

初冬におけるスギ耐凍性選抜木の葉の水分特性

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	丸山, 温 森川, 靖 細貝, 浩 金川, 侃 堀内, 孝雄
巻/号	70巻12号
掲載ページ	p. 518-524
発行年月	1988年12月

論 文

初冬におけるスギ耐凍性選抜木の葉の水分特性

丸山 温*・森川 靖*・細貝 浩**
金川 侃**・堀内孝雄***

丸山 温・森川 靖・細貝 浩・金川 侃・堀内孝雄：初冬におけるスギ耐凍性選抜木の葉の水分特性 日林誌 70 : 518~524, 1988 茨城県林試構内に植栽されているスギ耐凍性選抜木の一部について、 $P-V$ 曲線法を用いて晩秋から初冬にかけて葉の水分特性を調べ、乾燥抵抗性のクローンによる差異および乾燥抵抗性と耐凍性との関係を検討した。圧ポテンシャル (Ψ_p) を失うときの相対含水率 (RWC^{up}) はクローンで違わなかったが、 Ψ_p を失うときの水ポテンシャル (Ψ_w^{up}) や十分吸水したときの浸透ポテンシャル (Ψ_s^{sat}) は耐凍性の高いクローンが低いクローンと比べて低く、水欠差に対する Ψ_p の維持は耐凍性の高いクローンが有利であった。しかし、浸透調節に重要な細胞内液の溶質量はクローンで差がなく、 Ψ_s^{sat} との関連はみられなかった。細胞の体積弾性率 (ϵ , ϵ_{max}) は耐凍性の高いクローンが高く、これらの細胞は耐凍性の低いクローンと比べて強固で可塑性にとむことがわかった。こうした水分諸特性の差異は耐凍性の違いを反映しており、 $P-V$ 曲線法によって得られる水分特性が耐凍性を比較する上で有効な指標となりうる可能性が示された。

MARUYAMA, Yutaka, MORIKAWA, Yasushi, HOSOGAI, Hiroshi, KANEKAWA, Tadashi, and HORIUCHI, Takao: Tissue water relations of leaves of *Cryptomeria japonica* clones in early winter in relation to freezing resistance J. Jpn. For. Soc. 70 : 518~524, 1988 Tissue water relations were measured in leaves of freezing tolerant and intolerant clones of *Cryptomeria japonica* D. DON from early October to early December using the pressure-volume technique. Parameters were compared among the clones in relation to the freezing resistance. No significant differences were observed in the water deficits at turgor losses between the freezing tolerant and intolerant clones. However, both the water potential at turgor loss (Ψ_w^{up}) and the osmotic potential at full turgidity (Ψ_s^{sat}) were significantly lower in the former leaves than in the latter ones, and this result indicated that the freezing tolerant clones were able to maintain higher leaf turgor during water stress. The number of osmoles per unit dry weight ($N_s \cdot DW^{-1}$), which plays an important role in osmotic adjustment, did not differ significantly among clones. The greater values of bulk modulus of elasticity (ϵ_{max}) in the tolerant clones means that the leaf cells of the tolerant clones were stronger mechanically. These results suggest that the lower Ψ_w^{up} , lower Ψ_s^{sat} , and higher ϵ_{max} may contribute to freezing resistance in early winter.

I. はじめに

一般に、多年生植物の耐凍性は、秋から冬にかけて著しく高まる。すなわち、短日長による成長停止とそれに引き続いて低温にさらされることで耐凍性を獲得する (LARCHER, 1975)。スギの場合も耐凍性は、成長停止後比較的高い温度条件下ですすむ予備段階と、低温下ですすむ第2の段階を経て増大する (堀内・酒井, 1973)。越冬状態に入る12月下旬から1月の耐凍度は -25°C にも達するが、低温によって耐凍性を獲得する晩秋から初冬にかけては、しばしば気温が耐凍度を

下回ることがあるので、この時期には凍害が発生しやすい (堀内, 1976)。

幹・枝の皮層や葉などの生細胞の凍害は、細胞外凍結による脱水または細胞内凍結による細胞の死によって起こるが、この時期は主として前者によって起こるので、耐凍性の変化は細胞の乾燥抵抗性の変化とも対応している (酒井, 1982)。たとえば、*Tsuga canadensis* (TYREE *et al.*, 1978), *Abies amabilis* (TESKEY *et al.*, 1984), *Cryptomeria japonica* (DOI *et al.*, 1986), *Heteromeles arbutifolia* M. ROEM (DAVIS and MOONEY, 1986)などの樹種で、葉や枝葉の乾燥抵抗性

