

引張荷重下における木材の早晚材部のXRD分離測定

名古屋大学大学院生命農学研究科・山崎 真理子, 小島 瑛里奈, 今枝 紘樹, 佐々木 康寿
株式会社 中村建築研究所・住岡 雅将, あいち産業科学技術総合センター 共同研究支援部・杉本 貴紀

緒言

木材は階層構造を有する材料である。すなわち、成長輪(温帯地域の場合は年輪)構造を構成する早材層と晩材層があり、その下位構造として細胞壁の層構造がある。さらに、細胞壁は繊維要素であるセルロースとマトリクス要素のリグニンおよび結合要素であるヘミセルロースから成る(Fig. 1)。これらの階層構造とそれぞれの力学特性が組み合わさり、建材としての木材の力学特性が発現されている。本研究グループでは、これまでに細胞壁(S2とS1/S3)のそれぞれに存在するセルロース結晶を区別して測定する手法を実現し(Lee 2019)、この測定方法と負荷治具を組み合わせて、セルロース結晶の力学挙動と木材全体の力学挙動の関連や、熱処理の影響を検討してきた(Kojima 2020)。一方、細胞壁と木材全体をつなぐ年輪構造(早材・晩材)の力学挙動と、早晚材に存在するそれぞれのセルロース結晶の力学挙動との関連については、ほとんど明らかになっていない。

本研究の目的は、木材の階層構造を考慮した早晚材層構造の力学特性を明らかにすることである。このため、基本的な知見となる早材、晩材それぞれの結晶構造を把握し、早晚材層構造内の引張挙動を解析するため、それぞれの基準応力の算出方法を検討することとした。

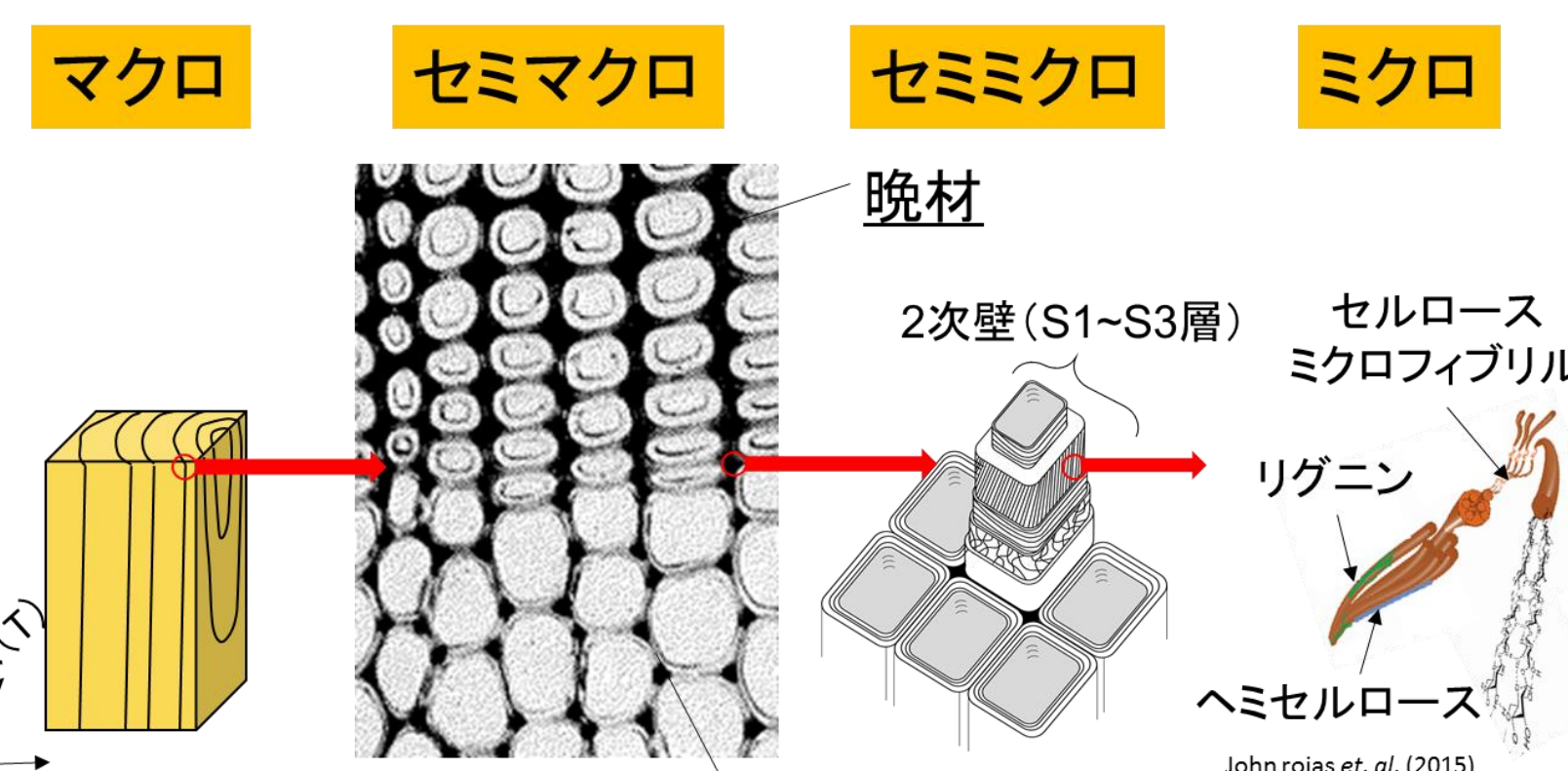
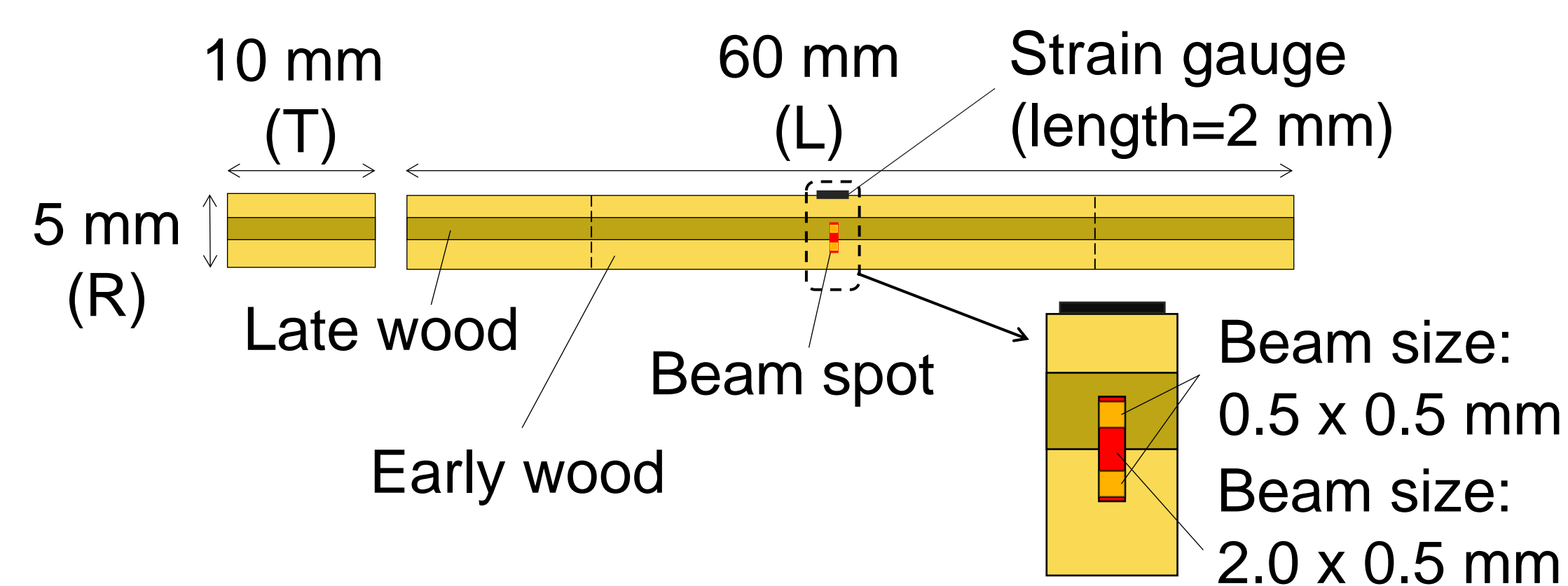


