

研究報告

紅檜造林木樹幹與枝條之生長應變探討

陳欣欣^{1,3)} 黃玲瓏²⁾ 李金梅¹⁾ 黃彥三¹⁾

摘要

本研究係利用應變規以刻溝法測定紅檜(*Chamaecyparis formosensis* Matsum.)造林木根曲樹幹之生長應變，探討樹高及圓周位置對解放表面生長應變之影響，同時亦測定樹幹內部殘留生長應變，木質部細胞壁S₂層之微纖維傾斜角(microfibril angle, MFA)與生長應變之關係亦被探討。試驗結果顯示生長應變與樹高間無明顯相關性，根曲樹幹下側有很大的壓縮生長應力，抗壓材之MFA遠大於正常材者。

樹枝承受來自自重之彎曲應力，此一應力與生長應力重疊。樹枝上下側之生長應變較樹幹者為大。枝條下側之生長應變有隨反彈應變之增大而增大之趨勢，且前者大於後者。吾人認為樹枝下側抗壓材所產生之壓縮生長應力係受到由自重所引發之重力彎曲應力之影響。因此，抗壓材所引起之高壓縮應力係與重力刺激有關。樹枝形態受樹枝自重所引起之彎距與生長應力所引起之彎距二者間之交互作用的影響。樹皮之生長應變測定結果顯示不論樹幹或樹枝均為收縮生長應變，顯示有引張生長應力之存在。

關鍵詞：抗壓材、微纖維傾斜角、生長應變、反彈應變、內部殘留應變。

陳欣欣、黃玲瓏、李金梅、黃彥三。2006。紅檜造林木樹幹與枝條之生長應變探討。台灣林業科學 21(2):263-72。

Research paper

Growth Strains in Trunks and Branches of Planted *Chamaecyparis formosensis* Matsum.

Shin-Shin Chen,^{1,3)} Ling-Long Kuo-Huang,²⁾ Chin-Mei Lee,¹⁾ Yan-San Huang¹⁾

【 Summary 】

The distribution of growth strain in basal sweeping trunks of *Chamaecyparis formosensis* Matsum. was measured by the kerf method using strain gauges. Effects of both tree height and peripheral positions on the trunk on the released surface strains were examined. The residual internal growth strains were also measured. The microfibril angles (MFAs) of the S₂ layer of cell wall were measured using the iodine deposition method to examine their influences on growth strain. The

¹⁾ 行政院農業委員會林業試驗所森林利用組，10066台北市南海路53號 Division of Forest Utilization, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

²⁾ 國立台灣大學生命科學系，10617台北市羅斯福路四段1號 Department of Life Science, National Taiwan University, 1 Roosevelt Rd., Sec. 4, Taipei 10617, Taiwan.

³⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail:sschen@tfri.gov.tw

2006年1月送審 2006年3月通過 Received January 2006, Accepted March 2006.



results showed that there was no obvious relationship between tree height and growth strain. We found large compressive stresses on the lower side of sweeping trunks that differed greatly from the tensile stresses in normal erect trunks. Regarding the residual internal stresses within erect trunks, contract strain or tensile stress was present toward the outside, whereas extension strain or compressive stress was induced toward the inside of the trunk. The MFA of compression wood was larger than that of normal wood.

Branches suffered bending stresses due to their own weight. This stress was then superposed on the growth stress. It was found that growth strains on the upper side or lower side of branches were larger than those in the stems. It was shown that the growth strain increased with an increase in the spring-back strain on the lower side of branches, and the former was obviously larger than the latter. This suggests that the generation of growth stresses on the lower side of branches containing highly developed compression wood is affected by the gravitational bending stress due to their own weight. It was concluded that the branch form is affected by the interaction between the bending moment due to its own weight and that due to growth stresses.

Key words: compression wood, microfibril angle, growth strain, residual internal stress, spring back strain.

Chen SS, Kuo-Huang LL, Lee CM, Huang YS. 2006. Growth strains in trunks and branches of planted *Chamaecyparis formosensis* matsum. Taiwan J For Sci 21(2):263-72.

緒言

樹幹於連年生長之同時累積生長應力 (growth stress)，此一現象與人工材料於加工過程中所產生的殘留應力頗為類似。樹幹外周之形成層在進行細胞分裂之同時，對內產生木質部，對外產生韌皮部，而於木質部形成之過程中累積生長應力(Boyd 1972, Yamamoto et al. 1991, Guitard et al. 1999)，樹木於肥大生長時樹幹表面會發生異向性應力分佈，此一應力經連年累積，樹幹內部為達成力學平衡，而在樹幹內縱向、徑向及弦向產生特定形式之殘留應力分佈(Archer and Bynes 1974, Kubler 1987, Fournier et al. 1990)，此一應力累積可說是樹木為適應環境之壓力所產生之不可避免的生理反應(Niklas 1992, Mattheck and Kubler 1995)。傾斜樹幹或枝條之特定部位常發生較大之生長應力，企圖使樹幹恢復直立生長或使枝條朝上方生長，而不致於傾倒或折斷。例如，針葉樹在傾斜樹幹或樹枝之下側產生抗壓材 (compression wood)，闊葉樹則在上側產生抗張材 (tension wood)，即使直立通直的樹幹，也必然在樹幹內部產生生長應力。雖然是直立的

