

収穫器官

作物によって収穫対象となる器官は異なり、種子 seed のもの、塊茎 tuber や塊根 tuberous root のものなどがある。野菜類 vegetables では花 flower、果実 fruit、葉 leaf や茎 stem の場合がある。

作物生産の多少は、収穫器官の生産量の多少であり、作物の発育が環境によってどのようにコントロールされるのかという仕組みを知る必要がある。

作物の生長と発育

生長(growth)とは:

発育(development)とは:

種子繁殖(seed propagation)植物の発育過程(developmental phase)の区分

花芽分化以前:栄養発育相(vegetative development phase)

花芽分化後:生殖発育相(reproductive development phase)

花芽分化(flower bud initiation)の時期はどのようにして決まるのか？

花成誘導条件の多様性

春化(バーナリゼーション:vernalization)

作物の生育期間長が決まる仕組み

- 発育の早さ(栄養生長～生殖生長への転換の遅速)で決まる
- なぜ、作物の生育期間長は重要なのか？
 - 生育期間長と作物の乾物重の関係
- 作物の栽培可能期間長はどのような要因で決まるか
- 発育過程に影響を及ぼす要因
 - 外的条件と内的条件

基本栄養生長性とは？その意義は？

栄養生長と生殖生長が比較的はっきりと分かれる作物 有限伸育型作物
栄養生長と生殖生長が大きく重複する作物 無限伸育型作物

日長と発育との関係

質的短日(長日)植物と量的短日(長日)植物

日長と発育速度

限界日長

適日長限界

天文日長と自然日長

照明による出穂遅延

温度の発育に対する影響

- 1) 花芽分化に低温を要求する作物の春化のための低温刺激
- 2) 発育の背後で進行する諸酵素の温度反応を介した、発育の一般的プロモーター

春化(vernalization)とは

質的低温要求性と量的低温要求性

発育プロモーターとしての温度

温度はあらゆる発育現象（発芽、葉・分枝数の増加、草丈伸長、花成（花芽分化）、花芽の発達、種子の成熟など）に影響する

温度と発育との一般的関係

1. 発育の最低温度以下では発育が全く進まない
2. 最適温度以上では高温ほど発育完了までの日数は短くなる
3. 発育の最適温度以上では逆に高温ほどその日数は長くなる

温度と発育との関係のとらえ方

積算温度

DVR

作物の栽培可能期間

作物の栽培可能期間や発育を考える意味は何か？

作物の生育期間長

全生育期間＝基本栄養生長期間＋感温相＋感光相＋狭義の生殖生長期間(登熟期間)

品種の早晚性は、以下の3つの性質の組み合わせで決まる。

- 1) 基本栄養生長性
- 2) 感温性
- 3) 感光性

感光性品種と感温性品種

品種の早晚生と地理的分布

緯度と作物生育

ムギ類の低温要求性

花成に必要な低温の程度とその日数には品種間差異がある→秋播性程度

秋播性程度と品種の地理的分布

地球温暖化のメカニズム

近年問題になっている地球温暖化の原因は温室効果ガスの増加によるものであるが、温室効果ガスがなくなったとしたら地球の平均温度は-18~-19℃になるとされており地球上の生物の大半は生存できない。しかし、実際の地球の平均温度はおよそ 15℃である。この温度差は温室効果によっている。

温室効果とはどのような現象か、温室効果ガスにはどのようなものがあるか

主要な温室効果ガスについて、その発生源や濃度の変化、温室効果への寄与率などについて解説。地球温暖化の観点からは二酸化炭素が最も注目されているが、気体の特性としての温室効果（地球温暖化係数などという）そのものの大きさは二酸化炭素をはるかに上回るものがある。

