

氏 名(本籍)	岡 正 明
学位の種類	農 学 博 士
学位記番号	農 博 第 3 8 2 号
学位授与年月日	平 成 元 年 3 月 2 4 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院農学研究科 (博士課程) 農 学 専 攻
学位論文題目	コンピュータ画像解析を利用した水稲草 型の数値的解析
論文審査委員 (主 査)	
	教授 日向 康吉
	教授 星川 清親
	教授 庄子 貞雄

論文内容要旨

序言

作物にとって、草型、すなわち葉や茎の配置及び角度が受光効率を高め物質生産力を向上させるために重要な要因であることは、多くの研究者によって指摘されてきた。水稻育種においても、草型に留意した選抜が行われ、草型を改良した多くの多収品種が育成されてきた。しかし、実際の育種の間では、草型を視覚的かつ経験的に認識・評価しているのが現状である。これは、これまで提案されてきた手法による草型の特徴の測定には、時間と労力を要したり植物群落を破壊したりする欠点があり、育種に有効な手法がまだ開発されていないためであると思う。

本研究では、植物体の側面写真をもとに、コンピュータ画像解析を用いて植物形の解析を行い、水稻品種の草型の特徴を、非破壊で数値的かつ客観的に認識する手法の開発を行った（第一章）。そして、この手法の妥当性を、立毛状態の多数品種への適用と、環境による草型の変化の解析によって検証し（第二章、第三章）、この手法によりとらえた二次元の葉配置が三次元の状態を良く反映していることを明らかにした（第四章）。以上の結果をもとに、水稻品種の草型に関する客観的評価の問題点と、技術開発の方向性について考察した。

第一章 二次元情報をもとに草型を計測するシステムの開発

ポット植え水稻植物体の側面写真をもとに、コンピュータ画像解析を用いて二次元平面上の葉密度分布（茎、穂を含む）・葉角度分布を求めるシステムを開発し、この手法によって品種の草型の特徴が把握できるかどうかを検討した。

水稻4品種、コシヒカリ、ササニシキ、アキヒカリ、密陽23号について最高分けつ期から出穂後までの5ステージに植物体の側面写真を撮った。これらの写真を画像解析して得た葉密度分布を密度等高線により図示し、また葉角度分布を矢印の方向によって図示することにより、各品種の草型の特徴

が視覚的に認識できた（図1、2）。

最高分けつ期には、草型の品種間差異は小さかったが、出穂期が近づくにつれ、それぞれの品種の草型の特徴が明瞭になった。密陽23号は、出穂期・出穂後を通して葉が集中的に分布する長方形型の植物形をとり、どの高さの葉も立っていた。コシヒカリは、葉が分散しており、出穂時では中部の高さで横に張り出す太鼓腹型の草型を示し、出穂後は幅の広い長方形型となり、上部の葉が他品種よりも傾く特徴を示した。アキヒカリ・ササニシキは、出穂時・出穂後ともに、中部の高さでやや横に張り出す植物形を示した。

二次元葉密度・葉角度のデータをもとに、品種の草型の特徴を表す数値要因を算出した。植物形の横への張り出しの大きさ・凹凸程度を表す要因、葉配置の集中程度を表す要因、上部・中部における平均葉角度の各要因について品種間で比較したところ、視覚的にとらえられていた品種間の草型の差異が数値的に認められた（図3、4、5）。

以上の結果から、画像解析を利用した草型解析法により、ポット植え水稻の草型の特徴を非破壊で数値的かつ客観的に解析できることがわかった。この手法を、PPP法（Plant Profile Processing Method）と名付けた。

第二章 画像解析による新・旧水稻品種の草型の比較

PPP法を利用して、水田で栽培した新・旧日本水稻品種の草型の比較を行い、本手法が多数の品種の草型解析に有効であるかどうか、及び、立毛状態の水稻植物体に適用可能か否かについて検討した。

昭和30年以降に育種された8つの新品種と、戦前に育成された7つの旧品種を水田で栽培し、出穂時および出穂3週間後に周囲の株を刈り取った個体について、植物体の側面写真を撮影した。この写真をもとに、改良を加えたPPP法により、二次元葉密度・葉角度分布を算出した（図6、7）。

新旧品種間には明らかな草型の差異があり、それは出穂後に顕著となることが認められた。新品種の多くは、出穂後も葉が集中的に存在し、横幅の狭い長方形型の植物形を維持した。これに対し、旧品種は、出穂後上部の葉が

顯著に傾いて植物体が横に大きく張り出し、その植物形は、大場などのキノコ型、陸羽132号の中部・上部が張り出す型、愛国20号などの幅広長方形型の3つのタイプに分けられた。新品種の中でもコシヒカリは、旧品種に近い草型を示した。前章と同様な数値要因を用いて草型の比較を行ったところ、視覚的に認められた新・旧品種間の草型の差異が数値的に確認された(図8、9、10)。

PPP法によって得られた結果は、新旧水稻品種の草型を比較した従来の報告と矛盾せず、またこれまではとらえることのできなかつた草型の細かな差異も認識できることを示した。本章の結果により、PPP法の妥当性が確かめられ、かつ、本手法が立毛状態の多数品種に適用可能であることがわかった。

第三章 画像解析による草型の栽植密度反応と肥料反応の解析

PPP法を用いて、異なる栽植密度条件・肥料条件で栽培した水稻植物体の草型を解析し、草型の栽植密度反応、肥料反応について検討した。

水稻2品種、密陽23号、コシヒカリを3段階の栽植間隔、3段階の施肥量で生育させ(表1)、出穂時と出穂3週間後の草型をPPP法によって解析した。栽植密度を変えた場合、両品種とも草型が変化し、特に出穂後の変化程度が大きかった。密陽23号は、密植区・標準区では第一章で認められた直立葉を持った長方形型の植物形を示したが、疎植区ではキノコ型に近い植物形を示した。コシヒカリも、疎植区で、標準区の形とは異なる植物体中央が張り出した植物形を呈した(図11、12、13、14、15)。

これに対し、肥料条件を変えた場合には、草型の変化は小さかった。両品種とも、植物形や葉の集中程度、葉角度分布の変化は、ほとんど認められなかった。ただ、密陽23号については、登熟期において多肥区の葉がより集中的となり、密陽23号はコシヒカリよりも肥料反応が大きいと推察された(図16、17、18、19、20)。

本実験の結果から、品種の草型は環境条件により変化し、その変化程度は、

品種により異なることが確かめられた。また、草型の環境変異を数値的に記載・解析する際に、PPP法が有効であることを示した。

第四章 二次元葉密度と実際の葉面積との関係

二次元葉密度と実際の葉面積との関係について、モデル式と実測値をもとに、検討を行った。

草型の異なる水稲4品種、密陽23号、ササニシキ、トヨニシキ、帽子頭をポット栽培し、出穂22日前、11日前と出穂時に、植物体側面の写真を撮影した。この写真からPPP法により二次元葉密度分布を求め、これをもとに垂直方向10cmごとの層別投影面積を算出した。一方、同一個体について、写真撮影と同時に、層別刈取法により垂直方向10cmごとの層別葉面積を実測した。

品種別・ステージ別に、対応する層ごとの層別投影面積と実測層別葉面積の相関図を描いたところ、両者の間には、原点を通る二次の回帰曲線 ($Y = B \times X + C \times X^2$) があてはまった。回帰曲線は品種ごとに特徴ある形を呈し、回帰係数B、Cは各品種の草型の特徴を表していると考えられた(図21)。

次に、任意の方位角で回転した葉片を一定の正方形区画内に連続して投影するモデルを考え、投影面積割合と実際の面積の関係を説明する次の数式を求めた。

$$S = a^2 / (\log(1 - (2/\pi \times a^2) / A^2)) \times \log(1 - P)$$

a : 正方形の葉片の一辺の長さ

A : 投影する正方形区画の一辺の長さ ($A > a$)

