

平成 17 年度 農学研究科 修士論文

ワイルドライスの生育
及び
収量性に関する研究

Growth and Yielding Ability in Wild Rice

宇都宮大学大学院農学研究科
生物生産科学専攻
穴澤拓未

目次	
要旨	1
序論	2
第1章 ワイルドライスの生育および収量性	5
第2章 ワイルドライスにおける選抜調査	30
第3章 ワイルドライスにおける電気炊飯器の使用が食味に与える影響	35
第4章 ワイルドライスにおけるカルス誘導および再分化に関する検討	41
第5章 ワイルドライスにおける破生通気組織の観察	52
総合考察	63
Summary	66
謝辞	68
引用文献	70

要旨

ワイルドライス (*Zizania palustris* L.) は、湛水条件下で生育するので、休耕田対策の作物として導入することが考えられる。本研究は、ワイルドライスの日本における栽培の可能性を探る目的で行った。

生育に関して、草丈は水稻と比較するとやや高く、穂数は多く、多収の可能性があった。畑条件で生育させたワイルドライスは根が成長に十分な養水分を吸収できずに枯死した。成長解析では、CGR の値は生育期間の前半では LAI が大きく寄与しており、後半では NAR に支配されている傾向を示した。太陽エネルギー利用効率 (Eu) の平均値は 2005 年に 1.26% であった。ワイルドライスの収量は 2005 年の平均で 175kg/10a であった。

導入した集団の選抜を行い、早生・晩生系統、短稈・長稈系統を作出した。

ワイルドライスは電気炊飯器で調理が可能であった。最適な水加減としてワイルドライス 1 : 水 4 が食味に最も優れていた。

ワイルドライス完熟種子からカルスを誘導させることに成功したが、再分化した植物体を得ることはできなかった。

根、茎および葉において破生通気組織 (通気孔) が観察された。その他の諸形態ではイネとの共通点が多く認められた。

キーワード：カルス，形態，生育，収量，ワイルドライス。

序論

ワイルドライス (*Zizania palustris* L.) は別名アメリカマコモと呼ばれる, イネ科マコモ属の植物 (n=15 の植物) である. ワイルドライスの学名は *Z. palustris* であるが, アメリカで発表された論文では *Z. aquatica* の名称を使う研究者が多い. 両種はおそらく同一の「生物種」に属すると思われる (岡 1989). 子実部を食用とし, 主にアメリカ・カナダにおいて, 分布・栽培されている. また, 一般に「マコモ」または「マコモタケ」と呼ばれるものは, ワイルドライスとは別種の *Zizania latifolia* Turcz. を指し, 子実ではなく, 黒穂菌を寄生させて肥大化した幼茎を食用とする (小山 1984, Terrell and Bartra 1982).

近年, 減反政策に伴う休耕田の増加を背景に, 休耕田対策の作物の試作が各地で行われている. その1つとして, ワイルドライスはいくつもの有望な性質を備えている.

湛水条件下で生育できるため, 水田栽培の可能性が高いと考えられ, 休耕田における水田再編対策として興味深い作物である (源馬ら 1993). また, 水田を湛水状態で使用できるため, 新規投資をほとんど必要としないというメリットがある. 収穫指数は平均 11%, 最高 17% に達する (Willson and Ruppel 1984). 穂の構造と開花習性から他殖性の植物と考えられる. しかし, 完全な他殖性植物ではなく, 明石 (2003) の自家受粉率の調査では自家受粉率が 4.55% から 4.76% であったと報告されている.

また, ワイルドライスの子実は栄養的価値が極めて高く, 健康食品としても注目されている. 白米と比較してみると, タンパク質は約 2 倍, 食物繊維は約 3 倍, マグネシウムは 4.6 倍, リンは 3.6 倍, 鉄は 5.3 倍である. ビタ

ミン類ではその比率はなお著しく，B1は6.4倍，B2は21.0倍，ナイアシンは3.9倍と，タンパク質，ミネラル，ビタミン含有量が極めて高いのが特長である(Oelke 1976, 村上 1988)．ワイルドライスは，栄養的価値の高さに加えて、『穀物のキャビア』と称されるほど食味がすばらしいことが既に知られている(有松・林 1985)．日本での販売価格は，1キログラム当たりおよそ2000円～4000円で，白米のおよそ5倍～10倍という高級食材となっている．日本で販売されているワイルドライスは全て北米などからの輸入によるもので，国産ワイルドライスの商業的な栽培は報告されていない．

さらに，ワイルドライスはイネの生育しない寒冷地の湿地に生えやすいので将来の穀物資源として注目される．また，*Zizania* 属植物はイネ属とも近縁であるから，将来は水稻に対する遺伝子(例えば耐冷性遺伝子)の供給源としても期待される(Terrell and Bartra 1982, 小山 1984)．

ワイルドライスは北米の湖や河に自生している植物であるから，日本の水田のような湛水条件下で生育が可能である．その植物形態学的根拠として，破生通気組織の存在が考えられる．植物の根は，通常過湿条件下において呼吸することができず，窒息死する．イネやハスなど，過湿条件に適応する植物では根の内部に通気組織を持っており，地上部から酸素を根にまで送り届けている．ワイルドライスにおいても同様な機能を有するかどうかについての報告は少ない．

以上のような背景の下に，本研究はワイルドライスの日本における栽培の可能性を探る目的で行った．

本論文は5章から構成されている．1章では生育と収量性について検討し，2章では選抜に関して検討を行った．また，3章ではワイルドライスの下ごしらえを電気炊飯器で代用できる可能性を検討し，4章では完熟種子からのカ

ルス誘導，さらにカルスからの再分化について検討した．5章では破生通気組織・諸形態を観察し，考察した．

第 1 章 ワイルドライスの生育および収量性

緒言

マコモ (*Zizania*) 属植物はイネ族 (*Oryzaceae*) に属し, *Zizania palustris* L., *Zizania aquatica* L., *Zizania texana* Hitchcock および *Zizania latifolia* Turcz. の 4 種がある. *Zizania latifolia* Turcz. は東アジア原産であり, 他の 3 種は北アメリカ原産である. また *Zizania palustris* L. と *Zizania aquatica* L. は, ともに一年生であり, ワイルドライスと呼ばれている. 他の 2 種は多年生である (渡部ら 1986).

ワイルドライスは北アメリカ唯一の固有の穀物で古くからアメリカ先住民の採集食糧であった. カナダではオンタリオ, マニトバ, サスカチュワンなどの諸州で, 主として浅い湖水や河の自生集団から収穫されるのに対し, アメリカ合衆国では 20 世紀後半から栽培化が始まった. 野生集団から選抜育成された K2 や Netum などの現在の栽培品種は, 完全な栽培型ではなく, 脱粒性や種子休眠, 出穂の同時性等の面で野生型の特徴を持つことが栽培の障害となっている (Oelke 1993).

本章では, ワイルドライスの日本における栽培の可能性を探るため, その生育と収量性を調査する目的で行った. 2004 年は水田及び畑条件で, 2005 年は水田のみで調査を行った.

材料と方法

育苗方法 :

2004 年と 2005 年に宇都宮大学峰キャンパス内のガラス室 (自動開閉システ

ム $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ に設定。)内で行った。 供試品種は 2002 年に名古屋大学和田富吉先生から譲渡していただいた品種 Z-13K2 を毎年世代更新したものをを用いた。 種子は 2004 年, 2005 年共に前年収穫後 1 週間以内に 70% エタノール中に 3 分間浸漬して殺菌し, 冷蔵庫内(約 5°C 前後)で水中保存したものをを用いた。 播種は, 2004 年には 3 月 29 日と 4 月 13 日に, 2005 年には 4 月 4 日と 4 月 18 日に 60cm×30cm×3cm の田植機移植用育苗箱に行った。 床土は水稻用育苗培土(日本培土, ゼオライト入り)を 1 箱あたり 2cm 程度の深さに入れた。 育苗培土の肥料成分は, 1 箱当たり N 1.0g, P3.0g, K1.5g であった。 また, 覆土としてパーミキュライトを, 出芽率を高めるため播種後の育苗箱に薄く散布した。

試験区及び栽培方法：

2004 年, 2005 年共に宇都宮大学峰キャンパス圃場 (黒ボク土の圃場)に移植した。 施肥は有機配合ひとふりくん(8-8-8)を 40kg/10a 施用した。 2004 年において, 水田への移植は 4 月 21 日と 5 月 6 日に行い, 前者を早植え区, 後者を遅植え区とした。 栽植密度は 22.2 株(30cm×15cm)とし, 1 株あたり 1 本植えて水田に移植し, 反復は設けなかった。 畑への移植は 5 月 6 日に 1 株あたり 1 本植えて, うね幅 60cm, 株間 5cm の密度で行った。 畑の施肥条件は化成肥料(3-10-10)を 67kg/10a と被覆尿素 LP100(尿素含量 40%)を 5kg/10a とした。 また畑条件における灌水は天水によるもののみとした。 2005 年において, 水田の移植は 4 月 28 日と 5 月 12 日に行い, 前者を早植え区, 後者を遅植え区とし, 栽植密度 22.2 株の 1 株 3 本植えて移植した。 また, コシヒカリを同じ条件で隣接して移植した。 移植の 20 日前に浸種・殺菌・催芽を施したコシヒカリの種粒を育苗箱に 1 箱あたり 50g(乾粒重)播種し, 宇都宮大学環境調節

実験棟 32/27℃室で出芽させ、22/17℃室で育苗したものをを用いた。

両年ともに生育期間中の除草は、除草剤を使用せず物理的に行った。また、イネミズゾウムシの発生が多かったため、移植後 10 日に殺虫剤トレボン 10a あたり 2kg 散布した。また、ワイルドライスは収穫期の脱粒性が激しいので、完熟前の穂に袋かけを行った。

調査項目

生育調査：

2004 年には水田および畑において生育が平均的な 5 個体を対象に、草丈・茎数・葉数・葉色・葉面積・乾物重(葉身・葉鞘・茎)の 6 項目を調査した。移植期から収穫期まで 2 週間おきに計 5 回行った。2005 年には水田のワイルドライスおよびコシヒカリについて生育が平均的な 5 個体を対象に、草丈・茎数・葉緑素示度 (SPAD)・葉面積・乾物重(葉身・葉鞘・茎)の 5 項目を 2 週間おきに計 9 回調査した。草丈は地際から最上位葉の先端もしくは穂の先端までを測定した。茎数は主茎と分けつ数の和とした。葉数は第 1 葉(不完全葉)を含む展葉数を調査した。葉緑素示度の測定には、葉緑素計 (SPAD-502, ミノルタ)を用い、最上位完全展開葉中央部 5 箇所を測定し、その平均値を求めた。葉面積は自動面積計林電工 AAM-8 型を用い、完全に枯死した部分は除いて計測した。葉身・葉鞘・茎に分け、80℃の通風乾燥機を用いて 72 時間以上乾燥させ、乾物重を測定した。

成長解析：

成長解析は、石井・深川(2004)の方法に従って、以下の項目について行った。本試験は植物体の地上部のみを解析の対象とした。

面積当たりの乾物重の増加速度，すなわち個体群成長速度(crop growth rate;CGR, $g\ m^{-2}day^{-1}$)を，次式で計算した．

$$CGR=(W_2-W_1)/(t_2-t_1)$$

ここで W は土地面積当たりの乾物重(g)， W_1 と W_2 はそれぞれ時期 t_1 および t_2 における土地面積当たりの乾物重である．

また，CGR は $CGR=NAR \times \overline{LAI}$ と表される．

NAR は，個体群における純同化率(net assimilation rate ;NAR, $g\ m^{-2}day^{-1}$)で，次式で計算した．

$$NAR=(W_2-W_1)/(t_2-t_1) \times (\ln L_2 - \ln L_1)/(L_2 - L_1)$$

ここで L は，土地面積当たりの葉面積(m^2)，つまり葉面積指数(leaf area index;LAI, m^2m^{-2})である． L_1 と L_2 はそれぞれ t_1 および t_2 における葉面積指数である．

また， \overline{LAI} ，平均葉面積指数を，次式で計算した．

$$\overline{LAI}=(L_2-L_1)/(\ln L_2 - \ln L_1)$$

ここで， L_1 と L_2 は，それぞれ t_1 および t_2 における葉面積指数である．

葉面積も時間の経過とともに指数関数的に増加することから，相対葉面積成長率(relative leaf growth rate;RLGR, $cm^2cm^{-2}day^{-1}$)を，次式で計算した．

$$RLGR=(\ln L_2 - \ln L_1)/(t_2 - t_1)$$

ここで， L_1 および L_2 はそれぞれ t_1 および t_2 における葉面積指数である．

生殖成長ステージに関する調査：

ワイルドライスの生殖成長の開始時期およびその程度を調査する目的で，全乾物重における茎の割合を調査した．なお，この場合の全乾物重とは地上部のみを指し，茎とは出穂後は穂を含む．

太陽エネルギー利用効率の調査：

作物の収量は収穫部位に蓄積された太陽エネルギーの乾物換算値とみなすことができ、太陽エネルギーをいかに効率的に子実生産に結びつけるかが作物の生産性を考える上で重要な課題である(山本ら 1996)。

地上部乾物重および全天日射量より、ワイルドライスの太陽エネルギー利用効率(Solar Energy utilization; E_u , %)を次式より算出した。また、植物体のエネルギーは乾物 1g あたり 16800J で計算した(吉田 1995)。

$$E_u(\%) = [(W_2 - W_1) \times 16800] / \text{全天日射量}$$

ここで、 W_1 と W_2 は、それぞれ t_1 および t_2 における土地面積当たりの地上部乾物重である。また、全天日射量も t_1 から t_2 の間の積算値である。

収量調査：

2004年において収穫は早植え区・遅植え区ともに8月2日に行った。2005年において早植え区の収穫は8月11日、遅植え区の収穫は8月17日に行った。生育が平均的な10個体を対象に収量構成要素として、穂数(本/m²)・1穂籾数・稔実歩合(%)・子実1000粒重(g)を調査し、子実収量を算出した。稔実歩合とは全籾数のうち結実籾数(全籾数から不稔籾数を除いたもの)の占める割合を示す。子実収量は72時間80℃で通風乾燥後、水分15%に換算して算出した。

気温・日射量調査：

ワイルドライス生育期間中の気温および全天日射量の値を気象庁の地域気象観測システム『アメダス(AMeDAS, Automated Meteorological Data

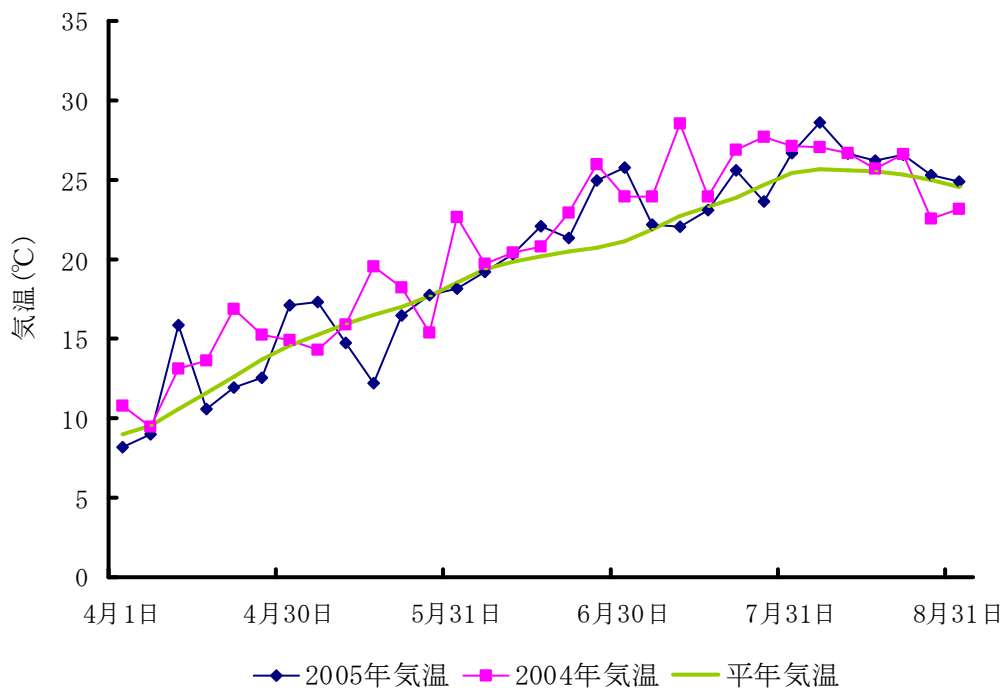
Acquisition System)』(注; <http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>より)を用いた。観測地点は宇都宮市とした。

結果

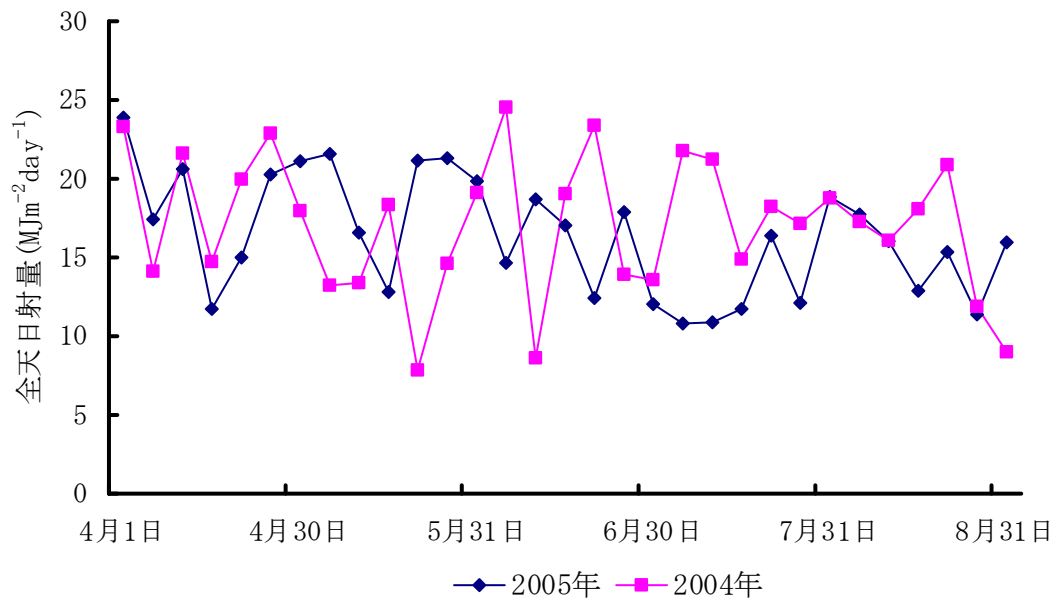
生育経過：

2004年と2005年のワイルドライス生育期間中の気温の推移を第1-1図に示した。また、第1-2図にワイルドライス生育期間中の全天日射量(日合計)の推移を、また、第1-1表に月ごとの全天日射量(日合計の平均値)を示した。第1-1図より、2004年、2005年ともに、ワイルドライス生育期間中の気温は概ね平年を上回る日が多かった。また、第1-2図、第1-1表より、ワイルドライス生育期間中の全天日射量は、2004年と2005年の比較において、5月は2005年の方が約 $4.3\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ 多かったが、それ以外の月は、2004年の方が約 $1.0\sim 5.2\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ 多かった。

2005年7-8月のコシヒカリの圃場において、主に乳熟期～糊熟期の小穂が、スズメ・ムクドリ等によって食害を受けた。対策として、早期に防鳥ネット等の設置が必要であった。従って、コシヒカリの生育調査における移植14週以降の乾物重に関するデータは省略することとする。ワイルドライスに関しては、早期に袋かけを行ったため、鳥による食害はみられなかった。



第1-1図 ワイルドライス生育期間中の気温の推移.
(半旬別平均値)



第1-2図 ワイルドライス生育期間中の全天日射量の推移.
(半旬別平均値)

第1-1表 ワイルドライス生育期間中の全天日射量.

