触感覚による粒子群の認識と言語評価*

渡辺 信一** 尾崎功一** 山崎友麻*** 山本純雄***

Recognition and Language Estimation of Fine Particles through Tactile Sensing with Fingers

Shinichi WATANABE, Koichi OZAKI, Yuuma YAMAZAKI and Sumio YAMAMOTO

This study analyzes the recognition process in the examination of the texture of fine particles through tactile sensing with human fingers, and aims at establishing the structure of texture recognition. Characteristic values of tactile sensing are looked for by the principal component analysis, and also by investigating a relationship between tactile sensing and its verbal response. In this study, it is understood that there are characteristic values of tactile sensing which is relative to the form of a fingerprint. These values are the threshold at which the tactile sensing switch. The correspondence between the diameters of the particles and the term expressed for the tactile sensing is also established.

Key words: measurement, human engineering, tactile sensing, fine particles

1. 緒 言

人間にとって触感覚は日常生活に欠かせない重要な感覚であり、生物の本能との結びつき、感性への影響が大きい最も原始的な感覚である。生理学的にみると触覚には、体性感覚と呼ばれる皮膚感覚、深部感覚、および平衡感覚があり、一般に我々が触覚と言うのは、温覚、冷覚、触覚、圧覚、痛覚などの皮膚感覚を指す。皮膚感覚は感覚受容器と呼ばれる特定の器官により外部刺激を感じ、刺激を認識する。触覚には触覚、温覚、冷覚などの感覚とそれと対応する受容器が多数多様存在するため(複特異性)、その認識構造が複雑である。本研究では皮膚および粘膜の感覚である皮膚感覚、広義の意味での触感覚を対象とする。

触感覚に関する工学的な研究として、近年のロボット工学の発達に伴い、その重要性が指摘され、触覚センサの開発¹⁾、視覚障害者用触覚ディスプレイの開発など積極的に行われている²⁾。また、触感覚計測という立場では、食品、化粧品、繊維業界で、触感、風合いなどの評価が行われている³⁾。

ところが、触感覚に対してさまざまな側面から評価する場合、大きな要因であろうと考えられる物体の形状と触感覚の関係の評価した基礎的な研究は、著者らが知る限りほとんど行われていないようである。そこで、本研究では人間の触感覚を理解する上で必要な基礎的研究という位置付けで、比較的粒子径のそろった粒子群を用いて

- 言葉による触感覚の評価とその解析
- 認識構造の理解

を行う。また、触感覚のようなあいまいなシステムを評価する場合、言葉を媒介とする手法が用いられることが多いため、本研究においても言葉を媒介とした計測方法を用いる。さらに、本研究では、触感覚のみで粒子群の手触り感を評価してもらい、主成分分析を用いて、触感覚と言語の関係について定量的に評価を行う。また、主成分分析により、触感覚のパターンを分類し、特徴点の抽出と指紋形状との関係を論じる。

* 原稿受付 平成 17 年 2 月 3 日

** 正 会 員 宇都宮大学大学院 (栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

*** 宇都宮大学大学院

2. 粒子群に対する触感覚の評価方法

本研究では、粒子群に対する人間の触感覚の感性評価を行うため、触感覚のみで試料を触り、触感覚を評価する。まず、本研究で用いる試料は JIS R6001(1998) に基づいた精密研磨用微粉 #240 ~ #8000 の 18 種類および、粗粒 #12 ~ #220 の代表的な 8 種類、計 26 種類のホワイタランダム (WA) 試料を用いた。試料の平均粒径は $1\mu\text{m}$ ~ $1700\mu\text{m}$ であり、形状は非球形であるが、粒径のばらつきが比較的小さく、多種類の粒径を容易に準備できる特徴がある。

本研究では、言葉と触感覚の関係を論じるため、心理学的な研究でよく用いられるセマンティックデファレンシャル法 (SD 法) を用いる。この手法は、評価対象に対して、意味的に対になる形容詞対を評価対象に対する「刺激」として複数個用意し、何段階かに分割し、被験者は評価対象から受ける感覚がその形容詞対の間のどこに位置するかを選択する。その結果、被験者のそれぞれの評価対象に対する平均的な評価や、2 つの評価対象間の類似性を評価、グループ分けなどを行うことが可能となる。

