

木質パーティクルマットの曲面成形 (第3報)
グズミ要素法によるコンピューターシミュレーション

楊 萍*・秦 正徳**・佐々木 光*

Molding Wood Particle Mats III

Computer Simulation by Finite Element Method with Guzumi-Elements

Ping YANG*, Masanori HATA** and Hikaru SASAKI*

(昭和63年8月2日受理)

In the previous paper (Report I)¹⁾ finite element method (FEM) with incremental elasticity for analysing deformation and stress distribution in a particle mat during hot-pressing with curved dies was proposed. By the proposed method the pressing process of particle mat was well simulated with changing elastic constants of the model elements. In this paper, FEM with Guzumi-element made of a triangle element and three Z shaped spring elements which gives more freedom of movement to particles was used to express slippage between particles during pressing. During the incremental calculation, the elastic constants of triangle element were kept constant (ie. the values of the final particleboard), and the spring constants of Z-element were increased in proportion to compression ratio of mat.

The results obtained are as follows:

1. In employing FEM with Guzumi-elements to solve the molding behavior of particle mat, more reasonable results could be obtained. When taking the spring constants of Z-element in x (horizontal) direction k_1 and in y (vertical) direction k_2 as: $k_1 = c_0 + c_1 \lambda^n$, $k_2 = k_1/4$, where λ : compression ratio of mat, c_0 : initial value of spring constant in x direction 0.04 kgf/mm, c_1 : spring constant factor in x direction 800 kgf/mm which depends on the shape, size and density of raw material, n : power of compression ratio of mat 2.
2. The calculated stresses at the stress concentration portion are a little greater than those in Report I¹⁾, but continuity in mat deformation at the interface between two layers with different elastic constants could be expressed more properly by this method.
3. To a certain extent, FEM with Guzumi-elements is an effective method to simulate the deformation and stress distribution in molding particle mat during pressing as well as FEM with incremental elasticity proposed in Report I¹⁾.

* 木質材料部門 (Research Section of Composite Wood)

** 高岡短期大学 (Takaoka National College, Takaoka, Toyama 933)

Key words: molding particle mats, computer simulation, structural analysis, particleboard

概 要

パーティクルマットの曲面成形における変形過程と応力分布を数値解析する方法を提案した第1報¹⁾では、マットのモデル要素の弾性定数は最初非常に小さいが、段々増加して、最終的には成形される曲面パーティクルボードのそれに到達するものと仮定し、パーティクルの相互間の滑りなどは要素の弾性定数の変化という形で表わされ、増分計算の過程で逐次要素内で消化されると考えた。本報では、マットが圧密化される過程におけるパーティクル相互間の滑りを更に適確に表現するために、もう少し自由に動くことができるパーティクルのモデル要素（三角形平面要素とバネ要素からなるいわゆるグズミ要素²⁾）を考えた。グズミ要素を用いたこの方法では、増分計算の過程の各段階における三角形平面要素の弾性定数をつねに一定（ここではボードの圧縮最終期の弾性定数を用いた）とし、要素と要素の間の連結部分のバネ要素（Z要素）のばね定数をマットの圧縮段階に応じて段々高くすることでパーティクルの動きと圧縮過程を表現した。本報で得られた結果は次の通りである：

1. 提案したグズミ要素法でパーティクルの成形問題を解くためには、水平方向のバネ定数 k_1 と垂直方向のそれ k_2 を次のようにとると、比較的合理的な答えが得られると考えられる。すなわち、 $k_1 = c_0 + c_1 \lambda^n$, $k_2 = k_1/4$, ここに、 $c_0 = 0.04 \text{ kgf/mm}$, $c_1 = 800 \text{ kgf/mm}$, λ : マットの圧縮率, $n=2$ 。
2. 前報¹⁾の増分弾性要素法による結果に比べて応力集中点の主応力は大きく算定される傾向があるが、弾性定数が非常に異なる層からなる複合系の解析には計算上層間の境界の不連続性が軽減されるので、より合理的な変形や応力分布の計算ができると考えられる。
3. グズミ要素を用いる方法もまた増分弾性要素法¹⁾とともに圧縮系の変形と応力のシミュレーションにある程度有効な方法であると考えられる。

1. 結 言

第1報¹⁾では増分弾性要素法によってパーティクルの曲面成形における変形過程と応力分布を数値解析する方法を提案したが、マットの圧密化される過程で弾性定数が著しく異なる層間の界面におけるパーティクルの相互間の滑りは必ずしもうまく表現できなかった。本報ではこの点を更に合理的に表現するために、もう少し自由に動くことができるモデルの導入を試みた。著者らは、先きに、水平せん断力を受ける釘接合ストレススキンパネルの非線形変形挙動を合理的に解析するために、釘点の緩みやめり込み挙動を表現できるモデル要素を提案した²⁾。すなわち、三角形平面要素の釘点に接するコーナーに釘の緩みを表現するバネ要素（Z要素）をつけた特殊の三角形要素（グズミ要素と呼ぶ）を導入し、増分計算によって解を収束させることに成功した²⁾。

