

MECHANICAL PROPERTIES
OF COMPRESSION PARALLEL TO GRAIN
IN STRUCTURAL WOOD-BASED MATERIALS
構造用木質材料における縦圧縮の力学特性

MARINA TOTSUKA
戸塚 真里奈

Doctoral Dissertation

博士論文

Mechanical properties of compression parallel to
grain in structural wood-based materials

構造用木質材料における
縦圧縮の力学特性

Marina Totsuka

戸塚 真里奈

東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物材料科学専攻 木質材料学研究室

2021 年 3 月 19 日

目次

1. 緒言	1
1.1 はじめに	1
1.2 木材の縦圧縮に関する試験法	8
1.3 木材の縦圧縮強さに関する既往研究	9
1.3.1 小試験体の実験的研究	9
1.3.2 キンクバンドモデル (kink band model)	10
1.3.3 実大材の実験的研究	13
1.3.4 後期破壊線 (ASTM D 143-14)	13
1.4 木材の縦圧縮ヤング係数に関する既往研究	14
1.5 木材の部分縦圧縮に関する既往研究	15
1.6 CLT の部分圧縮に関する既往研究	16
1.7 本論文の位置付け	17
2. 製材の全面縦圧縮, 部分縦圧縮	19
2.1 目的	19

2.2	実験概要	21
2.2.1	試験体及び試験方法	21
2.3	実験結果と考察	25
2.3.1	応力－ひずみ関係と破壊モード	25
2.3.2	ひずみ分布	32
2.3.3	最大応力とヤング係数の決定方法	34
2.3.4	密度と年輪幅	35
2.3.5	余長効果 (Spreading effects)	38
2.3.6	寸法効果 (Size effects)	41
2.3.7	縦ヤング係数	43
2.4	まとめ	44
3.	縦圧縮下の小試験体の表面形状	46
3.1	はじめに	46
3.2	実験概要	48
3.2.1	試験体及び試験方法	48
3.3	実験結果と考察	53
3.3.1	荷重－変位関係と変形形状	53
3.3.2	ダメージゾーンの定義	57
3.3.3	各パラメータがダメージゾーン，最大応力に与える影響	58
3.3.4	表面性状パラメータ	61
3.3.5	表面性状パラメータとダメージゾーンの長さ	62
3.3.6	載荷荷重とうねり曲線，粗さ曲線	64
3.4	まとめ	67
4.	集成材の全面縦圧縮	68
4.1	目的	68

4.2	実験概要	70
4.2.1	試験体及び試験方法	70
4.2.2	材料試験	77
4.3	実験結果と考察	79
4.3.1	応力－ひずみ関係と破壊モード	79
4.3.2	最大応力とヤング係数の決定方法	84
4.3.3	縦圧縮強さとヤング係数	85
4.3.4	縦圧縮強さの寸法効果(Size effects)	89
4.3.5	圧縮ひずみ分布とダメージゾーンの長さ	91
4.3.6	表面形状パラメータと試験体寸法	98
4.3.7	表面形状パラメータとダメージゾーンの長さ	99
4.4	まとめ	100
5.	縦圧縮ヤング係数評価式	102
5.1	目的	102
5.2	縦ヤング係数の評価法	103
5.2.1	モデル化	103
5.2.2	ダメージゾーンの長さ (x) の影響因子	104
5.2.3	ダメージゾーンの長さ (x)	108
5.2.3.1	ダメージゾーンの長さ (x) の特徴	108
5.2.3.2	最強リンクモデル (Strongest link model)	109
5.2.4	ダメージゾーンのヤング係数 ($E_{L,d}$)	116
5.2.4.1	ダメージゾーンのヤング係数 ($E_{L,d}$) の影響因子	116
5.2.4.2	ダメージゾーンのヤング係数 ($E_{L,d}$) の特徴	117
5.3	提案式と実験値の比較	118
5.4	提案式による既往の引きボルト式継手実験の剛性評価	124

5.5	まとめ	130
6.	CLT の面内部分圧縮	131
6.1	目的	131
6.2	実験概要	134
6.2.1	CLT 木口面の部分圧縮実験概要	134
6.2.1.1	試験体	134
6.2.1.2	試験方法	137
6.2.2	CLT を構成するラミナの材料試験	138
6.3	実験結果と考察	140
6.3.1	応力－ひずみ関係と特性値	146
6.3.2	CLT 木口面の部分圧縮特性値への影響因子	146
6.3.2.1	支圧幅	146
6.3.2.2	余長	148
6.3.2.3	支圧位置	150
6.3.2.4	幅はぎ接着の有無	151
6.4	まとめ	152
7.	CLT の面内部分圧縮理論式	153
7.1	目的	153
7.2	めり込み式	154
7.3	FEM 解析	157
7.3.1	FEM 解析モデル	157
7.3.2	材料特性	159
7.3.3	解析結果と実験結果の比較	160
7.4	FEM 解析による CLT のへこみ形状検討	162
7.5	CLT の面内部分圧縮理論式	166

7.5.1 ヤング係数-----	166
7.5.2 降伏応力-----	168
7.5.3 最外層ラミナの有効断面-----	169
7.6 まとめ-----	171
8. 結言-----	172
8.1 各章のまとめ-----	172
8.2 今後の課題-----	178
謝辞-----	179
参考文献-----	181
付録 A 関連論文-----	187
付録 B 各章のデータ-----	190

夢を追わせてくれた両親に感謝を込めて

そして、これから夢を見つける人に期待を込めて

1. 緒言

1.1 はじめに

木材を建築などの構造材料として使う場合、種々の外力を受けて生ずる部材応力とそれに対応する変形挙動が重要な問題となる。主要な変形挙動の一つに繊維方向圧縮（縦圧縮と呼ばれる）がある。平成 22 年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律¹⁾」が施行され、木造建築物は従来の住宅規模から事務所や学校・役所などの公共建築物といった中大規模にスケールアップする動きが活発になっている。中大規模では、縦圧縮変形が建物全体の変形に対して担う割合が住宅規模の場合に比べ増加するため重要になる。

最も基本的な縦圧縮変形をする部材は鉛直力および地震などによる水平力を受ける柱（Figure 1.1）である。特に柱が大きな金物と接する場合や鉄骨梁、コンクリート梁・床と接する場合は木質構造柱に無視できない縦圧縮変形や縦圧縮破壊が生じる。また、接合部における縦圧縮変形・破壊は建物全体に対して担う割合が大きい。例えば、引きボルト接合（Figure 1.2）では座金直下の木材が縦圧縮変形・破壊する。柱と土台の接合部では圧縮側で三角めり込みになる（Figure 1.3）。Figure 1.4 のように芯材を鋼板、その外周を木で一体化した要素がラチス形状にユニット化した耐震壁（前田建設”木鋼組子”²⁾）では引張力を鋼板で、圧縮力を木材の縦圧縮で負担する。その

他、ラフトトラス (Figure 1.5) ³⁾の木-木接合部でも角度のついた縦圧縮になる。また、鋼構造に CLT (Cross laminated timber) 耐震壁を用いた場合、水平力下において、その接合部では部分縦圧縮と部分横圧縮(繊維直交方向圧縮)が合わさった CLT の面内部分圧縮抵抗になる (Figure 1.6)。

このように縦圧縮は様々な部分で生じる可能性がある。特に中大規模木質構造や混構造においては縦圧縮の力学特性を把握する重要性が高い。無論、縦圧縮に関する研究は数多く行われている。しかし、これらは木材の基礎物性把握を目的とした無欠点小試験体の研究が中心であり、中大規模木質構造で使われる実大材を対象とした研究は少ない。特に縦圧縮の接合部付近の剛性や寸法効果、余長効果は未解明である。縦圧縮の研究が、木材の基礎物性把握を目的とした無欠点小試験体にとどまり実大材が少ない背景には、住宅などの低層建築では縦圧縮変形の割合が全体の変形に比べ少なく、縦圧縮破壊もあまり生じなかったためだと思われる。一方、中大規模木質構造が増加する近年においては実大材の縦圧縮特性の把握は急務である。

本論文では建築の構造用材料として、より木材・木質材料を中大規模建築へ利用しやすくすることを目的に、針葉樹(スギ、ヒノキ、スプルース)の製材、集成材、CLT を対象に縦圧縮 (CLT は面内部分圧縮) の研究を行った。

前記のとおり、木材の縦圧縮に関する研究は古くから行われており、17 世紀から 20 世紀前半頃までの研究の略歴を下記に記す。まず 17 世紀の中頃、Mariotte (フランス人:1620~1684)⁴⁾ が、木材の丸棒や矩形断面棒を片持梁条件で曲げ試験し、抵抗モーメントを計算するために、その引張側繊維の伸びと圧縮側繊維の縮みを推定した。1922 年に Baumann⁵⁾ が、1932 年に Ryska⁶⁾ が直六面体の試験体を用いて縦圧縮試験を行い、縦圧縮強さを得る際の断面の一辺の長さ a と繊維に沿った長さ h の比 h/a の適当な範囲 ($h/a=2\sim4$ が適当で、 $h/a=3$ が最適) を示した。1953 年には Frey-Wyssling⁷⁾ が縦圧縮の破壊では傾斜した座屈線があらわれることに言及している。我が国においては 1939 年に関谷⁸⁾ が、1954 年に北原、蕪木、村木が⁹⁾、1982 年に澤田¹⁰⁾ が木材の縦圧縮について纏めている。次節以降ではこれらの既往研究に加え、20 世紀後半以降の既往研究、さらに試験法等について詳しく述べる。



Figure 1.1 木質構造柱の例



Figure 1.2 引きボルト接合部

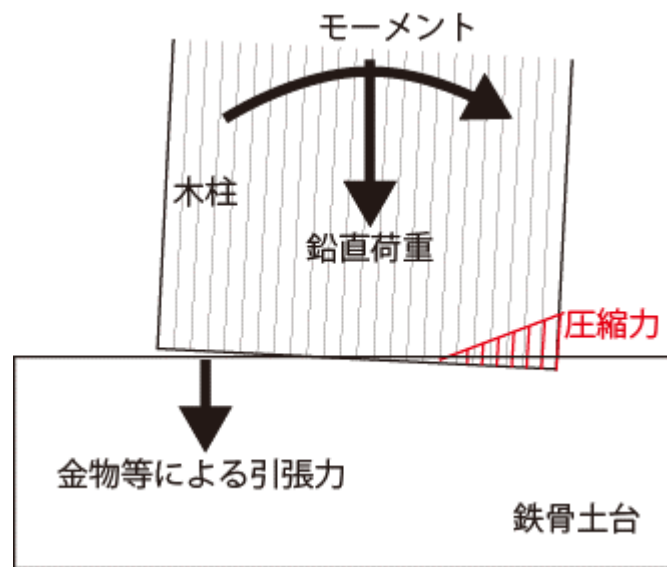


Figure 1.3 柱と土台の接合部

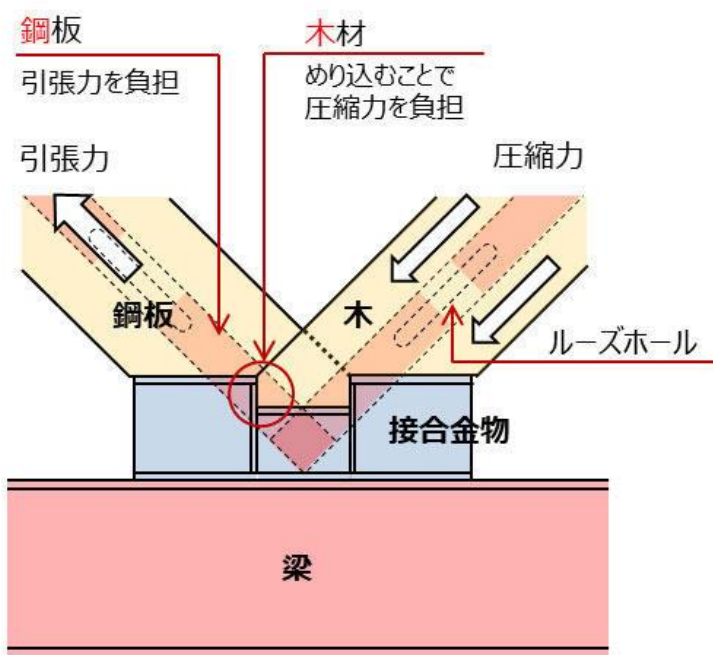
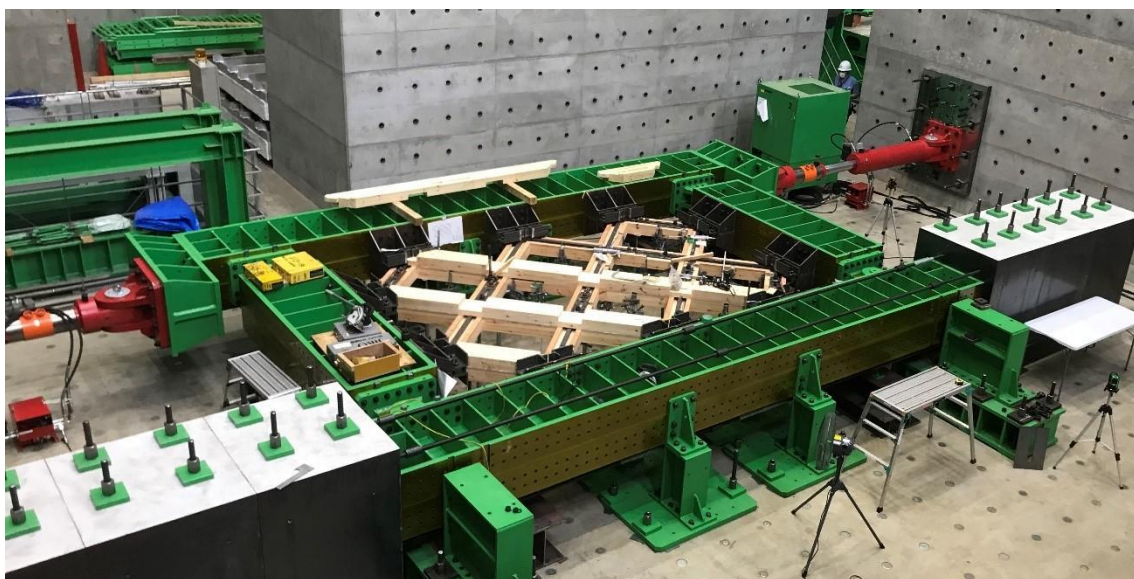


Figure 1.4 木材と鋼板による耐震壁（木鋼組子）²⁾



Figure 1.5 ラフタートラス³⁾

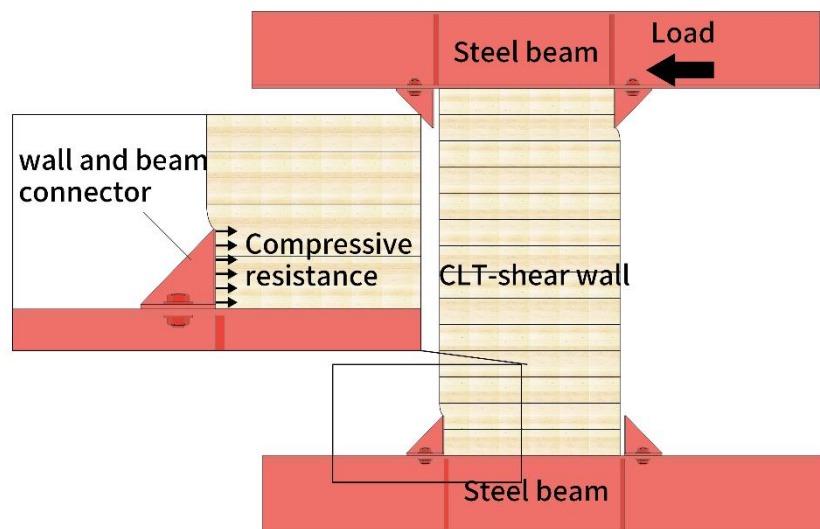


Figure 1.6 CLT 耐震壁を鋼構造に用いた例

1.2 木材の縦圧縮に関する試験法

Table 1.1 に木材の縦圧縮試験法に関する規格を示す。小試験体については日本産業規格 (JIS) Z 2101 : 2009¹¹⁾と ASTM D 143-14¹²⁾ で木材の縦圧縮強さ、縦圧縮比例限度応力及び縦圧縮ヤング係数の測定方法について規定している。試験体寸法はほぼ同じでともに単調加力である。構造用木材については ASTM D 198-15¹³⁾ と ISO 13910 : 2014¹⁴⁾, ISO 8375:2017¹⁵⁾で縦圧縮強さと縦圧縮ヤング係数の測定方法について規定している。我が国で構造用木材の試験法を網羅的に提案しているのは「構造用木材の強度試験マニュアル (以下, HOWTEC) ¹⁶⁾」であるため規格ではないが紹介する。ASTM D 198-15 と ISO 13910 : 2014 では試験体の繊維に沿った長さをそれぞれ、細長比 $h/a \leq 17$ または長辺の長さの 8 倍+2 m とし、座屈が生じないよう拘束治具を用いる。また、ISO 13910 : 2014 では別法として、繊維に沿った長さ方向に数分割し、その内の最低値で決定する方法も提案されている。ISO 8375 : 2017 では繊維に沿った長さを短辺の 6 倍と規定している。HOWTEC では試験の行いやすさを考慮し ISO 8375 : 2017 に従って試験体の繊維に沿った長さを断面の短辺の長さの 6 倍と規定している。

Table.1.1 木材の縦圧縮試験法に関する規格

		試験体寸法	
		加力断面	繊維に沿った長さ
小試験体	JIS Z 2101 : 2009	20~30mm の正方形	断面の一辺の長さの 2~4 倍
	ASTM D 143-14	25 又は 50mm の正方形	断面の一辺の長さの 4 倍
実大材	HOWTEC 法	-	断面の短辺の長さの 6 倍
	ASTM D 198-15	-	$h/a \leq 17$
	ISO 13910 : 2005	-	断面の長辺の長さの 8 倍+2m
	ISO 8375 : 2017	-	断面の短辺の長さの 6 倍

1.3 木材の縦圧縮強さに関する既往研究

1.3.1 小試験体の実験的研究

木材試験体の繊維方向に荷重を加えて、破壊するまでの最大荷重 P_m をもとの断面積 A で割った値を縦圧縮強さ f といい、次式で求める。

$$f = \frac{P_m}{A} \quad (1.1)$$

式 1.1 の最大荷重 P_m を比例限荷重 P_p に置き換えると縦圧縮比例限度 f_p になる。木材の縦圧縮破壊強度とその比例限度との関係はほぼ一定であり、針葉樹材の比例限度は平均して破壊強度の約 80% であり、広葉樹では約 75% である¹⁷⁾。

縦圧縮の破壊は繊維が局所的にせん断変形するキンクバンド (kink band) 破壊である。巨視的には、柁目面では圧縮軸に対して直交に、板目面では圧縮軸に対して $40^\circ \sim 60^\circ$ に傾斜した皺ができる (Figure 1.7)⁷⁾。

縦圧縮による直六面体木材の破壊の過程を観察すると、比例限度以下の比較的低い応力状態においても、細胞壁のミセル軸の傾斜と思われる滑り線 (Slip line) が観察され、荷重がこれより増大すると、Figure 1.8 のようにまさ目面では壁孔部に、板目面では放射組織の周囲に圧壊によるしわを生じる¹⁸⁾。さらに荷重が増大すると、Figure 1.9 のように細胞壁に褶曲や折れ曲がりを生じて破壊する。

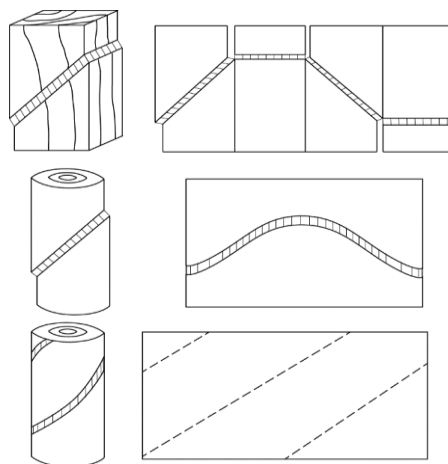


Figure 1.7 キンクバンドのあらわれ方⁷⁾

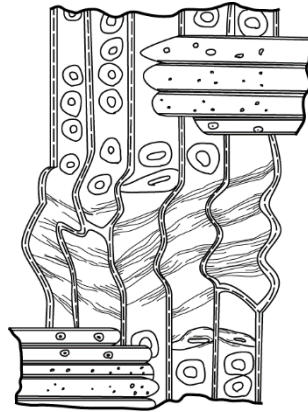


Figure 1.8 縦圧縮による仮道管の重縁壁孔付近の圧壊（スプルース）¹⁸⁾

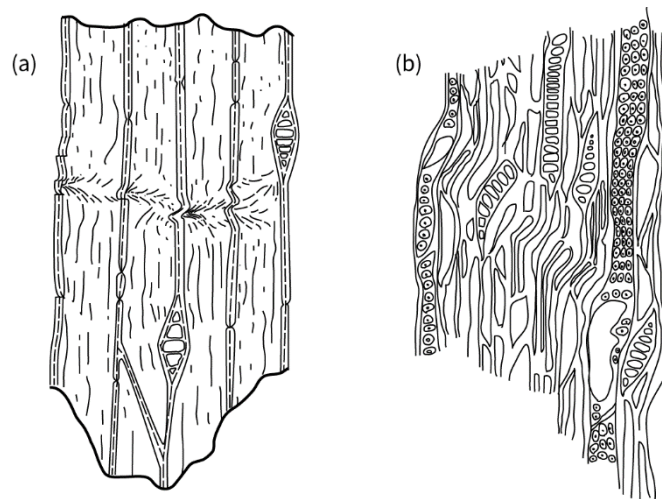


Figure 1.9 縦圧縮による (a) 破壊初期の仮道管壁の褶曲（スプルース，板目面）(b) 繊維の折れ曲がり（チェスナット，板目面）¹⁸⁾

1.3.2 キンクバンドモデル (kink band model)

Figure 1.7-1.9 と類似した破壊モードが圧縮下の炭素繊維複合材料や岩石，結晶でも見られる。炭素繊維複合材料や岩石，結晶ではこの破壊モードをキンクバンドモデルによって説明している¹⁹⁾⁻²⁴⁾。キンクバンドはすべり面が局部的に折れ曲がり，格子方向が回転している帯状帯である (Figure 1.10)。キンクバンド形成の力学条件は普通の褶曲やせん断とは異なり，一つの重要な

破壊条件である。Poulsen は初めて木材の小試験体の縦圧縮メカニズムを網羅的にキンクバンドモデルにより説明した²⁵⁾。Figure 1.11 に木材の縦圧縮の応力－ひずみ曲線とキンキングの様子を，Figure 1.12 に単一繊維のキンクバンド形成の詳細を示す。比例限度を過ぎると転々とした初期のキンキングが見られ（Incipient Kinking），最大荷重を過ぎるとキンキングがつながり試験体を横断するキンクバンドになる（Transient Kinking）。キンクバンド角がある一定の角度（スプルースでは約 23°）になると荷重が一定になり，一定のキンクバンド角をたもったままキンクバンド幅が増加する（Steady-State Kinking）。

Benabou は Budiansky と Fleck が提案するキンクバンド内の力のつり合い式（式 1.2，1.3）²³⁾とキンクバンド内の降伏クライテリア（式 1.4）を用いて縦圧縮強さの推定をおこなった²⁶⁾。

$$-\sigma \cos(\beta) \cos(\varphi + \gamma) = \sigma_L \cos(\beta - \varphi - \gamma) + \tau_{LT} \sin(\beta - \varphi - \gamma) \quad (1.2)$$

$$\sigma \cos(\beta) \sin(\varphi + \gamma) = \sigma_T \sin(\beta - \varphi - \gamma) + \tau_{LT} \cos(\beta - \varphi - \gamma) \quad (1.3)$$

$$F = -(\sigma_T - \sigma_{T0} - a_0)^2 + \frac{\tau_{LT}^2}{\tan^2 \varphi} + a_0^2 \quad (1.4)$$

ここで， σ ：縦圧縮応力， β ：キンクバンド角， φ ：繊維の初期不整配向角， γ ：キンクバンドの回転角， σ_L ， σ_T ：キンクバンド内の L または T 方向の応力， τ_{LT} ：キンクバンド内の LT せん断応力， σ_{T0} ：繊維直交方向引張強さ， a_0 ：ラフネスパラメータ（Figure 1.13）。スプルースとビーチの小試験体の実験値と Benabou による推定値は近い値を示した²⁶⁾。

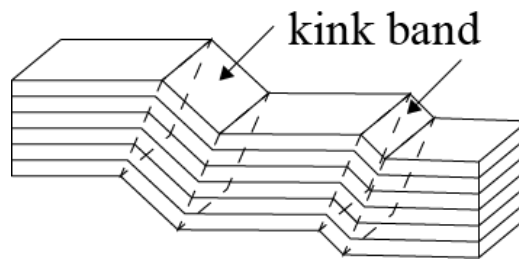


Figure 1.10 キンクバンドと各部の名称¹⁹⁾

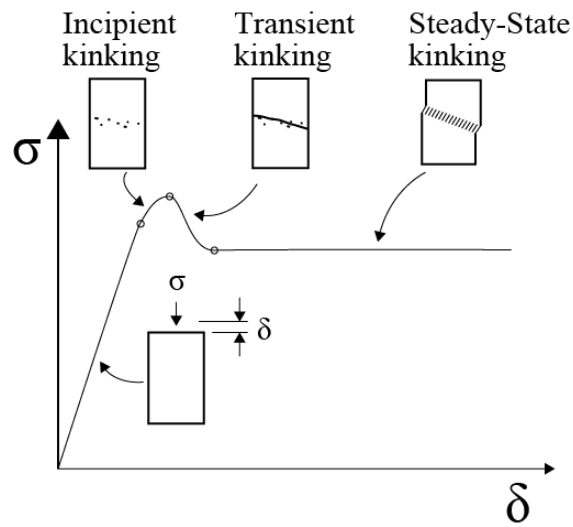


Figure 1.11 木材の縦圧縮の応力-ひずみ曲線とキンキング（スプルース）²⁵⁾

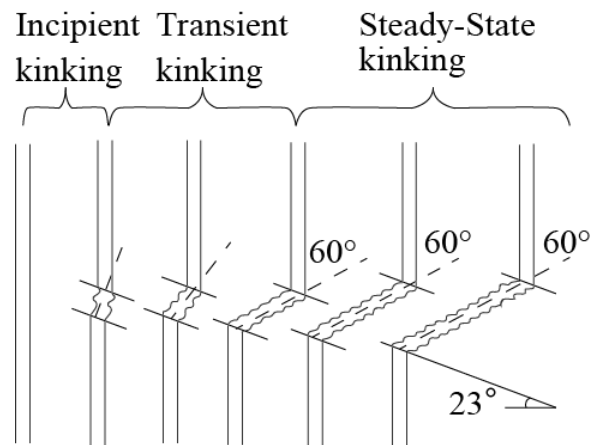


Figure 1.12 木材の単一繊維のキンクバンド形成の詳細²⁵⁾

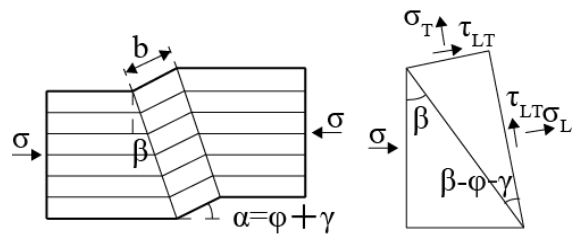


Figure 1.13 キンクバンドモデルと力のつり合い²⁶⁾

1.3.3 実大材の実験的研究

構造材料としての木材の力学的性質の評価は、実際に使用される寸法で試験された結果を基本とすることが最も適切である。しかし、試験の利便性から JIS で規定されている無欠点小試験体を用いることが多い。欠点を含む実大材（製材）の縦圧縮強さの平均値は無欠点小試験体の、約 96%（ヒノキ，断面 105mm×105mm×長さ 315mm）または約 94%（ベイマツ，断面 105mm×105mm×長さ 315mm）である²⁷⁾。しかし、既往研究が少なく評価法の提案には至っていない現状がある。

1.3.4 後期破壊線（ASTM D 143-14）

直六面体の無欠点小試験体に生ずる後期破壊線を ASTM D 143-14¹²⁾では次のように分類している（Figure 1.14）。

- a) 圧座型：破壊面がほぼ水平で，試験体の両端が比較的湿っている場合におこる型。
- b) 楔状き裂型：せん断とき裂が組み合わされた型。
- c) せん断型：破壊面が試験体の軸に急傾斜している型で，ふつう最も多くあらわれる。
- d) 割裂型：鉛直面に沿って繊維が割裂される型で，非常に乾燥した木材に時々あらわれる。
- e) 繊維に平行方向の圧縮とせん断の複合型：ふつう交走木理の試験体にあらわれる型で，この試験体値は除外する。
- f) ほうき状横倒し型：端部が横方向に押し倒される型。

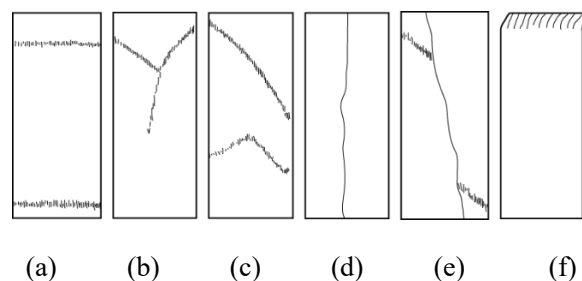


Figure 1.14 試験体に生ずる後期破壊線¹²⁾

1.4 木材の縦圧縮ヤング係数に関する既往研究

木材試験体縦圧縮では加力板付近の変形が大きい「ダメージゾーン」とダメージゾーンに挟まれた「ミドルゾーン」が存在する (Figure 1.15) ²⁸⁾。ミドルゾーンのヤング係数については数多くの研究がなされており ⁹⁾¹⁰⁾¹⁷⁾, 引張が圧縮より少し大きい値を示す傾向があるが ²⁹⁾³⁰⁾, 実用的にはほぼ等しいとみてよい ³¹⁾。

ミドルゾーンのヤング係数の測定には短柱の圧縮試験によるミドルゾーンの応力-ひずみ曲線から求める方法 (静的試験法) と縦共振による固有振動数から求める方法 (動的試験法, 縦振動法) がある。動的試験法から求めた動的ヤング係数は静的試験法から求めた静的ヤング係数より 5~10% 程度大きな値を示す。理由は粘弾性体である木材に静的測定を適応した場合, 応力の大きさや負荷時間の影響で塑性ひずみの影響が避けられないためである ¹⁶⁾³²⁾³³⁾。この点では, 静的試験法よりも動的試験法の方が本来の物理的なヤング係数に近い値を得られると考えられる。

ダメージゾーンの変形は柱の接合部変形や引きボルトの座金直下の木材の変形の大部分を占める場合があり重要となる。Brabec らは画像相関法を用いて無欠点小試験体木材 (ビーチ, スプルース) の縦圧縮変形を観察し, ダメージゾーンの圧縮ひずみが支圧板に近づくにつれ減少することを示した ³⁴⁾。しかし, ダメージゾーンに関する研究は少なく, 未解明点が多い。

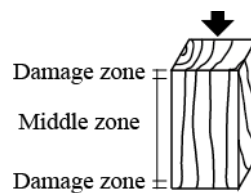


Figure 1.15 縦圧縮木材におけるダメージゾーンとミドルゾーン

1.5 木材の部分縦圧縮に関する既往研究

部分横圧縮（繊維直交方向めり込み）は支圧板まわりにある木材（余長部の木材）の影響を受けるため、余長の大小によって初期剛性、降伏耐力が変わる。日本では稲山式や EPM 式がその評価法として提案されている³⁵⁾。海外では部分横圧縮強度における余長効果を Stress Spreading として扱っている^{36) 37)}。

一方、部分縦圧縮（繊維方向めり込み）では既往研究³⁸⁾はあるものの、ダメージゾーンのメカニズムが解明されていないため、理論的な評価法は存在しない。また、部分横圧縮のように余長効果があるかについても検討が必要である。

1.6 CLT の部分圧縮に関する既往研究

挽き板を層ごとに繊維方向が直交するよう接着した大断面の木質材料である CLT は既に欧州で中高層建築物の構造部材として用いられている。わが国でも公共建築物等の木造化を推進していくための手段の一つとして CLT が注目されており、特に、CLT の生産および利活用を普及促進することにより地域林業・木材産業の活性化が期待される。

CLT は面内せん断剛性が非常に大きい材料であるため、その有効活用例として鉄筋コンクリート造や鉄骨造のフレームに嵌めこみ、耐力壁として水平せん断力を負担させることが考えられる。Figure 1.16 のように鉄骨造の耐震壁として CLT を使用することを想定した場合、CLT 端部のみを鋼材に留め付けることでせん断抵抗させる機構が考えられるが、そのような仕様では CLT 木口面の部分圧縮により水平力を伝達する機構となる。

CLT の部分圧縮について CLT 表面へ加力する場合、Brandner³⁹⁾ らによる応力分布モデルの提案や Serrano⁴⁰⁾ らによる余長や CLT 表面の繊維方向が部分圧縮強度に与える影響を検討したものなど多くの既往研究がある。CLT 木口面へ加力する場合、井道ら⁴¹⁾ による比例限度応力算定式の提案（CLT 木口面および表面に適応可能）や張⁴²⁾ らによる引きボルト接合部の研究の一部として行われた部分圧縮強度推定式の提案がある。しかし、CLT 木口面へ加力する場合では支圧幅や余長が限定された範囲の研究にとどまっており、更なる検討の余地がある。

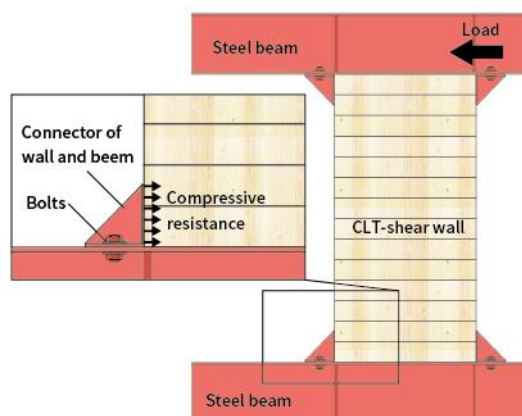


Figure 1.16 鉄骨造の耐震壁として CLT を使用した例

1.7 本論文の位置付け

Table 1.2 に縦圧縮の既往研究のまとめおよび本論文で扱う範囲を示す。このように無欠点小試験体の全面縦圧縮については知見が豊富であるが、部分圧縮や実大材（構造用木質材料）の力学特性については既往研究が少なく未解明点が多くある。特にダメージゾーンのヤング係数やメカニズムについては無欠点小試験体であってもあまり知られていない。

前記の通り、本研究の目的は木材・木質材料を中大規模建築の構造用材料として、より利用しやすくすることである。よって、本論文では構造用木質材料（針葉樹スギ、ヒノキ、スプルース）の製材、集成材を対象に全面および部分縦圧縮の実験的研究を行った。加えて、縦圧縮と横圧縮の複合になる CLT の面内部分圧縮特性を解明するため、実験および解析的研究を行った。

本論文の構成を下記に記す。第 1 章では研究背景を述べ、本研究の意義を示した。そして、既往研究との関連を示しながら本研究の目的や位置づけを述べた。第 2 章では製材の部分縦圧縮実験を実施し、縦圧縮における余長効果および縦圧縮強さの寸法効果について検討を行った。第 3 章ではダメージゾーンの機構を考察するため小試験体を用いて加力板との接面の表面形状と載荷荷重の関係について考察した。第 4 章では集成材のダメージゾーンを含む縦圧縮特性（縦圧縮強さの寸法効果、ヤング係数）について実験的検討を行った。第 5 章では第 2～4 章の結果をもとに縦圧縮のヤング係数（ダメージゾーン含む）の評価法を提案した。第 6 章では CLT の面内部分圧縮実験を実施し、余長効果と寸法効果を検討した。第 7 章では FEM 解析を用いて CLT の面内部分圧縮ヤング係数、圧縮強さの評価法を提案した。第 8 章では各章で得られた結論を総括して述べ、今後の研究課題についてまとめた。

Table 1.2 縦圧縮の既往研究マップ

		縦圧縮強さ	破壊メカニズム	縦圧縮ヤング係数	
				ミドルゾーン	ダメージゾーン
小試験体（無欠点）	全面圧縮	○	○	○	△
	部分圧縮	△	△	△	×
実大材（欠点含む）	全面圧縮	△	△	△	×
	部分圧縮	×	×	×	×

※○：既往研究が豊富，△：既往研究はあるが未解明点あり，×：既往研究なし。

※赤色は本研究で扱う範囲を示す。

2. 製材の全面縦圧縮，部分縦圧縮

2.1 目的

本章ではスギ製材の全面縦圧縮，部分縦圧縮について加力断面の寸法，高さ(L方向)，加力方法をパラメータとした実験を行い，縦圧縮破壊のメカニズム，縦圧縮強さの寸法効果や余長効果について検討したのでその結果を報告する。

目的は下記の3つに大分される。

- (1) 製材の縦圧縮強さの寸法効果検討
- (2) 製材の部分縦圧縮の余長効果検討
- (3) 製材のダメージゾーンを含むヤング係数の検討

実大材（節あり）の縦圧縮強さの寸法効果については中井ら¹⁾や Fryer ら²⁾が研究を行っているが，両者で見解が異なっている。中井らは実大材（節あり）の縦圧縮強さは寸法効果がないと結論付け¹⁾，Fryer らは寸法効果が認められたと論じている²⁾。筆者は実大材（節あり）の縦圧縮強さの寸法効果は節の大きさや出現率に影響を受け，両者の試験体は節の大きさや出現率が異なったために見解が分かれたのではないかと考えた。よって，本章では製材から節のない試験体

を作成し、縦圧縮強さの寸法効果が無節の場合にも存在するかを検討した。また、有節の場合の検討は4章で行った。

1.5 節で述も触れたが、部分横圧縮（めり込み）については最大耐力と剛性において余長効果が認められている³⁾。部分縦圧縮の余長効果については野口ら⁴⁾が算定法を提案しているが、ダメージゾーンのヤング係数を定数と仮定している点、論点が剛性のみであり最大耐力の余長効果に言及していない点、全面圧縮の実験と比較していない点などから提案する算定法の妥当性が怪しい。よって、本章では純粋に部分縦圧縮の余長効果を検討するため、同サイズの全面縦圧縮と比較し余長効果が縦圧縮強さとヤング係数に与える影響を検討した。

ダメージゾーンを含むヤング係数については、既往研究が少なく未解明である。本章ではミドルゾーンのみのヤング係数とダメージゾーンを含む全長のヤング係数を比較することで、ダメージゾーンがどのように全長のヤング係数へ影響を及ぼしているかを検討した。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体及び試験方法

Table 2.1 に試験体一覧と基礎物理特性値を示す。試験体は 1 本のスギ製材 (Japanese cedar, 学名: *Cryptomeria japonica*) から各 series を 1 体ずつ節が含まれないように切り出し作成した。サンプル数を 6 とするため 6 本の製材を用意した。試験体の加工には東京大学農学部の本工室にあるパネルソー (KYOWA, KVPF-02) と卓上丸鋸 (makita, LS1213 スライドマルノコ) を用いた。パラメータは加力断面の寸法, 高さ(L 方向), 加力方法 (全面圧縮, 部分圧縮 Partial 1, 部分圧縮 Partial 2 (Figure 2.1)) である。試験体は実験を行う前に, 気乾状態にするため恒温室 (20°C, 65%) に試験体重量の変化が重量の 1% 未満になるまで放置した。基礎物理特性値は気乾密度, 含水率 (全乾法), 年輪幅について測定した。なお, 試験体 90 体の平均気乾密度は $410 \pm 41 \text{ kg/m}^3$ であった。

Figure 2.2 に加力・測定装置を示す。加力は直角な鋼製ブロックを介した速度 1mm/min の単調圧縮とし, 鋼製ブロックの変位が 5mm に達するまで行った。測定はロードセルによるクロスヘッドの荷重及び変位計による試験体全長の変位とした。全面圧縮試験体では中央表裏面にひずみゲージを貼付しミドルゾーンのひずみを, 全面圧縮と部分圧縮 Partial 1 の試験体では 1 台のカメラ (Canon, Eos Kiss X5) を用いた 2D 画像相関法による 1 面の変位・ひずみ (0.2Hz) を測定した。画像相関法で必要となるランダムパターンはつや消し白のペンキを測定面に塗布したのち墨汁を香水の瓶に入れスプレーすることで試験体にペイントした (Figure 2.3)。カメラの撮影は手振れ等を防ぐためパソコンからの遠隔操作 (Canon, EOS Utility 2) により行った。画像相関法分析には GOM Correlate (GOM) を用いた。Table 2.2 に画像相関法に関する各設定値を, Figure 2.4 に GOM Correlate の設定例を示す。なお, 画像相関法の仕組みについては Blaber ら⁵⁾や村田⁶⁾の文献が参考になる。

Table 2.1 試験体一覧と基礎物理特性値

Series	#	Test setup	Specimen size [mm]		Loaded area [mm]	Density [kg/m ³]	Moisture content [%]	Width of annual rings [mm]
			Cross section	Height				
3-3				30		411		5.2
3-6			30×30	60	30×30	399		4.7
3-9				90		394		4.6
6-3		Entire surface		30		411		4.3
6-6			60×60	60	60×60	400		5.2
6-9				90		411		4.6
9-3				30		418		4.7
9-6	6		90×90	60	90×90	404	11.0- 13.8	4.8
9-9				90		459		4.8
3-9p		Partial 1	30×90	90	30×30	416		5.3
6-9p			60×120	90	60×60	406		5.4
9-9p			90×120	90	90×90	406		5.1
3-9pp		Partial 2		90	30×30	401		6.2
6-9pp			120×120	90	60×60	408		6.3
9-9pp				90	90×90	407		5.2

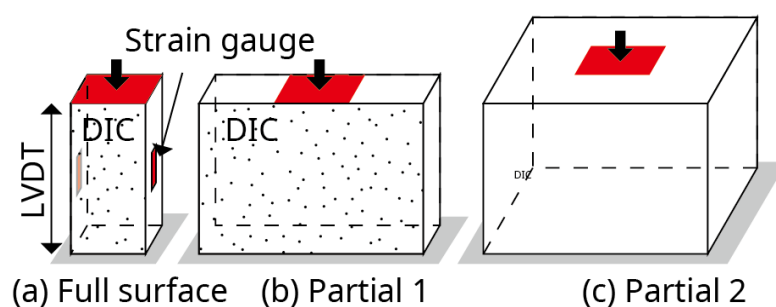


Figure 2.1 加力方法



Figure 2.2 加力・測定装置

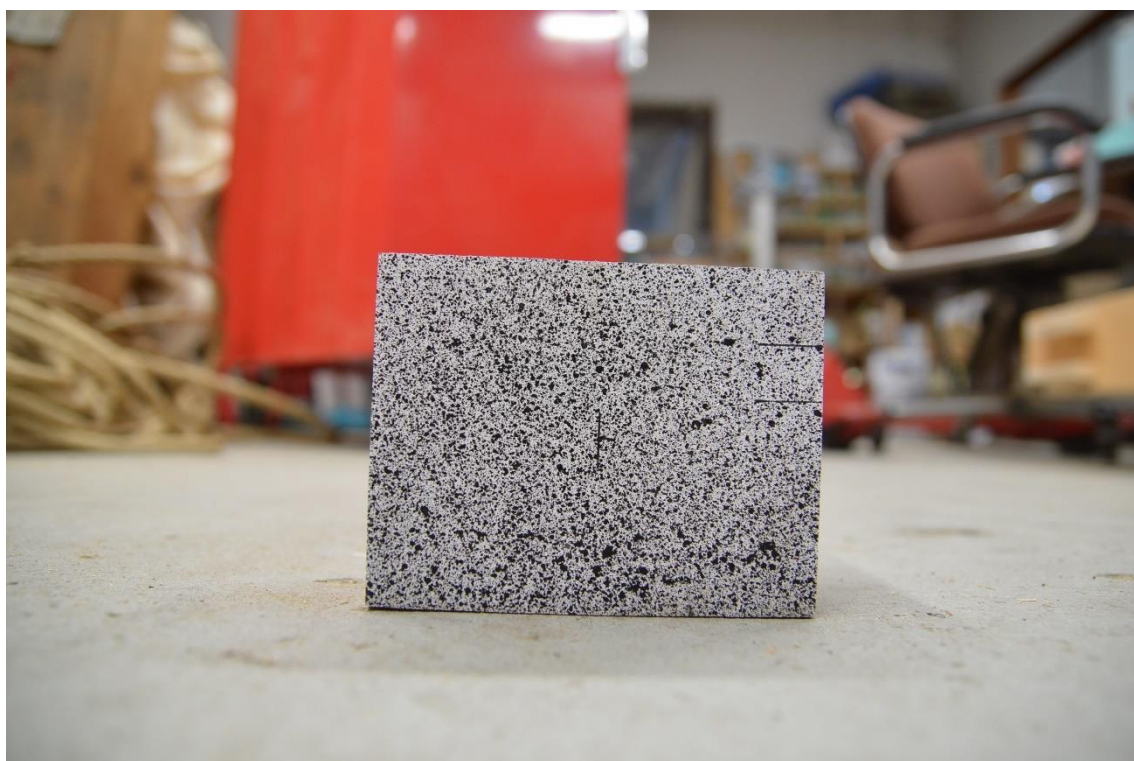


Figure 2.3 ランダムパターン

Table 2.2 画像相関法に関する各設定値

Image	Pixel number	5184 × 3456 pixels ²
	frequency	0.2 Hz
Camera	F-step	f/7.1
	Exposure time	1/20 sec.
	ISO	100
	Flash	No flash
GOM parameter-Facet	Facet size	14 × 14 pixels ²
	Point distance	16 × 16 pixels ²
	Computation	High accuracy

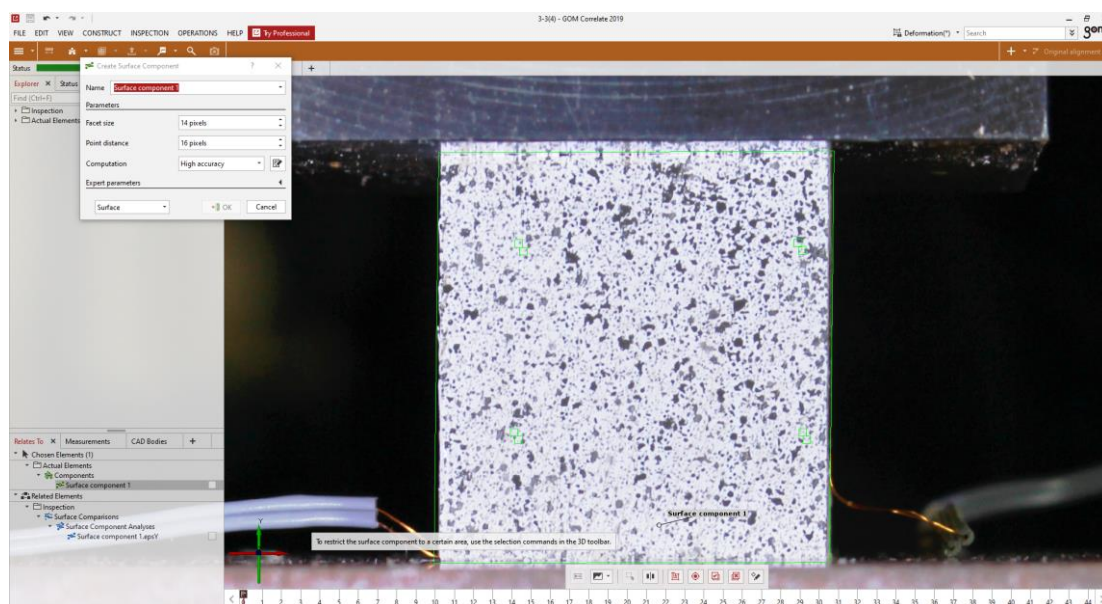


Figure 2.4 GOM correlate の設定例

2.3 実験結果と考察

2.3.1 応力－ひずみ関係と破壊モード

応力とひずみは次式により算出した。

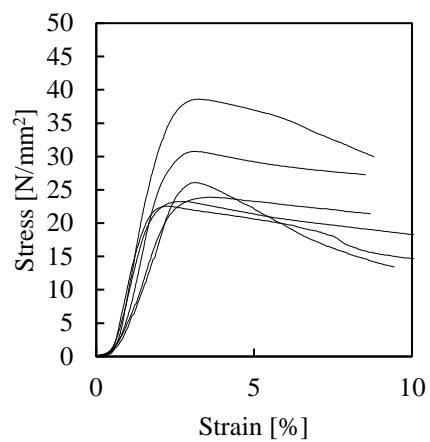
$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{H} \quad (2.2)$$

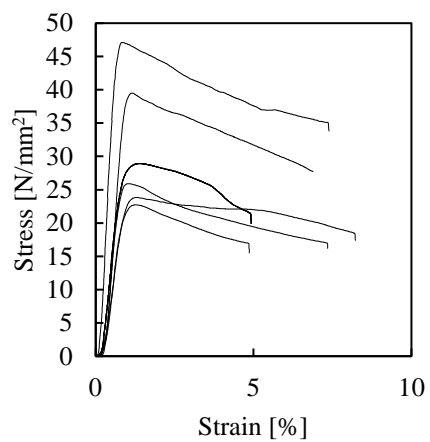
ここで、 P ：ロードセルによる荷重、 A ：加力面積、 Δl ：変位計による試験体全長の変化量、 H ：試験前の試験体全長。Figure 2.5 に実験結果の応力－ひずみ関係を示す。全面圧縮の試験体では応力が最大値を迎えたのち徐々に低下した。一方、部分圧縮 Partal 2 の試験体では応力が最大値を迎えたのち若干低下するものの、その後は一定の値を保持し高い靱性を示した。これは部分圧縮 Partal 2 の試験体では加力板直下のダメージゾーンのみがキンクバンド (kink band, Figure 2.6) 破壊するのに対し、全面圧縮の試験体では最大応力後に加力板直下のダメージゾーンだけではなく、ミドルゾーンでもキンクバンド破壊するためだと考えられる。さらにミドルゾーンでキンクバンド破壊した試験体の内、細長比が大きい試験体では塑性座屈するものもあった (Figure 2.7 (c))。部分圧縮 Partal 1 の試験体では上記 2 つの応力－ひずみ曲線が混在していた。ちなみに、キンクバンド破壊は座屈と似ているが異なるモードである。キンクバンド破壊は Figure 2.8(a) のように繊維の変形は平面保持のみ成立すると仮定した変形モードで、各繊維が同位相でせん断変形 (キンキング) しキンキングが断面全体に広がる破壊モードである。座屈は繊維の変形が平面保持・直交保持すると仮定してせん断変易を無視した変形モードで生じる Figure 2.8(b)。木材のように繊維体積含有率が高い場合の圧縮破壊はキンクバンド破壊になりやすい。キンキングのクライテリアは局所的なせん断と割裂の複合破壊である。

このように、縦圧縮破壊は引張や割裂破壊のように脆性的な破壊ではなく、徐々に荷重が低下するため比較的安全な破壊である。また、部分縦圧縮破壊に関しては高い靱性を持つためより安全な破壊と言える。部分縦圧縮の最大応力後の剛性 (塑性剛性) に関してはほぼ 0 と考えてよいと思われる。

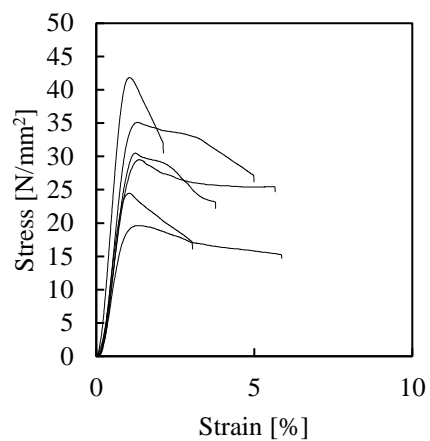
ASTM D 143-14⁷⁾での後期破壊線の分類を用いれば，全面圧縮の試験体はせん断型（Figure 1.14(c)）とほうき状横倒し型（Figure 1.14(f)）であった。部分圧縮の試験体については上記の分類を用いることが出来ないが，加力板直下でせん断型とほうき状横倒し型のような破壊線が生じていた。



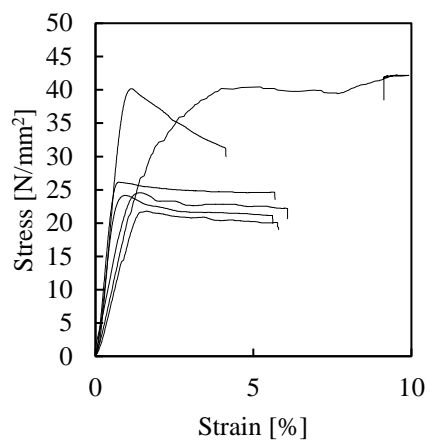
(a) 3-3



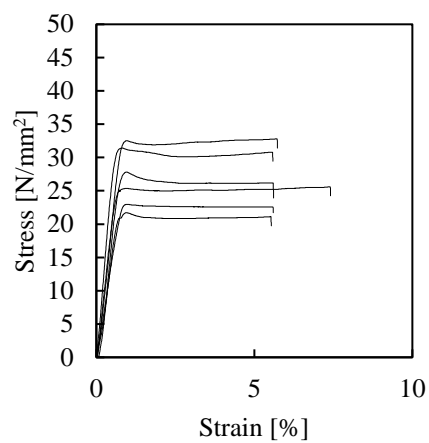
(b) 3-6



(c) 3-9

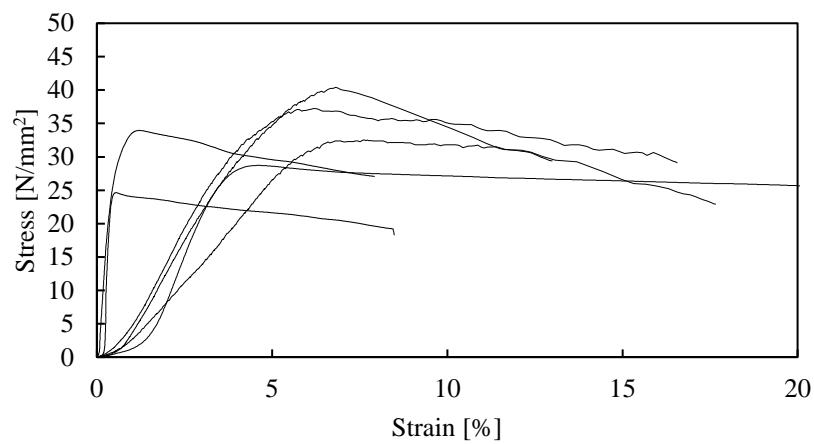


(d) 3-9p

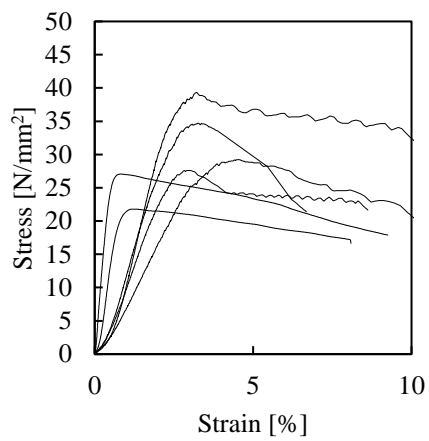


(e) 3-9pp

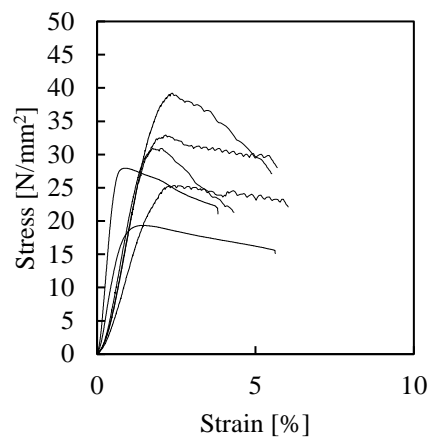
Figure 2.5 応力-ひずみ関係



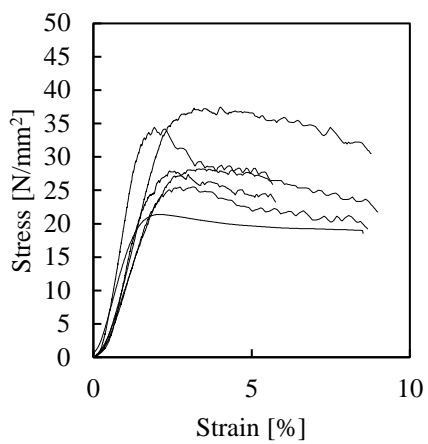
(f) 6-3



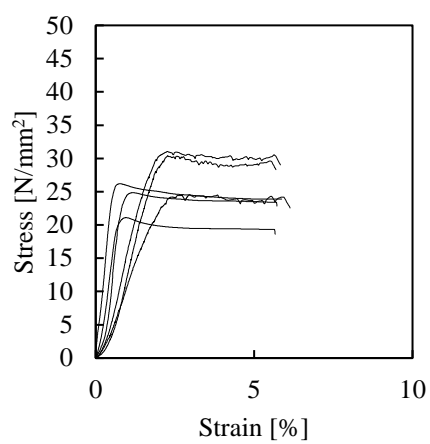
(g) 6-6



(h) 6-9

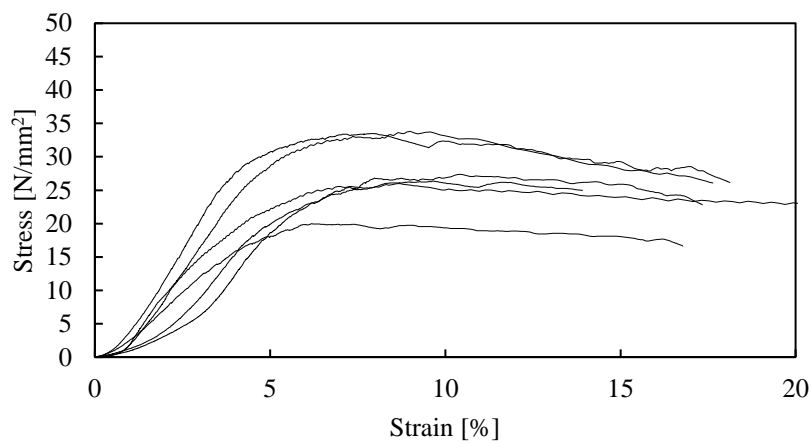


(i) 6-9p

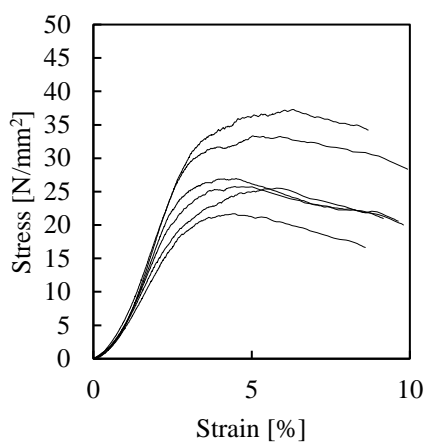


(j) 6-9pp

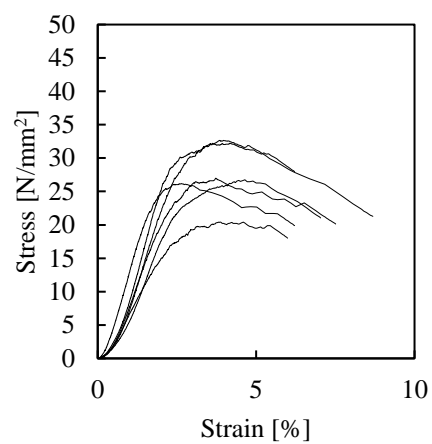
Figure 2.5 応力-ひずみ関係



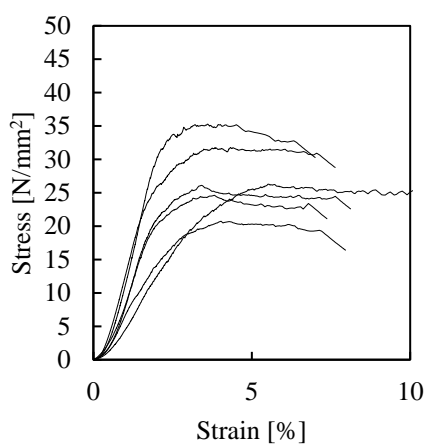
(k) 9-3



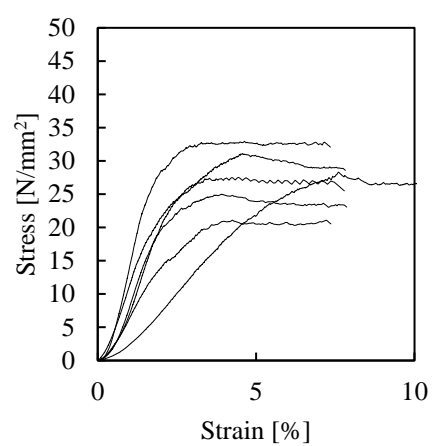
(l) 9-6



(m) 9-9

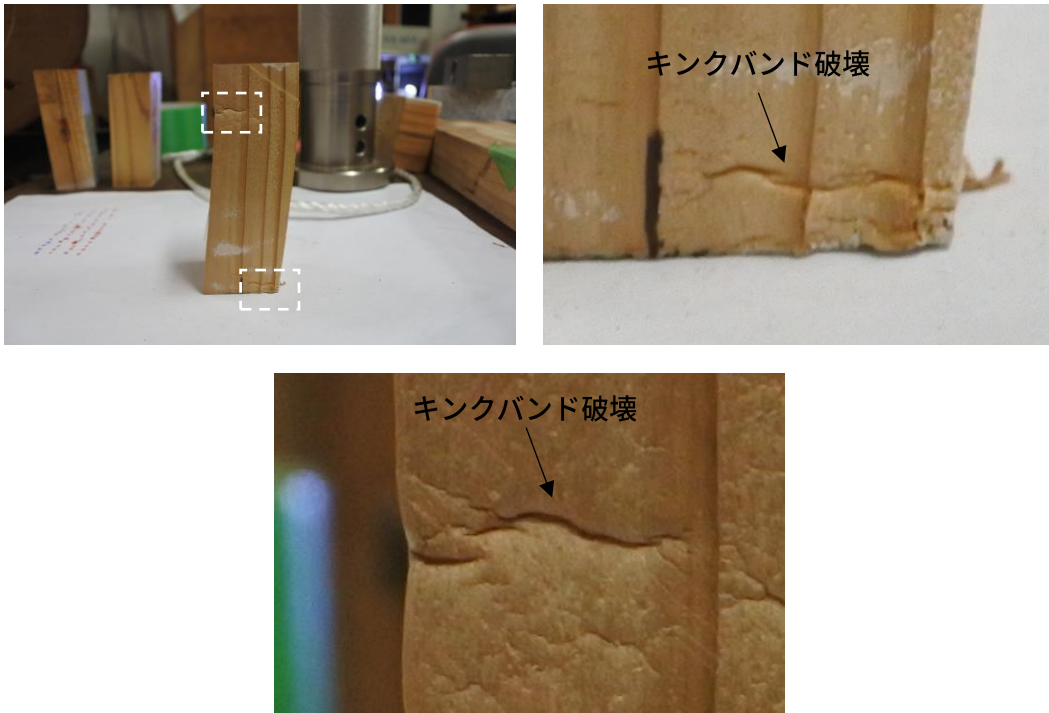


(n) 9-9p



(o) 9-9pp

Figure 2.5 応力-ひずみ関係



(a) 全面圧縮試験体の破壊



(b) 部分圧縮試験体の破壊

Figure 2.6 キンクバンド破壊

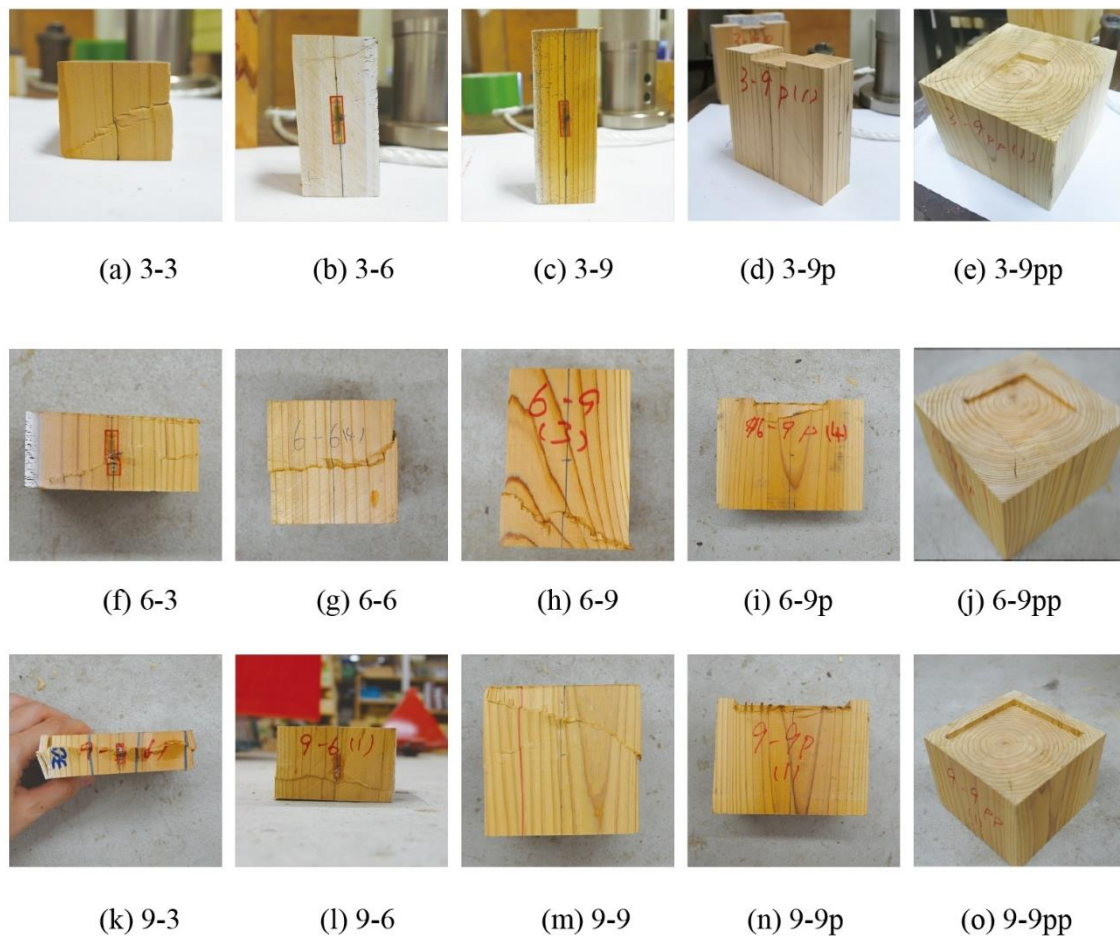


Figure 2.7 破壊モード（サンプル数 6 の内 1 試験体のみ）

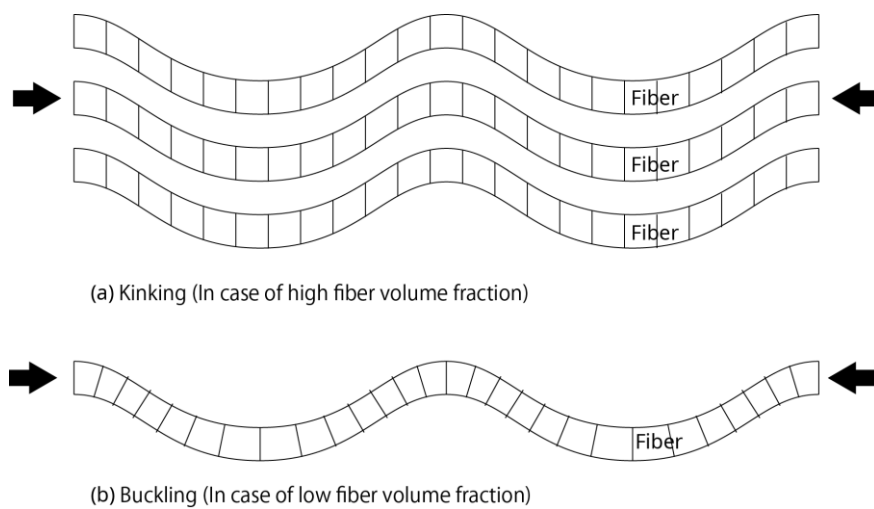
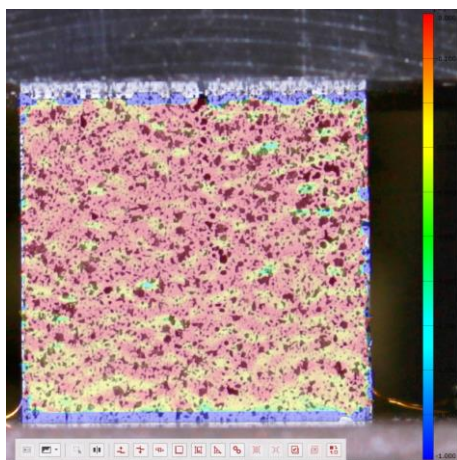


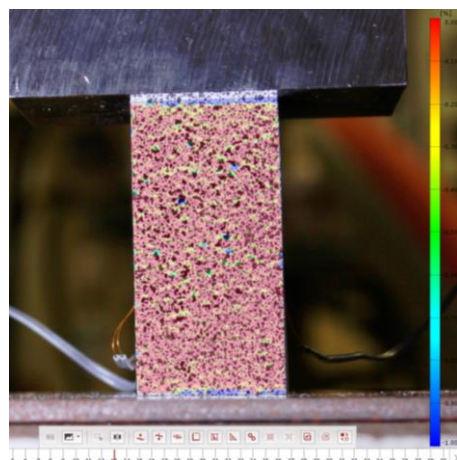
Figure 2.8 キンク変形と座屈変形

2.3.2 ひずみ分布

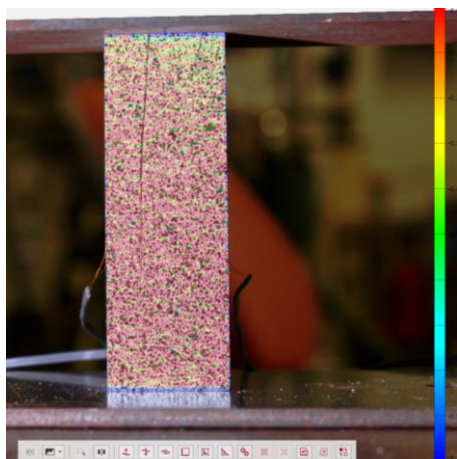
Figure 2.9 に画像相関法により得られた $0.2P_{max}$ (P_{max} は最大荷重) 時の加力方向のひずみ分布の一例を示す。全面圧縮の試験体ではひずみの大きいダメージゾーン (Figure 2.9 の青色) が上下の加力板付近の木材に見られた。部分圧縮 Partial 1 の試験体でも上下の加力板付近の木材にひずみの大きいダメージゾーンが見られるが、特に上の加力板付近に変形が集中していた。また、下の加力板付近の木材は加力板と接する全面のひずみが大きいわけではなく、上の加力板がある範囲のみでひずみが大きかった。ダメージゾーンの長さは非常に小さく、本章の画像相関法の解像度 (ファセットサイズやランダムパターンの密度, サイズにより決まる) では定量的な検討が出来なかったため定性的な検討のみとした。3 章と 4 章ではランダムパターンの密度を上げファセットサイズを小さくすることで、定量的な検討を行っている。



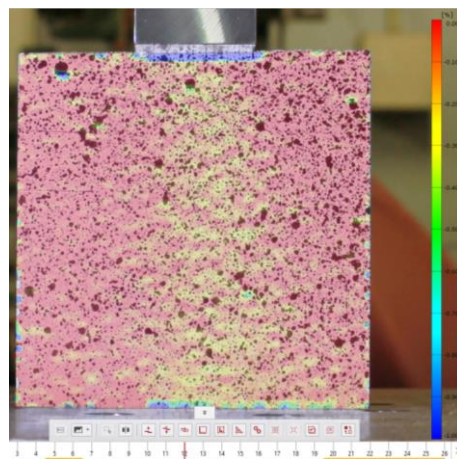
(a) 3-3



(b) 3-6



(c) 3-9



(d) 3-9p

※スケールは赤がひずみ 0%, 青が-1%

Figure 2.9 $0.2P_{max}$ 時の加力方向の画像相関法によるひずみ分布の一例

2.3.3 最大応力とヤング係数の決定方法

実験値の最大応力（縦圧縮強さ）は最大荷重 P_{max} を加力面積 A で除すことで計算した。

$$f_{c,0} = \frac{P_{max}}{A} \quad (2.3)$$

ヤング係数は弾性域において次式で算出される。

$$E_L = \frac{P}{A\varepsilon_1} \quad (2.4)$$

ここで、 ε_1 ：繊維方向の線形ひずみ。本実験では試験体上部と下部にダメージゾーンが見られたため（Figure 2.9）2種類のヤング係数を定義する。一つは変位計により得られた値を用いた試験体全長の縦ヤング係数 $E_{L,f}$ 、もう一つは試験体中央に貼り付けたひずみゲージより得られた値をもちいたミドルゾーンの縦ヤング係数 $E_{L,m}$ である。

2.3.4 密度と年輪幅

Figure 2.10 に全試験体の最大応力 $f_{c,0}$ と密度・年輪幅の関係を示す。 $f_{c,0}$ は密度が高いと増加し、年輪幅が大きくなると減少する傾向があった。決定係数 R^2 を比べると $f_{c,0}$ と密度の値 (0.13) よりも $f_{c,0}$ と年輪幅の値 (0.45) が大きく、年輪幅のほうが $f_{c,0}$ と強い相関があると言える。密度が大きくなるほど年輪幅は小さくなるため、密度と年輪幅はどちらか一方の指標を用いればよいとも考えられるが、本試験体では Figure 2.11 のように必ずしも密度と年輪幅が相関関係にあるわけではなかった。これは、木材が一定の年輪幅までは晩材率が変わらず密度が一定であるが、それよりも年輪幅が広くなると晩材幅は広くならないために晩材率が低下し密度も低下するためだと考えられる⁸⁾。よって、密度より年輪幅のほうが $f_{c,0}$ と強い相関があった所以は、 $f_{c,0}$ が晩材幅に影響を受けるためだと思われる。

ヤング係数 $E_{L,f}$ と $E_{L,m}$ は密度や年輪幅と相関性を持たなかった (Figure 2.12)。無欠点小試験体ではヤング係数 $E_{L,m}$ と密度に強い正の相関があることが知られるが、製材では相関が弱く密度のみからヤング係数 $E_{L,m}$ を予測することは難しいと思われる。祖父江らの研究でもスギとヒノキの実大材のヤング係数は密度と強い相関を持たなかった⁹⁾。なお、 $E_{L,f}$ は全試験体、 $E_{L,m}$ は全面圧縮試験体の結果である。

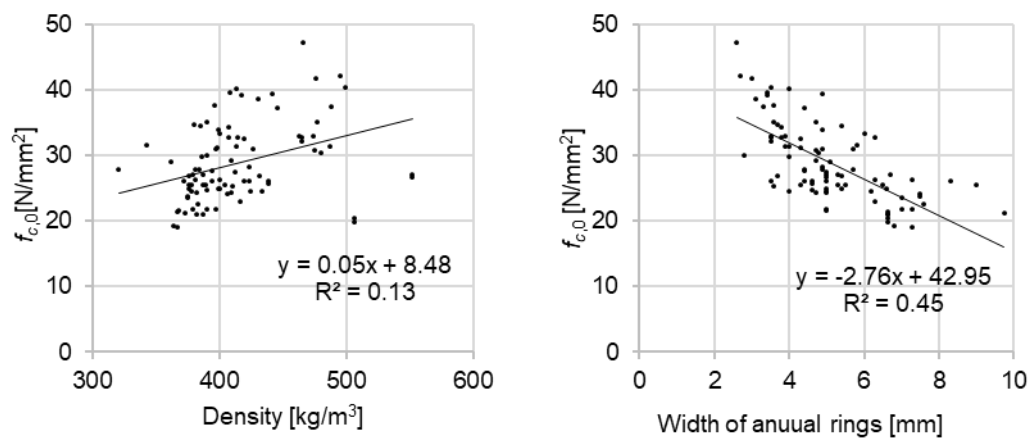


Figure 2.10 最大応力 $f_{c,0}$ と密度・年輪幅の関係（全試験体）

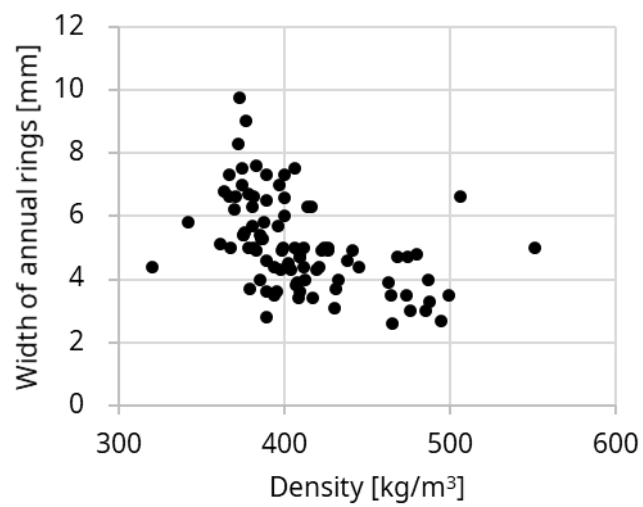


Figure 2.11 密度と年輪幅の関係（全試験体）

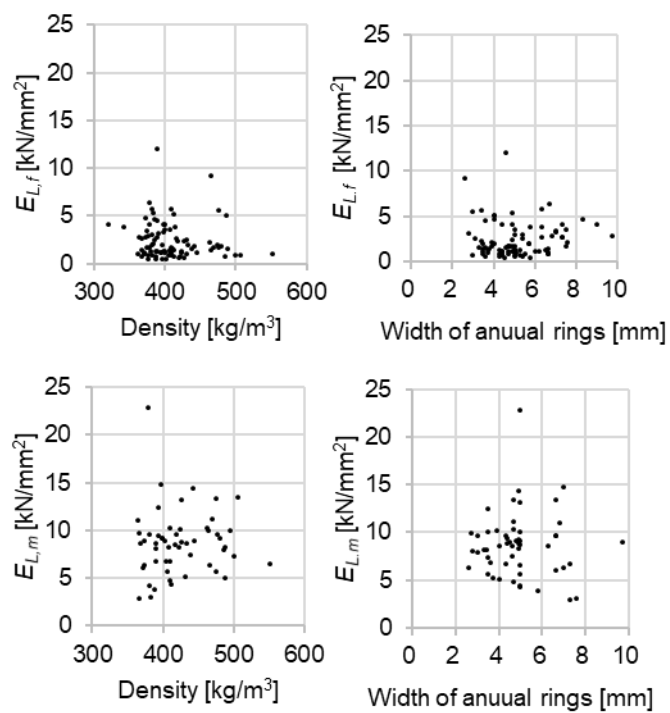


Figure 2.12 ヤング係数と密度・年輪幅の関係 ($E_{L,f}$: 全試験体, $E_{L,m}$: 全面圧縮試験体)

2.3.5 余長効果 (Spreading effects)

Table 2.3 に同一の試験体断面・高さを持つ全面圧縮と部分圧縮の試験体の実験結果を示す。部分横圧縮強さにおける余長効果 (Spreading effects) は Leijten ら¹⁰⁾ や van der Put¹¹⁾ により評価法が検討され、Stress spreading k_c (次式) として扱われる。

$$k_c = \frac{f_{c,s}}{f_c} \quad (2.5)$$

ここで、 $f_{c,s} : f_c$ と同一加力断面の部分圧縮強さ、 $f_c : f_{c,s}$ と同一加力断面の全面圧縮強さ。また、同様の考え方をヤング係数に応用すると、ヤング係数における余長効果 (Spreading effects) は次式で表される。

$$k_E = \frac{E_{L,f,s}}{E_{L,f}} \quad (2.6)$$

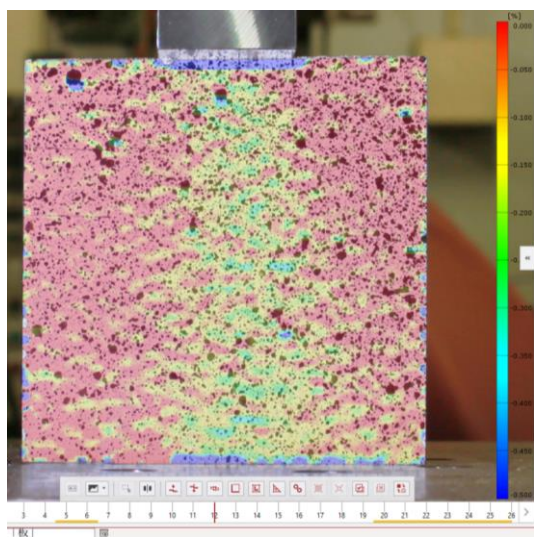
ここで、 $E_{L,f,s} : E_{L,f}$ と同一加力断面の部分圧縮ヤング係数、 $E_{L,f} : E_{L,f,s}$ と同一加力断面の全面圧縮ヤング係数。Table 2.3 に k_c と k_E の結果を示す。値は個体別に算出してから平均した値であり、 k_c で 0.9-1.0、 k_E で 1.0-1.1 と 1 に近い結果となった。よって、部分縦圧縮における余長効果は圧縮強さやヤング係数では無視できるほど小さいと考えられる。

また、余長効果が小さいことはひずみ分布からも見てとれる。Figure 2.13 に $0.2P_{max}$ 時および最大荷重付近の加力方向のひずみ分布を示す。ひずみは $0.2P_{max}$ 時と最大荷重付近ともに上の加力板直下の木材に集中していることが見てとれる (ダメージゾーン)。また、ひずみは上の加力板から下に向かってほぼ真っすぐに生じており、余長部分にはほとんど広がっていない。余長効果のある部分横圧縮のひずみ分布 (Figure 2.14) と比較すると、部分縦圧縮では加力板付近にひずみが集中していること (ダメージゾーン) や余長部分へ応力が広がっていないことはより明確である。

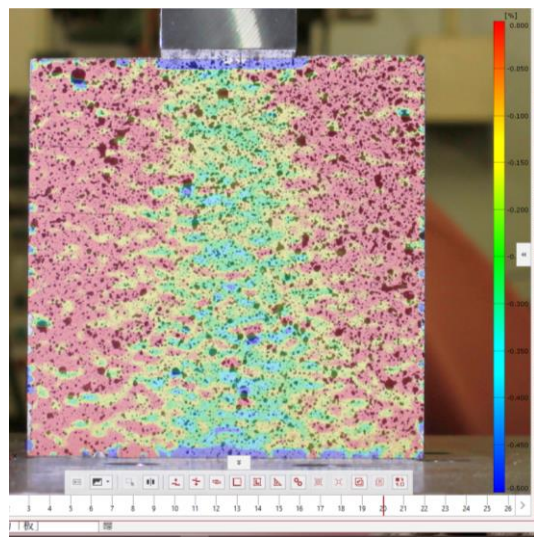
部分縦圧縮では部分横圧縮と異なり余長効果がほぼ見られなかった原因として、①加力板付近にダメージゾーンが存在し変形や破壊がほぼダメージゾーンで起きる点、②L 方向のせん断剛性が縦ヤング係数に比べ小さく余長部分に応力があまり伝わらない点、が考えられる。

Table 2.3 同一の試験体断面・高さを持つ全面圧縮と部分圧縮試験体の実験結果

statistics	Maximum stress $f_{c,0}$								
	3-9	3-9p	3-9pp	6-9	6-9p	6-9pp	9-9	9-9p	9-9pp
Number [-]	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Mean [N/mm ²]	30	27	27	29	29	26	28	27	27
CV[%]	24	18	15	21	18	13	15	17	14
Longitudinal modulus of elasticity in full height E_f									
Mean [N/mm ²]	3868	3435	3731	2750	2225	2483	1249	1267	1195
CV[%]	24	41	23	44	11	38	18	27	37
Stress spreading k_c									
Mean [-]	-	0.9	0.9	-	1.0	0.9	-	1.0	1.0
CV[%]	-	20	15	-	10	13	-	6.3	3.7
Ratio of longitudinal modulus k_E									
Mean [-]	-	1.0	1.0	-	1.0	1.1	-	1.0	1.0
CV[%]	-	18	13	-	9.6	11	-	6.8	5.8



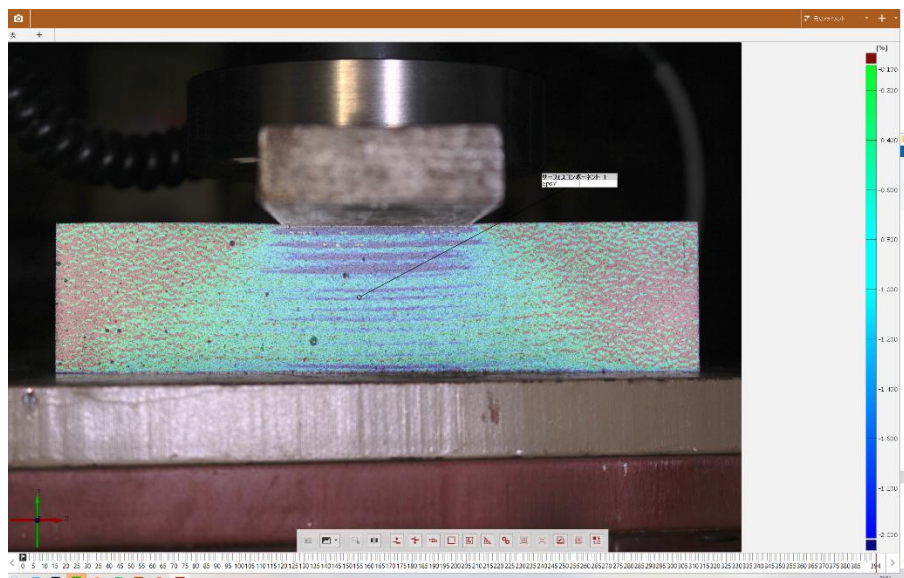
(a) $0.2P_{max}$ 時



(b) 最大荷重時付近

※スケールは赤がひずみ 0%, 青が-0.5%

Figure 2.13 画像相関法による加力方向ひずみ分布（試験体 3-3）



※スケールは赤がひずみ 0%, 青が-2%

Figure 2.14 部分横圧縮の画像相関法による加力方向ひずみ分布（試験体寸法：40(R)×50(T)×170(L)mm³）¹²⁾

2.3.6 寸法効果 (Size effects)

圧縮強さにおける寸法効果はワイブルの最弱リンク理論¹³⁾により議論されている。実験結果から寸法効果の有無を検討する場合、実験結果の分布がワイブル分布に従うかを検討すればよい。実験結果の統計分布の種類を検討するため Kolmogorov-Smirnov 検定 (KS 検定) を行った^{14) 15)}。なお、検討した分布の種類は正規分布と対数正規分布、ワイブル分布であり帰無仮説は「実験結果の分布は正規分布 (または対数正規分布、ワイブル分布) である」とした。正規分布と対数正規分布、ワイブル分布の各パラメータは最尤法 (MLE) を用いて決定した。Table 2.4 に各パラメータの値と KS 検定の結果を示す。KS 検定は両側検定により p 値を出力した。p 値は統計的仮説検定において、帰無仮説の元で検定統計量がその値となる確率のことである。p 値が小さいほど、検定統計量がその値となることはあまり起こりえないことを意味する。対数正規分布の p 値はほかの 2 つの分布に比べ高い値を示した。よって、実験結果の統計分布は対数正規分布である可能性が高く、節のない製材の縦圧縮強さは寸法効果がないと言える。一方、Fryer et. al.²⁾ の実験では節を含む集成材の縦圧縮において寸法効果が認められた。これは縦圧縮における寸法効果の原因が節にあるからだと考えられる。実験結果の統計分布と正規分布、対数正規分布、ワイブル分布の関係は Figure 2.15 から確認できる。

Table 2.4 各パラメータの値と KS 検定の結果

Parameter						P-value		
Normal			Lognormal		Weibull	K-S test		
μ	σ		μ	σ	a b	Normal	Lognormal	Weibull
29.5	6.27		3.36	0.21	32.1 4.90	0.095	0.424	0.073

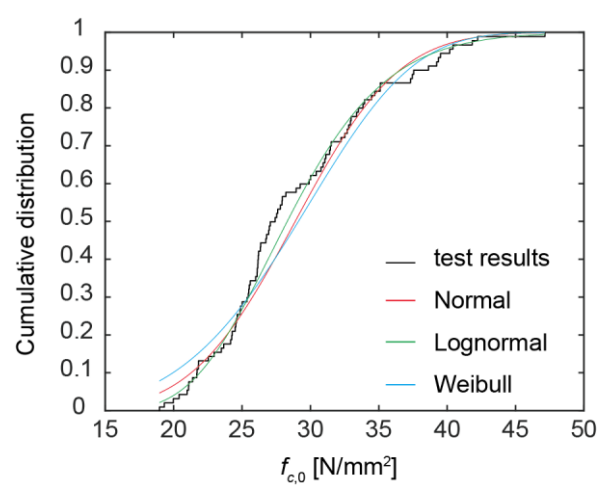


Figure 2.15 実験結果の統計分布と正規分布，ワイブル分布の比較

2.3.7 縦ヤング係数

Table 2.5 に全面圧縮試験体のミドルゾーンのヤング係数 $E_{L,m}$ を示す。 $E_{L,m}$ は試験体断面積や高さに係わらず 6481~10058 N/mm² であった。この値は木材工業ハンドブック¹⁶⁾ の示すスギの縦ヤング係数 7350 N/mm² と近く、一般的に使われる縦ヤング係数は $E_{L,m}$ を意味する。Figure 2.16 に全面圧縮および部分圧縮における試験体断面積と高さの変化が試験体全長のヤング係数 $E_{L,f}$ に与える影響を示す。 $E_{L,f}$ は試験体高さが高くなるほど、試験体断面積が小さくなるほど大きくなる傾向を示した。Table 2.5 より $E_{L,m}$ は試験体寸法に係わらず一定の値となるため、 $E_{L,f}$ が試験体寸法に寄与する原因はダメージゾーンの特性にありと思われる。ダメージゾーンに関する詳細な検討は 4 章および 5 章で行う。

Table 2.5 全面圧縮試験体のミドルゾーンのヤング係数 $E_{L,m}$

statistics	Longitudinal modulus of elasticity in middle zone $E_{L,m}$								
	3-3	3-6	3-9	6-3	6-6	6-9	9-3	9-6	9-9
Mean [N/mm ²]	9102	9253	8937	9085	7916	9032	10058	8246	6481
CV [%]	20	28	29	31	23	32	65	41	34