本研究では、表 1 に示すような形容詞 (言語) 対群 12 対を被験者に提示し、触感覚に関係があると考えられる 6 対とそうでない 6 対を用意した。また、評定は図 1 に示すような評定用紙を用いて、7 段階評定尺度で評価してもらった。ただし、本研究は日本語を介して日本人により評価を行ったため、本論文の図表の形容詞対の表記はローマ字表記を主として用い、英語表記は括弧内に表記する。

被験者は健康な 20 代の男女計 36 人で、実験前に視覚により試料を見てもらい、試料の印象をつかんでもらった。また、試料の提示順はランダムに行い、実験中は被験者と試料の間にブラインドを設置し、実験中は評価に対して視覚による影響を与えないようにし、さらに、試料を触りながら触感覚を評価できるように、利き手とは逆の手で試料を触ってもらうこと、被験者には試料が混じり合わないよう、また、公正な評価を行うため指及び指紋内に付着した試料を十分に落とし、ワイパー等で指先の湿気を落してから次の試料を触ってもらう。評定は -3 ~ 3 の整数値の重みを与え、それぞれの形容詞対ごとに平均を求め、評定値とした。

Table 1 Adjective pair

Relative to the tactile sensing		No relative to the tactile sensing	
komakai	arai	suki	kirai
(fine)	(coarse)	(like)	(dislike)
subesube	zarazara	zatsuna	sensaina
(smooth)	(rough)	(messy)	(slender)
kasakasa	shittori	omomigaaru	karoyakana
(dry)	(wet)	(importance)	(unimportance)
matomatta	barabara	fukuzatsu	tanjyun
(united)	(scatter)	(complex)	(simple)
katai	yawarakai	shizukana	nigiyakana
(hard)	(soft)	(quiet)	(lively)
nebaneba	sarasara	anshin	fuan
(sticky)	(dry)	(relief)	(anxiety)

Evaluation Sheet

	very	fairly a little	not apply	a little fairly	very	
matomatta	+	+	+	+	+	barabara
suki	+	+	+	+	+	kirai
katai	+	+	+	+	+	yawarakai
kasakasa	+	+	+	+	+	shittori
subesube	+	+	+	+	+	zarazara
komakai	+	+	+	+	+	arai
nebaneba	+	+	+	+	+	sarasara
zatsuna	+	+	+	+	+	sensaina
omomigaaru	+	+	+	+	+	karoyakana
fukuzatsu	+	+	+	+	+	tanjyun
shizukana	+	+	+	+	+	nigiyakana
anshin	+	+	+	+	+	fuan

Fig. 1 Evaluation sheet

3. 主成分分析を用いた定量的評価

3.1 主成分分析

一般に本実験のようにデータ量が多種多量の場合、データにどのような情報が隠されているのかを把握するのは困難であり、客観的な指標で評価することが必要である。そこで本節では、本実験結果に主成分分析を適用し、定量的に形容詞対の類似度を評価し、触感覚における特徴量の抽出を行う。主成分分析とは、多数の変数を要約し、少数の情報（主成分）で全体の特性を代表値で表す手法であり、この代表値である主成分得点 z_{ij} は重み v_{jk} を用いて、

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^n v_{jk} x_{ik}$$

という線形和で表される。本研究では、 i は形容詞対を表すインデックスで $i = 1, \dots, 12$ である。 n は試料数 26 であり、同時に主成分得点を求める際に必要となる相関行列の次元数でもある。 j は相関行列の次元数と対応し、 $j = 1, \dots, 26$ という値を取り、第 j 主成分であることを表すインデックスである。ただし、本研究では 3.2 節で述べるように、第 2 主成分まで用いて主成分分析を評価するため、 $j = 1, 2$ となる。したがって、 i 番目の形容詞対に対する主成分得点 z_i は $z_i = (z_1, z_2)_i$ で表される。また、 x_{ik} は i 番目の形容詞対に

Table 2 Eigenvalue from the principal component analysis

Eigenvalue	Rate [%]	Accumulation rate [%]
20.1	77.5	
3.30	12.7	90.2
1.59	6.1	96.3
0.75	2.8	99.1
0.21	0.81	99.9