	4月	5月	6月	7月	8月
2004年	18.9	14.6	17.2	18.8	16.1
2005年	17.9	18.9	15.5	13.6	14.9

数値は日合計の月平均値(MJ m⁻²day⁻¹).

生育調査：

2004年と2005年の草丈の推移を第1-3図に示す。図中の早WR区，遅WR区はそれぞれ早植えワイルドライス区，遅植えワイルドライスを表す。同様に早コシ区，遅コシ区はそれぞれ早植えコシヒカリ区，遅植えコシヒカリ区を表す。収穫期における草丈は2005年にコシヒカリでは100cmほどであったが，ワイルドライスでは150cmほどであった。ワイルドライスにおける2004年と2005年比較では2005年のほうが30cmほど高かった。また，早WR区と遅WR区の比較では，2004年，2005年ともに，遅WR区の方が草丈の生育が早い傾向を示した。一方，畑区に関しては移植後6週には出穂した個体があったが，移植を行ってから草丈の成長はほとんどなく，移植後10週に枯死した。

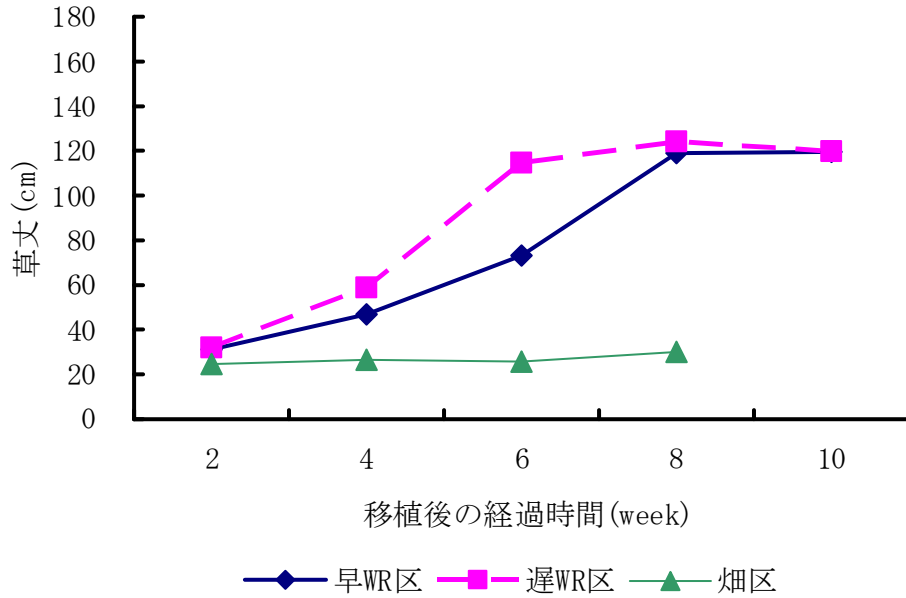
2004年と2005年の茎数の推移を第1-4図に示す。収穫期の茎数は，2004年(1株1本植え)に9本，2005年(1株3本植え)に12本であった。なお，2005年にコシヒカリでは17本ほどであった。また，早WR区と遅WR区の比較では，2004年，2005年ともに遅WR区の方が茎数の増加が早い傾向を示した。また，畑条件のワイルドライスにおいて分けつは見られなかった。

葉齢については2004年のみ調査を行った。第1-5図に葉齢の推移を示した。ワイルドライスは移植後4～6週に，葉齢9～10で止葉が出現し，出穂した。畑条件では移植後6～8週に出穂した。

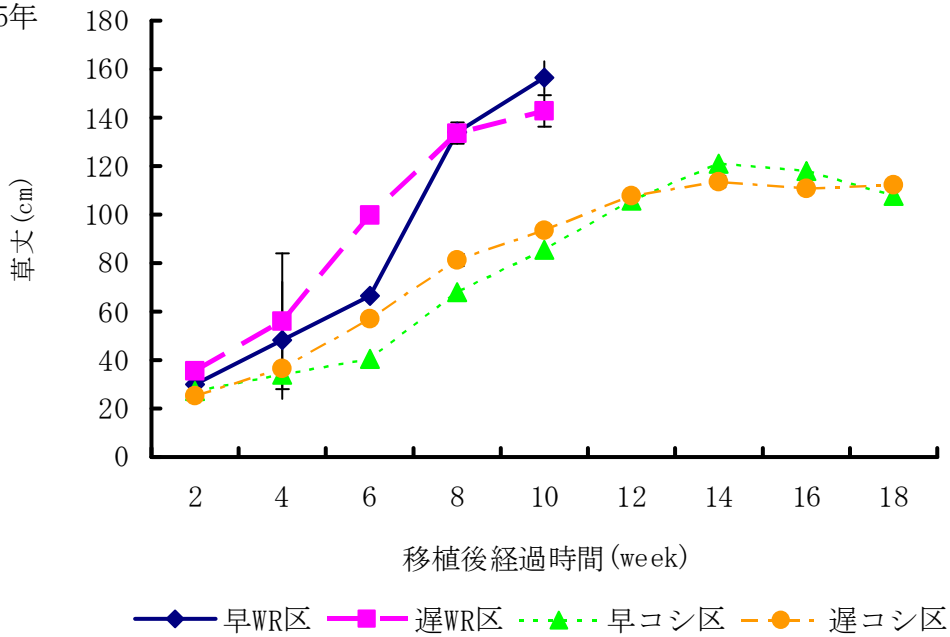
2004年と2005年の葉緑素示度(SPAD値)の推移を第1-6図に示す。2005年においてワイルドライスのSPAD値の最大値は移植後6～8週で45前後であり，コシヒカリの最大値40前後よりも高い値を示した。2004年においても，ワイルドライスのSPAD値は早WR区，遅WR区ともに移植後4～10週において45前後で推移した。なお，2005年の収穫期におけるSPAD値の比較では，ワイルドライスは収穫期においても高い値を維持した。畑条件におけるワイル

ドライスでは、移植後2週から20前後で推移し、移植後8週にやや低下した。

2004年



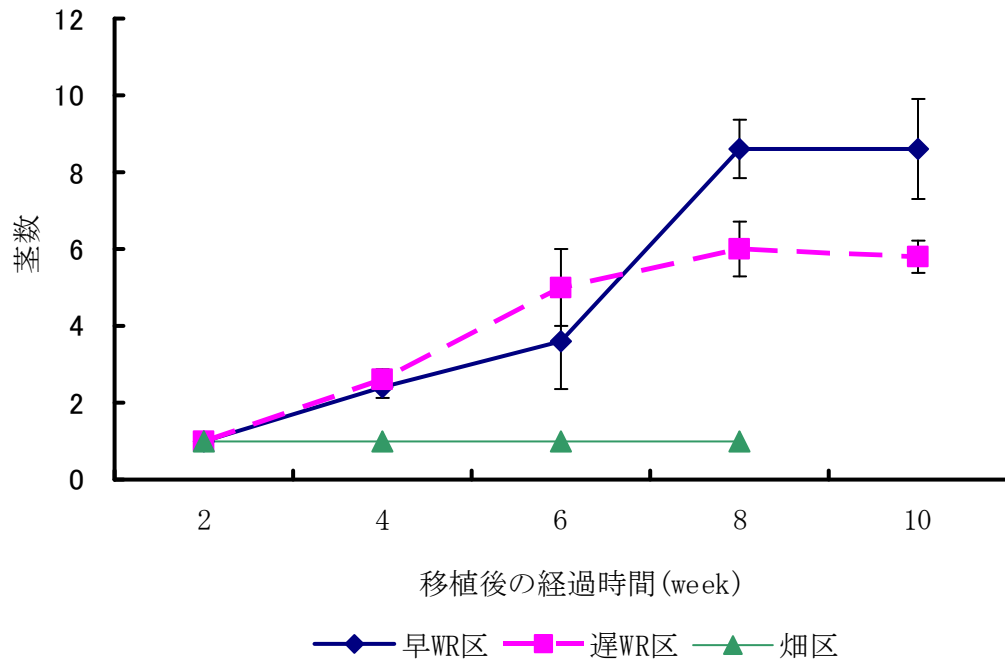
2005年



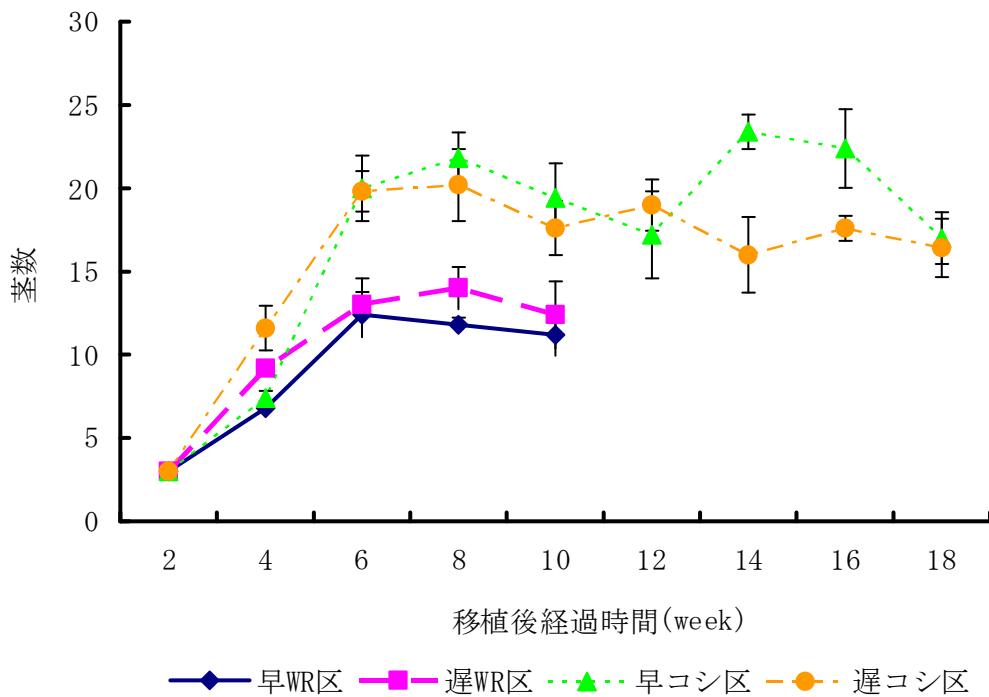
第1-3図 草丈の推移(2004年, 2005年)。

縦線は5個体の標準偏差。表示していないものは シンボル内に含む。

2004年



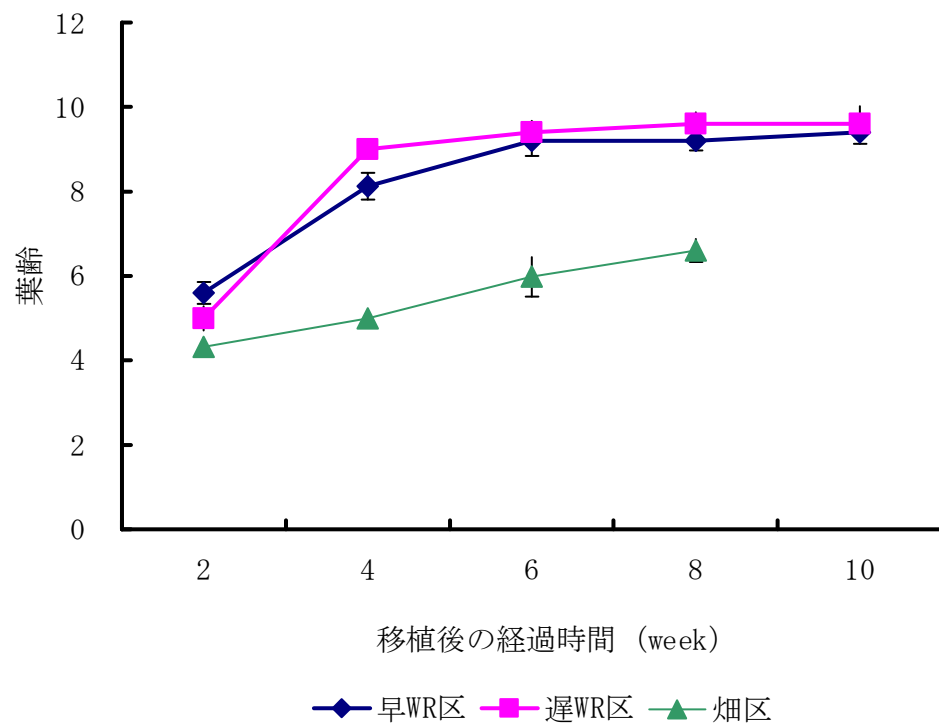
2005年



第1-4図 茎数の推移(2004年, 2005年).

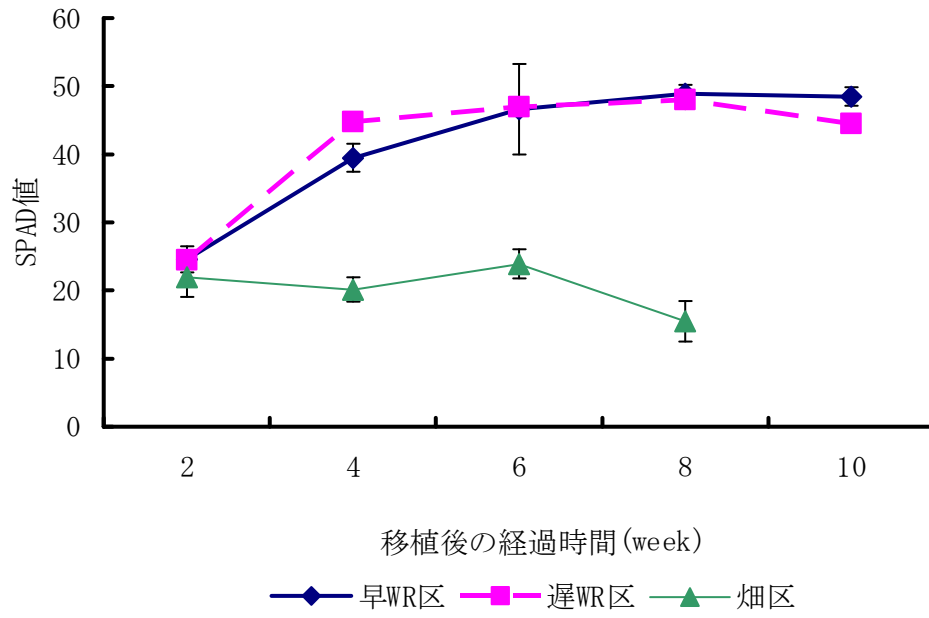
縦線は5個体の標準偏差. 表示していないものは シンボル内に含む.

2004年

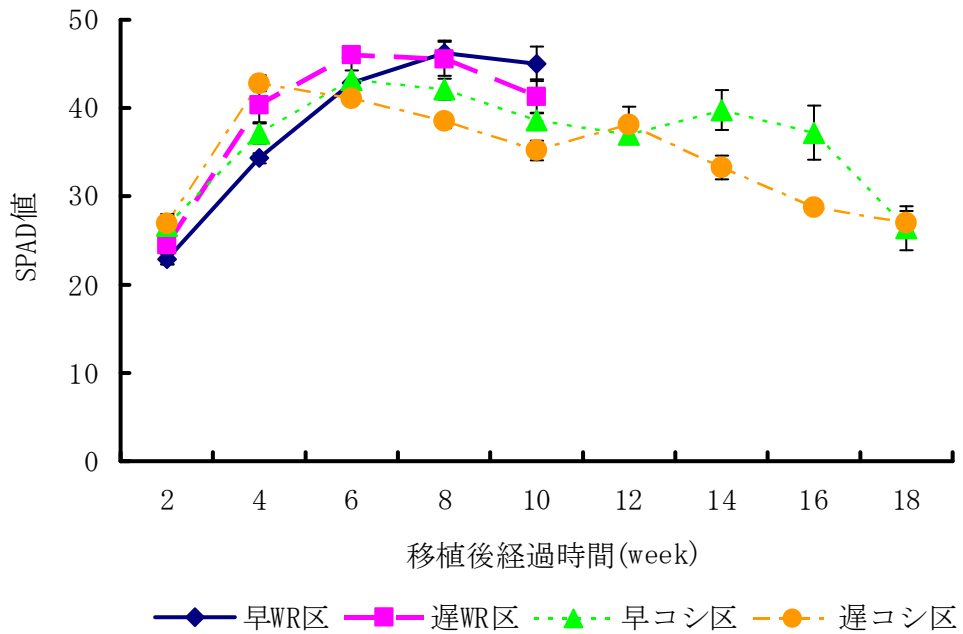


第1-5図 葉齢の推移(2004年).
縦線は5個体の標準偏差. 表示していないものは シンボル内に含む.

2004年



2005年



第1-6図 葉緑素示度 (SPAD値) の推移 (2004年, 2005年).
縦線は5個体の標準偏差. 表示していないものは シンボル内に含む.

