

# 衛星画像データによる水質分布解析へのファジィ 回帰分析の適用と可能性分布図の作成

正員 西田 眞 (秋田大学)  
正員 大塚 敬 (秋田大学)

Application of Fuzzy Regression Model on Water Quality Analysis with Satellite Image Data  
and Drawing of Estimation Map

This paper presents the results of using the fuzzy regression model to analyze the water quality from satellite images. A case study has been conducted and the results of the fuzzy regression model have been compared with the correlation coefficient of the conventional statistical model. To draw the possibility distribution map of the water quality, a new method with the fuzzy level-slice is proposed in this paper.

It is shown by statistical analysis that the CCT count number of the remote sensing data has no relation to the water quality. However, the fuzzy regression analysis shows that the CCT count number is related to two parameters about the water quality. They are SS (Suspended Solid) and T-P (Total Phosphorus). Therefore, it is indicated that the fuzzy regression model is applicable to the analysis of the water quality.

The estimation map of the water quality for SS has been drawn by using the fuzzy level-slice method. It is shown that the pollution level of the estimation map corresponds with the forecasted range from the actual data of the water quality. It also becomes clear that the distribution of the pollution level on the estimation map corresponds with the knowledge of an expert in the investigation of the water quality. Therefore, it can be concluded that the fuzzy level-slice method is a useful technique for drawing the estimation map of the water quality.

キーワード：リモートセンシングデータ，水質分布，相関係数，ファジィ回帰分析，ファジィレベルスライス処理，知識

## 1. まえがき

近年，地球環境保護の観点から湖沼，河川および海洋の水質汚濁状況のモニタリングの必要性が高まり，各地で水質に関する定期的な調査が実施されている<sup>(1)</sup>。水質調査は対象となる水域から直接採水し，これを分析すると言った方法が一般的である<sup>(2)</sup>。しかし，この方法では局所的な水質データは得られるものの，調査水域が広域にわたる場合には，目的とする水域全般の水質分布を推定することは困難である。このため，広域性や周期性に優れた衛星画像データ（リモートセンシングデータ：以下リモセンデータと略記する）の水質分布解析および水質分布図作成への利用が期待されている。

リモセンデータを用いて水質分布図を作成する場合には，回帰分析結果を利用するのが一般的な方法である<sup>(3)-(7)</sup>。しかし，確率論に基づいた回帰分析を解析手法として用いる場合には，数多くの観測データが存在しないと精度の良

い解析結果を得ることは期待されにくい。このため，回帰分析に利用可能な程度の数の観測データを確保するため，衛星飛来日に併せて多数の船を動員し，多数の観測地点（少なくとも20地点以上）における水質データを同時に測定すると言った大がかりな手法が取られてきた<sup>(3)-(6)</sup>。しかし，この方法は膨大な経費と人員を必要とすることから，水質データ取得の日常的な手段とはなり得ないと考えられる。さらに，仮に多数の水質データとリモセンデータを得ることができても，常に良好な解析結果が得られるとは限らないのが現状である<sup>(5)</sup>。なお，定期観測が行われている環境基準点などから得られる，少数の水質データを用いて解析を試みた例も報告されている<sup>(7)</sup>が，対象水域の基本的情報を得る手段として使用されているに過ぎなかった。

リモセンデータから良好な水質解析結果が得られにくい原因としては，次のようなことが推測される。一般に，リモセンデータには各種の外乱（大気効果，界面効果，水面

波効果、計測系のノイズ等)が含まれていることが知られている<sup>(5)(8)</sup>。これら各種外乱はリモセンデータに潜在する不確定因子、すなわち“あいまいさ”の一種であると考えられる。しかし、各種外乱を排除した上で水質解析を行うことは現時点では困難であると考えられている<sup>(5)-(8)</sup>。さらに、リモセンデータの瞬時視野に起因する問題や、水質測定位置を画像上で特定することの困難さに起因する問題が、データ処理プロセスに介在している。例えばランドサットTMセンサの瞬時視野はバンド6(熱バンド)を除き約30mであり、これが1画素の輝度値(CCT値)となる。この輝度値は30×30m<sup>2</sup>の面積に含まれる水面上の情報を平均したものと与えるのに対して、水質データは採水した場所の点情報と考えられる。このため、画像上で採水地点が特定できたとしても、輝度値と水質データの値が一意的に対応していると見なすのは無理であると考えられる。加えて、実際の処理において採水位置を画像上で特定することが困難なことから、画像上から採水地点と思われる周辺の数点~数十点の画素を選択し、その平均値をリモセンデータとして使用するのが一般的であった<sup>(3)-(7)</sup>。しかし、この方法では採水地点が特定された場合以上に、解析に用いたリモセンデータに“あいまいさ”が含まれていることになる。

以上述べたように、各種外乱や瞬時視野に起因するリモセンデータに潜在するあいまいさや、データ処理上で生じるあいまいさが要因となり、通常確率モデルに基づいた回帰分析手法による解析では良好な結果が得られない場合があったものと推測される。

