

小断層の土木地質学的な表現 — 論理と実例 —

An examination and an attempt on the engineering geological expression of minor faults

永田秀尚*

Hidehisa Nagata

Abstract: Engineering geological expression of minor faults is examined. From the engineering viewpoint, important factors of faults are their location and engineering characteristics like a width or a component of fault fracture zone. And it should be discerned that the factors are fuzzy. A fuzzy logical examination to various state of recognition is undertaken.

In consideration of such features, an attempt of expression of faults on an engineering geological map is shown. That brings to decrease misunderstandings caused by difference of recognition to the fault between geologists and non-geologists.

はじめに

断層は、地質学自体においてはもちろん、その応用分野(土木地質学もこれに含まれる)においても重要な地質現象である。実際の建設工事の施工においても、遭遇するのは地質学一般の範疇からいえば小断層に属するものがほとんどであるにも関わらず、断層(または断層破碎帯)の存在はいろいろの問題を引き起こすことが多い。

ところで岩松・横田(1989)が述べているように、「断層」という語は地質学以外の分野でも使用される数少ない用語の一つである。「面に沿う変位を有する」というのが断層の地質学的な定義であるが、異なる分野ではこの定義を離

れて使用されることも少なくない。たとえば土木分野で使用される「断層」という用語は、「設計・施工上何らかの対応をしなければならない規模の、面的連続性を有する細長い形状の劣化帯」というほどの意味で使用されており、地質学的な本来の定義にあった変位はこの中には含まれていない。すなわち「断層」というとき、これは実質的には「断層破碎帯」を指していることが多い。また「何らかの対応をしなければならない」という点でその評価には構造物の規模などに対する判断が働いており、破碎帯幅が小さい断層は断層と称されないことも多い。

技術者の、断層に対する上のような認識を理解していないと、地質家と土木技術者との間に

*北海道開発コンサルタント(株)
Hokkaido Engineering Consultants Co. Ltd.

誤解を生じることになる。断層がありふれたものであると考えがちな地質家は、特に調査段階では比較的気楽に断層を推定したり消したりするが、断層を重大な(しかも問題の多い)ものとしてとらえる傾向にある土木技術者にとってはこのことが良く理解できず、これが地質家に対する不信感につながる場合さえある。

ところで、応用地質学において重要なことの一つとして、情報の伝達という点がある。すなわち、地質学的に得られた情報をわかりやすくかつ誤解なく地質学の非専門家に伝えるにはどのような表現法をとるとよいかといった問題点が検討される必要がある。

応用地質学的に断層を取り扱おうとするときには、上に述べたような認識の違い、および情報の伝達という問題がある。しかしこのような点は従来十分検討されてこなかったように思われる。そこで本論では小断層の土木地質的な表現法についてとり上げ、情報伝達の問題を考慮した断層の表現法について検討する。

なお本論でとり上げる土木地質図は、構造物の計画・設計・施工・保守のために作成される大縮尺の地質図^{*1}のことである。この特徴は横田(1989a)がまとめている。

土木地質図上での断層表現の問題点

地盤に対する地質家の認識を伝達する手段は、主として土木地質図ということになる。理想的な土木地質図とは、誤りなく意志の伝達が可能であるものともいえる(横田, 1989b)。ある断層について、地質図上にどのように表現するか(表現しないことも含めて)ということが断層の評価に直結した問題になってくる。たとえば断層関係の確かさを表現する方法として「確実(実在)」「推定」といった区別によるものがある(地質調査所, 1979)。しかし何を基準にこのような区分をするのかは一般には示されてい

ない。その基準は、自ら調査を行い地質図を作成した経験のある者同士の暗黙の了解というべきものであろう。ところが土木地質図のようにその利用者が非専門家である場合にはこのような了解が得られにくい。特に断層のように、評価すべき要素が分野によって異なるような地質現象を取り扱う場合、記載内容をうまく伝達するための工夫が必要となってくる。そのためには地質図の目的に沿って「何を」(要素の選択)、「どのように」(表現に対する定義付け)表現するかということが問題になる。

