

乖離係数法(Coefficient of Estrangement)による イネ(*Oryza sativa*)の亜種判別に関する検討

宇田津徹朗・藤原宏志

1. 緒 言

日本およびアジアにおける稲作の歴史を解明して行く過程で、栽培イネ(*Oryza sativa*)の2つの亜種(インディカ種・ジャポニカ種)の解釈とその判別基準の果たす役割は非常に大きいといえるであろう。

インディカとジャポニカの判別基準には、今日まで数多くの方法が提案されてきたが、遺伝的特性をINDEXとした判別方法が国立遺伝学研究所のスタッフによって確立され、現存種の判別においては一つの終止符が打たれた感がある。

しかしながら、考古学や農学を学ぶ者の間で論争となっている稲作の伝播経路を解明する手がかりとされているイネの植物遺体(もみがら・炭化米等)からの亜種推定法においてはまだ決定的な方法が確立されていないのが現状である。また近年は、植物遺体の中からDNAを抽出する方法が検討され始めている。将来この方法が確立されれば、上述の遺伝学的な判別も導入可能になるであろう。しかし、この方法が応用されるためには、植物遺体が発掘域に残留するための数多くの偶然が不可欠である。

過去の水田遺構から当時その地域で栽培されていたイネを知る手がかりとしては粃がらをはじめとする各種の植物遺体があるが、これらは必ずしも限られた発掘域から確実に十分な量が得られるとは限らない。したがって、水田遺構から確実に得られる植物起源のINDEXの発見が期待されるゆえんである。

プラント・オパール(Plant opal)は、イネ科植物を始めとする珪酸植物が枯死した後に土壤中に残した植物起源土粒子である。プラント・オパールは、その主成分が珪酸(SiO_2)であるため化学的・物理的に安定であり、土壤中で風化をうけ、消失するといったことはほとんどない。また、植物1個体が残すプラント・オパール数は、極めて多く、発掘域から発見される可能性は高い。

幸いにも、我々が対象とする稲作開始期の水田の収穫法は、穂刈がほとんどであり、多量のイネ珪酸体(プラント・オパールの前身)を含んだ植物体の水田に残留したと考えられる。このイネ起源の土粒子であるイネのプラント・オパールから亜種の推定が可能となれば、前述の命題解決の大きな助けとなることは間違いないであろう。

プラント・オパールの活用については、藤原等が、植物種によるプラント・オパール形状の違いを

利用した、古代植生分析法（プラント・オパール分析法）を考察し、水田跡の探索をはじめ数多くの考古学的・農学的成果を挙げてきた（藤原：1979，藤原，杉山：1984，藤原：1987）。また，藤原等は，その基礎研究段階から，イネのプラント・オパールの形状が亜種で若干異なっており，イネ（*Oryza sativa*）の亜種判別に活用できる可能性を指摘してきた（藤原，森脇，橋川，川上：1982）。そこで，われわれは，プラント・オパールの前身であるイネの機動細胞珪酸体の形状と亜種（国立遺伝学研究所の判別による）との関連を調べ，その結果，高い相関関係を認めるにいたった。また，これらの関係を乖離係数法を用いて解析したところ亜種判別の有効な指標を得ることができた（藤原，佐藤，甲斐玉，宇田津：1990）。

本報では，今回用いた乖離係数法の特性に触れながら，機動細胞珪酸体の形状特性を利用した亜種判別の結果について報告するものである。

2. イネ亜種と機動細胞珪酸体の形状

イネ科植物の機動細胞珪酸体形状には，種間差のあることがわかっている（藤原：1976）。この形状の違いは，種という植物としての違いを何らかの法則にしたがって反映したものと判断できる。この“植物としての違い”が機動細胞珪酸体の形状を変化させているならば，同様に亜種という“植物としての違い”が機動細胞珪酸体の形状を何らかの法則性をもって変化させることも十分考えられる。ここでは，97系統のイネの機動細胞珪酸体の形状特性と亜種との関係について検討を行った結果について述べることにしたい（なお，本文中で用いる亜種（インディカ・ジャポニカ）は国立遺伝学研究所のZ関数により判別されたものである）。