樹木，因環境因素的影響，邊材部有發生壓縮破壞的危險性，故實際上，不論針、闊葉樹，均在樹幹周邊部產生纖維方向的引張應力，藉以削弱可能發生的壓縮應力而維持樹幹的安全。因此可以認為樹木是藉生長應力來巧妙地適應環境而維持樹體之生理需要(Mattheck and Kubler 1995)。然而，人類在砍伐樹木並做木材加工利用之際，此生長應力卻造成利用上的困擾，在立木狀態下恆續保持平衡狀態之樹幹內部之殘留應力分佈，在各加工過程中被解放出來，伐倒及截斷時可能發生心裂，製材時會發生反翹，造成利用率下降。因此從木材利用的立場，有必要就生長應力之發生機制加以探究，並尋求解除生長應力之方法(Okuyama and Sasaki 1979, Okuyama et al. 1990)。

樹木在地球生態體系中扮演重要的環境保護角色後，再度被以木材利用之形式作各種不同的有效利用，為人類的生活提供極為有用的資材。唯由於人口不斷增加，林產工業迅速發展，使森林資源日漸枯竭，全球性的環保意識因而日益增強，為因應大環境的變化，林產研

究的方向亦應有所調整，俾與林學研究相互配合，相輔相成，相得益彰。

紅檜(*Chamaecyparis formosensis* Matsum.) 分布於本省中央山脈海拔1,000~2,800 m之地區，與台灣扁柏共稱檜木，為台灣最貴重之針葉樹，其材質極為均勻優良，主供建築、傢具、器物、彫刻、造船及化粧合板之用，極具經濟價值。惟自實施保育政策以來，紅檜天然林已遭禁伐，並積極進行造林工作。目前棲蘭山林區已有生育狀況極佳的天然更新林，溪頭林區亦有生長良好的造林木，惟此等生長快速之紅檜次生林，其樹幹生長應力發生情況尚不明瞭，實有加以探究之必要。惟以往生長應力的研究大多以樹幹或原木為探討對象，僅少數著墨於枝條之問題(Yoshida et al. 1992a, b, Ohsako et al. 1968)。本計劃以棲蘭山紅檜次生林為對象，探討直立及根曲樹幹之表面生長應變(growth strain)及內部殘留生長應變。此外並就樹枝生長應變與反彈應變之關係加以探究。為了解木材組織細微構造與生長應力之關連性，並就樹幹表面木質部細胞壁 S_2 層之微纖維傾斜角(microfibril angle, MFA)加以測定，探討兩者間之相互關係。

材料與方法

於森林保育處棲蘭山事業區紅檜次生林選取30~35年生立木六株(其中四株為根曲樹幹)作為供試木，並加以伐採。分別編號為A、B、C、D、E及F，其胸徑分別為17、27、23、22、34.5及40 cm，樹高則分別為15、17、16、16、18及18.5 m。A、B、C三棵樹在樹高1 m以下略有根曲，1 m以上則通直，因屬造林地經過修枝作業，A號樹，枝下高約為7~8 m，B、C號樹，枝下高約為9~10 m。表面生長應變之測定係就纖維方向與圓周方向同時進行。測定時先在選定位置剝去樹幹表面之樹皮，然後將十字型應變規沿木質部之縱向與橫向利用瞬間膠予以黏貼。生長應變之測定採用附有40頻道掃描器(USB-11A)之手提式數字顯示應變測定儀(Model UCAM-A, Kyowa, Japan)。首先將所

有貼妥之應變規予以歸零，然後以手鋸於應變規上下距離約5 mm處鋸切深度約10~15 mm之橫向切溝，以解除縱向生長應變，然後以鏈鋸在應變規左右兩側鋸切縱向溝槽，以解除橫向應變，隨即讀取應變測定儀之顯示數值，此一刻溝法(Kerf method)之解放應變測定工作便告完成(Sasaki et al. 1978, Huang et al. 2002)。為瞭解樹高對生長應變之影響，先將伐倒之樹木截斷成2.0~2.5 m長之原木，然後於各段原木之近中央處測定縱向與橫向表面生長應變。至於樹幹縱斷面上之殘留應變分佈測定，係就E號樹在樹高5.3 m之直立部分，將原木中央加以鋸切，留取通過樹心之徑面版(厚約2 cm)，並保留上下兩端完整，然後在近板中央位置每隔1.5 cm沿縱向貼一片應變規，於歸零後，以手鋸於應變規上方5 mm處予以橫斷，再沿應變規之左右間隔加以鋸解分隔，隨即讀取儀器之掃描數值，測定工作便告完成。傾斜樹幹圓周方向生長應變之分佈測定，係就D號樹之根曲部分，以上側為 0° ，下側為 180° ，順時針方向每隔 22.5° ~ 45° ，測定縱向與橫向表面生長應變。因為抗壓材係發生在傾斜樹幹下側，故沿下側作密集的生長應變測定，藉以獲取更多資料(Fig. 1)。

