ν 値によって支配されるものであり、その現象自体は拡散タイプの不安定現象であると考えられる。

さらに、台形試験片を用いて、境界面で上下が対称形状になるように積層して平面ひずみ圧縮した場合についても計算した、台形の程度が長方形からの形状的差異が大きくなるにつれて、うねりの発生が抑制される結果となった。この計算結果も実験結果を良くシミュレートできているものとする。

3.4 結言

- (1) 材料境界面のうねり発生という特異現象について、シミュレートすることができた。
- (2) うねりは ν 値が小さいとき発生し、材料の拡散タイプの不安定現象に起因するものと推断された。

- (3) 台形試験片を用いて圧縮するとき、うねりを防止することができるという実験で見られた現象についても、シミュレートすることができた。

4. 鋸歯状境界面を持つ直方体ブロックの平面ひずみ圧縮の数値シミュレーション (参考文献2.3)

4.1 鋸歯の成長挙動について

まず、実験で用いた試験片形状を図4に示す。初期鋸歯角度は 60° 及び 90° で、共に[鋸歯の高さ]:[単体の試験片高さ]=1:5と設定した。この2種類の試験片は、いずれも幅10mm、奥行き10mm、鋸歯ピッチ1.0mmである。供試材には純アルミニウム(A1050)の軟質材、アルミニウム合金(A5056)及び純銅(C1100)の硬質材と軟質材を用いた。鋸歯の稜線方向の変形を拘束して、平面ひずみ圧縮した。

この時発現した特異な挙動は、図5に示すようにブロックの圧縮とともに鋸歯はつぶされていくのではなく、意外にも高さ方向(圧縮方向)に大きくなり、鋸歯の先端からせん断帯を生じながら元の形とほぼ相似形のまま、形全体として成長するものであった。

この現象も数値解析的にシミュレートできるかどうかはたいへん興味深いことである。弾塑性有限要素法(FEM)による計算を行い、実験結果と比較した。また、比較のため軸対称状態である積層円柱に関しても、同様の検討を行った。

4.2 計算方法及び計算条件

FEM解析には、弾塑性有限要素法コードGOLDA^{1)~3)}を用いた。これに境界面での材料どうしの接触処理に加え、さらに鋸歯状境界という形状を持つ幾何学的対称性に関する処理を付加して計算時間の短縮も図った。

幾何学的対称性に関する処理について述べる。図6に示す初期形状において、平面ひずみ圧縮では、材料は左右に十分長いと考えている。中央の直線状にある点l,m,n,o,pは、変形中、左側l-n線上のnからある距離に位置する節点mの節点速度 δ_m は、右側n-p線上のnから同じ距離にある節点oの節点速度 δ_o に依存するはずである。よって、計算は鋸歯の1/2波長の上半分領域に関して行えばよい。全体剛性行列Kの任意のr行目は、総節点数Nで2次元のとき以下のようにになっている。

$$K_{r,1}\delta_1 + K_{r,2}\delta_2 + \dots + K_{r,i}\delta_i + \dots + K_{r,j}\delta_j + \dots + K_{r,k}\delta_k + \dots + K_{r,2N}\delta_{2N} = \delta F_r \quad (2)$$

例えば、 δ_k が他の節点速度 δ_i と δ_j に依存するとき、a,bを

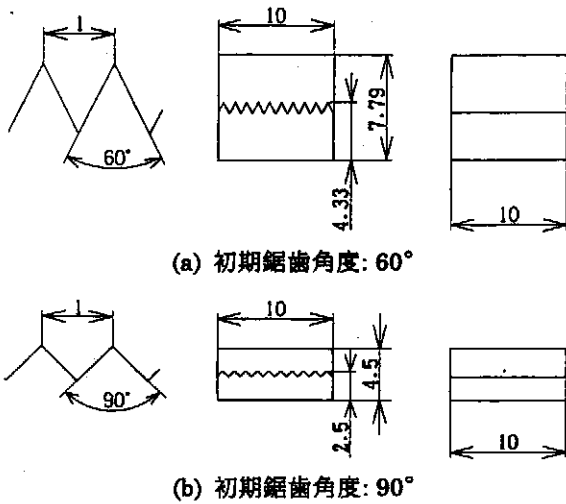
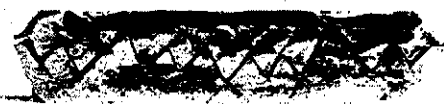


図4 試験片形状



圧縮率: 50%

図5 圧縮品の例(初期鋸歯角度: 60°)
(A5056-H, 初期鋸歯角度: 60°)