* 森林総合研究所 For. and Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305

** 茨城県林試 Ibaraki Pref. For. Res. Exp. Stn., Naka-gun, Ibaraki 311-01

*** 茨城県農林水産部 Dept. Agric., For., and Fish., Ibaraki Pref. Office, Mito 310

が、秋から冬にかけて気温の低下とともに高まり、冬から春にかけて気温の上昇とともに低下することが認められる。*Ilex opaca* AIT. (ROBERTS *et al.*, 1980), ウラジロモミ (丸山・森川, 1984), *Arctostaphylos glandulosa* EASTW. と *Ceanothus greggii* GRAY (BOWMAN and ROBERTS, 1985) でも、秋以降の気温の低下ともなう乾燥抵抗性の増大がみられる。また、O'NEIL (1983 b) は、キイチゴ (*Fragaria virginiana*) の越冬葉の乾燥抵抗性が 0°C 以下の気温によって急速に高まるのが、葉の耐凍性獲得と関連していることを明らかにした。

カンキツ類では、土壤乾燥により人工的に水ストレスを与えた場合、過冷却の程度が高まるとともに耐凍性も増大することが知られている (YELENOSKY, 1979)。同じくカンキツ類で 11 月から 1 月にかけて土壤乾燥処理を行った実験 (山田ら, 1987) で、11 月と 12 月では乾燥処理を与えた場合に葉、茎、根、各組織のプロリン含量と全糖含量が増加し、耐寒性が増大することが明らかにされた。水ストレスの前歴により乾燥抵抗性が高められることは、多くの種で明らかにされており (JONES and TURNER, 1978; IKE and THURTELL, 1981; O'NEIL, 1983a; WILSON and LUDLOW, 1983; BOWMAN and ROBERTS, 1985; RADA *et al.*, 1985), これらは環境条件に対する一種の適応 (浸透調節, osmotic adjustment) として知られているが、カンキツ類での前述のような変化も乾燥抵抗性の変化によるものと考えられる。

これらのことから、耐凍性を評価する場合、従来行われてきた凍結試験などの直接的な方法だけでなく、乾燥抵抗性の違いについても検討することが重要と考えられる。そこで、茨城県林試 (茨城県那珂郡那珂町) に植栽されているスギ耐凍性選抜木の一部について、晩秋から初冬にかけて葉の水分特性をしらべ、乾燥抵抗性のクローンによる差異、および乾燥抵抗性と耐凍性との関係を検討した。

II. 材料と方法

茨城県林試 (茨城県那珂郡那珂町) 構内に植栽されているスギ耐凍性選抜木および精英樹から、耐凍性の高いクローン (耐凍 19 号, 耐凍 37 号, 耐凍 56 号, 以下それぞれ 19 号, 37 号, 56 号とする), 耐凍性の低いクローン (耐凍 16 号, 耐凍 17 号, 精英樹筑波 1 号, 以下それぞれ 16 号, 17 号, 筑波 1 号とする) を材料として選んだ。茨城県林試で 1982 年と 83 年に行った凍

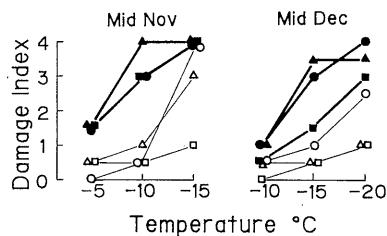


図-1. 耐凍性の高いクローン (○, 耐凍 19 号; △, 耐凍 56 号; □, 耐凍 37 号) と低いクローン (●, 筑波 1 号; ▲, 耐凍 16 号; ■, 耐凍 17 号) の凍結処理温度と枝葉の被害度の関係

Relationships between freezing temperature and damage index of shoots in freezing tolerant (○, No. 19; △, No. 56; □, No. 37) and intolerant (●, Tsukuba-1; ▲, No. 16; ■, No. 17) clones

