

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

「生態系の物資循環とエネルギーの流れ」

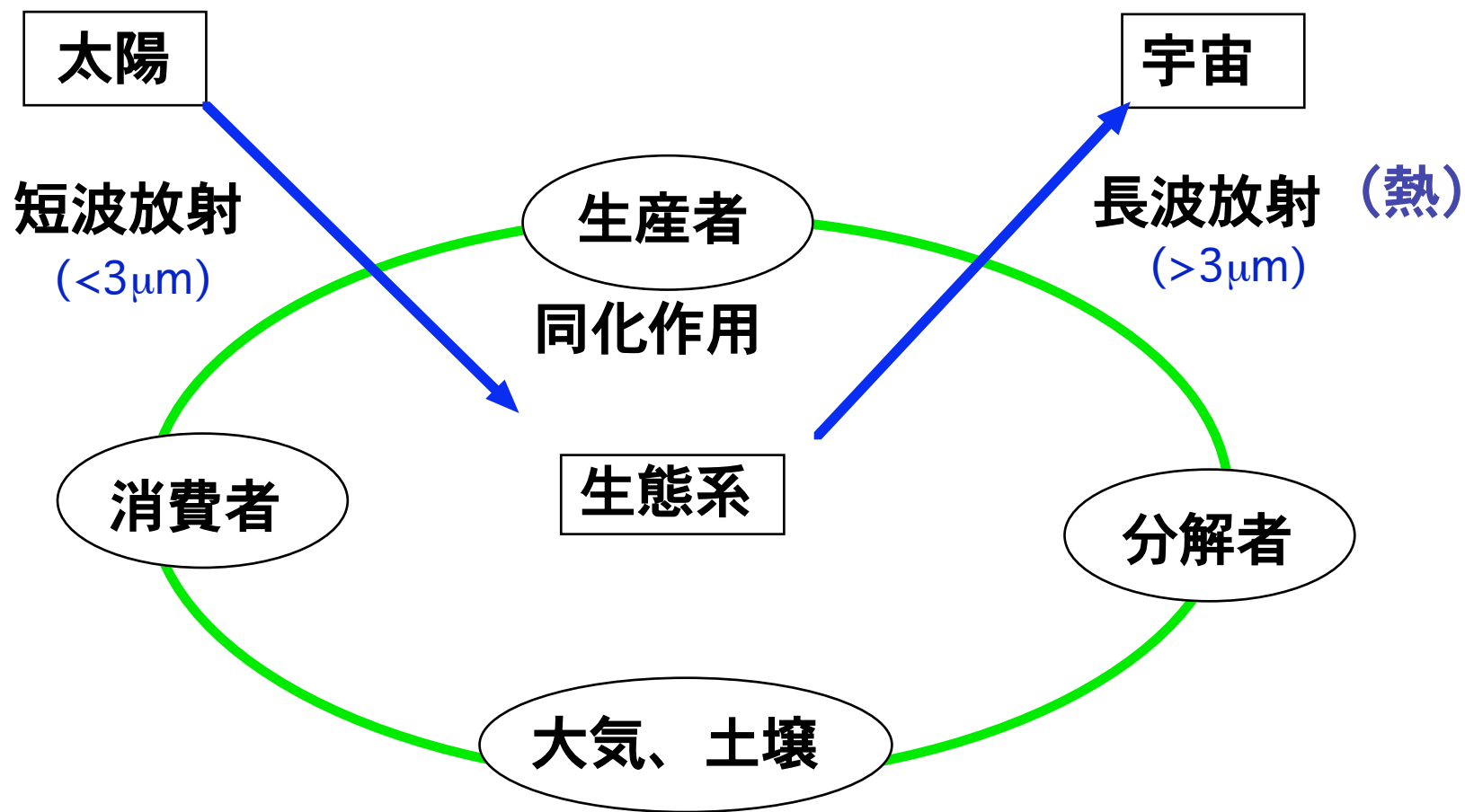
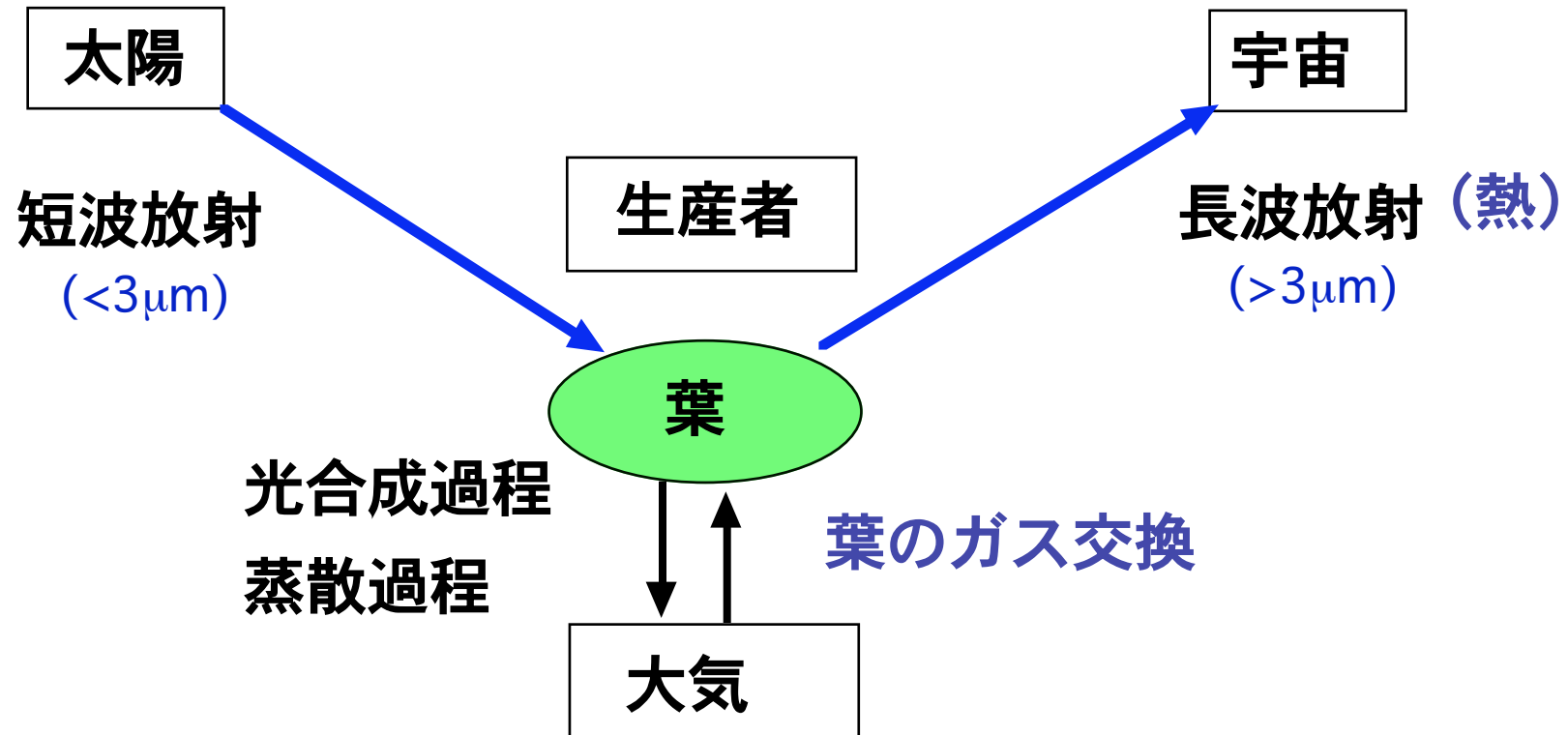


図3-1

質量保存の法則
エネルギー保存の法則

「葉のガス交換とエネルギーの流れ」



物質の動きやエネルギーの動きを表す物理式
→ 葉以外の系でも同じ式が適応できる

図3-2

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)

- 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。(短距離輸送)

「分子の拡散過程」

フィックの拡散第一法則 (Fick's First Law)

$$J_i = D_i \frac{\partial c_i}{\partial x}$$

J_i : フラックス (Flux or Flux density)

単位面積当たり、単位時間当たりの、物質 i の移動量
($\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$)

c_i : 物質 i の濃度 (単位体積当たりの物質 i の量, mol m^{-3})

→ 濃度差 (∂c_i) = 物が移動する力 (driving force)

x : 移動距離 (m)

D_i : 物質 i の拡散係数 (diffusion coefficient)
($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

「あるガス体の拡散係数 D の、温度と気圧依存性」

$$J = D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Fick's First Law})$$

$$D = D_0 (T/T_0)^n (P_0/P)$$

T_0 は 20°C (293.15 K)、

P_0 は 101.3 kPa (1013 mbar)、

n 値はガスの種類に依存した定数

→ ガス種を変えれば D は変化、
温度上昇で D は増加、気圧の低下で D は増加

例) 高山の空気では、ガスの体積当たりのモル数は低下するが、拡散はし易くなる。

「いくつかの物質種や熱の拡散係数：D」

表3-1

20°Cの時

		In air (mm ² s ⁻¹)	In water (mm ² s ⁻¹)
Water	— D_w	24.2	0.0024 ^a
Carbon dioxide	— D_c	14.7	0.0018
Oxygen	— D_o	20.2	0.0020
Heat	— D_H (= thermal diffusivity)	21.5	0.144
Momentum	— D_M (= kinematic viscosity, ν)	15.1	1.01
Sucrose (0.38% solution)		—	0.52×10^{-3}
Glycine (dilute)		—	1.06×10^{-3}
CaCl ₂ (10 mol m ⁻³)		—	1.12×10^{-3}
NaCl (10 mol m ⁻³)		—	1.55×10^{-3}
KCl (10 mol m ⁻³)		—	1.92×10^{-3}