任意の定数として、

$$\delta_k = a\delta_i + b\delta_j \quad (3)$$

と書ける。すると、その行において、

$$K_{r,1}\delta_1 + K_{r,2}\delta_2 + \dots + (K_{r,i} + aK_{r,k})\delta_i + \dots + (K_{r,j} + bK_{r,k})\delta_j + \dots + K_{r,k-1}\delta_{k-1} + K_{r,k+1}\delta_{k+1} + \dots + K_{r,2N}\delta_{2N} = \delta F_r \quad (4)$$

と修正できるので、 δ_k の項はなくなる。こうして他の同様な δ_k についても処理できる。

また、塑性構成式には、著者の一人が提案した尖り理論の一種であるJ2G^{1)~3)}を用いたが、尖り生成の程度を規定する材料定数 ρ については、いずれの計算でも0.8とした。

4.3 実験結果と計算結果の比較及び考察

計算で求めた圧縮後の形状を図7に示す。n値を0.01と小さく設定する場合、せん断帯の生成を伴って鋸歯が成長する様子をはっきりと再現できた。初期鋸歯角度60°における断面積拡大比に関して、計算及び実験結果を図8に示す。いずれの初期鋸歯角度の場合も圧縮が進行するにつれて急激に拡大した。実験では中央部の鋸歯について評価しているが、材質による差ははっきりしない。しかし、端寄り部では硬質材の方が一層成長した。

計算では、硬質材を想定してn値を小さくしたとき、成長の程度は大きくなり、実験結果を十分反映していると考えられる。

4.4 軸対称での計算結果

以上の平面ひずみ圧縮と比較するため、軸対称(円柱)圧縮についても計算した。

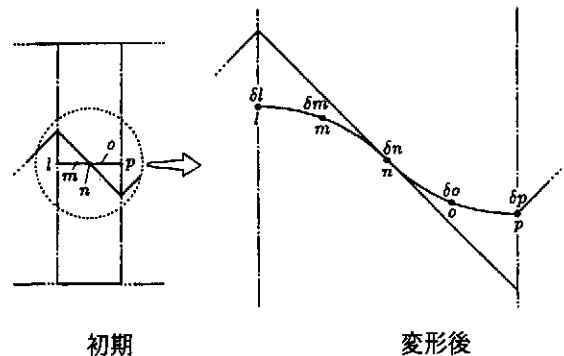
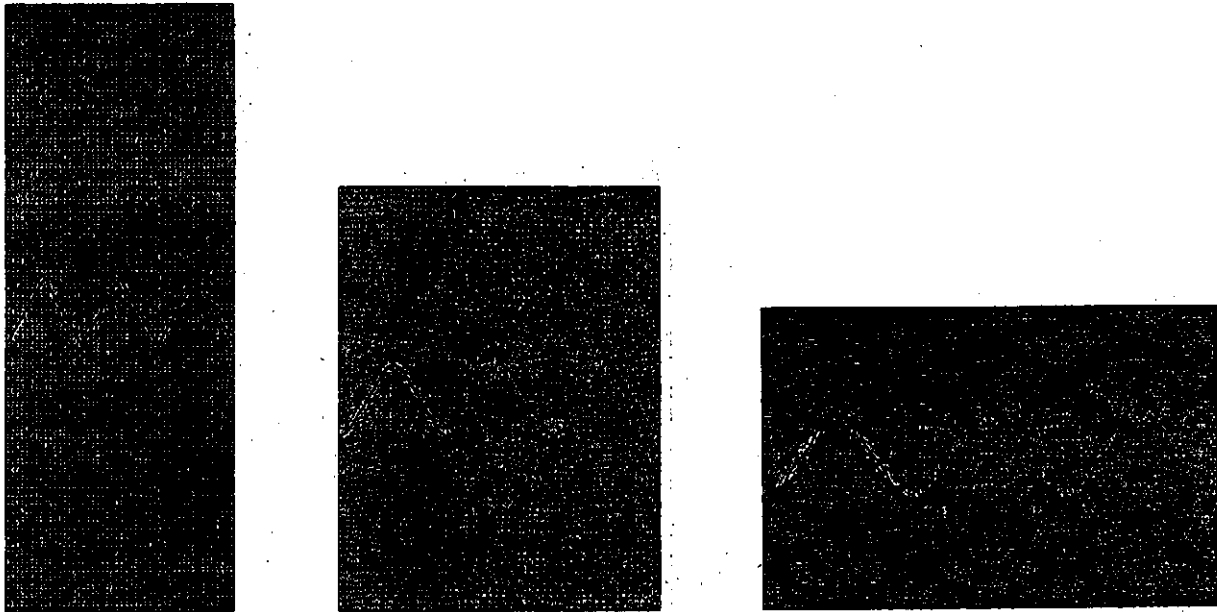