①供試試料について

供試した試料は，国立遺伝学研究所によって系統保存されている世界のイネ（通称 OKA テスターと呼ばれる）である。今回，この試料を採用したのは，系統保存がほどこされていることもさることながら，以下の3つの特性を持ちあわせていたためである。

- a. 各試料は，遺伝学的・植物学的特性にもとづく判別式（Z関数）によって定量的な亜種判別がおこなわれており，形状特性と亜種との定量的な結び付きを考察するのに適している。
- b. 世界各地から隔たりなく集められているため，「世界のイネ」という観点からみても標準的な考察・判断が可能である。
- c. 各試料の持つ様々な植物学的・遺伝学的特性が明らかにされており，機動細胞珪酸体形状の違いについてより多角的な考察が期待できる。

②機動細胞珪酸体の抽出と形状の計測

機動細胞珪酸体の抽出は，各試料の止葉数枚を電気炉で灰化させたものに超音波を照射したのち，挟雑粒子をストークス沈底法で除去することによって行った。形状の計測は，機動細胞珪酸体の400倍拡大像を画像計測装置に投影して行った。各試料から任意に抽出した50個の機動細胞珪酸体について，

図1に示す5つの部位のうちaを除く4つの部位〔縦長・横長・側長・b（a、bは縦長を横長との交点で分割した長さ）〕の計測を行った。各試料を代表する部位の大きさとしては、計測値の分散・分布形態が正規分布を呈していることから50個の相加平均値を採用することにした。また、解析の対象とした形状値は、縦長・横長・側長の長さ（micron）と縦長の分割比である b/a （無次元量）である。

③計測結果

機動細胞珪酸体の形状値のうち縦長・側長・ b/a を座標軸にもつ3次元座標上に各試料を展開した結果、図2のようなグラフを得た。このグラフを見ると、ジャポニカのいくつかに全体の傾向と異なるものがあるものの、ほぼジャポニカとインディカ2つの亜種が分離していることが読み取れる。また、形状別に亜種との関係を見てみると、ややおおざっぱではあるが、縦長・横長・側長についてはインディカ<ジャポニカ、 b/a についてはジャポニカ<インディカという傾向が認められた。特に、側長については、図3に示すように25 micronを境にして、インディカ・ジャポニカがかなり明瞭に分離する傾向が認められる。

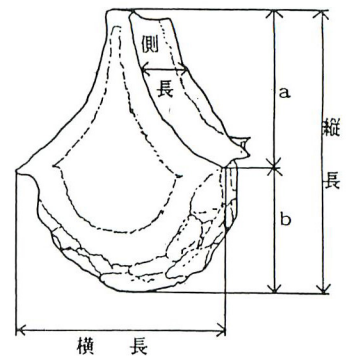


図1 機動細胞珪酸体測定部位
Fig.1 Schematic figure of motor cell.

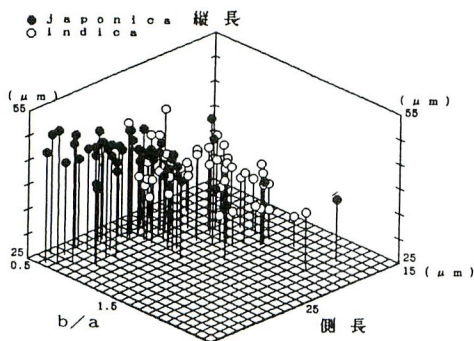


図2 機動細胞珪酸体形状値による亜種別3次元グラフ
Fig.2 Comparison of indica and japonica on figure of motor cells.

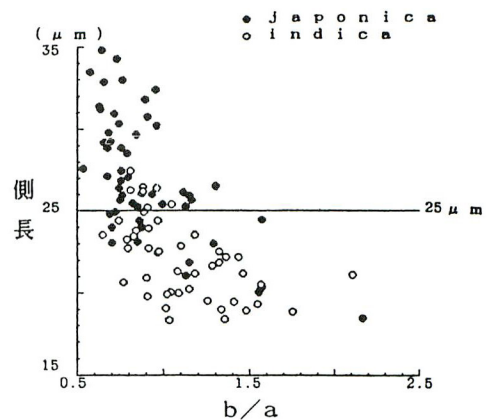


図3 機動細胞珪酸体形状値による亜種別2次元グラフ
Fig.3 Comparison of indica and japonica on lateral length of motor cells.