一方、実際の水質監視に携わっている現場では確率的に正確な水質分布と言えないまでも、ある程度の分布状況を把握したいとの要望がある。そこで本論文では、水質分布図の作成プロセスに可能性の領域と言った概念を導入することを提案する。すなわち、水質データとリモセンデータ間の誤差変動は観測および処理システムのあいまいさに基づくと仮定し、リモセンデータによる水質分布把握へのファジィ回帰分析の適用の可能性について検討を加えた。具体的には、秋田県八郎湖を対象として水質の定期観測データを用い、採水位置をリモセン画像上で特定し、この周辺の複数の画素の輝度情報をファジィ数として表し、ファジィ回帰分析を試みた。さらに、解析結果に基づいて簡略化推論法を用いたファジィレベルスライス処理を行い、水質の可能性推定分布図の作成を行ったので結果を報告する。

## 2. ファジィ回帰モデル、使用データおよび解析方法

**<2.1> ファジィ回帰モデル** ファジィ回帰モデルでは、観測データとモデルのずれは、入出力関係を表すシステムのあいまい性によるものと仮定されている<sup>(9)-(11)</sup>。本研究で用いたリモセンデータは本質的に各種外乱が含まれていることが予測されることや、データ処理上の問題として水質測定点を画像上で特定することが困難なことから、画像上からサンプリングして得られる輝度値の分布にはあい

まいさが含まれていると考えられる。そこで、採水地点周辺からサンプリングし得られた輝度値の分布をファジィ数と見なして処理を行った。

一般に、ファジィ回帰モデルは次のように表されている<sup>(9)-(12)</sup>。

$$Y(X_p) = A_0 + A_1 X_{p1} + \dots + A_n X_{pn} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$= (a(X_p), e(X_p))_L \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

$$a(X_p) = a_0 + a_1 X_{p1} + \dots + a_n X_{pn} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$e(X_p) = e_0 + e_1 |X_{p1}| + \dots + e_n |X_{pn}| \quad \dots \dots \dots (4)$$

である。また、 $A_i$ はファジィ係数、 $Y(X_p)$ は推定値(ファジィ数)、 $a(X_p)$ は $Y(X_p)$ の中心(平均値)、 $e(X_p)$ はその幅(広がり)を意味している。なお、(2)式は(1)のファジィ係数 $A_i$ を中心と幅で表したものである。

本研究ではファジィ単回帰モデルについて解析を行ったため1入力1出力システムと見なされる。そこで、前述のファジィ回帰モデルを(5)(6)式に示すように表した。

$$Y(X_p) = A_0 + A_1 X_p \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$= (a_0, e_0)_L + (a_1, e_1)_L X_p \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $X_p$ は各水質の実測値、 $A_i$ は各採水地点周辺の各バンドのCCT値から求めた水質値に対応する三角型ファジィ数<sup>(9)-(11)</sup>(詳細は後述する)であり、 $a_1$ と $e_1$ はそれぞれファジィ数 $A_1$ の中心値と幅(広がり)であり、 $Y(X_p)$ はCCT値に関する推定ファジィ出力の区間である。また、本研究では各水質の測定点周辺のCCT値として実数値データ(平均値)を用いた場合と、三角型ファジィ数 $A_1$ を用いた場合について解析を試みた。なお、ファジィデータに対する回帰分析は、与えられたファジィ出力の区間 $[Y_p]_h$ と推定ファジィ出力の区間 $[Y(X_p)]_h$ の関連によって回帰分析を行うことである。これにはMin問題、Max問題およびConjunction問題の3つの定式化が知られている<sup>(9)-(13)</sup>。本研究ではhレベル集合のレベルhを0に設定した場合について、Min問題とMax問題に関して検討を行った。

**<2.2> 使用データおよび解析方法** 本研究の解析の流れを図1に、対象とした秋田県八郎湖の概要と水質の測定地点を図2(八郎湖水質汚濁機構調査総合報告書<sup>(2)</sup>より引用)に示す。なお、同図中のA~Fの記号は、本研究の推定結果を検討するため着目した各地点を示している。解析に用いた水質データは、月一度の定期観測が行われているPH(水素イオン濃度指数)、DO(溶存酸素量)、COD(化学的酸素要求量)、SS(懸濁物質量または浮遊物質量)、T-N(全窒素濃度)およびT-P(全リン濃度)の6種類を使用した。また、水質データとしては1984年6月4日~6日に測定されたものを、リモセンデータとしては1984年6月4日に収集されたランドサットTMデータ(108-32)を使用した。なお、水質とリモセンデータの収集日が一部異なるが、同年6月2日~7日までは降雨が観測されておらず、平均風速も1~2m/秒程度の穏やかな気候が継続していた<sup>(14)</sup>ことから、測定日時ずれによる各地点での水質変動は少ないものと考えた。

各観測地点の水質項目の測定データを表1に、TM画像上から水質測定点周辺の25画素を抽出し、各バンドのCCT値の平均値( $a_1$ )と標準偏差( $\sigma$ )を求めた結果を表2に示す。なお、ランドサットTMには7つのバンド(波長域)があるが、バンド6は瞬時視野が120mと他のバンド(30m)と異なるので使用しなかった。

なお、本研究ではCCT値の平均値を実数値データとして用いた場合と、図3に示すように収集した25点のCCT値の平均値( $a_1$ )を頂点とし、幅( $e_1$ )を標準偏差( $\sigma$ )の2倍に設定し作成した対称三角型ファジィ数を用いた場合について解析を行った。