ここではこのグズミ要素を用いて、パーティクルマットの曲面成形過程の応力と変形を数値的に解析する可能性を検討した。すなわち、パーティクルマットを多数の三角形有限要素に分割し、各要素内のパーティクル集合体の力学的挙動（パーティクルの力学的挙動とパーティクル間の摩擦すべりを含む総合的挙動）を一定の弾性定数を持つ三角形平面要素とその3頂点（節点）に接続されたバネ要素（これらの複合がグズミ要素）によってモデル化し、圧縮過程を微小のステップに分け、各ステップについて増分計算を繰り返すとともに、各ステップで算出されたグズミ要素の座標を次のステップの計算の原座標とすることによってパーティクル間のすべりと圧密過程を表現することを試みた。本報はその解析結果を第1報¹⁾の増分弾性要素法による解析結果ならびに第2報の比重分布に関する実験結果³⁾と比較し、この解析方法がパーティクルマットの曲面成形における変形過程のシミュレーションに妥当性なものであるかどうかを考察したものである。

2. 解 析 方 法

2.1 グズミ要素 (Guzumi-Element)

増分計算過程の各段階におけるパーティクルマットを三角形平面要素でモデル化し、その弾性定数をつね

に一定（ここではボードの圧縮最終期の弾性定数）とし、要素と要素の間の連結部分にバネ要素を入れ、その剛性を段々高くすることによって、パーティクル相互の滑りや圧密化が圧縮に伴って漸次起こりにくくなってゆくことを表現した。このように節点にバネ要素をもつ特殊な平面要素をグズミ要素と呼ぶ²⁾。Fig. 1 はグズミ要素の構成を示している。三角形平面要素は各節点 l, m, n において、寸法ゼロのバネ要素（Z要素）を介して他の要素に連結されている。Z要素の直交する2本のスプリングは x 及び y 方向における要素間のゆるみをモデル化したもので、それぞれのバネ定数 k_1, k_2 は圧縮の段階に伴って変化し、マットの圧縮率に伴って増加するものと仮定した。

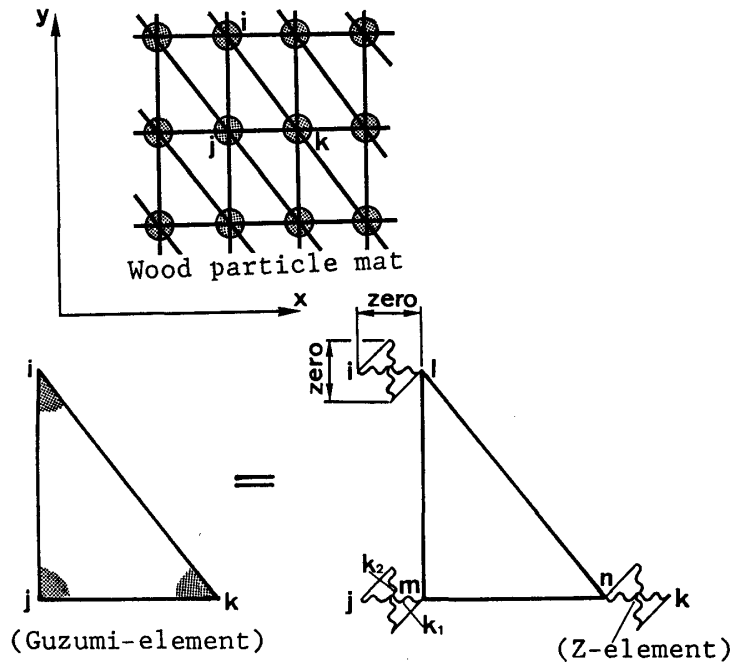


Fig. 1. Composition of Guzumi-element.

Note: k_1 : Spring constant in x direction.

k_2 : Spring constant in y direction.

このように、パーティクルマットの圧縮過程の変形挙動を3隅部に緩みを持つ独特の三角形有限要素（グズミ要素）でモデル化して表現することとした。平面要素 (l, m, n) と Z 要素 (li, mj, nk) のそれぞれの力学的性状を表わす剛性方程式を結合して、複合要素 (i, j, k) の剛性方程式を作ると、次のようになる：

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ X_j \\ Y_j \\ X_k \\ Y_k \\ X_l \\ Y_l \\ X_m \\ Y_m \\ X_n \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 \\ -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{11}+k_1 & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ 0 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{21} & k_{22}+k_2 & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & k_{31} & k_{32} & k_{33}+k_1 & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0 & 0 & k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44}+k_2 & k_{45} & k_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55}+k_1 & k_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66}+k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \\ u_l \\ v_l \\ u_m \\ v_m \\ u_n \\ v_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

これを略して次のように表わす：

$$\{P\} = [K] \{d\} \quad (2)$$

ここに、 X, Y はそれぞれの添字の節点に働く x 方向と y 方向の力の合計であり、 u, v はそれぞれの添字の x 方向と y 方向の変位である。 k_{ij} ($i=1\sim6, j=1\sim6$) は三角形平面要素の剛性マトリックスの i 行 j 列の成分である。

ここに、節点 i, j, k の力ベクトルを $\{P_A\}$ 、 Z 要素と三角形要素につながっている節点 l, m, n の力ベクトルを $\{P_B\}$ として、(2) 式左辺の節点力ベクトルを分割する。同様に、右辺の節点変位ベクトルを $\{d_A\}$ 、 $\{d_B\}$ に分割し、それらに対応して $[K]$ を $[K_{AA}]$ 、 $[K_{AB}]$ 、 $[K_{BA}]$ 、及び $[K_{BB}]$ に分割すると、

$$\begin{Bmatrix} P_A \\ P_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{BA} \\ K_{BA} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_A \\ d_B \end{Bmatrix} \quad (3)$$