3. 乖離係数法 (Coefficient of Estrangement) について

栽培イネを機動細胞珪酸体の形状特性からみた結果、前述のようにイネの亜種がほぼ分離することが明らかとなった。そこで、われわれはこの形状特性と亜種との関係を利用し簡便な亜種の判別方法

の作成を試みた。この際もちいた方法を藤原等は乖離係数法と呼ぶことにした（藤原，佐藤，甲斐玉，宇田津：1990）。ここでは，乖離係数法の論理概念および形状判別への応用の経緯について述べることにする。なお，この乖離係数法は，数学的には新しい解析法ではなく，数量化の方法については既存のものを組み合わせたにすぎない。ここで“乖離係数法”と呼ぶのは，この方法が，機動細胞珪酸体の形状によって亜種判別を行うという命題に立脚した数量化法および評価法を意図する，いわば“乖離係数法による珪酸体形状解析法”という意味においてである。

3. 1) 乖離係数法の理論的概念

図2に見られるように，イネの亜種と機動細胞珪酸体の各形状（縦長・横長・側長・ b/a ）との間には，一定の傾向が認められる。

そこで，われわれは，各形状の大小の程度をインディカ・ジャポニカの傾向の程度に置き換えて考え，各形状値の大小の程度の組合せを典型的なインディカ・ジャポニカとして表すことを考えた。しかし，試料を形状値の大きさを示すパラメータの組合せであらわした場合，例えば，各形状の大きさを5階級で表した場合，形状の組合せは最高 $5^4=625$ となり“簡便な方法”としてのメリットに欠けてしまう。そこでわれわれは，各試料の形状特性を形状の階級値の組合せでなくある典型的な組合せからの“違いの程度”すなわち典型的なものからの“乖離の程度”であらわすことを考え，この“乖離の程度”を表す数値を乖離係数（Coefficient of Estrangement）とよぶことにした。これが乖離係数法の論理的な概念である。なお，この方法を適用するにあたって，以下の3つの仮定をおくこととした。

- a. 適用し分類する数は2つであり，この2つの集団を位置づける性質は，集団に共通なものであり，かつ2極性をもったものであること。
- b. 基本的に組合せを構成する各性質（この場合は各形状値）およびその分級値の判別に影響する程度は同一であると考えている。
- c. 判別に有効な性質のうち，相関の非常に高いものが存在する場合は，これらの判別特性が強調されるおそれがあるので，その一方を採用することとする。

3. 2) 乖離係数法の亜種判別への適用について

前述の乖離係数法の理論概念にもとづき，各試料の機動細胞珪酸体の形状特性の組合せの決定および乖離係数の算定を以下の方法で行った。

①乖離係数の算定に用いる機動細胞珪酸体形状の決定

前述の仮定のcに基づき，まず機動細胞珪酸体の各形状間の相関係数を算定した（図4参照）。その結果，縦長と横長の間に高い相関関係が認められたため，横長を乖離係数の算定要因から除外することとした。

よって，もちいる形状は縦長・側長・ b/a の3つとする。

②各形状の階級値の設定

今回は、各形状の大きさの段階が判別にどのように影響するのかを推定する根拠がないため、bの仮定に立脚し、便宜的ではあるが各形状値の最大値と最小値を用いて以下のように等分に階級分けを行った。