土木地質図に表現すべき断層の要素

まず、「何を」という要素の選択の問題を考察してみよう。

地質図に表現されるべき断層の要素には種々のものがある。たとえば地質体相互の関係が断層であるかどうか(存在)・位置^{*2}・破碎帯の性状(幅や断層内物質の構成など)・変位(センスや履歴など)である。

ところで、実際の設計や施工などで断層に関して問題となるのは、断層がどこにあってどう対処しなければならないか、ということである。すなわち前者は断層の位置の要素であり、後者は断層破碎帯の幅や性状の要素であるといえる。

これらのうち断層の位置は土木地質上もっとも重要な情報のひとつである。地質学では、断層は異なる地質単元の「関係」としての認識の方が強く、存在位置の問題は二次的になりやすい。地質図を描くとき、地質体相互の関係が不整合か貫入か断層であるかは重要ではあるが、土木地質の立場からは、断層がどこにあるかも同等に重要なことである。同じ規模の断層が存在しても、それが構造物に対してどのような位置にあるかによって、断層の評価は異なるものとなるからである。さらに、実際に設計や施工

^{*1}Engineering geological mapの定義はたとえばIAEG Commission on Engineering Geological Maps (1976)に示されているが、ここには土地条件図あるいは環境地質図というべきものまで含まれており、本論で扱う「土木地質図」よりさらに広義のものである。表現の論理(Varnes, 1974)や方法についてもやや異なる。

^{*2}以下での「位置」は、地点という意味ではなく、ある空間の中に位置する断層の全延長(平面図上では断層のトレース)ということである。すなわち方向性も含む。

で断層に対処しようとする場合には、その位置が $10^{-1} \sim 10^0 \text{m}$ のオーダーの精度で把握されていなければならない、 $10^0 \sim 10^2 \text{m}$ といった「地質屋的」なオーダーでは対処できないこともある。

次に、断層破砕帯の性状という要素(群)であるが、これらは構造物の特性によって重要となる要素が異なってくる。たとえば基礎として岩盤の強度を問題とすべき場合には、断層破砕帯の幅が主要な要素となる。斜面安定の問題などのように、断層面そのものの強度が問題となるときは、断層内物質の構成が重要になってくる。あるいはトンネル掘削時の湧水の予想を行おうとする場合には、断層の水理特性が主要要素になる。

一方、変位(センスや履歴)は特別の目的がない限り土木地質図に必要な要素とはいえない。変位自体は、ある基準があって初めて認識されるものであり、地質図では地質単元の分布のズレとして表現されている(されなくともよい)ためである。

土木地質的にみた断層の諸要素の評価

次に、「どのように」という点について検討する。情報伝達の上で重要なのは、ある表現に対する定義付けができていないということである。

さて、定義付けというと厳密さを要求されるように思われがちである。しかし、断層の諸要素についての記述にはあいまいなものも含まれることがある(たとえば「このあたりが断層らしい」「破砕帯幅は約3m」「活動度はB~C級」といった記述である)。断層に関する記載は、その一部分である露頭でしか得られない(横田, 1989a の「一次情報」)ものであるから、断層(全体)に関するデータは一定の範囲・主観的な判断をも含むファジイなもの(同「二次情報」となるのである。したがって「ある表現に対する定義付け」は必ずしも2値論理的なものではなく、

多値あるいはファジイ論理的であってもよい^{*1}。

さらに、土木地質では、構造物の規模や特性に応じた判断(工学的判断)によって、断層の評価が異なるものとなる。この評価自体も多値あるいはファジイ論理的であることが多い。

そこで、以下ではファジイ論理を用いながら、断層の諸要素の土木地質的評価について検討してみる。

(1) 位置

実際に断層の位置を定めるためには次のようなさまざまなレベルの情報が総合されている。

① 断層露頭の位置：位置が最も確実なのは実際に断層の露頭が確認される場合である^{*2}。周囲の露頭状況を含めて、確認される範囲は広いほど確実であるし、断層の方向性も測定ができる。一方ボーリングのような点に近い確認では、方向性が良くわからないことが多い。