となる。式中のマトリックスやベクトルに示されている破線は分割を表わしており、乗算式は分割されたマトリックスやベクトルの大きさを表わしている。

しかしながら、Fig. 1 より明らかなように、節点 l, m, n には外力が作用していないので、

$$\{P_B\} = [000000]^T \quad (4)$$

である。したがって、(3) 式を分解して、 $\{d_B\}$ を求めると、

$$\{d_B\} = -[K_{BB}^{-1}][K_{BA}]\{d_A\} \quad (5)$$

となる。この (5) 式を $\{P_A\}$ に代入すると

$$\{P_A\} = ([K_{AA}] - [K_{AB}][K_{BB}^{-1}][K_{BA}])\{d_A\} \quad (6)$$

となる。(6) 式では、 l, m, n の3つの点の節点力や節点変位が消去されているので、三隅にバネ要素を含んでいるが、通常のものに比べて要素の剛性マトリックスを $([K_{AA}] - [K_{AB}][K_{BB}^{-1}][K_{BA}])$ に書き換えるだけで通常の三角形要素 (i, j, k) と同じ形で解析に用いることができる。

2.2 圧縮系のモデル化

今回解析例として取り上げた問題を Fig. 2 に示す。図は左右対称な圧縮系の右半分を示している。上の雄型と下の雌型はともに直線部分と円弧部分からなっている。圧縮される材料としては上下両表面に樹脂含浸紙をあてた、一定の厚さのパーティクルマットを仮定する。図は圧縮前の状態を示している。金型が樹脂含浸紙と接触しているところは、第1報¹⁾と同様、最大静摩擦力以上ですべる摩擦支点になっている。圧縮過程でマットと金型の接触面積が増加するので、摩擦支点の数が増加していく。数値解析のために、樹脂含浸紙は普通の三角形の有限要素に分割され、木質部分のパーティクルマットは各節点に緩みを持つ三角形の有限要素 (グズミ要素) に分割され、モデル化されている。節点の総数は544、要素の総数は938である。また、計算方法としては、微小な変形段階に分けて線形計算を繰り返す、いわゆる増分法を用いた。

2.3 解析手順と解析プログラムの特徴

第1報と同様に増分繰り返し計算を行なった。そのフローチャートは Fig. 3 の通りである。

まず、ステップ1で、雄型をパーティクルマットの元の厚さ t_0 の $1/N$ だけ y 軸に平行に下方に移動させ、それに伴って増加するマット上面と雄型の接触点の各点に雄型の形状に合わせて、 $-y$ 方向の強制変位を与え、パーティクルマット部分のグズミ要素のバネ定数をマットの圧縮率に比例して上昇する形で入力、マットの変形と応力分布を有限要素法による弾性平面構造解析の手法で計算する。但し、増分計算過程における各節点の座標は次々に更新され、次の出発の起点とする。ステップ2で、マットの凸面が雌型のカーブより下に行き過ぎたかどうかをチェックする。もし、行き過ぎならば、ステップ3でカーブ上に戻すため

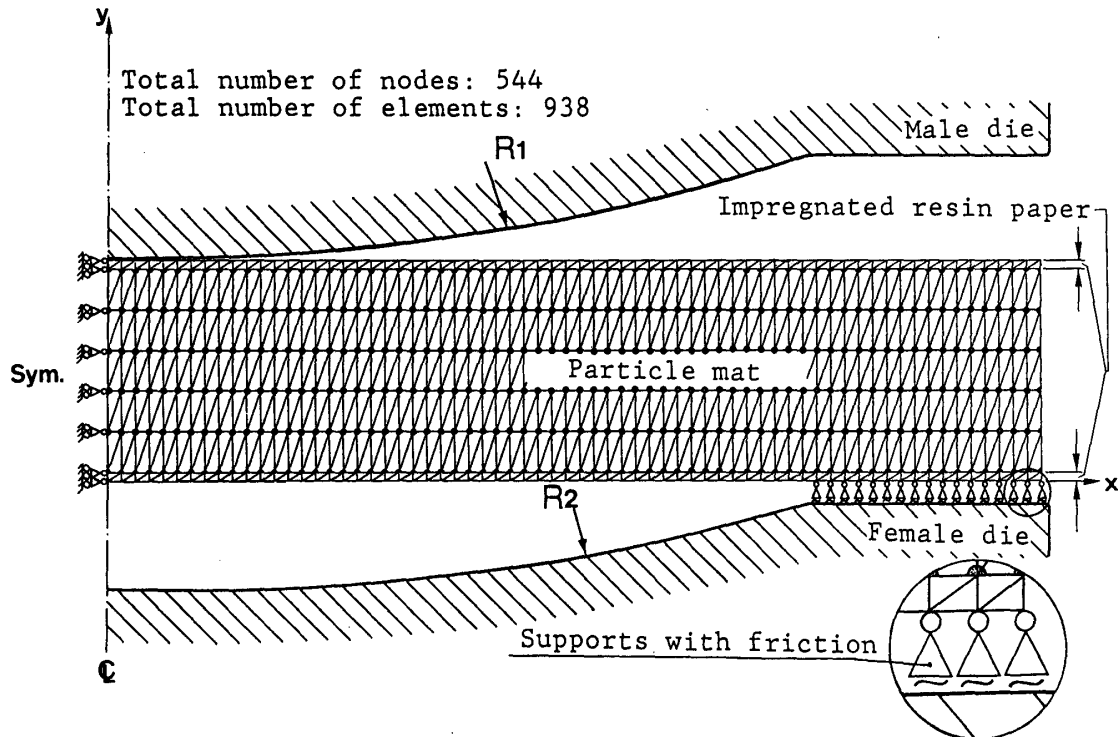


Fig. 2. Schematic diagram of dies and particle mat before pressing.
Sample problem of deformation and stress distribution analysis
by finite element method (FEM) with Guzumi-element.
Note: R_1 : Radius of male die, R_2 : Radius of female die.

