

生態学 I (石田 厚)

—植物の生理生態学をベースにした生態学—

- 1) 5月18日 生態系：大気と気象
- 2) 5月25日 個体レベル、群落レベルの物質生産
- 3) 6月01日 個葉のガス交換・エネルギー交換
- 4) 6月08日 植物の水利用特性
- 5) 6月15日 植物の通水性と形態

「SPAC (Soil-Plant-Air Continuum) Model」

$$E = K_{\text{soil-to-leaf}} (\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{leaf}})$$

ψ_{leaf} : 葉の水ポテンシャル (MPa)

E : 蒸散速度 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

通水抵抗の
大まかな割合

$K_{\text{soil-to-leaf}}$: 土壌から葉への通水コンダクタンス ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$)

ψ_{soil} : 土壌の水ポテンシャル (MPa)

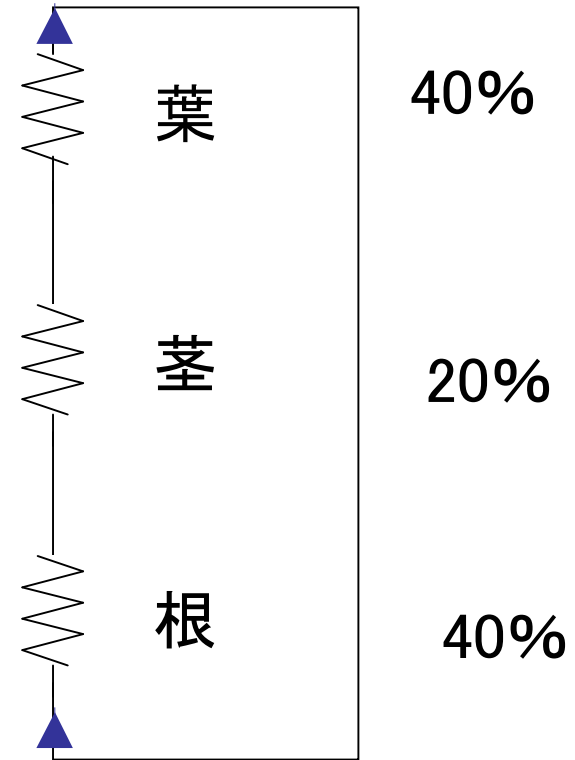
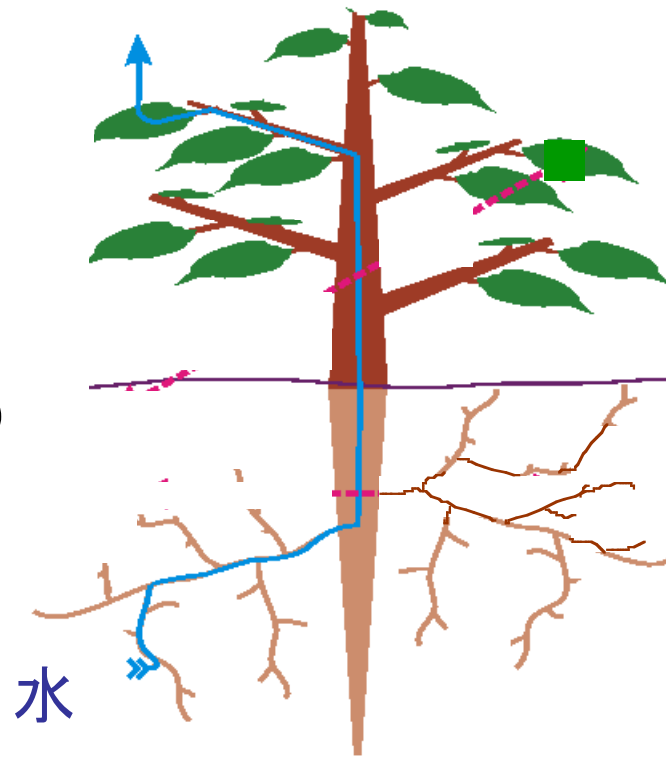


図5-1

土壌粒子間でのマトリックスポテンシャル (表面張力)

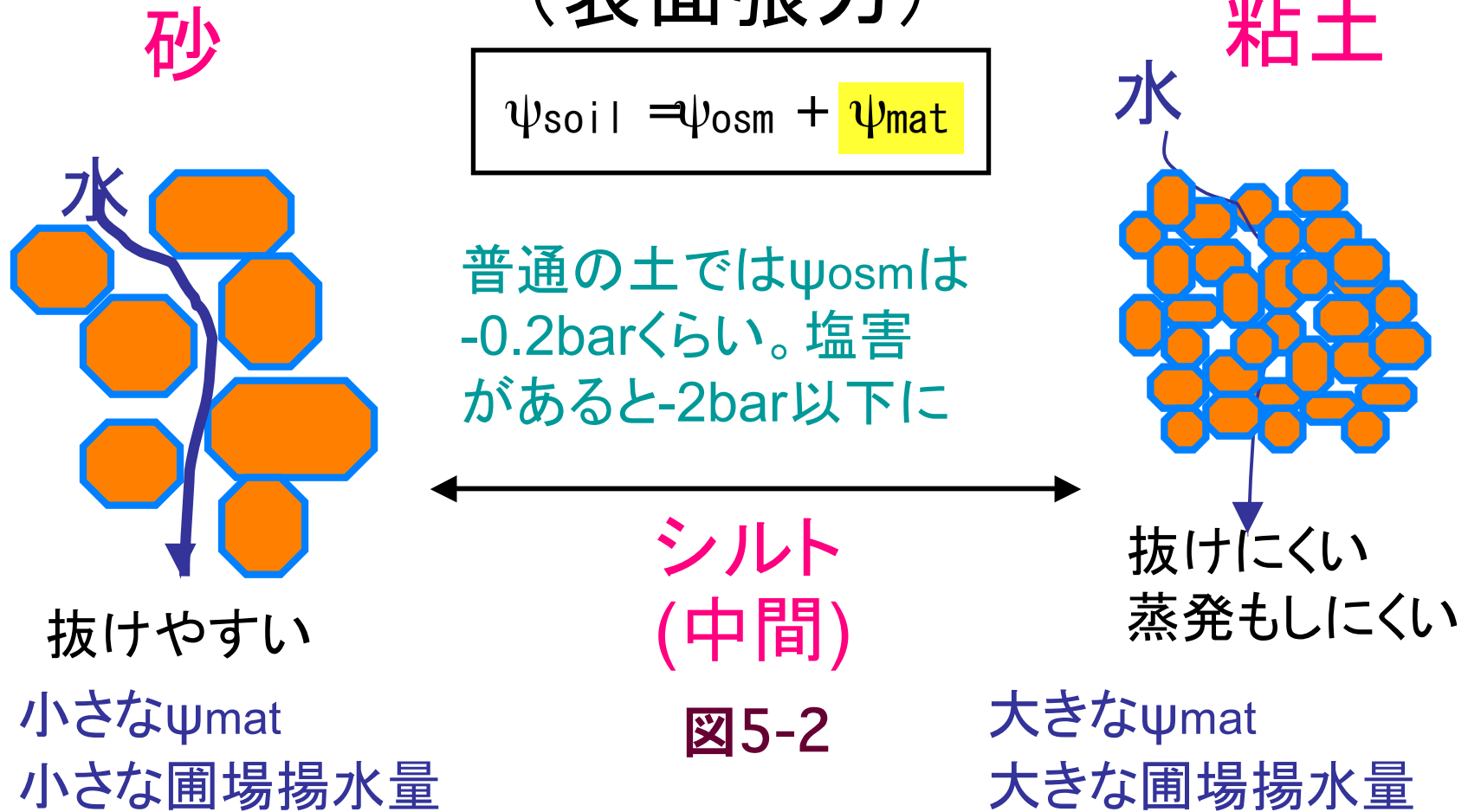


図5-2

圃場揚水量 (Field capacity): 土壌が水で飽和してから、
過剰な水は下方に流れ出た状態

マトリックスポテンシャル(表面張力)

管の表面張力にかかる力： $\mu_a - \mu_w$

$$\mu_a - \mu_w = \frac{-2\sigma}{r'} = \frac{-2\sigma \cos\theta}{r}$$

実際の土壌では曲率半径は複雑であるけれども、同じ原理で表面張力は働く

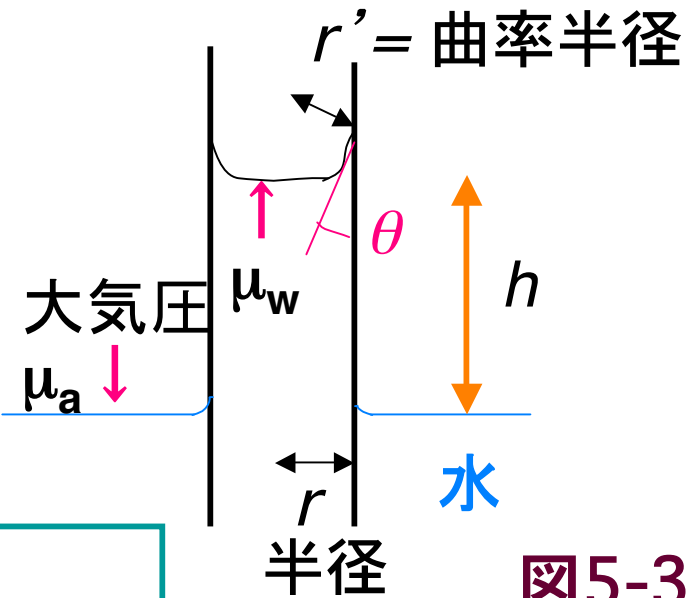


図5-3

$$\cos\theta = \frac{r}{r'}$$

管に水の上がる高さ： $h = \frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho g}$

r : 管の半径 (m)

σ : 水の表面張力 (0.072 N s⁻² at 25°C)

ρ : 水の密度 (1000 kg m⁻³ at 25°C)

g : 重力加速度 (9.8 m s⁻²)