Fig. 2 Eigenvector from the principal component analysis

おける k 番目の粒径に対する評定値を表す。

3.2 固有値と固有ベクトル

主成分分析を行うために、まず、重み v_{jk} と分析に必要な次元数を求める必要がある。主成分分析では、重み v_{jk} は相関行列の固有ベクトルに相当する。そこで、まず表 2 に相関行列の固有値、固有値の総和との比率、およびその累積和を示す。ただし、本研究の場合、試料数が 26 種類のため相関行列は 26×26 行列となり、26 種類の固有値が得られるが、表 2 では値が大きい順に 5 種類まで示し、残りの固有値は省略した。累積和に注目すると第 2 主成分までで、約 90% の情報を説明できることが確認でき、必要な情報を得るのに十分であると判断し、本研究では、第 2 主成分まで用いて評価を行う。

図 2 に第 1, 2 主成分の固有ベクトルと代表的な粒径の値を示す。図 2 より、粒径の大きさ順に円状に点が並んでいることが確認できる。本研究では、触感覚が変化する粒径を特徴点として考え、その抽出と考察を行う。まず、主成分分析における固有ベクトルは主成分得点 z_{ij} を求める際の重みであることを考慮すると、固有ベクトルの成分の符号が変化する粒径は触感覚の反応が変化する点であると考え、この粒径を特徴点として注目する。そこで、各主成分の固有ベクトルの要素の中で、符号が変化するものを求めると、図 2 より、第 1 主成分では粒径 $106\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ が、第 2 主成分では粒径 $7.9\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ が得られる。したがって、本研究ではこの粒径 $106\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ 近傍と $7.9\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 近傍を特徴点として注目することとする。

次にこれらの値の物理的な意味について考察する。触感覚を決定する因子として、まず指紋が考えられる。一般に指紋の形状は高さ約 $100\mu\text{m}$ 、幅約 $300\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ の小稜である¹⁾ことから、指紋の深さ(高さ)形状と特徴点である粒径 $106\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ とを意味付けることができる。そこで、本研究で用いた試料において平均粒径が $100\mu\text{m}$ 近傍のものは 150, 106, $80\mu\text{m}$ であり、これらの試料をガラス板の上に置き、指先でなぞり、試料の動きを観察した。その結果、平均粒径

 Fig. 3 Image that the particles don't get into a fingerprint ($150\mu\text{m}$)

 Fig. 4 Image that the particles get into a fingerprint ($80\mu\text{m}$)

$150\mu\text{m}$ の試料は指紋に引っかかり、試料が指先とガラス板の間で回転運動を行っているのが観察できた(図3参照)。また、図3に示すように試料をなぞっている時は指紋の模様は明確に観察できず、さらに、実験後、指先に付いた試料を容易に落とすことができ、指紋の中に試料が入り込んでいないことを確認した。

平均粒径 $106\mu\text{m}$ の試料も指紋に引っかかり、回転運動を行っているのが観察できた。また、指紋の模様は明確に観察できなかったが、実験後、指先に付いた試料の一部が指紋の中に試料が入り込んでいた。

平均粒径 $80\mu\text{m}$ の試料は指紋の中に入り込み指紋の模様が明確に観察できた(図4参照)。また、触感覚としては、試料を触っているよりも、下のガラス板を触っていると感じ、実験後、指紋の溝に試料が詰まっているのが確認できた。

以上の結果より、指紋の中に試料が入り込む場合と引っかかる場合の閾値が約 $106\mu\text{m}$ 前後にあると考えられ、平均的な指紋の高さに対応している。さらに、主成分分析における固有ベクトルの要素の符号が変化する値に対応しており、主成分分析により得られた特徴点の意味付けができた。また、触感覚が変化する粒径と指紋形状が対応していることから、粒子群に対する触感覚は指紋に大きく依存していると言える。特徴点 $7.9 \sim 10\mu\text{m}$ に関しては、触感覚の反応パターンの変化に関する考察と合わせて、4.2節で述べる。

3.3 主成分得点

図5に各形容詞対の主成分得点を示す。ただし、図中の表記において片方の形容詞で形容詞対を表記した。図5より、主成分得点が近い形容詞対を次のような4種類のグループに分類する。以後、主成分得点が近い形容詞対のグループを反応と呼ぶ。

