

第2章 植物器官形状による種・品種判別への植物形状判別モデルの適用

第1章では、形状情報と大きさ情報とを独立に評価する判別モデルの部品として、形状情報のみを評価する画像入力ニューラルネットワークに基づく判別モデルを構築し、カエデ葉形による種判別に適用して、その有効性を示した。本章では、構築した判別モデルの有効性と汎用性を実証するために、多数の植物器官形状による種や品種・系統の判別に適用する。緒言で述べたように、育種における選抜作業や遺伝資源の特性評価を効率的に行ううえで、植物器官の形状は重要な形質の一つである。供試材料は、葉形判別ではクワ、ダイズ、カラシナ、粒形判別ではソバ、ダクタンソバ、雑草種子、果形判別ではセイヨウナシである。

2.2では、供試材料と判別処理の共通事項について述べる。2.3および2.4では、カエデ葉形による種判別と同様に、それぞれ、非線形、線形のニューラルネットワークに基づく判別モデルの有効性と汎用性とを検討する(1.3, 1.4 参照)。2.5では、2.3および2.4を通じて、ニューラルネットワークの学習条件と誤判別率との関連を考察する。

2.1 はじめに

緒言で述べたように、植物器官の形状は、育種における形態評価やそれに基づく選抜、遺伝資源の特性評価の対象となっている。そのため、葉形に限らず、粒形や果形による種や品種・系統などの判別モデルの研究開発は、これまでもさかんに行われてきた。穀粒や種子の形状の判別モデルでは、輪郭の曲率に基づく方法(Liao *et al.*, 1993; Ni *et al.*, 1997)、形状特徴量に基づく方法(Travis and Draper, 1985; Zayas *et al.*, 1989; Chen *et al.*, 1989; 永田ら, 1989; Rigney and Brusewitz, 1993; Ding and Gunasekaran, 1994; Chtioui *et al.*, 1996; Ghazanfari *et al.*, 1996; Zayas *et al.*, 1996)などが提案された。果実などの形状の判別でも、形状特徴量に基づく方法が提案された(池田と斉藤, 1993; Heinemann *et al.*, 1994; Singh and Delwiche, 1994)。これらの研究では、形状特徴量が判別に有効であることが示された。

上述した判別モデルには、形状情報と大きさ情報とが混在する形状特徴量に依存するため、①対象ごとに判別モデルを開発しなければならないこと、②形状特徴量として抽出されなかった情報が欠落すること、③形状の評価が大きさに惑わされることなどから、非効率的で判別の安定性や精度に問題がある。

そこで、第1章では、これらの問題を解決するために画像入力ニューラルネットワークに基づく判別モデルを新たに構築し、それがカエデ葉形による種判別に有効であることを示した。本章では、この判別モデルを多数の植物器官形状による種や品種・系統の判別に適用し、その有効性と汎用性を検証する。供試材料は、葉形判別ではクワ、ダイズ、カラシナ、粒形判別ではソバ、ダツタンソバ、雑草種子、果形判別ではセイヨウナシである。

2.2 材料と方法

2.2.1では、供試材料を、2.2.2では、2.3 および 2.4 で検討する判別実験において共通する判別処理の流れについて述べる。

2.2.1 材料

供試材料は、次の (1)~(8) である (表 2-1~表 2-8) :

- (1) 4 種 10 品種・系統のクワ (*Morus*) 188 個葉,
- (2) 38 品種・系統のダイズ (*Glycine max* L. Merr.) 364 個葉,
- (3) 7 品種・系統の正逆交配から得られた 41 交配系統の F₁ ダイズ 749 個葉,
- (4) 30 品種・系統のカラシナ (*Brassica juncea* Czern. et Cossor) 353 個葉,
- (5) 30 品種・系統のソバ (*Fagopyrum esculentum* Moench) 720 粒,
- (6) 40 品種・系統のダツタンソバ (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) 800 粒,
- (7) 11 科 15 種の雑草種子 450 粒,
- (8) 11 品種のセイヨウナシ (*Pyrus communis* L. var. *sativa* DC) 207 果.

(2) のダイズは Furuta *et al.* (1995), (3) のダイズは二宮ら (1994), (4) のカラシナは北浦ら (1997), (5) のソバは Ohsawa *et al.* (1998), (6) のダツタンソバは Yoshida *et al.* (1995) が供試した材料である。(7) の雑草種子粒形は種判別, (1) のクワ葉形, (2) のダイズ葉形, (4) のカラシナ葉形, (5) のソバ粒形, (6) のダツタンソバ粒形, (8) のセイヨウナシ果形は品種・系統判別, (3) のダイズ葉形は交配系統間で判別を行う。したがって、それぞれ、種、品種・系統が判別すべきクラスとなる。なお、(2) および (3) のダイズは、それぞれダイズ (I)、ダイズ (II) と記述して区別することにする。

表2-1 葉形による品種・系統判別に供試したクワ

品種・系統名	種名(和名)	種名(学名)	葉数
一ノ瀬	カラヤマグワ	<i>Morus alba</i> L.	20
国桑第13号	ログワ	<i>Morus latifolia</i> Poir.	17
臥龍(A)	ログワ	<i>Morus latifolia</i> Poir.	17
臥龍(B)	ログワ	<i>Morus latifolia</i> Poir.	17
市平	ヤマグワ	<i>Morus bombycis</i> Koidz.	15
枝垂桑	カラヤマグワ	<i>Morus alba</i> L.	22
八丈桑(A)	ハチジョウグワ	<i>Morus kagayamae</i> Koidz.	20
改良鳳返	カラヤマグワ	<i>Morus alba</i> L.	19
八丈桑(B)	ハチジョウグワ	<i>Morus kagayamae</i> Koidz.	18
櫛桑	ログワ	<i>Morus latifolia</i> Poir.	23

(A)と(B)とでは、出所・栽培地が異なる。葉は、一団体から展開したものを無作為に採取した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

表2-2 葉形による品種・系統判別に供試したダイズ (I)

品種・系統名	葉数	品種・系統名	葉数
NCBPMR-3	10	Young	11
鉄豊19号	13	Cg2002 上岩	8
中育10号	10	春日青大豆	10
刈系408号	10	十育200号	10
Bosserer	8	東北103号	10
水原83号	10	Ao1038 鶴の子	9
Aksarben	10	中尾早生	5
N83-640	10	砂糖大豆 (小谷)	12
D74-9820	11	黒豆 (柿沢在来)	6
Essex	11	東北95号	10
cf1010 畦畔大豆	10	天竜在来5	6
Bay	10	刈系429号	10
岩手489	10	岩手668	11
Tracy	11	タマヒカリ	10
Monroe	10	丹波黒 (兵庫)	10
青豆 (飯山)	6	岩手577	7
褐目極小在来 (白花)	10	毛振	10
黒豆 (長野)	9	馬頭在来	10
浸豆 (信更)	10	ヤマベダイズ	10

葉は、複数個体から、主茎の完全展開した上位5枚を採取した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

表2-3 葉形による交配系統判別に供試したサイズ (II)

親の品種・系統	葉数	親の品種・系統	葉数
tn & tn	20	wa & wa	20
o8 & o8	20	o8 & t2	20
tn & tr	4	5k & tn	5
tr & tn	19	t2 & 5k	18
t2 & tn	20	wa & t2	20
t2 & wa	20	o8 & t1	20
tn & t2	20	tr & tr	20
wa & tn	20	t2 & t1	20
tn & wa	20	5k & o8	20
t2 & o8	20	5k & wa	20
t2 & tr	20	5k & tr	20
tr & wa	20	wa & 5k	20
t2 & t2	20	wa & t1	20
o8 & tr	20	tr & 5k	16
o8 & 5k	20	5k & t2	20
o8 & wa	20	5k & t1	20
wa & tr	4	t1 & t2	13
wa & o8	20	t1 & t1	20
t1 & tn	10	5k & 5k	20
t1 & o8	20	t1 & 5k	20
tn & t1	20		

記号 5k は五葉黒豆, o8 は東山系 O887, wa はワセシログ, t1 は東山154, t2 は T255, tn は十勝長葉, tr は東山 R15 の略称として用いた。葉は、複数個体から、主茎の完全展開した上位 5 枚を採取した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

表2-4 葉形による品種・系統判別に供試したカラシナ

品種・系統名	葉数	品種・系統名	葉数
黄からし菜 (株)日本農林社)	11	仙台芭蕉菜	10
葉からし菜 (トキタ種苗(株))	12	かつお菜 (タキイ種苗(株))	12
石岡高菜	11	相模グリーン	12
葉からし菜 (株)日本農林社)	12	GAI-CHOI	11
黄からし菜 (トキタ種苗(株))	12	三池たかな (トキタ種苗(株))	12
セリフォン	12	ザーサイ FM-58	12
純系山汐菜	12	三池高菜 (中原採種場(株))	12
こぶ高菜 (トキタ種苗(株))	12	柳川大葉高菜	12
雪里紅	12	清国青菜 (株)渡辺採種場)	12
(赤)大葉高菜 (トキタ種苗(株))	12	清国青菜 (トキタ種苗(株))	12
こぶ高菜 (株)サカタのタネ)	12	結球高菜 (トキタ種苗(株))	11
ちりめん菜からし菜	12	雲仙結球高菜	11
赤大葉高菜 (タキイ種苗(株))	12	DAI-SIN KAI TSAI	12
大山そだち	12	晩生平茎大葉たかな	12
かつお菜 (株)サカタのタネ)	12	結球高菜 (タキイ種苗(株))	12

葉は、複数個体から完全展開したものを無作為に採取した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

表2-5 粒形による品種・系統判別に供試したソバ

品種・系統名	粒数	品種・系統名	粒数
SIVA DOLENJSKA	24	益子在来	24
妙高在来	24	堀ノ内在来	24
木頭在来	24	C.V.LEHELLER	24
CRNA AJDA	24	安曇在来	24
祖谷在来	24	階上早生	24
高野在来	24	夏そば	24
鳥越在来	24	宮崎在来	24
脇町	24	尾花沢	24
小千谷1	24	大野在来	24
来迎寺在来	24	岩手在来	24
軽米12	24	有平在来	24
しなの夏そば	24	出雲	24
鹿屋そば	24	マンカン (アメリカ)	24
葛生在来	24	牡丹そば	24
軽米5	24	キタワセソバ	24

粒は、品種・系統内で無作為に採取した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

表2-6 粒形による系統判別に供試したダットンソバ

系統	粒数	系統	粒数	系統	粒数
ft190	20	ft132	20	ft081	20
ft069	20	ft232	20	ft167	20
ft022	20	ft124	20	ft150	20
ft224	20	ft071	20	ft127	20
ft038	20	ft097	20	ft141	20
ft054	20	ft225	20	ft157	20
ft057	20	ft146	20	ft115	20
ft174	20	ft065	20	ft163	20
ft041	20	ft160	20	ft126	20
ft180	20	ft062	20	ft162	20
ft221	20	ft166	20	ft009	20
ft108	20	ft084	20	ft080	20
ft143	20	ft099	20		
ft233	20	ft116	20		

系統名, 採取地は不明である。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

表2-7 種子粒形による種判別に供試した雑草

種名 (和名)	種名 (学名)	粒数
メヒシバ	<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koeler	30
カヤツリグサ	<i>Cyperus microiria</i> Steud.	30
スズメノテッポウ	<i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.	30
アメリカタカサブロウ	<i>Eclipta alba</i> (L.) Hasskarl	30
イヌビエ	<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) Beauv.	30
アキノエノコログサ	<i>Setaria faberi</i> Herrm.	30
ナズナ	<i>Capsella bursa-pastris</i> (L.) Medic.	30
イヌタデ	<i>Persicaria longiseta</i> (De Bruyn) Kitag.	30
イヌホオズキ	<i>Solanum nigrum</i> L.	30
ツユクサ	<i>Commelina communis</i> L.	30
イチビ	<i>Abutilon avicennae</i> Gaerthn.	30
スベリヒユ	<i>Portulaca oleracea</i> L.	30
コハコベ	<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	30
シロザ	<i>Chenopodium album</i> L.	30
イヌビユ	<i>Amaranthus lividus</i> L.	30

粒は、種内で無作為に採取した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

表2-8 果形による品種判別に供試したセイヨウナシ

品種名	果数
デボー	19
カイザークローネ	10
グランド・チャンピオン	18
マルゲリット・マリーラ	20
バートレット	20
マックス・レッド・バートレット	20
ゼネラル・レクラーク	20
ハイランド	20
フレミッシュ・ビューティ	20
ドワイエネ・ジュ・コムス	20
ブランデーワイン	20

標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

2.2.2 判別処理の流れ

2.3 および 2.4 で検討する判別処理の流れとして、植物器官形状の正規化 (2.2.2.1参照)、植物器官形状画像の復元 (2.2.2.2参照)、判別クラスを選択 (2.2.2.3参照) の各方法を述べる。誤判別率の定義は、カエデ葉形による種判別と同様であるので、説明は省略する (1.2.2.5 参照)

2.2.2.1 植物器官形状の正規化

2.2.1の (1) のクワ、(7) の雑草種子、(8) のセイヨウナシでは、画像を取得してからそれぞれの器官形状の正規化を行った。クワの場合は、カエデと同様、採取した葉を紙に複写した後、ビデオカメラで撮影した。雑草種子の場合は、実体顕微鏡で写真撮影し、スライドから画像に変換した。セイヨウナシの場合は、果実をライトテーブルの上に乗せ、側面形状をテーブル上部のビデオカメラで撮影した。これら形状を、カエデ葉形の正規化と同様、標準化楕円フーリエ記述子 (Kuhl and Giardina, 1982 ; Furuta *et al.*, 1995) により正規化した (1.2.2.1 参照)。なお、(2) のダイズ (I) 葉形、(3) のダイズ (II) 葉形、(4) のカラシナ葉形、(5) のソバ粒形、(6) のダツタンソバ粒形も、標準化楕円フーリエ係数で記述されている。

2.2.2.2 植物器官形状画像の復元

カエデの葉形画像と同様にして、各材料の器官形状の画像、形状分布、平均形状を作成した (1.2.2.2 参照)。それぞれの材料のクラスの形状分布を図 2-1~図 2-8に示す。図 2-9に各材料の器官形状のクラス内変異の例を示す。

2.2.2.3 判別クラスを選択

カエデ葉形による種判別と同様、判別クラス数は、2 から始め、5、10、…、全クラス数と増やし、互いに形状がもっとも異なるクラスを選択した (1.2.2.4 参照)。図 2-10~図 2-17に各クラス数ごと選択されたクラスの形状分布を示す。

2.3 非線形ニューラルネットワークに基づく植物形状判別モデルの有効性と汎用性の検討

本節では、2.2.1 で述べた材料の植物器官形状による種や品種・系統の判別モデルとしての、非線形ニューラルネットワークである多層パーセプトロン (1.3.1 参照) に基づく画像入力ニューラ

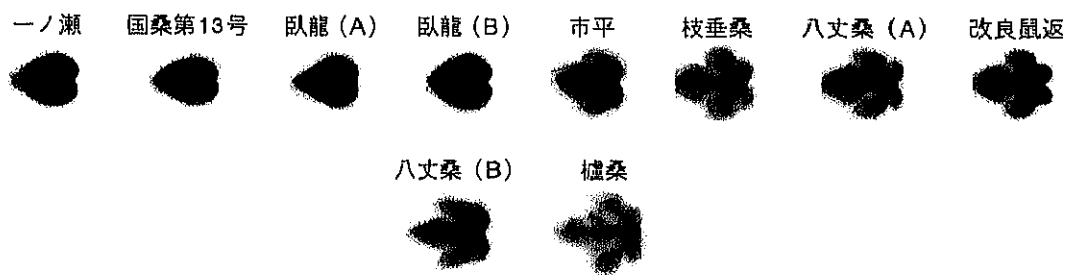


図2-1 クワ葉形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

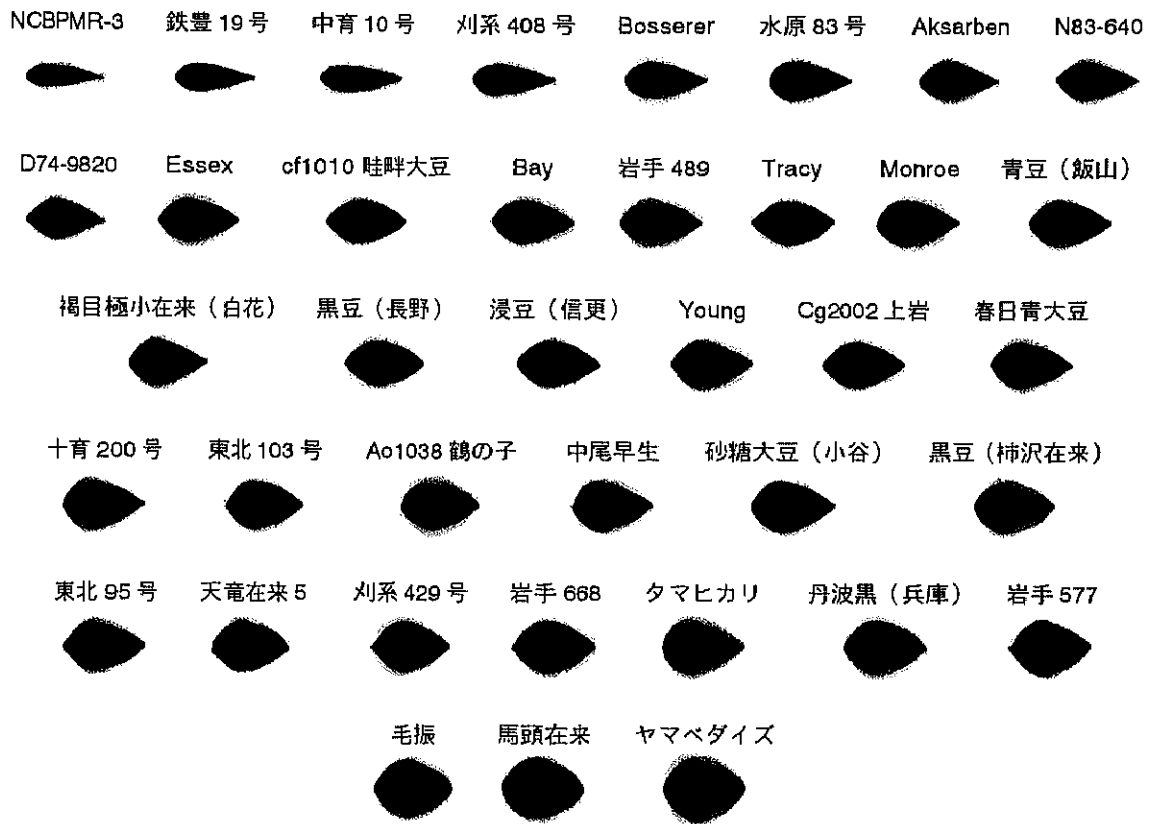


図2-2 ダイズ (I) 葉形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

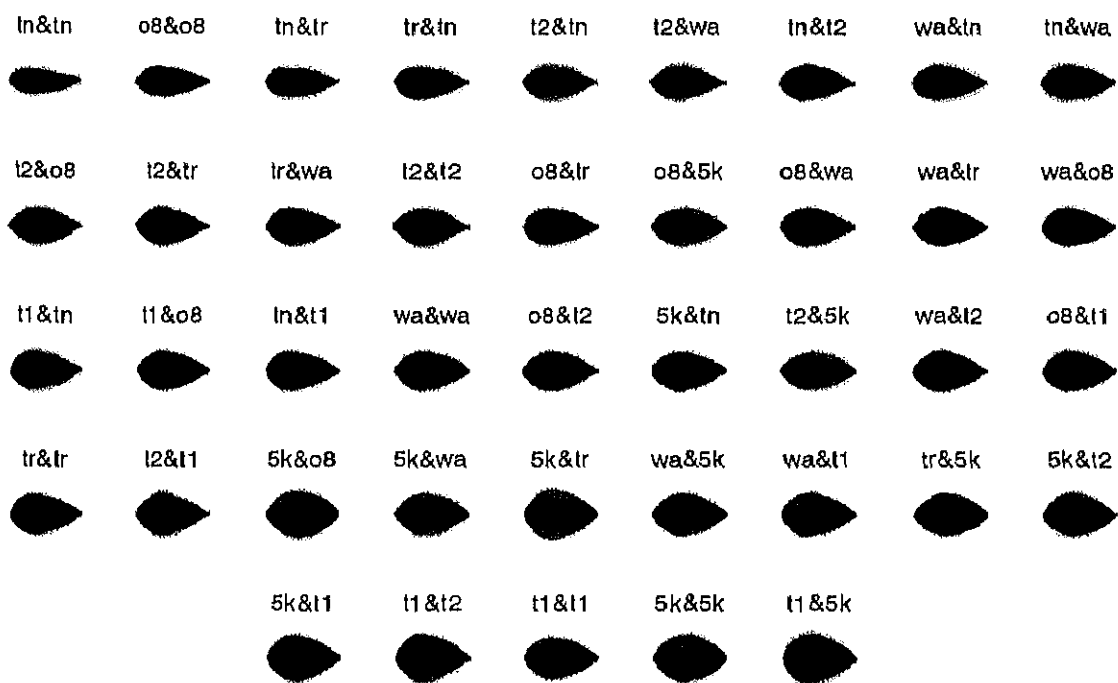


図2-3 ダイズ (II) 葉形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。記号 5k は五葉黒豆、o8 は東山系 O887、wa はワセシロゲ、t1 は東山 154、t2 は T255、tn は十勝長葉、tr は東山 R15 の略称として用いた。

