

## 第5回 種子と発芽

今回の目標	胚乳種子であるイネ科の種子と無胚乳種子のマメ科の種子の構造を比較し、スケッチする 芽生えの観察を行い、イネ科種子やマメ科種子が種によって発芽形態の異なることを理解する。 イネの発芽試験を行い、イネの種子が乾燥、低温条件では、その寿命がどれくらい長くなるかを調べる。
今回の提出物	種子のスケッチ（1枚） 芽生えのスケッチ（1枚） 発芽実験のレポート（6月16日締め切り）

### 1. 種子の観察

#### 目的

植物の一生の始まりである種子を観察し、種子の構造のうち植物体を分化させる部分（胚）、胚に栄養を供給する部分（胚乳）、それらを保護する部分（種皮）などの分化をみる。さらに胚の中の構造も観察する。

#### 材料

コムギ *Triticum aestivum* L. 胚乳が発達している。

イネ *Oryza sativa* L. 胚乳が発達している。

エンドウ *Pisum sativum* L. 胚乳は退化し、子葉が栄養貯蔵器官をかねている。

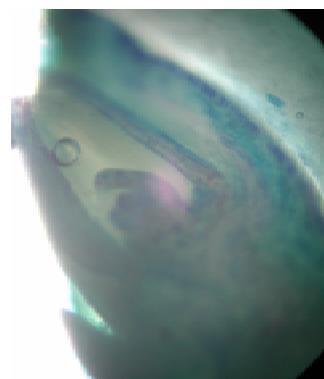


図1 コムギ種子の胚。

#### A. エンドウのスケッチの手順

莢の外観 莢を裂いて種子の配置 種子の外観 カミソリで2つに切断し 種子の内部を観察する。種子の切断方向は胚軸方向（互いに垂直に2方向）と胚軸に直角方向のあわせて3通りとする。

#### B. イネのスケッチの手順

籾の外観 籾殻を外す 玄米である種子（正確には果実）の外観 カミソリで2つに切断し、内部の形態を簡単にスケッチする（胚を含む部分を3方向からそれぞれ切断し、観察する） ピプラトームで作り、トルイジンブルー0.05%水溶液で染色した薄片（厚さ100μm程度）を観察する

#### C. コムギのスケッチの手順

玄麦である種子（正確には果実）の外観 カミソリで2つに切断し、内部の形態を簡単にスケッチする（胚を含む部分を3方向からそれぞれ切断し、観察する） ピプラトームで作り、トルイジンブルー0.05%水溶液で染色した薄片（厚さ100μm程度）を観察する。

スケッチには和名、学名、種子の器官名を記入する。さらにマイクロメーターの検定を読み、スケッチそれぞれにスケール（目盛り）を書き込む。



図3 イネの胚の断面図  
左が幼芽、右が幼根である。

## 2. 芽生えの観察

### 目的

発芽から出芽，定着までは植物の一生の中でもっとも環境変化に弱い時期である．同じイネ科でもコムギとイネでは発芽・出芽の環境も形態も異なっている．マメ科のインゲンマメやダイズは子葉が地表に現れるが，エンドウやソラマメでは子葉は地中に残る．このような発芽・出芽形態の違いを観察し，スケッチすることによって，理解・把握する．

### 材料

コムギ *Triticum aestivum* L. 種子根が数本出てくる．

イネ *Oryza sativa* L. 種子根は1本しかでない．

エンドウ *Pisum sativum* L. 子葉が地中に残り，上胚軸が伸長して，出芽する．

インゲンマメ *Phaseolus vulgaris* L. 下胚軸が伸長して出芽し，子葉が地表に出る．

### 観察

#### 1. コムギとイネの芽生えの観察

コムギは15℃，イネは25℃条件で数日湿らせたろ紙を敷いたシャーレに入れて発芽させたものを観察する．種子根，幼芽などの出現の様子をスケッチに観察する．その後，自分が適当と思う断面構造を，芽生えをカミソリで切断することによって，観察する．

スケッチには種子根，幼芽をそれぞれ赤，緑で色分けすること．芽生えをカミソリで切断して観察したものについては，スケッチの余白に，種子の状態とどのように違うかを簡単に気づいた点について記録する．