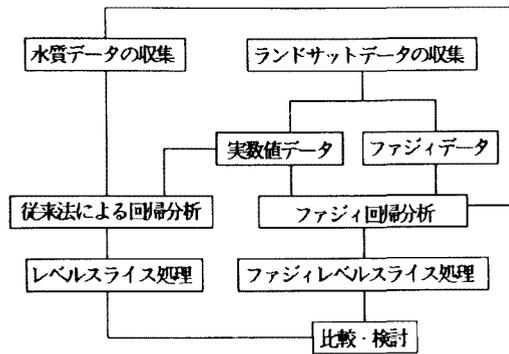
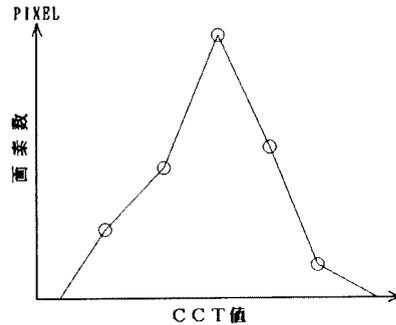
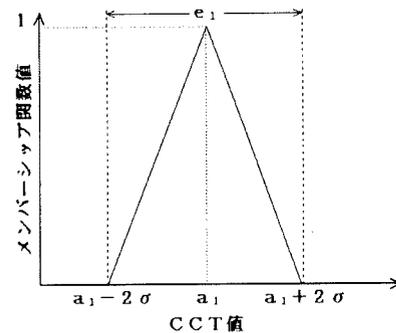


図1 解析の流れ  
Fig.1. Flow chart of data analysis.



(a) 実測値



(b) 三角型ファジィ数

図3 CCTの実測値と三角型ファジィ数  
Fig.3. Measurement value and triangular fuzzy number of CCT count.

表1 水質の実測データ  
Table.1. Measurement data of water quality.

No	測定点	水質項目					備考	
		pH	DO	COD	SS	T-N		T-P
1	浜口排水機場	7.2	9.3	5.3	10	0.97	0.036	6/4
2	野石橋	8.5	10.0	8.6	17	0.84	0.080	6/4
3	大湯橋	7.7	9.7	5.5	3	0.68	0.022	6/4
4	南部排水機場	7.8	9.1	4.5	8	0.34	0.074	6/6
5	防潮水門	7.6	8.8	5.0	8	0.40	0.100	6/6
6	調整池東部	7.6	8.8	3.8	2	0.28	0.055	6/6
7	調整池中央	7.6	9.2	3.4	3	0.24	0.063	6/6

(注)水質の単位はmg/Lである(pHを除く)

表2 TMの各バンドのCCT値の平均値と標準偏差  
Table.2. Average and standard deviation of CCT count number of TM-band.

No	測定点	TMのバンド					
		BAND1	BAND2	BAND3	BAND4	BAND5	BAND7
1	浜口排水機場	87.640 (0.959)	33.400 (0.400)	30.800 (0.447)	16.560 (0.400)	8.160 (0.525)	4.080 (0.529)
2	野石橋	98.760 (1.483)	35.960 (0.938)	33.200 (1.249)	17.800 (1.386)	10.440 (1.442)	4.720 (0.800)
3	大湯橋	92.960 (0.917)	36.280 (0.200)	31.920 (0.283)	18.240 (0.200)	9.480 (1.442)	3.880 (0.872)
4	南部排水機場	102.240 (1.844)	43.088 (0.959)	41.880 (1.249)	22.200 (0.800)	14.680 (0.721)	7.640 (1.233)
5	防潮水門	99.240 (1.281)	40.200 (0.490)	37.840 (0.800)	20.440 (0.748)	18.040 (1.265)	9.960 (0.748)
6	調整池東部	91.120 (1.649)	32.920 (0.849)	28.520 (0.693)	14.720 (0.566)	11.320 (1.114)	5.680 (0.566)
7	調整池中央	91.160 (1.114)	34.600 (0.340)	28.080 (0.400)	14.080 (0.400)	7.080 (0.632)	3.680 (0.693)

上段が平均値、( )内は標準偏差を示している

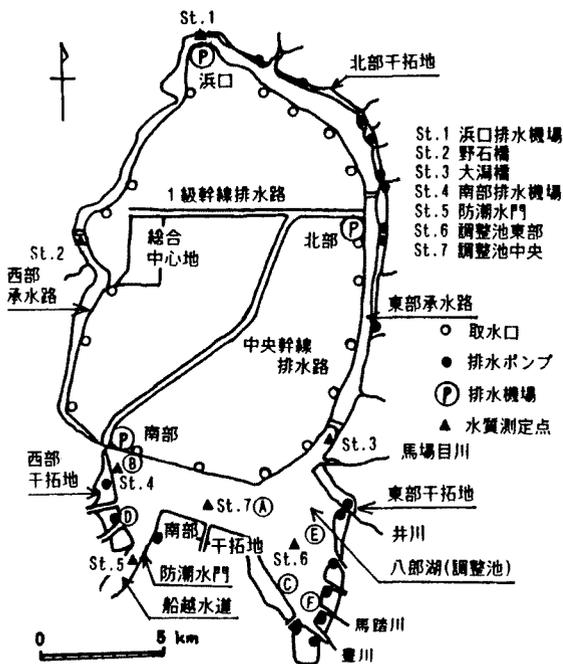


図2 対象地域の概要と水質測定地点  
Fig.2. Outline of study area and measurement site of water quality.

