

低比重パーティクルボードの形成と  
機械的性質に関する研究

末松 充彦

Studies on Mechanism of  
Low-density Particleboard Formation  
and Mechanical Properties

Atsuhiko Suematsu

①

低比重パーティクルボードの形成と  
機械的性質に関する研究

末松充彦

Studies on Mechanism of  
Low-density Particleboard Formation  
and Mechanical Properties

Atsuhiko Suematsu

## 目 次

Summary	1
第1章 序 論	
1.1 序 論	5
1.2 既往の研究	10
第2章 ボード内における小片の状態と小片結合力	
2.1 緒 言	18
2.2 ボード内の小片の状態	19
2.3 実験方法	19
2.3.1 低比重ボードの製造	19
2.3.2 小片厚さの測定	21
2.4 結果と考察	23
2.4.1 小片の積層数と空隙率	23
2.4.2 小片の圧縮率	27
2.5 摘 要	30
2.6 ボードの小片結合力	31
2.7 実験方法	31
2.7.1 低比重ボードの製造	31
2.7.2 材質試験	32
2.8 結果と考察	32
2.8.1 ボード厚さ方向の比重分布	32
2.8.2 ボードの小片結合力	34
2.9 摘 要	42
第3章 吸湿によるボードの厚さ膨潤機構	
3.1 緒 言	44
3.2 実験方法	45
3.2.1 低比重ボードの製造	45
3.2.2 吸湿前後の小片厚さの測定	47
3.3 結果と考察	47
3.3.1 圧縮方法と小片の圧縮率分布	47
3.3.2 小片の厚さ膨潤	51
3.3.3 ボードの厚さ膨潤	53
3.3.4 厚さ膨潤率の推定	59
3.4 摘 要	61

#### 第4章 2段階圧縮法によるボードの材質

4.1 緒言	63
4.2 実験方法	63
4.2.1 低比重ボードの製造	63
4.2.2 材質試験	64
4.3 結果と考察	66
4.3.1 熱圧時の圧縮圧力と内部温度	66
4.3.2 ボードの材質	70
4.4 摘要	75

#### 第5章 低比重ボードの機械的性質

5.1 緒言	77
5.2 はく離強さおよびせん断強さ	78
5.3 実験方法	78
5.3.1 低比重ボードの製造	78
5.3.2 試験方法	79
5.4 結果と考察	80
5.4.1 常態時のはく離強さおよびせん断強さ	80
5.4.2 吸水処理後のはく離強さおよびせん断強さ	83
5.4.3 はく離強さの推定	88
5.5 摘要	90
5.6 曲げ性能	92
5.7 実験方法	92
5.8 結果と考察	94
5.8.1 常態時の曲げ性能	94
5.8.2 吸水処理後の曲げ性能	101
5.9 摘要	106

#### 第6章 建築構造用面材としての低比重ボードの評価

6.1 緒言	108
6.2 実験方法	108
6.2.1 低比重ボードの製造	108
6.2.2 曲げ試験	109
6.2.3 パネルせん断試験	111
6.2.4 釘一面せん断試験	111
6.3 結果と考察	113

6.3.1 曲げ破壊係数および曲げヤング係数 .....	113
6.3.2 せん断弾性係数 .....	115
6.3.3 釘一面せん断耐力 .....	117
6.3.4 市販ボード類との比較 .....	119
6.4 摘要 .....	124
第7章 総括 .....	126
謝辞 .....	134

Studies on Mechanism of Low-Density Particleboard Formation  
and Mechanical Properties.

Atsuhiko Suematsu

Summary

Homogeneous low-density particleboards were produced using two adhesives, an isocyanate compound resin (IC) and/or a phenolic resin (PF). All particles were at 10 percent moisture content prior to resin addition for IC. Resin content level was 10 percent based on dry-wood weight. The particle mats were hand-formed, and total press-time was 5 minutes for IC and 10 minutes for PF at 160 °C platen temperature. Overall board thickness was 15 mm with target densities of 0.30, 0.40, 0.50, and 0.60 g/cm<sup>3</sup>. The effect of species, board densities and compaction ratio ( $Cr$ ; board density/particle density) on the mechanism of low-density particleboard formation and its physical and mechanical properties were discussed.

First, in Chapter Two, the effects of  $Cr$  on hot-pressing process and mechanism of board formation were investigated. The total thickness of particle piling before hot-pressing increased linearly with increases in  $Cr$ . All points of total thickness of particles piling were approximately on a straight line independent of particle density and thickness. The void-space rate decreased linearly with increases in  $Cr$ , and it was dependent on particle density. The distribution of the compression rate of particle throughout the thickness of the board had a tendency similar to that of the density gradient. The average compression rate of particles increased in  $Cr$ , and there was no different effects by wood species.

In the case of  $Cr < 1$ , the average compression rate of particles of 10 percent indicated the importance of low-density particleboard manufacturing. The internal-bond strength ( $IB$ ) increased with increases in the  $Cr$ , and these increases depended on particle density, that is, high-density particles had rapid increases.

In Chapter Three, low-density particleboards were produced in "one-step" and "two-step" pressing processes. In the first step of the two-step pressing process, the particle mat was compressed 1.5mm under the target thickness to obtain a high-density surface, and the pressing time was 30 seconds. The effects of pressing methods, particle species, and  $Cr$  on the hygroscopic thickness swelling were investigated.

Regarding ezomatsu (*Picea jezoensis* Carr.) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa* (S.&Z.)Endl.) particles, the compression rates of particles in the surface layers of boards were greater than that of the center layer regardless of pressing methods. The average compression rate of particles was greater in the two-step process compared with the one-step process. There was almost no recognizable difference in pressing methods with buna (*Fagus crenata* Bl.) particles. The average thickness swelling of particles increased linearly with increases in  $Cr$ , and was independent of particle species. The thickness swelling of large- $Cr$  boards was dependent on board densities (ezomatsu and hinoki), whereas the effect of density on thickness swelling of board was not observed in small- $Cr$  boards (buna). Thickness swelling of board increased linearly with increases in  $Cr$  except for the smallest- $Cr$  boards.

As the board density increased, there was not very much change in the void-space rate before and after swelling. It is presumed that small- $Cr$  boards were subjected to low pressure in the hot pressing, and particles could not stick to each other, so that small- $Cr$  boards had large changes in void-space rate, and their thickness swelling of board was increased. The multiple-regression analysis showed that thickness swelling of board could be predicted with the  $Cr$ , board density, and particle density as explanatory variables. There was no effect from the amount of resin applied per unit-area of particles.

In Chapter Four, low-density particleboards with a target  $Cr$  of 0.8 were produced under several pressing conditions. In the first pressing step of a two-step pressing process, the particle mat was compressed 1.5 mm under the target thickness to obtain a high-density surface. After the first pressing step, the platen was temporarily released. The effects of pressing time in the first step and the temporary release time on the mechanical properties of the board were investigated.

The mechanical properties of boards depend on the pressing time in the first step because of the steep density gradient that occurred through out the board thickness.  $IB$  has a tendency to increase with decrease in the pressing time in the first step, whereas the modulus of rupture ( $MOR$ ) increased. With increases of the temporary release time,  $IB$  and  $MOR$  showed slight decreases. It was estimated that there was no effect of the temporary release time on resin hardening.  $IB$  and  $MOR$  showed values of about 2.3 and 1.3 times as much, respectively, according to the difference of pressing conditions. The results suggests that the two-step pressing process can be applied to the continuous manufacture of low-density particleboard.

In Chapter Five, low-density particleboards were produced in a one-step pressing process. The effects of resin types, particle species, and board densities on the *IB*, interlaminar-shear strength (*IS*), the *MOR*, and the modulus of elasticity (*MOE*), and the reductions of these strength after vacuum-water-soaking (24 hrs) and drying (40°C, 48 hrs) treatments were investigated. Furthermore, the calculated values of *MOE* applied to the theory of strength of laminated-materials were compared with the measured values.

The *IS* and the *IB* of the face-layers were greater than that of the center-core in spite of the same densities in the broken parts. It is assumed that particles of the face-layers could stick to each other better than those of the center-core because of the differences in quality and quantity of particle binding-points. The maximum pressure during the hot pressing increased linearly with increases in the *Cr*, and was dependent on particle species. It is necessary to apply a pressure of more than 10 kgf/cm<sup>2</sup> to obtain boards having the *IB* of more than 2 kgf/cm<sup>2</sup>. PF boards with densities of 0.50 g/cm<sup>3</sup> had the *IB* of more than 5 kgf/cm<sup>2</sup>. A large correlation was observed between *IS* and *IB* for face-layer and the center-core.

The multiple-regression analysis showed that *IB* could be predicted with board density, void-space rate, and *Cr* as explanatory variables. There was no effect by the amount of resin applied per unit-area of particles, and sufficient *IB* could be obtained in spite of only  $1 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup> of resin applied.

Retentions of *IS* and *IB* after vacuum-water-soaking-drying treatments had no effects from species, resin types, and differences of face-layers and center-core. It was estimated that retentions after treatments were 75 percent of those before treatments. However, hinoki PF boards had greater spring-back than those of buna IC boards. Hinoki PF boards maintained about the same percent retentions of *IS* and *IB*. Consequently, it can be considered that there is no effect of spring back on *IS* and *IB* for low-density particleboards.

*MOR* and *MOE* increased linearly with increase in the board density. Bending properties of IC boards were greater than that of PF boards. In the case of the same adhesives, bending properties of hinoki boards showed greater than that of buna boards. As to hinoki PF boards with densities of 0.50 g/cm<sup>3</sup> and buna PF boards with densities of 0.60 g/cm<sup>3</sup>, they exceeded the minimum specified strength of Japanese Industrial Standard A 5908 type 200, which indicates the possibility of using PF as a binder for low-density particleboard.

Calculated values of *MOE* applied to the theory of the strength of laminated-materials

were in reasonable agreement with the measured *MOE*. As for the failure strength, the calculated values did not agree well with the measured value because of the failure occurred in the confined part.

Retentions of *MOR* and *MOE* after vacuum-water-soaking-drying treatments depended on resin types, regardless of particle species. It was estimated that the retentions after treatments were 90 percent for IC boards and 60 - 70 percent for PF boards of those before treatments. Maximum load and proportional limit load after treatments were almost the same as before treatment.

In Chapter Six, the basic properties of laboratory made low-density particleboards were evaluated for the possibility of using them as structural members in house construction. The effects of resin types, particle species, and board densities on the bending strength, modulus of rigidity (*G*) in panel-shear tests, and single-shear nailed-joint tests in compression were investigated. These mechanical properties of low-density particleboards were compared with those of commercial particleboard, medium-density fiberboard, oriented-strand board, and plywood.

Bending strength and shearing strength increased linearly with increases in board density. These strength of IC boards were greater than that of PF boards. There was almost no recognizable difference in the resin type with *G* values. In the case of the same adhesives, the strength of the hinoki boards were greater than those of buna boards. Hinoki IC boards with densities of 0.60 g/cm<sup>3</sup> showed results approximately the same as particleboard with density of 0.75 g/cm<sup>3</sup> in bending tests. In shearing tests, they showed almost the same or more *G* and shearing strength values than those of commercial panels, which indicate the possibility of using hinoki boards instead of commercial panels under normal conditions.

The lateral nail-resistance (*LNR*) for low-density particleboard increased linearly with increases in density, and was independent of wood species and resin types. It was estimated that the *LNR* was affected significantly by the densities of the side-members.

The *LNR* for boards with densities of 0.60 g/cm<sup>3</sup> showed results approximately same as commercial panels. As to the load at a joint slip of 1.00mm (*P*<sub>1.00</sub>), CN65 was about 1.11-1.35 times as much as CN50, and the maximum load (*P*<sub>max</sub>) was about 1.20-1.56 times as much as that of CN50.

## 第1章 序 論

### 1.1 序 論

パーティクルボードの製造は1887年、鋸屑に血膠液を加えて熱圧成形したことに始まる<sup>1)</sup>。その後合成樹脂接着剤の開発に伴って、1930年代から40年代にかけてヨーロッパではパーティクルボードが工業的に生産されるようになった。F. Fahrni は3層構造のボードを考案し、表層に多量の水分を与えて緻密な表層を作るなど多くの技術開発を行った。

パーティクルボードの製造技術に関しては、Klauditz<sup>2)</sup>、Kollmannら<sup>3)</sup>、Turner<sup>4)</sup> およびSuchsland<sup>5)</sup>が1950年代から60年代にかけて、小片樹種、パーティクルの寸法形状、接着剤の種類とその添加率、熱圧時間、熱圧中のボード内の温度、熱圧工程などに関する基礎的な研究を行っている。わが国では1950年代にヨーロッパより製造技術が導入され、パーティクルボードの生産が開始した。北原<sup>6)</sup>や清久ら<sup>7)</sup>がボードの研究を始め、その後岩下ら<sup>8)</sup>が基礎的な研究を報告している。

パーティクルボードは家具のコア材料として発展を遂げてきた。家具材料としての地位が確固たるものになると、新たな需要の開拓が必要となり、建築分野への進出が求められてきた。従来、住宅の床下地材、屋根下地材あるいは壁下張り材などの建築構造用パネルとしては、合板が一般に使用されていた。

合板は構成要素である単板が板面内で連続しており、木材繊維の強さをそのまま製品の中で発揮している。また、単板は表面が平滑であり、低圧締圧でも十分な面状接着がなされている。そのため強固で耐水性のある接着層が形成され、しかも圧密化されていないので、原料木材の比重以上にならず軽くて使いやすい材料である。

合板は強度、耐水性、寸法安定性、加工性など使い易さに優れた高性能、低

価格の板材料であるが、近年優良大径木の減少や南洋材産地国の原木丸太の輸出禁止措置などの社会的変化が起こり、原木確保に不安が生じてきた。また、合板の製造工程は複雑で人手がかかり、自動化が困難であるが、パーティクルボードは原料の選択範囲が広く、装置産業化や省力化が進んでおり、さらに工業材料としての品質管理が可能である。

パーティクルボードの構造材料的な利用を図るために、それまで問題にされなかった種々の機械的性質ならびに耐久性を明らかにすることが必要であった。1970年から1980年代にかけては、パーティクルボードの研究の多くは合板代替を目標としたボードの強度性能および耐久性<sup>9-39)</sup>に関するものである。

最近のボード工業では製造技術の開発が盛んに行われ、優れた機械的性能をもつボードが生産されつつある。北米では配向性ストランドボード、ウエファールボードあるいは単板とパーティクルボードを組み合わせた複合ボードが既に市場に出ており、従来合板が主体であった構造用材料として代替させる努力がなされてきた。このように、優良な木材資源の減少と低質化が進行しつつある現在、優良原木を必要とせず、むしろ未利用材や低質原料から得られた木材小片の活用が可能なパーティクルボードはさらに発展すると考えられる。

パーティクルボードの物理的・機械的性質に影響を及ぼす因子は多数あり、小片の樹種、比重、形状、含水率、接着剤の種類、添加量、マットの層構成、熱圧時の温度、圧縮圧力、ボード比重などである。これらの因子の組み合わせにより、目的とするボード性能を得るための最適条件が存在するが、そのうち最も重要な因子はボード比重であろう。ボードのほとんどの性質が比重により顕著な影響を受け、例えば曲げ強さおよびはく離強さとの高い相関は以前から認められている。

上述のように、パーティクルボードの機械的性能を向上させるには、その比重を高くする必要があった。パーティクルボードは木材小片に接着剤をスプレー塗布し、熱圧成形して製造される。構成要素である小片の形状は不整で小さ

く、板面内で連続していないので、ボードの強度発現の大部分を小片間の接着に頼っている。この小片間の結合点が種々の応力に耐え得る結合力を保持していることが最も重要である。不連続で、不整な小片には接着剤が点状に存在し、接着面の状態は不規則なので、十分な接着力を得るためには熱圧時の圧縮圧を高める必要がある。その結果として、ボード比重は高くなり重量が増す。現在のパーティクルボードの JIS規格では、比重は0.50~0.90と規定されているが、製造されているボードの中で 150タイプを上回るものはおおよそ0.70~0.80であり、合板と比較して重い。

パーティクルボードの建築的利用のアンケート調査<sup>40)</sup>によると、使用上の問題点として、重いことと水に弱いことが挙げられている。近年では、パーティクルボードを構造用として使用する場合、比較的厚いものが要求されるのでボードの重量が問題となり、軽量化の検討が必要になってきた。利用者の側からみると、低比重ということは多くの利点を持つであろう。取り扱う上で軽いということは何よりも便利である。そのほか釘打ち、切削、穴あけなどの加工性が向上するので、低比重で耐水性の高いパーティクルボードが建築サイドから強く望まれている。

パーティクルボードでは単位面積当りの接着剤塗布量が合板と比較して非常に少ない。構成要素の小片が3次元的に重なり合い、熱圧工程で圧密化されてその変形がセットされる。熱圧成形されたボードは、水分によってセットされた小片が元の厚さに戻ろうとするため、これとともに生じる内部応力により接着結合点が破壊され、ボードの厚さ膨潤は大きくなる。ボード比重を高めると小片間の接触面積が増大し、高い小片結合力が得られる。しかし熱圧時に小片の圧縮変形が増大するので、厚さ膨潤はより大きくなる。この厚さ膨潤に付随する小片間の緩みや接着層の機械的破壊などは、構造材料として使用する場合に無視できない。

木質ボードの耐久性の向上には、熱圧時における小片のセット量を極力少な

くするために、低圧縮ボードにすることが考えられる。パーティクルボードの低比重化を検討する場合、ボード比重を下げることによって強度性能の低下は余儀なくされるが、実用上必要な性能をいかに確保するかが重要であろう。ボードの曲げ破壊荷重は当然ボード比重に影響されるが、ボードの厚さを増すことでも破壊荷重を増大させる効果がある。

従来の接着剤を用いたボードは、比重が0.40以下になると小片が受ける圧縮圧力が小さいため、接着不良を生じるので低比重ボードは現実には製造されなかった。低比重で十分な強度と耐水性を有するボードを製造するためには、低圧縮圧で強力な接着が可能であり、しかも耐水性のある接着剤を用いなければならない。この様な目的を満たす可能性をもつ接着剤として、イソシアネート系樹脂接着剤が注目されている。イソシアネート化合物は1分子2個以上のイソシアネート基(-N=C=O)を有し、活性水素をもつ物質との反応性に富むため、木材中の水分や木材成分と反応し、化学結合するといわれている。

実用上の性能が確保されれば、ボードの低比重化は大きな意義を持つであろう。低比重ボードは断熱、吸音性能にも期待ができるので、住宅やオフィスの壁、間仕切用の部材としての利用も考えられる。そして合板に匹敵する耐水性が付与され、しかも低コストで得られれば、合板に替わって床下地材としての需要が伸展することが予想される。

本研究は、建築構造用面材としての低比重パーティクルボードの性能を評価することを目的とし、ボードの形成機構に始まる一連の研究についてその成果を取りまとめたものである。

第2章では低比重ボードの形成を解析するために、原料樹種、小片の圧縮率、圧縮比、小片間の空隙率等の因子がボード内における小片の状態に及ぼす影響を検討し、さらに小片結合力の発現について考察した。

第3章では低比重ボードの厚さ膨潤の機構を明らかにするため、吸湿による小片の挙動とボードの厚さ膨潤の関係について検討した。

第4章では低比重ボード製造の一方法として、2段階圧縮法の熱圧条件がボード材質に及ぼす影響を検討した。

第5章ではフェノール系樹脂接着剤およびイソシアネート系樹脂接着剤を用いた低比重ボードの小片結合力および曲げ性能について、原料小片樹種、接着剤の種類による影響を検討し、また、ボードに劣化促進処理を行い、その小片結合力および曲げ性能の低下について考察した。

第6章では建築構造用面材として低比重ボードの利用が可能であるかを調べるために、その曲げ性能、せん断剛性および釘接合せん断耐力について、市販ボード類との比較検討を行った。

## 1.2 既往の研究

パーティクルボードの製造技術や性能に関する研究は、ボードの歴史とともに始められた。パーティクルボードの物理的・機械的性質に影響を及ぼす因子は多数あり、これに関連する研究報告は非常に多い。しかし、ボードの低比重化に関する報告は僅かである。ここでは本研究に関連するものについて述べる。

Suchsland<sup>5)</sup>はフレークボードのマットについて報告している。マットの平面方向に存在する小片厚さの総和の分布は小片の重なりに起因し、この分布は圧縮圧を受ける面積を決定し、ボードの強度に影響するので小片形状の規制は重要であることを指摘した。さらに、Suchsland<sup>4)1)</sup>は熱圧工程におけるパーティクルマットの挙動について考察した。小片がマット中に整然と並んでいれば熱圧による比重増加は起こらない。実際のマットでは小片厚さの総和が目標ボード厚さより大きい部分が圧縮圧を受けて小片同士の接着が行われ、同時に厚さ方向の比重分布を生じる。一方、この総和がボード厚さより小さければ、成板後も小片間に空隙を残すと報告している。また、小片間の密着の程度は小片の重なりによるもので、これはマット内の空隙容積に影響し、圧縮比(ボード比重/原料小片比重)は相対的な圧縮面積を決定すると述べている。

3層構成のパーティクルボードはいわゆるサンドイッチ効果に基づくもので、高比重の表層と低比重の内層を得るために小片の形状を表層と内層で変えている。しかしボードの比重分布は熱圧時の諸条件によっても変動し、例えば表層、内層の小片形状が同一の単層ボードの場合でも均一な構造とはならず、熱圧時の温度傾斜により比重分布を生ずる<sup>4)</sup>。その分布状態はある程度人為的に変換可能であり、ボードの構造はその製造条件、特にマットの水分、熱圧温度、熱圧スケジュールなどの影響を受け、同一比重のボードでありながら、ボード内部に比較して表裏層を高比重化することも、また逆に低比重化することも充分可能である<sup>4)2)</sup>。

初期圧縮圧が高いと熱板閉鎖時間が短くなり、表層比重は高く、中央層は低くなる。厚さ方向の比重分布はボードの機械的性質に顕著な影響を与える。表層比重を大きくすれば、ボードの曲げ強さを向上させるほか、表面の硬さや耐摩耗性を高める。その反面、中央部の比重が著しく低下した場合、ボードのはく離強さおよび側面の木ねじ保持力を低下させる<sup>42,43)</sup>。

パーティクルボードは熱圧工程で木材小片が圧密化され、その変形がセットされる。平板プレスにより製造されたボードは、小片が板面に平行に堆積されるので、水分による伸縮の大きい木材の放射方向と接線方向がボードの厚さ方向となる。水分を吸収すると熱圧時にセットされた変形が一部回復して、厚さ方向のスプリングバックを生じ、吸湿・吸水時の厚さ膨潤が大きくなる<sup>29)</sup>。このような厚さ膨潤はボードの製造条件にも影響され、例えば厚さの薄い小片を用いた方がボードの厚さ膨潤は小さい。またボード比重の増加とともに、あるいは同一ボード比重でも原料樹種の比重が小さいほど厚さ膨潤が大きくなる傾向がある。さらにこれは接着剤の種類や添加量、製造条件によって影響を受ける。

ボードが水分変化を繰り返す受けると、非可逆的な厚さ膨潤を生じて小片結合力が低下する。その理由としてHannら<sup>44)</sup>は圧縮された木材小片のスプリングバック、接着剤の化学的劣化および小片の収縮、膨張による接着層の機械的破壊によると推定している。

斎藤ら<sup>31)</sup>は吸水・乾燥繰り返し処理によるボードの強度低下の要因は接着剤の機械的破壊であり、ボードの接着耐久性は厚さ方向の寸法安定化によって改善されるとしている。ボードの接着耐久性を増すには、接着層に生じる内部応力を軽減する必要があり、そのためにはボードの低比重化がひとつの方法であると考えられる。

Lehmannら<sup>28)</sup>は下地材として使用する構造用ボードの厚さと重量に着目し、比重0.48~0.88、厚さ9.5~19.1mmのボードを製造し、常態および劣化促進処

理後の機械的性能を検討した。その結果、はく離強さを除いて、ボードの重量が同一であれば厚い低比重ボードは、薄い高比重ボードよりも機械的性能は向上することを報告した。

Hse<sup>11)</sup>はボードの強度性能と圧縮比との関係を調べ、構造用ボードの圧縮比として1.24以上が好ましいと報告している。またRiceら<sup>10)</sup>は劣化処理後の厚さ膨潤率は圧縮比の増加とともに直線的に増大することを指摘し、接着剤添加率を高くして圧縮比は大きくならないようにすべきと報告している。

このようにボードの機械的性質を高めるにはボード比重を増加させるか、接着剤の添加量を増加させる必要がある。ボードの破壊荷重はボード比重の増加とともに増大するが、ボード厚さを増すことによっても破壊荷重を増大させる効果があると考えられる。

以上のことから、木質ボードの耐久性の向上には、小片のセット量を極力小さくするため、低比重化ならびに耐水性に優れた接着剤を用いることである。

近年、低圧縮圧力でも充分な接着性能を発現するといわれているイソシアネート系樹脂接着剤が注目されている。パーティクルボード用の接着剤としてイソシアネートを適用する試みは1960年代中頃から行われており、この研究成果がDeppera<sup>45)</sup>によって報告されている。それによると、接着剤添加率が低くてもフェノール系樹脂接着剤に匹敵する強度性能が低比重で得られ、さらに熱圧時間が短縮されるなどの利点を有している。イソシアネート化合物は活性水素をもつ物質との反応性に富むため、木材中の水分や木材成分と反応して化学結合するといわれ、イソシアネート系樹脂接着剤は構造用ボードの製造に適することが示された。この研究を契機にして、1980年代にはイソシアネート化合物をパーティクルボードの結合剤としての利用に関する研究が盛んに行われるようになった<sup>46-70)</sup>。

新しい木質材料が開発された場合、製造条件とその強度性能ならびに耐久性、耐水性が問題となる。Wilson<sup>48, 49)</sup>はイソシアネート系樹脂接着剤で結合した

パーティクルボードはフェノール系樹脂接着剤を用いたものと比較して、はく離強さおよび曲げ破壊係数は高い値を示し、寸法安定性にも優れていることを報告した。しかし、2時間煮沸後の曲げ破壊係数は、フェノール系樹脂に較べて評価できるほど高くないことを指摘している。

Johnsら<sup>50)</sup>はイソシアネート系樹脂で結合した構造用ボードの物理的、機械的性能に対する製造条件を検討し、その中で小片含水率は重要な因子であり、接着剤塗布前の含水率は18%以下にする必要があると報告している。

小片含水率について、大熊<sup>53)</sup>はイソシアネート系樹脂接着剤は含水率の許容範囲が広いことを指摘し、一般のパーティクルボード製造のように全乾近くまで乾燥させる必要はないので、やや高め含水率(20%)でも製造に支障を来さず、小片乾燥のコントロールが容易で省エネルギー生産につながると述べている。

斎藤ら<sup>55)</sup>はイソシアネートボードにフェノールボードに匹敵する接着耐久性を与えるには、小片樹種、小片形状に対応した接着剤添加率の検討が必要であることを指摘した。

低比重パーティクルボードの製造方法として、初期圧縮で数十秒熱圧して表裏面の高比重層を形成し、一時解圧することで十分な樹脂の発泡を促した後、さらに目標厚さに圧縮する方法により、単層フォーミングで3層構造が得られる2段階圧縮法が注目された<sup>53)</sup>。川井らはイソシアネート系接着剤を用いた低比重パーティクルボードの製造に関して、2段階圧縮法による比重傾斜の付与<sup>59)</sup>、小片の含水率<sup>60)</sup>ならびに原料比重および圧縮比<sup>61)</sup>がボード材質に及ぼす影響について検討した。その結果、初期圧縮圧力が高いほど比重分布は急になり、はく離強さが低下するとともに曲げ試験では水平せん断が生じること、小片の含水率範囲は12~20%が最適であり、構造用ボードの圧縮比の下限値は約0.80であることを報告している。さらに、単一樹種系のボードではその厚さ膨潤率は原料樹種の比重によらず、圧縮比に依存することを見いだした<sup>61)</sup>。

関野は低比重ボードの曲げ性能<sup>63)</sup>および小片間結合力と耐水性<sup>64)</sup>について検討し、常態のはく離強さ、曲げ強さおよび厚さ膨潤率はフェノール系樹脂に優るが、はく離強さおよび曲げ強さ残存率では劣ることを明らかにした。

## 文 献

- 1) 北原覚一、丸山憲一郎：ファイバーボード・パーティクルボード  
p.176 森北出版(1962).
- 2) Klauditz, W.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, 13, 405-421(1955).
- 3) Kollmann, F.P.; Kuenzi, E.W.; Stamm, A.J.: "Principles of Wood  
Science and Technology. Vol. II. Wood Based Materials", p.312-550,  
Springer-Verlag, New York.(1975).
- 4) Turnner, H.D.: *Forest Prod. J.*, 4(5), 210-222(1954).
- 5) Suchsland, O.: Q. Bull., Michigan Agri. Expt. Sta., Michigan State  
Univ. 42(2), 350-372(1959).
- 6) 北原覚一：木材学会誌、1(1), 17-20(1955).
- 7) 満久崇麿、佐々木光、浜田良三：同上、2(4), 142-145(1956).
- 8) 岩下 睦、松田敏誉、石原重春：林試研報、126, 63-89(1960).
- 9) Halligan, A.F.: *Wood Sci. and Technol.*, (4) 301-312(1970).
- 10) Suchsland, O.: *Forest Prod. J.*, 22(11), 28-32(1972).
- 11) Hse, C.Y.: *ibid.*, 25(3), 48-53(1975).
- 12) 大熊幹章：木材学会誌、21(2), 76-81(1975).
- 13) 大熊幹章：同上、22(3), 184-190(1976).
- 14) 大熊幹章：同上、22(5), 303-308(1976).
- 15) 大熊幹章、森泉 周：同上、23(10), 509-512(1977).
- 16) 大熊幹章、森泉 周：同上、23(10), 513-(1977).

