

# 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

## 「植物にとっての水の重要性」

### 1) 細胞質の主要構成物質

草本の重量の90-95%が水

木本では約50%が水

様々な溶質を溶解することができる

→化学反応の場

常温で液体

比熱が高い (水 :  $0.9986 \text{ cal g}^{-1} \text{ K}^{-1}$  at  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

→温度変化が少ない

表4-1

	分子量	融点 ( $^\circ\text{C}$ )	沸点 ( $^\circ\text{C}$ )
$\text{CH}_4$	16	-184	-161
$\text{NH}_3$	17	-78	-33
$\text{H}_2\text{O}$	18	0	100
$\text{HF}$	20	-92	19

Sutcliffe 「Plants and Water」 (1968) The Camelot Press, Table 2 より

## 「植物にとっての水の重要性」

- 2) CO<sub>2</sub>を獲得するため気孔を開くと、水が出てしまう  
→ 植物のジレンマ (気孔制御の問題)  
CO<sub>2</sub> 1 molの固定に対し、約100molの水を消費

畑や森林の水利用効率：収量 (光合成量) / 蒸発散量

個葉光合成の水利用効率：A (光合成速度) / E (蒸散速度)

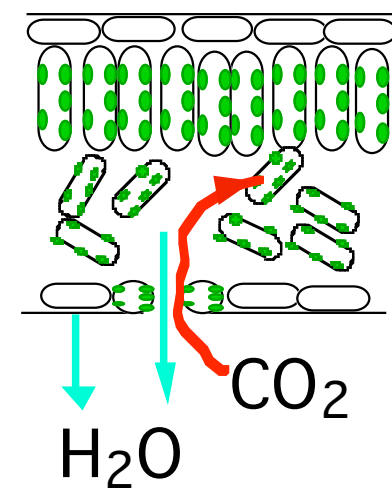
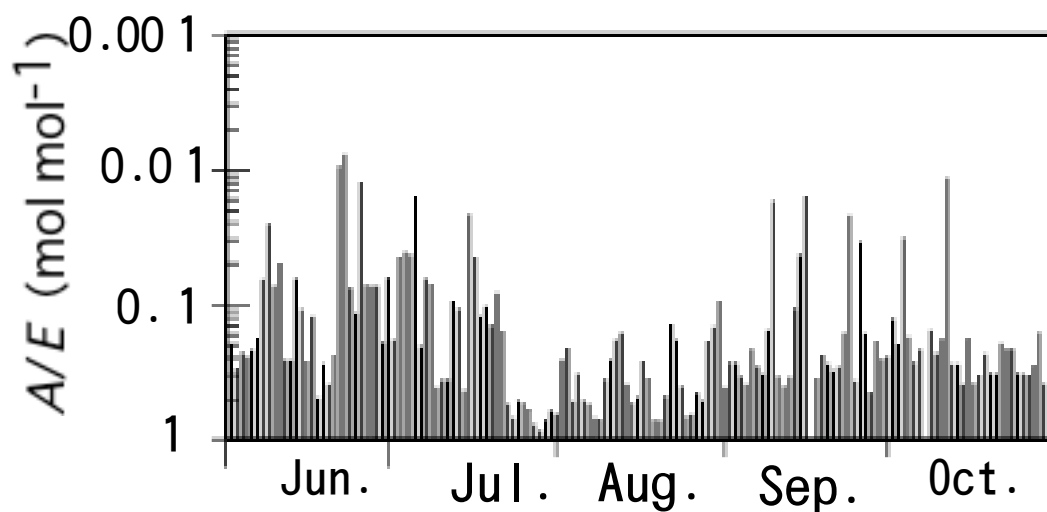
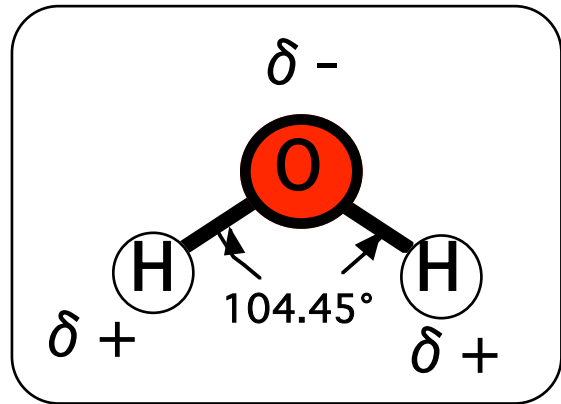


図4-1

ブナ成木における陽葉の1日の水利用効率

(Uemura et al. 2005)

# 「水分子の物理化学特性」



水分子の模式図

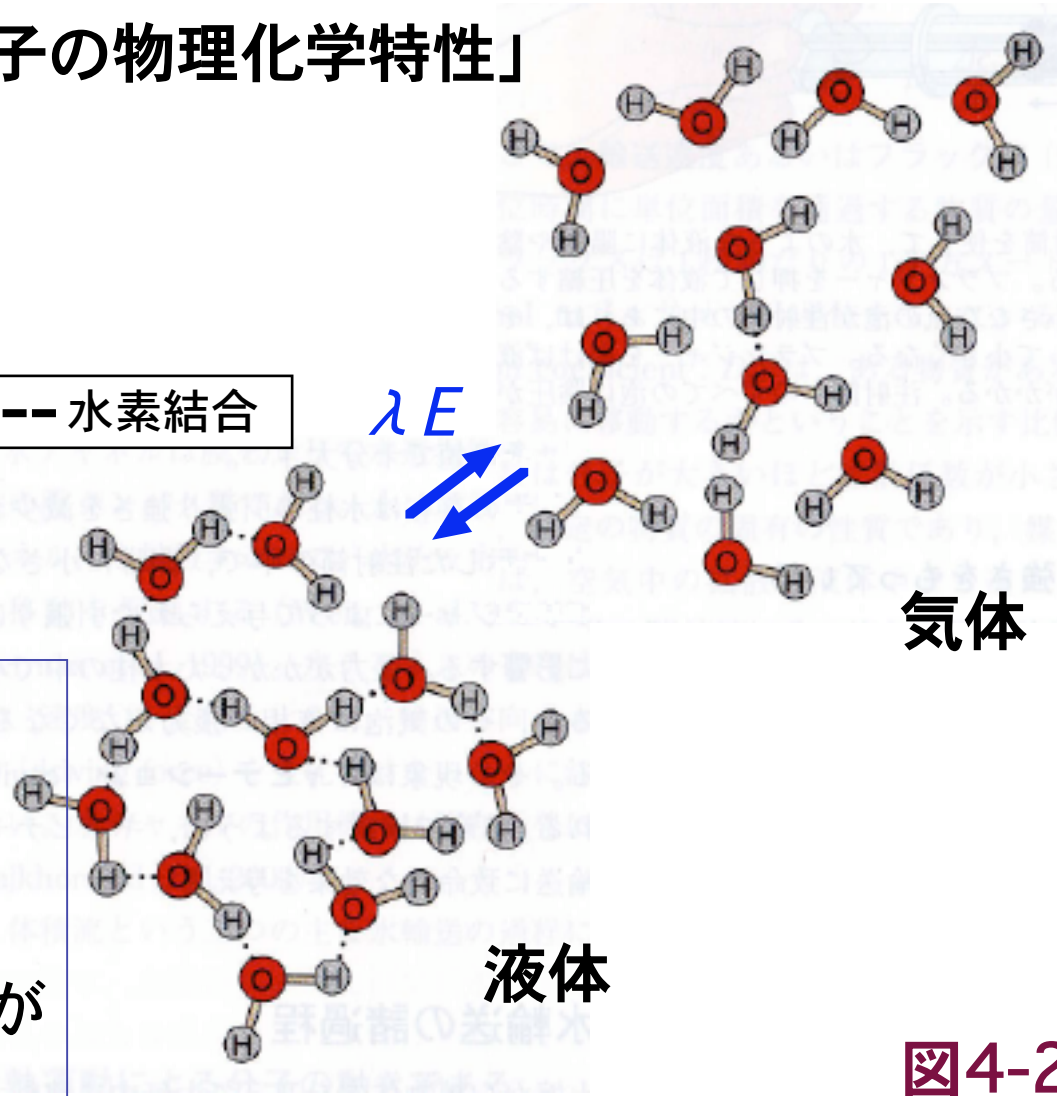
水素結合は比較的強い  
(20-30kJ mol<sup>-1</sup>)



- 高い気化熱。PARエネルギーの約20%が潜熱 ( $\lambda E$ ) に相当
- 凝集力により表面張力や毛管現象を起こす

--- 水素結合

$\lambda E$



気体

液体

図4-2

西谷/島崎監訳 (2004)  
テイツ/ザイガー  
植物生理学 培風館 図3.4より

## 「水の移動」

- 1) 水は水ポテンシャル ( $\psi$ ) の高い方から低い方へと動く  
→ 水ポテンシャルの差が Driving Force
- 2) 純水がもっとも高く、基準値として 0 と定義する

$$\psi = \frac{\mu_w - \mu_w^0}{V_w}$$

単位  $\frac{\text{J mol}^{-1}}{\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}}$   
 $= \text{J m}^{-3}$   
 $= \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ m}^{-3}$   
 $= \text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$   
 $= \text{Pa}$

$\mu_w^0$  : 等温、等圧下での純水の  
化学ポテンシャル → 0 と定義

$\mu_w$  : その系の水ポテンシャル

$V_w$  : その系の水のモル体積

$$\mu_w = \left( \partial G / \partial n \right)$$

$n$  : 等温、等圧で加えた純水のモル数

$G$  : 系のギブスのフリーエネルギー

# 物質の移動の仕方

## •1) マスフロー (mass flow)

風圧や、水圧で、物質全体が押されて移動する状態。例えば、乱流状態の空気や、パイプの中の水の流れ。(長距離輸送)

道管の中の水は、水ポテンシャルという圧力差で動くので、これもマスフロー

## •2) 拡散 (diffusion)

外からの圧力はなく、系と系のとの間の物質の濃度差に従って、拡散によって分子が動く状態。前回の授業でやった蒸散や光合成。(短距離輸送)

## 「水ポテンシャルの要素」

水ポテンシャル ( $\psi$ ) は、いろいろな要素に分解可能

$$\psi = \psi_p + \psi_\pi + \psi_m + \psi_g$$

$\psi$  : 水ポテンシャル (0 から一値の範囲)

$\psi_p$  : 圧ポテンシャル (細胞だと+値)

$\psi_\pi$  : 浸透ポテンシャル (0 から一値)  $\psi_\pi = (n/V) R T$

$\psi_m$  : マトリックスポテンシャル (0 から-値)