粘土では曲率半径が小さい

→ Ψ_{mat} はより負の値に

「土壌の性質と、土壌の水ポテンシャル」

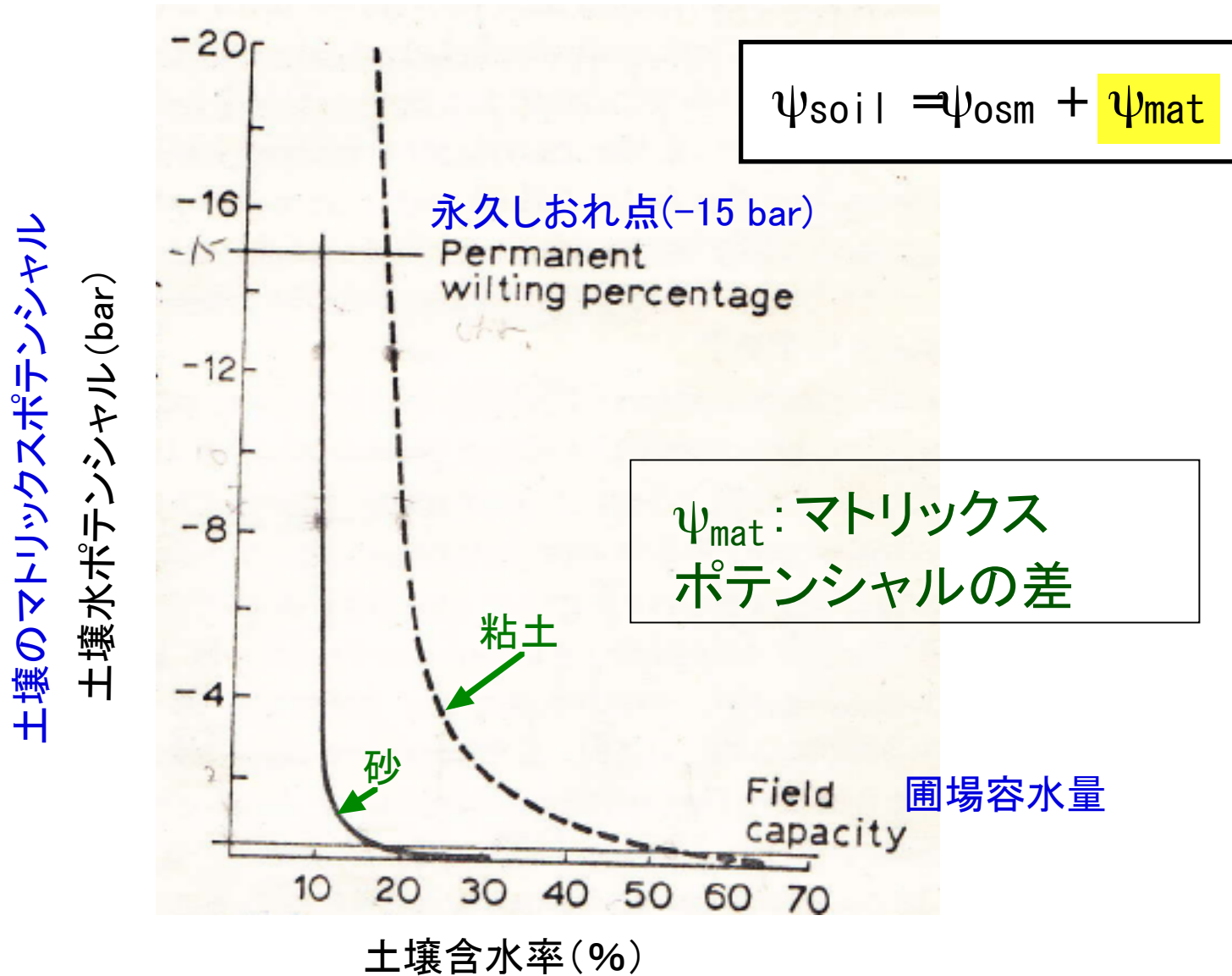
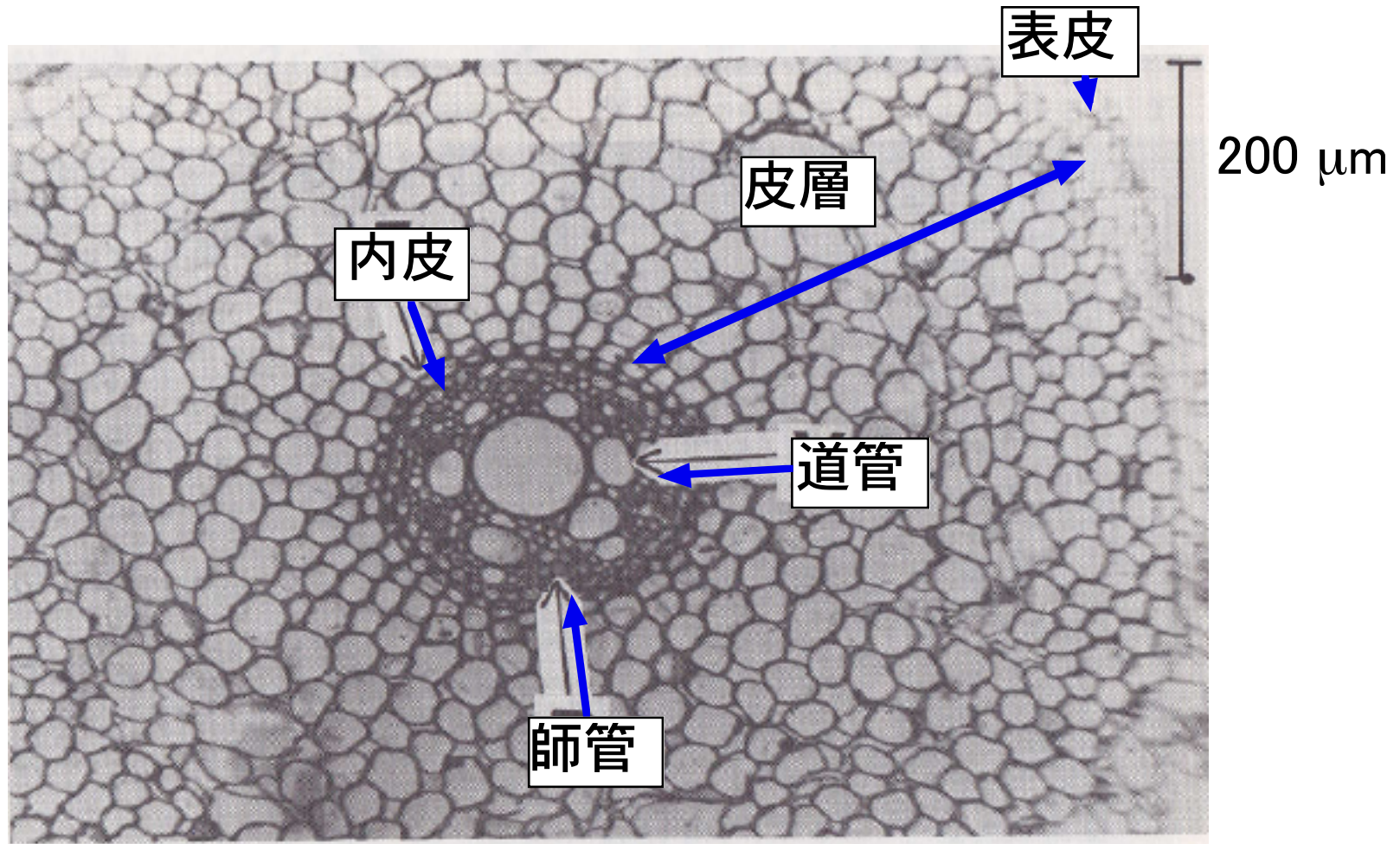


図5-4

「根の中の水の流れ」

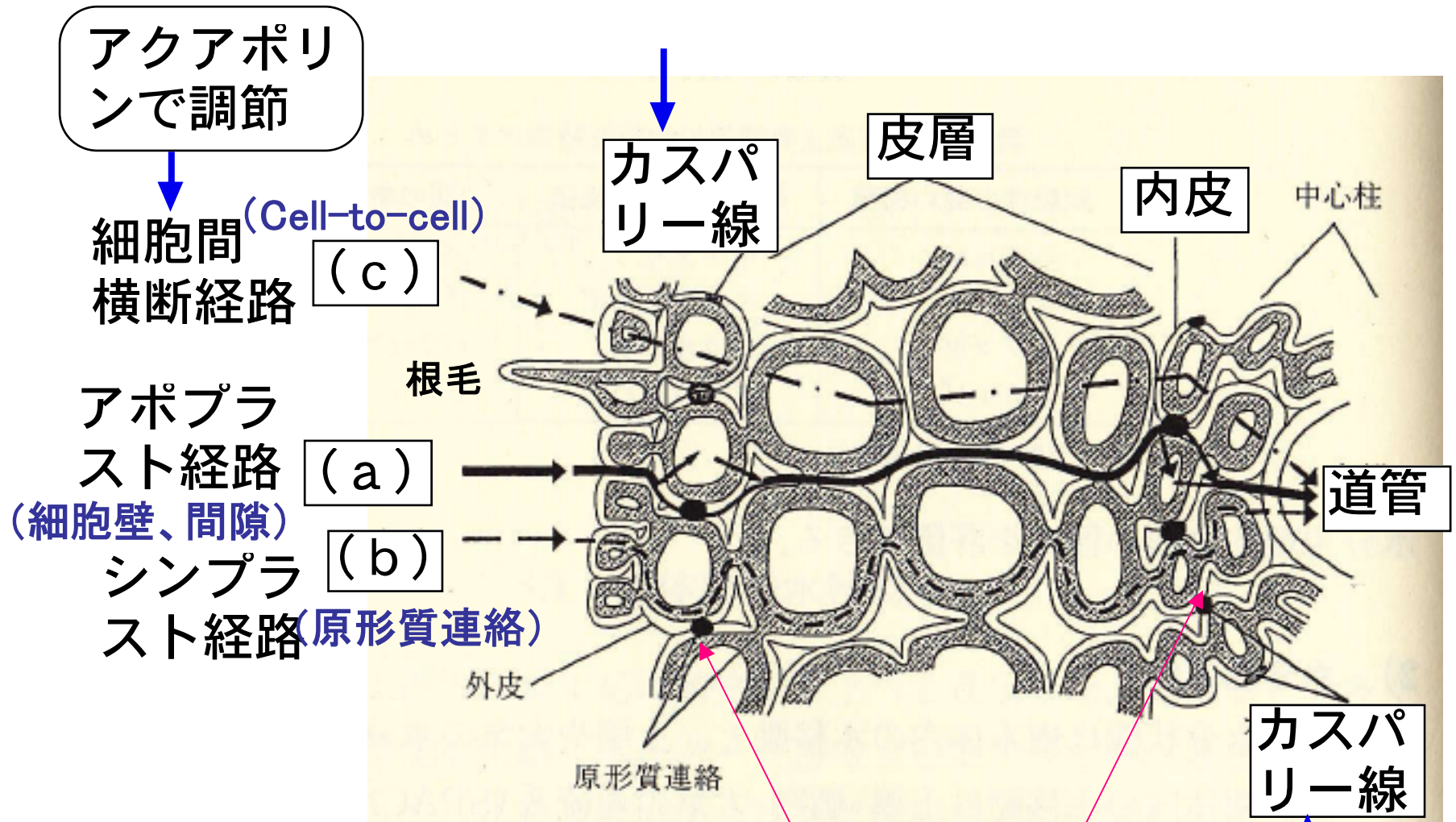


ネギの根の断面写真

図5-5

井上勤 監修「植物の顕微鏡観察」1980年 地人書館 図150より

「根の中(横断面)の水の流れ」



アクアポリンで調節

細胞間 (Cell-to-cell) 横断経路 (c)

アポプラスト経路 (a) (細胞壁、間隙)

シンプラスト経路 (b) (原形質連絡)

カスパーリ線

皮層

内皮

中心柱

根毛

道管

外皮

原形質連絡

カスパーリ線

図5-6

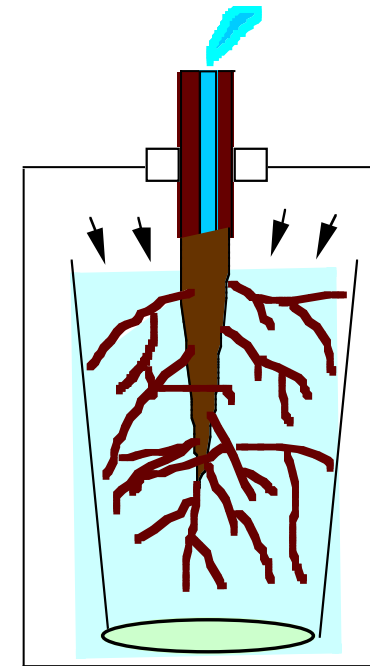
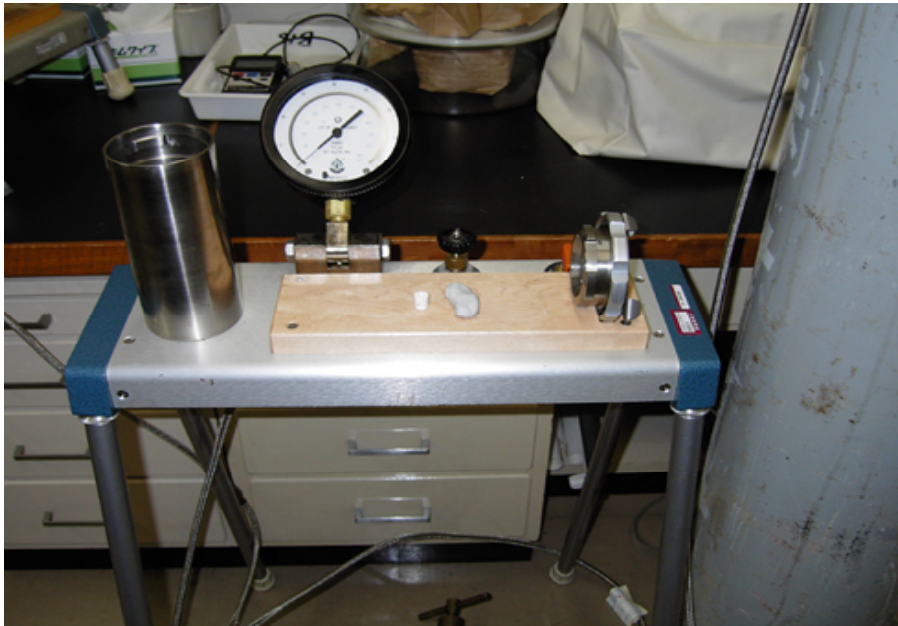
小池 編「樹木生理生態学」
2004年
朝倉書館 図8.1より

疎水性のスベリンが内(外)皮の細胞壁に沈着

アクアポリンで調節

「根系の通水性(コンダクタンス)の測定法」

- 1) プレッシャーチェンバー法：
水の流れの方向はOK



- 手順 1) 水
手順 2) 塩化水銀溶液
(アクアポリン阻害剤)
手順 3) 根の表面積測定

図5-7

- 2) HPFM法 (High Pressure Flow Method) : 野外でも可能
だけど、切り口から逆に水を押し込むので、水の方向が逆に

「根系の通水性(コンダクタンス)の測定手順」

ルーツキャナー



→細根の表面積を測定

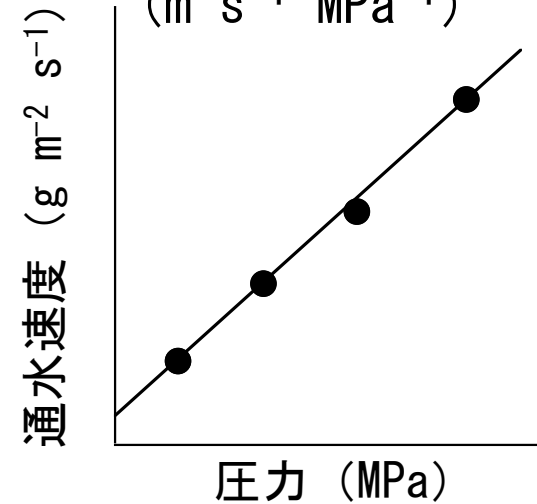
図5-8

傾き：根の通水コンダクタンス

($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$)

($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$)