- 17) Suchsland, O.: *Forest Prod. J.*, 27(1), 32-36(1977).
- 18) Rice, J.T.; Carey, R.H.: *ibid.*, 28(4), 21-28(1978).
- 19) Lehmann, W.F.: *ibid.*, 28(6), 23-31(1978).
- 20) Hunt, M.O.; Lehmann, W.F.; Hoover, W.L.; McNatt, J.D.;  
Fergus, D.A. : *ibid.*, 29(9), 43-49(1979).
- 21) Price, E.W.; Lehmann, W.F.: *ibid.*, 29(3), 29-33(1979).
- 22) 林 燦輝、大熊幹章：木材学会誌、23(12), 660-665(1977).
- 23) 林 燦輝、大熊幹章：同上、24(12), 879-883(1978).
- 24) 斎藤藤市、橋本 誠：同上、23(1), 45-52(1977).
- 25) 斎藤藤市、深沢政晶：同上、24(1), 51-54(1978).
- 26) 斎藤藤市、橋本文彰、早川 猛：同上、24(10), 714-719(1978).
- 27) 斎藤藤市、末松充彦、横井健二、平井信之：同上、25(1), 50-54(1979).
- 28) Lehmann, W.F.; Schaffer, E.L.: In: Proc. 13th Wash. State Univ.  
Int. Particleboard Symp., Pullman, Wash. pp.127-140(1979).
- 29) 斎藤藤市、杉山 学：木材学会誌、26(1), 1-5(1980).
- 30) Vital, B.R.; Wilson, J.B.: *Wood and Fiber*, 12(4), 264-271(1980).
- 31) 斎藤藤市、インダ'ン サストラ'マシ'ア、宮田雄二：木材学会誌、27(11),  
782-787(1981).
- 32) Geimer, R.L.: *Forest Prod. J.*, 32(8), 44-52(1982).
- 33) Kelly, M.W.; Price, E.W.: *ibid.*, 35(2), 39-44(1985).
- 34) 関野 登、大熊幹章：木材学会誌、31(10), 801-806(1985).
- 35) 関野 登、大熊幹章：同上、32(3), 163-169(1986).
- 36) 関野 登：同上、32(4), 280-284(1986).
- 37) 関野 登、大熊幹章：同上、33(2), 120-126(1987).
- 38) Chow, P.; McNatt, J.D.; Lambrechts, S.J.; Gertner, G.Z.:  
*Forest Prod. J.*, 38(6), 19-25(1988).

- 39) Au, K.C.; Gertjeansen, R.O.: *ibid.*, 39(4), 47-50(1989).
- 40) 吉田伸郎: 木材工業、39(6), 24-29(1984).
- 41) Suchsland, O.: *Forest Prod. J.*, 17(2), 51-57(1967).
- 42) Stricker, M.D.: *ibid.*, 9(7), 203-215(1959).
- 43) Smith, D.C.: *ibid.*, 32(3), 40-45(1983).
- 44) Hann, R.A.; Black, J.M.; Blomquist, R.F.: *ibid.*, 12(12),  
577-584(1962).
- 45) Deppe, H.J.; K. Ernst.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, 29(2), 45-50  
(1971).
- 46) Deppe, H.J.: In: Proc. 11th Wash. State Univ. Int. Particleboard  
Symp., Pullman, Wash. pp.13-32(1977).
- 47) 元木英生: 木材工業、35(4), 3-7(1980).
- 48) Wilson, J.B.: In: Proc. 14th Wash. State Univ. Int. Particleboard  
Symp., Pullman, Wash. pp.185-193(1980).
- 49) Wilson, J.B.: *Adhesives Age*, (5), 41-44(1981).
- 50) Johns, W.E.; Maloney, T.M.; Huffaker, E.M.; Saunders, J.B.;  
Lentz, M.T.: In: Proc. 15th Wash. State Univ. Int. Particleboard  
Symp., Pullman, Wash. pp.213-239(1981).
- 51) Gallagher, J.A.: *Forest Prod. J.*, 32(4), 26-33(1982).
- 52) Johns, W.E.: *ibid.*, 32(11/12), 47-50(1982).
- 53) 大熊幹章: ハードボード、パーティクルボード、インシュレーション  
ボード(日本繊維板工業会) No.97, 1-9(1983).
- 54) 関野 登、鈴木正治: 木材学会誌、30(1), 17-22(1984).
- 55) 斎藤藤市、谷口時徳: 同上、30(11), 921-926(1984).
- 56) 元木英生、鷲岡 雅、田近克司、坂井正孝: 同上、30(12), 995-1002(1984).
- 57) 斎藤藤市、渡辺稔彦、鈴木滋彦: 同上、31(12), 1028-1033(1985).

- 58) 元木英生、鷺岡 雅、長谷川 智：富山県木材試験場季報 木材と技術  
No.62, 1-11(1985).
- 59) Kawai, S.; Sasaki, H.: *Mokuzai Gakkaishi*, 32(5), 324-330(1986).
- 60) 川井秀一、須田久美、中路 誠、佐々木 光：木材学会誌、32(11),  
876-882(1986).
- 61) 川井秀一、須田久美、佐々木 光：同上、33(5), 385-392(1987).
- 62) 川井秀一、中路 誠、佐々木 光：同上、33(9), 702-707(1987).
- 63) 関野 登：同上、33(6), 464-471(1987).
- 64) 関野 登：同上、33(12), 957-962(1987).
- 65) 関野 登、森崎 信：同上、33(9), 694-701(1987).
- 66) 斎藤藤市、鈴木滋彦、岩田 徹：同上、34(1), 28-33(1988).
- 67) Schmidt, E.L.; Gertjeansen, R.O. : *Forest prod. J.*, 38(3),  
19-21(1988).
- 68) Jackowski, J.A.; Smulski, S.J. : *ibid*, 38(2), 49-50(1988).
- 69) 関野 登、岡崎正克：木材学会誌、35(2), 100-106(1989).
- 70) 斎藤藤市、井上勝之、鈴木滋彦：同上、37(10), 912-916(1991).

## 第2章 ボード内における小片の状態と小片結合力

### 2.1 緒言

パーティクルボードは小片に合成樹脂接着剤を噴霧塗布し、熱圧成形された材料である。接着剤が面状に塗布されている合板や集成材とは異なり、接着剤が点状に存在している。このため、パーティクルボードの製造工程では、不規則な形状と大きさをもった小片を少量の接着剤によって結合するには、高温高圧縮圧下でマットを圧密化する必要がある。その結果として、パーティクルボードの比重は原料比重以上になる。

このボード比重はパーティクルボードの性能に関して重要な因子であり、例えばボードの曲げ強さとの高い相関は以前より認められている。しかし一方、ボード比重の増大は吸湿、吸水時の厚さ膨潤を増加させる。そこで軽量かつ強度性能に優れた低比重パーティクルボードの製造に関する研究が始まった<sup>1-5)</sup>。

小片が接着剤によって結合されているボードの性能は、小片結合力の優劣により決定されると考えられる。ボードの低比重化により、製造時の圧縮圧力不足に起因する接着不良が危惧されるので、低比重パーティクルボードの物理的、機械的性能が発現する機構について、基礎的な研究を進めることは重要であると思われる。

そこで本章では、低比重パーティクルボードの形成機構を解明する端緒として、熱と圧縮圧力を受けた小片がボード内部でどの程度圧縮されているのか、その存在状態を明らかにし、また材質発現のひとつの指標である小片結合力について検討した。

## 2.2 ボード内の小片の状態

ボード比重は接着剤の添加量を無視すれば、ボードを構成している小片重量に左右される。小片量を少なくすれば製造ボード比重は小さくなるので熱圧時の圧縮率は低くなり、その場合ボードを構成している個々の小片の変形、特に圧縮変形は小さいと考えられる。

また低比重化により小片同士の密着はルーズになり、小片間には空隙が多数存在しつつボードが形成されていると予想される。個々の小片が元の厚さに対してどの程度圧縮されているのか、その尺度である圧縮率は小片の密着性に関連し、ボード性能に影響すると考えられる。

ボード製造時の熱圧工程で小片は圧縮され、その結果として生じる比重増加は厚さ方向の比重分布により検討されることが多い。しかし比重分布の測定では小片の存在状態、すなわち個々の小片の圧縮率を知ることはできない。また、一般のパーティクルボードでは3層あるいは多層構造をとっているため、各層の小片形状は異なるため、ボード内部の小片の状態を把握することは非常に困難である。

そこで本節では、小片には寸法形状を規制したモデル化されたものを用い、また結合剤には低圧縮圧下でも良好な接着力を発現するといわれている、イソシアネート系樹脂接着剤を用いて表層および中央部が同一の小片から成る単層の低比重ボードを製造し、原料樹種、圧縮比等の因子がボードの形成に及ぼす影響を検討した。

## 2.3 実験方法

### 2.3.1 低比重ボードの製造

供試小片の樹種はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl.)、ブナ

Table 2-1. Species, densities, and thicknesses of particles.

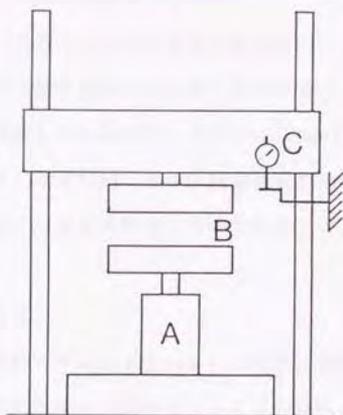
Species <sup>1)</sup>	Density <sup>2) 3)</sup> g/cm <sup>3</sup>	Thickness <sup>3)</sup> mm	S.D. <sup>4)</sup>
Ezomatsu	0.34	0.53	0.03
Hinoki	0.31	0.73	0.03
Buna A	0.53	0.64	0.04
Buna B	0.53	1.33	0.04

<sup>1)</sup> Ezomatsu, *Picea jezoensis* Carr. Buna, *Fagus crenata* Bl.

Hinoki, *Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl.

<sup>2)</sup> Oven-dried basis. <sup>3)</sup> The average of 300 measurements.

<sup>4)</sup> Standard deviation.



A: Load cell  
B: Hot plate  
C: Dial gauge

Fig. 2-1. Schematic diagram of hot pressing apparatus.

(*Fagus crenata* Bl.)およびエゾマツ (*Picea jezoensis* Carr.)である。小片は長さ25mm、幅10mmに形状を規制したものをを用いたが、このような小片を得るために、ヒノキおよびブナについては単板から切り出し、エゾマツは飽水状態の木材ブロックをプレーカーによって切削した。Table 2-1に小片の全乾比重および厚さ(約300枚の平均値)を示す。なお、ブナについては2種類の厚さの小片を用意した。すなわち、ブナAは厚さ0.64mm、ブナBは1.33mmである。なお、接着剤を塗布する前の小片含水率は約10%に調整した。

接着剤にはイソシアネート系樹脂接着剤(群栄化学工業株式会社 UL-4800)を用い、全乾小片重量に対し固形分10%の割合で噴霧塗布した。スプレー塗布の際、樹脂に対して重量比20%のアセトンを加えて粘度を調整した。手撒きによるフォーミングの後、テンシロン試験機(株式会社オリエンテック、容量10tonf)に取り付けた熱板により熱圧成形した。熱圧装置の概略をFig. 2-1に示す。ボード厚さはダイヤルゲージの目盛りが所定の位置にきたとき、クロスヘッドの動きを停止することにより規制した。製造ボード寸法は150mm×150mm(一部比重の高いものは130mm×130mm)厚さ15mmであり、目標全乾比重は0.40、0.50、0.60とした。熱圧温度は160°C、熱圧時間は5分間である。

### 2.3.2 小片厚さの測定

成板後20°C、55%RH(平衡含水率10%)の恒温恒湿室内にて約2週間調湿した後、50mm×50mmの試験片を1条件について2個採取した。これらの試験片断面の数カ所(1試験片につき4~6カ所)を顕微鏡(精度1/100mm)により、厚さ方向に連続してボードを構成している小片の厚さを測定した。また、ボード内にはFig. 2-2の模式図に示すように、マットおよびボード断面に種々の大きさの空隙が存在する。この空隙もボードを構成する要素であるから、空隙の厚さも同時に測定し、ボード厚さに占める空隙の割合をここでは小片空隙率と定義した。小片圧縮率ならびに空隙率は次式により算出した。

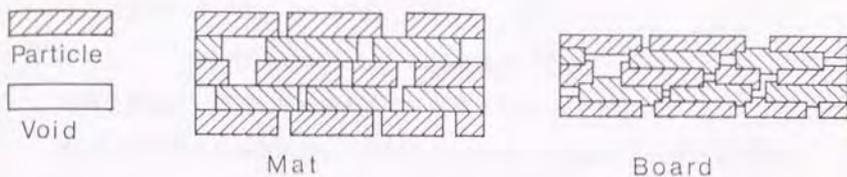


Fig. 2-2. Schematic diagram of board section composed of particles and voids.

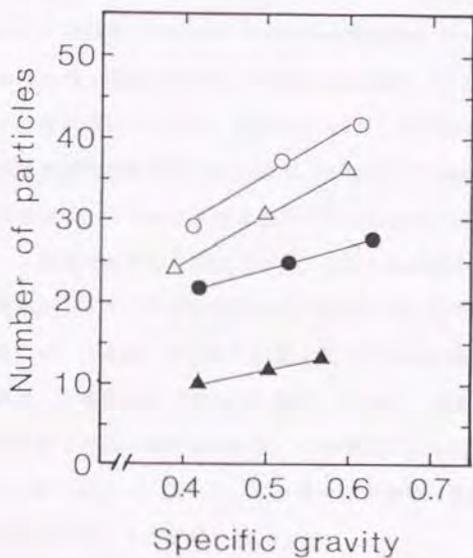


Fig. 2-3. Relationships between numbers of particles and oven-dried specific gravity.

Legend : O: Ezomatsu, Δ: Hinoki, ●: Buna A, ▲: Buna B.

$$\text{小片圧縮率} = \left( (T_0 - T) / T_0 \right) \times 100 (\%)$$

ここに、 $T_0$  : 圧縮前小片厚さ、 $T$  : 圧縮後小片厚さ

$$\text{小片空隙率} = (\text{空隙厚さの総和} / \text{ボード厚さ}) \times 100 (\%)$$

なお、小片厚さの測定誤差は、Table 2-1に示した供試小片の厚さの標準偏差から、 $\pm 10\%$ 程度と考えられる。

## 2.4 結果と考察

### 2.4.1 小片の積層数と空隙率

Fig. 2-3にボードの厚さ方向における小片の積層数とボード比重との関係を示す。図より、小片の積層数とボード比重は直線関係にあることがわかる。ボード比重は小片量に依存するので、当然ながらボード比重の増加につれて所要の小片積層数は直線的な増加を示す。また、原料小片の樹種によって直線の増加の傾きが異なるが、これは原料比重の差によるもので、原料比重が小さい場合には、ボード比重を高めるためにより多くの小片を必要とするからである。

少量の接着剤によって小片間に十分な結合強さを得るためには、少なくとも原料比重以上のボード比重、すなわち圧縮比 $\geq 1$ にする必要があると考えられている。一般に、圧縮比はボード比重と原料小片比重との比で表されるが、ボード比重は接着剤を含めた値であるから、この場合の圧縮比は実質的に小片の圧縮量を示すものではない。従って、本実験では接着剤の影響を除くために、圧縮比  $Cr$  を次に示すように定義した。

$$Cr = (Wp / Vb) / Dp$$

ここに、 $Wp$  : ボードの製造に要する全乾小片重量

$Vb$  : ボード体積、 $Dp$  : 全乾小片比重

いま、各比重のボードについて圧縮前の小片の合計厚さを計算（積層数 $\times$ 小片の平均厚さ）し、これをTable 2-2に示す。この圧縮前の小片の合計厚さと

Table 2-2. The total thickness of particle piling before hot pressing for various densities (mm).

Species <sup>1)</sup>	Target board density (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>2)</sup>		
	0.40	0.50	0.60
Ezomatsu	15.37	19.61	21.73
Hinoki	17.52	22.63	26.28
Buna A	13.44	16.00	17.28
Buna B	13.30	15.96	17.29

<sup>1)</sup> See Table 1 footnotes.    <sup>2)</sup> Oven-dried basis.

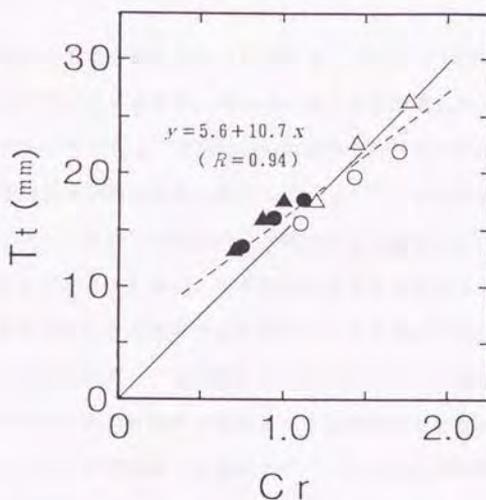


Fig. 2-4. Relationships between total thickness of the particles piling before hot pressing ( $Tt$ ) and compaction ratio ( $Cr$ ).

Legend : ○: Ezomatsu, △: Hinoki, ●: Buna A, ▲: Buna B.

Notes : Compaction ratio ( $Cr$ ) =  $D / D_p$ .

$D$  : oven-dried particles weight of board/board cubic volume.

$D_p$ : oven-dried particle specific gravity.

これらのマットを圧縮して、厚さ15mmのボードを製造したときの圧縮比を関係づけて示すとFig. 2-4が得られる。この図中の実線は、小片が隙間なく整然と理想的に重ねられたときの、圧縮前の小片の合計厚さと圧縮比の関係を示している。図より、小片比重および小片厚さに依らず、圧縮前の小片の合計厚さと圧縮比は直線関係にあることが認められる。実際のボードでは、小片は3次元的に重なり合っており、小片間に種々の大きさの空隙が存在し、小片の積層には乱れが生じている。圧縮比が1より大きくなると、小片の合計厚さが理想直線より下側にシフトしているのは、積層の乱れによって小片が理想的に隙間なく積層された場合より、少ない小片の積層数でボードは成板されることを示している。

圧縮前の小片の合計厚さがボード厚さ(15mm)以下になるのはブナA、ブナBの小片を用いて目標全乾比重0.40のボードを製造したときであり、これらの圧縮比は1以下である。Suchslandは小片の合計厚さがボード厚さより小さければ、圧縮後も空隙を残すと報告している<sup>6,7)</sup>。小片が隙間なく積層され、圧縮前の小片の合計厚さが目標ボード厚さ以下の場合には、マットは全く圧縮されないことになる。しかし、小片間に存在する空隙によって、マットの厚さがボード厚さ以上になる場所が多数存在し、その部分には圧力が加わり、小片間の接着が行われてボードは成板される。もちろんこの場合、ボード製造が可能な圧縮比の大きさには限度が存在することは明かである。

Fig. 2-5に小片空隙率の測定値とボードの圧縮比の関係を示した。この図によると、圧縮比の増加によりボード内の空隙は、それぞれの樹種小片で製造したボードとも直線的に減少する。小片の樹種(小片の比重)について比較すると、圧縮比の増加に伴う小片空隙率の減少の傾きの大きさから、小片比重の大きいものほど急激に減少することがわかる。また、圧縮比が2に近づくとき空隙はほとんどなくなるようである。一方、圧縮比が1より小さいボードでは小片空隙率は極めて大きい。そのため部分的にマットの高さがボード厚さ15mmより

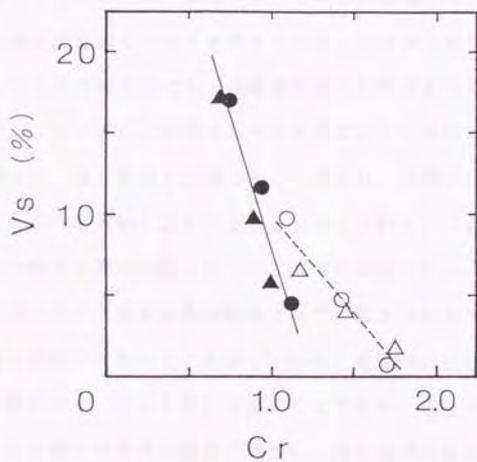


Fig. 2-5. Relationships between void-space rate ( $V_s$ ) and compaction ratio ( $Cr$ ).

Legend : ○: Ezomatsu, △: Hinoki, ●: Buna A, ▲: Buna B.

も高くなるので、熱圧時に小片間に圧縮圧力が加わる。このとき、小片比重が高いものほど大きな圧力を受け、小片同士に結合力が発生する。すなわち、比重の高い小片の方が低比重ボードを造り易いと言えよう。

#### 2.4.2 小片の圧縮率

小片の圧縮率分布をボードの厚さ方向について測定したものをFig. 2-6に示した。熱圧工程でマットが圧縮されるとき、小片の変形は主に横圧縮、曲げであり、特に横圧縮が大部分を占めると考えられる。小片が圧縮されると細胞内の空隙が減少して比重が高まるので、圧縮率が高い小片ほど比重が増加していることを意味する。従って、この図はボードを構成している小片が熱圧工程で受ける変形の程度は、厚さ方向の位置によって異なり、圧縮率はボードの表層付近で高く、中央部は相対的に低くなることを示している。これは既に報告されているボードの厚さ方向の比重分布<sup>7,8)</sup>と同様の傾向にある。特に針葉樹ボードでは表層と中央部の圧縮率の差が顕著であり、厚さ方向の比重分布に対する原料小片比重の影響が大きいことを示している。前述のように、低比重樹種では小片の積層数が多く、マット厚さも大きくなり圧縮による全体の変形が増大する。そのために個々の小片圧縮量が増加し、熱圧初期の温度傾斜により大きな比重分布を生ずるのであろう。

Fig. 2-7にボードを構成する小片の平均圧縮率と圧縮比の関係を示した。なお、この図における実線は、小片が隙間なく理想的に積み重ねられている場合の小片の平均圧縮率と圧縮比の関係を示している（圧縮比=1.0のとき小片の平均圧縮率=0(%)になり、また圧縮比=2.0のとき小片の平均圧縮率=50(%)である）。この図から、圧縮比の増加で平均圧縮率は直線的に増加し、この傾向は原料小片の樹種によらないことが認められる。一方、理想直線との関係を見ると、圧縮比が小さいときは空隙が多いために平均圧縮率は理想直線の上部にくるが、圧縮比が増大すると空隙が減少し理想直線に近づいてくる。圧

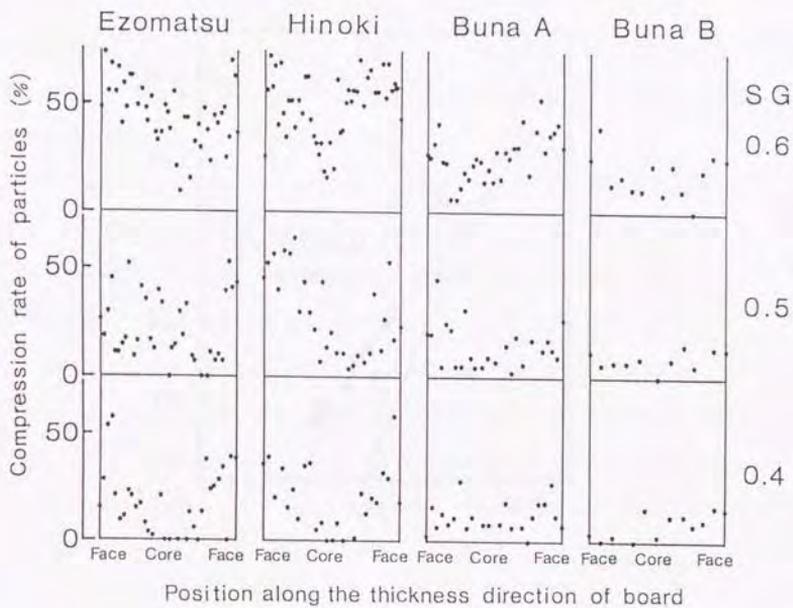


Fig. 2-6. Distribution of compression rate of particles throughout the thickness of boards.

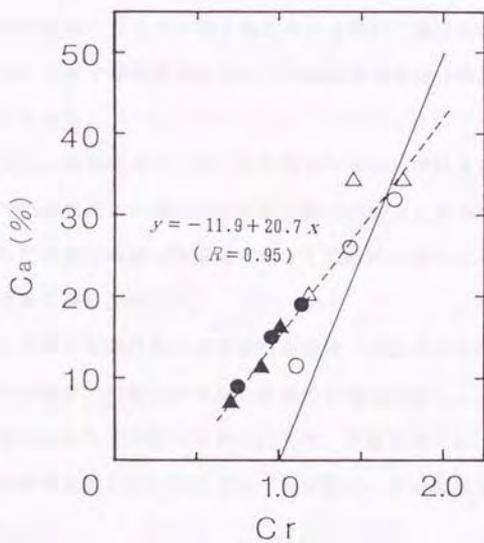


Fig. 2-7. Relationships between average compression rate of particles ( $Ca$ ) and compaction ratio ( $Cr$ ).

Legend : ○: Ezomatsu, △: Hinoki, ●: Buna A, ▲: Buna B.