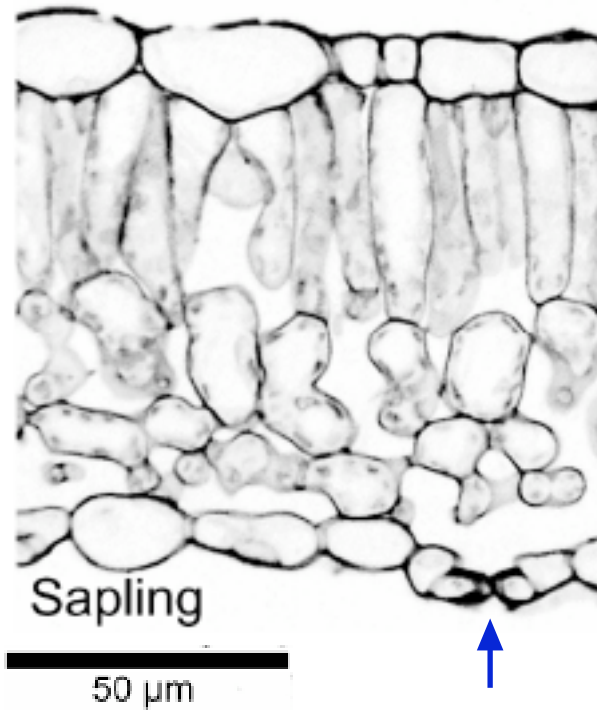
^a Coefficient of self-diffusion.

→ 気相と比べ、液相では約10,000倍移動しづらくなる

「葉の内部構造と葉のガス交換」

葉の断面写真

Macaranga gigantea



← 表皮 (向軸側)
← 柵状組織
← 海綿状組織
← 表皮 (背軸側)

↑ 気孔

図3-3

Ishida et al.
(2005)より

葉の断面の模式図

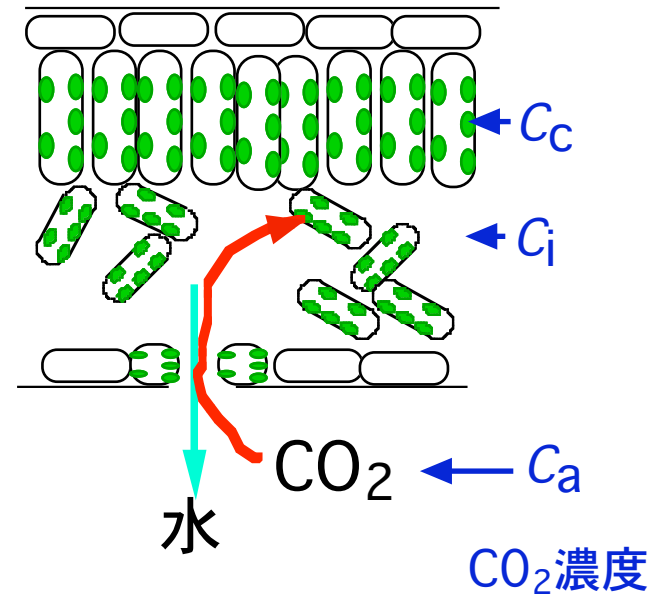


図3-4

- 1) ルビスコがCO₂を固定していくので葉内のCO₂は低下して、大気とのCO₂濃度差
- 2) 葉緑体は細胞壁のそばに!

「熱の流れの過程」

フーリエ則 (Fourier's Law)

$$C = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{フーリエの熱伝導式}$$

C : 熱フラックス (J s⁻¹ m⁻² = W m⁻²)

単位面積当たり、単位時間当たりの、熱の移動量

T : 温度 (K)

x : 移動距離 (m)

k : 熱伝導率:thermal conductivity
(J s⁻¹ m⁻¹ K⁻¹ = W m⁻¹ K⁻¹)

「フラックス (Flux or Flux density) を表す一般式」

フラックス：単位面積当たりの単位時間当たりの、物質の移動量

表3-2

$$\text{Flux density} = \text{Driving force} \times \text{Conductance}$$

Fick's Law	J_i	=	ΔC_i	x	D_i / x
	(kg m ⁻² s ⁻¹)		(kg m ⁻³)		(m s ⁻¹)
	(mol m ⁻² s ⁻¹)		(mol m ⁻³)		(m s ⁻¹)
	(mol m ⁻² s ⁻¹)		(dimensionless)		(mol m ⁻² s ⁻¹)

Fourier's Law	C	=	ΔT	x	k / x
---------------	-----	---	------------	---	---------