P : 区画全体の面積 (A^2) に対する投影面積の割合

S : 実際の葉面積

この推定式により、先の層別投影面積から層別葉面積を推定し、実測した層別葉面積との相関図を描いた。両者の間には、原点を通る回帰直線 ($Y = B \times X$) があてはまったが、その傾きは常に1以上であり、この推定式は葉面積を過小に推定していることがわかった(図22)。この推定が不完全で

あるのは、主として葉の傾斜角度を無視していることに由来すると考えられる。ある補正值で推定葉面積を処理し、実測値と比較した結果、ステージごとに一定の補正值を決めた方が、品種ごとに決めるよりも、推定精度が上がるということがわかった（図23）。

本章の結果により、PPP法により求めた二次元葉密度分布が、植物の三次元葉配置を反映していることが確認された。

結 語

本研究で開発したPPP法を用いて草型解析を行う利点として、これまででは困難であった草型の客観的かつ数値的な認識・記述が可能となることと、品種間の草型の細かな差異が認識可能となることの二点があげられる。本研究で示した数値による草型の表示は、二次元に投影した草型の近似値ではあるが、育種における草型についての判断基準を検討する際の基礎試料として重要であろうし、草型をデータベースで扱う際にも有効に使われると考えられる。また、本研究でとらえられた草型の細かな特徴は、群落の三次元構造や受光態勢を推定する上で、有力な情報となると期待できる。しかしながら、PPP法の実用化を考えると、圃場において群落非破壊で植物体側面の写真を撮る手法の開発が、今後の課題として残った。

今後、圃場植物の撮影技術を開発し、草型に関するデータを蓄積することにより、PPP法は、品種の草型の評価や、実際の育種における系統の選抜、農業における作物の診断などの場において、有力な手段となりうると考えられる。

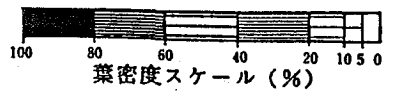
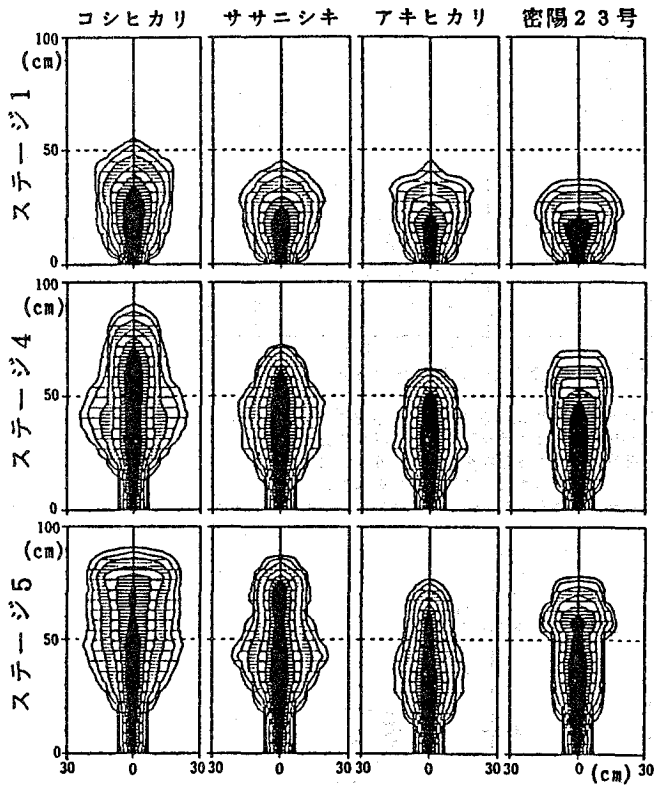


図1 水稲4品種の節間伸長期から出穂後までの二次元葉密度分布の変化。葉密度は7段階に分け、上のスケールにあわせて表示してある。ステージ1、4、5は、それぞれ出穂前31-35日、出穂時、出穂後12日にあたる。

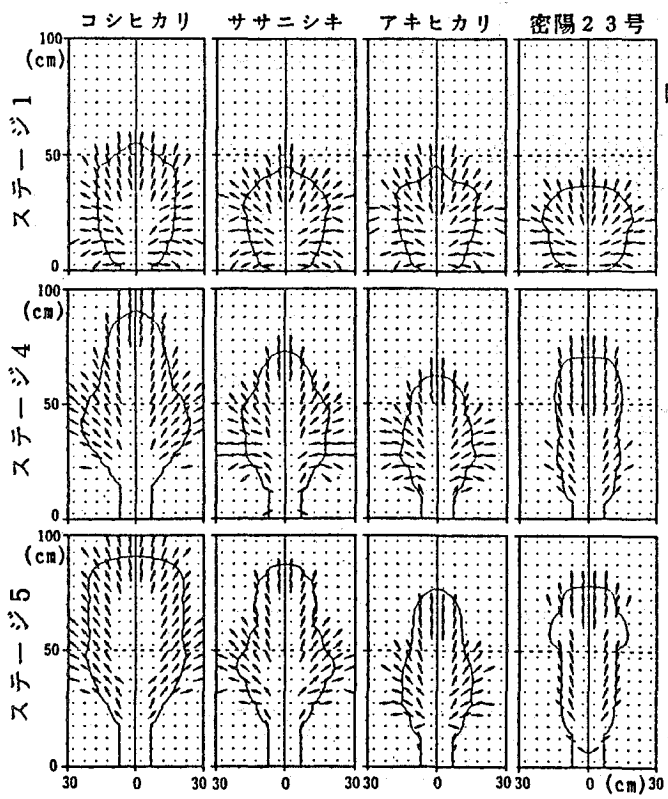


図2 水稲4品種の節間伸長期から出穂後までの二次元葉角度分布の変化。矢印の方向は、各小区画(5×5 cm)の平均葉角度を表している。ステージ1、4、5は、それぞれ出穂前31-35日、出穂時、出穂後12日にあたる。

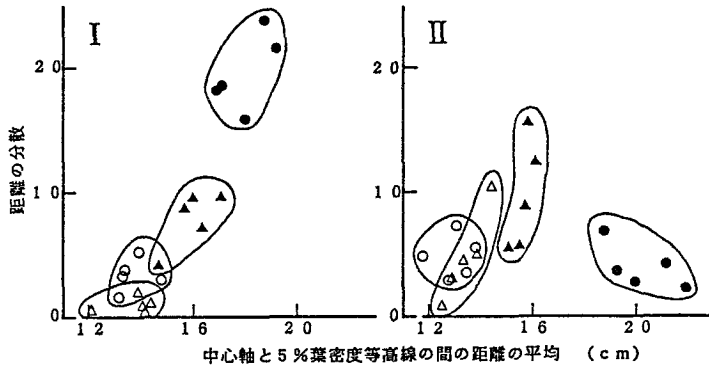


図3 植物体中心軸と5%葉密度等高線間の水平距離の、平均と分散による散布図。植物体の上部と下部を除く区間(草丈の2/6から5/6まで)を10等分した各高さにおける距離を用いている。Iはステージ4(出穂時)に、IIはステージ5(出穂12日後)にあたる。
●: コシヒカリ、▲: ササニシキ、○: アキヒカリ、△: 密陽23号。

