第3回（平成6年度）
研究助成成果報告書

1997年3月

財団法人
トステム建材産業振興財団

はじめに

いま住宅・建材産業は地域環境保護のために、高耐久・高機能そして高齢化社会に対応したより健康的な居住環境形成を提供できる建材技術の開発に積極的に取り組んでいくことが要求されております。

省エネルギー、ライフサイクルコスト低減、良質な建物ストック形成の維持保全などを初めとした社会の多様の要請に応えていくために、総合的な観点から今後より一層の充実・強化の必要を痛感しているところであります。

そのために平成4年より、トステム建材産業振興財団は『住宅・建材産業の分野における調査・研究の充実、国内・海外との交流・協力さらには人材育成に寄与するため』に研究助成を続けて参りました。

本年で6年目を迎え、設立以来5期間における助成先は延べ 109件、助成金額は1億4289万円に達しております。それにより第1回（平成4年）11件、第2回（平成5年）14件、そして第3回（平成6年）15件の成果報告をするに至りましたことは誠に喜ばしい限りでございます。

この第3回報告書に収録されたものは、平成6年度の選考委員会で54件の応募の中から選考され、理事会で承認された22件の研究のうち、研究が終了した15件をまとめ、第3号研究助成成果報告書と致しました。

これらの有意義な研究成果がこれからの住宅・建材産業の発展に貢献できれば幸いと存じます。

当財団としても、今後もこのような研究助成・その成果発表会そして自主事業の運営を図っていきたいと存じますので、よろしくご指導、ご鞭撻の程お願い申し上げます。

トステム建材産業振興財団
理事長　潮　田　健次郎

目　　次

はじめに

第1部　調査研究

1－1　薄肉強靱鋳鉄を応用した建築用排水継手の実用化研究 (94-01)
岩手大学工学部材料物性工学科　教　授　堀江　皓 …… 1

1－2　無加圧焼結法によるアルミニウム基複合材料製造法の開発 (94-03)
岩手大学工学部材料物性工学科　助教授　中村　満 …… 11

1－3　自発的浸透現象を利用した表面硬質アルミニウム建材の開発 (94-13)
名古屋大学工学部材料プロセス工学科　教　授　長　隆郎 …… 25

1－4　地域立脚環境調和型木質複合建材の開発 (94-02)
東京大学農学部林産学科　助教授　有馬　孝禮 …… 35

1－5　紙管の建材使用研究 (94-10)
株式会社坂茂建築設計　坂　茂 …… 57

1－6　ハニカムサンドウィッチ構造材料の材料設計と強度評価に関する研究 (94-20)
横浜国立大学工学部生産工学科　教　授　白鳥　正樹 …… 71

1－7　半地下室の付設温室に関する熱的評価研究（その2） (94-06)
お茶の水女子大学生活科学部　教　授　田中　辰明 …… 101

1－8　数値計算に基づく窓の熱貫流と日射遮蔽（取得）の解析 (94-07)
鹿児島大学工学部建築学科　教　授　赤坂　裕 …… 117

1－9　耐久性に配慮した外断熱設計法の開発 (94-14)
東京大学大学院工学系研究科建築学専攻　助教授　坂本　雄三 …… 129

1－10　高断熱高気密在来木造住宅の合理化オープンシステム工法の研究 (94-22)
室蘭工業大学建設システム工学科　助教授　鎌田　紀彦 …… 139

1－11　国産材生産と地域住まいづくりのリンケージに関する研究 (94-08)
京都大学工学部　助教授　東樋口　護 …… 151

1－12　歴史的都市における都市景観の変容と評価及び保全に関する研究
(94-12)　（3次元ＣＡＤを援用した住居環境の景観整備手法に関する考察）
千葉工業大学工学部建築学科　専任講師　片山　律 …… 165

第2部　論　文

2－1　現代都心住居における3つの問題　－板橋W邸にみるケーススタディー
(94-21)　東京芸術大学大学院美術研究科　博士課程　平岡　善浩 …… 169

第3部　交流・協力

3－1　公開シンポジウム in 福島
(94-04)　東北大学工学部建築学科　教　授　吉野　博 …… 181

3－2　有機系統（ポリマー）建設材料の廃棄とリサイクルに関するＲＩＬＥＭ国際
(94-09)　ワークショップの開催
㈳日本建築学会材料施工委員会
ＲＩＬＥＭ小委員会　主　査　大濱　嘉彦 …… 185

編集後記

１－１　薄肉強靱鋳鉄を応用した建築用配水継手の実用化研究

岩手大学工学部材料物性工学科
教授　堀　江　　皓

(研究の背景と目的)

屋内に使用されている建築用配水継手はビル等の建築物各階の配水を集合する機能をもっており、形状が複雑であることと、防災上の理由から鋳鉄で製造されている。そして我国では形状では21種類、管径で10種類の鋳鉄製建築用配水継手が約２万ｔ／年（60億円）生産されている。しかし、これらの継手は肉厚が10～15㎜と厚肉であるため、きわめて重く、軽薄短小化の時代に、その軽量化が課題となっている。

研究代表者は数年前より自動車の軽量化を目的として、自動車材料を中心に約 550万ｔ／年生産されている鋳鉄の薄肉軽量化の研究を行ってきている。すなわち、鋳鉄は軽量化を目的として薄肉化を図ると、凝固に際してＦｅ－Ｃ系平衡状態図の準安定系凝固に移行して著しく脆弱化する現象（チル化）が起きるため、従来７㎜以下に薄肉化することは困難であった。

研究代表者は基礎研究により、このチル化防止の機構を解明し、希土類元素とカルシウムを鋳鉄に添加することにより、３㎜肉厚まで鋳鉄を軽量化することが可能となった。さらに、㈶トステム建材産業振興財団平成４年度助成により、継手の最適化学成分や材質を研究し、さらにこの結果を基に継手を試作した結果、薄肉強靱鋳鉄を配水継手に適用することは十分可能であり、従来の継手に比べて約 1/3の重量となり、大幅な軽量化が達成できることが判明した。しかし、実際にこの鋳鉄を継手に適用して継手の実用化を図るためには、継手を鋳造する場合の鋳造方案を確立しなければならない。すなわち、本鋳鉄は新しく開発された材料であり、さらに肉厚３㎜ときわめて薄いため、溶けた鋳鉄を鋳込むときの鋳込み温度、鋳込み場所、鋳込み口の形状、寸法等（これらを総称して鋳造方案という）が全く不明である。鋳造方案は実際に製品を鋳造する場合に最も大事な因子である。特に、実際の製品は１個だけ鋳込まれることはなく、１度に複数個鋳造されるので、「湯廻り不良」の欠陥を出さないためにも、最適な鋳造方案の研究は重要である。従って平成６年度は鋳造方案の中でも薄肉強靱鋳鉄継手（以下継手）のチル化、流動性、組織に重要な影響を与えるオーバーフローの効果について検討した。

（研 究 内 容）

薄肉強靱鋳鉄物の流動性と組織に及ぼすオーバーフローの影響

1. 緒　言

薄肉鋳物を設計・製作するうえで、流動性を増加させる方案を考えることは重要である。これに加えて鋳鉄鋳物を製造する場合には、位置により冷却速度が変わると黒鉛形状及び基地組織のいずれもが変化し、準安定凝固組織いわゆるセメンタイトが晶出すると鋳造品の機械的性質を著しく低下させるとともに、切削加工も極めて困難になる。そこで流動性と凝固の面からセメンタイトが晶出しないように組織を制御する方案を考える必要がある。

現在、鋳鉄においては、接種によりチル（セメンタイト）の晶出を抑える研究や、鋳物に押湯や「はかせ」（吐かせ、オーバーフロー）を設けてチルを低減させる試みもある。これはガス抜きと兼ねて使用される場合もあるが、先頭を流れる溶湯を取り入れる効果もある。しかし実際にはこのはかせの量や設置場所についての細かいことまでは研究されておらず、よって必然的に無駄が多くなっている。

そこで本実験では鋳鉄の凝固組織変化と流動性におよぼすはかせ、押湯、あがりの効果について詳しく調べ、組織の均一化もしくは組織の制御の方法を検討した。

2. 実 験 方 法

鋳鉄〔4.24％C（mass％、以下同様に省略）、1.59％Ｓｉ、0.27％Ｍｎ、 0.058％Ｐ、 0.021％Ｓ〕、電解鉄、Ｆｅ－Ｓｉ、Ｆｅ－Ｍｎ、Ｆｅ－Ｐ、Ｆｅ－Ｓを用いて、３kHz 、12kWの高周波誘導炉により、アルミナライニングを施した６番黒鉛るつぼ中で１回の溶解量を４kgとして溶解を行った。

片状黒鉛鋳鉄溶湯の目標組成はＣ 3.4％、Ｓｉ 1.8％、Ｍｎ 0.5％、Ｐ0.05％、Ｓ0.03％のＦＣ 240相当である。溶湯は最高加熱温度を1723Ｋとし、1703Ｋで接種剤を 0.4％添加した。

球状黒鉛鋳鉄はＣ 3.8％、Ｓｉ 2.6％、Ｍｎ0.27％、Ｐ0.058％、Ｓ0.02％の溶湯を溶製した。最高溶解温度は1803ＫにおいてＦｅ－Ｓｉ－Ｍｇ合金 1.6％をサンドイッチ法により添加して球状化処理を行った。反応終了後1703ＫにおいてＦｅ－Ｓｉ接種剤を 0.4％添加した。両溶湯とも1603Ｋ及び1673ＫにおいてCO_2 型に注湯した。

Fig. 1には実験に用いたCO_2 型の形状を示す。この試験片は肉厚 3.0㎜、幅60㎜、長さ 190㎜とした。またはかせとして肉厚 3.0㎜、幅60㎜、深さ10㎜の溝を板状試験片の堰から80～ 160㎜の間に数カ所または先端部の位置に設けた。さらに押湯の効果を調べるために湯口高さを70㎜上げて 110㎜とした、型または先端に直径６㎜のガス抜きを付けた型を用意した。この鋳型は注湯速度の違いによる流速の影響を小さくするために、湯口底を大きくしてある。

3. 実験結果及び考察

3.1　片状黒鉛鋳鉄の流動性と組織に及ぼすはかせの効果

はかせの量を製品部（板のみ）の総重量(258ｇ）に対して10、30、50％と３種類変えて先端に設置した場合の組織図をFig. 2に示す。板状試験片の凝固組織は先端からそれぞれレデブライト、モットル、黒鉛組織に分けられるが、はかせ量が増加するにしたがってレデブライトとモットル組織領域は減少し、黒鉛組織領域が増加する。はかせ量30％では先端近くまで黒鉛組織となる。これは単に溶湯先端部がはかせ部に流れ込んだだけである。

Table 1にはそれぞれの組織領域の割合を示す。ここでは堰の先端から黒鉛組織とモットル組織との境界線まで領域を黒鉛組織長さとした。また全て黒鉛組織であった領域の体積を板とはかせを合わせた領域の体積で割った値（黒鉛領域に対する歩留り）を黒鉛領域（％）として表した。板のみをすべて均一の片状黒鉛組織にするためには先端にはかせを50％設ける必要があるがこれでは歩留りが66.6％と悪くなる。そこで歩留りも考慮してはかせの設定を考える必要がある。

Table 1 Length of graphite area and volume fraction of graphite or mottle+ledeburite

Overflow (Volume fraction and position)	Length of graphite area (mm)	Graphite area (%)	Mottle + Ledeburite area (%)
None	98	51.5	49.5
10% at the tip	131	62.6	37.4
30% at the tip	179	72.4	27.6
50% at the tip	190	66.6	33.4
10% at 80mm	116	55.5	45.5
10% at 120mm	158	75.6	24.4
10% at 160mm	137	65.5	34.5
20% at 160mm	151	66.2	33.8

次に板状流動試験型の途中にはかせを設けると組織がどうなるか、はかせの位置と凝固組織領域（レデブライト組織、モットル組織、黒鉛組織）との関係について調べた。Fig. 3は途中に設けたはかせの位置（湯口からの距離）と組織領域について示す。はかせを設けない場合には、モットルと黒鉛組織の領域は湯口から98㎜である。80㎜の位置にはかせを設置すると黒鉛領域は116㎜まで約10％増加する。 120㎜の位置では63％増加する。しかし 160㎜の位置では逆に黒鉛領域が41％まで減少している。または 160㎜の位置に先ほどの２倍の体積のはかせを設けた場合には、黒鉛領域ははかせ 120㎜に設置した場合と同じ効果があり、黒鉛領域は60％増加する。はかせを途中70、90、 110㎜に３箇所設けた場合は黒鉛領域が一番多く、67％増加した。はかせの

中の組織は下から、レデブライト組織、その上がモットル組織となっている。このことから流れてきた溶湯のうち最初に凝固を開始するはずの湯先の部分ははかせの中に溜って除去される。そして後方からは予熱された湯道を通ってきた溶湯がすでに充たされたはかせの上部を素通りして、前方に流れているもの考えられる。これよりはかせは先端に設けるよりは製品の途中に設け、溶湯を入れ変えるようにする方が効果的であり、黒鉛組織領域も増加する。これは同時に硬度および引張強さが良好となる健全部も増加すると考えられる。

Fig. 4 は注湯温度1603Kの場合の結果を示す。鋳込み温度が低下すると、はかせを設けない場合は堰からの距離98㎜で流動が停止している。はかせを90㎜の位置に設置した場合、流動長は130㎜となり33%増加する。また同じ体積のはかせを 110㎜に設けた場合には流動長ははかせなしの場合と変わらない。これは鋳型内を流れる湯先がすでに流動停止寸前（流動臨界固相率）まで冷えており、はかせの中にはいってもそこで凝固停止したために流動長は増加しないと考えられる。これは、はかせの中の組織が下からレデブライト領域が他に比べて大きくなっていることからも説明できる。

はかせを３つ70、90、 110㎜の位置に付けたものと、90㎜の位置で２倍の大きさにしたものとはほぼ同じ効果がみられ、流動長は約 150㎜で53%の増加である。組織は次々に溶湯の入れ替えが起こるために先端付近まで片状黒鉛組織となった。

このように湯先は急冷されるので、この最も凝固しやすい部分を除去すれば流動長は増加するし、黒鉛組織も増加する。はかせを付けると組織の改善はもちろん流動長まで伸ばすことができ、はかせの位置により流動長や組織領域も調整できる。

3.2　片状黒鉛鋳鉄の流動性と組織に及ぼす押湯とガス抜きの効果

Fig. 5 は先端にガス抜きのためにあがりを付けた場合と湯口にさらに高い押湯を設けた場合の流動長と組織領域を示す。

あがりを付けることで鋳型内の圧力抵抗となる空気が良く抜けるので流動長が増加すると考えたが、組織、流動長ともにあまり変化はみられず流動長の改善にはいたらなかった。これはCO_2型自身通気度があるために、ガス抜きの効果はなかったと考えられる。また湯口を高くすると1603Kの溶湯温度でも鋳型キャビテイ内を完全に満たし、はかせ無しに比べ94%も流動長が伸びた。これはヘッドを 110㎜まで70㎜高くすることで流速は約 1.6倍速くなり流動長が伸び鋳型先端部まで流れたものと考えられる。このように流動長増加方法にはヘッドを高くする方法も効果的であるが、試験片の組織領域を比較すると、黒鉛領域は増加するものの、同時に先端部のレデブライト、モットル組織の領域も増加した。流速増加は各組織領域をも増加させることになり、現実には歩留りを考えると押湯を付けることでその分歩留りが下がることになり実用的ではない。このことから製品中央部にはかせを付けることは歩留り向上にもよい方法である。

3.3　球状黒鉛鋳鉄の組織に及ぼすはかせの効果

片状黒鉛鋳鉄の場合、はかせの位置により板状試験片の組織領域が変化することが明らかになった。そこで球状黒鉛鋳鉄でも同じようにはかせを設置した。

Fig. 6 は途中に設けたはかせの位置（湯口からの距離）と組織領域について示す。はかせを設けない場合には、モットルと黒鉛組織の領域は湯口から 105㎜である。はかせを設けることでわずかではあるが黒鉛組織領域が増加している。またはかせの中の組織はすべてモットル組織と

なっている。片状黒鉛鋳鉄の場合同様に先端を流れる溶湯がはじめにはかせの中に入り、その後を流れてきた溶湯がその上を通過していったと考えられるが、片状黒鉛鋳鉄に比べて球状黒鉛鋳鉄はチル化しやすいので（チル臨界冷却速度が小さいので）同じ方案でも黒鉛組織領域の増加はわずかであったと考えられる。

4. 結　言

3㎜厚板状鋳鉄試験片の組織と流動性に及ぼすはかせ、押湯、あがりの効果について実験し、次の結論を得た。

(1) 一般に湯先は急冷され、この最も凝固しやすい部分を除去すれば流動長は増加する。

(2) 先端にあがりを付けた場合は、組織、流動長ともにあまり変化はみられず、流動長の改善にはいたらなかった。

(3) 押湯を付けた場合、流速が速くなるため流動長は伸び鋳型先端部まで流れ、はかせ無しに比べ流動長は94%増加した。しかし、先端部のレデブライト、モットル組織の領域も増加した。

(4) 鋳型中間にはかせ付をつけた場合、はかせの中の組織は下からレデブライト、モットルとなり、先端部の溶湯の入れ換えが起こっている。

(5) 鋳型中間にはかせを付けると、組織の改善はもちろん流動長まで伸ばすことができ、はかせの位置により流動長や組織領域を調整できる。

(期待される効果)

薄肉鋳鉄鋳物のオーバーフローについて詳細に調査した研究はきわめて少なく、今回の実験でオーバーフローの採用により組織の改善、チル防止に効果あり、さらに流動長まで伸ばすことが可能になった。

これにより、薄肉継手の流動長及び組織を制御することが可能となった。

(残る問題点と対策)

前項で述べたようにオーバーフローの効果は明瞭となった。しかし、これは研究室規模での研究効果であり、実際に薄肉継手を製造する場合には現場規模での実用化研究が必要である。

(研究発表の実績)

本研究の一部は共同研究者が日本鋳造工学会第 127回全国講演大会（北海道大学工学部　1995年10月）で発表した。

金田賢治、平塚貞人、新山英輔、堀江皓、小錦利憲

「薄肉鋳鉄鋳物の流動性と組織の改善法」

(実用化計画)

今後実際の鋳造工場で、薄肉鋳造継手の鋳造方案及び材質試験を現場規模で行うことを計画している。

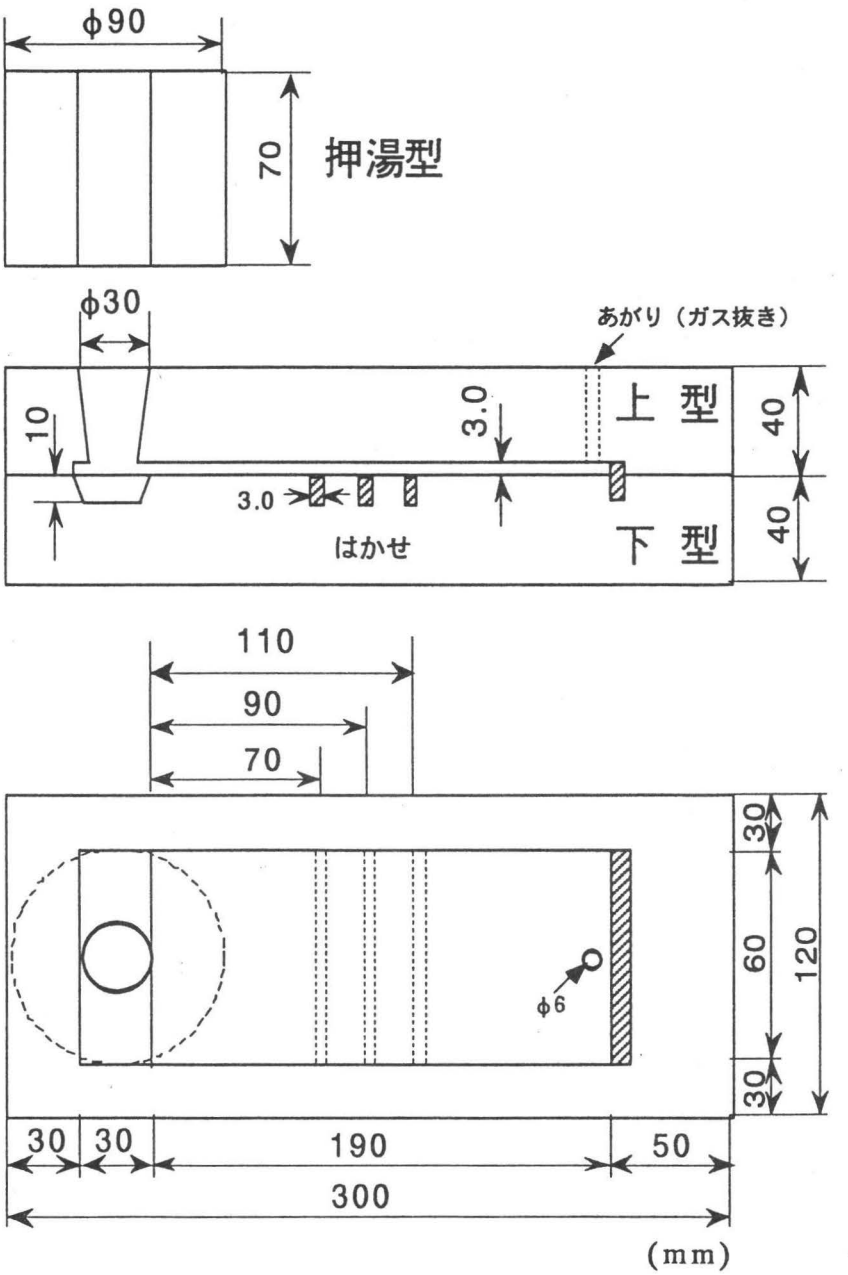


Fig.1 Schematic diagram of CO_2 mold

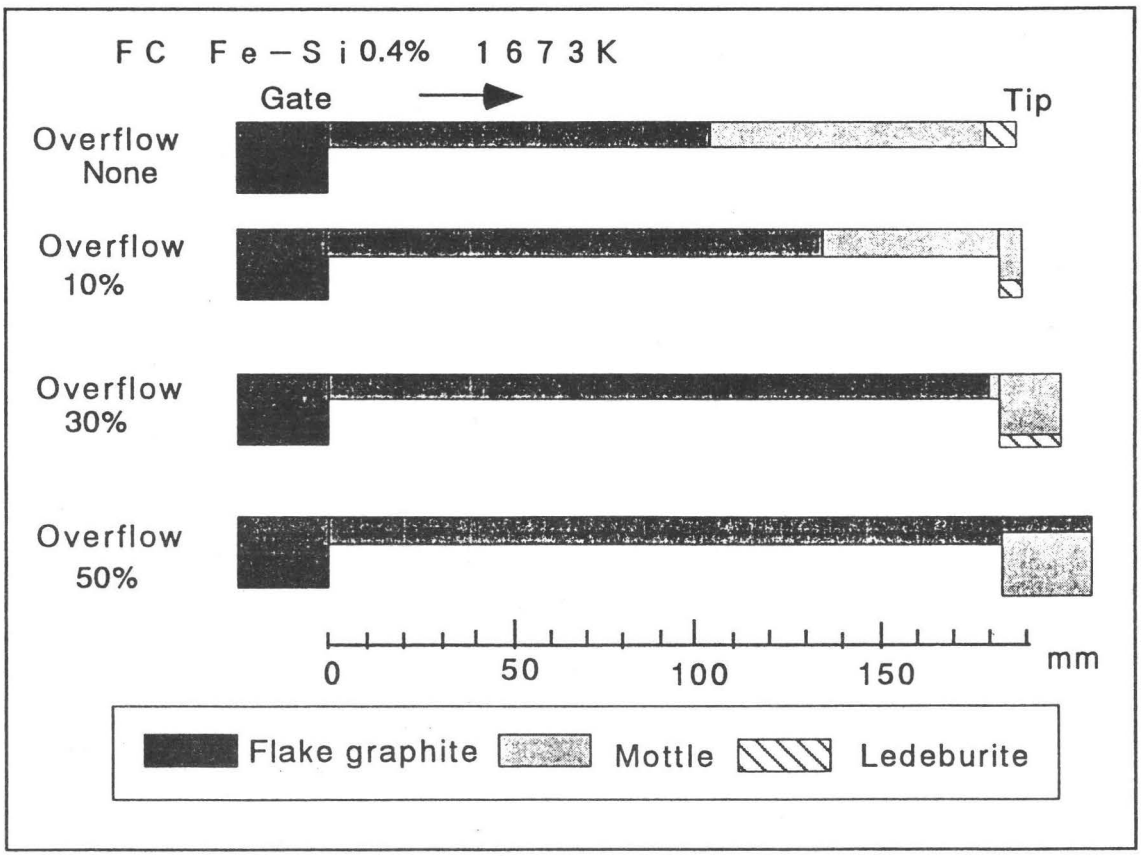


Fig.2 Structure map of plate specimens for different overflow size

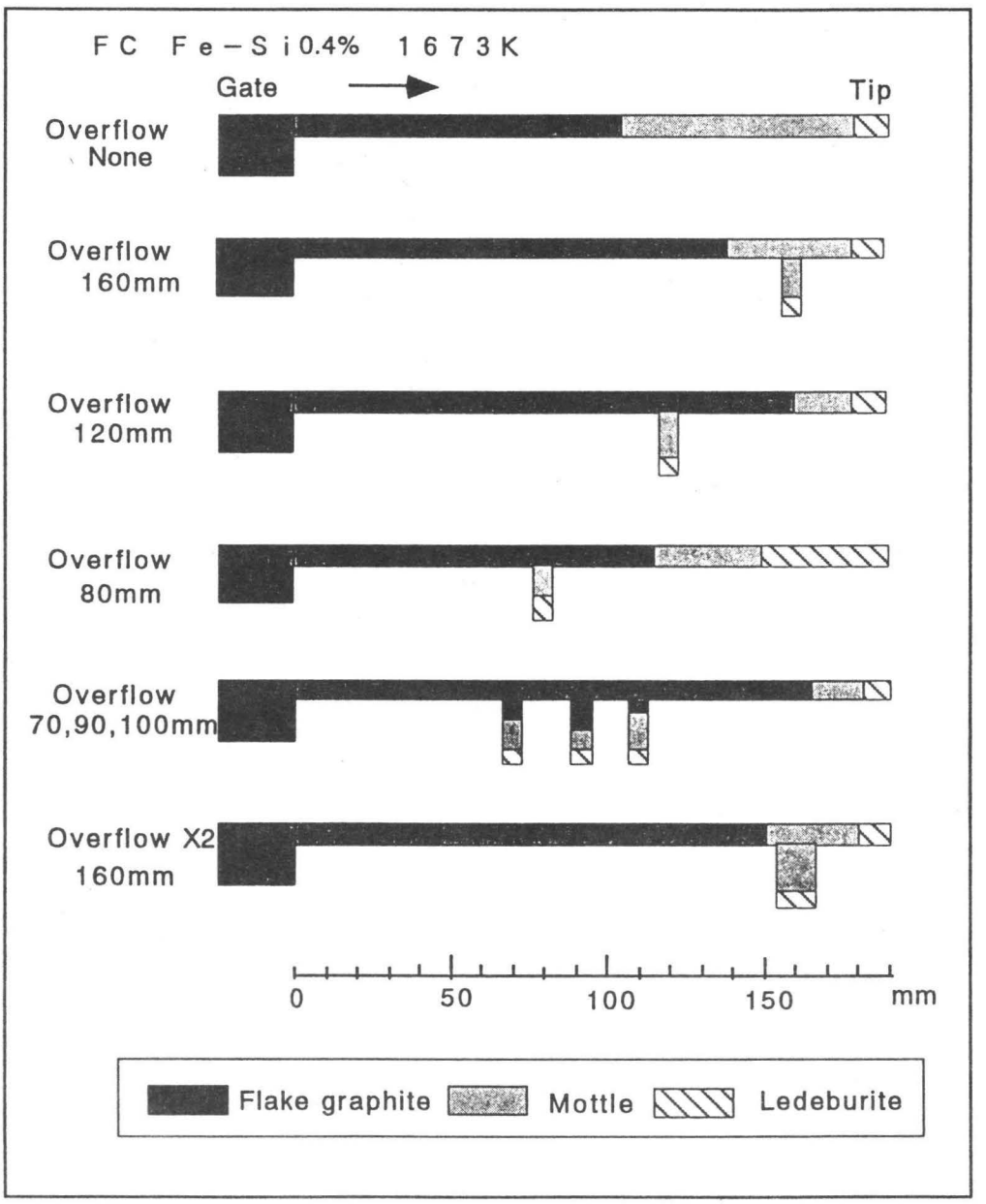


Fig.3 Structure map of plate specimens for different overflow size and positions

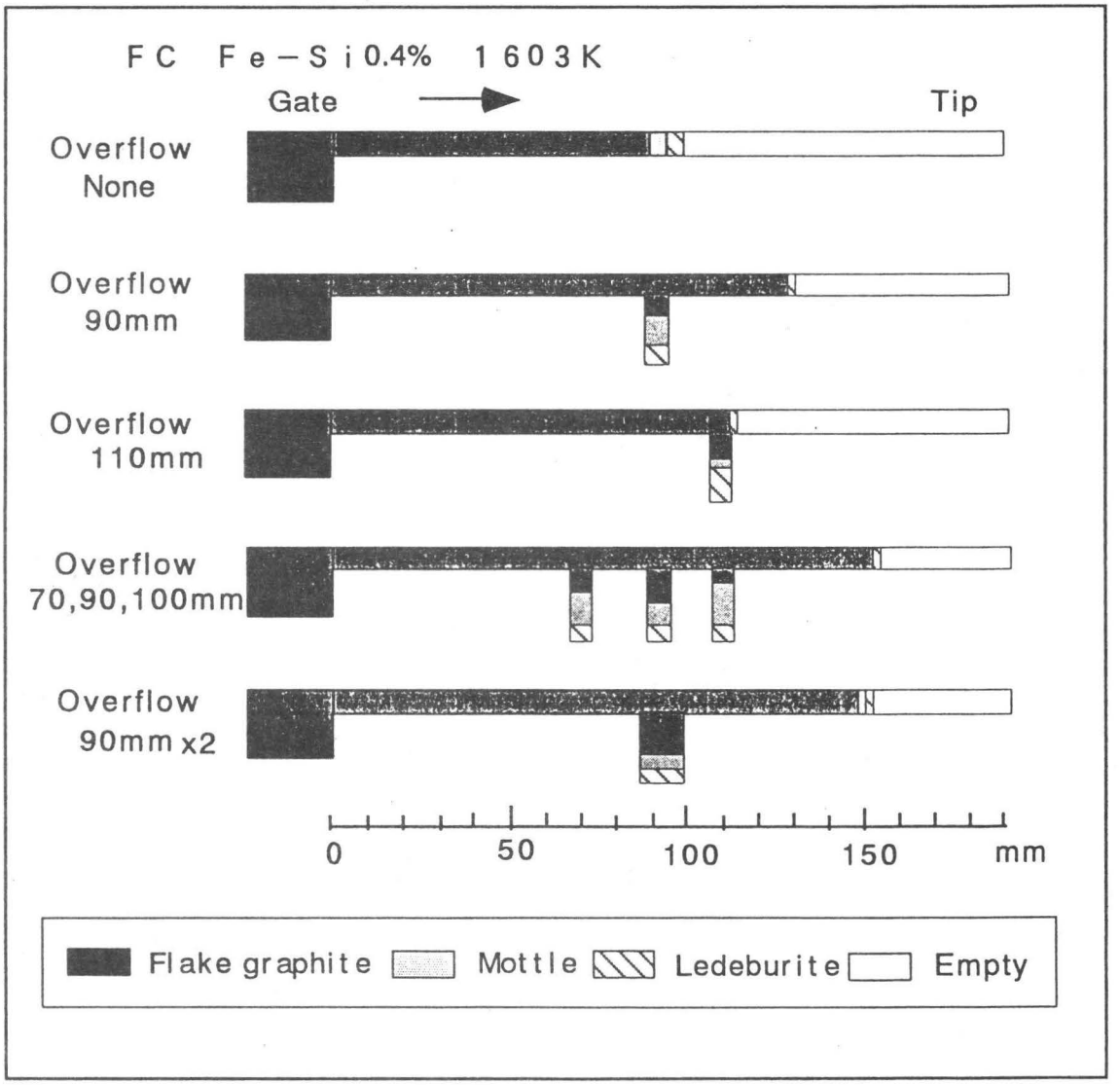


Fig. 4 Structure map of plate specimens with overflow

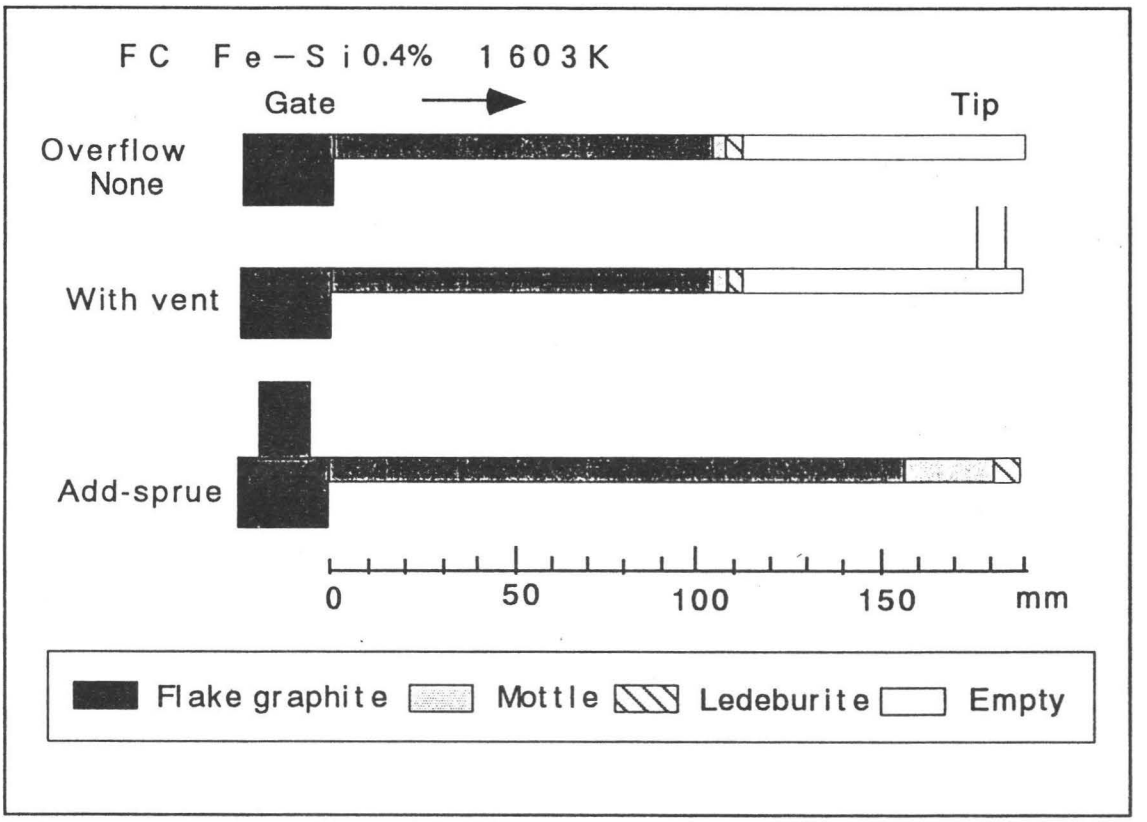


Fig.5 Structure map of plate specimens with vent or sprue

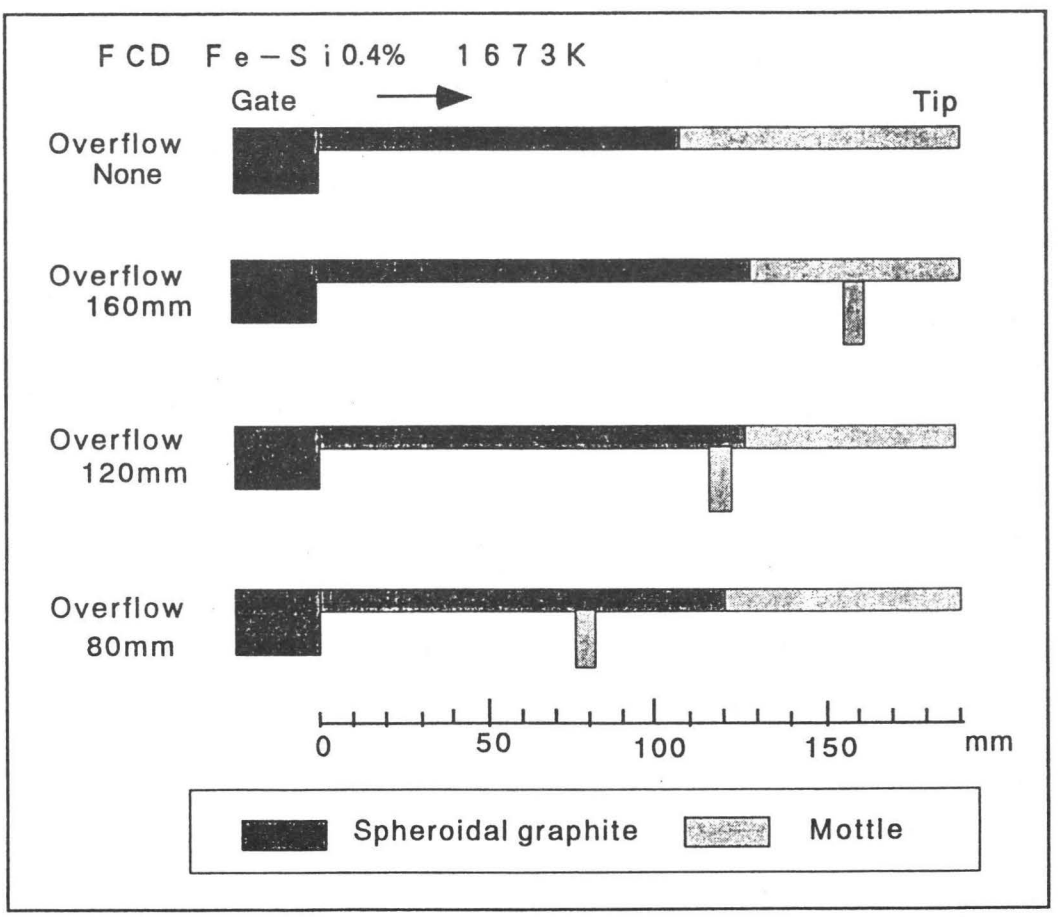


Fig.6 Structure map of plate specimens with overflow

１－２　無加圧焼結法によるアルミニウム基複合材料製造法の開発

岩手大学工学部材料物性工学科
助教授　中　村　　満

1. 研究の背景と目的

建築用アルミニウム合金は現在までに各種組成合金の開発により、著しく高強度、高靱性化しており各種構造材料に使用されている。一方、アルミニウム合金に繊維やウイスカー等の補強繊維を均一分散させた複合材料は溶製材料に比べ、さらに高い比弾性率、比強度および耐熱性を有するにもかかわらず、製造技術が複雑なため比較的高価な材料になっており、輸送関連（宇宙機器、航空機および船舶等）やスポーツ用品等に用いられているが、建築用には用いられていないのが現状である。

本研究は、これらアルミニウム基複合材料の経済的問題に対して従来の高圧鋳造法（溶湯鍛造法）またＨＩＰ（熱間等方加圧法）や一軸加圧による粉末焼結法等の高価な装置を用いない、大気圧下での粉末液相焼結法によるアルミニウム基複合材料の製造方法の開発を目的として研究を行った。

すなわち、実験ではウィスカーのアルミニウム母相への均一分散化のため、ウィスカーの偏析を可能な限り防ぐための混合法を初めに検討した。その後、液相焼結によりウィスカーと母相粒子間の濡れ性を改善するために母相と共晶反応が起こるCu粉末を添加し、諸物性の検討を行った。

2. 実験方法

2.1　供試材

本実験で用いた母材粉末及び添加元素粉末の化学組成と粒度分布をTable 1に示す。母材のAl粉末は－ 350meshのものを用いた。この粉末はアトマイズ粉であり、Al純度は約99.8%である。平均粒径は－45μmに86.1%含まれており、かなり微細な粉末である。添加粉末であるCu粉末は電解銅粉を用いた。純度98%以上で平均粒径は－45μmが大半を占めている。

本実験で用いたウィスカーは、四国化成工業㈱製のホウ酸アルミニウムウィスカー（$9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$）であり、商品名アルボレックスＧである。

Table 2にウィスカーの特性値とFig. 1に結晶構造模式図を示す。このウィスカーの特徴は斜方晶系で図のＣ軸方向に成長し、長さ10～30μm、直径 0.5～ 1.0μmの単結晶である。

Photo. 1に各金属粉末およびウィスカーのＳＥＭによる粒子形態写真を示す。Al粉末はアトマイズ粉で不規則形状であり、かなり微細な粉末である。それに比べCu粉末は電解粉末の特徴を示し、若干粗大粉に見える。一方、ホウ酸アルミニウムウィスカーは微細な針状であり、炭化珪素

ウィスカーや窒化珪素ウィスカーに見られるウィスカー表面の凹凸やウィスカーの曲がりはほとんど認められなかった。

2.2 実験フローチャート

Fig. 2に本実験で行った複合材料作製フローチャートを示す。まず、母材のAl粉末にCu粉末を質量比（mass%）で添加した後、ウィスカーを体積比（Vf%）で添加し、それを一度に乾式混合する。その後、圧縮成形、脱ガスおよび焼結を行い各種物性の評価を行った。以後、フローチャートの詳細を記述する。

初めに、粉末試料の混合は母材のAl粉末に質量比でCu粉末を0～15mass%添加し、その混合粉に対してウィスカーを体積比で0～20Vf%添加した。混合法は、粉末冶金による複合材料作製時に従来良く用いられる湿式混合法ではなく乾式混合法を用い、母材粉末、添加粉末および強化ウィスカー繊維を一度に自動乳鉢を用い 3.6ks混合した。混合条件は日陶科学㈱の自動乳鉢 AMN－ 200、アルミナ乳棒AL－ 20Bおよびアルミナ乳鉢AL－20を用い、回転数は乳棒モーター 100r.p.m 、乳鉢モーター6 r.p.mで一度に混合量 100ｇまでとして行った。

次に圧縮成形は成形圧力を98～490MPaの間の５条件で予備実験を行い、最も成形性のよかった 294MPa-2s保持にて行った。さらに成形性を良好にするため、金型表面にステアリン酸亜鉛を塗布し型潤滑を行い、Floating die法により圧粉体の不均一をなくするように行った。また、ミクロ組織観察用の試料は秤量を３ｇとし直径20mmの金型を用いた。一方抗折試験および摩耗試験用試料は秤量を約 6.5ｇとし55×10mmの衝撃試験片用金型を用いて、厚さ４～６mmの角柱試験片を作製した。

Fig. 3に脱ガスおよび焼結条件の概略図を示す。Al合金粉末には40～ 120cc/100ｇ程度、SiCwは数十cc/100ｇのH_2を主体とするガスが吸着していると言われている。そのため、粉末冶金法によるＷＲＭの製造において脱ガス処理は不可欠である。

一方、Al粉末に吸着しているガスや水分は約 673Kで 7.2ksの加熱でほぼ完全に除去できることが報告されているが、予備実験で脱ガス時間 1.8ksのものと比較して焼結後の試料には大きな物性の差は見られなかった。このため、本実験では 673K－ 1.8ksで一次脱ガス処理を行い、引き続き昇温速度を 0.17K/sと遅くすることにより二次脱ガスを行った。焼結条件は 843～ 913K－ 3.6ks保持して行い、焼結後は炉冷とした。また焼結雰囲気は真空とし、脱ガスと焼結過程は真空焼結炉を用い 1.0×10^{-3}Torr以下の条件で行った。

2.3 諸物性評価

焼結後、得られた試料は相対密度測定、ミクロ組織及び破面観察、ＥＰＭＡ分析、抗折試験及び摩耗試験を行い、諸物性を比較検討した。

抗折試験は JIS H5501に従い行った。

抗折力値の算出は次式を用いて計算した。

$$抗折力＝3pl／2bt^2 \quad （ＭＰａ）$$

ｐ：破断した時に荷重（Ｎ）

ｂ：試料の幅（mm）

ｔ：試料の厚さ（mm）

ｌ：両支点間の距離（mm）

一方摩耗試験はスガ式摩耗試験機を用いて JIS K5400に従い行った。本実験では荷重を 500ｇ、耐水研磨紙のエメリーナンバーを＃180、＃320、＃700で行った。

規定回転数の摩耗減量の算出は次式を用いて計算した。

$$摩耗減量＝（A－B）×R／M（mg）$$

A：試験前の試験片の重量（mg）

B：試験後の試験片の重量（mg）

R：規定回転数

N：試験回数

本実験は規定回転数Ｒを1000とした。

3．実験結果および考察

3.1　混合法

本実験で用いた粉末冶金法の欠点として、ウィスカーが高Vfになるに従い、Al粉末との均一混合が困難になるという問題点がある。このため、ウィスカーを均一分散させる混合法の検討が大変重要になってくる。均質で安定な混合原料を得る混合法のポイントとして、金属粉末を微細化したり、繊維の損傷を防ぐことが挙げられる。従来良く用いられる湿式混合法は、アセトン溶媒中で超音波撹拌を行うことでウィスカーを損傷させずウィスカー同士の絡みをほぐすことが可能であるため、粉末冶金法によるウィスカー強化複合材料作製時の混合法に適していると言われている。そこで本実験の初期段階で湿式混合法を用いて混合を行った。その結果、ウィスカーの絡みはかなり分離されていることが確認できたが、ウィスカーとアルミニウム母材粉末との混合においてはアセトン溶媒中で逆に分離を起こし、肉眼でもウィスカーの偏析が確認された。この理由は、ウィスカーの見掛け密度が 0.1～ 0.2ｇ／㎤と大変低いこと、及び使用した母材のAl粉末が－ 100meshのものでウィスカーとの粒径に大きな差があったためだと考えられる。このため、自動乳鉢による乾式混合を行い検討した。

Photo. 2は乾式混合前後の各供試粉末のＳＥＭ写真である。乾式混合を行う上で一番心配したのがウィスカー破損であった。しかし、繊維長に変化は無く、破損も見られない。さらに、Cu粉末においてはかなりの微細化に成功し、目的の混合状態は大変良好であると考えられた。

3.2　Cu添加による液相焼結法

3.2.1　ミクロ組織観察結果

Photo. 3は各ウィスカー量に対するCu添加有無の影響を検討したＳＥＭによる組成像（ＢＥＩ）である。元素分析の結果より、白い粒子がCuである。Cu無添加試料ではウィスカー量を５、10、15Vf％と増加させるにつれ母相粒界にウィスカーが偏析し、黒いウィスカーのネットワークが形成されている。このため、Alと共晶反応を起こすCu粉末を添加してウィスカーの分散化、さらには母相強度の向上を期待し、Cu添加（３mass％）を行った。この結果、ウィスカーの偏析を抑えネットワークの分断に成功した。これは、Al－Cuの共晶反応により液相が発生し、母材とウィスカーの濡れ性が改善されたためだと考えられる。すなわち、液相焼結法はウィスカーの母相への分散化に大変有効な焼結法であり、粉末焼結法による複合材料の作製上の最大の問題点である不均質化という面で大幅な改善が可能であることが判った。

3.2.2　抗折試験結果

Fig. 4 にウィスカーを５Vf％添加した試料の抗折試験結果を示す。Cuを添加したことで急激に抗折力が向上している。しかし、Cuを５mass％以上添加しても、それ以上の抗折力の向上は得られない。また、Cuの密度が8.93g/㎤と高いためウィスカー強化Al基複合材料の利点である比強度の面ではCu添加量を増やすと低下することになる。このため、Cu添加量を５mass％までとした。

Fig. 5 にCu添加量を５mass％までとした抗折試験結果を示す。無加圧焼結材料であるためウィスカー量の増加に伴い抗折力は低下する。しかし、Cuを添加することにより、一様に抗折力が向上している。特に、10Vf％ウィスカー添加においてはCuを３mass％添加することで無添加の試料の約２倍近い抗折力が得られた。

Fig. 6 にウィスカーを10Vf％添加した試料の焼結温度の相違による抗折試験結果を示す。Cu無添加および１mass％Cu添加の試料は焼結温度 873K以下では焼結がほとんど進まず抗折力は低い。また、５mass％Cu添加の試料は 893K以上の焼結温度では共晶液相量の増大により試料形状を維持できなかった。３mass％Cu添加の試料は焼結温度の広い範囲で高強度が保たれている。つまり、ウィスカーを分散化させる有効焼結温度範囲が広いことが判明した。

3.2.3　破面観察結果

Photo. 4 はCu添加による影響が一番大きかったウィスカー10Vf％添加した試料の抗折試験後の破面写真である。１mass％Cu添加の試料は破面全体にウィスカーが偏析、集中し、母相がほとんど観察できない。これは、photo. 3 の組成像にも見られたウィスカーのネットワークが形成されている状態であり、それに沿って破断しているためである。しかし、３mass％、５mass％Cu添加の試料においては母相の延性破面も観察でき、ウィスカーが分散化している様子が予想できる。このように無加圧焼結材料の抗折力に対してウィスカーの分散化は密接な関係があった。

3.2.4　摩耗試験結果

Fig. 7 にエメリー番号＃ 180、＃ 320、＃ 700についての摩耗試験結果を示す。耐摩耗性はウィスカーを５Vf％添加することにより無添加試料のものより向上する。しかし、ウィスカー量が10Vf％を超えると耐摩耗性はかなり低下している。一方、Cu添加は抗折力の時と同様、耐摩耗性も著しく向上させることが可能であった。すなわち、ウィスカーが偏析しネットワークを形成している場合は、その部分から剥離し摩耗減量が増加するため耐摩耗性は低下した。一方、ウィスカーが分散化した場合は、ウィスカー本来の高耐摩耗性や母材強度の向上により耐摩耗性も著しく向上する。以上のことから、耐摩耗性においてもウィスカーの分散化が大きく影響していることが判った。

尚、＃ 700番で行った摩耗試験においてはウィスカー量の影響があまり見られないが、これは＃ 700番研磨紙のSiCの粒径が24μmと微細であったため、ウィスカーの表面を削る形になり、ウィスカーの偏析部から剥がれ落ちるような摩耗形態にはならなかったためだと考えられる。

3.3　考察とまとめ

Fig. 8 にミクロ組織観察による分散－偏析傾向、抗折試験および摩耗試験結果をCu量比とウィスカー量比の関係により整理したグラフを示す。Cu粉末を添加し共晶反応を利用することで液相を発生させ、ウィスカーと母相粒子間の濡れ性を改善したため、無加圧焼結材料にもかかわらず

ウィスカー量が15Vf％まで分散化することができた。また、分散化によりウィスカーの粒界でのネットワークが分断されたために抗折力、耐摩耗性とも向上した。本実験において抗折力が 150 MPa以上の領域ではウィスカーは分散化し、それ以下の時は偏析していることがわかる。また、Cu添加により抗折力を最大で 100MPa向上させた。耐摩耗性ではエメリー紙＃ 320番での試験で摩耗減量が21mg以下の領域がウィスカーの分散化が良好の条件であった。耐摩耗性においては無加圧焼結材料でもウィスカーを５Vf％添加することで無添加試料より大幅に向上させることができが、さらにCuを添加し、液相焼結することで、20Vf％ウィスカーの試料まで無添加の試料より耐摩耗性を向上させることができた。

このように無加圧液相焼結法を用いることによりウィスカー10Vf％、Cu３mass％添加アルミニウム基複合材料は実用可能な抗折力 200MPa以上でかつ摩耗減量21mg以下（＃ 320番）の良好な値を得た。

4．結　言

本研究は無加圧焼結法によるウィスカーの母相への均一分散化を目的とし、混合法の検討、またウィスカーと粒子間の濡れ性を改善するために母相と共晶反応が起こるCu粉末を添加して諸物性の検討を行い、以下の結論を得た。

１）混合法

本研究では、従来行われている湿式混合法を用いず自動乳鉢を用い乾式混合を行った。その結果、ウィスカーの損傷は殆ど見られず、添加元素であるCu粉末はかなり微細化され混合状態は良好であった。

２）Cu添加

Cu添加は、固液相温度制御によりウィスカーの偏析を抑え、15Vf％ウィスカー添加まで分散化が可能であることが判明した。また、抗折力は無加圧焼結材料のままでCu無添加の試料より最大100MPa上回った。また、耐摩耗性においても無添加の試料よりかなりの向上が得られた。

３）まとめ

無加圧焼結法におけるウィスカー強化Al基複合材料は、ウィスカー添加量の増加に比例して偏析傾向を増し、それに伴い強度の低下を招く。しかし、Cu粉末を添加し共晶反応を利用することでウィスカーの母相への均一分散化を可能にする。このことは、ＨＩＰやホットプレスを用いた場合や、押出、鍛造等の二次加工後の材料の異方性の改善、すなわち機械的性質の向上等をさせることが可能であると考えられ、実用化に対して有益な知見を得た。

5．期待される成果および問題点

本研究は現在建築用材料としては種々の制約（経済性、材質安定性等）のため、ほとんど用いられていなかったウィスカー強化アルミニウム基複合材料の新しい経済的な製造方法を提案・開発したもので、液相焼結法を用いることで無加圧で焼結したにもかかわらず、ウィスカーが母相に比較的均一に分散した複合材料（Whiskers Reinforced Aluminum Metals)を得ることが可能となった。

このことは今後以下のような分野で新構造用材料として期待できる。

○比強度・比弾性率の高い機能性建築用構造材料

○耐熱性・剛性向上による軽量構造材料

○耐摩耗性等向上により輸送構造部品

一方、開発したWRMは現状のままでは以下のような問題点があり、今後もさらなる検討が必要と考える。

○液相焼結法によりウィスカーの均一分散化が可能になったが、溶湯鍛造法等で得られている市販の複合材料と比較して強度レベルが若干不足しており、現状のままでは、さらに二次加工（押し出し、鍛造等）が必要である。

○最終的には無加圧下での液相焼結法による建築用材料の開発が目的であるが、本研究結果によるとウィスカー量が10～15Vf％までが均一分散の限界であり、実用で用いられている20Vf％複合材料を目標にした場合、さらに新しい手法を提案しなければ抜本的改善はできないと考えられる。

6．研究発表の実績及び予定

1．中村、小綿、大木島：無加圧焼結法におけるウィスカー強化Al基複合材料の作製とその物性
粉体粉末冶金協会第76回講演大会　pp.3－60 1995

2．中村、小綿、大木島：無加圧焼結法におけるウィスカー強化Al基複合材料の作製とその物性
粉体および粉末冶金（粉体粉末冶金協会誌）論文投稿予定　1997

Table 1 Chemical compositions and particle size used powders.

Al

(mass%)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Ti+V	OtherMtl
99.82	0.04	0.13	tr.	tr.	0.01	tr.

Particle size distribution (μ m/mass%)		
<63	63~45	>45
0.4	13.5	86.1

Cu

(mass%)

Cu	Other Material
>98.0	tr.

Particle size distribution (μ m/mass%)			
<75	63	45	>45
1.7	6.2	28.5	63.6

Table 2 Characteristic values of $9Al_2O_3$-$2B_2O_3$ whisker.

Crystal structure	Orthorhombic
Lattice constant (Å) a axis b axis c axis	 7.69 15.00 5.66
Whisker axis	c axis
Mean Length(μ m)	10~30
Mean Diameter (μ m)	0.5~1.0
Mean Density (Mg/m^3)	2.93
Melting point (K)	1693~1733
Young's modulus	400
Tensile strength (GPa)	8
Moh's hardness (GPa)	7

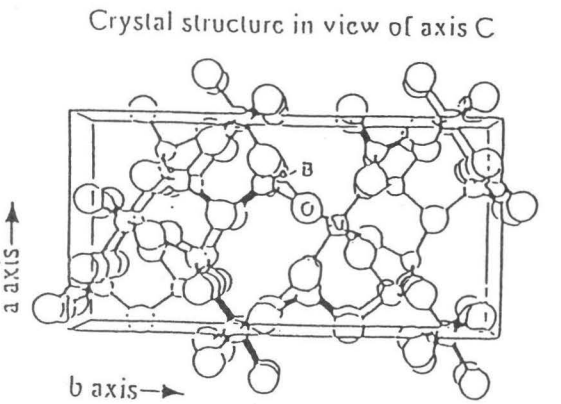


Fig.1 Crystal system of $9Al_2O_3$-$2B_2O_3$ whisker.

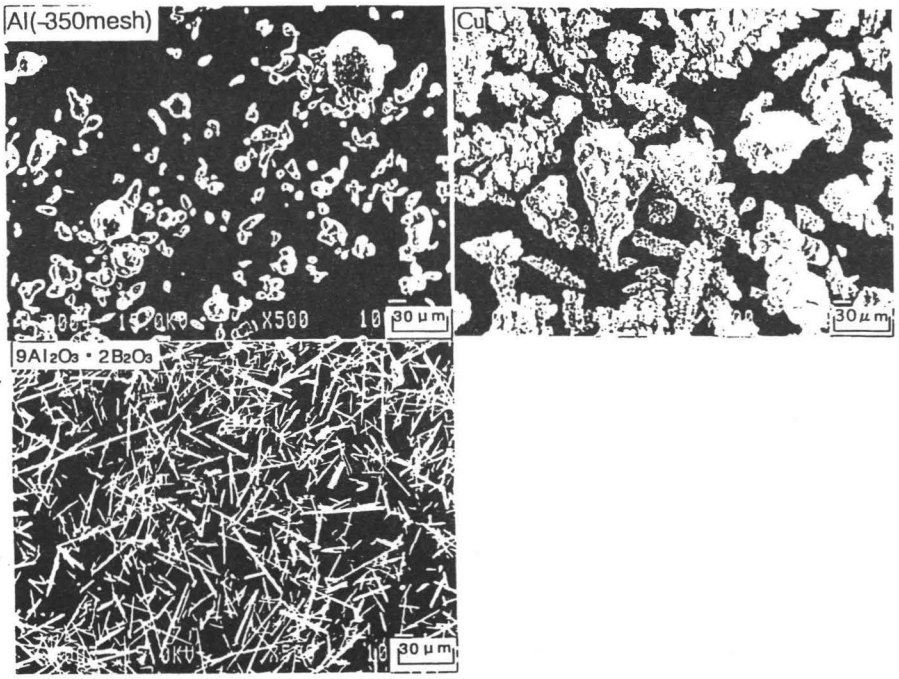


Photo.1 SEM photographs of used metal powders and whisker.

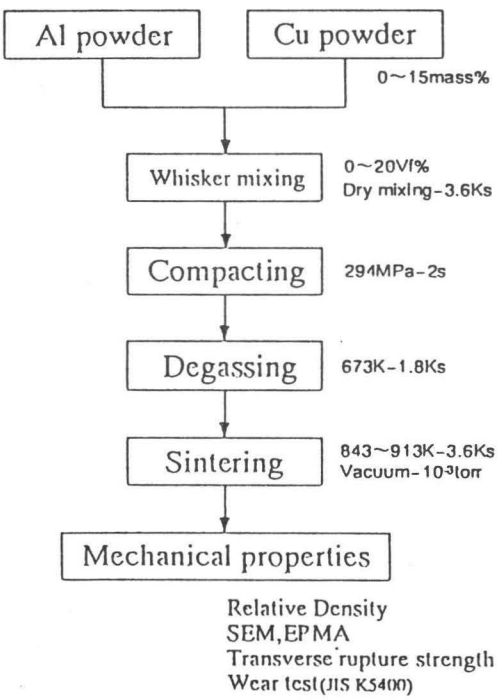


Fig.2 Flowchart of experimental method.

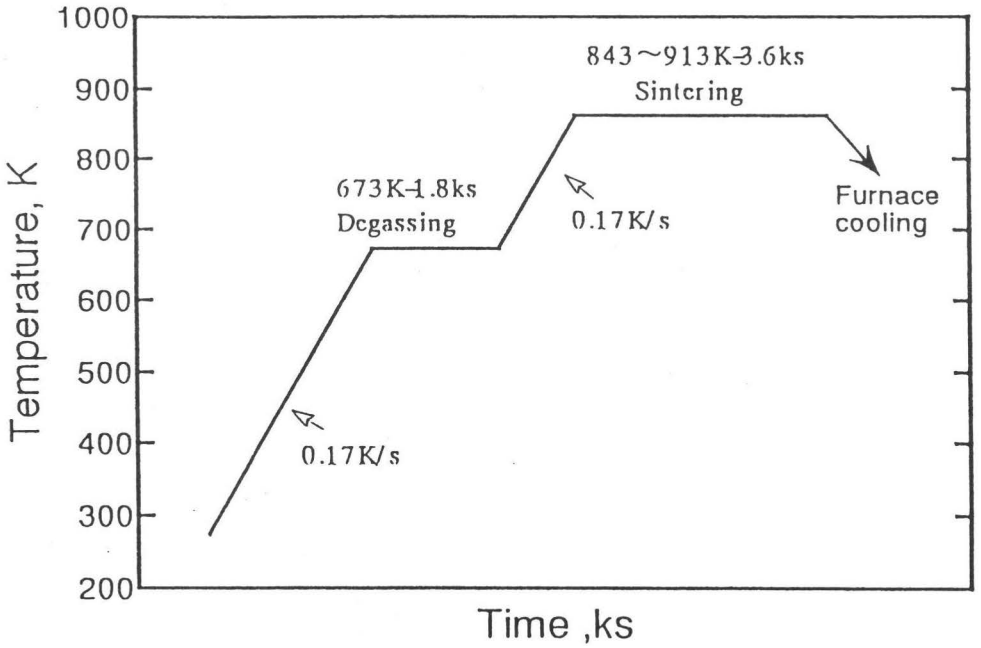


Fig.3 Schematic diagram of sintering condition.

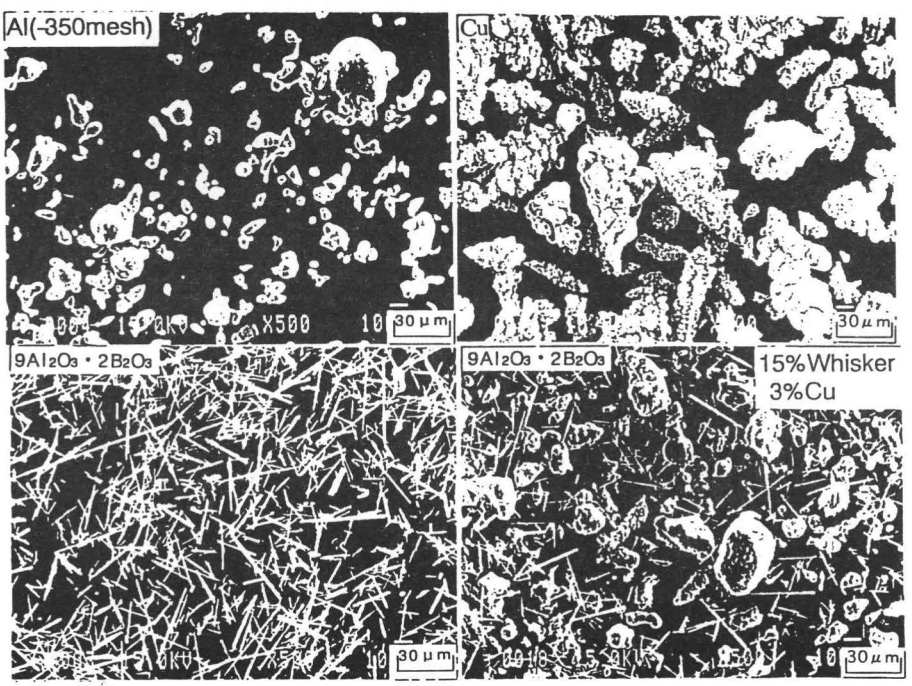
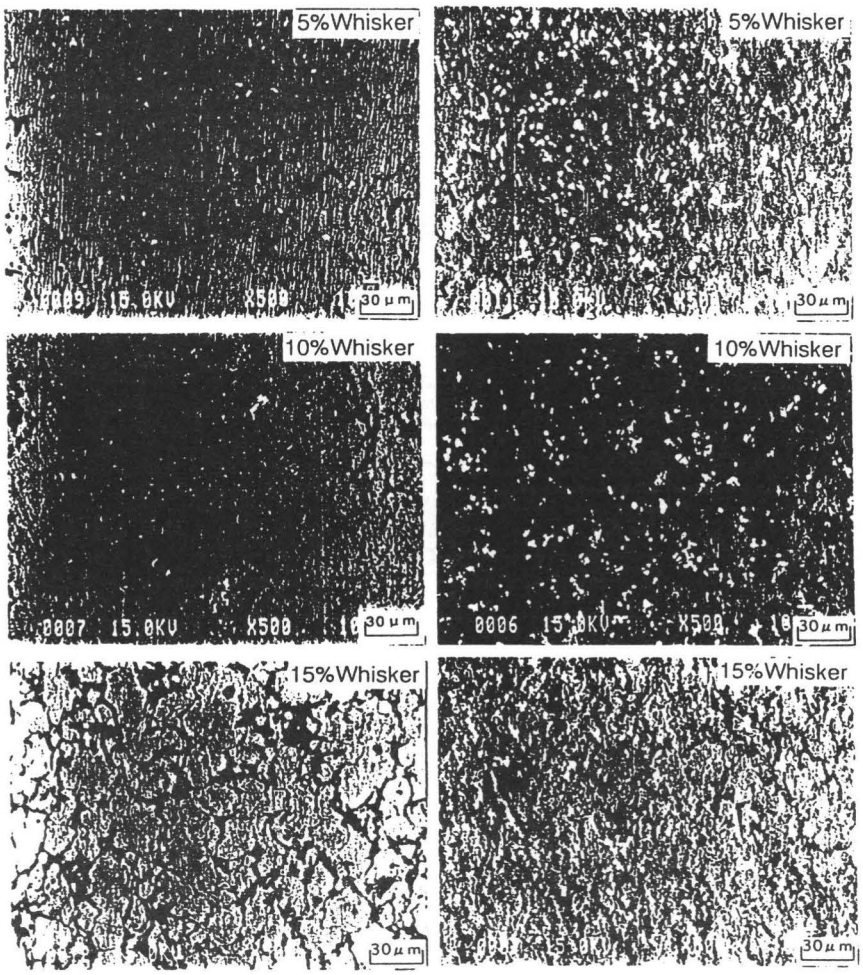


Photo.2 SEM photographs of mixing powders.



Non-Cu added　　3mass%Cu added

873K Sintered

Photo.3 BEI photographs of Al/whisker composites with copper added specimens.

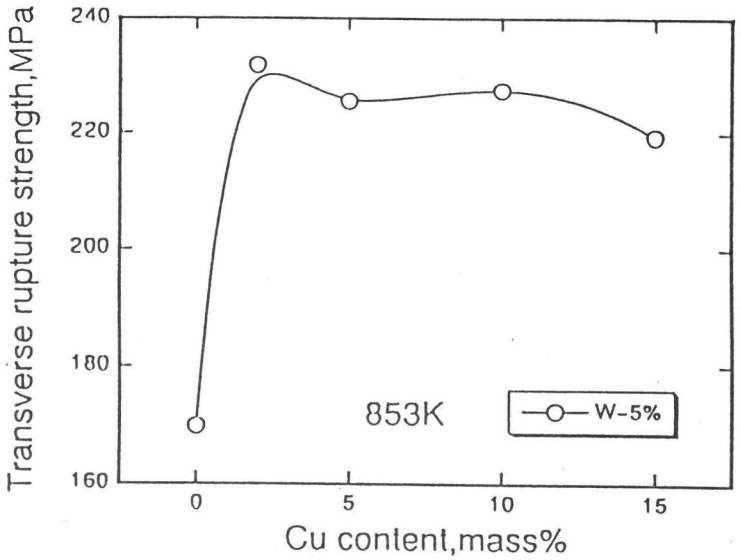


Fig.4 Relation between TRS and copper contents on 5Vf%-whisker composites.

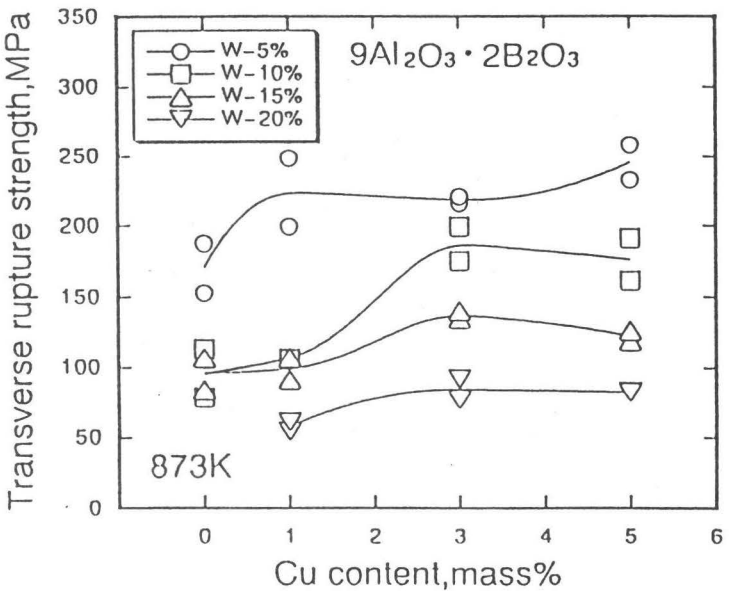


Fig.5 Relation between TRS and copper contents influenced by whisker contents.

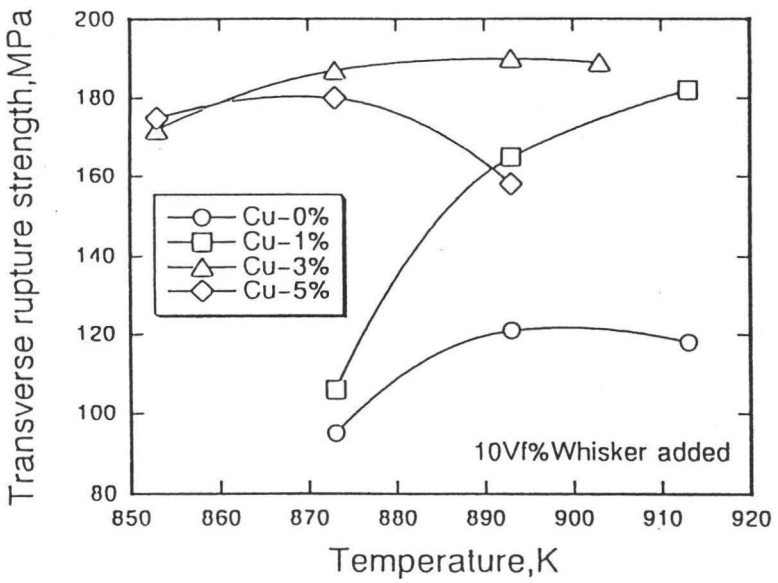


Fig.6 Relation between TRS and sintering temprature by copper contents on 10Vf%-whisker composites.

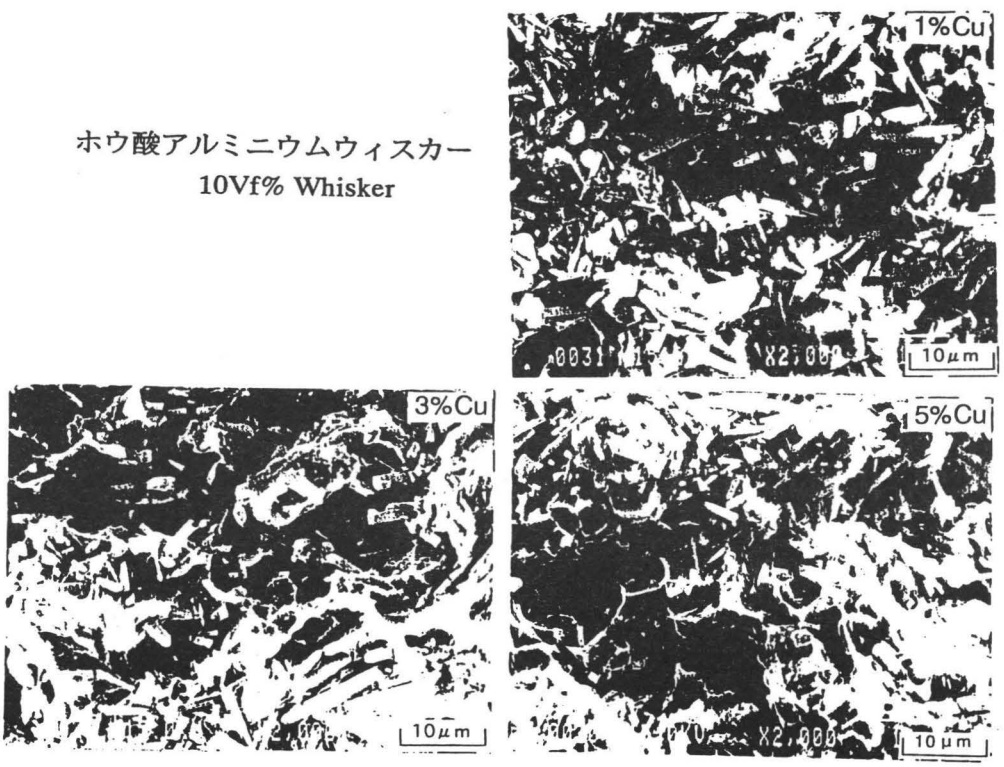


Photo.4 Fractured surface of Al/whisker composites with copper added specimens obtained by transverse rupture test.

