

講義の内容 (Contents)

1. ストレス環境の生起 (Occurrence of stress)
2. 植物の水分生理 (Plant water relations)
3. 水分動態 (Water dynamics)
4. 活性酸素 (Reactive oxygen)
5. 乾燥 (Drought)
- 6. 高温・低温 (Heat, Chilling)**
7. 塩類集積・栄養ストレス (Salinity, nutrition)
8. 湛水 (Waterlogging)
9. 環境ストレスの相互作用 (Interaction)

6. 高温・低温

1. 温度ストレスの発生
(Occurrence of temperature stress)
2. 高温に対する反応
(Plant responses to high temperature stress)
3. 耐暑性の機作 (Heat tolerance mechanisms)
4. 高温ストレス対策 (Measures)
5. 低温に対する反応
(Plant responses to low temperature stress)
6. 耐寒性の機作
(Mechanisms of low temperature tolerance)
7. 低温ストレス対策 (Measures)

1. 温度ストレスの発生

高温ストレス及び低温（冷温・凍温）ストレス発生に関する要因 (Factors related to high temperature or heat stress and chilling or freezing stress occurrence)

- a) 気候特性 (Climatic traits)
- b) 土壌特性 (Soil traits) ・ 地形 (Topography)
- c) 植物・作物特性 (Vegetation or crop characteristics)

高温害発生の条件 (Conditions for heat damages occurrence)

a) 気候特性(Climatic traits)

- 1) 高温・乾燥気候 (Hot & dry climate)
- 2) モンスーン・サバンナ気候の乾季
(The dry season in monsoon & savanna climate)
- 3) 温帯の酷暑期 (Hot period in temperate zone)

b) 土壌特性・地形 (Soil & topography)

- 1) 砂質土壌 (Sandy soils)
- 2) 植生の有無 (Vegetation)
- 3) 丘陵・平原 (Hills or plains)
- 4) フェーン現象 (Foehn phenomenon)

高温害発生の条件 (Conditions for heat damages occurrence)

c) 植物・作物特性 (Vegetation or crop character)

- 1) 植生の種類 (Type of vegetation)
- 2) 作物の種類 (Crop species)
- 3) 耐暑性 (Heat tolerance)
- 4) 生育ステージ (Growth stage)

低温害発生の条件 (Conditions for chilling damages occurrence)

a) 気候特性 (Climatic traits)

- 1) 冷涼な気候 (Cool or cold climate)
- 2) 不時の低温 (Unexpected low temperature)
晩霜・冷夏 (Late frost, Cool summer)

低温害発生の条件 (Conditions for chilling damages occurrence)

b) 土壌特性・地形 (Soil & topography)

- 1) 土壌水分 (Soil moisture)
- 2) 標高 (Altitude or height)
- 3) 起伏 (Undulation)
- 4) 海岸からの距離 (Distance from seashore)

c) 植物・作物特性 (Vegetation or crop character)

- 1) 耐性 (Chilling or freezing tolerance)
- 2) 生育ステージ (Growth stage)
- 3) 植生 (Vegetation)

6. 高温・低温

1. 温度ストレスの発生
(Occurrence of temperature stress)

2. 高温に対する反応
(Plant responses to high temperature stress)

3. 耐暑性の機作 (Heat tolerance mechanisms)

4. 高温ストレス対策 (Measures)

5. 低温に対する反応
(Plant responses to low temperature stress)

6. 耐寒性の機作
(Mechanisms of low temperature tolerance)

7. 低温ストレス対策 (Measures)

2. 高温に対する反応

植物の基礎代謝 (Basic metabolism)

✧ 一定の温度範囲では、気温の上昇により促進される

(Accelerated within a certain temperature range)

✧ 上限を超えると阻害

(Retarded over the optimum range)

→ さまざまな障害 (Various injuries)

影響を受ける生理作用

Affected Physiological Phenomena

タンパク合成 Protein Synthesis (+ → -)

タンパク変性 (Protein) Denaturation (+)

種々の酵素反応 Enzyme Responses

(+ → -)

細胞分裂・伸長 Cell Division & Elongation

(+ → -)

ABA生合成 ABA Biosynthesis (+ → -)

)

呼吸 Respiration (+ → -)

光合成 Photosynthesis (+ → -)

気孔開閉 Stomatal aperture (~~+~~ 植物環境ストレス学)

種々の酵素反応

(Various enzyme reactions)

✧ 一定の温度範囲では、気温の上昇により促進される

(Accelerated within a certain temperature range)

✧ 上限を超えると阻害

(Retarded over the optimum range)

← 変性 (Denaturation) や
膜組織劣化 (Membrane
deterioration)

不溶性沈殿

呼吸の温度に対する反応 (Responses of respiration to temperature)

Q10 : 1.5 ~ 2.5

(一定の範囲内で)、10°C上昇で約2倍

Q10 :

10°Cの温度差に対する反応速度の比率、
温度依存性の指標 (Index for temperature
dependence)

高温による呼吸量の増大 (Increase of respiration by heat)

呼吸基質の消耗 (特に高夜温影響大)
(Consumption of substrates for respiration)
見かけの同化率 (光合成速度) 減少
(Reduction of net assimilation rate)

高温による呼吸量の激減 (Drastic reduction)

酵素の変性・失活 (Inactivation)
高温限界以上で激減
エネルギー不足 → 枯死

光合成の温度に対する反応

Responses of photosynthesis to temperature

- ✧ 一定の温度範囲では、気温の上昇により促進される
- ✧ 上限を超えると急激に低下

光化学系 (Photosystems)