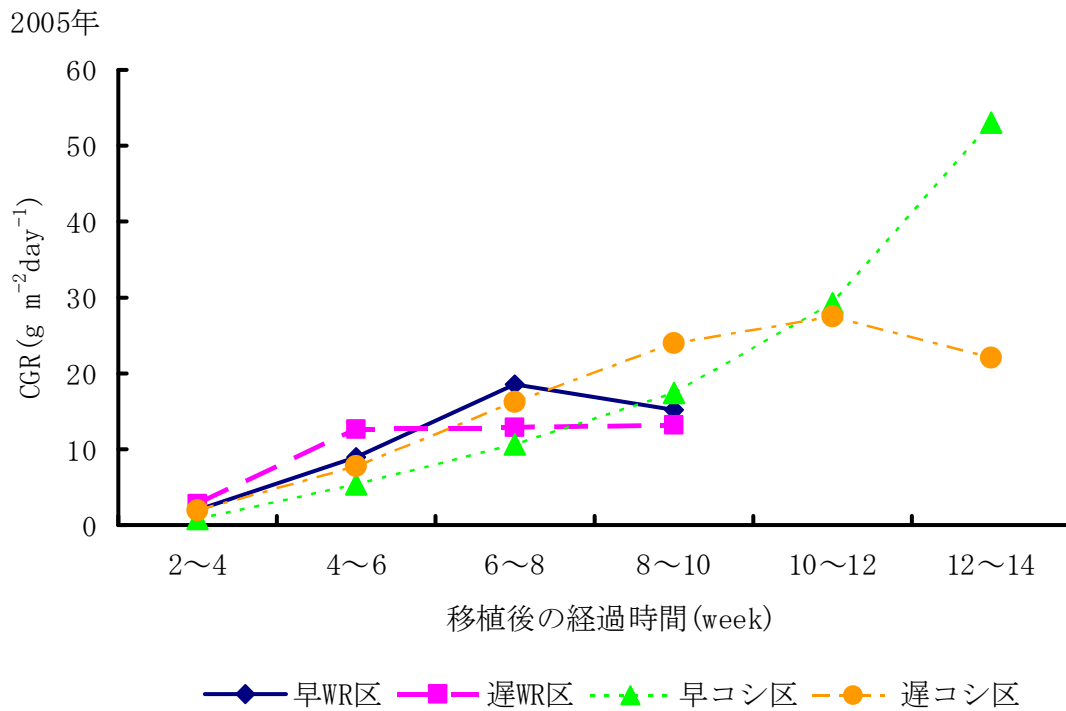
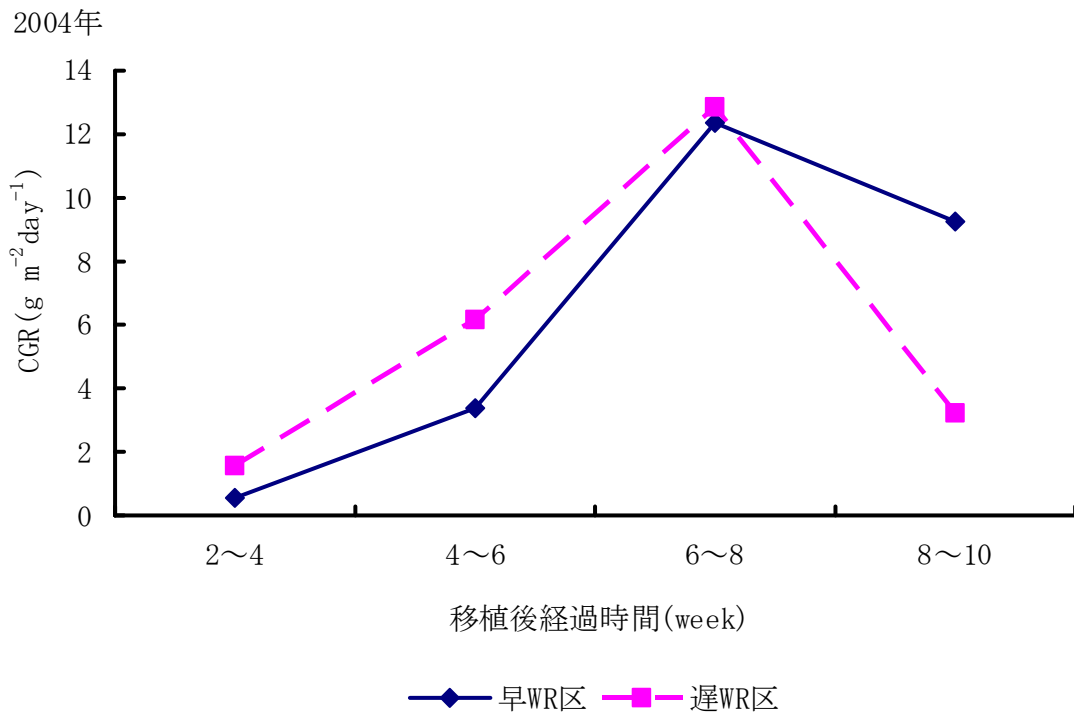
成長解析：

2004年と2005年のCGRの推移を第1-7図に示した。ワイルドライスのCGRは、2004年、2005年ともに移植後6~8週に最大値をとり、その後減少する傾向がみられた。最大値は、2004年に遅WR区で約 $12.9 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、2005年に早WR区で約 $18.5 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ であった。

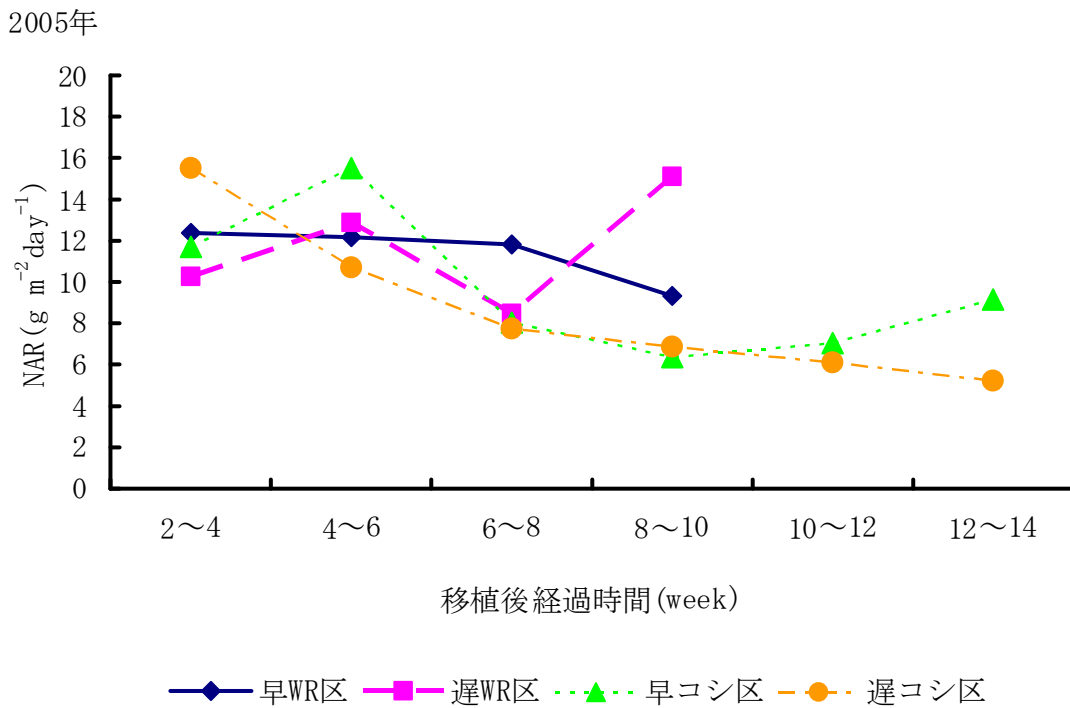
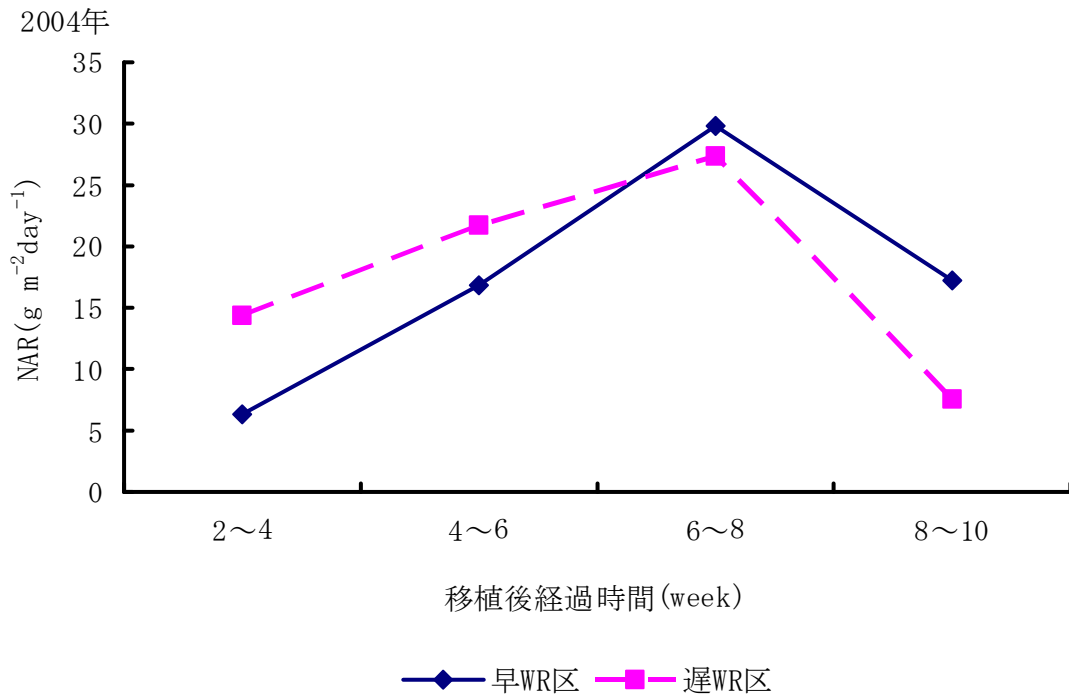
2004年と2005年のNARの推移を第1-8図に示す。ワイルドライスのNARは2004年には移植後6~8週に早WR区で最大値約 $29.8 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ をとり、2005年には移植後8~10週に遅WR区で最大値約 $15.1 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ を示した。2005年のコシヒカリでは、概ね生育とともに緩やかに減少する傾向を示した。

2004年と2005年の平均LAIの推移を第1-9図に示す。ワイルドライスの平均LAIは、2004年、2005年ともに概ね生育とともに増加する傾向を示したが、両年とも遅WR区において移植後8~10週にはやや減少した。最大値は2004年に移植後6~8週に早WR区で $0.54 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ 、2005年には移植後8~10週に早WR区で最大値約 $1.62 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ を示した。

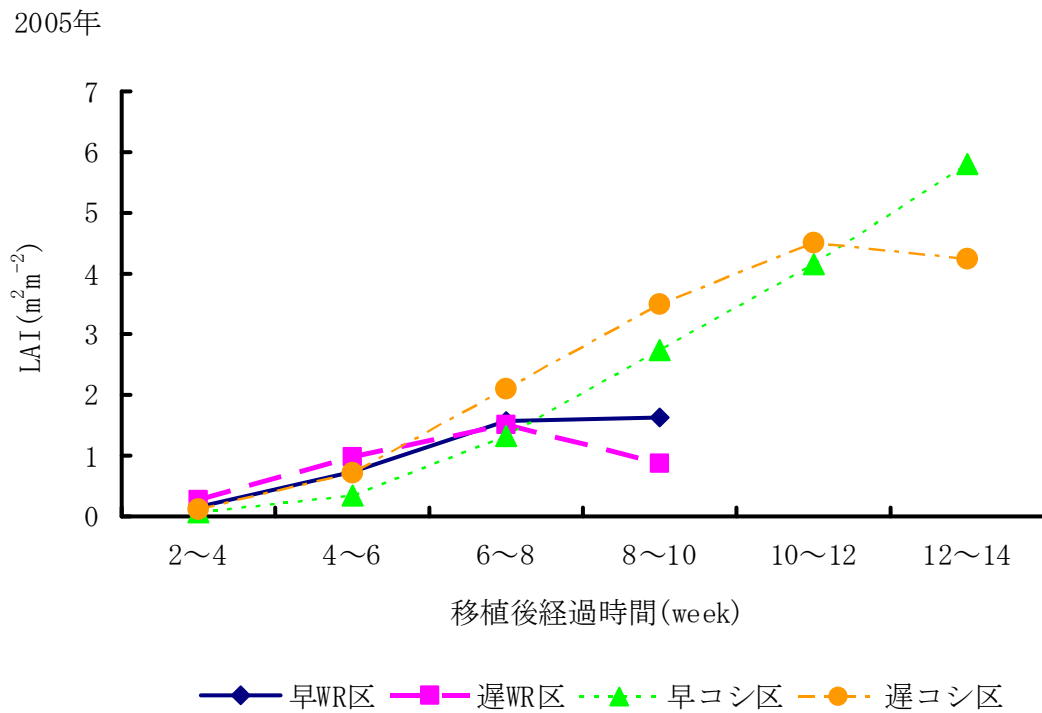
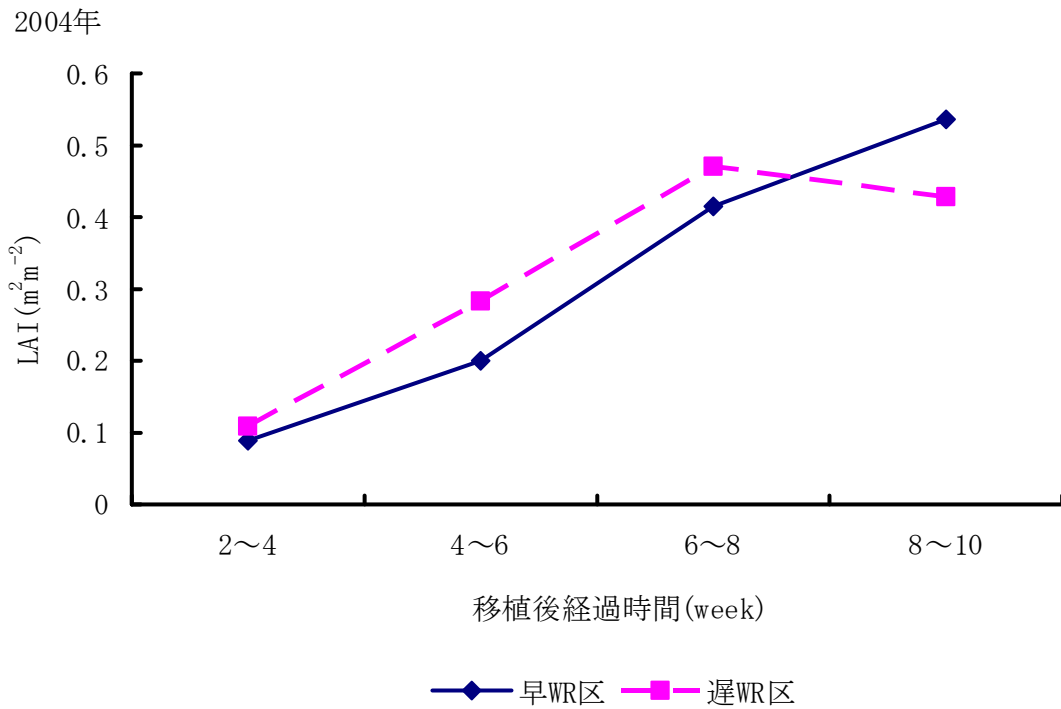
2004年と2005年のRLGRの推移を第1-10図に示した。ワイルドライスのRLGRは2004年、2005年ともに概ね移植直後に最大値をとり、生育とともに減少する傾向がみられた。最大値は2004年に遅WR区で約 $0.098 \text{ m}^2\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、2005年に早WR区で約 $0.126 \text{ m}^2\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$ であった。また、ワイルドライスは移植後8~10週にはマイナスの値をとり、葉面積が減少したことが示された。



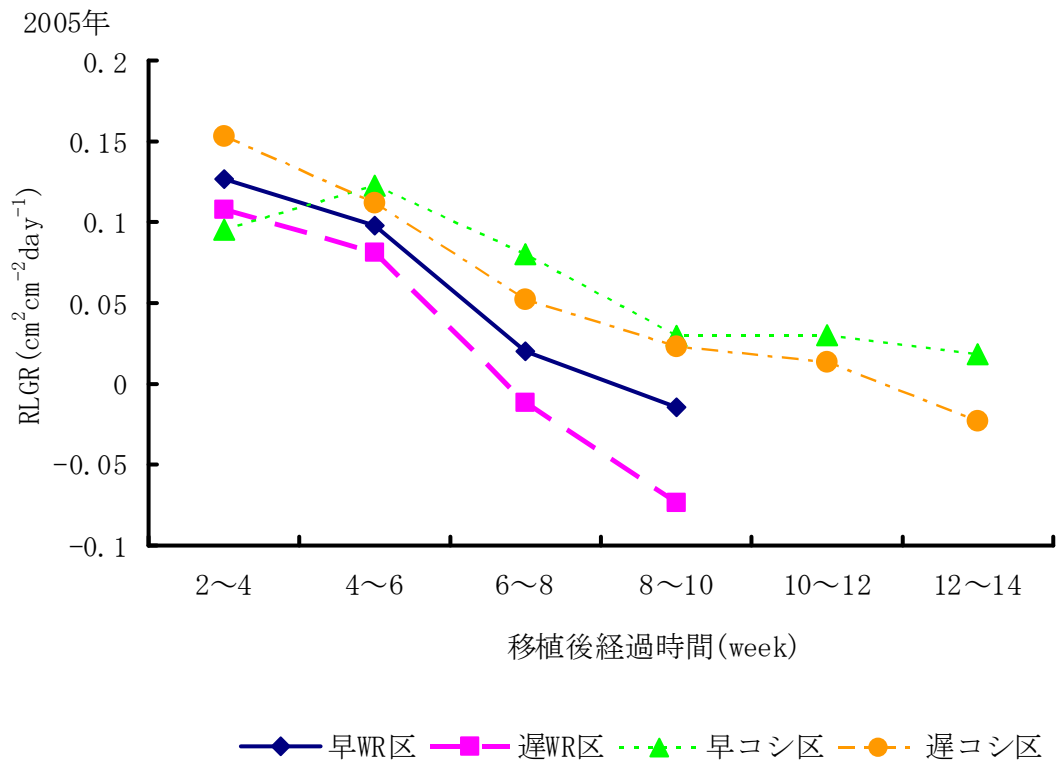
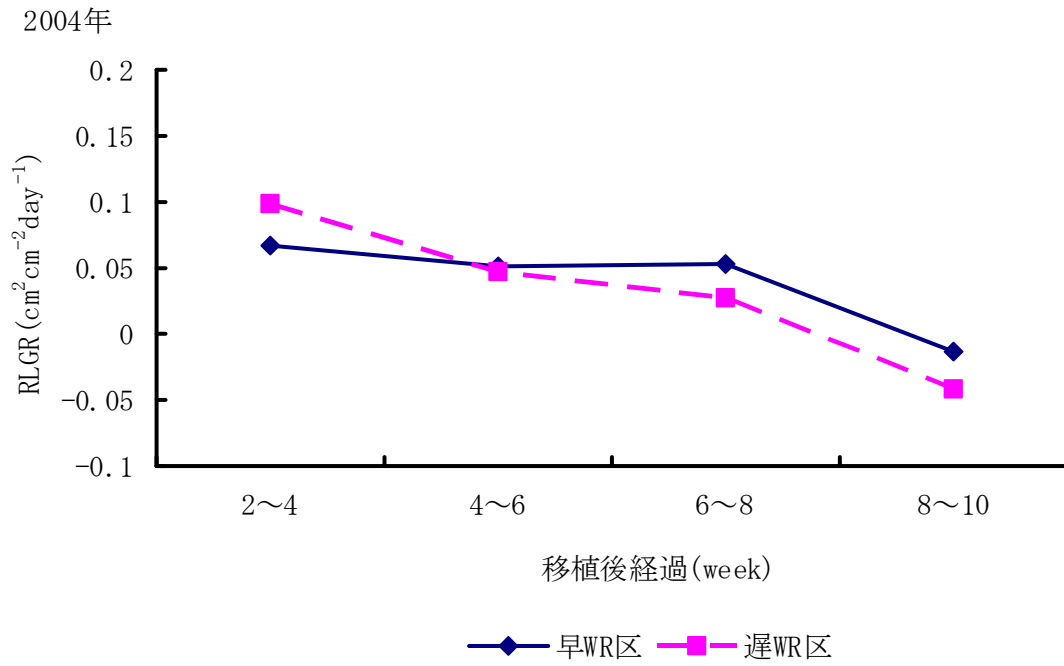
第1-7図 個体群成長速度 (CGR) の推移 (2004年, 2005年).