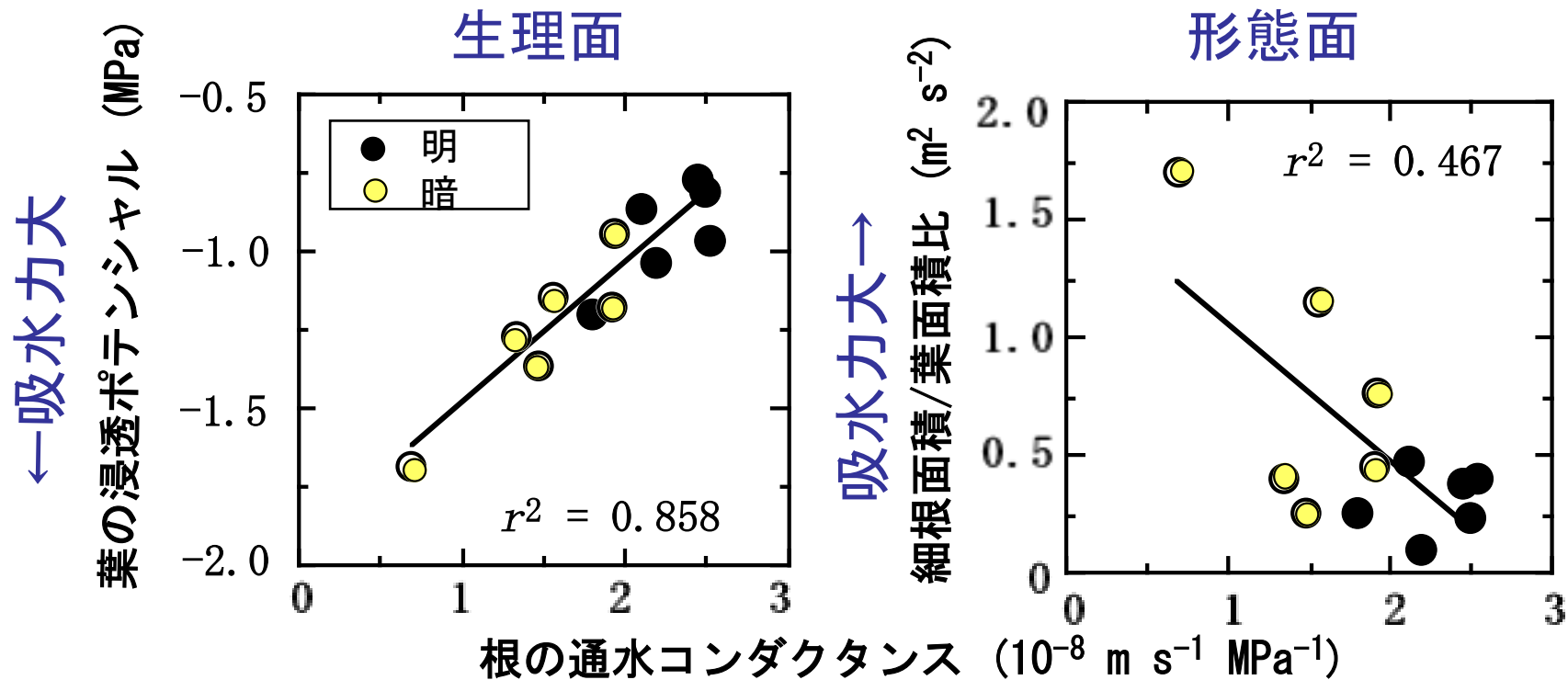
($\text{m s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$)



- 1) 水: Totalの通水性
- 2) 塩化水銀溶液:
細胞外経路の通水性
- 3) 細胞内経路の通水性
= 1) - 2)

「地下部と地上部の相互関係」

図5-9



Shimizu et al.
Oecologia (2005)

←通水性小

←通水性小

根の通水性が低い種ほど、葉の浸透ポテンシャルが低くなる。

根の通水性が低い種ほど、葉面積に対する細根面積の割合が大きい

→ 根の通水性を補償するために、葉や根にコストをかけている

「Form (形態) and Function (生理)」

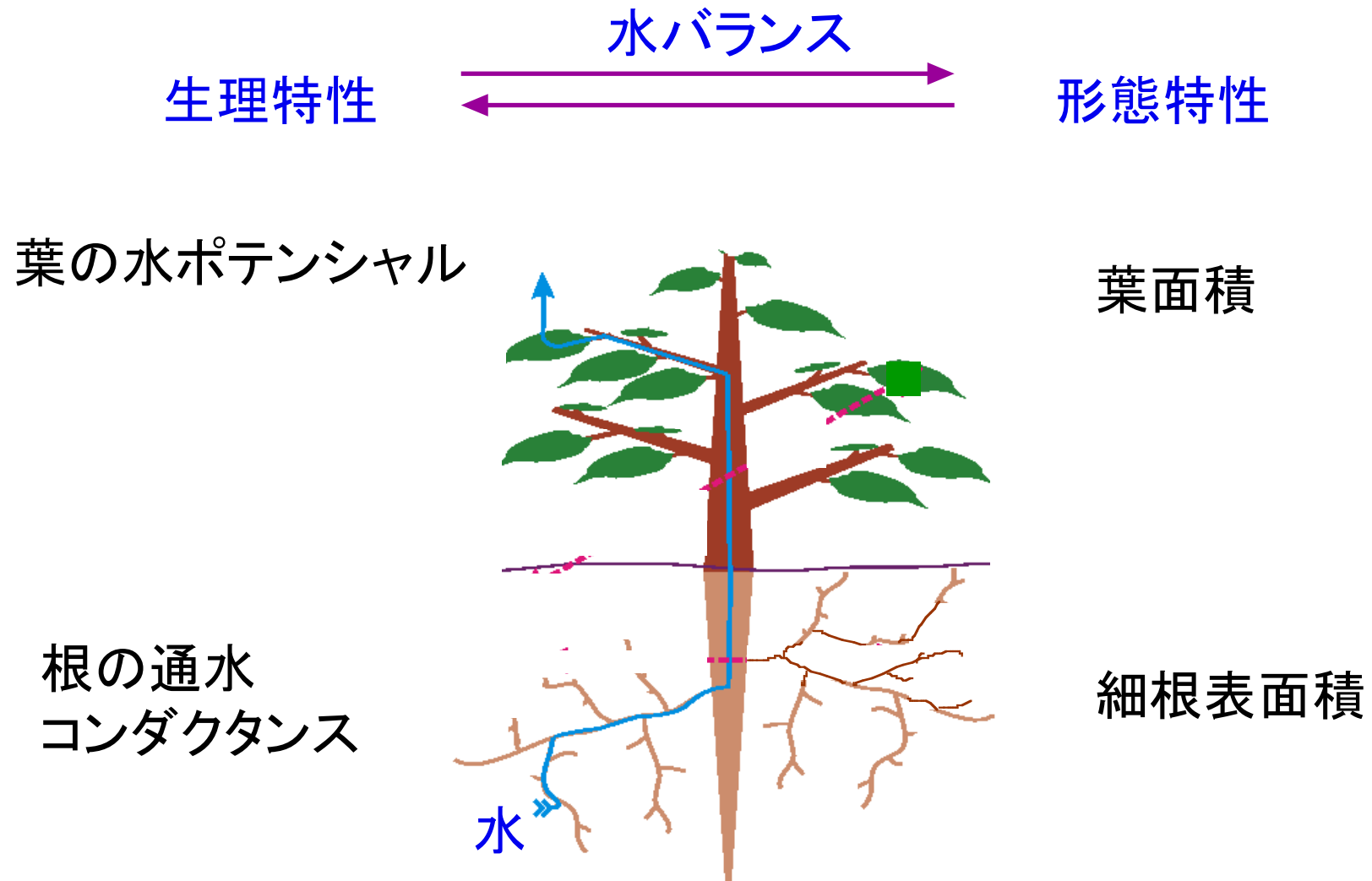
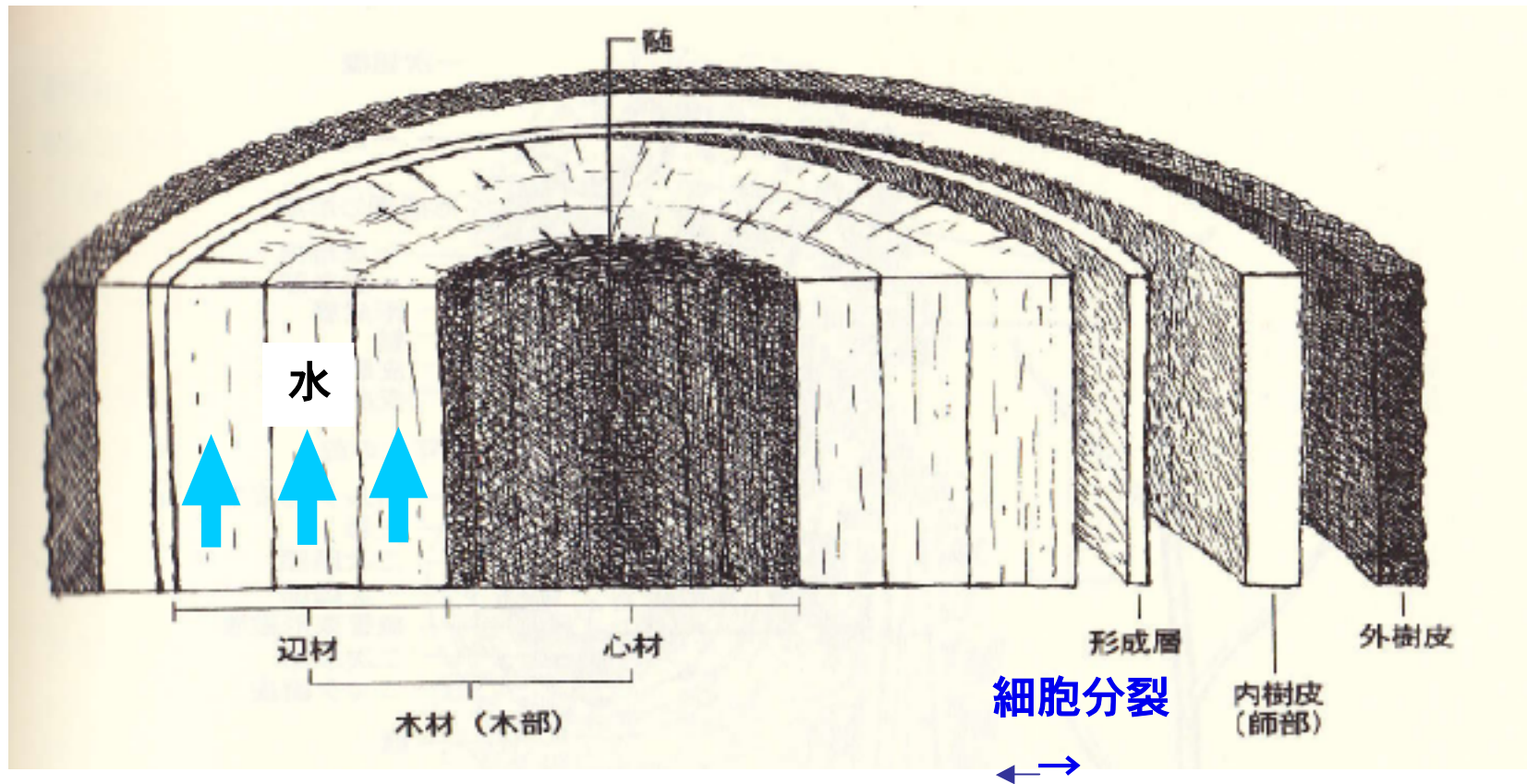