- ✧ 一定の範囲内では、促進される
- ✧ 上限を超えると阻害
 - 光化学系 II (Photosystem II) の阻害

光合成の温度に対する反応

Responses of photosynthesis to temperature

- ✧ 一定の温度範囲では、気温の促進される
- ✧ 上限を超えると急激に低下

チラコイド膜
組織劣化
電子伝達系阻
害

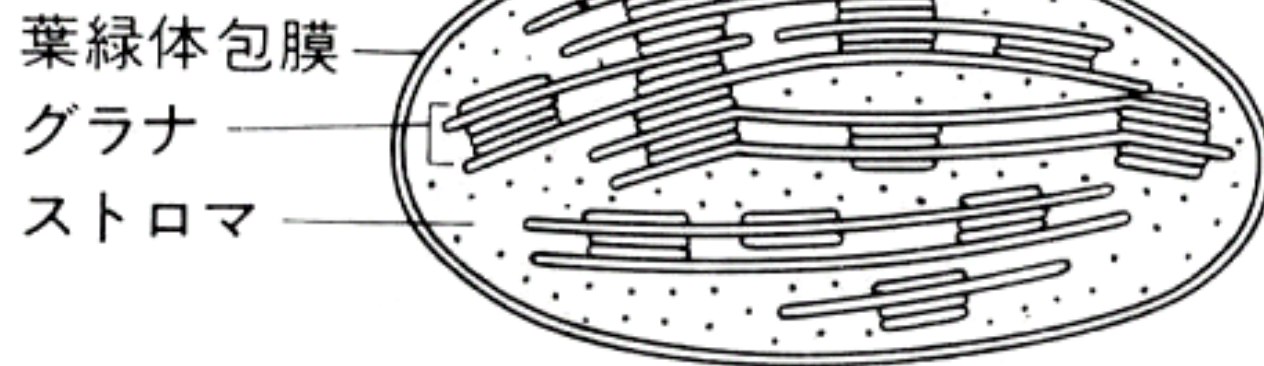
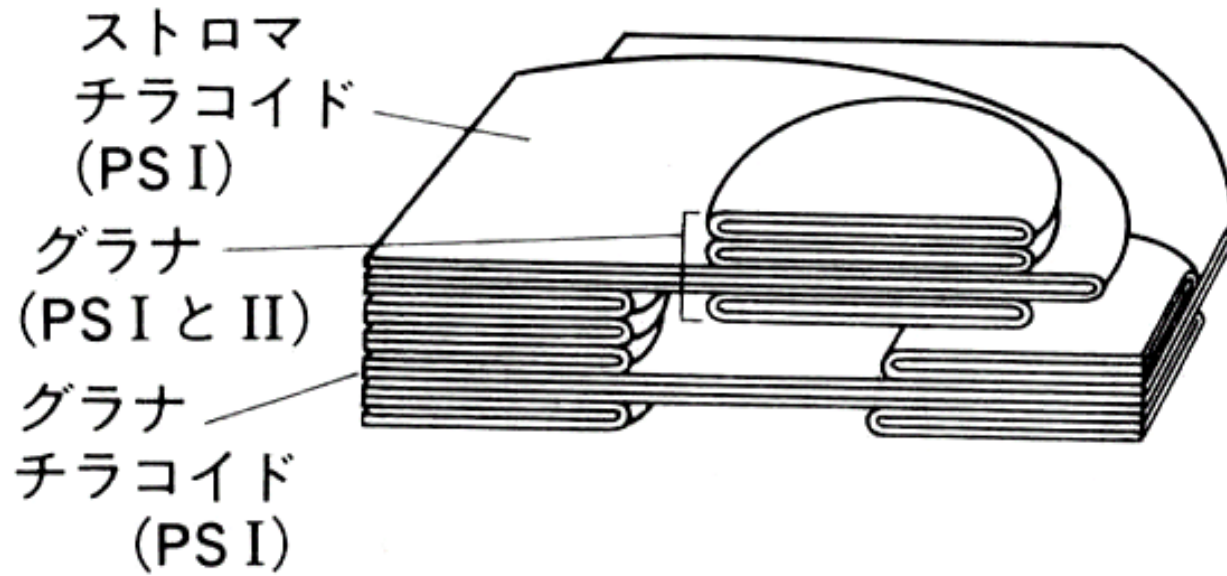
光化学系 (Photosystems)