第1-8図 純同化率 (NAR) の推移 (2004年, 2005年).



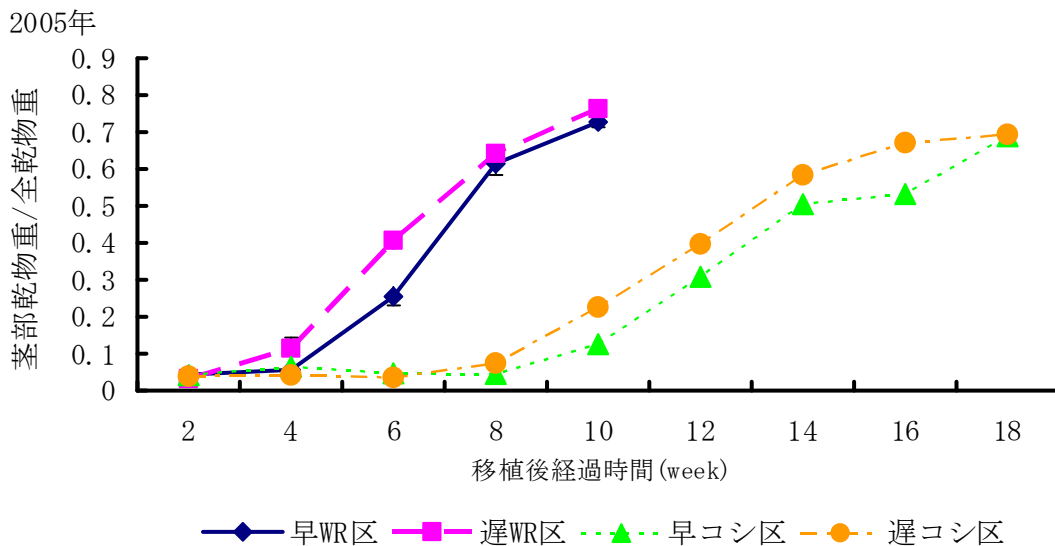
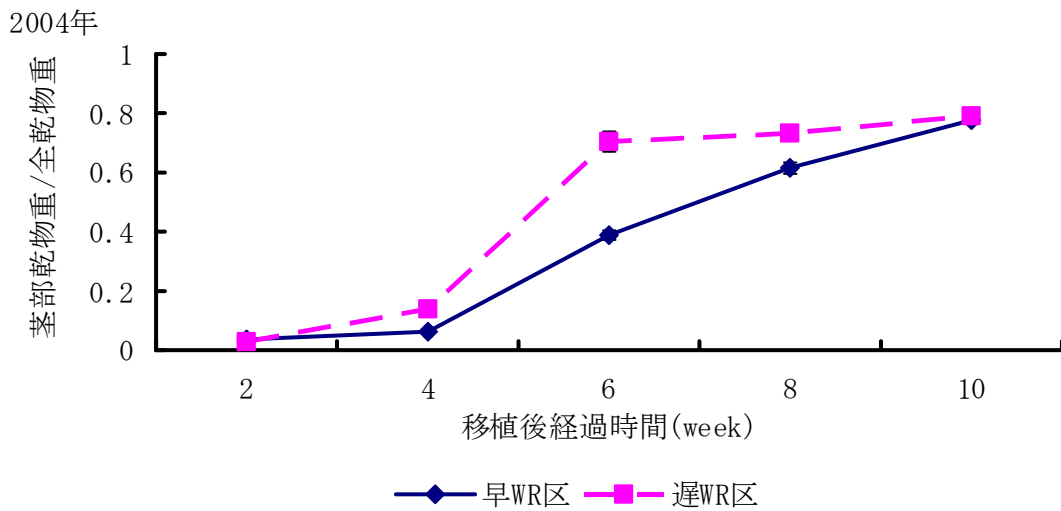
第1-9図 平均葉面積指数 ($\overline{\text{LAI}}$) の推移 (2004年, 2005年).



第1-10図 相対葉面積成長率(RLGR)の推移(2004年, 2005年).

生殖成長ステージに関する調査：

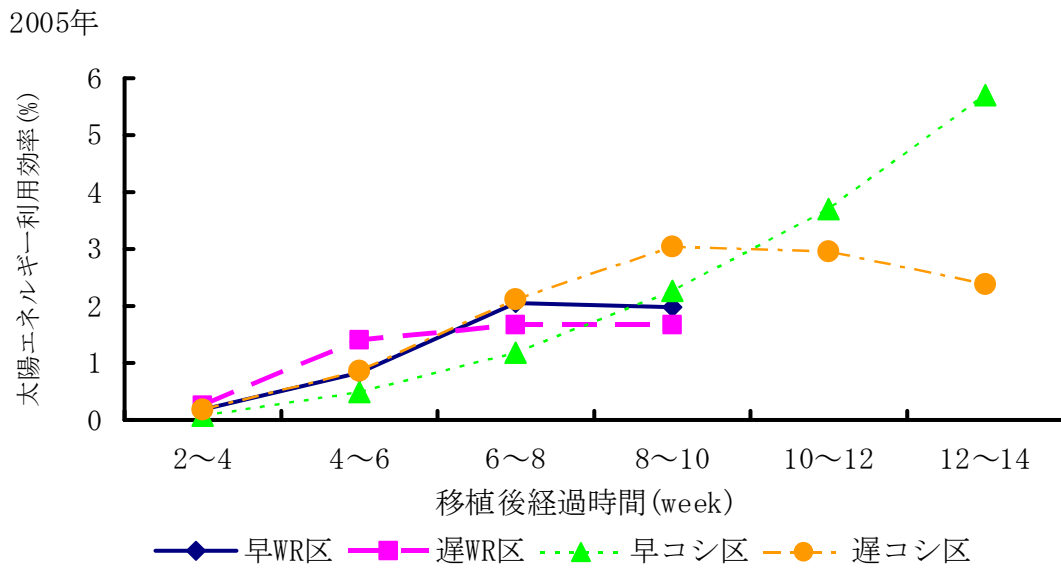
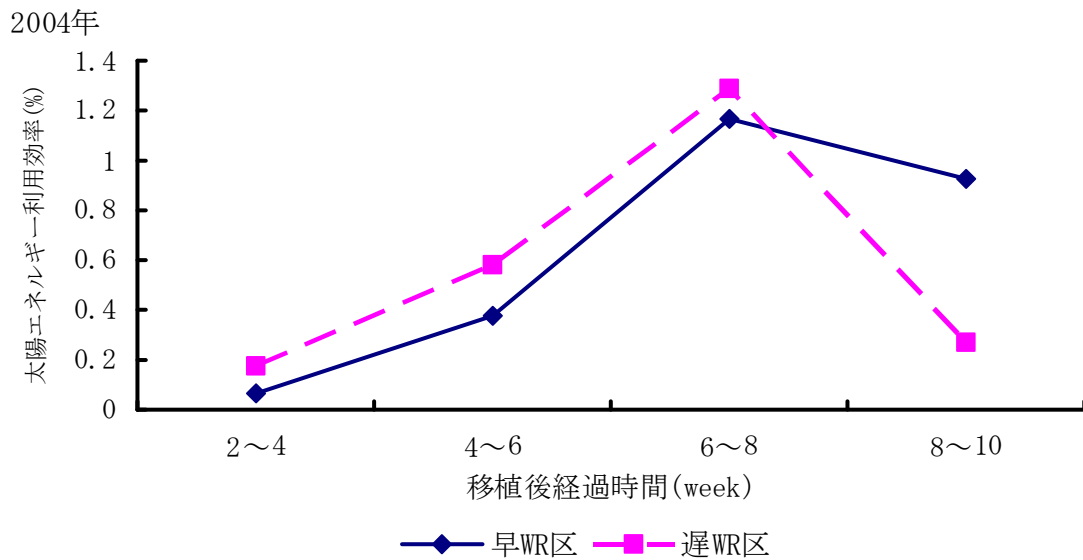
第1-11図に2004年と2005年の全乾物重における茎の割合の推移を示した。ワイルドライスでは2004年，2005年ともに，移植後4週より茎部の割合が増加した。一方，2005年のコシヒカリでは移植後10週より茎部の割合が増加した。また，コシヒカリが移植後18週で最大値70%に達したのに対し，ワイルドライスでは移植後10週で最大値75%に達した。



第1-11図 全乾物重における茎の割合の推移(2004年，2005年)。
縦線は5個体の標準偏差。表示していないものは シンボル内に含む。

太陽エネルギー利用効率の調査：

2004年と2005年のEuの推移を第1-12図に示した。ワイルドライスのEuは2004年，2005年ともに生育とともに増加し，移植後6～8週で最大値をとり，その後概ねやや減少する傾向がみられた。最大値は2004年に遅WR区で約1.29%，2005年に早WR区で約2.06%であった。また，全生育期間の平均値は2004年には約0.61%，2005年における試験では約1.26%であった。



第1-12図 太陽エネルギー利用効率(Eu)の推移(2004年，2005年)。

収量調査：

第 1-2 表に 2004 年のワイルドライスにおける収量構成要素，第 1-3 表に 2005 年のワイルドライスにおける収量構成要素を示した。2004 年における子実収量は早植え区で 106kg/10a，遅植え区で 107kg/10a を示した。2005 年における子実収量は早植え区で 184kg/10a，遅植え区で 166kg/10a を示した。穂数において早植え区と遅植え区では 2004 年には同様の値をとったのに対し，2005 年には早植え区で 150.1 本/m²，遅植え区では 230.9 本/m² と，遅植え区のほうが高い値を示した。1 穂粒数において早植え区と遅植え区では 2004 年には同様の値をとったのに対し，2005 年は早植え区で 48.7，遅植え区では 43.5 と，遅植え区でやや低い値を示した。稔実歩合において早植え区と遅植え区では 2004 年には概ね同様の値をとったのに対し，2005 年は早植え区で 82.9%，遅植え区では 65.9%と，遅植え区で低い値を示した。子実 1000 粒重においても早植え区と遅植え区では 2004 年には概ね同様の値をとったのに対し，2005 年は，早植え区で 28.0g，遅植え区では 23.3g と，遅植え区でやや低い値を示した。

第1-2表 ワイルドライスにおける収量構成要素(2004年).

試験区	穂数 (本/m ²)	1穂粒数	稔実歩合 (%)	子実 1000粒重 (g)	子実収量 (kg/10a)
早植え区	97.7±16.9	45.8±5.3	86.8±1.5	27.3±1.8	106±15.9
遅植え区	97.7±5.6	45.6±1.7	81.9±0.5	29.3±0.6	107±5.0

数値は平均値±標準誤差.

子実収量は、穎を除いたものを用い，水分は15%に換算した.

第1-3表 ワイルドライスにおける収量構成要素(2005年).

試験区	穂数 (本/m ²)	1穂籾数	稔実歩合 (%)	子実 1000粒重 (g)	子実収量 (kg/10a)
早植え区	150.1±15.0	48.7±4.8	82.9±2.4	28.0±1.1	184±25.1
遅植え区	230.9±25.7	43.5±4.3	65.9±4.5	23.3±1.2	166±31.1

数値は平均値±標準誤差.

子実収量は、穎を除いたものを用い、水分は15%に換算した.

考察

ワイルドライスの草丈は通常 2~3m に達すると報告されている(小山 1984, 村上 1988). しかし, 2005 年に行った本試験では平均で 150cm 程度を記録した. これは栽培環境の水深の差が影響していると考えられる. 著者のカナダにおけるワイルドライスの実地調査においても, 草丈は 2~3メートルほどであったが, 半分程度は水中であった. また, 本試験では 2004 年の 1 株 1 本植えの試験と 2005 年の 1 株 3 本植えの試験で草丈に 30cm の差がみられたことより, 栽培年が異なるため一概に比較は難しいが, 栽植密度が高い方が草丈が高くなる可能性が示唆された. 150cm という草丈は水稲と比較すると大きいものであるため, 栽培後期の倒伏も危惧される. 本試験でも 2005 年に圃場内で局所的に倒伏がみられた. 今後の育種目標として短稈化が挙げられる.

ワイルドライスの収穫期の茎数は 2005 年に 12 本/株を記録した。これは約 226.4 本/m² である。Lee and Stewart (1984) は穂数が 75 本/m² 以上に達することが経済的成功の限界としているため、本試験の結果は経済的に有望であると考えられる。また、明石 (2003) は主茎と各分げつごとの収量性を報告しているが、一定の傾向は見出されていない。本試験においても生育後期にやや茎数の減少がみられたが、有効分げつ数・無効分げつ数や、各分げつにおける収量性の調査は行っていないため、今後検討が必要である。

畑条件で生育させたワイルドライスは、移植後 6 週に出穂はしたが、結実せずに移植後 10 週には枯死した。また、全乾物重もほとんど増加しなかった。これは畑条件においては根が成長に十分な養水分を吸収できなかったためではないかと推察される。また、結実しなかった点に関しては飛散した花粉の密度が粗であったことに起因すると考えられる。

ワイルドライスの葉緑素示度 (SPAD 値) は生育期間を通しておおむねコシヒカリよりも高い値を示した。また、渡部ら (1986) は、単位葉緑素量も水稻品種「日本晴」と比較して高いことを報告しているが、光合成活性はやや低い値を示したと報告している。高い葉緑素量は光合成活性と必ずしも結びつかないとされており、ワイルドライスの葉緑素含量は水稻よりも高いが、光合成の効率は水稻と比較して低いという性質を有することが推察される。

成長解析では、ワイルドライスにおける CGR の最大値は 2005 年に早 WR 区で約 18.5 g m⁻²day⁻¹ であった。CGR の最大値は、ダイズで 22.2 g m⁻²day⁻¹ (北條・石塚 1985)、ソルガムで 32.4 g m⁻²day⁻¹、キビで 20.5 g m⁻²day⁻¹、ソバで 28.7 g m⁻²day⁻¹、オオムギで 8.34 g m⁻²day⁻¹ という値が報告されている (吉田 1995)。すなわち、ワイルドライスの CGR はオオムギよりは高い値を示したが、他の作物よりも低い値を示した。ワイルドライスの NAR の最大値は

2004年早WR区で約 $29.8 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ をとった。NARの最大値は、ダイズで $10.2 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ （北條・石塚 1985）、ソルガムで $19.1 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、キビで $23.9 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、ソバで $15.5 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、オオムギで $11.7 \text{ g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ という値が報告されている（吉田 1995）。すなわち、ワイルドライスのNARの最大値は他の作物よりも高い値を示した。ワイルドライスの平均LAIの最大値は、2005年に早WR区で最大値約 $1.62 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ を示した。平均LAIの最大値は、ダイズで $5.92 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ （北條・石塚 1985）、ソルガムで $6.81 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ 、キビで $4.80 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ 、ソバで $1.97 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ 、オオムギで $0.53 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ という値が報告されている（吉田 1995）。すなわち、ワイルドライスの平均LAIの最大値は、オオムギよりも高い値を示したものの、他の作物よりも低い値を示した。各作物別の値よりワイルドライスのCGRを支配している要因として、LAIが大きく関わっていることが推察される。

本実験においても、CGRの推移は生育期間の前半ではLAIが大きく寄与しており、後半ではNARに支配されている傾向を示した。これは、個体群内部の葉は受光量の不足により光合成速度が低下することに起因していると考えられる。石井・深川(2004)は個体群の成長速度は、太陽エネルギーの遮断量にほぼ比例するため、個体群による日射受光量を生育期間にわたって最大化することが栽培技術として求められるとしている。ワイルドライスにおいても育種的な草型の改良や、適切な草型の管理を可能とする栽培体系の確立が望まれる。

全乾物重における茎の割合の推移より、ワイルドライスは移植後4週には生殖成長を開始していることが示唆される。コシヒカリにおいては移植後8～10週より節間伸長が開始したため、ワイルドライスでは早期に生育ステージが進行するといえる。

ワイルドライスの太陽エネルギー利用効率 (Eu) の全生育期間の平均値は 2005 年の試験では約 1.26%であった。また、広田ら (1978) は水稲で 1.34%、大豆で 0.92%と報告している。吉田 (1995) は、ソルガムで 1.52%、キビで 0.90%、アワで 0.56%、ヒエで 0.88%、ソバで 1.42%という値を算出している。ワイルドライスの最大値は 2005 年の試験では約 2.06%を示した。また、広田ら (1978) は水稲で 4.5~5%、大豆で 3~3.5%と報告しており、ここでのワイルドライスの値はそれらよりも低かった。中世古・後藤 (1983) は、エネルギー吸収量に対する乾物生産効率は、日射強度が高まるにつれて双曲線的に低下し、この原因は光合成の光飽和現象によって生じるものであると推察している。ワイルドライスにおいては、葉面積指数などの受光能力や、光合成速度が Eu に影響していると考えられる。

