

イネの機動細胞珪酸体形状における 主成分分析およびその亜種判別への応用

王才林^{1,2)}・宇田津徹朗²⁾・藤原宏志²⁾・鄭雲飛³⁾

1. はじめに

1970年代以来、稲作起源およびその伝播ルートを解明する実証的な研究手法として、土中から検出された植物珪酸体由来するプラント・オパールを利用し、過去の植生や作物の特性を分析する方法—プラント・オパール分析法が藤原らによって確立されている(藤原:1976, 藤原・佐々木:1979)。プラント・オパールは、炭化米や花粉に比べ、土中での残留性に優れており、検出が容易である。そのため、土壌中に含まれるイネプラント・オパールの検出・定量を行うプラント・オパール分析法は、水田址探査において極めて有効である。さらに、検出されたイネプラント・オパールの形状から、亜種の判別が可能となれば、稲の起源と伝播に関する実証的なデータを収集していく有効な手段となろう。

これまでの研究によりイネの機動細胞珪酸体の形状は *indica* と *japonica* あるいは秈と粳によって異なることが明らかにされ、珪酸体形状による亜種判別式による判別率が80%以上であると報告されている(藤原ら:1990, 佐藤ら:1990, Udatsu and Fujiwara:1993, Wang *et al.*:1994)。しかし、これらの研究はいずれも、珪酸体形状による亜種判別が有効であることを明らかにすることが本来の目的であり、判別式における他の資料への適用性、特に遺跡調査への適用性については検討されていない。また、*indica*, *japonica* 亜種分類の対象はアジア栽培イネである。Wang *et al.* (1994) の中国在来イネおよび改良イネから作成した判別式は、中国イネへの適用性はよいかもしれないが、アジアのイネという点ではその代表性に問題がある。一方、佐藤ら(1990)および Udatsu and Fujiwara (1993) が報告したアジア在来イネから作成した亜種判別式については、材料の代表性には問題がないが、判別式の遺跡調査への適用性については再検討の必要がある。

本研究では、珪酸体形状について主成分分析を行い、珪酸体の形状特性を明確にし、判別により有効な判別指標を析出した。また、これらの判別指標を用い、より適用性の高い判別式の作成を試みたものである。

¹⁾ 江蘇省農業科学院 210014 南京, 中国

²⁾ 宮崎大学農学部 〒889-21 宮崎市学園木花台西1-1

³⁾ 鹿児島大学大学院連合農学研究科 〒889-21 宮崎市学園木花台西1-1

2. 材料および方法

2.1 供試試料

本研究に供試した試料は、以下に挙げる試料1、試料2、試料3である。

試料1：中国の在来イネ52品種であり、そのうち秈稻と粳稻がそれぞれ26品種ずつである。これらは、中国浙江省から広く集められたものである。

試料2：中国の改良イネ65品種であり、そのうち秈稻が37品種、粳稻が28品種である。これらの品種は、主に中国の南方および長江中・下流域から集められたものである。

試料3：アジア在来イネ約1300系統からランダムにサンプリングされた97品種である。そのうち、*indica* と *japonica* はそれぞれ50品種と47品種である。これらは、佐藤洋一郎博士が提供されたものである。

ここで、イネ亜種の名称については、中国イネの場合、秈稻 (*hsien*) と粳稻 (*keng*) を用いるが、アジア在来イネについては、*indica* と *japonica* を用いる。秈稻と粳稻は、イネの様々な外観的な形質によって分類されたものである。*indica*, *japonica* の定義は、Sato *et al.* (1986) の判別式によるものである。

なお、*indica* と秈、*japonica* と粳は、必ずしも一致していないが、ほぼ一致している (丁：1949, 1961)。

2.2 実験方法

2.2.1 珪酸体の抽出および形状の測定

珪酸体の抽出は、藤原 (1976) の方法に従って行った。形状の測定は、画像解析装置を用いて行い、各品種からランダムに抽出した50個の珪酸体について、図1に示す縦長 (Vertical length, VL), 横長 (Horizontal length, HL), 側長 (Lateral length, LL) および b の長さを測定した。また、 b の長さを a の長さ (VL- b) で割った形状係数 b/a を算出した。50個の珪酸体の縦長、横長、側長および b/a の平均値を各品種の形状値とした。なお、試料3の計測データは、佐藤ら (1990) および Udatsu and Fujiwara (1993) が用いたデータと同じだが、いくつかの計測ミスを訂正したものである。

2.2.2 統計分析

試料1、試料2および試料3について、珪酸体の4つの形質 (縦長、横長、側長および b/a) にもとづく主成分分析を行った。また、分析によって得られた全主成分のスコアを用い、判別分析を行った。

判別分析は、試料の代表性と遺伝的安定性の点から、試料3 (アジア在来イネ97品種) について行った。分析は、全主成分のすべての組合せについて行い、それぞれの判別式を求めた。また、比較を行

うために、珪酸体の形状についても同様に、4形質すべての組合せについて判別式を求めた。

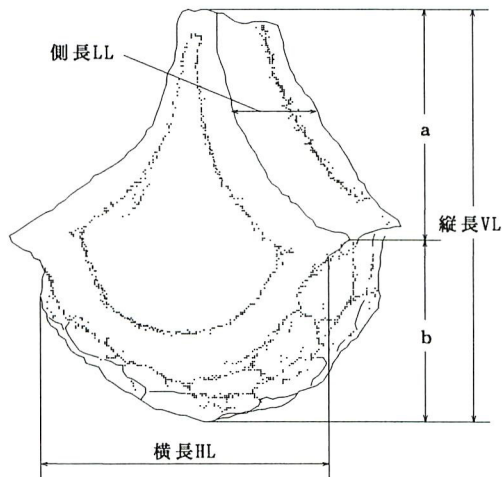


図1 イネの機動細胞珪酸体形状の測定部位
Fig.1 The morphology of silica body derived from motor cell of rice

得られた判別式については、相互間の相関分析や中国在来イネや改良イネおよび遺跡データへの適用を行い、これらの結果を比較しながら、最適な判別式を検討した。

なお、主成分分析および判別分析は、奥野ら（1981）の方法にしたがった。

3. 結果

3.1 珪酸体形状における主成分分析

3.1.1 珪酸体の形状における分散分析および相関分析

それぞれの試料について、珪酸体の形状における分散分析を行った結果、3サンプルの4形質のすべてについて1%の水準で有意差があり（表1）、これらの形状は主成分分析の対象指標として適当であることが分かった。

表1 供試試料品種間における機動細胞珪酸体形状の不偏分散
Table 1 Mean squares among varieties for the four morphological characters of silica bodies from motor cells

試料 ¹⁾ Sample ¹⁾	自由度 df	縦長 VL	横長 HL	側長 LL	b/a
1	51	506.23 **	347.24 **	693.30 **	1.00 **
2	65	747.49 **	511.35 **	287.51 **	0.94 **
3	58	813.33 **	473.20 **	696.16 **	1.07 **

** : 1%の水準で有意。Significant at 1% level.

¹⁾ 試料1, 2, 3: それぞれ中国の在来イネ52品種, 改良イネ65品種, アジア各地の在来イネ97品種。この後の表も同じ。
試料3について、分散分析に用いたデータは59品種のみである。

Sample 1, 2 and 3 represent the 52 native rice varieties from Zhejiang Province, China, 65 improved rice cultivars from different areas of China and 97 native varieties from different Asian countries, respectively. It is as same in following tables. And for sample 3, 59 of 97 varieties are available for the analysis of variance.