に、その点に強制変位を与える。ステップ4で、金型と接触している点の金型曲線の接線方向の節点力 X_i が最大静摩擦力 $\mu \cdot Y_i$ (μ は静摩擦係数, Y_i は接触点の金型曲線の法線方向の節点力) より大きいかどうかをチェックする。もし、大きければ、ステップ5で、接線方向の節点力の方向に最大動摩擦力 $\mu' \cdot Y_i$ (μ' は動摩擦係数 $= 0.8 \mu^{30}$) に相当する力を新たな拘束力として与えると共に、その点が接線方向にスライドできるように傾斜方向のローラー支持とする。もし、接線方向の節点力が最大静摩擦力より小さければ、そのまま拘束する。このような扱い方をすると、計算の各ステージで静摩擦状態にある支点と動摩擦状態にある支点が混在する場合が生じ、全体の釣り合い状態が変わるので、他の支点の摩擦状態もその影響を受ける。この影響を補正するために、繰り返し収束計算を行ない、結果を安定させるべきであるが、本報では計算が複雑に過ぎるので、この収束計算を省略した。しかし、この影響は全体の計算ステップの繰り返しの途中で徐々に緩和されてゆき、最終結果には大きな誤差を生じないものと考えられる。ステップ6で、マットの厚さが目標の厚さに圧縮されているかどうかをチェックし、圧縮されていなければ、最初のステップ1に戻って雄型の位置を下げることを増分的に繰り返す。この繰り返し計算によって、マットの厚さが目標の厚さまで圧縮されたのを確認した後、ステップ7で、金型と接触するマット表面の節点座標が金型の曲線から Δt (ここでは仮りに 0.01 mm にした) 以内に存在するかどうかをチェックし、はずれている場合は、計算をステップ3に戻す。全部が満足された時、ステップ8で、積算された各要素の応力成分からマットの最終の主応力分布が算出される。

なお、このような計算方法では境界上の隣あった節点が同時に少し異なる傾斜に沿って滑る場合が生ずるので、近傍の要素が異常な変形を強いられる可能性がある。この不都合を軽減するためには強制変位増分の刻み (t_0/N)、チェック幅 Δt を境界付近の要素寸法に比べて十分小さくする必要があると思われる。ここでは t_0/N と Δt を要素最小寸法 (3 mm) のそれぞれ $1/6$ 及び $1/300$ にとって計算している。なお、これらの不

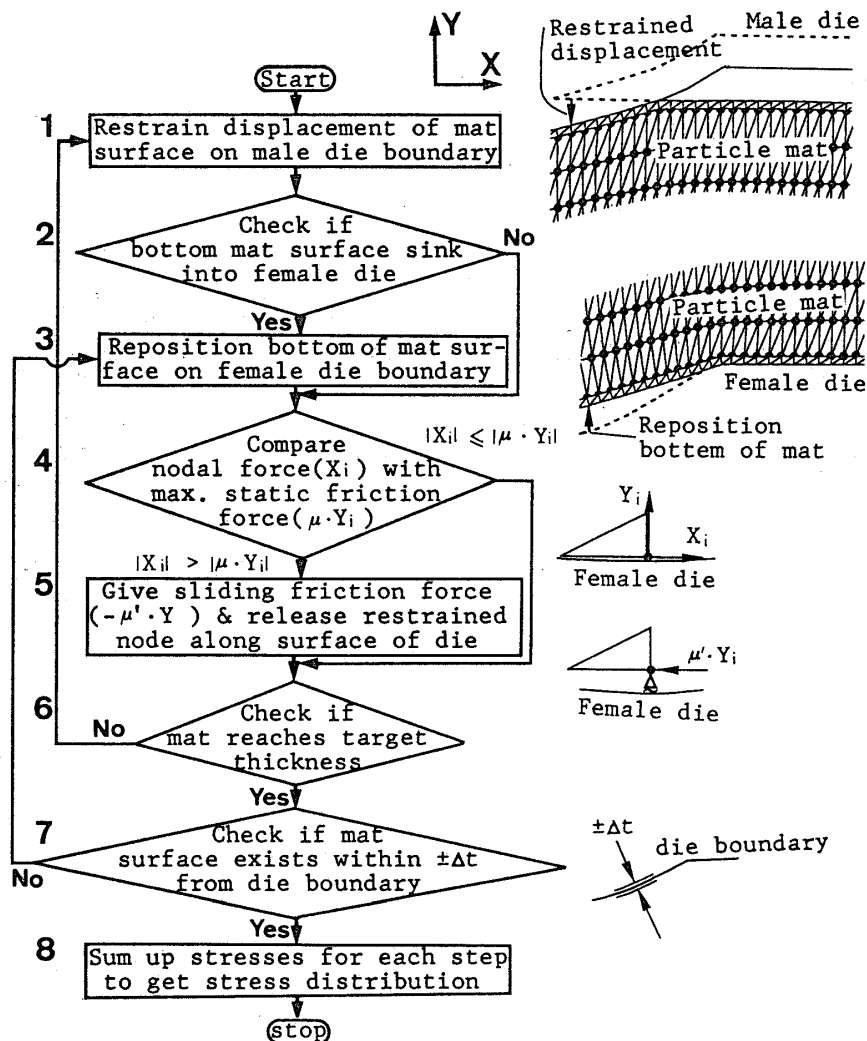


Fig. 3. Process of analysis of deformation and stress distribution by finite element method (FEM) with Guzumi-element.