縮比が1よりも小さい場合でも、小片の平均圧縮率が10%程度を示すことは、低比重ボード製造の面から重要なことであり、空隙部の存在の意義は大きいと思われる。

## 2.5 摘 要

寸法形状を規制したモデル化された小片を用いて低比重ボードを製造し、ボードの形成に及ぼす原料樹種ならびに圧縮比等の影響を検討した。結果の概要は次の通りである。

1) 圧縮比の増加により、ボードを構成する小片の厚さの合計は直線的に増加し、小片の比重および厚さによらず、同一直線上にのることが認められた。

2) 小片空隙率は圧縮比の増加に伴って直線的に減少し、小片比重の大きいものほど急激な減少を示した。

3) ボード厚さ方向の小片の圧縮率分布は、比重分布と同様の傾向を示した。小片の平均圧縮率は圧縮比の増加で直線的な増加を示し、この傾向は原料小片の樹種によらないことが認められた。また、圧縮比が1以下でも小片の平均圧縮率は10%程度を示していることは、低比重ボードの製造面では重要なことと考えられる。

## 2.6 ボードの小片結合力

パーティクルボードは小片が少量の接着剤によって結合されている。小片間の結合点が外力に充分抵抗できるだけの結合力を持つことが必要であり、小片結合力がボードの性能に影響を与えることは当然予測されよう。ボードの低比重化により、製造時の圧縮圧力不足に起因する接着不良が危惧されるので、低比重ボードの接着強さすなわち小片結合力を把握しておくことは重要である。パーティクルボード用の結合剤として、最近開発されたイソシアネート系樹脂接着剤は、低圧縮圧下でも良好な接着力を発現するといわれている。

そこで本節では、このイソシアネート系樹脂接着剤および従来より構造用途に用いられているフェノール系樹脂接着剤により低比重ボードを製造し、その小片結合力の発現について検討した。

## 2.7 実験方法

### 2.7.1 低比重ボードの製造

供試小片の樹種にはヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl.) およびブナ (*Fagus crenata* Bl.) を用いた。これらの単板 (ヒノキ: 気乾比重0.38, 厚さ0.53mm、ブナ: 気乾比重0.59, 厚さ0.57mm) を繊維方向に25mm長さに切断した後、ハンマーミルで破砕し、JIS-2000 $\mu$ メッシュ以上の小片をボード製造に使用した。接着剤にはフェノール系樹脂接着剤 (日本化成機#164, これをPFと略記する) ならびにイソシアネート系樹脂接着剤 (群栄化学工業機UL4800, これをICと略記する) を用い、全乾木材重量に対して固形分10%の割合で噴霧塗付した。なおICについては樹脂に対して重量比20%のアセトンを加えて粘度を調整した。

手撒きによるフォーミングの後、テンシロン試験機 (機オリエンテック、容

量10tonf)に取り付けた熱板を用い熱圧成形した。製造ボード寸法は150mm×150mm、厚さ15mmであり、目標気乾比重0.30~0.60(ブナボードでは0.40~0.60)のボードを1条件12枚製造した。熱圧温度は160℃とし、熱圧時間はPFでは10分間、ICについては5分間である。なお、接着剤塗付前の目標小片含水率はPFでは2%、ICについては10%に調整した。

## 2.7.2 材質試験

成板後20℃、55%RH(平衡含水率10%)の恒温恒湿室内で4週間調湿した試験片について、以下に示す試験を行った。

### (1) ボード厚さ方向の比重分布測定

試片表面から中央部まで、約0.5mm研削ごとに研削した体積および重量を測定し、厚さ方向の比重分布を求めた。この試験片の切削はボード製造時に下部熱板に接していた面より行った。試験片寸法は50mm×125mmとし、試験片数は1条件3個である。

### (2) 小片結合力の測定

小片間の結合力をボードの中央部および表層部について、はく離試験によって評価した。中央部のはく離強さの測定はJIS A 5908に準じて行った。表層部については表面を約0.3mm研削した後、50mm×50mm×2mm厚さの試験片を採取し、はく離治具により板面に垂直に荷重を加えた。試験片数は1条件それぞれ6個である。なお、表層部については比重分布測定と同様に、ボード製造時に下部熱板に接していた側を対象とした。

## 2.8 結果と考察

### 2.8.1 ボード厚さ方向の比重分布

低比重ボードの層状構造をボードの厚さ方向における比重分布により検討し

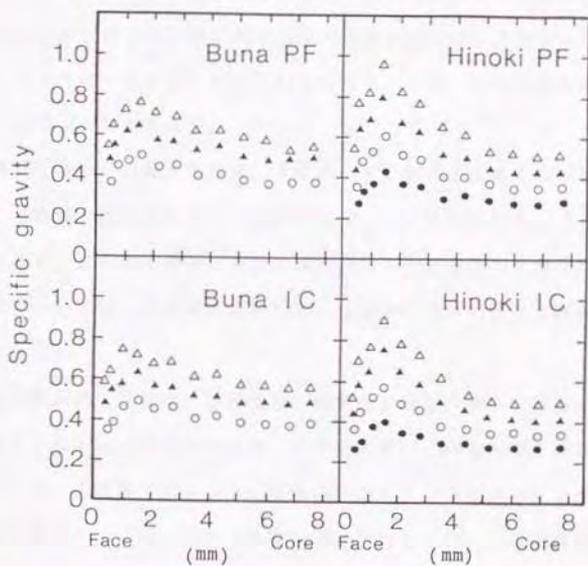


Fig. 2-8. The profiles of specific gravity throughout the thickness of boards.

Legend : Board specific gravity: ●: 0.3, ○: 0.4, ▲: 0.5, △: 0.6.  
 PF: Phenolic resin-bonded boards,  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards.

た結果をFig. 2-8に示す。表層・内層の小片形状が同一の単層ボードを従来の1段階圧縮法により製造した場合でも、熱圧によって明瞭な層状化が認められた。最大比重を比較すると、樹種についてはヒノキボードが大きな値を示した。これはブナと比較してヒノキの横圧縮比例限度力が小さいこと、および低比重樹種では熱圧前のマット体積が高比重樹種に比べて大きく、圧縮による全体の変形が増大するため、熱圧初期の温度傾斜により傾斜の大きい比重分布を示すと考えられる。ボード平均比重に対する最大比重の割合は、ブナボードでは1.18~1.22、ヒノキボードでは1.28~1.52となった。なお、このときの含水率を測定すると平均8.7%であった。

ヒノキPFボードの最大比重は、ICボードに較べて大きくなる傾向が認められた。これは、熱圧時のマット含水率はICボードでは9%、PFボードでは15%であり、この含水率差によって最大比重の差が生じたと考えられる。ブナボードについては、圧縮率が低いため、接着剤の違いによる明確な差は認められなかった。

ボード内部の最大比重は、小片樹種、接着剤の種類、ボード比重に係わらず、ボード表面よりボード厚さの約10%、すなわち約1.5mmの位置に存在することが認められた。本実験ではマットに圧縮圧が加わり、所定厚さにまで圧縮するときの試験機クロスヘッドの降下速度を20mm/minとした。この速度を変化させることによって、ボード厚さ方向に最大比重が現れる位置およびその大きさをコントロールすることが可能であると思われる。

## 2.8.2 ボードの小片結合力

ボード厚さ方向の比重分布は材質に顕著な影響を与え、表層比重の増加はボードの曲げ強さを増加させる。その反面、中央部比重の低下を招き、ボード中央層の小片結合力を低下させる恐れがある。

はく離強さと比重との関係をFig. 2-9に示す。ただし、この横軸の比重は厚

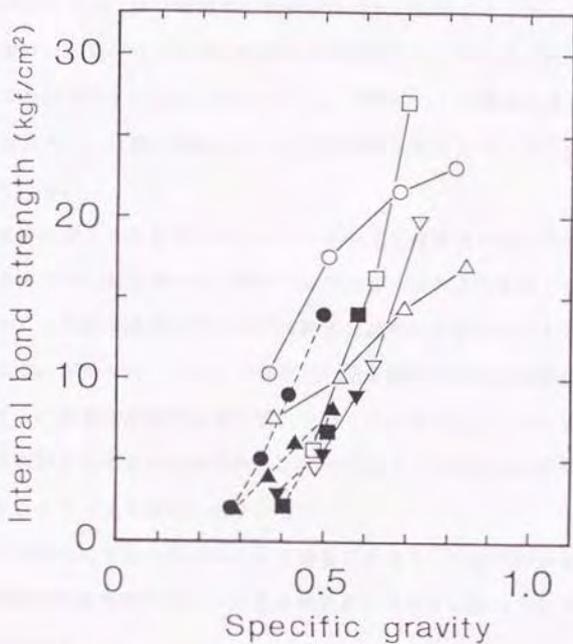


Fig. 2-9. Relationships between internal-bond strength and board specific gravity.

Legend :	Face layers	Center cores
Hinoki IC	○	●
Hinoki PF	△	▲
Buna IC	□	■
Buna PF	▽	▼

き方向の比重分布より得られた、中央付近および最大比重を中心とした3~4プロットの平均値であり、試験片の破壊部付近の比重を表している。図より、比重の増加とともに、はく離強さは直線的な増加の傾向を示した。これはボード比重の増加にともなう小片の圧縮変形の促進により、小片間の接触面積が増大して結合力が向上するためと考えられる。ICボードの増加の傾きはPFボードよりも大きく、比重の増加とともにその差は大きくなり、ICの高い接着力が現れている。

表層部と中央層とを比較すると、ヒノキボードでは破壊を生じた部分の比重が同一であっても、表層部のはく離強さは中央層のそれより大きくなるのが認められた。これは表層部と中央層では熱圧時の条件が異なることに起因すると考えられる。すなわち、ボードの表層部は熱板閉鎖直後に熱板温度に達するのに対して、内部温度は表面温度に遅れて徐々に上昇する。そのため表層部では小片間の密着性および接着剤の硬化が充分であり、中央層と比較して小片間の結合力が優れていると推測される。

ブナボードについては表層部の小片圧縮量が少なく、比重傾斜が小さいことから、本実験の比重範囲では、小片間の密着性に依存する結合力に差が現れなかったと思われる。

ヒノキボードのはく離強さの増加の傾きは、ブナボードより小さく、表層部では比重の増加につれて増加率が低下する傾向を示し、比重0.65付近でブナボードと逆転した。これは川井ら<sup>4)</sup>が指摘するように、ボード比重の増加による小片間の密着性を高めると、小片同士の接触点における結合力が十分に高い場合には、小片結合力は原料木材の強度値に近づいて飽和するためと考えられる。

低比重ボードは小片量が少ないので、比較的低压縮圧で成板されており、圧縮圧不足による小片相互の密着の程度がボード性能に影響を与えらると思われる。マットを所定厚さまで熱圧した時の最大圧縮圧とボード圧縮比との関係をFig. 2-10に示す。圧縮比は一般にボード比重と原料小片比重との比で表され、木材

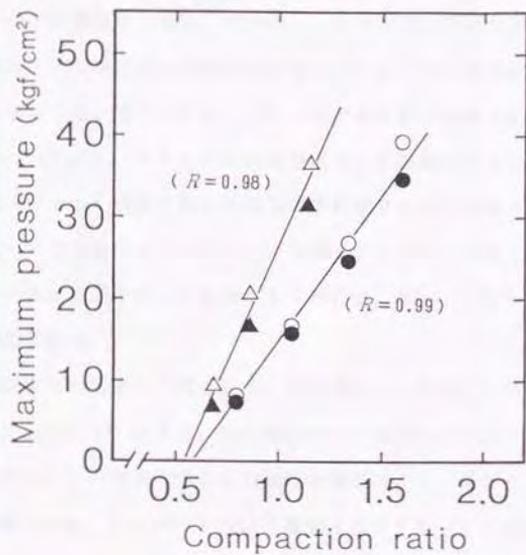


Fig.2-10. Relationships between maximum pressure during hot-pressing and compaction ratio.

Legend : ○: Hinoki PF, ●: Hinoki IC, △: Buna PF, ▲: Buna IC.  
*R*: Correlation coefficient.

Note : The solid lines represent the regression line.

小片の接触程度の指標となる。ボード比重は接着剤を含んだ値であり、実質的な小片の圧縮量を示していないため、本実験では、前節と同様に接着剤重量を含まずに求めたボード比重と小片比重から圧縮比を求めた。図より、最大圧縮圧はボード圧縮比の増加で直線的な増加を示した。増加の傾きは接着剤によらず原料樹種すなわち小片比重の影響を受け、比重が高いブナの傾きは大きく、同一圧縮比のボードを製造する場合、ブナボードの方がより大きな圧縮圧を必要とする。これはブナの横圧縮比例限度力はヒノキよりも大きいので、圧縮の仕事量が増大するためと考えられる。これらの回帰直線が横軸（圧縮比）と交わる点は0.5~0.6であり、原料小片の比重や形状にも影響されるが、本実験の条件では、ボードとして成形される圧縮比の下限値であると推測される。

なお、PFボードの圧縮圧がICボードより高くなっているのは、接着剤を塗布する前の小片含水率が予定よりも低くなったため、ボード比重が若干高くなったことが原因である。

接着強さと圧縮圧との関係の一例として、中央層のはく離強さと最大圧縮圧との関係をFig.2-11に示す。図より、はく離強さは圧縮圧の増加にともなって直線的な増加を示し、その増加の傾きは接着剤の種類によって異なっている。同一圧縮圧で比較すると、ICボードのはく離強さはPFボードの約2倍の値を示した。

また、圧縮圧が $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下で成板されたボードでは、ICとPFとの差は認められないことから、ICについても成板時の圧縮圧がある程度以上付与されなければ、強固な小片結合力の発現が得られないことがわかる。従って、本実験で用いた熱板降下速度が一定( $20\text{mm}/\text{min}$ )のホットプレスにより、JIS-150タイプをクリアする実用的な結合力をもつボードを製造するためには、IC、PFともに $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上の圧縮圧を必要とする圧縮比を選択すべきであると考えられる。

接着強さは単位面積当りの接着剤塗布量に影響を受けると考えられる。本実

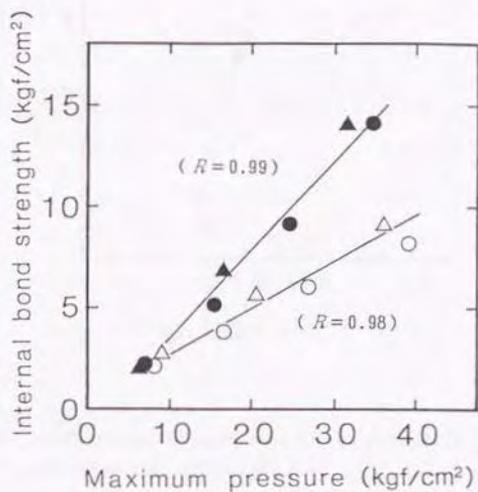


Fig.2-11. Effect of maximum pressure during hot-pressing on the internal-bond strength of boards.

Legend : ○: Hinoki PF, ●: Hinoki IC, △: Buna PF, ▲: Buna IC.  
 $R$ : Correlation coefficient.

Note : The solid lines represent the regression line.

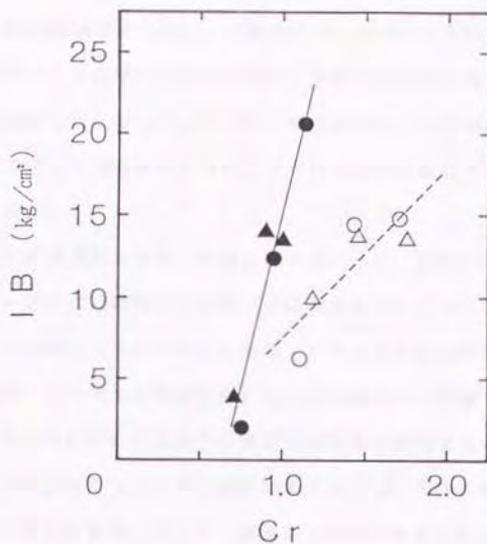


Fig.2-12. Relationships between internal-bond strength ( $I B$ ) and compaction ratio ( $C r$ ).

Legend :  $\circ$ : Ezomatsu,  $\triangle$ : Hinoki,  $\bullet$ : Buna A,  $\blacktriangle$ : Buna B.

Table 2-3. The amount of resin applied per unit-area of particle.

Species	Amount of resin ( $\times 10^{-3} \text{g/cm}^2$ )
Ezomatsu	0.9
Hinoki	1.2
Buna A	1.5
Buna B	3.5

験では接着剤の添加率を一定にしているので、比重の大きいブナの単位面積当りの塗布量はヒノキに較べて多くなるが、原料小片樹種の違いによるはく離強さには差が認められなかった。これは、単位面積当りの塗布量の増大が小片実質量の低下によって相殺されたため、見かけ上ははく離強さに差が現れなかったと推測される。

さて、ここで接着剤塗布量の影響を調べるために、前節の形状を規制した小片によるボードのはく離強さと圧縮比との関係をFig. 2-12に示した。はく離強さは小片間の接着力の大小を表しており、これには単位面積当りの接着剤塗布量と接着面積（小片同士の接触面積）および圧縮圧力が影響すると考えられる。ここで用いた小片の単位面積当りの接着剤塗布量を算出するとTable 2-3のようになる。この塗布量は次に示す方法により求めた。すなわち、各樹種について小片 100枚当りの重量とボード1枚当りに必要とする小片の重量から、各ボードに含まれる小片数が求まる。小片の寸法は10mm×25mmと一定であり、小片側面の面積を無視すれば所要小片の全表面積が得られ、これと添加した接着剤の重量から単位面積当りの塗布量を算出した。接着剤添加率を一定にしているので、ボード全体への塗布量は一定であり、比重および厚さの大きい小片は表面積の合計が小さくなるため単位面積当りの塗布量は増加する。

ブナAおよびブナBは単位面積当りの接着剤塗布量が多いが、圧縮比が低い場合（ボード比重 0.4の場合）では圧縮率も小さく、小片空隙率は大きいことから、有効接着面積ならびに小片間に加わる圧縮圧が小さいため、はく離強さは低い。圧縮比の増加につれて小片の接触部にかかる圧力も大きくなり、小片圧縮率は高くなる。そのため接着面積が増加し、接着層が薄くなって小片相互の密着性が良好となり、はく離強さは増大していく。また、ブナと針葉樹小片では、圧縮比の増加に伴うはく離強さの増加の傾きが異なっており、小片比重の大きいものほど増加が急である。これは小片同士の接触部分で十分な接着がなされていれば、原料比重が大きいものほどそれ自身の横引張強度は大きいと

め、高いはく離強さを示すと考えられる。なお、ブナAとブナBが同一直線上にのることから、この範囲の接着剤塗布量ではく離強さへの影響はほとんどないと言えよう。

## 2.9 摘 要

フェノール系樹脂(PF)およびイソシアネート系樹脂接着剤(IC)を用いた、低比重ボードの小片結合力の発現について検討した。得られた結果の概要は次の通りである。

1) 破壊を生じた部分の比重が同一であれば、表層部は中央層よりも高いはく離強さを示す傾向が認められた。これは表層部では小片間の密着性および接着剤の硬化が充分であり、中央層と比較して小片間の結合力は優っていると推測された。

2) ボード製造時の最大圧縮圧はボード圧縮比の増加で直線的な増加を示し、その増加の傾きには原料比重の影響が認められた。実用的なはく離強さをもつボードを製造するためには、両接着剤ともに $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上の最大圧縮圧が必要であった。

3) 圧縮比の増加に伴うはく離強さの増加の傾きは、原料小片によって異なり、小片比重の大きいものほど急激な増加を示した。

4) はく離強さに接着剤塗布量の影響は認められず、 $1 \times 10^{-3}\text{g}/\text{cm}^2$ 程度の塗布量でも充分な小片結合力が得られていることが示唆された。

## 文 献

- 1) Kawai, S.; Sasaki, H.: *Mokuzai Gakkaishi*, 32(5), 324-330(1986).
- 2) 川井秀一、須田久美、中路 誠、佐々木光: 木材学会誌, 32(11),

867-882(1987).

- 3) 須田久美、川井秀一、佐々木光：同上、33(5), 376-384(1987).
- 4) 川井秀一、須田久美、佐々木光：同上、33(5), 385-392(1987).
- 5) 川井秀一、中路 誠、佐々木光：同上、33(9), 702-707(1987).
- 6) Suchsland, O.: *Forest Prod. J.*, 17(2), 51-57(1967).
- 7) Suchsland, O.: *Q. Bull. Michigan Agri. Expt. Sta., Michigan State Univ.*, 45(11), 104-121(1962).
- 8) 岩下 陸、松田敏誉、石原重春：林誌研報、126, 63-89(1980).
- 9) 関野 登：木材学会誌、33(12), 957-962(1987).

### 第3章 吸湿によるボードの厚さ膨潤機構

#### 3.1 緒言

パーティクルボードは吸湿、吸水により大きな厚さ膨潤を示し、スプリングバックが大きいという問題は以前から指摘されてきた。ボードを構成する小片は熱圧されているので、水分の侵入によって内部応力が発生し、この応力は小片結合力により抑制されていると予想される。第2章、第2節から、ボード比重を高めると小片間の接触面積が増大し、高い小片結合力が得られることが分かった。しかしボードは水分の侵入により、セットされた小片が元の厚さに戻ろうとするため厚さ膨潤を生じ、これに起因する接着剤の機械的破壊によって小片結合力が低下する恐れがある。このような材質変化は建築構造用部材としてボードを使用する場合、耐久性の点から無視できない。

低比重ボードは小片量が少ないので熱圧時の圧縮率は低く、ボードを構成している個々の小片の圧縮変形は小さいため、その結果として吸湿、吸水による寸法変化は一般のボードより低く抑えられると考えられる。

ボードの厚さ膨潤機構を説明するには、まずこれを構成している個々の小片の厚さ膨潤を捉えることが重要であろう。しかし、このような実験の報告例は見当たらない。不規則な形状をもった小片により構成されているボードでは、小片の厚さ回復の挙動を調べるのは不可能である。そこで本章では、第2章、第1節と同様に寸法を規制したモデル化した小片によってボードを製造した。このボードの厚さ方向に連続して小片の厚さを測定し、その後吸湿させたときの小片およびボードの厚さ変化ならびに小片間の空隙率変化もあわせて検討した。さらに低比重ボードの厚さ膨潤に及ぼす影響を線形重回帰分析により検討した。

## 3.2 実験方法

### 3.2.1 低比重ボードの製造

供試小片の樹種はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl.)、エゾマツ (*Picea jezoensis* Carr.)ならびにブナ (*Fagus crenata* Bl.)であり、寸法形状を長さ25mm、幅10mmに規制したものをを用いた。これらの小片を得るために、ヒノキ、ブナについては単板から切り出し、エゾマツは飽水状態の木材ブロックをフレーカーによって切削した。Table 3-1に小片の全乾比重および厚さ(約300枚の平均値)を示す。なお、ブナについては2種類の厚さの小片、すなわち、0.64mmおよび1.33mmの小片を用意した。以下、それぞれブナAおよびブナBと略記する。小片に接着剤を塗布する前の含水率は約10%に調整した。

接着剤にはイソシアネート系樹脂接着剤(群栄化学工業㈱ UL-4800)を用い、全乾小片重量に対し固型分10%の割合で噴霧塗布した。スプレー塗布の際、樹脂に対して重量比20%のアセトンを加えて粘度を調整した。手撒きによるフォーミングの後、テンシロン試験機(鶴オリエンテック、容量10tonf)に取り付けた熱板を用い、通常行われている1段階圧縮法および2段階圧縮法により熱圧成形した。2段階圧縮法とは初期圧縮で目標ボード厚さ以下まで締め込み、2次圧縮で厚さを規制する方法である。ボードの厚さ規制はダイヤルゲージの目盛りが所定の位置を示したとき、クロスヘッドの動きを停止することによって行った。

製造ボード寸法は、150mm×150mm×15mm(一部比重の高いものについては、130mm×130mm×15mm)であり、目標全乾比重0.40、0.50、0.60のボードを1条件につき1枚成板した。なお、2段階圧縮法では初期圧縮時におけるボードの目標厚さ(15mm)からの締め込み量を1.5mmとした。熱圧温度は160℃であり、熱圧時間は両圧縮法ともに5分間である。ただし、2段階圧縮法では初期圧縮時間を30秒、一時解圧し、2次圧縮に移るまでの時間を30秒とした。

Table 3-1. Particle characteristics.

Species <sup>1)</sup>	Density <sup>2),4)</sup> g/cm <sup>3</sup>	Thickness <sup>2),4)</sup> mm	S.D. <sup>5)</sup>	Thickness <sup>3),4)</sup> mm	S.D. <sup>5)</sup>
Ezomatsu	0.34	0.53	0.03	0.54	0.03
Hinoki	0.31	0.73	0.03	0.74	0.03
Buna A	0.53	0.64	0.04	0.65	0.04
Buna B	0.53	1.33	0.04	1.34	0.04

<sup>1)</sup> Ezomatsu, *Picea jezoensis* Carr. Buna, *Fagus crenata* Bl.

Hinoki, *Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl.

<sup>2)</sup> Oven-dried basis. <sup>3)</sup> Air-dried basis.

<sup>4)</sup> The average of 300 measurements. <sup>5)</sup> Standard deviation.

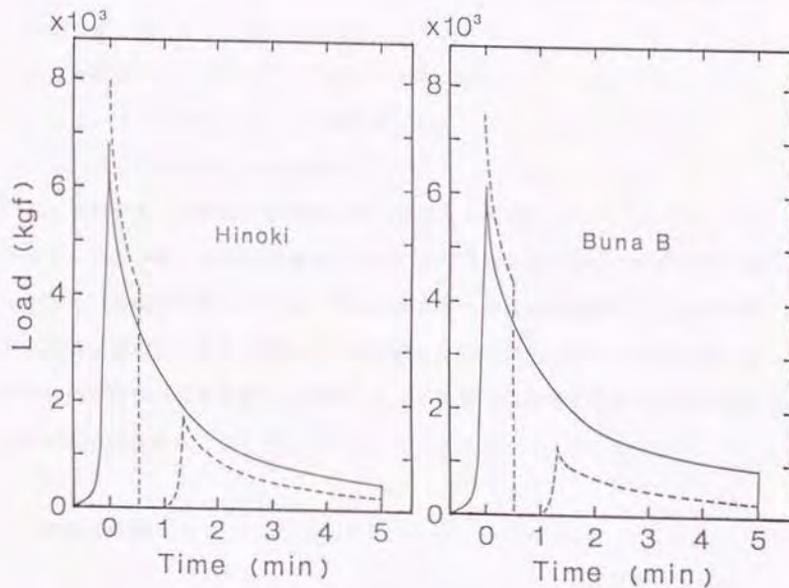


Fig. 3-1. Changes in pressure during hot-pressing.

Legend : — one-step process, - - - - two-step process.

Note : Board specific gravity 0.50.

### 3.2.2 吸湿前後の小片厚さの測定

ボード製造後20℃、55%RH(平衡含水率10%)の恒温恒湿室内にて約2週間調湿した後、50mm×50mmの試験片を1条件について2個採取した。これらの試験片断面の数カ所(1試験片につき4~6カ所)を読取顕微鏡(精度1/100mm)により、厚さ方向に連続して、ボードを構成している小片の厚さを測定した。その後、KNO<sub>3</sub>飽和水溶液をいれたデシケータ内(20℃、95%RH)で3週間吸湿させ、気乾状態と同一カ所について同様に厚さの測定を行い、小片の厚さ膨潤率およびボードの厚さ膨潤率を求めた。また、ボード内には種々の大きさの空隙が存在するので、ボードの厚さに占める小片間の空隙の割合を小片空隙率と定義して、吸湿前後の空隙率もあわせて測定した。小片圧縮率ならびに空隙率は、第2章、第1節と同様に次式によって算出した。

$$\text{小片圧縮率} = \left( \frac{T_0 - T}{T_0} \right) \times 100 (\%)$$

ここに、 $T_0$ : 圧縮前の小片の平均厚さ、

$T$ : 圧縮後の小片の厚さ

$$\text{小片空隙率} = \left( \frac{\text{空隙厚さの総和}}{\text{ボード厚さ}} \right) \times 100 (\%)$$

なお、小片の厚さの測定誤差は、Table 3-1に示した供試小片の厚さの変動幅から±10%程度と考えられる。また、含水率ベースが圧縮前の小片の平均厚さと圧縮後の小片の厚さの測定時では異なっているが、小片の平均厚さを全乾および気乾ベースの変動幅と比較すれば、本実験では含水率による厚さの差は測定誤差に含まれるとみて良からう。

## 3.3 結果と考察

### 3.3.1 圧縮方法と小片圧縮率分布

Fig. 3-1にヒノキおよびブナBのマットの熱圧経過を示す。実線は1段圧縮法、破線は2段階圧縮法を表している。熱板を降下させるとマット内に圧力が

かかり、圧縮圧力（荷重）は増加していく。圧縮圧の上昇過程においては、小片は圧縮、曲げ等の変形を受け、マット内の空隙が減少して、小片間の接触面積が増加する。マットが目標厚さ（1段圧縮では15mm）に達したときに荷重は最大値を示し、この時点から圧縮時間の計測を開始した。2段階圧縮法の初期圧縮では、目標厚さよりも1.5mm縮め込んでいるために、最大荷重は1段圧縮より大きくなっている。2段階圧縮の2次圧縮圧は1段圧縮の荷重緩和曲線上にのらず、これよりも低い荷重値を示していることから、30秒間の初期圧縮によりボードの圧密化が1段圧縮法に較べて促進されていることが予測される。また、本実験で採用した熱圧条件（圧縮時間5分）では、ボードの圧縮比が小さくても圧縮終了時において、内部に応力が残存していることが分かる。

Fig. 3-2は吸湿前にボードの厚さ方向について測定した、小片の圧縮率分布の一例である。この図より、針葉樹小片では1段圧縮法、2段階圧縮法ともに表層部の小片の圧縮率は高く、中央層では相対的に低い圧縮率を示している。これは、低比重樹種では小片積層数が多く、マット体積も大きくなり圧縮による全体の変形が増大するため、個々の小片の圧縮量が増加し、熱圧初期の温度傾斜によりこのような分布を示すと考えられる。2段階圧縮法では表層部と中央層の圧縮率の差はより大きく、表層の圧密化に及ぼす初期圧縮の効果が現れている。ブナについては、針葉樹と異なり木材小片の比重が高く、熱圧前のマット体積は同一ボード比重と比較すると小さい。このため、圧縮によるマット全体の変形が小さく、針葉樹小片のような圧縮率の分布は示さないと推測される。

1段圧縮法および2段階圧縮法の両圧縮方法の違いが小片の平均圧縮率に及ぼす影響をみたものがFig. 3-3である。実線は両圧縮方法による平均圧縮率が同一の場合を表している。針葉樹小片の平均圧縮率は実線の上側にあり、2段階圧縮による平均圧縮率の増加がみられる。これは前述のように、表層部の小片の圧密化が平均圧縮率を高めているからである。一方、ブナについては圧縮

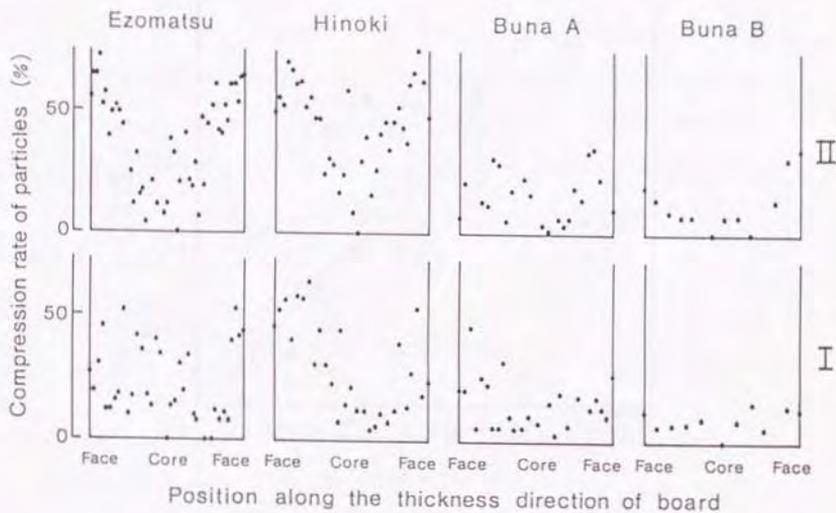


Fig. 3-2. Distribution of compression rate of particles throughout the thickness of boards at the specific gravity of 0.50. I: one-step process, II: two-step process.