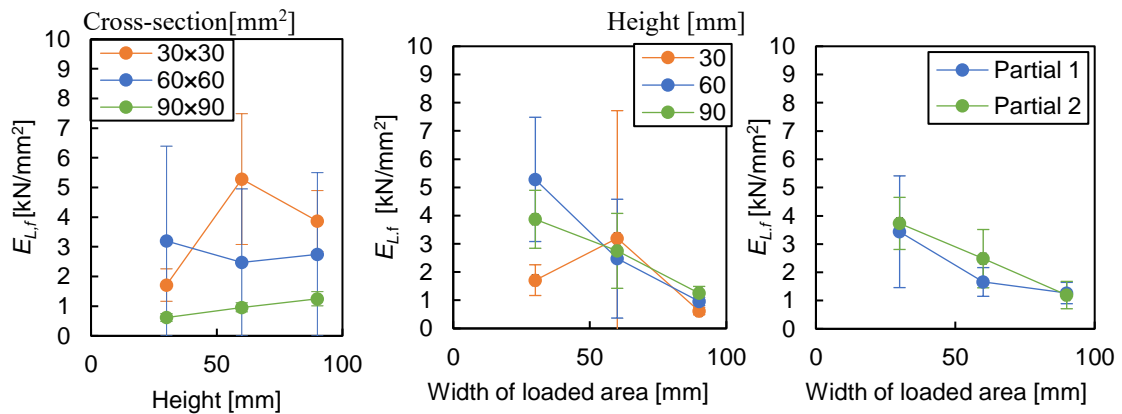


Figure 2.16 試験体断面積と高さの変化が試験体全長のヤング係数 $E_{L,f}$ に与える影響

2.4 まとめ

スギ製材（節無し）を用いた全面および部分縦圧縮の加力断面の寸法，高さ(L 方向)，加力方法をパラメータとした実験を行い，縦圧縮強さ及びヤング係数について検討した。得られた知見を下記に示す。

1. 全面圧縮の試験体では応力が最大値を迎えたのち徐々に低下した。一方，部分圧縮の試験体では応力が最大値を迎えたのち若干低下するものの，その後は一定の値を保持し高い靱性を示した。これは部分圧縮の試験体では加力板直下のダメージゾーンのみが変形するのに対し，全面圧縮の試験体では最大応力後に加力板直下のダメージゾーンだけではなく，ミドルゾーンでもキンク変形するためだと考えられる。さらにミドルゾーンでキンク変形した試験体の内，細長比が大きい試験体では塑性座屈するものもあった。このように，全面圧縮の縦圧縮破壊は引張や割裂破壊のように脆性的な破壊ではなく，徐々に荷重が低下するため比較的安全な破壊である。また，部分圧縮の縦圧縮破壊は高い靱性を持つためより安全な破壊と言える。部分縦圧縮の最大応力後の剛性（塑性剛性）に関してはほぼ 0 と考えてよいと思われる。
2. 全面圧縮の試験体ではひずみの大きいダメージゾーンが上下の加力板付近の木材に見られた。部分圧縮 **Partial 1** の試験体でも上下の加力板付近の木材にひずみの大きいダメージゾーンが見られるが，特に上の加力板付近に変形が集中していた。また，下の加力板付近の木材は，上の加力板がある範囲のみでひずみが大きかった。
3. 最大応力 $f_{c,0}$ は密度が高いと増加し，年輪幅が大きくなると減少する傾向があった。決定係数 R^2 を比べると $f_{c,0}$ と密度の値（0.13）よりも $f_{c,0}$ と年輪幅の値（0.45）が大きく，年輪幅のほうが $f_{c,0}$ と強い相関があると言える。密度が大きくなるほど年輪幅は小さくなるため密度と年輪幅はどちらかの指標を用いればよいとも考えられるが，本試験体では密度と年輪幅の相関は強くなかった。これは，木材が一定の年輪幅までは晩材率が変わらず密度が一定であるが，それよりも年輪幅が広くなると晩材幅は広ならないために晩材率が低下し密度も低下するためだと考えられる。よって，密度より年輪幅のほうが $f_{c,0}$ と強い相関があった所以は， $f_{c,0}$ が晩材幅に影響を受けるためだと思われる。

4. ヤング係数 $E_{L,f}$ と $E_{L,m}$ は密度や年輪幅と相関性を持たなかった。無欠点小試験体ではヤング係数 $E_{L,m}$ と密度に強い正の相関があることが知られるが、製材では相関が弱く密度のみからヤング係数 $E_{L,f}$ と $E_{L,m}$ を予測することは難しいと思われる。
5. 部分縦圧縮における余長効果は圧縮強さやヤング係数では無視できるほど小さかった。また、ひずみ分布をみても変形が上の加力板直下の木材に集中しており、余長部分にはほとんど広がっていない。部分縦圧縮では余長効果がほぼ見られなかった原因として、①加力板付近にダメージゾーンが存在し変形や破壊がほぼダメージゾーンで起きる点、②L 方向のせん断剛性が縦ヤング係数に比べ小さく余長部分に応力があまり伝わらない点、が考えられる。
6. 節のない製材の全面縦圧縮、部分縦圧縮の強さは寸法効果が見られなかった。節を含む集成材の全面縦圧縮強さでは寸法効果が見られたことから、縦圧縮強さにおける寸法効果は節の影響のみであると考察できる。
7. ダメージゾーンに挟まれたミドルゾーンのヤング係数 $E_{L,m}$ は試験体寸法に関わらず一定の値となり、一般的に言われる L 方向のヤング係数であった。
8. 試験体全長のヤング係数 $E_{L,f}$ は試験体高さが高くなるほど、試験体断面積が小さくなるほど大きくなる傾向を示した。

3. 縦圧縮下の小試験体の表面形状

3.1 はじめに

ダメージゾーンは加力板と接する木材面(RT 面)付近に生じることが2章より分かったため、本章ではその挙動に着目した。小試験体を用いて木材面(RT 面)の形状と載荷荷重の関係を検討したのでその結果を報告する。

目的は下記の3つに大分される。

- (1) 加力板と接する木材面(RT 面)の表面形状が載荷荷重により変化するかの検討
- (2) 加力板と接する木材面(RT 面)のカッターによる切り込み加工がダメージゾーンの特性に与える影響の検討
- (3) ダメージゾーンの定量的な評価とその影響因子の検討

木材の柃目および板目面の表面形状に関する研究^{例えば 1)2)3)}は散見されるが、木口面の表面形状に関する研究は少ない。山川らは木口面の表面の摩擦特性を評価することを目的に表面形状と摩擦の対応関係を実験的に検討した⁴⁾。しかし、木口面の表面形状と載荷荷重やダメージゾーン

の関係を論じた研究は見当たらない。また、1 章でも述べたが、ダメージゾーンに関する知見は乏しく、存在は知られているもののメカニズムは未解明である。よって、本章では小試験体を用いて各載荷荷重の木口面の表面形状を測定し、変化のメカニズムを検討した。また、その表面形状や加工（今回はカッターによる切り込み）がダメージゾーンにどのような影響を与えるかを検討した。

3.2 実験概要

3.2.1 試験体及び試験方法

試験体は 2 章の部分縦圧縮に供した試験体 6-9p の余長部から切り出し作成した。切り出しは東京大学農学部木工室にあるパネルソー (KYOWA, KVPF-02) と丸のこ昇降盤 (SawStop, CB 53200-50) で行い、特に木口面の切断は丸のこ昇降盤 (SawStop, CB 53200-50) で行った。小試験体 ($L90 \times R25 \times T10\text{mm}$) 12 体を作成し、内 6 体は加力板と接する木材面 (RT 面) のダメージを作るために、カッターで切り込みを 10 本入れた (試験体 $D90 \times 25 \times 10$, Figure 3.1)。切り込み深さは Figure 3.1 の写真からわかる通り 0.6-1mm 程度であった。また、切り込みを入れていない試験体 (試験体 $90 \times 25 \times 10$) は試験終了後に破壊していない部分を $L20 \times R25 \times T10\text{mm}$ へ加工し試験体 $20 \times 25 \times 10$ として使用した。よって、試験体は 3 シリーズで各シリーズのサンプル数は 6 である。

加力サイクル (予想最大荷重 $F_c(10\text{kN})$ の 7%, 28% (試験体 $20 \times 25 \times 10$ を除く)) と表面計測のタイミングを Figure 3.2 に示す。加力は繊維方向圧縮で、東京大学農学部の恒温室にある 50kN 万能試験機 (INSTRON, 4204) で行った。表面計測は試験体上下の RT 面の Figure 3.3 に示す 13 ヶ所の計測ラインに沿って埼玉県産業技術総合センター本所の非接触三次元測定機 (三鷹光器, NH-3SP, Figure 3.4) により行った。圧縮試験中の測定はロードセルによるクロスヘッドの荷重、画像相関法による試験体全体の変形とした。画像相関法は 1 台のカメラ (Canon, Eos Kiss X5) を用いた 2D 画像相関法による 1 面の変位・ひずみ (0.2Hz) の測定とした。画像相関法で必要となるランダムパターンはつや消し白のペンキを測定面に塗布したのち、つや消し黒のスプレーでドットを試験体にペイントした (Figure 3.5)。この方法では 2 章より細かく高密度にランダムパターンを作成することが出来た。カメラの撮影は手振れ等を防ぐためパソコンからの遠隔操作 (Canon, EOS Utility 2) により行った。画像相関法分析には GOM Correlate (GOM) を用いた。Table 3.1 に画像相関法に関する各設定値を、Figure 3.6 に GOM Correlate の設定例を示す。

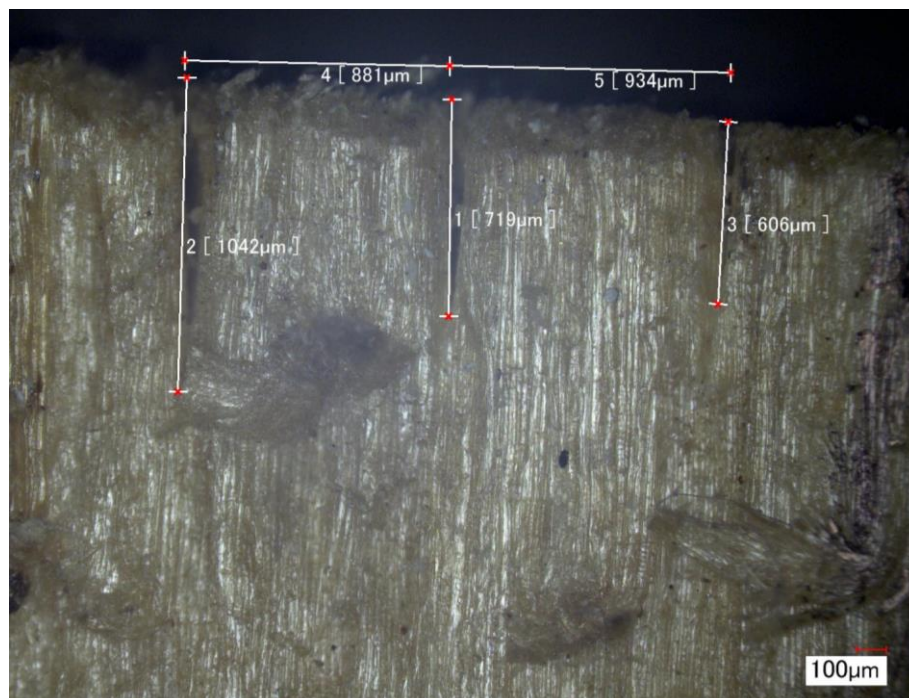


Figure 3.1 カッターにより切り込みを入れた試験体と切り込み深さ

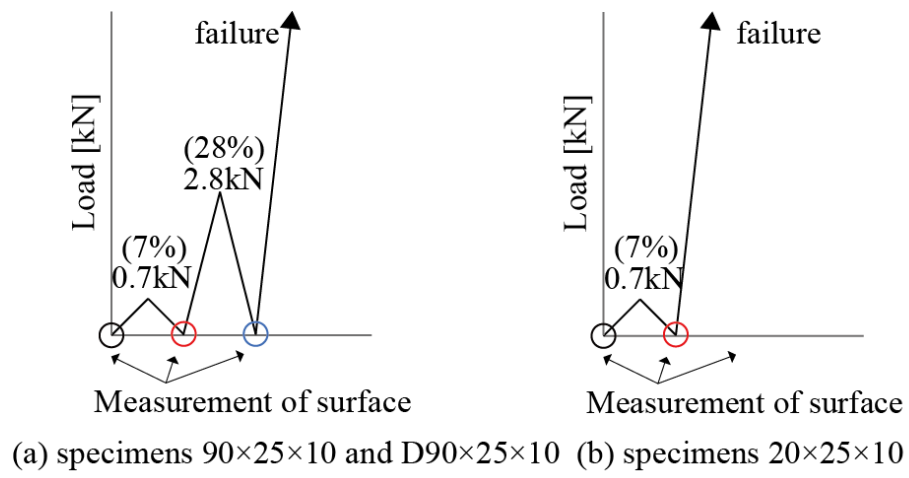


Figure 3.2 加力，表面測定サイクル

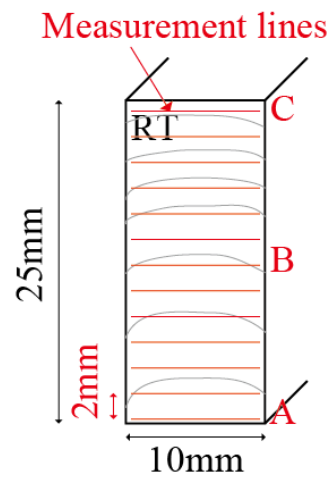


Figure 3.3 表面形状測定点

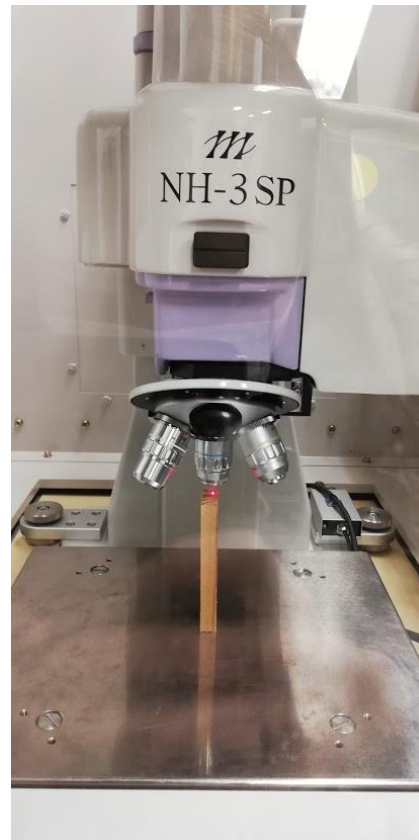


Figure 3.4 レーザーの非接触三次元測定機

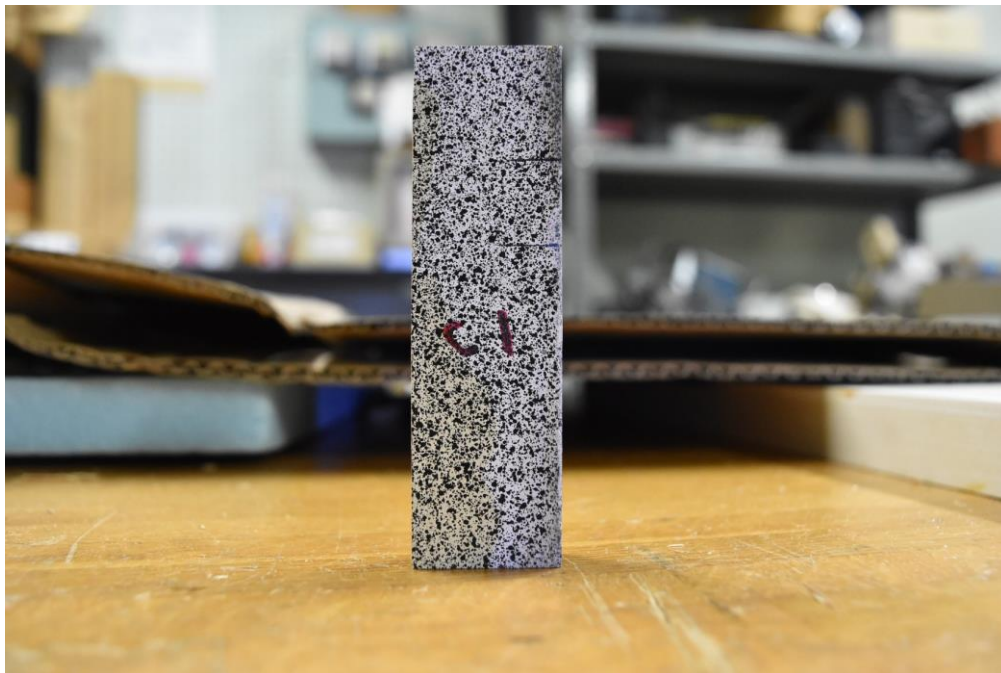


Figure 3.5 ランダムパターン

Table 3.1 画像相関法に関する各設定値

Image	Pixel number	$5184 \times 3456 \text{ pixels}^2$
	frequency	0.2 Hz
Camera	F-step	f/7.1
	Exposure time	1/8 sec.
	ISO	100
	Flash	No flash
GOM parameter-Facet	Facet size	$8 \times 8 \text{ pixels}^2$
	Point distance	$8 \times 8 \text{ pixels}^2$
	Computation	Standard

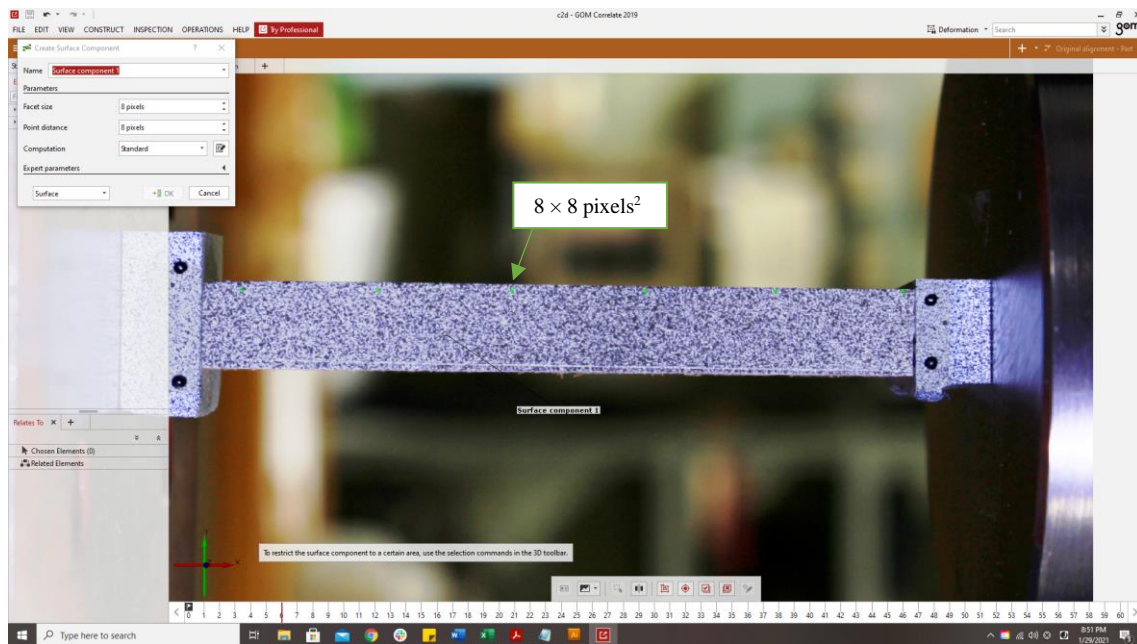


Figure 3.6 GOM correlate の設定例

3.3 実験結果と考察

3.3.1 荷重—変位関係と変形形状

Figure 3.7 に試験体 $90\times 25\times 10$ と $D90\times 25\times 10$ の 2.8kN までと最終破壊までのサイクルの荷重—変位関係を示す。荷重—変位曲線は 2.8kN までと最終破壊までのサイクルでほぼ一致した。よって、試験体 $90\times 25\times 10$ と $D90\times 25\times 10$ とともに 2.8kN まではダメージゾーンを含む試験体全長の変形は完全な弾性変形であると考えられる。

Figure 3.8 に試験体 $90\times 25\times 10$ の 0.7kN と 2.8kN まで加力した後の加力板付近の木材（ダメージゾーン）の形状写真を示す。写真はマイクロスコープを用いて撮影した。接触面の形状は他の試験体も同様でほぼ変わらなかった。よって、写真からも 2.8kN まではダメージゾーンも完全な弾性変形をしていると考察できる。

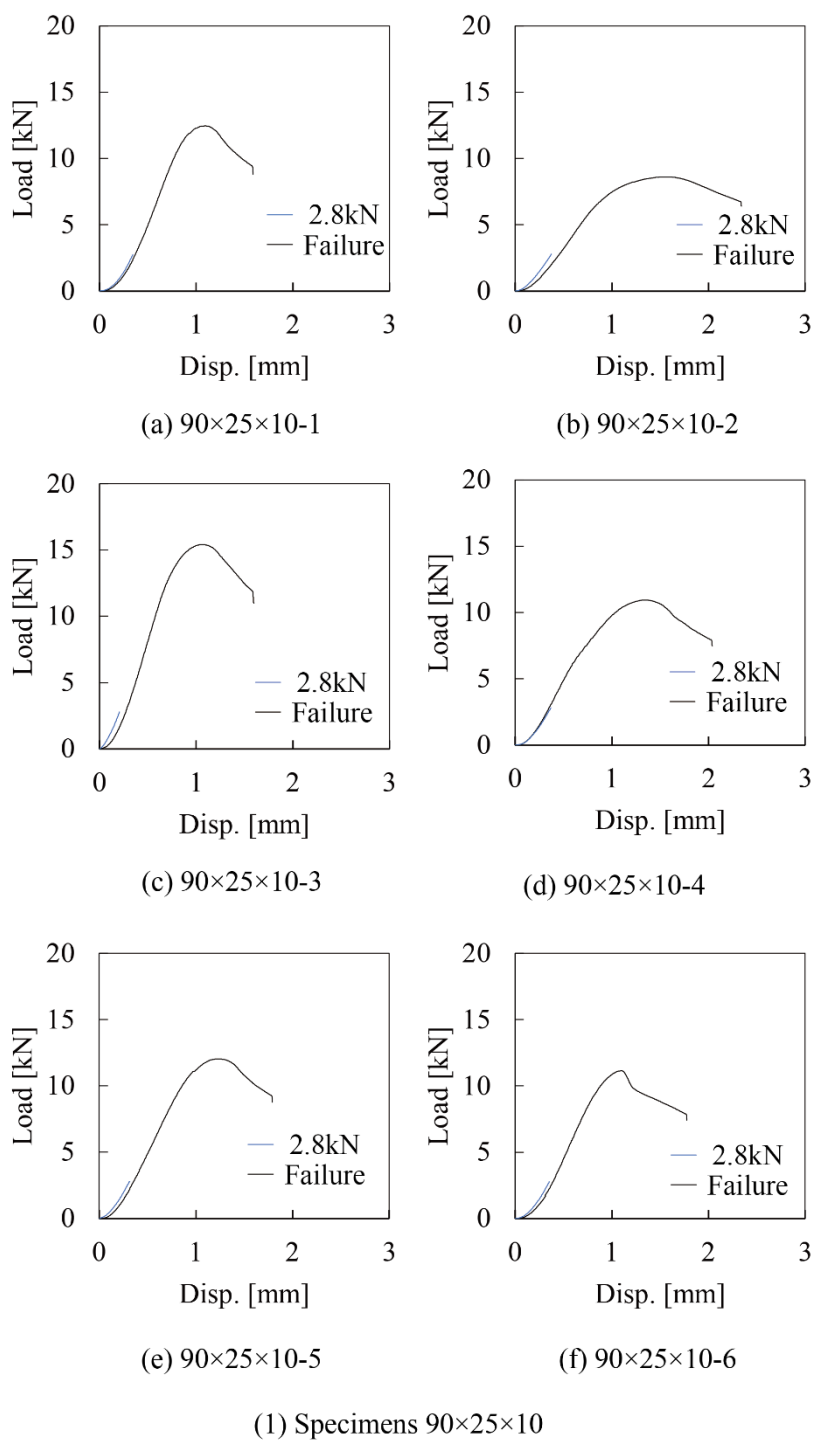


Figure 3.7 試験体 90×25×10 と D90×25×10 の 2.8kN までと最終破壊までのサイクルの荷重—変位関係

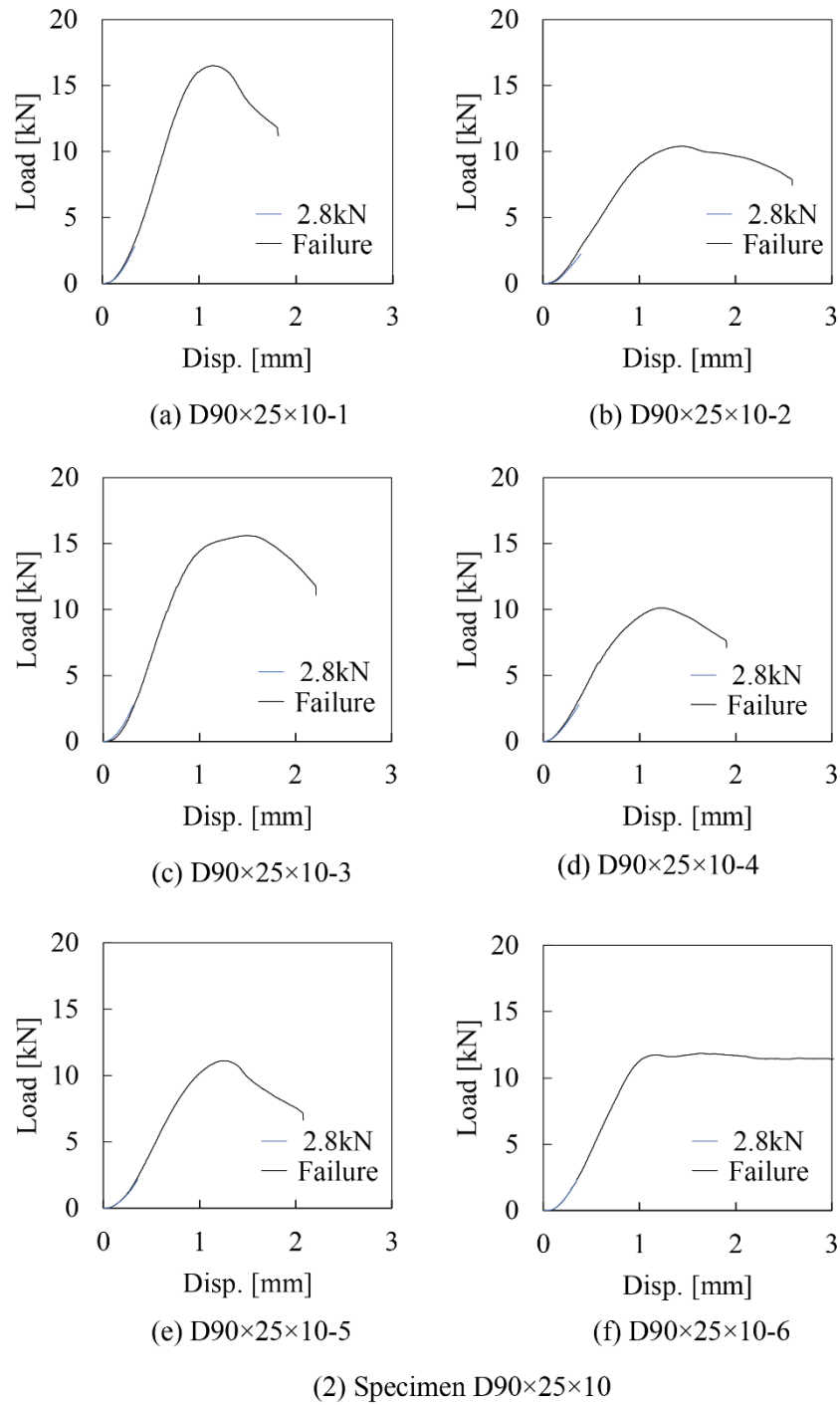


Figure 3.7 試験体 90×25×10 と D90×25×10 の 2.8kN までと最終破壊までのサイクルの荷重—変位関係



(a) 0.7kN まで加力し除荷した試験体



(b) 2.8kN まで加力し除荷した試験体

Figure 3.8 試験体 90×25×10 の木材と加力板との接触面（ダメージゾーン）形状写真

3.3.2 ダメージゾーンの定義

Figure 3.9 に $0.2P_{max}$ (P_{max} は最大荷重) と $0.4P_{max}$ における画像相関法による試験体中央のひずみ分布を示す。すべての試験体で加力版に近づくにつれひずみが増加しており、ダメージゾーンの存在が確認できた。また、ひずみが増加し始める点は $0.2P_{max}$ と $0.4P_{max}$ で同じであることが見て取れる。ダメージゾーンの定義は x 軸に加力板からの位置[mm], y 軸にひずみ[%]としたときのある点の周辺 5 点の回帰直線の傾き (Figure 3.10) の絶対値が 10 [%/mm] 以上である点とした。これは、ミドルゾーンの傾きが理想的にはほぼ 0 であり、本実験ではある点の周辺 5 点の傾きの絶対値が 9.4 [%/mm]以下であったためである。

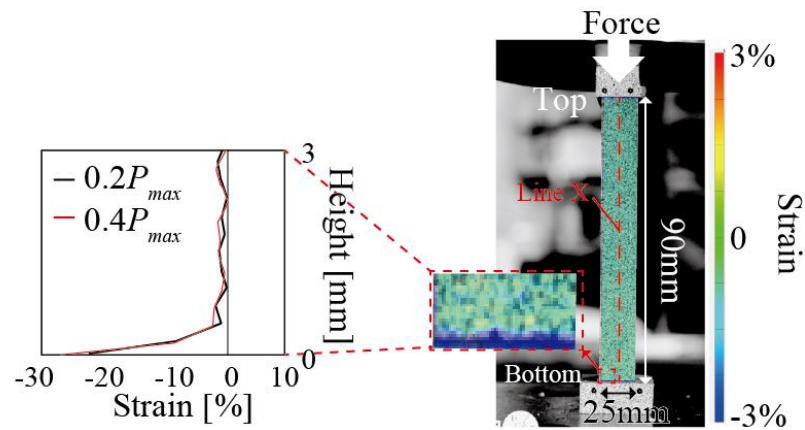


Figure 3.9 実験結果

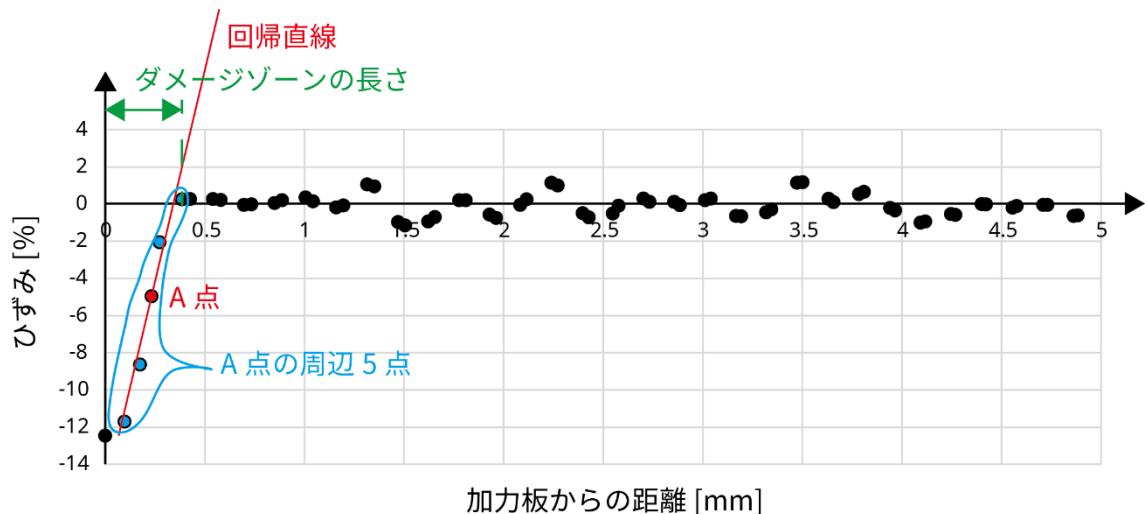


Figure 3.10 ダメージゾーンの定義

3.3.3 各パラメータがダメージゾーン，最大応力に与える影響

Table 3.2 に最大応力 $f_{c,0}$ と試験体全長のヤング係数 $E_{L,f}$ を示す。最大応力 $f_{c,0}$ はすべてのシリーズでほぼ同程度となった。20×25×10 の試験体全長のヤング係数 $E_{L,f}$ は他の 2 シリーズの約 1/3.5～1/4.6 倍とかなり小さかった。これは試験体 20×25×10 はダメージゾーンの全長に占める割合が大きいためだと思われる。

Figure 3.11 にダメージゾーンの長さを示す。ダメージゾーンの長さはカッターのダメージや試験体高さに依らず，0.2～0.7mm であった。試験体 20×25×10 は相対的にダメージゾーンの全長に占める割合がほかの試験体に比べ大きくなる。Figure 3.12 に示すようにカッターによる切り込みは表面形状で確認できるが，ダメージゾーンの長さには影響を与えなかった。

Table 3.2 実験結果

Sample statistics	Maximum stress $f_{c,0}$ [N/mm ²]		
	90×25×10 mm ³	D90×25×10 mm ³	20×25×10 mm ³
Mean	43	47	43
CV[%]	18	21	18
	Longitudinal modulus of elasticity in full height E_f [N/mm ²]		
	90×25×10 mm ³	D90×25×10 mm ³	20×25×10 mm ³
Mean	4946	6487	1408
CV[%]	25	33	33

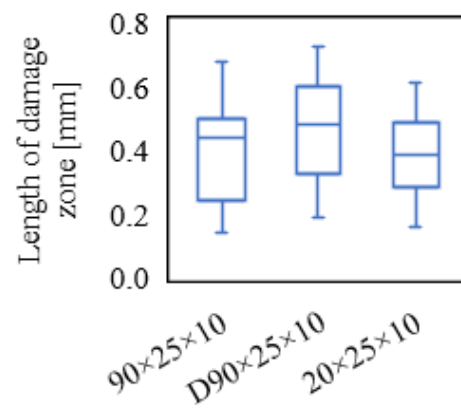
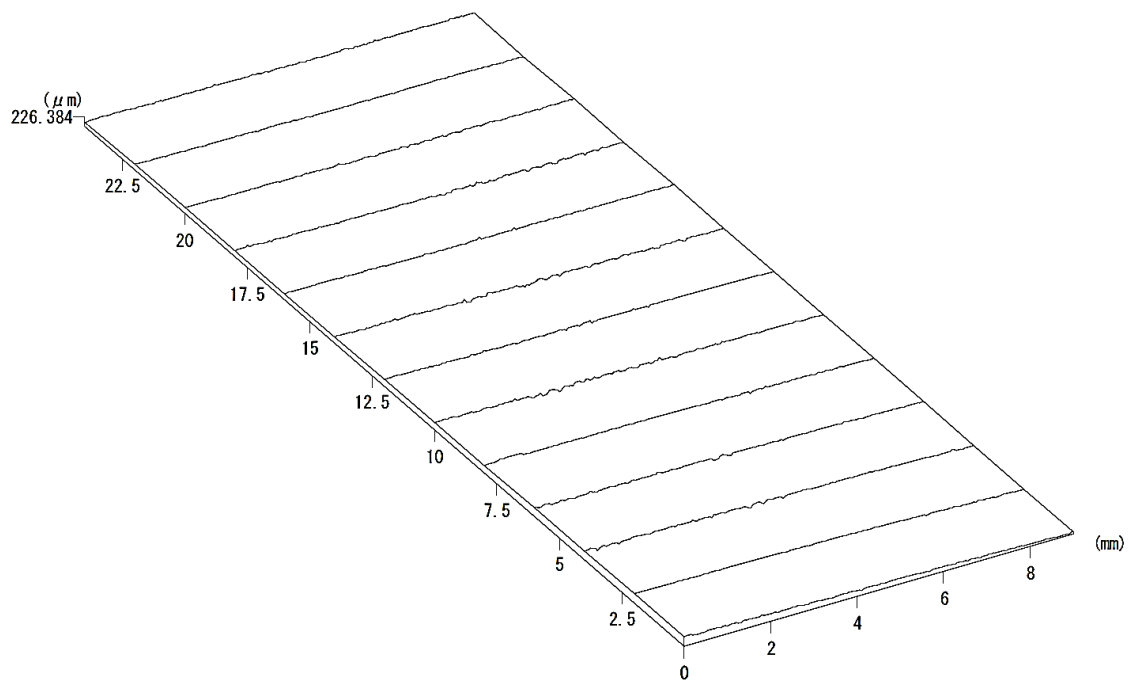
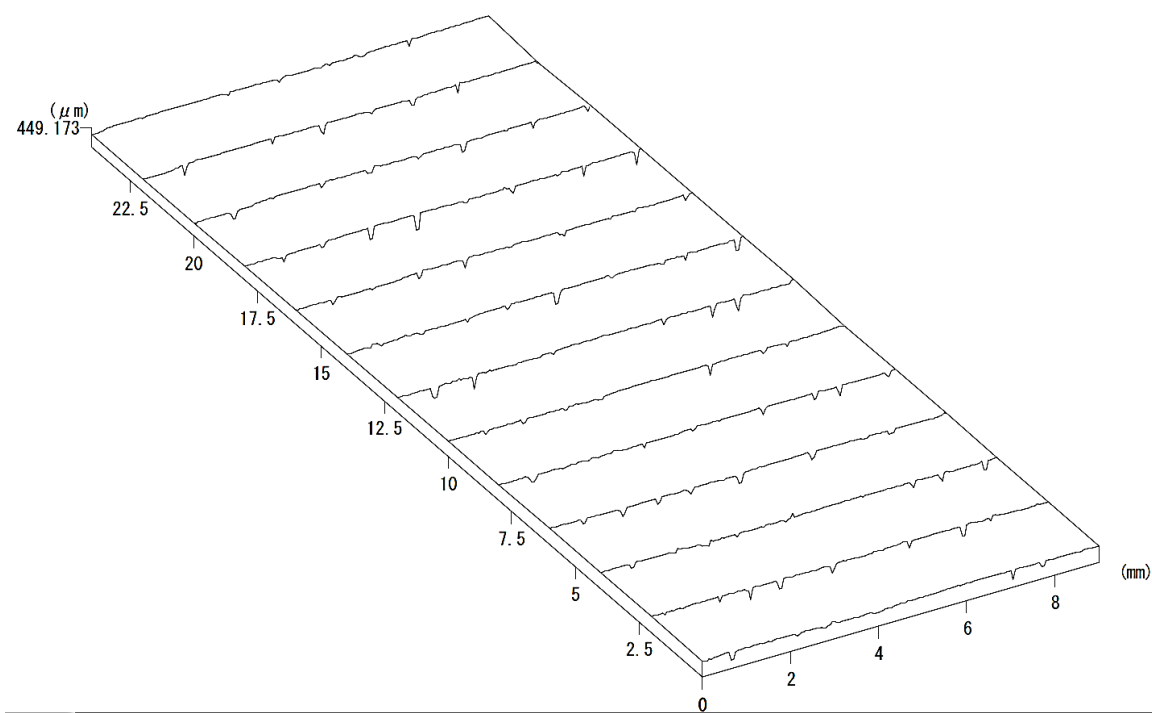


Figure 3.11 実験結果



(a) 90×25×10



(b) D90×25×10

Figure 3.12 レーザー3D形状測定機による表面形状の測定結果

3.3.4 載荷荷重と表面形状 (Profile curve)

Figure 3.13 に加力前、0.7kN と 2.8kN まで加力した後の line A～C の表面形状の一例（試験体 $90 \times 25 \times 10$ ）を示す。表面形状は加力前から 0.7kN までで平坦化し、0.7kN と 2.8kN ではほぼ変化しなかった。よって、木口面の表面は 0.7kN まで塑性変形するが、0.7kN から 2.8kN までは弾性変形していると考えられる。上記の荷重－変位関係に加え、表面形状からもダメージゾーンは 0.7kN から 2.8kN の範囲で完全な弾性変形であったと考察される。

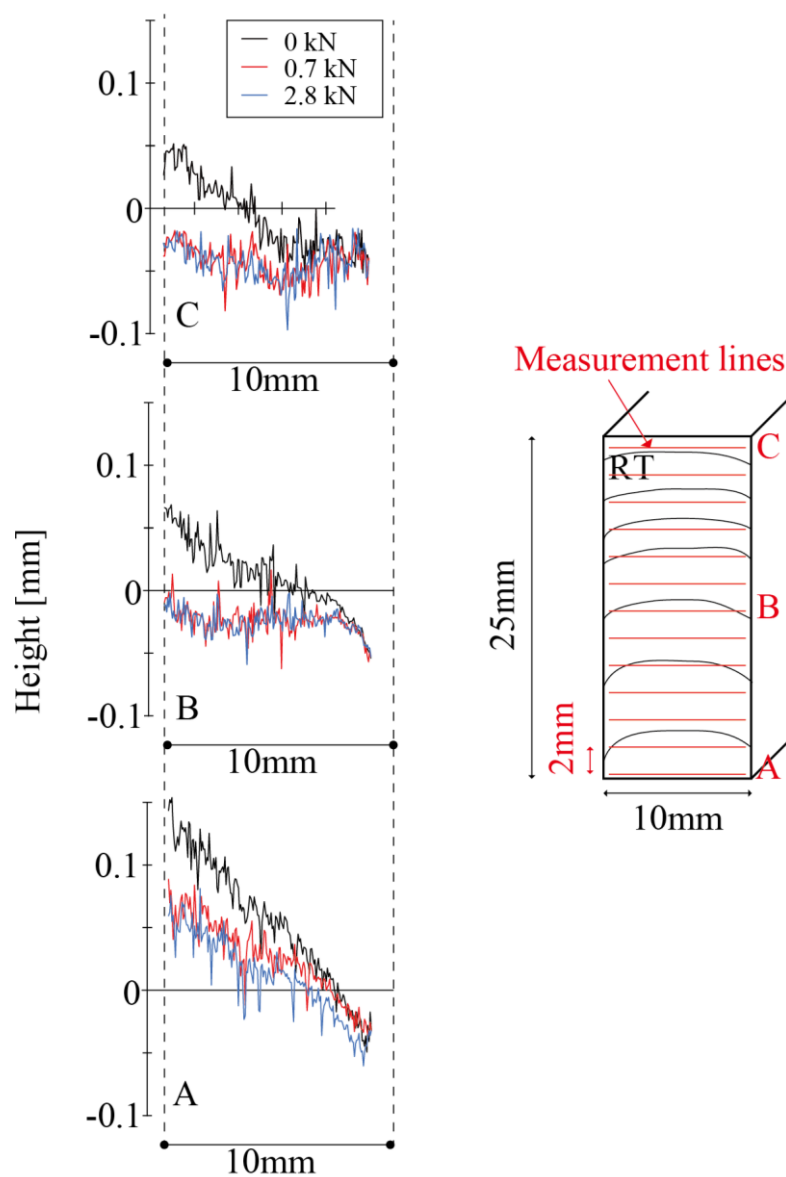


Figure 3.13 加力前、0.7kN と 2.8kN まで加力した後の line A～C の表面形状 ($90 \times 25 \times 10$)

3.3.5 表面性状パラメータ

ISO 4287:1997 や JIS B 0601:2013 では表面性状パラメータによって表面の形状を評価している。本論文では代表的なパラメータである算術平均粗さ P_a と最大高さ P_z について、加力板と接する木材面（RT 面）の表面形状を対象に検討を行った。

算術平均粗さ P_a (P-profile average) は基準長さにおける $Z(x)$ 絶対値の平均を表したもので、次式で表される (Figure 3.14)。

$$P_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (3.1)$$

最大高さ P_z (Maximum height peak-to-valley) は基準長さにおける輪郭曲線の中で、もっとも高い山の高さともっとも深い谷の深さの和を求め、表したものである。

Figure 3.15 に試験前と 0.7kN まで加力し除荷した時の P_a と P_z を示す。 P_a と P_z は試験前と 0.7kN まで加力し除荷した時とでほとんど変化しなかった。仕様別にみると、 P_a では $90 \times 25 \times 10 < D90 \times 25 \times 10 < 20 \times 25 \times 10$ の順であるのに対し、 P_z では $D90 \times 25 \times 10$ が $20 \times 25 \times 10$ よりも大きくなっていた。これは、カッターの切り込みがきちんと評価できたためである。しかし、 $D90 \times 25 \times 10$ と $20 \times 25 \times 10$ の P_z の平均値の差は試験前で 0.09mm, 0.7kN まで加力し除荷した時で 0.05mm と非常に小さかった。3.3.3 に示すようにダメージゾーンの長さは 0.2~0.7mm であったことから、今回のようなカッターの切り込み程度ではダメージゾーンの長さに影響を与えなかったと考察される。

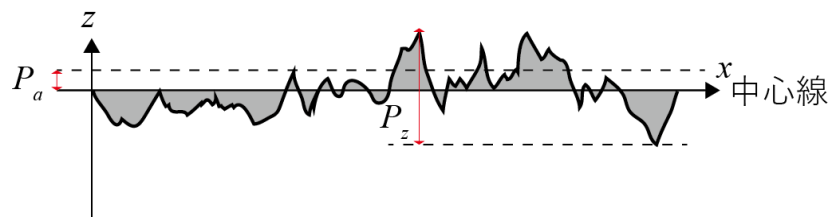


Figure 3.14 表面性状パラメータ説明図

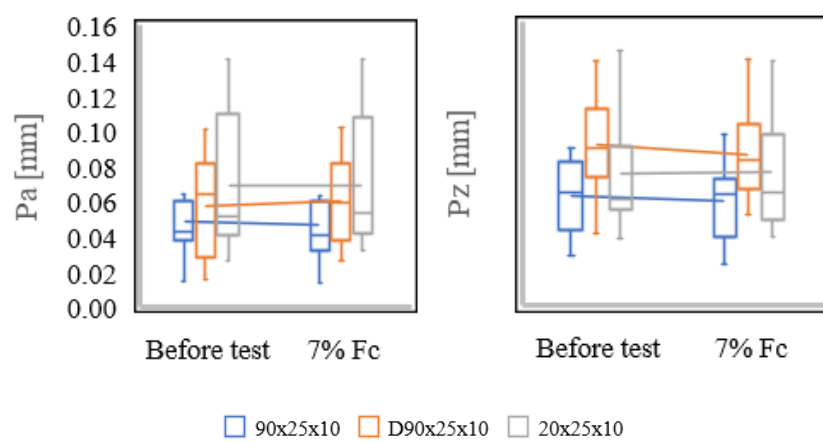


Figure 3.15 試験前と 0.7kN まで加力し除荷した時の P_a と P_z

3.3.6 表面性状パラメータとダメージゾーンの長さ

Figure 3.16 に表面性状パラメータ（算術平均粗さ P_a と最大高さ P_z ）とダメージゾーンの長さの関係を示す。なお、表面パラメータは 0.7kN まで加力し除荷した時の値である。表面性状パラメータ（ P_a と P_z ）ダメージゾーンの長さの相関係数はそれぞれ 0.07（ P_a ）と 0.28（ P_z ）であった。 P_a はダメージゾーンの長さとは相関性がなく、 P_z は若干相関性があると考えられる。特に、試験体 20×25×10 では P_z とダメージゾーンの長さの相関係数が 0.65 と高く、強い相関性が認められた。

また、 P_z とダメージゾーンの長さの範囲は 0.16mm～0.78mm（ P_z ）0.14～0.72mm（ダメージゾーンの長さ）と非常に近く P_z がダメージゾーンの長さになっているのではないかと推察される。本来 P_z がダメージゾーンの長さであれば、Figure 3.16 の P_z とダメージゾーンの長さは 1 対 1 になるはずである。しかし、ダメージゾーンの長さを決定したひずみ分布が試験体中央の一断面であり、ほかの部分ではダメージゾーンの長さが多少前後すると思われるため Figure 3.16 では正確に 1 対 1 となっていない。

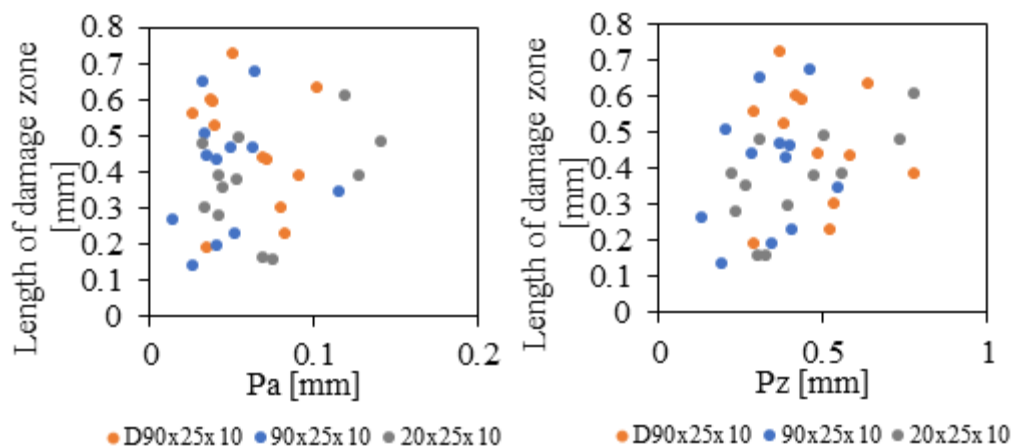


Figure 3.16 表面性状パラメータ（ P_a と P_z ）とダメージゾーンの長さの関係

3.3.7 載荷荷重とうねり曲線，粗さ曲線

本研究で検討する表面の凹凸の最大差はおおむね 1.5mm 以下の領域であった。表面形状の検討は表面の凸凹をそのまま読み取るより，フィルタリング等の計算を介したほうが行いやすい。表面形状は空間周波数が低いうねり曲線（waviness curve）と高い粗さ曲線（roughness curve）に分解できる(Figure 3.17)。ここでは ISO 25178 に従いうねり曲線と粗さ曲線の境界を 0.8mm とし表面フィルター処理を行った。

Figure 3.18 に Figure 3.13 の表面形状をフィルター処理することで得たうねり曲線と粗さ曲線を示す。うねり曲線は加力前から 0.7kN にかけて平坦化し，0.7kN から 2.8kN ではほぼ同じ曲線であった。粗さ曲線は積載荷重に関わらずほぼ同じ曲線であった。よって，表面形状は平坦化が 0.7kN ($7\%F_c$)まででほぼ終わり，弾性域においては変化しないと考えられる。

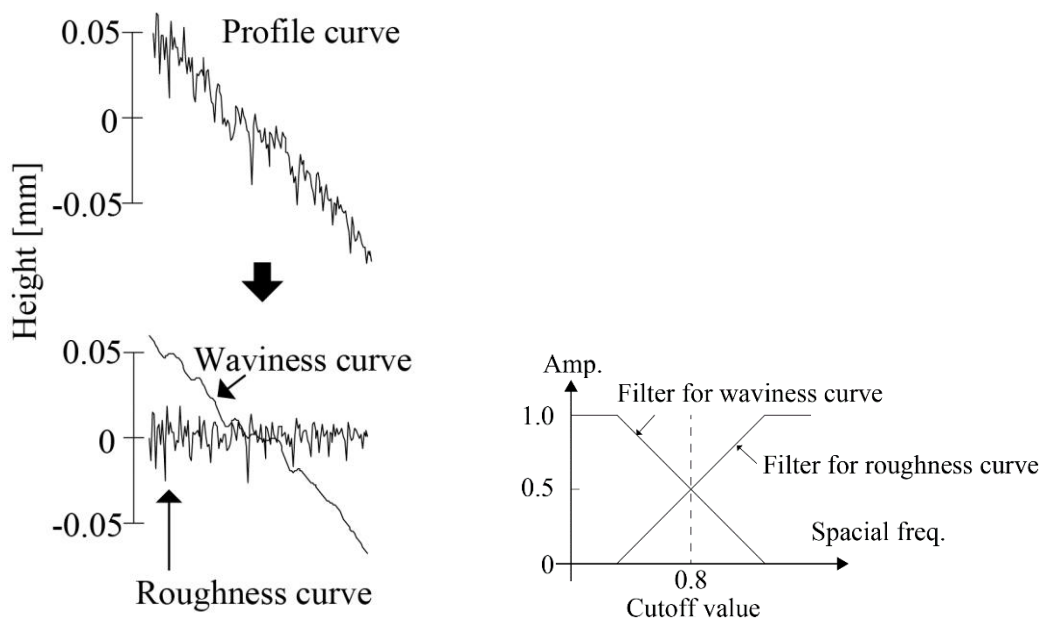


Figure 3.16 表面曲線の分解

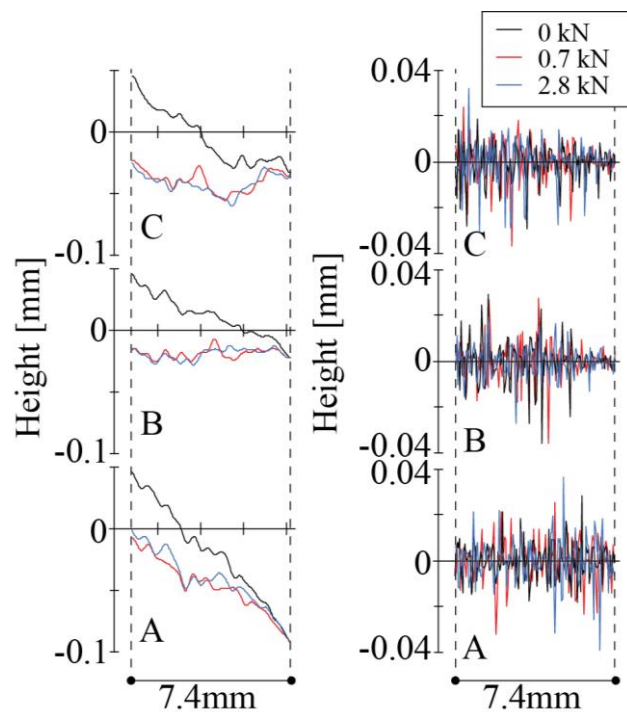


Figure 3.18 各荷重時のうねり，粗さ曲線 (90×25×10)

3.4 まとめ

スギの小試験体（節無し）を用いて木材面（RT 面）の形状と載荷荷重の関係を検討した。得られた知見を下記に示す。

1. ダメージゾーンを含む試験体全長の変形は、最大荷重の 7%から 28%まで完全な弾性変形であった。
2. ダメージゾーン内のひずみは加力板に近づくにつれて増加した。また、ダメージゾーンの長さは載荷荷重に関わらず一定の長さであった。
3. 加力板と接する面の木材（RT 面）の表面形状は最大荷重の 7%までで平坦化したが、それ以降の弾性域ではほぼ変化しなかった。また、最大荷重の 7%までの平坦化は表面形状のうねり成分のみが変化し、粗さ成分は変化しなかった。
4. 表面性状パラメータの算術平均粗さ P_a と最大高さ P_z は加力前の表面と最大荷重の 7%まで載荷し除荷した後の表面とでほぼ同じであった。
5. ダメージゾーンの長さはカッターの切り込みのある試験体とない試験体でほぼ同程度であった。これは、今回のようなカッターの切り込み程度では最大高さ P_z が切り込みのない試験体と比べて 0.09mm 程度しか増加せず、ダメージゾーンの長さにあまり影響を与えなかったためだと考察される。
6. 最大高さ P_z はダメージゾーン長さと若干の相関性が認められた。また、最大高さ P_z とダメージゾーンの長さの範囲は 0.16mm～0.78mm (P_z) と 0.14～0.72mm (ダメージゾーンの長さ) と非常に近く、 P_z はダメージゾーンの長さと等しいと推察される。

4. 集成材の全面縦圧縮

4.1 目的

2章の製材（節無し）の圧縮試験より，縦圧縮強さとヤング係数には余長効果が認められなかった。よって，本章では部分圧縮は行わず集成材の全面圧縮試験のみ行った。断面 25mm～200mm 角までの集成材（節あり）について寸法，高さ(L 方向)，突付仕様（突付なし，木一木，木一鉄一木），樹種をパラメータとした実験的検討をおこなったのでその結果を報告する。

目的は下記の 4 つに大分される。

- (1) 節のある集成材における縦圧縮強さの寸法効果の検討
- (2) 突付部にダメージゾーンが生じるか。また。突付仕様が木同士と木一鉄とでダメージゾーンの特性に影響を与えるかの検討
- (3) ダメージゾーンの長さおよびヤング係数の影響因子解明
- (4) 表面形状パラメータとダメージゾーンの関係の解明

2.1 節でも述べた通り，実大材（節あり）の縦圧縮強さの寸法効果については中井ら¹⁾や Fryer ら²⁾が研究を行っており，見解が分かれている。2章の製材の圧縮試験より，節がない試験体で

は縦圧縮強さに寸法効果が認められなかった。よって、縦圧縮強さの寸法効果は節の影響だと考えられる。本章では節のある集成材について断面、高さ（L 方向）が縦圧縮強さの寸法効果にどのような影響を与えるか検討した。

突付（contact joint）に関しては Marcus ら³⁾が CLT と集成材を用いて実験し、突付部がほかの部分に比べて大きく変形したと述べている。これは、突付部にダメージゾーンが生じていると思われ、本章では突付の仕様がダメージゾーンにどのように影響するかを検討した。

2 章ではダメージゾーンの加力板からの範囲はかなり小さいこと、3 章ではダメージゾーンの長さは小試験体において 0.2～0.7mm であることが得られた。本章では実大材（集成材）のダメージゾーン長さおよびヤング係数を評価できるようにするため、寸法や樹種、突付仕様をパラメータとした実験を行い、その影響因子を検討した。

3 章では表面パラメータ P_z がダメージゾーン長さと等しい可能性を示した。本章では実大材やほかの樹種においても同様の傾向があるかを検討した。

4.2 実験概要

4.2.1 試験体及び試験方法

Table 4.1 に試験体一覧と気乾密度を示す。試験体は EN 規格 GL30h のスプルース (Norway spruce, 学名: *Picea abies*) と JAS 規格 E65-F255 のスギ (Japanese cedar, 学名: *Cryptomeria japonica*), JAS 規格 E95-F315 のヒノキ (Japanese cypress, 学名: *Chamaecyparis obtusa*) の集成材より, 試験体の個体差をできる限り排除するために試験パラメータの項目が異なる試料を近接した位置から作成した。スギとヒノキの試験体の加工には銘建工業社にある NC 加工機の丸鋸を用いた。スプルースの加工はスウェーデンの Moelven 社で行い加工機は不明である。パラメータは断面寸法, 高さ(L 方向), 突付仕様 (突付なし, 鋼板なし, 鋼板あり, Figure 4.1) である。サンプル数は 6 体又は 4 体とした。断面が 25mm 角の試験体は節や接着層を含まないが, その他の試験体は節や接着層を含む。

Figure 4.2 に加力・測定装置を示す。試験方法は ASTM143-14 を参考にした。载荷はスウェーデン Chalmers University of Technology (スプルース) および東京電機大学 (スギ, ヒノキ) にある 3000kN 万能試験機 (スプルース: Toni Technik, 2040) (スギ, ヒノキ: 東京衡機製作所, 94T52) による単調圧縮加力とし, 载荷速度 1mm/min で最大荷重 (P_{max}) 到達後の荷重が $0.8 P_{max}$ に低下するまで行った。

スプルース試験体の計測は 2 台のカメラを用いた非接触 3D 変位・ひずみ測定システム (GOM mbH, ARAMIS) による隣り合う 2 面の変位とひずみ, 万能試験機内蔵の変位計とロードセルによるクロスヘッドの変位及び荷重とした。スギとヒノキの試験体の計測は 1 台のカメラ (Canon, Eos Kiss X5) を用いた 2D 画像相関法による 1 面の変位・ひずみ (0.2Hz), 万能試験機内蔵のロードセルによる荷重, 変位計による試験体全長の変位とした。カメラの撮影は手振れ等を防ぐためパソコンからの遠隔操作 (Canon, EOS Utility 2) により行った。画像相関法分析にはスプルース, スギ, ヒノキともに GOM Correlate (GOM) を用いた。Table 4.2 に画像相関法に関する各設定値を, Figure 4.3 に GOM Correlate の設定例を示す。

ARAMIS (3D 画像相関法を用いたシステム) 及び 2D 画像相関法で必要となるランダムパターンはつや消し白のペンキを測定面に塗布したのち, つや消し黒のスプレー及び目の粗いスポンジでドットを試験体にペイントした (Figure 4.4)。

スギとヒノキの試験体はダメージゾーンと木材－加力板接触面の関係を検討するため試験前、 $0.1P_{max}$ まで加力し除荷した時点の 2 回、木材－加力板接触面(1 試験体につき上下の RT 面 2 面)の表面形状を測定した。測定は埼玉県産業技術総合センター本所の非接触三次元測定機(三鷹光器, NH-3SP)および表面粗さ・輪郭形状測定機(ミットヨ, フォームトレーサーSV-C4100H8)により行った。測定位置を Figure 4.5 の黒線で示す。断面 200mm 角の試験体では 4 ライン、100mm 角と 25mm 角の試験体では 5 ライン測定した。スギとヒノキの加力サイクルを Figure 4.6 に示す。

Table 4.1 試験体一覧と含水率，気乾密度

Series	Species	#	Specimen size [mm]		Joint type	Moisture content [%]	Density [kg/m ³]
			Cross section	Height			
2.5-1Sp	Norway spruce	6	25×25	100	Non	7.5-10.6	463
10-1Sp			100×100				446
20-1Sp			200×200				442
20-05Sp				50			431
20-3Sp				300			460
20-3bSp		4			butt(same)		480
20-3bxSp					butt(cross)		488
20-3sSp					steel plate		482
2.5-1Ce	Japanese cedar	6	25×25	100	Non	10.9-11.3	367
10-1Ce			100×100				411
20-1Ce			200×200				404
20-2Ce				200			408
2.5-1Cy	Japanese cypress	6	25×25	100	Non	8.2-11.3	504
10-1Cy			100×100				485
20-1Cy			200×200				483
20-2Cy				200			489

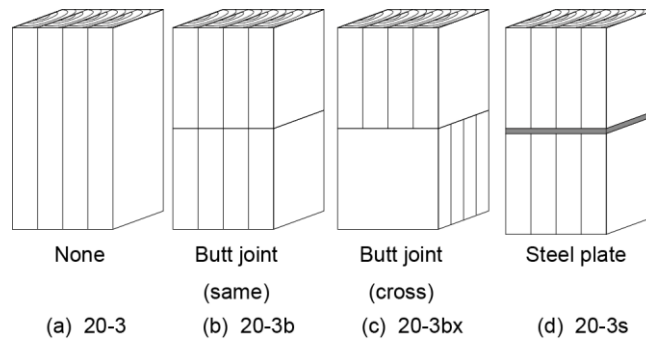


Figure 4.1 突付仕様（突付なし，鋼板なし，鋼板あり）



(a) スプルースの試験体



(b) スギ・ヒノキの試験体

Figure 4.2 加力装置

Table 4.2 画像相関法に関する各設定値

(a) スプルース

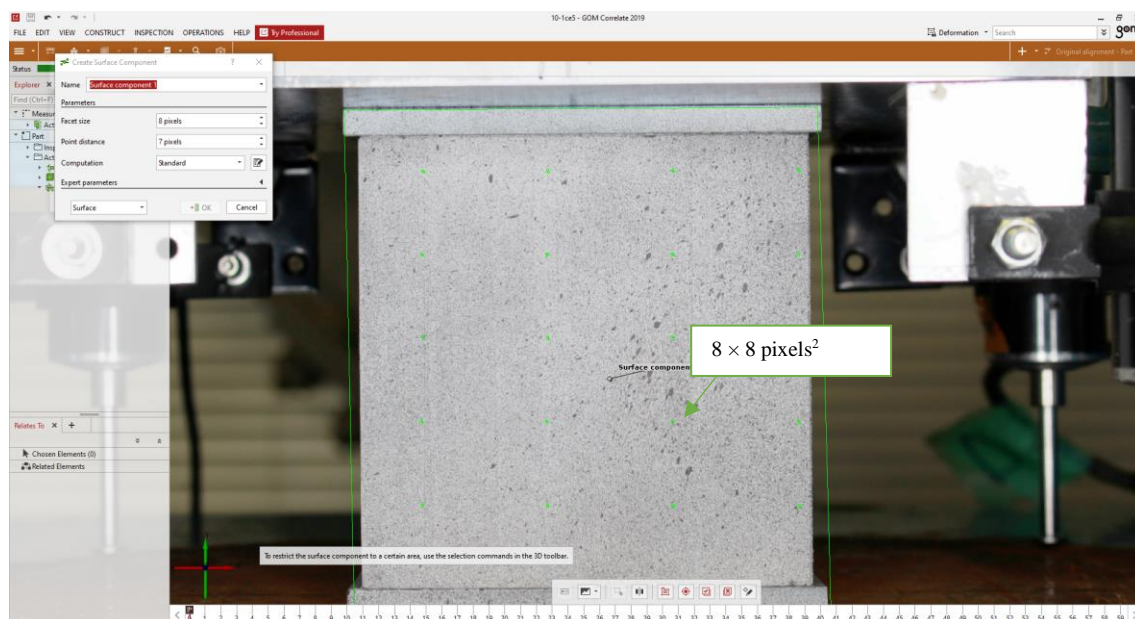
ARAMIS	frequency	1 Hz
	Facet size	$17 \times 17 \text{ pixels}^2$
GOM parameter-Facet	Point distance	$17 \times 17 \text{ pixels}^2$
	Computation	More points

(b) スギ, ヒノキ

Image	Pixel number	$5184 \times 3456 \text{ pixels}^2$
	frequency	0.2 Hz
Camera	F-step	f/7.1
	Exposure time	1/20 sec.
	ISO	100
	Flash	No flash
GOM parameter-Facet	Facet size	$8 \times 8 \text{ pixels}^2$
	Point distance	$7 \times 7 \text{ pixels}^2$
	Computation	Standard



(b) スプルス



(b) スギ, ヒノキ

Figure 4.3 GOM Correlate の設定例

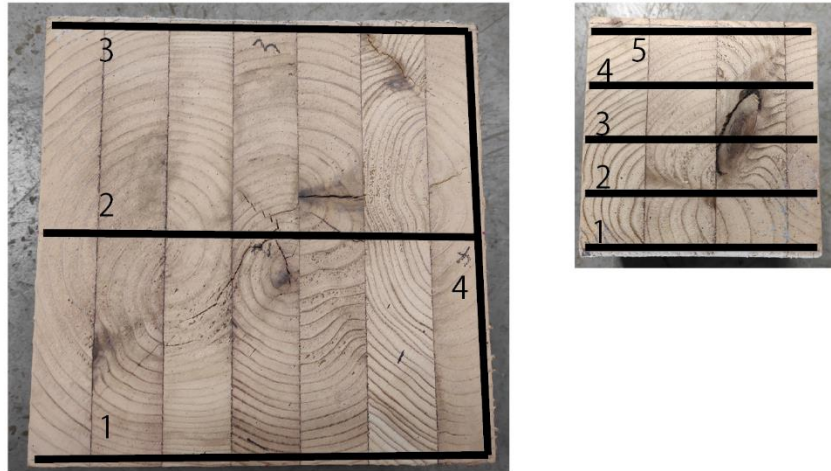


Figure 4.4 表面形状測定位置

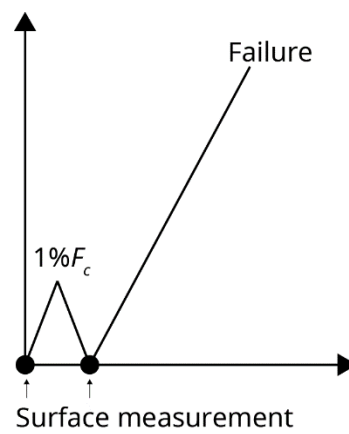


Figure 4.5 加力，表面測定サイクル（スギ，ヒノキ）

4.2.2 材料試験

試験体の物理的特性を取得するため、TGH 法による非破壊試験を行った。試験体は圧縮試験体を製作したのと同じ集成材から節を含まないように切り出し、10mm (T) × 幅 20mm (R) × 260mm (L) とした (Figure 4.6)。試験方法は 2 章と同じく構造用木材の強度試験マニュアル⁴⁾に準拠した。

Figure 4.7 に実験風景を Table 4.2 に TGH 法により得られた曲げヤング係数とせん断弾性係数 (LT) を示す。



Figure 4.6 TGH 試験体形状 (スプルース)

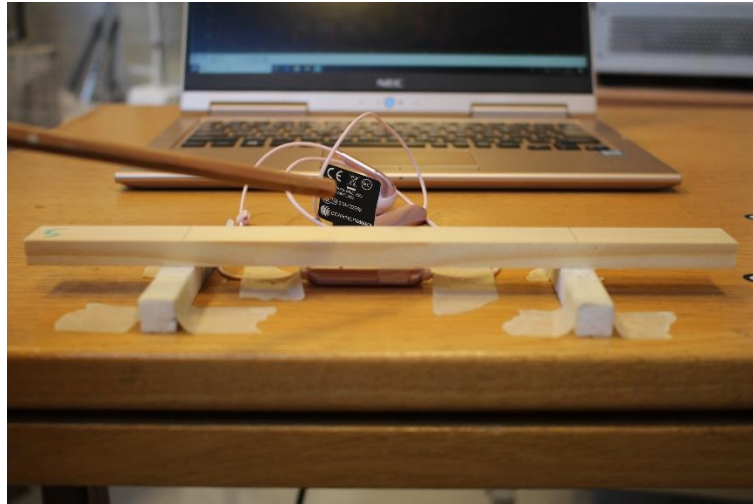


Figure 4.7 TGH 法の試験風景

Table 4.2 曲げヤング係数と LT 方向のせん断弾性係数, 気乾密度 (平均値)

	Bending modulus E [N/mm ²]	Shear modulus G_{LT} [N/mm ²]	Density [kg/m ³]
Norway spruce	14350	865	449
Japanese cedar	8644	913	428
Japanese cypress	12905	860	467

4.3 実験結果と考察

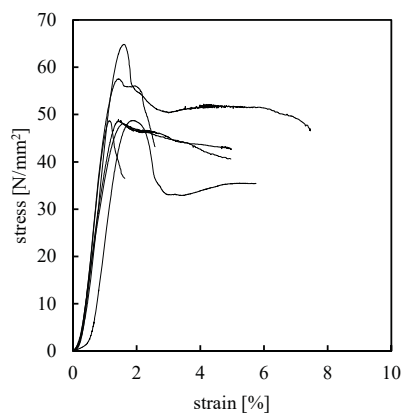
4.3.1 応力－ひずみ関係と破壊モード

試験応力とひずみは次式により算出した。

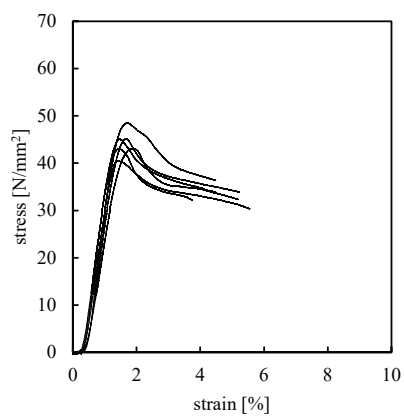
$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{H} \quad (4.2)$$

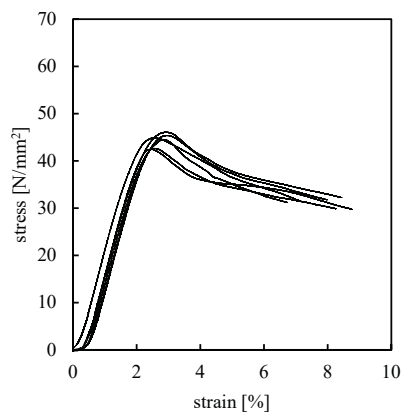
ここで、 P ：ロードセルによる荷重、 A ：加力面積、 Δl ：変位計による試験体全長の変化量、 H ：試験前の試験体全長。Figure 4.8 に実験結果の応力－ひずみ関係および試験後の破壊状況を示す。断面が 100mm と 200mm 角の試験体は 25mm 角の試験体に比べばらつきが少なかった。これは 100mm と 200mm 角の試験体が複数のラミナから構成され、結果はそれらのラミナの平均になるためだと考えられる。すべての試験体において応力が最大値を迎えたのち徐々に低下し、急激な応力低下は見られなかった。破壊はすべての試験体で加力板付近のダメージゾーンにおける微小な変形、いくつかの試験体では加えて中央部のミドルゾーンにおける大きなキンクバンド（キンクバンドの説明は 2.3 節章参照）が生じていた。特に、100mm と 200mm 角の断面の試験体は節付近でキンクバンドが生じた。また、突付部のある試験体 20-3bSp, 20-3bxSp, 20-3sSp では上下どちらかの試験体のみが大きく破壊していた。



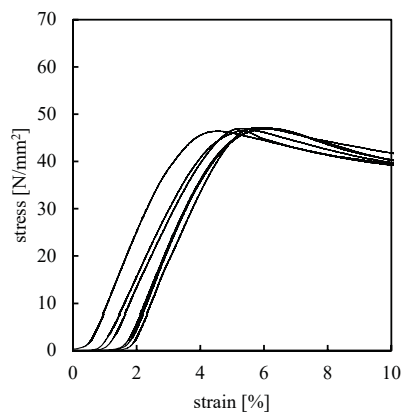
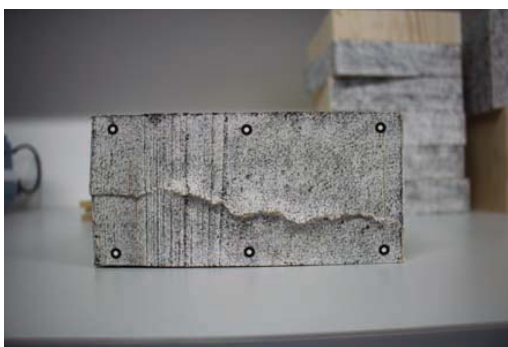
(a) 2.5-1Sp



(b) 10-1Sp



(c) 20-1Sp



(d) 20-05Sp

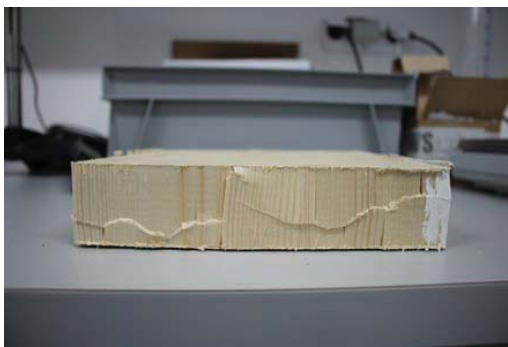


Figure 4.8 Stress—Strain (スプルース)

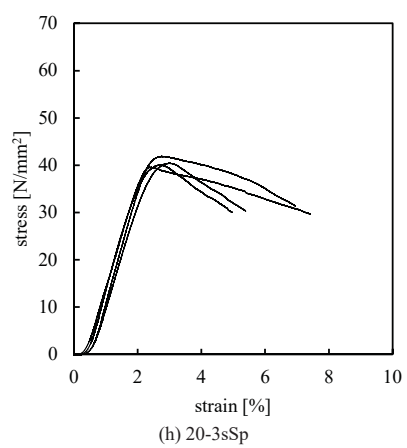
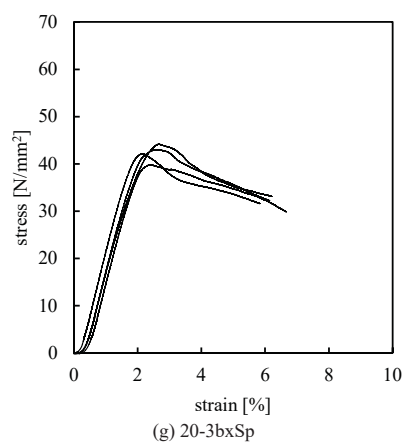
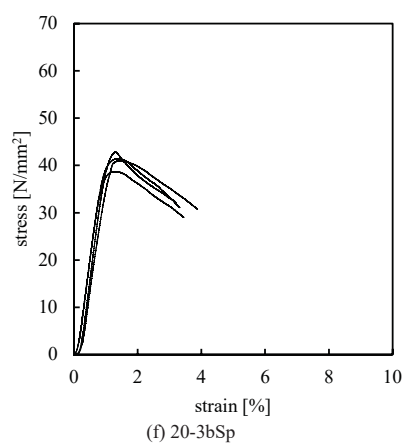
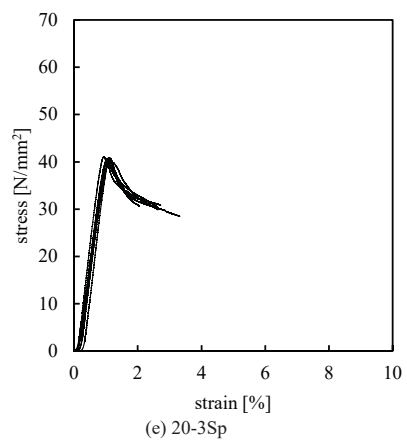
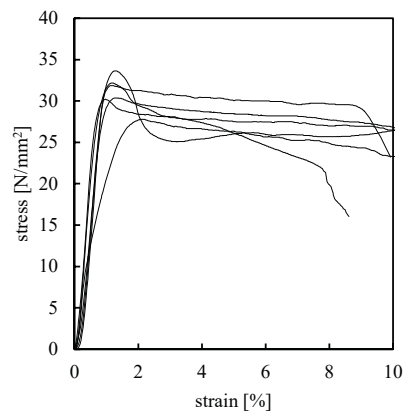
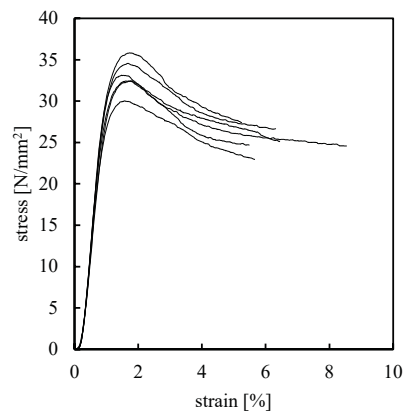


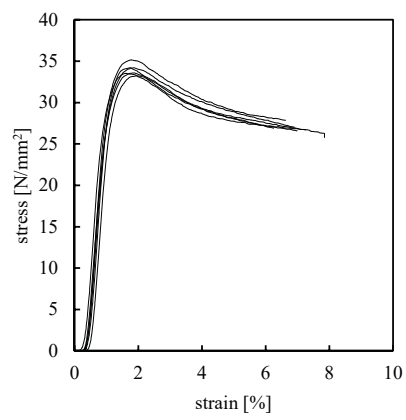
Figure 4.8 Stress—Strain (スプルース)



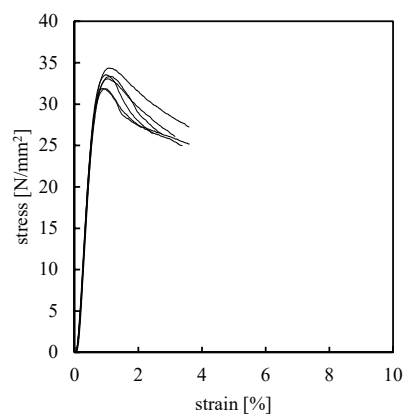
(a) 2.5-1Ce



(b) 10-1Ce



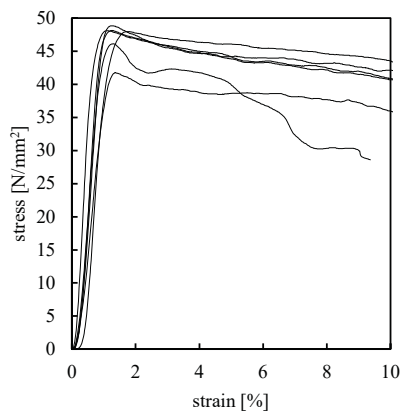
(c) 20-1Ce



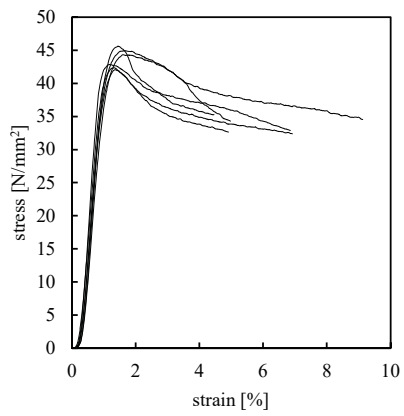
(d) 20-2Ce



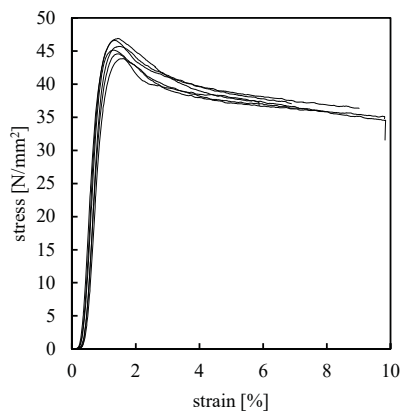
Figure 4.8 Stress—Strain (スギ)



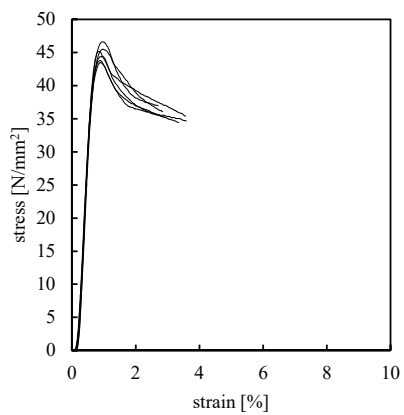
(a) 2.5-1Cy



(b) 10-1Cy



(c) 20-1Cy



(d) 20-2Cy



Figure 4.8 Stress—Strain (ヒノキ)

4.3.2 最大応力とヤング係数の決定方法

実験値の最大応力（縦圧縮強さ）は最大荷重 P_{max} を加力面積 A で除することで計算した。

$$f_{c,0} = \frac{P_{max}}{A} \quad (2.3)$$

ヤング係数は弾性域において次式で算出される。

$$E_L = \frac{P}{A\varepsilon_1} \quad (2.4)$$

ここで、 ε_1 ：繊維方向の線形ひずみ。本実験では試験体上部と下部に加え突付部でもダメージゾーンが見られたため4種類のヤング係数を定義する。それぞれ、変位計により得られた値を用いた試験体全長の縦ヤング係数 $E_{L,f}$ 、画像相関法により得られた値をもちいたミドルゾーンの縦ヤング係数 $E_{L,m}$ 、画像相関法により得られた値をもちいた加力板付近のダメージゾーンの縦ヤング係数 $E_{L,d}$ 、画像相関法により得られた値をもちいた突付部のダメージゾーンの縦ヤング係数 $E_{L,dj}$ である。

4.3.3 縦圧縮強さとヤング係数

Table 4.3 に全試験体の実験結果を示す。 $E_{L,m}$ および $E_{L,d}$, E_{L,d_f} は試験体の寸法（高さ，断面）や突付タイプに影響を受けなかった。 $E_{L,d}$ の全試験体の平均値はスギ 255 N/mm²，ヒノキ 366 N/mm²，スプルース 711 N/mm² であった。また， $E_{L,d}$ は $E_{L,m}$ の 2～12%（スプルース，平均 5%），1～8%（スギ，平均 3%），1～6%（ヒノキ，平均 2%）であった。

Figure 4.9 に試験体高さと断面積が $f_{c,0}$ と $E_{L,f}$ に与える影響を示す。 $f_{c,0}$ は試験体高さが高くなる小さくなった。これは 2 章の製材試験体と異なり節を含むため，節の影響による寸法効果だと思われる。しかし，試験体断面が増加しても $f_{c,0}$ は減少しなかった。Fryer et al.²⁾ も言及するように，断面積が増加することによる寸法効果は試験体高さが増加することによる寸法効果に比べ小さいと考えられる。

$E_{L,f}$ は試験体高さが高くなると増加した。これは，ダメージゾーンのヤング係数や長さが試験体高さに影響を受けず一定の値であるため，試験体高さが高くなるとヤング係数の高いミドルゾーンのみが長くなり，結果としてヤング係数が向上するためである。スプルースの試験体と 2 章のスギ製材試験体では試験体断面積が増加すると $E_{L,f}$ が減少した。これはダメージゾーンの長さが試験体断面の増加にともない長くなるためだと考察できる（詳細は後記）。ダメージゾーンの長さが試験体断面積の変化にあまり影響を受けなかったスギとヒノキの試験体では，試験体断面積が増加しても $E_{L,f}$ は減少しなかった（詳細は後記）。

Table 4.3 実験結果

(a) スプルースの試験体

sample statistics	Maximum stress $f_{c,0}$ [N/mm ²]							
	2.5-1Sp	10-1Sp	20-1Sp	20-05Sp	20-3Sp	20-3bSp	20-3bxSp	20-3sSp
Quantity	6	6	6	6	6	4	4	4
Mean	53	44	44	47	41	41	41	42
CV [%]	12	6	3	1	1	4	2	4
Longitudinal modulus of elasticity in full height $E_{L,f}$ [N/mm ²]								
Mean	5327	4920	2507	1601	5510	2558	2381	2670
CV [%]	9	11	3	7	4	3	6	2
Longitudinal modulus of elasticity in middle zone $E_{L,m}$ [N/mm ²]								
Mean	13155	12440	13950	13414	11865	13240	12500	14064
CV [%]	13	9	16	18	5	9	10	11
Longitudinal modulus of elasticity in damage zone $E_{L,d}$ near loading plates [N/mm ²]								
Mean	532	736	631	712	737	673	781	885
CV [%]	53	33	18	22	37	16	25	20
Longitudinal modulus of elasticity in damage zone $E_{L,dj}$ near joint [N/mm ²]								
Mean						953	624	1177
CV [%]						14	35	7

(b) スギ, ヒノキの試験体

sample statistics	Maximum stress $f_{c,0}$ [N/mm ²]							
	2.5-1Ce	10-1Ce	20-1Ce	20-2Ce	2.5-1Cy	10-1Cy	20-1Cy	20-2Cy
Quantity	6	6	6	6	6	6	6	6
Mean	31	33	34	33	47	44	45	44
CV [%]	0	0	0	0	0	0	0	0
Longitudinal modulus of elasticity in full height $E_{L,f}$ [N/mm ²]								
Mean	4383	4432	5349	6649	6823	6284	8242	10091
CV [%]	0	0	0	0	0	0	0	0
Longitudinal modulus of elasticity in middle zone $E_{L,m}$ [N/mm ²]								
Mean	7549	4432	14318	9722	14966	15247	22575	14847
CV [%]	11	5	2	1	9	2	2	2
Longitudinal modulus of elasticity in damage zone $E_{L,d}$ near loading plates [N/mm ²]								
Mean	286	162	264	309	359	327	314	462
CV [%]	39	32	46	8	76	45	22	19

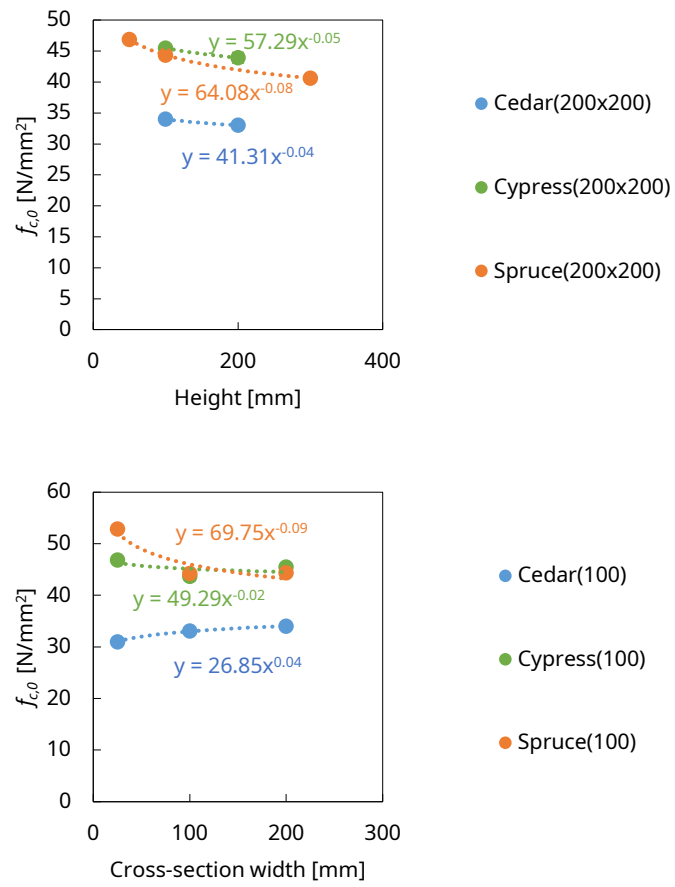


Figure 4.9 (a) 試験体高さと断面積が $f_{c,0}$ に与える影響

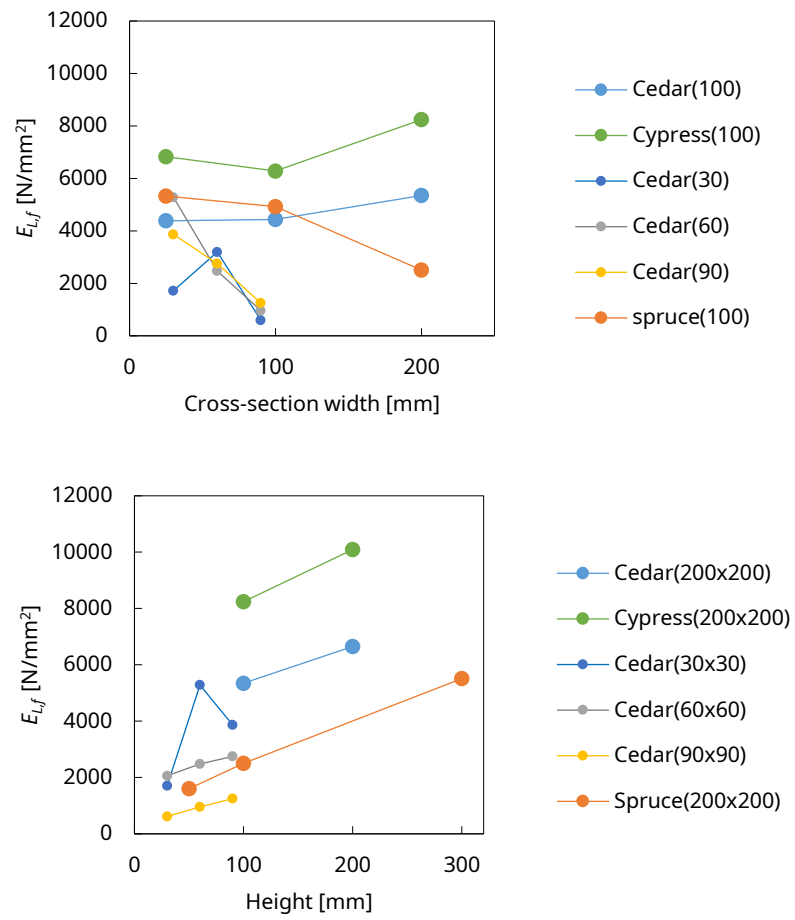


Figure 4.9 (b) 試験体高さと断面積が $E_{L,f}$ に与える影響 (2 章の結果も併せて示す。)