$\psi_g$  : 重力ポテンシャル (0 から+値)

$$\psi_g = \rho g h$$

$$0.01 \text{ MPa m}^{-1} \text{ or } 0.1 \text{ bar m}^{-1}$$

$\rho$ : 水の密度,  $\text{kg m}^{-3}$

$g$ : 重力加速度,  $\text{m s}^{-2}$

$h$ : 高さ,  $\text{m}$

→ 10mの高さの葉は、1 barの $\psi_g$ を持つ

$$1 \text{ 気圧} = 1013 \text{ mbar} = 1.013 \text{ bar}, \quad 1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$$

# 「植物細胞の水ポテンシャル： $\psi_{\text{leaf}}$ 」

$$\psi_{\text{leaf}} = \psi_p + \psi_{\pi} \quad (\text{吸水力} = \text{膨圧} - \text{浸透圧})$$

$\psi_{\text{leaf}}$  : 葉の水ポテンシャル (MPa)

$\psi_p$  : 葉の圧ポテンシャル (MPa)

$\psi_{\pi}$  : 葉の浸透ポテンシャル (MPa)

高い $\psi$ の液  
に浸けると

$\psi_{\text{leaf}}$ と同じ $\psi$ 液

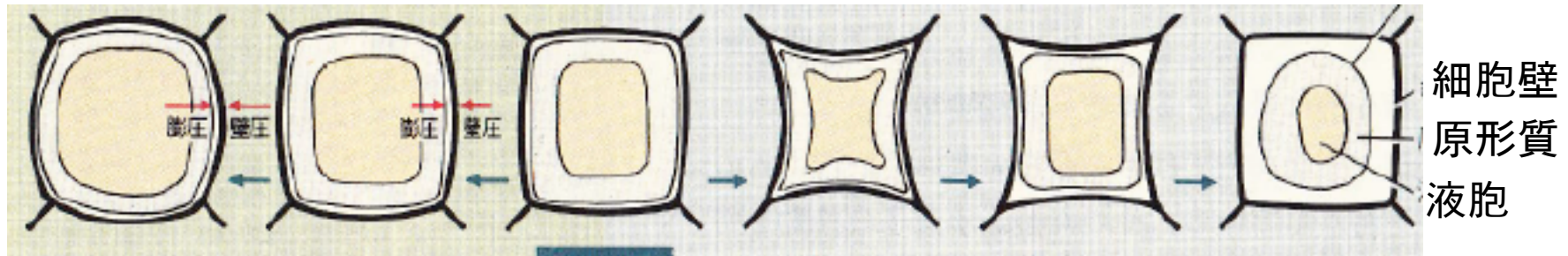
低い $\psi$ の液に浸けると

(純水 = 0bar)

(-10bar)

(-30bar)

原形質膜



細胞は圧ポテンシャル  
(膨圧) を保った状態

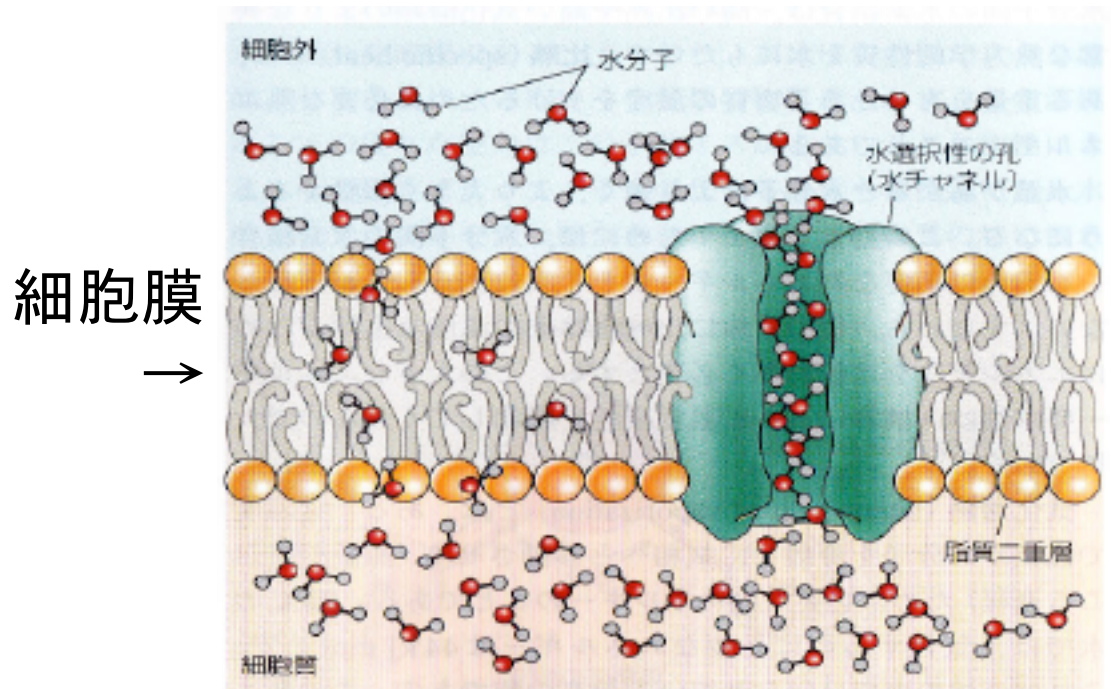
細胞は圧ポテンシャル  
を失い、しおれた状態

図4-3

小林 (1980) 「チャート式 新生物I」 数研出版 図2.26より作成



# 「細胞膜の水の透過性（単なる半透膜ではない）」



西村・島崎 監訳 (2004) 「テイツ/ザイガー 植物生理学」  
培風館 図3.6より

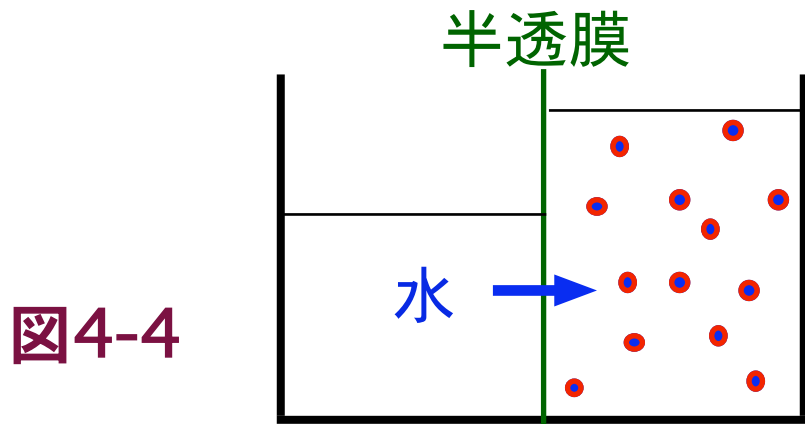


図4-4

- アクアポリン (水チャンネル) は1992年に発見され、P.アグレらに2003年ノーベル化学賞
- アクアポリン (膜タンパク) のリン酸化でオープン  
→開閉の制御
- アクアポリンの量と活性で、細胞膜の水の透過性は制御されている

## 「浸透ポテンシャル： $\psi_{\pi}$ 」

$$\psi_{\pi} = - (n/V) R T \quad \text{Van't Hoff の式}$$

$n$  → イオン性の溶質の場合は解離した分子数  
 $(n/V)$  はリッター当たりのイオン濃度

**表4-2**  $RT$ と $\psi_{\pi}$  (MPa)の温度依存性

温度 °C	$RT$   MPa mol <sup>-1</sup>	0.01 mol l <sup>-1</sup>	1 mol l <sup>-1</sup>	海水 MPa
0	2.271	-0.0227	-2.27	-2.6
10	2.354	-0.0235	-2.35	-2.7
20	2.437	-0.0244	-2.44	-2.8
30	2.520	-0.0252	-2.48	-2.9
40	2.604	-0.0260	-2.52	-2.9

→ 海水域のマング  
 ローブの葉は、海  
 水よりも低い葉の  
 水ポテンシャルを  
 持っているはず  
 : 実際日中で  
**-2.4~-4.0 MPa**  
 (Rhashila et al. 2009)

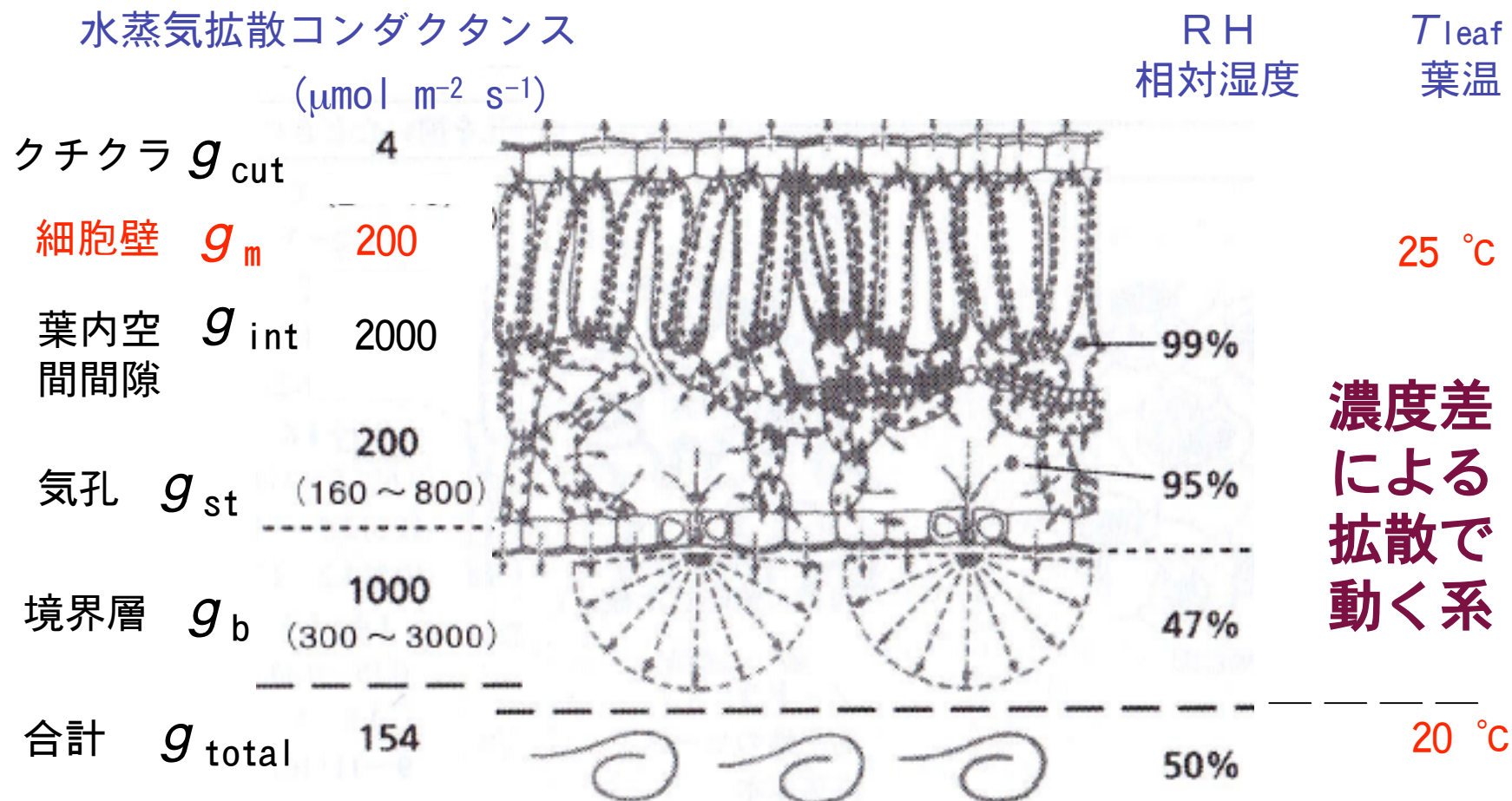
$$R = 0.0083143 \text{ | MPa mol}^{-1} \text{ k}^{-1}$$