ワイルドライスの収量は、2004 年に 107kg/10a、2005 年に 184kg/10a であった。有松・林 (1985) は、カリフォルニア州における調査で約 18kg/10a という収量を報告しているが、これは収穫時のロスが最も大きな減収要因であると考えられる。収穫期に袋かけを行った本試験における 184kg/10a という収量は、栃木県のコシヒカリの平均的収量 (約 600 kg/10a) の 3 分の 1 に満たない程度であるが、日本におけるワイルドライスの市場価格が水稲の 5~10 倍と高価であるから、採算性において有望であると考えられる。生育年が異なるので一概に比較は困難であるが、1 株 3 本植えの方が 1 株 1 本植えよりも収量が高くなる傾向が示唆された。そのため、今後は栽植密度と収量性に関する検討が求められる。さらに、実際の栽培化へ向けては、肥料感応性や薬剤耐性等の試験も必要であろう。

第2章 ワイルドライスにおける選抜調査

緒言

ワイルドライスは、穂の上部に雌花，下部に雄花をもつ雌性先熟の雌雄異花同株植物である。花数では雄花の方が多いがバイオマスの分配は雌花の方に多い。また，植物の生育環境がよいと雌花が多くなる傾向にある(岡 1989)。雌花は開花後約10日で種子が成熟するが，花や穂，個体ごとに成熟期が均一でない。また，雄花は花粉放出の直後に脱落する。種子は1-3℃の冷水中における数ヶ月の貯蔵により休眠が打破されて発芽する。種子は乾燥には弱いので収穫後すぐに冷水中に保存しないと種子の発芽能力が消失するとされているが，源馬・三浦(1986)は4~6ヶ月間乾燥貯蔵した種子でも，20~40日間冷水浸漬処理することによって15.0~27.5%発芽したと報告している。

穂の構造と開花習性から他殖性の植物と考えられる。しかし，完全な他殖性植物ではなく，明石(2003)の自家受粉率の調査では，自家受粉率が4.55%から4.76%であったと報告されている。また，ワイルドライスは，穂の雌性部と雄性部の間に，中間ゾーンをもつ個体がある。そこには，雄花・雌花いずれかだけでなく，自家受精をする両性小花をもつ枝梗が1本~2本観察される(Qinqin ら 1998)。両性小穂において，雄ずいや子房は非常によく生育する。ワイルドライスにおける両性花の役割は明らかではないが，進化に関するものであると考えられる(Qinqin ら 1998)。

本章では，以上のようなワイルドライスの性質を踏まえながら，早生・晩生・短稈・長稈の4つの形質に関して選抜を行い，選抜効果を調査する目的で行った。

材料と方法

供試材料：

ワイルドライス品種 Z-13K2 を、2003 年に直径 16cm ワグネルポット内で栽培した(穴澤 2004)ものについて、出穂期と草丈の記録より、早生短稈・早生長稈・晩生短稈・晩生長稈の形質を示した各上位 5 個体を選抜し、種子を選抜個体別に採取した。それを第 1 章と同様の条件で 2004 年に水田において 1 株 1 本植えて栽培後、選抜の強度を調査した。さらに 2004 年に再度各形質について 5 個体ずつ選抜を行い、種子を採取し、2005 年も同様の調査を行った。また、2005 年にはカナダのワイルドライス農家(Riese' s Canadian Lake Wild Rice)から譲渡していただいた種子(以下カナダ種子と呼ぶ)について、同様の条件で移植し、出穂期および収穫期の草丈に関して Z-13K2 との比較を行った。なお、採取した種子数の都合上反復は設けなかった。

調査方法：

2004 年、2005 年とも、前章と同じ早植え区・遅植え区において、それぞれ早生短稈・早生長稈・晩生短稈・晩生長稈系統を 20 株ずつ 1 株 1 本植えて、出穂期および収穫期の草丈について調査した。

結果

2004 年における早植え区・遅植え区の各選抜個体の出穂期および収穫期の草丈を、それぞれ第 2-1 表、第 2-2 表に示した。同様に、2005 年の早植え区・遅植え区について、それぞれ第 2-3 表、第 2-4 表に示した。

2004年の出穂期における比較では、早植え区の晩生長稈系統で早生系統よりも2～3日出穂期が遅くなった。他の系統では大きな差はみられなかった。2005年の出穂期における比較では、早植え区の晩生長稈系統で早生短稈系統、早生長稈系統よりも7～10日出穂期が遅くなった。また、2005年の遅植え区では、早生短稈系統と晩生短稈系統が同時期に出穂し、早生長稈系統と晩生長稈系統が同時期に出穂し、出穂期の選抜効果はみられなかった。

2004年の草丈における比較では、早植え区の晩生長稈系統で他の系統よりも7～8cm高い値を示した。遅植え区では晩生系統では晩生長稈の方が5cm程度高い値を示したが、早生系統では早生短稈系統の方が6cm程度高くなるという逆の結果を得た。2005年の草丈における比較では、早植え区、遅植え区ともに、また、どの系統においても長稈系統の方が短稈系統よりも約8～23cm高い値を示した。また、2005年には早植え区の各系統の方が遅植え区の各系統に対して草丈の値が高くなる傾向を示した。

2005年におけるカナダ種子と品種Z-13K2との比較をみると、早植え区・遅植え区ともにカナダ種子のほうが品種Z-13K2のどの系統と比較しても出穂期は約8～21日早く、草丈は約29.3～57.7cm低い値を示した。

第2-1表 早植え区における各選抜個体の出穂期および収穫期の草丈(2004年)。

	早生短稈	早生長稈	晩生短稈	晩生長稈
出穂期(月/日)	5/27±0.6	5/26±0.6	5/27±0.6	5/29±0.5
草丈(cm)	109.8±2.4	110.1±2.7	111.6±2.4	118.3±2.1

数値は平均値±標準誤差。

第2-2表 遅植え区における各選抜個体の出穂期および収穫期の草丈(2004年).

	早生短稈	早生長稈	晩生短稈	晩生長稈
出穂期(月/日)	6/3±0.5	6/3±0.5	6/4±0.5	6/5±0.5
草丈(cm)	118.5±2.8	112.6±2.9	110.7±2.1	115.6±2.7

数値は平均値±標準誤差.

第2-3表 早植え区における各選抜個体の出穂期および収穫期の草丈(2005年).

	早生短稈	早生長稈	晩生短稈	晩生長稈	カナダ種子
出穂期(月/日)	6/7±1.0	6/10±1.1	6/9±0.9	6/17±0.7	5/27±1.1
草丈(cm)	111.7±4.1	122.4±3.0	108.7±2.9	129.1±2.6	71.4±4.6

数値は平均値±標準誤差.

第2-4表 遅植え区における各選抜個体の出穂期および収穫期の草丈(2005年).

	早生短稈	早生長稈	晩生短稈	晩生長稈	カナダ種子
出穂期(月/日)	6/9±0.7	6/17±1.4	6/9±0.7	6/17±0.9	6/1±1.4
草丈(cm)	96.1±3.7	108.2±3.8	107.0±2.4	119.7±2.7	66.8±2.7

数値は平均値±標準誤差.

考察

Hays and Stucker (1987)はワイルドライスにおける出穂の同時性について選抜実験を行い、1回の選抜で3~6%の改善が可能であり遺伝力は30~50%であったと報告している。また、Evert and Stucker (1983)は、脱粒抵抗性に関して集団選抜を行い、遺伝力は0.55~0.58という結果を得ている。さらに、脱粒性の改善は主茎のほかに分けつにも認められ、脱粒性についての選抜は開花や成熟の早晩に影響しなかったと報告している。

ワイルドライスは、Netum, K2, Johnson, M1などの品種が野生集団から選抜されている(Oelke 1993)。これらの品種はすべてある程度の非脱粒性をもつが十分でない。また、各品種は集団内に相当の遺伝的変異を含むので2次選抜が可能である(岡 1989)。本試験では、2004年、2005年の試験の結果、品種Z-13K2より早生系統と晩生系統で出穂期が7~10日程度差をもち、短稈系統と長稈系統で約8~23cm差をもつ系統を作出することに成功した。しかし、ワイルドライスは他殖性の植物であるため、選抜効果が逆転したり、効果がみられない場合もあり、選抜の効率は低いと考えられる。また、野生型の性質が残っているため、形質が均一ではなく、系統間、個体間さらには分けつごとに差がみられた。ワイルドライスの選抜に関しては長期間の継続が必要である。また、日本の水田に適応させることを目的としてさらに選抜を続けることにより、形質を改善できる可能性が高い。

第3章 ワイルドライスにおける電気炊飯器の使用が食味に与える影響

緒言

ワイルドライスは、収穫の機械化などにより近年生産量が急増しており、その黒褐色の細長い形状、独特の香気、粘りの少ないテクスチャーは、わが国でも愛好されている(田原・三崎 2001)。用途としては、感謝祭やクリスマスなどの七面鳥料理に用いられ、スープやキャセロール料理にも使われている。基本的に肉や魚と相性が良く、どの料理と合わせても美味である。また、フルーツやアーモンドと共に生クリームやヨーグルトで和えるなどしてデザート材料としても優れている。

子実は収穫後、発酵・火力乾燥・脱ぷ・選別などの加工処理が施される。処理された子実は栄養的価値が極めて高く、健康食品としても注目されている。日本での販売価格は、1kgあたりおよそ2000円～4000円で、白米のおよそ5倍～10倍となっている。

ワイルドライスは、栄養的価値の高さに加えて、『穀物のキャビア』と称されるほど食味が素晴らしいことが既に知られている(有松・林 1985)。しかし、通常ワイルドライスの調理には、ワイルドライスと水を1:4でなべに入れ、50分ほど煮るという下ごしらえが必要である。近年は、インターネット等でも盛んに調理法が紹介されているが、この下ごしらえには手間がかかるため、ワイルドライス料理が面倒であるといわれる一因となっている。そこで、本章では、この下ごしらえを電気炊飯器で代用できないかを評価し、また、炊飯の際の最適な水量を検討した。

材料と方法

供試材料：

ワイルドライスとはカナダのワイルドライス農家(Riese's Canadian Lake Wild Rice)から譲渡していただいた加工済みのワイルドライスを用いた。水で軽く洗ってから炊飯器にセットし、30分浸漬後、白米炊飯のコースで炊飯した。また、標準としてワイルドライスと水を1：4でなべに入れ、30分浸漬後50分弱火で煮るといった一般に紹介されている方法を用いた。

試験法：

水稻における食味官能試験を参考とした(大里ら 1996, 1998)。1回の食味官能試験で以下に記す5パターンの設定で炊飯したワイルドライスを試食し、22人のパネル員により評価した。パネル員の構成は宇都宮大学農学部所属の教員3名・学生15名・その他4名で、男性15名・女性7名であった。白色無地の紙皿の縁に1～5の番号を記し、同じ番号を記した同型の炊飯器のワイルドライスをスプーンに1杯程度ずつ取り、標準を1として、2～5の記しをつけたところにとったワイルドライスを標準と比較して採点した。炊飯した量はそれぞれ2合ずつ(ワイルドライスの場合1合180cc=120g)とした。また、炊飯時に加えた水量は、水洗後、水をよく切った状態からそれぞれ設定した量を加えた。すなわち、水洗時にワイルドライス表面についた水は設定した水量には含まれていない。試験区の炊飯設定は次の通りである。

1…ワイルドライス1：水4とし、なべで炊飯したもの。(標準)

2…ワイルドライス1：水2とし、電気炊飯器白米コースで炊飯したもの。

- 3…ワイルドライス 1：水 3 とし，電気炊飯器白米コースで炊飯したもの．
- 4…ワイルドライス 1：水 4 とし，電気炊飯器白米コースで炊飯したもの．
- 5…ワイルドライス 1：水 2 とし，1 度電気炊飯器白米コースで炊飯し，さらに最初のワイルドライスと同量の水を加え，再度電気炊飯器白米コースで炊飯したもの．

評価基準：

評価項目は，外観，香り，味，粘り，硬さ，総合評価の 6 つで，各々について，よい（強い，硬い），悪い（弱い，柔らかい）を + 3 ～ - 3 の 7 段階で評価を行った．総合評価は個別の評価にこだわらずに総合的な値として行った．+ 3（- 3）は一口で違いが明らかなもの，+ 2（- 2）は 2 ～ 3 口試食すれば違いがわかるもの，+ 1（- 1）はよく試食すれば違いが判別できる程度の差があるもの，0 は何度試食しても違いがないものとして評価した．

結果

ワイルドライスにおける電気炊飯器の使用に関する食味官能試験の結果を第 3-1 表に示した．

総合評価では設定 4 と設定 5 において，それぞれ 0.32，0.27 と標準を上回ったが，5% 水準で有意差はみられなかった．設定 2 と設定 3 はそれぞれ -0.50，-0.73 と標準を下回った．設定 3 においては 10% 水準の有意性を示した．

外観については全ての設定で標準を上回った．設定 5 で 10% 水準の有意性を示した以外，有意差はみられなかった．

香りについては標準とほぼ同水準の評価を得た．

第3-1表 食味官能試験の結果.

		平均値
総合	設定2	-0.50
	設定3	-0.73 #
	設定4	0.32
	設定5	0.27
外観	設定2	0.32
	設定3	0.59
	設定4	0.27
	設定5	0.36 #
香り	設定2	-0.32
	設定3	-0.18
	設定4	0.05
	設定5	0.05
味	設定2	-0.45
	設定3	-0.23
	設定4	0.50 #
	設定5	0.27
粘り	設定2	-0.50
	設定3	-1.00**
	設定4	0.14
	設定5	0.23
硬さ	設定2	2.41 **
	設定3	1.86 **
	設定4	0.68 *
	設定5	0.50 *

** , * , # はそれぞれ t 検定による 1 % , 5 % 及び 10 % 水準の有意性を示す .

味についてはどの設定も有意差はなく，設定 4 で 10% 水準の有意性を示したのみであった。

粘りについては設定 4 と設定 5 において，それぞれ 0.14, 0.23 と標準を上回ったが，有意差はみられなかった。設定 2 と設定 3 はそれぞれ -0.50, -1.00 と標準を下回った。設定 3 に関しては 1% 水準で有意に低い評価であった。

硬さについては全ての設定で標準を有意に上回った。設定 2 と設定 3 ではそれぞれ 2.41, 1.86 と 1% 水準で有意に高い値であった。設定 4 と設定 5 ではそれぞれ 0.68, 0.50 と 5% 水準で有意に高い値を得た。逆に，この結果は標準が有意に柔らかかったという結果である。すなわち，『硬さ』に関しては評価の値が高いほど食味に優れているわけではないことに注意が必要である。

考察

本試験ではワイルドライス 1 : 水 4 とし，電気炊飯器白米コースで炊飯する場合と，ワイルドライス 1 : 水 2 とし，1 度電気炊飯器白米コースで炊飯し，さらに最初のワイルドライスと同量の水を加え，再度電気炊飯器白米コースで炊飯した場合に標準と同等の評価を得た。すなわち，ワイルドライスの下ごしらえは電気炊飯器で十分代用が可能であると結論付けられる。現実的には前者の方法の方が手間が少なく，実用的であると考えられる。さらに外見においては全ての設定で有意ではないが標準を上回った。これは，標準の場合，ワイルドライスが完全に炊き上がった際に種皮が弾け，胚乳の白色部分が露出することによると思われる。しかし，この状態をプラスの評価をつけるパネル員もおり，外見の評価基準には個人差が見られた。

村上(1988)は電気炊飯器を用いて白米(コシヒカリ)に重量で 10%のワイルドライス(ワイルドライスを混合して炊飯し、「飽きのこないおいしさであった」と報告している。ワイルドライスはまだ知名度も低いため、日本における普及に際しては栽培方法の確立とともに、その調理方法の開発の余地が大きいと考えられる。現在、特に一般家庭向けのワイルドライス料理に関する情報は少ないように思われる。ワイルドライスは既に美味しいことが証明されているため、より手軽な料理法の開発・普及を図っていくことが重要である。

第4章 ワイルドライスにおけるカルス誘導および再分化に関する検討

緒言

現在の栽培品種として知られる K2 や Netum は野生集団から選抜育成された。それゆえ、完全な栽培型とは言えず、脱粒性や出穂の同時性、種子休眠などの面で野生型の特徴を有することが栽培を行う上で障害となっている。Archibold and Weichel(1986)はカナダのサスカチュワン州北部に生育している個体群について調査し、同じ種においても環境条件や遺伝的な差異により変異の幅が大きいという野生な性質を報告している。また、バイオマスにおける子実の割合は 20%に満たない(Willson and Ruppel 1984)ため、草型についても改良の必要性がある。

近年、細胞培養や遺伝子導入技術が進歩を遂げている現状を踏まえて、イネなどの主要な禾穀類の改良に対して、ワイルドライスを遺伝子供給源としてみたとき、いくつもの有用形質を持っている(村山・三浦 1996)。玄米に比べ、タンパク質が2倍程度と高く、逆に脂肪含量が低く、ビタミン類やミネラルが豊富である(村上 1988, Oelke 1976)。単位葉面積あたりの光合成活性はイネよりやや低いことが報告されている(渡部ら 1986)が、北米高緯度の冷温帯に広く分布しているため、優れた耐冷性遺伝子の供給源として有望であると考えられる(小山 1984)。このようなワイルドライスの長所を禾穀類の改良に活用するには、組織培養や細胞融合技術の確立が前提となる。

村山・三浦(1996)はワイルドライス完熟胚からのカルス誘導に関して、SH 培地や B5 培地に比べ、MS 培地が有効であると報告している。また、収穫後2ヶ月以内に置床した胚において、2,4-D 濃度 1mgL^{-1} の培地で高いカルス誘導

率 66.7% を報告しているが，ワイルドライスの脱分化，再分化に関する研究は少ない．本章では，ワイルドライスの品種改良および育種利用へ向けた基礎的資料を得る目的で，完熟種子からのカルス誘導，さらにカルスからの再分化について検討した．

材料と方法

供試材料：

ワイルドライス種子は 2005 年に宇都宮大学峰キャンパス圃場において生育させた品種 Z-13K2 を用いた．

カルス誘導実験：

種子の培地への置床は 8 月 7 日，8 月 17 日および 8 月 27 日の計 3 回行った．8 月 7 日には完熟前の種子（果皮が緑色のもの）を圃場の個体から選抜し，実験に用いた．また，8 月 11 日に収穫後室温で保存した完熟種子（果皮が褐色のもの）を 8 月 17 日と 8 月 27 日の実験に用いた．8 月 7 日の実験では穎を取り除いた種子を表面殺菌のため 70% エタノールに 3 分間浸漬した後，5% 次亜塩素酸ナトリウム溶液で 20 分間攪拌し，滅菌水中で一晩冷蔵保存した後，直径 90mm のプラスチックシャーレ内に置床し，25℃ 暗黒条件下で培養した．8 月 17 日では殺菌の前に種子を 2 分の 1 に切断した後，胚のある部分のみを実験に用い，同様な処理を行った．8 月 27 日の実験では殺菌後，クリーンベンチ内で胚のみを摘出し，実験に用いた．

本試験ではカルス誘導培地に MS 培地に 2,4-D を濃度 2mgL⁻¹ 添加した．炭素源としてスクロースを 30gL⁻¹，固形剤として寒天 8gL⁻¹ を添加した．また，

1N NaOH で pH5.8 に調整した. 第 4-1 表にカルス誘導培地の組成を示す.