縦 長：

① $\leq 35\mu\text{m}$ < ② $\leq 40\mu\text{m}$ < ③ $\leq 45\mu\text{m}$ < ④

側 長：

① $\leq 20\mu\text{m}$ < ② $\leq 25\mu\text{m}$ < ③ $\leq 30\mu\text{m}$ < ④

b/a：

① ≤ 0.8 < ② ≤ 1.0 < ③ ≤ 1.2 < ④

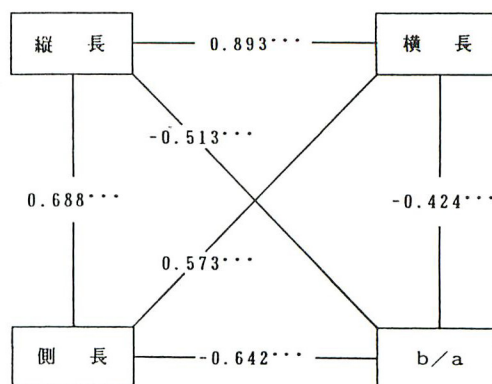


図4 機動細胞珪酸体形状間の相関係数

Fig.4 Correlation coefficient among shapes of motor cells.

③典型の決定

乖離係数を決定する際に用いる“典型の組合せ”としては、藤原等がジャポニカタイプの機動細胞珪酸体に多くみられると報告している（藤原，森脇，橋川，川上：1982），「縦長・横長は大きく，側長は厚く，b/aは小さい」という形状の組合せを「典型的なジャポニカの形状」として用いることとした。よって，典型的なジャポニカの組合せは④—④—①となり，各試料は，「典型的なジャポニカとどれだけ近いか遠いか」を意味する0から9までの乖離係数によって整理されることになる。

④乖離係数の算定

乖離係数の算定は，各試料の形状値を用い以下のように行った。

〈計 算 例〉

縦長：42 μm ，側長：23 μm ，b/a：1.1の試料の場合

分級値への変換

縦 長：42 μm → ③

側 長：23 μm → ②

b/a：1.1 → ③ よって，組合せは③—②—③

乖離係数 (C. E.) の決定

C. E. = | 3 - 4 | + | 2 - 4 | + | 3 - 1 |

= 1 + 2 + 2

= 5

この試料の乖離係数は5となる。

なお，試料の乖離係数の算定には，各形状値の平均値を用いるのではなく各試料について計測した50個の機動細胞珪酸体の乖離係数を求め，そのモードを用いることも考えられる。しかし，前述したように50個の形状値の分布は正規分布をなしており，平均値で求めた乖離係数とモードの乖離係数はほ

ば一致している。また、計算の手間等を考え合わせると、乖離係数の算定に平均値を用いる方が“簡便な判別法”という主旨に適しているといえるだろう。

3. 3) 乖離係数の表す“距離概念”の幾何的な位置関係

乖離係数を算定し判別に利用する以上、乖離係数の“乖離の程度”の持つ意味を十分に確かめておく必要がある。ここでは、星座グラフ解析法を用いて、乖離係数の値の違いが幾何的にみてどのようなになっているかを確かめてみた。

①星座グラフ解析

星座グラフ解析は、集団を構成する個体の形質をつかさどるいくつかの変量を角度に変換し、変量ひとつひとつをベクトル化して加え合わせることで集団内の個体を半円内の点として投影し、集団を構成する個体のかたよりを表現する方法である。具体的な計算方法およびその理論的な概念については、引用文献（河口，水田：1986）を参照されたい。

②星座グラフからみた乖離係数間の関係

乖離係数の違いをみるため、乖離係数を決定している3つの形状（縦長・側長・ b/a ）を変量として、それぞれの乖離係数（0～9）をつくる全ての変量の組合せを星座グラフ上に投影した（図5参照）。

図5を見てみると、乖離係数が大きくなるにつれて、領域が左から右に移動すること、乖離係数の領域が0から5・6にかけて大きくなり、それを越えると9に近づくにつれて小さくなること、隣合う乖離係数の領域同士では重なり合う部分があること等が読み取れる。

