特集 確率ファジィ解析とその周辺

確率ファジィ解析[†]

—「確率ファジィ解析とその周辺」特集にあたって—

小倉 幸雄*

1. はじめに

1997年10月9日(木)-10月11日(土), 佐賀大学理工学部で研究集会『ファジィ解析とその周辺』が開催された。文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)の援助によるものである。もともと数学の世界では, 科学研究費で研究集会を開き, 基本的結果の紹介と新しい結果についての講演と討論を行なうことにより, その分野の現状把握と, 今後の発展の方向を探ることは珍しいことではなく, これは有形, 無形に当該研究に寄与するところが大きい。付録に講演者と講演題目の一覧を掲げておいたので, 興味のある方は参照して頂きたい。

本特集は, そのときの講演の中から, 特に研究集会のテーマである確率ファジィ解析に直結しているものを選び, 講演者に執筆を依頼したものである。数学者の文章は難解になり易く, 読み難いというのが定評であるが, 各執筆者ともその点には注意して頂いたので, 基礎的なところから分り易く解き起してくれているようである。それらへのより簡易な導入を, というのが本稿の目的であるが, これは屋上屋ならぬ『床下床』かも知れない。せめて, 導入により却ってわけが分からなくなった, などということのないように気を付けなければなるまい。

[†] Stochastic Fuzzy Analysis
本研究は, 文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(課題番号 09440085)からの援助によるものである。
Yukio OGURA

* 佐賀大学理工学部数理科学科
Department of Mathematics, Faculty of Science and Engineering, Saga University

最後に, 本特集は前出の研究集会に出席された, 水本雅晴本紙編集委員(現 日本ファジィ学会会長)の勧めによるものである。この場を借りて同編集委員に謝意を表するものである。

2. 確率ファジィ解析とは何か

この言葉は新語であり, 私の創作である。少なくとも私自身は何処からか引っぱって来たわけではないので, そう思っている。しかし, この言葉を研究集会の題名にしたりして, 平然と使っているが, その意味について質問されたことがない。近年の情報洪水の中で, 様々な新語が出ては消えているので, 別に気にもされなかったとも言えるが, もうひとつの解釈としては, 『意はずから生ず』でネーミングが自然で分り易かったのかも知れないと, やゝ我田引水的な解釈もある。だが, 寧ろ新しい分野が現われるときには何時もそうなのだが, 例えば「100人の情報科学研究者がいると, 100種類の情報科学が存在する」と言れるように, 夫々に人が夫々のイメージで自分流にこの言葉を捉えておられると考えた方が妥当だろう。それはそれで結構なことなので, これを第一の定義(広義の定義)としておこう。即ち,

広義の定義 『確率ファジィ解析』とは, 夫々の人が持つ『確率ファジィ解析』の集合であって, その意味は時間の経過とともに確定して行くものである。

ということになる。

だが、これでは少し無責任で「それでは、おまえの『確率ファジィ解析』は何か」と問われかねない。そこで、私なりの広辞苑的な定義(狭義の定義)を与えてみると

狭義の定義 『確率ファジィ解析』とは、ファジィに現われる確率的な現象を解析する学問である。となる。これは単語を適当に結びつけただけではないか、と思われるかも知れないが、いくつかの可能性を捨象している。ひとつは、例えば『確率解析』と言ったときには、確率的な現象を解析するだけでなく、解析学の奥に隠れている確率的な原理を見つけ出し、その原理を用いて解析学を行なうことが、主要な分野として含まれているが、上の定義からこのことに対応することを捜すのは困難である。また、測度論も確率解析の一分野と言えるが、その拡張であるファジィ測度論も上の定義に入れ難い。それで、第3の定義ということになるが、

第3の定義 『確率ファジィ解析』とは、ファジィに関連する確率解析、またはその拡張である。

ということにしておこう。こうすると、大分多くの人に受け入れられ易くなるが、やゝ無責任ともいえる『広義の定義』との差もあまり無くなる。

そこでこの節の結論だが、多分正しいのは『定義は第3の定義』だが、個人的には当面『狭義の定義』を支持したい。そして、時代とともにこの分野が発展して行って、『第3の定義』が真の意味を持つようになることを期待したい。