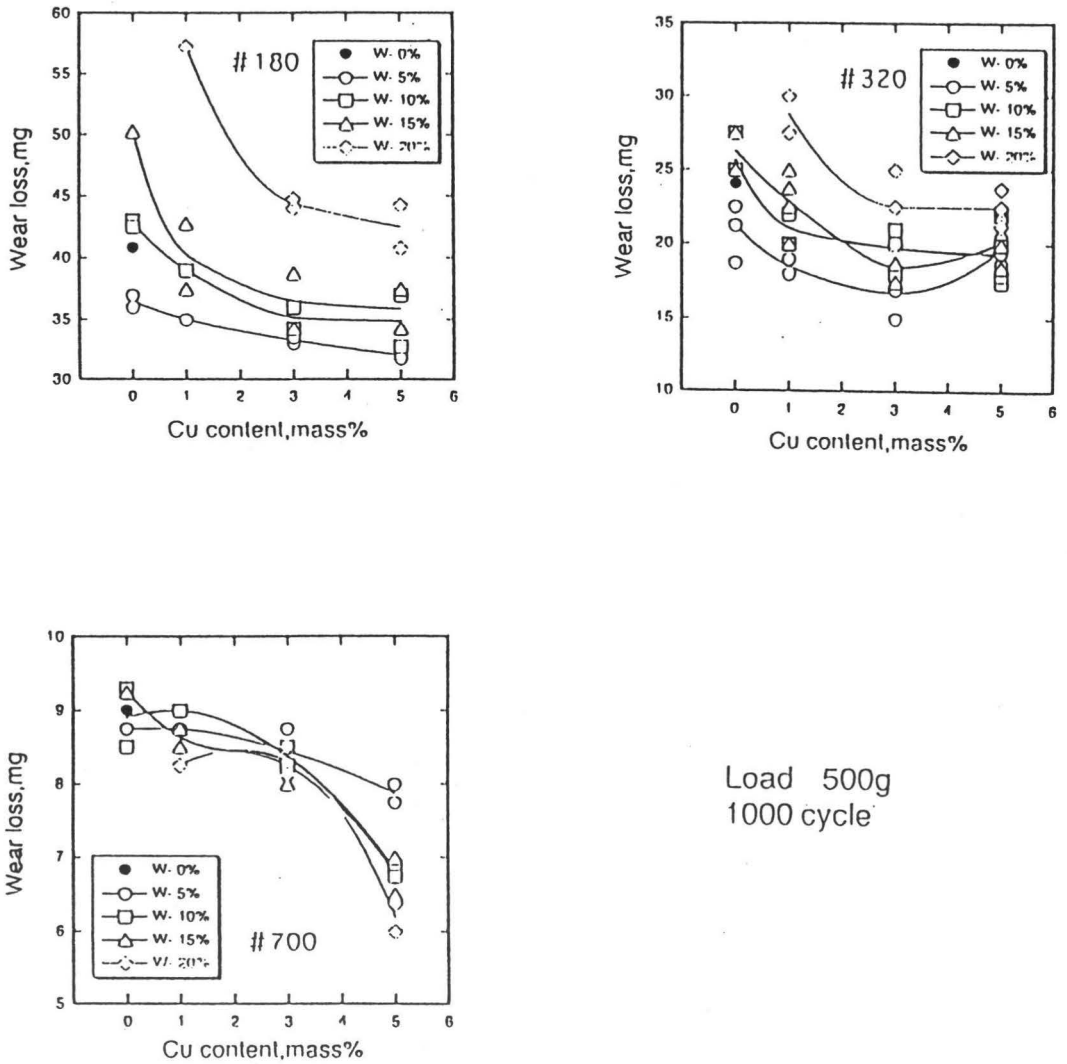
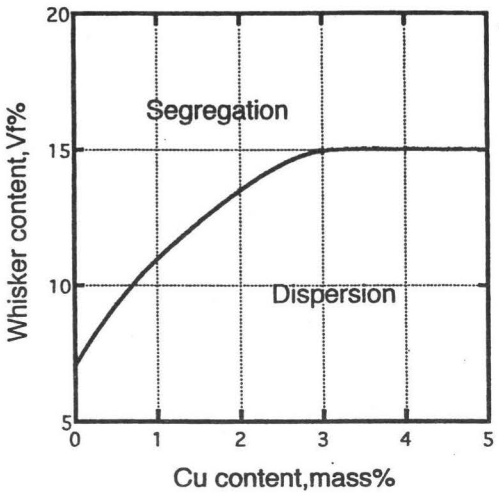
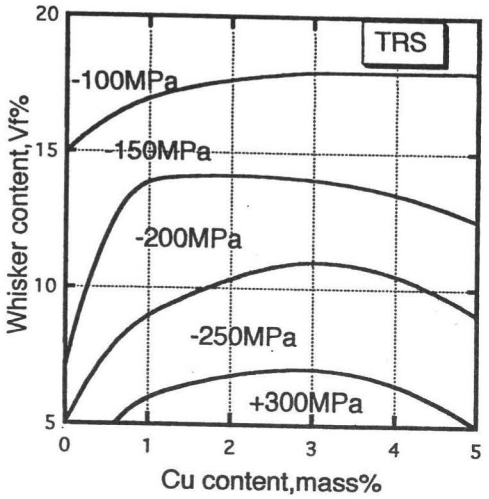


Fig.7 Relation between wear loss and copper contents influenced by whisker contents. (#180,#320,#700)





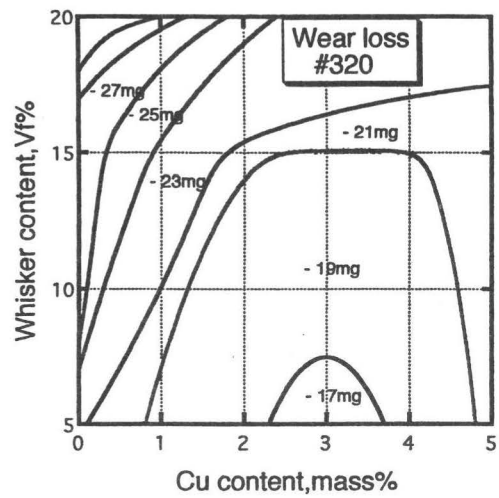


Fig.8 Good area maps on whisker contents and copper contents plane on Al/whiskers composites

１－３　自発的浸透現象を利用した表面硬質アルミニウム建材の開発

名古屋大学工学部材料プロセス工学科
教授　長　　隆　郎

1. 本研究の背景と目的

アルミニウムは実用金属の中でマグネシウムに次いで密度が低いので、「構造用材料における軽量化」の波に乗って各方面で使用され、建材としての適用も多い。最近の科学技術の進歩につれてアルミニウム材料に対する要求も厳しくなり、耐磨耗性、耐熱性、高強度など、優れた特性を発揮することが求められている。このアルミニウムにとっては低比重の利点を有しながらも、比較的柔らかく、塑性変形を受けやすく、したがって表面に傷がつきやすいという問題点を抱えている。

一方、アルミニウムに耐磨耗性を付与する技術としては、Al－Si系合金など高硬質材料の適用、あるいは陽極酸化処理による硬化皮膜形成、さらにはアルミニウム表面へのレーザあるいはプラズマ・アークなどの照射によってアルミニウムを部分的に溶融状態とし、この中に高融点金属あるいはセラミックス粒子を添加する方法、すなわち部分複合化技術の応用が見られる。[1)]

そこで、本研究ではこのようなアルミニウム表面の部分複合化法として、レーザあるいはプラズマ・アークなどを用いないで、新しい方法をとることによって比較的厚い硬化層を形成することにした。すなわち、部分複合化法を出来るだけ簡単にするために、窒化硼素（BN）と金属粒子からなる混合粒子層内に溶融アルミニウムを自発的に浸透させ、この時のin situ 反応によって、液相内に微細な硼化物および窒化アルミニウム(AlN) のようなセラミックス粒子を生成させ、この生成領域を表面に限定して粒子分散硬化層の形成を試みる。これが成功した段階からは、この材料について圧延を試み、その挙動についても検討する。

2. 研究の方法

本研究で用いる硬化法の特徴は原料粒子層への溶融アルミニウムの自発的浸透と複合強化粒子のin situ 反応合成の二つのプロセスを複合化するところにある。

基本的にはアルミニウムに対して良好な濡れ性を示すBN粒子を用い[2)]、さらにこれにBNとin situ反応を生じる物質としてチタンあるいはタンタル粒子を混合し、この混合粒子を坩堝内に装填し、この上にアルミニウム・インゴットを静置後、窒素雰囲気中にて加熱する。この時、原料粒子層そのものの濡れ性は、BNと金属粒子とが混合されているので良好であり、溶融アルミニウムは自発的に浸透し、次に示すようなin situ反応によって、TiB_2（あるいはTaB_2）および AlN 粒子を生成・分散し、複合材料となる。[3)]

Ti（あるいはTa）＋2BN ＋2Al ＝TiB_2（あるいはTaB_2）＋2AlNこの自発的浸透および in situ反応による複合化プロセスの進行領域を、混合粒子装填量を減少することによって狭い範囲に限定すれば、本研究の主目的である部分複合化による硬化表面層の形成が可能となる。

本研究では、このようにアルミニウム材料への部分複合化方法として、外部からセラミックス強化材を添付・結合する方法をとらずに、マトリックスである溶融アルミニウム内においてin situ反応を生じさせ、強化材を合成析出させる方法をとることにした。それはin situ 生成する粒子が微細なうえに、粒径分布の幅が狭く粒子径が揃っていること、さらに粒子の高温での化学的安定性が優れているなど、多くの利点を有することを考慮したことによるもので、これは材料そのものの特性向上につながることを期待させる。

この製造法の概念図を図１に示す。上記の方法によって作製された部分複合材料を二分し、組織観察および圧延特性の検討用に供した。

3. 研究の計画と進捗状況

まず、部分複合化を作製する前に 100%複合材料を創製して創製条件を把握し、次に部分複合化材料を創製するなど、ほぼ計画通り研究を遂行することが出来た。また、部分複合化材料の圧延特性については複合強化材の体積配合率を低下して成功した。

一方、硬度測定および耐磨耗特性については、100%複合材料についてはかなり良好な測定結果が得られたが、部分複合化材料については材料組織の安定性に問題があり、硬度測定および磨耗特性については測定結果がバラツキ、ともに報告できるような測定結果は得られなかった。

4. 今までに得られた結果

(1) 自発的浸透・in situ法による複合材料作製

まず創製条件である自発的浸透温度およびその後の保持時間に関する条件の設定を、100%複合材料を創製することによって行なった。そのために、小さいアルミナ坩堝（内径12㎜、高さ 100㎜）に〔BN＋Ti（あるいはTa）〕からなる混合粒子を充填し、この上に純アルミニウム・インゴットを静置し、窒素雰囲気中にて、まず1473Kまで加熱した。その後、この温度で時間を変化して保持し、次に冷却して複合材料を取り出した。

さらに、このようにして作製した材料を切断し、その断面について、X線回折を行い、in situ反応の進行程度を測定した。すなわち、反応原料であるBNおよび未反応チタンあるいはタンタルから生成される金属間化合物$TiAl_3$ あるいは$TaAl_3$ などが消滅する保持時間を求めた。その結果、BN-Ti系では60～ 180分、BN-Ta系では約５分とみなすことができた。しかも、保持温度も1473Kがもっとも安定した組織が得られることが明らかになった。

(2) 部分複合材料の作製

当初、(1)において述べた標準的操作によって体積配合率Vf＝30%の複合材料を深さ５㎜に狭め、これを表面硬化組織とすれば、部分複合材料は簡単に作製できるものと考え、直ちに圧延特性の研究に進行できるものと予測していた。しかしながら、実際にはこのような高配合率の部分複合化材料を作製したが、これを冷却する過程において熱膨張率の差が原因する残留熱応力が発

生し、複合化部分と金属部分との境界近傍において剥離が生じ、圧延操作が困難となることが判明した。すなわち、熱膨張率が相対的に高い金属マトリックスに、この値が低いセラミックス強化材を混合すれば、全体としての熱膨張率が低下するという一般的現象が、複合材料／アルミニウムというマクロな界面を有する部分複合材料においては、バイメタルのように冷却時に大きな収縮の差を出現させ、そのマクロな界面近傍において残留熱応力を生じ、圧延に支障をきたすことを表す。

そこで、この部分複合化部分においては、in situ 生成強化粒子の体積配合率を低下する方策を考えねばならなくなった。そこで具体的には、〔BN＋Ti（あるいはTa）〕混合粒子にアルミニウム粒子をさらに混合し、この混合粒子を同様に約５㎜の深さになるように坩堝中に装填し、これにアルミニウム・インゴットを乗せた後、加熱して溶融アルミニウムを浸透させた。その結果、溶融アルミニウムの自発的浸透およびin situ 反応によって体積配合率が10％および５％の部分複合化材料を作製できた。なお、この研究からは、より大きな試料を作製して圧延操作を容易にするために、大きな坩堝（内径36㎜、高さ90㎜）を使用した。

このようにして作製した試料を坩堝から取り出した後、組織観察用試料については、浸透の最下端から２㎜の位置において、まず浸透方向に対して垂直な面で試料を切断し、次に浸透方向に平行に切断するなどして作製し、複合材料部分あるいは複合材料／アルミニウムのマクロ界面をＳＥＭによって観察した。

図２および図３は、強化材配合率を10％および５％として作製した（BN＋Ti＋Al）および（Bn＋Ta＋Al）系試料断面のマクロ写真を示す。10％の場合には、複合材料部分における白色部分が示すように、３次元的な大きな亀裂が原料粒子層の中で生じ、ここにアルミニウムが浸透した形の欠陥が認められる。一方、５％の場合には、マクロ的には10％の場合よりも均一な組織になっている。ここでさらに、５％の場合を取り上げ、界面近傍をミクロ観察した結果、図４に示すように、特に大きな亀裂は認められないことが明らかとなった。

このように、硼化物生成金属であるチタンまたはタンタルをBNに混合し、さらに強化材配合率が５％になるようにアルミニウムを添加すれば、熱膨張率の差が低下し、複合材料／アルミニウムからなるマクロ界面の状況を良好にすることができる。

(3) 部分複合材料の組織および圧延特性

図５はこのようにした作製した部分複合材料を圧延する試験方法を模式的に示す。圧延機のロール径は 150㎜であり、またロール回転速度を19rpm として圧延することにした。

部分複合材料の圧延法としては二通りの方法をとった。すなわち、複合材料／アルミニウムのマクロ界面が、ロール面と平行になるような圧延法をMethod(1)、およびその界面がロール面に対して垂直になるような圧延法をMethod(2)とする。Method(1)用の試験片は部分複合材料を縦約８㎜、横約25㎜、高さ約６㎜の直方体形状に切り出し、またMethod(2)用の試験片は縦約８㎜、横約25㎜、高さ約２㎜に切り出した。いずれの試験片も、アルミニウム部分と複合材料部分の体積比は、おおよそ１：１となるようにした。

圧延条件は温度 573Kで熱間圧延であり、また、圧延圧下率を５％刻みで増加させ、圧延後の試験片形状およびマクロ界面の結合状況の変化を観察した。

図６は亀裂が観察され始めるまで圧延した試験片のマクロ写真を示す。

Method(1)では、チタンあるいはタンタルのいずれの場合にも、圧下率25％の時点で、複合材料

部分を横断する形で亀裂が発生した。

Method(2)の場合には、Method(1)による圧延結果に比べて優れ、タンタルを用いて作製した試験片では圧下率40%の時点で、またチタンを用いた材料では圧下率55%の時点で、複合材料部分に細かい亀裂が発生した。この生成粒子種による差異は、in situ 生成されたTiB_2の粒子径が、TaB_2粒子径よりも小さいことに起因する。したがって、BNとの反応金属としては微細化合物を形成するチタンが有効であるとみなすことが出来る。また、このほか圧延による特徴的なこととして、圧延機に挿入される先端部分においては、複合材料／アルミニウムのマクロ界面が剥離していることが観察された。

なお、圧延後の部分複合材料の硬度はビッカース硬度で 300～50の間で大きくバラツキ、また耐磨耗製についても報告できるような結果は得られなかった。

(4) 残る問題への対策とこれから期待される成果

作製した部分複合材料の圧下率は低い。そこで作製した材料を直ちに圧延するのではなく、まず押し出し加工を施した後に圧延するなど、加工法についてさらに検討を加えるならば、全体としての加工量増大も期待されよう。

参考文献

1）松縄朗：第17回軽金属セミナー資料、「界面制御によるアルミニウムの高機能化」（1993）、p.22

2）H.Fujii H.Nakae and K.Okada ; Acta.Met.Mater.,41（1993）, 2963

3）中田博道、長隆郎、金武直幸；日本金属学会誌、58（1994）, 803

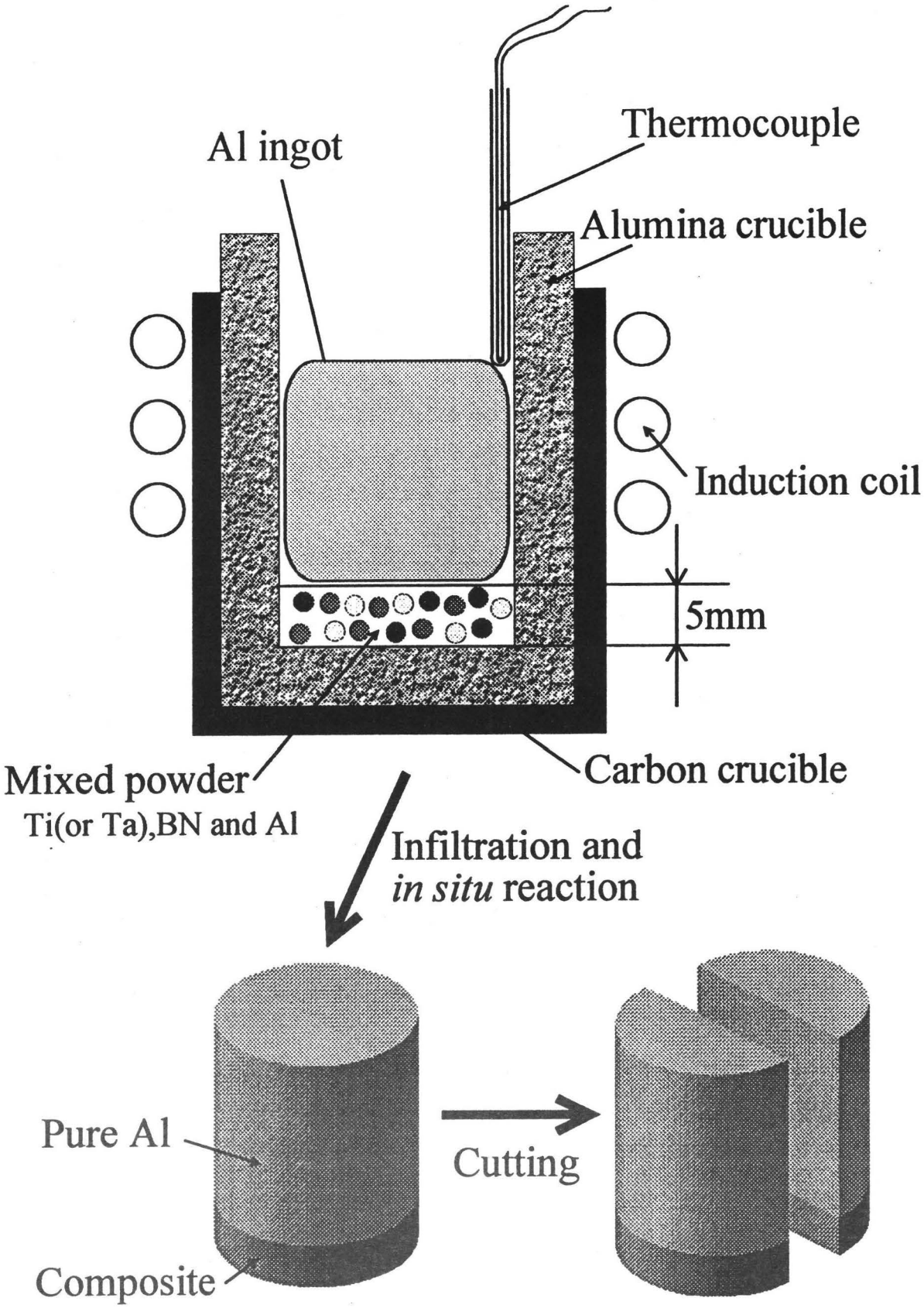


図1　自発的浸透・in situ 反応合成法による部分複合化プロセスの概念図

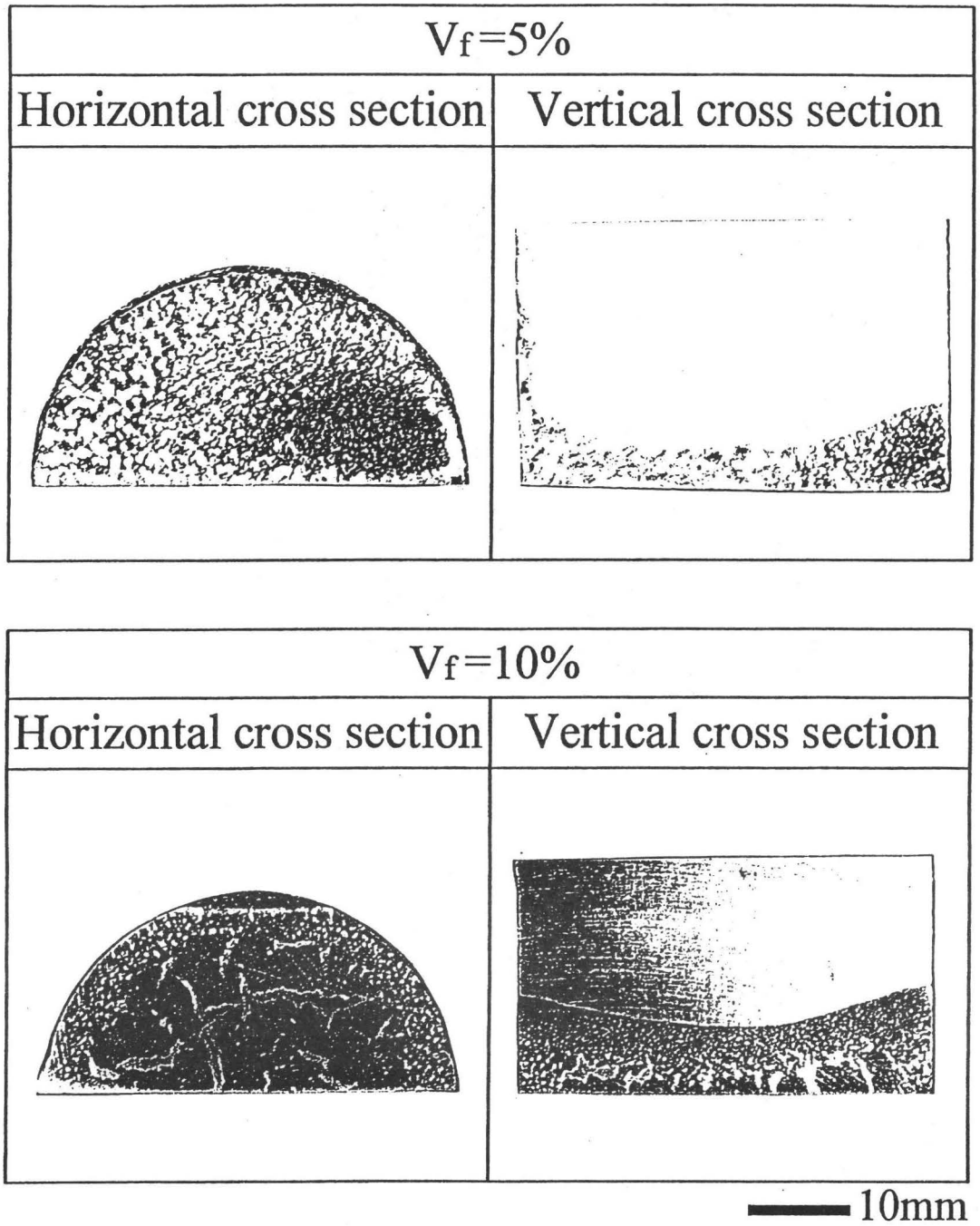


図2　（ＢＮ＋Ｔａ＋Ａｌ）系混合粒子から作製した部分複合材料のマクロ組織

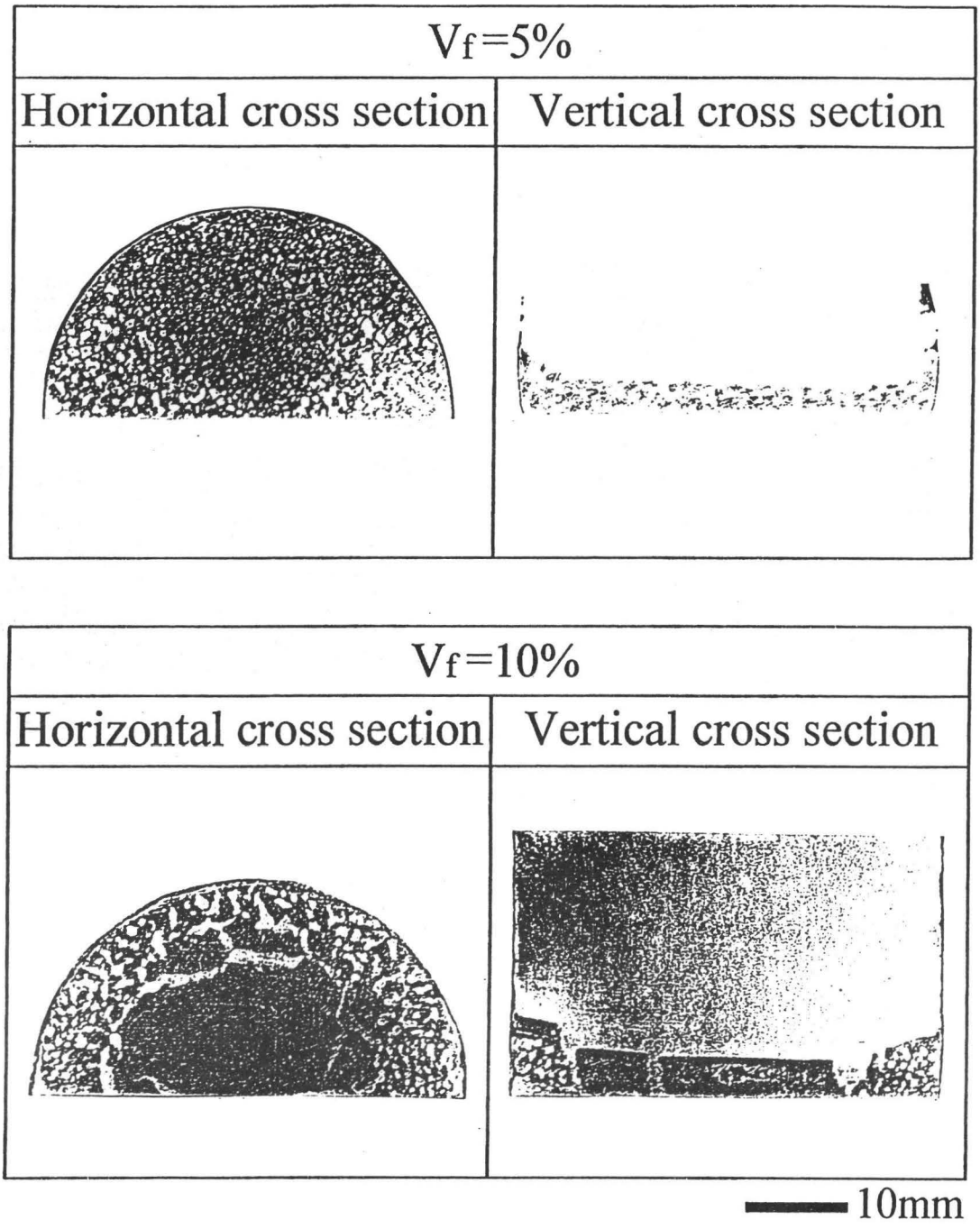


図3　（ＢＮ＋Ｔｉ＋Ａｌ）系混合粒子から作製した部分複合材料のマクロ組織

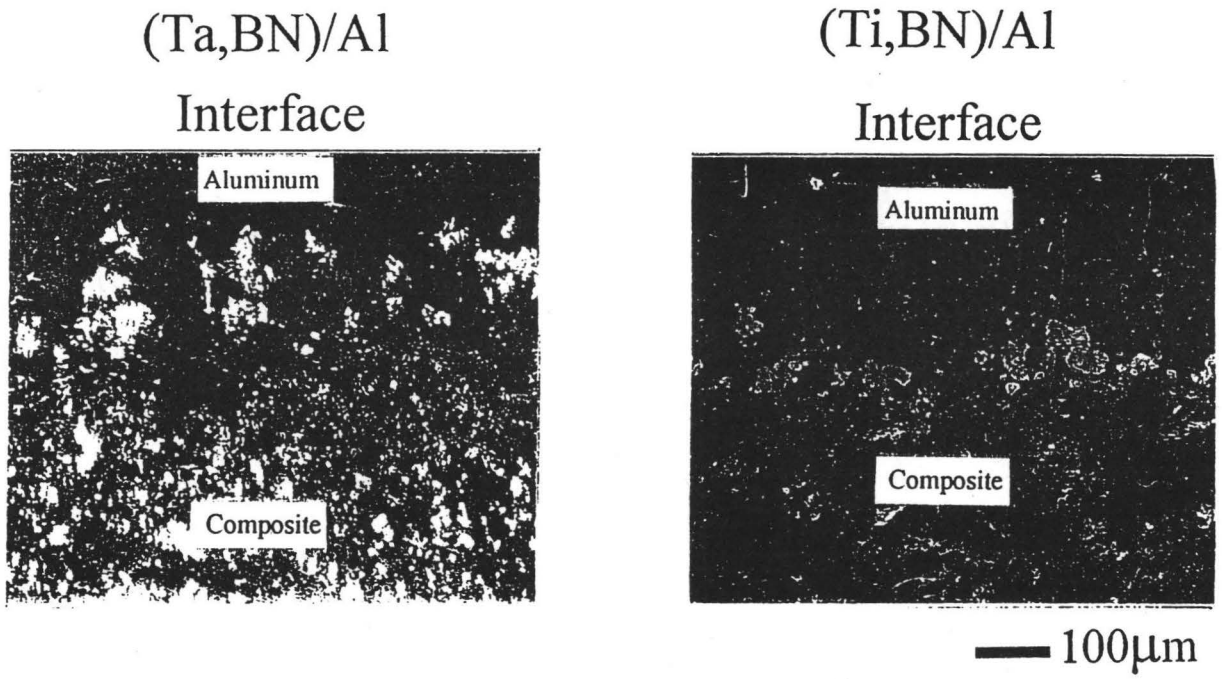


図4　界面近傍のミクロ組織

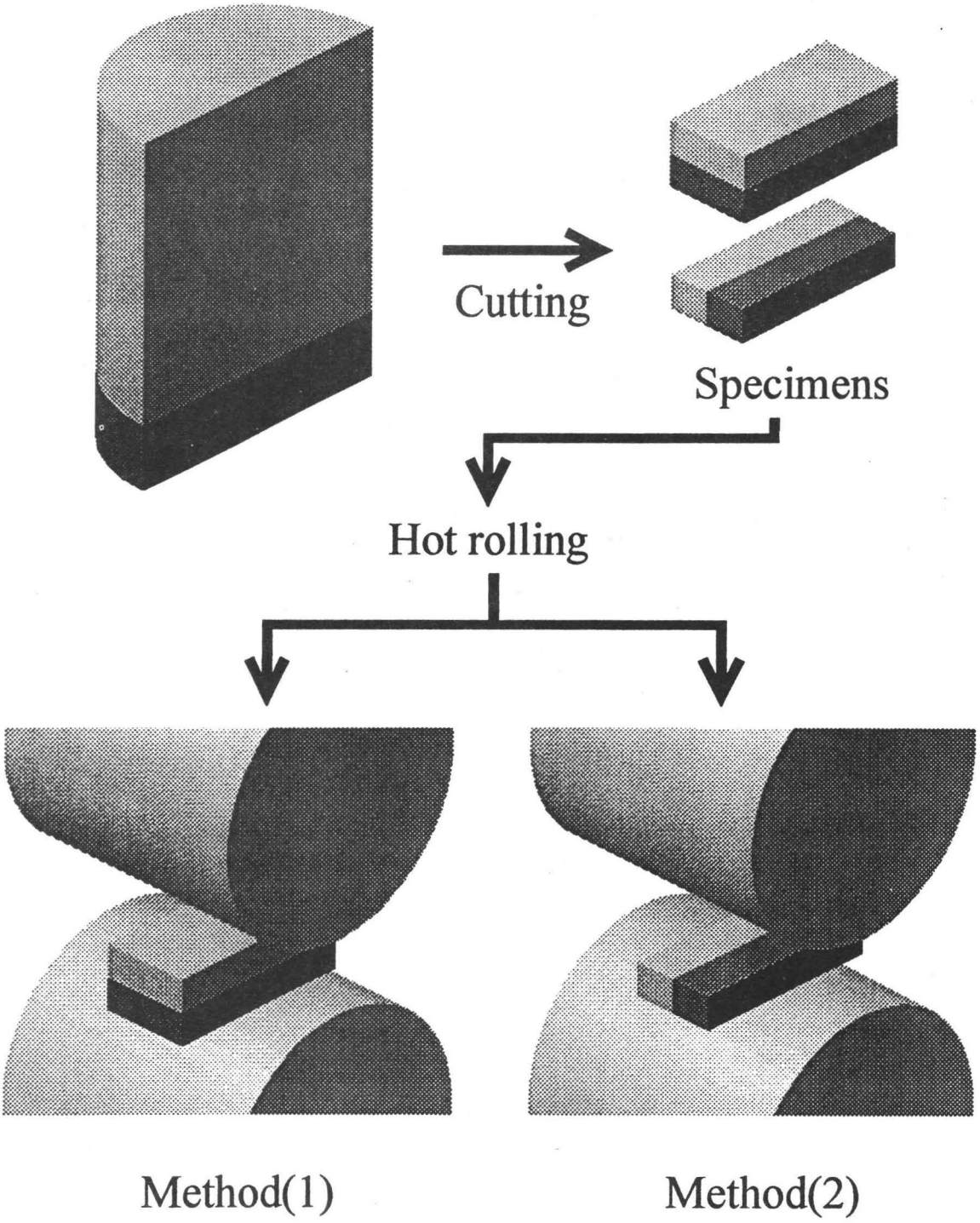


図5　部分複合材料の圧延方法の概念図

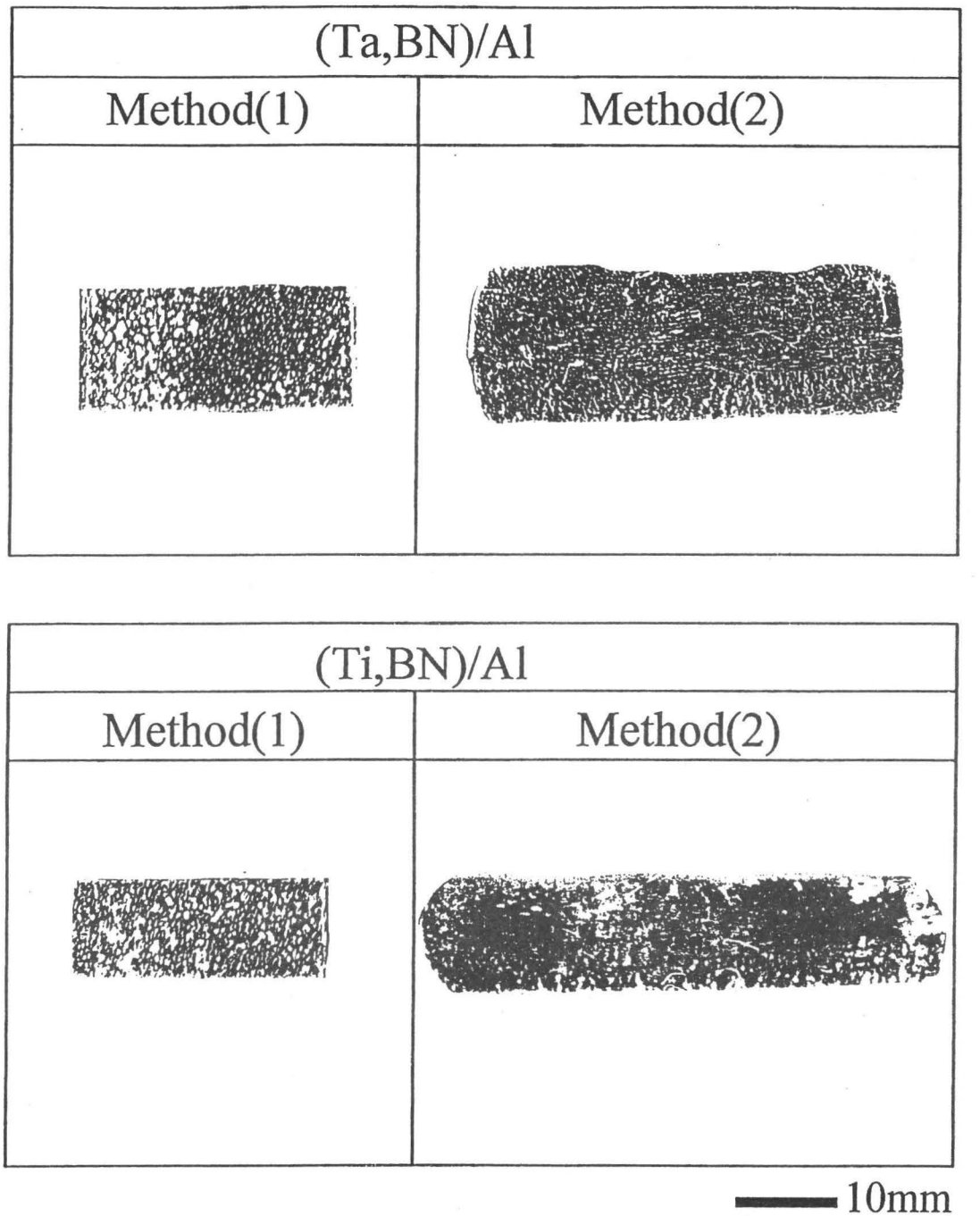


図6　５７３Ｋでの熱間圧延後のマクロ組織

1－4　地域立脚環境調和型木質複合建材の開発

東京大学農学部林産学科
助教授　有馬　孝禮

研究の背景

都市の発展、人間の豊かさ追求、経済活動は基本的に資源およびエネルギー消費そして生態系の破壊の側面をもっている。住宅建設におけるエネルギー消費は化石燃料などの枯渇を、さらにそれに伴う二酸化炭素（CO_2）の増加は地球温暖化、解体資材や残材に係わるゴミ処理問題は地球規模の環境保全に少なからぬ影響をもっている。住宅建設の根源である建築資材を環境保全と資源の確保あるいはエコロジー的な視点からみてみると、木材資源の生産に要したエネルギーはきわめて少ないので換算された炭素放出はきわめて小さく、太陽エネルギーで樹幹内に固定された炭素貯蔵と焼却などの最終処理の負荷の少なさは基本的に生態系のサイクルにあることを意味している。木材資源の適正利用は森林の更新と保全にきわめて重要な位置にあるばかりでなく、多くのエネルギーを消費してきた建設行為にとっても大きな課題である。しかしながら我が国の林業、木材産業の現況は外国産材との競争や技術利用の多角化の遅れなどで厳しい状況にあり、国土の 2/3を占める森林を支えている林業地域の空洞化、さらに将来の資源生産、国土環境を危うくするともいえる。また、住宅の更新に伴う解体、建設は多くの木質廃棄物を生んでおり、都市環境をも危うくするといってもよく、解体資材や残材を有効利用する必要がある。このように木材資源の適正利用は今後きわめて重要な位置にある。本研究はこれを踏まえ、我が国の木材生産の原点である柱の生産を側面から支える背板、間伐、小径材の技術開発をめざしたものではあるが、解体廃材の再利用への展開とも関連が深い。すなわち背板、間伐、小径材を原料としたゼファ（木材繊維を痛めずに長繊維のままで、「のしイカ状」にしたもの）やステック（細い棒状のもの）を基本要素としてボード類、軸組資材さらに発泡性樹脂と複合した多彩な資材の構成と強度の適性化と断熱など環境調整機能性能について検討したものである。とくに地域の製材業への付加価値を、それをベースにした複合資材は住環境の向上と小ロットの住宅生産への還元を意図したものである。

1. ゼファを用いたボードの製造と性能

(1)　ゼファの意義と製作手法

木材資源の小径、低質化あるいは製材端材である背板などに対する、有効利用を計ることはきわめて重要な課題であるが、現在ではチップ化が唯一の方法としてとられている。チップは繊維を切断し、方向性を少なくするあるいは均一化の手段として基本的なものである。しかしながら、

強度的には低く抑えられることは避けられず、ボードとしての強度あるいは膨潤などの寸度安定性の確保は比重と接着剤の種類に依存せざるをえない。それと同時にボード工業といった大規模な装置産業にならざるをえない側面がある。本研究で対象としたゼファア（木材繊維を痛めずに長繊維のままで、のしイカ状にしたもの）やステック（細い棒状のもの）は木材の強度や寸度安定性に優れた繊維方向を生かすことと、低質材の均質化する簡便性に注目したものである。（写真1、図1）

ゼファア（Zephyr）はオーストラリアの CSIROで開発されたScrimberと類似するもので、ローラーで押しつぶしながらのしイカ状に広がった網状繊維体である。工程はローラーのみを数段階に配置すればよく、量産的ではないが、省エネルギー的で、騒音や粉塵少ない方法である。本実験に用いたゼファアはヒノキ製材背板を原材料とものので厚さ 3.5㎜の網状繊維体である。圧密されているので比重は素材の1.25倍程度になっている。組織構造的にみると細胞壁がしわ状に圧密化されており、部分的に圧潰している。

(2) ゼファアを用いたパーティクルボード

ゼファアは木材繊維を痛めずに長繊維のままで取り出したものであるので、繊維方向の強度を生かしたパーティクルボードの製造を試みた。（図2）

原料ゼファアの繊維長は製造時のフオミング、圧密性に関連し、パーティクルボードの強度や寸度安定性に大きな影響を与えた。20、40、60、80㎜長では40㎜が強度、寸度安定性とも優れていた。しかしながら、このゼファアを短く切断したゼファアパーティクルボードはゼファアエレメントが厚く、円筒状でありエレメント間の接着性能が悪く、ボードの接着剥離強さ、表面の平滑性、水分による厚さ膨潤が大きかった。（図3）

安定化を増すためには形成する空隙を減少させるには高圧による高密度化が必要であった。それを改良するために通常のパーティクルボードに用いられているパーティクルを混合することが有効であることを見出した。このパーティクルの混入はボードの圧密性、寸度安定性に大きな影響をもち、とくに強度に関しては比重の上昇した時に顕著に効果がみられ、混入比率に対して最大値を有することが認められた。（図4～6）

(3) ゼファアストランドを用いた積層ボード

ゼファアは形状が大きいシート状になっているためボード工程ではハンドリングがきわめてむずかしい。そこでシート形状の繊維方向はそのままにして幅方向を変えたゼファアストランドを原料とした3層のボードを製造し、強度、寸度安定性などの比較を行った。すなわち、ゼファアを構成する繊維が比較的棒状の形態をとることからボードを構成する時、接着性能を支配する接触面積を相対的に上げるには高圧、高比重化を必要とする。ハンドリングを考慮した幅の変化とボードの比重による効果の位置関係を明らかにした。また、このボードが強度的にはパーティクルボードよりも合板に近い性能を期待していると同時に寸度安定性は合板より劣ることが予想されるのでそのレベルを明らかにすることも重要な点である。

曲げ強度、曲げヤング係数および剥離強さに及ぼす製造因子はボードの比重であり、ゼファアストランドの幅方向の影響は余り大きくは認められない。曲げ強度、曲げヤング係数は予想されたようにパーティクルボードよりも性状は合板に近いが、剥離強度のついてはパーティクルボードに劣り、比重の大きくなるにつれ差異が大きくなる傾向にある。それに対して煮沸処理の水分の

侵入による強度低下、すなわち残存強度はボードの比重によって特異な傾向がみられた。それは吸水による厚さ膨潤率とも関連している。（図７～９）

ゼファストランド積層ボードの比重の効果は釘側面抵抗、釘頭貫通抵抗にみられ、その性状はほぼ合板に匹敵した。（図10）

ゼファの繊維方向長さを変えることで相互の重なりの効果を検討したが10㎜から40㎜まででは曲げ強度や曲げヤング係数には大きな差異は認められなかったが、剥離強さはストランドの長いほど低下の傾向があった。

水分の侵入による強度低下や厚さ膨潤率、剥離強さにはゼファ製造時の圧潰などの影響が考えられるので、ローラーを通す条件を変化させてゼファを製造し、それを用いたボード性状を比較検討した。ゼファ製造時のローラー間圧力の影響は製造したボードの比重によって異なる。すなわち、ボードの比重が 0.5では曲げ強度や剥離強さにほとんど影響がみられないが比重 0.7では圧力の増大、すなわち圧潰の増加で強度低下がみられる。その傾向は圧力を一定にして通過回数を変化させた時も同じである。また、剥離強さ試験で木部で破損する比率が通過回数の増加と共に増すことからも木部損傷に支配されていることが認められる。吸水による厚さ膨潤も圧力の増大で大きくなる。とくに、ボードの膨潤はそれを構成しているゼファストランドの膨潤によることが認められた。（図11～14）

(1)で述べたゼファを短く切断したゼファパーティクルボードの剥離強さ、表面の平滑性、水分による厚さ膨潤を改良するためにパーティクルを混合することが有効であることを見出したが、ゼファストランドボードの場合はパーティクルの混入で強度の低下はみられるが、ボードの寸度安定性が混入比率に対して最大値を有することが認められた。（図15、16）

2．棒状エレメントによる軸材およびボードの製造と性能

(1) 棒状エレメントの熱圧による寸度安定化の意義

本研究で対象としたゼファは木材の強度や寸度安定性に優れた繊維方向を生かすことと、低質材の均質化することに関してはすでにみてきたように評価できた。しかしながら部分的に圧潰しているためにボードにしたときの剥離強さや水分に対する寸度安定性はチップに比較しても不充分な面があった。ここで対象とするステック（細い棒状のもの）も部分的に圧潰したボードでは剥離強さや水分に対する寸度安定性が充分になるとは考えにくい。それは接着剤で抑え込めばある程度は低減できるが、構成要素である木部エレメントが圧縮されているため、その回復を抑える、すなわち固定化しない限り限界があることが明らかになった。そこで圧密され、部分的に圧潰した状態を保つにはエレメントに安定化の工夫が必要である。ボードの状態でエレメントの固定化には大きく区分すると、(a)ボード製造時に固定化のための条件で圧締する　(b)ボード製造後固定化の処理を行う　(c)エレメントの段階で固定化を行う　３つの方法が考えられる。(a)については成型圧締における接着固化条件を考慮すると現状では困難が伴う。(b)は固定化の処理の条件下でボードにどのような変化が生じるのか、処理方法に検討すべき点がある。いずれにしても(c)のエレメントの段階で固定化についての知見が必要になる。木部の高密度の固定化は温度と含水率の組み合わせが重要であり、割箸を用いた実験では熱圧温度 180℃以上、含水率17％前後が適切であることが認められている。本実験で用いた棒状エレメントは高密度によってエレメントとしての形状を小さくし、強度を増したことを生かして各種比重および強度の軸材やボードの形成

することを最終目的としている。その基礎段階として固定化処理した棒状エレメントを平行に配列したボードの性状を検討した。

(2) エレメントの固定化処理とボード性状

棒状エレメントの寸法は幅15㎜、厚さ３㎜、長さ 330㎜で、室温水に浸し、含水率約30％にした後、熱板温度 180℃で以下の圧締条件でエレメントを処理した。すなわち50kgf/㎠処理（50kgf/㎠ 5min.＋6 kgf/㎠ 5min.）、 100kgf/㎠処理(100kgf/㎠ 5min.＋6 kgf/㎠ 5min.）および無処理である。それらのエレメントを用いて軸方向の一致したボードを製造し、曲げ強度、膨潤など計測した。接着剤はフエノール樹脂接着剤（PF）イソシアネート系接着剤（IC）である。吸水による膨潤はエレメントの熱圧処理によって低減できることが認められる。従来よりいわれている接着剤の効果も同様に認められたが、とくにボード比重による膨潤率の差異が少ないことはエレメントの固定化が効果を示していると推測される。強度に関しては棒状エレメントはゼファと同じく繊維を痛めずに長繊維のままで取り出したものであるので、それで形成されたボードの強度は高温圧締によって見かけ上向上した。しかしながら破壊形態からみられるようにエレメント相互の接着性が不充分で、強度は無処理エレメントの圧締による一体化ボードに劣るので、さらに工夫が必要である。（図17）

謝辞　なお、本研究は当研究室の大熊幹章教授、大学院生ルイサ・カナデド、金柔姫、高橋裕子氏らとの共同によるものである。

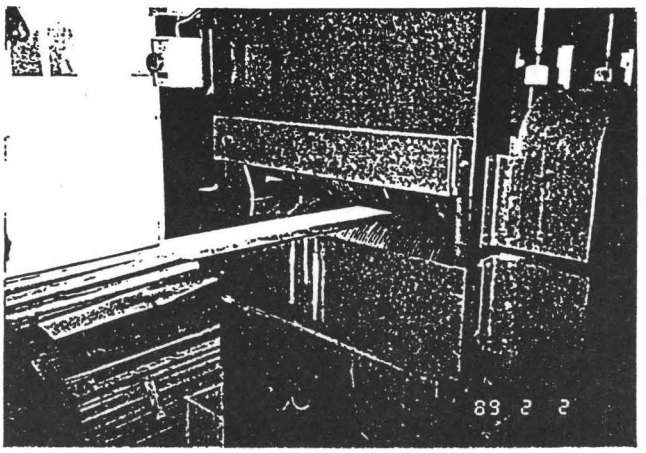


Photo 1. Loading of sawn lumber into the rollers.

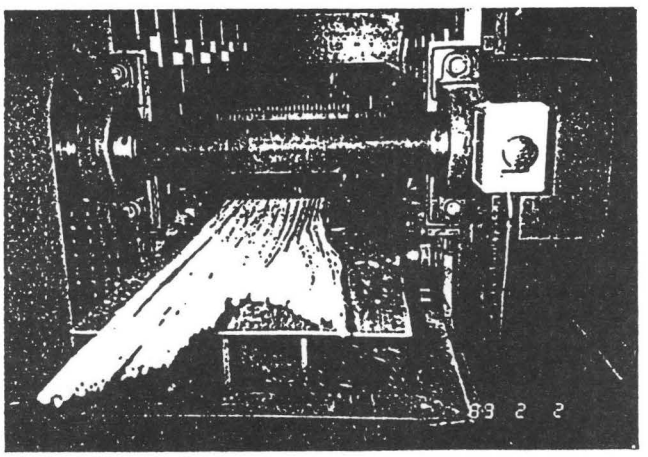


Photo 2. 'Zephyr' sheet just after crushing through the rollers.

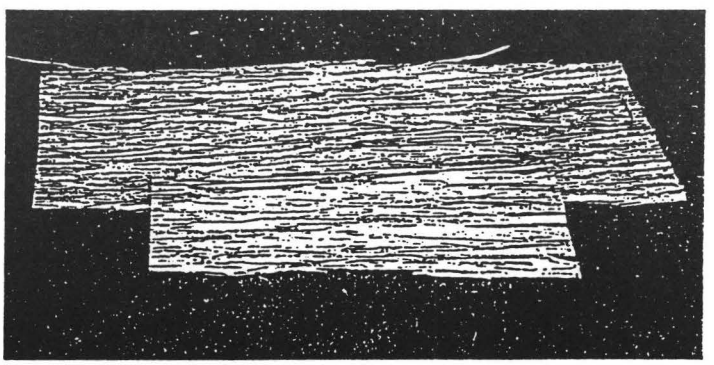


Photo 3. 'Zephyr' sheet from Douglas-fir.

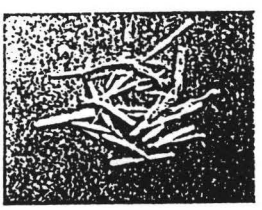
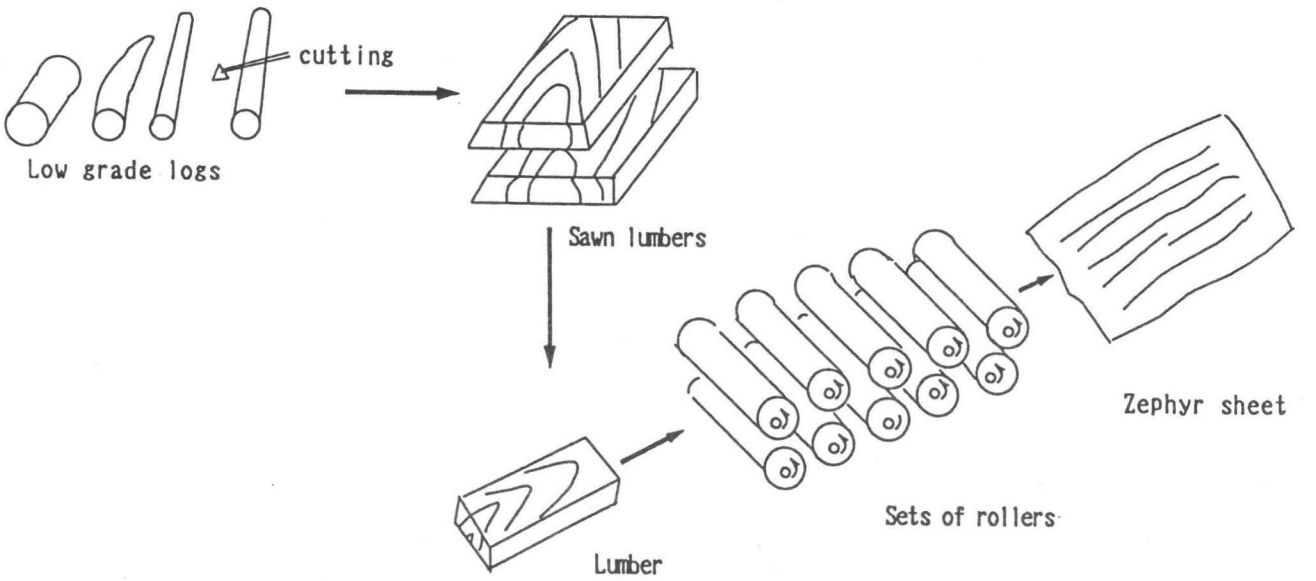


Photo 4. 40-mm long 'Zephyr' particles.

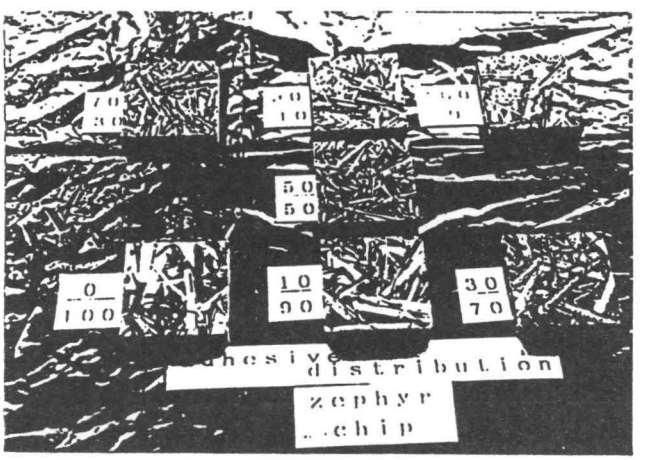
Photo 5. Ordinary core chips.

写真１　ゼファ（Zephyr）の製造とシートとチップローラーで押しつぶしながらのイカ状に広がった網状繊維体

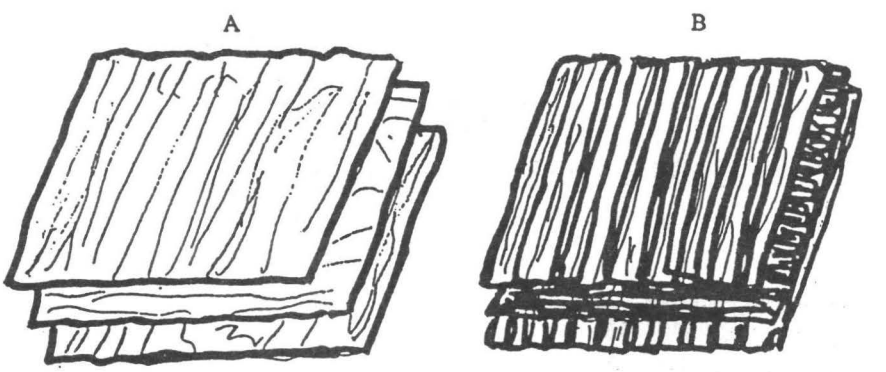


Flow of zephyr production.

図1　ゼファ製造の概念図



Samples from boards at different adhesive distribution ratios.



3-ply construction made by one piece of zephyr sheet

3-ply construction of oriented zephyr strand

Board ply construction

図2　ゼファを用いたパーティクルボードとゼファシートを用いたボード

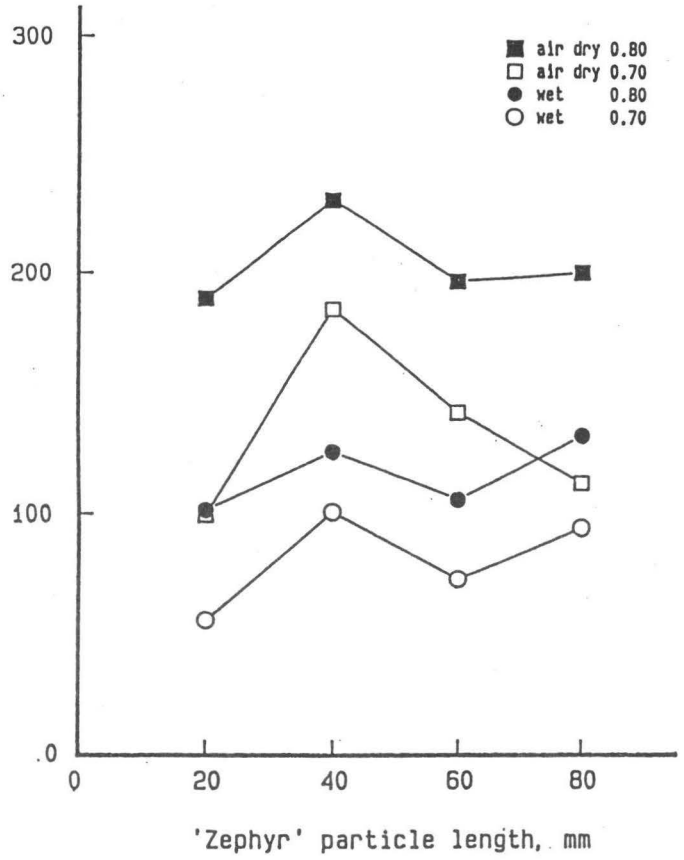


Fig. MOR of "Zephyr' particleboards at different particle lengths and two density levels before (air-dry) and after (wet) accelerated aging.

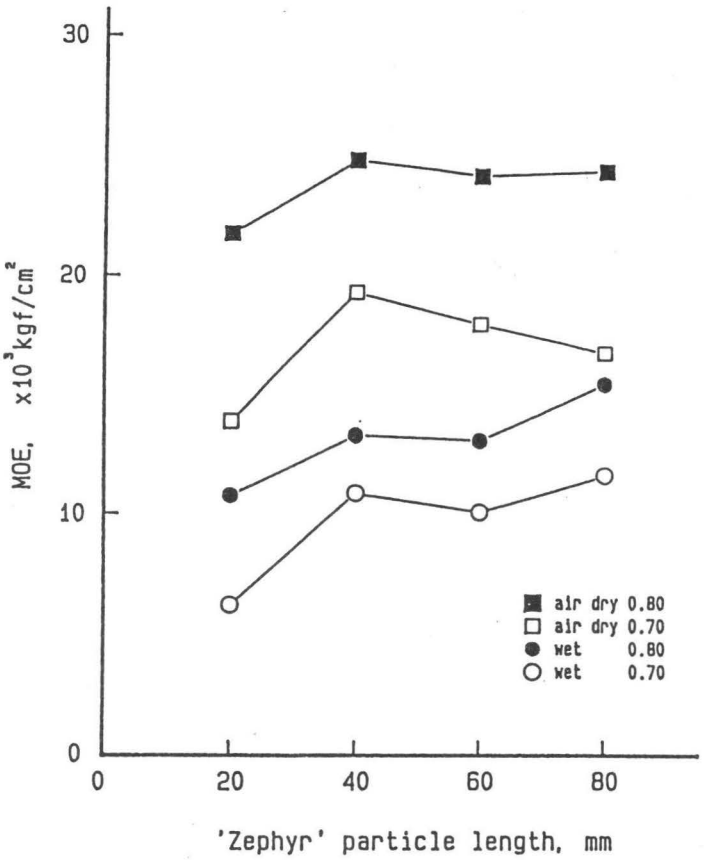


Fig. MOE of 'Zephyr' particleboards at different particle lengths and two density levels before (air-dry) and after (wet) accelerated aging.

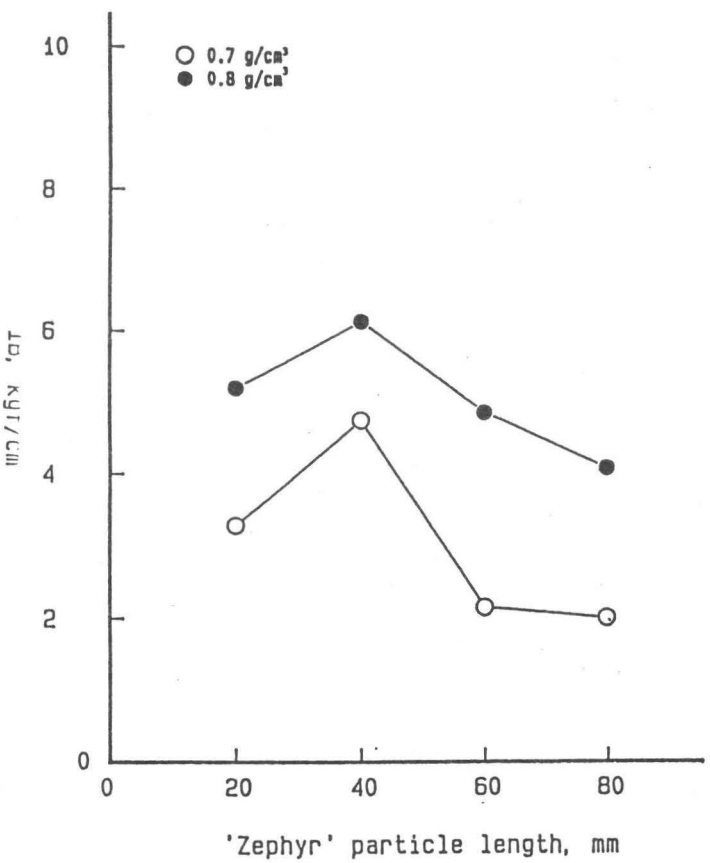


Fig. Relationship between the 'Zephyr' particle length and IB strength of the boards at two density levels.

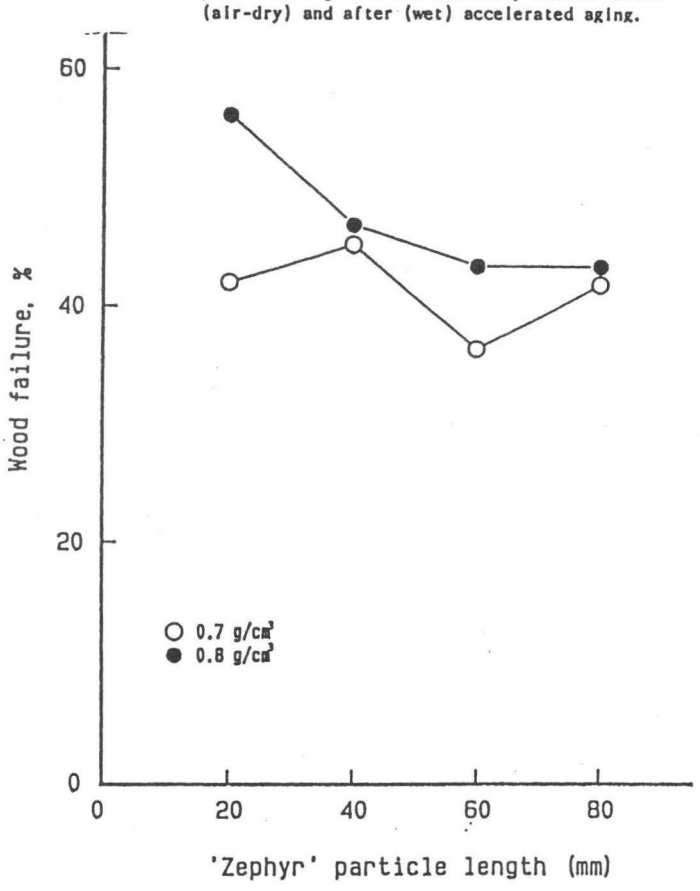


Fig. Relationship between 'Zephyr' particle length and wood failure of the boards at two density levels.

図3　ゼファアパーティクルボードの曲げ強度、ヤング係数、剝離強さとゼファア長さの関係

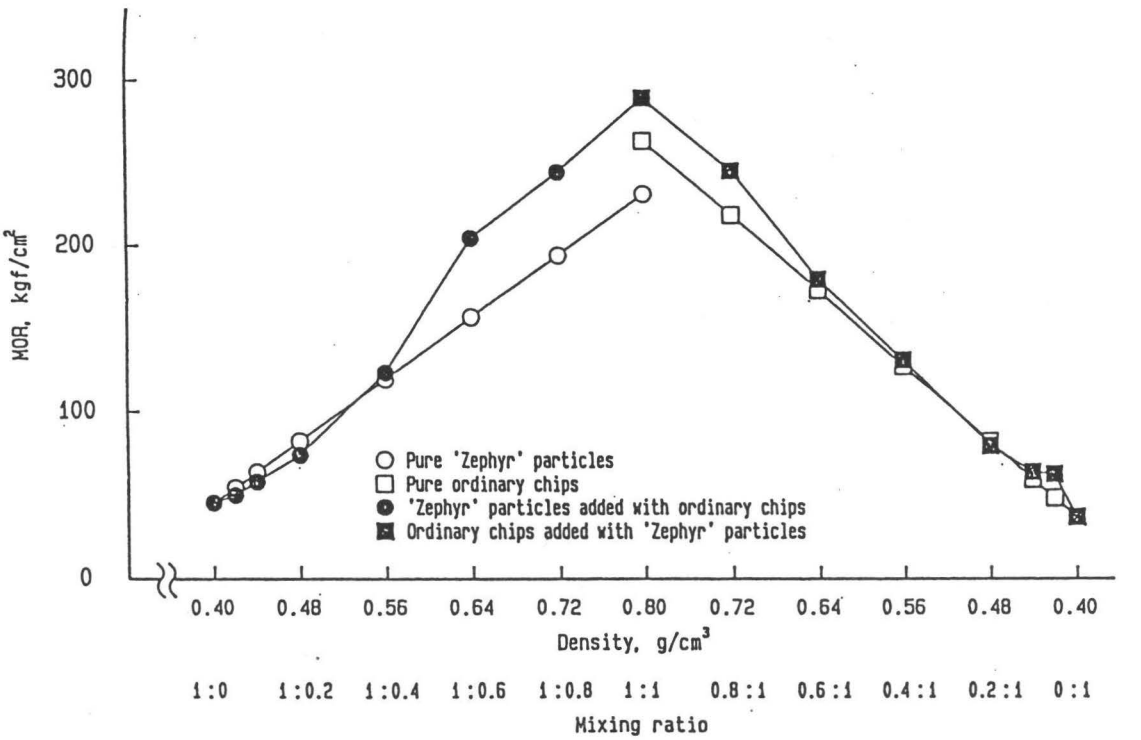


Fig. MOR of boards as affected by density and mixing ratio of 'Zephyr' particles and ordinary chips.

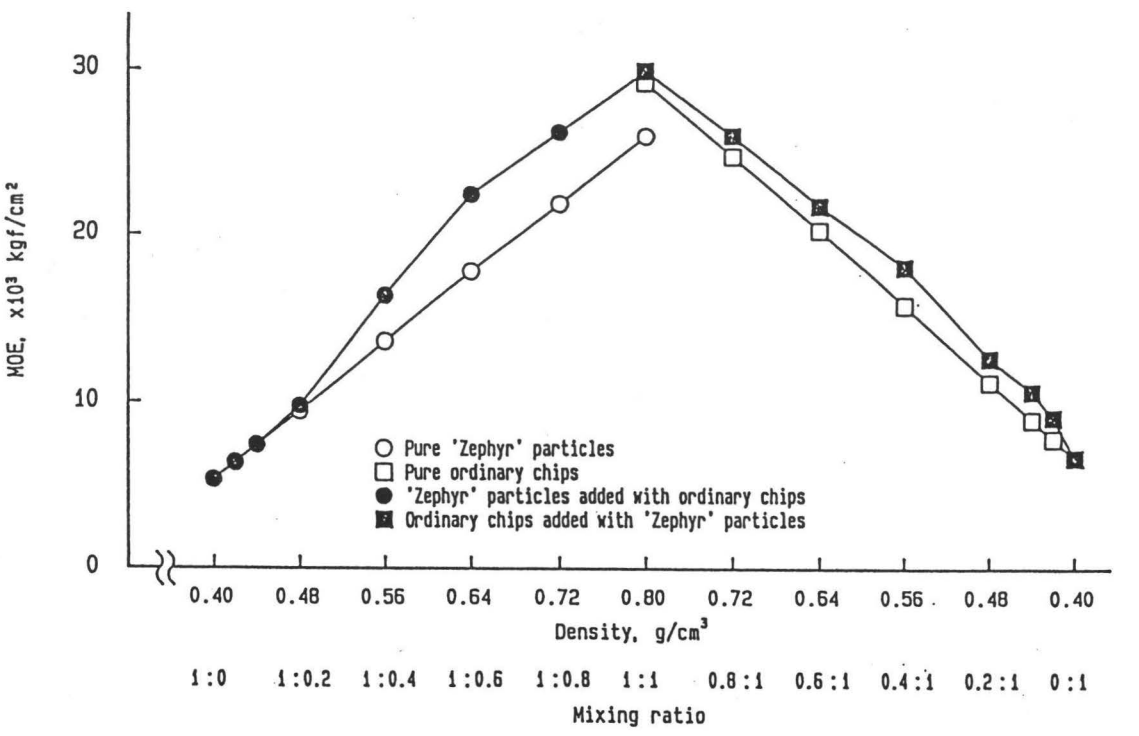


Fig. MOE of boards as affected by density and mixing ratio of 'Zephyr' particles and ordinary chips.

図4　ゼファアパーティクルボードの曲げ強度、ヤング係数とゼファアとチップの混合の関係

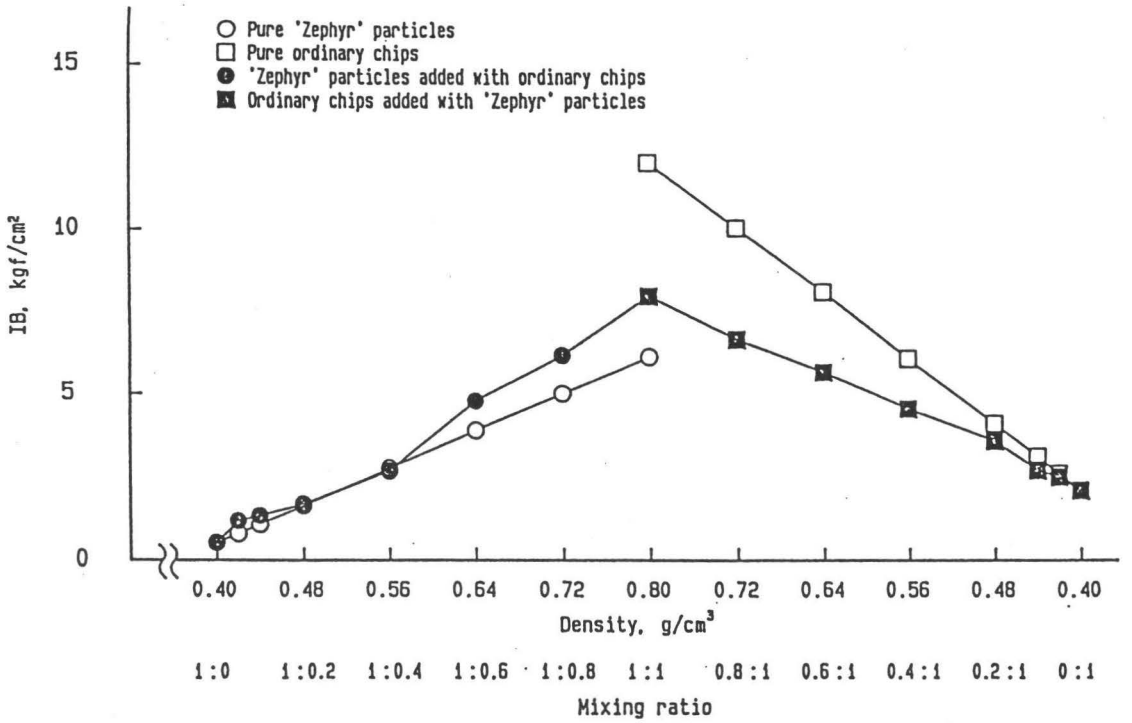


Fig. .. IB strength of boards as affected by density and mixing ratio of 'Zephyr' particles and ordinary chips.

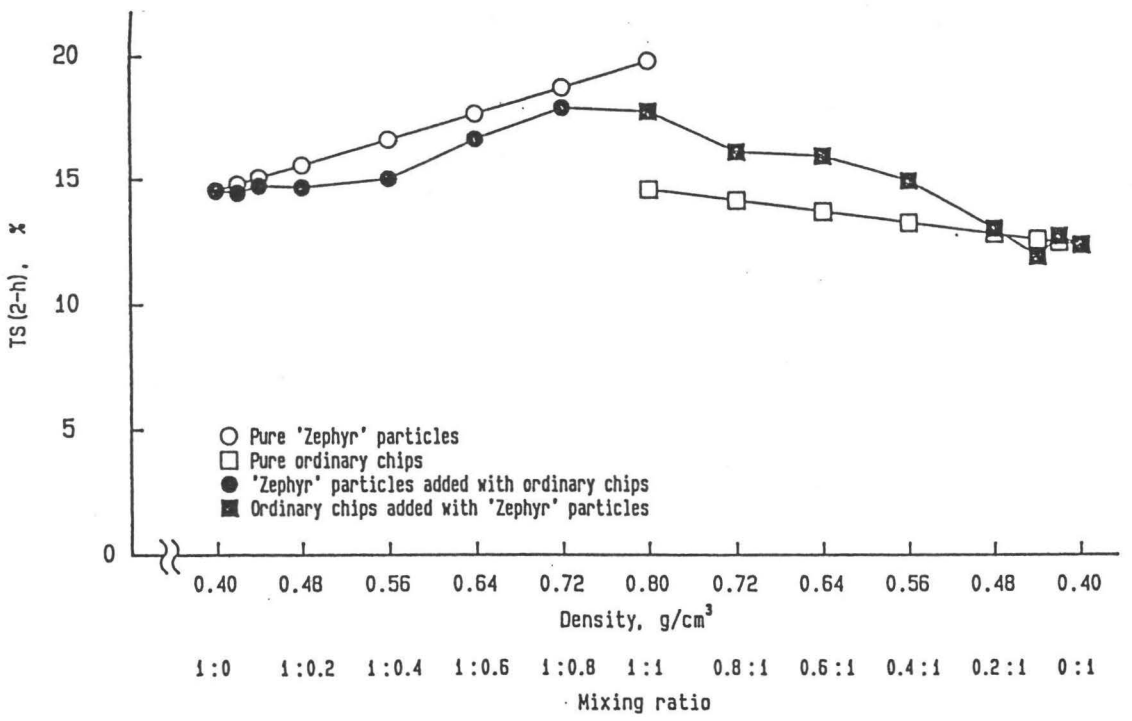


Fig. .. TS of boards after 2-hour water-soaking as affected by density and mixing ratio of 'Zephyr' particles and ordinary chips.

図5　ゼファパーティクルボードの剝離強さ、膨潤とチップの混合の関係

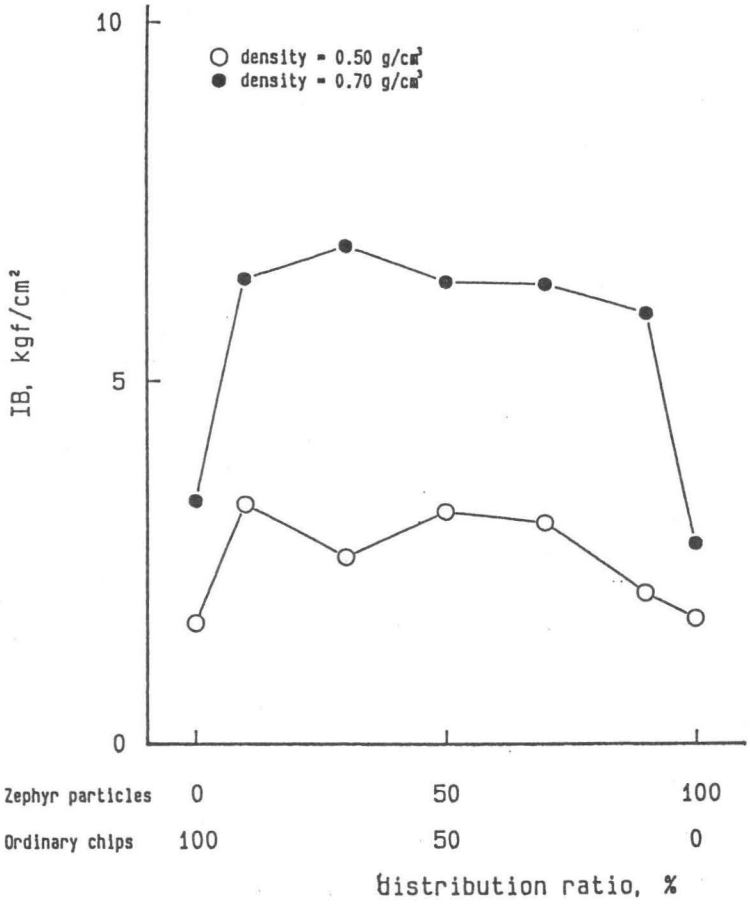


Fig. Effect of adhesive distribution ratio on the IB strength of 'Zephyr' particleboards at two density levels.

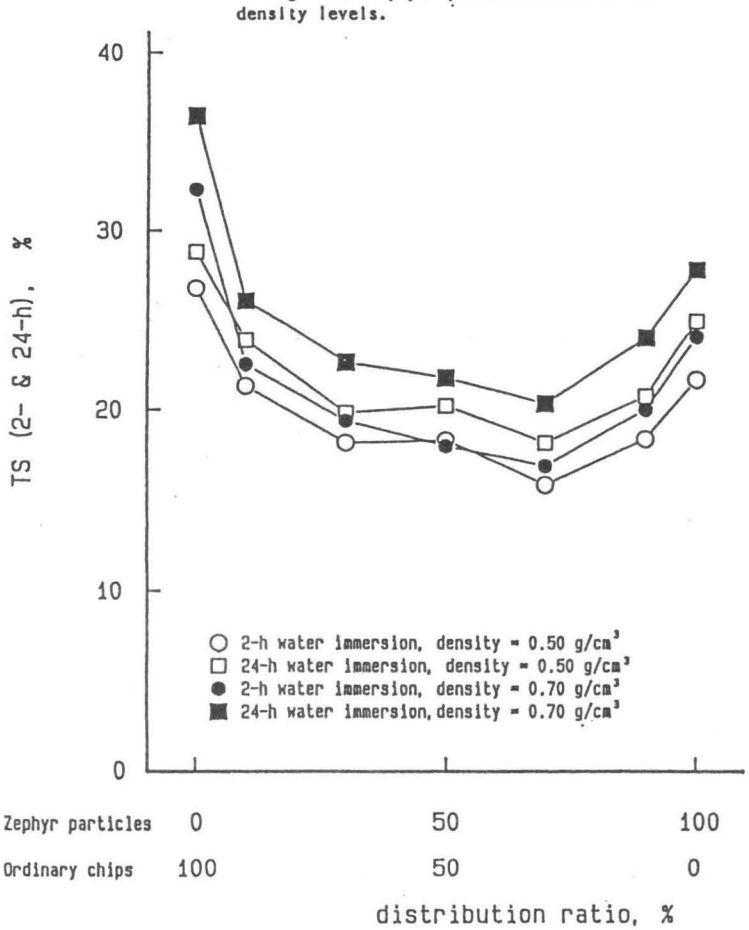


Fig. Effect of adhesive distribution ratio on the TS of boards at two density levels after 2- and 24-hour water-soaking.

図6　ゼファパーティクルボードの剝離強さと膨潤とチップの混合の関係

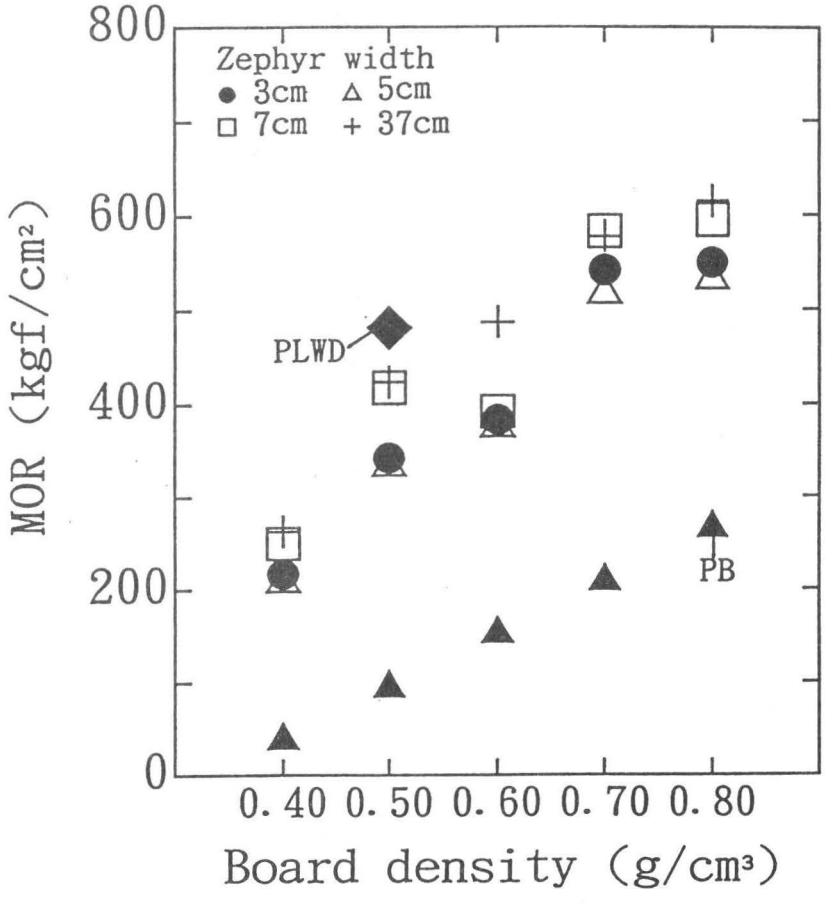


Fig. Relationship between the modulus of rupture (MOR) and board density at different zephyr widths.

Note: PB:Particleboard
PLWD:Plywood

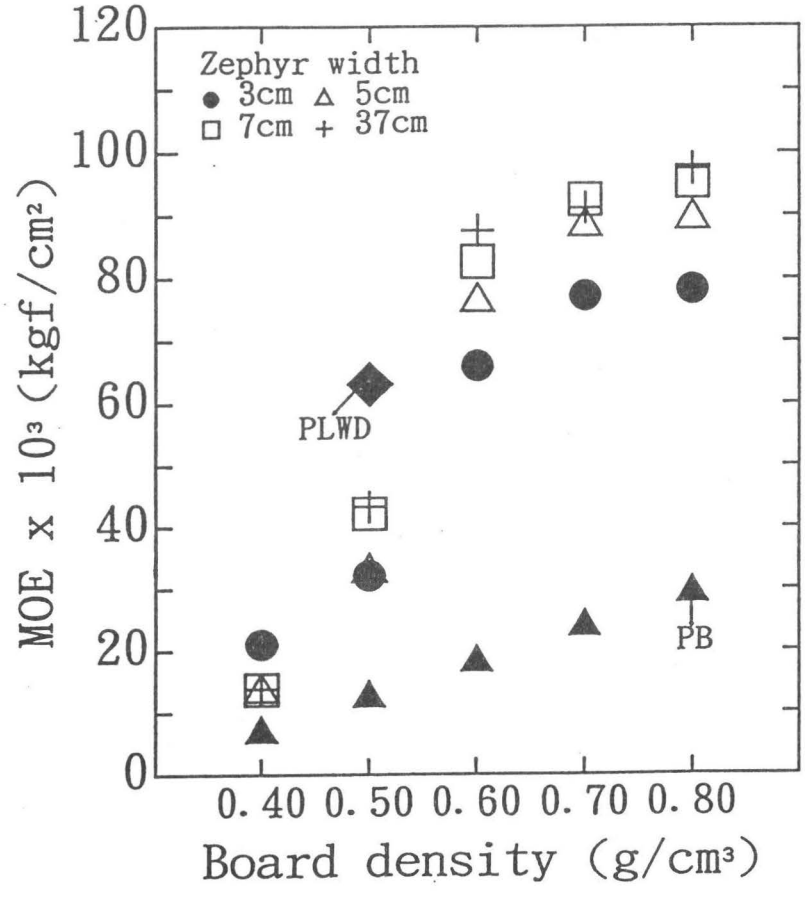


Fig. Relationship between the modulus of elasticity (MOE) and board density at different zephyr widths.

Note: PB:Particleboard
PLWD:Plywood

図7　ゼフアストランド積層ボードの曲げ強度、ヤング係数とボード比重、ゼフア長さ

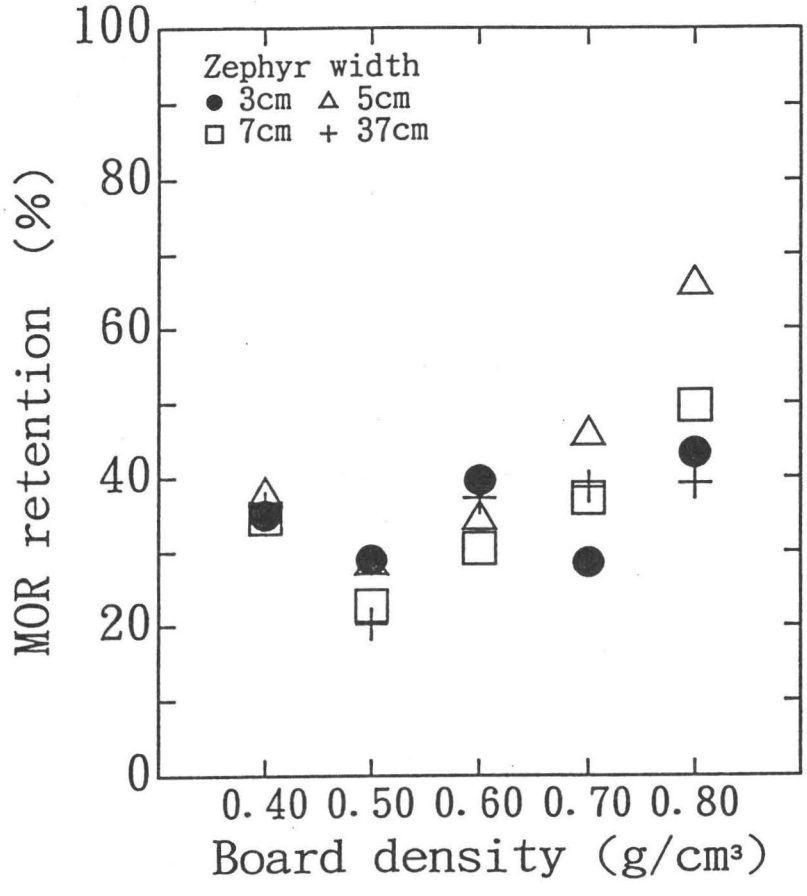


Fig. Relationship between MOR retention after 2-hour boiling and board density at different zephyr widths.

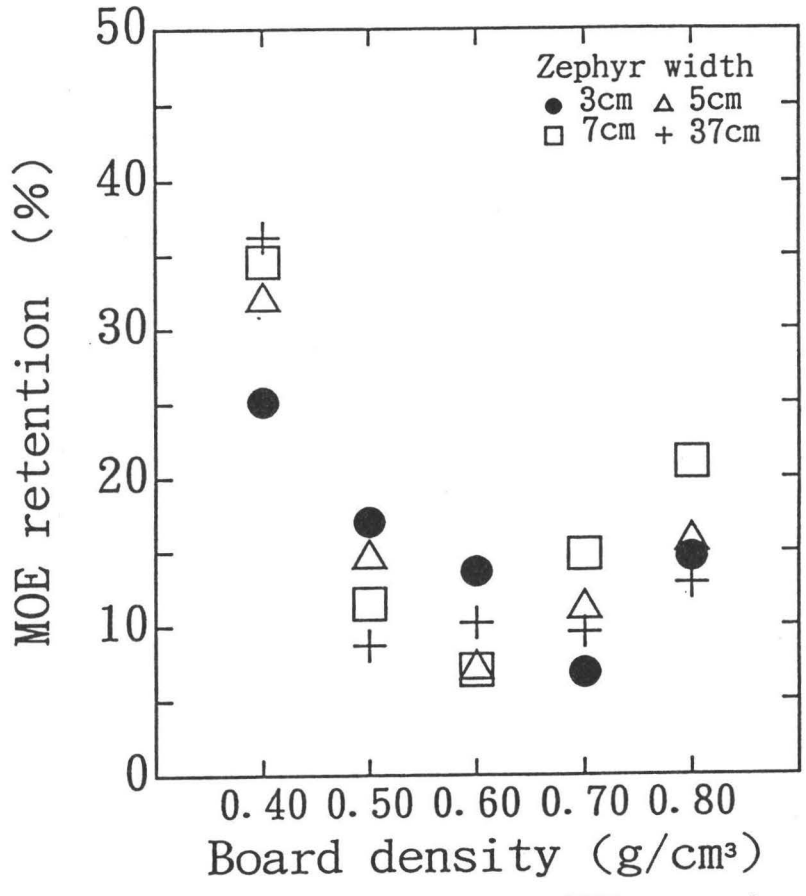


Fig. Relationship between MOE retention after 2-hour boiling and board density at different zephyr widths.

