

長野県産カラマツ構造材の強度特性に関する研究

橋 爪 丈 夫

要 旨

カラマツ人工林は短伐期経営を意図して誕生したが、需要構造の変化から長伐期大径材生産を指向するようになった。

本論文では、カラマツを構造材として利用するために心去り正角の曲げ強度を詳細に解析し、荷重方向と曲げ強さとの関係から、横架材として有利な使い方を示すとともに、林分の樹齢、海拔高および地域と曲げ強度性能との関係を考察した。

つぎに、構造用集成材素材としての可能性を検討し、ラミナの製材寸法は木取り位置によって設定できること、縦振動法による丸太等級区分の意義を示した。また、連続送り式機械等級区分装置の特性を明らかにし、測定値の解析結果から現状の人工造林木で製造可能な集成材の強度等級を推定した。

さらに、ラミナの曲げおよび引張り強度特性を明らかにし、ラミナの機械等級と集成材の曲げ強度性能の関係を示した。加えて、集成加工材料の特性である積層効果が垂直積層集成材で顕著であり、水平積層集成材では認められないことを示し、後者の最外層用ラミナの機械等級区分は長さ方向の曲げヤング係数の最小値で行うべきことを提案した。

本論文は、「京都大学学位論文」である。

目 次

第1章 序論	7
1.1 はじめに	7
1.2 既往の研究	7
1.2.1 長伐期施業に向けての研究	7
1.2.2 カラマツの材質に関する研究	8
1.2.3 カラマツ製材の外観的因子による品等区分に関する研究	9
1.2.4 カラマツ材のヤニ滲出防止、乾燥に関する研究	10
1.2.5 実大材による強度評価に関する研究	10
1.2.6 製材およびラミナの強度等級区分に関する研究	11
1.2.7 構造用集成材に関する研究	13
1.2.8 木材強度の寸法効果に関する研究	14
1.3 おわりに	15
第2章 心去り正角の実大材曲げ強度特性	16
2.1 はじめに	16
2.2 実験	16
2.2.1 林分と供試木	16
2.2.2 試験材の調整および製材	18
2.2.3 材質指標、含水率、および縦振動ヤング係数の測定	18
2.2.4 曲げ試験	20
2.3 結果と考察	21
2.3.1 荷重方向と曲げ強度性能との関係	21
2.3.2 材質指標と曲げ強度性能との関係	22
2.3.3 非破壊的手法による曲げ強さの推定	23
2.3.4 構造材としての評価	24
2.3.5 試験結果の林分別比較	26
2.4 おわりに	29
第3章 連続送り式グレーディングマシンの特性とその調整	31
3.1 はじめに	31
3.2 連続送り式グレーディングマシンについて	31
3.3 実験	32
3.3.1 材料	32
3.3.2 試験条件の設定と連続送り式グレーディングマシンによる曲げヤング係数の測定	32
3.3.3 材料試験機による曲げヤング係数の測定	33
3.3.4 ラミナの力学的支持条件を示す指標	33
3.4 結果と考察	34
3.4.1 送り速さと測定値との関係	34
3.4.2 装置により測定した曲げヤング係数と材料試験機により測定した曲げヤング係数との関係	34
3.4.3 測定中のラミナの力学的支持条件	34
3.4.4 測定値の補正と測定精度の推定	37

3.5 おわりに	39
第4章 乾燥工程におけるラミナの狂いと適正製材寸法との関係	40
4.1 はじめに	40
4.2 実験	40
4.2.1 供試丸太と製材および人工乾燥	40
4.2.2 ラミナの調査	41
4.3 結果と考察	42
4.3.1 製材精度とラミナ歩留り	42
4.3.2 ラミナの乾燥による形質変化	44
4.3.3 適正な製材寸法	45
4.4 おわりに	46
第5章 縦振動法による丸太等級区分と木取り位置によるラミナの選別	47
5.1 はじめに	47
5.2 実験	47
5.2.1 供試丸太と縦振動ヤング係数の測定	47
5.2.2 製材および人工乾燥	47
5.2.3 ラミナの調査	47
5.3 結果と考察	48
5.3.1 末口径および材質指標と丸太の縦振動ヤング係数との関係	48
5.3.2 丸太の縦振動ヤング係数とラミナの曲げヤング係数との関係	49
5.3.3 縦振動ヤング係数による丸太の等級区分	50
5.3.4 ラミナの曲げヤング係数の丸太内変動	50
5.3.5 丸太の等級区分と木取り区分を併用したラミナの選別	51
5.4 おわりに	52
第6章 ラミナの等級区分と構造用集成材の強度等級の推定	54
6.1 はじめに	54
6.2 実験	54
6.2.1 材料	54
6.2.2 ラミナの調査	54
6.2.3 連続送り式グレーディングマシンで測定した曲げヤング係数の分布	54
6.3 結果と考察	55
6.3.1 ラミナの調査結果	55
6.3.2 目視等級区分されたラミナの曲げヤング係数	57
6.3.3 連続送り式グレーディングマシンによって測定されたラミナの曲げヤング係数の分布	58
6.3.4 製造可能な構造用集成材の強度等級の推定	59
6.4 おわりに	60
第7章 ラミナの曲げ、引張り強度特性	61
7.1 はじめに	61
7.2 実験	61

7.2.1	材料	61
7.2.2	ラミナの調整	62
7.2.3	ラミナの調査	62
7.2.4	ラミナの強度試験	62
7.3	結果と考察	63
7.3.1	装置によって機械等級区分されたラミナの曲げヤング係数	63
7.3.2	破壊に関係したと判断された因子の比率	63
7.3.3	通しラミナおよび縦継ぎラミナの強度特性	63
7.3.4	材質指標、曲げヤング係数によるラミナの強度推定	66
7.3.5	等級区分されたラミナの強度性能	67
7.4	おわりに	71
第8章 機械等級区分ラミナで構成した同一等級構成集成材の曲げ強度特性		73
8.1	はじめに	73
8.2	実験	73
8.2.1	ラミナの等級区分と試験体の作成	73
8.2.2	振動試験	75
8.2.3	曲げ試験	76
8.3	結果と考察	76
8.3.1	ラミナの強度特性	76
8.3.2	集成材の強度特性	80
8.3.3	縦振動およびたわみ振動ヤング係数と曲げヤング係数との関係	84
8.4	おわりに	86
結 言		87
本論文の要旨		89
謝 辞		93
引用文献		94

第1章 序 論

1.1 はじめに

カラマツ (*Larix leptlepis* GORDON) は、東北の一部、関東、中部の山地に天然分布する我が国固有の樹種であり、亜高山帯を中心に低山帯や高山帯にも分布し、垂直分布の範囲は900～2800mにまで及ぶ⁽¹⁾。寒冷気候に適し、成長が早く、立地適応力が大きいなどの特性があることから、短伐期経営・拡大造林の担い手として、第二次世界大戦後北海道から九州まで広く造林された^(2,3)。その結果、植栽面積は107万ha⁽⁴⁾を超え、全国の人工林面積の10%以上を占めるに至った。一方、長野県におけるカラマツ人工林面積は24.4万haで、人工林総面積の55%を占め、長野県を代表する樹種となった⁽⁴⁾。

かつて、カラマツ材の用途は土木用材が主流であり、戦後の都市復興資材として十分な需要があったが、1960年頃からの代替材の進出、1965年頃からのソ連カラマツ材の大量輸入などにより、土木用材としての需要は激減し⁽⁵⁾、新たな用途開発が必要となった。しかし、拡大造林により植栽されたカラマツは、若齢で小径材であったこと、製材とした場合に、らせん木理に起因する乾燥にともなうねじれが著しい上、ヤニの滲出などから、構造材への利用展開は困難であった。その結果、需給構造の変化に柔軟に対応できる、大径材の保続生産を目標とした長伐期施業の選択が有効であると考えられるようになった⁽⁶⁾。

長伐期大径材生産を指向したとき、構造材の中でも心去り正角が用途の多くを占めると考えられる。心去り正角の形質的な性能は1.2で述べる既往の研究により明らかにされているので、本論文第2章では、構造材として要求される性能として曲げ強度を取り上げ、大径材からの心去り正角の強度特性を明らかにした。また、カラマツ林の施業が長伐期大径材生産に移行しても、継続的に生産される間伐材や大径材上部の中・小丸太からの製材は狂いの発生が大きいので構造材としての利用展開が困難な場合が多い。構造用集成材は、未成熟材を多く含む強度的に劣るラミナであっても、対称異等級構成集成材の内層用として利用が可能であり、それらの有効な用途と考えられる。そこで、本論文第3章から第8章において、強度的信頼性が要求される構造用集成材の分野でカラマツ材を利用することを目的にして行った、一連の実験的研究の成果をまとめた。

本章では本研究と関連する既往の研究と本論文の内容を概説する。

1.2 既往の研究

本論文は、カラマツ人工造林木について、心去り正角の曲げ強度特性、および構造用集成材としての利用に向けての研究成果をまとめたものである。これらの研究の背景として、まず、カラマツの長伐期施業に向けての研究、材質に関する研究、外観的因子による品等区分に関する研究、およびヤニ滲出防止と乾燥に関する研究を取り上げる。つぎに、木材一般の研究の中から、本論文と関係する実大材による強度評価に関する研究、製材およびラミナの等級区分に関する研究、構造用集成材に関する研究、および木材強度の寸法効果の研究について概説する。

1.2.1 長伐期施業に向けての研究

1970年代、カラマツ材の需要構造が変化し土木用材の需要が減少すると、長伐期施業に関する研究がはじまった。武井⁽⁷⁾は、1977年、1番玉で4丁取りができる胸高直径40cm以上のものを大径材とし、長野県内の30林分の調査結果から、大径材を得るための施業指針を示した。また、150林分の調査結果から、長野県民有林を対象とした地位指数スコア表を作成して、土壌型、土性、石礫、腐植、標高などと成長との関係を検討し、長伐期施業では、立地条件と保育管理が重要なことを示した⁽⁸⁾。菅原⁽⁹⁾は、高樹齢のカラマツ人工林の調査結果から、林齢が50年をこえても良

好な材積成長を示すことを明らかにした上で、長伐期施業のための条件を示した。以上のような研究成果をうけて、1991年、長野県は、「カラマツ人工林・長伐期施業の手引き」⁽⁶⁾を著し、地位級Ⅰ、地位級Ⅱを大径材生産可能な林地とし、地位級Ⅲと地位級Ⅳの一部は中径材生産林地、地位級Ⅳ未満は森林保全機能重視林地とした。また、森ら⁽¹⁰⁾は、秋田県における88年生の人工林カラマツの成長解析結果から、この時点でも総平均成長量は漸増か横這いであり、大径材生産のための伐期は88年以上となることを示した。

一方、間伐を必要とする長野県内民有林の人工林は約11万ha、そのうち、緊急に間伐を要する林分は4.4万haにも及んでいる⁽¹¹⁾。このような状況下で、島崎^(12,13)は、高密カラマツ林のための4種類の間伐方法を提案した。また、重松^(14,15)は、間伐と成長および材質との関係を検討し、間伐によって偏心成長、アテ材の発生は認められないこと、密度、晩材率についても間伐による変化が生じないことを明らかにした。そして、林分密度が著しく高い放置林分では、成熟材であっても年輪幅が約1mm以下になると仮道管長が短くなり、強度が劣ることを示した。さらに、武井^(16~19)は、間伐や枝打ちなどの施業技術により、樹幹の連年成長量や心材材積率の管理ができることを示した。

1.2.2 カラマツの材質に関する研究

カラマツはらせん木理が顕著な樹種であり、それが利用上障害となるねじれの原因となることから、らせん木理とねじれに関する研究について述べ、つぎに材質変動に関する研究について述べる。

1.2.2.1 らせん木理とねじれに関する研究

大倉⁽²⁰⁾は、1955年、樹木の回旋性を、50科、100属、170種について検討し、カラマツは成長の初期に左回旋でらせん木理が発達する、S型配向樹種であることを示した。小沢⁽²¹⁾は、カラマツ、アカマツはスギ、ヒノキに比較してらせん木理が大きいことを示した。

大倉ら⁽²²⁾、小沢ら^(23,24)、織田ら⁽²⁵⁾、久保ら⁽²⁶⁾、塩倉ら^(27,28)、武井⁽²⁹⁾、中川⁽³⁰⁾、重松ら^(31~35)の研究により、カラマツのらせん木理傾角の半径方向の変動は、髓から樹皮側に向かって左回旋で次第に大きくなり、数年輪で最大角度に達し、その後緩やかに減少するという一般的パターンが明らかになった。そして、小沢⁽³⁶⁾は、半径方向の変動を3パターン、中川⁽³⁰⁾は5パターンに分類し、小沢⁽²³⁾、川口ら⁽³⁷⁾、中川⁽³⁰⁾、重松⁽¹⁴⁾は、最大角度は通常髓から10年輪以下で現れることを示した。さらに、小沢は、らせん木理の方向が左回旋から右回旋に変わるねじれがえしの時期は、 31 ± 4 年⁽²³⁾、47年前後⁽²⁴⁾と推定し、環境の影響が大きいことを示唆した。

成長と関連して、久保ら⁽²⁶⁾、三上ら⁽³⁸⁾は、らせん木理傾角と肥大成長との間には、有意な関係は認められないと報告したが、武井⁽²⁹⁾、重松⁽¹⁴⁾、小沢⁽²¹⁾は、成長初期の段階に限れば、成長の良いものほど、らせん木理傾角が大きい傾向を認めた。また、重松⁽³⁴⁾は、3齢級以上の肥大成長は、らせん木理傾角の増大と関係しないことを示した。

三上ら^(38~43)、織田ら^(25,44)は、カラマツのらせん木理は、成長や樹幹の形態に従属しない遺伝的性質であり、らせん木理傾角の少ない個体を選抜することにより、総合的に優れた母材を得ることが可能であるとして、育種クローンの増殖を進めた。また、中川⁽⁴⁵⁾は、精英樹クローンの間伐木のらせん木理傾角とその母樹の木理傾角との関係を調べ、木理傾角の変動パターンはクローン内で類似することを示し、母樹の最大らせん木理傾角と、クローンのそれとの間に高い相関を認めた。

らせん木理と製材の乾燥にともなうねじれとの関係は、大倉ら^(46~48)、小林⁽⁴⁹⁾、織田ら⁽⁴⁴⁾、向山ら^(50,51)、加納ら⁽⁵²⁾によって研究され、心持ち角材ではらせん木理が関係してねじれが生じ、その方向は木理の方向に一致することが示された。さらに、小沢は、丸太および板材の乾燥によるねじれ量を推定するために、らせん木理傾角、繊維軸基準の3方向収縮率、および幹軸基準の3方向収縮率を変数とした理論式を誘導し、丸太についてはアカマツ材⁽⁵³⁾、板材についてはカラマツ

材⁽⁶⁴⁾を用いてその理論の有効性を検証した。

1.2.2.2 材質指標の変動に関する研究

針葉樹の仮道管長は、ある樹齢までは樹齢に比例してほぼ一定の割合で増加し、この樹齢を過ぎると増加率が小さくなり、一定の値に達する。この仮道管長が一定の値に達する樹齢を成熟樹齢とし、これより幼齢な材部を未成熟材、これより老齢な材部を成熟材という⁽⁶⁵⁾。太田⁽⁶⁶⁾は、スギ、ヒノキ、アカマツ、クロマツの未成熟材の力学特性に関する研究を行い、未成熟材は成熟材に比べて多くの点で劣るので、両者を同一母集団として取り扱うことはできないとした。また、渡辺⁽⁶⁷⁾は、針葉樹内心部には必ず未成熟材部が存在し、成長が著しく抑制されたものは成熟材の形成時期が遅れるが、この支配要因は、遺伝的要因が主であり、環境的要因は従であるとしている。

塩倉らは、カラマツの材質指標の変動に関する研究⁽⁶⁸⁻⁶⁹⁾を行い、正常に成長したカラマツ樹幹の組織構造的な材質指標の変動として、年輪幅は、髓付近から約8年輪ぐらいまでは急速に増加し、その後は次第に減少し、20年輪を過ぎるとほぼ安定する、仮道管長は、髓から10～15年輪ぐらいまでは急速に長くなり、20年輪を過ぎるとほぼ安定する、晩材部仮道管の壁厚は髓付近で薄く、徐々に厚くなり、10年輪程度で安定する、仮道管二次壁中層のフィブリル傾角は、髓付近で最大を示し、徐々に小さくなり、15年輪程度で安定する、の4点を示した⁽²⁸⁾。

さらに、物理的な材質指標の変動として、密度は髓付近でやや高く、8年輪ぐらいまで減少し、その後わずかに増加し、12～13年輪で安定する、収縮率は、髓付近で小さく、外側に向かって大きくなるが、収縮率の異方向性は、髓に近い部分の方が大きい、未成熟材部の曲げ強さ、曲げ比例限度、曲げヤング係数は、成熟材部の約1/3である、の3点を示した⁽²⁸⁾。

そして、これら7種類の材質指標の変動傾向を模式図で示し、カラマツの未成熟材の範囲を髓から14～15年輪、距離で5～8cmであるとした⁽²⁸⁾。また、小泉ら⁽⁶²⁾は、北海道産カラマツ間伐木による研究結果から、未成熟材は髓から15年輪、便宜上8cmが妥当とした。

さらに重松ら^(31-35, 63-72)は、長野県産カラマツの材質に関する研究を、1970年代から20年間以上も続け、前述した塩倉と同様な結果を得て、3ないし4齡級からの肥大成長は単に径級が大きくなるだけでなく、材質的にも強度的にも優れた材部の蓄積になることを強調した。

また、古賀ら^(73,74)は、北海道産カラマツの林分内における材質のバラツキを、スギ、ヒノキと比較して報告し、又木⁽⁷⁵⁾らは、実大寸法小割材の曲げヤング係数の材長方向の変動について報告した。

小泉らは体重負荷方式の立木非破壊検査の方法を開発し⁽⁷⁶⁻⁷⁹⁾、カラマツ精英樹林分^(80,81)において樹幹曲げヤング係数の比較を行った。さらに高田ら⁽⁸²⁻⁸⁴⁾は、樹幹曲げヤング係数によって林分単位の材質評価ができることから、材質育種において強度材質面からの成績判定が可能なことを示した。

1.2.3 カラマツ製材の外観的因子による品等区分に関する研究

1960年代、カラマツ材の丸太需要が減少したのをうけて、加納ら⁽⁵²⁾は長野県内の40年生と56年生2林分の3番玉までの丸太663本から、径級に応じて心持ち角、二方桁角、四方桁角を得て、ねじれ、曲がり、割れなどの外観的因子を調査した。その結果、構造材として利用可能と判断した試験材の出現比率は、心持ち角、二方桁角、四方桁角でそれぞれ15.3%、16.7%、30.6%であることを示した。さらに加納ら⁽⁶⁵⁾は、青森県の47年生と45年生の2林分、長野県の36～57年生の3林分を加えて同様な研究を行い、利用可能な比率は、心持ち角は極めて低く、心去り角で60～75%と報告した。これらの結果からカラマツ材の品質は立地条件の影響が大きいので、構造材の生産は平坦地に限り、急傾斜地では丸太あるいは化学工業原料をめざすべきであるとした。

1980年代、重松ら⁽⁸⁶⁻⁹³⁾は、前項で述べたカラマツの材質試験の結果^(31-35, 63-72)から、高樹齢大径材では、品質の高い角類が得られることを予測し、それを検証するために、長野県内の40～75年

生の7林分、72本の立木から、総数600本近くの正角を得て、目視による品等区分を行った。その結果、高樹齢の1番玉、2番玉で4丁取りができる大径材から得られる正角は、構造材として利用でき、その多くは化粧表示でも役物として扱えることを示した。

また、安藤ら^(94,95)、渡辺ら⁽⁹⁶⁾も高樹齢材からの心去り角の形質的な優秀性を報告した。

1.2.4 カラマツ材のヤニ滲出防止、乾燥に関する研究

木材は、含水率がFSP以下になれば収縮し変形する。また、ヤニの滲出は利用上の欠点になる。したがって、カラマツのようにらせん木理が顕著で狂いやすく、ヤニが滲出しやすい樹種の利用では乾燥が重要な意味を持つ。

カラマツ材のヤニ滲出防止に関する最初の実用技術的研究は、1960年代後半に長野県工業試験場によって行われ、ソーダー灰を用いたアルカリ脱脂法⁽⁹⁷⁾として実用化された。その後、種田ら^(98~103)によって、高圧蒸気釜を用いる方法など、精力的な研究がなされた。大山ら^(104~106)は、人工乾燥過程の蒸煮と高温乾燥により、ヤニの滲出防止が可能なことを示し、橋爪ら^(107,108)、三村ら⁽¹⁰⁹⁾は、蒸煮—高温乾燥によってアルカリ脱脂法と変わらないレベルのヤニの滲出防止が可能なこと、高温ほど割れが防止できることを示した。さらに吉田らは、蒸煮時間とヤニ滲出との関係⁽¹¹⁰⁾、乾燥温度と強度性能との関係⁽¹¹¹⁾を検討した。

これらの成果は、乾燥温度85~95℃のカラマツ材の人工乾燥法⁽¹¹²⁾として、1980年代には長野県内に定着し⁽¹¹³⁾、現在、長野県内だけで、年に1.5万m³以上の乾燥材が生産され⁽¹¹⁾、壁板と構造用集成材が主な用途となった。

カラマツ材の人工乾燥技術が急速に普及した理由は、この方法によりヤニの滲出が防止でき、狂いや割れなども抑制されることに加えて、スギやアカマツと異なり心材部の含水率が立木でも40~50%⁽⁶⁵⁾と低いため、乾燥に長時間を要さないことも一つの要因であった。しかし、板類の乾燥が主体であり、断面の大きな構造材等へは、乾燥時間、コストなどから人工乾燥は普及しなかった。近年、吉田ら^(114,115)は心持ち正角の100~130℃での高温乾燥の検討を始め、乾燥時間の短縮で良好な成果を示した。

なお、カラマツ以外の樹種を対象としては、鷲見^(116,117)がダグラスファー材を用いて高温乾燥の研究を行い、強度との関係、ヤニ滲出との関係を明らかにした。

1.2.5 実大材による強度評価に関する研究

我が国の許容応力度は、無欠点試験片から得られる強度値の統計的下限値を基準強度とし、節、繊維走行の傾斜などによる強度低減、荷重の存続期間と強度との関係、含水率の影響などを考慮して誘導されている⁽¹¹⁸⁾。また、アメリカ合衆国では、樹種ごとに無欠点小試験体からの許容応力度誘導体系を確立し、これらはASTM D 245⁽¹¹⁹⁾に示されている。

我が国では1963年、現農林水産省森林総合研究所（以下森林総合研究所と記す。）により、日本産主要樹種の性質、試験計画⁽¹²⁰⁾が公にされ、日本産主要樹種の基礎的な情報が、日本工業規格に準拠した統一的な方法で蓄積され発表されている^(121,122)。

一方、1975年以降 Madsen⁽¹²³⁾は、目視等級区分された2×6材を中心とした膨大な試験体に対して、力学的性質を確かめる試験（以下イングレイドテストと記す。）を行い、基準強度値に対して、いくつかの仮説を設けて誘導される許容応力度は、実大材の試験結果と必ずしも一致しないことを示した。

我が国における実大材の強度試験は、1970年以前では、杉山ら⁽¹²⁴⁾によって行われたぐらいであるが、1970年代後半から多くの機関において行われるようになった。

系統だった実大材の試験は、1978年から森林総合研究所で行われた「間伐材の利用技術に関する研究」が始めとなり、つぎに、1981年から行われた林野庁助成による、都道府県林業試験研究機関の「構造用製材の強度等級区分に関する研究」が続き、その成果の中のスギ材については、中井ら^(125,126)によって報告された。以後、多くの研究機関で、多量の実大材データの蓄積がなされ

た^(127~149)。

1988年、日本木材学会木材強度・木質構造研究会は、日本各地で得られた実大材の強度データの収集と分析を行った⁽¹⁵⁰⁾。その時点で集められたデータは、在来工法用製材4548本、枠組み壁工法用製材948本分で、その後も、同研究会および森林総合研究所によってデータの収集が進められている。

カラマツ材の実大材強度試験については、北海道産カラマツ材について、1978年、倉田ら⁽¹⁵¹⁾が枠組み壁工法用製材に関して報告した。また、高橋らは31年生の非常に成長の良い立木から得た正角の曲げ試験を行い⁽¹³⁷⁾、年輪幅が6 mmを超えた正角で、曲げヤング係数が低いわりに曲げ強さが高いことを報告した。さらに、31年生と22年生カラマツの心持ち角を主体とした研究の中で、樹皮側から採材した平割りの曲げヤング係数、曲げ強さが高いことを示した⁽¹³⁸⁾。また、60年生⁽¹³⁹⁾、67年生⁽¹⁴⁰⁾の高樹齢大径材からの正角の強度試験結果を報告した。

長野県産カラマツ材については、橋爪らが小径材からの心持ち正角⁽¹⁴⁵⁾、平割⁽¹⁴⁶⁾、主伐4林分から得られた心去り角を主体とした正角⁽¹⁴⁷⁾の曲げ試験結果を報告し、心去り角の曲げ強さは荷重方向と関係することを示唆した。また、1. 2. 3で述べた重松が品等区分の試験に供した正角を用いて、長野県林業総合センターが実大材曲げ試験を、森林総合研究所が実大材引張り試験を、信州大学農学部が短柱圧縮試験およびJISに基づく小試験体の試験を共同研究として行った。なお、このプロジェクトの提案者でリーダーであった重松は、研究途上で急逝（1990年2月）したが、実大材試験に関する部分は、徳本ら⁽¹⁵²⁾によりまとめられた。

1.2.6 製材およびラミナの強度等級区分に関する研究

木材の強度等級区分には、目視等級区分、機械等級区分、保証荷重試験がある。ここでは目視等級区分、機械等級区分について述べる。

目視等級区分における材質指標は、一般的には節、繊維傾斜、年輪幅である。この三者は枠組み壁工法構造用製材の日本農林規格⁽¹⁵³⁾（以下枠組み壁工法構造用製材JASと記す。）、および針葉樹構造用製材の日本農林規格⁽¹⁵⁴⁾（以下針葉樹構造用製材JASと記す。）において、製材の目視等級区分の強度低減因子とされ、さらに構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾（以下構造用集成材JASと記す。）でも、ラミナの目視等級区分の強度低減因子として扱われている。

節については、従来断面欠損として扱われていたが、畑山⁽¹⁵⁶⁾は、有節材の引張り強さ、曲げ強さと関係するのは、節周辺の繊維走行の傾斜であるとし、これによる強度推定の方法を提案した。また、中西ら⁽¹⁵⁷⁾は、ラミナの曲げ試験で、節が側面にある場合、アーチ現象を起こして予想以上に大きな値をとる場合もあることを報告している。中井ら⁽¹²⁶⁾は、スギ心持ち材の実大材曲げ試験の結果、節径比と曲げ強さの間には相関が認められなかったと報告した。増田ら⁽¹⁵⁸⁾は、節と曲げ強さとの関係を有限要素法により解析し、同一径の節でも曲げ強さに大きなばらつきが生じるとした。このように節と強度との関係は明確でないが、樹種、節の形態と位置によりその関係は異なると考えられる。とくに心去り角と心持ち角の節を同一には扱えないだろうし、曲げでは、節の位置が引張り側か圧縮側かで、その関係が異なると考えられる。

繊維傾斜は、ASTM D 245⁽¹¹⁹⁾、我が国の針葉樹製材⁽¹⁵⁴⁾および構造用集成材の規格⁽¹⁵⁵⁾の中で強度低減因子として扱われている。しかし、実大材の繊維傾斜は測定が難しいこと、カラマツのようにらせん木理傾角が大きく、かつ変動している樹種は、測定する部分によって値が異なることなどから、実大材の繊維傾斜と強度との関係を明らかにするのは難しいと考えられる。また、髄を中心にスパイラル状を呈する心持ち角の繊維傾斜と、そうでない心去り角の繊維傾斜では、強度との関係は異なると考えられる。杉山⁽¹²⁰⁾は、実用材にみられる繊維傾斜はそれほど小さくなく、曲げ強さとの関係は著しいものではないと述べている。

年輪幅は人工造林木の髄周辺の未成熟材部は一般的に広く、成熟材部では狭い⁽²⁸⁾ので、小試験体では年輪幅と強度との高い相関が得られると考えられる。一方、断面の大きな実大材は年輪幅

の広い部分と狭い部分とを含むことになり、その評価が難しい。

以上、目視等級区分に関わる材質指標について簡単に述べたが、人工造林木からの心去り正角には、未成熟材と成熟材が存在している。とくに曲げの場合、荷重方向が木表側か木裏側かで曲げ強さは異なり、荷重方向が曲げ強さに関係すると考えられるが、それを研究した例は見られない。

機械等級区分は、ヤング係数と曲げ強さとの間に高い相関があることから、ヤング係数を指標として等級区分する方法である^(159~162)。ヤング係数には静的ヤング係数と動的ヤング係数があるが、本章ではそれらを特定しない場合に単にヤング係数と記す。また、単に曲げヤング係数と記した場合には静的ヤング係数をさす。ヤング係数と曲げ強さとの関係は1960年代に各国で認識され始め、ヤング係数を指標とする等級区分機、いわゆるグレーディングマシン^(163~165)が開発実用化され、これらについては中井⁽¹⁶²⁾、神谷⁽¹⁶⁶⁾によって紹介されている。

我が国では、曲げヤング係数と曲げ強さとの関係に注目した研究がラミナの分野⁽¹⁶⁷⁾で始められ、澤田^(168,169)は木材の力学的材質指標として非破壊検査による曲げヤング係数を提案した。

1991年1月に制定された針葉樹構造用製材 JAS⁽¹⁵⁴⁾に機械等級区分製材が規定され、1996年1月に制定された構造用集成材 JAS⁽¹⁵⁵⁾では、少なくとも最外層用のラミナに対してはヤング係数による区分が義務づけられた。

機械等級区分法には、静的測定法と動的測定法がある。前者は材料試験機を応用したもので、すでに我が国で実用化され、製材用としては全国木材協同組合連合会において3機種が認定されている⁽¹⁷⁰⁾。また、1987年にラミナ用の国産グレーディングマシンが誕生し⁽¹⁷¹⁾、近年、CLTタイプ⁽¹⁶⁵⁾の連続送り式グレーディングマシン^(172,173)として、多くの集成材工場に普及した。

動的測定法は振動試験法ともいわれ、縦振動法、たわみ振動法、応力波伝播法、超音波伝播法などが知られている⁽¹⁷⁴⁾。これらは、木材に軽い打撃を加えたときに発生する共振現象や、材中を伝わる音の伝播速度などを利用して動的ヤング係数を計算する方法である。祖父江は、1986年にFFTスペクトルアナライザを用いた打撃音分析で、縦振動法が小試験体から大断面材まで適用できることを明らかにし⁽¹⁷⁵⁾、パソコンを組み合わせることによって自動計測ができることを示した^(176,177)。なお、縦振動法は縦固有振動数と材の密度とを変数として動的ヤング係数を計算する方法で、重量測定が必要になる。

有馬ら⁽¹⁷⁸⁾は、縦振動法により測定した動的ヤング係数（以下縦振動ヤング係数と記す。）と曲げヤング係数は高い相関関係にあること、縦振動ヤング係数はスパン梁背比の影響を受けず、短尺材でも測定ができ、構成部材の平均的な値になること、水分分布が等しいとき振動数だけで等級区分が可能なることを示した。そして「周波数分析による丸太区分とその製品生産工程への応用」として、国産材の銘柄化の1方法として、流通にまで踏み込んだ提案を行った⁽¹⁷⁹⁾。縦振動法による丸太の等級区分が丸太の曲げヤング係数推定に有効なことは多くの研究^(180~191)によって確かめられた。さらに、荒武らは、高次の縦固有振動数が極積みの影響を受けないことを示し、振動数だけで丸太の等級区分が可能なること^(192~194)、および計測可能な丸太の径と材長との関係⁽¹⁹⁵⁾を示した。

縦振動ヤング係数による曲げヤング係数の推定および曲げ強さ推定の有効性は、多くの研究^(128,133,135,136,181,182,196)により実証され、現在、全国木材協同組合連合会よりFFTアナライザを用いたもの、騒音計を用いたもの、各1機種が認定されている⁽¹⁷⁰⁾。また、この認定にあったっては、公的試験研究機関で性能を評価することとされており⁽¹⁹⁷⁾、この2機種および材料試験機を応用した1機種の性能評価は本論文の著者が行った。

近年、応力波伝播法を用いた立木の材質評価法を名波ら^(198~200)が確立し、池田ら⁽²⁰¹⁾はその測定装置を開発した。また、小玉⁽²⁰²⁾は丸太の応力波伝播速度を求め、音速から動的ヤング係数が測定できることを示した。

針葉樹構造用製材 JAS⁽¹⁵⁴⁾の目視等級区分製材は、使用目的で甲種と乙種に分類され、それぞれ1、2、3級の3区分、機械等級区分製材は、ヤング係数によって、E50からE150まで6区分される。1996年建設省住宅局建築指導課長名通達⁽²³⁸⁾により、規格による等級それぞれに、圧縮、引張り、曲げの許容応力度が与えられた。これは画期的なことであり、我が国でも、製材がエンジニアリングウッド⁽²⁰³⁾の仲間に入る下地が整ったといえるが、今後、イングレイドテスト等により、等級区分された製材の強度的信頼性を高めることが必要である。

1.2.7 構造用集成材に関する研究

集成材はラミナの積層体であり、欠点分散により確率的に強度弱小部が減少し、かつ積層配置により、強度性能のコントロールが可能となる、という2つの利点に着目した研究がこれまでに多くなされてきた⁽²⁰⁴⁾。

アメリカ合衆国を中心とした今世紀初頭の研究では、すでに外層に高品質材、内層に低品質材という合理的配置法が確立されており⁽²⁰⁴⁾、その後、ラミナ構成と集成材強度との関係が多く報告されている。この中には、1950年代のWilsonら⁽²⁰⁵⁾による I_K/I_G 理論、これに確率的検討を加えたFreasら⁽²⁰⁶⁾の研究、1960年代後半のCurry⁽²⁰⁷⁾の欠点分散による集成材強度向上に関する研究など、重要なものが多い。1970年以降、Moodyら^(208,209)、Catherineら⁽²¹⁰⁾、Russellら⁽²¹¹⁾により、構造用集成材の強度性能の研究が、ラミナの性能と関連づけて進められている。

ラミナの性能評価は、引張り試験を中心として、Moodyら⁽²¹²⁾、Catherineら⁽²¹³⁾、Patrickら⁽²¹⁴⁾、Showalterら⁽²¹⁵⁾、Allanら⁽²¹⁶⁾、Frankら⁽²¹⁷⁾、Stevenら^(218,219)、Friendら⁽²²⁰⁾、Williamら⁽²²¹⁾によって行われ、フィンガージョイントによる縦継ぎラミナの性能、信頼性設計法に対応するための強度分布モデル、引張り試験における寸法効果に関するものが多い。

我が国では、1972年に、中村⁽¹⁶⁷⁾がラミナの等級区分に関して先駆的な研究を行った。中西ら^(157,222~227)は、1974年以来、構造用集成材の製造と品質の安定化に関する研究を継続的に進めた。また、1976年から1978年にかけて、林野庁の助成を受けた10都道府県林業試験研究機関で、国産材のラミナの等級区分に関して統一的な研究が行われた。これにより我が国の代表樹種であるスギ、ヒノキ、カラマツ、アカマツなどから得られるラミナの性質がある程度明らかになった。また、ラミナの等級と集成材の強度性能との関係が明らかにされ、藤井^(228,229)によりまとめられた。しかし、この時点で研究に供された集成材は、高さ10cm、幅10cmの5層集成材であり、梁背が30cmを超えるような構造用集成材の曲げ試験が行われるようになったのは1980年代の後半になってからである。

1980年代後半から、ラミナの性質および構造用集成材の強度性能に関する研究^(184,185,230~246)が、多くの機関でなされるようになり、これらには丸太の選別、通しラミナ、縦継ぎラミナの性質、ラミナの保証荷重試験、集成材の強度を検証するための試験などが含まれている。この中で、とくに池田ら^(184,185,244,245)は静岡県産材を対象として、丸太から出発して構造用集成材の最終破壊に至る総合的な研究を行った。また、小泉ら⁽²⁴⁶⁾、飯島ら^(247,248)は、秋田県産スギの丸太とラミナを用いて一連の研究を行い、実用的にはラミナの曲げヤング係数は丸太の縦振動ヤング係数から推定できることを統計的に示した。

石井ら⁽²⁴⁹⁾は、縦継ぎラミナ、および引張り側最外層に縦継ぎ部がある構造用集成材は、脆性的に破壊することを報告した。

異樹種複合集成材の研究は、長谷部ら⁽²⁵⁰⁾、江口ら⁽²³⁸⁾が報告している。また、ベイマツLVLを最外層としたスギとの複合集成材の強度特性を林ら^(251,252)が検討した。

堀江ら^(253~257)、柳川ら^(258~260)は、構造用縦継ぎ材の強度性能を系統的に研究し、この中にはフィンガージョイントの形状研究も含まれる。さらに、縦継ぎラミナの接合効率を高める目的で、スロープトフィンガージョイントの研究^(261~263)がなされた。最近、和田⁽²⁶⁴⁾はスギラミナの引張り試験で、スカーフジョイントとフィンガージョイントの接合効率を比較した。

構造用集成材の強度を推定する方法として、浅野⁽²⁶⁵⁾は接着積層型木材を梁とした場合の弾塑性的曲げ計算理論を一般化した。また、倉田⁽²⁶⁶⁾はラミナの機械等級区分の有効性を実証的に明らかにし、集成梁の設計計算法を提案した。

林らは、LVLを含む集成加工材料の特性である積層数が増えれば特性値の変動係数が減少するという、いわゆる積層効果を確率・統計的手法を用いて解析した。その結果、「 n 層の積層材の特性値のばらつきは原材料の $1/\sqrt{n}$ になる。」という積層効果の確率理論が、垂直積層材の曲げヤング係数と曲げ強さにほぼ成立するが、理論の適合する積層数には上限があることを示した^(267,268)。また、2層水平積層材では、引張り強さでは積層効果があるが^(269,270)曲げ強さでは積層効果が認められない⁽²⁷¹⁾ことを示した。

1980年代末から、構造用集成材の強度予測としてモンテカルロシミュレーション⁽²⁷²⁾を用いた研究がなされるようになった。林らは、集成加工材料の曲げヤング係数分布を予測するための確率モデルを作成し、積層数、等級区分、積層方向とその分布との関係を検討した⁽²⁷³⁾。また、曲げヤング係数と曲げ強さの相関関係を利用して、乱数を発生させる方法を開発し⁽²⁷⁴⁾、5層集成材の強度特性分布予測確率モデル⁽²⁷⁵⁾を示した。さらに、5層集成材について集中節径比の統計的分布からの曲げ強さ予測モデル⁽²⁷⁶⁾、引張り強さの予測モデル⁽²⁷⁷⁾を提案した。小松⁽²⁷⁸⁾、平嶋ら⁽²⁷⁹⁾はモンテカルロシミュレーションの結果、引張りと曲げの2次の複合モデルが実験値とよく一致することを示し、三橋ら⁽²⁸⁰⁾は、スギ構造用集成材に対して、積層による補強効果と塑性領域を考慮した集成材の曲げ破壊予測モデルを提案した。

なお、集成材の耐火性能については上杉^(281~283)が報告した。

1.2.8 木材強度の寸法効果に関する研究

木材の寸法が大きくなれば強度が減少するいわゆる寸法効果⁽²⁸⁴⁾について、1966年 Bohannon⁽²⁸⁵⁾は、ワイブルによって提唱された「最弱リンク理論」による材料強度の統計理論を用いて寸法と強度との関係を検討し、曲げ強さは梁背の $1/9$ 乗に比例して減少することを明らかにし、幅はそれとは独立であるとした。この結果は、ASTM D 245⁽¹¹⁹⁾、さらに我が国の構造用集成材 JAS⁽¹⁵⁵⁾の寸法調整係数にも取り入れられている。一方、1986年 Madsen ら⁽²⁸⁶⁾は伝統的最弱理論に修正を加え、曲げ強さにおける寸法効果においては、長さおよび荷重条件効果が梁背効果よりはるかに重要であることを示した。また、1993年 Peterson ら⁽²⁸⁷⁾は、集成材の曲げ強さに幅効果を認めた。また、引張り強さの長さ効果については、多くの研究が続けられている^(215,217,220,221)。

我が国における寸法効果の研究は少ないが、角谷ら⁽²⁸⁸⁾は1957年小試験体を用いた実験から、引張り強さと曲げ強さの寸法効果を報告した。大河平らは、引張りについて寸法効果を認め⁽²⁸⁹⁾、縦圧縮については認められなかったと報告した⁽²⁹⁰⁾。鈴木ら⁽²⁹¹⁾は、せん断強度に比較的大きな寸法効果を認めた。曲げ強さについては、増田ら⁽²⁹²⁾が破壊力学的立場から、引張り強さの寸法効果と引張り強さと圧縮強さの比を因子とした、寸法効果の予測式を提案した。以上の我が国における研究は、主として欠点の非常に少ない材料で行われたものである。

飯島⁽²⁹³⁾は、ソ連カラマツ材の実大材の研究結果から、曲げ強さは梁背の $1/5$ 乗に比例して減少することを報告した。林ら⁽²⁹⁴⁾は、LVLの曲げ強さにおいて梁背方向の寸法効果を顕著に認め、幅方向は認められないと報告した。また、最近になって林ら⁽²⁹⁵⁾は、ラミナの引張り強さの寸法効果をスギ材について報告した。

我が国も1987年に建築基準法および同施行令の一部が改正されて大規模木造建築の時代に入り、断面の大きな材が使われるようになってきた。したがって、寸法効果の研究は今後さらに重要なことと考える。

1.3 おわりに

カラマツ人工造林木の基礎的な材質については1.2.2に述べたように多くの研究成果がある。また、1.2.3で述べたように製材の品等区分に関する研究から、高樹齢大径材からの心去り材は形質的に優良であることが示されているが、心去り材の強度特性を明らかにした研究はカラマツ材に限らず、我が国の代表樹種であるスギ材においてさえ少ない。さらに、その曲げ試験において荷重方向と曲げ強度性能を検討した報告は見あたらない。

そこで、本論文第2章では、心去り正角の強度特性として、木取りおよび荷重方向と曲げ強度性能との関係を明らかにし、ついで、材質指標と曲げ強度性能との関係を検討した。つぎに、構造材としての性能を曲げ強度の面から評価し、試験結果の林分別比較から、樹齢、地域、海拔高と心去り正角の曲げ強度性能との関係を検討した。

また、1.1で述べたように構造用集成材は、間伐材や大径材上部の中・小丸太の有効な用途と考えられる。著者らは、1992年以来、カラマツ材を強度的信頼性が要求される構造用集成材の分野で利用することを目的に、実用規模で、製材、ラミナの諸性質の把握、集成材の製造および破壊試験までの一連の実験的研究を行った。第3章から第8章はそれらをまとめたものである。

第3章では、材質変動の大きなカラマツ材を構造用集成材として利用するためには、ラミナの機械等級区分が不可欠と考え、そのための装置である連続送り式グレーディングマシンの特性を明らかにし、その調整法を考察した。

第4章では、カラマツ材が狂いやすい材であることから、乾燥工程におけるラミナの狂いと木取り位置との関係を明らかにし、その関係から適正製材寸法について考察した。

第5章では、丸太の縦振動ヤング係数とラミナの曲げヤング係数との関係およびラミナの木取り位置と曲げヤング係数との関係を明らかにし、縦振動ヤング係数による丸太の等級区分、木取り位置によるラミナの区分、および両者を併用したラミナの選別それぞれが構造用集成材の製造工程のなかで有用性が高いか否かを検討した。

第6章では、ラミナの目視等級区分に関わる材質指標と曲げヤング係数との関係から、ラミナの目視等級区分について考察した。つぎに、連続送り式グレーディングマシンにより測定したラミナ65653枚の曲げヤング係数の分布から、現状のカラマツ林から得られるラミナから製造可能な構造用集成材の強度等級を推定した。

第7章では、通しラミナおよび同一工程で製造した縦継ぎラミナの曲げおよび引張り試験を行い、通しラミナとの比較によって縦継ぎラミナの強度特性を明らかにした。つぎに、等級区分したラミナの曲げおよび引張り強さを、構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾が要求している基準強度との関係で検討した。さらに、ラミナの等級と曲げおよび引張り強さの変動係数および曲げ強さに対する引張り強さの比との関係を明らかにした。

第8章では、個々のラミナ内の曲げヤング係数の、最大値、平均値および最小値の關係に検討を加え、長さ方向の曲げヤング係数の変動について考察した。ついで、機械等級区分した同一等級ラミナを用いて積層数を変えて製造した水平積層集成材および垂直積層集成材の曲げ試験を行い、ラミナの等級と集成材の曲げ強度性能との関係、積層効果といわれるラミナの積層数と曲げ強さの変動係数との関係、および寸法効果といわれる集成材の寸法と曲げ強さとの關係に検討を加えた。つぎに、製品検査の手段として縦振動法、たわみ振動法が有効であるか否かを検証した。

第2章 心去り正角の実大材曲げ強度特性

2.1 はじめに

曲げ強度性能は木材を構造材として利用する場合最も重要な因子である。また、我が国の引張りおよび圧縮の許容応力度は曲げ強さに対するそれらの比率から誘導されている⁽¹¹⁸⁾。

カラマツ人工造林木の基礎的な材質については1.2で述べたとおり、多くの研究成果があり、製材の品等区分に関する研究^(52,85,86~96)から、高樹齢で、かつ大径材となれば優れた心去り材が得られることが明らかにされているが、それらの実大材強度性能を評価した研究は少ない。また、実大材の曲げ試験は1.2.5において述べたように多くの研究機関で行われているが^(125~149)、心持ち角を主体とした研究がなされており心去り角の曲げ強度性能に関する研究は我が国を代表するスギ材においてさえほとんどない。