Ohm's Law	電流	=	電圧	x	1 / 抵抗
-----------	----	---	----	---	--------

→ 一般式は基本的に同じ形、左辺右辺の単位が合っていれば良い

「葉のガス交換モデル：光合成速度 P 」

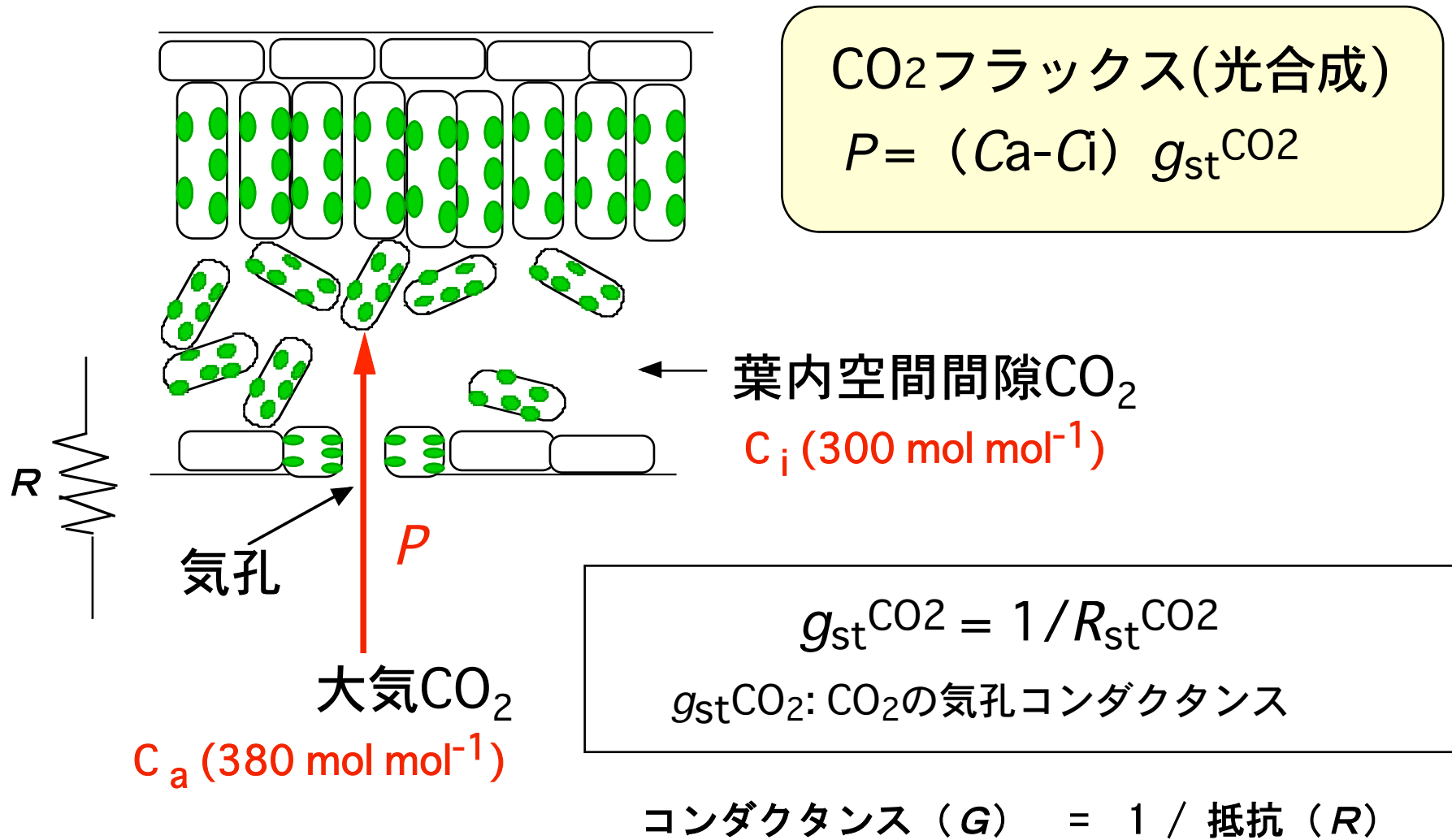


図3-5

「葉のガス交換モデル：蒸散速度 E 」

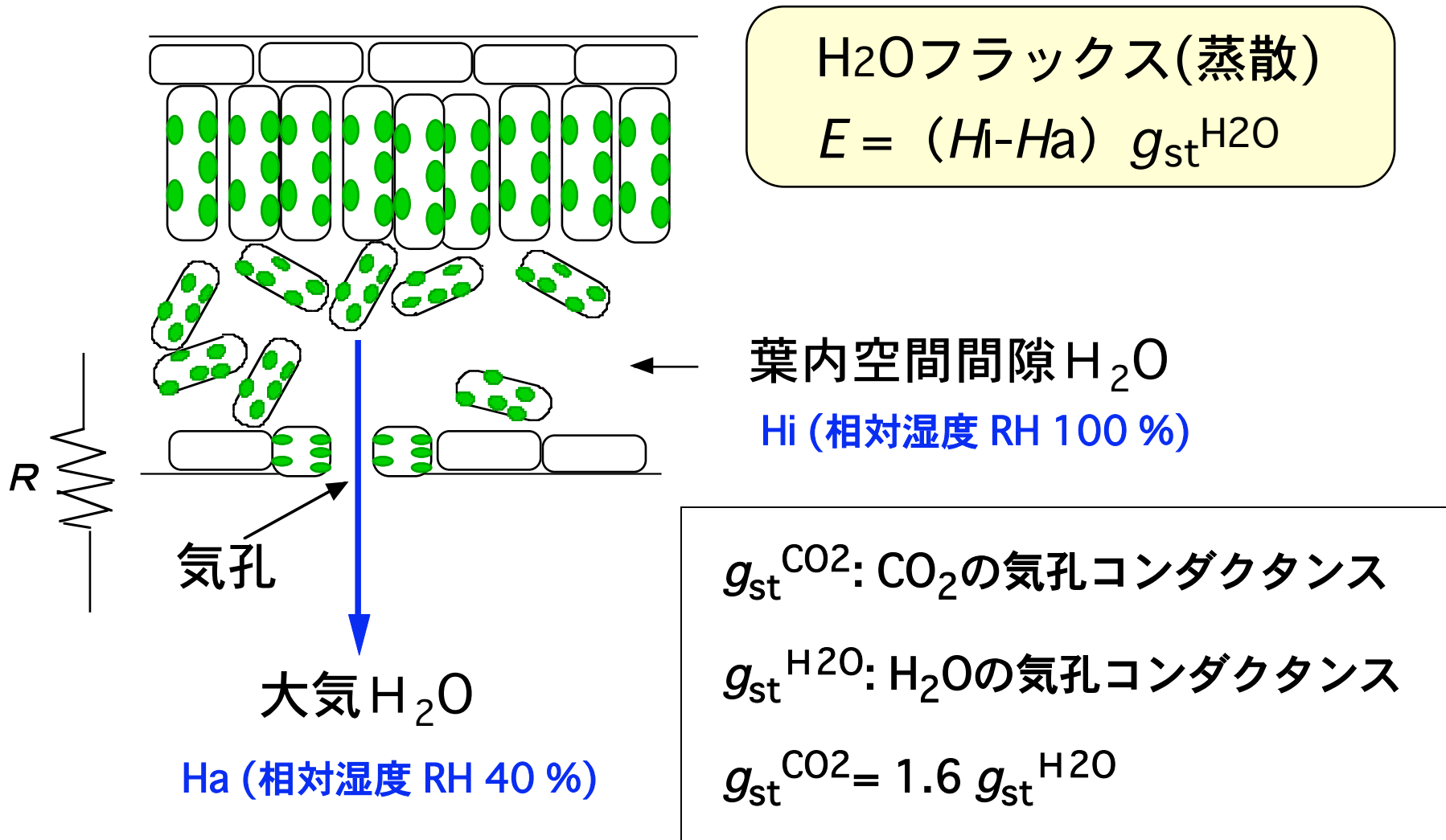
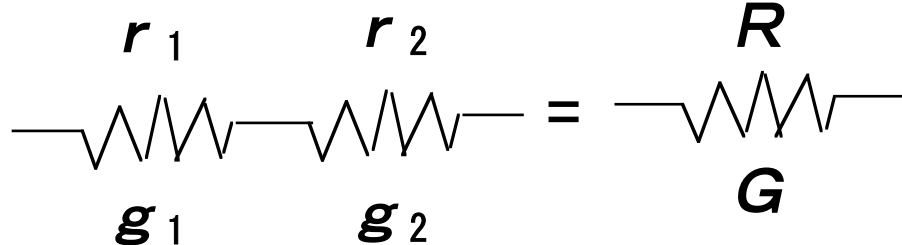


図3-6

コンダクタンス (G) = 1 / 抵抗 (R)

「電気抵抗のネットワーク」

直列

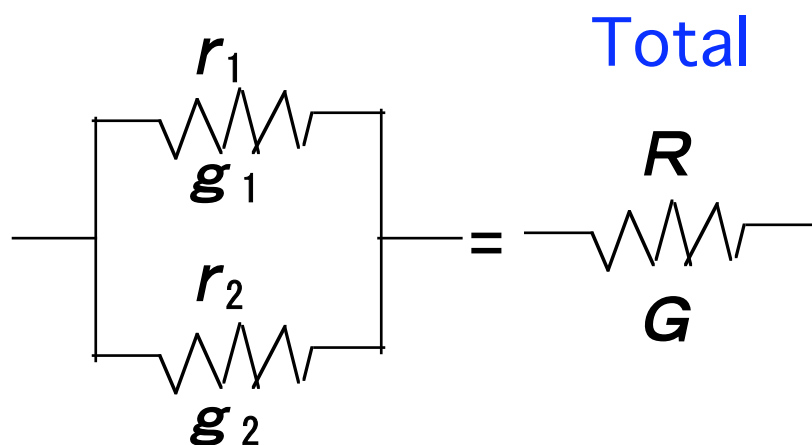


$$R = r_1 + r_2$$

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2}$$

$$G = g_1 g_2 / (g_1 + g_2)$$

並列



$$G = g_1 + g_2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

$$R = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$$

図3-7

コンダクタンス (G) = 1 / 抵抗 (R)

「ある系の中でフラックス J が定常状態の時」

Constant Flux (J)