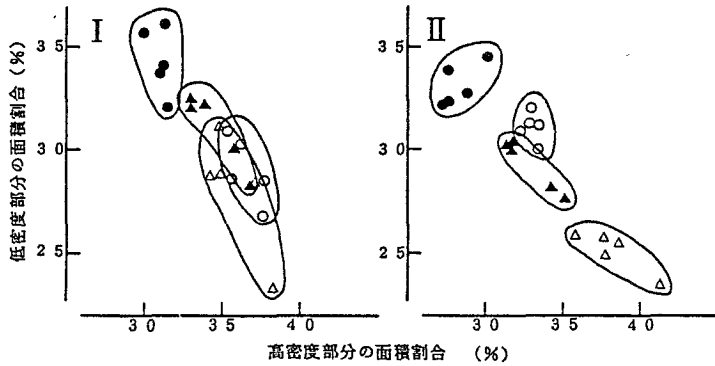


図4 二次元葉密度分布における、全面積(5-100%)に対する高密度(60%以上)・低密度(5-20%)部分の面積割合による散布図。Iはステージ4(出穂時)に、IIはステージ5(出穂12日後)にあたる。
●: コシヒカリ、▲: ササニシキ、○: アキヒカリ、△: 密陽23号。

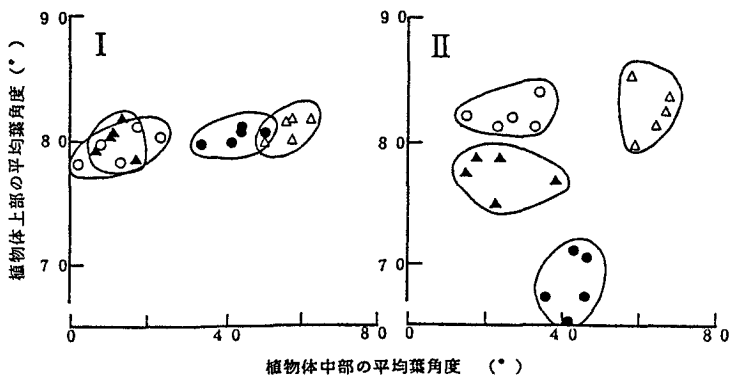


図5 植物体中部(草丈の2/6から3/6の高さ)と上部(5/6から6/6の高さ)における平均葉角度による散布図。Iはステージ4(出穂時)に、IIはステージ5(出穂12日後)にあたる。
●: コシヒカリ、▲: ササニシキ、○: アキヒカリ、△: 密陽23号。

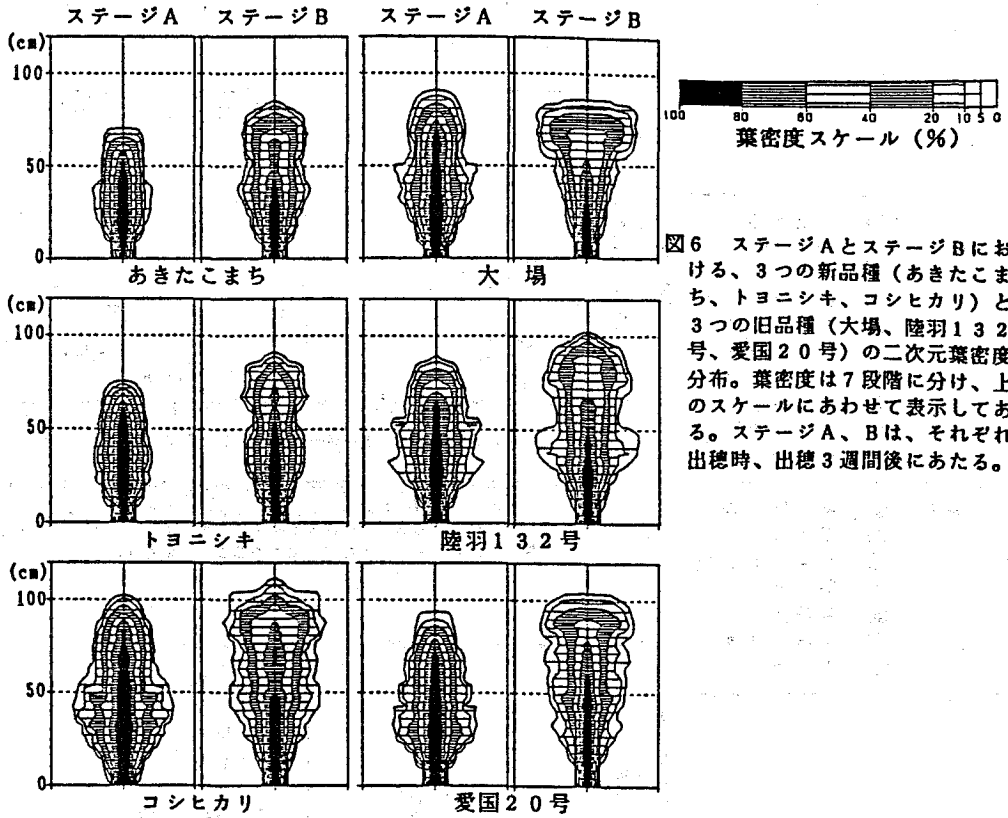


図6 ステージAとステージBにおける、3つの新品種（あきたこまち、トヨニシキ、コシヒカリ）と3つの旧品種（大場、陸羽132号、愛国20号）の二次元葉密度分布。葉密度は7段階に分け、上のスケールにあわせて表示してある。ステージA、Bは、それぞれ出穂時、出穂3週間後にあたる。

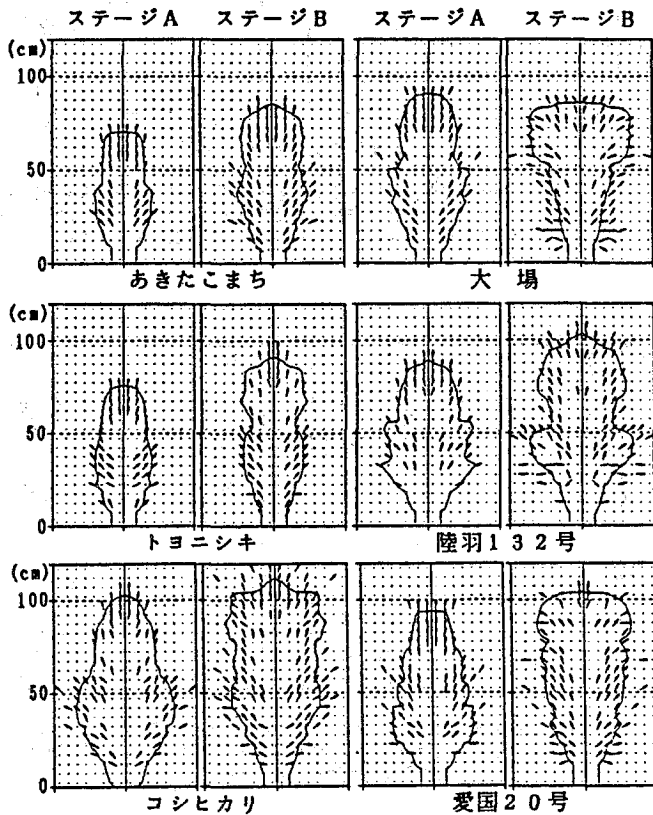


図7 ステージAとステージBにおける、3つの新品種（あきたこまち、トヨニシキ、コシヒカリ）と3つの旧品種（大場、陸羽132号、愛国20号）の二次元葉角度分布。矢印の方向は、各小区画（5×5 cm）の平均葉角度を表している。ステージA、Bは、それぞれ出穂時、出穂3週間後にあたる。

記号	品種名
新品種	
①	アキヒカリ
②	あきたこまち
③	キヨニシキ
④	トヨニシキ
⑤	ササニシキ
⑥	サトホナミ
⑦	コシヒカリ
⑧	日本晴
旧品種	
①①	亀ノ尾4号
②	愛国
③	陸羽132号
④	関取
⑤	銀坊主
⑥	愛国20号
⑦	大場