温室効果ガスの濃度増加の一例

	産業革命以前	1992 年
二酸化炭素	280ppm	360ppm
メタンガス	700ppb	1720ppb
亜酸化窒素	275ppb	310ppb

上に示した表での二酸化炭素濃度の上昇幅 80ppm は過去 16 万年の間の濃度変化（氷河期 200ppm、温暖期 280ppm）と同等である。

温室効果ガスの一つであるフロンガスのうちある種類のものにはオゾン層破壊の作用がある。オゾン層の破壊によって、地球上、特に高緯度地方に降り注ぐ紫外線量が増加しつつあるので、フロンガスは紫外線の面からも注意が必要である。

温暖化に伴う作物収量の変化の予測

今後予想される気候変化に伴う作物生育や収量への影響が多くの作物種について調査検討されている。個々の研究報告をみると、同一作物であっても必ずしも同様の予測結果になってはいないが、多くの研究報告を全体としてみた場合、今後予想されている、二酸化炭素濃度の上昇およびそれに伴う気温上昇のもとでは全般に収量は上昇することが予想されている。ただし、作物種（C₃植物かC₄植物かなど）によって、影響が異なるとみられる。

作物収量の予測に関わる問題点

予測の信頼性は高いとは言い切れないが、将来の環境に適応し、高い生産を安定的にあげられるような作物品種の改良などには長い年月を要するので、この種の将来予測は、起こりうる危険を回避できるようにしておくための警鐘として重要である。

作物の生長（生産）シミュレーション

生長（生産）の予測の手法（モデルのタイプ）

統計的（経験的）モデルと機構的（メカニスティック）モデルに大別される

前者 (statistic model, empirical model) は、ある特定の場所における長年のデータから、生育・収量を推定・予測する手法、後者 (mechanistic model) は、作物の生育と収量生成に関する物理的・生物的因果関係に基づいて推定・予測する手法。

統計的モデルの問題点とは

機構的モデル

収量(生長)が決まるメカニズムに基づいて収量(生長)を予測しようとする考え方

考え方の基本

作物の乾物重＝生長期間長×CGR

作物の収量＝作物の乾物重×収穫指数

つまり、収量は作物の生長期間、生長速度と収穫指数によって決まるので、これらの要素がどのように決まるかをモデル化することで収量を予測するモデルができる。つまり、発育、生長と収穫部位への分配をモデル化すればよい。

CO₂濃度上昇で収量増加が起こるのはなぜか

C₃植物とC₄植物の生産性

現在： C₄>C₃ だが、将来： C₃>C₄と考えられる

気候変化に伴う降水量減少の影響

CO₂濃度上昇環境下では、ある程度降水量が減ったとしても、その影響は気孔開度の減少による水利用効率の向上によってマスクされる。

温度と光合成

温暖化（高温）の影響は光合成に有利なのか？その影響はC₃とC₄植物でどう違うのか？

光合成速度の温度反応

・光合成速度とは何か？

真の光合成速度の温度反応性

真の光合成速度にかかわる3要素

（光合成システムの構成）

1)光化学反応系（明反応）

2)CO₂固定反応系（暗反応）

3)CO₂拡散系

上記の3つの過程のうち、1)と3)は温度による影響が一般に小さい。これに対し、2)は酵素反応であるため、温度の影響が大きい。

呼吸速度の温度反応性

呼吸には2種類ある

1) 暗呼吸

2) 光呼吸（photorespiration）

光呼吸は温度上昇すると促進される

光呼吸の意義とは？

温度上昇による呼吸増大の頭打ち

C₃植物とC₄植物の光合成の温度反応性の違い

C₄植物はC₃植物に比べて、光合成の適温域が高い傾向にある。これは、C₄植物は光呼吸をしないため、高温下でも呼吸による光合成速度の低下が小さいことが一つの要因である。

植物の水の利用効率

水の利用効率とは、植物がどれだけ少ない水で効率よく光合成できるかを表現する指標

1) 水利用効率（water use efficiency: WUE）

最も一般的に用いられる水利用効率は、作物が生産した乾物量を **DM**、生育期間中の蒸散量を **T** とすると $WUE = DM / T$ で与えられる。