3. 確率とファジィの結びつき

ファジィの概念が世に出たとき、一見それが確率と似ている為に「確率論と何処が違うのか」という疑問が出され、その違いを強調するあまりに、確率論の研究者とファジィの研究者の距離が離れて行った、という不幸な経緯がある。幸いにして、私自身は当時はファジィについて何も知らなかったもので、そのような確執から免れたので、双方の

学問について何の拘りも持たずに済んでいる。

その私なりの解釈では、「あいまいさをメンバシップ関数で表すのがファジィで、確率で表わすのが確率論である」と考える。勿論、多くの場合メンバシップ関数は規格化可能で、そのときは確率密度関数と見なせなくはない。しかし、規格化出来ない場合もあるわけだし、その場合例えば情報量についての Rényi 流の解釈をしようと思うと一工夫必要である([6]参照)。更に言えば、たとえ規格化出来て、確率密度関数で表わされたとしても、そのことを用いた確率解析がなければその甲斐がないし、接近法が違うのに無理にそうすると本来に意味を失ないかねないという危惧さえある。ただし、双方の違いを認めた上で、互いの共通点にも目を向け、深いところで繋がっていることを明かにし、互いの長所を取り入れるようにしなければならないことは、どの分野について言えることである。

もう一つのファジィの手法は、ファジィ測度である。ファジィ関係等は、基底の空間を複雑にすればメンバシップ関数で表わされないことはないが、一般のファジィ測度はそうはいきそうにない。これは確率測度の拡張であり、容量の拡張であり、その意味では測度論に近い。

上での話は、確率とファジィを対立的または協調的に捉える立場で、この二つは同じ土俵に上に乗っている。しかし、これを立体的に捉える立場はないだろうか？

例を一つ挙げよう。 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ の n 人の人に、明日の天気を尋ねたとしよう。 ω_1 の人は『晴れ』と言ひ、 ω_2 の人は『曇』というだろう。しかし、 ω_3 の人は『晴だろが、曇かも知れない』という。それを聞くと、 ω_1 の人も「そういう答えでも良いのなら、『大体晴』という回答に変更する」というかも知れない。 ω_2 の人も、『曇だが、ひょっとすると雨になるかも知れない』と回答を変えるかも知れない。結局、人間の予想というのはあいまいで、ファジィな形でしか答えられない。というより、その方が自分の気持ちに正直で自然であるということである。こう考えると、これらの人の回

答は、晴の度合を横軸に取った、メンバシップ関数で表わすのが良いだろう。それは、例えば図1のようになる。

なかには、もっとちゃんとした確信を持っている人がいて、絶対に晴だとか、絶対に雨だとかいう人もいるかも知れないが、そのときは何時もするように、クリスプ集合や、一点に集中した関数をメンバシップ関数ととってくればよい。こうして得られる $\{X(\omega_k)\}_{k=1,2,\dots,n}$ が**ファジィ値確率変数**または**ランダムファジィ集合**である。勿論、確率変数というからには、確率空間 (Ω, F, P) を準備しておかなければならないが、今の場合、それらは暗に自然なものが与えられている。即ち、 $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ で、 F は Ω の部分集合全体、 P は

$$P(A) = \frac{1}{n} \# A$$

($\# A$ は集合 A の元の総数を表す)で与えられるものである。実は、 P は別に上式でなくてもよく、色々な与え方があるが、ここでは全ての人の予想に対し同等な重み与えることにした。

この例では、直観的に確率変数を定義して後でそれに相応しい確率空間を定義したが、先ず適当な確率空間を与え、その上のファジィ値確率変数を与えるのが普通である。その際に厳密にやろうとすると、可測性とかのや、複雑な議論を必要とする。ここではそれらには触れないことにするが、本特集で日合文雄氏が初歩的なところから分り易く解説しているので御覧頂きたい。

なおこの例では、人間の予想する結論のあいまいさを、メンバシップ関数で表すことによってファジィ値確率変数が得たが、対象になるもの固有の性質によって、ファジィ値確率変数が現れる例も沢山ある。天気予報に関連したものでは、気圧配置とか雲の分布などがそれに当たる。前者では、確率変数 $X(\omega)$ の値は地表上の点から気圧の値をとる関数である。特に台風などは、狭い範囲のデータですむので恰好な例となるだろう。後者では、 $X(\omega)$ は地表の点から雲の密度の値を取る関数である。厭、寧ろ3次元的に考えて、地上何キ