再分化実験:

カルス誘導実験より得たカルスを 9 月 12 日および 10 月 9 日に継代培養した. 8 月 7 日に置床した種子からのカルスと 8 月 17 日に置床したものでカルス分化の速さが異なり, 9 月 12 日の時点で同程度であったため, 同時に継代培養した. 8 月 27 日に置床した胚からはカルスを得られなかったので再分化実験には用いていない. 再分化培地への置床は 10 月 31 日に直径 90mm のプラスチックシャーレ内に行い, 26°C 16 時間照明下で培養した. また, 12 月 7 日に有望なカルスのみ, 培地の組成は変えずに 50mL 三角フラスコ中に継代培養した.

再分化培地は MS 基本培地に, カイネチン 3mgL^{-1} , ベンジルアデニン(BA) 3mgL^{-1} , インドール酢酸(IAA) 0.3mgL^{-1} , ナフタレン酢酸(NAA) 0.3mgL^{-1} , プロリン 500mgL^{-1} , L-グルタミン 500mgL^{-1} , casein hydrolysate (CH) 800mgL^{-1} を添加した. 炭素源としてマルトースを 30gL^{-1} , 固形剤としてゲランガム 3.5gL^{-1} を添加した. また, 1N NaOH で pH5.8 に調整した. 第 4-2 表に再分化培地の組成を示す.

第4-1表 カルス誘導培地の組成 (mgL⁻¹)

基本培地組成	
NH ₄ NO ₃	1650
KNO ₃	1900
CaCl ₂ · 2H ₂ O	439.8
MgSO ₄ · 7H ₂ O	370.6
KH ₂ PO ₄	170
H ₃ BO ₃	6.2
MnSO ₄ · 2H ₂ O	13.2
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	8.6
KI	0.83
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.25
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.025
CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.025
Na ₂ -EDTA	37.3
Fe ₄ SO ₄ · 7H ₂ O	27.8
ミオイノシトール	100
グリシン	2
塩酸ピリドキシン	0.5
ニコチン酸	0.5
塩酸チアミン	0.1
2,4-D	2
スクロース	30000
寒天	8000

第4-2表 再分化培地の組成 (mgL⁻¹)

基本培地組成	
NH ₄ NO ₃	1650
KNO ₃	1900
CaCl ₂ · 2H ₂ O	439.8
MgSO ₄ · 7H ₂ O	370.6
KH ₂ PO ₄	170
H ₃ BO ₃	6.2
MnSO ₄ · 2H ₂ O	13.2
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	8.6
KI	0.83
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.25
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.025
CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.025
Na ₂ -EDTA	37.3
Fe ₄ SO ₄ · 7H ₂ O	27.8
ミオイノシトール	100
グリシン	2
塩酸ピリドキシン	0.5
ニコチン酸	0.5
塩酸チアミン	0.1
カイネチン	3
BA	3
IAA	0.3
NAA	0.3
プロリン	500
L-グルタミン	500
CH	800
マルトース	30000
ゲランガム	3500

結果

第 4-3 表に置床した種子数におけるカルス数及びカルス形成率を示した。表中の置床種子数は培養中に細菌等により汚染を受けた種子は含まれていない。培養開始日が 8 月 7 日の種子では 27.7%のカルス形成率を示した。また、種子を 2 分の 1 に切断した後、胚のある部分のみを培養に用いた 8 月 17 日培養開始の種子では 56.1%という高いカルス形成率を示した。8 月 27 日培養開始の完熟種子の胚のみを摘出して培養した場合には胚の脱分化がみられず、カルスを得ることはできなかった。

8 月 17 日に培養を開始したワイルドライスにおける胚のカルス化の様子を第 4-1 図に示した。脱分化した種子の多くで図に示したように発芽がみられ、また、胚付近よりカルスが形成された。

第 4-2 図にワイルドライスにおけるメソコチルのカルス化した様子を示した。図は 8 月 7 日に培養開始より約 1 ヶ月経過した種子の様子である。種子の中には、図で示したようにメソコチルがカルス化したものや、発芽した茎葉部が脱分化するケースがみられた。

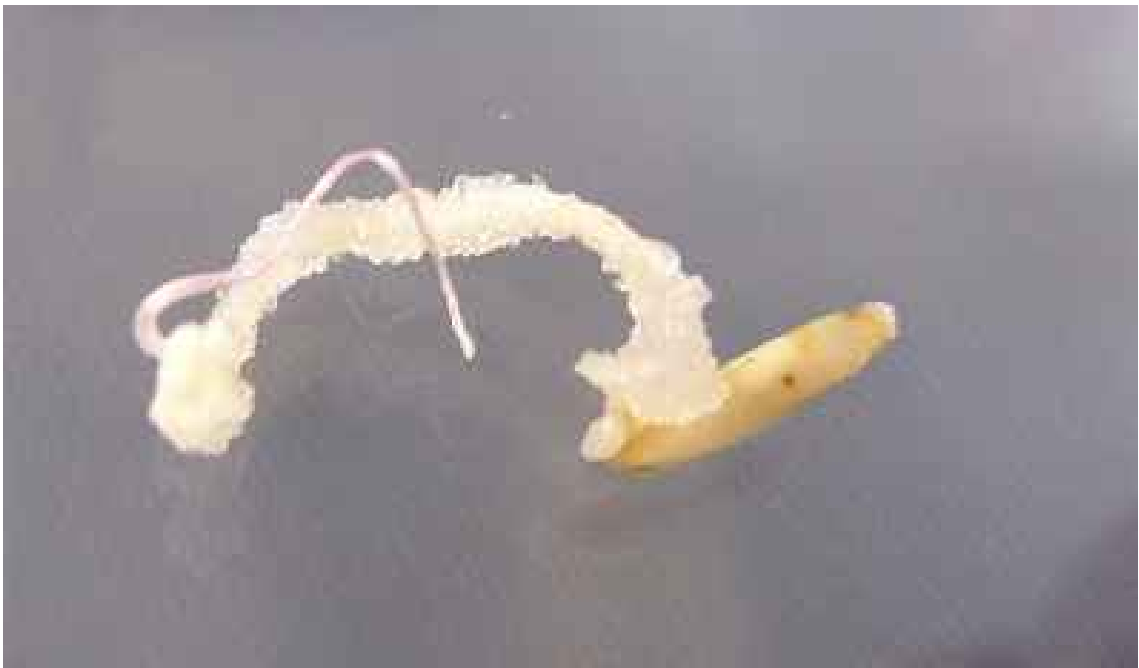
第 4-3 図に再分化培地の様子、第 4-4 図に再分化培地において緑化したカルスの様子を示した。本試験では再分化培地移植後 5 日からカルスの緑化が観察された。しかし、継代培養開始後もカルスから茎葉部を再生させることはできなかった。

第4-3表 カルス形成率.

培養開始日	置床種子数	カルス数	カルス形成率(%)
8月7日	65	18	27.7
8月17日	205	115	56.1
8月27日	200	0	0



第 4-1 図 ワイルドライスにおける胚のカルス化の様子.



第4-2図 ワイルドライスにおけるメソコチルのカルス化した様子.



第 4-3 図 再分化培地の様子.



第 4-4 図 再分化培地において緑化したカルスの様子.

考察

本試験では村山・三浦(1996)の実験と同様に、MS培地を用いてワイルドライス種子からカルスを誘導させることに成功した。また、種子を2分の1に切断する処理を施した種子では50%を超える高いカルス形成率を示したことから、種子の脱分化に関して有効であったと考えられる。また、いくつかの種子では発芽が誘導され、幼葉鞘やメソコチルからカルスが形成される様子が観察された。カルス誘導に関してはさらにカルス形成の効率化を図るため、さらに他の基礎培地やホルモン濃度による検討が必要である。

再分化実験では再分化した植物体を得ることはできなかったため、イネとワイルドライスでは適する培地の種類やホルモン濃度が異なることが示唆された。また、イネの蒴培養においてはN6培地を用いて再分化個体を得るのが一般的(小澤ら 1998, 島田ら 1999, 小澤ら 2000)であり、今後は他の基礎培地やホルモン濃度による検討すべきである。また、本試験における供試サンプル数は十分でないため、MS培地による試験も引き続き検討すべきであると考えられる。

また、本試験において完熟種子の胚のみを摘出した場合では胚の脱分化がみられなかった。ワイルドライス種子は収穫後の乾燥に弱いことが報告されている(Elliott and Perlinger 1977, Davidら 1994, Tobiasら 1997)。発芽能力が消失されるとしているため、本試験においても乾燥貯蔵を行った段階で胚が失活した可能性がある。源馬・三浦(1986)は乾燥種子の発芽率が低下する要因は、胚の失活ではなく種子休眠の影響が大きいとしている。Cardwellら(1978)は休眠中の種子において種皮に穴を開けると発芽が促進されることを報告している。これは、種皮の不浸透性が休眠に関係している

ことを示唆している。さらに Albrecht ら (1979) はワイルドライス種子の休眠に ABA が関係していると報告している。村山・三浦 (1996) は冷水貯蔵した種子でなくともカルス誘導は可能であるものの、乾燥した種子を対象とする場合にはできるだけ新鮮なものを用いる必要があると報告している。したがって、本研究においても同様の傾向がみられたといえる。今後、ワイルドライス種子を実験に用いる場合には収穫後できるだけ早く冷水浸漬保存する必要があると考えられる。

第 5 章 ワイルドライスにおける破生通気組織の観察

緒言

ワイルドライスは北米の湖や河に自生していた植物であるから、日本の水田のような湛水条件下で生育が可能である。その植物形態学的根拠として破生通気組織の存在が考えられる。植物の根は通常過湿条件下において呼吸することができず、窒息死する。イネやハスなど過湿条件に適応する植物では根の内部に通気組織を持っており、地上部から酸素を根にまで送り届けている。イネの根では地上部からの酸素を呼吸に使うと同時に、根の先端部から酸素を土中に出し、土の中の亜酸化鉄を酸化鉄にかえる。その酸化鉄の膜は湛水状態で発生しやすい硫化水素などの有害物質からイネの根を保護する役割を果たすが、ワイルドライスにおいても同様な機能があるかどうかは不明である。

本研究は、ワイルドライスの根、茎および葉の断面における破生通気組織・諸形態を観察する目的で行った。

材料と方法

供試材料：

2003年に直径16cmワグネルポット内で栽培した個体(ワイルドライス品種Z-13K2)から採取した種子を用いた。その種子を約3ヶ月間冷水貯蔵した後、同型のポットに15粒ずつ播種し、葉齢3~4で1ポットあたり5個体に間引いた。肥料は1ポットあたり窒素0.5gを施用した。また、栽培を冬季に行ったため、ポットを宇都宮大学環境調節実験棟22/17℃室に置いた。ポット数

は 3×3 配置で，計 9 ポットとした．

実験方法：

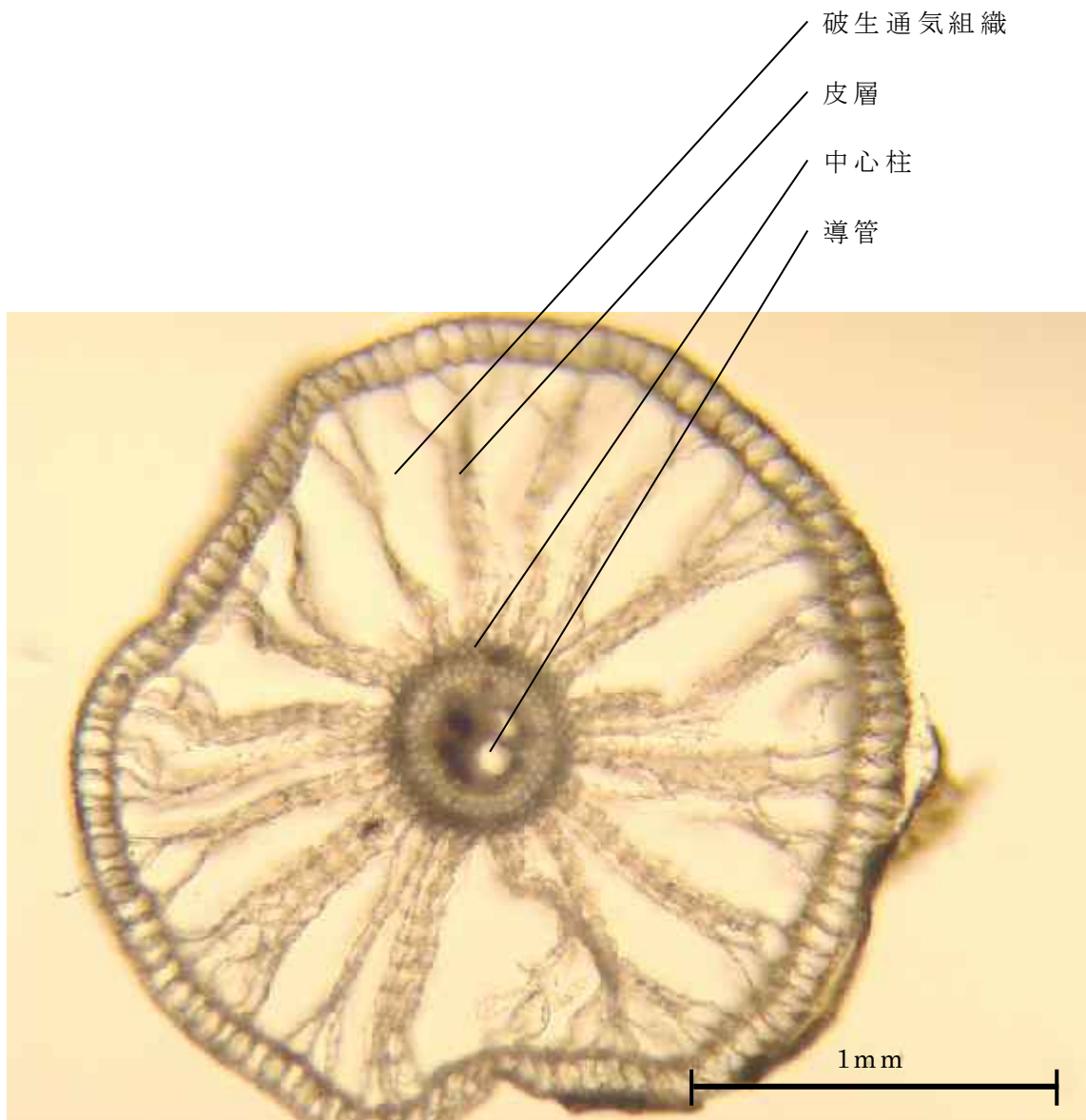
葉齢 9～10 の個体を用い，徒手切片法またはマイクロスライサーで，生体の葉，茎，および根の切片を作り，光学顕微鏡(オリンパスシステム生物顕微鏡 BHS)で断面を観察した．倍率を 100 倍・200 倍・400 倍に設定し，デジタルカメラ(オリンパス顕微鏡用デジタルカメラシステム NY2000S3 スーパーシステム，CAMEDIA C-5060 Wide Zoom)で各組織断面の顕微鏡写真を撮影した．

結果

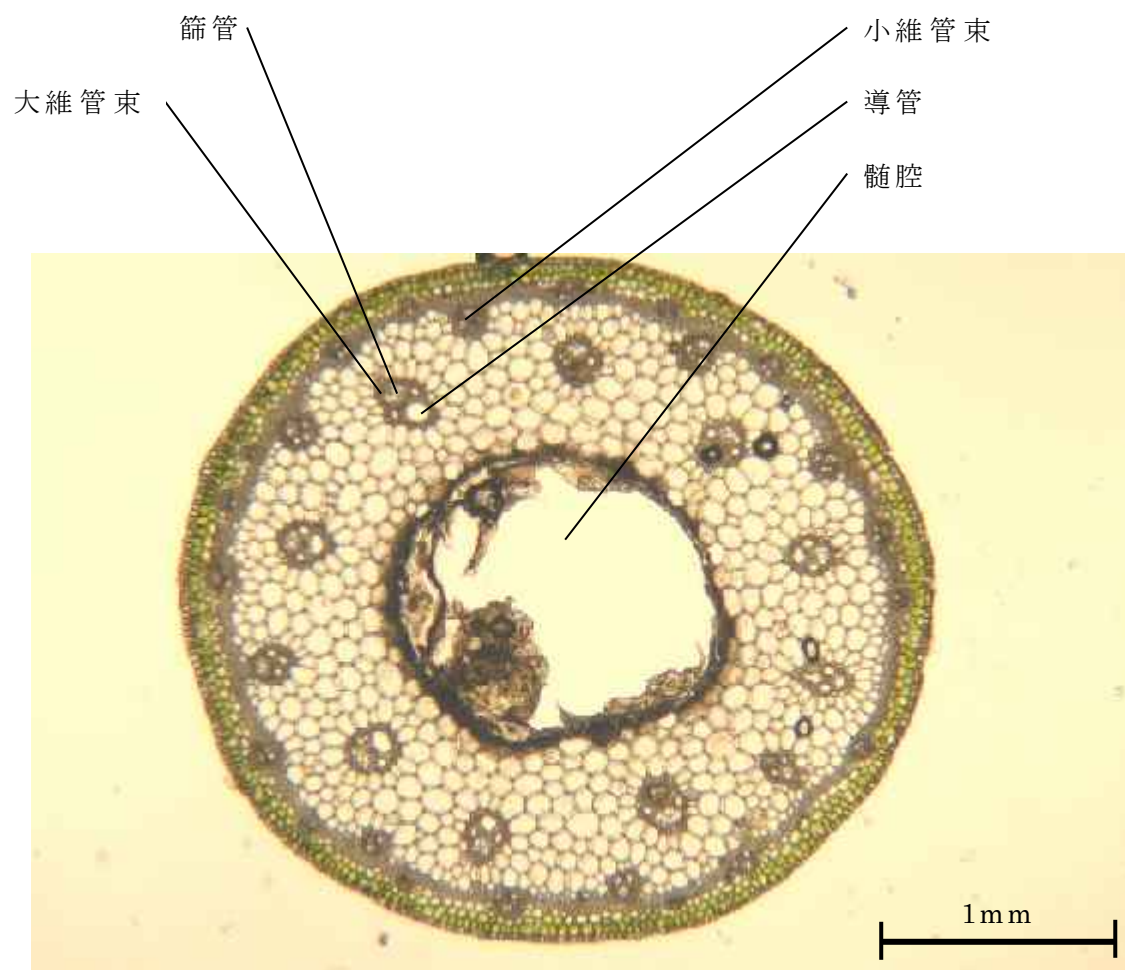
ワイルドライスにおける根の断面の様子を第 5-1 図に示した．皮層においてその大部分が退化し，空洞化している様子が観察された．その部分が破生通気組織である．また，中心柱の内部に発達した導管が観察された．