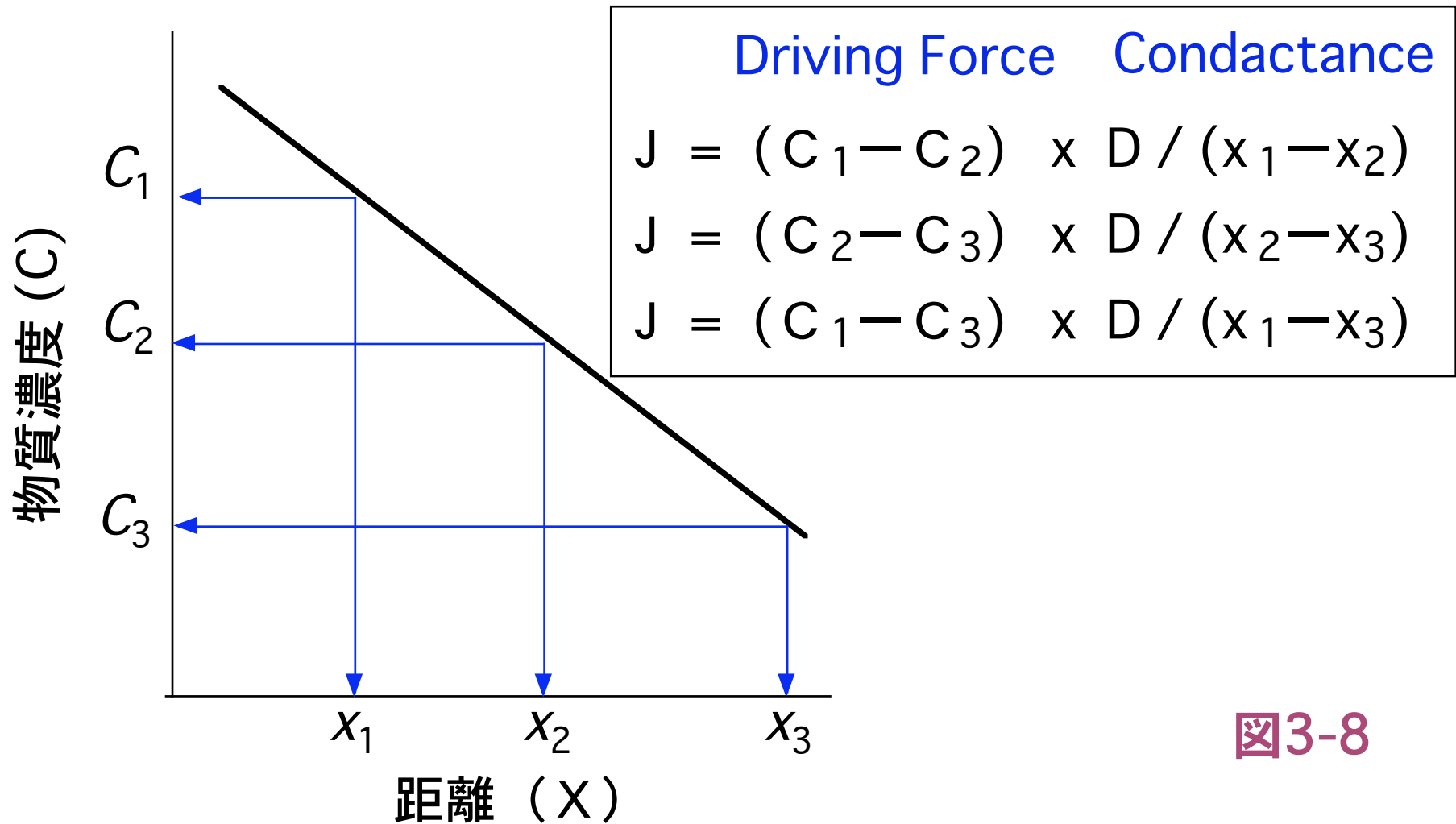


図3-8

「葉の境界層抵抗とクチクラ抵抗」

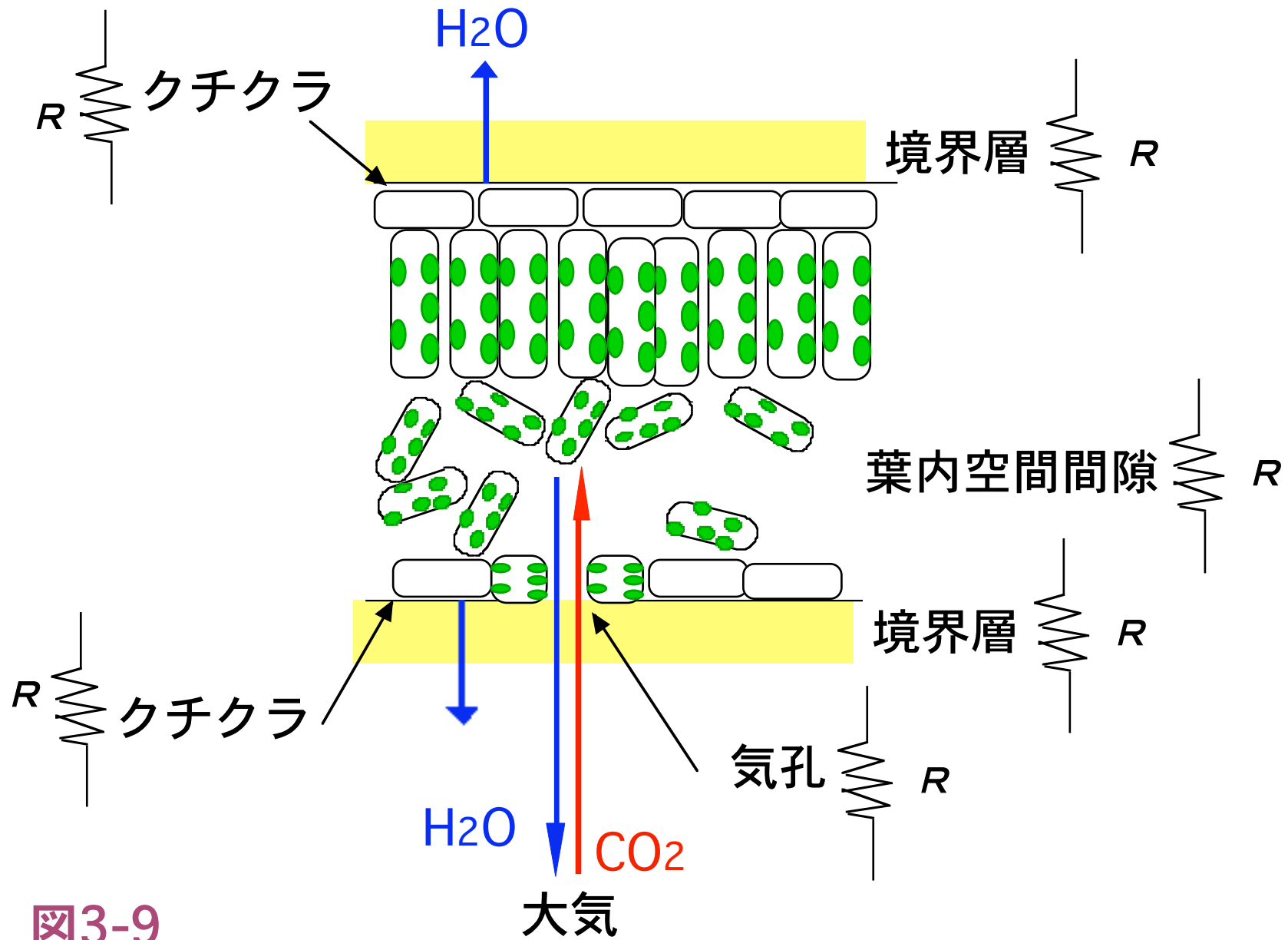
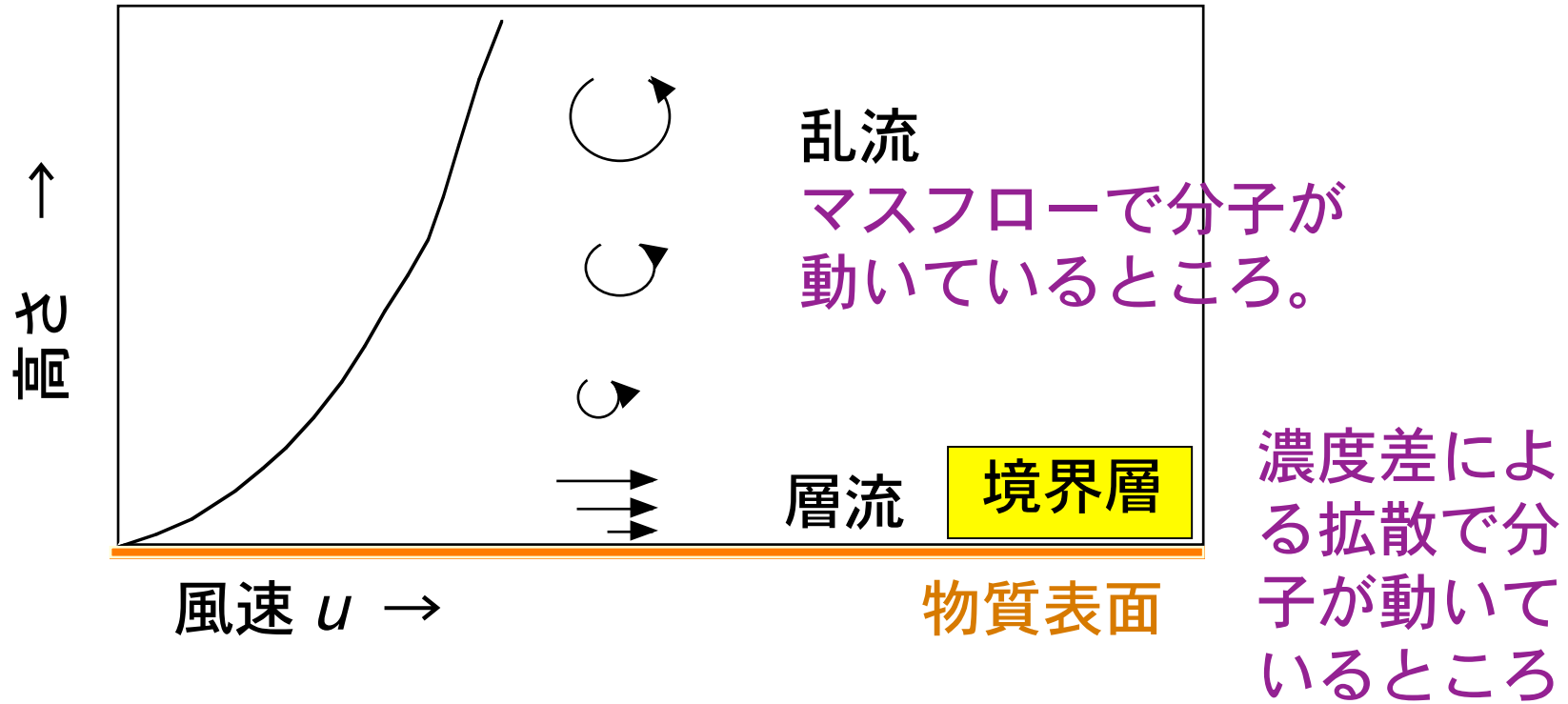


図3-9

「風と境界層」



風速が弱いほど、面が広いほど、また面が粗面なほど、境界層は厚くなる。

図3-10

マスフローで分子が動いているところ。

Jones 「Plants and Microclimate」
(1992) Cambridge Fig. 3.3 より改変

「境界層の熱輸送コンダクタンス」

$$g_H = 1 / r_H = 6.62 (u/d)^{0.5} \quad \text{Monteith (1981)}$$

g_H : 熱輸送のコンダクタンス (mm s^{-1})

u : 風速 (m s^{-1})

d : 代表長 (m)
Charasteric Dimention

風速が弱いほど、大きな葉ほど、
境界層は厚くなる。

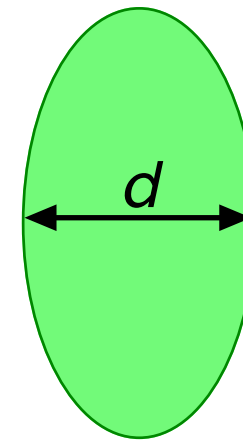


図3-11

「コンダクタンスの変換率」

表3-4

g_H に対する比

	g_H (熱)	$g_W(H_2O)$	$g_C(CO_2)$
静止空気	1.0	1.12	0.68
層流	1.0	1.08	0.76
乱流	1.0	1.0	1.0