図1 天気の予想のファジィ値確率変数

ロか以下の空間の点から、雲の密度への関数とした方が適切だろう。

これらの例に現れる確率変数をファジィ値と解釈することには、異論もあるかも知れない。しかし、数学的にメンバシップ関数の値を取る確率変数を捉えるには、一般の関数値確率変数を解明する手段を開発しなければならず、そこまで広げると、そのイメージを与える良い例になっていると言えよう。何れにせよ、このように考えると、確率とファジィは対立するものではなく、自然と結びつくのである。それに、これは確率変数の拡張という形での両者の結びつきであるが、まだまだ他の結びつきも沢山あるかも知れない。

4. ファジィ値確率変数と集合値確率変数

ファジィ値確率変数 $X(\omega)$ を調べるのには、いくつかの方法がある。例えば、メンバシップ関数を正規三角形関数(1の値をとる三角形)に限定すると、図2のように、 $X(\omega)$ は3つの確率変数 $l(\omega)$, $m(\omega)$, $r(\omega)$ だけで決まるので、これらの性質を調べて $X(\omega)$ に接近するという方法がある。

また、メンバシップ関数を1次元凸関数に限定して、図3のように、 $X(\omega)$ をそれを決める右側関数 $R(\omega)$ と左側関数 $L(\omega)$ のふたつの関数に帰着させて、これを調べる方法もあるだろう。

これらの方法は、その特殊性を生かしたもので、大変有用な方法である。しかし、数学者の習性と

図2 三角形ファジィ値確率変数

図3 凸型ファジィ確率変数

してももう少し一般の形で定義しておきたいという気がおこる。その要求をみたすのが、最も標準的な方法、即ちレベル集合に切ってそれを積み上げる方法である。

$\mathfrak{X}$ 上のメンバシップ関数をもつファジィ値確率変数 $X(\omega)$ と $\alpha \in [0, 1]$ に対して

$$X_\alpha(\omega) = \{x \in \mathfrak{X} : X(\omega) \geq \alpha\}$$

とおくと、これは $\omega \in \Omega$ から $\mathfrak{X}$ の部分集合に値をとる写像と考えられる。可測性の議論を無視すると、 $X_\alpha(\omega)$ は集合値確率変数またはランダム集合とよばれるものとなる。そこで、「関係式

$$X(\omega)(x) = \sup\{\alpha : x \in X_\alpha(\omega)\}$$

で定まるメンバシップ関数をもつファジィ値確率変数が元の $X(\omega)$ に一致する」ということを利用して $\{X_\alpha(\omega) : \alpha \in [0, 1]\}$ の性質を調べることで、 $X(\omega)$ の性質を得ようという方法である。

この極く当たり前の方法が割と有用である。というのは、ランダム集合の研究は結構前から行われていて、それなりの蓄積があるからである。実際、ランダム集合の研究は、私の知っている範囲

でも、古くは 1944 年の Robbins の仕事[21]がある。その後、Choquet[2]は容量からランダム集合を構成することを試みているが、この仕事は別の接近を行なった D. G. Kendall[10]に注目されることになるのだが、そこら辺のからみは、本特集の神田 護氏の記事に詳しく紹介されている。因みに、氏の記事はランダム集合の構成を初学者向けに解説していて有用であることは勿論だが、数学物語の読物としても面白い。

尚、神田氏の解説のランダム集合の定義は、一見上の定義と異なるように見えるが、本質的には同じものである。この違いは、多分 Choquet の問題意識が、その序文でも触れているように、容量そのものにあったことからきているように見える。また、ファジィ値確率変数からレベル集合を作るとき、

$$X_{\alpha+}(\omega) = \{x \in \mathfrak{X} : X(\omega) > \alpha\}$$

と真の不等号にするか、或いは、 $X_\alpha(\omega)$ と $X_{\alpha+}(\omega)$ との間の集合を取るかという議論があるが、これは定式化するとき、どのバージョンを取るかだけの問題で、あまり本質的な問題ではないと思う。

5. 現状と展望

以下は、私見にもとづく『現状と展望』で、全てを網羅しているものではない。特に、ファジィ測度とファジィ積分に関することは、完全に欠落していることを断っておく。

ファジィ値確率変数の研究の一つの捉え方として、普通の実数値確率変数、ベクトル値確率変数、集合値確率変数、ファジィ値確率変数、と一般化の流れとみる見方がある。勿論、この見方は一面的で、実際の研究は研究者のもつ興味、洞察力、見識、それに外部との交流等によって行なわれるもので、単なる一般化というのは、あまり良い見方ではない。しかし、例えばある具体的な問題を与えられたとき、それがどのような形で解けるかということは、その時代の水準に依るところが大きい。