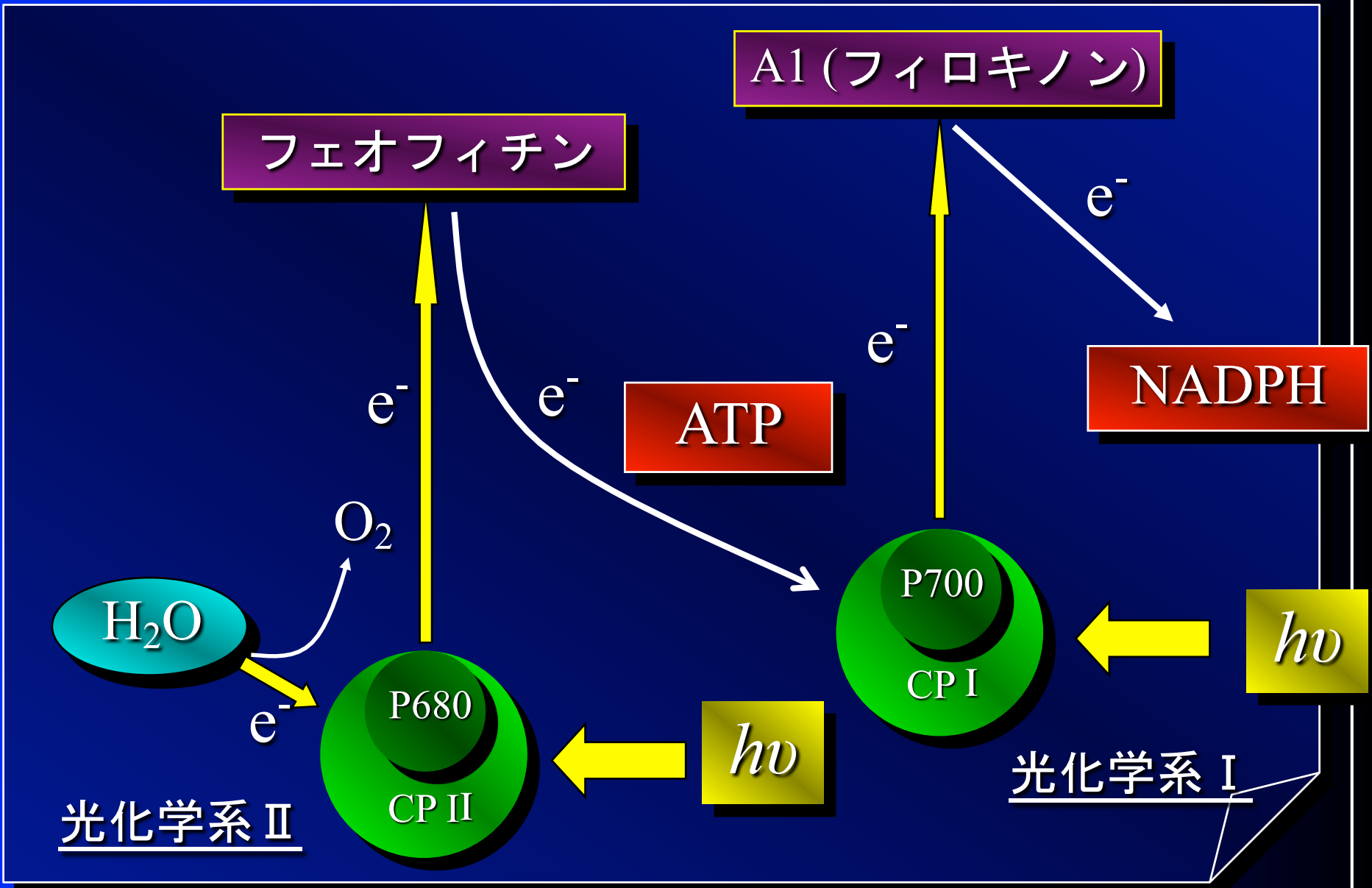
暗反応系 < 光化学系

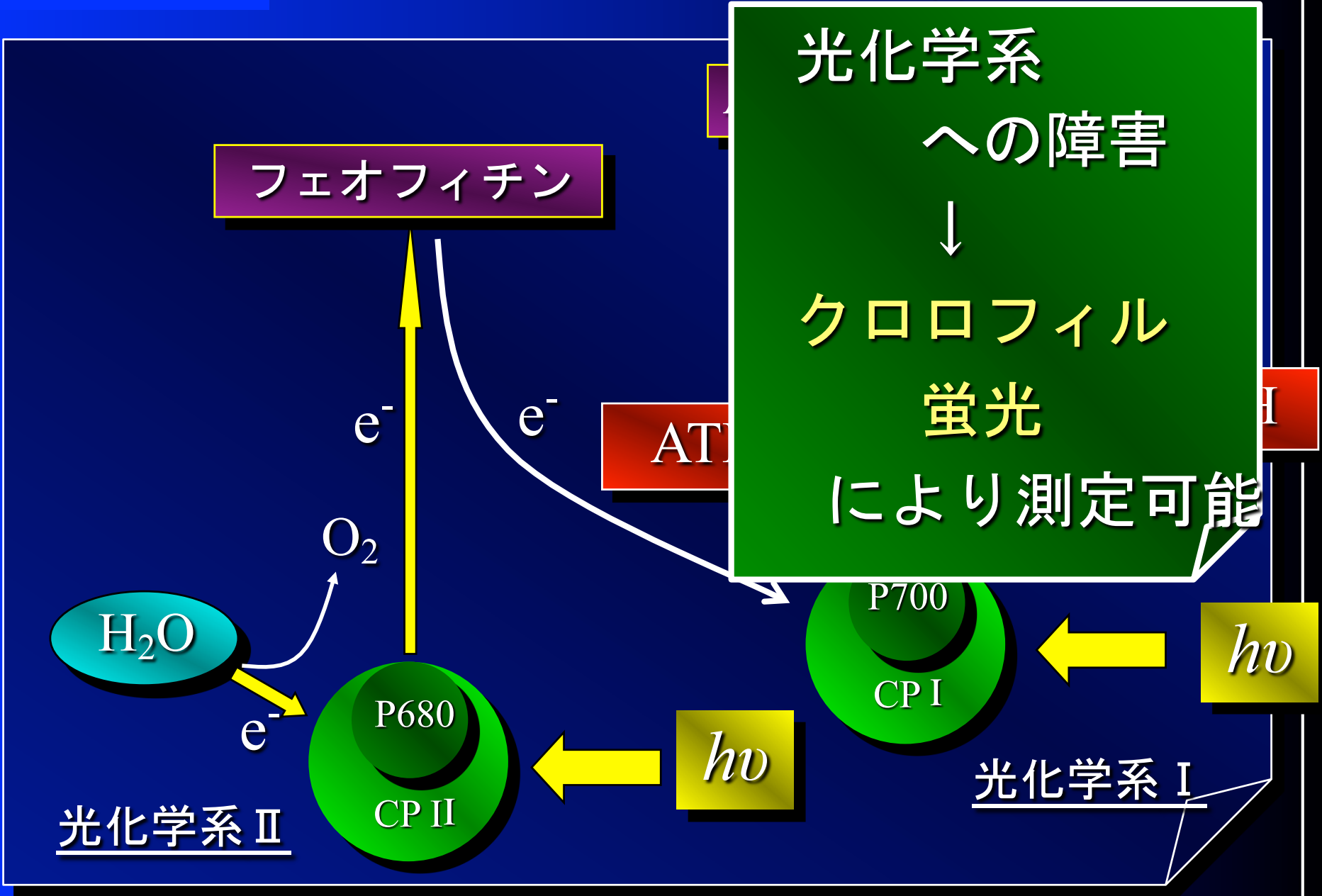
- ✧ 一定の範囲内では、促進される
- ✧ 上限を超えると阻害
→ 光化学系 II (Photosystem II) の阻害

高温に対する反応

植物生理学、培風館、
1989、p. 177 より







見かけの同化率 (Net assimilation rate)

呼吸量の増大



真の同化率 (Absolute assimilation) の減少開始より早く減少開始

光化学系への影響 (Effect on photochemical systems)

呼吸より低温で阻害

→ 生育への影響早い

呼吸・光合成への影響

(Effects on respiration and photosynthesis)

呼 吸：相当高温まで増加
基質消費

(Consumption of
substrate)

光合成：呼吸より増加速度低い
呼吸より低温で阻害

呼吸・光合成への影響

(Effects on respiration and photosynthesis)

生育低下

呼吸：相当高温まで増加
基質消費

(Consumption of

substrate)

光合成：呼吸より増加速度低い
呼吸より低温で阻害

高温に対する器官レベルの反応 (Plant responses to heat at organ level)

葉面積・葉数減少

(Reduction in leaf area and leaf number)

側枝伸長阻害

(Retardation of lateral shoot development)

根伸長阻害

(Suppression of root development)

開花・結実阻害

(Inhibition of flowering and fruiting)

形態異常・成熟異常

(Morphological abnormality)