表2は4形質間の相関係数を示す。表2からみると、形質間の相関は試料によって異なるものもあるが、縦長と横長、縦長と側長、側長と b/a の相関は、いずれの試料においても1%あるいは5%の水準で有意であった。したがって、これらの形質について、主成分分析を行う必要があると判断される。主成分分析を行うことにより、相互無相関な新しい成分(主成分)を抽出することができ、これらの主成分はもとの形質に比べ判別分析に有効であると考えられる。

表2 供試試料における機動細胞珪酸体の4形質間の相関係数
Table 2 Correlation coefficients among the four morphological characters of silica bodies from motor cells in rice

相関形質 Characters	試料1 Sample 1	試料2 Sample 2	試料3 Sample 3
縦長と横長 VL and HL	0.860 **	0.794 **	0.893 **
縦長と側長 VL and LL	0.273 *	0.355 **	0.688 **
縦長と b/a VL and b/a	-0.040	-0.005	-0.511 **
横長と側長 HL and LL	0.147	-0.049	0.573 **
横長と b/a HL and b/a	0.239	0.423 **	-0.423 **
側長と b/a LL and b/a	-0.398 **	-0.412 **	-0.637 **

* **: 5%、1%水準で有意。Significant at 5% and 1% levels, respectively.

3.1.2 第1および第2主成分からみられる珪酸体形状の特徴

表3は、試料1、試料2および試料3について、珪酸体形状の相関係数から抽出された固有値および固有ベクターを示したものである。

固有値(λ)は抽出された主成分の変異の大きさを表し、固有値の和は、4主成分の全変異を示す。したがって、それぞれの主成分の固有値が固有値の和に占める割合は全変異への貢献度あるいは全情報量に対する寄与率を示す。寄与率が大きいほど、その主成分が重要であることを示す。

表3からみると、第1および第2主成分の寄与率は、それぞれ全情報量の47.55~71.94%および17.58~38.35%であり、合計で84.10~89.52%に達している。一方、第3、第4主成分の寄与率は合計10.48~15.90%にすぎなかった。これらの結果から、4形質によって表される珪酸体の形状は、第1、第2主成分だけで十分に要約、代表されるとみなされた。

第1主成分の固有ベクターをみると、最も大きいのは、縦長と横長であった。したがって、第1主成分は、珪酸体の「大きさ」の特徴を表すものとみられる。一方、第2主成分の固有ベクターでは、側長が負の方向に、形状係数 b/a が正の方向に、大きく寄与していた。 b/a と側長は、それぞれ珪酸体の尖りおよび厚みを示すものであるため、第2主成分は珪酸体の「かたち」の特徴を表すものとみられる。

したがって、珪酸体の形状は、「大きさ」を表す第1主成分と「かたち」を表す第2主成分で簡単かつ明瞭に表すことが可能である。

表3 珪酸体形状の相関係数から抽出した固有値および固有ベクター
 Table 3 The eigenvalues and eigenvectors obtained from correlation coefficients among the four morphological characters of silica bodies from motor cells in rice

順序 Sequence	固有値 Eigenvalue ¹⁾			固有ベクター Eigenvector			
	λ	寄与率 PV ¹⁾ (%)	累積寄与率 CPV ¹⁾ (%)	因子 Factor			
				縦長 VL	横長 HL	側長 LL	b/a
試料1 Sample 1							
1	1.953	48.83	48.83	0.685	0.667	0.292	0.017
2	1.411	35.27	84.10	0.015	0.240	-0.625	0.743
3	0.540	13.49	97.59	-0.269	-0.056	0.724	0.632
4	0.096	2.41	100.00	-0.677	0.703	-0.006	-0.219
試料2 Sample 2							
1	1.902	47.55	47.55	0.649	0.700	0.086	0.286
2	1.534	38.35	85.89	-0.306	0.112	-0.702	0.633
3	0.488	12.21	98.10	-0.216	-0.161	0.682	0.680
4	0.076	1.90	100.00	-0.663	0.687	0.186	-0.235
試料3 Sample 3							
1	2.878	71.94	71.94	0.545	0.511	0.503	-0.434
2	0.703	17.58	89.52	0.357	0.521	-0.299	0.715
3	0.326	8.16	97.68	-0.059	-0.255	0.795	0.548
4	0.093	2.32	100.00	-0.756	0.635	0.160	-0.018

¹⁾ PV=Percentage of variability; CPV=Cumulative percentage of variability.

3.1.3 主成分スコアの分布特徴

図2は、3試料の各品種における第1主成分および第2主成分スコアの分布を籼、粳別あるいは *indica*, *japonica* 別に表したものである。図2をみると、試料2の第1主成分を除いて、籼と粳あるいは *indica* と *japonica* によって分布のピークが明瞭に異なることが分かる。

これまでの研究により、*indica* や籼の珪酸体形状は、縦長、横長、側長が小さく、b/a が大きい、逆に、*japonica* や粳のものは、縦長、横長、側長が大きく、b/a が小さいという傾向が明らかにされている（藤原ら：1990, 佐藤ら：1990, Wang *et al.* : 1994）。この傾向は、まさに珪酸体の「大きさ」と「かたち」によって支配されているものである。したがって、主成分分析で得られた第1主成分と第2主成分によって *indica* と *japonica* あるいは籼と粳の珪酸体形状特性を表すことができる。つまり、*indica* や籼の珪酸体は、第1主成分が小さく、第2主成分が大きい。逆に、*japonica* や粳の珪酸体は、第1主成分が大きく、第2主成分が小さいといえる。

図3、図4および図5は、3試料の各品種における第1および第2主成分スコアの散布図を示したものである。図中の黒丸は籼または *indica* を、白丸は粳または *japonica* を示す。また直線は主成分による籼と粳または *indica* と *japonica* の二元境界線を表している。これらの図をみると、籼と粳あるいは *indica* と *japonica* は境界線によって明瞭に区別できることが分かる。