これらの結果から、今回作成した乖離係数の特性およびその解釈について以下の3つのポイントが挙げられる。

- 乖離係数は、幾何的にみても乖離係数0と9を両極とする2極性の性質をもっている。
- それぞれの乖離係数の持つ幾何的な多様性は異なっている（典型をあらわす乖離係数（0や9）ほど該当する機動細胞珪酸体形状は限定され、中間的なもの（5か6）はかなりの多様性を持つ）。
- 乖離係数の1程度の違いは、機動細胞珪酸体形状からみてそれほどの違いにはならない。このことは、乖離係数5・6付近についての解釈の際には特に留意されなければならないだろう。

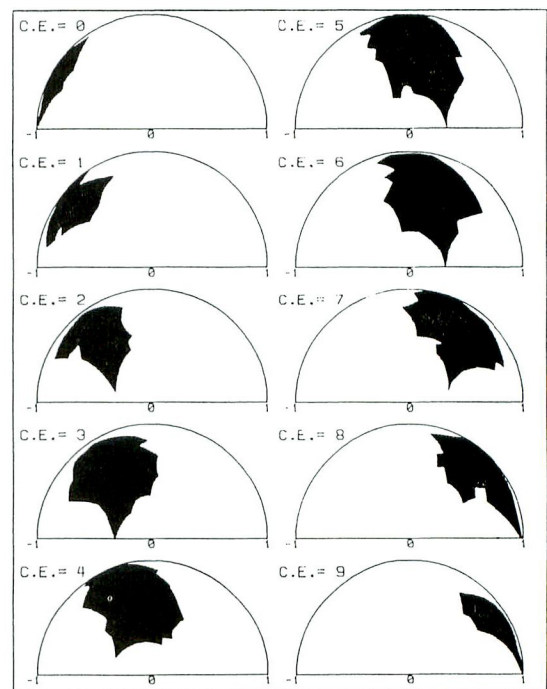


図5 星座グラフにおける各乖離係数の領域
Fig. 5 Area of each C. E. on constellation graph.

4. 乖離係数法および星座グラフ解析によるイネの亜種判別結果について

4. 1) 乖離係数 (10階級) の場合の判別

前述の手順に従って97試料のイネについて乖離係数を求め、インディカ・ジャポニカについて棒グラフ (図6) を作成した。また、乖離係数法の示す結果を幾何的に把握するために、縦長・側長・ b/a を変量とした星座グラフ (図7) も作成した。棒グラフ, 星座グラフともに, 黒色がジャポニカタイプ, 白色がインディカタイプを表している。

これらのグラフをみて, 明らかなようにジャポニカタイプに数個の例外はあるものの, 星座グラフでは, その中央部分を, 棒グラフでは乖離係数5・6付近を境界にしてインディカ・ジャポニカが分離する。

乖離係数0・1・2および3をジャポニカタイプ, 4・5を中間型, 9・8・7および6をインディカタイプと見れば, 大まかではあるが亜種判別の目安となるであろう。

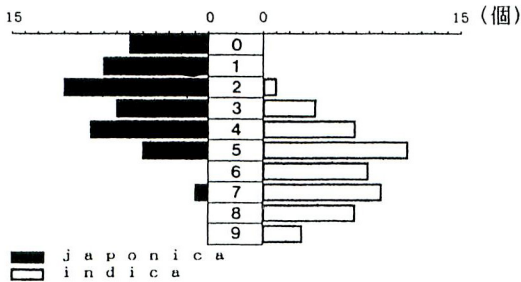


図6 乖離係数 (10階級) による亜種別頻度グラフ
Fig.6 Relation between indica and japonica on degrees of C.E..

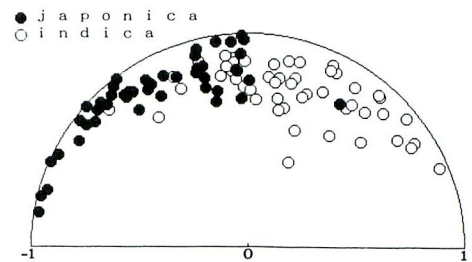


図7 縦長・側長・ b/a による亜種別星座グラフ
Fig.7 Relation between indica and japonica on constellation graph organized by vertical length, lateral length and b/a .