### 3. ファジィレベルスライス処理

ファジィ回帰モデルから得られるファジィ出力区間は、任意の画素の有している CCT 値があるグレイドでそれぞれの水質レベルに帰属することを表していると考えられる。そのため、通常のレベルスライス処理を用いて水質に関する可能性推定分布図を作成することは困難である。そこで、いくつかの適当な水質レベルでファジィ回帰直線をスライスし、そのスライスレベルにおける CCT 値のファジィ出力値集合を得、簡略化推論法<sup>(15)</sup>を用いて水質の可能性分布図を作成した。

本研究では着目画素の CCT 値はそれぞれ特定の水質レベルに対して、あるグレイドで帰属する可能性を有していると見なし、各画素の水質値を推定するファジィ推論規則を次のように与えた。

$$\left. \begin{array}{l} \text{規則 1: } Y_1 \rightarrow Z_1 \\ \dots\dots\dots \\ \text{規則 n: } Y_n \rightarrow Z_n \\ \text{入力: } S \\ \text{出力: } Z_0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

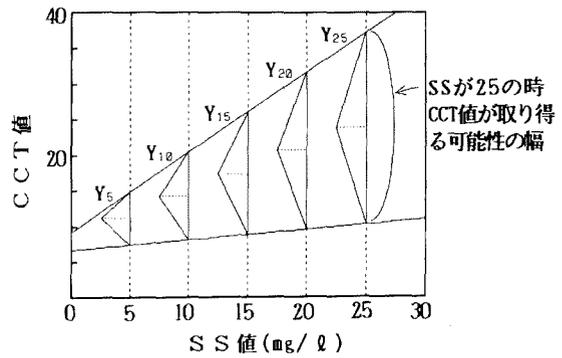
ここで、 $Y_i$  はスライスレベルに対応した CCT 値の推定ファジィ集合、 $Z_i$  はスライスレベルに用いた水質の値、 $S$  は入力した CCT 値、 $Z_0$  は最終出力値である。なお、規則数は設定したスライスレベル数に対応する。

具体的には、図4に示すようにファジィ回帰直線を適当な水質レベルでスライスし、スライスレベル( $X_i$ )に対応する CCT 値の存在する可能性として推定ファジィ出力( $Y_i$ )を得る。次に、推定ファジィ出力を y 軸方向へ射影し、これを推定ファジィ出力値集合とし、画像上の任意の画素について各推定ファジィ出力( $Y_i$ )に対する適合度  $h_i$  を求めた。なお、適合度  $h_i$  は入力  $S$  が与えられたときに、各規則の  $Z_i$  が得られる度合いを表している。最終出力である可能性推定値  $Z_0$  は、入力した CCT 値に対する適合度  $h_i$  と確定値  $Z_i$  を荷重平均することにより次式<sup>(15)</sup>から求めた。

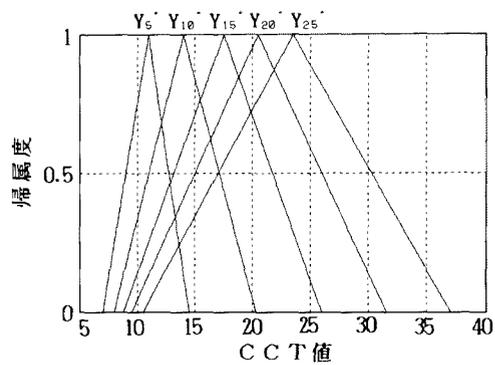
$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n h_i Z_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \dots\dots\dots (8)$$

### 4. 解析結果および検討

<4.1> ファジィ回帰分析結果 実数値データおよびファジィデータを用いた線形回帰分析を行った結果を表3および表4に示す。なお、本研究の解析は1入力1出力システムであるため、求める変数は4種類 ( $a_0, e_0, a_1, e_1$ ) となる。この4種類の変数の内1つでも欠けたり、目的関数が求まらなかった場合は完全な解が得られなかったと見なし解析に用いなかった。また、ファジィデータを用いた場合、Max問題に関しては解を得ることができなかった。こ



(a) ファジィ線形回帰モデルとスライスレベル



(b) 推定ファジィ出力値集合の例

図4 ファジィ回帰モデルとファジィ出力値集合の例  
Fig.4. Example for fuzzy regression model and fuzzy set.

のため表4に示した結果は、Min問題について解が得られた場合の各変数の値である。また、目的関数が最小値を示した組み合わせについてのファジィ回帰直線を図5(実数値データ)と図6(ファジィデータ)にそれぞれ示す。実線の範囲が各水質値における推定ファジィ出力区間を表し、各水質レベルにおける CCT 値の取り得る可能性の領域を示すものと考えられる。実数値データおよびファジィデータのいずれの場合も、水質レベルの上昇に伴い CCT 値が取り得る可能性の領域も広がる傾向が認められる。なお、参考として同図中に従来の回帰分析によって求めた回帰直線を波線で示した。