く、その意味で時代の到達点というのも重要な要素で、その意味で、敢えてこの立場から見てみよう。時代から言うと、集合値確率変数が現われたのは、前出のように1950年前後で、ファジィ値確率変数の研究は1980年頃である。後者の発展には、Ralescu と Puri の寄与が大きく、最近ではスペインの Gil とそのグループが活発である。

5.1 構成と可測性 ランダム集合研究は、4節で述べたように、私の知識の範囲では1950年前後に始められたと思うが、先ず問題となるのは構成だろう。これについては、前出の神田氏の記事が詳しいので、それに譲ることとする。([15]も参照)。次が可測性だが、上で触れた日合氏の記事が、ファジィ値確率変数の場合も含めて充分の解説してくれているので、その記事とそこにある文献を参照されたい。そこにもあるように、可測性は可測選択と直接的に関係しており、この可測選択は、凸解析の方から来た支持関数とともに、ランダム集合の性質を導くための重要な手段になっている。尚、集合値関数の可測性については、最近出た[20]でも最後を1章を割いているので、参照されたい。余談だが、この本の他の章はランダムでない集合に関することだが、これらは必ずしもランダムでないファジィ解析の研究に役立ちそうである。

5.2 大数の法則

大数の法則は、確率論における最も基本的な問題で、その発祥は Jacob Bernoulli の『推論術』(1713)に遡る。その後、de Moivre と Quetelet は、確率を独立な試行の相対頻度の極限と考えるようになるようになるのだが、これをベクトル値確率変数に拡張するのは容易である。集合値確率変数の場合、その取る値がコンパクト集合のときは、Shapley-Fokman の不等式を使って凸集合値の場合に帰着させ、これをある Banach 空間へ埋め込む、という方法を取る。しかし、これは独立同分布の場合で、この条件を外すと事は複雑である。この辺りの事情については、本特集の井上 洋氏の記事が、初歩的なところから詳しく解説しているので参照されたい。コンパクト集合値という

条件を外すと、位相の問題等も出て来て話は更に複雑になるが、[8]が良く纏っている。また、大数の法則はファジィ値確率変数についてもいくつかの結果があるが、これについても井上氏の記事に譲ることにする。

5.3 牽引域定理

大数の法則の一般化のひとつの方向は、分布についての仮定を緩めることである。即ち、対応する確率変数を可積分としないで、その代りに分布の遠方での退化の速さの条件を与えて、独立確率変数の和をその退化の速さを決める量に関係した適当なパラメータで規格化し、その極限を得ようとするものがある。所謂牽引域(domain of attraction)理論の集合値版であるが、詳しくは[4]にあるので、興味のある方は、それとそこにある文献を参照されたい。なお、上の議論では集合の『和』は全て Minkowski 和、即ち

$$A+B=\{a+b:a\in A, b\in B\}$$

(場合によってはこの閉包をとることもある)を用いているが、[16]では代りに集合和を用いて同様な議論を展開している。ベクトル値との対応で言えば、Minkowski 和が、通常の和に対応しているのに対し、集合和の方は最大値を取ることに対応している。例も豊富なので、この方向の研究は今後も期待が持てそうである。

5.4 中心極限定理

大数の法則、牽引定理と続くと、次は中心極限定理ということになるが、これが意外に厄介である。集合値確率変数の大数の法則の極限值は、零(空集合)にはなり得ないので、中心極限定理を記述しようとするときに引き算が必要になるが、Minkowski 和にしても、集合和にしてもその演算が逆元となるような引き算がうまく定義出来ない。それでコンパクト凸集合全体を Banach 空間に埋め込んで、そこで中心極限定理を得るのだが、それを元の集合族の空間にそのまま戻せない。それで、上の埋め込みが等距離的だということに着目して、距離だけで記述する形の定理を得るのだが、

あまりきれいな形ではない。更に Gauss 分布も、例えば全ての支持関数が Gauss 分布に従う、という定義にすると極く限られたものになってしまう。これらの結果については[5]と[17]が参考になる。