4.3.4 縦圧縮強さの寸法効果(Size effects)

Figure 4.9 (a) で示したように集成材の縦圧縮強さには寸法効果があると思われる。そこで、実験結果の統計分布の種類を検討するため Kolmogorov-Smirnov 検定 (KS 検定) を行った^{14) 15)}。なお、検討した分布の種類は正規分布と対数正規分布、ワイブル分布であり帰無仮説は「実験結果の分布は正規分布 (または対数正規分布、ワイブル分布) である」とした。正規分布と対数正規分布、ワイブル分布の各パラメータは最尤法 (MLE) を用いて決定した。

Table 4.4 に各パラメータの値と KS 検定の結果を示す。KS 検定は両側検定により p 値を出力した。p 値は統計的仮説検定において、帰無仮説の元で検定統計量がその値となる確率のことである。p 値が小さいほど、検定統計量がその値となることはあまり起こりえないことを意味する。スプールの試験体では対数正規分布とワイブル分布の p 値が、スギの試験体ではワイブル分布の p 値が、ヒノキの試験体ではすべての分布の p 値が高かった。すべての試験体でワイブル分布の p 値が高かったため、集成材の縦圧縮強さはワイブル分布である可能性が高く、寸法効果があると考察できる。

強さにおける寸法効果の程度を検討する際には一般に最弱リンクモデルにより導かれる寸法効果パラメータが用いられる⁵⁾。寸法効果パラメータ k は次式で表される。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_W} \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{k_L}$$

ここで、 σ_i : 破壊強度、 V_i : 体積、 W_i : 断面一辺の長さ、 L_i : 高さ。縦圧縮強さでは断面と高さ方向で寸法効果の程度が異なることが予測されるため、断面による寸法効果パラメータ k_W と高さによる寸法効果パラメータ k_L を分けて評価した。Figure 4.9 (a) に示すように k_L (スプルス: -0.08, スギ: -0.04, ヒノキ: -0.05) の平均値は -0.06 と k_W (スプルス: -0.09, スギ: 0.04, ヒノキ: -0.02) の平均値の -0.02 に比べ高い値を示した。よって、縦圧縮強さの寸法効果は試験体断面よりも高さにより影響されると考察される。また、 k は $k_W + k_L$ でありスプルスが -0.17, スギが 0, ヒノキが -0.07 であった。ただし、断面積は本実験の範囲 (25mm~200mm 角) でかなりの範囲の柱を網羅しているが、実際の柱の高さは 6m のものもあり検討の余地が残る。本研究により高さ方向がより縦圧縮強さの寸法効果に影響を与えることが分かったため、高さ方向に長い材が多く建築に使われる点を考えると、実大材 (節あり) の縦圧縮強さの寸法効果は重要だと思われる。

Table 4.4 各パラメータの値と KS 検定の結果

(a) スプルース

Parameter [N/mm ²]						P-value [-] (significance level = 0.05)		
Normal		Lognormal		Weibull		K-S test		
μ	σ	μ	σ	a	b	Normal	Lognormal	Weibull
45.8	5.11	3.82	0.103	48.2	7.30	0.18	0.32	0.031

(b) スギ

Parameter [N/mm ²]						P-value [-] (significance level = 0.05)		
Normal		Lognormal		Weibull		K-S test		
μ	σ	μ	σ	a	b	Normal	Lognormal	Weibull
32.8	1.78	3.49	0.0560	33.6	22.9	0.63	0.56	0.96

(c) ヒノキ

Parameter [N/mm ²]						P-value [-] (significance level = 0.05)		
Normal		Lognormal		Weibull		K-S test		
μ	σ	μ	σ	a	b	Normal	Lognormal	Weibull
45.0	2.18	3.81	0.0488	46.0	23.0	0.99	0.99	0.97

4.3.5 圧縮ひずみ分布とダメージゾーンの長さ

Figure 4.10 に画像相関法で得られた $0.2P_{max}$ と $0.4P_{max}$ の圧縮ひずみ分布および lineA と lineB の圧縮ひずみの平均値の一例（試験体 10-1Sp）を示す。ダメージゾーンのひずみは 3 章と同様に加力板へ近づくにつれ大きくなっていた。また、最大ひずみは載荷荷重により変化するが、ダメージゾーンの長さは載荷荷重に関わらず一定の長さであることが分かった。

Figure 4.11 に画像相関法による $0.2P_{max}$ での各試験体の圧縮ひずみ分布（加力板付近と突付部）を示す。すべての試験体でダメージゾーンの長さは試験体高さや突付タイプに影響を受けなかった。突付部のひずみは、加力板付近のひずみと同様に突付部に近づくにつれて増加していた。その増加の仕方やダメージゾーンの長さは加力板付近と同様であった。よって、木—木および木—鉄の突付付近のダメージゾーンは加力板付近のダメージゾーンと同様の性状であると言える。また、スプリースの試験体では試験体断面積が大きくなるほどダメージゾーンの長さが長くなる傾向があった。

ダメージゾーンの長さを 3.3.2 と同様に定義する。Figure 4.12 に加力板付近のダメージゾーンの長さと断面積および高さの関係を示す。スプリースの試験体において、ダメージゾーンの長さは試験体断面積が増加するごとに長くなり、かつ、ばらつきが大きくなる傾向にあった。スギとヒノキの試験体でもダメージゾーンの長さは試験体断面積が増加するごとに長くなったが、その増加率はスプリースよりも低かった。これは、スギとヒノキが同じ加工機で加工されたため似たような傾向となり、スプリースは他の加工機で加工されたため異なった傾向になったと思われる。また、加工誤差は試験体断面積が大きくなるほど大きくなる可能性が高く、特にスプリースの加工で顕著だったと思われる。つまり、ダメージゾーンの長さは加工機の精度により左右される可能性がある。一方、試験体高さが変化してもダメージゾーンの長さは変化しなかった。

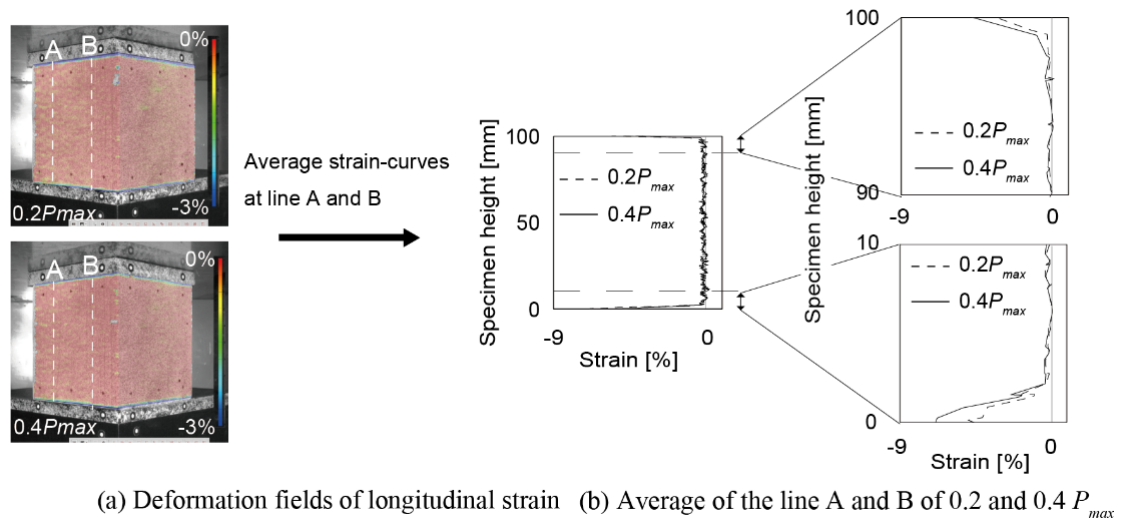


Figure 4.10 画像相関法で得られた $0.2P_{max}$ と $0.4P_{max}$ の圧縮ひずみ分布および lineA と lineB の圧縮ひずみの平均値の一例 (試験体 10-1Sp)

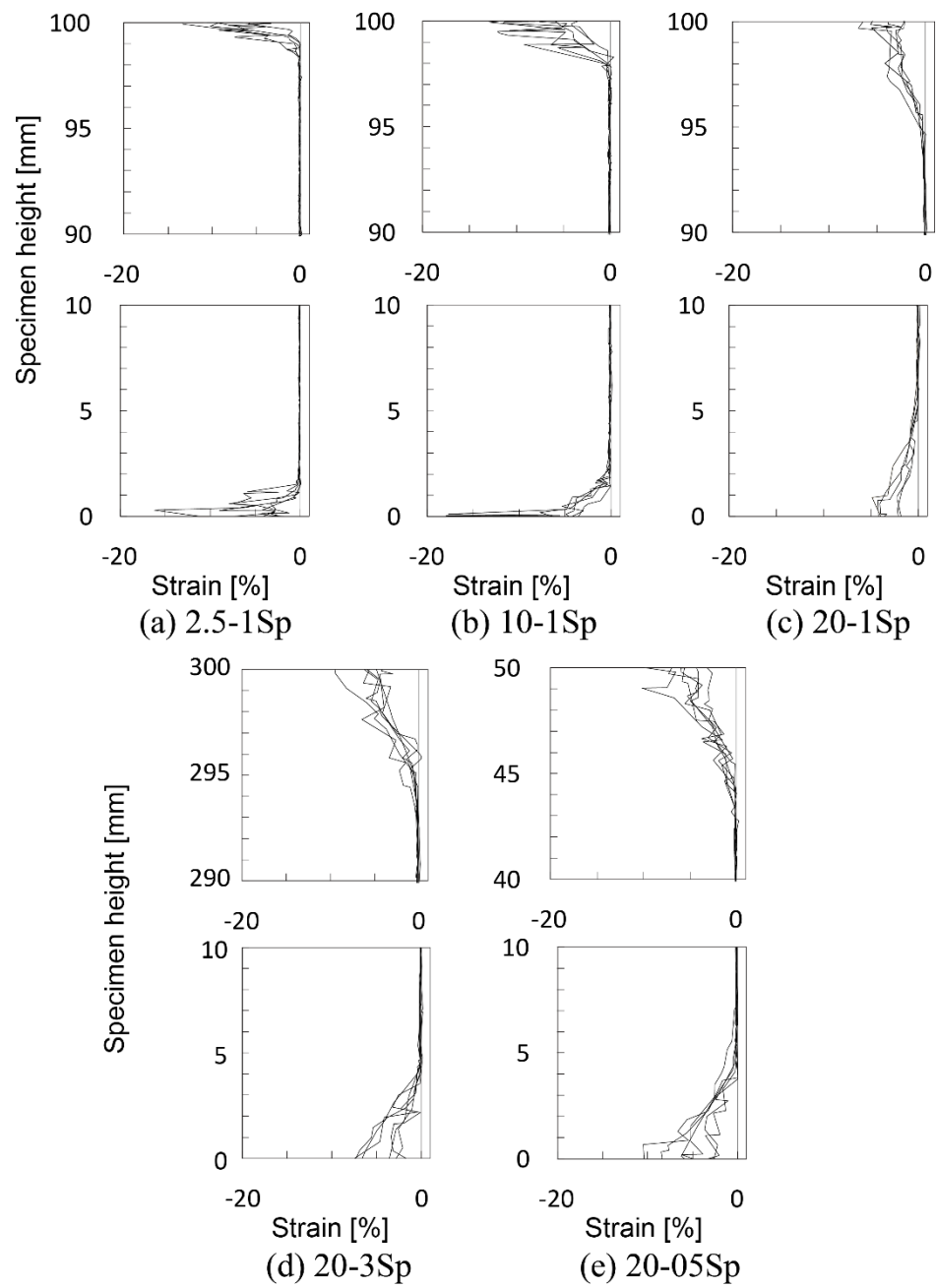


Figure 4.11 画像相関法による $0.2P_{max}$ での各試験体の圧縮ひずみ分布（スプルース）

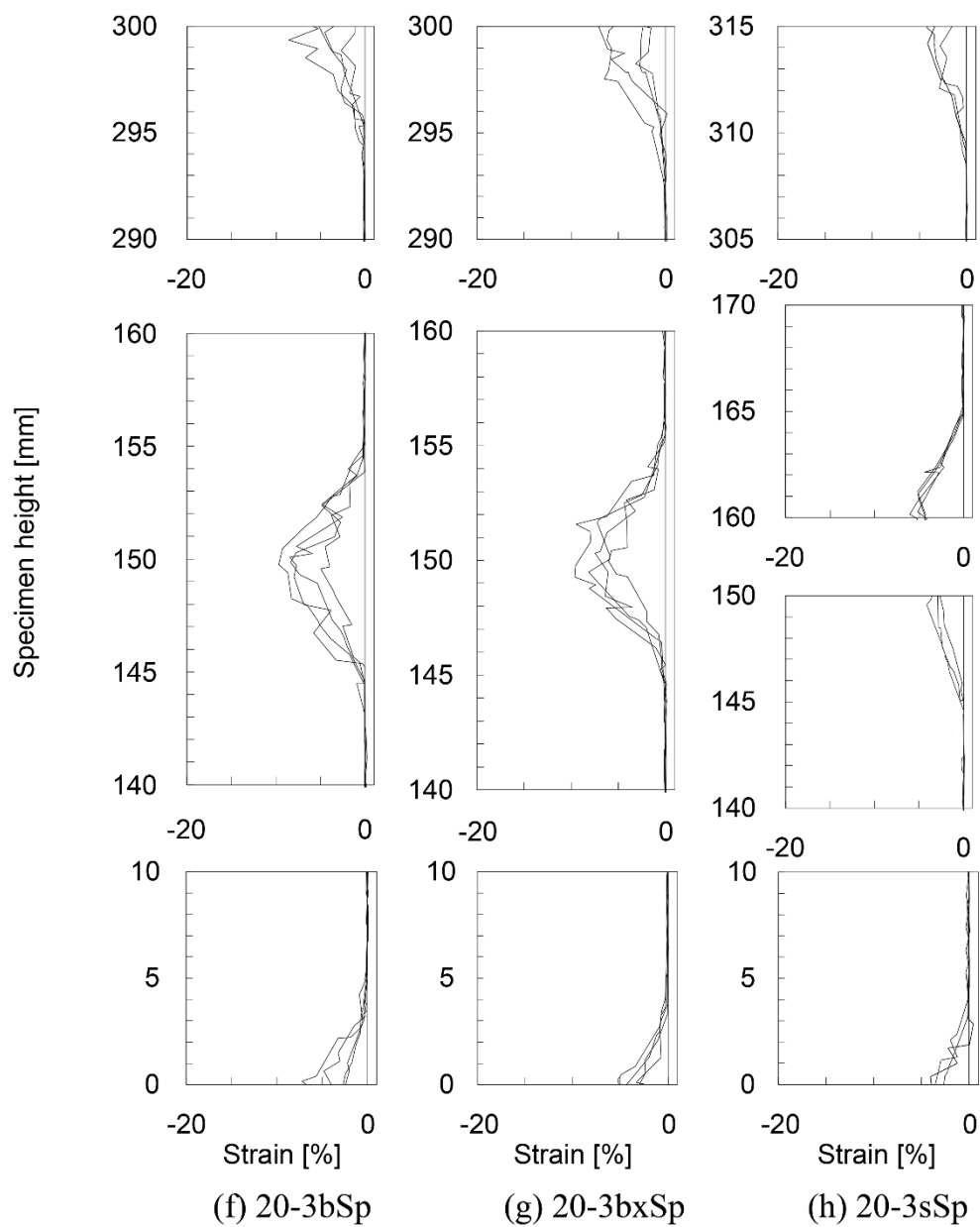


Figure 4.11 画像相関法による $0.2P_{max}$ での各試験体の圧縮ひずみ分布（スプルース，突付仕様）

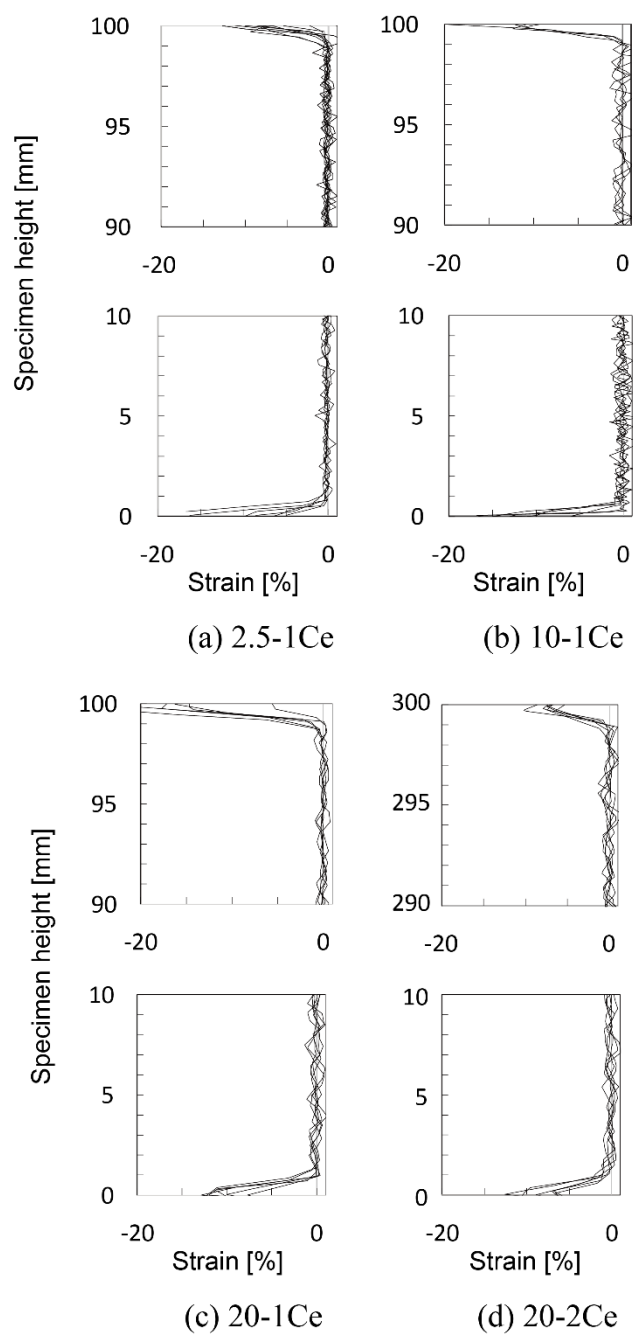


Figure 4.11 画像相関法による $0.2P_{max}$ での各試験体の圧縮ひずみ分布 (スギ)

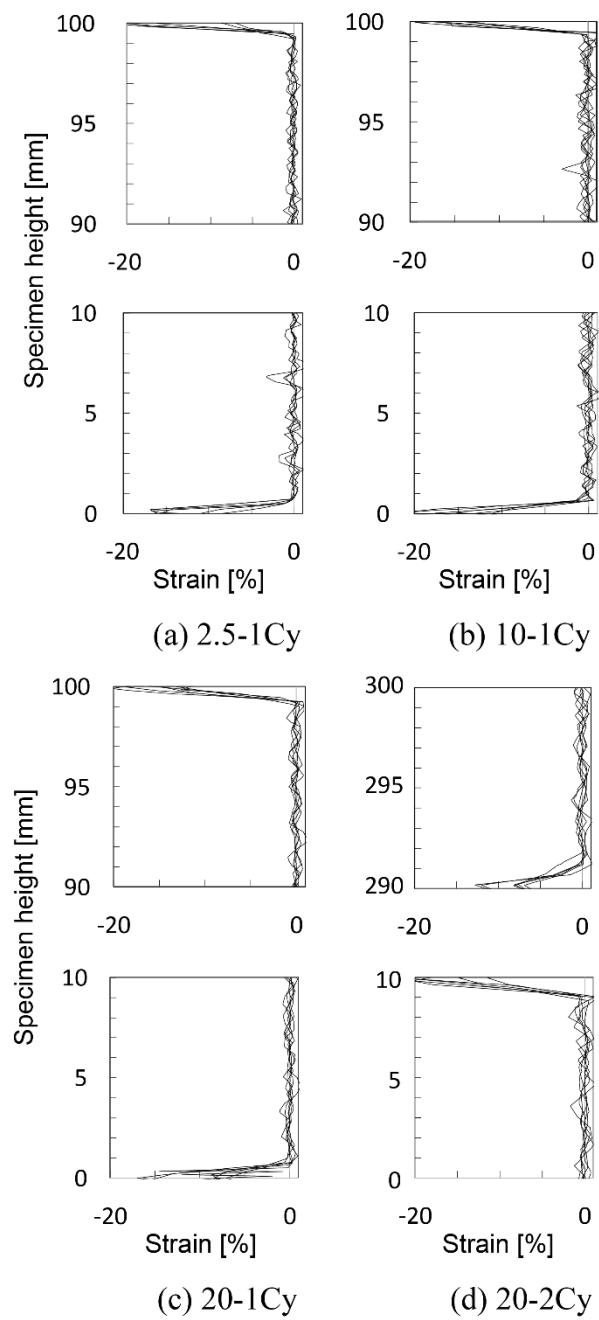
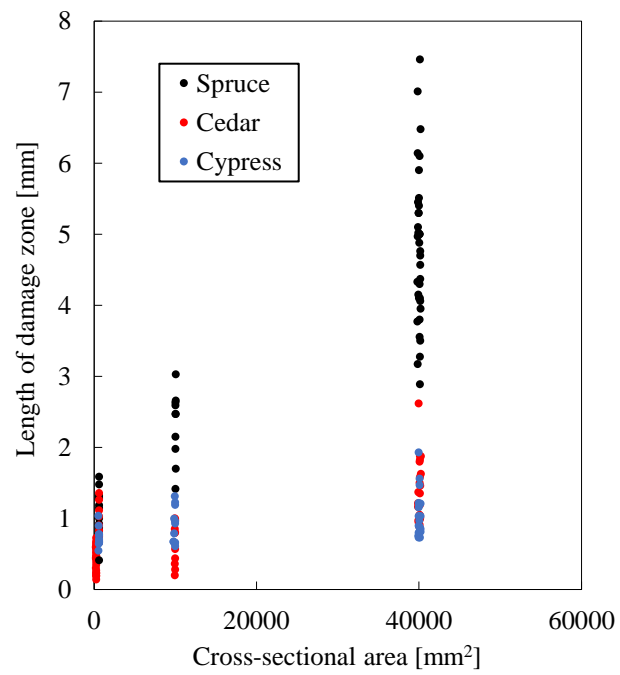
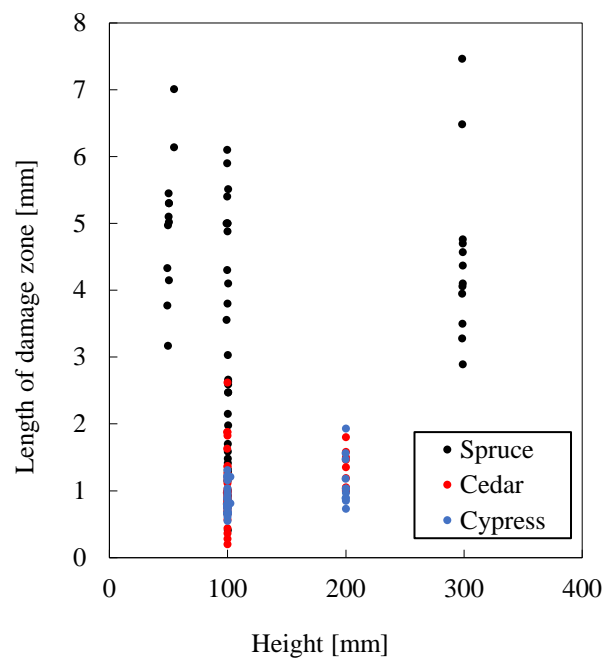


Figure 4.11 画像相関法による $0.2P_{max}$ での各試験体の圧縮ひずみ分布（ヒノキ）



(a) 断面積



(b) 高さ

Figure 4.12 ダメージゾーンの長さ、断面積および高さの関係

4.3.6 表面形状パラメータと試験体寸法

3章と同様にスギとヒノキの試験体について木材－加力板接触面（1試験体につき上下のRT面2面，Figure 4.4）の表面形状をパラメータ P_a と P_z を用いて評価した。なお，用いた表面形状は $0.1P_{max}$ まで加力し除荷した時点で測定したのものである。Figure 4.13 に試験体の断面積と表面性状パラメータの関係を示す。 P_a と P_z は試験体断面積が増加するにつれ大きくなり，かつ，ばらつきが大きくなる傾向にあった。この傾向は試験体断面積とダメージゾーン長さの関係と類似している。よって，ダメージゾーンの長さが試験体断面積に影響を受ける原因は試験体断面積により表面形状が変化するためだと考えられる。つまり，ダメージゾーンの長さは表面形状の影響を受けると考えられる。

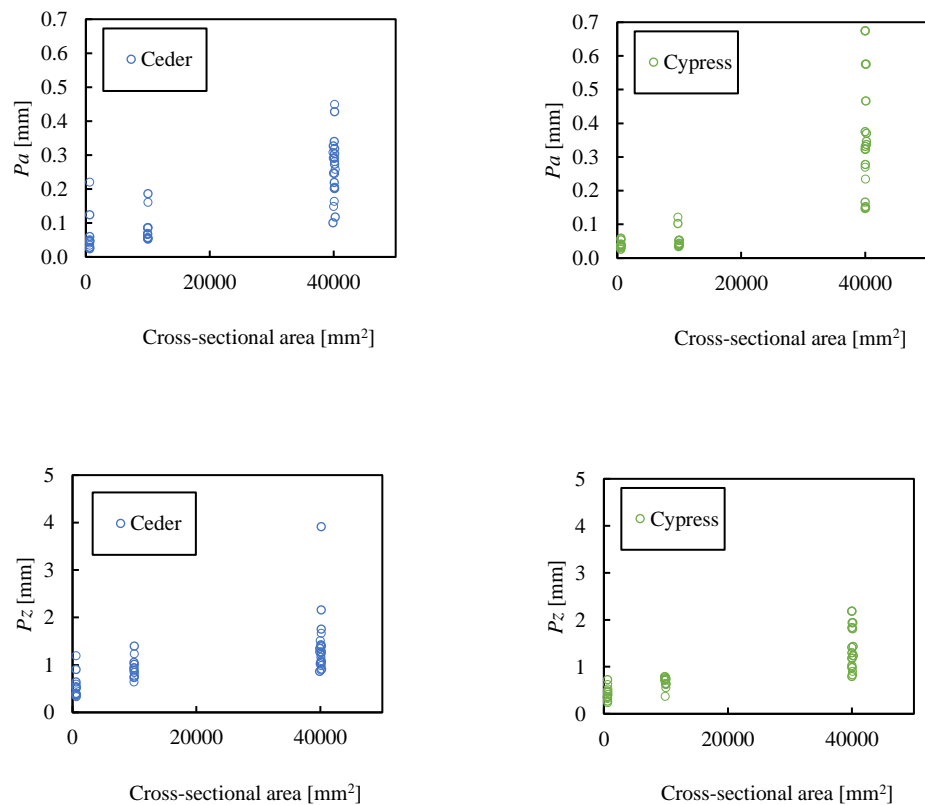


Figure 4.13 断面幅と表面性状パラメータ P_a と P_z の関係

4.3.7 表面形状パラメータとダメージゾーンの長さ

Figure 4.14 にスギとヒノキ試験体の表面性状パラメータ P_a と P_z とダメージゾーンの長さの関係を示す。相関係数はそれぞれ 0.38 (スギ, P_a), 0.11 (ヒノキ, P_a), 0.34 (スギ, P_z), 0.18 (ヒノキ, P_z) であった。相関係数から P_a , P_z どちらも若干の相関性があると言える。

また、3 章の小試験体と同様に本章の集成材試験体でも P_z (スギ 0.3~3.9mm, ヒノキ 0.2~2.2mm) とダメージゾーンの長さ (スギ 0.2~2.6mm, ヒノキ 0.5~1.9mm) の範囲は非常に近く、 P_z がダメージゾーンの長さであると推察される。

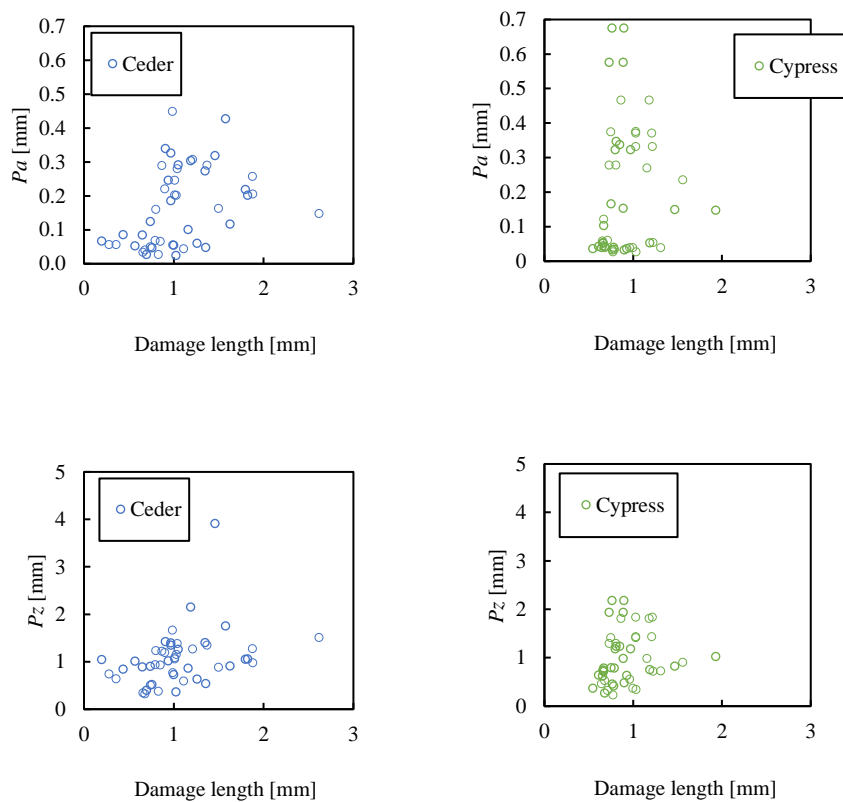


Figure 4.14 表面性状パラメータ P_a と P_z とダメージゾーンの長さの関係

4.4 まとめ

節を含む集成材の全面圧縮（断面 25mm～200mm 角）について寸法、高さ(L 方向)、突付仕様（突付なし、木一木、木一鉄一木）、樹種をパラメータとした実験的検討をおこない、下記の知見を得た。

1. 縦圧縮強さには寸法効果が見られた。2 章の節のない製材では寸法効果が認められなかったため、縦圧縮強さの寸法効果は節の影響だと考えられる。また、寸法効果は断面積よりも高さの影響が大きかった。本研究では、高さ方向のパラメータが実大材の寸法をカバーしていないが、高さ方向に長い材が多く建築に使われる点を考えると、実大材（節あり）の縦圧縮強さの寸法効果は重要であり、今後の課題である。
2. 3 章の小試験体と同様に、ダメージゾーン内のひずみは加力板へ近づくにつれ大きくなっていった。また、最大ひずみは載荷荷重により変化するが、ダメージゾーンの長さは載荷荷重に関わらずある一定の長さであった。
3. ダメージゾーンは加力板付近に加え、突付部でも生じた。突付部のひずみは、加力板付近のひずみと同様に突付部に近づくにつれて増加していた。その増加の仕方やダメージゾーンの長さは突付仕様に関わらず加力板付近と同様であった。よって、木一木および木一鉄の突付付近のダメージゾーンは加力板付近のダメージゾーンと同様の性状であると言える。
4. ダメージゾーン長さは試験体断面積（RT 面）が大きくなるほど長くなり、かつ、ばらつきが大きくなった。
5. ミドルゾーンのヤング係数 $E_{L,m}$ とダメージゾーンのヤング係数 $E_{L,d}$ は試験体寸法（高さ、断面積）に影響を受けなかった。
6. 全長のヤング係数 $E_{L,f}$ は 2 章の製材試験体と同様に試験体高さが高くなると大きくなった。これは、ダメージゾーンのヤング係数や長さが試験体高さに関わらず一定の値であるため、試験体高さが高くなるとヤング係数の高いミドルゾーンのみが長くなり、結果としてヤング係数が向上するためである。

7. スプルースの試験体と 2 章の製材試験体では試験体断面積が増加すると全長のヤング係数 E_{Lf} が減少した。これは、ダメージゾーンの長さが試験体断面の増加に伴い長くなるためだと考察できる。
8. 表面性状パラメータの算術平均粗さ P_a と最大高さ P_z は試験体断面積が増加するに従い大きく、かつ、ばらつきが大きくなる傾向にあった。この傾向は試験体断面積とダメージゾーン長さの関係と類似しているため、ダメージゾーンの長さは表面形状に影響を受けられる。
9. ダメージゾーンの長さは 3 章の小試験体と同様に最大高さ P_z と同程度であった。よって、ダメージゾーンの長さは最大高さ P_z と等しい可能性がある。

5. 縦圧縮ヤング係数評価式

5.1 目的

本章では 2 章から 4 章までの木材の縦圧縮特性の実験的検討をふまえ、ダメージゾーンを考慮した全長の縦圧縮ヤング係数の評価法を提案する。

目的は下記である。

(1) 縦圧縮ヤング係数の評価法確立

2 章から 4 章までの木材の縦圧縮特性の実験的検討により、部分縦圧縮および全面縦圧縮の強さは余長効果がなく、寸法効果を考慮すれば評価できることが分かった。縦ヤング係数に関してはダメージゾーンとミドルゾーンが存在し、それぞれの影響因子を考察した。本章では、その縦ヤング係数の評価法を提案した。さらに、応用例として引きボルトの面圧剛性の評価法を提案した。

5.2 縦ヤング係数の評価法

5.2.1 モデル化

本章までの実験結果をふまえ縦ヤング係数の評価法を提案する。縦圧縮木材の変形はミドルゾーン K_m とダメージゾーン K_d の2種類のばねによりモデル化できる (Figure 5.1)。

$$K_m = \frac{E_{L,m}A}{H - 2x} \quad (5.1)$$

$$K_d = \frac{E_{L,d}A}{x} \quad (5.2)$$

$$K_f = \frac{E_{L,f}A}{H} = \frac{1}{\frac{2}{K_d} + \frac{1}{K_m}} \quad (5.3)$$

$$E_{L,f} = \frac{1}{\frac{2x}{E_{L,d}A} + \frac{H-2x}{E_{L,m}A}} \frac{H}{A} = \frac{1}{\frac{2x}{E_{L,d}} + \frac{H-2x}{E_{L,m}}} H \quad (5.4)$$

ここで、 $E_{L,m}$ ：ミドルゾーンの縦ヤング係数、 $E_{L,d}$ ：ダメージゾーンの縦ヤング係数、 $E_{L,f}$ ：試験体全長の縦ヤング係数、 A ：試験体断面積、 H ：試験体高さ（L方向）、 x ：ダメージゾーンの長さである。2章より、部分縦圧縮試験体は同一加力断面を持つ全面圧縮試験体として扱うことができる。式 5.4 において $E_{L,m}$ は一般に言われる L 方向のヤング係数で樹種により異なることが知られる。 x および $E_{L,d}$ については既往の評価法が存在しないため次節以降で検討する。

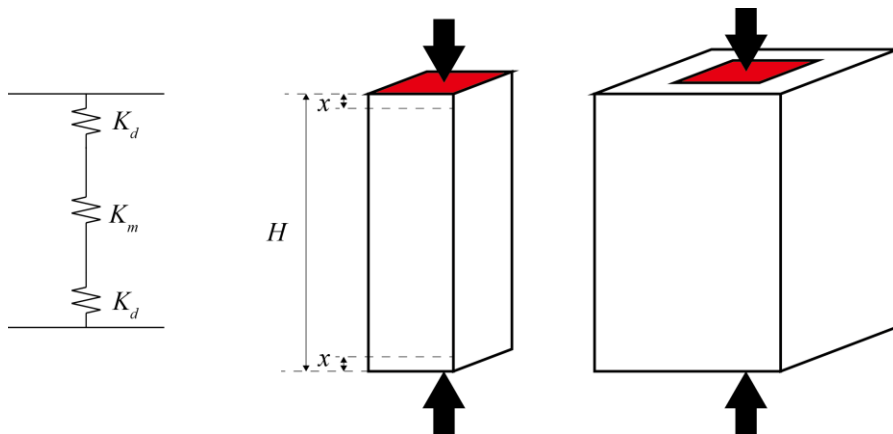


Figure 5.1 縦圧縮下の木材のモデル化

5.2.2 ダメージゾーンの長さ (x) の影響因子

ダメージゾーンの長さは4章より試験体の断面積 (RT 面) に影響を受けると考えられる。

Figure 5.2, 5.3 に3章と4章の実験結果から得られたダメージゾーンの長さ (x) と試験体寸法の関係を示す。図中の R は相関係数である。ダメージゾーンの長さ (x) と試験体高さ (L 方向) の相関係数はそれぞれ 0.19 (スギ, $200 \times 200 \text{ mm}^2$), -0.22 (スギ, $25 \times 10 \text{ mm}^2$), 0.40 (ヒノキ, $200 \times 200 \text{ mm}^2$), -0.15 (スプルース, $200 \times 200 \text{ mm}^2$) でありほぼ相関性がないと考えられる。一方, ダメージゾーンの長さ (x) と試験体断面積 (RT 面) の相関係数はそれぞれ 0.74 (スギ), 0.40 (ヒノキ), 0.84 (スプルース) であり相関性が認められる。

ダメージゾーンの長さはスギ試験体で 0.1~2.6 mm, ヒノキ試験体で 0.5~1.9 mm (平均 0.8mm), スプルース試験体で 0.4~7.5 mm であった。Table 5.1 に同一寸法の試験体のダメージゾーンの長さを示す。同一寸法のスギ試験体とヒノキ試験体はダメージゾーンの長さが同程度であった。これは同じ加工工場 (銘建工業) で加工されているため加工精度が同程度となり, ダメージゾーン部分の木材表面形状 (P_a 平均値: 0.2mm (スギ), 0.2mm (ヒノキ), P_z 平均値: 1.1mm (スギ), 1.0mm (ヒノキ)) が同程度だったためだと思われる。一方, スプルースの試験体は同一寸法であってもスギやヒノキの試験体と比べダメージゾーンの長さが長かった。これはスプルース試験体が他の工場 (Moelven) で加工されており, 加工機械が異なるため木材の表面形状がスギとヒノキ試験体に比べ凸凹していたからだと思われる。ただし, スプルース試験体は表面形状を測定していないため今後検討する必要がある。なお, 断面積が $25 \times 25 \text{ mm}^2$ の試験体に関してはスギ, ヒノキ, スプルースでほぼ同程度のダメージゾーン長さであった。断面の小さい試験体では加工方法による表面性状の違いが小さくなり, 樹種の影響のみ現れると考えられるため, ダメージゾーン長さは樹種に影響を受けないと思われる。

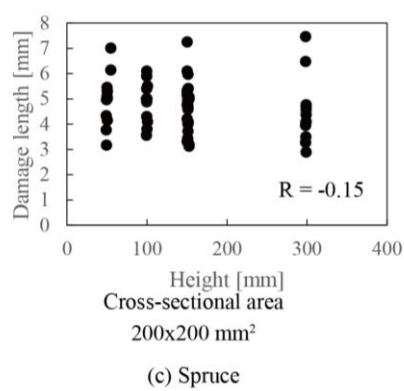
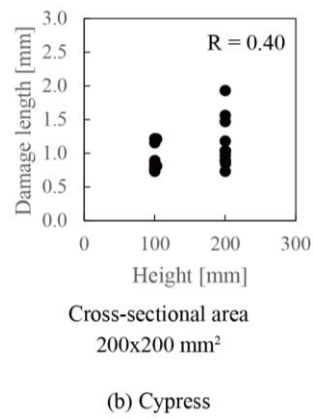
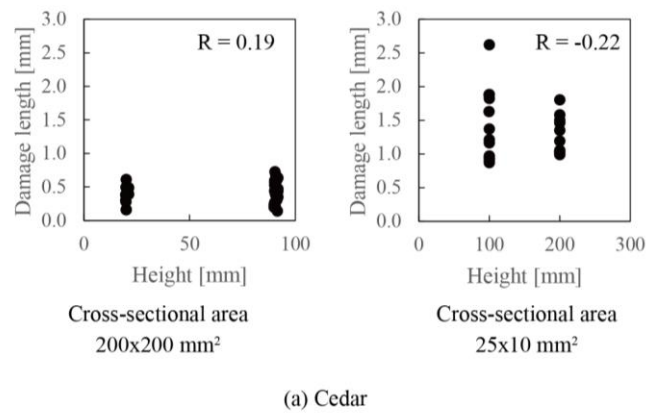
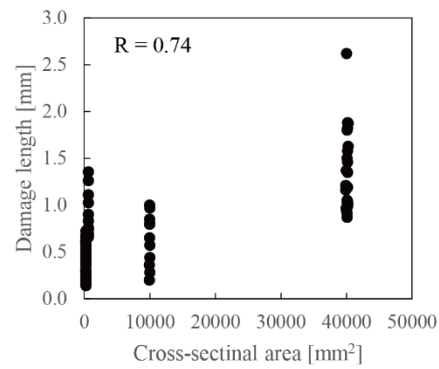
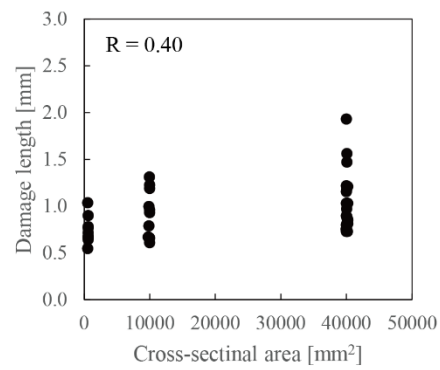


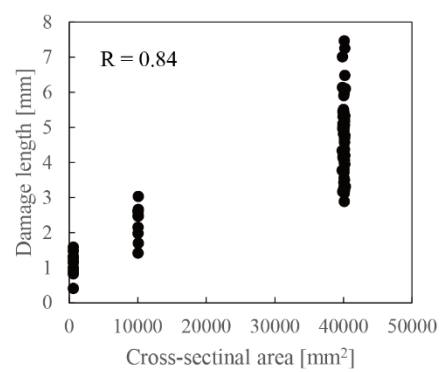
Figure 5.2 ダメージゾーンの長さ と 試験体高さ (L 方向)



(a) Cedar (all specimens)



(b) Cypress (all specimens)



(c) Spruce (all specimens)

Figure 5.3 ダメージゾーンの長さ と 試験体断面積 (RT 面)

Table 5.1 各樹種の同一寸法試験体のダメージゾーンの長さ

	Damage length								
	25x25x100mm ³			100x100x100mm ³			200x200x100mm ³		
	Cedar	Cypress	Spruce	Cedar	Cypress	Spruce	Cedar	Cypress	Spruce
Mean [mm]	0.90	0.74	1.11	0.66	0.89	2.31	1.44	0.89	4.88
Max [mm]	1.36	1.03	1.58	1.00	1.31	3.03	2.62	1.22	6.10
Min [mm]	0.66	0.55	0.41	0.20	0.61	1.42	0.87	0.73	3.56

5.2.3 ダメージゾーンの長さ (x)

5.2.4.1 ダメージゾーンの長さ (x) の特徴

先に述べた特徴的なダメージゾーンの長さの特性を下記に整理する。

- ①試験体高さ (L 方向) が長くなってもダメージゾーンの長さは変化しない。
- ②試験体断面積 (RT 面) が大きくなるとばらつきが大きくなり、ダメージゾーンの長さの平均値は上昇する (寸法効果)。
- ③弾性範囲では荷重に寄らず一定の値になる。
- ④樹種に影響を受けない。

試験体断面積 (RT 面) が大きくなると表面性状を表す P_a (算術平均粗さ), P_z (最大高さ) のばらつきが大きくなり、平均値も上昇する。よって、②は試験体断面積が大きくなると、木材の表面形状の凹凸が大きくなる確率が上がり、結果としてダメージゾーンの長さが長くなる確率も上がると解釈できる。

また、 P_z はダメージゾーンの長さとは非常に近く、 P_z がダメージゾーンの長さではなかと思われる (Figure 5.4)。

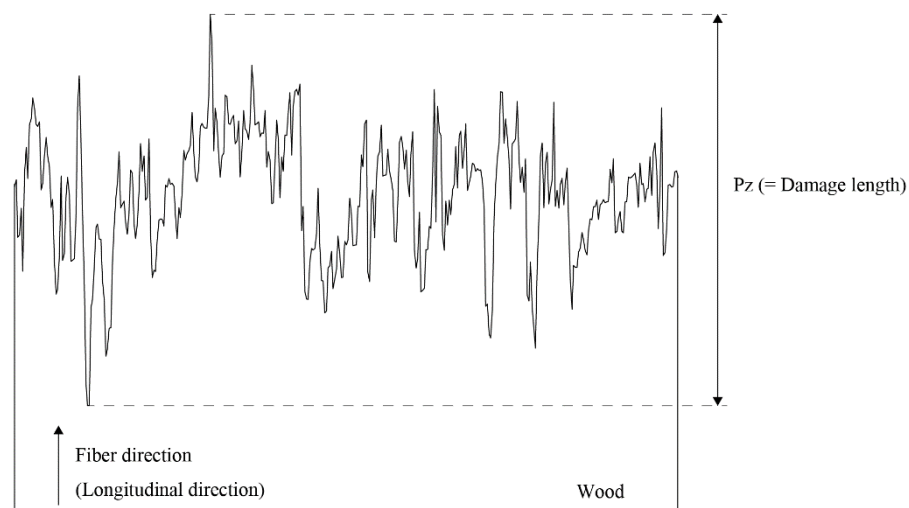


Figure 5.4 木材の表面形状と説明図

5.2.4.2 最強リンクモデル (Strongest link model)

上記②よりダメージゾーンの長さは試験体断面積が増加すると大きくなる。これは Strongest link model (最強リンクモデル)¹⁾ により評価できると考えられる。Strongest link model は Weakest link model²⁾ の対極のモデルであり、Figure 5.5 のようにある特性（本研究ではダメージゾーンの長さ）が最も強い（長い）要素によって決まるモデルである。単位面積における要素の長さ y が長さ x 以下になる確率は次式の 2 パラメータワイブル分布となるとする。

$$E(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m} \quad (5.5)$$

ここで、 x_0 ：尺度パラメータ、 m ：形状パラメータ。Figure 5.5 のようなモデルではすべての要素長さ y が長さ x 以下となる場合、ダメージゾーンの長さは x になる。よって、 n 個の要素が存在するとき、すべての要素長さ y が長さ x 以下となる確率 $E(x)$ は次式の累積分布関数で表される。

$$E(x) = \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m}\right)^n \quad (5.6)$$

断面積 A の試験体の場合、 n は A に置き換えることができ、ダメージゾーンの長さが x になるすべての要素長さ y が長さ x 以下となる確率 $E(x)$ は次式で表される。

$$E(x) = \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m}\right)^A \quad (5.7)$$

4 章の実験より得られたダメージゾーンの長さの累積確率分布とその実験値に近い式 5.7 を断面積ごとに Figure 5.6 に示す。図中の実線は実験値、破線は式 5.7 である。試験体数があまり多くないため完全な一致ではないが、実験値の累積確率分布は式 5.7 の最強リンクの分布と概ね一致した。ダメージゾーンの長さの寸法効果は Figure 5.5 のワイブル分布を用いた Strongest link model で説明できると思われる。

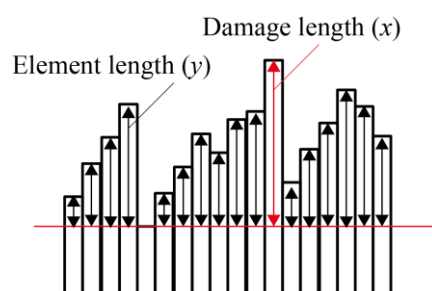
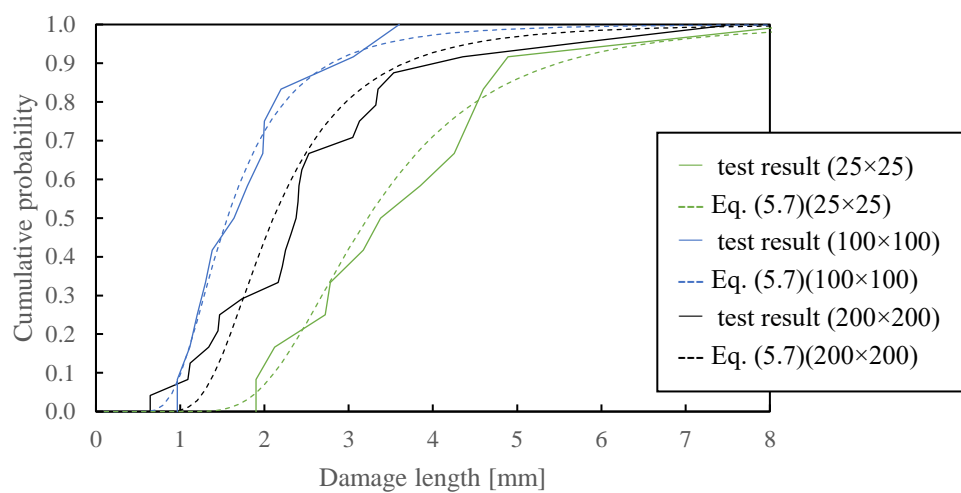
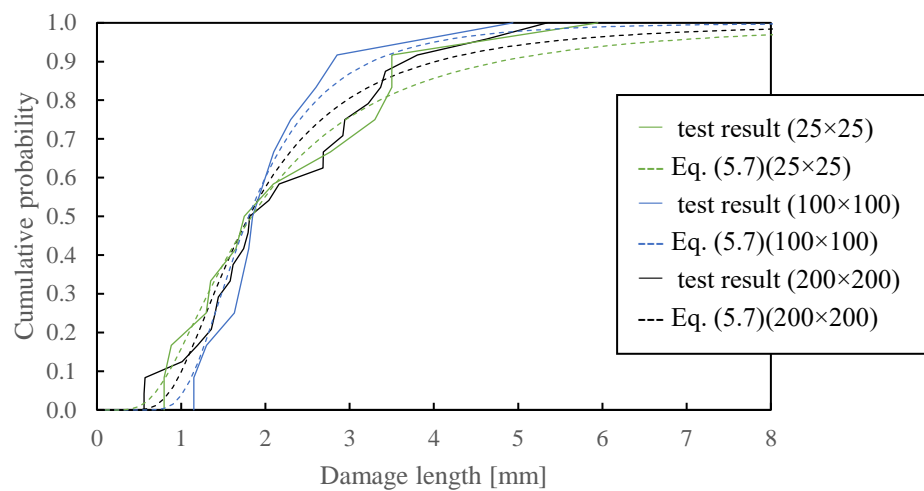


Figure 5.5 ダメージゾーンの長さが最も長い要素によってきまるモデル（最強リンクモデル）

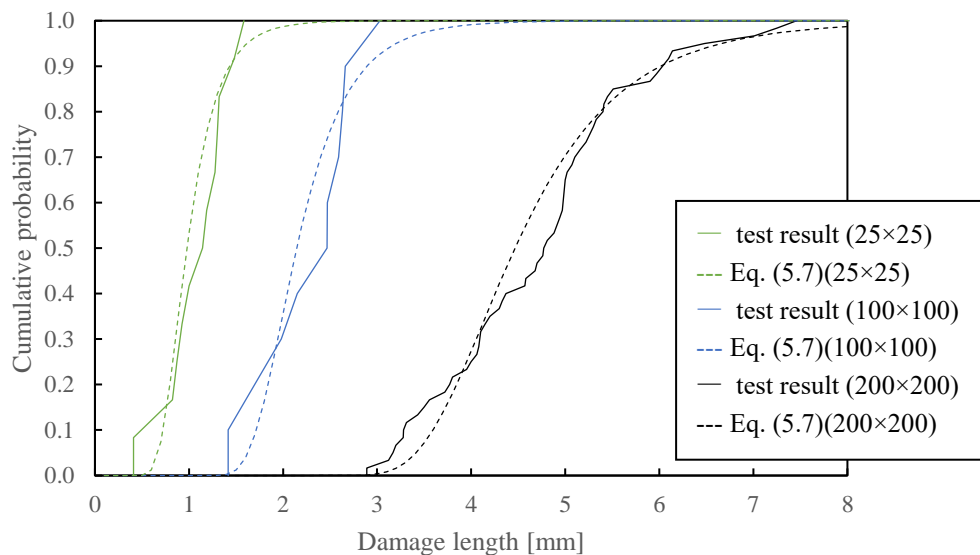


(a) スギ



Cross-sectional area [mm ²]			
	25×25	100×100	200×200
<i>A</i>	625.00	10000	40000
<i>x</i> ₀	0.001	0.001	0.00001
<i>m</i>	0.255	0.301	0.198

(b) ヒノキ



Cross-sectional area [mm ²]			
	25×25	100×100	200×200
<i>A</i>	625.00	10000	40000
<i>x</i> ₀	0.05	0.05	0.05
<i>m</i>	0.479	0.601	0.645

(c) スプルース

Figure 5.6 実験値の累積分布と式 5.7 の累積分布関数

また、Weakest link model では異なる面積 A_1A_2 について、同じ確率 $E(x)$ では

$$\int_{A_1} \left(\frac{x}{x_0}\right)^m dA = \int_{A_2} \left(\frac{x}{x_0}\right)^m dA \quad (5.8)$$

$$\frac{x_1}{x_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^k \quad (5.9)$$

が成立することが知られる。ここで k は寸法効果パラメータである。Strongest link model では面積 A_1A_2 におけるダメージゾーンの長さの関係を下記のような手順で算出できる。まず、式 5.7 より次式が得られる。

$$E(x)^{\frac{1}{A}} = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m} \quad (5.10)$$

$$1 - E(x)^{\frac{1}{A}} = e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m} \quad (5.11)$$

$$\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}}\right) = -\left(\frac{x}{x_0}\right)^m \quad (5.12)$$

$$\left(-\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}}\right)\right)^{\frac{1}{m}} = \frac{x}{x_0} \quad (5.13)$$

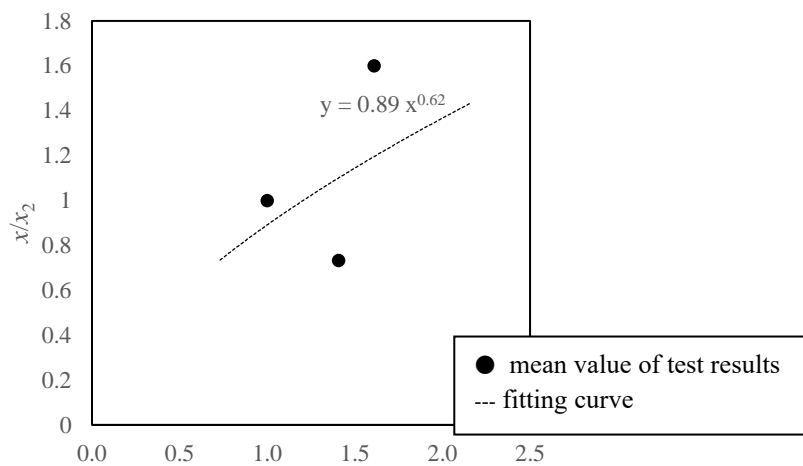
断面積 A_1A_2 における m , x_0 , $E(x)$ が等しい場合、断面積 A_1A_2 の試験体のダメージゾーンの長さ x_1x_2 の関係は次式になる。

$$\frac{x_1}{x_2} = \left(\frac{\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_1}}\right)}{\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}}\right)}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_1}}\right)}{\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}}\right)}\right)^k \quad (5.14)$$

Figure 5.7 に累積確率が 50% とした時の 25mm 角の断面の試験を基準 (x_2 および A_2) とした式 5.14 の実験値と近似曲線を示す。寸法効果パラメータ k はスギで 0.62, ヒノキで 0.42, スプルースで 3.1 あった。なお, Strongest link model の寸法効果パラメータ k は Weakest link model と同様に大きいほど寸法効果が大きいことを示す。

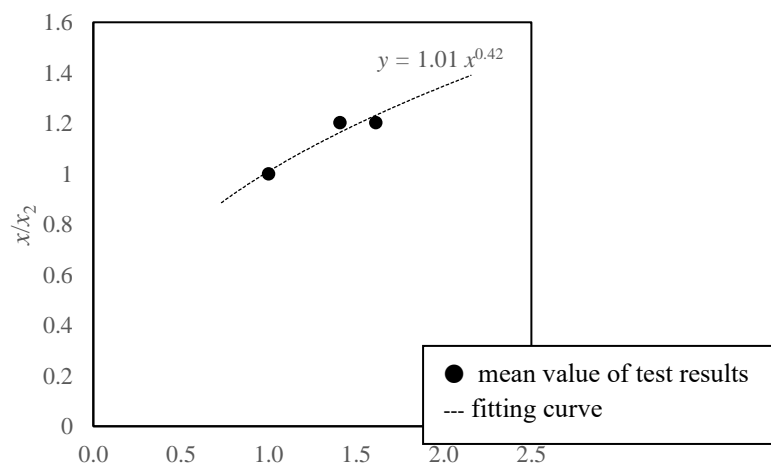
また、式 5.14 は概形が分かりにくいため Figure 5.8 に 25mm 角の断面の試験体を基準 (x_2 および A_2) とし、寸法効果パラメータをスギ 0.62, ヒノキ 0.42, スプルース 3.1 としたダメージゾーン長さ x と断面積 A のグラフを示す。図中には実験値も併せて示す。式 5.14 は試験体断面

積が大きくなるとダメージゾーン長さが長く、また、そのダメージゾーン長さの増加率は試験体断面積が大きくなるほど緩やかになることを表す。



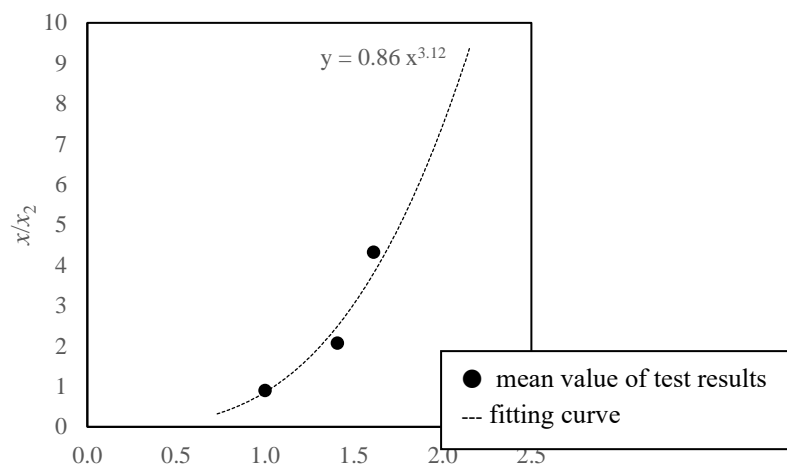
$$\left(\frac{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}} \right)}{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}} \right)} \right)$$

(a) スギ



$$\left(\frac{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}} \right)}{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}} \right)} \right)$$

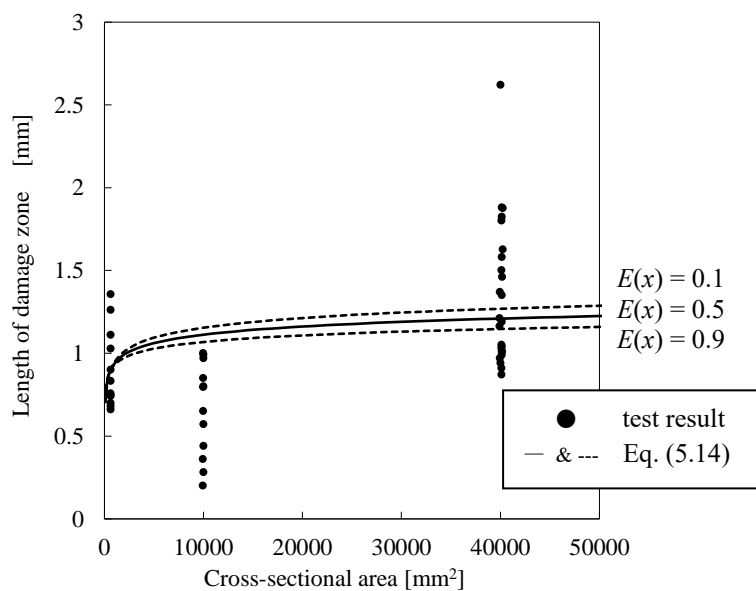
(b) ヒノキ



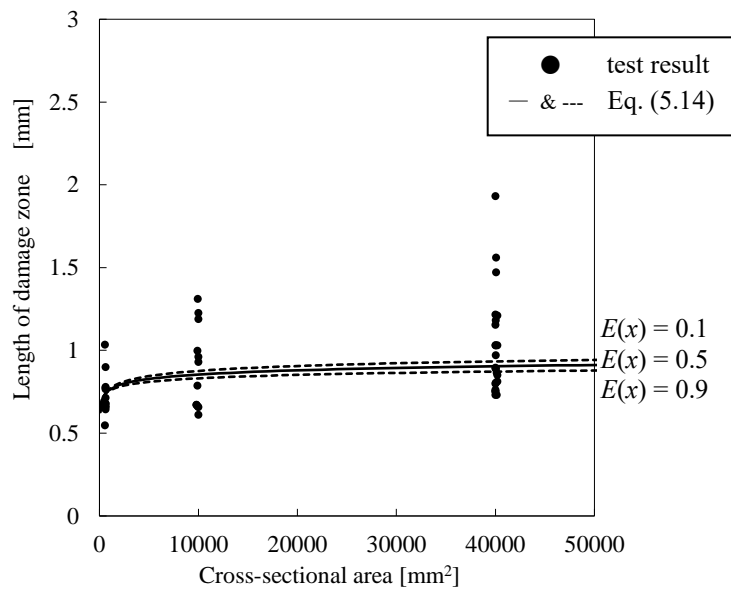
$$\left(\frac{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}} \right)}{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}} \right)} \right)$$

(c) スプルース

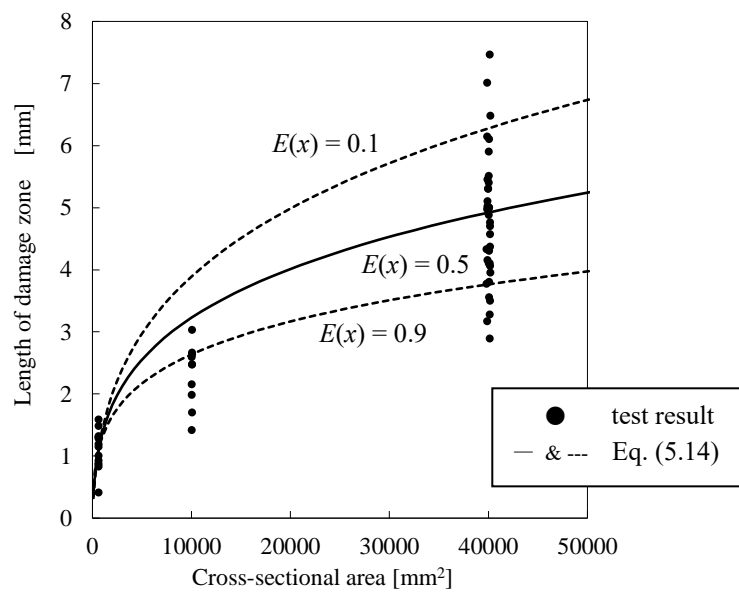
Figure 5.7 累積確率が 50%とした時の 25mm 角の断面の試験を基準 (x_2 および A_2) とした式 5.14 の実験値と近似曲線



(a) スギ



(b) ヒノキ



(c) スプルース

Figure 5.8 25mm 角の断面の試験体を基準 (x_2 および A_2) としたダメージゾーン長さ x と断面積 A のグラフ

5.2.4 ダメージゾーンのヤング係数 ($E_{L,d}$)

5.2.4.1 ダメージゾーンのヤング係数 ($E_{L,d}$) の影響因子

Table 5.2 に同一寸法の試験体のダメージゾーンのヤング係数を示す。ダメージゾーンのヤング係数は同じ加工工場（銘建工業）で加工され、表面形状が同程度であったスギとヒノキを比べても、ヒノキがスギより高かった。また、加工方法による表面性状の影響が小さい小断面の試験体（25x25mm²）でも、ダメージゾーンのヤング係数はスプルース>ヒノキ>スギとなった。

Table 5.2 各樹種の同一寸法試験体のダメージゾーンのヤング係数

	$E_{L,d}$								
	25x25x100mm ³			100x100x100mm ³			200x200x100mm ³		
	Cedar	Cypress	Spruce	Cedar	Cypress	Spruce	Cedar	Cypress	Spruce
Mean [N/mm ²]	286	359	532	162	327	736	264	314	631
Max [N/mm ²]	497	954	993	300	607	1127	571	548	847
Min [N/mm ²]	156	116	249	71	185	313	101	174	435

5.2.4.2 ダメージゾーンのヤング係数 ($E_{L,d}$) の特徴

4章と 5.2.4.1 で述べた特徴的なダメージゾーンのヤング係数の特性を再度整理すると、ダメージゾーンのヤング係数は

①試験体高さ (L 方向) や断面積 (RT 面)、ダメージゾーンの長さが変化しても変化しない。

②樹種によって異なる。

また、ダメージゾーン内の L 方向ひずみは加力板に近づくにつれ増加する。ダメージゾーン内の L 方向ひずみが増加する原因は

③ダメージゾーンの木材の断面積が加力板に近づくにつれ減少しているため

④ダメージゾーンの木材が座屈またはキンク変形するため

が考えられる。③の断面積の減少だけであればダメージゾーンのヤング係数はミドルゾーンの半分になるが (Figure 5.9 (a)), 実際のダメージゾーンのヤング係数はミドルゾーンの 1~12% であるため (詳しくは 4 章参照) ④の座屈またはキンク変形も生じていると考えられる (Figure 5.9 (b))。

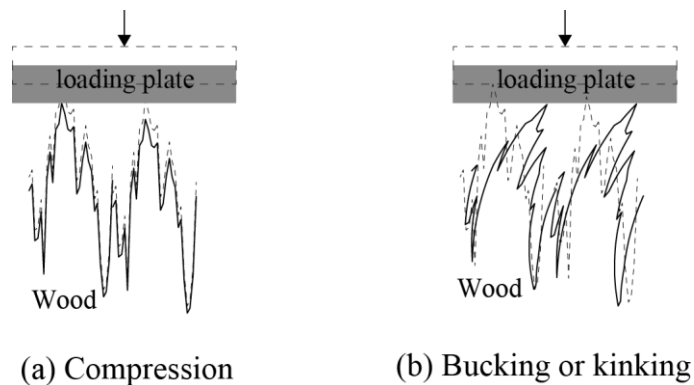


Figure 5.9 ダメージゾーンの木材の変形

5.3 提案式と実験値の比較

Figure 5.10 に式 5.4 による全長のヤング係数 $E_{L,f}$ の計算値 (1) と実験値を示す。式 5.4 に代入した値を Table 5.3 に示す。計算値は各試験体の傾向をとらえているが、実験値に比べ高い値となった。特に突付を含む (ダメージゾーンが 4 か所存在する) 試験体 20-3bSp, 20-3bxSp, 20-3sSp の計算値が実験値よりも大幅に大きいことから実際のダメージゾーンのヤング係数は Table 5.3 に示す値より小さかったのではないかとと思われる。これは、用いたダメージゾーンのヤング係数が画像相関法から得られた値であり、画像相関法は 4 面の内 1 面又は 2 面しか測定していないこと、Table 5.2 からわかるように非常にばらつきが大きかったが、平均値を用いたことが原因だと思われる。実験値に合うようにダメージゾーンのヤング係数を調整すると、スギで 145 N/mm²、ヒノキで 237 N/mm²、スプルスで 260 N/mm² となった (Figure 5.10 計算値 (2))。この場合、ダメージゾーンのヤング係数はミドルゾーンの 0.017 (スギ)、0.018 (ヒノキ)、0.018 (スプルス) 倍となる。よってダメージゾーンのヤング係数はミドルゾーンの 1.8% として算出できる。また、加工工場が異なるスプルスがスギやヒノキと同様にミドルゾーンの 1.8% であったため、ダメージゾーンとミドルゾーンのヤング係数の比は木口面の加工の巧劣により影響されないのではないかとと思われる。

よって、試験体全長の全面および部分縦圧縮ヤング係数 $E_{L,f}$ は次式でおおむね評価できる。

$$E_{L,f} = \frac{1}{\frac{2x}{0.018E_{L,m}} + \frac{H-2x}{E_{L,m}}} H \quad (5.15)$$

$$x = \left(\frac{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}} \right)}{\ln \left(1 - E(x_s)^{\frac{1}{A_s}} \right)} \right)^k x_s \text{ または } x = P_z \quad (5.16)$$

ここで、 $E_{L,m}$ ：ミドルゾーンの縦ヤング係数、 H ：試験体高さ (L 方向)、 x ：ダメージゾーンの長さ、 $E(x)$ ：累積確率、 A ：試験体断面積、 x_s ：基準試験体のダメージゾーン長さ、 A_s ：基準試験体の断面積、 k ：寸法効果パラメータ、 P_z ：表面性状の最大高さ。

x を短くするためには、寸法効果パラメータが小さくなればよく、表面の凹凸があまり大きくなり機械加工が推奨される。また、基準試験体には断面が小さいほど加工精度の影響を受けにくくなることをふまえ、なるべく小断面のものを設定するとよいと思われる (本論文で

は ASTM143 の小試験体 R25×T25×L100mm とした)。累積確率は接合部の基準剛性に標本平均が用いられること³⁾をふまえ、50%に設定するとよいと考える。基準試験体の断面積が25mm 角、累積確率を50%とした場合、式 5.16 は次式になる。

$$x = \left(\frac{\ln \left(1 - 0.5^{\frac{1}{A}} \right)}{0.68} \right)^k x_s \text{ または } x = P_z \quad (5.17)$$

実際に設計を行う際は上記の式を用いるか、表などでダメージゾーン長さを定義するとよいと考える。また、試験体全長の全面および部分縦圧縮剛性 K_f は次式で表される。

$$K_f = \frac{E_{L,f} A}{H} = \frac{A}{\frac{2x}{0.018E_{L,m}} + \frac{H-2x}{E_{L,m}}} \quad (5.18)$$

ここで、 $E_{L,m}$ ：ミドルゾーンの縦ヤング係数、 A ：試験体断面積、 H ：試験体高さ（L 方向）、 x ：ダメージゾーンの長さ。

Figure 5.11 に 2 章のスギ製材全面圧縮、部分圧縮の式 5.15、式 5.16 による全長のヤング係数 $E_{L,f}$ の予測値と実験値を示す。式 5.15 に代入した値を Table 5.3 に示す。ミドルゾーンのヤング係数 $E_{L,m}$ は全面圧縮試験体の中央に貼り付けたひずみゲージより得られた値（8679 N/mm²）、ダメージゾーン長さは式 5.16 より、2.5-1Ce のダメージゾーン長さ 0.90mm を基準として寸法効果パラメータ 3.5（手加工）とすることで算出した。予測値は実験値をおおむね評価出来ていると思われる。

式 5.15 は様々な縦圧縮変形する部分へ応用できる。例えば、応用例として引きボルトの座金直下の木材の縦圧縮剛性（面圧剛性） K_d がある（Figure 5.12）。引きボルトの座金直下の木材の縦圧縮剛性 K_d はダメージゾーンの変形が全体の変形の大部分を占めると予想され、その評価が重要であり次式で表されると考える。

$$K_d = \frac{0.018E_{L,m}A}{x} \quad (5.19)$$

$$x = \left(\frac{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}} \right)}{\ln \left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_s}} \right)} \right)^k x_s \text{ または } x = P_z \quad (5.20)$$

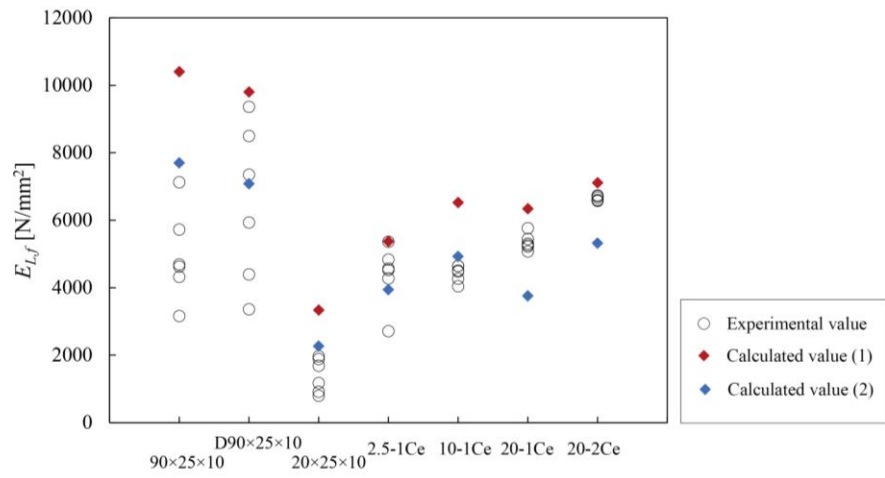
ここで、 A ：座金により圧縮される面積、 k ：寸法効果パラメータ。引きボルトの座彫り加工は角ノミを用いる場合とフンデガーなどのルーターを用いる場合があり、両者で寸法効果パラメータが異なると思われる。

Table 5.3 式 5.4 に入力した値（集成材試験体）

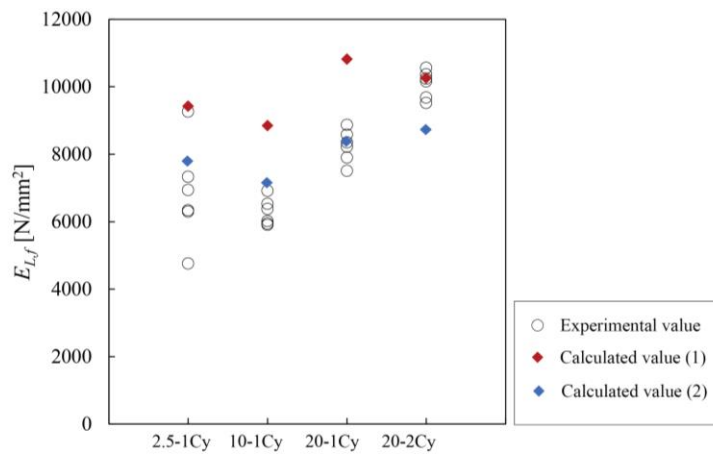
	90×25×10	D90×25×10	20×25×10	2.5-1Ce	10-1Ce	20-1Ce	20-2Ce
$E_{L,m}$ [N/mm ²]	14542	14228	5259	7549	8807	14318	13264
$E_{L,d}$ [N/mm ²]	320	320	320	320	320	320	320
x [mm]	0.5	0.4	0.5	0.9	0.7	1.4	0.3

	2.5-1Cy	10-1Cy	20-1Cy	20-2Cy
$E_{L,m}$ [N/mm ²]	14966	17517	22575	14847
$E_{L,d}$ [N/mm ²]	366	366	366	366
x [mm]	0.7	0.9	0.9	1.1

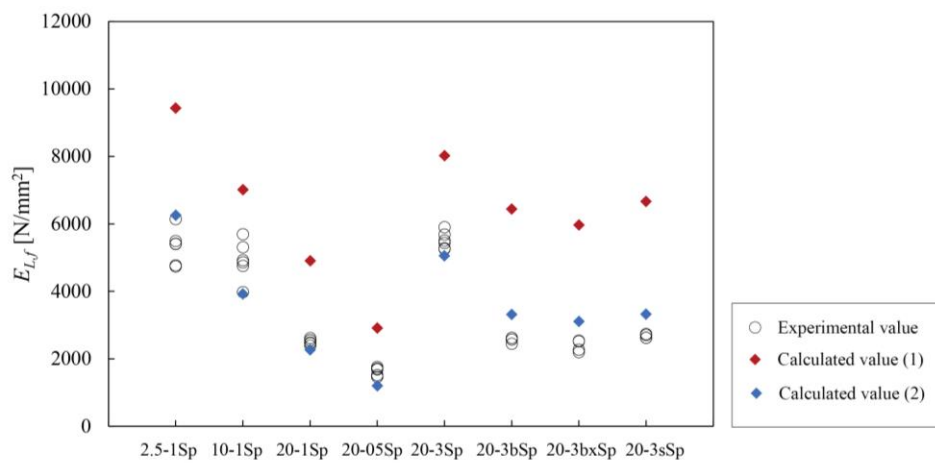
	2.5-1Sp	10-1Sp	20-1Sp	20-05Sp	20-3Sp	20-3bSp	20-3bxSp	20-3sSp
$E_{L,m}$ [N/mm ²]	13155	12440	13950	13414	11865	13570	12216	15367
$E_{L,d}$ [N/mm ²]	701	701	701	701	701	701	701	701
x [mm]	1.1	2.3	4.9	5.0	4.5	4.5	4.8	4.7



(a) Cedar



(b) Cypress



(c) Spruce

Figure 5.10 E_{L_f} の実験値と計算値の比較 (集成材 (4 章))

Table 5.4 式 5.15 に入力した値（製材スギ（2 章））

	3-3	3-6	3-9	6-3	6-6	6-9	9-3	9-6	9-9
$E_{L,m}$ [N/mm ²]	8679	8679	8679	8679	8679	8679	8679	8679	8679
x [mm]	1.1	1.1	1.1	2.0	2.0	2.0	2.8	2.8	2.8

	3-9p	6-9p	9-9p	3-9pp	6-9pp	9-9pp
$E_{L,m}$ [N/mm ²]	8679	8679	8679	8679	8679	8679
x [mm]	1.1	2.0	2.8	1.1	2.0	2.8

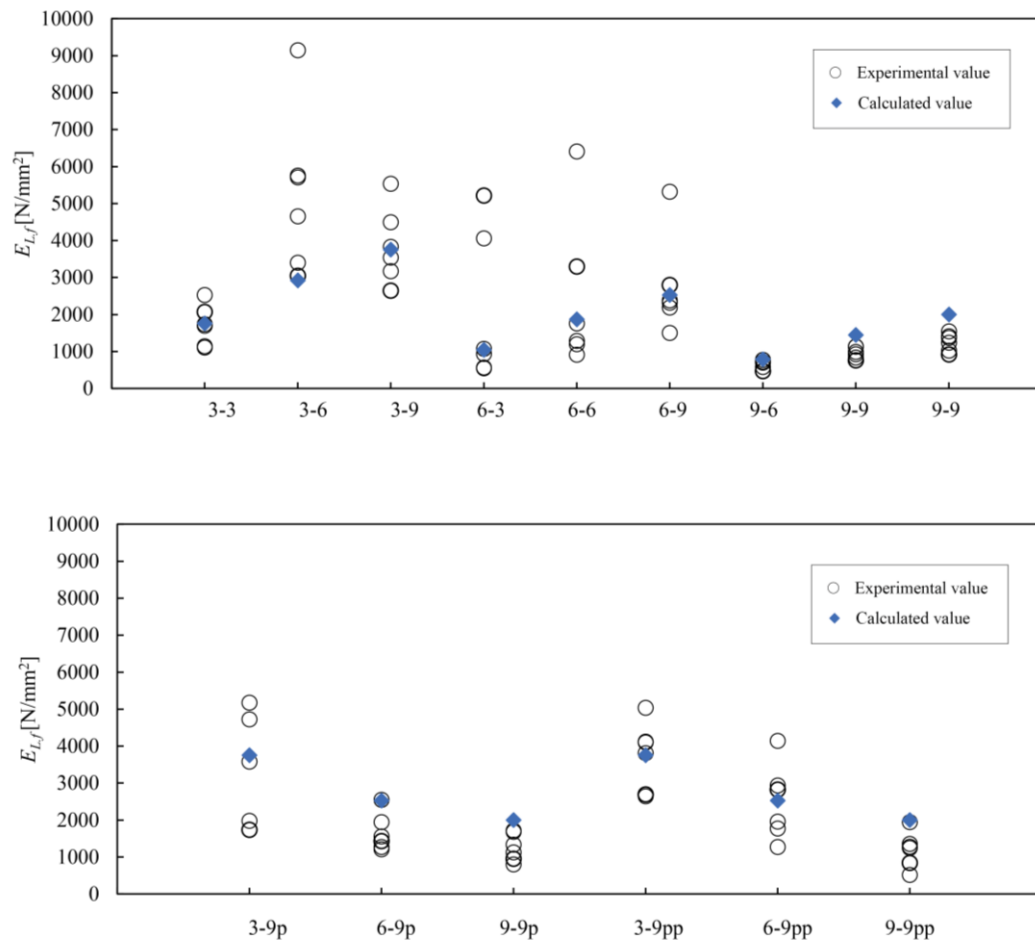


Figure 5.11 $E_{L,f}$ の実験値と予測値の比較（製材スギ（2 章））

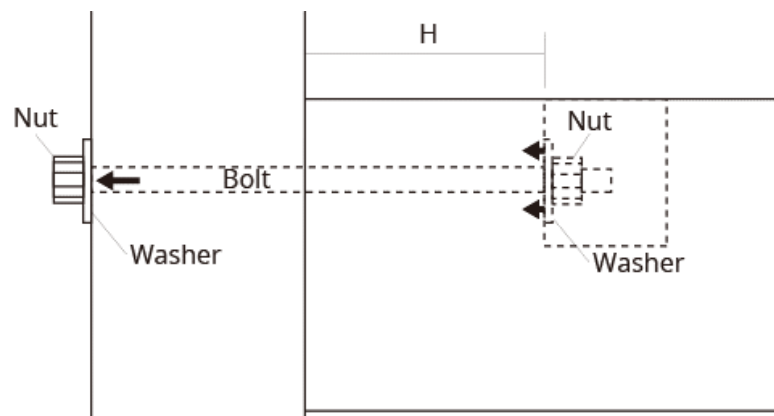


Figure 5.12 引きボルト接合部

5.4 提案式による既往の引きボルト式継手実験の剛性評価

式 5.19 の妥当性を検討するため、田尾ら⁴⁾の実験の引きボルト式継手の剛性を式 5.19 により評価した。Table 5.5 に試験体一覧および実験結果、Figure 5.13 に試験体図面 (No.8) を示す。試験体は長さ 3m の材を材長の中心で 2 分割し、ボルト 2 本により再び緊結したものである。パラメータは製材又は集成材、樹種、角座金の寸法、ボルト長さである。No.8～No.16 は Z マーク金物の両引きボルト、No.17～No.23 は S45C の丸鋼 (両サイドねじ切) が用いられていた。角座金がかかる座彫りは角ミノにより加工された (Figure 5.14)。Table 5.5 の接合部全体の剛性 K は荷重一継手位置での両材間の相対変位関係から算出されたものである。

接合部全体の剛性 K の計算値は座金直下の面圧剛性 (ダメージゾーンの剛性) とボルトの剛性の直列ばねが 2 つ並列に並んでいるものと仮定し (Figure 5.15)、次式で表される。

$$K = \frac{2}{\frac{1}{K_b} + \frac{2}{K_d}} \quad (5.21)$$

$$K_d = \frac{0.018E_{L,m}A}{x} \quad (5.19)$$

$$x = \left(\frac{\ln \left(1 - 0.5^{\frac{1}{A}} \right)}{0.68} \right)^k x_s \quad (5.17)$$

ここで、 K_b : ボルトの剛性、 K_d : 座金直下の面圧剛性 (ダメージゾーンの剛性) で式 5.19。基準試験体の断面積が 25mm 角、累積確率を 50% とし、ダメージゾーン長さ x は式 5.17 より算出した。その際、基準試験体のダメージゾーン長さ x_s は 6mm、寸法効果パラメータ k は 2 (今回は x_s と k を実験に合う値とした)、ミドルゾーンのヤング係数 $E_{L,m}$ は強度等級の曲げヤング係数とした。理想的には基準試験体のダメージゾーン長さ x_s は、木口面を角ノミで加工した 25mm 角の試験体の表面パラメータの最大高さ P_z を測定するか、ひずみ分布から算出したい。

Figure 5.16 に全試験体の、Figure 5.17 にスギ試験体の角座金の大きさごとの接合部全体の剛性 K の実験値と式 5.21 による計算値の比較を示す。提案式による計算値は実験値の 0.8～1.5 倍であった。式 5.19 の $E_{L,m}$ に代入した値が強度等級によるものでばらつきがあることを考慮すれば、提案式は実験を概ね評価出来たと考えられる。また、提案式による計算値はスギ実験値の角座金の大きさごとの剛性 K の傾向を良くとらえている。

Table 5.5 (a) 試験体一覧 (田尾ら⁴⁾)

試験体仕様								
No	series	母材種別	樹種	強度等級	角座金	ボルト	ボルト長さ	n
8	TBJ-Z500-6/54	製材	スギ	E70-SD20	54×54	M16	500	3
9	TBJ-Z600-6/54	製材	スギ	E70-SD20	54×54	M16	600	3
10	TBJ-Z600-6/54_DF110KD	製材	ベイマツ	E110-SD22	54×54	M16	600	3
11	TBJ-Z500-12/72	製材	スギ	E70-SD20	72×72	M16	500	6
12	TBJ-Z600-12/72	製材	スギ	E70-SD20	72×72	M16	600	6
13	TBJ-Z500-12/72_DF110KD	製材	ベイマツ	E110-SD22	72×72	M16	500	6
14	TBJ-Z500-12/58_105	製材	スギ	E70-SD20	58×58	M16	500	6
15	TBJ-Z600-12/58_105	製材	スギ	E70-SD20	58×58	M16	600	6
16	TBJ-Z600-12/70_JC65EW	集成材	スギ	E65-F225	70×70	M16	600	3
17	TBJ-S600-9/70_HI90KD	製材	ヒノキ	E90-SD20	70×70	M16	600	6
18	TBJ-S600-9/70_JC65EW	集成材	スギ	E65-F225	70×70	M16	600	6
19	TBJ-S600-9/70_JL95EW	集成材	カラマツ	E95-F270	70×70	M16	600	6
20	TBJ-S600-9/70_RW105EW	集成材	オウシュウアカマツ	E105-F300	70×70	M16	600	6
21	TBJ-S600-9/70_DF120EW	集成材	ベイマツ	E120-F330	70×70	M16	600	6
22	TBJ-S600-9/70_DF135EW	集成材	ベイマツ	E135-F375	70×70	M16	600	6
23	TBJ-S600-9/70_DFJC120EW	集成材	スギーベイマツ	E120-F330	70×70	M16	600	6

Table 5.5 (b) 実験結果 (田尾ら⁴⁾)

No.	実験結果(平均値)		
	剛性 [kN/mm]	最大耐力[kN]	終局時の破壊性状
8	35.8	95.6	座金めり込み(変位 30mm)
9	32.2	95.6	座金めり込み(変位 30mm)
10	36.1	153	座金めり込み(変位 30mm)
11	56.0	148	座金めり込み(変位 30mm),材軸芯からの割裂
12	50.7	139	両引きボルトのネジ部破断,材軸芯からの割裂
13	59.2	160	材軸芯からの割裂,ブロック状せん断,引張
14	36.6	115	座金めり込み(変位 30mm),材軸芯又は側面からの割裂
15	39.0	118	座金めり込み(変位 30mm),材軸芯又は側面からの割裂
16	52.6	217	両引きボルトのネジ部破断
17	42.2	169	材軸芯からの割裂
18	41.3	227	座金めり込み(変位 30mm),引張+せん断破壊
19	46.5	236	引張+せん断破壊,両引きボルトのネジ部破断
20	38.5	251	座金めり込み(変位 30mm),両引きボルトのネジ部破断
21	49.0	258	両引きボルトのネジ部破断
22	44.8	256	両引きボルトのネジ部破断
23	50.0	256	両引きボルトのネジ部破断

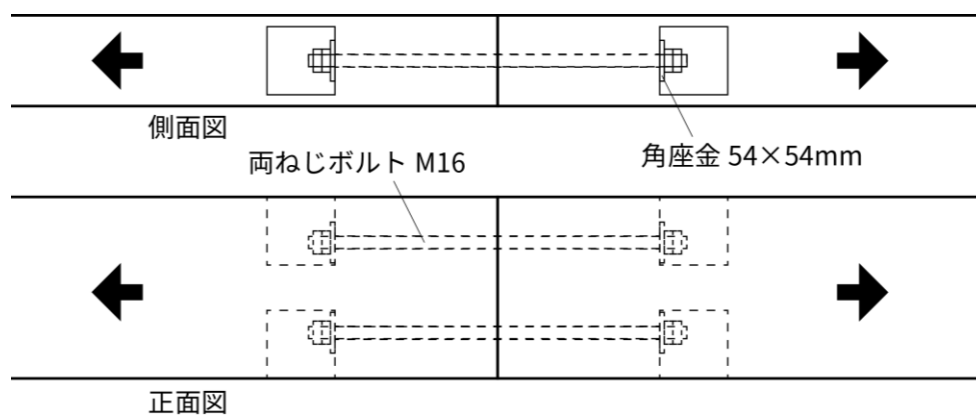
Figure 5.13 試験体図面 No.8 (田尾ら⁴⁾)