$$0 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 273.15 \text{ K}$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$$

# 「葉の蒸散 $E$ と水蒸気コンダクタンス」

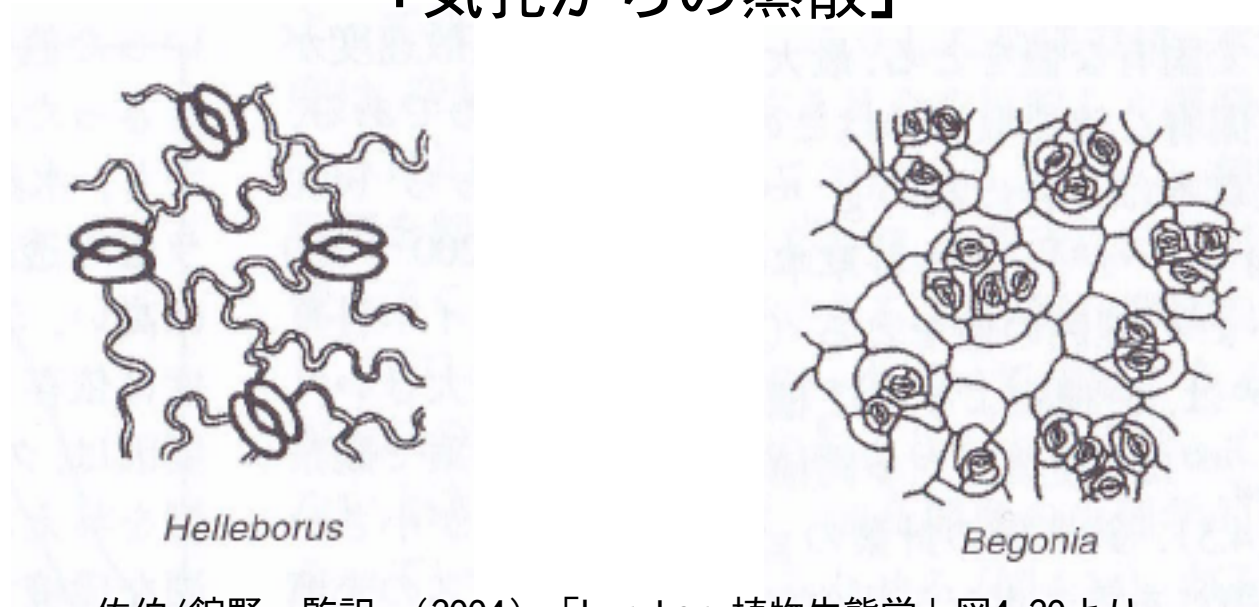
$$E = g_{\text{total}} (\psi_{\text{leaf}} - \psi_{\text{air}})$$



大気：乱流なのでマスフローで動く系

図4-5

# 「気孔からの蒸散」



佐伯/館野 監訳 (2004) 「Larcher 植物生態学」図4.20より

濃度差  
による  
拡散で  
動く系



図4-6

Sutcliffe (1968) 「Plants and Water」The Camelot Press Fig. 6-5 より

点線は、気孔から出る水蒸気圧の等圧線。(b) 気孔間の距離が近いと、気孔が閉鎖近くなるまで、気孔開度の違いによっても、蒸散は大きく制御はされない可能性を示す。

# 「S P A C (Soil-Plant-Air Continuum) Model」

蒸散 → 葉の脱水 →  $\psi_{\text{leaf}}$  低下 → 吸水力：  
水の凝集力があるから、水は上に引き上げられる

Flux = Conductance x Driving Force

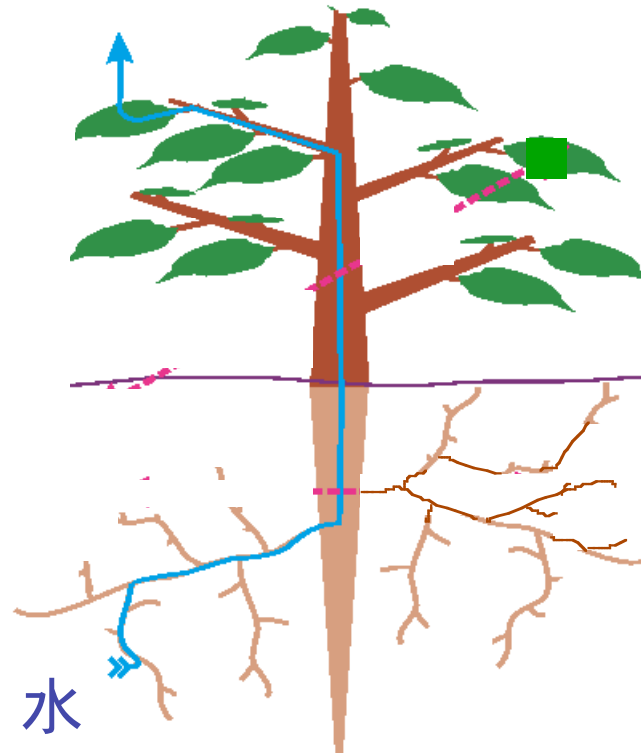
$$E = K_{\text{soil-to-leaf}} (\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{leaf}})$$

道管内の水は  
マスフローと  
して動いている

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

$\psi_{\text{leaf}}$  : 葉の  
水ポテンシ  
ヤル (MPa)

$\psi_{\text{soil}}$  : 土壌の  
水ポテンシヤ  
ル (MPa)