樹枝生長應變之測定係就枝條上距主幹不同距離之部位，先剝去樹皮，然後在上側及下側分別貼上縱向應變規，於歸零後，將枝條鋸下，去除側枝及樹葉，隨即讀取因枝條解除自重後所產生的反彈應變，此後於應變規前後約5 mm處鋸斷枝條，便可測得生長應變。

木質部細胞壁 S_2 層微纖維傾斜角之測定係採用碘素沈澱法，利用由各樹幹表面生長應變測定部位所取下之試材，切取20 μm 弦面顯微切片，於顯微鏡下就春材與秋材分別測定30個管胞之MFA，求取平均值，以便與各該部位所測得之生長應變互作比較。此外並觀察正常材與抗壓材之橫切面與徑切面之顯微構造，抗壓材之存在可由 S_2 層之加厚，圓形細胞壁橫斷面及其細胞間隙之存在，以及管胞內壁之螺旋狀開裂(helical fissures)加以確認(Yamamoto et al. 1991)。此外並就樹幹、樹枝之樹皮部分，先剝去外樹皮，然後將應變規貼在內樹皮上，同樣

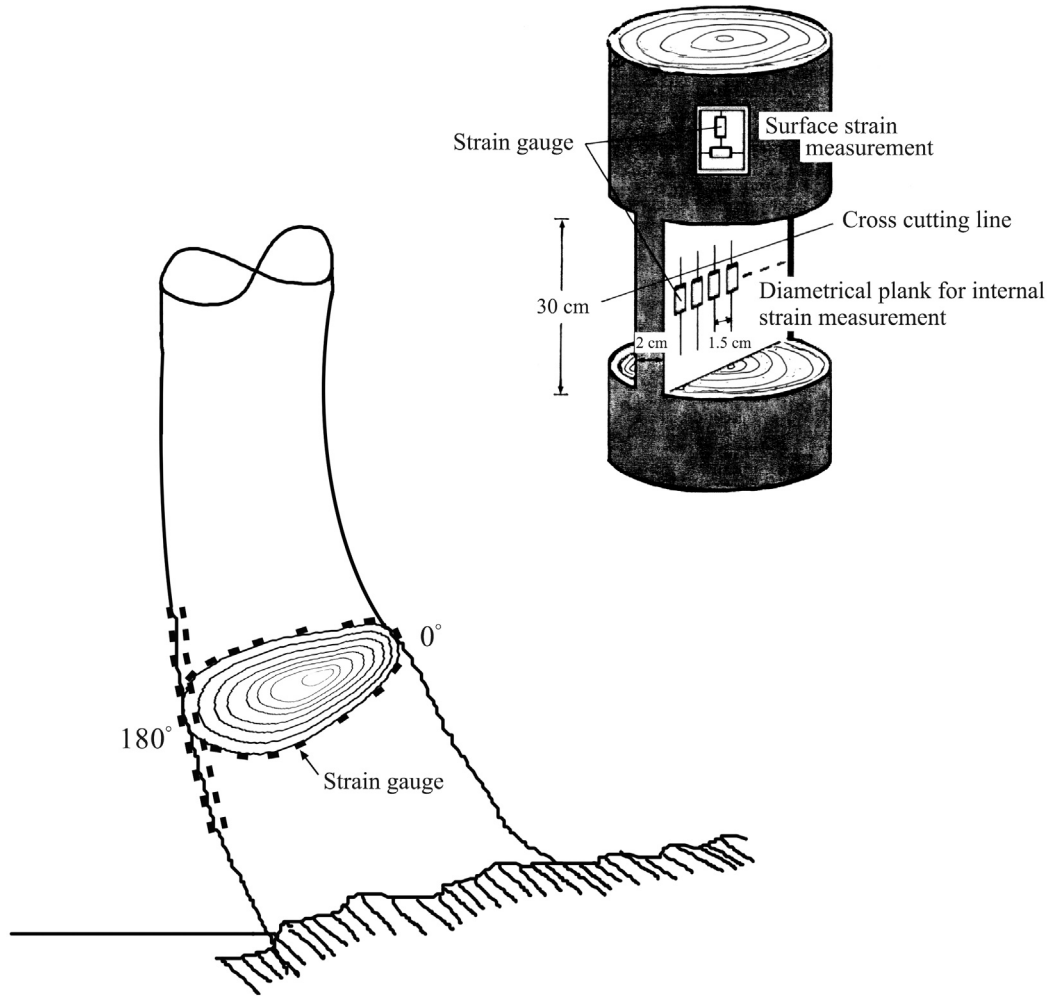


Fig. 1. Measurements of the trunk and of the peripheral positions of a basal sweeping trunk.