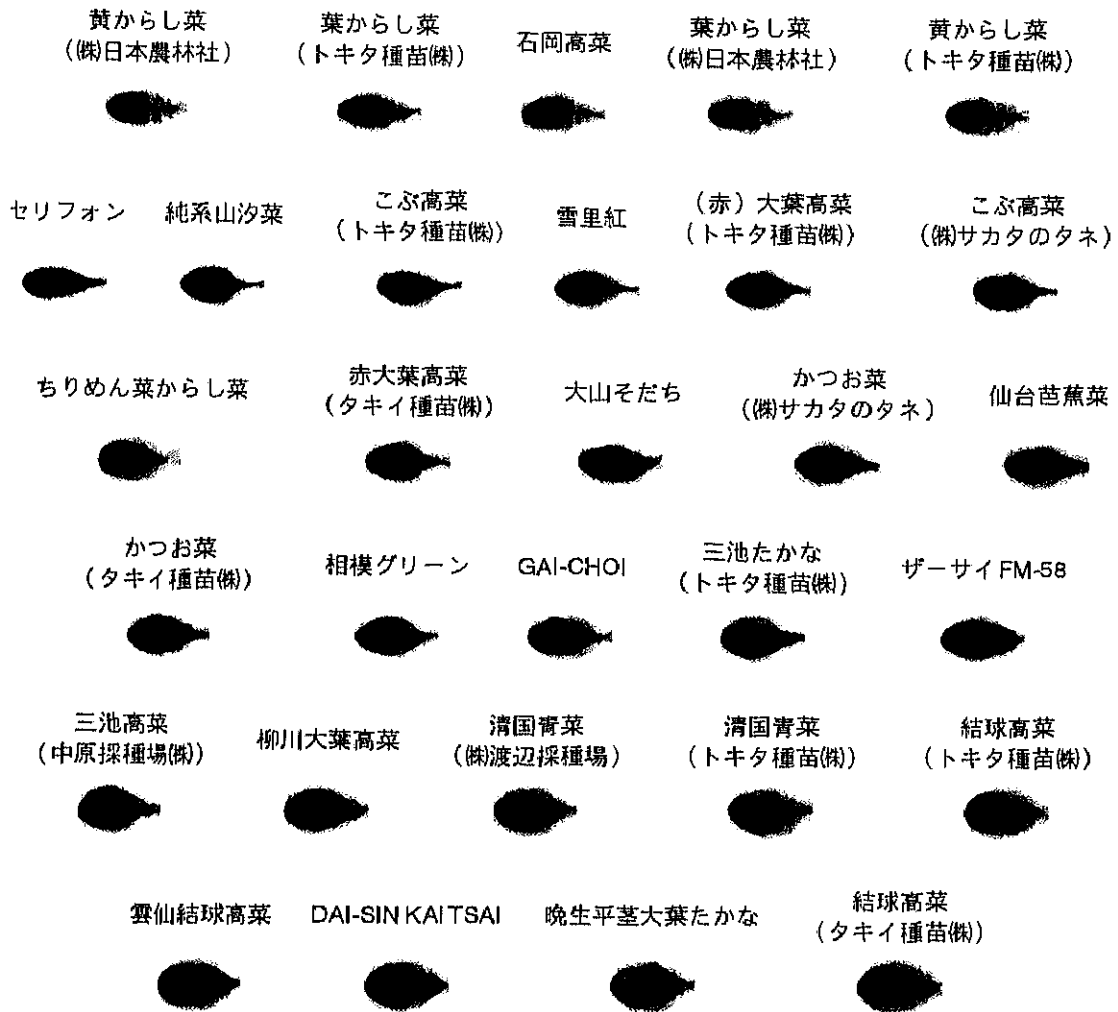


図2-4 カラシナ葉形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

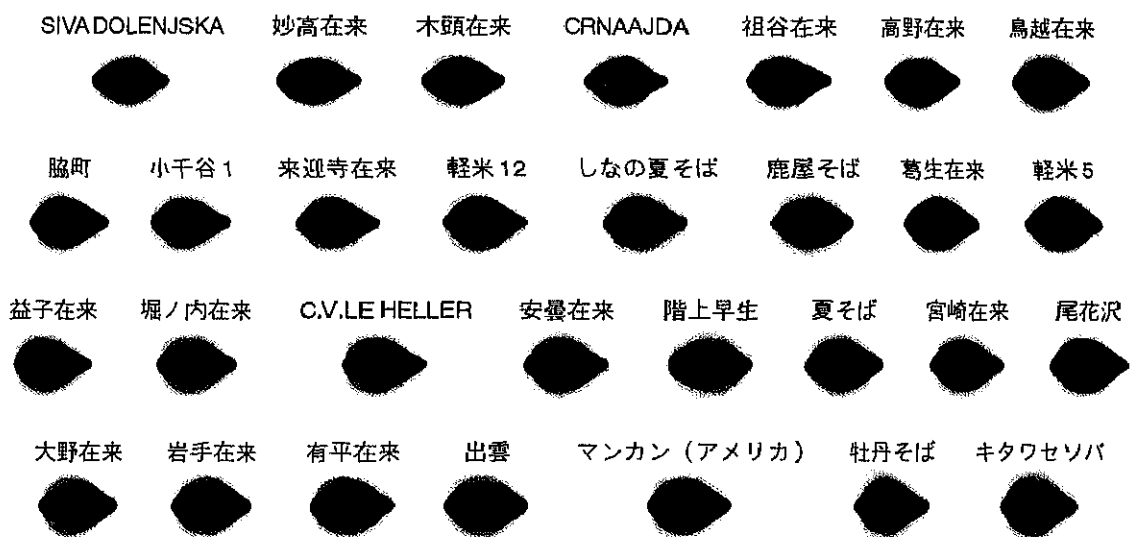


図2-5 ソバ粒形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

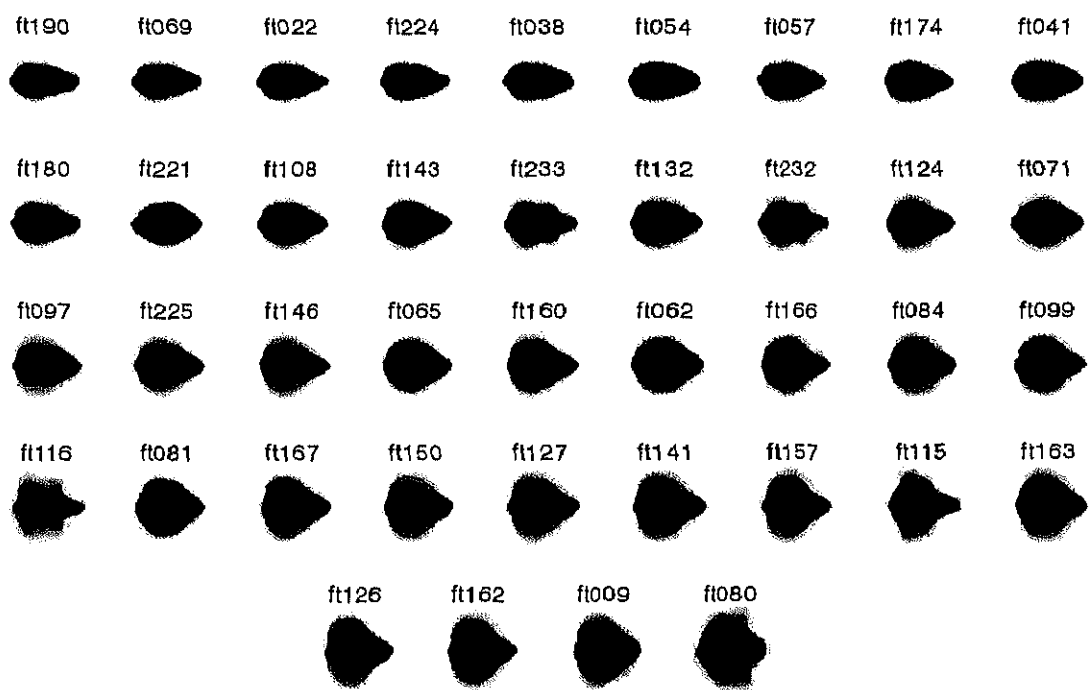


図2-6 ダットンソバ粒形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

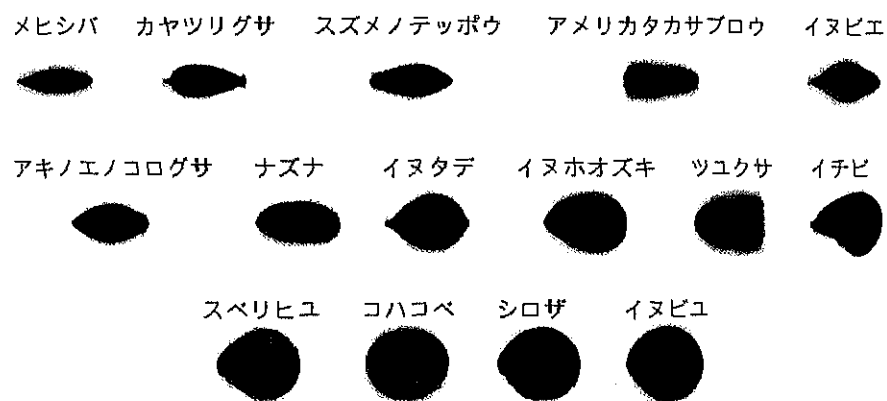


図2-7 雑草種子粒形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

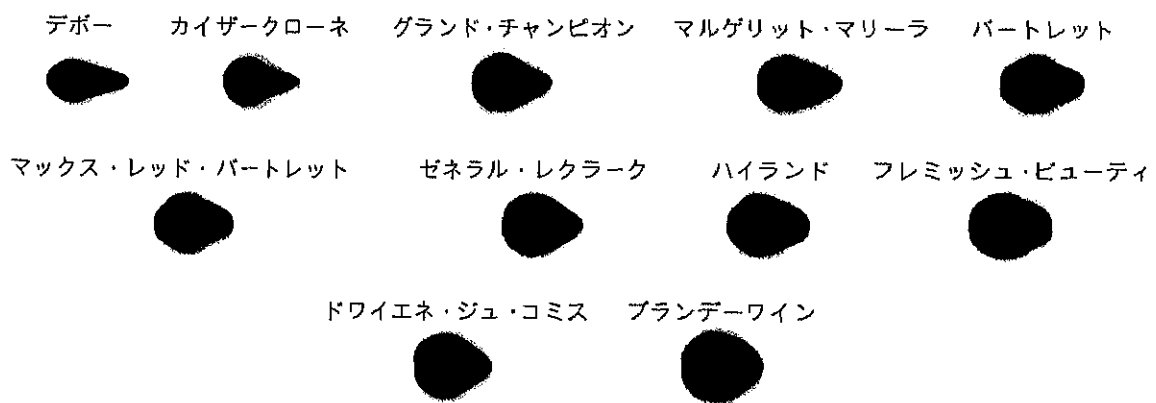


図2-8 セイヨウナシ果形の形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

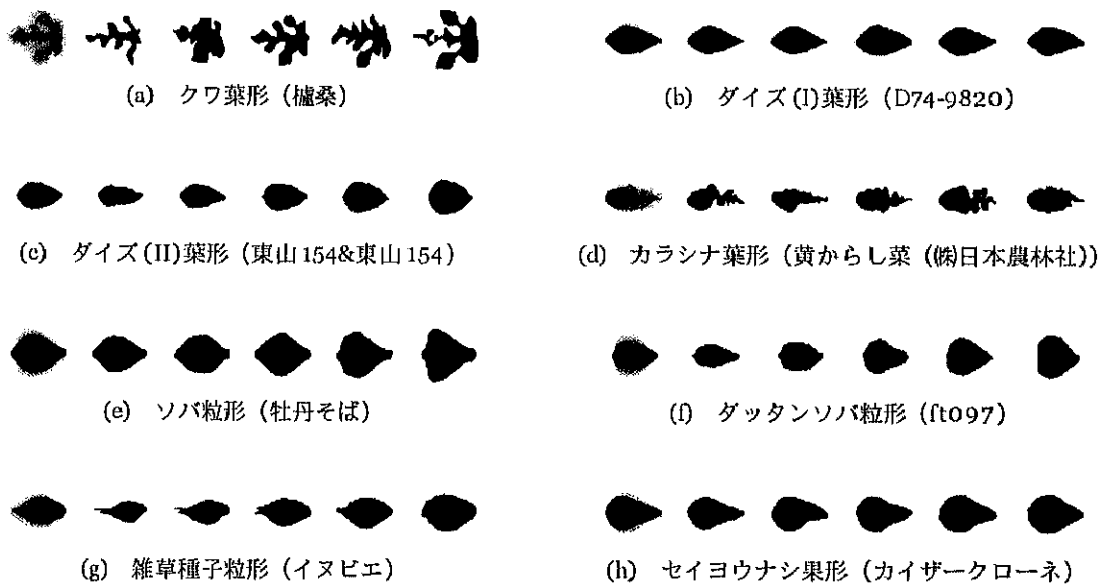


図2-9 各材料の形状分布とクラス内変異の例

左端の濃淡形状は形状分布，右5枚の二値形状は原データである。形状分布は，二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は，それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し，白い画素は，背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は，一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。

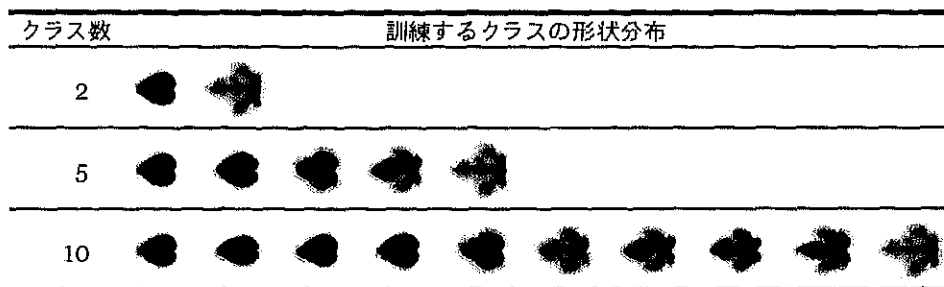


図2-10 クラス数ごとのクワ葉形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

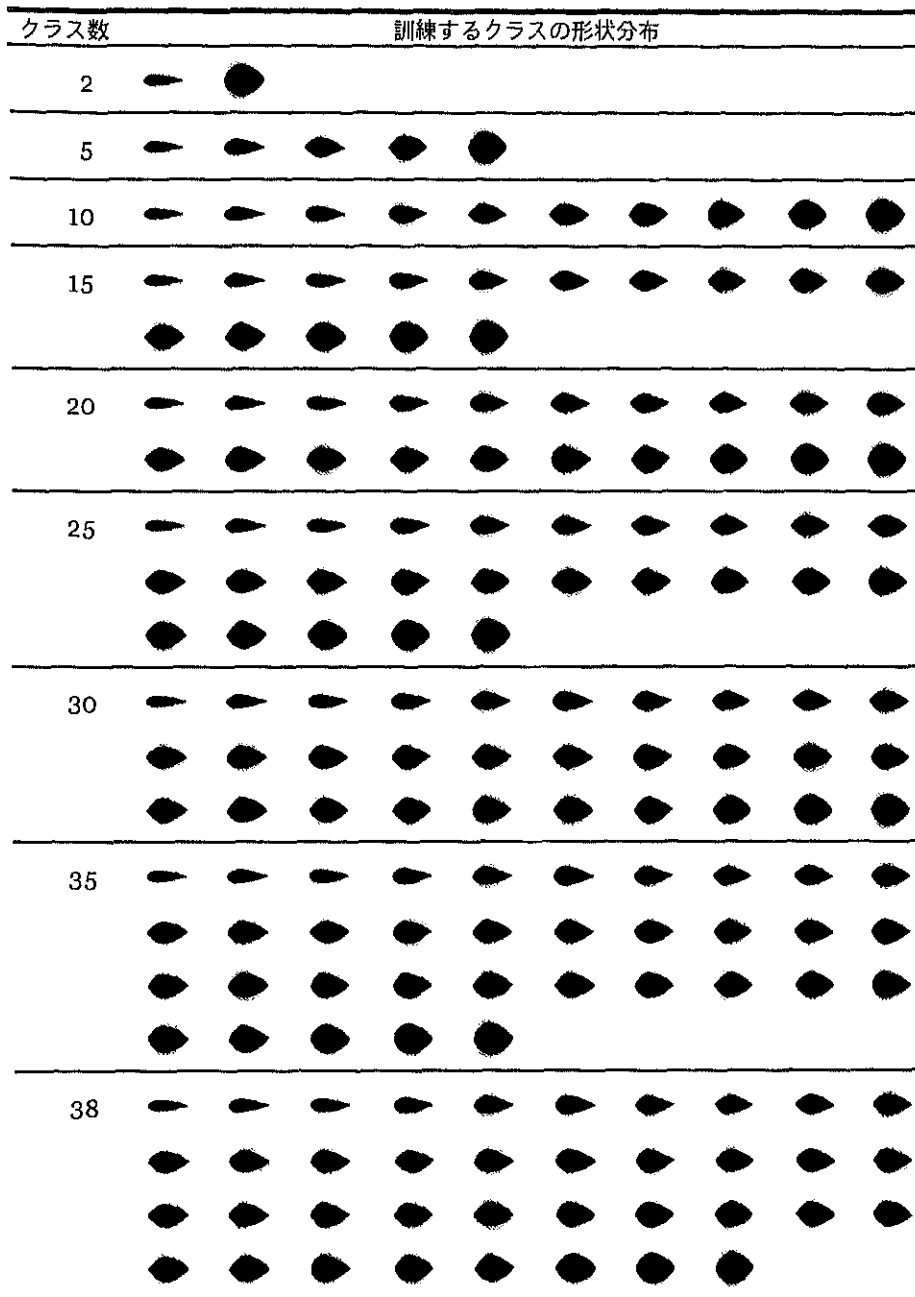


図2-11 クラス数ごとのダイズ (I) 葉形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

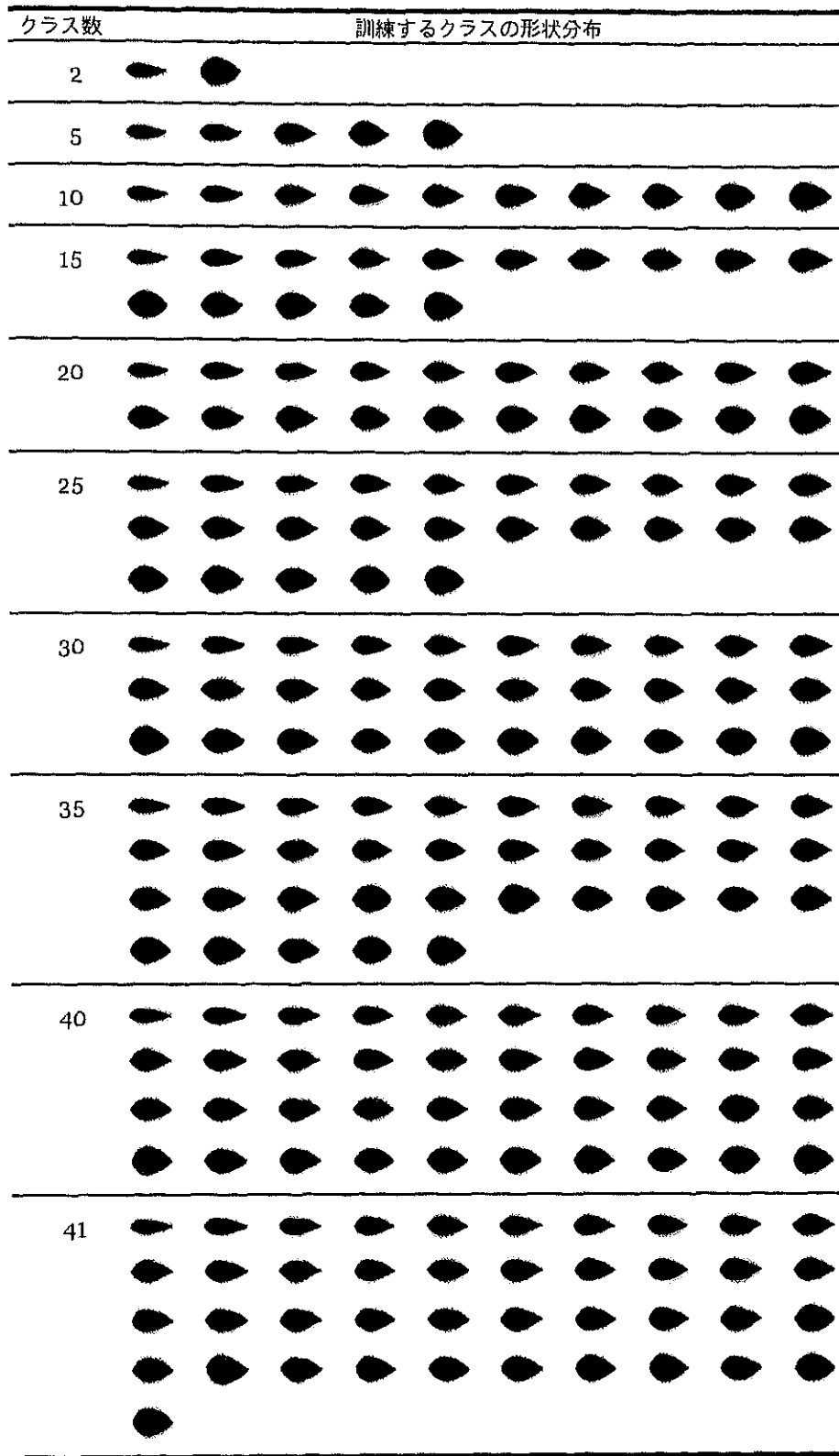


図2-12 クラス数ごとのダイズ (II) 葉形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

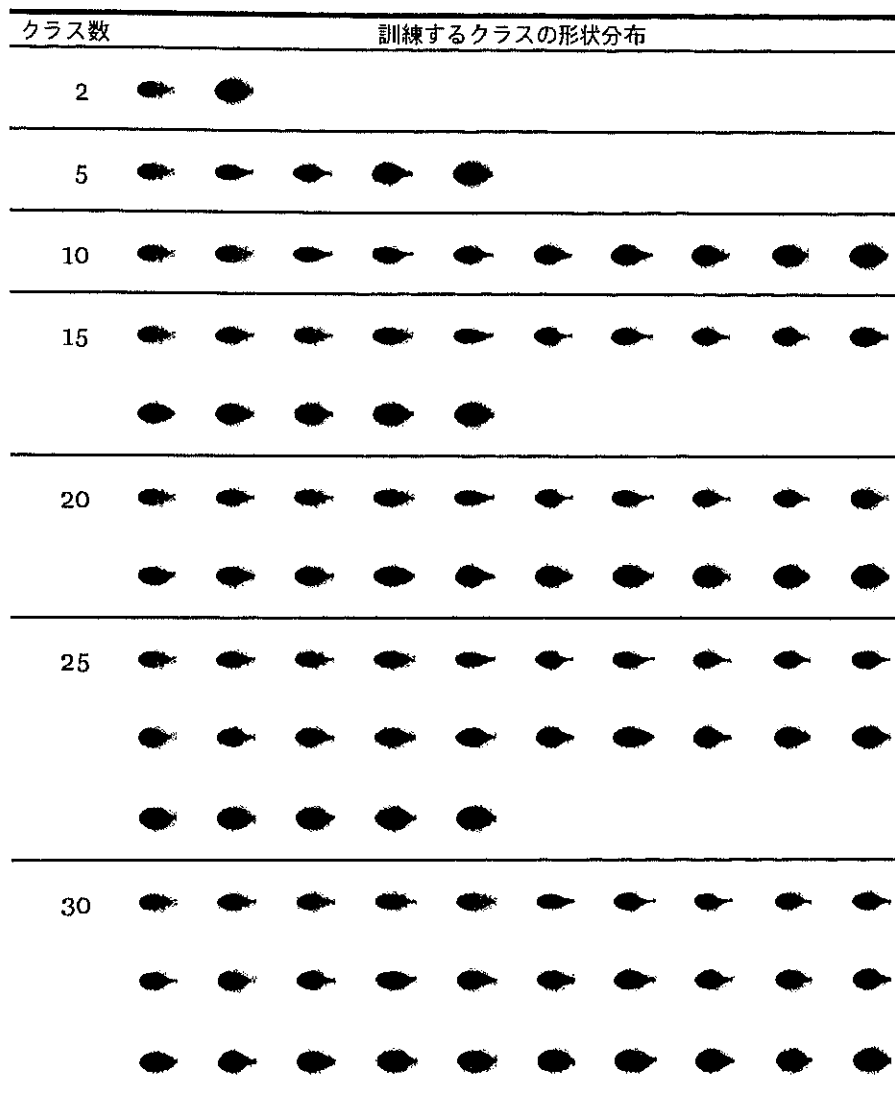


図2-13 クラス数ごとのカラシナ葉形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した、標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

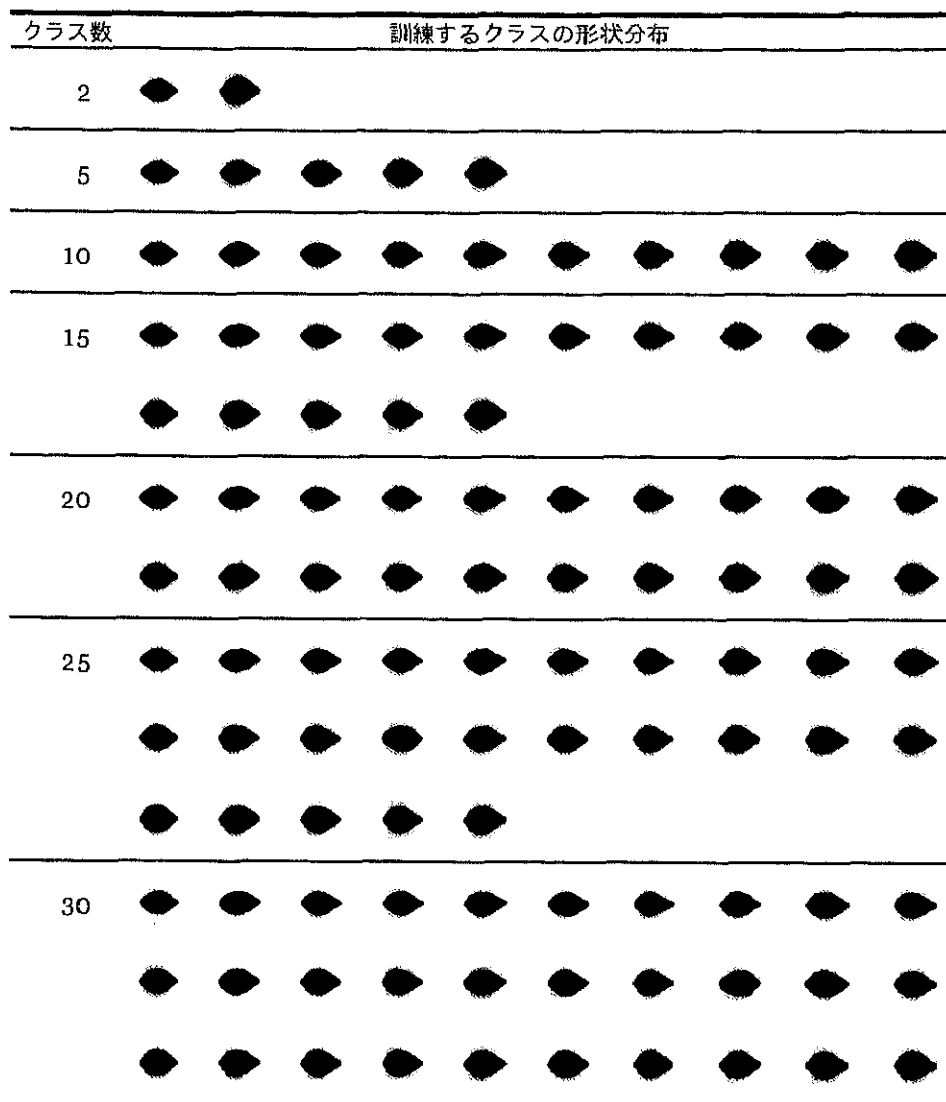


図2-14 クラス数ごとのソバ粒形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

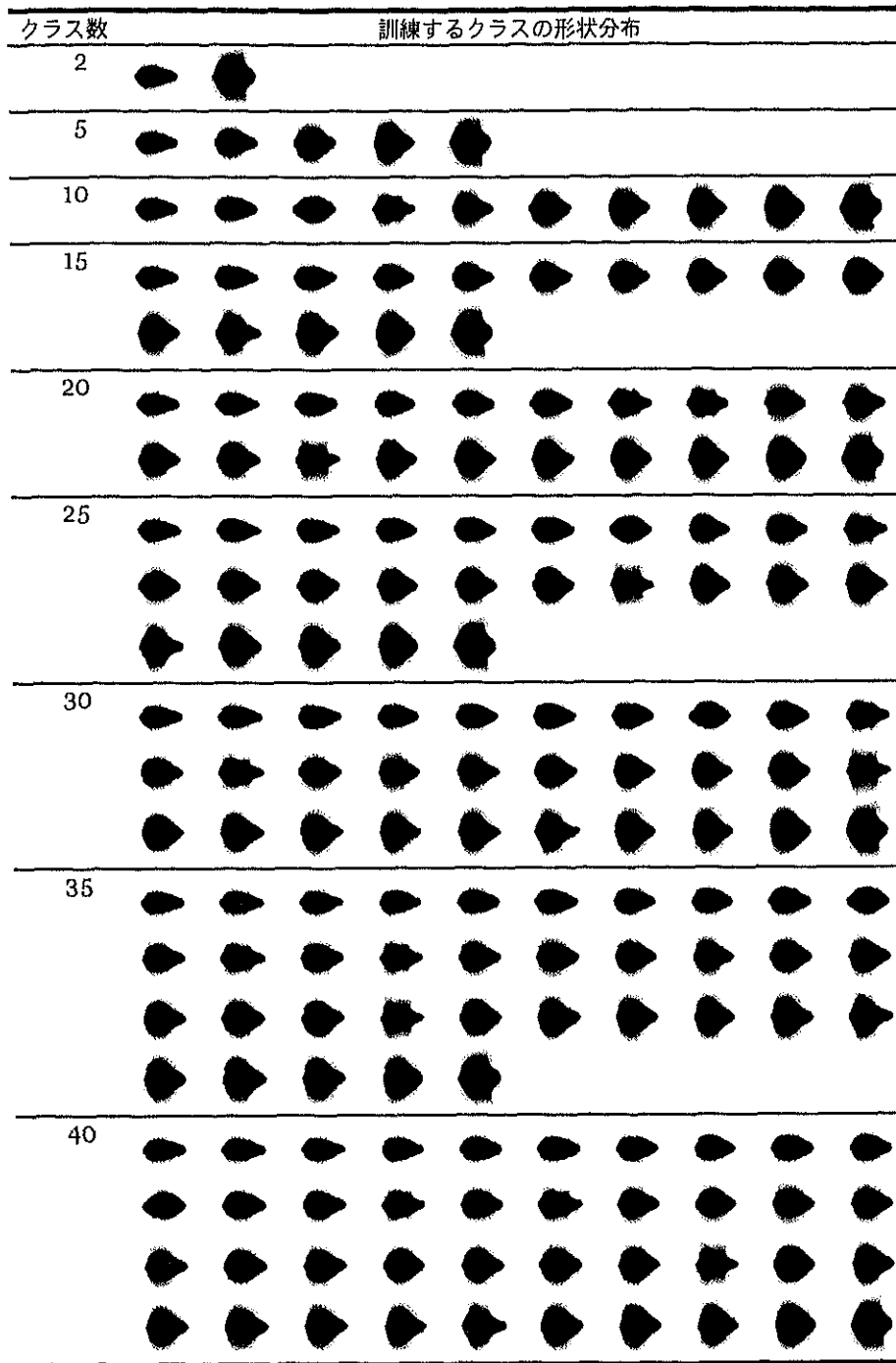


図2-15 クラス数ごとのダットンソバ粒形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

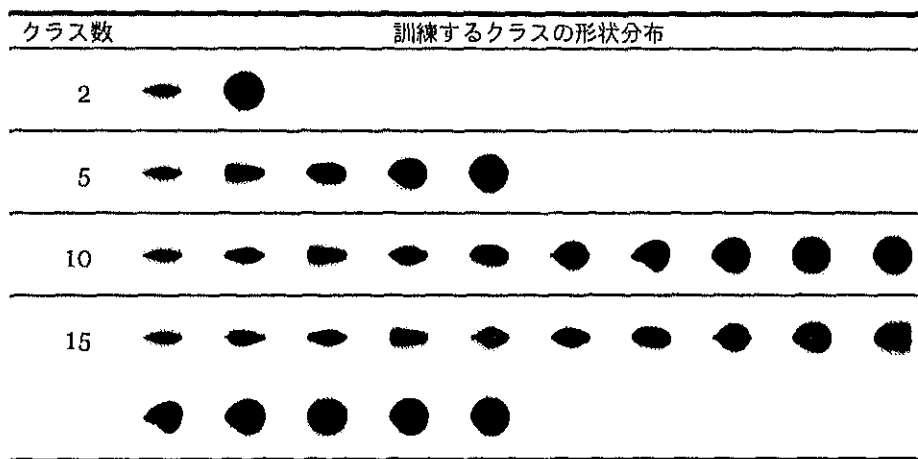


図2-16 クラス数ごとの雑草種子粒形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

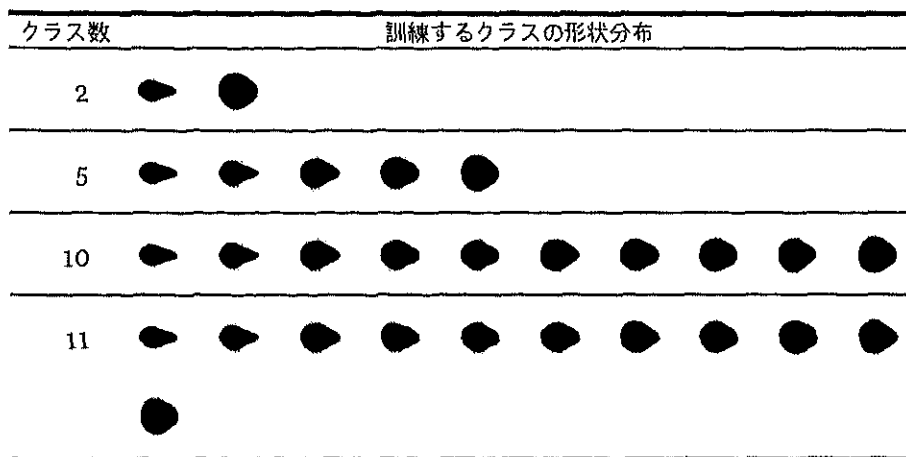


図2-17 クラス数ごとのセイヨウナシ果形の訓練するクラスの形状分布

形状分布は、二値の形状画像のクラス内平均である。黒い画素は、それぞれのクラスの形状画像すべてにおいて形状内部の領域に含まれることを示し、白い画素は、背景の領域に含まれることを示す。灰色の画素は、一部の画像で形状内部の領域に含まれることを示す。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分のクラス内平均値でソートして配置した。標準化楕円フーリエ係数の第一主成分は、形状の縦横比にほぼ該当する。