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

図4-7

# 「葉の脱水による水ポテンシャル ( $\psi_{\text{leaf}}$ ) の低下」

$$\psi_{\text{leaf}} = \psi_p + \psi_{\pi}$$

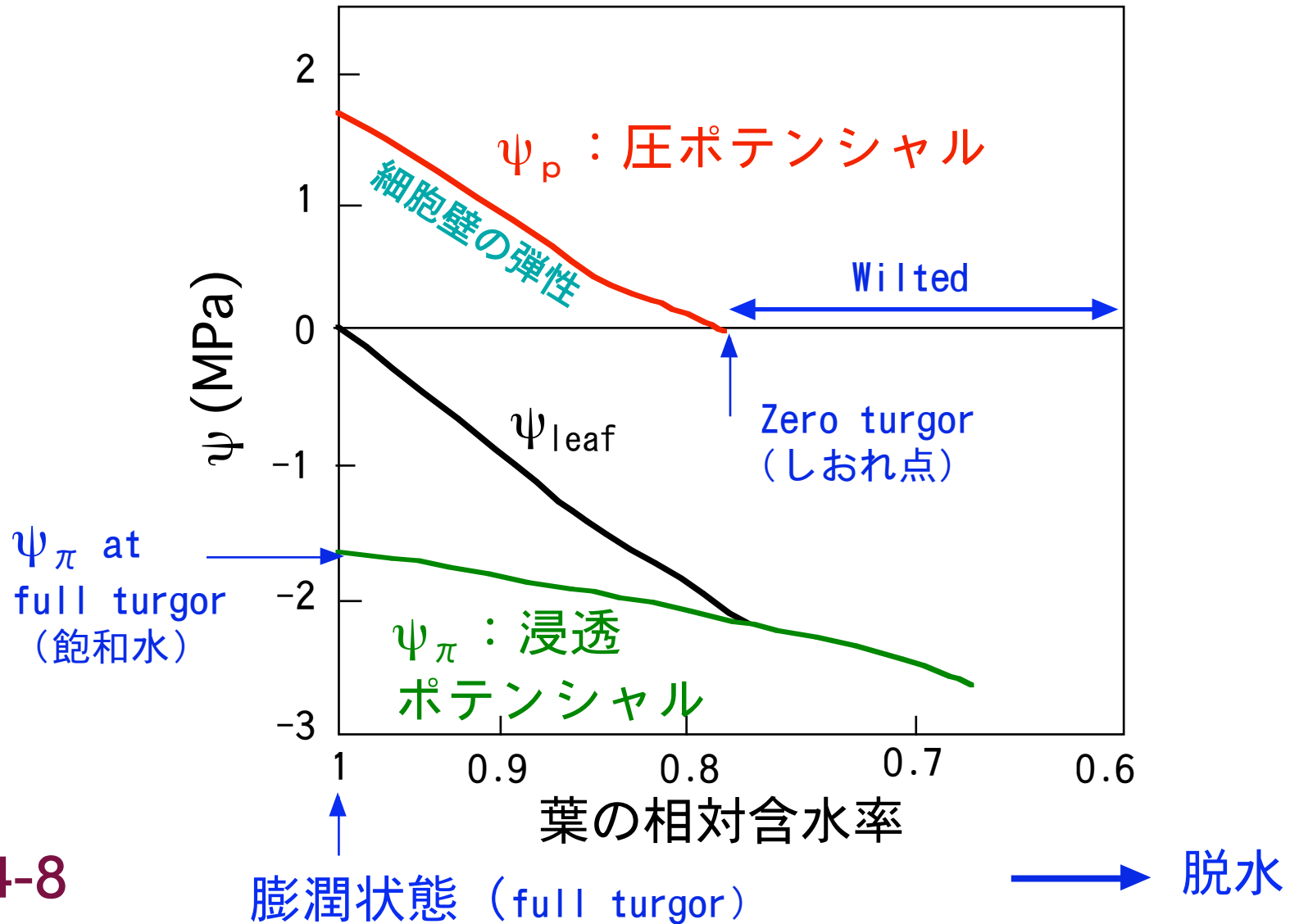


図4-8

## 「水ポテンシャル： $\psi_{\text{leaf}}$ の測定法」

- 1) プレッシャチェンバー法
- 2) サイクロメータ法
- 3) プレッシャーブループ法

# 「1) プレッシャーチェンバー法」

Scholander *et al.* (1965) Science

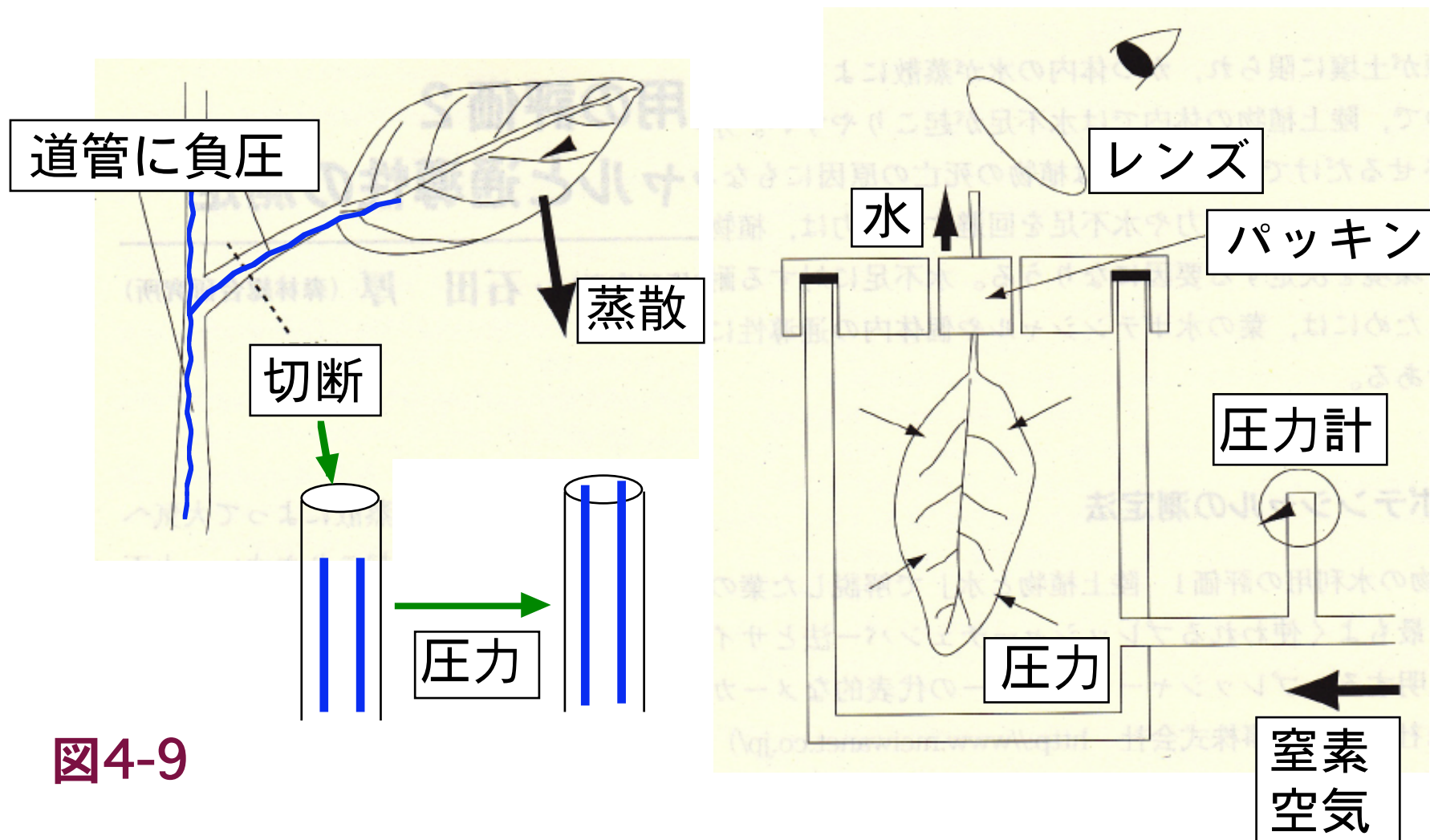


図4-9



# 「プレッシャーチェンバーの写真」

圧力計

パッキン

蓋

ガスボンベ

チェン  
バー

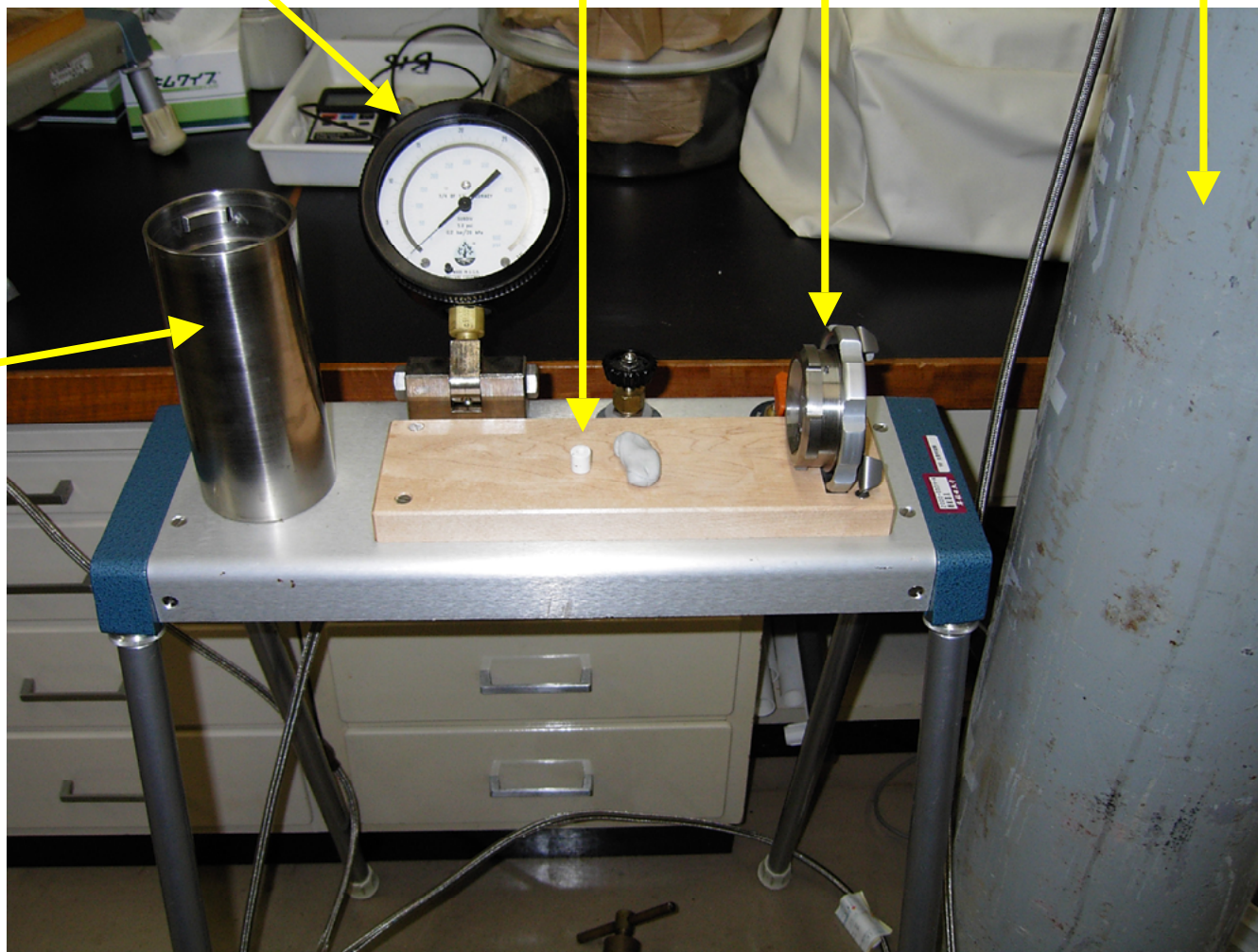


図4-10

米国 Soil Moisture Stress 社製

## 「2) サイクロメータ法」

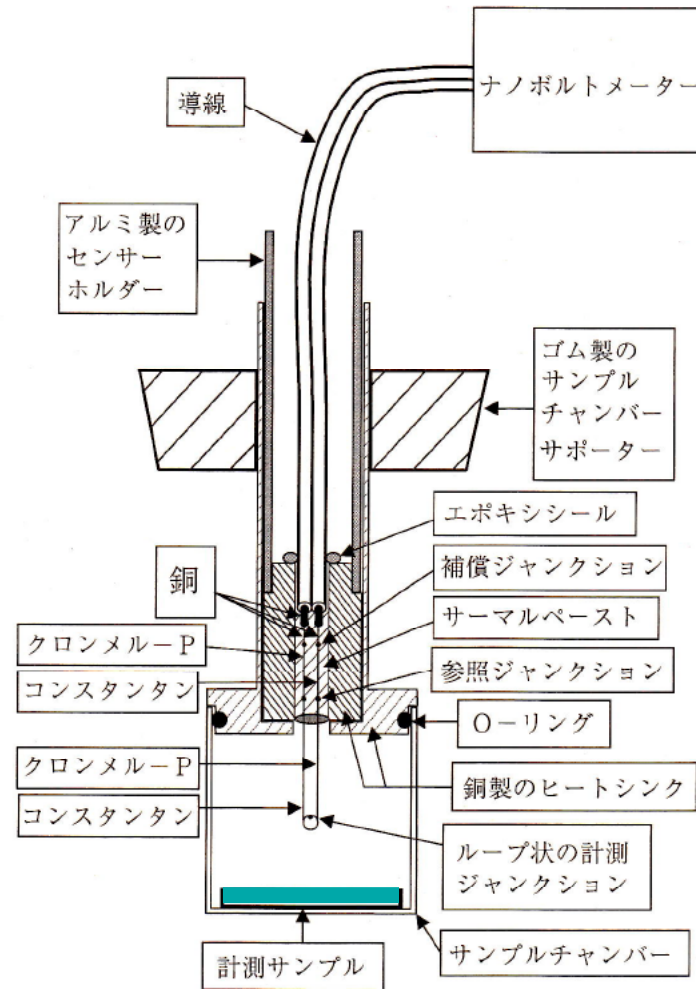


図4-11