② 周辺の地質状況：断層露頭そのものは周辺の岩盤より脆弱なことも多く、露頭として残りにくい。しかし周辺の地質状況(たとえば割れ目が多くなる・異質の岩石が近接しているなど)から断層の位置がほぼ推定できることも少なくない。この場合、位置的には確実でも断層関係そのものが不確実だということがあり得る。

③ 確認位置で測定された方向の延長：露頭で測定された断層の方向性の延長上には、当然断層の存在が推定される。しかし断層面は必ずしも平面ではないし、雁行したり他の系統の断層系に切断されたりすることもまれではない。このため断層位置の確実さは測定点から遠ざかるほど小さくなる。

④ 間接的な手段による推定：リモートセンシングや各種の物理探査手法によって推定されたりする断層ないし破砕帯もある。間接的な手段による場合、位置的な精度は対象とする線または面上でどこでもおよそ均一である(普通余り確実ではない)ことが特徴である。しかしこの間接的な情報のみからは、得られた結果が断

*1 地質データは一般にファジイ性を有する(横田・升本, 1984)。したがって地質図もファジイ論理マップであるといえる。

*2 「断層露頭」という表現も実際には断層破砕帯の露頭であることが多い。

層であるのかどうかは決められないことが多い。

上に述べたように、断層の位置の确实さ、というときその中には不可分に断層関係の确实さという要素が入り込んでいることがわかる。すなわち断層の位置と存在の确实さは一括して記述されることになる。

空間S内の任意の点P(x,y,z)における断層位置(存在)の确实さをファジイ論理的に表現すると以下ようになる。すなわち、

命題A：空間Sに属するある点P(x,y,z)は断層である

に対するファジイ真理値 $\mu_A(x,y,z)$ を空間全体において決定することである。たとえば、

$$\mu_A(x,y,z) = 1 \rightarrow P(x,y,z) \text{は断層である}$$

$$0 < \mu_A(x,y,z) < 1 \rightarrow$$

P(x,y,z)のあたりに断層がある(位置のあいまいさ)

または P(x,y,z)は断層の可能性がある(関係のあいまいさ)

または P(x,y,z)のあたりは断層の可能性がある(位置と関係の両方のあいまいさ)

$$\mu_A(x,y,z) = 0 \rightarrow P(x,y,z) \text{は断層ではない}$$

上に述べた①～④の場合の典型的な例を第1図に示す。本図にはある断面線上での真理値 μ_A の断面をも併せて示してある。ここで明らかのように位置あるいは存在の确实さは真理値断面の形態・ピークの高さ・幅によって記述することができる。また平面的には真理値コンターというべきもので表現されるべきであろう。

なおここでファジイ論理マップ特有の留意点についてふれておこう。それは「描かれた位置以外に断層が存在しないということではない」という点である。論理的には次のようになる。上の命題Aに対する否定命題 $\sim A$ (すなわち「Pは断層ではない」ととると、その真理値は