Figure 5.14 角ミノにより加工された座彫りの様子

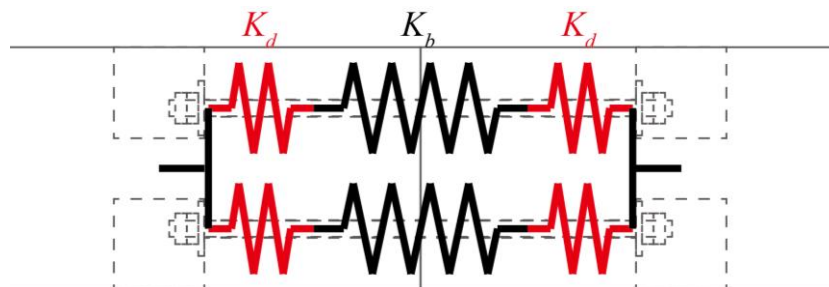


Figure 5.15 接合部全体の剛性 K の模式図

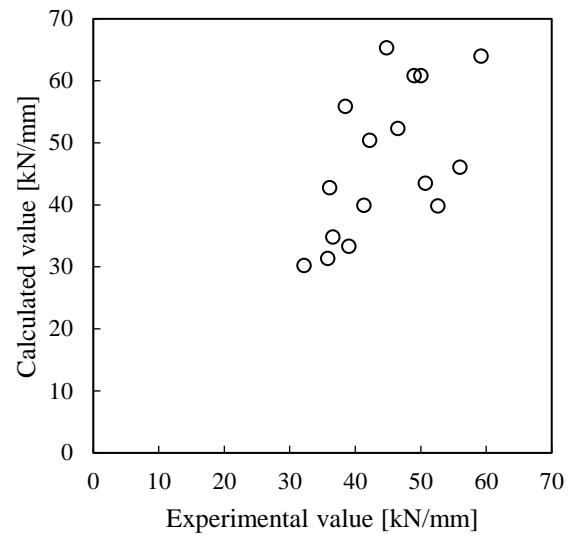
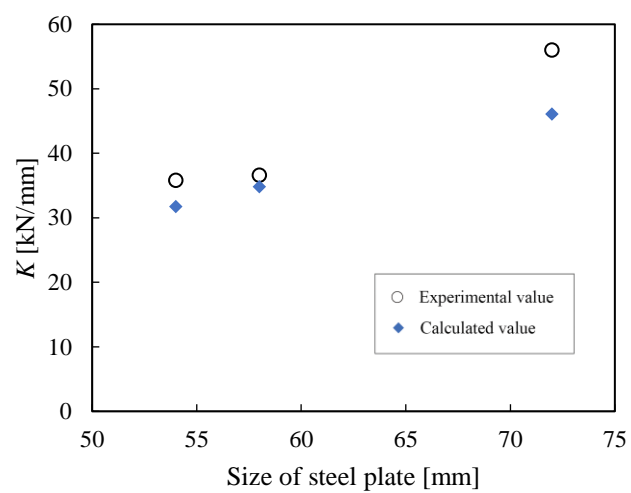
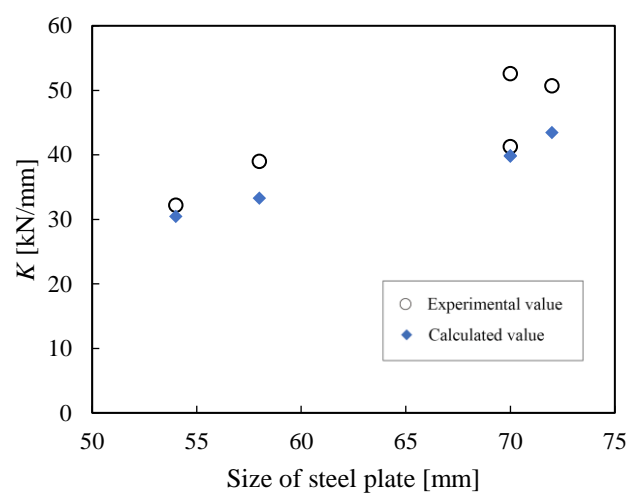


Figure 5.16 全試験体の接合部全体の剛性 K の実験値（平均）と提案式による計算値の比較



(b) ボルト長さ 500mm



(b) ボルト長さ 600mm

Figure 5.17 スギ試験体の接合部全体の剛性 K の実験値（平均）と提案式による計算値の比較
(角座金のサイズ別)

5.5 まとめ

2 章から 4 章までの木材の縦圧縮特性の実験的検討をふまえ、ダメージゾーンを考慮した全長の縦圧縮ヤング係数の評価法を検討し、下記の知見を得た。

1. ダメージゾーンの長さは試験体高さ（L 方向）や荷重，樹種に影響を受けない。断面積（R T 面）が大きくなるとばらつきが大きくなり，ダメージゾーンの長さの平均値は上昇する寸法効果があった。
2. ダメージゾーン長さの寸法効果はワイブル分布を使った Strongest link model（最強リンクモデル）で評価できる。寸法効果パラメータ k は加工精度によって異なり，丸鋸機械加工で 0.42～0.62（日本），3.1（スウェーデン），卓上丸鋸手加工で 3.5（筆者が行った）であった。
3. ダメージゾーンのヤング係数は試験体寸法に影響を受けないが，樹種によって異なる値であった。また，ダメージゾーンのヤング係数はミドルゾーンの 1.8%程度として評価できる。
4. ダメージゾーンのヤング係数はミドルゾーンのヤング係数に比例する値，ダメージゾーンの長さは試験体断面積によって寸法効果がある値とし，全長のヤング係数の評価法（式 5.15）を提案した。提案した評価法は実験値をおおむね評価出来た。
5. ダメージゾーンの剛性の応用である引きボルト式継手接合の剛性の評価式を提案した。提案した評価法は既往実験の結果をおおむね評価出来た。

6. CLT の面内部分圧縮

6.1 目的

本章では、CLT の面内部分圧縮特性を実験により把握し、支圧幅、余長、支圧位置、幅はぎ接着の有無が初期剛性や二次剛性、降伏応力に与える影響を検討したのでその結果を報告する。

目的を下記に示す。

(1) 支圧幅、余長、支圧位置、幅はぎ接着の有無が初期剛性や二次剛性、降伏応力に与える影響を明らかにする、

挽き板を層ごとに繊維方向が直交するよう接着した大断面の木質材料 CLT (Cross Laminated Timber) は既に欧州で中高層建築物の構造部材として用いられている。わが国でも公共建築物等の木造化を推進していくための手段の一つとして CLT が注目されており、特に、CLT の生産および利活用を普及促進することにより地域林業・木材産業の活性化が期待される。

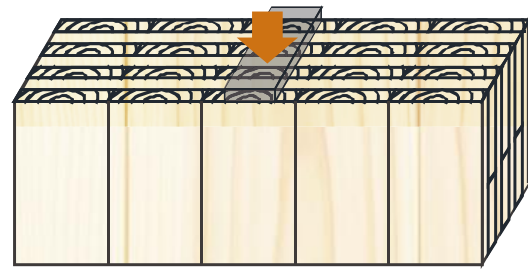
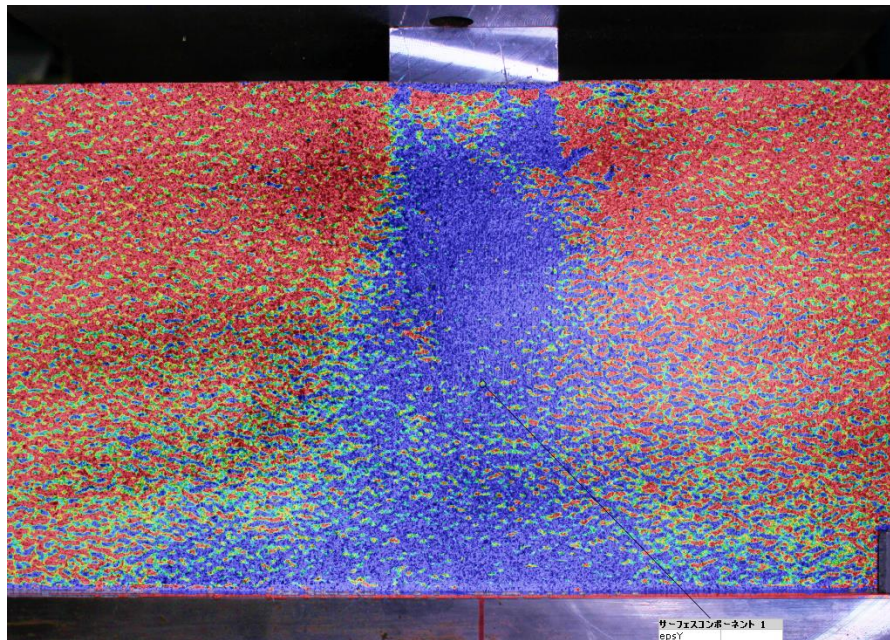
CLT は面内せん断剛性が非常に大きい材料であるため、その有効活用例として鉄筋コンクリート造や鉄骨造のフレームに嵌めこみ、耐力壁として水平せん断力を負担させることが考えられる。1 章で述べたように鉄骨造の耐震壁として CLT を使用することを想定した場合、CLT 端部

のみを鋼材に留め付けることでせん断抵抗させる機構が考えられるが、そのような仕様では CLT 端部の部分圧縮により水平力を伝達する機構となる。この時、初期剛性、二次剛性、降伏耐力が設計を行う上で重要になる。

「CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル」¹⁾では CLT の圧縮特性に関して、適用範囲が一部の等級区分に限られるものの、木口面へ加力する場合の強度・剛性を等価断面法に基づきラミナの圧縮強度・圧縮弾性係数から定義している。

CLT の部分圧縮について CLT 表面へ加力する場合、Brandner²⁾らによる応力分布モデルの提案や Serrano³⁾らによる余長や CLT 表面の繊維方向が部分圧縮強度に与える影響を検討したものなど多くの既往研究がある。CLT 側面へ加力する場合、井道ら⁴⁾による比例限度応力算定式の提案（CLT 側面および表面に適用可能）や張⁵⁾らによる引きボルト接合部の研究の一部として行われた部分圧縮強度推定式の提案がある。しかし、CLT 側面へ加力する場合では支圧幅や余長が限定された範囲の研究にとどまっており^{4),5)}、更なる検討の余地がある。

筆者は CLT の面内部分圧縮特性が部分縦圧縮と部分横圧縮の足し合わせであると考えていた。しかし、実際には Figure 6.1 のように縦圧縮される層でひずみが余長部に広がっていた。これは、横圧縮される層と縦圧縮される層が接着されているため、また、縦圧縮される層の変形が横圧縮される層に影響を受けたため、だと考えられる。製材の部分縦圧縮とは異なるメカニズムであり、CLT の縦圧縮される層には余長効果がある可能性、変形が加力板直下にあまり集中しない（ダメージゾーンの影響が小さい）可能性がある。よって、まずは CLT の面内部分圧縮特性について影響因子を実験的に検討した。



※赤色がひずみ 0，青色がひずみ-0.2%

Figure 6.1 CLT を面内部分圧縮した時のひずみ分布（最外層は縦圧縮層）

6.2 実験概要

6.2.1 CLT 木口面の部分圧縮実験概要

6.2.2.1 試験体

Table 6.1 に試験体一覧と密度を示す。試験体は厚 210mm×材せい 210mm×長さ 500mm 又は 600mm のスギ (Japanese cedar, 学名: *Cryptomeria japonica*) の A 種 CLT S60-7-7 とした。ラミナ幅は 122mm(幅はぎ接着なし)又は 125mm(幅はぎ接着あり)とし、積層接着と幅はぎ接着には水性高分子イソシネアート系樹脂接着剤を用いた。ここで、外層ラミナの繊維方向と加力方向が同じ試験体を強軸(strong axis), 外層ラミナの繊維方向と加力方向が直交する試験体を弱軸(weak axis)と呼ぶ。試験変数は支圧幅(W), 余長(side margin), 支圧位置(location of plate, Figure 6.2), 幅はぎ接着の有無(edge bonded), 弱軸(weak axis)・強軸(strong axis)であり, 試験体数は 24 種×3=72 体である。試験体の切り出しは, 幅はぎ接着なしの CLT 大板(厚 210mm×幅 1830mm×長さ 8040mm, 銘建工業製) 2 枚(強軸用と弱軸用)と幅はぎ接着ありの CLT 大板(厚 210mm×幅 1000mm×長さ 3000mm, セイホク製) 2 枚(強軸用と弱軸用)より同一 series の 3 体の試験体が同一個体由来のラミナを含まないように行った。

試験体の平均含水率は高周波木材水分計(ケツト科学研究所製 HM-520)を用いて計測し, 幅はぎ接着なしで 15.0% (標準偏差 (以下 SD とする) 3.08), 幅はぎ接着ありで 15.1%(SD 3.16)であった。密度の平均値は幅はぎ接着なし (54 体平均) で 412 kg/m³ (SD 12.0), 幅はぎ接着あり (18 体平均) で 379 kg/m³(SD 5.03)であった。

Table 6.1 試験体一覧と密度

Series	Length [mm]	CLT direction	Loading set up	Loading plate W [mm]	Location of plate	Side margin [mm]	Edge bond	Mass density [kg/m³]
c1	600	Weak axis	Center	10	On laminae	over 265mm	Not bonded	392
c3				30				404
c7				70			Bonded	416
c7G				70				378
c1A				10	On seam	Not bonded	432	
c7A				70			420	
c1GA				10			Bonded	383
c7GA				70				378
e3-0	500	Edge	30		0		430	
e7-0			70	On laminae	0	Not bonded	423	
e7-50	600		70		50		421	
e7-100			70		100		427	
c1'	600	Strong axis	Center	10	On laminae	over 265mm	Not bonded	390
c3'				30				408
c7'				70			Bonded	407
c7G'				70				387
c1A'				10	On seam	Not bonded	408	
c7A'				70			411	
c1GA'				10			Bonded	377
c7GA'				70				372
e3-0'	500	Edge	30		0		411	
e7-0'			70	On laminae	0	Not bonded	407	
e7-50'	600		70		50		407	
e7-100'			70		100		398	

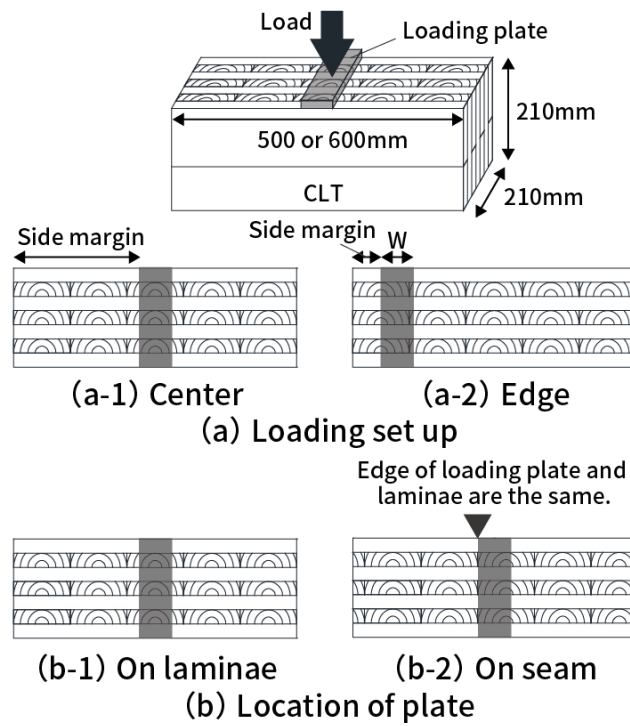


Figure 6.2 加力方法と加力板の位置

6.2.2.2 試験方法

Figure 6.3 に CLT 木口面の部分圧縮試験の加力装置を示す。試験方法は JIS Z 2101⁶⁾ を参考に直角の鋼製ブロック（厚 10mm 以上×幅 10～70mm×長さ 300mm）の加圧板を用い、東京大学工学部の 2000kN 万能試験機（島津製作所，RES-200 T.V.）による単調圧縮加力とし，加力板上の鋼製治具の変位（D1,D2 の平均）が 20mm に達するまで行った。載荷速度は 5mm/min を目標とし，結果として 4～6mm/min になった。測定項目はロードセル（東京測器研究所，TCLP-500kNB）による荷重，変位計（東京測器研究所，CDP-50）による加力板上の鋼製治具と試験体下の鋼板との間の変位（試験体両側部分の 2 点 D1,D2）とした。なお，変位は加力板と鋼製治具が接し荷重がかかった時点をゼロとした。

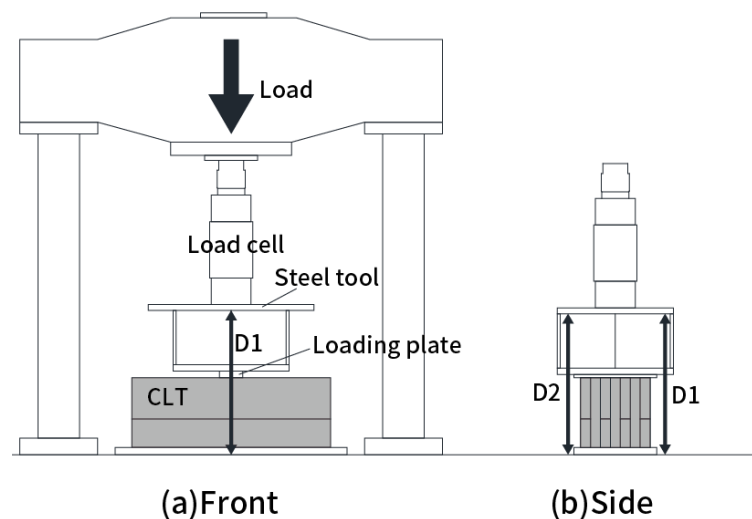


Figure 6.3 CLT 木口面の部分圧縮試験の加力装置

6.2.2 CLT を構成するラミナの材料試験

CLT を構成するラミナの物理的特性を取得するため、縦振動試験と小試験体による圧縮試験を行った。縦振動試験体は幅はぎ接着なしとありの CLT 大板製作時にそれぞれランダムに 6 枚（計 12 枚）抽出したラミナから製作した。小試験体は縦振動試験に供した試験体から切り出し製作した。

縦振動法を行った試験体は厚さ 30mm×幅 90mm×長さ 1000mm（幅はぎ接着なし CLT 用ラミナ）または厚さ 30mm×幅 125mm×長さ 1000mm（幅はぎ接着あり CLT 用ラミナ）とした。試験方法は構造用木材の強度試験マニュアル⁷⁾に準拠した。

小試験体の圧縮試験は全面縦圧縮と全面横圧縮を行った。試験体は全面縦圧縮で断面 30mm×30 mm，材せい 60mm，全面横圧縮で 30 mm 角の立方体とした。試験体数は縦圧縮 12 体、横圧縮 12 体の計 24 体であり、1 枚のラミナから縦圧縮試験体、横圧縮試験体を 1 体ずつ作成した。小試験体の切り出しはラミナから節や目切れを避け、横圧縮試験体ではラミナの厚さ方向が加力方向と直角方向になるよう行った。なお、測定した小試験体の平均年輪幅は 1.5～10.0mm，横圧縮試験体の加力直交方向に対する年輪の傾きは 50～90°であった。試験は JIS Z 2101²⁾に準拠し、東京大学農学部 50kN 万能試験機（インストロン製 型式 4204）による単調圧縮加力とし、加力板の変位が 5mm に達するまで行った。測定項目はクロスヘッドに内蔵されたロードセル（型式 2518-80Z）による荷重，変位計（東京測器研究所製 CDP-50）による加力板と試験体下の H 型鋼との間の変位（試験体両側部分の 2 点）とした。

Table 6.2 に縦振動法による動的縦ヤング係数および小試験体の圧縮試験結果を示す。表中の $E_{d,0}$ は縦振動法による動的縦ヤング係数， $\sigma_{max,0}$ は小試験体の縦圧縮強さ， $\sigma_{y,90}$ は小試験体の横圧縮降伏応力を示す。なお，試験体の 6 体平均の密度（縦振動試験時に測定）および平均含水率（全乾法）は幅はぎ接着なし用ラミナで 437 kg/m³（SD 18.8），13.2%（SD 1.10），幅はぎ接着あり用ラミナで 351 kg/m³（SD 20.3），12.0%（SD 0.47）であった。小試験体の横圧縮降伏応力（ $\sigma_{y,90}$ ）は下記のように定義した。変位 5mm を生じた点における応力を $\sigma_{max\ 90}$ とし， $0.1\sigma_{max\ 90}$ と $0.4\sigma_{max\ 90}$ を示す点の間で定義された最小自乗近似直線を第 1 直線とする。これを 1% ひずみ分だけオフセットした直線が元の曲線と交差する点を降伏点とし，この時の応力を横圧縮降伏応力（ $\sigma_{y,90}$ ）とした。ただし，降伏後に剛性が低下する場合は最大応力を降伏点とした。

Table 6.2 縦振動法による動的縦ヤング係数および小試験体の圧縮試験結果

CLT	Dynamic young's	Parallel to grain	Perpendicular to grain
	modulus	Max. strength	Yield strength
	$E_{d,0}[\text{kN/mm}^2]$	$\sigma_{\text{max},0}[\text{N/mm}^2]$	$\sigma_{y,90}[\text{N/mm}^2]$
Not bonded	8.46(1.88)	37.7(1.99)	3.2(1.1)
Bonded	7.59(1.00)	30.2(3.96)	4.9(1.6)

6.3 実験結果と考察

6.3.1 応力－ひずみ関係と特性値

荷重を加圧面積で除して見かけ応力を，計測した変位 2 点（D1，D2）の平均値を材せいで除して見かけひずみを算出した。Figure 6.4 に見かけ応力－見かけひずみ関係と試験後の写真を，Table 6.3 に実験結果を示す。表中括弧内は 3 体の標準偏差である。初期剛性は 5%ひずみを生じた点における応力を σ_{max} とし， $0.1\sigma_{max}$ と $0.4\sigma_{max}$ を示す点の間で定義された最小自乗近似直線の傾きとした。これを 1%ひずみ分だけオフセットした直線が元の曲線と交差する点と σ_{max} を示す点との間で定義された最小自乗近似直線の傾きを二次剛性とした。また，初期剛性と二次剛性を定義した 2 つの近似直線の交点を降伏点とした⁸⁾。なお，この方法で二次剛性を評価した場合には Figure 6.3 (c) (d) のような見かけ応力－見かけひずみ関係の試験体で剛性が負の値をとる。定義からすると剛性が負の値になることはないが，本報では評価の利便上，二次剛性が負の値になる場合がある。

すべての試験体で急激な荷重低下が生じることなく変位 20mm に到達し，靱性のある破壊となった。試験体 c1,c3,c7 を比べると，二次剛性は支圧幅が大きくなるにしたがい低下した。さらに，余長の短い試験体 e7-0 は c7 に比べ二次剛性が低かった。

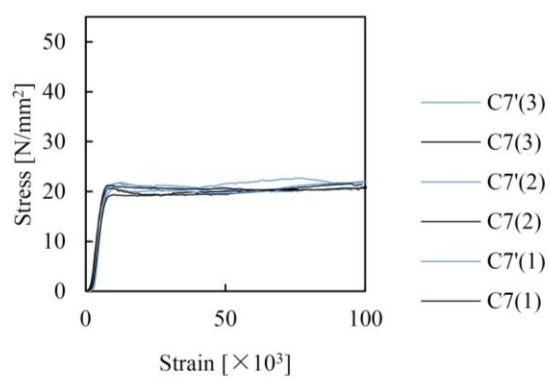
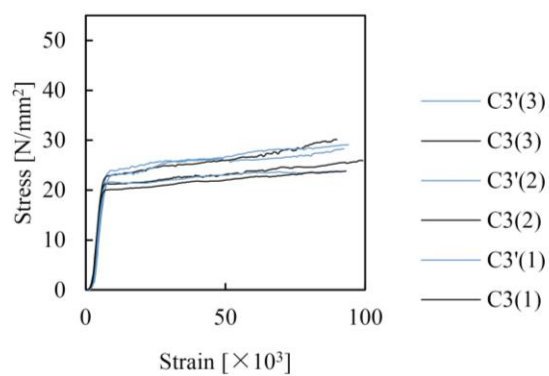
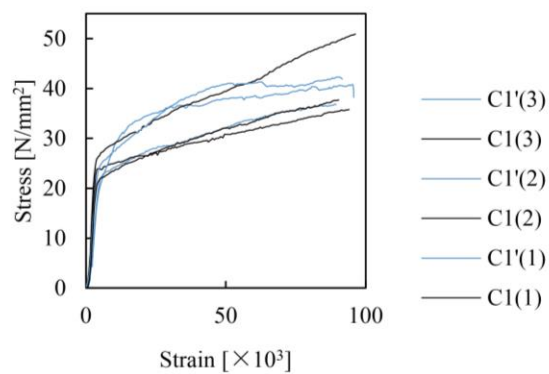


Figure 6.4 見かけ応力—見かけひずみ関係

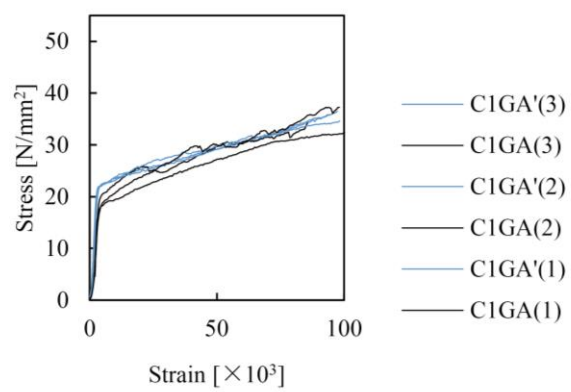
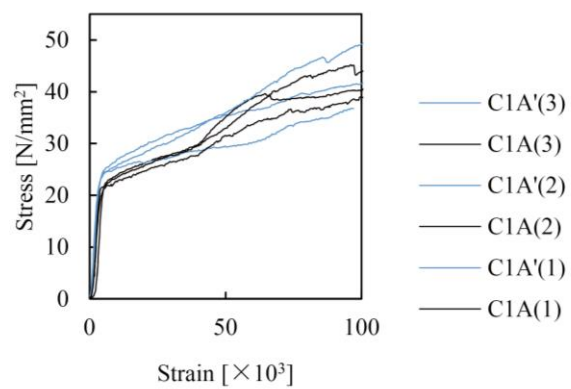


Figure 6.4 見かけ応力—見かけひずみ関係

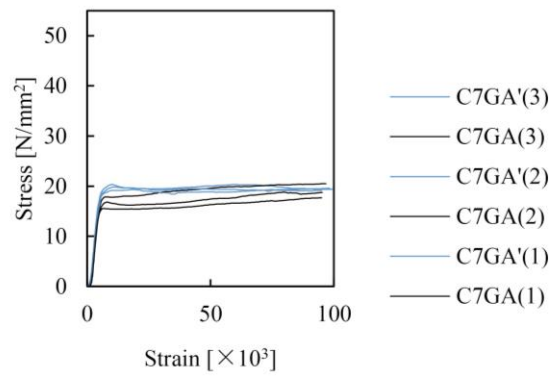
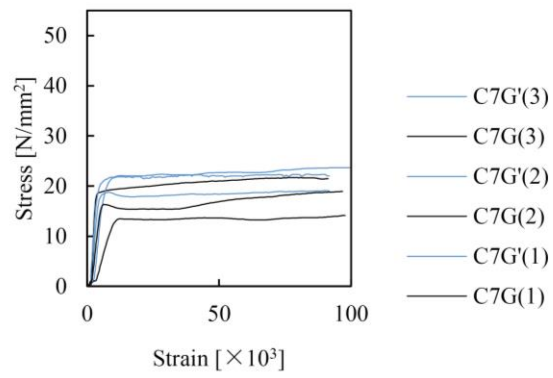
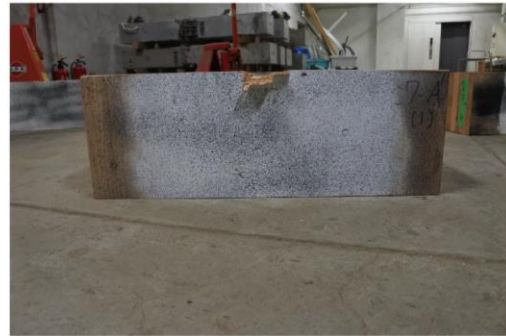
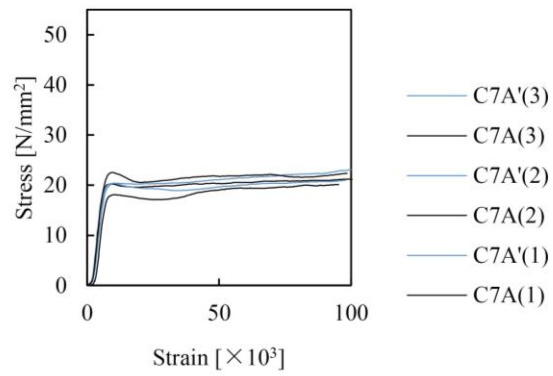


Figure 6.4 見かけ応力—見かけひずみ関係

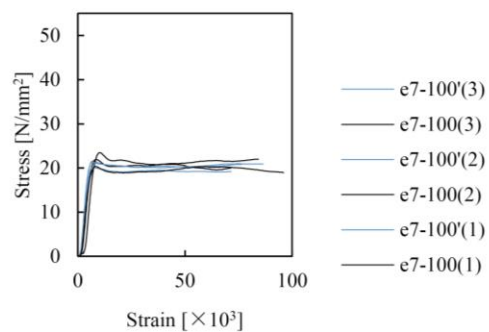
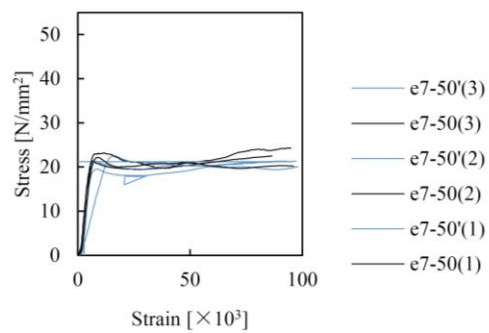
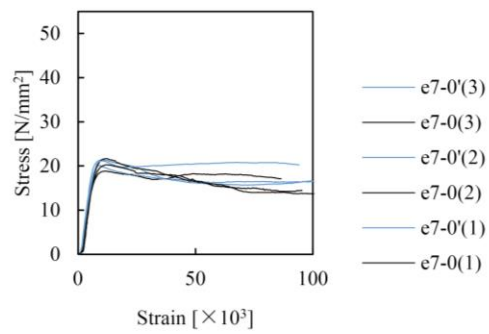
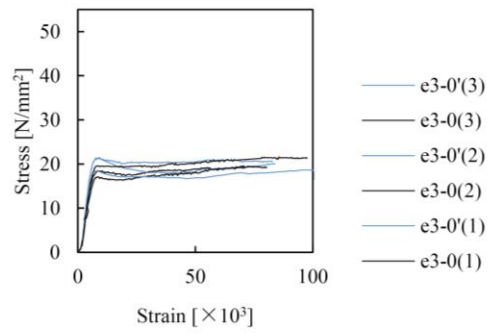


Figure 6.4 見かけ応力—見かけひずみ関係

Table 6.3 実験結果の特性値

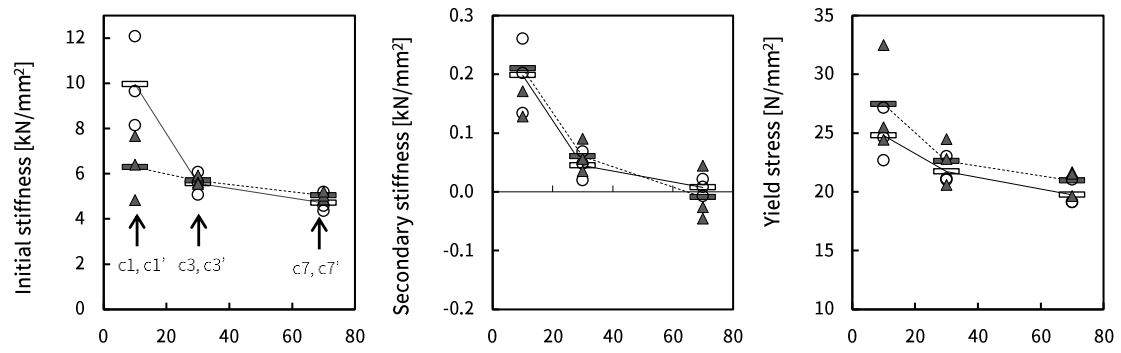
Series	Yield stress	Initial stiffness	Secondary stiffness
	[N/mm ²]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]
c1	24.8(2.24)	9.95(1.99)	0.20(0.06)
c3	21.7(1.13)	5.58(0.50)	0.05(0.02)
c7	19.8(1.12)	4.71(0.43)	0.01(0.01)
c7G	15.6(2.89)	4.32(0.85)	0.03(0.02)
c1A	23.0(0.88)	8.12(0.31)	0.22(0.02)
c7A	18.5(1.84)	4.49(0.58)	0.04(0.02)
c1GA	20.4(2.79)	6.89(0.99)	0.19(0.05)
c7GA	22.6(1.96)	2.44(0.09)	0.03(0.01)
e3-0	17.2(1.60)	3.88(0.39)	0.04(0.01)
e7-0	20.1(1.58)	4.07(0.30)	-0.07(0.06)
e7-50	20.7(2.20)	5.33(0.38)	0.00(0.04)
e7-100	20.3(1.64)	4.80(0.40)	0.00(0.03)
c1'	27.5(4.38)	6.29(1.42)	0.21(0.11)
c3'	22.6(1.96)	5.69(0.20)	0.06(0.03)
c7'	20.9(1.13)	5.03(0.17)	-0.01(0.05)
c7G'	20.2(2.36)	5.77(0.55)	0.02(0.00)
c1A'	24.8(1.02)	9.88(1.34)	0.19(0.07)
c7A'	20.2(0.63)	4.75(0.65)	0.02(0.02)
c1GA'	22.9(0.24)	8.05(0.79)	0.14(0.00)
c7GA'	19.4(0.13)	4.89(0.10)	0.00(0.01)
e3-0'	19.2(1.54)	4.64(0.56)	-0.02(0.02)
e7-0'	20.0(1.20)	4.10(0.26)	-0.06(0.08)
e7-50'	19.5(2.06)	4.23(1.98)	0.01(0.04)
e7-100'	20.1(0.95)	5.54(0.97)	0.00(0.01)

6.3.2 CLT 木口面の部分圧縮特性値への影響因子

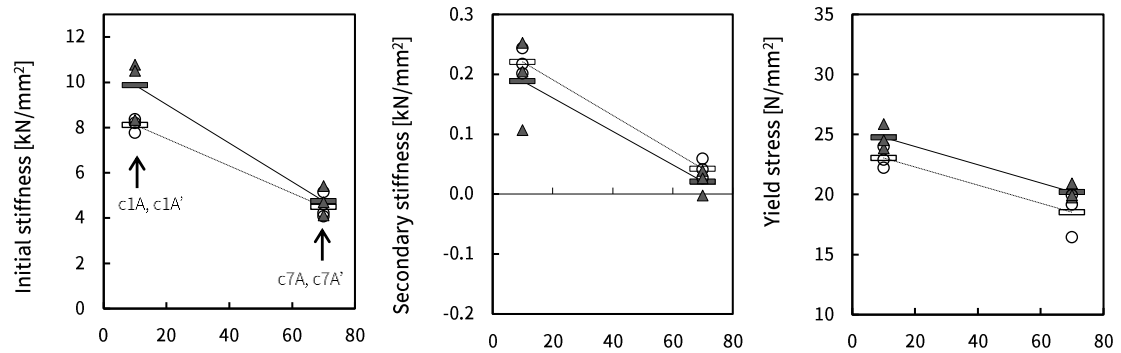
6.3.2.1 支圧幅

Figure 6.5 に支圧幅と各特性値の関係を示す。Figure 6.5 (a)の試験体 (c1,c1',c3,c3',c7,c7') は幅はぎ接着なし、かつ加力板とラミナの境界が一致しない試験体の強軸および弱軸で、支圧幅は 10, 30, 70 mm である。Figure 6.5 (b)の試験体 (c1A,c1A',c7A,c7A') は幅はぎ接着なし、かつ加力板とラミナの境界が一致する試験体の強軸および弱軸で、支圧幅は 10, 70 mm である。Figure 6.5 (c)の試験体 (c1AG,c1AG',c7AG,c7AG') は幅はぎ接着あり、かつ加力板とラミナの境界が一致する試験体の強軸および弱軸で、支圧幅は 10, 70 mm である。幅はぎ接着の有無や加力板の位置にかかわらず、支圧幅が小さくなると初期剛性・二次剛性は増加し、増加率は支圧幅が小さいほど大きかった。降伏応力は、幅はぎ接着ありかつ加力板とラミナ境界が一致する場合 (Figure 6.5(c)) の弱軸試験体を除き、支圧幅が小さくなるほど大きくなった。たとえば、Figure 6.5 (a)において支圧幅が小さくなることによる各特性値の増加率は支圧幅 10mm 平均と 70mm 平均を比べると初期剛性で 2.11 倍 (弱軸) 又は 1.25 倍 (強軸)、降伏応力で 1.26 倍 (弱軸) 又は 1.31 倍 (強軸) であった。二次剛性については支圧幅 10mm で $0.13 \sim 0.26 \text{ kN/mm}^2$ に対し 70mm ではほぼゼロとなった。

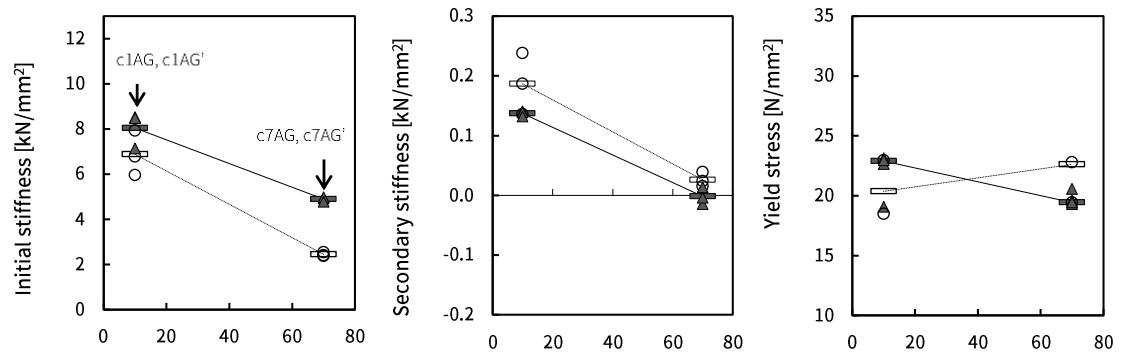
降伏応力が支圧幅の減少に伴い増加する現象は、集成材の部分縦圧縮⁹⁾と部分横圧縮¹⁰⁾でも生じることが知られる。よって、部分縦圧縮と部分横圧縮の組み合わせとなる CLT の部分圧縮特性でも生じたと説明できる。また、支圧幅の減少による二次剛性の増加は、集成材の部分横圧縮で見られるため¹¹⁾、CLT の部分圧縮特性にも同様の傾向が見られたと考えられる。



(a) Width of loading plates (On laminae, Not edge bonded) [mm]



(b) Width of loading plates (On seam, Not edge bonded) [mm]



(c) Width of loading plates (On laminae, Edge bonded) [mm]

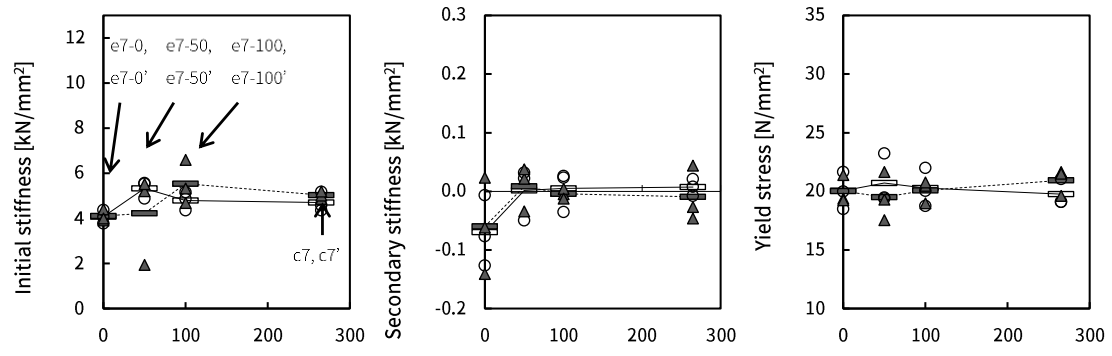
Legend: ○: Weak axis, ▲: Strong axis, □ & dotted lines: Average value of weak axis specimens, — & solid lines: Average value of strong axis specimens.

Figure 6.5 支圧幅と各特性値

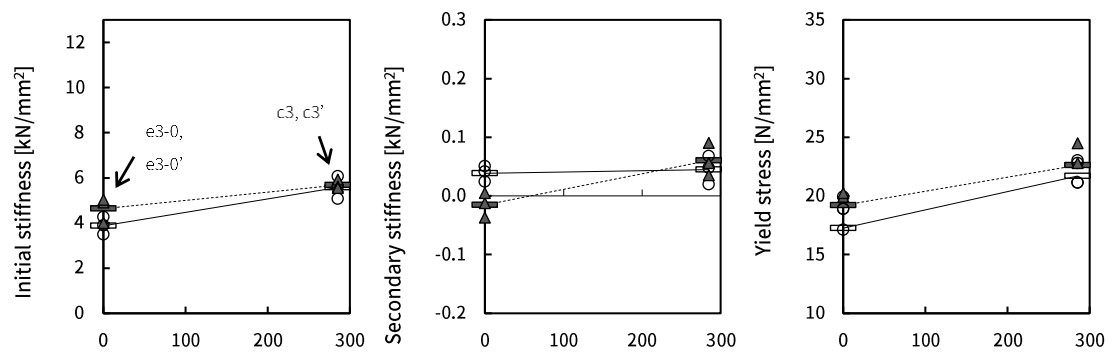
6.3.2.2 余長

Figure 6.6 (a)に支圧幅 70mm 試験体の、Figure 6.6 (b)に支圧幅 30mm 試験体の余長と各特性値の関係を示す。図中の試験体 (e7-0, e7-0', e7-50, e7-50', e7-100, e7-100', c7, c7', e3-0, e3-0', c3, c3') は幅はぎ接着なし、かつ加力板とラミナの境界が一致しない試験体の強軸および弱軸で、余長は支圧幅 70mm の場合 0, 50, 100, 265mm, 支圧幅 30mm の場合 0, 285mm である。支圧幅 70mm 試験体に関して、余長 265mm に比べ余長ゼロの試験体は平均値で初期剛性が 0.87 倍 (弱軸) 又は 0.82 倍 (強軸) となった。また、余長が小さくなることによる二次剛性の減少は見られたが、降伏応力の減少は見られなかった。支圧幅 30mm 試験体に関して、余長 285mm に比べ余長ゼロの試験体は平均値で初期剛性が 0.70 倍 (弱軸) 又は 0.82 倍 (強軸)、降伏応力が 0.79 倍 (弱軸) 又は 0.85 倍 (強軸) となった。よって、支圧幅が小さい場合、余長が初期剛性、二次剛性、降伏応力に与える影響は大きいと推察される。

支圧幅 70mm 試験体の余長長さと各特性値の関係 (Figure 6.6 (a))については、余長 100mm であれば弱軸・強軸ともに初期剛性、二次剛性、降伏応力が余長 265mm と同等であった。よって、余長 100 以上であれば余長長さを無限長とみなすことが出来ると考えられる。



(a) Side margins of $W=70$ [mm]



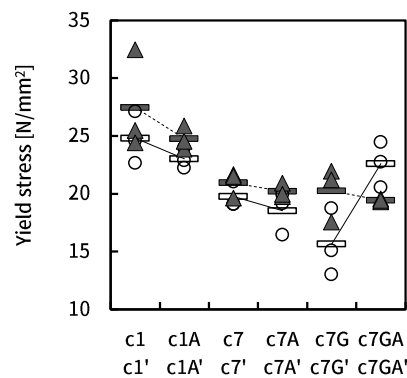
(b) Side margins of $W=30$ [mm]

Legend: ○: Weak axis, ▲: Strong axis, □ & dotted lines: Average value of weak axis specimens, — & solid lines: Average value of strong axis specimens.

Figure 6.6 余長と各特性値の関係

6.3.2.3 支圧位置

Figure 6.7 に支圧位置と降伏応力の関係を示す。試験体名に A が見つからない試験体は加力板とラミナの境界が一致しないことを、A が見つかる試験体は加力板とラミナの境界が一致することを示す。加力板とラミナ境界が一致する(Figure 6.2 (b-2)) 場合、幅はぎ接着なしの試験体 (c1A,c1A', c7A,c7A') では加力板とラミナ境界が一致しない試験体 (Figure 6.2 (b-1), c1,c1',c7,c7') の 0.90~0.97 倍となった。幅はぎ接着ありの試験体 (c7GA,c7GA') では加力板とラミナ境界が一致しない試験体 (c7G,c7G') の 0.96~1.45 倍となった。よって、幅はぎ接着なしの場合は、加力板とラミナ境界が一致すると若干降伏応力が低下する可能性がある。また、幅はぎ接着ありの場合は支圧位置は降伏応力に影響しないと考えられる

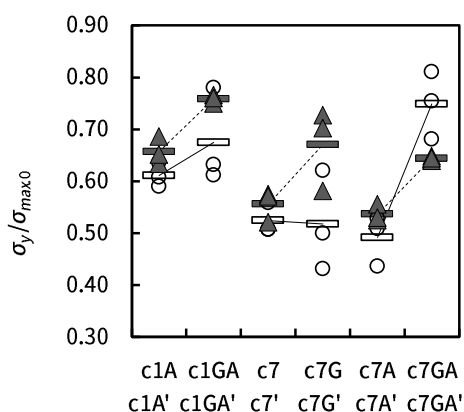


Legend: ○: Weak axis, ▲: Strong axis, □ & dotted lines: Average value of weak axis specimens, — & solid lines: Average value of strong axis specimens.

Figure 6.7 支圧位置と降伏応力の関係

6.3.2.4 幅はぎ接着の有無

圧幅はぎ接着ありとなしの CLT 大板のメーカーが異なり、かつラミナの縦圧縮強度がかなり異なっていた。そこで、幅はぎ接着の有無が降伏応力に与える影響を考察する際、CLT の降伏応力 σ_y をラミナの縦圧縮強さ $\sigma_{max.0}$ で除し無次元化して比較を行うこととした。無次元化の際に横圧縮降伏応力を考慮しなかった理由は、スギの縦圧縮ヤング係数 E_L に比べ横圧縮ヤング係数 E_R , E_T がそれぞれ 1/12 倍、1/25 倍¹¹⁾と低く、CLT 木口面に部分圧縮力を作用させた場合、圧縮力に対して平行方向のラミナがほとんどの力を負担するためである。Figure 6.8 に $\sigma_y/\sigma_{max.0}$ と幅はぎ接着の有無の関係を示す。試験体名に G につかない試験体は幅はぎ接着なしを、G がつく試験体は幅はぎ接着ありを示す。c7G は c7 の 0.99 倍と幅はぎ接着ありの場合の $\sigma_y/\sigma_{max.0}$ が若干低かったが、他の試験体では幅はぎ接着ありがなしの試験体よりも $\sigma_y/\sigma_{max.0}$ が高かった。幅はぎ接着による $\sigma_y/\sigma_{max.0}$ の上昇はもっとも大きい c7AG で c7A の 1.52 倍、図中の全試験体平均で 1.20 倍となっていた。ほとんどの試験体で幅はぎ接着ありがなしの $\sigma_y/\sigma_{max.0}$ を上回っていることから、幅はぎ接着により CLT の圧縮強度は向上すると考えられる。これは、余長効果が幅はぎ接着がある方が大きくなるためだと思われる。ただし、縦圧縮強さ $\sigma_{max.0}$ は幅はぎあり用ラミナ (30.2 N/mm²) となし用ラミナ (37.7 N/mm²) でかなり異なるため検討の余地が残る (Table 6.2)。



Legend: ○: Weak axis, ▲: Strong axis, □ & dotted lines: Average value of weak axis specimens, — & solid lines: Average value of strong axis specimens.

Figure 6.8 $\sigma_y/\sigma_{max.0}$ と幅はぎ接着の有無の関係

6.4 まとめ

スギ A 種 CLT S60-7-7 について部分圧縮試験を実施し，支圧幅，余長，支圧位置，幅はぎの有無，弱軸・強軸が初期剛性や二次剛性，降伏応力へ与える影響を考察した。本実験によって得られた知見を下記に示す。

1. 支圧幅が小さくなると初期剛性や二次剛性，降伏応力が上昇した。上昇率は支圧幅が小さいほど大きくなる。これは，集成材の縦圧縮と横圧縮に見られる現象が CLT でも生じているためと考えられる。
2. 余長が小さくなると CLT の部分圧縮初期剛性・二次剛性は小さくなった。また，支圧幅が小さい試験体では降伏応力も余長が小さくなるに従い小さくなった。よって，CLT の部分圧縮特性には余長効果があると推察される。余長効果は支圧幅が小さいほど大きかった。また，今回検討した CLT 仕様では余長長さが 100mm 以上であれば，無限長とみなすことが出来た。
3. 幅はぎ接着をすることで幅はぎ接着のない試験体よりも $\sigma_y / \sigma_{max,0}$ が向上したことから，幅はぎ接着により CLT の部分圧縮強度は向上すると考えられる。
4. 支圧位置は CLT の部分圧縮性能にあまり影響しないことが分かった。

7. CLT の面内部分圧縮理論式

7.1 目的

本章では、FEM 解析をもとに CLT の面内部分圧縮ヤング係数、圧縮強さの評価法を提案した。

目的を下記に示す。

- (1) めり込み式の CLT の面内部分圧縮への応用、評価法の提案
- (2) CLT の面内部分圧縮における余長部のへこみ形状検討

6.1 節でも述べたように CLT の面内部分圧縮では、縦圧縮される層の変位が横圧縮される層に影響を受け余長効果が生じ、ダメージゾーンの影響が少ないと考えられる。逆に、横圧縮される層の変位は縦圧縮される層に影響を受け、余長効果がめり込み式で示される値より小さい可能性がある。そこで、CLT の面内部分圧縮の縦圧縮される層と横圧縮される層の余長部のへこみ形状をそれぞれ検討し、CLT の面内部分圧縮ヤング係数、圧縮強さの評価法を提案した。

7.2 めり込み式

CLT はラミナを繊維方向が直交するように積み重ねた構造をもつため、CLT 木口面の部分圧縮特性は繊維方向および繊維直交方向の部分圧縮特性を応用し評価できると考えられる。木質構造設計規準・同解説^{1) 2)}では繊維直交方向の部分圧縮（めり込み）の弾性剛性 K および降伏強度 P_y を次式（めり込み式、または稲山式と呼ばれる）で評価している（Figure 7.1）。

$$K = \frac{x_p y_p C_{x,90} C_{y,90} E_{90}}{Z_0} \quad (7.1)$$

$$P_y = x_p y_p F_m \sqrt{\frac{C_{x,90} C_{y,90}}{C_{xm,90} C_{ym,90}}} \quad (7.2)$$

$$C_{x,90} = 1 + \frac{2Z_0}{3x_p} \left(2 - e^{-\frac{3x_1}{2Z_0}} - e^{-\frac{3x_2}{2Z_0}} \right), C_{xm,90} = 1 + \frac{4Z_0}{3x_p} \quad (7.3)$$

$$C_{y,90} = 1 + \frac{2Z_0}{3ny_p} \left(2 - e^{-\frac{3ny_1}{2Z_0}} - e^{-\frac{3ny_2}{2Z_0}} \right), C_{ym,90} = 1 + \frac{4Z_0}{3ny_p} \quad (7.4)$$

ここで、 x_p ：加力板と木材の接触長さ（ x 方向）、 y_p ：加力板と木材の接触長さ（ y 方向）、 E_{90} ：繊維直交方向の圧縮ヤング係数、 F_m ：余長が無限大の時の圧縮応力、 x_1, x_2, y_1 および y_2 ： x 又は y 軸方向の余長長さ。上記の式は加力板によってへこんだ体積（Figure 7.2）が荷重と比例すると仮定し次式から導き出されている。

$$P = \frac{E_{90}}{Z_0} V \quad (7.5)$$

ここで、 V ：へこんだ部分の体積。加力板周りのへこみ形状は次式で表される。

$$f(x) = \delta e^{-ax} \quad (7.6)$$

ここで、 δ ：加力による加力板直下の変形、 x ：加力板からの距離、 a ：へこみ形状係数。式（7.1）～（7.4）では繊維直交方向の部分圧縮のへこみ形状係数 a を $3/(2Z_0)$ としている。加力板周りのへこみ断面は次式で算出される。

$$A = \int_0^x f(x) dx = \delta \int_0^x \delta e^{-ax} dx = \frac{\delta}{a} \left(1 - e^{-\frac{3x}{2Z_0}} \right) \quad (7.7)$$

また、へこみ体積は次式で算出される。

$$V = \delta \left[x_p + \frac{2Z_0}{3} \left(2 - e^{-\frac{3x_1}{2Z_0}} - e^{-\frac{3x_2}{2Z_0}} \right) \right] \times \left[y_p + \frac{2Z_0}{3n} \left(2 - e^{-\frac{3ny_1}{2Z_0}} - e^{-\frac{3ny_2}{2Z_0}} \right) \right] \quad (7.8)$$

ここで、 n : x 軸方向と y 軸方向の体積比。式 (7.1) は式 (7.5) と式 (7.8) を代入することで得られる。式 (7.2) はひずみエネルギー保存則により導かれた。

$$U = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E_b} = \frac{\varepsilon_y^2 E_b}{2} \quad (7.9)$$

ここで、 σ_y : 部分圧縮降伏応力、 ε_y : 降伏時のひずみ、 E_b : 部分圧縮のヤング係数。余長が十分に長い場合の部分圧縮のヤング係数 $E_{b,max}$ は次式で表される。

$$E_{b,max} = C_{xm,90} C_{ym,90} E_{90} \quad (7.10)$$

式 (7.9) および式 (7.10) より次式が得られる。

$$\frac{\sigma_y^2}{E_b} = \frac{F_m^2}{E_{b,max}} \quad (7.11)$$

$$P_y = x_p y_p F_m \sqrt{\frac{E_1}{E_{b,max}}} = x_p y_p F_m \sqrt{\frac{C_{x,90} C_{y,90}}{C_{xm,90} C_{ym,90}}} \quad (7.12)$$

本章では式 (7.12) を CLT へ応用することを試みる。そのためには、CLT の部分圧縮のへこみ形状 (式 (7.6)) を得る必要がある。次節以降では FEM 解析を用いて CLT の部分圧縮のへこみ形状を検討する。

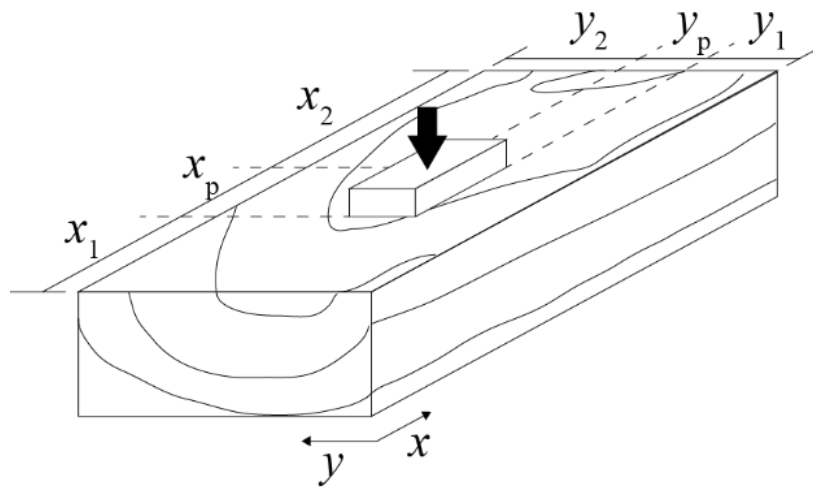


Figure 7.1 式 (7.1) ~ (7.4) の説明図

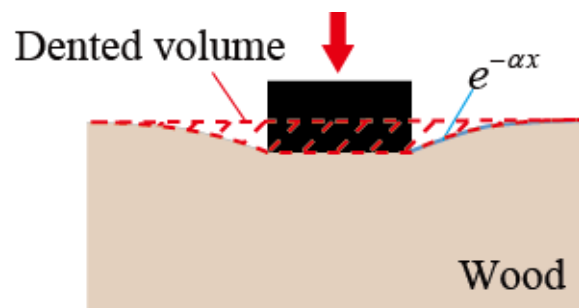


Figure 7.2 へこみ形状 (式 (7.6))

7.3 FEM 解析

7.3.1 FEM 解析モデル

汎用解析ソフト MSC Marc を用いて弾塑性解析を行った。CLT 試験体は Figure 7.3 に示すように $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ または $1\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (加力板周り) のソリッド要素として 3D の FE モデルに置換した。ラミナは 6 章の実験と同様に幅 120mm, 厚さ 30mm とした。幅はぎ接着のない試験体を想定し, ラミナ間に 0.1mm の空白を設けた。CLT 層間については接着されているため, 一つのノードを隣り合う層で共有した。つまり, 層間の接着剤は物性値を持たない厚さゼロの剛接合として扱った。

境界条件は加力される面と反対の面を固定端とした。加力板と接する面は RBE2 を用いてリンクさせ, リンクさせたノードの変位はすべて同変位となるようにした。RBE2 はメッシュやノードをつなげる (リンクさせる) ために使われる剛体要素であり, リンクさせたメッシュやノードの変位をすべて同じにできる。なお, モーメントはリンクさせていない (Figure 7.3(a))。加力は試験体の加力される面より 90mm 離れた位置にポイントを置き, そのポイントとリンクさせた加力面の変位が同一になるよう設定し与えた。

試験変数はへこみ形状に影響を与えると思われる, 加力幅, 加力方向 (weak or strong axis), 余長長さ, 試験体高さとした (Table 7.1)。

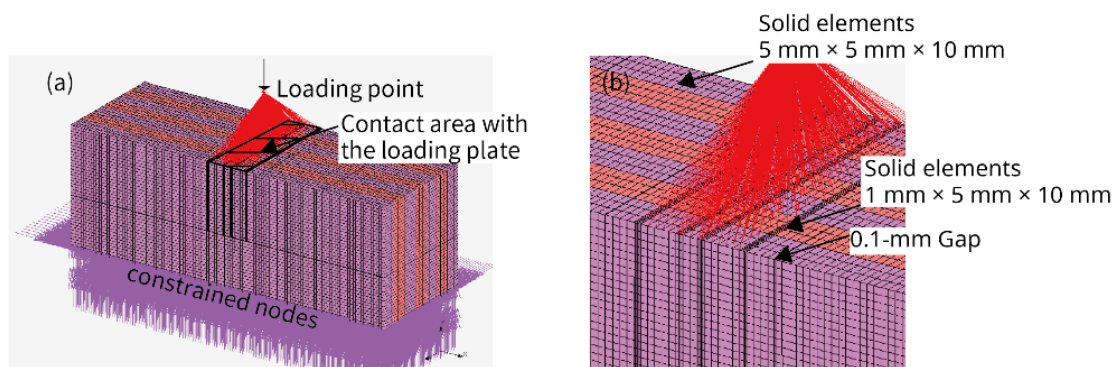




Figure 7.3 FE モデル

Table 7.1 FEM 解析の試験パラメータ

Loading setup	 	
	Center	Edge
Loading plate (W) [mm]	10, 30, 70	10, 30, 70
Side margin (x) [mm]	Greater than 100	0, 10, 100
Height of CLT (Z_0) [mm]	100, 210, 600	210

7.3.2 材料特性

CLT の FE モデルはラミナの繊維方向を L 方向，ラミナの厚さ方向を R 方向，ラミナの幅方向を T 方向とした直交異方性材料として扱った。入力した各特性値を Table 7.2 に示す。なお，樹種は 6 章の実験と同様にスギを想定し，木材工業ハンドブック³⁾の特性値を用いた。直交異方性材料である木材の降伏は Hill の降伏条件⁴⁾により表現した。Hill の降伏条件はミーゼスの降伏条件（等方性材料でよく用いられる）を異方性材料に応用したものであり次式で表される。

$$\frac{\sqrt{a_1(\sigma_y - \sigma_z)^2 + a_2(\sigma_z - \sigma_x)^2 + a_3(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 3a_4\tau_{zx}^2 + 3a_5\tau_{yz}^2 + 3a_6\tau_{xy}^2}}{\sqrt{2}} = 1 \quad (7.13)$$

$$a_1 = \frac{1}{f_{c,T}^2} + \frac{1}{f_{c,R}^2} - \frac{1}{f_{c,L}^2}, \quad a_2 = \frac{1}{f_{c,R}^2} + \frac{1}{f_{c,L}^2} - \frac{1}{f_{c,T}^2}, \quad a_3 = \frac{1}{f_{c,L}^2} + \frac{1}{f_{c,T}^2} - \frac{1}{f_{c,R}^2} \quad (7.14)$$

$$a_4 = \frac{2}{3f_{s,RT}^2}, \quad a_5 = \frac{2}{3f_{s,LT}^2}, \quad a_6 = \frac{2}{3f_{s,LR}^2} \quad (7.15)$$

ここで， τ_{zx} , τ_{yz} , τ_{xy} : zx, yz, xy 方向のせん断応力， $f_{c,L}$, $f_{c,T}$, $f_{c,R}$: L, R, T 方向の圧縮強さ， $f_{s,LR}$, $f_{s,LT}$, $f_{s,RT}$: zx, yz, xy 方向のせん断強さ。木材工業ハンドブックのスギの各値を Table 7.2 に示す。本研究では降伏点までを研究対象とするためひずみ硬化は無視した。

Table 7.2 FEM 解析に用いた材料特性

Moduli of elasticity [N/mm ²]						Poisson's ratios			Compressive strengths [N/mm ²]			Shear strengths [N/mm ²]		
E_L	E_T	E_R	G_{LR}	G_{RT}	G_{TL}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TL}	$f_{c,L}$	$f_{c,T}$	$f_{c,R}$	$f_{s,LR}$	$f_{s,LT}$	$f_{s,RT}$
7350	590	290	637	15	343	0.4	0.6	0.022	22.6	0.7	1.4	6.4	7.4	0.7

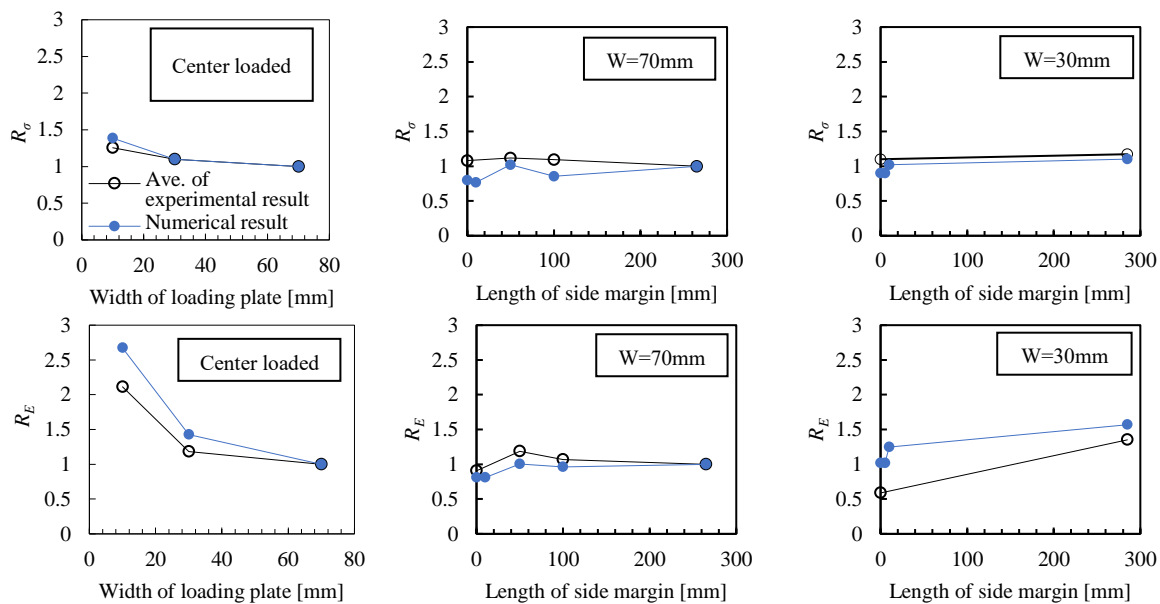
7.3.3 解析結果と実験結果の比較

解析結果の妥当性を検証するため、実験結果と解析結果の比較を行った。比較には次式の強度比 R_σ およびヤング係数比 R_E を用いた。

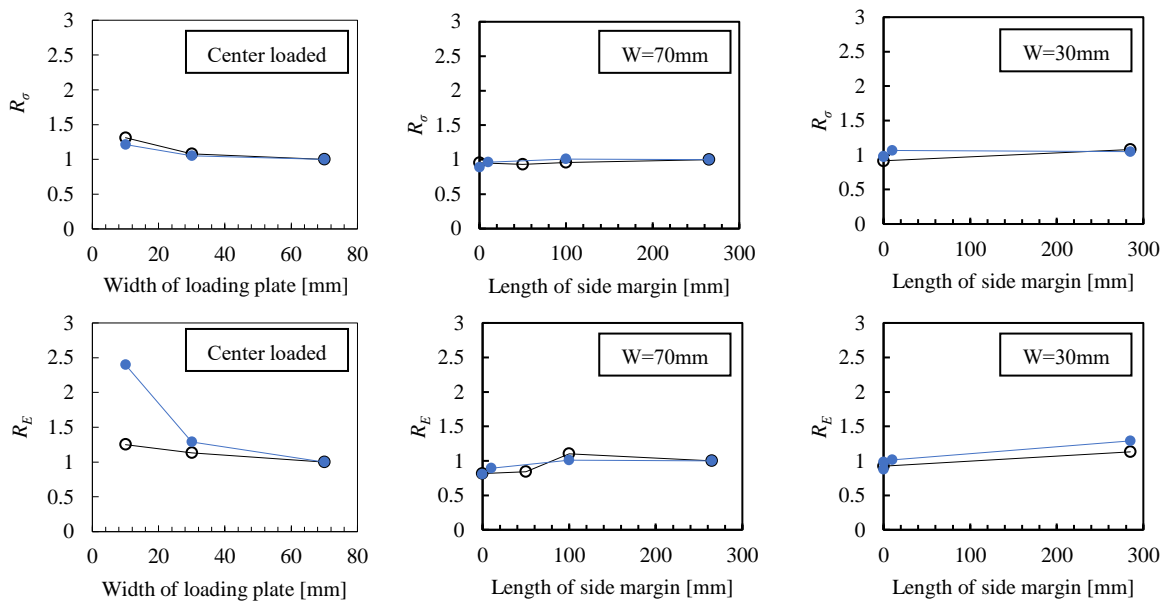
$$R_\sigma = \frac{\sigma_y}{\sigma_{y,b}} \quad (7.16)$$

$$R_E = \frac{E_{CLT}}{E_{CLT,b}} \quad (7.17)$$

ここで、 $\sigma_{y,b}$ ：基準となる試験体の降伏応力、 $E_{CLT,b}$ ：基準となる試験体のヤング係数。なお、weak axis の試験体では c_7 を strong axis の試験体では c_7' を基準とした。Figure 7.4 に各パラメータの実験値と解析値の比較を示す。解析結果はおおむね実験結果と同じ傾向を持ち、実情を再現できていると考えられる。



(a) Results of weak-axis specimens



(b) Results of strong-axis specimens

Figure 7.4 各パラメータの実験値と解析値の比較

7.4 FEM 解析による CLT のへこみ形状検討

下記の CLT の余長部のへこみ形状の検討では降伏点の形状を検討する。Figure 7.5 に降伏点の CLT の面外変形を示す。最外層のラミナは面外に変形しているため、圧縮力の有効断面積は加力される全断面ではないことがわかる。最外層のラミナが面外に変形する現象は 6 章の実験でも見られた。

CLT のへこみ形状を検討するため、Figure 7.6 の lineA と lineB の位置における試験体表面の変形形状を Figure 7.7 に示す。weak axis の lineA のへこみ形状と strong axis の lineB のへこみ形状、weak axis の lineB のへこみ形状と strong axis の lineA のへこみ形状はそれぞれ似たような形状であった。これは、へこみ形状が CLT パネルの加力方向ではなく、繊維方向に影響を受けるからだと考えられる。横圧縮および縦圧縮される CLT のラミナについて、加力板周りのへこみ形状を次式とすると、解析により得られた表面の変形形状をうまく表現できる (Figure7.7)。

perpendicular to the grain

$$f(x) = 0.7\delta e^{-\frac{7}{Z_0}x} \quad (7.18)$$

parallel to the grain

$$f(x) = 0.2\delta e^{-\frac{7}{Z_0}x} \quad (7.19)$$

ただし、strong axis における最外層の縦圧縮されるラミナのへこみ形状は他の縦圧縮されるラミナのそれとは異なる。Figure.7.8 に strong axis における最外層 (outermost laminae) と中間層 (lineB) の縦圧縮されるラミナのへこみ形状を示す (加力幅 70mm, 中央加力)。0.2 P_y 時, 0.4 P_y 時, P_y 時すべてで最外層のラミナの余長部のへこみ量は中間層に比べ少なかった。最外層のラミナの余長部のへこんだ面積は中間層の 0.81 倍 (0.2 P_y 時), 0.73 倍 (0.4 P_y 時, P_y 時) であった。これは、strong axis における最外層の縦圧縮されるラミナが、横圧縮されるラミナと 1 面しか接着されていないため横圧縮されるラミナの変形に引っ張られにくいからだと考えられる。

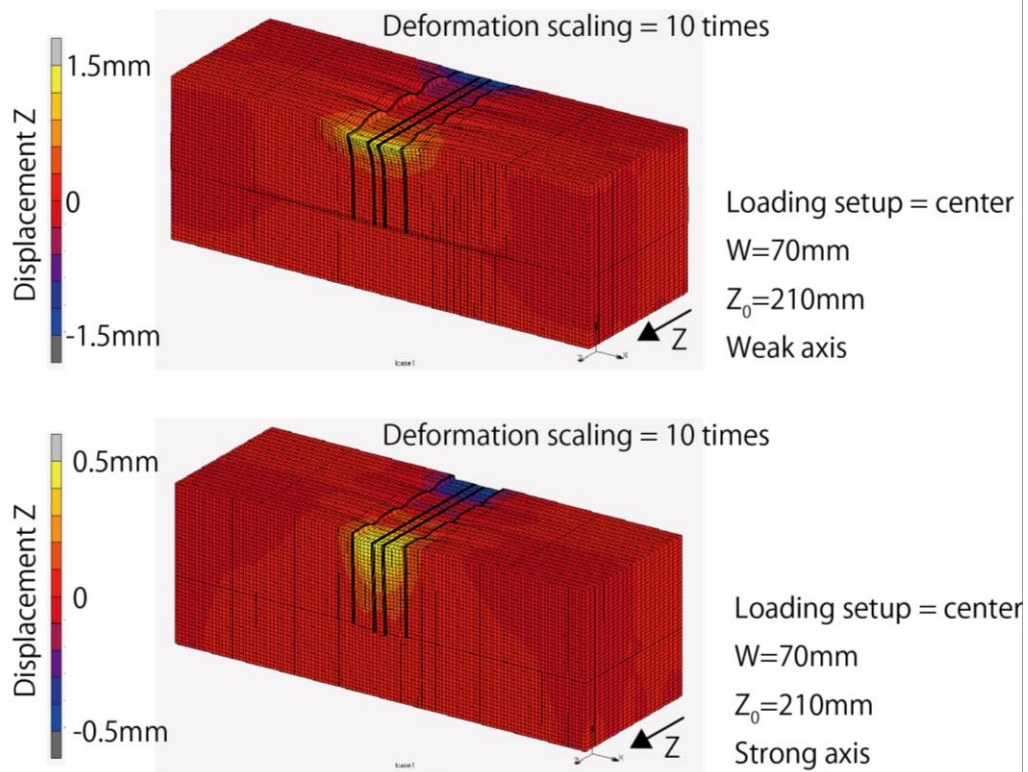


Figure 7.5 降伏点の CLT の面外変形 (Z 方向変形)

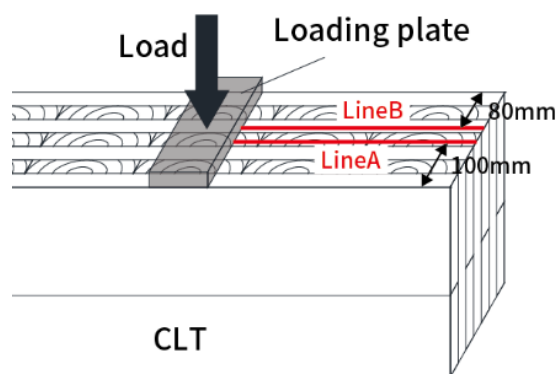


Figure 7.6 試験体表面の変形測定位置

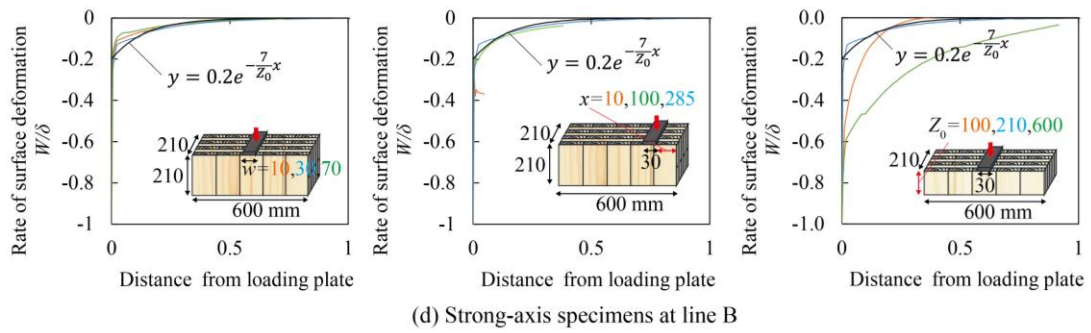
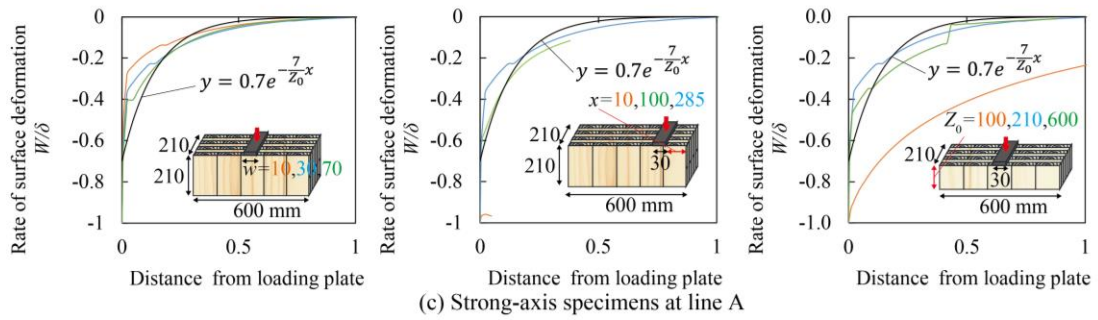
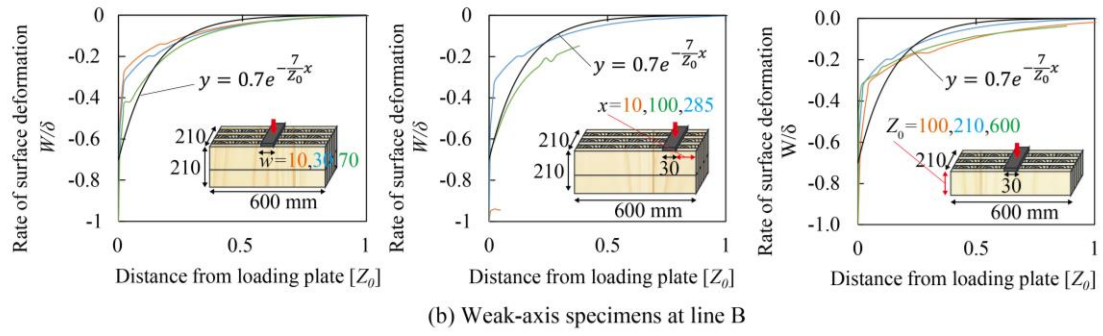
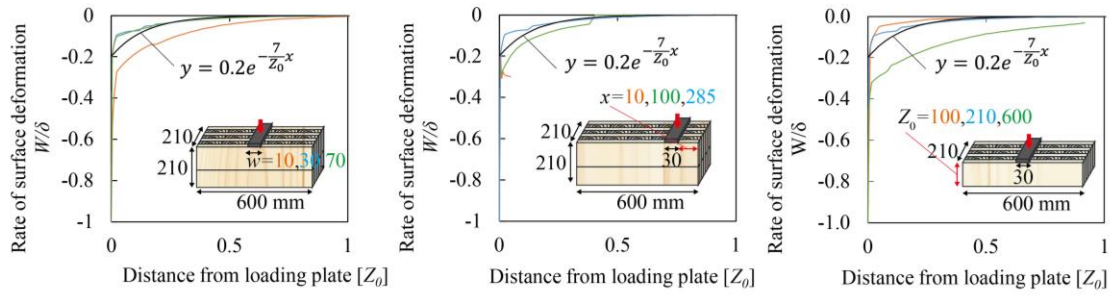
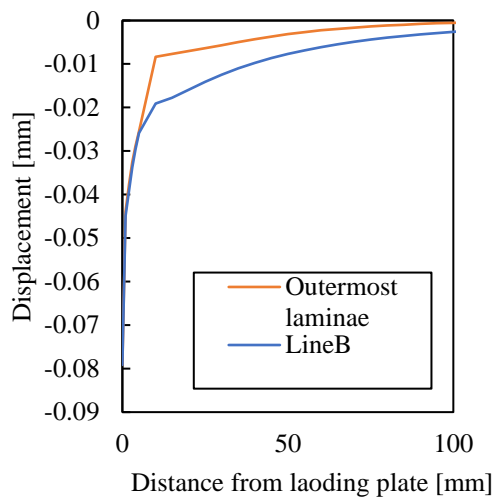
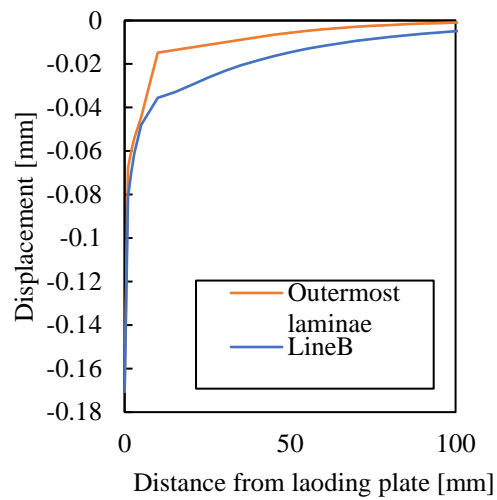


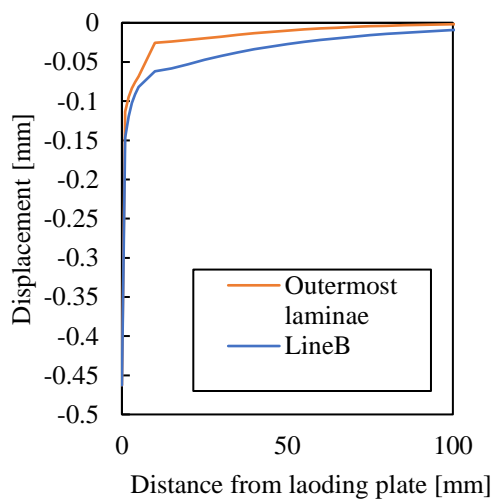
Figure 7.7 lineA と lineB の位置における試験体表面の変形形状



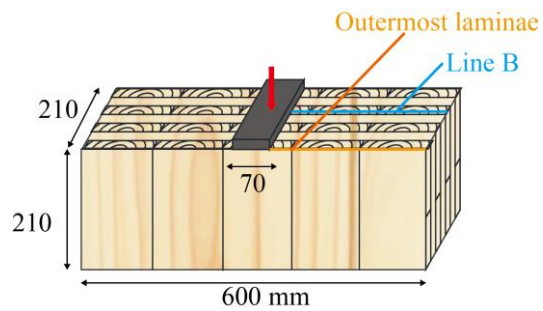
(a) $0.2P_y$ の時の試験体表面の変形形状



(b) $0.4P_y$ の時の試験体表面の変形形状



(c) P_y の時の試験体表面の変形形状



(d) 説明図

Figure 7.8 strong axis における最外層と中間層 (line B) の縦圧縮されるラミナのへこみ形状
(加力幅 70mm, 中央加力)

7.5 CLT の面内部分圧縮理論式

7.5.1 ヤング係数

CLT の面外部分圧縮ヤング係数 ($E_{b,CLT}$) は各ラミナの足し合わせから次式で表される。

$$E_{b,CLT} = \frac{n_0 E_{b,0} + n_{90} E_{b,90}}{n_{CLT}} \quad (7.20)$$

ここで, n_0 , n_{90} : 繊維方向または繊維直交方向圧縮ラミナの数, n_{CLT} : CLT 内のラミナ数,
 $E_{b,0}$, $E_{b,90}$: 繊維方向または繊維直交方向部分圧縮のヤング係数。式 (7.10) より, y 方向の余
長がゼロの場合の $E_{b,0}$, $E_{b,90}$ は次式で表される。

$$E_{b,0} = C_{x,0} E_0 \quad (7.21)$$

$$E_{b,90} = C_{x,90} E_{90} \quad (7.22)$$

また, $C_{x,0}$ と $C_{x,90}$ は式 (7.3), 式 (7.18), 式 (7.19) より次式で表される。

$$C_{x,0} = 1 + \frac{0.2Z_0}{7x_p} \left(2 - e^{-\frac{7x_1}{Z_0}} - e^{-\frac{7x_2}{Z_0}} \right) \quad (7.23)$$

$$C_{x,90} = 1 + \frac{0.7Z_0}{7x_p} \left(2 - e^{-\frac{7x_1}{Z_0}} - e^{-\frac{7x_2}{Z_0}} \right) \quad (7.24)$$

Figure 7.9 に既存の実験結果と提案式 (7.20) による計算値との比較を示す。なお, 実験結果は
6 章の試験体に加え Table 7.3 に示す既往実験の値とも比較した。Table 7.3 の既往実験はスギ試
験体で中央加力されたものである。提案式による計算値は strong axis 試験体では実験値を上回
っていた。これは提案式では

- ①Figure 7.5 のように CLT の最外層ラミナが面外方向に動いていること
 - ②Figure 7.8 のように strong axis の最外層のラミナの余長効果が小さいこと
- を考慮していないからだと思われる。これらの影響は 7.5.3 項で検討する。

Table 7.3 CLT の面内圧縮既往実験

Source	Name of series	CLT direction	Loading setup	Height	Thickness	Width	CLT layer #	Width of loading plate
				[mm]	[mm]	[mm]		[mm]
Ido et al. [5]	2	Weak axis	Center	150	150	900	5	90
	4	Strong axis		150	150	900	5	90
	6	Weak axis		150	150	900	5	90
	8	Strong axis		150	150	900	5	90
	10	Weak axis		150	210	900	7	90
	12	Strong axis		150	210	900	7	90
Suzuki [6]	CO33	Weak axis	Center	120	90	400	3	100
	CP33	Strong axis		120	90	400	3	100
	CP55	Weak axis		120	150	400	5	100
	CO55	Strong axis		120	150	400	5	100

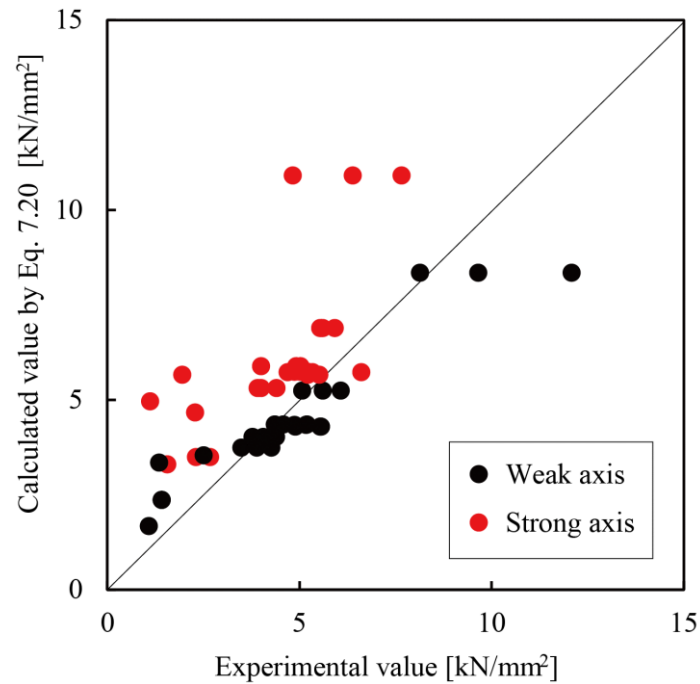


Figure 7.9 CLT 面内圧縮ヤング係数の実験値と式 (7.20) による計算値との比較

7.5.2 降伏応力

CLT の面外部分圧縮降伏応力は式 (7.9) ～式 (7.12) を用いて次式で表される。

$$\frac{\sigma_y^2}{E_b} = \frac{F_0^2}{E_0} \quad (7.25)$$

$$\sigma_y = F_0 \sqrt{\frac{E_b}{E_0}} = F_0 \sqrt{C_{x,0}} \quad (7.26)$$

$$\sigma_{b,CLT} = \frac{n_0 \sigma_y + n_{90} \sigma_y \frac{E_{90}}{E_0}}{n_{CLT}} = \sigma_0 \sqrt{C_{x,0}} \frac{n_0 + \frac{E_{90}}{E_0} n_{90}}{n_{CLT}} \quad (7.27)$$

ここで、 σ_0 ：繊維方向圧縮の降伏応力。Figure 7.10 に実験値と提案式による計算値の比較を示す。ヤング係数と同様に strong axis 試験体では実験値に比べ計算値が高くなった。これも、ヤング係数と同様に CLT の最外層ラミナが面外方向に動いていること、strong axis 試験体の最外層ラミナの余長効果が他と比べて小さいことを考慮していないからだと思う。

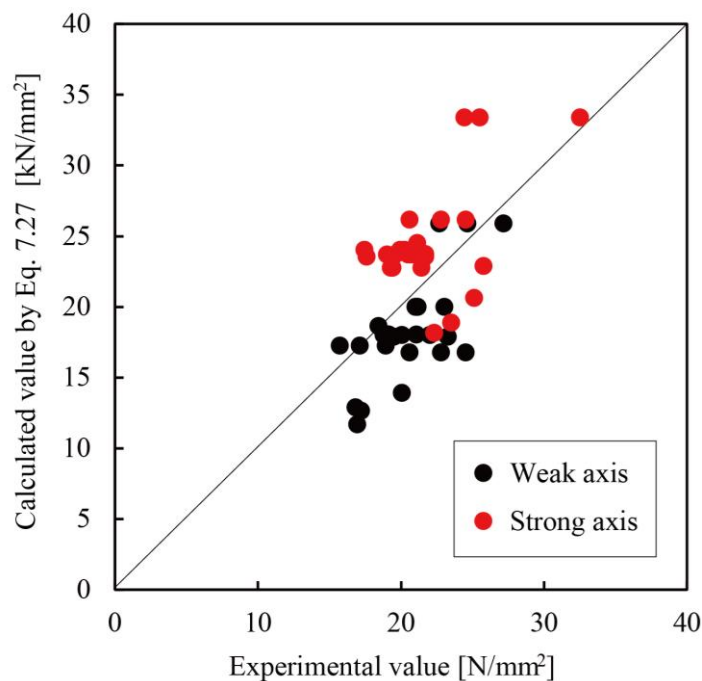


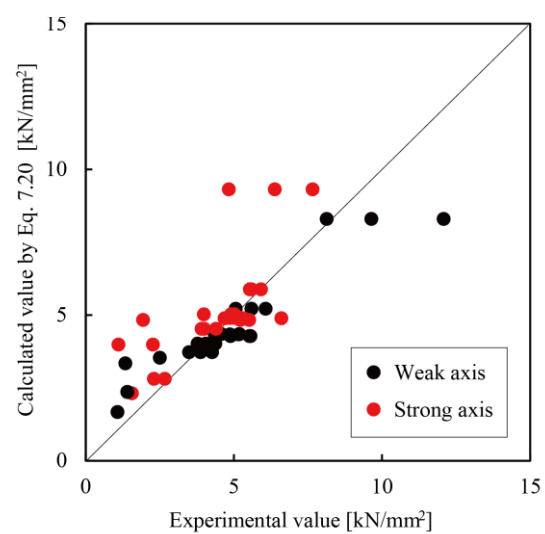
Figure 7.10 CLT 面内圧縮降伏応力の実験値と式 (7.27) による計算値との比較

7.5.3 最外層ラミナの有効断面

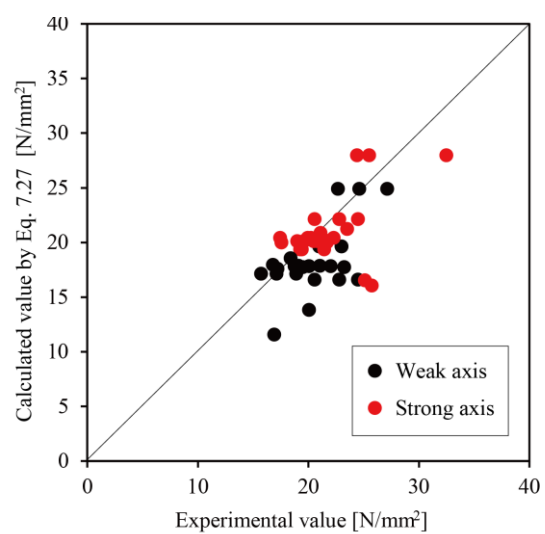
Figure 7.5 のように CLT の最外層ラミナが面外方向に動いていること，Figure 7.8 のように strong axis の最外層のラミナの余長効果が小さいことを考慮するために，CLT の最外層ラミナの有効断面積を設定する。最外層のラミナの負担応力および余長効果を別途評価してもよいが，評価法が複雑になるため，利便性を考慮し有効断面積を設定する方法をとった。Table 7.4 に最外層のラミナの有効断面積を変化させたときの実験値と計算値の比（実験値／計算値）を示す。ヤング係数については最外層のラミナの有効断面積を 30%とした場合に，降伏応力については最外層のラミナの有効断面積を 100%とした場合に実験値と計算値の比が 1 に近くなった。ヤング係数と降伏応力の両方を総合的に見た場合は最外層のラミナの有効断面積を 70%にすると実験値と計算値の比が 1 に近くなった。Figure 7.11 に最外層のラミナの有効断面積を 70%とした提案式の計算値と実験値を示す。提案式は実験値をおおむね評価出来ていると思われる。

Table 7.4 最外層のラミナの有効断面積を変化させたときの実験値と計算値の比

		(実験値／計算値)							
		Effective area of the outermost laminae							
		30%		50%		70%		100%	
		Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV
		-	[%]	-	[%]	-	[%]	-	[%]
Stiffness	Weak axis	0.90	31	0.90	30	0.89	30	0.89	30
	Strong axis	1.0	38	0.95	26	0.82	27	0.68	29
Strength	Weak axis	1.1	15	1.1	16	1.1	16	1.1	16
	Strong axis	1.4	30	1.3	26	1.1	19	0.91	13



(a) ヤング係数



(b) 降伏応力

Figure 7.11 最外層のラミナの有効断面積を 70%とした提案式の計算値と実験値の比較

7.6 まとめ

FEM 解析により CLT 側面が部分圧縮される場合のへこみ形状を検討し、めり込み式を応用した CLT の面内部分圧縮強さ・剛性の評価法を提案した。得られた知見を下記に示す。