第 5-2 図にワイルドライスにおける茎の断面の様子(×100)を示した．中央部に大きな髓腔があり，組織はその周囲にある．維管束は周辺の厚膜組織の中に埋まって多くの小維管束があり，そのおのおのと対応したような位置に大維管束がある．大維管束はやや内側に大型のものと，厚膜組織付近にやや小型のものの 2 種類が観察される．すなわち大維管束は内・外 2 層に並んでいるといえる．また，大維管束内では導管と篩管の様子が観察された．また，第 5-3 図に茎の断面を 400 倍に拡大した様子を示した．ここでは，小維管束における導管・篩管の様子や，表皮組織中には気孔も観察された．

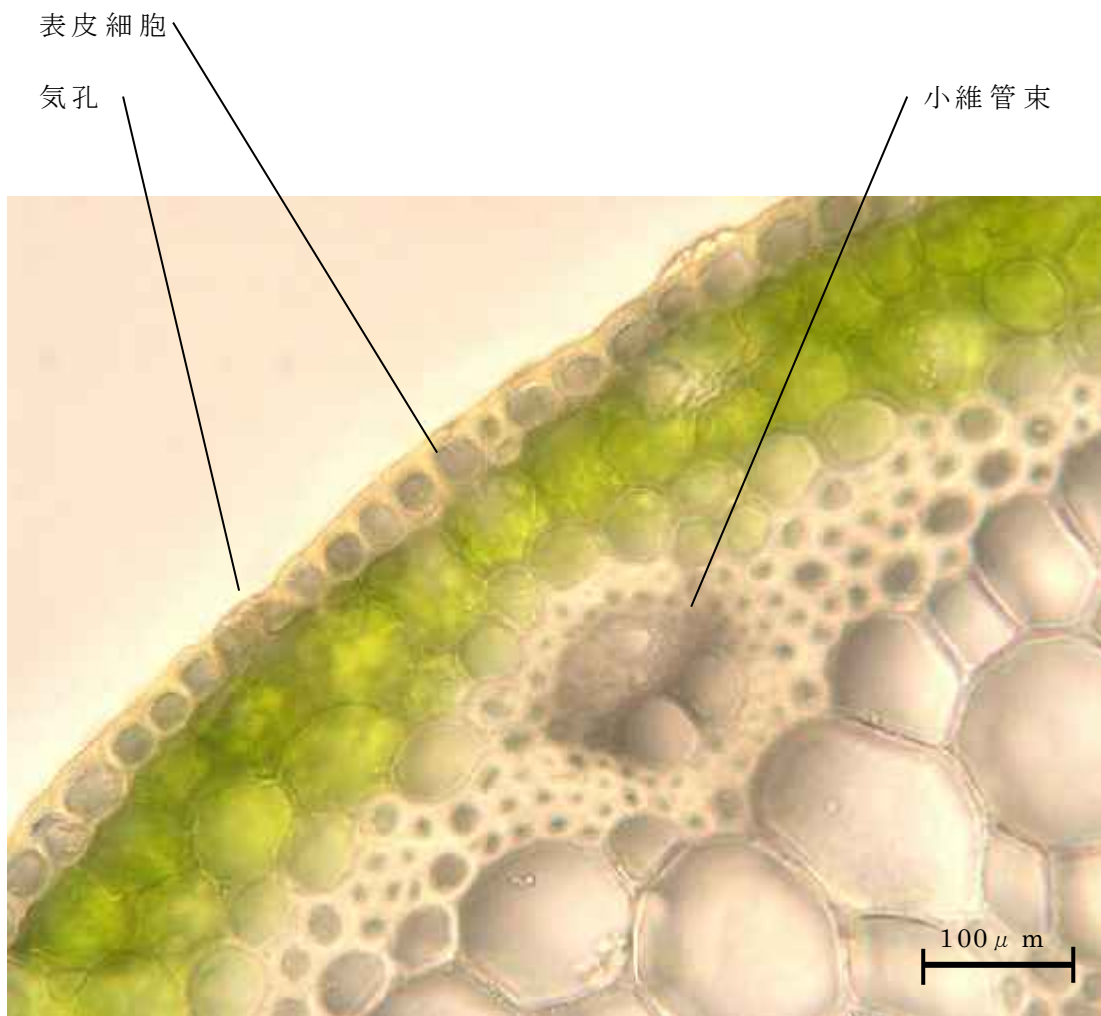
第 5-4 図にワイルドライスにおける葉(中肋部)の断面の様子(×100)を示した．葉身中肋部は裏面側に大きく突出している．中肋では大・中型の維管



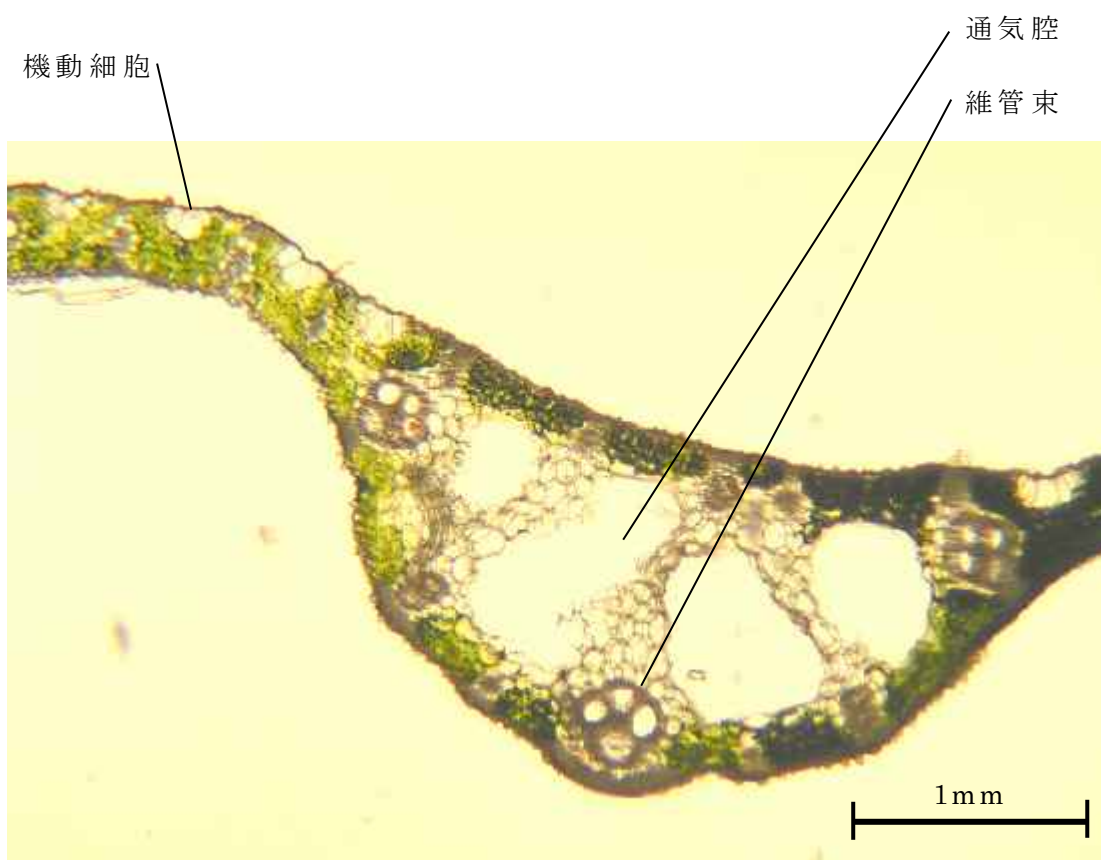
第 5-1 図 ワイルドライスにおける根の断面の様子.



第 5-2 図 ワイルドライスにおける茎の断面の様子.

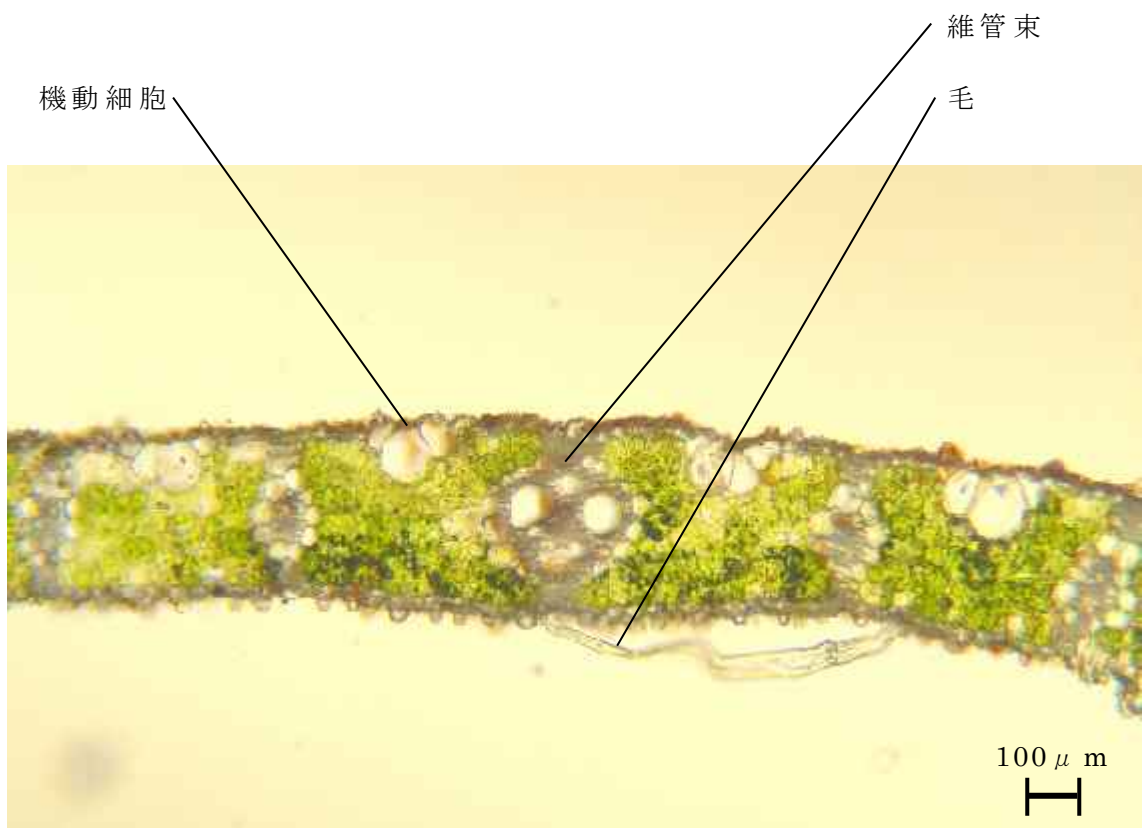


第 5-3 図 ワイルドライスにおける茎の断面の様子.

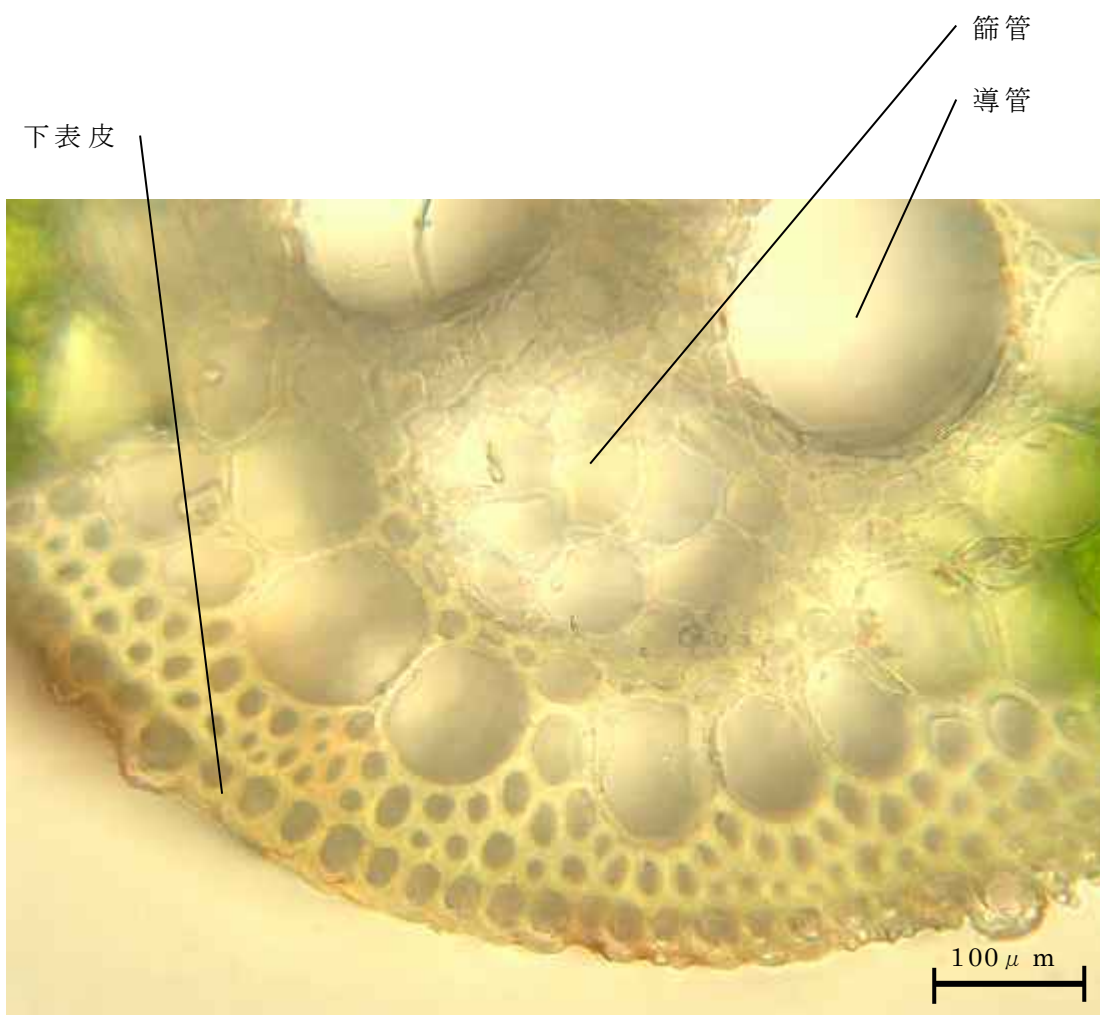


第 5-4 図 ワイルドライスにおける葉(中肋部)の断面の様子.

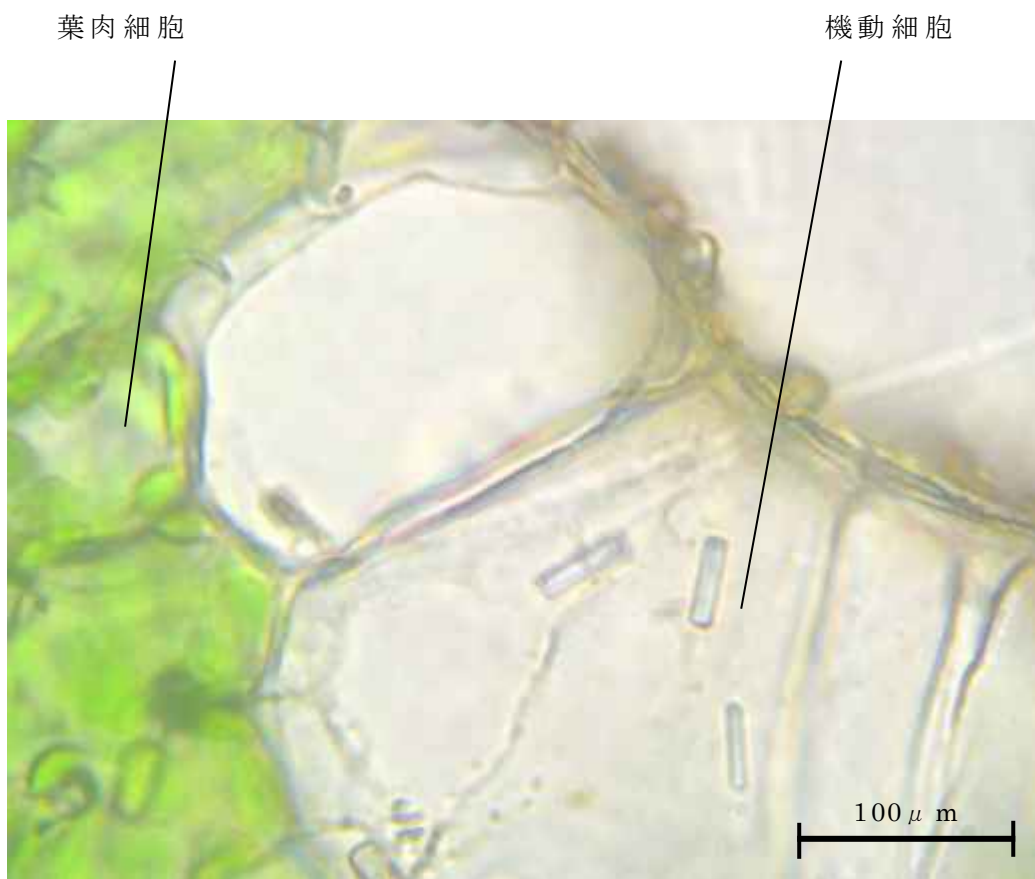
束が裏面側に並び、内部に大きな通気孔が観察された。第 5-5 図に葉身の断面の様子(×200)を示した。ここでは、機動細胞が葉身の表側にほぼ等間隔で並んでいる様子が観察された。機動細胞はイネ科植物の葉の上表皮に特有の組織で、葉の水分が減少すると膨圧を失って収縮する(星川 1975)。維管束は大、小ともに維管束鞘に囲まれ、維管束鞘には葉緑体がわずかしか存在しない。また、葉身の裏面側には毛が観察された。第 5-6 図に中肋下部断面を 400 倍に拡大した様子を示した。ここでは、大維管束における導管および篩管の様子が観察され、下表皮では硅質化した表皮細胞列がみられた。第 5-7 図に機動細胞を 400 倍に拡大した様子を示した。機動細胞内に葉緑体はみられず、柱状の結晶体が観察された。



第 5-5 図ワイルドライスにおける葉(葉身)の断面の様子.