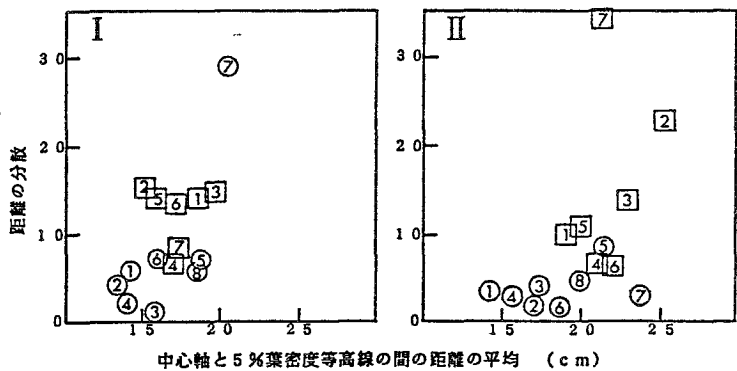


図8 植物体中心軸と5%葉密度等高線との間の水平距離の平均と分散による散布図。植物体の上部と下部を除く区間(草丈の2/6から5/6まで)を10等分した各高さにおける距離を用いている。IはステージA(出穂時)に、IIはステージB(出穂3週間後)にあたる。

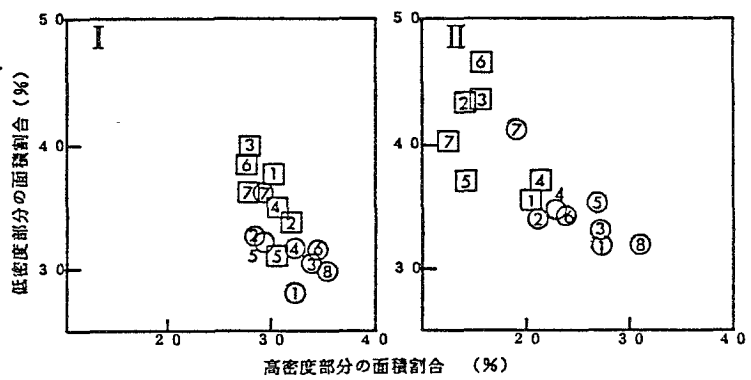


図9 二次元葉密度分布における、全面積(5-100%)に対する高密度(60%以上)・低密度(5-20%)部分の面積割合による散布図。IはステージA(出穂時)に、IIはステージB(出穂3週間後)にあたる。

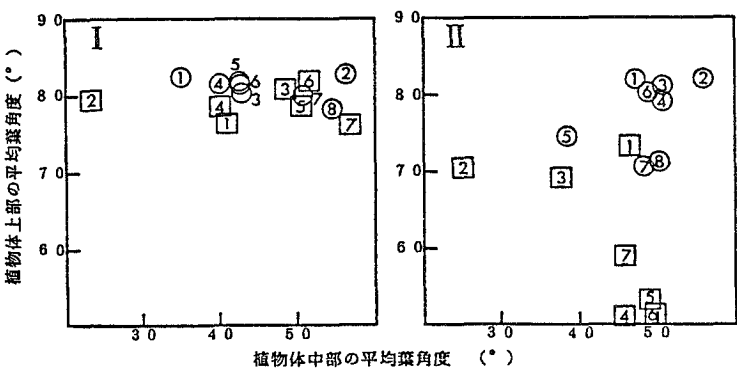


図10 植物体中部(草丈の2/6から3/6の高さ)と上部(5/6から6/6の高さ)における平均葉角度による散布図。IはステージA(出穂時)に、IIはステージB(出穂3週間後)にあたる。

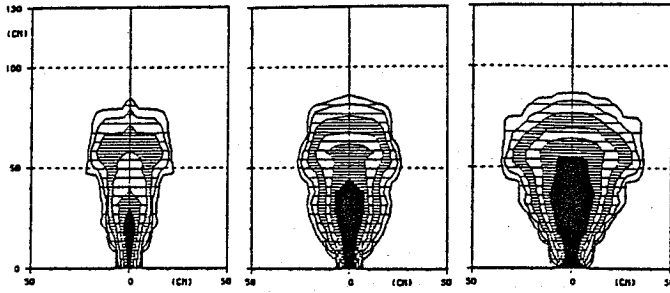
表1 密陽23号とコシヒカリの各区の処理条件と出穂日

品 種	処理区	栽植密度	施肥量 (g/m ² , N, P ₂ O ₅ , K ₂ O)			出穂日	
			元肥	追肥 ^{*1}	追肥 ^{*2}		
栽植 密度 試験	密陽23号	密植区	18×18cm	8	4	2	8月18日
		標準区	24×24cm	8	4	2	8月18日
		疎植区	36×36cm	8	4	2	8月23日
	コシヒカリ	密植区	18×18cm	8	4	2	8月24日
		標準区	24×24cm	8	4	2	8月25日
		疎植区	36×36cm	8	4	2	8月26日
肥料 試験	密陽23号	少肥区	24×24cm	8	4	2	8月19日
		中肥区	24×24cm	4	1	1	8月19日
		多肥区	24×24cm	2	0	0	8月18日
	コシヒカリ	少肥区	24×24cm	8	4	2	8月24日
		中肥区	24×24cm	4	1	1	8月24日
		多肥区	24×24cm	2	0	0	8月25日

追肥^{*1}：7月下旬の追肥

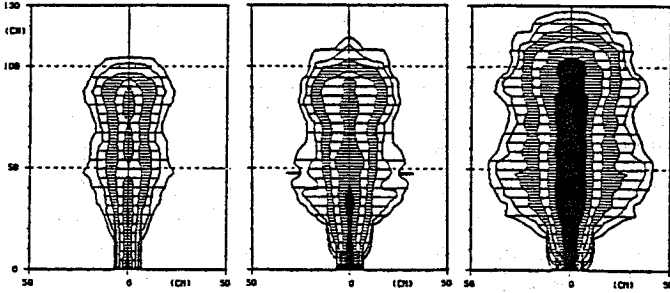
追肥^{*2}：8月下旬の追肥

密陽
23
号



栽植密度 18×18cm 24×24cm 36×36 cm

コシ
ヒカリ



栽植密度 18×18cm 24×24cm 36×36 cm

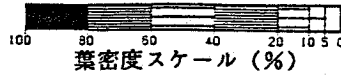
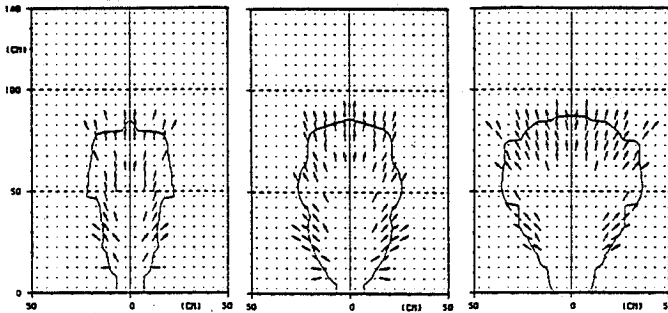


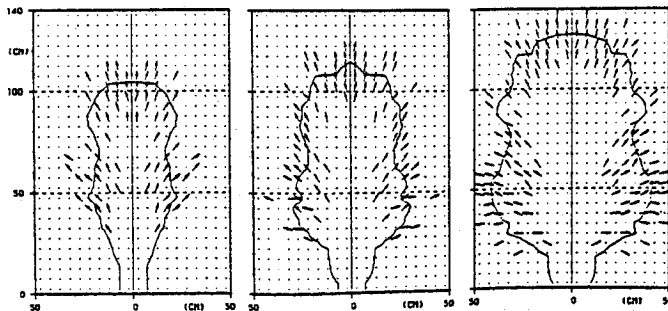
図11 密陽23号(上段)とコシヒカリ(下段)のステージB(出穂3週間後)における、各栽植密度区の二次元葉密度分布。葉密度は7段階に分け、下のスケールにあわせて表示してある。各区の栽植間隔は、左から18×18cm(密植区)、24×24cm(標準区)、36×36cm(疎植区)。