図8　ゼフアストランド積層ボードの曲げ強度、ヤング係数の煮沸による低減

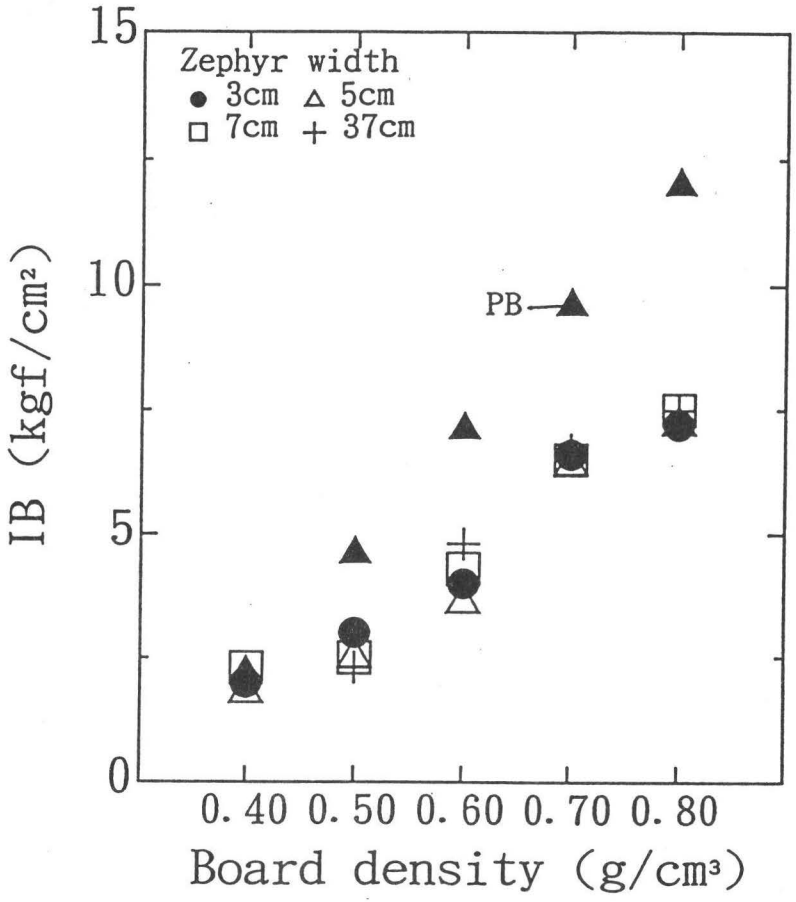


Fig. Relationship between the internal bond (IB) strength and board density at different zephyr widths.

Note: PB:Particleboard

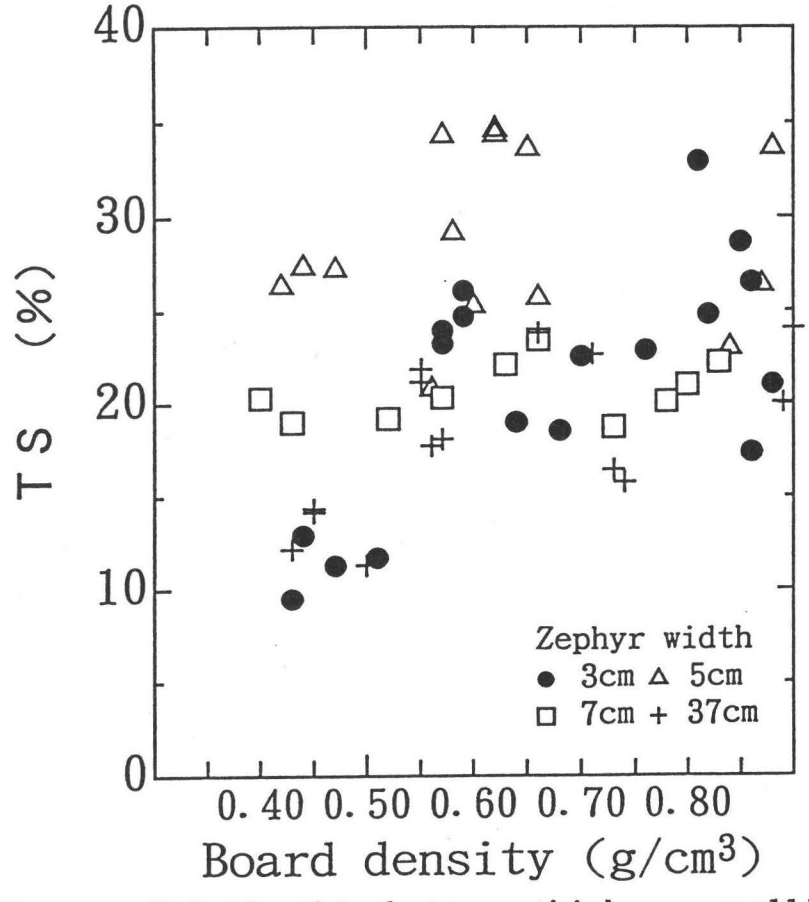


Fig. Relationship between thickness swelling (TS) and board density after 24-hour water immersion.

図9　ゼフアストランド積層ボードの剝離強さ、膨潤とボード比重、ゼフア長さの関係

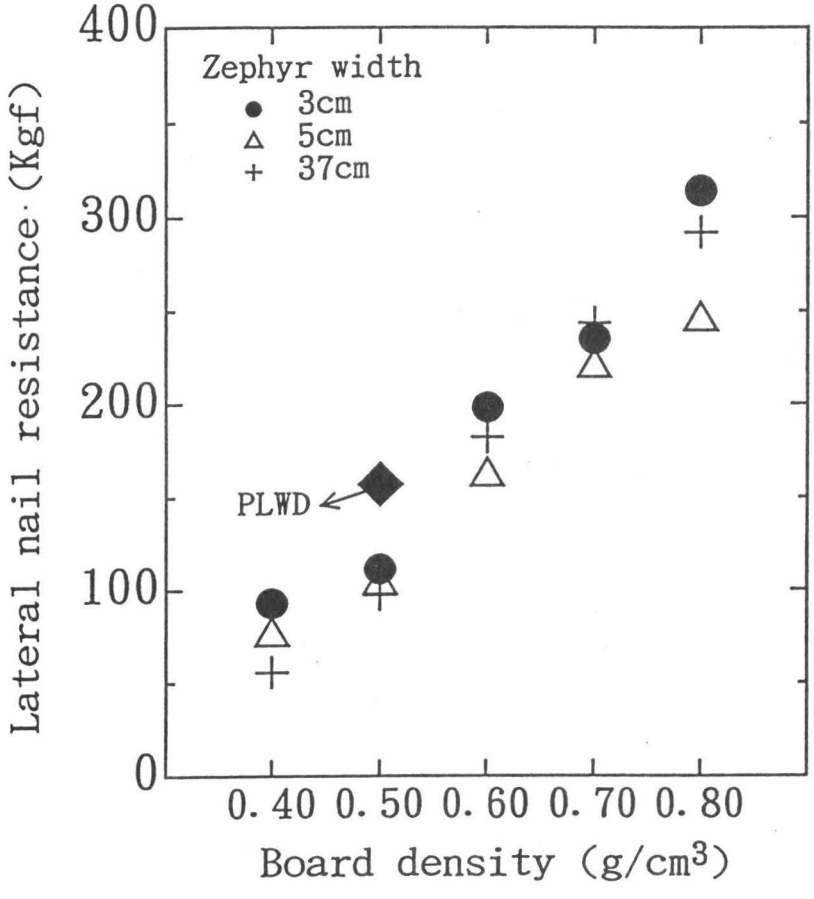


Fig. Relationship between lateral nail resistance strength and board density at different zephyr widths.

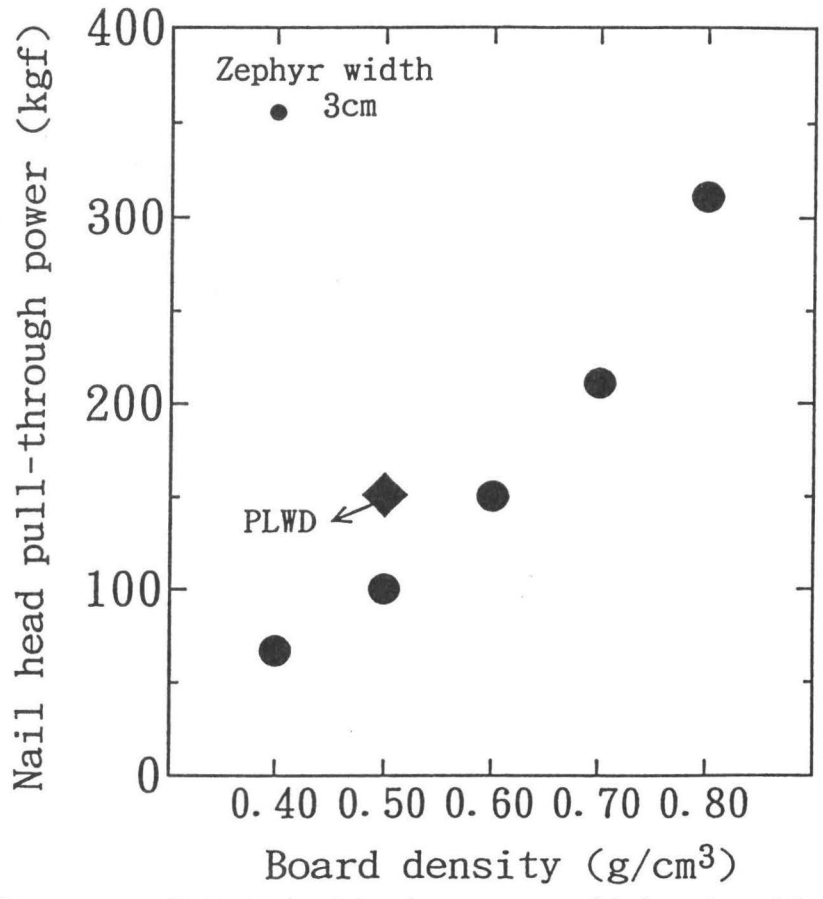


Fig. Relationship between nail head pull-through strength and board density.

図10　ゼフアストランド積層ボードの釘側面抵抗と釘頭貫通抵抗

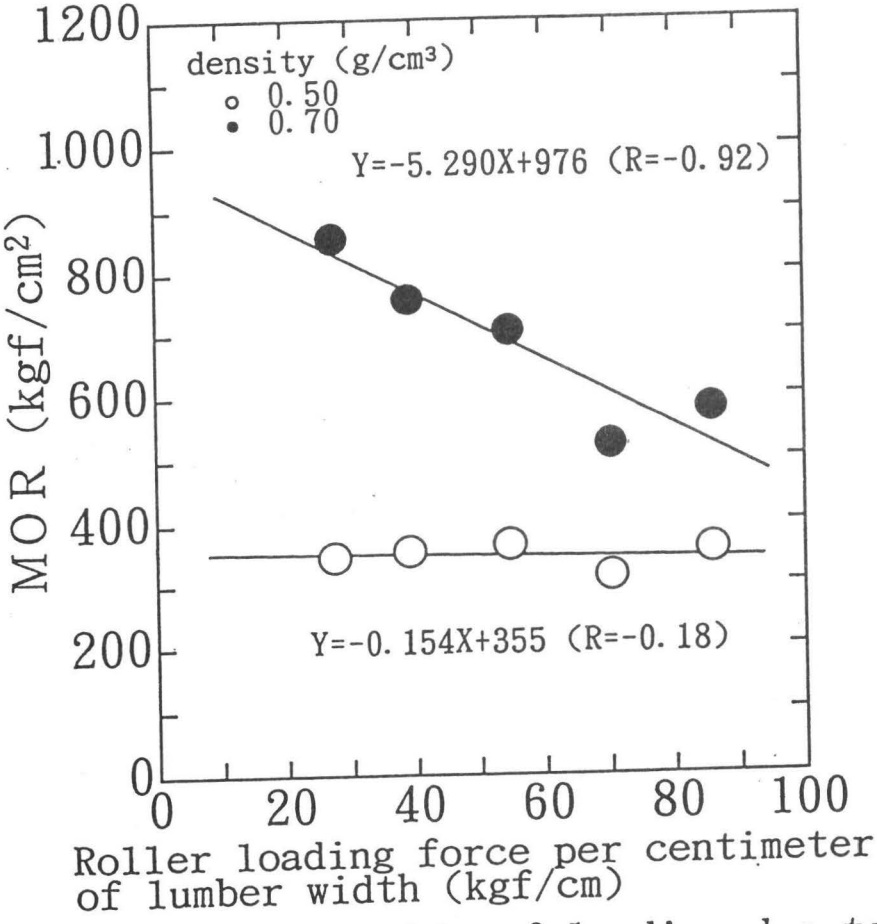


Fig. Relationship of loading due to the crushing roller and MOR

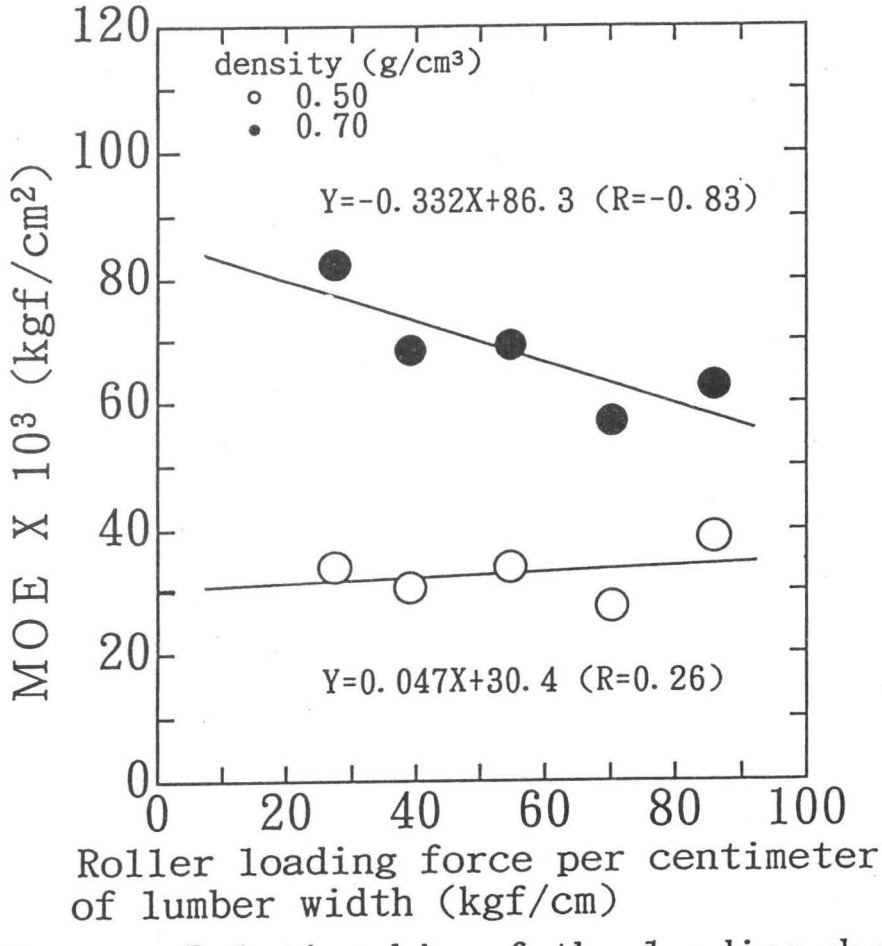


Fig. Relationship of the loading due to the crushing roller to MOE

図11 ゼファストランド積層ボードの曲げ強度、ヤング係数とゼファの損傷との関係

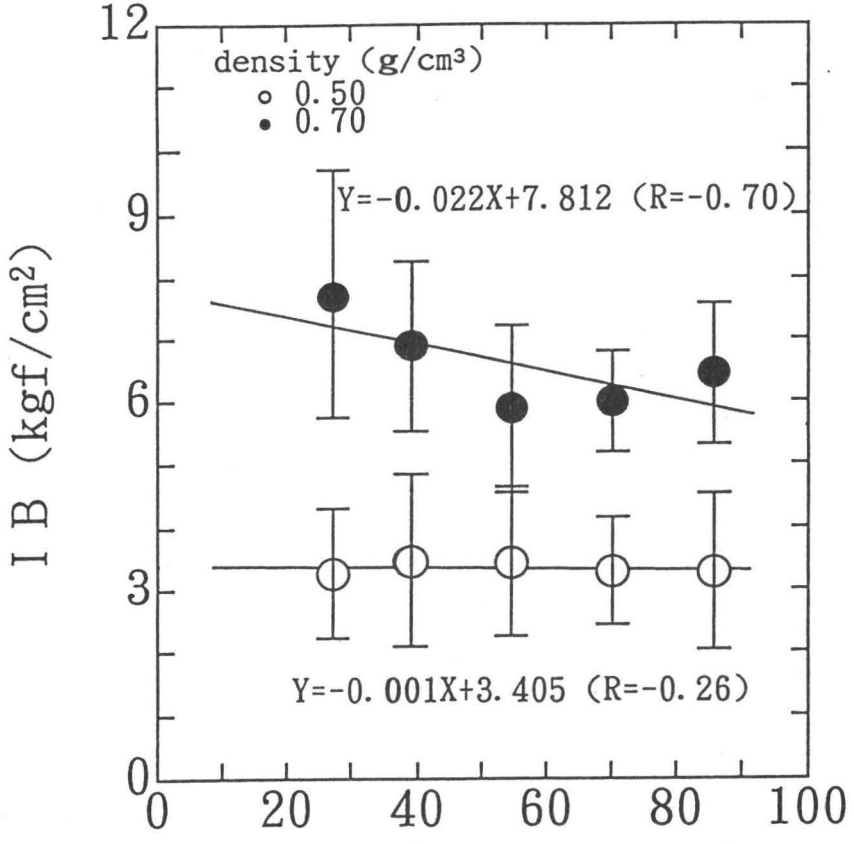


Fig. Relationship of loading due to the crushing roller and IB

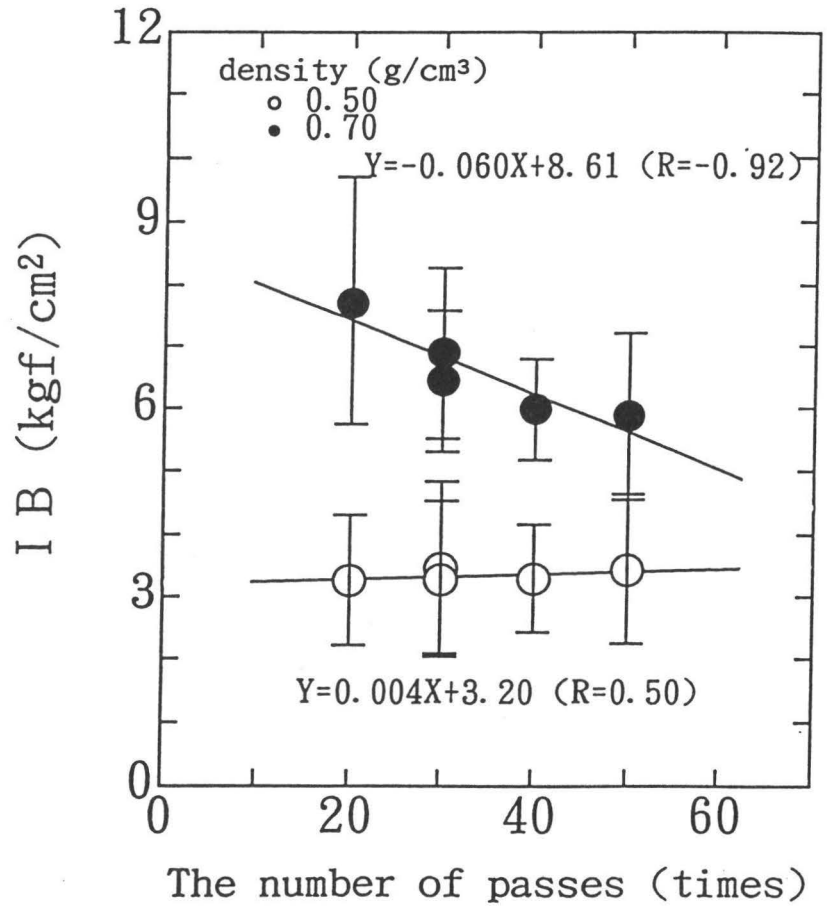


Fig. Relationship of the number of passes through the roller to IB strength

図12　ゼフアストランド積層ボードの剝離強さとゼフアの損傷との関係

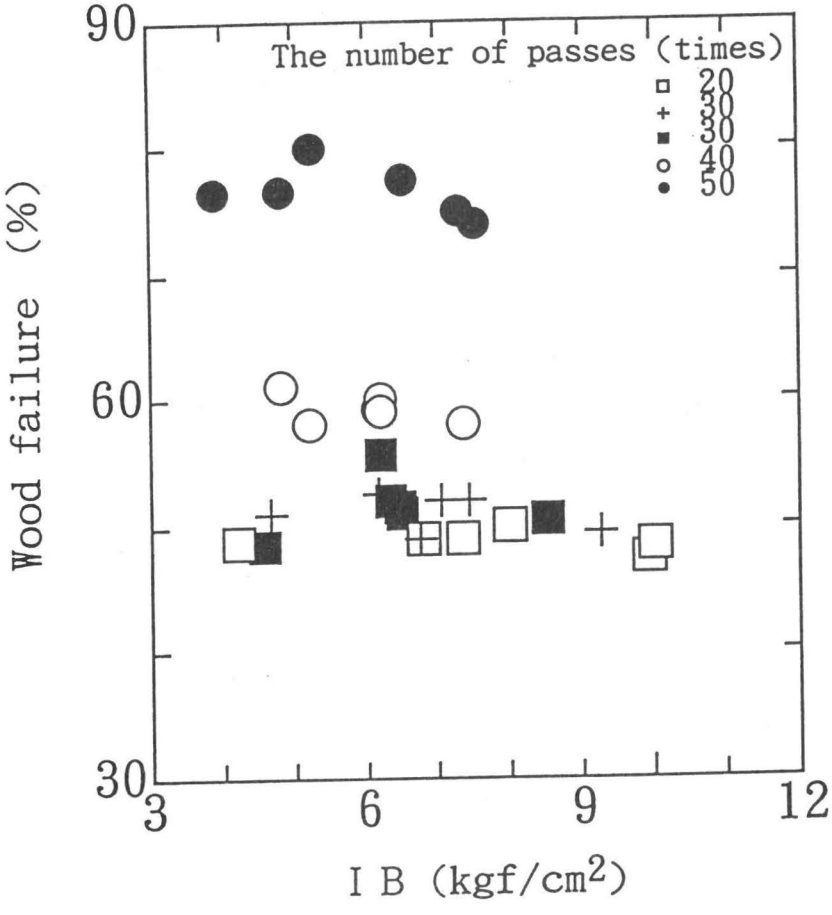


Fig. Relationship of wood failure to boards IB strength

図13(1) ゼファストランド積層ボードの剝離強さと木部破壊の関係

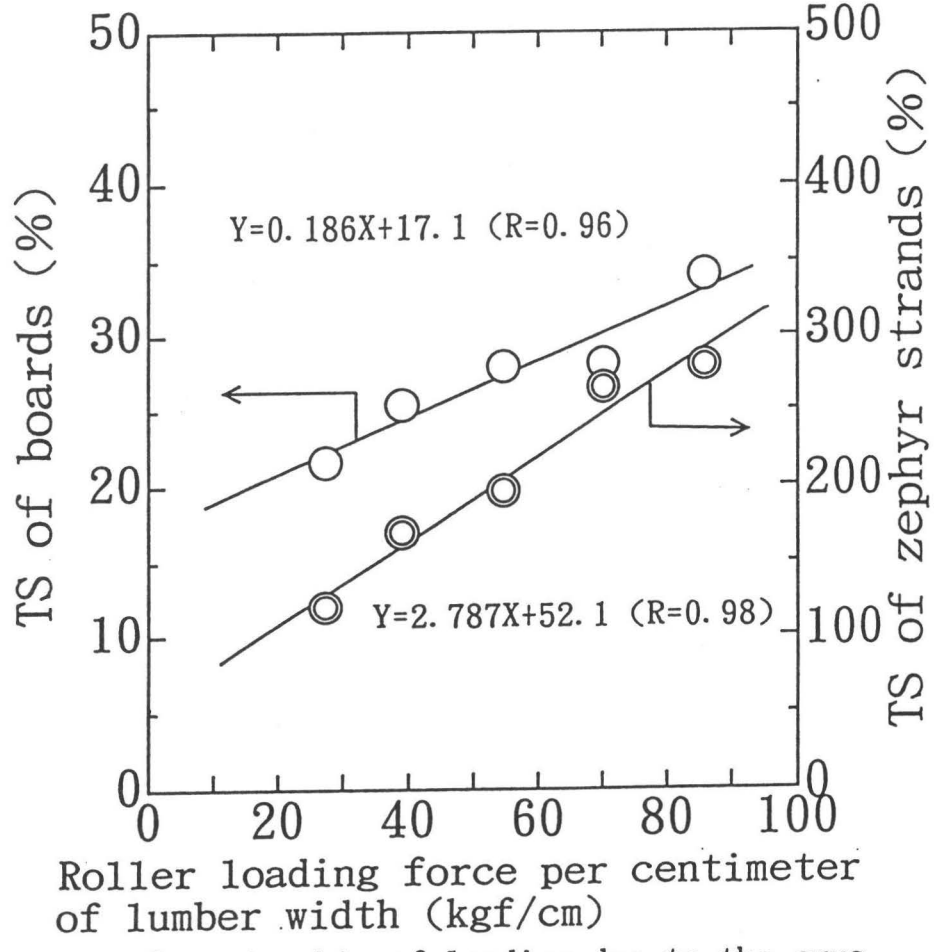


Fig. Relationship of loading due to the crushing roller on TS of both zephyr strands and boards (density: 0.70) after 24-hour soaking

図13(2) ゼファストランド積層ボードの膨潤とゼファの損傷との関係

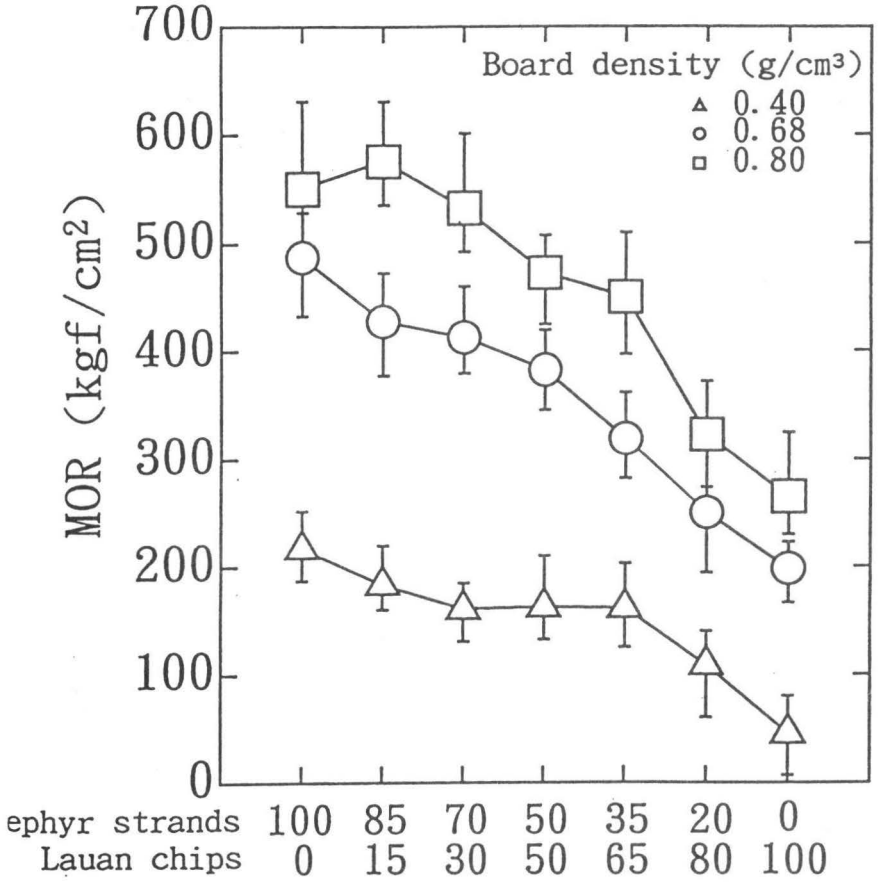


Fig. Effect of chip mixing ratio on the modulus of rupture (MOR) of Zephyr Strand Board.

Note: Circles and vertical bars denote average values and standard deviations, respectively.

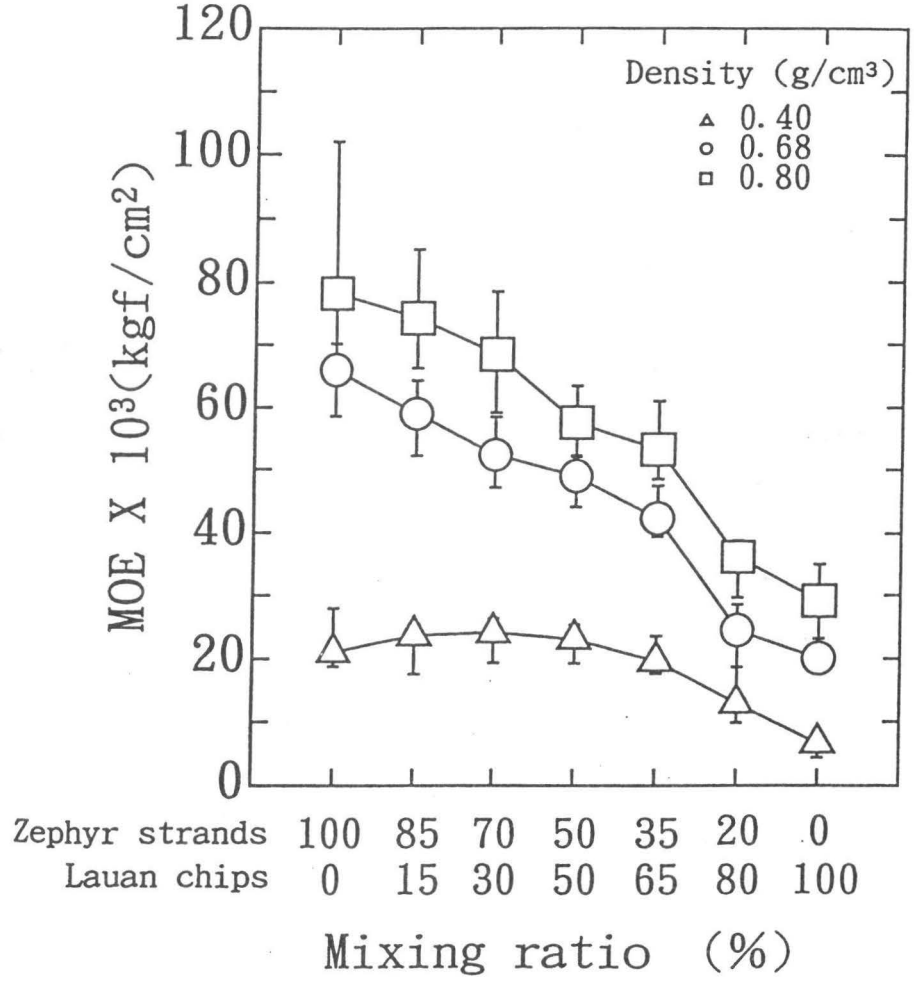


Fig. Effect of chip mixing ratio to the modulus of elasticity (MOE) of Zephyr Strand Board.

Note: Circles and vertical bars denote average values and standard deviations, respectively.

図14 ゼファストランド積層ボードの曲げ強度、ヤング係数とゼファとチップ混合の関係

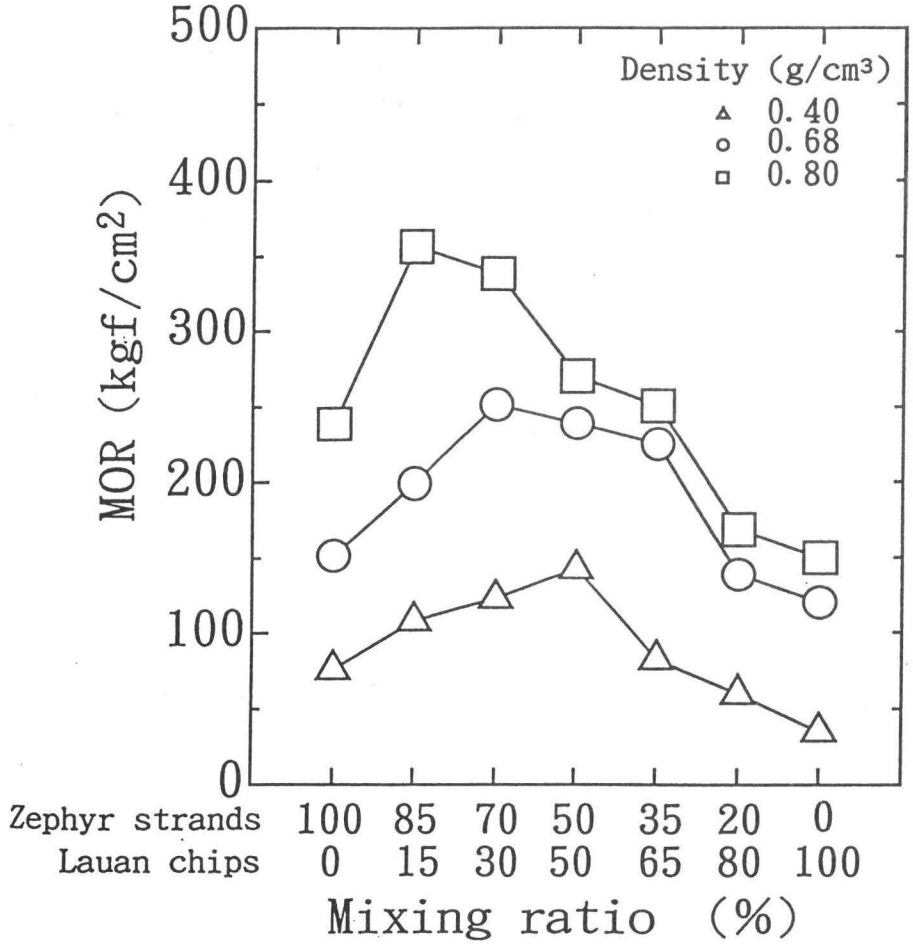


Fig. Effect of chip mixing ratio on the MOR after 2-hour boiling of Zephyr Strand Board.

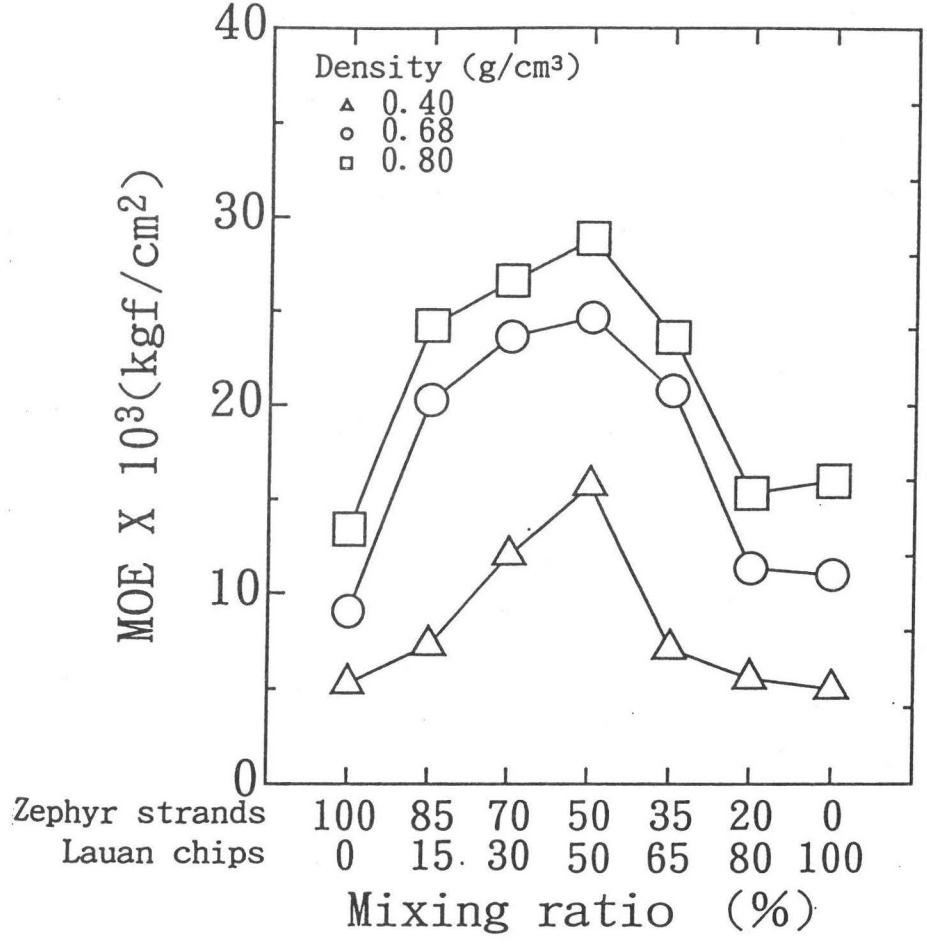


Fig. Effect of chip mixing ratio on the MOE after 2-hour boiling of Zephyr Strand Board.

図15 ゼフアストランド積層ボードの曲げ強度、ヤング係数とゼフアとチップ混合の関係
（2時間煮沸後）

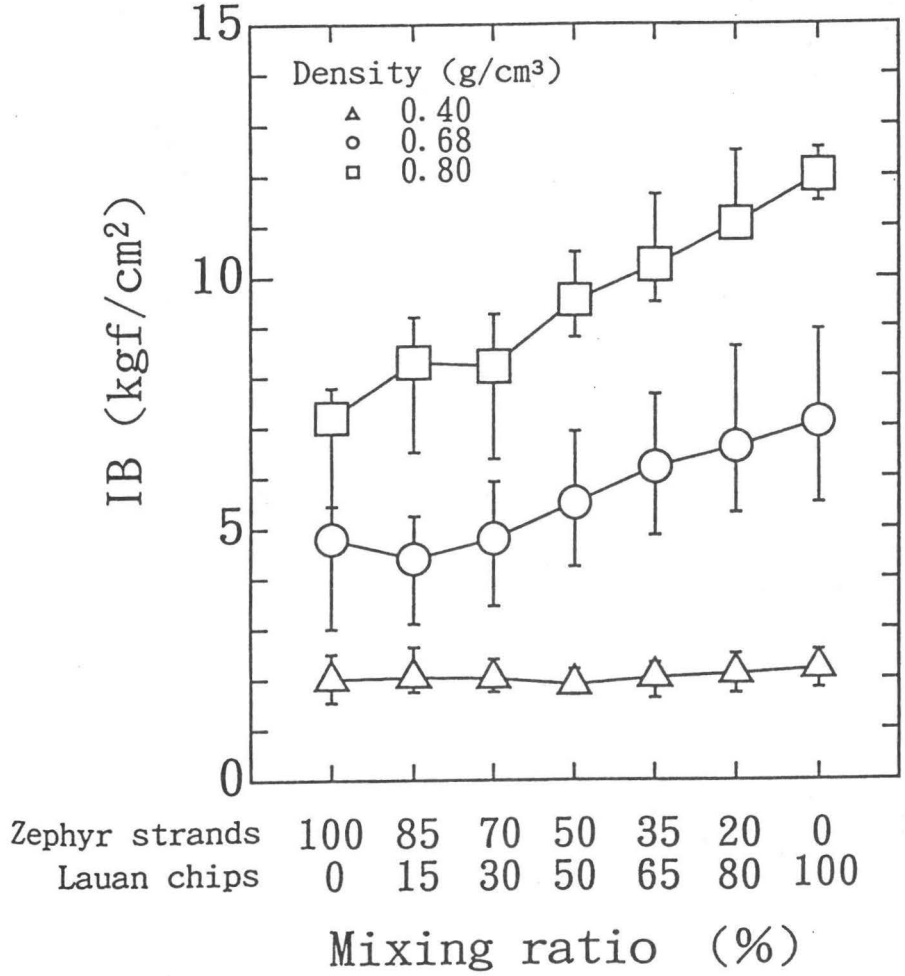


Fig. Effect of chip mixing ratio on the internal bond (IB) strength of Zephyr Strand Board.

Note: Circles and vertical bars denote average values and standard deviations, respectively.

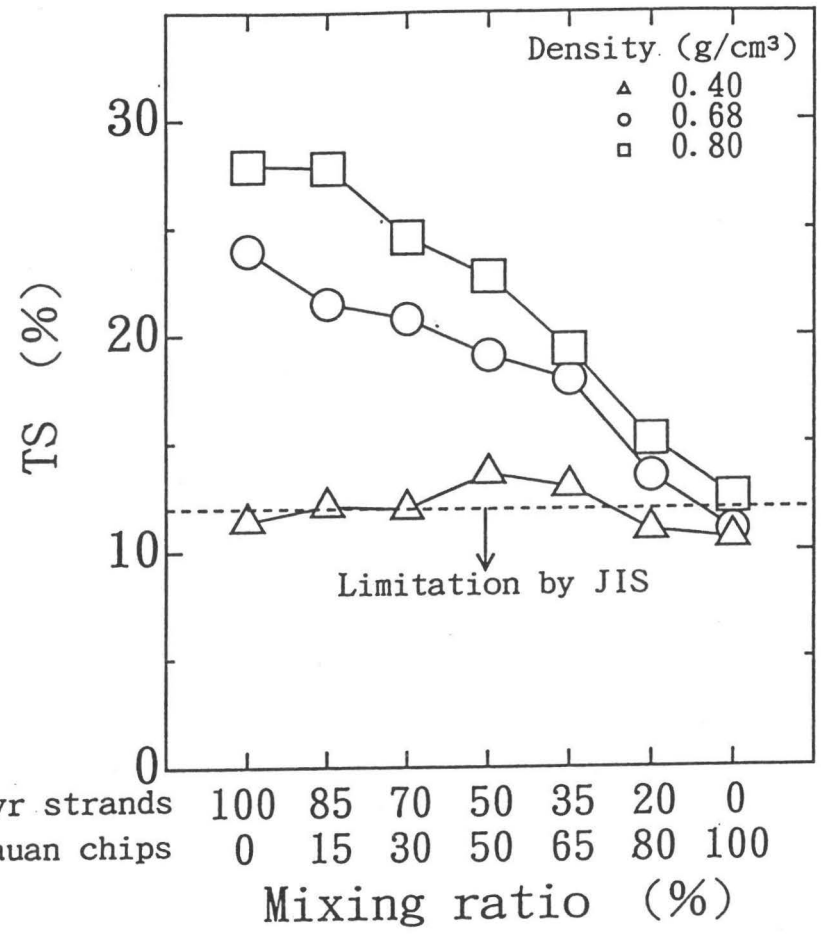


Fig. Effect of chip mixing ratio on the thickness swelling (TS) of Zephyr Strand Board after 24-hour water immersion.

Note: JIS: Japanese Industrial Standard.

図16 ゼファストランド積層ボードの剝離強さ、膨潤とチップの混合の関係

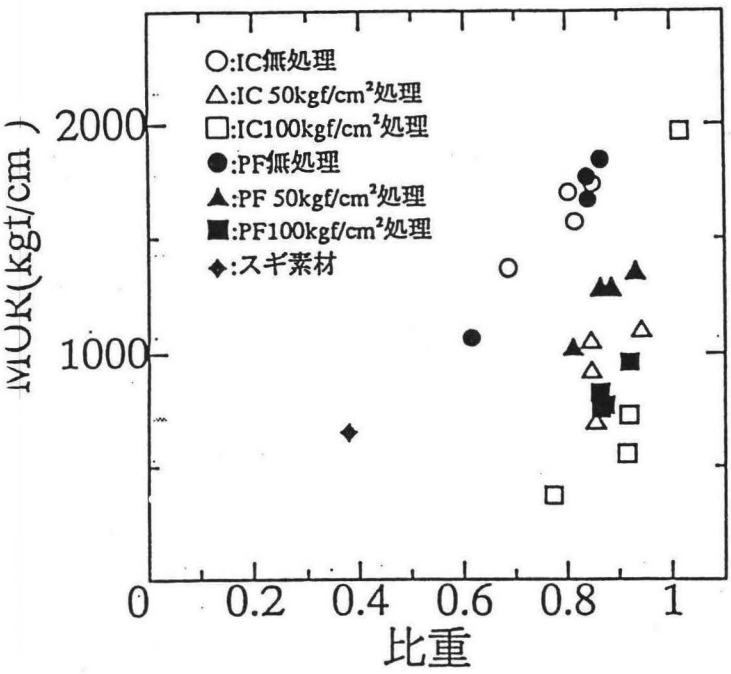


図　MORと比重

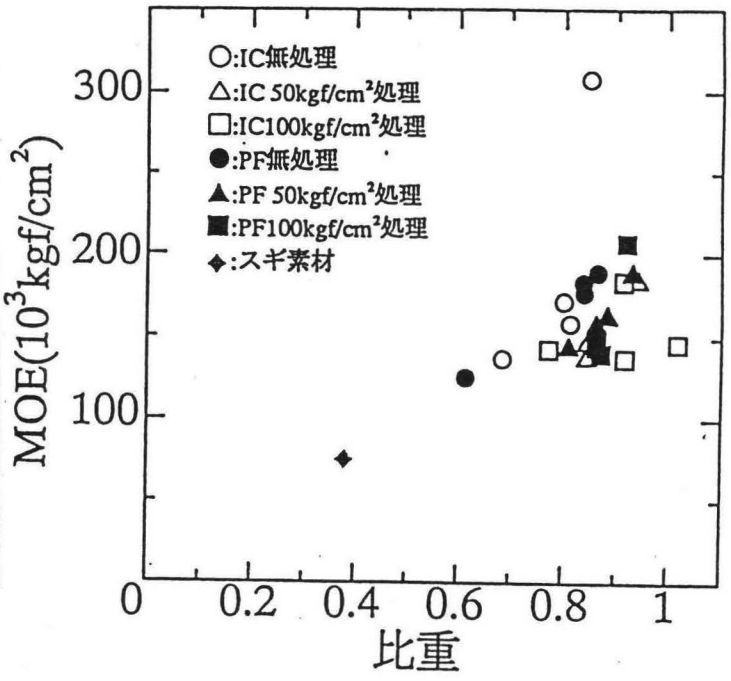


図　MOEと比重

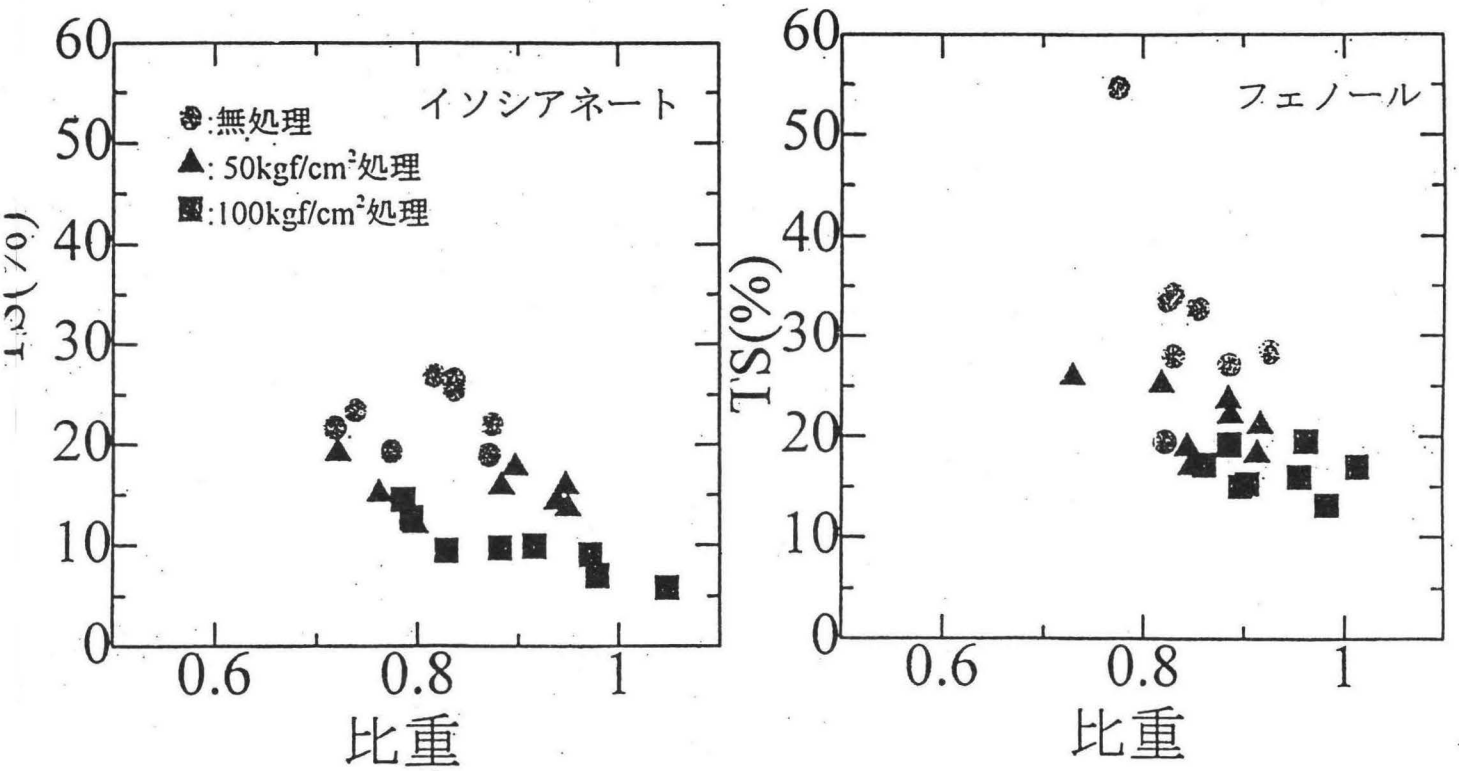


図　ＴＳと比重

図17　熱圧処理棒状エレメントボードの曲げ強度、ヤング係数と膨潤性能

1－5　紙管の建材使用研究

株式会社坂茂建築設計
坂　　茂

1. はじめに

昨今、森林伐採による環境問題が深刻化してきている。その問題への提案のひとつとして、再生紙の筒（紙管）を建材として、特に構造材として使用を考えた。紙管は、安価でサイズ（長さ・直径・厚さ）もほぼ自由に製作でき軽量である。そこでその特長を生かした実験住宅を設計し、その柱材として使用を設定し実験に基づいた研究を行った。

2. 構造概要

この実験住宅の屋根は、軽い折板で構成され、折板の折り目と直交する方向に4本のH形鋼の梁を架けている。折板または4本の梁の負担する屋根荷重は、計10本の紙管によりピン支持され、その軸力として基礎に伝達させている。横力は、地震力よりも風圧力による値がやや大きく、上述の10本の紙管から頭つなぎ材を経て残りの紙管に伝達され、コンクリートスラブ上端を固定とする計80本の片持ち梁により抵抗させている。荷重はすべて紙管に流しているので、その許容応力度及び接合方法が問題となる。

3. 紙管の許容応力度とその接合方法

紙管の寸法は、外径φ 280㎜、内径φ 250㎜、長さ2700㎜であり、紙管原紙は特A級を用い、ポリビニル系接着材によりロール成形されている。なお、紙管の内外部はパラフィン処理、小口は油性シーラント（コーキング剤）塗布により防水処理を行っている。また屋外に放置される29本の紙管には、構造耐力が見込まれていない。

3－1　許容応力度

紙管の強度に影響する原因として以下の2点があげられる。

a　含水率：本実験住宅の場合メーカーから提示された相対湿度の紙管耐力への影響と表1に示す建設地における年間の湿度変化から、それによる低減率を求めている。具体的には、強度試験結果の最低値の2／3に、表1の10月における相対湿度71％とメーカー提示資料から求まる低減率をかけて短期許容応力度とした。

表－1　山中湖における過去6年間の月間平均湿度（1986.1～1991.10）

要　　素	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均湿度(%)	62.2	60.3	58.0	49.7	52.5	59.5	66.2	63.8	69.7	71.0	65.4	64.4

（資料：東京大学農学部付属演習林富士演習林計測）

b　成形方法：市販されている紙管は、耐力よりも寸法精度が重要視されているため、一定幅の原紙をオーバーラップしないように巻きつけて成形している。この隙間が耐力に影響する。また原紙の強度は方向によって異なるため、紙管の径によって変化する巻つけ角度も影響する。

3－1－1　許容圧縮応力度

本実験住宅に用いられている紙管を長さ 600㎜に切断し、写真1に示すように圧縮試験をし、歪値を測定した。試験結果を図1と表2に示す。破壊は写真2に示すように、原紙の巻つけ角度と対応する皺の発生を伴う。短期許容応力度は、C－1供試体の最大耐力の2／3に含水率の影響を検討し64.7kg／㎡とした。

3－1－2　許容曲げ応力度

図2、写真3に示すように3720㎜スパンの紙管に中央集中荷重をかけることにより曲げ試験を行った。その際載荷点のたわみも測定した。試験結果を図3と表3に示す。破壊は写真4に示すように、圧縮域での皺の発生を伴う。これは圧縮試験結果と同様である。短期許容応力度は、B－2供試体の最大耐力の2／3に含水率の影響を検討し、94.9kg／㎠とした。

3－1－3　床面近くでの許容応力度の検討

建築センターの委員より、床面近くでは湿度は90%近くなることが指摘された。計算上必要とされる強度は、許容応力度の半分以下であり、湿度90%による低減を見込んでも十分なため、部材変更はなかった。

3－2　接合方法

鉛直荷重としては、積雪時のものが大きく、これによって決まるH形鋼及び折板と天井の自重は、風による吹上力を上回り、紙管が軸引張力を受けることはない。従って紙管上部とH形鋼の接合の問題点は、屋根にかかる横力を、いかにして80本の紙管で抵抗させるかである。また10本の紙管にかかる軸圧縮力は、紙管下部とコンクリートスラブ接触させることで処理している。紙管下部においては横力による固定端モーメントをいかにコンクリートスラブに伝達させるかが問題となる。

3－2－1　紙管上部に接合方法

紙管内部に木製ジョイント材を落とし込み、それと紙管をスクリュー釘で固定する。ジョイント材の上端面に構造用合板（JAS 1級12㎜厚）を3枚重ねた頭つなぎ材（厚36㎜、幅 900㎜）をのせ、梁をかける。梁下の紙管では、ラグスクリュー（d＝9㎜）2本で、梁材と木製ジョイント材が頭つなぎを貫通して接合されている。他の紙管は、頭つなぎ材と木製ジョイント材は太め鉄釘（CN90）で固定されている。

3－2－2　紙管下部に接合方法

紙管を基礎とアンカーボルトにより固定した木製ジョイントに差し込み、側面からラグスクリューにより接合している。

(1)　ラグスクリューの短期許容耐力

短期許容耐力は、その許容相対変位量を2㎜とすると共に最大耐力に対する安全率が 2.0をこえるように設定した。その際3－1で述べた含水率も考慮した。実験は、図4と写真5に示すような供試体を加圧し、試験機の加圧盤間の変位を測定した。図5と表4にその試験結果を示す。ラグスクリュー1本あたりの短期許容耐力は、J－2供試体の実験結果に、含水率を考慮し、1本あたり 169kgとした。また破壊状況を写真6に示す。

(2)　床面近くでの湿度の影響

湿度90％では、紙管の圧縮強度が6割近くになると予測される。耐力もこれに伴い低減することから、余力のないラグボトルの本数を2本から3本に変更した。

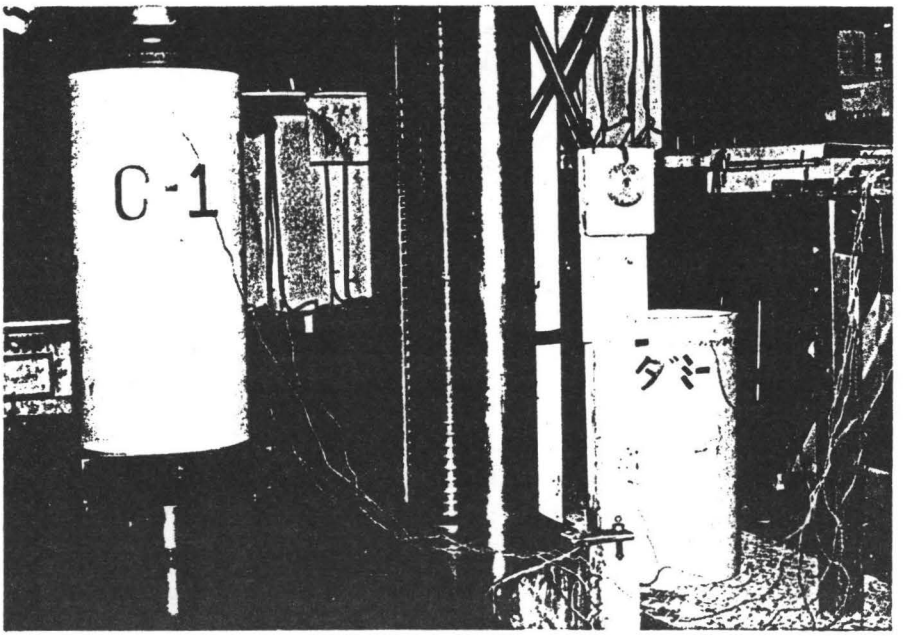
4．今後の展開

紙管の耐久性を把握するために、本実験住宅を対象に以下のことを明らかにしたいと考えている。

a　室内の湿度の連続測定と定期的な紙管の含水率の測定により両者の相関性と経年変化の影響を把握すること。

b　径の小さな紙管を室内に設置し、定期的に圧縮試験を行うことから、含水率と圧縮強度の関係とそれに及ぼす経年変化の影響を把握すること。

参考文献：伊藤一夫、山田伸典、手塚升、坂茂、松井源吾「紙管構造に関する実験的研究　その1　ラグスクリュー接合の強度について」『日本建築学会大会学術講演梗概集』1992年8月



写真－１　圧縮試験　全景

表２　圧縮試験結果

供試体 No.	C－1	C－2	C－3	C－4	C－5
圧縮強度 σ_c (kg／cm²)	108.1	115.4	116.3	114.9	114.9
	平均　113.9				
ヤング係数*1 (×10⁴kg／cm²)	2.55	2.40	2.34	2.45	2.33
	平均　2.41				
ボアソン比*1	0.113	0.155	0.150	0.135	－
	平均　0.138				
含水率（%）	8.3	8.8	8.9	9.2	8.8
	平均　8.8				

*1印は、σ_c／3における割線ヤング係数およびボアソン比

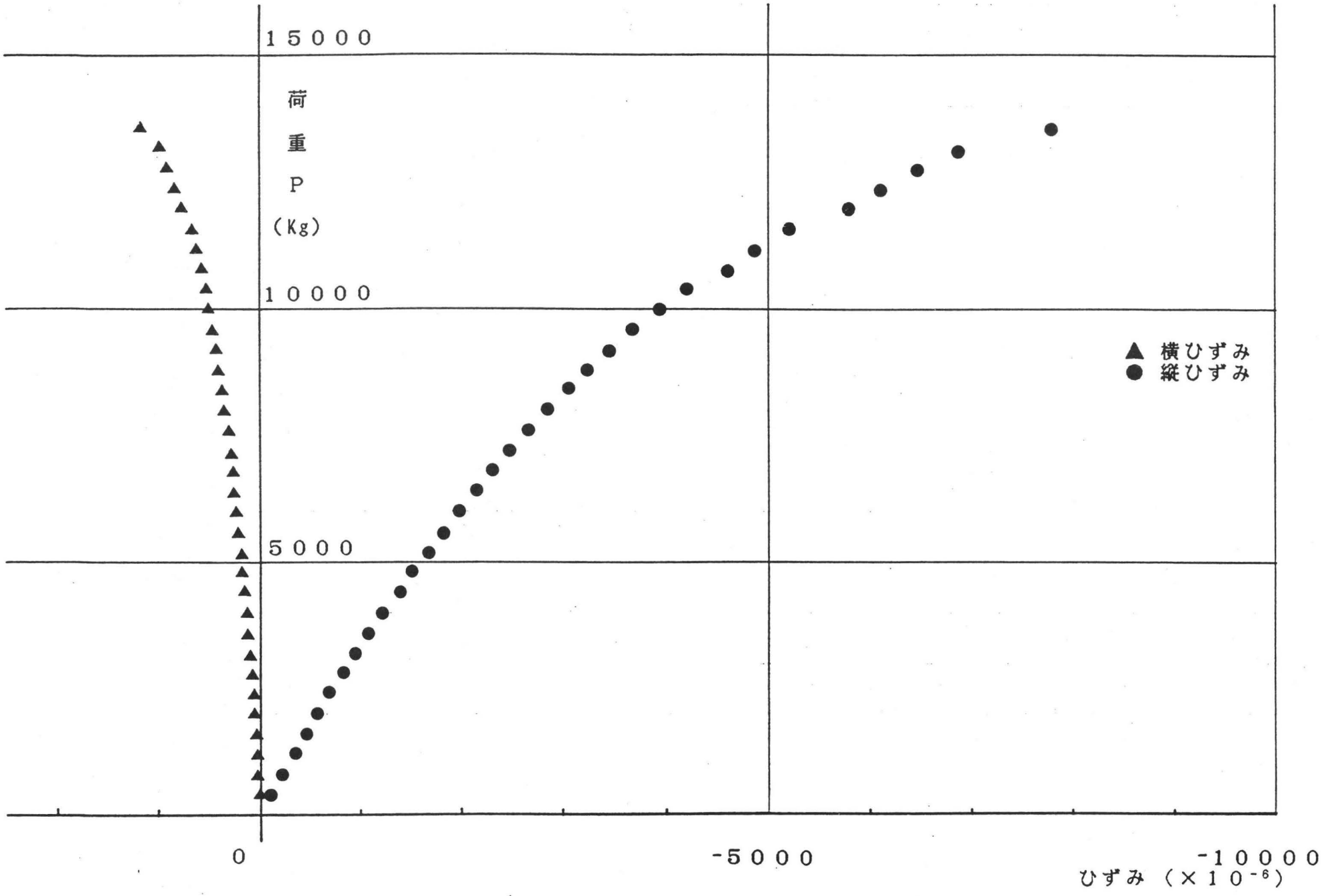
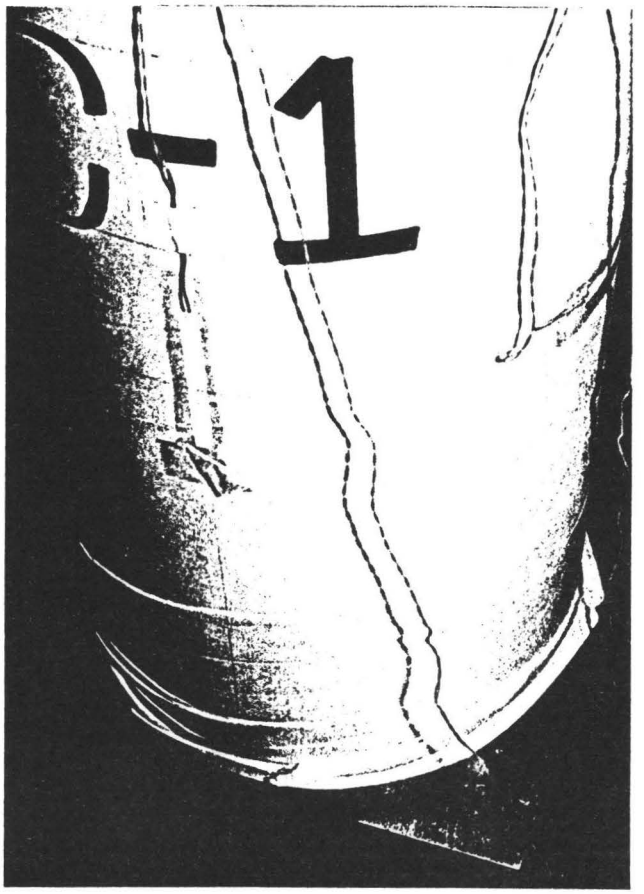
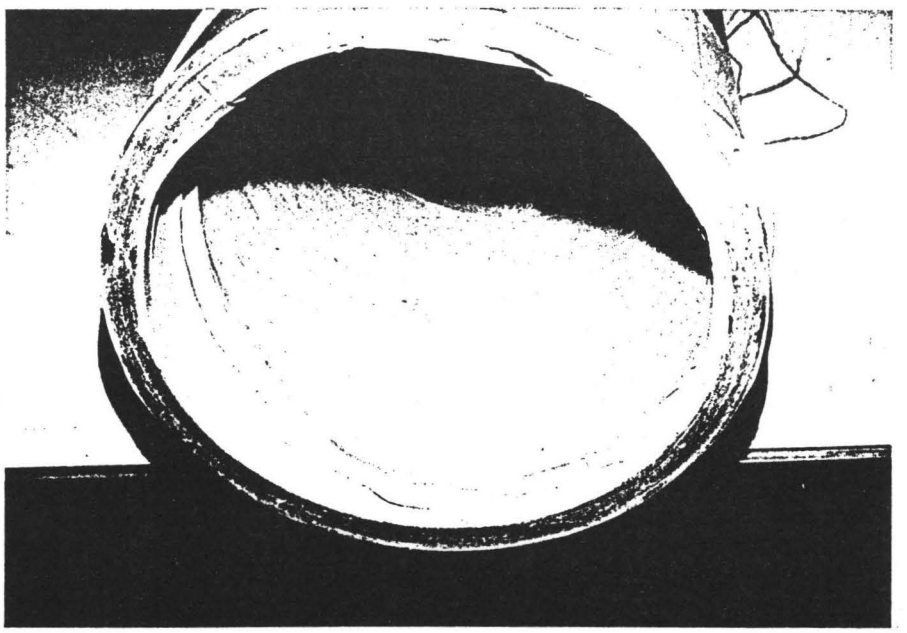


図1　荷重－ひずみ関係（圧縮試験　C－1）



(a) 外　観



(b) 内　観

写真 2　破壊状態

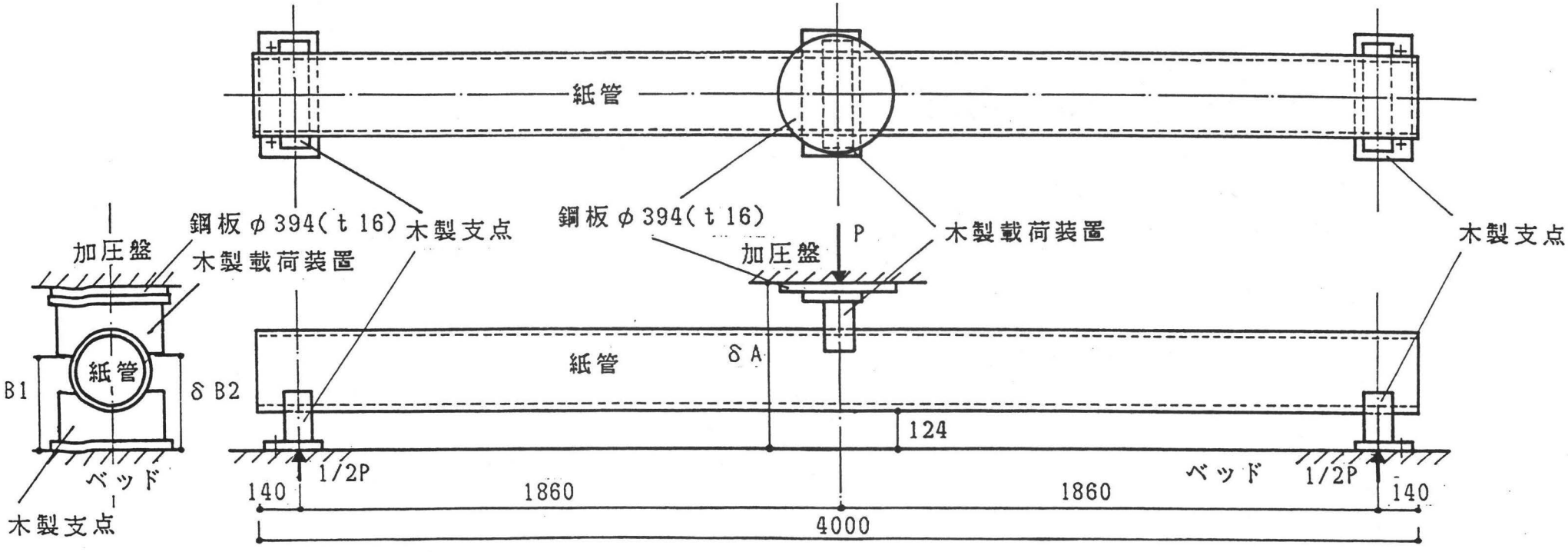

紙管
鋼板φ394(t16)
木製支点
鋼板φ394(t16)
P
木製載荷装置
木製支点
加圧盤
木製載荷装置
加圧盤
紙管
B1
δB2
紙管
δA
124
ベッド
1/2P
140
1860
1860
ベッド
1/2P
140
木製支点
4000

図 2

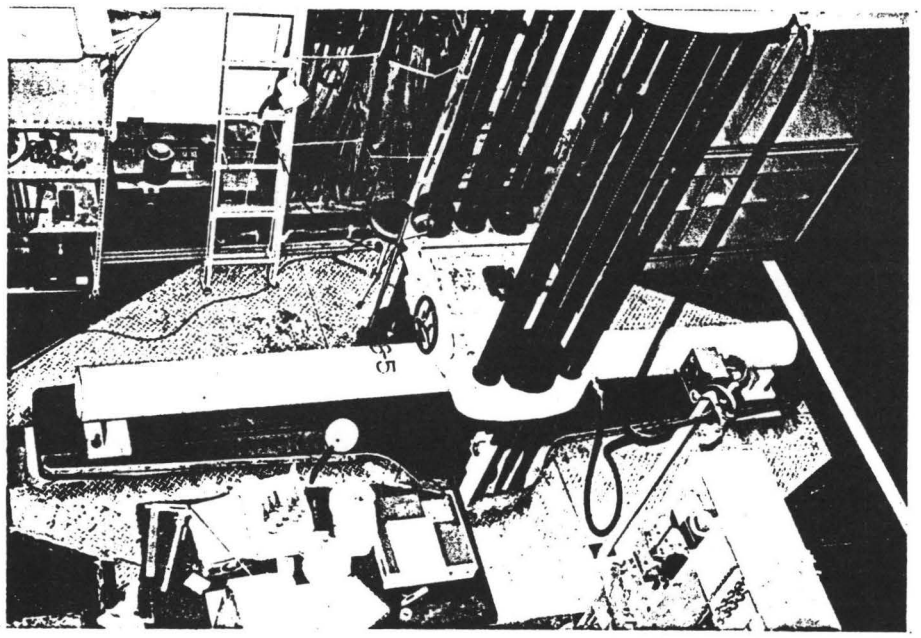


写真３　曲げ試験　全景

表３　曲げ試験結果

供試体 No.	B－1	B－2	B－3	B－4	B－5
曲げ強度 σb (kg／cm²)	172.4	151.3	158.4	158.8	165.7
	平均　161.3				
ヤング係数*1 (×10⁴kg／cm²)	2.18	2.15	2.26	2.20	2.29
	平均　2.22				
含水率（%）	9.3	9.3	8.6	8.7	8.5
	平均　8.9				

１．曲げ強度は、中央変位が124㎜になった時に強度とする

２．*1印は、σb＝σc／３におけるたわみの式から求めたヤング係数

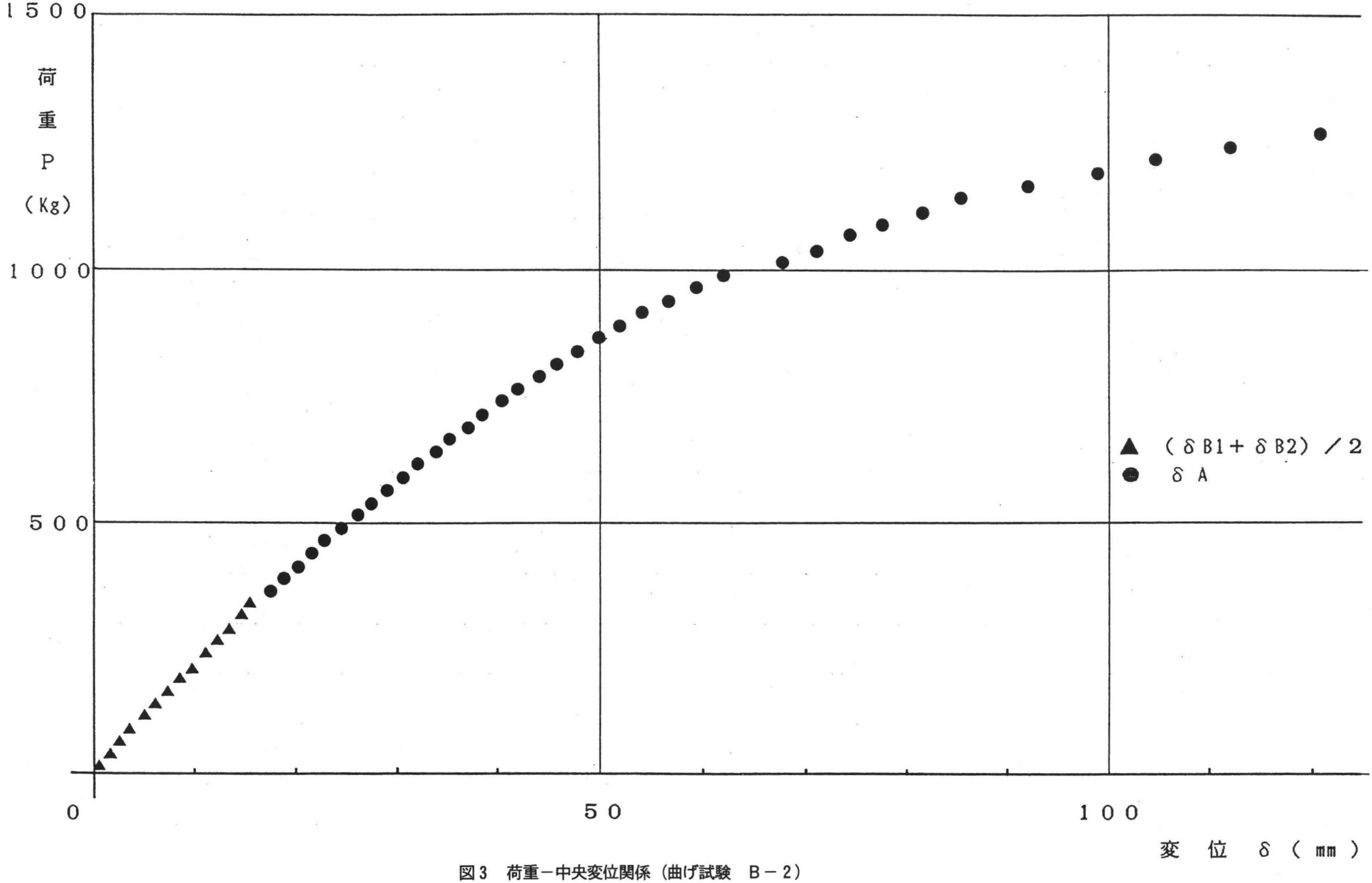


図3　荷重－中央変位関係（曲げ試験　B－2）

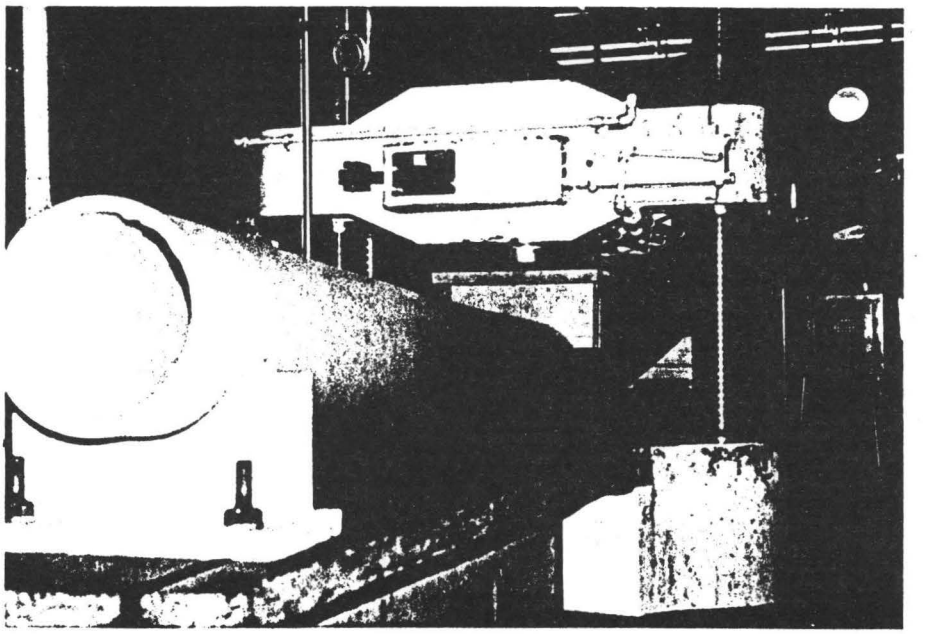


写真 4　破壊状態　全景

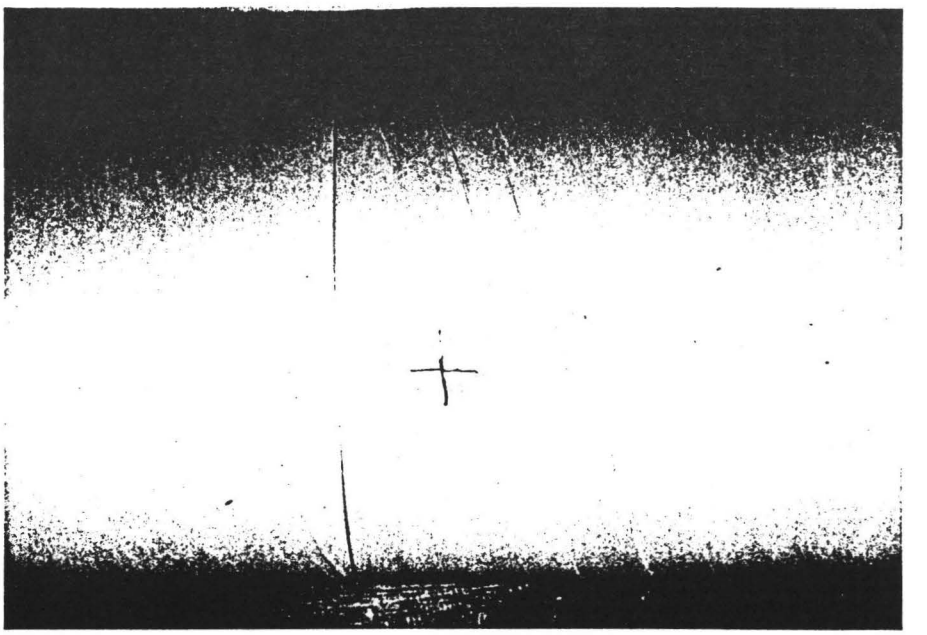


写真 4　破壊状態　載荷点上端
（＋印がスパン中央を示す）

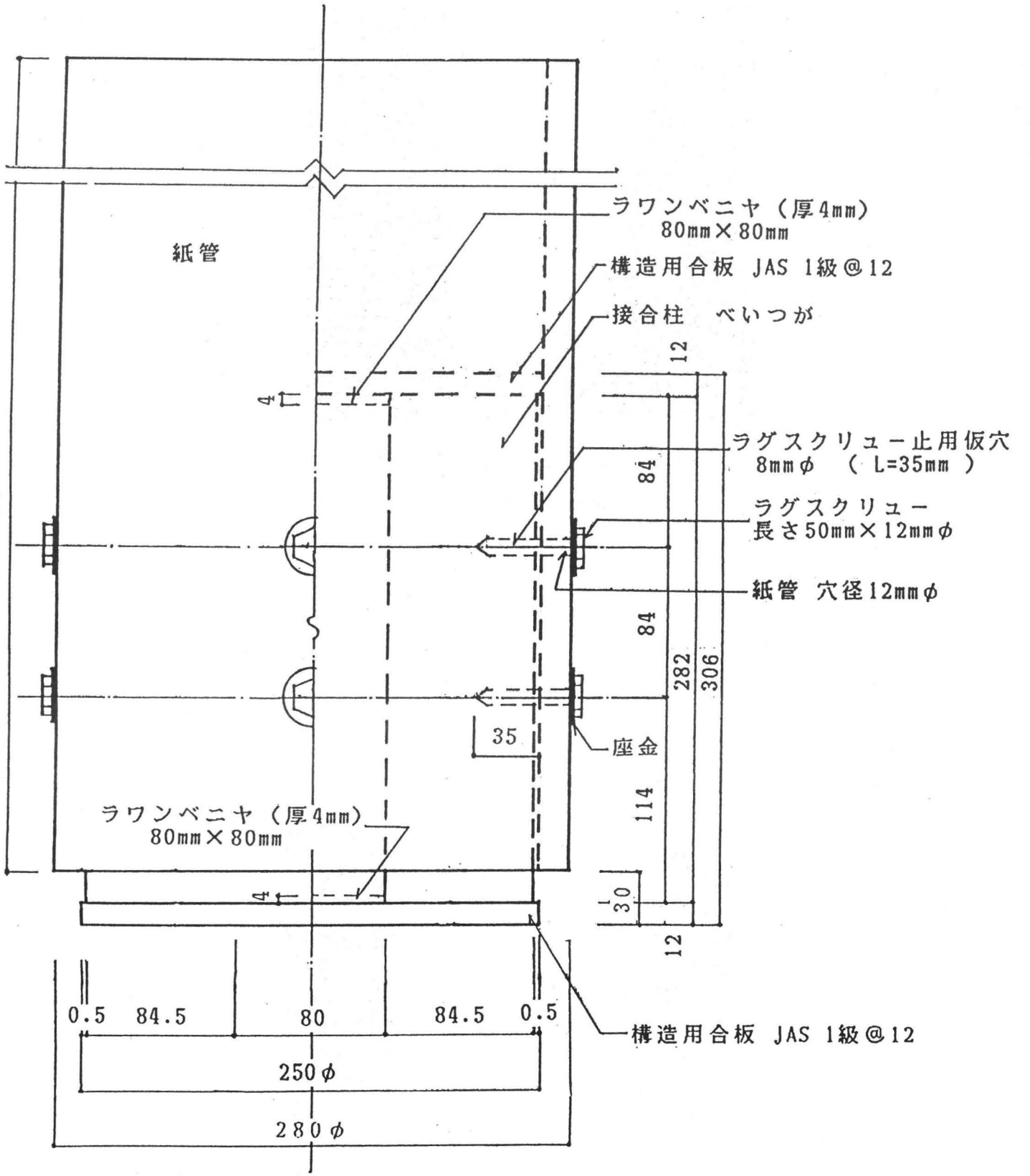

ラワンベニヤ（厚4mm）
80mm×80mm
構造用合板 JAS 1級@12
接合柱 べいつが
紙管
ラグスクリュー止用仮穴
8mmφ （ L=35mm ）
ラグスクリュー
長さ50mm×12mmφ
紙管 穴径12mmφ
座金
ラワンベニヤ（厚4mm）
80mm×80mm
構造用合板 JAS 1級@12
600
4
84
84
282
306
35
114
30
12
12
0.5
84.5
80
84.5
0.5
250φ
280φ