第 5-6 図ワイルドライスの葉における中肋下部の断面の様子.



第 5-7 図ワイルドライスの葉における機動細胞の断面の様子.

考察

ワイルドライスでは根、茎および葉において破生通気組織(通気孔)が観察された。したがって、湛水条件下においても生育が可能な形態を備えていることが示唆された。また、ワイルドライスとイネの形態の間には多くの類似点見出すことができる。破生通気組織の形状や、維管束の配置、機動細胞の様子などはほとんど共通しているものと考えられる(星川 1975)。

一方、十分な日照下で生育したイネの葉身上表面は葉脈部分が隆起していることが知られているのに対し、本試験に用いたワイルドライスの葉身では隆起が見られなかった。イネの葉身では光不足の条件になると葉脈部分の隆起が低くなり、葉の厚さが薄くなる傾向がある。本試験で供試したワイルドライスも冬季に宇都宮大学環境調節実験棟内で生育させたため、日照不足となった可能性は否定できない。イネは十分な日照下で葉身上表面を隆起させることにより、単位葉面積当たりの葉緑素数を増加させ、光合成能力を高く維持していると考えられている。ワイルドライスにおいてもこのような機能があるかどうかは不明であるが、今後検討する必要がある。

ワイルドライスの形態に関して記された資料は乏しいため、葉身の特徴以外にも、胚の構造および種子根と冠根の比較や、稈構造と耐倒伏性の評価などの調査を進める必要がある。今後、ワイルドライスの構造的特徴を明らかにすることで、日本の水田に適した栽培技術の確立へ向けての前進が期待される。

総合考察

本研究は、ワイルドライスの日本における栽培の可能性を探る目的で行った。

ワイルドライスの生育に関して以下に考察を述べる。ワイルドライスの草丈は通常2~3mに達すると報告されている(小山 1984, 村上 1988)。しかし、2005年に行った本試験では平均で150cm程度を記録した。これは栽培環境の水深の差が影響していると考えられる。150cmという草丈は水稻と比較すると大きいものであるため、栽培後期の倒伏も危惧される。本試験でも2005年に圃場内で局所的に倒伏がみられた。今後の育種目標として短稈化が挙げられる。収穫期の茎数は2005年に12本/株を記録した。これは、約226.4本/m²である。Lee and Stewart(1984)は穂数が75/m²以上に達することが経済的成功の限界としているため、本試験の結果は経済的に有望であると考えられる。

2004年の試験において、畑条件で生育させたワイルドライスは根が成長に十分な養水分を吸収できなかつたため、枯死したのではないかと推察される。また、結実しなかつた点に関しては飛散した花粉の密度が粗であったことに起因すると考えられる。

ワイルドライスは、葉緑素含量は水稻よりも高いが、光合成の効率は水稻と比較して低いという性質を有することが推察された。

成長解析において、他作物との比較により本試験の値は妥当だと考えられる。CGRの値は生育期間の前半ではLAIが大きく寄与しており、後半ではNARに支配されている傾向を示した。石井・深川(2004)は、個体群の成長速度は、太陽エネルギーの遮断量にほぼ比例するため、個体群による日射受光量を生

育期間にわたって最大化することが栽培技術として求められるとしている。

ワイルドライスの太陽エネルギー利用効率(Eu)の最大値は 2005 年の試験では約 2.06%を示した。また、広田ら(1978)は水稲で 4.5~5%,大豆で 3~3.5%と報告しているが、ここでのワイルドライスの値はそれらよりも低かった。

ワイルドライスの収量は、2004年に 107kg/10a, 2005年に 184kg/10aであった。10aあたり 184kg という収量は、栃木県におけるコシヒカリの平均的収量(約 600 kg/10a)の 3分の 1に満たない程度であるが、日本におけるワイルドライスの市場価格が水稲の 5~10倍と高価であるから、採算性において有望であると考えられる。生育年が異なるので一概に比較は困難であるが、1株 3本植えの方が 1株 1本植えよりも収量が高くなる傾向が示唆された。そのため、今後は栽植密度と収量性についての検討が求められる。さらに、実際の栽培化へ向けては、肥料感応性や薬剤耐性等の試験も必要であろう。

選抜に関する検討では 2004年, 2005年の試験の結果, 品種 Z-13K2 より早生系統と晩生系統で出穂期が 7~10日程度差をもち, 短稈系統と長稈系統で約 8~23cm 差をもつ系統を作出することに成功した。しかし, ワイルドライスは他殖性の植物であるため, 選抜の効率は低いと考えられ, 選抜に関しては長期間の継続が必要である。また, 日本の水田に適応させることを目的として, 草丈・出穂期の早晩・脱粒性についてさらに選抜を続けることにより, 形質を改善できる可能性が高い。

ワイルドライスの下ごしらえを電気炊飯器で代用できる可能性の検討に関しては十分代用が可能であると結論付けられた。最適な水加減としてワイルドライス 1:水 4 が食味に優れているという結果を得た。ワイルドライスはまだまだ知名度も低いため, 日本における普及に際しては栽培方法の確立の確立とともに, その調理方法の開発が重要であると考えられる。

完熟種子からのカルス誘導，さらにカルスからの再分化について検討に関して，MS培地を用いてワイルドライス種子からカルスを誘導させることに成功したが，再分化した植物体を得ることはできなかった．イネとワイルドライスでは適する培地の種類やホルモン濃度が異なることが示唆された．今後は他の基礎培地やホルモン濃度によるさらなる検討が必要である．

破生通気組織・諸形態の観察では，根，茎および葉において破生通気組織（通気孔）が観察された．したがって，湛水条件下においても生育が可能な形態を備えていることが示唆される．また，ワイルドライスとイネの形態の間には，多くの類似点を見出すことができる．破生通気組織の形状や，維管束の配置，機動細胞の様子などはほとんど共通しているものと考えられる．ワイルドライスの形態に関して記された資料は乏しいため，葉身の特徴以外にも胚の構造および種子根と冠根の比較や稈構造と耐倒伏性の評価などの調査を進める必要がある．今後，ワイルドライスの構造的特徴を明らかにすることで日本の水田に適した栽培技術の確立へ向けての前進が期待される．

今後の展望として，ワイルドライスは移植後コシヒカリの半分ほどの生育期間で収穫が可能なことから，関東地方における二期作の可能性も示唆される．また，今後の課題としては種子の脱粒性の改善が第一に挙げられる．育種的な手法による脱粒抵抗性の付与や，完熟前早期収穫など栽培法において対策を検討する必要がある．

Summary

Growth and Yielding Ability in Wild Rice

Takumi Anazawa

Wild rice (*Zizania palustris* L.) is an annual aquatic cereal that is indigenous to the shallow lakes and streams in North America. Wild rice is enjoyed by good palatability as a nutritious food. In addition, if wild rice is grown in a paddy field in Japan, newly investment by a farmer is small. Therefore, wild rice has many hopeful characters as a crop for a paddy field in fallow. This research aims at the analysis about possibility that wild rice can be grown in Japan.

Plant length of wild rice was longer than that of paddy rice. Panicle number of wild rice was large, which promises high-yielding. The value of SPAD was higher than paddy rice. While, wild rice couldn't absorb enough water and nutrient, and died in upland condition.

The growth analysis showed that CGR was limited by LAI in the former growth period, and NAR tended to contribute to CGR in the latter growth period. The average of efficiency of solar energy utilization (Eu) was 1.26% in 2005. The yield of wild rice was 175kg/10a in 2005.

Early maturing short-culmed populations of wild rice were selected by mass selection.

As a result of eating quality test, wild rice 1 : water 4 was the best as

the amount of water in rice cooker.

Callus could be derived from mature seeds of wild rice, but regenerated plants couldn't be obtained.

Lysigenous aerenchymas were observed in roots, stems and leaves of wild rice. A lot of other traits of wild rice were in common to paddy rice.

Key words : Callus, Growth, Trait, Yield, Wild Rice.

謝辞

本研究の計画から遂行そして取りまとめに至るまで、適切な御指導と御助言を頂いた作物栽培学研究室の吉田智彦教授に深く感謝の意を表します。また、多くのアドバイスをいただいた同研究室の三浦邦夫助教授、和田義春助教授、作物生産技術学研究室の前田忠信教授に心より感謝申し上げます。そして、審査委員として和田義春助教授と比較農学研究室の本條均教授にご校閲を賜りました。適切な御指摘・御指導、ありがとうございました。

また、カナダにおける実地調査を敢行する上では、多くの方々に助けて頂きました。まずは、御好意でワイルドライス農家を探してくださった元イーオン宇都宮校講師のアヤコ先生、現地での手配を請け負ってくださった GPI のモリモトアキヒロ氏には大変お世話になりました。現地では、片言の英語しか話すことができない私を、温かく迎えてくださった Riese' s Canadian Lake Wild Rice の Riese 夫妻の笑顔は忘れられません。特に Mrs. アイリスの作るワイルドライス料理は、今でも夢に見るほど素晴らしく美味しいものでした。また、仕事をする上で足を引っ張る存在でしかなかったであろう私に対し、何度も丁寧に仕事を教えてくれた Riese' s Canadian Lake Wild Rice の仲間たちにも感謝致します。お客さんではなく、仲間として扱ってくれたことが何より嬉しく感じました。釘の打ち方やワイルドライスハーベスターの操縦を教えてくれた Mr. ミルトン、カヌーの扱い方、ギターの弾き方、大自然の中での生き残り方、野草の名前や食べ方などを教えてくれたドイツ人の Mr. ステファン、モーターボートの操縦やストーブの焚き方を教えてくれた Mr. ランディー、薪の割り方や、工具の扱いを教えてくれたセスナパイロットの Mr. ジョン、一緒にヘラジカの解体を手伝った Mr. アール達と共に汗を

流した日々は忘れられません。また、La Ronge の博物館やワイルドライス工場を案内してくれた Mrs. ポーラ、また、ワイルドライス工場の設備や加工工程を丁寧に説明していただいたマネージャーの Bill Plunz 氏には大変お世話になりました。カナダにおけるワイルドライス実地調査の詳細については <http://agri.mine.utsunomiya-u.ac.jp/hpj/deptj/plaj/plantindex.html> を参照していただきたいと思います。

そして、本研究を行うにあたり、設計の段階から実験データの処理の仕方まで、貴重なアドバイス、多大な協力をしてくださった本研究室のノノ・カルソノさん、リー・トンさん、肥田野善隆先輩、作物生産技術学研究室の朝妻英治先輩、人見成郎さん、堀内宣彦君、本当にありがとうございました。そして、ワイルドライスの播種から、水田への移植・データ収集・収穫に至るまでいつも笑顔で手伝ってくれた、井上雅洋君、薄井一樹君、奥平義郎君、川内健介君、白間俊輔君、廣瀬文恵さん、村上景美さん、飯田貴子さん、君嶋治樹君、古西朋子さん、小林奈々恵さん、小松原美央さん、福島孝君、上野恵美さん、山室理恵さんに、心から感謝の意を表します。また、培地の作り方や無菌操作を教えてくださいました園芸学研究室の藤林希美さん、ありがとうございました。

最後に、いつも精神的、経済的な部分のみならずあらゆる面で私を支援し、人生の中でこのような素晴らしい時間を与えてくれた両親、そして家族に感謝したいと思います。

引用文献

明石春奈 2003. ワイルドライスの形態観察および収量調査. 宇都宮大学農学部生物生産科学科作物栽培学研究室卒業論文. 1-42.

穴澤拓未 2004. 異なる移植期におけるワイルドライスの収量性. 宇都宮大学農学部生物生産科学科作物栽培学研究室卒業論文. 1-21.

Albrecht, K. A., E. A. Oelke and M. L. Brenner 1979. Abscisic acid levels in the grain of wild rice. *Crop Sci.* 19 : 671-676.

Archibold, O. W. and B. J. Weichel 1986. Variation in wild rice (*Zizania palustris*) stands across northern Saskatchewan. *Can J. Bot.* 64 : 1204-1211.

有松晃・林利宗 1985. 北米におけるワイルド・ライスの調査. 農業構造問題研究 147 : 75-92.

Cardwell, V. B., E. A. Oelke and W. A. Elliott 1978. Seed dormancy mechanisms in wild rice (*Zizania aquatica*). *Agron. J.* 70 : 481-484.

David, W. S., D. A. Kovach and K. J. Bradford 1994. Development of desiccation tolerance during embryogenesis in rice (*Oryza*

sativa) and wild rice (*Zizania palustris*). Plant Physiol. 104 : 431
– 438.

Elliott , W. A. and G. J. Perlinger 1977. Inheritance of shattering
in wild rice. Crop Sci. 17 : 851 – 853.

Everett. L. A. and R. E. Stucker 1983. A comparison of selection
methods for reducing shattering in Wild Rice. Crop Sci. 23 : 956
– 960.

源馬琢磨・三浦秀穂 1986. アメリカマコモ (*Zizania palustris* L.)
種子の発芽に及ぼす浸漬処理ならびに種皮処理の効果. 帯大研報 I ,
15-1 : 65 – 68.

源馬琢磨・三浦秀穂・林克昌 1993. ワイルドライス幼植物体の生育
に及ぼす水深と温度の影響. 日作紀 62 : 414 – 418.

Hays, P. M. and R. E. Stucker 1987. Selection for heading date
synchrony in wild rice. Crop Sci. 27 : 653 – 658.

広田修・武田友四郎・村田祐治・木場明倫 1978. 数種作物の太陽利
用率に関する研究. 第 2 報 水稻並びに大豆個体群における短波放
射と光合成有効放射の利用率および転換率. 日作紀 47 : 133 – 140.

北條良夫・石塚潤爾 1985. 最新 作物生理実験法. 農業技術協会.
東京. 232-254.

星川清親 1975. イネの生長. 農文協, 東京. 95-155.

石井泰之・深川聡 2004. 成長解析. 日本草地学会(編)草地科学実験・
調査法. 畜産技術協会, 東京. 88-91.

小山鐵夫 1984. 資源植物学. 講談社, 東京. 145-147, 170-171.

Lee, P. F. and J. M. Stewart 1984. Ecological relationships of
wild rice, *Zizania aquatica*. 3. Factors affecting seeding success.
Can J. Bot. 62 : 1608-1615.

村上高 1988. ワイルドライスの植物学的位置と食品的価値. 農業お
よび園芸 63(12) : 13-15.

村山廉生・三浦秀穂 1996. ワイルドライス(*Zizania palustris* L.)
完熟胚からのカルス誘導におよぼす培地と種子令の影響. 帯大研報
20 : 1-4.

中世古公男・後藤寛治 1983. 大豆, 小豆, 菜豆の生産生態に関する
比較作物的研究. 第7報 エネルギー吸収量ならびにその乾物生産効
率からみた生産力の作物間差異. 日作紀 52 : 49-58.

Oelke , E. A. 1976. Amino acid content in wild rice (*Zizania aquatica*) grain. *Agronomy J.* 68 : 146 – 148.

Oelke , E. A. 1993. Wild rice : Domestication of a native North American genus. *New crops.* Wiley, New York. 235 – 243.

岡彦一 1989. アメリカンワイルドライス(*Zizania*)における栽培化と育種. *育雑* 39 : 111 – 117.

大里久美・浜地勇次・川村富輝・松江勇次 1998. 良食味水稻品種における食味試験の精度. *日作紀* 67 : 170 – 173.

大里久美・浜地勇次・松江勇次・吉田智彦 1996. 品種と環境要因の交互作用からみた米の食味評価. *日作紀* 65 : 585 – 589.

小澤隆司・小牧正子・大谷基泰・島田多喜子 1998. イネの薬培養において培養期間の長短とカルスの大きさが植物体再分化率に及ぼす影響. *北陸作物学会報* 33 : 13 – 16.

小澤隆司・P. Slipichitt・大谷基泰・島田多喜子 2000. タイのインディカ種イネの薬培養. *北陸作物学会報* 35 : 44 – 46.

Probert , R. J. and E. R. Brierley 1989. Desiccation intolerance

in seeds of *Zizania palustris* is not related to developmental age or the duration of post-harvest storage. *Annals of Bot.* 64 : 669 – 674.

Qinqin , L, E. A. Oelke, R. A. Porter and R. Reuter 1998. Formation of panicles and hermaphroditic florets in wild rice. *Int. J. Plant Sci.* 159(4) : 550 – 558.

島田多喜子・大谷基泰・生田陽子 1999. イネ葯培養におけるカルス誘導培地と再分化培地の検討. *日作紀* 68 : 151 – 154.

田原モト子・三崎旭 2001. ワイルドライスの細胞壁多糖の構成. *日本栄養・食糧学会誌* 54 : 205 – 211.

Terrell, E. E. and L. R. Bartra 1982. *Zizania latifolia* and *Ustilago esculenta*, a grass-fungus association. *Economic Bot.* 36 : 274 – 285

Tobias, M. N, P. Berjak, N. W. Pammenter and M. T. Smith 1997. Effect of temperature on the desiccation responses of seeds of *Zizania palustris*. *Seed Science Reserch.* 7 : 145 – 160.

Vertucci , C. W. , J. Crane, R. A. Porter and E. A. Oelke 1994. Physical properties of water in *Zizania* embryos in relation to

maturity status, water content and temperature. *Seed Science Research*. 4 : 211 – 224.

渡部信義・川尻達也・宮田祐二 1986. *Zizania* 属植物の光合成活性. 岐阜大農研報 51 : 43 – 49.

Willson, M. F. and K. P. Ruppel 1984. Resource allocation and floral sex ratios in *Zizania aquatica*. *Can. J. Bot.* 62 : 799 – 805.

山本晴彦・本條均・河田尚之・鈴木義則・早川誠而 1996. 暖地二条オオムギの太陽エネルギー利用効率の品種間差異. 日作紀 65 : 198 – 206.

義平大樹・唐澤敏彦・中司啓二 2005. 北海道で多収を示す秋播き性ライコムギの成長解析 —コムギ, ライムギとの比較—. 日作紀 74 : 330 – 338.

吉田智彦 1995. 北部九州での水稲早生栽培後作を想定した数種穀類の生育収量. 日作紀 64 : 698 – 702.