密陽
23
号



栽植密度 18×18 cm 24×24 cm 36×36 cm

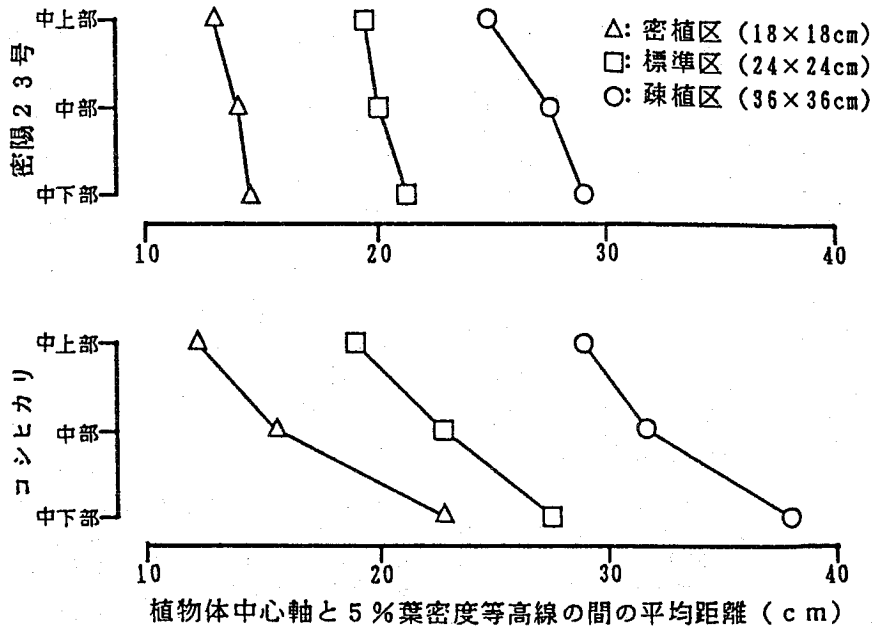
コシ
ヒカリ



栽植密度 18×18 cm 24×24 cm 36×36 cm

図12 密陽23号(上段)とコシヒカリ(下段)のステージB(出穂3週間後)における、各栽植密度区の二次元葉角度分布。矢印の方向は、各小区画(5×5cm)の平均葉角度を表している。各区の栽植間隔は、左から18×18cm(密植区)、24×24cm(標準区)、36×36cm(疎植区)。

ステージA



ステージB

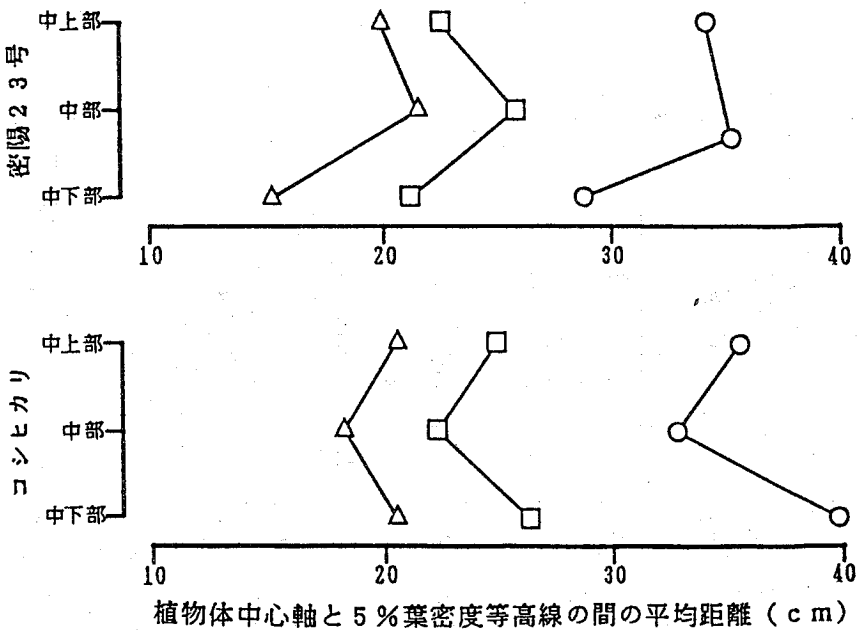


図13 各栽植密度区における密陽23号とコシヒカリの、中上部・中部・中下部の高さでの植物体の幅。中上部(草丈の19/33-2/3の高さ)・中部(15/33-18/33)・中下部(1/3-14/33)における、植物体中心軸と5%葉密度等高線との水平距離の平均を、植物体の幅としている。ステージAは出穂時、ステージBは出穂3週間後にあたる。
 △: 密植区(栽植間隔18×18cm)、□: 標準区(栽植間隔24×24cm)、○: 疎植区(栽植間隔36×36cm)。

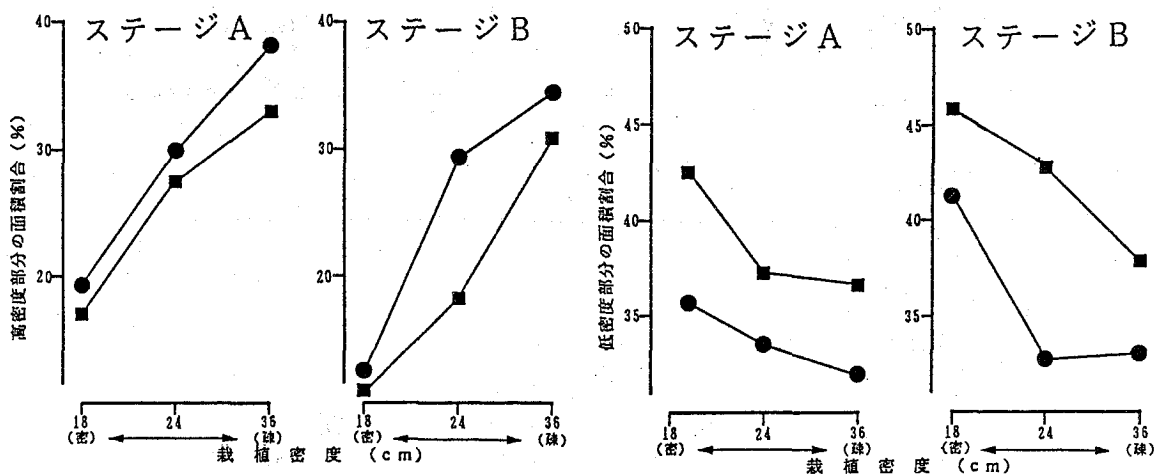


図14 各栽植密度区における密陽23号とコシヒカリの、植物体の集中程度を表す2要因。二次元葉密度分布における、全面積(5-100%)に対する高密度(60-100%)・低密度(5-20%)部分の面積割合を要因とした。ステージAは出穂時、ステージBは出穂3週間後にあたる。各区の栽植密度は、左から18×18cm(密植区)、24×24cm(標準区)、36×36cm(疎植区)。●:密陽23号、■:コシヒカリ。