高温に対する反応の特徴

乾燥に対する反応との類似

高温による乾燥の進行

飽差 (Saturation deficit) の上昇

蒸散の増加



高温への適応

葉面積・葉数減少

← 高温による物質生産減少

→ 高温に対する適応

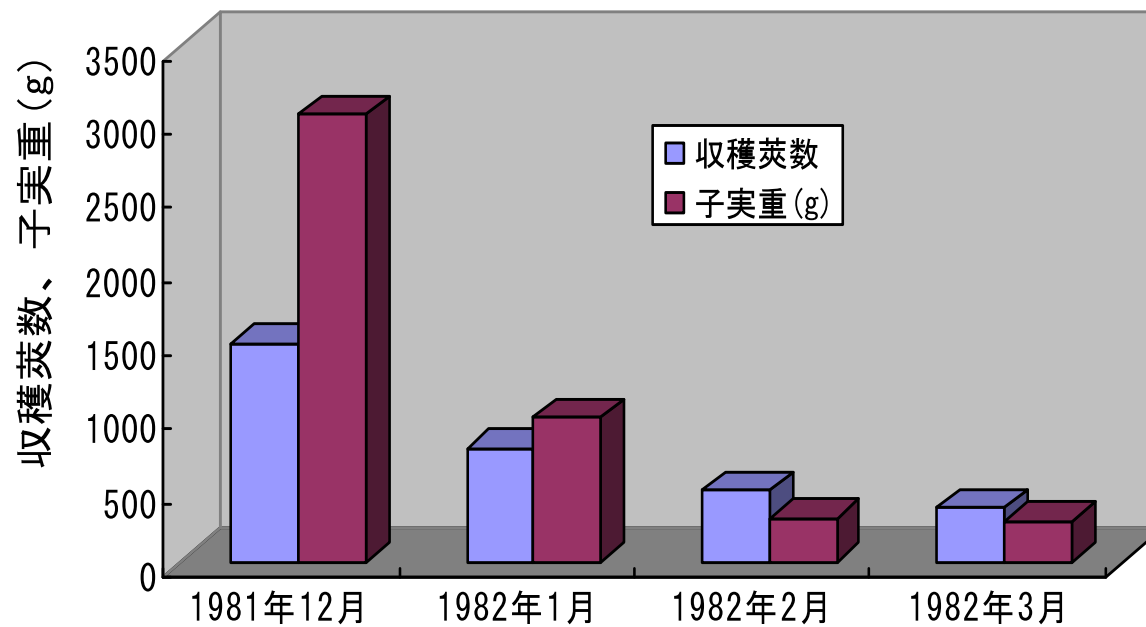
→ 葉の形態的变化 (Morphological changes)

小型化
薄葉化
細葉化
表面突起

高温による側枝伸長阻害

側芽分化期 (Lateral bud initiation stage)
分蘖期 (Tillering stage)

高温？水ストレス？

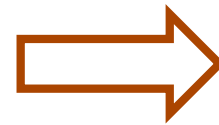


高温による側枝
伸長阻害
(ナガササゲ)

高温による根伸長阻害

自然状態での高温障害

葉 > 根



地温：気温より安定

地温上昇、乾燥の進行



呼吸活性上昇



基質消耗
酸素不足

養液栽培における根の高温障害

液温上昇→溶存酸素 (Dissolved oxygen) 濃度低下

高温による開花結実阻害

物質生産低下

(Reduction of dry matter
production)

花芽分化阻害

(Inhibition of flower bud initiation)

花粉稔性低下

(Reduction of pollen viability)

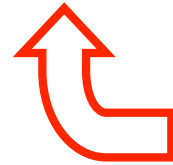
高温？水ストレス？

高温による形態異常

(Morphological abnormality or malformation caused by high temperature)

異常花 (Malformed flower)

異常果 (Malformed fruit)



ホルモン異常
Hormonal imbalance

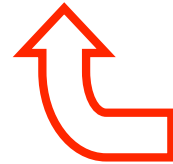
(例) トマト・ピーマン乱形果

高温による形態異常

(Morphological abnormality or malformation caused by high temperature)

異常花 (Malformed flower)

異常果 (Malformed fruit)



ホルモン異常
Hormonal imbalance

(例) トマト・ピーマン乱形果

尻腐れ果 (Blossom end
rot)

高温による成熟異常 (Abnormal maturation by high temperature)

代謝活性の促進

(Promotion of metabolic activities)

エチレン生合成の促進

(Acceleration of ethylene
biosynthesis)



過度の成熟促進 (Excess maturation)

果実の肥大阻害

(Inhibition of fruit development)

2. 高温に対する反応

- ✧ 代謝活性の促進→阻害
- ✧ 呼吸基質の消耗増加
- ✧ 光合成阻害
- ✧ 物質生産の減少
- ✧ 生育の遅延・停滞
- ✧ 種々の形態的变化・異常
- ✧ 種々の生育阻害・障害

5. 高温・低温

1. 温度ストレスの発生
(Occurrence of temperature stress)
2. 高温に対する反応
(Plant responses to high temperature stress)
3. **耐暑性の機作 (Heat tolerance mechanisms)**
4. 高温ストレス対策 (Measures)
5. 低温に対する反応
(Plant responses to low temperature stress)
6. 耐寒性の機作
(Mechanisms of low temperature tolerance)
7. 低温ストレス対策 (Measures)

3. 耐暑性の機作

耐暑性の機作 (Mechanisms of heat tolerance)

1. 温度上昇回避遅延
(Postponement of temperature increase)
(Avoidance of temperature increase)
2. 温度上昇耐性
(Tolerance to temperature increase)

耐暑性の機作 (Mechanisms of heat tolerance)

1. 温度上昇回避遅延

(Postponement of temperature increase)

(Avoidance of temperature increase)

2. 温度上昇耐性

(Tolerance to temperature increase)

耐暑性の機作 (Mechanisms of heat tolerance)

1. 温度上昇回避遅延

2.