ルネットワークの有効性と汎用性を検討する。2.3.1では、設定ごとに判別の結果を示し、2.3.2では、結果に基づいて、適切な多層パーセプトロンの構造や教師データ、多層パーセプトロンに基づく画像入力ニューラルネットワークの有効性と汎用性を考察する。なお、多層パーセプトロンの構造や教師データの各種設定は、カエデ葉形による種判別と同様であるので、説明は省略する(1.3.2参照)。

2.3.1 結果

表 2-9 に学習が収束しなかった学習条件の組み合わせを示す。これによると、入力画像サイズが大きい場合や、クラス数が多い場合、収束せずに打ち切られた学習が多く、平均形状が形状分布より学習が収束しやすかったことがわかる。

材料ごと、入力画像サイズごとの誤判別率を図 2-18～図 2-25 に示す。形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した場合に誤判別率が低かったため、カエデ葉形の誤判別率も含めて、この場合の誤判別率を 1 枚のグラフにプロットしたのが図 2-26、判別結果の二元表が図 2-27～図 2-34 である。いずれも、学習が収束しなかった場合は、プロットされていない。

再代入法による誤判別率、一つ抜き法による誤判別率ともに、同じ材料では、平均形状より形状分布を入力パターンとする教師データで訓練したほうが低かった。入力画像サイズは、雑草種子粒形を除いて、16 画素×16 画素がもっとも小さい誤判別率を与えた(図 2-18～図 2-25)。

材料間で誤判別率を比較すると(図 2-26)、形状分布を入力パターンとする教師データで訓練したクラス数が 10 の場合(クワのクラス数が最大 10 までしかとれないため；以下同様)、再代入法による誤判別率は、低い順に、雑草種子粒形(0.088)、カエデ葉形(0.136)、ダイズ(I)葉形(0.184)、カラシナ葉形(0.313)、クワ葉形(0.340)、ダツタンソバ粒形(0.346)、ダイズ(II)葉形(0.432)、セイヨウナシ果形(0.455)、ソバ粒形(0.646)だった。ただし、雑草種子粒形では入力画像サイズは 32 画素×32 画素、それ以外の材料では 16 画素×16 画素である。同じく、一つ抜き法による誤判別率は、低い順に雑草種子粒形(0.117)、カエデ葉形(0.254)、ダイズ(I)葉形(0.293)、ダツタンソバ粒形(0.406)、クワ葉形(0.469)、ダイズ(II)葉形(0.510)、カラシナ葉形(0.513)、ソバ粒形(0.711)だった(セイヨウナシ果形は学習に失敗した)。

判別結果の二元表(図 2-27～図 2-34)を見ると、隣り合うクラス、すなわち、形状の縦横比が似ているクラスの間には判別誤りが集中することがわかる。しかし、クワの欠刻の深い葉形をもつクラスは、判別誤りが分布する範囲が広く、縦横比が似ていないクラスへの誤判別も見られた。

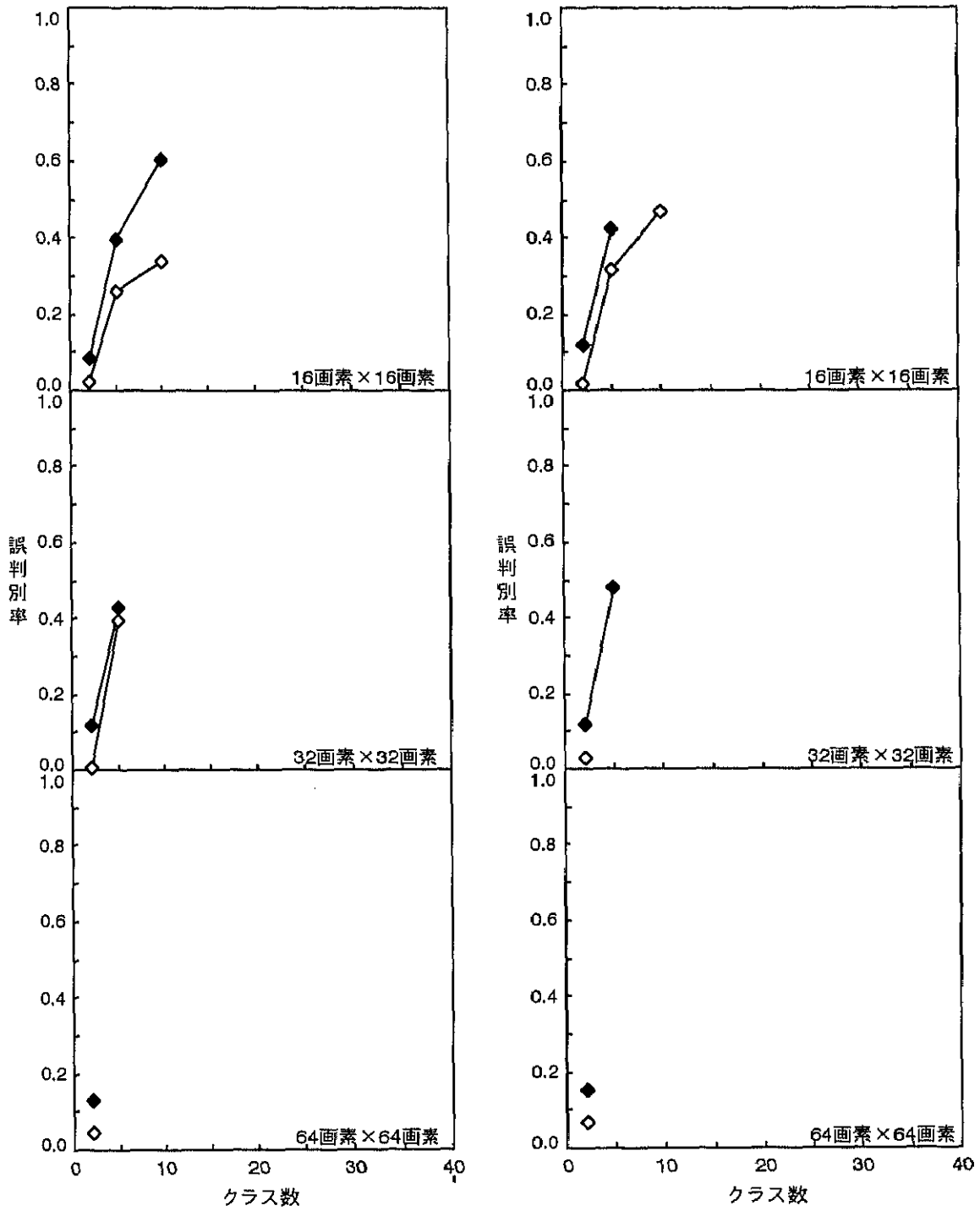
表2-9 学習が収束しなかった学習条件の組み合わせ

(a) 再代入法

材料	入力画像サイズ	教師データ	クラス数
クワ葉形	32 ^{国票} × 32 ^{国票}	形状分布 平均形状	10
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上
サイズ (I) 葉形	32 × 32	形状分布 平均形状	15 以上 20 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	10 以上
サイズ (II) 葉形	32 × 32	形状分布 平均形状	10 以上 15 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	10 以上
カラシナ葉形	32 × 32	形状分布 平均形状	10 以上 15 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上 10 以上
ソバ粒形	32 × 32	形状分布 平均形状	10 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上 10 以上
ダットンソバ粒形	32 × 32	形状分布 平均形状	15 以上 20 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	10 以上 15 以上
雑草種子粒形	64 × 64	形状分布 平均形状	15
セイヨウナシ果形	16 × 16	形状分布 平均形状	11
	32 × 32	形状分布 平均形状	10 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上 10 以上

(b) 一つ抜き法

材料	入力画像サイズ	教師データ	クラス数
クワ葉形	16 ^{国票} × 16 ^{国票}	平均形状	10
	32 × 32	形状分布 平均形状	5 以上 10
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上
サイズ (I) 葉形	32 × 32	形状分布 平均形状	15 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	10 以上
サイズ (II) 葉形	16 × 16	形状分布 平均形状	41 40 以上
	32 × 32	形状分布 平均形状	10 以上 15 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上 10 以上
カラシナ葉形	32 × 32	形状分布 平均形状	10 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上
ソバ粒形	16 × 16	平均形状	20 以上
	32 × 32	形状分布 平均形状	25 以上 5 以上
ダットンソバ粒形	32 × 32	形状分布 平均形状	10 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上
雑草種子粒形	32 × 32	形状分布	15
	64 × 64	形状分布 平均形状	10 以上
セイヨウナシ果形	16 × 16	形状分布	10 以上
	32 × 32	形状分布 平均形状	5 以上 10 以上
	64 × 64	形状分布 平均形状	5 以上 10 以上



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

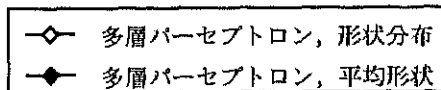
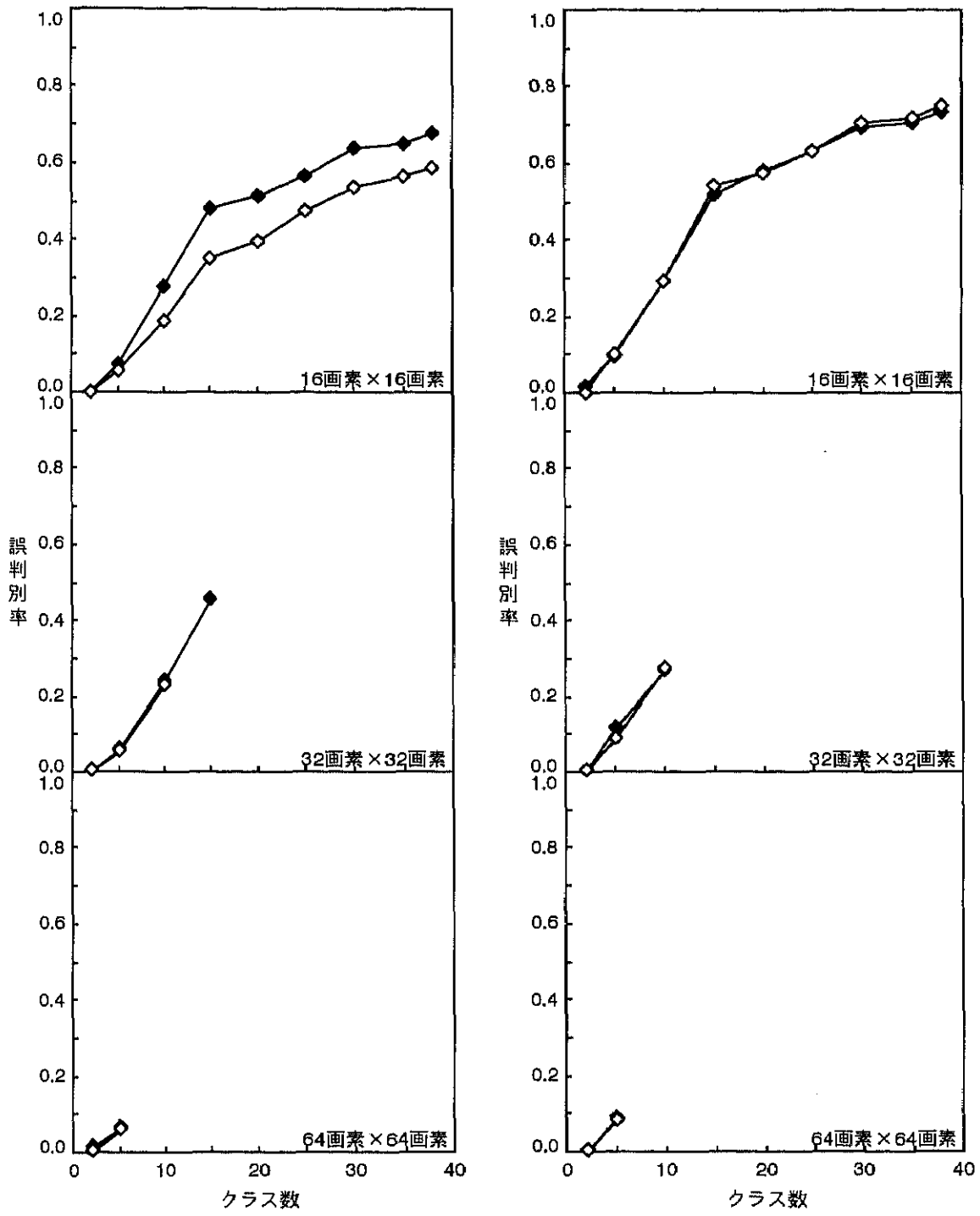


図2-18 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによるクワ葉形の誤判別率のクラス数にともなう変化の教師データの入力パターンによる比較



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

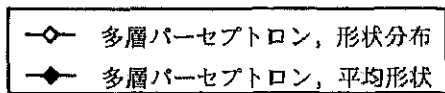


図2-19 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによるダイズ (I) 葉形の誤判別率のクラス数にともなう変化の教師データの入力パターンによる比較

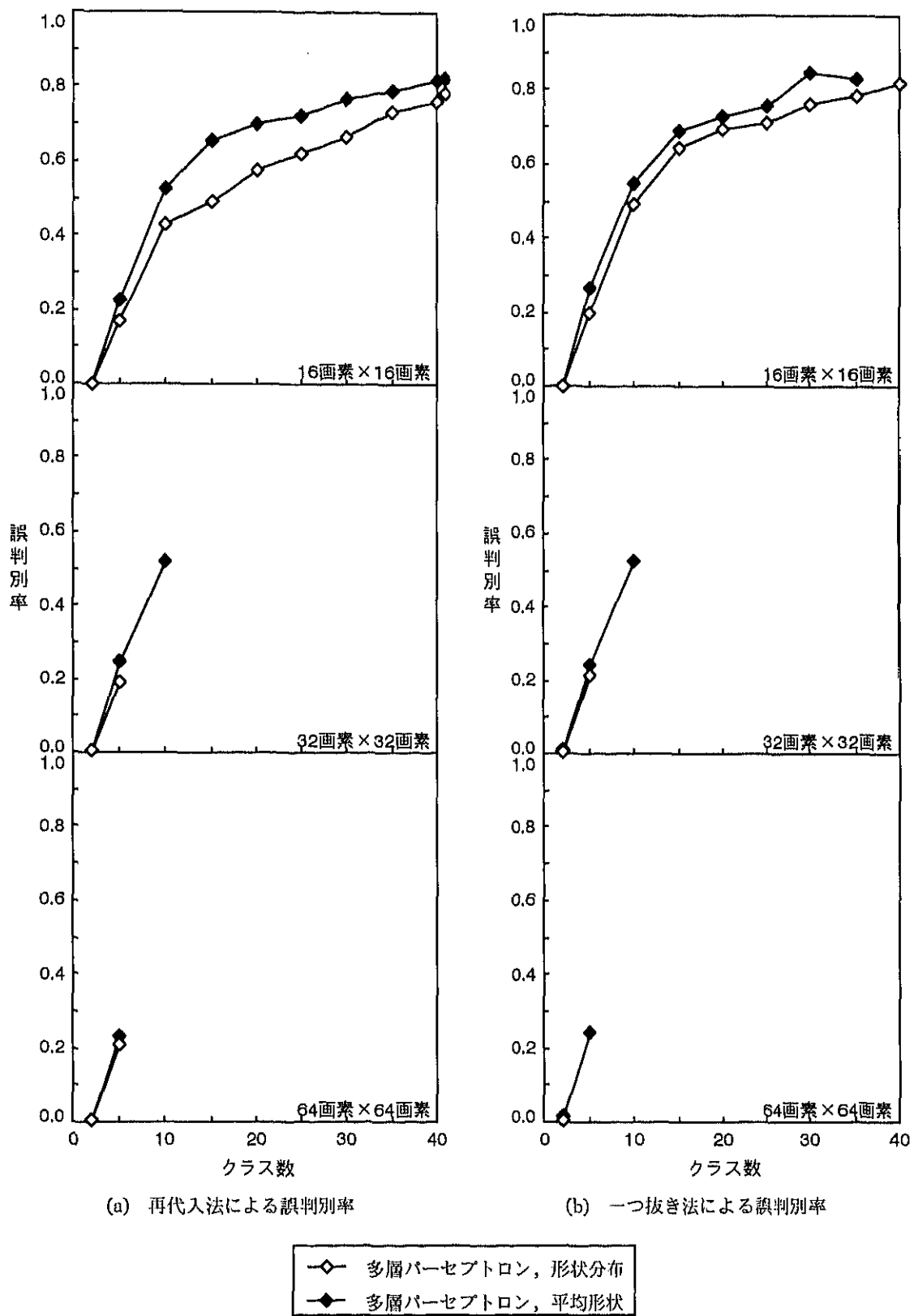


図2-20 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによるダイズ (II) 葉形の誤判別率のクラス数にともなう変化の教師データの入力パターンによる比較

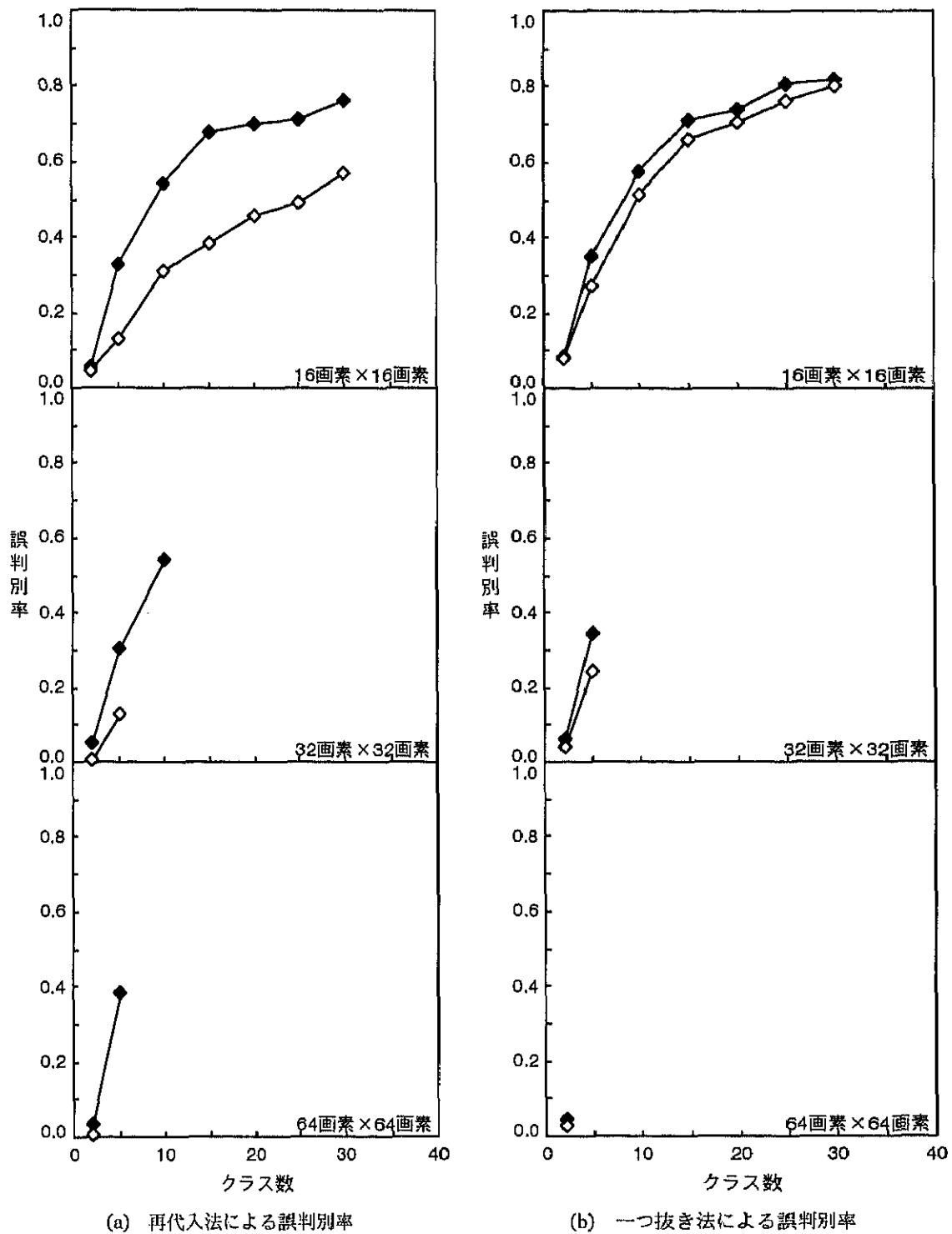


図2-21 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによるカラシナ葉形の誤判別率のクラス数にともなう変化の教師データの入力パターンによる比較