Note: μ , μ' : Static and sliding friction coefficients between the die and overlaying paper.

X_i , Y_i : Tangential and normal components of the nodal force at the interface.

都合は強制変位増分を停止した後の繰り返し計算を、解が十分に収束するまで行なうので、その過程で徐々に矯正されているものと考えられる。

2.4 解析条件

第1報¹⁾と同様に2種類の雄型雌型の組合わせについて計算した。すなわち、曲面ボードの圧縮方向 (y 方向) の厚さが一定となる場合 (Case 1) と曲面ボードの円弧部分の放射方向の厚さが一定となる場合 (Case 2) である。また、曲率の影響を解明するために、雄型の曲率半径 R_1 の平均値を 62, 119, 216, 349, 522 mm の5つの値に変化させ、それに伴って雌型の曲率半径 R_2 も変化させた。

マットの両表面に敷いたメラミン樹脂含浸紙は熱圧硬化後においても高温であるため、文献値⁴⁾よりも弾性定数が低いと考えられる。フォルマリン系樹脂の2次転移点温度前後の弾性率の比が 200 : 1⁵⁾ 程度であることを考慮に入れて、計算ではヤング率 $E_x = E_y = 560 \text{ kgf/cm}^2$, 剛性率 $G_{xy} = 200 \text{ kgf/cm}^2$, ポアソン比

$\mu_{xy}=0.4$ を仮定した。

パーティクルマットの三角形要素内の弾性定数は常に一定とし、その値は次のような値を用いた。すなわち、通常のパーティクルボードでは、成板後の弾性定数 E_x , E_y , G_{xy} の比はおおよそ $29:7.4:4.8^{6-8)}$ である。この比を用い、第2報⁹⁾に述べた実験で求めた目的厚さに到達した時の $E_y=239 \text{ kgf/cm}^2$ を入れて圧縮最終期の E_x , G_{xy} を次のように算出した。

$$E_x=945 \text{ kgf/cm}^2$$

$$G_{xy}=154 \text{ kgf/cm}^2$$

なお、弾性定数のうち、 μ_{xy} の影響については不明であるが、ここでは仮に増分計算過程の各段階で一定、 $\mu_{xy}=0.48$ とした。また、強制変位増分の刻み t_0/N を $49/100=0.5 \text{ mm}$ とし、静摩擦係数 μ を 0.53 とした。

圧縮の初期にはマットのパーティクルの部分の各エレメントの弾性主軸と座標軸が一致しているが、圧縮するに従って、曲面部の各三角形のエレメントの弾性主軸の傾きが段々変わってくる。したがって、このような部分については、座標軸を変換する操作を行なった。

3. 解析結果と考察

3.1 バネ定数 k の設定

ここでは、マットが圧縮されるのに伴い、パーティクルの相互間に滑りが生じ、密着性が高くなって、全体として圧密化が進む過程をグズミ要素のバネ定数 k_1 と k_2 を変化（増加）させることで表現している。すなわち、増分計算の過程の各段階におけるパーティクル部分の三角形平面要素の弾性定数はつねに一定とし、要素と要素の間の連結部分のバネ要素の剛性を次の式のようにマットの圧縮率 λ の n 乗に比例して段々高くなるように設定した。

$$k_1=c_0+c_1\lambda^n \quad (7)$$

$$k_2=k_1/4 \quad (8)$$

ここに、 c_0 はマットの初期状態 ($\lambda=0$) における x 方向のバネ定数 (k_1 の初期値) であり、 c_1 はパーティクルの形状と樹種に依存する比例定数である。 n はマットの圧縮率の乗数で、整数とする。また、 $k_2=k_1/4$ としたのは、 k_1 と k_2 の比率を $1:4 \sim 4:1$ まで広範囲に変化させても計算結果にほとんど影響がなかったこととパーティクルボードでは前述のように $E_x:E_y=4:1$ であることなどによった。 λ はマットの圧縮率であり、次の式で算出される：

$$\lambda=(t_0-t')/t_0 \quad (9)$$

ここに、 t_0 はマットの最初の厚さ (49 mm) であり、 t' は増分計算過程の各段階におけるマットの厚さである。

3.2 n の値が解析結果に及ぼす影響

n の変化に対するマットの圧縮率とバネ定数の関係の変化は Fig. 4 に示される。

但し、パーティクルマットは初期には崩れ易い極めて疎な構造をもっており、圧縮されるに従いパーティクル間の空隙が閉じて、全体として固まった構造になるが、その性状を示す c_0 , c_1 , n などを正確に求めることは困難である。しかし、その変化の形の大勢は n によって支配されるから、ここでは簡単な実験で c_0 , c_1 の概略の値を推定し、 $c_0=0.04 \text{ kgf/mm}$, $c_1=800 \text{ kgf/mm}$ を仮定した。 n についてはその値を $2, 3, 4, 5$ に変化させた。 n が大きくなると、 k_1 の増加が緩やかになって、最大値も小さくなる。

Fig. 5 は異なる n に対するマットの最終変形の計算結果を図にしたものである。 n の増加に従い、マットの中層と上部表層のずれが激しくなり、曲線部分の上部のパーティクル層が強く変形する傾向が見られる。