2) 要水量（water requirement）または蒸散係数（transpiration ratio）

水利用効率の逆数。作物が **1g** の乾物生産をするのに必要とした蒸散量 **g** で表す。

より正確な水利用効率

環境条件に影響されない水利用効率（ WUE_c ）は飽差（VPD: vapor pressure deficit）を用いて

$WUE_c = DM / (T / VPD)$ と表される。

このように飽差を用いて補正した水利用効率は、栽培環境に関らず、作物種固有のかなり安定した数値になることが知られている。つまり、

$WUE_c = K = DM / (T / VPD)$ **K**は定数

となり、上式を変形すると、乾物生産は気孔開度（正確には飽差あたりの蒸散量）に比例することを示すことがわかる（下式）。

$DM = K \cdot (T / VPD)$

K は作物種によって固有のかなり安定した値ではあるが、同じ作物種でも品種により値の違いがある。よって、**K**（水利用効率）を遺伝的に向上させることで、作物生産の向上の可能性がある。

圃場レベルでの水利用効率

圃場レベルでの水利用効率（ WUE_f ）は下式で表される。

$WUE_f = DM / ET$

ここで、**ET** は蒸発散量で、圃場から失われる水のすべてで、

$ET = E_s + T$ (E_s = 土面からの蒸発、**T** = 蒸散)

である。

耕地の水利用効率を高めるには、土面蒸発率を低くすることが考えられる。

このほか、圃場レベルでの水の利用効率を高めるための考え方について講述する。

温暖化（CO₂濃度 2 倍化）後の日本の水稲収量の予測

東北地方を除いて減収（現在と同じ品種を、現在と同じ作期で栽培した場合）

西南日本での収量低下の原因

北海道での減収の原因

高温不稔の感受性の高い時期

出穂開花期、ついで出穂前 9 日ころ。開花時の気温が 35℃以上くらいになると高温による不稔発生が増加する（品種間差あり）。断されている。

日本の水稲の収量予測

作物の収量予測にはモデルがよく使われる。イネに関するモデルの代表的なものとして、**SIMRIW** (**S**imulation **M**odel for **R**ice-**W**eather relations)がある。

発育予測：日長と気温から日々の発育速度を予測し、いつ出穂するか、いつ成熟期になるかなどを予測

収量予測：

- 葉面積の増加速度の予測（環境条件（気温や窒素施肥）によってどのように拡大して行くかを表すモデル式）
 - ある葉面積の時にその作物群落が吸収する日射量を求める（葉がどのように光を吸収するかに関する植物生態学の理論（門司・佐伯理論）に基づく）
 - 吸収した日射からどれだけの乾物生産が得られるかを決める。
- 収量予測にはさらに、低温（冷害）が収量に及ぼす影響の予測が必要になる。
- 不稔率を気温条件から推定する

イネの冷害

冷害には主に障害型冷害と遅延型冷害の 2 種類

遅延型冷害：出穂後、登熟に必要な気温が不足するために減収となる冷害

障害型冷害：不稔の発生により減収となる冷害

それぞれの冷害における収量低下のメカニズムの解説

不稔の発生しやすい時期：穂孕期（正確には小孢子初期：出穂前 12-10 日）

以上のような、水稲収量を決める要因を全て数式化すると、与えられた環境条件の下で最適の栽培管理をした場合の収量の予測が可能になる。

環境ストレス

作物（植物）はある範囲内の環境条件下では良く生長するが、その範囲を越えると障害を受けたり、枯死したりする。このような、植物に対する不適な環境条件の影響を環境ストレスという。

環境ストレスの種類

生物的環境ストレス、物理化学的ストレス

植物生産上最も重要なものは水による環境ストレス。（水ストレスは、世界中で起こっている。生産制限要因として重要。）

水ストレスの生殖生長への影響

イネ:出穂前日から出穂後 4 日目頃までが危険期で、この頃の水ストレスは多くの不受精を生じ、減収を招く。幼穂発育初期の水ストレスは籾殻の生長を抑制して籾殻が小さくなり、減収を招く。