野並 浩 (2001) 「植物水分生理学」養賢堂 図2-3 より

## 「サイクロメータの写真」



セル投入口

図4-13

米国 Wescor 社製 5520型

### 「3) プレッシュャープループ法」

細胞1個の水  
ポテンシャル  
が測れる

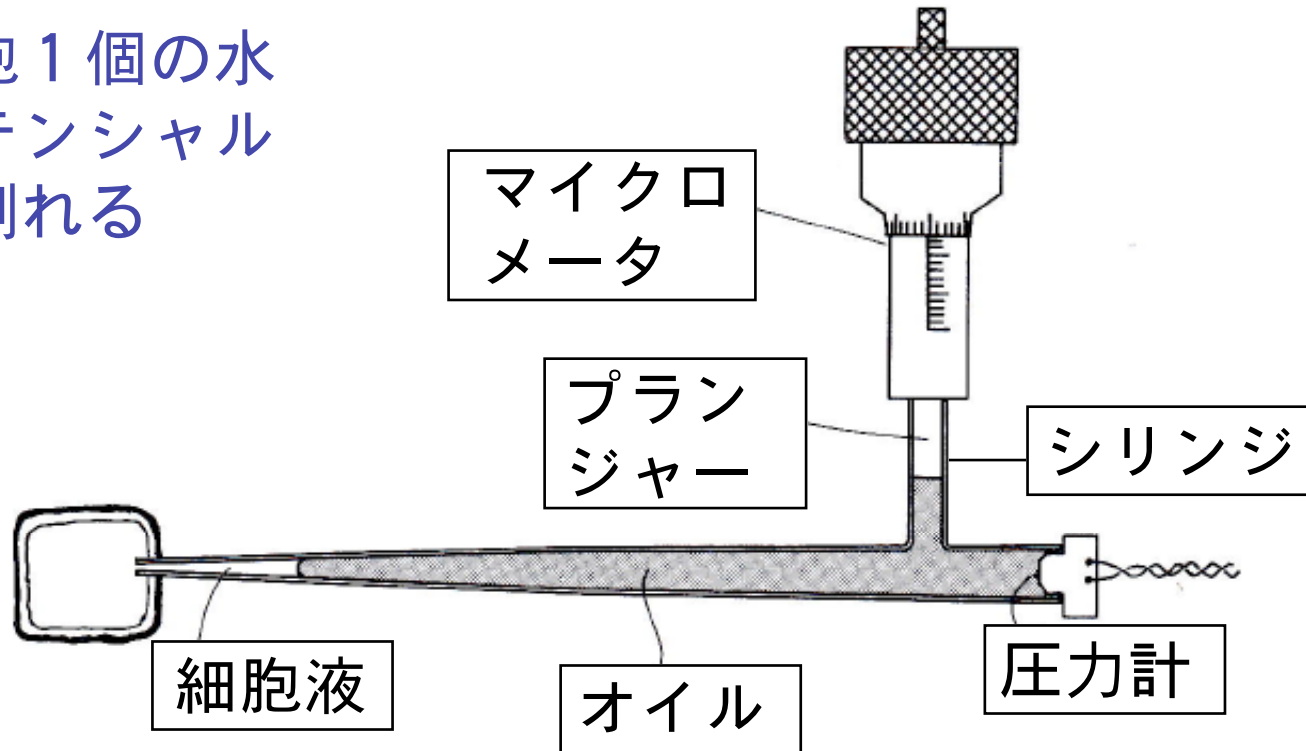


図4-14

Jones (1992) 「Plants and Microclimate」 Cambridge Fig. 4.4 より

まず圧ポテンシャルを測定し、ナノリッター浸透圧計で浸透ポテンシャルを測定。体積の低下と圧ポテンシャルの変化から細胞壁の弾性も計算可能。

# 「プレッシャープループを使っているところ」

顕微鏡下での  
柔らかい細胞  
でないと測れ  
ない。

Canada  
Alberta Univ.  
Zwiamek 博士  
の研究室にて

図4-15



# 「葉の水分特性の測定：プレッシャーチェンバーの利用」

## P V カーブ法

$$\psi_{\text{leaf}} = \psi_p + \psi_{\pi}$$

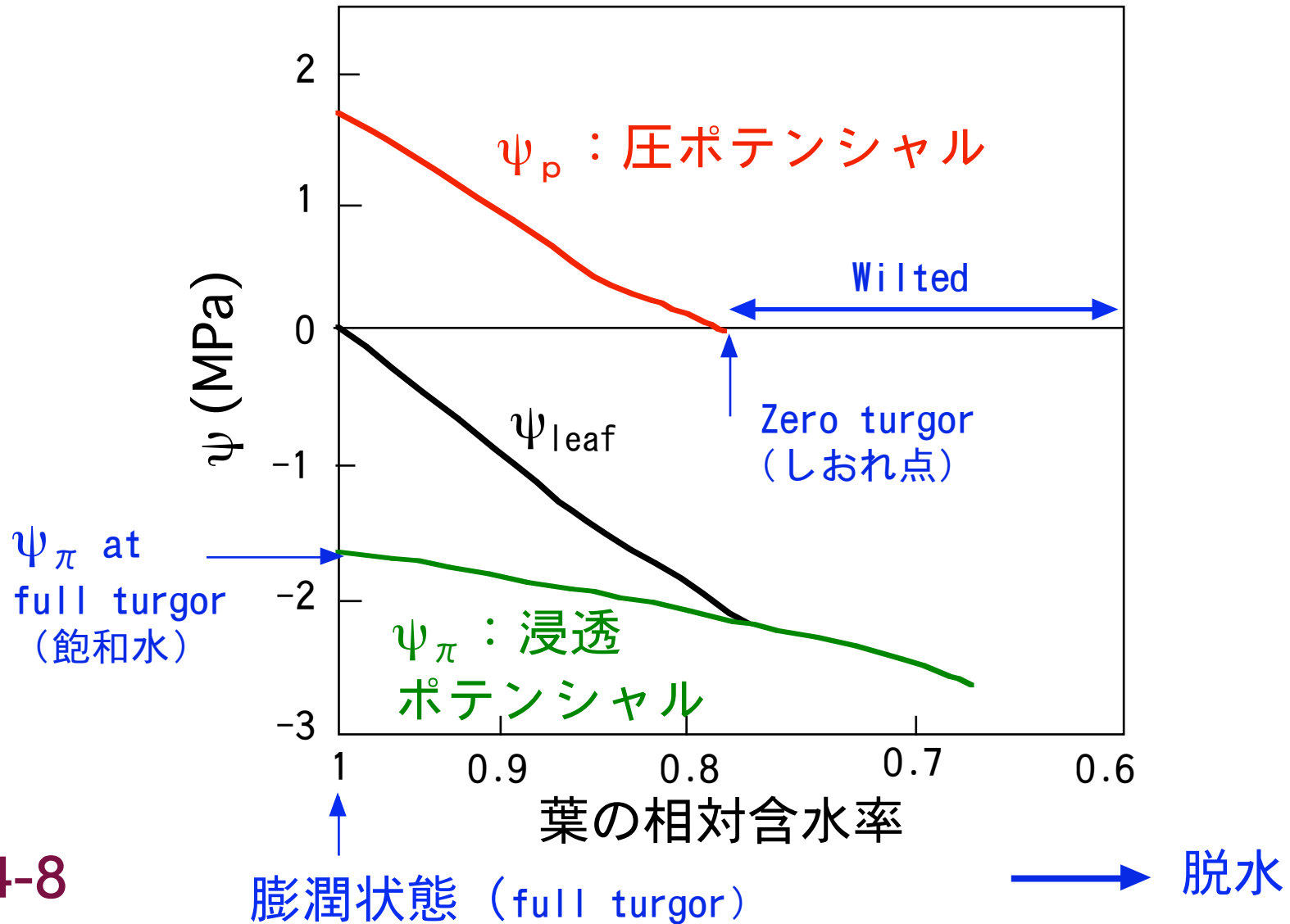


図4-8

# 「P-Vカーブ (Pressure-Volume Curve)法」

Scholander et al. (1965)