図6 形状の対称性



初期形状

圧縮率 30%

圧縮率 50%

図7 鋸歯状境界面の成長挙動(鋸歯角度: 60° , $n=0.01$)

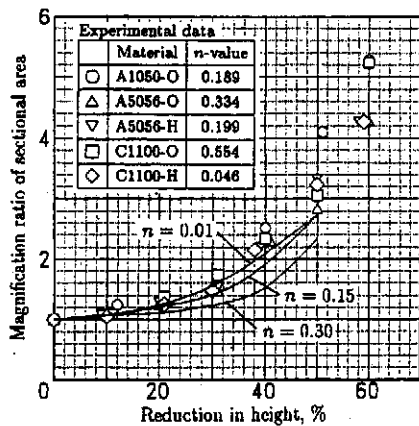
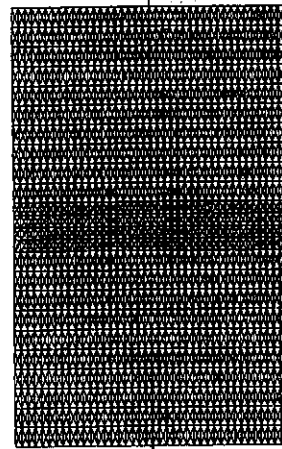
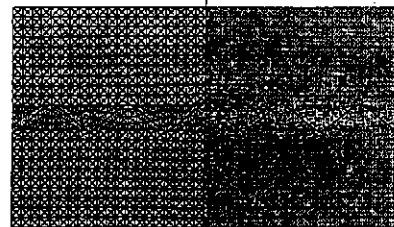


図8 断面積拡大比の実験と計算との比較
(初期鋸歯角度: 60°)

初期鋸歯角度 60° , [鋸歯の高さ]:[単体の高さ]=1:5 と設定して, $n=0.15$ で計算した結果を図9に示す. 境界面で多少相対滑りが生じてはいるものの, 平面ひずみの場合と異なり鋸歯は高さ方向に成長せず, 圧縮するにつれてつぶれていき全体としてほぼ一様圧縮に近い形となった. 鋸歯部の体積の拡大は下側の最外周でわずか約 1.2 倍程度であり, 平面ひずみのものとは比べるとはるかに小さい. なお, 別途実験も行っており, 同様な結果を得ている. 平面ひずみとは異なり, 軸対称変形では半径方向の物質移動は必然的に付加的な円周ひずみを伴う. せん断帯に沿う変形も周辺に円周ひずみを誘起するので, 結果的にせん断帯形成が抑制され, 変形が一様化するであろう. 軸対称では(剛塑性で考えても)場の方程式は楕円



(a) 初期形状



(b) 圧縮率: 50%

図9 軸対象形状での圧縮
(初期鋸歯角度: 60° , $n=0.15$)

型となり、すべり線(特性曲線)が一般に存在しないことと関連すると考えられる。

4. 5 結言

- (1) 平面ひずみ圧縮による鋸歯成長は、実験及び計算結果から形状的な効果と鋸歯先端から出るせん断帯に変形が集中することによるものであることがわかった。
- (2) 平面ひずみ圧縮のとき、計算でも鋸歯の成長を再現できたが、特に、初期鋸歯角度 60° で $n=0.01$ のとき、せん断帯の発生も明瞭に再現できた。
- (3) 平面ひずみ圧縮時の鋸歯の成長を鋸歯の断面積で評価するとき、計算でも鋸歯は圧縮率が大きくなると急激に成長するという実験と同様な結果が得られた。
- (4) 計算では n 値が小さいとき成長は大きくなり、実験では硬質材で成長が大ききその傾向は一致した。
- (5) 鋸歯状境界の軸対称圧縮では、鋸歯の成長はほとんどない。

5. アルミ・ハニカムの衝撃座屈変形(興味論文4)

実験的にハニカムの衝撃座屈特性を検討した例⁴⁾はあるが、数値シミュレーションとの比較はなされていない。そこで本研究ではハニカムの衝撃座屈変形について、動的陽解法有限要素法ソフトウェア DYNASD[®](パブリックドメインバージョン)を用いて、数値シミュレーションを行ったが、その時、定量的にも実験結果を予測可能な計算モデルを考案することを目的とした。そして、種々の箔厚及びハンマーの衝突速度について、別途実験を行っているが、数値シミュレーションもこれと対応させて行い、実験結果と比較しモデルの有効性を検討した。