- 反応 I 「細かい — 粗い」をはじめとする右半面の7種類の形容詞対を要素とするグループ
- 反応 II 「ねばねば — さらさら」の中央上部の1種類の形容詞対を要素とするグループ

Fig. 5 Points of the principal component analysis

Fig. 6 A relationship between the diameters of the particles and evaluate value (Response I) komakai(fine) — arai(coarse)

Fig. 7 A relationship between the diameters of the particles and evaluate value (Response II) nebaneba(sticky) — sarasara(dry)

- 反応 III 「安心 — 不安」をはじめとする最左部の3種類の形容詞対を要素とするグループ
- 反応 IV 「複雑 — 単純」の中央下部1種類の形容詞対を要素とするグループ

4. 粒径と評定値の関係

前節で、主成分分析により本研究で用いた形容詞対は4種類に分類できることを述べた。そこで、本節では粒径(平均粒径)と評定値の関係を示し、3.2節で得られた特徴点との関係について述べる。まず、前節で分類した4種類の代表的な反応を図6~9に示す。ただし、エラーバーは標準偏差を表す。

4.1 反応 I

反応 I は、本研究で用いた形容詞対の中で最も多くみられた反応であり、図6はその代表として、「細かい — 粗い」の場合である。この反応には2つの特徴的な反応パターンが見られる(図10)。

- 粒径が約 $35\mu\text{m}$ より小さい場合、粒径の変化に対して、評定値の変化が少なく、感覚的に反応の変化が小さい場合。つまり、ある範囲内における刺激の変化に対して、反応の変化が鈍い状態であり、この状態を本研究では「無変化状態」と呼ぶ。(反応パターン 1)

Fig. 8 A relationship between the diameters of the particles and evaluate value (Response III) anshin(relief) — fuan(anxiety)

Fig. 9 A relationship between the diameters of the particles and evaluate value (Response IV) fukuzatsu(complex) — tanjyun(simple)

Fig. 10 An outline figure of a relationship between the diameters of the particles and evaluate value for Response I

- 粒径が約 $35\mu\text{m}$ より大きい場合、粒径の変化に対して、評定値の変化が大きく、感覚的に反応の変化が大きい場合。(反応パターン 2)

この反応が見られる形容詞対は

- ・細かい — 粗い
- ・すべすべ — ざらざら
- ・かさかさ — しっとり
- ・まとまった — ばらばら
- ・硬い — 柔らかい
- ・雑な — 繊細な
- ・静かな — にぎやかな

の 7 種類である。これらの形容詞対は物体の荒さ、湿性、密集感、硬さを表現するものであり、人間の粒子群に対する触感覚において、これらの物理的諸量は同様な認識構造であると考えられる。

この反応では約 $35\mu\text{m}$ で評定値の反応パターンの変化が見られ、ある閾値となっている。この点を本研究では感覚折点と呼ぶ(図 10 A 点)。反応 I における感覚折点は粒子刺激閾と呼ばれる値に近い値である。この粒子刺激閾とは著者らの以前の報告より、粒子群を触った際に、液体や固体のように連続体として感じるか、粒子一粒一粒からできていると感じるかの閾値であり、約 $36\mu\text{m}$ としている⁴⁾。つまり、「まとまった — ばらばら」形容詞対に代表されるように約 $35\mu\text{m}$ より

Table 3 A stimulus threshold for the tactile sensing

Adjective pair	Stimulus threshold [μm]
matomatta(united) — barabara(scatter)	75
kasakasa(dry) — shittori(wet)	82
subesube(smooth) — zarazara(rough)	99
katai(hard) — yawarakai(soft)	128
shizukana(quiet) — nigiyakana(lively)	137
komakai(fine) — arai(coarse)	144
zatsuna(messy) — sensaina(slender)	149

小さい粒径の粒子群を触った場合、粒径に関係なく、人間は連続体に触っていると感じている。このため、粒径の変化に対して、評定値の変化が少なく、感覚的な反応の変化が鈍くなっている結果が得られたと考えられる。また、それより大きい粒径の粒子群を触った場合、粒子一粒一粒として認識するため感覚が粒径に大きく依存している。以上の結果により、反応 I における感覚折点約 $35\mu\text{m}$ は粒子刺激閾に対応しており、この値は前節 3.2 節で述べた主成分分析による特徴点には含まれない粒径であるが、以後特徴点の 1 つとして注目する。

