論 説

ファジィ測度による地質図表現の解釈

永田 秀尚*

An Interpretation of Geological Map Expression by Means of Fuzzy Measure

Hidehisa NAGATA*

Abstract : The certainty of identifying to geological unit in geological map is interpreted by means of fuzzy measure, and the information sum of the certainty as well as the expression of geological map are examined for a practical application.

Geological map is a kind of thematic maps, which is classified to plane data map. The difference from the other distribution maps is that the geological unit is expressed not in a nominal scale but in an ordinal scale, and that each point on the map has various certainty of belonging to the unit. On the latter, a fuzzy measure makes it possible to express the certainty. The fuzzy measure g becomes $g=1$ at an actual outcrop, and it decrease with an increasing distance from the outcrop. The fuzzy measure is possible to represent complexities including anisotropy of the geologic body, and the subject or the judgement of the author of the map.

An integral of fuzzy measure of a domain enables us not only to get information sum of the certainty but also to evaluate increased information after exploration. About the geological map expression, features with higher measure points such as outcrops should be shown on the map, and the degree of certainty should be defined. By utilizing fuzzy measure, both the possibilities of the information sum and the certainty can be expressed.

Key words : geological map, fuzzy measure, certainty, geological unit, information

1. はじめに～地質図表現の重要性と問題点

野外地質を対象とする研究者や技術者にとって、地図的表現、すなわち地質図は重要な表現方法のひとつである。情報の表現方法にはこのほかに、文章・表・図解・画像などによる表現があるが(浮田・森, 1988), 地図的表現では対象地域の調査や考察の結果の多くを総合的にあらわすことができる。地質図では、強調や省略といった地図的な操作(高崎, 1988)もおこなうことができるので、多くの情報をわかりやすく表現することが可能である。地質図1枚に表現されていることがらを文章のみによって表現しようとするならば、膨大な文字数が必要となり、それでもなお理解しにくいものとなるだろう。

良質な地質図の備えるべき条件は、多くの情報を含むこと、なおかつ正しく伝達されることである。これらの条件のうち前者についての問題点は、地質図に含まれる情報の量が必ずしも明確ではないことである。また、後者についていえば、地質図はその作成過程を知る地質家どうしの暗

黙の了解を前提として描かれており、その表現についての説明が非専門家に対しては十分ではないことが問題である。たとえば、図上のある位置での地質は、地質図に示された通りではない場合もしばしばある。地質家にはそのことは自明であるが、地質の非専門家には必ずしもそのようには受け取られない。とくに環境地質や土木地質のような応用分野では、地質の非専門家も地質図の利用者であることが多いため、情報伝達の点でさまざまな不都合を生じることがある。

このような伝達上の問題に対処するために、地質図表現に含まれるさまざまな前提の明確化とそれにもとづいた適切な表現方法の検討は重要な課題である。Varnes (1974) はいちはやくこれらの問題点を指摘し、図示単元を設定する際の論理や表現上の注意点・マップにおける操作・「不確かさ」への対応の必要性などについて言及している。

しかし、こうした課題に対する検討が進展しはじめたのは最近になってからである。横田 (1989a) は地質図作成

1998年1月30日受付, 1998年10月2日受理

Geoinform, 1993 (東京) および IAMG, 1995 (大阪) にて一部発表

* (有)風水土 063-0845 札幌市西区八軒 5条西10丁目1-40-107 Fu-Sui-Do Co. Ltd., 1-40-107, 5-jo Nishi-10-chome, Hachiken, Nishi-ku, Sapporo, 063-0845, Japan, E-mail:nagatahide@msn.com

の過程について考察し、地質情報として性質の異なるものの混在や段階性、またその変換について指摘した。また横田 (1989b) は伝達手段としての地質図について考察し、地質情報の誤差やあいまいさについての伝達方法を検討している。地質図情報の特殊性については、横田 (1996) や升本ほか (1997) が論じている。

このような研究のなかで、地質データ・地質図のファジィ理論的な扱いが、地質家の考え方を説明するために有効な方法であるという主張がなされてきた。横田・升本 (1984) は地質データのファジィ性について初めて言及した。富長 (1986) は主観的な判断の有効さをファジィ集合論的に示した。地質図がファジィ論理マップであるという指摘は永田 (1991a) によって示された。その後著者はファジィ理論的な取扱いについて検討してきている (永田, 1995a・Nagata, 1995b)。

本論文では、地質図の表現をファジィ測度によって解釈することを試みる。また、ファジィ測度に立脚した情報量の算定や、地質図上での具体的な表現についても考察する。

2. 地図の分類・図示単元の定義・集合論的に見た面データ地図

地質図は地図学的には主題図の一種である。本論に入る前に、より一般的に地図の分類について概観し、図示単元 (地質図においては地質単元) を定義する。また、面データ地図が集合論的にどのように記述されるかを示す。