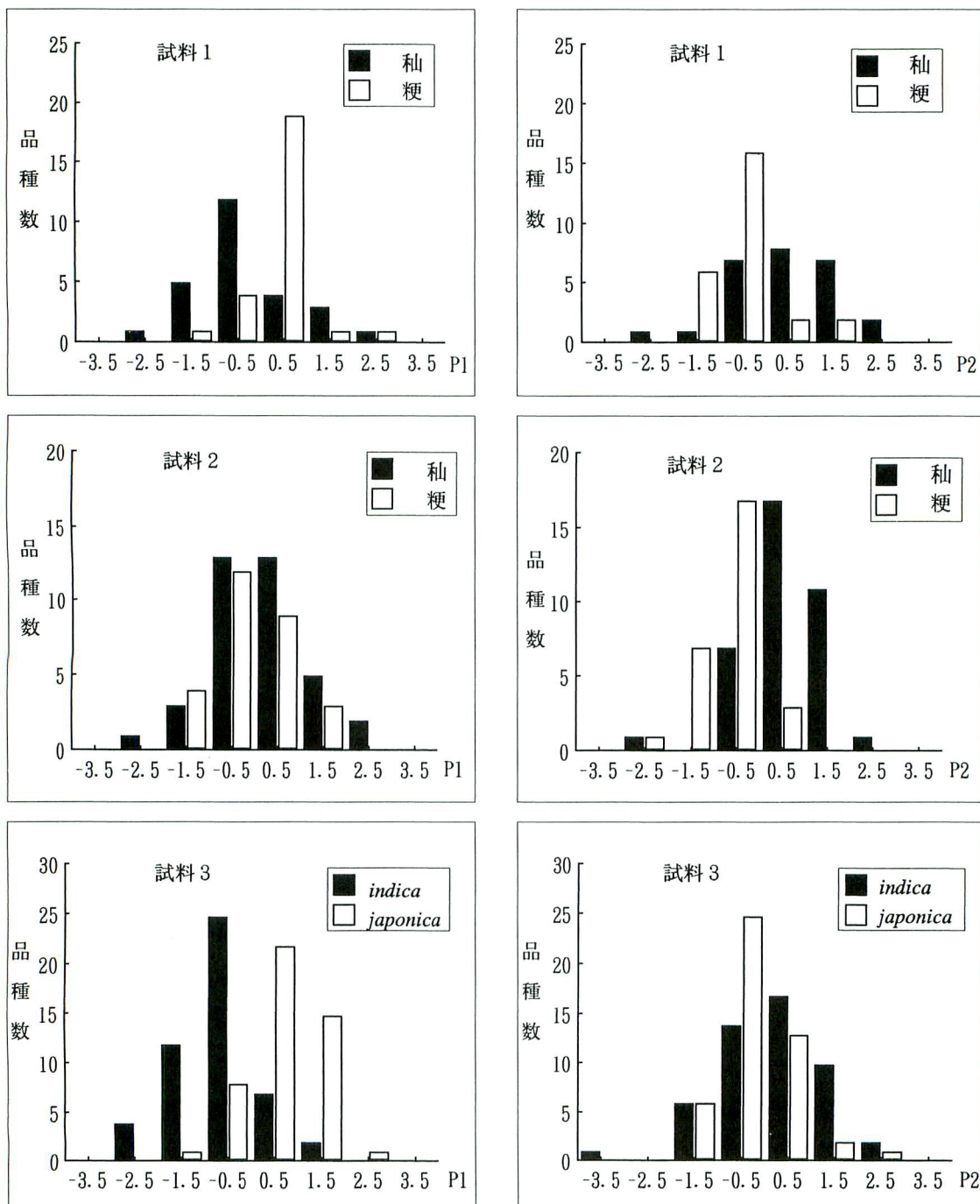


図2 試料1, 2と3における第1 (P1) および第2 (P2) 主成分の籼, 粳別あるいは *indica*, *japonica* 別分布
 Fig.2 Distributions of the first (P1) and second (P2) principal components of *hsien* and *keng* (or *indica* and *japnica*) varieties for Samples 1, 2 and 3

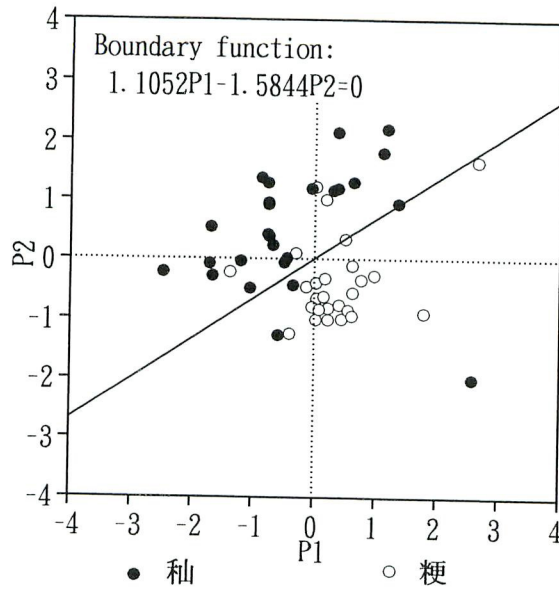


図3 試料1における52品種の第1 (P1) および第2 (P2) 主成分の散布図
 Fig.3 Scatter diagram of the first (P1) and second (P2) principal components of 52 varieties in Sample 1

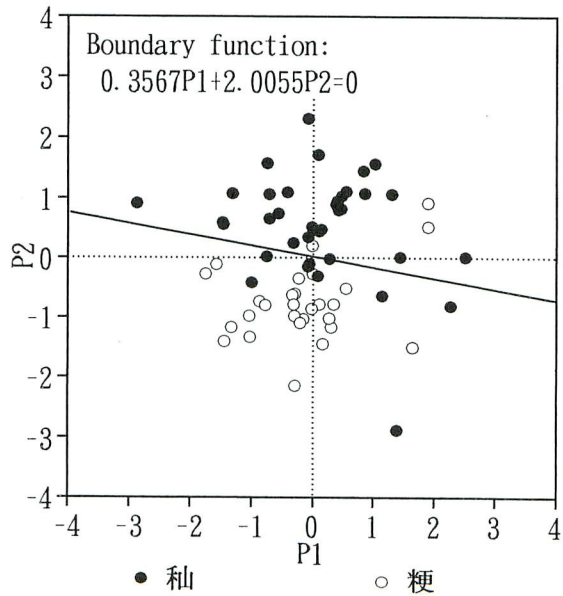


図4 試料2における65品種の第1 (P1) および第2 (P2) 主成分の散布図
 Fig.4 Scatter diagram of the first (P1) and second (P2) principal components of 65 varieties in Sample 2

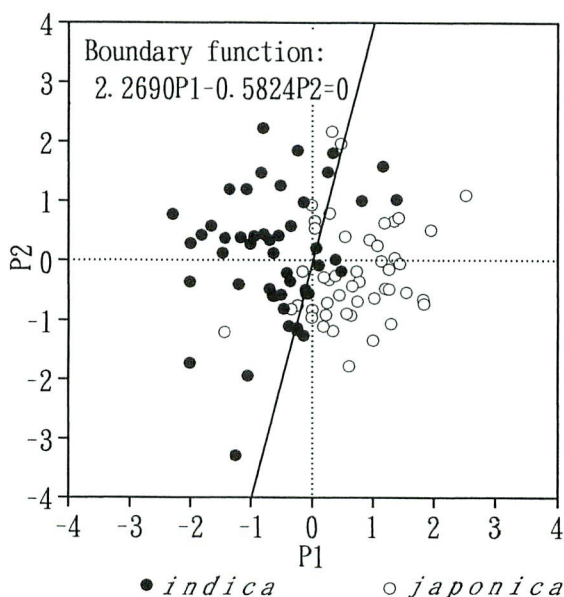


図5 試料3における97品種の第1 (P1) および第2 (P2) 主成分の散布図
 Fig.5 Scatter diagram of the first (P1) and second (P2) principal components of 97 varieties in Sample 3