Jones 「Plants and Microclimate」 (1992) Cambridge Table. 3.2 より作成

↑
マスフローで動くので係数は一定

「葉の光合成過程のガス交換モデル」

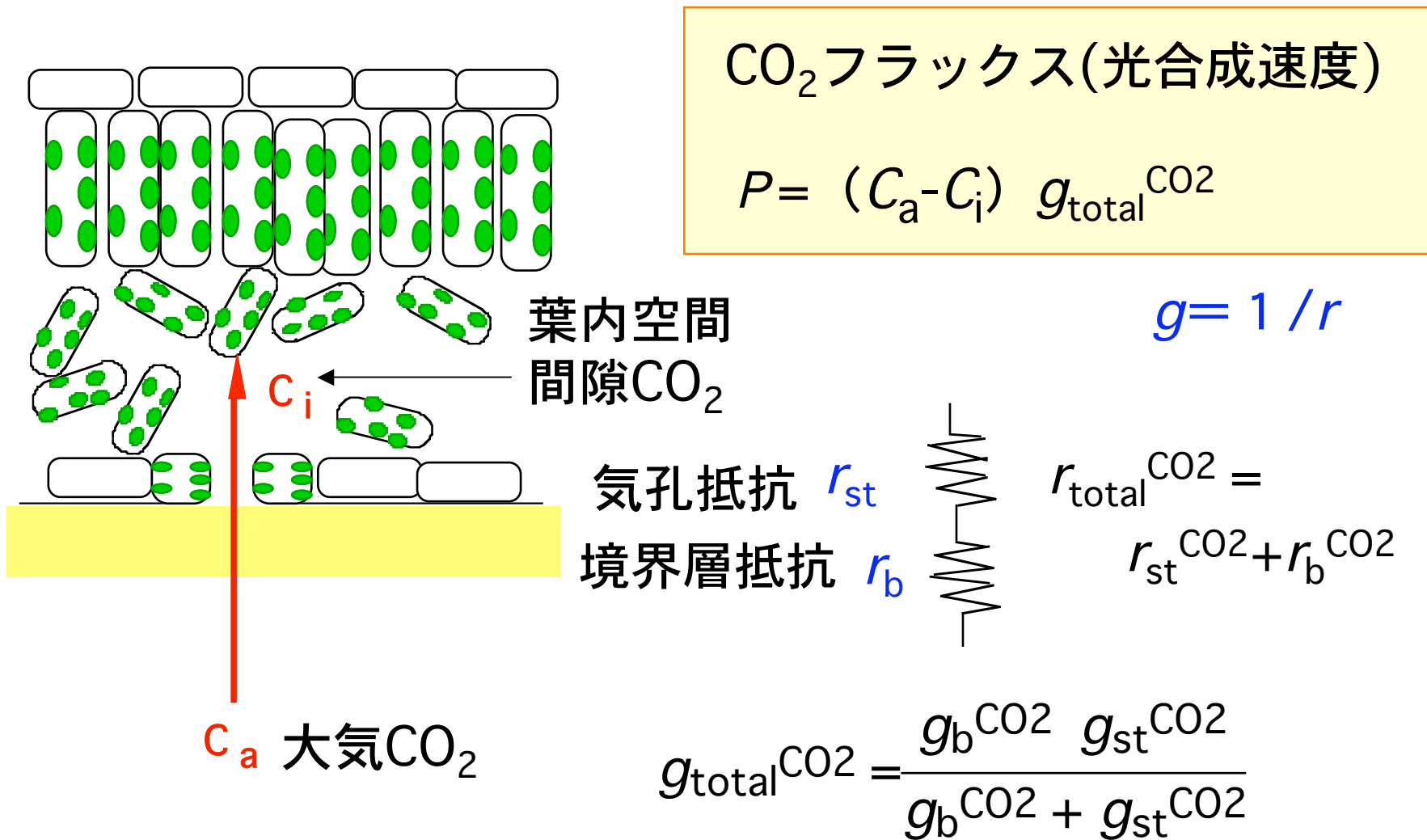


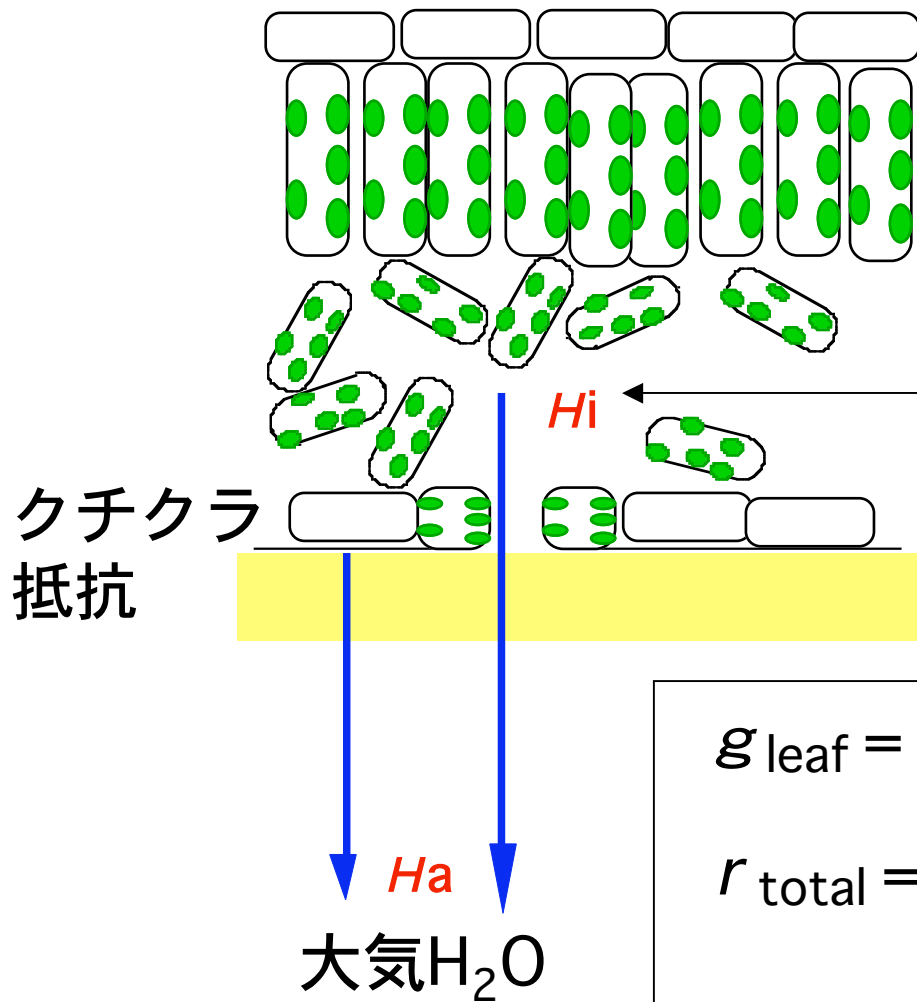
図3-12

g : コンダクタンス、 r : 抵抗

「葉の蒸散過程のガス交換モデル(片面)」

H₂Oフラックス(蒸散速度)

$$E = (H_i - H_a) g_{total}^{H_2O}$$



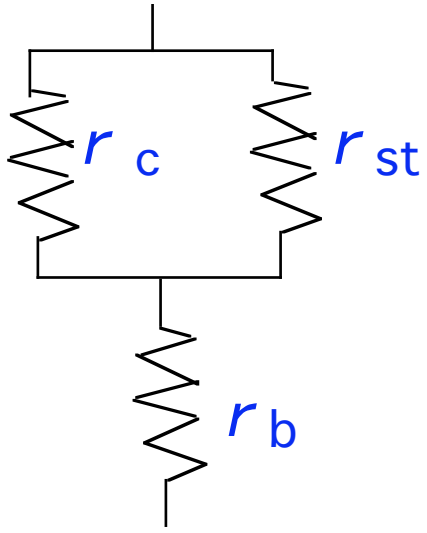
葉内空間間隙H₂O
 (相対湿度RH 100%)

気孔抵抗 r_{st}
 境界層抵抗 r_b

$$g_{leaf} = g_{st} + g_c$$

$$r_{total} = r_{leaf} + r_b$$

$$g_{total} = \frac{g_{leaf} g_b}{g_{leaf} + g_b}$$



$g = 1 / r$

図3-13

「葉と大気の水蒸気圧差 : Leaf-to-air VPD」

$$\text{蒸散速度} : E = (H_i - H_a) g_{\text{total}}^{\text{H}_2\text{O}}$$

(mol m⁻² s⁻¹) (Pa/Pa) (mol m⁻² s⁻¹)

$H_i - H_a$: Leaf-to-air Vapor Pressure Difference
葉と大気の水蒸気圧差

大気が葉から水を引く力、すなわち蒸散を引き起こす力 (Driving Force)

H_i : 葉内の空間間隙は RH 100% として、葉温から計算

H_a : 大気の気温と相対湿度から計算

「Leaf-to-air VPDの計算」

例)