以切割法切至木質部，測定解放應變。

結果與討論

一、樹高對表面生長應變之影響

Figure 2顯示樹高與A、B、C樹號之生長應變間並無明顯關係。A號於樹高4 m以下部位之縱向表面生長應變值平均在-340~-350 $\mu\epsilon$ 間，並無太大變化，顯示引張生長應力之存在，惟於6.2 m樹高部位則因輕微抗壓材之存在，使生長應變呈正負互見。B號樹於樹高6.2 m以

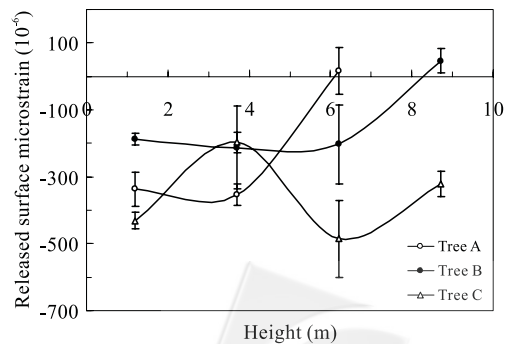


Fig. 2. Effects of tree height on released surface growth strain (trees A, B, and C).

下部位，生長應變值平均在-185~-215 $\mu\epsilon$ 間，亦無太大變化，惟在樹高8.7 m部位，因輕微抗壓材之存在而呈現平均值+45 $\mu\epsilon$ 之較小伸張應變。C號樹於樹高8.7 m以下部位，生長應變平均值在-195~-485 $\mu\epsilon$ 間呈較大的起伏，且未發現抗壓材之存在。Huang et al. (1998)就柳杉直立正常木所作的試驗，顯示生長應力與樹高間並無明顯關連。另Huang et al. (2003)就台灣杉所作之測試，顯示不論修枝與否，縱向與橫向表面生長應變與樹高間無明顯關係。而Sasaki et al. (1978)就日本柳杉所作之測定，亦顯示生長應力與樹高無明顯關連。Yao (1979)選擇易於發生端裂(end split)之胡桃木(*Carya ovata*)、櫟木(*Quercus nigra*)與光臘樹(*Fraxinus americana*)，探討生長應力之樹高變異性，顯示平均在樹高7.7 m處呈現最大應力，平均應力為97 kgf cm⁻²，並認定此一應力值足以造成製材上之問題及原木端裂。Chafe (1981)亦就5株39年生光臘樹作類似研究，得知彈性係數，比重及生長應力均隨樹高之增高而增加，且因應力之增加而使原木易於發生端裂，此點與現場所見一致。顯然生育地對樹高與生長應力之關係之效應尚待進一步之探討。

二、樹幹內部之殘留應變分佈

Figure 3顯示E號樹於樹高5.3 m處之樹幹內部縱向殘留應變分佈。靠樹幹外周為收縮應變或引張應力，樹幹內側則為伸張應變或壓縮應力。靠近樹幹外周之最大殘留應變為-529 $\mu\epsilon$ ，靠近中心則為+388 $\mu\epsilon$ ，以上之殘留應變分佈係表面生長應變累積於樹幹內部之結果。表面生長應變係每年產生在樹幹之最外側，而樹幹內部則產生新的應變分佈以因應此一表面生長應變。換言之，新的應變重疊在原有的應變分佈上，形成應變的重新分佈，隨著樹幹的生長，以上過程連年重複進行，因而形成有規則的應變分佈(Okuyama et al. 1986)。

三、根曲樹幹之生長應變圓周分佈

Figure 4顯示根曲樹幹(樹號D)之下側(180°)具有頗大的縱向表面生長應變，其範圍在

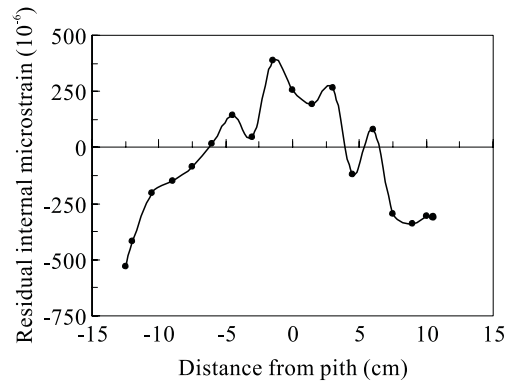


Fig. 3. Distribution of residual internal strain in the erect portion of the trunk (tree E).

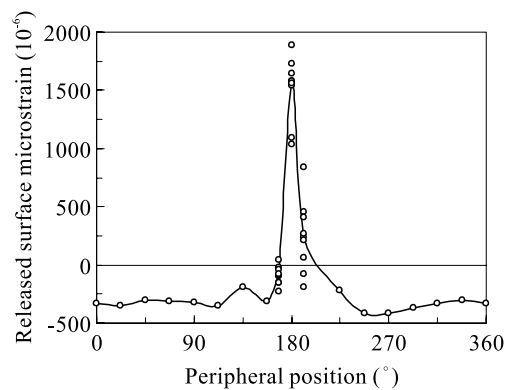


Fig. 4 Peripheral distribution of released surface strain in the longitudinal direction in a basal sweeping trunk (tree D).