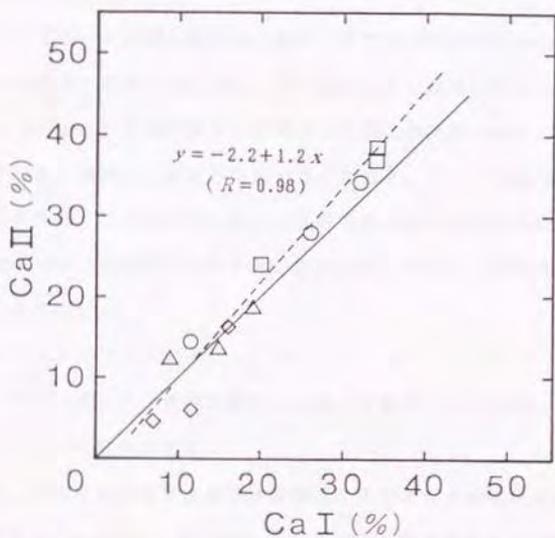


Fig. 3-3. Relationships between average compression rate of particles ( $Ca$ ) of two-step process ( $Ca II$ ) and that of the one-step process ( $Ca I$ ).

Legend :  $\circ$ ; Ezomatsu,  $\square$ ; Hinoki,  $\triangle$ ; Buna A,  $\diamond$ ; Buna B.

Notes : The solid line represents the relationship in the case of  $Ca II = Ca I$ .

The broken line represents the regression line.

方法による差はこの図からは明確ではないが、小片の厚さが薄いブナAの平均圧縮率はブナBより高くなる傾向が認められる。

### 3.3.2 小片の厚さ膨潤

パーティクルボードの厚さ膨潤は、熱圧工程で受けた木材小片の圧縮変形が、水分の侵入によって平衡状態を崩し、元に戻ることに起因していると考えられる。Fig. 3-4に小片の平均吸湿厚さ膨潤率と圧縮比の関係を示す。一般に圧縮比はボード比重と原料小片比重との比で表されるが、ボード比重は接着剤を含めた値であるから、この場合の圧縮比は実質的な小片の圧縮量を示すものではない。したがって、本実験では接着剤の影響を除くために、圧縮比  $C_r$  を次に示すように定義した。

$$C_r = (W_p / V_b) / D_p$$

ここに、 $W_p$  : ボードの製造に要する全乾小片重量、 $V_b$  : ボード体積、

$D_p$  : 全乾小片比重

圧縮変形した木材の水分による厚さ回復は、圧縮率が大きくなると増加することが報告されている<sup>6-8)</sup>。図より小片の平均吸湿厚さ膨潤率と圧縮比には直線関係がみられ、その相関は高く(相関係数  $R=0.90$ )この増加の傾向は原料樹種によらないことが認められる。前章の結果によると、圧縮比の増加で平均圧縮率は直線的な増加を示すことから、小片の圧縮変形が大きいものほど水分の侵入による厚さの戻りが大きくなることはこの図からも分かる。圧縮方法について比較すると、高い平均圧縮率値を示す2段階圧縮法によるものが吸湿厚さ膨潤率は大きい。

ブナについては2種類の厚さの小片を用いたが、小片が厚いほど厚さ膨潤は大きくなる傾向がみられる。これは須田ら<sup>4)</sup>が指摘するように、小片の厚さが大きいものほど小片の3次元的な重なりに乱れが生じ、熱圧時のセット量が増加するので、吸湿による厚さ膨潤が増大すると考えられる。なお、本実験にお

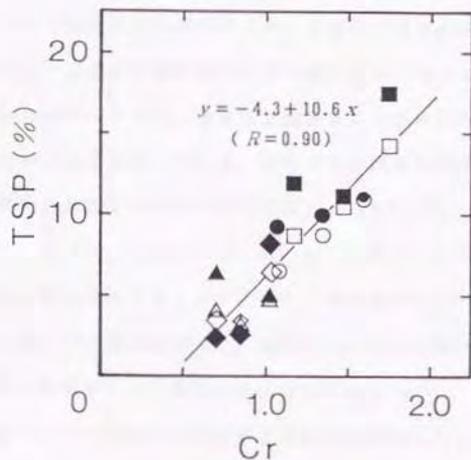


Fig. 3-4. Relationships between average thickness swelling of particles (*TSP*) and compaction ratio (*Cr*).

Legend :

	Ezomatsu	Hinoki	Buna A	Buna B
One-step process	○	□	△	◇
Two-step process	●	■	▲	◆

Notes : Compaction ratio (*Cr*) =  $D / D_p$ .

*D* : oven-dried particles weight of board/board cubic volume.

*D<sub>p</sub>* : oven-dried particle specific gravity.

ける吸湿後のボード含水率は16~18%であった。

### 3.3.3 ボードの厚さ膨潤

イソシアネート系接着剤を用いた低比重ボードは圧縮比が小さく<sup>5,6)</sup>、また接着剤自体の撥水性等<sup>5,6)</sup>によって、優れた寸法安定性を有することが報告されている。ボードの吸湿厚さ膨潤率とボード全乾比重との関係をFig. 3-5に示す。一般にボードの厚さ膨潤率はボード比重の増加で増大する。川井ら<sup>1)</sup>は圧縮比が1.0以下のボードでは、吸水厚さ膨潤率にはボード比重に対する依存性は認められないことを報告している。ボードの吸湿厚さ膨潤率とボード比重の関係を全体的にみればその相関は非常に低い( $R=0.07$ )。ここで高圧縮ボード(エゾマツ、ヒノキ、圧縮比 $>1$ )についてみれば、ボードの厚さ膨潤率には比重依存性が認められるが( $R=0.49$ )、低圧縮ボード(ブナ、圧縮比 $<1$ )ではボード比重0.40の厚さ膨潤率は、比重0.60のときの値かそれ以上の値を示しており、厚さ膨潤率には比重依存性は認められない。

Fig. 3-6はボードの吸湿厚さ膨潤率と圧縮比の関係を示したものである。ブナの低圧縮ボード(圧縮比 $=0.70$ )の厚さ膨潤率の値(図中の破線内のもの)は高く、これを除外して考えればその直線性は高くなり( $R=0.80$ )、圧縮比の増加による厚さ膨潤率の増加の傾向は小片の平均厚さ膨潤率のそれと同様に、小片樹種によらないことが認められる。ブナの低圧縮ボードの厚さ膨潤率が高い値を示すのは、ボード製造時の圧縮圧が低いので小片間の密着性が充分でないために、小片の厚さ膨潤による結合部の破壊に抵抗できないことが影響していると考えられる。以上のことから、厚さ膨潤を低く抑えるにはボード比重、すなわち圧縮比に最適値が存在することが推測される。

2段階圧縮法によって製造したボードは、その吸湿厚さ膨潤率が1段階圧縮法によるものより大きく、小片の平均厚さ膨潤率における関係と同様であり、個々の小片の厚さ膨潤がボードの厚さ膨潤に影響を与えていると思われる。Fig.

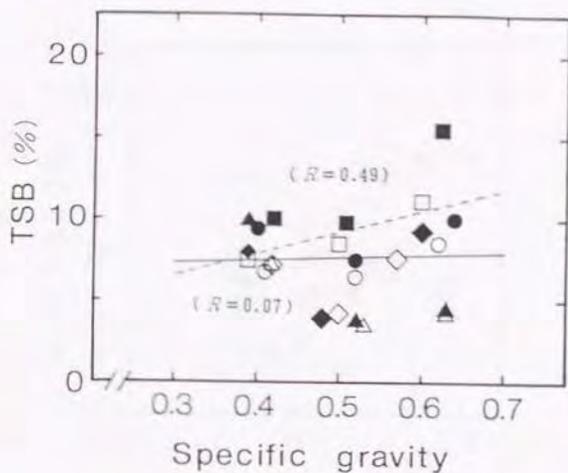


Fig. 3-5. Relationships between thickness swelling of board (*TSB*) and oven-dried board specific gravity.

Legend :

	Ezomatsu	Hinoki	Buna A	Buna B
One-step process	○	□	△	◇
Two-step process	●	■	▲	◆

Notes : The solid line represents the regression line of all plots. The broken line represents the regression line of all plots except the buna plots.

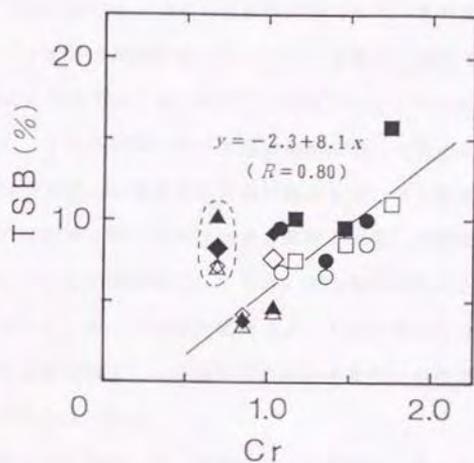


Fig. 3-6. Relationships between thickness swelling of board (*TSB*) and compaction ratio (*Cr*).

Legend :

	Ezomatsu	Hinoki	Buna A	Buna B
One-step process	○	□	△	◇
Two-step process	●	■	▲	◆

Note : The solid line represents the regression line of all plots except the buna ( $Cr = 0.70$ ) plots.

3-7に小片の平均厚さ膨潤率とボードの厚さ膨潤率の関係を示す。ボードの厚さ膨潤は個々の小片の厚さ膨潤の平均として現れると考えると、その関係は実線で表せる。破線は測定値の回帰式 ( $y = -1.3 + 1.2x$ ) であり、その相関は高く ( $R = 0.83$ )、小片の厚さ膨潤がボードの厚さ膨潤に強く影響していることが分かる。ブナの低圧縮ボードは平均圧縮率が低く小片の平均吸湿厚さ膨潤率は小さいが、ボードの厚さ膨潤率は大きくなり、実線から離れる傾向を示している。これは前述したように、低圧縮圧下で熱圧されているため、小片間の密着が不十分であり、小片の膨潤に伴って結合部が破壊したためと考えられる。

小片間の空隙は小片同士の密着性の問題に関連していると思われる。Fig. 3-8に吸湿後の小片空隙率と吸湿前の空隙率の関係を示す。実線は吸湿前後で小片空隙率に差がないときの関係を示している。測定値の回帰式を求めると破線が得られる。前章より、ボード比重の増加によって小片空隙率は直線的に減少するから、ボード比重が大きいものほど小片間の密着性は良好であり、吸湿前後の小片空隙率の変化は少ない。

ボード比重が低くなるに従って、吸湿後の小片空隙率は増加する傾向が認められる。これは吸湿による小片の膨潤が小片間の結合を切断するためと考えられ、1段圧縮法、2段階圧縮法を問わず実線から離れていく。この吸湿後の小片空隙率の増加によって、比重0.40のブナボードの厚さ膨潤率は高い値を示すと考えられる。ブナの低圧縮ボードは木材小片の比重が大きく、熱圧による圧縮率の増加が少ないので小片空隙率は高い。そのため、小片同士の密着が不十分で、小片の膨潤による結合部分の破壊が進むことがこの図からも推測される。

ボードの厚さ膨潤は接着剤の塗布量によっても影響される。小片の単位面積当りの接着剤塗布量を算出するとTable 3-2のようになった。この塗布量は次に示す方法により求めた。すなわち、各樹種について小片100枚当りの重量とボード1枚当りに必要とする小片重量から、各ボードに含まれる小片数が求められる。小片の寸法は10×25mmに規制しているので、所要小片の全表面積が求めら

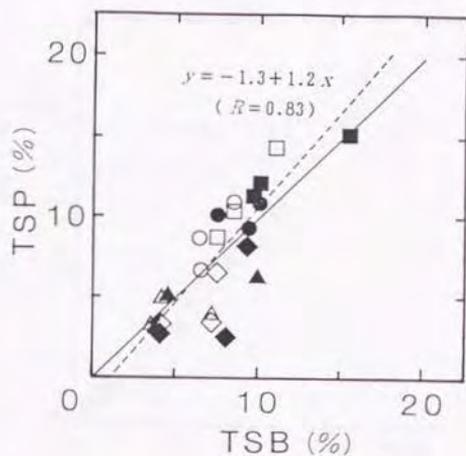


Fig. 3-7. Relationships between average thickness swelling of particles (*TSP*) and thickness swelling of board (*TSB*).

Legend :

	Ezomatsu	Hinoki	Buna A	Buna B
One-step process	○	□	△	◇
Two-step process	●	■	▲	◆

Notes : The solid line represents the relationship in the case of  $TSP = TSB$ .

The broken line represents the regression line.

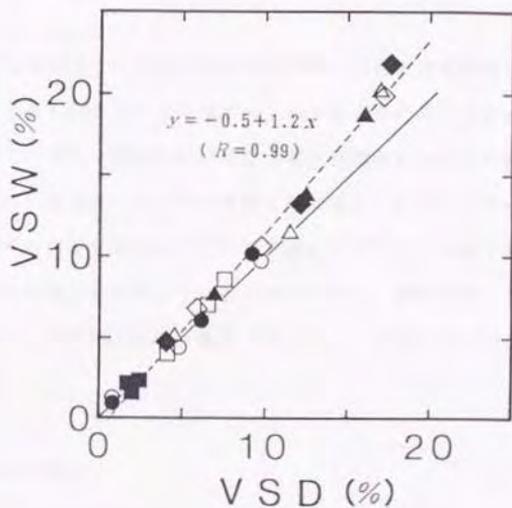


Fig. 3-8. Relationships between void-space rate under wet conditions (VSW) and that under dry conditions (VSD).

Legend :

	Ezomatsu	Hinoki	Buna A	Buna B
One-step process	○	□	△	◇
Two-step process	●	■	▲	◆

Notes : The solid line represents the relationship in the case of  $VSW = VSD$ .

The broken line represents the regression line.

れ、これと添加接着剤重量から単位面積当りの塗布量を算出した。含脂率を一定にしているから、ボード全体への塗布量は一定であり、比重および厚さの大きい小片は表面積の合計が小さくなるので、単位面積当りの接着剤塗布量は増加する。

ブナについて比較すると、ブナBの単位面積当りの接着剤塗布量はブナAの2倍程度多い。比重0.40のボードではボード厚さ膨潤率の差はほとんど認められず（Fig. 3-5）、また、比重0.60における厚さ膨潤率は塗布量の多いブナBが大きいことから、塗布量についての明確な差は認められない。さらに、吸湿前後の小片空隙率の大きな変化はブナの低圧縮ボードについて見られ、針葉樹ボードでは十分な接着力を保持していると考えられる。低圧縮ボードは平均圧縮率が小さいので、小片間の結合が充分でないため、厚さ膨潤が大きくなると推測される。

#### 3.3.4 厚さ膨潤率の推定

原料小片比重、圧縮比等の因子が、低比重ボードの厚さ膨潤に及ぼす影響を線形重回帰分析により検討した。Table 3-3にボードの厚さ膨潤率と各因子についての相関行列を示す。本分析では説明変数を選択する方法として、説明変数をすべて含んだモデルからスタートして変数を減少させる変数減少法<sup>9)</sup>を採用し、その結果、3変数モデルが選択された。第1、第2、第3説明変数にはそれぞれ圧縮比  $C_r$ 、ボードの全乾比重  $D_b$ 、小片の全乾比重  $D_p$  が選択され、ボードの厚さ膨潤率 ( $TSP$ ) の予測式は次のように示される。

$$TSP(\%) = -11.6 + 21.0C_r - 41.7D_b(\text{g/cm}^3) + 39.2D_p(\text{g/cm}^3) \quad (R^2=0.55)$$

ボードの厚さ膨潤率に関してその寄与率  $R^2$  は低いが、原料小片の比重、すなわち原料樹種の影響が大きいことが分かる。なお、同様にして小片の平均厚さ膨潤率 ( $TSP$ ) に関する重回帰式を求めると次のとおりである。

Table 3-2. The amount of resin applied per unit-area of particle.

Species	Amount of resin ( $\times 10^{-3} \text{g/cm}^2$ )
Ezomatsu	0.9
Hinoki	1.2
Buna A	1.5
Buna B	3.5

Table 3-3. Correlation matrix between *TSB* and its factors.

	<i>TSB</i>	<i>Db</i>	<i>Cr</i>	<i>Ca</i>	<i>Vs</i>	<i>Dp</i>	<i>Rc</i>
1 <i>TSB</i>	1.00						
2 <i>Db</i>	0.07	1.00					
3 <i>Cr</i>	0.60	0.56	1.00				
4 <i>Ca</i>	0.58	0.56	0.95	1.00			
5 <i>Vs</i>	-0.40	-0.72	-0.90	-0.87	1.00		
6 <i>Dp</i>	-0.59	-0.03	-0.82	-0.77	0.64	1.00	
7 <i>Rc</i>	-0.27	-0.10	-0.56	-0.61	0.43	0.70	1.00

Legend: *TSB*: Thickness swelling of board (%). *Db*: Board density ( $\text{g/cm}^3$ ). *Cr*: Compaction ratio. *Ca*: Average compression rate (%). *Vs*: Void space rate (%). *Dp*: Particle density ( $\text{g/cm}^3$ ). *Rc*: Amount of resin applied ( $\text{g/cm}^2$ ).

$$TSP(\%) = -0.5 + 12.2Cr - 11.0Db(g/cm^3) \quad (R^2=0.86)$$

小片の平均厚さ膨潤率に関しては圧縮比、ボードの全乾比重の2変数モデルで表すことができる。ボードの厚さ膨潤率の寄与率は小片の平均厚さ膨潤率と比較して小さいことから、ボードの厚さ膨潤には種々の因子が複雑に影響を及ぼしていることが推測される。また、本分析の結果からも、単位面積当りの接着剤塗布量の影響は認められず、 $1 \times 10^{-3}g/cm^2$ 程度の塗布量でも小片同士は十分に結合されていることが示唆された。

### 3.4 摘 要

寸法形状を規制した小片を用いて、1段圧縮法および2段階圧縮法により低比重ボードを製造し、ボードを形成する因子および熱圧方法が小片ならびにボードの吸湿厚さ膨潤に及ぼす影響を検討した。結果の概要は次の通りである。

1) 針葉樹ボードの厚さ方向の小片圧縮率分布は、圧縮方法によらず表層部の圧縮率は高く、中央層は相対的に低い傾向を示した。ブナについては表層部と中央層の圧縮率の顕著な差は現れなかった。小片の平均圧縮率は、針葉樹小片では2段階圧縮法により増加を示したが、ブナについては圧縮方法による差は認められなかった。

2) 小片の平均吸湿厚さ膨潤率は圧縮比の増加で直線的な増加を示し、その傾向は原料樹種によらないことが認められた。ボードの吸湿厚さ膨潤率とボード比重との関係は、高圧縮ボードでは比重依存性がみられたが、低圧縮ボードには認められなかった。ボードの厚さ膨潤と圧縮比との関係では、一部の低圧縮ボードの厚さ膨潤率は高い値を示したが、これらを除外すれば相関の高い直線関係が認められ、この増加の傾向は小片の平均厚さ膨潤率と同様に原料樹種に依存しない。

3) 吸湿後の小片空隙率は低圧縮ボードで大きな増加を示し、ボード比重の

増加と共に吸湿前後の空隙率の変化は少なくなった。低圧縮ボードは製造時の圧縮圧が低いので、小片間の密着性が充分でなく、小片の厚さ膨潤による結合部の破壊に抵抗できないためにボード厚さ膨潤率が大きくなると考えられ、厚さ膨潤を低く抑えるには、圧縮比の最適値が存在することが推測される。

4) ボードの吸湿厚さ膨潤に影響を及ぼす因子を線形重回帰分析により推定した結果、ボードの厚さ膨潤率は圧縮比、ボード比重、ならびに原料小片比重の3つの説明変数によって予測が可能である。また、接着剤塗布量の影響は認められなかった。

#### 文 献

- 1) 川井秀一、須田久美、中路 誠、佐々木光：木材学会誌、32(11), 876-882(1986).
- 2) 川井秀一、須田久美、佐々木光：同上、33(5), 385-392(1987).
- 3) 関野 登：同上、33(6), 464-471(1987).
- 4) 須田久美、川井秀一、佐々木光：同上、33(5), 376-384(1987).
- 5) 元木英生：木材工業、35(4), 3-7(1980).
- 6) 元木英生、鷺岡 雅、田近克司、坂井正孝：木材学会誌、30(12), 995-1002(1984).
- 7) 末松充彦、平井信之、齋藤藤市：同上、26(9), 581-586(1980).
- 8) 有馬孝礼、杉山真司、丸山則義、早村俊二：静岡大学演習林報 No.11, 89-96(1987).
- 9) 田中 豊、垂水共之、臨本和昌編：“パソコン統計解析ハンドブック”、共立出版、1984. p.16

## 第4章 2段階圧縮法によるボードの材質

### 4.1 緒言

パーティクルボードの製造に採用される熱圧方法には2種類あり、それらは従来より行われている1段階圧縮法およびイソシアネート系樹脂接着剤を用いた低比重ボードの製造を目的として近年提案された2段階圧縮法である。後者は熱圧工程の初期圧縮で目標ボード厚さ以下までマットを圧縮し、一定時間保持することにより表層の高比重化を促進する。その後、一時解圧して2次圧縮で厚さを規制する方法である。川井ら<sup>1)</sup>はこの方法について、初期圧縮圧力と圧縮時間がボード材質に与える影響を検討している。

2段階圧縮法では熱圧途中で解圧することが特徴の一つである。この一時解圧する方法は、従来の平板プレスを複数用いてボードを連続的に製造する可能性の検討には興味深い方法であると思われる。小片同士を接着剤で強固に結合するには十分な圧縮圧力と熱量が必要であるが、一時解圧による熱量の不足がボードの材質に及ぼす影響についての報告は見られない。本章では、2段階圧縮法の熱圧条件についての基礎資料を得る目的で、初期圧縮時間および解圧時間がボードの性能に与える影響を調べた。

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 低比重ボードの製造

小片原料にはヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl., 厚さ0.58mm、気乾(含水率10%)比重0.41) およびブナ (*Fagus crenata* Bl., 0.54mm、0.66) 単板を用いた。これらを繊維方向に25mm長さに鋸断した後、ハンマーミルで破砕し、JIS-2000 $\mu$ メッシュ以上の小片を使用した。接着剤を塗布する前の小片

含水率は約10%に調整した。接着剤はイソシアネート系樹脂接着剤（群栄化学工業株式会社 UL-4811）を用い、全乾木材重量に対して固形分10%の割合で噴霧塗布した。

熱圧にはテンシロン試験機（株式会社オリエンテック、容量10tonf）に取り付けた熱板を用い、クロスヘッドの移動速度を20mm/minとして2段階圧縮法によってボードを製造した。厚さの規制はダイヤルゲージの目盛りが所定の位置を示したとき、クロスヘッドの動きを停止する方法で行い、ディスタンスバーは用いてない。

初期圧縮時の目標ボード厚さに対するマットの圧縮量は10%（1.5mm）とし、13.5mmのマット厚さで一定時間保持した。熱圧温度は160℃であり、熱圧時間は初期圧縮時間、一時解圧時間および2次圧縮時間の合計を300秒とした。熱圧時間の組合せをTable 4-1に示した。これらの組合せは9条件であるが、マットが圧縮圧を受けている実際の時間は210, 240, 270秒の3条件となる。

製板ボード寸法は150mm×150mm、厚さ15mmであり、圧縮比（ボード比重/原料小片比重）0.80のボードを1条件6枚製造した。なお、比較のために熱圧時間300秒の1段階圧縮法によるボードも製造した。

上記のように熱圧時間の条件が異なるので、熱圧中のボード中央部の温度を測定した。ボードの厚さ方向および長さ方向の中央部に熱電対（銅-コンスタンタン、 $\phi=0.3\text{mm}$ ）を挿入し、マットが目標厚さに達したときから5秒間隔で測定を開始した。この測定は各熱圧条件につき1枚とした。この時のマット初期含水率は平均で9.4%であった。

#### 4.2.2 材質試験

成板後20℃、55%RH（平衡含水率10%）の恒温恒湿室内で4週間以上調湿した後、曲げおよびはく離強さ試験を行い、さらに厚さ方向の比重分布を求めた。曲げ試験は幅50mm、長さ125mmの表面未研削ボードの両端にラワン材（曲げヤ

Table 4-1. Condition of hot-pressing time (sec).

$T_1^{a)}$	$T_2^{b)}$	$T_3^{c)}$	$T_1^{a)}$	$T_2^{b)}$	$T_3^{c)}$	$T_1^{a)}$	$T_2^{b)}$	$T_3^{c)}$	$T_1 + T_3$
	30	240		30	210		30	180	270
30	60	210	60	60	180	90	60	150	240
	90	180		90	150		90	120	210

a) Pressing time in the first step.

b) Temporary release time.

c) Pressing time in the second step.

ング係数： $145 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ) の継ぎ手を接着し、荷重速度  $5 \text{ mm/min}$ 、スパン  $375 \text{ mm}$  の中央集中荷重で行った。試験の際に引張り応力を受ける側は、ボード製造時に下部熱板に接していた面とした。また、はく離強さ試験は JIS A 5908 に準じて行った。試験片数はそれぞれ 1 条件 5 個である。

ボード厚さ方向の比重分布は、 $50 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$  の試験片表面から中央部まで約  $0.5 \text{ mm}$  切削毎に除去した体積および重量を測定することによって求めた。この試験片の切削はボード製造時に下部熱板に接していた面より行った。試験片数は 1 条件 3 個とした。

### 4.3 結果と考察

#### 4.3.1 熱圧時の圧縮圧力と内部温度

熱板を降下させるとマット内に圧力がかかり、マットが目標厚さに達したとき圧縮圧力は最大値を示す。本実験ではディスタンスパーを用いていないので、熱圧中のマットにかかる荷重はロードセルを介して記録された。Fig. 4-1 は初期圧縮時の最大圧縮圧 (熱圧時間 = 0) 到達後の初期圧縮圧および 2 次圧縮時の圧縮圧の経時変化を解压時間が 30 秒の場合について示している。初期圧縮圧の大きさは、初期圧縮時間が異なっても小片樹種ごとにほぼ等しいので、ここでは 3 条件の平均値 (ヒノキ： $10.4 \text{ kgf/cm}^2$ 、ブナ： $25.0 \text{ kgf/cm}^2$ ) で表している。2 段階圧縮法では目標ボード厚さよりも  $1.5 \text{ mm}$  締め込んでいるため、1 段圧縮法と比較してヒノキでは 1.28 倍、ブナでは 1.45 倍高い圧縮圧を必要とした。なお、1 段圧縮による最大圧縮圧はヒノキでは  $8.1 \text{ kgf/cm}^2$ 、ブナは  $17.2 \text{ kgf/cm}^2$  であった。

所定時間圧縮した後一時解压し、次に目標ボード厚さ  $15 \text{ mm}$  を得るための 2 次圧縮を行った。ここでは解压時間が 30 秒の場合について示したが、熱板を解放していた時間は 2 次圧縮圧の大きさに影響を与えなかった。初期圧縮時間が

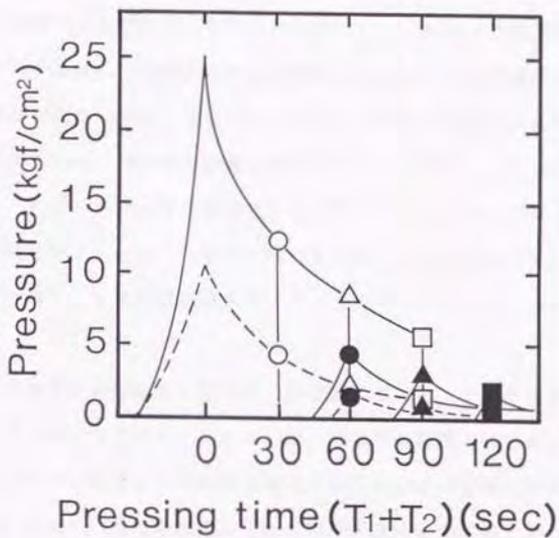


Fig. 4-1. Measured pressure in the first step, the temporary release, and the second step in the case of  $T_2 = 30$ .