#### 2. インゲンマメ（地上子葉型）とエンドウ（地下子葉型）

側面を透明なプラスチックで作った箱にインゲンマメとエンドウの種子を播種して，15℃の条件に1週間程度置き，出芽させ，出芽形態の違いを側面から観察する．

スケッチには下胚軸，上胚軸，子葉をそれぞれ赤，青，黄色で色分けする．



図3 コムギの芽生え  
種子根が3本見える．



図4 イネの芽生え  
種子根は1本だけである．



図5 地下子葉型 (hypogeal) のエンドウ (左)  
と地上子葉型 (epigeal) のダイズの出芽

### 3. 発芽試験

#### 目的

イネ科種子の寿命はおおむね短い．イネでは外気にさらした種子の寿命はだいたい3年ほどである．イネ科種子を低湿度，低温条件で保存するとその寿命を長くできる．今回の実験では デシケーターによる低湿度条件下の保存，冷蔵庫による低温・低湿度条件下の保存によって種子の寿命あるいは栽培，遺伝資源保存の2つの用途に対する有効期限がどの程度延びるのかを調査する．さらに実験結果から種子の保存目的それぞれにどの方法が適するかを考える．

#### 材料と方法

1992～2002年の秋に採種したイネ種子（品種：チドリ）を供試する．それぞれの種子は採種後，翌春まで自然状態で保存し，採種した翌年に塩水選（比重 1.13）し，優良な種子だけを選別した．塩水選以降，以下に述べた方法で保存している．

昨年（2002年）採種した種子（比較対照区）

自然状態で保存したもの（2000, 2001年産：1999年以前の種子の発芽率は昨年で0%になった）

デシケーターで低湿度状態で保存したもの（1992～2001年産のうちからいくつかを選ぶ）

冷蔵庫で低温・低湿度状態で保存したもの（1995～2001年産のうちからいくつかを選ぶ）

全体を6班に分け、 から を分担して調査する。

シャーレにろ紙を敷き、その上に採種年度と保存方法が異なる種子をそれぞれ50粒ずつまく。そのあと水道水を種子がほぼ浸かる程度入れる。シャーレのふたをし、30 に設定した恒温器に入れる。毎日夕方に発芽数を数える。このとき必要ならシャーレに水を補給し、腐敗した種子は捨てる。これを2週間継続する。発芽は芽が種皮を破って、出現した瞬間である（図6）。



図6 イネの発芽

データの解析（発芽勢と発芽率）

今回の実験では発芽率を14日目の発芽割合、発芽勢を5日目の発芽割合とする。種子の寿命は発芽率が0%となったときとする。種子の有効期限は栽培と遺伝資源保存の2つについて「レポートを書くときのポイント」をよく読んで計算する。なお授業のホームページには昨年度までの作物学実験のデータを載せているので、データを補って解析してもかまわない。

レポートの構成

レポートは「目的」、「材料と方法」、「結果と考察」からなるものとし、必ず発芽勢・発芽率の表を載せる。データは自分の班のデータだけではなく、他の班のデータも含めて3反復の平均を取り、それを用いる。A4のレポート用紙に2～3枚とする。班ごとではなく、各自1部ずつレポートを6月16日までに提出する。このあとの指示だけでなく、「文章の書き方」、「科学論文の読み方」もよく読んでレポートを完成させること。

「結果と考察」では以下の「データの処理の仕方」を読み、3つの保存方法での10年後と30年後の発芽勢と発芽率をそれぞれ予測する。

データの処理の仕方

今回のデータからは種子の発芽率が0%になるには何年かかるかはわからないことがある。この場合、しだいに種子に発芽率が年月とともに低下する傾向が一定であると考えて推定する。一番簡単な方法はグラフにこの傾向を書き、適当な線を目分量で書く方法である。より高度な方法は数式をあてはめることである。しかし、生物学的に考えて理論的に適当でない数式でも、数学的に当てはめることは可能なので、数式を当てはめるのに注意が必要である。データが十分にあれば以下のRobertsの式を当てはめることができるだろう。今回のデータは少ないので、適当な線をグラフ上に書き込んで、保存開始から10年後と30年後の発芽勢と発芽率を推定してみよう。