心去り正角には、二方桁角(以下 S_2 と記す。)と四方桁角(以下 S_4 と記す。)があり、これらの曲げ強度性能は荷重方向との関係が大きことが予想される。すなわち、曲げ破壊は通常引張り側から発生するので、引張り側が成熟材部であるか、未成熟材部であるかで、曲げ強さ(以下MORと記す。)が異なると考えられるが、我が国において心去り正角の曲げ強度性能と荷重方向との関係を明らかにした研究はない。

そこで、本章では将来生産されるカラマツ大径材の用途の多くを占めると考えられる心去り正角の曲げ強度特性について述べる。はじめに、曲げ強度性能と荷重方向との関係を検討し、ついで、材質指標と曲げ強度性能との関係に検討を加えた。つぎに、構造材としての評価を強度面から行い、最後に試験結果の林分別比較から、林分の樹齢、地域および海拔高と曲げ強度性能との関係を考察した。

2.2 実験

2.2.1 林分と供試木

供試木を得た林分は、長野県内の北信、東信、南信、木曽の4地域の12林分で、標高850~1850m、樹齢40~75年である。12林分のうち7林分からの試験体は1979~1986年にかけて重松ら^(86~92)により、1.2.3で述べた目視による製材の品等区分に関する研究に供されたもので、その後、同氏の提案により進められた共同研究の中で著者らが実大材曲げ試験を行った。

供試木を得た林分の位置を図2.1に示した。林分を示す記号は、12林分をA~Lで示し、樹齢ならびに低海拔林分をL、中海拔林分をM、高海拔林分をHとし、下付き文字で示した。海拔の基準はカラマツの地位指数推定スコア⁽⁹⁾に従い、表2.1の脚注のように3区分した。なお、この中で、 A_{40M} 、 C_{42M} 、 D_{44L} 、 F_{50M} 、 G_{55M} 、 I_{65L} 、および L_{76H} の7林分が共同研究⁽¹⁵²⁾に関わるものである。

供試木を得た林分の所在地をつぎに示した。

- A_{40M} : 長野営林局管内諏訪営林署東俣国有林
- B_{40L} : 北佐久郡望月町大字協和細尾沢167
- C_{42M} : 長野営林局管内伊那営林署黒河内国有林
- D_{44L} : 長野営林局管内駒ヶ根営林署大河原国有林
- E_{45L} : 北佐久郡望月町大字布施
- F_{50M} : 長野営林局管内伊那営林署黒河内国有林
- G_{55M} : 長野営林局管内臼田営林署北相木国有林
- H_{59M} : 長野営林局管内蕨原営林署蕨原国有林
- I_{65L} : 長野営林局管内臼田営林署大曲国有林

J_{71L} : 長野営林局管内長野営林署黒姫国有林
 K_{75L} : 小諸市野間取
 L_{75H} : 長野営林局管内伊那営林署入笠山国有林

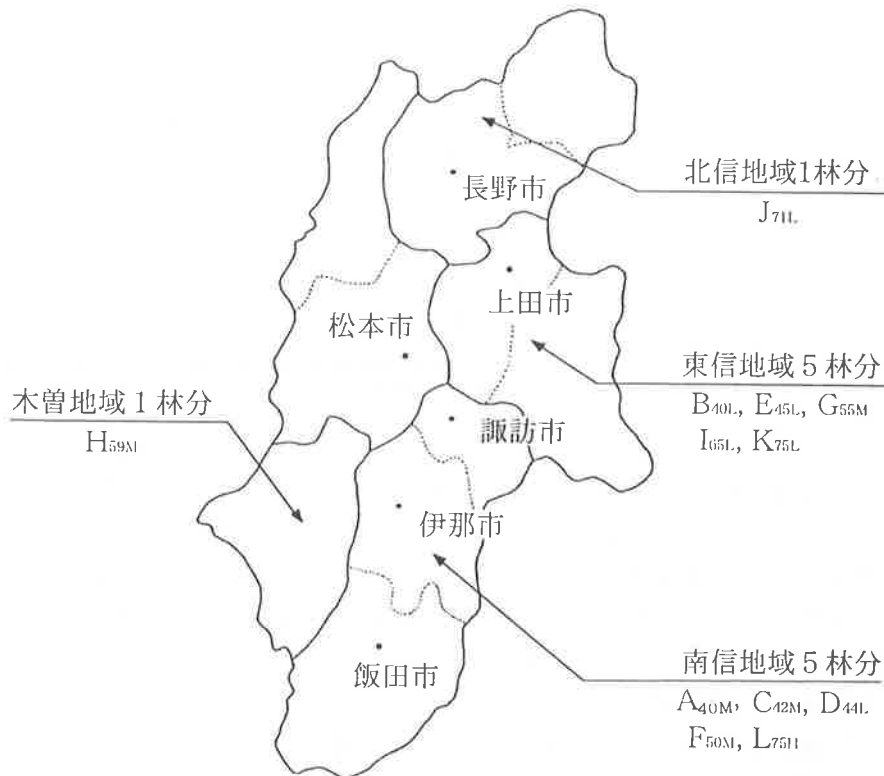


図 2.1 供試木を得た林分の長野県内における位置

表 2.1 供試木を得た林分の概要

林分記号	樹齢	海拔 m	土壌型 ^{a)}	地位級 ^{b)}	所有形態	地域区分	樹齢区分	海拔 ^{c)} 区分	備考
A _{40M}	40	1500	B $\theta_{D(d)}$	II~III	国有林	南信	40年生級	M	
B _{40L}	40	920	B θ_E	II	私有林	東信	40年生級	L	
C _{42M}	42	1500	B θ_E	III~IV	国有林	南信	40年生級	M	
D _{44L}	44	1090	B θ_E	II~III	国有林	南信	40年生級	L	
E _{45L}	45	850	B θ_E	II	私有林	東信	40年生級	L	二段林
F _{50M}	50	1600	B θ_E	II~III	国有林	南信	50年生級	M	
G _{55M}	55	1455	B θ_D	III~IV	国有林	東信	50年生級	M	
H _{59M}	59	1500	B θ_D	II	国有林	木曾	50年生級	M	
I _{65L}	65	1200	B $\theta_{D(d)}$	II~III	国有林	東信	60年生級以上	L	
J _{71L}	71	1260	B $\theta_{D(d)}$	II~III	国有林	北信	60年生級以上	L	
K _{75L}	75	1350	B $\theta_{D(d)}$	I	私有林	東信	60年生級以上	L	
L _{75H}	75	1850	B θ_D	IV~V	国有林	南信	60年生級以上	H	

^{a)} 土壌型⁽²⁹⁾ : B $\theta_{D(d)}$: 適潤性黒色土 (偏乾亜型), B θ_E : 弱湿性黒色土, B θ_E : 弱湿性褐色森林土, B θ_D : 適潤性褐色森林土, B θ_D : 適潤性黒色土, ^{b)} 地位級 : カラマツ人工林長伐期施業の手引き⁽⁶⁾ に従った。 ^{c)} 海拔区分⁽²⁾ : L : 1400m以下, M : 1401~1600m, H : 1600m以上

表 2.2 供試木の概要と正角本数

林分 記号	胸高直径 (平均) cm	樹高 (平均) m	枝下高 (平均) m	完満度 ^{a)} (平均)	枝下高率 ^{b)} %	正角数		
						二方桁角 (S ₂)	四方桁角 (S ₄)	計
A _{40M}	34.8	22.7	11.7	0.652	51.5	23	23	46
B _{40L}	35.6	23.5	11.8	0.660	50.2	5	11	16
C _{42M}	37.2	19.7	8.5	0.530	43.1	12	20	32
D _{44L}	32.2	23.7	11.4	0.736	48.1	7	9	16
E _{45L}	33.9	25.4	15.2	0.749	59.8	12	9	21
F _{50M}	39.1	26.0	13.3	0.665	51.2	10	22	32
G _{55M}	36.9	21.7	7.6	0.588	35.0	29	10	39
H _{59M}	34.0	27.0	13.0	0.794	48.1	15	7	22
I _{65L}	43.3	26.1	12.4	0.603	47.5	17	21	38
J _{71L}	39.0	27.0	17.0	0.692	63.0	24	75	99
K _{75L}	47.0	35.0	18.0	0.745	51.4	17	14	31
L _{75H}	31.2	18.2	6.3	0.583	34.6	13	6	19
計						184	227	411

^{a)} 完満度 = 樹高(m)/胸高直径(cm), ^{b)} 枝下高率 = 枝下高/樹高×100

林分の概要と、地域、樹齢、海拔による区分を表 2.1 に示し、供試木の概要と正角本数を表 2.2 に示した。この中で、I_{65L}、K_{75L}の 2 林分は、胸高直径が40cmを超えており、とくに大径材林分であった。低海拔および中海拔までの11林分のうち、C_{42M}、G_{55M}の 2 林分が完満度、枝下高率が小さく、これらは地位級がⅢ～Ⅳであり、地位の低い林分であった。また、高海拔林分であるL_{75H}は、完満度、枝下高率とも小さく、地位も低かった。

2.2.2 試験材の調整および製材

各供試木は伐倒後玉切り、長さ 3 m あるいは 3.2 m の丸太とした。長さ 3.2 m 材は元口から長さ約 15 cm の円板を採取し、共同研究に関わる 7 林分からの丸太は、径級にあわせて製材し、4 丁取り、2 丁取り、1 丁取りとした。そのほかの 5 林分からの丸太からは、正角以外の材種も製材した。心去り正角の木取りを図 2.2 に示した。図中に参考のため未成熟材の範囲を髓から 6 cm として示した。なお、正角の製材寸法はすべて一辺 12 cm である。以上の角材のなかで本研究で対象とするのは、心去り正角だけである。

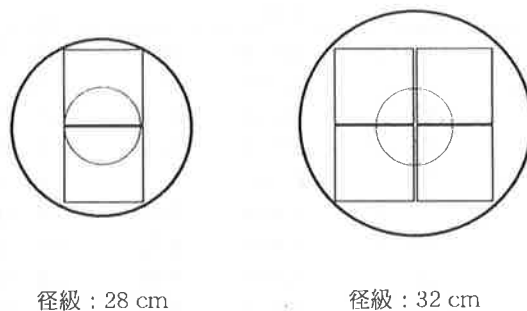


図 2.2 心去り正角の木取り
中央の円は未成熟材の範囲を髓から 6 cm として示した。

2.2.3 材質指標、含水率、および縦振動ヤング係数の測定

すべての試験体は、製材後数年間はシートで覆って屋外に保管し、試験前に1年間以上室内に棧積み状態で保管したため、すべての測定は完全な気乾状態で行った。

材質指標、含水率および縦振動法による動的ヤング係数（以下縦振動ヤング係数あるいは E_{fr}

と記す。)の測定方法をつぎに示した。

密度は曲げ試験直前の重量と体積から求めた。

繊維傾斜は曲げ試験終了後の非破壊部分から長さ10cmの角材を採取し、図2.3に示すように、両木口面に、平行な基準線を引き、一方の面から割裂し、他方の面上の割裂線と基準線のずれを基準線を4等分して5箇所測定した。5箇所の測定値の平均値を長さ1mに対する傾斜[mm/m]に換算した。

年輪幅は繊維傾斜測定用角材を用い、図2.3に示すように木口における完全年輪数と年輪の含まれる長さから求めた。

髓と引張り側材面までの距離(以下DPと記す。)および年輪数(以下NARPと記す。)は曲げ試験における引張り側材面と髓までの距離を、繊維傾斜測定用角材により図2.4に示す方法で測定した。木口上に髓が存在しないものについては年輪状況から推定した。

最大単節径比(以下 K_M と記す。)、集中節径比(以下 K_G と記す。)の測定は針葉樹構造用製材の日本農林規格⁽⁵⁵⁾(以下規格と記す。)に従った。

含水率は、曲げ試験終了後、厚さ2cm程度の角板を採取し、JIS Z 2101にしたがって、全乾法により求めた。

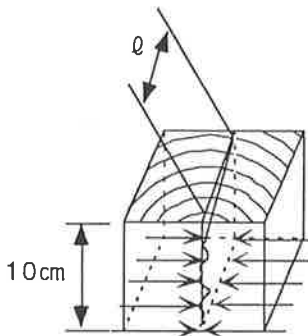


図2.3 繊維傾斜、年輪幅の測定法
 l : 完全年輪が含まれる距離

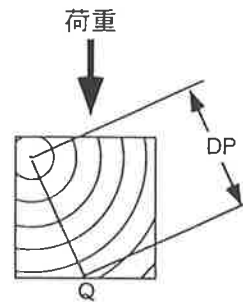


図2.4 髓と引張り側材面までの距離(DP)と年輪数(NARP)の測定法
 Q : 引張り面中心、DP : 髓と引張り側材面までの距離

Efrは図2.5に示すように、支持台と試験体の間にクッション材を置き、試験体の一方の木口をプラスチック製ハンマで打撃することにより、試験体を縦振動させた。そして、他方の木口面近傍にセットしたマイクロフォンで、材中を伝播した弾性波を縦振動音としてとらえ、FFTスペクトラルアナライザに入力した。この時得られた固有振動数と密度から、次式によりEfrを計算した。

$$Efr = \frac{4 \times L^2 \times fr^2 \times \rho}{g} \quad [\times 10^3 \text{kgf/cm}^2] \quad (2.1)$$

ここで、 L : 材長 [cm]、 fr : 1次基本振動数 [Hz]、 ρ : 密度 [g/cm^3]、 g : 重力加速度 [cm/sec^2] である。

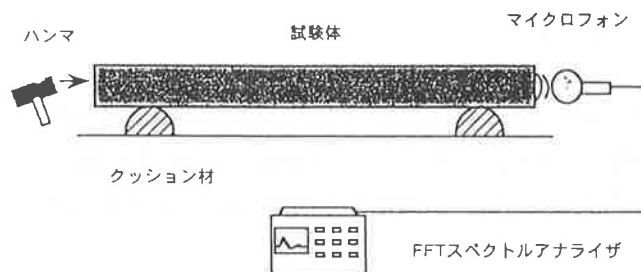


図 2.5 縦振動ヤング係数 (Efr) の測定

2.2.4 曲げ試験

心去り正角に対する荷重負荷の方法を図 2.6 に示した。S₂では 3 種類の方法があり、木表側から荷重を負荷した場合（以下木表荷重と記す。）を S₂B、木裏側から荷重を負荷した場合（以下木裏荷重と記す。）を S₂P、正柢目面から荷重を負荷した場合（以下正柢目面荷重と記す。）を S₂S と表す。S₄についても、木表荷重、木裏荷重の 2 方法があり、それぞれ S₄B、S₄P と表す。荷重負荷の方法は試験材を得た林分によって異なっており、それらについては結果のなかで示す。

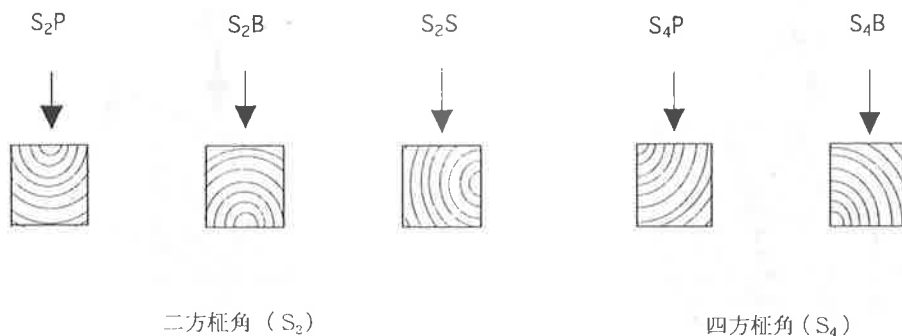


図 2.6 心去り正角の木取りと曲げ試験における荷重方向

S₂P：二方柢角・木裏荷重、S₂B：二方柢角・木表荷重、S₂S：二方柢角・正柢目面荷重、
S₄P：四方柢角・木裏荷重、S₄B：四方柢角・木表荷重

曲げ試験は、スパン270cm、3等分点4点荷重で行った。スパン梁背比（以下 L/h と記す。）は22.5倍である。試験機は、ミネベア製30 ton 曲げ試験機 TCM-30000を用い、クロスヘッド速度 5 mm/min で荷重を負荷し、最大荷重からMORを計算し、荷重-たわみ曲線の比例域内における荷重の差と、それに対応するスパン中央部のたわみ量から、静的曲げヤング係数（以下 MOE と記す。）を計算した。これらの計算式をつぎに示した。

$$MOR = \frac{3 \times a \times P_m}{b \times h^2} \quad [kgf/cm^2] \quad (2.2)$$

$$MOE = \frac{\Delta P \times a \times (3L^2 - 4a^2)}{4 \times b \times h^3 \times \Delta y} \quad [\times 10^3 kgf/cm^2] \quad (2.3)$$

ここで、a：上部荷重点と下部支点の距離 [90cm]、P_m：最大荷重 [kgf]、b：試験体の幅 [cm]、h：試験体の高さ [cm]、ΔP：比例域内における上限荷重と下限荷重の差 [kgf]、Δy：ΔPに対応するスパン中央部のたわみ量 [cm]、L：スパン [270cm] である。

2.3 結果と考察

2.3.1 荷重方向と曲げ強度性能との関係

はじめに荷重方向と曲げ強度性能との関係を検討する。なお、試験時の試験体の含水率は、すべての平均で13.5%、変動係数が7.5%であったので、MOE、MORの含水率補正は行わなかった。

B_{40L}、E_{45L}、H_{59M}、J_{71L}、K_{75L}の5林分からのS₂、S₄それぞれに通し番号を付け、奇数番と偶数番の一方を木表荷重用の試験体とし、他方を木裏荷重用の試験体とした。

木取り・荷重方向区分ごとにEfr、MOE、MORの平均値と変動係数を表2.3に示し、さらにMOE、MORを木取り・荷重方向区分別に比較して図2.7に示した。まずMOEについて検討すると、図に示すようにS₂のMOEは荷重方向による違いがほとんど認められなかった。S₄では平均値に少し差が認められるが、この傾向は表2.3のEfrの傾向と同じである。したがって、荷重方向はMOEに対してはほとんど関係しないと考えられる。つぎに、MORについてみると、荷重方向との関係が顕著に認められた。すなわちS₂、S₄とも木裏荷重で得られたMORの平均値は、木表荷重で得られたその約1.3倍であり、荷重方向区分間の平均値の差は1%水準で有意であった。

表 2.3 荷重方向と曲げ強度性能との関係

木取り区分	荷重区分	試験体数	Efr ^{a)}		MOE ^{b)}		MOR ^{c)}	
			平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	平均値 kgf/cm ²	変動係数 %
二方桁角 (S ₂)	木表荷重 (S ₂ B)	37	108.2	13.7	95.0	14.1	393	18.9
	木裏荷重 (S ₂ P)	36	113.0	14.2	97.6	14.9	514	22.6
四方桁角 (S ₄)	木表荷重 (S ₄ B)	57	124.4	16.7	107.5	16.0	447	24.7
	木裏荷重 (S ₄ P)	59	120.8	13.8	103.9	13.5	547	19.2
計		189	118.0	15.8	102.1	15.5	480	24.8

^{a)}Efr：縦振動ヤング係数，^{b)}MOE：曲げヤング係数，^{c)}MOR：曲げ強さ，5林分 (B_{40M}，E_{45L}，H_{59M}，J_{71L}，K_{75L}) からの正角189本の集計である。

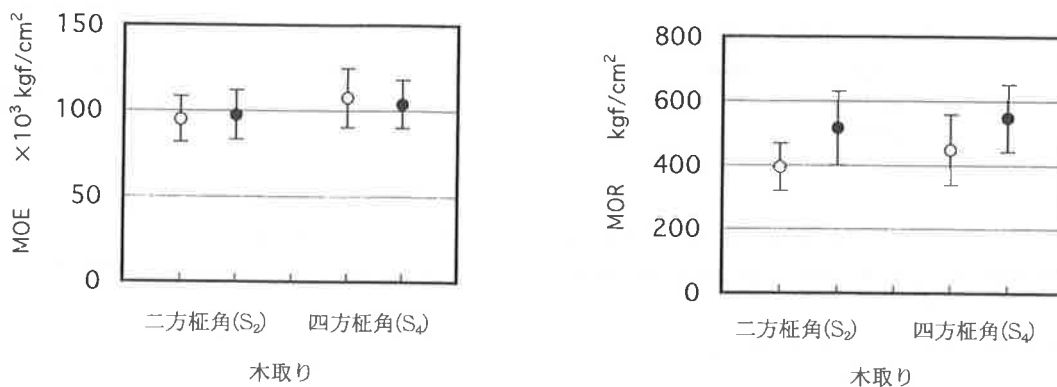


図 2.7 荷重方向と曲げ強度性能との関係

○：木表荷重、●：木裏荷重、MOE；MOR：表2.3参照、図中の範囲は平均値±標準偏差を示す。

また、同一荷重方向区分内でS₂とS₄のMOE、MORを比較すると、両者ともS₄の方が大きかった。これは図2.1に示したように、成熟材部の占める比率がS₂よりもS₄のほうが大きいことから説明できる。すなわち、カラマツの未成熟材部のMOE、MORが成熟材部のそれらより著しく劣ることが既往の研究^(28,34,35,58,67~69)により明らかであり、心去り正角中の未成熟材部は、MOEに対しては断面に占めるその比率、MORに対してはその比率および荷重方向の違いによる差と

して関係しているものと考えられる。

2.3.2 材質指標と曲げ強度性能との関係

本節で対象とする林分は、A_{40M}~L_{75H}までの12林分、試験体数は411である。2.3.1で検討した5林分以外の7林分から得たS₂に対する荷重方向は、C_{42M}から得た試験体だけをS₂Bとし、残りの6林分から得た試験体はすべてS₂Sである。2.3.1で検討した5林分以外のS₄は、すべてS₄Pで曲げ試験を行った。

材質指標とMOEとの関係は、2.3.1において荷重方向はMOEに関係しないと考えられたので、すべての試験体を使って検討する。材質指標とMOEとの関係を示す単相関係数（以下rと記す。）を表2.4に示した。表に示したように密度とMOEの間にはr=0.60**の高い相関が認められた。なお、**は表の脚注に示すようにrが危険率1%で有意なことを示す。一方、年輪幅、繊維傾斜、および4種類の節径比とMOEとの間に、統計的には有意な相関が認められたが、相関関係は低かった。

MORは荷重方向と関係することが明らかであるので、木取り・荷重方向区別にrを求め、それらを表2.5に示した。各区分内の試験体数は大きく異なっているが、密度とMORとの関係はS₂B以外は統計的には有意で、とくに、S₂、S₄とも木裏荷重のとき高い相関が認められた。目視等級区分の指標である年輪幅および繊維傾斜とMORとの相関は低いものの、年輪幅は狭いほど、繊維傾斜は小さいほど、MORが大きい傾向が認められる。節とMORとの関係は、S₂、S₄とも木裏荷重で有意な相関が認められ、とくに、引張り面最大単独節径比（以下K_MTと記す。）、引張り面集中節径比（以下K_GTと記す。）との間に高い相関が認められた。これによって、MORは引張り側材面の節との関係が大きいことがわかった。また、DPとMOR、NARPとMORとの関係は、木取り・荷重方向区分内では有意な関係が認められないものが多いが、全試験体で見れば有意な相関関係にあり、引張り面が髓から離れているほどMORが大きいことを示した。このことはDPあるいはNARPが大きいほど引張り面近傍は成熟材であることから説明できる。

表 2.4 材質指標と曲げヤング係数 (MOE) との関係を示す単相関係数

ρ ^{a)}	ARW ^{b)}	GI ^{c)}	DP ^{d)}	NARP ^{e)}	K _M ^{f)}	K _M T ^{g)}	K _G ^{h)}	K _G T ⁱ⁾
0.60** ^{j)}	-0.28**	-0.13**	0.07	0.12	-0.25**	-0.19**	-0.20**	-0.16**

a) ρ : 密度, b) ARW: 年輪幅, c) GI: 繊維傾斜, d)~e): 図 2.3参照, f) K_M: 最大単独節径比, g) K_MT: 曲げ試験における引張り面最大単独節径比, h) K_G: 集中節径比, i) K_GT: 引張り面集中節径比, j) **: 相関係数が危険率1%で有意なことを示す。試験体数は411である。

表 2.5 材質指標と曲げ強さ (MOR) との関係を示す単相関係数

木取り・荷重 方向区分	試験 体数	ρ ^{a)}	ARW ^{b)}	GI ^{c)}	DP ^{d)}	NARP ^{e)}	K _M ^{f)}	K _M T ^{g)}	K _G ^{h)}	K _G T ⁱ⁾
S ₂ B ^{j)}	49	0.38** ^{k)}	-0.29** ^{k)}	-0.32*	0.13	0.22	-0.15	0.14	-0.12	-0.17
S ₂ S ^{m)}	99	0.48**	-0.18*	-0.22*	0.14	0.23*	-0.29**	-0.41**	-0.22*	-0.39**
S ₂ P ⁿ⁾	36	0.66**	-0.25	-0.41*	0.18	0.21	-0.60**	-0.69**	-0.52**	-0.58**
S ₄ B ^{o)}	57	0.25	-0.19	-0.10	0.16	0.37**	-0.37**	-0.14	-0.44	-0.31*
S ₄ P ^{p)}	170	0.53**	-0.23**	-0.20*	0.30**	0.40**	-0.29**	-0.48**	-0.26**	-0.48**
全試験材	411	0.42**	-0.21**	-0.26**	0.44**	0.49**	-0.29**	-0.45**	-0.29**	-0.48**

a)~j): 表2.4参照, k) *: 相関係数が危険率5%で有意なことを示す。l)~p): 図2.6参照

2.3.3 非破壊的手法による曲げ強さの推定

2.3.3.1 曲げヤング係数、縦振動ヤング係数による曲げ強さの推定

MOEとMORとの関係を示す回帰直線を木取り・荷重方向区分別に図2.8に示した。図に示すように各区分において、 r は0.56**~0.73**の範囲であった。木裏荷重で得られる回帰直線と木表荷重で得られる回帰直線は図の中の位置が異なっているが、同一荷重方向では S_2 と S_4 の違いは少なかった。そして、 S_2S の回帰直線は、 S_2P と S_2B の間よりも S_2B に近い位置であった。また、図には示さなかったが、EfrとMORとの関係を示す r および標準誤差（以下 Se と記す。）は S_4P で0.71**および86.3、 S_2P で0.67**および88.8、 S_2S で0.58**および86.2、 S_4B で0.58**および91.7、 S_2B で0.53**および70.9で示され、木取り・荷重方向区分別の回帰直線の傾向は、図2.8に示したMOEとMORの場合と同様であった。

以上の結果から、従来いわれているように、単独の指標の中では、MOEあるいはEfrがMORと最も高い相関関係にあるが、それらによるMORの推定は荷重方向区分別の回帰式によらなければならないことが明らかである。

EfrとMOEとの関係を図2.9に示した。EfrとMOEとの関係は、原点を通る回帰直線 $MOE = 0.871 \times Efr$ 、 $r = 0.876$ **で示され、MOEはEfrの90%程度あることが分かった。ただし、これは L/h が22.5倍のスパン条件で求めたMOEに対して成立する関係であって、後述するように、 L/h がはるかに大きいラミナの曲げ試験とでは、EfrとMOEとの関係を示す回帰式の係数は異なった。

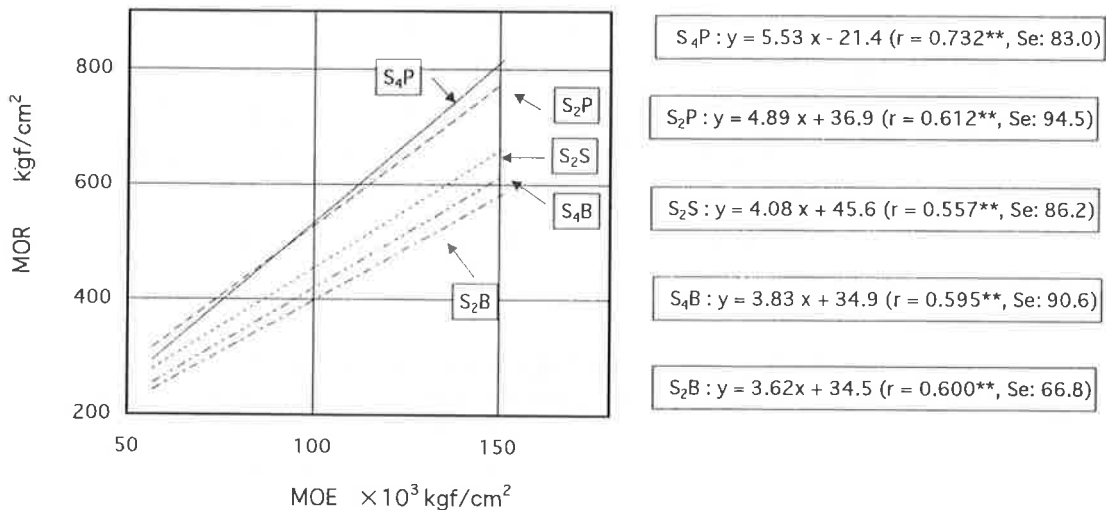


図2.8 曲げヤング係数（MOE）と曲げ強さ（MOR）との関係を示す回帰直線

r : 相関係数、** : 相関係数が危険率1%で有意なことを示す。Se : 標準誤差、 S_4P ; S_2P ; S_2S ; S_4B ; S_2B : 図2.6参照、 y : MOR、 x : MOE

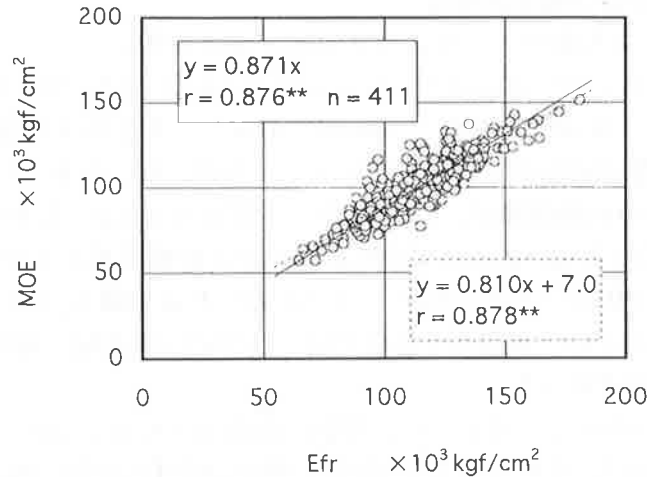


図 2.9 縦振動ヤング係数 (Efr) と曲げヤング係数 (MOE) との関係

実線：原点を通る回帰直線、破線：原点を通らない回帰直線、 r ；**：図 2.8 参照、 y ：MOE、 x ：Efr

2.3.3.2 曲げヤング係数と材質指標併用による曲げ強さの推定

木裏荷重の S_2P と S_4P を1グループとして、材質指標とMOEを併用してMORを推定する目的で、重回帰分析を試みた。 S_2P と S_4P を1グループとしたのは図 2.8 に示したように、両者の回帰直線は位置および傾きの違いが少なく、両者を分ける必要がないと判断したからである。節径比は表 2.5 で高い相関が認められた K_{MT} とした。表 2.6 に示すように、密度、年輪幅、繊維傾斜、 K_{MT} 、MOEの5因子を説明変数とした場合、重相関係数（以下 R と記す。）が0.805と最も大きく、 Se は72.5kgf/cm²と最も小さかった。しかし K_{MT} とMOEの2変数の場合でも R 、 Se は0.782、75.6kgf/cm²であり、密度、年輪幅、繊維傾斜の3変数を加えることによるMOR推定の意義は小さいといえる。一方MOE単独を説明変数とした場合の R 、 Se は0.714、84.8kgf/cm²であるから、MOEによる区分に、さらに K_{MT} による区分を加える意義が認められる。ここでは試みとして、節は K_{MT} を用いたが K_{CT} を用いても木裏荷重に対しては同様な結果が得られると考えられる。

表 2.6 曲げ強さ (MOR) を目的変数をとした重回帰分析結果

説明変数	F-値	重相関係数 (R)	標準誤差 (Se) kgf/cm ²
ρ^a , ARW ^b , GI ^c , K_{MT}^d , MOE ^e	73.9** ¹⁾	0.805	72.5
ARW, GI, K_{MT} , MOE	86.7**	0.796	73.9
GI, K_{MT} , MOE	115.8**	0.795	73.8
K_{MT} , MOE	160.3**	0.782	75.6
MOE	212.5**	0.714	84.8

a)~d)：表2.4参照、^{e)}MOE：曲げヤング係数、¹⁾**：F-値が危険率1%で有意なことを示す。試験体数は二方桁角、四方桁角それぞれ36、170の計206である。表の最下行は参考のためMOE単独を説明変数としたときの回帰分析結果を示した。

2.3.4 構造材としての評価

試験体の曲げ強度性能の評価を、建築基準法施行令⁽²⁹⁷⁾（以下施行令と記す。）に示されている材料強度、日本建築学会の木質構造設計基準⁽¹¹⁸⁾（以下設計基準と記す。）を参考にして全体的な評価を行い、つぎに規格⁽¹⁵⁴⁾による評価を行った。

2.3.4.1 建築基準法施行令、木質構造設計基準による評価

木取り・荷重方向区分別にMOE、MORの集計結果を表 2.7 に示した。表のMORの5%下限

値は順位化して求めたものを5%NPE, 正規分布と仮定した統計的下限値のうち、単純に平均値 - 1.645×標準偏差で計算したものを5%NORMとした。また、ASTM D 2915⁽¹¹⁹⁾の方法、すなわち、平均値 - K×標準偏差で計算したものを5%PTLとした。ここでKはASTM D 2915に示されている信頼水準75%のときの5%下限値を求めるための係数である。Kは試験体数によって変わるため、表2.7に示すように、試験体数が少ないほど5%PTLと5%NORMとの差が大きくなる。

施行令⁽²⁹⁷⁾ではカラマツ材の材料強度をMORについて270kgf/cm²と定めており、表に示すようにS₂B、S₄BのMORの5%下限値はいずれの評価法でもそれ以下であった。S₂SのMORの5%下限値はほぼ材料強度を満足し、S₂PおよびS₄Pのそれらは両者ともはるかに高い値であった。つぎに、設計基準⁽¹¹⁸⁾ではカラマツ材は針葉樹Ⅲ類であり、その長期許容応力度から誘導されるMORの基準強度は普通構造材で255kgf/cm²、上級構造材で315kgf/cm²であるから、普通構造材の基準は5%下限値が最も小さいS₂BのMORでもほぼ満たすと判断できる。また、S₂PのMORの5%PTLが上級構造材の基準値以下であるが、これは試験体が少ないためで、S₂PおよびS₄PのMORは上級構造材の基準強度を満たすと判断できる。

MOEについて設計基準では、普通構造材、上級構造材それぞれに80×10³kgf/cm²、90×10³kgf/cm²の値を与えており、これらは平均値から誘導されたものであるから、表2.7に示したMOEは上級構造材の基準を満たしていると考えられる。

表2.7 木取り・荷重方向区分別曲げ強さ (MOR) および曲げヤング係数 (MOE)

木取り・荷重 方向区分	試験 体数	MOE × 10 ³ kgf/cm ²			MOR kgf/cm ²					
		平均値	変動係数 %	%	平均値	変動係数 %	%	5% NPE ^{a)}	5% NORM ^{b)}	5%PTL ^{c)}
S ₂ B ^{d)}	49	93.7	14.4		374	21.9		221	239	226
S ₂ S ^{e)}	99	98.8	14.2		448	22.9		295	279	268
S ₂ P ^{f)}	36	97.6	14.9		514	22.6		340	323	300
S ₄ B ^{g)}	57	107.5	16.0		447	24.7		260	265	248
S ₄ P ^{h)}	170	99.1	16.2		527	23.0		323	328	317
全体	411	99.4	15.9		478	25.7		289	276	269

^{a)} 5% NPE: 順位法で求めた5%下限値, ^{b)} 5% NORM: 平均値 - 1.645×標準偏差, ^{c)} 5%PTL: 5% parametric lower tolerance limit = 平均値 - K×標準偏差 (K: ASTM D2915⁽¹¹⁹⁾, Table 3, 75% Confidence, 5%Tolerance), ^{d)} S₂B: 二方桁角・木表荷重, ^{e)} S₂S: 二方桁角・正桁目面荷重, ^{f)} S₂P: 二方桁角・木裏荷重, ^{g)} S₄B: 四方桁角・木表荷重, ^{h)} S₄P: 四方桁角・木裏荷重

2.3.4.2 針葉樹の構造用製材の日本農林規格による評価

規格⁽¹⁵⁴⁾は1991年に制定され、これに対応して1996年、規格によって区分した各等級それぞれに建設省住宅指導課長名通達⁽²⁹⁸⁾によって許容応力度が与えられた。そこで、各試験体を規格にしたがって等級区分し、MORの5%下限値と許容応力度を3倍した基準強度とを比較した。なお、ここでは木取り区分はしないで、荷重方向区別に検討した。木取り区分をはずしたのは、2.3.3.1の結果からS₂BとS₄B、S₂PとS₄PのMOEとMORとの関係を示す回帰直線の位置および傾きが近いこと、木取り区分を加えれば同一等級内の試験体数が少なくなること、等級区分においてS₂とS₄を分けて処理することは実際的でないこと、の3点の理由からである。

規格⁽¹⁵⁴⁾では等級区分の方法によって、目視等級区分製材(以下S_{VG}と記す。)と機械等級区分製材(以下S_{MG}と記す。)に大きく分類している。S_{VG}は甲種構造材と乙種構造材にさらに区分され、前者は主として高い曲げ性能を必要とする部分に使用するもの、後者は主として圧縮性能を必要とする部分に使用するものである。甲種構造材はさらに断面寸法により、構造用Ⅰ、構造用Ⅱに分けられ、等級は1級、2級、3級の3区分である。本研究では試験体を構造用Ⅱによって区分し、目視等級の1級、2級、3級、枠外をVG1、VG2、VG3、VG4で表す。また、S_{MG}はMO

Eによって、E 50 : $40 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2 \leq \text{MOE} < 60 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2 \sim \text{E 150} : \text{MOE} \geq 140 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ まで6区分される。

目視等級、機械等級に対応させて、試験体のMORの平均値、標準偏差の範囲、5%下限値、建設省住宅指導課長名通達⁽²⁹⁸⁾による許容応力度を3倍した値を基準強度として図2.10に示した。ここでは、MORの5%下限値は5%NORMで検討した。その理由は、等級区分することによって試験体数が少なくなり、5%NPEが求められないものが多く、5%PTLでは試験体数が少ない場合、極端に値が下がってしまうからである。

S_{VG}としての評価では、図2.10に示すように木裏荷重の場合のMORの平均値および5%NORMは等級に対応して上位等級ほど大きかった。一方、正桁目面荷重および木表荷重の場合、等級間の差は顕著ではなかった。S_{VG}の基準強度は、VG1、VG2、VG3で、それぞれ285、255、225 kgf/cm²である。これらと5%NORMとを比較すると、木裏荷重では基準強度よりはるかに高く、最もMORが低い木表荷重でも基準強度をほぼ満足していた。

以上の結果から、カラマツ心去り正角を横架材として使用する場合、木裏荷重の状態になるように荷重面を指定すれば、S_{VG}としてさらに高い許容応力度が設定可能なことが示唆された。

つぎに、S_{MG}としての評価では、図2.10に示すように木裏荷重のMORの平均値および5%NORMは上位等級ほど大きく等級に対応していた。一方、正桁目面荷重および木表荷重は、MORの平均値では上位等級が大きく等級に対応するものの、5%NORMは下位等級では等級間の差が明確ではなかった。S_{MG}の基準強度はE70、E90、E110、E130で、それぞれ210、300、390、465 kgf/cm²であり、S_{VG}の基準強度よりも高い値が与えられている。これらと5%NORMとを比較すると、木裏荷重では基準強度以上であるが、正桁目面荷重および木表荷重では基準強度以下であった。したがって、カラマツ心去り正角がS_{MG}の基準強度を満たすためには荷重面の指定が必要である。

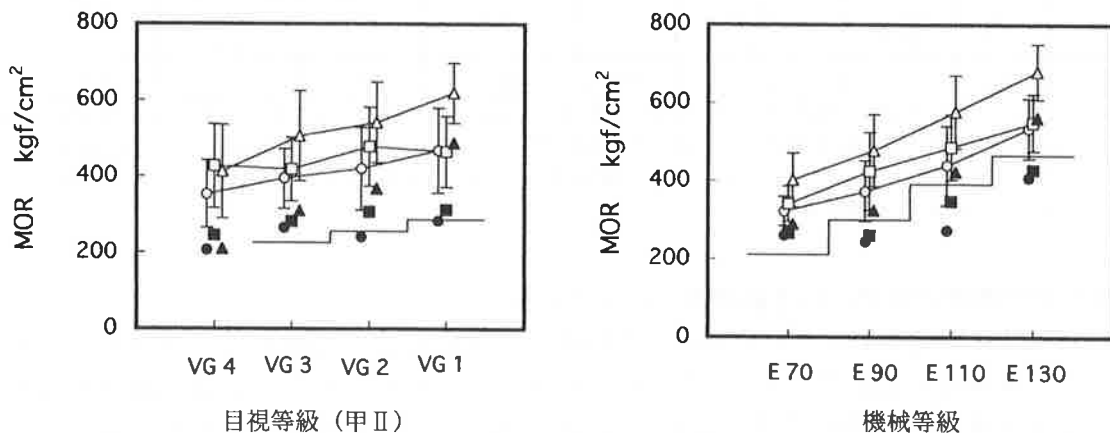


図2.10 針葉樹構造用製材の日本農林規格⁽¹⁵⁹⁾によって等級区分した心去り正角の曲げ強さ (MOR)
 ○; ●: 木表荷重、□; ■: 正桁目面荷重、△; ▲: 木裏荷重、○; □; △: 平均値、●; ■; ▲: 5%下限値=平均値-1.645×標準偏差、実線: 許容応力度から誘導した基準強度、VG1; VG2; VG3: 目視等級の1級; 2級; 3級、VG4: 目視等級の枠外、E70; E90; E110; E130: 機械等級、図中の範囲は平均値±標準偏差を示す。

2.3.5 試験結果の林分別比較

2.3.5.1 材質指標の林分別比較

心去り正角の密度、年輪幅、繊維傾斜、最大節径比 (以下K_Mと記す。)、および集中節径比 (以下K_Gと記す。)の林分別比較を図2.11に示した。これらの中で、傾向が認められたものは年輪幅だけであり、高樹齡林分からの試験体ほど年輪幅が小さくなる傾向が認められた。とくに

L_{75H}は海拔が1850mと高海拔林分であり、試験体の年輪幅の平均値が3mm以下であった。密度は図に示すように、林分間で違いがあるが、樹齢、地域、海拔いずれをとっても傾向は見いだせなかった。同様に繊維傾斜、K_M、K_Gについても傾向は認められなかった。

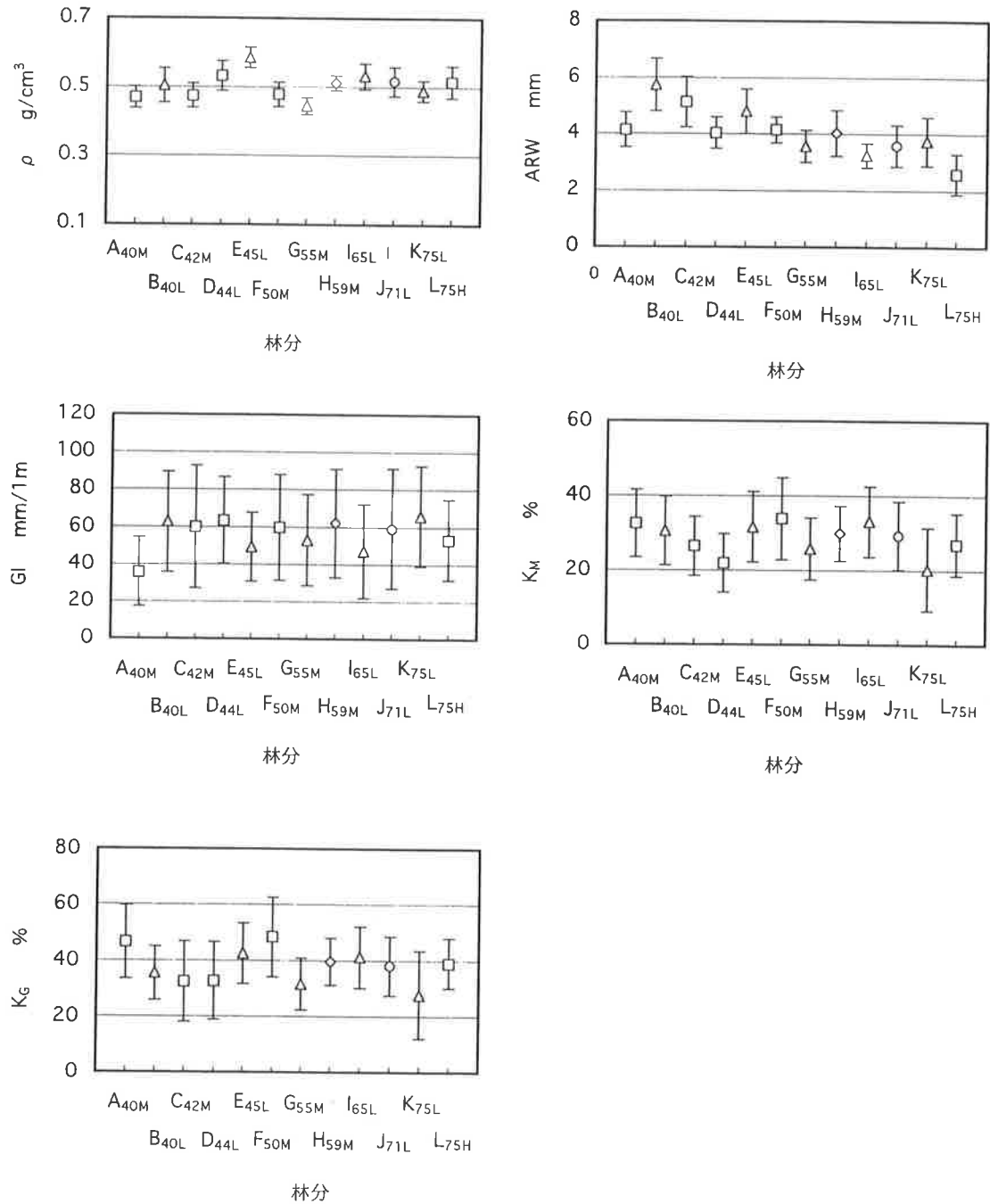


図 2.11 密度 (ρ)、年輪幅 (ARW)、繊維傾斜 (GI)、最大節径比 (K_M) および集中節径比 (K_G) の林分別比較
○：北信地域、△：東信地域、□：南信地域、◇：木曾地域、図中の範囲は平均値±標準偏差を示す。