被害度: 0, 無被害; 1, 微害; 2, 中害; 3, 激害; 4, 枯死

結実験^{*1}の結果得られた各クローンの枝葉の処理温度と被害度の関係を図-1 に示す。これらの植栽木から 80 cm~1 m の長さの枝を切り取り、ただちに水切りを行い、農林水産省林業試験場 (茨城県稲敷郡茎崎町) に持ち帰り、ビニール袋をかぶせて一晩屋外に放置した。枝採集の際、高さ (HELLKVIST *et al.*, 1974) や光前歴 (矢幡, 1978; 丸山・森川, 1983) による違いを避けるため、すべて地上 1~1.5 m の高さの日当りのよい枝を選んだ。十分吸水した試料から先端付近の葉を切り取り、プレッシャーチャンバーを用いたこれまでの方法 (TYREE and HAMMEL, 1972; 丸山・森川, 1983) によって P-V 曲線をえた。P-V 曲線は試料に含まれる軸部分の割合によっても影響を受けるので (NEUFELD and TESKEY, 1986; PARKER and PALLARDY, 1987), なるべく同じ葉位の同じ重さ (生重で 2 g 前後) の葉を選んだ。木部圧ポテンシャル (xpp: xylem pressure potential) の値をそのまま水ポテンシャル (Ψ_w) として用いた。

得られた P-V 曲線から、圧ポテンシャル (Ψ_p) が 0 になるときの水ポテンシャル (Ψ_w^{up} , tlp: turgor loss point), 相対含水率 (RWC^{up} , RWC : relative water content), および全細胞内液量 (V_c), 十分吸水したと

*1 凍結実験は、以下の方法で行った。前処理として 0°C で 2 時間置いた後、5°C 刻みで約 1 時間ごとに温度を下げ、所定の温度で 16 時間放置する。処理後、0°C で約 4 時間置き屋内の水槽で水挿しし、およそ 1 ヶ月後に被害検定を行った。

きの浸透ポテンシャル (Ψ_s^{sat} , sat: saturated) および全細胞内液量 (V_0) を求めた。細胞内液に溶けている全溶質 osmole 数 (N_s) は, V_0, N_s, Ψ_s^{sat} の関係を表す式,

$$\Psi_s^{sat} = -RTN_s/V_0 \quad (1)$$

R : ガス定数, T : 絶対温度

から求めた。絶対温度は, 測定時の室温 25°C から 298°K で一定とした。細胞の体積弾性率 (bulk modulus of elasticity, ϵ) は, 細胞内液量 (V) と Ψ_p から,

$$\epsilon = V \cdot d\Psi_p/dV \quad (2)$$

の式で求め, 最大値を ϵ_{max} とした。

測定は, 19号, 筑波1号は 1987年 10月 19日から 12月 15日にかけておよそ 10日ごとに, 他の 16, 37, 56号は同年 12月 7, 14日, 17号は 12月 9, 15日のそれぞれ 2回ずつ行った。なお, この $P-V$ 曲線法は再現性が高いことから, 測定の繰返しは行わなかった。

III. 結 果

圧ポテンシャル (Ψ_p) が 0 になり, 細胞が初発原形質分離をひきおこすときの相対含水率 (RWC^{up}) は, 19号の場合, 測定開始時の 73.9% から徐々に低下し, 11月 18日に最低 (68.4%) に達した後上昇し, 測定終了時の 12月 15日が 79.8% で最も高かった (図-2)。筑波1号では, 測定開始時が 82.8% で最も高く, 11月 9日に最低 (71.5%) に達した後上昇し, 11月 18日以降は 75.8~78.8% で大きな変化はみられなかった。また, 19号と比べた場合, 測定開始から 11月末までは 19号が低い値を示したが, 12月は逆に筑波1号が低かった。12月測定の他の 4 クロウンは 73.1~81.5% で, ばらつきが大きくクロウン間の違いは明らかでなかった。

Ψ_p が 0 になるときの水ポテンシャル (Ψ_w^{up}) は, 19号では測定開始時の -2.00 MPa から徐々に低下し続け, 12月には -2.8 MPa 以下に達した (図-2)。筑波1号の場合も測定開始 (-1.44 MPa) 後低下したが, 11月中旬に 1度上昇がみられ, 12月の値は -2.6 MPa 前後であった。これらをクロウン間でくらべた場合, 10月末と 11月上旬の 2回の測定を除いて 19号の Ψ_w^{up} が低かった。