コムギ:減数分裂期に水ストレスを受けると、花粉の不稔が発生し、稔実種子数が減少する。

トウモロコシ:水ストレスによる減収の原因は、不受精によって不稔が多発するためだが、それは雌雄両花の成熟期が不一致になることが主因である。

土壌や植物の水分状態の示し方

・**含水率（含水比）**：(生重－乾燥重)／乾燥重×100

土壌や植物体の水分状態を示すには通常、水ポテンシャルが使われる。

水ポテンシャルの定義：

ある系における水の活動度（移動のしやすさ）で、ある系の単位体積に含まれる全水分子の全自由エネルギー（単位はJ/m³）で示される。

なぜ水ポテンシャルの考え方を使うのか

水ポテンシャルの概念を使うと、水の移動方向や、移動のしやすさ、しにくさが明快に説明できる。

土壌中や植物体中での水の移動は自由エネルギーの勾配に沿って起こり、水が豊富で単位体積あたりの自由エネルギーの多い所から、水の自由エネルギーの少ない所へ向かう。水ポテンシャルは水の移動方向を規定する要因である。水ポテンシャルが低いほど、その水は移動しにくい。

利用されやすい水：毛管に吸着されている水（毛管水）が植物に利用される水で、毛管水の水ポテンシャルは比較的高い（移動しやすい、だから植物が吸収できる）

利用されにくい水：土壌が乾燥して毛管水が失われると、土壌粒子表面に吸着された水が残る。この水は土壌粒子に強く吸着保持されていて、毛管水に比べて水ポテンシャルが非常に低い。

植物が吸水できるためには根の組織の水ポテンシャルが土壌水の水ポテンシャルより低くなければならない。一方、植物組織の水ポテンシャルは、細胞の浸透圧と膨圧によって決まる。植物が吸水を続けるためには浸透ポテンシャル（osmotic potential）を大幅に低下させる必要がある。

水ストレスの影響

細胞伸長の抑制:細胞の伸長生長には一定以上の膨圧が必要だが、吸水が制限されると膨圧が一定値を下まわってしまうから。

水ストレスと生長・光合成

水ストレスによる生長への影響

葉面積拡大(葉面生長)の抑制、光合成の抑制、気孔開度の減少が起こる。

水ストレスによる光合成抑制のメカニズム

1) CO₂拡散系に対する影響

2) CO₂固定系の機能低下

水ストレスと ABA

乾燥に伴う気孔閉鎖反応にはアブシジン酸（ABA）が関与。一般に、水不足条件下では植物の ABA 含量は増加する。

根への影響

根の伸長と根乾物重は葉面積や地上部乾物重ほど強く水ストレスの影響を受けない。根は土壌中にあり水ストレスの影響を他器官より受けにくいためと考えられている。乾燥条件下ではT／R比が低下するのが一般。

ストレスに対する抵抗性（stress resistance）

抵抗性：ストレス条件下でも正常な生育を維持する能力で、抵抗性は2つの要素　回避性（avoidance）と耐性（tolerance）からなる。

水ストレスの回避性　1) 吸水の維持、2) 水の損失の低減

水ストレスへの耐性　1) 浸透調整 2) 浸透調整の効果

凍結障害と耐凍性

低温によって起こる植物体の凍結は2種類で細胞外凍結と細胞内凍結。通常、細胞外凍結から始まる。

耐凍性に関する要因

- 細胞内凍結に関する要因
- 細胞外凍結に関する要因

耐凍性と ABA

植物の低温馴化（cold acclimation）、低温ハードニング（cold hardening）の初期の過程で、ABA 含量が高まることや、人為的に ABA を与えると、植物を低温にさらした時に作られるタンパク（低温誘導タンパク cold-induced proteins という）と同じタンパクが作られる。ABA は耐凍性に関連しているとみられている。