1. 温度上昇回避遅延

- A. 落葉 (Leaf abscission)
- B. 葉の形態変化
(Leaf morphological changes)
- C. 葉の調位運動
(Leaf movement)
- D. 蒸散 (Transpiration)

A. 落葉 (Leaf abscission)

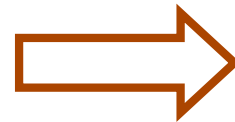
暑季の落葉

樹木・一部の草本

暑季落葉樹：幹で光合成

B. 葉の形態変化 (Morphological change)

小型化
薄葉化
細葉化
複葉化
表面突起



日射吸収
量の減少
(Reduction in
solar radiation)

6. 高温・低温

3. 耐暑性の機作 1. 温度上昇回避遅延



植物環境ストレス学

C. 葉の調位運動 (Leaf movement)

吸収日射量 (Absorbed radiation)

水平葉 > 垂直葉

季節変化 (Seasonal change)

日変化 (Diurnal change)

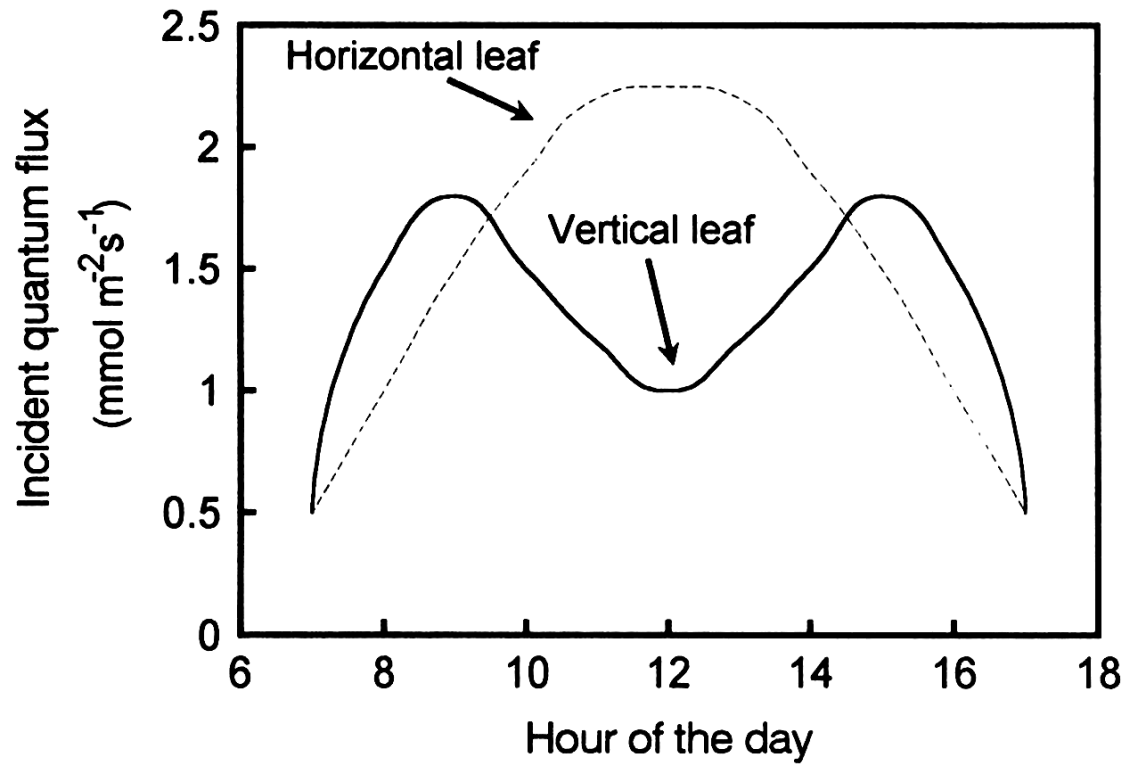
D. 蒸散 (Transpiration)

気孔開孔 (Stomatal opening)



効果限定的 (Limited effects)

主要な機作ではない



C. 葉の調位運動 (Leaf movement)

吸収日射量 (Absorbed radiation)

水平葉 > 垂直葉

季節変化 (Seasonal change)

日変化

D. 蒸散

気孔開

↓

効果限

主要な

キサントフィルサイクル

(Xanthophyll cycle)

ビオラザンチン (Violaxanthin)

アンテラザンチン (Antheraxanthin)

ゼアザンチン (Zeaxanthin)

熱の放散に寄与

6. 高温・低温

耐暑性の機作 (Mechanisms of heat tolerance)

1. 温度上昇回避遅延

(Postponement of temperature increase)

(Avoidance of temperature increase)

2. 温度上昇耐性

(Tolerance of temperature increase)

2. 温度上昇耐性

- A. 代謝反応の耐暑性
(Heat tolerance of metabolic reactions)
- B. 膜組織の耐暑性
(Heat tolerance of membranes)
- C. ストレスタンパク (Heat shock protein)

植物体の温度上昇耐性

通常 ~40°C

耐暑性植物

(砂漠植物 Desert plant 等) ~60°C

数種のバクテリア ~70°C

A. 代謝反応の耐暑性

- ✧ 反応基質 (Reaction substrate) ・ 酵素の熱的安定性 (Heat stability) に依存
- ✧ タンパク合成過程 (Process of protein synthesis) の熱的安定性に依存

B. 膜組織の耐暑性

- ✧ 各種膜組織の熱的安定性
- ✧ 詳細不明

熱ショック
タンパク質

C. ストレスタンパク (HSP, Heat Shock Protein)

- ✧ 変性・傷害タンパクの修復
- ✧ 高温からの保護

C. ストレスタンパク (Stress Protein)

細胞がストレスにさらされたときに合成される蛋白質の総称

熱ショックタンパク質(HSP)

SOD (Super Oxide Dismutase)

酸化ストレスタンパク質 (oxidation-stress protein)

通常は、熱ショックタンパク質(HSP)を指す。

HSP の機能

- 1) 異常構造タンパク質に結合、沈澱形成抑制及び再生補助
- 2) 変性タンパク質の選択的分解

5. 高温・低温

1. 温度ストレスの発生
(Occurrence of temperature stress)
2. 高温に対する反応
(Plant responses to high temperature stress)
3. 耐暑性の機作 (Heat tolerance mechanisms)
4. 高温ストレス対策 (Measures)
5. 低温に対する反応
(Plant responses to low temperature stress)
6. 耐寒性の機作
(Mechanisms of low temperature tolerance)
7. 低温ストレス対策 (Measures)

ストレス環境に対する農業技術の適応 (Adaptation of agricultural technologies to stressful environment)

- ✧ 工学的適応 (Engineering adaptation)
- ✧ 農学的適応 (Agronomic adaptation)

ストレス環境に対する農業技術の適応
(Adaptation of agricultural technologies to stressful environment)

高温ストレス → 不可

◇ 工学的適応 (Engineering adaptation)

◇ 農学的適応 (Agronomic adaptation)

気温の人為的制御 (Artificial control of temp.)

低温ストレス → 実験・実用可

(ファイトトロン・施設園芸 Protected horticulture)

高温ストレス → 実験可

実用不可 Not practical?