気温26°C、RH50%

葉温36°C

大気圧101.3kPa

Leaf-to-air VPD

$$= \frac{5.942 - (3.361 \times 0.5)}{101.3}$$

$$= 0.042 \text{ (kPa kPa}^{-1}\text{)}$$

相対湿度が低く、
葉温が高いと、
Leaf-to-air VPD
は上昇

RH 100%の時の水蒸気圧

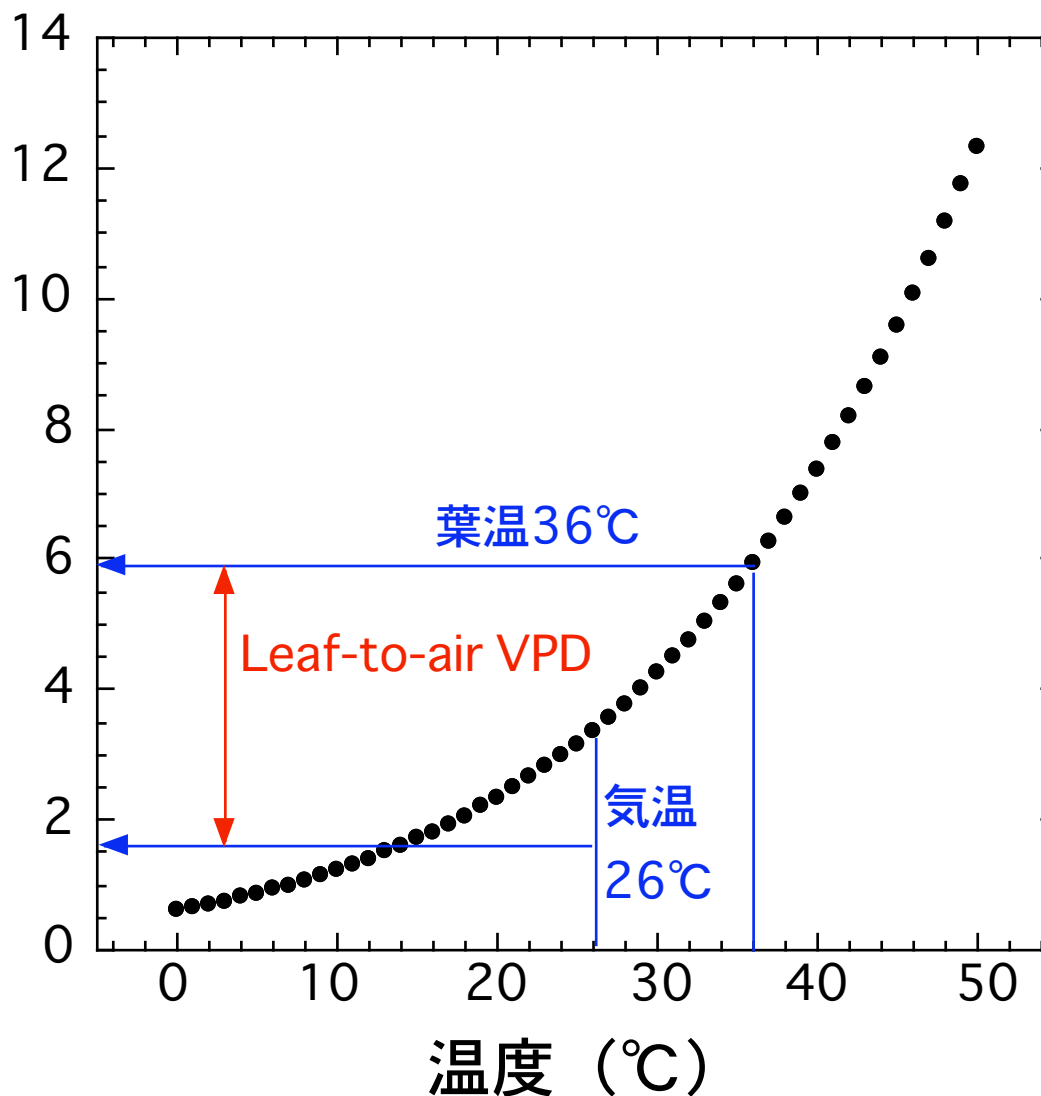


図3-14

Pearcy et al. 「Plant Physiological Ecology」 (1989)
Chapman and Hall, Table A7より作成

「実際の光合成や蒸散速度の測定」

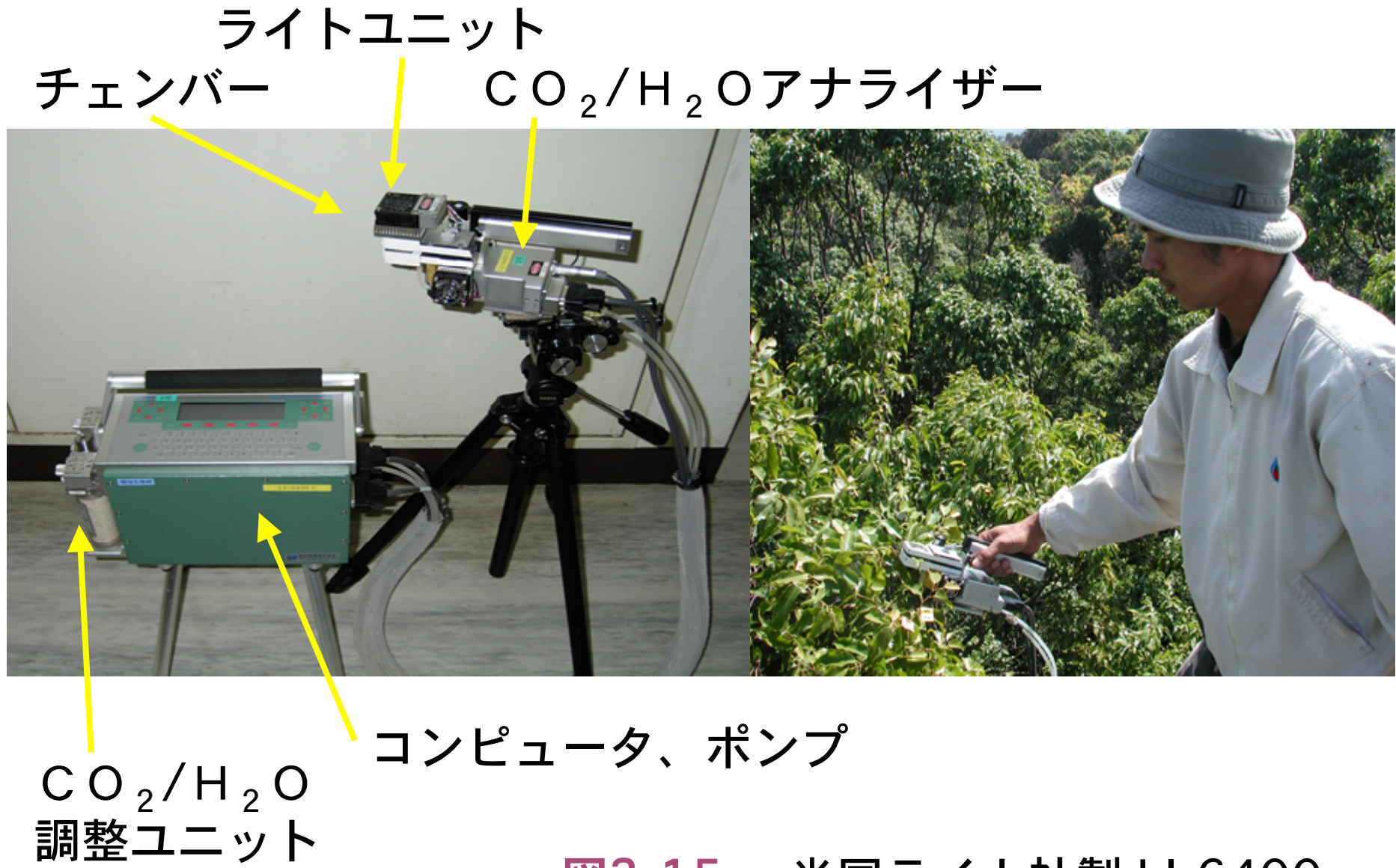
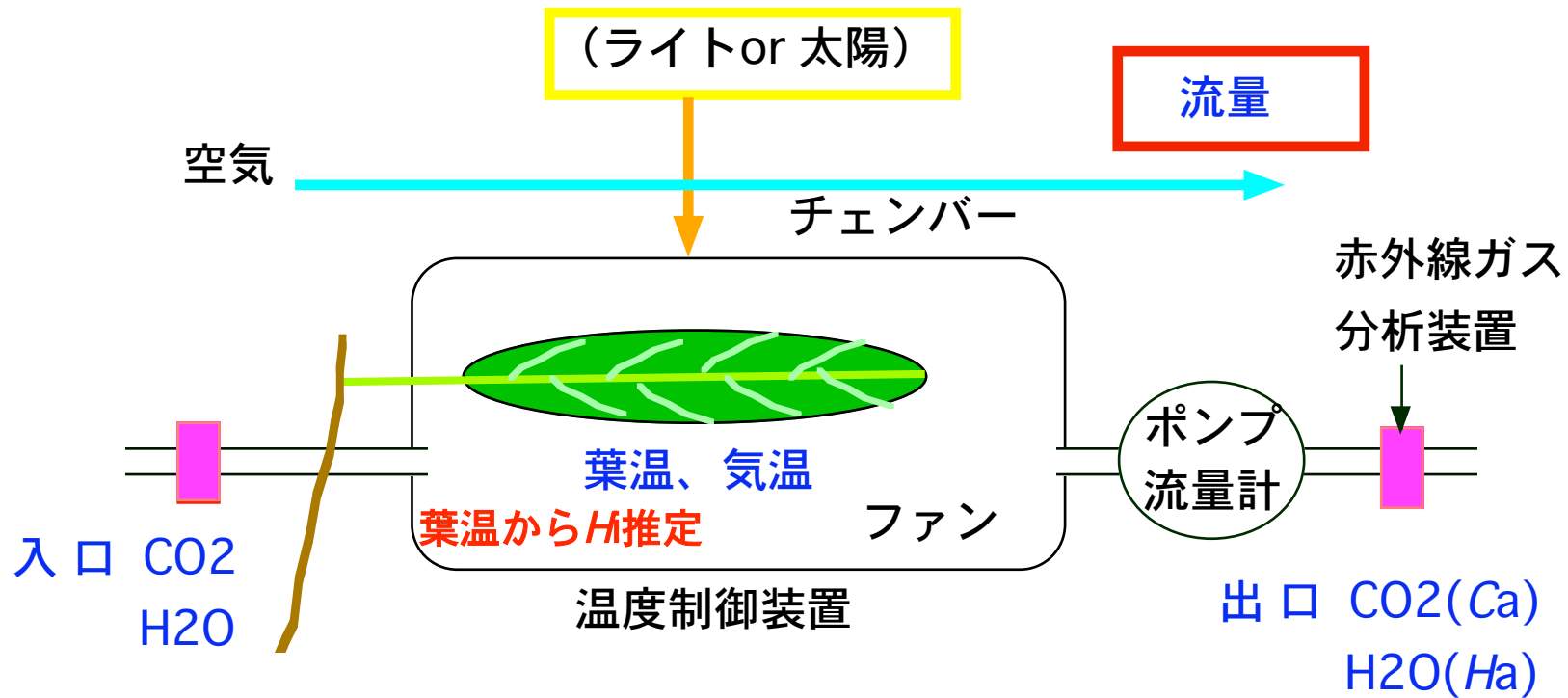