図5-10

「樹木の茎（幹）の構造と通水機能」



幹の断面

死細胞：道管・仮道管・繊維細胞
生細胞：柔組織

図5-11

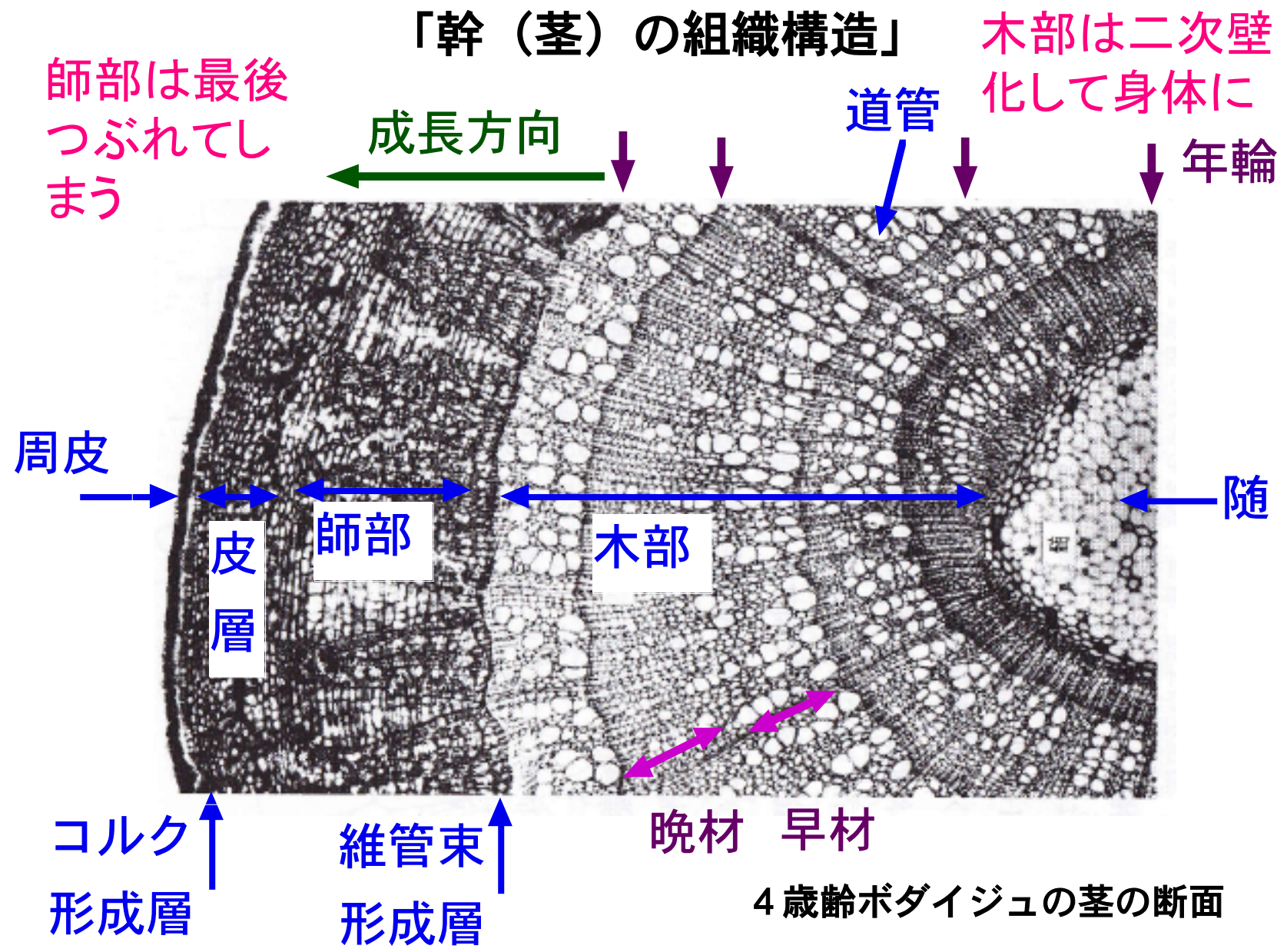


図5-12

鈴木・田川 訳 ポーラ・ルダル著「植物解剖学入門」八坂書店 1997年 図2-8

「木部組織の細胞要素」

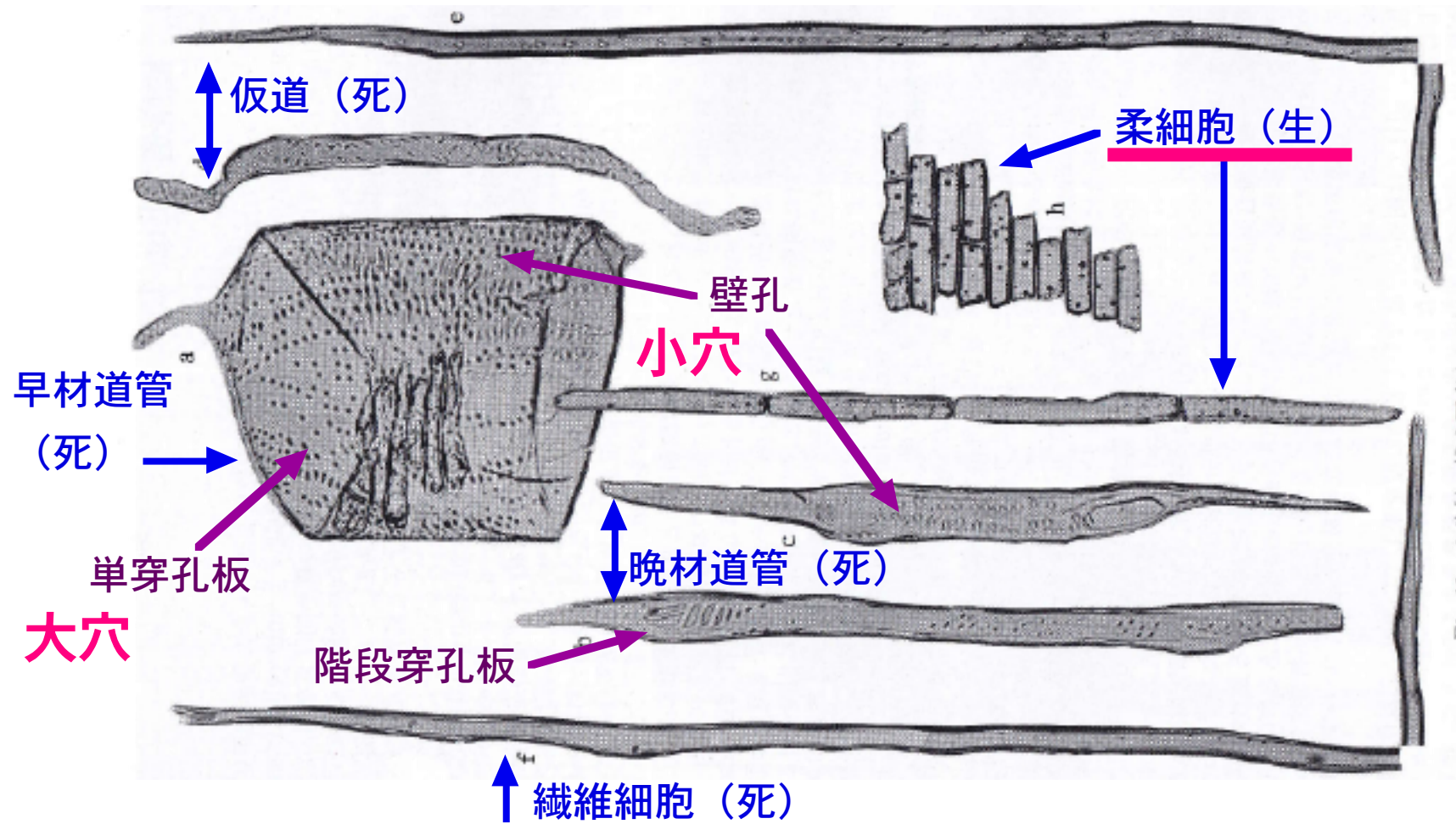


図5-13

クリ

島地・伊東「図説 木材組織」地球社 1982年 Fig. 11

「道管の連結と水の上昇」

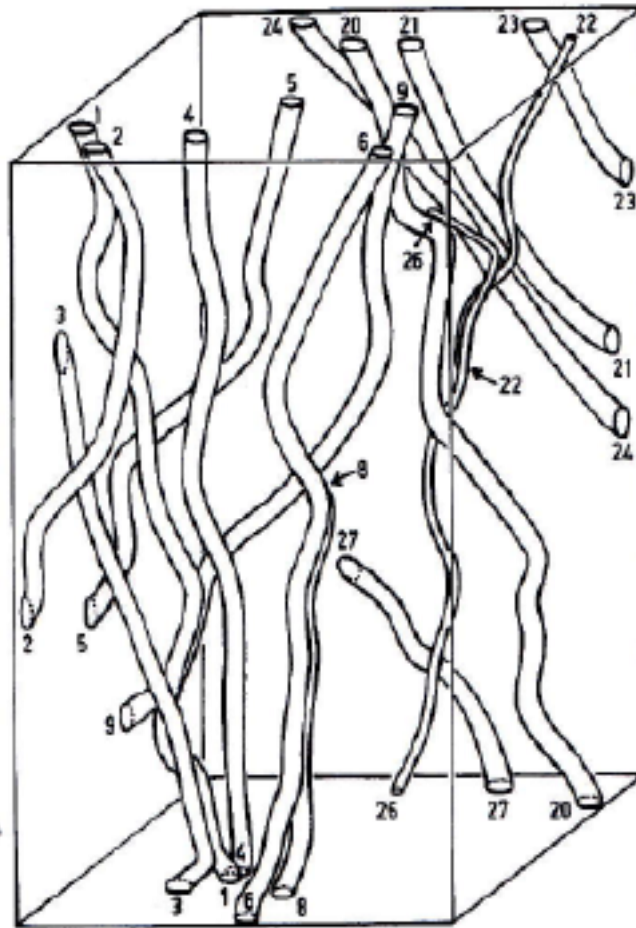
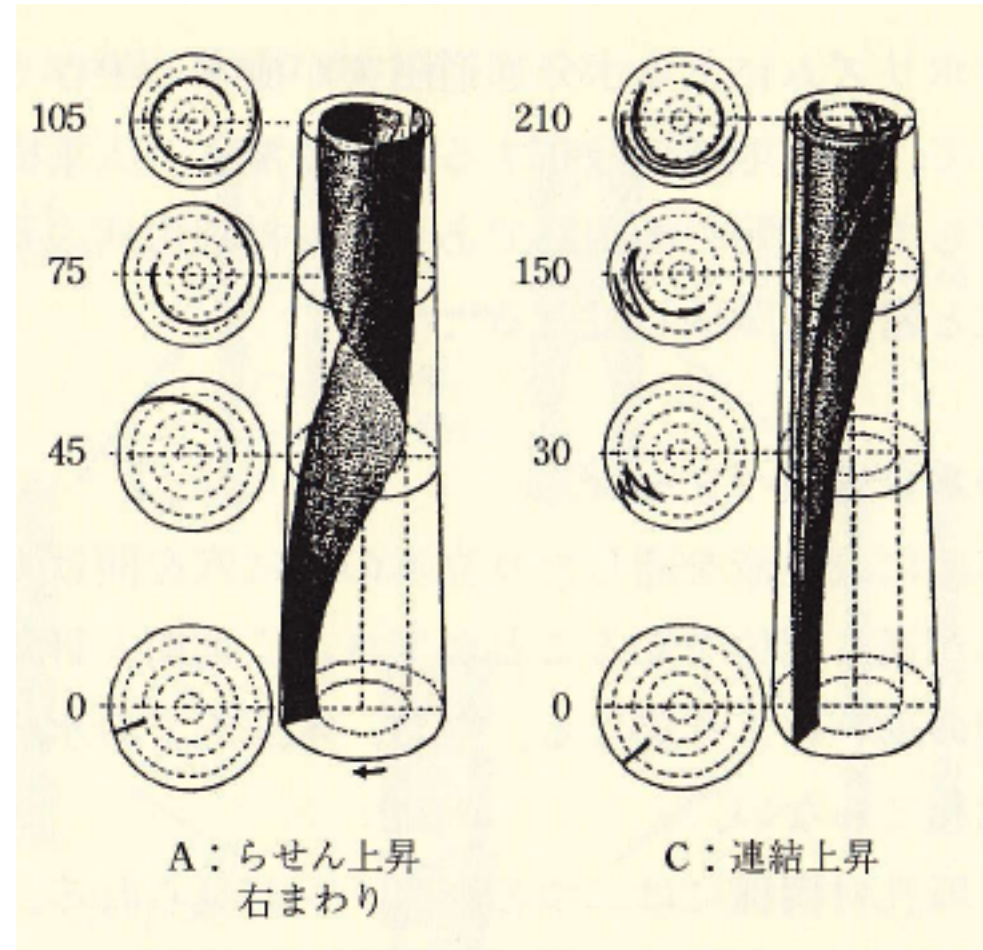


図5-14

内海ほか訳 Tyree & Zimmermann
 「植物の木部構造と水移動様式」
 シュプリンガー 2007年 図2.2



より分散？

根一葉の連結？

図5-15

小池編 「樹木生理生態学」
 朝倉書店 2004年 図8.4

「道管の閉塞（エンボリズム）と心材の形成」

辺材

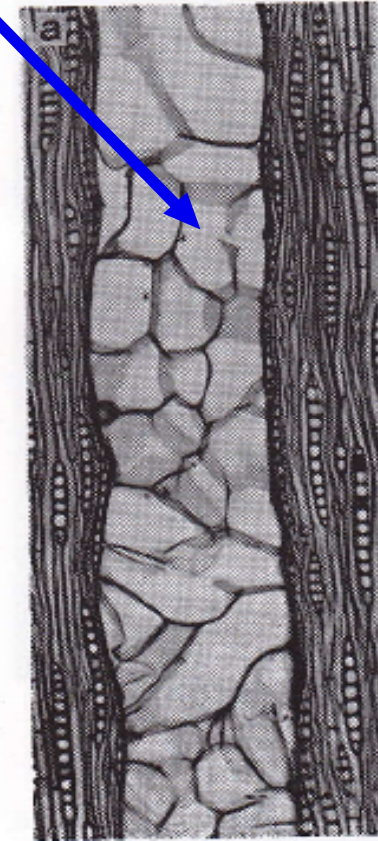
心材



図5-16 19歳齢の杉のの横方向断面

針葉樹では10年くらい辺材で維持
(仮道管は通水機能)