パッドアンドファン
(Pad & fan)

農学的適応

1. 作付体系の適応
2. 作型の適応
3. 耐暑性品種 (Heat tolerant var.) の育成

作付体系：地域
作型：作物

1. 作付体系 (Cropping system) の適応

酷暑期 (Extremely hot period) を避ける

各作目の高温感受期 (Heat sensitive period)

作目選択 各作目の耐暑性 (Heat tolerance)

酷暑期の栽培 耐暑性作目の利用

作物の高温感受期

穀類：開花期、分蘗期 (Tillering stage)

マメ類：側枝 (Lateral shoot) 分化期、開花期

果菜類：花芽分化・開花期

根菜類・葉菜類：特になし

果樹・樹木作物：萌芽期

作物の一般的耐暑性

耐暑性強：熱帯原産の作物

(例) イネ、ササゲ (Cowpea)、C₄ 植物

耐暑性弱：温帯・熱帯高標高原産の作物

(例) コムギ、インゲン、ジャガイモ

2. 作型 (Cropping pattern) の適応

酷暑期 (Extremely hot period) を避ける

酷暑地域を避ける

栽培地域の気温特性

作物・品種の耐暑性

3. 耐暑性品種の育成

植物体レベルの耐暑性

温度制御環境下でのスクリーニング

組織・細胞レベルの耐暑性

分離組織・細胞のテスト

2. 作型 (Cropping pattern) の適応

酷暑期 (Extremely hot period) を避ける

酷暑地域を避ける

栽培地域の気温特性
作物・品種の耐暑性

クロロフィル蛍光特性
光合成明反応系の障害
(光化学系Ⅱ)

3. 耐暑性品種の育成

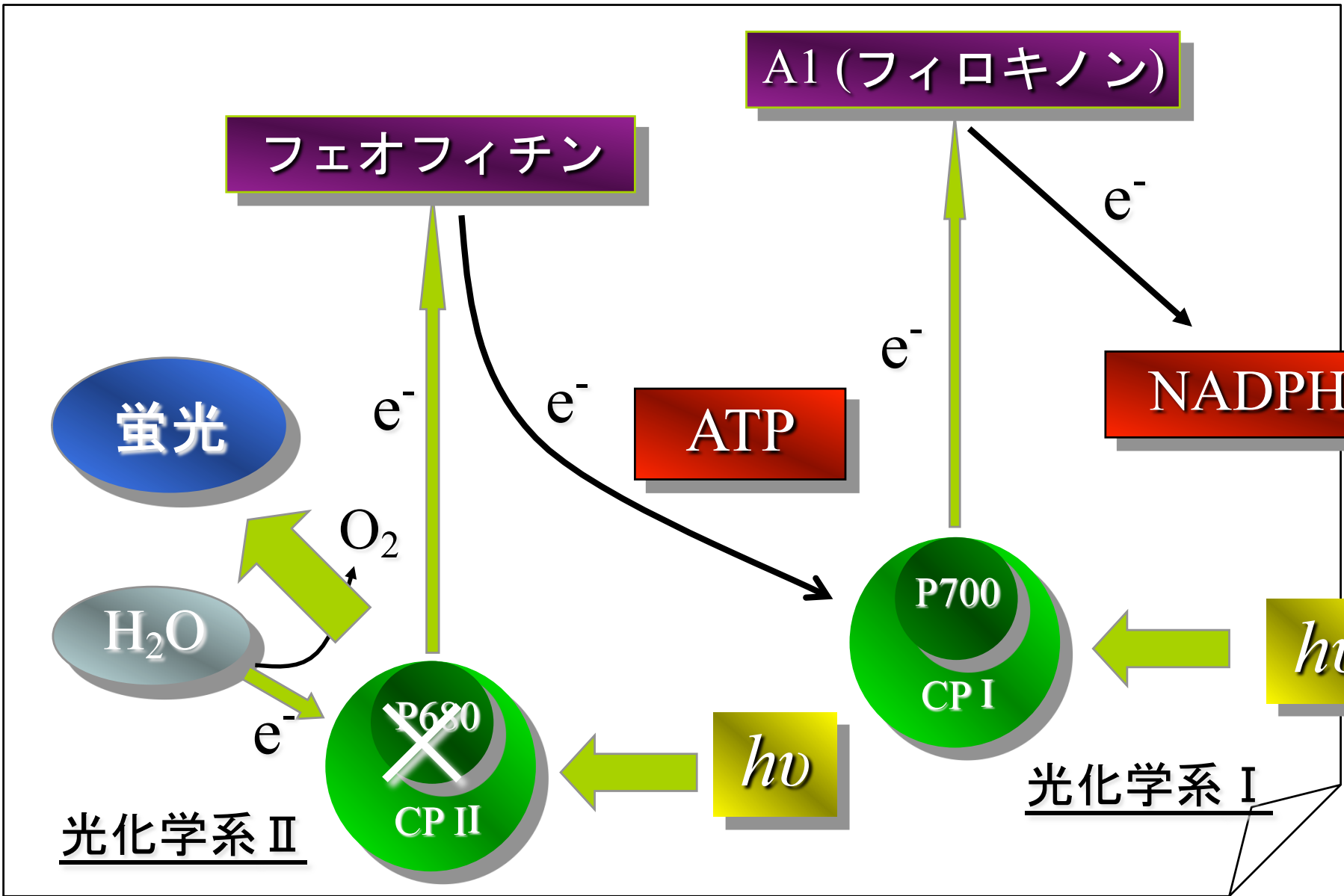
植物体レベルの耐暑性

温度制御環境下でのスクリーニング

組織・細胞レベルの耐暑性

分離組織・細胞のテスト

Chlorophyll
fluorescence



5. 高温・低温

1. 温度ストレスの発生
(Occurrence of temperature stress)
2. 高温に対する反応
(Plant responses to high temperature stress)
3. 耐暑性の機作 (Heat tolerance mechanisms)
4. 高温ストレス対策 (Measures)
5. 低温に対する反応
(Plant responses to low temperature stress)
6. 耐寒性の機作
(Mechanisms of low temperature tolerance)
7. 低温ストレス対策 (Measures)

低温ストレス (Low Temperature Stress)

1. 冷温ストレス (Chilling Stress) $0^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$
2. 凍温ストレス (Freezing Stress) $< 0^{\circ}\text{C}$
3. 境界温度域ストレス (Frost etc.) $-3^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$

低温に対する反応 (Responses to low temp.)