2.1 地図 (マップ) の分類

地図の表現形式についての研究は地理学の分野で主におこなわれてきた。地図 (マップ) にもいろいろな分類がある。浮田・森 (1988) は主題図の表現形式・方法について研究し、表現されるデータの性質によって地図を分類した。それによれば、地図は「定性的地図」「定量的地図」、また「点データ地図」「線データ地図」および「面データ地図」に区分される。これらの組み合わせによって地図は計6種類に分類できる。

定量的地図・定性的地図の区別は、データがどのような測定尺度をとるかによって決まる。浮田・森 (1988) によれば、名目尺度・順序尺度は定性的、間隔尺度・比例尺度は定量的である。

点データ地図は、点的なデータをその位置で示した地図である。地質関係では鉱床の位置と産出鉱物をあらわした鉱産図などがこの種の地図に相当する。位置と産出鉱物種類のみが示されていれば定性的、産出量まであらわされている場合には定量的地図ということになる。

線のデータとしては、たとえば地性線 (尾根・谷・傾斜変換線など) があり、これらを示した地形学図は定性的線データ地図といえる。活動度を示した小縮尺の活断層図は半定量的な線データ地図といえよう。

面データ地図は、ある面的な広がりを有するデータを示

したもので、一般の地質図がこれに相当するほか、地質図以外では土地利用図・植生図などがある。

なお、これらの地図は互いに重ねあわせることができる。実際の地質図でも基礎的な面データ地図の上に化石産地・ボーリング地点などの点データや褶曲軸・物理探査測線位置などの線データを示すことは普通におこなわれている。また種類の異なる面データを重ねあわせて表示することも可能である。原岩の地質図に変成度を重ねて表現するような比較的単純な例もあるし、応用地質図の中にはさまざまな要素の重ね合わせによって地域を評価するような手法もある (Matula, 1979)。

この論文での以下の検討は、定性的面データ地図についておこなう。一般的な意味での地質図は上記分類のうちの定性的面データ地図に分類されるからである。また、本論ではスケールモデルとしての地質図 (横田, 1989b) を念頭に議論をすすめる。以下に扱う位置のあいまいさといった問題は、スケールモデルとしての地質図では重要であるが、概念モデルとしての地質図に近づくほど副次的となってゆくためである。まったく概念的なモデルでは地質単元の相対的關係のみが重要であり、絶対的な位置はほとんど意味をもたない。ただし、完全なスケールモデルというのは成立せず、どのような地質図でも縮尺に応じた総描・省略・誇張といった地図の手法が用いられている。

2.2 図示単元・地質単元

図示単元の定義

面データ地図においては「図示単元」の定義を明確にしておく必要がある。図示単元は次のように定義される (永田, 1993)。

「記載的に他と区別でき、かつ表示可能な領域」

地質図における図示単元を地質単元と呼ぶ。ある地質図においてどのような地質単元を設定するかは、地質図の縮尺や目的によって異なる。Varnes (1974) は、目的に適合した対象物の属性のグループ化と分割の作業をおこなって、明晰に分類された単元を定義するよう主張している。

具体的には、たとえば次のようなものが地質単元となる。

- ① 白亜系
- ② ○○花崗岩体
- ③ △△砂岩部層
- ④ 粗粒砂岩
- ⑤ CH級岩盤
- ⑥ 断層

どのような区分をおこなうか、ということも地質図作成過程の一つである。したがって、記載によって他と区別できるものを地質単元と称する。上の例でいうと、①の場合には、他にジュラ系とか第三系とかの地質系統を区別できる場合に、白亜系という地質単元を使うことができる。区別の基準は何でもよく、②の場合は岩体、③の場合は層準、④では粒度という基準での区分である。④のように素

材としての区分, ⑤に示すような工学的な基準での区分であってよい。

⑥の断層は地質単元のあいだの関係として扱うこともできるが, その場合断層の両側の地質単元を, 性質が同じであっても区別して扱う必要が出てくる。このため, 断層(厳密には個々の断層)は地質単元とみなすほうが扱いやすい。なお断層が, 定義にあるように「表示可能な領域」を占めることは, 小縮尺の地質図では必ずしも多くはない。たとえば1:50,000の地図で0.5mmの線幅で示される断層は, 実際には25mの幅をもつことになるが, 描かれた断層がすべてそのような幅をもつとはいえない。しかし, 地図には誇張的な表現が許されていることにより表示が可能となるのである。逆に, 地質工学図として用いられる1:500といった大縮尺の地図では, 幅を正しく示した断層(破碎帯)が描かれる場合もある。