Roberts (1972)によると、種子の寿命が貯蔵温度と種子水分の2要因によって決まるとしたら、種子の平均寿命は以下の式で予測できるという。

$$\log \bar{p} = K_V - C_1 m - C_2 t$$

ここで  $\bar{p}$  は種子の平均寿命（発芽率が50%になるまでの日数）、 $m$  は種子水分（生重ベース%）、 $t$  は貯蔵温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）、 $K_V$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  は実験結果より推定される作物ごとに固有の定数である。イネの場合は、 $K_V = 6.531$ 、 $C_1 = 0.159$ 、 $C_2 = 0.069$  とされている。この式の根拠は種子の生存率の曲線が負の累積正規曲線で表されること、およびその分布の標準偏差が作物によって一定で（イネの場合には0.210）、しかも平均寿命に比例するという実験的な事実に基づいている。すなわちこの種子の寿命の分布は正規分布で近似できる。

今回の低温・低湿度貯蔵の条件が冷蔵庫の温度が3 $^{\circ}\text{C}$ 、種子水分が8%であるとしたら、この種子の

平均寿命は何年になるかを計算してみよう．その答えはレポートの最後に書くこと．

レポートを書くときのポイント

今回，種子の実用性は栽培と遺伝資源保存の2つについて考える．

栽培に使う種子は発芽率が高いだけではだめで，発芽がそろっていないなければならない．発芽勢は発芽がすみやかでかつそろっていることを示す指標である．今回は発芽勢が95%以下になると栽培用の種子としては有効でないと考えよう．

遺伝資源保存のときには種子の更新のたびに遺伝子を失ったり，品種特性を劣化させたりする危険性にさらすのでできるだけ種子を更新しないようにするのが望ましい．しかし，種子の数が少なすぎると遺伝的浮動が生じて，遺伝子が失われる危険性が増す．イネの場合，増殖集団は300個体以上が望ましい．今回は単純化して考える．すなわちイネを1回種子更新すると種子量が100倍になるとする．こうすると種子の発芽率が1%になるとともに種子量に戻る．安全をみて，発芽率が10%以下になると種子更新すると考えて，今回は種子の有効期限を算出する．

それぞれの種子の発芽率，発芽勢以外に3つの保存方法それぞれに対応した種子の寿命，栽培上の有効期限，遺伝資源保存上の有効期限がこの実験から得られる．

なるべく要点をすべて尽くし，かつ簡潔に書くこと．目的は自分なりに考えて農業上の意義も考えて書くこと．このテキストに書いてあることを写すだけではいけない．材料と方法では，自分が実際に行った方法で書くこと．実験をまったく手順に書いてある通りにできることはまれでどこかを変えて行うことがふつうである．また，予想外のことや実験所に書いていないことに気づくことも多い．そういう変更点や気をついた点もきっちりメモすることが大切である．

具体的に数値データを引用して，結果と考察を述べること．図表だけを載せないで，文章で結果を述べること．図表のデータから何を導くかは人によって違うからだ．

乾燥あるいは冷蔵保存でどの程度，種子の寿命あるいは有効期限が伸びたかを考える．

種子の寿命は冷蔵庫保存，デシケーター保存，自然状態で保存の順に長い．冷蔵すると寿命は長い．しかし，そのために余分な設備や費用がいる．栽培用の種子は大量に必要となる．コストについても検討してみよう．ここでは自然状態で6年保存するコストがデシケーターで3年保存，冷蔵庫での1年保存のコストと同等であると単純に仮定する．遺伝資源保存の場合は，失われた遺伝資源は二度と取り返せない，さらに種子更新のたびに遺伝的浮動が起こるので，コストは度外視して考える．

## 解説

### 種子と発芽

#### 1．種子の役割と特性

種子は植物の個体の維持や繁殖に対して重要な意味を持っている．冬の寒さ，夏の乾燥などの厳しい環境に対して種子は独特な抵抗機構を持ち，植物の生活環の中で環境の外圧に対してもっとも安定した形態的ならびに生理的状态にある．種子内の代謝活性はきわめて抑制され，長時間発芽力を保持できる状態にある．種子は植物の一生の始まり（厳密にいうと受精のとき）である．種子には両親の遺伝情報が集まり，変異の増大がなされ，種子繁殖を通して進化が起こる．種子はこのように生物本来の属性である連続性と多様性の担い手としての役割を有している．一方，種子は作物栽培においては収穫対象そのものとなることが多い．種子と発芽生理はそれゆえに重要な研究対象である．