十分吸水したときの浸透ポテンシャル (Ψ_s^{sat}) も Ψ_w^{up} と同様の傾向がみられた (図-2)。すなわち, 19号では -1.4 MPa 前後から徐々に低下し, 12月には -2 MPa 以下に達した。筑波1号の場合, -1.11 MPa から低下した後 11月中旬に 1度上昇し, 以後再び低下して 12月には -1.9 MPa 前後であった。また, 10月末と

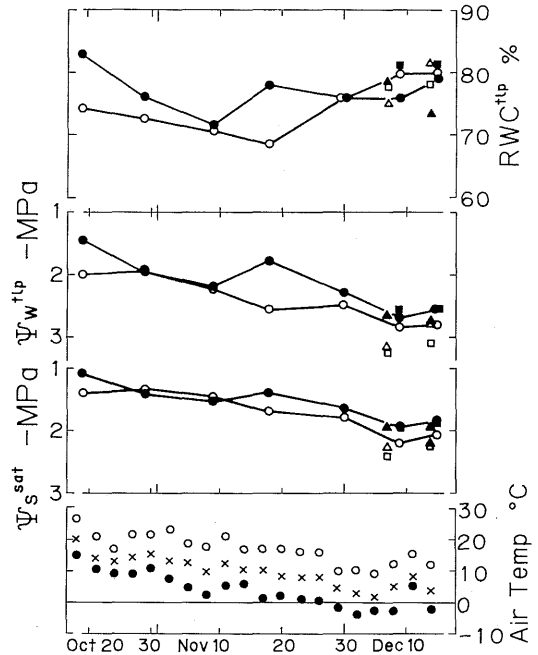


図-2. 圧ポテンシャルを失うときの相対含水率 (RWC^{up}), 水ポテンシャル (Ψ_w^{up}), 十分吸水したときの浸透ポテンシャル (Ψ_s^{sat}) と, 3日ごとの最高 (○), 最低 (●) 気温および平均気温の平均値 (×)

Relative water content at turgor loss (RWC^{up}), water potential at surgor loss (Ψ_w^{up}), osmotic potential at full turgidity (Ψ_s^{sat}) in each clone, and maximum (○), minimum (●), and mean (×) temperatures of each three days

気温以外の記号は図-1に同じ。

Symbols, except for the temperature, are the same as in Fig. 1.

11月中旬をのぞいて 19号の Ψ_s^{sat} が低かった。

他の 4 クロウンでは, Ψ_w^{up} は耐凍性の高いクロウン (37, 56号) で -2.75~-3.26 MPa, 低いクロウン (16, 17号) で -2.54~-2.80 MPa と, 前者が低い値を示した (図-2)。 Ψ_s^{sat} も同様に, 37, 56号が -2.19~-2.41 MPa, 16, 17号が -1.90~-2.03 MPa で, 耐凍性の高いクロウンが低かった。

十分吸水したときの単位葉乾重当りの生細胞内液量 ($V_0 \cdot DW^{-1}$) は, 19号では 10月中は 2.3前後と高く, 以後徐々に低下し, 12月 15日は 1.29で 10月の 1/2強であった (図-3)。筑波1号の場合, 10月末から 11月中旬にかけて上昇した後低下し, 12月 15日は 1.42で 11月 18日の最大値 (2.87) のほぼ 1/2であった。

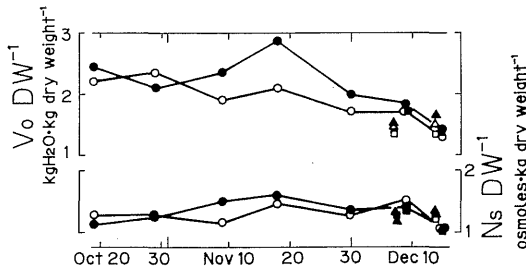


図-3. 単位葉乾重当りの飽水時の全細胞内液量 ($V_0 \cdot DW^{-1}$) と溶質 osmole 数 ($N_s \cdot DW^{-1}$)

Volume of symplasmic water at full turgidity per unit dry weight ($V_0 \cdot DW^{-1}$) and number of osmoles per unit dry weight ($N_s \cdot DW^{-1}$) in each clone 記号は図-1に同じ。

Symbols are the same as in Fig. 1.