Fig. 1 Schematic diagram from macro level to micro level of wood.

実験方法



- ### 試験体
- アカマツ (*Pinus densiflora*)
 - 試験体寸法: 中央部5 mmのダンベル型(Fig. 2)
 - 試験体数: 4体
 - 密度: $416 \pm 24 \text{ kg/m}^3$
 - 晩材率: $22.7 \pm 0.8\%$
 - ヤング率: $9.21 \pm 1.99 \text{ GPa}$

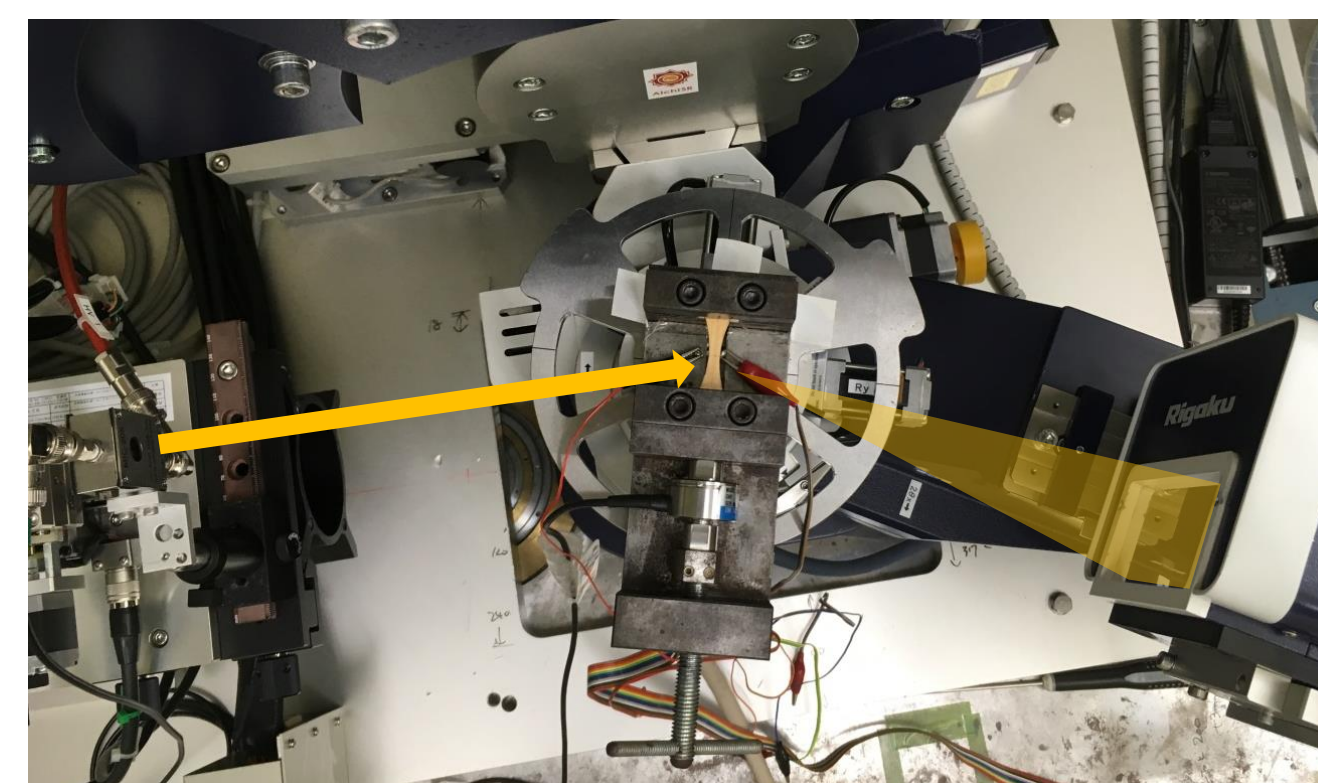


Fig. 3 XRD measurement under tensile load.

XRD測定

- ビームライン: BL8S1
- シンクロトン光波長: 9.16 keV (1.35Å)
- Bragg角: 26.5~35° (セルロース(004)面)
- 測定箇所: 早材, 晩材, 早晚材の3箇所(Fig.2)

引張試験

- ステージ中央に自作負荷治具を設置(Fig. 3)
- 試験片中央部にひずみゲージを貼付
- 破壊するまで、段階的な引張を負荷
- 引張負荷の1段階ごとにXRD測定を行った