チロース：木材強度・抗菌



クリの心材部道管
縦方向断面

図5-17 島地ほか「木材の構造」
文永堂出版 1985年 図57

「樹木の茎の横断面の組織構造」

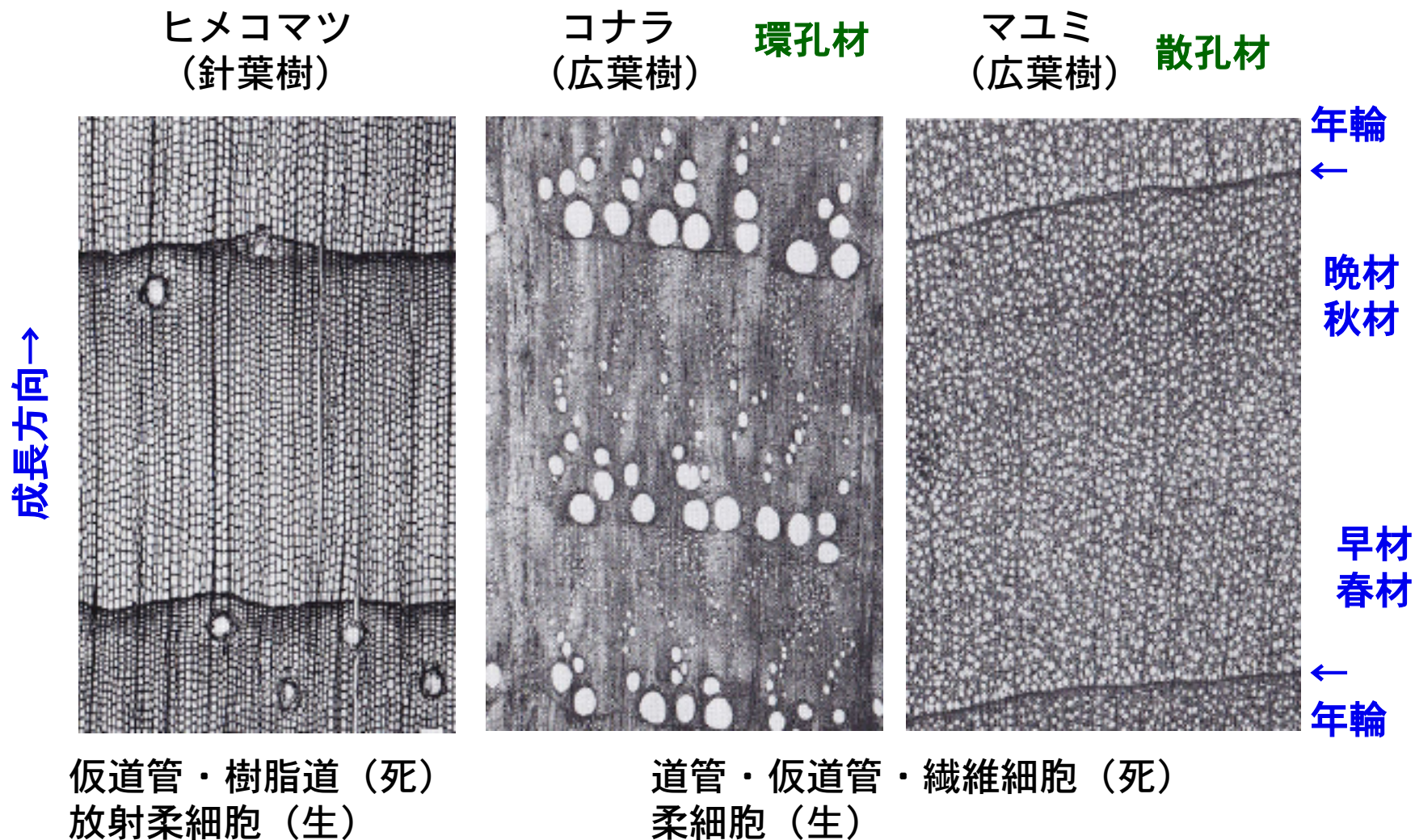


図5-18

島地・伊東「図説 木材組織」地球社 1982年

「針葉樹の壁孔構造—有縁壁の例」

横からの写真

正面からの写真

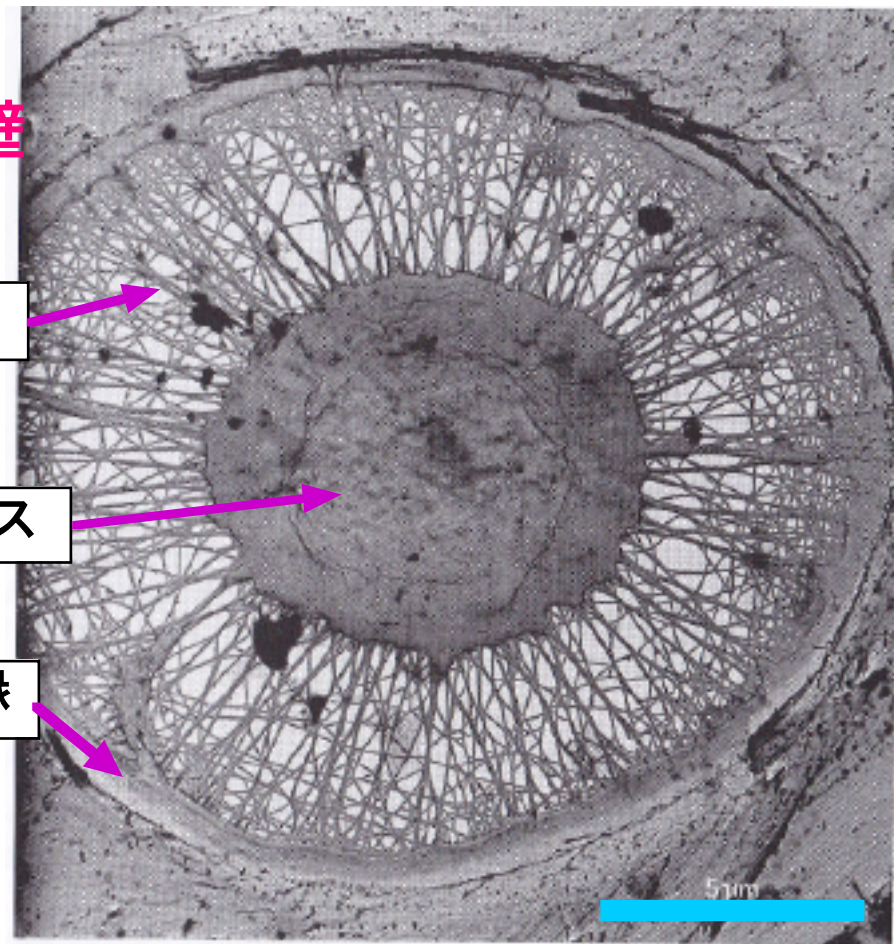
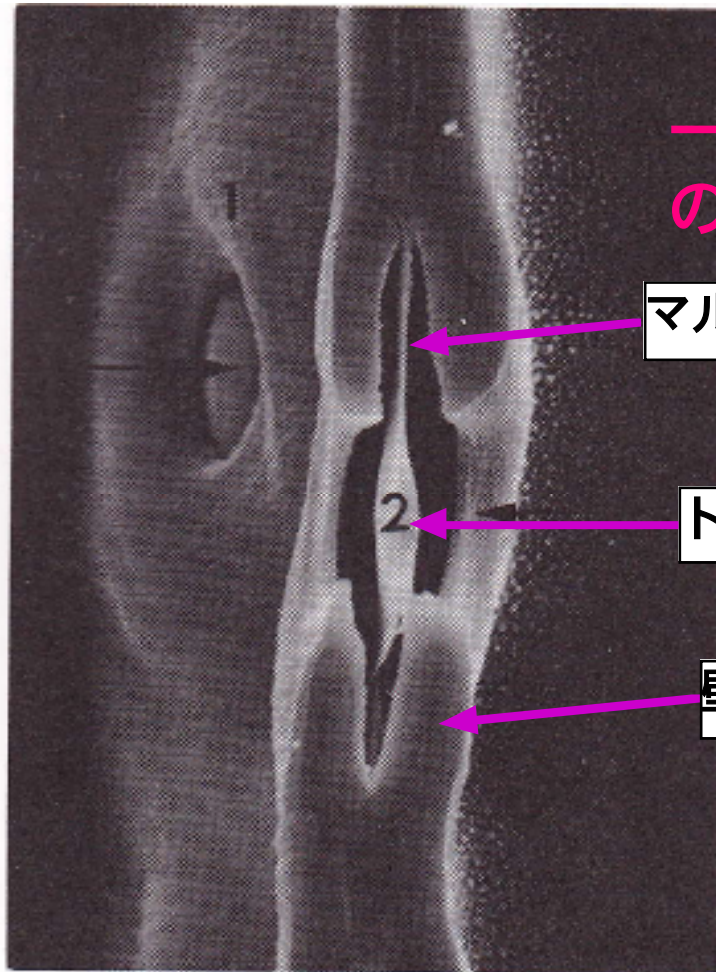