地質単元の特徴

上に述べたような図示単元の定義は, 地質図に限らず, 定性的面データ地図としての分布図一般に適用される。この中で地質単元は, 面データの単元がそれぞれ時間的な前後関係を有することが特徴である。それぞれの地質単元の形成年代を $t_1, t_2, \dots, t_n$ とするとこれらは順序集合をなしている(塩野・弘原海, 1988)。各単元のあいだには整合・不整合・貫入といった時間的な関係が存在し, 単元の集合は総合柱状図のような形で示されている。すなわちデータとしては順序尺度を扱っていることになる。これに対して, 土地利用図や植生図などの区分単元は, たとえ形成順序があっても普通はそれを考慮しない名目尺度である。

地質単元が順序尺度であることは, 地質図を描く際の重要な制約条件となることがある。たとえば, ある単元Eと単元Fとの関係が不整合であるのか貫入であるのかによって, 描かれる地質図が異なるような場合である。このような, 地質単元が名目尺度ではなく順序尺度であるという点は, 地質の非専門家には必ずしも理解されているとは限らない。

2.3 集合論的に見た面データ地図

面データ地図は, 表現の範囲を図示単元で分割したものである。集合論的には, 面データ地図は次のように表現される。

D1: 表現の範囲 Ω が存在する。

ここで Ω は全体集合をしめす

D2: 任意の $i, j (i \neq j)$ について, $E_i \cap E_j = \phi$

ここで ϕ は空集合をあらわす。 $i, j (\leq n)$ は整数。また, $n=1$ の場合をのぞけば部分集合である E_i および E_j はそれぞれ図示単元である。また $\cap$ は共通集合をあらわす。

$$D3: \bigcup_{i=1}^n E_i = \Omega$$

ここで $\cup$ は和集合をあらわす。

D1は表現の範囲を設定する式である。 Ω はたとえば地質調査所発行の5万分の1地質図幅では国土地理院5万分の1地形図の図郭(厳密に言えばその中の陸域のみ)に相当する。

D1で定義された範囲 Ω は, n 個($n \geq 1$)の図示単元で分割される。それぞれの図示単元には重複がなく(D2), 逆にどの図示単元にも属しないような場所はない(D3)。定義された範囲の中の任意の点 $P(x, y)$ ^{注1}は, 必ずいずれかの図示単元 E_i に属し, かつ複数の図示単元に重複して属することはない。

3. 地質データのファジィ性と地質図のファジィ測度論的解釈

3.1 地質図の作成過程と地質データのファジィ性

ある地点Pにおける岩石名・年代・化学分析値・構造などのさまざまな記載を地質データと呼ぶ。またこれらから判断される地質単元も地質データである。横田(1989a)は前者を1次データ・後者を2次データと区分した。岩石圏ではすべて何らかの地質記載が可能である。一方, 等しい精度の記載をすべての地点においておこなうことは不可能である。このことが本質的に地質データをファジィなものにしている。

ここでファジィ理論について簡単にふれておこう。

ファジィ理論(Fuzzy system theory)のなかにはファジィ論理・ファジィ集合論・ファジィ測度などの分野がある。これらのうち, ファジィ論理は命題の真偽について「どちらでもない」「やや真である」というような2値的でない真理値を扱う論理体系である。またファジィ集合論では「背の高い」とか「美しい」といった境界の明瞭でない集合を扱う。これは「あいまい性」(vagueness)とよばれる不確かさ(uncertainty)を扱っている。一方ファジィ測度は, 「両義性」(ambiguity)とよばれる不確かさを扱う(Klir and Folger, 1988)。つまり, 集合自体はクリスプであるが, その集合への帰属の確からしさに幅がある場合に適用できる(菅野 編, 1993)。

ところで, 地質図の作成過程を考えた場合, 地質データにファジィ性があらわれるのには2つの段階がある。まず, 1次データの判断に関連するファジィ性であり, 次に1次データから2次データへの変換(拡張)の際のファジィ性である。

前者は, 記載における主観の入り込み, たとえば堆積岩における粒度の判定や, 肉眼観察による火成岩の岩石名の判定・岩盤等級の判定のような事例である。実際には連続

注1 地質データは3次元的に分布するものであり, その意味では任意の点Pは3次元座標系(x, y, z)であらわされる。しかし, ここでは2次元の平面としてのマップの上での論議をするため, このように表現した。当然他の2次元平面(x, zまたはy, z)でもよい。

的に変化するものに対して、人為的な区分を設定しようとする場合にしばしば起こる。いわば人間の認識におけるファジィ性ということができ、少なくとも実際に観察したり試験したりすることが原則的には可能である実物を対象としている。この種のファジィ性に関してはファジィ集合論が有効で、富長 (1986) は岩石名の判定について、Nguyen (1985), 清水・桜井 (1986a・b) などは岩盤分類・評価について研究した。