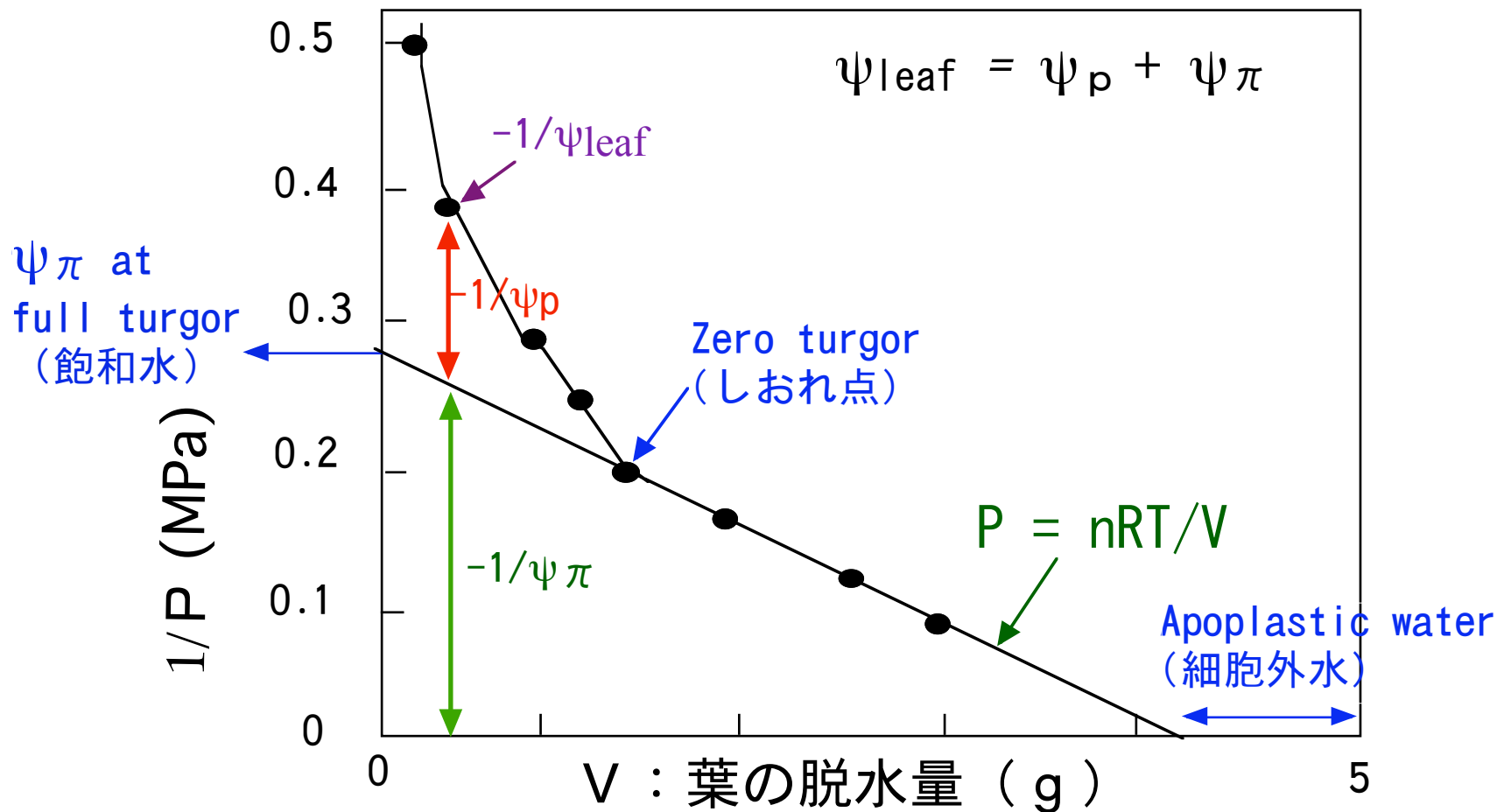


図4-16

葉を脱水させながら、脱水量 (V) と水ポテンシャル (P) を測定し続ける

# 「葉の乾燥耐性 1) 細胞壁に弾性を持たせる」

→細胞壁の二次壁の変化

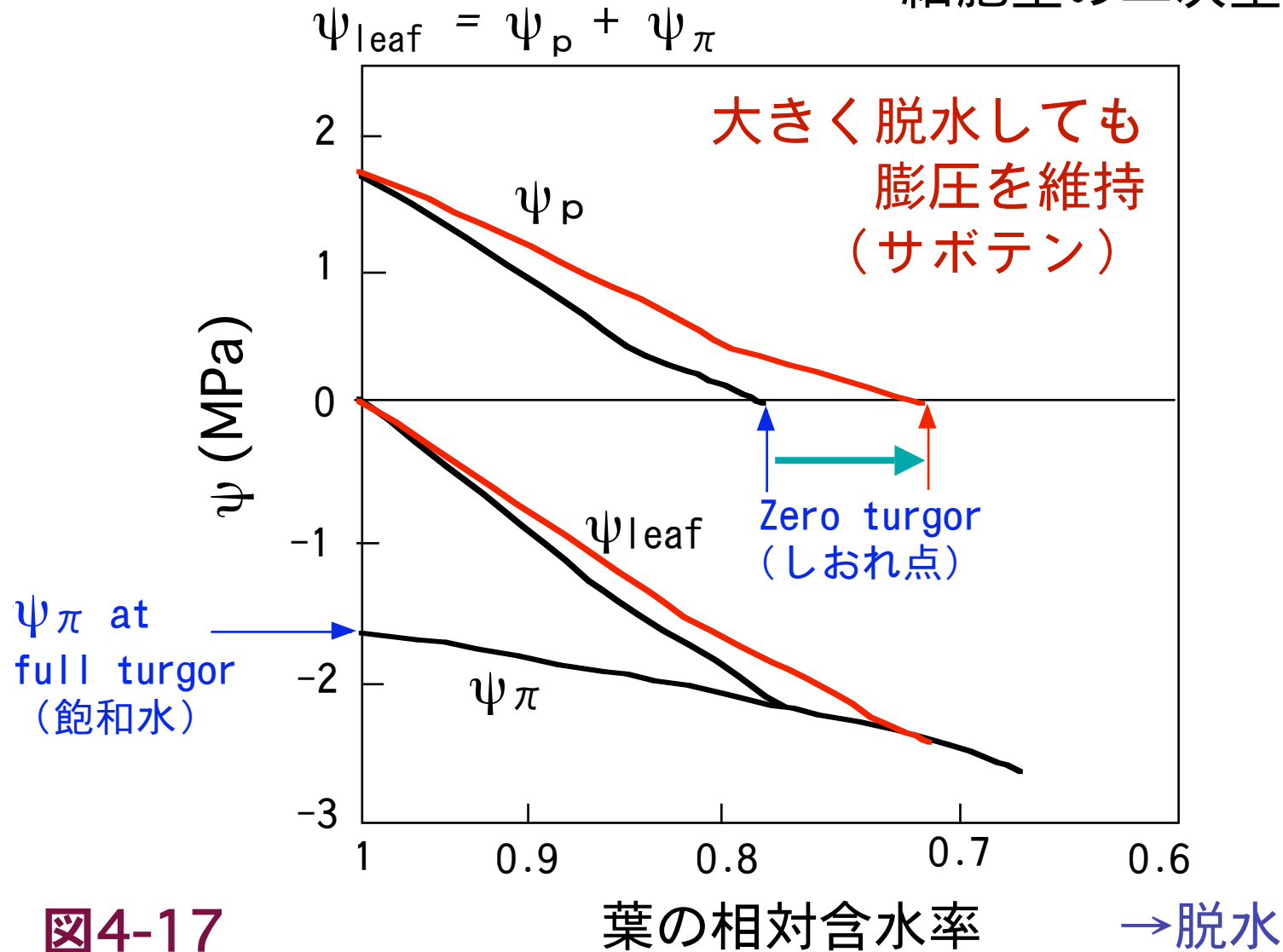


図4-17



# 「葉の乾燥耐性 2) 細胞壁を堅くする」

→細胞壁の二次壁の変化

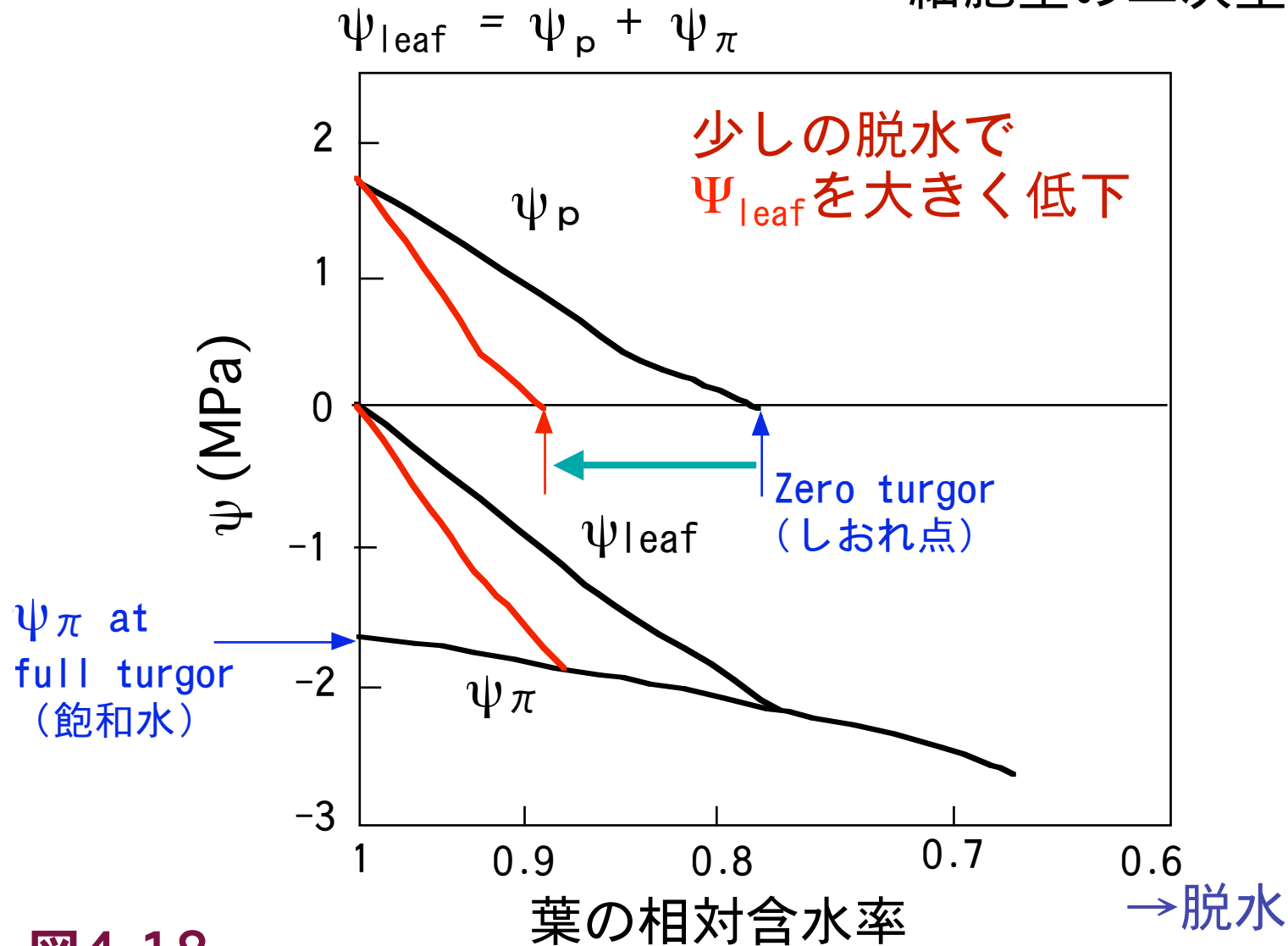
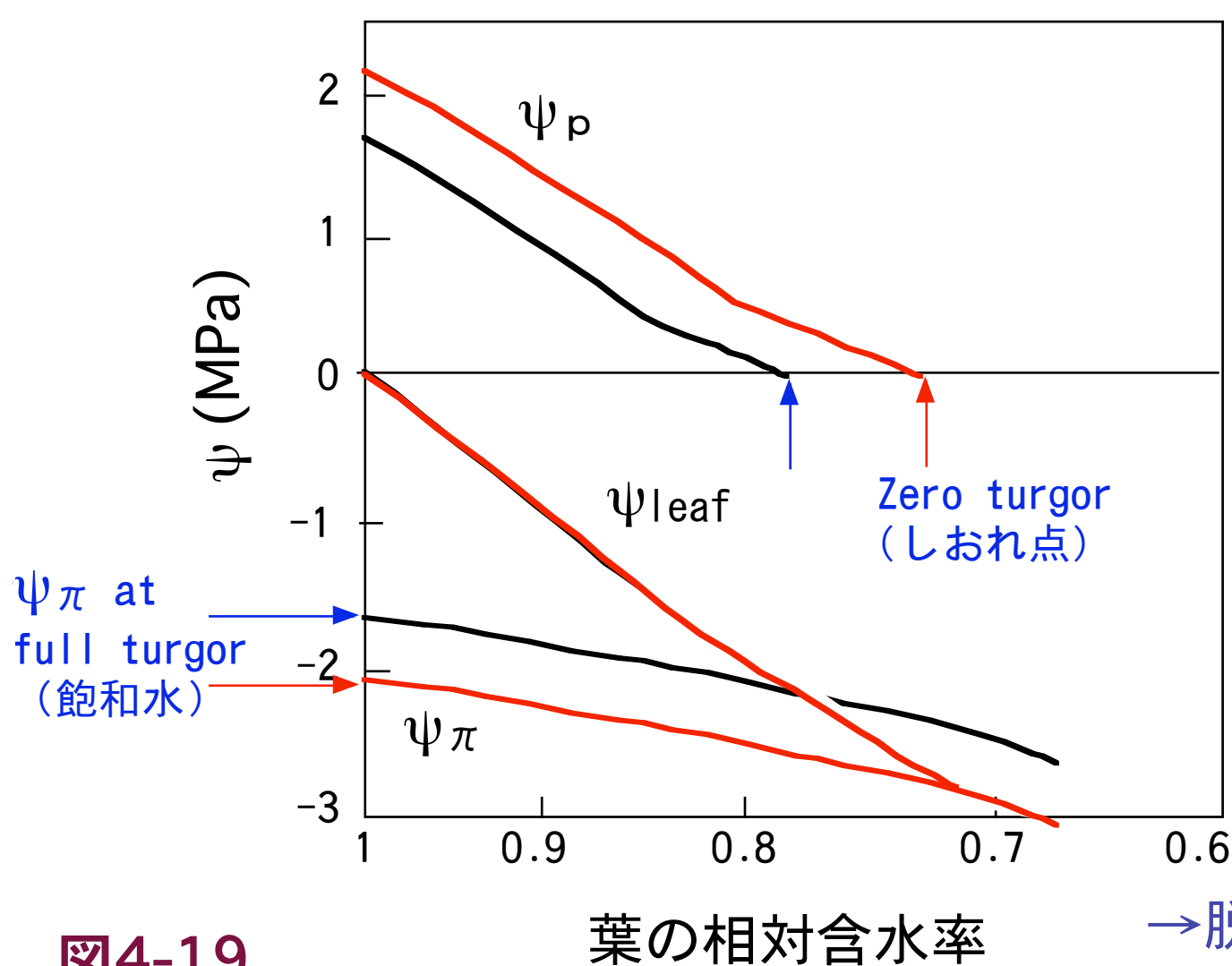