1. めり込み式を応用した CLT の面内部分圧縮強さと剛性の評価法を提案した。その際重要となる CLT 側面のへこみ形状曲線は FEM 解析より取得した。
2. CLT が面内部分圧縮をうける場合、最外層のラミナが面外に変形する。よって、圧縮力の有効断面積は加力される全断面よりも小さいと考えられる。
3. strong axis における最外層のラミナの余長部のへこみ量は中間層に比べ少なかった。これは、最外層の縦圧縮されるラミナが、横圧縮されるラミナと 1 面しか接着されていないため横圧縮されるラミナの変形に引っ張られにくいからだと考えられる。
4. 最外層のラミナの有効断面積を 70% とした提案式は実験値をおおむね評価出来た。

8. 結言

8.1 各章のまとめ

本論文では部分縦圧縮や実大材（構造用木質材料）の縦圧縮メカニズムを検討し，縦圧縮強さおよびヤング係数の評価法を提案した。また，CLT の面内部分圧縮の力学的メカニズムについて検討し，強度と剛性の評価法を提案した。

第2章～第4章ではスギ製材の全面縦圧縮，部分縦圧縮，小試験体の全面圧縮，集成材の全面圧縮試験を行った。また，全長の縦圧縮ヤング係数 E_{Lf} の評価法を提案した。得られた知見を下記にまとめる。

【縦圧縮の荷重－変位関係】

縦圧縮（全面，部分）の荷重変位関係は加力開始から $0.1P_{max}$ (P_{max} は最大荷重) あたりまで木口面の凹凸が平坦化し剛性が上昇する。 $0.2P_{max} \sim 0.8P_{max}$ あたりまでほぼ直線的に荷重が増加する。また，ダメージゾーンは $0.2P_{max} \sim 0.6P_{max}$ あたりまで弾性変形する（無論，ミドルゾーンも）。 $0.8P_{max}$ あたりから P_{max} までは剛性が緩やかになり，キンキングが生じる。 P_{max} でキンキングが断面全体にわたりキンクバンド破壊になる。若干荷重が低下したのち，荷重が横ばいになる。よ

って、上降伏点と下降伏点が存在する。全面圧縮試験体の細長比が大きいものはキンクバンド破壊後に塑性座屈し、荷重が低下する。一方、細長比が大きいものや部分圧縮の試験体では高い靱性を持つ。

【縦圧縮破壊】

部分縦圧縮破壊は破壊後も荷重が低下せず高い靱性を持ち、その塑性剛性は0であった。全面縦圧縮は破壊後に座屈する試験体があった。座屈しなければ部分縦圧縮と同様に高い靱性を持つ。破壊モードは全面縦圧縮、部分縦圧縮ともにキンクバンド破壊であった。キンクバンド破壊の発生個所は「ダメージゾーンのみ」「ダメージゾーンとミドルゾーン」で、節がある場合は「ダメージゾーンと節付近」であった。

【縦圧縮強さ】

縦圧縮強さは密度・年輪幅と強い相関がある。寸法効果は節の影響であり、節がなければ認められない。節のある試験体では断面積よりも高さのほうが寸法効果への影響が大きかった。

【余長効果】

縦圧縮強さ、ヤング係数には余長効果が認められなかった。これは、破壊と変形が①ダメージゾーンに集中する、②L方向のせん断剛性が縦ヤング係数に比べ小さく余長部分に応力があまり伝わらない、ためだと考えられる。

【ダメージゾーン】

すべての試験体でひずみの大きいダメージゾーンが上下の加力板および突付付近の木材に見られた。つまり、切断された木口面で生じる。部分縦圧縮の試験体のダメージゾーンはほぼ小さい方の加力板と同じサイズで上下に生じた。ダメージゾーン内のひずみは加力板へ近づくにつれ大きくなっていった。また、ダメージゾーンの力学メカニズムは最大荷重の7~28%の範囲で弾性変形であった。最大ひずみは載荷荷重により変化するが、ダメージゾーンの長さは載荷荷重に関わらずある一定の長さであった。木一木および木一鉄の突付付近のダメージゾーンは加力板付近のダメージゾーンと同様の性状であった。ダメージゾーン長さは試験体断面積（RT面）が大きくなるほど長く、ばらつきが大きくなる（Strongest link modelで評価される寸法効果）。ま

た，加工精度に左右され，表面形状の最大高さ P_z と等しかった。樹種や L 方向の長さ，荷重には影響を受けなかった。

【ヤング係数】

ヤング係数は密度や年輪幅との間に相関性が見られなかった。ミドルゾーンのヤング係数は試験体寸法に関わらず一定の値となり，一般的に言われる L 方向のヤング係数であった。ダメージゾーンのヤング係数は試験体寸法やダメージゾーンの長さに影響を受けなかった。樹種により異なる値を持ち，ミドルゾーンのヤング係数の 1.8% であった。全長のヤング係数はミドルゾーンとダメージゾーンのばねの足し合わせである。

【実大材の縦圧縮強さの評価法】

1. 余長効果は無視できるほど小さい
2. ダメージゾーンで破壊する場合もミドルゾーンで破壊する場合も破壊モードはキンクバンド破壊になり，縦圧縮強さは同じ値になる。
3. 寸法効果は節の影響により生じ，高さ（L 方向）による寸法効果パラメータ k_L を考慮する必要がある。本実験では k_L （スプルース：-0.08，スギ：-0.04，ヒノキ：-0.05）であった。断面による寸法効果は考慮しなくてよいと思われる。

【実大材の縦圧縮ヤング係数，剛性の評価法】

実大材の縦圧縮ヤング係数 $E_{L,f}$ ，剛性 K_f は次式で評価できる。

$$E_{L,f} = \frac{1}{\frac{2x}{0.018E_{L,m}} + \frac{H-2x}{E_{L,m}}} H \quad (8.1)$$

$$K_f = \frac{E_{L,f}A}{H} = \frac{A}{\frac{2x}{0.018E_{L,m}} + \frac{H-2x}{E_{L,m}}} \quad (8.2)$$

$$x = \left(\frac{\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A}}\right)}{\ln\left(1 - E(x)^{\frac{1}{A_s}}\right)} \right)^k x_s \text{ または } x = P_z \quad (8.3)$$

基準試験体の断面が 25mm 角，累積確率を 50% とした場合

$$x = \left(\frac{\ln \left(1 - 0.5^{\frac{1}{A}} \right)}{0.68} \right)^k x_s \quad (8.4)$$

ここで、 $E_{L,m}$ ：ミドルゾーンの縦ヤング係数、 H ：試験体高さ（L方向）、 x ：ダメージゾーンの長さ、 $E(x)$ ：累積確率、 A ：試験体断面積、 x_s ：基準試験体のダメージゾーン長さ、 A_s ：基準試験体の断面積、 k ：寸法効果パラメータ（加工精度による。本実験では丸鋸機械加工で0.42～0.62（日本）、3.1（スウェーデン）、卓上丸鋸手加工で3.5）、 P_z ：表面性状の最大高さ。基準試験体には断面が小さいほど x が加工精度に影響を受けにくくなることをふまえ、なるべく小断面のものを設定するとよいと思われる（本論文ではASTM143の断面25mm角とした）。また、 x を短くするためには、寸法効果パラメータが小さくなればよく、表面の凹凸があまり大きくならない機械加工が推奨される。提案した評価法は実験値と概ね一致した。

【実大材の塑性剛性について】

縦圧縮の塑性剛性は座屈しなければ0で横ばいになる。

なお、上記の評価法の適応範囲は

1. 断面 20×25mm～200×200mm、高さ（L）90～300mm
2. スギ、ヒノキ、スプルース
3. 寸法効果パラメータは丸鋸による切断時（機械加工、手加工）

である。特に加工方法が変わるとダメージゾーンの基準長さおよび寸法効果パラメータが変化するため注意が必要である。

【引きボルト式継手接合部への応用】

ダメージゾーンの評価法は様々な接合部へ応用できる。本報では次式の引きボルト式継手接合部の剛性 K の評価への応用例を示した。その評価法は既往の実験値を概ね評価出来た。

$$K = \frac{2}{\frac{1}{K_b} + \frac{2}{K_d}} \quad (8.5)$$

$$K_d = \frac{0.018 E_{L,m} A}{x} \quad (8.6)$$

$$x = \left(\frac{\ln \left(1 - 0.5^{\frac{1}{A}} \right)}{0.68} \right)^k x_s \quad (8.4)$$

ここで、 K_b ：ボルトの剛性、 K_d ：座金直下の面圧剛性（ダメージゾーンの剛性）で式 8.6。ただし、提案式で使用了角ノミを使った時の基準試験体のダメージゾーン長さ x_s および寸法効果パラメータ k は推測値である。今後、角ミノやフンデガーなどを使った加工の基準試験体のダメージゾーン長さ x_s および寸法効果パラメータ k を把握する必要がある。

第 6 章では支圧幅、余長、支圧位置、幅はぎ接着の有無をパラメータとした CLT の面内部分圧縮実験を行った。第 7 章では FEM 解析を行い、CLT の面内部分圧縮ヤング係数、圧縮強さの評価法を提案した。得られた知見を下記にまとめる。

【降伏応力】

支圧幅が小さくなると上昇した。余長が小さい（50mm 以下）範囲では減少した。幅はぎ接着のある試験体では幅はぎ接着のない試験体に比べ上昇する可能性がある。

【初期剛性、二次剛性】

支圧幅が小さくなると上昇した。余長が小さい（50mm 以下）範囲では減少した。

【余長効果とダメージゾーン】

縦圧縮される層で余長効果が見られた。製材の縦圧縮では余長効果が見慣れなかったが CLT の縦圧縮層で余長効果が見られた原因は、横圧縮される層と縦圧縮される層が接着されているため、縦圧縮される層の変形が横圧縮される層に影響を受けたためだと思われる。製材の部分縦圧縮とは異なるメカニズムであり、CLT の縦圧縮される層には余長効果があり、変形が加力板直下にあまり集中しない（ダメージゾーンの影響が薄い）と考えられる。

【最外層ラミナの有効断面】

最外層のラミナは面外に変形する。また、最外層ラミナが縦圧縮である場合、中間層に比べ余長効果が少ない。よって、有効断面積は加力される全断面よりも小さいと考えられる。

【CLT の面内部分圧縮ヤング係数の評価法】

CLT の面外部分圧縮ヤング係数 ($E_{b,CLT}$) は次式で表される。

$$E_{b,CLT} = \frac{n_0 E_{b,0} + n_{90} E_{b,90}}{n_{CLT}} \quad (8.5)$$

$$E_{b,0} = C_{x,0} E_0 \quad (8.6)$$

$$E_{b,90} = C_{x,90} E_{90} \quad (8.7)$$

$$C_{x,0} = 1 + \frac{0.2Z_0}{7x_p} \left(2 - e^{-\frac{7x_1}{Z_0}} - e^{-\frac{7x_2}{Z_0}} \right) \quad (8.8)$$

$$C_{x,90} = 1 + \frac{0.7Z_0}{7x_p} \left(2 - e^{-\frac{7x_1}{Z_0}} - e^{-\frac{7x_2}{Z_0}} \right) \quad (8.9)$$

ここで、 n_0 , n_{90} ：繊維方向または繊維直交方向圧縮ラミナの数（最外層のラミナの有効断面積は70%に低減する）、 n_{CLT} ：CLT 内のラミナ数、 $E_{b,0}$, $E_{b,90}$ ：繊維方向または繊維直交方向部分圧縮のヤング係数。

【CLT の面内部分圧縮降伏応力の評価法】

CLT の面外部分圧縮降伏応力 ($\sigma_{b,CLT}$) は次式で表される。

$$\sigma_{b,CLT} = \frac{n_0 \sigma_y + n_{90} \sigma_y \frac{E_{90}}{E_0}}{n_{CLT}} = \sigma_0 \sqrt{C_{x,0}} \frac{n_0 + \frac{E_{90}}{E_0} n_{90}}{n_{CLT}} \quad (8.10)$$

ここで、 σ_0 ：繊維方向圧縮の降伏応力。

なお、上記の評価法の適応範囲はスギ7層7プライおよび5層5プライ、3層3プライ、ラミナ幅30mmのCLTである。特に、ラミナ幅が小さくなると最外層の有効断面積が大きくなる可能性、ラミナ幅が大きくなると繊維方向圧縮ラミナの余長効果が小さくなる可能性がある。

8.2 今後の課題

【縦圧縮強さの寸法効果】

寸法効果は断面積よりも高さの影響が大きかったが、本研究では高さ方向のパラメータが実大材の寸法をカバーしていない。高さ方向に長い材が多く建築に使われる点を考えると、実大材（節あり）の縦圧縮強さの寸法効果は重要であり、今後の課題である。

【キンクバンド理論を用いた縦圧縮強さの評価】

本論文ではダメージゾーン、ミドルゾーンともに破壊モードがキンクバンド破壊であることを述べた。キンクバンド破壊は炭素繊維複合材料で多く研究され、せん断および割裂強度と繊維傾斜から理論的に導き出されることが知られる。木材でもこの考え方を用いて圧縮試験を行わずに圧縮強さが評価でき、無欠点小試験体の評価法は提案されている。しかし、節を含む製材や集成材、モーメントがかかる三角めり込みについては研究事例がなく今後検討する。

【ダメージゾーンの剛性評価法の接合部等への応用】

提案したダメージゾーンの剛性の評価法は木材が縦圧縮される様々な接合部に応用できると思われる。本論文では引きボルト式継手接合部の例を示したが、ほかの接合部についても今後検討する。また、ドリフトピンやボルトの面圧剛性にもダメージゾーンの評価法が応用できると思われ、今後検討する。

【縦圧縮のダメージゾーンのメカニズム解明】

本論文ではダメージゾーンの影響因子や評価法は提案したが、ダメージゾーンでどのような挙動が生じているかは解明出来ていないため課題が残る。

【CLT の評価法の適応範囲拡大】

本論文で提案した CLT の面内部分圧縮ヤング係数、降伏応力の評価法はスギ 7 層 7 プライおよび 5 層 5 プライ、3 層 3 プライ、ラミナ幅 30mm の CLT を対象にしたものである。他の構成やラミナ幅にも適用可能か確認する必要がある。

謝辞

実は本研究は 6, 7 章の CLT の面内部分圧縮からはじまっています。CLT の面内部分圧縮について研究する中で、縦圧縮に興味を持ち研究をはじめました。稲山正弘教授には博士課程に入学して慣れない時期に CLT のプロジェクトに入れていただき感謝しています。実験計画や試験体の発注先、考察、論文に至るまで悩んでいる時にはご指導ご鞭撻を賜りました。また、留学や講演会など私がやりたいことがある時には快く後押ししていただき深く感謝申し上げます。

青木謙治准教授には日頃から研究資金の調達や実験計画、試験体の発注先、考察、論文に至るまでご指導ご鞭撻を賜り感謝いたします。また、韓国木材学会へ同行させていただいたり、Pacific Timber Engineering Conference (PTEC)では気にかけていただいたり、様々な研究者の方を紹介していただいたり、優秀女子学生賞へ推薦いただいたり、就職活動や留学の相談に乗っていただいたり、と研究者として育てていただきました。深く感謝申し上げます。

落合陽助教には研究費の管理や些細な相談、論文指導、実験の遂行にあたり多くご教授いただき感謝いたします。また、落合先生とお昼に他愛もない会話をすることが良い息抜きであり、日々の楽しみでした。

Dr. Robert Jockwer, Assistant Professor at Chalmers University of Technology, には縦圧縮の実験計画、試験体の発注先、考察、論文に至るまでご指導ご鞭撻を賜り感謝いたします。突然メールを送った私を留学生として受け入れていただき、スウェーデンで慣れない私に研究に加えビザなどの私生活まで助けていただき感謝いたします。また、Research Institutes of Sweden や他大学の研究者と議論する場を設けていただいたり、International Wood Construction Conference (IHF) に同行させていただいたり、Robert のお陰で有意義な留学生活を送ることが出来ました。

実験の遂行にあたり東京電機大学の河原大助教、Sebastian Almfeldt, Research Engineer at Chalmers University of Technology, 大成建設株式会社の森田仁彦氏、東京電機大学の小山毅准教授、木質材料学研究室の皆様、東京電機大学建築学科の皆様には惜しみないご協力を頂きました。試験体の製材は網中木材株式会社の網中氏に、CLT は大成建設株式会社に提供いただきました。深く感謝申し上げます。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費(特別研究員 JP19J13253), 公益財団法人 PHOENIX 木材・合板博物館の研究助成, スウェーデン留学は東京大学・国際交流促進プログラムにより遂行されたものです。お礼申し上げます。

最後に, 博士課程への入学を応援してくれ日常生活を支えてくれた両親に, 研究生生活を応援してくれた夫に感謝の意を記し, 謝辞とさせていただきます。

2021 年 3 月 19 日

参考文献

1 章

1. 平成 22 年 10 月 1 日 法律第 36 号：公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律 (2010).
2. 前田建設.”木で建ててみよう”<https://kidetatetemiyou.com/sodateru/KUMIKO.html>, 2021 年 1 月 27 日アクセス.
3. 杉野貴彦, 田尾玄秀, 河原大, 青木謙治, 稲山正弘, 藤田和彦, 室星啓和：つなぎ梁両端を嵌合接合としたラフター方式トラスに関する実験的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集 2017 (中国), 22254, 507-508 (2017) .
4. S. P. Timoshenko : History of Strength of Materials. McGraw-Hill, Chap. 1-5 (1953) .
5. R. Baumann : Die bisherigen ergebnisse der holzprüfungen in der Materialprüfungsanstalt an der Technischen hochschule Stuttgart. J. Springer (1922) .
6. K. Ryska : Einige Fragen aus dem Gebiete der technischen Prüfungsmethoden für Hölzer. Int, Kongr. Materialprüfung (1932) .
7. A. Frey-Wyssling : Nachtrag zum Beitrag von P. A. Roelofsen. *Holz als Roh-und Werkstoff* 14, 210 (1956) .
8. 関谷文彦 :木材強弱論.賢文館, 3-140 (1939) .
9. 北原覚一, 蕪木自輔, 村木正男 :木材の圧縮に関する研究, 東京大学農学部演習林報告.47, 1-64 (1954) .
10. 澤田稔 : 木材の変形挙動. 材料, 32 (359), 838-847 (1983) .
11. 日本規格協会：日本工業規格 JIS Z 2101:2009 木材の試験方法(2009) .
12. ASTM : D143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber (2014) .
13. ASTM : D198-15 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes (2015) .
14. ISO : ISO 13910:2014 Timber structures — Strength graded timber — Test methods for structural properties (2014) .
15. ISO : ISO 8375:2017 Timber structures — Glued laminated timber — Test methods for determination of physical and mechanical properties (2017) .
16. (公財) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル. 13-14 (2013) .
17. 渡辺治人：木材理学論. 農林出版株式会社, 456-487 (1978) .

18. H. Tiemann : Wood Technology. 237-243, *Sir Isaac Pitman & Sons Ltd* (1951) .
19. 植村武, 龍学明 : 岩石のキンクバンド. 地質学雑誌, **93**(9), 681-699 (1987) .
20. 松尾剛, 影山和郎 : 熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズムに関する一考察. 日本複合材料学会誌, **40**(3), 98-105 (2014) .
21. 塩谷正俊 : 炭素繊維・炭素繊維複合材料の未来. S&T 出版 (2018) .
22. B. Budiansky : Micromechanics. *Computers and Structures*, **16** (1), 3-12 (1983).
23. B. Budiansky, N. A. Fleck : Compressive failure of fiber composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **41** (1), 183-211 (1993).
24. B. Budiansky, N. A. Fleck, J. C. Amazigo : On kink-band propagation in fiber composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **46** (9), 1637-1653 (1998).
25. J. S. Poulsen, P. M. Moran, C. F. Shih, E. Byskov : Kink band initiation and band broadening in clear wood under compressive loading. *Mechanics of Materials*, **25** (1), 67-77 (1997) .
26. L. Benabou : Predictions of compressive strength and kink band orientation for wood species. *Mechanics of Materials*, **42**, 335-343 (2010) .
27. 中井毅尚, 中尾哲也, 浜武正年 : 島根大学総合理工学部紀要, 実大材および小試験体を用いた木材の縦圧縮試験. シリーズ A 34, 181 - 189 (2000) .
28. J. Xavier, A. M. P. de Jesus, J. J. L. Morais, J. M. T. Pinto : Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain. *Construction and Building Materials*, **26**(1), 207-215 (2012) . <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.012>
29. C. Bach, R. Baumann : Elastizität und Festigkeit. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1924) .
30. 浅野猪久夫 : 接着積層型木材梁の曲げに関する弾塑性的研究. 名大農学部演習林報告, **4**, 24 (1965) .
31. 澤田稔 : 木材の強度特性に関する研究主として, その木材梁への適用. 林業試験場研究報告, **108**, 115-224 (1959) .
32. 松本昂 : 木材の動的弾性率特に撓み振動によるヤング率と対数減衰率とに関する研究. 九大農演報, **36**, 1-86 (1962) .
33. 北原覚一 : 木材物理. 森北出版, 113-118 (1966) .
34. M. Brabec, J. Tippner, V. Sebera, J. Milch, P. Rademacher : Standard and non-standard deformation behaviour of European beech and Norway spruce during compression . *Holzforschung*, **69**(9), 1107-1116 (2015) <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0231>.
35. 日本木材学会, 木材強度・木質構造研究会 : ティンバーメカニクス. 海青社, 221-229 (2015).

36. Leijten A. J. M., Franke S., Quenneville P., Gupta R. M. ASCE: Bearing Strength Capacity of Continuous Supported Timber Beams: Unified Approach for Test Methods and Structural Design Codes. *Journal of Structural Engineering*, 138(2), (2012) .
37. van der Put T.A.C.M. : Derivation of the bearing strength perpendicular to the grain of locally loaded timber blocks. *Holz Roh Werkst*, 66, 409–417(2008).
38. 野口昌宏, 中村昇, 飯島泰男: 縦部分圧縮の支圧剛性の算定法の提案と強度特性, 日本建築学会構造系論文集, **76**(662), 803-809 (2011) .
39. R Brandner, G Schickhofer: Properties of CLT in Compression Perpendicular to Grain. *INTER-International Network on Timber Engineering Research*, Bath, UK, 47-12-5 (2014).
40. E Serrano, B Enquist: Compression Strength Perpendicular to Grain in Cross-Laminated Timber (CLT). *11th World Conference on Timber Engineering 2010*, Riva del Garda, Italy, 2010, pp.153-154.
41. 井道裕史, 長尾博文, 三浦祥子, 宮武敦: スギを用いて製造したクロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) のめり込み強度性能, 木材学会誌 , **60**(1), 16-22 (2014).
42. 張雲翔, 小林研治, 安村基, ダベンス・リュク: 引きボルトを用いた CLT 接合部の強度性能. 木材工業, **73**(5), 180-186 (2018).

2 章

1. 中井毅尚, 中尾哲也, 浜武正年: 島根大学総合理工学部紀要, 実大材および小試験体を用いた木材の縦圧縮試験. シリーズ A 34, 181 - 189 (2000)
2. Fryer B K, Foster R M, Ramage M H. (2018) Size effect of large scale timber columns. World Conference on Timber Engineering (WCTE), Seoul, Korea.
3. 日本木材学会, 木材強度・木質構造研究会: ティンバーメカニクス. 海青社, 221-229 (2015) .
4. 野口昌宏, 中村昇, 飯島泰男: 縦部分圧縮の支圧剛性の算定法の提案と強度特性, 日本建築学会構造系論文集, **76**(662), 803-809 (2011) .
5. Blaber, J., Adair, B. & Antoniou, A.: Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Exp Mech* 55, 1105–1122 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
6. 村田功二: 画像相関法によるひずみ分布解析の利用法. 木材工業, **60** (3), 110-113(2005)
7. ASTM : D143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber (2014) .
8. 丹下健: 年輪幅－容積密度関係を用いたスギ造林木の材積成長量の重量成長量への変換の試み. 森林立地学会誌, 森林立地 **51** (2), 137-141 (2009) .
9. 祖父江信夫, 水上清志: 実大構造用木材のヤング係数予測因子としての縦共振固有振動数. 材料, **45** (473), 121-125 (1993) .

10. Leijten A. J. M., Franke S., Quenneville P., Gupta R M. ASCE: Bearing Strength Capacity of Continuous Supported Timber Beams: Unified Approach for Test Methods and Structural Design Codes. *Journal of Structural Engineering*, 138(2), (2012).
11. van der Put T.A.C.M. : Derivation of the bearing strength perpendicular to the grain of locally loaded timber blocks. *Holz Roh Werkst*, 66, 409–417(2008).
12. 中山翔太：木材の応力緩和の特性把握のための実験的研究. 東京大学大学院農学生命科学研究科, 修士論文 (2021)
13. Weibull W.: A statistical theory of the strengths of materials, *Ingeniörsvetenskapskademiens*, Hanlingar Nr 151, Stockholm (1939).
14. (公財) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル. 13-14 (2013) .
15. Matlab Online Help, [online] Available: <http://www.mathworks.com>.
16. 村田誠四郎：改訂 4 版木材工業ハンドブック. “木材の性質”, 森林総合研究所編, 丸善出版, 東京(2004).

3 章

1. Hendarto, B., Shayan, E., Ozarska, B. et al.: Analysis of roughness of a sanded wood surface. *Int J Adv Manuf Technol* 28, 775–780 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2414-y>
2. Murat Kilic, Salim Hiziroglu, Erol Burdurlu: Effect of machining on surface roughness of wood. *Building and Environment*, 41(8), 1074-1078(2006). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.008>.
3. 藤原裕子：木材加工面の粗さ評価に関する既往の研究. 木材工業, 59(1), 8-12 (2004) .
4. 山川僚太, 佐藤利昭：接触面圧で変化する表面性状を考慮した木材と鋼材の摩擦特性. 日本建築学会構造系論文集, 84(765), 1433-1442 (2019) .

4 章

1. 中井毅尚, 中尾哲也, 浜武正年：島根大学総合理工学部紀要, 実大材および小試験体を用いた木材の縦圧縮試験. シリーズ A 34, 181 - 189 (2000)
2. Fryer B K, Foster R M, Ramage M H. (2018) Size effect of large scale timber columns. World Conference on Timber Engineering (WCTE), Seoul, Korea.
3. M. Flaig, T. Schmidt, H. J. Blass: Compressive strength and stiffness of end grain contact joints in glulam and CLT. INTER 2019, Tacoma USA , 52-12-5(2019).
4. (公財) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル. 13-14 (2013) .
5. Weibull W.: A statistical theory of the strengths of materials, *Ingeniörsvetenskapskademiens*, Hanlingar Nr 151, Stockholm (1939).

5 章

1. Gustafsson, P-J., Jockwer, R., Serrano, E., & Steiger, R.: A strongest link model applied to fracture propagating along grain. In R. Görlacher (Ed.), Proceedings International Network on Timber Engineering Research - Meeting 48 Timber Scientific Publishing, Karlsruhe, Germany (2015) .
2. Weibull W (1939): A statistical theory of the strength of materials. Proceedings no 151, Royal Swedish Institute for Engineering Research, Sweden.
3. “2018 年 枠組壁工法建築物 構造計算指針”,一般社団法人 日本ツーバイフォー建築協会編, 丸善出版,東京,2018,pp.281.
4. 田尾玄秀, 佐々木賢太, 河原大, 稲山正弘, 藤田和彦, 大野英克, 亀山雄揮, 大塚紘平: 平角製材及び集成材の引張継手に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集 , **24**(57),643-648 (2018).

6 章

1. “2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル”,CLT 設計施工マニュアル編集委員会編, (公財)日本住宅・木材技術センター,東京,2016,pp.177-197.
2. R Brandner, G Schickhofer: Properties of CLT in Compression Perpendicular to Grain. INTER-International Network on Timber Engineering Research, Bath, UK, 47-12-5 (2014).
3. E Serrano, B Enquist: Compression Strength Perpendicular to Grain in Cross-Laminated Timber (CLT). 11th World Conference on Timber Engineering 2010, Riva del Garda, Italy, 2010, pp.153-154.
4. 井道裕史, 長尾博文, 三浦祥子, 宮武敦:スギを用いて製造したクロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) のめり込み強度性能, 木材学会誌 , **60**(1),16-22 (2014).
5. 張雲翔, 小林研治, 安村基, ダベンス・リュク:引きボルトを用いた CLT 接合部の強度性能, 木材工業, **73**(5),180-186 (2018).
6. JISZ2101:木材の試験方法.日本規格協会 (2017) .
7. “構造用木材の強度試験マニュアル(第 4 版)”, (公財)日本住宅・木材技術センター,東京 ,2013,pp.13-76.
8. 北守顕久, 森拓郎, 片岡靖男, 小松幸平:木材の部分横圧縮における余長効果の影響 支持条件における違いの検討, 日本建築学会構造系論文集, **74**(642), 1477-1485 (2009).
9. 野口昌宏, 中村昇, 飯島泰男:縦部分圧縮の支圧剛性の算定法の提案と強度特性. 日本建築学会構造系論文集, **76** (662), 803-809 (2011).
10. 野口弘行, 小林幹大, 橋爪靖彦:許容めり込み応力度に関する検討と提案 木材の繊維に直角方向の圧縮に関する研究. 日本建築学会構造系論文集, **64**(518), 65-70 (1999).
11. 村田誠四郎:改訂 4 版木材工業ハンドブック. “木材の性質”, 森林総合研究所編, 丸善出版, 東京, 2004, p.135.

7 章

1. “木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法”, 日本建築学会, 東京, 2006.
2. 稲山正弘:木材のめり込み理論とその応用. 東京大学大学院, 博士論文 (1991)

3. 村田誠四郎：改訂 4 版木材工業ハンドブック．“木材の性質”，森林総合研究所編，丸善出版，東京，2004.
4. MSC Marc User's Manual Vol. A: Theory and User Information. Newport Beach: MSC Software Corporationm, 2017.
5. 井道裕史，長尾博文，三浦祥子，宮武敦：スギを用いて製造したクロス・ラミネイティド・ティンバー（CLT）のめり込み強度性能，木材学会誌 ， **60**(1),16-22 (2014).
6. 鈴木圭：CLT 構造における引きボルト接合部の力学特性と耐力算定に関する研究．東京大学大学院農学生命科学研究科，博士論文（2017）

付録 A 関連論文

【査読付き論文】

1. 戸塚真里奈 青木謙治 稲山正弘 森田仁彦：クロス・ラミネイティド・ティンバー（CLT）の部分圧縮性能（第一報）,木材学会誌, **66**(1), 8-15 (2020)：第 6 章
2. Marina Totsuka, Kenji Aoki, Masahiro Inayama and Robert Jockwer: Experimental Study of Compression parallel to grain, Journal of wood science (査読中)：第 2 章
3. Marina Totsuka, Kenji Aoki, Masahiro Inayama: Prediction of bearing strength and stiffness of cross-laminated timber under in-plane loading, European Journal of Wood and Wood Products (査読中)：第 7 章

【総説】

1. 戸塚真里奈：木材の縦圧縮特性，木材工業，**76**（1），2-7（2021）。

【国際学会】

1. Marina Totsuka, Kenji Aoki and Masahiro Inayama : Experimental Study of Partial Compressive Strength to Lateral Face of CLT, Annual Meeting of The Korean Society of Wood Science & Technology, P-13, 2019 年
2. Marina Totsuka, Kenji Aoki and Masahiro Inayama : Partial Compressive Properties in the direction to the Lateral Face in CLT, Proceedings of 5th Pacific Timber Engineering Conference (PTEC 2019), Wood products and components, 2019 年
3. Marina Totsuka, Kenji Aoki, Masahiro Inayama and Robert Jockwer : Compressive Behaviour Parallel to Grain of Japanese Cedar, Proceedings of World Conference on Timber Engineering proceedings, 2021 年（採用決定済）

【国内学会】

1. 戸塚真里奈 落合陽 河原大 青木謙治 稲山正弘 森田仁彦: CLT の部分圧縮性能に関する実験的研究, 第 69 回日本木材学会大会 (北海道), 要旨集, H41-09-0900, 2019 年 3 月
2. 戸塚真里奈 河原大 落合陽 青木謙治 稲山正弘 森田仁彦: CLT 側面における部分圧縮特性の解析的検討, 2019 年度日本建築学会大会 (金沢), 大会梗概集, 2019 年 9 月
3. 戸塚真里奈 青木謙治 稲山正弘 Robert Jockwer: 繊維方向圧縮下における集成材の力学的性状, 第 70 回日本木材学会大会 (鳥取), 要旨集, D16-04-1430, 2020 年 3 月
4. 戸塚真里奈 青木謙治 稲山正弘: 木材の繊維方向部分圧縮特性, 2020 年度日本建築学会大会 (千葉), 大会梗概集, 2020 年 (新型コロナの影響で大会中止、発表したと見なす)
5. 戸塚真里奈 青木謙治 稲山正弘 河原大: 縦圧縮される集成材の低剛性部 (ダメージゾーン) の評価, 第 71 回日本木材学会大会 (東京), 要旨集, D1-04-03, 2021 年 3 月

付録 B 各章のデータ

2 章

試験結果

Series	Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress	modulus of elasticity		
	kg/m ³	mm		$f_{c,0}$	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
				N/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	
3-3	1	394	3.5	9	26.1	12.5	1.14
	2	383	7.6	4	22.5	8.61	2.07
	3	475	4.7	6	30.8	8.61	1.69
	4	410	4.7	6	24.3	6.70	1.11
	5	430	3.1	10	38.6	7.94	2.52
	6	375	7.5	4	23.7	10.3	1.74
Series	Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress	modulus of elasticity		
	kg/m ³	mm		$f_{c,0}$	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
				N/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	
3-6	1	409	3.4	9	39.5	8.22	5.71
	2	382	5.0	6	24.2	8.30	3.04
	3	466	2.6	12	47.1	14.8	9.14
	4	375	7.0	4	23.5	8.93	3.40
	5	386	4.0	8	29.9	8.92	4.65
	6	381	6.3	5	26.3	6.33	5.75
Series	Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress	modulus of elasticity		
	kg/m ³	mm		$f_{c,0}$	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
				N/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	
3-9	1	399	5.0	6	25	9.16	3.54
	2	367	7.3	4	19	5.64	2.64
	3	476	3.0	10	42	11.0	5.53
	4	390	2.8	11	30	9.63	3.17
	5	390	3.6	9	35	10.0	4.50
	6	342	5.8	5	32	8.11	3.83

Series	Density	Width of	Number of	Max. stress	modulus of elasticity		
		annual rings	annual rings	$f_{c,0}$	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
	kg/m ³	mm		N/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	
6-3	1	399	4.9	12	34	9.22	4.06
	2	390	4.6	13	25	8.54	12.0
	3	500	3.5	17	40	3.86	0.929
	4	420	4.3	14	33	13.4	0.567
	5	396	3.6	16	38	9.93	0.543
	6	362	5.1	12	29	9.59	1.07

Series	Density	Width of	Number of	Max. stress	modulus of elasticity		
		annual rings	annual rings	$f_{c,0}$	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
	kg/m ³	mm		N/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	
6-6	1	410	4.7	13	29	4.79	0.910
	2	398	7.0	8	22	10.1	3.29
	3	442	4.9	12	39	8.67	1.76
	4	394	4.4	13	28	6.31	1.19
	5	380	3.7	16	35	8.23	1.29
	6	379	6.7	9	27	9.42	6.41

Series	Density	Width of	Number of	Max. stress	modulus of elasticity		
		annual rings	annual rings	$f_{c,0}$	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
	kg/m ³	mm		N/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	
6-9	1	427	4.9	12	31	8.79	2.38
	2	364	6.8	9	19	4.40	2.79
	3	463	3.9	15	33	13.5	2.18
	4	410	3.6	16	25	9.60	1.50
	5	417	3.4	18	39	11.1	2.32
	6	384	4.9	12	28	6.79	5.32

Series	Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity		
	kg/m ³	mm		N/mm ²	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
9-3	1	426	5.0	18	27.4	13.1	0.574
	2	388	5.8	15	20.0	3.05	0.464
	3	485	3.0	30	33.5	22.8	0.773
	4	402	4.5	20	26.4	7.32	0.470
	5	421	4.4	20	33.8	5.05	0.697
	6	387	5.3	17	26.0	8.95	0.724

Series	Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity		
	kg/m ³	mm		N/mm ²	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
9-6	1	431	3.7	24	26.9	5.19	0.988
	2	368	5.0	18	21.7	4.27	0.759
	3	445	4.4	20	37.3	9.69	1.12
	4	404	4.3	21	25.5	14.4	0.921
	5	400	6.0	15	33.4	9.15	1.13
	6	376	5.5	17	25.5	6.76	0.835

Series	Density	Width of	Number of	Max. stress	modulus of elasticity		
		annual rings	annual rings	$f_{c,0}$	Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	
	kg/m ³	mm		N/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	
9-9	1	431	5.0	18	26.7	6.54	1.02
	2	368	6.6	14	20.4	2.89	0.919
	3	445	3.5	26	32.2	6.09	1.41
	4	404	4.6	19	26.2	10.2	1.54
	5	400	3.8	24	32.7	5.67	1.37
	6	376	5.3	17	27.0	7.47	1.23

Series	Density		Width of	Number of	Max. stress	modulus of elasticity
			annual rings	annual rings	$f_{c,0}$	Full $E_{L,f}$
	kg/m ³	mm			N/mm ²	kN/mm ²
3-9p	1	433	4.0	8	24.5	1.98
	2	379	5.0	6	21.8	1.74
	3	495	2.7	11	27.4	-
	4	407	7.5	4	24.2	3.58
	5	413	4.0	8	37.2	5.17
	6	372	8.3	4	26.1	4.72
Series	Density		Width of	Number of	Max. stress	modulus of elasticity
			annual rings	annual rings	$f_{c,0}$	Full $E_{L,f}$
	kg/m ³	mm			N/mm ²	kN/mm ²
6-9p	1	423	4.9	12	28.2	1.21
	2	367	6.6	9	21.4	1.43
	3	488	3.3	18	37.4	1.56
	4	389	6.5	9	25.5	1.27
	5	385	5.4	11	34.4	2.55
	6	381	5.7	11	27.9	1.94
Series	Density		Width of	Number of	Max. stress	modulus of elasticity
			annual rings	annual rings	$f_{c,0}$	Full $E_{L,f}$
	kg/m ³	mm			N/mm ²	kN/mm ²
9-9p	1	407	5.0	18	26.1	1.33
	2	371	6.6	14	21.0	0.953
	3	469	4.7	19	35.1	1.71
	4	412	4.4	20	26.2	0.797
	5	408	3.9	23	31.4	1.68
	6	370	6.2	15	24.5	1.13

Series		Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity Full $E_{L,f}$
		kg/m ³	mm		N/mm ²	kN/mm ²
3-9pp	1	417	6.3	5	23.0	2.64
	2	390	7.3	4	21.7	2.69
	3	487	4.0	8	31.4	5.03
	4	321	4.4	7	27.8	4.10
	5	414	6.3	5	32.8	3.81
	6	377	9.0	3	25.6	4.12

Series		Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity Full $E_{L,f}$
		kg/m ³	mm		N/mm ²	kN/mm ²
6-9pp	1	424	5.0	12	24.6	1.27
	2	373	9.8	6	21.1	2.82
	3	480	4.8	13	30.4	1.77
	4	400	7.3	8	26.2	4.14
	5	397	5.7	11	31.0	1.95
	6	376	5.4	11	24.9	2.93

Series		Density	Width of annual rings	Number of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity Full $E_{L,f}$
		kg/m ³	mm		N/mm ²	kN/mm ²
9-9pp	1	412	5.0	18	27.5	1.35
	2	382	6.6	14	21.1	0.840
	3	474	3.5	26	33.0	1.94
	4	400	6.6	14	25.0	1.28
	5	398	4.3	21	31.1	1.24
	6	376	5.4	17	26.8	0.518

3 章

試驗結果

Series	Density	Width of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	Length of		modulus of elasticity				
				damage zone		Full $E_{L,f}$	Middle $E_{L,m}$	Damage zone $E_{L,d}$		
				Top	Bottom			Top	Bottom	
				kg/m ³	mm			N/mm ²	mm	mm
90×25×10	1	424	4.6	46.4	0.44	0.14	5727	9703	146.6	115.7
	2	356	6.7	31.6	0.68	0.51	3166	5994	131.3	234.8
	3	480	2.9	57.5	0.43	0.27	7129	12037	544.0	647.5
	4	398	5.0	38.9	0.47	0.35	4327	21221	209.8	39.9
	5	393	3.4	44.7	0.47	0.65	4697	24741	122.1	109.7
	6	357	4.0	40.9	0.20	0.23	4630	13555	106.4	150.0

Series		Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)							
		Before test				at 0.7kN			
		Top		Bot		Top		Bot	
		P_a	P_z	P_a	P_z	P_a	P_z	P_a	P_z
90×25×10	1	0.039	0.30	0.037	0.23	0.034	0.28	0.026	0.19
	2	0.065	0.50	0.047	0.24	0.063	0.46	0.033	0.20
	3	0.040	0.46	0.015	0.16	0.041	0.38	0.013	0.13
	4	0.041	0.34	0.11	0.46	0.050	0.36	0.11	0.55
	5	0.063	0.45	0.031	0.26	0.063	0.40	0.032	0.30
	6	0.045	0.37	0.050	0.39	0.041	0.34	0.051	0.40

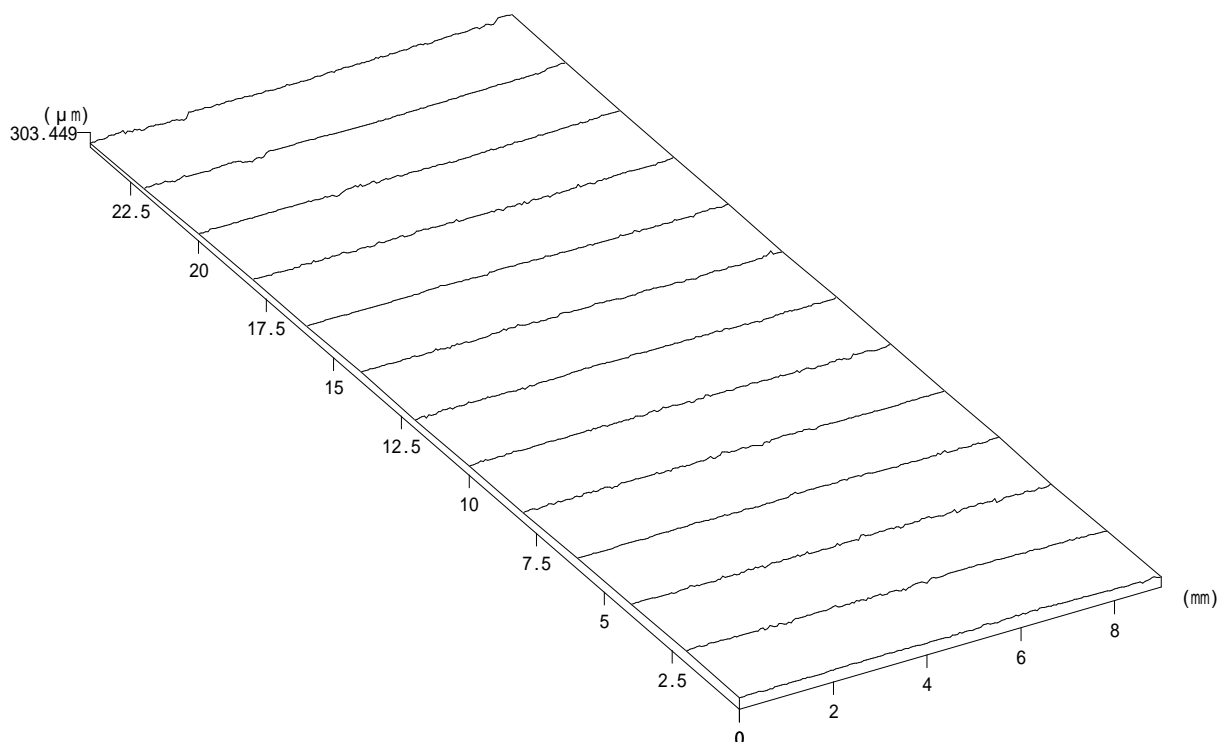
Series		Density	Width of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	Length of damage zone		modulus of elasticity			
					Top	Bottom	Full $E_{L,f}$	Middle $E_{L,m}$	Damage zone $E_{L,d}$	
									Top	Bottom
		kg/m ³	mm	N/mm ²	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
D90×25×10	1	519	1.8	62.3	0.53	0.56	8501	15143	234.0	374.0
	2	379	4.5	36.6	0.39	0.19	3361	8140	66.6	182.5
	3	503	2.8	60.3	0.44	0.59	9364	11991	816.3	313.0
	4	402	3.3	37.7	0.43	0.63	4399	25721	160.6	65.4
	5	390	3.3	44.4	0.60	0.30	5939	13255	235.9	83.9
	6	358	3.2	43.7	0.23	0.72	7355	11120	107.2	186.9

Series		Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)							
		Before test				at 0.7kN			
		Top		Bot		Top		Bot	
		P_a	P_z	P_a	P_z	P_a	P_z	P_a	P_z
D90×25×10	1	0.031	0.40	0.015	0.23	0.040	0.38	0.027	0.29
	2	0.079	0.71	0.021	0.42	0.091	0.78	0.035	0.29
	3	0.077	0.58	0.027	0.45	0.069	0.48	0.039	0.44
	4	0.090	0.64	0.10	0.78	0.072	0.58	0.10	0.64
	5	0.038	0.38	0.082	0.55	0.038	0.42	0.081	0.54
	6	0.081	0.49	0.051	0.51	0.082	0.52	0.050	0.37

Series	Density	Width of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	Length of		modulus of elasticity				
				damage zone		Full $E_{L,f}$	Middle $E_{L,m}$	Damage zone $E_{L,d}$		
				Top	Bottom			Top	Bottom	
kg/m ³	mm	N/mm ²	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
20×25×10	1	428	4.8	46.8	0.16	0.16	1886	7383	1797	1510
	2	361	6.7	30.6	0.5	0.4	803	1280	198	228
	3	490	2.9	56.7	0.3	0.4	1971	6654	636	785
	4	409	5.1	39.4	0.6	0.4	923	4304	89	1273
	5	385	3.5	44.7	0.5	0.3	1179	5255	700	526
	6	367	4.1	42.6	0.5	0.4	1689	6676	782	735

Series		Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)							
		Before test				at 0.7kN			
		Top		Bot		Top		Bot	
		P_a	P_z	P_a	P_z	P_a	P_z	P_a	P_z
20×25×10	1	0.068	0.30	0.083	0.34	0.068	0.30	0.075	0.33
	2	0.14	0.69	0.13	0.52	0.14	0.74	0.13	0.55
	3	0.031	0.33	0.044	0.45	0.033	0.39	0.053	0.47
	4	0.12	0.81	0.052	0.31	0.12	0.77	0.044	0.26
	5	0.052	0.43	0.045	0.29	0.054	0.50	0.042	0.24
	6	0.026	0.32	0.040	0.21	0.032	0.30	0.041	0.22

90×25×10-1 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1top-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1657.15 μm

測定開始点Y : 4269.6 μm

測定終了点X : 10657.2 μm

測定終了点Y : 19730.5 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31674.4 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

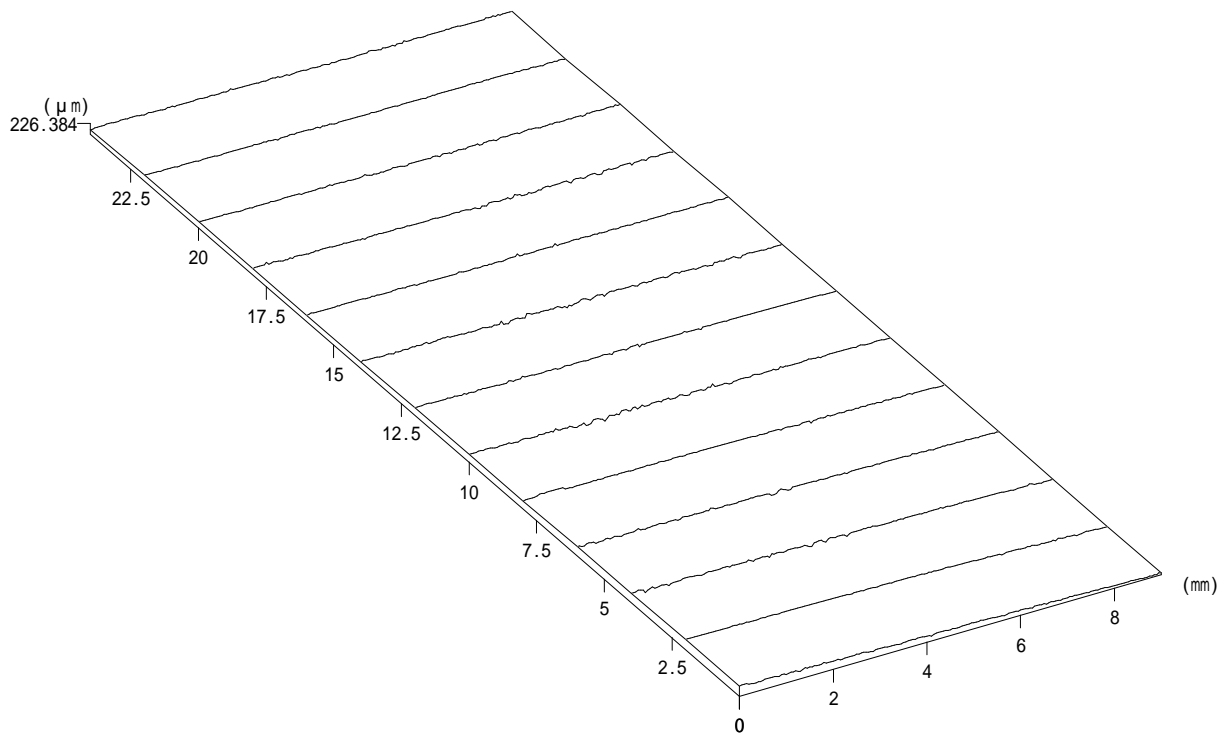
最大値 : 303.449 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 188.075 μm

平面度 : 303.449 μm

90×25×10-1 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1bot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1124.73 μm

測定開始点Y : -10969.6 μm

測定終了点X : 10124.8 μm

測定終了点Y : 13030.5 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31546.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

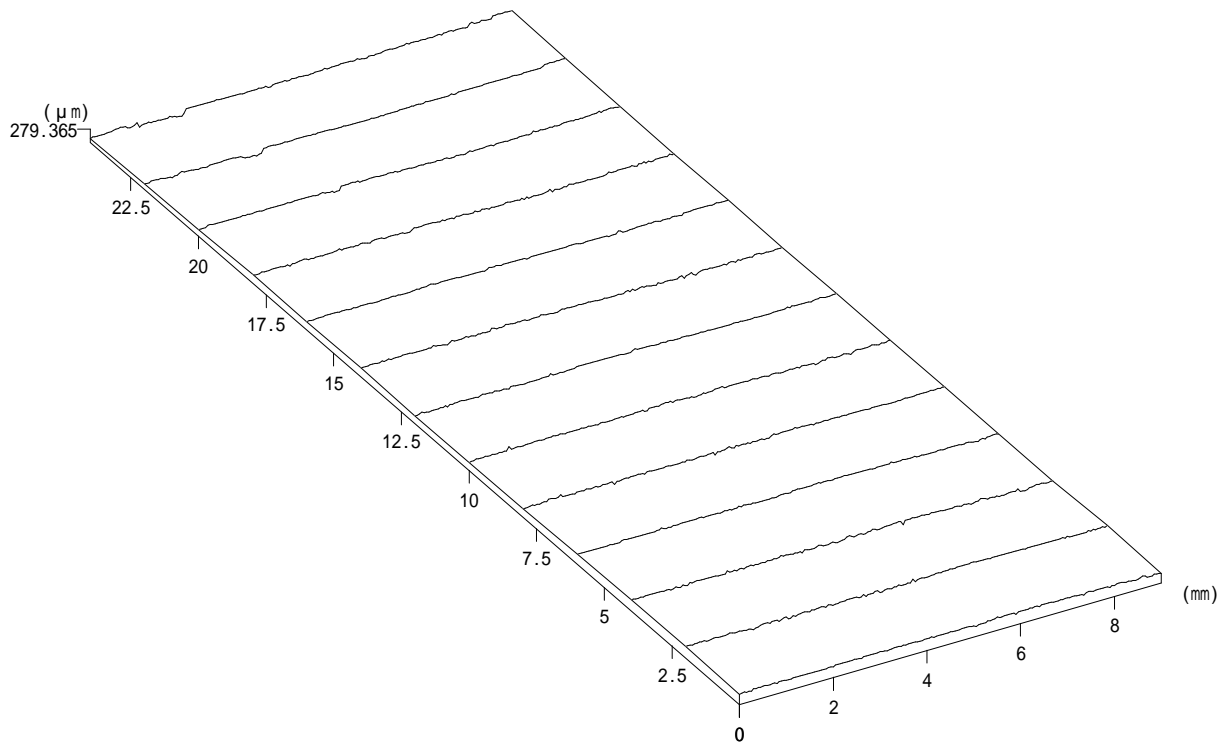
最大値 : 226.384 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 102.386 μm

平面度 : 226.384 μm

90×25×10-1 0.7kN, Top



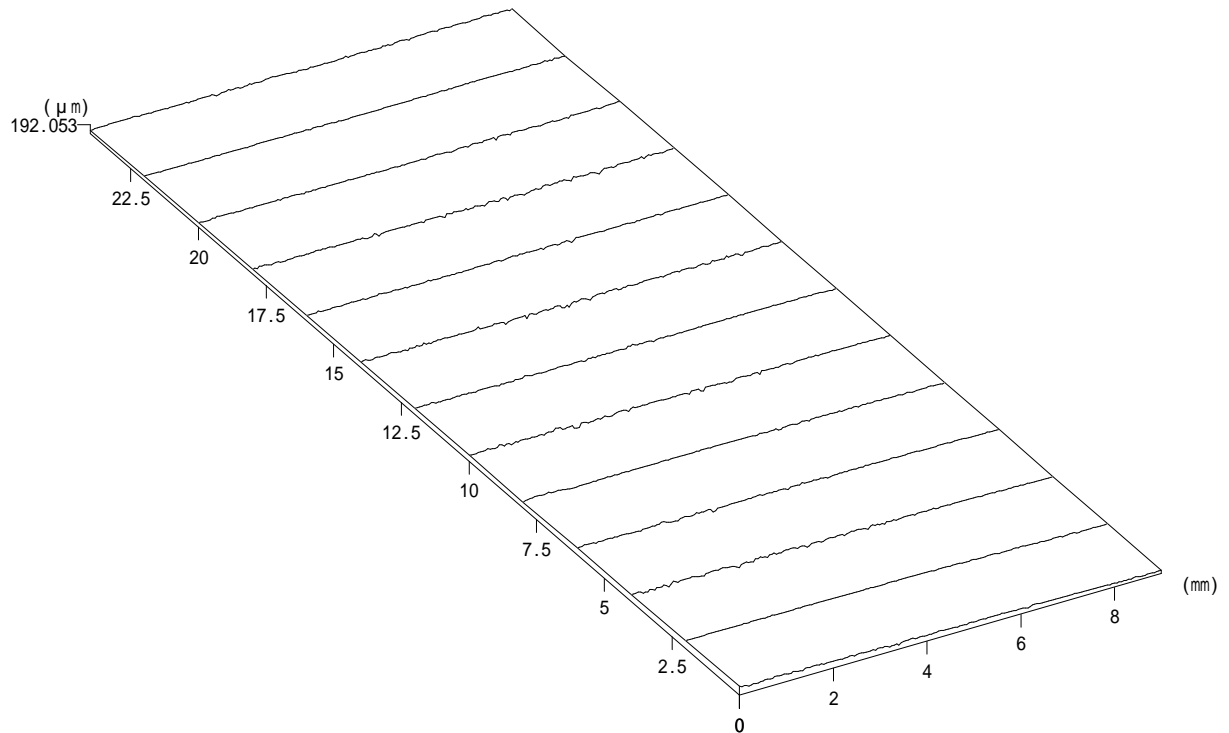
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\c1top-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点 X :	154.251 μm	測定開始点 Y :	4185.74 μm
測定終了点 X :	9154.31 μm	測定終了点 Y :	28185.8 μm
測定範囲 X :	9000.06 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-31680.1 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	279.365 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	182.05 μm	平面度 :	279.365 μm

90×25×10-1 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\c1bot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 887.254 μm

測定開始点Y : 773.004 μm

測定終了点X : 9887.28 μm

測定終了点Y : 24773.1 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31578.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

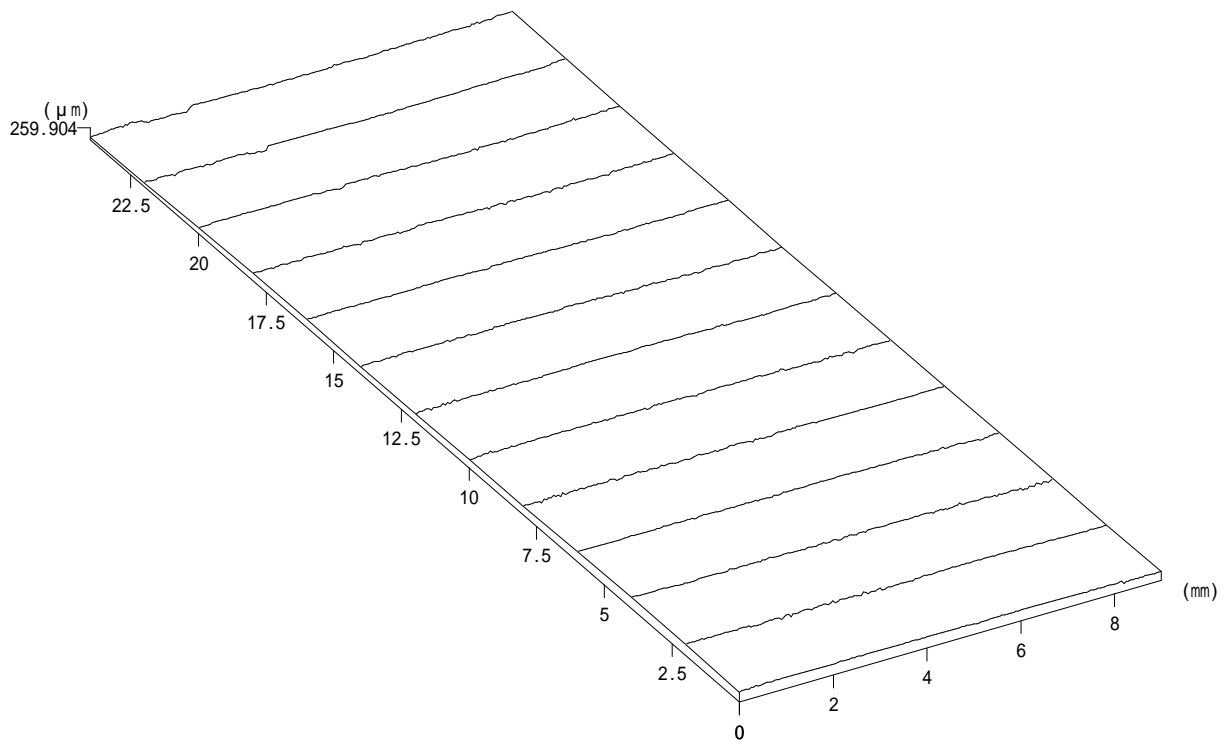
最大値 : 192.053 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 103.525 μm

平面度 : 192.053 μm

90×25×10-1 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c1top-4.nh3

データ名 :

測定開始点X : 4372.23 μm

測定開始点Y : -17179.3 μm

測定終了点X : 13372.3 μm

測定終了点Y : 6820.69 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31659.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

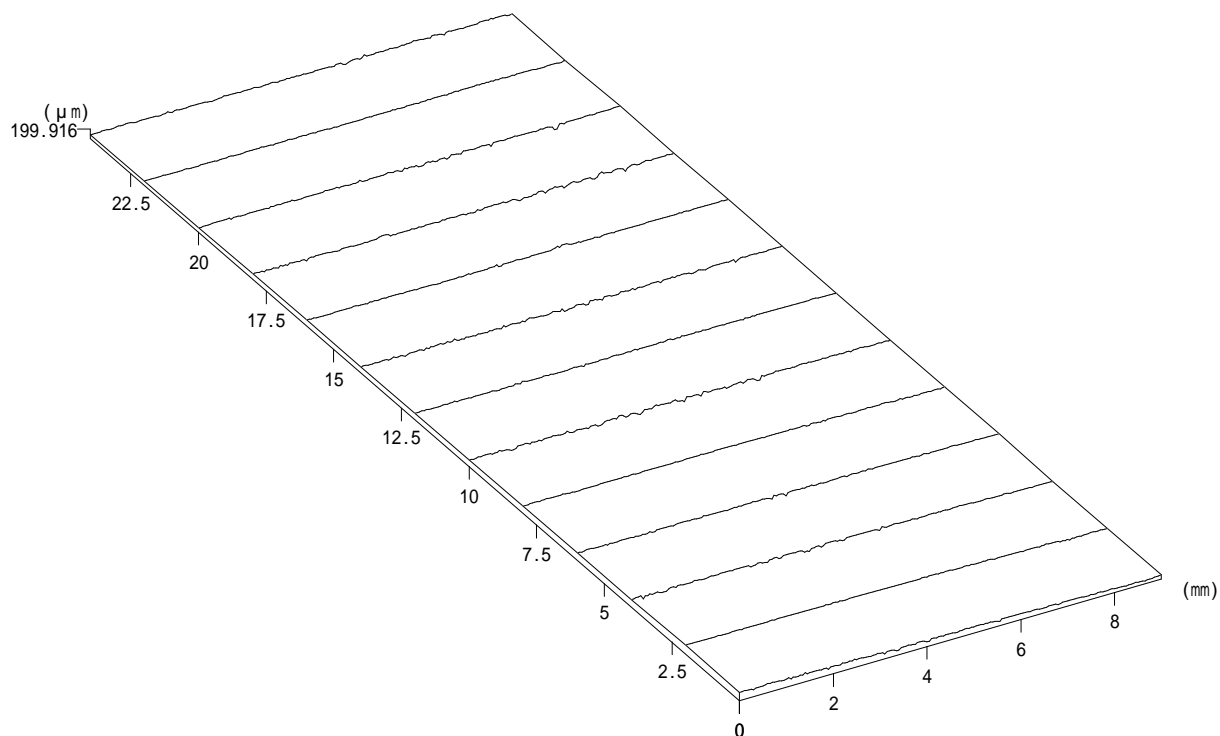
最大値 : 259.904 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 156.264 μm

平面度 : 259.904 μm

90×25×10-1 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c1bot-4.nh3

データ名 :

測定開始点X : 4082.19 μm

測定開始点Y : -19204 μm

測定終了点X : 13082.2 μm

測定終了点Y : 4796.1 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31615.9 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

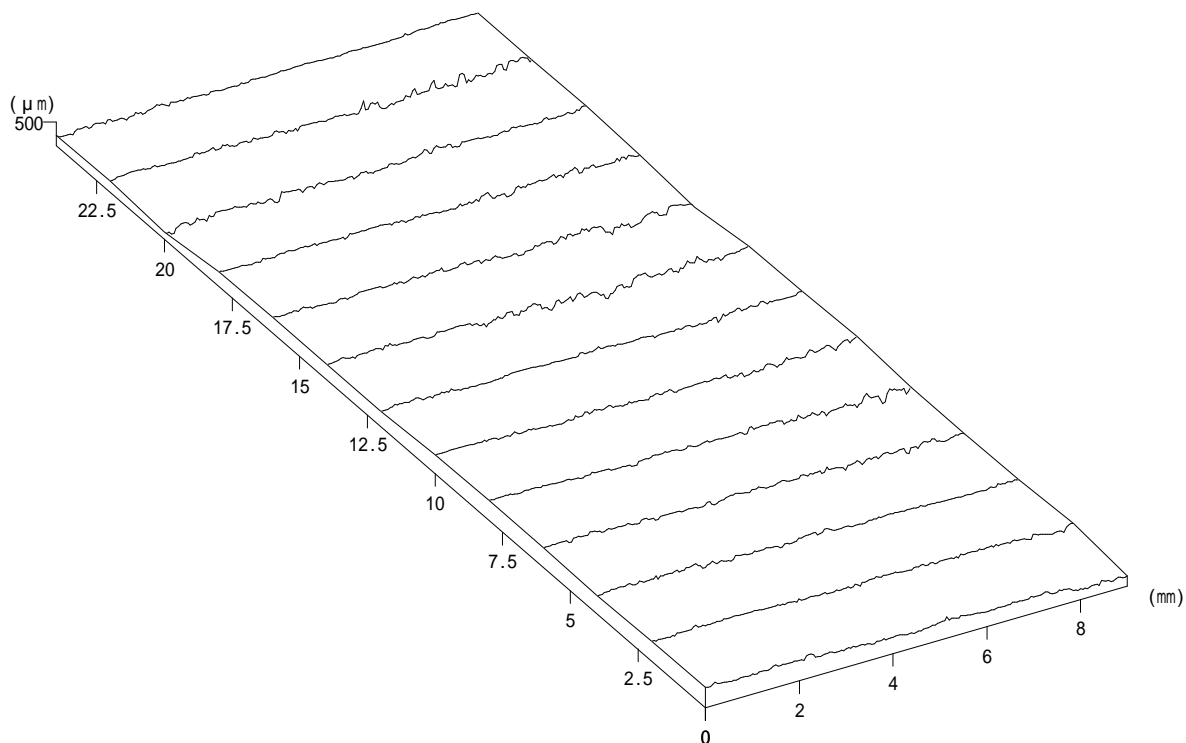
最大値 : 199.916 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 113.432 μm

平面度 : 199.916 μm

90×25×10-2 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2top-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1020.8 μm

測定開始点Y : -11467.2 μm

測定終了点X : 10020.8 μm

測定終了点Y : 12532.9 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32902 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

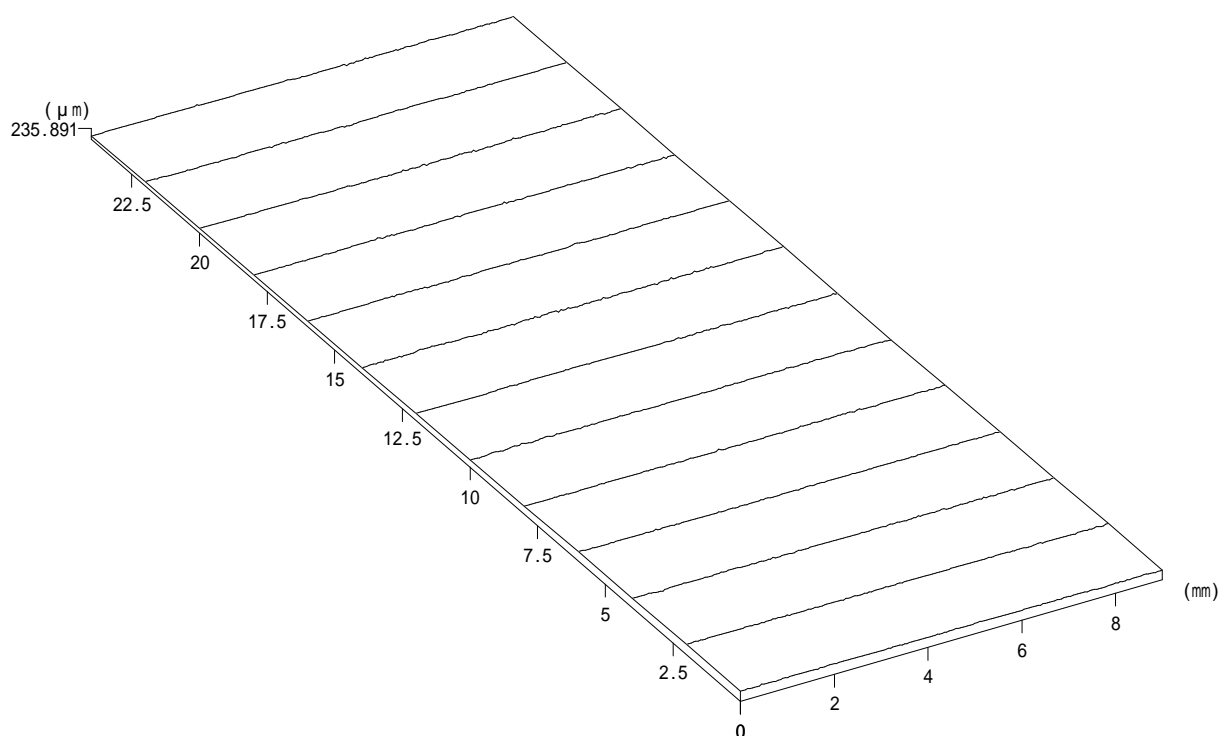
最大値 : 500.327 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 287.12 μm

平面度 : 500.327 μm

90×25×10-2 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2bot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1585.54 μm

測定開始点Y : -10148.8 μm

測定終了点X : 10585.5 μm

測定終了点Y : 13851.3 μm

測定範囲X : 9000.01 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32627 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

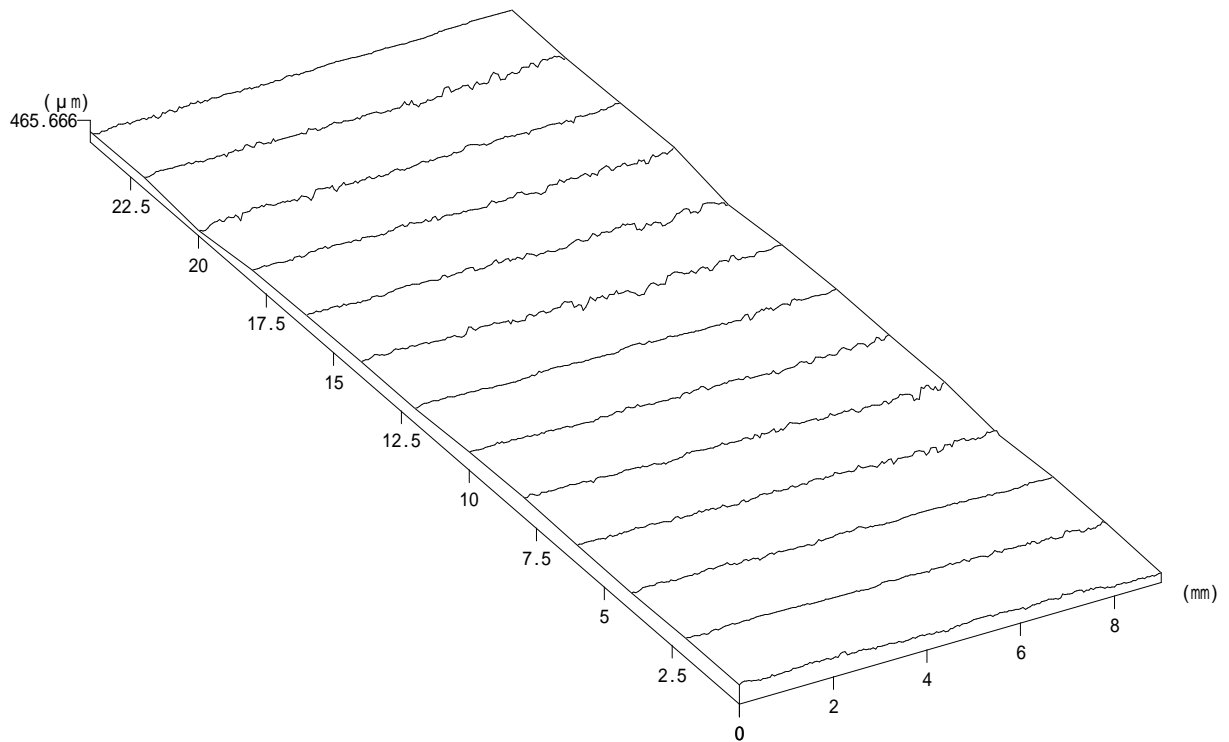
最大値 : 235.891 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 134.217 μm

平面度 : 235.891 μm

90×25×10-2 0.7kN Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\c2top-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 798.554 μm

測定開始点Y : 297.195 μm

測定終了点X : 9798.6 μm

測定終了点Y : 24297.2 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32908 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

最大値 : 465.666 μm

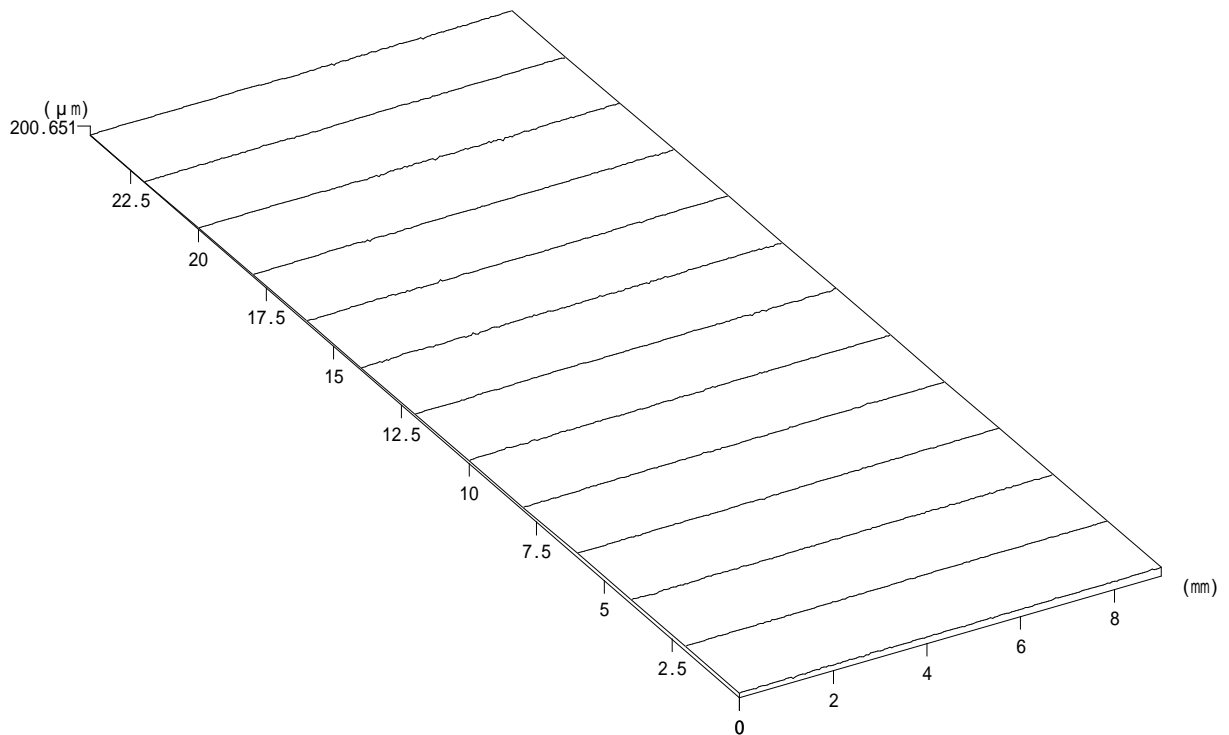
最小値 : 0 μm

平均値 : 261.5 μm

平面度 : 465.666 μm

***** 三次元形状表示 *****

90×25×10-2 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2bot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 470.542 μm

測定開始点Y : -3470.88 μm

測定終了点X : 9470.61 μm

測定終了点Y : 20529.2 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32646.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

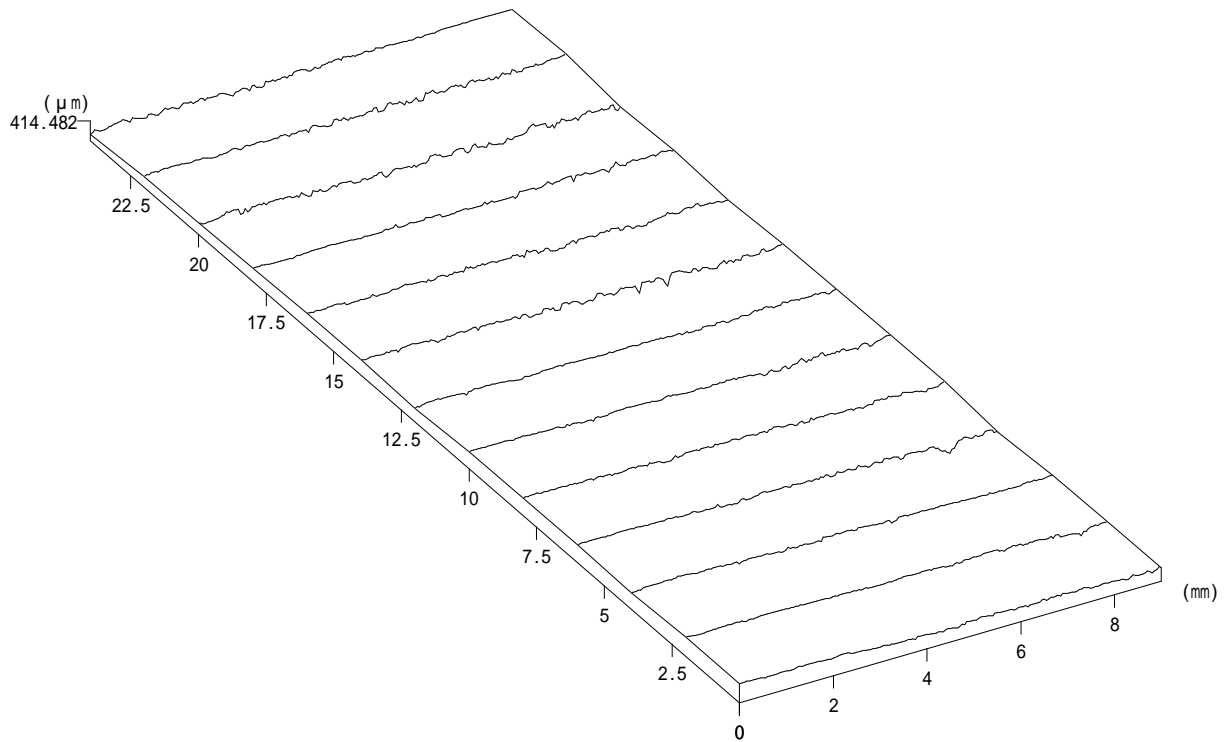
最大値 : 200.651 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 93.7976 μm

平面度 : 200.651 μm

90×25×10-2 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c2top-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 4286.42 μm

測定開始点Y : -18644.7 μm

測定終了点X : 13286.5 μm

測定終了点Y : 5355.43 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32931.6 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

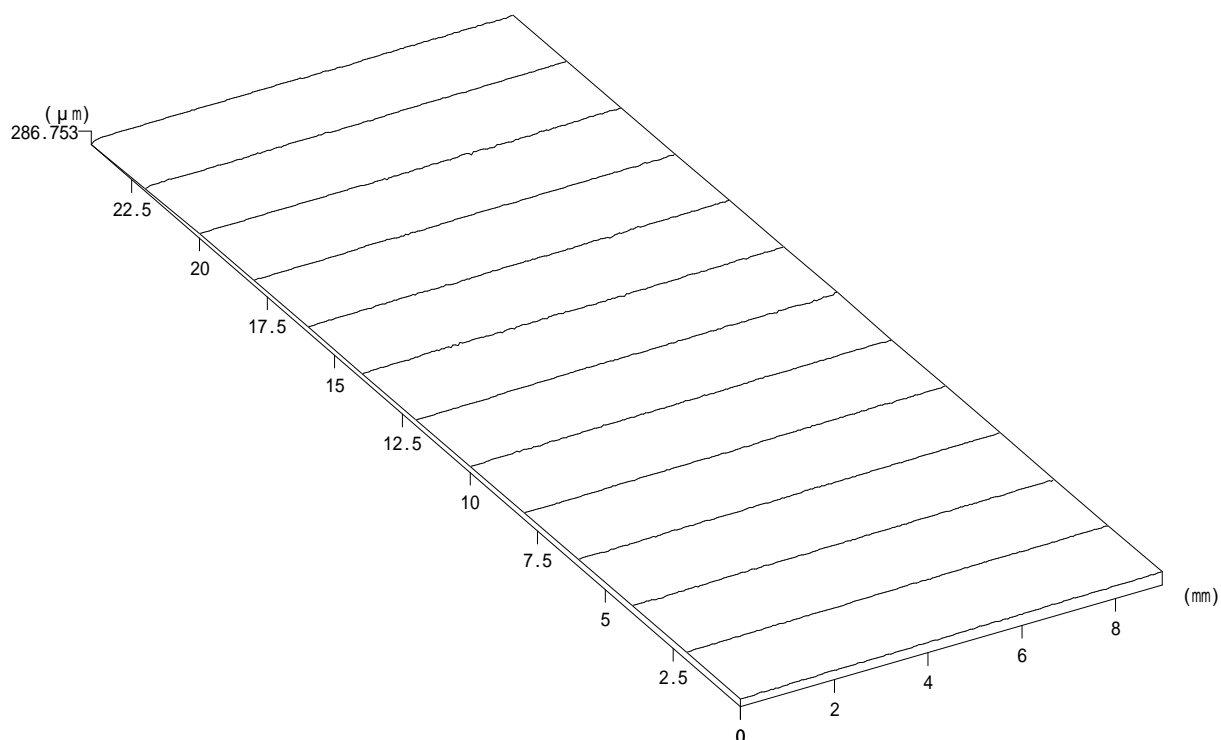
最大値 : 414.482 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 261.292 μm

平面度 : 414.482 μm

90×25×10-2 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c2bot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 4521.85 μm

測定開始点Y : 20681 μm

測定終了点X : 13521.9 μm

測定終了点Y : 3319.06 μm

測定範囲X : 9000.01 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32800.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

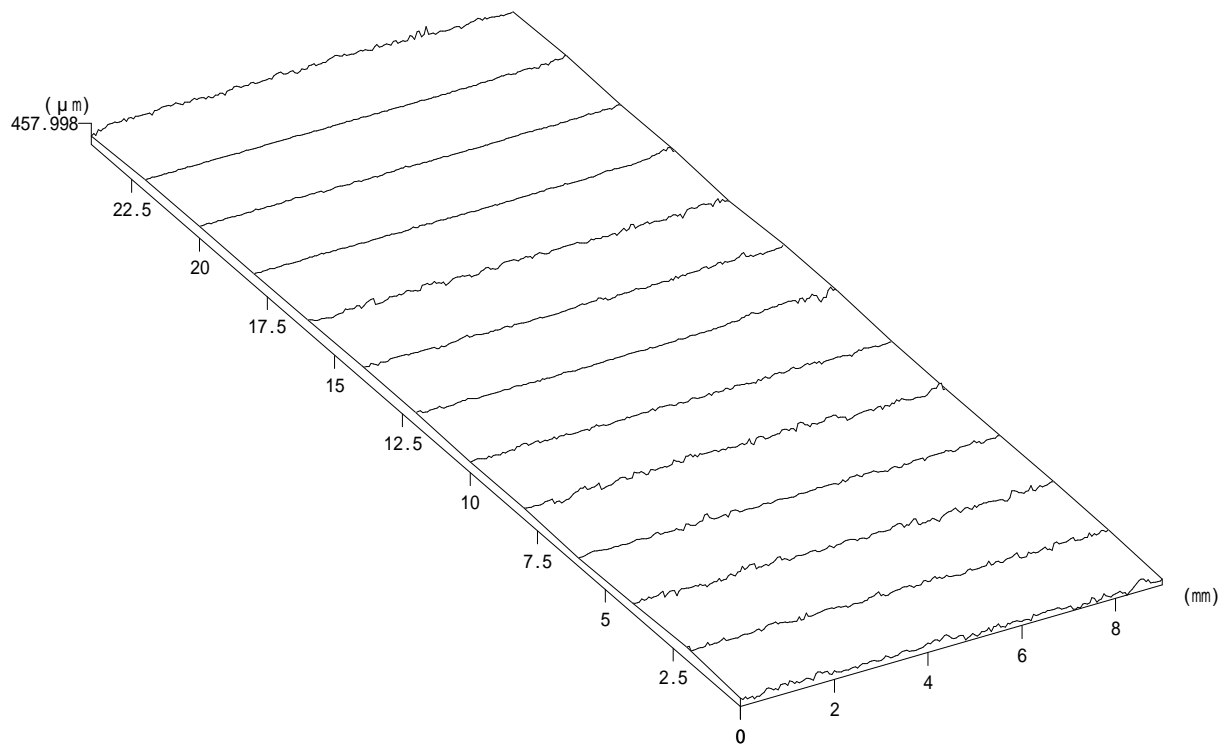
最大値 : 286.753 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 175.153 μm

平面度 : 286.753 μm

90×25×10-3 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3top-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1136.41 μm

測定開始点Y : -12882.2 μm

測定終了点X : 10136.5 μm

測定終了点Y : 11117.8 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33329.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

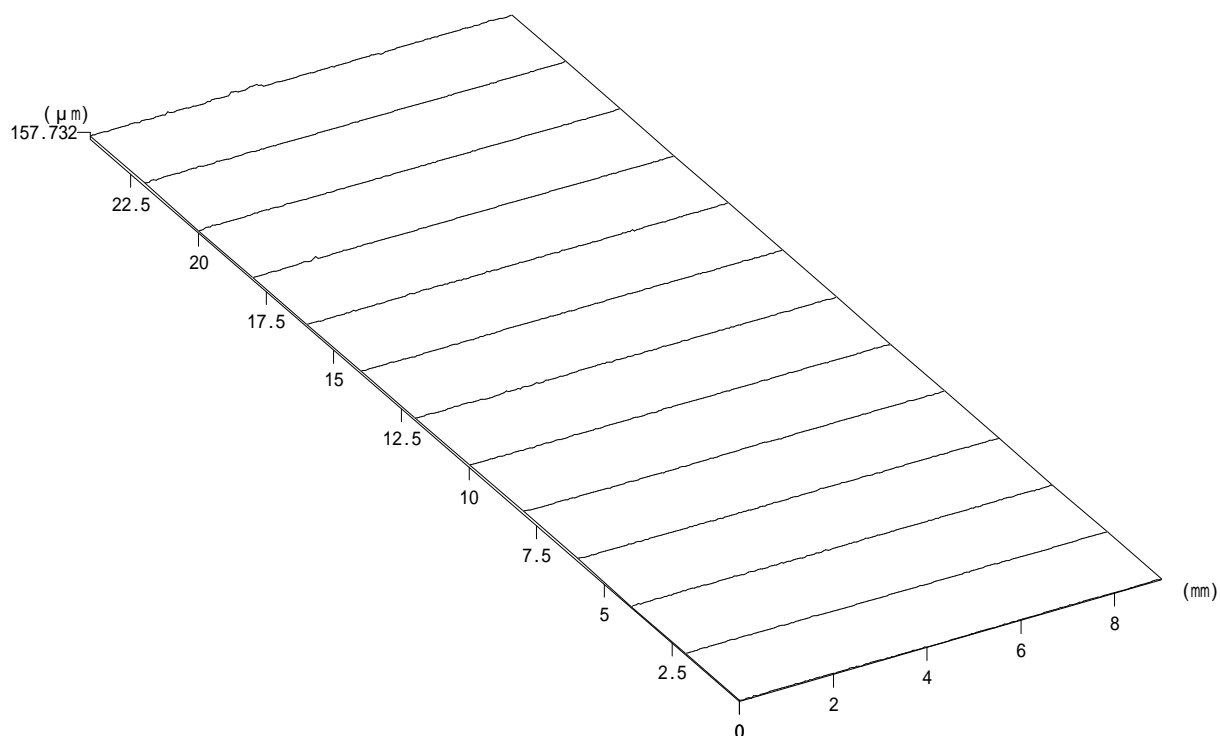
最大値 : 457.998 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 220.502 μm

平面度 : 457.998 μm

90×25×10-3 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3bot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1376.51 μm

測定開始点Y : -12680.3 μm

測定終了点X : 10376.6 μm

測定終了点Y : 11319.7 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33044 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

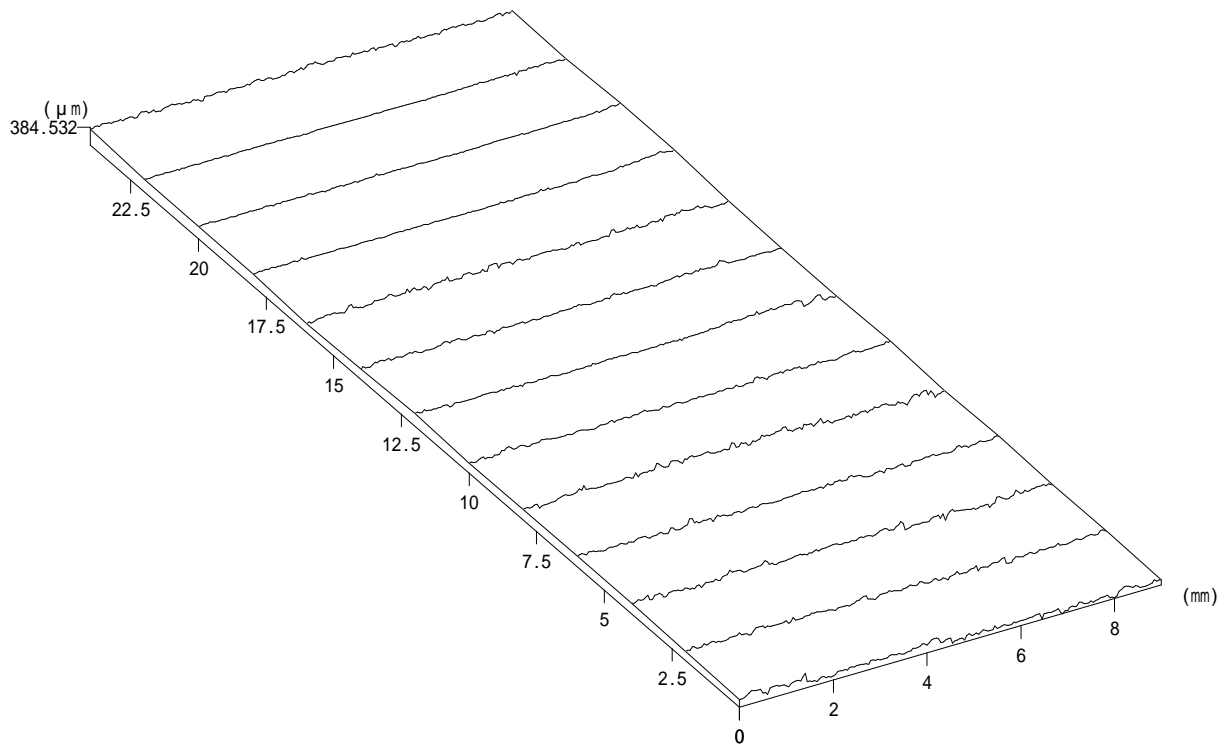
最大値 : 157.732 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 46.0664 μm