次に、評定値が零となる点、刺激閾について考える(図 10 B 点)。例えば、図 6 より、「細かい — 粗い」形容詞対の場合、刺激閾は約 $144\mu\text{m}$ であり、粒子群を触った時に、「細かい」と感じるか「粗い」と感じるかの境界となっている。この値は 3.2 節で述べた特徴点 $106\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ に対応していることから、反応 I に関しては刺激閾は指紋の深さに関係し、さらに主成分分析から抽出できると考えられる。反応 I におけるその他の形容詞対の刺激閾を表 3 に示す。表 3 より、反応 I におけるすべての形容詞対の刺激閾が特徴点 $106\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ 内、もしくは近傍の値となっているのが確認できた。さらに、図 5 と対応させると、第 2 主成分得点が高い程、刺激閾が小さいことがわかり、反応 I においては第 2 主成分得点と刺激閾は対応関係にあると言える。

また、3.2 節で述べた特徴点の中で、 $7.9 \sim 10\mu\text{m}$ に対応すると思われる約 $6\mu\text{m}$ が感覚折点となっており、触感覚の反応パターンが変化する点となっている。

4.2 反応 II

図 7 に示すようにこの反応 II は、反応 I(図 6) の場合と幾何的に点対称な形状をしており、

- 粒径が約 $100\mu\text{m}$ より大きい場合、粒径の変化に対して、評定値の変化が少なく、感覚的に反応の変化が鈍い(無変化状態)
- 粒径が約 $100\mu\text{m}$ より小さい場合、評定値が粒径の変化に対して、大きく変化し、感覚的に反応の変化が大きい

という反応 I と同様な 2 つの特徴的な反応パターンが見られる。

この反応が見られる形容詞対は

- ・ねばねば — さらさら

の 1 種類である。この形容詞対は物体の粘性を表現するものである。

この反応においても、約 $100\mu\text{m}$ で評定値の反応パターンの変化(感覚折点)が見られることから、3.2 節と同様な考察により、指紋の形状が大きな要因となっていると考えられる。

Table 4 A characteristic value(the diameters of the particles) for each response

Response	10 μ m	36 μ m	120 μ m
I	Break	Break	Threshold
II	Threshold	Break(No Response)	Break
III	Break	No Response	Break
IV	Threshold	No Response	Threshold

Break : Break Point, Threshold : Stimulus Threshold

さらに、粒子刺激閾 36 μ m 近傍である約 20 μ m~40 μ m において、無変化状態であることが確認できる。また、刺激閾は、約 10 μ m でこれ以下の粒径の場合、粉体にもかかわらず、ねばねば感を感じるようになり、流体もしくは液体として感じていると考えられる。この値は 3.2 節で述べた特徴点 7.9~10 μ m に対応していることから、反応 I の刺激閾と同様に反応 II の刺激閾も主成分分析により、抽出できると考えられる。

4.3 反応 III

反応 III は評定値の変化が少なく、感覚的に反応が鈍いパターンであり、図 8 はその代表として、「安心—不安」の場合である。この反応が見られる形容詞対は

- ・安心—不安
- ・重みがある—軽やかな
- ・好き—嫌い

の 3 種類である。これらの形容詞対は個人の主観に大きく依存するものであり、触覚にほとんど影響を与えない言語であると考えられる。つまり、図 8 よりわかるように、反応 I、反応 II と異なり、評定値の変動が少なく、触感覚に対する反応が鈍いことがわかる。また、反応 I、反応 II と同様に、粒子刺激閾 36 μ m 近傍で無変化状態が確認でき、特徴点の近傍である約 10 μ m および約 90 μ m が感覚折点となっている。

4.4 反応 IV

図 9 に示すように、この反応 IV も評定値の変動が少なく、感覚的に反応が鈍いパターンであり、反応 III と異なるのは粒径の変化に伴い感覚がほぼ直線形状（指数関数的）に変化するパターンである。この反応が見られる形容詞対は