3.2 珪酸体形状による亜種判別式の検討

3.2.1 珪酸体形状による亜種判別式

珪酸体の4形質すべての組合せによる亜種判別式とその判別結果を表4に示す。判別結果は、それぞれの判別式でアジア在来イネ97品種 (*indica* 50品種, *japonica* 47品種) を判別した結果である。表4をみると、各式の判別率は低いもので67%, 高いもので約85%であった。判別式に含まれる形質の数と判別率については、形質数が少なくても高い判別率を示すものがあるものの、全体としては、形質が増えると判別率が高まる傾向がみられる。なお、判別率の最も高いものは珪酸体の4つの形質による判別式 (No.1) と縦長, 横長, 側長による判別式 (No.2) であった。

表4に示した判別結果は、判別式が導出された試料3そのものを判別した結果である。判別式の他の試料への適用性を検討するために、その理論的判別率を知ることでもある。

判別関数の原理からみると、もとの集団を高い判別率で2つのグループに分けるには、両グループ間の平均値の差が大きく、グループ内の分散が小さいことが重要である。したがって、両グループ間の平均値の差と共同標準偏差をそれぞれ d と σ とすれば、 d を 2σ で割った値 $d/2\sigma$ によってその判別能力を表すことができる。また、正規分布の原理によって、 $d/2\sigma$ から無限大までの部分の面積でその理論的判別率を推算することもできる (Snedecor and Cochran 1967)。

表5は、表4の各判別式の判別得点から求めた *indica*, *japonica* 別の平均値, 標準偏差, 判別力 ($d/2\sigma$), 理論的判別率を示したものである。表5をみると、4つの形質のうち、側長の判別力が最も高く、次いで縦長, b/a , 横長であった。2つ以上の形質を組み合わせると、その判別力は向上する

表4 試料3における珪酸体4形質の各組合せによる亜種判別式およびそれらの判別結果
 Table 4 Discriminant functions and their discriminating results between *indica* and *japonica* varieties based on the four morphological characters of silica bodies from motor cells in sample 3

番号 No.	判別式 Discriminant function				判別結果 Results		
	係数 Coefficient				<i>indica</i> (n=50)	<i>japonica</i> (n=47)	判別率 Rate (%)
	縦長 VL	横長 HL	側長 LL	b/a			
1	-0.53	0.44	-0.49	1.00	43	39	84.54
2	-0.54	0.44	-0.53	—	44	38	84.54
3	-0.66	0.43	—	3.01	40	40	82.47
4	-0.16	—	-0.48	1.04	41	39	82.47
5	—	-0.02	-0.57	1.29	40	39	81.44
6	-0.72	0.43	—	—	41	35	78.35
7	-0.17	—	-0.52	—	41	39	82.47
8	-0.30	—	—	3.02	40	40	82.47
9	—	-0.03	-0.62	—	41	38	81.44
10	—	-0.17	—	3.79	34	37	73.20
11	—	—	-0.58	1.32	40	39	81.44
12	-0.36	—	—	—	41	37	80.41
13	—	-0.24	—	—	34	33	69.07
14	—	—	-0.63	—	41	38	81.44
15	—	—	—	4.47	27	38	67.01

表5 珪酸体形状による各判別式の理論的な亜種判別率
 Table 5 Probabilities of discrimination between *indica* and *japonica* varieties by different functions based on the morphological characters of silica bodies from motor cells

番号 No.	形質 Character ¹⁾				平均値±標準偏差 $\bar{X} \pm SD$		$d/2\sigma$ ²⁾	P (%)
	縦長 VL	横長 HL	側長 LL	b/a	<i>indica</i>	<i>japonica</i>		
1	+	+	+	+	2.20±1.81	-2.34±2.43	1.06	85.65
2	+	+	+	-	2.17±1.72	-2.31±2.47	1.06	85.51
3	+	+	-	+	1.52±1.86	-1.62±1.68	0.89	81.21
4	+	-	+	+	1.90±1.78	-2.02±2.17	0.99	83.87
5	-	+	+	+	1.75±1.68	-1.86±2.11	0.95	82.87
6	+	+	-	-	1.26±1.61	-1.34±1.62	0.81	79.02
7	+	-	+	-	1.87±1.70	-1.99±2.21	0.98	83.70
8	+	-	-	+	1.24±1.79	-1.32±1.37	0.80	78.82
9	-	+	+	-	1.71±1.56	-1.81±2.16	0.94	82.59
10	-	+	-	+	0.81±1.51	-0.86±1.01	0.65	74.07
11	-	-	+	+	1.74±1.68	-1.86±2.11	0.95	82.86
12	+	-	-	-	0.98±1.53	-1.05±1.31	0.71	79.17
13	-	+	-	-	0.39±0.98	-0.41±0.80	0.45	67.30
14	-	-	+	-	1.70±1.55	-1.81±2.17	0.94	82.57
15	-	-	-	+	0.63±1.36	-0.67±0.84	0.57	71.43

¹⁾ “+” と “-” は当該形質がその判別式に含むと含まないことを示す。

“+” and “-” indicate that the character is included or excluded in the function.

²⁾ $\sigma = [(n_i SD_i^2 + n_j SD_j^2) / (n_i + n_j - 2)]^{1/2}$, *indica* と *japonica* 母集団の分散が有意差がないという仮定で推定した共同標準偏差。Standard deviation assumed the same in the *indica* and *japonica*.