図 4

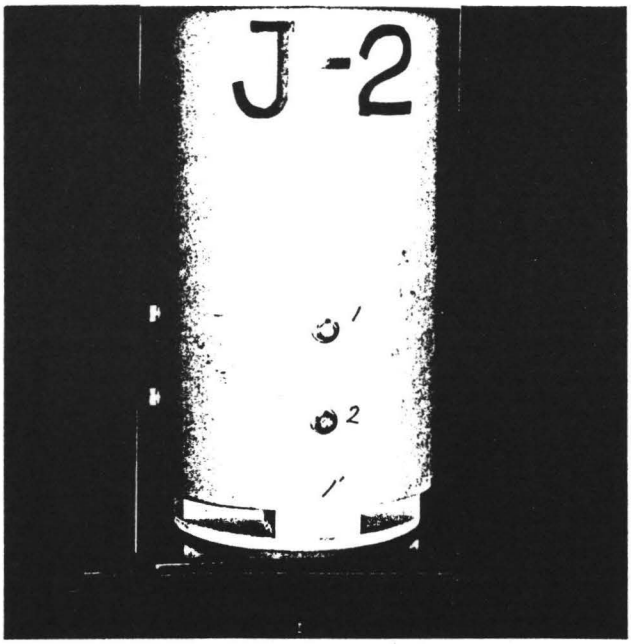


写真 5　初期荷重時における供試体の状態

表 4　接合部試験結果

供試体 No.	J－1	J－2	J－3	J－4	J－5
最大荷重 P (kg)	4625	4395	4500	4865	4865
	平均 4650				
変位 2 mmの時の荷重 (kg)	1611	1424	1561	1483	1786
	平均 1573				
含水率 (%)	9.5	9.4	9.1	8.8	9.3
	平均 9.2				

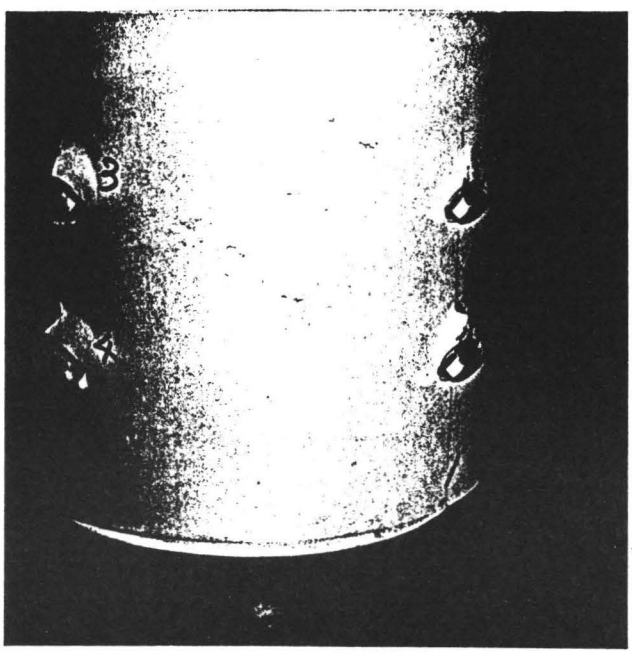


写真 6　破壊状態

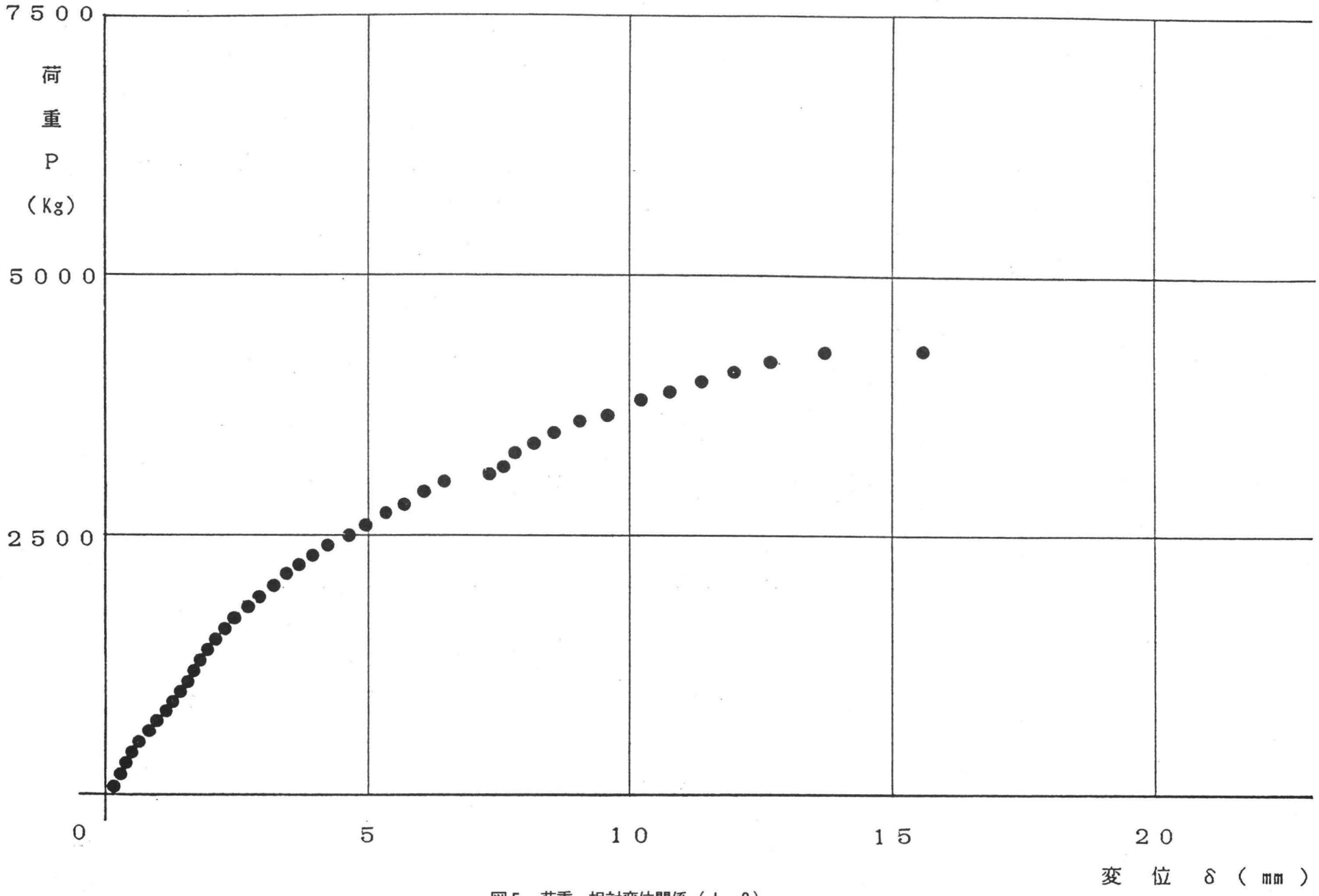


図5　荷重－相対変位関係（J－2）

１－６　ハニカムサンドウィッチ構造材料の材料設計と強度評価に関する研究

横浜国立大学工学部生産工学科
教授　白鳥　正樹

1. 緒　言

ハニカムサンドウィッチ構造材料（以下ＨＳＣ）は、材料に高性能化が求められる近年の傾向にあいまって、航空宇宙産業に限られてきた従来の使用例だけでなく、その他の幅広い分野でも使用されつつある。中でも特に発展著しい建築分野であるが、ＨＳＣの複合構造が非常に複雑であるため効率良い最適設計が行えず、多くの場合かなり安全側に余裕を持たせた設計を行っている現状がある。

このような背景において最適な建築設計を行うためには、ＨＳＣの種々の材料特性を把握し簡単に再現できる有限要素モデルを作成することは、非常に有意義なことである。

本研究では、ＨＳＣの性質を組み込んだ極めて簡単な有限要素モデルを作成することで設計の効率化を図ることを目的に、剛性または強度に関するＨＳＣ構造解析モデルと熱的特性を考慮したＨＳＣ熱伝導解析モデルを作成した。

また、ＨＳＣのような複合構造をもつ材料は、非破壊検査等の保守保全対策が非常に重要である。一般的な構造材料として、安全かつ簡便にはく離欠陥を検知できる赤外線映像を用いたシステムを構築し、実験と解析により手法の確立を試みた。

2. ハニカムサンドウィッチ構造材料

六角形の集合体である蜂の巣状のコア材料を２枚の比較的薄い板（表面板）で挟み込んだ構造材料をハニカムサンドウィッチ構造材料と呼ぶ。図２－１にＨＳＣの代表的形状を示す。

ハニカムコアの素材は、紙・アラミド・アルミニウム・ステンレス・ＦＲＰなどの種類があり様々な用途毎に用いられているが、ほとんどの使用例ではアルミニウム箔で作られたものがもっとも一般的である。これは、軽量であること、安定した性質（品質）が得られること、製造コストが安いこと等による。

図２－２に、アルミニウムハニカムコアの製造方法の一つである展張方式を示した。はじめに薄いシート状材料に、条線状交互に半ピッチずらして接着剤を塗布したものを集積し、熱圧してブロックを作成、これを必要な厚さ（ハニカムコアの高さ：ｈに相当）に切断する。次に重積した方向（ｗ方向）に展張することによって六角セルを形成し、ハニカムコアの完成となる。

接着剤のピッチを変化させ六角セルの寸法（セルサイズ：ｓ）変化させたり、シート状材料の箔厚：ｔを変化させたりして、異なるハニカムコアを製造できる。また、最初の工程で接着剤を

塗布した部分（展張方向に垂直な辺）は他の傾いた辺に対し板厚が２倍となり、ハニカムコアの面内異方性の原因の一つとなっている。一方、表面板の主な材料としては、アルミニウム・ステンレス・ＦＲＰなどが使用される。

このように、ＨＳＣには各素材・サイズの組み合わせの変化等により無数の種類が存在し、強度・重量・熱伝導・腐食環境などの条件によりユーザーが自由に選択できる利点がある。

ＨＳＣの主な用途としては、構造材料（パネル）・整流板・衝撃吸収材料・断熱材等があげられる。近年最も実用化が進んでいるものは、アルミニウムＨＳＣを一般構造材料として建材に使用する例である。これは、従来から扉・仕切板等の内装の構造材として使用されてきていたが、近年ビルの高層化・高級化が進み、大理石を見立てた化粧板のスライスをＨＳＣに接着、パネル化して用いる外壁用製品の普及したことによる。非常に軽量かつ剛性に優れ、平面精度が良く、またパネルが大型化できるなど、外見も良く現場での作業が行いやすいという特徴がある。

以上のように、一般材料として使用されつつあるＨＳＣであるが、一般化が進むにつれ設計時に必要な構造解析・熱伝導解析あるいは非破壊検査手法は、より簡素化したものが望まれている。以降の章では、航空宇宙産業等で行われているＨＳＣの厳密な解析・検査手法に対して、ほとんど精度を落とすことなく簡単に行える解析・検査手法について紹介する。３章では、剛性・強度設計のためのハニカムコア構造解析モデルを、４章では、断熱特性などを把握するためのＨＳＣ熱伝導解析モデルを、５章では、簡易非破壊検査手法の一例として、赤外線映像を用いた手法について述べる。

3．ハニカムコア構造解析モデル

3.1　直交異方性

ハニカムコアの形状を観察すると、ＨＳＣの面内方向（ｘ、ｙ方向）とハニカムコア軸方向（ｚ方向）とでは引張り・圧縮に対する剛性が異なるであろうことは容易に想像がつく。ＨＳＣ面内（ｘ、ｙ方向）変形では、六角セルの辺の曲げにより六角形全体が曲げ変形することに対し、ハニカムコア軸方向（ｚ方向）変形では、六角形は保たれたままセル壁の面内方向（ｚ方向）に変形しているからである。また、せん断に対する剛性も方向によって異なる。ＨＳＣ面内（τ_{xy}方向）変形は、六角形の辺の曲げ変形によるものであることに対し、ＨＳＣ面外（τ_{yz}、τ_{zx}方向）変形は、セル壁のせん断変形によるためである。

さらに詳しく、ハニカムコアの面内の方向による剛性の違いを調べるために、汎用有限要素法解析ソフト（ＭＡＲＣ）を用いて引張試験・せん断試験のシミュレーションを行った。その結果を、図３－１に示した。左図は垂直応力の方向による分布を、右図はせん断応力の分布を表している。垂直応力は、面内方向では異方性を持たないことに対し、せん断応力は六角形状と接着面（板厚が２倍）の影響で面内にも異方性を持っていることがわかる。そこで、ハニカムコアを直交異方性材料としてモデル化することにした。

等方性材料（式３－１）と直交異方性材料（式３－３）の応力－ひずみマトリックス（応力とひずみの関係をあらわす構成方程式をマトリックス表示したもの）を以下に示す。ここで、Ｅ：縦弾性係数（ヤング率）[MPa]・ν：ポアソン比・Ｇ：横弾性係数[MPa]である。

表面板に使用されているアルミニウム等の等方性材料では、ヤング率・ポアソン比を決定すれ

ば、応力とひずみの関係は求まる。ハニカムコアのような直交異方性材料では、Maxwellの相反定理（式３－４）によって９個の独立変数を求める必要があることがわかる。

等方性材料

$$D=\begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & - & - \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & - & - \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & - & - \\ - & - & - & \frac{1}{G} & - \\ - & - & - & - & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \qquad 3-1$$

$$\{\sigma\} = [D]\ \{\varepsilon\} \qquad 3-2$$

異方性材料

$$D=\begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & - & - \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & - & - \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & - & - \\ - & - & - & \frac{1}{G_{yz}} & - \\ - & - & - & - & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \qquad 3-3$$

$$\frac{V_{ij}}{E_i} = \frac{V_{ji}}{E_j} \qquad 3-4$$

3.2　ハニカムコアの材料定数の決定

本節では、ハニカムコアの応力－ひずみマトリックスを与えるために必要な材料定数９つを、理論的に求める手法について述べる。すでに、 Patel・Finnie, AbdEl-Sayed, Gibson, Warren・Kraynik などによりセル壁の変形挙動に着目し材料力学等により求める方法が論じられているので、本節ではそれらに従う。

ｘ方向のヤング率：Exを求める。図３－２のハニカムコアにおいて、ｘ方向に垂直荷重をかけた場合、変形状態からＡ－ＢおよびＢ－Ｃには、図３－３のような荷重がかるが、Ｂ－Ｄは変形しないと仮定できる。よって斜線部における反力は、はりＡ－Ｂに荷重とモーメントを掛けたことを想定し計算すれば求められる。また、求められた反力値を、等価される面積（図３－２斜線部）で割ることで見掛け上の弾性定数が求められる。まずモーメントの釣合いを考慮しはりのたわみ曲線式より

$$\delta = \frac{P\sin\theta}{12EsI} L^3 \qquad 3-5$$

$$\delta = \frac{2\delta\sin\theta}{2l\cos\theta} = \frac{P\sin^2\theta\, l^2}{12EsI\cos\theta} \qquad 3-6$$

よって見掛け上のｘ方向のヤング率はハニカムコアの材料のヤング率を用いて以下の表される、

$$\frac{\text{見かけ上のヤング率 Ex}}{\text{材料（Al）のヤング率 Es}} = \frac{12EI\cos\theta P}{Pl^2\sin^2\theta\, l(1+\sin\theta)b} = \frac{4}{\sqrt{3}}\left(\frac{t^3}{l^3}\right) \qquad 3-7$$

ｙ方向のヤング率を同様の手順で求められる

$$\frac{\text{見かけ上のヤング率 Ey}}{\text{材料（Al）のヤング率 Es}} = \frac{24EI(1+\sin\theta)P}{Pl^2\cos^2\theta\, 2l\cos\theta\, b} = \frac{4}{\sqrt{3}}\left(\frac{t^3}{l^3}\right) \qquad 3-8$$

次にｚ方向のヤング率を求める。ｚ方向軸荷重を支えるものは、ハニカムコアのセル自身であ

るため、座屈臨界荷重までは単純な面積比によるヤング率で等価される。つまり、見掛け上のｚ方向のヤング率と材料のヤング率の比は、図３－２の斜線部内のセル壁の面積（４１×ｔ）と斜線部の面積の比と同じである。

$$\frac{\text{見かけ上のヤング率 Ez}}{\text{材料（Al）のヤング率 Es}} = \frac{21+21}{1(1+\sin\theta)1\times 21\cos\theta} = \frac{8}{3\sqrt{3}}\ \frac{t}{1} \qquad 3-9$$

次に、ポシソンν_{xy}、を求める。ハニカムコアがｘ方向に変形し、図３－４において、はりＡＢおよびＢＣがδだけたわみを生じたとする。この時、ｘ方向変位は$\delta\sin\theta$であり、ｙ方向変位は$2\delta\cos\theta$である。よって次式が成立する。

$$\nu xy = \frac{\varepsilon y}{\varepsilon x} = \frac{\dfrac{\delta\cos\theta}{1(1+\sin\theta)}}{\dfrac{2\delta\sin\theta}{21\cos\theta}} = 1 \qquad 3-10$$

ポアソン比ν_{zx}、ν_{zy}を求めるにあたり、ハニカムセルを薄肉円筒と近似すると材料のν_sと同じになる。ν_{yz}はν_{zy}を利用し Maxwellの相反定理（式３－４）より求められる。

$$\nu_{yz} = \frac{E_y}{E_z}\nu_{zy} \qquad 3-11$$

続いて各弾性係数を求める。

まず、図３－５のようなせん断荷重がかかった際の横せん断係数G_{xy}を求める。変形状態は、はりＢＤの湾曲・Ｂ点周りの回転・はりＡＢの湾曲の３種類で表せれるが、中でも大きなはりＢＤの湾曲・Ｂ点周りの回転を考慮することとする。まず、Ｂ点におけるモーメントの総和をとれば、はりに作用するモーメントは式３－12となり、式３－13が導かれる。

$$M = \frac{F1}{4} \qquad 3-12$$

$$\delta = \frac{F1^3}{24E_sI} \qquad 3-13$$

Ｂ点周りの回転角ϕは、$1\phi = \delta$より、

$$\phi = \frac{F1^2}{24E_sI} \qquad 3-14$$

Ｂ点に対するＤ点のせん断たわみｕは次式で与えられる。

$$u = \frac{F1^3}{24E_sI_1} + \frac{F1^2\times\dfrac{1}{2}}{24E_sI_2} \qquad 3-15$$

故に、せん断弾性係数は次式で表される。

$$\frac{G_{xy}}{G_s} = \frac{P\gamma}{A} = \frac{12}{5\sqrt{3}}\left(\frac{t}{1}\right)^3 \qquad 3-16$$

面外の横弾性係数G_{zx}をも求める。ｚ面上にｘ方向せん断力をかけた際、図３－６の面ａ，ｂ，ｃはそれぞれ異なる変形状態となる。ｂ，ｃには主にせん断変形、ａには曲げ変形が生じる。この場合の曲げの弾性エネルギーはせん断のエネルギーと比べ非常に小さいと考えられるので、ｂ，ｃのせん断変形のみ着目する。

各面のせん断ひずみ　　応力とひずみの関係

$$\left\{\begin{array}{l}\gamma_a = 0\\ \gamma_b = \gamma_{zx}\cos\theta\\ \gamma_c = \gamma_{zx}\cos\theta\end{array}\right\} \qquad 3-17$$

$$\left\{\begin{array}{l}\gamma_{zx} = G_{zx}\gamma_{zx}\\ \gamma_b = G_s\gamma_b\\ \gamma_c = G_s\gamma_c\end{array}\right\} \qquad 3-18$$

力のつりあいより、

$$\tau_{zx}\times 2l\cos\theta\, 1(1+\sin\theta) = \tau_b l\cos\theta + \tau_c l\cos\theta\, t \qquad 3-19$$

上式より、

$$\frac{Gzx}{Gs} = \frac{1\ t}{\sqrt{3}\ 1} \qquad 3-20$$

同様にせん断弾性係数Gyzを求める。

$$\frac{Gyz}{Gs} = \frac{5\ t}{3\sqrt{3}\ 1} \qquad 3-21$$

以上、ハニカムコアの材料定数を表３－１にまとめて示した。すべての材料定数が（１／ｔ）で決定することがわかる。また表３－２に、有限要素法でハニカムコアモデルを作成、単位強制変位を与え生じた反力を断面積で割り求めた解析測定値との比較を示した。

3.3　非線形解析

ハニカムコアの線形範囲における剛性問題は、前節のように多くの研究が行われているが、非線形挙動についての解析研究例は少ない。これは、過去の使用例が航空宇宙産業などの極めて特種な分野に限られて、剛性のみに着目すればよたったためであると考えられる。今後、分野が広がり強度が問題になる使用例も増えてくると考えられ、本節ではハニカムコアの非線形挙動のモデル化について述べる。

均質材料とＨＳＣのような積層材料では曲げ荷重が加えられたときの現象が異なってくる。図３－７は均質材料に曲げ荷重をくわえたときの変形状態で、板厚方向中心線と伸び縮みが生じない中立軸は重なり、上半分は圧縮応力、下半分は引張応力を受けている。また、上下端面において垂直応力が降伏応力に達したとき非線形現象が生じる。これに対し、図３－８は内部に（板厚方向を除いた）剛性が非常に低い材料を挟み込んだ３層（サンドウィッチ）構造材料の曲げ変形状態である。中立軸が上下表面板のそれぞれの中心付近に存在し、それぞれの曲率がほぼ等しい（均質材では曲率が異なり、同じ中心点をもつカーブを描く）。また、内部層ではせん断変形を生じている。よって、（板厚方向を除いた）剛性が低い材料であるＨＳＣの非線形現象は、ハニカムコアのせん断変形、あるいは表面板の降伏によると考えられる。

構造解析を行う際、材料は von Misesの相当応力：σ_y （式３－22）が降伏応力に達したとき降伏すると考えられる。異方性材料の場合は、上記条件を拡張した形のHillの理論式（式３－23）で塑性条件を表す。

$$\sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2+(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+6(\sigma_{23}{}^2+\sigma_{31}{}^2+\sigma_{12}{}^2)}$$

$$=\sigma_{eg}=\sigma_y \qquad 3-22$$

$$a_1(\sigma_y-\sigma_z)^2+a_2(\sigma_z-\sigma_x)^2+a_3(\sigma_x-\sigma_y)^2+3a_4\tau_{yz}{}^2+3a_5\tau^2{}_{zx}+3a_6\tau^2{}_{xy}$$

$$=2\overline{\sigma}^2 \qquad \overline{\sigma}=\frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \qquad 3-23$$

以下に、ハニカムコアの場合の式３－23の係数の決定方法について述べる。

ＨＳＣでは、内部ハニカムコアは曲げによる降伏、あるいは圧縮による座屈のどちらかの現象を起こす。圧縮による座屈は、表面板が非常に薄くセルサイズが非常に大きな時などに限られるため、ここでは曲げによる降伏現象をとりあげる。

３点曲げ試験などにおいて、上記仮定からセル壁の降伏は主にせん断応力τ_{yz}・τ_{zx}によるものと考えられる。すると、式３－23の係数a1・a2・a3およびa6は０とおける。また、図３－９においてτ_{zx}によるハニカムコアの降伏は、セル壁ＡＢとＢＣの降伏と考えられる。よって力の釣り合い式（式３－24）より、ハニカムコアの等価降伏応力$\overline{\tau_{zx}}$（式３－25）が求められる。

$$\tau_{zx} \cdot 2l^2\cos\theta(1+\sin\theta) = 2\overline{\sigma}tl\cos\theta \qquad 3-24$$

$$\tau_{zx} = \frac{t}{l(1+\sin\theta)}\overline{\sigma} \qquad 3-25$$

同様に$\overline{\tau_{yz}}$も式３－26、式３－27で求められる。

$$\tau_{yz} \cdot 2l^2\cos\theta(1+\sin\theta) = 2\overline{\sigma}tl + 2\overline{\sigma}tl\sin^2\theta \qquad 3-26$$

$$\tau_{yz} = \frac{t(1+\sin^2\theta)}{l\cos\theta(1+\sin\theta)\theta}\overline{\sigma} \qquad 3-27$$

式３－25および式３－27をそれぞれ式３－23に別々に代入しa4とa5を求める。

$$a_4 = \frac{2\cos^3\theta(1+\sin\theta)^2}{3(1+\sin^2\theta)^2}\left(\frac{1}{t}\right)^2 = \frac{18}{25}\left(\frac{1}{t}\right)^2 \qquad 3-28$$

$$a_5 = \frac{2(1+\sin\theta)^2}{3}\left(\frac{1}{t}\right)^2 = \frac{3}{2}\left(\frac{1}{t}\right)^2 \qquad 3-29$$

3.4　構造解析結果

求められた係数a4・a5を汎用有限要素法ソフトのHillの降伏条件式に代入したモデル（図３－11）を用いて構造解析を行う。ハニカムコア部を細分割したモデル（図３－10）と比較した結果を図３－12以降に示す。図３－12、図３－13はハニカムセルの方向を変えた３点曲げ試験の結果である。また、図３－14は４辺支持した正方形板に強制変位を与えたときの荷重変位曲線である。降伏点及び反力値とも良い結果が出ており、本モデルを用いることで前処理時間および解析時間の大幅な削減が行えることが確認された。

4．ハニカムコア熱伝導解析モデル

4.1　熱伝導解析

ＨＳＣが建築構造部材として使用される際は、その他の使用例では必要のなかった熱伝導に関する知識が重要になってくる。外壁パネルとして使用される時は、太陽日射による熱の内部への影響を考慮しなくてはならないであろう、また扉など内装で使用される時は、隣の部屋との温度伝導状態を把握しなくてはならない。しかし、前述のようにハニカムコアが複雑な形状をもつため有限要素法で詳細解析を行うことは困難であり、強度解析で行ったモデル解析手法を熱伝導解析でも応用する必要がある。

モデル化するにあたり定める必要のある定数は３軸方向の熱伝導率と、比熱、密度の５つである。以下に、それぞれの材料定数を決定する手法について述べる。また、紙製またはアラミド繊維製のＨＳＣは高い断熱特性を持つが、防火・強度・コスト面等で問題があるため、実際にはア

ルミニウム製ＨＳＣが多く使用されている。よって以下の節はアルミニウム製ＨＳＣを対象としている。

4.2　ＨＳＣ熱伝導に関する材料定数

ＨＳＣの伝熱現象は、主にハニカムコアのセル壁を通じて行われる。これはアルミニウムの熱伝導率が、ハニカムコア内空気の熱伝導率の約 10^4倍（表４－１参照）であることによる。よってハニウムコアの３軸方向の熱伝導率において、以下の理論式が考えられる。

以下の各式において、それぞれλ_{xx}：熱伝導率・t_{xx}：板厚・V_{xx}：体積．M_{xx}：質量・ρ_{xx}：密度・Cp_{xx}：比熱をあらわし、添え字についてcore：ハニカムコア・al：アルミニウム・ad：接着剤・all ：全てをあらわす。また、ｓはセルサイズをｔはセル壁箔厚を示している。

ｚ方向については、単位セルに占めるアルミニウム製のセル壁の割合（面積比）をアルミニウムの熱伝導率にかけて求められる。

$$\lambda_z = \frac{A_{al}}{A_{all}} = \lambda_{al} = \frac{8\,l}{3\,s}\,\lambda_{al} \qquad 4-1$$

次にｘ方向・ｙ方向の熱伝導率を求める。

一定量の熱量を与えた材料が定常状態に落ち着くと、その温度差分布は距離に対し線形分布を示す。つまり、距離が２倍であれば始点との温度差は２倍となる。ハニカムコアの一部を切り出した図４－１において、セル壁をｙ方向に熱が伝導する場合、セル壁が傾いているl_2部での上下端温度差（T3－T2）はl_1部での上下端温度差（T2－T1）の sin30倍である。よって、ハニカムセルは$l_1 = l_2$が成り立つため、等価熱伝導率λには$\lambda_1 = \sin 30\,\lambda_2$の関係がある。

以上のことを踏まえると、ｙ方向の熱伝導率は、伝熱経路であるセル壁の長さ（$l_1 + l_2 \sin 30 + l_3$）とそれをｙ軸に投影した長さ（$l_1 + l_2 + l_3$）の比を掛けて求められる。

$$\lambda_y = \frac{1\ \frac{3}{2}\ 1}{\frac{s}{2}\ 2\ 1}\lambda_{al} = \frac{3\,l}{2\,s}\,\lambda_{al} \qquad 4-2$$

ｘ方向も同様に求められる。。

$$\lambda_x = \frac{1\ \frac{s}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}\ s\ \frac{s}{\sqrt{3}}}\,\lambda_{al} = \frac{1}{s}\,\lambda_{al} \qquad 4-3$$

また、ハニカムコアの等価密度は、アルミニウムと空気の体積比によって求められ（式４・４）、等価比熱は質量比によって求められる（式４・５）。

$$\rho_{core} = \frac{\rho_{al}\,V_{al} + \rho_{air}\,V_{air}}{V_{all}} = \rho_{air} + \frac{8t}{3S}\,(\rho_{al} - \rho_{air}) \qquad 4-4$$

$$Cp_{core} = \frac{Cp_{al}\,m_{al} + Cp_{air}\,m_{air}}{Mall} = Cp_{aif}\,\frac{\rho_{air}}{\rho_{core}} + \frac{8t}{3S\,\rho_{core}}(C_{pal}\,\rho_{al} - C_{pair}\,\rho_{air}) \qquad 4-5$$

ハニカムコアの全ての材料定数は、セルサイズ・箔厚と、アルミニウムおよび空気の材料定数で決められる。

4.3　ＨＳＣ熱伝導モデル

4.2節で、ハニカムコアの材料定数５つが求められた。これらを直交異方製をもつソリッド要素の材料定数に代入すると、ハニカムコアモデルができる。

実際にはＨＳＣがコアと表面板２と接着剤２の５層構造にため、図４－３で示されたソリッドモデルがＨＳＣの５層伝熱モデル（5plied model）となる。ハニカムコアを細分割した図４－２（full model）と比較して、節点数の大幅な削減が行われているとともに、六角セルに関係なく分割できるためメッシュ作成時間の大幅な短縮が可能である。またセル壁・空気間など、コア内部における局所的な熱伝導の再現は不可能であるが、熱伝導の良い上下表面板が熱伝導を平均化しているため、ＨＳＣの表面の温度分布は十分に再現可能である。

ＨＳＣがコア・表面板・接着剤の３物質・５層構造で構成されていることを考慮して、さらに簡単に解析が行えるモデルの作成を試みた。

ハニカムコアの面内方向（ｘ・ｙ方向）の熱伝導率は、表面板材質であるアルミニウムの熱伝導率のおよそ１％程度であり、パネル面内方向の熱の移動は、ほとんど表面板で行われると仮定できる。そこで、単層モデルの面内熱伝導率はアルミニウムの値を使用する。

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_{al} \qquad 4-6$$

３物質が直列にならぶｚ方向の熱伝導率は、３物質各々の熱伝導率の逆数に全板厚（t_{all}）に占める各々の板厚（t_{corc}等）の割合を掛けたものの和をとり求められる。

$$\lambda = (2t + 2t_d + t_{corc}) \times \left(\frac{2t_s}{\lambda_s} + \frac{2t_{ad}}{\lambda_{ad}} + \frac{t_{corc}}{\lambda_{corc}} \right)^{-1} \qquad 4-7$$

比熱は３物質の質量比、密度は３物質の板厚比で求められる。

$$\rho = \frac{2\rho_{al}\, t_s + 2\rho_{ad}\, t_{ad} + t_{core}\, \rho_{core}}{t_{all}} \qquad 4-8$$

$$Cp = \frac{2\rho_{al}\, t_s\, Cp_{al} + 2\rho_{ad}\, t_{ad}\, Cp_{ad} + \rho_{core}\, t_{core}\, Cp_{core}}{\rho\, t_{all}} \qquad 4-9$$

ＨＳＣ全体の材料定数５つが決定し、一種類の材料定数を持つＨＳＣの単層熱伝導モデル（single ply model）が作成できる（図４－４）。このモデルは、３物質を区別しメッシュ分割を行う必要のある５層熱伝導モデルに較べ、より単純な作業でより少ない節点を持つモデルが作成できる。

4.4　熱伝導解析結果

ハニカムコアを細分割した細い分割モデル・５層熱伝導モデル・単層熱伝導モデルを用いて定常熱伝導解析または非定常解析を行い比較した結果、以下の考察が得られた。境界条件を面で与えたときは、両表面の温度分布に関しては３モデルともほぼ同じ分布を示した。しかし単層モデルでは、局所的境界条件（１点のみ温度固定等）を与えたとき面内方向の温度分布に差が見られる。また、内部の温度分布に関しては常に単層モデルのみ異なる分布を示した。これは、単層モデルが内部を均質として扱っているからである。

４節で述べる内部欠陥を含むような場合の解析では、５層モデルを使用して内部状態を再現しなくてはならないが、本来の目的である一般構造全体の熱伝導解析では局所的な境界条件を与えることは少なく、また内部の様子は考慮しないため、前処理も容易で節点数が少ない単層モデルで十分に解析を行えると考えられる。

5. 赤外線映像を用いたＨＳＣ非破壊検査手法

5.1　ＨＳＣのはく離欠陥

ＨＳＣは、全体構造および内部ハニカムコアの組み立てに接着成形を行っているため、接着はく離による剛性の低下が非常に大きな問題となっている。製造工程において、または使用時に起こりうるはく離欠陥の箇所を表５－１に示した。中でも最も起こりやすく、剛性低下に問題となるのは、表面板・コア間の接着不良である。

航空宇宙産業では、確実にはく離部を検出するために超音波やｘ線を用いた非破壊検査を行っている。しかし、ＨＳＣが一般構造材料として広く利用されるためには、検査の安全性と簡便性をもつ非破壊検査の開発が必要とされる。そこで、赤外線映像を用いた非破壊検査システムを構築した。

5.2　赤外線映像を用いたＨＳＣ非破壊検査システム

非破壊検査では、内部に含まれる欠陥の物理的性質の違いが引き起こす異常現象を検出する。本システムでは、はく離欠陥部つまり空気の熱伝導率がアルミニウムの熱伝導率より極めて低いことを利用している。

システム構成を図５－１に示す。ＨＳＣの下面表面板をヒーターなどで一様に加熱すると、熱は内部ハニカムコアを通じて上面表面板に伝導されるが、内部に欠陥が含まれている場合には、欠陥が熱伝導を阻止し欠陥部上面の温度は低くなる。表面温度分布を検出できる赤外線映像装置でＨＳＣの上面を観察すると、この異常が検出され欠陥を検知できる。下面表面板を均一に加熱することが重要で、ＨＳＣとヒーターの間に鉄板を挿み、不均一なヒーターの温度分布を均質化するとともに、熱容量を増している。また、熱源として、熱湯にビニルをかぶせ防水したものなども有効である。

5.3　赤外線手法実験結果

本節では、疑似欠陥を入れた試験片を作成し実験を行った結果について述べる。用意した欠陥は、type１：ハニカムコアが打ち抜かれたもの、type２：接着剤が切り取られたもの、type３：接着剤と表面板の間に非常に薄いＦＥＰフィルムを挿んだものの３種類である。type３の試験片を図５－２に示す。また、type３の試験片については、表面板材質・ハニカムコア等の組み合わせを変化させて、構成要素による検知能力の差を比較した。試験片を構成する物質の熱伝導率を表５－２に示した。

実験方法については、前節で述べたシリコンラバーヒーターを用いた手法で行い、ヒーター温度を 320K～ 340K程度に設定した。

赤外線映像装置で得られた実験開始数秒後の画像を図５－３および図５－４に示す。青色系は温度が低く赤色系は温度が高いことを示す（画面右のカラーサンプル参照）。周囲に較べ温度が低い部分に欠陥があると考えられるが、図５－４に関してはハニカムコアの形状が表面板に現れている。両試験片ともハニカムコアはアルミニウム製であるが、表面板に関し図５－３はアルミニウム製、図５－４はGFRP製である。

３typeの欠陥については種類の区別なく検知可能であったが、種類によって検知可能な欠陥のサイズ（直径・はく離厚さ）の限界に差が見られた。試験片を構成する物質の組み合わせ等を変

化させた実験では、板厚が大きい表面板、または熱伝導の良いアルミニウム製の表面板を用いた試験片は欠陥が検出され難いことなどが示された。また、下面の加熱むらと欠陥とを区別することは非常に難しいため、下面を均一に加熱することが非常に重要である。

5.4　EWSを用いた画像処理

図5－4の赤外線画像において最も小さな欠陥が検出され難くなっている。このような欠陥を確実に検出するための画像処理システムをEWS上で構築した。赤外線映像装置で得られた赤外線画像をEWSに転送し、図5－5に示したフローで処理が行われる。図5－3の処理結果を図5－6に示したが、確認が難解であった最も小さな欠陥が検出されていることが判る。

5.5　熱伝導解析による赤外線手法のシミュレート

5.3節の構成要素を変化された実験について、5層熱伝導モデル（4章参照）を用いてシミュレート解析を行った。解析における境界条件を図5－7に示した。空気の材料定数を持つはく離欠陥(0.025mm）を、表面板(0.5mm）と接着剤（0.05mm）の間に入れ、全体の初期温度を 293Kとする。下面を343Kに温度固定し、上面は熱伝達率10W／㎡Kで外部空気（293K）と熱伝達を行っている。構成要素等パラメータには、セルサイズ・箔厚・コア高さ・表面板厚・表面板材質（熱伝導率）・接着層厚・加熱温度の7種類を選んだ。欠陥上面A点と正常部上面B点の温度を出力し、その最大温度差と最大温度差を生じる時間について検討を行った。

点A、Bの温度履歴および温度差変化を図5－8、図5－9に示す。また、最大温度差を生じた時の温度分布を図5－10に示した。熱伝導が阻止された欠陥上面の温度は低く（青色）、欠陥の下面は温度が高くなっていることが確認できる。

図5－11から図5－17に各パラメータ値を変化させた時の、最大温度差（□）、最大温度差時間（■）を示した。これら結果から、加熱温度を変化させた時、最大温度差は増加するが、最大温度差時間はほぼ変化していない事などの定性的結果が得られた。今後は、4章におけるモデル化を進め、定量的な解析を試みる。

6．結　言

HSCの構造解析および熱伝導解析を行う際、精度を落とすことなく簡単に解析が行えるモデルを作成した。両モデルとも、前処理作業の簡略化、計算時間の短縮化に大きな効果をあげることに成功した。今後、実験との比較を重視しより正確なモデル化を進めていくことで、十分実用化できると考えられる。また、HSCの非破壊検査について、赤外線映像を用いた手法が構築された。今後は、欠陥部同定などの課題が残されているが、簡単な欠陥検知手法として実用可能であると考えられる。

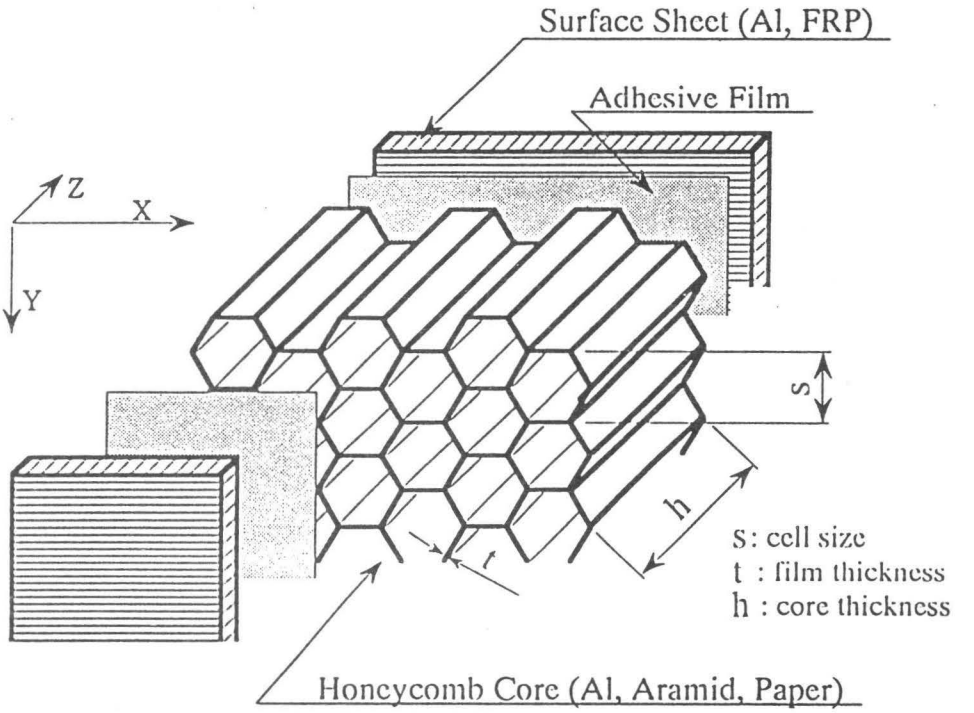


図２－１　ハニカムサンドウィッチ構造材料（ＨＳＣ）

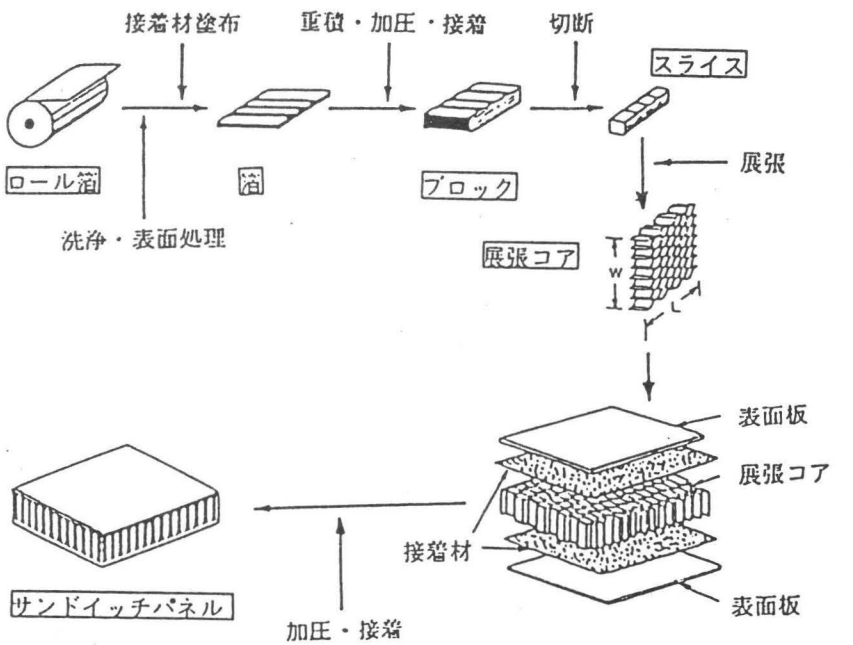


図２－２　アルミニウム製ハニカムコア製造方法

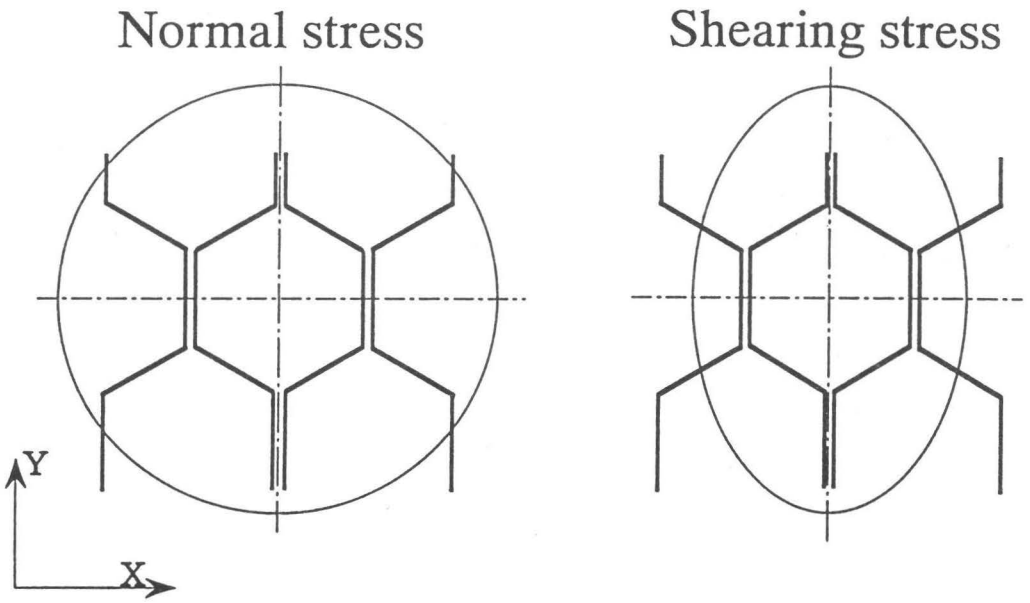


図３－１　垂直力・せん断力の面内異方性

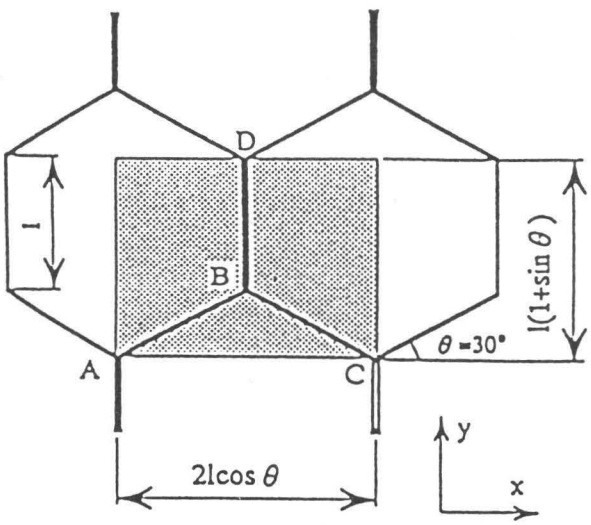


図３－２　ヤング率を決定する単位セル

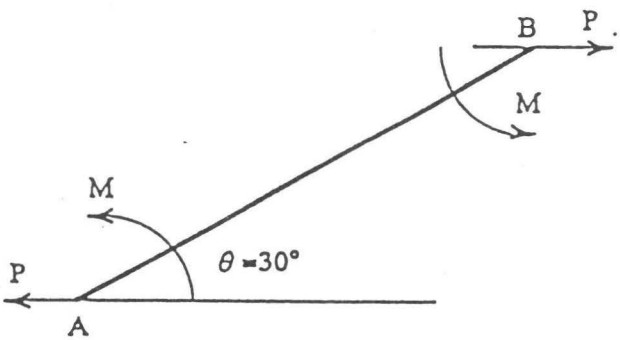


図３－３　はりＡＢにかかる条件

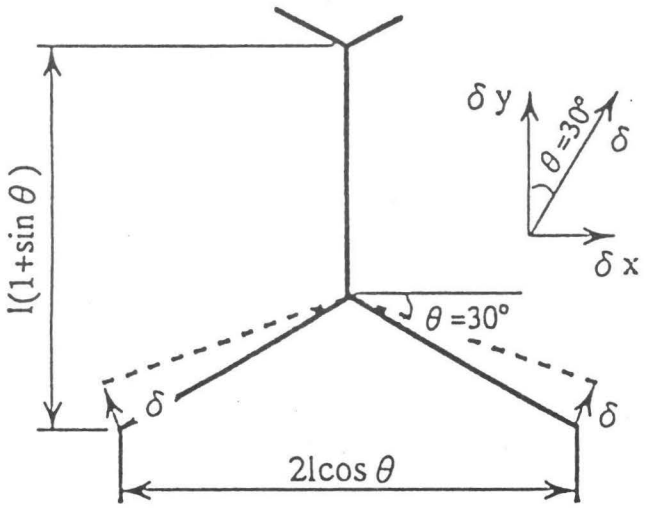


図３－４　変位の関係（ポアソン比の決定）

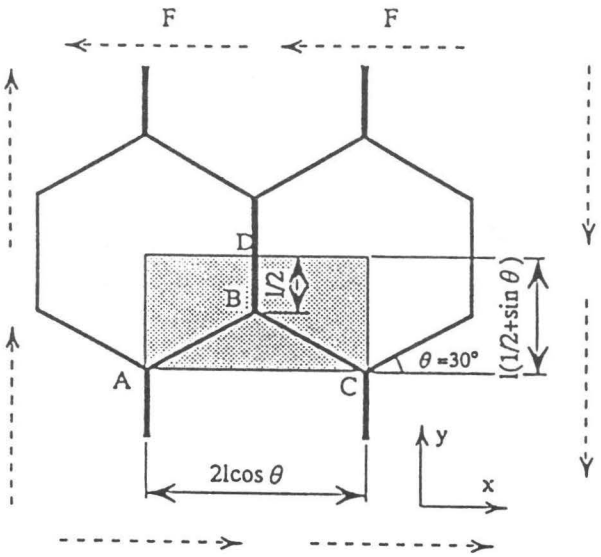


図３－５　Ｇｘｙを決定する単位セル

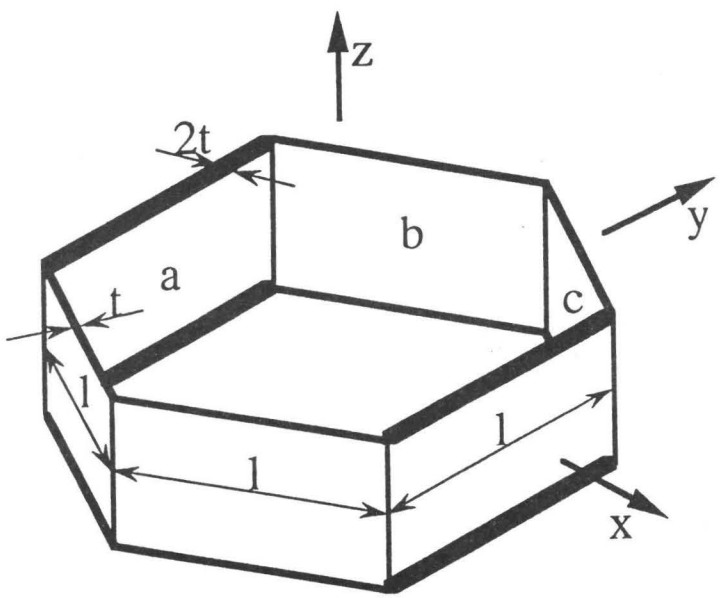


図３－６　せん断変形を生じる際のひずみ

表３－１　ハニカムコアの材料定数（理論値）

ヤング率	せん断係数
$\frac{Ex}{Es} = \frac{4}{\sqrt{3}}\left(\frac{t}{l}\right)^3$	$\frac{Gxy}{Gs} = \frac{12}{5\sqrt{3}}\left(\frac{t}{l}\right)^3$
$\frac{Ey}{Es} = \frac{4}{\sqrt{3}}\left(\frac{t}{l}\right)^3$	$\frac{Gyz}{Gs} = \frac{5}{3\sqrt{3}}\left(\frac{t}{l}\right)$
$\frac{Ez}{Es} = \frac{8}{3\sqrt{3}}\left(\frac{t}{l}\right)$	$\frac{Gzx}{Gs} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(\frac{t}{l}\right)$
ポアソン比	
$\nu_{xy} = \nu_{yx} = 1$ $\nu_{zx} = \nu_{zy} = \nu_s$	$\nu_{xz} = \nu_{yz} = \frac{3}{2}\nu_s\left(\frac{t}{l}\right)^2$

表３－２　ＦＥＭ解析値との比較

	解析測定値	計算値
Ex [kgf/mm²]	0.0148	0.0130
Ey [kgf/mm²]	0.0132	0.0130
Ez [kgf/mm²]	101.87	101.55
Gxy [kgf/mm²]	0.0080	0.0029
Gyz [kgf/mm²]	20.406	23.682
Gzx [kgf/mm²]	14.377	14.209
ν xy	1.05	1.00
ν yz	5.47e-5	4.35e-5
ν zx	0.34	0.34

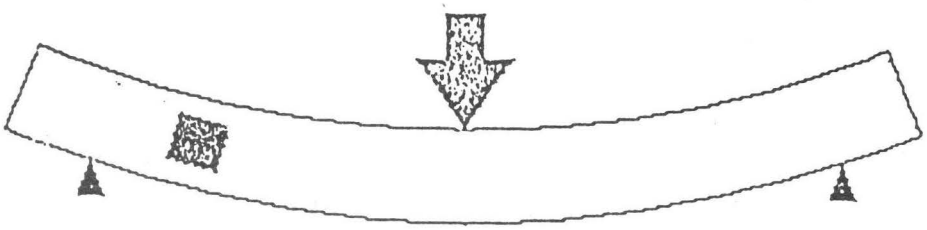


図３－７　均質材料の曲げ変形

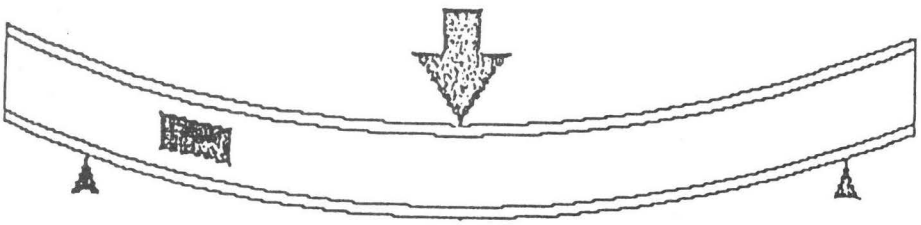


図３－８　サンドウィッチ材料の曲げ変形

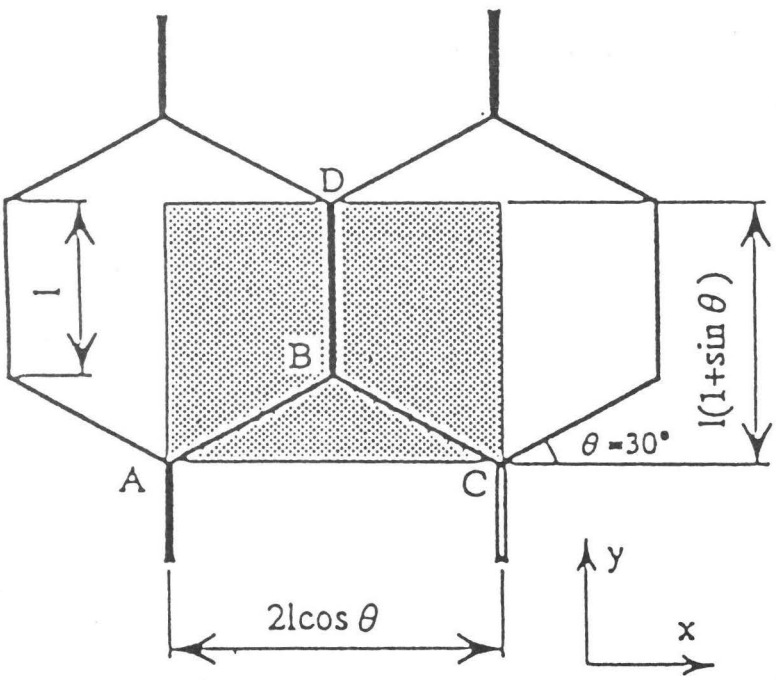


図３－９　せん断による降伏条件を決定する単位セル

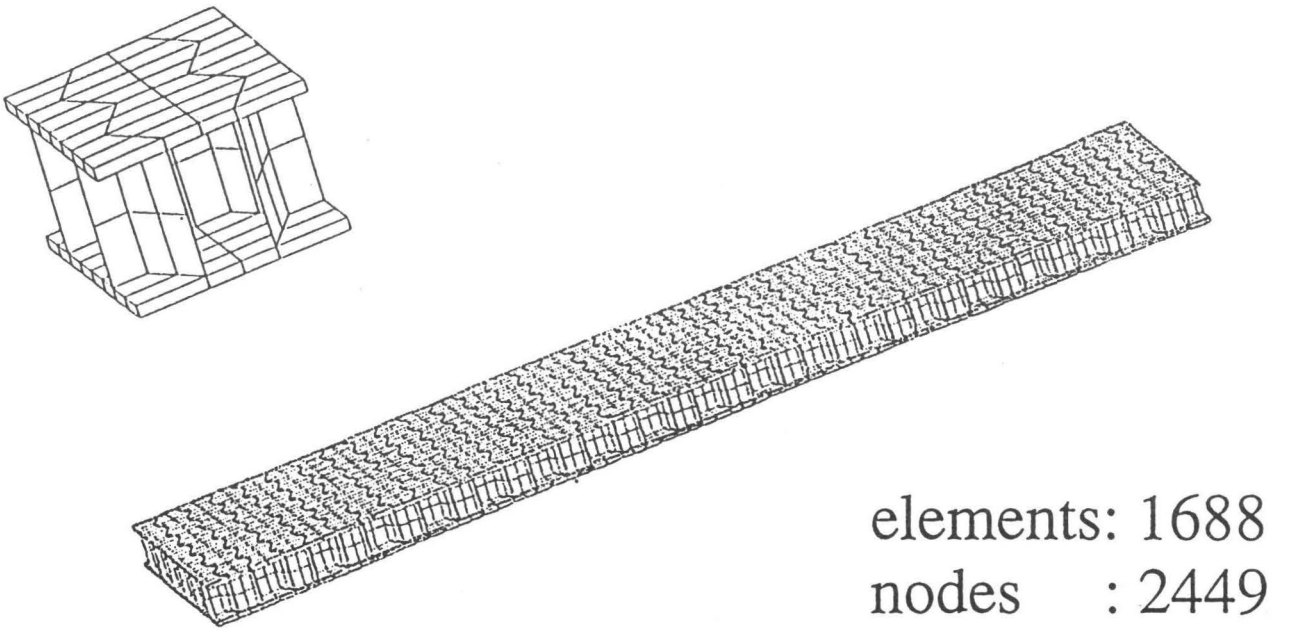


図３－10　細分割モデル

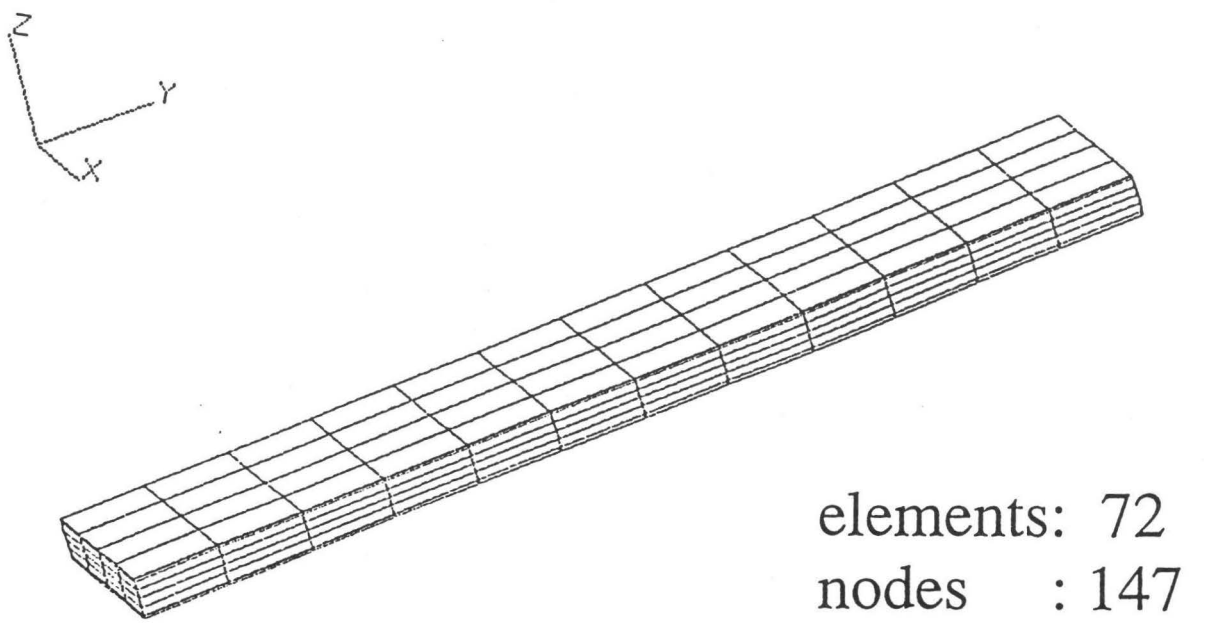


図３－11　Hill簡易解析モデル

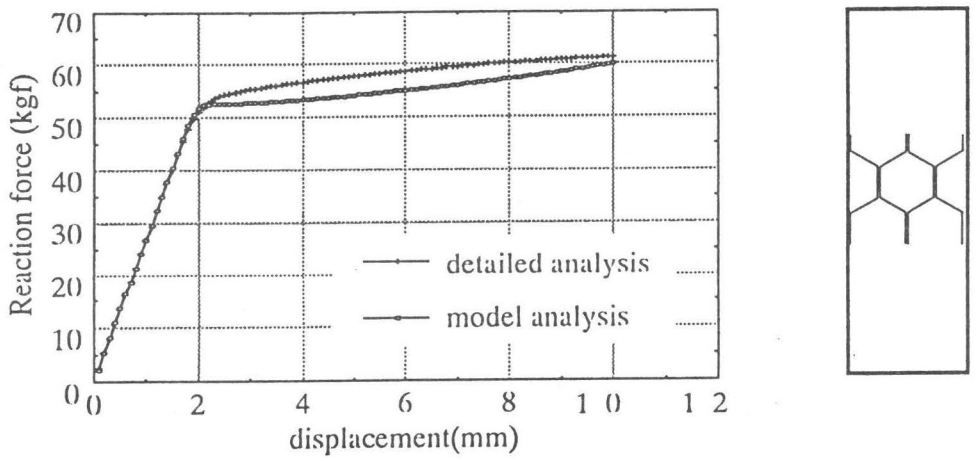


図３－12　３点曲げ試験（Ｙ方向）

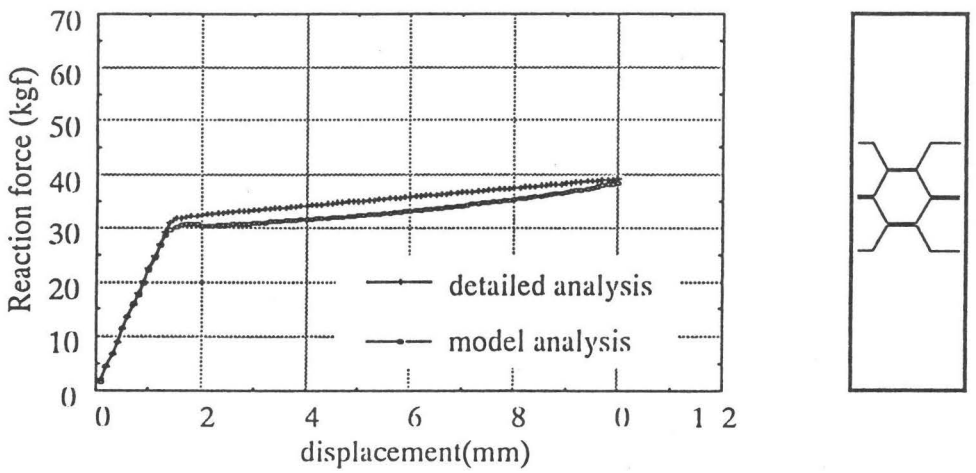


図３－13　３点曲げ試験（Ｘ方向）

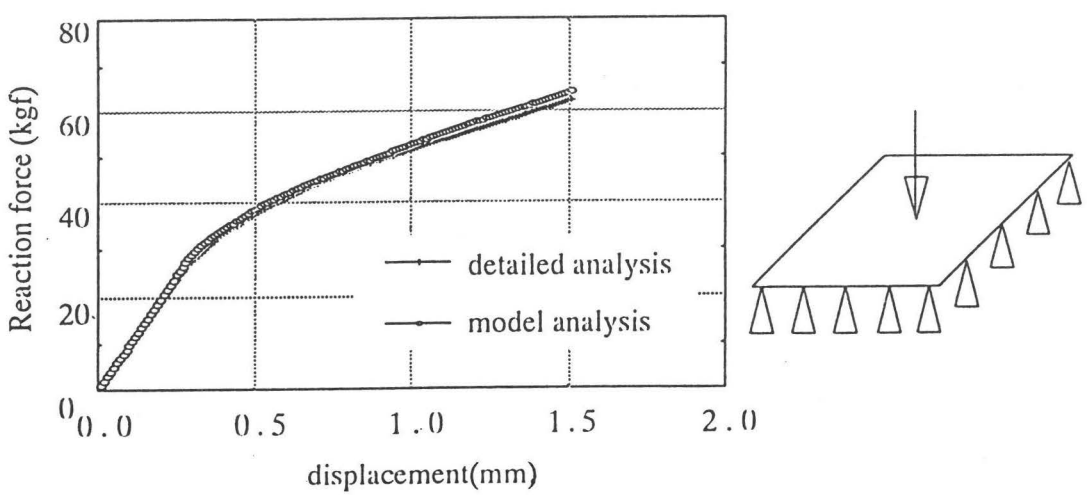


図３－14　４辺支持試験

表４－１　ＨＳＣの構成物質の材料定数

	thermal conductivity	density	specific heat
aluminum	204 (W/m.K)	2710 (kg/m3)	896 (J/kg.K)
air (293K)	0.027	1.205	1000
adhesive mat.	1.900	1500	1000
honeycomb core model (5plies model)	1.63 (x) 2.45 (y) 4.35 (z)	58.99	898.1
HSC model (single ply model)	204 (x) 204 (y) 5.16 (z)	50.81	814.4

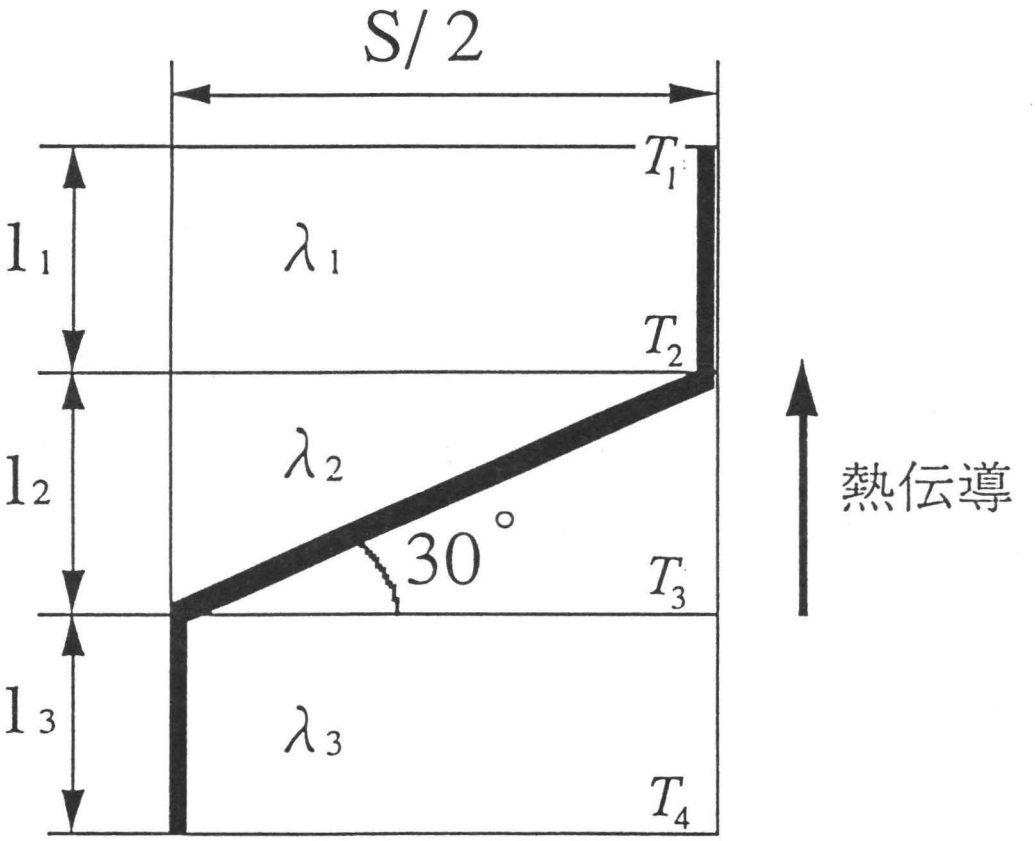


図４－１　λｙを決定する単位セル

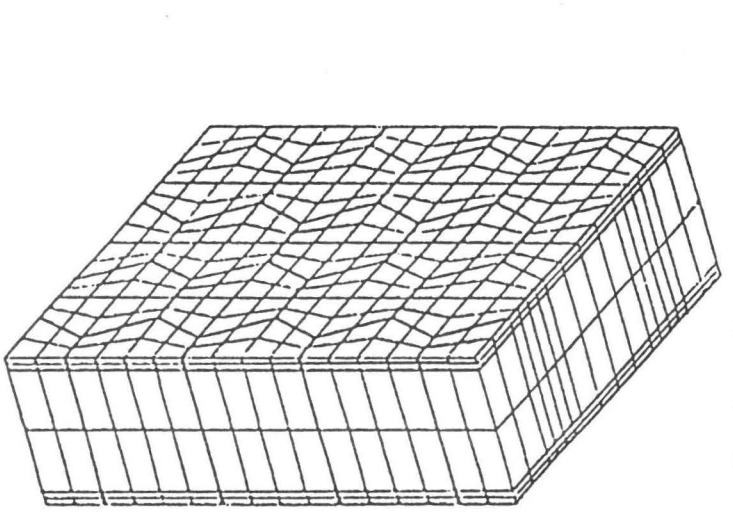


図4－2　細分割モデル

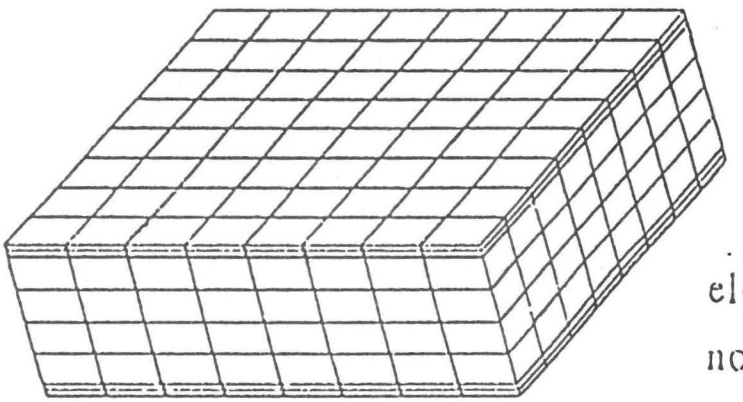


図4－3　ＨＳＣ5層モデル

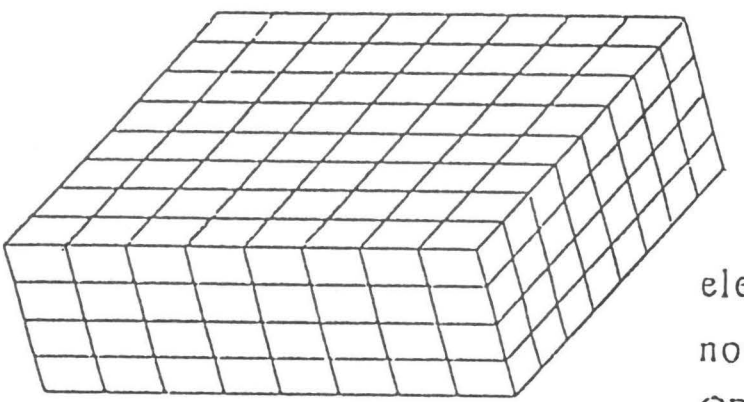


図4－4　ＨＳＣ単層モデル

表５－１　ＨＳＣの使用時に起こりうる欠陥

欠陥名称	説明	検査法	
		超音波	Ｘ線
異物混入	金属片混入	×	○
	プライ間にシート状のもの混入	○	△
ブラウンコア	ハニカムセルが拡張した状態	×	○
コンデンスコア	ハニカムセルが押し潰された状態	×	○
カットコア	ハニカムセルが切断された状態	×	○
コアノード セパレーション	ハニカムノード（接着部）が 分離した状態	×	○
非接着または デラミネーション	コンポジットスキン内の面状ボイド スキンとコア間の接着不良	○	△
ハニカム スプライス不良	ハニカム同士の接着不良	△	○

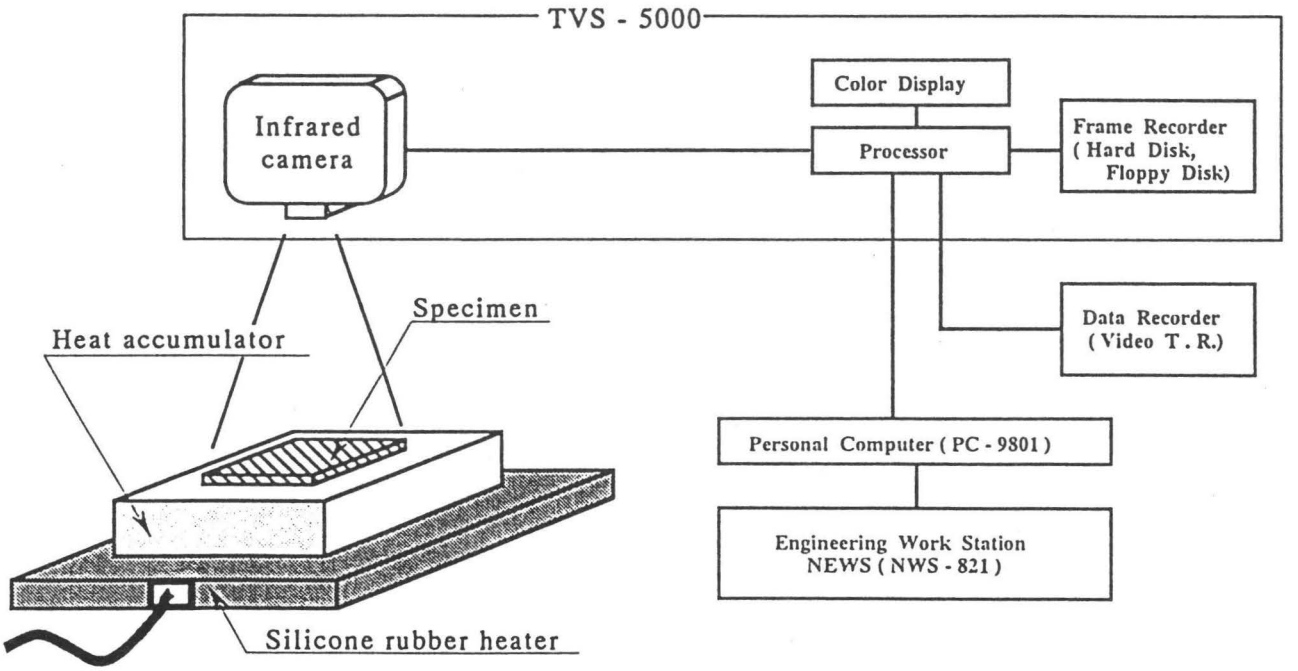
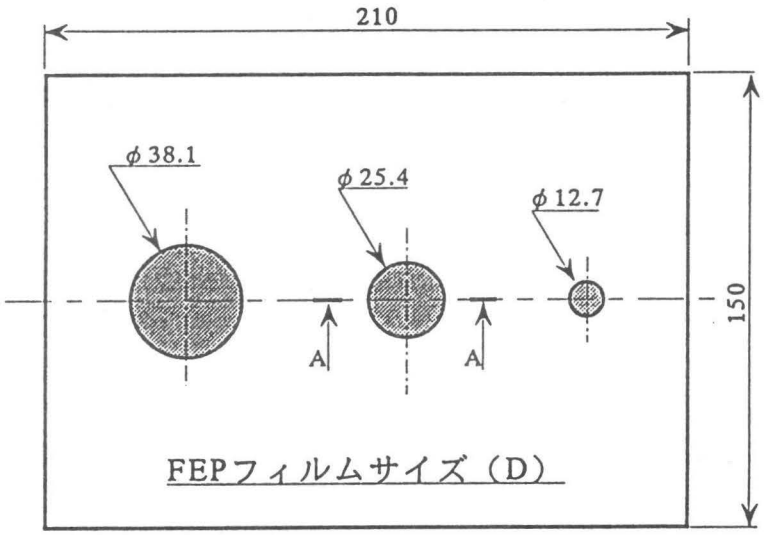
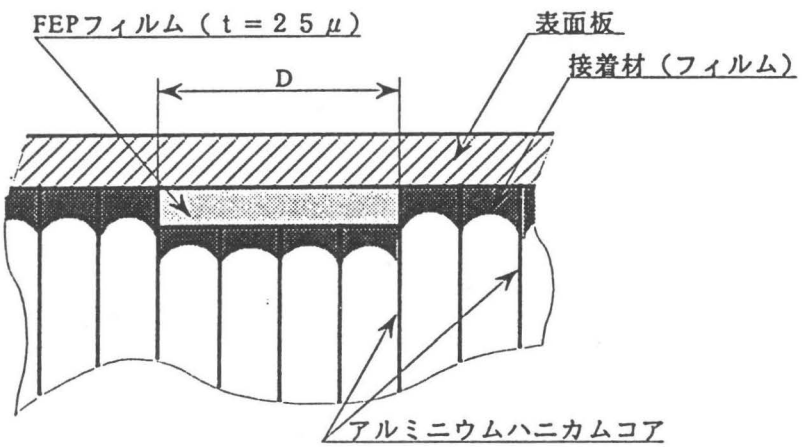


図５－１　赤外線映像を用いたＨＳＣはく離欠陥検知システム





A-A図　板厚方向表面断面図

図5－2　疑似はく離欠陥を含んだ試験片

表5－2　試験片を構成する物質の熱伝導率

材質	熱伝導率（W/m・K）	使用箇所
アルミニウム	205	表面板.ハニカムコア
CFRP	0.41～0.70	表面板
GFRP	0.29～0.30	表面板
アラミド（NOMEX）	0.126	ハニカムコア
フェノール樹脂	0.147	ハニカムコア
エポキシ系接着材	0.167～0.209	接着材
FEPフィルム	0.251	欠陥材
空気（20℃）	0.0272	ハニカムコア内