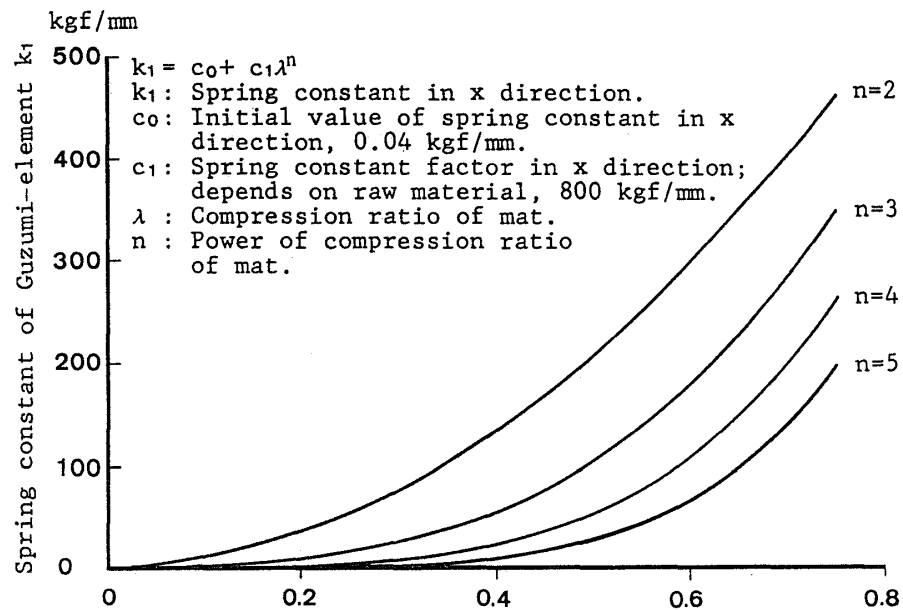


Fig. 4. Relationship between spring constant and compression ratio of mat.

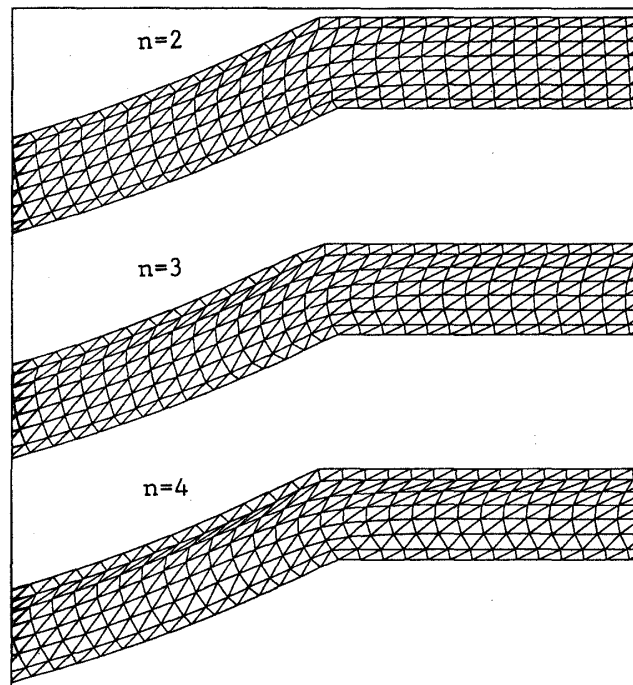


Fig. 5. Effect of spring constant of Guzumi-element on final deformation of mat.

Fig. 6 はそれらの密度分布の等高線図である。 n を変化させると、曲線部分と直線部分の密度が違ってくる。

Fig. 7 は第2報⁹⁾で実際に曲面ボードを成形して、その比重分布を測定した1例である。この写真は、実際に作った曲面成形ボードを一定の幅で切り出し、側面から軟X線を照射し、基本映像を得た後、コントロ

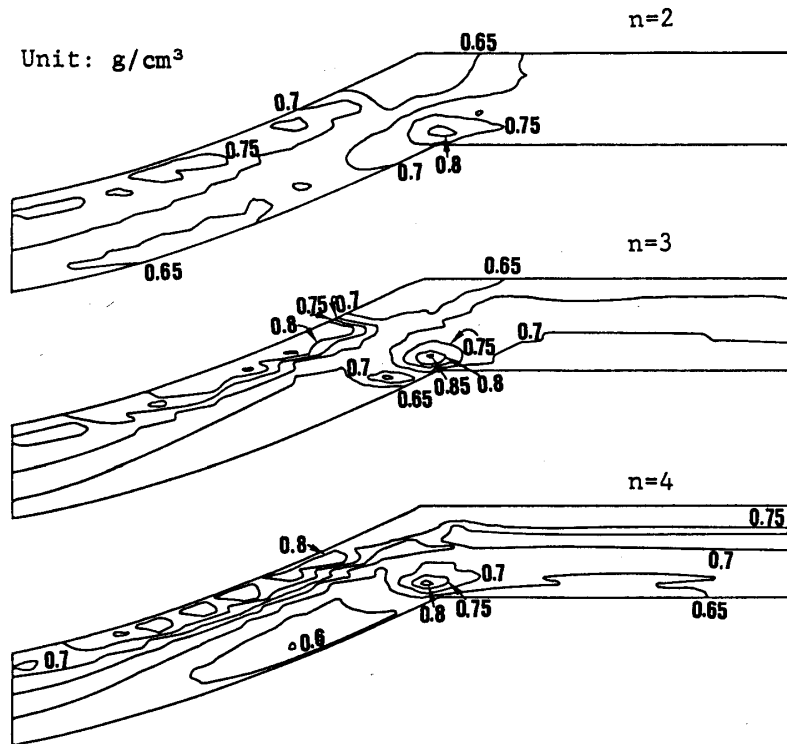


Fig. 6. Effect of spring constant of Guzumi-element on density distribution of molded (Case 2) particleboard.