$$\mu_{\sim A} = 1 - \mu_A \text{であり、}$$

Aと $\sim A$ の論理和Gは

$$G = \mu_A \vee \mu_{\sim A} = \max(\mu_A, \mu_{\sim A})$$

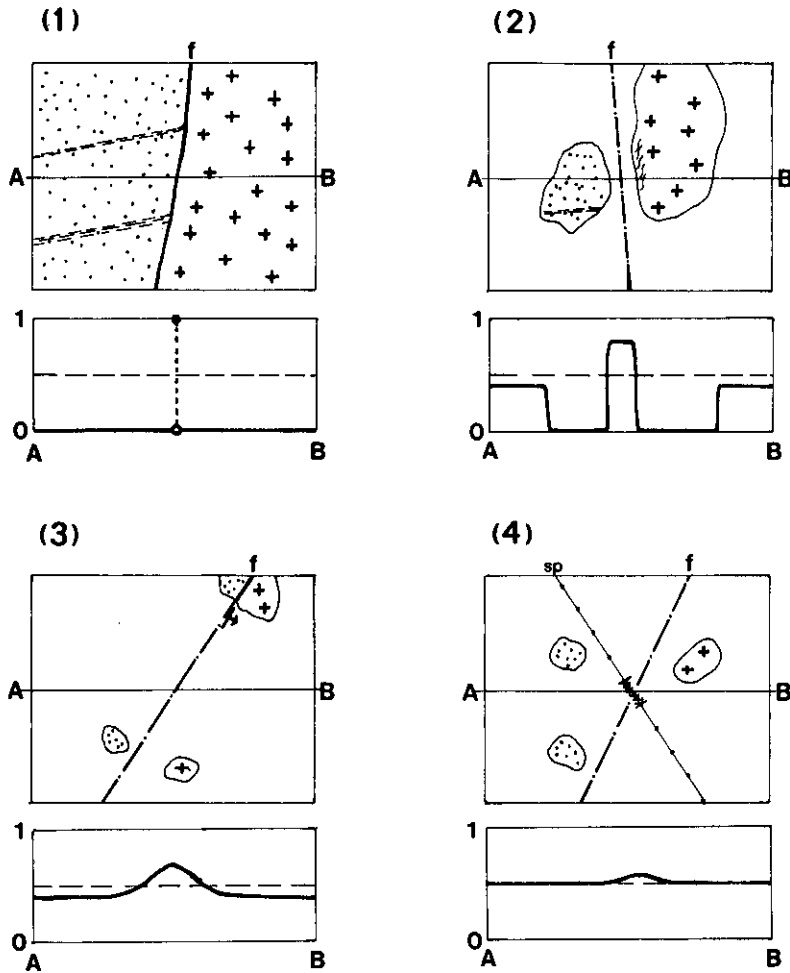
$$1 \geq G \geq \frac{1}{2}$$

ここで、 $G = 1$ となるのは $\mu_A = 0$ または $\mu_A = 1$ のときに限られる。これは実際には確認された露頭(ボーリングコアのような人工的な露頭も含む)の位置でのみ取り得る値である。したがって、確認地点以外はどこでも断層がある可能性がある(すなわち $\mu_A \neq 0$)。このように考えるとファジイ論理マップとしての地質図には露頭位置の明示が重要であることがわかる。なお点PにおけるGの値の大きさはPの持つ地質情報の确实さを示し、空間SについてのGの積分値がSの持つ确实さの総量である。また空間でGの持つ勾配が「予測性」(永田, 1990a)の概念である。これらについては稿を改めて論じたい。

(2) 断層破碎帯の性状

断層破碎帯の性状の中でも、まず破碎帯幅について考察してみよう。劣化帯としての断層破碎帯の幅は土木地質の立場からは最も重要な評価要素の一つである。ここで「評価」というときには、構造物の規模や特性・建設のどの段階にあるかなどの条件が考慮されなければならない。たとえば、計画段階では、ある構造物に対して「避けるべき断層であるか否か」といった2値論理的な判断に対応する表現、すなわち避けるべき(であると判断される)断層のみを表示するといったことが可能である。一方、設計段階では、「対処が必要か否か」という判断のほかに、どの程度の(工法・金額・工期など)対処が必要か、という判断も要求される。これらの判断基準と断層破碎帯の幅が対応することになるが、その基準値はクリस्पなものでなくファジイである(第2図)。なぜならば、位置と同様に、破碎帯幅も、確認地点では确实であるがそれ以外では推定でしかないためである。加えて、基準値の具体的な値は、構造物の規模や特性によって異なるためである。