後者は、地質図を扱う上で重要である。たとえ地下 1 m のことであっても、実際には観察できない空間の方がはるかに多くを占めており、調査によって得られるデータは点または線、せいぜい小さな面である。したがって地質図の面データ (ある地点の地質単位への帰属) は、その作成過程において点データ、線データの拡張 (内挿・外挿の両方を含む) をおこなって得られたものである。拡張は、かなりの主観や判断もまじえておこなわれることが多く、このことによって、地質図の面データは本質的に両義的 (ambiguous) である。

以下では、後者のファジィ性について検討する。すなわち、ある地点の地質単位への帰属に対する確実さをファジィ測度論的にあつかう。

Fig. 1 Relationship between the distance from the point of $g=1$ (ex. outcrop) and fuzzy measure. a to g each shows the decreasing pattern of fuzzy measure.

3.2 ファジィ測度の適用性

上述したように、面データ地図としての地質図はファジィ性を有しているが、このようなファジィ性を扱うには、ファジィ測度が適当である。地質図はある点 P がどの地質単位に属しているかを示すものであるが、ここでの地質単位は定義されて区分されているからファジィ集合ではなくクリスプ集合である。また、ある地点 P が、どのような地質単位に属しているかは、原理的には調査によって確認できることである。実際には、その所属の確実さに幅があるので、ファジィ測度を用いるのが適切である。

ファジィ測度は次のように定義される (菅野 編, 1993)。

$\Omega \neq \phi$ とし、 $\mathcal{F}$ を Ω の部分集合からなる集合体とする。次の条件 $F1$, $F2$ および $F3$ を満たす $g: \mathcal{F} \rightarrow [0, 1]$ をファジィ測度という。

$$F1: \Omega \text{ の部分集合 } E, F \text{ について, } E \subset F \Rightarrow g(E) \leq g(F)$$

$$F2: g(\phi) = 0$$

$$F3: g(\Omega) = 1$$

ここで $F1$ は単調性と呼ばれる性質である。 $F1 \sim F3$ が成立していれば、ファジィ測度とみなされるので、ファジィ測度はきわめて一般的な集合関数であるといえる。さらに、いくつかのファジィ測度の特殊形として、可能性測度 (possibility measure), 分解可能測度 (decomposable measure), 必然性測度 (necessity measure) などが提案されている。また $F1$ のかわりに、

$$F1': E \cap F = \phi \Rightarrow g(E \cup F) = g(E) + g(F)$$

という「加法性」を定義すれば、確率測度 (probability measure) となる (ここで、 $\cap$ と $\cup$ は集合演算における共通集合と和集合をそれぞれあらわす)。ファジィ測度は確率測度の拡張となっている (菅野 編, 1993)。

ある地点 $P \in \Omega$ が白亜系に属するというものの確実さを $g(K)$, 中生界に属するというものの確実さを $g(M)$ とあらわすとき、 $g(K) \leq g(M)$ と考えるのは自然である。したがって、 $F1$ は成立している。また、 $P \in \Omega$ がある地質単位 E に確実に属する場合には $g(E) = 1$, 逆に確実に属さない場合には $g(E) = 0$ と考えることも自然である。したがって、ある地質単位に属する度合はファジィ測度 g であらわすことができる。

3.3 測度値断面

いま測度値 $g = 1$ であるような点 (たとえば露頭) があるとする。この点から離れるにしたがって測度値は低下してゆく。このように空間の中の値に関係があると考えるのは地質統計 (新井, 1985) のアナロジーでもあるが、距離と測度値との関係は Fig. 1 のように示される。ここに示されるように測度値の低下のパターンはさまざまなものが考えられる。このパターンを決定するのは次のような要素である。

- ① 地質体の予測性の大きさ (永田, 1990) ; 予測性の小さい複雑な地質体では低下の度合が大きく (たとえば Fig. 1 の e や f), 単純な地質体ではそれが小さい (同 c や b)。すなわち、初生的、あるいは後生的に複雑な地質体においては、確認された地点から少しでも離れれば、別の地質単位に属する可能性が大きくなるということである。一方、均質な地質体においては離れた地点まで類推を及ぼすことが可能である。地質体が層状であるような場合、その構造に平行な方向では予測性が高く、逆に構造に垂直な方向では予測性が低い。ファジィ測度を用いればこのような「異方性」も表現可能である。
- ② 地質単元の設定; 地質単位が細かく設定されるほど