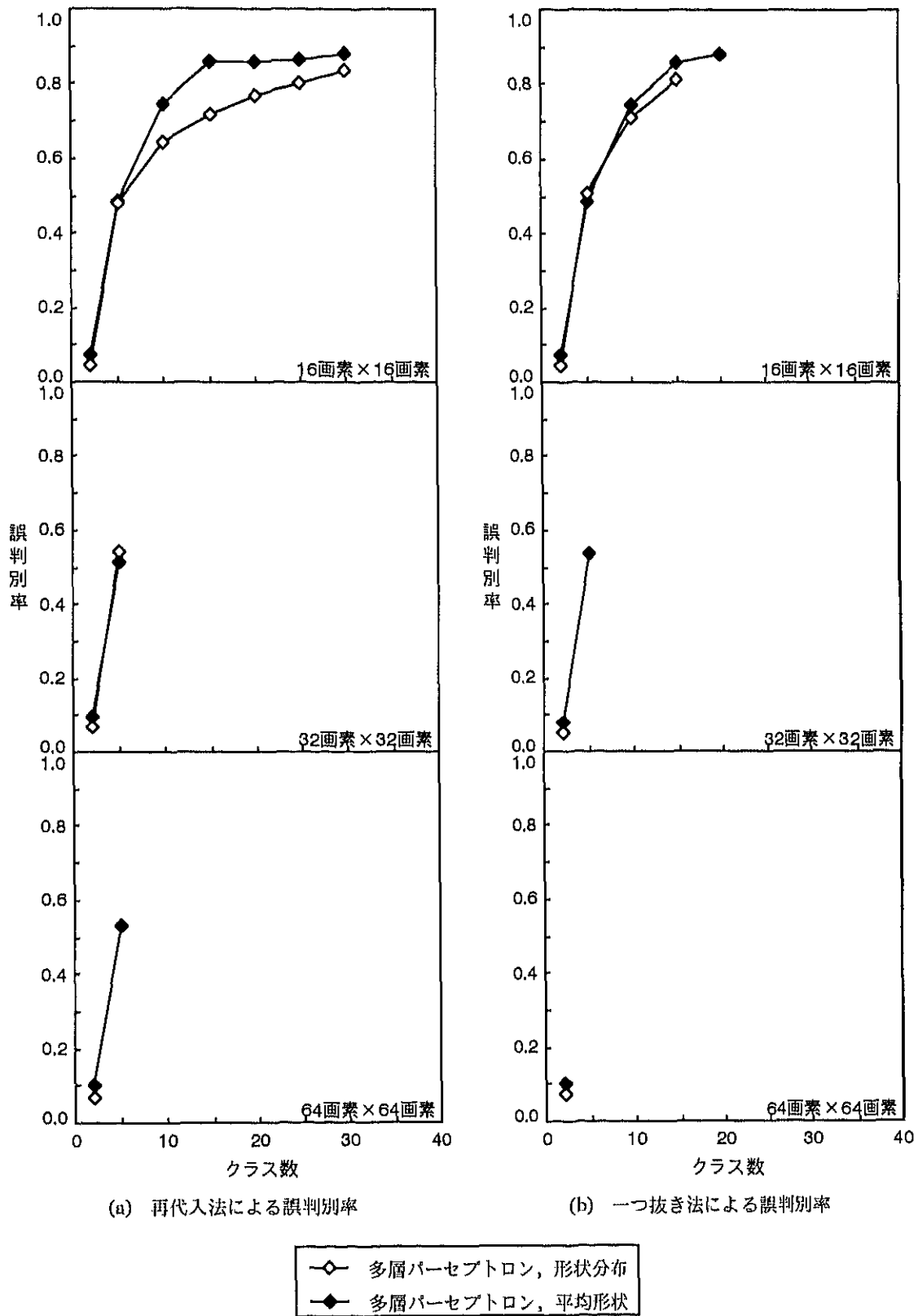
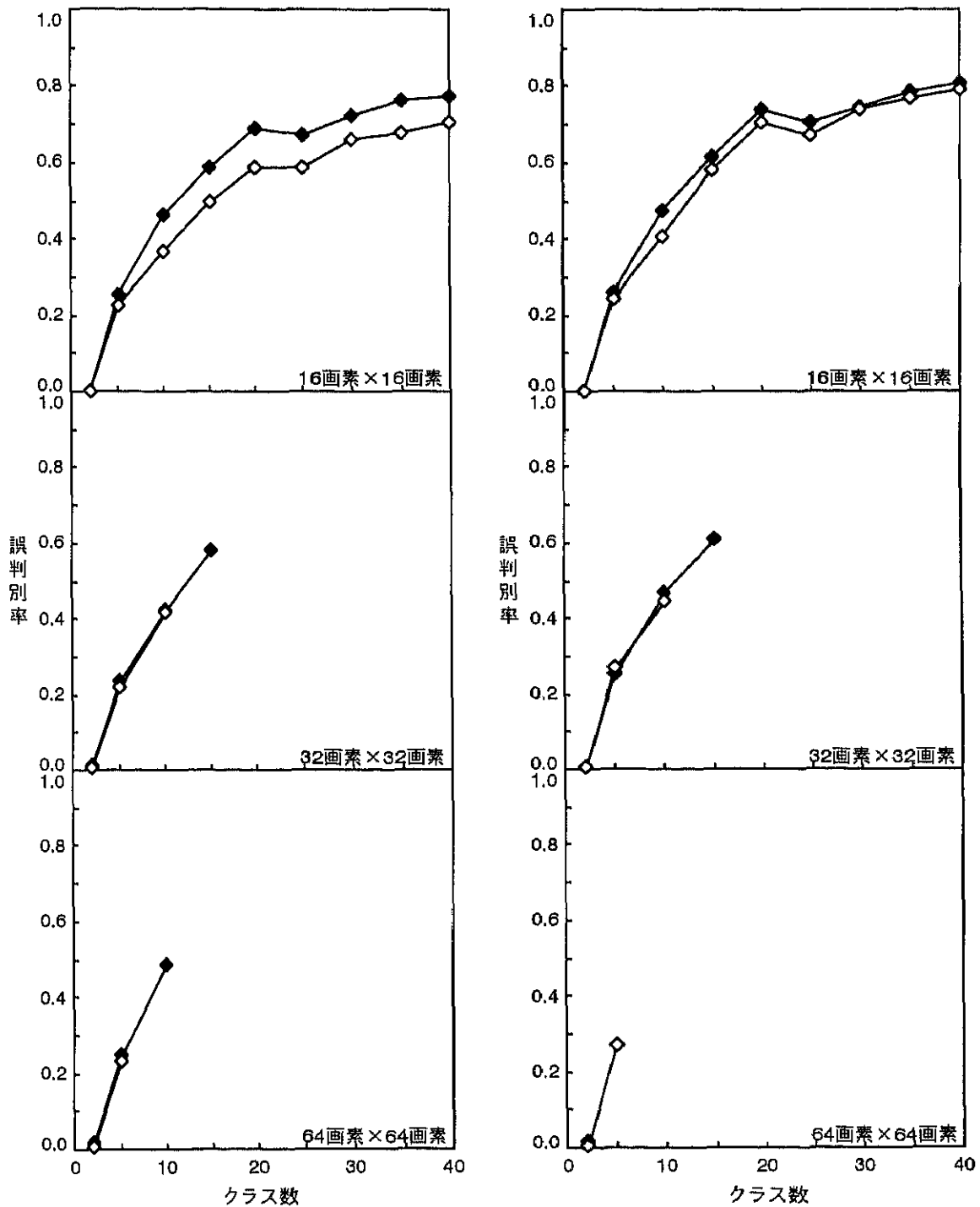


図2-22 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによるソバ粒形の誤判別率のクラス数にともなう変化の教師データの入力パターンによる比較



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

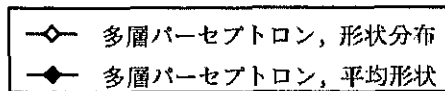


図2-23 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによるダットンソバ粒形の誤判別率のクラス数にともなう変化の教師データの入力パターンによる比較

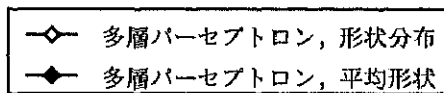
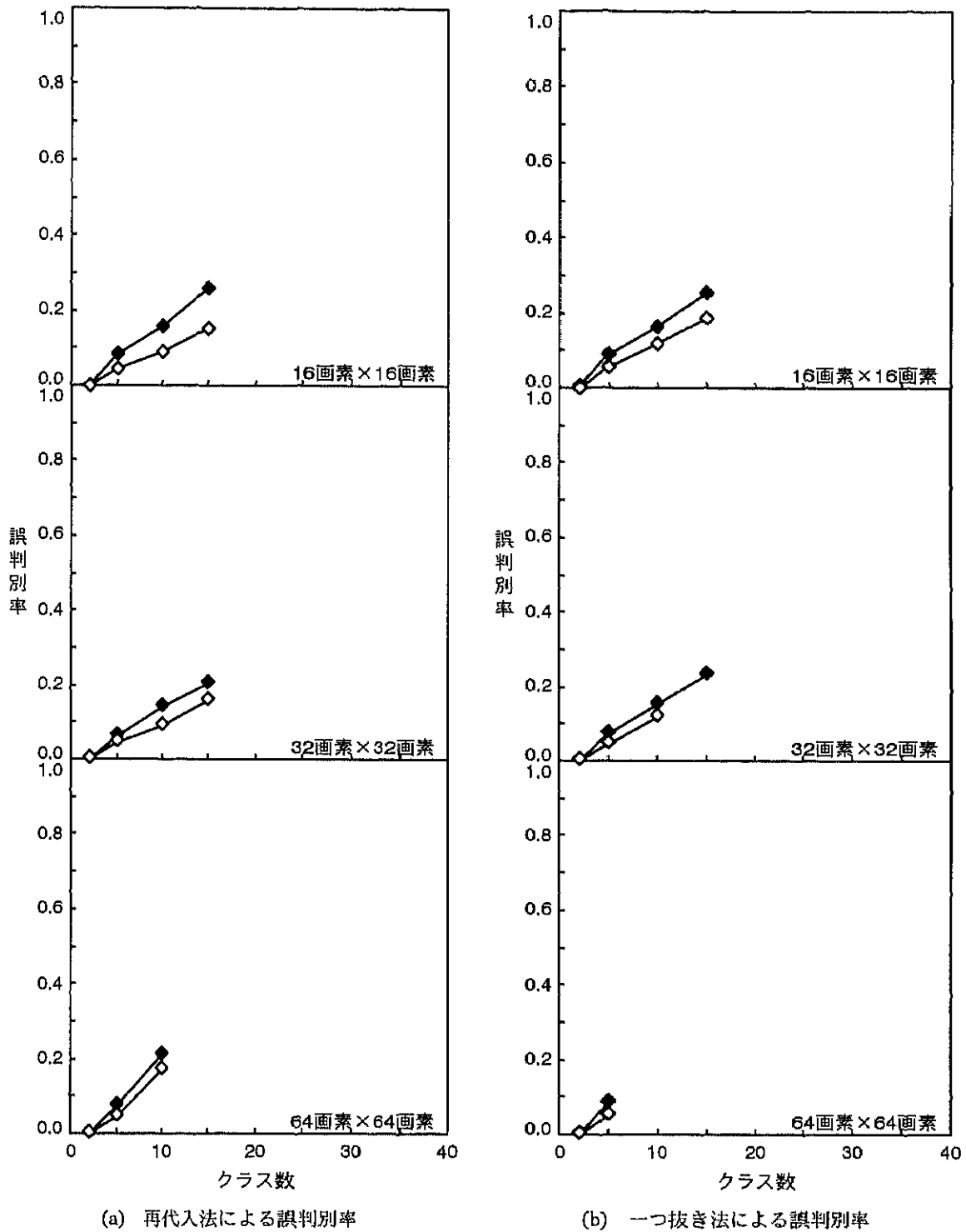


図2-24 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによる雑草種子粒形の誤判別率のクラス数ともなう変化の教師データの入力パターンによる比較

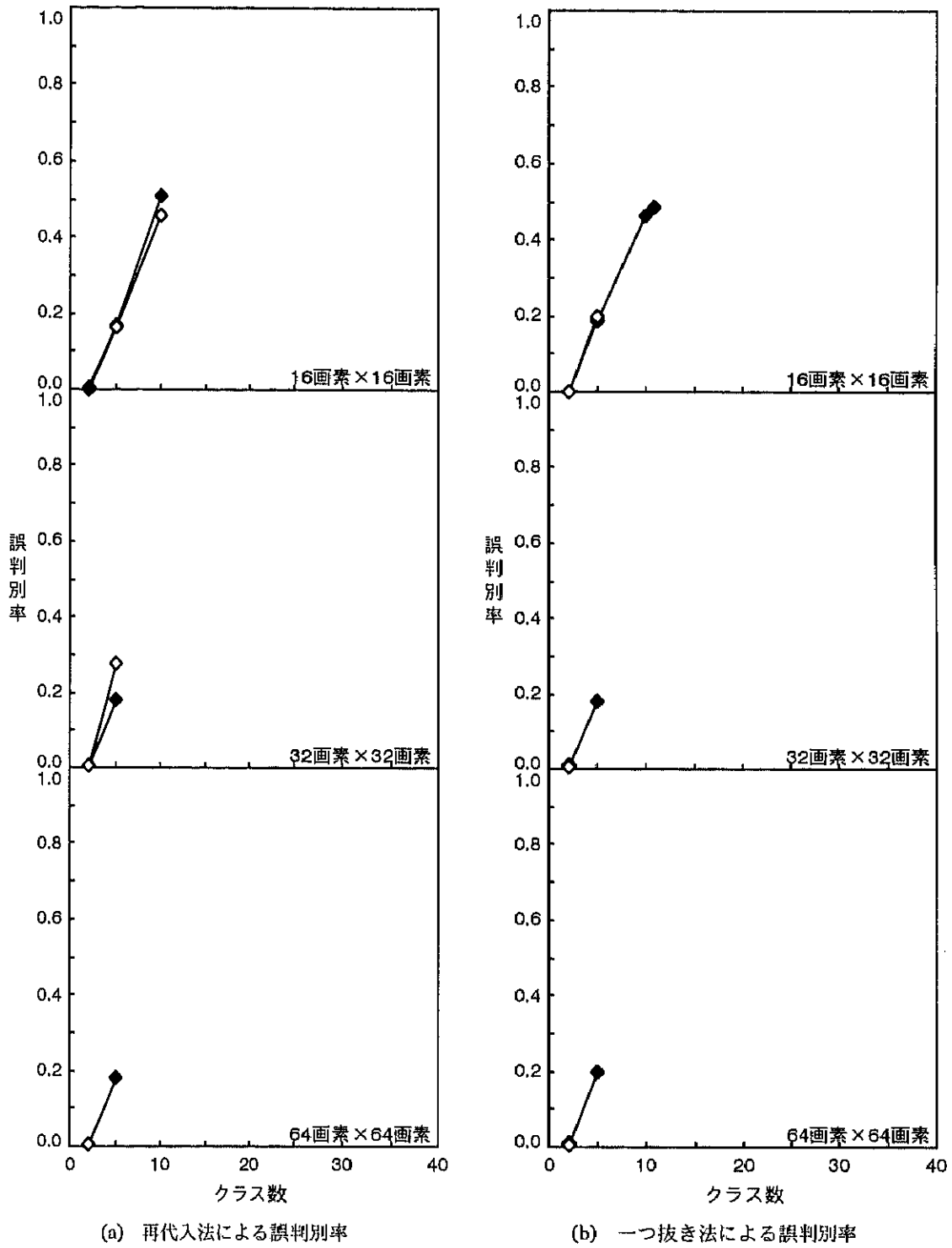


図2-25 入力画像サイズごとの多層パーセプトロンによるセイヨウナシ果形の誤判別率のクラス数にともなう変化の教師データの入力パターンによる比較

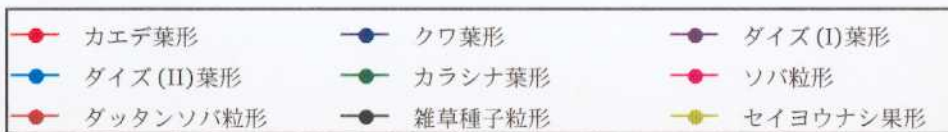
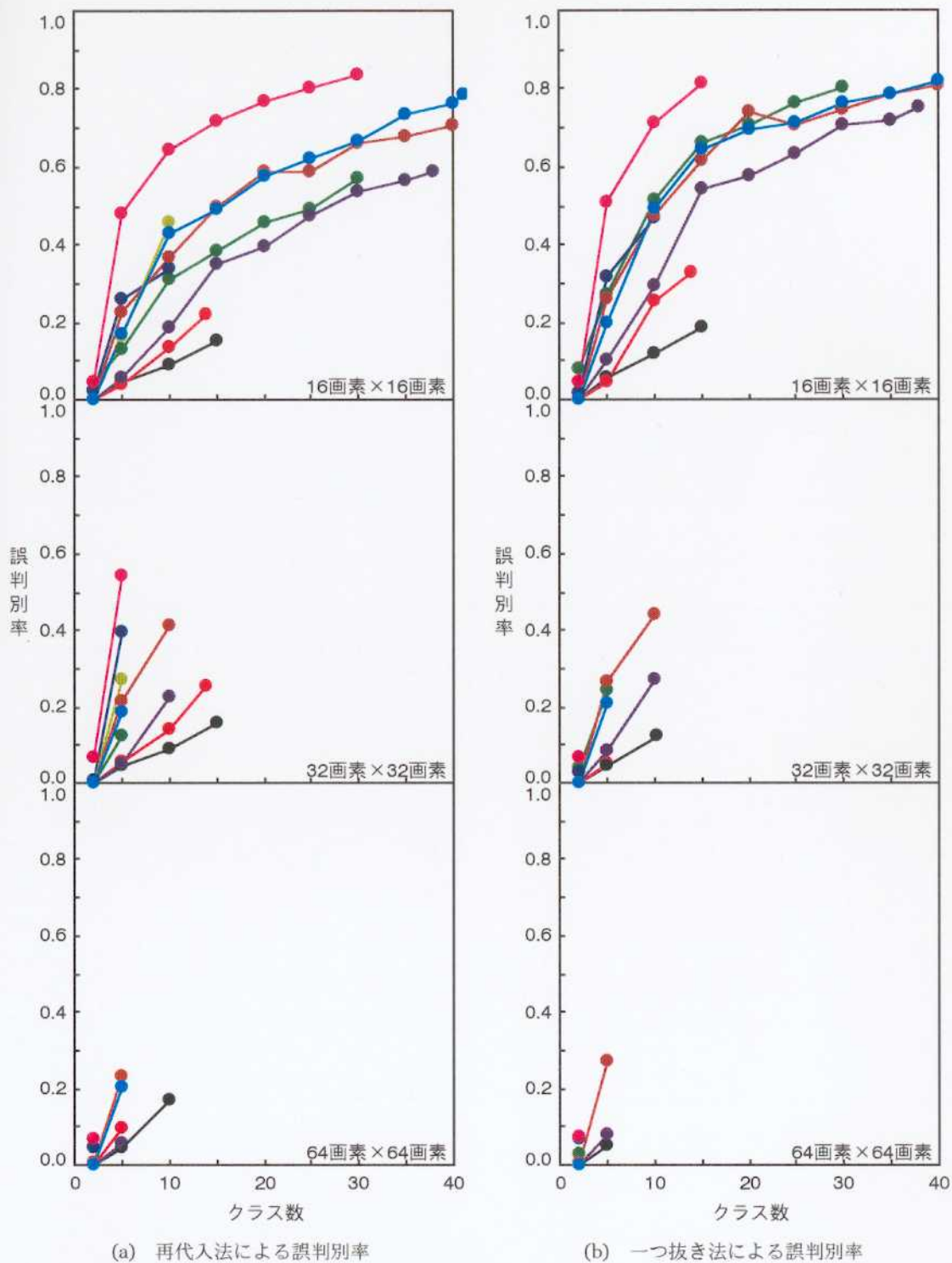


図2-26 入力画像サイズごとの形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによる誤判別率のクラス数ともなう変化の材料による比較

	判別されたクラス										合計			
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤		
	17.0	3.0	0.0	0.0	0.0	17.0	3.0	85%	15%	0%	0%	0%	85%	15%
正	6.5	8.3	2.2	0.0	0.0	8.3	8.7	38	49	13	0	0	49	51
い	3.4	1.2	9.3	1.1	0.0	9.3	5.7	23	8	62	7	0	62	38
ク	0.0	0.1	3.0	15.9	1.0	15.9	4.1	0	1	15	79	5	79	21
ラ	0.1	0.0	3.1	0.0	19.8	19.8	3.2	1	0	13	0	86	86	14
ス	0.1	0.0	3.1	0.0	19.8	19.8	3.2	1	0	13	0	86	86	14
合計	27.0	12.6	17.6	17.0	20.8	70.3	24.7	28	13	19	18	22	74	26

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.260)

	判別されたクラス										合計			
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤		
	17.0	3.0	0.0	0.0	0.0	17.0	3.0	85%	15%	0%	0%	0%	85%	15%
正	6.9	7.0	3.1	0.0	0.0	7.0	10.0	41	41	18	0	0	41	59
い	3.0	2.0	7.8	1.9	0.3	7.8	7.2	20	13	52	13	2	52	48
ク	0.0	0.0	3.6	15.3	1.1	15.3	4.7	0	0	18	76	6	76	24
ラ	0.0	0.1	3.9	1.1	17.9	17.9	5.1	0	0	17	5	78	78	22
ス	0.0	0.1	3.9	1.1	17.9	17.9	5.1	0	0	17	5	78	78	22
合計	26.9	12.1	18.4	18.3	19.3	65.0	30.0	28	13	19	19	20	68	32

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.316)

	判別されたクラス										合計													
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤												
	11.2	1.2	4.6	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.2	8.8	56%	6%	23%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	56%	44%	
正	2.0	7.2	5.9	1.4	0.2	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	7.2	9.8	12	42	35	8	1	1	0	0	0	0	42	58
い	4.3	1.2	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	5.5	25	7	68	0	0	0	0	0	0	0	68	32	
ク	4.4	0.0	2.0	9.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8	7.2	26	0	12	57	5	0	0	0	0	0	57	43	
ラ	1.4	1.2	1.1	0.3	9.4	0.0	1.2	0.3	0.1	9.4	5.6	9	8	7	2	63	0	8	2	1	0	63	37	
ス	0.0	0.8	0.0	0.0	2.8	13.8	1.6	2.5	0.0	13.8	8.2	0	4	0	0	13	63	7	11	0	2	63	37	
正	0.0	0.0	0.0	0.3	2.1	1.6	13.4	1.5	0.6	13.4	6.6	0	0	0	2	10	8	66	8	3	3	66	34	
い	0.0	0.1	0.0	0.2	1.1	1.2	1.4	15.0	0.0	15.0	4.0	0	1	0	1	6	6	7	79	0	0	79	21	
ク	0.0	0.2	0.1	0.0	1.8	0.0	0.3	0.5	14.9	14.9	3.1	0	1	1	0	10	0	2	3	82	1	82	18	
ラ	0.0	0.3	0.5	0.0	2.3	0.5	0.1	0.0	1.4	17.9	5.1	0	1	2	0	10	2	0	6	79	79	21		
ス	0.0	0.3	0.5	0.0	2.3	0.5	0.1	0.0	1.4	17.9	5.1	0	1	2	0	10	2	0	6	79	79	21		
合計	23.3	12.2	25.7	15.0	20.5	17.2	18.0	20.0	17.0	19.1	124.1	163.9	12	6	14	8	11	9	10	11	9	10	66	34

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.340)

	判別されたクラス										合計													
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤												
	10.9	2.4	3.6	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	9.1	54%	12%	18%	16%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	54%	46%	
正	2.4	5.2	6.9	1.8	0.5	0.0	0.0	0.2	0.0	5.2	11.8	14	31	40	11	3	0	0	1	0	0	31	69	
い	4.9	3.0	8.7	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	8.7	8.3	29	18	51	0	2	0	0	0	0	0	51	49	
ク	5.2	0.1	1.9	8.7	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0	8.7	8.3	31	1	11	50	5	0	0	2	0	0	50	50	
ラ	1.8	0.9	0.7	1.6	4.3	0.0	1.3	2.7	1.6	4.3	10.7	11	6	5	11	28	0	9	18	11	1	28	72	
ス	0.0	1.2	0.0	0.0	1.6	10.6	3.6	4.0	0.6	10.6	11.4	0	5	0	0	7	49	16	18	3	2	49	51	
正	0.3	1.0	0.0	0.2	1.4	2.0	9.0	4.9	0.7	9.0	11.0	2	5	0	1	7	10	44	24	4	3	44	56	
い	0.0	0.2	0.0	0.3	0.8	2.3	2.7	12.6	0.1	12.6	6.4	0	1	0	2	4	12	14	66	1	0	66	34	
ク	0.0	0.2	0.0	0.0	2.1	0.3	0.3	0.1	14.6	14.6	3.4	0	1	0	0	12	2	2	1	80	2	80	20	
ラ	0.0	0.9	0.0	0.0	2.2	2.1	0.6	0.0	1.9	15.3	7.7	0	4	0	0	10	9	3	0	8	66	66	34	
ス	0.0	0.9	0.0	0.0	2.2	2.1	0.6	0.0	1.9	15.3	7.7	0	4	0	0	10	9	3	0	8	66	66	34	
合計	25.5	15.1	21.8	15.7	14.1	17.3	17.5	24.8	19.5	16.7	99.9	88.1	14	8	12	8	8	9	9	13	10	9	53	47

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.469)

図2-27 16画素×16画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによるクワ葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度（10回の訓練の平均）、下段数値は相対値（単位：%）を示す。

	判別されたクラス										合計			
	←	◀	▶	→	●	○	△	▽	◇	◇	●	正	誤	
正	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0		
し	0.2	9.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7	0.3		
い	0.0	0.4	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	0.4		
ク	0.0	0.0	0.0	9.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	0.4		
ラ	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	0.4		
ス	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	8.1	8.1	1.9	0.0	0.0	0.0		
合計	10.2	10.1	10.7	11.5	8.5	48.0	3.0	20	20	20	23	17	94	6

(a) 再代入法

(5クラス; 誤判別率 0.059)

	判別されたクラス										合計			
	←	◀	▶	→	●	○	△	▽	◇	◇	●	正	誤	
正	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0		
し	1.0	8.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	1.6		
い	0.0	0.2	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.8	0.2		
ク	0.0	0.0	0.0	1.0	8.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6	1.4		
ラ	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0		
ス	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	8.0	8.0	2.0	0.0	0.0	0.0		
合計	11.0	8.6	12.4	10.6	8.4	45.8	5.2	22	17	24	21	16	90	10

(c) 一つ抜き法

(5クラス; 誤判別率 0.102)

	判別されたクラス										合計												
	←	◀	▶	→	●	○	△	▽	◇	◇	●	正	誤										
正	8.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	1.7										
し	0.7	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	0.7										
い	0.0	1.0	6.0	2.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	4.0										
ク	0.0	0.0	1.9	5.2	0.3	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	5.2	2.8										
ラ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0										
ス	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	8.7	0.0	1.1	8.7	1.3										
合計	9.0	15.0	7.9	8.6	9.3	11.7	11.2	9.2	9.8	10.3	83.2	18.8	9	15	8	9	11	11	9	10	10	82	18

(b) 再代入法

(10クラス; 誤判別率 0.184)

	判別されたクラス										合計													
	←	◀	▶	→	●	○	△	▽	◇	◇	●	正	誤											
正	7.2	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	2.8											
し	3.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	3.0											
い	0.0	1.0	6.1	2.1	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	3.9											
ク	0.0	0.0	3.3	2.6	1.9	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	2.6	5.4											
ラ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											
ス	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	6.9	0.0	0.5	0.0	6.9	3.1	0	0	0	0	26	69	0	5	0	69	31	
合計	10.2	13.8	9.4	5.5	12.0	13.0	9.3	8.7	11.9	8.2	72.1	29.9	10	13	9	5	12	13	9	9	12	8	71	29

(d) 一つ抜き法

(10クラス; 誤判別率 0.293)

図2-28 16画素×16画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによるダイズ (I) 葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度 (10回の訓練の平均), 下段数値は相対値 (単位: %) を示す。

	判別されたクラス										合計			
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤		
	18.4	0.6	1.0	0.0	0.0	18.4	1.6	92%	3%	5%	0%	0%	92%	8%
正	0.0	3.0	1.0	0.0	0.0	3.0	1.0	0	75	25	0	0	75	25
しい	0.0	1.6	17.1	0.3	1.0	17.1	2.9	0	8	85	2	5	85	15
クラス	0.0	0.0	3.6	14.1	2.3	14.1	5.9	0	0	18	70	12	70	30
	0.0	0.0	0.0	3.0	17.0	17.0	3.0	0	0	0	15	85	85	15
合計	18.4	5.2	22.7	17.4	20.3	69.6	14.4	22	6	27	21	24	83	17

(a) 再代入法
(5クラス; 誤判別率 0.171)