が、その程度は形質およびその組合せによって異なる。判別力の最も高い判別式は、4形質によるもの(No.1)であり、実際の判別結果とも一致している。

3.2.2 主成分による亜種判別式

4主成分すべての組合せによる亜種判別式とその判別率を表6に示す。

表6をみると、最も判別率の高い式は、第1、第2および第4の3つの主成分を用いたもの(No.3)であった。その判別率は89.69%であり、もとの形質によるもの(84.54%、表4のNo.1)よりも5.15%高くなっている。

表7に表5と同様に求めた*indica*, *japonica*別の平均値、標準偏差、判別力および理論的判別率を示す。表3の主成分分析の結果では、各主成分の貢献度はP1 > P2 > P3 > P4の順になっていたが、判別力からみると、P1 > P3 > P4 > P2の順になっている。特にP1の判別力は80%近くに達し、他の主成分よりはるかに大きい。したがって、P1を組合せにもつ判別式の判別率はすべて80%以上になっている。他の3つの主成分による判別式の判別率は56.59%~59.44%であり、相互間の差はあまりみられなかった。

4つの主成分による判別式(表7のNo.1)の判別率は85.65%と高く、4つの形質によるもの(表5のNo.1)と同じであった。しかし、判別力の最も高いものはP1, P2およびP4によるもの(表7のNo.3)であり、実際の判別結果とよく符合した。したがって、No.3の判別式が最も有効であると判断される。

表6 試料3における4主成分の各組合せによる亜種判別式およびそれらの判別結果
Table 6 Discriminant functions and their discriminating results between *indica* and *japonica* varieties based on the four principal components in sample 3

番号 No.	判別式 Discriminant function				判別結果 Results		
	係数 Coefficient				<i>indica</i> (n=50)	<i>japonica</i> (n=47)	判別率 Rate (%)
	主成分1 P1	主成分2 P2	主成分3 P3	主成分4 P4			
1	-2.73	0.70	-1.00	0.85	43	39	84.54
2	-2.52	0.65	-0.92	—	40	40	82.47
3	-2.44	0.63	—	0.76	44	43	89.69
4	-2.58	—	-0.94	0.80	45	38	85.57
5	—	0.37	-0.53	0.45	31	28	60.82
6	-2.27	0.58	—	—	37	38	77.32
7	-2.39	—	-0.87	—	44	40	86.60
8	-2.32	—	—	0.72	45	38	85.57
9	—	0.35	-0.50	—	32	28	61.86
10	—	0.35	—	0.42	33	29	63.92
11	—	—	-0.51	0.43	32	29	62.89
12	-2.16	—	—	—	41	38	81.44
13	—	0.33	—	—	29	31	61.86
14	—	—	-0.49	—	30	25	56.70
15	—	—	—	0.41	29	24	54.64

表7 主成分による各判別式の理論的な亜種判別率
Table 7 Probabilities of discrimination between *indica* and *japonica* varieties by different functions based on the four principal components

番号 No.	主成分 Principal component				平均値±標準偏差 $\bar{X} \pm SD$		$d/2\sigma^{2)}$	P (%)
	P 1 ¹⁾	P 2	P 3	P 4	<i>indica</i>	<i>japonica</i>		
1	+	+	+	+	2.20±1.81	-2.34±2.43	1.06	85.65
2	+	+	+	-	1.87±1.73	-1.99±2.19	0.98	83.72
3	+	+	-	+	2.32±1.98	-2.38±2.34	1.08	86.06
4	+	-	+	+	1.97±1.72	-2.09±2.29	1.01	84.38
5	-	+	+	+	0.26±0.72	-0.28±0.75	0.37	64.40
6	+	+	-	-	1.50±1.89	-1.60±1.61	0.88	81.06
7	+	-	+	-	1.68±1.62	-1.79±2.08	0.93	82.40
8	+	-	-	+	1.58±1.88	-1.68±1.72	0.90	81.66
9	-	+	+	-	0.17±0.61	-0.18±0.57	0.30	61.66
10	-	+	-	+	0.14±0.53	-0.15±0.53	0.27	60.47
11	-	-	+	+	0.20±0.64	-0.21±0.64	0.32	62.57
12	+	-	-	-	1.34±1.76	-1.43±1.56	0.83	79.73
13	-	+	-	-	0.05±0.38	-0.06±0.28	0.17	56.59
14	-	-	+	-	0.11±0.49	-0.12±0.46	0.24	59.44
15	-	-	-	+	0.08±0.39	-0.08±0.42	0.20	58.00

¹⁾ P 1, P 2, P 3, P 4 はそれぞれ第1, 第2, 第3 および第4 主成分を示す; “+” と “-” は当該主成分がその判別式に含むと含まないことを示す。

P 1, P 2, P 3 and P 4 represent the first, second, third and fourth principal component, respectively; and “+” and “-” indicate that the principal component is included or excluded in the function.

²⁾ $\sigma = [(n_i SD_i^2 + n_j SD_j^2) / (n_i + n_j - 2)]^{1/2}$, *indica* と *japonica* 母集団の分散が有意差がないという仮定で推定した共同標準偏差。Standard deviation assumed the same in the *indica* and *japonica*.

3.2.3 最適判別式の検討

佐藤ら (1990) は, アジア在来イネ96品種の機動細胞珪酸体形状解析結果に基づき, 珪酸体の4形質による亜種判別式

$$Z1 = 0.049VL - 0.019HL + 0.197LL - 4.792b/a - 2.614$$

$$(Z1 < 0 : indica ; Z1 \geq 0 : japonica)$$

を報告している。

また, Udatsu and Fujiwara (1993) は, 同じアジア在来イネ97品種の機動細胞珪酸体形状からつぎの判別式を報告している。

$$Z = 0.53VL - 0.44HL + 0.50LL - 0.91b/a - 17.27$$

$$(Z < 0 : indica ; Z \geq 0 : japonica)$$

(注: 原文は印刷の誤りで, VL の係数および定数の符号は間違っていた。)

本研究では, 同じアジア在来イネ97品種の機動細胞珪酸体形状解析データおよびその主成分分析結果に基づき, 判別分析を行った。判別率からみると, 珪酸体形状から直接作成した判別式で最も有効なものは表4のNo.1である。この判別式は, Udatsu and Fujiwara (1993) の判別式とほぼ同じである。以後, この判別式をZ2とする。

$$Z2=0.53VL-0.44HL+0.49LL-b/a-17.02$$

($Z2 < 0$: *indica*; $Z2 \geq 0$: *japonica*)

表4に示すように、判別式Z2 (No.1) による判別得点では *indica* が正で、*japonica* が負となっている。一方、佐藤ら (1990) の判別式では、正負が逆になっている。そこで、判別式Z2の各項目に-1を乗じ、正負をそろえることとした。

主成分を用いたもので有効な判別式は表6のNo.1とNo.3である。これらは、以後、Z3、Z4とする。

$$Z3=2.73P1-0.70P2+P3-0.85P4$$

$$Z4=2.44P1-0.63P2-0.76P4$$

ここで、式中の主成分 (P1、P2、P3、P4) を元の形質に戻すと、Z3、Z4式は次のように表される。

$$Z3=0.35VL-0.30HL+0.33LL-0.67b/a-11.35$$

($Z3 < 0$: *indica*; $Z3 \geq 0$: *japonica*)

$$Z4=0.49VL-0.30HL+0.14LL-3.82b/a-8.96$$

($Z4 < 0$: *indica*; $Z4 \geq 0$: *japonica*)

以上、求められたZ2、Z3およびZ4の判別式と佐藤ら (1990) の判別式Z1を、中国在来イネと改良イネおよび遺跡から検出されたプラント・オパール形状解析に適用し、その有用性について検討を行った。