測度値の低下が起こりやすい。逆に、地質単元の設定を大まかにおこなえば、見かけ上の確実性・予測性が大きくなるため、測度値の低下は起こりにくい。

- ③ 地質図作成者の主観；多くの場合に予測性の大きさが主観的に定められているためである。「見たものしか信じない」というような極端な考え方はFig.1のgのようにあらわされる。いろいろの可能性を考慮するならばFig.1のaのようにあらわされる場合もある。

3.4 ある点における確実さの測度値（未知の単元の想定）

一般に、 Ω はn個の地質単元 $E_1, E_2, \dots, E_n$ からなっている。したがってある点Pにおける確実さの測度値 g_P はそれぞれの地質単元に対する確実さの測度値の演算結果としてあらわされる。さまざまな演算が考えられるが、ある地点においてもっとも確実さの大きい地質単元に対する測度値をその地点での測度値とするのが実用的には妥当であろう（実感としてそのように考え、作業しているということでもある）。すなわち

$$g_P = g(E_1) \wedge g(E_2) \wedge \dots \wedge g(E_n)$$

ここに $\wedge$ は最大値をとる演算

次に、それぞれの単元に対する測度値の関係を検討する。簡単のために $n=2$ の場合を考え、否定命題に対する測度値、たとえば $P \in E_1$ ではない確実さを $g(\overline{E_1})$ とあらわすとき、ファジィ論においては $g(E_1) + g(\overline{E_1}) = g(E_1) + g(E_2) = 1$ は成立せず、1より大きい場合も小さい場合もありうる。ただ確率測度を採用する場合においてのみ $g(E_1) + g(\overline{E_1}) = 1$ が成立する。より一般的には、 $0 \leq g(E_1) + g(E_2) + \dots + g(E_n) \leq n$ 、確率測度の場合に $g(E_1) + g(E_2) + \dots + g(E_n) = 1$ である。このことは、ファジィ論的には「ある地点Pがある地質単元 E_i に属している確実さが大きい」と考えることが単純に「地点Pは別の地質単元 E_j に属する確実さが小さい（ここで $i \neq j$ ）」ということにつながらない、という意味である。

さらに、地質図の作成過程では、地質家はつねに「これまで見つからない、新しい地質単元が存在するかもしれない」と考えている。このような場合、それまでに仮定している地質単元のみでは領域全体を網羅していないことになる。すなわち $g(E_1 \cup E_2) < 1$ であることが暗黙の了解となっている。これはすでに述べたファジィ測度の定義からF3をのぞいた、劣正規ファジィ測度的な考えかたであるともいえる。具体的には、ある調査範囲内で「断層が存在しない」と判断するのが大変困難であるといった例があげられる。

なお、最終的に作成される地質図には「未知の地質単元」は当然登場しない。したがってマップとしては一見正規性があるようにみえることに注意すべきである。また、狭い領域で調査精度の高い地質図や地質時代のみで単元を区分した地質図のように、「未知の地質単元」をほとんど（あるいは全く）考慮する必要がないマップも存在する。

この場合にはgを正規ファジィ測度あるいは確率測度として扱うことができる。

3.5 地質単元の境界

地質単元 E_1, E_2 の境界は、ファジィ測度論的には、2つの単元 E_1 と E_2 に対する確実さの等しい箇所である。すなわち $g_{P(E_1)} = g_{P(E_2)}$ となる位置に描かれるのが妥当である。Fig. 2aに示すように露頭からの距離に対して測度値が単調に減少する場合、この位置は測度値 g_P が最小、すなわち $\min(g(E_1) \wedge g(E_2))$ となる位置である。また、測度値が露頭の近傍を除いて同じように不確実な場合もある。このときはFig. 2bに示すように、境界線はある範囲内でどこに描かれても（Fig. 2bではAとBとの間）本質的な差はない。

4. 表現・応用に対する考察

ここまで、ファジィ測度によって地質データの確実さが表現できることを示し、測度値の空間的な分布がどのようになるかについて考察した。この結果は、地質図の表現に具体的に考慮される必要がある。以下では、ファジィ測

Fig. 2 Unit boundary defined from the viewpoint of fuzzy measure.

- a: The case of that the fuzzy measure decreases linearly to the distance from the outcrop. Boundary between the unit E and the unit F is located at the point of the minimum $g(E \vee F)$.
- b: The case of that the fuzzy measure decreases rapidly and settles. Boundary can be described anywhere between A and B, because the equivalent minimum measure $g(E \vee F)$ holds between them.

Fig. 3 Fuzzy measure contour map with the progress of investigation (modified profiles).

Stage 1: Outcrops a and b have been found by the survey. Each is belongs to the unit P and S. Where S has vertical foliation.

Stage 2: Geophysical prospecting has undergone on the line c-d. An anomaly that is inferred to be fault is found at the point f.