5.5 マルチンゲール

もうひとつの話題は、マルチンゲールである。「確率 $1/2$ で勝負が決し、賭金と同額を得失するというゲームでは、今迄失ったのと同額の金額を賭けるようにすれば、何時かは必ず勝つことがあるので、必ず元は取り戻せる。」という戦術がマルチンゲールの発祥とされており、この言葉は古くから用いられていたという。これを、体系的な理論として確立したのが Doob[3]で、今ではこの理論は確率解析で欠かせない存在になっている。これをランダム集合に持ち込んだのが[9]である。これには、平均や条件付平均の定義と性質とか、位相の導入とかのいろいろな準備が必要で、その意味で彼等の功績は大きい。[18]はこれをファジィ値確率変数に拡張したが、[12]と[13]ではそれを整備して広いクラスに適用出来るようにした。尚、集合値マルチンゲールの収束定理の拡張と、優または劣マルチンゲールの収束定理については[14]と[7]を参照されたい。

5.6 その他の話題

その他の話題だが、重複対数の法則が、5.3 節で述べた Banach 空間への等距離埋め込みの形で、得られている([5])。また、[1]は個別エルゴード定理を、集合値とファジィ値の双方について得ている。[11]は論文の題名が興味を惹くが、内容は Malliavin calculus というより、Itô calculus を用いて、ファジィ確率微分方程式を扱ったものである。大偏差原理については、未だ手をつけられていないようなので、今後の研究が待たれる。最後に、ファジィ積分には触れないと書いたが、[19]はファジィ上の汎関数がファジィ積分で表されるための条件を与えていて興味をそそられる。

5.7 今後の展望

『今後の展望』ということだが、多くの分野がそうであるように確率ファジィ解析も、数学的理論と応用を結びつけるような、具体的な青写真は見えて来ない。では将来が暗闇かということ、必ずしもそうでない。理論と応用の結びつきの過去の例を見てみると、先ず理論で提起された言葉とその概念の応用への移入がある。これは、応用の方へのアイデア提供という意味で馬鹿にならない。次に、一見無関係に見える理論と応用の蓄積があるが、その混沌とした中から応用の方にも真に有用な理論や手段が生まれて来る。確率解析の例で言えば、中心極限定理が主役の統計的推定理論、確率微分方程式の記述に欠かせない Itô calculus、制御理論における Kalman フィルタ、数理経済学における Black-Scholes モデル等が挙げられよう。将来、確率ファジィ解析にこれに匹敵する理論や手法が生まれるという保障はないが、それでも希望は捨てたくない。今はその可能性を目指して個々の理論を発展させて、具体例を蓄積する時期だろう。また、そもそもランダム集合の概念そのものが、数理経済学と数理統計学において、互いに独立に導入されたものであることから考えて、現時点でも応用に役立つ道具が既にある筈なので、それを用いた仕事も期待されよう。

6. あとがき

本特集の記事で、前節までに紹介出来なかったものが二つある。高橋渉氏の記事と吉田祐治氏—安田正実氏の記事である。前者は凸解析の立場からファジィ集合の解析に迫るものであり、今後のランダムファジィの研究に欠かせない道具となる期待が大きい。後者はファジィシステムにおける意思決定についての総説だが、接近法は確率解析で、確率的なものを内包している。共に、直接ランダムファジィではないが、紛れもないファジィ解析で、確率解析とも極く近い関係にあるので、本特集に加えたことを断っておく。