	判別されたクラス										合計			
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤		
	17.9	1.2	0.9	0.0	0.0	17.9	2.1	89%	6%	5%	0%	0%	89%	11%
正	0.0	3.0	1.0	0.0	0.0	3.0	1.0	0	75	25	0	0	75	25
しい	0.0	2.6	15.5	1.0	0.9	15.5	4.5	0	13	77	5	5	77	23
クラス	0.0	0.0	3.3	14.1	2.6	14.1	5.9	0	0	17	70	13	70	30
	0.0	0.0	0.0	3.3	16.7	16.7	3.3	0	0	0	17	83	83	17
合計	17.9	6.8	20.7	18.4	20.2	67.2	16.8	21	8	25	22	24	80	20

(c) 一つ抜き法
(5クラス; 誤判別率 0.200)

	判別されたクラス										合計													
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤												
	18.0	0.8	0.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	2.0	90%	4%	1%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	90%	10%		
正	2.2	16.1	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.1	3.9	11	80	0	9	0	0	0	0	0	80	20		
しい	4.0	4.5	2.3	1.3	4.2	0.7	1.9	1.1	0.0	2.3	17.7	20	21	12	7	20	4	10	6	0	12	88		
クラス	1.0	1.0	0.0	13.0	0.7	0.3	0.0	3.7	0.3	0.0	13.0	7.0	5	5	0	64	4	2	0	18	2	0	64	36
	0.7	0.8	1.3	4.8	6.3	0.0	4.5	1.6	0.0	6.3	13.7	4	4	7	24	31	0	22	8	0	0	31	69	
しい	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	14.3	0.6	0.0	0.4	1.0	14.3	5.7	0	0	0	19	0	71	3	0	2	5	71	29
クラス	0.0	0.2	0.0	0.9	4.2	0.0	9.2	2.3	3.2	0.0	9.2	10.8	0	1	0	5	21	0	45	12	16	0	45	55
	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	3.0	8.3	5.1	0.6	8.3	11.7	0	0	0	5	5	5	15	41	26	3	41	59
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	4.6	10.5	4.0	10.5	9.5	0	0	0	0	0	1	4	23	52	20	52	48
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.4	2.6	15.7	15.7	4.3	0	0	0	0	1	1	7	13	78	78	22	
合計	25.9	23.4	3.8	27.4	16.4	16.5	20.2	23.0	22.1	21.3	113.7	86.3	13	12	2	13	8	10	12	11	11	57	43	

(b) 再代入法
(10クラス; 誤判別率 0.432)

	判別されたクラス										合計													
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤												
	17.5	1.4	0.1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5	2.5	87%	7%	1%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	87%	13%		
正	2.4	14.1	0.2	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	5.9	12	70	1	17	0	0	0	0	0	70	30		
しい	4.1	5.4	1.1	1.4	5.7	0.6	0.7	1.0	0.0	1.1	18.9	21	26	6	7	28	3	4	5	0	6	94		
クラス	0.8	1.4	0.0	11.9	0.9	1.0	0.0	3.8	0.2	0.0	11.9	8.1	4	7	0	59	5	5	0	19	1	0	59	41
	0.8	0.6	1.3	5.4	7.0	0.1	2.9	1.9	0.0	7.0	13.0	4	3	7	26	34	1	15	10	0	0	34	66	
しい	0.0	0.0	0.0	4.0	0.8	12.6	1.2	0.0	0.5	0.9	12.6	7.4	0	0	0	20	4	62	6	0	3	5	62	38
クラス	0.0	0.1	0.0	1.0	6.4	0.2	6.2	3.4	2.5	0.2	6.2	13.8	0	1	0	5	31	1	31	17	13	1	31	69
	0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	1.0	2.7	7.9	5.7	0.2	7.9	12.1	0	0	0	5	8	5	14	39	28	1	39	61
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	6.0	8.7	4.1	8.7	11.3	0	0	0	0	0	3	3	30	43	21	43	57
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.9	3.1	14.9	14.9	5.1	0	0	0	0	0	1	10	15	74	74	26	
合計	25.6	23.0	2.7	29.0	22.3	16.1	14.4	25.9	20.7	20.3	101.9	98.1	13	12	1	15	11	8	7	13	10	10	51	49

(d) 一つ抜き法
(10クラス; 誤判別率 0.510)

図2-29 16画素×16画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによるダイズ(II)葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度(10回の訓練の平均), 下段数値は相対値(単位: %)を示す。

	判別されたクラス										合計						
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤					
正	8.7	1.4	0.9	0.0	0.0	0.0	8.7	2.3	79%	13%	8%	0%	0%	79%	21%		
しい	0.0	11.0	1.0	0.0	0.0	11.0	1.0	0	92	8	0	0	92	8			
い	0.3	1.7	9.9	0.1	0.0	9.9	2.1	3	14	82	1	0	82	18			
ク	0.0	0.0	0.6	11.4	0.0	11.4	0.6	0	0	5	95	0	95	5			
ラ	0.6	0.0	0.1	1.0	10.3	10.3	1.7	5	0	1	8	86	86	14			
ス	9.6	14.1	12.5	12.5	10.3	51.3	7.7	16	25	21	21	17	87	13			
合計											16	25	21	21	17	87	13

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.131)

	判別されたクラス										合計						
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤					
正	6.5	2.7	1.7	0.0	0.1	6.5	4.5	59%	25%	15%	0%	1%	59%	41%			
しい	0.7	10.0	1.3	0.0	0.0	10.0	2.0	6	83	11	0	0	83	17			
い	1.5	2.0	7.7	0.8	0.0	7.7	4.3	13	17	63	7	0	63	37			
ク	0.0	0.1	2.1	9.8	0.0	9.8	2.2	0	1	18	81	0	81	19			
ラ	0.9	0.0	0.6	1.6	8.9	8.9	3.1	8	0	5	13	74	74	26			
ス	9.6	14.8	13.4	12.2	9.0	42.9	16.1	16	25	23	21	15	73	27			
合計											16	25	23	21	15	73	27

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.273)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	6.0	1.4	1.0	1.0	0.7	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	5.0
しい	1.1	7.3	1.6	0.8	1.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	7.3	4.7
い	0.0	0.0	10.6	0.4	0.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	1.4
ク	0.0	0.2	0.9	9.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	9.8	2.2
ラ	0.1	0.2	1.0	1.3	8.2	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	8.2	3.8
ス	0.0	0.2	0.0	0.8	2.5	7.2	0.7	0.6	0.0	0.0	7.2	4.8
合計	7.2	11.3	15.1	14.4	14.6	12.7	12.1	9.1	12.4	10.1	81.7	37.3
	6	9	14	12	12	11	10	8	10	8	69	31

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.313)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	3.7	2.8	1.6	1.2	0.6	1.0	0.0	0.0	0.1	0.0	3.7	7.3
しい	1.8	5.8	1.8	1.5	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	6.2
い	0.9	0.0	8.9	1.2	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	3.1
ク	0.1	0.2	2.8	7.1	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	4.9
ラ	1.0	0.2	1.4	1.7	5.6	1.1	0.9	0.0	0.1	0.0	5.6	6.4
ス	0.0	0.6	0.3	0.9	3.9	4.0	2.0	0.3	0.0	0.0	4.0	8.0
合計	7.5	13.2	16.9	14.0	14.6	9.6	14.9	7.0	10.9	10.4	58.0	61.0
	6	11	14	12	12	8	13	6	9	9	49	51

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.513)

図2-30 16画素×16画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによるカラシナ葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度（10回の訓練の平均）、下段数値は相対値（単位：%）を示す。

判別されたクラス											合計	
● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●											正 誤	
●	18.7	1.7	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.7	5.3
	78%	7%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	78%	22%
正	6.6	11.4	3.3	1.0	1.7	11.4	12.6					
し	28	47	14	4	7	47	53					
い	8.0	0.0	11.9	3.8	0.3	11.9	12.1					
ク	33	0	50	16	1	50	50					
ラ	1.3	3.2	4.3	9.4	5.8	9.4	14.6					
ス	5	13	18	40	24	40	60					
●	0.0	3.1	3.1	6.7	11.1	11.1	12.9					
	0	13	13	28	46	46	54					
合計	34.6	19.4	26.2	20.9	18.9	62.5	57.5					
	29	16	22	17	16	52	48					

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.479)

判別されたクラス											合計	
● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●											正 誤	
●	18.6	1.7	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.6	5.4
	78%	7%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	78%	22%
正	6.9	10.9	3.6	1.1	1.5	10.9	13.1					
し	29	45	15	5	6	45	55					
い	8.0	0.4	11.0	4.6	0.0	11.0	13.0					
ク	33	2	46	19	0	46	54					
ラ	1.7	2.6	5.1	8.0	6.6	8.0	16.0					
ス	7	11	21	33	28	33	67					
●	0.0	2.9	2.7	7.9	10.5	10.5	13.5					
	0	12	11	33	44	44	56					
合計	35.2	18.5	26.1	21.6	18.6	59.0	61.0					
	29	15	22	18	16	49	51					

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.508)

判別されたクラス											合計	
● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●											正 誤	
●	14.7	3.8	2.3	0.5	1.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	14.7	9.3
	61%	16%	10%	2%	4%	0%	7%	0%	0%	0%	61%	39%
●	6.1	10.5	0.5	2.7	1.2	0.2	1.9	0.8	0.0	0.1	10.5	13.5
	25	45	2	11	5	1	8	3	0	0	45	55
●	3.2	4.4	9.1	2.0	1.5	0.4	1.2	2.0	0.2	0.0	9.1	14.9
	13	18	39	8	6	2	5	8	1	0	39	61
正	0.4	5.3	1.3	8.7	3.1	1.3	2.0	1.0	0.9	0.0	8.7	15.3
し	2	22	5	37	13	5	8	4	4	0	37	63
い	1.5	2.0	2.5	3.0	8.9	1.2	0.9	0.2	1.6	2.2	8.9	15.1
	6	8	10	13	37	5	4	1	7	9	37	63
ク	0.0	2.3	0.0	2.8	5.0	1.2	2.0	7.5	0.5	2.7	1.2	22.8
	0	10	0	12	21	5	8	31	2	11	5	95
ラ	1.4	1.1	0.9	1.2	1.6	2.0	7.2	3.3	0.7	4.6	7.2	16.8
	6	5	4	5	7	8	29	14	3	19	29	71
●	1.0	0.1	3.2	0.9	0.9	0.6	2.1	8.9	1.4	4.9	8.9	15.1
	4	0	13	4	4	3	9	37	6	20	37	63
●	0.0	0.0	0.0	4.3	1.9	1.2	4.6	1.9	7.1	3.0	7.1	16.9
	0	0	0	18	8	5	19	8	29	13	29	71
●	0.0	0.0	0.2	0.8	3.4	0.3	2.6	4.4	3.7	8.6	8.6	15.4
	0	0	1	3	14	1	11	18	15	37	37	63
合計	28.3	29.5	20.0	26.9	28.5	8.4	26.2	30.0	16.1	26.1	84.9	155.1
	12	12	8	11	12	4	11	12	7	11	35	65

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.646)

判別されたクラス											合計	
● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●											正 誤	
●	12.1	6.1	3.0	0.1	0.9	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	12.1	11.9
	50%	25%	13%	0%	4%	0%	8%	0%	0%	0%	50%	50%
●	6.2	10.7	0.5	3.1	1.0	0.7	1.5	0.3	0.0	0.0	10.7	13.3
	26	45	2	13	4	3	6	1	0	0	45	55
●	2.4	5.6	7.7	2.9	1.3	0.7	1.5	1.9	0.0	0.0	7.7	16.3
	10	29	33	12	5	3	6	8	0	0	33	67
正	0.5	7.7	1.3	5.2	4.4	1.5	2.4	1.0	0.0	0.0	5.2	18.8
し	2	33	5	22	18	6	10	4	0	0	22	78
い	1.5	2.1	3.1	4.3	5.4	3.0	0.7	0.4	1.7	1.8	5.4	18.6
	6	9	13	18	21	13	3	2	7	8	21	79
ク	0.0	3.6	0.0	2.5	4.7	0.8	1.2	8.0	0.6	2.6	0.8	23.2
	0	15	0	10	20	3	5	33	3	11	3	97
ラ	1.9	0.6	1.0	1.6	1.4	3.4	5.2	3.9	0.5	4.5	5.2	18.8
	8	3	4	7	6	14	21	16	2	19	21	79
●	1.0	0.3	2.2	1.6	0.9	0.5	2.9	8.7	0.6	5.3	8.7	15.3
	4	1	9	7	4	2	12	36	3	22	36	64
●	0.0	0.0	0.0	4.4	2.8	2.2	4.8	2.3	4.8	2.7	4.8	19.2
	0	0	0	18	12	9	20	10	20	11	20	80
●	0.0	0.0	0.3	0.9	3.6	1.0	2.7	4.3	2.5	8.7	8.7	15.3
	0	0	1	4	15	4	11	18	10	37	37	63
合計	25.6	36.7	19.1	26.6	26.4	13.8	24.7	30.8	10.7	25.6	69.3	170.7
	11	15	8	11	11	6	10	13	4	11	29	71

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.711)

図2-31 16画素×16画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによるソバ粒形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度（10回の訓練の平均），下段数値は相対値（単位：％）を示す。

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	19.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.1	0.9
	95%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	5%
正	2.0	16.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5	3.5
し	10	82	8	0	0	0	0	0	0	0	82	18
い	0.0	4.8	10.8	3.4	1.0	10.8	9.2					
ク	0	24	54	17	5	54	46					
ラ	0.0	0.0	3.0	14.5	2.5	14.5	5.5					
ス	0	0	15	72	13	72	28					
	0.0	0.0	1.0	2.3	16.7	16.7	3.3					
	0	0	5	12	83	83	17					
合計	21.1	22.2	16.3	20.2	20.2	77.6	22.4					
	21	23	16	20	20	78	22					

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.224)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	19.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.1	0.9
	95%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	5%
正	1.4	16.7	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	3.3
し	7	83	10	0	0	0	0	0	0	0	83	17
い	0.0	6.0	9.1	3.9	1.0	9.1	10.9					
ク	0	30	46	19	5	46	54					
ラ	0.0	0.0	3.5	14.1	2.4	14.1	5.9					
ス	0	0	18	70	12	70	30					
	0.0	0.0	1.6	1.7	16.7	16.7	3.3					
	0	0	8	9	83	83	17					
合計	20.5	23.6	16.1	19.7	20.1	75.7	24.3					
	21	23	16	20	20	76	24					

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.243)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	15.1	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	4.9
	75%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	75%	25%
	4.0	15.9	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.9	4.1
	20	79	0	1	0	0	0	0	0	0	79	21
	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0
	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100	0
正	0.2	0.4	1.0	15.6	2.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	15.6	4.4
し	1	2	5	78	10	4	0	0	0	0	78	22
い	0.0	1.0	0.0	2.4	11.1	1.9	1.1	2.5	0.0	0.0	11.1	8.9
ク	0	5	0	12	55	10	6	12	0	0	55	45
ラ	0.0	0.2	0.0	1.8	1.6	10.8	1.8	1.8	1.7	0.3	10.8	9.2
ス	0	1	0	9	8	53	9	9	2	53	47	
	0.0	0.1	0.0	0.7	4.4	2.2	5.7	3.8	3.1	0.0	5.7	14.3
	0	1	0	4	21	11	28	19	16	0	28	72
	0.0	0.0	0.1	0.0	1.2	3.4	3.1	5.2	6.6	0.4	5.2	14.8
	0	0	1	0	6	17	16	25	33	2	25	75
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	1.8	15.1	0.7	15.1	4.9
	0	0	0	0	0	0	12	9	75	4	75	25
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.4	1.9	16.3	16.3	3.7
	0	0	0	0	0	0	7	2	10	81	81	19
合計	19.3	22.5	21.1	20.6	20.3	19.1	15.5	15.5	28.4	17.7	130.8	69.2
	10	11	11	10	10	10	8	8	13	9	65	35

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.346)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	14.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	5.9
	71%	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	71%	29%
	4.0	15.6	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.6	4.4
	20	77	0	2	1	0	0	0	0	0	77	23
	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0
	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100	0
正	0.4	0.7	1.0	13.5	3.1	0.9	0.4	0.0	0.0	0.0	13.5	6.5
し	2	4	5	67	15	5	2	0	0	0	67	33
い	0.0	0.2	0.0	5.4	10.5	1.2	2.5	0.0	0.2	0.0	10.5	9.5
ク	0	1	0	27	52	6	13	0	1	0	52	48
ラ	0.0	0.0	0.1	3.9	1.5	8.5	3.8	0.1	1.1	1.0	8.5	11.5
ス	0	0	1	19	8	42	18	1	6	5	42	58
	0.0	0.1	0.0	1.5	5.0	1.6	7.0	1.7	3.1	0.0	7.0	13.0
	0	1	0	8	24	8	34	9	16	0	34	66
	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	4.4	6.3	0.2	5.9	0.9	0.2	19.8
	0	0	0	0	12	22	31	1	29	5	29	99
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	1.2	13.3	2.2	13.3	6.7
	0	0	0	0	0	0	17	6	66	11	66	34
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.1	1.4	1.5	16.1	16.1	3.9
	0	0	0	0	0	5	1	7	7	80	80	20
合計	18.5	22.5	21.1	24.6	22.5	17.5	23.4	4.6	25.1	20.2	133.8	81.2
	9	11	11	12	11	9	12	2	13	10	59	41

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.406)

図2-32 16画素×16画素の形状分布を入力ボタンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによるダットンソバ粒形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度（10回の訓練の平均）、下段数値は相対値（単位：%）を示す。

		判別されたクラス										合計	
		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正 誤	
	●	29.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.6	0.4
	●	99%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	99%	1%
正	●	1.4	25.8	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.8	4.2
し	●	5	86	9	0	0	0	0	0	0	0	86	14
い	●	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0
ク	●	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100	0
ラ	●	0.0	0.0	0.7	28.5	0.8	28.5	1.5				28.5	1.5
ス	●	0	0	2	95	3	95	5				95	5
	●	0.0	0.0	0.0	0.5	29.5	29.5	0.5				29.5	0.5
	●	0	0	0	2	98	98	2				98	2
合計		31.0	26.2	33.5	29.0	30.3	143.4	6.6					
		21	17	23	19	20	96	4					

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.044)

		判別されたクラス										合計	
		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正 誤	
	●	29.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.6	0.4
	●	99%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	99%	1%
正	●	1.8	26.1	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.1	3.9
し	●	6	87	7	0	0	0	0	0	0	0	87	13
い	●	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0
ク	●	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100	0
ラ	●	0.0	0.0	1.3	27.9	0.8	27.9	2.1				27.9	2.1
ス	●	0	0	4	93	3	93	7				93	7
	●	0.0	0.0	0.0	0.7	29.3	29.3	0.7				29.3	0.7
	●	0	0	0	2	98	98	2				98	2
合計		31.4	26.5	33.4	28.6	30.1	142.9	7.1					
		21	18	22	19	20	95	5					

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.047)

		判別されたクラス										合計	
		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正 誤	
	●	27.3	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.3	2.7
	●	91%	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	91%	9%
	●	1.1	28.7	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.7	1.3
	●	4	95	0	1	0	0	0	0	0	0	95	5
正	●	0.7	0.6	25.9	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	4.1
し	●	2	2	87	0	9	0	0	0	0	0	87	13
い	●	0.0	3.2	0.0	26.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.0	4.0
ク	●	0	11	0	86	3	0	0	0	0	0	86	14
ラ	●	0.0	0.0	0.0	0.4	29.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4	0.6
ス	●	0	0	0	1	98	1	0	0	0	0	98	2
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.3	0.7	0.0	0.0	0.0	29.3	0.7
	●	0	0	0	0	0	98	2	0	0	0	98	2
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0
	●	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	0
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.8	0.3	0.9	28.8	1.2	
	●	0	0	0	0	0	0	96	1	3	96	4	
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.4	21.8	6.6	21.8	8.2
	●	0	0	0	0	0	1	0	5	72	22	72	28
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.4	26.5	26.5	3.5
	●	0	0	0	0	0	0	0	7	5	88	88	12
合計		29.1	35.2	25.9	26.6	33.0	29.7	30.7	32.3	23.5	34.0	273.7	26.3
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91	9

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.088)

		判別されたクラス										合計	
		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正 誤	
	●	26.7	2.6	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.7	3.3
	●	89%	9%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	89%	11%
	●	1.6	27.1	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.1	2.9
	●	5	91	0	4	0	0	0	0	0	0	91	9
正	●	1.2	1.0	25.3	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.3	4.7
し	●	4	3	85	0	8	0	0	0	0	0	85	15
い	●	0.0	3.5	0.0	25.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	4.1
ク	●	0	12	0	86	2	0	0	0	0	0	86	14
ラ	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	29.9	0.0	0.0	0.0	0.0	29.9	0.1
ス	●	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0
	●	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	0
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.8	0.8	1.4	27.8	2.2
	●	0	0	0	0	0	0	92	3	5	92	8	
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	1.2	18.3	9.8	18.3	11.7
	●	0	0	0	0	0	2	0	4	61	33	61	39
	●	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	3.5	24.3	24.3	5.7
	●	0	0	0	0	0	0	0	7	12	81	81	19
合計		29.5	34.2	25.9	27.6	32.9	30.6	30.0	31.2	22.6	35.5	250	35.0
		10	11	9	9	11	10	10	10	8	12	88	12

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.117)

図2-33 32 画素×32 画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによる雑草種子粒形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度 (10 回の訓練の平均), 下段数値は相対値 (単位: %) を示す。

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
	16.5	2.5	0.0	0.0	0.0	16.5	2.5
	87%	13%	0%	0%	0%	87%	13%
正	1.3	6.3	2.4	0	0	6.3	3.7
し	13	63	24	0	0	63	37
い	0.0	2.0	14.0	1.0	1.0	14.0	4.0
ク	0	11	77	6	6	77	23
ラ	0.0	0.0	0.4	18.9	0.7	18.9	1.1
ス	0	0	2	94	4	94	6
	0.0	0.0	0.0	3.0	17.0	17.0	3.0
	0	0	0	15	85	85	15
合計	17.8	10.8	16.8	22.9	18.7	72.7	14.3
	20	12	19	27	22	84	16

(a) 再代入法
(5クラス; 誤判別率 0.164)

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
	16.1	2.8	0.1	0.0	0.0	16.1	2.9
	84%	15%	1%	0%	0%	84%	16%
正	2.0	5.5	2.5	0.0	0.0	5.5	4.5
し	20	55	25	0	0	55	45
い	0.0	2.5	12.7	1.8	1.0	12.7	5.3
ク	0	14	70	10	6	70	30
ラ	0.0	0.0	0.3	18.7	1.0	18.7	1.3
ス	0	0	2	93	5	93	7
	0.0	0.0	0.0	3.0	17.0	17.0	3.0
	0	0	0	15	85	85	15
合計	18.1	10.8	15.6	23.5	19.0	70.0	17.0
	21	12	18	27	22	80	20

(c) 一つ抜き法
(5クラス; 誤判別率 0.195)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	17.5	0.9	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5	1.5
	92%	5%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	92%	8%
	1.5	6.3	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	3.7
	15	63	22	0	0	0	0	0	0	0	63	37
	0.6	1.0	10.4	0.9	1.1	3.0	0.0	0.0	0.1	0.9	10.4	7.6
	3	6	57	5	6	17	0	0	1	5	57	43
正	0.2	0.4	3.8	8.6	2.0	1.1	2.9	1.0	0.0	0.0	8.6	11.4
し	1	2	19	42	10	6	15	5	0	0	42	58
い	0.0	0.0	6.2	3.4	1.8	2.8	5.8	0.0	0.0	0.0	1.8	18.2
ク	0	0	31	17	9	14	29	0	0	0	9	91
ラ	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	10.3	4.5	0.1	1.6	0.0	10.3	9.7
ス	0	0	18	0	0	51	22	1	8	0	51	49
	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	1.4	14.4	1.7	0.2	0.1	14.4	5.6
	0	0	0	11	0	7	71	9	1	1	71	29
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	9.6	7.8	0.4	1.2	7.8	12.2
	0	0	0	0	0	5	48	39	2	6	39	61
	0.0	0.0	0.3	0.3	0.4	3.9	0.8	1.7	8.1	4.5	8.1	11.9
	0	0	2	2	2	19	4	9	40	22	40	60
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.1	1.3	0.1	16.7	16.7	3.3
	0	0	0	0	0	9	1	7	1	82	82	18
合計	19.8	8.6	26.8	15.6	5.3	25.3	38.1	13.6	10.5	23.4	101.9	85.1
	11	5	14	8	3	14	19	7	6	13	54	46

(b) 再代入法
(10クラス; 誤判別率 0.455)

図2-34 16画素×16画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した多層パーセプトロンによるセイヨウナシ果形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度 (10回の訓練の平均), 下段数値は相対値 (単位: %) を示す, 一つ抜き法による10クラスの判別では, 学習が収束しなかった。

2.3.2 考察

クラス間変異に対するクラス内変異の大きさが材料ごとに異なるため、材料によって誤判別率が異なった。ダイズ (I) 葉形、雑草種子粒形は、相対的なクラス内変異が小さく (図 2-9b, g), クワ葉形、ダイズ (II) 葉形、ソバ粒形は、相対的なクラス内変異が大きい (図 2-9a, c, e) ことから、それが示唆される。

学習条件については、学習可能性の観点からは、教師データの入力パターンでは平均形状が、入力画像サイズは小さいほどよく、汎化能力の観点からは、教師データの入力パターンは形状分布が、入力画像サイズは小さいほどよかった。しかし、この両方を考慮すると、今回の実験の結果だけからは、最適な構造や教師データを決定できないという、1.3.4 のカエデ葉形と同じ結論が得られる。

クワ葉形、カラシナ葉形のように複雑な変異をもつ植物器官形状を含め、十分低い誤判別率が得られた。このように、画像入力をもつ多層パーセプトロンは、形状のもつ情報全体を使えるために、植物器官形状に基づく種や品種・系統などの判別に有効に働くと考えられる。

そして、画像入力をもつ多層パーセプトロンは、構造や学習のための各種の内部パラメタが固定されていたにもかかわらず、それらを変更することなく、すべての材料にそのまま適用できたことから、さまざまな対象に適用できる汎用性を示せた。

2.3.3 むすび

本節では、各種植物器官形状による種や品種・系統の判別モデルとしての、非線形ニューラルネットワークである多層パーセプトロンに基づく画像入力ニューラルネットワークの有効性と汎用性を検討した。その結果、すべての材料に判別モデルを変更することなく適用でき、十分低い誤判別率を得た。たとえば、雑草種子粒形では 11.7% の誤判別率で 10 種の判別が行えた。したがって、多層パーセプトロンに基づく画像入力ニューラルネットワークの、精度よく判別できる有効性とさまざまな形状にも適用できる汎用性が明らかとなった。