図3-15 米国ライカ社製 LI-6400

「光合成や蒸散速度システム 1) 開放型」



蒸散速度 : $E = (H_a - H_i) g_{st}^{H_2O}$

$$g_{st}^{CO_2} = \frac{g_{st}^{H_2O}}{1.6}$$

光合成速度 : $P = (C_a - C_i) g_{st}^{CO_2}$

図3-16

赤字のパラメータ値を計算から求める

「大気分子による光の吸収の波長依存特性」

Visible light
(太陽の窓!) PAR = 400-700 nm

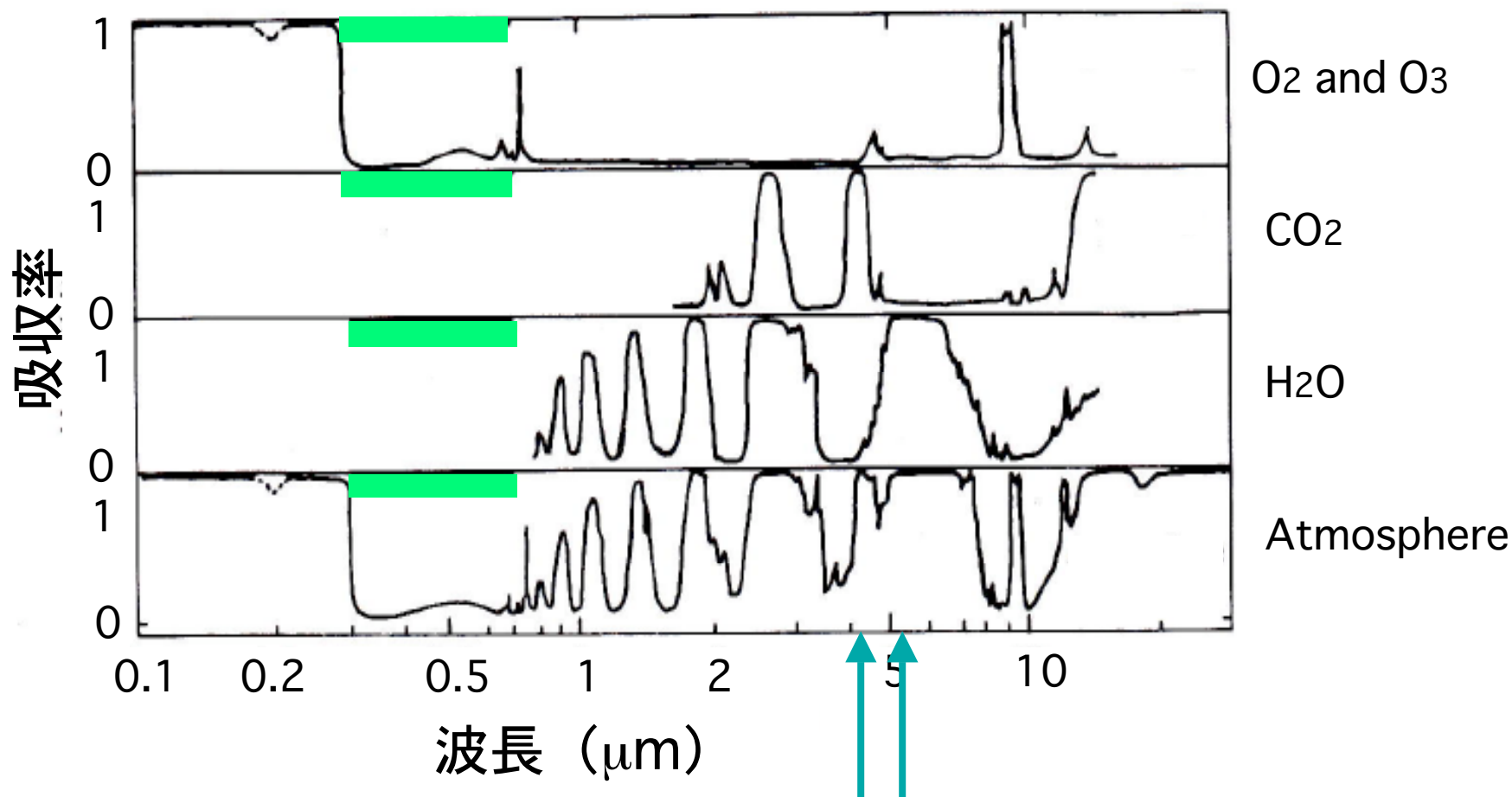


図3-17

赤外線ガス分析計：赤外線をあてて、吸収率から大気中の水やCO₂濃度を測定

「光合成や蒸散速度システム 2) 閉鎖型」

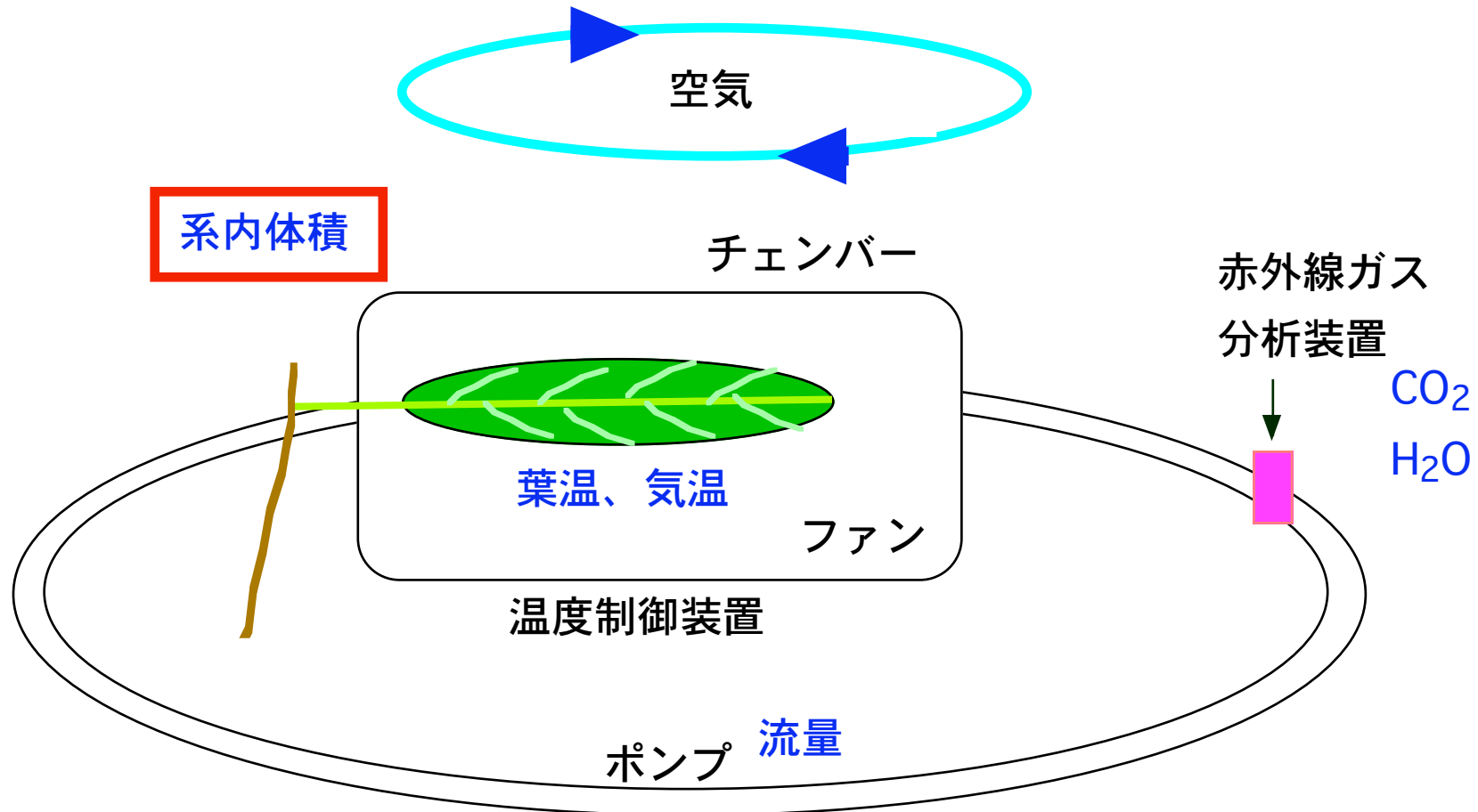


図3-18

呼吸速度など、大気中の濃度変化の低い場合の測定に有利

「葉のガス交換とエネルギーの流れ」

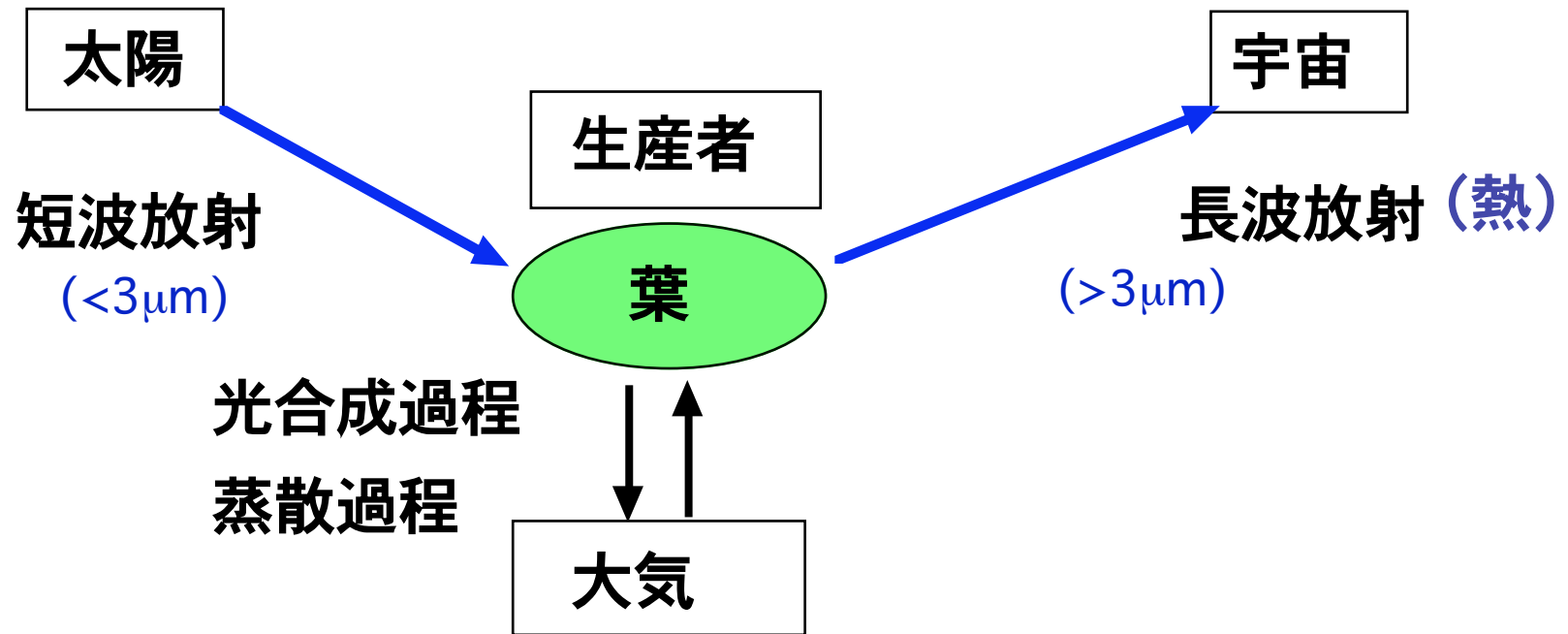


図3-19

物質の動きを表す物理式：

Fick's Law :

$$\text{Flux} = \text{Driving force} \times \text{Conductance}$$

電気の式：

コンダクタンスと抵抗の関係（並列か直列か）

「植物体のエネルギーバランス: エネルギー保存の法則」

湿系の平衡状態の時 (乾系の時は λE がなくなる)

$$S + L = C + \lambda E + G$$

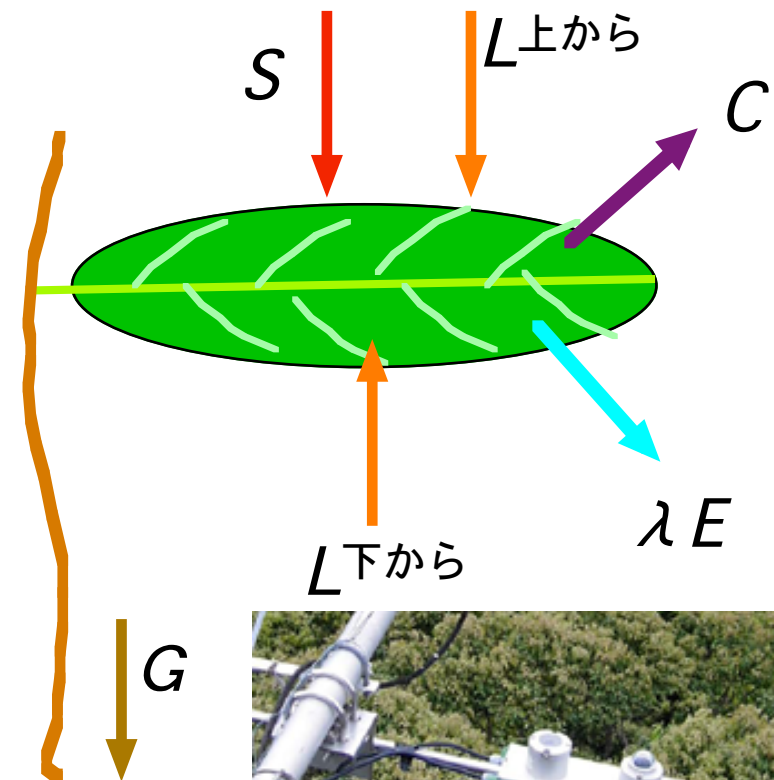
S : 短波放射フラックス

L : net長波放射フラックス