2.3.5.2 曲げ強度性能の林分別比較

試験体のMOE、MORの林分別比較を図 2.12に示した。MOEは全試験体であるが、MORは木裏荷重で曲げ試験を行った試験体だけを集計した。図に示すように、MOEが高い林分はMORも高い傾向が概略認められ、図 2.11に示した密度の高い林分ともほぼ対応している。したがって、MOE、MORについても密度と同様に、樹齢、地域、海拔による傾向がないことが予想され

るが、ここでは細かく解析する。全林分、林分の樹齢区分、地域区分、海拔区分別に、MOEは全試験体を対象とし、MORは木裏荷重の試験体だけで一元配置の分散分析を行い、その結果を表2.8に示した。

12林分間での分散分析の結果はMOE、MORともに1%水準で有意であった。樹齢区分内では、40年生級5林分間において1%水準で有意であったが、50年生級、60年生級以上では1%水準では有意でなかった。したがって、分散分析の結果が12林分間で有意であったのは、40年生級の林分、とくに図2.12で認められるようにD_{44L}のMOEおよびMORの値が高いことが原因しているものと思われた。また、50年生級、60年生級以上で有意でなかったことから、高樹齢になれば林分の影響が少なくなることが示唆された。

地域区分内では、東信地域の5林分でMOE、MORの両者とも1%水準では有意でなく、南信地域の5林分では有意であったが、これもD_{44L}の影響が大きいものと思われる。海拔区分内ではMOE、MORとも1%水準では有意ではなかった。また、I_{65L}とK_{75L}はとくに大径材であったが、図2.12に示すように、それらの林分から得られた試験体のMOEおよびMORはほかと大差なかった。

つぎに、MOEとMORとの関係を示す回帰直線が、区分された林分間で違いがあるかどうかを検討した。林分の海拔区分、樹齢区分、および地域区分別に木裏荷重のMOEとMORとの関係を示す回帰直線を図2.13にそれぞれ示した。図に示すように、これらの回帰直線は、海拔区分、樹齢区分ではほとんど重なった。地域区分では必ずしも重なっていないが、北信地域、木曽地域は1林分だけであり、南信地域の5林分と東信地域の5林分の回帰直線は近いことから、MOEとMORとの関係は、海拔、樹齢、地域による差異は少なく、ひとつの回帰式で表せるものと考えられる。なお、武井⁽⁹⁾は、北海道産カラマツと長野県産カラマツの心持ち正角に限った曲げ強度性能の比較を行い、両地域間にMOEの差が認められるものの、それは成長の違いからくるものであり、MOEとMORとの関係は変わらないとしている。

重松⁽⁹⁾は、製材の品等区分の試験の中で、心去り正角であっても本研究でいう40年生級および50年生級は、60年生級と比較して構造材として利用できる比率が少ないことを示したが、本研究の荷重方向を木裏荷重とした心去り正角の曲げ強度性能では、品等区分で認められたような樹齢による違いは認められなかった。

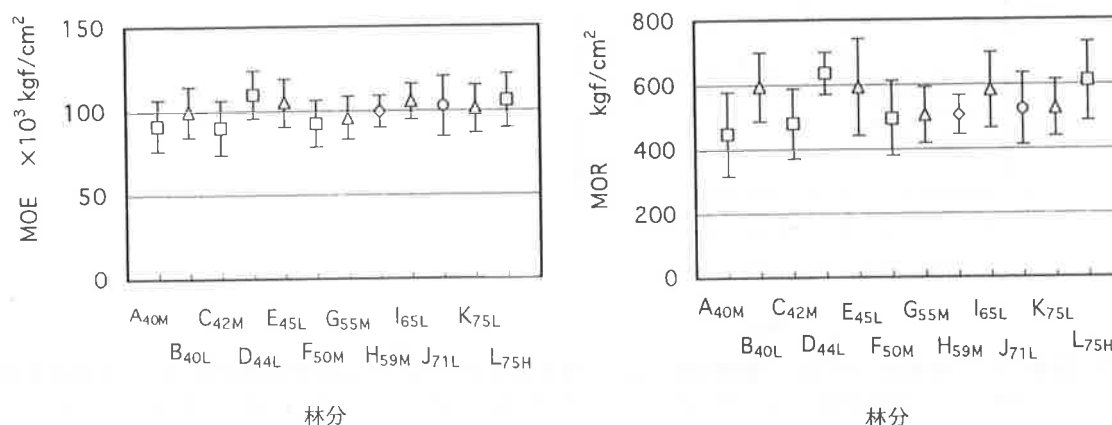


図2.12 曲げヤング係数 (MOE)、曲げ強さ (MOR) の林分別比較

○：北信地域、△：東信地域、□：南信地域、◇：木曽地域、MOEは全試験体、MORは木裏荷重で曲げ試験を行った試験体だけを集計した。図中の範囲は平均値±標準偏差を示す。

表 2.8 分散分析結果

林分区分		林分	MOE ^{a)}	MOR ^{b)}
全林分		12林分	** ^{c)}	**
樹齢区分	40年生級5林分	A _{40M} , B _{40L} , C _{42M} , D _{44L} , E _{45L}	**	**
	50年生級3林分	F _{50M} , G _{55M} , H _{59M}	—	—
	60年生級以上級4林分	I _{65L} , J _{71L} , K _{75L} , L _{75H}	—	—
地域区分	東信地域5林分	B _{40L} , E _{45L} , G _{55M} , I _{65L} , K _{75L}	—	—
	南信地域5林分	A _{40M} , C _{42M} , D _{44L} , F _{50M} , L _{75H}	**	**
海拔区分	低海拔6林分	B _{40L} , D _{44L} , E _{45L} , I _{65L} , J _{71L} , K _{75L}	—	—
	中海拔5林分	A _{40M} , C _{42M} , F _{50M} , G _{55M} , H _{59M}	—	—

^{a)} MOE：曲げヤング係数：全試験体で分析した。^{b)} MOR：曲げ強さ：木裏荷重の試験体だけで分析した。

^{c)} **：分散分析の結果が1%水準で有意なことを示す。

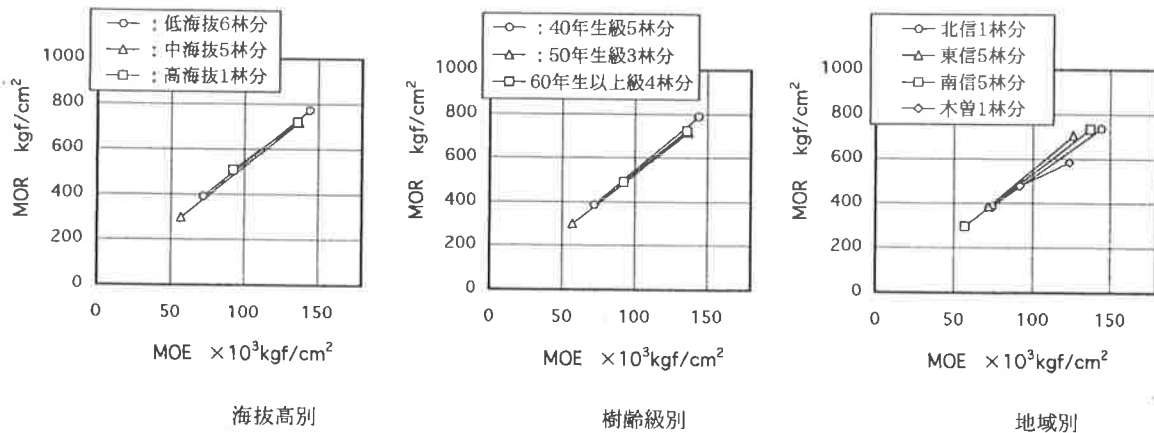


図 2.13 林分の海拔高区分、樹齢区分および地域区分別の曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強さ (MOR) の関係を示す回帰直線
木裏荷重の試験体だけで解析した。

2.4 おわりに

将来生産されるカラマツ大径材の用途の多くを占めると考えられる心去り正角の曲げ強度特性を明らかにし、つぎに、林分間の強度性能の比較を行った。試験材を得た林分は北信、東信、中信、木曾の4地域の人工12林分、海拔850~1850m、樹齢40~75年であった。

心去り正角の木裏荷重で得られるMOEおよびMORと木表荷重で得られるそれらと比較した結果、MOEは荷重方向と関係しないが、MORは荷重方向との関係が大きく、二方桁角、四方桁角とも、木裏荷重のMORの平均値は木表荷重の約1.3倍であった。

材質指標とMOEとの関係では、密度との間に $r = 0.60^{**}$ の高い相関が認められたが目視等級区分の指標である年輪幅、繊維傾斜および節 (K_M , K_{MT} , K_G , K_{GT}) との相関関係は低かった。材質指標とMORとの関係は、木取り・荷重方向で異なり、木裏荷重の場合には引張り側材面の節との相関が高いことが明らかとなった。

MOEとMORとの関係は、木取り・荷重方向区分内で、 $r = 0.56^{**} \sim 0.73^{**}$ の高い相関が認められたが、木裏荷重で得られたMOEとMORの回帰直線は木表荷重で得られたそれと位置が異なっていた。一方、荷重方向区分内では二方桁角と四方桁角の違いは少なかった。

木裏荷重で得られたMORを目的変数とした重回帰分析の結果、説明変数としてMOEに引張り側材面の節径比を加えることによって、MORを推定する精度が向上することが示されたが、密度、年輪幅、繊維傾斜を加えても効果は少なかった。

針葉樹構造用製材の日本農林規格⁽¹⁵⁾の目視等級区分製材としての評価では、MORの5%下限

値は木表荷重でもほぼ基準強度を満たし、正桁目面荷重、木裏荷重のそれらは、基準強度以上であった。とくに木裏荷重の場合、MORの5%下限値が基準強度よりはるかに大きく、横架材として荷重面を指定すれば、さらに高い許容応力度が設定可能であることが示唆された。一方、機械等級区分製材として評価すると、木裏荷重のMORの5%下限値だけが基準強度を満たし、正桁目面荷重および木表荷重のそれらは基準強度を満たさなかった。したがって、機械等級区分製材の基準強度を満たすためには荷重面を指定する必要がある。

MOEの高い林分はMORも高い傾向が認められ、密度も大きい傾向にあった。分散分析の結果、MOE、MORとも林分の影響が認められたが、これは40年生級の若い林分が関係しており、50年生級以上の林分では林分の影響は認められなかった。

高樹齢林分からの試験体ほど強度性能の向上が予想されたが、本研究での心去り正角のMOE、木裏荷重で得られたMORに限ればその傾向は認められなかった。逆に40年生級であっても曲げ強度性能が劣るということはなかった。

以上の結果、心去り正角の曲げ強度特性として、MORは荷重方向と関係することが明らかになった。すなわち、未成熟材部が引張り側の木表荷重の場合、MORは小さく、逆に木裏荷重の場合大きい。他樹種について心去り角の荷重方向とMORとの関係を検討した研究は見あたらないが、この傾向はカラマツに限らず、未成熟材の存在する針葉樹人工造林木一般にいえると考える。

また、現存する高樹齢林分が少ないために、胸高直径が同じであっても樹齢が異なる林分、あるいは樹齢、胸高直径、施業が同じであっても地域が異なるというような林分の選定はできなかった。このため、肥大成長の違いによる実大材曲げ強度性能の比較、地域間によるその比較は厳密な意味ではできなかったが、少なくとも、心去り正角の実大材曲げ強度性能については、樹齢、地域との関係は少ないことが示唆された。

第3章 連続送り式グレーディングマシンの特性とその調整⁽²⁹⁹⁾

3.1 はじめに

構造用集成材はそれを構成するラミナの集合体であり、ラミナの強度性能と構造用集成材の強度性能とは重要な関連があるので、カラマツ人工造林木を構造用集成材として利用するためには、ラミナを適正に等級区分する必要がある。等級区分の方法には、1.2.6で述べたように目視等級区分と機械等級区分とがあるが、機械等級区分の有効性は多くの研究から明らかにされている^(127,168,169,204)。

ラミナを機械等級区分する場合、そのための装置の性能と調整が重要なことはいうまでもない。本章では、機械等級区分のための装置である連続送り式グレーディングマシン（以下装置と記す。）の特性とその調整について述べる。

本研究に用いた装置は、アメリカ、カナダで広く普及しているContinuous Lumber Tester^(160,165)（以下CLTと記す。）タイプの1992年に製造された我が国の第1号機、飯田工業(株)製、機種名MGFS 251、である。この種の装置は1996年に制定された構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾に、長さ方向に移動させながら連続して曲げヤング係数を測定したMSRラミナが定義されたこともあり、我が国の大型集成材工場に導入が進んでいる。しかし、これらの装置の性能を評価した報告は少なく、金田らの報告⁽¹⁷²⁾や、スギラミナを用いた予備的な検討⁽¹⁷³⁾がある程度である。

この装置はCLT⁽¹⁶⁵⁾と同様、1枚のラミナを長さ方向に分割して静的曲げヤング係数（以下装置により測定した曲げヤング係数をMGEと記す。）を連続測定することができ、送り速さが速く、自動化が可能なことを特徴とする。しかし、CLT⁽¹⁶⁵⁾と異なりローラが水平に固定されているため、支点ローラの位置で曲げモーメントが発生する。したがって、送り速さ、測定ローラが与えるたわみ（以下測定たわみと記す。）の大きさ、ラミナの厚さ、およびラミナの曲げヤング係数によって力学的支持条件（以下支持条件と記す。）が変化する可能性がある。

そこで、本研究では、装置の特性として、送り速さ、測定たわみ、ラミナの曲げヤング係数およびラミナの厚さと測定中のラミナの支持条件との関係を検討した。また、装置による測定値の合理的な補正方法について考察し、ラミナの厚さ別に変えている補正係数を同一のものにする可能性についても検討を加えた。

3.2 連続送り式グレーディングマシンについて

試験に用いた装置は、図3.1に示すように水平に固定されたローラ間をラミナが通過する間に、第1段階は上面から一定量のたわみを与え、第2段階では下面からそれを与え、その反力を連続的に測定する方式で、ふたつの段階の測定値を平均することによって、材料の縦ざりが測定値に関係しない構造である。

この装置によるMGEの測定は、ラミナの端から80cmの位置が120cmのスパンの中央である測定ローラの位置にきた時点で始まり、一定間隔、すなわち、1.4cm以上、0.7cmの倍数で任意、通常5.6cm間隔で計測される。したがって、ラミナの両端20cmの部分はMGE測定に全く関与しない。そしてMGE測定値による等級区分は、MGEの平均値（以下MGE_{AV}と記す。）あるいは最小値（以下MGE_{MIN}と記す。）で行われる。

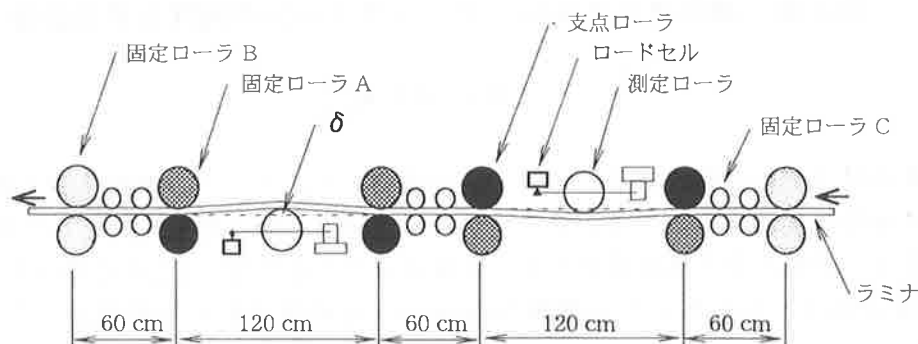


図 3.1 連続送り式グレーディングマシンの模式図

δ : 測定たわみ、駆動するローラは固定ローラ A、固定ローラ B、および支点ローラである。ラミナ上部のすべてのローラは上部フレームに取り付けられており、固定ローラ A 以外はフレームに水平に固定されている。ラミナ下部のすべてのローラは上下移動可能な水平フレームに取り付けられており、固定ローラ A 以外はフレームに水平に固定されている。上下の固定ローラ A は空気圧により測定中のラミナを支点ローラに押しつける機能を有している。すべてのローラは鋼製である。

3.3 実験

3.3.1 材料

材料は曲げヤング係数の範囲を広げるために、スギ、カラマツ、ダグラスファーの 3 樹種とし、ラミナは人工乾燥の後 4 面モルダ仕上げをした。材料の寸法および試料数はそれぞれ、厚さ 16mm、幅 135mm、長さ 3300mm のラミナを各樹種ごとに 10 枚、計 30 枚、厚さ 24mm、幅 135mm、長さ 3300mm のそれを各樹種ごとに 10 枚、計 30 枚、および厚さ 32mm、幅 135mm、長さ 3030mm のラミナを各樹種ごとに 12 枚、計 36 枚、である。

3.3.2 試験条件の設定と連続送り式グレーディングマシンによる曲げヤング係数の測定

本研究に用いた装置と CLT⁽¹⁶⁵⁾の構造的な大きな相違は、ローラによるラミナの支持条件である。すなわち、CLT は図 3.1 における各固定ローラおよび支点ローラを、測定ローラが与えるたわみ角度に等しい角度で傾斜させるので、支点ローラの位置では曲げモーメントはゼロであり、ラミナの支持条件は力学的に単純支持として扱うことができる⁽¹⁶⁵⁾。一方、試験に用いた装置の場合、測定ローラ以外のローラは水平に固定されており、支点ローラの位置で曲げモーメントを生じ、ラミナの支持条件は両端固定に近いと考えられる。そこで、本研究では、ラミナの支持条件を両端固定と仮定して MGE を測定した。

中央集中荷重の曲げにおいて、両端固定支持条件の場合、次式が成立する。

$$M = \frac{P \cdot \ell}{8} \quad [\text{kgf} \cdot \text{cm}] \quad (3.1)$$

$$E = \frac{P \cdot \ell^3}{192I \cdot \delta} \quad [\times 10^3 \text{kgf}/\text{cm}^2] \quad (3.2)$$

$$\sigma_M = \frac{M}{Z} \quad [\text{kgf}/\text{cm}^2] \quad (3.3)$$

ここで、 M : 曲げモーメント [$\text{kgf} \cdot \text{cm}$]、 P : 荷重 [kgf]、 ℓ : スパン [cm]、 E : 曲げヤング係数 [$\times 10^3 \text{kgf}/\text{cm}^2$]、 I : 断面 2 次モーメント [cm^4]、 δ : たわみ [cm]、 σ_M : 辺縁応力⁽³⁰⁾ [kgf/cm^2]、 Z : 断面係数 [cm^3] である。

(3.1) と (3.3) から $P = 8Z \sigma_M / \ell$ 、これと (3.2) から $\sigma_M = 24E \cdot I \delta / (Z \ell^3)$ 、 $I/Z = t/2$ より

$$\sigma_M = \frac{12E}{l^2} (\delta \cdot t) \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (3.4)$$

ここで、t: 厚さである。

したがって、ローラによる材料の支持条件が、材厚、送り速さ等で変わらないと仮定すると、 $\delta \cdot t$ [mm²] が一定になる条件で測定すれば、曲げヤング係数が等しいラミナの場合、厚さが異なっても等しい辺縁応力⁽³⁰⁰⁾水準で測定できることになる。そこで、測定たわみは表 3.1 に示すように、 $\delta \cdot t$ が96、144および192mm²の3条件となるようにラミナの厚さごとに設定した。曲げヤング係数が $100 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ のラミナで、ラミナの支持条件を両端固定と仮定した場合、測定たわみ条件1、2、3のそれぞれに対応する辺縁応力⁽³⁰⁰⁾は80kgf/cm²、120kgf/cm²、160kgf/cm²である。送り速さは厚さ32mmのラミナについては60m/min および120m/min の2条件、他は120m/min の1条件とした。以下、表 3.1 の条件1、2、3で求めたMGEをMGE1、MGE2 およびMGE3 と記す。

表 3.1 連続送り式グレーディングマシンによる測定条件

ラミナの種類	条件 1 δ^a mm	条件 2 δ mm	条件 3 δ mm	送り速さ m/min
16 mm	6	9	12	120
24 mm	4	6	8	120
32 mm	3	4.5	6	120, 60
$\delta^a \cdot t^b$ (mm ²)	96	144	192	
MGE ^c 区分	MGE 1	MGE 2	MGE 3	

^{a)} δ : 測定たわみ, ^{b)} t: ラミナの厚さ, ^{c)} MGE: ラミナの支持条件を両端固定と仮定して連続送り式グレーディングマシンによって測定した曲げヤング係数

3.3.3 材料試験機による曲げヤング係数の測定

材料試験機による静的曲げヤング係数（以下材料試験機により求めた曲げヤング係数をMOEと記す。）はミネベア製材料試験機TCM-5000を用い、スパン120cmの単純支持条件で、中央集中荷重の非破壊検査により求めた。MGEの測定はラミナの端から80cmの位置を測点1として5.6mピッチで行ったため、1枚のラミナについて、3m材であれば25点の測定値が得られる。各ラミナの測点1、5、9、13、17、21および25に該当する7箇所を材料試験機の中央に配置し、厚さ別に決めた最終たわみ量まで荷重を負荷し、その間の荷重とたわみを一定間隔で記録した。各最終たわみ量は、曲げヤング係数が等しい材料に両端固定条件で表 3.1 の条件3に示したたわみを与えたとき生じる辺縁応力⁽³⁰⁰⁾と単純支持条件で生じる辺縁応力とが等しくなるように設定した。その結果、非破壊検査における最終たわみ量は、厚さ16、24、および32mmのラミナに対してそれぞれ24、16および12mmとなった。この方法は、一定荷重まで荷重を負荷する通常の非破壊検査とは異なり、一定たわみまで荷重を負荷し、たわみに対応する荷重からMOEを求めた。

3.3.4 ラミナの力学的支持条件を示す指標

この研究におけるMGE1、MGE2、MGE3の測定はラミナの支持条件を両端固定と仮定して行っているため、MOEに対するMGEの比（以下MGE/MOEと記す。）を求め、この比をその支持条件を示す指標とした。すなわち、この値が1に近ければ測定中のラミナの支持条件が両端固定側にあり、値が小さくなるほど単純支持側にシフトしていることになる。

3.4 結果と考察

3.4.1 送り速さと測定値との関係

厚さ32mmのラミナについて、送り速さ120m/minで測定したMGEと60m/minで測定したMGEとの関係を、MGE3について図3.2に示した。図に示すように、相関係数（以下rと記す。）は0.999と極めて高く、回帰式の傾きも1に近かった。また、MGE1およびMGE2についてもMGE3とほとんど同じ傾向が認められ、rはそれぞれ0.996および0.998であり、測定たわみの大きな条件ほど高いrが得られた。つぎに、測定たわみとMGE/MOEとの関係を図3.3に示した。図に示すように測定たわみが大きいほどMGE/MOEは小さくなり、ラミナの支持条件が単純支持側にシフトすることを示していた。この傾向は標準偏差の範囲も含めて、送り速さ60m/minと120m/minの測定ではほとんど変わらなかった。このことから、送り速さはラミナの支持条件とほとんど関係しないと判断できる。

以下本研究におけるMGE1、MGE2、MGE3は、送り速さ120m/minで測定したものとする。

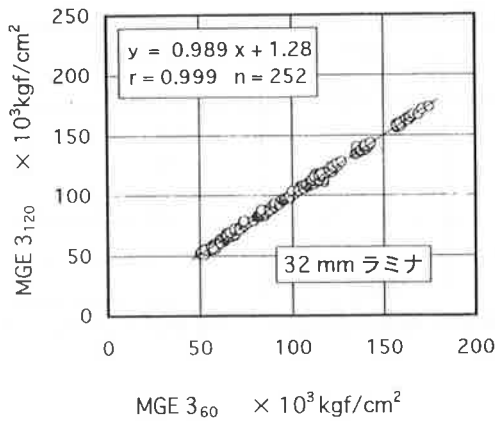


図3.2 MGE3₆₀とMGE3₁₂₀との関係

MGE3₆₀：表3.1に示した条件3、送り速さ60m/minで測定した。

MGE3₁₂₀：同様に120m/minで測定した。

y：MGE3₁₂₀、x：MGE3₆₀

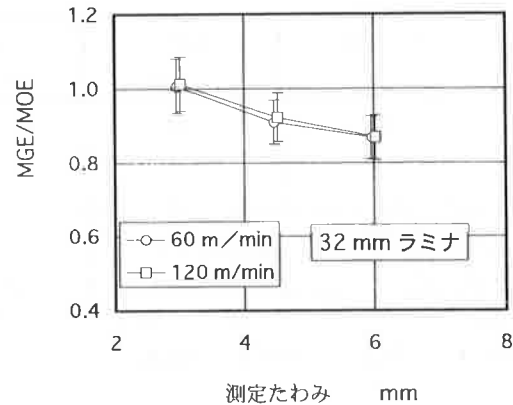


図3.3 測定たわみとMGE/MOEとの関係

60m/min；120m/min：送り速さ

3.4.2 装置により測定した曲げヤング係数と材料試験機により測定した曲げヤング係数との関係

MGE1、MGE2、MGE3とMOEとの関係を示す回帰直線とrを、測定たわみ条件別に図3.4に示した。図に示すように同一測定たわみ条件では、厚いラミナほど回帰式の傾きが大きく、同一厚さのラミナでは測定たわみの大きな条件ほどその傾きが大きかった。MGEとMOEとの関係を示すrはすべての条件で0.95以上と高かったが、ラミナの種類によらず、δ・tが大きいMGE3との相関が最も高く、この場合のrは0.98以上であった。

3.4.3 測定中のラミナの力学的支持条件

3.4.3.1 ラミナの曲げヤング係数と支持条件との関係

MOEが、40×10³kgf/cm²以上、60×10³kgf/cm²未満のラミナをE50、同様に60×10³kgf/cm²以上、80×10³kgf/cm²未満のラミナをE70というように、20×10³kgf/cm²の区間で等級分けを行い、各等級ごとにMGE/MOEの平均値を計算し、図3.5に厚さおよび測定たわみ条件別に示した。図に示すように、MOEの高いラミナほどMGE/MOEが小さくなり、ラミナの支持条件が単純支持側にシフトすることを示していた。これらの傾向は厚さ32mmのラミナにおいて顕著である。一方、厚さ16mmのラミナについては、MOEの低いE50とE70では逆にMGE/MOEが低くなっていて、MOEの高いグループでも、厚さ24mmおよび32mmのラミナほどの減少

傾向は認められなかった。

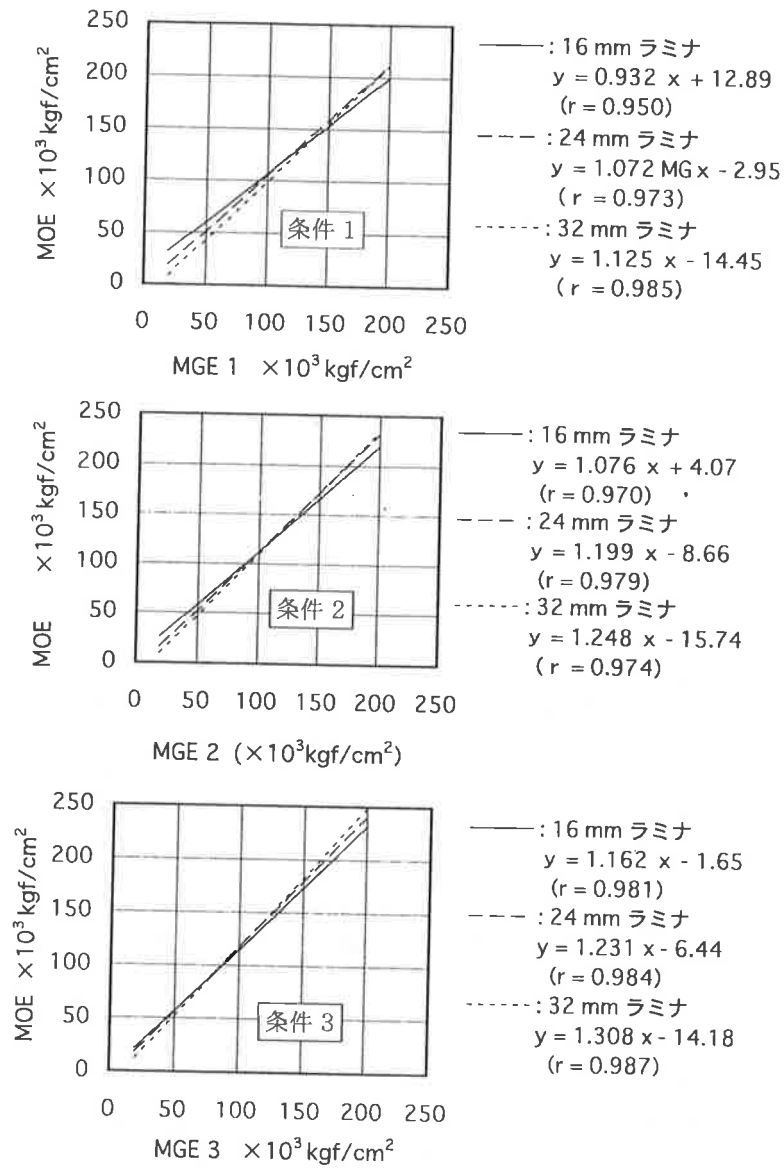


図 3.4 MGE と MOE との関係を示す回帰直線

条件 1 ; 条件 2 ; 条件 3 ; 表 3. 1 参照、r : 相関係数、y : MOE、x : それぞれの横軸に示した MGE

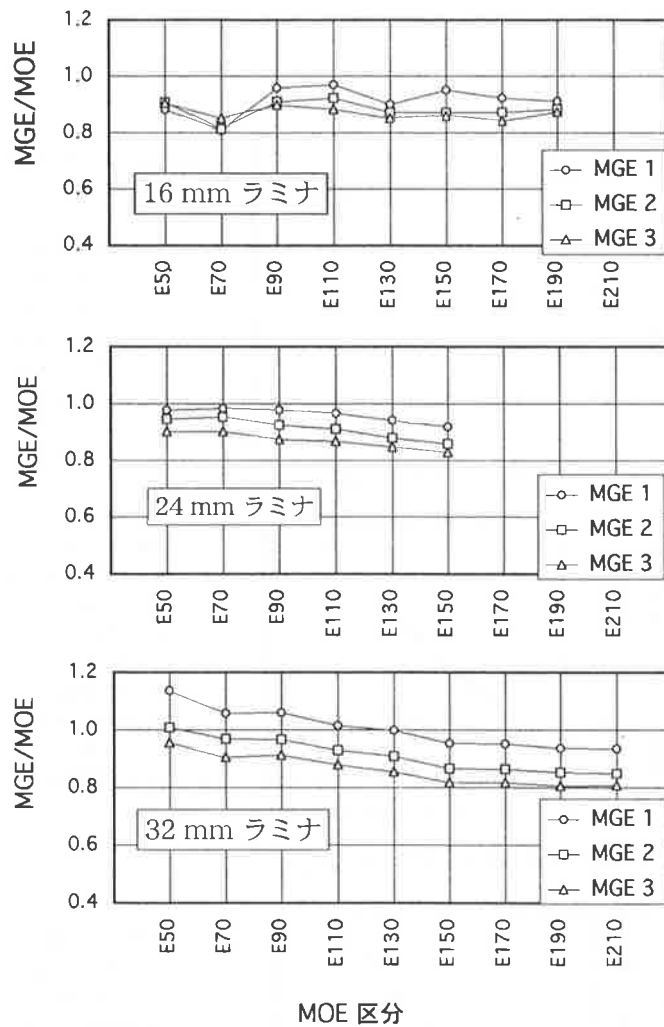


図 3.5 MOE区分とMGE/MOEとの関係
MGE 1 ; MGE 2 ; MGE 3 ; 表 3. 1 参照

3.4.3.2 ラミナの厚さおよび測定たわみ条件と力学的支持条件との関係

ラミナの厚さおよび測定たわみ条件別に、MGE/MOEの平均値および変動係数を表 3.2 に示し、ラミナの厚さとMGE/MOEの平均値との関係を図 3.6 に示した。表に示すように厚さ 32 mm のラミナのMGE 1 のMGE/MOEは平均値でも1.0を上回っており、測定中のラミナに見かけ上引張り力が働く場合もあることを示していた。

$\delta \cdot t$ が小さなMGE 1 では図 3.6 に示すように、ラミナの厚さによりMGE/MOEの平均値が異なり、厚いほど両端固定条件に近かった。また、MGE 2 でも傾向は同じであるが、厚さによる差は小さくなった。 $\delta \cdot t$ が最も大きなMGE 3 ではMGE/MOEがほぼ等しくなり、表 3.2 に示すようにその値は全体の平均値に対して $\pm 1\%$ 以内であった。以上の結果から、設定した条件の中では $\delta \cdot t$ が大きな条件ほど、MGE/MOEのラミナの厚さ別平均値は厚さによる差が少ないことが明らかとなった。

また、各条件のMGE/MOEの変動係数は表 3.2 に示すように、 $\delta \cdot t$ が大きな条件ほど小さくなる傾向にあった。とくに厚さ16mmのラミナのMGE 1 およびMGE 2 は変動係数が10%以上であり、測定が不安定になることを示していた。厚さ24mmと32mmのラミナについても厚さ16mmのラミナほどではないが、測定たわみの大きな条件ほど変動係数が小さくなり、測定値が安定する傾向が認められた。

表 3.2 MGE/MOEの平均値

ラミナの種類	MGE 区分		
	MGE 1 ^{a)} ($\delta \cdot t = 96 \text{ mm}^2$)	MGE 2 ^{b)} ($\delta \cdot t = 144 \text{ mm}^2$)	MGE 3 ^{c)} ($\delta \cdot t = 192 \text{ mm}^2$)
16 mm	0.912 (16.6%)	0.883 (11.7%)	0.874 (7.8%)
24 mm	0.961 (6.2%)	0.908 (5.6%)	0.866 (4.9%)
32 mm	1.010 (7.3%)	0.920 (7.1%)	0.867 (7.0%)
全体	0.959 (12.0%)	0.904 (8.7%)	0.869 (6.7%)

a)~c): 表 3.1 参照, ()内は変動係数である。

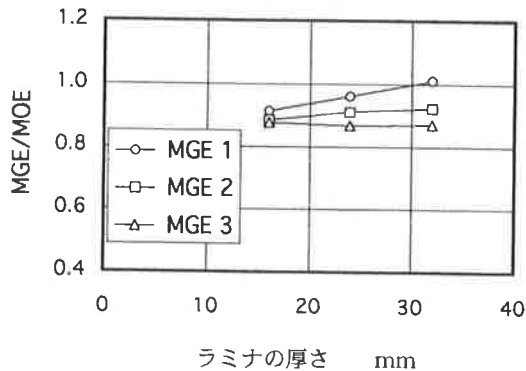


図 3.6 ラミナの厚さと MGE/MOE との関係
MGE 1 ; MGE 2 ; MGE 3 : 表 3.1 参照

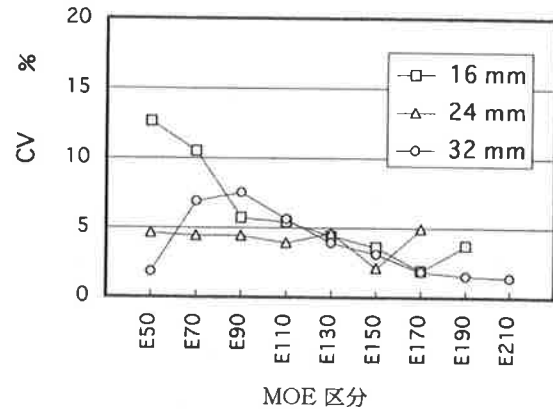


図 3.7 MGE 3 の MOE 区分内変動係数 (CV)
16mm ; 24mm ; 32mm : ラミナの厚さ、E50~
E210 : $40 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2 < \text{MOE} \leq 60 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$
 $\sim 200 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2 < \text{MOE} \leq 220 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$

つぎに、MOE区分と MGE/MOE の変動係数との関係を検討する。変動係数が最も小さかった MGE 3 について、MOE で区分した等級に含まれる MGE/MOE の変動係数を図 3.7 に示した。図に示すように厚さ 16mm のラミナは、MOE の低い E 50、E 70 で変動係数が 10% を超えていたが、等級が高いほど、それが小さくなった。厚さ 32mm のラミナも、MOE の高いグループほど変動係数が小さくなる傾向にあった。一方、厚さ 24mm のラミナは MOE の高低に関わらず、変動係数は比較的小さく安定していた。このことから装置には適した厚さがあり、その厚さから離れるに従い、測定が不安定になることが考えられるが、その場合であっても、MOE の高いラミナほど測定が安定しているといえよう。

3.4.4 測定値の補正と測定精度の推定

測定中のラミナの MGE/MOE がラミナの厚さ、および曲げヤング係数によって変わる以上、両端固定支持条件と仮定して測定した MGE そのままではラミナの等級区分を行うのに無理があり、MGE を補正する必要がある。ラミナの等級区分は、本研究で設定した条件の中では、条件 3 のたわみを与え、図 3.4 に示した厚さ別の回帰式の係数と定数を用いて MGE を補正して行うのが、最も合理的で安全な方法である。しかし、ラミナの厚さ別に係数を入力することは操作が煩雑になることから、厚さ別に変えている補正係数を同一のものにする可能性を つぎに検討する。

条件 3 の MGE/MOE の平均値は表 3.2 に示したようにラミナの厚さによらずほぼ等しいので、その条件で測定した MGE 3 について、すべてのラミナのデータから得られた一次回帰式による補正を試みた。

MGE 3 と MOE との関係を図 3.8 に示した。r は 0.984 であり、高い相関が認められた。つぎに、図 3.8 で得られた回帰式の係数を用いて補正した MGE_{3i} と MOE との関係を図 3.9 に示した。

MGE_{3i}をラミナ1枚単位で平均したものをMGE_{3i・AV}、同様にMOEを平均したものをMOE_{AV}とし、この関係を図3.10に示した。この場合、両者の関係を示すrは0.993であり、極めて高い相関が認められた。

補正したMGEとMOEの差を測定精度として、MGE_{3i}、MGE_{3i・AV}について厚さ別に補正した場合と、厚さを考慮しないで補正した場合をそれぞれ計算し、その標準偏差を表3.3に示した。装置の測定精度を標準偏差の3倍とすると、それぞれの場合において測定精度は±3×標準偏差[×10³kgf/cm²]となる。

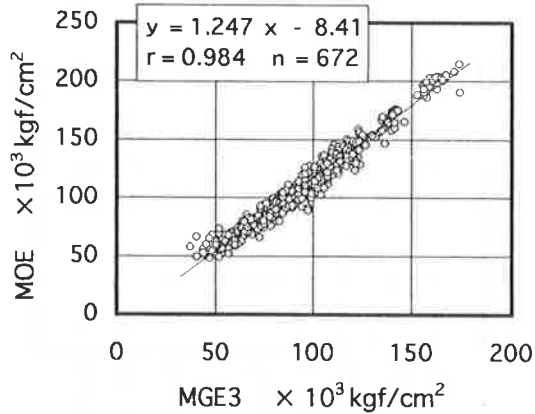


図3.8 MGE₃とMOEとの関係
r: 相関係数、y: MOE、x: MGE₃

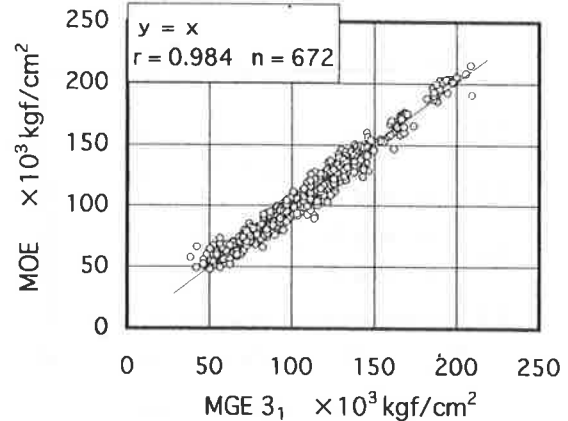


図3.9 MGE_{3i}とMOEとの関係
MGE_{3i}: MGE₃を図3.8の回帰式を用いて補正した。
r: 相関係数、y: MOE、x: MGE_{3i}

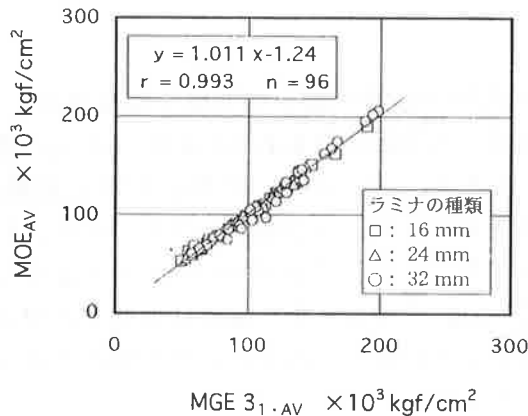


図3.10 MGE_{3i・AV}とMOE_{AV}との関係
MGE_{3i・AV}: MGE_{3i}のラミナ1枚当たり平均値、MOE_{AV}: MOEのラミナ1枚当たりの平均値、
r: 相関係数、y: MOE_{AV}、x: MGE_{3i・AV}

表に示すように、測定精度はラミナの厚さにより異なり、厚さ24mmの測定精度が最も高かった。このことは、このラミナのMGE/MOEの変動係数が安定していた図3.7の結果と符合している。

MGE_{3i}の測定精度に対してMGE_{3i・AV}の測定精度は向上し、標準偏差は厚さ16mmおよび24mmのラミナでは1/2以下になった。ラミナの等級区分をMGE_{MIN}で行う場合は、表に示したMGE_{3i}の測定精度で計測され、MGE_{AV}で行う場合はMGE_{3i・AV}の測定精度で計測されることになる。

また、MGEを厚さ別に補正した場合と厚さを考慮しないで補正した場合では、測定精度の差

は少なく、本研究のように、MGE/MOEの平均値がラミナの厚さ別にほぼ等しい $\delta \cdot t$ が設定できれば、実用的には厚さ別に補正係数を変えなくてもよい可能性が示された。

表 3.3 MGE 3_1 と MGE $3_{1 \cdot AV}$ の測定精度の標準偏差

ラミナの種類	ラミナの厚さ別補正 $\times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$		ラミナ全数補正 $\times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$	
	MGE $3_1^{a)}$	MGE $3_{1 \cdot AV}^{b)}$	MGE 3_1	MGE $3_{1 \cdot AV}$
16mm	7.5	3.1	8.1	3.9
24mm	4.7	1.8	4.7	1.9
32mm	7.1	5.5	6.9	5.3
全体	6.6	3.9	6.8	4.1

^{a)}MGE 3_1 : 図 3.9 参照, ^{b)}MGE $3_{1 \cdot AV}$: 図 3.10 参照, ラミナの厚さ別補正の MGE 3_1 は 図 3.4 の各々の回帰式を用いて補正した。ラミナの全数補正の MGE 3_1 は 図 3.8 の回帰式を用いて補正した。測定精度は (MGE - MOE) で計算した。

3.5 おわりに

連続送り式グレーディングマシンの特性として、送り速さ、測定たわみ、ラミナの曲げヤング係数およびラミナの厚さと測定中のラミナの支持条件を示す MGE/MOE との関係性を明らかにした。また、ラミナの支持条件を両端固定として測定した MGE の補正方法について考察し、厚さ別に変えている補正係数を同一のものにする可能性についても検討を加えた。

厚さ 32mm のラミナを用いて、送り速さ 120m/min および 60m/min の 2 水準で MGE を測定した結果、両測定値および MGE/MOE は変わりなく、測定値と送り速さとの関係は認められなかった。

測定中のラミナの支持条件は、高い曲げヤング係数のラミナほど単純支持条件側にシフトし、その傾向は厚いラミナほど顕著であった。また、設定した条件の中では、 $\delta \cdot t$ の大きな条件、言い換えれば辺縁応力⁽³⁰⁰⁾が大きな測定条件ほど、MGE/MOE の平均値は厚さによる差が小さかった。

また、MGE/MOE の変動係数は、設定した条件の中では $\delta \cdot t$ が大きなほど小さかったが、その条件のなかでも厚さ 16mm と 32mm のラミナは MOE の高いラミナのグループほど変動係数が小さい傾向にあった。一方、厚さ 24mm のラミナの MGE/MOE の変動係数は MOE 区分間で変化が少なく、全体的に小さかったので、厚さ 24mm のラミナの測定精度が最も高かった。

両端固定支持条件と仮定して測定した MGE と MOE との間で得られる回帰式を使って、MGE を厚さ別に補正した場合と、厚さを考慮しないで補正した場合では測定精度の差は少なく、本研究のように MGE/MOE の厚さ別平均値がほぼ等しい測定たわみ条件 $\delta \cdot t$ が設定できれば、実用的には厚さごとに補正係数を変えなくてもよい可能性が示された。