+1036~+1884 $\mu\epsilon$ 間。正值表示解放應變為伸張應變，顯示有較大的壓縮生長應力存在。180°左右兩側(191°與169°)之生長應變呈現正、負互見，而其餘各角度則均呈現負值，顯示根曲樹幹之側面及上側均為引張生長應力，因正常直立樹幹之外周均呈現引張生長應力(Huang et al. 1998)，根曲樹幹下側之壓縮生長應力應來自抗壓材之存在。Boyd (1980)亦在*Pinus radiata* D. Don之傾斜樹幹下側測得較大的伸張解放應變(+1800 $\mu\epsilon$)。抗壓材所產生的壓縮生長應力對傾斜樹幹之恢復直立具有一定之力學功能，與闊葉樹相對應，針葉樹樹幹通常一方面由傾斜樹



幹之上側產生拉力另一方面又由下側產生推力俾使樹幹恢復直立(Archer 1986)。

傾斜樹幹恢復直立之機制曾被解釋為抗壓材於縱向發生膨脹而推動樹幹至直立位置(Timell 1986b, Niklas 1992, Mattheck and Kubler 1995), 惟抗壓材沿樹幹縱向膨脹之機制仍尚未被完全明瞭。吾等認為傾斜樹幹下側抗壓材所產生的壓縮應力會在橫斷面上引起一個平衡彎距(balancing moment), 傾斜樹幹必須朝上彎曲, 藉以抵消內部彎距來達成力學平衡, 樹幹於向上彎曲之際, 樹幹下側產生引張應力, 上側則產生壓縮應力, 此等應力則與原有內部生長應力相重疊(superpose), 因此所測得之內部應力分佈仍原有內部殘留應力與彎曲應力之和, 且因連年生長之應力累積而更形複雜(Huang et al. 2001)。吾人有必要作更進一步之研究, 藉以釐清生長應力之生理意義。

四、傾斜樹幹表面微纖維傾斜角之圓周分佈

Figure 5顯示根曲樹幹(樹號D)表面木質部細胞壁 S_2 層微纖維傾斜角(MFA)之圓周分佈。靠近下側(180°)之部位因抗壓材之存在, 其MFA有偏高之明顯趨勢, 其最大值为 31.9° , 左右兩側及上側之MFA範圍在 $15^\circ\sim 23.5^\circ$ 之間, 值得注意的是左右兩側之MFA並不對稱, 右側之MFA顯然較左側者為高, 其理由尚難判斷。MFA與

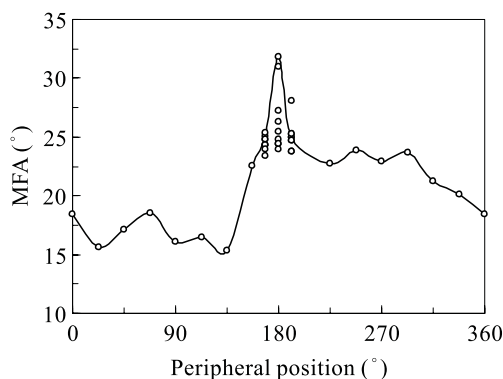


Fig. 5. Effects of peripheral positions in a basal sweeping trunk on the microfibril angle (tree D).

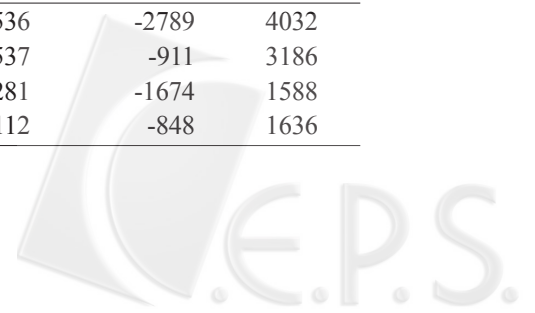
生長應力具有密切相關性(Okuyama et al. 1986, 1994, Yamamoto et al. 1995), 依據統一假說(unified hypothesis), Guitard et al. (1999)運用力學模式來探討MFA與生長應力的關係, 彼等計出生長應力由引張應力轉變為壓縮應力之臨界MFA約為 $20^\circ\sim 30^\circ$, 與Fig. 4相對照, 可知傾斜樹幹下側之高壓縮應力與高MFA, 與抗壓材之存在息息相關, 而抗壓材之所以產生壓縮應力被認為與木質素之膨潤作用有關, 抗壓材常較正常材含較多之木質素與較大的MFA。壓縮生長應力之大小可用來評估抗壓材之發達程度。