2.4 線形ニューラルネットワークに基づく植物形状判別モデルの有効性と汎用性の検討

本節では、2.2.1 で述べた材料の植物器官形状による種や品種・系統の判別モデルとしての、線形のホップフィールドネットワーク (1.4.1 参照) および単純パーセプトロン (1.4.2 参照) に基づく画像入力ニューラルネットワークの有効性と汎用性を検討する。2.4.1 では、設定ごとに判別

の結果を示し、2.4.2では、結果に基づいて、適切な線形ニューラルネットワークのアーキテクチャ・構造や教師データ、線形ニューラルネットワークに基づく画像入力ニューラルネットワークの有効性と汎用性を考察する (Oide and Ninomiya, 2000a-b)。なお、線形ニューラルネットワークの構造や教師データの各種設定は、カエデ葉形による種判別と同様であるので、説明は省略する (1.4.3 参照)。

2.4.1 結果

入力画像サイズが小さく、かつ、クラス数が多い場合のうちの一部を除いて、すべての学習条件の組み合わせで学習が終了した。学習が完了しなかった学習条件の組み合わせを表 2-10 に示す。

材料ごと、入力画像サイズごとの誤判別率を図 2-35～図 2-42 に示す。形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンの場合に再代入法による誤判別率が低かったため、カエデ葉形も含めて、この場合の全材料の誤判別率を 1 枚のグラフにプロットしたのが図 2-43、判別結果の二元表が図 2-44～図 2-51 である。いずれも、学習が失敗した場合は、プロットされていない。

再代入法では、学習条件の組み合わせによって誤判別率が異なった。全材料に共通して、64 画素×64 画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンが、もっとも低い誤判別率を示した。一つ抜き法による誤判別率は、入力画像サイズが大きくなるにつれて低くなったが、他の学習条件による差は小さく、また、系統的なちがいも見いだせなかった。

どの材料、どの学習条件の組み合わせにおいても、再代入法による誤判別率は一つ抜き法による誤判別率を越えなかった。とくに、カラシナ葉形では、再代入法による誤判別率は極端に小さいのに一つ抜き法による誤判別率は高かった。

再代入法による誤判別率がもっとも低かった学習条件の組み合わせ (64 画素×64 画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロン) で、材料間で再代入法による誤判別率を比較すると (図 2-43)、カラシナ葉形の誤判別率はもっとも低く、30 クラスまで学習しても 0.1 未満だった。クラス数が 10 の場合では、低い順に、雑草種子粒形 (0.050)、カラシナ葉形 (0.084)、ダイズ (I) 葉形 (0.118)、カエデ葉形 (0.116)、セイヨウナシ果形 (0.214)、ダツタンソバ粒形 (0.220)、クワ葉形 (0.245)、ダイズ (II) 葉形 (0.290)、ソバ粒形 (0.475) だった。同じく一つ抜き法による誤判別率は、低い順に、雑草種子粒形 (0.063)、カエデ葉形 (0.202)、ダイズ (I) 葉形 (0.225)、ダツタンソバ粒形 (0.375)、セイヨウナシ果形 (0.444)、クワ葉形 (0.463)、ダイズ (II) 葉形 (0.465)、カラシナ葉形 (0.513)、ソバ粒形 (0.746) だった。

表2-10 学習が収束しなかった学習条件の組み合わせ

材料	画像サイズ	教師データ	クラス数
クワ葉形	16 ^{国素} × 16 ^{国素}	平均形状	10
ダイズ (I) 葉形	16 × 16	平均形状	35 以上
ダイズ (II) 葉形	16 × 16	形状分布	30 以上
		平均形状	10 以上
	32 × 32	平均形状	40 以上
ソバ粒形	16 × 16	平均形状	20 以上
ダットンソバ粒形	16 × 16	平均形状	15 以上

ここに示した組み合わせは，再代入法と一つ抜き法で共通である。

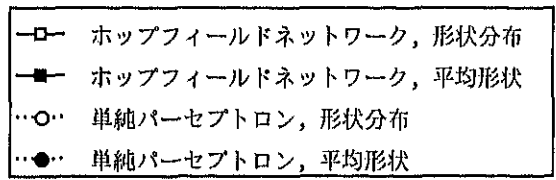
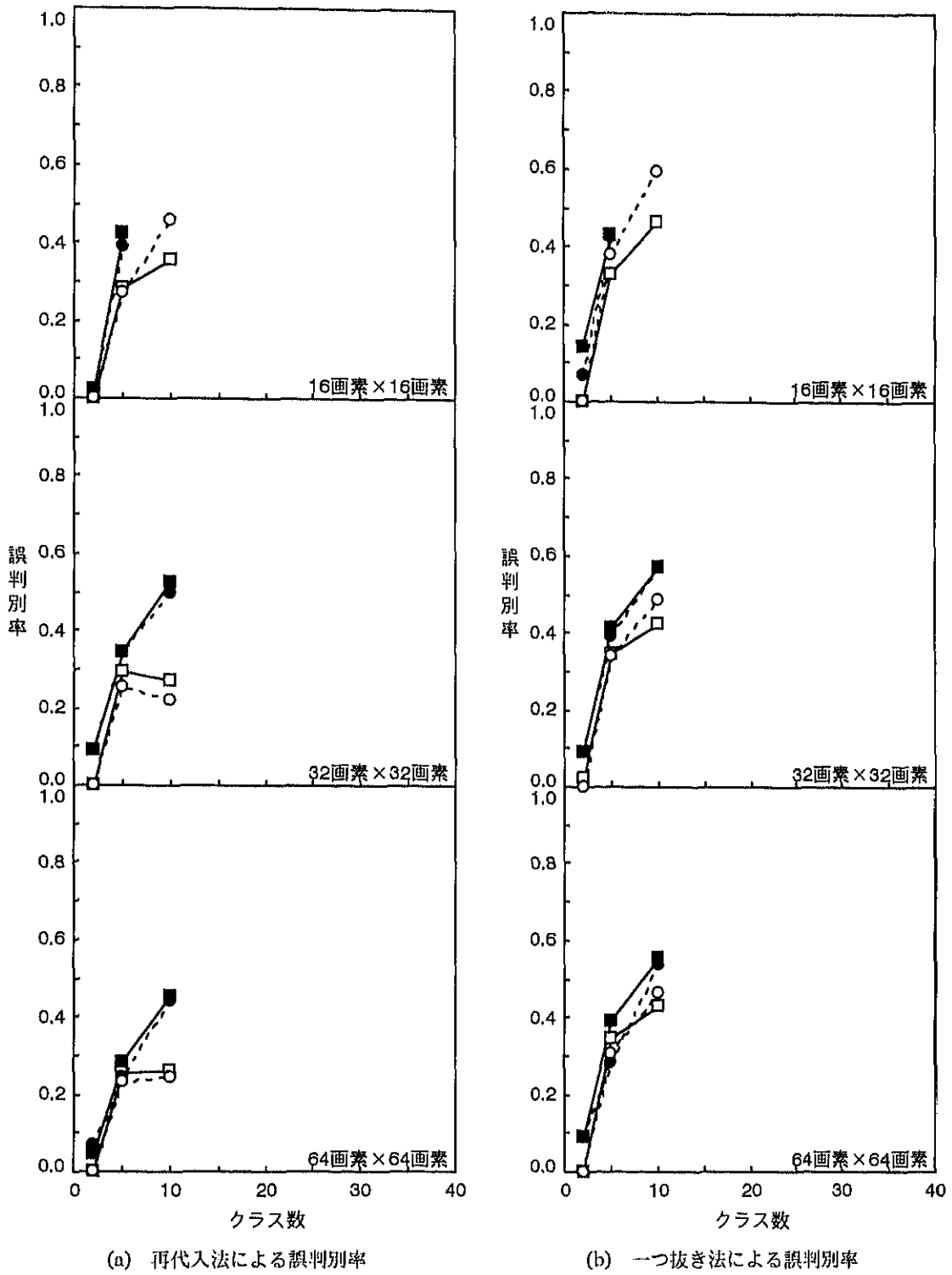
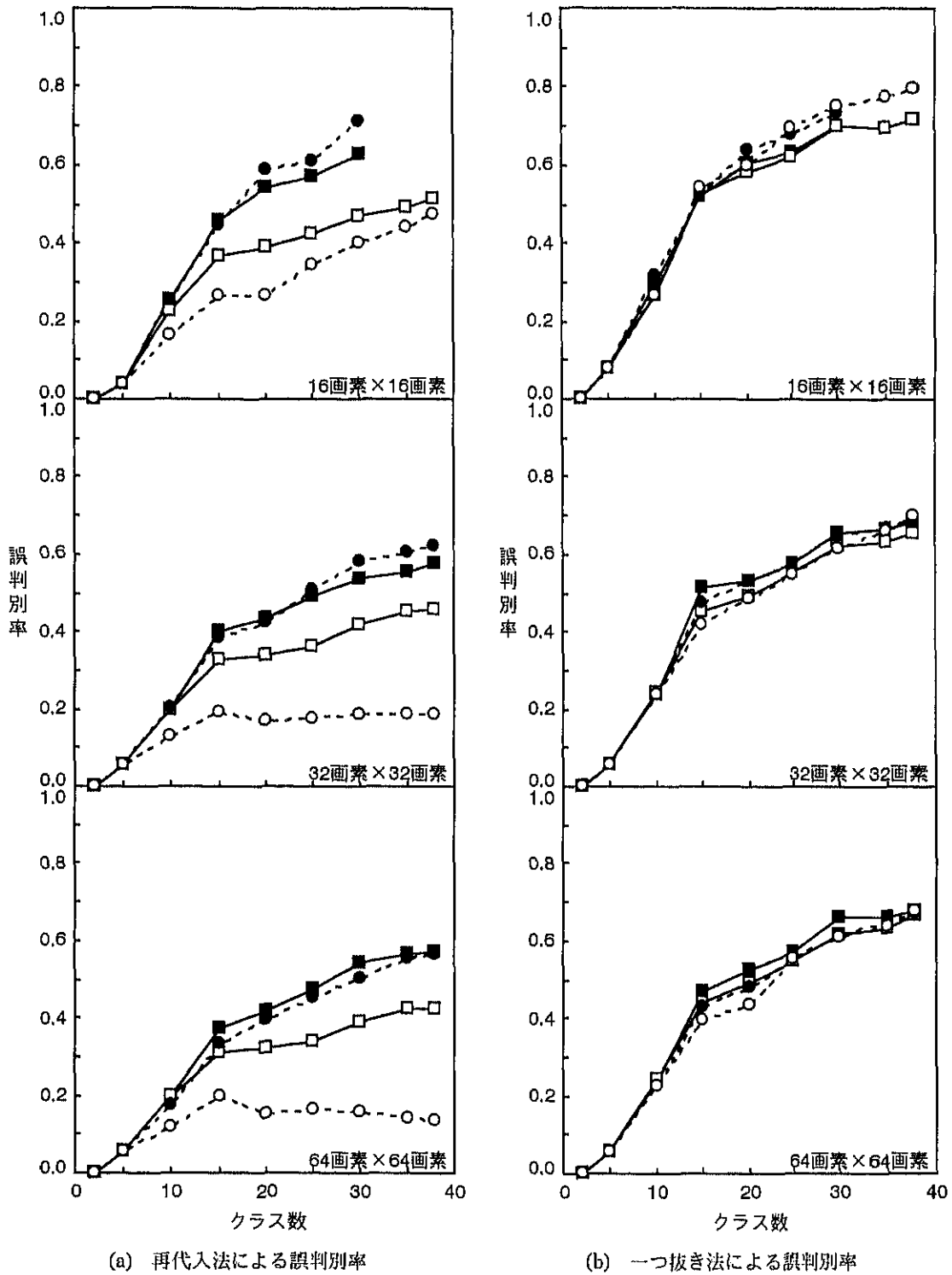


図2-35 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによるクワ葉形の誤判別率のクラス数にともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

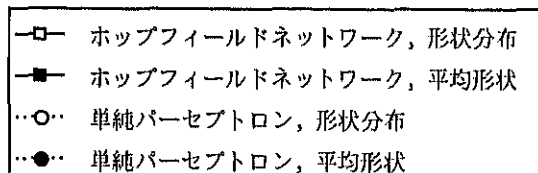
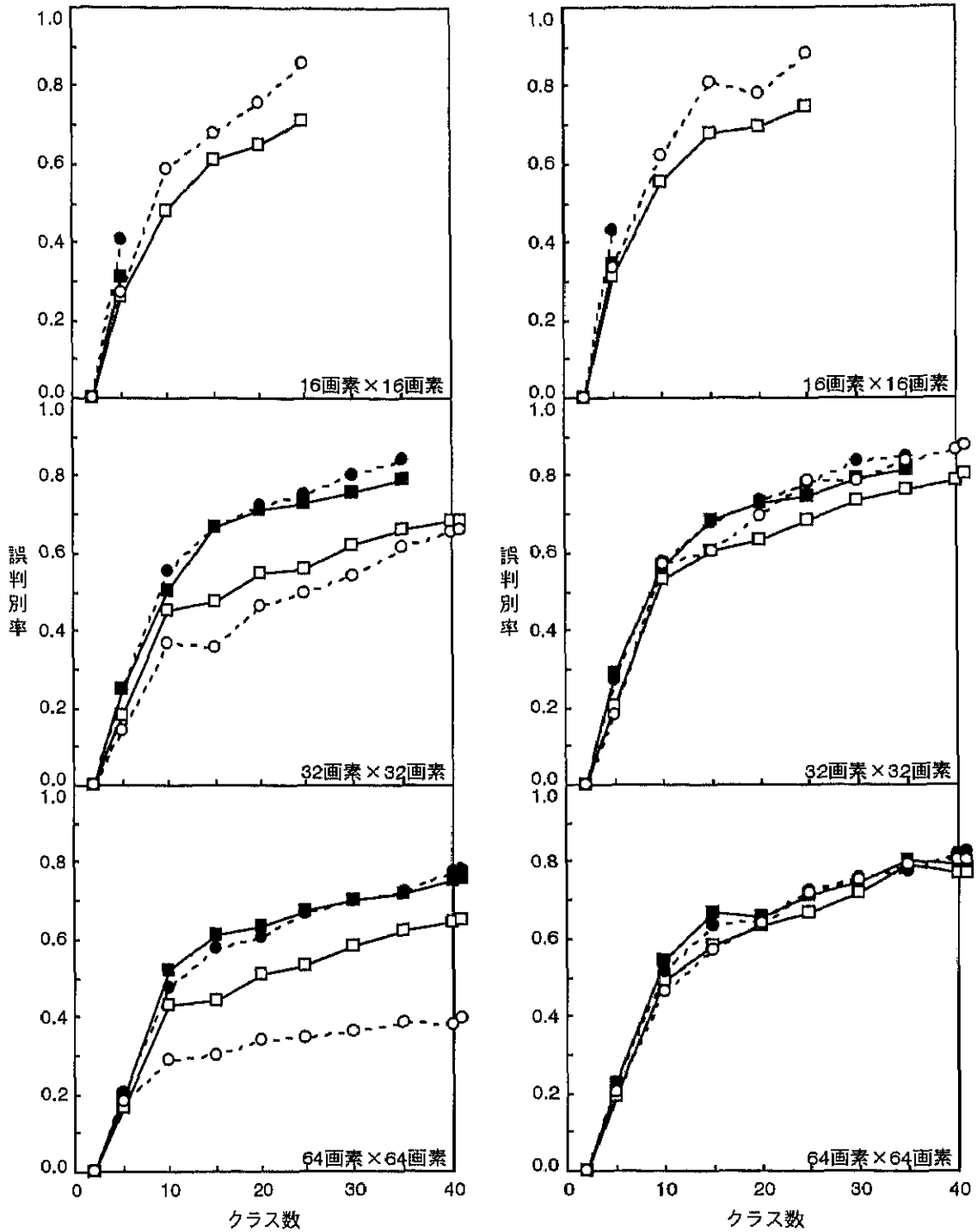


図2-36 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによるダイズ (I) 葉形の誤判別率のクラス数にともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

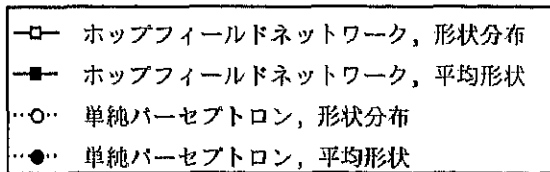


図2-37 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによるダイズ(II)葉形の誤判別率のクラス数ともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較

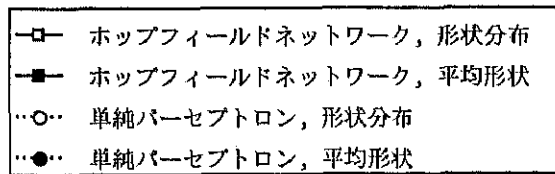
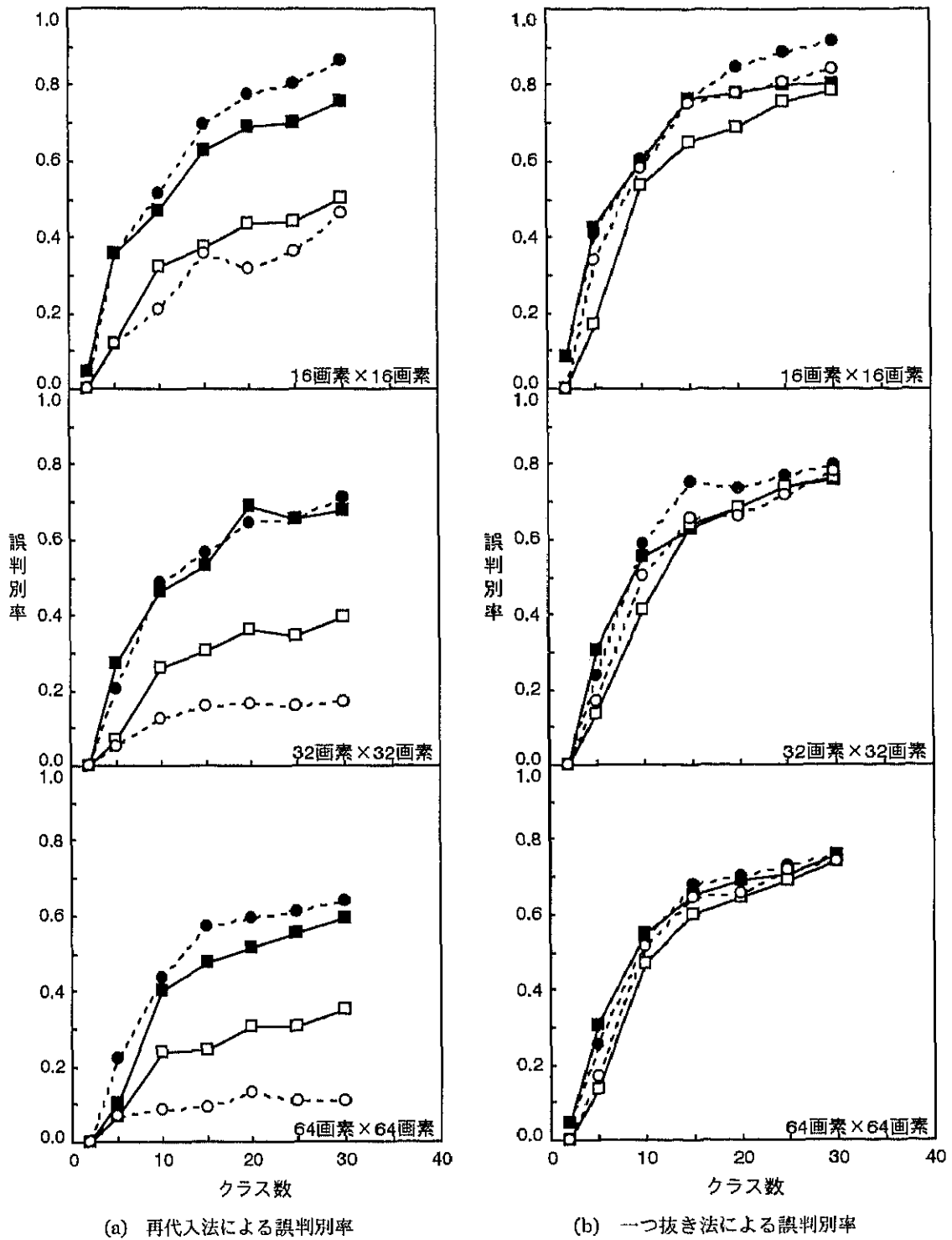


図2-38 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによるカラシナ葉形の誤判別率のクラス数ともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較

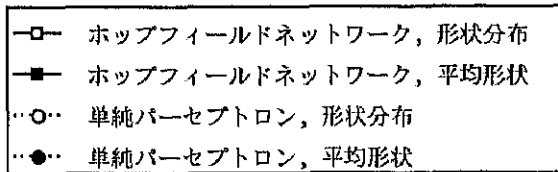
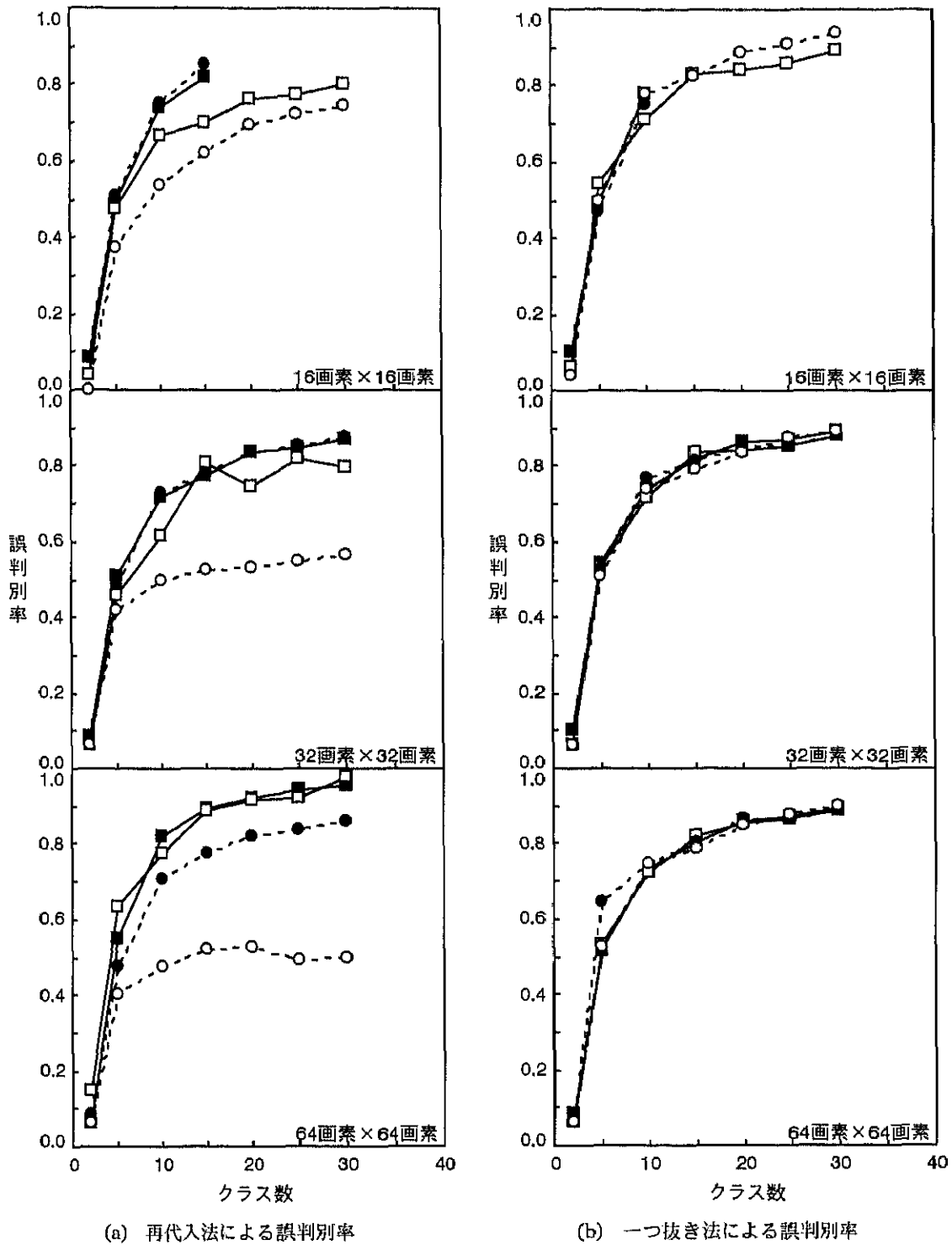
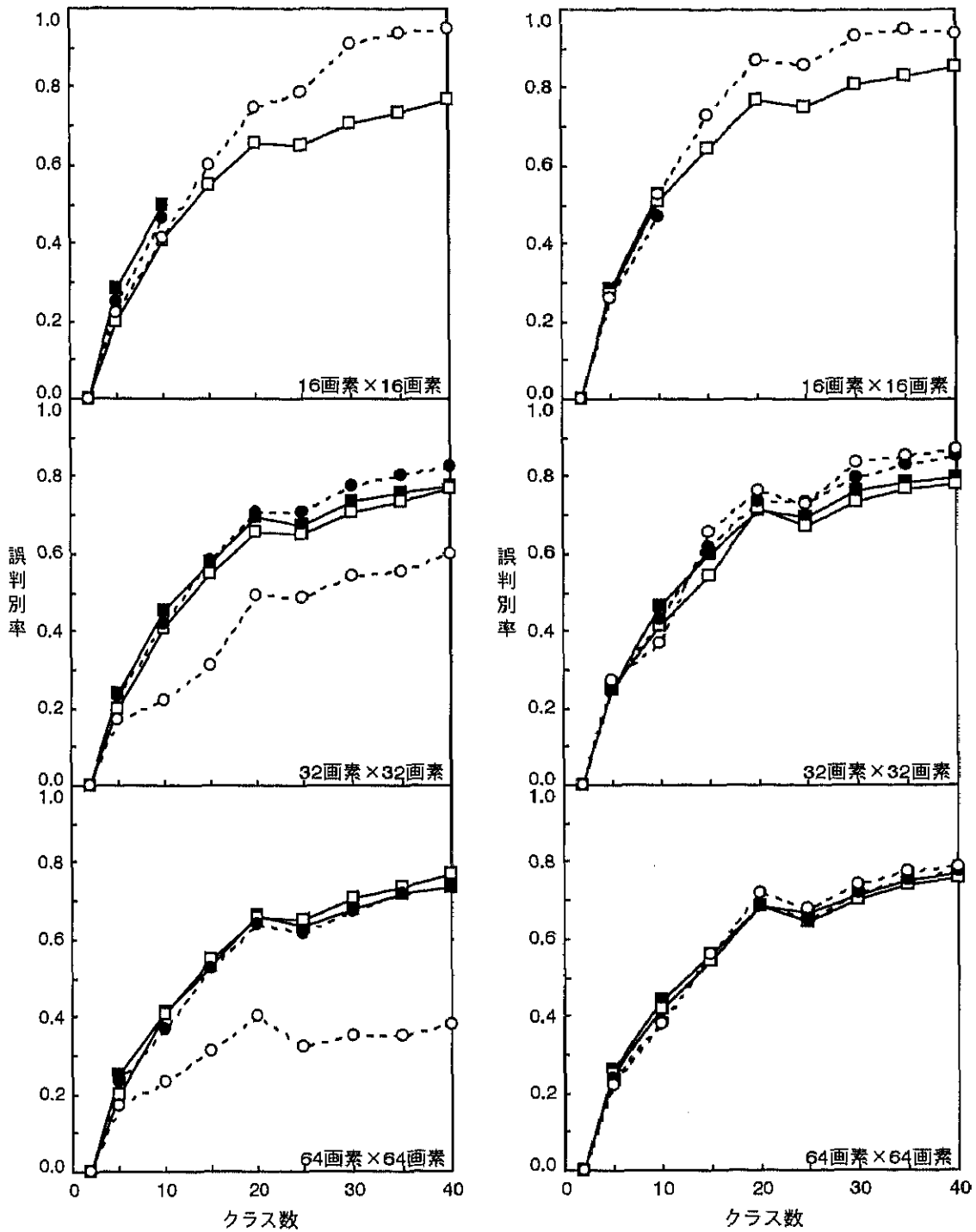