5. 1 計算モデルと計算条件

六角形ハニカムは、六角形セルの集合であるが、モデル形状としては二重壁部が1枚ずつの箔に分離するY字が多数集まったものとして行うことができる。そこで、数値シミュレーションでは、図10に示すようなY字状の計算モデルを考案した。Y字形状の箔は、4節点シェル要素を2720個を用いた。要素形状は縦0.25mm、横0.33mmの矩形を基本とした。なお、二重壁から一枚壁への分岐部分では、1枚箔部分の二重壁よりの要素の幅は0.17mmで、その要素のみ分岐角度 120° の半分の 60° で分岐させ、それに続く要素は 120° で分岐させた。二重壁部の箔間の接着剤として0.004mmの薄い層状の六面体要素(要素数640個)を付加した。箔および接着剤ともに、等方弾塑性材を仮定し、箔の材料特性値は箔厚が0.033mmの実験で使用したものとほぼ同様になるように設定した。接着剤を仮定する要素の材料強度は、箔に比べてかなり小さく設定した。計算で用いた箔と接着剤の材料特性値を表1に示す。

図10に示す計算モデルの高さは20mmであるが、繰

り返し座屈現象を再現し、圧縮時の応力を計算するには十分である。また、計算は規則的な数周期の座屈が現れてクラッシュ強度が十分予測できたと考える時点で終了させた。

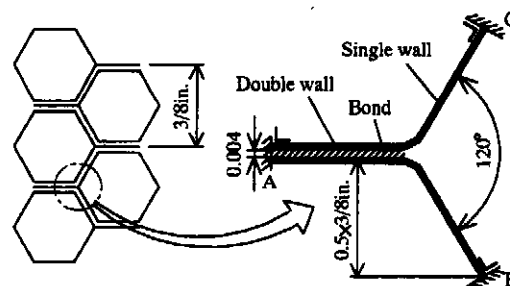


図10 計算で用いたY字形モデル

表1 数値シミュレーションで使用した材料特性値

	Foil	Bond(Assumed)
Density (g/cm ³)	2.7	2.0
Young's modulus (GPa)	72.0	1.29
Shear modulus (GPa)	28.0	0.5
Yield stress (MPa)	300.0	5.0
Hardening modulus	0.01	0.0
Bulk modulus (GPa)	60.0	1.0

5. 2 結果と考察

紙面の都合上、計算結果のみを示す。変形形状の計算結果の例を図11に示すが、これに関しては実験と同様な繰り返し座屈現象が再現できた。数種類の計算例について圧縮応力-時間曲線を図12に示す。同図中にはクラッシュ強度の平均値も直線で示した。実験と同様な振動する圧縮応力が計算でも再現できたが、振幅の程度は、計算の方が大きかった。これは、計算モデルには不均一性を一切考慮していないが、実際のハニカムでは、多数のY字を含み、各種の不均一性がY字内に存在するため、応力振動の振幅に相互干渉が起こり、結果的に実験の振幅は計算のものより小さいものと考えられる。また、ハンマー衝突直後のピーク応力に関しては、計算の方が実験のものよりもかなり大きかったが、これも計算で種々の不均一性が考慮されていないからであると考えられる。一方、振動する繰り返し座屈現象が現れている部分について平均したクラッシュ応力は、定量的にも実験値にかなり近いものであった。この時、ハンマーの衝突速度が速いほど、クラッシュ強度はやや大きくなるという計算結果も実験結果と一致した。