#### 2．種子の構造

種子は発芽し成長していく幼植物である胚（子葉，幼根，幼芽などからなる）と胚の成長するため

に必要な栄養の蓄積された胚乳，こうしたものを保護する種皮などからできている．種によっては胚乳が退化し，胚に栄養が蓄積されている種子を有するものもある．胚乳の発達しているものとしては，イネ科，クワなどがあげられ，胚自身に栄養を蓄積するものとしてはマメ科などがある．

図7 コムギの種子（穎果）とその内部構造．  
左：外形と横断面，中：縦断面，右：胚乳の内部構造

図8 コムギの穎果の内部構造．

図9 コムギの胚（断面）．

図10 イネの籾の構造．  
1：横から見たもの，2：縦断面，3：内穎，4：外穎，  
5：玄米，6：小穂軸，7,8：護穎，9：副護穎と小枝梗

図11 イネの果皮・種皮の構造（玄米皮部の横断面）

図12 イネ（左）とダイズ（右）の胚珠（上段）と種子（中・下段）の縦断模式図

図13 イネ（左）とダイズ（右）の胚珠（上段）と種子（中・下段）の縦断模式図

### 3. 発芽

#### 発芽の条件

種子の発芽には水分、適温、酸素が必要な条件である。  
光が発芽に関与する種もある。

#### 発芽過程

##### A. 吸水 (図 14)

吸水過程は 3 つに分けられる。急激な吸水増加を示す吸水期、これに続く吸水増加の停滞する発芽準備期、再び吸水率の急に増大する成長期である。吸水期は種皮を通して物理的に種子内に水が入る段階である。呼吸もこのときに急激に増える。発芽準備期においては貯蔵養分の消化、各種酵素の活性化、それに引き続き、養分の移動や同化が起こる。このあと幼芽や幼根が伸長し、種子から出現する成長期に入る。

図 14 発芽過程におけるイネ種子の吸水パターン

##### B. 貯蔵養分の消化

発芽当初の幼植物は十分な炭素同化作用ができないので種子中の貯蔵養分の供給を受けて成長する。貯蔵養分はデンプン・脂肪などの高分子化合物であるから、一度、分解・消化されないと種子中の組織を移動できない。種子中の吸水に引き続いて、貯蔵養分の急激な消化が起こる。この過程には多くの酵素が作用する。

##### C. 養分の移動

消化され可溶性となった養分は貯蔵されていた細胞から胚の成長している部分へと移動する。この時点の幼植物には転流のための通導組織は未発達なので、養分の移動は主に拡散に依存している。

##### D. 同化作用

成長中の胚に移動してきた養分から原形質や細胞膜などが合成され、幼根・幼芽・子葉などの伸長が起こり、胚が成長する。分子量の低いものから高分子物質を合成することを同化という。

##### E. 成長

種子の吸水に引き続いて起こる一連の過程を経て、種皮が主に吸水による膨圧の増大によって破られ、幼根や幼芽が出現する。幼根は地中の養分を吸収し、幼芽は地上に出て光合成を行うようになると栄養的に種子の貯蔵養分から独立する。