図2-39 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによるソバ粒形の誤判別率のクラス数にともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

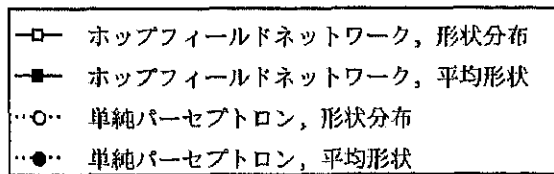


図2-40 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによるダットンソバ粒形の誤判別率のクラス数ともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較

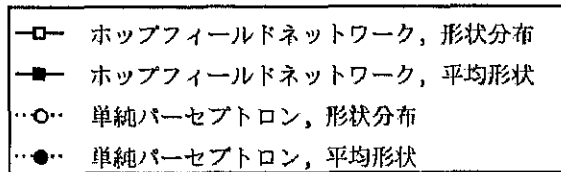
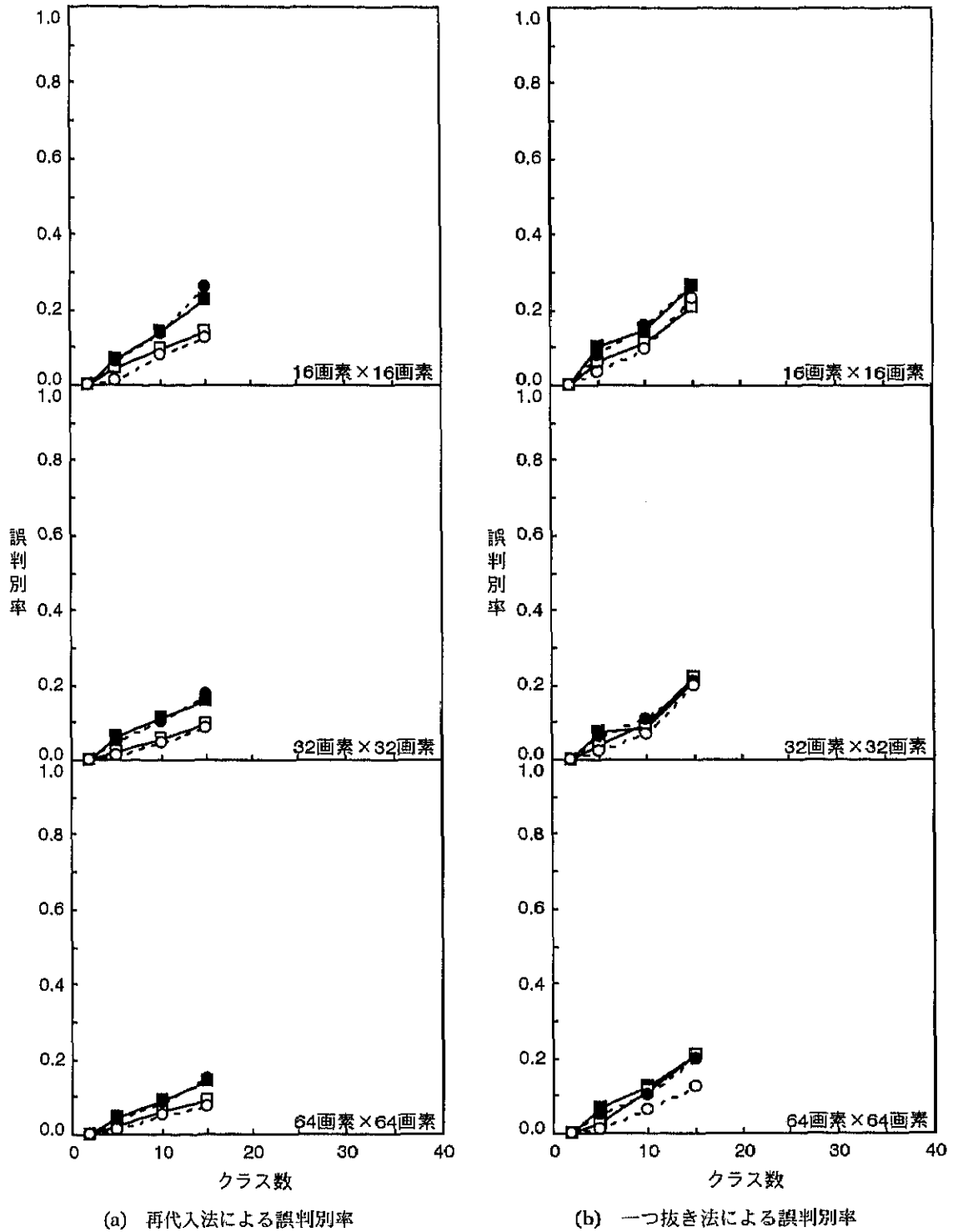
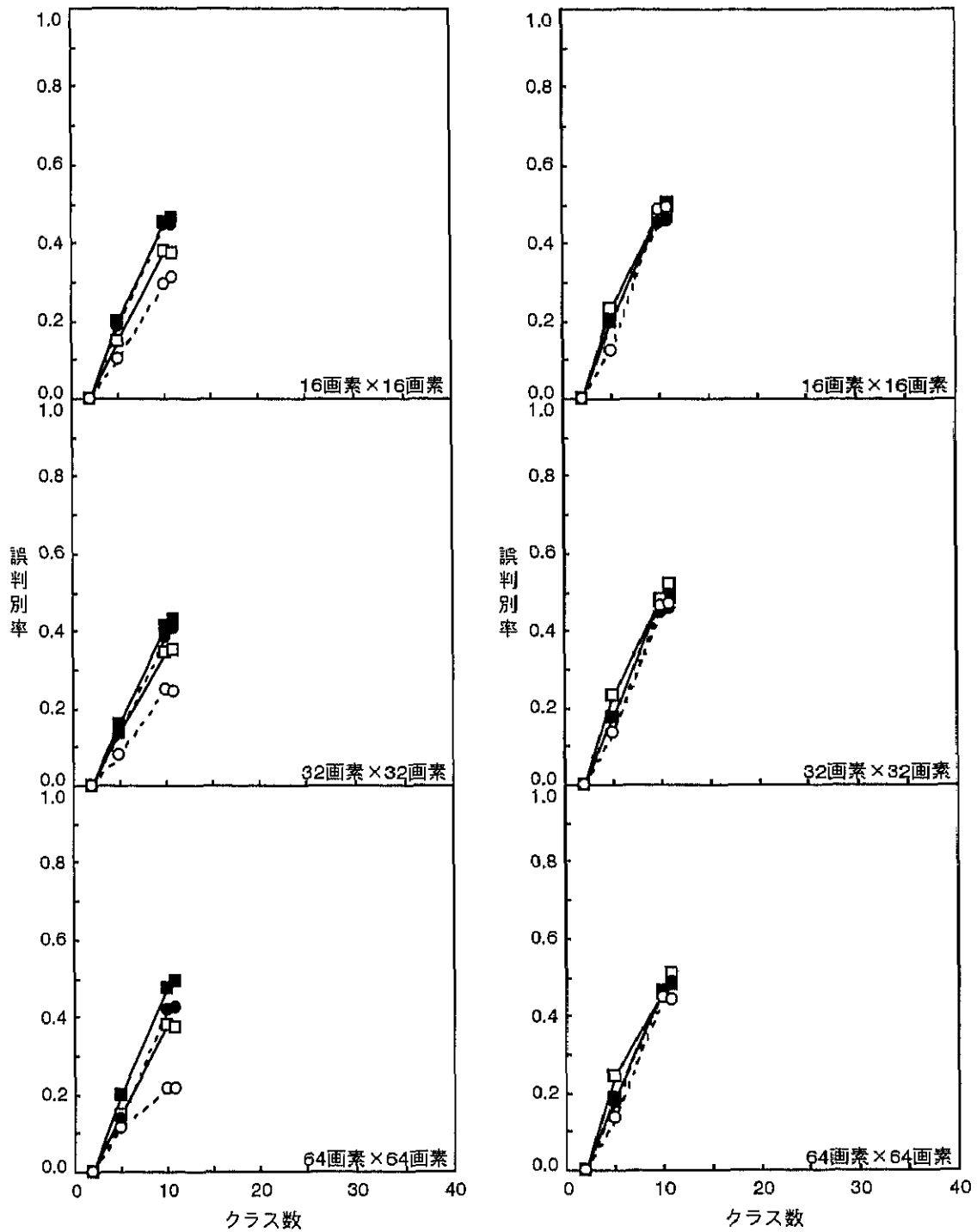


図2-41 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによる雑草種子粒形の誤判別率のクラス数にともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

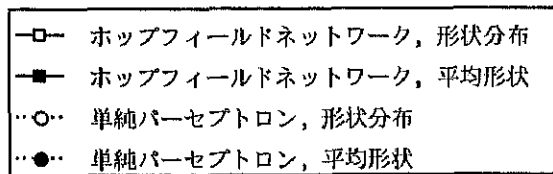
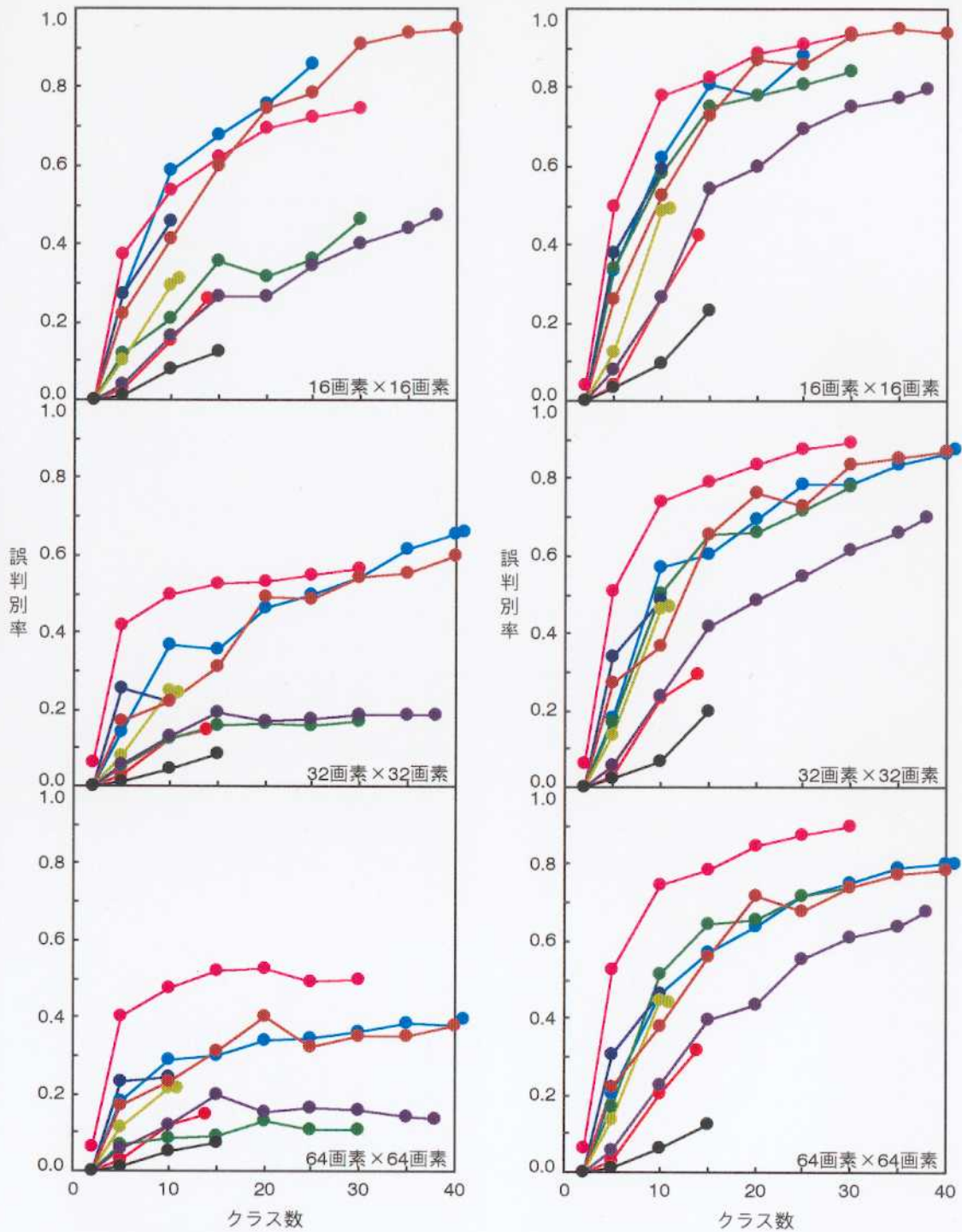


図2-42 入力画像サイズごとの線形ニューラルネットワークによるセイヨウナシ果形の誤判別率のクラス数にともなう変化のネットワークアーキテクチャおよび教師データの入力パターンによる比較



(a) 再代入法による誤判別率

(b) 一つ抜き法による誤判別率

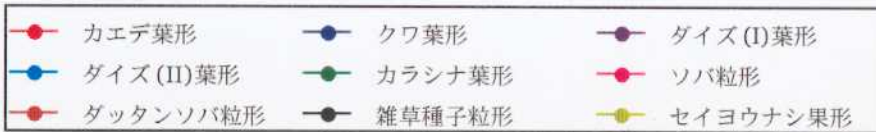


図2-43 入力画像サイズごとの形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによる誤判別率のクラス数ともなう変化の材料による比較

		判別されたクラス					合計	
		●	●	●	●	●	正	誤
		16	4	0	0	0	16	4
		80%	20%	0%	0%	0%	80%	20%
正しい クラス	●	6	11	0	0	0	11	6
	●	35	65	0	0	0	65	35
	●	3	1	10	1	0	10	5
	●	20	7	66	7	0	66	34
	●	0	1	1	17	1	17	3
	●	0	5	5	85	5	85	15
	●	0	0	3	1	19	19	4
	●	0	0	13	4	83	83	17
	●	0	0	3	1	19	19	4
	●	0	0	13	4	83	83	17
合計	25	17	14	19	20	73	22	
	26	18	15	20	21	77	23	

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.232)

		判別されたクラス					合計	
		●	●	●	●	●	正	誤
		14	5	1	0	0	14	6
		70%	25%	5%	0%	0%	70%	30%
正しい クラス	●	7	10	0	0	0	10	7
	●	41	59	0	0	0	59	41
	●	3	3	9	0	0	9	6
	●	20	20	60	0	0	60	40
	●	0	1	2	16	1	16	4
	●	0	5	10	80	5	80	20
	●	0	0	5	1	17	17	6
	●	0	0	22	4	74	74	26
	●	0	0	5	1	17	17	6
	●	0	0	22	4	74	74	26
合計	24	19	17	17	18	66	29	
	25	20	18	18	19	69	31	

(e) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.305)

		判別されたクラス										合計	
		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
		14	2	1	2	1	0	0	0	0	0	14	6
		70%	10%	5%	10%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	70%	30%
正しい クラス	●	0	15	2	0	0	0	0	0	0	0	15	2
	●	0	88	12	0	0	0	0	0	0	0	88	12
	●	1	3	12	1	0	0	0	0	0	0	12	5
	●	6	18	70	6	0	0	0	0	0	0	70	30
	●	3	1	2	11	0	0	0	0	0	0	11	6
	●	18	6	12	64	0	0	0	0	0	0	64	36
	●	2	3	0	0	9	1	0	0	0	0	9	6
	●	13	20	0	0	60	7	0	0	0	0	60	40
	●	0	0	0	1	3	16	1	1	0	0	16	6
	●	0	0	0	5	13	72	5	5	0	0	72	28
●	0	1	0	1	2	0	14	1	1	0	14	6	
●	0	5	0	5	10	0	70	5	5	0	70	30	
●	0	0	0	2	0	0	0	17	0	0	17	2	
●	0	0	0	11	0	0	0	89	0	0	89	11	
●	0	0	1	0	1	0	0	0	16	0	16	2	
●	0	0	6	0	6	0	0	88	0	0	88	12	
●	0	0	0	0	2	0	1	0	2	18	18	5	
●	0	0	0	0	9	0	4	0	9	78	78	22	
合計	20	25	18	18	18	17	16	19	19	18	142	46	
	10	12	10	10	10	9	9	10	10	10	76	24	

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.245)

		判別されたクラス										合計	
		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
		11	3	2	3	1	0	0	0	0	0	11	9
		55%	15%	10%	15%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	55%	45%
正しい クラス	●	4	5	7	1	0	0	0	0	0	0	5	12
	●	24	29	41	6	0	0	0	0	0	0	29	71
	●	3	4	9	1	0	0	0	0	0	0	9	8
	●	18	24	52	6	0	0	0	0	0	0	52	48
	●	7	0	1	8	1	0	0	0	0	0	8	9
	●	41	0	6	47	6	0	0	0	0	0	47	53
	●	3	2	0	2	8	0	0	0	0	0	8	7
	●	20	13	0	13	54	0	0	0	0	0	54	46
	●	0	2	0	2	4	9	3	1	0	1	9	13
	●	0	9	0	9	18	40	14	5	0	5	40	60
●	0	1	0	2	1	5	8	3	0	0	8	12	
●	0	5	0	10	5	25	40	15	0	0	40	60	
●	0	0	0	2	1	0	0	16	0	0	16	3	
●	0	0	0	11	5	0	0	84	0	0	84	16	
●	0	1	1	0	2	0	0	0	14	0	14	4	
●	0	6	6	0	11	0	0	0	77	0	77	23	
●	0	0	1	0	4	2	0	0	3	13	13	10	
●	0	0	4	0	17	9	0	0	13	57	57	43	
合計	28	18	21	21	22	16	11	20	17	14	101	87	
	14	10	11	11	12	9	6	11	9	7	54	46	

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.463)

図2-44 64画素×64画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによるクワ葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度，下段数値は相対値（単位：％）を示す。

	判別されたクラス										合計				
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤			
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	100%	0%		
正しい	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	100		
しい	0	0	11	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0		
クラス	0	0	0	9	1	9	1	0	0	0	90	10	0	100	
	0	0	0	2	8	8	2	0	0	0	20	80	0	20	
合計	10	10	11	11	9	48	3	20	20	21	21	18	94	6	6

(a) 再代入法
(5クラス; 誤判別率 0.059)

	判別されたクラス										合計				
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤			
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	100%	0%		
正しい	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	100		
しい	0	0	11	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0		
クラス	0	0	0	9	1	9	1	0	0	0	90	10	0	100	
	0	0	0	2	8	8	2	0	0	0	20	80	0	20	
合計	10	10	11	11	9	48	3	20	20	21	21	18	94	6	6

(c) 一つ抜き法
(5クラス; 誤判別率 0.059)

	判別されたクラス										合計				
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤			
	9	1	0	0	0	0	0	0	0	9	1	90%	10%		
正しい	0	12	1	0	0	0	0	0	0	12	1	0	92		
しい	0	0	9	1	0	0	0	0	0	9	1	0	0		
クラス	0	0	90	10	0	0	0	0	0	90	10	0	100		
	0	0	1	7	0	0	0	0	0	7	1	0	0		
正しい	0	0	13	87	0	0	0	0	0	87	13	0	87		
しい	0	0	0	1	10	0	0	0	0	10	1	0	0		
クラス	0	0	0	9	91	0	0	0	0	91	9	0	0		
	0	0	0	0	0	9	1	0	0	0	9	1	0	0	
正しい	0	0	0	0	0	0	10	0	0	10	0	0	100		
しい	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0		
クラス	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	10	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1	0	0
正しい	0	0	0	1	0	0	0	9	0	0	9	1	0	90	
しい	0	0	0	10	0	0	0	90	0	0	90	10	0	0	
クラス	0	0	0	0	0	0	1	0	8	1	8	2	0	0	
	0	0	0	0	0	0	10	0	80	10	80	20	0	0	
正しい	0	0	0	0	0	0	0	1	2	7	7	3	0	0	
しい	0	0	0	0	0	0	0	10	20	70	70	30	0	0	
合計	9	13	11	10	10	9	12	10	10	8	90	12	9	12	
	9	12	11	10	10	9	11	10	10	8	88	12	9	12	

(b) 再代入法
(10クラス; 誤判別率 0.118)

	判別されたクラス										合計			
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤		
	9	1	0	0	0	0	0	0	0	9	1	90%	10%	
正しい	0	12	1	0	0	0	0	0	0	12	1	0	92	
しい	0	1	7	2	0	0	0	0	0	7	3	0	0	
クラス	0	10	70	20	0	0	0	0	0	70	30	0	0	
	0	0	2	5	0	0	1	0	0	5	3	0	0	
正しい	0	0	25	62	0	0	13	0	0	62	38	0	0	
しい	0	0	0	1	7	3	0	0	0	7	4	0	0	
クラス	0	0	0	9	64	27	0	0	0	64	36	0	0	
	0	0	0	0	1	8	1	0	0	0	8	2	0	0
正しい	0	0	0	0	0	10	80	10	0	0	80	20	0	0
しい	0	0	0	0	0	2	8	0	0	0	8	2	0	0
クラス	0	0	0	0	0	20	80	0	0	0	80	20	0	0
	0	0	0	1	0	0	9	0	0	9	1	0	0	
正しい	0	0	0	10	0	0	90	0	0	90	10	0	0	
しい	0	0	0	0	0	0	1	0	8	1	8	2	0	0
クラス	0	0	0	0	0	0	10	0	80	10	80	20	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	3	6	6	4	0	0
正しい	0	0	0	0	0	0	0	10	30	60	60	40	0	0
しい	0	0	0	0	0	0	0	10	30	60	60	40	0	0
合計	9	14	10	9	8	13	11	10	11	7	79	23	9	23
	9	13	10	9	8	12	11	10	11	7	77	23	9	23

(d) 一つ抜き法
(10クラス; 誤判別率 0.225)

図2-45 64画素×64画素の形状分布を入力パタンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによるダイズ (I)葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度, 下段数値は相対値 (単位: %) を示す。

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	17	3	0	0	0	0	0	0	0	0	17	3
	85%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	85%	15%
正	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	3	1
し	0	75	25	0	0	0	0	0	0	0	75	25
い	0	0	19	0	1	19	1	0	0	0	19	1
ク	0	0	95	0	5	95	5	0	0	0	95	5
ラ	0	0	3	15	2	15	5	0	0	0	15	5
ス	0	0	15	75	10	75	25	0	0	0	15	25
	0	0	0	5	15	15	5	0	0	0	15	5
	0	0	0	25	75	75	25	0	0	0	25	25
合計	17	6	23	20	18	69	15	20	7	28	24	18

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.179)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	16	4	0	0	0	0	0	0	0	0	16	4
	80%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	20%
正	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	3	1
し	0	75	25	0	0	0	0	0	0	0	75	25
い	0	0	19	1	0	19	1	0	0	0	19	1
ク	0	0	95	5	0	95	5	0	0	0	95	5
ラ	0	0	4	14	2	14	6	0	0	0	14	6
ス	0	0	70	10	70	30	0	0	0	70	30	
	0	0	0	5	15	15	5	0	0	0	15	5
	0	0	0	25	75	75	25	0	0	0	25	25
合計	16	7	24	20	17	67	17	19	8	29	24	20

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.202)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	16	3	1	0	0	0	0	0	0	0	16	4
	80%	15%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	20%
正	0	18	0	2	0	0	0	0	0	0	18	2
し	0	90	0	10	0	0	0	0	0	0	90	10
い	0	1	16	0	2	0	0	1	0	0	16	4
ク	0	5	80	0	10	0	0	5	0	0	80	20
ラ	0	2	0	14	0	0	0	3	1	0	14	6
ス	0	10	0	70	0	0	0	15	5	0	70	30
	0	1	0	1	14	0	1	3	0	0	14	6
	0	5	0	5	70	0	5	15	0	0	70	30
	0	0	0	3	0	15	1	0	0	1	15	5
	0	0	0	15	0	75	5	0	0	5	75	25
	0	0	0	1	4	2	12	1	0	0	12	8
	0	0	0	5	20	10	60	5	0	0	60	40
	0	0	0	1	3	1	3	11	0	1	11	9
	0	0	0	5	15	5	15	55	0	5	55	45
	0	0	0	0	0	1	1	3	13	2	13	7
	0	0	0	0	0	5	5	15	65	10	65	35
	0	0	0	0	0	0	2	2	3	13	13	7
	0	0	0	0	0	0	10	10	15	65	65	35
合計	16	25	17	22	23	19	20	24	17	17	142	58
	8	12	9	11	11	10	11	9	9	9	71	29

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.290)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	14	5	1	0	0	0	0	0	0	0	14	6
	70%	25%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	70%	30%
正	0	18	0	2	0	0	0	0	0	0	18	2
し	0	90	0	10	0	0	0	0	0	0	90	10
い	2	3	7	0	6	0	1	1	0	0	7	13
ク	10	15	35	0	30	0	5	5	0	0	35	65
ラ	0	2	0	12	1	1	0	1	3	0	12	8
ス	0	10	0	60	5	5	0	5	15	0	60	40
	0	1	2	7	3	1	2	4	0	0	3	17
	0	5	10	35	15	5	10	20	0	0	15	85
	0	0	0	3	0	13	1	1	0	1	13	7
	0	0	0	20	0	65	5	5	0	5	65	35
	0	0	0	1	4	3	10	2	0	0	10	10
	0	0	0	5	20	15	50	10	0	0	50	50
	0	0	0	1	3	2	3	7	3	1	7	13
	0	0	0	5	15	10	15	35	15	5	35	65
	0	0	0	0	0	1	2	5	10	2	10	10
	0	0	0	0	0	5	10	25	50	10	50	50
	0	0	0	0	0	0	1	2	4	13	13	7
	0	0	0	0	0	0	5	10	20	65	65	35
合計	16	29	10	27	17	21	20	23	20	17	107	93
	8	14	5	13	9	11	10	11	10	9	53	47