実数値データを用いた場合には全ての変数が求まった水質とバンド間の組み合わせは4組であり、ファジィデータを用いた場合には9組であった。さらに、実数値データおよびファジィデータで解を得ることができた水質項目はSSとT-Pのみであり、その他の水質項目に関しては解を得ることができなかった。特に、SSに関してはファジィデータを用いた場合に全てのバンドで解を得ることができた。水質項目によって解が得られたり得られなかったりした原因としては、水質の濃度の変動範囲が異なることが要

因となったものと推測される。すなわち、水質の実測データによると、解が得られたSSの濃度の範囲は2~17mg/l、T-Pでは0.022~0.100mg/lであり、最大値と最小値との比がそれぞれ8.5および4.5程度である。これに対して、解を得ることができなかったPH、DO、CODおよびT-Nの比は1.18、1.14、2.53、3.5程度であり、SSやT-Pに比較し相対的に濃度の変動範囲が狭いことが認められる。したがって、ファジィ回帰分析において解を得るためには、水質の濃度の変動範囲が比較的広いことが必要であるように思われる。

**<4.2> 従来の解析法による解析結果との比較** CCT値と水質データとの相関係数を求めた結果を表5に示す。表5より従来の回帰分析結果ではT-Pとバンド5および7との相関係数が比較的高いことを除くと、他の水質項目に関しては相関がほとんど見られない。さらに、ファジィ回帰分析によって解が得られた組み合わせと、相関係数の値の間にも関連が認められない。特に、ファジィ回帰分析で解を得ることができたSSについては相関係数が著しく小さいため、従来の解析方法ではこの結果を水質分布解析に利用することは困難と見なされる。なお、従来の解析法を用いた場合に解析が困難であった理由としては、水質測定地点数が7カ所と少数であったことや、水質の濃度の変動範囲が狭かったことなどによると推測される。

一方、相関係数が低いため解析への使用が困難であると見なされた水質とリモセンデータの組み合わせについても、ファジィ回帰分析法では解を得ることができた。この結果から、水質分布解析へファジィ回帰分析法が適用可能であることが示唆される。

表3 実数値データを用いたファジィ回帰分析結果  
Table.3. Result of fuzzy regression analysis with real number.

No	TM BAND	水質	目的関数	$a_0$	$a_1$	$e_0$	$e_1$
1	4	SS	22.454	14.573	0.529	1.291	0.263
2	5	SS	33.246	7.849	0.637	1.231	0.483
3	7	SS	19.340	3.881	0.385	0.372	0.328
4	2	T-P	27.070	29.818	126.185	3.586	4.585

表4 ファジィデータを用いたファジィ回帰分析結果  
Table.4. Result of fuzzy regression analysis with fuzzy number.

No	TM BAND	水質	目的関数	$a_0$	$a_1$	$e_0$	$e_1$
5	1	SS	63.433	89.464	0.828	1.118	1.090
6	2	SS	40.870	31.284	0.918	0.405	0.746
7	3	SS	52.442	25.457	1.337	0.000	1.028
8	4	SS	32.336	14.225	0.578	1.319	0.454
9	5	SS	47.225	8.362	0.635	2.845	0.536
10	7	SS	29.631	3.594	0.422	1.669	0.352
11	4	T-P	32.242	16.084	30.326	0.373	68.904
12	5	T-P	37.335	8.532	43.081	1.518	62.117
13	7	T-P	23.568	2.889	45.024	0.838	41.172

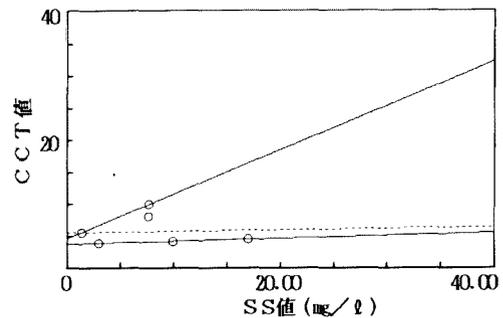


図5 実数値データを用いたファジィ回帰モデルの例 (バンド7)  
Fig.5. Example for fuzzy regression model with real number.

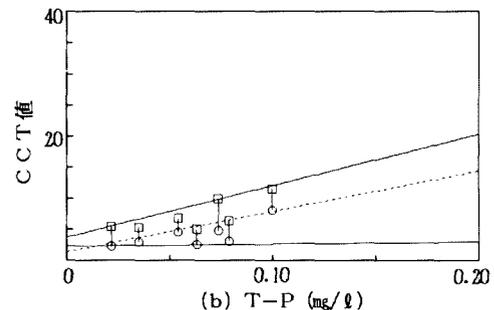
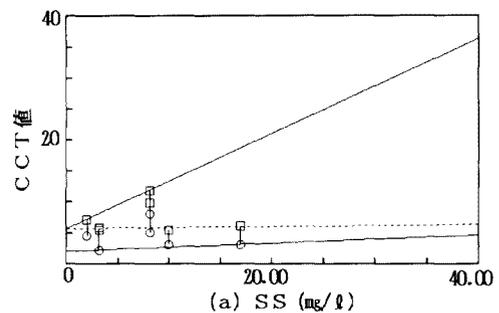


図6 ファジィデータによるファジィ回帰モデルの例 (バンド7)  
Fig.6. Example for fuzzy regression model with fuzzy data.

表5 相関係数  
Table.5. Correlation coefficient.