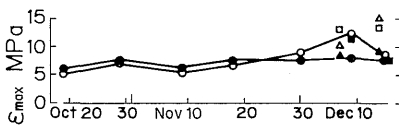


図-4. 細胞の体積弾性率の最大値 (ϵ_{max})

Maximum value of bulk modulus of elasticity (ϵ_{max}) in each clone

記号は図-1に同じ。

Symbols are the same as in Fig. 1.

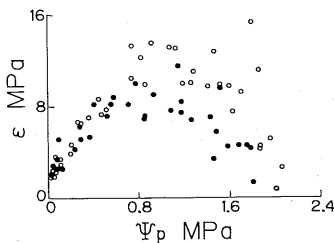


図-5. 12月測定の高耐凍性の高いクローン (○: 19, 56, 37号) と低いクローン (●: 16, 17, 筑波1号) の圧ポテンシャル (Ψ_p) と細胞の体積弾性率 (ϵ) の関係

Relationships between pressure potential (Ψ_p) and bulk modulus of elasticity (ϵ) in freezing tolerant (white dots: No. 19, 56, and 37) and intolerant (black dots: No. 16, 17, and Tsukuba-1) clones measured in December

また、11月以降は筑波1号が19号とくらべて高い値を示した。生細胞内液に溶解こんでいる単位葉乾重当りの溶質 osmole 数 ($N_s \cdot DW^{-1}$) は、筑波1号では測定開始の1.09から徐々に上昇し、11月18日に最大(1.59)に達した後低下し、12月15日は1.06で測定

開始時とほぼ同じ値であった(図-3)。19号の場合、測定期間を通じて1.06~1.52で筑波1号とほぼ同じ範囲にあったが、測定時期による傾向は明らかでなかった。他の4クローンでは、 $V_0 \cdot DW^{-1}$ は1.34~1.69、 $N_s \cdot DW^{-1}$ は1.04~1.36で、クローンによる違いは明らかでなかった。

19号と筑波1号の細胞の体積弾性率 (ϵ_{max}) は、12月初めの19号が12.32 MPaと高かった他はいずれも4.89~9.11 MPaで、時期やクローンによる違いは明らかでなかった(図-4)。しかし他の4クローンでは、耐凍性の高いクローン(37, 56号)が10.04~15.33 MPa、低いクローン(16, 17号)が7.46~11.67 MPaで、前者がやや高い範囲にあった。また、12月の測定をまとめて Ψ_p と ϵ の関係を比べた場合、 Ψ_p が0.8 MPaより高い範囲では耐凍性の高いクローン(19, 37, 56号)の ϵ が高くなる傾向がみられた(図-5)。

IV. 考 察

RWC^{up} の値については多くの場合、樹種や季節、環境条件の前歴による違いはみられず、乾燥抵抗性との関連も明らかでない (PARKER *et al.*, 1982; HINCKLEY *et al.*, 1983; 丸山・森川, 1984; TESKEY *et al.*, 1984; DOI *et al.*, 1986; SOBRADO, 1986; DAVIS and MOONEY, 1986)。今回の測定では時期によるばらつきはあったが(図-2)、12月の結果をまとめた場合、耐凍性の高いクローン(19, 37, 56号)が $78.6 \pm 2.3\%$ 、低いクローン(16, 17, 筑波1号)が $78.1 \pm 3.1\%$ で両者に差はなく、耐凍性との関連は明らかでなかった(表-1)。

Ψ_w^{up} , Ψ_s^{sat} はこれまで多くの樹種で調べられた結果 (TYREE *et al.*, 1978; ROBERTS *et al.*, 1980; 丸山・森川, 1984; TESKEY *et al.*, 1984; DOI *et al.*, 1986; DAVIS and MOONEY, 1986) と同様に、気温の低下に伴って低下する傾向がみられた(図-2)。Fragaria virginiana (O'NEIL, 1983 b) では、浸透ポテンシャル (Ψ_s) は 0°C 以下の気温にさらされることで著しく低下するが、今回測定を行った19号、筑波1号でも最低気温が 0°C 以下の日が現れた後の12月上旬の Ψ_s^{sat} の低下は大きく、耐凍性との関連が示唆された。