一般に生理活性低下

酵素反応は、高温より安定 (Stable)

発育零点

氷結による傷害 (Ice injuries)

影響を受ける生理作用

Affected Physiological Phenomena

タンパク合成 Protein synthesis (-)

酵素反応 Enzyme reactions (- or +)

細胞分裂・伸長 Cell division & elongation (-)

GA 生合成 Gibberellins synthesis (- or +)

サイトカイニン生合成 Cytokinin synthesis (-)

ABA 生合成 ABA synthesis (+ or -)

エチレン生合成 Ethylene synthesis (- or +)

呼吸 (- or +)

光合成・気孔開孔 (-)

影響を受ける生理作用

Affected Physiological Phenomena

タンパク合成 Protein synthesis	反応速度・
酵素反応 Enzyme reactions (-)	(Reaction velocity)
細胞分裂・伸長 Cell division	基質親和性低下
GA 生合成 Gibberellins synthesis	(Affinity for substrate)
サイトカイニン生合成 Cytokinin synthesis (-)	
ABA 生合成 ABA synthesis (+ or -)	
エチレン生合成 Ethylene synthesis (- or +)	
呼吸 (- or +)	
光合成・気孔開孔 (-)	

呼吸 (Respiration)

低下 ← 酵素反応の低下
馴化による一時的増加
C₃ 植物：光呼吸の低下

光合成 (Photosynthesis)

クロロフィル含量低下
気孔開度低下
暗反応系 (Dark reaction system)
明反応系 (Light reaction system)
低温下の強光 → 光阻害 (Photoinhibition)
SOD活性低下

呼吸 (Respiration)

低下 ← 酵素反応の低下
馴化による一時的増加
C₃ 植物：光呼吸の低下

馴化 (Acclimation)

徐々に気温低下
低温への適応促進

光合成 (Photosynthesis)

クロロフィル含量低下
気孔開度低下
暗反応系 (Dark reaction system)
明反応系 (Light reaction system)

SOD

Superoxide dismutase

低温下の強光 → 光活性酸素消去酵素 Reactive oxygen scavenging enzymes
SOD活性低下

6. 高温・低温

4. 低温に対する反応

光合成

明反応系

光エネルギーの吸収
化学エネルギーへの変換

$h\nu$

H_2O

O_2

ADP · NADP

ATP · NADPH

暗反応系

CO_2 固定

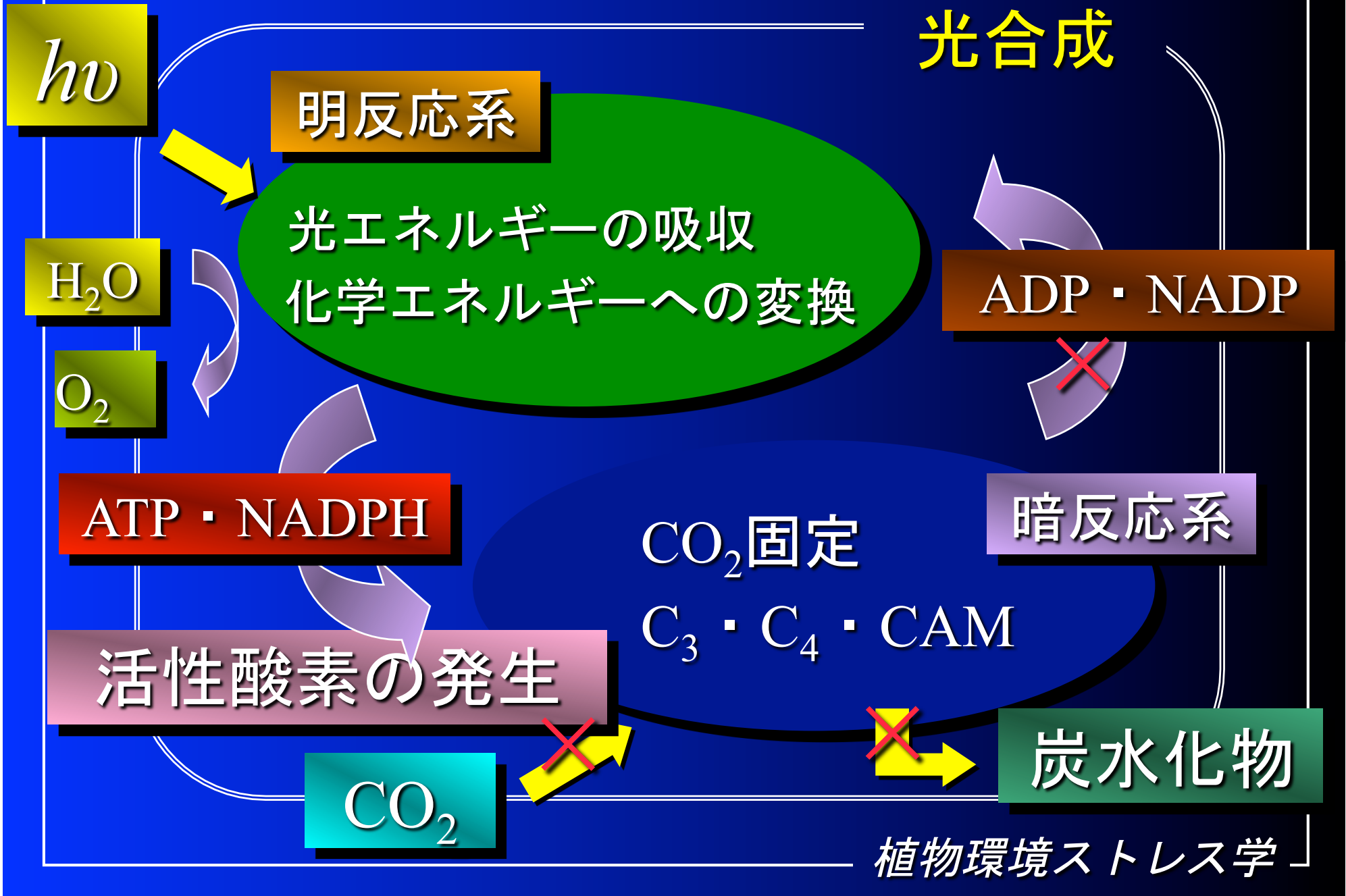
C_3 · C_4 · CAM

活性酸素の発生

CO_2

炭水化物

植物環境ストレス学



器官レベルの反応 (Responses at organ level)

器官生長速度低下

組織の傷害 (Organ injuries)

葉の形態変化 (Leaf morphological changes)