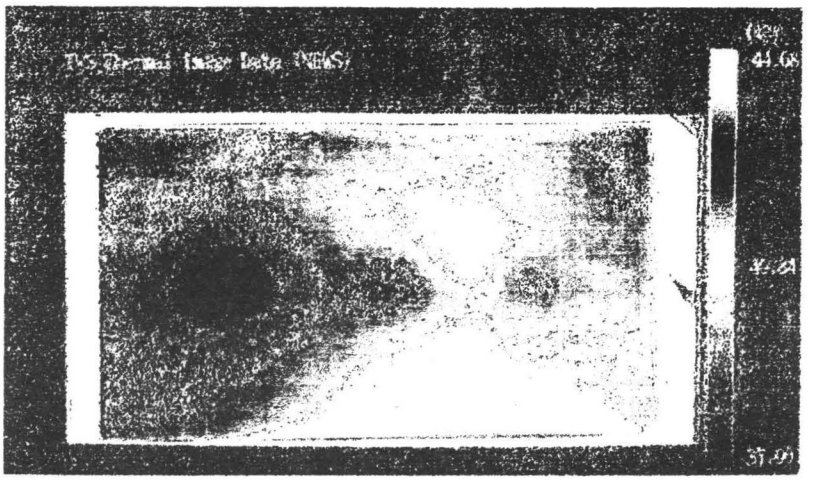


図５－３　赤外線画像（表面板：アルミニウム・コア：アルミニウム）

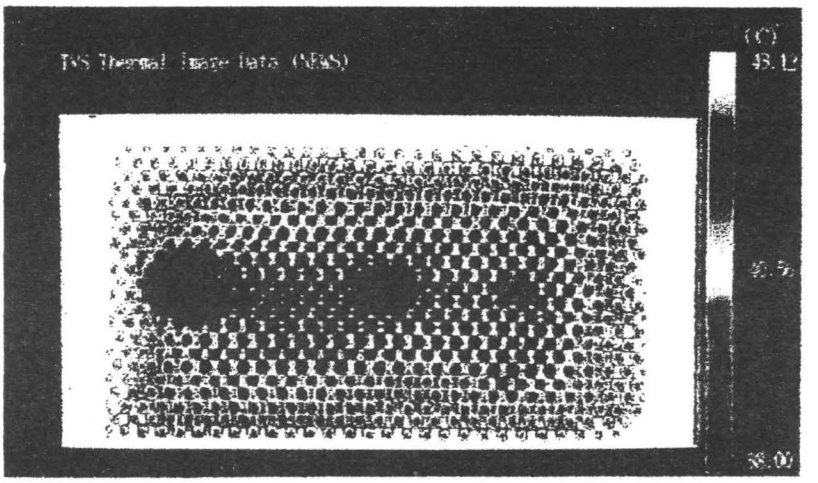


図５－４　赤外線画像（表面板：ＧＦＲＰ・コア：アルミニウム）

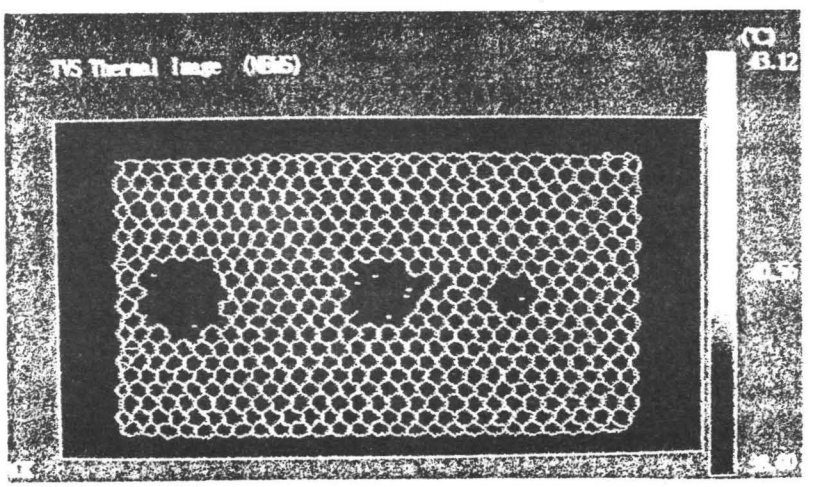


図５－６　画像処理結果（図５－４）

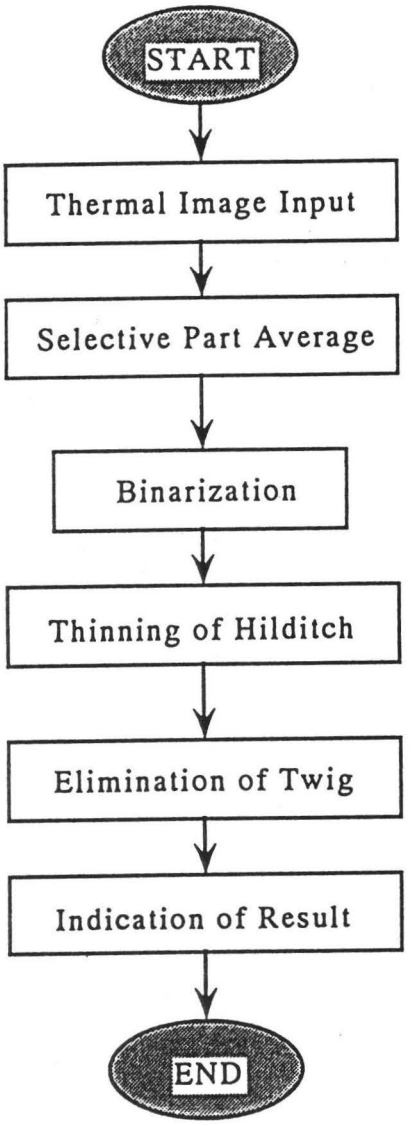


図5－5　画像処理プロセス

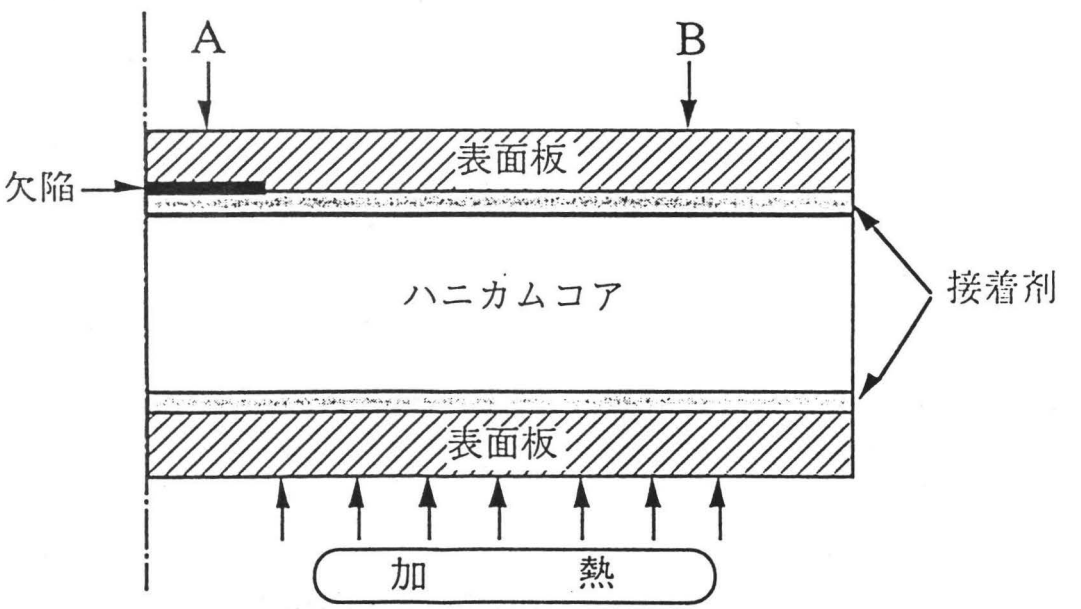


図5－7　解析境界条件

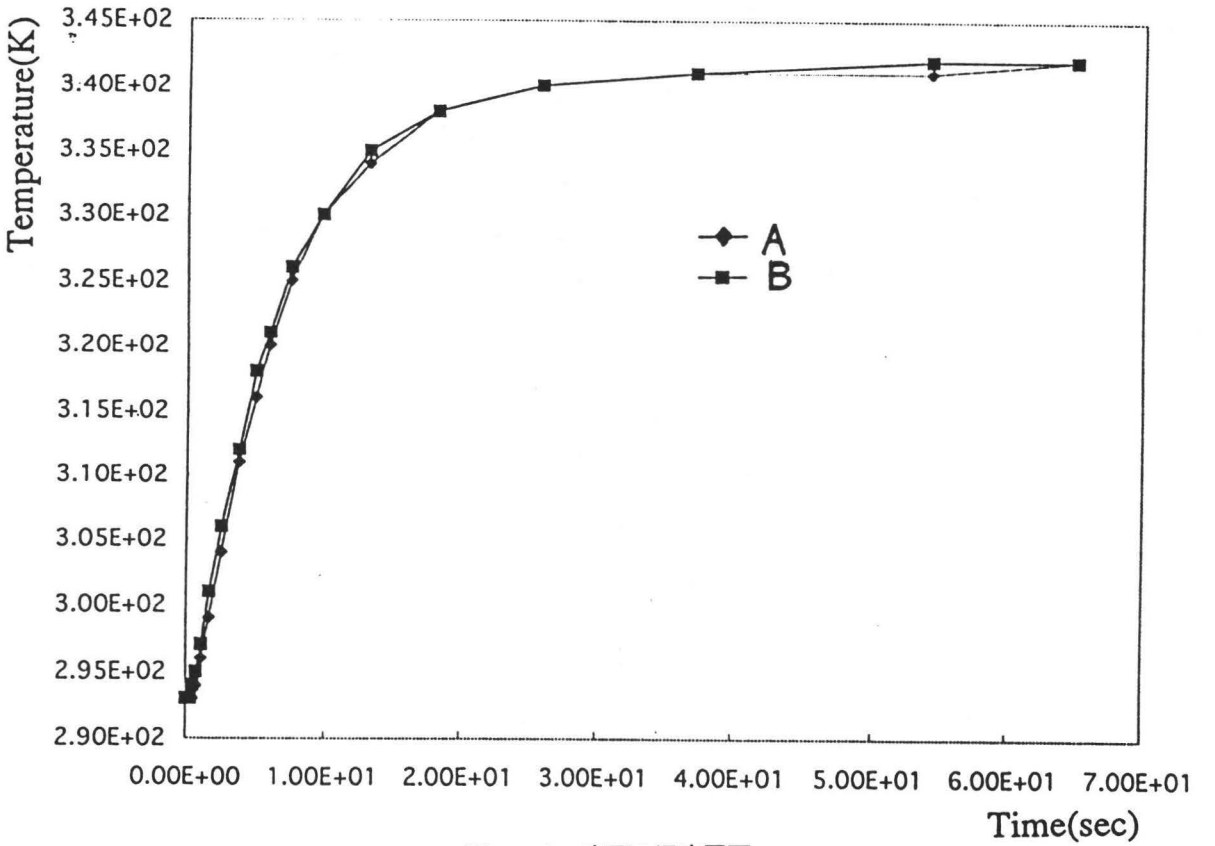


図５－８　表面の温度履歴

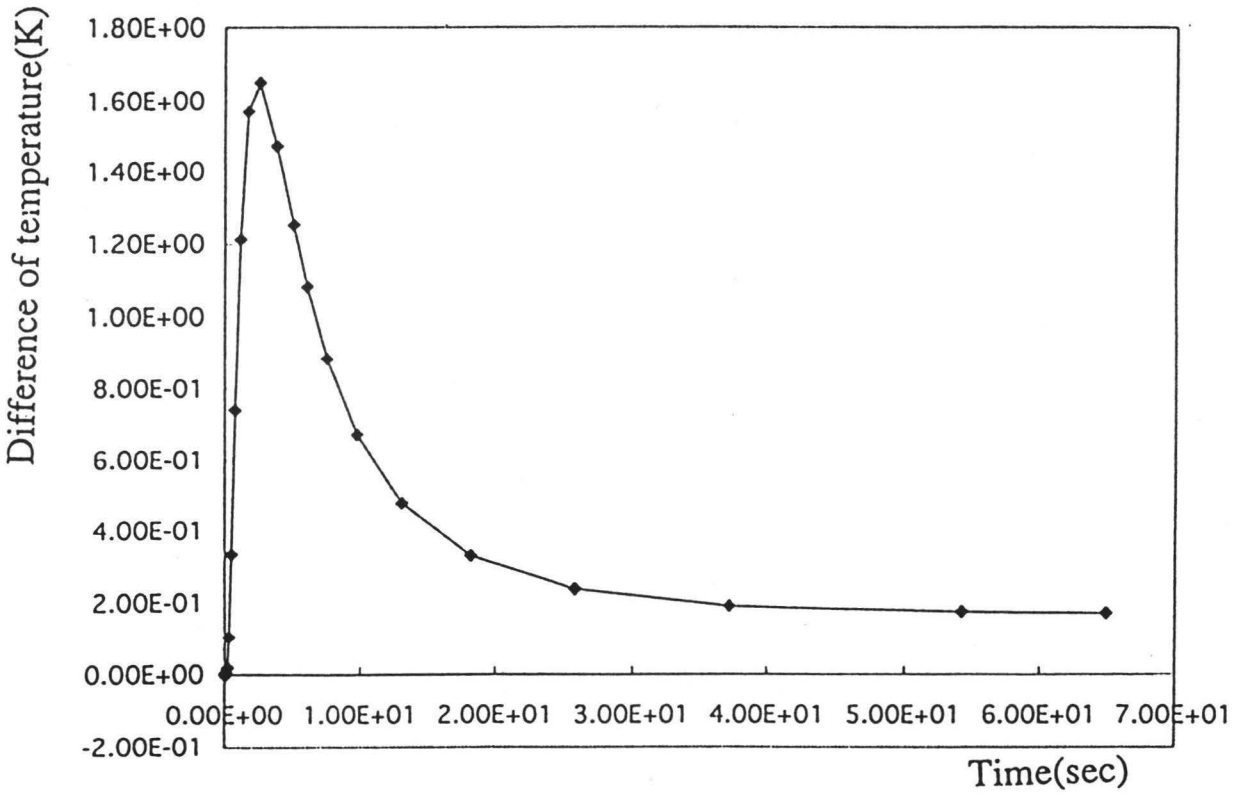
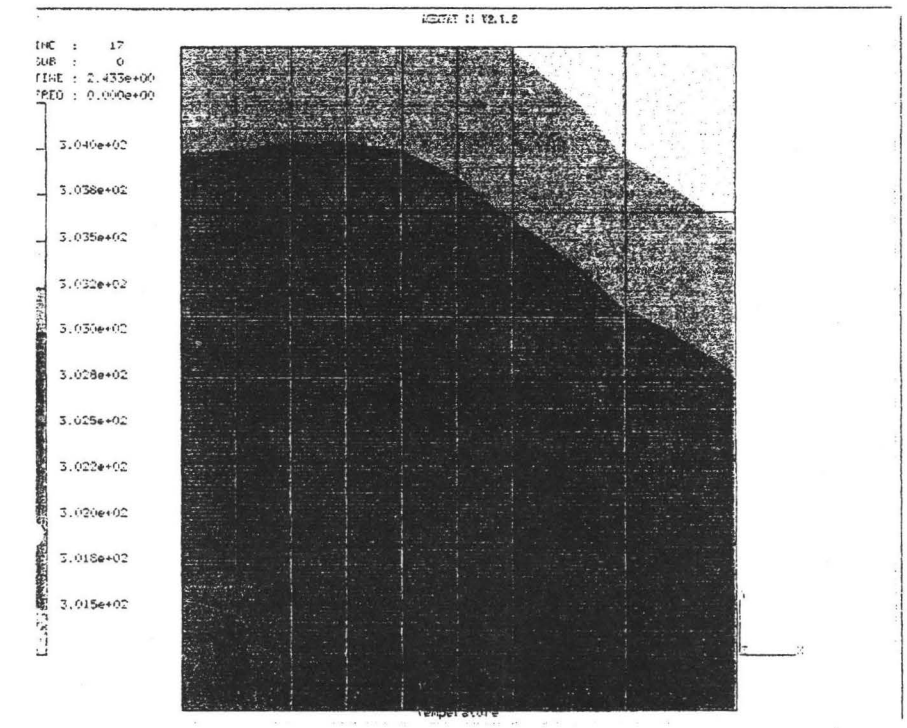


図５－９　欠陥－正常部表面の温度差変化



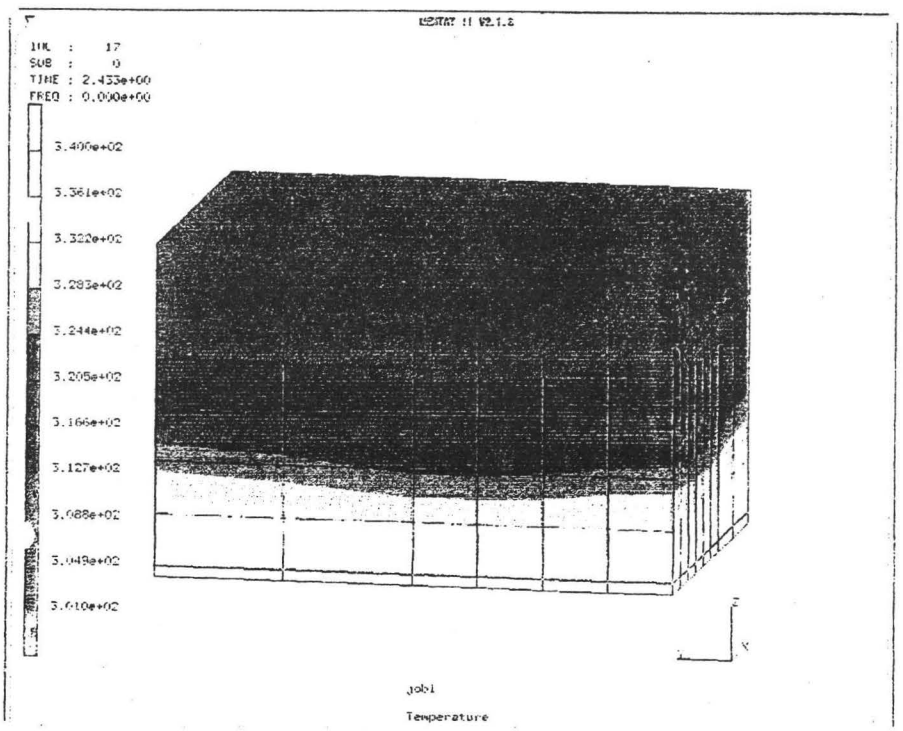


図５－10　欠陥部周辺の温度分布

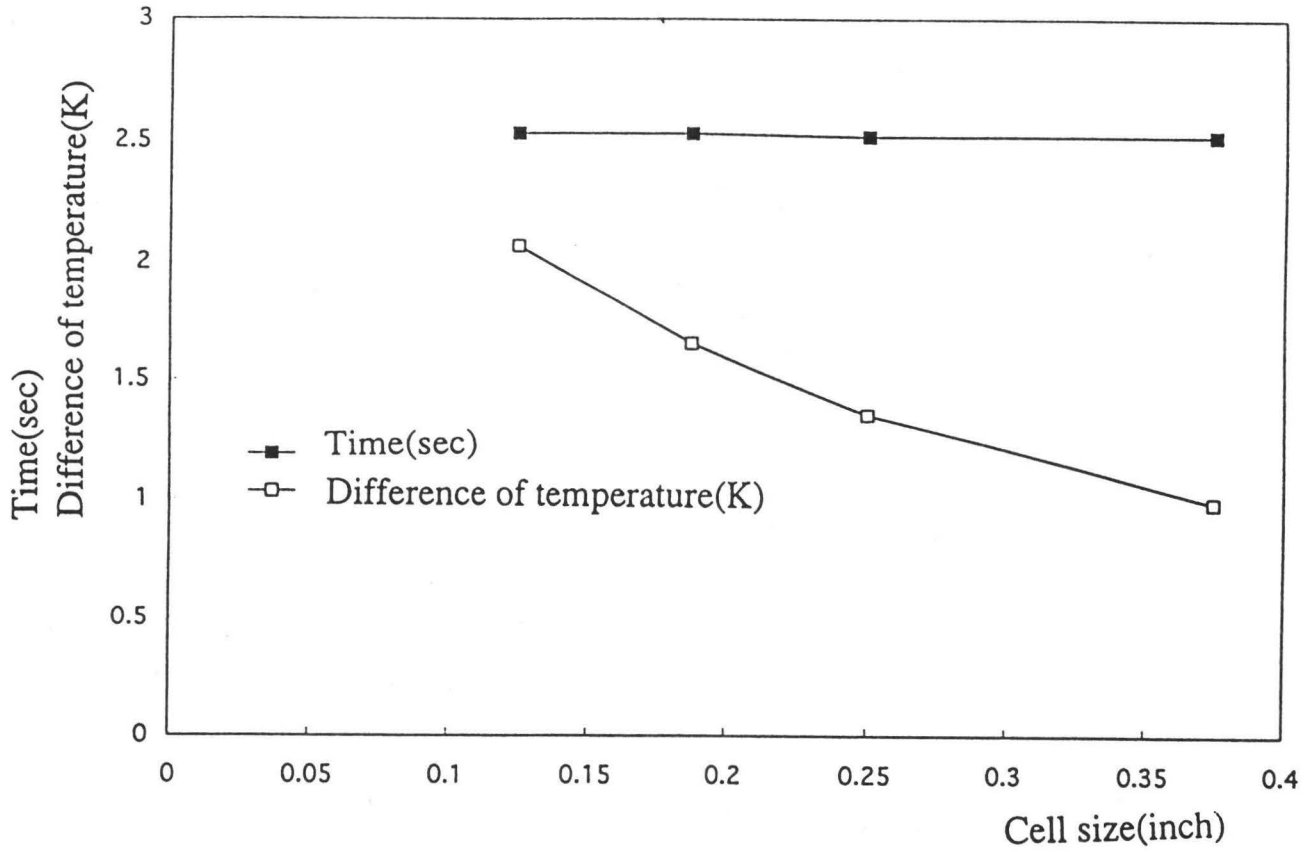


図5－11　セルサイズによる変化

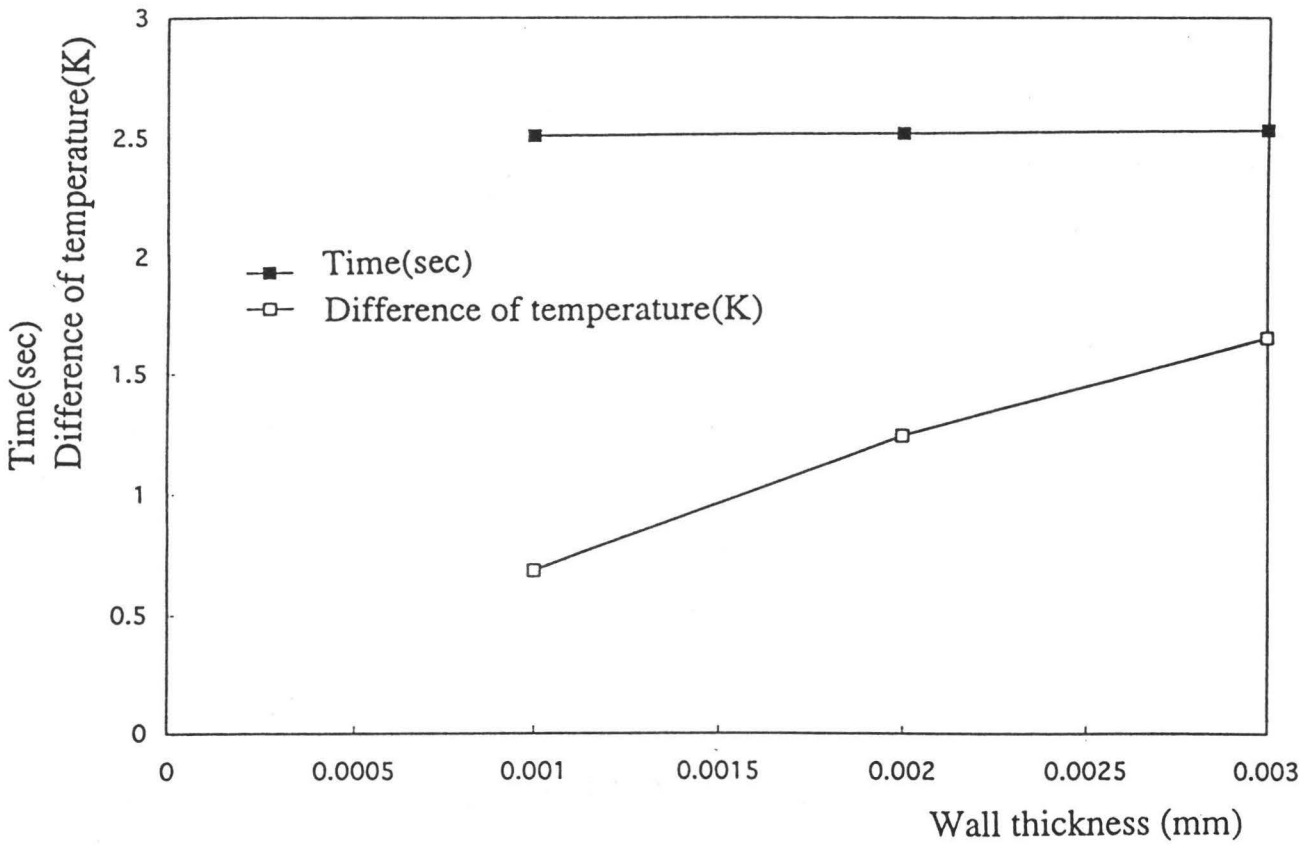


図5－12　セル壁箔厚による変化

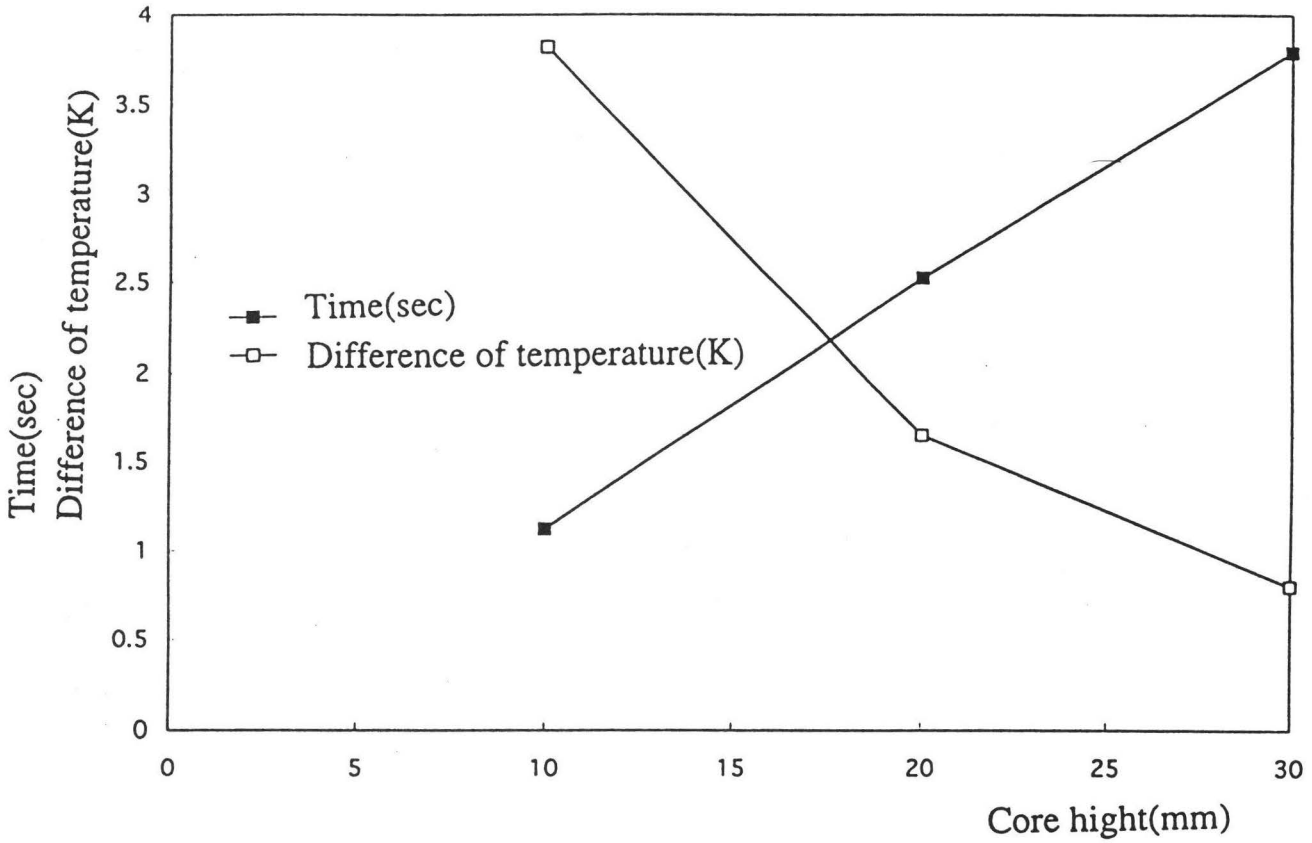


図5－13　ハニカムコアの高さによる変化

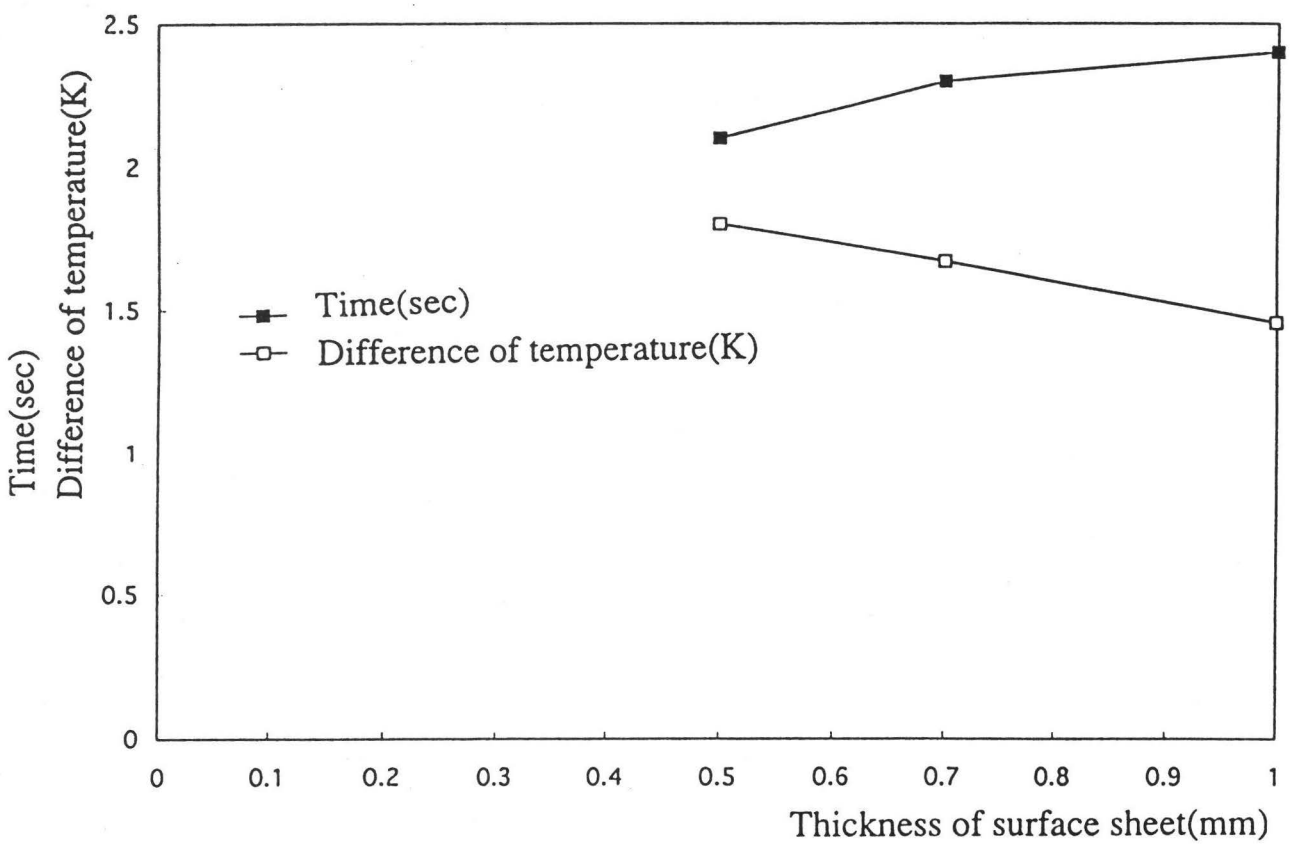


図5－14　表面板の厚さによる変化

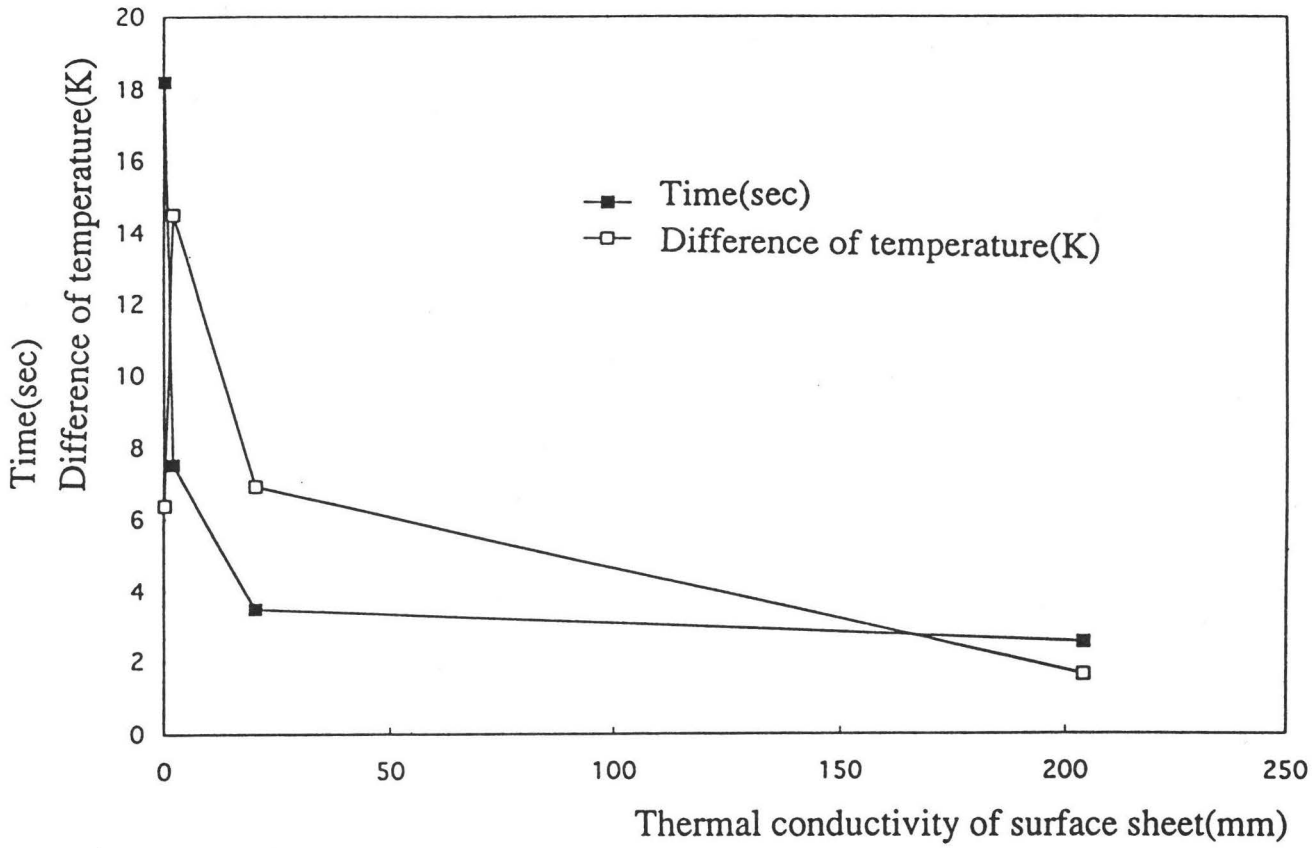


図５－15　表面板の熱伝導率による変化

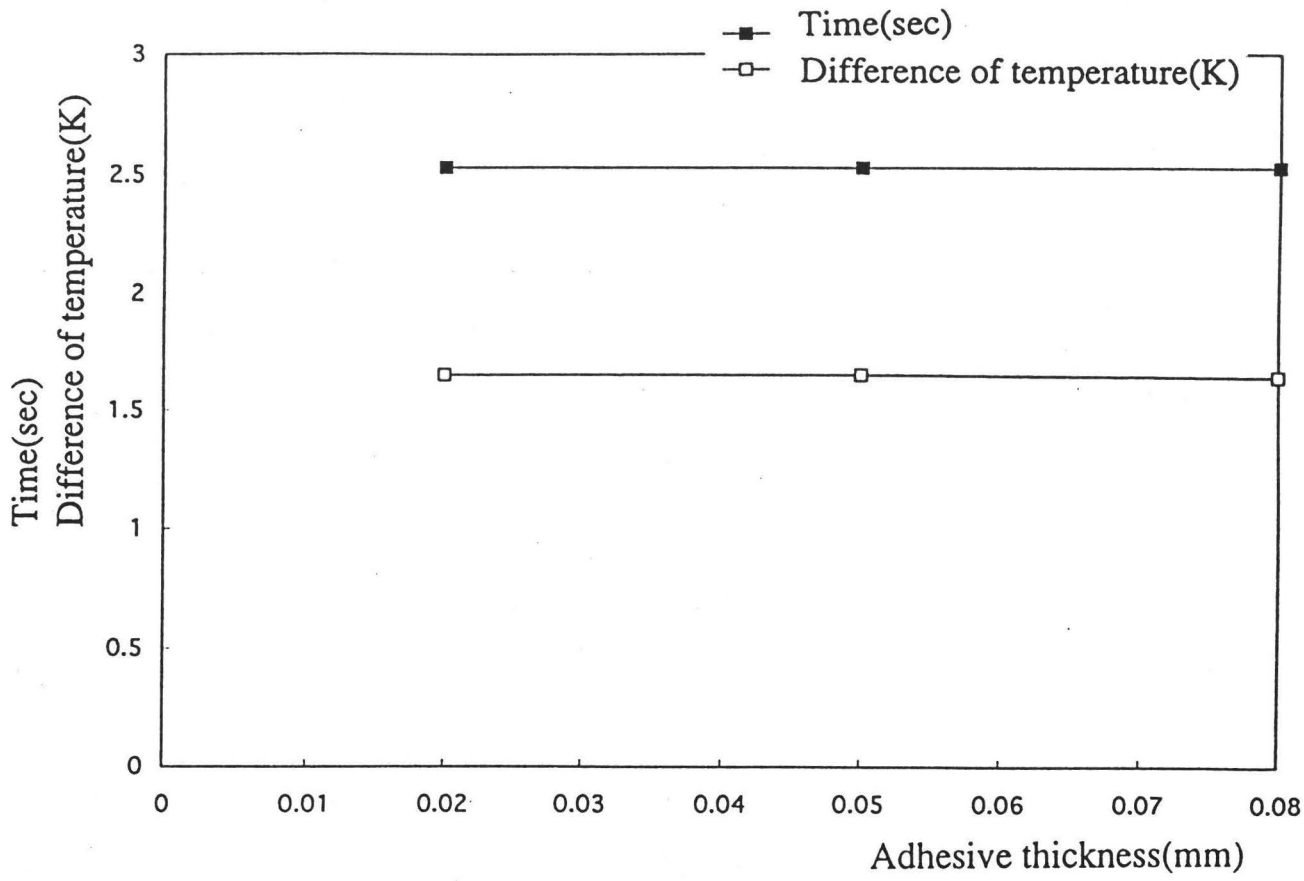


図５－16　接着層の厚さによる変化

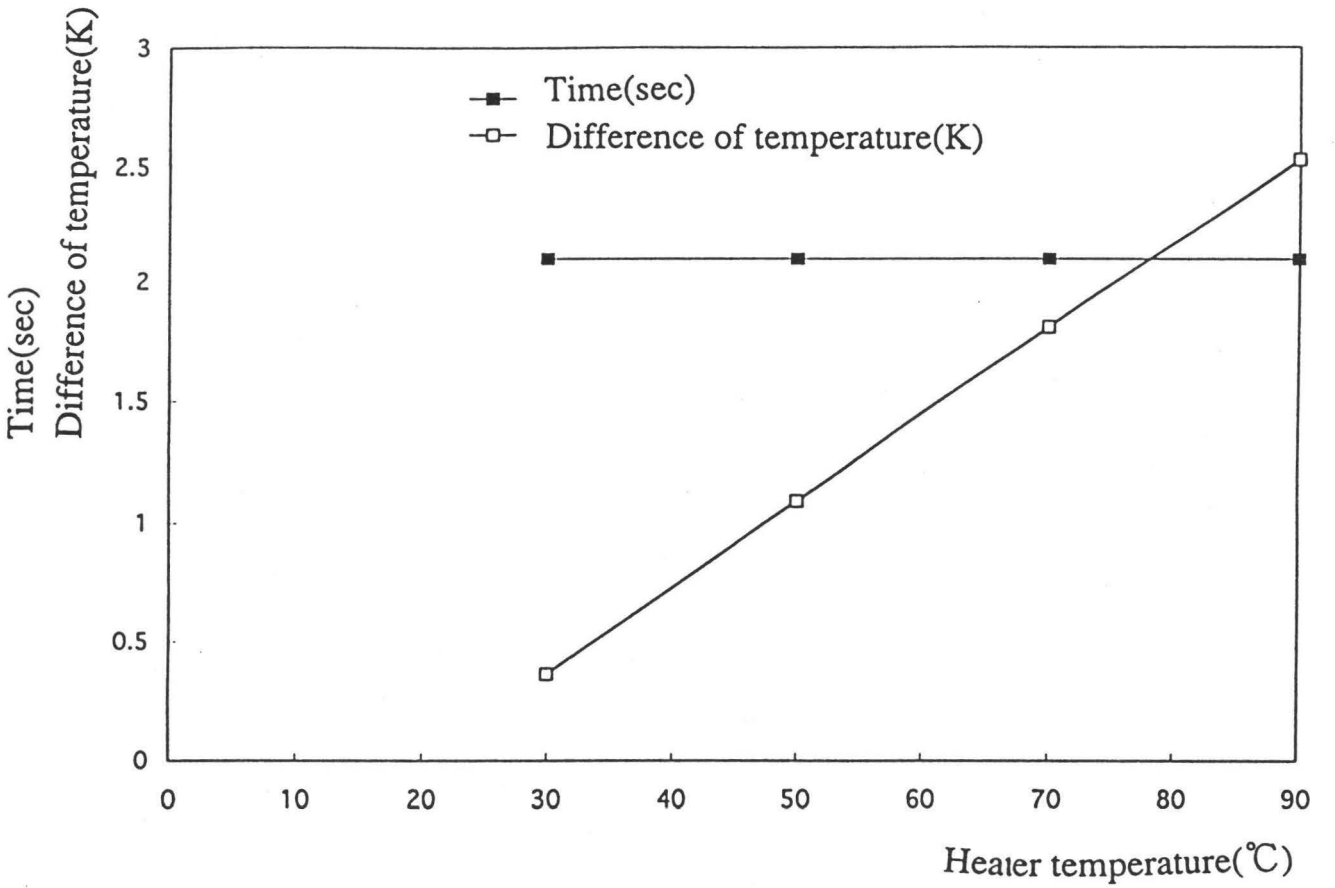


図5－17　加熱温度の違いによる変化

1－7　半地下室の付設温室に関する熱的評価研究（その２）

お茶の水女子大学生活科学部
教授　田中　辰明

1. 本研究の背景と目的

地球的規模の環境破壊への関心が世界的に広まり地球環境問題が話題になっている。

地球環境問題解決のためには省エネルギーと代替エネルギー利用開発が大切である。政府は省エネルギーとエネルギーの安定供給のために努力はしているが、エネルギー消費はこのところ増加を続け、最近の６年間では年率で 3.5%という伸びを示している。これは石油価格の安定と国民生活のスタイルが豊かさとゆとりを求めて変化してきていることにもよる。一般に省エネルギーに対する関心が薄らいできているといって良いであろう。昨今世界的に経済活動が沈滞化している中でアジア諸国の経済成長は目を見張るものがある。かつて炎暑の地域では工業は発達しないものと思われていた。これが急激な発展を遂げているのも空気調和・冷凍技術の発達と普及が貢献していることは間違いない。ヒートポンプの果たした役割も大きいであろう。しかし従来はエネルギー消費の少なかったこの地域も経済成長に伴い、将来エネルギー消費が急上昇することは十分に予想される。これに伴い再び1973年の石油ショックのように世界的にエネルギー需要がひっ迫する恐れも十分にある。またエネルギーの多消費により二酸化炭素の排出量が増大し、地球の温暖化をもたらす、酸性雨問題を生じるなど地球環境に及ぼす影響も大きい。

先に工業発展を遂げたわが国ではますます、代替フロンの開発、省エネルギー技術の開発、代替利用エネルギー技術の開発が大切になってくる。特に民生用エネルギー、とりわけ住宅分野で消費されるエネルギーの伸びは著しく、住宅での省エネルギー努力が大切である。もちろんこのためには省エネルギー機器の開発も必要となってくる。

近年の土地不足はもとより、地価高騰によって地下に空間をつくるコストが経済的合理性を獲得しつつあることも手伝って、地下空間の建設が注目されている。ジオフロントの計画として提案されていたのは、大深度地下利用など計画の域を出ないものだったが、1989年の建築基準法第30条を補う形で出された住宅の地下居室の設計、施工基準によってより身近な地下利用へと焦点が移った。この通達及び指針の要点は、法規で定められた有効採光面積が得られない場合でも、一定条件のドライエリアを確保すれば居室として認めるという採光条件の緩和措置である。また94年度には、その利用促進を図るため容積率の算定における緩和措置も講じられている。

地下利用の長所として、地表面の利用が可能になるプライバシーの侵害や騒音が少ない、熱損失が少なく、年間を通じて少ないエネルギーで快適な熱環境が得られるなどがあげられる。短所としては、日照量の不足、結露の発生、自然換気の少なさがあげられる。

本研究において著者らは付設温室のある半地下室の熱的特性、採光特性、及び騒音特性を調査

し、その居住性について考察を行った。

地球環境を破壊することなく快適な生活を維持していくには先にも述べたとおり、省エネルギーを徹底すると同時に非枯渇エネルギーである太陽エネルギーに代表される自然エネルギーの利用を積極的に行うことが肝要である。

太陽エネルギーの利用にはポンプやファン等機械力を利用して行うアクティブの方法と建築手法によるパッシブの方法がある。パッシブの方法のうち、半地下室及び付設温室は有効な手段の一つであると考えた。半地下室は大きな熱容量を持つ土に囲まれており、比較的季節による温度変化が小さく冷暖房の負荷が低減でき、また付設温室は夏期の夜間の窓を開放することにより外気温と半地下室の温度との差が小さく冷房の負荷を低減し、冬期の日射の利用により暖房の負荷を低減すると推測されるからである。

またわが国では住宅での地下室は珍しいものであったが、平成6年の建築基準法の改正により、今後住宅における地下室の増加は間違いない。熱容量の大きい土中の半地下室を建物に組み込むことはエネルギー消費の観点から意義深く、半地下室の研究は重要である。従って、付設温室のある半地下室の熱的特性の研究は意義のあるものであると考える。

半地下室は熱的には良い室内環境をつくり、室内で発生する騒音を外部に出さないなどの長所を持つと言われている。一方、自然採光が採りにくい等の欠点もある。

地下室のイメージとして物置・倉庫・食品庫などの付帯空間イメージが強い。しかしながら、オーディオルーム、ガレージも特化して多く、防音環境面での地下空間の優位性や、地下空間の駐車場化が相当程度一般に普及されてきた。そこで遮音性に優れている点を生かして、オーディオルーム等の音響に関する余暇空間として利用することにより、周囲に気兼ねすることなく余暇時間を楽しんだり、周囲の環境が騒々しい立地条件下にあっても、静かで落ちついた余暇空間を地下室に確保することも可能であると考えられる。

従って、地下空間の恒温・恒湿性だけでなく遮音性を活用すれば、地下室を従来のような貯蔵のためのスペースとして利用するだけでなく、趣味や団らんのための居室として活用し、冷暖房費等を節約することも可能になり、省エネルギーや遮音性の面で優れた住空間が確保できると考えられる。

2．研究の方法

杉並区善福寺にあるパッシブソーラーハウスの半地下室において昼光率分布、遮音性能、また熱的特性を測定した。

数台の照度計を用意し、1台は屋上にて屋外水平面照度を、残りで半地下室内および付設温室内の各測定点の照度を測定した。各測定点は半地下室内に等間隔に36カ所、付設温室内に中央等間隔に3カ所とった。（図1参照）

測定は、比較的天空照度の安定している曇天日に行った。

半地下付設温室（半地下室内と付設温室外部間）の遮音性能は、日本建築学会推奨測定基準の「建築物の現場における外周壁の遮音性能測定方法」に準じ、外部音源法（参考として付属規定の内部音源法でも測定した。）により付設温室外部と半地下室内の各測定点の音圧レベルを測定し、各々平均音圧レベルを求めその差を音響透過損失相当値として算出した。

参考として半地下室内と付設温室内部間（半地下室内間仕切りの引き違いサッシ[FL5]の遮音

性能に相当）と付設温室内部と外部間（サンルーム全面の引き違いサッシ[PW6.8]の遮音性能に相当）の遮音性能を求めた。

半地下室の熱的特性の測定は次の機器を用い、1）～10）のポイントにおいて（図4、図5参照）、午前0時から24時間、2分間隔で行った。測定値はデータ・ロガーにてフロッピーディスクに記録し、パーソナルコンピューターで解析した。測定は夏期、中間期、冬期に行った。

データ・ロガー7326／B	株式会社アドバンテスト
T型熱電対	
全天日射計ソーラーエースSM－62	英弘精機株式会社
湿度センサー	日本ビーム電子株式会社
グローブ温度計	英弘精機株式会社
潜熱蓄熱体（18℃PCM）	クボタトレーン株式会社

1）温室内垂直温度

温室内の1点において高さ床上0、 0.5、 1.0、 1.5、 2.0、 2.5mの6点を測定した。

2）室内垂直温度

半地下室内の2点において高さ床上0、 0.5、 1.0、 1.5、 2.0mの5点を測定した。

以後、半地下室内の温室と温室との間仕切りガラスに近い点を間仕切り側温度、半地下室の中央よりの点を地下室中央温度と呼ぶ。

3）グローブ温度

温室内中央、地下室内中央のそれぞれ1点において床上 1.5mのグローブ温度を測定した。

4）地下室壁面温度

半地下室内の壁面（床上 1.0m）を測定した。（中間期、冬期）

5）廊下空気温度

半地下室入り口付近の廊下空気温度（床上 1.5m）を測定した。（中間期、冬期）

6） 2階居間室温

半地下室の真上に位置する居間の室温（床上 1.5m）を測定した。（中間期、冬期）

7）温室上面ガラス付近温度

温室上面ガラスと遮蔽シートの間（夏期）、遮蔽シート表面（夏期）、温室上面ガラスの温度を測定した。

8）外気温

建物の南側芝生地面上1mで測定した。かつこれは付設温室のガラスに比較的近い場所である。外気温は本来、反射及び放射の影響を受けない状態において測定するのが常であるが、本研究では人間が実際に建物に住まう際の居住性について研究することを目的としているため、反射、放射などの影響を含んだ状態で測定を行った。従って百葉箱で計測した外気温と比べて昼間は高めの値を計測することとなった。また太陽放射熱を直接受けないように熱電対の感温部をアルミ箔で覆った。

9）湿度

屋外、付設温室内、半地下室内それぞれ1点にて湿度センサーを用い測定した。

10）日射強度

日射計は水平方向と垂直方向（南側）に設置し、屋外及び付設温室内にて測定した。

また測定値をもとにＰＭＶ、ＰＰＤを算出し半地下室の温熱環境評価を行った。

3．研究の計画と進捗状況

半地下室の昼光率分布、遮音性能の測定を行い、その評価を行った。

半地下室の熱的特性の測定は平成７年７月から12月にかけて夏期、中間期、冬期、それぞれ行い、パーソナルコンピュータで解析した。

4．今までに得られた成果

昼光率に関する実験の結果、各室内の測定点の昼光率を図１に示した。さらに昼光率分布を図２に示した。

表１の基準昼光率を参考に室内各所に照度レベルを調べると以下のようになった。

・付設温室

３点とも10％以上の昼光率で基準昼光率の「１段階」を上回っている。晴天日には精密な手作業が、曇天日には読書が共に昼光照明のみで可能な照度といえる。

・半地下室窓際

昼光率は３～５％で「３～２段階」に相当する。晴天日ならば昼光照明のみで読書できる。また、両端に比べ中央部の値が高いのは、直射光の付設温室のコンクリート壁による妨げが少なかったためと思われる。

・半地下室中央

昼光率は１％前後となり「８～６段階」となる。晴天日ならば団らんが可能であるが、曇天日だと廊下や階段の一般的な照度に値するため読書や手作業するには人工照明が必要になる。

・半地下室奥

昼光率は１％未満で「９段階」に相当するかしないか程度となる。倉庫や物置と同じ照度となり、人工照明なしでは事務的な作業は不可能といえる。

以上より、窓際では人工照明は昼間不要であるが、室内中央では昼光照明との併用が望ましいと言える。

さらに、人工照明と対比しながら昼光照明の特徴をまとめてみた。

１）昼光は時間的、位置的に人工光に比べて制約を受ける。当然昼間しか利用できず、窓からの採光に限られる。

２）窓側は明るく、部屋の奥は照度不足となり、その比は1/10にも及ぶ場合もあるが、人工照明の時ほど気にならない。

３）部屋の奥では光の方向が水平近くにも傾く。

４）人工光のように安定していない。季節、天候、太陽高度によって明るさや光源の色も変化する。

５）常に明るさを必要とする作業環境では欠点であるが、住宅のような場合には、この自然の変

化が生活にメリハリを与える意味で非常に貴重である。

6）窓から採光することによって、日当たりや外部の見通しも得られ、かつ通気・換気も図れるなど、これら総合的な効果は人工的なものでは得がたい。

遮音性能に関する測定結果（図3、表2参照）

〔半地下付設温室の遮音性能について〕

1）遮音性能の構成について

半地下付設温室の遮音性能は、付設温室自体（付設温室前面の引き違いサッシ[PW6.8]の遮音性能、半地下室内間仕切りの引き違いサッシ[FL5]の遮音性能、付設温室内の吸音力、測定間距離による減衰及び半地下構造による遮音効果の5つが組み合わさったものと考えられる。

今回、外部音源法で測定した付設温室内外の音響透過損失相当値（付設温室前面の引き違いサッシ[PW6.8]の遮音性能に相当）は、20.0dB（1000Hz時）であり、内部音源法で測定した半地下室内と付設温室内部間の音響透過損失相当値（半地下室壁面の引き違いのサッシ[FL5]遮音性能に相当）は、15.7dB（1000Hz）であった。

この2つの引き違いサッシの遮音性能を加えると、35.7dBであり、半地下付設温室の遮音性能43.0dBとの差は 7.3dBである。

この値が、付設温室内の吸音力、測定間距離による減衰及び半地下構造による遮音効果に相当するものと思われる。

《参考》

参考として分かりやすいように、付設温室全体（引き違いサッシを含む）の遮音性能がどのような材質のどのくらいの厚さの壁体に相当するのかを 125Hz（最小中心周波数）、1000Hz（基準中心周波数）、4000Hz（最大中心周波数）について調べた。ただし値が一致する場合がほとんどなかったため、値の近いものを取り上げた。

125Hz[25.1dB] の場合

ラワン合板（40mm）

石膏ボード（9）＋合板（5.5）＋石膏ボード（9）

普通形アルミサッシの二重⇨ガラス（5－5）、中空層（150）

1000Hz[43.0dB]の場合

発泡コンクリート（100mm）

石膏ボード（9）＋ガラスウール（45）＋石膏ボード（9）

4000Hz[52.5dB]の場合

発泡コンクリート（100mm）

石膏ボード（9）＋中空層（100）＋石膏ボード（9）

さらに、基準周波数1000Hzの場合の引き違いサッシ[PW6.8]、[FL5]及び、付設温室自体の遮音性能については以下のようになった。

[PW6.8] －　ラワン合板（６㎜）、鉄板（0.4）、フェルト（102）

[FL5] －　アルミニウム（0.6㎜）、トマテックス（15.9）

付設温室自体　－　アルミニウム（0.15㎜）、フェルト（25）

材料の性質、厚さと音の中心周波数（これにより材質が受ける影響も含む）の組み合わせにより透過損失値が決まるため、半地下付設温室全体が実際にはどのくらいの遮音性能を果たしているのかは一概には言えない。

しかし、次項に述べるコインシデンス効果等の影響を全く受けないと考えるならば、付設温室全体の遮音性能は、発泡コンクリート 100㎜のそれに最も近いものであるといえる。

２）中心周波数2000Hzでの遮音性能の低下について

測定結果の図３を見ると外部音源法による半地下付設温室（半地下室内と付設温室外部間）の遮音度は中心周波数2000Hz時で遮音性能が低下している。

これは、半地下付設温室の遮音性能を構成している付設温室自体（付設温室前面の引き違いサッシ[PW6.8] の遮音性能に相当）の遮音性能が低下したからと思われる。この遮音性能の低下は、引き違いサッシに使用しているガラスの共鳴周波数に近いためガラス部からの音の透過が大きくなったと考えられる。（これをコインシデンス効果と言い、コインシデンス効果の起こる周波数は、[PW6.8]:1760Hz、[FL5]:2530Hzである。）

この中心周波数2000Hz時での遮音性能の低下を防ぐには、コインシデンス周波数の違うガラス厚を組み合わせたり、気密性の良いサッシを利用することなどが考えられる。

〔半地下付設サンルームの遮音性能評価について〕

実験を行ったパッシブソーラーハウスの半地下付設温室（半地下室内と付設温室外部間）の遮音性能（音響透過損失相当値）は、外部音源法による測定で日本建築学会基準「戸建住宅の外壁の適用等級」のＤ－30”を上回る音圧レベルである。よって、同学会で言う一般的な性能水準であり、遮音等級２級（学会許容基準）を満足していると言える。

また、JIS A4706 $^{-1993}$ 「サッシ」の遮音等級でもＴｓ－40に相当し、高性能の防音サッシレベルであると言える。

熱的特性に関する結果

・半地下室は熱容量が大きいため一日を通しての温度変化が少ない。また年間を通しても屋外に比べ温度変化が少ない。

・日射遮蔽により夏期の温室内への日射は冬期と同程度におさえられた。

・夏期の水平面日射強度は大きいが遮蔽によって低減でき、垂直面日射強度は小さい。また冬期は垂直面日射強度が大きく日射を取り入れやすいため南側の温室は居住性の向上ために有効である。

・夏期は窓を開放することによって温度の上昇をおさえられた。

・冬期に潜熱蓄熱体を設置することにより日中の温室温度の上昇と夜間の温室温度の下降をやや低減できた。

・夏期は快適に生活するためには日中は３～４℃温度を下げるために人工的冷房を行う必要がある。中間期は一日を通して暖冷房を行う必要はない。冬期は４～５℃の温度上昇により快適に過ごせる。
・半地下室は付設温室の影響を受けてはいるが、熱容量の大きさのためにその影響が現れにくい。

5．残る問題点と対策

今回、実験を行ったパッシブソーラーハウスの半地下室に温室を付設した場合においての遮音性能及び評価を行うことはできたが、半地下室に温室を付設したことによる遮音効果を正確に判断するには、今後、他の建具（半地下室に温室を付設しない場合、１Ｆ居室に温室を付設した場合、半地下室に２重サッシや防音サッシを取り付けた場合等）も加え、設定条件毎（ガラスの種類・厚さ、建具寸法、半地下室の床面積・段差等）の比較試験を行い、相対的な評価により遮音性能の優劣を決めることが必要である。

半地下室の熱的特性をさらに詳しく知るために一般の居室との比較を空気温度、湿度などの項目において測定する必要がある。

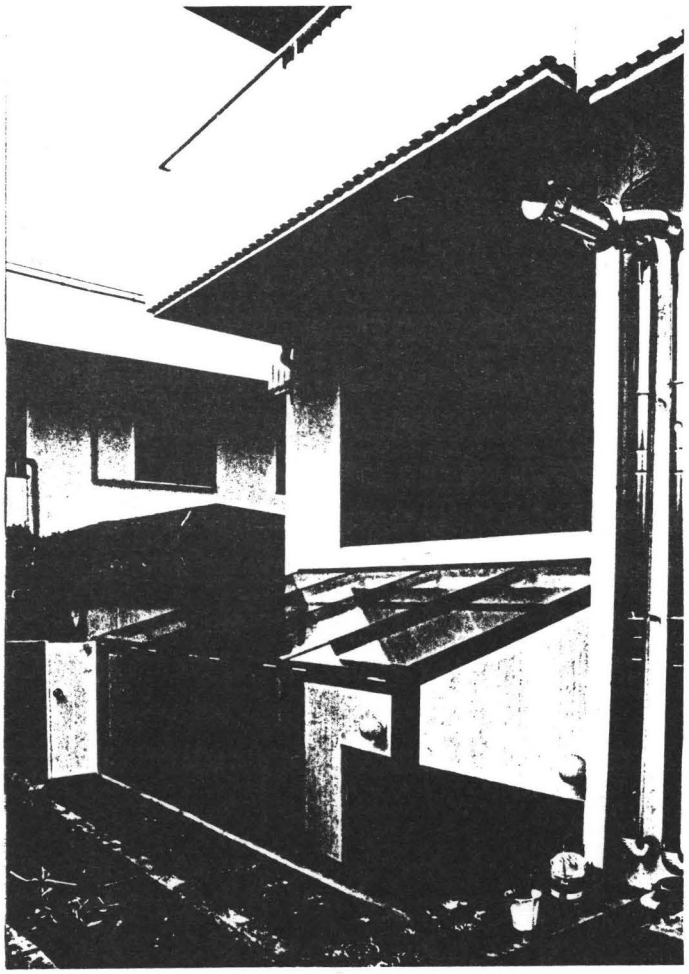
6．研究発表の実績及び予定

平成７年度お茶の水女子大学家政学部卒業論文発表会において発表を行った。

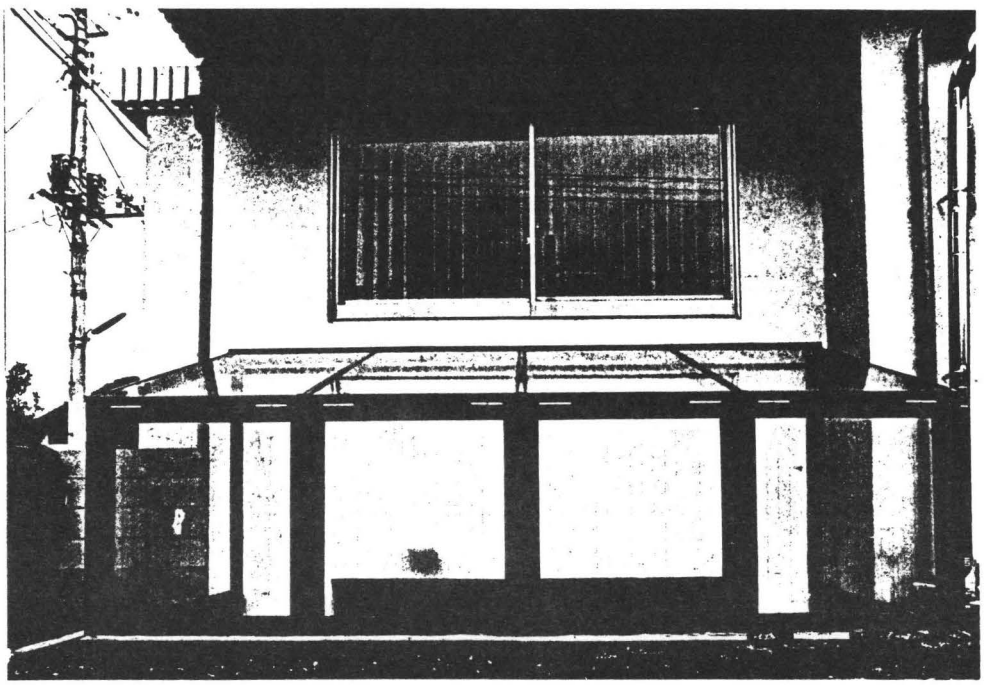
今後、家政学会、建築学会、空気調和・衛生工学会において発表していく予定である。

7．実用化計画

折りに触れ紹介、ＰＲし、一般の設計に取り入れられるようにしていきたい。

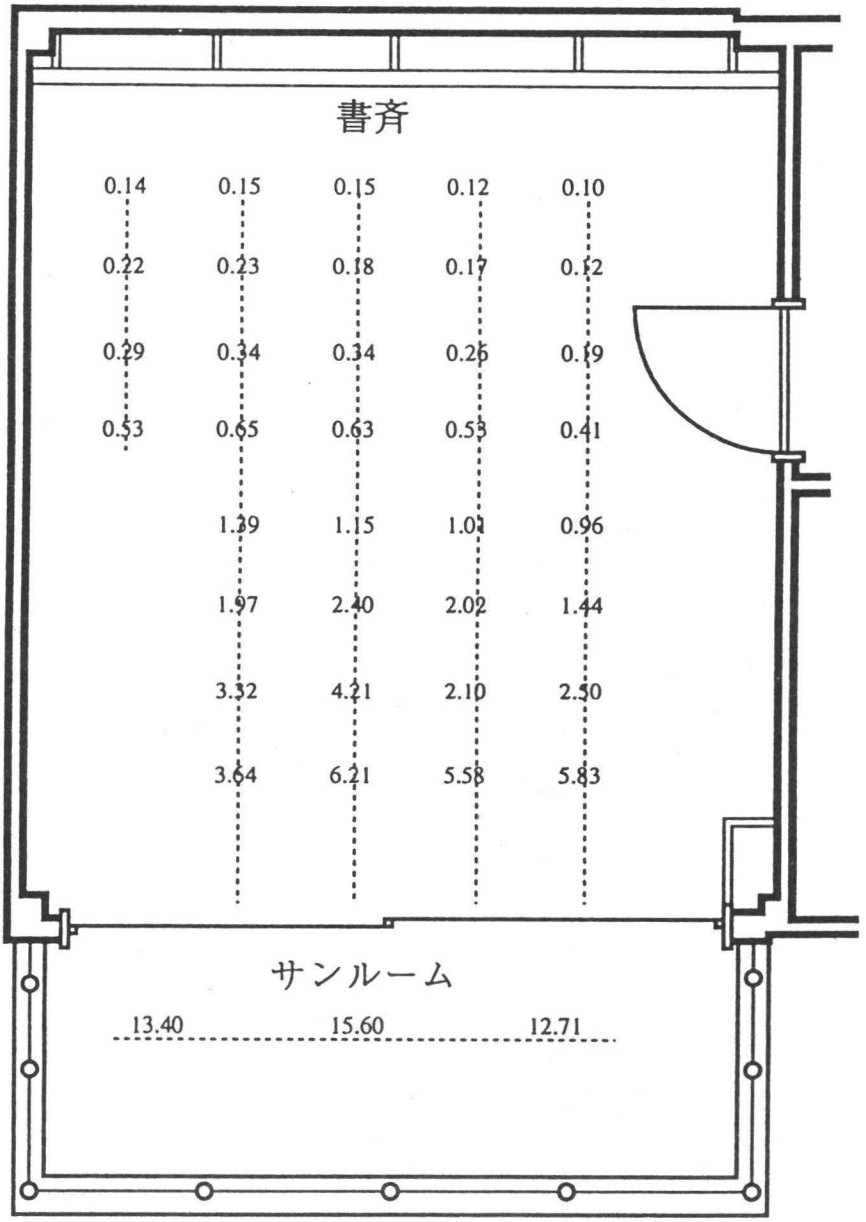


測定を行ったパッシブソーラーハウス



測定を行った付設温室

測定を行った付設温室（潜熱蓄熱体設置）



単位：%

図1　半地下室、サンルーム（付設温室）の昼光率分布測定値

段階	作業または室の種別例	基準昼光率(%)	左の場合の昼光照度(lx)			
			明るい日	平生	暗い日	非常に暗い日
1	時計修理・昼光のみの手術室	10	3000	1500	500	200
2	長時間の裁縫・精密製図・精密工作	5	1500	750	250	100
3	短時間の裁縫・長時間の読書・製図一般・タイプ・電話交換・歯科診察	3	900	450	150	60
4	読書・事務・診察一般・普通教室	2	600	300	100	40
5	会議・応接・調査平均・体育館最低・病室一般	1.5	450	225	75	30
6	短時間の読書（昼間）・美術展示・図書館書庫・自動車車庫	1	300	150	50	20
7	ホテルロビー・住宅食堂・居間一般・映画館休憩室・教会客席	0.7	210	105	35	14
8	廊下階段一般・小型貨物倉庫	0.5	150	75	25	10
9	大型貨物倉庫・住宅納戸・物置	0.2	60	30	10	4

表1　基準昼光率

採光による室内の明るさを表す指標として、開口率よりやや精密なものに昼光率がある。推奨されている基準昼光率は、作業や室の種別に応じ必要な明るさを確保するためのもので、設計用全天空照度を用いれば、これに対応する昼光照度が予測できる。

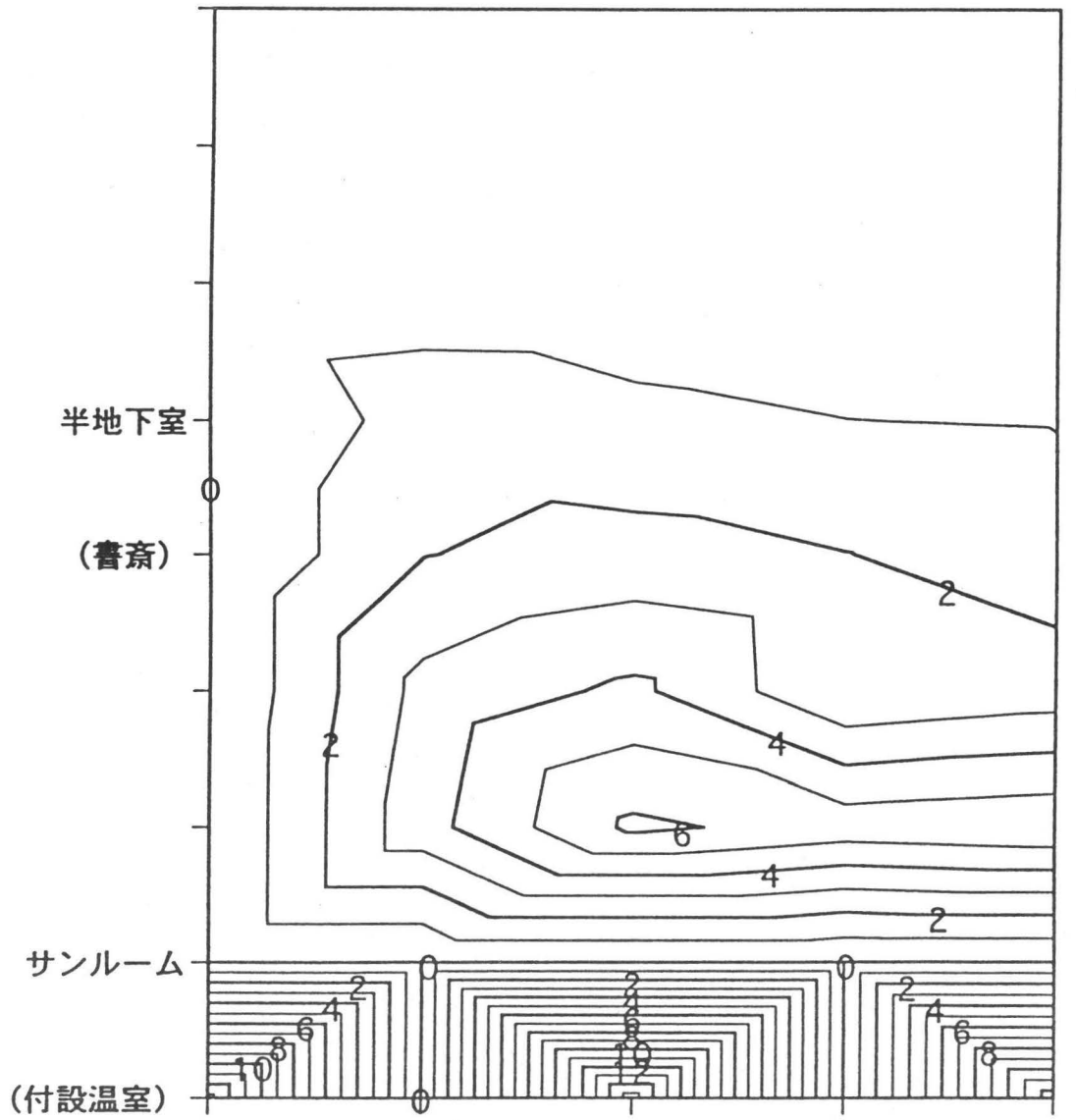


図2　半地下室、サンルーム（付設温室）の昼光率分布図

表２　　測定結果　　［単位：（ｄＢ）］

			中心周波数（Ｈｚ）					
			125	250	500	1000	2000	4000
外部音源法	サンルーム外部	R	96.8	103.6	102.2	96.7	97.4	86.5
	半地下室内	P	71.7	61.8	55.2	53.7	60.2	34.0
	遮音度	DW	25.1	41.8	47.0	43.0	37.2	52.5
	サンルーム内部	Q	89.0	83.8	79.8	76.7	81.4	62.0
	音響透過損失相当値	TLq	7.8	19.8	22.4	20.0	16.0	24.5
内部音源法（参考）	半地下室内	P	97.1	98.2	97.2	95.3	92.9	82.3
	サンルーム外部	R	62.8	56.4	47.0	50.5	50.2	28.5
	遮音度	DW	30.6	38.1	46.5	41.1	39.0	50.1
	サンルーム内部	PQ	84.8	81.4	76.6	75.9	74.0	59.0
	音響透過損失相当値	TLq	8.6	12.7	16.9	15.7	15.2	19.6

表－２

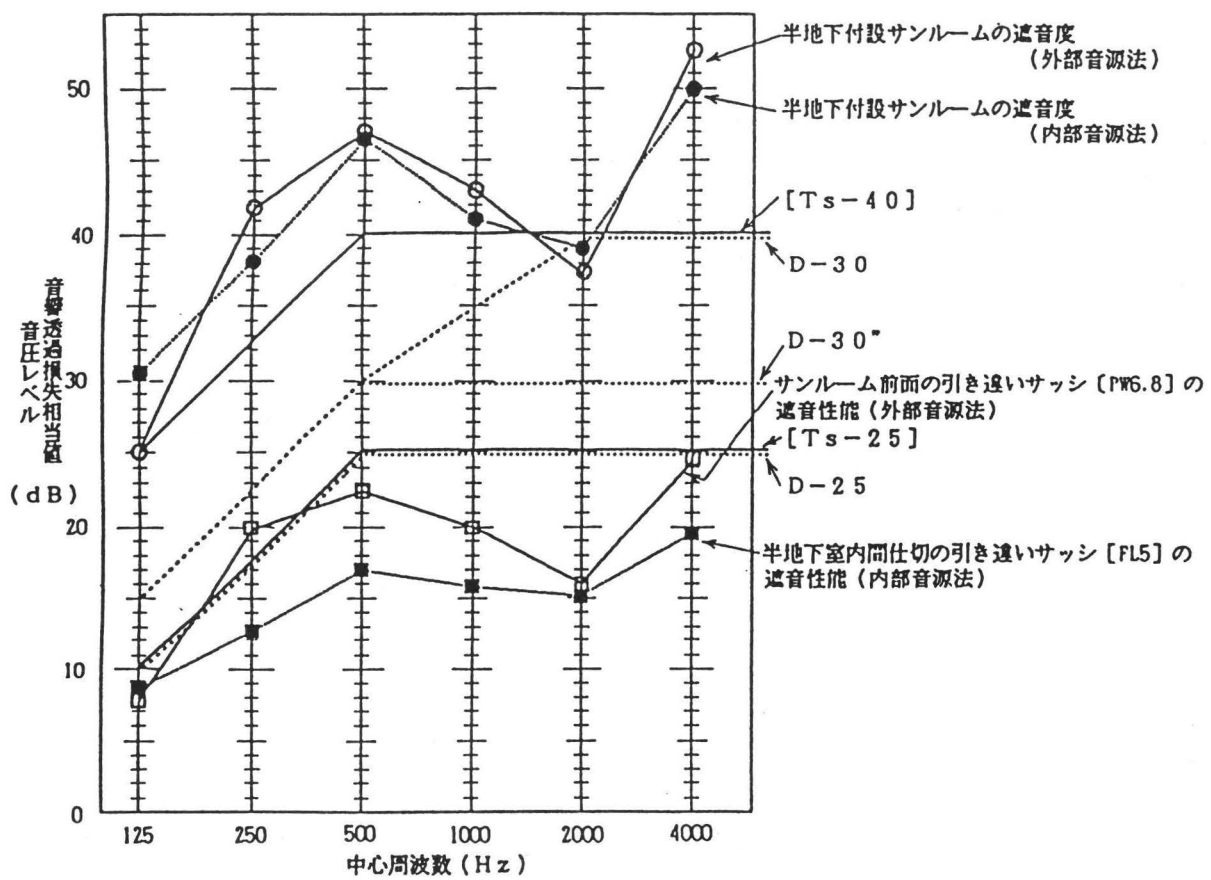


図３

注１）日本建築学会推奨基準及びＪＩＳ　A1419（建築物の遮音等級）では、遮音性能を音圧レベルで表し、遮音等級をＤ値で呼ぶ。

注２）サッシは、遮音性能を音響透過損失（相当値）で表し、遮音等級をＴｓ値で呼ぶ。

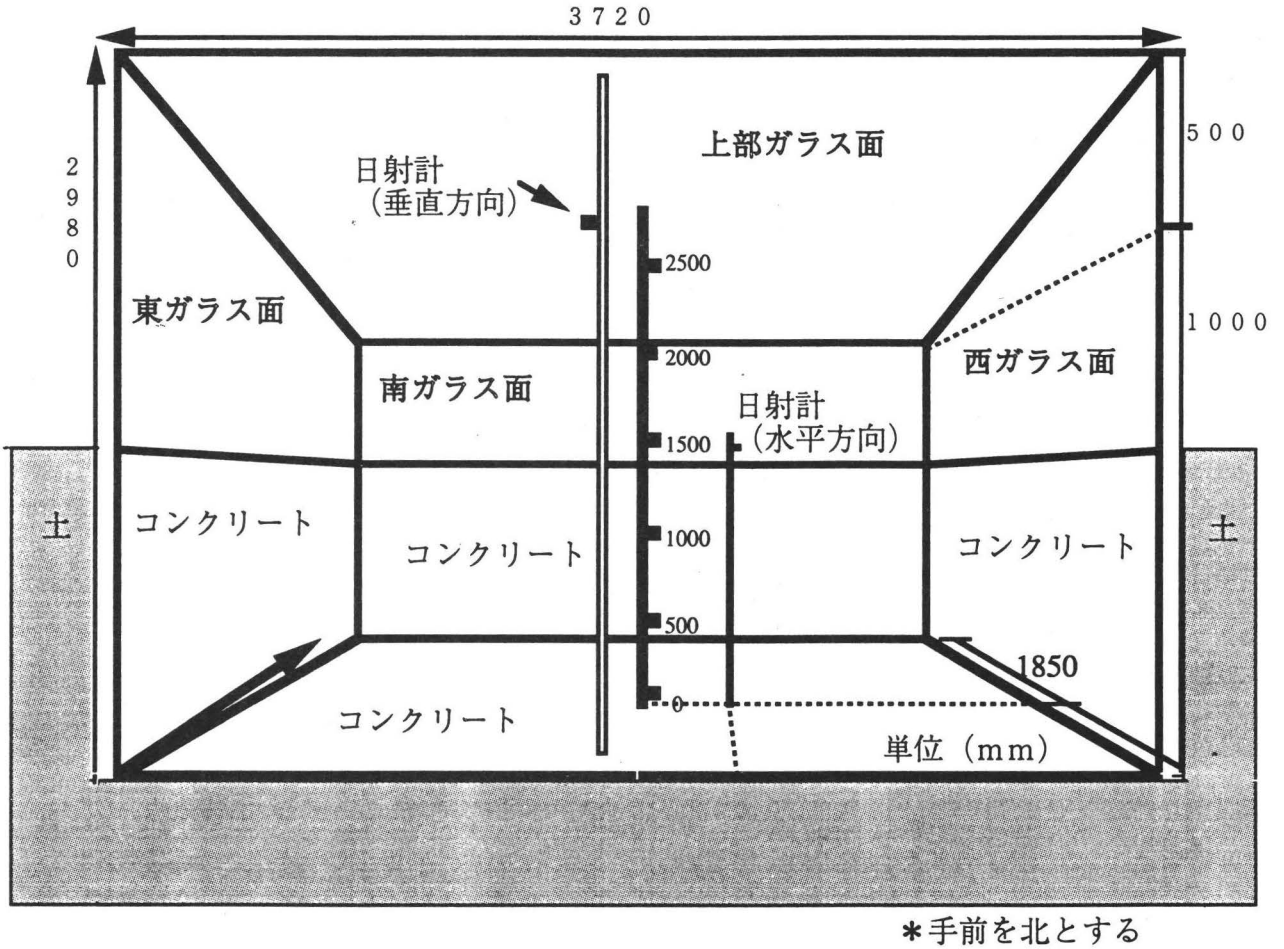


図4　付設温室内部

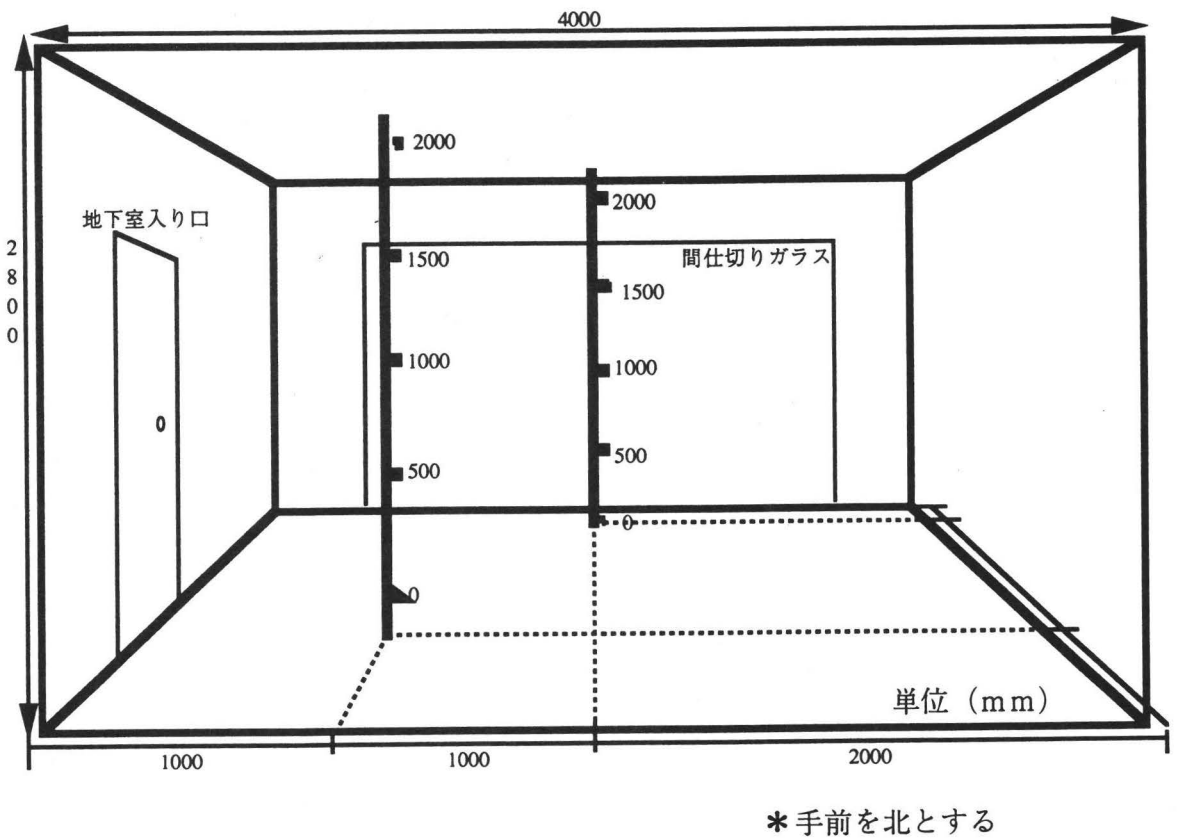
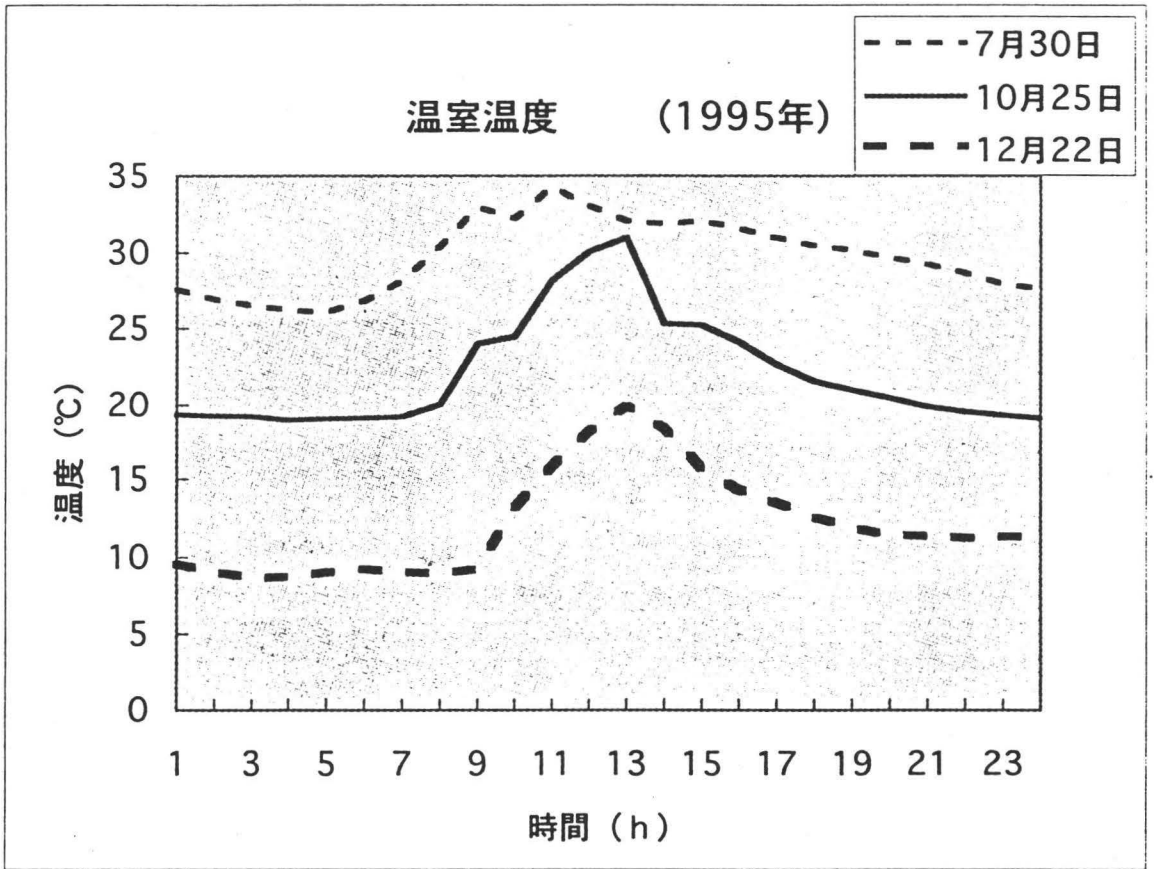
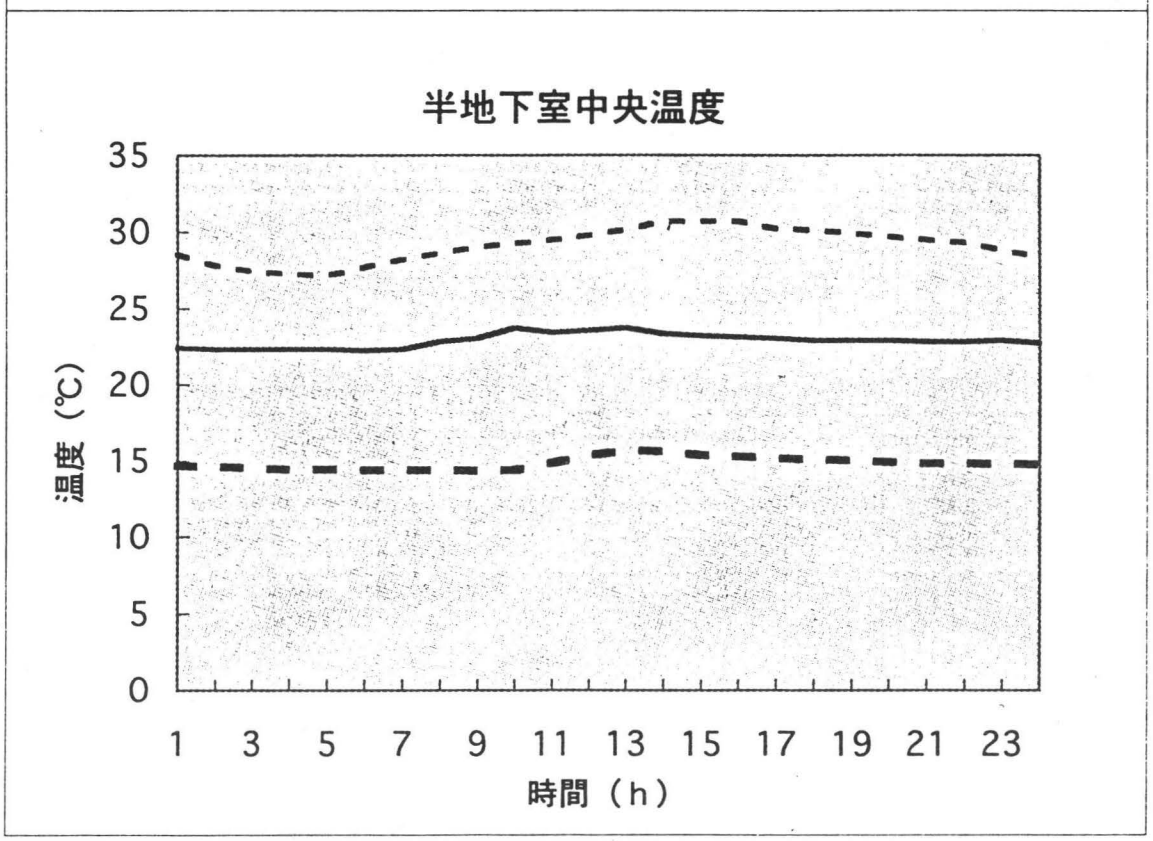