平面度 : 157.732 μm

90×25×10-3 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3top-1.nh3

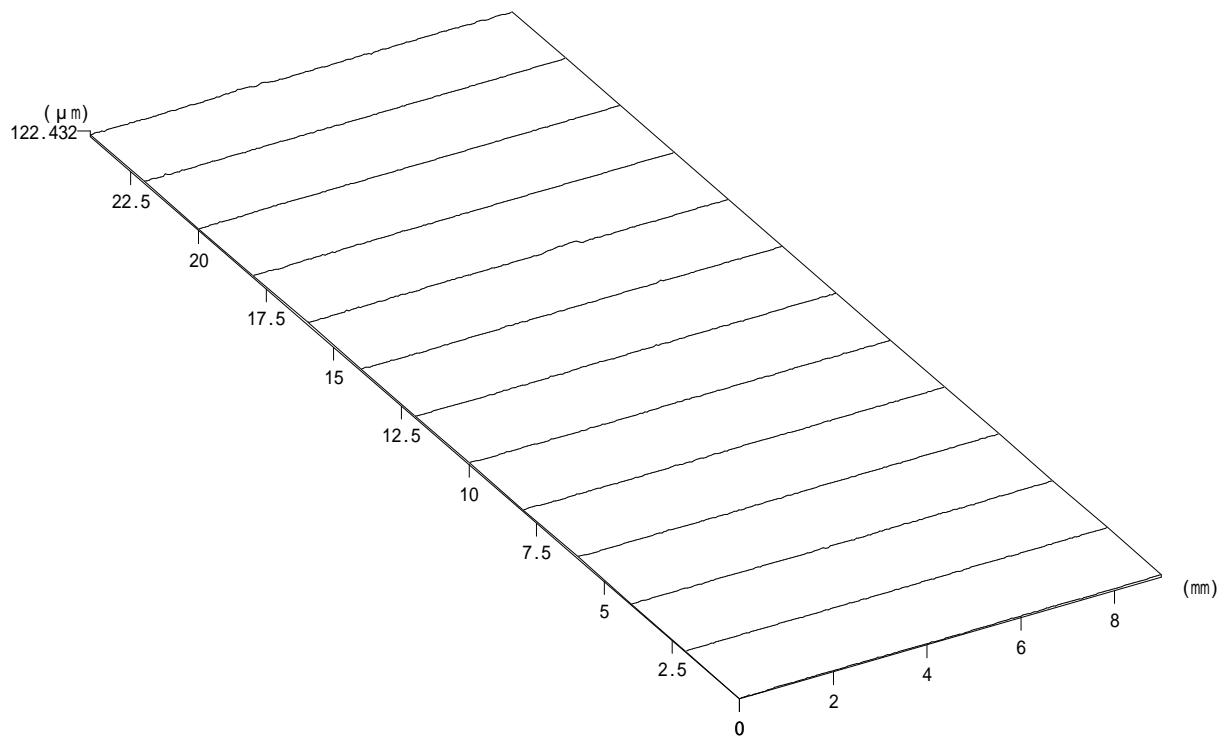
データ名 : 1

測定開始点 X :	-166.471 μm	測定開始点 Y :	-6491.49 μm
測定終了点 X :	8833.58 μm	測定終了点 Y :	17508.6 μm
測定範囲 X :	9000.05 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-33350.8 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	384.532 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	219.56 μm	平面度 :	384.532 μm

***** 三次元形状表示 *****

90×25×10-3 0.7kN,Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3bot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -1618.75 μm

測定開始点Y : -9330.2 μm

測定終了点X : 7381.27 μm

測定終了点Y : 14669.9 μm

測定範囲X : 9000.02 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33093.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

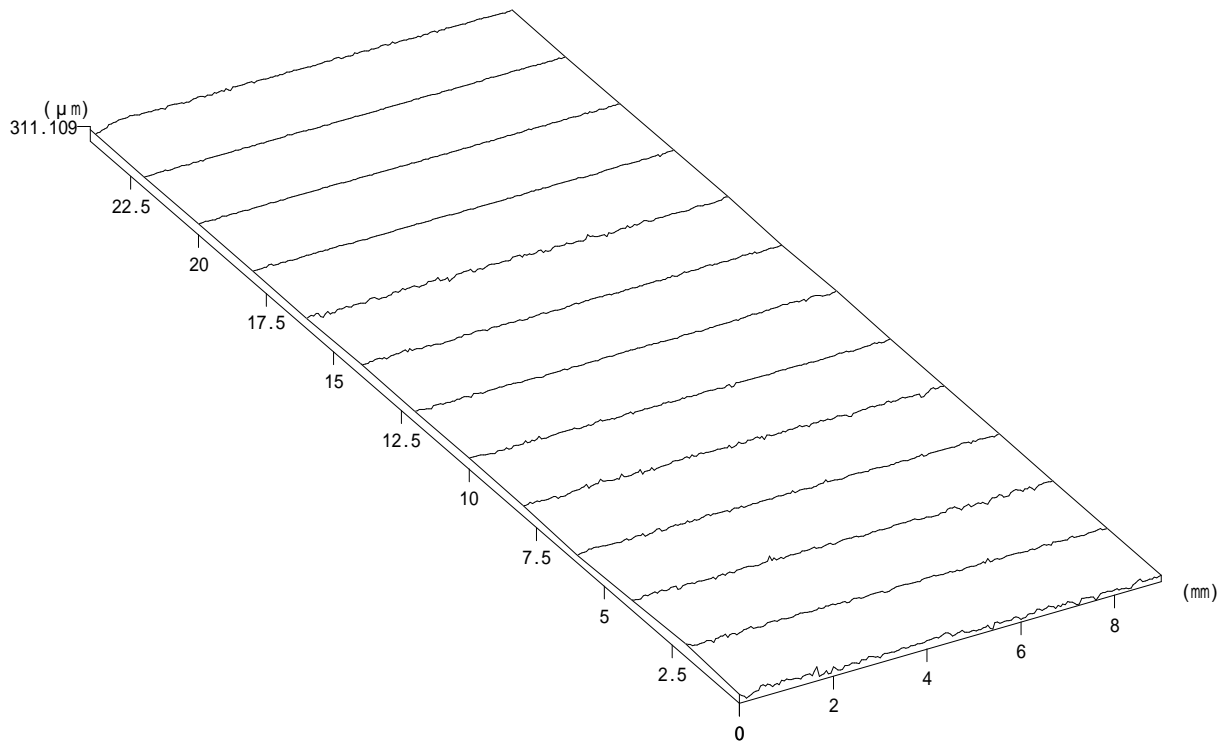
最大値 : 122.432 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 47.1846 μm

平面度 : 122.432 μm

90×25×10-3 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3\data\三次元データ\totsuka\4\c3top-4.nh3

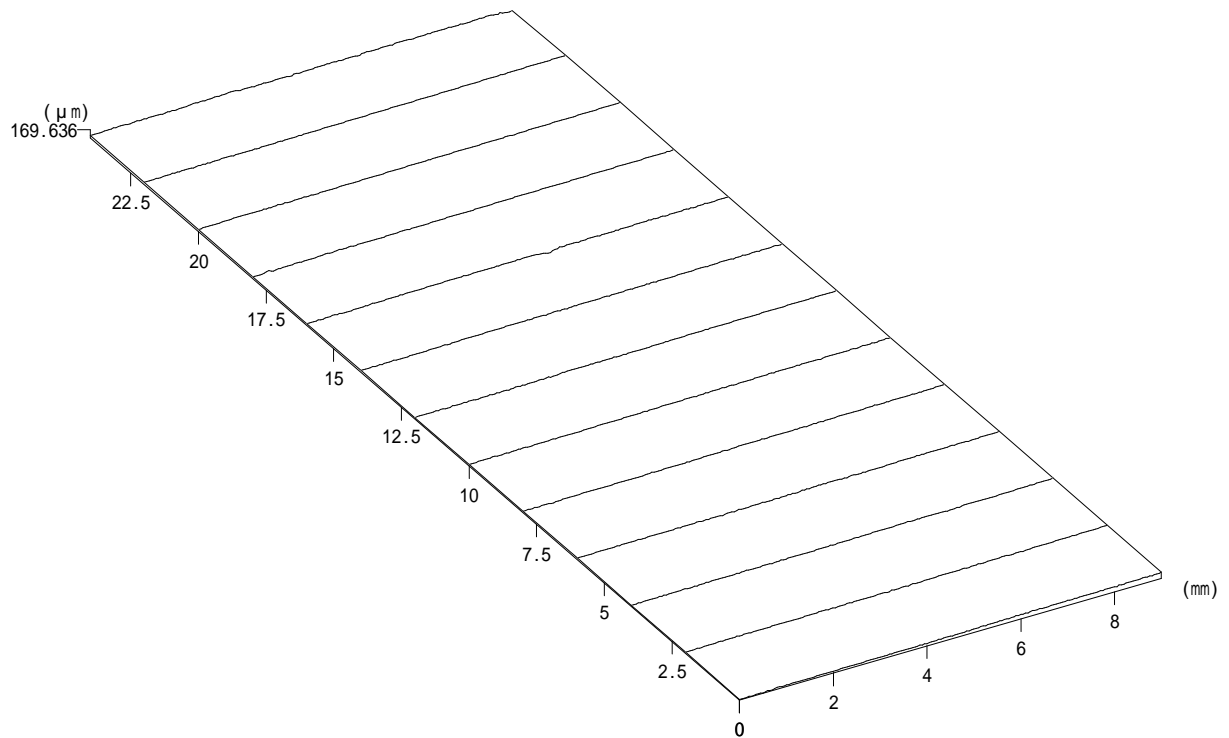
データ名 : 4

測定開始点 X :	4557.84 μm	測定開始点 Y :	-22435 μm
測定終了点 X :	13557.9 μm	測定終了点 Y :	1565.05 μm
測定範囲 X :	9000.04 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-33375.6 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	311.109 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	196.208 μm	平面度 :	311.109 μm

***** 三次元形状表示 *****

90×25×10-3 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c3bot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 4276.71 μm

測定開始点Y : -24088.6 μm

測定終了点X : 13276.8 μm

測定終了点Y : -88.542 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33236.3 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

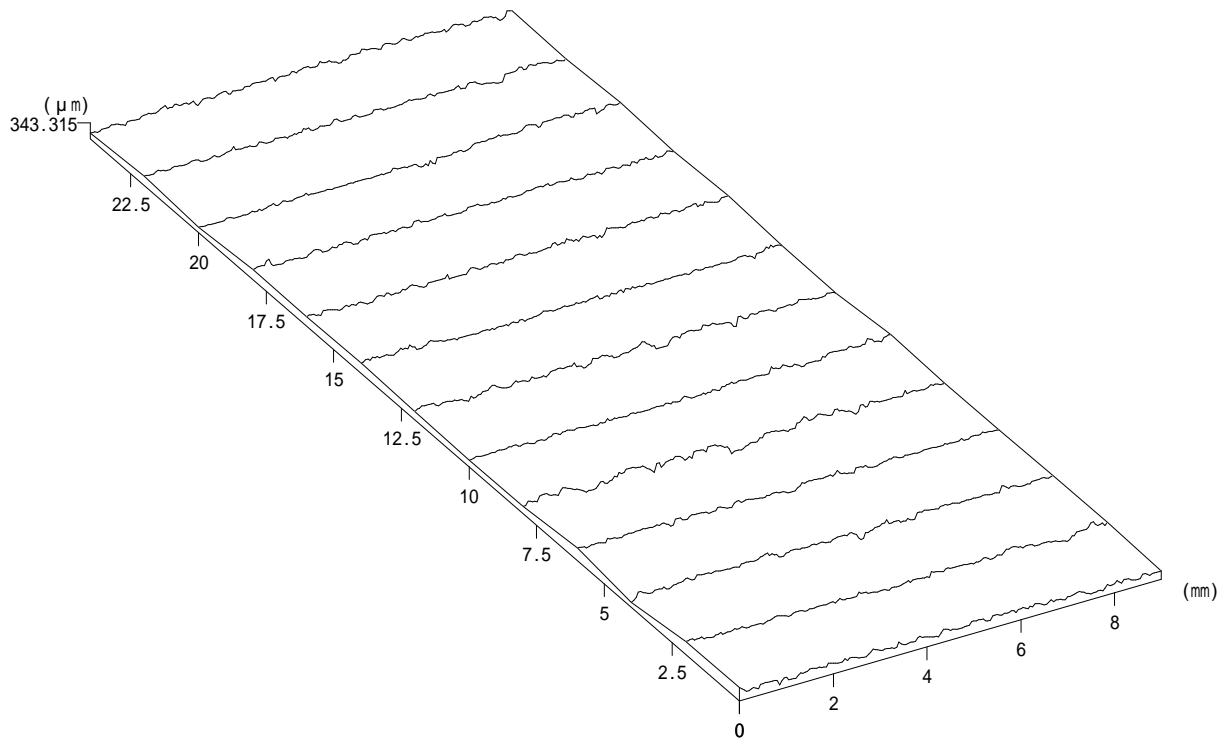
最大値 : 169.636 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 87.649 μm

平面度 : 169.636 μm

90×25×10-4 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4top-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 989.055 μm

測定開始点Y : -16693.1 μm

測定終了点X : 9989.11 μm

測定終了点Y : 7306.94 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31529.8 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

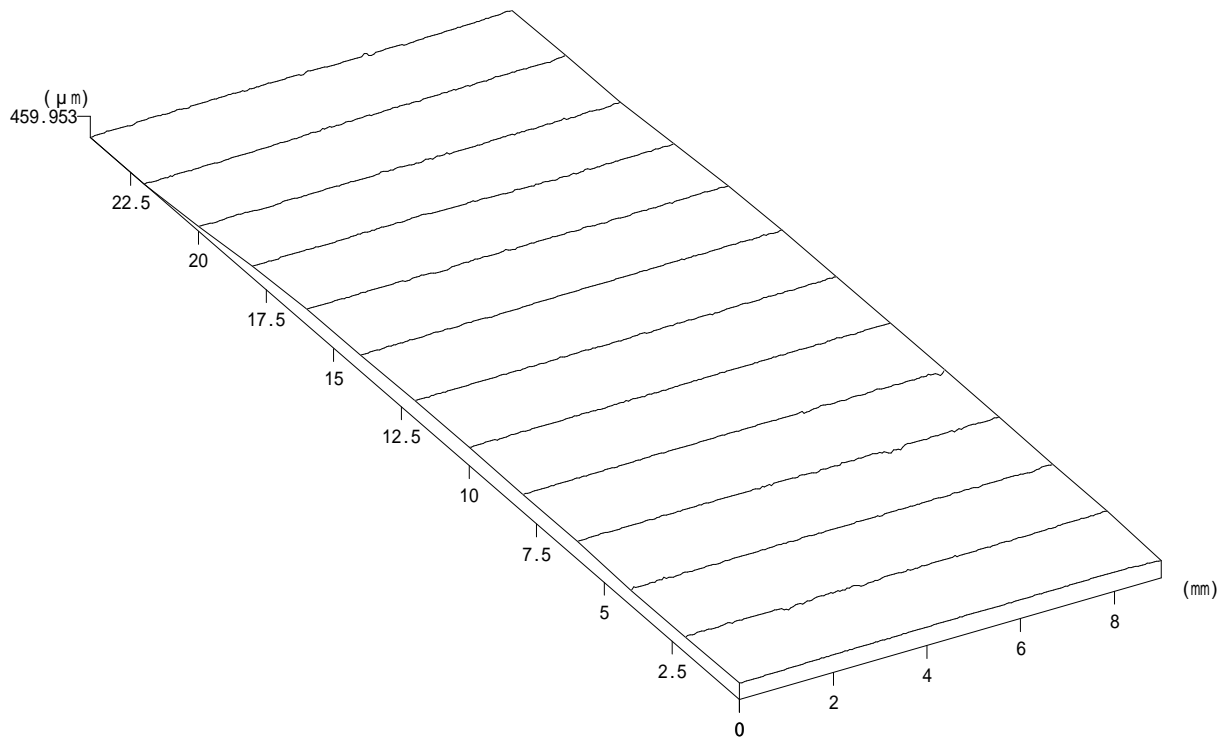
最大値 : 343.315 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 179.861 μm

平面度 : 343.315 μm

90×25×10-4 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4bot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1492.88 μm

測定開始点Y : -18351 μm

測定終了点X : 10492.9 μm

測定終了点Y : 5649.14 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31647.8 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

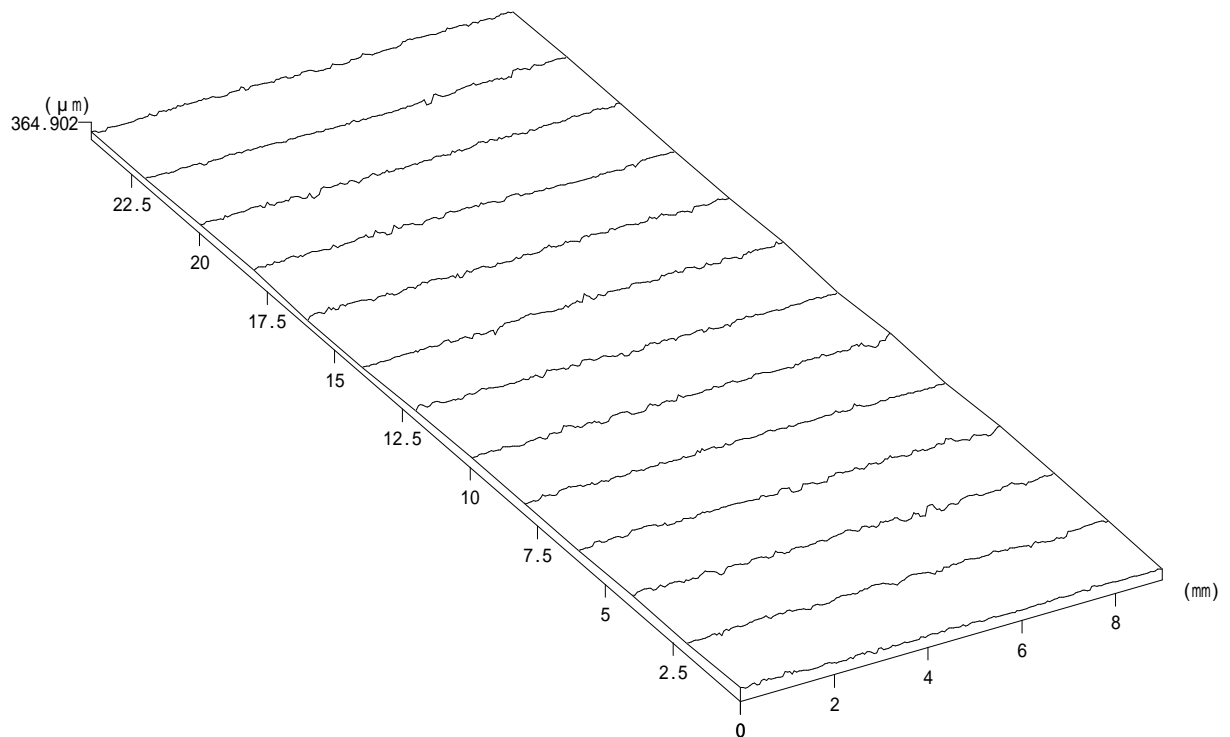
最大値 : 459.953 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 314.455 μm

平面度 : 459.953 μm

90×25×10-4 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4top-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -1640.22 μm

測定開始点Y : -10386.5 μm

測定終了点X : 7359.78 μm

測定終了点Y : 13613.6 μm

測定範囲X : 9000 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31568.9 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

最大値 : 364.902 μm

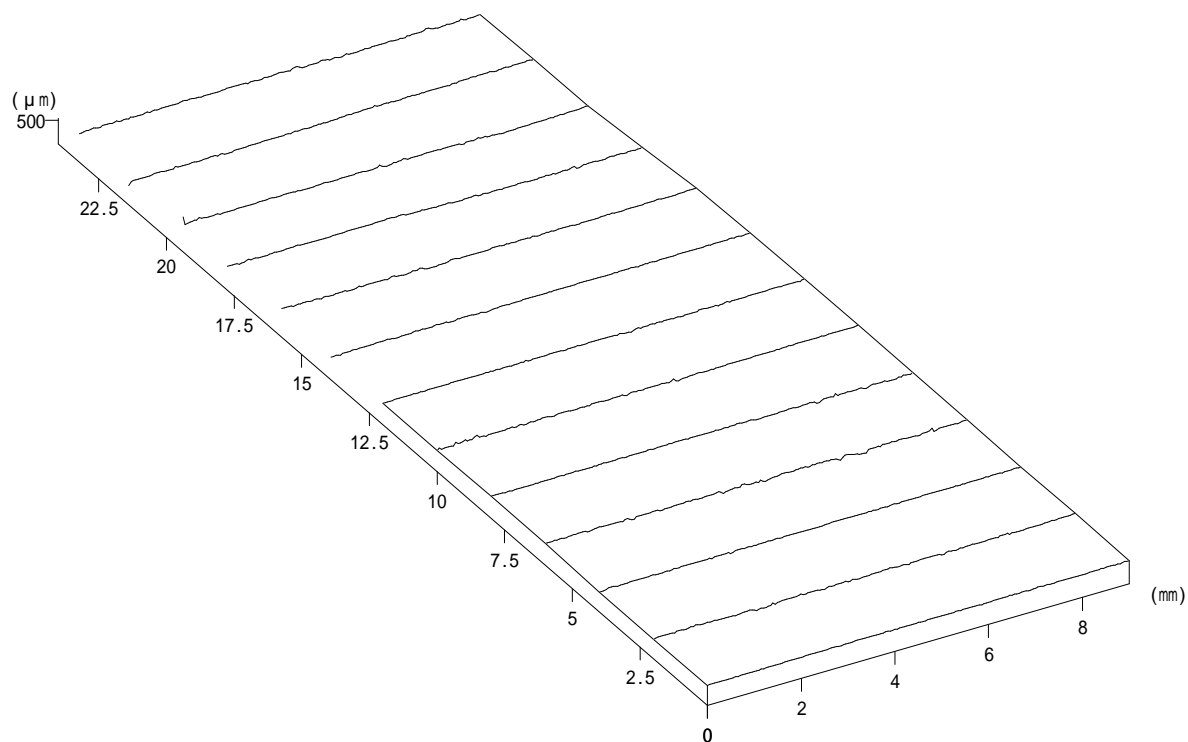
最小値 : 0 μm

平均値 : 198.808 μm

平面度 : 364.902 μm

***** 三次元形状表示 *****

90×25×10-4 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4bot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -1923.81 μm

測定開始点Y : -16824.4 μm

測定終了点X : 7076.25 μm

測定終了点Y : 7175.65 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31774.9 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2323

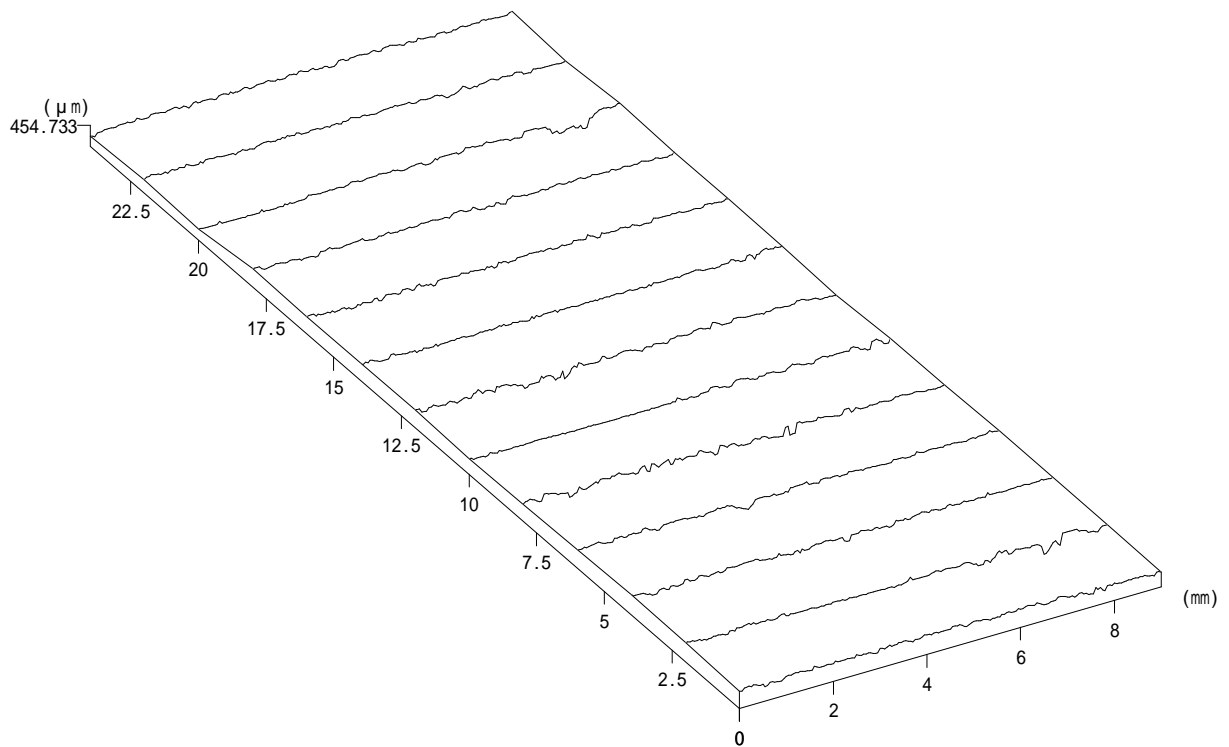
最大値 : 545.153 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 387.686 μm

平面度 : 545.153 μm

90×25×10-4 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c4top-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 4833.98 μm

測定開始点Y : -25267.3 μm

測定終了点X : 13834 μm

測定終了点Y : -1267.23 μm

測定範囲X : 9000.01 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31716.4 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

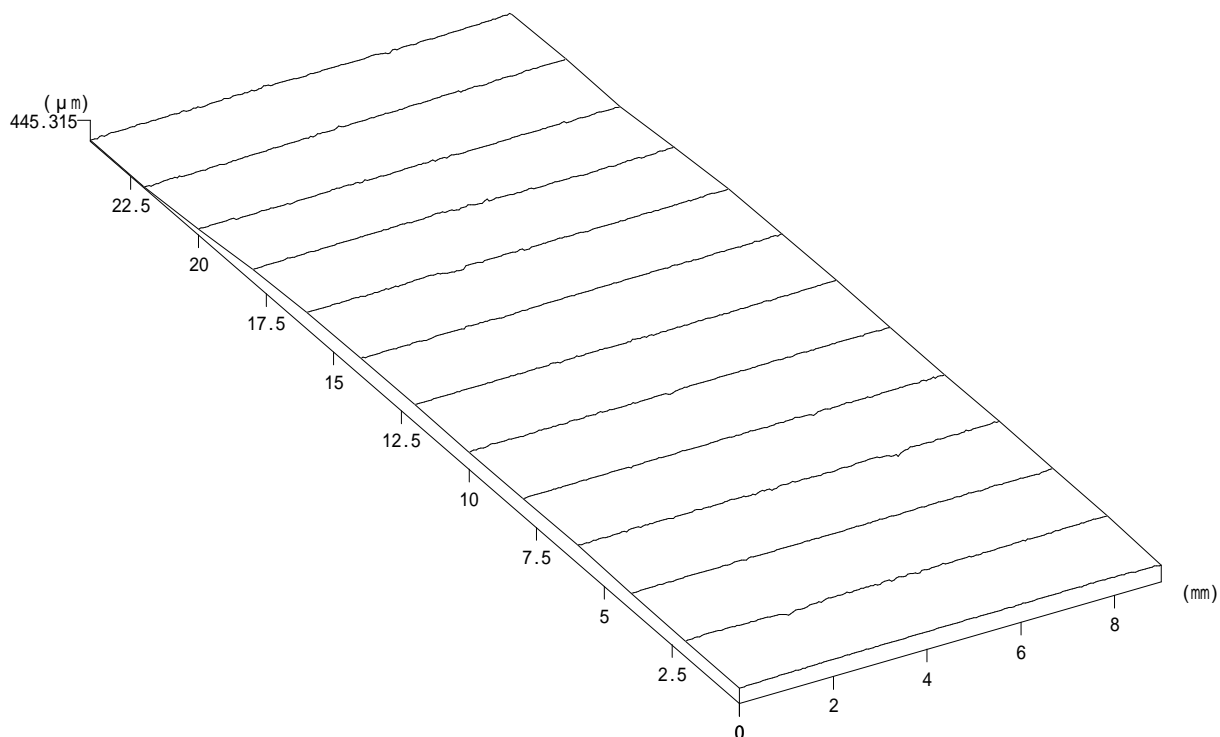
最大値 : 454.733 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 311.686 μm

平面度 : 454.733 μm

90×25×10-4 2.8kN, Bot



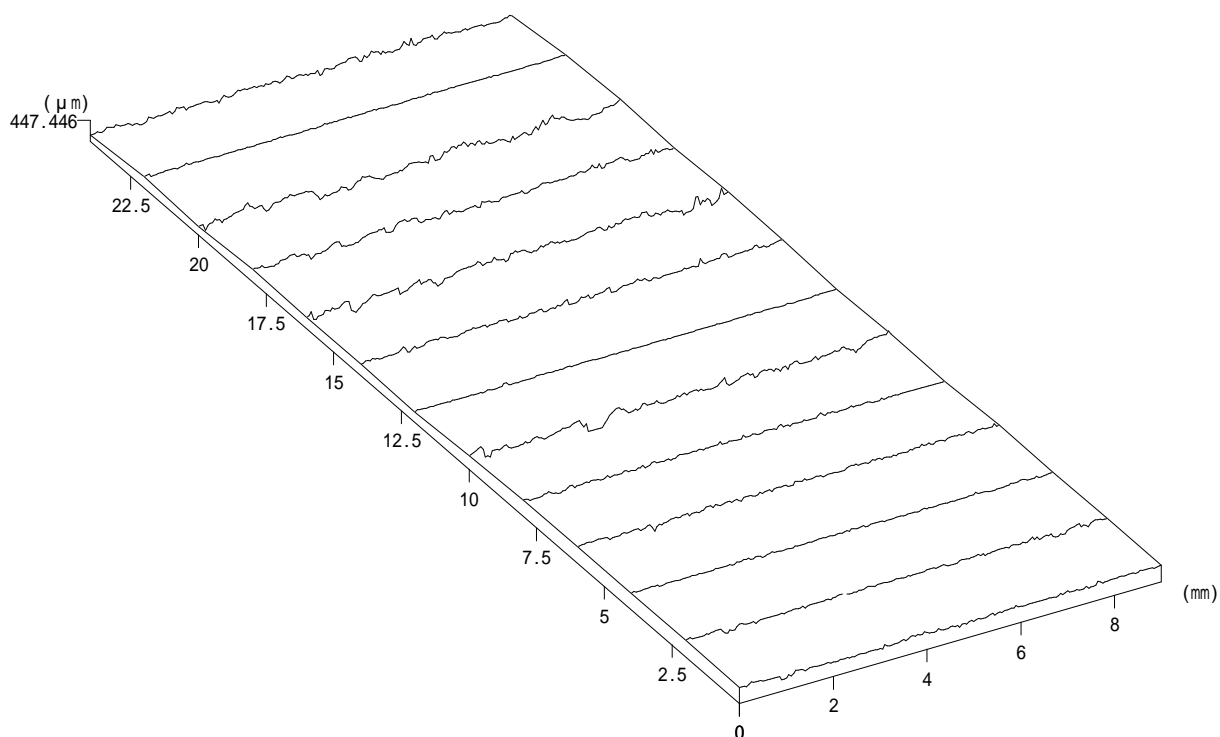
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c4bot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点 X :	5016.82 μm	測定開始点 Y :	-26362.4 μm
測定終了点 X :	14016.9 μm	測定終了点 Y :	-2362.31 μm
測定範囲 X :	9000.06 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-31739.6 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	445.315 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	311.431 μm	平面度 :	445.315 μm

90×25×10-5 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5top-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1795 μm

測定開始点Y : -17976.7 μm

測定終了点X : 10795.1 μm

測定終了点Y : 6023.32 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32569.8 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2352

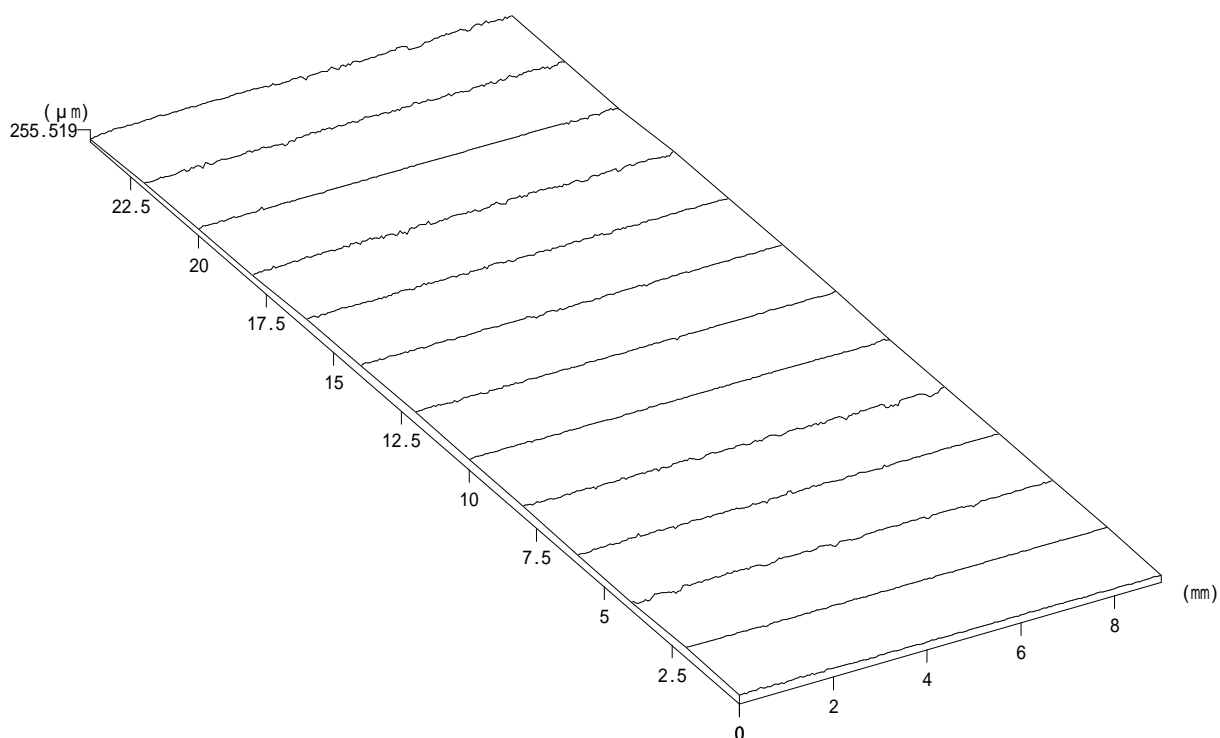
最大値 : 447.446 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 271.344 μm

平面度 : 447.446 μm

90×25×10-5 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5bot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 524.682 μm

測定開始点Y : -19064.1 μm

測定終了点X : 9524.76 μm

測定終了点Y : 4936.02 μm

測定範囲X : 9000.08 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32381.3 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

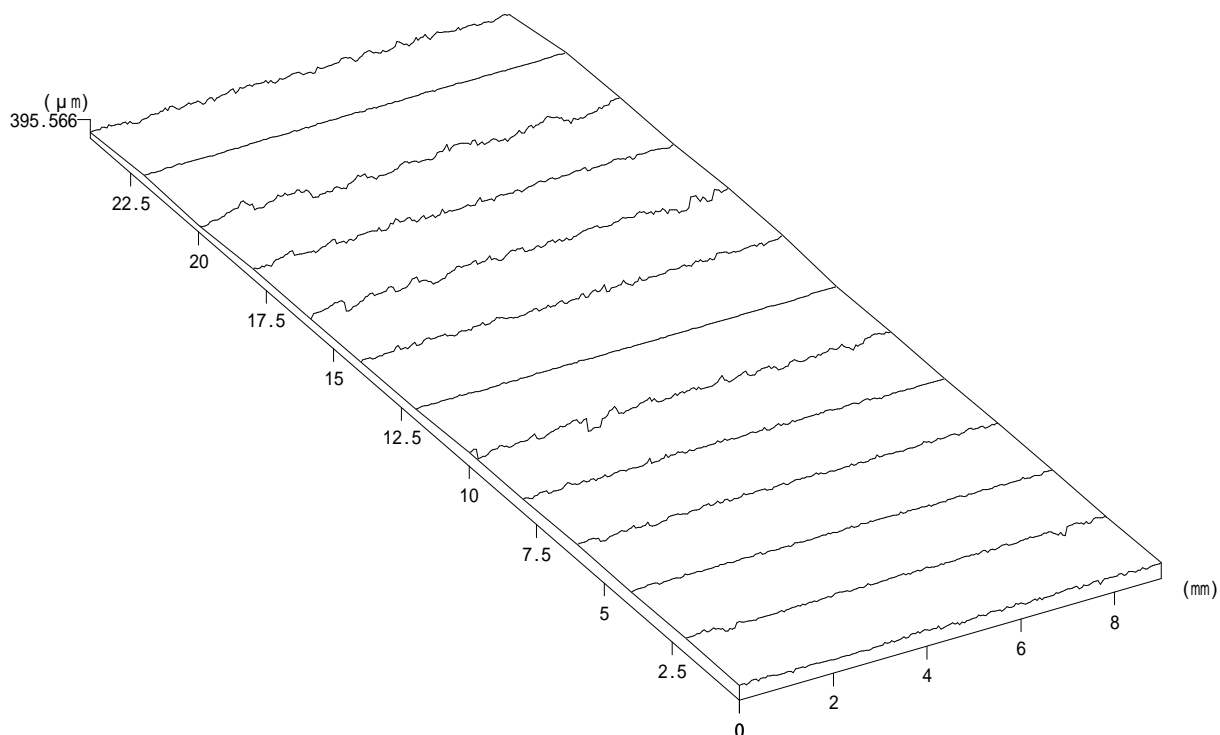
最大値 : 255.519 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 174.459 μm

平面度 : 255.519 μm

90×25×10-5 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5top-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -1672.88 μm

測定開始点Y : -17443.9 μm

測定終了点X : 7327.17 μm

測定終了点Y : 6556.19 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32567 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

最大値 : 395.566 μm

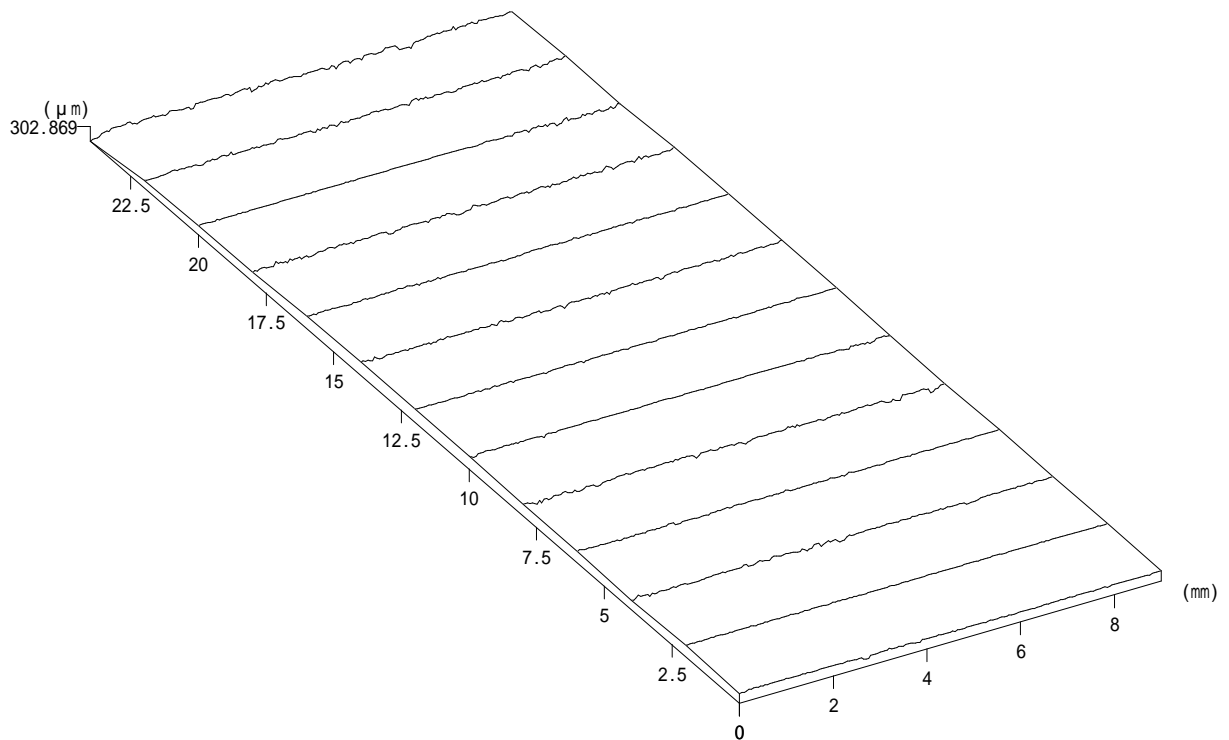
最小値 : 0 μm

平均値 : 253.441 μm

平面度 : 395.566 μm

***** 三次元形状表示 *****

90×25×10-5 0.7kN, Bot



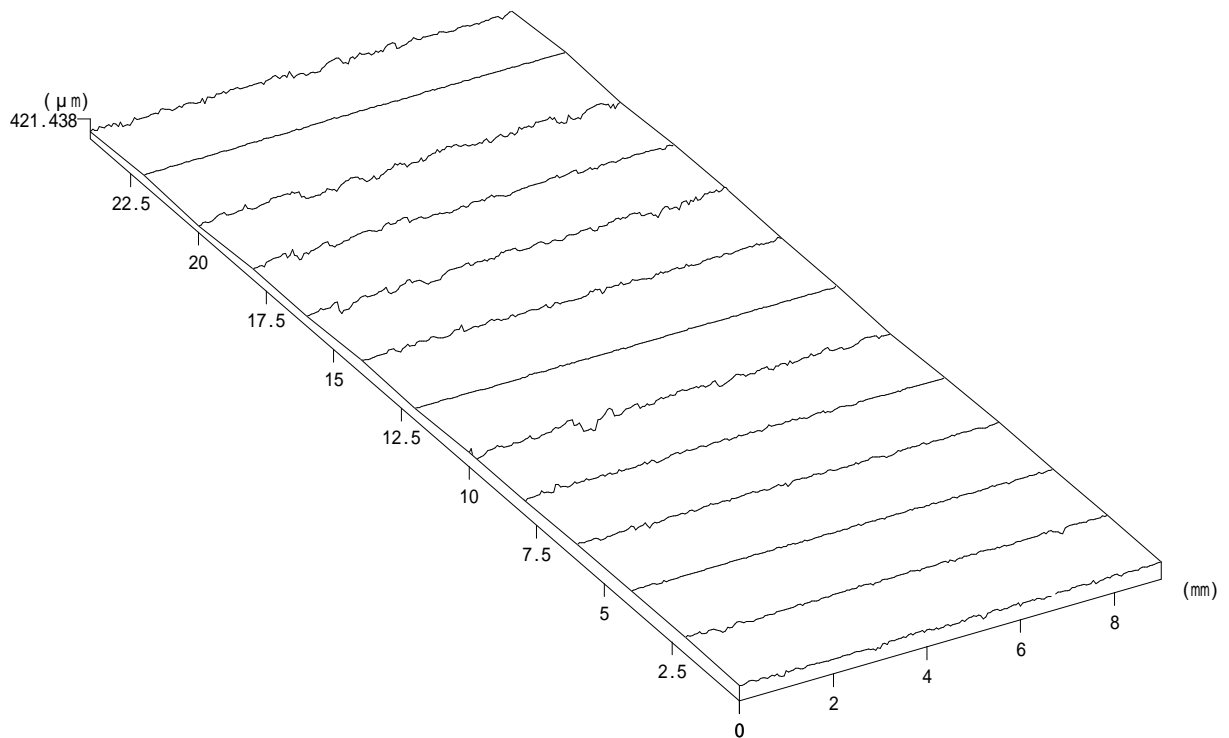
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5bot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X :	-1550.63 μm	測定開始点Y :	-20969.1 μm
測定終了点X :	7449.38 μm	測定終了点Y :	3030.97 μm
測定範囲X :	9000.01 μm	測定範囲Y :	24000.1 μm
測定ピッチX :	50 μm	測定ピッチY :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-32467.2 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	302.869 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	221.213 μm	平面度 :	302.869 μm

90×25×10-5 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c5top-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 4733.39 μm

測定開始点Y : -27362.8 μm

測定終了点X : 13733.4 μm

測定終了点Y : -3362.67 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32605.8 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2352

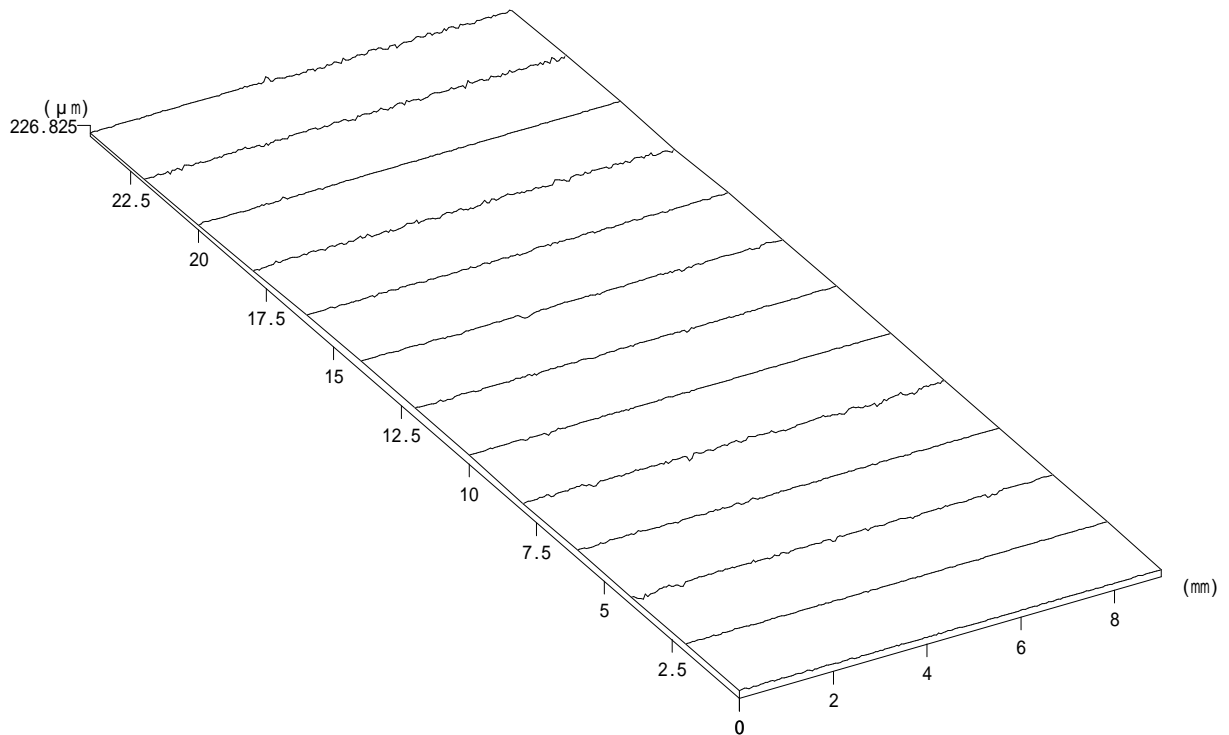
最大値 : 421.438 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 274.496 μm

平面度 : 421.438 μm

90×25×10-5 2.8kN, Bot



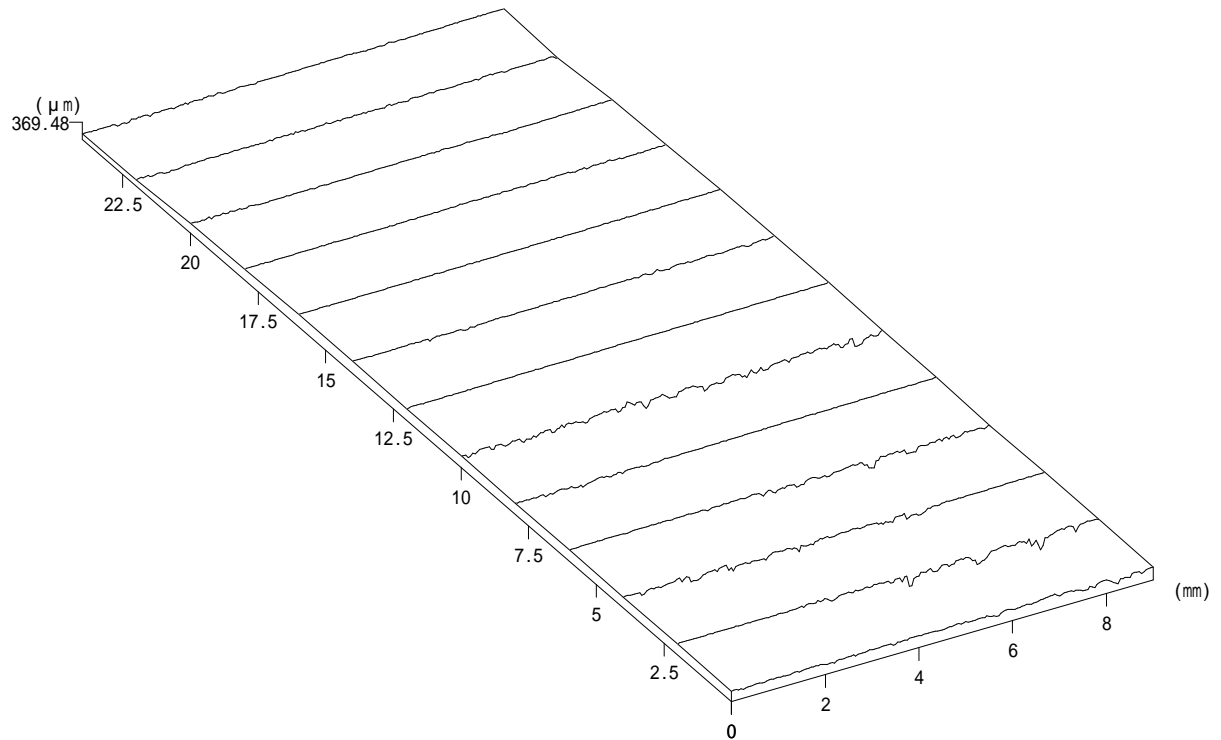
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c5bot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X :	5365.43 μm	測定開始点Y :	-32231.7 μm
測定終了点X :	14365.5 μm	測定終了点Y :	-8231.59 μm
測定範囲X :	9000.05 μm	測定範囲Y :	24000.1 μm
測定ピッチX :	50 μm	測定ピッチY :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-32425.3 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	226.825 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	153.532 μm	平面度 :	226.825 μm

90×25×10-6 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6top-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1034.18 μm

測定開始点Y : -24755.9 μm

測定終了点X : 10034.2 μm

測定終了点Y : -755.784 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33635.9 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

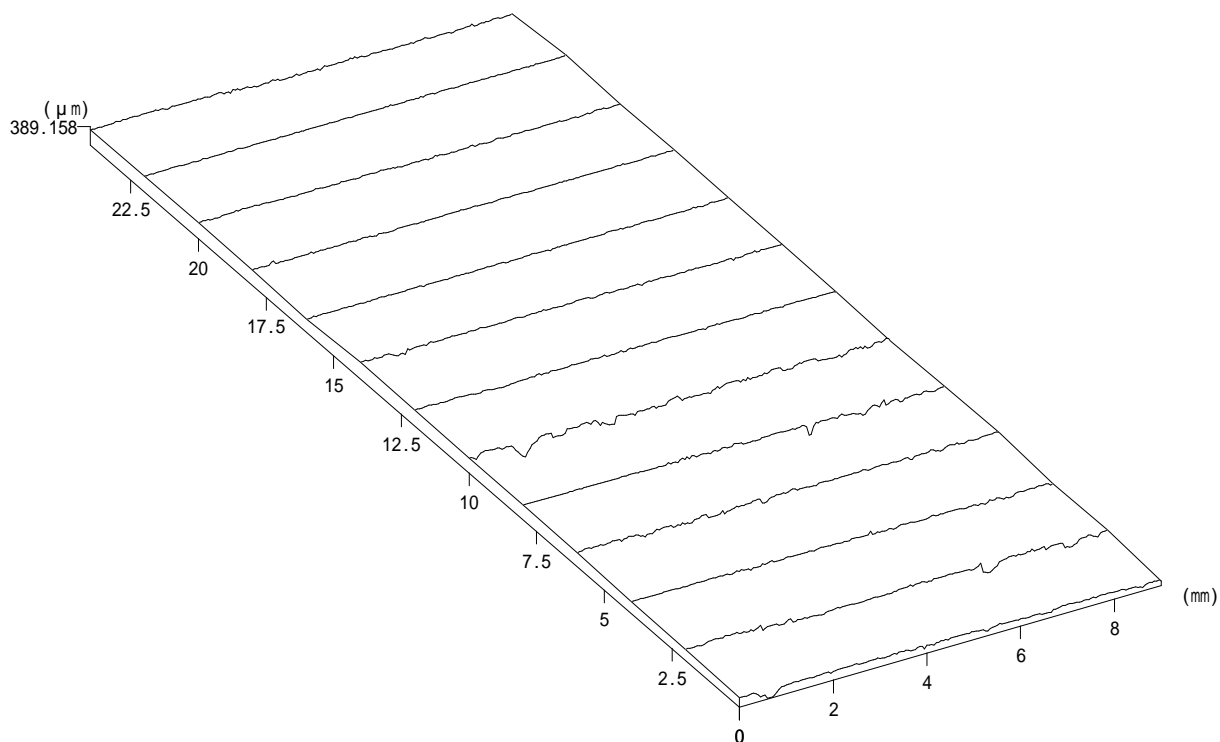
最大値 : 369.48 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 246.517 μm

平面度 : 369.48 μm

90×25×10-6 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3\data\三次元データ\totsuka\c6bot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1342.37 μm

測定開始点Y : -26614.3 μm

測定終了点X : 10342.4 μm

測定終了点Y : -2614.22 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33671.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

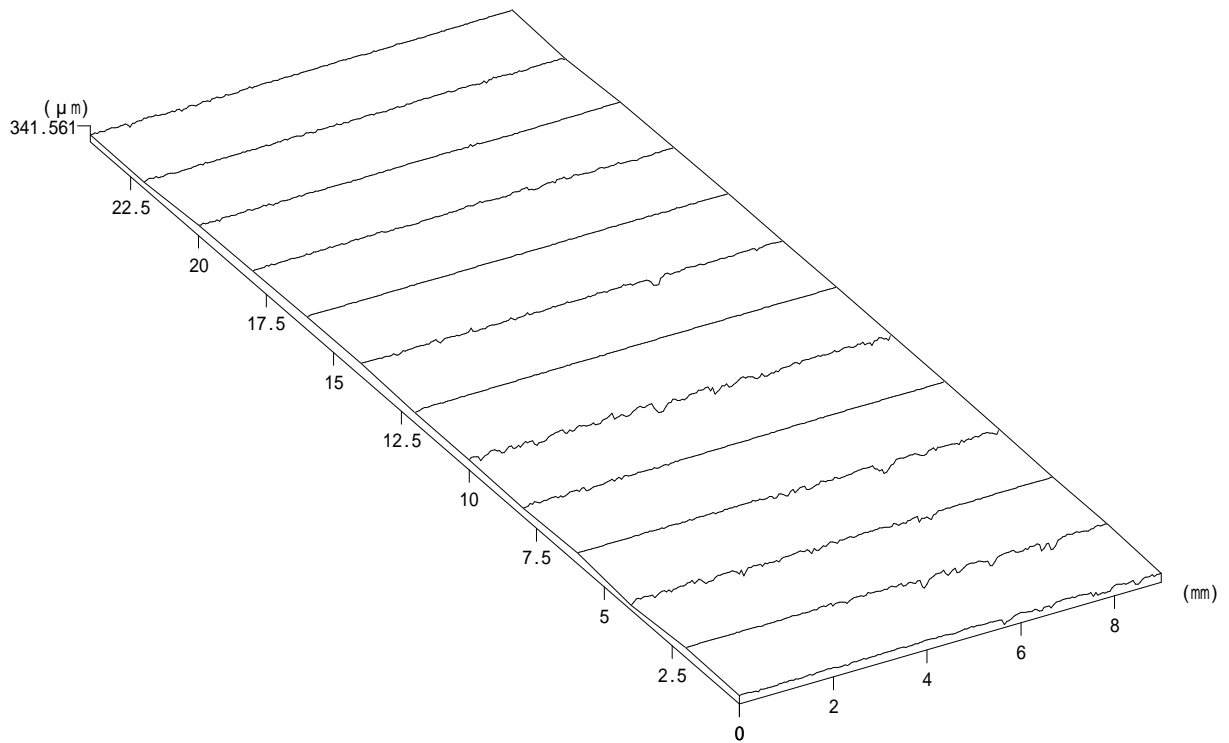
最大値 : 389.158 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 267.577 μm

平面度 : 389.158 μm

90×25×10-6 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6top-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -2064.83 μm

測定開始点Y : -19213.3 μm

測定終了点X : 6935.21 μm

測定終了点Y : 4786.82 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33648.4 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

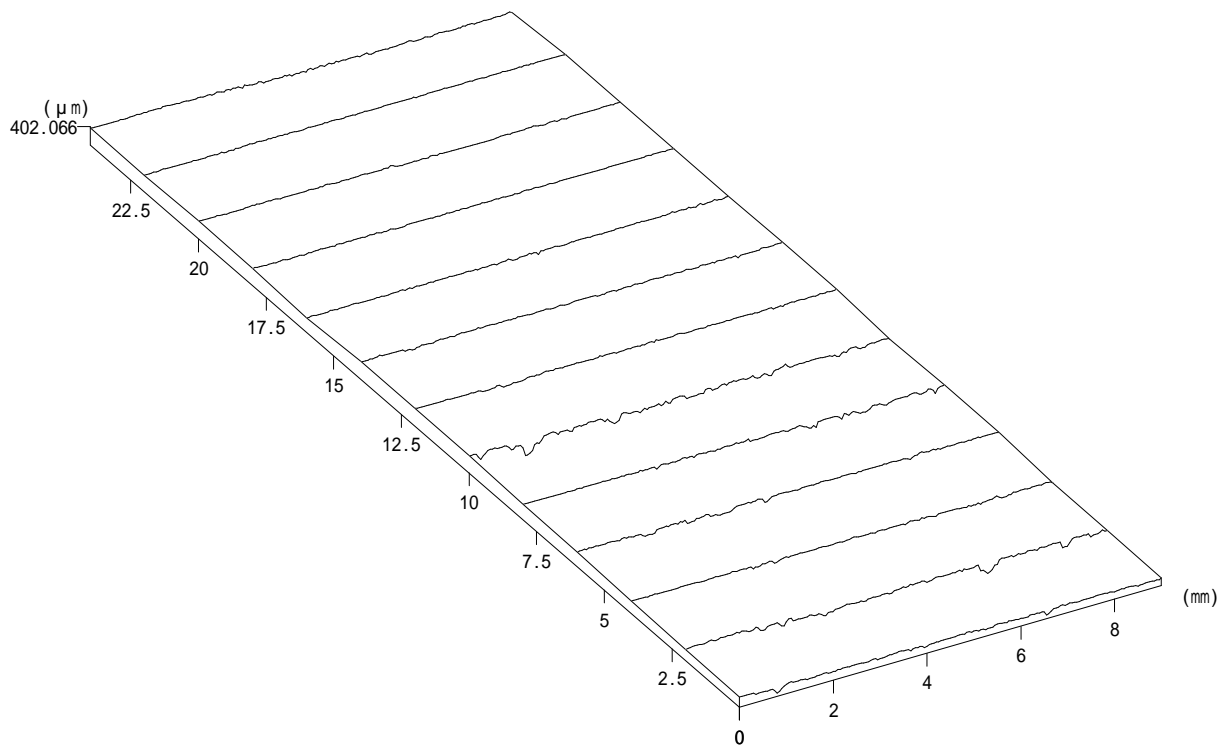
最大値 : 341.561 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 230.277 μm

平面度 : 341.561 μm

90×25×10-6 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6bot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 927.164 μm

測定開始点Y : -19315.8 μm

測定終了点X : 8072.91 μm

測定終了点Y : 4684.23 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33708.4 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

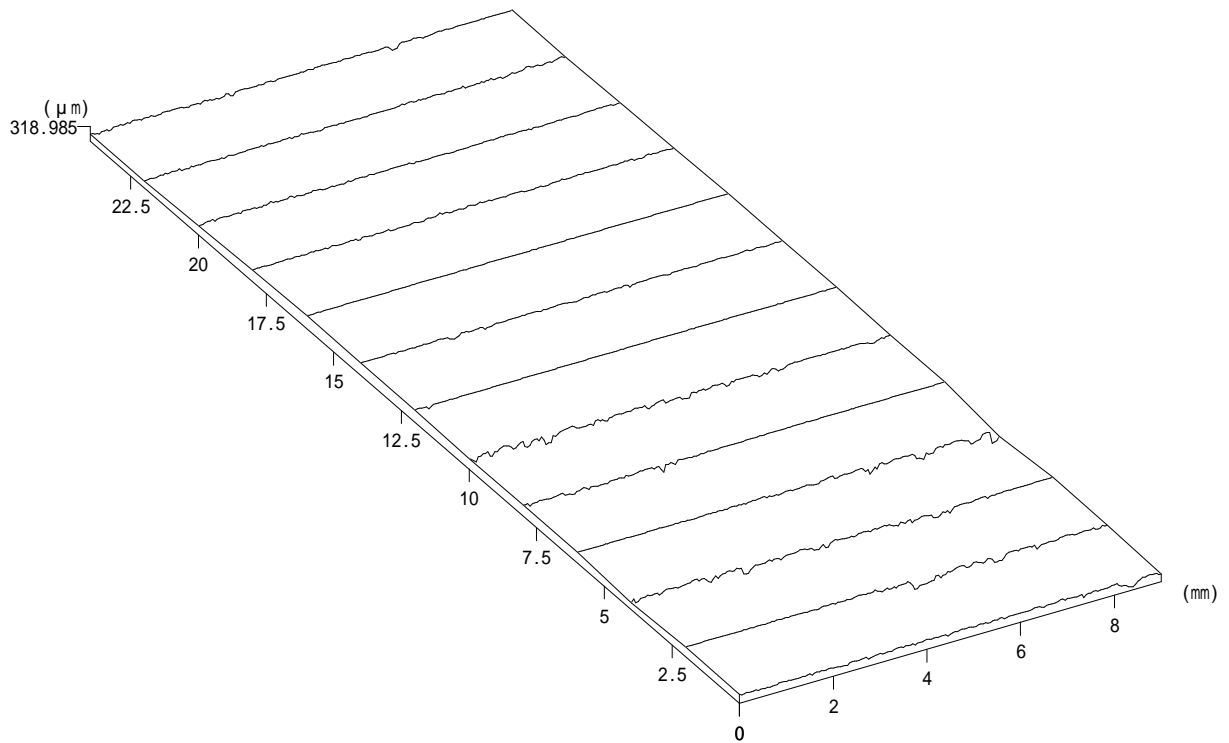
最大値 : 402.066 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 294.154 μm

平面度 : 402.066 μm

90×25×10-6 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c6top-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 5694.16 μm

測定開始点Y : -33012.7 μm

測定終了点X : 14694.2 μm

測定終了点Y : -9012.61 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33654.5 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

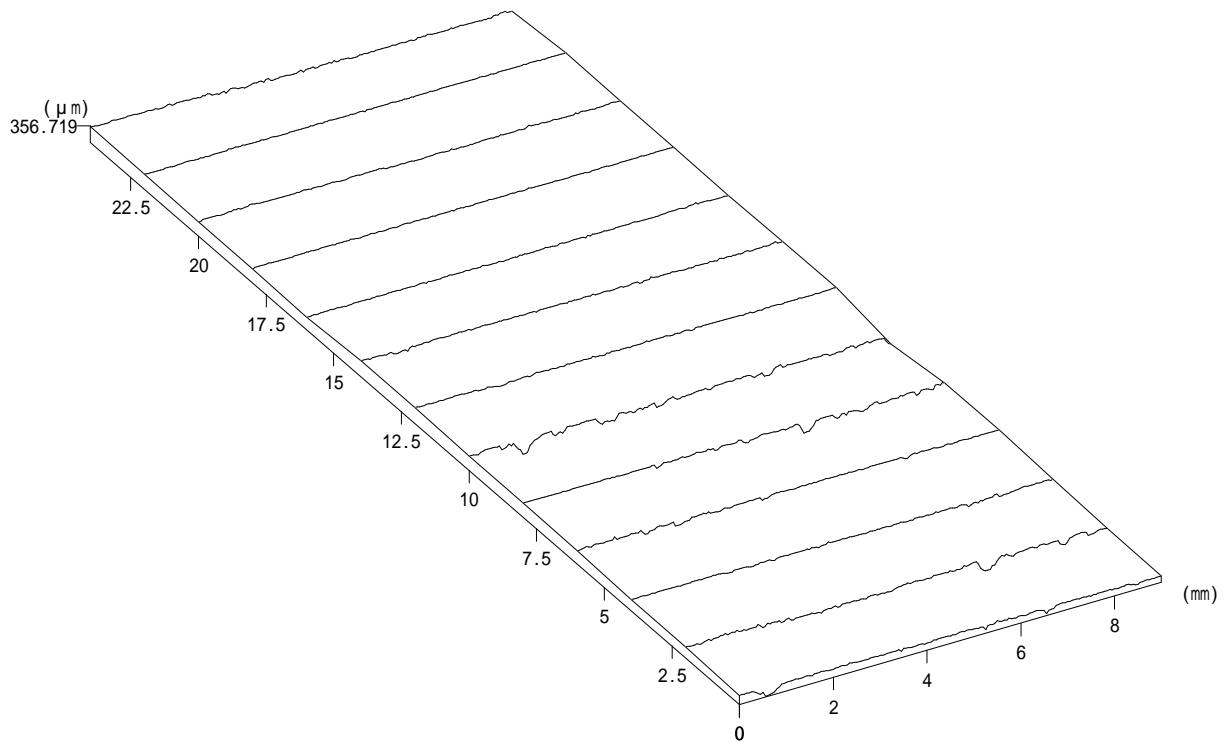
最大値 : 318.985 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 226.564 μm

平面度 : 318.985 μm

90×25×10-6 2.8kN, Bot



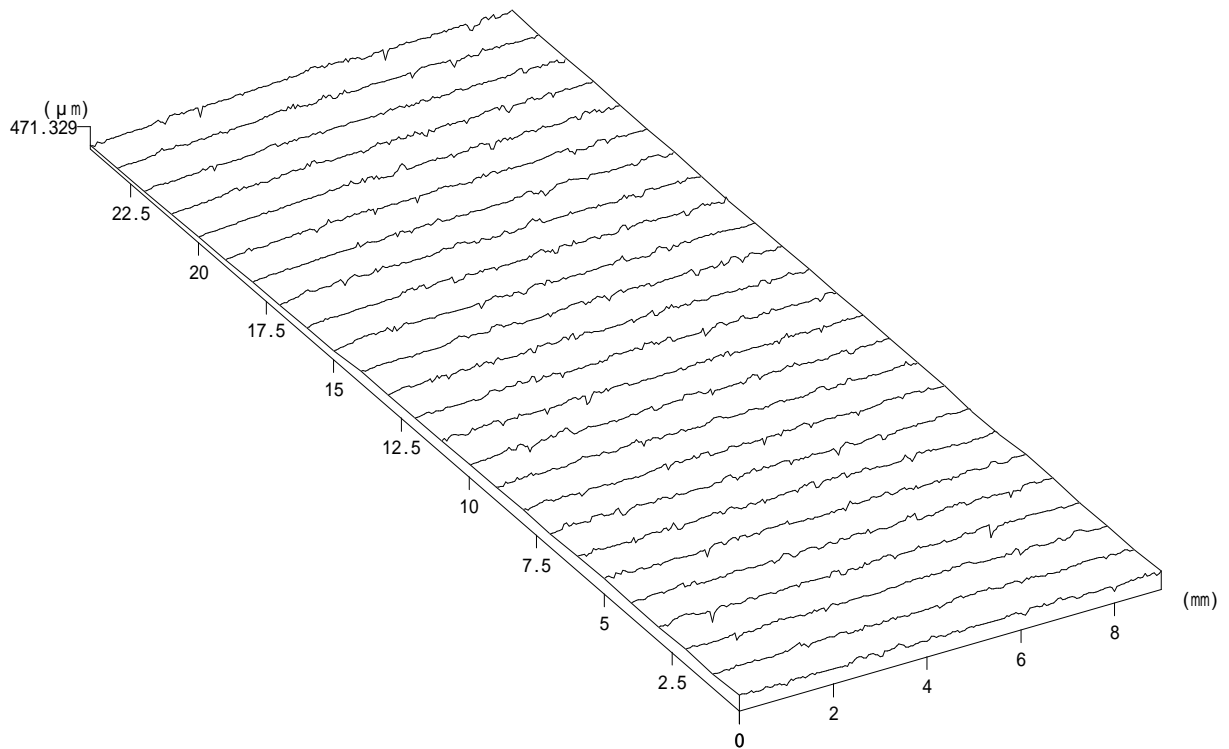
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c6bot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X :	6098.67 μm	測定開始点Y :	-33455.6 μm
測定終了点X :	15098.7 μm	測定終了点Y :	-9455.51 μm
測定範囲X :	9000.02 μm	測定範囲Y :	24000 μm
測定ピッチX :	50 μm	測定ピッチY :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-33698.3 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	356.719 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	260.368 μm	平面度 :	356.719 μm

D90×25×10-1 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH_3data\三次元データ\totsuka\totsuka.nh3

データ名 : c1dtop_0

測定開始点X : -7247.7 μm

測定開始点Y : -22420 μm

測定終了点X : 1752.37 μm

測定終了点Y : 1580.07 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 1000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33315.4 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 4525

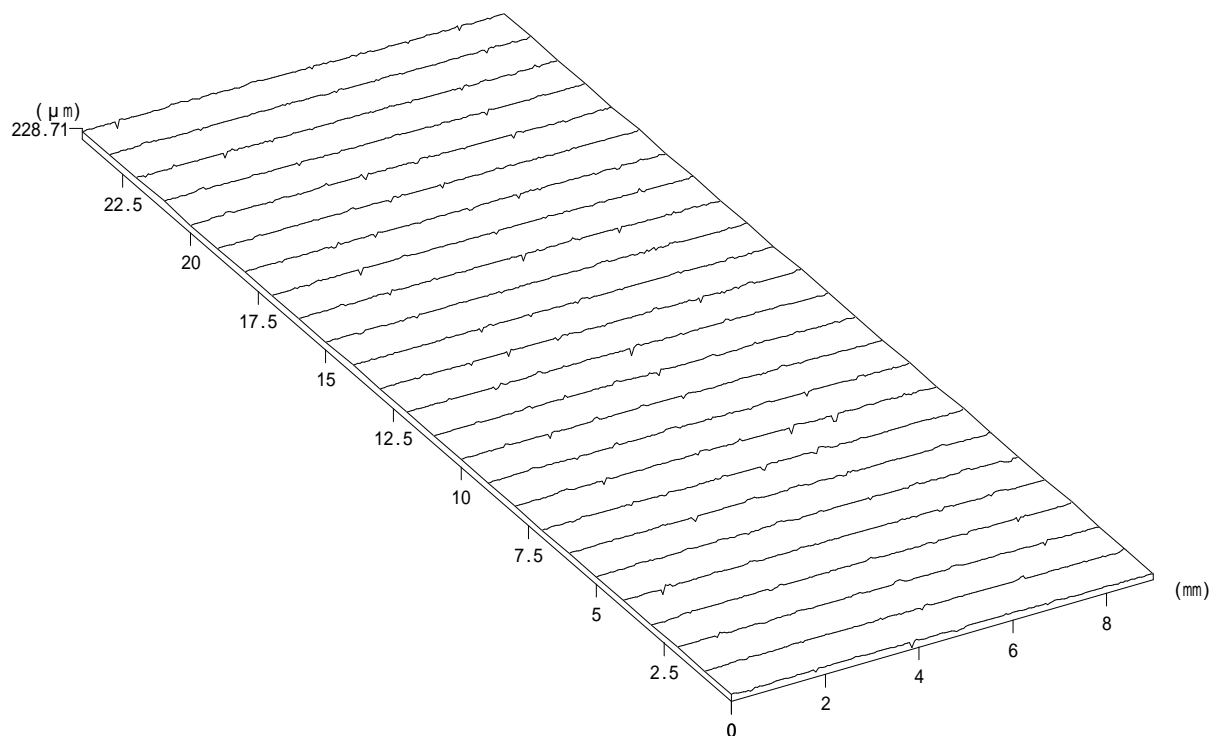
最大値 : 471.329 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 317.07 μm

平面度 : 471.329 μm

D90×25×10-1 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH_3data\三次元データ\totsuka\c1dbot_0.nh3

データ名 : c1dbot_0

測定開始点X : 543.833 μm

測定開始点Y : -24738.7 μm

測定終了点X : 9543.91 μm

測定終了点Y : -738.644 μm

測定範囲X : 9000.08 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 1000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33092.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 4525

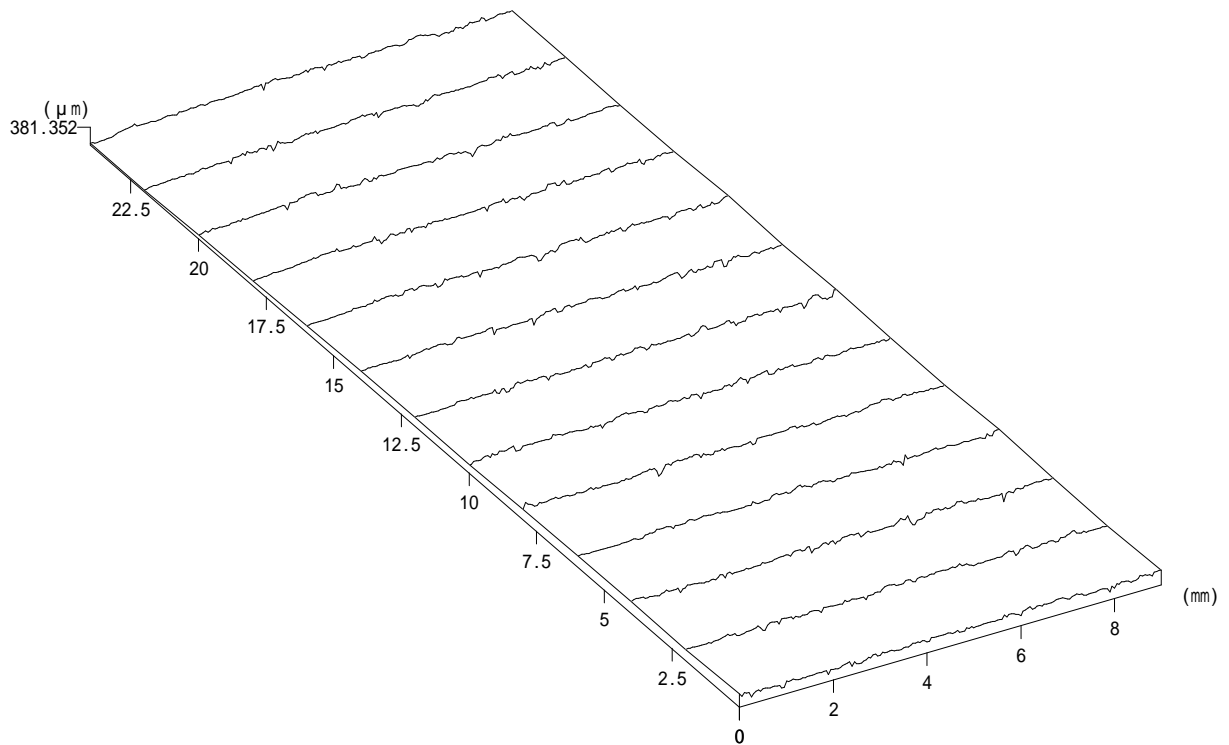
最大値 : 228.71 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 150.346 μm

平面度 : 228.71 μm

D90×25×10-1 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1dtop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -1750.81 μm

測定開始点Y : -22913.3 μm

測定終了点X : 7249.21 μm

測定終了点Y : 1086.75 μm

測定範囲X : 9000.02 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33271.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

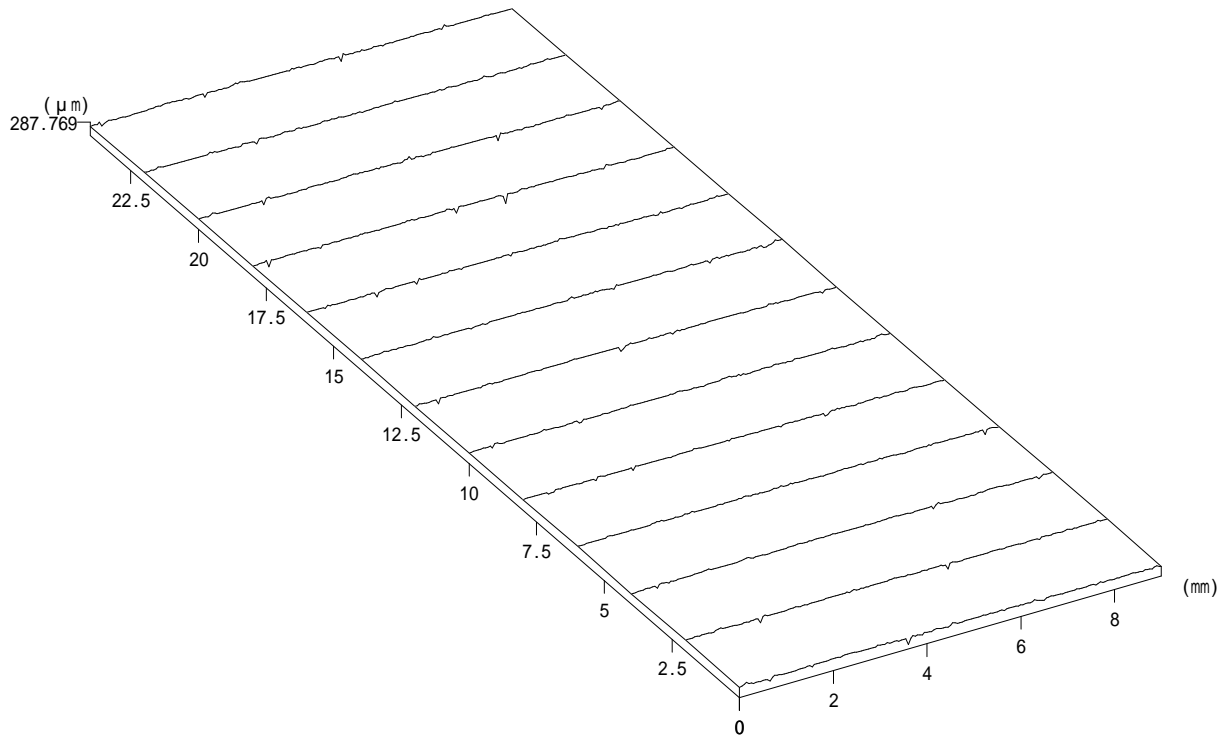
最大値 : 381.352 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 238.595 μm

平面度 : 381.352 μm

D90×25×10-1 0.7kN, Bot



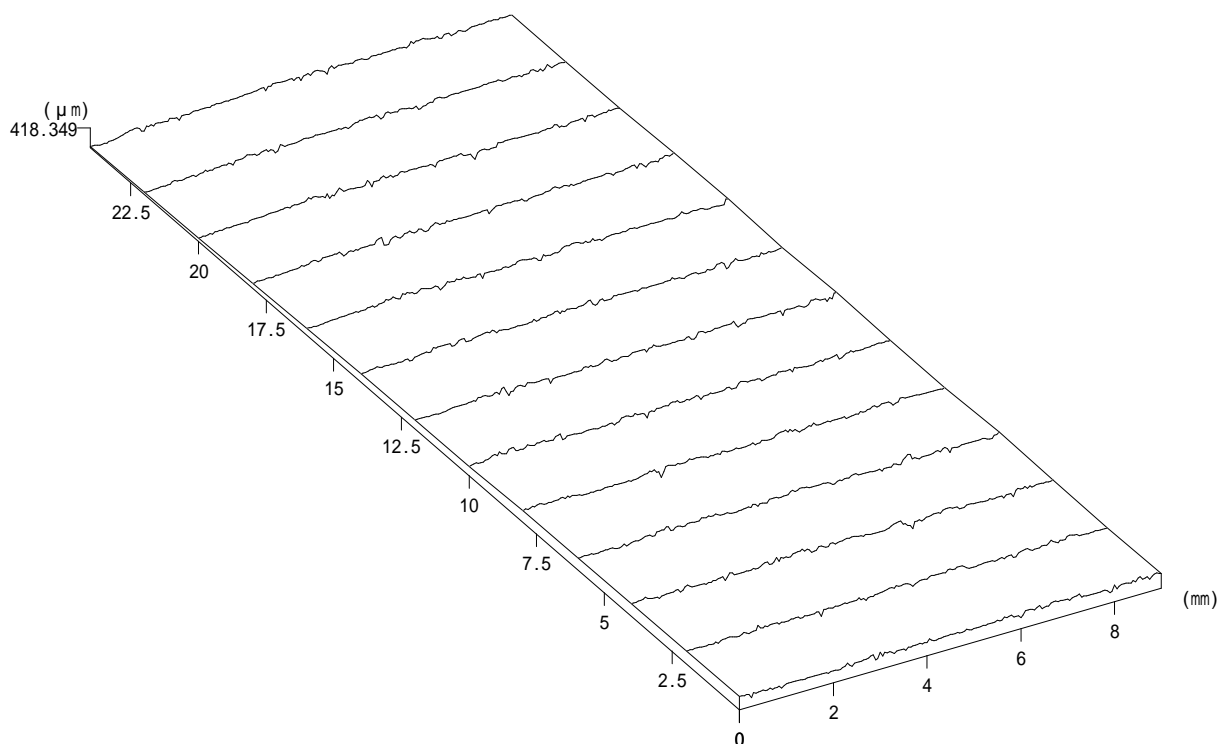
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1dbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点 X :	-1949.77 μm	測定開始点 Y :	-23934.3 μm
測定終了点 X :	7050.28 μm	測定終了点 Y :	65.791 μm
測定範囲 X :	9000.05 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-33180.5 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	287.769 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	210.434 μm	平面度 :	287.769 μm

D90×25×10-1 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c1dtop-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 6566 μm

測定開始点Y : -34372.7 μm

測定終了点X : 15566 μm

測定終了点Y : -10372.7 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33285.5 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

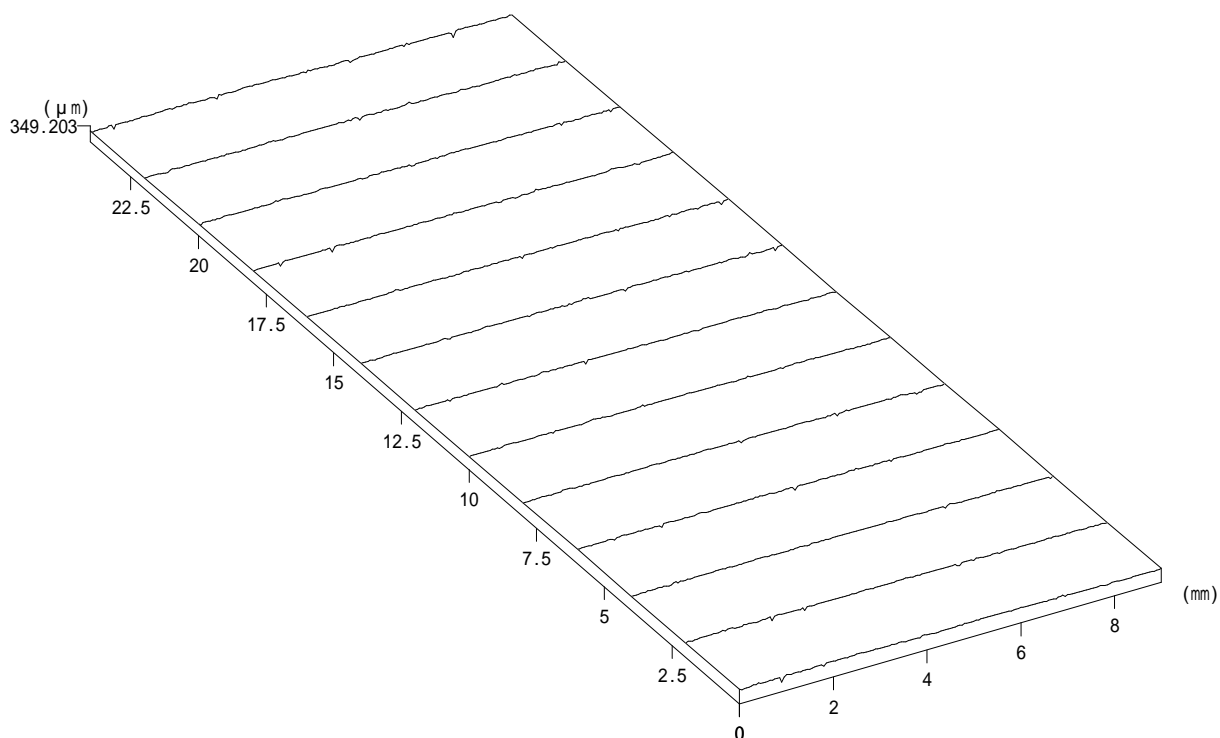
最大値 : 418.349 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 243.245 μm

平面度 : 418.349 μm

D90×25×10-1 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c1dbot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 6751.8 μm

測定開始点Y : -35177.8 μm

測定終了点X : 15751.9 μm

測定終了点Y : -11177.7 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33228.4 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

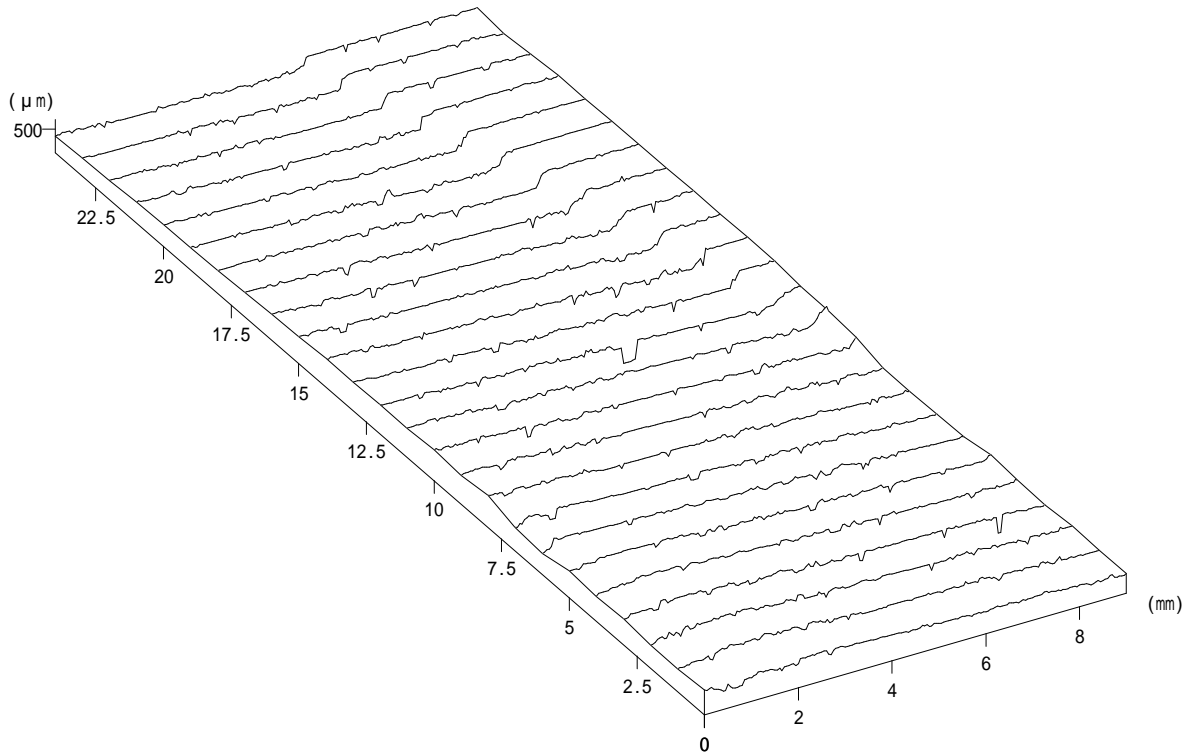
最大値 : 349.203 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 254.127 μm

平面度 : 349.203 μm

D90×25×10-2 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2dtop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -337.832 μm

測定開始点Y : -28428.3 μm

測定終了点X : 8662.24 μm

測定終了点Y : -4428.29 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 1000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33078.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 4525

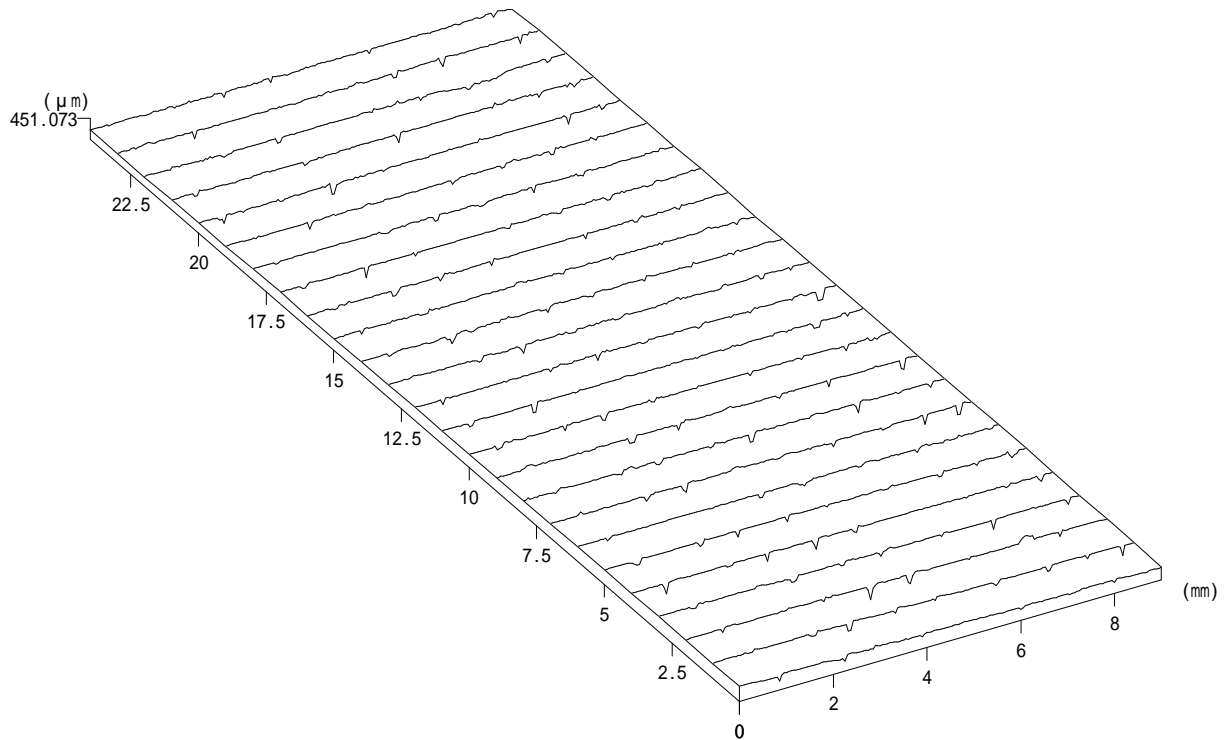
最大値 : 713.411 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 454.392 μm