断層破碎帯幅以外の他の性状の要素(断層内物質の構成、水理特性など)も、破碎帯幅と同じように、多値あるいはファジイ論理的な評価をすることができる。



第1図 断層fが存在することの確実さの度合い

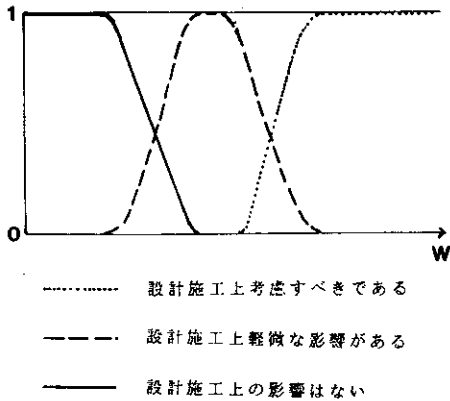
(上図：平面図，下図：AB間の真理値断面)

- (1) 露頭が存在して最も確実な場合，断層位置で $\mu=1$ ，これ以外は $\mu=0$
- (2) 露頭は確認されないが周囲の地質状況からはほぼ確実な場合，真理値の最大はたとえば $\mu=0.8$ ，またある幅を有する。
- (3) 方向性のわかっている断層の延長部では，真理値の最大はたとえば $\mu=0.7$ で，ピークを有する。
- (4) 物理探査(SP)による推定の場合，真理値の最大はたとえば $\mu=0.6$ ，(3)同様のピークを有するが，周囲($\mu=0.5$ ，これは「断層があるかどうかかわからない」という意味になる)との差が小さくなる。

(3) 変位

はじめに述べたように，土木地質の立場では，活断層を除けば断層の変位そのものは評価の対象としなくてもすむ。しかし変位の要素をまっ

たく無視したマップが成立するというのではない。たとえばある程度以上の規模の破碎帯を持つもの以外は断層として表示しないという立場を徹底すると，変位は大きいが破碎帯をほと



第2図 断層破碎帯の幅(W)と工学的判断のメンバーシップ関数(μ)との関係(例)
Wの具体的な値は構造物の規模や特性によって異なる

んど伴わない(たとえば未固結変形時に生じた断層),あるいは固結して周囲との物性差を考慮しなくて良いような断層は表示されないことになってしまうが,これでは表現にならない。断層は地質単元の境界の一つとして役割をはたしている(横田, 1990, 永田, 1990b)ためである。

情報の伝達性を考慮した断層表現の例

これまでの考察をまとめると次のようになる。① 土木地質図によって伝達される断層の情報として,重要なものは,その位置と性状(断層破碎帯の幅・構成物・水理的特徴など,工学的判断が可能となる要素)である。変位の要素は一般に直接的には重要ではない。

② 位置・性状の要素ともに情報の確実な箇所は限られており,それ以外の箇所の情報は多かれ少なかれ推定や主観によっている。したがって情報全体はファジイ論理的である。また工学的判断も一般にファジイ論理的なものである。

上に述べたような考察をもとに,実際に土木地質図を作成する場合の表現方法の検討を行う。具体的には表現とその定義について,すなわち,ある土木地質図においてどのような凡例

が適切かという検討になる。

第3図に,あるダムサイトの基礎岩盤(主としてダム軸の決定)検討のための地質平面図(S=1/500)に付した凡例(試案)を示す。この凡例は1つの表と付属記号からなっている。

表は断層破碎帯幅によるランクと断層位置(または関係)の確実さのランクとのマトリクスとなっている。両者とも3ランクずつに区分されている。ここで従来の凡例と異なっているのは,各ランクに定義付けがしてあること。「表現されない」という凡例が含まれていることである。重要な点はこの2つで,ランク分けについては必要に応じて何段階になってもかまわない。各ランクの定義の明示が必要なことはすでに述べた。ここに示した例では,断層破碎帯幅のランク分けは,構造物の規模から判断されたものである。また確実さのランク分けは,図面のスケール・構造物の規模・地盤の予測性の大きさを考慮して決めたものである。