- ・複雑—単純

の 1 種類である。この形容詞対は物体の複雑性を表現するもので、反応 III と同様に個人の主観に依存すると思われる言語である。図 9 より、粒子群に対する触覚による複雑性の認識は単純に粒径の大きさに依存すると思われる。また、反応 IV においても、粒子刺激閾近傍、約 25 μ m~50 μ m において、無変化状態が確認できる。

以上の結果を主成分分析により得られた特徴点、および粒子刺激閾と各反応に関してまとめると、表 4 のようになる。ただし、特徴点の代表点を、10 μ m、120 μ m とした。表 4 より、特徴点と各反応の感覚折点、刺激閾が対応していることから粒子群に対する人間の触感覚の反応パターンは約 8~10、36、100~150 μ m で変化し、特に約 36 μ m 付近では、粒径の変化に対して、感覚的に反応の変化が鈍くなる傾向が見られると言える。

5. 結 言

本研究では、日常的な人間の動作の一つである手触りに注目し、その手触り感を言葉を媒介とし、評価し、その認識構

造を理解することを試みた。まず、手触り感の評価について平均粒径が異なる 26 種類の WA 砥粒を用いて、12 対の形容詞対について、7 段階評定尺度で評価したところ次の結果が得られた。

まず、主成分分析を用いて定量的に評価した結果について述べる。

- (1) 2 つの主成分の固有ベクトルの成分の符号が変化する粒径を特徴点として注目した結果、7.9 μ m~10 μ m と 106 μ m~150 μ m が得られた。
- (2) 特徴点 106 μ m~150 μ m は平均的な指紋の深さと近い値であり、触感覚は指紋に起因するものが大きいと考えた。
- (3) 主成分得点の類似性より、本研究で用いた 12 対の形容詞対を 4 種類に分類し、それぞれの集合を「反応」と定義した。

さらに、各反応について、粒径と評定値の関係から次の結果が得られた。

- (1) 反応 I では、感覚折点約 35 μ m を境界に、無変化状態と粒径の変化に対して、感覚的に反応が大きく変化する反応パターンにわけることができた。感覚折点は粒子刺激閾に対応し、また、刺激閾は約 120 μ m であり、指紋の深さに対応した。
- (2) 反応 II では、感覚折点約 100 μ m を境界に、無変化状態と粒径の変化に対して、感覚的に反応が大きく変化する反応パターンにわけることができた。また、刺激閾は約 10 μ m であり、粒子刺激閾近傍約 25~50 μ m で無変化状態が確認できた。
- (3) 反応 III では、あらゆる粒径に対して感覚的に反応が鈍く、反応 II と同様に粒子刺激閾近傍で無変化状態が確認できた。
- (4) 反応 IV では、粒径の変化に伴い感覚がほぼ直線的に変化する反応を示し、また、粒子刺激閾近傍約 25~50 μ m で無変化状態が確認できた。

以上の結果より、人間が触感覚により粒子群を評価する場合、粒径約 10、36、120 μ m という値は触感覚にある変化を与える閾値であると考えられ、その中でも約 120 μ m は指紋の深さに対応しており、指紋が触感覚に与える影響が大きいと考えられる。また、刺激閾である 10、120 μ m は主成分分析における固有ベクトルから抽出できる。

本研究の結果を、触感覚のバーチャルリアリティへの応用、さらに、本研究のような指先で自由運動を行う粒子群に対する触感覚と、人工皮革のような固定面に拘束された凹凸面に対する触感覚との比較、およびその表面性状との比較、評価への応用が期待できる。最後に、被験者としてご協力いただいた、本学、計測ロボット工学研究室、ならびにシステム力学研究室所属の学生に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 前野隆司：ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能、日本ロボット学会誌、18、6、(2000)、772。
- 2) M.Kobayashi, T.Watanabe : A Tactile Display System Equipped with a Pointing Device -MIMIZU-, Computers Helping People with Special Needs, Springer, (2002), 527。
- 3) 官能検査ハンドブック：日科技連出版社、(1973)。
- 4) 山本純雄、他 3 名：手触りによる粒子群の認識とそのセンサ化（言葉による評価と基本的諸量の測定）、日本機械学会論文集 (C 編)、59、561、(1993)、1473。
- 5) 菅民郎：多変量解析の実践 (上)、現代数学社、(1993)。