平面度 : 713.411 μm

D90×25×10-2 Before test, Bot



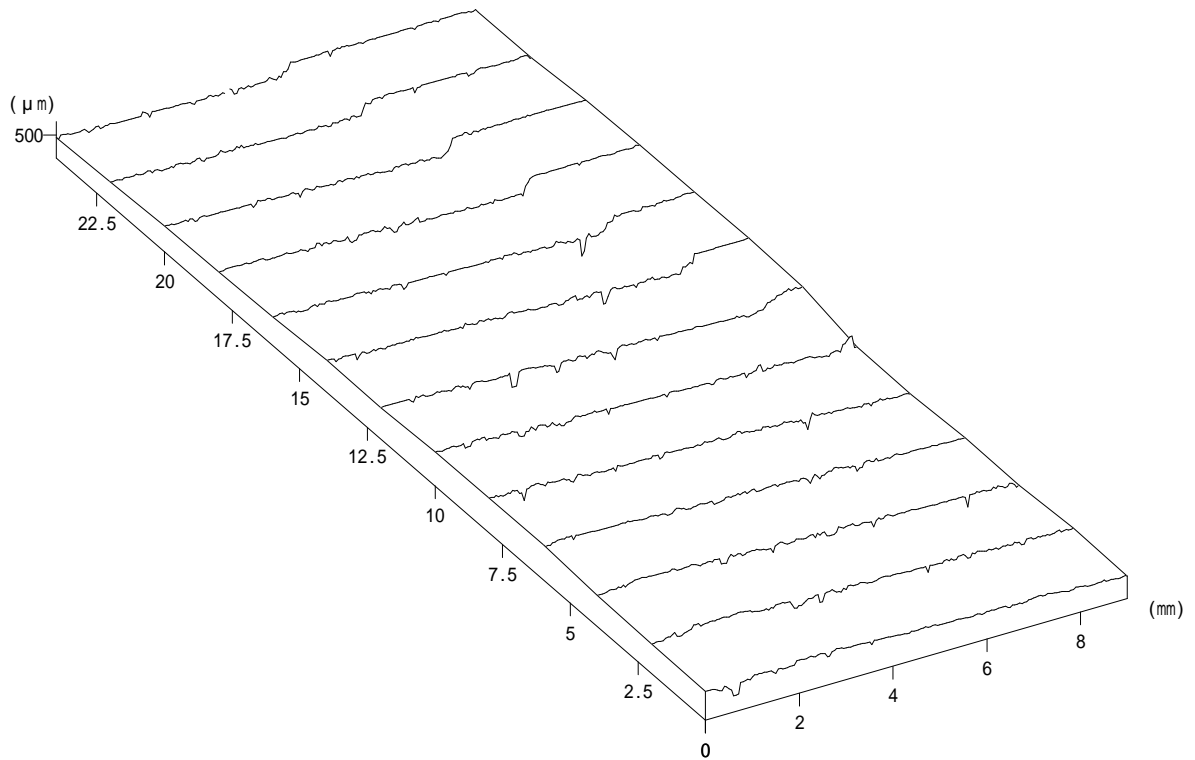
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2dbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X :	-853.694 μm	測定開始点Y :	-30129.9 μm
測定終了点X :	8146.37 μm	測定終了点Y :	-6129.88 μm
測定範囲X :	9000.06 μm	測定範囲Y :	24000 μm
測定ピッチX :	50 μm	測定ピッチY :	1000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-32759.6 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	4525		
最大値 :	451.073 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	267.492 μm	平面度 :	451.073 μm

D90×25×10-2 0.7kN, Top



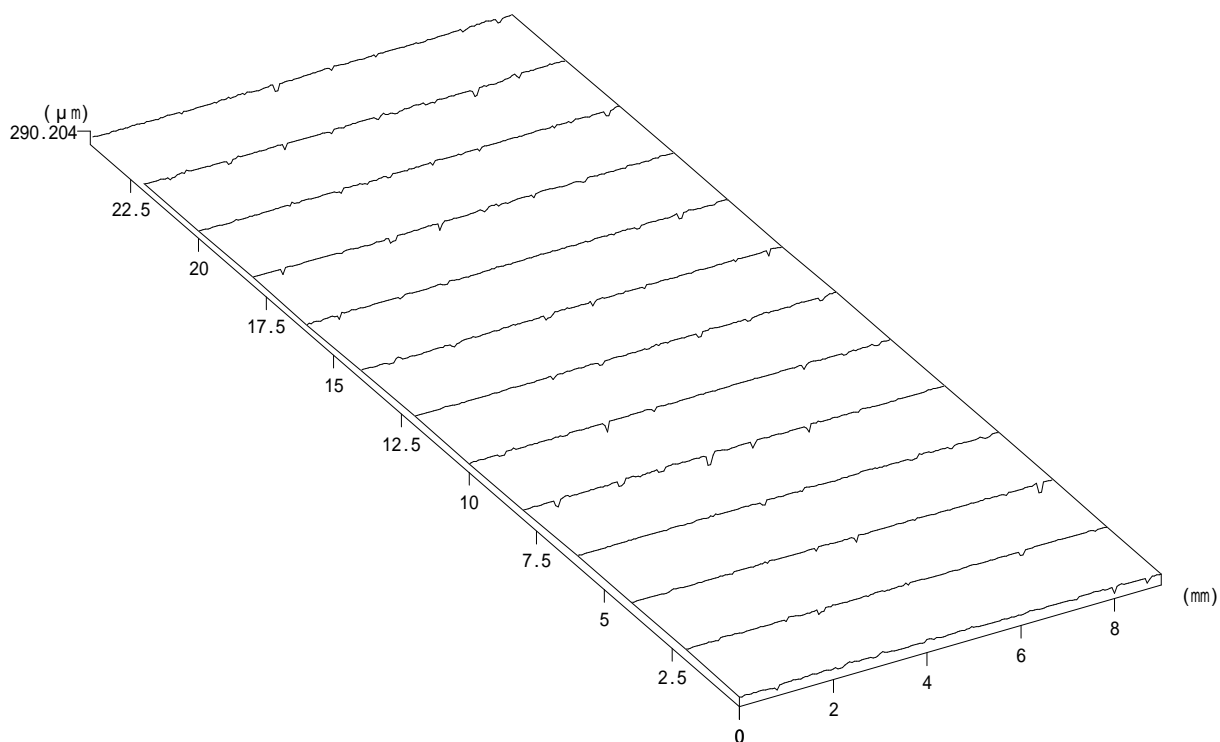
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2d-top-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点 X :	2376.19 μm	測定開始点 Y :	-23121.8 μm
測定終了点 X :	11376.3 μm	測定終了点 Y :	878.226 μm
測定範囲 X :	9000.06 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-33209.6 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2352		
最大値 :	779.916 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	548.067 μm	平面度 :	779.916 μm

D90×25×10-2 0.7kN, Bot



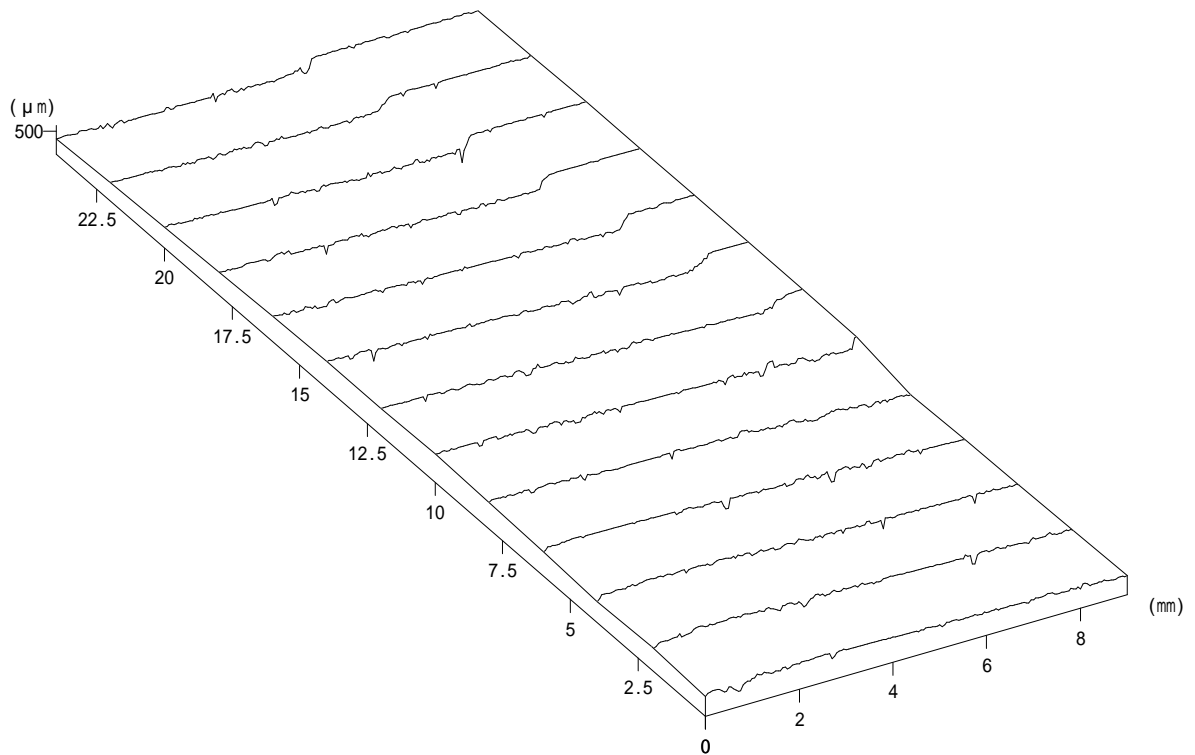
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2dbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X :	2196.23 μm	測定開始点Y :	-24003.1 μm
測定終了点X :	11196.3 μm	測定終了点Y :	-3.05 μm
測定範囲X :	9000.05 μm	測定範囲Y :	24000.1 μm
測定ピッチX :	50 μm	測定ピッチY :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-32721.7 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2352		
最大値 :	290.204 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	206.789 μm	平面度 :	290.204 μm

D90×25×10-2 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c2dtop-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 6673.9 μm

測定開始点Y : -35246.7 μm

測定終了点X : 15673.9 μm

測定終了点Y : -11246.6 μm

測定範囲X : 8999.99 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33118.9 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

最大値 : 623.836 μm

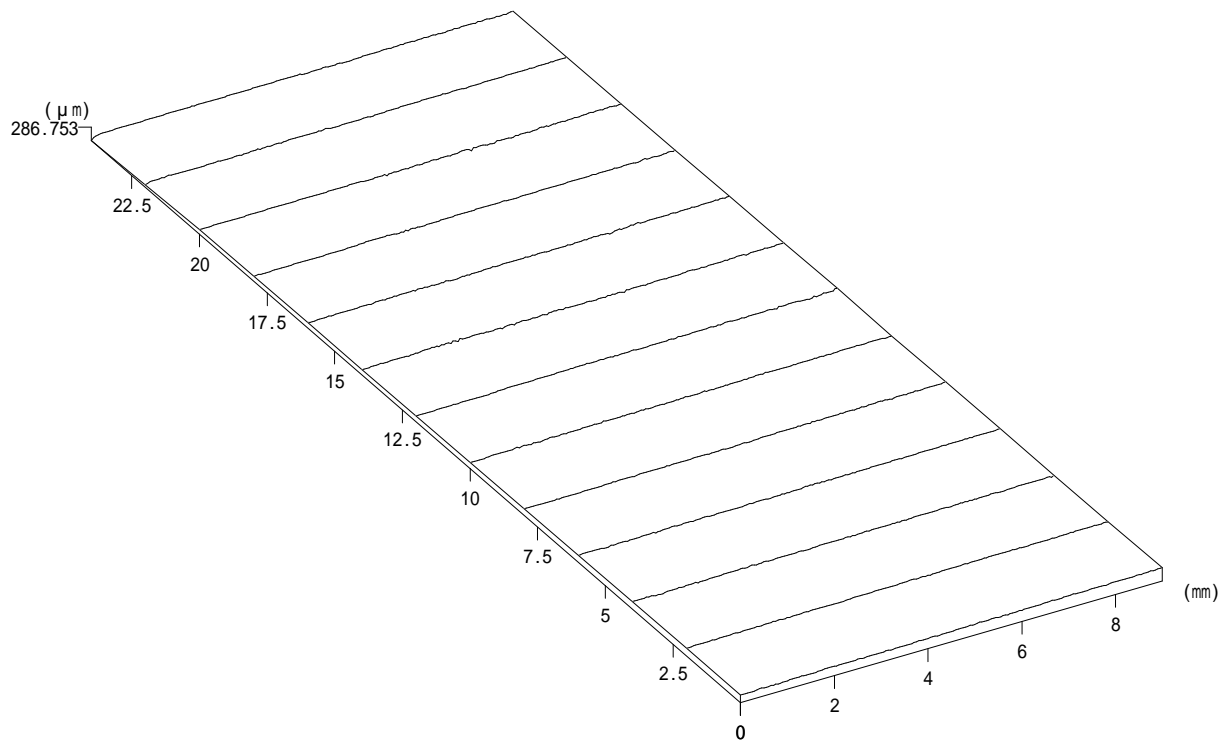
最小値 : 0 μm

平均値 : 439.204 μm

平面度 : 623.836 μm

***** 三次元形状表示 *****

D90×25×10-2 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c2bot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 4521.85 μm

測定開始点Y : 20681 μm

測定終了点X : 13521.9 μm

測定終了点Y : 3319.06 μm

測定範囲X : 9000.01 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32800.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

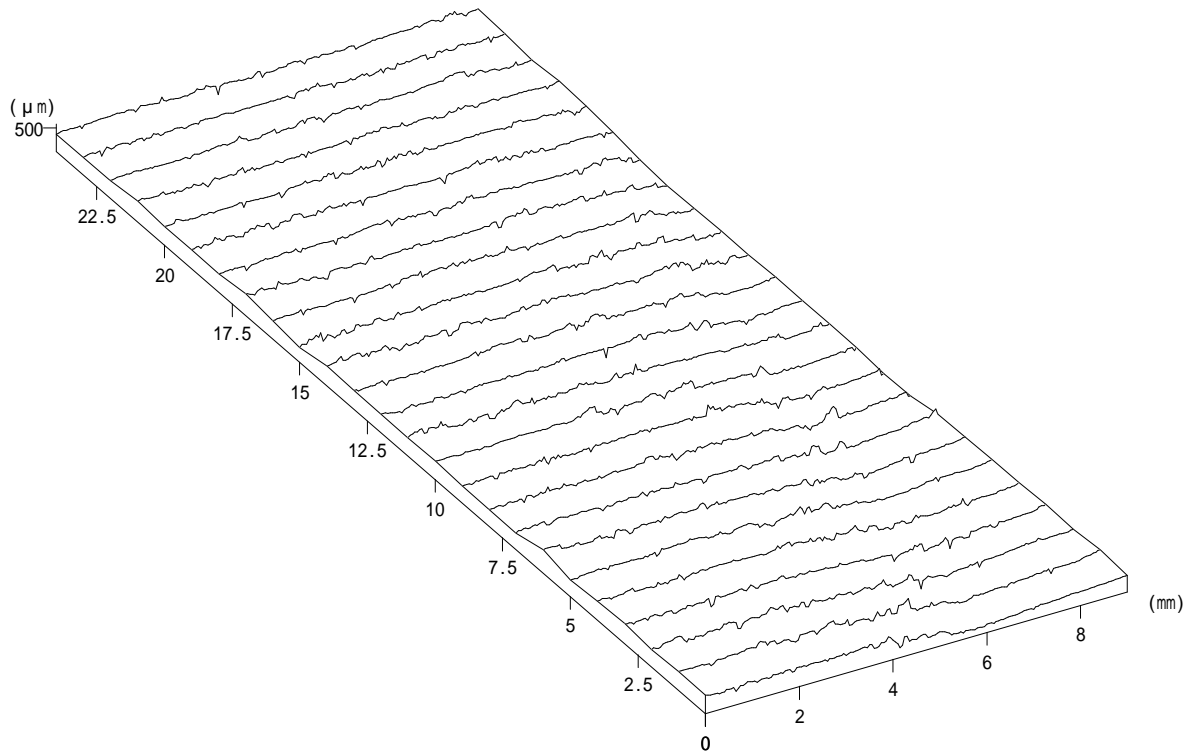
最大値 : 286.753 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 175.153 μm

平面度 : 286.753 μm

D90×25×10-3 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3dtop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1709.02 μm

測定開始点Y : -30504.1 μm

測定終了点X : 7291.01 μm

測定終了点Y : -6504.1 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 1000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33520.2 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 4525

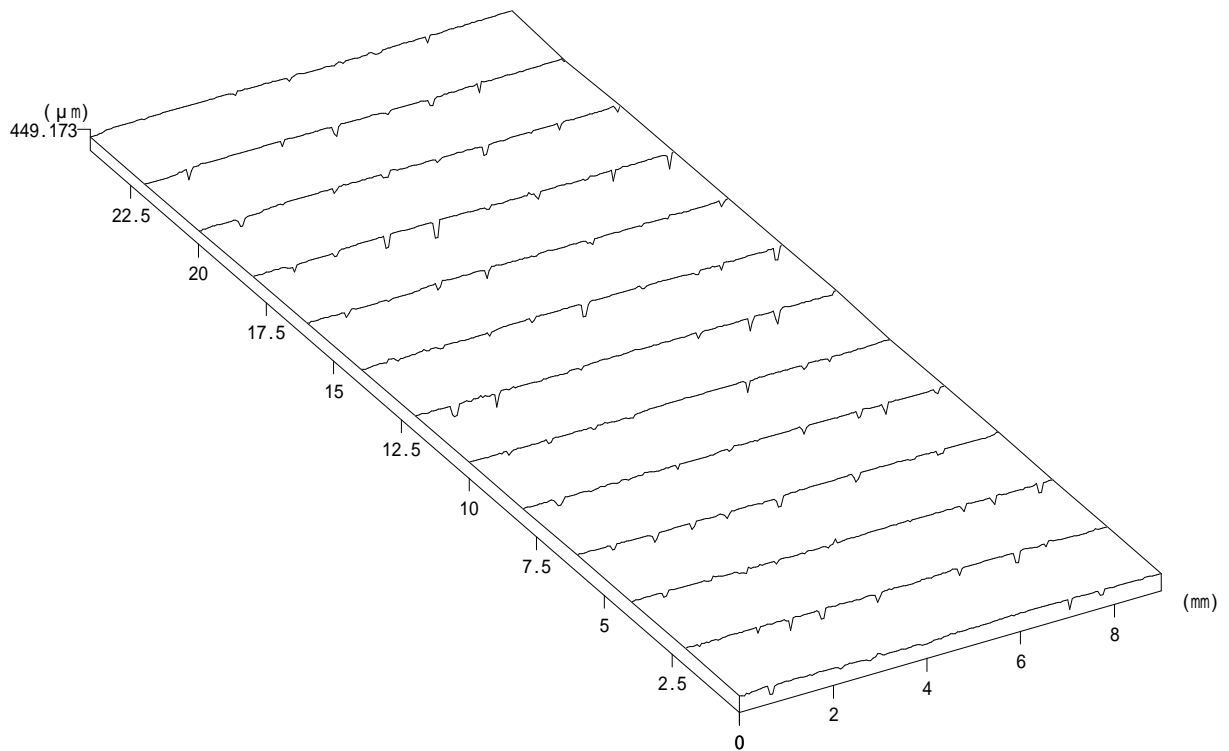
最大値 : 582.314 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 364.688 μm

平面度 : 582.314 μm

D90×25×10-3 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3dbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 323.321 μm

測定開始点Y : 3476.43 μm

測定終了点X : 9323.37 μm

測定終了点Y : 27476.5 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33393 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

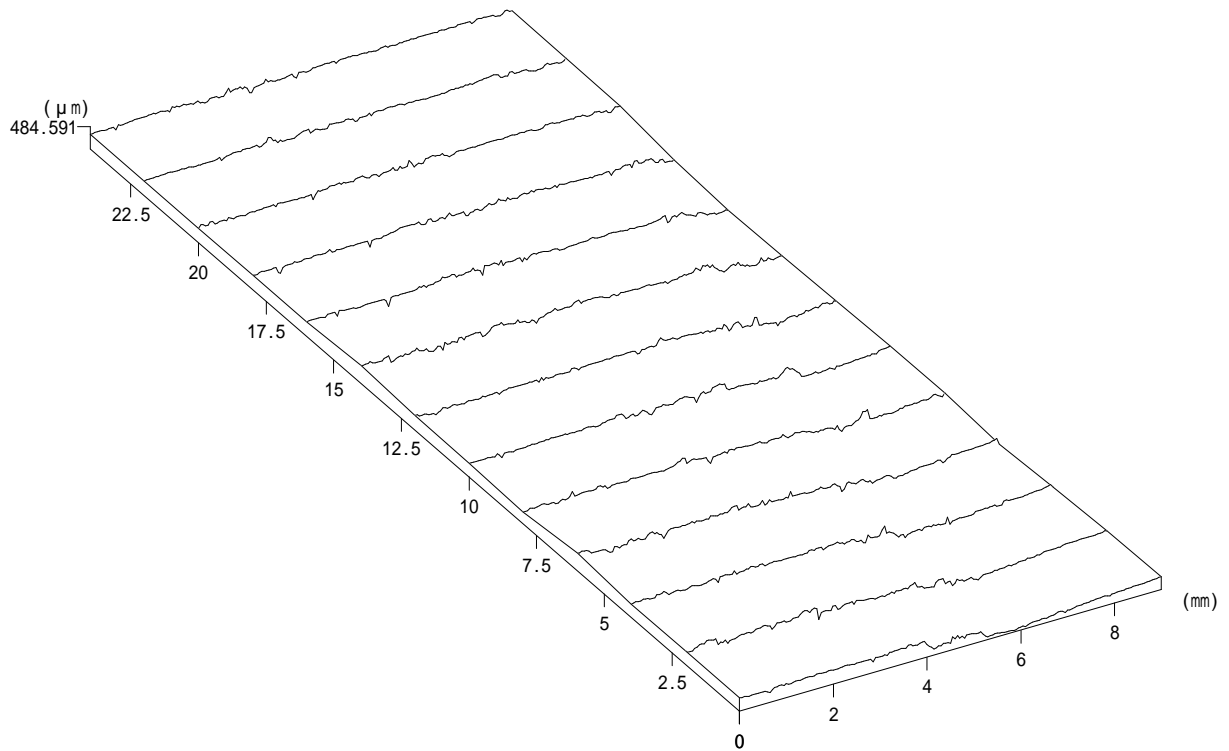
最大値 : 449.173 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 343.777 μm

平面度 : 449.173 μm

D90×25×10-3 0.7kN, Top



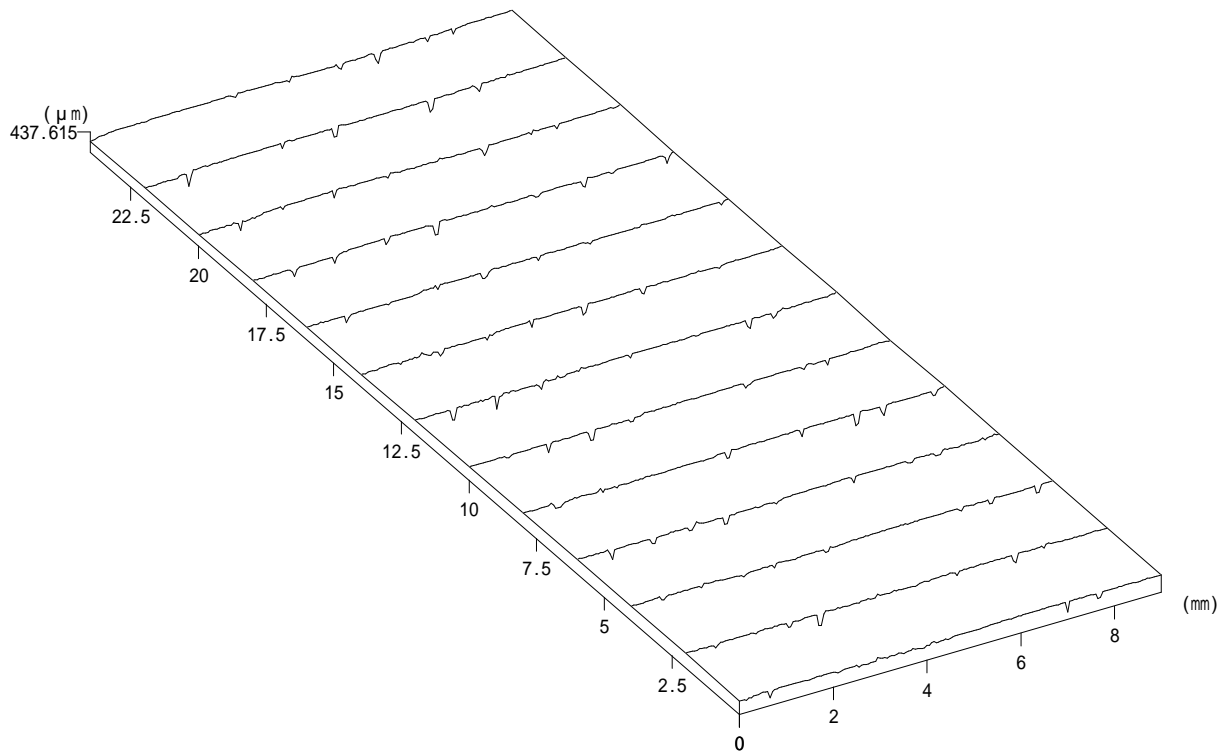
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3dtop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点 X :	2603.21 μm	測定開始点 Y :	-24646.7 μm
測定終了点 X :	11603.2 μm	測定終了点 Y :	-646.592 μm
測定範囲 X :	9000.03 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-33460.3 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	484.591 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	285.308 μm	平面度 :	484.591 μm

D90×25×10-3 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3dbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 3282.8 μm

測定開始点Y : -26417.9 μm

測定終了点X : 12282.9 μm

測定終了点Y : -2417.84 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33428.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

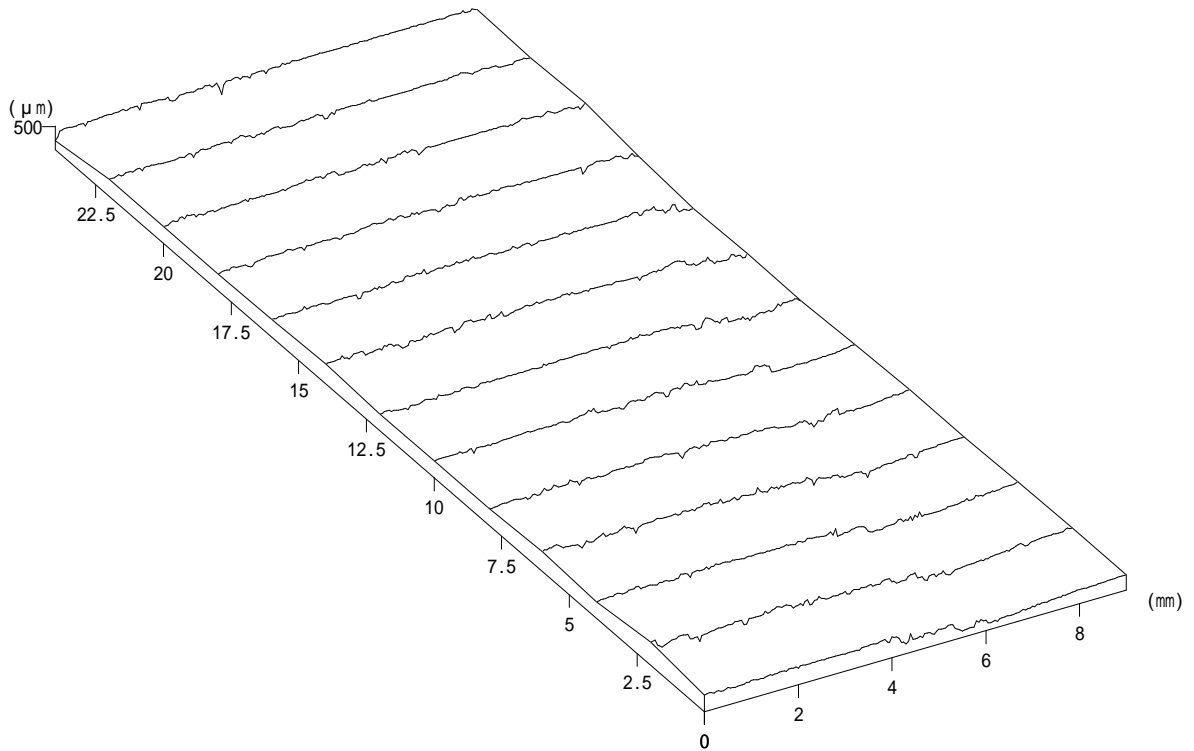
最大値 : 437.615 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 330.622 μm

平面度 : 437.615 μm

D90×25×10-3 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3dtop-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 6185.24 μm

測定開始点Y : -39219.4 μm

測定終了点X : 15185.3 μm

測定終了点Y : -15219.3 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33553.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

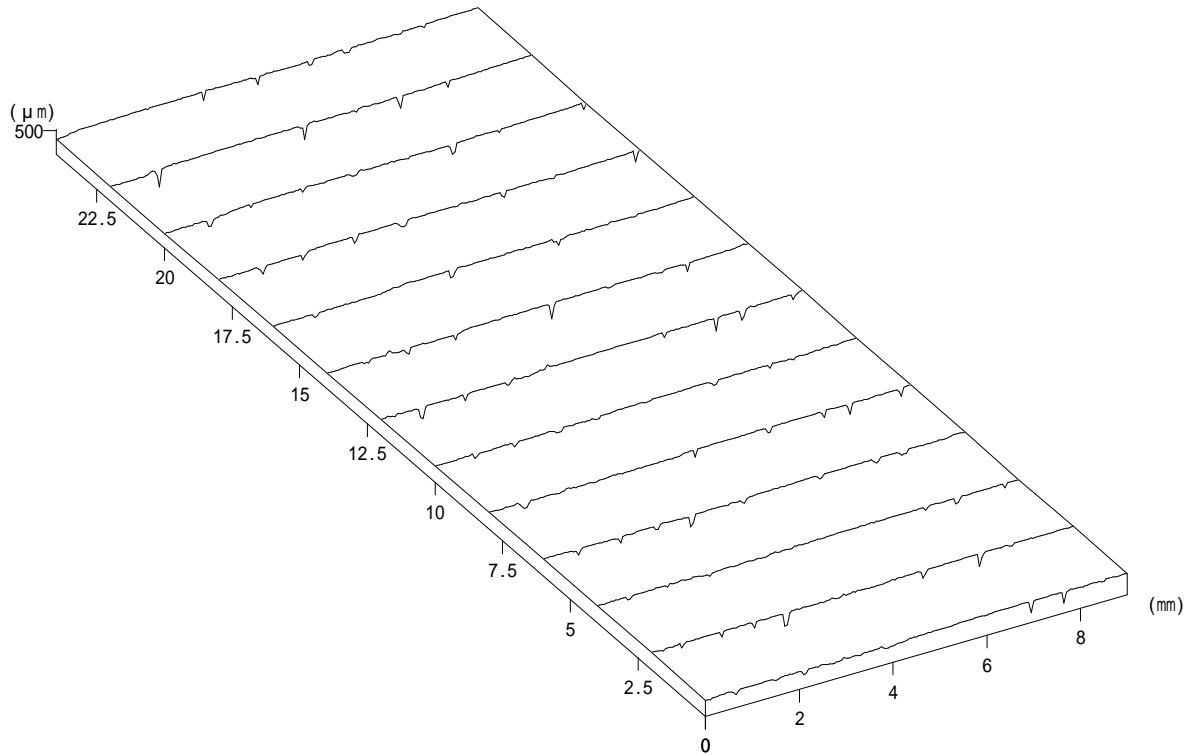
最大値 : 511.261 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 357.644 μm

平面度 : 511.261 μm

D90×25×10-3 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c3dbot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 6640.45 μm

測定開始点Y : -38006 μm

測定終了点X : 15640.5 μm

測定終了点Y : -14006 μm

測定範囲X : 9000.01 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33544.2 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

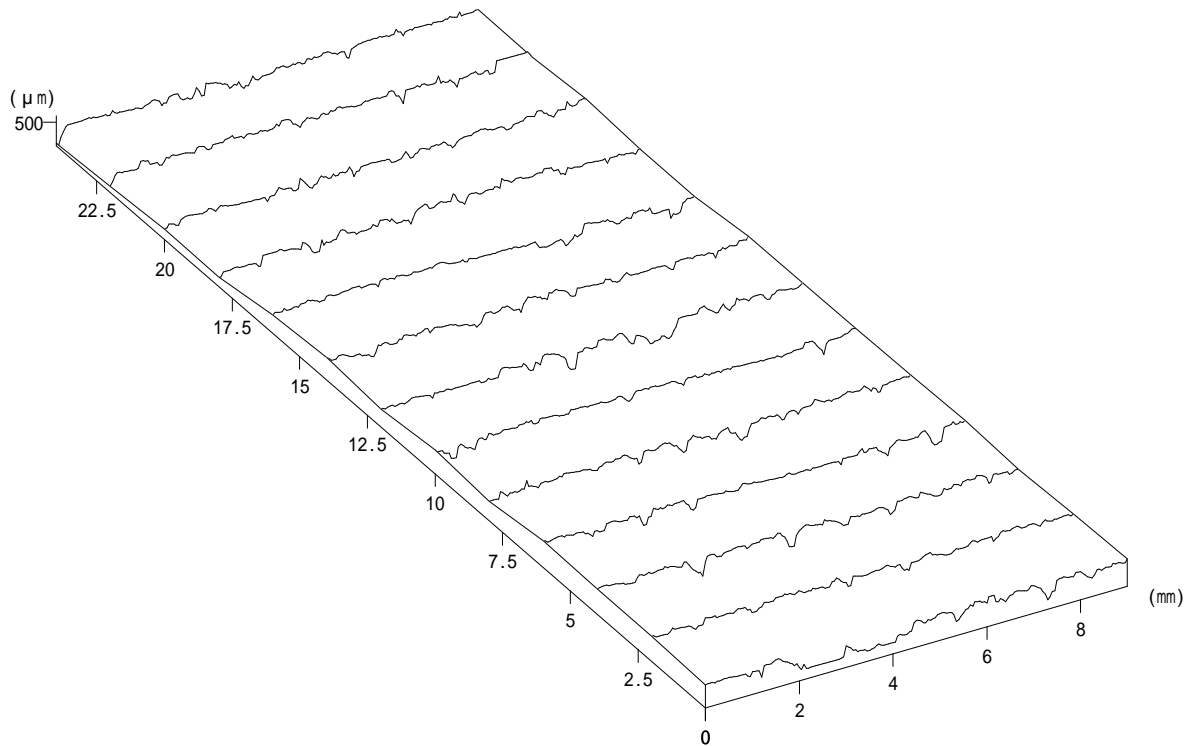
最大値 : 528.323 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 407.601 μm

平面度 : 528.323 μm

D90×25×10-4 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4dtop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -710.943 μm

測定開始点Y : 2123.52 μm

測定終了点X : 8289.15 μm

測定終了点Y : 26123.6 μm

測定範囲X : 9000.09 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31768 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

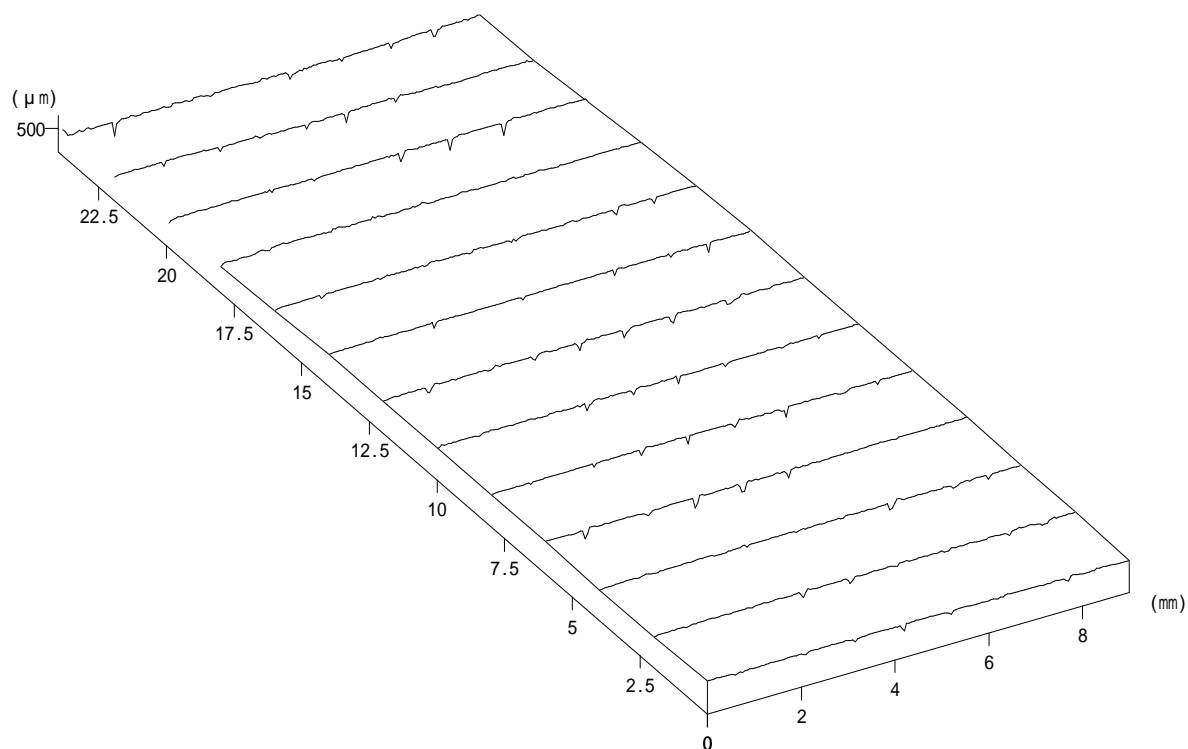
最大値 : 638.08 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 408.814 μm

平面度 : 638.08 μm

D90×25×10-4 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4dbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -426.362 μm

測定開始点Y : 1629.57 μm

測定終了点X : 8573.67 μm

測定終了点Y : 25629.6 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31950.3 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2349

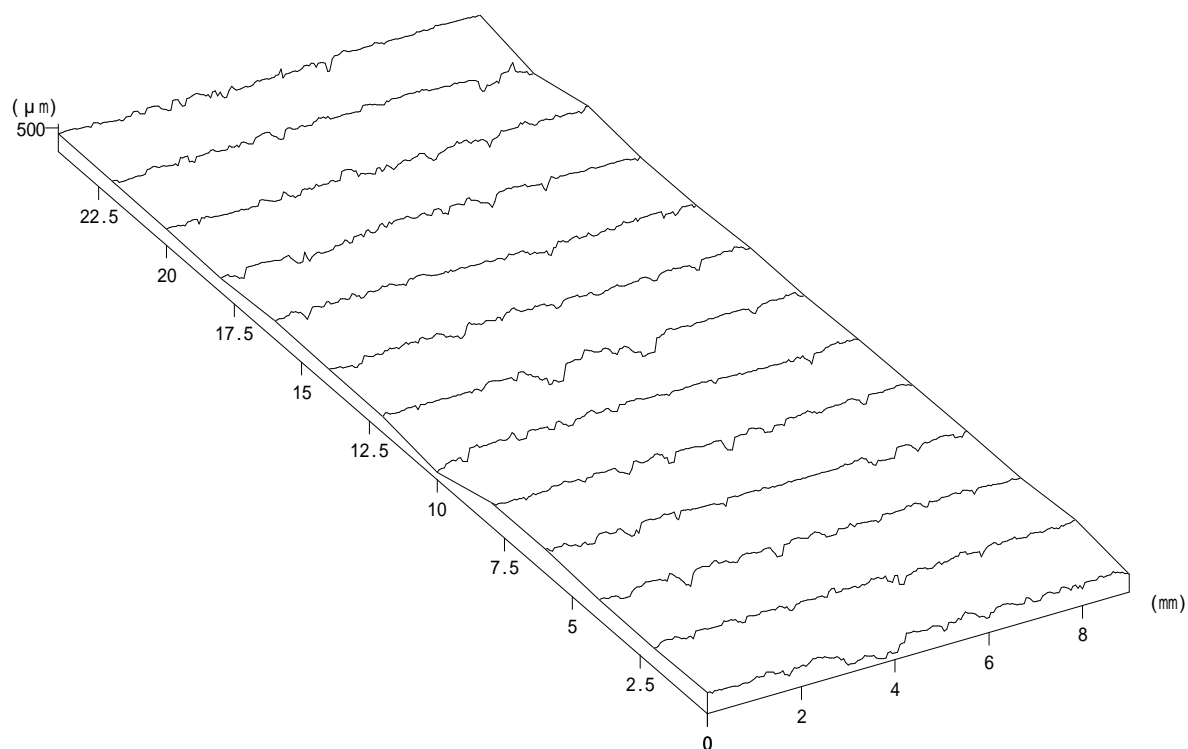
最大値 : 775.087 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 627.078 μm

平面度 : 775.087 μm

D90×25×10-4 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4dtop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 3655.14 μm

測定開始点Y : -27621.7 μm

測定終了点X : 12655.2 μm

測定終了点Y : -3621.67 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31778.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

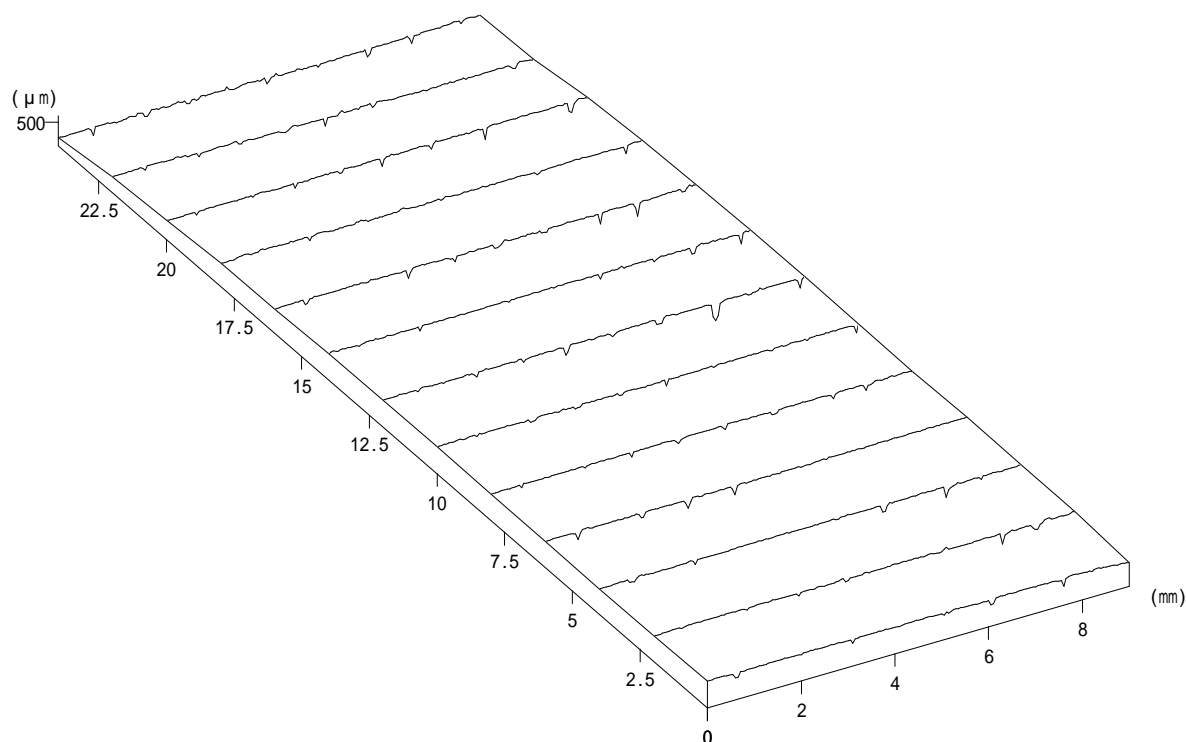
最大値 : 584.27 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 380.441 μm

平面度 : 584.27 μm

D90×25×10-4 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4dbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 3855.95 μm

測定開始点Y : -28267.7 μm

測定終了点X : 12856 μm

測定終了点Y : -4267.7 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31878.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

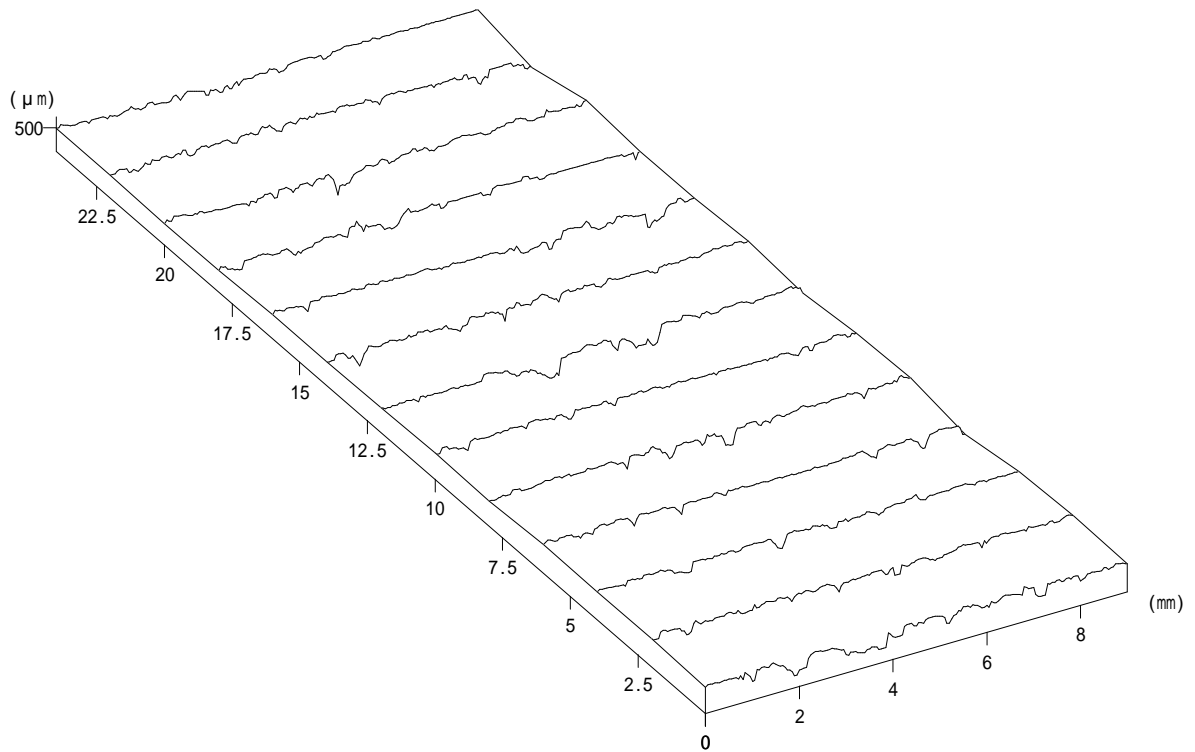
最大値 : 635.732 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 497.683 μm

平面度 : 635.732 μm

D90×25×10-4 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c4dtop-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 5442.93 μm

測定開始点Y : -40610.1 μm

測定終了点X : 14443 μm

測定終了点Y : -16610 μm

測定範囲X : 9000.12 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -31949 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

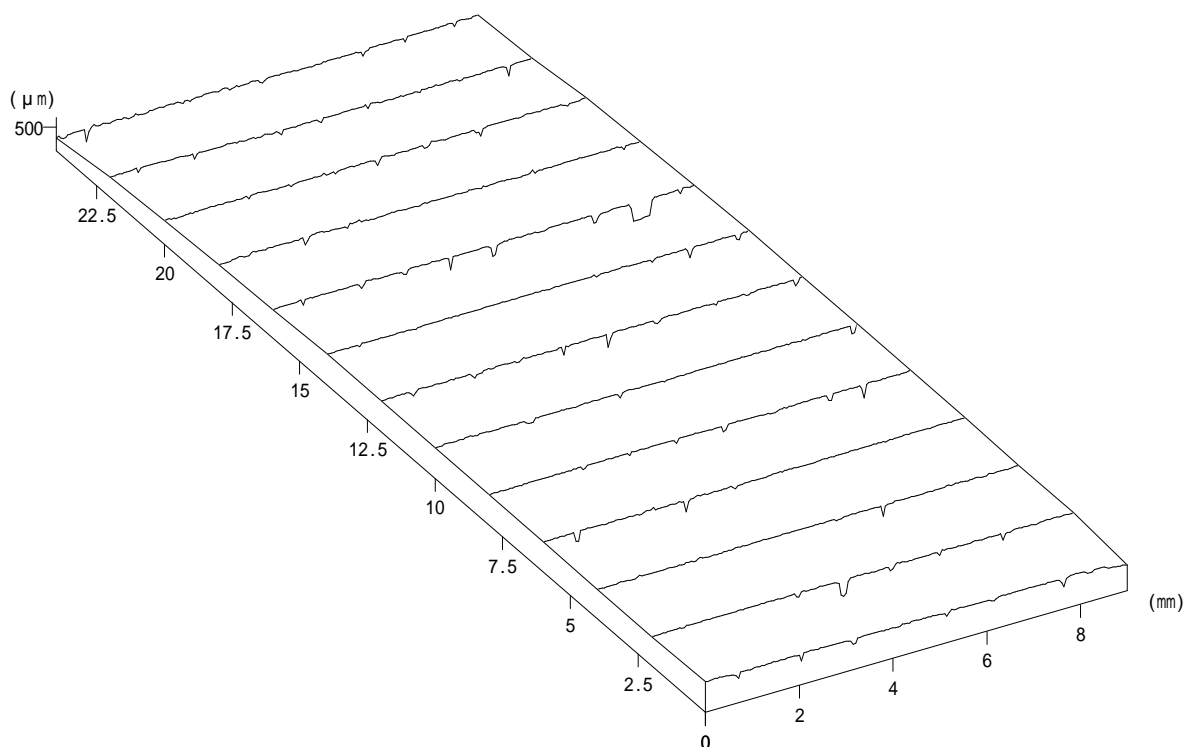
最大値 : 742.73 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 511.317 μm

平面度 : 742.73 μm

D90×25×10-4 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c4dbot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 5495.06 μm

測定開始点Y : -41544.7 μm

測定終了点X : 14495.2 μm

測定終了点Y : -17544.7 μm

測定範囲X : 9000.12 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32007.9 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

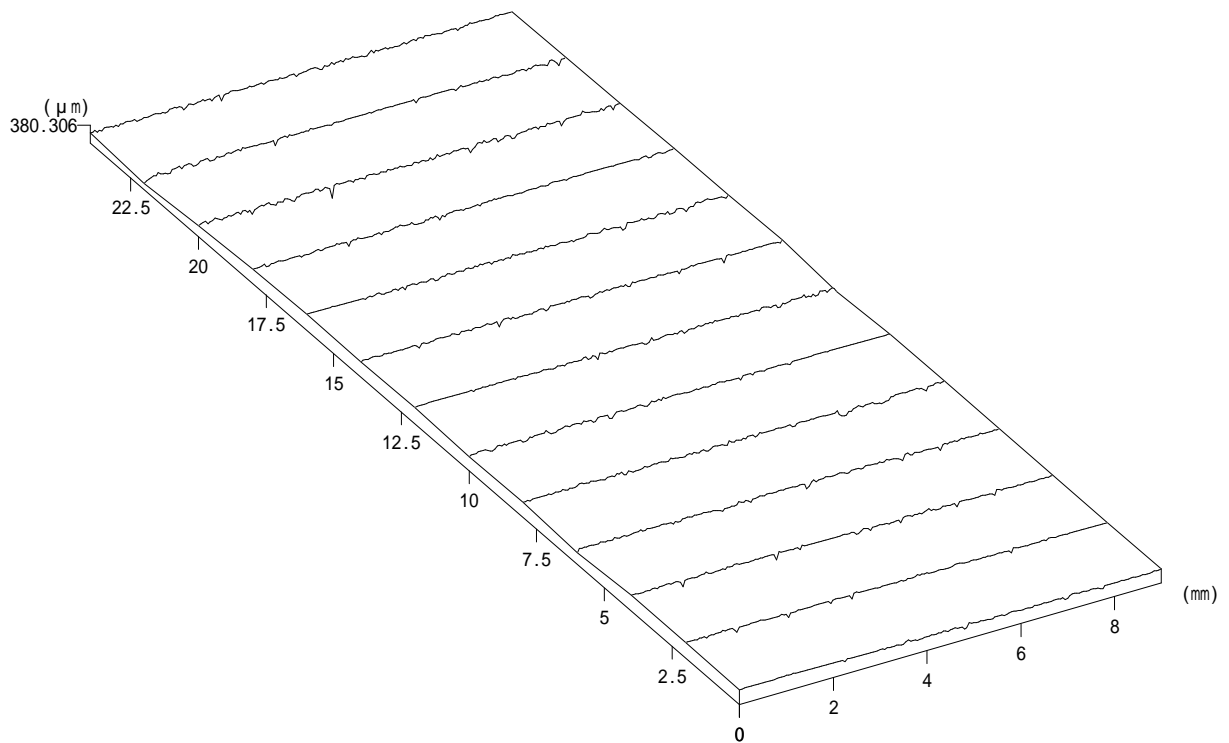
最大値 : 710.907 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 587.883 μm

平面度 : 710.907 μm

D90×25×10-5 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5dtop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 92.44 μm

測定開始点Y : 779.174 μm

測定終了点X : 9092.51 μm

測定終了点Y : 24779.2 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32541.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

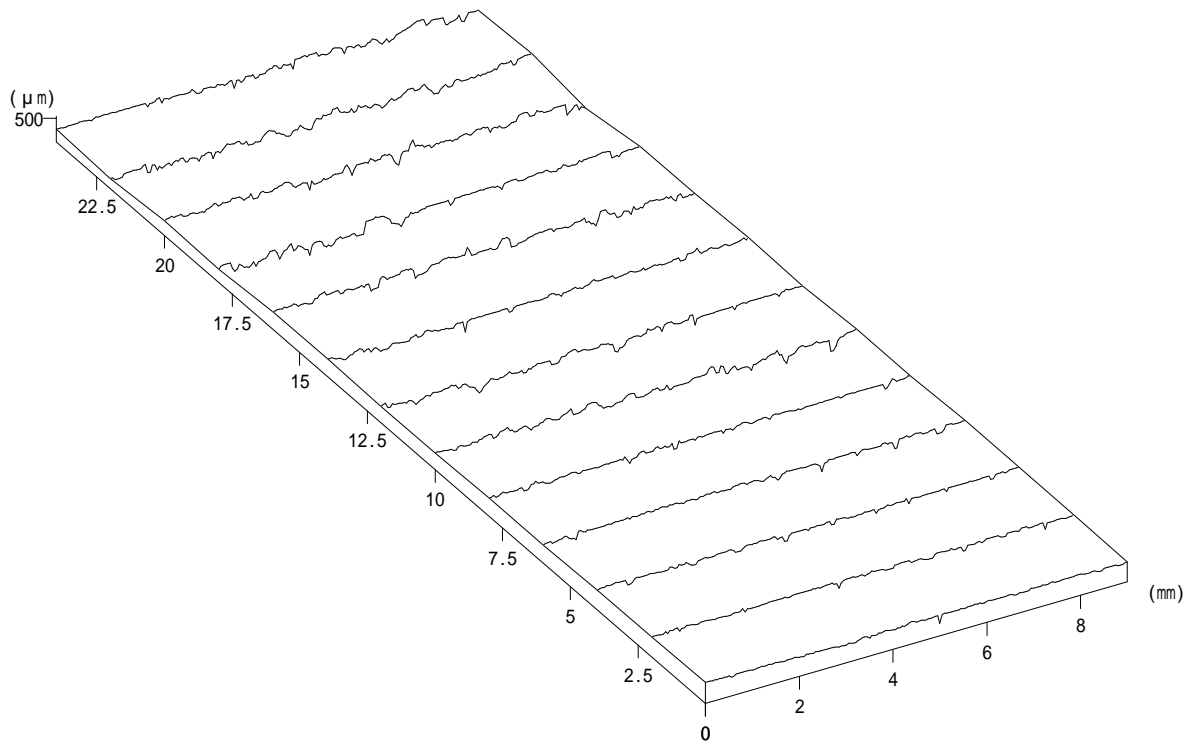
最大値 : 380.306 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 293.35 μm

平面度 : 380.306 μm

D90×25×10-5 Before test, Bot



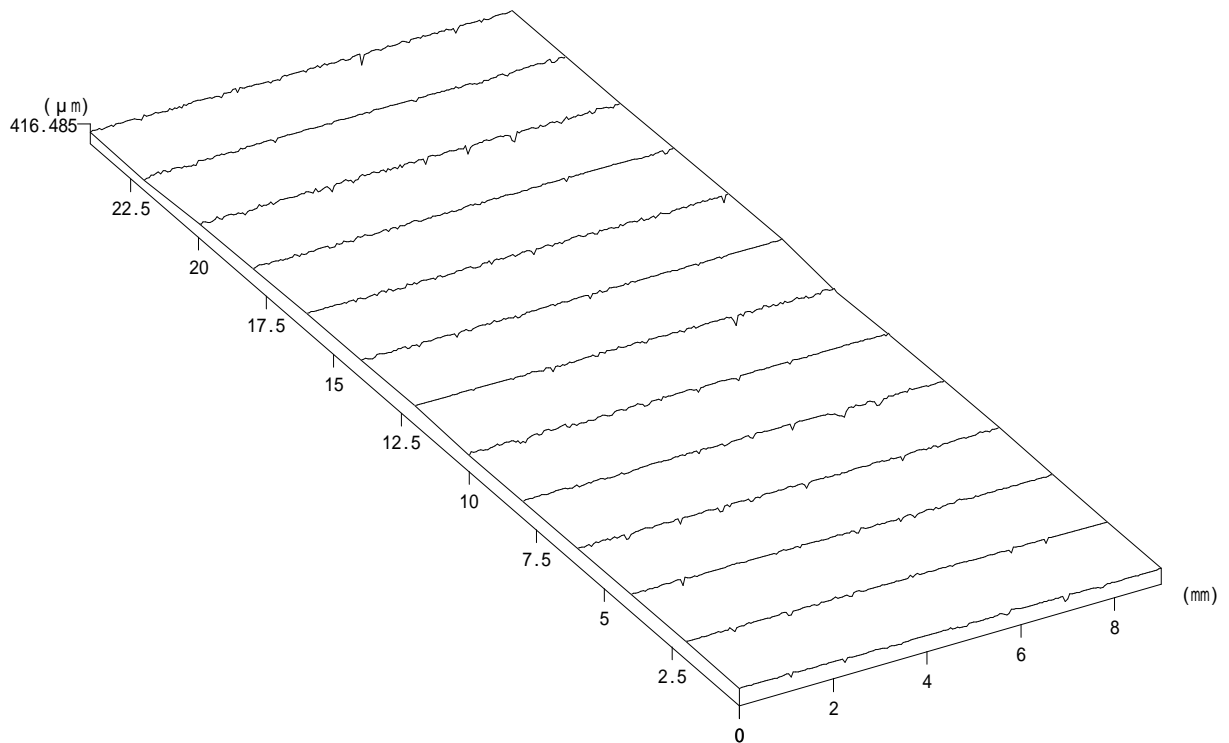
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5dbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点 X :	-238.271 μm	測定開始点 Y :	1365.27 μm
測定終了点 X :	8761.76 μm	測定終了点 Y :	25365.3 μm
測定範囲 X :	9000.03 μm	測定範囲 Y :	24000.1 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-32655.4 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	547.154 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	336.429 μm	平面度 :	547.154 μm

D90×25×10-5 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5dtop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 4369 μm

測定開始点Y : -27835.6 μm

測定終了点X : 13369.1 μm

測定終了点Y : -3835.55 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32613 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

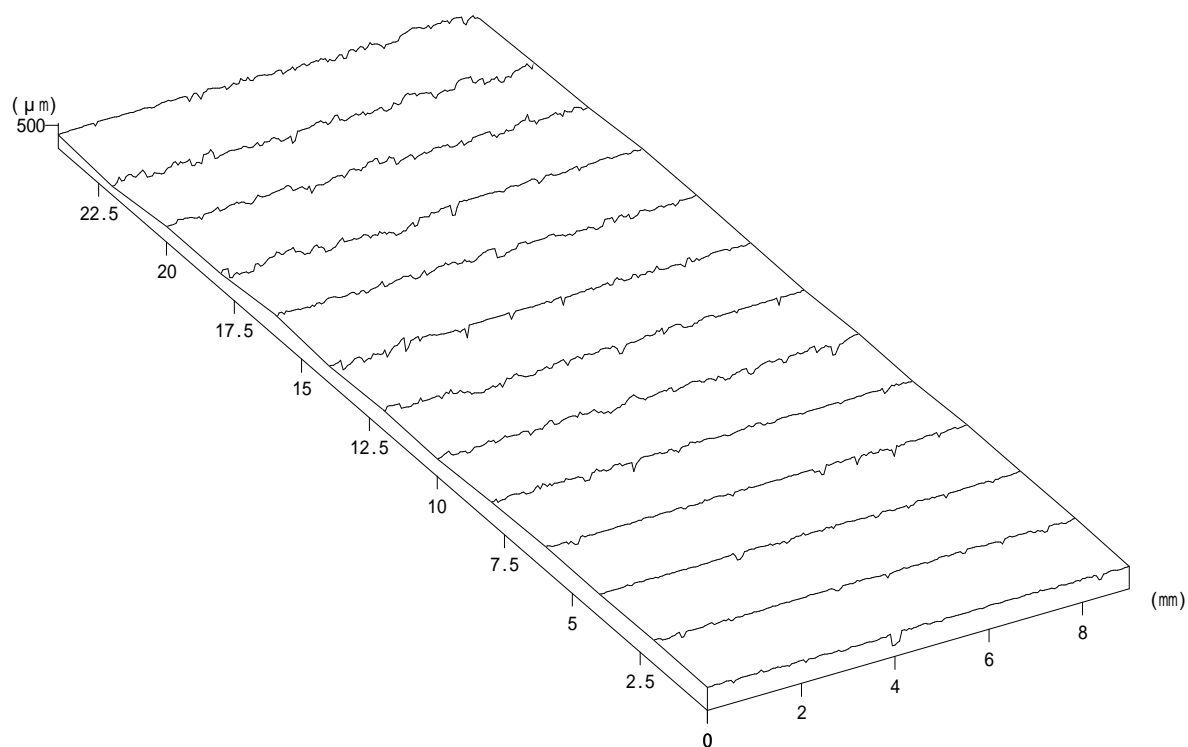
最大値 : 416.485 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 328.549 μm

平面度 : 416.485 μm

D90×25×10-5 0.7kN, Bot



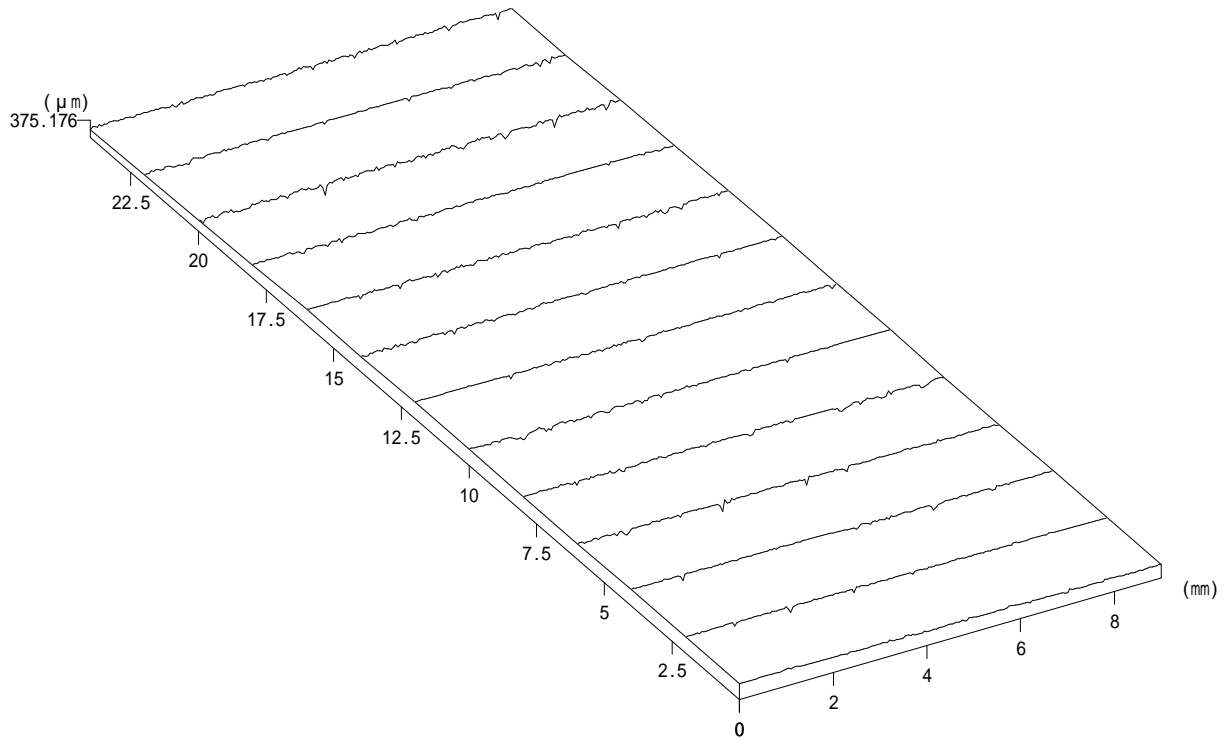
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5dbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点 X :	4156.92 μm	測定開始点 Y :	-27980.3 μm
測定終了点 X :	13157 μm	測定終了点 Y :	-3980.23 μm
測定範囲 X :	9000.06 μm	測定範囲 Y :	24000 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-32724.6 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	537.338 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	385.668 μm	平面度 :	537.338 μm

D90×25×10-5 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c5dtop-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 5472.32 μm

測定開始点Y : -42907.5 μm

測定終了点X : 14472.4 μm

測定終了点Y : -18907.4 μm

測定範囲X : 9000.13 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32584.1 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

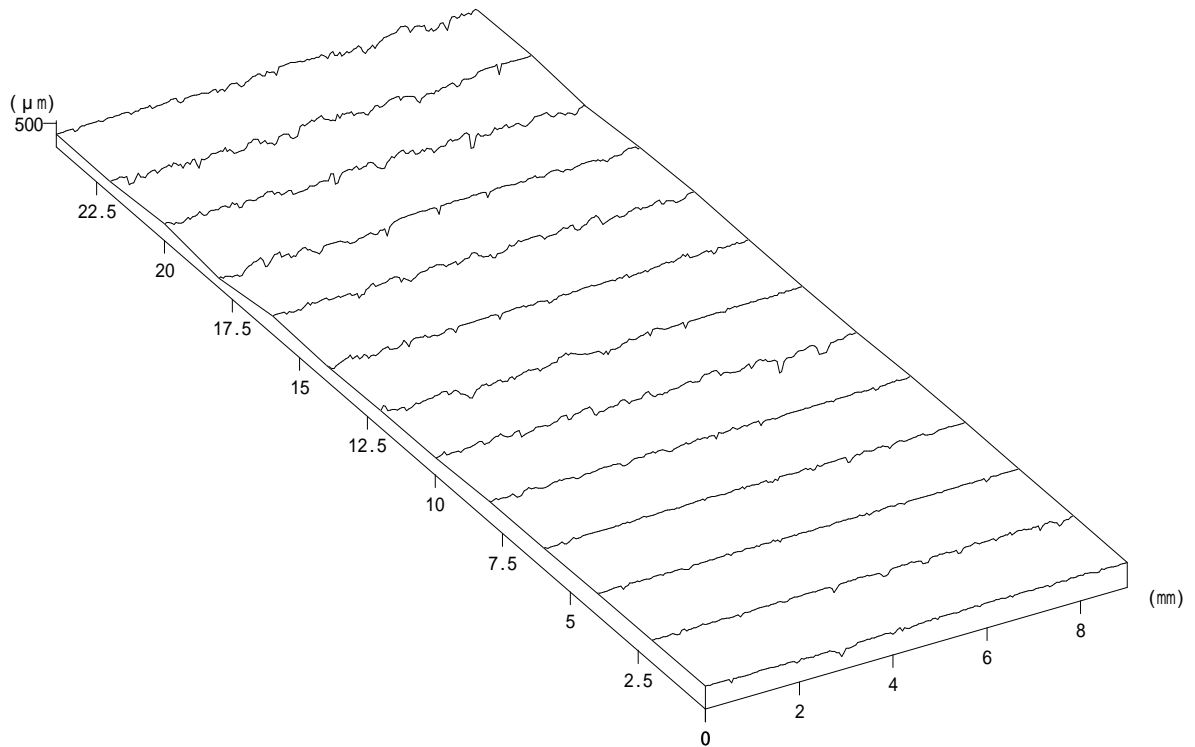
最大値 : 375.176 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 282.114 μm

平面度 : 375.176 μm

D90×25×10-5 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5dbot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 5919.13 μm

測定開始点Y : -42130.1 μm

測定終了点X : 14919.2 μm

測定終了点Y : -18130 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -32728.9 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

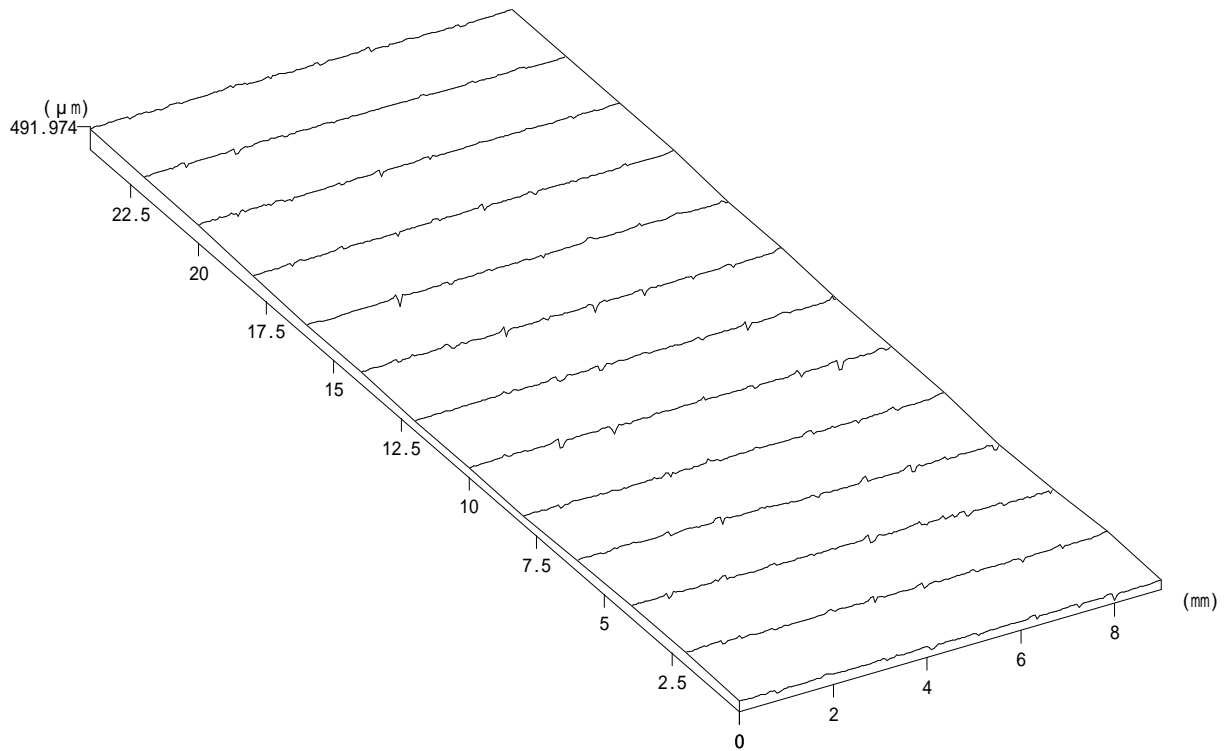
最大値 : 557.708 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 385.36 μm

平面度 : 557.708 μm

D90×25×10-6 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6dtop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 404.612 μm

測定開始点Y : 4308.21 μm

測定終了点X : 9404.7 μm

測定終了点Y : 19691.8 μm

測定範囲X : 9000.09 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33375.8 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

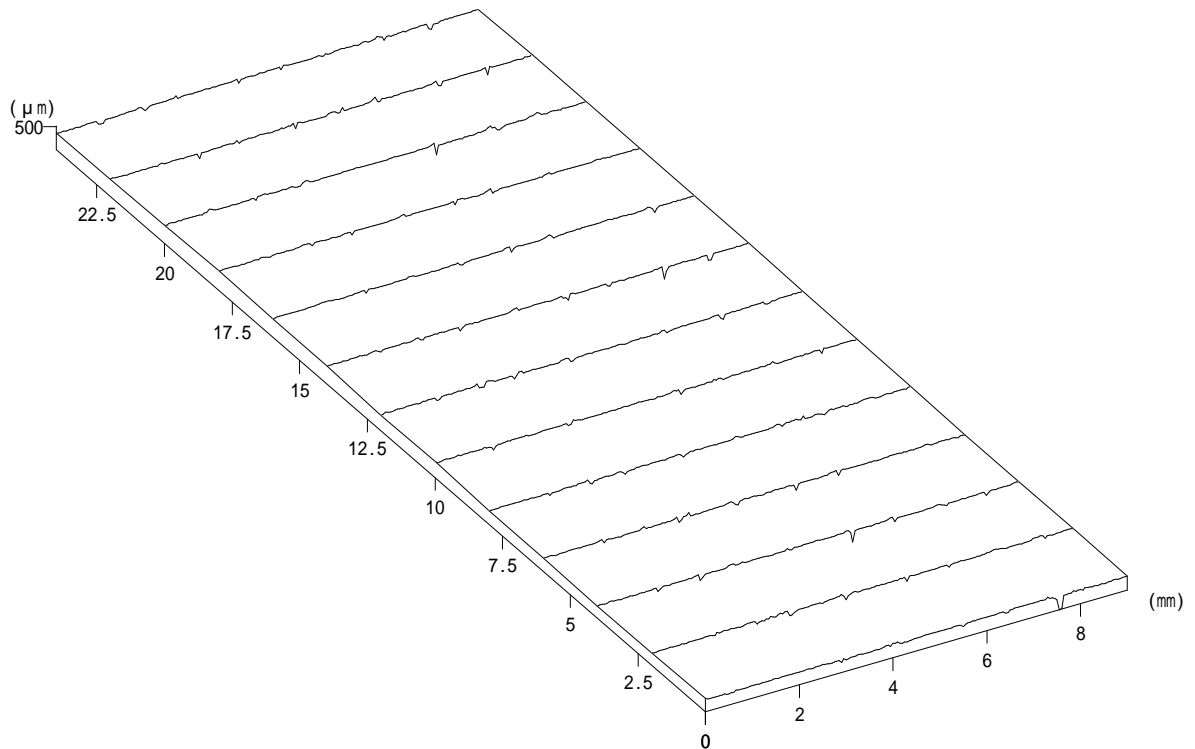
最大値 : 491.974 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 268.664 μm

平面度 : 491.974 μm

D90×25×10-6 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6dbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : 1232.97 μm

測定開始点Y : -3631.46 μm

測定終了点X : 10233 μm

測定終了点Y : 20368.6 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33431.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

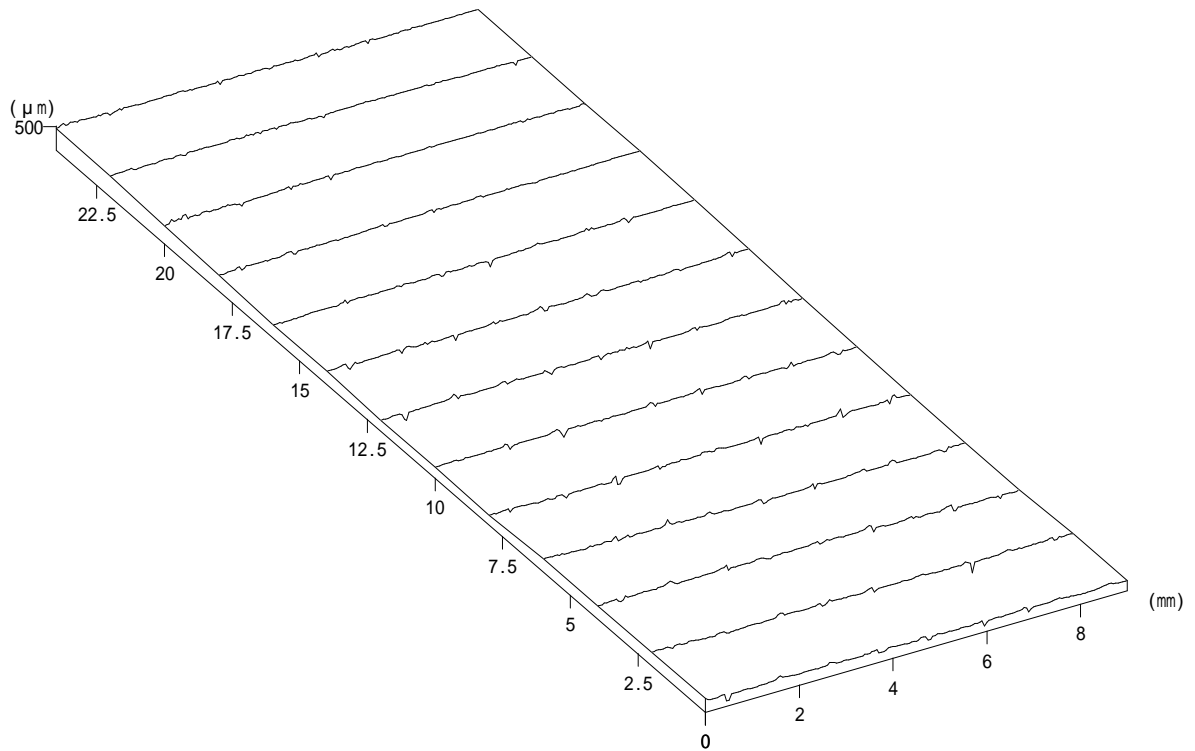
最大値 : 506.329 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 353.245 μm

平面度 : 506.329 μm

D90×25×10-6 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6dtop-11.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 4231.68 μm

測定開始点Y : -27622.8 μm

測定終了点X : 13231.7 μm

測定終了点Y : -3622.75 μm

測定範囲X : 8999.99 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33436.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

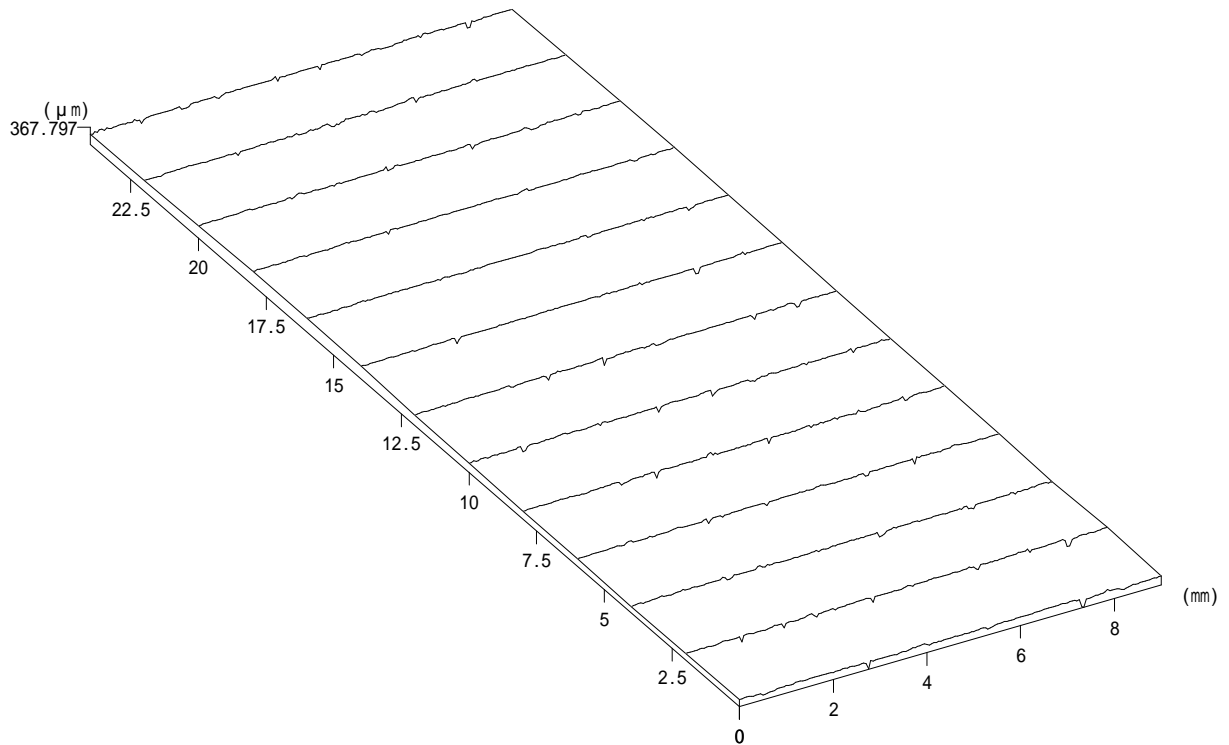
最大値 : 522.791 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 293.172 μm

平面度 : 522.791 μm

D90×25×10-6 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6dbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 4440.3 μm

測定開始点Y : -29977.5 μm

測定終了点X : 13440.3 μm

測定終了点Y : -5977.46 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33353.4 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

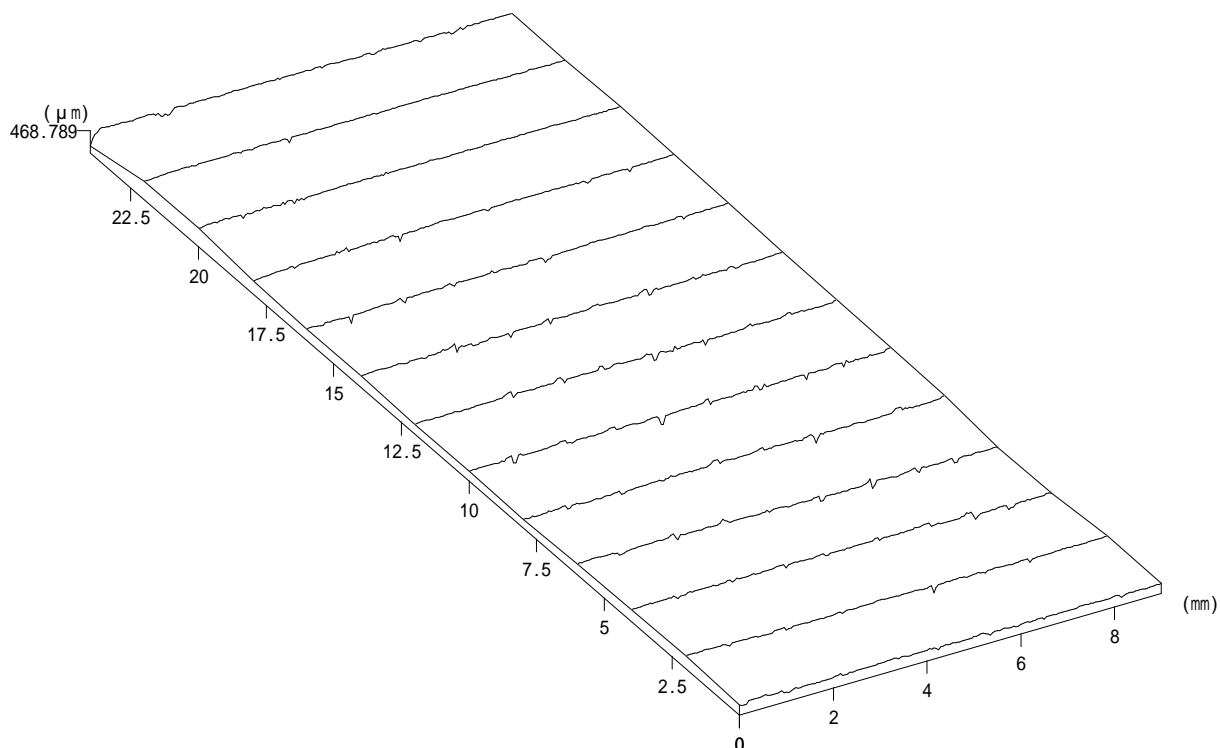
最大値 : 367.797 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 244.078 μm

平面度 : 367.797 μm

D90×25×10-6 2.8kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c6dtop-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 6201.02 μm

測定開始点Y : -43576.1 μm

測定終了点X : 15201.1 μm

測定終了点Y : -19576 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33434.7 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

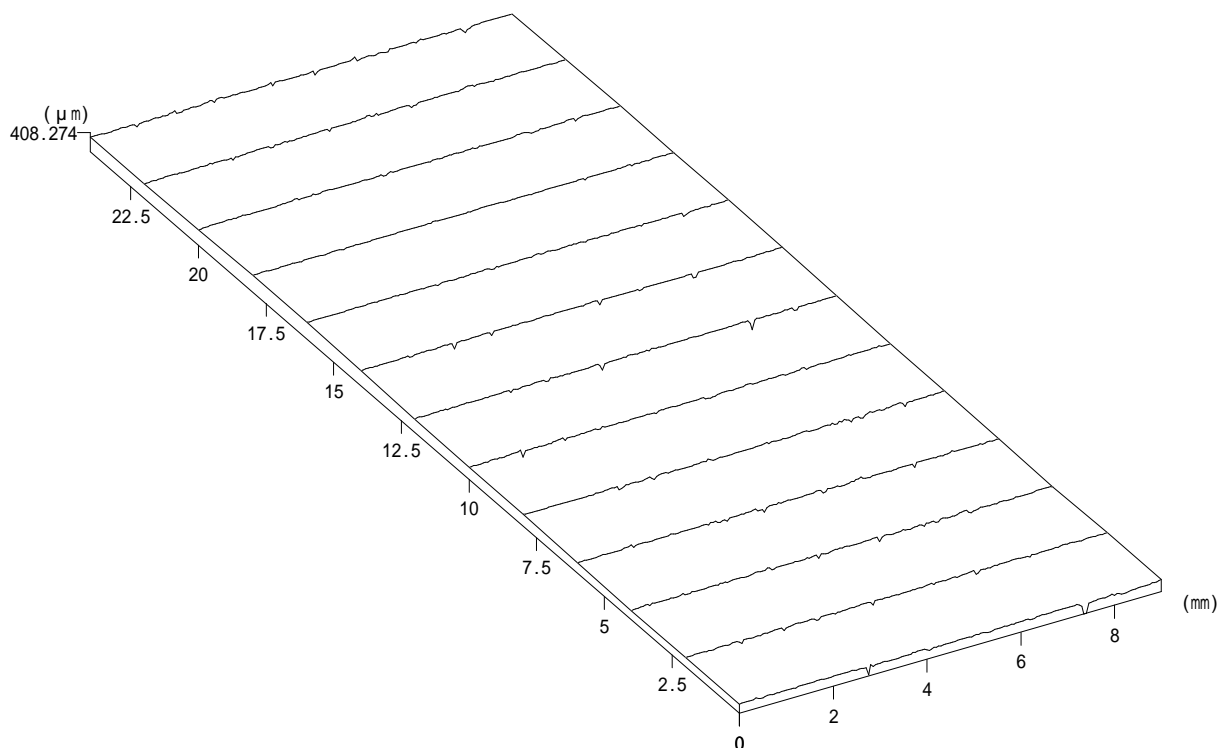
最大値 : 468.789 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 271.775 μm

平面度 : 468.789 μm

D90×25×10-6 2.8kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\4\c6dbot-4.nh3

データ名 : 4

測定開始点X : 6398.51 μm

測定開始点Y : -44265.6 μm

測定終了点X : 15398.5 μm

測定終了点Y : -20265.5 μm

測定範囲X : 9000.02 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -33434.5 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

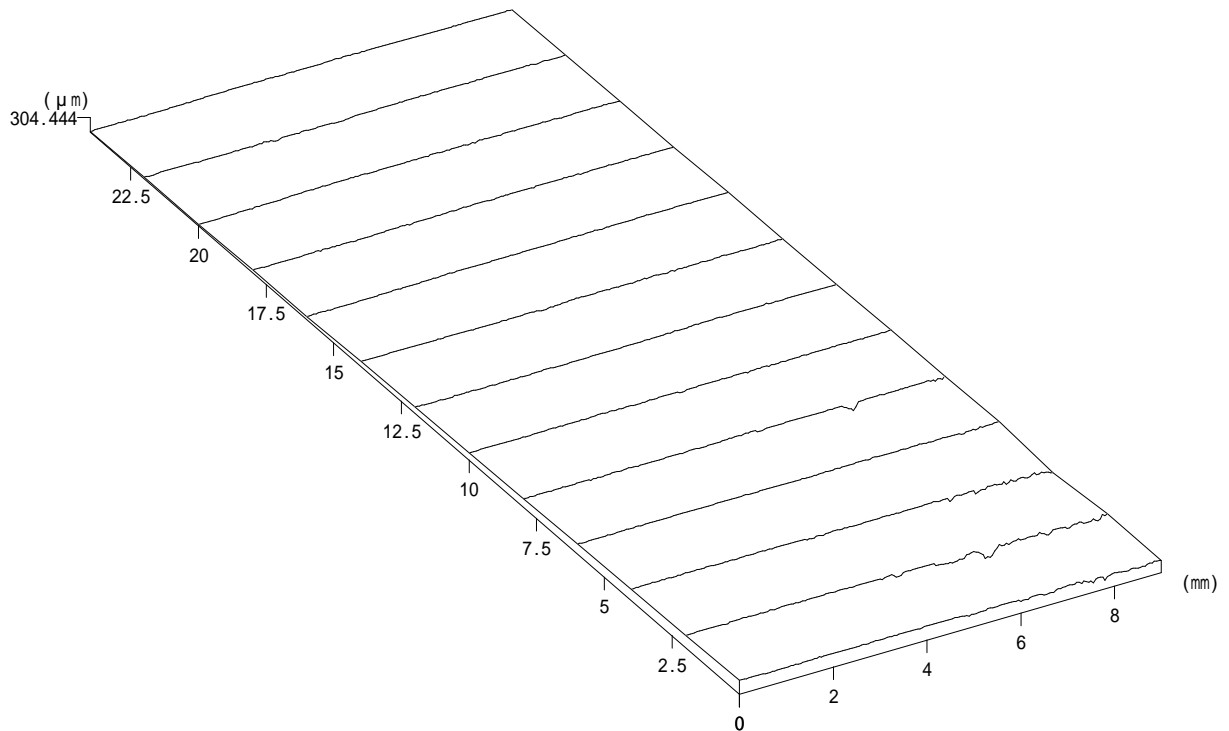
最大値 : 408.274 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 297.858 μm