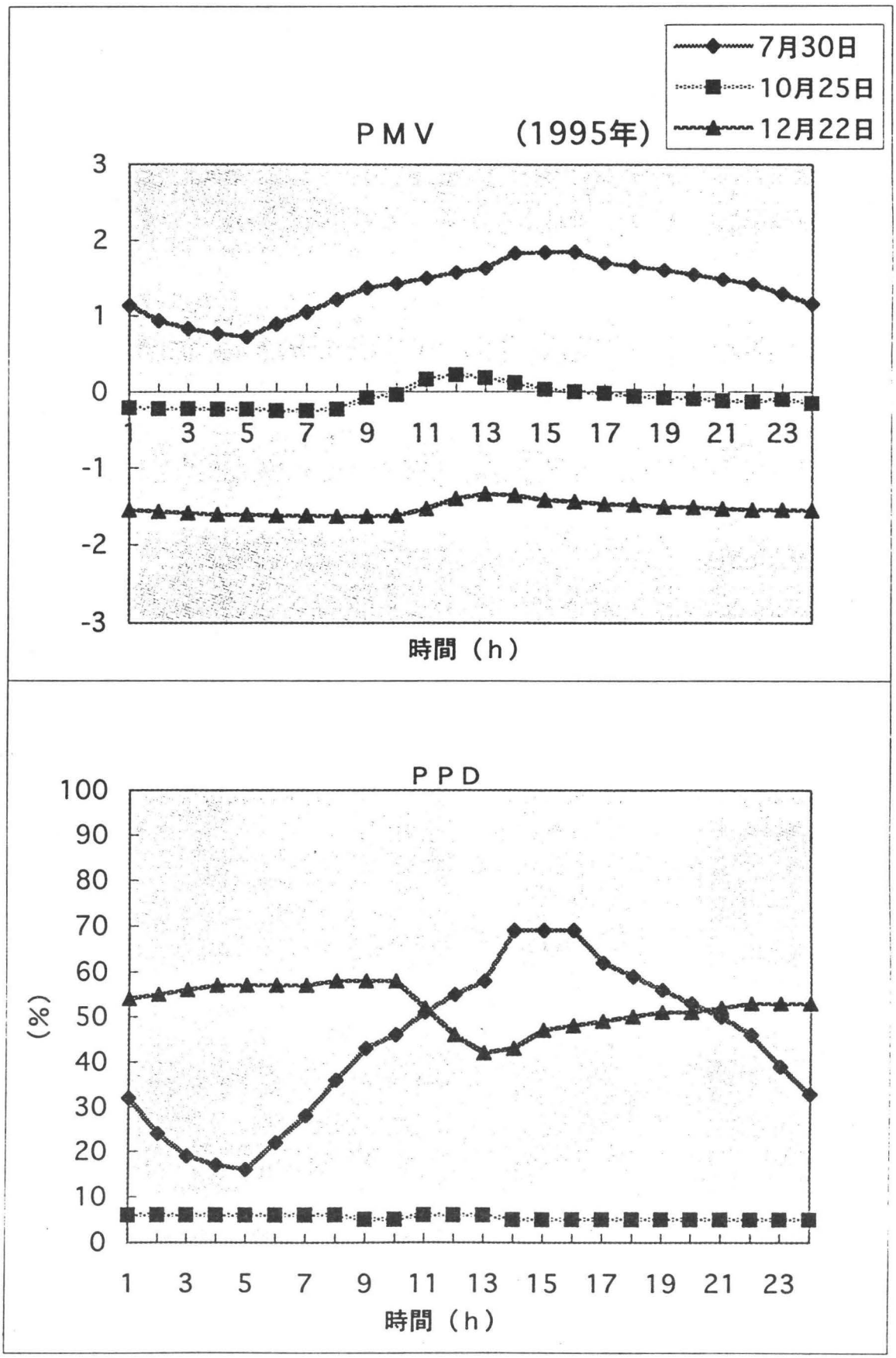
図5　半地下室内部





夏期・中間期・冬期の比較

測定地：東京都杉並区



夏期・中間期・冬期の比較

着衣量：7／30＝0.3clo，10／25＝0.75clo，12／22＝1.0clo

1－8　数値計算に基づく窓の熱貫流と日射遮蔽（取得）の解析

鹿児島大学工学部建築学科
教授　赤　坂　　裕

1. はじめに

建物の断熱性を高めるためには、外壁だけでなく開口部の断熱性も向上させることが必須である。断熱性を評価する簡易で最も一般的な指標が熱貫流率であるが、開口部の熱貫流率の計算は一般外壁に比べて格段に複雑である。一方では、開口部は非定常伝熱の影響が小さいため、熱貫流率による断熱性の評価が有効である。開口部には扉および各種の窓が使用されるが、これらのうち玄関扉の熱貫流率の計算法については既に整理[1] した。本研究では窓（主として開き窓）を対象として、2次元および3次元の数値計算による解析を行い、熱貫流率の計算法について検討した。なお、表題にある日射遮蔽（取得）に関しては、研究期間内に具体的な成果が得られなかったので、本報告書では窓の熱貫流率の解析結果のみを整理した。

2. 窓の熱貫流率の計算法

2.1　開き窓の各部の名称

開き窓の各部の名称を図1に示す。

2.2 開き窓の熱貫流率の計算法

(1)　窓の熱貫流率の一般式

$$U = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \Psi_g + \sum U_p}{\sum A_g + \sum A_f} \tag{1}$$

ただし、

A_g	：ガラスの見付面積	[m^2]
U_g	：ガラスの熱貫流率	[W/m^{2}K]
A_f	：「枠＋框」の見付面積	[m^2]
U_f	：「枠＋框」の熱貫流率	[W/m^{2}K]
l_g	：ガラスの周長	[m]
Ψ_g	：ガラス周囲の線熱貫流率	[W/mK]
U_p	：3次元熱流部の点熱貫流率	[W/K]

(2) 各種の計算法

U_g は周辺部の影響を受けないガラス中央部の熱貫流率で、ISO 10292[2]によって計算する。ガラス周辺部には、枠の影響によってガラス中央部とは異なる熱流が生じる。また、枠が同じであってもガラス仕様が異なる（例えば Low-Eフィルムの有無、封入ガスの相違等）と、ガラスの影響を受けて枠の熱貫流率が変化する。ISO[3]はこのような、枠の構造以外の要因が熱貫流率に与える影響を除くため、ガラスの代わりに枠に較正パネル（断熱パネル）を入れた場合の枠の熱流量から枠の熱貫流率U_f を求めること、および較正パネルと本来のガラスが入っている場合との熱流量のずれをガラス周長に比例する線熱貫流率 Ψ_g で補正する方法を提案している。すなわち、U_f と Ψ_g は次式で表される。

$$U_f = \frac{q_{l,tot} - U_c \cdot l_c \cdot \Delta T}{\Delta T \cdot l_f} \tag{2}$$

$$\Psi_g = \frac{q^*_{l,tot} - U_f \cdot l_f \cdot \Delta T - U_g \cdot l_g \cdot \Delta T}{\Delta T} \tag{3}$$

ただし、

$q_{l,tot}$	:「枠＋較正パネル」の熱流束	[W/m](図２a)
$q^*_{l,tot}$	:「枠＋ガラス」の熱流束	[W/m](図２b)
U_c	:較正パネルの熱貫流率	[W/m^{2}K]
l_c	:較正パネルの見付幅	[m]
ΔT	:室内外の空気温度差	[K]

$q_{l,tot}$ $q^*_{l,tot}$ は数値計算によって求める。数値計算法は複雑な形状に対応するため境界要素法（ＢＥＭ）による２次元熱橋計算プログラム（TB2D/BEM[5]）を用いる。枠に含まれる多くの密閉中空層は、密閉中空層の熱抵抗計算プログラム（VAC[5]）により、同じ熱抵抗を有する固体に置き換え、枠全体を２次元熱伝導問題として解いている。

2.3 計算例

以上の方法による計算例を以下に示す。

(1) 計算対象

計算対象は図１の開き窓と FIX窓の連窓とする。伝熱開口面積はW×H＝1.724(m) × 1.389 (m) ＝2.3946 (㎡) である。枠の材質は PVCの１種類のみとしたが、ガラスは３㎜複層（空気層12㎜）、及び３㎜複層＋Low-E(空気層12㎜) の２種類を考慮した。

(2) 枠の断面構造と計算モデル

計算対象とした開き窓の「枠＋框」部と FIX部には、上下左右に計７つの枠がある。その１つの断面構造を図３に、同断面の計算モデルを図４に示す。図４で、各密閉中空層には、置換された固体媒質の等価熱伝導率が記入されている。

(3) 計算結果

計算結果を表１に示す。線熱貫流率は、普通複層より Low-E使用の方がやや大きくなった。この計算では３次元の影響は無視している。窓全体としての熱貫流率は、普通複層の場合で 2.795、複層＋ Low-Eで1.758[W/㎡K]となった。

3　三次元伝熱の影響

開き窓の伝熱性状を整理すると、ガラス中央部の一次元的な熱流、ガラス周辺部および枠部の二次元的な熱流、枠のコーナー部分や方立と枠との接合部分における三次元的な熱流が考えられる。この節では開き窓における三次元熱流の影響について検討する。

3.1　三次元伝熱の計算法

三次元伝熱の影響を評価するために、差分法による三次元定常熱解析プログラムTB3D／FDM[5]を開発した。TB3D/FDMの信頼性については、ISO/DIS 10211[13] に示された数値計算の検証用三次元モデルで、温度、熱流の計算結果が、提示された条件を満たしていることで確認した。

3.2　開き窓における三次元伝熱の影響

(1)　窓のモデル

開き窓で三次元的な熱流の影響が考えられるのは、枠のコーナー部分および方立と枠との接合部分である。方立と枠は構造的に類似しており、方立と枠との接合部分に生じる三次元的な熱流は、枠のコーナー部分と同程度であると推測される。このことから、考察に際しては、方立てのない図５のような窓を想定した。また、問題を単純化するために、モデルは上下・左右の枠の構造が全て等しいと仮定した。窓枠は材質、性能により幾つかの種類が考えられる。ここでは市販されている商品等を参考にして、図６に示す３種類の枠モデルを想定した。ａは一般的な枠モデルで、材質がＰＶＣの場合（CASE1)とアルミニウムの場合（CASE2)を検討する。ｂはアルミニウムとＰＶＣの複合タイプ（CASE3)、ｃはアルミニウム枠にサーマルブレイクが付加されたタイプ（CASE4）である。コーナー部分は図５のように枠を45°に切断した端部を突き合わせた形状になっている。表２に各部材の熱伝導率を示す。中空層の熱伝導率は VACで算出した値である。

(2)　計算結果

窓の熱貫流率の計算結果を表３に示す。ａ欄は窓モデルの寸法、ｂ欄はガラス面の寸法と通過熱流、ｃ欄はISO[12] で提案された方法（二次元伝熱計算に基づく）で算出した窓の熱貫流率、ｄ欄は枠コーナー部分の三次元熱流の影響を考慮して算出した窓の熱貫流率、ｅ欄はISO(二次元)法と三次元熱流を考慮した場合の計算結果の比率(ISO／三次元）である。ｅ欄を見ると、二次元計算（ISO)の方が三次元熱流を考慮した場合より熱貫流率を大きく見積もっていることがわかる。しかし、その差は最大でも 0.5%（CASE2:図６のモデルで材質がアルミニウムの場合）程度である。

(3)　枠コーナー部分の室内側表面温度

図７に各CASEにおけるコーナー部分の室内側表面温度分布を示す。ガラス部分に着目すると、ガラスの枠近傍が低温になっていることがわかる。これは複層ガラスのスペーサー部分（図６および表２の⑧の部材）が熱橋になっていることによる。枠の表面温度は、CASE１、３、４ではガラス面より高温となっているが、CASE２（アルミニウム）では枠が熱橋構造のため非常に低温になっており、ガラス面との熱的なバランスがとれていない。

4. 計算値と試験値の比較

断熱性試験の結果が既知な23種の具体的な開き窓について、計算により熱貫流率を求め、試験値との比較により本研究で提案した計算法の整合性を検討する。ただし、かならずしも計算値が試験値を正確に再現すべきだとは言えない。計算法・試験法それぞれの特性を踏まえ、両方法が補完しあい共に改良されていくべきであろう。

4.1 試験方法の概要

窓やドアの断熱性試験方法については、JIS[6]やCEN[7]などで規格化されており、ISO での基準化の検討[8] も行われている。建築の分野では JISを基とした㈶ベターリビングの試験方法[9]（以下BL）もある。これらは基本的には保護熱箱（GHB)ないし較正熱箱（CHB)を用いた熱箱法である。JIS やBLが CEN・ ISOと大きく異なるのは、国内のものは温度差を空気温度で求めるが、CEN や ISOは放射の影響を考慮した環境温度を用いる点である[10]。

4.2 比較の対象とした開き窓

本研究で比較の対象とした開き窓は、外開きの開き窓とはめ殺し窓との連窓となったタイプのもので、㈶ベターリビンク・筑波建築試験センターないし㈶日本建築総合試験所にて断熱性試験の行われた製品のうち、データの揃った23種のものである。開口部の大きさは幅約 1.7m、高さ約 1.3mである。枠・障子の材質に、PVC(No.1～10）／アルミ＋ PVCの複合（No.11～18）／アルミ＋木の複合（No.19～20）／アルミ（No.21～23）、などがあり、熱遮断方式をもつもの（No.21～22）もある。また、ガラスの仕様についても、 Low-E複層／ガス入り Low-E複層／複層、の違いが見られる。

4.3 計算値と試験値の比較

2で述べたように開口部の熱的な要素による分離を前提に、枠＋障子框部（開き窓）、枠部（はめ殺し窓）の各部位について2次元計算モデルを作成し、多媒質について連立した境界要素法による定常伝熱計算プログラム（TB2D/BEM[5,11]）で計算を行う。各媒質の境界を一筆書きの要領でモデル化を行なう。差分法とは異なり斜材部分があってもよく、モデル形状についてはかなりの自由度を持つ。しかし、今回の実際の製品のモデル化にあっては極力熱的特性を損なわないような単純化が行われている。計算により得られた通過熱流量とその成分内訳、および、試験値の通過熱流量を図8に示す。傾向的に計算値が試験値より若干大きくなっている。また Low-E複層ガラス仕様の場合、枠・障子框部分の通過熱流量の全体に占める割合が大きくなっている。ガラススペーサー部の線熱貫流成分についても同様のことが言える。 Low-E仕様の中でも、ガス入りで高断熱化した複層ガラスのものは枠・障子框部分の割合が大きい。

4.4 比較結果の考察

断熱性能として熱貫流率を用いる場合、伝熱開口面積の取り方が重要となる。本研究では JISを基としたBL試験基準と ISO／DIS 10077[12] による方法（以下 ISO）の二つの方法について検討を行った。BLは全て内観寸法を用い、 ISOは内外投影面積の大きいほうを用いる。23種の開き窓の結果の平均は ISOの方がBLより若干大きい値となったが大きな違いではなかった。以下では

ISO による計算法で求めた熱貫流率で比較を行う。この熱貫流率を試験値と比較したものが図９である。相対比で見ると 0.995より 1.146の範囲に収まっており、よい整合性を示している。既報の玄関ドアの場合[1] と比べてもかなりよい一致度を示す。これは、面積的に大部分を占めるガラス部での通過熱流量を比較的正確に求める方法が確立していること、窓の熱的構成要素の種類が玄関ドアの場合より少ないこと、プログラムの改良とパソコンの性能向上により計算精度を高めることができたこと、が要因と考えられる。なお存在する両者の差を縮小する要因としては、試験体の作り方や計算モデルの作り方、試験値を求める際の放射成分の考慮、より積極的な３次元伝熱の影響の取り込み、などがあろう。

4.5　枠障子框部の熱貫流率の計算結果

図10に枠・障子框部の熱貫流率の分布を部位毎に示す。各部位で高い値となっているのはアルミを材質とする唯一ガラス厚の薄い№23の結果である。他は２～５[W/㎡KW] 付近に分布をしている。

4.6　ガラススペーサー部の線熱貫流率の計算結果

図11および図12にガラススペーサー部の線熱貫流率の分布をそれぞれガラスの熱貫流率別、部位別に示す。方立＋障子の分布が他のほぼ倍となっているが、これは方立には両側にガラスがあるためである。他は0.02～0.09[W/㎡KW] 付近に分布している。図11からは、高断熱のガラスほどガラススペーサー部の線熱貫流率が大きくなる傾向が読み取れる。

5. ま と め

本研究では、２次元および３次元の数値計算より窓の熱貫流を解析し、窓の熱貫流率の計算法を提案するとともに、計算値と試験法によって得られた熱貫流率の比較を行った。概要は以下の通りである。

１）窓の熱貫流率の計算法を、海外での計算基準の動向を考慮して整理した。

２）開き窓における３次元伝熱の影響について検討した。窓の熱貫流率を２次元伝熱計算モデルと３次元伝熱計算モデルで比較した結果、その差は最大でも 0.5%程度であった。

３）公的機関での熱貫流率の試験値がある23種類の開き窓について、数値計算による熱貫流率と試験値を比較した。その結果、両者の差は最大でも15%程度であり、全体としては良く一致していることを確認した。

謝　辞

本研究を行うにあたり、㈳リビングアメニティー協会の「窓の熱貫流率算出方法に関する研究委員会」の委員の方々に貴重な助言、資料を提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

[1] 赤坂、伊丹、二宮：玄関ドアの熱貫流率の計算法（その１）～（その３）、建築学会大会学術講演梗概集、1995

[2] ISO/DIS 10292,Glass in building - Calculation of steady state U values (thermal transmittance) of multiple glazing,1994
[3] ISO/TC 163 N293E,Windows, doors and shutters - Thermal transmittance, Part2, Numerical calculation method (working draft),1995
[4] 赤坂、澤村、垂直密閉中空層の熱抵抗の各種計算法、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、1995
[5] ALIA業務報告書：窓の熱貫流率算出方法に関する研究、1996
[6] JIS A4710-1989 建具の断熱性試験方法
[7] CEN/TC Draft, Measuring Method for The Determination of The Aggregate Thermal Transmittance of A Window System of Door System:Calibrated and Guarded Hot Box Method, 1992
[8] ISO/CD 12567,Thermal Insulation Determination of Thermal Resistance of Componets - Hot Box Method for Doors and Windows -
[9] ㈶ベターリビング、木造・RC造住宅用サッシ（断熱型サッシ）性能試験方法、1994
[10]㈶ベターリビング、玄関ドアK値算出方法に関する研究、業務報告書、1995
[11]赤坂、伊丹、小原：熱橋の計算法、日本建築学会第24回熱シンポジウム、1990
[12]ISO/DIS 10077, Windows, Doors and Shutters - Thermal transmittance - Calculation Method, 1993
[13]ISO/DIS 10211, Thermal bridges in building construction - Heart flows and surface temperatures - General calculation methods,1992

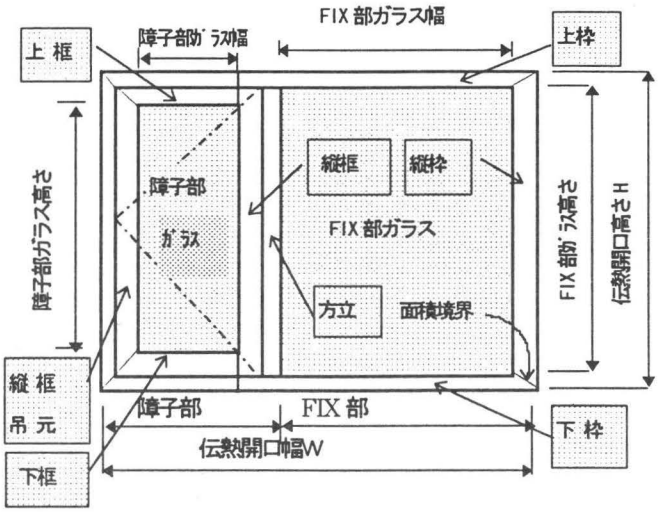


図1　開き窓（開き窓とFIX窓の連窓）各部の名称

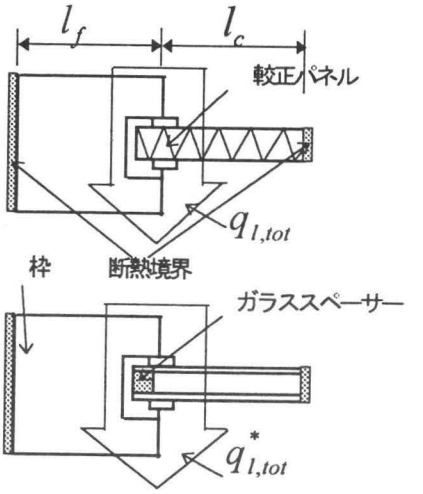


図2ａ（上）$q_{l,tot}$，ｂ（下）$q^*_{l,tot}$ の説明

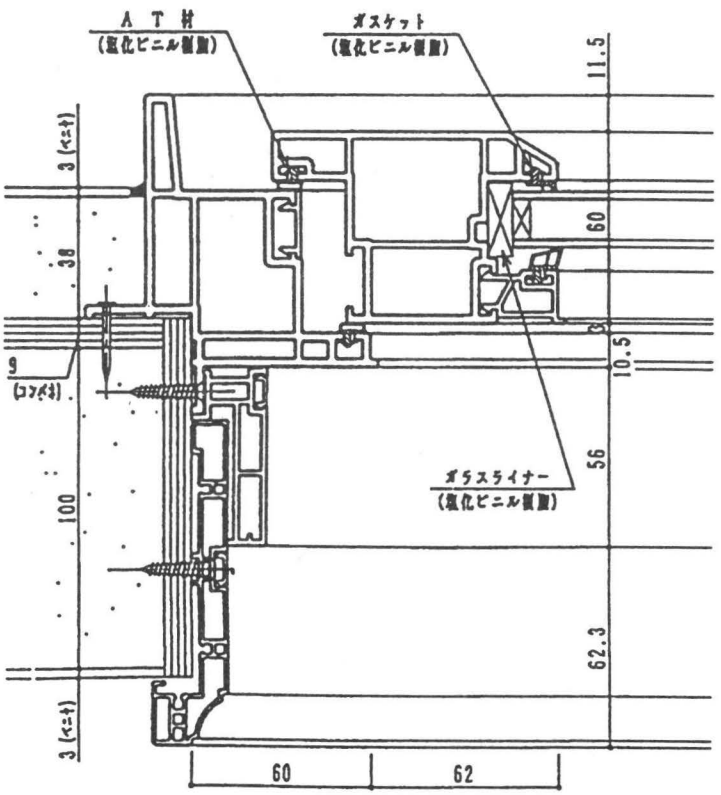


図3　ＰＶＣ縦開き窓の枠＋障子框（吊元）の断面構造

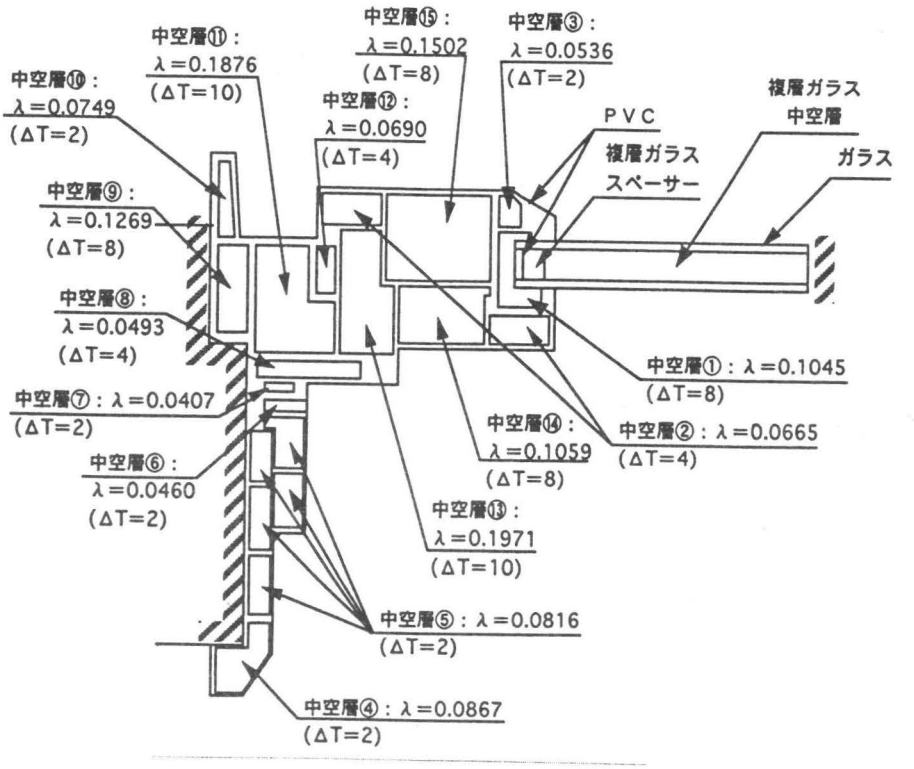


図4　図3の断面の計算モデル

表1　図1の窓の部位別及び全体の熱貫流率

窓の部位			面積(m2) or長さ(m)	3-A12-3 通過熱流 W/K	3-A12-3 熱貫流率 W/m2K or W/mK	3-A12-E3 通過熱流 W/K	3-A12-E3 熱貫流率 W/m2K or W/mK
ガラス	障子部		0.4527	1.3581	3	0.6311	1.394
	FIX部		1.182	3.546	3	1.6479	1.394
枠部	枠＋障子部	上	0.065	0.1226	1.887	0.1226	1.887
		下	0.065	0.1226	1.887	0.1226	1.887
		縦	0.1715	0.2992	1.745	0.2992	1.745
		方立	0.1883	0.4498	2.389	0.4498	2.389
	FIX部	上	0.0858	0.1571	1.832	0.1571	1.832
		下	0.0858	0.1515	1.767	0.1515	1.767
		縦	0.0986	0.1695	1.72	0.1695	1.72
ガラススペーサー	枠＋障子部	上	0.406	0.0151	0.037	0.0225	0.055
		下	0.406	0.0151	0.037	0.0225	0.055
		縦	1.115	0.0492	0.044	0.0693	0.062
		方立	1.177	0.1016	0.086	0.1446	0.123
	FIX部	上	0.954	0.0361	0.038	0.0567	0.059
		下	0.954	0.0455	0.048	0.0641	0.067
		縦	1.239	0.0543	0.044	0.0787	0.064
製品			2.3947	6.6933	2.795	4.2097	1.758

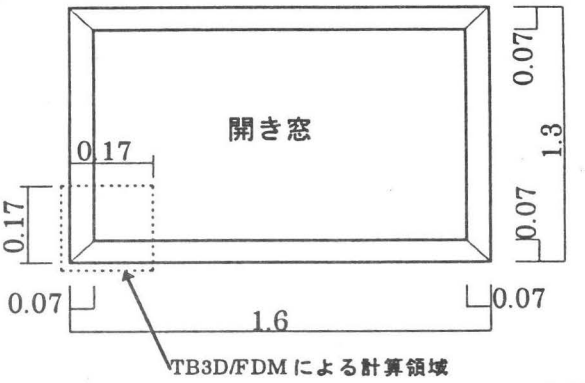
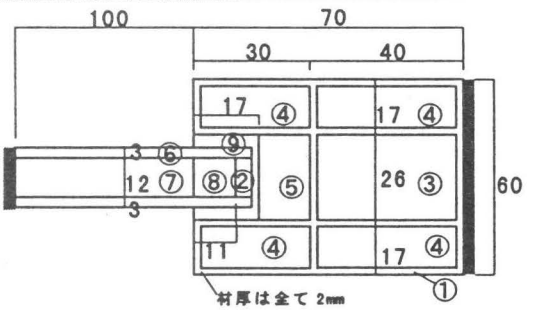
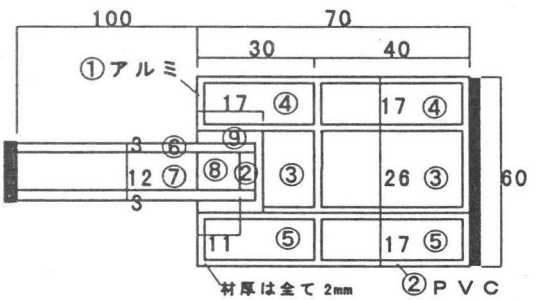


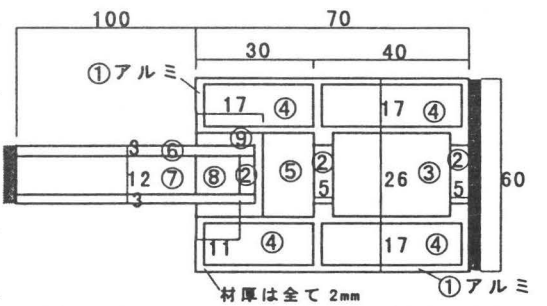
図5　窓のモデル



a　一般タイプ
（CASE1:ＰＶＣ，CASE2:アルミニウム）



b　ＰＶＣとアルミの複合タイプ(CASE3)



C　アルミ枠・サーマルブレイクタイプ(CASE4)

図6　枠のモデル（図の下側が室内）

■ 部分は断熱境界、α_i=8.94、α_o=23.25［W／㎡K］

表2　各部材の熱伝導率［W／mK］

枠タイプ ＼ 材番号	タイプa		タイプb	タイプc
	CASE1 PVC	CASE2 アルミ	CASE3	CASE4
①	0.163	203	203	203
②	0.163	0.163	0.163	0.163
③	0.140	0.058	0.058	0.058
④	0.093	0.035	0.035	0.035
⑤	0.140	0.058	0.093	0.058
⑥	1.000	1.000	1.000	1.000
⑦	0.069	0.069	0.069	0.069
⑧	26.7	26.7	26.7	26.7
⑨	0.163	0.163	0.163	0.163

表3　窓の熱貫流率の計算結果

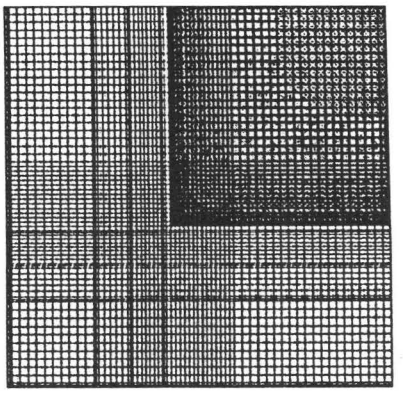
a 窓モデル	
伝熱開口・H[m]	1.3000
W[m]	1.6000
S[㎡]	2.0800
縦枠長さ[m]	1.3000
上下枠長さ[m]	1.4600

b ガラス部	
熱貫流率Kg[W/㎡K]	2.9773
Hg[m]	1.1600
Wg[m]	1.4600
見付面積Sg[㎡]	1.6936
通過熱量Ｑｇ[W/K]	5.0423

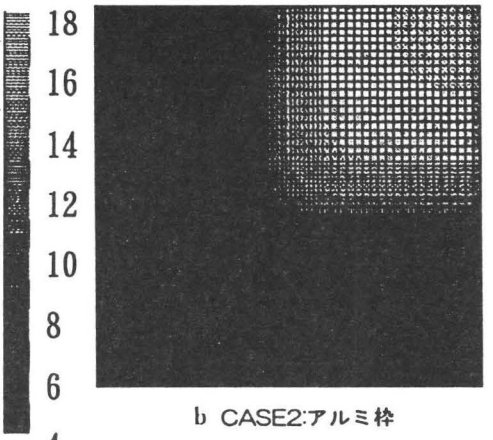
c ISO/TC 163 N 292E ,293Eによる計算結果（二次元計算）				
枠部モデル	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
２次元モデル熱流[W/m(20K)]	9.8256	17.9651	12.2093	12.0930
校正パネルモデル熱流[W/m(20K)]	5.5814	14.6512	8.3140	6.6860
校正パネルの熱貫流率[W/㎡K]	1.4220	1.4220	1.4220	1.4220
枠部熱貫流率Ｕｆ[W/㎡K]	1.9553	8.4337	3.9072	2.7444
枠部面積[㎡]	0.3864	0.3864	0.3864	0.3864
枠通過熱量[W/K]	0.7555	3.2588	1.5097	1.0604
線熱貫流率Ψ[W/mK]	0.0567	0.0102	0.0392	0.1148
該当長さ[m]	5.2400	5.2400	5.2400	5.2400
通過熱量[W/K]	0.2970	0.0533	0.2056	0.6016
枠部通過熱量[W]	1.0525	3.3121	1.7153	1.6621
窓総通過熱量[W/K]	6.0949	8.3544	6.7576	6.7044
窓の熱貫流率[W/㎡K]	2.9302	4.0165	3.2489	3.2233

d 三次元熱流を考慮した計算結果（三次元計算）				
枠部モデル	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
コーナー部分熱流[W/(20K)]	1.5091	3.6031	2.1458	2.0785
窓総通過熱量[W/K]	6.0844	8.3102	6.7409	6.7017
窓の熱貫流率[W/㎡K]	2.9252	3.9953	3.2408	3.2220

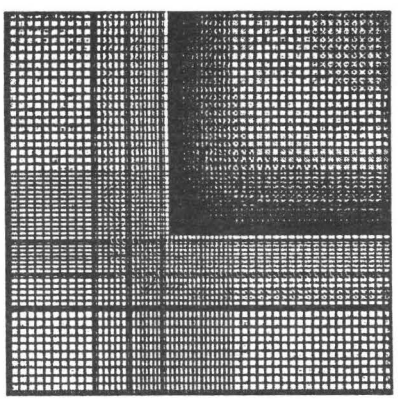
e 二次元計算(ISO)と三次元計算の熱貫流率の比(二次元／三次元)				
枠部モデル	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
比率(二次元／三次元)	1.0017	1.0053	1.0025	1.0004



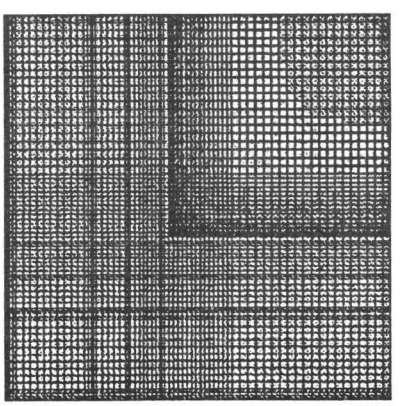
a CASE1:ＰＶＣ枠



b CASE2:アルミ枠



c CASE3:アルミ＋ＰＶＣ複合タイプ



d CASE4:アルミ＋サーマルブレイク

図７　枠コーナー部分室内側表面温度

図右上がガラス部分

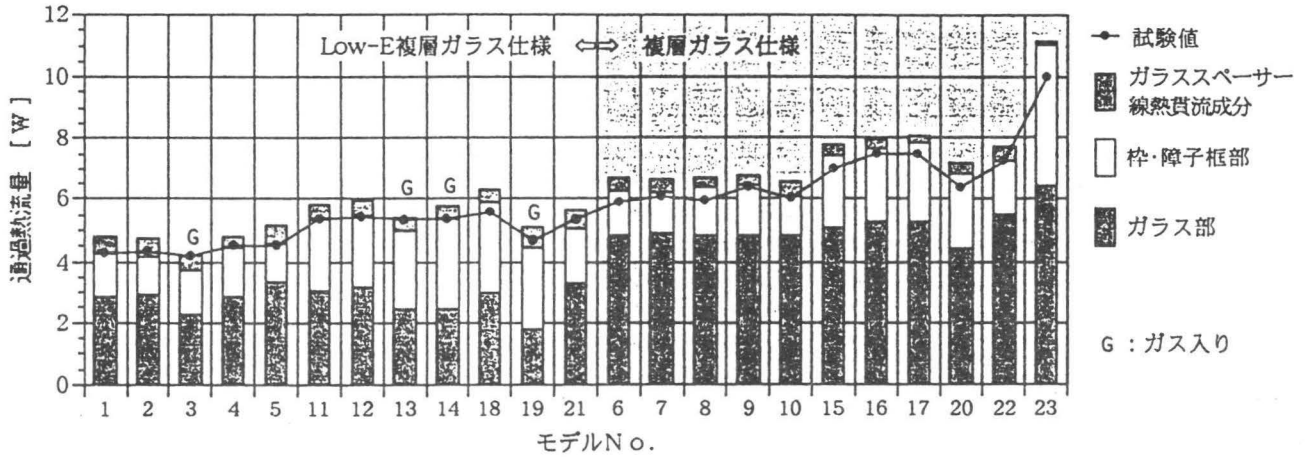


図8　通過熱流量の試験値と計算値の比較

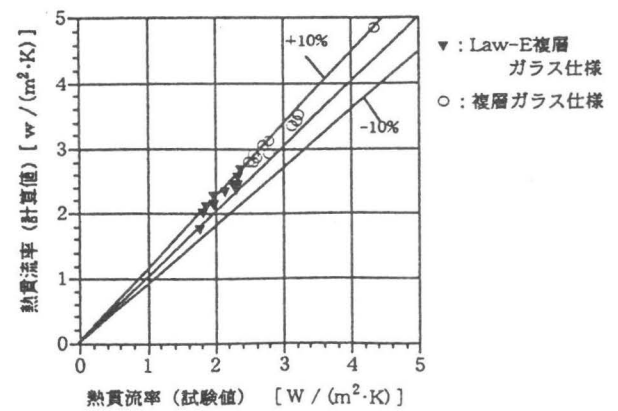


図9　熱貫流率の計算値と試験値の相関

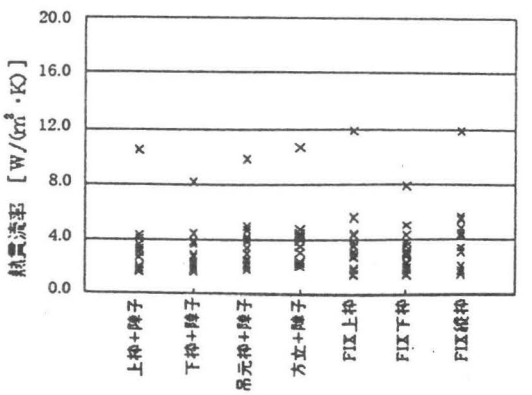


図10　枠＋障子框部の熱貫流率

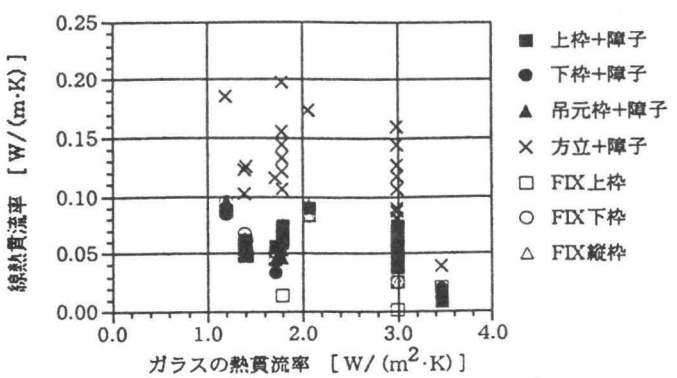


図11　ガラススペーサー部線熱貫流率とガラスK値

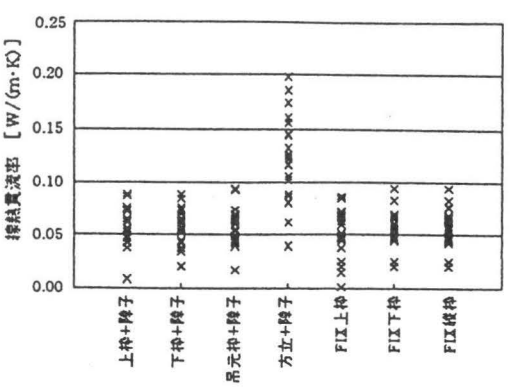


図12　ガラススペーサー部の線熱貫流率

１－９　耐久性に配慮した外断熱設計法の開発

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
助教授　坂　本　　雄　三

1. はじめに

ＲＣ構造における外断熱構法は、躯体を断熱材で外側からくるむのでヒートブリッジができにくいこと、コンクリートの熱容量を活用できるのでパッシブソーラー化が容易であることなど、熱環境的には非常に優れた構法であることが知られている。しかしながら、外断熱構法を採用した場合、断熱材の外側にある外装材は室内や躯体とは反対に厳しい外界環境の影響を内断熱構法の場合より強く受けることになってしまい、その耐久性が懸念される。このように、外装材も含めた外断熱構法の耐久性に関しては、外断熱の恩恵に浴する室内熱環境とは裏腹に十分な検討がなされているとはいいがたく、外断熱構法を普及させるためにも、より一層の研究や調査が必要と思われる。

一般の内断熱構法にも共通する耐久性上の問題は除くものとすると、外断熱ゆえに問題になることは先に挙げた外装材や断熱材自身の温湿度変動に起因する劣化であろう。結露や急激な温度変化による部材や金具の劣化、疲労等は不安視されるところである。温湿度の変化ということに着目した場合、その様相はかなり複雑であるが、大きく分ければ、日周期の気象条件の変化が原因で生じる短周期（１日以内）の変化と、季節的な気象条件の変化が原因で生じる長周期（１ヶ月～１年）の変化に分けられよう。耐久性を論じる場合、この時間スケールが異なる２種類の温湿度変化の両方に対して適切な設計を行う必要があるが、ここでは後者の長周期の変化に対する耐久設計について検討してみる。なぜならば結露による障害を考えた場合、長周期の変化によって発生するものは継続時間も長くなるのでそのダメージも大きく、優先的に対処する必要があると思われるからである。

本研究では、このような長周期の気象条件の変動に対して、外断熱構法における外装材や断熱材が結露しないか、あるいは結露までいかなくてもカビ等が発生するような高湿度にならないかということに着目して、シミュレーションスタディを行った。

2. 壁体内の水分予測シミュレーションモデルの検証

各外断熱構法のシミュレーションスタディを行う前に、そのスタディで用いるシミュレーションモデルの検証を行った。検証は、実験室実験において測定された含水率の分布と、同様な境界条件の下で得られたシミュレーションによる含水率分布とを比較することで行った。

(1)　実験装置と方法

シミュレーションモデルを検証するために行った実験の概要と実験装置を図１に示す。独立に温湿度をコントロールできる恒温室を隣り合わせで二つ用意し、両恒温室の界壁に含水率分布測

定用の試験体を設置した。二つの恒温室のうち一つ（chamber-X）は常時一定の温湿度（20℃、66%）とするが、他の一つは図１に示すように32℃・80%の状態（夏の外気を想定）と８℃・20%の状態（冬の外気を想定）を20日間毎に繰り返した。これによって、試験体には熱移動と水分移動が生じ、それによって含水率分布が形成される。含水率分布の測定は、図１に示すＡ～Ｄの４時点で行った。これらの時点で、試験体をコア抜きし、そのコアをさらに１㎝程度の間隔で切片にスライスし、それらの各切片の重量と絶乾重量から含水率を求めた。

試験体に用いた材料は軽量気泡コンクリート（以下、ＡＬＣと記す）である。この理由は、ＡＬＣは普通コンクリートより水分移動が速く短期間の実験に適していること、コア抜きや切片スライス等の作業が容易なこと、平衡含水率曲線や湿気伝導率等の物性値がよく知られていることなどである。もちろん、ＡＬＣは普通コンクリートと同じ吸放湿性材料であり、非定常性を考慮した熱湿気同時移動モデルの検証をする上では同質のものと扱って構わない材料である。また、この実験では、試験体は材厚が10㎝のものと５㎝のもの、２種類を使用した。

(2) 熱湿気同時移動方程式とシミュレーション

表１に、本研究で用いた含水率予測のシミュレーションモデルを示す。このモデルは松本衛博士（神戸大学）らが定式化したモデルであり、一般には熱湿気同時移動方程式と呼ばれるものの一つである。本研究では、隅角部やヒートブリッジは対象としないので、計算モデルは全て１次元モデルとした。(1)式が水分の保存式、(2)式が熱量の保存式であり、水分ポテンシャルとしては含水率が選ばれている。この含水率は、局所平衡の仮定から、(3)式（平衡含水率曲線）によって相対湿度と一義的に関係づけられる。

上記の熱湿気同時移動方程式は、係数が従属変数に依存するので非線形な連立偏微分方程式であるが、差分法を用いれば数値的に解くことができる。ここでは、時間後退差分と空間中心差分を用いてこれらを解いた。

また、ＤやＦの材料物性値は別途個別に測定して求めた。その結果得られた、湿気伝導率＝0.0066g/mhmmHg、熱伝導率＝ 0.13kcal/mh℃、容積比熱＝121kcal/m³℃、平衡含水率勾配＝0.09 wt%/rh% 、という数値をシミュレーションに使用した。なお、平衡含水率勾配とは、測定した平衡含水率曲線の中相対湿度領域（おおよそ20%～80%の領域）を直線近似したときに当てはまる直線の勾配のことであり、平衡含水率曲線を表現するための代表的な数値である。

(3) 計算結果と実験結果の比較

図２と図３にシミュレーションによる含水率の計算結果と実験で得られた含水率の測定結果を比較して示す。図２がＡＬＣの厚さが10㎝のもの、図３が５㎝のものである。いずれも、横軸にchamber-ＸからＹに向かって計った距離（Ｘ側の表面を座標原点とする）を取ったときの含水率で示した。計算結果は、実験結果はより全般的にやや低い傾向は見られるが、分布の傾きなどの定性的な傾向をよく再現しており、本シミュレーションは予測モデルとして十分な精度があることが確認された。

3．シミュレーションによる外断熱構法の検討

ここでは、外断熱構法における典型的な壁体仕様を10種類想定し、日本全国５ヶ所の気象条件

の下で、先に示したシミュレーションモデルを用いて壁体内部の湿気状態に関する検討を例示的に行った。吸放湿性の材料は理論的には相対湿度がゼロでない限りいくばくかの液水を必ず含み、含まれる液水量（含水率）は相対湿度に対して連続的に変化するので、吸放湿性材料における結露判定は非吸放湿性材料の場合のように有るか無しかの二通りの判定方式で行うことはできない。しかし、実質的には、吸放湿性材料においては、相対湿度がかなりの高さ（例えば90％）以上になった場合をほぼ結露状態とみなすのが妥当と思われる。なぜならば、このような高含水率状態では、もしその近くに金属等の非吸放湿性材料があるとすると、ちょっとした温度差でその金属等の表面に結露水を生じさせると考えることができるからである。また、相対湿度が80％以上になると、カビ等の菌類の繁殖が盛んになり、諸々の障害が発生する危険も生じる。ここでは、このようなことを勘案し、シミュレーションによって計算した結果を年間最高相対湿度の分布という数量で表示し、各構法における耐久性判定のための指標とした。

(1) シミュレーションにおける設定条件

外断熱構法の壁体に使用される主な材料の熱湿気物性値を表２に示す。本シミュレーションではこの表の物性値を用いてシミュレーションスタディを行った。

また、表３は本シミュレーションスタディで設定した室内側の温湿度条件である。冒頭で述べたような理由から、本研究では温湿度変動については１日周期等の短周期の変化ではなく季節変動のような長周期の変動に対する温湿度の様相を検討の対象としたので、室内側の温湿度も表３に示すように各月において一定の値とした。なお、冬期の室温がやや高め、夏期の室温がやや低めであるが、これは過剰な冷暖房を考え、かなりの安全率を設けたためである。

外気側の温湿度にもついても同様に日変動等の短周期の変動は無視し季節変動だけが表現されるように設定した。つまり、理科年表等に示されている月平均値の最低と最高から１年周期の変動曲線を余弦関数を用いて作成し、与えた。なお、外気側の気象条件としては、政府の住宅用省エネルギー基準で用いられている地域区分を参考にして、５都市（札幌、秋田、仙台、東京、鹿児島）の条件を選定した。

計算は初期条件による違いを打ち消すために30年分行い、最後の１年間における壁体各部の最高相対湿度を出力した。

(2) 年間最高相対湿度の検討結果と考察

検討した外熱熱構法の壁体は、断熱材として発泡樹脂系のものを用いるか、あるいは、繊維系のものを用いるかで二分される。また、内装材や外装材の有無や種類でもそれぞれ、５種類づつ設定した。図４と図５に設定した壁体仕様と共に、各都市の年間最高相対湿度の計算結果も併せて示す。図４は発泡樹脂系の断熱材を用いた構法の結果、図５は繊維系断熱材を用いた構法の結果である。なお、外装材が無い仕様が設定されているが、これは外気側に通気層が設けられる構法では外気側の温湿度条件が外装材なしのそれと同等であろうと想定したためであり、外断熱構法では「外装材なし」はあり得ないので、「外装材なし」はむしろ「外気側通気構法」と読み替えたほうが適切かもしれない（ただし、この読み替えには通気量が十分確保される構法であることが必須である）。

図４と図５から判明したことを以下に示す。

① 今回設定した仕様の中では、全体的に発泡樹脂系断熱材のほうが繊維系断熱材より最高相対

湿度は低く、問題が少ないと思われる。この大きな要因は、繊維系断熱材が小さい熱伝導率にもかかわらず大きな湿気伝導率を有しているためである。すなわち、繊維系断熱材は小さな熱伝導率によって大きな温度勾配を生じさせる一方で、水蒸気圧については大きな湿気伝導率のために分布をつくらない。したがって、相対湿度についてはその材料中に大きな分布が生じ、それが他の材料にも影響を及ぼすと考えられる。いわば、熱伝導率と湿気伝導率のアンバランスが招く結果と思われる。他方、発泡樹脂系断熱材では、熱伝導率も小さいが湿気伝導率も小さいので、相対湿度の差が生じにくく、壁体中の最高相対湿度は全般的にそれほど高くならない。

② 問題が少ないと思われる（最高湿度がそれほど高くはならない）仕様は全国同一ではなく、地域によって若干の差異が有りそうである。つまり、ある地域では問題がない仕様でも他地域で使用すると問題が生じる場合がある（例えば、図４のｃや図５のｄなど）。これは十分注意しなければならないことである。

③ 外断熱構法の場合、内装材によって内部湿度が大きく変わるようなことはないが、外装材は注意して選択しないと外装材自身や断熱材に影響がある場合がある（図４と図５のｃとｄの比較）

4. まとめと今後の課題

以上、熱湿気同時移動方程式に基づくシミュレーションモデルの検証と、そのモデルを用いて行った外断熱構法の耐久性に関する検討結果を示した。その結果、本シミュレーションモデルは妥当な精度を持つことが示され、また、外断熱構法の耐久性に関しては湿度の面だけ見れば発泡樹脂系の断熱材のものが問題が少なそうであるなどの実用的に価値のあるいくつかの知見が得られた。

しかし、本研究で行ったシミュレーションモデルの検証例や耐久性評価に用いた構法例などは全体から見ればほんの一部であり、ここで述べた結果は今後さらに多くの検証例と検討例によって追認されるべきものと思われる。また、耐久性の評価のためには、冒頭で述べたように、本研究では無視した短周期の気象変動による影響も長周期変動による影響と併せて評価する必要がある。このような短周期の問題も条件の変更を行えば基本的には本シミュレーションモデルを用いて実行することが可能であるので、今後とも本研究を継続・発展させる研究が期待される。

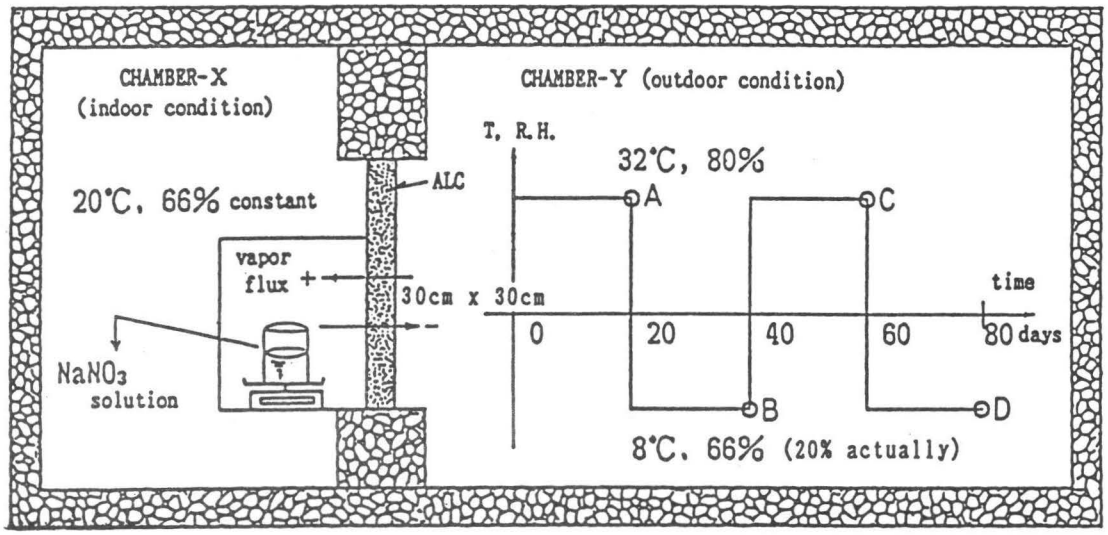


図１　実験装置と温湿度の条件（A～Dの4時点でALC試験体の含水率分布を測定）

表１　含水率の予測シミュレーションモデル（熱湿気同時移動方程式）

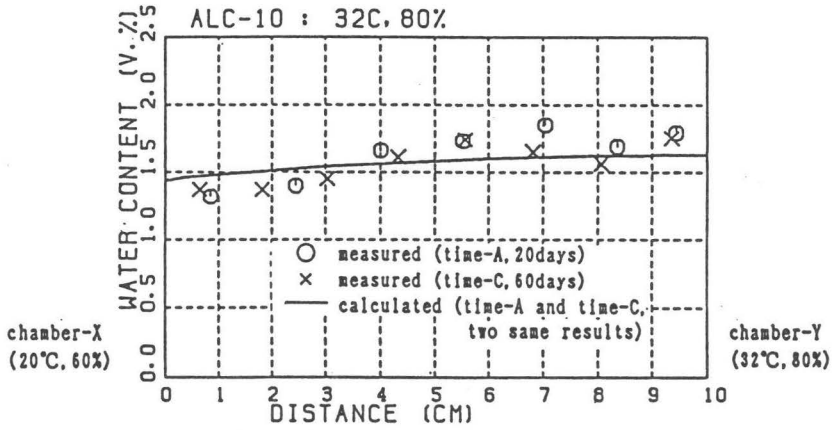
$$\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left\{ (\lambda + r D_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} + r D_{\phi g} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right\} \quad (2)$$

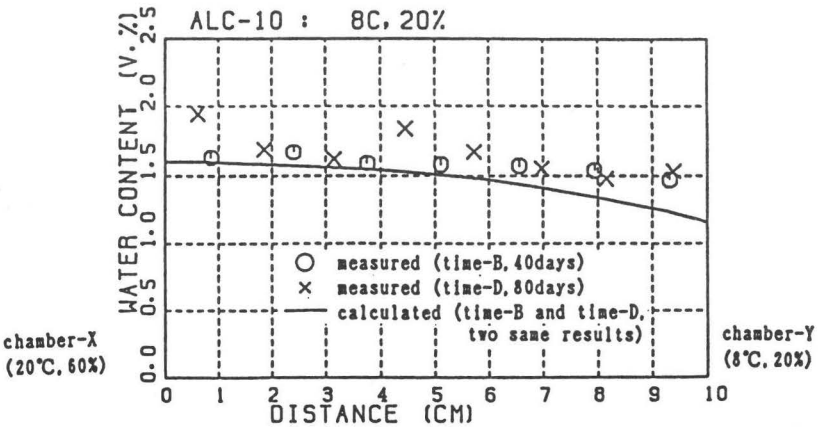
$$\phi = F(h, T) \fallingdotseq F(h) \quad (3)$$

(symbols)
T : temperature
ϕ : volumetric water content
h : relative humidity
r : the heat of vaporization water
ρ : density of material
ρ_w : density of liquid water
c : specific heat of material
D : moisture conductivity coefficient
λ : thermal conductivity coefficient
t : time
x : distance

(subscripts)
T : for temperature gradient
ϕ : for water content gradient
g : in gas phase

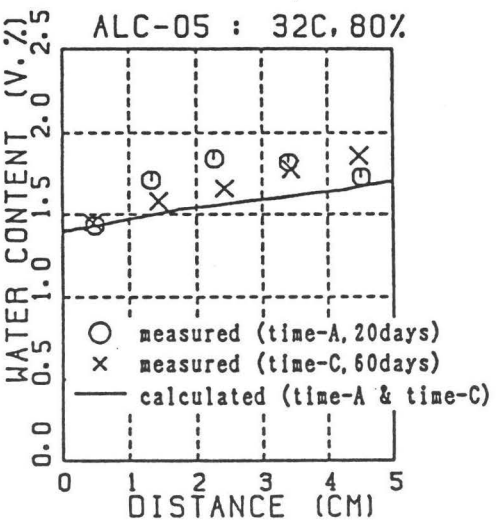


(b) chamber-Yが8℃, 20%のとき（B時点及びD時点）

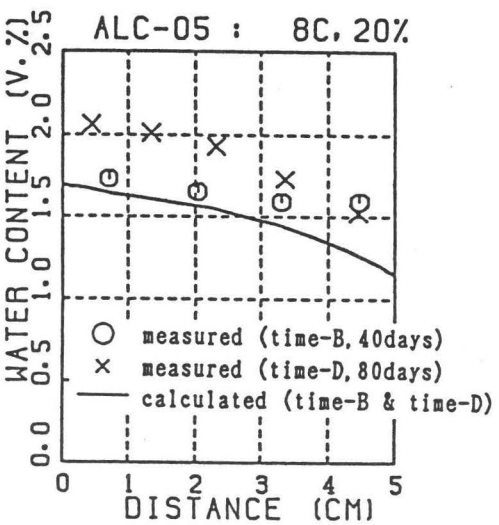


(a) chamber-Yが32℃, 80%のとき（A時点及びC時点）

図２　ＡＬＣ10cm厚試験体の含水率に関する計算結果と測定結果の比較



(a) chamber-Yが32℃, 80%のとき
（A時点及びC時点）



(b) chamber-Yが8℃, 20%のとき
（B時点及びD時点）

図３　ＡＬＣ5cm厚試験体の含水率に関する計算結果と測定結果の比較

表2　シミュレーションに用いた材料の熱湿気物性値

材料＼物性値	絶乾密度 kg/㎥	熱伝導率 kcal/m・h・℃	比熱 kcal/kg℃	湿気伝導率 g/m・h・mmHg	含水率勾配 wt%/rh%
繊維系断熱材	16	0.038	0.20	0.07	0.014
発泡樹脂系断熱材	30	0.030	0.30	0.005	0.01
木質系断熱材	270	0.048	0.31	0.019	0.15
吹き付け樹脂タイル	1000	0.16	0.30	0.0017	0.01
軽量モルタル	1400	1.0	0.22	0.005	0.06
塩化ビニール壁紙	550	0.12	0.33	0.00015	0.01
シージングボード	322	0.052	0.31	0.019	0.24
ポリエチレンシート	100	0.16	0.30	0.0000002	0.001
コンクリート	2300	1.3	0.19	0.0033	0.028
石膏ボード	900	0.15	0.27	0.0069	0.21

表3　シミュレーションに用いた室内温湿度条件

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
温度℃	22.1	22.0	22.3	22.8	23.4	23.7	24.5	25.0	23.5	23.0	22.6	22.3
相対湿度 %	61.0	62.0	63.0	65.0	68.0	70.0	71.0	71.0	70.0	65.0	63.0	61.0

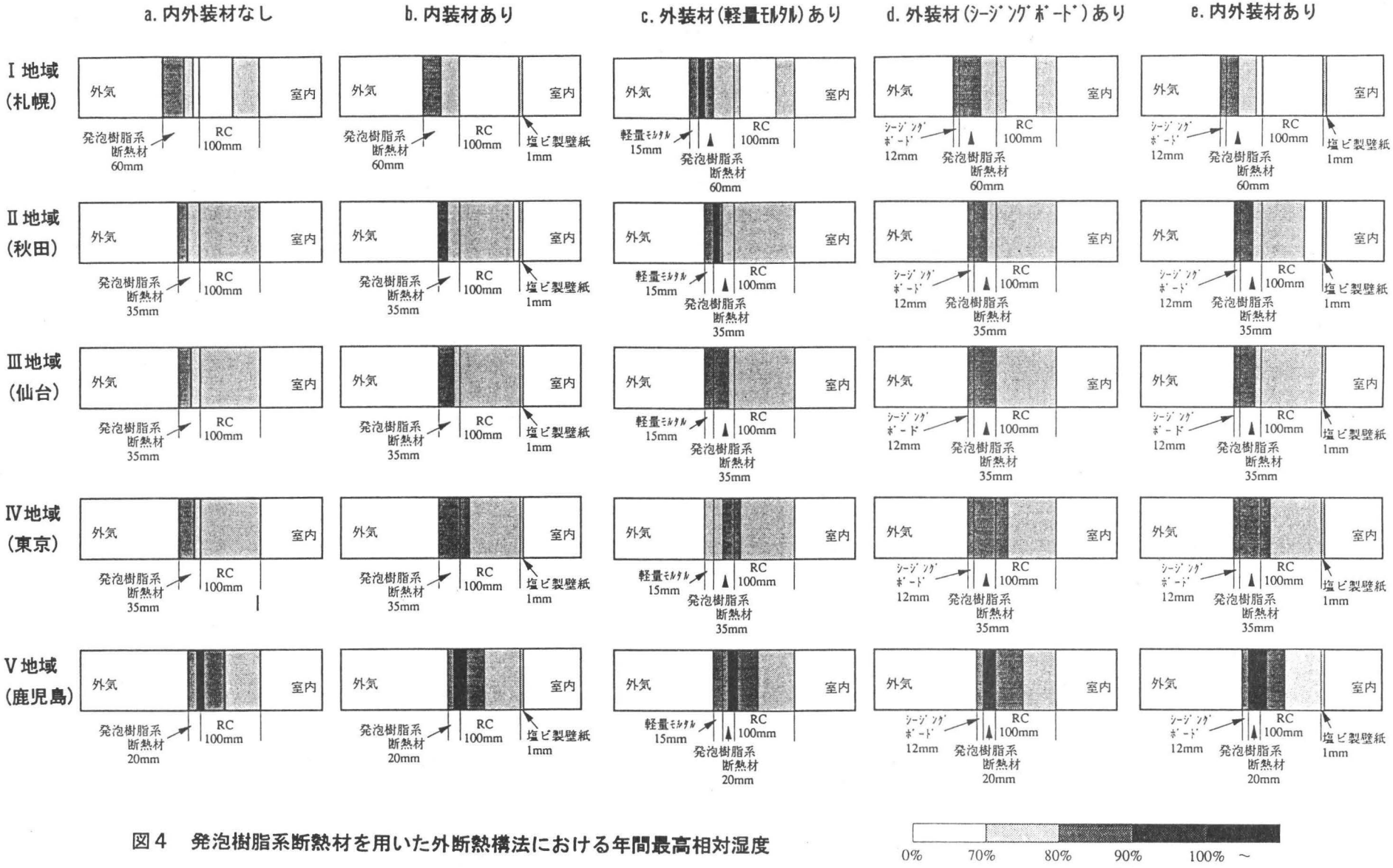


図４　発泡樹脂系断熱材を用いた外断熱構法における年間最高相対湿度

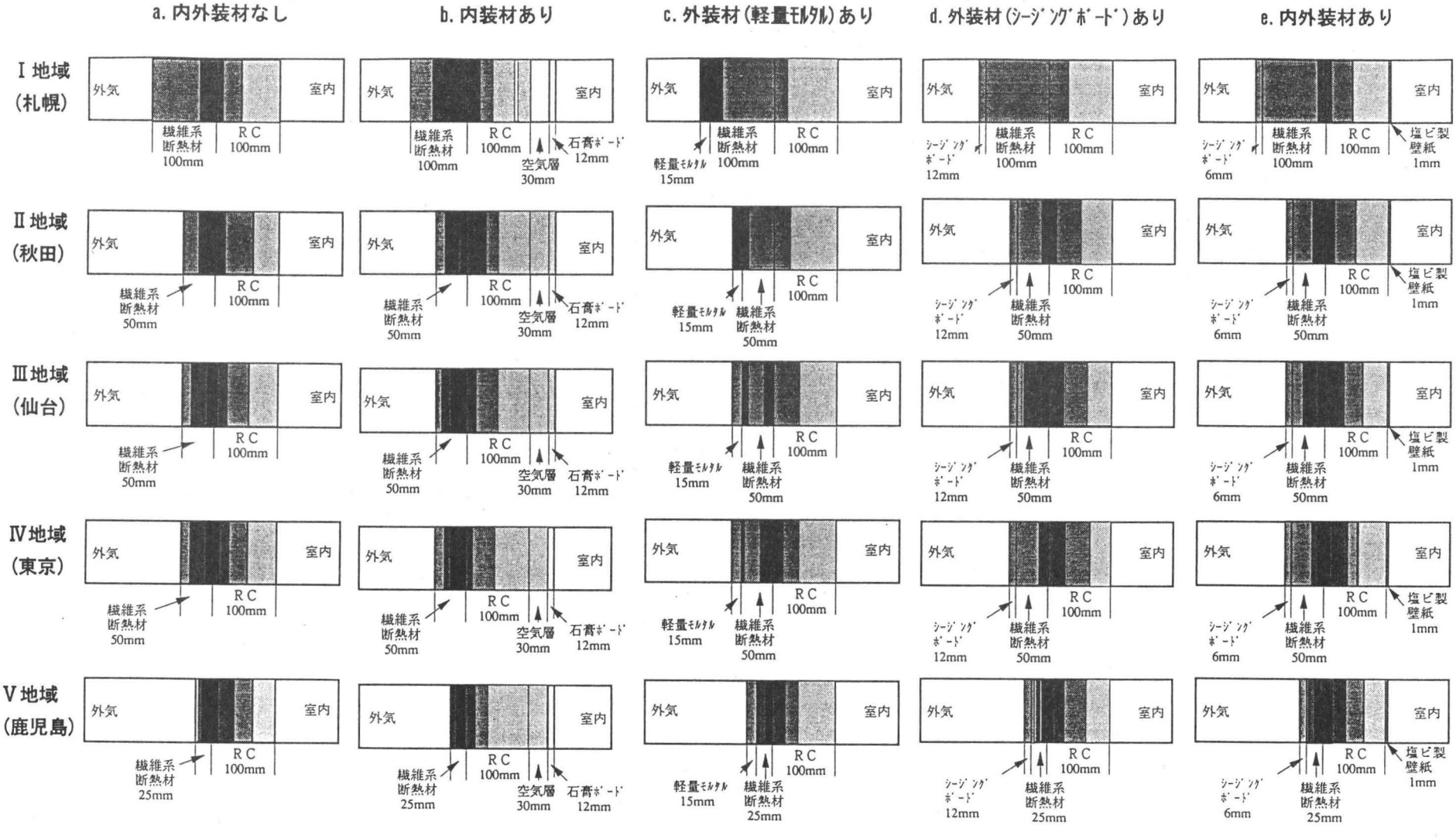


図５　繊維系断熱材を用いた外断熱構法における年間最高相対湿度

1－10　高断熱高気密在来木造住宅の合理化オープンシステム工法の研究

室蘭工業大学建設システム工学科
助教授　鎌　田　紀　彦

1．研究の目的

在来木造工法の熱的な性能向上を目指した改良工法として、新在来工法を提案し、更に、その省力化工法として、プレカット軸組部材を金物で接合する大工工務店単独で可能なＰＦＰ工法を提案してきた。こうした中で、大工不足、老齢化が一般的に進み、工務店レベルでの人手不足が深刻化している。更に住宅の商品化が進行する中で、大手プレファブメーカーやハウスメーカーによる工務店の下請け化や、省力化パネル工法の部材供給を軸とする大手フランチャイズが進行しつつある。本来、在来木造工法は、地域に根ざした住宅供給システムとして、地域経済の中核を成してきた地場産業であるが、次第に手間受け仕事として労務量提供という地位におち、現在の地域経済斜陽化の流れに飲み込まれようとしている。こうした、本来の住宅供給の地域のネットワークを保持し、経済的に発展するために、従来木造をはじめとする住宅工法がローカルな供給システムを維持しながら合理化、コストダウン、品質の向上を果していくべく、変化していく必要がある。ここで、住宅などのパネルや部材の工場生産が、比較的小ロットで量産効果が大きく得られることに着目し、将来への改良やコストダウン等をもたらす競争原理を保持しながら、地場産業が生産に主体的に参加できる住宅工法システムを研究する必要があろう。本研究は、その為のシステムルールと、それに適応するハードな工法システムを提案する。

2．ＰＦＰ工法トータルシステム

在来木造工法は軸組工法であり、部品化に当たっては、軸組を単独で部品化するか、床や壁等の面的な部位と複合して部品化するかが大きな選択肢である。しかし、生産や輸送、建て方の工程で部品が大きく重くなることは、生産設備に多額な資金を要し、在来木造のフレキシビリティを大きく損なう可能性が大である。在来木造が平面モデュール910mm（3尺）を基準としたモデュラーコーディネーションが普及していることも考え、図－１のようなサブシステム構成が最も一般的であろう。こうした背景の中で高さ方向の寸法を標準化すれば、在来木造は容易にオープンシステム化が可能となる。図－１は、それをＰＦＰ（PrecutFlame and Pannel）工法としてまとめたものである。全体は８つのサブシステムに分割され、それらは各々のサブシステムがどのように構成されようとも、標準寸法ルールと他のサブシステムとのジョイントルールを守れば、他社のシステムとの互換性が生じ混合使用が可能になる。今回、開発提案した白抜きのサブシステムに網掛けのような別な構成で特長を持ったサブシステムの参入が可能であり、各サブシステム

の中でのメーカー間の競争が生じる。今回、ＰＦＰ工法として定めた寸法ルールは全く単純なもので、３尺平面モジュールに４種類の高さ方向の寸法を定めたものであり、その寸法も合板の製造可能寸法によるもので、普遍性をもっていると考えられる。ジョイントルールは未だ若干の検討が必要だろうが、複数の企業の参入によって、ローカルであってもオープンなシステムとして定着する可能性は大きい。

3．ＰＦＰ工法の基本構成

本工法は、

1．集成材プレカット軸組S/S
2．床S/S
3．外壁S/S
4．間仕切耐力壁S/S
5．屋根S/S　　（図－２参照）

の五つによって構成される。

集成材プレカット軸組S/S は、土台15種類（１Ｐ～４Ｐ）、大引８種類（１Ｐ～５Ｐ）、柱31種類、梁31種類（２Ｐ～６Ｐ）の85種類から構成されている。（ただし１Ｐは 910㎜）

床S/S は、基本的には1820×910㎜の24㎜合板で、場所によっては４種類で構成されている。

外壁S/S は、外壁パネル13種類、開口パネル30種類、妻パネル13種類の56種類で構成されている。

間仕切耐力壁S/S は２種類で構成されている。

屋根S/S は、小屋パネル、屋根パネル合わせて３種類で構成されている。

よって本システムは、150種類の部品で構成されている。

この５つのS/S を各々単独に採用することも、もちろん可能である。しかし基本には、

A．軸組S/S ＋床法S/S
B．A＋外壁S/S ＋間仕切S/S
C．五つのS/S 全ての採用

のパターンが考えられるであろう。

Aは省力化の程度が低くなるが、コスト的には安くすみ、自由度は大きい。又、A、Bに関しての平面計画は、３尺グリッドを守れば、どんな平面構成も可能で、クレッテク金物の取り付け穴を現場施工すれば、サブグリッドの 1.5尺にも対応できるものとなっている。（図－３参照）Cは、５寸、10寸勾配の切妻屋根で屋根断熱という構成となり、図－５に示すように屋根のバリエーションは全部で24通り考えられる。平面形状は矩形に限定される。（図－４参照）この構法のすばらしい点は、上記１～５のように各ユニットとなっており、それぞれが独自に機能するようになっており、他社のシステムとの併用が可能な点にある。（図－１参照）これによって従来行われてきたクローズドシステムとは違い、広く誰にでも、どこの部分でも使用、併用可能な、オープンなシステムであるといえよう。今後この構法との互換性を持った他社のシステムの登場が、本構法をよりオープンでよりよいものにするであろう。

4－1　ＰＦＰ工法の断面寸法

本システムは階高寸法として、基本的には2,940㎜と、2,730㎜の２種類の寸法に対応する柱及び壁パネルの部材が用意されている。2,400㎜の標準の天井高に対して2,940㎜では、梁下に264㎜の寸法があり梁下にダクト配管を施工できる。又、2,650㎜程度の高い天井も作ることができる。梁下をくぐる配管がない場合は、2,740㎜ので構成できる。この他に、窓上端高さを約2,000㎜ として妻壁を構成している部材を利用して、図７左下のような２階の外壁高さの低い構成も　可能で、この場合、屋根は標準５寸屋根S/S を構成すれば、平均天井高を十分取れ、傾斜天井の変化のある２階が構成できる。又、10寸屋根S/S には 910㎜の腰壁を用意し、小屋裏三角屋根を有効に利用できる空間構成を可能にしているが、この場合、控壁等構造上の注意が必要であろう。図８に示すように、色々な組み合わせの階高構成が可能であろう。

4－2　構造用木材と軸組金物（クレッテック金物）

軸組用の木材は、グルーラムを用いている。日本の普通の構造用集成材よりもラミナーが厚く、積層数が少なくコストが安い。金物のボルトのゆるみをさけるため、芯まで乾燥して、寸法精度の良い木材として集成材を採用しているが、むく材でも乾燥が十分であれば、使用可能であろう。乾燥工程を吟味して、ボルトのゆるみが生じない限界を探る必要があるが、この方が更にコストが安くなる。将来的には、間伐小径木の角材の積層木材なども検討している。

接合金物はクレテックを用いている。柱に金物を取り付ける作業は少しやっかいではあるが、梁との接合は、ドリフトピンだけで可能で、引き寄せの機構を持ち、工夫に富んだ金物である。しかも、このような金物としては安価であることが魅力である。住宅気候研究所で開発、改良した金物も含んでいる。軸組S/S としては、そのシステムの中で完結的に全く別な金物を適用することも可能である。ＰＦＰ工法と互換性を持つ全く別な、軸組S/S の登場も可能であろう。

図－６は、クレテック金物と今工法使用金物一覧である。クレテック金物は、厚 3.2㎜亜鉛鉄板製の軸組金物であり、比較的安価で、誰でも手にいれることのできるオープン金物であることに大きな利点がある。

5－1　各部位詳細（一階床組）

布基礎の上に置く土台と、同寸の大引きによって１階床組を構成する。土台、大引き、柱、等の相互の結合を図－９に示す。

基礎、土台、大引は基本的には３尺モジュールに対応しているが、長さが 910㎜×1.5 、2.5、3.5 の部材も用意し、サブモジュールとして 455㎜にも対応できるようにしてある（図－21）。但しこの場合、クレテック取り付け穴は現場加工となる場合がある。

また、２階床組については、基本的には、１階床組と同じである。

土台は偶角部を呼び寸法 455㎜の部材で構成した後、その間を長さ 910㎜×ｎ（1.5　2.5・・・）の部材でつなぐ。

長さ 910㎜×ｎ－105㎜の部材も用意されているので、455㎜モジュールの土台割り付けは全て可能である。

床パネルは、大引きと土台でつくられた 910×1820㎜のグリッドの上に、24㎜の合板をのせる。柱の内々にパネルをはめ込むことになるので、４種類の寸法バリエーションがある。（図－10中Ａ、Ｂ、Ｃ、Ｄ）

24㎜の合板は試験施工では、敷き込み後、中央部の凹凸が若干生じた。今後、改良が必要となろう。

5－2　柱、梁の構成

柱は階高寸法に対応して基本寸法4種、更に各々梁受けと 240㎜短い梁下柱がある。基本的に梁下柱は、上下にほぞパイプ用の穴があり、梁受け柱の上はほぞパイプとクレテック用の穴、下はほぞパイプ用の穴がある。梁は 105×240㎜を基本とする。但し、大スパン用に 105×300㎜も用意されている。これらの梁は、仕口が全てクレテック用に加工しており、一部穴にドリフトピンをいれた後に、クレテックに上から落とし込み、残りの穴にドリフトピンを入れ接合するようになっている。