Stage 3: Drill core has obtained from b to e. The distribution of the units P and S, and the fault boundary of the units are recognized.

度論的にとらえた地質図の表現や応用に対する考察をおこなう。

4.1 積分可能性

領域内の任意の地点は、その帰属する地質単位に対する確実さの測度を持つ。これは、その地点のもつ情報量（地質データ）の一つである。

調査が実施されれば当該地点のみならず周辺の情報量も増大し、測度値が大きくなる。測度は積分可能であるから、情報量の増大はある空間の測度の積分値の増大としてあらわされ、数量的に扱うことが可能となる。適当な設定

をおこなえば、調査の進展を情報量の増大（調査数量や金額ではなく）として表現することも可能となろう。また、他の数量的な地質データと組み合わせて、より高精度の補完や予測に利用することも考えられる。

Fig. 3は調査の進展と情報量の増大について模式的に示したものである。ここでⅠからⅢは調査の進展（ステージ）をあらわす。ファジィ測度値は、便宜的に距離に対して階段状に減少するものとした（Fig. 4a）。ステージⅠは地表踏査だけの段階である。単位Pと単位Sにそれぞれ属する2ヶ所の露頭a・bを中心に同心円状の測度値コンターが描かれる。面構造を持つ単位Sでは、その方向に長軸をもつ楕

円形のコンターを想定する。ステージⅡは物理探査を実施して、露頭の間に異常が見出された場合を考えた。その異常は両単元の境界が断層であることによると推定したとき、断層という新しい単元Fが追加される。同時に露頭を中心とした測度値コンターはかなり変化する。地表付近では断層の存在を想定したことにより境界の推定位置が定まり、露頭以外での測度値が若干大きくなる。ステージⅢはb地点から斜ボーリングによる調査を実施し、両単元のひろがり断層境界を確認したものとする場合である。露頭とコア・探査による異常箇所とコアを結びつけて、推定の確実さがさらに増大することが示されている。

調査領域での情報量は、その領域について測度値を積分することによって得られる。Fig. 4bは測度値の積分と投資金額との関係を示したものである（このときの測度値と距離との関係はFig. 4aのように定めた）。このようにして情報量の増大や投資効果をあらわすことができる。

はじめに述べたような、地質情報の数量化という課題に対しては、ある範囲内でのファジィ測度の積分という、ここで述べた考え方も、ひとつの試みであると思われる。

4.2 確実さの定義と区分

確実さを測度値であらわすことができることは示された。しかし、測度値をそのまま扱うには問題がある。それはたとえば $g_p = 0.5$ というのはどの程度の確実さなのか、といった問題に対して合意ができていないことや、どのような場合にどのようなファジィ測度の変化パターン（距離・測度関係や異方性）を用いるのが妥当かといった点である。地質体の持つ複雑性と地質図作成者の主観の両方を区別できないという点もある。したがって当面は、確実さを定義していくつかのランクに区分し、地質単元やその境界線をそれによって表現するといった手法が実用的であろう。「実在断層」「推定断層」といった表現は長く使用されてきた。しかしそれは定義されて区別されているわけではない（地

質調査所, 1979)。定義を与えて確実さを区分する手法は活断層の分布を表現する際にはじめて用いられ（松田ほか, 1977）、現在にいたっている（活断層研究会 編, 1980, 1991, 今泉, 1990, 松山ほか, 1991）。これらの表現はファジィ理論的な基礎に立脚しているわけではないが、情報の伝達を考慮して到達した表現方法ではある。逆に、これらの表現方法に対する理論的根拠が、本論文によって与えられたともいえる。ファジィ理論に基づいた土木地質図上の断層表現は永田（1991）が試みており、確実さの区分がファジィ集合となる場合もあることを示している。

4.3 図上での表現

以下では、確実さの伝達という観点から、より具体的な地質図での表現について述べる。

露頭あるいはボーリング箇所のように確認された地点は定義上 $g_p = 1$ であるが、それ以外の箇所についての確実さのファジィ測度は一義的には定めることができない。この意味で、地質図上で露頭などの存在位置を示すことは重要である。「日本の活断層」が「新編」（活断層研究会 編, 1991）になって、断層露頭の位置を凡例として示すようになったのは情報伝達の上での進歩である。同様な意味で、調査ルート図を付す（たとえば原山ほか, 1991）のも、情報の確実さを示す点で望ましいことである。とくに、情報の確実さが具体的に問題になることの多い大縮尺の地図の場合に有効性が大きいと思われる。Fig. 3に対応する地質図表現の例をFig. 5に示した。ここでは、情報確認位置（露頭やボーリング孔位置）の明示、地質単元境界の関係と確実さの表示をおこない、情報の確実さが伝達されるよう考慮されている。