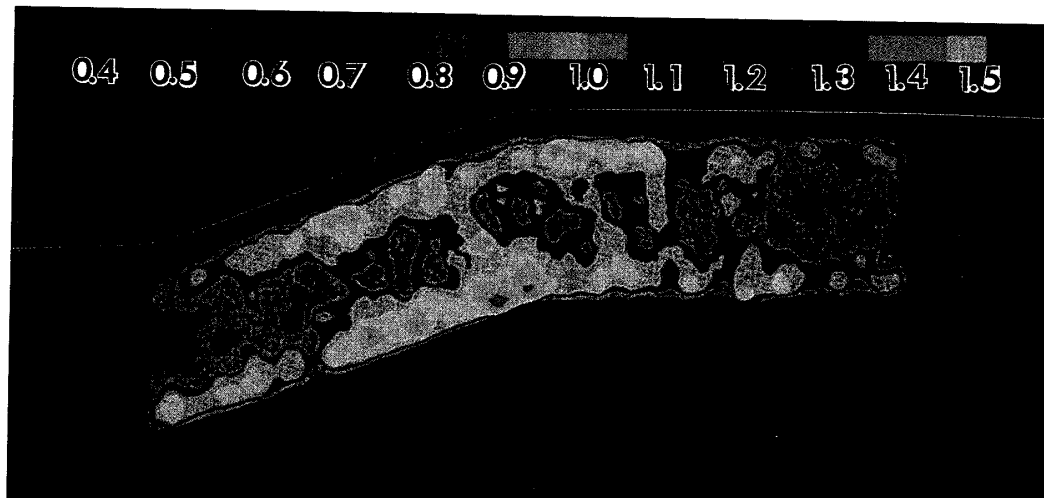


Fig. 7. Color contour map of density distribution of molded (Case 2) particleboard.

ールサンプルの映像濃度をレファレンスとして画像解析装置で処理を行ない比重分布の色画面に転換したものである。Fig. 7 では曲線部分の比重が直線部分のそれより高く、曲線と直線の入り隅部分の応力集中が見られる。また、曲線部分における上密下疎の傾向はあまり見られない。計算結果をこの結果と比較すると、 n が小さいものの方が実験結果をよく表現しているように思われる。なお参考までに、 $n=2$ とし、 c_1 を 400, 800, 1,600, 2,000, 4,000 kgf/mm の 5 段階に変えて計算したところ、 c_1 の変化は表面変位や密度分布に

僅かな影響をもっているものの、 n 程大きな変化をもたらさなかった。その中で、とくに、 $c_1=800$ kgf/mm の場合の密度分布の範囲および密度集中形は実験結果と定性的によく一致していた。

3.3 曲率半径が応力集中に及ぼす影響

(7) (8) 式において、 $c_0=0.04$ kgf/mm, $c_1=800$ kgf/mm, $n=2$ を用いて、曲率半径の異なる場合について計算を行なった。その結果、曲率半径が小さくなるほど、曲面中央部分では凹面側の表層から凸面側の表層に向かって、厚さ方向に上密下疎の傾向が表われた。しかし、曲面から平面に移行する角の近くでは、この傾向が逆になって、上疎下密の傾向が現われ、入り隅に近い部分では密度の最大の点が現われた。この密度の最大の点は、また、応力の集中点である。Fig. 8 は応力集中点の主応力と曲率半径の関係を示したものである。増分弾性要素法による計算結果¹⁾に比べると、図の主応力の値はかなり大きくなっている。しかし、これらの絶対値は弾性的な計算を行なったために異常に大きな値となっているので、応力集中点における塑性や粘弾性による応力緩和を考えると、これらはいずれも現実的な値ではなく、圧密の度合い、つまり、成形における難易度を示すものと解釈される。この観点から曲率半径の関係をみると、曲率半径が成形性に及ぼす影響は第1報の結果¹⁾とはほぼ同じである。即ち、曲率半径 R がボードの厚さ t の20倍以下になると、雄型と雌型の相対位置および曲率半径の影響が大きくなり、曲率半径の減少に伴って急速に成形が困難になることが分かる。とくに、Case 1 の y 方向に厚さが一定の場合にその傾向が著しい。

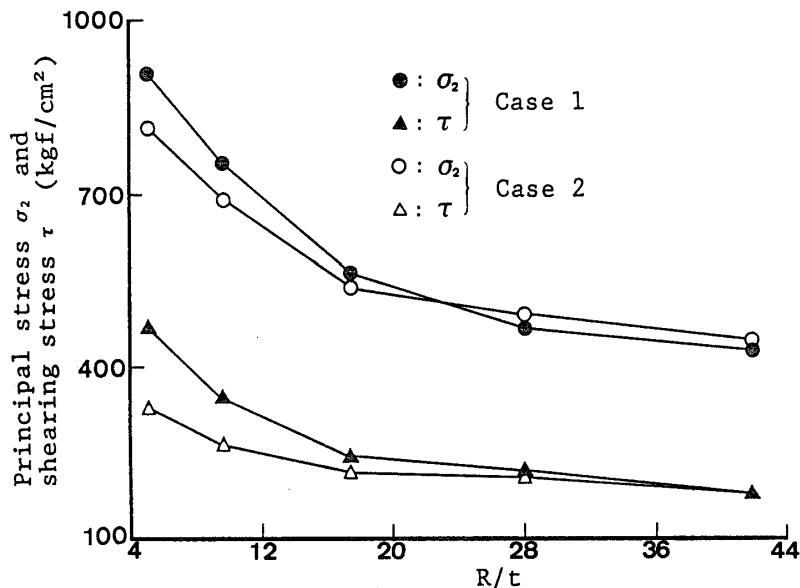


Fig. 8. Relationship between radius of die and stresses at stress concentration portion of molded particleboard.