本研究の結果、この装置を用いてラミナの機械等級区分が行えることが示されたが、継続的な性能が保証された訳ではない。すなわち、ここで得られた数値は同種の装置に対して普遍的な意味を持つものではなく、この装置そのものに対しても、長期間使用することによるローラのガタあるいは修理等によって変わるものと考えられる。

第4章 乾燥工程におけるラミナの狂いと適正製材寸法との関係⁽³⁰¹⁾

4.1 はじめに

構造用集成材の製造工程において、製材が重要な位置を占めていることはいうまでもない。しかし、仕上がりラミナの寸法には、乾燥による狂い、収縮率、製材精度など種々の要因が関与するため、ラミナの製材寸法は、製材に携わる熟練者の経験と勘で決められているのが現状である。そこで、カラマツラミナの製材の現状を把握し、ラミナの仕上がり寸法に関係する要因に検討を加え、適正な製材寸法を検討することは意義のあることと考える。とくに、カラマツはらせん木理が顕著な樹種であることから乾燥による狂いが生じやすく^(44,46~49,52)、他樹種による以上にこれらのことを検討する必要がある。しかしながら、これまでカラマツ材についてこれらのことを検討した研究は見あたらない。

本章では、まず製材直後のラミナの寸法のばらつきについて述べ、つぎに人工乾燥にともなうラミナの狂いおよび収縮率と木取り位置との関係を定量的に検討し、適正な製材寸法について考察した。

4.2 実験

4.2.1 供試丸太と製材および人工乾燥

市場において直材として扱われている末口径級20~34cm、長さ4mのカラマツ丸太62本を供試材とし、ラミナ325枚を得た。製材装置は自動送材車付き1200mm帯鋸盤を用い、製材寸法は幅、厚さそれぞれ177mm、32mmとした。想定している集成材とした際のラミナの幅、厚さは150mm、25mmである。なお、本研究におけるラミナは商取引上幅175mm、厚さ30mmとして扱われ、2mmの上乗せは製材を依頼した工場の自主基準である。

製材木取りは図4.1に示すように、径の小さな丸太はラミナ幅のタイコ落としとし、そのタイコ材から順次ラミナを得、径級の大きな丸太からはタイコ以外の部分からもラミナを得た。製材終了後ラミナの厚さと幅を測定した。歩留り計算のための丸太材積は、丸太径級による末口二乗法⁽³⁰²⁾により計算した。また、丸太の外周側からは副製品として板類を採材したが、これらの材積は測定しなかった。したがって、製材における歩留りは主製品であるラミナ歩留りである。

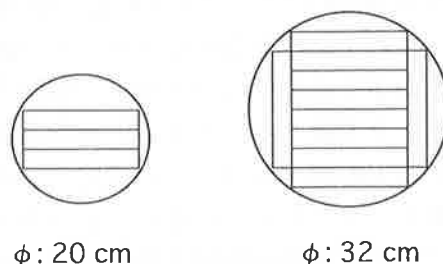


図4.1 ラミナの製材木取り
φ: 末口径級

ラミナの人工乾燥は蒸気式 I F 型乾燥装置を用い、棧積み幅は1.6 m とし、棧積み上部にコンクリート製のブロックを載荷し、いわゆる圧縮乾燥を行った。圧縮圧は約0.6 tf/m²であった。人工乾燥は初期蒸煮を96℃で5時間行い、その後、乾燥温度を90℃一定とし、乾・湿球温度差を初期5℃から末期30℃まで、段階的に変化させた。最後の調湿は温度75℃、乾・湿球温度差5℃で10時間行った。仕上がり含水率8~10%を目標としたが、乾燥終了後の含水率は3枚のテスト

ピースの全乾法による平均で6.8%を示し、やや過乾燥であった。

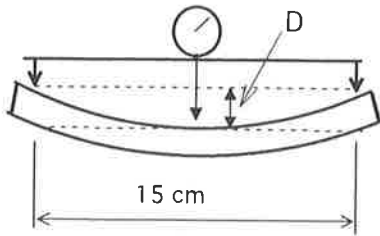


図4.2 幅ぞりの測定法
D: 幅ぞり [mm/15cm]

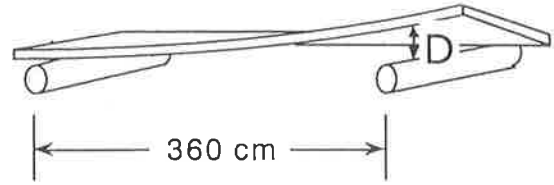


図4.3 ねじれの測定法
D: ねじれ [mm/3.6m]

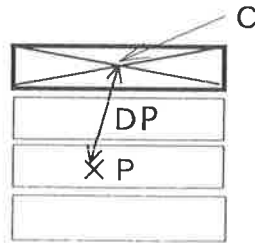


図4.4 髄とラミナ中心までの距離 (DP)の測定法
C: ラミナ中心、P: 髄、DP: 距離 [cm]

4.2.2 ラミナの調査

乾燥終了後、ラミナの幅、厚さ、曲がり、縦ぞり、幅ぞり、ねじれの測定を行った。なお、乾燥終了材において測定した厚さは材縁部の厚さである。ラミナの曲がりと縦ぞりは材長に対する曲がりの最大矢高 [mm] とし、幅ぞりは図4.2に示すように幅15cmに対するそのの矢高 [mm] を測定した。ねじれは図4.3に示すようにスパン360cmで水平に配置したローラー上で3点を固定し、残りの1点と水平面との距離 [mm] を測定した。なお、ねじれの方法は考慮しなかった。収縮率は次式に従い計算した。

$$\frac{t_w - t_d}{t_w} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

ここで、 t_w : 製材後寸法 [mm]、 t_d : 人工乾燥後寸法 [mm] である。

ラミナの木取り位置を示す髄からラミナ中心までの距離 (以下DPと記す。) は、図4.4に示したように、切断した木口試片によって丸太の末口横断面を再現して実測した。

4.3 結果と考察

4.3.1 製材精度とラミナ歩留り

ラミナの製材後の実測寸法のヒストグラムを図4.5に示した。幅は少し偏った分布を示したが、厚さはほぼ正規分布とみなすことができる。幅の実測寸法の平均値および標準偏差は177.1mmおよび1.6mm、厚さの平均値および標準偏差は32.0mmおよび0.92mmであった。製材精度を $\pm 2.326 \times$ 標準偏差として計算すると、製材精度は幅および厚さで ± 3.7 mmおよび ± 2.1 mmであった。なお、標準偏差にかけた係数は正規分布表の外側確率1%に対応する係数である。

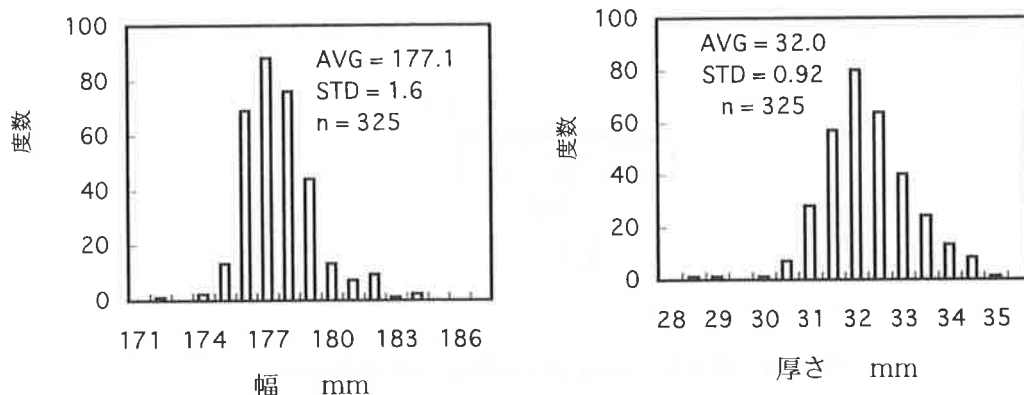


図4.5 ラミナの実測寸法のヒストグラム
AVG：平均値、STD：標準偏差

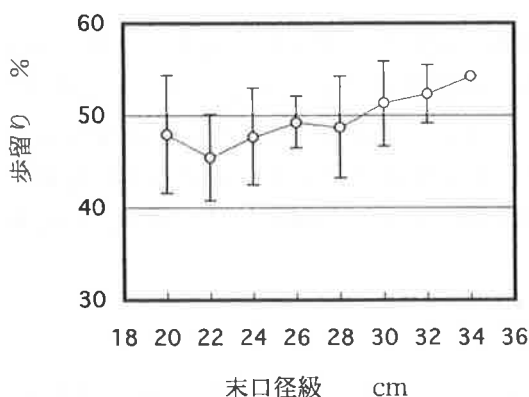


図4.6 丸太の末口径級とラミナ歩留りとの関係
図中の範囲は平均値±標準偏差を示す。

針葉樹構造用製材の日本農林規格⁽¹⁵⁾ (以下規格と記す。)では製材の実測寸法と表示寸法との差を規定している。それによると寸法90mm以上ではその差を0~3mm以内とするように要求し、寸法36mm未満はその差が0~1mm以内であることを要求している。本研究における幅の表示寸法は175mmであるから、規格を満たすためには175mm以上、178mm以内に製材することが必要になる。ここで、設定した製材寸法に対して実測寸法が正規分布すると仮定し、製材寸法を176.5mmに設定すると、 176.5 ± 1.5 mmの範囲で製材されなければ規格が満たせないことになる。この場合の製材精度は ± 1.5 mmであり、これが規格を満たすために必要最低限の製材精度といえることができる。表示寸法30mmの場合を同様に計算すると最低限必要な製材精度は ± 0.5 mmとなる。本研究で得られた製材精度と規格⁽¹⁵⁾から誘導した製材精度の絶対値の差は幅および厚さで2.2mmおよび1.6mmもあり、製材精度は低かった。

ラミナ歩留りを丸太の径級別に図4.6に示した。ラミナ歩留りは全体では48.4%であった。な

お、歩留り計算のためのラミナ材積は幅177mm、厚さ32mmの製材寸法で求めた。図に示すように大径丸太ほどラミナ歩留りが向上する傾向が認められるが、その中でも、末口径級20cm、26cmのように、採材するラミナの断面寸法によって有利な径級が認められた。

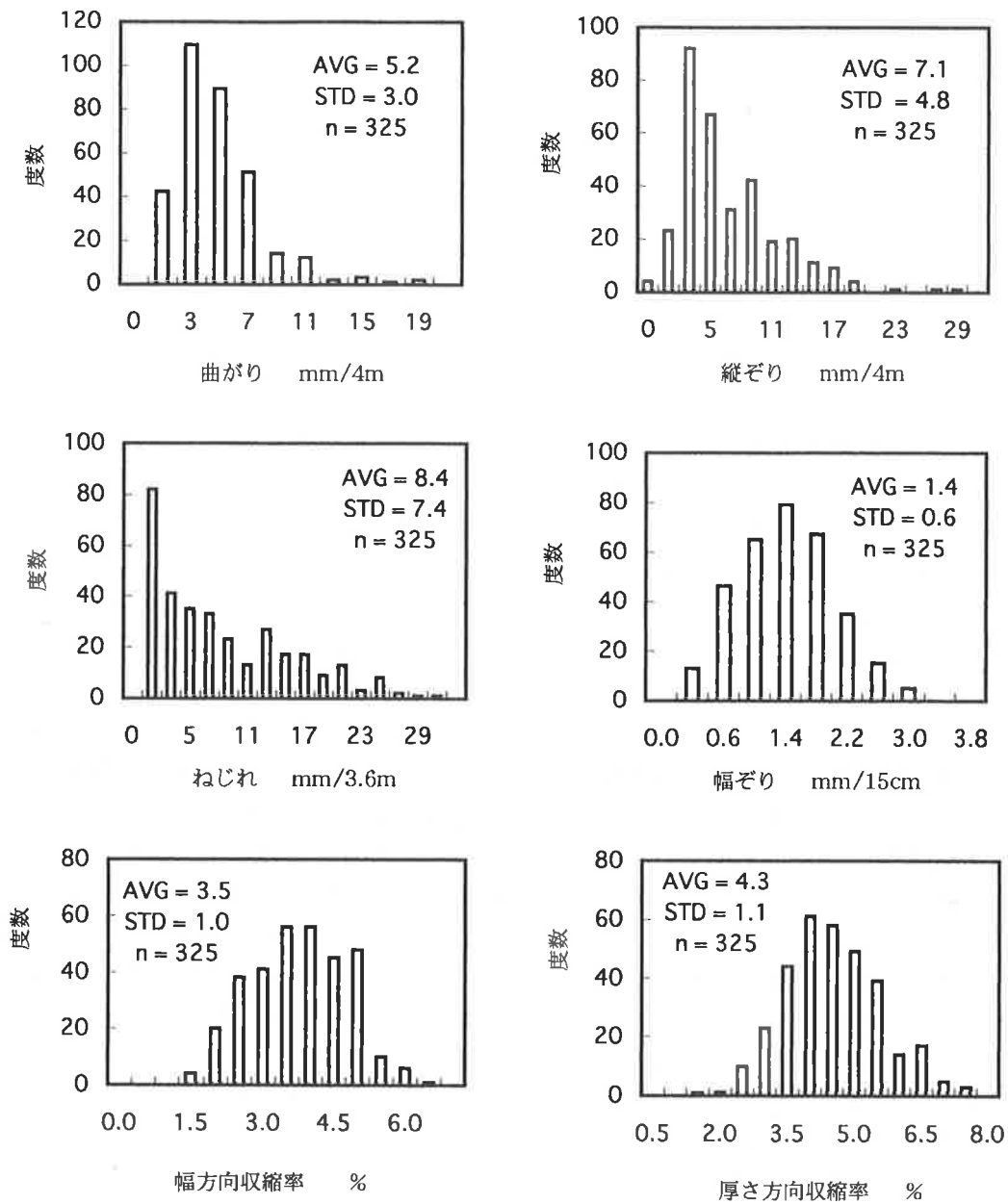


図 4.7 人工乾燥後のラミナの狂いと収縮率の分布
AVG : 平均値、STD : 標準偏差

4.3.2 ラミナの乾燥による形質変化

4.3.2.1 形質変化

ラミナの狂いおよび収縮率の出現頻度を図 4.7 に示した。このヒストグラムでは、幅ぞり、収縮率はほぼ正規分布、そのほかは偏った分布を示した。

構造用集成材の適正製造基準⁽³⁰³⁾ (以下製造基準と記す。) に示されている仕上げされたラミナの狂いの許容値は、曲がりで 5 mm/3 m、縦ぞりおよびねじれで 10 mm/3 m である。これらの値を本研究での測定スパンに換算すると、曲がりはおよそ 7 mm/4 m、同様に縦ぞりは 13 mm/4 m、ねじれは 12 mm/3.6 m となる。

通常のプレーナーがけでは曲がり、縦ぞり、およびねじれは矯正されないので、乾燥後のラミナの狂いをこれらの値を許容値とすると、それを超えるラミナの出現比率は曲がり、縦ぞり、およびねじれで、それぞれ 20%、12%、および 30% であった。したがって、縦継ぎ前に横切りによって短尺にする必要があるラミナが相当量あることがわかった。

幅ぞりは、製造基準⁽³⁰³⁾ では幅 100~200 mm のプレーナー仕上げされたラミナの場合、厚さ 20 mm、30 mm に対してそれぞれ 1.5 mm、1 mm 以下であることを求めている。本研究のラミナを厚さ 25 mm に仕上げるとすると、幅ぞりの許容値は 1.2 mm 程度と考えられ、乾燥によって生じた幅ぞり量と、この許容値の差が幅ぞりを矯正するための必要切削量となる。本研究で得られた幅ぞりの測定結果と必要切削量を考慮に入れた製材厚さについては 4.3.3 で考察する。

4.3.2.2 木取り位置と乾燥による形質変化との関係

髓からラミナ中心までの距離 (以下 DP と記す。) と乾燥による狂いおよび収縮率との関係を図 4.8 に示した。曲がり、縦ぞりについては DP との間に傾向は認められなかったが、ねじれは DP が大きなラミナほど小さいことが明らかである。

既往の研究^(44,46~49,52) によって、心持ち角材の乾燥によるねじれは、らせん木理に起因すること、その方向は木理の方向と一致し、繊維傾斜の大きさとねじれ量とは相関関係にあることが明らかにされている。また、小沢^(36,54) は板目板のねじれは繊維傾斜の大きさではなく、収縮率および木表と木裏の繊維傾斜の差に支配されるとしている。すなわち、この理論によれば、繊維傾斜の方向が同じで木表側が大きい板目板はねじれの方向が木理の方向と一致し、木裏側が大きいとねじれの方向は木理の方向と逆になる。そして両者が等しいとねじれは発生しない。

カラマツにおけるらせん木理の樹幹内変動の一般的パターンは、木理傾角が髓から左旋回で急激に大きくなり、数年輪、最大でも 10 年輪までに最大角度に達し、その後ゆるやかに減少する^(24,25,28,30,35,38)。このパターンを小沢の理論^(36,54) にあてはめると、心持ちラミナは心持ち角と同様に繊維傾斜の大きさにより大きなねじれが発生する。そして、急勾配で繊維傾斜が増大する髓から数年輪までを含む心去りラミナは、木表と木裏の傾斜角度の差が比較的大きいのでねじれが大きい傾向が予想できる。さらに最大角度を過ぎた髓から離れた位置の心去りラミナは繊維傾斜の減少勾配が小さくなることからねじれは減少すると考えられる。

本研究ではねじれの方向は区別しなかったが、ここで認められた DP とねじれとの関係は小沢⁽⁵⁴⁾ の示した理論にしたがっているものと考えられた。

幅ぞりは、図 4.8 に示すように DP が 0~2 cm 程度のラミナでは比較的少なく、2~3 cm 位のラミナで最大となり、それ以上の DP のラミナでは減少する傾向が認められた。

理論的には、幅ぞりは木表側と木裏側の収縮量の差によって発生する⁽³⁰²⁾ から、DP が 0 mm のラミナはそれが発生しない。そして、DP が 1.5 cm 程度のラミナは髓側は柾目面で、樹皮側は板目面であるから、木表側と木裏側の収縮量の差が大きく、大きな幅ぞりが発生することになり、DP がさらに大きくなると木表、木裏の収縮量の差は小さくなるから幅ぞりは小さくなると思われる。本研究の場合、DP は丸太の末口横断面を再現して測定しているのに対して、幅ぞりはラミナ全長での最大部分を測定しているため、測定位置が末口面の DP と一致しない場合が多い

ため、理論的傾向が顕著ではなかったものと考えられる。

DPとラミナの収縮率との関係は図4.8に示すように理論⁽³⁰²⁾どおり、幅方向では正、厚さ方向では負の相関が認められた。これらの関係は曲線回帰式を当てはめるべきものであるが、図に示すようにDPが15cm位までDPの増加にともなう幅方向収縮率の増加、あるいは厚さ方向収縮率の減少は概略直線関係とみなすことができる。

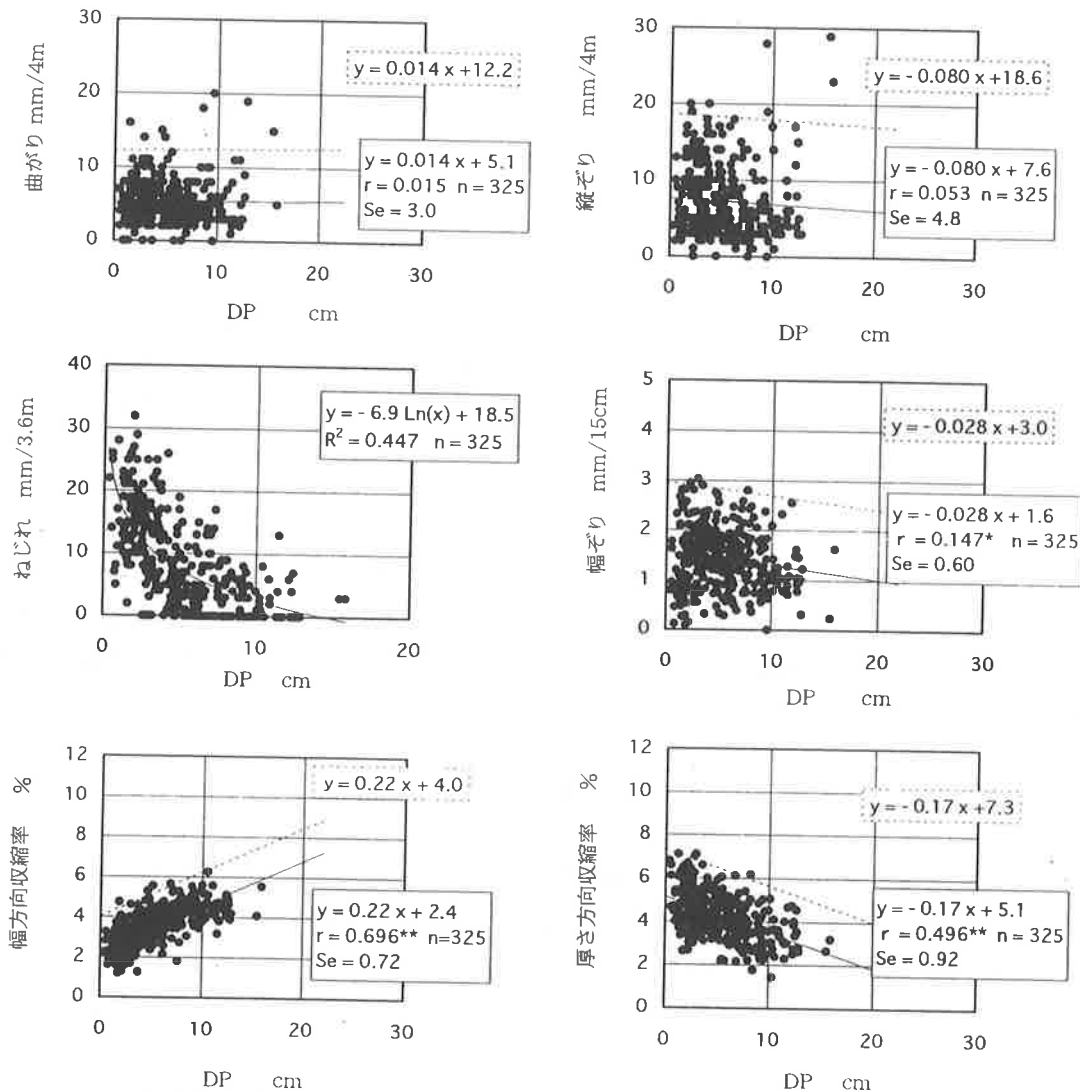


図4.8 ラミナの髓からの距離 (DP)と乾燥による狂い、収縮率との関係

r : 相関係数、Se : 標準誤差、** : rが危険率1%で有意なことを示す。* : rが危険率5%で有意なことを示す。
 実線 : 回帰線、破線 : 99%上限信頼限界線、y : 縦軸に示した狂いおよび収縮率、x : DP

4.3.3 適正な製材寸法

ラミナの製材幅は幅方向の収縮量と曲がりの発生程度から決められるべきものであるが、図4.8に示したようにラミナの曲がりとDPの間には傾向がほとんど認められなかった。また、図4.1に示したような木取りではタイコ部分の幅は同一となるので、製材幅を変えることは実際的ではない。一方、厚さはコンピューター制御の製材機ならば、DPに応じて細かく寸法を設定することが可能である。

そこで、本研究で得られたデータを使って仕上がりラミナ厚さを25mm、許容幅ぞり量を1.2mmとして必要最低限の製材厚さをつぎに検討する。

製材厚さの下限値を t_w [mm]、乾燥材厚さの下限値を t_d [mm]、厚さ方向収縮率を u [%]、幅ぞり量を c_d [mm] とすると

$$t_d = t_w - 0.01 u \times t_w \quad [\text{mm}] \quad (4.2)$$

$$t_d = 25 + c_d - 1.2 \quad [\text{mm}] \quad (4.3)$$

u および c_d を図 4.8 の 99 % 上限信頼限界線を用いて DP [cm] で表すと

$$u = -0.17 \times DP + 7.3 \quad [\%] \quad (4.4)$$

$$c_d = -0.028 \times DP + 3.0 \quad [\text{mm}] \quad (4.5)$$

となる。(4.2)~(4.5) 式から t_w を DP で表すと

$$t_w = \frac{26.8 - 0.028 \times DP}{0.927 + 0.0017 \times DP} \quad [\text{mm}] \quad (4.6)$$

となる。

式 (4.6) により t_w を計算すると、DP = 0 cm、5 cm、10 cm、および 15 cm で、 t_w はそれぞれ 28.9 mm、28.5 mm、28.1 mm、および 27.7 mm であった。これらが仕上がりラミナ厚 25 mm に対する必要最低製材厚さであり、製材厚さはそれらに製材精度の絶対値を加えた値となる。4.3.1 で示したように本研究での厚さの製材精度は ± 2.1 mm であったので、この絶対値を加えると製材寸法は DP = 0 cm、5 cm、10 cm、および 15 cm のラミナでそれぞれ 31.0 mm、30.6 mm、30.2 mm、および 29.8 mm となった。

以上の結果、DP によってラミナの製材厚さを設定できることがわかった。図 4.1 に示した径級 20 cm の丸太から 3 枚のラミナを木取るような場合は、DP によってラミナの厚さを変える意義は少ない。しかし、同図に示した径級 32 cm の丸太では、10 枚のラミナを 31.0 mm で画一的に製材した場合、厚さの和は 310 mm であるが、DP によって厚さを細かく変えて計算するとその和は 304.4 mm となり、その差が 5.6 mm、比率で約 1.7% であり、すくなくともこれだけは副製品を合わせた歩留りが向上することになる。

4.4 おわりに

適正な製材寸法を検討するために、末口径級 20~34 cm のカラマツ丸太 62 本からラミナ 325 枚を得て、ラミナ歩留り、ラミナの木取り位置と乾燥による狂いおよび収縮率との関係を明らかにした。そして、これらの関係から適正製材寸法を検討した。

製材におけるラミナ歩留りは、全体で 48.4% であり、径の大きな丸太ほど歩留りが高くなる傾向が認められた。

乾燥後のラミナの狂いが製造基準の許容値を超え、縦継ぎ前に短尺化する必要のあるラミナの比率は、曲がり、縦ぞり、ねじれでそれぞれ 20%、12%、30% であった。

ラミナの木取り位置と乾燥による形質変化との関係では、髓から離れた位置のものほどねじれ、幅ぞりが小さくなる傾向が認められ、とくにねじれにおいて顕著であった。したがって、大径丸太ほど形質的に優良なラミナが得られる比率が多くなる。一方、曲がりおよび縦ぞりは木取り位置との間に傾向が認められなかった。

ラミナの厚さ方向の収縮量と幅ぞり量を木取り位置との関係で定量的に検討した結果、厚さ寸法は木取り位置別に設定できることが示された。

なお、本研究はカラマツラミナの製材の現状、乾燥の実態を事例的に調査したものである。その中で、製材精度を向上させる必要性、狂いを抑制する乾燥法の必要性が示された。また、大径丸太ほど形質的に優良なラミナが得られることが実証された。

第5章 縦振動法による丸太等級区分と木取り位置によるラミナの選別⁽³⁰⁴⁾

5.1 はじめに

ラミナの曲げヤング係数の分布が明らかであれば、それから製造される構造用集成材の強度等級が容易に推定できる上、高い曲げヤング係数のラミナが必要な場合、ラミナの選別がなされていれば、容易にそれを得ることができる。

縦振動法によって測定した動的ヤング係数（以下縦振動ヤング係数と記す。）によるスギ丸太の等級区分が、丸太から得られる製材の選別に有用なことが、藤田ら⁽¹⁸³⁾、荒武ら⁽¹⁹²⁾によって明らかにされている。また、有馬ら⁽¹⁷⁹⁾は丸太等級区分の有用性を示し、流通上の課題にまで踏み込んだ提案を行った。その中でスギについて「高い曲げヤング係数のラミナを必要とするときは丸太の等級区分がなされた上で、木取りによる選別をすることが有効である。」としている。また、このことは池田ら⁽¹⁸⁴⁾によっても指摘され、さらに、小泉ら^(188,246)、飯島ら⁽²⁴⁷⁾は秋田県産スギ材を用いた一連の研究から、ラミナの曲げヤング係数は丸太の縦振動ヤング係数（以下 $E_{fr_{log}}$ と記す。）から推定できることを統計的に示した。

カラマツについてこの種の報告はないが、平角や中小径材からの心持ち正角などの曲げヤング係数と $E_{fr_{log}}$ との相関は高いと考えられる。一方、丸太断面に対して小断面であるラミナでは、曲げヤング係数の丸太内変動との関係が大きいことが予測できる。そこで、本章では、曲げヤング係数の樹幹内水平変動が大きいカラマツ^(28,34,58)について、縦振動法による丸太の等級区分、木取り位置によるラミナの区分、さらに両者を併用したラミナの選別それぞれが、集成材の製造工程の中で有用性が高いか否かを検討した。なお、本章における材料は第4章のそれと同一である。

5.2 実験

5.2.1 供試丸太と縦振動ヤング係数の測定

市場で直材として扱われている末口径級20~34cm、長さ4mのカラマツ丸太62本を供試材とした。末口年輪数は最小、平均、最大でそれぞれ22、35.8、70であった。

重量は丸太をロードセルをつけたワイヤで吊り上げて測定した。このとき、丸太の一方の木口を木製ハンマーで打撃することによって丸太を縦振動させ、他方の木口近傍のマイクロフォンで材中を伝播した弾性波を縦振動音としてとらえ、FFTスペクトルアナライザに入力した。この時得られた1次の縦基本振動数から、次式によって $E_{fr_{log}}$ を計算した。

$$E_{fr_{log}} = \frac{4 \times L^2 \times fr^2 \times \rho_{log}}{G} \quad [\times 10^3 \text{kgf/cm}^2] \quad (5.1)$$

ここに、 L : 材長 [cm]、 fr : 1次縦基本振動数 [Hz]、 ρ_{log} : 丸太の密度 [g/cm^3]、 G : 重力加速度 [cm/sec^2]、である。

丸太の密度（以下 ρ_{log} と記す。）測定のための材積は、ミリ単位で測定した末口径と元口径を用い、末口二乗法と平均直径法の2種類の方法⁽³⁰²⁾で求めた。また、丸太の年輪幅（以下 ARW_{log} と記す。）は末口における髓と外周までの距離を年輪数で除して計算した。

5.2.2 製材および人工乾燥

製材は第4章で述べたように行い、62本の丸太からラミナ325枚を得た。集成材にしたときのラミナの幅、厚さをそれぞれ15cm、2.5cmと想定して、製材寸法は幅、厚さそれぞれ17.7、3.2cmである。製材木取りおよびラミナの人工乾燥については、4.2.1で述べた。

5.2.3 ラミナの調査

ラミナの荷重載荷法による静的曲げヤング係数（以下 E_{dw} と記す。）はスパン360cmで水平に

調整したローラー間で、中央集中荷重、初期5kgf、終期15kgfの荷重を負荷し、終期荷重と初期荷重の差とこれらの荷重に対応するたわみの差から計算した。終期荷重15kgfは、辺縁応力⁽³⁰⁰⁾で約50kgf/cm²に相当する。

Edwの測定を終了したラミナの末口側の木口から長さ4cm程度の試片を採取し、図5.1に示す方法で年輪幅(以下ARWと記す。)を測定した。ラミナの木取り位置を示す随からラミナ中心までの距離(以下DPと記す。)は、4.2.1で述べたように切断した木口試片によって丸太の末口断面を再現して実測した。



図5.1 年輪幅の測定法

年輪幅 (ARW) は $(D1+D2+D3) / (D1、D2、D3に含まれる年輪数)$ により計算した。

5.3 結果と考察

5.3.1 末口径および材質指標と丸太の縦振動ヤング係数との関係

有馬ら⁽¹⁷⁶⁾は縦振動ヤング係数とその材の平均的な動的ヤング係数になることを示している。そこで、末口二乗法と平均直径法の2方法⁽³⁰²⁾で求めた材積で計算した ρ_{log} を使って求めたEfr_{log}と、丸太ごとのEdwの平均値(以下Edw_{AV}と記す。)との関係を予備的に検討した。その結果、得られた相関係数(以下rと記す。)は末口二乗法で計算した材積から求めたEfr_{log}とEdw_{AV}との間で0.703**、平均直径法で計算した材積から求めたEfr_{log}とそれとの間で0.660**であった。なお、**はrが危険率1%で有意なことを示す。また、1番玉7本と1番玉以外の55本に分けての分析では、1番玉では平均直径法による材積を使用したEfr_{log}との相関が低く、これは根張りの影響と考えられた。一方、1番玉以外ではEfr_{log}とEdw_{AV}との間に両者ともほぼ同じrが得られた。以上の結果から、本研究における ρ_{log} およびEfr_{log}は、末口二乗法によって計算した材積を使って求めたものとした。

Efr_{log}、 ρ_{log} およびARW_{log}の測定結果を表5.1に、末口径(以下 ϕ と記す。)、Efr_{log}、ARW_{log}、 ρ_{log} 間の関係を示すrを表5.2に示した。ARW_{log}とEfr_{log}との間に高い負の相関が認められ、ARW_{log}はEfr_{log}推定の目安となると考えられる。

表5.1 丸太の末口径、縦振動ヤング係数、年輪幅、および密度の平均値、標準偏差、変動係数

	ϕ ^{a)} cm	Efr _{log} ^{b)} × 10 ³ kgf/cm ²	ARW _{log} ^{c)} mm	ρ_{log} ^{d)} g/cm ³
平均値	25.4	110.0	3.7	0.654
標準偏差	3.5	12.9	0.77	0.072
変動係数	%	11.7	20.7	11.0

a) ϕ : 末口径, b) Efr_{log} : 丸太の縦振動ヤング係数, c) ARW_{log} : 丸太の年輪幅, d) ρ_{log} : 丸太の密度, 丸太本数は62である。

表 5.2 丸太の縦振動ヤング係数、年輪幅、密度、および末口径間の相関係数

	Efr _{log} ^{a)}	ARW _{log} ^{b)}	ρ _{log} ^{c)}
ARW _{log}	-0.479** ^{e)}		
ρ _{log}	0.422**	-0.345**	
φ ^{d)}	-0.439**	0.508**	-0.142

a)~d) : 表5.1参照, e)** : 相関係数が危険率1%で有意なことを示す。丸太本数は62である。

5.3.2 丸太の縦振動ヤング係数とラミナの曲げヤング係数との関係

Edwの測定結果を表5.3に示した。Edwの総平均は $116.5 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であり、Efr_{log}の平均値 $110.0 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ に対して約6%大きかった。ARWは平均で4.5mmとARW_{log}に比較して大きかった。これはカラマツ人工造林木の成長の特性、すなわち初期成長が旺盛であり、丸太内部から外周に向かって年輪幅が小さくなるという一般的な性質⁽²⁸⁾によるものと考えられた。

Efr_{log}とEdwとの関係は図5.2に示すように両者の間にrが0.480**、標準誤差(以下Seと記す。)が $18.6 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ の関係が認められた。図から明らかなようにEdwはEfr_{log}のほぼ80%以上のところに、約 $60 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ の範囲で分布しており、個々のラミナのEdwをEfr_{log}のみで推定するのは無理であるが、それを指標としてEdwの分布を予測することは可能である。なお、秋田県産スギラミナ1726枚を用いた本研究と同種の研究結果では、Efr_{log}とEdwとの関係はrが0.590**、Seが約 $11 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ で示されている⁽²⁴⁾。したがって、本研究の結果はカラマツのEdwの丸太内変動が秋田県産スギより大きいことを示していると考えられる。

表 5.3 ラミナの曲げヤング係数、年輪幅、密度、および木取り位置の平均値、標準偏差、変動係数

	Edw ^{a)} $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	ARW ^{b)} mm	ρ ^{c)} g/cm^3	DP ^{d)} cm
平均値	116.5	4.5	0.499	5.3
標準偏差	21.1	1.5	0.049	3.2
変動係数 %	18.1	33.7	9.9	60.2

a)Edw : 荷重載荷法により求めた曲げヤング係数, b)ARW : 年輪幅, c)ρ : 密度, d)DP: 髓からラミナまでの距離, ラミナ枚数は325である。

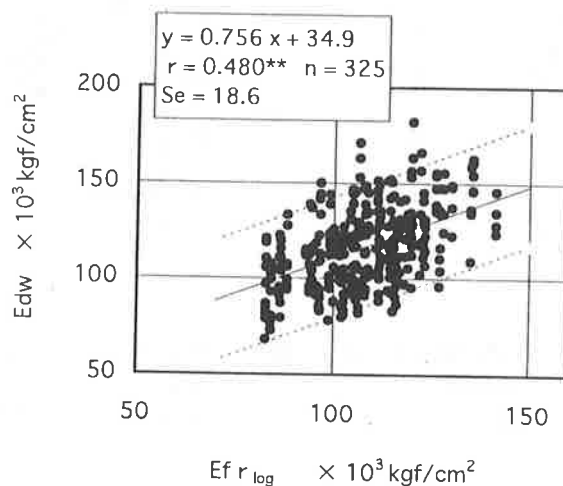


図 5.2 丸太の縦振動ヤング係数 (Efr_{log})とラミナの曲げヤング係数 (Edw) との関係

r : 相関係数、** : 相関係数が危険率1%で有意なことを示す。Se : 標準誤差、実線 : 回帰直線、破線 : 95%信頼限界線、y : Edw、x : Efr_{log}

5.3.3 縦振動ヤング係数による丸太の等級区分

丸太を Efr_{log} によって、 $20 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ の区間で等級区分し、その等級に該当するラミナの Edw の集計を表5.4に示した。なお、5%下限値は表の脚注に示したようにASTM D 2915⁽¹¹⁹⁾の方法で計算した。表に示すように、 Edw の平均値および5%下限値とも上位等級ほど大きくなり、丸太の等級は明らかに Edw に反映している。しかし、変動係数はL 80, L 100およびL 120で、17.1%、17.0%および13.1%、平均値で15.7%であり、全体の18.1%と比較して変動係数の減少は少なかった。この結果から、丸太の等級区分はある範囲の Edw を持ったラミナが必要な場合、とくに構造用集成材の強度等級をあらかじめ決めて製造するような場合に有効な手段になることが明らかとなった。

表5.4 丸太の縦振動ヤング係数によって区分したラミナの曲げヤング係数

丸太等級区分	$Efr_{log}^a)$ $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	試験体数		$Edw^b)$			
		丸太	ラミナ	平均値 $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	標準偏差 $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	変動係数 %	5%下限値 ^{c)} $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$
L 80	$80 \leq Efr_{log} < 100$	14	87	105.6	18.1	17.1	73.5
L 100	$100 \leq Efr_{log} < 120$	36	185	116.6	19.8	17.0	82.4
L 120	$120 \leq Efr_{log} < 140$	12	53	134.4	17.6	13.1	102.5
全体		52	325	116.5	21.1	18.1	80.5

^{a)} Efr_{log} : 縦振動ヤング係数, ^{b)} Edw : 荷重載荷法により求めた曲げヤング係数,

^{c)} 5%下限値 = 平均値 - $K \times$ 標準偏差 (K : ASTM D2915¹¹⁹⁾, Table 3, 75% confidence, 5% tolerance)

5.3.4 ラミナの曲げヤング係数の丸太内変動

丸太ごとに Edw の変動係数を求め、その結果を末口径との関係で図5.3に示した。変動係数の平均値は12.3%と大きく、末口径が大きいほど大きくなる傾向が認められた。また、ひとつの丸太内での Edw の最大値と最小値の差は平均値で $38.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、最大で $88.5 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ もあり、径の大きな丸太ほどその差は大きい傾向にあった。

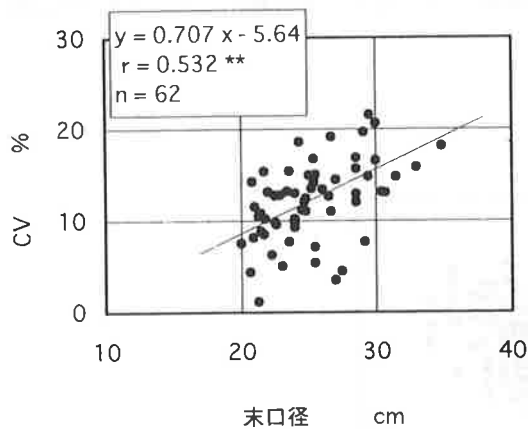


図5.3 丸太末口径 (ϕ) とラミナの丸太別曲げヤング係数 (Edw) の変動係数 (CV) の関係

r : 相関係数、** : r が危険率1%で有意なことを示す。
 y : CV、 x : 末口径

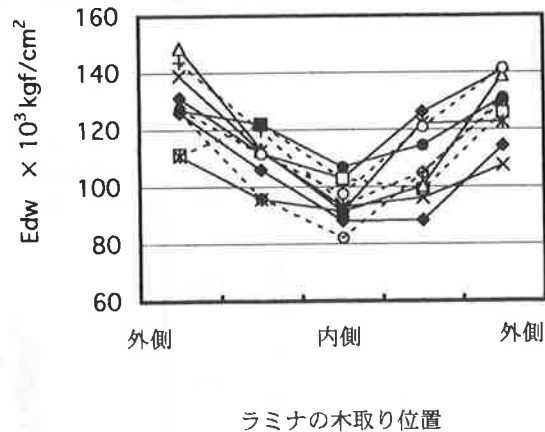


図5.4 ラミナの曲げヤング係数 (Edw) の丸太内水平変動

末口径級24cmの丸太の例である。

既往の材質的研究^(28,34)によれば、カラマツの曲げヤング係数は随から外周に向かい著しく増大する。そこで、丸太内の Edw の変動の例を、径級24cmの丸太でラミナの採材枚数が5だった丸太10本について、図5.4に示した。同一丸太でみると丸太の中心部から得られたラミナの Edw は

低く、中心から離れた位置のラミナほど大きい傾向が顕著に認められる。つぎに、丸太間で比較すると変動傾向は類似しているが、同じ位置のラミナでも丸太によって差が認められる。なお、これらの傾向はスキ^(179,185)についても認められている。

ラミナの木取り位置を示すDPとEdwとの関係を図5.5に示した。つぎに、DPとEfr_{log}に対するEdwの比（以下Edw/Efr_{log}と記す。）との関係を図5.6に示した。DPとEdw/Efr_{log}との関係は図5.2に示したEfr_{log}とEdwとの関係、および図5.5に示したDPとEdwとの関係よりも高い相関が認められた。この結果は丸太の等級区分に木取り区分を併用した選別がラミナの区分にさらに有効なことを示している。

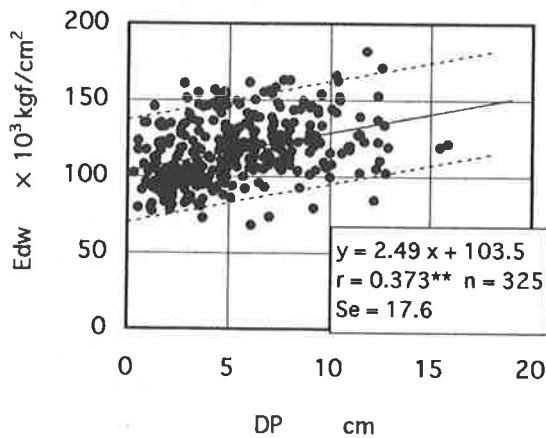


図5.5 髄とラミナまでの距離（DP）と曲げヤング係数（Edw）との関係

r ; ** ; Se ; 実線 ; 破線 : 図5.2参照、
y : Edw、x : DP

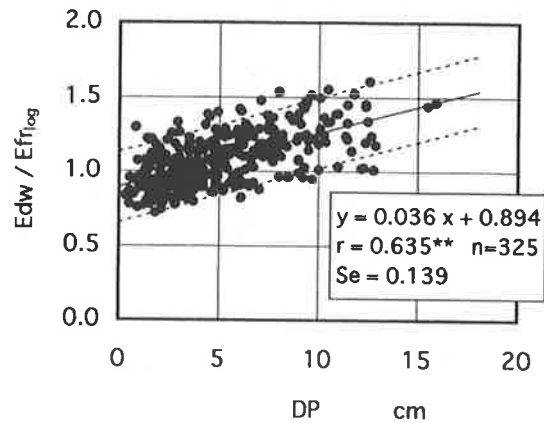
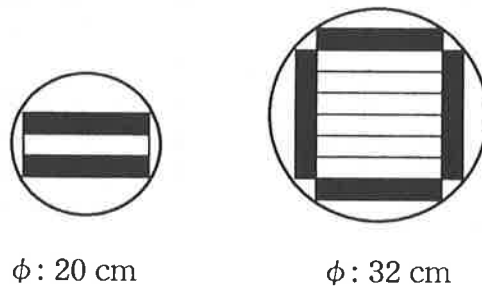


図5.6 髄とラミナまでの距離（DP）とEdw/Efr_{log}との関係

Edw/Efr_{log} : ラミナの曲げヤング係数と丸太の縦振動ヤング係数との比、r ; ** ; Se ; 実線 ; 破線 : 図5.2参照、y : Edw/Efr_{log}、x : DP



φ: 20 cm

φ: 32 cm

□ : 内側ラミナ ■ : 外側ラミナ

図5.7 ラミナの木取り区分

5.3.5 丸太の等級区分と木取り区分を併用したラミナの選別

ラミナの木取り区分は図5.7に示したように、樹皮に近い外周からのものを外側ラミナ、そのほかを内側ラミナとした。各ラミナをEfr_{log}により区分し、さらに木取りによる選別を加えた区分を試み、その結果を表5.5に示した。Efr_{log}による区分の基準は表5.4と同じである。

外側ラミナは明らかに内側ラミナよりEdwが大きく、丸太等級区分内でのEdw平均値の差の検定の結果は1%水準で有意であった。また、区分されたラミナのEdwの変動係数も減少し、Edwの分布幅が狭い区分が可能ながわかった。また、丸太の等級区分がなされていない場合、すなわち表5.5のラミナ全数でも、外側ラミナのEdwと内側ラミナのそれとの間に平均値および5%下限値とも25×10³kgf/cm²近くの差が認められ、木取り区分だけでもEdwの高いラミナと