五、樹枝縱向表面生長應變分佈

針葉樹常在傾斜樹幹或樹枝下側產生抗壓材(Panshin et al. 1964, Timell 1986a), 由此特殊組織所產生的應力不同於由正常材所產生者, 抗壓材產生壓縮應力藉以拘束木材之伸張, 並迫使傾斜樹幹或樹枝朝上方生長或使樹枝與主幹保持一定的角度。Yoshida et al. (1992a)曾研究日本扁柏樹枝之生長應力, 並指出其生長應力與物理性質間之關係異於樹幹者, 彼等認為枝條所產生的生長應力有異於樹幹中之正常材或反應材。Table 1顯示樹枝上距離主幹不同位置之反彈應變與生長應變, 樹枝斷面均呈卵圓形並在下側產生抗壓材, 由表可知, 樹枝上側之反彈應變均為收縮應變(負值), 而下側者皆為伸張應變(正值)。樹枝下側之生長應變皆為正值, 而上側者則正負互見, 樹枝下側之生長應變均遠大於樹幹者。樹枝下側之生長應變, 在距主幹距離較近者有隨反彈應變之增加而增加之明顯趨勢, 且前者之數值大於後者, 兩者之平均比值為0.51。Figure 6顯示生長應變與反彈應變成高度直線相關性($R^2 = 0.478$)。另一可見的傾向是樹枝下側之生長應變有隨距主幹距離之減小而增大之現象, 從樹枝斷面之觀察可知, 距離主幹越近則髓心之偏心越大, 靠近主幹處之抗壓材顯然較為發達, 故能產生較大的壓縮應力。我們強調, 含有高度發達的抗壓材之樹枝下側所產生的生長應力係受到枝條自重引起的重力彎距之影響, 而此一彎距係經由反彈應變表現出來。換言之, 重力刺激

Table 1. Branch shape, growth strains, and spring-back strains at different distances from the trunk

Branch no.	Branch type	L (cm)	D ₁ (cm)	D ₂ * (cm)	Spring-back strain (μ ϵ)		Surface growth strain (μ ϵ)	
					Upper side	Lower side	Upper side	Lower side
1	I	6	3.00	2.65	-3121	4133	1280	6895
		28	2.80	2.70	-2139	2495	450	4936
		52	2.40	2.70	-1510	2263	-211	3154
		75	2.20	2.90	-323	685	-	609
		96	2.20	2.30	-1695	365	-667	119
2	I	6	2.90	2.10	-2433	2517	2141	5719
		17	2.50	2.20	-1525	2335	629	4950
		30	2.20	2.20	-2093	2197	486	4796
		44	2.00	2.20	-401	1992	105	3036
		64	1.60	2.05	-1594	1545	-	1650
3	I	10	5.30	4.85	-1552	1403	1310	3397
		31	4.60	5.00	-973	1247	396	3219
		52	4.25	4.70	-946	853	252	-
		75	4.00	4.10	-393	731	247	72
		100	3.75	3.80	-194	845	172	-30
4	I	12	2.55	2.40	-2218	1509	436	2905
		37	2.30	2.20	-2247	1602	417	2869
		62	2.10	2.00	-1275	1256	-677	2109
		89	1.80	1.80	-1254	1273	-206	1495
		113	1.50	1.50	-1674	713	-1017	391
5	I	16	7.20	5.50	-2063	3230	783	6615
		46	7.20	5.00	-2676	3053	-50	5776
		72	6.50	4.30	-1409	2887	490	5893
		94	5.90	4.70	-2127	2791	-306	4260
6	I	25	6.80	4.70	-	3879	-	5937
		55	6.50	4.40	-515	1005	2820	5249
		91	5.90	4.50	-1170	973	982	3524
		124	4.90	3.80	-945	983	700	2975
		150	4.30	3.80	-1062	1049	27	1606
7	II	15	3.50	3.30	-1456	2062	-1063	2754
		27	3.30	3.00	-1202	1452	-407	2416
		31	3.00	2.20	-848	1014	-34	1284
8	II	10	1.13	1.02	-4196	3536	-2789	4032
		33	1.05	1.10	-1117	2537	-911	3186
		59	0.83	0.89	-1179	1281	-1674	1588
		77	0.78	0.73	-847	1112	-848	1636



continue

Branch no.	Branch type	L (cm)	D ₁ (cm)	D ₂ * (cm)	Spring-back strain (μϵ)		Surface growth strain (μϵ)	
					Upper side	Lower side	Upper side	Lower side
9	II	9	1.26	1.07	-3818	4730	-2471	5523
		24	1.13	1.04	-2997	3302	-2330	4107
		45	0.97	0.91	-2831	3348	-1875	3767
		66	0.86	1.00	-3038	2485	-2961	2542
10	III	8	1.50	1.30	-4181	5756	-4045	-
		28	1.55	1.20	-2225	2589	-1244	4009
		53	1.50	1.25	-1773	1797	-541	3055
		79	1.40	1.10	-1804	1857	-	2696
		107	1.20	1.10	-1518	1490	-406	2228
11	III	8	1.60	1.45	-3577	5052	-4348	4138
		25	1.40	1.70	-2164	2924	-1609	3194
		43	1.60	1.30	-881	1621	1524	3205
		61	1.50	1.00	-1988	1723	416	2606
		77	1.10	1.10	-1913	1750	-725	2068

* L, distance from the trunk; D₁, vertical axial diameter of a branch cross-section; D₂, horizontal axial diameter of a branch cross-section; Type I, bending upward; Type II, horizontal; Type III, bending downward.