一方、地質単元やその境界にさまざまな確実さの区分をおこなう場合、これまでよりさらに多量の情報がひとつのマップに集中することになり、煩雑になってかえって説得力を小さくするという問題が生じてくることも課題である。これに対しては、ひとつの調査結果から「楽観的（オプティミスティック）」・「悲観的（ペシミスティック）」な2枚のマップを作成する手法（たとえばIngenieurgesellschaft Lötschberg-Basistunnel, 1991）が解決策の一つとしてあげられる。この方法はスイスにおいて情報公開の手段として採用されたといわれるが、当然専門家どうしの情報伝達手段としても利用できるものである。ただし、情報量が少ない場合には、推定の幅がありすぎて採用困難な方法であろう。

5. まとめ

本論文では、地質図における地質単元への帰属の確実さについて、ファジィ測度を用いた解釈をおこない、さらにその検討結果の表現への応用について考察した。

これらは以下のようにまとめられる。

- ① 分布図としての地質図は、対象とする範囲のすべての点においてそれが属する地質単元（これについて

Fig. 4 Relationship between the development of prospecting and integrated fuzzy measure.

- a: relationship between fuzzy measure and the distance
b: integrated fuzzy measure vs. invested amount of money. I, II, III show the stages of investigation (see Fig.3)

Fig. 5 Expression of geological profiles taking account of the certainty. Stages correspond to those of Fig.3

も定義した)を定めたマップであり, 順序尺度を扱う定性的面データ地図に分類される. すべての点において均質な地質データを得ることが不可能であるため, 主観を含む何らかの方法によってその点の属する地質単元を推定あるいは判断する必要が生じてくる(点データ・線データの面データへの拡張). このため, 地質図は本質的にファジィである. この, 単元が順序尺度を有することと, 各地点が単元への帰属の確実さを有することが, 一般的な分布図(面データ地図)と異なる地質図の特徴である.

- ② 各地点が単元への帰属の確実さを有することは, 地質体の予測性の大きさや地質図作成者の主観に起因

するものである. これらはファジィ測度を用いることによって数値として表現できる. ファジィ測度を用いれば, ある点における帰属の確実さの度合いを表現できる. 地質単元の境界は測度値最小の位置に描かれることも示した.

- ③ さらに測度値は積分可能で, ある領域における情報量, あるいは調査の進展にともなう情報量の増大をも表現できる可能性を示した.
- ④ 上記のような検討によって, 地質図表現の方法について, ファジィ測度論的な観点から根拠が与えられた. たとえば, 確実さの区分を定義づけて使用すべきことや露頭など確実な情報を持つ箇所を明

示すべきことなどである。

- ⑤ ファジィ測度を用いることによって、情報の量と確かさの両方を地質図上で伝達できる可能性が示された。

一方、今後検討すべき課題としては、ファジィ測度のなかのどのような特殊形あるいは距離-測度関係が、地質体の性質や地質家の主観に最適であるか、という点がある。また、作成者の判断を的確に伝達するための手法、具体的には地質図の表現技法についても、今後の課題の一つである。

謝 辞

島根大学横田修一郎教授には素稿を閲読していただき、多くの有益なご指摘をいただいた。埼玉大学の渡辺邦夫博士には討論の機会を与您いただき、また資料を提供していただいた。英文要旨の校閲は北海道大学岡田尚武教授にお願いした。さらに、査読者からのご指摘は本稿を改善する上で大変貴重であった。これらの方々に深く感謝いたします。