以上の結果から、本研究で提案した二重壁を考慮したY字モデルは、六角形セルを持つハニカムの衝撃座屈変形解析には、十分適するものと考えられる。

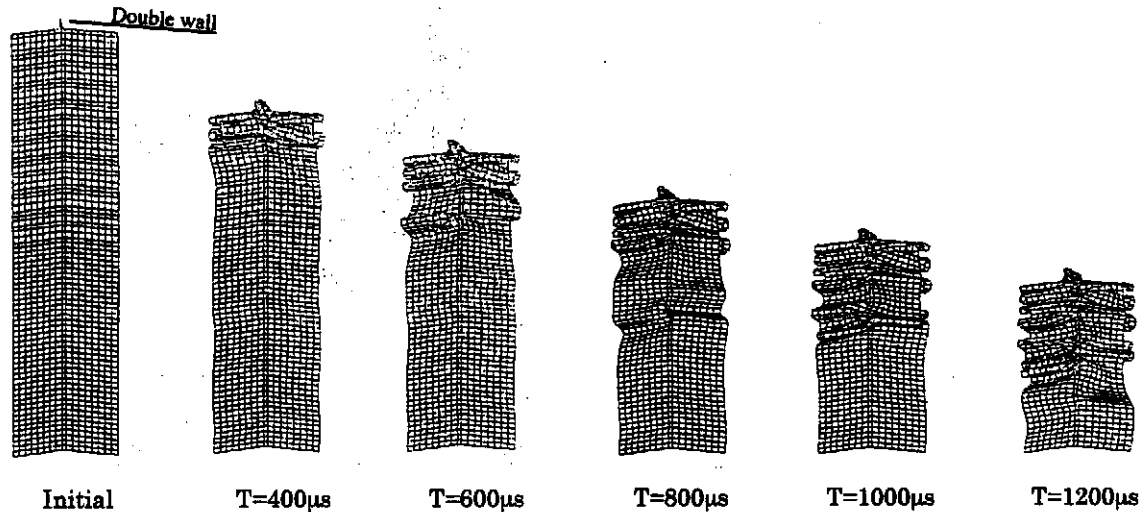


図 1 1 衝撃座屈変形状 (箔厚さ : 0.033mm, 衝突速度 : 10m/s)

5. 3 結言

- (1) 数値シミュレーションを実際のハニカムに近い二重壁を考慮した計算モデルを用いて行ったところ、実験と同様な繰り返し座屈現象が再現できた。
- (2) 振動する繰り返し座屈現象が現れている部分について平均したクラッシュ応力は、定量的にも実験値にほぼ一致した。
- (3) 衝突速度が速くなると、クラッシュ強度がやや大きくなるという実験結果もシミュレートできた。

謝 辞

本研究の遂行に対しまして、研究助成を賜りました財団法人天田金属加工機械技術振興財団に心より謝意を表します。

参考文献 (主なもののみ)

- (1) 後藤学, 機論A, 54-500(1988),777.
- (2) 後藤学, 機論A, 55-518(1988),1579.
- (3) 後藤学, 機論A, 55-518(1989),2080.
- (4) Goldsmith and J. L, Sackman, Int. J. Impact. Eng., 12(1992) 241.
- (5) Hallquist, DYNA3D Users's manual, Rev.5 (1989).

本研究に関する主なる発表論文

- (1) Unexpected Phenomena and Their Numerical Simulations in Plane Strain Compression of Multilayered Blocks (Manabu GOTOH, Minoru YAMASHITA, Naoshi TORII), Forth International Conference on Computational Plasticity(Complas4), Barcelona(Spain), (3-6, April, 1995), pp.2189-2200(1995).
- (2) 平面ひずみ圧縮を受ける鋸歯状積層界面の成長挙動

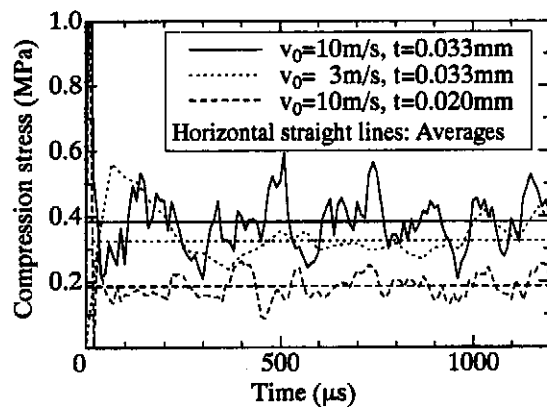


図 1 2 計算で得られた圧縮応力-時間線図 (V₀:ハンマー衝突速度, t:箔厚)

とその数値シミュレーション (後藤学, 山下実, 鄭泰勲, 松野正信), 日本材料学会誌「材料」, Vol.44, 500, pp.570-577(1995).

- (3) Growth Behavior of Sawtoothed Interface Between Two Blocks Under Plane Strain Compression (Manabu GOTOH, Minoru YAMASHITA, Tae Hoon CHUNG), The fifth international symposium on plasticity and its current applications (Plasticity '95), Osaka(Japan), (17-21, July, 1995), pp.377-380(1995).
- (4) Crush Behavior of Honeycomb Structure Impacted by Drop-hammer and Its Numerical Analysis, Materials Science Research International, Vol.2, No.4, pp.261-266(1996).