Legend :  $T_1 = 30 \quad 60 \quad 90$

Pressure of the temporary release. ○ △ □

Pressure in the second step. ● ▲ ■

Notes :  $T_1$  : Pressing time in the first step (sec).

$T_2$  : Temporary release time (sec).

The solid lines and dashed lines represent buna board and hinoki board, respectively.

長くなるほど2次圧縮圧は減少する傾向が認められる。これは時間の経過にともなって小片の圧縮セットおよび接着剤の硬化が進み、一時解圧したときのマットのスプリングバックが減少するためである。

2次圧縮圧と解圧時の圧力の比を求めると、初期圧縮時間が30秒および60秒では小片樹種によらず0.36~0.37でほぼ等しいが、90秒まで増加するとブナでは0.31、ヒノキは0.08となりこの比は小さくなった。これは後述のようにボード内部温度は既に90℃以上であったことから、小片の可塑性がより進んでいたためと考えられる。90秒間の初期圧縮を行ったヒノキボードの2次圧縮圧は非常に低く、解圧している間に生じるマットのスプリングバックは1.5mm程度であり、初期圧縮でマットの圧密化は既に終了していると思われる。なお、熱圧終了時に残存していた内部応力は0（ヒノキ）~0.4（ブナ） $\text{kgf/cm}^2$ であった。

2段階圧縮法は熱圧途中で熱板を一時解放するため、ボード内部の温度上昇に影響を与えらると思われる。Fig. 4-2は、初期圧縮時間を30秒としてブナボードを製造したときのマット中央部の温度上昇経過に及ぼす解圧時間の影響を示している。図より、熱圧を開始してから解圧するまでの温度上昇の傾きと2次圧縮を開始するまで（解圧中）のそれとは異なっており、解圧時間が長くなるにつれてこの曲線の傾きは徐々に低下した。これは解圧した時にボード内に蓄積された熱が大気中に拡散し、熱は下部熱板からのみ供給されるので、中央部に伝達される熱量の不足が影響するためである。

初期圧縮時間が60秒のときはFig. 4-2と同様の傾向を示したが、90秒まで増加するとマット内部の温度はそのとき既に約90℃まで上昇しており、曲線の傾きに解圧の影響は認められなかった。

2段階圧縮法は初期圧縮時間の増加に伴い、1段階圧縮法と比較して温度上昇の傾きは大きくなった。2段階圧縮では、後述するように表層部小片の圧密化が促進されており、比重の増加にともなう熱伝導の増大ならびに初期圧縮の際

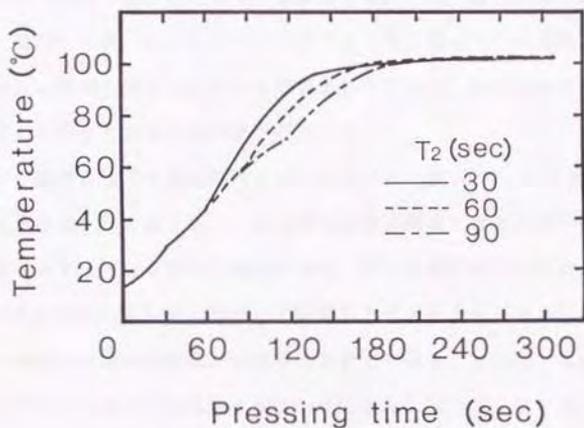


Fig. 4-2. Measured temperature of core layers of buna mats during hot-pressing in the case of  $T_1 = 30$ .

Legend :  $T_1$  : Pressing time in the first step (sec),  
 $T_2$  : Temporary release time (sec).

に1段圧縮法よりも熱の伝達距離が短いことが、温度上昇の速度に影響を与えていると推測される。なお、ヒノキについても同様の結果が得られた。

熱圧中のマット中央部温度が100℃に達するのに要した時間と解圧時間の関係をFig. 4-3に示した。図より、初期圧縮時間の増加によって中央部が100℃に達する時間は短くなったが、解圧時間の増加とともにこの時間は長くなった。初期圧縮時間が30秒から90秒まで増加したとき100℃まで上昇する時間の差はブナは35~40秒、ヒノキでは30~40秒である。一方、解圧時間によるその差はブナでは25~30秒、ヒノキは25~35秒であった。従って、本実験の条件ではマット中央の温度上昇により大きな影響を及ぼすのは、初期圧縮時間あるいは解圧時間のどちらであるかは明確でなかった。

1段圧縮法では、熱圧を開始してからヒノキでは145秒、ブナは160秒後にマット中央は100℃に達した。一般に熱伝導率は密度にほぼ比例する。パーティクルボードではマット内部の熱の伝達は、主に表層付近の小片に含まれる水分が水蒸気となり、中央部に向かって拡散することによると考えられる。従って、マット内部の空隙が水蒸気の平均自由行程より大きくなれば、水蒸気の拡散は制約されなくなるが、本実験で製造した圧縮比0.80のボードでは、比重が低い（マット内部の空隙が多い）ものほど水蒸気の移動する速度が大きいと思われる。ボードの内部温度が最大値を示すのは、圧縮を開始してから310~330秒（103~110℃）であった。

#### 4.3.2 ボードの材質

ボードの層状構造を厚さ方向の比重分布測定によって調べた。本実験の条件では、表面から約1.4~1.7mm付近に比重のピークが現れており、圧縮比が小さくても明瞭な層構造が認められた。このピーク比重前後の3点の平均値を最大比重とし、また中央部の3点の比重を最小比重として、これらの比（最大比重/最小比重）をTable 4-2に示した。表より、2段階圧縮法で製造したものは、

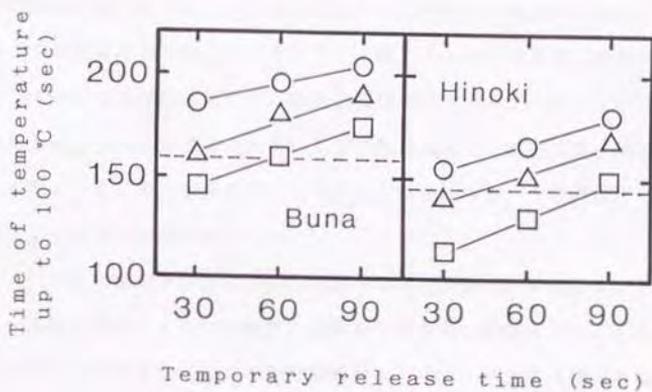


Fig. 4-3. Effect of temporary release time on the times of temperature up to 100 °C at the center of the particle mats.  
 Legend : Pressing time of the first step, ○ : 30, △ : 60, □ : 90 (sec).  
 Note : The dashed line represents one-step method.

Table 4-2. Ratio of maximum and minimum specific gravity in the board.

$\gamma_1^{a)}$	Buna	Hinoki
30	1.28	1.38
60	1.33	1.49
90	1.38	1.54
300 <sup>b)</sup>	1.23	1.23

<sup>a)</sup> Pressing time in the first step (sec).

<sup>b)</sup> One-step hot-pressing.

初期圧縮時間が長くなるにつれて表層部小片の塑性変形が増大するため、この比は増加する傾向を示した。ヒノキはブナと較べてこの比は初期圧縮時間の増加でより大きくなる傾向を示した。低比重樹種のヒノキはブナよりも横圧縮比例限度応力が小さいため圧縮による全体の変形が増大し、熱圧初期の温度傾斜により表層小片の圧密化が促進されると考えられる。なお、1段圧縮ボードでは樹種による差は認められなかった。

Fig. 4-4ははく離強さに及ぼす初期圧縮時間および解圧時間の影響を示している。2段階圧縮ボードのはく離強さは初期圧縮時間の影響を受け、これが30秒のとき最も大きな値を示し、この時間の増加に伴って減少する傾向が認められる。はく離強さはボード中央部比重の影響を受けるので、ボード内部の比重傾斜が小さいものほど小片同士の密着性は高いと考えられる。初期圧縮時間の増加によるはく離強さの減少は、ブナボードでは $2.0\sim 2.5\text{kgf/cm}^2$ 、ヒノキボードは $1.0\text{kgf/cm}^2$ であった。

2段階圧縮法では、解圧時間の増加による熱圧時間の減少は中央部の温度上昇を遅らせたが、はく離強さには顕著な差を与えなかった。初期圧縮時間が同じであれば、比重0.53のブナボードでは解圧時間が30秒から90秒まで60秒間長くなると、はく離強さはおよそ $1\text{kgf/cm}^2$ の減少を示した。一方、ヒノキについてはほとんど変化は認められない。これは比重0.33のヒノキボードは木材夾質量が少なく、さらに中央部の比重低下による小片相互の密着不足による影響が大きいため、はく離強さに解圧時間の影響が現れなかったと推測される。

初期圧縮時間30秒、2次圧縮時間180秒であればブナボードのはく離強さは $5\text{kgf/cm}^2$ を示すことから、90秒間の解圧を行っても接着剤の硬化に必要な熱量は不足していないと考えられる。

熱圧条件の相違によるはく離強さの値は、ブナボードは2.4倍、ヒノキでは2.2倍の差が認められた。

比重傾斜が小さい1段圧縮ボードは2段階圧縮ボードよりも高いはく離強さ

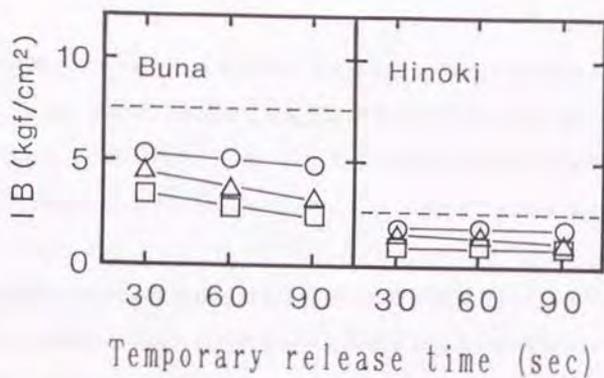


Fig. 4-4. Effect of pressing times in the first step and temporary release time on internal-bond strength (*IB*) of boards.  
 Legend : Pressing time of the first step,  $\circ$  : 30,  $\triangle$  : 60,  $\square$  : 90 (sec).  
 Note : The dashed line represents one-step method.

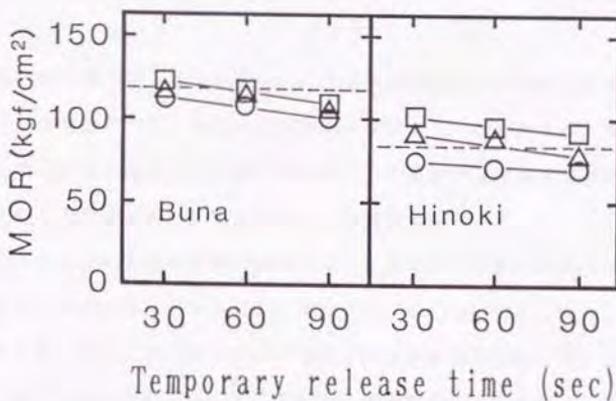


Fig. 4-5. Effect of pressing times in the first step and temporary release time on modulus of rupture (*MOR*) of boards.  
 Legend : Pressing time of the first step,  $\circ$  : 30,  $\triangle$  : 60,  $\square$  : 90 (sec).  
 Note : The dashed line represents one-step method.

を示し、ブナボードについては1段階圧縮法で製造したものはJIS-200タイプをクリアした。また、2段階圧縮法では初期圧縮時間が60秒以下であれば200タイプに合格するものが得られた。一方、ヒノキでは初期圧縮時間が30秒のものは100タイプに相当し、1段階圧縮ボードについては150タイプに相当することが分かる。

曲げ破壊係数に及ぼす初期圧縮時間および解圧時間の関係をFig. 4-5に示した。図よりはく難強さと同様に曲げ破壊係数は初期圧縮時間の影響を受け、この時間が30秒から90秒まで増加すると、ブナボードでは約 $10\text{kgf/cm}^2$ 、ヒノキボードでは約 $30\text{kgf/cm}^2$ の増加が認められた。初期圧縮時間が90秒のとき最も大きな値を示し、これは表層部比重の増大すなわち比重傾斜に対応している。川井ら<sup>1)</sup>は、比重傾斜の大きいボードは曲げ破壊よりも水平せん断による破壊が先に生じるので、曲げ性能の向上は認められないと報告している。本実験では、せん断破壊はヒノキボードで一部認められたが、ブナボードでは観察されなかった。

初期圧縮時間の違いによるブナボードの曲げ破壊係数の差は小さい。曲げ試験ではボード表層部の材質、特に比重の影響を受けると考えられるが、本実験で製造したボードの圧縮比は比較的小さいので、表層部の比重増加が曲げ破壊係数に大きな差を生じるまでには至らなかったと考えられる。

解圧時間の増加に伴う熱圧時間の減少により、曲げ破壊係数は漸減する傾向を示し、ブナ、ヒノキボードともにその差は $7\sim 13\text{kgf/cm}^2$ であった。これはせん断破壊を生じないとすれば、ボード中央部の小片結合力を表しているはく難強さが $1\text{kgf/cm}^2$ の減少を示したことから、表層部の小片結合力についても解圧時間の影響をある程度受けていると考えられる。

熱圧条件の相違による曲げ破壊係数の値は、ブナボードは1.2倍、ヒノキでは1.4倍の差が認められた。

ブナおよびヒノキボードの一部はJIS-100タイプに合格する曲げ破壊係数が

得られたが、JIS-200タイプの曲げ性能を得るには圧縮比を1.0程度にまで高める必要がある<sup>2,3)</sup>。

以上の結果から、本実験の熱圧時間条件では、2段階圧縮法によって製造した低比重ボードの機械的性質は主に初期圧縮時間により決定され、解圧時間の影響は比較的小さかった。初期圧縮を30秒以上行っていれば、90秒以内の熱板解放によるボード材質の低下は少なく、2段階圧縮法を利用した連続的なボード製造の可能性が示唆された。

本実験では、初期圧縮時の締め込み量はボード厚さの10%であったが、ボード内の比重傾斜が機械的性質に大きく影響するので、この締め込み量についても検討が必要であろう。

#### 4.4 摘要

2段階圧縮法の熱圧条件についての基礎資料を得る目的で、初期圧縮時間および解圧時間がボードの機械的性質に及ぼす影響を調べた。得られた結果の概要は以下の通りである。

1) 初期圧縮時間は低比重ボードの機械的性質に影響を与え、この時間が長いものほど高い曲げ破壊係数を示したが、はく離強さは減少する傾向が認められた。これらはボード内部の比重傾斜によるものであった。

2) 解圧時間の増加によるはく離強さおよび曲げ破壊係数の低下は小さかった。初期圧縮時間30秒、2次圧縮時間180秒であれば、接着剤の硬化に必要な熱量は充分であることが示唆された。

熱圧条件の違いによりはく離強さは、ブナでは2.4倍、ヒノキは2.2倍の差が認められ、曲げ破壊係数についてはブナは1.2倍、ヒノキでは1.4倍であった。

3) 初期圧縮時間が30秒以上であれば、90秒以内の熱板解放によるボード材

質の低下は少なく、2段階圧縮法を利用した連続的なボード製造の可能性が示唆された。

#### 文 献

- 1) Kawai, S.; Sasaki, H.: *Mokuzai Gakkaishi*, 32(5), 324-330(1986).
- 2) 関野 登: 木材学会誌、33(6), 464-471(1987).
- 3) 関野 登: 同上、33(12), 957-962(1987).

## 第5章 低比重ボードの機械的性質

### 5.1 緒言

従来、パーティクルボードは家具用材料として発展してきたが、最近では建築構造材料としての使用が増加している。パーティクルボードを構造用部材として使用する場合、優れた機械的性能と寸法安定性が問題となる。ボードに応力が加わると、接着剤が小片に荷重を伝え分散させる媒体として働き、ボードの強さは小片の強さ、小片結合力、接着剤のせん断強さなどに依存する。一般に、曲げ試験では引張り最外層から破壊が進む場合が多く、この最外層の小片結合力が曲げ強さの支配因子になると考えられる。

ボードはその製造過程で熱圧縮されるので、小片形状が同一の単層構造であっても、ボードの厚さ方向に比重傾斜を生じ、表層部の比重は高くなることは第2～4章で既に述べてきた。ボードの曲げ性能は必ずしも表層部のみに依存するわけではないが、内部のせん断破壊を生じない状態では表面強度の果たす役割は大きいと考えられる。

JIS-A-5908にはパーティクルボードの規格が定めてあり、この中で機械的性質としてはく離強さおよび曲げ性能が規定されている。低比重ボードの構造材料的な利用を図るには、この機械的性質ならびに耐久性を明かにする必要がある。

本章では、イソシアネート系樹脂接着剤および従来より耐水性に定評のあるフェノール系樹脂接着剤を用いた低比重ボードの小片結合力ならびに曲げ性能について原料小片樹種、接着剤の種類による影響を検討した。

また、ボードの機械的性能と耐久性には小片結合力の大きさとその低下が大きな問題となるので、減圧吸水・乾燥の劣化促進処理を行い、機械的性質の低下について考察した。

## 5.2 はく離強さおよびせん断強さ

一般にボードの小片結合力としては、せん断強さとはく離強さの2つが考えられる。パーティクルボードではJIS-A-5908によって、はく離強さ試験の規準が設けられており、この方法によればボード厚さ方向の最弱層の接着力を求めることができる。

ボードの厚さ方向の比重分布は材質に顕著な影響を与え、表層比重を大きくすると曲げ性能を向上させるほか、表面硬さや耐摩耗性を高める。ボードを構造用途に使用する場合、表層部分が果たす役割は大きく、表層部の小片結合力も重要な要因であると考えられる。また、ボードの耐久性を考える場合、原料小片の材質変化も多少あろうが、小片間の結合力変化は最も重要であると思われる。

そこで本節では、低比重ボードの小片結合力をはく離強さならびにせん断強さ試験により評価を行った。さらにボードの耐久性を調べるひとつの方法として、劣化促進処理後の小片結合力の低下について考察した。

また、ボードのはく離強さに影響を及ぼす因子を線形重回帰分析により推定し、その予測式を求めた。

## 5.3 実験方法

### 5.3.1 低比重ボードの製造

供試小片の樹種にはヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl.)およびブナ(*Fagus crenata* Bl.)を用いた。これらの単板(ヒノキ: 気乾比重0.38, 厚さ0.53mm、ブナ: 気乾比重0.59, 厚さ0.57mm)を繊維方向に25mm長さに切断した後、ハンマーミルで破砕し、JIS-2000 $\mu$ メッシュ以上の小片をボード製造に使用した。接着剤にはフェノール系樹脂接着剤(日本化成㈱ #164,これをP

Fと略記する)ならびにイソシアネート系樹脂接着剤(群栄化学工業株式会社 UL-4800, これをICと略記する)を用い、全乾木材重量に対して固形分10%の割合で噴霧塗付した。なおICについては樹脂に対して重量比20%のアセトンを加えて粘度を調整した。

手撒きによるフォーミングの後、テンシロン試験機(株式会社オリエンテック、容量10tonf)に取り付けた熱板を用い、通常行われている1段圧縮法により熱圧成形した。ボード寸法は150mm×150mm、厚さ15mmであり、目標気乾比重0.30~0.60(ブナボードでは0.40~0.60)で1条件12枚製造した。熱圧温度は160℃とし、熱圧時間はPFでは10分間、ICについては5分間である。なお、接着剤塗付前の目標小片含水率はPFでは2%、ICについては10%に調整した。

はく離強さに影響を及ぼす因子の推定には、第2章、第1節で製造したボードを用いた。供試樹種にはブナ、ヒノキに加えてエゾマツ(*Pinus jezoensis* Carr.)を用い、小片は長さ25mm、幅10mmに形状を規制した。用いた接着剤はイソシアネート系樹脂であり、小片含水率、接着剤塗布量、ボード寸法ならびに熱圧条件は上記と同様である。

### 5.3.2 試験方法

成板後20℃、55%RH(平衡含水率10%)の恒温恒湿室内で4週間調湿した試験片について、以下に示す試験を行った。

#### (1)常態はく離強さおよびせん断強さ

はく離強さの測定はJIS-A-5908に準じて行った。試験片数は1条件6個である。表層部と中央部のせん断強さは、せん断面積25mm×25mmのイス型せん断試験片により測定した。表層部のせん断試験では、表層から約1.5mm深さの切り欠きをいれ、加圧面の圧縮破壊を防ぐために、10mm厚さのマカンバ材を補強材として接着した。試験片数は1条件それぞれ4個である。なお、表層部については、製造時に下部熱板に接していた側を対象とした。

## (2) 吸水処理後のはく離強さおよびせん断強さ

24時間減圧吸水処理を行った試験片(幅50mm、長さ125mm)を40°Cで48時間乾燥し、これを恒温恒湿室内で5週間調湿した。これらの試験片について常態時と同様に、はく離強さ(第2章、第2節で実験を行った表層部を含む)およびせん断強さ試験を行い、処理後の残存強度を調べた。

## 5.4 結果と考察

### 5.4.1 常態時のはく離強さおよびせん断強さ

ボード厚さ方向の比重分布は材質に顕著な影響を与え、表層比重の増加はボードの曲げ強さを増加させる。その反面、中央部比重の低下を招き、ボード中央層の小片結合力を低下させる恐れがある。

はく離強さおよびせん断強さとボード比重との関係をFig. 5-1に示す。図より、比重の増加とともに、はく離強さおよびせん断強さは直線的な増加の傾向を示した。これはボード比重の増加にともない小片間の接触面積が増大して結合力が向上するためと考えられる。その増加の傾向は小片樹種および接着剤の種類により4つの直線群が得られた。I Cボードの増加の傾きはP Fボードよりも大きく、比重の増加とともにその差は大きくなり、I Cの高い接着力が現れている。

また、ブナボードの小片結合力はヒノキボードと比較してその増加の傾きが大きく、より低比重側ではヒノキが優っているのに対して、比重0.60前後でこの値は逆転した。これは比重の増加により小片間の密着性が高まり、小片同士の間接結合が充分であれば、小片結合力は原料木材の強度に近づくためと推測される。

なお、本実験で採用した熱圧温度条件はP Fに対しては比較的低いものであったが、ボード比重0.50であればブナおよびヒノキP Fボードのはく離強さは

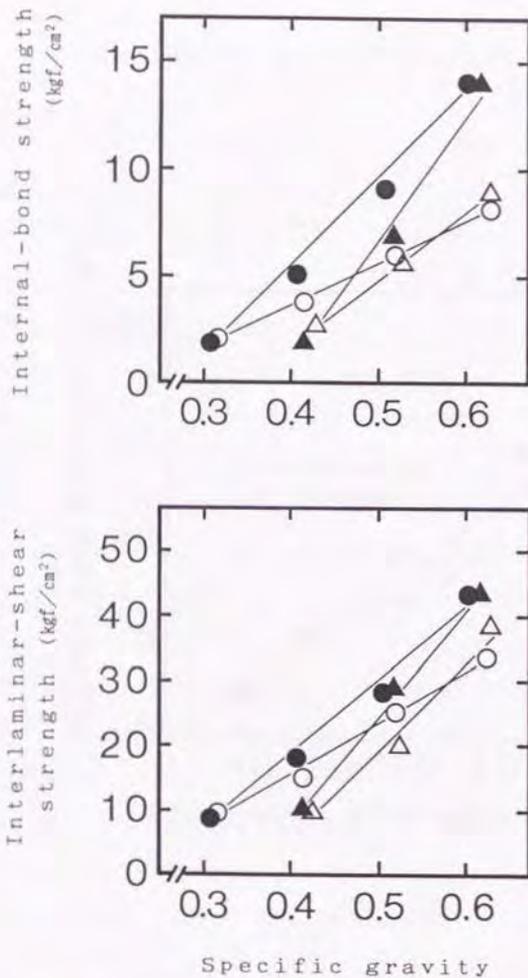


Fig. 5-1. Effect of board specific gravity ( $SG$ ) on internal-bond strength ( $IB$ ) and interlaminar-shear strength ( $\tau$ ).

Legend : ●: Hinoki IC, ○: Hinoki PF, ▲: Buna IC, △: Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.

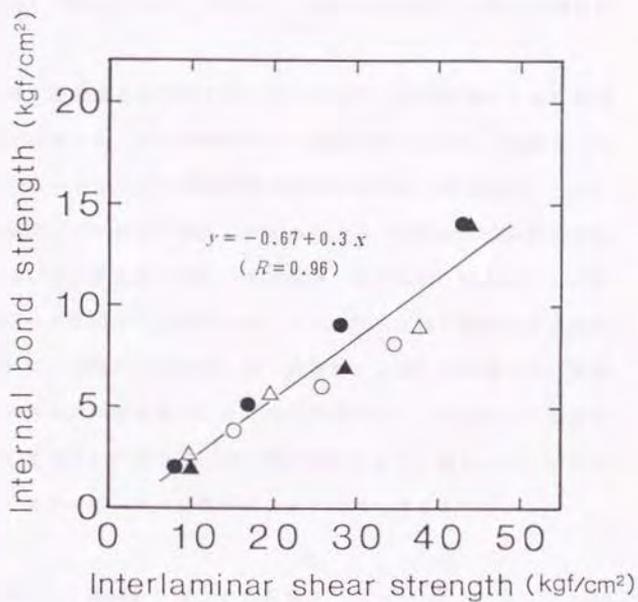


Fig. 5-2. Relationships between internal-bond strength and interlaminar-shear strength in board center cores.  
 Legend : ○: Hinoki PF, ●: Hinoki IC, △: Buna PF, ▲: Buna IC.  
*R*: Correlation coefficient.  
 Note : The solid lines represent the regression line.

5 kgf/cm<sup>2</sup>を上回り、PFによる低比重ボードの製造の可能性を示すものであろう。

構造用パーティクルボードでは2 kgf/cm<sup>2</sup>以上のはく離強さが推奨されている。はく離強さ2 kgf/cm<sup>2</sup>を得る圧縮比の下限値を求めると、ブナについては0.70、ヒノキでは0.80程度であり、川井ら<sup>3,2)</sup>ならびに関野<sup>3)</sup>の報告と同様の結果が得られた。

はく離強さとせん断強さとの関係をFig. 5-2に示す。はく離強さとせん断強さには直線関係が認められ、その相関は高い(相関係数 $R=0.96$ )。斎藤ら<sup>3)</sup>は、市販パーティクルボードについて各種強度値間の比を求め、せん断強さとはく離強さとの強度比は3.89であると報告している。また、McNatt<sup>5)</sup>の実験結果では3.30が得られている。本実験で用いた小片樹種、小片形状、接着剤およびボード比重などのボード製造条件は異なるが、せん断強さ/はく離強さを求めると、中央層では3.83、表層部(第2章、第2節参照)では3.45が得られ、斎藤およびMcNattの報告と近い値となった。これらの結果から、小片結合力を表すせん断強さとはく離強さとの間には、ある種の関連があると推測され、この強度比の値はパーティクルボードの材質特性を示すものと考えられる。

#### 5.4.2 吸水処理後のはく離強さおよびせん断強さ

パーティクルボードの厚さ回復は、熱圧工程で受けた木材小片の圧縮変形が、水分の浸入によって平衡状態を崩して元に戻り、さらに加水分解等による劣化およびこれにともなう結合点の切断の総計として現れると考えられる。吸水処理を行った試験片を乾燥後、恒温恒湿室内で5週間調湿した。このときの試験片厚さと吸水前の厚さから得られる厚さ方向の不可逆的な膨潤、いわゆるスプリングバックとボード比重との関係をFig. 5-3に示す。図より、スプリングバックは比重と直線関係があり、比重の増加で増大する。この増加の傾向はボードの原料樹種および接着剤の影響を受け、原料比重が小さく小片圧縮量の大き

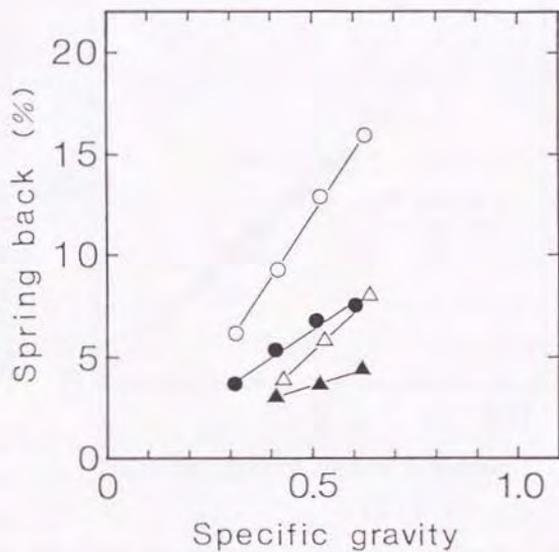


Fig. 5-3. Relationships between spring back and board specific gravity.  
 Legend : ○: Hinoki PF, ●: Hinoki IC, △: Buna PF, ▲: Buna IC.