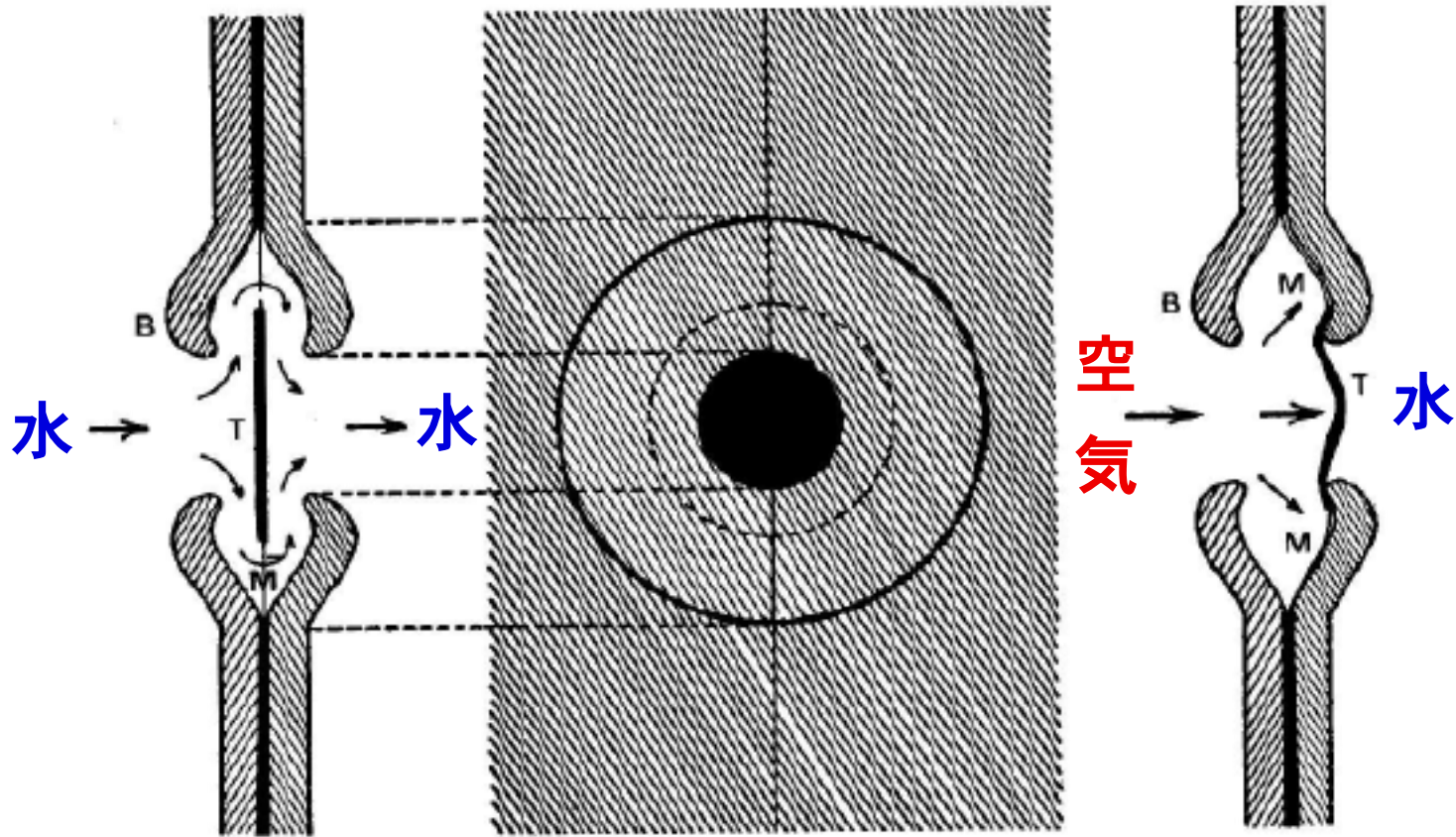
図5-19 スギ

図5-20 カナダツガ 5μm

島地ほか「木材の構造」文永堂出版
1985年 図12

内海ほか訳 Tyree & Zimmermann
「植物の木部構造と水移動様式」
シュプリンガー 2007年 図1.14

「針葉樹の有縁壁孔の閉鎖」



通常時

道管の水切れ (キャビテーション) を防ぐ

図5-21

内海ほか訳 Tyree & Zimmermann 「植物の木部構造と水移動様式」
シュプリンガー・ジャパン 2007年 図4.9

「針葉樹（仮道管）の有縁壁孔の閉鎖と水の動き：迂回」



図5-22 カヤ（材の縦方向の断面）

島地・伊東「図説 木材組織」
地球社 1982年 Fig. 28

→仮道管：通水抵抗は大きい
が、経路は保たれやすい（長寿命）

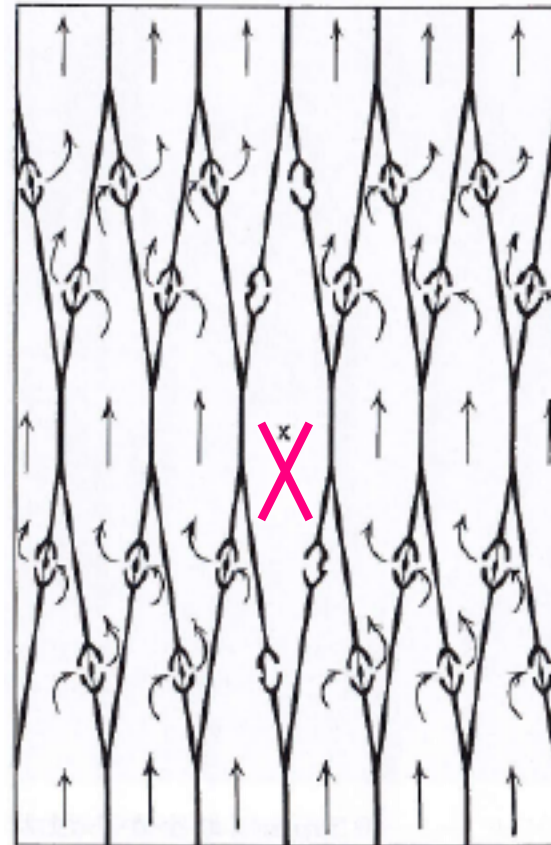


図5-23 模式図

内海ほか訳 Tyree & Zimmermann
「植物の木部構造と水移動様式」
シュプリンガー 2007年 図4.10

×キャビテーションを
起こした道管

「材の道管構造と道管機能の寿命：冬季落葉広葉樹の場合」

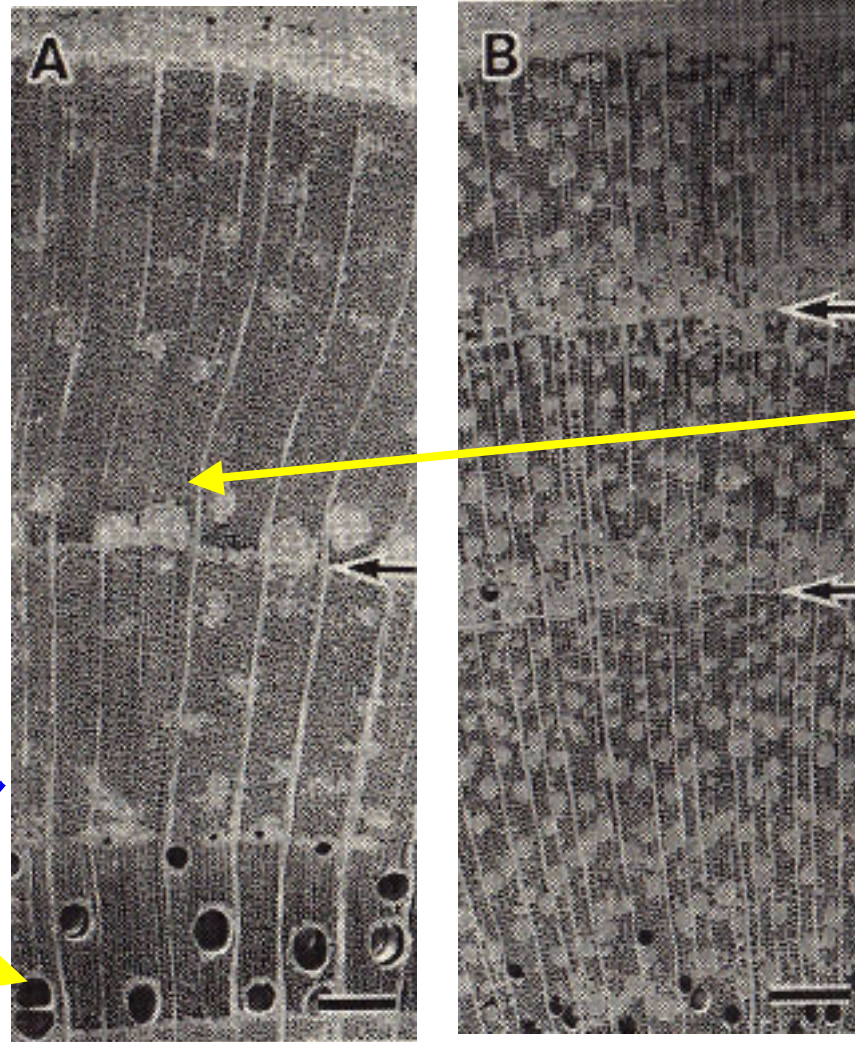
ヤチダモ 環孔材 オノエヤナギ 散孔材

道管の機能は単年度

→

春先、新しく道管を作って（再生）から新葉が展開

キャビテーション（水切れ）を起こした道管



道管の機能は数年間維持

年輪

水で充填された道管

年輪

成長方向

図5-24

茎横断面のCryo-SEM画像

100µm

小池編「樹木生理生態学」朝倉書店 2004年 図7.7

「木部キャビテーションの直接の回復」 灌水処理

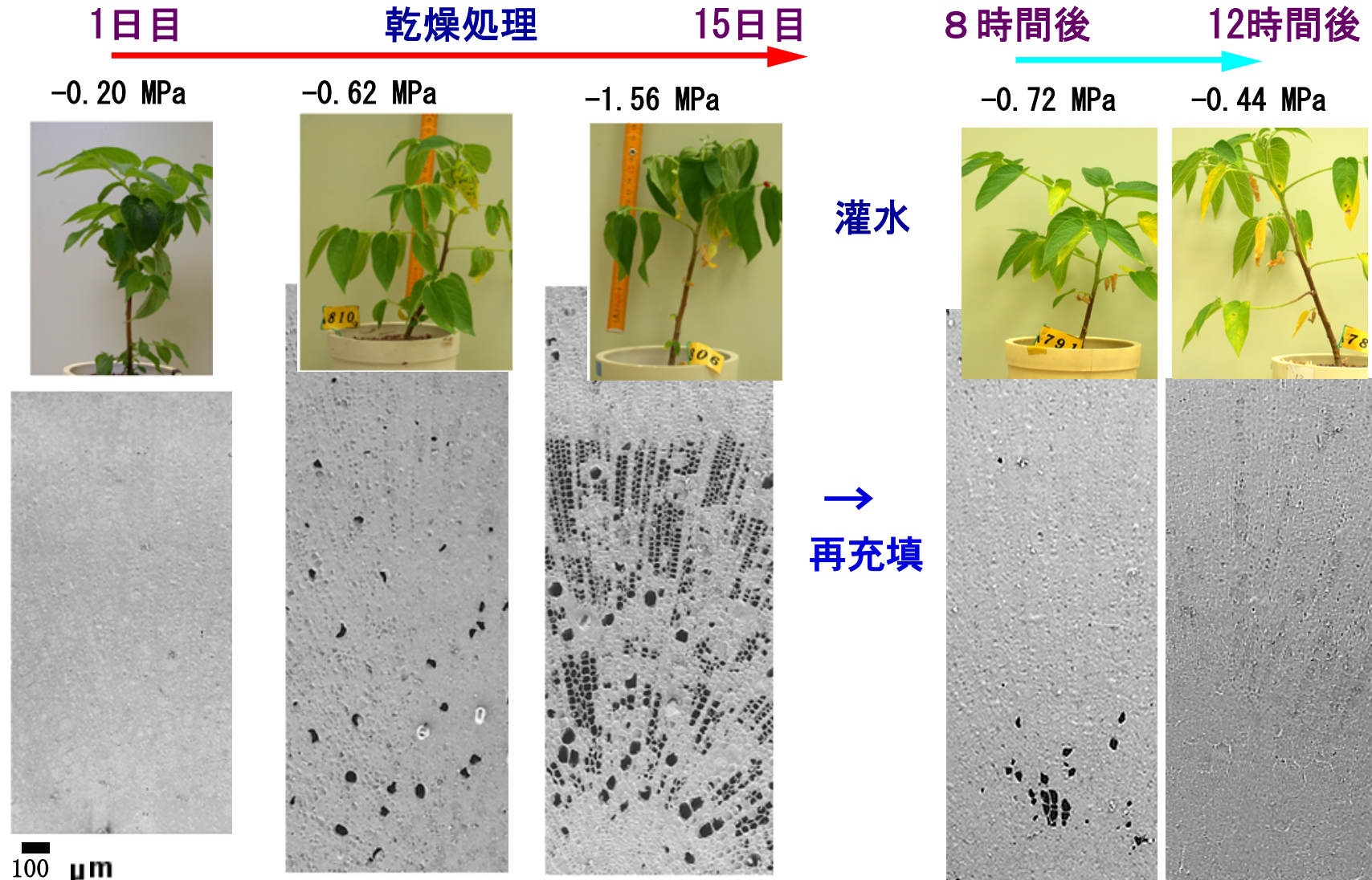
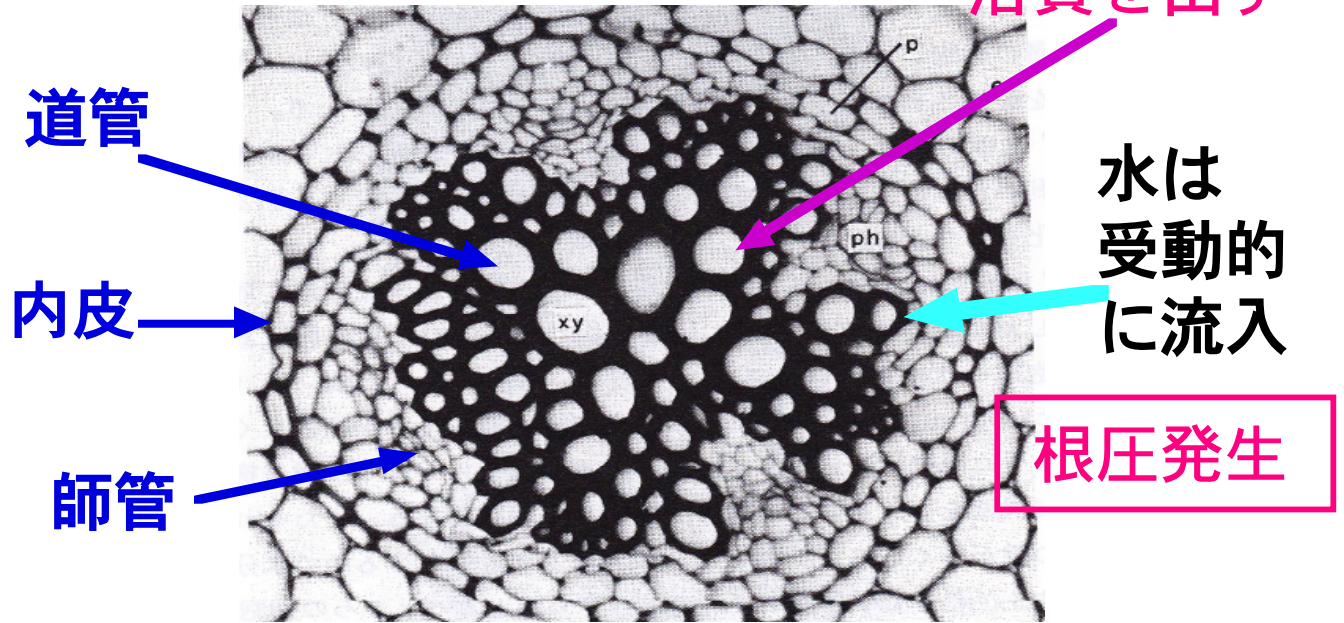


図5-25 古い道管からキャビテーション 繋がってる細胞間でキャビテーションが拡大 ウラジロエノキの茎 横断面のCryo-SEM画像

「木部キャビテーションの回復のメカニズム1」

1) 根圧による気泡の溶解



例1) 茎を切った時に切り口から出て来る水（ヘチマ、ミズキ）

例2) 早朝、葉縁にある排水組織から出る水滴

図5-26

鈴木・田川 訳「植物解剖学入門」
八坂書店 1997年 図3-5

→ 温帯落葉広葉樹の場合

- ・ 環孔材種：翌年新規道管を作ってから、新葉の展開
- ・ 散孔材種：旧道管に水を再充填して、すぐに新葉展開
- ・ 新規道管の作成：春先、梢の枝の道管から作っていく