図4-18

# 「葉の乾燥耐性 3) $\psi_{\pi}$ を下げる」

$$\psi_{\text{leaf}} = \psi_p + \psi_{\pi}$$



細胞質に溶質を貯め  $\psi_{\pi}$  を下げる  
→浸透調節

細胞外水への割合を増やして  $\psi_{\pi}$  を下げる

図4-19

# 「S P A C (Soil-Plant-Air Continuum) Model」

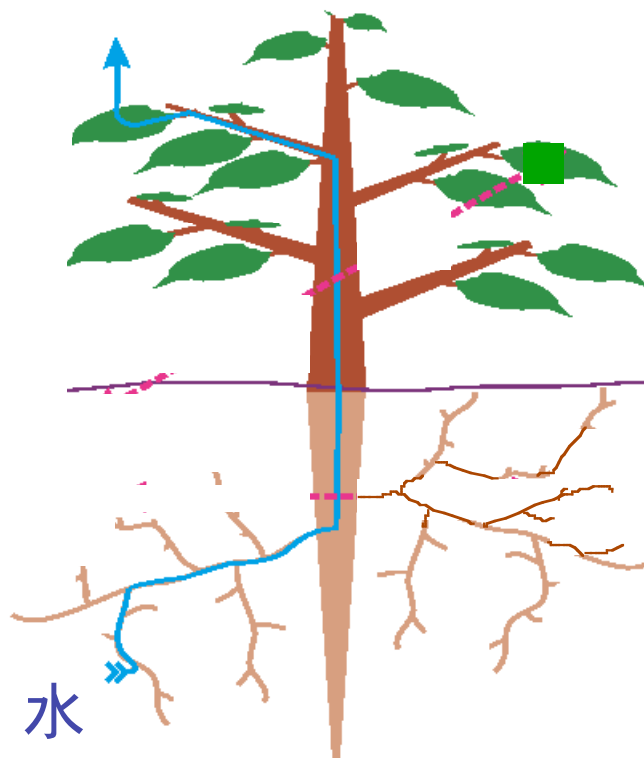
$$E = K_{\text{soil-to-leaf}} (\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{leaf}})$$

蒸散することによって水ポテンシャルが低下→  
吸水力を生み出し、水は道管の中をマスフローと  
して引き上げられていく

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

$\psi_{\text{leaf}}$  : 葉の  
水ポテンシ  
ヤル (MPa)  
→ P V 特性  
の変化

$\psi_{\text{soil}}$  : 土壌の  
水ポテンシ  
ヤル (MPa)



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

図4-20

## 「 $K_{\text{soil-to-leaf}}$ の測定法」

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

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

$\psi_{\text{leaf}}$  : 葉の水ポテンシャル (MPa)

$\psi_{\text{soil}}$  : 土壌の水ポテンシャル (MPa)