結果と考察

早晚材の結晶構造解析

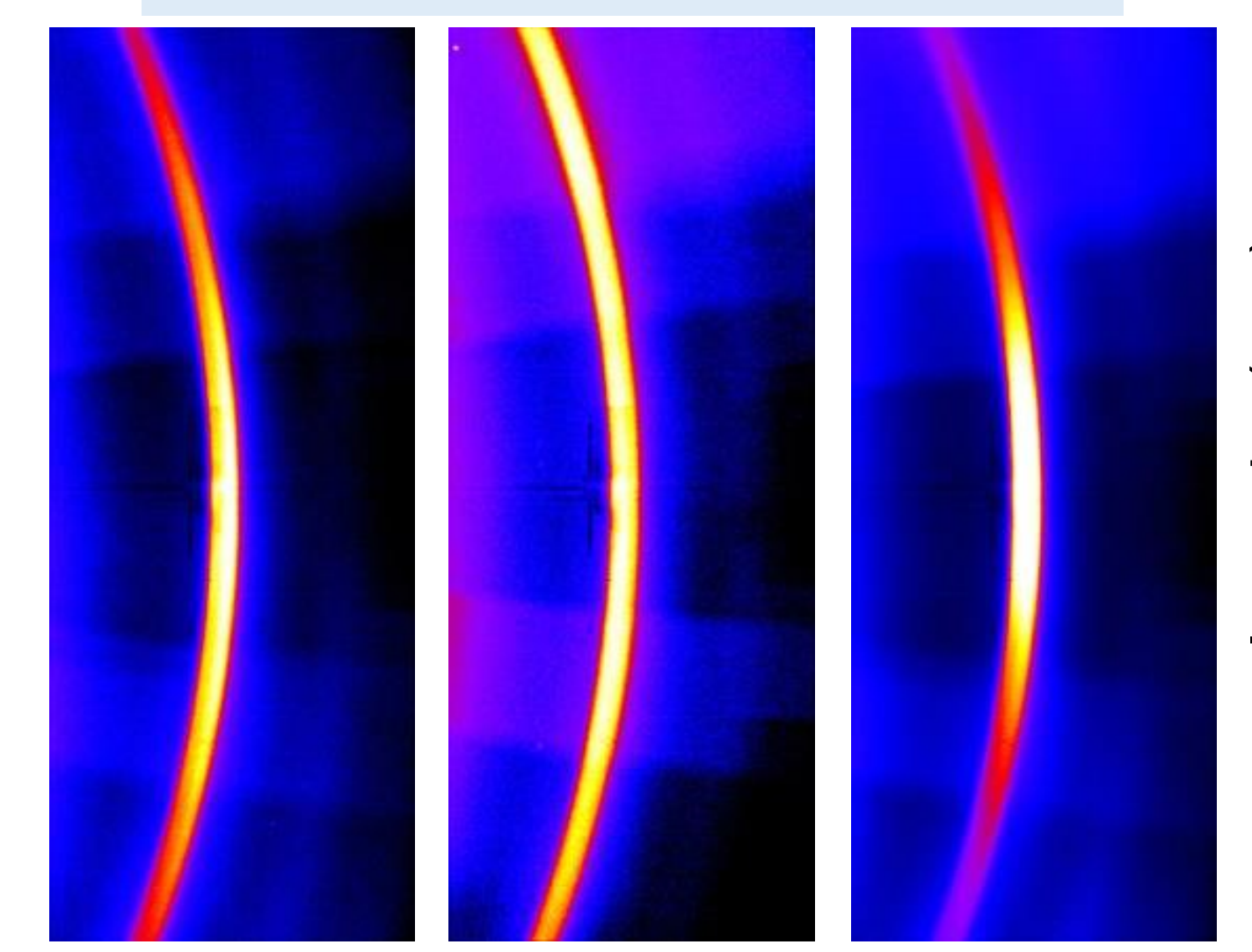


Fig. 4 2D diffraction patterns of cellulose (004) plane.

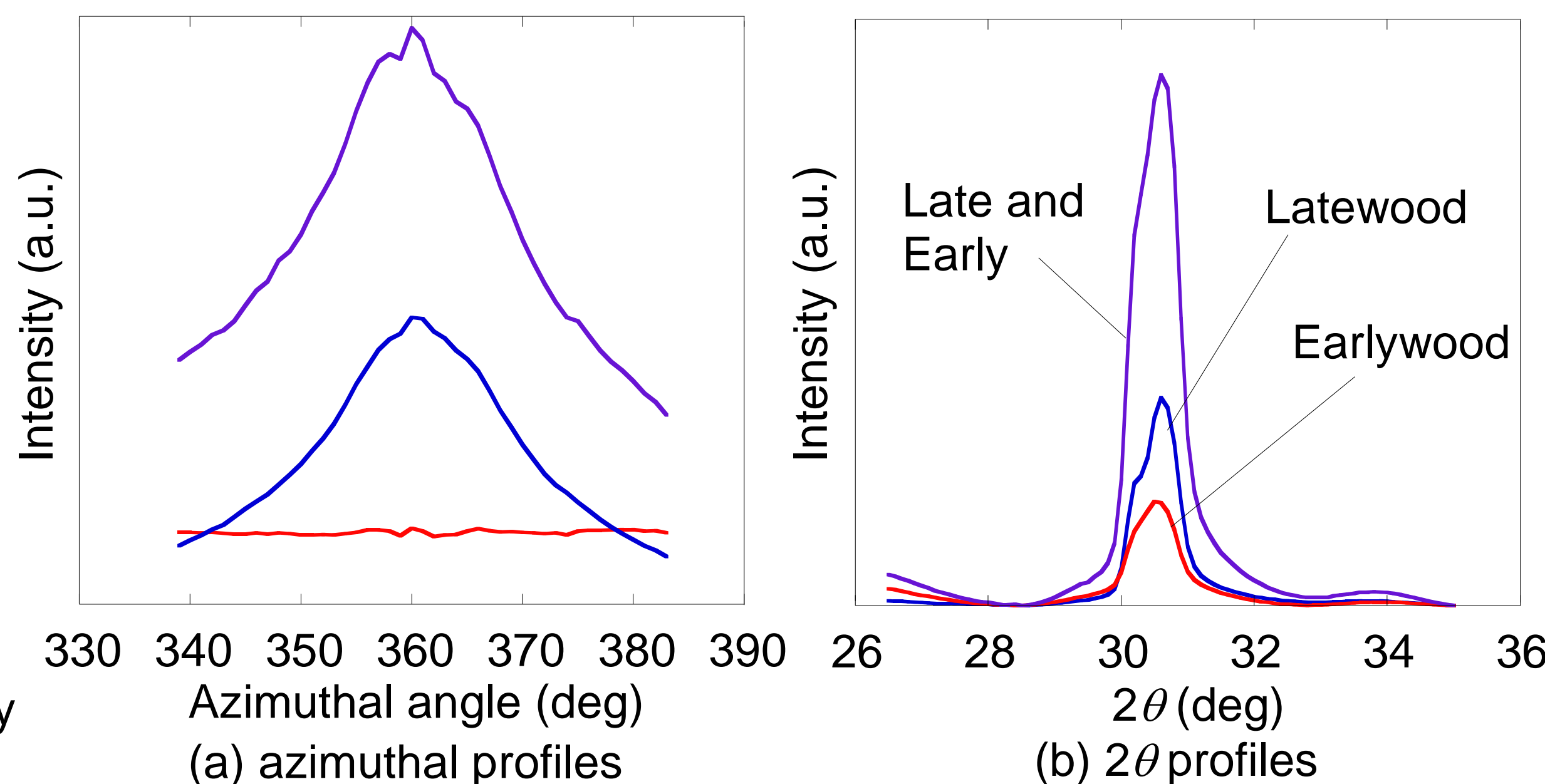


Fig. 5 Profiles of cellulose (004) plane.