「木部キャビテーションの回復のメカニズム2」

2) 隣接する柔細胞（生細胞）からの糖の流入による浸透圧説

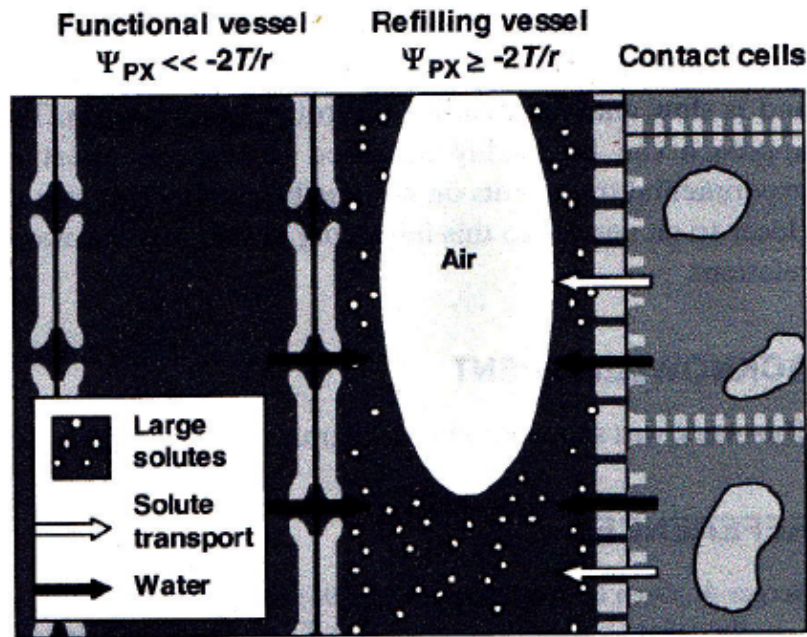


図5-27 Hacke & Sperry (2003)
PCE Vol. 26 図8

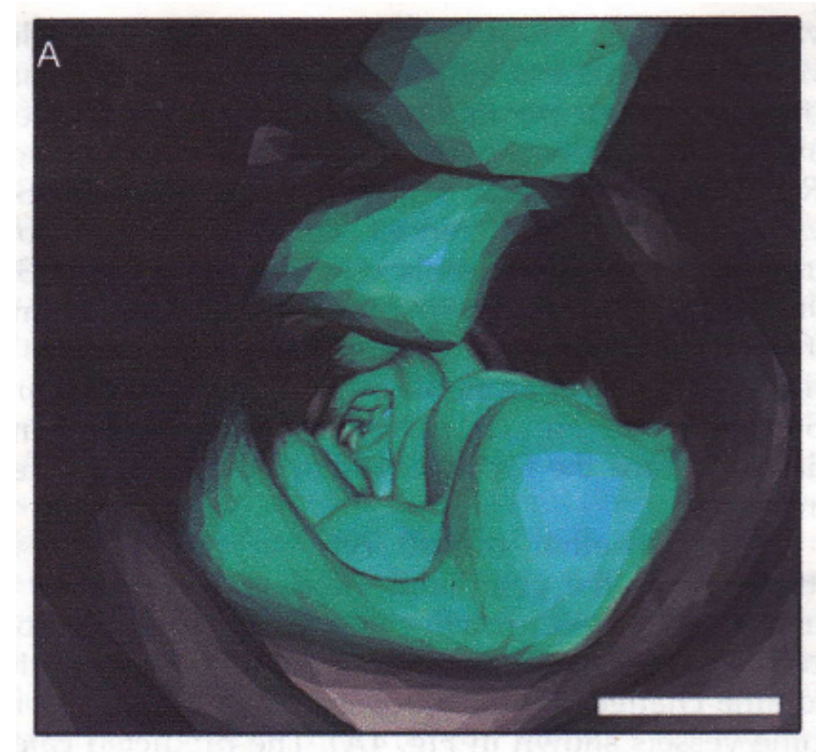


図5-28
Brodersen CR et al (2010)
Plant Physiology Vol. 154 図3

まだ他に説があり、よくわかっていない。

仮説

「道管径のトレード オフ」

一方をたてると一方がなりたたない

通水効率

水切れの
起こしにくさ

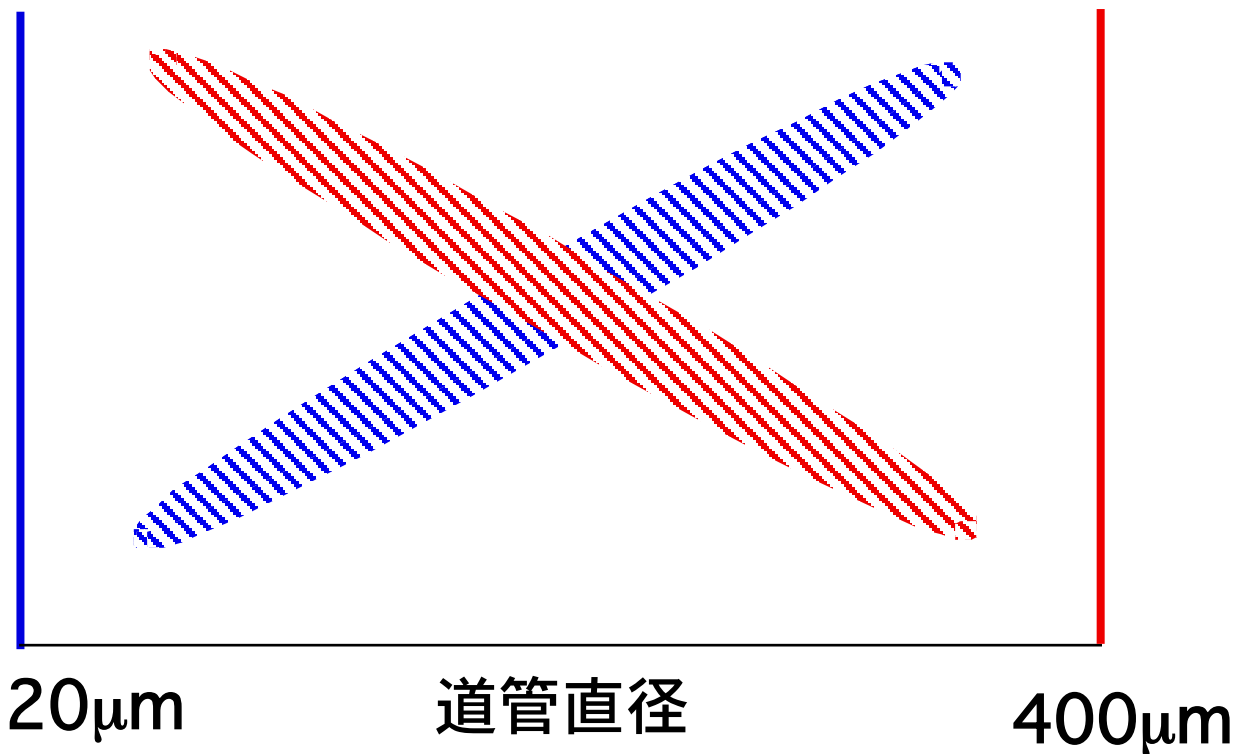


図5-29

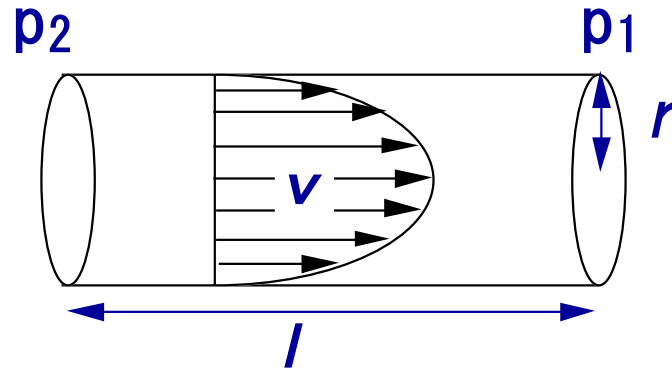
通水性は悪いが
キャビテーション
しにくい



通水性は良いが
キャビテーション
し易い

「Hagen-Poiseuille's Law (ハーゲン・ポアズイユ則)」

図5-30



(パイプの中の層流：
マスフロー)

円筒管を通過する流体の平均流速： V (m s^{-1})

$$V = \frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{l}$$

円筒管を通過する流体の流量： Φ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

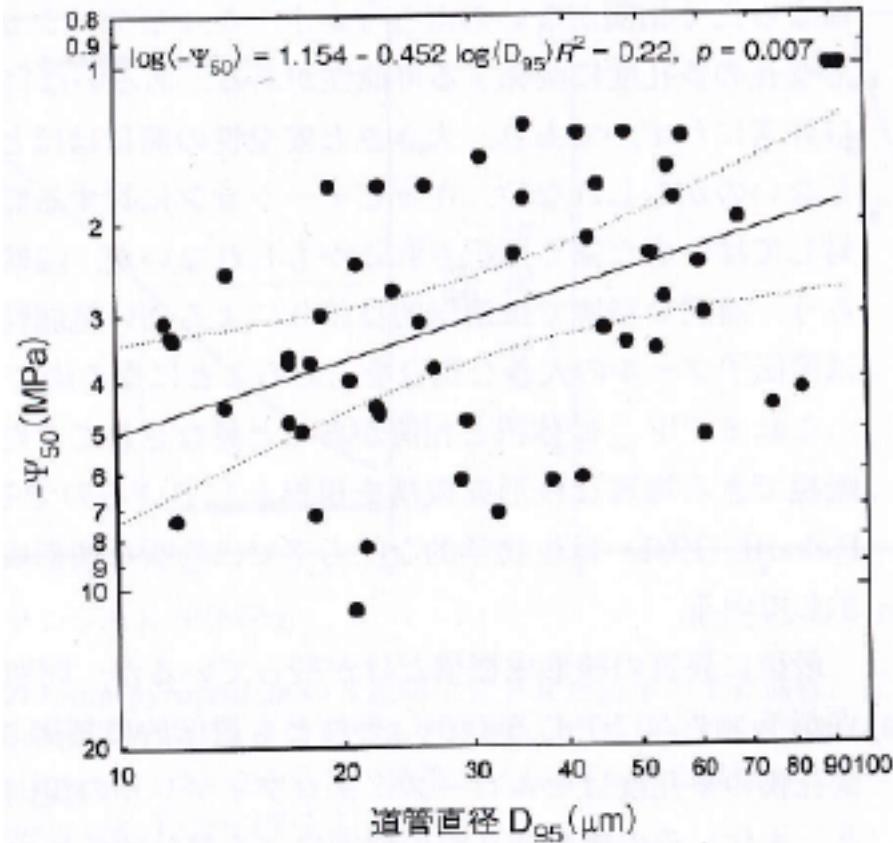
$$\Phi = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{l}$$

r : パイプ半径 (m), l : パイプ長 (m), p : 圧力 (Pa),
 η : 動粘性 (粘性/密度) ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} = \text{Pa s}$)

流量 Φ は、半径の 4 乗や圧力差と比例し、
粘性や管長に反比例する。

「道管直径とキャビテーション（水切れ）の起こし易さ」

乾燥による場合



凍結融解による場合

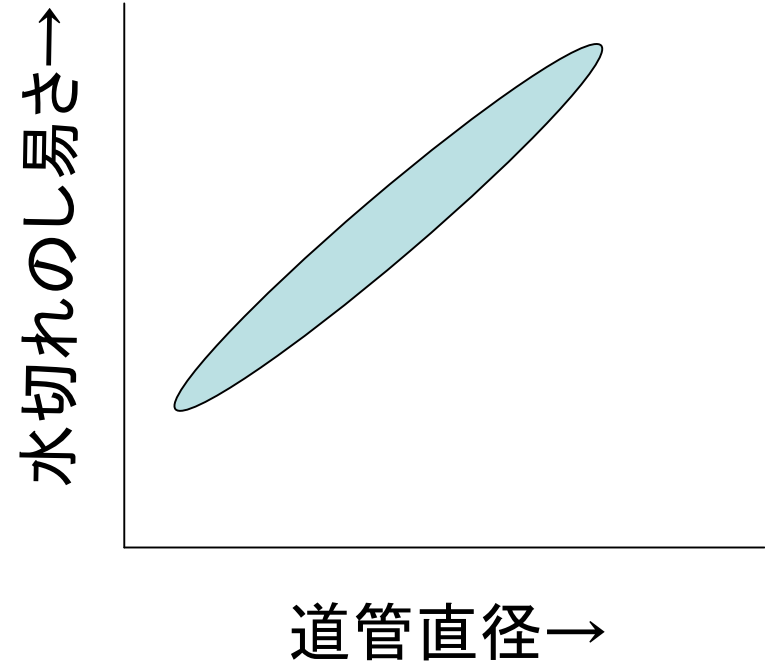


図5-31

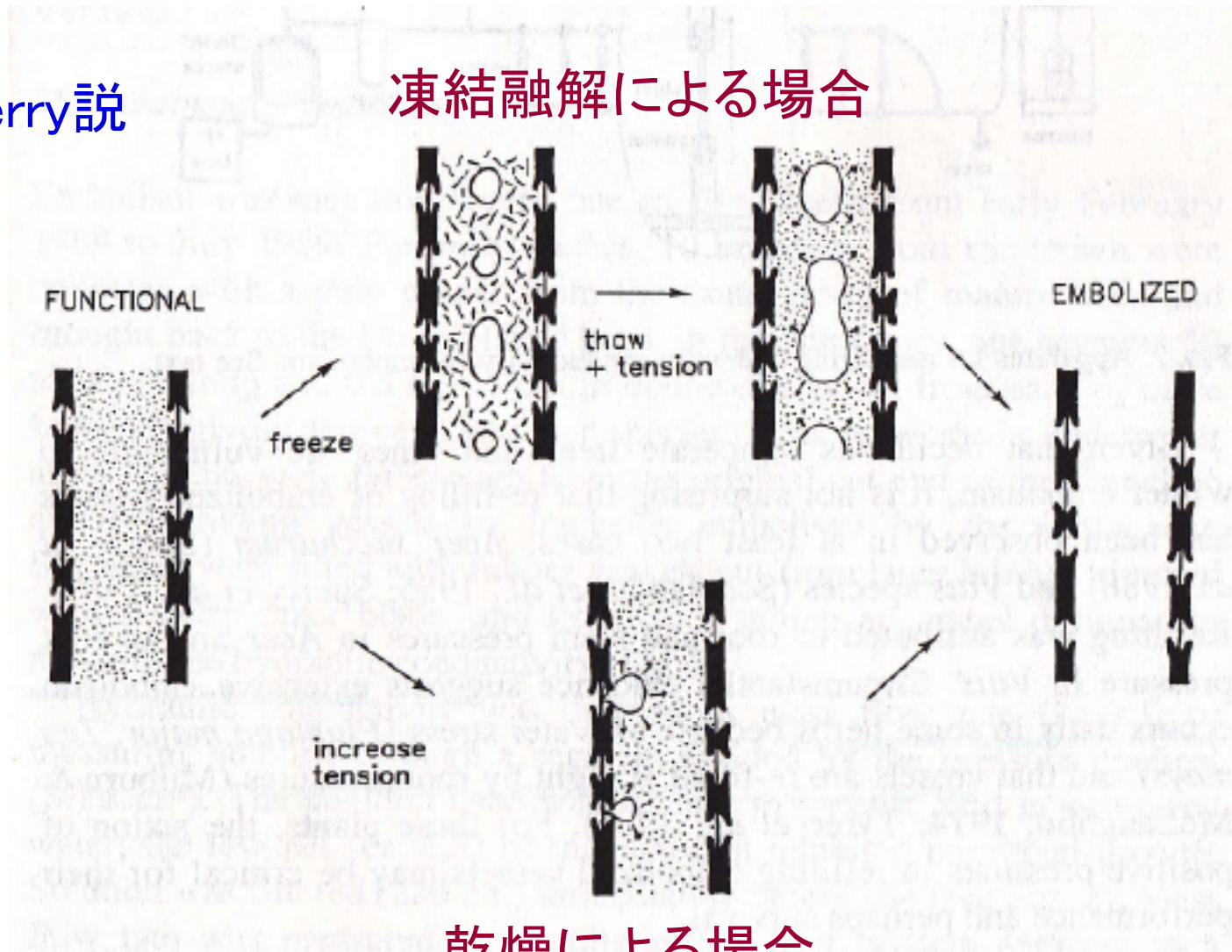
内海ほか訳 Tyree & Zimmermann
 「植物の木部構造と水移動様式」
 シュプリンガー 2007年 図4.14