「表現されない」という凡例も重要である。これが「描かれないところにも断層はあるかもしれない」ということの宣言にもなっている。

付属記号は「断層の確認位置」「消失する断層」「伏在区間」の3つである。露頭の確認位置の明示が重要なことはすでに述べた。ここでは確認位置における断層面の方向・変位のセンス・破碎帯幅・水理的な特徴を示すことにしている。

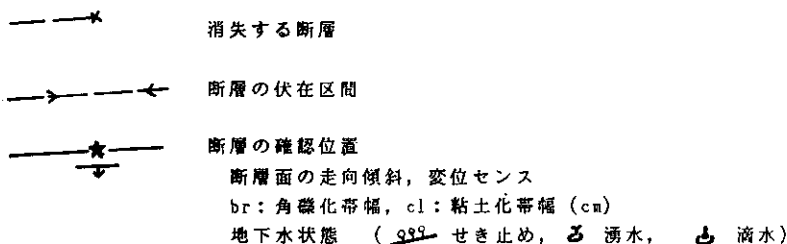
「消失する断層」の凡例を設けたのは,この記号がないと,破碎帯幅が小さくなって表現されなくなった断層と位置の確実性が小さくなって表現されなくなった(すなわち実際は連続しているかもしれない)断層とを区別するためである。すなわち「表現されない」と同様の意義を持っている。

独立した凡例として伏在断層を設けなかったのは,断層線に破碎帯幅と位置の評価以外の性格を持たせたくなかったためである。伏在によって位置の確実さが低下することは表の凡例で表現できる。土木地質図としては位置の確実さの方が重要であり,他の地層境界との関係は付属記号で表現する程度で十分であるという立

確実度 破砕帯幅	I	II	III
A			 または表現されない
B			 または表現されない
C	 または表現されない	 または表現されない	表現されない

破砕帯幅 A : 設計施工上考慮・対策が必要である $W > \text{ほぼ} 100\text{cm}$
 (W) B : 設計施工上軽微な影響がある $W = 20 \sim 100\text{cm}$
 C : 設計施工上はほとんど影響がない,
 地質単元境界・地質構造の解釈上表現される断層 $W < \text{ほぼ} 20\text{cm}$

確実度 I : 断層の存在及び関係が確実である 図上誤差3m以内
 露頭とその近傍など
 II : 確実度の高い推定 図上誤差3~10m
 方向の確認された露頭の延長・近接した確認地点の連続など
 III : 確実度の低い推定・仮定 図上誤差10m以上 (方向不確実)
 層序対比・地形判読・物理探査などによる



第3図 ある土木地質図における断層の表現例

場になっている。

このような凡例によって作成した地質図の利点・欠点は次のようである。

- ① 調査によって実際に確認された事実と作成者の主観・解釈や判断との区別が明かである。このことにより、非専門家に対しても誤解なく情報の伝達がされる。
- ② 表現された情報の確実さが示されているということは、地質図を作成した地質家の負うべき責任が明確になるということでもある。つまり確実度の大きい表現の箇所で実際との相違が

明かとなった場合、どこかに判断の誤りがあったということになる。逆に確実度の小さい表現の箇所での実際との相違は、情報の不足に起因するものである。

- ③ 確実さの大小が表示されているので、構造物にとって必要な箇所にはさらに調査を追加する、といった計画がたてやすい。また結果として調査の進展をも表すことになる。設計や施工の際にも情報の不確実さに応じたリスクを見込むことも可能となる。
- ④ 線の種類が多くなるため図面が煩雑になる

のが欠点である。伝達する情報量が増えるため避けられないことであるが、表現の工夫で煩雑さを緩和する必要がある。

ここに試みたのは、与えられた構造物・調査段階・図面のスケールに対応した例であり、これらのすべてのバリエーションに対して汎用的な表現方法があるわけではない。ある場合にはより詳細な、また別の場合にはもっと簡潔な形で表現が可能である。とくに存在の不確実な断層・あるいは工学的に無視し得る規模の断層の表現については、調査者の主観が大きく影響するところでもあり、慎重な対応が必要である。

