

構造地質学をベースとした応用地質学分野*

Engineering Geology based on Structural Geology*

横田修一郎**
Shuichiro YOKOTA**

Abstract: Faults and joints are generally one of fundamental factors for the evaluation of geological conditions in engineering geology because individual fracture planes have various physical properties affecting rock mass conditions. Therefore, understanding of geological structures including them should be a starting point for such evaluation in engineering geology as well as for structural geology. Probably, many methods for treatment and analyses of fractures may be common to both fields.

However, the style of expressions of geological structures obtained should be different between them according to the differences of purposes and viewpoints.

Estimation and prediction of geologic conditions are also main purposes in engineering geology. Much knowledge and information on structural geology may be available for these processes.

はじめに

1990年5月、構造地質研究会の春の勉強会として「応用地質学的にみた小断層・節理系」と題したごく簡単なシンポジウムが開かれた。シンポジウムの趣旨は、構造地質学の今後の発展のために、小断層や節理系の他分野での取扱いを知り、それらに関わる研究動向・課題を探ろうというものであった。当日の出席者はゴールデンウィークの真最中のこともあって必ずしも多いというほどではなかったが、この企画に対するその後の反響は意外に大きかったように思

われる。構造地質学関係者にとっては他分野でのフラクチャーの研究動向を知る機会になったし、応用地質学関係者にとっては構造地質学という学問分野の存在を知る絶好の機会にもなった。そして筆者にとっては以下のような両分野相互の関わりを考えるきっかけでもあった。

近年、土木構造物の巨大化、とくに巨大地下構造物の出現とも相まって岩盤の力学的性質を追求する研究分野は著しく発展してきた。とくに岩盤を力学的に不連続なものとなし断層や節理等のフラクチャーを重視する力学はこ

1993年2月15日受付。1993年3月17日受理。

*1992年4月5日 構造地質研究会夜間小集会(熊本大学)にて講演。

**鹿児島大学理学部地学教室。

の10数年の間に理論、解析手法の面で進展がめざましく、手法と問題意識では構造地質学のそれを追い越している感がある。

歴史的にみると、岩盤中のフラクチャーは応用地質学関係でも古くから重要視されており、たとえば19世紀から20世紀はじめのヨーロッパではダム計画に際してすでに地質構造的な位置とそれに関連する断層・節理の性質にかなりの注意が払われている(第1図参照)。岩盤改良技術の乏しかった当時、強度、透水性などすべての点で好条件を備えた地質構造を見いだすことが最優先であったに違いない。

この分野での地質構造やフラクチャーの重要性はその後ますます増大し、派生する実際的な問題を中心に研究は進むが、学問の細分化の流れによって構造地質学とはしだいに距離を置くようになった。しかし、構造地質学と応用地質学(あるいは地質工学)がいずれもフラクチャーを力学的にとらえようとする分野であることを考えれば、両者は明らかに共通領域を有している。このことは岩波講座の『地質構造の形成』(植村・水谷編, 1979)に「割れ目と岩盤」といった内容が網羅されていることにも現れている。

対象が共通である限り両者は手法的な面でもっと相互に関わるべきではないかと思われるし、その反面、目的や立場など基本的立脚点が違う以上、着目点や表現などにおいて両者の違いを意識しないと混乱を生ずる恐れがあるかもしれない。そこで、以下では地質構造のなかでもフラクチャーを例に、両分野での共有すべ

き手法・考え方とともに目的・立場の違いを含めた現在の両者に関わる問題を考えてみることにする。

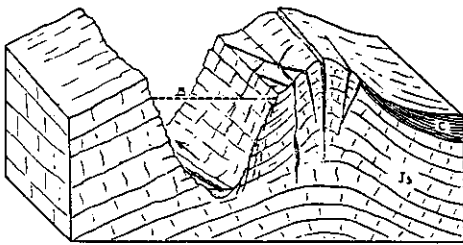
地質構造をとらえる構造地質学と応用地質学

(1) 応用地質学に不可欠な地質構造

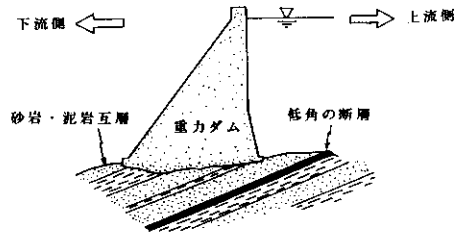
応用地質学では広く地質構造の把握や認識が必要とされるが、これは地質構造が岩盤などの力学的性質の分布とそこでの力学的異方性を与えるからである。岩石・岩盤に関する様々な力学的・物理的性質が得られても地質分布、岩盤分布が分からないと実際的な問題に対処できない。

たとえば、砂岩・泥岩互層の層理面は力学的弱面になりやすいため、これが同斜構造をなしていれば層理面方向と斜面方向との間で「流れ盤(slipping structure)」、「受け盤(plunging structure)」とよばれる関係が発生するのは広く知られている。層理面に限らず特定方向に卓越した節理面や片理面でも新しい斜面をカットするときなどこの関係が大きな問題となる。