参 考 文 献

- [1] J. Bán, Ergodic theorems for random compact sets and fuzzy variables in Banach spaces, *Fuzzy Sets and Syst.*, 44(1991), 71-82.
- [2] G. Choquet, Theory of capacities, *Ann. Inst. Fourier*, 5(1955), 131-295.
- [3] J. L. Doob, *Stochastic Processes*, Wiley, 1953.
- [4] E. Giné and G. Hahn, Characterization and domain of attraction of p -stable random compact sets, *Ann. Probability*, 13(1985), 447-468.
- [5] E. Giné, G. Hahn and J. Zinn, Limit theorems for random sets : an application of probability in Banach space results, in *Probability in Banach Spaces IV*, Lec. Note in Math. 990, 112-135, 1982.
- [6] K. Handa, P. Kalukottege and Y. Ogura, A probabilistic interpretation of the degree of fuzziness, *J. Appl. Probab.*, 31, (1994), 1034--1148.
- [7] C. Hess, On the almost sure convergence of sequences of random sets : martingales and extensions, to appear in *Jour. Pattern Recognition*.
- [8] F. Hiai, Convergence of conditional expectations and strong laws of large numbers for multivalued random variables, in *Trans. Amer. Math. Soc.* 291, (1985), 613-627.
- [9] F. Hiai and H. Umegaki, Integrals, conditional expectations and martingales of multivalued functions, *Jour. Multiva. Anal.*, 7 (1977), 149-182.
- [10] D. G. Kendall, Foundation of a theory of random sets, in *Stochastic Geometry*, eds. E. F. Harding and D. G. Kendall, Wiley, 1974.
- [11] R. P. Leland, Fuzzy differential systems and Malliavin calculus, *Fuzzy Sets and Syst.*, 70 (1995), 59-73.
- [12] S. Li and Y. Ogura, Fuzzy random variables, conditional expectations and fuzzy valued martingales, *J. Fuzzy Mathematics*, 4(1996), 905-927.
- [13] S. Li and Y. Ogura, Convergence of set valued and fuzzy valued martingales, to appear in *Fuzzy Sets Syst.*, 100(1998).
- [14] S. Li and Y. Ogura, Convergence of set valued sub- and super-martingales in the Kuratowski-Mosco sense, *Ann. Probability* 26(1998), 1384-1402.
- [15] G. Matheron, *Random Sets and Integral Geometry*, John Wiley and Sons, 1975.
- [16] I. S. Molchanov, *Limit Theorems for Unions of Random Closed Sets*, Lec. Note in Math., 1561(1993).
- [17] M. L. Puri and D. A. Ralescu, The concept of normality for fuzzy random variables, *Ann. Probab.*, 13 (1985), 1373-1379.
- [18] M. L. Puri and D. A. Ralescu, Convergence theorem for fuzzy martingales, *Jour. Math. Anal. Appl.* 160(1991), 107-121.
- [19] D. A. Ralescu and M. Sugeno, Fuzzy integral representation, *Fuzzy Sets and Syst.*, 84(1996), 127-133.
- [20] R. T. Rockafellar and R. J-B. Wets, *Variational Analysis*, Springer, 1998.
- [21] H. E. Robbins, On the measure of a random set, *Ann. Math. Statist.* I : 14(1944), 70-74, II : 15(1945), 342-347.

付 録

研究集会『ファジィ解析とその周辺』の
講演者・講演題目一覧

- 神田 護(筑波大・数学系) : Random set の基礎をめぐって (I) (II) (III)
- 高橋 渉(東工大・情報理工学) : Shadows and Fixed Point Theorems for Fuzzy Sets
- 井上 洋(東京理大・経営) : Fuzzy Random Sets and Convergence Results
- 本田 あおい, 岡崎 悦明(九州工大・情報工) : ファジィ測度と意思決定
- 水本 雅晴(大阪電通大・情報工) : 最近のファジィ推論法
- 石 岩(九州東海大・工), 水本 雅晴(大阪電通大・情報工) : An Analysis on Neuro-Fuzzy Learning Algorithms
- 吉田 祐治(北九州大・経済), 安田 正實, 中神 潤一, 蔵野 正美(千葉大・理) : A fuzzy stopping problem with additive weighting function
- 吉田 祐治(北九州大・経済) : On Optimal Stopping Problem of a Sequence of Fuzzy Random

Variables

日合 文雄(茨城大・理): Conditional Expectations
for Normal Integrands

李 寿梅(佐賀大・工学系), 小倉 幸雄(佐賀大・理
工): Convergence of Set Valued Sub- and
Super-Martingales

[問い合わせ先]

〒840-8502

佐賀市本庄町 1

佐賀大学理工学部数理科学科

小倉 幸雄

FAX : 0952-28-8501

E-mail : ogura@ms.saga-u.ac.jp

URL <http://www.ms.saga-u.ac.jp/~ogura/>

(1998年9月30日 受付)

— 著 者 紹 介 —

小倉 幸雄 (おぐら ゆきお)

佐賀大学数理科学科

1964年 京都大学理学部数学科卒, 同大
学院理学研究科修士課程修了, 理学博士.
九州大学工学部助手, 佐賀大学講師, 助教
授を経て現在佐賀大学数理科学科 教授.
専門は確率解析学