低いラミナに区分することが可能である。

表 5.5 木取り区分したラミナの丸太の等級別曲げヤング係数

丸太 ^{a)} 等級	木取り区分 ^{b)}							
	内側ラミナ				外側ラミナ			
	試験 体数	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ^{c)} ×10 ³ kgf/cm ²	試験 体数	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ×10 ³ kgf/cm ²
L 80	52	96.6	15.1	70.2	35	118.8	12.0	92.5
L 100	105	105.7	13.9	79.9	80	130.9	12.4	102.1
L 120	28	126.4	12.1	97.3	25	143.3	10.9	113.8
全体	185	106.3	16.4	76.2	140	130.1	13.5	99.6

^{a)}丸太等級：表5.4参照, ^{b)}木取り区分：図5.7参照, 5%下限値：表5.4参照

つぎに、 Ed_w/Efr_{log} を末口径級とラミナの木取り区分別に表 5.6 に示した。平均値でみると内側ラミナでは Ed_w/Efr_{log} は径級22cmで0.92とやや低かったが、ほかは0.97から1.04とほぼ一定であった。これに対して外側ラミナでは1.12から1.33と変化し、径級が大きいほどその比が大きかった。

以上の結果から、丸太等級区分に木取り区分を併用することによって、 Ed_w の分布範囲が狭いラミナの選別が可能となり、大径丸太ほどこの区分の意義が大きいことが示された。

表 5.6 木取り区分したラミナの丸太末口径級別 Ed_w/Efr_{log} ^{a)}

丸太径級 cm	木取り区分 ^{b)}					
	内側ラミナ			外側ラミナ		
	試験体数	平均値	変動係数 %	試験体数	平均値	変動係数 %
20	18	0.98	10.1	22	1.13	11.9
22	20	0.92	11.4	22	1.12	11.2
24	45	0.97	12.8	32	1.18	9.4
26	26	1.01	16.5	15	1.19	10.2
28	34	1.04	13.4	20	1.26	12.4
30	24	1.02	12.8	17	1.32	10.2
32	18	0.97	15.5	12	1.33	13.0
全体	185	0.99	14.0	140	1.20	12.8

^{a)} Ed_w/Efr_{log} ：図5.6参照, ^{b)}木取り区分：図5.7参照

5.4 おわりに

本章では、縦振動法による丸太の等級区分、ラミナの木取り区分、および両者を併用したラミナの選別それぞれが、構造用集成材の製造工程の中で有用性が高いか否かを検証した。

カラマツ丸太の Efr_{log} による等級区分は同一丸太から得られたラミナの Ed_w の変動が大きいため、その変動係数の減少は少なかったが、 Ed_w 分布が明らかなラミナの選別が可能なることを示した。

髓に近いラミナは Ed_w が小さく、樹皮に近いラミナほどそれが大きい傾向が認められた。そこで、丸太の等級区分にさらに木取り区分を併用すると、丸太の等級区分内で外側ラミナの Ed_w と内側ラミナのそれとの差は1%水準で有意であった。また、内側ラミナの Ed_w の平均値は丸太径に関わりなく Efr_{log} とほぼ等しく、末口径との関係は少なかったが、外側ラミナの Ed_w の平均は Efr_{log} の1.12~1.33倍であり、大径丸太ほど大きかった。したがって、製材現場では丸太から画一的にラミナを製材する場合、丸太の等級区分をした上で内側ラミナと外側ラミナを分ける

と、 E_{dw} の分布の小さなラミナが選別できることになる。また、大径丸太の内側から平角等を、外側からラミナを採材するような場合は、 $E_{fr_{log}}$ に対して高い E_{dw} のラミナが得られる。なお、木取り区分だけでも E_{dw} の高いラミナと低いラミナに区分することが可能である。

本章で検討したそれぞれの選別がなされたラミナは、ラミナの曲げヤング係数の分布が予測できるため、それらを原料とした構造用集成材の強度等級が事前に推定できる上、高い曲げヤング係数のラミナが必要な場合容易にそれを得ることができる。したがって、これらの方法によるラミナの選別は集成材の製造工程において有用性が高いと考えられる。

第6章 ラミナの等級区分と構造用集成材の強度等級の推定⁽³⁰⁵⁾

6.1 はじめに

カラマツ人工造林木から信頼性の高い構造用集成材を製造するためには、材料であるラミナの適正な等級区分が必要である。また、現存する人工林から得られるラミナの曲げヤング係数の分布を明らかにすることは製品である構造用集成材の強度等級の推定が可能であり、極めて重要なことと考えられる。なお、一地方の一樹種から得られるラミナの曲げヤング係数の分布については秋田県産スギに関する飯島ら⁽²⁴⁶⁾の報告がある。

本章では、まず、荷重載荷法により測定したラミナの静的曲げヤング係数（以下 E_{dw} と記す。）および目視等級区分のための材質指標の分布、および材質指標と E_{dw} との関係を明らかにした上で、ラミナの目視等級と E_{dw} との関係を検討した。

つぎに、工場において蓄積された連続送り式グレーディングマシン（以下装置と記す。）によるカラマツラミナのグレーディングデータから静的曲げヤング係数測定値（以下装置によって連続測定した曲げヤング係数をMGEと記す。）のラミナ1枚中の最小値（以下 MGE_{MIN} と記す。）、平均値（以下 MGE_{AVG} と記す。）、最大値（以下 MGE_{MAX} と記す。）を取り出し、それらの分布を明らかにし、現状のカラマツ林から得られるラミナによって製造可能な構造用集成材の強度等級を推定した。

6.2 実験

6.2.1 材料

材料としたラミナはすべて人工乾燥材であり、第4章および第5章で調査した325枚に1317枚を追加して1642枚を試験材とした。ラミナの公称寸法は、幅17.5cm、厚さ3.0cm、および長さ400cmである。なお、追加したラミナは構造用集成材の原料として含水率10%以下に人工乾燥され、集成材工場に養生されていたものの一部である。

6.2.2 ラミナの調査

各ラミナに対して、幅、厚さ、重量および集中節の測定を行った。集中節径比（以下 K_0 と記す。）の計算は製造基準⁽³⁰³⁾と同じである。 E_{dw} はスパン360cmで水平に調整したローラ間で、初期5kgf、終期15kgfの中央集中荷重を負荷し、終期荷重と初期荷重の差およびこれらの荷重に対応するたわみの差から計算した。なお、終期荷重15kgfは辺縁応力⁽³⁰⁰⁾で約50kgf/cm²に相当する。

以上の測定を終了したラミナについて、丸太の末口側の木口から長さ4cm程度の試片を採取し、年輪幅（以下ARWと記す。）を測定した。髓からラミナ中心までの距離（以下DPと記す。）および髓からラミナ中心までの年輪数（以下NARPと記す。）は、第4章および第5章において調査した325枚については丸太末口横断面を再現して測定した数値を用い、追加したラミナは木口試片の年輪形状から推定した。繊維走行の傾斜（以下GIと記す。）は、切断した試片のすべてに丸太段階での木口割れが材面割れとして認められたので、この傾斜を測定し、材長1mに対する傾斜[mm/m]に換算した。心持ちの判定は、ラミナの全長で行った。すなわち、材長4mの中で少しでも髓を含んでいる部分があれば心持ちラミナとした。

6.2.3 連続送り式グレーディングマシンで測定した曲げヤング係数の分布

MGEを測定した装置は、各ラミナの両端80cmを除いた全区間を5.6cmに分割して4m材であれば42点のMGEを測定し、それらの平均値である MGE_{AVG} によって等級区分する。そしてMGEの測定値はフロッピーに保存されるので日常的に工場で測定された65653枚のカラマツラミナの

MGE_{MIN}、MGE_{AVG}、およびMGE_{MAX}を取り出し、それらの度数分布表を作成した。なお、本研究に用いた装置については第3章において詳しく述べた。

6.3 結果と考察

6.3.1 ラミナの調査結果

6.3.1.1 材質指標および曲げヤング係数の分布

測定したK_G、ARW、GI、 ρ 、DP、およびEdwの分布と心持ちラミナと心去りラミナの出現比率を図6.1に示した。この中でK_G、ARW、 ρ 、およびEdwは正規分布をしているのに対して、GIは傾斜の少ない方に偏った分布を示した。

Edwの平均値、変動係数はそれぞれ、 $111.3 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、18.0%であった。なお、ラミナのEdwの変動係数については秋田県産スギのそれ⁽²⁴⁾と大差がなかった。心持ちラミナの出現比率は45.9%と大きかったが、これは材長4mに対して少しでも髓を含んでいれば心持ちとしたためである。また、DPの平均値が3.6cmであり、髓に近いラミナが多く、DPが5cmを超えるラミナは少なかった。

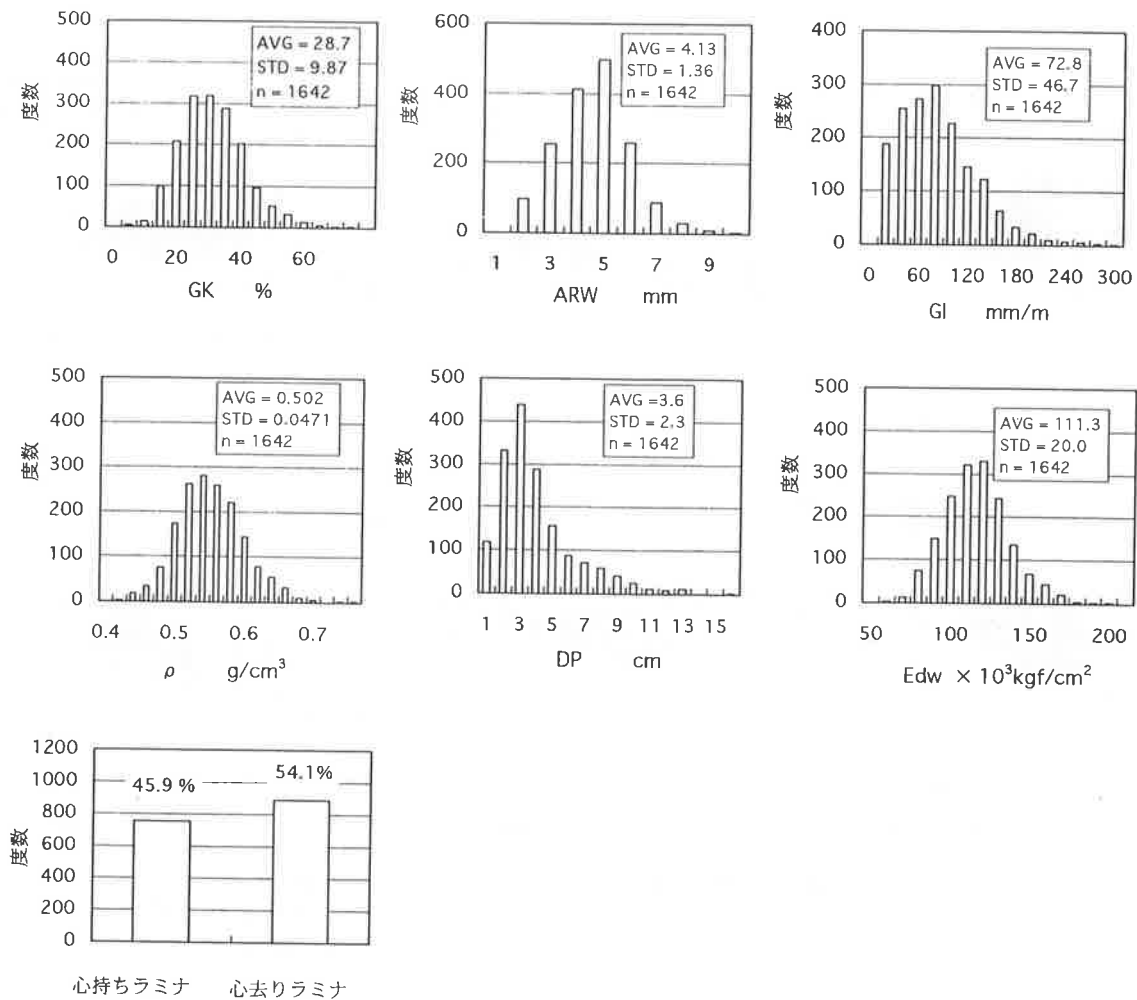


図6.1 ラミナの材質指標および曲げヤング係数 (Edw) の分布と心持ちラミナの出現比率

K_G : 集中節径比、ARW : 年輪幅、GI : 繊維傾斜、 ρ : 密度、DP : 髓とラミナの距離、Edw : 荷重載荷法で測定した曲げヤング係数、AVG : 平均値、STD : 標準偏差、試験体数は1642である。

6.3.2.1 材質指標と曲げヤング係数との関係

K_G 、ARW、GI、DP、NARPおよび ρ とEdwの関係を図6.2に示した。この中で目視で判断できる K_G 、ARW、GI、DPおよびNARPとEdwの関係は統計的には1%水準で有意であったが、相関係数(以下rと記す。)はARWとの間で認められた -0.445^{**} が最も大きく、これらの材質指標によって、Edwを推定するには無理があると考えられた。なお、 ** はrが危険率1%で有意なことを示す。とくにGIについては相関も低く、回帰式の傾きも0に近かった。

K_G とEdwの関係は3等分点荷重で測定した既往の研究⁽³⁰⁾では本研究の結果よりも高い相関関係が認められている。本研究におけるラミナのEdwの測定は中央集中荷重で行い、 K_G の測定は全長で行った。したがって、 K_G の材長方向の位置によってEdwへの影響が異なるため、相関がそれほど高くなかったものと考えられる。DPおよびNARPとEdwの相関関係はそれぞれ $r = 0.292^{**}$ および $r = 0.381^{**}$ で示され、NARPとの相関の方が高かった。このことは針葉樹の成熟現象が、髄からの距離よりも年輪数によること⁽⁵⁵⁾により説明できよう。

ここで、2.3.2で述べた心去り正角における材質指標と曲げヤング係数との関係と比較すると K_G 、GI、 ρ についてはほぼ等しい相関係数が得られた。ARWと曲げヤング係数の関係はラミナにおいて高い相関が認められ、断面が小さいほどARWとの相関が高くなることが明らかとなった。これには未成熟材である髄周辺部の年輪幅が広いことが原因しているものと考えられる。

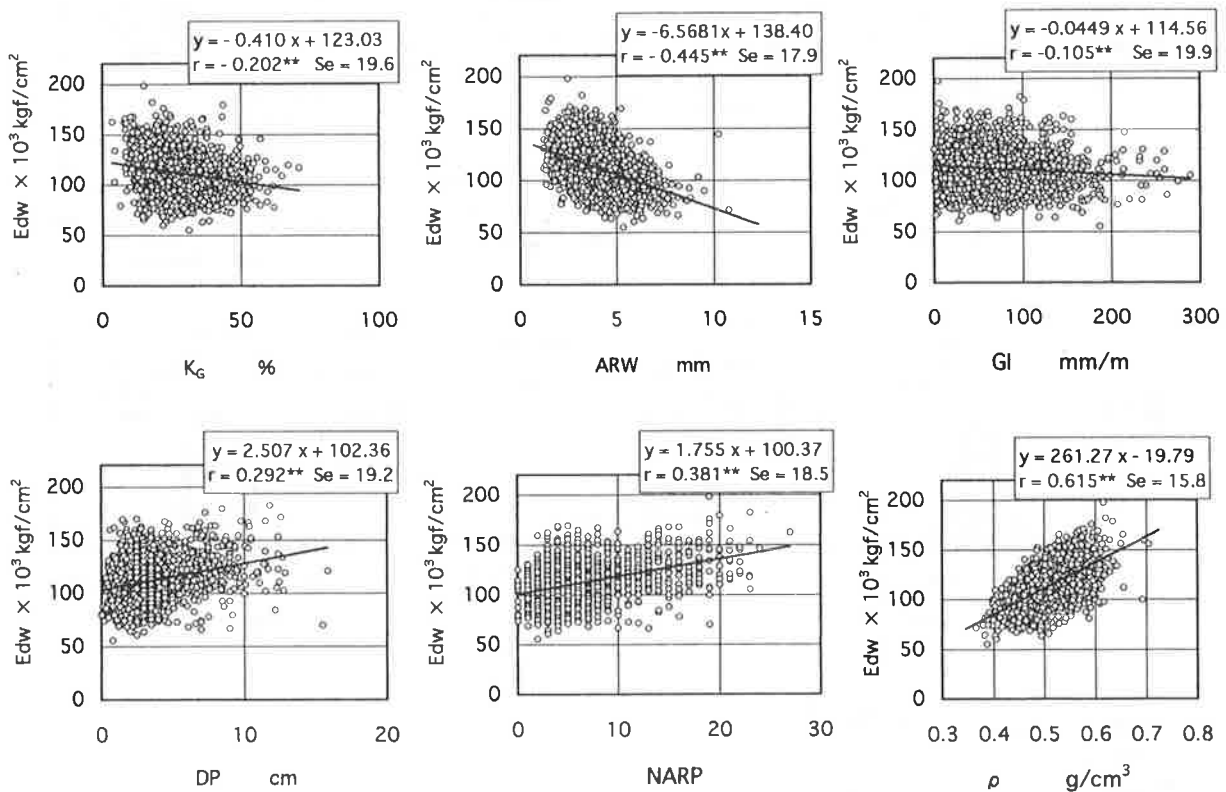


図6.2 材質指標と曲げヤング係数 (Edw) の関係

K_G ; ARW; GI; ρ ; DP; Edw: 図6.1参照、NARP: 髄からラミナ中心までの年輪数、r: 相関係数、 ** : rが危険率1%で有意なことを示す。Se: 標準誤差、試験体数は1642である。y: Edw、x: 横軸に示したそれぞれの材質指標

つぎに、Edwを目的変数として、説明変数に K_G 、ARW、GI、NARPを選び、重回帰分析を試みた。分析の結果、重相関係数は4変数の場合で0.518、 K_G 、ARW、GIの3変数で0.481であり、 K_G 、ARWの2変数で0.478であった。すなわち、ここで選択した説明変数の中では K_G とARWがEdwを推定する材質指標として比較的有效であると思われる、この2変数の時の標準誤差は $17.6 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ であった。一方、 ρ とEdwの関係は図に示すように $r = 0.615^{**}$ 、標準誤差は $15.8 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ であるから、Edwを推定する必要がある場合には、肉眼的に検知可能な指標を無視し、 ρ のみで行う方が推定精度は高いといえる。

6.3.2 目視等級区分されたラミナの曲げヤング係数

規格⁽¹⁵⁵⁾における目視等級区分は主な材質指標として、 K_G 、材縁の節径比（以下 K_E と記す。）、GI、ARWを取り上げ、それぞれに制限値を与え4区分としている。本研究では K_E は測定しなかったため目視等級区分は K_G 、ARW、GIを指標として表6.1に示した基準で行った。表中のVG1～VG4の各制限値は規格⁽¹⁵⁵⁾における目視等級1～4等の制限値と同じである。そしてVG5は規格では枠外である。

試みとして行った3種類の目視等級区分の結果を、平均値、標準偏差の範囲および5%下限値で図6.3に示した。5%下限値は図の脚注に示したようにASTM D 2915の方法⁽¹¹⁹⁾で計算した。心持ちラミナのEdwと心去りラミナのそれとの間に、平均値で $10.8 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ の差が認められ、平均値の差の検定結果は1%水準で有意であった。

目視等級区分では表6.1の3個の指標で区分した場合、および K_G とARWの2者で区分した場合とも、平均値および5%下限値でVG1が高い傾向が認められ、VG2との間で1%水準で有意差が認められた。しかし、VG2～VG5では平均値の有意差は認められず、5%下限値では同等か逆転している場合もあった。このことは6.3.1.2の結果から予想されたことであるが、目視等級区分の有効性はEdwに対しては低いと考えられる。

表 6.1 ラミナの目視等級区分の基準

目視等級	K_G ^{a)} %	ARW ^{b)} mm	GI ^{c)} mm/m
VG 1	$K_G \leq 20$	≤ 6	$GI \leq 62.5$
VG 2	$20 < K_G \leq 30$	≤ 6	$62.5 < GI \leq 71.4$
VG 3	$30 < K_G \leq 40$	—	$71.4 < GI \leq 83.3$
VG 4	$40 < K_G \leq 50$	—	$83.3 < GI \leq 125.0$
VG 5	$50 < K_G$	—	$125.0 < GI$

a) K_G ; b) ARW; c) GI: 図6.1参照

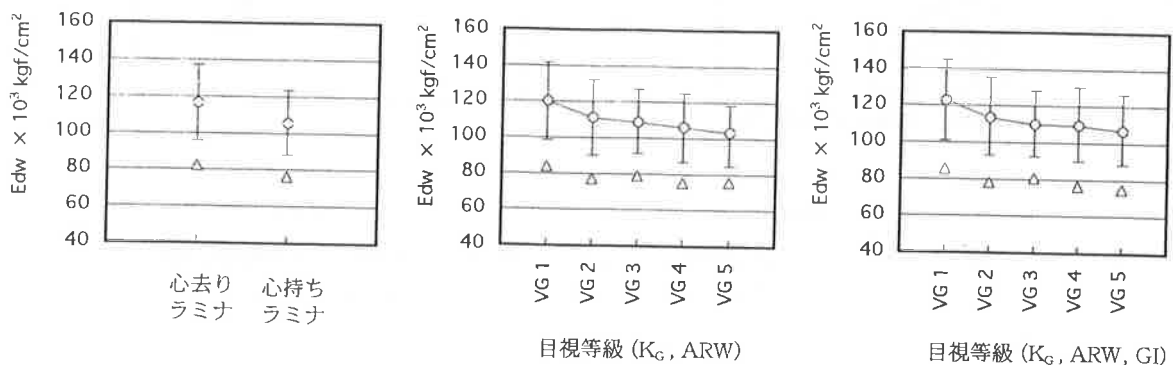


図 6.3 ラミナの目視等級と曲げヤング係数 (Edw) の平均値および5%下限値

○: 平均値、△: 5%下限値=平均値-K×標準偏差 (K: ASTM D 2915⁽¹¹⁹⁾、Table 3、75% Confidence、5% Tolerance)、図中の範囲は±標準偏差を示す。

6.3.3 連続送り式グレーディングマシンによって測定されたラミナの曲げヤング係数の分布

装置によって、工場で測定された65653枚のラミナのMGE_{AVG}、MGE_{MIN}およびMGE_{MAX}の度数分布を表6.2に示した。また、MGE_{AVG}のヒストグラムとMGE_{MIN}、MGE_{AVG}およびMGE_{MAX}の累積度数分布を図6.4に示した。なお、表6.2に示した標準偏差は度数分布表から求めた。

表 6.2 MGE_{AVG}、MGE_{MIN}、MGE_{MAX}の度数分布

ラミナの機械等級 ^{a)}	MGE _{AVG} ^{b)} 試験体数 (%)	MGE _{MIN} ^{c)} 試験体数 (%)	MGE _{MAX} ^{d)} 試験体数 (%)
φ 50	132 (0.2)	720 (1.2)	23 (0.0)
φ 60	1046 (1.6)	3495 (5.3)	261 (0.4)
φ 70	4249 (6.5)	8815 (13.4)	1901 (2.9)
φ 80	9416 (14.3)	12270 (18.7)	5632 (8.6)
φ 90	12237 (18.6)	12196 (18.6)	9846 (15.0)
φ 100	11112 (16.9)	9881 (15.1)	11613 (17.7)
φ 110	9375 (14.3)	7128 (10.9)	10780 (16.4)
φ 120	6852 (10.4)	4721 (7.2)	8647 (13.2)
φ 130	4653 (7.1)	2791 (4.3)	6415 (9.8)
φ 140	2800 (4.3)	1750 (2.7)	4181 (6.4)
φ 150	1786 (2.7)	1001 (1.5)	2739 (4.2)
φ 160	1118 (1.7)	498 (0.8)	1782 (2.7)
φ 170	586 (0.9)	275 (0.4)	1215 (1.9)
φ 180	291 (0.4)	112 (0.2)	618 (0.9)
平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	108.3	99.2	116.3
標準偏差 ×10 ³ kgf/cm ²	23.3	22.5	23.8
変動係数 %	21.5	22.8	20.5
5% 下限値 ^{e)} ×10 ³ kgf/cm ²	70.0	62.2	77.1

a) ラミナの機械等級：φ 50：50 < MGE ≤ 60 × 10³ kgf/cm² ~ φ 180：180 < MGE ≤ 190 × 10³ kgf/cm²，
 b) MGE_{AVG}：ラミナ1枚中のMGEの平均値， c) MGE_{MIN}：ラミナ1枚中のMGEの最小値， d) MGE_{MAX}：ラミナ1枚中のMGEの最大値， e) 5% 下限値：図6.3参照， MGE：連続送り式グレーディングマシンによる曲げヤング係数測定値，全試験体数は 65653である。

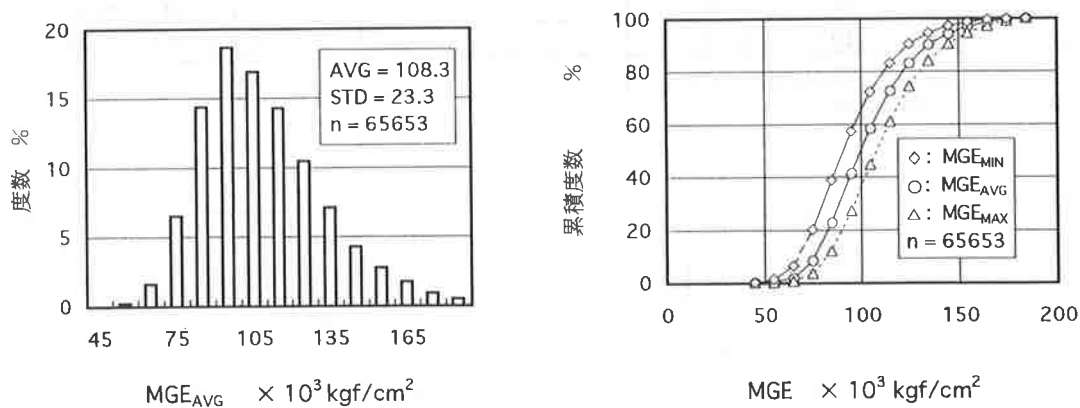


図 6.4 MGE_{AVG}のヒストグラムとMGE_{MIN}、MGE_{AVG}、MGE_{MAX}の累積度数分布
 MGE_{AVG}；MGE_{MIN}；MGE_{MAX}：表6.2参照、AVG：平均値、STD：標準偏差

表に示すようにラミナ65653枚のMGE_{AVG}の平均値、標準偏差、変動係数はそれぞれ108.3 × 10³ kgf/cm²、23.3 × 10³ kgf/cm²、21.5%であった。また、第8章で述べるようにラミナ6400枚のMGE_{AVG}の測定結果では、平均値、標準偏差、変動係数それぞれ、107.3 × 10³ kgf/cm²、22.3 × 10³ kgf/cm²、20.8%であった。これらの結果から判断して、ここに示したラミナのMGE_{AVG}、M

GE_{MIN} 、および MGE_{MAX} の分布は、現状のカラマツ人工造林木から得られるラミナの曲げヤング係数の分布を示しているものと考えられる。 MGE_{MAX} の平均値と MGE_{MIN} の平均値の差は表 6.2 に示したように $17.1 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、同様に MGE_{AVG} と MGE_{MIN} の差も $9.1 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ と大きかった。この結果はラミナの性質として曲げヤング係数が長さ方向で大きく変動していることを示している。この原因は原木が比較的小径であり、材の曲がりにより曲げヤング係数の低い未成熟材の占める比率がラミナの長さ方向で変動しているためと考えられる。このことは髓が少しでも存在するラミナの出現比率が全体の45.9%もあったという 6.3.1.1 で述べた調査結果からも推定できる。

6.3.4 製造可能な構造用集成材の強度等級の推定

規格⁽¹⁵⁵⁾では、連続送り式グレーディングマシンによるラミナの機械等級区分は原則として MGE_{AVG} で行うよう規定しているが、前項で明らかになったように、 MGE_{AVG} と MGE_{MIN} の差が平均で $10 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 近くもあるということは、長さ 4 m のラミナの最小強度を MGE_{AVG} で推定することは困難であると考えられる。第 8 章で述べる水平積層集成材の曲げ試験結果から、少なくとも最外層用ラミナは MGE_{MIN} で等級区分すべきことが示唆された。そこで構造用集成材の最外層用ラミナを MGE_{MIN} で、そのほかを MGE_{AVG} で等級区分するという前提で、製造可能な構造用集成材の強度等級の推定を行った。

規格⁽¹⁵⁵⁾におけるラミナの機械等級の L50～L100までは表 6.2 の ℓ で表示した機械等級と同じであるが、その上位は L110、L125、L140、L180である。表 6.2 に示した度数分布表から MGE_{AVG} と MGE_{MIN} を取り出し、規格の機械等級に対応させた各等級のラミナの出現比率を表 6.3 に示した。また、規格に規定されている異等級対称構成集成材の強度等級と、それを構成するラミナの配置の一部を表 6.4 に示した。

表 6.3 ラミナの機械等級出現比率

機械等級 ^{a)}	MGE_{AVG} ^{b)}	%	MGE_{MIN} ^{c)}	%
L 50	0.2		1.2	
L 60	1.6		5.3	
L 70	6.5		13.4	
L 80	14.3		18.7	
L 90	18.6		18.6	
L 100	16.9		15.1	
L 110	21.3		16.0	
L 125	10.5		6.3	
L 140	7.0		4.2	
L 160	2.6		1.2	
L 180	0.4		0.2	
計	100.0		100.0	

^{a)} 機械等級：構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾に基づく機械等級、^{b)} MGE_{AVG} ；^{c)} MGE_{MIN} ：表 6.2 参照

表 6.4 構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾における異等級対称構成集成材の強度等級とラミナ構成

強度等級	ラミナ構成			
	最外層用ラミナ	外層用ラミナ	中間層用ラミナ	内層用ラミナ
E 135 - F 375	L 160	L 140以上	L 125以上	L 100以上
E 120 - F 330	L 140	L 125以上	L 110以上	L 90以上
E 105 - F 300	L 125	L 110以上	L 100以上	L 80以上
E 95 - F 270	L 110	L 100以上	L 90以上	L 70以上
E 85 - F 225	L 100	L 90以上	L 80以上	L 60以上

製造可能な構造用集成材の強度等級を推定するためには最外層用、外層用、中間層用、内層用の各ラミナの比率を明らかにする必要がある。規格⁽¹⁵⁵⁾における対称異等級構成集成材の最外層、外層、中間層、内層の断面比率はそれぞれ12.5%、12.5%、25%、50%であり、積層数が16の倍数の場合、各層のラミナの比率はこれらの比率と一致するが、それ以外の積層数の場合は上位のラミナの比率が増えることになる。4層から64層までの構造用集成材のラミナの比率をすべて計算し、それらを単純平均した結果、最外層用、外層用、中間層用、内層用ラミナの比率はそれぞれ14.5%、12.9%、24.1%、48.6%となった。そこで、この比率を用いて製造可能な集成材の強度等級を推定したところ、最外層用ラミナを MGE_{MIN} で等級区分し、そのほかを MGE_{AVG} で等級区分した場合、強度等級「E120-F330」、「E105-F300」、「E95-F270」、「E85-F255」の出現比率はそれぞれ、38.7%、43.5%、13.8%、4.0%であった。したがって、カラマツ人工造林木からは規格⁽¹⁵⁵⁾に規定されている強度等級「E120-F330」、「E105-F300」を主体とした集成材が製造できることになる。

6.4 おわりに

ラミナの材質指標と荷重載荷法で測定した曲げヤング係数 Ed_w との関係を検討した。つぎに、連続送り式グレーディングマシンによって測定したラミナ65653枚の曲げヤング係数の分布を明らかにして、製造可能な構造用集成材の強度等級を推定した。

目視で判断できる K_G 、 ARW 、 GI 、 DP および $NARP$ と Ed_w の相関関係は、すべての場合統計的には危険率1%で有意であったが、最も大きな r は ARW との間で得られた -0.445^{**} であり、これらの材質指標によって、 Ed_w を推定するには無理があると考えられた。また、 ρ との間には $r=0.615^{**}$ と高い相関が認められた。

材質指標と Ed_w の関係を2.3.2.2で述べた心去り正角における結果と比較すると ARW との間の相関が高く、 K_G 、 ρ 、 GI との間には同程度の r が得られた。

ラミナ65653枚の MGE_{AVG} の平均値および変動係数はそれぞれ $108.3 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ および21.5%であった。 MGE_{MAX} の平均値と MGE_{MIN} の平均値の差は $17.1 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、同様に MGE_{AVG} と MGE_{MIN} の差も $9.1 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ と大きかった。この結果は、現状のカラマツ人工林から得られるラミナの曲げヤング係数が、長さ方向で大きく変動していることを示していた。したがって、長さ4mのラミナの最小強度を MGE_{AVG} で推定するのは困難であると考えられた。

ラミナの MGE の分布から判断して、最外層を MGE_{MIN} で等級区分したラミナ、外層、中間層および内層を MGE_{AVG} で等級区分したラミナで対称異等級構成集成材を製造した場合、現状のカラマツ人工造林木を原料とした構造用集成材は、規格⁽¹⁵⁵⁾に規定されている強度等級「E120-F330」、「E105-F300」が主体となると考えられた。

第7章 ラミナの曲げ, 引張り強度特性⁽³⁰⁷⁾

7.1 はじめに

縦振動法によるカラマツ丸太の等級区分と木取り位置によってラミナを選別する意義については第5章において述べた。第6章では目視等級区分のための材質指標と荷重載荷法で測定した曲げヤング係数との関係を検討し、つぎにカラマツ人工造林木から得られるラミナの曲げヤング係数の分布から製造可能な構造用集成材の強度等級を推定した。本章ではラミナの強度特性を明らかにする目的で行ったラミナの曲げ試験および引張り試験の結果について述べる。

構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾（以下規格と記す。）、構造用集成材の適正製造基準⁽³⁰³⁾（以下製造基準と記す。）では、ラミナの強度性能評価を曲げ試験あるいは引張り試験による強度値の平均値および5%下限値で行うように規定している。規格⁽¹⁵⁵⁾における引張り強さ（以下TSと記す。）の基準強度値は、曲げ強さ（以下MORと記す。）に対するTSの比（以下TS/MORと記す。）を、ほぼ0.6として決められている。また、平均値と5%下限値との関係は、等級内のラミナのMORおよびTSの変動係数がそれぞれ15%のときあてはまる。

ラミナのMORとTSとの関係は、縦継ぎラミナについて有馬⁽²³⁰⁾、池田ら⁽²⁴⁴⁾、丸山ら⁽³⁰⁸⁾が報告し、通しラミナと縦継ぎラミナの両方を対象として林ら⁽²⁶⁹⁾が報告しているが、TS/MORあるいはTSおよびMORの変動係数について、等級区分されたラミナにまで踏み込んだ研究は少ない。さらに、カラマツは他樹種以上に強度性能の変動が大きいと考えられる上、TS/MORがスギに比較して低いという報告⁽¹⁵²⁾もあり、ラミナの等級とそれらとの関係が明らかにされていない。

近年、小松⁽²⁷⁶⁾、平嶋ら⁽²⁷⁹⁾は集成材の強度予測をモンテカルロシミュレーション⁽²⁷²⁾で行い、TSとMORの2次の複合モデルが実験値とよく一致することを示しており、この場合、ラミナのTS、MOR、およびTS/MORが強度予測のための重要な因子になる。

また、縦継ぎラミナの強さと通しラミナの強さの比（以下接合効率と記す。）はMORで評価した場合とTSで評価した場合では異なることが予想されるが、それぞれ単独で評価した報告がほとんどで、同一工程で製造した縦継ぎラミナの接合効率を両者で評価した報告はみあたらない。

そこで、本章では、まず、通しラミナおよび同一工程で製造した縦継ぎラミナの曲げ試験および引張り試験の結果から、縦継ぎラミナの強度特性を通しラミナのそれとの比較で検討した。つぎに、等級区分したラミナのTSおよびMORと規格⁽¹⁵⁵⁾における基準値との関係を検討し、さらに、ラミナの等級とTSおよびMORの変動係数との関係、および等級とTS/MORとの関係を検討した。

7.2 実験

7.2.1 材料

ラミナのサンプリングのための機械等級区分は連続送り式グレーディングマシン（以下装置と記す。）を用い、ラミナの長さ方向に分割して静的曲げヤング係数（以下装置により測定した曲げヤング係数をMGEと記す。）を連続測定し、MGEのラミナ1枚あたりの平均値（以下MGE_{AVG}と記す。）で行った。試験材の曲げヤング係数の分布幅を大きくするために、装置により機械等級区分（以下MGE区分と記す。）されたラミナのつぎの3区分から、幅17.5cm、厚さ3.0cm、長さ4mのラミナをそれぞれ120枚、計360枚を得て試験材とした。

$$\text{MGE } 80 : 80 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2 \leq \text{MGE}_{\text{AVG}} < 90 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$$

$$\text{MGE } 100 : 100 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2 \leq \text{MGE}_{\text{AVG}} < 110 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$$

$$\text{MGE } 120 : 120 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2 \leq \text{MGE}_{\text{AVG}} < 130 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$$

サンプリングにおいて、MGE 90、MGE 110を除いたのは6.3.3.1において述べたように長さ4mのラミナ内で曲げヤング係数が長さ方向で大きく変動していることがわかっていたからである。MGE区分ごとに50枚、3区分の合計で150枚を通しラミナ用、同様にMGE区分ごとに70枚、3区分の合計で210枚を縦継ぎラミナ用とした。

7.2.2 ラミナの調整

通しラミナ用に区分したラミナは1/2に切断し、モルダーにより仕上げ、厚さ2.4cm、幅14.9cm、長さ200cmの通しラミナとした。縦継ぎラミナ用に区分したラミナは製造基準⁽³⁰³⁾に従い、接合部に節がこないように配慮して、長さ約1mのラミナを可能な限り切り出し、2枚を接合して縦継ぎラミナとし、通しラミナと同一寸法に仕上げた。接合に用いたフィンガージョイントの形状はラミナの幅広面にフィンガー形状が現れる垂直型フィンガーであり、長さ18.63mm、ピッチ6mm、フィンガー先端厚さ0.8mm、フィンガー底部幅0.6mm、スカーフ傾斜比1/8.1である。接着剤はレゾルシノール樹脂系を用い、フィンガー両面に塗布し、圧縮圧50kgf/cm²で接合した。用いた接着剤は大鹿振興(株)、大鹿ディアノール33である。なお、接合は基本的には同一ラミナから切り出したもの同士、それができない場合は同一MGE等級内での接合とし、異等級間での接合は行わなかった。

通しラミナ、縦継ぎラミナとも2.2.3で述べた縦振動法により測定した動的ヤング係数（以下縦振動ヤング係数あるいはE_{fr}と記す。）により順位化し、奇数番を引張り試験用、偶数番を曲げ試験用とした。その結果、通しラミナは曲げ試験用および引張り試験用、各150枚、縦継ぎラミナは曲げ試験用および引張り用それぞれ155枚および156枚であった。

7.2.3 ラミナの調査

通しラミナおよび縦継ぎラミナに対して、密度（以下 ρ と記す。）、集中節径比（以下 K_G と記す。）、材縁の節径比（以下 K_E と記す。）、およびE_{fr}を測定した。年輪幅（以下ARWと記す。）および髄からラミナ中心までの距離（以下DPと記す。）は通しラミナについてだけ、曲げ試験終了後非破壊部から木口試片を切り出し、それにより測定した。DPの測定法は4.2.2において示し、ARWのそれは5.2.3で述べたが、DPはその木口試片の年輪形状からの推定値である。 K_G および K_E の測定は製造基準⁽³⁰³⁾に従ったが、曲げ試験用ラミナは三等分点曲げ試験におけるスパン間とロードスパン間の2区分、引張り試験用はラミナ全長とグリップ間の2区分で測定した。以下曲げ試験用ラミナのスパン間および引張り試験用ラミナの全長で測定した K_G および K_E を、それぞれ K_{GL} および K_{EL} と記し、曲げ試験におけるロードスパン間および引張り試験におけるグリップ間のそれらを、それぞれ K_{GC} および K_{EC} と記す。

7.2.4 ラミナの強度試験

曲げ試験は(株)ミネベア製材料試験機TCM-5000を用い、スパン120cm、3等分点荷重で、クロスヘッド速さ5mm/minで荷重を負荷し、破壊荷重からMORを、比例域内における荷重とたわみとの関係から静的曲げヤング係数（以下材料試験機により測定した曲げヤング係数をMOEと記す。）を計算した。なお、MOE計算のための荷重区間は、荷重-変位曲線のほぼ完全な直線域とした。

引張り試験用ラミナは、曲げ試験と同一スパン条件の非破壊検査によってMOEを測定した後、引張り試験に供した。非破壊検査における荷重負荷は100kgfまでとし、これは辺縁応力⁽³⁰⁰⁾140kgf/cm²に相当する。引張り試験は飯田工業(株)製引張り強度試験機NET-501Eを用い、グリップ間隔を約100cmとして行い、破壊荷重からTSを計算した。1試験が3～5分程度で終了するようにグリップの引張り速さを調節した。

7.3 結果と考察

7.3.1 装置によって機械等級区分されたラミナの曲げヤング係数

通しラミナのMOEの分布をMGE区分に対応させて図7.1に示した。MGE 80、MGE 100、MGE 120に対応するMOEの平均値は順に、 $10.6 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $130.2 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $152.8 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であった。このようにMGE区分ごとのMOEは予定したMOEよりもはるかに高かった。この原因は装置の設定が安全側にある上、長時間使用したことにより装置のローラによるラミナの支持条件が、調整した時点よりも単純支持側にシフトしていたためと思われる。一方、図に示すようにMOEの分布範囲が広く、全体では概略台形状を呈しており、MOEの分布範囲を広げるというサンプリングにおける目的はほぼ達成されていると考えられる。

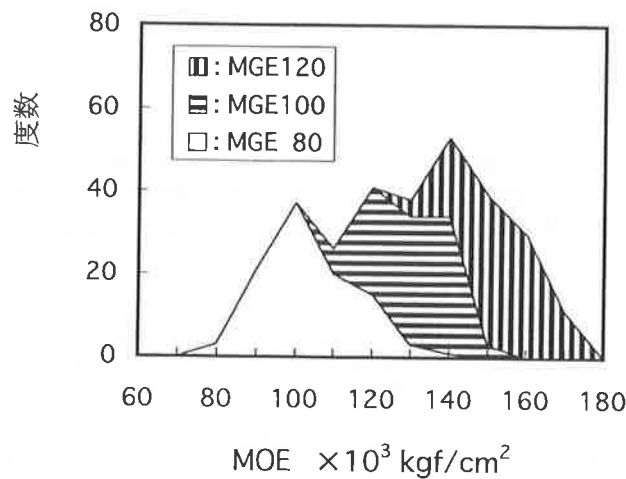


図7.1 連続送り式グレーディングマシンにより等級区分した通しラミナの曲げヤング係数 (MOE) の分布
MGE 80 ; MGE 100 ; MGE 120 : 連続送り式グレーディングマシンによって区分したラミナの機械等級

7.3.2 破壊に関係したと判断された因子の比率

ラミナの曲げ、引張りの各試験において破壊に関係したと判断された因子の比率を節、目切れ、接合部、およびその他に分けて表7.1に示した。これらの因子の中で2以上の因子が破壊に関係したと判断されるものについては、表中の上部の因子を優先した。通しラミナでは、節が破壊と関係したと認められたものは曲げで67.8%、引張りで92.6%であり、とくに引張りにおいて大きかった。縦継ぎラミナでは、接合部での破壊が曲げで92.9%と支配的であるのに対して引張りでは68.6%であった。なお、縦継ぎラミナの引張りで節が関係したと認められた破壊が30.8%あった。

表7.1 ラミナの破壊に関係したと判断された因子の出現比率 (%)

破壊原因	通しラミナ		縦継ぎラミナ	
	曲げ	引張り	曲げ	引張り
節	67.8	92.6	5.7	30.8
目切れ	2.7	1.3	0.0	0.0
その他	29.5	6.0	1.3	0.6
接合部	-	-	92.9	68.6
全体	100.0	100.0	100.0	100.0

7.3.3 通しラミナおよび縦継ぎラミナの強度特性

通しラミナおよび縦継ぎラミナについて、 ρ 、ARW、DP、 K_{GC} 、 K_{GL} 、 K_{EC} および K_{EL} の平均

値と変動係数を表7.2に示し、MOE、Efr、含水率の平均値と変動係数を表7.3に示した。表7.2に示したように K_{GC} および K_{EC} の平均値が縦継ぎラミナのほうが小さい傾向にあるが、これは縦継ぎに際して節を避けた結果が現れているものと考えられる。それ以外の因子は両者ではほとんど差がないと判断した。また、表7.3に示すように両ラミナのMOEの平均値および変動係数の差はわずかであり、ラミナのサンプリングにおいて通しラミナ用、縦継ぎラミナ用はほぼ同質のラミナで分けられたものと判断できる。また、含水率は両ラミナとも平均値は等しく、変動係数が10%程度であったので、強度値の含水率補正は行わなかった。

表7.2 ラミナの材質指標の平均値、変動係数

ラミナの種類		ρ ^{a)} g/cm ³	ARW ^{b)} mm	DP ^{c)} mm	K_{GC} ^{d)} %	K_{GL} ^{e)} %	K_{EC} ^{f)} %	K_{BL} ^{g)} %
通しラミナ	平均値	0.538	3.5	52.1	23.9	28.9	7.7	11.9
	変動係数 %	10.2	36.7	49.6	60.5	49.2	119.0	82.4
縦継ぎラミナ	平均値	0.545	-	-	19.8	28.2	6.4	12.0
	変動係数 %	8.7	-	-	68.6	48.4	141.6	87.5