	BAND1	BAND2	BAND3	BAND4	BAND5	BAND7
pH	-0.122	0.221	0.214	0.215	0.106	0.000
DO	-0.381	-0.163	-0.128	-0.016	-0.482	-0.595
COD	-0.184	0.024	0.158	0.247	0.002	-0.109
SS	-0.044	0.184	0.347	0.345	0.132	0.095
T-N	-0.509	-0.284	-0.092	0.038	-0.330	-0.395
T-P	-0.557	0.544	0.523	0.397	0.704	0.751

**<4.3> 水質に関する可能性推定分布図** 従来のレベルスライス処理法(以下、スライス法と略記)を用いて作成した分布図の例として、SSのバンド7に関する結果を図7に示す。また、本論文で提案したファジィレベルスライス処理法(以下、ファジィ法と略記)を用いて作成した可

可能性推定分布図の例として、バンド7を用いた場合のSSとT-Pについての結果を図8に示す。なお、スライスレベルを設定する物理的基準が存在しないことから、本研究ではSSについては湖沼における環境基準値の類型Aに相当する値(5.0mg/l)、T-Pについては湖沼の窒素・りんに係わる環境基準の類型IIの値(0.01mg/l)<sup>(2)</sup>を基準としてそれぞれ5個のスライスレベル数を定めた。

スライス法によって得られた図7によると、対象水域のほとんど全ての領域にわたって、SS値はレベル1(5mg/l:類型A)以下あるいはレベル6(25mg/l)以上のいずれかであると表示され、レベル2(5mg/l)~5(25mg/l)の中間的なSS値の分布状況を判読するのは極めて困難であると思われる。このため、スライス法を用いて作成した分布図からは、2~3レベル程度の濃度分布についての情報のみしか読み取り得ないと考えられる。なお、スライス法を他の水質項目と各バンドの組み合わせについて適用した場合についても同様の結果が得られることを確認している。さらに、図7からはレベル6(25mg/l)以上と推定される領域が比較的広い範囲に存在していると判読されるが、これは実測値のデータから予想される結果とは異なるものである。すなわち、表1に示したように、本研究で用いた実測データのSS値の範囲は2~17mg/lであることから、レベル6(25mg/l)以上のSS値が広範囲に分布しているとは考え難い。以上の結果より、スライス法を用いた分布図から水質の詳細な分布状況を把握するのは困難であると考えられる。

これに対して、ファジィ法によって得られたSSの可能性推定分布図(図8(a))では、レベル5(20~25mg/l)と推定された場所が八郎湖東南部(F地点:図2参照)近傍に僅かに認められるに過ぎず、レベル6以上のSS値が存在する可能性に至っては全く確認することはできなかった。また、レベル1~4までの中間的な汚濁レベルもそれぞれ良好に推定されている。このことから、スライス法の結果と比較して、対象水域全域にわたってSS値の各汚濁レベルの分布状況を判読することが容易であると考えられる。さらに、ファジィ法によって得られた水質レベルの範囲は水質の実測データから予想されるSS値の範囲とも概ね合致しており、妥当な可能性推定分布図を与えているものと推察される。以上のことから、ファジィ法によって得られた可能性推定分布図から、対象水域全般の水質分布状況を把握することが可能であると考えられる。

次に、環境基準値を考慮せず適当にスライスレベル数を設定した場合の例として、スライスレベル数を8個に設定した場合の可能性推定分布図の作成結果を図9に示す。可能性推定分布図から得られる全体的な印象は図8と類似しているものの、各地点を詳細に比較すると、各地点の水質レベルの相違が比較的容易に判読可能と思われる。なお、各種スライスレベル数について検討した結果、本研究で用いた水質の濃度の変動範囲においては、スライスレベル数として5~8程度が適当であることを確認している。

**<4-4> 可能性推定分布図の検証結果** ファジィ法によって作成した水質の可能性推定分布図の確かさを判定する物理的な基準は現在のところ存在しない。しかしながら、八郎湖に関しては水質調査に長年従事している専門家が存在することから、推定分布図の結果と専門家の知識との間に明白な矛盾が生じないことが、確かさを検証する一つの方法となり得ると考えられる。そこで、専門家の知識と可能性推定分布図との対応について検討を加える。八郎湖に直接関連した専門家の知識をまとめると、

- ①湖心(A地点)は汚濁が少ない。
- ②大潟村から農業排水および生活排水を含む汚濁水が南部(B地点)および北部排水機場より流入する。
- ③八郎湖東部(C地点周辺)や防潮水門(D地点)付近は水の循環が悪く、汚濁物質が溜まり易い。
- ④馬場目川から生活排水を含む汚濁水が流入する。八郎湖東部にある(E地点周辺)排水機場から汚濁水が流入する。
- ⑤八郎湖東南部(F地点)の豊川や馬踏川からは汚濁の著しい河川水が流入する。
- ⑥穏やかな日が継続した場合、湖面の広い範囲でSS値が25mg/l以上になることは考え難い。
- ⑦湖水の大きな移動はない。