X-ray irradiation area	2θ (deg)	d_{004} (Å)	FWHM (deg)	Peak height (cps·deg)	Integrated Intensity (cps·deg)
Latewood	30.62 (0.08)	2.563 (0.006)	0.923 (0.040)	5001 (898)	4740 (807)
Earlywood	30.49 (0.05)	2.573 (0.004)	1.011 (0.011)	2869 (400)	3259 (368)
Late and Early	30.58 (0.07)	2.566 (0.006)	1.002 (0.036)	13684 (4238)	14235 (3378)

In parentheses is standard deviation.

β回折強度曲線(Fig. 5(a))

- 早晚材, 晩材: 360°付近にピーク
- 早材: 配向性なし

2θ回折強度曲線(Fig. 5(b))

- 早材は晩材よりも回折強度下
- 全特性値で有意差有り(Table 1)

95%有意差: 2θ
99%有意差: d_{004} , FWHM, Peak height, Integrated intensity

2θ回折曲線の重ね合わせ

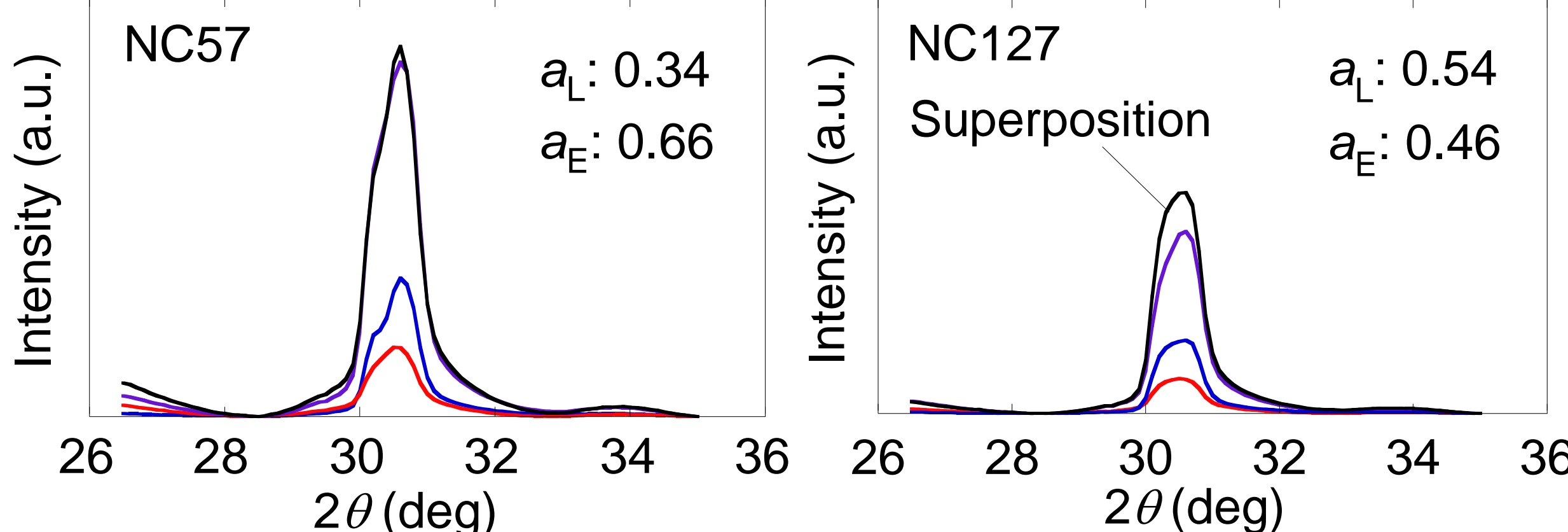
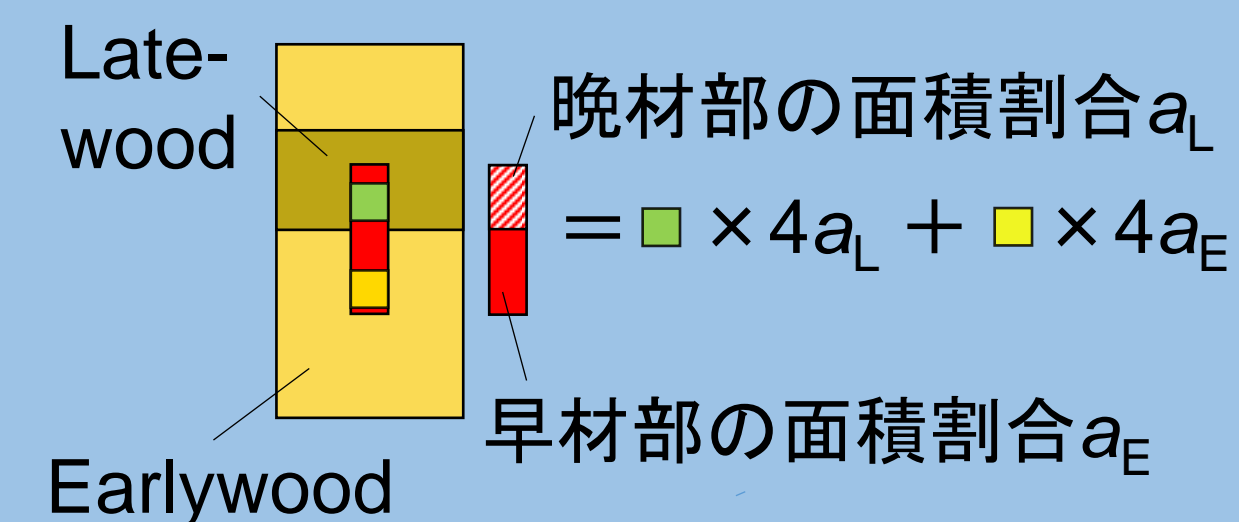