4. 2) 乖離係数 (7階級) の場合の判別

10階級の乖離係数による判別の場合, 試料数に対する階級数が多いためピークが若干, 分かりにくいという問題点があるので階級値の幅をさらに少なくすることを試みた。乖離係数法の性格上, 階級値を減少させる方法としては, 「算定に用いる形状の数を減らす」か「各形状の分級数を減らす」のいずれかとなるわけであるが, 今回は前者の方法を用い, b/a を除くこととした。この場合, 乖離係数は0~6の7階級となる。 b/a を除いた理由としては, 縦長・側長と比べ, b/a は50個の計測値のCV値が大きい, 計測誤差の介入の可能性が大きい等である。乖離係数の算定は, 典型的

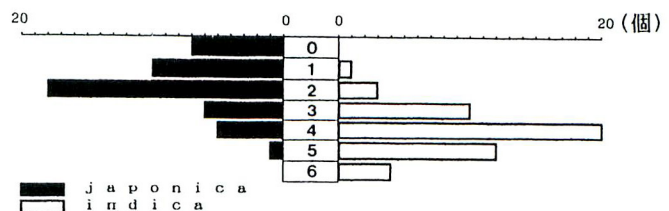


図8 乖離係数 (7階級) による亜種別頻度グラフ
Fig.8 Relation between indica and japonica on degrees of C.E..

なジャポニカを④—④型として前述の方法に順じて行った。結果の棒グラフを図8に星座グラフを図9に示す。

図8をみると乖離係数2と4にピークがあり、乖離係数0～2にジャポニカタイプ、乖離係数4～6にインディカタイプが集中することがわかる。

この7階級の結果についても、10階級の場合と同様の分類を行うと、乖離係数0～2をジャポニカタイプ、3を中間型、4～6をインディカタイプとすれば、9階級と同様の判別が可能である。

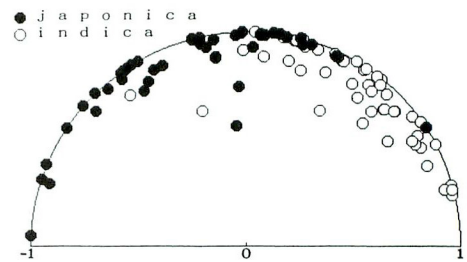


図9 縦長・側長による亜種別星座グラフ

Fig.9 Relation between indica and japonica on constellation graph organized by vertical length and lateral length.

5. 考 察

5. 1) 乖離係数法による亜種分類について

乖離係数法による亜種分類を行った結果、栽培イネ97試料は、インディカ型、ジャポニカ型と呼べる部分と2つの亜種の混在している境界部分（ここでは中間型と名付けた）の3つに分類されることが明らかとなった。中間型が生じた理由の一つとしては乖離係数の算定に用いた条件の少なさが挙げられる。しかしまた逆の視点からみれば、中間型が存在することは、「亜種などの非常に近い植物の中には、ほとんど見分けがつかないものが存在する」という植物学的な常識に一致しており、機動細胞珪酸体の形状特性が信頼にたる判別指標であることを意味しているとも言えるだろう。また、今回用いた乖離係数法の「簡便さ」を重視するならば、亜種間の明確な境界を設定することは困難であろう。しかし、典型的な亜種の分類判別においては、十分実用に耐えうるものと考えられる。

5. 2) 乖離係数法からみた機動細胞珪酸体形状の特性

今回、作成した乖離係数法によって、簡便に亜種を分類できるということは、乖離係数法を適用する際のいくつかの仮定がほぼ正しかったと判断できる。特に、典型的なジャポニカタイプの機動細胞珪酸体形状が「縦長・横長が大きく、側長が厚く、 b/a が小さい」という仮定の成立は、典型的なインディカタイプの形状が「縦長・横長が小さく、側長が薄く、 b/a が大きい」ということを導きだしたといえる。

5. 3) 10階級および7階級の乖離係数法の違いについて

図6、図8をみるとわかるように、7階級と10階級の判別における効果にはあまり差がない。10階級の場合、各亜種の典型的部分がより細かく分類される程度である。しかし、図7、図9の星座グラフを見てみると b/a を加えた10階級の場合、グラフ中央部分、中間型に相当する部分の試料の分離力が高く、潜在的な判別力としては10階級の方が優れていると判断できる。