^{a)} ρ : 密度, ^{b)} ARW : 年輪幅, ^{c)} DP : 髓とラミナの距離, ^{d)} K_{GC} : 曲げ試験用はロードスパン内, 引張り試験用はグリップ間の集中節径比, ^{e)} K_{GL} : 曲げ試験用はスパン間, 引張り試験用は全長で評価した集中節径比, ^{f)} K_{EC} : K_{GC} と同じ区間で測定した材縁の節径比, ^{g)} K_{BL} : K_{GL} と同じ区間で測定した材縁の節径比, 試験体数は通しラミナ299, 縦継ぎラミナ311である。

表7.3 ラミナの曲げヤング係数、縦振動ヤング係数、および試験時含水率

ラミナの種類		MOE ^{a)} ×10 ³ kgf/cm ²	Efr ^{b)} ×10 ³ kgf/cm ²	MC ^{c)} %
通しラミナ	平均値	128.9	130.7	11.1
	変動係数 %	17.4	15.9	10.4
縦継ぎラミナ	平均値	127.4	130.3	11.1
	変動係数 %	16.1	16.5	11.9

^{a)} MOE : 材料試験機で測定した曲げヤング係数, ^{b)} Efr : 縦振動法による動的ヤング係数, ^{c)} MC : 試験時含水率

曲げ試験および引張り試験の結果を表7.4に示した。MORの平均値、変動係数は通しラミナで616kgf/cm²、25.6%、縦継ぎラミナで476kgf/cm²、17.4%であり、TSの平均値、変動係数は通しラミナで332kgf/cm²、39.1%、縦継ぎラミナで303kgf/cm²、31.8%であった。通しラミナと縦継ぎラミナの平均値の差の検定を行ったところ、MORでは1%水準で有意差が認められたが、TSでは1%水準での有意差は認められなかった。なお、表中にTS/MORについても示したがこれについては後述する。

ラミナの接合効率率は表7.4に示したようにMORの平均値で評価すると77.2%であり、TSのそれで評価すると91.6%であった。接合部と関係したと判断される破壊の出現比率がTSよりもM

表7.4 ラミナの曲げ、引張り試験結果

	通しラミナ				縦継ぎラミナ				接合効率 ^{a)} %	
	試験体数	平均値 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ^{b)} kgf/cm ²	試験体数	平均値 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 kgf/cm ²	平均値 評価	5%下限値 評価
MOR ^{c)}	149	616	25.6	351	155	476	17.4	327	77.2	93.2
TS ^{d)}	150	332	39.1	153	156	304	31.8	133	91.6	87.0
TS/MOR ^{e)}	-	0.54	-	0.44	-	0.64	-	0.41	-	-

^{a)}接合効率 = 縦継ぎラミナの強さ/通しラミナの強さ × 100 [%], ^{b)}5%下限値 : 順位法で求めた5%下限値, ^{c)}MOR : 曲げ強さ, ^{d)}TS : 引張り強さ, ^{e)}TS/MOR : MORに対するTSの比

ORで多い傾向は7.3.1.2において述べたが、同一工程で製造された縦継ぎラミナの接合効率を、MORで評価した場合とTSで評価した場合では異なることが明らかとなった。つぎに、TSの変動係数はMORの変動係数よりも大きく、通しラミナで約1.5倍、および縦継ぎラミナで約1.8倍であった。縦継ぎラミナの強度値の変動係数が通しラミナのそれより小さくなることは林ら⁽²⁶⁹⁻²⁷¹⁾、池田⁽¹⁸⁵⁾によって指摘されているが、本研究でも縦継ぎラミナの変動係数はMOR、TSでそれぞれ約30%、約20%通しラミナより小さかった。

順位化したMOR、TSをラミナの種類別に図7.2に示した。図に示したように、通しラミナと縦継ぎラミナのMORは順位化して求めた5%下限値近傍まではほぼ等しいが、それを超えると差が大きくなり、両者ではその分布が異なることが明らかである。一方、TSでは、50%を超えるまで通しラミナと縦継ぎラミナに差が認められず、60%程度から通しラミナのほうが大きくなるが、MORに比較してその差は小さかった。したがって、両ラミナのTSの分布はほぼ類似していると判断できる。

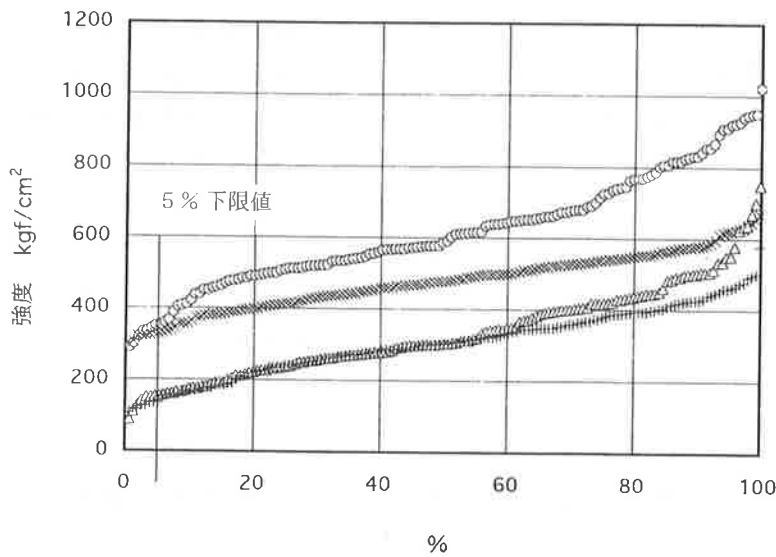


図 7.2 順位化した通しラミナ、縦継ぎラミナの曲げ強さ (MOR) および引張り強さ (TS)
○：通しラミナのMOR、×：縦継ぎラミナのMOR、△：通しラミナのTS、+：縦継ぎラミナのTS

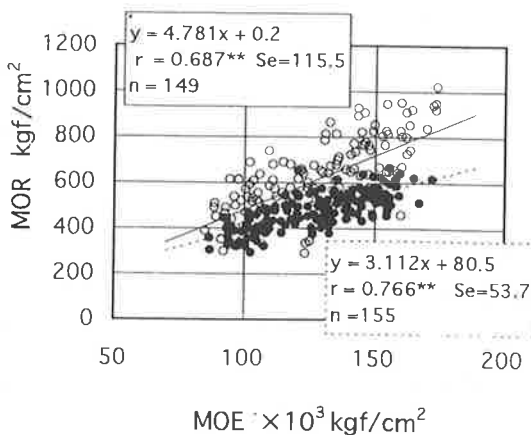


図 7.3 ラミナの曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強さ (MOR) との関係

○：通しラミナ、●：縦継ぎラミナ、r：相関係数、
**：相関係数が危険率1%で有意なことを示す。
Se：標準誤差、実線：通しラミナの回帰直線、
破線：縦継ぎラミナの回帰直線、y：MOR、x：MOE

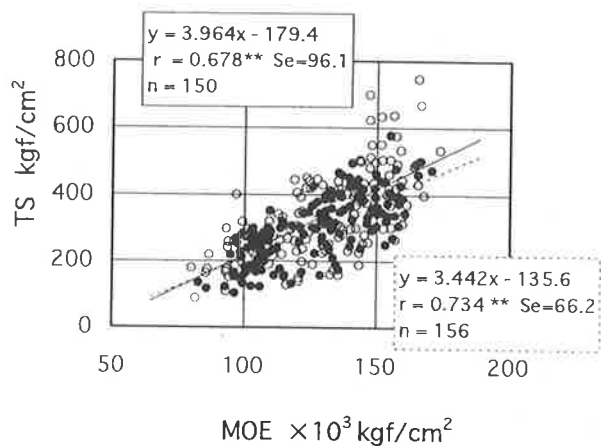


図 7.4 ラミナの曲げヤング係数 (MOE) と引張り強さ (TS) との関係

○；●；r；**；Se；実線；図7.3参照、y：MOR、
x：MOE

MOEとMORとの関係を図7.3に示した。MOEとMORとの関係は、通しラミナ、縦継ぎラミナそれぞれの相関係数（以下rと記す。）は、0.687**、0.766**で示され、縦継ぎラミナのほうに高い相関が認められた。なお、**は相関係数が危険率1%で有意なことを示す。通しラミナのMOEとMORとの関係を示す回帰直線はほぼ原点を通る直線で示された。縦継ぎラミナのMORはそのほとんどが通しラミナの回帰直線の下側に分布し、回帰直線の傾きは通しラミナのそれより35%ほど小さく、MOEの高いラミナほど両ラミナのMORの差が大きいのことを示していた。

MOEとTSとの関係を図7.4に示した。通しラミナのMOEとTSとの関係は、 $r = 0.678^{**}$ 、縦継ぎラミナのそれは $r = 0.734^{**}$ で示され、MORと同様に縦継ぎラミナのほうに高い相関が認められた。縦継ぎラミナのTSは通しラミナのそれとほぼ同様な分布を示し、回帰直線の傾きは14%小さくなっただけであった。また、ふたつの回帰直線は接近しており、MOEが $80 \times 10^3 \text{ kg f/cm}^2$ 近傍で交差した。

以上の結果、縦継ぎラミナの性能は製造工程が影響するので一概には結論づけられないが、縦継ぎラミナの強度性能は、TSで評価する場合とMORで評価する場合で異なることが示めされた。すなわち、TSで評価すると接合効率も高く、通しラミナと縦継ぎラミナではTSの分布およびMOEとの関係を示す回帰直線も相違が少ない。一方、MORで評価すると接合効率も低く、通しラミナと縦継ぎラミナではMORの分布およびMOEとの関係を示す回帰直線の傾きが異なり、両ラミナを同一に扱えないと考えられた。

7.3.4 材質指標、曲げヤング係数によるラミナの強度推定

ラミナの材質指標である ρ 、ARW、DP、 K_{GC} 、 K_{EC} とMOR、TSおよびMOEとの関係は通しラミナだけで検討した。これらの関係を示すrを表7.5に示した。 ρ 、ARW、DPのMORおよびTSに対する相関はMOEに対するよりも低かった。一方、 K_{GC} 、 K_{EC} のMORおよびTSに対する相関はMOEに対するよりも高かった。

表7.5 通しラミナの材質指標と曲げ強さ(MOR)、引張り強さ(TS)および曲げヤング係数(MOE)との関係を示す相関係数

	試験体数	ρ ^{a)}	ARW ^{b)}	DP ^{c)}	K_{GC} ^{d)}	K_{EC} ^{e)}
MOR	149	0.242** ⁽¹⁾	-0.237**	0.339**	-0.478**	-0.485**
TS	150	0.213**	-0.435**	0.304**	-0.473**	-0.477**
MOE	299	0.417**	-0.583**	0.463**	-0.369**	-0.357**

a) ~ e): 表7.2参照, ⁽¹⁾ **: 相関係数が危険率1%で有意なことを示す。

つぎに、MOR、TSそれぞれを目的変数、MOE、 K_{GC} 、 K_{EC} 、ARW、DP、 ρ を説明変数として重回帰分析を行い、表7.5に重相関係数（以下Rと記す。）と標準誤差（以下Seと記す。）を示した。MORについてみると6変数の場合、 $R = 0.764$ 、 $Se = 107.7$ であり、MOE、 K_{GC} 、 K_{EC} の3変数の場合、 $R = 0.731$ 、 $Se = 109.3$ であるから、説明変数としてMOEにARW、DP、 ρ の3変数を加えても、推定精度はそれほどあがらない。一方、MOEとMORとの関係は $r = 0.687$ 、 $Se = 115.5$ であるので、説明変数としてMOEに K_{GC} 、 K_{EC} を加える意義が認められる。TSについても傾向はMORの場合とほとんど同じであり、TSの説明変数としてMOEに K_{GC} 、 K_{EC} を加える意義が認められた。

なお、EfrとMOEとの関係を図7.5に示した。図に示すようにEfrとMOEは高い相関関係にあり、通しラミナ、縦継ぎラミナでは回帰式および相関係数もほとんど変わりなく、EfrはMOEよりも1~2%高い値を示した。

表 7.6 曲げ強さ (MOR)、引張り強さ (TS) を目的変数とした重回帰分析結果

説明変数	目的変数			
	MOR ^{a)}		TS ^{b)}	
	R ¹⁾	Se ²⁾	R	Se
MOE ^{c)} , K _{GC} ^{d)} , K _{BC} ^{e)} , ARW ^{f)} , DP ^{g)} , ρ ^{h)}	0.746	107.7	0.764	85.7
MOE, K _{GC} , K _{BC}	0.731	109.3	0.743	88.0
MOE, K _{GC}	0.717	111.3	0.730	89.6
MOE, K _{BC}	0.726	109.7	0.728	89.8
MOE	0.687	115.5	0.678	96.1

a) MOR: 曲げ強さ, b) TS: 引張り強さ, c) MOE: 曲げヤング係数, d)~h): 表7.2参照, 1) R: 重相関係数, 2) Se: 標準誤差, 表の最下行は参考としてMOEだけを説明変数とした回帰分析結果を示した。

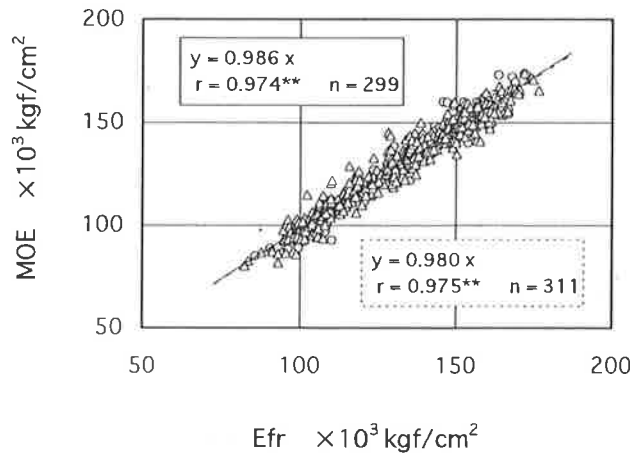


図 7.5 通しラミナ、縦継ぎラミナの縦振動ヤング係数 (Efr) と曲げヤング係数 (MOE) との関係

○: 通しラミナ、△: 縦継ぎラミナ、r; **: 図 7.3 参照、実線: 通しラミナの回帰直線、破線: 縦継ぎラミナの回帰直線、y: MOE、x: Efr

7.3.5 等級区分されたラミナの強度性能

ラミナの等級と強度性能との関係は通しラミナについてだけ検討した。

ラミナの目視等級区分は表 7.6 に示すように規格⁽¹⁵⁵⁾に準拠してK_{GL}、K_{EL}、ARW によって行ったが、そのためのK_{GL}およびK_{EL}は表の脚注に示したように曲げ試験用のラミナはスパン間において評価し、引張り試験用のそれは全長で評価した。以下、ラミナの目視等級は等級の高いほうからG1、G2、G3、G4、G5と表す。なお、G5は規格では枠外等級である。ラミナの機械等級区分は規格⁽¹⁵⁵⁾に従い表に示すようにMOEによって行った。

規格では目視等級の1～3等および機械等級のすべてに強度値の平均値(以下平均値基準と記

表 7.7 構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾に準拠したラミナの目視等級区分、機械等級区分の基準

目視等級	目視等級区分			機械等級区分	
	K _{GL} ^{a)} %	K _{EL} ^{b)} %	ARW ^{c)} mm	機械等級	MOE ^{d)}
G 1	K _{GL} ≤ 20	K _{EL} ≤ 17	≤ 6	L 160	160 ≤ MOE
G 2	20 < K _{GL} ≤ 30	17 < K _{EL} ≤ 25	≤ 6	L 140	140 ≤ MOE < 160
G 3	30 < K _{GL} ≤ 40	25 < K _{EL} ≤ 33	-	L 125	125 ≤ MOE < 140
G 4	40 < K _{GL} ≤ 50	33 < K _{EL} ≤ 50	-	L 110	110 ≤ MOE < 125
G 5	50 < K _{GL}	50 < K _{EL}	-	L 100	100 ≤ MOE < 110
-	-	-	-	L 90	90 ≤ MOE < 100
-	-	-	-	L 80	80 ≤ MOE < 90

a) K_{GL}: 曲げ試験用はスパン間、引張り試験用は全長で測定した集中節径比, b) K_{EL}: K_{GL}と同じ区間で測定した材縁の節径比, c) ARW: 年輪幅, d) MOE: 材料試験機で測定した曲げヤング係数

表 7.8 構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁸⁵⁾が要求している目視等級区分ラミナのMOE、MOR、およびTSの基準強度

目視等級 ^{a)}	MOE ^{b)} × 10 ³ kgf/cm ²		MOR ^{c)} kgf/cm ²		TS ^{d)} kgf/cm ²	
	平均値	5%下限値	平均値	5%下限値	平均値	5%下限値
G 1	125	105	485	365	285	215
G 2	110	95	450	340	265	200
G 3	100	85	420	315	245	185

^{a)} 目視等級：表7.7参照, ^{b)} MOE：曲げヤング係数, ^{c)} MOR：曲げ強さ, ^{d)} TS：引張り強さ, 規格⁽¹⁸⁵⁾ではカラマツは樹種群Cに含まれ, その部分の抜粋である。

表 7.9 構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁸⁵⁾が要求している機械等級区分ラミナのMOR、およびTSの基準強度

機械等級 ^{a)}	MOR ^{b)} kgf/cm ²		TS ^{c)} kgf/cm ²	
	平均値	5%下限値	平均値	5%下限値
L 160	630	475	375	280
L 140	540	405	320	240
L 125	485	365	285	215
L 110	450	340	265	200
L 100	420	315	245	185
L 90	390	295	235	175
L 80	360	270	215	160

^{a)} 機械等級：表7.7参照, ^{b)} MOR ; ^{c)} TS：表7.8参照

す。)と5%下限値(以下5%下限値基準と記す。)を定めており、それらを表7.8、表7.9に示した。目視等級とラミナのMOE、MOR、およびTSとの関係、機械等級とMORおよびTSとの関係はそれらの基準との比較で検討した。ただし、5%下限値についてはラミナの等級間で試験体数が異なり、かつ等級内の試験体数が少ない場合が多かったので、5%下限値は求めず、5%下限値基準より低い強度値のラミナの出現比率で検討した。

7.3.5.1 目視等級区分されたラミナの強度性能

通しラミナのMOE、MORおよびTSの平均値と標準偏差の範囲を目視等級との対応で、図7.6に示した。なお、MOEについては曲げと引張り用通しラミナをあわせて検討した。また、平均値基準と5%下限値基準を図中に示した。目視等級区分されたラミナのMOE、MOR、TSの平均値は、図に示すように三者ともすべての等級で要求されている平均値基準を十分に満たし、MOR、TSは高位等級ほど基準との差が大きい傾向が認められた。つぎに、5%下限値基準未達のMOE、MOR、TSのラミナの出現比率を図7.7に示した。出現比率は全体で、MOE、MOR、TSでそれぞれ、7.6%、1.5%、10.7%であり、MORは5%下限値基準を満たすが、MOEとTSは

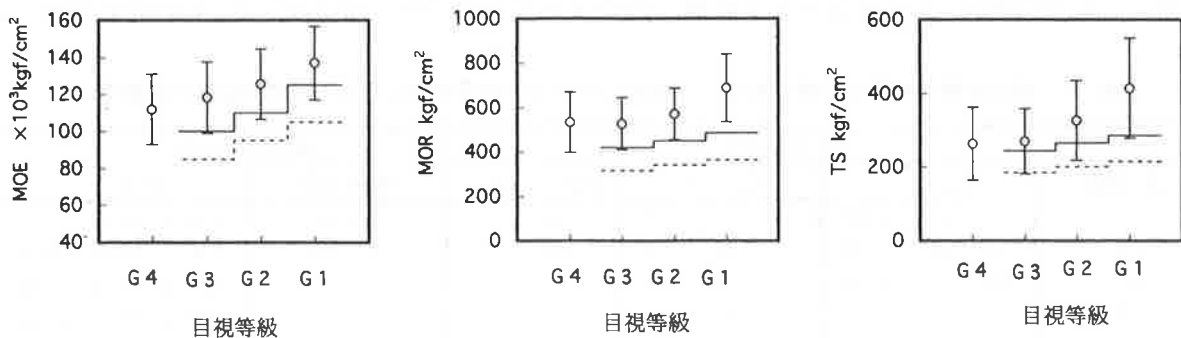


図 7.6 目視等級区分された通しラミナの曲げヤング係数 (MOE)、曲げ強さ (MOR)、および引張り強さ (TS) の平均値と標準偏差

G1~G4：表7.7参照、実線：構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁸⁵⁾が要求している平均値、破線：構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁸⁵⁾が要求している5%下限値、図中の範囲は土標準偏差を示す。

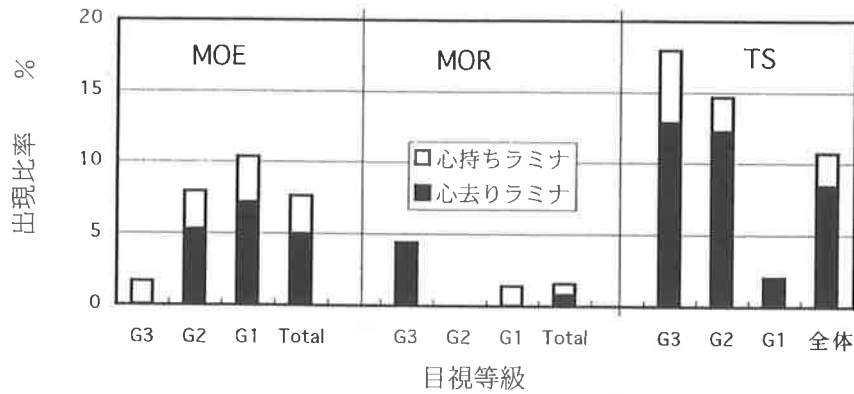


図7.7 曲げヤング係数 (MOE)、曲げ強さ (MOR)、および引張り強さ (TS) が構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾が要求している5%下限値基準未滿の通しラミナの出現比率
G1~G3: 表7.7参照

それを満たすことが困難なことが示された。また、試みとして心持ちラミナを除くと、図に示すように5%下限値基準未滿のラミナの出現比率はMOE、MOR、TSでそれぞれ4.9%、0.8%、8.9%と減少するが、この場合でもTSにおける出現比率は5%以上であった。

7.3.5.2 機械等級区分されたラミナの強度性能

機械等級に対応させて通しラミナのMOR、TSの平均値と標準偏差の範囲、および平均値基準と5%下限値基準を図7.8に示した。なお、L80については試験体数が少なかったので除外した。MORの平均値はすべての機械等級で、平均値基準以上であり、上位等級ほどその差が大きくなる傾向にある。TSの平均値も下位等級では平均値基準とほぼ等しいが、L110以上では基準より大きく、さらに上位等級ほどそれとの差が大きくなる傾向が認められた。

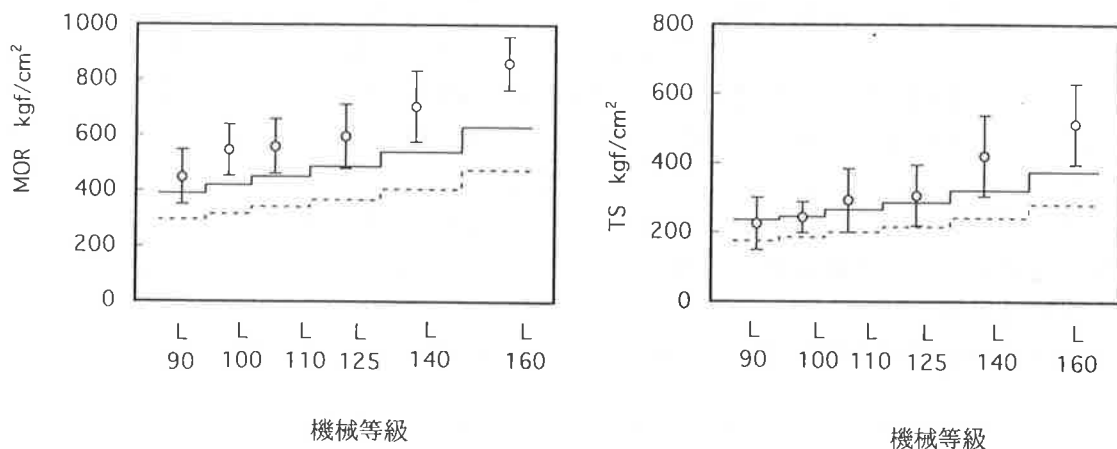


図7.8 機械等級区分した通しラミナの曲げ強さ (MOR) および引張り強さ (TS) の平均値と標準偏差
実線: 構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾が要求している平均値、破線: 構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾が要求している5%下限値、L90~L160: 表7.7参照、図中の範囲は±標準偏差を示す。

つぎに、TSが5%下限値基準未滿のラミナの出現比率を図7.9に示した。なお、基準値未滿であったラミナの目視等級のG1、G2を上位ラミナ、G3、G4、G5を下位ラミナと区分して図中に示した。図に示すようにTSが5%下限値基準未滿だったラミナの出現比率は全体で13.3%もあり、機械等級区分だけでは5%下限値基準を満たすのは困難と考えられた。したがって、TSの5%下限値がその基準を満たすためには、機械等級区分に目視等級区分を併用する必要があると考えられる。図に試みとして示した目視等級G1、G2の上位等級に限ればTSが5%下限値

基準未満のラミナの出現比率は全体で4.7%であった。なお、MORについては5%下限値基準より低いラミナの出現比率は全体で1.3%であったので図には示さなかった。

以上の結果、ラミナの機械等級区分だけでMORは規格⁽¹⁵⁵⁾の基準を満たすが、TSは5%下限値基準を満たすことは困難なことが示された。

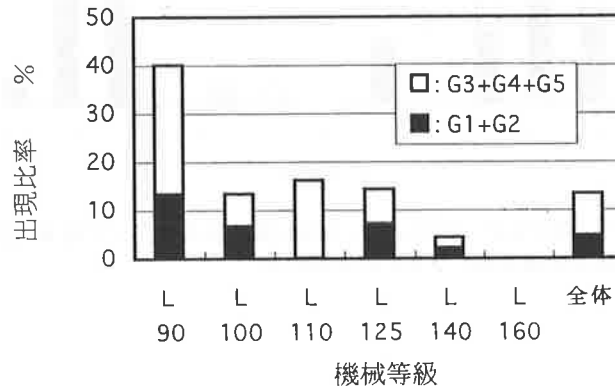


図 7.9 引張り強さ (TS) が構造用集成材の日本農林規格が要求している 5%下限値基準未満の通しラミナの出現比率
L 90~L 160 ; G1~G5 : 表 7.7 参照

7.3.5.3 ラミナの等級と曲げ強さおよび引張り強さの変動係数との関係

ラミナの等級区分の結果のひとつとして強度性能の等級内での変動係数が減少することが考えられる。そこで、通しラミナの等級内のMORおよびTSの変動係数に検討を加えた。なお、7.1で述べたように規格⁽¹⁵⁵⁾が要求している平均値基準と5%下限値基準との関係はMOR、TSの変動係数が等級内でそれぞれ15%のときあてはまる。

通しラミナの目視等級、機械等級に対応させてMORおよびTSの変動係数を図 7.10 に示した。L 110を例外とすれば、両区分とも上位等級ほどMOR、TSの変動係数がわずかに小さくなる傾向が認められた。等級区分された通しラミナのMORの変動係数の平均値は目視等級区分で22.6%、機械等級区分で17.6%であった。同様にTSのそれは目視等級区分で34.1%、機械等級区分で28.6%であった。このように変動係数は規格⁽¹⁵⁵⁾で想定している15%よりも大きく、とくにTSのそれがはるかに大きかった。したがって、7.3.5.1、7.3.5.2で等級区分されたラミナのTSが5%下限値基準を満たすのが困難であった理由のひとつとして等級内のTSの変動係数が極めて大きいことがあげられる。

通しラミナ全体の変動係数は表 7.4 に示したようにMORで25.6%、TSで39.1%であった。等

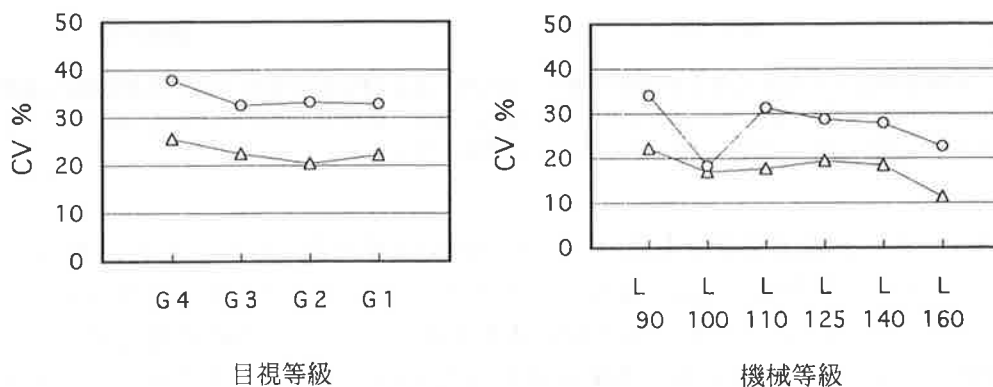


図 7.10 目視等級区分、機械等級区分した通しラミナの曲げ強さ (MOR)、引張り強さ (TS) の変動係数 (CV)
○ : 引張り強さ、△ : 曲げ強さ、G1~G4 ; L 90~L 160 : 表 7.7 参照

級区分されたラミナの変動係数の平均値と全体の変動係数の比率は、MORについては目視等級区分で0.88、機械等級区分で0.78であり、TSについては目視等級区分で0.87、機械等級区分で0.73であった。したがって、ラミナの等級区分によってMOR、TSの変動係数が小さくなる比率は全体の変動係数に対して目視等級区分では12%程度、機械等級区分でも25%程度であった。

7.3.5.4 等級区分されたラミナの曲げ強さに対する引張り強さの比

TS/MORは表7.4に示したように平均値評価で、通しラミナ、縦継ぎラミナそれぞれ0.54、0.64であった。通しラミナのTS/MORは規格⁽¹⁵⁵⁾で求めている0.6より小さかった。カラマツ正角実大材の試験結果⁽¹⁵²⁾においてもスギよりもその比率が小さいことが指摘されているが、通しラミナについて報告されている低質ベイマツラミナの0.5程度⁽²⁶⁹⁾よりは大きかった。一方、縦継ぎラミナのTS/MORは製造工程が影響するので一概に比較ができないが、報告されている値^(230,244,269,308)と同程度かそれ以上であった。

通しラミナおよび縦継ぎラミナのTS/MORを目視および機械等級に対応させて図7.11に示した。両ラミナとも等級が高いほどTS/MORが大きくなる傾向が認められた。なお、図中に図7.3、図7.4に示した回帰直線を使い $TS/MOR = (MOEに対するTSの回帰式) / (同様にMORの回帰式)$ で計算した曲線を示した。この曲線がTS/MORの機械等級依存性を示すのは当然の結果であるが、単独に行われたラミナの曲げ試験、引張り試験の結果であってもMOEとMORの回帰式およびMOEとTSの回帰式を使ってTS/MORの機械等級依存性を明らかにできることが示された。

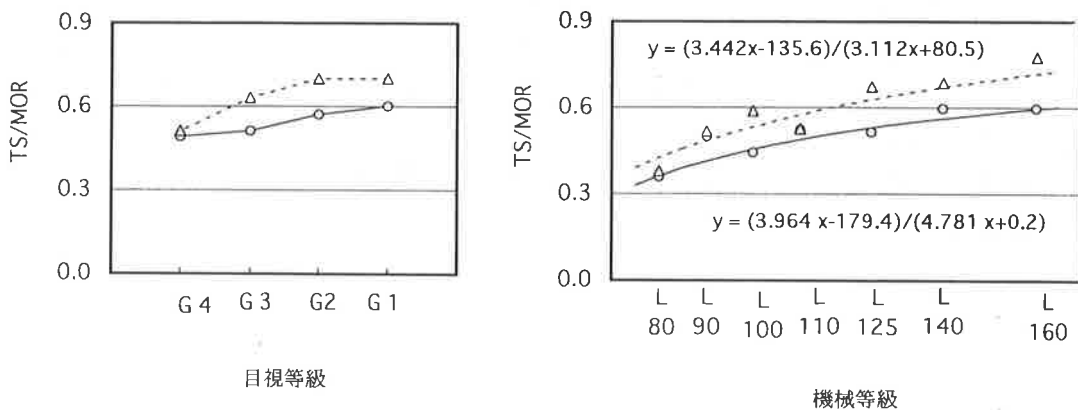


図7.11 TS/MORの等級依存性

○：通しラミナ、△：縦継ぎラミナ、目視等級の図中の実線は通しラミナのTS/MORを結んだ線、破線は同様に縦継ぎラミナのTS/MORを結んだ線、機械等級の図中の曲線は $TS/MOR = (MOEに対するTSの回帰式) / (MOEに対するMORの回帰式)$ で計算した曲線を示し、実線は通しラミナ、破線は縦継ぎラミナである。回帰式については図7.3および図7.4参照、y：TS/MOR、x：MOE

7.4 おわりに

通しラミナおよび同一工程で製造した縦継ぎラミナの曲げ試験および引張り試験の結果から、縦継ぎラミナの強度特性を通しラミナとの比較で検討した。つぎに、等級区分したラミナのTSおよびMORと規格⁽¹⁵⁵⁾における基準値との関係を検討し、ラミナの等級とTSおよびMORの変動係数との関係、および等級とTS/MORとの関係を明らかにした。

縦継ぎラミナの性能は製造工程が影響するので一概に結論づけることはできないが、縦継ぎラミナと通しラミナの強度性能をMORで比較した場合と、TSで比較した場合とでは異なることが明らかとなった。すなわち、接合部が関係したと認められた破壊の出現比率は引張り試験よりも曲げ試験で大きく、MORの平均値で計算した接合効率は77.2%であり、TSで計算したそれは91.7%と約15%の相違が認められた。平均値の差の検定の結果、通しラミナと縦継ぎラミナでは

MORにおいて1%水準で有意差が認められ、TSでは有意差は認められなかった。また、MOEとTSとの関係を示す回帰直線は、通しラミナと縦継ぎラミナでは位置および傾きの差異は比較的少なかったが、MOEとMORとの関係を示す回帰直線は両ラミナで差異が認められた。

通しラミナにおいてMOEとMORとの関係は $r=0.687^{**}$ 、MOEとTSとの関係は $r=0.678^{**}$ で示され、単独の強度推定因子としてはMOEが有効であることが示された。また、MOR、TSを目的変数とした重回帰分析の結果、説明変数としてMOEにARW、DP、 ρ の3変数を加えても推定精度はそれほど上がらないが、MOEに K_G 、 K_E を加えると、MOR、TSの推定精度が向上することが示された。

通しラミナの構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾に準拠した目視等級区分、機械等級区分の結果では、MORは規格の要求する平均値基準、5%下限値基準をほぼ満足するが、TSについては平均値では基準を満たすものの5%下限値では基準を満たすのは困難であり、TSの5%下限値が基準を満たすためには、機械等級区分に目視等級区分を併用する必要性が認められた。

通しラミナの等級内のMORの変動係数の平均値は目視等級区分、機械等級区分で22.6%、17.6%、同様にTSのそれは目視等級区分、機械等級区分で34.1%、28.6%と、とくにTSにおいて大きく、このことがTSが5%下限値基準を満たせない一因と考えられた。ラミナを等級区分することによってMOR、TSの変動係数が減少する比率は、全体の変動係数に対して目視等級区分で12%程度、機械等級区分で25%程度であった。

通しラミナのTS/MORは平均で0.54であり、規格⁽¹⁵⁵⁾で前提としている0.6よりも小さく、これもTSが5%下限値基準を満たせない一因と考えられた。目視等級区分あるいは機械等級区分がなされたラミナは上位等級ほどTS/MORが大きい傾向が認められた。また、単独に行われた試験であっても、MOEとMORとの関係を示す回帰式とMOEとTSとの関係を示す回帰式からTS/MORの機械等級依存性が明らかにできることが示された。

なお、本研究で認められたTS/MORの等級依存性が樹種特性であるのかどうかは今後の検討に待たなければならない。

第8章 機械等級区分ラミナで構成した同一等級構成集成材の 曲げ強度特性^(309,310)

8.1 はじめに

本論文では、現状のカラマツ林から得られるラミナの曲げヤング係数の分布を第6章において明らかにし、製造可能な集成材の強度等級を推定した。また、第7章においてラミナの曲げおよび引張り強度特性を明らかにした。

近年、我が国の建築物の構造設計法を、許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行させようとする動きがある⁽³¹¹⁾。そのためには材料強度の評価が必須であり、新しく開発された材料や集成材も含めて木材および木質材料の強度データの充実が求められている⁽³¹¹⁾。特に重木構造の材料である集成材については高い信頼性が要求されるため、より厳密な強度分布の情報が必要とされている⁽²⁷⁵⁾。

こうした背景から、国産材を用いた構造用集成材の強度性能に関する研究が進められており^(245,312,313)、ラミナの性能と関連した強度データの蓄積が進んでいる。また、ラミナの性能から集成材の強度性能を確率モデルを用いたシミュレーションによって予測する研究が、小松⁽²⁷⁸⁾、平島ら⁽²⁷⁹⁾、林⁽²⁷⁶⁾、三橋ら⁽²⁸⁰⁾によって行われている。このようにラミナの性能と構造用集成材の強度性能とを関係づける研究は多いが、集成加工材料の特性である積層数が増えれば曲げ強さ（以下MORと記す。）の変動係数が減少するいわゆる積層数効果、および試験体の寸法が大きくなればMORが減少するいわゆる寸法効果を、構造用集成材の分野で実証的に明らかにした研究は少ない。また、我が国における研究の対象はそのほとんどが水平積層集成材であり、垂直積層集成材を対象としたものは少ない。

本章では、まず、連続送り式グレーディングマシンの測定値（以下MGEと記す。）の平均値（以下MGE_{AVG}と記す。）、最小値（以下MGE_{MIN}と記す。）、および最大値（以下MGE_{MAX}と記す。）の関係を個々のデータから解析した。つぎに、MGE_{MIN}によって等級区分した同一等級ラミナで製造した水平積層集成材（以下H試験体と記す。）および垂直積層集成材（以下V試験体と記す。）について、構成するラミナの等級と集成材の曲げ強さ（以下MORと記す。）との関係を検証した。ついで、HおよびV試験体それぞれにおける積層効果を検討し、ラミナの等級区分法について考察した。さらに、梁背とMORとの関係を検討し、H試験体において寸法効果を明らかにした。最後に、縦振動法およびたわみ振動法で測定した集成材の動的ヤング係数と曲げ試験の結果得られた静的曲げヤング係数（以下曲げ試験の結果得られた曲げヤング係数をMOEと記す。）との関係を検討し、製品検査の手段としてこれらの方法が有効か否かを検討した。

なお、一般に製造される集成材は対称異等級構成集成材であるが、本研究ではラミナの積層配置を試験結果の解析で考慮する必要がない同一等級構成集成材とした。また、等級区分をMGE_{MIN}で行った理由は、6.3.3において述べたように、ラミナの曲げヤング係数が長さ方向で大きく変動しており、MGE_{AVG}によって等級区分したラミナで生産した集成材ではその強度性能が過大に評価される危険があると考えたためである。

8.2 実験

8.2.1 ラミナの等級区分と試験体の作成

8.2.1.1 ラミナの等級区分

厚さ3.0 cm、幅17.5cm、および長さが400cmのラミナ6400枚を、厚さ2.8cmにプレーナ掛けし、連続送り式グレーディングマシン（以下装置と記す。）によって等級区分を行った。この装置で

は、各ラミナの両端80cmを除いた全区間を5.6cmに分割して長さ4mのラミナであれば42点のMGEが測定され、通常、自動的に計算されたMGE_{AVG}によって等級区分される。しかし、本研究でのラミナの等級区分は、8.1で述べた理由からMGE_{MIN}によった。等級区分終了後、装置に記憶されているデータのうち、MGE_{MIN}、MGE_{AVG}、およびMGE_{MAX}を取り出し、それらの関係を検討した。

MGE_{MIN}により等級区分したラミナの等級をLとして、以下に示す4区分を同一等級構成集成材の製造に用い、L60、L70を下位等級のラミナ、L100、L110を上位等級のラミナとした。

$$L60 : 60 \leq MGE_{MIN} < 70 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$$

$$L70 : 70 \leq MGE_{MIN} < 80 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$$

$$L100 : 100 \leq MGE_{MIN} < 110 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$$

$$L110 : 110 \leq MGE_{MIN} < 120 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$$

各等級ごとに300枚のラミナを予定したが、L60は予定枚数に達しなかった。なお、試験に用いたラミナは、工場において構造用集成材の原料として準備されていたものの一部で、人工造林木から製材し、仕上がり含水率10%以下という工場の受け入れ基準で人工乾燥された後、数ヶ月間倉庫内で養生されていたものである。

8.2.1.2 ラミナの接合

すべての同一等級構成集成材製造用ラミナは、長さ方向の中央から40cm離れた位置で切断し、それを復元する形で接合して縦継ぎラミナとした。フィンガー形状は垂直型フィンガーで、長さ23.0mm、ピッチ6mm、底部幅0.8mm、およびスカーフ傾斜比1/8.1である。接着剤はレゾルシノール樹脂を用い、圧縮圧は50kgf/cm²で接合した。

8.2.1.3 試験体の種類と接合部の配置

製造したH試験体はラミナの4区分に対して、図8.1に示すように1層、2層、3層、5層、8層、および12層の6水準を設定したので24種類であり、V試験体は1層、2層、3層、5層、および8層の5水準を設定したので20種類である。試験体の種類ごとに各5体の試験体を予定したが、L60が予定枚数に達しなかったため、8H60および12H60は各3体とした。なお、記号8H60はL60のラミナで構成した積層数8のH試験体であることを示す。試験体数はH試験体とV試験体について、それぞれ116および100である。

試験体の寸法および曲げ試験におけるスパンを表8.1に示した。強度試験のスパンの関係から、8H試験体および12H試験体は長さをそれぞれ450cmおよび650cmとしたが、そのほかは1H試験体および1V試験体も含め、両端を横切りして長さ360cmとした。

V試験体の3層以上、およびH試験体の3、5層は、図8.2に示したようにラミナの接合位置が互い違いになるように配置した。H試験体の8層および12層についても縦継ぎラミナを用いて作製したが、最外層の中心近傍には必ず接合部を配置した。

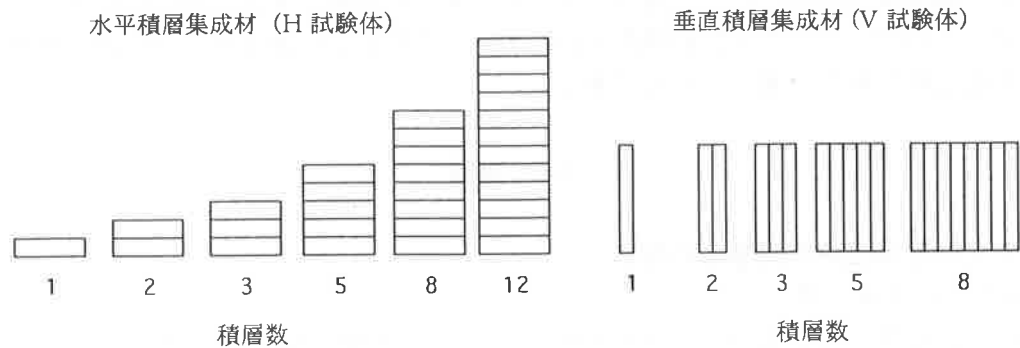


図8.1 同一等級構成集成材の種類

表 8.1 試験体の寸法および曲げ試験におけるスパン

	積層数	幅 cm	梁背 cm	長さ cm	曲げ試験のスパン cm
水平積層集成材 (H 試験体)	1	15.0	2.4	360	50.4
	2	15.0	4.8	360	100.8
	3	15.0	7.2	360	151.2
	5	15.0	12.0	360	252.0
	8	15.0	19.2	450	403.2
	12	15.0	28.8	650	604.8
垂直積層集成材 (V 試験体)	1	2.4	15.0	360	315.0
	2	4.8	15.0	360	315.0
	3	7.2	15.0	360	315.0
	5	12.0	15.0	360	315.0
	8	19.2	15.0	360	315.0

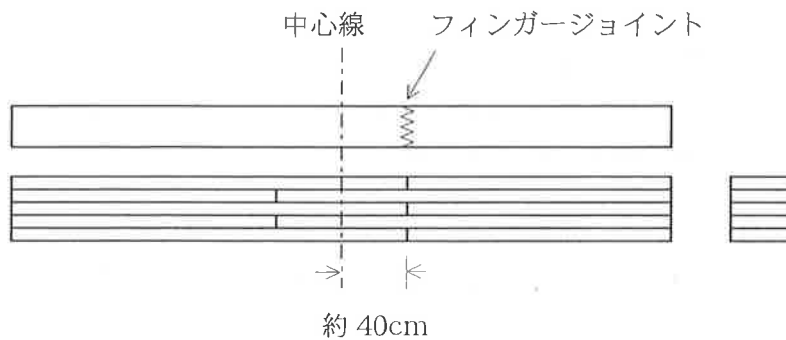


図 8.2 集成材におけるラミナの接合部の位置
5 層集成材の例を示した。

8.2.2 振動試験

振動試験は、プラスチック製ハンマーで試験体を打撃し、この打撃音をFFTスペクトルアナライザで周波数解析し、縦振動およびたわみ振動それぞれの1次モードの共振周波数を測定した。縦振動法による動的ヤング係数（以下縦振動ヤング係数あるいはEfrと記す。）の求めかたについては2.2.3に示した。