5－3　壁パネルの構成

外壁パネルには一般の外壁パネル、電気ボックス用外壁パネル、開口部用パネル、妻壁用パネル、それに開口部補足用パネルがある。

パネルは木枠の両面に 7.5㎜の構造用合板を貼ったパネルとなり、外側の柱の外面の上に釘止めするつばがあり、内側は柱、梁と同面になる。室内側は、石膏ボードを貼って仕上げるのが標準であるが、若干のサンダ仕上げで直接クロスを貼ることも可能性があり、何も仕上げないでクリア塗装をすることもできる。

外壁パネルの断熱材は細繊維グラスウール16K（厚さ 100㎜）を使用している。幅は1P（3尺）を基本とし、0.5Pもある。

基礎上に配置された外壁パネルは壁倍率 2.5倍の耐力壁として計算できる。又、内側からも構造用合板を柱にうちつけると壁倍率5.0倍の耐力壁として計算できる。但し、0.5Pの外壁パネルと開口部パネルは耐力壁に算入出来ない。また、間仕切り耐力壁パネルも別に用意されている。

5－4　小屋組（切妻屋根）

一般在来軸組構法に準じ、小屋梁、棟柱、棟木、登り梁等で構成し、屋根勾配は5寸と10寸の2種類である。

登り梁は105×240㎜の構造用集成材を用い、登り梁間隔は1820㎜となるように配し、断熱材入り小屋パネルを張り、屋根断熱とする。小屋パネルは27㎜×125㎜の製材、厚さ7.5㎜の構造用合板、断熱材（B類3種に押出発泡ポリスチレン）とによって構成され、基本パネル寸法は2P×1Pに統一した。短辺、長辺とも気密パッキンの付いたフランジがでており、短辺は登り梁との結合部、長辺は次のパネルとの結合部としこのラインを気密層とする。

登り梁と棟木との継ぎ手はジョイント金物（図14－1）、桁、柱との継ぎ手はホゾパイプを用いる。また、妻壁パネル両端の斜めカット柱においてクレテック金物との接合はマークアンカー（図14－2）を用いる。

小屋パネルの割付けは、桁、棟木において面戸ブロック、頂部ブロックを小屋パネルの受け材として面戸ブロックより（図14－3）下のパネルにフランジが被るように張り、頂部は図14－4で示すように現場カットにて調整する。面戸ブロック、頂部ブロックそれぞれに予め気密パッキンを張り付ける。

5－5　小屋パネル

標準屋根S/S を採用しない場合、小屋梁の上に屋根パネルを水平に敷き込むことで、天井断熱層と小屋組を施工する場合の簡易足場を構成することができる。

小屋パネルは基本的に切妻屋根と同様であるが、小屋梁の幅、フランジの出を考慮し、スタート、センター、エンドパネルの３種類を用いる。割付は図で示すように、両端にスタート、エンドパネル、間にセンターパネルを隣のパネルに長辺のフランジが被るように配置する。小屋梁との接合は切妻屋根と同様に小屋パネル短辺のフランジと22.5㎜×50㎜の受け材を用いる。

6．ＰＦＰ工法建て方工程

工程１

まず、土台にアンカーボルトの位置だしを行い、穴を開け、あらかじめ必要な接合金物を全て取り付ける。土台の下に気密パッキンを敷き、土台、大引を設置する。土台はマークアンカーにて、締め付ける。

工程２

受け材取り付け後、ネダボンド併用木ネジ打ちで床パネルを木ネジ@ 150㎜にてとりつける。内部で柱がくる場合、床パネルを欠き込むこと。

工程３

床の施工は外周に受け材を土台と同じレベルで取り付け、木ネジにて床パネルを取り付ける。内部単独柱がくる位置では床パネルを欠き込む必要がある。あらかじめ接合金物を取り付けた梁受け柱、梁下柱を土台に指定された位置に差し込み、ドリフトピンでとめる。

工程４

あらかじめホゾパイプ、クレテック金物をとりつけた胴差、床梁を設置し、ドリフトピンでとめる。

工程５

１階壁パネルと開口パネルを設置する。（但し、壁パネルは作業の進行上、後での施工も可）

工程６

１階と同様に、床受け材、床パネル、柱、桁梁、床梁、壁パネルの順で施工する。（この時、桁梁の登り梁のかかる部分には、直交ほぞピンをとりる。

工程７

棟柱と、棟梁の登り梁のかかる部分に、ジョイント金物を取り付けておき、登り梁を設置する。

小屋パネルの受け材である頂部ブロックと面戸ブロックを取り付け、パネルを下から施工する。頂部は切断の上、発泡ウレタンを吹き付け気密する。

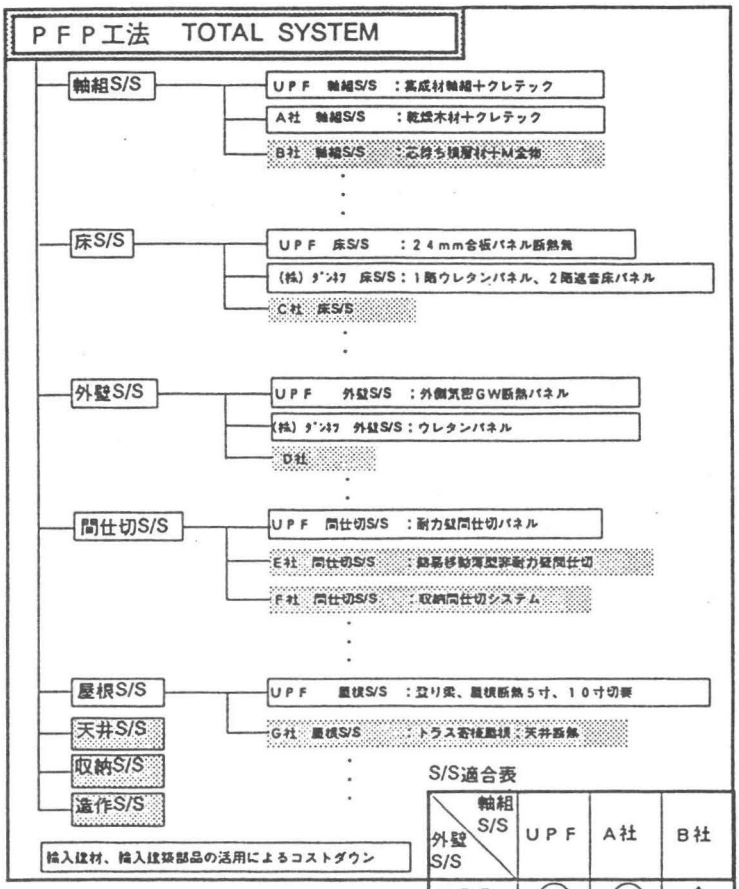
7．終わりに

海外との住宅価格差の問題が論じられ、日米の労働生産性格差が原因のごとき議論がある。労務費の差は価格差の10％以下しか占めていないことは明瞭ではあるが、日本の戸建住宅の50％以上を占める在来木造の合理化はいずれにせよ進めなければならない。その訳は、大工の所得向上やそれによる若手大工の育成、又、合理化工法と同時に、住宅の熱性能の向上、耐振性能の向上

等が現時点での大きな動機づけとなっている。

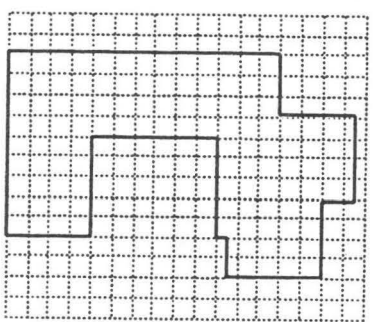
20年以上も前に導入された2”×4”工法は今ようやく合理化工法への転機が始まっている。在来工法もまたしかりである。

今回のＰＦＰ工法の提案は軀体の部品化、システム化、オープンシステムによる部材供給に主眼が置かれ、その現場作業の省力化効果は、約50％程度ある。今後このシステムが展開するにつれ、内装工事の合理化も取り込み、現場労務量を約１／３程度に抑えることが可能となろう。その為に、このシステムの熟成と普及を図ることが必要である。



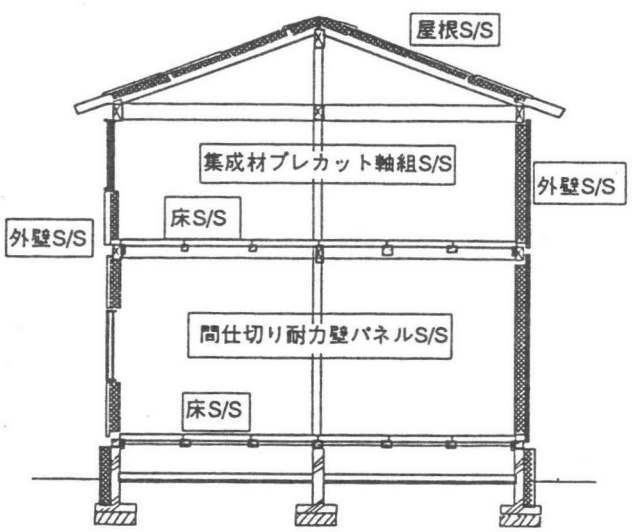
図－１

3尺グリンドを守ればどんな平面構成でも可



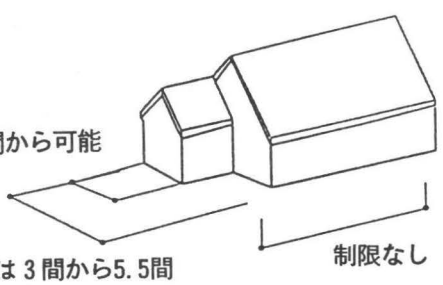
一目盛り＝三尺

図－３　屋根を現場施工とする場合



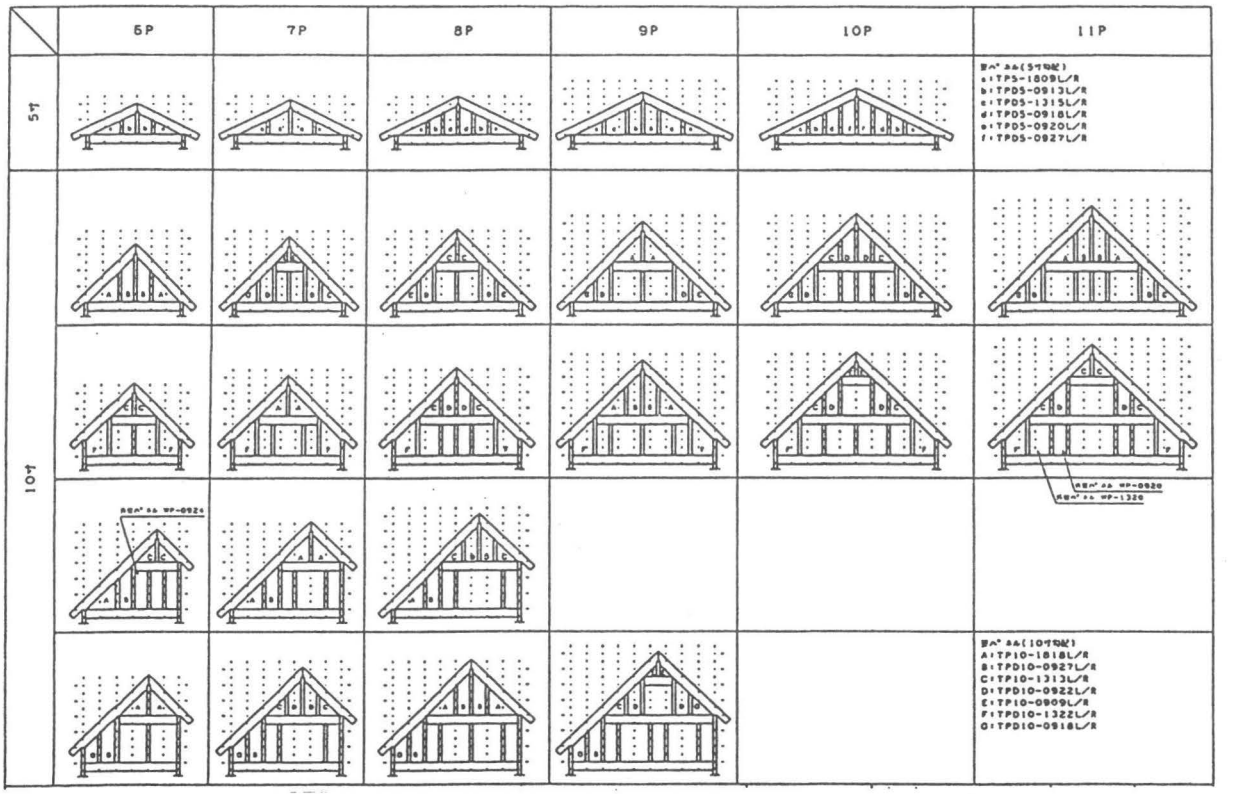
図－２　基本構成

屋根は５寸または10寸勾配切妻

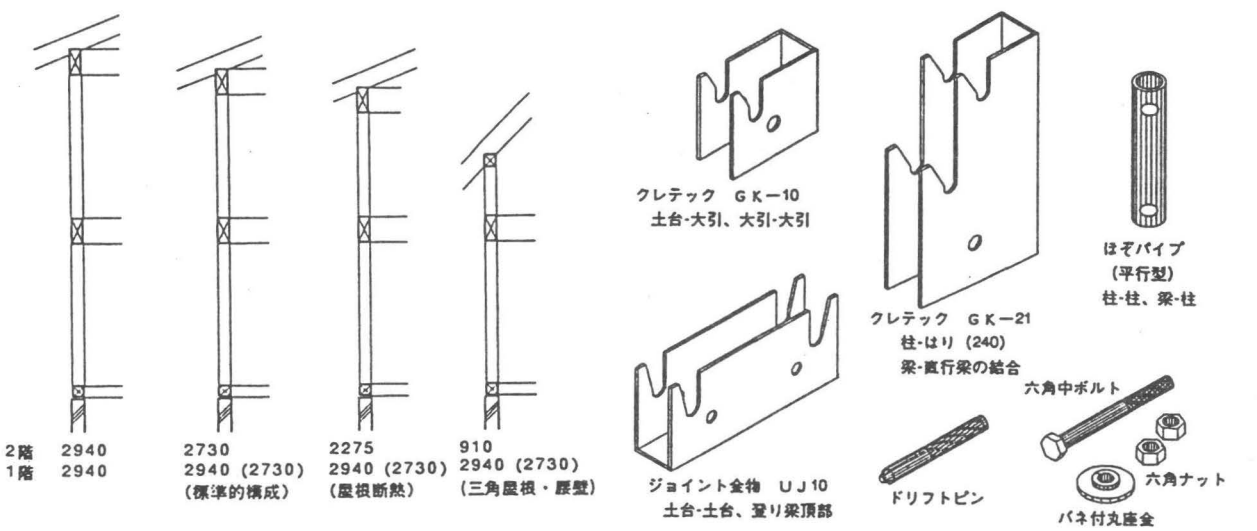


スパンは３間から5.5間

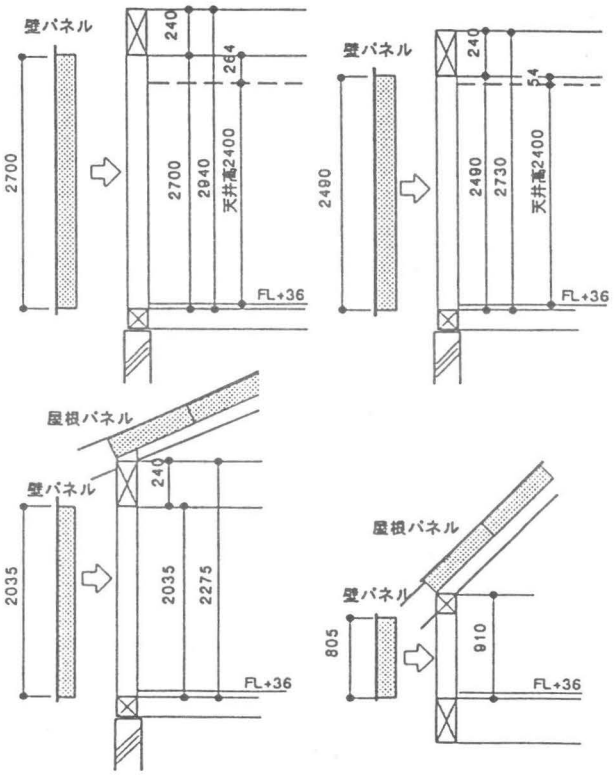
図－４　標準屋根S/Sを採用した場合



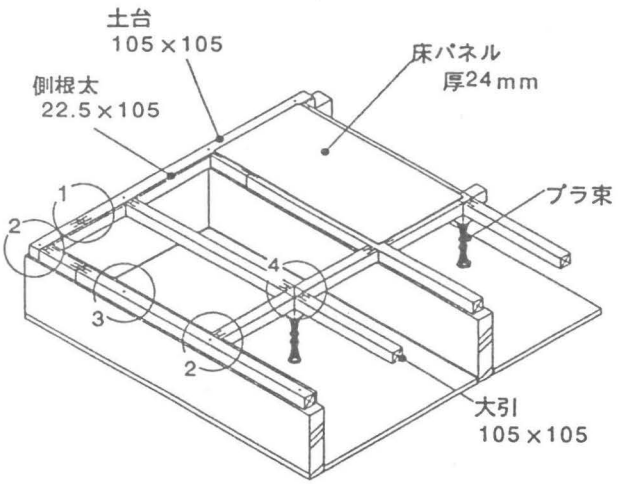
図－5　標準屋根Ｓ／Ｓによる小屋の構成と妻壁割り付け



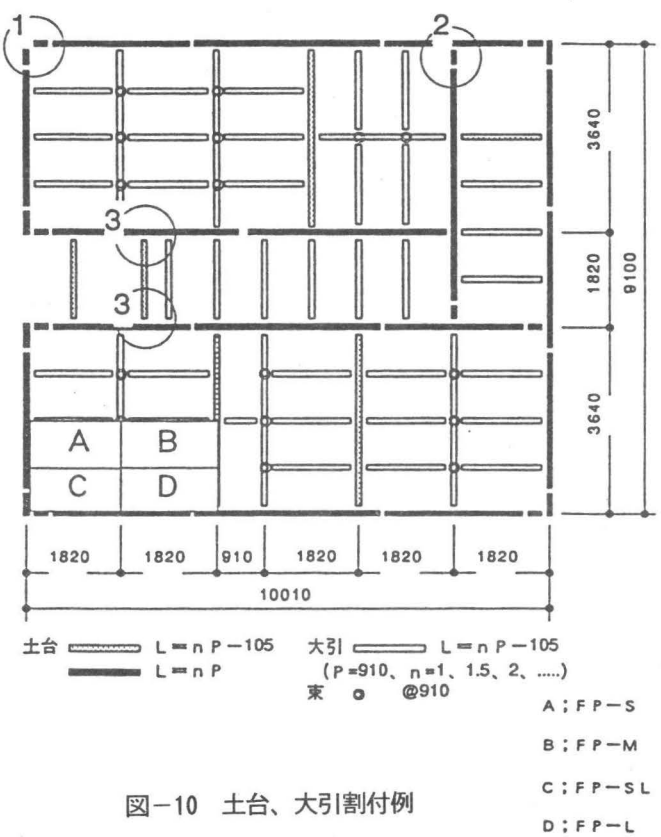
図－6　クレテック金物一覧



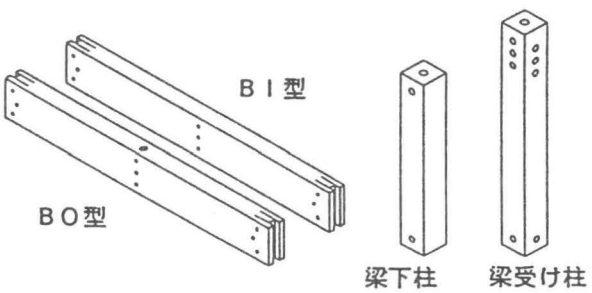
図－7　ＵＰＦＰ工法の断面寸法(1)



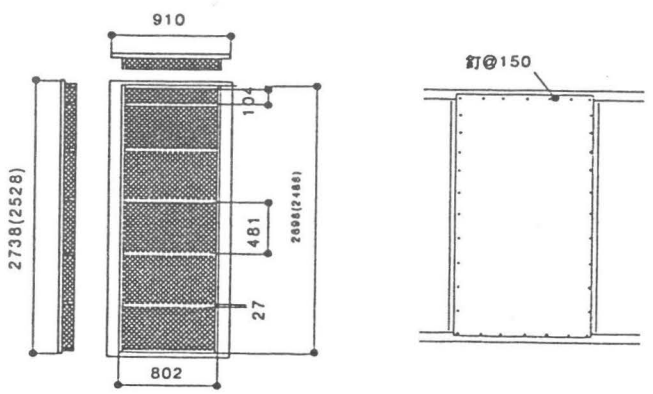
図－9　１階床組の構成と詳細



図－10　土台、大引割付例

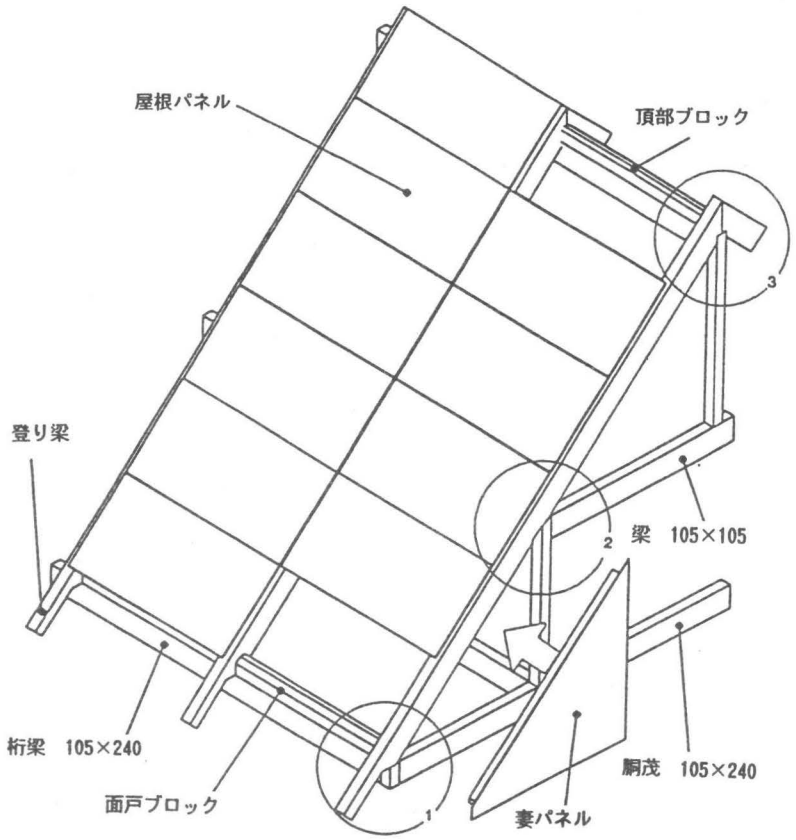


図－11　柱と梁部分の基本形状

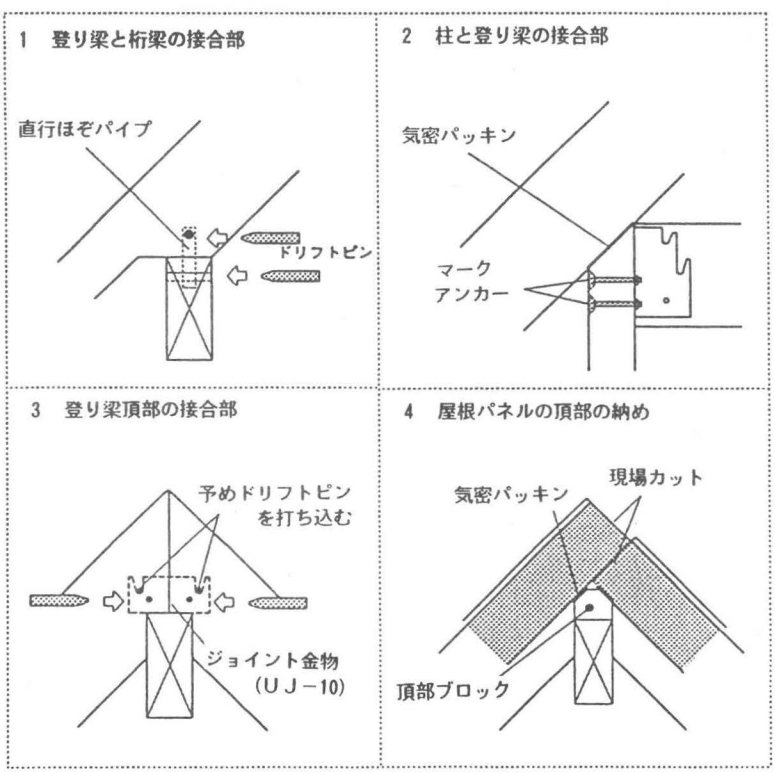


外壁パネル図　　外壁パネル見付け図

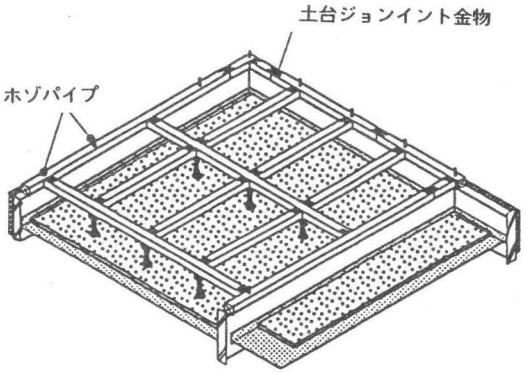
図－12　外壁パネル



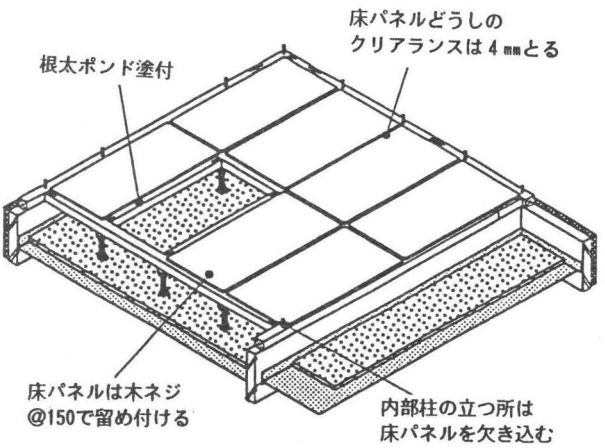
図－13　標準屋根S/Sの構成と詳細



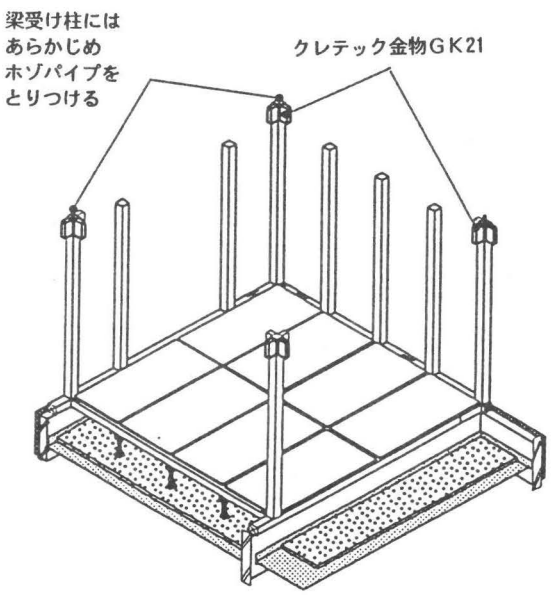
図－14　各接合部詳細



工程１　土台、大引の施工

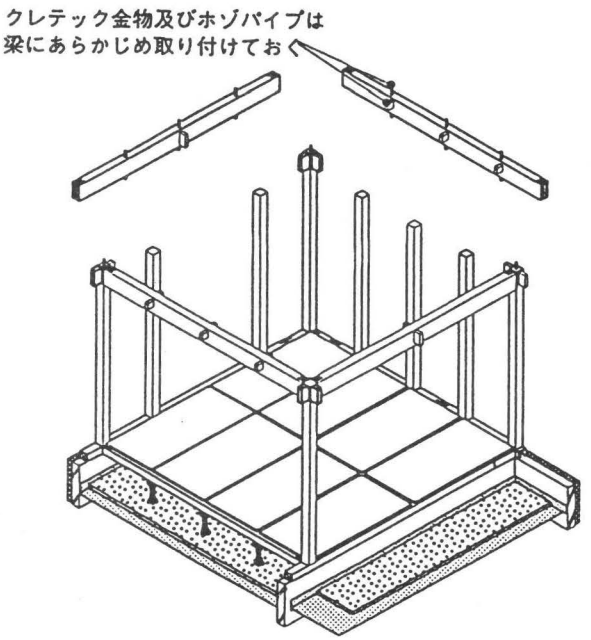


工程２　床パネルの取付



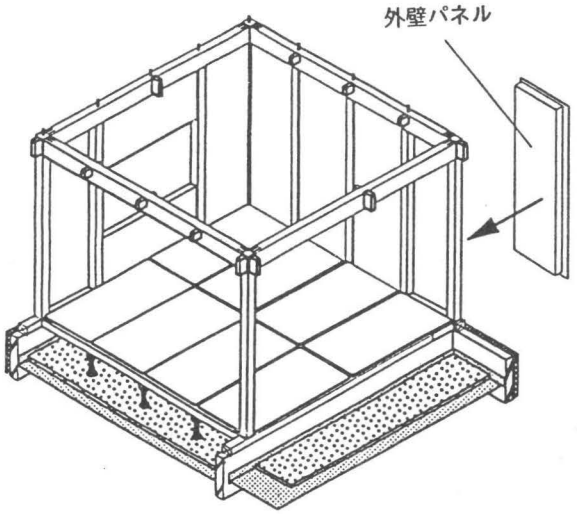
工程３　柱建方

工程３

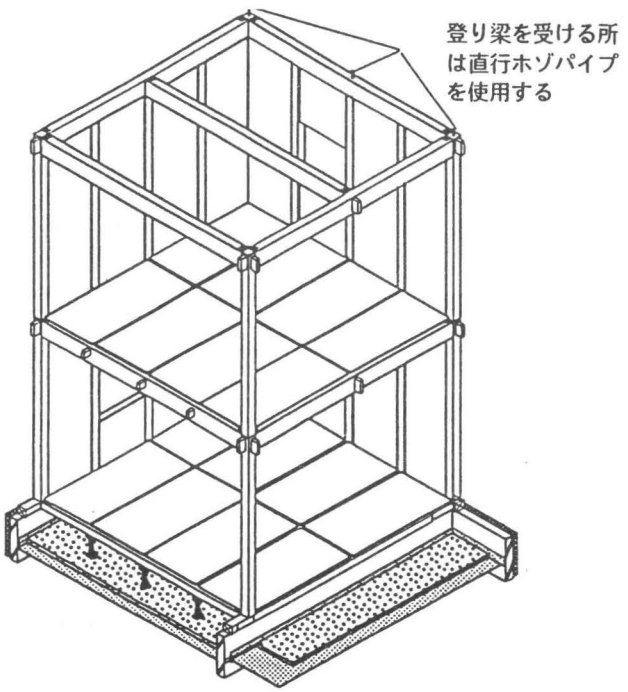


工程４　梁　はめ込み

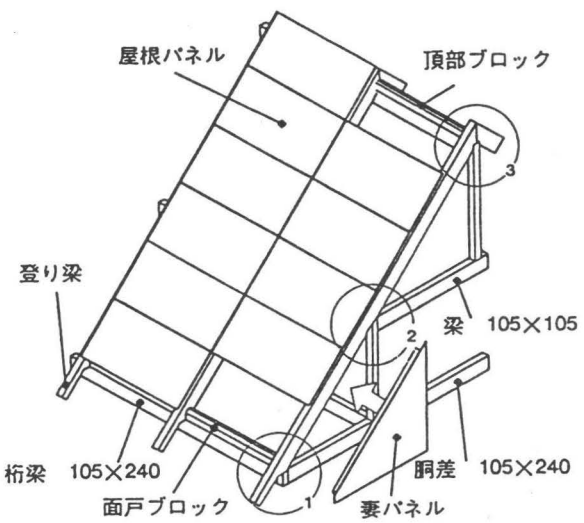
工程４



工程 5　　外壁パネル取り付け



工程 6　　床パネルの施工



工程 7　屋根、妻パネルの施工

1－11　国産材生産と地域住まいづくりのリンケージに関する研究

京都大学工学部
助教授　東樋口　護

1. 研究の背景と目的

我が国の木造建築は近世まで、国内で生産された木材を使用し、地域の大工・職人によって住宅や社寺仏閣などとして生み出されてきた。そこには、木材の産地から建築現場まで一種の地域内完結型のつながりがあり、需要と供給のバランスが保たれてきた。山側では、木の伐採と成長の調和的循環があり、住宅生産などの木材消費側では、山側の幾林サイクルと同じ周期で、建て替えが行われた。

現在、特に戦後の住宅難時代以降、生産さる住宅棟数は増加し、国産材の生産量以上に需要が伸び、外材への依存が必要不可欠となっている。我が国で消費される用材の７割は、北米やロシア、東南アジアから輸入される外材で占められている。その安い外材輸入により、国内の林材業は、急速に衰えており、既存の調和的つながりが保てなくなっている。また、住宅生産の側でも、プレハブ住宅やツーバイフォー等の新工法の導入、在来構法の担い手である大工の高齢化・人材不足、機械道具の導入など、国産材を利用できる環境が崩れつつある。今日、山林保全への危機、地域のアイデンティティの喪失などが懸念されている。

しかし近年、山林保全、国内林材業の活性化、地域産材の活用等の観点から、外材に依存している現在の状況を打開する、新たな川上・川下のリンケージが模索する動きがある。国産材供給の安定化、木材流通の合理化、住宅生産における国産材利用の増大、住まい手と木材生産者とのネットワーク形成など、様々な試みがようやく始まったところである。

本研究は、このような国産材生産と地域の住まいづくりとのリンケージに関わる様々な試みの事例を取り上げ、そこでの国産材利用の現状について分析し、国内の森林資源の有効的・持続的活用と、同じく国内での住宅生産における国産材利用の可能性と課題について考察することを目的としている。

具体的には、既存研究、統計資料、現地ヒアリング調査に基づいて、これまでの木材生産・流通・消費の状況、新たな「林・住リンケージ」の事例における国産材利用状況・経営状況・住宅生産側とのネットワークなどの成立条件について明らかにするとともに、それらリンケージの類型化を行い、今後、国産材を活かしていく上で各「林・住リンケージ」タイプの可能性と課題について検討する。

2. 木材を取り巻く現状

現在、我が国の森林資源は決して少なくない。全国の森林面積は 2,521万ha、林野率67%で、林野率は主要な木材輸出国の中でも東南アジアの国々に次いで高い。しかし国内で消費される約1億㎥の木材のうち75%を外材に依存しており（1992年）、その依存率は徐々に上昇している。1991年には丸太輸入で世界貿易量の約4割を占め世界第一位の輸入国となっている。その一方で国産材は、年々そのシェアを減少しつつある。特に1980年前半は、木材需要が大幅に落ち込み、急激な円高の影響を受けて、木材市況が低迷し、木材加工や木材流通が長期にわたって経営不振に陥った。

このような現状には、国内での素材生産、製材、木材流通、住宅生産が、それぞれに厳しい現状と問題を抱えていることに依っている。その主なものは、

素材生産：従事者の高齢化・人材不足、中小零細経営の多さ、木材の投機的販売

製　　材：中小零細経営の多さ、機械化の導入

木材流通：複雑な流通機構

住宅生産：大工・工務店の技能低下・人材不足、新工法の導入による在来構法の衰退

である。また外材の輸入によって、国産材価格が低下し、それまで成り立っていた経営が成り立たなくなったというのも、大きな要因と言える。特に米材は、国際的な木材価格を低下させる大きな要素となり、国内にも反映されていると言われている。

これまであった川上と川下のつながりは、現在、様々な要因によって分断されており、森林資源の有効かつ持続的活用を行う上で、また建築における木材利用を促進する上で、大きな障害となったいる。今後、山林保全や森林資源の有効活用などを考える上で、既存のしくみにとらわれないシステムや、木に対する再評価、川上と川下のネットワーク形成が、重要な課題なのである。

3. 林住リンケージ事例

我が国では、森林資源の活用のほかに、治山治水の観点から、山林保全に多額の補償金を出し、林業を保護してきた経緯がある。そのため、今日の林業は、零細規模の林家が多く、林業経営も行政などの補助なしには考えられなくなっている。また、現在その林業をはじめ、木材流通、消費者である、大工・工務店、建築主に至る、木材の流れをみると、必ずしもうまく言っていない。近年、新たなネットワーク形成を試みる事例が各地で生まれ、既存のシステムとは異なった形で、木材、木造住宅の供給を行う動きがある。

本章では、新たな試みとして各地で行われている「林住リンケージ」のいくつかの事例を元に、今後展開可能と思われる「林住リンケージ」システムについて考察してみたい。特にここでは、素材生産から住宅生産へという流れの中で、新たな試みを行っている5つの事例を取り上げ、各事例について現状と問題点について分析する。

事例1「京北プレカット㈱」

京都府北部および中部は以前から林業の盛んなところであった。現在4つの木材市場を中心に近畿圏を中心に木材を供給している。その京都府林業の中心の一つ、京北町では、10年ほど前から、町内の林業振興のため、まず、町内にプレカット工場をつくり、製材品を最終消費段階であ

る柱・梁材に加工して付加価値を付け、販売することを計画した。その具体的な形として、平成3年に京北町及び京都府、京北町森林組合、京北町内の工務店などの出資して、「京北プレカット株式会社」が設立された。さらに需要層拡大、京都府下への流通経路の確保のため、平成6年に、全京都府建設協同組合との業務提携を結び、組合に所属する大工・工務店、建設会社へのプレカット材供給を開始した。現在、10名の従業員が、約 6,200㎡の敷地にある管理棟、作業用建物、製品保管倉庫等で働いている。

この工場には、プレカット加工機械、乾燥機、「モルダー」と呼ばれる多面かんな盤などがあり、それらをコンピュータが制御している。一日当たりの加工能力は45坪である。

第4期（平成6年8月から平成7年7月まで）の稼働状況を見ると、加工実績は 208棟、延べ床面積 7,364坪（平均 35.40坪）、一日当たりの平均加工量は約28坪、稼働率は約60％となっている。

加工する製材は、製材品市場から仕入れるか、もしくは注文側が自前で製材を持ち込んでいる。そして、それらを注文に応じて、プレカット工場で加工し、引き渡している。全京都建設協同組合所属の大工・工務店からの注文は、一度組合に送られ、ＣＡＤで入力し、そのデータをプレカット工場に送って、加工を行ってもらう。第4期における木材使用量とその内訳、さらにプレカット材の納入先は、以下の通りである。

プレカットによる人工の削減は、大きなメリットである。ある資料によると、製材品の下拵え、軸組部分の加工、造作部分の下拵え・取付に要する人工数は、伝統構法で 4.9人／坪、在来構法で 3.7人／坪、ツーバイフォー工法 2.7人／坪、木質プレハブ 1.2人／坪であるのに対し、プレカットでは 3.1人／坪となっている。従って、建築面積20坪、2階建ての住宅では、延べ人工数で24人の削減になる。組合に所属する大工・工務店へのヒアリングでも、工務店内で人手が足らず、日程的に工事完了が難しい時に、プレカットを使用するとした意見がほとんどであった。

プレカット工場で使用される国産材は現在26％で、外材は74％である。国産材の利用、特に京都府や流域の地域産材の利用が少ないのは、主に小径材が多いことによる。したがって、国産の杉、桧は、柱材や化粧材といった、横架材以外に利用される。また製材工場でも、これら国産材よりは大径の外材の方が、製材しやすく、乾燥の点でも外材の方がよい。また会社で試算された構造材の価格をみても、価格面でも、国産材の方が高くはなるが、材の質等を考慮すると、どちらがよいかは一概には言えない。

また、会社経営を考える上で、組合や町等からの補助金に大きく依存している点も留意すべき点である。現時点で、仮に補助金が支給されなければ、減価償却費の増加、支払利息の増加で、経営が成り立たない。

現状をみる限り、プレカット加工は順調に行われ始めたが、まだプレカット材利用のための環境が整っているとは言い難く、林材業、大工・工務店においてプレカット加工を現状打開の有効な選択肢としての認識がなされておらず、その準備も十分ではない。林材業おいては、素材の安定供給や乾燥率の向上、製材工場での製材精度の向上、大工・工務店においては、プレカット加工に関する知識の普及、ＣＡＤ等による部材情報伝達手段の普及が課題である。さらに大工や設計者が木造住宅のデザインや施工で各自のこだわりを持ち、その中でプレカット材の有効利用を行うという面も必要である。

事例２「ＴＳウッドハウス協同組合」

徳島杉を利用した「ＴＳウッドハウス」は、徳島に若手林業経営者グループ「徳島林業クラブ青年部」が中心となって葉枯らし乾燥を行った原木を生産し、徳島の建設会社及び工務店、大阪の設計事務所がそれらの原木を利用して家づくりを行うネットワークである。木材供給側は、各々会社を経営する５名で構成され、徳島県海部川の上流、剣山の南東部で葉枯らし材を生産している。

徳島杉の葉枯らし乾燥材は、３ケ月ほど枝葉を付けたまま乾燥させた木材は葉を落として寝かした木材より乾燥されているが、それでも60～70％という含水率であるため、製材後、ストックヤードで桟積天然乾燥を行い、20～35％ぐらいになるまで乾燥を行う。平成７年度の実績で年間１万㎥の葉枯らし乾燥材が生産された。これらの材は、組合のストックヤード（90坪の倉庫と２棟と作業所１棟、３ケ月分のストックが可能）に一度ストックされ、その後、原木市場に出荷される。生産された乾燥材のうち、昨年度ＴＳウッドハウスとして利用されたのは、480㎥であった。

480㎥の原木は、240㎥の製材品に加工され天然乾燥させた後、施工担当のメンバーに引き渡され、計６棟（１棟当たり40㎥）の住宅が建設された。

ＴＳウッドハウス協同組合の大きな特徴は、施工・設計側と素材生産側がネットワークを結び、住宅などの建築に適切な木材を生産している点である。これを可能にしているのは、双方が「よりよい木造住宅を」という意識が高いことと、それを具現化するために双方で情報交換や研究会を行い、また研究者との協同で調査・実験を行うといった実行力と実績による。また、住宅設計（大阪の設計事務所が担当）においても真壁づくりを採用し、在来構法を行える徳島の大工・工務店が行う。さらにエンドユーザーである住まい手が実際に使用される木材を立木で見ることができるよう配慮しているのも注目される。

現在のところ、葉枯らし乾燥材は、ふつうの原木より1000円／㎥程度高いだけで、１万㎥の葉枯らし材を生産しても、それにかかる経費などを考えると、大きな増収にはならない。しかし、当グループでは棟数を現在の５倍、30棟／年（原木で約 2,400㎥）としたいと考えている。

始動して１年目ではあるが、ＴＳウッドハウスの事例は、葉枯らしによる付加価値を高めた木材生産、地域の工務店や設計事務所、住まい手との提携、木を生かした住宅生産を行おうとしている点で高く評価できる。

事例３「雑木利用～甲佐町森林組合とＹ工務店の試み」

針葉樹以外の木材は慣習的に「雑木」とよばれるが、その中で国内の広葉樹を建築用材として利用しようという試みが、熊本県甲佐町森林組合と京都のＹ工務店との間で行われている。

雑木は元々用材として利用されることは少なく、欅や栗、桜などが玄関や敷居などに利用されたり、また茶室の化粧材（一部構造材）として利用される程度で、いわゆる「数寄」的要素として利用されてきた。甲佐町の雑木も用材として利用されることはほとんどなく、パルプ材が高騰した時に補塡材として製紙会社が買いに来たり、また炭鉱の坑木や薪炭用に市に出荷したりする程度であった。

雑木は含水率が高く、また乾燥もしにくいため、建築用材として利用するためには、どうしても伐採時期や乾燥が大きな問題となる。また山の水が上がる夏場のに出荷するのは難しく、冬場の出荷がメインとなる。

Y工務店と協同してまず取り組んでいるのは、広葉樹を利用した「セカンドハウス」である。従来の杉や米松を利用しながらも、根絡み貫、タルキ、根太、土台、梁、母屋、束柱、柱など構造材を計約8㎥の材を広葉樹で置き換えることを検討している。

現時点での問題として、広葉樹で母屋、柱などの長材を確保できるかどうか、また広葉樹を製材する際の歩留りが悪いので木材費がどの程度になるか、さらに仕上げ加工に要する人件費がどの程度かさむか、などがある。しかし広葉樹の利用は、国産材活用の一つの選択肢として十分に可能であり、そのための試みを行う本事例は、そのさきがけとして評価することができる。

事例4「吉野銘木」

吉野（ここでは主に吉野川森林計画区を指す）では、これまで杉、桧の銘木を全国向けに供給している。農林業センサスや林業統計などの統計資料により奈良県の林業特性を分析した福本の研究論文でも「人工林率が高く、林業地域として成熟した地域」で「木材加工の主要地域」でもあるとし、「生産・加工・定住の3機能が揃った地域である」と述べている。この地域の林業の特徴は、このような成熟した林業地域という森林資源を生かした「銘木」の生産にある。国内林業が全体的に低迷する中で、吉野は一定水準を保った経営を行っている。

しかし素材生産量は一定しているものの、主伐材の割合が減少し、間伐材の割合が増えつつある。これは、木材価格の低下で林家が大径材を出荷するのを見合わせるなど、林家の意図が働いていることも要因の一つである。このような投機的な木材販売ではなく、健全な会社経営を行おうとする、吉野で銘木販売を行っているY会社では、現在のところ、会社で所有している山は260haで、徐々に拡大しているところであるが、この山にある木は、最長で80年生の木なので、あと20年はほとんど出荷できない状況にある。銘木として、利用している材は、素材市場からの購入によって確保しており、さらに特別な注文を受けたときには、直接林家から買っている。銘木の注文は、そのほとんどが直接注文で、その内訳は、10%が設計事務所、60～70%が大工・工務店、建設会社、残り20%ほどが問屋からの注文である。しかし、一方で、このような銘木販売以外にも、集成材を扱う別の会社も持っている。集成材として利用している材は、製材市場から購入し、それらを集成材として加工している。

銘木産業は、高級木材として一定の需要があるため、安定した経営が可能であるが、長期的に見れば、過去の資産を削りながら投機的供給がなされているため、造林・素材生産・木材消費のバランスがうまくとれるかどうかは問題であり、大径材を育林する過程で発生する間伐材をいかに利用するかが重要な課題となっている。

事例5「対馬・上県町における地域完結型リンケージ事例」

対馬・上県町は、自家が所有する持ち山から用材を伐り出し建築主が中心となって家造りの一切を取り仕切り（直営方式）、またカセイ（住民の合力機構）の援助を得ながら、「平柱造り」と称される独特の伝統的住居を造り出す仕組みが一部に残っている。

上県町の一つの集落、志多留集落は、上県郡上県町の南西部の朝鮮海峡に突出した伊奈崎の基部に位置する集落で、平成5年11月時点の人口は総戸数50戸、住民数 145人で、近年若者層の本土への流出による過疎化と高齢化が進んでいる。主な産業は、林産業（主に木材、椎茸）及び漁業であり、ほぼ全世帯が多かれ少なかれ持ち山を所有しており、加えて、41戸が共同で所有権を持つ共有林もある。もっとも興味深いのは、この地域独自の住居で「平柱造り住居」と呼ばれる

伝統的な住居が、直営方式によって建てられていることである。しかも、それらは持ち山や共有林から伐り出された材を使用して、地元の大工が加工し、建築主がそれら一切を仕切っているのである。

近年なされた住宅新築工事の中から平柱造り住居が作られる流れをみると、使用される木材が住宅を建設する毎に、山で選定され（山取り）必要な量だけを伐り出しているのがわかる。また、伐採された後には植林がなされ、その苗木が再び成長し伐採可能な時期になるまで、建物が持つように、平柱造り住居では、4寸角以上の太い材が使用されている。また施工工事の過程で「加勢」という親戚・知人による共同作業が加わる。

平柱造り住居に使用される木材量は、平均 3.7㎥にもなる。また使用される樹種も、杉、桧のほかに、建築主の好みに合わせて、カヤやモミ、欅、モミジなどが用いられる。

このような地域完結型の住宅生産が行えるのは、建築主が木や住宅建設に関する豊富な知識と経験を持っているだけでなく、林業や所有林管理に携わっている事、加勢という共同作業のしくみが継承されている事、平柱造り住居という長期耐用型の構法が継承されている事などが挙げられる。逆に、画一的な技術の流入、加えて過疎化・高齢化の進行、農林水産業の衰退、第3次産業の発展といった社会状況の変化、それに伴う集落社会の崩壊、生活スタイルの多様化などによって、これらのバランスが崩れてしまう危機にあるとも言える。

4. 林住リンケージの類型化

今回調査可能なリンケージの事例について資料収集を行った。今後とのような形で、林住リンケージのしくみを形成しているかを考察するために、前章で取り上げた事例を元に、これまで林住リンケージの展開の仕方について主体となる組織を中心に類型化すると、次の8つのタイプがあると考えられる。

1）地山・裏山・里山利用の地域住宅 —— 自家生産、直営生産

いわゆる「地域の埋め込まれた資源循環システム」で、林住リンケージを考える上で、もっとも原初的しくみと言える。（事例5：対馬の平柱造り住居）

このタイプは、戦前まで各地で見られたが、現在、このようなシステムが残っているのは、山村や島嶼などの特殊な地理的条件や社会条件が成り立っている地域でしか見られない。

2）地域産材・地域市場による地域都市住宅（町家など）生産システム

その地域周辺の林野から伐り出された木材が、材木店や大工を通じて、町屋や借家、長屋などの地域特有の木造住宅として、川下へ流れるしくみで、後に全国規模の市場システムへと展開している。1970年以降の外材依存の流れの中で、主にコスト的問題により、地域産材、国産材を木造住宅建設に使用される事が難しくなった。外材の低価格状態が持続される限り、このシステムは市場経済のもとで一定の割合で存続すると考えられる。

3）森林組合・大工組合ネットワークシステム

森林組合などが行ってきた産直住宅のシステムから、プレカット加工という技術を利用して、もう一歩住宅生産側に広げた形のしくみである。事例1で取り上げた例では、森林組合と大工組合が、双方で独立した事業を展開しながら、一定規模の業務提携を行うという形でネットワークを形成している。林材業、大工・工務店ともに、中小零細規模の経営を行って

いる現状を考えると、安定した地域産材を利用していくためには、このような協同組合同士のネットワークは有効であると考えられる。

4）林家・設計事務所ネットワークシステム

3）のタイプのネットワーク主体を、組合から個別の事業体もしくは業者にしたタイプであると考えられる。事例2で取り上げた例では、林家と設計事務所がその中核となっており、木材や木造住宅に「こだわり」をもって生産・供給していくしくみである。このようなネットワークは、互いに密接な情報交換やつながりをもつとき成立する可能性があるが、全体としてはそれほど数は多くなるとは考えにくい。しかし、地域産材を利用する上で、このようなゲリラ的な方法は、次のネットワークやしくみを形成するきっかけとなる。

5）高級材の市場・銘木市場

現在では国産材が地位を保ちつづけることのできる分野であるが、一時的には景気動向に左右される。しかし、林家側では、木材の投機的出荷を行い、住宅生産側では、高級志向をもつ層があることから、需要・供給ともに安定したストックがあると言え、今後とも存続していく市場であると考えられる。

6）大規模林業経営

5）との結び付きや景気動向を見据えた長期的経営が可能である。したがって、安定した木材供給が可能であると考えられる。

7）広葉樹・雑木の利用

これまでは建材として利用されてこなかった木材を、新たな木材として利用していくことは、木材利用の幅を広げる意味で重要であると考えられる。広葉樹・雑木以外にも、ＥＷなどの新しく開発された木質材料の利用も同様である。しかし、それには技術的な問題が残っており、これらを克服するための努力が必要である。今回事例3で取り上げた例でも、乾燥技術や利用技術の開発が必要となっている。

8）税金・補助金による支援

このタイプは実現してはいないものの、川下から川上を支援する一つの方法の選択肢である。経済的に豊かな川下の住民が、形としては「環境税」「CO_2 税」などで、経済的な支援を行うしくみとして有効であると考えられる。

今回収集した事例は、今後林住リンケージをどのようなしくみで実現できるのかを示唆するものである。それぞれ母体となる組織、ネットワーク、流通のしくみ、扱う木材や建物、様々である。しかし地域の林材業、木材流通、住宅供給は独自の様相を呈しており、国全体として一つのしくみのもとで、林業から住宅生産、住まい手のリンケージを実現するのが不可能であり、そのことは先の事例を見ても分かる。つまり地域に適応したしくみが各々の地域で様々に展開されることにより、林住リンケージが実現できると考えられる。

《参考文献》

○林野庁監修「木材需給と木材工業の現状　平成5年度版」、1993年
○農林水産省統計情報部「1990年世界農林業センサス」、1991年
○「京都府産材ブランド化促進事業委託調査報告書」、1993年
○京都府農林水産部林務課「京都府における木材産地形成戦略」、1993年

○坂野上なお「プレカット加工と製材流通」、'92林業経済研究No.123
○吉野流域林業活性化センター「原木流通改善指針」、1993年
○福本通治「奈良県の林業特性」、奈良県林業試験場林業資料No.3（1988）／No.5（1990）
○山上勝修士論文「対馬の平柱造り住居に見る地場普請の研究」1994年
○木造建築フォラム「第７回公開フォラム資料／木材地場産業の活路」、1988年

添付図表

「２．」における図表

図1　木材（用材）需給量

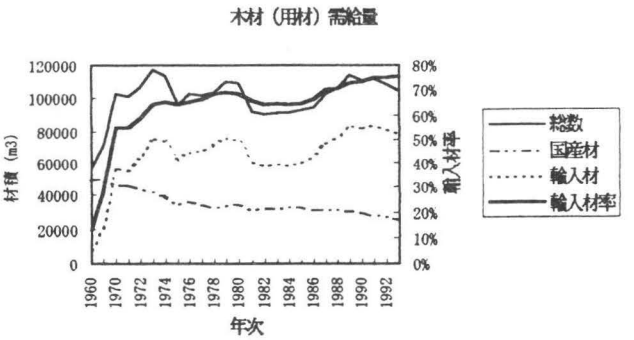


図2　住宅着工数に占める木造住宅

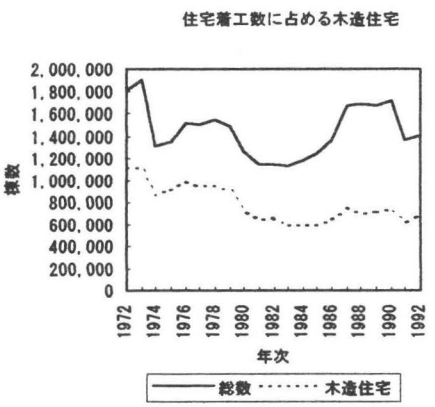


表1　主要木材輸出国の森林資源

主要木材輸出国の森林資源

国名		国土面積	森林面積	林野率	蓄積	生産量	輸出量	生産量/蓄積
	単位	万ha	万ha	%	億m*3	百万m*3	百万m*3	
米材	アメリカ合衆国	93726	29360	31	230	501	62	0.218%
	カナダ	99761	35900	36	149	155	82	0.104%
南洋材	マレーシア	3298	1933	59	45	51	31	0.113%
	インドネシア	19046	11343	60	209	172	16	0.082%
	フィリピン	3000	1035	35	18	39	1	0.217%
	パプアニューギニア	4628	3823	83	44	8	2	0.018%
	ロシア（旧ソ連）	224030	94700	42	503	365	26	0.073%
	ニュージーランド	2710	735	27	4	12	6	0.300%
	日本	3777	2521	67	31	29	0	0.094%

出典「木材需給と木材工業の現状（平成５年度版）」

「３．」事例１における図表

表2　京北プレカット（株）第４期の木材使用量と納入先

木材使用量　　単位：m3

	国産材	外材	合計
材持ち分	456.78 30%	1041.85 70%	1498.63 100%
持ち込み分	142.22 19%	620.39 81%	762.61 100%
合計	599 26%	1662.24 74%	2261.24 100%

納入先	坪数	割合
全京都建設協同組合	2123	29%
プレカット工場	1454	20%
京都市内工務店	1687	23%
製材工場・材木店	1015	14%
京北町工務店	447	6%
美山町工務店	479	7%
その他	159	2%
合計	7364	

図3　京北プレカット（株）と全京都建設協同組合との業務提携

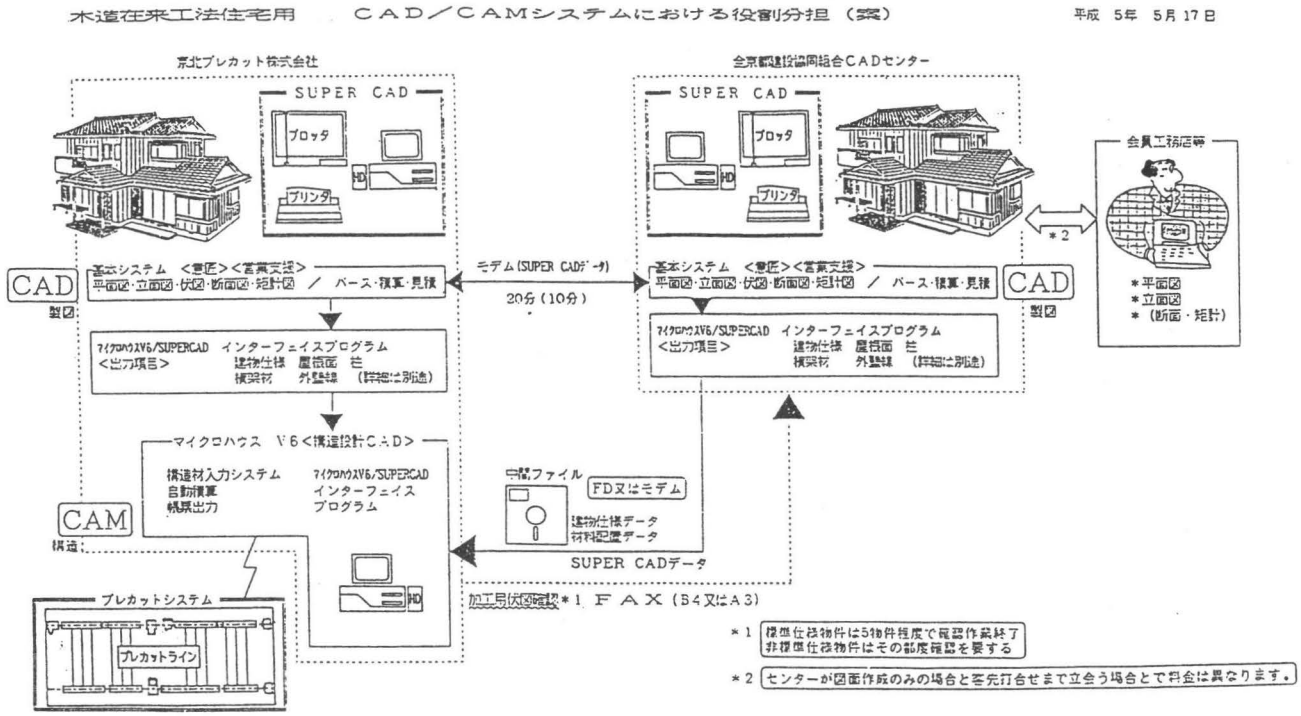


図4　京北プレカット（株）作業場のプレカット機械配置図

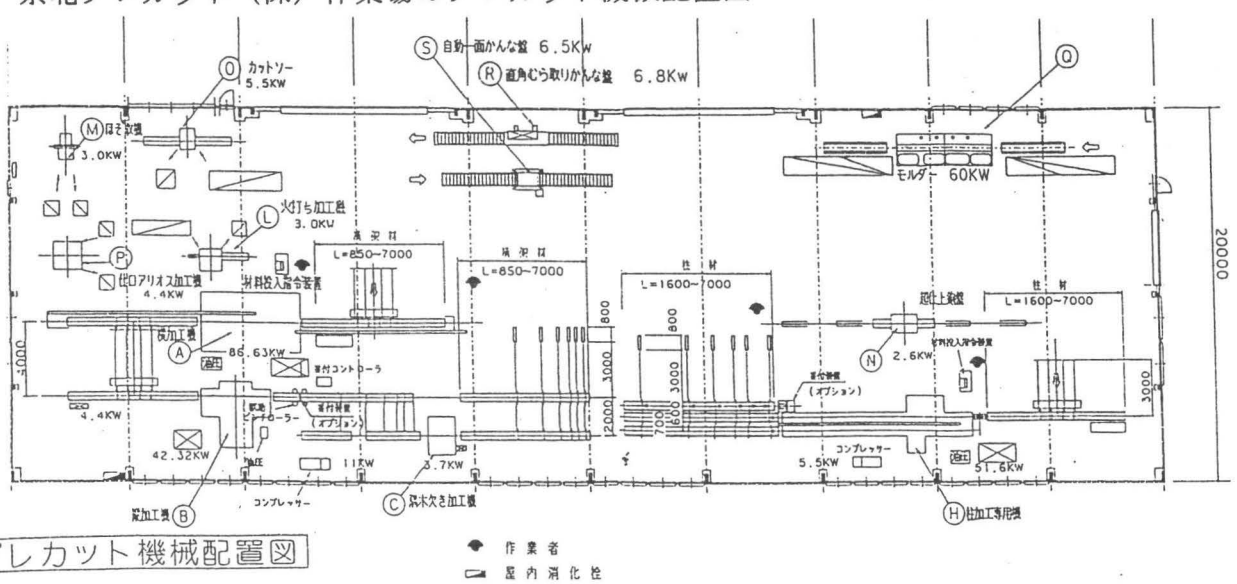


表3　工法別人工数比較

人工数比較（坪当たり）

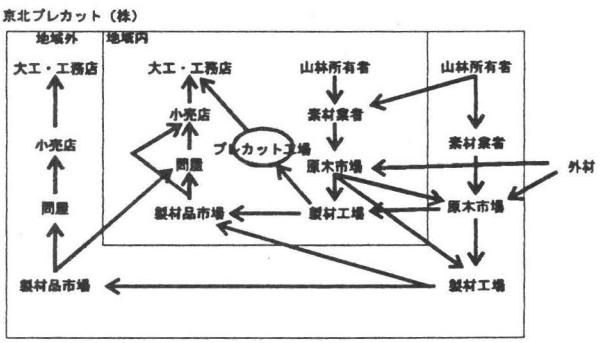
構法・工法	下拵え・工場生産人工	軸組工事部分の人工	造作部分の下拵え・取付人工	合計人工
伝統構法	0.7	1.5	2.7	4.9
在来構法	0.7	1.3	1.7	3.7
プレカット	0.1	1.3	1.7	3.1
2×4		1.1	1.6	2.7
木質プレハブ		0.5	0.7	1.2

表4　米松仕様と地松仕様における構造材価格差試算例

構造材（土台、大引、柱、桁、梁、束、母屋）の価格例

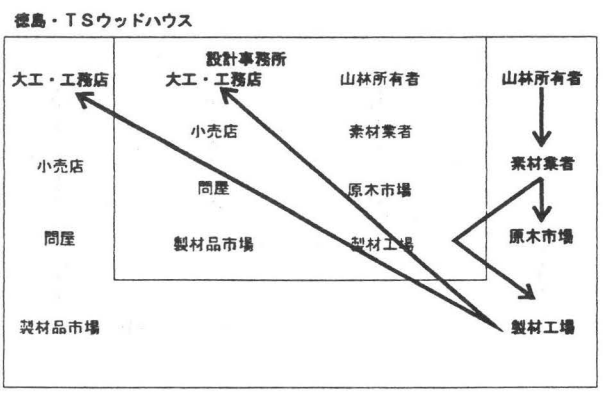
	見積時点	桁・梁材		上昇率	備考
		米松仕様	地松仕様		
例1　74.84坪平屋建て	1994.9	¥2,118,030	¥2,661,120	126%	桁・梁以外は、すべて杉、桧
例2　32.95坪2階建て	1994.5	¥1,166,070	¥1,252,740	107%	桁・梁以外は、すべて杉、桧（一部集成材柱）

図5　京北プレカット（株）におけるネットワーク図



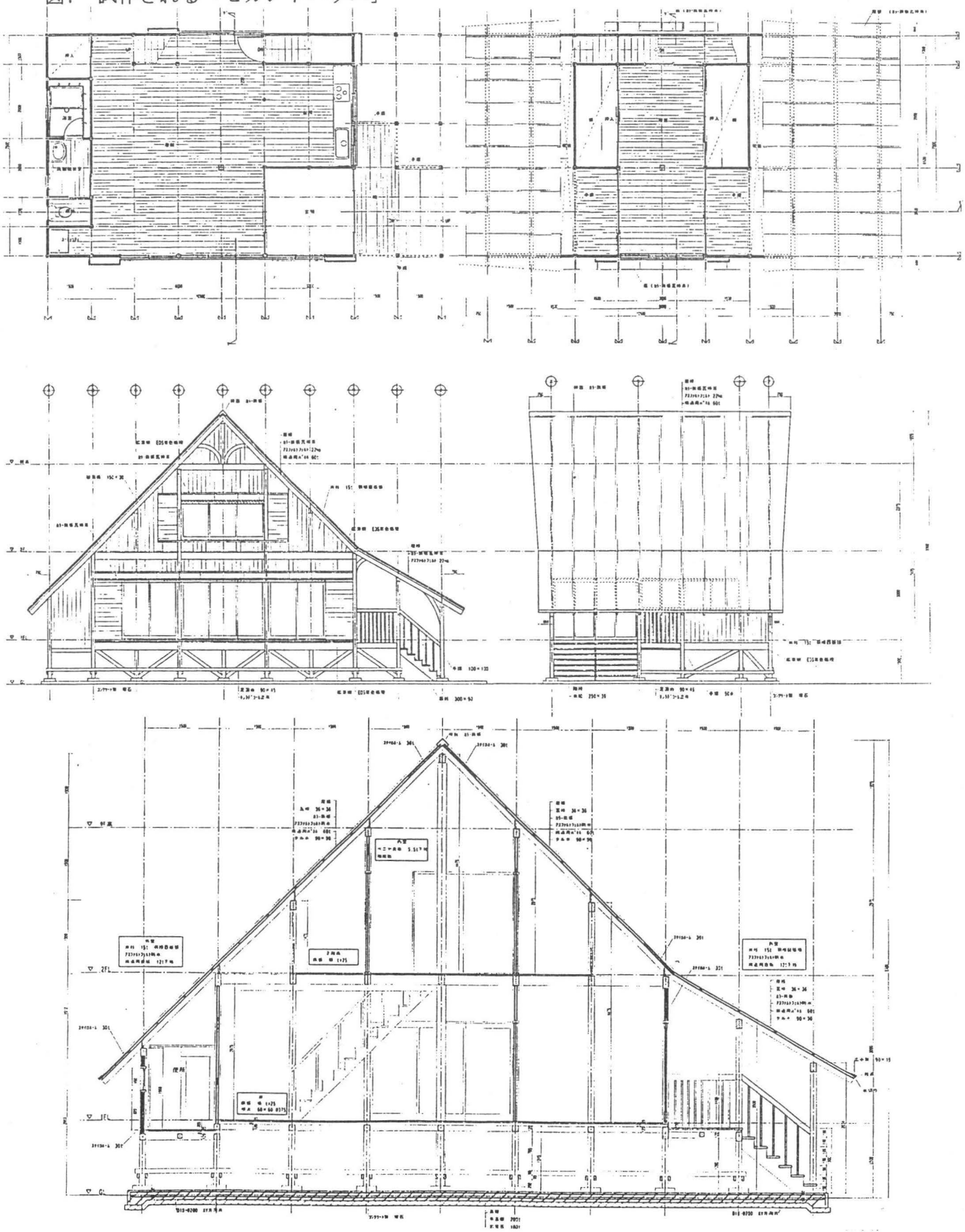
「3．」事例2における図表

図6　ＴＳウッドハウス協同組合におけるネットワーク図



「３．」事例３における図表

図7　試作される「セカンドハウス」



「３．」事例５における図表

図8　平柱造り住居の工程フローチャート

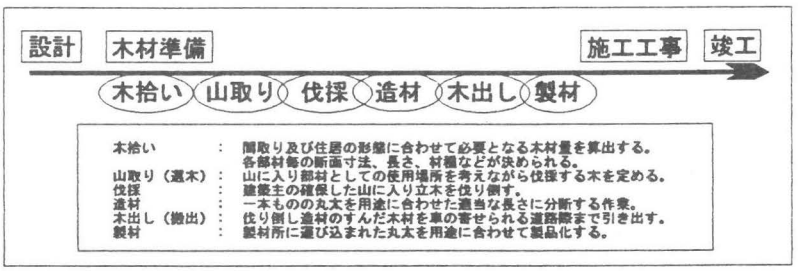


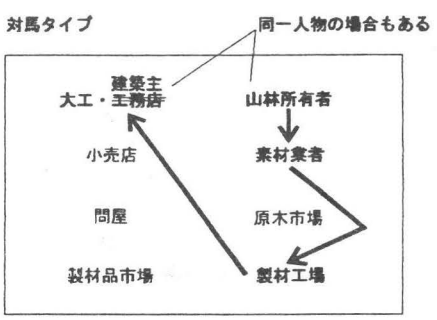
表5　平柱造り住居における木材使用量の例

平柱造り住居における使用木材量の例

H邸（40坪平屋建て）			O邸（57坪２階建て）			Y邸（54坪平屋建て）		
樹種	樹齢	材積	樹種	樹齢	材積	樹種	樹齢	材積
杉	100	50	カヤ	200	100	杉	不明	97
桧	80	23	杉	50～100	33	モミ	100～	83
モミ	100～	17	モミ	100	33	桧	120	33
欅	100～	２本	桧	40	17	カヤ	150～200	40
松	100	１本	欅	150	10	欅	不明	10
桑	50	１本	モミジ	50	0.7～1			
			コガ	50	0.7～1			
			桑	80	３本			

材積の単位は特に記入がなければ「m^3」

図9　平柱造り住居におけるネットワーク図



1－12　歴史的都市における都市景観の変容と評価及び保全に関する研究

－－－3次元ＣＡＤを援用した居住地環境の景観整備手法に関する考察－－－

千葉工業大学工学部建築学科
専任講師　片　山　　律

〈研究報告概要〉

本研究は、「歴史的都市における都市景観の評価と計画手法に関する研究」の継続研究の一部である。今回の助成研究では歴史的都市鎌倉市での若宮大路を中心とする周辺道路網の中から山並スカイラインを眺望する視点調査ポイントを設定し、都市景観写真調査と景観保護基準線との両手法を使って建築高度規制の検討を行った。現在制定されている法的及び誘導規則（8，10，15M）による景観保護限界点を算出し、規制値通りに建てられた場合にスカイライン面積にどの程度影響があるかを考察した結果、各直線道路において望ましい高さ規制限界点が求められ、許容高さ規制地区別比較図を描く事が出来た。更に、直線道路上における建物高さ誘導規制値による山並スカイラインの眺望の可能性及び眺望消失面積を簡便に追求する手法として3次元ＣＡＤ手法を応用して、鎌倉市における山並スカイライン眺望性可能領域の検討を進めた。その結果鎌倉市主導の誘導規制値・住居系で8M、商業系で15Mの意味と妥当性を検証するとともに、法定規制値を制限し誘導規制値を適用してこの誘導規制値を堅持していく方向が必要である事を理解した。

1．研究の目的

都市景観及び都市美創出のためのデザインコントロール手法に関する研究は、歴史的都市においては特に必要である。本研究では、神奈川県鎌倉市・旧鎌倉地区での都市景観保全手法の必要性を追求するため、都市地図情報を用いて3次元ＣＡＤの援用により、現状建築物の高さ変化させた時の山並スカイライン面積との関係をシュミレーションして、鎌倉市の定める誘導規制値の妥当性の検討と、山並み景観保全の観点から建築物の望ましい高さ規制の提案を研究目的とした。

2．分析の展開

3次元ＣＡＤにより旧鎌倉地区の地形図を作成し調査対象道路（南北）の各視点ポイント(100Mピッチ）から見た山並スカイラインを3次元表示し、建築物の高さを現状値（概ね住宅の軒高

6M）から、誘導規制値（8.15M）、法定規制値(10.20M）に変えた時の山並スカイライン面積の消失率が、どの様な変化傾向を示すかを計測し、その結果をふまえ許容消失率の検討をし、各ポイント、各道路、各地区、旧鎌倉地区全域での建築高度規制の検討を行った。（図－1）

3. 分析結果

一例として、各ポイントごとに建築物の高さを変化させたときの山並みスカイライン面積の変化傾向を示すと（図－2）になる。同様に各道路、各地区、旧鎌倉地区全域で算出し、それぞれの領域での変化傾向を検討した。また、上記の面積値より各ポイント、各道路、各地区、旧鎌倉地区全域における消失率を算出した。（図－3）

以上のデータをふまえた上で、数値ではなくパース表現した山並スカイライン図を見ての印象という観点から考えてみた。実際に、パース表現された 200ポイントの図の中より現状値から誘導規制値・法定規制値に高さを変えたとき、これ以上山並スカイライン面積が減少しては景観が阻害されると感じるポイント（54ポイント）をピックアップし（若宮大路は除く）、その消失率の平均を算出したところ、49.7%と算出された。そこで許容消失率の値を暫定基準値として「50%」と定めた。この基準になる値「50%」を設けることにより、消失率が基準より高いところでは建物高さを低くし、基準より低いところでは高くしてもよいと考えた。

ここで問題となることは、どの程度高くして良いのか、又低くしなければならないのかである。そこで次の様な計算式を考えてみた。

現状値⇨誘導規制値の消失率：A

現状値⇨法的規制値の消失率：B

住宅地での許容建物高さ：X

商業地での許容建物高さ：Y

$X = (50 - A / B - A) \times (10 - 8) + 8$

$Y = (50 - A / B - A) \times (20 - 15) + 15$

この計算式を用いて各道路、各地区、旧鎌倉地区全域について許容建物高さを算出した。（表－1）

先に除外した若宮大路に関しては、旧鎌倉地区での景観を考える上で最も重要な道路であり、景観を大きく左右するため、許容消失率を「45%」までに抑える事に決め、基準とした。

表－１　各地区での許容建物高さ一覧

	（誘）消失率（%）	（法）消失率（%）	住宅系（M）	商業系（M）
若宮大路	45.2	49.5	7.9	14.8
Ⅰ地区	43.4	66.5	8.6	16.4
Ⅱ地区	44.5	67.8	8.5	16.2
Ⅲ地区	65.6	84.8	6.4	10.9
Ⅳ地区	48.5	71.3	8.1	15.3
Ⅴ地区	48.7	73.1	8.1	15.3
Ⅵ地区	48.5	71.2	8.1	15.3
地区全域	49.9	72.5	8.0	15.0

表－１のうち、各地区での高さを地図上で区分表現し、高さ規制の関係を地区別に示した。（図－４）

4．考　察

表－１より許容消失率を「50%」としたときの旧鎌倉地区全域での、許容建物高さは住居系で８M、商業系で15Mと算出され、これを本研究での誘導規制値とする。

この研究結果より、法定規制値により住居系地域で10M、商業系地域で20Mまで建物を建てると、面積消失率は72.5%となり、鎌倉の街並み景観が著しく阻害されてしまうこととなる。

又許容消失率を「40%」としたときの許容建物高さは住居系で7.1 M、商業系で12.8Mとなり、この値を高さ規制値として考えると商業系では、商業活動の妨げになる。以上から、鎌倉市主導の誘導規制値・住居系で８M、商業系で15Mの意味と妥当性をこの研究から理解することができ、住居系では40%、商業系では50%の消失率を採用する考え方等を併用することも必要であると考えられる。

また現行の商業地域より後背地になる地域では、景観を保全するためには建物高さをかなり低くしなければならないため、用途地域の見直しをしなければならないことも併せて理解できた。

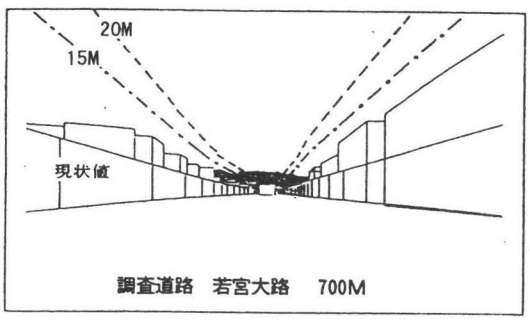
以上により歴史的都市鎌倉では、法定規制値を制限し、誘導規制値を適用し、この値を堅持していく方向で今後の都市開発を進めていくべきであると考えられる。

このように建物高さの基準は全国一律ではなく、風土や景観を考えその地域にあった規制値を定め、その値を適用し、堅持していくべきである。（図－５）

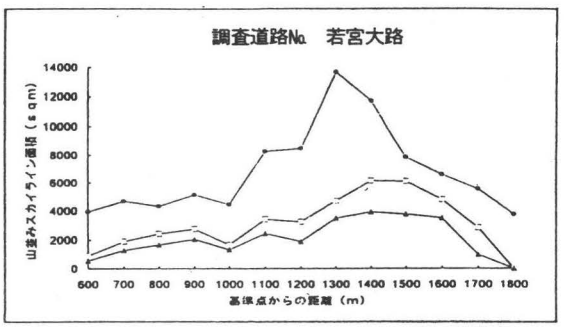
5．今後の研究課題

本研究では、地理情報と３次元ＣＡＤを援用して南北方向道路について検討を行ったが、東西方向道路についても同様に行い、南北方向道路と融合した分析を行わなければならない。又、山並スカイライン面積の基準（許容消失率）の値として「50%」を用いたが、これは許せる最大値であり、理想の値ではない。したがって鎌倉市の都市としての発展を考慮に入れつつこれら基準値の設定範囲を更に探求していかなければならない。

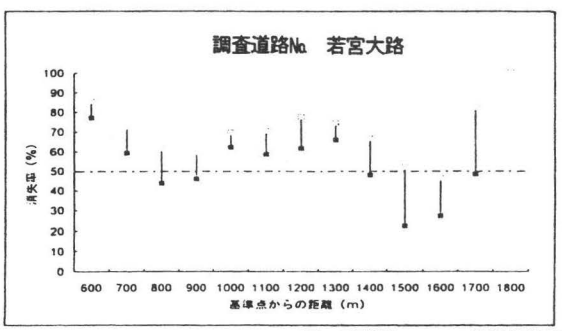
更に、今回の研究では現行の用途地域制をそのまま採用したが、白紙に戻した状態から都市景観保全に対する高さ規制の検討を行って、用途地域の根元的な見直しをしていかなければならないであろう。



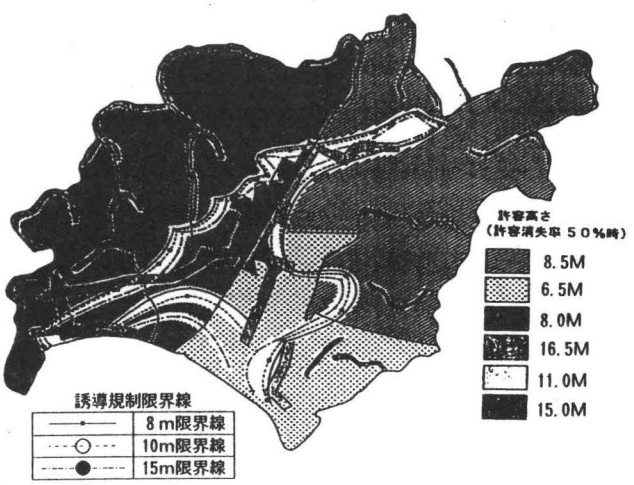
図－1　山並スカイライン図



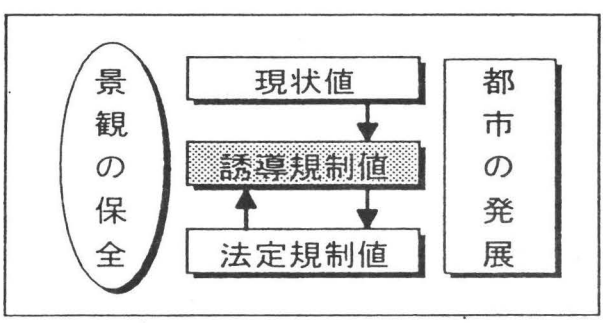
図－2　面積変更傾斜グラフ



図－3　消失率比較グラフ



図－4　許容高さ規制地区別比較図



図－5　都市景観保全計画の概念図

表－1　各地区での許容建物高さ一覧

	(誘)消失率(%)	(法)消失率(%)	住宅系(M)	商業系(M)
若宮大路	45.2	49.5	7.9	14.8
Ⅰ地区	43.4	66.5	8.6	16.4
Ⅱ地区	44.5	67.8	8.5	16.2
Ⅲ地区	65.6	84.8	6.4	10.9
Ⅳ地区	48.5	71.3	8.1	15.3
Ⅴ地区	48.7	73.1	8.1	15.3
Ⅵ地区	48.5	71.2	8.1	15.3
地区全域	49.9	72.5	8.0	15.0

2－1　現代都心住居における3つの問題
－板橋W邸にみるケーススタディ－

東京芸術大学大学院美術研究科
博士課程　平岡　善浩

1. はじめに

現代の住宅に関する問題は多岐にわたり、各分野においてそれぞれの研究成果はあるが、実際の住宅設計においては個々のケースにおいて、総合的に解決することが要求される。特に都心の密集地に建てる場合はそれらの問題が複雑に絡み合っている。

本稿は、実際都心に計画された戸建て住宅（板橋W邸）*1において、現代都心住宅に関する問題のうち顕著にあらわれた以下の3点について取り上げる。

1）高齢者との同居　　2）狭小な敷地への対応　　3）ローコスト化

これらの問題には、施主が老母親と仕事を持つ娘との二人家族で、敷地が面積15坪間口4.25m、建築費50万円以下／坪の予算で建てるという与条件が照応する。これらの問題の現状を指摘し、本ケースでの対応策を述べ、今後の都心住宅の在り方を示唆する。