文 献

- 新井勝男 (1985) 地球統計学の基本的概念とその応用—鉱床品位のクリッキングとシミュレーションについて—。鉱山地質, vol. 35, no. 4, pp. 299-311.
- 活断層研究会 編 (1980) 日本の活断層—分布図と資料。東京大学出版会, 363 p.
- 活断層研究会 編 (1991) 新編 日本の活断層。東京大学出版会, 438 p.
- 地質調査所 (1979) 地質図類の用語・記号について, 15 p.
- 原山 智・竹内 誠・中野 俊・佐藤 佑生・滝沢文教 (1991) 槍ヶ岳地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 190 p.
- 今泉俊文 (1990) 活断層詳細図の凡例—仙台平野西縁活断層系の例—。活断層研究, no. 8, pp. 91-96.
- Ingenieurgesellschaft Löttschberg-Basistunnel (1991) Geologisch-geotechnisches Langenprofile des Alptransit Löttschberg-Basistunnel (optimistische und pessimistische prognosen). 2 sheets.
- Klir, G. J. and Folger, T. A (1988) *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*. Prentise Hall. (本多中二 訳, 1993, ファジィ情報学, 日刊工業新聞社, 461 p.)
- Matila, M. (1979) Regional engineering geological evaluation for planning purposes. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, no. 19, pp. 18-24.
- 升本真二・塩野清治・Venkatesh Raghavan・坂本正徳・弘原海清 (1997) 地質情報と GIS—地質図情報の特殊性について—。情報地質, vol. 8, no. 2, pp. 99-106.
- 松田時彦・太田陽子・岡田篤正・清水文健・東郷正美 (1977) 空中写真による活断層の認定と実例。震研集報, vol. 52, parts 3-4, pp. 461-496.
- 永田秀尚 (1990) 予測性の観点からの地質体の分類と記述。応用地質, vol. 31, no. 1, pp. 29-36.
- 永田秀尚 (1991a) ファジィ論理マップとしての地質図。日本応用地質学会平成 3 年度研究発表会講演論文集, pp. 85-88.
- 永田秀尚 (1991b) 小断層の土木地質的な表現—論理と実例—。構造地質, no. 37, pp. 41-49.
- 永田秀尚 (1993) 地質図における「地質单元」の定義。日本情報地質学会講演予稿集, pp. 39-40.
- 永田秀尚 (1995a) 地質図作成へのファジィ理論応用の取り組み。北海道応用地学合同研究会論文集, no. 6, pp. 93-98.
- Nagata, H. (1995b) Application of fuzzy measure to geological map. *Abstr. for Technical Programs of IAMG 1995 Ann. Conf.*, pp. 199-200.
- 中田高・岡田篤正 (1990) 活断層詳細図 (ストリップマップ) の作成の目的と作成規準について。活断層研究, no. 8, pp. 59-70.
- Nguyen, V. U. (1985) Some fuzzy set applications in mining geomechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 22, no. 6, pp. 369-379.
- 清水則一・桜井春輔 (1986 a) ファジー理論を用いたトンネル切羽観察結果の一評価法。土木学会第 41 年次学術講演会, pp. 775-776.
- 清水則一・桜井春輔 (1986b) ファジー理論を用いた岩盤分類の構成方法に関する研究, 土木学会論文集, no. 370/Ⅲ-5, pp. 225-232.
- 塩野清治・弘原海清 (1988) 論理地質学のための関係の代数。情報地質, no. 13, pp. 261-296.
- 菅野道夫 編 (1993) 講座ファジィ 第 3 巻 ファジィ測度。日刊工業新聞社, 288 p.
- 高崎正義 編 (1988) 総観地理学講座 3 地図学。朝倉書店, 279 p.
- 富長勇作 (1986) ファジィ集合論の地質工学への応用。日本鉱業会秋季大会資料, pp. 1-4.
- 浮田典良・森三紀 (1988) 地図表現入門。大明堂, 109 p.
- Varnes, D. T. (1974) The logic of geological maps, with reference to their interpretation and use for engineering purpose. *USGS professional paper*, no. 837, 48 p.
- 横田修一郎 (1989a) 地質図作成過程の分析—地質情報の段階的変換と地質モデルの構築—。情報地質, no. 14, pp. 81-92.
- 横田修一郎 (1989b) 地質情報の伝達媒体としてみた土木地質図。応用地質, vol. 30, no. 3, pp. 143-152.
- 横田修一郎 (1996) 露頭データベースの作成はなぜ困難か? 情報地質, vol. 7, no. 4, pp. 297-301.
- 横田修一郎・升本真二 (1984) 地質データのファジー性とその表現。月刊地球, vol. 6, no. 5, pp. 309-314.

要 旨

ファジィ測度による地質図表現の解釈

：永田 秀尚

地質図における地質単元への帰属の確実さを、ファジィ測度をもちいて解釈した。また、その応用として、確実さについての情報量と、地質図における表現について検討した。

地質図は面データ地図に分類される主題図の一種である。他の分布図と異なるのは、地質単元が名目尺度ではなく順序尺度であることと、図上の各点が帰属する地質単元についての確実さをそれぞれ異にしていることである。後者については、ファジィ測度によってその確実さをあらわすことが可能である。ファジィ測度 g は、露頭のように帰属の確実な地点で $g=1$ であり、そこから離れるにつれて減少する。ファジィ測度を用いて、異方性を含む地質体の複雑さや作成者の主観ないし判断を表現することができる。

ある領域のファジィ測度を積分することで、確実さについての情報量を得ることができる。さらに、調査による情報量の増大も評価できる。地質図表現については、露頭など帰属の確実な地点を図上に明示すべきこと、確実さの区分を定義づけて使用すべきことを示した。ファジィ測度によって情報量と確実さをともに伝達できる可能性が示された。

キーワード：地質図・ファジィ測度・確実性・地質単元・情報量