Note: R: Radius of curvature.

t: Board thickness, 12 mm.

Case 1: Thickness of molded board in pressing direction (y) is uniform.

Case 2: Board thickness of curved part in radial direction is uniform.

3.4 グズミ要素法と弾性要素法の比較, 評価

Fig. 9 はグズミ要素法と増分弾性要素法¹⁾のそれぞれによって計算したマットの最終変形図の比較例である。これを見ると、グズミ要素法による計算結果は増分弾性要素法のそれより弾性定数の異なる層間（オーバーレイ層とパーティクル層）の連続性が良いことが分かる。これは弾性定数の高い要素と低い要素の間の

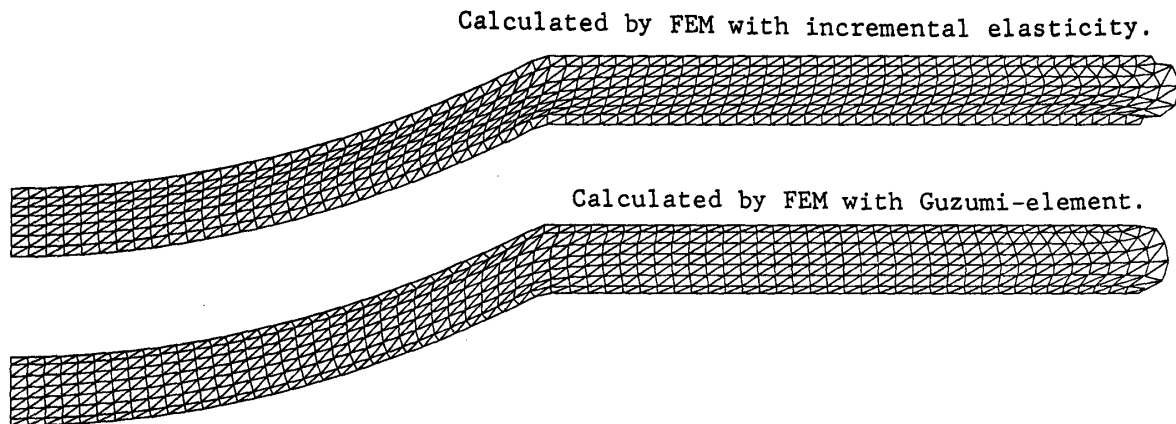


Fig. 9. Comparison between final deformation of mat by two kinds of calculation method.

ずれや食い込みの状態を境界節点に組み込まれているバネ定数の変形で, ある程度表現しているためと考えられる。

4. 結 論

1. 提案したグズミ要素法でパーティクルの成形問題を解くためには, 水平方向のバネ定数 k_1 と垂直方向のそれ k_2 を次のようにとると, 比較的合理的な答えが得られると考えられる。すなわち, $k_1 = c_0 + c_1 \lambda^n$, $k_2 = k_1/4$, ここに, $c_0 = 0.04 \text{ kgf/mm}$, $c_1 = 800 \text{ kgf/mm}$, λ : マットの圧縮率, $n=2$ 。
2. 前報¹⁾の増分弾性要素法による結果に比べて応力集中点の主応力は大きく算定される傾向があるが, 弾性定数が非常に異なる層からなる複合系の解析には計算上層間の境界の不連続性が軽減されるので, より合理的な変形や応力分布の計算ができると考えられる。
3. グズミ要素を用いる方法もまた増分弾性要素法¹⁾とともに圧縮系の変形と応力のシミュレーションにある程度有効な方法であると考えられる。

謝 辞

本報の計算は京都大学化学研究所のコンピューター「FACOM M-380Q」を用いて行なった。また, 考察に当って, 当部門院生, 澤田 豊氏に有益なる助言を頂いた。ここに深甚の謝意を表する。

文 献

- 1) 楊 萍, 秦 正 徳, 佐々木光: 木材学会誌, **34**(12), (1988)
- 2) 秦 正 徳, 佐々木光: 木材学会誌, **33** (1), 12~18 (1987)
- 3) 藤井光雄, 石川欣造, 後藤憲三, 佐倉武久: “高分子材料の工学的性質 (I)”, p. 154. 地人書館 (1969)
- 4) 谷 資信編著: “構造解析の基礎”, p. 35. 技報堂 (1976)
- 5) 藤井光雄, 石川欣造, 後藤憲三, 佐倉武久: “高分子材料の工学的性質 (I)”, p. 144. 地人書館 (1969)
- 6) 平嶋義彦: 林試研報, No. 330, 1~139 (1984)
- 7) 山井良三郎, 近藤孝一: 林試研報, No. 218, 45~58 (1968)
- 8) 林業試験場編: “木材工業ハンドブック”, p. 131. 丸善 (1972)
- 9) 楊 萍, 川井秀一, 佐々木光: 木材学会誌, **34**(12), (1988)