開花・結実阻害 (flowering & fruiting inhibition)

形態異常 (Malformation)

成熟異常 (Abnormal maturation)

器官成長速度低下 (Reduction of growth rate)

発育零点：見かけの量的生長停止

物質生産 ↔ 呼吸基質消耗

質的生長停止、生長モデルで重要

組織の傷害 (Injury of organs)

葉：水浸状障害 (Water-soaked symptoms)

茎：亀裂 (Crack)・内部変色 (Discoloration)

膜構造 (Membrane structure) の変化

電解質 (Electrolyte) の漏出 (Leakage)

温度変化 (低温→高温) により顕在化

葉の形態変化 (Leaf morphological changes)

縮葉 (Rugose)・小型化

馴化 (Acclimation) による変化

低温による水ストレスの進行

←根の障害・大気の乾燥化

開花結実阻害 (Flowering & Fruiting Inhibition)

冷害 (Cool weather damages)

→ 花粉不稔 (Pollen sterility)

形態異常 (Malformation) ・ 成熟異常

トマトの乱形果 (Malformed fruits)

幼苗時 (Juvenile phase) の低温

植物体レベルの反応

生長遅延 (Delay of growth)

成熟の遅延 (Delay of maturation)

不時の低温 (Unexpected low temperature)

影響大きい、馴化不能

5. 高温・低温

1. 温度ストレスの発生
(Occurrence of temperature stress)
2. 高温に対する反応
(Plant responses to high temperature stress)
3. 耐暑性の機作 (Heat tolerance mechanisms)
4. 高温ストレス対策 (Measures)
5. 低温に対する反応
(Plant responses to low temperature stress)
6. 耐寒性の機作
(Mechanisms of low temperature tolerance)
7. 低温ストレス対策 (Measures)

5. 耐寒性の機作 (Mechanisms of low temperature tolerance)

耐冷性 (Chilling tolerance)

耐凍性 (Freezing tolerance)

凍結回避 (延期)

(Freezing avoidance,
postponement)

凍結耐性 (Freezing tolerance)

耐霜性 (Frost tolerance)

耐冷性の機作 (Mechanism of chilling tolerance)

膜構造 (Membrane structure) の耐性

生体膜ゲル化 (Solid-gel phase) の遅延

酵素反応の向上 (Improvement of enzyme reactions)

反応速度・基質親和性 (affinity) 向上

馴化 (acclimation) による耐冷性向上

ゆっくりとした気温低下 (Gradual cooling)

日長変化 (Changes of day-length)

貯蔵物質の蓄積 (Accumulation of storage materials)

酵素動態の変化 (Changes in enzyme dynamics)

休眠 (Dormancy) : 芽、球、ロゼット (rosette)

Polyol, Sugar, Protein

植物環境ストレス学

耐凍性の機作 —凍結回避—

過冷却 (Supercooling) による凍結回避

浸透ポテンシャルの能動的低下

(K^+ 、糖、アミノ酸等)

蓄熱 (多肉植物, succulent)

代謝熱 (Metabolic Heat)の放出

耐凍性の機作 —凍結耐性—

細胞間凍結 (Intercellular ice formation)

細胞壁の堅牢性 (Strength of cell wall)

細胞内凍結 (Intracellular ice formation)

→ 致命的影響 (Lethal)

耐凍性の機作 —凍結回避—

過冷却 (Supercooling) による凍結回避

浸透ポテンシャルの能動的低下

(K^+ 、糖、アミノ酸等)

蓄熱 (多肉植物, succulent)

代謝熱 (Metabolic Heat)の放出

アポプラスト
(apoplast)

導管・木部

(Vessel, Xylem)

篩管・篩部

(Sieve, Phloem)

耐凍性の機作 —凍結耐性—

細胞間凍結 (Intercellular ice formation)

細胞壁の堅牢性 (Strength of cell wall)

細胞内凍結 (Intracellular ice formation)

→ 致死的影響 (Lethal)

5. 高温・低温

1. 温度ストレスの発生
(Occurrence of temperature stress)
2. 高温に対する反応
(Plant responses to high temperature stress)
3. 耐暑性の機作 (Heat tolerance mechanisms)
4. 高温ストレス対策 (Measures)
5. 低温に対する反応
(Plant responses to low temperature stress)
6. 耐寒性の機作
(Mechanisms of low temperature tolerance)

植物環境ストレス学

7. 低温ストレス対策 (Measures)

ストレス環境に対する農業技術の適応 (Adaptation of agricultural technologies to stressful environment)

- ✧ 工学的適応 (Engineering adaptation)
- ✧ 農学的適応 (Agronomic adaptation)

ストレス環境に対する農業技術の適応
(Adaptation of agricultural technologies to stressful environment)

◇ 工学的適応 (Engineering adaptation)

◇ 農学的適応 (Agronomic adaptation)

気温の人為的制御 (Artificial control of temp.)

園芸作物生産で実用化

→ 施設園芸、周年生産 (Year-round prod.)

稲作・畑作物生産

→ 寒冷期の育苗 (Raising seedling)

化石エネルギー (Fossil energy) の大量消費

農学的適応

作付体系：地域
作型：作物

1. 作付体系・作型の適応
2. 工学的適応との組合せ
3. 耐寒性品種 (Cold tolerant var.) の育成

1. 作付体系・作型の適応

厳寒期 (Extremely cold period) を避ける

栽培期間の短縮化

早生品種 (Early varieties)

作目選択

耐寒性作物 (Cold tolerant cultivars)

作物の低温感受期 (Sensitive period)

穀類・マメ類・果菜類：花芽分化・開花期

根栽類・葉菜類：特になし

果樹・樹木作物：萌芽期

作物の一般的耐寒性

耐寒性強：温帯・冷帯・高標高原産の作物

(例) ムギ類、インゲン、ジャガイモ

耐寒性弱：熱帯・亜熱帯原産の作物

(例) イネ、サツマイモ、C₄ 植物

耐寒性：樹木作物 > 草本作物

2. 工学的適応との組合せ

厳寒期に保温・加温

イネ・果菜類 → 育苗期

降霜防止 チャ：空気攪乱 (Disturbance)

ハードニング (Hardening)

3. 耐暑性品種の育成

耐冷性 (Chilling Tolerant) 品種育成

イネ → 花芽分化期の耐冷性

耐冷性遺伝子分析

耐凍性 (Freezing Tolerant) 品種育成

組織耐凍性 → 漏出液 (Leachate) 分析