なお、Z1、Z2、Z3およびZ4はそれぞれの判別式を示すが、場合によっては、各判別式による判別得点も意味する。

表8は、Z1、Z2、Z3およびZ4の判別式を中国在来イネ (試料1)、改良イネ (試料2) およびアジア在来イネ (試料3) の形状解析結果に用いた場合の理論的な判別力 ($d/2\sigma$) および実際に得られた判別率を示したものである。中国およびアジア在来イネについては、判別力、判別率ともZ4が高い。一方、中国改良イネについては、Z2、Z3が判別力、判別率ともに高いが、Z4もそれほど低くない。なお、Z1による判別率は、いずれの試料についても最も低い結果であった。

図6、図7および図8は、各試料について4つの判別式による判別得点の分布を表したものである。いずれの分布においても、稈と稈あるいは *indica* と *japonica* のピークが明瞭に認められる。とりわけ、境界値によって分けられる *indica*、*japonica* の正確さを考えると、Z4による分布が判然としている。

表9は、日本の吉野ヶ里遺跡、桑田遺跡および中国の草鞋山遺跡から検出されたイネのプラント・オパール形状解析結果について、これらの判別式を用い、亜種判別を行った結果である。Z2、Z3およびZ4を用いた場合、いずれの試料においても、すべて *japonica* と判別された。しかし、Z1を用いた場合、草鞋山遺跡から検出された52試料のうち、36試料が *indica* と判別された。

表8 4つの判別式における供試試料への理論的な判別力 ($d/2\sigma$) および実際に得られた判別率
 Table 8 Theoretical discriminant effectiveness ($d/2\sigma$) and practical discriminating rate by function Z1, Z2, Z3 and Z4 for sample 1, 2 and 3

試料 Sample	Z1	Z2	Z3	Z4
判別力 Discriminant effectiveness ($d/2\sigma$)				
1	0.674	0.508	0.508	0.800
2	0.740	0.875	0.875	0.716
3	0.822	1.065	1.065	1.083
判別率 Discriminating rate (%)				
4	76.92	80.77	80.77	80.77
5	56.92	84.62	84.62	80.00
6	80.41	84.54	84.54	89.69

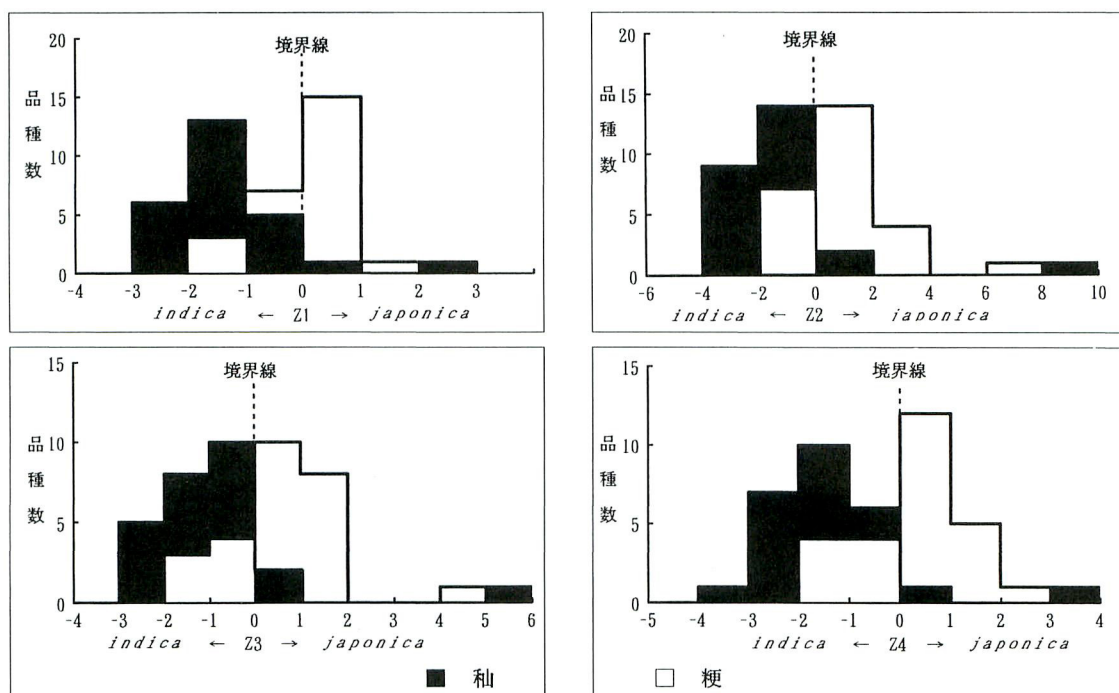


図6 試料1における判別式Z1, Z2, Z3, Z4による判別得点の■, 粳分布
 Fig.6 Distributions of the discriminating scores by the function Z1, Z2, Z3 and Z4 for *hsien* and *keng* rice of Sample 1

表10は、各判別式の判別得点について相関分析を行った結果である。4つの判別得点間の相関係数はいずれも1%の水準で有意であるが、Z1と他の判別得点の相関係数においてはやや低い傾向がみられる。特に遺跡データ(試料4)の相関係数は明らかに低い。なお、Z2とZ3の相関係数は1であり、両判別式は同じ結果を示している。このことは、表8の結果からも明瞭である。

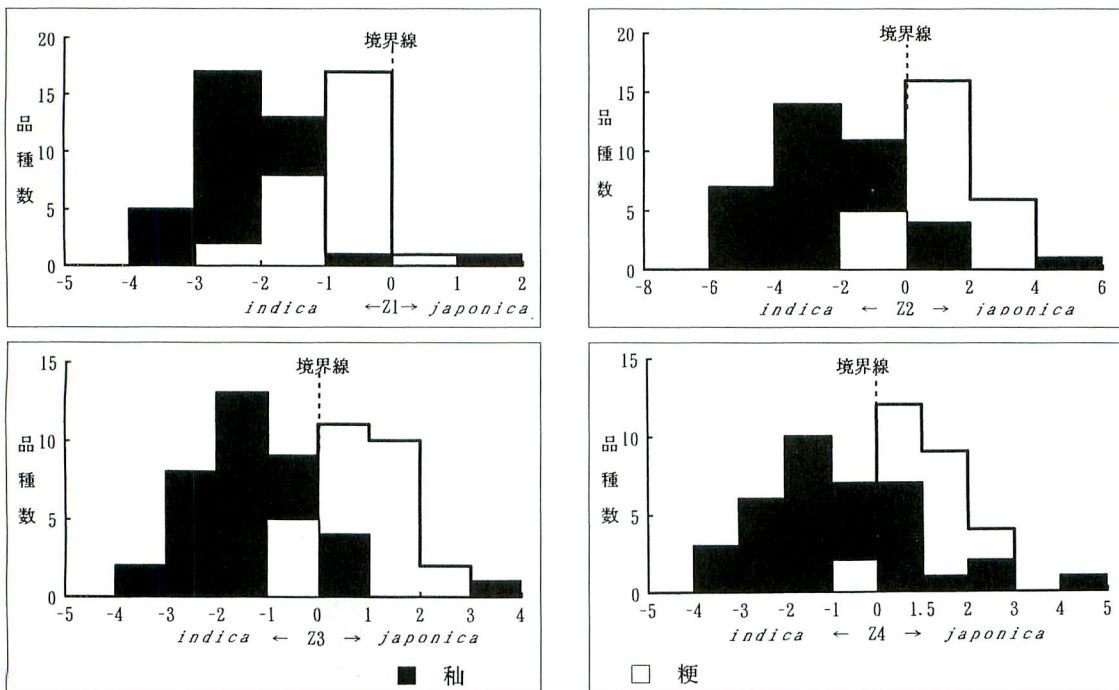


図7 試料2における判別式Z1, Z2, Z3, Z4による判別得点の■, 粳別分布
 Fig.7 Distributions of the discriminating scores by the function Z1, Z2, Z3 and Z4 for *hsien* and *keng* rice of Sample 2