2. 高齢者との同居

2．1．高齢者住居の現状

高齢者の住居問題は既に身近なものとなり、専用設計ではなく「デザインフォアオール」の時代になりつつある。現在家を建てている世代が高齢者となるころに問題が本格化するため、早急な対策が求められており、ノーマライゼーション*2、バリアフリー*3といったキーワードのもとに議論が行われている。

高齢者住居というと安全対策上の技術的な処置に終始しがちであるが、通路空間などはその形態を単純明解にするより、高齢者のふらつきを寛容する空間的な余裕があったほうが効果的である*4。予め面積的に余裕を持って設計しておくと、車椅子や介護機器の使用にも対応でき、後々

*1　板橋W邸「双塔の長屋」詳細については別紙図面参照

*2　ノーマライゼーション(Normalization) 高齢者・障害者が社会の中で普通に暮らし、社会参加する事

*3　バリアフリー（Barrier-free）段差等、高齢者・障害者の実生活に障害となるようなものをなくす事　参考文献：特集「高齢化社会の住宅」住宅特集94年7月号

*4　「高齢者同居家族の住空間と居住特性に関する研究」服部・園田1992　住宅総合研究財団研究年報№19

解決できる問題も多い。

また、高齢者同居世帯が「住み続ける」という観点から、使用状況の変化に対応でき、改装の可能性も考慮しなければならない。つまり、家族構成や経済状態、ライフスタイルといった「ファミリー」の変化と、個人の経年変化や高齢化といった「パーソナル」の変化を受容できるものが望ましい。

そして、お年寄りが生き生きと生活するには、地域コミュニティとのつながりも大切な要素となる。外へ出ていく目的の有無や外出の障壁となるものの排除、急激な環境の変化を避ける事などが問題となる。

しかし結局、高齢者同居に対する具体的な処方というのは、各々のケースにおいて求められるものであり、最終的には、高齢者の自立を助け、共に暮らすという新しい生活を喚起するような豊かな住空間を提供する事が重要な課題となる。

2．2．板橋W邸での対応策

板橋W邸での施主の希望は、「母が元気なううちは2階の南側に、できるだけ広く母の部屋を取ること」「後々1階にベッドを置いて、母の生活が一階で済むようにすること」の2点であり、設計者が心配するよりお年寄りは元気であった。

1階に共用スペース、2階に各々の個室、中央に明り取りの階段吹きぬけを配置した。面積的に厳しいので、共用部は部屋を小割せず、狭いがボトルネックとなる箇所をなくすようにした。高齢者の生活は、常に目的を持った能動的な行動が行われるわけではなく、昼間「何もしないで過ごす空間」が要求される。1階の居間と食堂がそれにあたり、周辺環境から阻害されない、自然光を取り入れた空間としている。

一階の居間と食堂はスライディングドア（引き戸）で仕切れる「ツヅキマ」として、後々母の寝室としての使用にも配慮してある。非同居の場合より高齢者同居住宅のほうが、襖で仕切られた「続き間」のある確率が高い*5。これは、家族とのコミュニケーションを図れる事と使用状況の変化に対応できるためだと思われる。2階の個室も吹き抜けに面してスライディングドアで開放する事ができ、吹きぬけを介して1階の共用部と一体的な空間となる。2つの個室は、床は連続していないが空間的には連続しており、不連続の「ツヅキマ」として、母娘の自立と対話が両立するよう目論まれている。

こうした一連の空間は狭苦しさの解消と、気配が感じられて邪魔しあわない程度の分離を生み、住居内のどこに居てもお互いを感じ取れる、コミュニケーションの空間をめざしている。

3．狭小な敷地への対応

3．1．現　　状

昭和30年代後半、敷地の建蔽率算定の際30㎡を絶対空地として確保する事が基準法から取り消され、敷地の最小限規模を定める考えが無くなってしまい、宅地の細分化が進んだ*6。

狭小な敷地にゆとりのある住宅を造ろうとすると当然多層化する事になり、高齢者にも負担が

*5　前掲（＊4）参照　世代の若い核家族の場合「各室アクセス型」が多い

*6　「失ってしまった最小限敷地規模」伊藤滋　建築雑誌1993年4月号

増す。１階が車や仕事接客のスペース、２・３階が居室という住宅形式が定着し始めている。中庭を取り込む内向的なコートハウスの手法も用いられているが、それも不可能な厳しい条件の敷地が多い。

３．２．板橋W邸での対応

当敷地は、元々東側隣地と合せて二戸一の長屋が建っていたが、相手の半分が取り壊され独立住宅として新築される事となり、結局残ったもう一軒も取り壊して立て直す事となった。こうして都心の宅地は細分化される。隣地との協議で敷地境界線から壁面を30㎝後退させ、前面道路が法42条２項指定であったため、現状の道路境界線より65㎝後退せねばならず、必然的に建築可能範囲が限定されてしまった。

前面道路が南側、敷地間口が4.25m奥行き12m弱、道路以外の敷地境界線には隣家がぴったりと隣接するという厳しい条件の中、周辺環境から阻害されない濃密な内部空間をめざした。壁面には大きい開口部は取らず、中央吹きぬけのすりガラス窓によって光を取り入れている。また南北軸上には、バルコニー、外付けサッシ、構造体、スライディングドア、手すりといった装置が層状に配され、空間に奥行きを与えるとともに、光や風の動きプライバシーを調節する役割をなし、一体的に住空間に変化を与える。

４．ローコスト化

４．１．問題の現状

住宅におけるコストダウンは、設備・サッシ・仕上げ材料など、段階的なグレード調整ができる工業製品によってコスト調整を行うのが常套だが、設計の段階からコストをチェックし、ＶＥ*7やＬＣＣ*8といった考え方も可能な範囲で住宅設計に応用することが考えられる。

４．２．板橋W邸での対策

低予算と都心部の高い建設費を考慮すると材料や構造の選択の余地はなく、基本的な構造、空間構成がそのまま住空間として露呈すると思われる。設計時に施工業者が決定していなかった事もあり、複雑な構造を避けて均一グリッドの在来工法とした。工事に使用する唯一の道路が幅員2.7mで、かつ道路を挟んだ正面および東側の隣地には計３軒の住宅が建設中だった事から、高く確実な施工が求められた結果でもある。こうした問題は都心部では常に付きまとい、特に商店街などでは施工時間もかなり限定される。

高齢者世帯のライフステージの変化に応じた改装が求められても、均一グリッドの構造体はベースとして変更せずに対応する。モジュールを 910㎜としたのは、敷地間口と壁面後退の関係から、幅が丁度２間分しか建築できなかったためであるが、立体的なカルデシアン・グリッドを基礎とした標準設計としてヴァリエーションの可能性を秘めている。W邸は２×５ユニットをもと

*7　ＶＥ（Value Engineering)設計段階を含めたコスト管理技術

*8　ＬＣＣ（Life Cycle Cost)建物の企画・設計の段階から廃棄にいたるまでに必要なコストを合計したもの　参考文献「建築のライフサイクル・コスト分析」Ａ．Ｊ．デリソッラ＋Ｓ．Ｊ．キルク著　座島出版会

に、4＋2＋4に分割した。

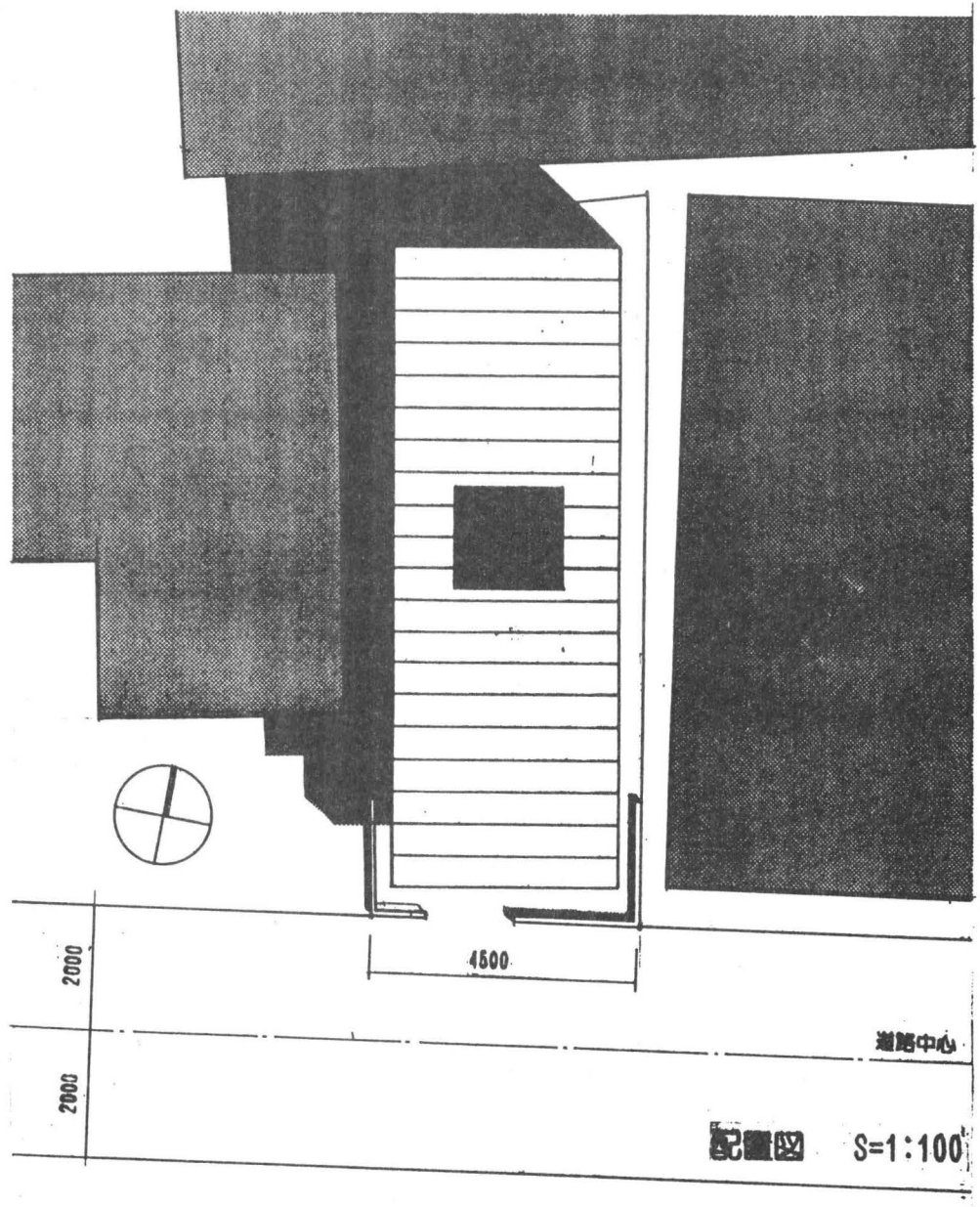
またコストダウンに際し、安易に設備や仕上げ材料のグレードを落とす事で対応せず、今回メンテナンスが困難な外装材や、耐用年数の長い躯体と、改装が想定される内装材とでコスト配分のバランスを取る考えである。

5．結

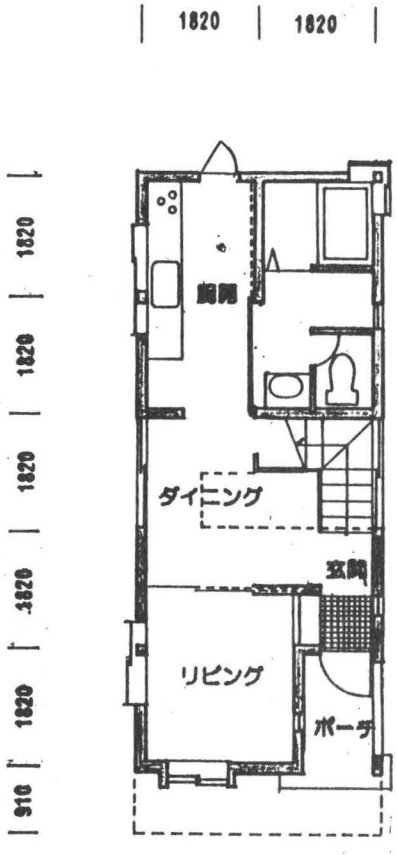
都心住宅における様々な問題は複雑に絡み合っており、その解決法は各コースによって独自のものとなる。しかし個々の問題はプラグマティックなものであっても、根源にある住宅全体の空間性、その空間構造から見直す事で総合的な解決が可能となり、厳しい条件下でも豊かな住空間が作り出せるのではないか。

建築概要

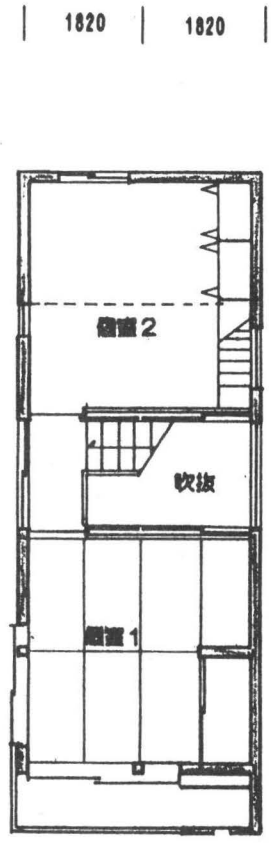
プロジェクト名	双塔の長屋（若菜邸新築工事）
建築用途	専用住宅
施主	若菜久美江
家族構成	母と娘（施主）　　計２名
工事予定期間	平成６年８月初旬～１１月末
所在地	東京都板橋区
地域指定	準工業および近隣商業地域
敷地面積	49.31 ㎡
建築面積	33.12 ㎡（建蔽率：67.2% ）
延べ床面積	72.31 ㎡（容積率：144.6%）
１階床面積	30.82 ㎡
２階床面積	34.77 ㎡
屋階床面積	6.62 ㎡
主体構造	木造軸組工法
基礎構造	鉄筋コンクリート布基礎
主な外部仕上げ	屋根／アスファルト防水、スレート葺き
	外壁／アルミスパンドレル、一部モルタルリシン吹き付け
	開口部／アルミサッシ
主な内部仕上げ	居間・食堂
	床／ナラフローリング
	壁／ＰＢ　クロス貼り
	天井／ＰＢ　クロス貼り
	個室２
	床／カーペット敷
	壁／ＰＢ　クロス貼り
	一部シナベニヤCL
	天井／シナベニヤCL



配置図　S=1:100



1階



2階

S=1:100

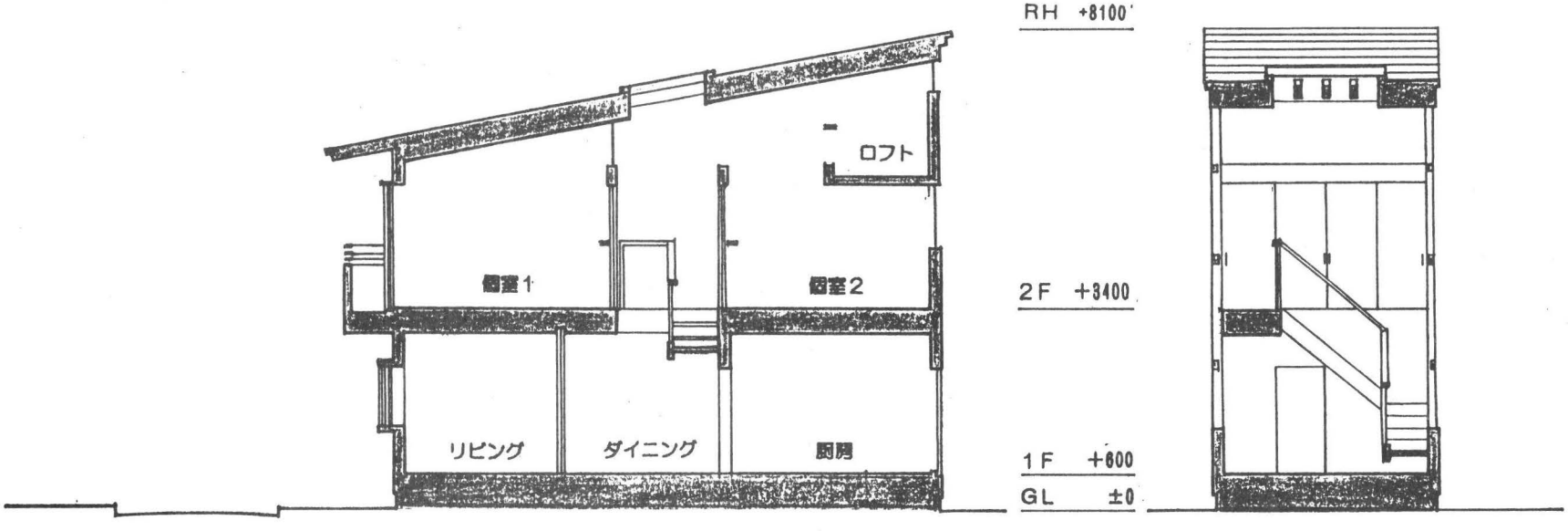
間口 4.5m，狭小で袋小路の敷地に対し、クライアントの要求は以下のものだった。
・母が元気なうちは、2階の南側に母の和室を取ること。
・母が高齢になったときは母の生活はすべて1階で済むようにすること。
・極力ローコストで仕上げること。

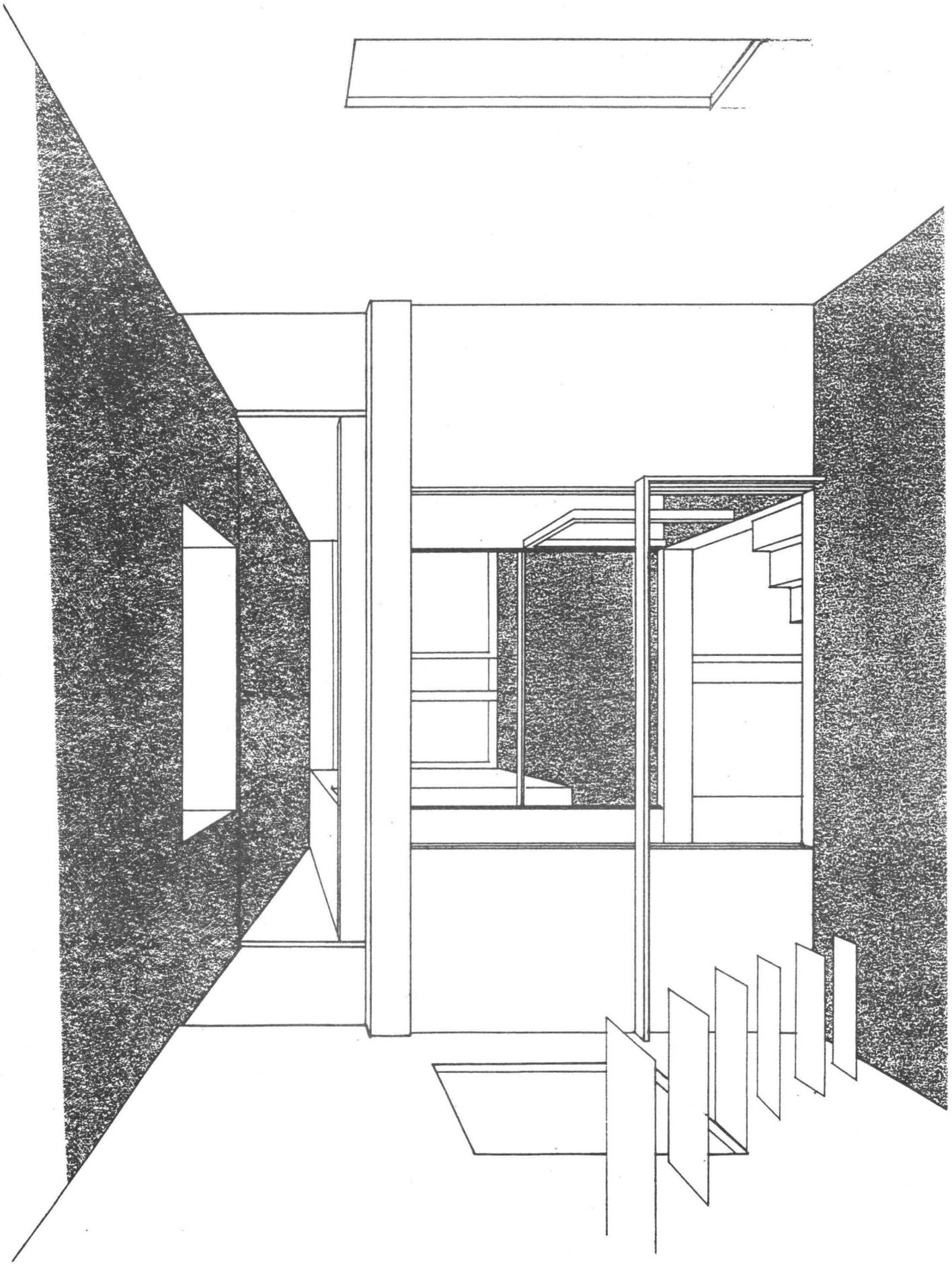
設計者が想像するよりお年寄りは元気に暮している。高齢者住居に対して細部の技術的な対策は多々論じられるが、やはり世代の違う家族と、いかにして共に生活し関係し合っていくかが重要となる。

1階は共用機能が配置され、L－Dは基本的にワンルームとして使用されるが、スライディングドアで区切ることにより、後々母の寝室として使用できる。2階の母娘の個室は2×2間の正方形平面とし、間に階段吹き抜けを介している。両室とも吹き抜け側は4分割の全面スライディングドアとし、解放すると住戸内のすべてが一体的な空間となる。

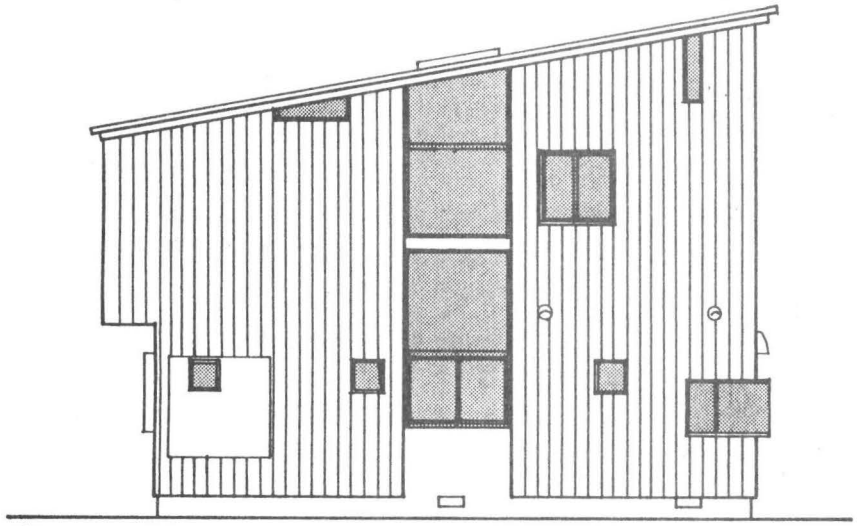
外界に対して堅固な二つの塔が、中央の吹き抜け空間に面して解放されることにより、個室の独立性を保ちつつ、平面的断面的に空間の一体感、連続性を高めている。この住居は、仕事を持つ女性とその母親の自立と対話を促す空間であり、どこにいてもお互いの存在を確認しあえるものとなっている。

S=1:100

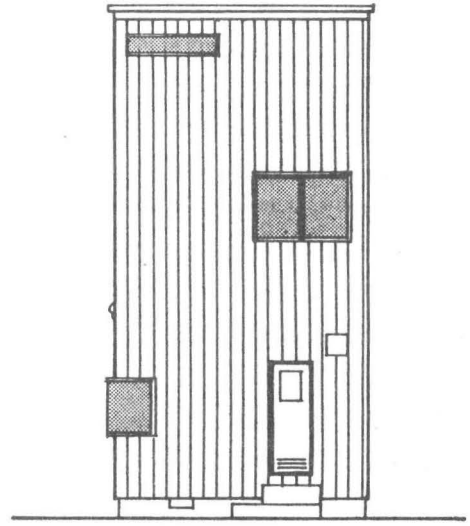




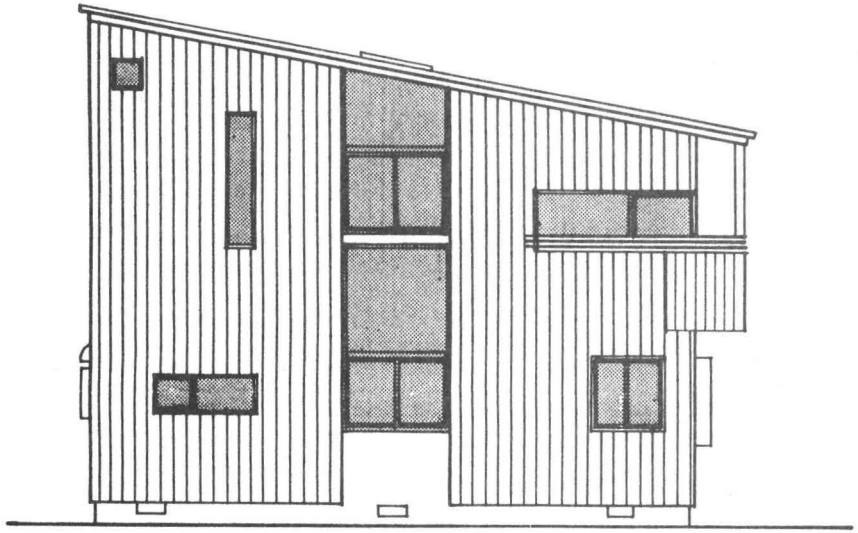
S=1:100



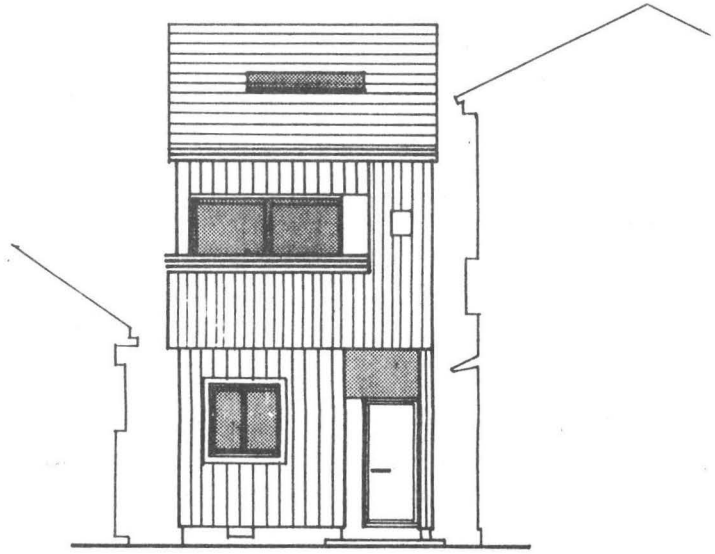
東



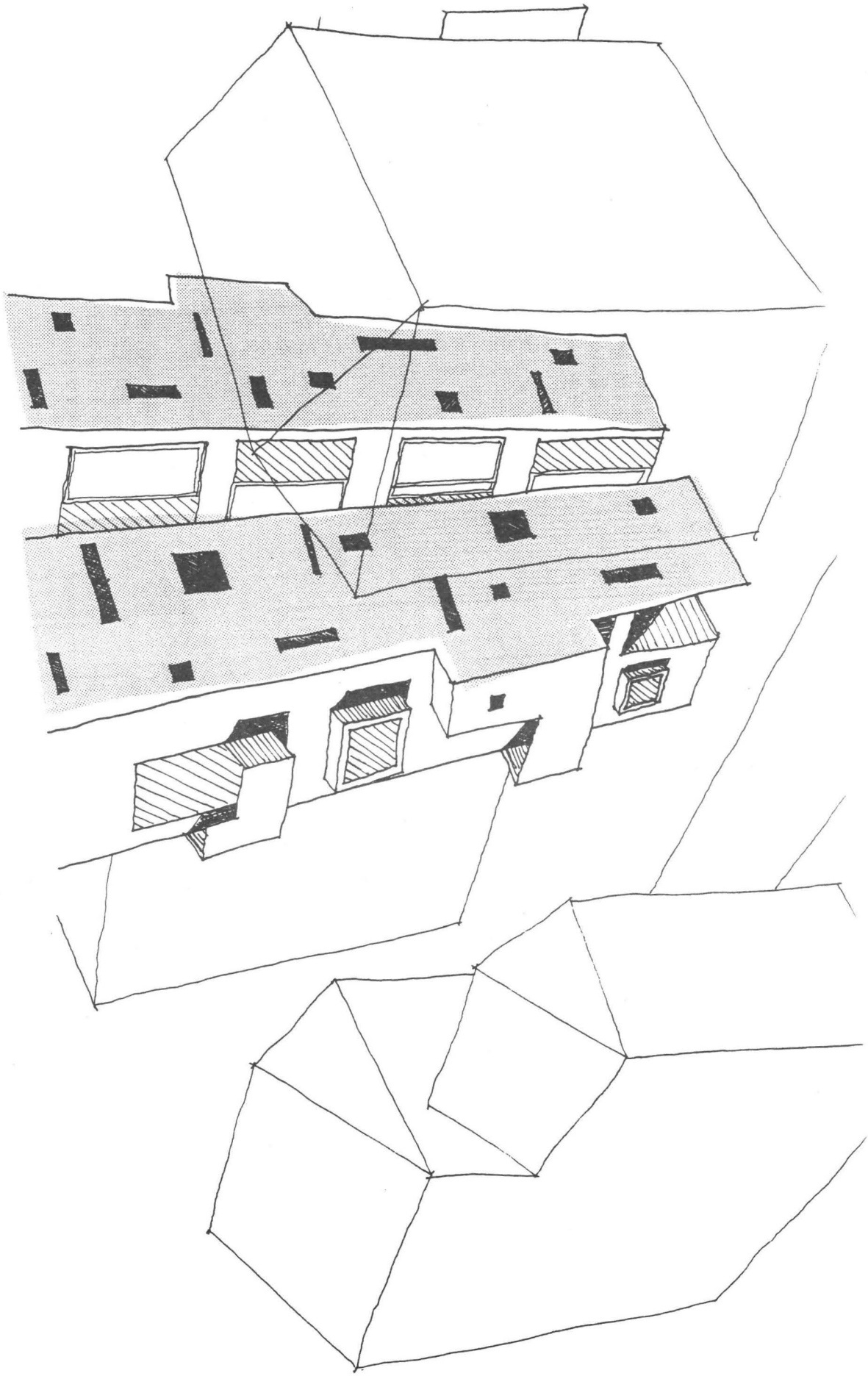
北



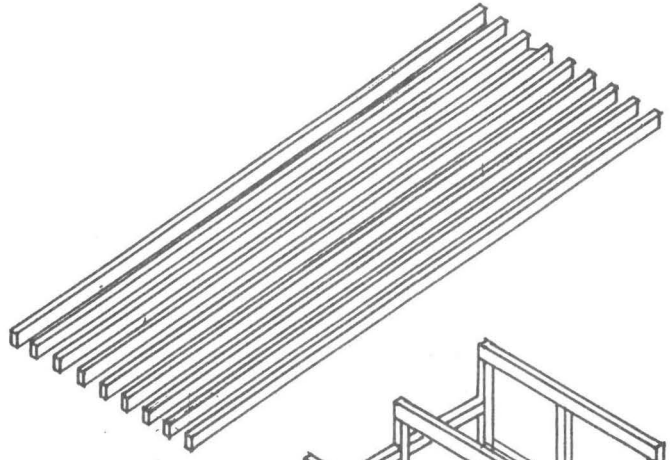
西



南

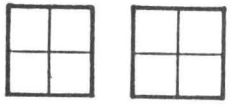


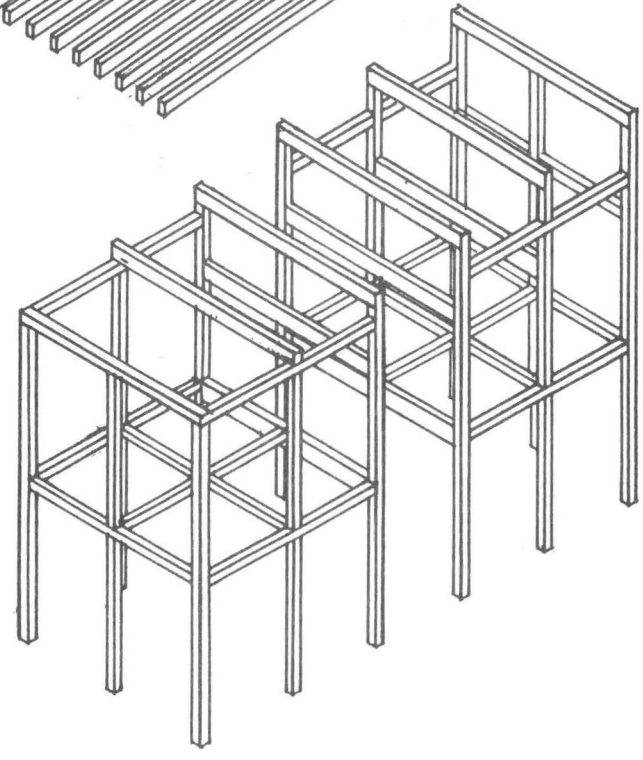
ROOF



伸長する二つの塔を不意に切断する屋根は、全体を覆う一枚の「板」として空間の連続性、統一感を生む。

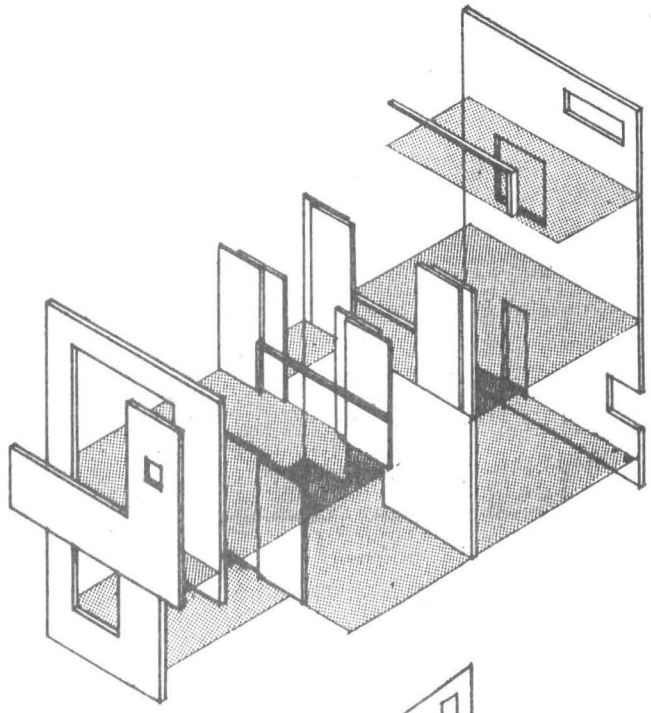
FRAME





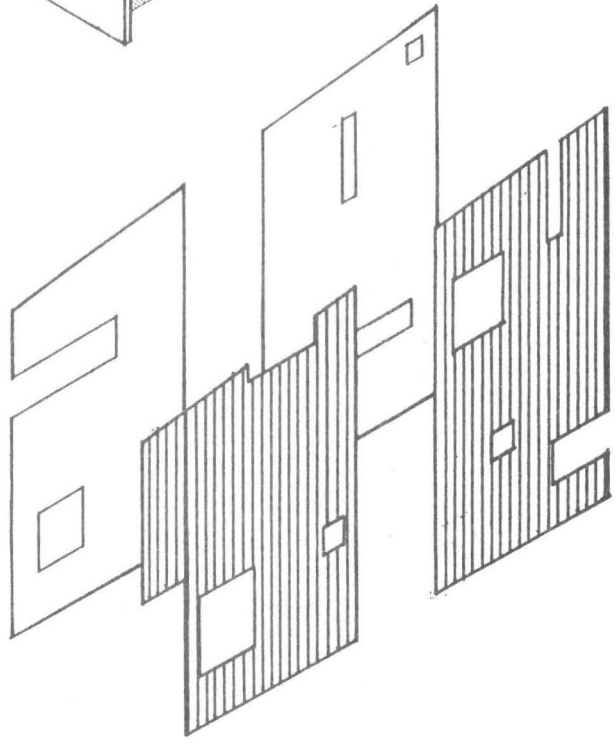
敷地の与条件から決定された、間口２間奥行き５間のグリッドを平面の基本とし、構造体もそれを基にした立体格子を用い、極力簡明なものとした。

SCREEN



南北軸上にバルコニー、外付けサッシ、手すり、スライディングドアといった装置を配し、層状の空間構成をつくるとともに、視線や風の流れを操作することで、住戸の奥行きと一体感を深める。

FACADE



こうした都市住宅の多分に漏れず、南面道路以外はすべて敷地境界ぎりぎりまで隣家が接しているので、外壁に大きい開口は設けず、中央の明かり取りの吹抜け部分だけ全面半透明ガラスを用いている。

3－1　公開シンポジウム in 福島

東北大学工学部建築学科
教授　吉野　博

研究実施計画書に従って、平成7年3月11日に「住まいと環境　東北フォーラム公開シンポジウム in 福島」を開催した。以下に概要を示す。

1．テーマ　　第6回　　住まいと環境の集い「家づくりから考える　住む人の健康」
2．日　時　　平成7年3月11日（土）午後1：30～5：00
3．場　所　　福島市黒岩字田部屋53の3　福島県青少年会館
4．内　容
(1) 基調講演：環境共生住宅と健康
吉野　博　　東北大学工学部建築学科　教授
(2) 招待講演：住まいとカビ、ダニ
吉川　翠　　東京都立衛生研究所　医動物研究室主任研究員
(3) パネルディスカッション：住まいと健康
コーディネーター　石川　善美　　東北工業大学　教授
パネラー　高島　浩一郎　岩手大学医学部　医学博士
野崎　淳夫　日本大学東北高等学校教諭　工学博士
小林　正幸　中央開発㈱　代表取締役
安井　妙子　建築家　一級建築士
5．参加者数　　180名
6．配付資料
(1) 省エネ住宅に対して求められる正しい理解　吉野　博
(2) 快適な住まい　吉川　翠
(3) 基礎医学の立場から住まいと健康の関係をどう考えるか　高島　浩一郎
(4) 高断熱・高気密住宅の試み　安井　妙子
7．概　要

まず、東北フォーラム理事長である東北大学の吉野教授が開催のあいさつを行い、引き続き「環境共生住宅と健康」というテーマで基調講演を行った。住宅に必要な性能は、地震や火事、台風でも大丈夫であるという安全性、きれいな水が得られるといった衛生性、そして住居の快適性、更に建設費や電気・ガスなどの燃費がかからないといった効率性のことであることを明確にした後、これまで調査した東北の住宅について紹介した。

東北の住宅は冬寒く、夏は暑い。最近は、結露・カビ・ダニの問題も増えてきている。山形の住宅ではこたつとファンヒーターで1室のみで暖房を行い、暖房していない部屋はとても寒い。血圧計をつけて生活し、計られたデーターによれば、東北に多い脳卒中につながりそうな血圧の大きな変動が見られた。水蒸気の量はどの部屋も同じなのに、相対湿度が違う。これは温度差によるものであり、寒い部屋ほど湿度が高く結露がひどい。結露を防ぐためには、温度もある程度住宅の中では同じにする必要がある。

社会的背景として省エネ、地球環境、高齢社会などの問題があげられ、これからの住宅は、これらの背景をふまえて設計されることが望まれる。阪神大震災で、それどころではないといった感もあるが、地球環境問題は将来とも続くものだけに常に設計において考えていかなくてはならない。今後の住宅は耐熱・気密・暖房・換気がキーワードであり、この4つはセットで考えるべきである。更にこれらをベースに太陽エネルギーの利用ということも考えていくべきである。レンガ床と普通の木造床での室温測定によれば、蓄熱性が高いと室温の変動が小さいという研究を紹介し、地球環境を保全しつつ、周辺環境との親和性に富む健康で快適な居住環境のコンセプトを示した。

つづいて、東京都立衛生研究所の医動物研究室の主任研究員である吉川翠さんが講演した。ダニの研究をして25年というエキスパートであり、ダニ問題と改善方法について話をした。

ダニの繁殖条件は3つである。1．高温多湿　2．ゴミというエサ　　3．潜って産卵できる場所。この中でも繁殖の大きな条件となるのが高温多湿である。

採取されるダニの中でも56％を占め、問題になるのはヤケヒョウヒダニ・コナヒョウヒダニなどのチリダニである。古い家ほど多くみられる。掃除機で吸えば内蔵破裂で95％は死に至る。湿度が低いとペチャンとなるものの、湿度50％の状態であれば2週間は平気であり、湿度76％の環境に移すと16、17時間で元に戻る。

ダニもダニのフンも重くて呼吸器官に入らないものの、粉々になったフンは10ミクロンと小さく呼吸器官に入りやすくなる。アレルゲンの9割はフンによるものである。ダニは満足に食べさせると1日平均6コのフンをする。ダニはだいたい3か月生きるので、一生のうちに 500くらいのフンをする。生きたダニを減らせばフンの数が減る。アトピーなどは吸い込みだけではなく、皮膚から直接吸収される。アトピーと間違われやすいもので、ツメダニによる噛刺がある。70％以上の湿度で、吸収性のいい材料があると繁殖しやすい。これは関東以南、特に沖縄がひどい。エサと勘違いして刺したところに唾液が入り湿疹を起こす。アトピーが比較的左右対象に出るので、その出方を見ると違いがわかる。

ダニは昔は6～9月に多いものであったが、最近は暖房の発達もありカビと一緒に冬場に多くなってきている。最近はカビを食べるイエササラダニや昆虫が増えてきている。チャクタテムシという昆虫は、本来食品害虫であったが、カビが年中存在するのでカビばかり食べるようになってきた。アレルギーとも関係がありそうであるが、研究は行われていない。チリダニもカビを食べるが、カビだけでは成長できない。

ダニの量は、湿度の高い低いに比例するものの、住まい方によってずいぶん数が違ってくる。冬に殺さずに育ててしまうと夏に異常繁殖となる。１年中湿度が50％くらいだとダニは繁殖できない。冬の結露は一番大きな原因になる。これからの住宅は多少乱暴に暮らしても大丈夫な家がいいのではないかと吉川さんは感じている。

湿度が管理されている商業ビルではダニの量はずいぶん少ない。絨毯を使用している学校で調査してもダニは少ない。しかし、アレルゲンとしては一般家庭と同等の数値が出る。生息はしづらいものの、掃除がいいかげんだったりすると結局アレルゲンとなるフンなどは出ていかないためである。除去方法としては、50℃の環境で20分コナヒョウヒダニなどは死滅する。ふとんなどは掃除機で吸ったり、丸洗いすると９割ぐらいは落ちる。いずれこれからの住宅でも、温湿度管理と掃除はダニ・カビ対策の大きなポイントである。

基調講演が終わりパネルトーキングが行われた。コーディネーターは東北工業大学の石川善美教授である。パネラーには生理学が専門の岩手医科大学の高島浩一郎さん、日本大学東北高校建築科教諭・国立公衆衛生院客員研究員で室内空気汚染を研究する野崎淳夫さん、会津若松で高性能住宅を手がける工務店を営む小林正幸さん、宮城県で設計事務所を開いている一級建築士の安井妙子さんである。最初にそれぞれが専門分野の住宅について話をした。

高島さんは、「昔は病気でなければいいとされていたが、今は、より積極的な健康が求められている」と発言。寒ければ体は表面積を小さくし、放熱量を減らそうとし、暑ければ、どんどん放熱しようとする。これだけで調節できない場所では、衣服や住宅でフォローすることになる。体を鍛えるために寒いところで暮らしたり運動したりという意見もあるが、いつまでもがまんしつづけることは鍛えることではなく、がんばるときはがんばり、休むときは休むのが鍛えることにつながる。住まいに求められるのはがまんではなく、体がノビノビと動く環境である。

安井さんは自ら設計した高断熱・高気密住宅を紹介した。もともと木が好きで、それを長持ちさせようと取り組んでいったら、高断熱・高気密住宅にたどりついたとのこと。

小林さんはコストダウンと「私のような40代の人間が75歳になった我々を保護してくれる住宅」が必要と力説した。

野崎さんは集合住宅の暖房器を調査した結果、８割が開放型暖房器を使用していたと発表した。体調不良を訴える人も多く、中には二酸化窒素は0.06ppm という基準を遙に上回る６ppm といった汚染濃度のところもあった。室内の汚染発生を除くためのものは換気しかない。また、石油やガスの消費を減らすことが汚染の総量を減らすことにつながることから断熱性を高めること、器具特性に応じた部屋の使われ方、空調換気扇、吸着性の大きな内装材の開発が求められる。

高性能住宅ではしばしば低湿度が問題になるが、との石川教授の投げ掛けに、安井さんは「自分が建てた家で48％のところがあって、湿度が高すぎるのではないかと思ったのですが、住んでいる人は快適だというんですよ」とコメントした。小林さんは、もっと低い20％くらいのところもあるといった上で「医者はだいたい50～55％くらいというし、それ以上はカビのもとになる。住み手が知恵を働かせないといけない」と主張し、自宅では少し喉がかわくと思ったときは、障子に霧吹きで水をたっぷりかけたりする。高島さんは体が訴えるサインに従って、環境の調節をすることを前提にしながら「風邪は湿度の低さだけでなく、体力が落ちていたり疲れているときに起こる。むしろ快適な環境でよく休むことが大切」とコメントした。

野崎さんは、東京などではＲＣ造の集合住宅では電気ストーブやエアコンを使用しているので、汚染が少ないが、東北は寒いのでそれだけでは不十分である。空気汚染から考えれば気密は問題

であると指摘した。吉野教授は最後に、断熱・気密・換気・全室暖房を単独ではなく、セットで考えることが大切と発言した。

住宅はトータルで考えるべきであるとの認識を確認し、シンポジウムは閉会となった。

3－2　有機系（ポリマー）建設材料の廃棄とリサイクルに関するＲＩＬＥＭ国際ワークショップの開催

[RILEM Workshop on Disposal and Recycling of Organic(Polymeric) Construction Materials]

㈳日本建築学会　材料施工委員会　ＲＩＬＥＭ小委員会
主査　大濱　嘉彦

1．はじめに

近年、各種の有機系（ポリマー）材料が、建設分野において広範囲に利用されており、その廃棄とリサイクルが、建設産業の重大な問題となっている。又、建設産業は、有機系（ポリマー）材料の消費量が多い分野の１つであり、更に、リサイクルされた有機系（ポリマー）材料の極めて重要な消費分野にもなると考えられる。従って、有機系（ポリマー）建設材料のための自然に優しい廃棄システム及び効果的なリサイクルシステムの開発が、建設産業にとって必要な急がれる課題である。そこで、有機系（ポリマー）建設材料の廃棄及びリサイクルに関する最近の情報を収集すること及び自然に優しい廃棄システムと効果的なリサイクルシステムを開発するための新しいアイディアを創造することを目的に、本ワークショップを開催した。

2．会議の概要

(1)　会期：1995年３月26日（日）～28日（火）
(2)　会場：日本建築会館（〒108　東京都港区芝５－26－20）
(3)　共催：RILEM(国際材料構造試験研究機関連合）、㈳日本建築学会及び
　　㈳日本工業技術振興協会
(4)　後援：American Concrete Institute(ACI), American Society for Testing and Materials (ASTM)、㈳強化プラスチック協会、㈳土木学会、㈳プラスチック処理促進協会、廃棄物学会、㈶日本住宅・木材技術センター、㈳セメント協会、㈳日本コンクリート工学協会など計19団体
(5)　日程

1995年３月26日（日）	Registration Reception

1995年３月27日（月）	Opening Address Session Ⅰ Plastics-Based Materials Session Ⅱ FRP-Based Materials Banquet
1995月３月28日（火）	Session Ⅲ Rubber-Based Materials, Wood-Based Materials and Paper-Based Materials Session Ⅳ Others General Discussion Closing Address

(6) 参加者：海外からの参加者14名、日本からの参加者59名　　合計73名
主な参加国 ― アメリカ、ドイツ、スイス、韓国、中国

3. 発 表 内 容

講演は４つのセッションに分かれて行われた。以下に講演内容の概要をセッション別に紹介する。又、講演風景を写真１に示す。

＊Session Ⅰ Plastics-Based Materials

（１）Mechanical Properties of Polymer Mortar Made from Recycled PET-Based Unsaturated Polyester Resin

Y.S. Soh and H.S. Park
Department of Architectural Engineering, College of Engineering,
Chonbuk National University, Chonju, Korea
D.S. Lee
Department of Chemical Technology, College of Engineering,
Chonbuk National University, Chonju, Korea

再生 PET（ポリエチレンテレフタレート）を主原料とする不飽和ポリエステル樹脂を結合材としたポリマーモルタルの機械的性質に関する研究報告。再生 PETを熱分解したものを主原料とする不飽和ポリエステル樹脂を製造し、それを用いたポリマーモルタルの性質について検討している。不飽和度の高い不飽和ポリエステル樹脂の硬化物及びそれを用いたポリマーモルタルは、不飽和度の低い樹脂で製造されたそれらに比べて、高いガラス転移点及び圧縮強さ並びに、高い曲げ弾性と低い曲げ強さを与えることから、このような性質は、樹脂の不飽和度、架橋密度及び樹脂分子鎖の柔軟性に依存することを明らかにしている。

（２）Properties of Plain and Reinforced Polyester Concretes Made with Recycled PET

K.S. Rebeiz
Department of Civil and Environmental Engineering, Lafayette College,
Easton, Pennsylvania, USA

D.W. Fowler
Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin,
Austin, USA

再生 PETを主原料とする不飽和ポリエステル樹脂を結合材とした無筋及び鉄筋補強ポリエステルコンクリートの性質に関する研究報告。再生 PETを主原料とする不飽和ポリエステル樹脂を結合材とした無筋及び鉄筋補強ポリマーコンクリートの性質は、純粋な樹脂を用いたポリマーコンクリートのそれらとほぼ同様であり、再生 PETを主原料とする樹脂の使用は、ポリマーコンクリート製品の価格を減少すると共に、省エネルギー化をもたらし、プラスチック廃材による環境問題の軽減に役立つと述べている。

（3）A New Kind of Hybird Recycled Polymer Mortar

Y. Bao
East China Hydroelectric Power Investigation & Design Institute,
Hangzhou, Zhejiang Province, China
D.P. Whitney and D.W. Fowler
Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin,
Austin, USA

再生ポリマーを複合化して用いた新しい種類のポリマーモルタルに関する研究報告。再生ポリウレタン樹脂及び不飽和ポリエステル樹脂を結合材とするポリマーモルタルの配合、機械的性質及び耐薬品性について検討している。再生ポリウレタン樹脂で変性した再生ポリエステル樹脂を結合材とするポリマーモルタルはオーバーレイ材料として使用でき、ポリウレタン樹脂とポリエステル樹脂の長所を併せ持っている。そのモルタルは、優れた接着性、良好な引張及び圧縮強さを有し、硬化収縮が小さく、不透水性である。又、強度発現にも優れることから、コンクリート構造物の補修材料としても使用可能であるとしている。

（4）Utilization of Waste Plastics as Aggregate in Asphalt Mixture

M. Yamada
Department of Civil Engineering, Osaka City University, Osaka, Japan

アスファルト混合物の骨材としての再生プラスチックの利用に関する研究報告。工業用プラスチックリサイクルのための減容工場から得られる寸法２～10㎜の再生プラスチック粒及び廃棄物から分類され、破砕した寸法２～５㎜の再生プラスチック粒を、骨材の５～10 vol%混入したアスファルト混合物の安定性及び曲げ性状について検討すると共に、それの試験施工を実施している。その結果、廃棄物から得られるこれらのプラスチック粒は、アスファルト混合物用骨材として使用できることを見いだしている。

（5）The Behavior of Portland Cement Concrete with the Incorporation of Waste Plastic Fillers

D. Sander, D.W. Fowler and R.L. Carrasquillo
Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin,
Austin, USA

廃棄プラスチック充填材を混入したポルトランドセメントコンクリートの挙動に関する研究報告。高密度及び低密度ポリエチレン、ポリエチレンテレフタレート、ポリプロピレン、ポリ塩化ビニル、ポリスチレンなどの廃棄プラスチックを充填材として用いたセメントコンクリートの圧縮強度、耐衝撃性、耐摩耗性、塩化物イオン浸透性などについて検討し、それらの性質に及ぼす充填材としての廃棄プラスチックの種類、形状、寸法及び添加量の影響を明らかにしている。

（6）Polymer Granulates for Masonry Mortars and Outdoor Plaster

H.R. Sasse
IBAC, Rheinisch-Westfalische Technische Hochschule Aachen, Aachen, Germany
O. Lehmkamper
PROKU, Kunststoffveredelung GmbH, Essen, Germany
R. Kwasny-Echterhagen
SICOWA, Verfahrenstechnik fur Baustoffe GmbH & Co. KG, Aachen, Germany

組石造用モルタル及び外装用プラスターのための人工軽量骨材に関する研究報告。プラスチック廃材を人工軽量骨材として再利用するための生産工程について述べている。その工程は、廃棄プラスチックの破砕、洗浄、加圧成形及びオートクレープ処理から成り、オートクレープ処理によって得られたブロック状の成形体は、寸法 0.125～4 mmの粉状に粉砕され、人工軽量骨材として使用される。このような工程で製造された人工軽量骨材の基礎的性質を明らかにすると共に、それを混入したモルタルの性質について検討し、その有用性を示している。

（7）Polymer Modified Lightweight Cement Mortar Using Plastics Waste

Y. Hayashi
Technical Research Institute, Obayashi Corporation, Tokyo, Japan
R. Naniwa, H. Iibachi and K. Hada
Department of Architecture, Faculty of Engineering, Kogakuin University, Tokyo, Japan
T. Yamazaki
Acolite Construction, Pte. Ltd., Singapore

廃棄プラスチックを用いた軽量ポリマーセメントモルタルに関する研究報告。タイル接着用として使用される廃棄プラスチックを骨材とした軽量ポリマーセメントモルタルについて、それを用いてタイルを接着した場合の外気温の変化に伴うタイル接着面の挙動についての解析結果並びに、軽量ポリマーセメントモルタルのワーカビリティー、乾燥収縮、吸水率、強さ性状などについての試験結果を述べ、その利用法を示している。

＊Session Ⅱ FRP-Based Materials

（8）Updating Recycling Technologies for Thermoset Composites in Japan

T. Kitamura
The RTC (FRP Waste Recycling and Treatment Council) of The Japan Reinforced

Plastics Society (JRPS), Tokyo, Japan

日本における熱硬化性樹脂を用いた複合材料の最新のリサイクル技術に関する研究報告。FRP廃材のリサイクル技術は、３つに大別される。それは、粉砕によるリサイクル材料の収集、熱分解あるいは化学分解による化学的リサイクル、焼却によって提供される再生エネルギーである。本報告では、それらの技術の詳細について述べている。なお、 FRP廃材の粉砕処理費用を低減するためには、固定残留物に付加価値をつけた再利用の開発は欠くことのできないものであり、1990年に強化プラスチック協会では、熱硬化性樹脂を用いた複合材料廃材のリサイクルに関する技術及び社会問題を解決するために、「FRP Recycling and Treatment Councli (FRPのリサイクルと処理委員会）」を組織している。

(9) Environment-Conscious Materials Design of Lightweight Precast Concrete Components with Recyclable FRP Rebars

T. Fukushima
Materals Department, Building Research Institute,
Ministry of Construction, Tsukuba, Ibaraki-ken, Japan
K. Yanagi
Inorganic Materials Testing Division, Japan Testing Center for Construction Materials, Soka, Saitama-ken, Japan
T. Maeda
General Institute, Mitsubishi Chemical Corporation, Yokohama, Japan

リサイクル可能な FRP筋で補強した軽量プレキャストコンクリート複合体の環境共生材料としての設計に関する研究報告。地球環境問題を引き起こす多量の建設廃材の環境への負担を低減するために、建設材料や部材の環境共生材料（エコマテリアル）としての概念を示している。この概念の一つとして、鉄筋コンクリート柱と新しいプラスチック連続繊維補強コンクリート梁をスチールファスナーで接合する複合構造システム、リサイクルプレキャスト鉄筋コンクリート及び各種の効果的な解体方法が提案されている。熱硬化性のエポキシ樹脂及びビニルエステル樹脂ではなく、熱、光化学及び生化学的に分解できる樹脂を用いたリサイクル可能な連続繊維補強筋で補強した軽量高強度コンクリートが、建設材料や部材の長期の耐用年数と再生利用の両方を満足するエコマテリアルとして推奨されている。この材料設計のための効果的なデータを得るための試験として、せん断補強筋として連続炭素繊維を熱分解できる樹脂によって結束した補強筋（CFRP）又は、主筋として現在使われている熱硬化性エポキシ樹脂を結合材としたCFRP製異形補強筋で補強した軽量高強度プレキャストコンクリート供試体の曲げ試験を行い、その実験結果を報告している。

(10) Recycling of Plastics Wastes from Electronic Parts Production Processes

M. Iji and S. Yokoyama
Resource and Environment Protection Research Laboratories,
NEC Corporation, Kawasaki, Japan

電子部品製造工程からの廃棄プラスチックの再利用に関する研究報告。電子部品産業において、主要なプラスチック製品であるプリント基板及びICパッケージの製造工程から発生する熱

硬化性プラスチック廃棄物のリサイクルについて検討している。プリント基板の成形残留物の粉砕技術及びガラス繊維と樹脂からなるFRP微粉末からの銅の回収技術が開発されていることを示している。平均粒径 100～ 300μmのプリント基板廃棄粉末から、そこに含まれる銅の90%以上が回収でき、銅回収後のガラス繊維－樹脂粉末は、エポキシ樹脂系塗料や接着材の強度及び熱的性質の改善に利用でき、ポリマーモルタルの充填材としても利用できることを明らかにしている。

(11) Preparation and Properties of Lightweight High-Strength Mortars Containing FRP Fine Powder as Aggregate

A. Kojima
Department of Industrial Chemistry, Gunma College of Technology, Maebashi, Gunma-ken, Japan
S. Furukawa
Department of Civil Engineering, Gunma College of Technology, Maebashi, Gunma-ken, Japan

骨材としてFRP微粉末を混入した軽量高強度モルタルの製造及び性質に関する研究報告。セメントモルタルの骨材としてFRP微粉末を混入し、200℃で加熱養生することによって、軽量化が図られ、その曲げ及び圧縮強度は、それぞれ、 2.5 及び 3.5倍になることを示している。又、 FRP微粉末を混入したモルタルの曲げ強度及び変形性能を改善するための繊維（ビニロン、ポリプロピレン、炭素繊維など）の補強効果についても検討している。本研究の結果、かさ密度1.0g／cm³、曲げ強度7.1MPa、圧縮強度41MPa の軽量高強度モルタルを製造できたと結論づけている。図１及び図２は、 FRP微粉末を混入したモルタルの建設材料としての用途例を示している。

(12) Properties of Autoclaved Cement Paste Containing Scrap FRP Powder

M. Wakasugi and A. Sugiura
Central Research Division, Cement/Concrete Research Laboratory, Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd., Osaka, Japan

オートクレーブ養生したFRP微粉末混入セメントペーストの性状に関する研究報告。 FRP微粉末あるいはガラス粉を混入したセメントペーストをオートクレーブ(160℃、10時間）養生した時の強度及びかさ比重について検討している。その結果、かさ比重の増加に伴って、圧縮及び曲げ強度は増大するが、 FRP微粉末の混入率を５及び10%とした時の圧縮及び曲げ強度は、FRP微粉末未混入セメントペーストのそれらより小さくなるが、その混入率を15%とすることによって、それらの強度は増大することを明らかにし、 FRP微粉末はオートクレーブ養生して製造されるセメント系の製品の充填材として使用できるとしている。

(13) Recycling of FRP as a Cementitious Composite

K. Yamada
Chemicals Research Laboratories, Nippon Steel Co., Ltd., Kawasaki, Japan
H. Mihashi

Department of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku University,
Sendai, Japan

セメント系複合材料への FRPの再利用に関する研究報告。アスベストを使用しない押出成形用モルタルとしての FRP微粉末を用いたセメント系複合材料の曲げ性状について検討している。使用する粉体材料に対する FRP微粉末の混入割合を 9.1、13.3、及び22.8%と変化させたセメント系複合体（寸法15mm×40mm）を押出成形すると共に、 FRP微粉末未混入で、珪砂をすべての粉体材料に大して 9.1%混入したものとしないものを成形して、それらの押出適性、かさ密度、曲げ強度、弾性係数などについて検討している。又、曲げ試験後の供試体破断面をSEM(走査型電子顕微鏡）によって観察し、空隙の測定も行っている。その結果、 FRP微粉末を混入し、オートクレーブ養生を行った供試体の曲げ強度は優れないが、 FRP微粉末を 9.1%混入し、水中養生した供試体については優れた曲げ強度を示すことを明らかにすると共に、本研究の範囲では、 FRP微粉末の混入量の増加に伴って、曲げ強度及び曲げ弾性係数は減少し、吸水率は増大すると述べている。

(14) Properties of Artificial Woods Using FRP Powder

K. Demura, Y. Ohama amd T. Satoh
Department of Architecture, College of Engineering, Nihon University,
Koriyama, Fukushima-ken, Japan

FRP微粉末を混入したセメント系人工木材の性質に関する研究報告。 FRP廃材の再利用を目的として、 FRP廃材を微粉砕して得られる廃棄 FRP微粉末を利用した人工木材の性質について検討している。 FRP微粉末混入人工木材を、早強ポルトランドセメント、シリカフューム、FRP微粉末、人工軽量骨材、化学混和剤及び炭素繊維を配合して製造し、そのかさ比重、曲げ及び圧縮強さ、釘の引抜き抵抗性などについて試験している。その結果、人工木材の最適調合を提案すると共に、その調合で作製した人工木材のかさ比重、曲げ及び圧縮強さは、ケイ酸カルシウムを用いた人工木材のそれらより大きくなることを見いだしている。更に、 FRP微粉末混入人工木材は、天然の木材と同様に釘打ちやのこぎり引きができると述べている。

＊Session Ⅲ Rubber-Based Materials, Wood-Based Materials and Paper-Based Materials

(15) Noise Abatement by Panels of Recycled Vehicle Tires

M. Motavalli, M. Farshad and P. Flueler
Eidgenossische Materialprufungs-und Forschungsanstalt,
Dubendorf, Switzerland

廃タイヤを原料とした遮音材料に関する研究報告。自動車タイヤの再生ゴムから製造される再生パネルに関する実験的及び理論的研究結果について報告している。このパネルは、高速道路沿いに設置される垂直壁部材であり、交通騒音の減少を目的としている。再生ゴムで成形されたパネルの引張、圧縮及び曲げ試験を行うと共に、その短期及び長期クリープ特性、吸音特性、難燃性などについて検討している。

(16) Construction Materials Using Powdered Rubber Made of Vehicle Tires

R. Yamamoto

Muraoka Rubber Reclaiming Co., Ltd., Ichikawa, Chiba-ken, Japan

廃タイヤ粉砕品を用いた建設材料に関する研究報告。粉砕ゴムとすることは、自動車タイヤの廃棄とリサイクルのために効果的な手段と述べ、使用済み自動車タイヤをから粉砕ゴムを得るための代表的な製造工程を示し、建設材料の製造技術、性質及び用途（例えば、粉砕ゴムを用いたインターロッキングゴムブロック及びアスファルト混合物）について概説している。図3～図6には廃タイヤ粉砕品を用いた建設材料の用途例を示す。

(17) Punching Resistance of Mats Made of Recycled PVC and Rubber in Underground Construction

P. Flueler, M. Farshad and A. Roller

Eidgenossische Materialprufungs-und Forschungsanstalt, Dubendrof, Switzerland

再生 PVC（ポリ塩化ビニル）マット及びゴムマットを保護層とする地下構造物用防水シートの打抜き抵抗性に関する研究報告。保護層として再生 PVCマット又は再生ゴムマットを張付けた PVC製防水シートの打抜き抵抗性を検討するために、重さ6kgの球形のノズル（図7）又は、重さ 0.560kgの円柱形の打抜きヘッド（図8）から成る落下物を、 PVC防水シートの保護層を貫通するまで、落下高さを変化させて落下させ、試験を行っている。その結果、これらの保護層を持つ PVC防水シートは打抜きに対する優れた抵抗性を有し、SIA Norm 80 の必要条件を満たしており、その水密性が保証されることを明らかにしている。

(18) Newly Developed Wood-Chip Concrete with Recycled Timbers

Y. Kasai, M. Kawamura and J. D. Zhou

Department of Architecture and Architectural Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Narashino, Chiba-ken, Japan

K. Machida

Central Laboratory, Japan Testing Center for Construction Materials, Soka, Saitama-ken, Japan

廃棄木材を用いた木片混入コンクリートの開発に関する研究報告。水セメント比を35、40、50及び60%、木片混入率を30、40、50及び60%として、その密度が 920から1250kg／㎥になるように調製した木片混入コンクリートについて、その曲げ強度、圧縮強度、収縮、熱伝導率及び熱膨張係数試験を実施している。その結果、木片混入コンクリートの曲げ及び圧縮強度は、それぞれ、 4.0～7.0MPa及び 5.0～8.0MPa、熱伝導率は 0.2 ～0.36W/mKであり、又、釘打ちやのこぎりでひくこともでき、開発した木片混入コンクリートを建設材料として使用することが可能であるとしている。

(19) Particleboards Made from Recycled Wood

S. Suzuki

Department of Forest and Wood Engineering, Faculty of Agriculture, Shizuoka University, Shizuoka, Shizuoka-ken, Japan

再生木材を原料とするパーティクルボードに関して、原料としての再生木材（廃棄木材のチップ）の品質や利用上の問題点に関する研究報告。現在、パーティクルボードの原材料として再生木材が用いられており、その再生木材の小片としては、比較的大型の建設部材を切削して製造されるＰチップと廃棄木材を破砕して用いられるＳチップとがある。これらを用いて製造したパーティクルボードのうち、Ｐチップを用いたものの品質は通常のチップを用いたものの品質と同等であり、低品質のチップをハンマーミルで粉砕した小片であっても、パーティクルボードの芯材として使用することができることを明らかにすると共に、再生木材チップを用いた３層構造を有する新しい構造合板の製造法を提案している。

(20) Development of Formwork Material Made of Scrap Lumber

T. Ono, S. Ono and T. Kumano
Civil Engineering Division, Shimizu Corporation, Tokyo, Japan
T. Sano
Tokyo Branch, Shimizu Corporation, Tokyo, Japan
Y. Mukawa
Technology Development Division, Shimizu Corporation, Tokyo, Japan

廃棄木材を原料とする型枠の開発に関する研究報告。廃棄木材を原料として得られた木材チップを用いて製造するパーティクルボードの曲げ強度改善のためのガラス繊維混入効果を検討している。その結果、廃棄木材を用いたパーティクルボードの曲げ強度特性は、ラワン合板のそれとほぼ同等の性能を有し、耐衝撃性についても、通常使われている厚さ25㎜のパーティクルボード以上の性能を示すことを明らかにし、型枠への利用の可能性を示している。

(21) Ecology Boards Using Recycled Paper Resources for Concrete Forms

K. Kurihara and S.Takata
Technical Research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd.,
Yamato. Kanagawa-ken, Japan
Y. Tomimura and S. Hosoya
Forestry and Forest Products Research Institute,
Kukizaki-machi, Ibaraki-ken, Japan

コンクリート用型枠として用いる再生紙資源を用いたエコロジーボードに関する研究報告。「エコロジーボード」と称して、廃紙を原料としたボードの製造法を検討すると共に、製造したボードの性質について明らかにし、廃紙、特に、新聞紙はコンクリート型枠用エコロジーボードとして再生利用可能であると述べている。又、密度0.85g/㎤として製造したエコロジーボードの曲げ強度及び弾性係数は、それぞれ、 40MPa及び4.5GPa以上であり、コンクリート用型枠として使用する場合の釘打ち及び切断に関しても問題がないことを示している。

(22) Recycling of Used Paper as a Building Material

H. Mihashi, K.Kirikoshi and S. Arikawa
Department of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku University,
Sendai, Japan

T. Yamamoto
Tohoku Pole Company, Inc., Sendai, Japan
T. Narita
Tohoku Electric Power Company, Inc., Sendai, Japan

廃紙の建設材料としてのリサイクルに関する研究報告。石炭灰から製造される軽量骨材の繊維補強材料として廃紙を利用することを試みている。シュレッダーで粉砕した廃紙、早強セメント及び石炭灰の混合物に水を加えて造粒して軽量骨材を製造し、それを用いたモルタルを芯材として、その外側をガラス繊維メッシュとアルミニウムシートで覆ったサンドイッチパネルの曲げ性状について検討し、パネルの曲げ性状の改善には、芯材のせん断強度が重要な要因の一つであるため、芯材の補強用繊維の増加及びより強いメッシュの使用が望まれるとしている。

(23) Use of Paper Sludge Ash in Concrete Products

Y.S. Soh and S.Y. Soh
Department of Architectural Engineering, College of Engineering,
Chonbuk National University, Chonju, Korea
D.S. Lee
Department of Chemical Technology, College of Engineering,
Chonbuk National University, Chonju, Korea

コンクリート製品への紙スラッジの焼却灰の利用に関する研究報告。セメントコンクリート製インターロッキングブロックへの紙スラッジの焼却灰の使用の可能性について検討し、焼却灰の添加は、セメントモルタルあるいはコンクリートの水セメント比及び吸湿量の増加と曲げ強度の減少を引き起こすが、アクリル系エマルションを５％混入することによって、それらの性状が改善されることを明らかにしている。

＊Session Ⅳ Others

(24) Investigation on Deterioration of Recycled Hot-Mixed Asphalt Concrete Pavement and a Trial Re-recycling of Asphalt Concrete

T. Yoshikane
Taiyu Kensetsu Co., Ltd., Nagoya, Japan

再生アスファルトコンクリート舗装の劣化及びアスファルトコンクリートの再々利用に関する研究報告。再生アスファルトコンクリート舗装の耐久性及びそれを再度再生して用いたアスファルトコンクリート舗装の試験施工現場の調査結果について検討し、再生アスファルトコンクリート舗装は、15年３箇月経ても良好な耐久性を維持していることを明らかにすると共に、アスファルトコンクリートの再々利用のための調合を確立している。

(25) Reuse of Carpet Industrial Waste for Concrete Reinforcement

Y. Wang
School of Textile & Fiber Engineering, Georgia Institute of Technology,
Atlanta, USA

コンクリートの補強材としての廃棄カーペットの再利用に関する研究報告。コンクリート補強材として、廃棄カーペットから得られる再生繊維を用いた場合と、従来の繊維を用いた場合について、圧縮、曲げタフネス及び乾燥収縮試験を行い、比較検討している。その結果、コンクリート補強材としての再生繊維の使用は、コンクリートのタフネス、伸び能力、乾燥収縮などの改善に有効であり、又、低価格の廃棄カーペット繊維は、実構造物（床スラブ、壁材）、高速道路、橋梁などに利用可能であるとしている。

4. 展 示 会

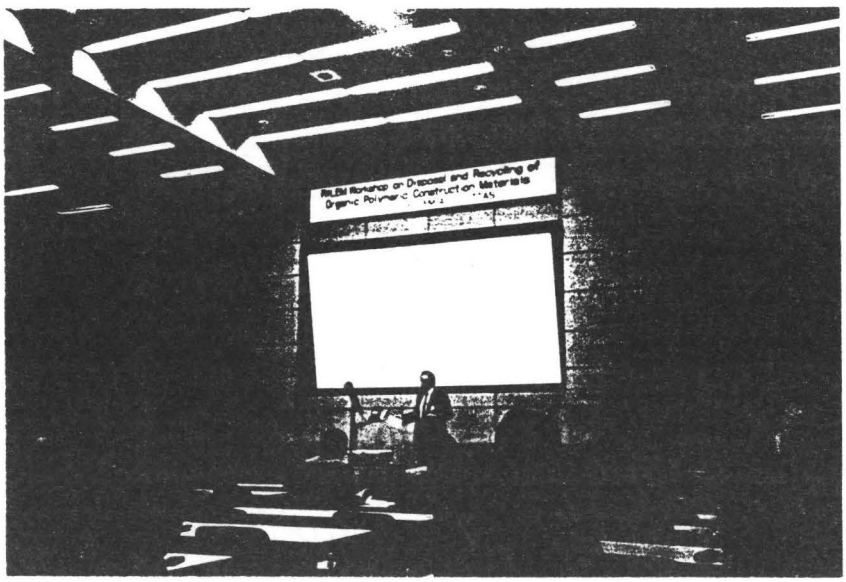
ワークショップと並行して、有機系（ポリマー）建設材料の廃棄とリサイクルに関する展示会も開催された。展示会風景を写真－2に示す。

5. おわりに

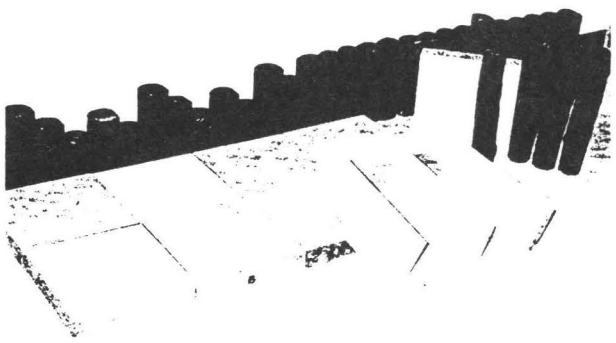
各 Sessionでの研究発表の後、General Discussionが行われ、有機系（ポリマー）建設材料の廃棄及びリサイクルに関する意見交換の後、本ワークショップで取り上げられた多くのテーマは、今後とも、継続して研究が行われると共に、このような廃棄やリサイクルに関する考え方を、学生を含めた、建設分野の技術者に啓蒙することが重要であることが確認された。

謝辞

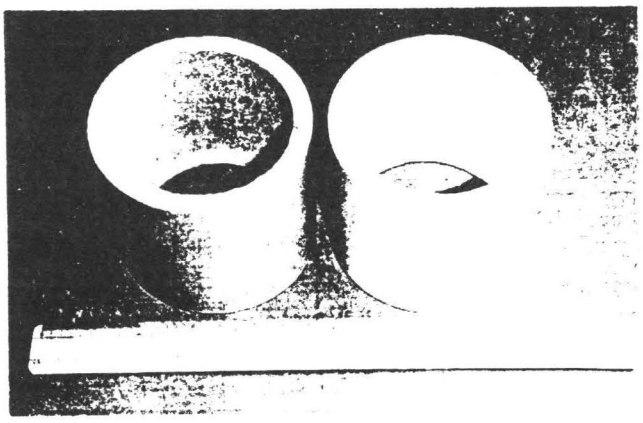
本ワークショップは、㈶トステム建材産業振興財団第3回（平成6年度）助成並びに、㈳日本建築学会及び㈳日本工業技術振興協会からの補助を得て開催された。ここに記して、厚くお礼申し上げる。



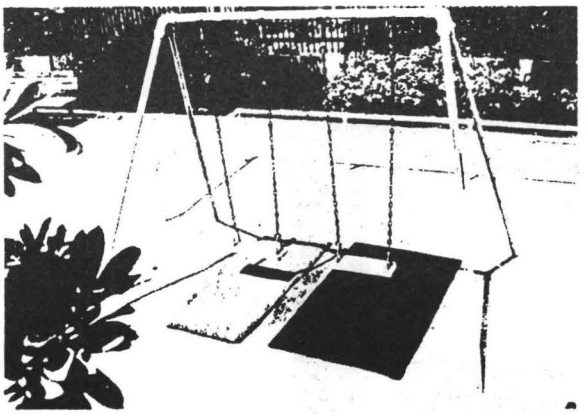
写真－１　講演風景



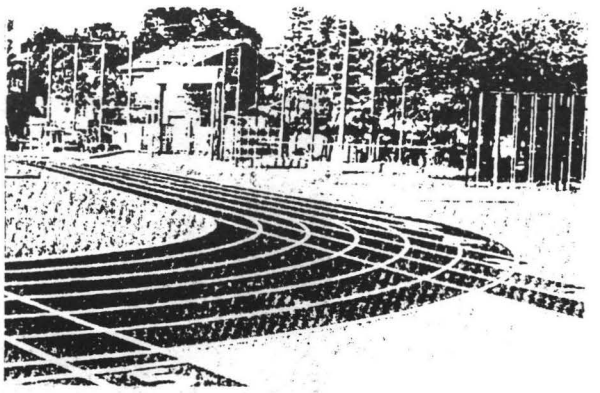
図－１　コンクリート歩道板と人工木材



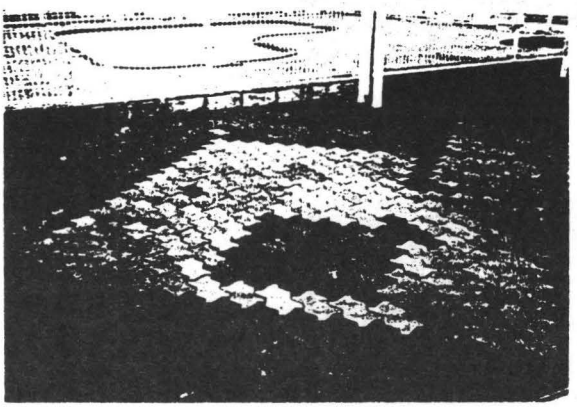
図－２　光沢面を有する遠心成形コンクリートパイプ



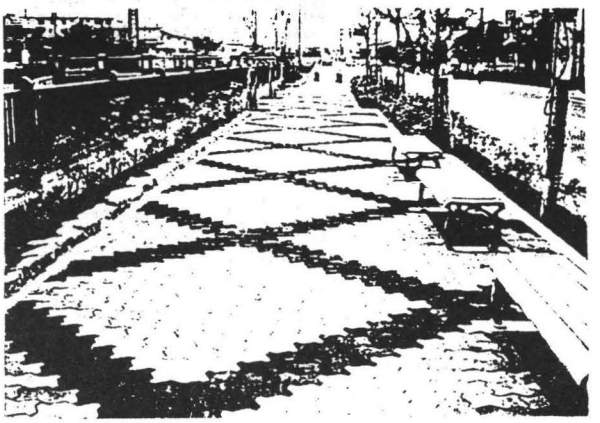
図－3　ブランコ下の防護マット



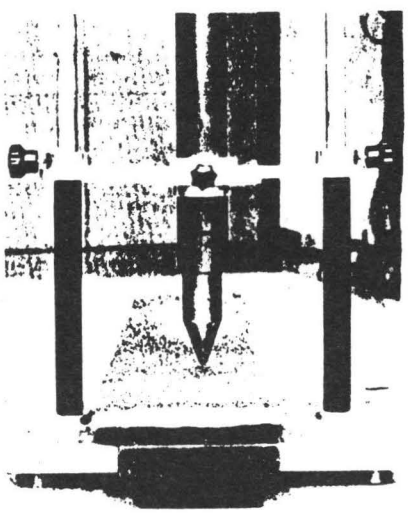
図－4　学校の運動場



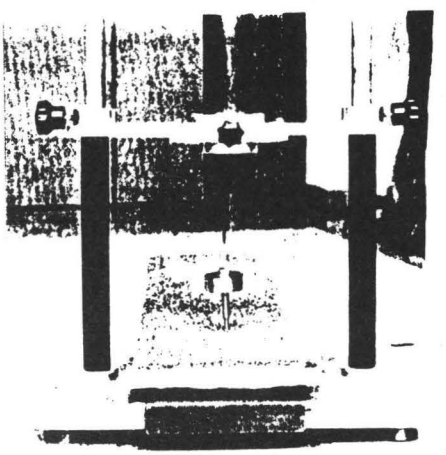
図－5　プールサイドの舗道



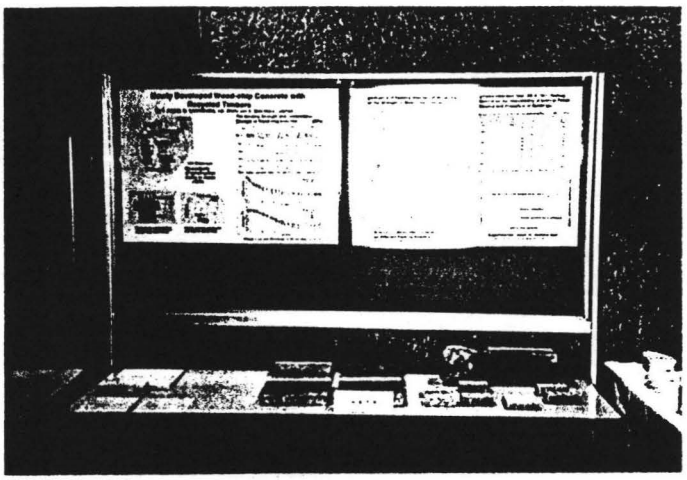
図－6　川沿いの遊歩道

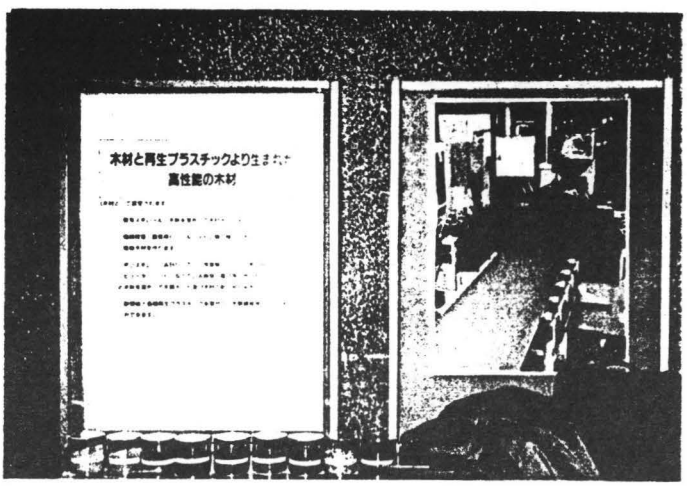


図－7　球形のノズル



図－8　円柱形の打抜きヘッド





写真－２　展示会風景

編 集 後 記

平成６年度研究助成の成果をまとめ、第３号研究助成成果報告書と致しましたので、お届け致します。

研究者の方々には編集にご協力戴きまして有難うございました。

1997年３月

第３回（平成６年度）研究助成成果報告書

1997年３月25日　　発　行

財団法人トステム建材産業振興財団

東京都江東区大島２丁目１番１号

トステムハウジングプラザビル７階

TEL.03－5626－1008

FAX.03－5626－1033