Hacke, Sperry, Tyree らの研究

「木部キャビテーションのメカニズムの違い」

Sperry説

凍結融解による場合



乾燥による場合

図5-32

Borghetti ら編「Water Transport in Plants under Climatic Stress」
Cambridge 1993年 P.87 Fig.1 (Sperry 1983)

「乾燥による木部キャビテーション」

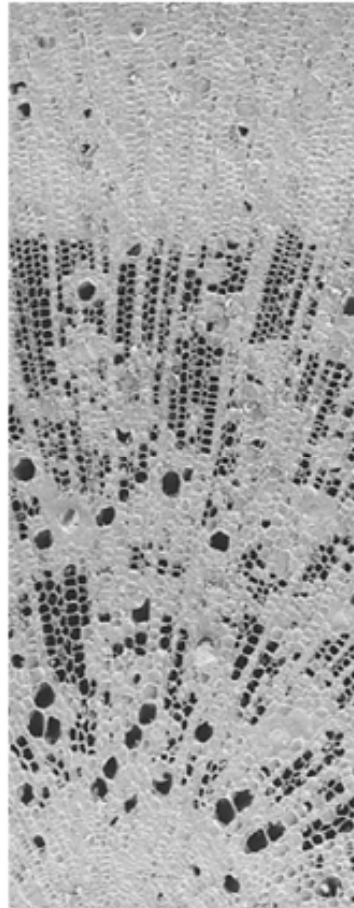
乾燥処理



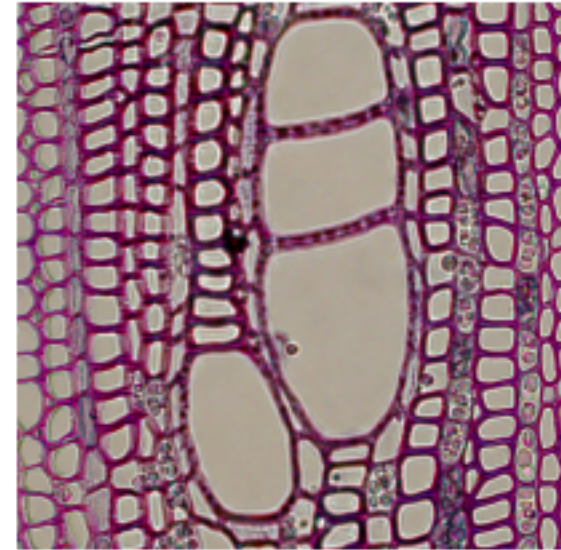
-1.31 MPa

Trema orientalis
(L.) Blume

茎断面クライオ
セム画像



連結した道管 (複合道管)



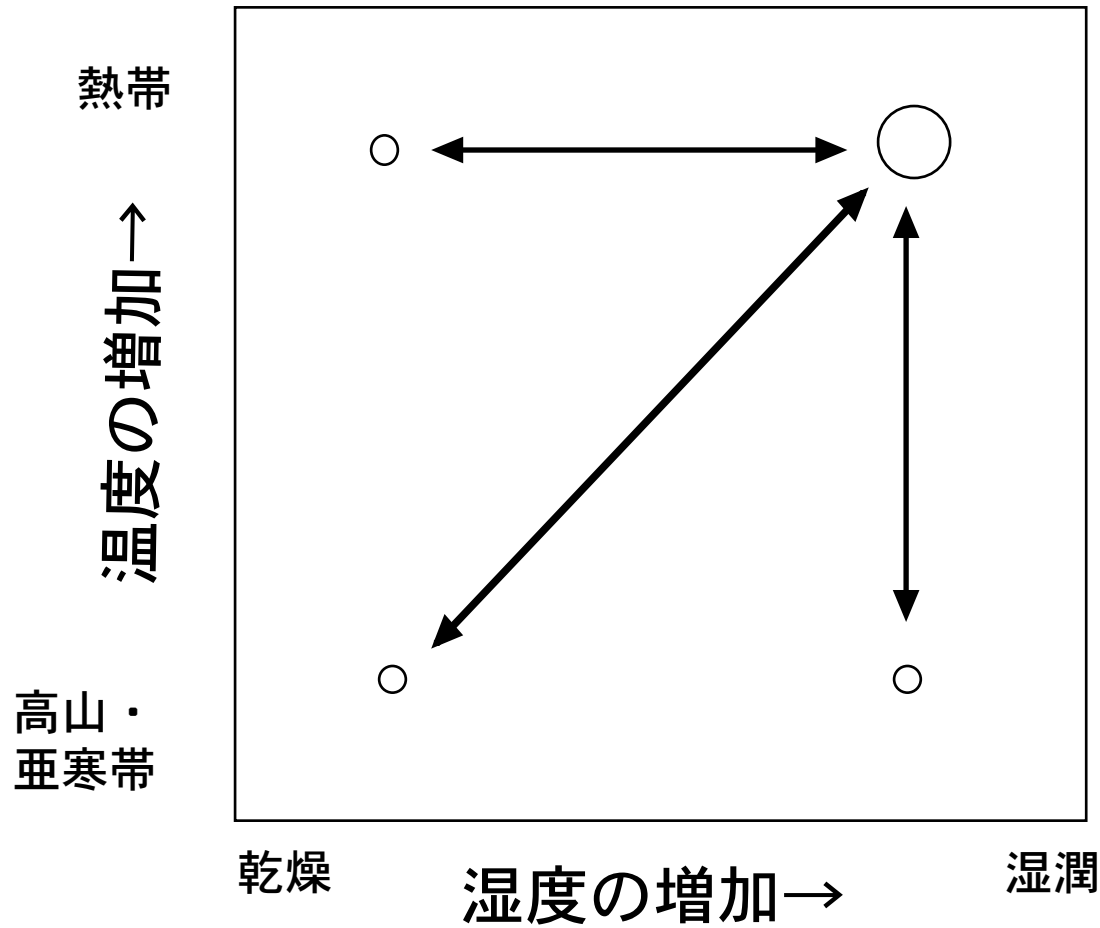
50μm

Macaranga tanarium (L.)
Muel. Arg.

図5-33

壁孔構造・道管の連結の仕方が問題？

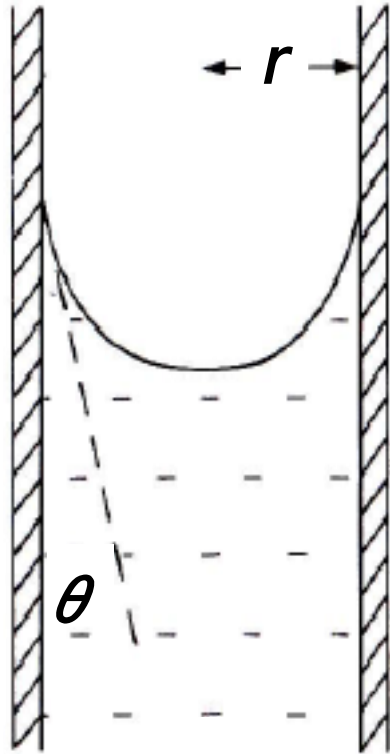
「Global scale での道管直径と気候」



内海ほか訳 Tyree & Zimmermann 「植物の木部構造と水移動様式」
シュプリンガー・ジャパン 2007年 図4.11 より作図

図5-34

「道管が毛細管現象で上げられる水の高さは？」



$$h = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r \rho g}$$

r : 管の半径 (m)

σ : 水の表面張力 (0.072 N s⁻² at 25°C)

ρ : 水の密度 (1000 kg m⁻³ at 25°C)

g : 重力加速度 (9.8 m s⁻²)

図5-36

Jones 「Plants and Microclimate」
Cambridge 1992年 Fig. 4.2

毛細管力で水を上げられる高さは？

道管の半径：10~200 μm

h : 1.496~0.073m

$\theta=0$ として計算

「毛細管現象で木の高さまで水をあげるのに
必要な道管の太さは？」

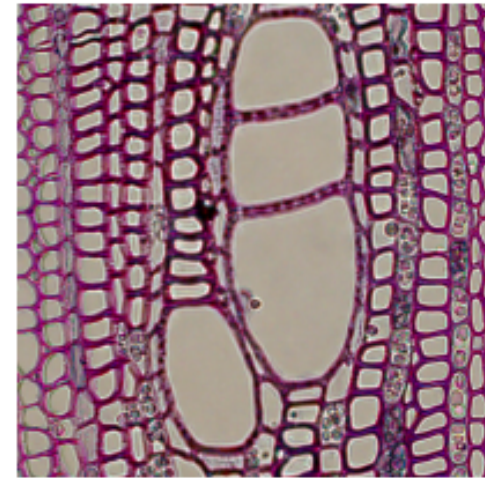
$$h = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r \rho g}$$

20m高さ：道管の半径は $0.737 \mu\text{m}$

115m高さ：道管の半径は $0.128 \mu\text{m}$
(世界最高) $\theta=0$ として計算

実際の道管の半径は $10 \sim 200 \mu\text{m}$
仮道管の半径でも $5 \sim 10 \mu\text{m}$

Macaranga tanarium
(L.) Muel. Arg.



50 μm

図5-37

木は毛細管力で水をあげている訳ではない

→ 水ポテンシャルの圧力差と水の凝縮力で水を上げている

「SPAC (Soil-Plant-Air Continuum) Model」

$$E = K_{\text{soil-to-leaf}} (\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{leaf}})$$

生理特性 ←————— 水バランス —————→ 形態特性

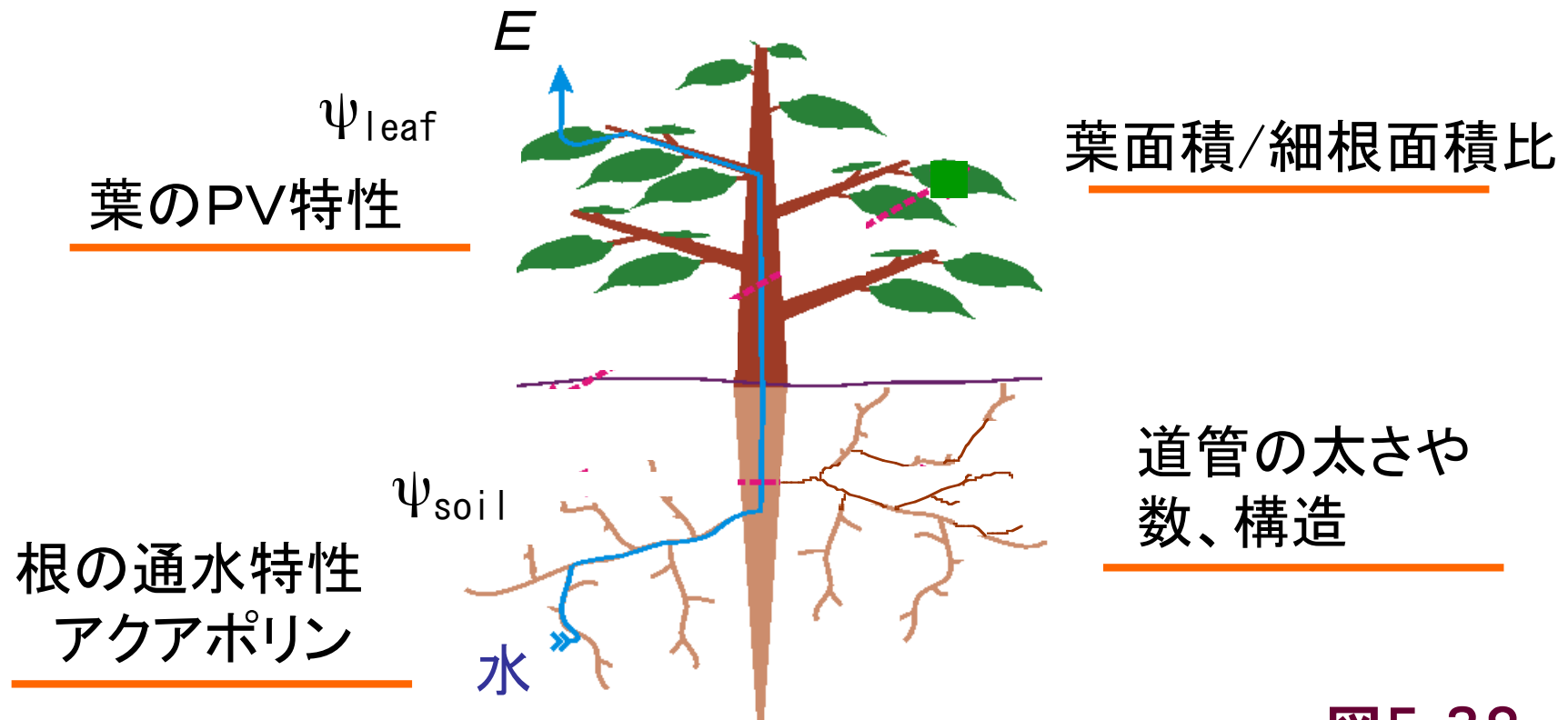


図5-38

生態学 I ー植物の生理生態ー

「植物の通水性と形態」

- 1) 土の性質とマトリックスポテンシャル
- 2) 根の通水経路とアクアポリン
- 3) 植物の水バランス：
葉と根の生理機能ー葉と根の表面積比
Form (形) and Function (機能)
- 4) 樹木の道管構造
- 5) 道管構造と木部キャビテーション (水切れ)
とキャビテーション修復機能