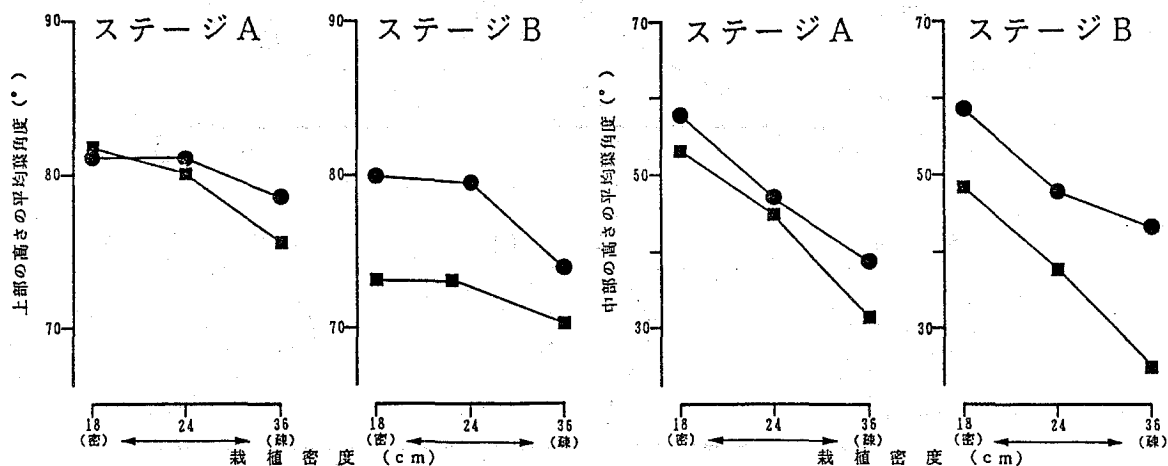
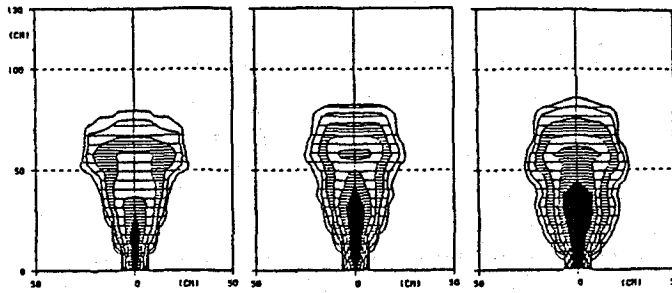


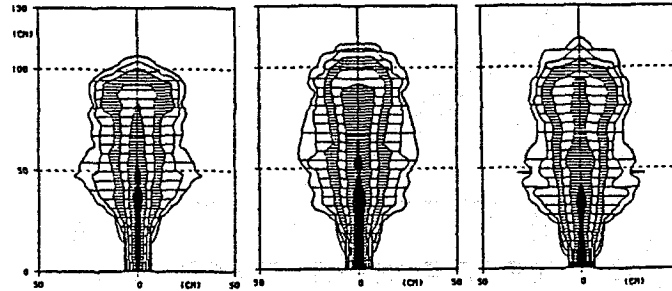
図15 各栽植密度区における密陽23号とコシヒカリの、上部の高さ(草丈の5/6から6/6の高さ)と中部の高さ(2/6から3/6の高さ)における平均葉角度。ステージAは出穂時、ステージBは出穂3週間後にあたる。各区の栽植密度は、左から18×18cm(密植区)、24×24cm(標準区)、36×36cm(疎植区)。●:密陽23号、■:コシヒカリ。

密陽
23
号



肥料条件 少肥 中肥 多肥

コシ
ヒカリ

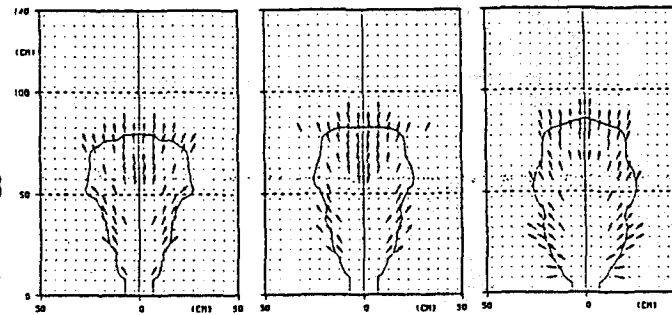


肥料条件 少肥 中肥 多肥



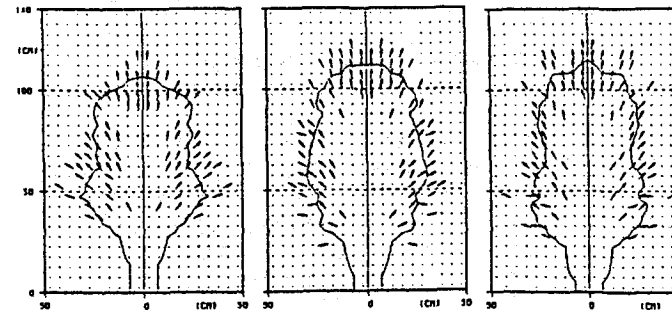
図16 密陽23号(上段)とコシヒカリ(下段)のステージB(出穂3週間後)における、少肥区・中肥区・多肥区の二次元葉密度分布。葉密度は7段階に分け、下のスケールにあわせて表示してある。各区の施肥量は、表1参照。

密陽
23
号



肥料条件 少肥 中肥 多肥

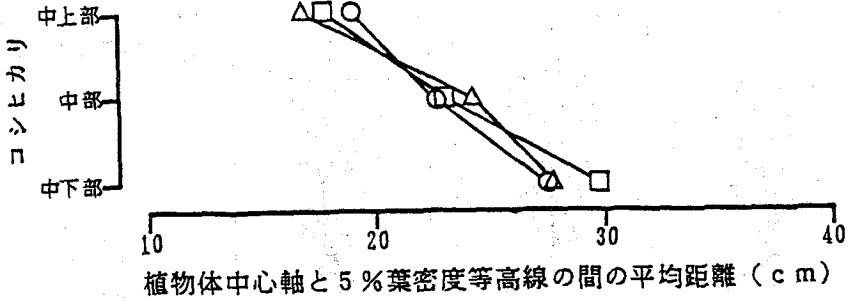
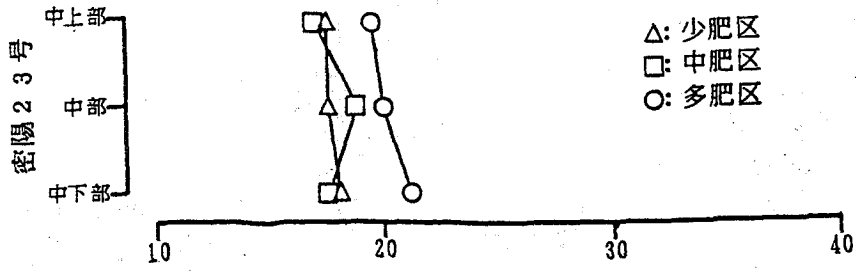
コシ
ヒカリ



肥料条件 少肥 中肥 多肥

図17 密陽23号(上段)とコシヒカリ(下段)のステージB(出穂3週間後)における、少肥区・中肥区・多肥区の二次元葉角度分布。矢印の方向は、各小区画(5×5cm)の平均葉角度を表している。各区の施肥量は、表1参照。

ステージA



ステージB

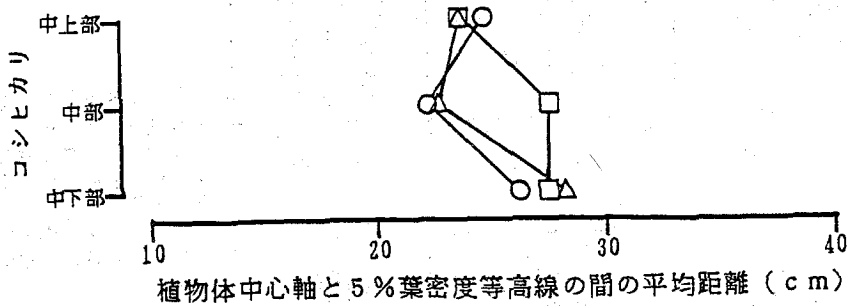
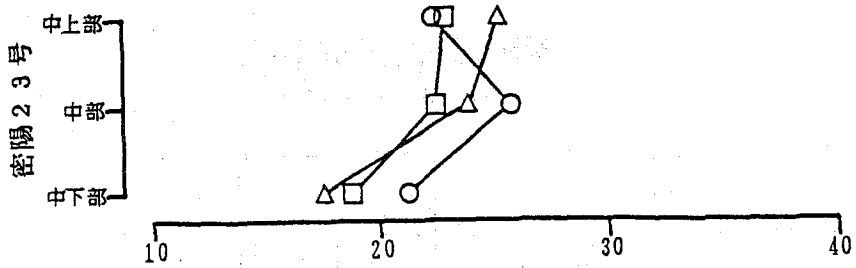