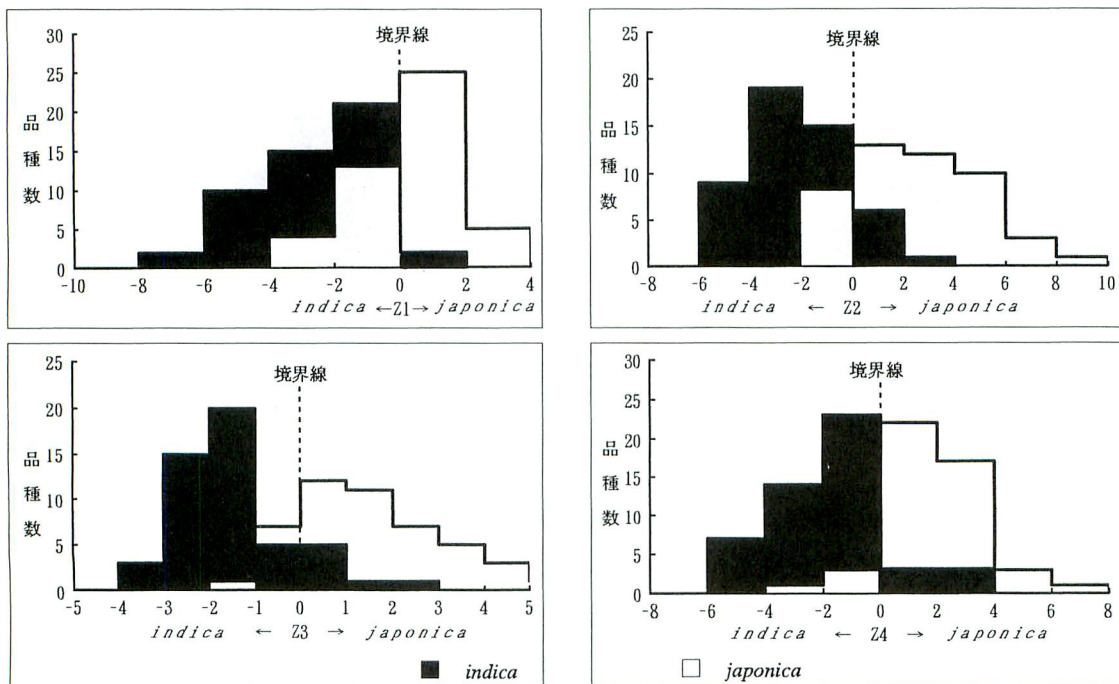


図8 試料3における判別式Z1, Z2, Z3, Z4による判別得点の*indica*, *japonica*別分布
 Fig.8 Distributions of the discriminating scores by the function Z1, Z2, Z3 and Z4 for *indica* and *japonica* rice of Sample 3

表9 遺跡から検出されたプラント・オパール¹⁾の4つの判別式による判別結果
 Table 9 Discriminating results of plant opals detected from the sites of Yoshinogari and Kuwata in Japan and Caoxieshan in China by the function Z1, Z2, Z3 and Z4

遺跡 Site	標本数 No. of samples	Z1		Z2		Z3		Z4	
		I ¹⁾	J ¹⁾	I	J	I	J	I	J
吉野ヶ里 Yoshinogari	27	0	27	0	27	0	27	0	27
桑田 Kuwata	5	0	5	0	5	0	5	0	5
草鞋山 Caoxieshan	52	36	16	0	52	0	52	0	52

¹⁾ I=*indica*, J=*japonica*.

表10 4つの判別式における判別得点Z1, Z2, Z3, Z4間の相関分析
 Table 10 Correlation coefficients between discriminating scores by the four discriminant functions

相関形質 Characters	試料1 Sample 1	試料2 Sample 2	試料3 Sample 3	試料4 ¹⁾ Sample 4
Z1 and Z2	0.899 **	0.871 **	0.872 **	0.643 **
Z1 and Z3	0.899 **	0.871 **	0.872 **	0.643 **
Z1 and Z4	0.847 **	0.852 **	0.932 **	0.395 **
Z2 and Z3	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **
Z2 and Z4	0.897 **	0.955 **	0.947 **	0.773 **
Z3 and Z4	0.897 **	0.946 **	0.947 **	0.773 **

¹⁾ 試料4：日本の吉野ヶ里遺跡、桑田遺跡および中国の草鞋山遺跡から検出されたプラント・オパール、全標本数84。
 Sample 4 represents the pooled data of plant opals detected from Yoshinogari and Kuwata Sites in Japan and Caoxieshan Site in China (n=84).

** : 1%の水準で有意。Significant at 1% level.

4. 考察

イネの亜種判別法の実用性を考える上で、より有効な判別指標を探すことは重要である。本研究は、中国在来イネと改良イネおよびアジア在来イネを試料として主成分分析を行い、珪酸体形状による新しい分類指標について検討を行った。その結果、縦長、横長、側長とb/aの4つの形質によって示される珪酸体の形状は、第1および第2主成分だけで十分に要約・代表され、それぞれ珪酸体の「大きさ」と「かたち」を表すものとみられる(表3)。また、第1および第2主成分は、*indica*と*japonica*あるいは籼と粳の2つの亜種の珪酸体形状の変異傾向を表すものである(図2~5)。この結果は、3つの供試試料すべてにおいて認められ(表3)、主成分による亜種判別はもとの形質に比べより有効であると判断される。

より有効な判別式を作成するためには、判別式を導出するデータに一定の基準を決める必要がある。本研究で検討に用いたデータは、アジア在来イネ97品種から得られた形状解析結果である。これらのイネは、佐藤洋一郎博士から提供され、約1300系統のアジア在来イネから無作為にサンプリングされたものである。したがって、これらのイネは、「アジアイネ」の代表といえ、このデータを基準とすることが適当であると判断される。

そこで、アジア在来イネにおける珪酸体形状解析の基礎データおよびその主成分分析データについて

て判別分析を行った。その結果、珪酸体形状による判別式 Z2 と主成分による判別式 Z3, Z4 が得られた (表 4 ~ 7)。さらに、これらの判別式と佐藤ら (1990) が報告した判別式 Z1 について検討した結果、本研究で得られた判別式 Z2, Z3, Z4 の判別率は、いずれの試料においても 80% 以上に達するが、判別式 Z4 のアジア在来イネ (試料 3) に対する判別率は 90% 近くでとくに高いことが分かった (表 8, 図 5 ~ 7)。