Fig. 6 Result of superposition of 2θ profiles with layer component.

2θ回折曲線の重ね合わせ(Fig. 6)

- 重ね合わせ結果の精度に個体差あり
- 年輪構造の中で早材から晩材へ移り変わる中間層の影響(Fig.7)

細胞の連続的な変化を考慮する必要がある

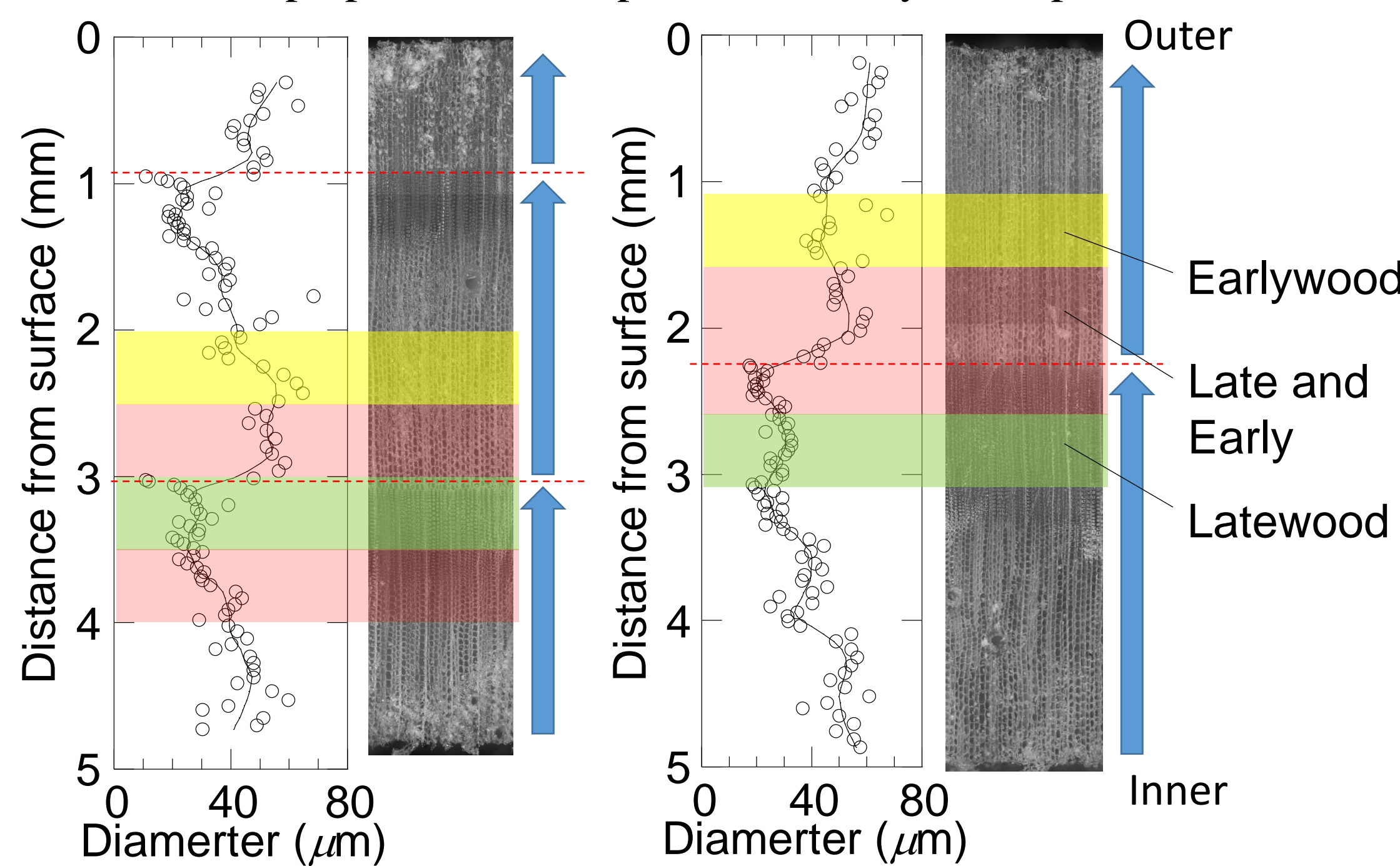


Fig. 7 Image of cross section of specimens and transition of cell diameter.