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.465)

図2-46 64画素×64画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによるダイズ (II) 葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度，下段数値は相対値（単位：％）を示す。

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
	10	1	0	0	0	10	1
	91%	9%	0%	0%	0%	91%	9%
正	0	12	0	0	0	12	0
し	0	100	0	0	0	100	0
い	0	2	10	0	0	10	2
ク	0	17	83	0	0	83	17
ラ	0	0	0	12	0	12	0
ス	0	0	0	100	0	100	0
	0	0	0	1	11	11	1
	0	0	0	8	92	92	8
合計	10	15	10	13	11	55	4
	17	25	17	22	19	93	7

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.068)

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
	9	1	1	0	0	9	2
	82%	9%	9%	0%	0%	82%	18%
正	0	10	2	0	0	10	2
し	0	83	17	0	0	83	17
い	0	2	10	0	0	10	2
ク	0	17	83	0	0	83	17
ラ	0	0	2	10	0	10	2
ス	0	0	17	83	0	83	17
	0	0	0	2	10	10	2
	0	0	0	17	83	83	17
合計	9	13	15	12	10	49	10
	15	22	26	20	17	83	17

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.169)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	1
	91%	0%	0%	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	91%	9%
正	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0
し	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
い	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	12	0
ク	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100	0
ラ	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	12	0
ス	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	0
	0	0	0	1	11	0	0	0	0	0	11	1
	0	0	0	8	92	0	0	0	0	0	92	8
合計	10	12	12	14	13	11	14	13	11	9	109	10
	8	10	10	12	11	9	12	11	9	8	92	8

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.084)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	7	0	0	2	1	0	0	0	0	1	7	4
	64%	0%	0%	18%	9%	0%	0%	0%	0%	9%	64%	36%
正	6	2	0	1	0	2	0	1	0	0	2	10
し	50	17	0	8	0	17	0	8	0	0	17	83
い	0	0	11	1	0	0	0	0	0	0	11	1
ク	0	0	92	8	0	0	0	0	0	0	92	8
ラ	1	0	2	8	1	0	0	0	0	0	8	4
ス	8	0	17	67	8	0	0	0	0	0	67	33
	0	0	1	2	7	1	1	0	0	0	7	5
	0	0	8	17	59	8	8	0	0	0	59	41
合計	0	1	1	1	1	3	5	0	0	0	3	9
	0	8	8	8	8	25	43	0	0	0	25	75
	0	0	1	0	0	2	4	2	3	0	4	8
	0	0	8	0	0	17	33	17	25	0	33	67
	0	0	0	0	0	1	5	2	2	2	2	10
	0	0	0	0	0	8	41	17	17	17	17	83
	0	0	0	0	1	0	1	0	8	2	8	4
	0	0	0	0	8	0	8	0	67	17	67	33
	0	0	0	0	0	0	1	2	3	6	6	6
	0	0	0	0	0	8	17	25	50	50	50	50
合計	14	3	16	15	11	9	17	7	17	10	58	61
	12	3	13	13	9	8	14	6	14	8	49	51

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.513)

図2-47 64画素×64画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによるカラシナ葉形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度，下段数値は相対値（単位：％）を示す。

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
	16	2	5	1	0	16	8
	67%	8%	21%	4%	0%	67%	33%
正	4	16	3	0	1	16	8
し	17	66	13	0	4	66	34
い	5	2	14	3	0	14	10
ク	21	8	58	13	0	58	42
ラ	1	3	3	15	2	15	9
ス	4	13	13	62	8	62	38
	0	4	6	3	11	11	13
	0	17	25	13	45	45	55
合計	26	27	31	22	14	72	48
	22	23	25	18	12	60	40

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.400)

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
	16	2	5	1	0	16	8
	67%	8%	21%	4%	0%	67%	33%
正	5	13	1	4	1	13	11
し	21	54	4	17	4	54	46
い	5	3	11	5	0	11	13
ク	21	13	45	21	0	45	55
ラ	1	3	8	8	4	8	16
ス	4	13	33	33	17	33	67
	0	2	4	9	9	9	15
	0	8	16	38	38	38	62
合計	27	23	29	27	14	57	63
	23	19	23	23	12	48	52

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.525)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	13	2	6	1	1	0	1	0	0	0	13	11
	55%	8%	25%	4%	4%	0%	4%	0%	0%	0%	55%	45%
	2	13	4	1	1	0	3	0	0	0	13	11
	8	54	17	4	4	0	13	0	0	0	54	46
	1	2	15	1	2	1	2	0	0	0	15	9
	4	8	64	4	8	4	8	0	0	0	64	36
正	1	2	1	16	1	0	2	1	0	0	16	8
し	4	8	4	68	4	0	8	4	0	0	68	32
い	2	1	5	3	11	0	1	1	0	0	11	13
ク	8	4	21	13	46	0	4	4	0	0	46	54
ラ	0	1	0	1	3	14	3	2	0	0	14	10
ス	0	4	0	4	13	58	13	8	0	0	58	42
	0	1	2	3	3	0	13	1	0	1	13	11
	0	4	8	13	13	0	54	4	0	4	54	46
	0	1	5	2	3	1	0	11	1	0	11	13
	0	4	21	8	13	4	0	46	4	0	46	54
	0	0	1	2	3	2	1	3	11	1	11	13
	0	0	4	8	13	8	4	13	46	4	46	54
	0	0	2	2	4	1	1	4	1	9	9	15
	0	0	8	8	17	4	4	17	4	38	38	62
合計	19	23	41	32	32	19	27	23	13	11	126	114
	8	10	17	13	13	8	11	10	5	5	52	48

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.475)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
	11	3	6	2	0	1	1	0	0	0	11	13
	46%	13%	25%	8%	0%	4%	4%	0%	0%	0%	46%	54%
	3	6	6	2	1	0	5	0	1	0	6	18
	13	25	25	8	4	0	21	0	4	0	25	75
	1	4	12	2	3	1	1	0	0	0	12	12
	4	17	50	8	13	4	4	0	0	0	50	50
正	1	3	2	10	3	2	2	1	0	0	10	14
し	4	13	8	42	13	8	8	4	0	0	42	58
い	0	1	7	2	6	4	2	1	1	0	6	18
ク	0	4	30	8	25	17	8	4	4	0	25	75
ラ	0	2	0	7	7	1	2	4	0	1	7	23
ス	0	8	0	29	29	4	8	18	0	4	29	96
	0	0	2	4	4	2	5	5	1	1	5	19
	0	0	8	17	17	8	21	21	4	4	21	79
	0	0	5	2	2	9	2	1	1	2	1	23
	0	0	21	8	8	39	8	4	4	8	4	96
	0	0	1	7	3	1	4	3	3	2	3	21
	0	0	4	28	13	4	17	13	13	8	13	87
	0	0	1	2	5	1	1	4	4	6	6	18
	0	0	4	8	21	4	4	17	17	25	25	75
合計	16	19	42	40	31	22	25	19	11	12	61	179
	7	8	18	17	13	9	10	8	5	5	25	75

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.746)

図2-48 64画素×64画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによるソバ粒形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度，下段数値は相対値（単位：％）を示す。

	判別されたクラス										合計		
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤	
	19	1	0	0	0	0	0	0	0	19	1	95%	5%
正	1	17	2	0	0	0	0	0	0	17	3	5	85
い	0	3	15	2	0	0	0	0	0	15	5	0	85
ク	0	0	15	10	0	0	0	0	0	15	10	0	85
ラ	0	0	4	15	1	15	5	0	0	15	5	0	20
ス	0	0	0	2	18	18	2	0	0	18	2	0	10
	0	0	0	10	90	90	10	0	0	90	10	0	90
合計	20	21	21	19	19	84	16	10	10	84	16	10	84

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.160)

	判別されたクラス										合計		
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤	
	19	1	0	0	0	0	0	0	0	19	1	95%	5%
正	1	16	3	0	0	0	0	0	0	16	4	5	80
い	0	4	13	3	0	13	7	0	0	13	7	0	20
ク	0	0	65	15	0	65	35	0	0	65	35	0	20
ラ	0	0	5	13	2	13	7	0	0	13	7	0	25
ス	0	0	0	3	17	17	3	0	0	17	3	0	15
	0	0	0	15	85	85	15	0	0	85	15	0	85
合計	20	21	21	19	19	78	22	20	21	78	22	20	78

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.220)

	判別されたクラス										合計			
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤		
	16	4	0	0	0	0	0	0	0	16	4	80%	20%	
	3	17	0	0	0	0	0	0	0	17	3	15	85	
	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20	0	0	100	
正	0	0	0	19	0	1	0	0	0	19	1	0	95	
しい	0	0	0	0	15	0	1	4	0	15	5	0	75	
い	0	0	0	0	75	0	5	20	0	75	25	0	100	
ク	0	0	0	0	4	11	2	3	0	11	9	0	20	
ラ	0	0	0	0	20	55	10	15	0	55	45	0	10	
ス	0	0	0	0	2	2	15	0	1	15	5	0	10	
	0	0	0	0	10	10	75	0	5	75	25	0	10	
	0	0	0	0	0	2	3	12	3	12	8	0	10	
	0	0	0	0	0	10	15	60	15	60	40	0	10	
	0	0	0	0	0	2	3	2	13	13	7	0	10	
	0	0	0	0	0	10	15	10	65	65	35	0	10	
	0	0	0	0	0	0	3	0	1	16	4	0	15	
	0	0	0	0	0	0	15	0	5	80	20	0	15	
合計	19	21	20	19	21	18	27	21	18	16	154	46	10	77

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.230)

	判別されたクラス										合計			
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤		
	14	6	0	0	0	0	0	0	0	14	6	70%	30%	
	3	17	0	0	0	0	0	0	0	17	3	15	85	
	0	0	19	0	0	1	0	0	0	19	1	0	95	
正	0	1	0	15	1	2	1	0	0	15	5	0	75	
しい	0	0	0	0	13	2	2	3	0	13	7	0	65	
い	0	0	0	0	65	10	10	15	0	65	35	0	20	
ク	0	0	0	0	4	6	2	4	4	6	14	0	20	
ラ	0	0	0	0	20	30	10	20	20	30	70	0	25	
ス	0	0	0	0	5	2	8	5	0	8	12	0	25	
	0	0	0	0	25	10	40	25	0	40	60	0	25	
	0	0	0	0	0	3	8	5	4	8	12	0	15	
	0	0	0	0	0	15	40	25	20	40	60	0	15	
	0	0	0	0	0	3	6	4	7	7	13	0	15	
	0	0	0	0	0	15	30	20	35	35	65	0	15	
	0	0	0	0	0	0	3	0	1	16	4	0	15	
	0	0	0	0	0	0	15	0	5	80	20	0	15	
合計	17	24	19	15	23	19	30	21	16	16	123	77	9	62

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.375)

図2-49 64画素×64画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによるダクタンソバ粒形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度、下段数値は相対値（単位：%）を示す。

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0
	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
い	0	29	1	0	0	0	0	0	0	29	1	
ク	0	97	3	0	0	0	0	0	0	97	3	
ラ	0	0	30	0	0	0	0	0	0	30	0	
ス	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	
	0	0	0	30	0	0	0	0	0	30	0	
	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	
	0	0	0	1	29	29	1					
	0	0	0	3	97	97	3					
合計	30	29	31	31	29	148	2					
	20	19	21	21	19	99	1					

(a) 再代入法
(5クラス；誤判別率 0.013)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0
	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
い	0	29	1	0	0	0	0	0	0	29	1	
ク	0	97	3	0	0	0	0	0	0	97	3	
ラ	0	0	30	0	0	0	0	0	0	30	0	
ス	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	
	0	0	0	30	0	0	0	0	0	30	0	
	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	
	0	0	0	1	29	29	1					
	0	0	0	3	97	97	3					
合計	30	29	31	31	29	148	2					
	20	19	21	21	19	99	1					

(c) 一つ抜き法
(5クラス；誤判別率 0.013)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	28	1	0	1	0	0	0	0	0	0	28	2
	94%	3%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	94%	6%
い	1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	29	1
ク	3	97	0	0	0	0	0	0	0	0	97	3
ラ	0	0	29	0	1	0	0	0	0	0	29	1
ス	0	0	97	0	3	0	0	0	0	0	97	3
	0	2	0	28	0	0	0	0	0	0	28	2
	0	7	0	93	0	0	0	0	0	0	93	7
	0	0	0	1	29	0	0	0	0	0	29	1
	0	0	0	3	97	0	0	0	0	0	97	3
	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	30	0
	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0
	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	30	0
	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	29	0	1	29	1
	0	0	0	0	0	0	0	97	0	3	97	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	27	3	27	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	90	10	90	10
	0	0	0	0	0	0	3	1	26	26	4	
	0	0	0	0	0	0	10	3	87	87	13	
合計	29	32	29	30	30	30	32	28	30	285	15	
	10	11	10	10	10	10	11	8	10	95	5	

(b) 再代入法
(10クラス；誤判別率 0.050)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	28	1	0	1	0	0	0	0	0	0	28	2
	94%	3%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	94%	6%
い	1	28	0	1	0	0	0	0	0	0	28	2
ク	3	94	0	3	0	0	0	0	0	0	94	6
ラ	0	0	28	0	2	0	0	0	0	0	28	2
ス	0	0	93	0	7	0	0	0	0	0	93	7
	0	2	0	28	0	0	0	0	0	0	28	2
	0	7	0	93	0	0	0	0	0	0	93	7
	0	0	0	1	29	0	0	0	0	0	29	1
	0	0	0	3	97	0	0	0	0	0	97	3
	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	30	0
	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0
	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	30	0
	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	29	0	1	29	1
	0	0	0	0	0	0	0	97	0	3	97	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	26	3	26
	0	0	0	0	0	0	0	0	3	87	10	87
	0	0	0	0	0	0	3	2	25	25	5	
	0	0	0	0	0	0	10	7	83	83	17	
合計	29	31	28	31	31	30	30	33	28	29	281	19
	10	9	10	10	10	10	10	12	9	10	94	6

(d) 一つ抜き法
(10クラス；誤判別率 0.063)

図2-50 64画素×64画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによる雑草種子粒形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度，下段数値は相対値（単位：％）を示す。

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
正	18	0	1	0	0	18	1
し	95%	0%	5%	0%	0%	95%	5%
い	0	8	2	0	0	8	2
ク	0	80	20	0	0	80	20
ラ	0	2	15	0	1	15	3
ス	0	0	1	19	0	19	1
	0	0	5	95	0	95	5
	0	0	0	3	17	17	3
	0	0	0	16	85	85	15
合計	18	10	19	22	18	77	10
	21	11	22	25	21	89	11

(a) 再代入法
(5クラス; 誤判別率 0.115)

	判別されたクラス					合計	
	●	●	●	●	●	正	誤
正	18	0	1	0	0	18	1
し	95%	0%	5%	0%	0%	95%	5%
い	1	7	2	0	0	7	3
ク	10	70	20	0	0	70	30
ラ	0	3	14	0	1	14	4
ス	0	0	1	19	0	19	1
	0	0	5	95	0	95	5
	0	0	0	3	17	17	3
	0	0	0	15	85	85	15
合計	19	10	18	22	18	75	12
	22	11	21	25	21	86	14

(c) 一つ抜き法
(5クラス; 誤判別率 0.138)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	18	1
し	95%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	5%
い	0	8	2	0	0	0	0	0	0	0	8	2
ク	0	80	20	0	0	0	0	0	0	0	80	20
ラ	0	0	16	0	0	1	0	0	1	0	16	2
ス	0	0	88	0	0	6	0	0	6	0	88	12
	0	0	0	16	1	2	0	0	1	0	16	4
	0	0	0	80	5	10	0	0	5	0	80	20
	0	0	0	2	17	0	1	0	0	0	17	3
	0	0	0	10	85	0	5	0	0	0	85	15
	0	0	3	0	0	16	0	0	1	0	16	4
	0	0	15	0	0	80	0	0	5	0	80	20
	0	0	0	1	1	0	14	2	2	0	14	6
	0	0	0	5	5	0	70	10	10	0	70	30
	0	0	0	0	0	0	3	16	1	0	16	4
	0	0	0	0	0	0	15	80	5	0	80	20
	0	0	0	1	0	5	0	1	12	1	12	8
	0	0	0	5	0	25	0	5	60	5	60	40
	0	0	0	0	0	1	0	1	4	14	14	6
	0	0	0	0	0	5	0	5	20	70	70	30
合計	18	8	22	20	19	25	18	20	22	15	147	40
	10	4	12	11	10	12	10	11	12	8	79	21

(b) 再代入法
(10クラス; 誤判別率 0.214)

	判別されたクラス										合計	
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	正	誤
正	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	18	1
し	95%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	5%
い	1	7	2	0	0	0	0	0	0	0	7	3
ク	10	70	20	0	0	0	0	0	0	0	70	30
ラ	0	3	10	1	0	2	1	0	1	0	10	8
ス	0	16	55	6	0	11	6	0	6	0	55	45
	0	0	1	10	6	1	1	0	1	0	10	10
	0	0	5	50	30	5	5	0	5	0	50	50
	0	0	2	9	6	0	3	0	0	0	6	14
	0	0	10	45	30	0	15	0	0	0	30	70
	0	0	4	1	0	7	2	0	6	0	7	13
	0	0	20	5	0	35	10	0	30	0	35	65
	0	0	0	1	3	1	11	2	2	0	11	9
	0	0	0	5	15	5	55	10	10	0	55	45
	0	0	0	0	0	0	3	16	1	0	16	4
	0	0	0	0	0	0	15	80	5	0	80	20
	0	0	0	0	0	0	9	0	2	8	1	8
	0	0	0	0	0	45	0	10	40	5	40	60
	0	0	0	0	0	1	0	1	7	11	11	9
	0	0	0	0	0	5	0	5	35	55	55	45
合計	19	10	20	22	15	21	21	21	26	12	104	83
	10	5	11	12	8	11	11	11	15	6	56	44

(d) 一つ抜き法
(10クラス; 誤判別率 0.444)

図2-51 64画素×64画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンによるセイヨウナシ果形の判別結果の二元表

枠内上段数値は頻度, 下段数値は相対値(単位: %)を示す。

図 2-44～図 2-51 で判別結果の二元表を見ると、近隣のクラス間、すなわち形状の縦横比が似ているクラス間に判別誤りが集中した。

2.4.2 考察

2.3 で検討した多層パーセプトロンと同様、誤判別率は材料ごとに異なった。すなわち、相対的クラス内変異が小さいダイズ (I) 葉形、雑草種子粒形は誤判別率が小さく (図 2-9b, g)、相対的クラス内変異が大きいダイズ (II) 葉形やソバ粒形は誤判別率が大きかった (図 2-9c, e)。また、判別誤りが、形状の縦横比が似たクラス間で多い (図 2-44～図 2-51) ことから、それが示唆される。

一般的に、一つ抜き法による誤判別率が、再代入法による誤判別率以上だったことから、常にオーバーフィッティングが発生したといえる。カラシナ葉形による判別ではとくに、オーバーフィッティングが顕著に見られた。カラシナ葉形の教師データの入力パターンは、一つ抜き法でテストデータとして除いた個葉によって大きく変動し、単純パーセプトロンがその変動に敏感に反応したからであると思われる。

学習可能性と汎化能力の両方の観点をあわせてみると、再代入法、一つ抜き法による判別ともに、64 画素×64 画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロンの組み合わせがもっともよい。

クワ葉形、カラシナ葉形のように複雑な変異をもつ植物器官形状を含め、十分低い誤判別率が得られた。このように、画像入力をもつ線形ニューラルネットワークは、形状のもつ情報全体を使えるために、植物器官形状に基づく種や品種・系統などの判別に有効に働くと考えられる。

そして、画像入力をもつ線形ニューラルネットワークは、判別モデルを変更することなく、すべての材料にそのまま適用できたことから、さまざまな対象に適用できる汎用性を示せた。最適な学習条件の組み合わせ (64 画素×64 画素の形状分布を入力パターンとする教師データで訓練した単純パーセプトロン) も材料によらず一定しており、新しい対象にもそのまま使える可能性がある。すなわち、ネットワークアーキテクチャや教師データでさえ、対象ごとに検討しなおす必要もないかもしれない。これによって、画像入力をもつ線形ニューラルネットワークに基づく判別モデルの汎用性は、ますます強められることとなる。

2.4.3 むすび

本節では、各種植物器官形状による種や品種・系統の判別モデルとしての、線形ニューラルネットワークであるホップフィールドネットワークおよび単純パーセプトロンに基づく画像入力ニュー

ーラルネットワークの有効性と汎用性を検討した。その結果、すべての材料に判別モデルを変更することなく適用でき、十分低い誤判別率を得た。たとえば、雑草種子粒形では 6.3%の誤判別率で 10 種の判別が行えた。したがって、線形ニューラルネットワークに基づく画像入力ニューラルネットワークの、精度よく判別できる有効性とさまざまな形状にも適用できる汎用性が明らかとなった。

2.5 考察

本章では、植物器官形状による種や品種・系統の判別に、非線形および線形の画像入力ニューラルネットワークを適用した。その結果を通して、考察を行う。

教師データの入力パターンについては、すべての材料において、①線形ニューラルネットワークでは、学習可能性と汎化能力の双方で、サイズの大きい葉形分布が優れ、②多層パーセプトロンでは、学習には平均葉形が有利であったが、誤判別率の低さでは、葉形分布が優れた。このように、カエデ葉形による判別と同様の結論が得られた (1.5.1 参照)。

ニューラルネットワークアーキテクチャについては、すべての材料において、線形のニューラルネットワークが、非線形の多層パーセプトロンより高い汎化能力を与えた。線形のニューラルネットワークのなかでは、64×64 の入力素子をもつ単純パーセプトロンが、カエデ葉形による判別と同様、本章の判別実験においても最適なネットワークアーキテクチャであった (1.5.2 参照)。

ソバやダツタンソバの穀粒、セイヨウナシの果実のような立体的な対象では、どの部分から見た二次元射影を使うかによって、判別結果が異なってくるかもしれない。したがって、形状の三次元データを使えば、形状に関するより詳細の情報が得られ、誤判別率の改善に役立つだろう。入力する情報の量が増えても、ニューラルネットワークの入力素子数を増やすことで対応でき、判別モデルの変更は容易である。電子計算機の処理速度など技術的な問題が解決されるならば、このような拡張も今後検討すべきである。

このように、まだ課題は残されているが、形状特徴量を必要としなかったため、画像入力ニューラルネットワークの、さまざまな対象にそのまま適用できる汎用性を示せた。また、形状のもつ情報全体を利用できたため、単純な形状ばかりではなく、欠刻のある葉のように複雑な形状からも安定的な判別精度が得られたことも、画像入力ニューラルネットワークの利点の一つである。最適な学習条件の組み合わせは、材料によらず一定しており、他の対象にも同じように使える可能性が大きい。ネットワークアーキテクチャや教師データも、対象ごとに検討しなおす必要がないかもしれない。遺伝資源の特性評価のように、多くの種のさまざまな植物器官形状を判別しなければならない

い局面では、判別モデルのこのような汎用性は非常に重要であり、画像入力ニューラルネットワークは有用で強力な判別モデルになり得るだろう。

2.6 まとめ

本章では、第1章で構築した形状情報のみ評価する画像入力ニューラルネットワークに基づく判別モデルの有効性と汎用性を実証するために、本判別モデルを多数の植物器官形状による種や品種・系統の判別に適用した。その結果、判別モデルを変更することなくすべての材料に適用でき、判別モデルの汎用性が示された。これは、形状特徴量の必要性をなくし、判別モデルが対象に依存しなかったためである。さらに、単純な形状ばかりでなく複雑な形状も精度よく判別でき、たとえば、雑草種子粒形は6.3%の誤判別率で10種の判別が行え、判別モデルの有効性が示された。これは、形状のもつ情報全体を使えたためである。

植物育種や遺伝資源の特性調査の現場への判別モデルの応用について考えると、植物器官形状の判別作業を全面的に判別モデルに委ねられるようになるには、これから先かなりの研究が必要とされるだろう。しかし、最終的な決定権を評価者にもたせると仮定すれば、判別作業の一部を判別モデルで代替することによって、作業の省力化や効率化が可能である。たとえば、材料の種や品種・系統を同定する場面で、判別モデルが候補を少数に絞れば、評価者は、その限定された範囲内だけを検索すればよいことになる。また、評価者と判別モデルと同じ材料を判別し、結果を照合することで、互いに判別結果の信頼性を評価し合うことができる。ひいては、双方の判別結果の信頼性の向上につながる可能性がある。すなわち、独立した複数の評価者が、同じ材料の判別を行うのと同じ効果が得られる。このように、評価者の判断を判別モデルが補完することによって、省力的かつ効率的な判別を行うことが期待できる。

本章では、一つの器官形状から、その種や品種・系統の判別を検討した。実際に遺伝資源の特性を評価するには、個々の器官の形状の評価がばらばらに存在しても意味がなく、少なくとも個体レベルで総合的な評価が必要である。このとき、本研究で提案した判別モデルを利用するには、たとえば、一個体からいくつかの器官を標本抽出し、個体内で器官形状の形状分布を作成してそれを判別モデルに入力すれば、個体レベルでの器官形状の評価に対応できると考えられる。または、個々の器官の判別結果の平均や多数決をとるなど、別のアプローチも考えられる。カエデ葉形やクワ葉形の判別実験で良好な結果を収めたことから、欠刻のある葉形のように、個体内で変異が大きい器官の形状にも、この評価法は適用できると予想される。さらに、この評価法は、群落レベルでの器官の形状評価にも拡張できると考えられる。

判別モデルの副次的な有用性としては、判別モデルに入力するための器官形状の画像の取得によって、自然にあるいはごく少ない労力の付加で、各種の定量データを蓄積することができることである。たとえば、葉形を撮像すれば、形状に関する情報以外にも、大きさ、色などの情報も簡単な

画像解析によって抽出・保存することができる。これらの情報は、同属や同種の植物の特性調査や分類作業において参考になるだろう。このように、本研究で提案した判別モデルは、画像や画像情報を蓄積・管理するデータベースと一体化することによって、より有益性が拡大すると思われる。