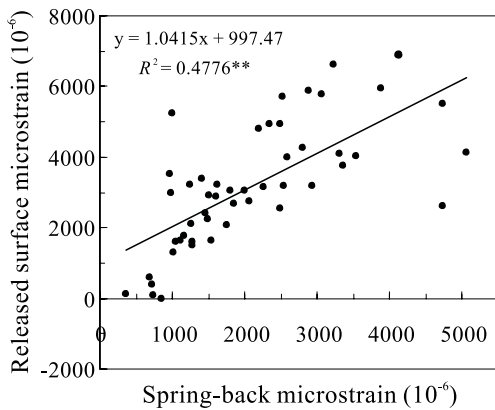


Fig. 6. Relationship between surface growth strains and spring-back strains in a branch.

(gravity stimulus)可用來說明抗壓材所引起的高壓縮應力。樹枝形態與枝條自重所引起的彎曲應力以及生長應力間之平衡有關。當因枝條之自重所引起之朝下彎距大於生長應力所引起

之朝上彎距時，樹枝便會下垂。反之，樹枝便朝上彎曲，這便是廣義上的負屈地性(negative gravitropism)現象(Mattheck 1991)，其結論是樹形因反應材(reaction wood)所產生的高生長應力而受到調整。Table 1顯示水平伸展(或斜傾)枝條(Type II)及朝下彎曲枝條(Type III)之上側生長應變為負值，下側者為正值。惟在朝上彎曲之枝條(Type I)，則不論上側或下側，在靠近樹幹之彎曲部份皆為正值，在靠近末端之直線部分，則上側為負值，下側為正值，枝條之形態與生長應變分布之關係圖可歸納如Fig. 7。

六、樹皮之生長應變

就直立樹幹、根曲樹幹之上側、側面及下側，以及樹枝之上側、側面及下側所測得解放生長應變值如Table 2。由表可知不論測定部位如何，樹皮之縱向生長應變皆為負值，顯示有引張生長應力之存在。有關樹皮生長應力之研究，僅見於Okuyama et al. (1981)就日本柳杉所

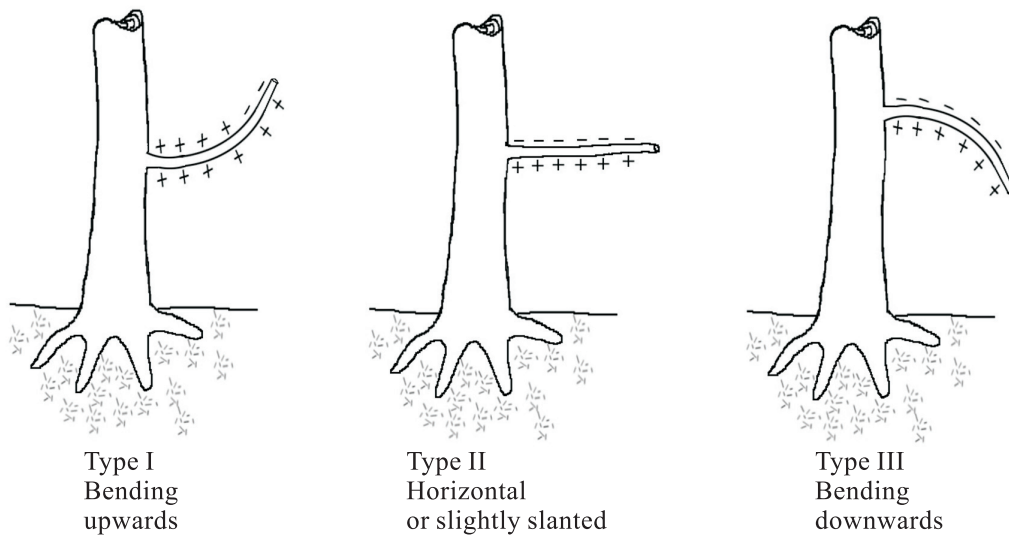


Fig. 7. Relationship between branch shape and growth strain distribution.

Table 2. Growth strain in the bark

Position	Erect trunk	Sweeping trunk			Branch		
		Upper side	Side	Lower side	Upper side	Side	Lower side
Growth strain ($\mu\epsilon$)	-920	-1595	-1263	-1126	-401.5	-768.3	-363.4

作之試驗，其結果顯示不論縱向或弦向之測定皆為負值，顯示有引張應力之存在，與本試驗之結果相似。

引用文獻

Archer RR. 1986. Growth stresses and strains in trees. New York: Springer-Verlag. p 203-4.
Archer RR, Bynes FE. 1974. On the distribution of tree growth stresses. Part I: An anisotropic plane strain theory. Wood Sci Technol 8:184-96.
Boyd JD. 1972. Tree growth stresses. V. Evidence of an origin in differentiation and lignification. Wood Sci Technol 6:251-62.
Boyd JD. 1980. Relationship between fibre morphology, growth strain and physical properties of wood. Aust For Res 10:337-60.