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

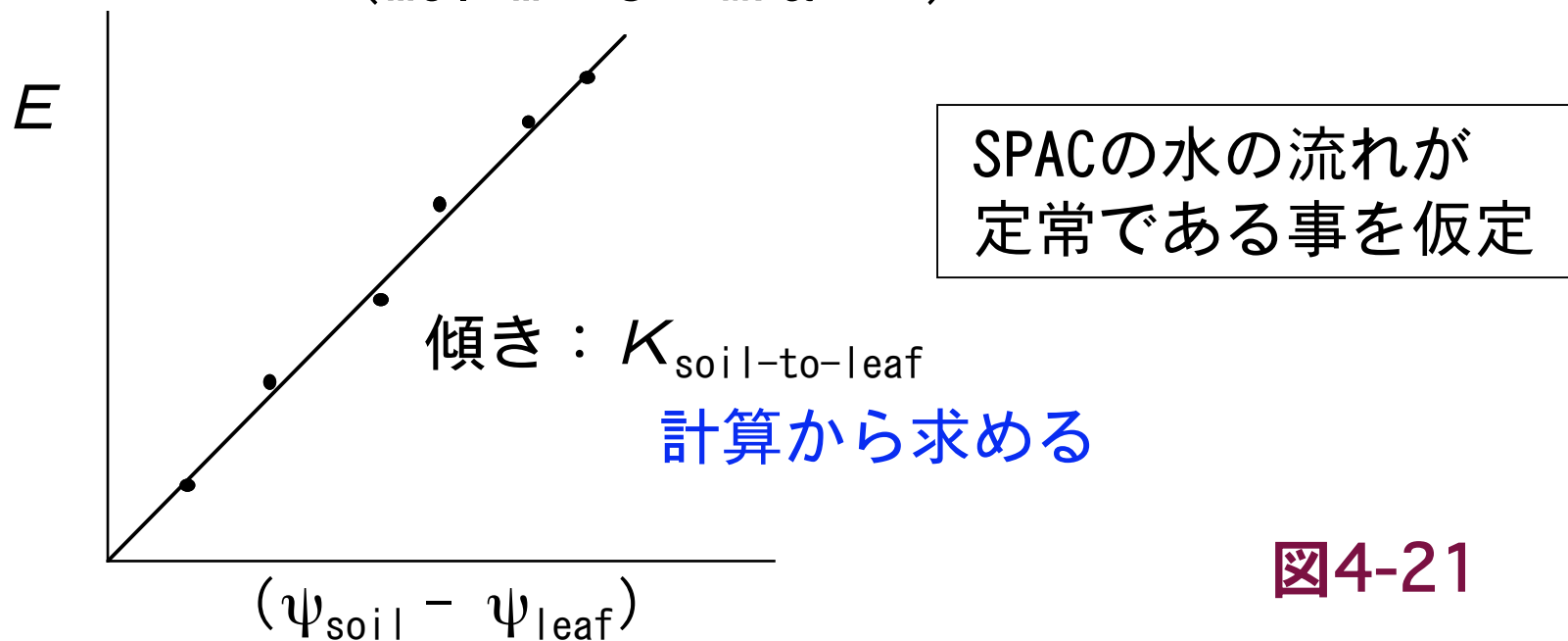


図4-21

# 「野外の植物の晴れた日中の値」

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

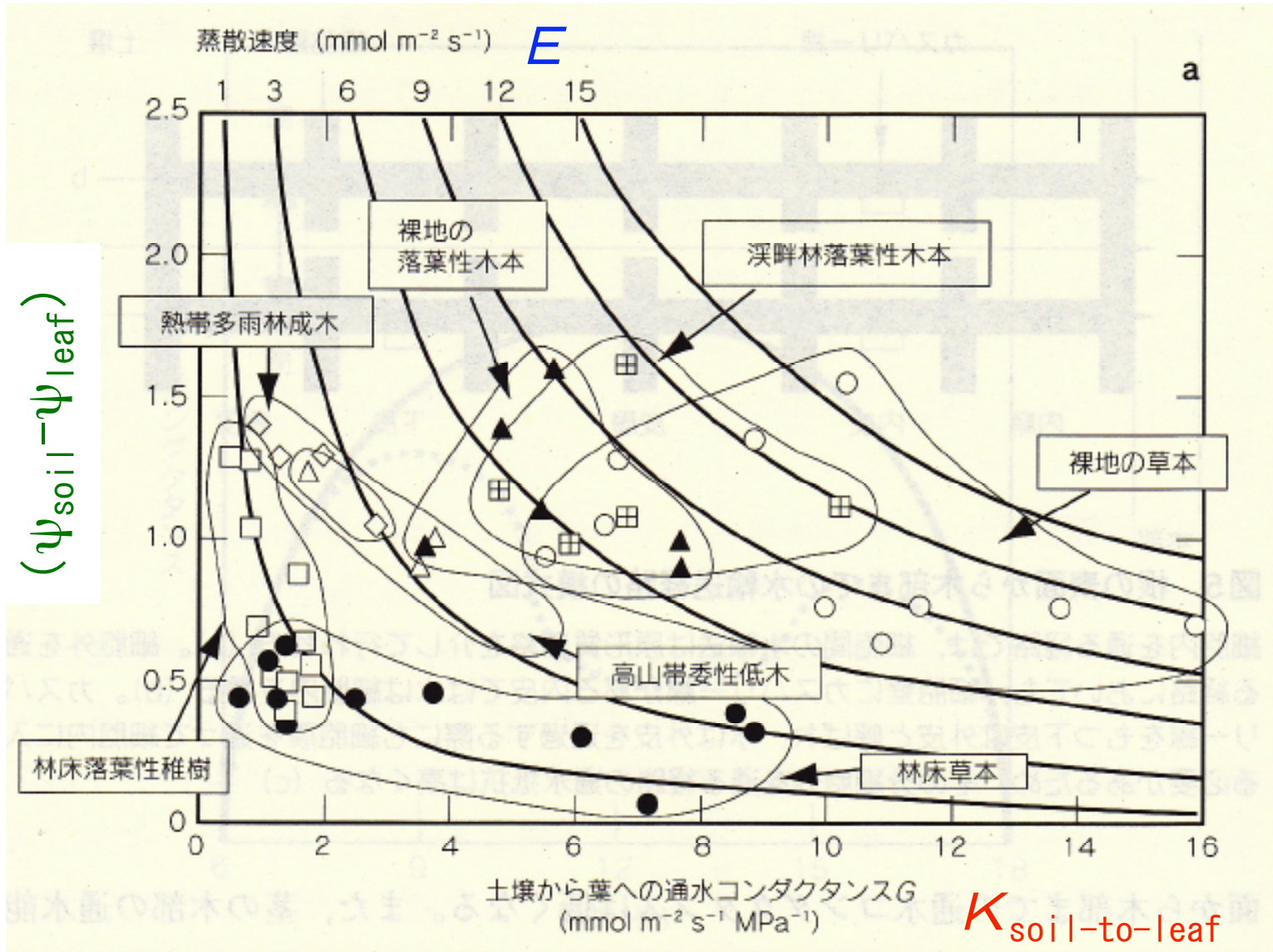


図4-22

石田・谷 (2003) 「光と水と植物のかたち」文一総合出版 III-5 図6 より

「高蒸散環境に対する馴化（暗条件→明条件）」

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

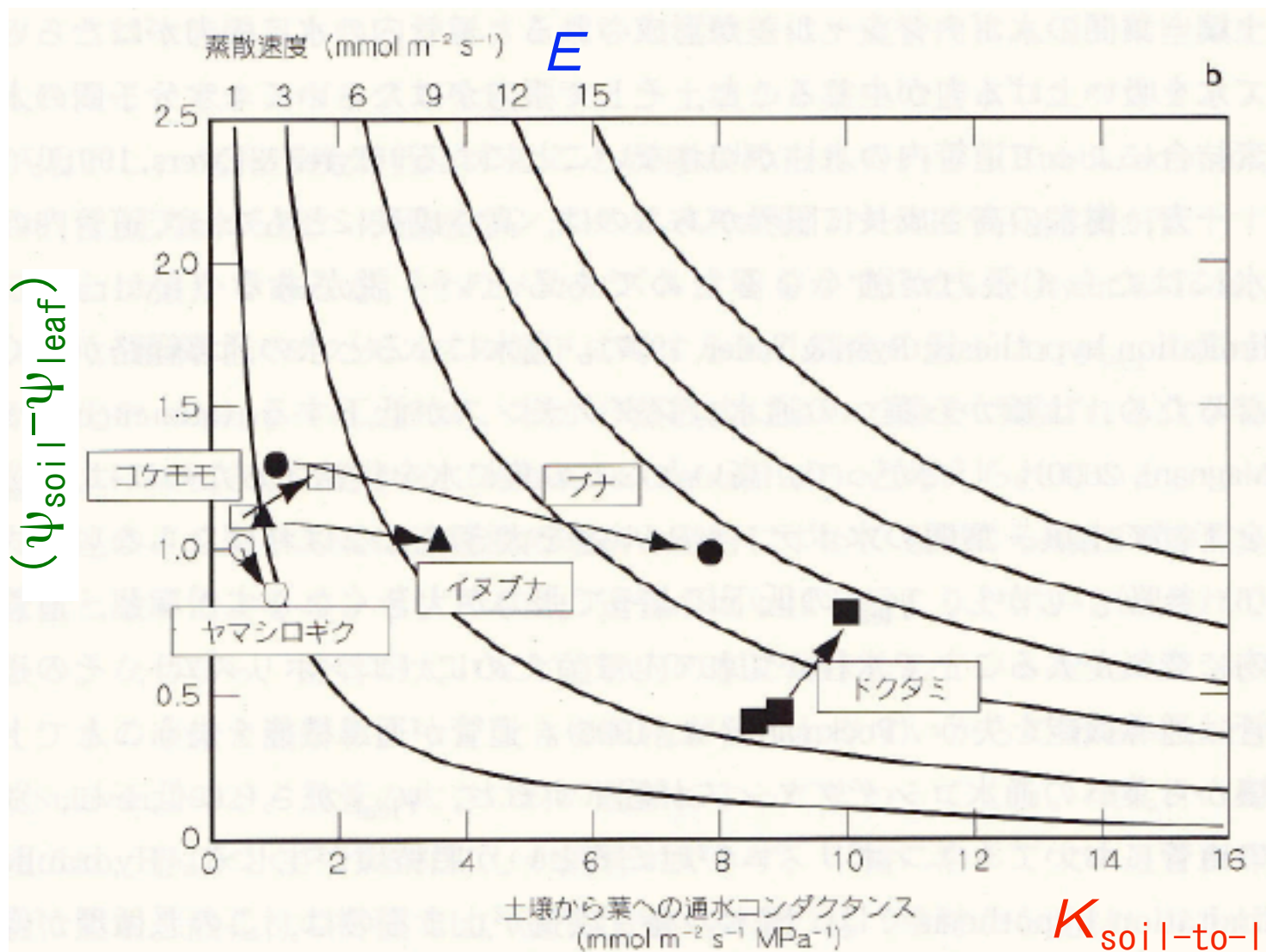


図4-23

石田・谷（2003）「光と水と植物のかたち」文一総合出版 III-5 図6 より

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

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

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

生理特性 ←————— 水バランス —————→ 形態特性

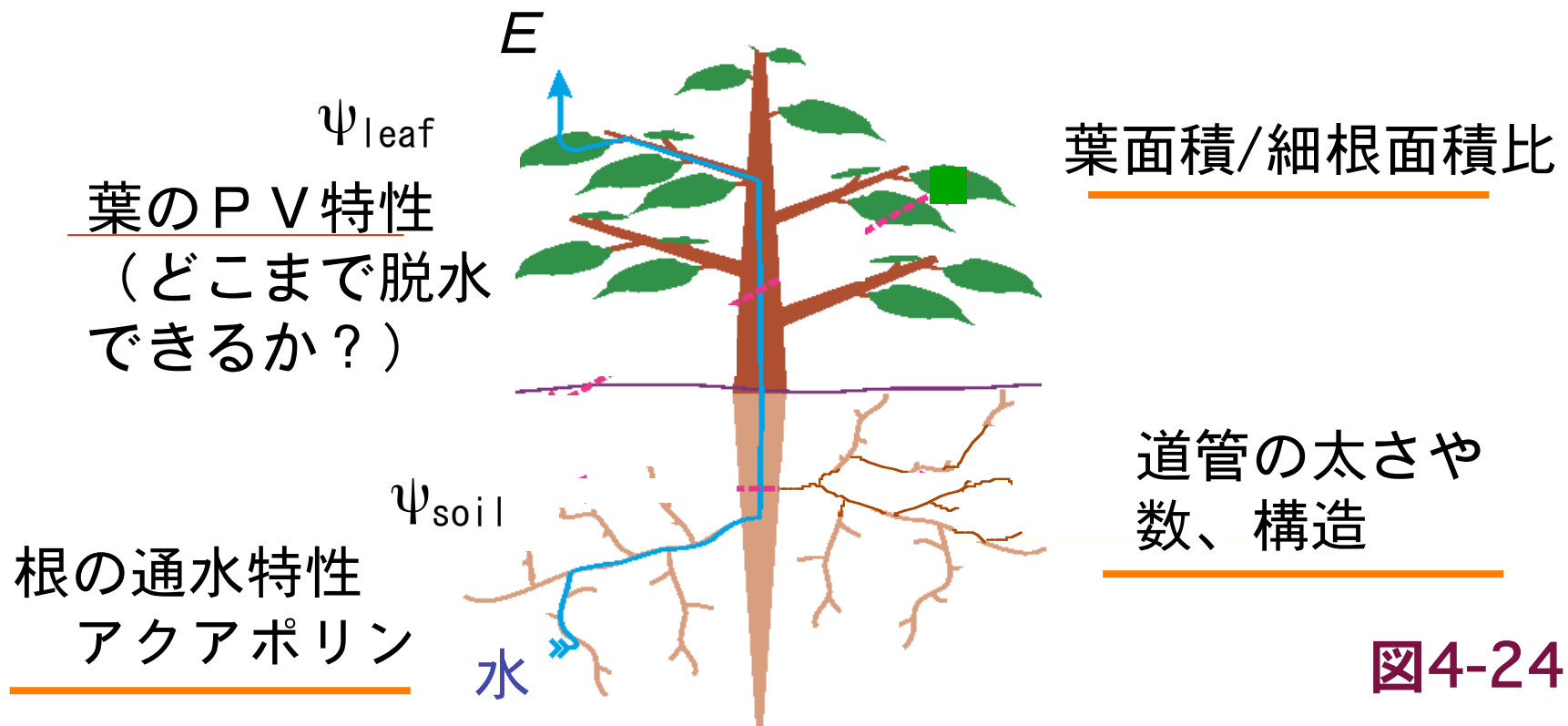


図4-24

「植物の水利用特性」

- 1) 植物のジレンマ：光合成を行うために気孔を開くと  
水が抜けてしまう（水利用効率： $A/E$ ）
- 2) 水ポテンシャルの差と水の分子の凝集力で植物は吸水  
水は圧力差でマスフローとして上がっていく
- 3) 水ポテンシャルの測定  
プレッシャーチェンバー法：Scholander *et al.* (1965)
- 4) 葉の P V 特性馴化：圧ポテンシャルの維持する
- 5) 個体の水の流れ：  
S P A C モデルと土壌から葉への通水コンダクタンス