セルロース鎖の引張挙動

セルロース鎖ひずみ(ε) (Bragg則より)

$$\epsilon = \frac{d'_{004} - d_{004}}{d_{004}} = \frac{\sin\theta}{\sin\theta' - \sin\theta}$$

d_{004} : セルロース(004)面の格子間隔
 θ : Braggの回折角度

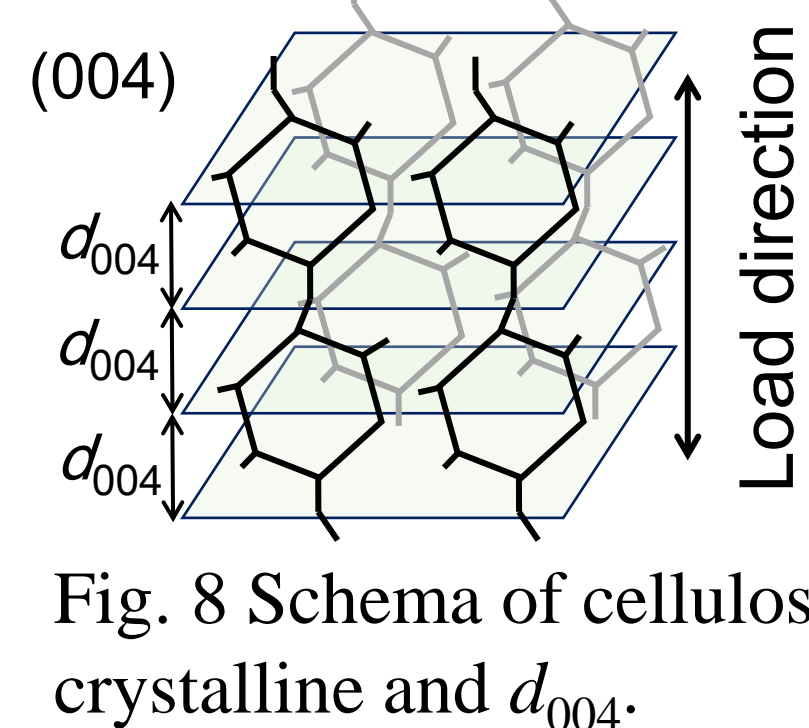
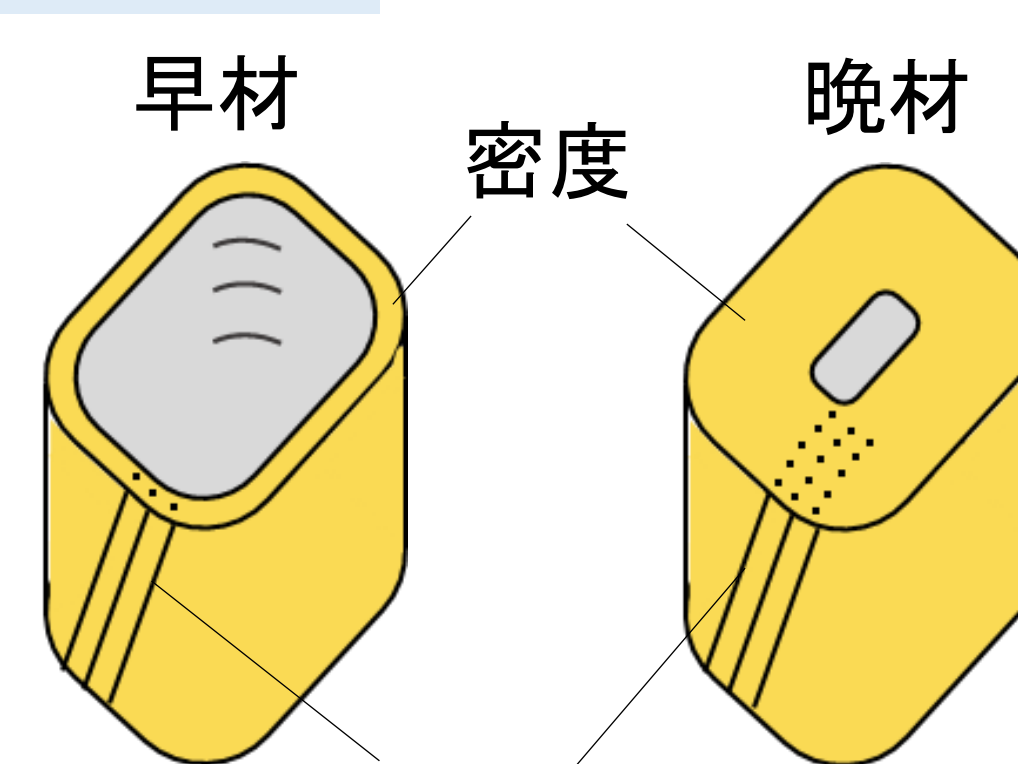


Fig. 8 Schema of cellulose crystalline and d_{004} .