Chafe SC. 1981. Variations in longitudinal growth stress, basic density and modulus of elasticity with height in the tree. Aust For Res 11:79-82.
Fournier M, Bordonne PA, Guitard D, Okuyama T. 1990. Growth stress patterns in tree stems. Wood Sci Technol 24:131-42.
Guitard D, Masse H, Yamamoto H, Okuyama T. 1999. Growth stress generation: a new mechanical model of dimensional change of wood cells during maturation. J Wood Sci 45:384-91.
Huang YS, Chen SS, Chen YS. 1998. Study on the growth stress in tree. I. The growth stress distribution of planted *Cryptomeria Japonica*. Q J Chin For 31:177-86. [in Chinese with English summary].
Huang YS, Chen SS, Kuo-Huang LL, Chiu CM. 2003. Effects of thinning and pruning on



- growth stress of *Taiwania cryptomerioides*. Q J Chin For 36(4):361-70. [in Chinese with English summary].
- Huang YS, Chen SS, Lin TP, Chen YS. 2001.** Growth stress distribution in leaning trunks of *Cryptomeria japonica*. Tree Physiol 21:261-6.
- Huang YS, Chen SS, Lin TP, Chen YS. 2002.** Growth strain in coconut palm trees. Tree Physiol 22:261-6.
- Kubler H. 1987.** Growth stresses in trees and related wood properties. For Abstr 48:131-89.
- Mattheck C. 1991.** Trees: the mechanical design. New York: Springer-Verlag. p 9-11.
- Mattheck C, Kubler H. 1995.** Wood-the internal optimization of trees. New York: Springer-Verlag. p 63-89.
- Niklas KJ. 1992.** Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function. Chicago: Univ Chicago Press. p 420-3.
- Ohsako Y, Yamada T. 1968.** Growth stresses in branch of Buna-wood (*Fagus crenata* Blume). Wood Res 45:36-45. [in Japanese with English summary].
- Okuyama T, Kawai A, Kikata Y, Yamamoto H. 1986.** The growth stresses in reaction wood. In Proceedings of the 18th IUFRO World Congress, Yugoslavia, Div. 5, Forest Processes, Philippine p 249-60.
- Okuyama T, Sasaki Y. 1979.** Crooking during lumbering due to residual stress in the tree. Mokuzai Gakkaishi 25:681-7.
- Okuyama T, Sasaki Y, Kikata Y, Kawai N. 1981.** The seasonal change in growth stress in the tree trunk. Mokuzai Gakkaishi 27:350-5.
- Okuyama T, Yamamoto H, Kobayashi I. 1990.** Quality improvement in small log of Sugi by direct heating method. Mokuzai Kogyo 45(2):12-6. [in Japanese with English summary].
- Okuyama T, Yamamoto H, Yoshida M, Hattori Y, Archer RR. 1994.** Growth stresses in tension wood: role of microfibrils and lignification. Ann Sci For 51:291-300.
- Panshin AJ, deZeeuw C, Brown HP. 1964.** Textbook of wood technology. New York: McGraw-Hill. p 257-76.
- Sasaki Y, Okuyama T, Kikata Y. 1978.** The evolution process of the growth stress in the tree: the surface stress on the tree. Mokuzai Gakkaishi 24:149-57.
- Timell TE. 1986a.** Compression wood in gymnosperms. Vol. 1. New York: Springer-Verlag. p 63-89.
- Timell TE. 1986b.** Compression wood in gymnosperms. Vol. 3. New York: Springer-Verlag. p 1757-91, 1799-824.
- Yamamoto H, Okuyama T, Yoshida M. 1995.** Generation process of growth stresses in cell walls VI. Analysis of growth stress generation by using a cell model having three layer (S₁, S₂, and I+P). Mokuzai Gakkaishi 41(1):1-8.
- Yamamoto H, Okuyama T, Yoshida M, Sugiyama K. 1991.** Generation process of growth stresses in cell walls. Growth stress in compression wood. Mokuzai Gakkaishi 37:94-100.
- Yao J. 1979.** Relationships between height and growth stress within and among white ash, water oak, and shagbark hickory. Wood Sci 11:246-51.
- Yoshida M, Okuyama T, Yamamoto H. 1992b.** Tree forms and internal stresses III. Growth stresses of branches. Mokuzai Gakkaishi 38(7):663-8.
- Yoshida M, Okuyama T, Yamamoto H, Sugiyama K. 1992a.** Tree forms and internal stresses II. Stresses around the base of a branches. Mokuzai Gakkaishi 38(7):657-62.