また、筆者らはすでに判別式 Z4 を用い、中国在来イネおよび改良イネ 50 品種への適用性および *indica* と *japonica* を定義する Z 値との関係を調べた。その結果、判別式 Z4 による亜種判別率は 92% と高く、フェノール反応や塩素酸カリ抵抗性によるもの (それぞれ 92%, 98%) とほぼ同じであった。また、判別式 Z4 による判別得点と *indica* と *japonica* を定義する Z 値の間には 0.845 の高い相関関係がみられた (王ら: 1996)。

したがって、判別式

$$Z4 = 0.49VL - 0.30HL + 0.14LL - 3.82b/a - 8.96$$

$$(Z4 < 0: indica; Z4 \geq 0: japonica)$$

をイネの機動細胞珪酸体形状による最適な判別式として提唱したい。

5. おわりに

本研究では、アジア在来イネの機動細胞珪酸体の形状解析結果について主成分分析を行い、珪酸体の形状特性を明確し、その結果に基づき判別分析を行った。得られた各判別式について、その理論的な判別率および中国イネまたは遺跡データへの適用性、*indica* と *japonica* を定義する Z 値との関係などについて検討を加え、最適な亜種判別式の導出を行った。この一連の分析特性から、最適な判別式は相対的な意味を持つことが分かる。したがって、これからも、基礎的なデータを増やし、判別式の様々な試料への適用性を検討していくとともに判別式の改善を行うべきであろう。

また、今後は、判別式の改善を行うとともに、イネプラント・オパール形状による亜種判別法をアジア各地の遺跡調査に広く応用し、古代稲作に関する実証的なデータを収集することにより、*indica*, *japonica* の分化や稲作の起源に関わる問題を解明することが期待される。

参考文献

- 丁 穎 (1949) : 中国古来粳籼稻種栽培及分布之探討与現在栽培稻種分類法預報. 中山大学農学院農芸專刊 6 : 1-32.
- 丁 穎 (1961) : “中国水稻栽培学” 農林出版社, 北京.
- 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・佐々木章 (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.) 生産総量の推定. 考古学と自然科学 12 : 29-42.
- 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の変遷に関する研究. 考古学雑誌 75 : 349-384.
- 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正 (1981) : 判別分析, “多変量解析法 (改訂版)” 日科技連出版社, 東京. 77-114.
- Sato, Y. I., S. Chitrakon and H. Morishima (1986) : The *Indica-Japonica* differentiation of rice cultivars in Thailand and its neighbouring countries. In “New Frontier Breeding Researches. Proc. 5th SABRAO Intern. Congress. “Nepompeth, B. and B. Subhadrabandhu (eds.), Kasetsat Univ., Bangkok, 185-193.
- Snedecor, G. W. and W. G. Cochran (1967) : Statistical Methods (6th ed.). Iowa State Univ. Press, Ames.
- 佐藤洋一郎・藤原宏志・宇田津徹朗 (1990) : イネの *indica* および *japonica* の機動細胞にみられる珪酸体の形状および密度の差異. 育雑 40 : 495-504.
- Udatsu, T. and H. Fujiwara (1993) : Application of the discriminant function to subspecies of rice (*Oryza sativa*) using the shape of motor cell silica body. Ethnobotany 5 : 107-116.
- Wang, C. L., H. Fujiwara and T. Udatsu (1994) : Morphological features of silica bodies from motor cells in local and modern cultivated rice (*Oryza sativa*, L.) from China. Ethnobotany 6 : 77-86.
- 王 才林・宇田津徹朗・藤原宏志 (1996) : 中国イネの亜種判別における機動細胞珪酸体形状と籾の形態・生理形質の関係について. 育雑 46 : 61-66.

Principal Component Analysis and Its Application of Four Morphological Characters of Silica Bodies from Motor Cells in Rice (*Oryza sativa* L.)

Cailin WANG^{1,2)}, Tetsuro UDATSU²⁾, Hiroshi FUJIWARA²⁾, Yunfei ZHENG³⁾

1) Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, 210014 China

2) Faculty of Agriculture, Miyazaki University, Gakuen Kibanadai Nishi 1-1, Miyazaki, 889-21 Japan

3) The United Graduated School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, Gakuen Kibanadai Nishi 1-1, Miyazaki, 889-21 Japan

To find some new indexes of the shape of silica bodies from motor cells in rice (*Oryza sativa* L.), data on four morphological characters—vertical length (VL), horizontal length (HL), lateral length (LL) and shape coefficient b/a —of silica bodies from motor cells were subjected to the principal component analysis. 52 native varieties (26 *hsien* and 26 *keng*) from Zhejiang Province, China (samples 1), 65 improved cultivars (37 *hsien* and 28 *keng*) from different areas of China (sample 2) and native varieties (50 *indica* and 47 *japonica*) from different Asian countries (sample 3) were used. The result revealed that the four morphological characters of silica body were described by the first (47.55~71.94%) and second principal components (17.58~38.35%) (Table 3), which were interpreted as the “size factor” and “shape factor”, respectively. They are available for describing the trend of differentiation between the shape of silica bodies in *hsien* and *keng* (or *indica* and *japonica*) varieties of rice (Figs.2~5).

By using the results of morphological analysis and principal component analysis of sample 3, discrimination analysis was carried out to obtain a useful function for the classification of *indica* and *japonica* rice based on the shape of silica body. The function Z2 based on the shape of silica bodies (Table 4) and functions Z3 and Z4 based on the principal components (Table 6) were obtained. The discriminant results by these functions and the function Z1 reported by Sato *et al.* (1990) were compared. The discrimination probability shown by $d/2\sigma$ (where, d is the difference between *indica* and *japonica*, σ is the standard deviation assumed the same in both *indica* and *japonica*) was same for function Z2 and Z3, but it was highest for the function Z4 (Table 8). The correct discrimination rate of all the

three functions Z2, Z3 and Z4 for Sample 1, 2 and 3 were over 80%, and the function Z4 gave a highest rate of near 90% for Sample 3 (Table 8). Furthermore, the discriminating scores by the function Z4 were strongly correlated with those obtained by the Sato's discriminant function by which the *indica* and *japonica* are defined. Therefore, the function

$$Z4 = 0.49VL - 0.30HL + 0.14LL - 3.82b/a - 8.96$$

$$(Z4 < 0 : indica ; Z4 \geq 0 : japonica)$$

was recommended as the best discriminant function in discriminating of *indica* and *japonica* rice based on the shape of silica body. In the future, it is expected to understand the process of the differentiation of *indica* and *japonica* or the origin and spread of rice cultivation if the data on plant opals excavated from the sites in different Asian countries or regions can be collected by using the above discriminant function.