たわみ振動法による動的ヤング係数（以下たわみ振動ヤング係数と記す。）の測定は図8.3に示すとおり、試験体両端からの距離が両端自由支持条件⁽³¹⁴⁾における1次振動モードの節点となる試験体長さの0.224倍の2箇所で支持して行い、次式に示す長方形断面棒の振動方程式⁽³¹⁵⁾から計算した。以下では、たわみ振動ヤング係数で積層面が水平のものをEfrh、垂直のものをEfrvとした。

$$E_{frh}, E_{frv} = \frac{4\pi^2 \ell^2 \rho f^2}{m^4 i^2} \quad [\times 10^3 \text{kgf/cm}^2] \quad (8.1)$$

$$m^4 = 500.6, \quad i^2 = h^2 / 12$$

ここで、Efrh：H試験体のたわみ振動ヤング係数、Efrv：V試験体のたわみ振動ヤング係数、f：共振周波数 [Hz]、ℓ：試験体長さ [cm]、ρ：密度 [g/cm³]、h：梁背 [cm] である。

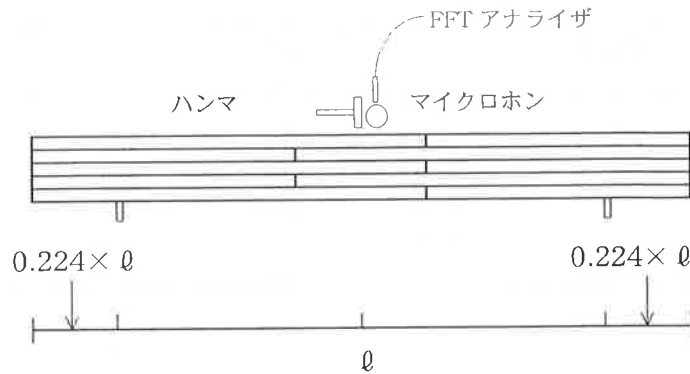


図 8.3 たわみ振動ヤング係数の測定

8.2.3 曲げ試験

曲げ試験は、ミネベア製材料試験機TCM-30000を用い、3等分点4点荷重で行った。スパンを表 8.1 に示したが、これはすべての試験体に対してスパン梁背比（以下 L/h と記す。）が21倍の条件である。曲げ試験における荷重負荷はクロスヘッド速さ5 mm/minとして行い、試験終了後、破壊荷重からMORを計算し、スパンに対する中央のたわみからMOEを計算した。MOEを計算するための荷重区間は、荷重とたわみの関係がほぼ完全な直線と判断される区間とした。その結果、荷重区間の上限の辺縁応力⁽³⁰⁰⁾は、1H試験体、2H試験体および3~12H試験体の平均でMORに対して、それぞれ41.5%、53.1%、および61.7%、V試験体では積層数による違いは少なく平均で62.0%であった。

また、1H試験体、すなわち、ラミナ単体では、曲げ試験のスパンが50.4cmと短いので、接合位置を中心に約80cmに切断し、縦継ぎラミナ1体と約180cmと100cmの通しラミナ2体に分割し、約180cmのラミナをさらに2分割することによって通しラミナを3体を得て、それについても曲げ試験を行った。

縦継ぎを有するすべてのH試験体は、曲げ試験におけるロードスパン内の引張り側の面に接合部を配置して曲げ試験を行い、通しラミナについては欠点によって位置をずらす等の配慮はしなかった。V試験体についてはスパン条件はすべて同一であり、1V試験体および2V試験体の接合部、および3層以上の互い違いの2箇所の接合部は両方ともロードスパン内に配置した。

8.3 結果と考察

8.3.1 ラミナの強度特性

8.3.1.1 連続測定した曲げヤング係数の、平均値、最小値および最大値の関係

装置で測定したラミナ6400枚の個々の MGE_{AVG} 、 MGE_{MIN} 、 MGE_{MAX} の平均値、標準偏差、および変動係数を表 8.2 に示した。表に示すように MGE_{AVG} の平均値、変動係数は $107.3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、20.7%であり、 MGE_{MIN} のそれらは $97.9 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、22.0%、 MGE_{MAX} のそれらは $115.8 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、19.8%であった。これらの値は6.3.3で述べた65653枚のラミナの度数分布表から集計した結果とほぼ同じであった。

ラミナ6400枚の MGE_{AVG} と MGE_{MIN} との関係、および MGE_{AVG} と MGE_{MAX} との関係を図 8.4 に示した。図に示すように、これらの関係は高い相関関係にあるが、 MGE_{MIN} および MGE_{MAX} と MGE_{AVG} との間にかなりの差が認められる。そこで、 MGE_{AVG} と MGE_{MIN} 、 MGE_{MAX} と MGE_{MIN} の差および比率（以下 MGE_{MIN}/MGE_{AVG} と記す。）を表 8.3 に示した。 MGE_{MAX} と MGE_{MIN} の差の平均値、変動係数は $17.9 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、39.3%とラミナの長さ方向でMGEが大きく変動している

ことを示していた。つぎに、機械等級区分の指標である MGE_{AVG} と MGE_{MIN} の差、変動係数は $9.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、46.9% とその差は平均値でも本研究における機械等級区分の区間幅 $10 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ と同程度であった。

なお、ラミナ6400枚の MGE_{MIN} の分布を図8.5に示した。本研究で集成材製造に用いたラミナはL60とL70についてはカラマツラミナとしては低質あり、L100とL110は中位から上位にかけてのラミナと判断できる。なお、図8.5に示したL60とL70を合わせた部分に含まれていたラミナの MGE_{MIN} 、 MGE_{AVG} の平均値は順に $73.2 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $82.3 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、同様にL100とL110を合わせた部分に含まれていたラミナのそれらはそれぞれ $108.8 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $118.3 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であった。

表 8.2 ラミナ6400枚の MGE_{AVG} 、 MGE_{MIN} 、 MGE_{MAX} の平均値、標準偏差、変動係数

	$MGE_{AVG}^a)$ $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	$MGE_{MIN}^b)$ $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	$MGE_{MAX}^c)$ $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$
平均値	107.3	97.9	115.8
標準偏差	22.2	21.5	22.9
変動係数 %	20.7	22.0	19.8

^{a)} MGE_{AVG} : 連続送り式グレーディングマシンで長さ方向に連続測定したラミナの曲げヤング係数 (MGE) の平均値, ^{b)} MGE_{MIN} : MGE の最小値, ^{c)} MGE_{MAX} : MGE の最大値

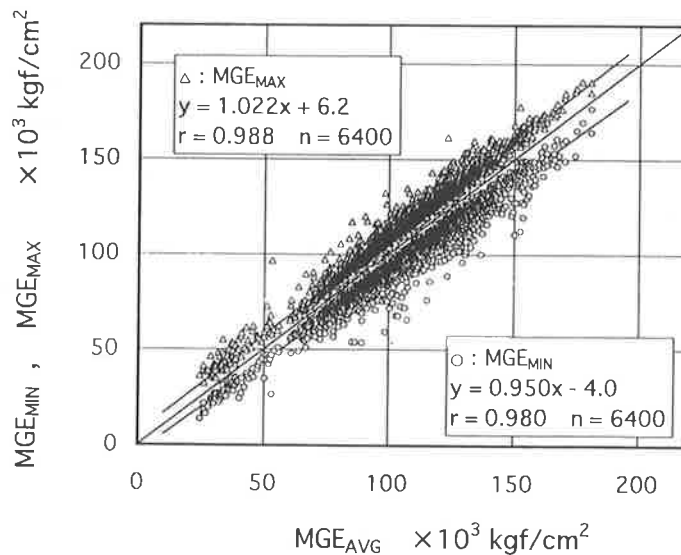


図 8.4 MGE_{AVG} と MGE_{MIN} および MGE_{MAX} との関係

r : 相関係数、 MGE_{AVG} ; MGE_{MIN} ; MGE_{MAX} : 表 8.2 参照、y : MGE_{MIN} ; MGE_{MAX} 、x : MGE_{AVG}

表 8.3 MGE_{AVG} と MGE_{MIN} 、 MGE_{MAX} と MGE_{MIN} の差および比率の集計

	$MGE_{AVG}^a) - MGE_{MIN}^b)$ $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	$MGE_{MAX}^c) - MGE_{MIN}$ $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$	MGE_{MIN}/MGE_{AVG}	MGE_{MAX}/MGE_{MIN}
平均値	9.4	17.9	0.910	1.195
標準偏差	4.4	7.0	0.044	0.113
変動係数 %	46.9	39.3	4.8	9.4

^{a)~c)} : 表 8.2 参照, 試験体数は 6400 である。

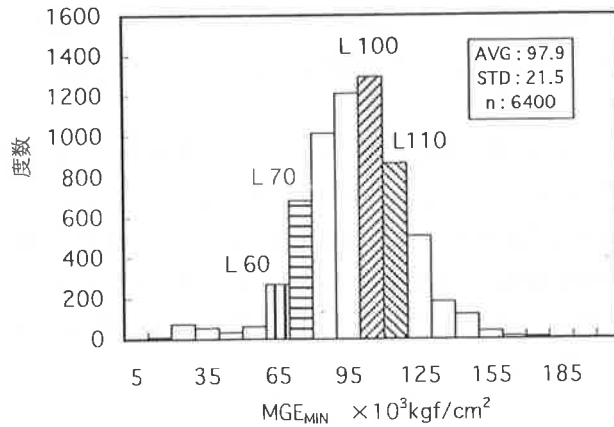


図 8.5 ラミナ6400枚のMGE_{MIN}の分布
MGE_{MIN} : 表 8.2 参照、AVG : 平均値、STD : 標準偏差

8.3.1.2 ラミナの機械等級区分

ラミナの等級区分をMGE_{AVG}で行った場合をMGE_{AVG}等級とし、MGE_{MIN}で行った場合をMGE_{MIN}等級として、各等級に含まれる個々のラミナのMGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差、およびMGE_{MIN}/MGE_{AVG}を、それぞれの等級に含まれるラミナの枚数が50以上のものについて、表 8.4 および表 8.5 に示した。

MGE_{AVG}で等級区分した場合、表 8.4 に示すように、MGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差の平均値は等級が上がるほど大きくなり、L 120以上では $10 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ を超え、標準偏差も大きくなる傾向が認められた。このことは、MGE_{AVG}等級の高いラミナほどMGE_{AVG}とMGE_{MIN}との差が大きくなることを示している。また、MGE_{MIN}/MGE_{AVG}をみると、高い等級ほど比率がわずかに上昇する傾向が認められるが、標準偏差および変動係数に傾向は認められなかった。

一方、MGE_{MIN}で等級区分した場合は、表 8.5 に示すように、MGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差の平均値はL 50とL 140で $10 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ を超えていたが、ラミナのほとんどを占めるL 60～L 130では平均値で $9.1 \sim 9.5 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ とほぼ等しかった。標準偏差もL 70以下では下位等級ほど大きくなるが、その他は $4.0 \sim 4.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ とほぼ等しかった。また、MGE_{MIN}/MGE_{AVG}については、MGE_{MIN}で等級区分した場合は、その比率が等級が上がるほど漸増し、標準偏差および変動係数が減少する傾向が認められた。

以上の結果、MGE_{AVG}等級とMGE_{MIN}等級では等級内に含まれるラミナのMGE_{AVG}とMGE_{MIN}との関係が異なることが明らかとなった。すなわち、MGE_{AVG}等級では等級の高いラミナほどMGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差が大きくなるのに対して、MGE_{MIN}等級では等級依存性は少なく、その差はほぼ一定である。その結果、MGE_{MIN}/MGE_{AVG}はMGE_{AVG}等級では等級依存性が少なく、MGE_{MIN}等級では等級の高いラミナほどそれが大きくなる。

MGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差が全体として大きいことから、ラミナ内の最小強度をMGE_{AVG}で推定することが困難であることを6.3.3で述べたが、等級区分したラミナであってもラミナの最小強度をMGE_{AVG}で推定することは困難である。

表 8.4 MGE_{AVG}で等級区分したラミナのMGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差および比率

MGE _{AVG} 等級 ^{a)}	試験体数	MGE _{AVG} ^{b)} - MGE _{MIN} ^{c)}			MGE _{MIN} /MGE _{AVG}		
		平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
		×10 ³ kgf/cm ²	×10 ³ kgf/cm ²	%			%
L 60	69	7.0	2.9	42	0.895	0.044	4.9
L 70	314	7.6	3.3	43	0.900	0.043	4.8
L 80	717	8.3	3.7	45	0.903	0.043	4.8
L 90	1015	8.6	3.7	44	0.910	0.039	4.3
L 100	1197	9.2	4.2	45	0.912	0.040	4.4
L 110	1205	9.5	4.1	44	0.917	0.036	3.9
L 120	888	10.2	4.6	46	0.918	0.037	4.0
L 130	466	11.4	5.3	46	0.915	0.040	4.3
L 140	193	10.9	5.2	48	0.924	0.036	3.9
L 150	113	12.2	6.7	55	0.921	0.044	4.8
L 160	50	12.9	4.9	38	0.921	0.030	3.3
全体	6227	9.4	4.4	47	0.913	0.040	4.3

^{a)} MGE_{AVG}等級: L 60 ~ L 160: 60 ≤ MGE_{AVG} < 70 × 10³ kgf/cm² ~ L 160: 160 ≤ MGE_{AVG} < 170 × 10³ kgf/cm², ^{b)} MGE_{MIN}; ^{c)} MGE_{MAX}: 表 8.2 参照

表 8.5 MGE_{MIN}で等級区分したラミナのMGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差および比率

MGE _{MIN} 等級 ^{a)}	試験体数	MGE _{AVG} ^{b)} - MGE _{MIN} ^{c)}			MGE _{MIN} /MGE _{AVG}		
		平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
		×10 ³ kgf/cm ²	×10 ³ kgf/cm ²	%			%
L 50	57	12.6	8.2	65	0.828	0.087	10.5
L 60	267	9.3	5.0	54	0.880	0.051	5.8
L 70	682	9.1	4.6	51	0.895	0.045	5.1
L 80	1015	9.0	4.0	45	0.906	0.037	4.1
L 90	1210	9.5	4.3	46	0.911	0.036	3.9
L 100	1283	9.5	4.3	46	0.919	0.033	3.6
L 110	877	9.5	4.3	45	0.924	0.030	3.3
L 120	505	9.5	4.4	46	0.930	0.029	3.1
L 130	181	9.2	4.1	44	0.937	0.025	2.7
L 140	115	10.3	4.3	42	0.934	0.026	2.8
全体	6192	9.4	4.4	47	0.912	0.040	4.3

^{a)} MGE_{MIN}等級: L 50 ~ L 140: 50 ≤ MGE_{MIN} < 60 × 10³ kgf/cm² ~ L 140: 140 ≤ MGE_{MIN} < 150 × 10³ kgf/cm², ^{b)} MGE_{MIN}; ^{c)} MGE_{MAX}: 表 8.2 参照

表 8.6 ラミナの曲げ曲げ強さ

	通しラミナ	縦継ぎラミナ
試験体数	60	20
平均値 kgf/cm ²	596	455
標準偏差 kgf/cm ²	149	109
変動係数 %	25.0	24.0

平均値による接合効率は 76.3% である。

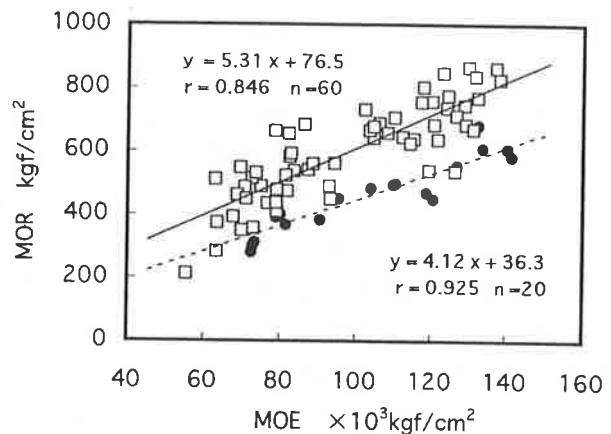


図 8.6 ラミナの曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強さ (MOR) との関係

□: 通しラミナ、●: 縦継ぎラミナ、y: MOR、x: MOE

8.3.1.3 通しラミナと縦継ぎラミナの曲げ強さの比較

通しラミナと縦継ぎラミナの曲げ試験の結果を表 8.6 に示し、MOEとMORとの関係を図 8.6 に示した。7.3.3 で述べた縦継ぎラミナの接合効率は、MORの平均値による計算で77.2%、引張りの平均値による計算で91.6%であった。本研究ではラミナの引張り試験は行っていないが、MORの平均値で計算した縦継ぎラミナの接合効率は76.3%であり、7.3.3 で検討した縦継ぎラミナと接合効率はほぼ同じであると判断した。また、図 8.6 に示すように回帰直線の傾きは縦継ぎラミナの方が小さく、下位等級ほど通しラミナと縦継ぎラミナのMORの差は小さくなる傾向を示しており、これも7.3.3 において得られた傾向と同様であった。

8.3.2 集成材の強度特性

8.3.2.1 破壊に関係したと判断した因子の比率

破壊に関係したと判断した因子としては、H試験体では主としてラミナの接合部が関係したと判断されたものが61%、接合部に加えて節、あるいは目切れのいずれかが関係していたと判断されるものを含めると83%となった。一方、V試験体のそれらは41%および84%であり、引張り面の接合部が分散されるV試験体でも接合位置での破壊例が多かった。これは 図 8.2 に示したように1層おきに接合部が同位置になるように集成材を製造しており、これも接合位置での破壊が多かった原因と考えられる。

8.3.2.2 ラミナの等級と集成材の曲げヤング係数および曲げ強さとの関係

L60のラミナおよびL70のラミナで製造した試験体を下位等級集成材、L100のラミナおよびL110のラミナで製造した試験体を上位等級集成材として、その種類別にMOEおよびMORの平均値、標準偏差、変動係数をそれぞれ表 8.7、表 8.8 に示した。なお、MORについては5%下限値を表 8.8 の脚注に示したようにASTM D 2915⁽¹⁹⁾に示されている方法で計算した。はじめに、ラミナの等級とMOEとの関係について述べ、つぎに、ラミナの等級とMORとの関係について述べる。

集成材のMOEには、ラミナのMGE_{AVG}が関係すると考えられるが、表 8.7 に示すように、H試験体およびV試験体における下位等級と上位等級のMOEの差は明らかである。図 8.5 に示したMGE_{MIN}区分でL60とL70を合わせた部分およびL100とL110を合わせた部分に含まれるラミナのMGE_{AVG}の平均値は $82.3 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ および $118.3 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であった。表 8.7 に示すようにH試験体のMOEの平均値は下位等級、上位等級で順に $80.6 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $115.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であり、構成するラミナのMGE_{AVG}の平均値より少し低かった。装置によるMGEの測定はL/hが約43倍の中央集中荷重で行い、集成材の曲げ試験はL/hを21倍の3等分点荷重で行っている。曲げ試験においてはL/hが小さいほどせん断負荷たわみが大いいためMOEが小さく計算される。したがって、集成材のMOEの平均値がラミナのMGE_{AVG}の平均値より低かったのはこの試験条件の違いも一因と考えられた。

H試験体とV試験体のMOEを比較すると、下位等級、上位等級ともV試験体のMOEが高い傾向にあり、全体の平均値の差は約 $6 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であった。この理由は、4.2.1 で述べた一般的なカラマツ人工造林木からのラミナの木取りから説明できる。すなわち、髄を含む柾目のラミナは、幅方向の中心部分に髄を含むことになり、両端はほぼ成熟材である。また、ラミナの木取り位置が髄から離れた板目のラミナでも、幅方向の中心部分が髄と最も近いことになり、この部分は曲げヤング係数が低いと考えられる。したがって、V試験体は梁背方向では曲げヤング係数が高-低-高の3層構造と考えられ、その結果、V試験体のMOEがH試験体より高かったものと考えられる。なお、ラミナの幅方向の曲げヤング係数の変動は武田ら⁽²⁰⁾によって確認されている。

つぎに、上位等級集成材のMORと下位等級集成材のMORとを比較すると、表 8.8 に示すように上位等級集成材のMORの平均値、5%下限値は、下位等級集成材のそれより高かった。す

なわち、上位等級のH試験体の積層数別のMORの平均値は下位等級集成材の1.32~1.57倍、平均で1.43倍であり、V試験体では同様に1.45~1.65倍、平均で1.53倍であった。この結果はラミナの機械等級区分の有効性を顕著に示していると考えられる。また、平均値での倍率以上に5%下限値での倍率が大きい傾向が認められ、H試験体ではそれほどではないが、V試験体において顕著であった。

本研究における試験体は、すべて曲げ試験におけるロードスパン内の引張り側にラミナの接合部を配置している。このように、ラミナの接合部が関係しやすい荷重負荷方法で、ラミナ等級と集成材のMORとの関係が実証された意義は大きいと考える。

表 8.7 集成材の曲げヤング係数 (MOE) の平均値と変動係数

	積層数	L 60・L 70 ^{a)}			L 100・L 110 ^{b)}		
		試験体数	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	試験 体数	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %
水平積層集成材 (H試験体)	1	10	79.6	7.5	10	123.9	10.2
	2	10	82.9	11.6	10	112.9	9.2
	3	10	82.6	10.4	10	111.1	4.5
	5	10	76.5	6.5	10	114.4	6.8
	8	8	80.3	4.6	10	116.5	4.9
	12	8	81.5	4.6	10	113.7	4.2
	全体	56	80.6	7.5	60	115.4	6.6
垂直積層集成材 (V試験体)	1	10	79.3	5.3	10	120.8	7.9
	2	10	95.9	13.5	10	123.5	4.6
	3	10	89.0	10.3	10	119.8	6.4
	5	10	89.7	10.3	10	124.5	7.2
	8	10	84.1	4.8	10	126.4	5.5
	全体	50	86.4	8.6	50	121.7	6.4

^{a)}L 60・L 70 : L 60, L 70 のラミナで製造した下位等級集成材, ^{b)}L 100・L 110 : L 100, L 110 のラミナで製造した上位等級集成材

表 8.8 集成材の曲げ強さ (MOR) の平均値、変動係数および5%下限値

	積層数	L 60・L 70 ^{a)}				L 100・L 110 ^{b)}			
		試験 体数	平均値 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ^{a)} kgf/cm ²	試験 体数	平均値 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ^{c)} kgf/cm ²
水平積層 集成材 (H試験体)	1	10	366	14.4	255	10	544	13.1	395
	2	10	323	18.4	198	10	425	21.3	235
	3	10	309	21.5	169	10	409	13.8	290
	5	10	283	12.7	208	10	408	12.1	304
	8	8	247	17.5	152	10	354	13.8	247
	12	8	230	12.8	166	10	361	11.5	271
	垂直積層 集成材 (V試験体)	1	10	203	33.8	59	10	317	23.3
2		10	258	19.0	155	10	426	15.3	289
3		10	271	17.9	168	10	391	11.3	298
5		10	294	14.0	207	10	425	6.9	363
8		10	276	7.6	232	10	432	7.8	361

^{a)}L 60・L 70 ; ^{b)}L 100・L 110 : 表 8.7 参照, ^{c)}5%下限値=平均値-K×標準偏差 (K : ASTM D2915¹¹⁹⁾, Table 3 の75%confidence, 5%tolerance のときの係数)

8.3.2.3 積層数と曲げ強さの変動係数との関係

一般的に集成材を含む積層材の大きな特徴のひとつとして、欠点の分散により特性値のばらつきが減少する、いわゆる積層効果が知られている。林ら⁽²⁶⁾は、「n層の積層材の特性値の変動係

数は原材料のその $1/\sqrt{n}$ になる。」という統計的に導かれる理論を、長さ方向に欠点を含まない単板により製造した垂直積層のLVLにより実験的に確かめ、5～15層の範囲ではよく当てはまるとしている。また、Ronaldら⁽³¹⁶⁾はダグラスファー、サザンパインの目視等級区分した通しラミナで構成した1～5層の垂直積層集成材の曲げ試験結果から、その理論の有効性を報告している。そこで積層数とMORの変動係数との関係を以下に検討する。

積層数によるMORの変動係数の変化を図8.7に示した。図に示すようにH試験体では積層数とMORの変動係数との関係はほとんど認められず、積層効果は小さかった。一方、V試験体では積層数の増加にともない、変動係数が著しく減少し、回帰曲線の指数定数は、統計的に導かれる理論値である-0.5よりも絶対値が大きく、下位等級集成材で-0.656、上位等級集成材で-0.583であり、いわゆる積層効果は下位等級の方が大きく現れた。

積層効果がV試験体で顕著で、H試験体でほとんど認められなかった本研究の結果は、構成するラミナの応力負担の度合いが、試験体によって異なることから説明できる。すなわち、V試験体ではその構造上、構成するいずれのラミナも、等しく応力を受け持つと考えることができ、ラミナ内の欠点は積層数の増加によって分散するから、顕著な積層効果が認められたものと考えられる。これに対しH試験体のMORは、引張り側の最外層との関係が大きいので、積層効果はほとんど期待できないと考えられる。

水平積層で2層の試験体のMORは積層効果が認められないことを、林⁽²⁷⁰⁾が報告しているが、Pertersonら⁽³¹⁷⁾はダグラスファーの1～7層の水平積層集成材で曲げ試験を行い、2層のみ積層効果を認め、それ以上では認められないとしている。

いずれにしても、水平積層集成材のMORに対しては積層効果が期待できず、その結果最外層ラミナの位置づけが極めて重要になるもの考えられる。

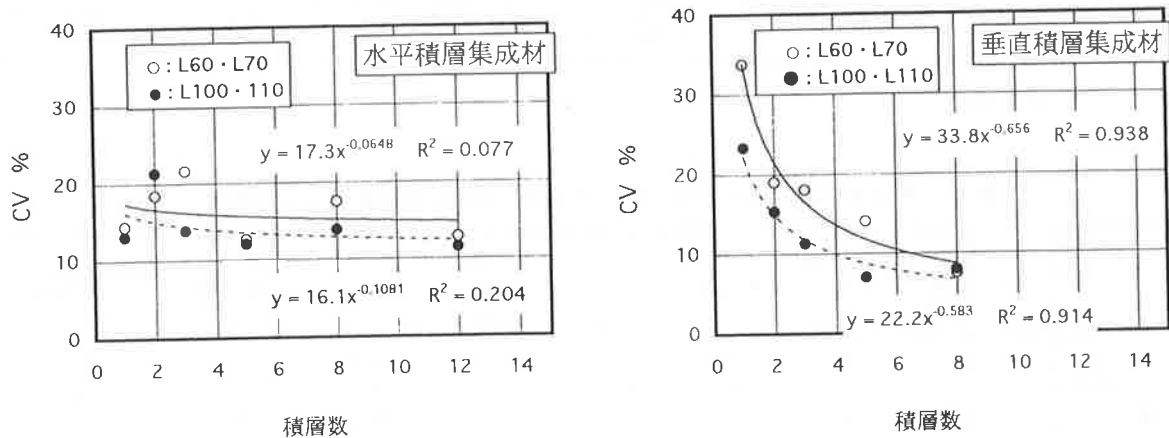


図8.7 集成材の積層数と曲げ強さ (MOR) の変動係数 (CV) との関係

L60・L70；L100・L110：表8.7参照、実線は下位等級集成材の回帰曲線、破線は上位等級集成材の回帰曲線を示す。y：CV、x：積層数

8.3.2.4 垂直積層集成材の積層数と曲げ強さとの関係

V試験体の積層数とMORの平均値との関係を図8.8に示した。積層数の増加によりMORの平均値が上昇する傾向認められた。この傾向は積層数が増すことによりV試験体の幅が大きくなり、試験体断面に占めるラミナ内の個々の欠点の比率が小さくなることによって説明できる。また、三橋ら⁽²⁸⁰⁾は集成材の曲げ強さを予測する解析モデルに積層による欠点の補強効果を考慮することを提案しており、本研究の結果にもこの補強効果が関係していることが考えられる。

本研究におけるV試験体は図8.2に示したようにラミナの接合部が1層おきに同じ位置に配置されており、積層数によって接合部の重なり比率が異なる。すなわち、1V試験体は縦継ぎラミ

ナであり、2V試験体はラミナの接合部が断面に占める比率は1/2であり、3V試験体のそれは2/3である。図8.8に認められる上位等級試験体の1層から2層にかけての大幅なMORの平均値の上昇および3V試験体のMORの平均値が2V試験体より低いのは接合部が関係しているものと考えられる。一方、下位等級の試験体では接合部との関係はほとんど認められなかった。ラミナの曲げ試験において、上位等級のラミナほど通しラミナと縦継ぎラミナのMORの差が大きいことは図8.6、および7.3.3で述べた結果からも明らかである。これらはラミナのフラットワイズから荷重を负荷した結果であるが、エッジワイズから荷重を负荷した場合も下位等級ラミナのMORに対しては接合部の関係は少ないと考えられる。

Ronaldら⁽³¹⁶⁾も同一等級の垂直積層集成材で、3層までに顕著なMORの平均値の上昇を報告しており、本研究の結果でも、5層までMORの平均値が上昇する傾向が認められた。

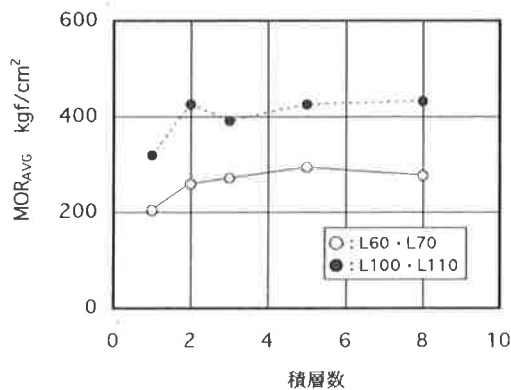


図8.8 垂直積層集成材における積層数と曲げ強さの平均値 (MOR_{avg}) との関係
L60・L70；L100・L110：表8.7参照

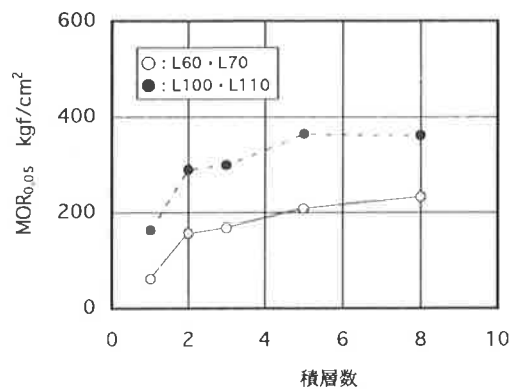


図8.9 垂直積層集成材における積層数と曲げ強さの5%下限値 (MOR_{0.05}) との関係
L60・L70；L100・L110：表8.7参照

V試験体では積層数の増加によって、MORの変動係数が減少する積層効果が顕著なことを8.3.2.3で述べた。また、本項においてMORの平均値も積層数の増加によって上昇することが明らかとなった。これらのことにより、積層数が増せばMORの5%下限値が大幅に上昇することが期待できる。そこで、V試験体の積層数とMORの5%下限値との関係を図8.9に示した。図に示すように積層数の増加によるMORの5%下限値の上昇が上位等級、下位等級の試験体とも5層までは顕著に認められ、5V試験体の5%下限値は1V試験体のその上位等級で2.3倍、下位等級で3.5倍であった。

8.3.2.5 水平積層集成材の寸法と曲げ強さとの関係

本研究におけるH試験体は、等しい厚さのラミナで構成されており、積層数が多くなれば試験体の寸法が大きくなる。表8.7に示すようにH試験体のMOEについてはラミナの積層数、すなわち寸法による傾向は認められない。MOEについては寸法との関係がないことが明らかにされており⁽²⁹²⁾、ここではMORについて検討する。

梁の寸法が大きくなるほどMORが少しずつ減少するいわゆる寸法効果⁽²⁸⁴⁾について、Bohannan⁽²⁸⁵⁾は最弱リンク理論といわれる統計的強度理論に基づき、梁の曲げにおける寸法効果は、長さ、梁背、スパン条件に依存し幅とは無関係であることを示し、ダグラスファーの無欠点材を用いてその理論を確かめた。そして、中央集中荷重でL/hが等しい場合、MORは梁背の1/9乗に比例して減少することを示した。構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾においてもこの結果が採用され、MORは梁背の1/9乗に比例して減少するという前提で寸法調整係数が定められている。一方、Madsenら⁽²⁸⁶⁾は、異なるスパン条件での試験結果の解析から、最弱リンク理論に改良を加え、曲げにおける寸法効果は、梁背効果ではなく長さ効果であり、有効長さによって寸法効果を

よく表すことができるとしている。

本研究におけるH試験体の幅は一定で、試験条件はL/hを21倍としているので、寸法の指標として梁背と長さのいずれをとっても得られる結果は同じである。H試験体について、梁背とMORの平均値との関係を図8.10に示した。寸法効果が顕著に認められ、図の回帰曲線の指数定数を分数で表すと上位等級集成材は1/6.4、下位等級集成材は1/5.3であった。この結果は規格⁽¹⁵⁾が前提としているよりも寸法効果が大きいこと、さらに下位等級の試験体の方が大きいことを示した。なお、飯島⁽²⁰⁾はソ連カラマツ気乾材で、MORは梁背の1/5乗に比例した減少傾向を示すことを報告しており、本研究はそれに近い結果であった。

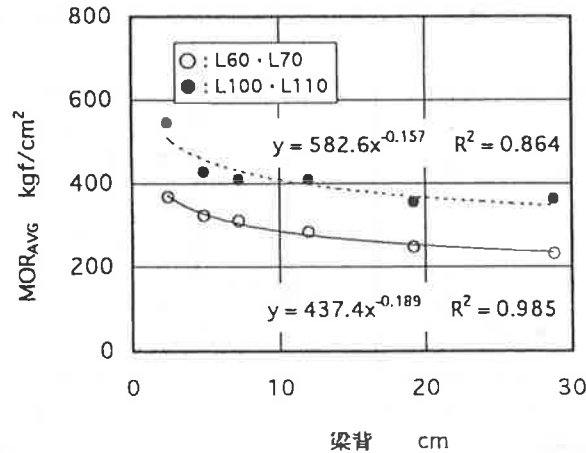


図8.10 水平積層集成材における梁背と曲げ強さ (MOR) の平均値との関係

L60・L70；L100・L110：表8.7参照、実線は下位等級集成材の回帰曲線、破線は上位等級集成材の回帰曲線を示す。y：MOR、x：梁背

8.3.3 縦振動およびたわみ振動ヤング係数と曲げヤング係数との関係

構造物の横架材の設計において、荷重に対する曲げ、せん断、たわみが許容範囲であるように部材断面が決められるが、その場合、たわみによって決まることが多い⁽³¹⁾ので、製品検査において、集成材の曲げヤング係数を測定する意義は大きいと考えられる。構造用集成材は断面が大きいので非破壊検査によって静的曲げヤング係数を直接求めるのは困難な場合が多い。そこで、集成材の曲げヤング係数を検査する手段として、縦振動法、たわみ振動法が有効か否かを検討する。なお、本研究で測定した縦振動法によるEfrおよびたわみ振動法によるEfrvおよびEfrhについては、武田ら⁽³¹⁾が、それらと積層数との関係について報告しているが、本論文では実用的な観点から考察する。

H試験体、V試験体に分けて縦振動ヤング係数およびたわみ振動ヤング係数とMOEとの関係を図8.11に示した。EfrとMOEとの関係をみると、H試験体では直線回帰式が $MOE = 0.891 \times Efr$ で示され、これは2.3.3で述べたL/hを22.5倍として行った心去り正角で得られた関係、すなわち $MOE = 0.871 \times Efr$ とよい符合を示した。

一方、V試験体では図8.11に示すように $MOE = 0.979 \times Efr$ で示され、H試験体における関係と係数が異なった。これは8.3.2.2で述べたようにV試験体は梁背方向で曲げヤング係数が高-低-高の三層構造であり、MOEがH試験体よりも大きかったためである。このように縦振動ヤング係数は、構成するラミナの平均的な値を示す⁽¹⁷⁾ことから、ラミナ配置が関係する対称異等級構成集成材のMOEを推定する場合は注意が必要である。

つぎに、たわみ振動ヤング係数をみると、H試験体で $MOE = 0.915 \times Efrh$ 、V試験体で $MOE = 0.929 \times Efrv$ の関係が得られ、係数もEfrで認められたほどの差はなかった。これは曲げ試験に

おける荷重方向とたわみ振動の方向が同じであるので当然の結果であるが、たわみ振動法は、同一等級構成集成材だけでなく対称異等級構成の断面の大きな集成材のMOEを推定する有効な方法であることが実証できたと考える。本研究の結果から、L/hが21倍の条件で得られるMOEはたわみ振動ヤング係数の0.9倍程度と判断できる。

なお、EfrとEfrhおよびEfrvとの関係を図8.12に示した。Efrvとの関係を示す係数がEfrhとの関係を示す係数よりも明らかに大きく、これは本研究におけるV試験体とH試験体のMOEの差を反映しているものと考えられる。

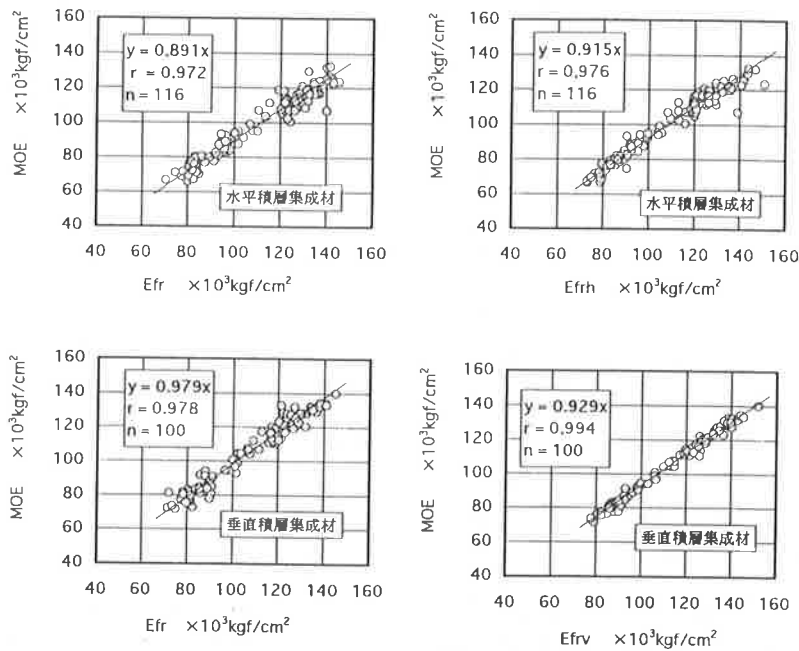


図8.11 動的ヤング係数と曲げヤング係数 (MOE) との関係

MOE : 集成材の曲げヤング係数、Efr : 縦振動ヤング係数、Efrh : H試験体のたわみ振動ヤング係数、Efrv : V試験体のたわみ振動ヤング係数、r : 相関係数、y : MOE、x : それぞれの図のx軸に示したEfr ; Efrh ; Efrv

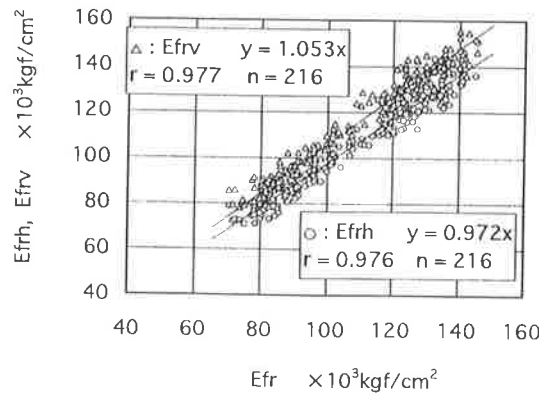


図8.12 動的ヤング係数間関係

Efr : 縦振動ヤング係数、Efrh : H試験体のたわみ振動ヤング係数、Efrv : V試験体のたわみ振動ヤング係数、r : 相関係数、y : Efrh ; Efrv、x : Efr

8.4 おわりに

本章では、連続送り式グレーディングマシンによるラミナの曲げヤング係数の連続測定データから MGE_{AVG} 、 MGE_{MIN} 、 MGE_{MAX} を取り出し、これらの関係を解析した。つぎに、 MGE_{MIN} で等級区分したラミナを用いて同一等級構成集成材を積層数を変えて製造し、水平積層のH試験体、垂直積層のV試験体の曲げ試験を行い、ラミナの等級と集成材の強度性能との関係、積層効果といわれる積層数とMORの変動係数との関係、および寸法効果といわれる梁背とMORとの関係に検討を加え、最後に製品検査の手段として縦振動法、たわみ振動法が有効か否かを検討した。

ラミナ6400枚の個々のラミナ内の MGE_{AVG} と MGE_{MIN} の差の平均値、標準偏差は $9.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $4.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であり、上位等級ほどその差が大きくなる傾向を示した。したがって、ラミナの最小強度を MGE_{AVG} によって推定することは困難であると考えられる。

MGE_{MIN} により等級区分したラミナで構成した同一等級構成集成材のMORの平均値は、上位等級は下位等級に対して、H試験体およびV試験体、それぞれ1.43倍および1.53倍であった。

H試験体のMORは最外層ラミナの性能によって決定されるため、積層数によってMORの変動係数が減少する積層効果はほとんど認められなかった。したがって、少なくとも、水平積層集成材の最外層用ラミナの等級区分は MGE_{MIN} によって行うべきであると考えられた。一方、V試験体においては積層効果が顕著に認められ、積層数が5を超えるようであれば MGE_{AVG} を指標としても問題がないことが示唆された。また、V試験体においては5層程度までは変動係数の減少に加えて、MORの平均値が上昇する傾向が認められ、それらの結果として、MORの5%下限値が5層程度まで大幅に上昇することが明らかになった。

集成材の寸法が大きくなればMORが減少する、いわゆる寸法効果を、H試験体において梁背との関係で検討した結果、顕著な寸法効果が認められ、上位等級では梁背の1/6.4乗、下位等級では1/5.3乗に比例してMORの平均値が減少し、下位等級集成材のほうに大きな寸法効果が認められた。

縦振動ヤング係数およびたわみ振動ヤング係数とMOEとの関係を検討した結果、たわみ振動法は同一等級構成集成材だけでなく、対称異等級構成集成材の製品検査の方法として有効であることが示された。

結 言

カラマツ林の経営において長伐期大径材生産を指向したとき、心去り正角が用途の主体となると考えられる。心去り正角には未成熟材部と成熟材部が必然的に含まれ、強度性能はそれらの影響を顕著に受ける。曲げ強さ（以下MORと記す。）は未成熟材部が引張り側か、圧縮側か、言い換えれば荷重を負荷する方向が木表側（以下木表荷重と記す。）か、木裏側か（以下木裏荷重と記す。）で異なる。本研究では、その違いを定量的に明らかにし、心去り角を横架材として使用する場合には木裏荷重の状態、すなわち、未成熟材部を圧縮側にすべきことを示した。また、曲げヤング係数（以下MOEと記す。）はMORを推定するための指標であるが、木表荷重と木裏荷重とではMOEとMORとの関係が同一の回帰直線では示すことができないこと、木裏荷重の場合、引張り面の節がMORを低減させる因子となることを明らかにした。

荷重方向を木裏荷重とした場合、心去り正角の林分別曲げ強度性能の差は供試木を得た林分の、樹齢、地域、海拔高のいずれによっても明確にできなかった。とくに、成長のよい若齢材からの心去り正角が高樹齢材からのそれよりも曲げ強度性能が劣るということはなかった。この知見は、成熟樹齢からの肥大成長の促進が実大材の曲げ強度性能を小さくしないことを示唆するものであり、カラマツ林の施業を考える場合、極めて重要である。

なお、以上の結果は心去り正角の強度性能を曲げだけで評価したものであり、引張り、圧縮、せん断等による総合的な評価が今後必要である。また、曲げ強度性能についても、限られた林分と限られた試験体数から得られた結果であり、さらなる研究が必要である。

ラミナの強度的性質および形質的な性質においても、未成熟材、成熟材との関係が大きい。すなわち髓に近い位置のラミナはねじれ、幅ざりが大きく、MOEも低い。これに対して、樹皮側のそれは狂いが少なく、MOEが高いので、大径丸太ほど優良ラミナが得られる比率が高くなる。したがって、カラマツ材を構造用集成材として利用する場合においても、成熟樹齢からの肥大成長の促進が重要である。

縦振動法により等級区分した丸太からはMOE分布の明らかなラミナが得られ、かつ木取りによる選別を行うことによって、さらにMOEの分布範囲が狭い選別が可能なることを明らかにした。したがって、これらの選別を行うことは、製造する構造用集成材の強度等級の推定が容易にできることから有用性が高い。

MOEによって機械等級区分されたラミナであっても、等級内のMOR、引張り強さ（以下TSと記す。）の変動係数は大きく、とくにTSにおいてそれが大きい上、TSとMORの比率（以下TS/MORと記す。）が構造用集成材の日本農林規格⁽⁴⁵⁾において想定している0.6よりも小さく、これらがTSにおいて、規格が規定している5%下限値基準を満たさない原因と考えられた。したがって、TSが規格のそれを満たすためには、機械等級区分に加えて、目視等級区分を併用する必要が認められた。一方、TS/MORが上位等級のラミナほど高くなる傾向が認められ、その機械等級依存性がMOEとTS、MOEとMORの回帰式から明らかにできることを示した。

構造用集成材の曲げ試験の結果、ラミナの機械等級は集成材のMORに反映しており、ラミナの接合部が破壊と関係するように意図的に行った曲げ試験において、ラミナの等級とMORとの関係が実証できた意義は大きいと考える。

現状のカラマツ林から得られるラミナはMOEが長さ方向で大きく変動しており、その平均値でラミナの最小強度を推定するには無理があると考えられた。また、水平積層の同一等級構成集成材では積層数の増加によりMORの変動係数が減少する積層効果が認められず、MORは最外層ラミナの性能との関係が大きい。したがって、連続送り式グレーディングマシンを用いた等級区分において、少なくとも水平積層集成材の最外層用ラミナは測定値（以下MGEと記す。）の最小値で区分すべきであると考えられる。一方、垂直積層集成材では、積層効果が顕著であり、かつ

積層数の増加によりMORの平均値も上昇することから、5層程度まで5%下限値が大幅に上昇した。したがって、積層数が5以上の垂直積層集成材用のラミナはMGEの平均値で等級区分してもよいと考えられる。また、集成材の寸法が大きくなればMORが減少する寸法効果が顕著に認められ、寸法との関係は規格で前提としているよりも大きいことが示唆された。