図18 少肥区・中肥区・多肥区における密陽233号とコシヒカリの、中上部・中部・中下部の高さでの植物体の幅。中上部(草丈の19/33-2/3の高さ)・中部(15/33-18/33)・中下部(1/3-14/33)における、植物体中心軸と5%葉密度等高線間の水平距離の平均を、植物体の幅としている。ステージAは出穂時、ステージBは出穂3週間後にあたる。各区の肥料条件は、表1参照。 栽植間隔はいずれの区も24×24cmである。 △: 少肥区、□: 中肥区、○: 多肥区。

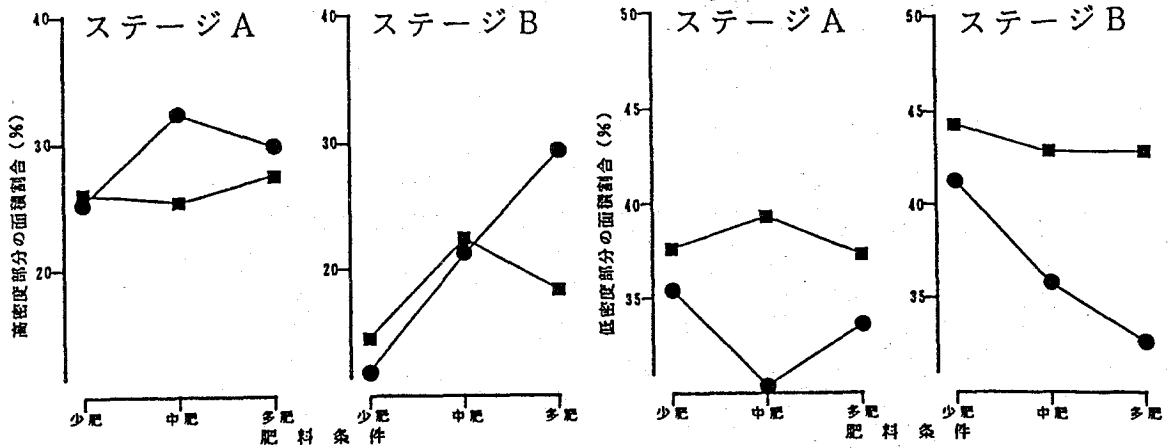


図19 少肥区・中肥区・多肥区における密陽23号とコシヒカリの、植物体の集中程度を表す2要因。二次元葉密度分布における、全面積(5-100%)に対する高密度(60-100%)・低密度(5-20%)部分の面積割合を要因とした。ステージAは出穂時、ステージBは出穂3週間後にあたる。各区の肥料条件は、表1参照。 栽植間隔はいずれの区も24×24cmである。 ●：密陽23号、■：コシヒカリ。

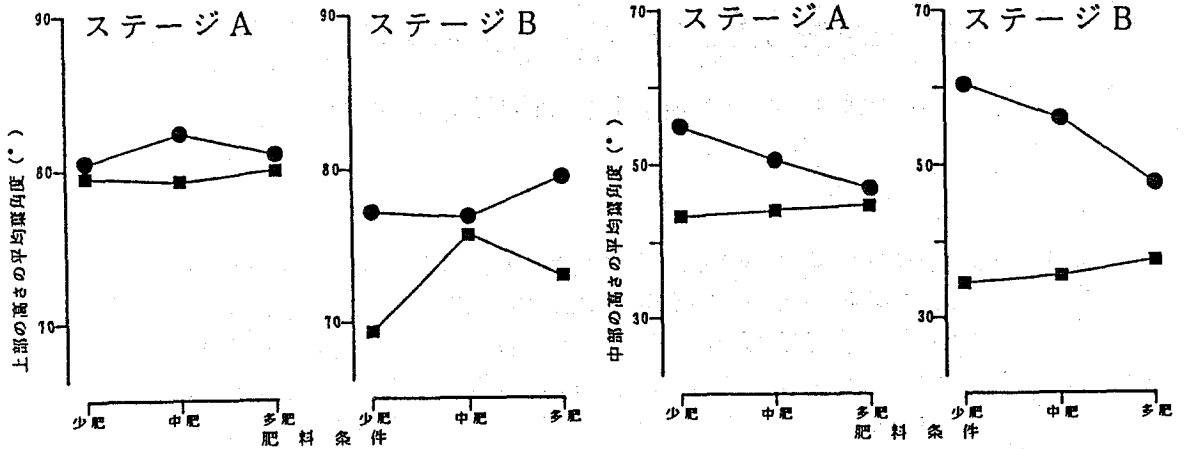


図20 少肥区・中肥区・多肥区における密陽23号とコシヒカリの、上部の高さ(草丈の5/6から6/6の高さ)と中部の高さ(2/6から3/6の高さ)における平均葉角度。ステージAは出穂時、ステージBは出穂3週間後にあたる。各区の肥料条件は、表1参照。 栽植間隔はいずれの区も24×24cmである。 ●：密陽23号、■：コシヒカリ。

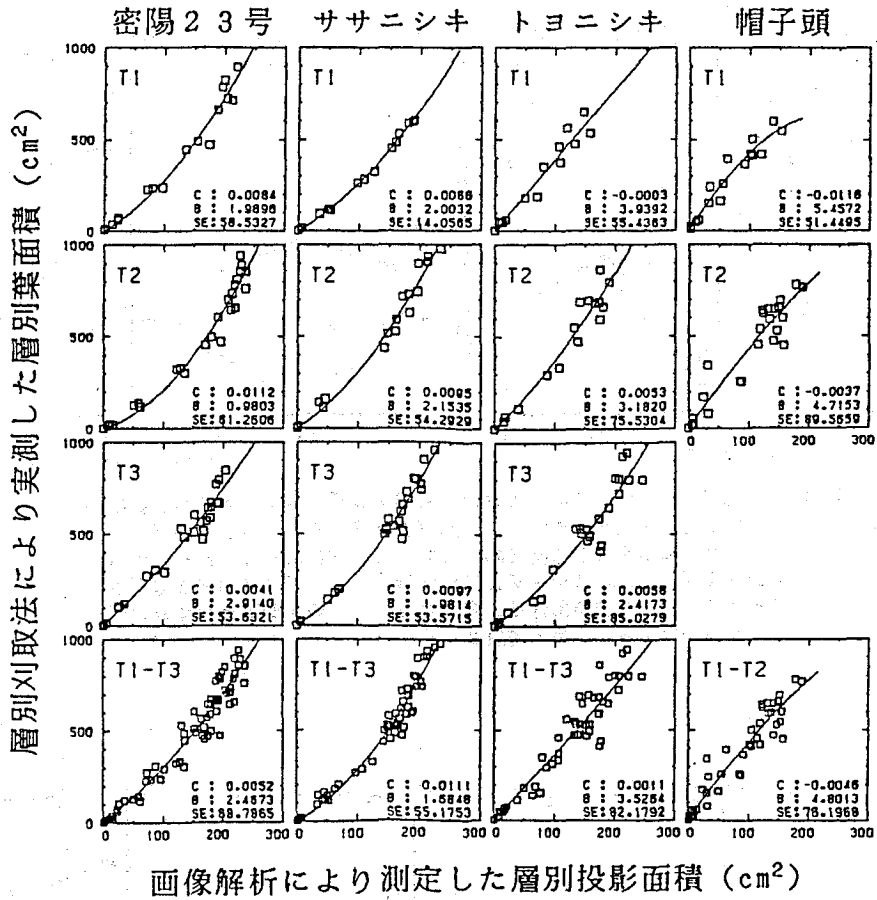


図21 画像解析により求めた二次元層別投影面積と、層別刈取法により実測した層別葉面積の関係。地上20cm以上のデータについて、原点を通る二次の回帰曲線 ($Y=CX^2+BX$) とともに、表示してある。 T1: 出穂20日前、 T2: 出穂10日前、 T3: 出穂時、 T1-T3: T1・T2・T3 のデータをまとめたもの、 C, B: 二次の回帰曲線の係数、 SE: 標準誤差。