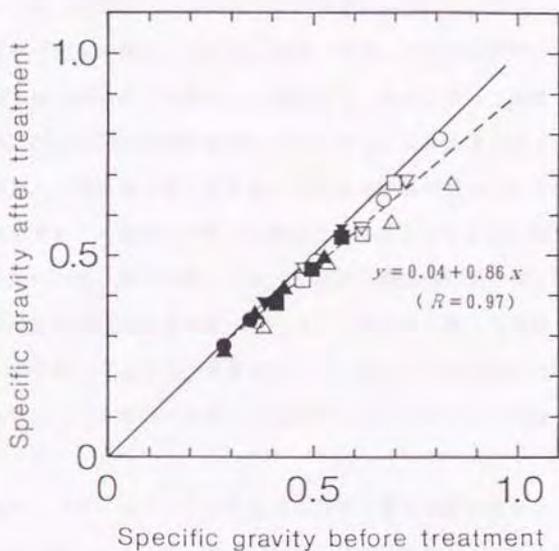


Fig. 5-4. Effects of vacuum-water-soaking-drying treatments on the changes of board specific gravities.

Legend :

	Face layers	Center cores
Hinoki IC	○	●
Hinoki PF	△	▲
Buna IC	□	■
Buna PF	▽	▼

$R$ : Correlation coefficient.

Notes : The solid line represents the relationships in the case of no difference in treatment. The broken line represents the regression line.

いヒノキボードの厚さ回復はブナのそれより大きく、また、常態における小片結合力が優るICボードは、PFボードよりも小さな厚さ回復を示した。なお、このときの含水率は9.6%であった。

吸水処理を行う前（常態時）の低比重ボードの層状構造を、ボードの厚さ方向における比重分布により検討した結果、表層・内層の小片形状が同一の単層ボードを従来の1段圧縮法により製造した場合でも、熱圧によって明瞭な層状化が認められた。Fig. 5-4は吸水処理後のボード厚さ方向の比重分布を測定し、得られた表層部および中央層の最大比重ならびに最小比重付近の3~4個のプロットの平均値を求め、常態時のそれとの関係を示したものである。図中の実線は処理前後で変化が無い場合を表しており、破線は測定値の回帰式を表している。表層部の比重低下は中央層に較べて大きく、実線から離れる傾向を示した。これは第3章で述べたように、表層部の小片の圧縮率は中央層と比較して高いため、水分の浸入による厚さ回復が表層部で大きくなることに起因している。

常態時（含水率8.7%）のボード平均比重に対する最大比重の割合は、ブナボードでは1.18~1.22、ヒノキボードでは1.28~1.52であった。処理後のそれらはブナボードで1.12~1.21、ヒノキボードでは1.17~1.37であった。

比重低下の傾向は高い相関（ $R=0.97$ ）の回帰直線が得られ、小片樹種および接着剤の種類に無関係にひとつの式で表された。また、ボード全体の比重変化から得られた回帰直線は $y=0.03+0.89x$ （ $R=0.99$ ）であり、表層部および中央層についての回帰式とほぼ一致する結果となった。このことから、水分の浸入によるボードの比重低下は、表層部と中央層の比重低下の平均として現れ、特に表層部の影響を受けると考えられる。

水分の侵入に伴う小片結合力の低下は、ボードを構造用途に使用する場合無視できない。処理前後における表層部、中央層のせん断強さの変化について示したものがFig. 5-5である。図中の実線は処理前後で変化が無い場合を表し、

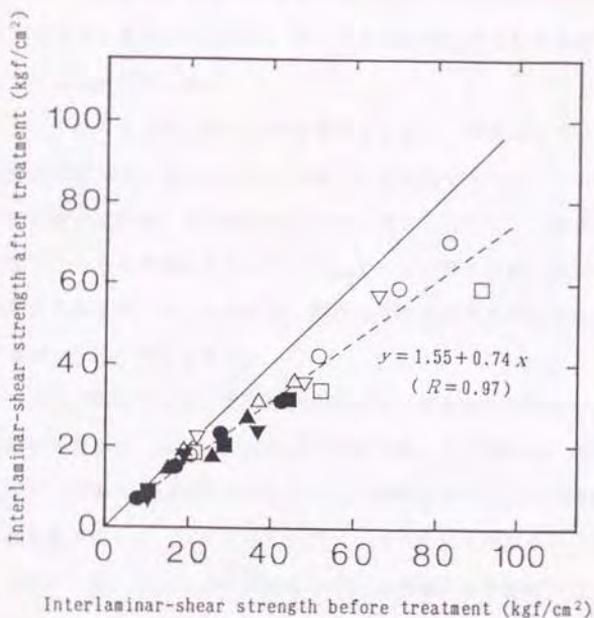


Fig. 5-5. Relationships between interlaminar-shear strength after treatments and those before treatments.

Legend :	Face layers	Center cores
Hinoki IC	○	●
Hinoki PF	△	▲
Buna IC	□	■
Buna PF	▽	▼

$R$ : Correlation coefficient.

Notes : The solid line represents the relationships in the case of no difference in treatment. The broken line represents the regression line.

破線は測定値の回帰直線である。ボード比重が低い場合、その常態せん断強さは低い値を示すが、その反面、処理による変化は小さい。これは低比重化により内部応力が低減されるためと考えられ、ボード比重の増加につれて処理による変化は大きくなる傾向を示した。

ヒノキPFボードの厚さ回復は最も大きな値を示したが、表層部ならびに中央層のせん断強さの低下は、他のボードと比較して同程度であった。この結果から、比重0.60程度の低比重（低圧縮比）ボードでは、小片のセット回復が厚さ回復の支配因子であると推察される。従って、ボードの厚さ回復に影響を及ぼす結合点の破壊の割合は少ないと思われ、厚さ回復の大きさが直接的に小片結合力の低下を表さないと考えられる。

低比重ボードのせん断強さの低下は、小片樹種および接着剤の種類ならびに表層部、中央層の区別なく、ひとつの回帰式で表された。この傾向は、はく離強度についても同様であり、処理前後におけるはく離強度の変化から回帰直線式および相関係数を求めると、 $y = 0.94 + 0.75x$  ( $R = 0.97$ ) が得られ、せん断強度の結果とほぼ一致した。これらの結果から、本実験の比重範囲では、吸水・乾燥の劣化処理後の小片結合力は、常態時の75%以上が残存すると推測される。

なお、接着剤による差が認められないことから、従来より耐水性能に定評のあるPFは、常態における小片結合力はICに及ばないが、ICと同等の耐水性を示した。

#### 5.4.3 はく離強さの推定

小片間の結合力を求めるためにはく離強さを測定し、原料小片の比重、小片の圧縮率、圧縮比等の因子が、低比重ボードのはく離強さに及ぼす影響を線形重回帰分析<sup>6)</sup>により検討した。Table 5-1にはく離強さと各因子についての相関行列を示す。目的変数（はく離強さ）の予測には、多くの説明変数を取り入

Table 5-1. Correlation matrix between *IB* and its factors.

	<i>IB</i>	<i>Db</i>	<i>N</i>	<i>Cr</i>	<i>Vs</i>	<i>Ca</i>	<i>Dp</i>	<i>Rc</i>	<i>Tp</i>	
1	<i>IB</i>	1.00								
2	<i>Db</i>	0.81	1.00							
3	<i>N</i>	0.37	0.42	1.00						
4	<i>Cr</i>	0.52	0.55	0.87	1.00					
5	<i>Vs</i>	-0.78	-0.69	-0.69	-0.90	1.00				
6	<i>Ca</i>	0.57	0.56	0.79	0.95	-0.87	1.00			
7	<i>Dp</i>	-0.10	0.04	-0.74	-0.81	0.62	-0.74	1.00		
8	<i>Rc</i>	-0.13	-0.08	-0.89	-0.62	0.43	-0.55	0.70	1.00	
9	<i>Tp</i>	-0.12	-0.10	-0.85	-0.50	0.33	-0.43	0.55	0.98	1.00

Legend: *IB*: Internal-bond strength ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). *Db*: Board density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).  
*N*: Number of particles. *Cr*: Compaction ratio. *Vs*: Void space rate (%). *Ca*: Average compression rate (%). *Dp*: Particle density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). *Rc*: Amount of resin applied ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ). *Tp*: Thickness of particles (mm).

れると実用的でなくなり、また無駄な変数による推定精度の悪さなどの問題が生じることがある。本分析では説明変数を選択する方法として、説明変数をすべて含んだモデルからスタートして変数を減少させる変数減少法を採用し、回帰モデルのあてはまりの良さを示す尺度として、寄与率(重相関係数  $R$  の 2 乗)だけでなく、自由度調整済み重相関係数、赤池の情報量基準なども考慮した。これらの詳細については文献<sup>5)</sup>に譲るが、その結果として 3 変数モデルが選択され、第 1、第 2、第 3 説明変数にそれぞれボードの全乾比重  $D_b$ 、小片空隙率  $V_s$ 、圧縮比  $C_r$  が選択された。はく離強さ  $I B$  の予測式は次のように示される。

$$I B (\text{kgf/cm}^2) = 20.5 + 26.4 D_b - 1.1 V_s - 11.6 C_r \quad (R^2 = 0.87)$$

小片空隙率、圧縮比および小片の平均圧縮率の 3 因子は互いに内部相関が大きい。さらに圧縮比と小片の平均圧縮率は原料小片の比重と相関が強いため、原料小片比重、すなわち原料樹種がはく離強さに影響を与えることが推測される。川井らの報告<sup>2)</sup>によれば、はく離強さはボード比重および原料比重によって予測できることが示されており、本実験からもはく離強さに対してはボード比重および原料樹種の影響が大きいことが分かる。また、すでに第 2 章、第 1 節で触れたことであるが、単位面積当りの接着剤塗布量の影響は、本分析の結果からも現れていないことから、 $1 \times 10^{-3} \text{g/cm}^2$  程度の塗布量でも十分な小片間結合力が得られていることが示唆された。

## 5.5 摘 要

フェノール系樹脂(PF)およびイソシアネート系樹脂接着剤(IC)を用いた、低比重ボードのはく離強さおよびせん断強さについて検討した。得られた結果の概要は次の通りである。

- 1) ボード比重が 0.5 以上であれば、ブナおよびヒノキPFボードのはく離

強さは  $5 \text{ kgf/cm}^2$  を上回り、PF を低比重ボードの結合剤として利用できる可能性が示唆された。

2) 小片結合力を表すせん断強さとはく離強さとの間には、ある種の関連があると推測され、これらの強度比は中央層で3.83、表層部で3.45が得られ、斎藤らの結果(3.89)と近い値となった。この強度比の値はパーティクルボードの材質特性を示すものと考えられる。

3) 低比重ボードの吸水・乾燥処理後の小片結合力の低下は、小片樹種および接着剤の種類ならびに表層部、中央層の区別なく、ひとつの回帰式で表された。本実験の比重範囲では、劣化処理後の小片結合力は、常態時の75%以上が残存すると推測された。

4) 厚さ回復が最も大きい値を示したヒノキPFボードは、そのせん断強さの低下は他と比較して同程度であり、比重0.60程度の低比重ボードの厚さ回復の大きさは、直接的に小片結合力の低下を表さないと考えられる。従来より耐水性能に定評のあるPFは、常態における結合力ではICに及ばないが、ICと同等の耐水性を示した。

5) 寸法形状を規制した小片を用いた低比重ボードのはく離強さに影響を及ぼす因子を線形重回帰分析によって検討した結果、はく離強さはボードの全乾比重、小片空隙率、圧縮比の3つの説明変数によって予測が可能であった。また、塗布量の影響は認められず、 $1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  程度の塗布量でも充分なはく離強さが得られていることが示唆された。

## 5.6 曲げ性能

前節では、低比重ボードのはく離強さならびにせん断強さについて、常態時および劣化促進処理後の低下について考察した。

本節では、低比重ボードを構造部材として使用するとき、機械的性質の重要な指標となる曲げ性能について、原料小片樹種、接着剤の種類による影響を検討した。また減圧吸水・乾燥処理を行った後の曲げ性能低下について考察した。

さらに、ボードが比重の異なる層によって構成される積層材とみなして、積層材料の力学による若干の検討を試みた。

## 5.7 実験方法

ボードの製造条件（原料小片、接着剤、熱圧条件等）は前節と同様であるので参照されたい。成板後20℃、55%RH（平衡含水率10%）の恒温恒湿室内で4週間調湿した試験片について、以下に示す試験を行った。

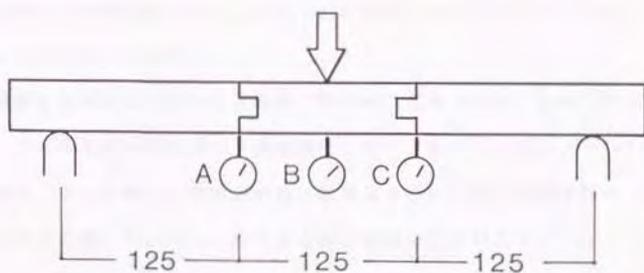
### (1) 常態曲げ試験

試験は幅50mm、長さ125mmの表面未研削ボードの両端にマカンバ材（曲げヤング係数： $168 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ）の継ぎ手を接着し、荷重速度5mm/min、スパン375mmの中央集中荷重で行った。試験の際に引張り応力を受ける側は、ボード製造時に下部熱板に接していた面とした。試験片数は1条件4個である。

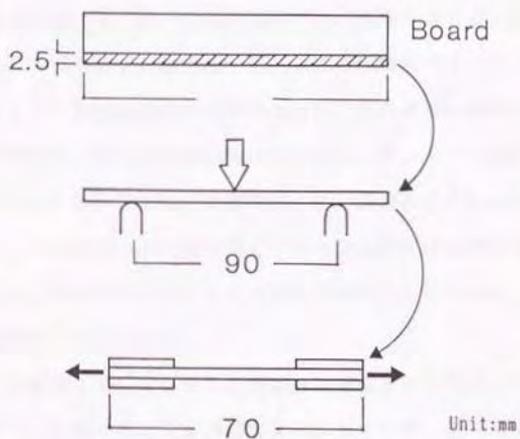
### (2) 表層部の曲げおよび引張り試験

表層から幅25mm、長さ125mm、厚さ2.5mmの試験片を採取し、スパン90mmの中央集中荷重により曲げ試験を行った。なお、この試験片はボード製造時に下部熱板に接していた側から採取した。

表層部の曲げ試験終了後、70mm長さの試験片を切り取り、その両端に20mm長さの補強材を接着して、荷重速度1mm/minで引張り強さを測定した。1条件の



(1) Bending specimen of board.



(2) Bending and tensile specimens of face layer.

Fig. 5-6. Specimen and experimental arrangement of bending and tensile tests.

Legend : A, B, C : Displacement transducer.

試験片数はそれぞれ4個である。(1)、(2)の試験方法をFig. 5-6に示す。

### (3)吸水処理後の材質試験

24時間減圧吸水処理を行った試験片(幅50mm、長さ125mm)を40℃で48時間乾燥し、これを恒温恒湿室内で5週間調湿した。これらの試験片について常態時と同様に、ボードおよび表層部の曲げ試験ならびに引張り試験を行い、処理後の残存強度を調べた。なお、曲げ強度値の算出は試験時の寸法で行った。

## 5.8 結果と考察

### 5.8.1 常態時の曲げ性能

ボードの曲げ破壊係数(MOR)および曲げヤング係数(MOE)とボード比重との関係をFig. 5-7に示す。図より、ボード比重の増加によって、曲げ破壊係数および曲げヤング係数は直線的な増加を示し、その増加の傾向は小片樹種および接着剤の種類により4つの直線群が得られた。同一ボード比重では、原料比重が小さいヒノキボードの曲げ強度値は、ブナのそれよりも大きくなる傾向が認められた。これはボード比重が同じであっても圧縮比が異なるため、低比重小片は高比重小片に較べて良好な小片間の密着が得られるので、より高い曲げ性能が発現すると考えられる。

接着剤の種類で比較すると、この増加の傾きは両樹種ともICボードがPFボードよりも大きく、比重の増加でその差はより大きくなり、ボードの結合剤としてのICは、PFよりも優れた曲げ性能を与えることが認められた。ヒノキボードとブナボードとを比較すると、接着剤の違いによる曲げ性能の差はヒノキに大きく現れた。これは前述したように、ブナと較べて圧縮比が大きいいため、充分な小片間の密着が得られ、小片結合力の差(前節参照)が曲げ試験結果となって現れたものと考えられる。ヒノキICボードとPFボードとを比較すると、曲げ破壊係数の差はおよそ20~100kgf/cm<sup>2</sup>であった。なお、全ての曲

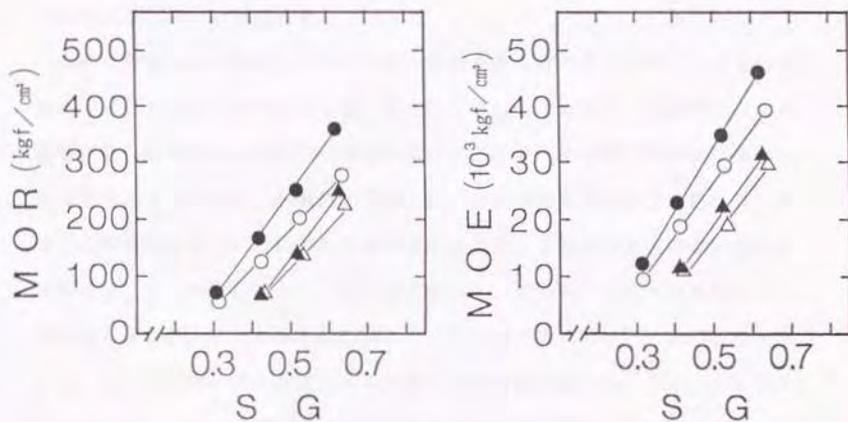


Fig. 5-7. Effect of board specific gravity ( $SG$ ) on modulus of rupture ( $MOR$ ) and modulus of elasticity ( $MOE$ ) based on bending test.

Legend : ●: Hinoki IC, ○: Hinoki PF, ▲: Buna IC, △: Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.

げ試験片について破壊は引張り側で生じ、水平せん断破壊は観察されなかった。

前節で述べたように、ボード比重が0.50程度であれば、ブナおよびヒノキを用いたPFボードのはく離強さは、JIS-200タイプを上回る結果が得られている。曲げ試験の結果についても、ヒノキPFボードは比重0.50、ブナPFボードでは0.60であればJIS-200タイプに合格することが認められ、PFによって製造された低比重ボードは、常態曲げ試験によっても構造用材としての利用が可能であることが示唆された。

$H_{se}$  は構造用途に使用するボードが、要求される強度値を達成するときの圧縮比（ボード比重/原料小片比重）について報告している<sup>7)</sup>。その中で、曲げ破壊係数の規準値は $315 \text{ kg f/cm}^2$ 以上であり、これを上回る最小圧縮比の値は1.20であると述べている。本実験の場合とは小片の樹種および形状は異なり、また、この規準値はJISと比較して高い値であるが、上記の値を上回る圧縮比を求めると、ヒノキICについては1.47であった。その他については外挿による推定値であるが、ブナICでは1.22、PFではヒノキ1.84、ブナ1.32となった。なお、JIS-200タイプを上回るときの最小圧縮比を求めると、ICについてはヒノキ1.13、ブナ0.93であり、PFではヒノキ1.32、ブナ1.00が得られた。

ボードの曲げ性能は、内層部でせん断破壊を生じない状態であれば、表層部分の強度が果たす役割は大きいと考えられる。ボード表層部から採取した厚さ約2.5mmの試験片の引張り強さ（ $\sigma_t$ ）ならびに表層部の曲げヤング係数（ $MOE_t$ ）と試片比重との関係をFig. 5-8に示す。図より、引張り強さおよび表層部の曲げヤング係数はともに比重の増加で増大し、その増加の傾向はボードの曲げ試験結果と同様であり、ヒノキICボードが最も大きな値を示した。なお、ここには図示していないが、表層部の曲げ破壊係数と比重との関係はその曲げヤング係数と同様の傾向を示した。

引張り試験では、試験片の長さ方向に存在する最弱部分あるいは欠陥部分で破壊すると考えられる。ヒノキボードは原料小片比重が小さく、圧縮されやす

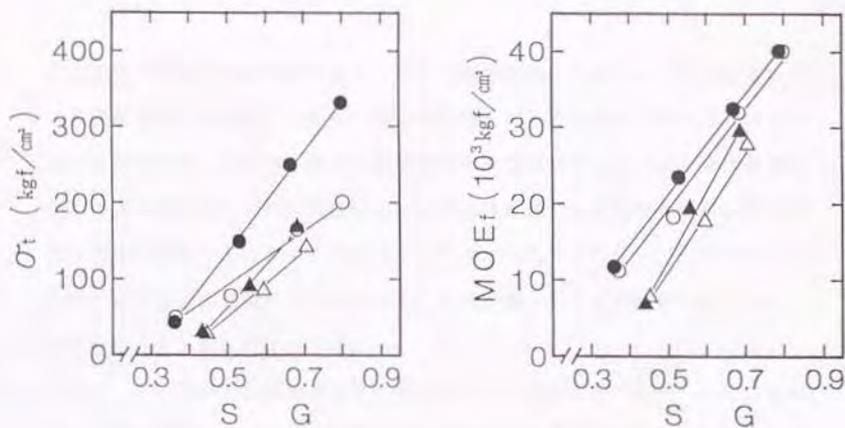


Fig. 5-8. Effect of specific gravity ( $SG$ ) of face layer on tensile strength ( $\sigma_t$ ) and bending modulus of elasticity ( $MOE_t$ ) of face layer.

Legend : ●: Hinoki IC, ○: Hinoki PF, ▲: Buna IC, △: Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.

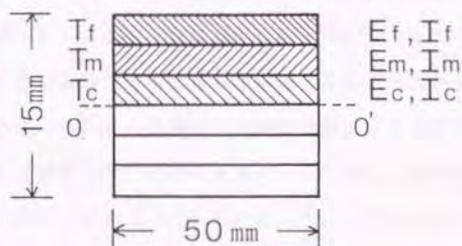


Fig. 5-9. Cross-section model of board laminate composite.

Legend :  $T$ : Thickness of layer.  $T_f = T_m = T_c = 2.5\text{mm}$ .  
 $E$ : Modulus of elasticity of each layer.  
 $I$ : Moment of inertia of area of each layer.  
 $O - O'$ : Neutral axis.

いので小片間の密着が良好であり、ボード厚さ方向の比重分布に見られるように、表層部の比重は高く、引張り強さに影響を与える大きな欠陥の存在が少ない。その反対に、ブナボードでは表層部の比重増加が少なく、第2章で指摘した小片間の空隙すなわち欠陥数が多いと推測される。小片樹種の違いによる引張り強さの差は、ICボードで大きく、PFボードでは小さい。これはICと比較してPFの接着強さが小さいので、樹種の違いによる欠陥数の差が大きく現れなかったものと考えられる。

なお、ボードの曲げ破壊係数と引張り強さとの関係を調べると、これらの間には1次の関係が認められ、原料小片樹種および接着剤の種類に係わらず、 $y = 41.5 + 1.00x$  (相関係数  $R = 0.96$ ) の回帰式が得られた。

表層部の小片結合力はボード比重0.60付近までは接着剤の種類によらず、ヒノキボードの結合力はブナボードと比較して優っているのに対して、比重0.65を越えると結合力に逆転が認められた(第2章参照)。これは素材強度が比較的小さいヒノキでは、ある一定の結合力に達する比重がブナよりも早く現れるためと解釈したが、引張り強さおよび表層部の曲げヤング係数については、本実験の比重範囲ではこの逆転は認められなかった。

ボードを高比重の表層部、低比重の中央層ならびにその中間の層からなるサンドイッチ構造体と見なし、積層材の材料力学から求めた曲げヤング係数の計算値と実測値とを比較した。この低比重ボードでは、比重が表面から内部にかけてゆるやかに変化していることは既に述べた。そこでモデルとしてはFig. 5-9に示すように、表面から2.5mmまでの表層部( $E_t, I_t$ )、2.5mm~5.0mmの中間層( $E_m, I_m$ )ならびに5.0mm~7.5mmの中央層( $E_c, I_c$ )の3種類の層のサンドイッチ構造と考えると、次式によってボードの曲げヤング係数を算出した。

$$MOE = \frac{2(E_t I_t + E_m I_m + E_c I_c)}{I} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

ここに、 $E_{t,m,c}$  および  $I_{t,m,c}$  はそれぞれの層の曲げヤング係数ならびに

断面2次モーメントを表し、 $I$ はボードの断面2次モーメントである。なお、表層部の曲げヤング係数 $E_f$ については実測値を用いたが、 $E_m$ および $E_c$ はそれぞれの層の平均比重を求め、Fig. 5-8に示した表層部の曲げヤング係数の結果より、外挿によって得られた値を用いた。なお、ここでのボード厚さは15mmとして、中立軸はボード表面から7.5mmの位置にあり、中立軸に対してボードの層構成は対称であると仮定した。

また、本実験ではせん断破壊は認められなかったことから、破壊は荷重点の反対側の表層部の引張応力が、その破断応力に達したときに発生すると考えられる。引張り側表層部の破断応力( $\sigma_b$ )とその点に加えられた破断時の曲げモーメント( $M_b$ )の関係は、次式で表すことができる。そこで、ボードの曲げ試験から得られた結果を用いて引張り側表層部の破断応力を求めた。

$$\sigma_b = \frac{M_b}{E I} \cdot E_f \cdot \frac{T}{2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

ここに、 $T$ はボードの厚さ、 $E_f$ は表層部の曲げヤング係数、 $E I$ はボードの曲げ剛性であり、これらの値には実測値を用いた。

Table 5-2にボードの曲げヤング係数の実測値と計算値および表層部の破断応力と引張り強さならびにこれらの値の比を示した。曲げヤング係数については、実測値と積層構造とみなして計算した値との比は、0.76~0.96の範囲にあり、全体の平均では0.84となった。本実験では、表層部の曲げおよび引張り試験片とボードの曲げ試験片寸法の相違ならびにせん断たわみの影響などが、実測値と計算値との差を生じる原因であると思われる。また、この計算では前提とした中立軸の位置および層の対称性などの誤差が含まれると考えられるが、これらを考慮しても、ボードの曲げヤング係数は積層材の力学によって、ある程度は正確に予測することができると考えて良からう。

表層部の引張り強さと破断応力との比は、0.60~1.11となり、曲げヤング係数と比較してばらつきは大きく、平均で0.76であった。これは曲げ試験の場合

Table 5-2. Comparison of the experimental  $MOE^{a)}$  and  $\sigma$  with calculated.

Specimen	Specific gravity	$MOE$ cal. $\times 10^3$	$MOE$ exp. (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ratio exp./cal.	$\sigma_b^{b)}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_t^{c)}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ratio $\sigma_t/\sigma_b$	
Buna IC <sup>d)</sup>	0.4	13.1	11.4	0.87	38	29	0.76	
	0.5	26.3	22.0	0.84	124	88	0.71	
	0.6	35.3	31.0	0.88	236	171	0.72	
	PF <sup>e)</sup>	0.4	12.1	22.8	0.96	46	28	0.61
		0.5	22.8	19.1	0.84	125	84	0.67
		0.6	32.4	30.0	0.92	207	143	0.69
Hinoki IC <sup>d)</sup>	0.3	13.9	12.3	0.88	72	43	0.60	
	0.4	28.6	23.1	0.81	166	148	0.89	
	0.5	42.5	34.8	0.82	235	250	1.06	
	0.6	55.0	45.8	0.83	295	328	1.11	
	PF <sup>e)</sup>	0.3	12.1	9.6	0.79	66	49	0.74
		0.4	24.7	18.8	0.76	119	74	0.62
		0.5	36.8	29.4	0.80	220	170	0.77
		0.6	49.1	38.9	0.79	284	193	0.68

<sup>a)</sup> Bending modulus of elasticity of boards.

<sup>b)</sup> Calculated values of failure strength of outer layer in boards.

<sup>c)</sup> Tensile strength of face layers (2.5mm thickness).

<sup>d)</sup> Isocyanate compound resin-bonded boards.