6. まとめ

今回作成した乖離係数法は、亜種の定量的な判別に利用できることが判明した。さらに基礎データを集積し、分級幅の変更や形状値に対するおもみづけ等をおこなってゆけば、“簡便な亜種判別法”としてその利用価値は上がるものと期待できる。なお、より詳細な亜種判別については、判別分析によって得られた判別関数による判別法が佐藤・藤原等によって既報（佐藤，藤原，宇田津：1989）され、実用的な段階に入りつつある。

乖離係数法による“簡便な判別法”と判別関数による“詳細な判別法”，この2つの方法を有効に活用してゆけば，過去の水田遺構で栽培されていたイネの亜種の推定やそれらの地域的・時代的なつながりを実証的に考察してゆくことが可能になるであろう。

引用文献

- 河口至商・水田正弘(1986) パソコンによる多変量グラフ解析入門，森北出版：80-83.
- 佐藤洋一郎・藤原宏志・宇田津徹朗(1989) イネ機動細胞珪酸体の形状による *indica japonica* の判別．育種学雑誌 39-別1．
- 藤原宏志(1976) プラント・オパール分析法の基礎的研究(1)―数種イネ科植物の珪酸体標本と定量分析法―考古学と自然科学 9：15-29.
- 藤原宏志(1979) プラント・オパール分析法の基礎的研究(3)―福岡・板付遺跡(夜臼期)水田および群馬・日高遺跡(弥生時代)水田におけるイネ (*O. sativa. L*) 生産量の推定―考古学と自然科学12：29-42.
- 藤原宏志・森脇 勉・橋川 潮・川上潤一郎(1982) 泳動像型の異なる栽培稲 (*O. sativa*) における機動細胞珪酸体の形状．日本作物学会紀事 51：別1．
- 藤原宏志・杉山真二(1984) プラント・オパール分析法の基礎的研究(5)―プラント・オパール分析による水田址の探査―考古学と自然科学 17：73-85.
- 藤原宏志(1987) プラント・オパール分析による弥生時代水田遺構の検討―とくに鳥取・目久美遺跡および青森・垂柳遺跡の水田遺構について―東南アジア研究 25-1：140-150.
- 藤原宏志・佐藤洋一郎・甲斐玉浩明・宇田津徹朗(1990) プラント・オパール分析(形状解析法)によるイネ系統の歴史的変遷に関する研究 考古学雑誌 75-3：93-102.

**The study on the coefficient of estrangement for discriminating subspecies
of cultivated rice (*Oryza sativa*)**

Tetsuro UDATSU and Hiroshi FUJIWARA

Miyazaki University. Gakuen kibanadai nishi 1-1, Miyazaki

In tracing the origin and routes of rice cultivation in Asia, the methods employed for the discrimination of subspecies in cultivated rice (*Oryza sativa*) are very important. In order to discriminate subspecies of cultivated rice, a number of methods have been used and studied. Plant opal analysis was suggested as an effective method for discriminating them. The coefficient of estrangement (C. E.) method is a kind of plant opal analysis. The values of the C. E. are induced from morphological differences in the silica body and plant opal of cultivated rice.

In the present paper, the effectiveness of C. E. for the discrimination of subspecies in cultivated rice is discussed.

The results obtained are as follows :

- 1) A quantitative relation was observed between the shape of silica bodies and subspecies of cultivated rice (*Oryza sativa*).
- 2) cultivated rice was classified into three types ; indica, japonica, and neutral using C. E. values.
- 3) In order to make the C. E. method effective, it would be desirable to apply this method to a group consisting of dipolar parts.

This study of the C. E. method makes it clear that the shape of the silica body enables us to discriminate subspecies of cultivated rice. In order for it to be more useful, however, it will be necessary to accumulate more data on silica bodies and to make some improvements in the method.

If the C. E. method is applied to studies on the origin and routes of rice cultivation, these studies can be discussed more positively.