### 4. イネの種子の発芽と発芽力

#### A. 発芽の過程 (図 15)

外穎の基部 (胚の包まれている部分) が増大する。

外穎を破って幼芽が抽出する (このときをもって発芽したとする)。

幼根が続いて抽出する。幼根の抽出は幼芽の後でも、その後の伸長は速い。

#### B. 環境条件と発芽

酸素濃度……酸素が不足すると根が伸びず、鞘葉が伸びる (図 15, 16)。

温度……最適温度は 30~32℃。それ以下だと発芽が遅くなり、それ以上だと発芽に異常が現れる。

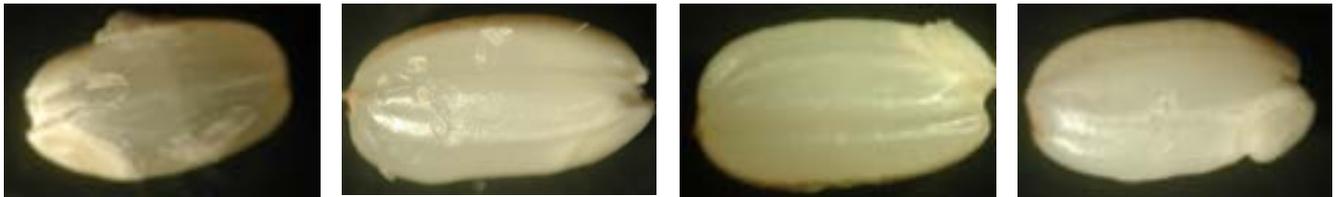
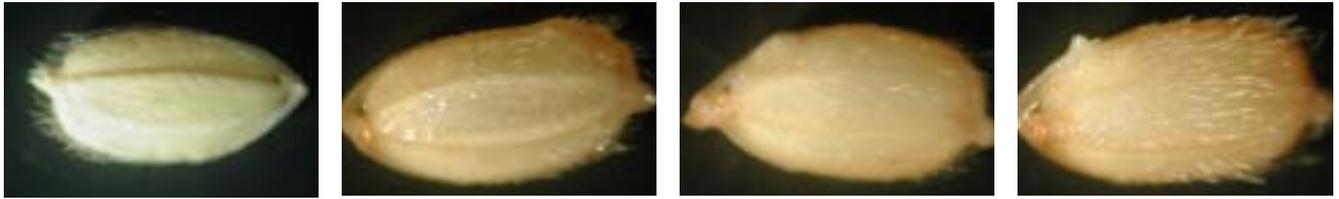
光……発芽に光は無関係である。発芽後の暗黒は鞘葉、メソコチルが伸長する。暗黒下では葉緑素は形成されない。胚乳を消費して、第 4 葉が抽出するところまで成長できる (図 17)。

#### C. 発芽と予措

以下の 3 点の条件を満たすことが作物としてのイネにおける発芽には重要である。この目的のため

めに選種・浸種・催芽を行う（「資料 水稻栽培法」参照）。

a . 正常かつ円滑に成長する , b . 健全な苗となる , c . よくそろった発芽をする .



24 時間後 , 上 : 籾 , 下 : 籾殻を向いた玄米の状態

48 時間後 , 上 : 籾 , 下 : 籾殻を向いた玄米の状態

60 時間後 , 上 : 籾 , 下 : 籾殻を向いた玄米の状態

72 時間後 , 上 : 籾 , 下 : 籾殻を向いた玄米の状態



96 時間後 ( 籾 )

120 時間後 ( 籾 ) . 水につけたために酸素不足のため , 根が伸びないで鞘葉だけが伸びている .



84 時間後 , 上 : 籾 , 下 : 籾殻を向いた玄米の状態

図 15 浸種 25 から 24 時間後 , 48 時間後 , 60 時間後 , 72 時間後 , 84 時間後 , 96 時間後 , 120 時間後



図 16 酸素のある条件で発芽させた場合 . 最初は鞘葉が出現するが , すぐに幼根も抽出する .

図 17

暗黒下で発芽成長したイネ . この大きさまで育ったところで胚乳を使い尽くし , 成長は停止し , 枯死する .

#### D. イネの種子検査

種子検査とは種子の栽培上の利用価値をさまざまな方法で評価することである。種子検査には発芽能力、休眠程度、夾雑物の割合、種子伝染性病菌の有無が含まれる。このうち発芽試験はもっとも端的に種子の良否を判定する重要な検査である。

種子を発芽しやすい環境に置き、どのくらいの割合の種子が何日程度で発芽するのかを調

べるのは発芽試験である。イネの場合、種子を水に浸して30の条件下に置き、次の2つを調査する。  
発芽勢：5日目の発芽割合（発芽揃いの良さの指標）

発芽率：14日目の発芽割合（種子の生存率の指標）

種により、発芽最適温度、発芽に要する日数は異なる。各種作物の発芽試験の基準温度、発芽率、発芽勢の定義を表1に示した。表1の発芽温度で20-30を16時間、30を8時間の変温を与え