等であった。なお、A~Fの記号に対応する具体的な位置については図1を参照されたい。

ファジィ法によって得られた可能性推定分布図によると、湖心(A地点)は相対的に汚濁レベルが低いことが認められ①の専門家の知識と一致している。また、湖心に比較して、前述のB~Fの各地点周辺のT-PおよびSSに関する推定値は全般に高い汚濁レベルを示しており、これは知識②~⑤に対応している。CおよびD地点周辺は高い汚濁レベルの滞留している様子が確認され、これは知識③と一致する。また、F地点では最も高い汚濁レベルが観察され、これは知識⑤と対応している。さらに、SSの推定値として25mg/l以上の場所は認められず、これは知識⑥と合致している。このように、ファジィ法によって作成した可能性推定分布図と専門家の知識との間には矛盾が認められず、むしろ良好な一致を得ることができた。以上の結果は、本論文で提案したファジィ法が、妥当な水質分布図を作成する上で有効な手法となり得る可能性を有していることを示すものであろう。

## 5. まとめ

本論文で得られた成果の要点は次のようになる。

(1) リモートセンシングデータによる水質分布解析へのファジィ回帰分析の適用の可能性について検討を加えた結果、水質の濃度の変動範囲が比較的広いSSとT-Pに関して解を得ることができた。

(2) ファジィ回帰分析によって解が得られた組み合わせと、従来の回帰分析によって得られた相関係数の値とは必ずしも対応せず、相関係数が低い場合であってもファジィ

回帰分析によって解を得ることができた。この結果、水質分布解析を行うと言った課題に対して、ファジィ回帰分析法が適用可能であることが示された。

(3) 従来のレベルスライス処理法によって作成した水質分布図は、実測された水質データから予想される結果とは異なるものであった。これに対して、ファジィレベルスライス処理法によって得られた可能性推定分布図は、水質の実測データから予想される範囲と概ね符合し、妥当な推定結果を与えていると考えた。さらに、スライス法では得られ難かった中間的な汚濁レベルについても良好に推定されていることが認められた。

(4) ファジィレベルスライス処理法により得られた水質に関する可能性推定分布図の検証のため、専門家の知識との対応について検討を加えた。その結果、提案法によって作成した分布図と専門家の知識の間には良好な一致を見ることができた。したがって、本論文で提案したファジィレベルスライス処理法は水質分布図を作成する上で有効な手法となり得るものと考えた。

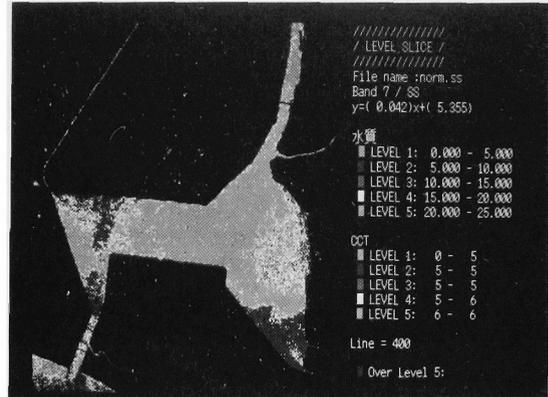
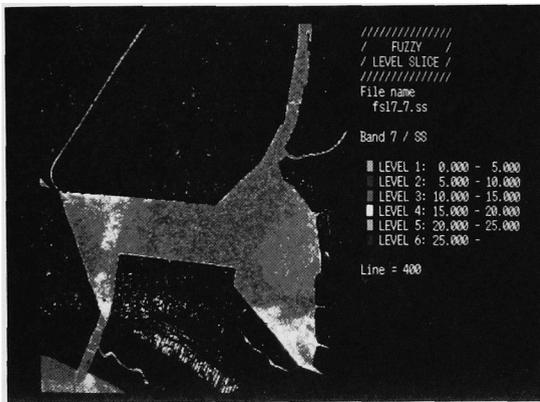
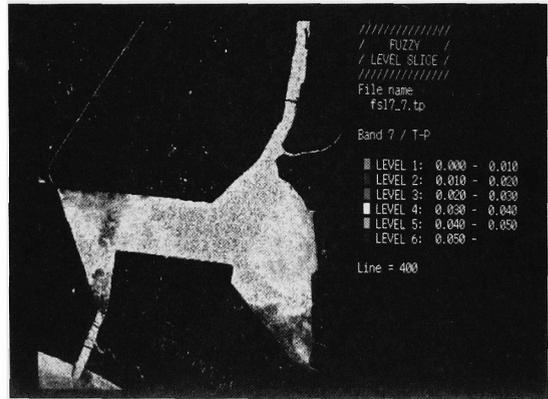


図7 スライス法による水質分布図の出力例 (SS,バンド7,スライス数5個)  
Fig.7. Distribution map for conventional level-slice (SS,BAND7,slice number:5)