12月の結果を耐凍性の高いクローンと低いクローンで比べた場合、 Ψ_w^{up} はそれぞれ -2.97 ± 0.21 MPa, -2.62 ± 0.10 MPa、 Ψ_s^{sat} はそれぞれ -2.23 ± 0.12 MPa, -1.93 ± 0.05 MPa で、いずれも耐凍性の高いクローンが低く(表-1)、同じ Ψ_w に対する Ψ_p は

表-1. 12月測定 of 耐凍性の高いクローン (tolerant: 19, 56, 37号) と低いクローン (intolerant: 16, 17, 筑波1号) の水分特性

Water relation parameters in tolerant (No.19, 56, and 37) and intolerant (No.16, 17, and Tsukuba-1) clones measured in December

	<i>n</i>	$RWC^{1P}(\%)$	$\Psi_w^{1P}(-MPa)$	$\Psi_s^{sat}(-MPa)$	$V_o \cdot DW^{-1}$	$N_o \cdot DW^{-1}$	$\epsilon_{max}(MPa)$
Tolerant	6	78.6±2.3 ^{ns}	2.97±0.21 ^{**}	2.23±0.12 ^{**}	1.43±0.15 ^{ns}	1.29±0.15 ^{ns}	12.14±2.50*
Intolerant	6	78.1±3.1	2.62±0.10	1.93±0.05	1.56±0.16	1.22±0.15	8.71±1.55

*, **: Significantly different at the level of 5% and 1%, respectively.

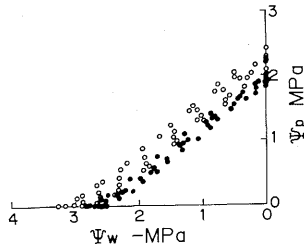


図-6. 12月測定 of 耐凍性の高いクローン(○)と低いクローン(●)の水ポテンシャル(Ψ_w)と圧ポテンシャル(Ψ_p)の関係

Relationships between water potential (Ψ_w) and pressure potential (Ψ_p) in freezing tolerant (white dots) and intolerant (black dots) clones measured in December

耐凍性の高いクローンが高かった(図-6)。19, 筑波1号についても, 11月中旬以降の Ψ_w^{1P} , Ψ_s^{sat} は耐凍性の高い19号が低かった(図-2)。すなわち, 凍害の発生しやすい晩秋から初冬にかけての水欠差に対する Ψ_p の維持は, 耐凍性の高いクローンが有利であると考えられる。

これらのことから, 気温の低下に伴う乾燥抵抗性の変化は耐凍性の変化とよく対応していること, 耐凍性の高いクローンでは初冬の乾燥抵抗性が高く, 耐凍性と乾燥抵抗性に密接な関連があること, が示された。

(1) 式から, Ψ_s^{sat} は十分吸水したときの生細胞内液量(V_o)とそれに溶け込んでいる溶質 osmole 数(N_o)で決まる。しかし単位葉乾重当りのこれらの値については, 11月末以降の $V_o \cdot DW^{-1}$ が低い値を示した他は, 時期やクローンによる違いは明らかでなかった(図-3)。また, 12月の測定結果を耐凍性の高いクローンと低いクローンで比べた場合, $V_o \cdot DW^{-1}$ はそれぞれ 1.43 ± 0.15 と 1.56 ± 0.16 , $N_o \cdot DW^{-1}$ はそれぞれ 1.29 ± 0.15 と 1.22 ± 0.15 で有意差はなかった(表-1)。低温下に置かれた細胞や冬期の細胞の浸透ポテンシャルが低い原因として, デンプンと可溶性の

糖類の含有量の比率が変化すること(O'NEIL, 1983b; POLLOCK and LLOYD, 1987), 可溶性糖類の含有率が高まること(RADA *et al.*, 1985), 含水量が少なく糖, 糖アルコール, アミノ酸などの溶質が多いこと(酒井, 1982), などが知られているが, 今回の測定では Ψ_s^{sat} のクローンによる違いとの関連はみられなかった。