凍結害防止試薬

地球温暖化の中で、耐凍性の研究の意味は何か？

植物の耐凍性の研究は、寒冷地での作物栽培だけが目標ではない。

砂漠化 desertification

不適切な人間活動に起因する乾燥・半乾燥地域に見られる土地の荒廃現象

砂漠化の原因

- ・牧地での過放牧
- ・耕地の過剰耕作
- ・不適切な干害排水による塩類集積 → 塩類土壌
- ・森林伐採など

塩類土壌

乾燥地の土壌には塩類が集積した土壌がよくみられる。

- 1) 降水量が少→土壌中の塩類が溶脱で失われない
- 2) 降水量より蒸発量が多い→土壌中の塩類が土壌表面に集積する

ナトリウム土壌は塩類化の進んだ**塩類土壌** (saline soil) の一種であるが、特にナトリウムの集積が著しいものをいう。

ナトリウム土壌の問題点

1. pH が非常に高くなる→養分の不可給態化
2. 土壌物理性の悪化

ナトリウム土壌の改善対策

石膏（硫酸カルシウム：CaSO₄）の施用

物理性が改善されれば、透水性がよくなるので灌漑水による洗い流しが可能になる場合もある。

塩類土壌の問題点

1. 吸水障害
2. 植物体内の塩濃度が高くなることによる生育障害
3. 高濃度の塩が他の必須要素の吸収を抑制するために起こる要素欠乏による生育障害

塩類土壌の改善対策

除塩 十分な灌漑水を与えて土壌中の塩類を洗い流して除去すること。

土壌の酸性化

酸性雨

- 1) 酸性雨とは
- 2) 酸性雨の原因物質
- 3) 土壌の酸性化との関り

酸性土壌と作物の生育

土壌が酸性化するメカニズム

1. 作物の栽培や植物の生育自体が土壌を酸性化する
 2. 降雨による塩基の溶脱
 3. 有機物分解
 4. 酸性の灌漑水の流入
- など

土壌酸性化への対策

1. 石灰資材の施用
2. 耐酸性の作物の利用

酸性土壌が作物生育に及ぼす影響

1. K, Ca, Mg などの塩基および微量元素（B, Zn, Cu, Mo）の不足による生育不良
2. H⁺, Al (特に重要)あるいはMnの害作用
3. P の不足による生育不良
4. 微生物の種類や活性の異常

作物の耐酸性

耐酸性は作物種によって大きく異なる

作物の耐酸性は何によって決まるのか？

耐酸性は3つの要素からなる

1. 耐低 pH 性
2. 耐高 Al 性
3. 耐低 P 性

地球温暖化が耕地（土壌）に及ぼす影響を理解するために

- 耕地（土壌）の生産力は何によって決まるか
- 地力を決める要因

土壌有機物（soil organic matter）の構成

- 1) 粗大有機物＝分解途中の植物や動物遺体
- 2) 非腐植物質＝土壌生物により生産・放出されたタンパク質、多糖類、脂質など
- 3) 腐植物質＝植物質からさらに微生物作用により合成される土壌固有の高分子物質群

腐食の地力への寄与

1. 土壌の窒素・リン酸の供給源、2. 土壌の団粒構造形成を促進（通気性、透水性、保水性の向上）、3. 養水分の吸着・保持、4. 土壌微生物活性を高める

地球温暖化と耕地（土壌）との関り

- 1) 温暖化が耕地（土壌）に及ぼす影響
 1. 温度上昇の直接的効果
 2. 温度上昇の間接的影響
- 2) 土壌が地球温暖化に及ぼす影響

土壌や農業活動が地球温暖化に関わる温暖化ガスを発生している

1. 土壌からのメタンの発生（主として水田土壌）
2. 土壌からの亜酸化窒素の発生（水田・畑の両方）

水田土壌の還元（土壌還元）における物質の変化とメタン発生

水田でのメタン発生に関与する要因

土壌酸化還元電位、土壌中の有機物量、土壌温度、土壌pH、など

メタン発生の抑制技術

1. 有機物施用法の改善
2. 水管理法

水田から発生する温室効果ガス（亜酸化窒素） N_2O

1. 硝酸化成作用
2. 脱窒作用

脱窒作用による亜酸化窒素の発生