まとめ

断層についてはその認識が地質家と土木技術者とで互いに異なり、このことが両者の相互理解を妨げている。地質データ・地質図のフェジイ論理性についてもまだ必ずしも十分に理解されているとはいえない(地質家自身の中でさえも)。

本稿は、この相互理解に苦心してきた筆者の、いわば現場からの発想によるものである。ここでは主観をどのように伝達するかという視点からのアプローチがなされた。土木地質図における断層の表現法について、地質図の情報伝達という役割を考慮するとともに、断層自体の認識・地質図上での表現の論理までさかのぼって検討を加え、表現の試みについても示した。

ところで、一方ではコンピュータによる地質図の自動作成というアプローチから地質図作成のアルゴリズムを明らかにしようという研究の方向性もある(たとえば横田・升本, 1984, 弘原海ほか, 1987)。両者は異なった視点から始まっているが、最終的にはほぼ同じような到達点をめざすことになる。

断層に対する表現法の検討は、土木地質分野のみならず、環境地質、特に活断層の分野においても試みられている*(中田・岡田, 1990, 今泉, 1990, など)。活断層詳細図の作成目的は土

木地質図とは異なるので、当然表現内容も異なってくる。たとえば、活動時期などが重要な表現要素となってくる。しかしいずれも専門家が非専門家に対して情報を伝達するという点、また地質家が、その判断において社会的責任を有するという点では共通である。また応用地質学のいずれの分野にしろ、非専門家に対しても理解しやすく、かつ誤解のない表現の研究も今後さらに望まれるところである。

謝 辞 シンポジウムの世話人のかたがたには、発表の機会を与えて頂いた。とくに、鹿児島大学横田修一郎博士には草稿を読んでいただき、貴重な意見を賜った。当日シンポジウムに参加された方々からは熱心なご討論をいただいた。北海道開発コンサルタント株式会社田中富男技師長には日頃ご指導頂いている。以上のかたがたに厚く感謝いたします。

文 献

- IAEG Commission on Engineering Geological Maps, 1976: Engineering geological maps. The Unesco Press, Paris.
- 岩松 暉・横田修一郎, 1989: 断層調査法—野外における断層のみかた。地学ハンドブックシリーズ, 3. 地学団体研究会, 東京。
- 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, v.8, 91-96.
- 活断層研究会, 1980: 日本の活断層。東京大学出版会, 東京。
- 永田秀尚, 1990a: 予測性の観点からの地質体の分類と記述。応用地質, v. 31, 29-36.
- 永田秀尚, 1990b: 地質図に表現される地質単元の境界の種類と関係。日本地質学会97年会要旨, 400.
- 中田 高・岡田篤正, 1990: 活断層詳細図(ストリップマップ)作成の目的とその作

*実際には活断層の分野での表現法が先行した。本稿で示した表現例も活断層研究会(1980)の表現に着想を得ている。

- 成基準について. 活断層研究, v. 8, 59-70.
- 地質調査所, 1979: 地質図類の用語・記号について.
- 横田修一郎, 1989a: 地質情報の伝達媒体としてみた土木地質図. 応用地質, v. 30, 143-152.
- 横田修一郎, 1989b: 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, v. 14 A, 81-92.
- 横田修一郎, 1990: 断層形態の把握レベル. 構造地質, no. 35, 119-123.
- 横田修一郎・升本真二, 1984: 地質データの FUZZY 性について. 月刊地球, v. 59, 309-314.
- Varnes, 1974: The Logic of Geological Maps, With Reference to Their Interpretation and Use for Engineering Purposes. USGS prof. paper no.837.
- 弘原海 清・塩野清治・升本真二, 1987: 地質図自動作成システム(GEOMAP-CAD) 開発の現状と課題. 情報地質, v. 12, 351-358.