細胞の体積弾性率(ϵ)は細胞の物理的性質を表す一つのパラメータであり, この値が低い場合は細胞が柔軟で弾性にとんでいること, 高い場合は強固で可塑性が高いことを示している。たとえば, 落葉樹と常緑樹では前者の ϵ が低い傾向があり(ROBERTS *et al.*, 1981; 丸山・森川, 1983; SOBRADO, 1986), とくに mockernut hickory (*Carya tomentosa* NUTT.)では成長期の平均で2.52 MPaと著しく低い(PARKER *et al.*, 1982)。また同じ樹種でも葉位(TYREE *et al.*, 1978)や葉齢(ROBERTS *et al.*, 1981), 生育段階(丸山・森川, 1984)などによっても ϵ は異なる。しかしこれらはいずれも成長期のもので, 冬期の ϵ を調べた例は少ない(土井, 1984)。今回の測定では気温の低下との関連は明らかでなかったが, 耐凍性の高いクローンと低いクローンを比べると Ψ_p が高い場合に前者の ϵ が高く(図-5), また ϵ_{max} も 12.14 ± 2.50 MPaと 8.71 ± 1.55 MPaで前者が高かった(表-1)。すなわち, 耐凍性の高いクローンは低いクローンと比べて, 細胞が強固で可塑性にとむと考えられる。冬の細胞の特徴としては, 細胞膜が可塑性にとみ, 強度の脱水や機械的ストレスに対して高い耐性をもつことがあげられるが(酒井, 1982), ここでえられた ϵ や ϵ_{max} のクローンによる違いは, 耐凍性の差異を反映している可能性がある。

V. ま と め

晩秋から初冬にかけてのスギの葉の水分特性がクローンによって異なること, この違いは耐凍性のクローン間差を反映していることを明らかにした。

耐凍性の高いクローンは低いクローンと比べて Ψ_w^{up} , Ψ_s^{sat} が低く, 同じ Ψ_w に対する Ψ_p は耐凍性の高いクローンが高かった。すなわち, 水欠差に対する Ψ_p の維持は, 耐凍性の高いクローンが有利であることがわかった。 $V_0 \cdot DW^{-1}$ は 12 月が低い値を示した他は, 測定時期やクローンによる違いはみられなかった。 $N_s \cdot DW^{-1}$ についても測定時期やクローンによる違いは明らかでなく, Ψ_s^{sat} との関連はみられなかった。 ϵ や ϵ_{max} は耐凍性の高いクローンが高く, これらの細胞は強固で可塑性にとむこと, こうした特徴は耐凍性の差異を反映していることが示された。 RWC^{up} は測定によるばらつきが大きく, 耐凍性との関連やクローンによる差異はみられなかった。これらの傾向は, 1984 年に 19 号と筑波 1 号を用いて行った予備試験の結果とよく一致した。

以上の結果, $P-V$ 曲線によって得られる水分特性は, 晩秋から初冬にかけてのスギ枝葉の耐凍性を比較する上で有効な指標となりうる可能性が示された。ただし, 水分特性は葉齢, 葉位や光, 温度, 水分などの環境条件の前歴によっても変わるので, 指標として用いる場合には十分注意する必要がある。