集成材のMOEを検査する手段として振動法による方法を検討した結果、たわみ振動法が、同一等級構成集成材だけでなく、対称異等級構成集成材に対しても有用性が高いことが示唆された。

集成材の曲げ強度に関する本研究の結果は、ラミナの積層配置を考慮する必要がない同一等級構成集成材により得られたものであり、対称異等級構成集成材の外層用、中間層用、内層用のラミナまで、MGEの最小値で区分する必要があるかどうかは今後の検討課題である。また、本研究で認められた縦継ぎラミナの接合効率をMORで評価した場合とTSで評価した場合の差異が、構造用集成材の強度性能とどのように関係するかなど残された課題は多いと考える。

本論文の要旨

カラマツ人工林の多くは第二次世界大戦後、短伐期林業経営を意図して誕生したが、土木用材としての用途が著しく減少したことなどから、長伐期大径材生産を指向する林業経営へと移行するようになった。一方、カラマツはらせん木理が顕著な樹種であり、製材とした場合、乾燥に伴うねじれが大きいことなどから構造材として利用するには困難な場合が多い。

本論文は、将来生産されることが予測される大径材の用途の多くを占めると考えられる心去り正角の曲げ強度特性に関する研究、および継続的に生産される間伐材や、大径材上部からの中、小丸太を構造用集成材として利用するために必要な研究の成果をまとめたものである。各章ごとの要旨を以下に述べる。

第1章では、カラマツ林業の中での本研究の背景と既往の研究を概説し、本論文の内容を示した。

第2章では、長野県内4地域の海拔850~1850m、樹齢40~75年の12林分から得られた心去り正角411本の実大材曲げ試験の結果について述べた。

心去り正角の木表荷重と木裏荷重の曲げ強度性能を比較した結果、曲げヤング係数（以下MOEと記す。）は荷重方向と関係しないが、曲げ強さ（以下MORと記す。）は荷重方向との関係が大きく、二方桁角、四方桁角とも、未成熟材部が圧縮側になる木裏荷重の平均MORは木表荷重のその約1.3倍であった。したがって、心去り正角を横架材として使用する場合には木裏側を荷重面として使用すべきである。

MOEとMORとの関係は、木取り・荷重方向の区別に高い相関関係にあるが、木裏荷重で得られるMOEとMORとの関係を示す回帰直線は木表荷重で得られるそれと位置が異なることを明らかにした。

木裏荷重で得られたMORを目的変数とした重回帰分析の結果、説明変数としてMOEに引張り側材面の節径比を加えることによって、MORを推定する精度が向上することが示されたが、密度、年輪幅、繊維傾斜を加えても効果は少なかった。

針葉樹構造用製材の日本農林規格⁽¹⁵⁾の目視等級区分製材としての評価では、木表荷重であってもほぼ基準強度を満たし、とくに、木裏荷重の場合5%下限値が基準強度よりはるかに高く、横架材として荷重面を指定すればさらに高い許容応力度の設定が可能であることが示唆された。

機械等級区分製材として評価すると、木裏荷重の5%下限値だけが基準強度を満たしていた。したがって、機械等級区分製材としての基準強度を満たすためには荷重面の指定が必要であることを明らかにした。

密度、年輪幅、繊維傾斜、最大節径比、集中節径比は林分によって異なったが、樹齢との関係が認められたのは年輪幅だけであり、高樹齢材ほど小さい傾向を示した。

MOEの高い林分はMORも高い傾向が認められ、密度も大きい傾向にあった。

高樹齢林分からの試験体ほど強度性能の向上が予想されたが、本研究での心去り正角のMOE、木裏荷重で得られたMORに限ればその傾向は認められなかった。逆に40年生級であっても曲げ強度性能が劣るということはない。また、地域および海拔高と木裏荷重で得られた曲げ強度性能との関係は明確でなかった。

現存する高樹齢林分が少ないために、胸高直径が同じで樹齢が異なる林分、あるいは樹齢、胸高直径、施業が同じで地域が異なるというような林分の選定はできなかった。したがって、肥大成長の違う林分間での実大材曲げ強度性能の比較、地域間による比較は厳密な意味ではできなかったが、少なくとも、心去り正角の実大材曲げ強度性能と樹齢、地域との関係が少ないことが示唆された。

第3章では、ラミナの機械等級区分装置である連続送り式グレーディングマシン（以下装置と

記す。)の特性として、測定中のラミナのローラによる力学的支持条件は送り速さと関係しないこと、MOEの高いラミナおよび厚いラミナほど両端固定支持条件から単純支持条件側にシフトすることを示した。そして、力学的支持条件がラミナの厚さ別にほぼ等しい測定たわみ条件〔厚さ×測定たわみ：mm²〕を設定した場合においては、両端固定条件と仮定して測定した装置による測定値を、材料試験機によって測定したMOEとの間で得られた回帰式を使って厚さ別に補正した場合と厚さを考慮しないで補正した場合とでは、測定精度の差は小さかった。このことから、力学的支持条件がラミナの厚さ別にほぼ等しい測定たわみ条件が設定できれば、実用的には厚さ別に補正係数を変えなくてもよい可能性が示された。第4章では、適正なラミナの製材寸法を検討するために、末口径級20~34cmの丸太からラミナを得て、その木取り位置と乾燥による狂いおよび収縮率との関係を明らかにし、これらの関係からラミナの製材寸法について検討を加えた。

製材におけるラミナ歩留りは全体で48.4%であったが、径が大きな丸太ほど歩留りが向上する傾向が認められた。

ラミナの木取り位置と乾燥による形質変化との関係では、髓から離れた位置のものほど、ねじれ、幅ぞり、厚さ方向の収縮率が小さくなる傾向が認められ、とくにねじれにおいて顕著であった。これらの結果から、厚さ方向の収縮量と幅ぞり量を木取り位置との関係で定量的に検討して、製材における厚さ寸法は木取り位置別に設定できることを示した。

第5章では、縦振動法による丸太の等級区分、木取り位置による区分、さらに両者を併用したラミナの選別の集成材製造工程における有用性を検証した。

縦振動法により測定した動的ヤング係数（以下縦振動ヤング係数と記す。）を指標とした丸太の等級とラミナのMOEの分布との関係を検討し、丸太の等級区分は丸太の選別に有効なことを明らかにしたが、同一丸太から得られたラミナのMOEの変動係数は大きかった。

ラミナの木取り区分において、内側ラミナは、丸太径に関わりなくMOEの平均値は丸太の縦振動ヤング係数とほぼ等しかった。これに対して外側ラミナでは、MOEの平均は丸太ヤング係数の約1.1~1.3倍であり、木取り区分は大径丸太ほどMOEの高いラミナと低いラミナが選別できることを示した。さらに、丸太の等級区分に加えて、木取り位置による区分を行うと、MOE分布の狭いラミナの選別が可能であることを示した。

以上の、縦振動法による丸太の等級区分、木取り位置による区分、および両者を併用したラミナの選別がなされたラミナのグループはそれに含まれるラミナのMOEの分布が容易に推定できるので、それらを原料とした集成材の強度等級が容易に推定できること、高いMOEのラミナが必要な場合、それらが容易に得られることなどから、集成材製造工程において有用性が高いと考えられた。

第6章では、ラミナの材質指標とMOEとの関係を検討した。つぎに、装置によって測定したラミナの曲げヤング係数の分布から製造可能な構造用集成材の強度等級を推定した。

比重とMOEとは高い相関関係にあったが、目視で判断できる節、年輪幅、繊維傾斜、ラミナの木取り位置とMOEとの関係は、統計的には有意であったが、相関係数は最も高い年輪幅との間でも-0.445**であり、これらの材質指標によって、MOEを推定するのは困難であると考えられた。なお、**は相関係数が危険率1%で有意なことを示す。

カラマツラミナ65653枚の連続送り式グレーディングマシンによる曲げヤング係数測定値（以下MGEと記す。）のラミナ1枚あたりの最小値（以下MGE_{MIN}と記す。）、平均値（以下MGE_{AVG}と記す。）、最大値（以下MGE_{MAX}と記す。）の平均値および変動係数は、それぞれ99.2×10³kgf/cm²および22.5%、108.3×10³kgf/cm²および21.5%、116.3×10³kgf/cm²および23.8%であった。MGE_{MAX}とMGE_{MIN}の平均値の差は17.1×10³kgf/cm²、MGE_{AVG}とMGE_{MIN}の平均値の差も9.1×10³kgf/cm²と大きかった。これらの測定値の分布から判断して、現状のカラマツ人工造林木

から製造される構造用集成材は、構造用集成材の日本農林規格⁽¹⁵⁵⁾における強度等級「E120-F330」、「E105-F300」に該当するものが主体となると考えられた。

第7章では、通しラミナ、縦継ぎラミナの曲げおよび引張り試験の結果について述べた。

縦継ぎラミナの接合部と強度との関係はMORに対して大きく、引張り強さ(TS)に対しては小さいことを明らかにした。すなわち、MORで評価した接合効率は平均値による計算で77.2%であり、TSで評価したそれは91.6%と約15%の相違が認められた。通しラミナと縦継ぎラミナではMORにおいて1%水準で平均値に有意差が認められたが、TSでは認められなかった。また、MOEとMORとの関係を示す回帰直線の位置および傾きが両ラミナで異なったがMOEとTSとの関係を示すそれは大差なかった。

通しラミナのMORは目視等級区分、機械等級区分のいずれでも、構造用集成材の日本農林規格の要求する基準をほぼ満足した。しかし、TSについてはいずれの区分でも平均値では基準を満たすものの、5%下限値基準を満たさないラミナの出現比率が10%以上あった。したがって、TSの5%下限値が基準を満たすためには、機械等級区分に目視等級区分を併用する必要が認められた。

TSが5%下限値基準を満たせない原因は、等級区分されたラミナのTSの変動係数がとくに大きい上、通しラミナのMORに対するTSの比率(以下TS/MORと記す。)が平均で0.54であり、規格で前提としている0.6より低いためであると判断した。一方、目視等級区分、機械等級区分いずれともラミナの等級が高いほどTS/MORが大きい傾向が認められ、単独に行われた曲げ、あるいは引張り試験であっても、MOEとMOR、MOEとTSの回帰式からTS/MORの機械等級依存性を明らかにできることを示した。

第8章では、連続送り式グレーディングマシンによるラミナのMGEの連続測定データからMGE_{AVG}、MGE_{MIN}、MGE_{MAX}を取り出し、これらの関係を解析した。つぎに、MGE_{MIN}で機械等級区分したラミナを用いて同一等級構成集成材を積層数を変えて製造し、水平積層集成材(以下H試験体と記す。)、垂直積層集成材(以下V試験体と記す。)の曲げ試験を行い、ラミナの等級と集成材の強度性能との関係、積層効果といわれる積層数とMORの変動係数との関係、および寸法効果といわれる梁背とMORとの関係に検討を加え、最後に集成材の製品検査の手段として縦振動法、たわみ振動法が有効か否かを検討した。

ラミナ6400枚の個々のラミナ内のMGE_{AVG}とMGE_{MIN}の差の平均値、標準偏差は $9.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $4.4 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であり、上位等級ほどその差が大きくなる傾向を示した。したがって、ラミナの最小強度をMGE_{AVG}によって推定することは困難であると考えられた。

MGE_{MIN}により等級区分したラミナで構成した同一等級構成集成材のMORの平均値は、上位等級は下位等級に対して、H試験体およびV試験体、それぞれ1.43倍および1.53倍であった。

H試験体のMORは最外層ラミナの性能によって決定されるため、積層数によってMORの変動係数が減少する積層効果はほとんど認められなかった。したがって、少なくとも、水平積層集成材の最外層用ラミナの等級区分はMGE_{MIN}によって行うべきであると考えられた。一方、V試験体においては積層効果が顕著に認められ、積層数が5を超えるようであればMGE_{AVG}を指標としても問題がないことが示唆された。また、V試験体においては5層程度までは変動係数の減少に加えて、MORの平均値が上昇する傾向が認められ、それらの結果として、MORの5%下限値が5層程度まで大幅に上昇することが明らかになった。

集成材の寸法が大きくなればMORが減少する、いわゆる寸法効果をH試験体において梁背との関係で検討した結果、顕著な寸法効果が認められ、上位等級では梁背の1/6.4乗、下位等級では1/5.3乗に比例してMORの平均値が減少し、下位等級集成材のほうに大きな寸法効果が認められた。

縦振動ヤング係数およびたわみ振動ヤング係数とMOEとの関係を検討した結果、たわみ振動

法は同一等級構成集成材だけでなく、対称異等級構成集成材の製品検査の方法として有用性が高いことが示された。

謝 辞

本論文をまとめるに当たり、多大なるご支援、ご指導をいただいた、京都大学木質科学研究所石原茂久教授に厚くお礼を申し上げます。また、有益なご助言をいただいた京都大学大学院農学研究科増田稔教授、奥村正悟教授に深謝いたします。

学術誌等への投稿に際して御指導をいただいた、信州大学農学部中野達夫教授、徳本守彦教授、武田孝志助手にお礼を申し上げます。

また、実大材の試験に関して御指導をいただいた、森林総合研究所元特性科長中井孝氏、材料性能研究室長田中俊成氏、主任研究官長尾博文氏、秋田県立農業短期大学附属木材高度加工研究所教授飯島泰男氏、集成材の研究で御指導をいただいた、森林総合研究所集成加工研究室長藤井毅氏、接合研究室長林知行氏に感謝いたします。

本研究の多くは(財)日本住宅・木材技術センターのご援助により行ったものであり、試験研究部長牧勉氏、防・耐火研究室長山田誠氏ほかの皆さんに厚くお礼を申し上げます。

集成材に関わる研究で、多大なる御協力を得た斎藤木材工業(株)ナガト工場長斎藤健氏、村井勇睦氏をはじめとする諸氏、並びに上伊那森林組合工場長下平隆夫氏、林友ハウス工業(株)工場長久保田順氏に感謝いたします。また、連続送り式グレーディングマシンの試験に際し協力を得た飯田工業(株)野田道雄氏にお礼を申し上げます。

長野県林業総合センター所長武井富喜雄氏、主任研究員柴田直明氏には本論文作成に際し、適切なお助言をいただいた。また、長野県林業指導所元木材部長三村典彦氏、同小林大徳氏、長野県林業総合センター木材部長馬渡栄達氏、研究員吉田孝久氏、同吉野安里氏には試験を進めるにあたり温かいご支援をいただいた。さらに、近藤かよ子、五味妙子、吉田祐美子の皆さんには試験およびデータ整理にお手伝いいただいた。記してこれらの方々に厚くお礼を申し上げます。

最後に、カラマツ材の研究の手ほどきをしてくださった故重松頼生信州大学農学部教授、並びに学生時代の指導教官であった故高橋成直信州大学農学部教授、試験を進めるにあたりご支援をいただいた元長野県林業指導所長故今井元政氏、元上司の元長野県林業指導所研究員故向山繁人氏、試験およびデータ整理にお手伝いいただいた故都竹操さんに感謝申し上げ、心から皆様のご冥福をお祈りいたします。

引用文献

- (1) 橋詰隼人ほか5名：“図説実用樹木学”、1993、p.14、朝倉書店。
- (2) 浅田節夫、佐藤大七郎編著：“カラマツ造林学”、1981、p. 53-88、農林出版。
- (3) 半沢道郎、澤田稔共編：“カラマツ材の性質と利用”、1969、p. 6、北方林業会。
- (4) 長野県林務部林政課：“長野県森林林業長期構想”、1997、p. 94。
- (5) 有木純善：“信州のからまつ”、1983、p. 263-306、リンケイ新聞出版局。
- (6) 片倉正行ほか：“カラマツ人工林・長伐期施業の手引き”、1991、p. 8-12、長野県林務部。
- (7) 武井富喜雄：長野林指業報、51、165-177 (1977)。
- (8) 武井富喜雄、片倉正行：長野林総セ研報、2、12-20 (1986)。
- (9) 菅原聰：信大演習林報告、27、1-15 (1990)。
- (10) 森麻須夫、大住克博：森林総研研報、361、1-15 (1991)。
- (11) 長野県林務部資料。
- (12) 島崎洋路：信大演習林報告、23、1-117 (1986)。
- (13) 島崎洋路：信大演習林報告、30、101-116 (1993)。
- (14) 重松頼生：“カラマツ造林木の植栽密度による成長と材質の影響”、1984、p. 1-23、昭57、58年科研費補助金（一般研究C）研究成果報告書。
- (15) 重松頼生：“育林技術と材質形成、とくにカラマツ造林木の間伐による成長と材質の変動”、1987、p. 1-72、昭和61年科研費補助金（一般研究C）研究成果報告書。
- (16) 武井富喜雄：日林誌、78(3)、231-237 (1996)。
- (17) 武井富喜雄：日林誌、78(3)、238-243 (1996)。
- (18) 武井富喜雄：日林誌、78(4)、347-353 (1996)。
- (19) 武井富喜雄：“カラマツの材質向上のための施業技術に関する研究”、1997、三重大学学位論文。
- (20) 大倉精二：64回日本林学会大会講演集、298-301 (1955)。
- (21) 小沢勝治：日林誌、53(11)、368-371 (1971)。
- (22) 大倉精二、鳥山清美：信州大学農学部学術報告、1、28-35 (1963)。
- (23) 小沢勝治：日林誌、54(8)、269-274 (1972)。
- (24) 小沢勝治：日林誌、55(7)、221-226 (1973)。
- (25) 織田春紀：林育研報、12、27-55 (1994)。
- (26) 久保隆文、森田司、伏谷賢美：農工大演習林報告、32、31-38 (1994)。
- (27) 塩倉高義、渡辺治人：農学集報、13(3)、99-104 (1969)。
- (28) 塩倉高義：“針葉樹の未成熟材に関する知見補遺ならびにカラマツ樹幹内における材質の変動に関する研究”、1981、p. 1-71、東京農業大学木材工学研究会。
- (29) 武井富喜雄：39回日林中支講、1991、p. 187-189。
- (30) 中川伸策：林試研報、248、97-120 (1972)。
- (31) 重松頼生、安本善次：20回日林中支講、1971、p. 245-251。
- (32) 重松頼生、中屋秀樹：21回日林中支講、1973、p. 55-60。
- (33) 重松頼生：23回日林中支講、1974、p. 202-207。
- (34) 重松頼生：28回日林中支講、1980、p. 253-258。
- (35) 重松頼生：木材工業、45(10)、2-8 (1990)。
- (36) 小沢勝治：“針葉樹の旋回木理と乾燥ねじれ”、1984、p. 1-100、京大農学位論文。
- (37) 川口信隆、山本宏、高橋政治、滝沢忠昭：北林産試月報、5、4-8 (1979)。
- (38) 三上進、渡辺操、太田昇：日林誌、54(7)、213-217 (1972)。

- (39) 三上進、長坂寿俊：林試研報、276、1-22 (1975).
- (40) 三上進：林育研報、4、1-14 (1986).
- (41) 三上進：林育研報、6、47-152 (1988).
- (42) 三上進：林木の育種、136、1-4 (1985).
- (43) 三上進ほか4名：林木の育種、168、4-18 (1993).
- (44) 織田春紀、片寄禰：林育研報、4、29-46 (1986).
- (45) 中川伸策：林試研報、312、21-43 (1980).
- (46) 大倉精二、小沢勝治、高島恵浩、竹入勝美：木材学会誌、7、205-207(1961).
- (47) 大倉精二、小沢勝治：木材学会誌、8(3)、105-108 (1962).
- (48) 大倉精二、小沢勝治、高垣宣裕：木材学会誌、9(4)、121-124 (1963).
- (49) 小林大徳：長野林指業報、40、62-69 (1965).
- (50) 向山繁人、三原康義：25回日林中支講、1977、p. 30-33.
- (51) 向山繁人、三原康義、今井元政：長野林指業報、53、64-66 (1979).
- (52) 加納孟、中川伸策、斎藤久夫、小田正一：林試研報、162、1-44 (1964).
- (53) 小沢勝治：木材学会誌、29(11)、744-749 (1983).
- (54) 小沢勝治：木材工業、40(4)、15-19 (1985).
- (55) 加納孟：“林木の材質”、1973、p. 29-30、日本林業技術協会.
- (56) 太田貞明：九大演習林報告、1-71 (1972).
- (57) 渡辺治人：木材工業、26(5)、7-10 (1971).
- (58) 塩倉高義、渡辺治人：農学集報、16(2)、91-98 (1971).
- (59) 塩倉高義、渡辺治人：農学集報、17(1)、87-94 (1972).
- (60) 塩倉高義：農学集報、26(1)、59-67 (1981).
- (61) 塩倉高義：木材学会誌、28(2)、85-90 (1982).
- (62) 小泉章夫、上田恒司、片寄禰：北大演習林報告、44(1)、327-354 (1987).
- (63) 重松頼生、安本善次：19回日林中支講、1970、p. 92-95.
- (64) 重松頼生：20回日林中支講、1971、p. 259-263.
- (65) 重松頼生、徳本守彦：21回日林中支講、1973、p. 61-66.
- (66) 重松頼生、原一：23回日林中支講、1974、p. 197-202.
- (67) 重松頼生：23回日林中支講、1974、p. 208-213.
- (68) 重松頼生：24回日林中支講、1976、p. 43-48.
- (69) 重松頼生：24回日林中支講、1976、p. 49-54.
- (70) 重松頼生：28回日林中支講、1980、p. 247-252.
- (71) 重松頼生、秋津裕司、稲垣利樹、今西洋：36回日林中支論、1988、p. 23-130.
- (72) 今西洋、重松頼生：36回日林中支論、1988、p. 127-130.
- (73) 古賀信也：九大演習林年報、33-34 (1990).
- (74) 古賀信也、小田一幸、堤壽一、古賀英明：九大演習林報告、66、55-68 (1992).
- (75) 又木義博、河辺純一、東寺裕康、原洋二：九大演習林報告、59、71-95 (1988).
- (76) 小泉章夫：木材学会誌、32(9)、669-676 (1986).
- (77) 小泉章夫、上田恒司：木材学会誌、32(11)、860-867 (1986).
- (78) 小泉章夫、上田恒司：木材学会誌、33(6)、450-456 (1987).
- (79) 小泉章夫：北大演習林報告、44(4)、1329-1415 (1987).
- (80) 小泉章夫、高田克彦、上田恒司、片寄禰：木材学会誌、36(2)、98-102 (1990).
- (81) 小泉章夫、高田克彦、上田恒司：木材学会誌、36(9)、704-708 (1990).
- (82) 高田克彦、小泉章夫、上田恒司：木材学会誌、38(3)、222-227 (1992).

- (83) 高田克彦、小泉章夫、上田恒司：木材学会誌、38(12)、1082-1088 (1992).
- (84) 高田克彦：北大演習林報告、51(1)、115-166 (1994).
- (85) 加納孟ほか4名：林試研報、182、113-147 (1965).
- (86) 重松頼生：28回日林中支講、1982、p. 193-198.
- (87) 重松頼生：31回日林中支講、1983、p. 241-246.
- (88) 重松頼生：33回日林中支講、1985、p. 101-104.
- (89) 重松頼生：34回日林中支論、1986、p. 91-94.
- (90) 重松頼生、石原祥生：34回日林中支論、1986、p. 95-98.
- (91) 重松頼生：35回日林中支論、1987、p. 147-150.
- (92) 重松頼生：35回日林中支論、1987、p. 151-154.
- (93) 重松頼生：木材工業、46(1)、9-16 (1991).
- (94) 安藤賢吾、小林善重、三村典彦：長野林指業報、45、264-291(1970).
- (95) 安藤賢吾、小林善重、三村典彦、百瀬公夫：長野林指業報、46、136-156 (1971).
- (96) 渡辺利一、秋山喜蔵、名取潤：山梨林試場報、7、10-17 (1982).
- (97) 大日方秀夫ら：カラマツ材の脱脂法、特公昭49-32921 (1974)、特公昭50-7121 (1975).
- (98) 種田健造、川上英夫、山科創、中野隆人：木材の研究と普及、10、4-10 (1976).
- (99) 種田健造、川上英夫、山科創、中野隆人：木材の研究と普及、6、12-20 (1977).
- (100) 中野隆人、山科創、川上英夫、種田健造：木材の研究と普及、6、12-16 (1978).
- (101) 種田健造、川上英夫、山科創、中野隆人：木材の研究と普及、11、13-18 (1978).
- (102) 種田健造：木材工業、31(5)、2-6 (1976).
- (103) 種田健造：木材工業、34(12)、6-11 (1979).
- (104) 大山幸夫ほか5名：木材の研究と普及、6、10-18 (1976).
- (105) 大山幸夫ほか5名：木材の研究と普及、8、5-10 (1977).
- (106) 大山幸夫、米田昌代、千葉宗昭、奈良直哉：木材の研究と普及、11、7-12 (1978).
- (107) 橋爪丈夫、三村典彦：29回日林中支講、1981、207-209.
- (108) 橋爪丈夫：“信州のからまつ”、1983、p. 247-262、リンケイ新聞出版局.
- (109) 三村典彦ほか5名：長野林指研報、1、19-43 (1986).
- (110) 吉田孝久、橋爪丈夫、武井富喜雄、吉野安里：36回日林中支論、1988、p. 139-142.
- (111) 吉田孝久、橋爪丈夫：日本木材学会中部支部大会講演集、1991、p. 19-20.
- (112) 長野県林業総合センター木材部：“カラマツ材利用の手引き”、1991、p. 47、長野県木材協同組合連合会.
- (113) 橋爪丈夫、吉田孝久、吉野安里、武井富喜雄：20回林業技術シンポジウム、1988、p. 40-50.
- (114) 吉田孝久ほか5名：46回日本木材学会大会研究発表要旨集、1996、p. 157.
- (115) 吉田孝久、橋爪丈夫、馬渡栄達：47回日本木材学会大会研究発表要旨集、1997、p. 161.
- (116) 鷲見博史：木材学会誌、28(8)、489-494 (1982).
- (117) 鷲見博史：木材学会誌29(2)、105-110 (1983).
- (118) 日本建築学会：“木質構造設計基準・同解説”、1995、p. 12-17、p. 155-187、丸善.
- (119) ASTM D245-93、D2915-94.
- (120) 上村武、梅原誠：林試研報、153、1-14 (1963).
- (121) 木材部・木材利用部：林試研報、319、85-126 (1982).
- (122) 中井孝、山井良三郎：林試研報、319、13-46 (1982).
- (123) Madsen, B: Can J Civ Eng, 2, 270-279 (1975).
- (124) 杉山英男：“建築構造学体系22 木構造”、1968、p. 3-15、彰国社.

- (125) 中井孝：木材工業、39(11)、42-46 (1984).
- (126) 中井孝、田中俊成：木材工業、39(5)、29-35 (1984).
- (127) 飯島泰男、中谷浩：富山県木材試験場報告、63、1-11 (1985).
- (128) 大森昭壽、池田潔彦：静岡林技セ研報、21、45-57 (1993).
- (129) 池田潔彦、大森昭壽：静岡林技セ研報、22、19-29 (1994).
- (130) 大森昭壽、池田潔彦：静岡林技セ研報、21、59-70 (1993).
- (131) 池田潔彦：木材工業、50(1)、22-25 (1995).
- (132) 池田潔彦ほか5名：静岡林技セ研報、21、33-43 (1993).
- (133) 東野正、中野正志、高柴俊雄：岩手林技セ研報、6、29-48 (1996).
- (134) 江口篤、倉谷幸作：奈良林試研報、14、40-48 (1984).
- (135) 海本一、江口篤：奈良林試研報、21、21-31 (1991).
- (136) 杉山正典、富田守泰、長谷川良一、古川邦明：岐阜林技セ研報、22、51-76 (1994).
- (137) 高橋政治、川口信隆、大久保勲：北林産試月報、402、7、5-10 (1985).
- (138) 高橋政治、川口信隆、大久保勲：北林産試月報、411、4、12-17 (1986).
- (139) 高橋政治、川口信隆：北林産試月報、414、7、5-12 (1986).
- (140) 川口信隆、高橋政治、大久保勲：北林産試場報、1(7)、1-12 (1987).
- (141) 錦織勇、中村正樹、勝部理市、安井昭：島根林技セ研報、36、9-17 (1985).
- (142) 錦織勇、勝部理市、安井昭：島根林技セ研報、37、47-55 (1986).
- (143) 錦織勇、勝部理市、安井昭：島根林技セ研報、38、51-59 (1987).
- (144) 池淵隆、錦織勇：島根林技セ研報、46、33-41 (1995).
- (145) 橋爪丈夫、向山繁人、吉田孝久、三村典彦：31回日林中支講、1983、P. 247-250.
- (146) 橋爪丈夫ほか4名：長野県林指研報、1、14-18 (1986)
- (147) 橋爪丈夫、武井富喜雄、吉田孝久：長野林総セ研報、6、79-97 (1992).
- (148) 吉村武志：徳島林総研報、26、11-30 (1988).
- (149) 坂田和則：徳島林総研報、27、1-21 (1989).
- (150) 日本木材学会木材強度・木質構造研究会：“構造用木材-強度データの収集と分析”、1988、p. 1-77.
- (151) 倉田久敬ほか4名：林産試験場研報、67、1-33 (1978).
- (152) 徳本守彦ほか8名：信大演習林報告：33、75-145 (1997).
- (153) 農林水産省告示第1626号：“枠組壁工法構造用製材の日本農林規格”、1993.
- (154) 農林水産省告示第1627号：“針葉樹の構造用製材の日本農林規格”、1993.
- (155) 農林水産省告示第111号：“構造用集成材の日本農林規格”、1996.
- (156) 畑山立義男：林試研報、326、69-167 (1984).
- (157) 中西祺周、和田博：奈良林試研報、6、51-63 (1975).
- (158) 増田稔、本田龍介：木材学会誌、40(2)、127-133 (1994).
- (159) W. L. Galligan, D. V. Sondgrass : Forest Products Journal, 20(9). 63-69 (1970).
- (160) William L. Galligan, Delos V. Snodgrass, Gerald W. Crow : USDA Forest service general technical report FPL 7、1-83 (1977).
- (161) William L. Galligan, David W. Green : Forest products journal, 30(9), 39-46 (1980).
- (162) 中井孝：木材工業、41(10)、3-7 (1986).
- (163) Robert J. Hoyle : Forest Products Journal, 33, 6, 251-254 (1961).
- (164) J. G. Sunley, W. M. Hudson : Forest products journal, 6, 155-158 (1964).
- (165) James D. Logan, P. E. : C Metrigard Inc. 1984, p. 1-28.
- (166) 神谷文夫：木材工業、40(12)、21-25 (1985).

- (167) 中村徳孫：宮崎大演習林報告、6、1-82 (1972).
- (168) 澤田稔：木材工業、35(1)、3-7 (1980).
- (169) 澤田稔：木材工業、40(2)、10-14 (1985).
- (170) 全国木材協同組合連合会資料.
- (171) 小松幸平：木材工業、43(11)、37-43 (1988).
- (172) 金田利之、本田多賀雄：7回日本木材学会中国四国支部研究発表会要旨集、1995、p. 60-61.
- (173) 岐阜県林業センター、セブン工業株式会社：“住宅部材安全性能向上事業報告書”、日本住宅・木材技術センター、1995、p. 1-54.
- (174) 祖父江信夫：木材工業、47(11)、13-19 (1992).
- (175) Nobuo Sobue：Mokuzai Gakkaishi, 32(9)、744-747 (1986).
- (176) 祖父江信夫：木材工業、42(9)、21-23 (1987).
- (177) 祖父江信夫：木材工業、45(12)、14-16 (1990).
- (178) 有馬孝禮ほか4名：材料、39(444)、1228-1234 (1990).
- (179) 有馬孝禮ほか4名：材料、42(473)、141-146 (1993).
- (180) 菱田重寿、大野浩日章、木方洋二、祖父江信夫：愛知林業セ研報、29、19-26 (1992).
- (181) 藤田晋輔ほか5名：木材工業、47(6)、266-270 (1992).
- (182) 宮内正文ほか4名：木材工業、49(7)、312-317 (1994).
- (183) 藤田晋輔ほか4名：木材工業、50(4)、160-165 (1995).
- (184) 池田潔彦、大森昭壽：静岡林技セ研報、18、25-35 (1990).
- (185) 池田潔彦：静岡林技セ研報、23、7-19 (1995).
- (186) 山吉栄作、野々田稔郎：46回日本木材学会大会研究発表要旨集、1996、p. 128.
- (187) 富田守泰、杉山正典、長谷川良一：岐阜県林技セ研報、25、39-54 (1996).
- (188) 小泉章夫ほか5名：木材学会誌、43(1)、46-51 (1997).
- (189) 中村昇ほか4名：木材工業、46(7)、315-319 (1991).
- (190) 中村昇、名波直道、有馬孝禮：木材工業、50(5)、215-219 (1995).
- (191) 藤原拓哉、細谷俊人、千葉宗昭、工藤修：北林産試場報、8(6)、25-28 (1994).
- (192) 荒武志朗、有馬孝禮、追田忠芳、中村徳孫：木材学会誌、38(11)、995-1001 (1992).
- (193) 荒武志朗、有馬孝禮：木材学会誌、40(9)、1003-1007 (1994).
- (194) 荒武志朗、有馬孝禮、追田忠芳、中村徳孫：木材工業、48(4)、166-170 (1993).
- (195) 荒武志朗、有馬孝禮：木材工業、52(6)、294-299 (1997).
- (196) 海本一、江口篤：奈良林試木材加工資料、18、1-7 (1989).
- (197) E表示製材技術委員会：“製材の機械等級区分技術開発事業報告書”、1993、p. 1-28、日本住宅・木材技術センター.
- (198) 名波直道、中村昇、有馬孝禮、大熊幹章：木材学会誌、38(8)、739-746 (1992).
- (199) 名波直道、中村昇、有馬孝禮、大熊幹章：木材学会誌、38(8)、747-752 (1992).
- (200) 名波直道、中村昇、有馬孝禮、大熊幹章：木材学会誌、39(8)、903-909 (1993).
- (201) 池田潔彦、木野直樹、青木孝輔、祖父江信夫：42回日林中支論、1994、p. 267-268.
- (202) 小玉泰義：木材学会誌、36(11)、997-1003 (1990).
- (203) 林知行：木材工業、49(11)、546-551 (1994).
- (204) 飯島泰男：富山木試研報、1、1-39 (1983).
- (205) Wilson, T. R. C. and Cottingham, W. S. : U. S. F. P. L Report, R 1687 (1952).
- (206) Freas, A. D. and Selbo, M. L. : U. S. Department of agriculture technical bulletin No. 1069, 1-220 (1954).

- (207) Curry, W. T. : Forest products research, special report, No. 15, 1-50 (1961).
- (208) R. C. Moody, Billy Bohannon : USDA Forest service research paper FPL 151, 1-36 (1971).
- (209) R. C. Moody, Billy Bohannon : USDA Forest service research paper FPL 127, 1-20 (1970).
- (210) Catherine M. Marx, Russel C, Moody : USDA Forest products laboratory research paper FPL 380, 1-20 (1981).
- (211) Russell C. Moody, Peder P. De Sousa, J. Kevin Little : Forest Products journal, 38 (10), 39-45 (1988).
- (212) R. C. Moody : USDA Forest service research paper FPL 138, 1-19 (1970).
- (213) Catherine M. Marx, James W. Evans : Forest products journal, 36(10), 13-19 (1986).
- (214) Patrick J. Pellicane, Kim Stanfill-Mcmillan, Robert J. Tichy : Forest products journal, 37(5), 13-16 (1987).
- (215) K. L. Showalter, F. E. Woeste, B. A. Bendtsen : USDA Forest Products Laboratory Research paper, 482, 1-10 (1987).
- (216) Allan G. Burk, Donald A. Bender : Forest products journal, 39(3), 45-50 (1989).
- (217) Frank Lam, Erol Varoglu : Forest products journal, 40(5), 37-42 (1990).
- (218) Steven E. Taylor, Donald A. Bender : Wood and Fiber Science, 23(4), 501-519 (1991).
- (219) Steven E. Taylor, Donald A. Bender, D. Earl Kline. Karen S. Kline : Forest Products Journal, 42(2), 23-30 (1992).
- (220) Friend K. Bechtel : Forest products Journal, 42(2), 53-56 (1992).
- (221) William L. Galligan, Brad E. Shelley. Roy F. Pellerin : Forest products journal, 43(4), 70-74 (1993).
- (222) 中西祺周 : 奈良林試研報 : 5、83-87 (1974).
- (223) 中西祺周、和田博 : 奈良林試研報、5、89-94 (1974).
- (224) 中西祺周、和田博 : 奈良林試研報、7、29-37 (1978).
- (225) 中西祺周、和田博 : 奈良林試研報、8、16-23 (1979).
- (226) 中西祺周、和田博 : 奈良林試研報、9、18-29 (1980) .
- (227) 中西祺周、和田博、的場三輪子 : 奈良林試研報、10、17-22 (1981).
- (228) 藤井毅 : 木材工業、35(1)、8-14 (1980).
- (229) 藤井毅 : 木材工業、35(2)、15-20 (1980).
- (230) 有馬孝禮 : 木材工業、39(10)、9-14 (1984)
- (231) 丸山則義、有馬孝禮 : 日本建築学会大会学術講演梗概集、関東、1984、p. 2683-2684.
- (232) 中野正志、東野正 : 日林東北支部会誌、37、277-278 (1985) .
- (233) 中野正志、東野正 : 日林東北支部会誌、38、339-340 (1986).
- (234) 東野正、中野正志 : 日林東北支部会誌、37、279-280 (1985).
- (235) 東野正、中野正志 : 日林東北支部会誌、38、337-338 (1986).
- (236) 東野正、中野正志 : 岩手林試成果報告、22、79-84 (1989).
- (237) 東野正、中野正志 : 岩手林試成果報告、22、69-78 (1989).
- (238) 江口篤 : 奈良林試研報、17、42-46 (1987).
- (239) 江口篤 : 奈良林試木材加工資料、16、8-12 (1987).
- (240) 江口篤、海本一、中西祺周 : 奈良林試研報、18、38-45 (1988).
- (241) 海老原徹ほか 4 名 : 38回日本木材学会大会研究発表要旨集、1988、p. 132.
- (242) 小野広治、今村祐嗣 : 奈良林試研報、30-35 (1980).

- (243) 小松幸平他 4 名 : 木材工業、41(11)、25-28 (1986).
- (244) 池田潔彦ほか 6 名 : 静岡林業技セ研報、19、1-15 (1991).
- (245) 池田潔彦、伊藤勝啓 : 静岡林技セ研報、22、9-18 (1994).
- (246) 小泉章夫、飯島泰男、佐々木貴信、岡崎泰男 : 木材学会誌、43(2)、210-214 (1997).
- (247) 飯島泰男ほか 4 名 : 木材学会誌、43(2)、159-164 (1997)
- (248) 飯島泰男ほか 4 名 : 木材学会誌、43(2)、165-170 (1997).
- (249) 石井誠ほか 4 名 : 北林産試場報、2(3)、1-12 (1988).
- (250) 長谷部薫、薄木征三、飯島泰男、藤原直之 : 土木学会誌、41A、3、907-913 (1995).
- (251) 林知行、宮武敦 : 木材学会誌、37(3)、200-205 (1991).
- (252) 林知行、宮武敦、星通 : 木材学会誌、38(3)、247-255 (1992).
- (253) 堀江秀夫、倉田久敬 : 北林産試研報、73、1-34 (1984).
- (254) 堀江秀夫、倉田久敬、石井誠 : 北林産試研報、76、45-71 (1986).
- (255) 堀江秀夫、倉田久敬 : 北林産試月報、9、5-16 (1981).
- (256) 堀江秀夫、倉田久敬 : 北林産試月報、4、1-7 (1982).
- (257) 堀江秀夫、倉田久敬 : 北林産試月報、381、10、14-16 (1983).
- (258) 柳川靖夫、和田博 : 奈良林試研報、20、39-45 (1990).
- (259) 柳川靖夫、上田正文 : 奈良林試研報、22、36-44 (1992).
- (260) 柳川靖夫、上田正文 : 奈良林試研報、23、1-6 (1993).
- (261) 大籠幸治ほか 4 名 : 農工大演習林報告、30、21-33 (1992).
- (262) 松藤剛ほか 5 名 : 木材学会誌、38(12)、1089-1097 (1992).
- (263) 森光正ほか 7 名 : 木材工業、46(10)、462-467 (1991).
- (264) 和田博 : 木材工業、51(12)、587-590 (1996).
- (265) 浅野猪久夫 : 名大演習林報告、4、1-45 (1965).
- (266) 倉田久敬 : 林産試験場研報、70、1-130 (1981).
- (267) 王潜、林知行、佐々木光、長谷泰弘 : 木材学会誌、36(8)、624-631 (1990).
- (268) 林知行、宮武敦 : 材料、44(498)、273-278 (1995).
- (269) 林知行ほか 4 名 : 木材学会誌、41(1)、103-109 (1995).
- (270) 林知行、宮武敦、星通、山路和義 : 木材学会誌、38(11)、1026-1034 (1992).
- (271) 林知行、宮武敦、高野勉、星通 : 木材学会誌、39(9)、980-984 (1993).
- (272) 林知行 : 木材工業、45(8)、7-12 (1990).
- (273) 林知行 : 木材学会誌、35(11)、1048-1057 (1989).
- (274) 林知行 : 木材学会誌、35(12)、1144-1153 (1989).
- (275) 林知行 : 材料、39(444)、1197-1202 (1990).
- (276) 林知行 : 木材学会誌、36(10)、812-818 (1990).
- (277) 林知行 : 木材学会誌、37(10)、904-911 (1991).
- (278) 小松幸平 : “木構造設計資料MT-2”、1991、p. 1-10、日本住宅・木材技術センター.
- (279) 平嶋義彦、山本幸雄、鈴木滋彦 : 木材学会誌、40(11)、1172-1179 (1994).
- (280) 三橋博三、板垣直行、伊藤彦紀、鈴木登 : 木材学会誌、42(2)、122-129 (1996).
- (281) 上杉三郎 : 木材学会誌、39(1)、58-68 (1993).
- (282) 上杉三郎 : 木材学会誌、39(10)、1201-1207 (1993).
- (283) 上杉三郎 : 木材学会誌、40(4)、424-428 (1994).
- (284) 鈴木直之 : 木材工業、52(6)、278-282 (1997).
- (285) Billy Bohannan : U. S. Forest service research paper FPL 56(5). 1-30 (1966).
- (286) Borg Madsen, Andrew H. Buchanan : Can. J. Civ. Eng. 13, 218-232 (1986).

- (287) John Peterson : Forest products journal, 43(3), 27-30 (1993).
- (288) 角谷和夫、杉原彦一 : 木材学会誌、3(5)、168-173 (1957).
- (289) 大河平行雄、増田稔、鈴木直之 : 三重大学生物資源紀要、1、1-6 (1988).
- (290) 大河平行雄、増田稔、鈴木直之 : 三重大学生物資源紀要、2、13-21 (1989).
- (291) 鈴木直之、大河平行雄 : 三重大学農学報、70、45-53 (1985).
- (292) 増田稔、大河平行雄 : 三重大農学報、71、61-69 (1985).
- (293) 飯島泰男 : 日本建築学会梗概集、構造Ⅱ、1986、p. 1265-1266.
- (294) 林知行、鷺海四郎 : 木材学会誌、39(9)、985-992 (1993).
- (295) 林知行、宮武敦、宮原久光 : 木材工業、52(1)、15-19 (1997).
- (296) 林業試験場土壌部監修 : “森林土壌の調べ方とその性質”、1982、p. 65-99、林野弘済会.
- (297) 建築基準法施行令第95条.
- (298) 建設省住指発第195号 : “針葉樹構造用製材の取り扱いについて”、1996.
- (299) 橋爪丈夫、斎藤健、野田道雄、石原茂久 : 木材学会誌、43(2)、141-148 (1977).
- (300) 著者代表伏谷賢美 : “木材の物理”、1985、p. 143-144、文英堂.
- (301) 橋爪丈夫、斎藤健、石原茂久 : 木材学会誌、43(11)、965-970 (1997).
- (302) 林業試験場監修 : “木材工業ハンドブック”、1982、p. 27、p. 109-110、丸善.
- (303) “構造用集成材の適正製造基準”、1996、p. 1-66、日本合板検査会.
- (304) 橋爪丈夫、吉田孝久、石原茂久 : 木材学会誌、43(8)、647-654 (1997).
- (305) 橋爪丈夫、吉田孝久、斎藤健、石原茂久 : 木材学会誌、43(11)、940-947 (1997).
- (306) 三村典彦、橋爪丈夫 : 長野林指業報、54、167-182 (1979).
- (307) 橋爪丈夫、吉田孝久、武田孝志、石原茂久 : 木材学会誌、44(1)、(1998).
- (308) 丸山則義ほか4名 : 38回日本木材学会大会研究発表要旨集、1988、p. 133.
- (309) 橋爪丈夫、斎藤健、武田孝志、石原茂久 : 材料、46(4)、395-400 (1997).
- (310) 武田孝志、橋爪丈夫 : 材料、46(7)、839-844 (1997).
- (311) 平嶋義彦 : 木材学会誌、41(12)、1063-1069 (1995).
- (312) 千葉一弘ほか4名 : 第46回日本木材学会大会研究発表要旨集、1996、p. 138.
- (313) 森田宅満、小館善樹 : 第47回日本木材学会大会研究発表要旨集、p. 143.
- (314) Nobuo Sobue : Mokuzai Gakkaishi、32(4)、274-279 (1986).
- (315) 外崎真理雄、岡野健、浅野猪久夫 : 木材学会誌、29、547-552 (1983).
- (316) Ronald W. Wolfe, Russel C. Moody : USDA Forest products laboratory research paper FPL 333, 1-20 (1979).
- (317) Peterson, J., D. Noziska : Forest Prod. J, 23(11), 50-51(1973).
- (318) 堀江和美 : 木材工業、47 (8)、375-377 (1992).