<sup>e)</sup> Phenolic resin-bonded boards.

は、荷重点の反対側付近のある程度限定された部分で破壊を生じるのに対して、引張り試験では、試験片の長さ方向に存在する最弱部分で破壊するため、このように引張り強さと表層部の破断応力との差が大きくなると考えられる。

以上のことから、曲げヤング係数はマクロな平均的な量であり、モデル化によってもある程度予測が可能であるのに対して、破壊はミクロな局所的な現象であるため、モデル化による予測が難しいものと考えられる。

さらに詳細な実験を行えば、ボードにある平均比重を与えた場合、曲げ剛性あるいは曲げ強度を最大にする比重分布の存在が求められ、ボードの曲げ性能に対する層構成の最適設計が可能であると思われる。

#### 5.8.2 吸水処理後の曲げ性能

ボードの劣化を促進するために減圧吸水・乾燥処理を行い、処理後の曲げ性能の変化について調べた。処理によるボードの曲げヤング係数の変化ならびに表層部の曲げヤング係数および引張り強さの変化をそれぞれFig.5-10、Fig.5-11に示す。これらの結果から、ボードおよび表層部の曲げ性能は処理によって低減を示し、PFボードはICボードよりもその低下が大きく現れた。また、曲げヤング係数の低下は小片樹種に関わりなく、接着剤の種類に影響を受けることが認められた。

ボードの曲げ破壊係数の低下は曲げヤング係数と同様の傾向を示し、そのプロットの回帰式を求めると、PFボードでは $y = 9.08 + 0.72x$  ( $R = 0.99$ )、ICボードでは $y = -5.98 + 0.92x$  ( $R = 0.99$ ) が得られた。

前節 5.4.2より、吸水・乾燥処理後の小片結合力は接着剤の種類による差は認められず、PFはICと同等の耐水性を示し、常態接着強さの75%程度が残存すると推定された。ボードの曲げ破壊係数および曲げヤング係数は、接着剤の種類によって強度の残存に差が現れ、ICボードでは常態時のおよそ90%、PFボードでは60~70%が残存すると推察される。

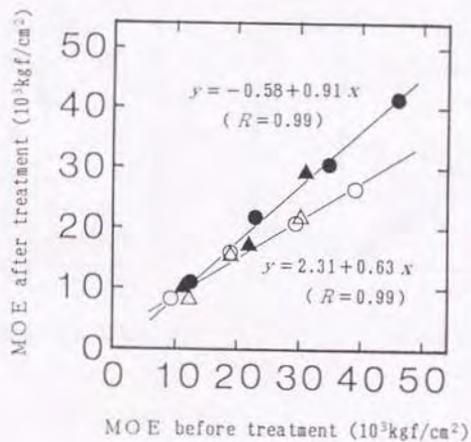


Fig. 5-10. Relationships between modulus of elasticity (*MOE*) of board after treatments and those before treatments.

Legend : ●: Hinoki IC, ○: Hinoki PF, ▲: Buna IC, △: Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.  
*R*: Correlation coefficient.

Note : The solid lines represent the regression line.

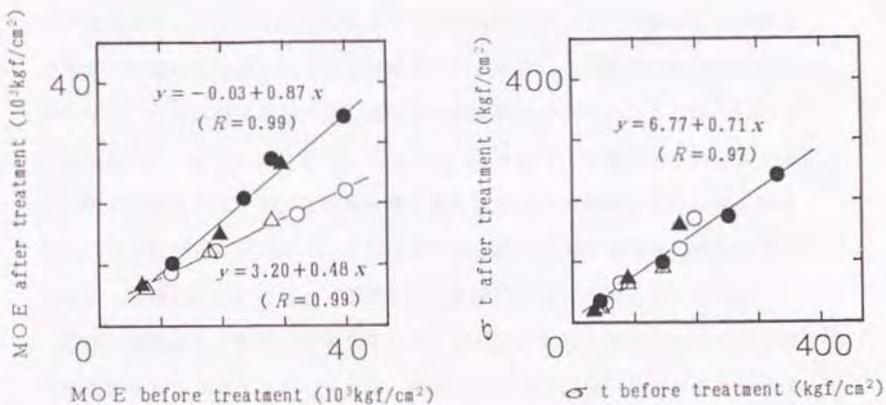


Fig. 5-11. Relationships between modulus of elasticity ( $MOE$ ) and tensile strength ( $\sigma_t$ ) of face layer after treatments and those before treatments.

Legend : ● : Hinoki IC, ○ : Hinoki PF, ▲ : Buna IC, △ : Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.  
 $R$ : Correlation coefficient.

Note : The solid lines represent the regression line.

表層部の曲げヤング係数の変化はボード全体のそれよりも大きく、回帰式の傾きはPF、ICボードともに小さくなった。これは、水分の侵入によってボードは厚さ膨潤を生ずるが、小片の圧縮率が高い表層部の厚さ変化が大きく、それにとまう比重低下が表層部で大きいためと考えられる。

引張り強さについても処理後の低下は認められるが、小片樹種および接着剤の種類に影響を受けず、ひとつの回帰式で表された。小片結合力の処理前後の関係では、せん断強さおよびはく離強さの回帰式はそれぞれ $y = 1.55 + 0.74x$  ( $R = 0.97$ )、 $y = 0.94 + 0.75x$  ( $R = 0.97$ )であり、引張り強さの傾きとほぼ一致した結果となった。これは引張り強さ試験では、積層された小片の接着面に平行方向に応力が加わり、小片自身あるいは小片間の接着点で破壊を生ずるので、接着強さ試験の場合と類似した破壊形態を示すためと考えられる。

前節の結果から、吸水・乾燥処理によってボードは厚さを回復し、不可逆的な膨潤すなわちスプリングバックは、原料小片比重が小さいヒノキで大きく現れ、また、PFボードはICボードよりも大きな値を示した。曲げヤング係数および曲げ破壊係数は計算によって得られる係数であり、これによって処理前後を比較すると、処理後の曲げ性能は常態時のおよそ60~90%を保っていることが分かった。これらの係数を求める場合、厚さが大きくなるほど計算値は小さくなる。

ボードの曲げ試験時の破壊荷重 ( $P_{max}$ )ならびに比例限度荷重 ( $P_p$ )を処理前後で比較したものをTable 5-3に示す。この結果から、曲げ破壊荷重および比例限度荷重の処理前後の比は、ボード全体ではそれぞれ平均0.96となった。ヒノキボードの場合にはこれらの比は1.00かそれ以上であり、曲げ破壊荷重および比例限度荷重は常態時と同等かそれ以上の値を示している。ボードは厚さ回復によって小片結合力の低下を示したが、曲げ破壊荷重の値はボード厚さが増すほど大きくなり、厚さの増加分が接着強さおよび引張り強さの低下を相殺しているものと考えられる。ブナボードはスプリングバックが小さいので、常

Table 5-3. Comparison of the maximum load ( $P_{max}$ ) and proportional limit load ( $P_p$ ) in bending test before vacuum-water-soaking-drying treatments and those after treatments.

Specimen	Specific gravity	$P_{max}$ (kgf)			$P_p$ (kgf)			
		A.D. <sup>a)</sup>	A.T. <sup>b)</sup>	Ratio A.T./A.D.	A.D. <sup>a)</sup>	A.T. <sup>b)</sup>	Ratio A.T./A.D.	
Buna IC <sup>c)</sup>	0.4	12.5	12.0	0.96	7.0	5.0	0.71	
		28.5	24.0	0.84	12.5	12.0	0.96	
		50.5	49.0	0.97	20.0	19.5	0.98	
	PF <sup>d)</sup>	0.4	14.0	12.0	0.86	7.0	4.5	0.64
		0.5	27.5	25.0	0.91	12.0	10.0	0.83
		0.6	45.5	37.0	0.81	17.0	14.0	0.82
Hinoki IC <sup>c)</sup>	0.3	15.0	14.5	0.97	6.5	6.0	0.92	
		33.5	33.0	0.98	13.5	13.0	0.96	
		51.5	53.0	1.03	22.0	21.0	0.95	
		69.0	71.0	1.03	24.5	31.5	1.28	
	PF <sup>d)</sup>	0.3	11.5	11.5	1.00	5.0	5.0	1.00
		0.4	25.0	26.0	1.04	10.0	10.0	1.00
		0.5	41.5	41.0	0.99	16.5	17.0	1.03
		0.6	56.5	56.0	0.99	20.0	26.0	1.30

<sup>a)</sup> Air-dried condition.

<sup>b)</sup> After treatment. Specimen were conditioned to equilibrium at 20 °C and 55 percent relative humidity for five weeks.

<sup>c)</sup> Isocyanate compound resin-bonded boards.

<sup>d)</sup> Phenolic resin-bonded boards.

態時の曲げ破壊荷重を保持する厚さにまで戻らず、低い荷重で破壊すると推測される。

本実験では、吸水処理後に乾燥し、常態時とほぼ同じ含水率状態に戻っているので、湿潤時の曲げ試験<sup>3)</sup>あるいは水分繰り返し試験<sup>9)</sup>とは異なるが、吸湿あるいは吸水による厚さ回復が生じ、曲げヤング係数、曲げ破壊係数の値は低下しても、実際にボードを使用する場合には、曲げ破壊荷重の値を比較した方がより現実的であると思われる。

## 5.9 摘 要

フェノール系樹脂(PF)およびイソシアネート系樹脂接着剤(IC)を用いた、低比重ボードの曲げ性能について検討した。得られた結果の概要は次の通りである。

1) ボードの結合剤として、ICはPFよりも優れた曲げ性能を与えることが認められた。また、PFを用いた低比重ボードでもヒノキでは比重0.50、ブナでは0.60であれば、JIS-200タイプに合格することが認められ、構造用材料として利用できる可能性が示唆された。

2) ボードの曲げヤング係数は、実測値とモデル化した積層材の力学によって求めた値とはほぼ一致する結果が得られた。破断応力は破壊が局所的な現象であるため、実測値と計算値との差は大きくなると推測された。

3) 吸水・乾燥処理後の曲げ性能の低下は小片樹種に係わりなく、接着剤の種類に影響を受けることが認められた。PFボードはICボードよりもその低下が大きく、曲げ破壊係数および曲げヤング係数はICボードでは常態時のおよそ90%、PFボードでは60~70%が残存すると推測された。

4) 処理後の最大荷重および比例限度荷重は、ヒノキボードの場合には常態時と同等かそれ以上の値を示した。最大荷重はボードの厚さが増すほど大きく

なり、厚さの増加分が処理による小片結合力および引張り強さの低下を相殺していると考えられる。

## 文 献

- 1) Kawai, S.; Sasaki, H.: *Mokuzai Gakkaishi*, 32(5), 324-330(1986).
- 2) 川井秀一、須田久美、佐々木光: 木材学会誌、33(5), 385-392(1987).
- 3) 関野 登: 同上、33(12), 957-962(1987).
- 4) 斎藤藤市、橋本 誠: 同上、23(1), 45-52(1977).
- 5) McNatt, J.D.: In: Proc. 7th Wash. State Univ. Int. Particleboard Symp., Pullman, Wash. pp.367-378(1973).
- 6) 田中 豊、垂水共之、臨本和昌編: "パソコン統計解析ハンドブックII"、共立出版、1984. p.16.
- 7) Hse, C.Y.: *Forest Prod J.*, 25(3), 48-53(1975).
- 8) 関野 登: 木材学会誌、33(6), 464-471(1987).
- 9) 斎藤藤市、平林利勝、池田正行、鈴木滋彦: 同上、36(3), 180-185(1990).

## 第6章 建築構造用面材としての低比重ボードの評価

### 6.1 緒言

枠組壁工法を始めとする木造建築には、床下張り、屋根下張りあるいは壁下張り材として構造用合板が多用されている。最近では木質構造用の板材料として、各種の木質ボードが規格化されるようになり、合板以外のボード類が使用されつつある。数年前より低比重ボードの研究開発が行われており、構造用材料として期待されている。これに関する報告は製造技術と材質<sup>1-4)</sup>、小片間結合力<sup>5)</sup>、曲げ性能<sup>6)</sup>および厚さ膨潤<sup>2-5)</sup>についてが主である。

一方、下張り材は曲げ、せん断に対する抵抗要素として働き、構造的に重要な役割を果たしている。これらの下張り材は枠組に釘によって固定されており、これにせん断力が加わったときの剛性および強度を知ることは、これらが構造要素として使用可能であるかを判断する上で極めて重要であると思われる。

低比重ボードの構造用途への利用を図るには、曲げ性能ばかりでなく他の機械的諸性能についても十分に把握しておく必要がある。しかしながら、釘接合せん断特性については関野ら<sup>7)</sup>の報告だけであり、面内せん断剛性については報告例が見られない。

本章では、建築構造用面材として低比重ボードの利用が可能か否かを調べるために、その曲げ性能、せん断剛性および釘接合せん断耐力について、市販ボード類との比較検討を行った。

### 6.2 実験方法

#### 6.2.1 低比重ボードの製造

供試小片の原料樹種にはヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (S. & Z.) Endl.)

およびブナ (*Fagus crenata* Bl.)を用いた。これらの単板(ブナ: 気乾比重0.62、厚さ0.54mm、ヒノキ: 気乾比重0.43、厚さ0.56mm、含水率10%)を繊維方向に25mmの長さに切断したものをハンマーミルで破砕し、JIS-2000 $\mu$ メッシュ以上のものを使用した。

接着剤にはイソシアネート系樹脂接着剤(群栄化学工業㈱ UL-4811、これをICと略記する)およびフェノール系樹脂接着剤(日本化成㈱#164、これをPFと略記する)を用い、全乾小片重量に対して固形分10%の割合で噴霧塗付した。なお、接着剤を塗布する前の目標小片含水率はICでは10%、PFについては2%に調整した。手撒きによるフォーミングの後、高容量万能部材試験機(㈱島津製作所、UH-100A)に取り付けた熱板を用い、1段圧縮法により熱圧成形した。

製造ボード寸法は400mm $\times$ 400mm、厚さ15mmであり、目標気乾比重0.40、0.50、0.60のボードを1条件につき4枚製造した。熱圧温度は160 $^{\circ}$ C、熱圧時間は、ICは5分間、PFでは10分間とした。

なお、ボードの厚さ規制は試験機の制御プログラムにより、熱板間隔が15mmになったときクロスヘッド(移動速度20mm/min)の動きを停止する方法で行った。このときマットに加わる最大圧縮圧力は、ブナボードの比重0.40、0.50、0.60ではそれぞれ6.0、13.5、24.5kgf/cm<sup>2</sup>であり、ヒノキボードのそれらは12.0、20.0、29.0kgf/cm<sup>2</sup>であった。

ボードは製造後20 $^{\circ}$ C、55%RH(平衡含水率10%)の恒温恒湿室内で4週間以上調湿してから実験に供試した。

### 6.2.2 曲げ試験

実験室製ボードの曲げ試験片は幅50mm、長さ300mmであり、スパン230mmの中央集中荷重で曲げ試験を行った。なお、低比重ボードとの比較のために供試した市販ボードは、パーティクルボード(PB)、配向性ストランドボード(O

Table 6-1. Tested commercial wood-based panels.

Board	PE	MDF	OSB	Plywood
Specific gravity	0.75	0.64	0.64	0.66
Thickness(mm)	15	15	11	12
Standard	JIS 200 <sup>a)</sup>	JIS 300	JAS <sup>b)</sup>	JAS
	P-type	U-type	Type-3	Type-1
Layer construction	3-layer	3-layer	3-layer	5-ply

<sup>a)</sup> Japanese Industrial Standard.

<sup>b)</sup> Japanese Agricultural Standard.

S B)、中質繊維板(M D F)ならびに構造用合板である。Table 6-1に供試した市販ボードの気乾比重(含水率10%)、厚さおよび規格等を示した。試験体寸法およびスパンは合板については幅50mm、長さ350mm(スパン300mm)としたが、その他の試料については製造ボードと同じである。荷重速度は5mm/minとし、最大荷重および試験体中央部のたわみを測定した。試験体数はそれぞれ6個である。

### 6.2.3 パネルせん断試験

せん断弾性係数を求めるために、本実験ではLW改良法を用いた<sup>3)</sup>。試験体の概略をFig. 6-1に示した。試験体は長さ375mm、高さ200mm、せん断力を受ける部分は100mm×100mmの正方形であり、その周囲には補強材が接着されている。試験体中央に荷重を加えるが、この両端はベアリングローラーによって支持されている。荷重速度は1mm/minとし、試験体の中央部に対角線に沿って貼ったワイヤーストレインゲージによりひずみを測定し、次式によりせん断弾性係数 $G$ を求めた。

$$G = \frac{P}{2LT} \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

ここに、 $G$ :せん断弾性係数(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $P$ :荷重(kgf)、 $\gamma$ :せん断ひずみ、 $L$ :辺長(cm)、 $T$ :ボード厚さ(cm)である。

試験体数は製造ボードでは1条件2体、市販ボードについては3体である。

### 6.2.4 釘一面せん断試験

引張り型のせん断耐力試験では、試験体に生じる偏心モーメントによる曲げ変形を防ぐには特殊な治具が必要であるため、本実験では圧縮型の試験によって行った。試験体の形状をFig. 6-2に示した。主材にはSPF(スプルース・パイン・ファー)の204材、釘はCN50およびCN65を用いた。SPFは乾燥材

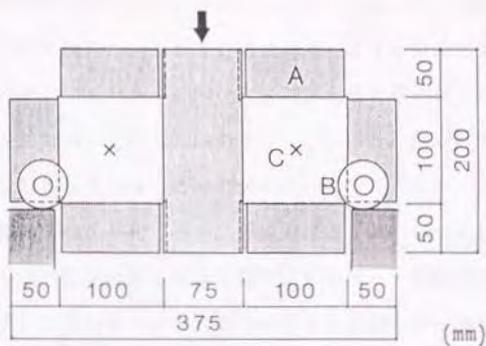


Fig. 6-1. Specimen and experimental arrangement of LW-improved method.

Legend : A: Reinforcing block, B: Ball-bearing roller, C: Wire strain gauge.

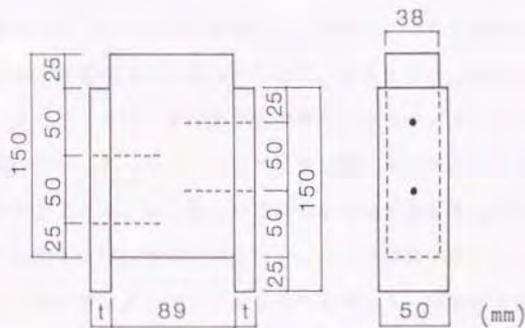


Fig. 6-2. Single-shear nailed-joint testing method.

Notes : Nailed-joint specimen consisted of spruce-pine-fir (SPF, 204) main-member and wood-based panel side-member fastened with CN50 and CN65 nails.

であり、供試材全体の平均比重は0.37（含水率12.5%）であった。釘は片側それぞれ2本である。主材に側材のボードを釘着する際、所定の位置に予め釘径の約70%の先孔を開けた。すなわち、CN50（50本の実測値の平均径：2.88mm）では2mm、CN65（同：3.33mm）では2.3mmのドリルを用いた。釘を打ち込む際、釘頭部が側材面にめり込みを生じないように注意した。

荷重方向は主材の繊維方向と平行であり、荷重速度は1mm/minとして接合部の相対変位を測定した。変位の測定には2個のひずみゲージ式変位計（精度1/500mm）を用い、主材とそれぞれの側材間の変位の平均値を接合部の相対変位とみなした。試験体数は4～5体である。

## 6.3 結果と考察

### 6.3.1 ボードの曲げ破壊係数および曲げヤング係数

曲げ破壊係数および曲げヤング係数とボード比重との関係をFig. 6-3に示した。曲げ破壊係数ならびに曲げヤング係数は比重の増加につれて直線的な増加を示し、この傾向は小片樹種および接着剤の種類に影響されることが分かる。原料小片比重が小さいヒノキボードの曲げ強度値は、ブナボードのそれよりも大きな値を示した。これは同一ボード比重では低比重小片は圧縮比が高く、小片間の密着が良好であるため、より高い曲げ性能が発現すると考えられる。

接着剤の種類で比較すると、増加の傾きはICボードはPFボードよりも大きく、比重の増加でその差はより大きくなる傾向を示した。接着剤の違いによる曲げ性能の差はヒノキに大きく現れている。これは小片結合力の差によるものと考えられ、ヒノキICボードとPFボードとを比較すると、曲げ破壊係数の差はおおよそ60～85kgf/cm<sup>2</sup>となった。ブナボードの場合は圧縮比が低いので小片結合力の差が発現するには至らず、本実験の比重範囲では接着剤の違いによる明瞭な差は現れなかった。

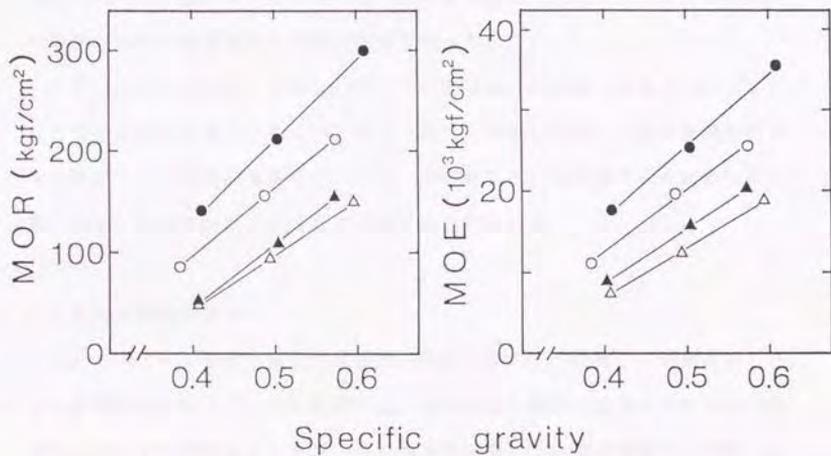


Fig. 6-3. Effects of board specific gravity on modulus of rupture (*MOR*) and modulus of elasticity (*MOE*).

Legend : ●: Hinoki IC, ○: Hinoki PF, ▲: Buna IC, △: Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.

曲げ破壊係数についてJIS-150タイプをクリアするものは、ヒノキICではボード比重0.40~0.60、ヒノキPFは0.50、0.60、ブナICおよびPFは0.60であり、JIS-200タイプをクリアするのは、ヒノキICは0.50、0.60およびヒノキPFは0.60であった。

また、曲げヤング係数はJISでは参考値として示されているが、JIS-150および200タイプをクリアするものは、規準値に達していないブナPFの比重0.60を除けば曲げ破壊係数の場合と同様であった。

なお、目標比重に達していないブナIC0.60は、外挿値でみると200タイプに合格するものが得られるようである。また、前章と比較して曲げ破壊係数および曲げヤング係数の値が小さいのは、本実験で用いた原料単板の比重が幾分高いので、圧縮比が低くなったことによると思われる。

### 6.3.2 せん断弾性係数

Fig. 6-4にせん断弾性係数およびせん断強さとボード比重との関係を示した。せん断弾性係数ならびにせん断強さは、曲げ試験と同様に比重の増加と共に直線的に増大する傾向を示したが、せん断弾性係数については接着剤の種類による差は認められず、小片樹種の影響を受けることが分かる。

これは曲げ試験では、引張りおよび圧縮応力を受ける外縁部の小片結合力がボードのたわみに影響するので、接着剤の種類による差が曲げヤング係数に現れた。一方、パネルせん断試験では応力がボードの厚さ方向にほぼ平均して加わり、これに対応するひずみは厚さ方向の平均値として生じるため、接着剤の種類による差が現れないと考えられる。

また、小片樹種の相違による差は次のように考えられる。すなわち、ボード比重が同じ場合には、小片比重の小さいヒノキボードは、ボードを構成している小片数がブナボードよりも多い。接着剤の添加率は一定であるので、単位面積当りの接着剤塗布量はブナの方が多くなる。しかし、小片数の低下が影響す

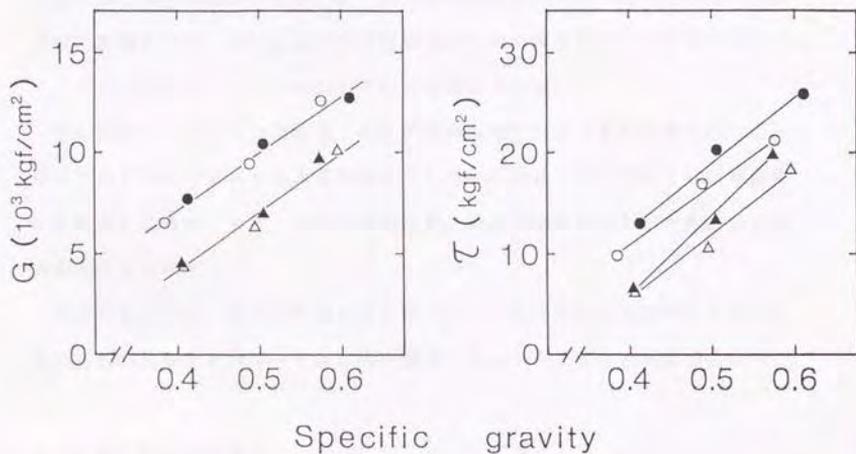


Fig. 6-4. Effects of board specific gravity on modulus of rigidity ( $G$ ) and shearing strength ( $\tau$ ).

Legend : ●: Hinoki IC, ○: Hinoki PF, ▲: Buna IC, △: Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.

るために、ボード比重が0.60以下では、ヒノキはブナよりも大きな小片結合力を示す（第5章参照）ことから、応力を伝達する接着点と伝達しない接着点が存在すると仮定すれば、ヒノキボード内部には応力を伝達する小片間の接着点の数は、ブナと比較して十分に存在すると考えられる。せん断弾性係数は比例領域における応力とひずみの関係から求めた値である。したがって、せん断応力による小片間の微小なずれは、小片間の結合力が充分であれば接着剤の種類には影響されず、応力を伝達する接着点の数の影響を受け、小片数の少ないブナボードで大きいことに起因していると推測される。

せん断強さについては両樹種ともに接着剤の違いによる差が認められ、ICボードはPFボードよりも大きな値を示した。これは、せん断強さは破壊荷重から得られるものであり、層内せん断強さと同様に小片結合力が支配的になるためと考えられる。

以上のことから、曲げと同様にせん断についても原料小片比重が小さい、すなわち圧縮比が大きいボードほど高い機械的性能を有することが認められた。

### 6.3.3 釘一面せん断耐力

釘接合部の初期剛性を表すと考えられる、相対変位が1.00mmのときの釘一本当りのせん断耐力（ $P_{1.00}$ ）および最大耐力（ $P_{max}$ ）とボード比重との関係をFig. 6-5に示した。図中の実線はCN65、破線はCN50の回帰直線を表している。本実験では、相対変位の増加に対してロードセルから検出される荷重の増加が認められなくなった時点で試験を終了し、試験機に記録された荷重の最大値を破壊荷重とした。従って、最終的な破壊形態が側材の釘頭貫通（バンチング）または主材からの釘の引き抜けであるかは確認していない。

せん断耐力および最大耐力とボード比重には一次の関係が認められ、その相関は高い（相関係数  $R = 0.78 \sim 0.93$ ）。比重の増加に伴うせん断耐力の増加の傾向には、小片樹種および接着剤の種類による差が認められないことから、せ

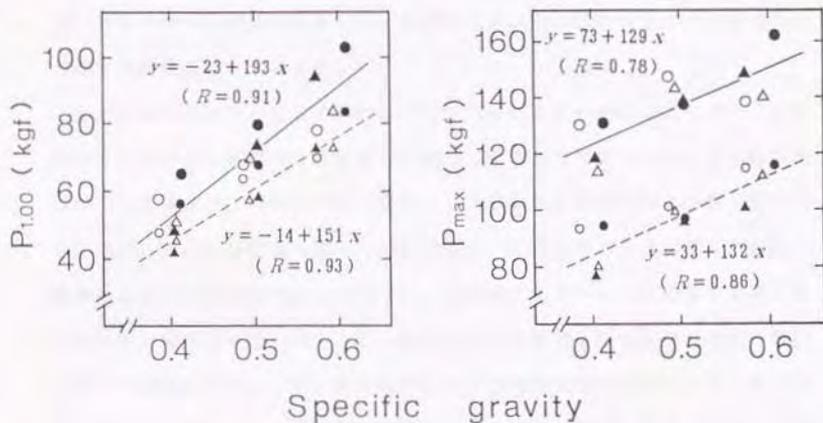


Fig. 6-5. Effects of board specific gravity on loads at joint slips of 1.00 mm ( $P_{1.00}$ ) and maximum load ( $P_{max}$ ).

Legend : ●: Hinoki IC, ○: Hinoki PF, ▲: Buna IC, △: Buna PF.  
 IC: Isocyanate compound resin-bonded boards,  
 PF: Phenolic resin-bonded boards.  
*R*: Correlation coefficient.