引用文献

- BOWMAN, W. D. and ROBERTS, S. W.: Seasonal and diurnal water relations adjustments in three evergreen chaparral shrubs. *Ecology* **66**: 738~742, 1985
- DAVIS, S. D. and MOONEY, H. A.: Tissue water relations of four co-occurring chaparral shrubs. *Oecologia* **70**: 527~535, 1986
- 土井恭次: スギの冬期乾燥害. 東京大学学位論文第 6758 号, 1~130, 1984
- DOI, K., MORIKAWA, Y., and HINCKLEY, T. M.: Seasonal trends of several water relation parameters in *Cryptomeria japonica* seedlings. *Can. J. For. Res.* **16**: 74-77, 1986
- HELLKVIST, J., RICHARDS, G. P., and JARVIS, P. G.: Vertical gradients of water potential and tissue water relations in *Sitka spruce* trees measured with the pressure chamber. *J. Appl. Ecol.* **11**: 637~667, 1974
- HINCKLEY, T. M., DUHME, F., HINCKLEY, A. R., and RICHTER, H.: Drought relations of shrub species: assessment of the mechanisms of drought resistance. *Oecologia* **59**: 344-350, 1983
- 堀内孝雄: スギ幼齢木の幹の凍害と防除に関する研究. 茨城林試研報 **10**: 1-59, 1976
- ・酒井 昭: スギの耐凍性変動におよぼす温度の影響. 日林誌 **55**: 46~51, 1973
- IKE, I. F. and THURTELL, G. W.: Osmotic adjustment in indoor grown cassava in response to water stress. *Plant Physiol.* **52**: 257~262, 1981
- JONES, M. M. and TURNER, N. C.: Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficits. *Plant Physiol.* **61**: 122~126, 1978
- LARCHER, W.: *Physiological plant ecology*. pp. 219~234, Springer-Verlag, Berlin, 1975
- 丸山 温・森川 靖: 葉の水分特性の測定— $P-V$ 曲線法—. 日林誌 **65**: 23~28, 1983
- ・———: ミスナラ, ダケカンバ, ウラジロモミの葉の水分特性の季節変化. 日林誌 **66**: 499~505, 1984
- NEUFELD, H. S. and TESKEY, R. O.: Variation in the amount of foliage on woody shoots and its effects on water relations parameters derived from pressure-volume curves. *Can. J. For. Res.* **16**: 239~243, 1986
- O'NEIL, S. D.: Role of osmotic potential gradients during water stress and leaf senescence in *Fragaria virginiana*. *Plant Physiol.* **72**: 931~937, 1983 a
- : Osmotic adjustment and the development of freezing resistance in *Fragaria virginiana*. *Plant Physiol.* **72**: 938~944, 1983 b
- PARKER, W. C. and PALLARDY, S. G.: The influence of resaturation method and tissue type on pressure-volume analysis of *Quercus alba* L. seedlings. *J. Exp. Bot.* **38**: 535~549, 1987
- , ———, HINCKLEY, T. M., and TESKEY, R. O.: Seasonal changes in tissue water relations of three woody species of the *Quercus-Carya* forest type. *Ecology* **63**: 1259~1267, 1982
- POLLOCK, C. J. and LLOYD, E. J.: The effect of low temperature upon starch, sucrose and fructan synthesis in leaves. *Ann. Bot.* **60**: 231~235, 1987
- RADA, F., GOLDSTEIN, G., AZOCAR, A., and MEINZER, F.: Daily and seasonal osmotic changes in a tropical treeline species. *J. Exp. Bot.* **36**: 989~1000, 1985
- ROBERTS, S. W., STRAIN, B. R., and KNOERR, K. R.: Seasonal patterns of leaf water relations in four co-occurring forest tree species: Parameters from pressure-volume curves. *Oecologia* **46**: 330~337, 1980
- , ———, and ———: Seasonal variation of leaf tissue elasticity in four forest tree species. *Physiol. Plant.* **52**: 245~250, 1981
- 酒井 昭: 植物の耐凍性と寒冷適応—冬の生理・生態学—, 469pp, 学会出版センター, 東京, 1982
- SOBRADO, M. A.: Aspects of tissue water relations and seasonal changes of leaf water potential components of evergreen and deciduous species coexisting in tropical dry forests. *Oecologia* **68**: 413~416, 1986
- TESKEY, R. O., GRIER, C. C., and HINCKLEY, T. M.: Change in photosynthesis and water relations with age and season in *Abies amabilis*. *Can. J. For. Res.* **14**: 77~84, 1984
- TYREE, M. T., CHEUNG, Y. N. S., MACGREGOR, M. E., and TALBOT, A. J. B.: The characteristics of seasonal and ontogenetic changes in the tissue-water relations of *Acer*, *Populus*, *Tsuga*, and *Picea*. *Can. J. Bot.* **56**: 635~647, 1978
- TYREE, M. T. and HAMMEL, H. T.: The measurement of

- the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure-bomb technique. *J. Exp. Bot.* **23**: 267~282, 1972
- WILSON, J. R. and LUDLOW, M. M.: Time trends for change in osmotic adjustment and water relations of leaves of *Cenchrus ciliaris* during and after water stress. *Aust. J. Plant Physiol.* **10**: 15~24, 1983
- 矢幡 久: スギ在来品種の水分特性 (I) プレッシャーチャンバーによる葉の水分特性の測定法の検討. 日林九支研論 **31**: 115~116, 1978
- 山田 寿・向井啓雄・杉浦 明・苦井 孝: カンキツの耐寒性に及ぼす水ストレスの影響. 園学雑 **56**: 273~279, 1987
- YELENOSKY, G.: Water-stress-induced cold hardening of young citrus trees. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* **104**: 270~273, 1979

(1988年6月22日受理)