C : 大気への顕熱フラックス
(Sensible heat)

λE : 蒸散 (E) による潜熱
フラックス (Latent heat)

G : 地面への顕熱フラックス (熱伝導)



上向きと下向きに
センサーを2つ設置

図3-20

「顕熱(Sensible heat)と潜熱(Latent heat)」

$$S + L = C + \lambda E + G$$

顕熱 $C = c_p g_H (T_p - T_a)$

c_p : 空気比熱

g_H : 熱の拡散コンダクタンス

T_p : 植物体温度

T_a : 気温

潜熱 $\lambda E = \lambda g_{leaf} (\text{leaf-to-air VPD})$

λ : 2.454 MJ kg⁻¹ (20°C)

乾系の時は (潜熱) はない。

25°Cの水1molが気化するのに44kJ mol⁻¹必要

(液体の最高値)

地上のPARは平均約215kJ mol⁻¹ なので ($E\lambda = N_0 h c / \lambda$)

PARエネルギーの約20% (44/215) が潜熱に相当。

「生態系の物質のフラックスやエネルギーの流れ」

個葉ばかりでなく、植被（畑や森林）でも適用可能

- ・ ボーエン比法
- ・ 渦乱流法

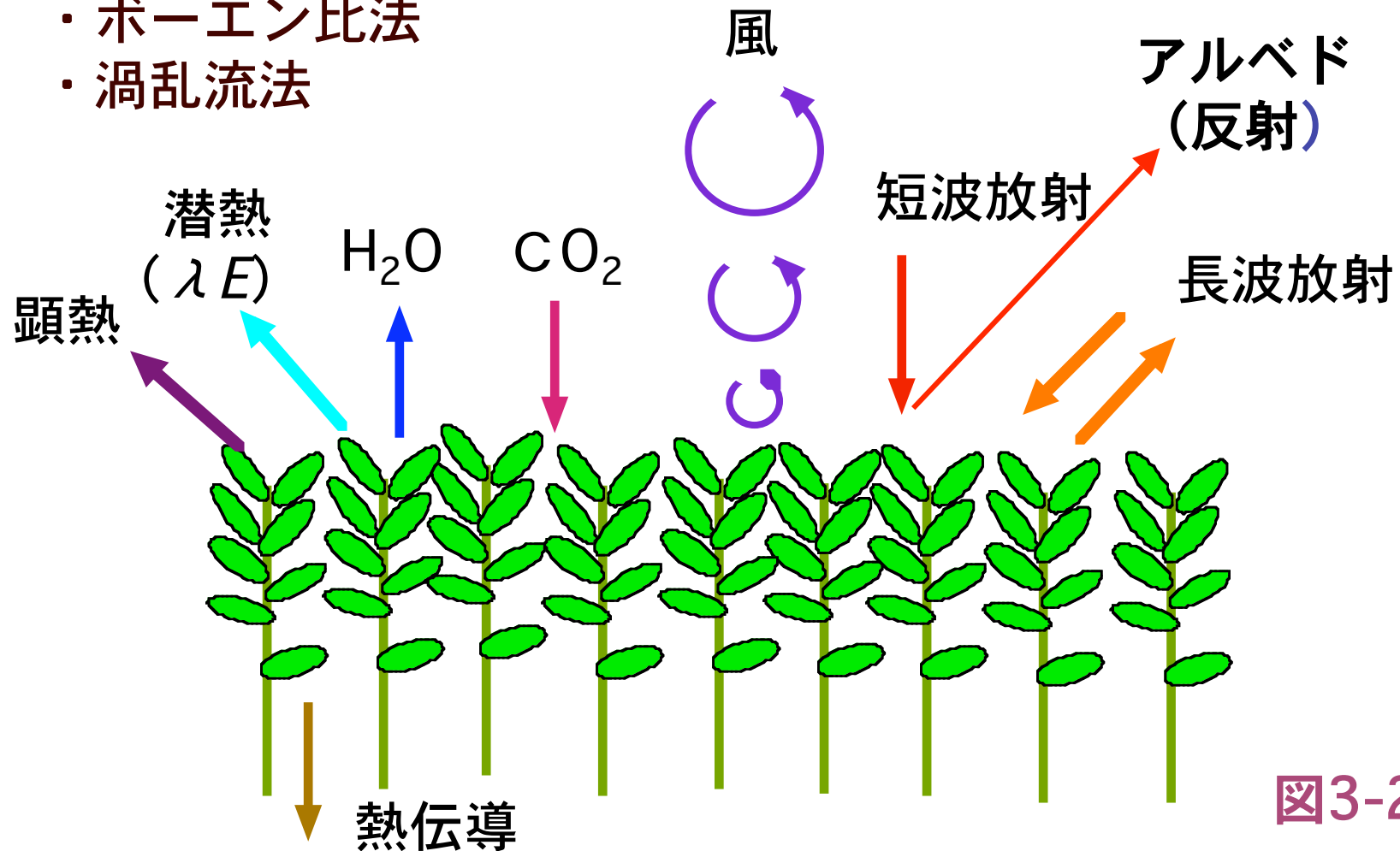


図3-21

生態学 I ー植物の生理生態ー

第3回 葉のガス交換とエネルギーの流れ

物質の輸送の式

$$\text{Flux} = \text{Driving Force} \times \text{Conductance}$$

電気式：抵抗が並列か直列

境界層（面と風）

光合成・蒸散の物理式（フラックス）

エネルギー輸送の式（潜熱・顕熱）