#### 5. 出芽

地中で発芽し、幼芽と幼根を出した種子は胚乳や子葉に蓄えられた養分を活用しながら従属栄養成長を続け、土壤中を伸長し、やがて地上に出現する。これを出芽といい、発芽とは区別する。出芽後は光合成を始め、しだいに独立栄養成長へと移行する。発芽から出芽に至る土中での生活期間は土壤微生物、土壤の機械的圧迫、温度、水分、酸素、二酸化炭素、光などの影響を受ける。これらの要因は季節、時刻、土中の位置などで著しく変動するから、時に出芽できない場合も起こる。出芽しても種々の欠陥のために独立個体にできない場合、作物同士あるいは雑草との競争に負けて農業上無価値になる場合もある。正常な生育を継続できる状態に達した時を定着したと呼ぶ。農業上は、発芽そのものよりも出芽・定着の過程の方が直接的な重要性を持つ。

#### 出芽過程

イネ科種子では発芽後、鞘葉が伸びて出芽する。しかし、深播きした場合、イネではメソコチルが伸び、鞘葉を地表まで押し上げる。一方、コムギでは第1節間（鞘葉節と第1本葉の間の節間）が伸び、第1本葉を地表に押し上げる。

作物は出芽の仕方によって、地上子葉型（epigeal）と地下子葉型（hypogeal）に分けられる（図18）。地上子葉型はダイズ、インゲンマメ、ワタなどのように子葉が先に地上に抽出し、その後、本葉が出現する。地下子葉型はアズキ、エンドウ、ソラマメなどのように子葉が地下に残って地上には現れない。ダイズのように子葉の大きい種子では、子葉を地上に押し上げるには強い下胚軸後からで大きい土壤抵抗に打ち勝たなければならない。このとき幼芽は子葉の中で保護される。しかし、マメ科の子葉には初期生長のための栄養が貯蔵されており、地表に子葉を出すと鳥や虫の食害を受けやすくなる。

地下子葉型の幼芽の先はかぎ状に曲がり、土壤貫通には好都合な形態をしているが、幼芽が土壤を裸出して伸長するので直接的な傷害を受けやすい。

#### 出芽と環境

出芽は種子の大きさ、播種深度、土壤強度、土壤水分、酸素などの影響を受ける。

表1 種子発芽試験の基準

作物名	発芽温度 ( )	締め切り日数	
		発芽勢	発芽率
イネ	30	5	14
コムギ	20	4	10
トウモロコシ	30	4	7
ダイズ	30	5	8
ワタ	25	4	12
ソバ	20-30	3	6
タバコ	20-30	7	14

図18 ダイズ（地上子葉型）とエンドウ（地下子葉型）の幼植物  
C：子葉，E：上胚軸，H：下胚軸

一般に種子が大きいほど出芽能力が高い。環境が同一であれば種子が大きく、播種深度が浅いほど出芽が速やかであり、出芽歩合も高くなる。トウモロコシでは播種深度が 2.5cm 深くなると出芽が 1 日程度遅れる。深播きは種子周辺の水分が豊富になるという利点があるが、長期間にわたり幼植物が土中にあるので、衰弱したり、病虫害を受けたりしやすく、日本のように土壤水分が過剰になりやすい条件では酸素不足になることも起こる。

土壌が硬いと出芽が困難である。大型トラクターなどで固められた土壌では根の伸長が阻害され、出芽や出芽後の定着が困難になる。土壤水分の過不足も出芽の成否に影響する。過剰な水分は水分そのものよりも土壌中の酸素不足を引きおこし、酸素欠乏あるいは還元状態によって土壌中に生成した種々の化学物質の影響によって出芽が阻害される。イネは酸素の少ない条件でも健全に発芽する能力を持っているが、還元状態の土壌に生成される種々の化学物質の影響を受けて出芽が悪くなることが知られている。水稻の湛水土中直播では催芽種子を過酸化カルシウム（カルパーと呼ぶこともある）でコーティングして酸素を供給してやることによって発芽を良好にしている。

図 19 土壌で傷害を受けて出芽できないダイズ幼植物。

A：正常に出芽したもの、B：罹病したもの、C：機械的傷害、D：とぐろを巻いたもの、子葉 1 枚脱落、E：タネバエ食害のもの



図 20 各種作物の芽生え。シャーレに紙を敷いて、適度な水分条件に保って 20 前後の室温下で発芽させた。左から、オオムギ、エンバク、ソバ、ダイズ、トウモロコシ



図 21 各種作物の出芽（プランターにマサ土とグリーンソイル覆土用を詰めて、適宜灌水して出芽させた場合）。

左から、ライムギ、ソバ、トウモロコシ、ソルガム、ダイズ

MEMO