基準応力



(a) 密度
晩材=567, 早材=332 kg/m^3 (Cown 1977)

(b) 相対セルロース推定含有量

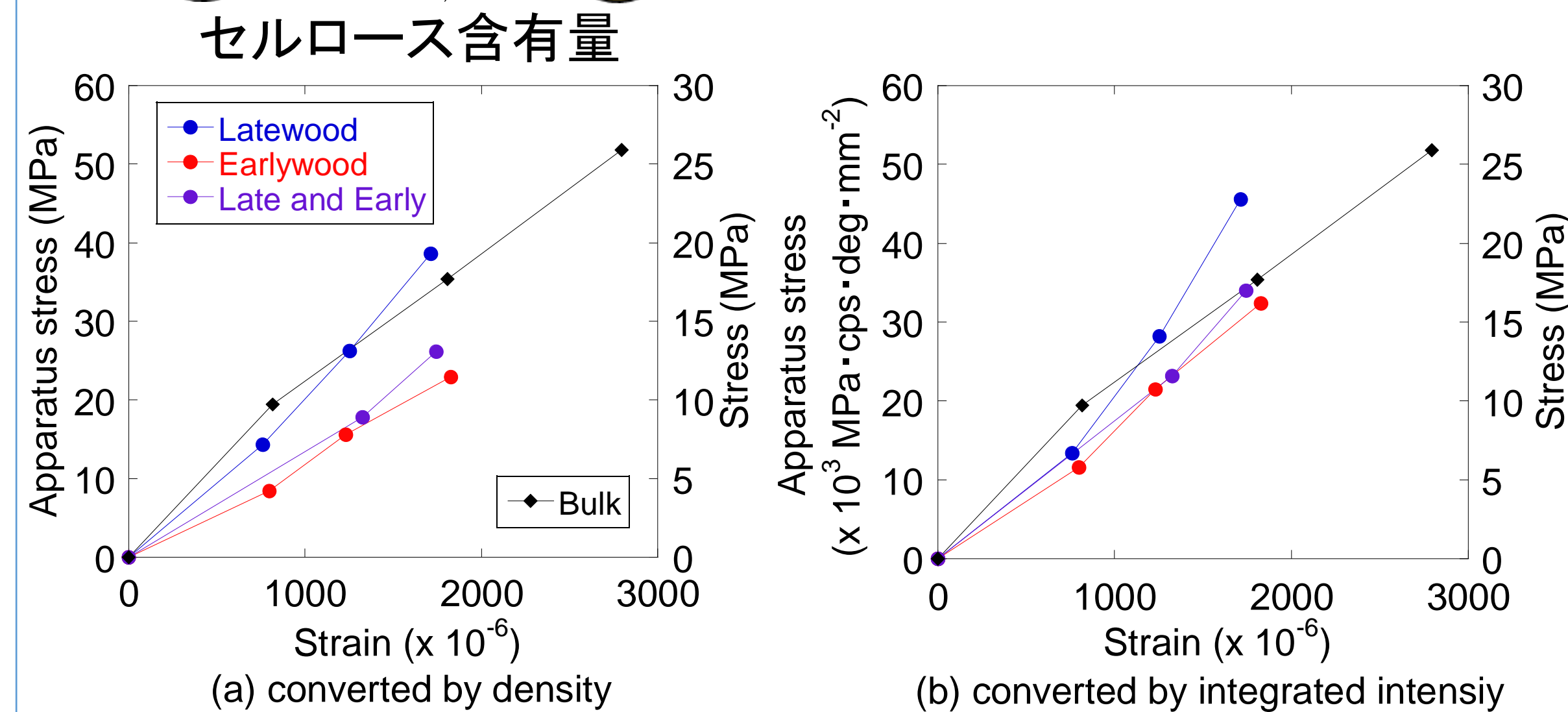


Fig. 9 Apparatus stress-strain relations.

並列モデルの適応

$$K' = \frac{A_L K_L + A_E K_E}{A_L + A_E}$$

K' : 重ね合わせによる剛性, K : 各層の剛性, A : 試験体の各層の断面積
 L : 晩材, E : 早材

Table 2 Rigidity of each layer and estimated rigidity convert with integrated intensity or density.

Method of estimation	Unit	Latewood K_L	Earlywood K_E	Late and Early K_A	Estimated K'
By density	GPa	24.37 (13.77)	14.57 (4.74)	28.55 (20.42)	16.74 (1.98)
By intensity	$\text{MPa} \cdot \text{cps} \cdot \text{deg} \cdot \text{mm}^{-2}$	37.10 (23.36)	22.92 (7.94)	38.71 (27.46)	26.04 (4.38)

In parentheses is standard deviation.

早晚材層構造内の基準応力の検討(Fig. 9)

- 早材と晩材で同程度の引張ひずみを進展した(最大ひずみ $(\times 10^{-6})$: 早材 1512 ± 597 , 晩材 1634 ± 516)
- 木材バルクと比較して、早晚材のひずみは同程度、あるいは小さい(最大ひずみ $(\times 10^{-6})$: 木材バルク 2580 ± 519)
- 早材のほうが晩材に比べ低い剛性 (K_E/K_L : Densityで 0.80 ± 0.54 , Intensityで 0.87 ± 0.61)