層別刈取法により実測した層別葉面積 (cm²)

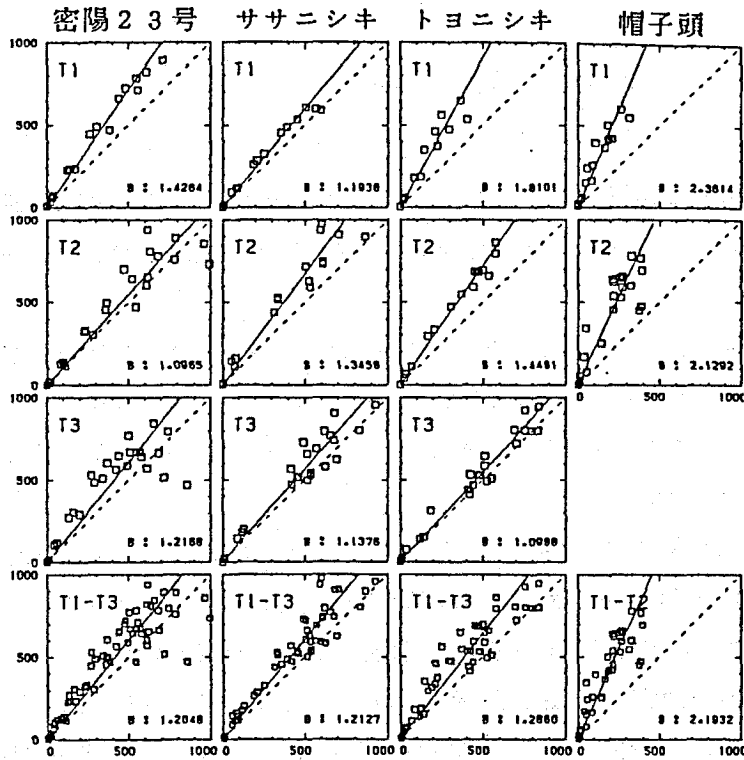


図2 二次元投影面積割合をもとに本文中の関係式により推定した層別葉面積と、層別刈取法により実測した層別葉面積の関係。地上20cm以上のデータについて、表示している。実線は、原点を通る回帰直線 ($Y=BX$) を示し、点線は推定値と実測値が等しい場合の回帰直線 ($Y=X$) を示す。
 T1: 出穂20日前、
 T2: 出穂10日前、
 T3: 出穂時、
 T1-T3: T1・T2・T3のデータをまとめたもの、
 B: 回帰直線の係数。

投影面積割合から推定した層別葉面積 (cm²)

層別刈取法により実測した層別葉面積 (cm²)

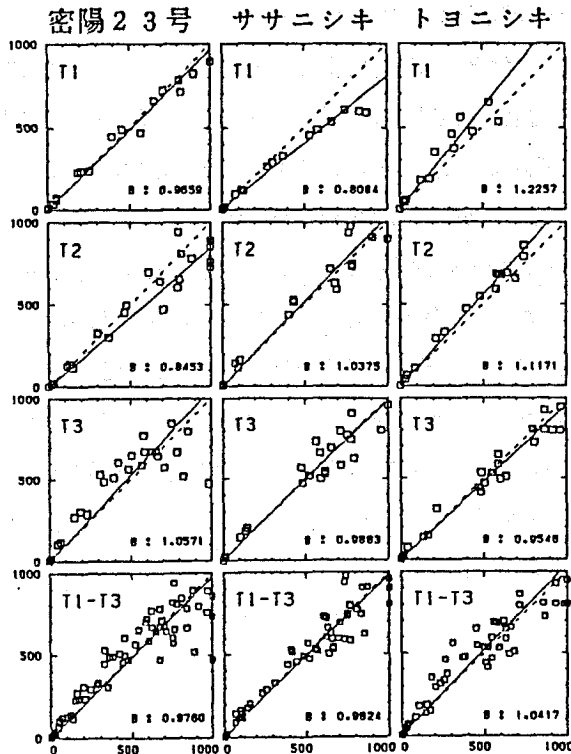


図3 二次元投影面積をもとにして、ステージごとに一定の係数で補正して推定した層別葉面積と、層別刈取法により実測した層別葉面積の関係。それぞれのステージの係数は、密陽23号・ササニシキ・トヨニシキのデータをまとめた場合の回帰直線の傾きが1となるよう、決めてある。地上20cm以上のデータについて、表示している。実線は原点を通る回帰直線 ($Y=BX$) を示し、点線は推定値と実測値が等しい場合の回帰直線 ($Y=X$) を示す。なお、ここでは帽子頭を除いた。T1: 出穂20日前、T2: 出穂10日前、T3: 出穂時、T1-T3: T1・T2・T3のデータをまとめたもの、B: 回帰直線の係数。

ステージごとに補正した推定層別葉面積 (cm²)

審査結果の要旨

本研究は、イネ植物体の側面写真を元に、コンピュータ画像解析を用いて、イネの葉の配置や葉の確度の解析を行い、水稻品種の草型の特徴を、非破壊で数値的かつ客観的に認識する手法の開発を行ったものである。

まず、ポット植え水稻4品種を用い、2次元平面上に投影した時の植物体の葉密度分布（茎と穂を含む）・葉角度分布を求めるコンピュータ画像解析システムを開発し、この手法によって品種の草型の特徴が把握できることを示した。そして、この方法をPPP法（Plant Profile Processing Method）と名づけた。

次に、PPP法が多数の立毛品種について有効か否かを検討するために、水田に育成した8新品種、7旧品種間の比較をPPP法によって行った。新品種の多くは、出穂後も葉が集中的に配置し、長方形型の草型を維持するのに反し、旧品種は、出穂後に上部の葉が顕著に傾いて、植物体が横に大きく張り出し、その植物型は、大場などのキノコ型、陸羽132号などの中部・上部が張り出す型、愛国20型などの幅広長方形型などのタイプに分けられることを示した。この結果は新旧水稻品種の草型を比較した従来の報告と矛盾せず、しかもこれまでは捉えることのできなかった草型の細かな差異も明らかにし、そしてそれを数値的に解析している。

さらに本研究においては、栽植密度を変えた場合と施肥量を変えた場合にどのように草型が変化するかをPPP法を用いて解析した。その結果、栽植密度を変化させると、草型が大幅に変化し、その反応に品種間差があること、また肥料条件を変えると、植物体の形の変化は少ないが、葉の集中程度が変化することを明らかにし、PPP法の有効性をたしかめた。

PPP法においては、2次元平面に投影した植物体を解析しているが、実際の植物は3次元に分布しており、その間の関係が問題となる。そこで、植物の草型解析に多用されている層別刈り取り法による葉面積の分布とPPP法によって推定した葉量との関係を調べ、層別投影面積と実測層別葉面積の間に、2次の回帰曲線が当てはまり、両者の間の相関が密であることを確かめた。

以上、本研究は、イネの草型を非破壊・客観的かつ数値的に計測する新しい手法を開発して、その適用性を吟味したもので、そのアイデアのオリジナリティ・それを用いて得られた新知見は著者に博士号を授与するに相応しいものと判定した。