Notes : The solid lines represent the regression line of CN65.  
 The dashed lines represent the regression line (smaller symbols) of CN50.

せん断耐力は側材の性質の中でもその比重に大きく依存し、小片結合力が充分であれば、釘一面せん断耐力はボード比重によって決定されると解釈できよう。

関野ら<sup>7)</sup>は、釘一面せん断耐力は比重傾斜を高めて表層を強固にしても、内層の低比重部が支配的な因子となり、耐力の減少が認められると報告している。ヒノキボードの厚さ方向の比重傾斜がブナと比較して大きいことは既に述べたが、本章で行った実験の範囲では、表層部比重の大小はこれらのせん断耐力に影響を及ぼさないようである。

せん断耐力は主として釘の曲げと木材へのめり込みに依存したもので、その終局状態は釘頭の側材へのめり込みによって決まる<sup>7)</sup>と言われている。釘の種類について見ると、CN65はCN50と比較して大きなせん断耐力および最大耐力を与えるが、両者の差は最大耐力で顕著である。これは次のように考えられる。相対変位が1.00mm前後では、変位は主に釘側面によるボードの破壊であり、釘の曲げ等の変形は少ないので、せん断耐力は釘の種類よりも側材の性質（特に比重）に左右される。一方、釘の曲げならびに側材の破壊が進行しなくなった時の荷重から得た最大耐力は釘径、釘頭径および釘の長さに影響を受けるため、釘の種類による差が大きく現れるのであろう。

本実験では、前述のように最終的な破壊形態を確認していないが、荷重の増加にともなって釘頭部が側材へめり込む様子が観察され、ボード比重の増加につれて、このめり込み量は相対的に少なくなった。試験終了後に釘の変形を調べると、比重0.40のボードを接合した釘の変形は、0.60のそれと比較して小さかった。これはボード比重が低い場合には釘側面によってボードが圧潰し、さらに釘頭がボードにめり込んでいき、その後釘頭が貫通破壊するという経過を辿るので、釘自体の曲げ変形が少ないと考えられる。

#### 6.3.4 市販ボード類との比較

次に、目標気乾比重0.60の低比重ボードと市販ボードの機械的性質を比較す

Table 6-2. Results of bending and shearing tests.

	Actual SG thickness		MOR	MOE	F <sub>bmax</sub> <sup>a)</sup>	G <sup>b)</sup>	z <sup>c)</sup>	Q <sub>max</sub> <sup>d)</sup>
	cm		kgf/cm <sup>2</sup>	×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf
Hinoki IC	0.61	1.53	300	35.4	103	12.7	26	808
Hinoki PF	0.58	1.56	212	25.5	75	12.6	21	675
Buna IC	0.57	1.67	154	20.3	62	9.7	20	660
Buna PF	0.59	1.52	154	19.0	52	10.3	18	570
PB	0.75	1.53	228	37.1	77	10.5	18	565
MDF	0.64	1.51	376	32.8	124	8.2	21	638
OSB    <sup>e)</sup>	0.64	1.11	368	56.7	61	14.1	23	508
⊥ <sup>f)</sup>			212	23.3	36	14.0	38	813
Ply-    <sup>e)</sup>	0.66	1.21	571	83.8	92	4.2	40	960
wood ⊥ <sup>f)</sup>			431	48.6	66	3.9	44	1067

a) Maximum bending load. b) Modulus of rigidity. c) Shearing strength.

d) Maximum shearing load.

e) Load applied parallel to the aligned direction or face veneer grain direction.

f) Load applied perpendicular to the aligned direction or face veneer grain direction.

るとTable 6-2のようになる。表より、本実験で採用した製造条件では、ヒノキICボードの曲げ破壊係数は合板には遠く及ばないが、比重0.75のパーティクルボード以上の値を示し、また、曲げヤング係数についてもパーティクルボードおよび中質繊維板と同等もしくはそれ以上の値を示すことが分かる。

これらの低比重ボードについて、実際の使用を考えると応力度で示される曲げ強さの値よりも、材料としての厚さを考慮した曲げ破壊荷重 ( $P_{bmax}$ ) の値を比較した方がより現実的であると思われる。

ヒノキICボードは12mm構造用合板と比較すると、曲げ破壊係数では約50%、曲げヤング係数では約40%の値を示した。合板と製造ボードの曲げ試験時のスパンは異なっているので、曲げ破壊荷重を直接に比較はできないが、破壊時の曲げモーメントで見るとヒノキICボードは合板の約85%を示した。また、ヒノキボードおよびブナICボードの曲げ破壊荷重は、配向性ストランドボードの100%以上を示している。これらの結果から、曲げ破壊荷重はボード厚さが増すほど大きくなるのは当然であるが、常態についての比較では、ヒノキPFボードは配向性ストランドボードおよびパーティクルボードの代替として、またヒノキICボードは12mm合板の代替として利用できる可能性が示唆された。

せん断弾性係数については、ヒノキボードは本実験で最も大きな値を示した配向性ストランドボードの約90%の値を示し、また、ブナボードはパーティクルボードあるいは中質繊維板と同等かそれ以上である。曲げ試験では合板の50%程度の性能であったが、せん断弾性係数は約3倍の値を示していることから、低比重ボードの面内せん断変形に対する抵抗性は、市販ボードと同等かそれ以上であることが分かる。

配向性ストランドボードと合板は、配向方向あるいは表面単板の繊維方向が荷重方向と平行(∥)なものと同様に垂直(⊥)なものについて実験したが、理想的にせん断試験が行われればせん断弾性係数は等しくなるはずであり、本実験では荷重方向の相違は認められなかった。

一方、せん断強さは配向性ストランドボードⅠおよび合板は大きな値を示し、ヒノキⅠCボードの1.5~1.7倍であるが、パーティクルボード、中質繊維板ならびに配向性ストランドボードⅡと比較すると、低比重ボードのせん断強さは同等かそれ以上である。また、厚さを考慮したせん断破壊荷重 ( $Q_{max}$ ) で比較すると、ヒノキⅠCボードは合板の約75~85%を示し、配向性ストランドボードⅠにほぼ等しいことから、これらの代替としての可能性を示すものであろう。

以上の結果より、本実験で製造した低比重ボードはボード比重が0.60であれば、市販ボードに匹敵する曲げおよび面内せん断性能を持つことが認められた。

釘一面せん断耐力は側材であるボードの種類、厚さおよび釘の種類に依存<sup>10)</sup>し、側板が厚いほど初期耐力は大きい<sup>9)</sup>ことが知られている。Table 6-3に目標比重0.60のボードのせん断耐力および最大耐力と比較のために供試した市販ボードのそれらを示した。配向性ストランドボードならびに合板は荷重方向が配向方向あるいは表面単板の繊維方向が平行なものと同垂直なものについて実験を行ったが、せん断耐力および最大耐力には方向による明確な差は認められなかった。

低比重ボードの耐力は、せん断耐力では12mm合板の約86~114%を示し、最大耐力は約80~100%を示した。その他の市販ボードを比較すると、せん断耐力は約80~114%、最大耐力では約80~98%となり、比重0.60のボードは合板を含めた市販ボード類とほぼ同等の釘一面せん断耐力を示すことが分かる。

釘の種類で比較すると、せん断耐力についてはCN65はCN50の約1.11~1.35倍、最大耐力では約1.20~1.56倍となり、前述のように釘径および長さの増加による効果は最大耐力で大きく現れている。

短期許容せん断耐力について、低比重ボードと市販ボードとを比較したものをTable 6-3に併記した。木構造計算規準<sup>11)</sup>では、次の(1)式、(2)式によって計算した値のいずれか小さい方を短期許容せん断耐力としている。

$$sP = P_{max} \times 3 / 4 \times 1 / 2 \quad (1)$$

Table 6-3. Results of nailed-joint tests.

	SG	$P_{1.00}^{a)}$		$P_{max}^{b)}$		$s P^{c)}$	
		kgf		kgf		kgf	
		CN50	CN65	CN50	CN65	CN50	CN65
Hinoki IC	0.61	84	104	116	162	43	61
Hinoki PF	0.58	70	78	114	138	43	52
Buna IC	0.57	72	95	100	148	38	55
Buna PF	0.59	73	84	112	140	42	52
PB	0.75	77	104	103	161	38	60
MDF	0.64	72	96	100	154	38	58
OSB $\parallel^{d)}$	0.64	65	80	101	148	38	56
$\perp^{e)}$		63	80	101	152	38	57
Ply- $\parallel^{d)}$	0.66	80	94	125	165	47	62
wood $\perp^{e)}$		79	88	127	162	48	61

a) Load at a joint slip of 1.00 mm.

b) Maximum load. c) Allowable bearing load.

d) Load applied parallel to the aligned direction or face veneer grain direction.

e) Load applied perpendicular to the aligned direction or face veneer grain direction.

$$sP = P_{1.00} \times 3 / 4 \quad (2)$$

ここに、 $sP$ ：一面せん断に対する許容耐力 (kgf)、 $P_{max}$ ：実験により求めた最大せん断耐力 (kgf)、 $P_{1.00}$ ：実験によって求めた相対変位が1.00mmのときのせん断耐力 (kgf)、 $3/4$ ：ばらつきを考慮した係数、 $1/2$ ：安全率2をみた安全係数である。

本実験ではすべて(1)式によって短期許容せん断耐力が決定された。本実験で製造した比重0.60のボードはCN50については38~43kgf、CN65は52~61kgfであり、市販ボードのそれらはCN50では38~48kgf、CN65は56~62kgfとなり、市販ボードとほぼ同等の許容せん断耐力が得られることが分かる。

#### 6.4 摘 要

ブナおよびヒノキを原料とした実験室製造の低比重ボードについて、建築構造用面材としての利用が可能か否かを調べるために、曲げ、面内せん断ならびに釘一面せん断耐力試験を行い、市販ボード類のそれらと比較検討した。得られた結果は次の通りである。

1) 曲げ破壊係数、曲げヤング係数ならびに面内せん断強さは小片樹種および接着剤の種類に影響を受けた。ヒノキボードはブナボードよりも高い強度値を示し、またイソシアネート系樹脂接着剤はフェノール系樹脂接着剤よりも優れた機械的性能を与えたが、せん断弾性係数については接着剤の違いによる差は認められなかった。

2) 比重0.60のヒノキボードと市販ボードとを比較すると、12mm構造用合板には及ばないが、比重0.75のパーティクルボードと同等の曲げ性能を示した。せん断弾性係数およびせん断強さについてもヒノキボードは市販ボードと同等かそれ以上の値を示し、常態についての比較ではこれらの代替として利用されることが示唆された。

3) 釘一面せん断耐力とボード比重には一次の関係が認められ、比重増加にともなうせん断耐力の増加の傾向には、小片樹種および接着剤の種類による差は認められなかった。

4) 比重0.60のボードは市販ボード類とほぼ同等の釘一面せん断耐力を示した。釘の種類で比較すると、初期剛性についてはCN65はCN50の約1.11~1.35倍、最大耐力では約1.20~1.56倍となり、釘径および長さの増加による効果は最大耐力で大きく現れた。

以上のように本実験で製造した低比重ボードは、比重が0.60であれば建築構造用面材として利用できる可能性が示唆された。ただし、これは常態についての比較であり、構造用材料として使用する場合に重要となる耐久性に関するデータの蓄積が必要であろう。

## 文 献

- 1) Kawai, S.; Sasaki, H.: *Mokuzai Gakkaishi*, 32(5), 324-330(1986).
- 2) 川井秀一ほか3名: 木材学会誌, 32(11), 876-882(1986).
- 3) 須田久美、川井秀一、佐々木 光: 同上, 33(5), 376-384(1987).
- 4) 川井秀一、須田久美、佐々木 光: 同上, 33(5), 385-392(1987).
- 5) 関野 登: 同上, 33(12), 957-962(1987).
- 6) 関野 登: 同上, 33(6), 464-471(1987).
- 7) 関野 登、森崎 信: 同上, 33(9), 694-701(1987).
- 8) 大熊幹章: 同上, 12(3), 123-128(1966).
- 9) 杉山英男: "木構造", 彰国社, 1971. p.303.
- 10) 有馬孝禮ほか3名: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1982, 2061-2062.
- 11) 日本建築学会: "木構造計算基準・同解説", 日本建築学会, 1973. p.158.

## 第7章 総括

小片が接着剤によって結合されているパーティクルボードの性能は、小片結合力の優劣に影響を受ける。低比重パーティクルボードは小片量が少なく、低圧縮圧下で成板されるため、小片同士の密着性に関連する接着不良が危惧される。そこで本研究の前半ではこの物理的、機械的性能が発現する機構について、ボード内部における個々の小片の積層状態および小片の圧縮変形を検討し、さらにボードの厚さ膨潤機構の解明を試みた。後半では低比重パーティクルボードが構造用材料としての性能を備えているかを明らかにし、種々の機械的性質について市販の木質材料と比較検討した。

低比重パーティクルボードの形成機構を解明する端緒として、ボード内の小片の存在状態を明らかにするため、寸法形状を規制した小片を用いて単層の低比重ボードを製造した。原料樹種、圧縮比等の因子がボードの形成に及ぼす影響ならびに材質発現のひとつの指標である小片結合力について検討した。

小片はボード内部で3次元的に重なり合っており、小片間に種々の大きさの空隙が存在し、小片の積層には乱れが生じている。圧縮比が1以上になると、小片が理想的に隙間なく積層された場合より、少ない小片の積層数でボードは成板されることが示された。圧縮前の小片の合計厚さ（積層数×小片の平均厚さ）がボード厚さ（15mm）以下になるのは、高比重小片を用いて圧縮比が1以下のボードを製造したときであった。小片間の空隙率は圧縮比の増加により直線的に減少し、それは小片比重の大きいものほど急激であった。また、圧縮比が2に近づくと空隙はほとんど無くなった。一方、圧縮比が1以下のボードでは小片空隙率は極めて大きく、部分的にマットの高さがボード厚さよりも高くなるので、小片間の接着に必要な圧縮圧が加わってボードが形成される。小片比重が高いものほど大きな圧力を受けて小片間に結合力が発生するが、ボード製造が可能な圧縮比には限度が存在する。

熱圧工程でマットが圧縮されるとき、小片の変形は横圧縮が大部分である。小片が受ける変形の程度は厚さ方向の位置によって異なり、小片の圧縮率はボードの表層付近で高く、中央部は相対的に低くなった。特に針葉樹ボードでは表層部と中央部の圧縮率の差が顕著であった。圧縮比の増加で小片の平均圧縮率は直線的に増加し、この傾向は原料小片の樹種に依存しないことが認められた。圧縮比が1以下の場合でも小片の平均圧縮率が10%程度を示すことは、低比重ボード製造の面から重要なことであり、空隙部の存在の意義は大きい。

ヒノキおよびブナ小片を用い、イソシアネート系樹脂接着剤（以下ICと略記する）ならびにフェノール系樹脂接着剤（以下PFと略記する）により低比重ボードを製造し、その小片結合力の発現について検討した。

表層部と中央部のはく離強さを比較すると、ヒノキボードでは破壊を生じた部分の比重が同一でも、表層部のはく離強さは中央部のそれより大きくなった。これは表層部では小片間の密着および接着剤の硬化が充分であるためと推測された。ブナボードでは表層部の小片圧縮量が少ないので、本研究の比重範囲では小片間の密着性に依存する結合力に差が現れなかった。ヒノキボードのはく離強さの増加の傾きはブナボードより小さく、比重の増加につれて増加率が低下する傾向を示した。これは片同士の接触点における結合力が充分に高い場合には、小片結合力は原料木材の強度値に近づいて飽和するためと推測された。

熱圧時の最大圧縮圧は圧縮比の増加で直線的な増加を示した。増加の傾きは接着剤によらず原料小片比重の影響を受け、同一圧縮比のボードを製造する場合、高比重小片の方がより大きな圧縮圧を必要とした。これらの回帰直線が横軸（圧縮比）と交わる点は0.5~0.6であり、本研究の条件では、ボードとして成形される圧縮比の下限值であると推測された。

はく離強さは圧縮圧の増加に伴って直線的な増加を示し、その傾きは接着剤の種類によって異なり、ICボードの増加の傾きはPFボードの約2倍の値を示した。低圧縮圧で成板されたボードはICとPFとの差が認められず、実用

的な結合をもつボードを製造するためには、I C、P Fともに $10 \text{ kgf/cm}^2$ 以上の圧縮圧を受ける圧縮比を選択する必要があった。

ボードの厚さ膨潤機構を解明するため、ボードの厚さ方向に連続して小片の厚さを測定し、吸湿処理後の小片およびボードの厚さ変化ならびに小片間の空隙率変化について調べ、低比重ボードの厚さ膨潤に及ぼす影響を線形重回帰分析により検討した。

小片の平均厚さ膨潤率と圧縮比には高い相関の直線関係が認められ、小片の平均圧縮率が高いものは厚さ膨潤率が大きく、この増加の傾向は原料小片樹種に依存しなかった。小片が厚いものほど3次元的な重なりが乱れが生じ、熱圧時のセット量が増加するので、厚さ膨潤は大きくなる傾向が認められた。ボードの厚さ膨潤率は圧縮比と直線関係にあり、この増加の傾向は小片の平均厚さ膨潤率と同様に、小片樹種に依存しないことが認められた。小片の平均厚さ膨潤率とボードの厚さ膨潤率には高い相関の回帰式が得られ、小片の厚さ膨潤がボードの厚さ膨潤に強く影響していることが示された。

小片間の空隙はボード比重の増加によって直線的に減少するので、比重が大きいものほど小片間の密着は良好であり、吸湿前後の小片空隙率の変化は少なかった。小片空隙率が大きく、小片間の密着が充分でないブナの低圧縮ボードは、小片の膨潤による結合部の破壊に抵抗できないため大きな厚さ膨潤を示した。以上の結果から、厚さ膨潤を低く抑えるには圧縮比に最適値が存在することが推測された。

原料小片比重、圧縮比等の因子が、低比重ボードの厚さ膨潤に及ぼす影響を線形重回帰分析により検討した結果、3変数モデルが選択され、第1、第2、第3説明変数はそれぞれ圧縮比、ボード比重、小片比重であった。同様にして小片の平均厚さ膨潤率に関する重回帰式を求めると圧縮比、ボード比重の2変数モデルで表すことができた。ボードの厚さ膨潤率の寄与率は、小片の平均厚さ膨潤率のそれと比較して小さいことから、ボードの厚さ膨潤には種々の因子

が複雑に影響を及ぼしていると推測された。この分析の結果から、吸湿厚さ膨潤率に及ぼす単位面積当りの接着剤塗布量の影響は認められなかった。

次に、低比重ボードの製造を目的として提案された、2段階圧縮法の熱圧条件についての基礎資料を得る目的で、初期圧縮時間および解圧時間がボードの性能に与える影響を調べた。

ボードの厚さ方向に現れる最大比重と最小比重の比は、初期圧縮時間が長くなるにつれて表層部小片の塑性変形が増大するため増加する傾向を示した。はく離強さはボード中央部比重の影響を受けるので、2段階圧縮ボードでは初期圧縮時間30秒のとき最も大きな値を示し、この時間の増加に伴って減少する傾向が認められた。熱圧条件の相違によるはく離強さの値は、約2.3倍の差が認められた。解圧時間の増加による熱圧時間（初期圧縮時間と2次圧縮時間の合計）の減少は、中央部の温度上昇を遅らせたが、はく離強さに顕著な差を与えなかった。

曲げ破壊係数ははく離強さと同様に初期圧縮時間の影響を受け、この時間の増加で約 $10 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ の増大が認められた。この時間が90秒のとき最も大きな値を示し、これは表層部比重の増大すなわち比重傾斜に対応していた。解圧時間の増加に伴う熱圧時間の減少により、曲げ破壊係数の差は $7 \sim 13 \text{ kgf/cm}^2$ であった。熱圧条件の相違による曲げ破壊係数の値は、約1.3倍の差が認められた。

解圧時間の増加によるはく離強さおよび曲げ破壊係数の低下は小さく、初期圧縮時間30秒、2次圧縮時間180秒であれば、接着剤の硬化に必要な熱量は充分であると推測された。また、初期圧縮時間が30秒以上であれば、90秒以内の熱板解放によるボード材質の低下は少なく、2段階圧縮法を利用した連続的なボード製造の可能性が示唆された。

低比重ボードの構造材料的な利用を図るには、その機械的性質ならびに耐久性を明かにする必要がある。ICおよび従来より耐水性に定評のあるPFを用

いた低比重ボードの小片結合力ならびに曲げ性能について原料小片樹種（ヒノキおよびブナ）、接着剤の種類による影響を検討した。また、ボードの機械的性能と耐久性には小片結合力の大きさとその低下が大きな問題となるので、減圧吸水・乾燥の劣化促進処理を行い、機械的性質の低下について考察した。

はく離強さおよびせん断強さはボード比重の増加とともに直線的な増加を示し、その傾向は小片樹種および接着剤の種類により4つの直線群が得られた。ICボードの増加の傾きはPFボードよりも大きく、比重の増加とともにその差は大きくなり、イソシアネートの高い接着力が現れた。ブナボードの小片結合力はヒノキボードと比較してその増加の傾きが大きく、より低比重側ではヒノキが優っているのに対して、比重0.60前後でこの値は逆転した。

ボード比重が0.50程度であれば、ブナおよびヒノキPFボードのはく離強さは $5 \text{ kgf/cm}^2$ を上回り、PFによる低比重ボードの製造の可能性が示唆された。構造用パーティクルボードで推奨されている $2 \text{ kgf/cm}^2$ 以上のはく離強さを得る圧縮比の下限値を求めると、ブナについては0.70、ヒノキでは0.80であった。

ボードの曲げ破壊係数および曲げヤング係数はボード比重の増加によって直線的な増加を示し、その増加の傾向は小片樹種および接着剤の種類に依存した。同一ボード比重では、原料比重が小さいヒノキボードの曲げ強度値はブナのそれよりも大きく、また、ICはPFよりも優れた曲げ性能を与えることが認められた。ヒノキICボードとPFボードとを比較すると、曲げ破壊係数の差はおよそ $20 \sim 100 \text{ kgf/cm}^2$ であった。常態の曲げ試験結果から、PFによって製造された低比重ボードは、ヒノキは比重0.50、ブナでは0.60であればJIS-200タイプに合格することが認められ、構造用材としての利用が可能であることが示唆された。JIS-200タイプを上回るときの最小圧縮比を求めると、ICについてはヒノキ1.13、ブナ0.93であり、PFではヒノキ1.32、ブナ1.00が得られた。

原料小片の比重、小片の圧縮率、圧縮比等の因子が、低比重ボードのはく離強さに及ぼす影響を線形重回帰分析により検討した。その結果として3変数モ

デルが選択され、第1、第2、第3説明変数にそれぞれボード比重、小片空隙率、圧縮比が選択された。本分析の結果から、単位面積当りの接着剤塗布量の影響は認められなかった。

減圧吸水・乾燥処理前後の厚さ方向の比重分布より、表層部の比重低下は中央層に較べて大きくなった。比重低下の傾向は高い相関の回帰直線式が得られ、小片樹種および接着剤の種類の影響は認められなかった。また、ボード全体の比重変化から得られた回帰直線はこの回帰式とほぼ一致し、水分の浸入によるボードの比重低下は、表層部と中央層の比重低下の平均として現れ、特に表層部の影響を受けると推察された。

ヒノキPFボードの厚さ回復は最も大きな値を示したが、表層部ならびに中央層のせん断強さの低下は、他のボードと比較して同程度であった。この結果から、比重0.60程度の低比重ボードでは、小片のセット回復が厚さ回復の支配因子であると推察された。

低比重ボードのはく離強さおよびせん断強さの低下は、小片樹種ならびに接着剤の種類によらずひとつの回帰式で表され、本研究の比重範囲では、吸水・乾燥の劣化処理後の小片結合力は常態時の75%以上が残存すると推測された。なお、耐水性能に定評のあるフェノール系樹脂接着剤は、常態における小片結合力はイソシアネート系樹脂接着剤に及ばないが、同等の耐水性を示した。

減圧吸水・乾燥処理後の曲げヤング係数の低下は小片樹種に関わりなく、接着剤の種類に影響を受けることが認められた。ボードの曲げ破壊係数および曲げヤング係数は、接着剤の種類によってその残存率に差が現れ、ICボードでは常態時のおよそ90%、PFボードでは60~70%が残存すると推察された。

曲げヤング係数および曲げ破壊係数は計算によって得られる係数であり、厚さが大きくなるほどこの値は小さくなる。曲げ試験時の破壊荷重ならびに比例限度荷重を処理前後で比較すると、ボード全体ではそれぞれ平均0.96となった。ヒノキボードの場合にはこれらの比は1.00かそれ以上であり、常態時と同等か

それ以上の値を示した。曲げ破壊荷重はボードの厚さが増すほど大きくなり、厚さの増加分が小片結合力の低下を相殺していると推測された。実際にボードを使用する場合には、曲げ破壊荷重の値を比較した方がより現実的であろう。

建築構造用面材として低比重ボードの利用が可能であるかを調べるために、そのせん断剛性および釘接合せん断耐力について検討を行った。

せん断弾性係数ならびにせん断強さは、曲げ性能と同様に比重の増加とともに直線的に増大する傾向を示したが、せん断弾性係数は小片樹種の影響を受け、接着剤の種類による差は認められなかった。パネルせん断試験では応力がボードの厚さ方向にほぼ平均して加わり、これに対応するひずみは厚さ方向の平均値として生じるため接着剤の種類による差が現れず、せん断応力による小片間の微小なずれは、小片間の結合力が充分であれば応力を伝達する接着点の数の影響を受けると推測された。

曲げと同様にせん断についても原料小片比重が小さい、すなわち圧縮比が大きいボードほど高い機械的性能を有することが認められた。

相対変位が1.00mmのときの釘一本当りのせん断耐力および最大耐力とボード比重には、一次の高い相関関係が認められた。比重の増加に伴うせん断耐力の増加の傾向には、小片樹種および接着剤の種類による差が認められず、小片結合力が充分であれば、釘一面せん断耐力はボード比重によって決定されると解釈された。表層部比重の大小はこれらのせん断耐力に影響を及ぼさなかった。

目標気乾比重0.60の低比重ボードと市販ボードの機械的性質を比較した。本研究で製造したボードの曲げ性能は、12mm構造用合板の曲げ破壊係数の約50%、曲げヤング係数では約40%の値を示し、また比重0.75のパーティクルボードおよび中質繊維板と同等もしくはそれ以上の値を示した。これらの結果から、常態曲げ試験についての比較では、ヒノキP Fボードは配向性ストランドボードおよびパーティクルボードの代替として、またヒノキI Cボードは12mm合板の代替として利用できる可能性が示唆された。

せん断弾性係数およびせん断強さについても、低比重ボードの面内せん断変形に対する抵抗性は、市販ボードと同等かそれ以上であることが認められ、本研究で製造した低比重ボードはボード比重が0.60であれば、市販ボードに匹敵する面内せん断性能を持つことが認められた。

釘一面せん断耐力および最大耐力と市販ボードのそれらを比較した結果、せん断耐力は約80~114%を示し、最大耐力は約80~100%となり、比重0.60のボードは合板を含めた市販ボード類とほぼ同等の釘一面せん断耐力を示した。

短期許容せん断耐力について比較すると、本研究で製造したボードはCN50については38~43kgf、CN65は52~61kgfであり、市販ボードとほぼ同等の許容せん断耐力が得られることが認められた。

以上のように、低比重パーティクルボードとして形成される圧縮比の下限值は0.5~0.6であり、構造用途に利用するためには小片樹種、接着剤の相違により異なるが、圧縮比の下限值は0.9~1.3であると推測された。本研究で製造した低比重パーティクルボードは、比重が0.60であれば建築構造用面材として利用できる可能性が示唆されたが、これは常態についての比較であり、構造用材料として使用する場合に重要となる耐久性に関するデータの蓄積が必要である。

現在では低比重パーティクルボードの製造は行われていないが、本研究の成果が今後のボード製造に多少なりとも役に立つことを願う次第である。

## 謝 辞

本研究の遂行ならびに論文の作成にあたり、終始ご懇篤なるご配慮と種々のご教示、ご指導を賜りました東京大学農学部大熊幹章教授に対し衷心より感謝の意を表します。

また、本論文の取り纏めに際し、貴重なご助言ならびにご教示を賜りました東京大学農学部岡野 健教授、有馬孝禮助教授、小野擴邦助教授、太田正光助教授に謝意を表します。

さらに本研究の遂行に当たり、ご指導と様々なご配慮を戴いた職業能力開発大学校鈴木秀三教授、また、実験を行うに当たりご協力を戴いた木質材料研究室の専攻学生諸氏に厚く御礼申し上げます。