平面度 : 408.274 μm

20×25×10-1 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1ndtop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1733.52 μm

測定開始点Y : -19178.5 μm

測定終了点X : 7266.52 μm

測定終了点Y : 4821.49 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103481 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

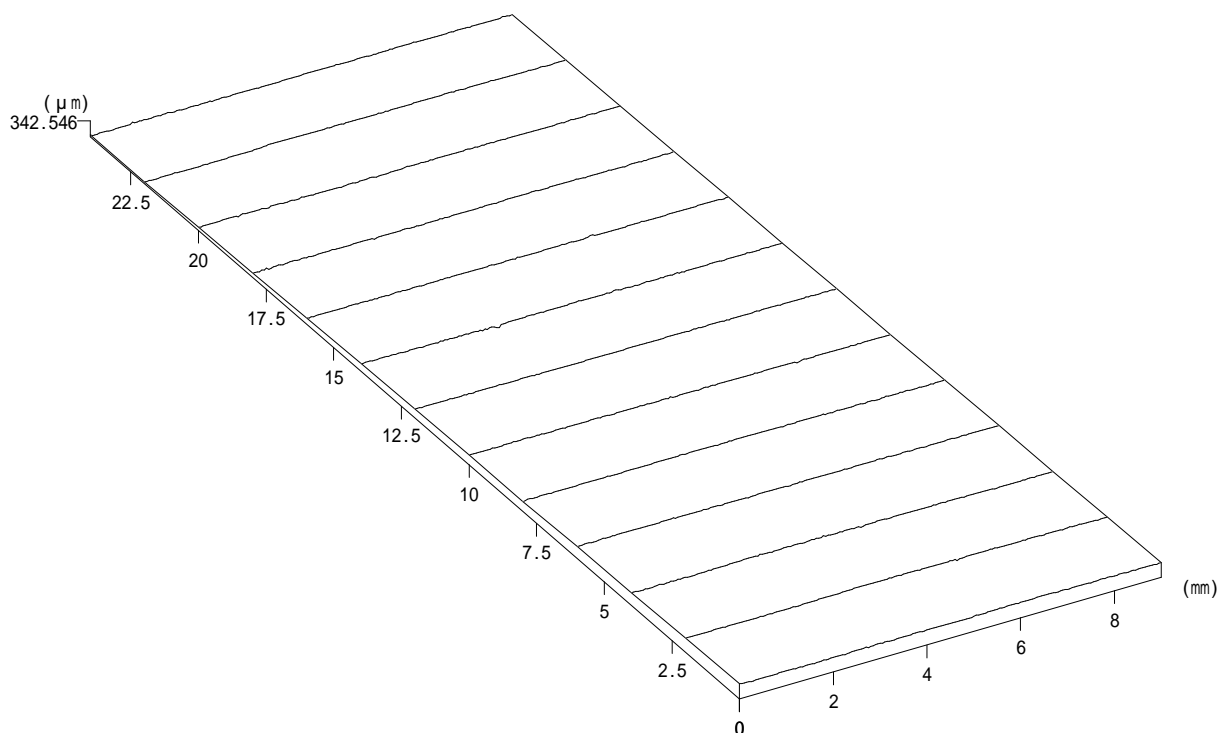
最大値 : 304.444 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 141.89 μm

平面度 : 304.444 μm

20×25×10-1 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1ndbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1883.65 μm

測定開始点Y : -21762 μm

測定終了点X : 7116.4 μm

測定終了点Y : 2238.03 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103473 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

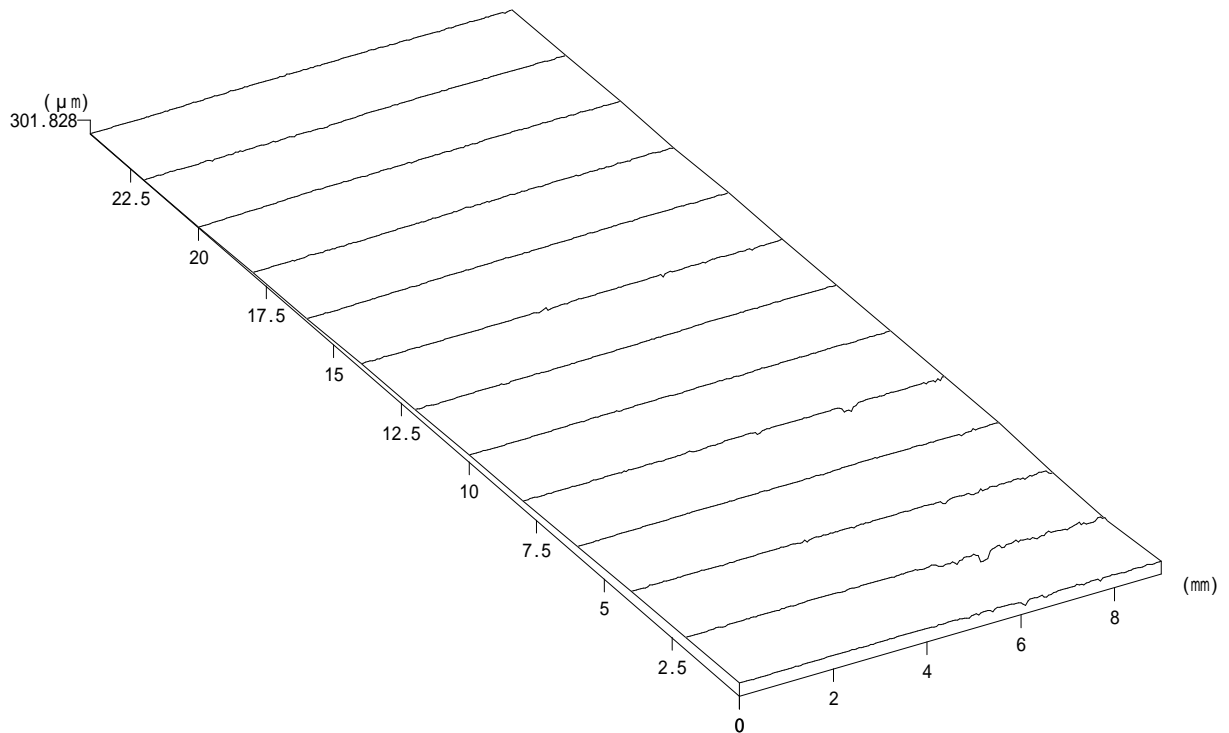
最大値 : 342.546 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 170.399 μm

平面度 : 342.546 μm

20×25×10-1 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1mintop-1.nh3

データ名 :

測定開始点X : -4352.17 μm

測定開始点Y : -5382.55 μm

測定終了点X : 4648.02 μm

測定終了点Y : 18617.5 μm

測定範囲X : 9000.19 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103482 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

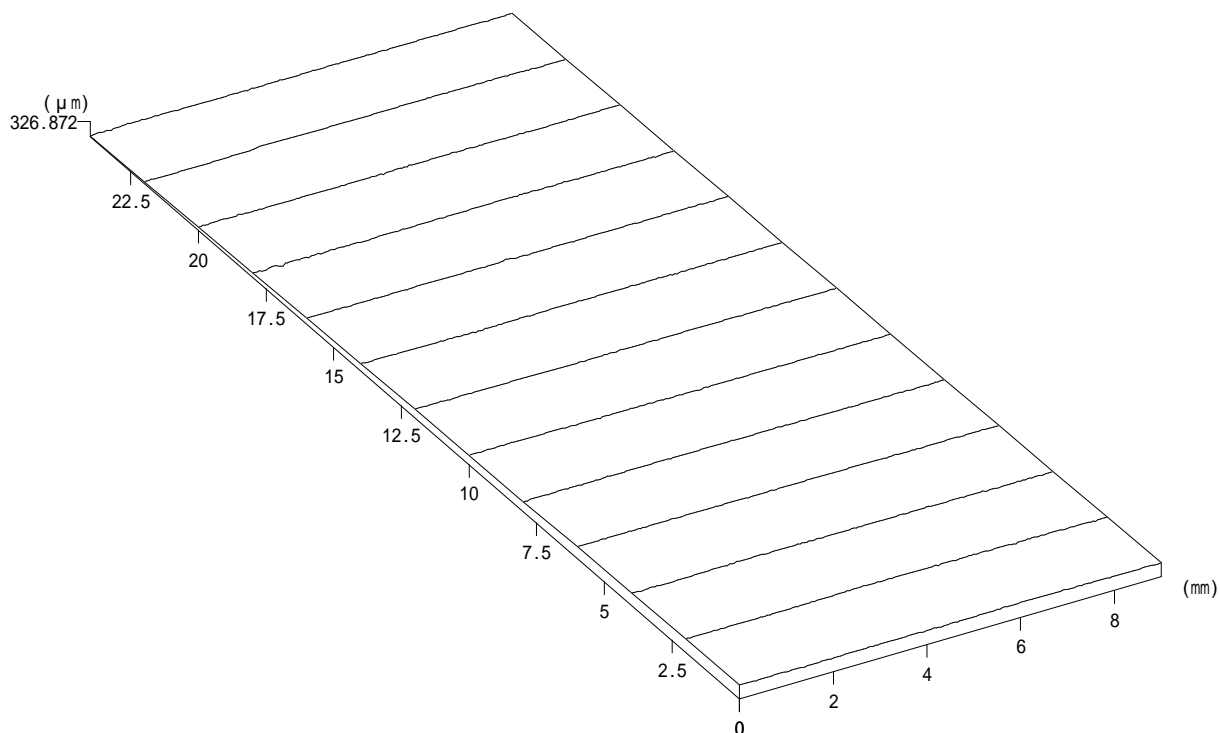
最大値 : 301.828 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 153.143 μm

平面度 : 301.828 μm

20×25×10-1 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c1minbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -4854.47 μm

測定開始点Y : -9410.83 μm

測定終了点X : 4145.6 μm

測定終了点Y : 14589.2 μm

測定範囲X : 9000.07 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103460 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

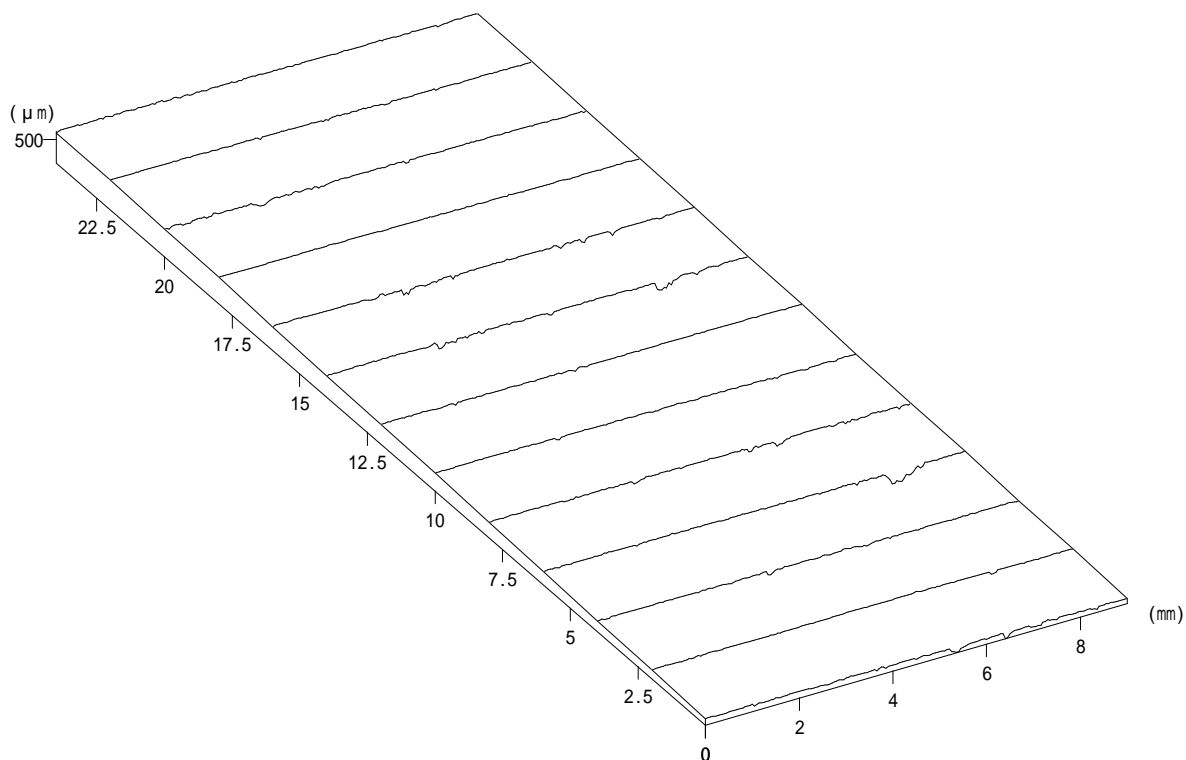
最大値 : 326.872 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 168.458 μm

平面度 : 326.872 μm

20×25×10-2 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2ndtop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1127.35 μm

測定開始点Y : -24404.4 μm

測定終了点X : 7872.72 μm

測定終了点Y : -404.367 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -102029 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

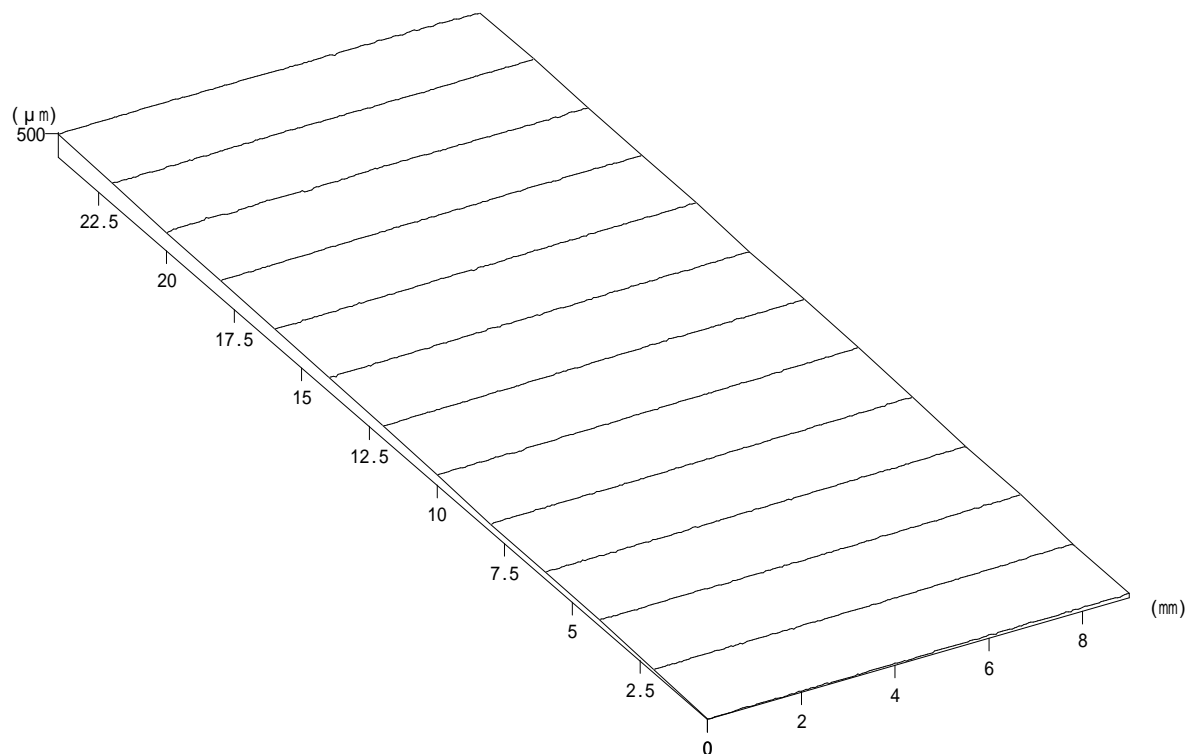
最大値 : 687.334 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 388.91 μm

平面度 : 687.334 μm

20×25×10-1 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2minbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1209.05 μm

測定開始点Y : -26318.8 μm

測定終了点X : 7790.98 μm

測定終了点Y : -2318.73 μm

測定範囲X : 9000.02 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -101932 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

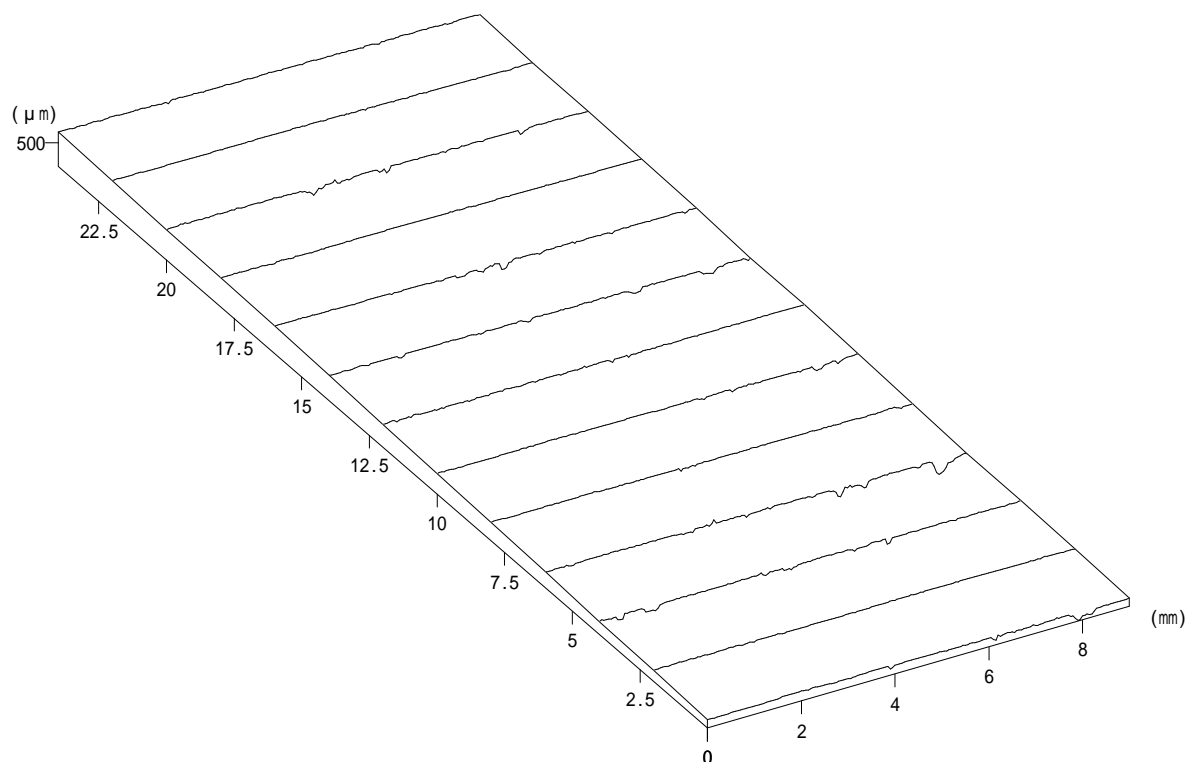
最大値 : 524.665 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 295.298 μm

平面度 : 524.665 μm

20×25×10-2 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2mintop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 5495.97 μm

測定開始点Y : -12470.3 μm

測定終了点X : 3504.07 μm

測定終了点Y : 11529.7 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -102052 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

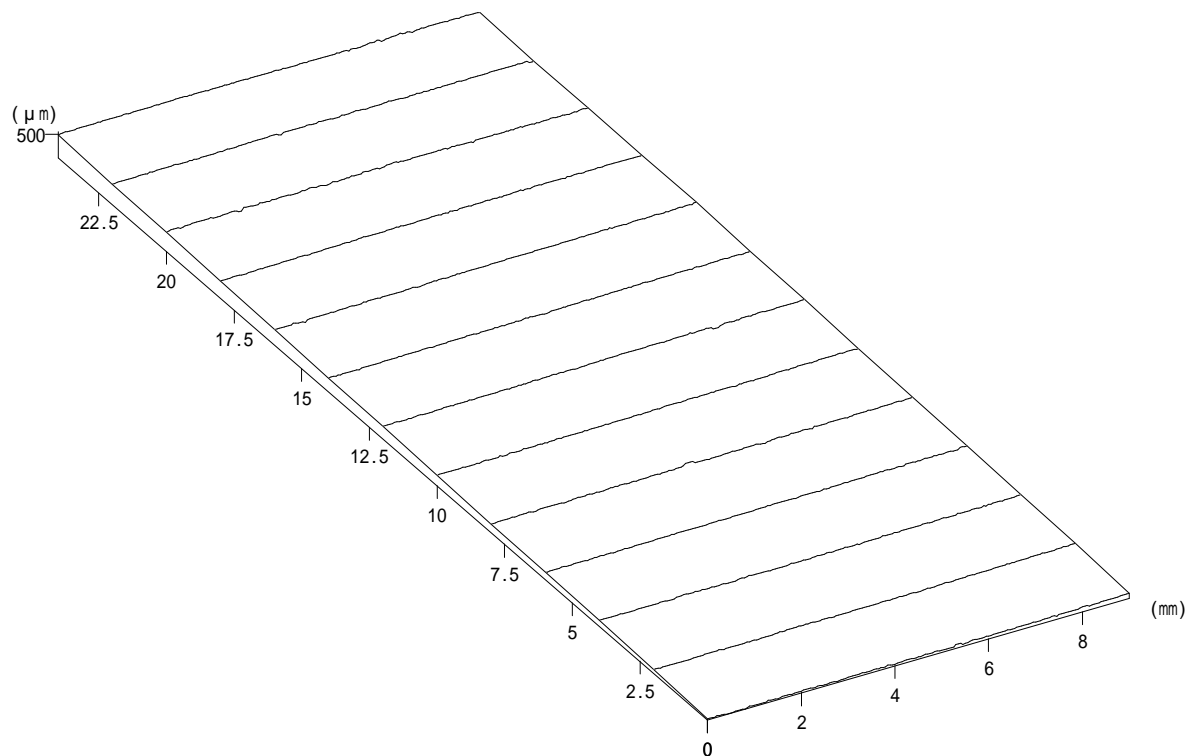
最大値 : 735.419 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 447.169 μm

平面度 : 735.419 μm

20×25×10-2 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c2minbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : 5898.89 μm

測定開始点Y : -15210.8 μm

測定終了点X : 3101.17 μm

測定終了点Y : 8789.3 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -101918 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

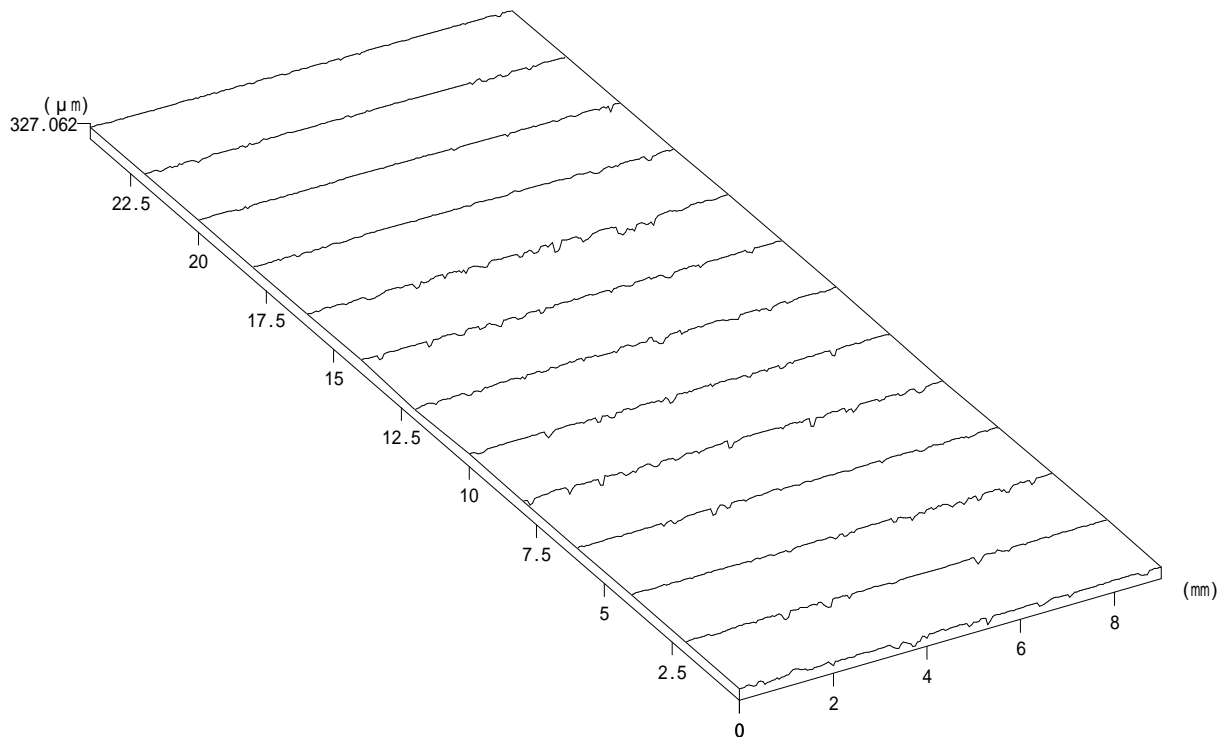
最大値 : 553.336 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 306.616 μm

平面度 : 553.336 μm

20×25×10-3 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3\data\三次元データ\totsuka\c3mintop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1433.31 μm

測定開始点Y : -29480.7 μm

測定終了点X : 7566.73 μm

測定終了点Y : -5480.68 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103665 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

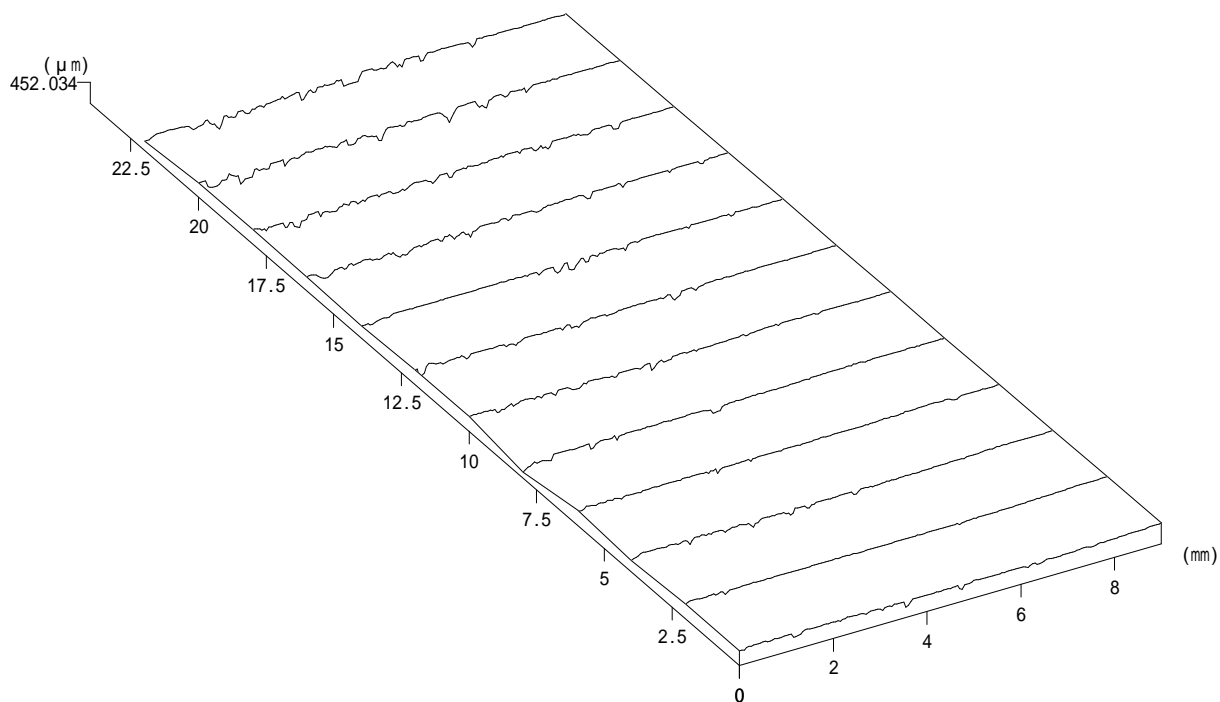
最大値 : 327.062 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 225.983 μm

平面度 : 327.062 μm

20×25×10-3 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3minbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1579.05 μm

測定終了点X : 7420.94 μm

測定範囲X : 8999.99 μm

測定ピッチX : 50 μm

A / F ゲイン : 6

対物レンズの倍率 : 50倍

測定方法 : 詳細

測定開始点Y : -30146.2 μm

測定終了点Y : -6146.16 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F センサー : Wide

レーザー・オフセット : 5

視点位置 (水平) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103764 μm

データ数 : 2172

最大値 : 452.034 μm

平均値 : 321.165 μm

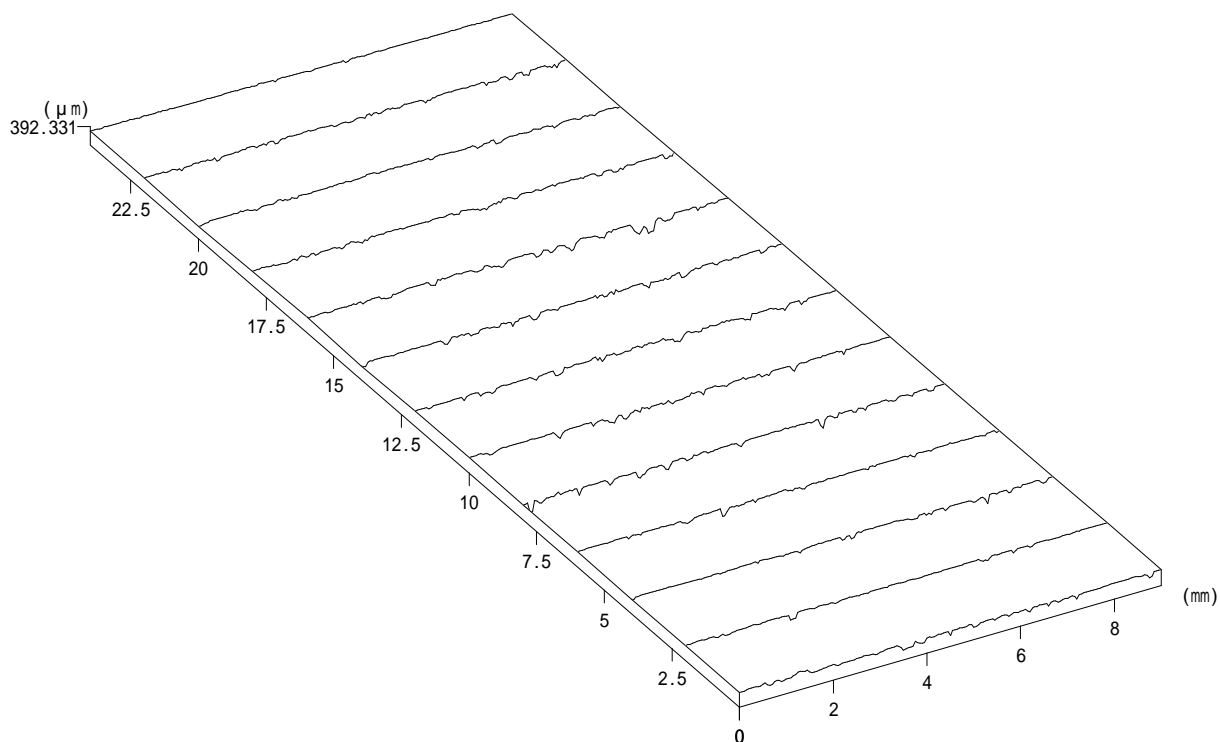
視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸倍率 : 1

最小値 : 0 μm

平面度 : 452.034 μm

20×25×10-3 0.7kN Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3mintop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -6994.33 μm

測定開始点Y : -18229 μm

測定終了点X : 2005.85 μm

測定終了点Y : 5771.05 μm

測定範囲X : 9000.18 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103706 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

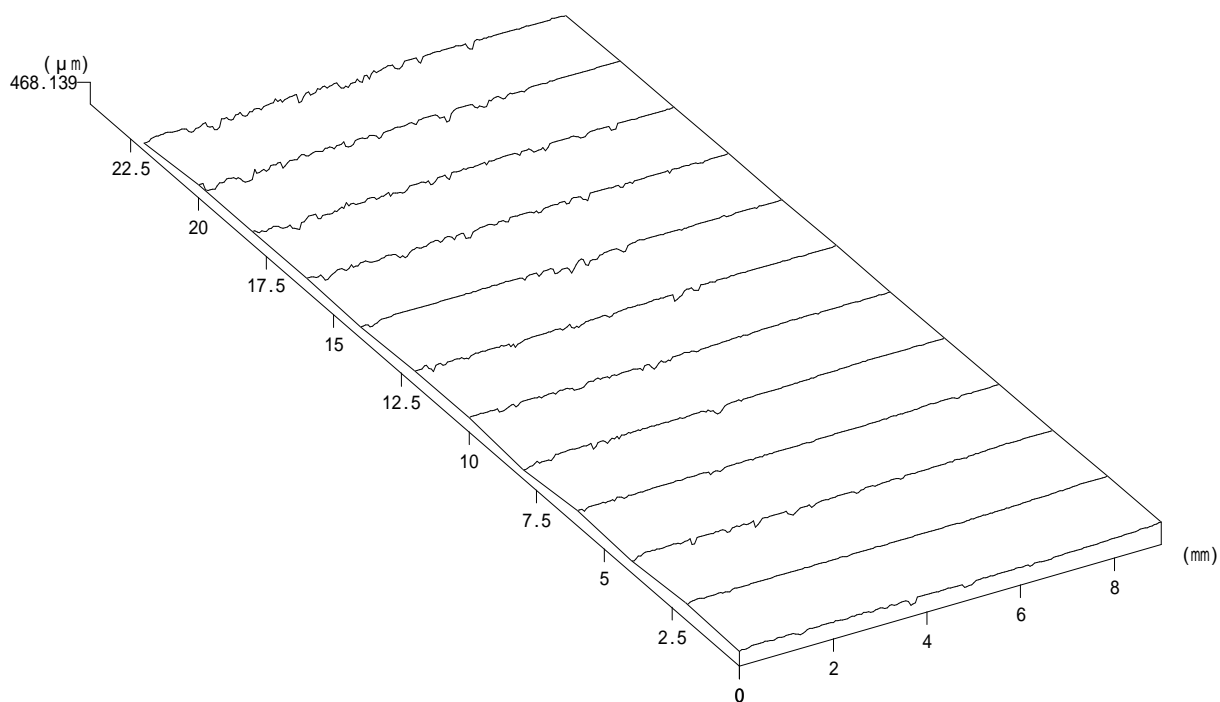
最大値 : 392.331 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 290.811 μm

平面度 : 392.331 μm

20×25×10-3 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c3minbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -7204.71 μm

測定開始点Y : -21719.7 μm

測定終了点X : 1795.37 μm

測定終了点Y : 2280.39 μm

測定範囲X : 9000.08 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103725 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2172

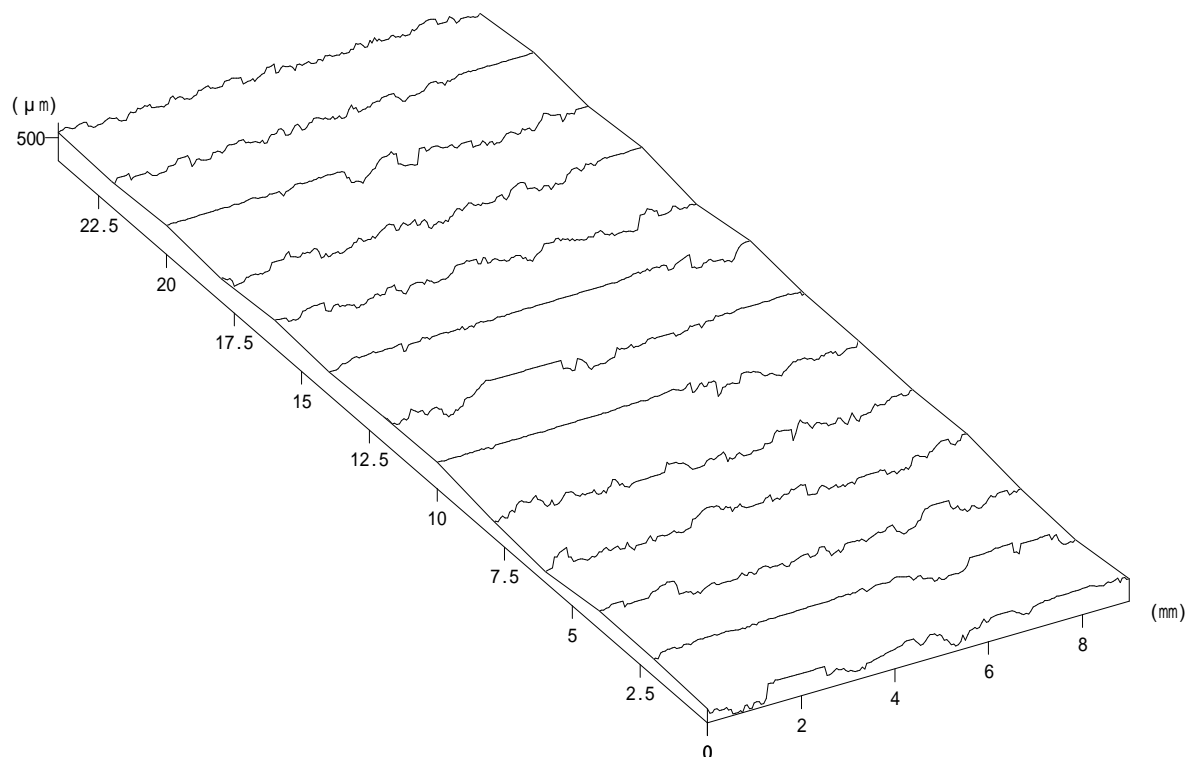
最大値 : 468.139 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 315.011 μm

平面度 : 468.139 μm

20×25×10-4 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4mintop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -1725.2 μm

測定開始点Y : -34102.9 μm

測定終了点X : 7274.83 μm

測定終了点Y : -10102.8 μm

測定範囲X : 9000.03 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103568 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

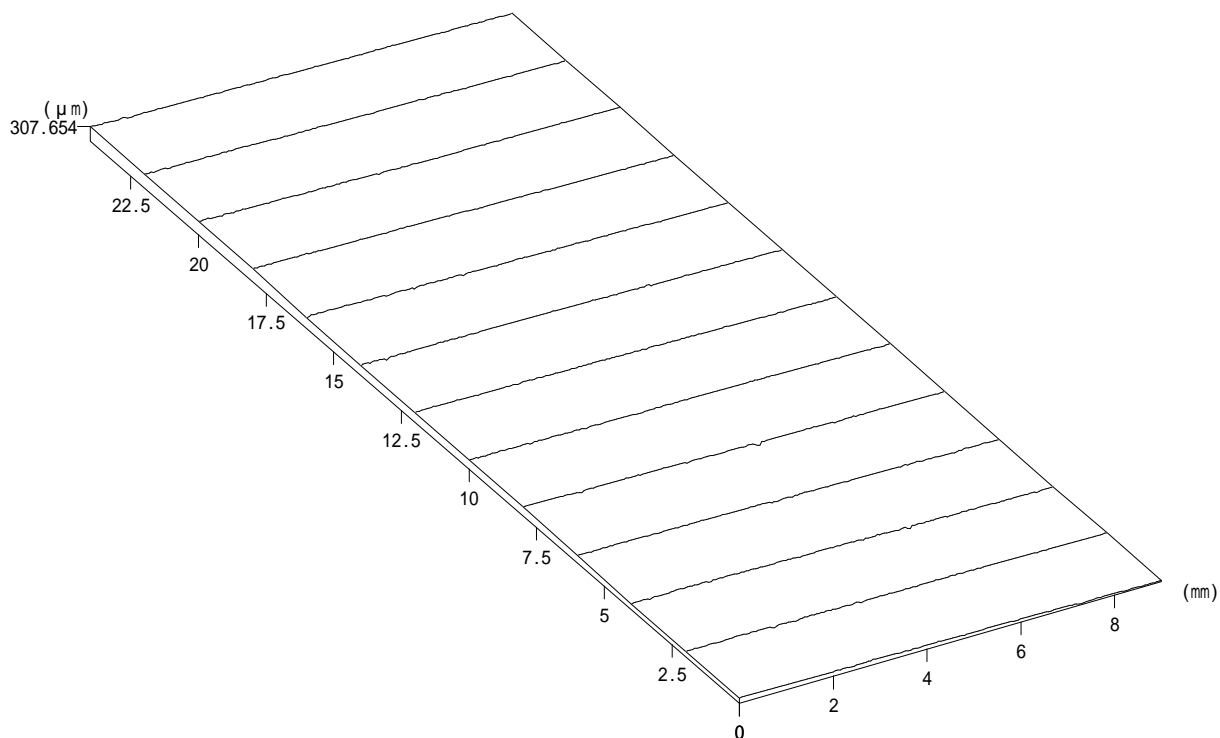
最大値 : 806.975 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 482.952 μm

平面度 : 806.975 μm

20×25×10-4 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4minbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -2129.52 μm

測定終了点X : 6870.53 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定ピッチX : 50 μm

A / F ゲイン : 6

対物レンズの倍率 : 50倍

測定方法 : 詳細

測定開始点Y : -35568.6 μm

測定終了点Y : -11568.6 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F センサー : Wide

レーザー・オフセット : 5

視点位置 (水平) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -102981 μm

データ数 : 2353

最大値 : 307.654 μm

平均値 : 143.411 μm

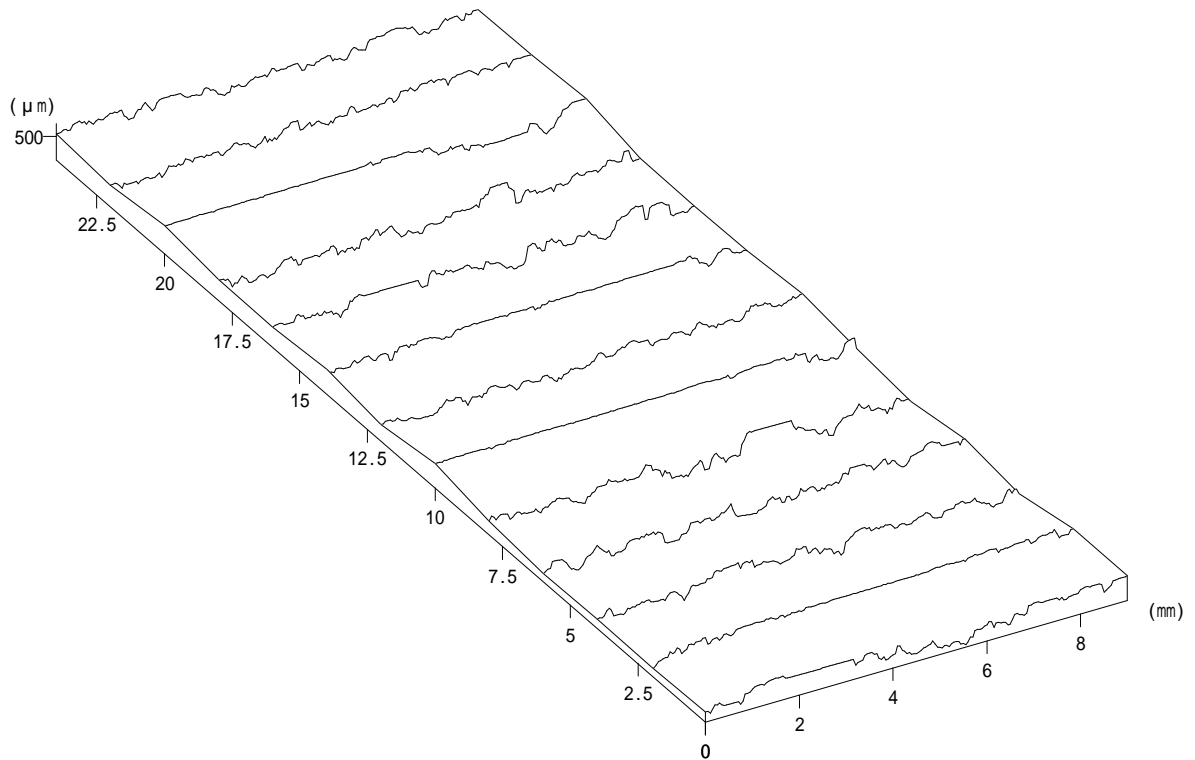
視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸倍率 : 1

最小値 : 0 μm

平面度 : 307.654 μm

20×25×10-4 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c4mintop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -7525.17 μm

測定開始点Y : -23121.2 μm

測定終了点X : 1474.9 μm

測定終了点Y : 878.826 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103506 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

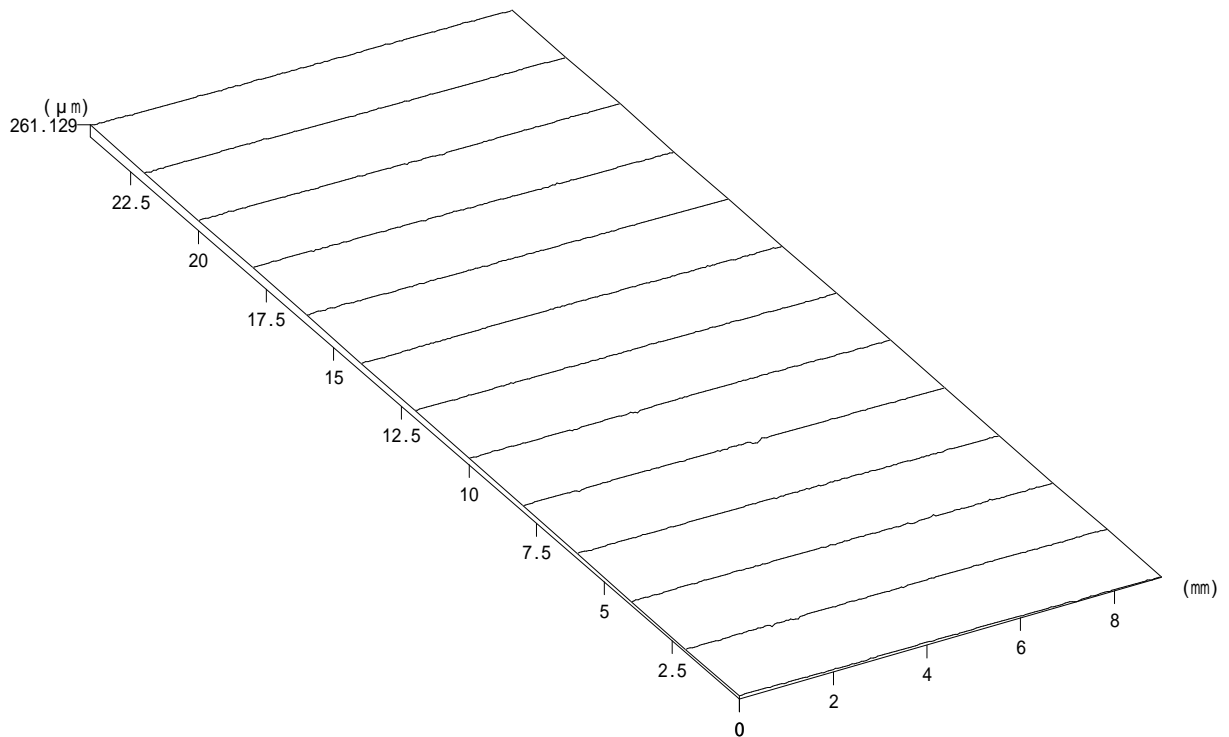
最大値 : 774.636 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 447.55 μm

平面度 : 774.636 μm

20×25×10-1 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3\data\三次元データ\totsuka\c4minbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -7501.88 μm

測定終了点X : 1498.14 μm

測定範囲X : 9000.01 μm

測定ピッチX : 50 μm

A / F ゲイン : 6

対物レンズの倍率 : 50倍

測定方法 : 詳細

測定開始点Y : -24875.7 μm

測定終了点Y : -875.706 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F センサー : Wide

レーザー・オフセット : 5

視点位置 (水平) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -102941 μm

データ数 : 2353

最大値 : 261.129 μm

平均値 : 113.045 μm

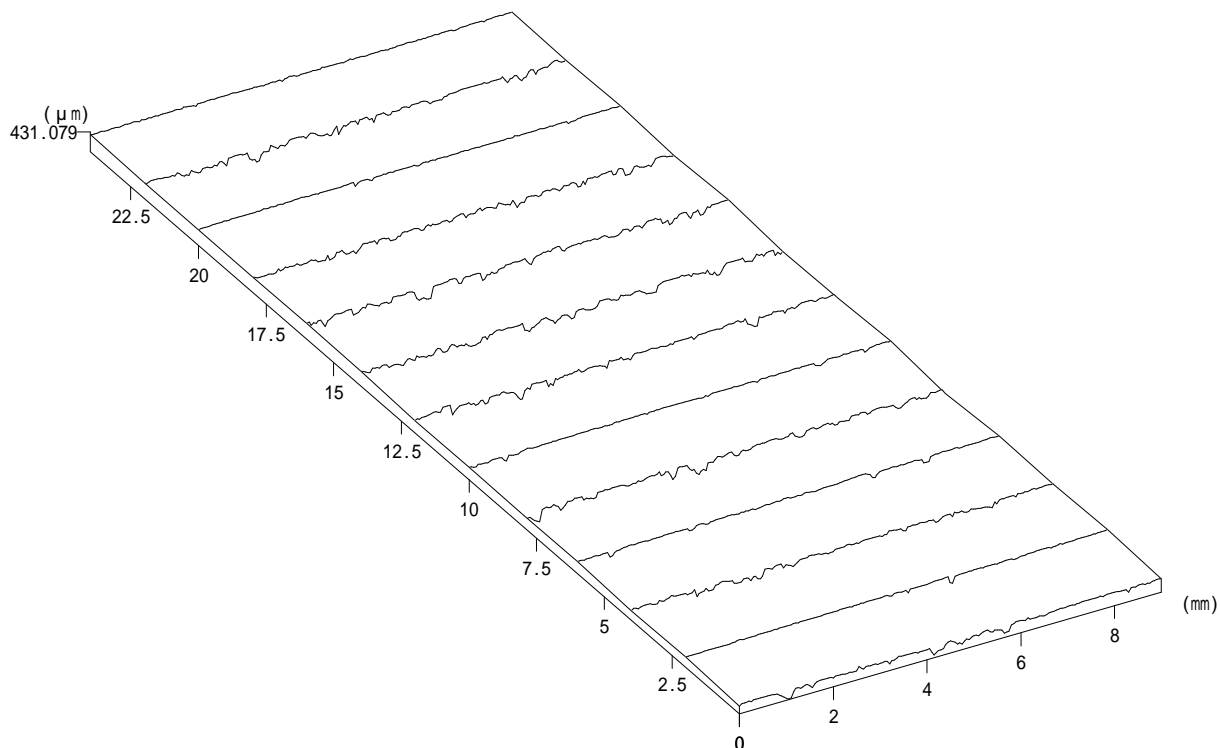
視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸倍率 : 1

最小値 : 0 μm

平面度 : 261.129 μm

20×25×10-5 Before test, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5mintop-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -2159.77 μm

測定開始点Y : -36774.3 μm

測定終了点X : 6840.28 μm

測定終了点Y : -12774.2 μm

測定範囲X : 9000.05 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103525 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

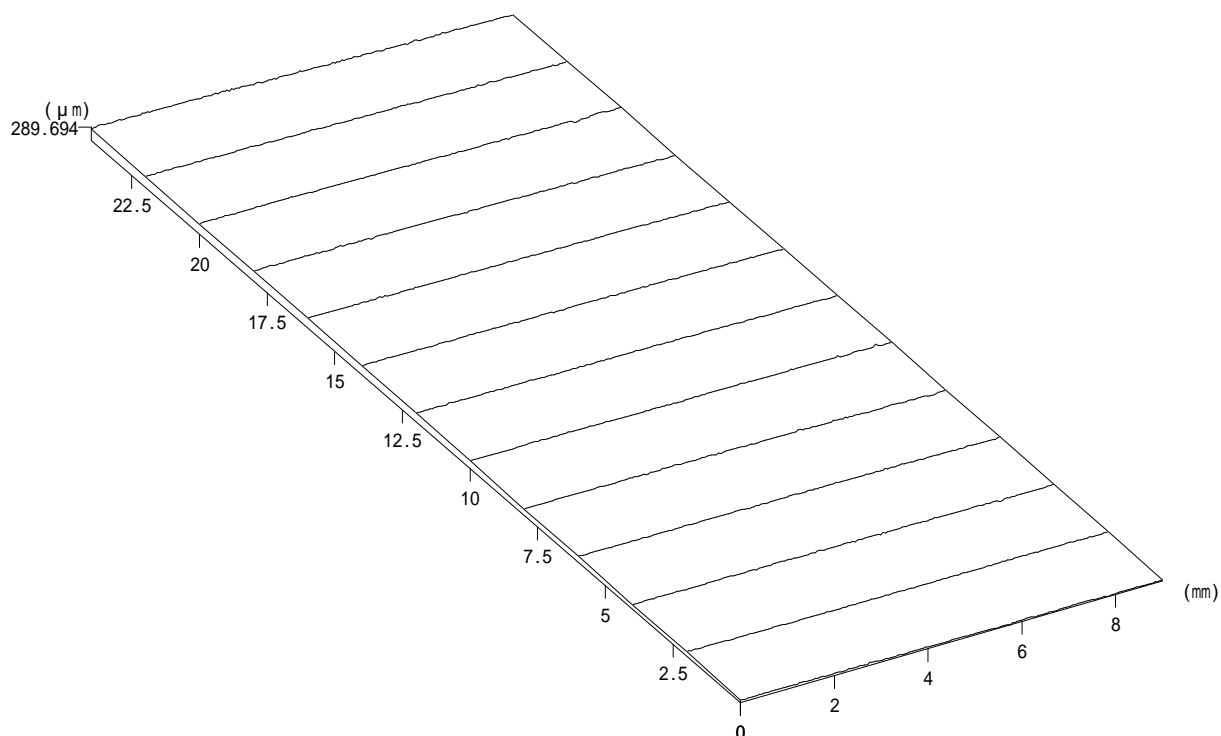
最大値 : 431.079 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 302.189 μm

平面度 : 431.079 μm

20×25×10-5 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5minbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -2107.96 μm

測定開始点Y : -39308.8 μm

測定終了点X : 6892.1 μm

測定終了点Y : -15308.8 μm

測定範囲X : 9000.06 μm

測定範囲Y : 24000.1 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -103293 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

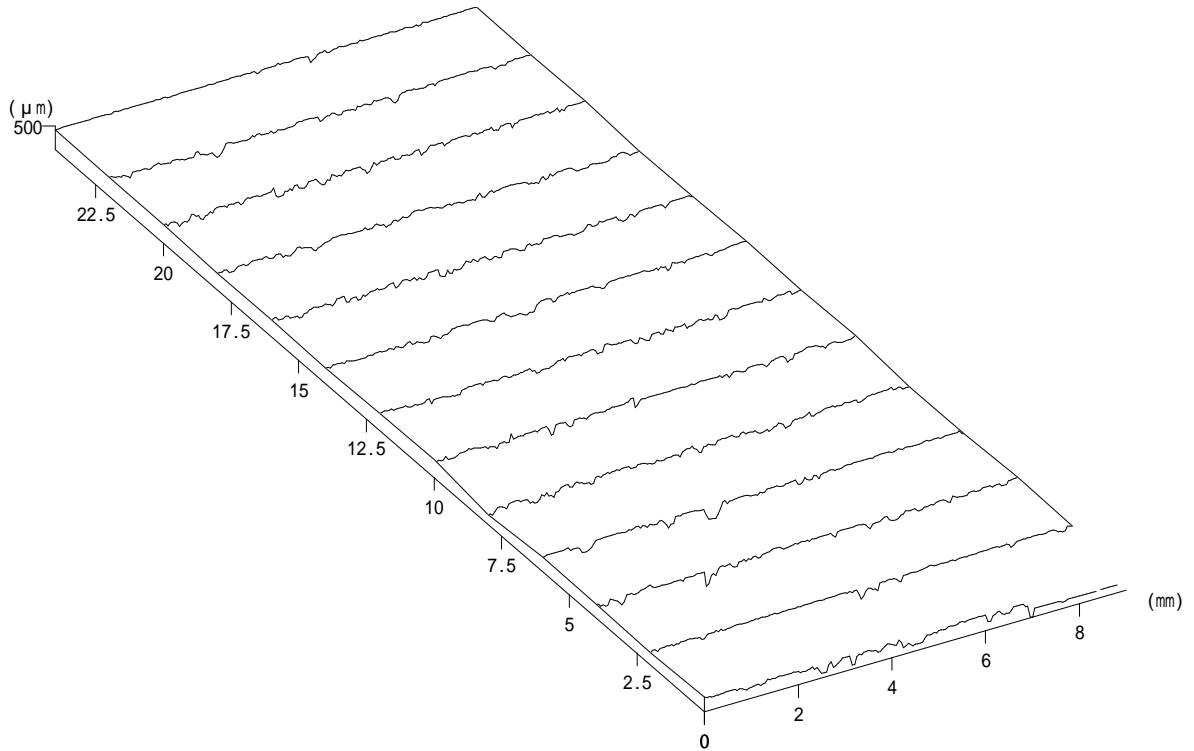
最大値 : 289.694 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 131.536 μm

平面度 : 289.694 μm

20×25×10-5 0.7kN, Top



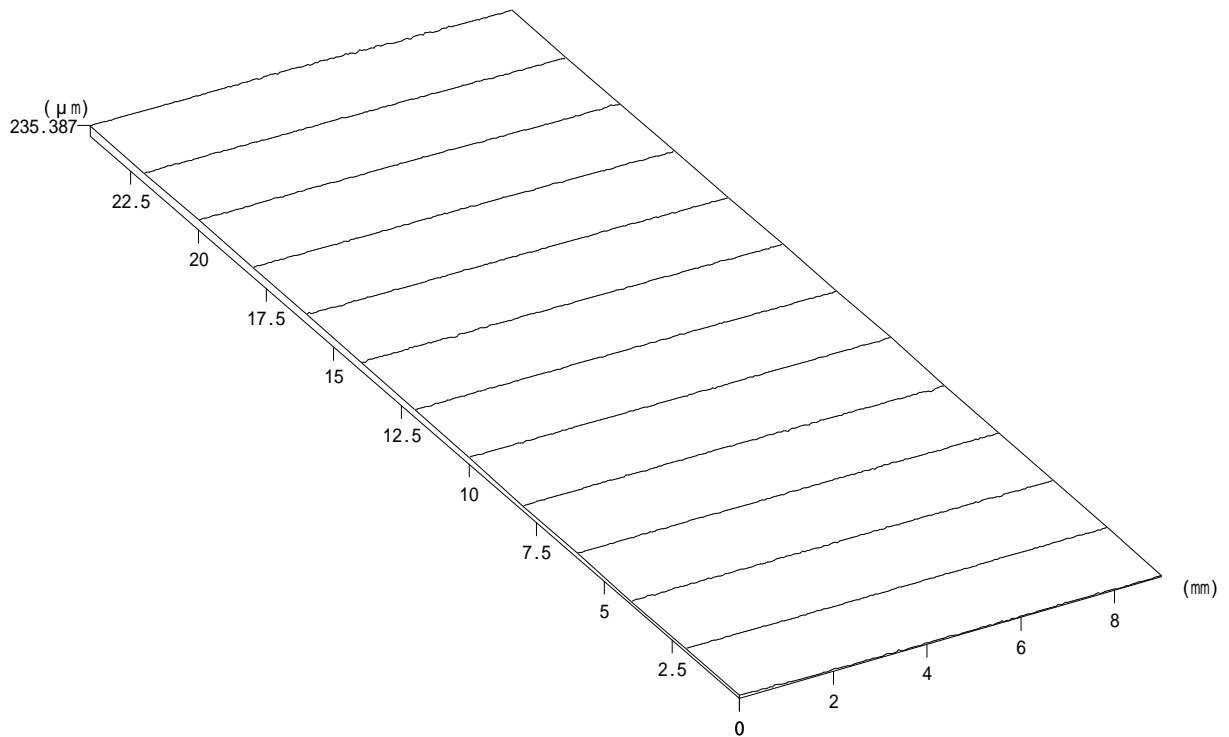
ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c5mintop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X :	-7189.21 μm	測定開始点Y :	-28447.8 μm
測定終了点X :	1810.85 μm	測定終了点Y :	-4447.71 μm
測定範囲X :	9000.06 μm	測定範囲Y :	24000.1 μm
測定ピッチX :	50 μm	測定ピッチY :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-103577 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2348		
最大値 :	502.514 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	355.923 μm	平面度 :	502.514 μm

20×25×10-5 0.7kN, Bot



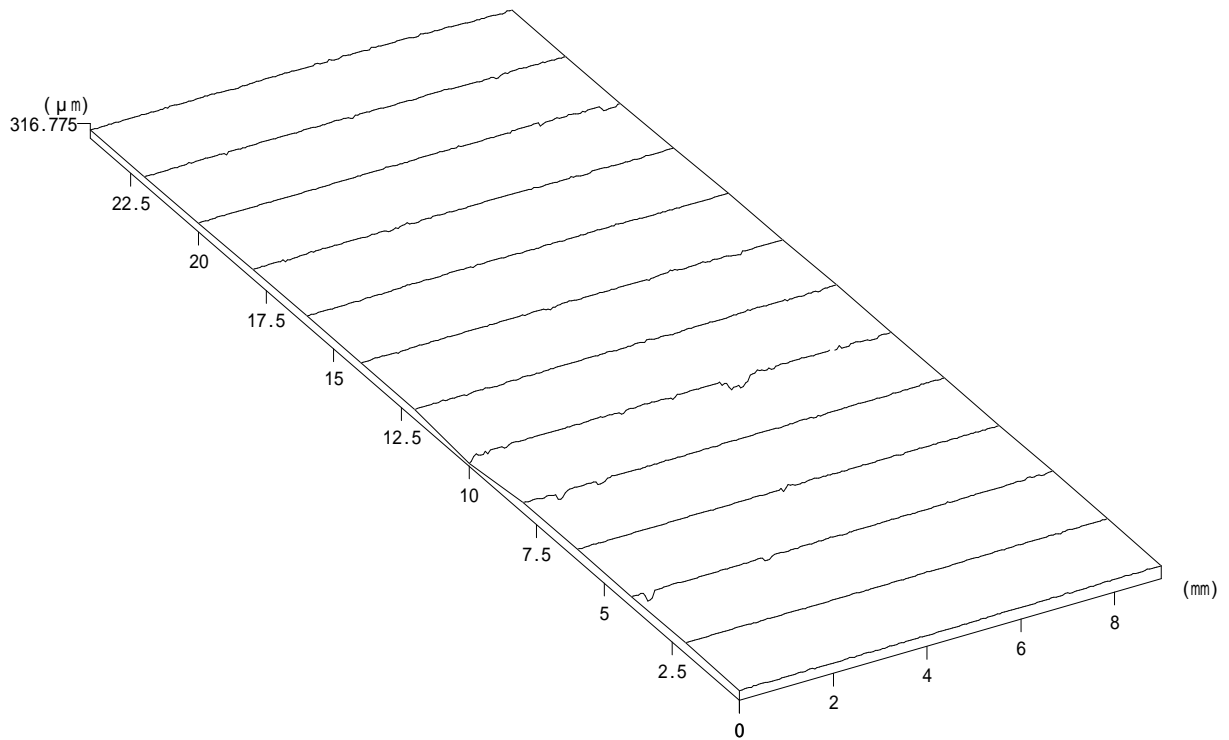
ファイル名 : C:\NH-3\data\三次元データ\totsuka\c5minbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X :	-7457.99 μm	測定開始点Y :	-31993.8 μm
測定終了点X :	1542.01 μm	測定終了点Y :	-7993.8 μm
測定範囲X :	9000 μm	測定範囲Y :	24000 μm
測定ピッチX :	50 μm	測定ピッチY :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

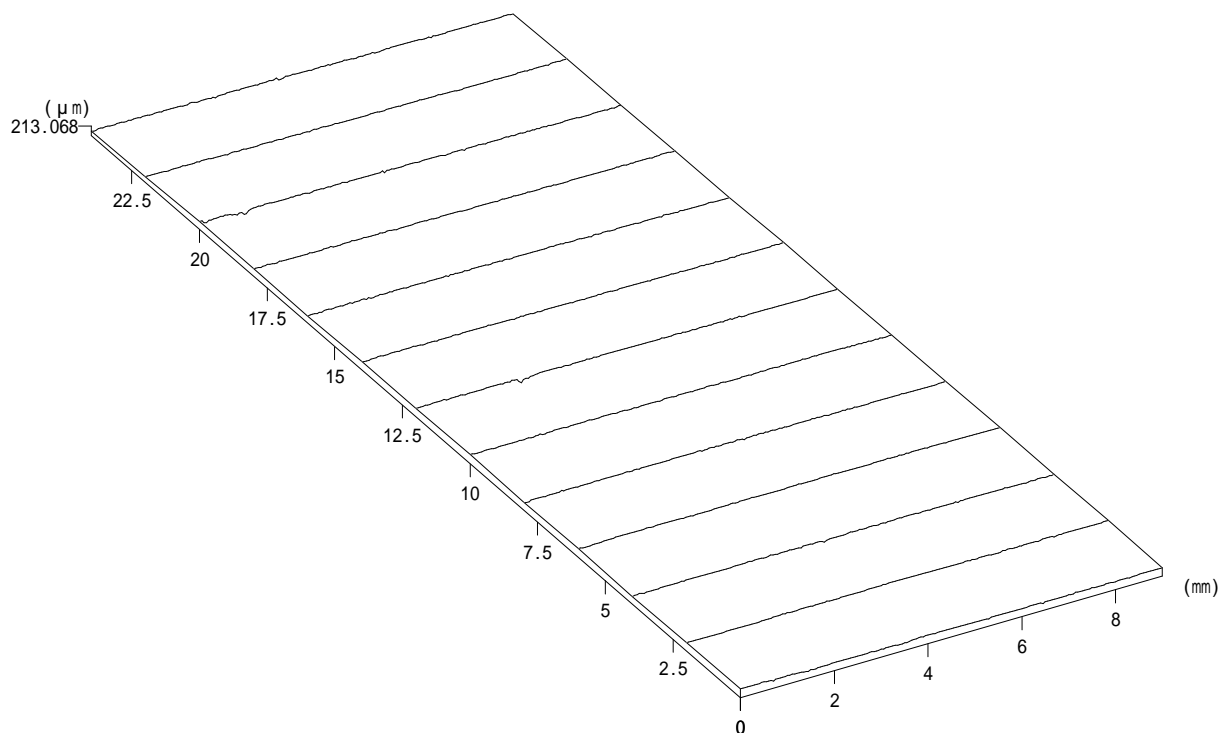
視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-103262 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	235.387 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	120.719 μm	平面度 :	235.387 μm

20×25×10-6 Before test, Top



ファイル名 :	C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6mintop-0.nh3		
データ名 :	0		
測定開始点 X :	-2133.32 μm	測定開始点 Y :	-42640.6 μm
測定終了点 X :	6866.71 μm	測定終了点 Y :	-18640.6 μm
測定範囲 X :	9000.03 μm	測定範囲 Y :	24000 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		
視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-102304 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2352		
最大値 :	316.775 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	222.306 μm	平面度 :	316.775 μm

20×25×10-6 Before test, Bot



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6minbot-0.nh3

データ名 : 0

測定開始点X : -2185.65 μm

測定開始点Y : -45443.5 μm

測定終了点X : 6814.39 μm

測定終了点Y : -21443.5 μm

測定範囲X : 9000.04 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -102220 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

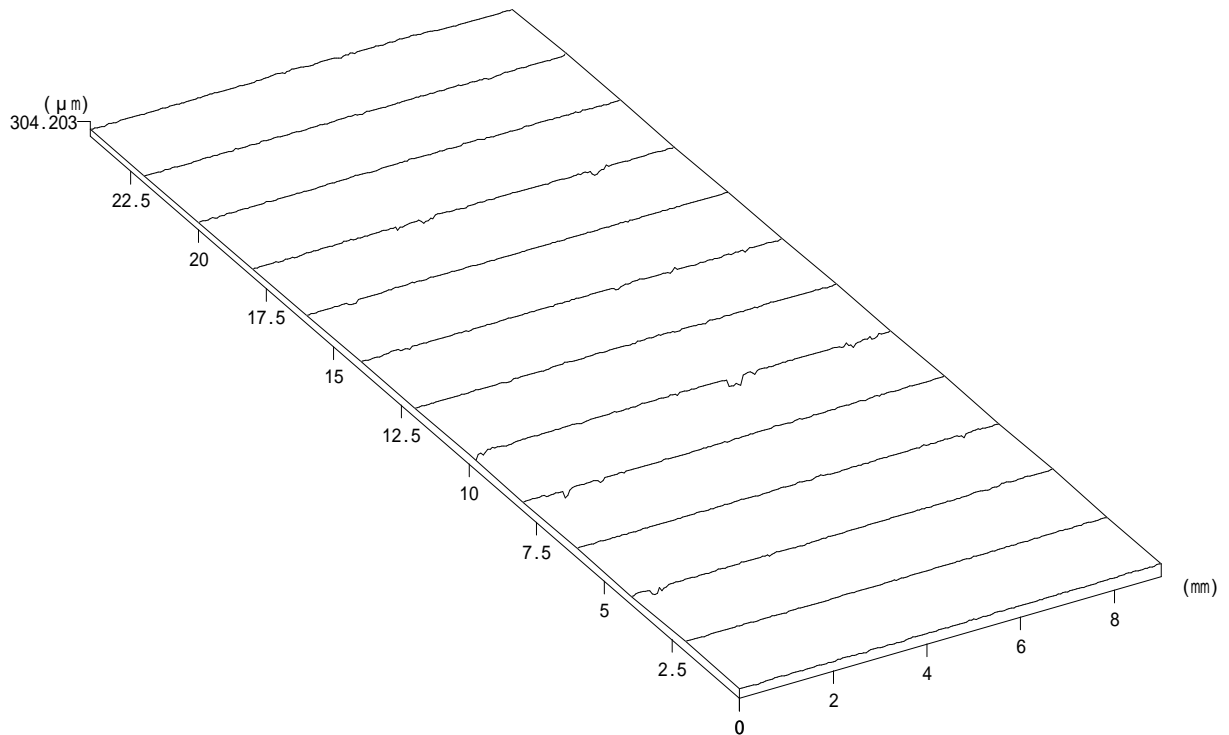
最大値 : 213.068 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 146.321 μm

平面度 : 213.068 μm

20×25×10-6 0.7kN, Top



ファイル名 : C:\NH-3data\三次元データ\totsuka\c6mintop-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点X : -7977.58 μm

測定開始点Y : -34721.5 μm

測定終了点X : 1022.7 μm

測定終了点Y : -10721.5 μm

測定範囲X : 9000.27 μm

測定範囲Y : 24000 μm

測定ピッチX : 50 μm

測定ピッチY : 2000 μm

A / F ゲイン : 6

A / F センサー : Wide

対物レンズの倍率 : 50倍

レーザー・オフセット : 5

測定方法 : 詳細

視点位置 (水平) : 30.0 °

視点位置 (垂直) : 30.0 °

Z 軸表示オフセット : -102262 μm

Z 軸倍率 : 1

データ数 : 2353

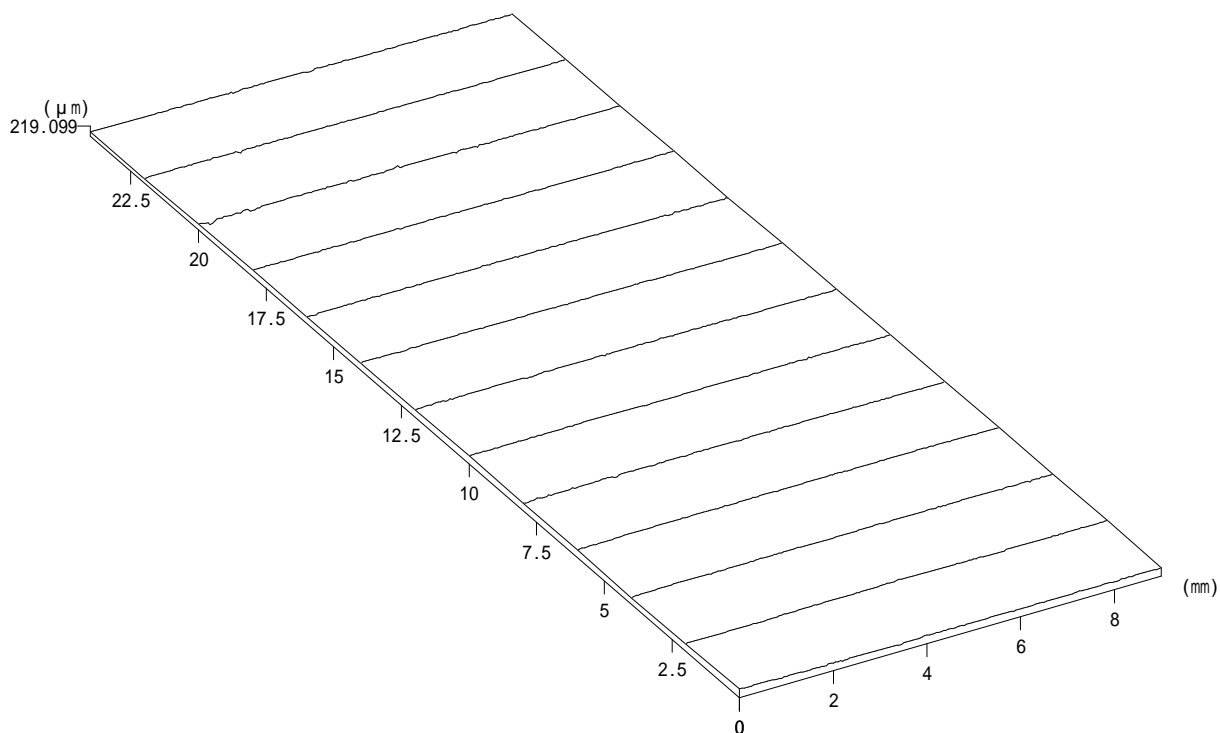
最大値 : 304.203 μm

最小値 : 0 μm

平均値 : 198.248 μm

平面度 : 304.203 μm

20×25×10-6 0.7kN, Bot



ファイル名 : C:\NH-3\data\三次元データ\totsuka\c6minbot-1.nh3

データ名 : 1

測定開始点 X :	-8474.38 μm	測定開始点 Y :	-38290.9 μm
測定終了点 X :	526.592 μm	測定終了点 Y :	-14290.9 μm
測定範囲 X :	9000.97 μm	測定範囲 Y :	24000 μm
測定ピッチ X :	50 μm	測定ピッチ Y :	2000 μm
A / F ゲイン :	6	A / F センサー :	Wide
対物レンズの倍率 :	50倍	レーザー・オフセット :	5
測定方法 :	詳細		

視点位置 (水平) :	30.0 °	視点位置 (垂直) :	30.0 °
Z 軸表示オフセット :	-102186 μm	Z 軸倍率 :	1
データ数 :	2353		
最大値 :	219.099 μm	最小値 :	0 μm
平均値 :	137.414 μm	平面度 :	219.099 μm

4 章

試験結果

Series		Density	Moisture content	Width of annual rings	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity			Length of damage zone		
						Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone $E_{L,m}$			
										Top	Bottom
						kg/m ³	%	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
2.5-1Sp	1	535	7.5	0.9	64.9	13868	5401	279	798	0.93	1.28
	2	463	7.5	2.4	48.7	11415	4741	358	257	1.19	0.41
	3	433	7.5	3.5	48.0	12017	4767	404	826	1.32	1.30
	4	422	7.5	2.4	49.0	12089	5495	249	993	0.83	1.58
	5	482	7.5	1.5	57.6	16484	6143	302	928	1.00	1.48
	6	442	7.5	2.2	48.6	13056	5411	264	723	0.87	1.15
10-1Sp	1	454	9.5	2.3	43.1	14162	3977	313	823	2.63	2.47
	2	435	7.5	2.3	48.5	12896	5692	1075	1127	-	-
	3	449	8.9	2.5	45.1	12049	4860	555	1046	1.70	3.03
	4	441	8.9	2.6	40.5	11794	4756	573	776	2.47	2.66
	5	443	8.0	2.4	45.1	13035	5307	488	598	1.42	2.15
	6	453	9.0	2.4	43.0	10702	4926	629	827	1.98	2.59

Series	Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
				Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
						$E_{L,m}$				
						Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-1Sp	1	435	9.6	45.4	13128	2462	695	531	5.51	4.10
	2	440	10.4	44.9	18324	2549	495	435	3.56	5.00
	3	444	9.7	42.5	12587	2617	524	663	3.80	5.00
	4	436	10.0	46.1	12117	2548	586	723	4.30	6.10
	5	447	10.0	42.7	12318	2476	651	718	4.88	5.00
	6	446	8.8	44.6	15227	2391	701	847	5.40	5.90

Series	Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of		
				Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone $E_{L,m}$		damage zone		
						Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-05Sp	1	444	9.3	46.6	10420	1470	825	709	5.30	5.30
	2	435	9.2	47.1	17104	1755	655	850	5.45	5.10
	3	392	9.4	47.2	11333	1707	1030	803	7.01	6.14
	4	432	9.4	47.0	11797	1471	585	718	4.15	5.02
	5	442	8.6	46.5	13972	1516	483	650	3.17	4.97
	6	439	8.7	47.0	15857	1685	462	772	3.77	4.33

Series	Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
				Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
						$E_{L,m}$				
						Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-3Sp	1	464	10.3	40.8	11197	5510	692	619	4.10	2.89
	2	450	10.6	39.9	13040	5434	528	661	4.57	4.76
	3	468	10.4	40.3	11246	5277	503	724	3.50	4.06
	4	465	10.1	40.9	11728	5680	740	731	4.37	4.70
	5	453	9.4	41.1	12362	5898	528	1284	3.95	6.48
	6	462	7.8	40.7	11619	5262	498	1339	3.28	7.46

Series	Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of		
				Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone $E_{L,m}$		damage zone		
						Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-3bSp	1	475	9.6	41.1	13806	2451	649	864	4.81	4.94
	2	480	9.8	42.9	13138	2626	638	812	5.16	5.22
	3	483	9.3	38.7	13189	2578	617	510	3.43	3.28
	4	480	10.5	41.5	14144	2578	641	657	4.68	4.58

Series		Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity			Length of		
					Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone $E_{L,m}$		damage zone	
							Top	Bottom	Top	Bottom
		kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-3bxSp	1	482	10.5	39.6	11150	2269	713	678	3.72	4.91
	2	483	9.9	41.9	10808	2534	647	805	4.00	5.97
	3	494	10.6	40.1	13630	2522	735	1179	3.31	6.10
	4	495	10.2	40.4	13278	2198	518	971	4.77	5.33

Series	Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of		
				Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone $E_{L,m}$		damage zone		
						Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-3sSp	1	480	10.4	39.8	14631	2625	765	989	3.12	5.00
	2	482	8.9	43.0	16527	2700	646	948	4.08	5.41
	3	488	9.4	44.2	15934	2622	989	1196	4.20	7.25
	4	478	10.3	42.2	14376	2735	656	893	3.20	5.07

Series	Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
				Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
						$E_{L,m}$				
						Top	Bottom			
								Top	Bottom	
	kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
2.5-1Ce	1	359	11.0	31.8	8069	4571	220	311	1.03	0.83
	2	338	11.3	30.2	6911	4839	233	338	0.70	0.66
	3	388	11.3	32.2	8379	5363	385	385	1.36	1.11
	4	349	10.9	30.4	7825	4528	333	218	1.26	0.74
	5	325	11.2	27.8	8198	2715	174	156	0.74	0.90
	6	444	11.1	33.6	5913	4281	188	497	0.76	0.68

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> <i>max</i>			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
2.5-1Ce	1	0.024	0.027	0.37	0.38
	2	0.027	0.034	0.40	0.35
	3	0.048	0.044	0.54	0.60
	4	0.060	0.050	0.64	0.51
	5	0.12	0.22	0.90	1.2
	6	0.047	0.040	0.52	0.33

Series	Density	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
			Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
					$E_{L,m}$				
					Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
10-1Ce	1	395	33.1	8020	4648	160	245	0.57	0.99
	2	400	32.4	7334	4482	71	82	0.20	0.36
	3	371	30.0	10854	4267	130	178	0.65	0.85
	4	434	34.6	8329	4509	300	150	1.00	0.80
	5	459	35.8	10117	4645	222	132	0.44	0.28
	6	410	32.5	8188	4041	162	113	0.97	0.80

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> <i>max</i>			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
10-1Ce	1	0.052	0.056	1.0	0.77
	2	0.067	0.056	1.0	0.64
	3	0.085	0.065	0.89	0.93
	4	0.054	0.069	0.73	0.94
	5	0.086	0.056	0.84	0.74
	6	0.19	0.16	1.4	1.2

Series	Density	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
			Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
					$E_{L,m}$				
					Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-1Ce	1	401	33.5	15770	5308	172	385	1.1	2.4
	2	399	33.2	17290	5220	253	382	1.5	2.2
	3	399	34.2	22473	5449	145	252	0.64	1.1
	4	413	34.2	7532	5262	101	571	1.3	7.6
	5	413	35.2	11264	5771	253	195	2.3	1.7
	6	399	33.6	11579	5081	168	293	1.4	2.5

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> <i>max</i>			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
20-1Ce	1	0.10	0.31	0.86	1.3
	2	0.20	0.21	1.1	0.98
	3	0.34	0.29	1.4	1.2
	4	0.25	0.15	1.0	1.5
	5	0.33	0.29	1.3	1.4
	6	0.12	0.26	0.91	1.3

Series	Density	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
			Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone $E_{L,m}$				
					Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-2Ce	1	411	31.9	9443	6604	559	204	1.4	1.0
	2	399	33.5	10242	6718	320	243	1.1	1.0
	3	405	31.9	9091	6584	302	219	1.6	1.0
	4	393	33.4	9112	6672	305	278	1.8	1.5
	5	423	33.1	9185	6741	400	220	1.5	1.0
	6	417	34.4	11258	6578	398	261	1.2	1.0

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> _{max}			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
20-2Ce	1	0.27	0.25	1.4	1.1
	2	0.29	0.20	1.3	1.2
	3	0.43	0.28	1.8	1.4
	4	0.22	0.16	1.1	0.89
	5	0.32	0.20	3.9	1.1
	6	0.30	0.45	2.2	1.7

Series	Density	Moisture content	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of		
				Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone $E_{L,m}$		damage zone		
						Top	Bottom	Top	Bottom	
kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
2.5-1Cy	1	401	8.2	33.5	15770	5308	172	385	1.16	1.21
	2	399	11.3	33.2	17290	5220	253	382	1.82	1.88
	3	399	11.0	34.2	22473	5449	145	252	0.91	0.87
	4	413	10.9	34.2	7532	5262	101	571	0.94	2.62
	5	413	11.0	35.2	11264	5771	253	195	0.97	1.37
	6	399	11.2	33.6	11579	5081	168	293	1.63	1.88

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> max			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
2.5-1Cy	1	0.10	0.31	0.86	1.3
	2	0.20	0.21	1.1	1.0
	3	0.34	0.29	1.4	1.2
	4	0.25	0.15	1.0	1.5
	5	0.33	0.29	1.3	1.4
	6	0.12	0.26	0.91	1.3

Series	Density	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
			Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
					$E_{L,m}$				
					Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
10-1Cy	1	464	44.3	12295	6017	350	607	1.0	1.2
	2	526	45.6	18857	6532	396	396	1.2	0.93
	3	483	42.4	12404	5945	224	224	0.67	0.67
	4	470	42.1	16096	5910	263	185	0.66	0.61
	5	473	44.9	15284	6383	397	199	1.3	0.66
	6	496	42.9	16548	6917	381	305	1.0	0.79

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> max			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
10-1Cy	1	0.039	0.053	0.55	0.75
	2	0.053	0.036	0.72	0.63
	3	0.12	0.10	0.71	0.78
	4	0.044	0.042	0.62	0.64
	5	0.039	0.052	0.72	0.74
	6	0.039	0.034	0.37	0.78

Series	Density	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
			Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
					$E_{L,m}$				
					Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-1Cy	1	488	44.6	31133	7905	178	174	0.8	0.9
	2	473	46.6	20424	8872	548	356	1.2	0.8
	3	473	46.9	19095	8584	259	309	0.9	0.7
	4	488	43.9	22087	7507	264	224	1.2	0.8
	5	489	45.2	22339	8227	483	313	1.2	0.8
	6	488	45.7	20371	8355	294	366	0.7	0.8

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> _{max}			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
20-1Cy	1	0.28	0.15	1.3	1.0
	2	0.37	0.35	1.4	1.2
	3	0.47	0.58	1.8	1.9
	4	0.27	0.17	1.0	0.79
	5	0.33	0.32	1.8	1.2
	6	0.37	0.67	1.4	2.2

Series	Density	Max. stress $f_{c,0}$	modulus of elasticity				Length of damage zone		
			Middle zone $E_{L,m}$	Full $E_{L,f}$	Damage zone				
					$E_{L,m}$				
					Top	Bottom	Top	Bottom	
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	
20-2Cy	1	488	46.6	16599	10566	263	484	0.7	1.9
	2	478	45.5	16105	10369	519	292	1.0	0.9
	3	494	40.4	12923	10239	598	264	1.2	0.9
	4	500	44.4	14625	9523	782	501	1.6	1.5
	5	487	42.8	14476	10165	488	426	1.0	1.0
	6	488	43.8	14354	9686	546	386	1.0	0.9

Surface roughness parameters of primary profile (ISO 4287:1997)					
Series		At 0.1 <i>P</i> _{max}			
		<i>P_a</i>		<i>P_z</i>	
		Top	Bottom	Top	Bottom
20-2Cy	1	0.28	0.15	1.3	1.0
	2	0.37	0.34	1.4	1.2
	3	0.47	0.58	1.8	1.9
	4	0.23	0.15	0.90	0.82
	5	0.33	0.32	1.8	1.2
	6	0.37	0.67	1.4	2.2

6 章

試験結果

Series		Density	Moisture content	Yield stress	Stiffness	
					Initial stiffness	Secondary stiffness
		kg/m ³	%	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²
c1	1	378	11.5	22.7	8.13	0.20
	2	402	12.4	27.1	12.1	0.26
	3	395	12.8	24.6	9.65	0.13
c3	1	386	11.8	21.1	5.07	0.019
	2	409	11.3	21.0	6.07	0.048
	3	417	14.0	23.0	5.60	0.068
c7	1	418	13.3	21.0	5.19	-0.0075
	2	407	14.5	19.1	4.36	0.0082
	3	422	14.6	19.1	4.58	0.021
c7G	1	394	15.5	15.1	4.21	0.040
	2	356	12.1	13.0	3.53	0.013
	3	385	14.5	18.7	5.22	0.045
c1A	1	427	11.6	22.2	7.78	0.20
	2	439	14.5	22.9	8.21	0.22
	3	429	13.1	24.0	8.36	0.24
c7A	1	414	17.0	19.9	5.16	0.041
	2	423	13.2	16.4	4.09	0.059
	3	422	14.9	19.2	4.23	0.027
c1GA	1	391	12.1	19.1	5.16	0.24
	2	367	13.1	18.5	4.09	0.19
	3	391	16.3	23.6	4.23	0.14
c7GA	1	384	15.5	20.6	2.54	0.024
	2	367	10.6	22.8	2.40	0.039
	3	383	11.1	24.5	2.38	0.015
e3-0	1	432	18.5	18.9	4.27	0.024
	2	419	12.0	15.7	3.49	0.051
	3	438	17.2	17.1	3.88	0.041
e7-0	1	430	15.5	20.0	4.06	-0.076
	2	417	15.9	21.7	4.38	-0.13
	3	423	14.5	18.5	3.78	-0.0066
e7-50	1	426	18.3	19.5	4.89	0.032
	2	419	23.0	19.4	5.54	0.022
	3	419	12.6	23.2	5.57	-0.049
e7-100	1	418	16.1	18.8	5.17	0.026
	2	437	17.3	22.0	4.37	-0.035
	3	425	17.0	20.0	4.87	0.024

Series		Density	Moisture content	Yield stress	Stiffness	
					Initial stiffness	Secondary stiffness
		kg/m ³	%	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²
c1'	1	400	13.5	25.5	7.66	0.33
	2	388	13.1	32.5	4.83	0.13
	3	383	11.8	24.4	6.39	0.17
c3'	1	404	13.5	20.6	5.92	0.055
	2	416	13.6	22.8	5.60	0.090
	3	403	11.9	24.5	5.54	0.035
c7'	1	404	19.6	21.7	4.86	-0.046
	2	410	17.2	21.5	5.03	-0.026
	3	408	13.8	19.6	5.20	0.044
c7G'	1	372	15.9	22.0	5.13	0.017
	2	404	23.7	21.2	6.09	0.012
	3	384	19.4	17.6	6.08	0.018
c1A'	1	417	11.9	23.9	10.8	0.25
	2	405	15.0	24.5	8.34	0.11
	3	403	14.4	25.9	10.5	0.21
c7A'	1	415	25.6	19.8	4.70	-0.0021
	2	413	14.2	20.9	5.42	0.039
	3	405	14.8	19.9	4.12	0.026
c1GA'	1	363	16.7	22.6	7.13	0.14
	2	385	12.7	23.1	8.52	0.14
	3	383	17.8	22.9	8.49	0.13
c7GA'	1	361	14.5	19.3	4.93	-0.015
	2	384	14.6	19.6	4.97	-0.0040
	3	373	15.6	19.4	4.78	0.013
e3-0'	1	414	18.0	17.4	3.99	-0.013
	2	414	21.1	19.9	4.91	-0.037
	3	406	17.0	20.2	5.02	0.0046
e7-0'	1	410	15.2	19.4	4.40	0.024
	2	412	16.7	19.3	3.91	-0.061
	3	399	16.6	21.4	4.00	-0.14
e7-50'	1	416	11.1	19.3	5.22	0.021
	2	392	15.5	17.6	5.52	0.038
	3	413	19.3	21.7	1.94	-0.034
e7-100'	1	400	10.4	20.5	5.33	-0.0048
	2	412	11.1	19.0	4.69	0.0046
	3	384	13.5	20.8	6.61	-0.012