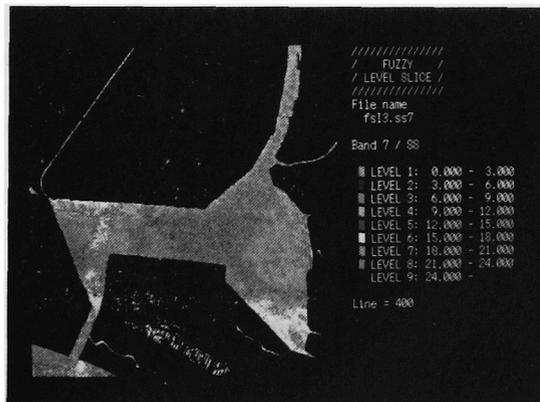


(a) S S

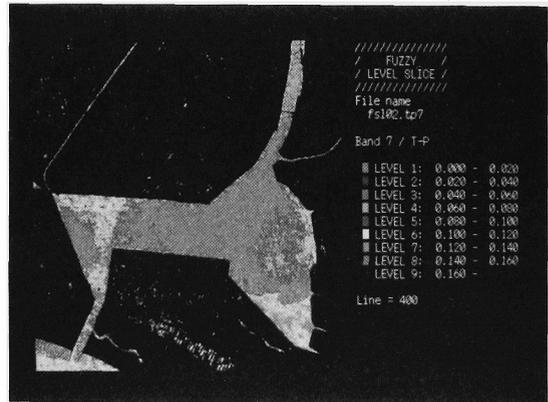


(b) T - P

図8 ファジィレベルスライス処理による可能性推定分布図の出力例(バンド7,スライス数5個)  
Fig.8. Possibility distribution map for fuzzy level-slice(BAND7,slice number:5)



(a) S S



(b) T - P

図9 ファジィレベルスライス処理による可能性推定分布図の出力例(バンド7,スライス数8個)  
Fig.9. Possibility distribution map for fuzzy level-slice(BAND7,slice number:8)

なお、本論文では少数の水質データを用いた単回帰モデルについて検討するにとどまった。このため、多数の水質データが得られる場合での提案法の有効性、ファジィ重回帰分析による検討および専門家の知識ベースの解析手法への導入などが今後の課題と考える。最後に、有益な示唆を賜った本学電気電子工学科吉村 昇教授に深く感謝の意を表します。また、水質データと専門家の知識を提供下された秋田県環境保全課関係各位、並びにデータ処理に協力下された本学技官佐藤貴子さんと大学院生田畑 亮君に厚く御礼申し上げます。本研究は文部省科研費一般研究Cの援助の基で行ったことを付記し感謝します。

(平成6年7月27日受付、同6年11月7日再受付)

## 文 献

- (1) 例えば:「平成5年版 環境白書」,秋田県環境部編 (平5-12)
- (2) 例えば:「八郎湖水質汚濁機構調査総合報告書」,秋田県編 (昭60-3)
- (3) 丸安隆和・大林成行・高橋康夫:「新しい眼で見る琵琶湖」,技報堂(1988-6)
- (4) 横山隆三:「水質調査手法としてのリモートセンシング」,情報処理,第24巻,第5巻,633~640 (昭58-5)
- (5) 横山隆三:「可視・近赤外域リモートセンシングによる水質検出の諸問題」,航水研ノート,空と海,第7号,11~21 (1985)
- (6) 宮崎 清・鷹野 洋・安岡善文:「ランドサットTMデータによる児島湖及び周辺水域の水質分布推定」,日本リモートセンシング学会誌,Vol.11, No.2,191~193 (1991)
- (7) 田中修三・比企三蔵・小西浩之:「Landsatの捉えた霞ヶ浦のアオコの拡がり」と吹送流」,日本リモートセンシング学会誌,Vol.10, No.3,25~35 (1990)
- (8) 猪俣 靖・藤原建紀・緒方純俊:「可視・近赤外域衛星リモートセンシングを用いた汚濁調査における海面波の影響についての一考察」,日本リモートセンシング学会誌,Vol.12, No.3,55~65 (1992)
- (9) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫:「ファジィシステム入門」,オーム社 (1989)
- (10) 坂和正敏:「ファジィ理論の基礎と応用」,森北出版 (1990)
- (11) 石測久生:「ファジィ回帰分析」,日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.1,52~60 (1992)
- (12) 石測久生・田中英夫:「区間回帰モデルによるファジィ係数の同定」,電子情報通信学会論文誌,Vol.J72-A, No.12,1958~1964 (1989)
- (13) 石測久生・田中英夫・長坂一徳:「改良型区間回帰モデルによる区間データの解析」,計測自動制御学会論文誌, Vol.25, No.11,1218~1224 (1989)
- (14) 「秋田県気象月報」,秋田地方気象台 (昭59-6)

(15) 水本雅晴:「ファジィ推論(1)」,日本ファジィ学会誌,Vol.4, No.2,256~264 (1992)

**西田 眞** (正員) 1952年1月18日生。74年3月秋田



大学鉱山学部電気工学科卒業。同年4月トヨタ自動車工業(株)入社。75年4月秋田大学鉱山学部電気工学科助手。87年10月同講師。92年8月同学部情報工学科助教授。各種リモートセンシングデータの解析技術とアルゴリズム,画像情報応用および知識情報システムの研究に従事。63年11月~平成元年クラークソン大学客員研究員。59年電気学会論文賞,63年静電気学会論文賞授賞。ファジィ学会,リモートセンシング学会,写真測量学会,応用物理学会,IEEE会員。工博。

**大塚 敬** (正員) 1933年7月11日生。57年3月早稲



田大学第一理工学部電気工学科卒業。同年4月富士電機製造(株)入社。88年4月秋田大学鉱山学部電気工学科教授。91年4月同学部情報工学科教授。電力システム並びに各種産業システムの制御,運用の知能化に関する研究に従事。計測自動制御学会,システム情報制御学会,電子情報通信学会,IEEE会員。工博。