第2図はダムの基礎岩盤における地質構造の例である。重力ダムでは水位低下時には荷重は底面の上流側に作用するのに対し、満水時には下流側に作用する。このため、底面直下の岩盤中に低角の断層面が存在していれば、荷重によっては浸透水も加わって不安定化の原因をつくる。フラクチャーを含む地質構造の影響が単なる力学的弱面(強度)から変形性、透水性と広がってくるためである。



第1図 ダムの基礎における地質構造とフラクチャーの例(Gignoux, 1955)



第2図 ダムの基礎岩盤と好ましくない低角の断層面の例

フラクチャーを3次元的にみれば問題はさらに複雑になる。2方向に節理面や断層面があれば組合せによっては岩盤中に“クサビブロック”が形成されるが、これによる不安定化は土木構造物の設計・施工に様々なかたちで影響する。

(2)地質構造・現象の正確な把握

このようにみると、構造地質学、応用地質学のいずれも構造の正確な把握が出发点になると考えられ、そうするとフラクチャーを対象とする研究アプローチは一般には第3図のようなものであろう。構造地質学では現象・形態の把握から形成過程、形成の場の問題を通じて機構解明の方向に進むし、応用地質学では力学的・物理的性質と地質構造に対応したそれらの異方性から複合場での挙動などを通じてより実際的な問題へと進む。その間には理論面での検討や実際的な解析段階がある。

構造地質学では第3図の現象・形態の特徴を把握する段階で目的を達成する場合が少なくないのに対し、応用地質学では力学的・物理的性質まで言及しない限り意味をなさないことが多い。たとえば節理を含む岩盤の強度や変形性、

透水性、あるいは断層破碎帯の力学的性等が実際的な問題では焦点となる。ただし、理想をいえば構造地質学も力学的・物理的性質段階に達しないと機構の議論は不十分であろうし、逆に応用地質学でも全体的な形成過程や機構を背景に力学的・物理的性質を考えないと、実際的な問題に対処しきれないことも多いであろう。

ところで、地質構造に関する現象・形態の正確な把握は一般に難しい。これには属性の多様性に加え、露頭等の制約といった物理的困難性が原因していると考えられる。後者は、たとえば「○○断層をとらえた」といっても断層破碎帯の一部に過ぎず、ほとんどの場合断層という地質構造の全貌をとらえていないことである。これは地質学の他分野において岩体の貫入関係や層序関係などがわずかな露頭で把握できるのとは大きな違いがある。また、断層破碎帯そのものも地表近くでの岩盤の緩み、風化といった様々な現象が加わっているため、露頭では構造運動と他の地表面象の総和としてとらえてしまう恐れがある。

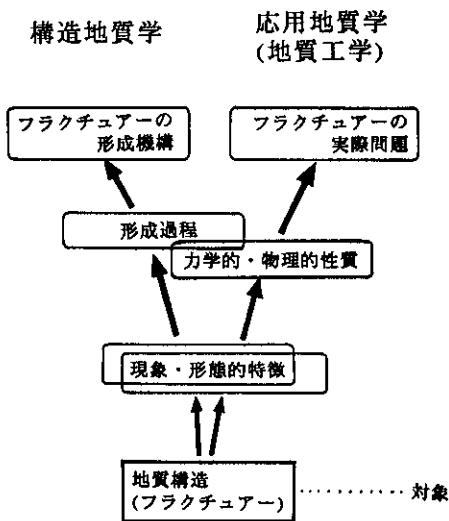
このような対象自身の把握に関する困難性が応用地質学、構造地質学のいずれであっても結果の曖昧さをもたらし、さらに表現の多様性にも影響しているといえよう。

ところで、上記の「正確(精確)な」の内容も構造地質学と応用地質学とで微妙に異なっている。前者では「断層関係」といった「関係の正確さ」が分かればいいのに対し、後者ではそれに加えて「位置的な正確さ」が要求されるからである(横田, 1990)。後者の立場でボーリング調査やトレンチ調査を駆使して位置と性状を確認するのはこのためといえる。

岩盤力学の進展とフラクチャーの情報

(1)岩盤力学の解析面での進展

ここ10数年、フラクチャーを重視した岩盤の力学的性質が大規模地下空洞などの建設に伴って内容的にも量的にも頻繁に追求されるようになってきた。岩石(intact rock)と節理(あるいはクラック)より構成される岩盤では、[1



第3図 研究の進め方における構造地質学と応用地質学

視的には均質に見えても、部分をとれば節理面の力学性が大きく影響する。そして、前述のように節理面の方向によっては顕著な力学的異方性が現れる。節理や断層は単に力学的破断面であるだけでなく、その形態・性状・組合せから波及する属性は強度、変形性、透水性など多岐にわたる。これらを考慮して現在のフラクチャーに関わる応用地質学的課題を挙げれば、第1表のようなものであろう。形態・性状と強度、変形性、透水性等に関する多くの経験的知識が各地での調査・工事に伴って蓄積されてきている。

一方、このような岩盤の挙動の解析や推定には従来有限要素法や境界要素法を用いて弾性的・粘塑弾性的取扱い等が頻繁に行われてきたが、最近では、より実際に即するということから節理面を考慮した解析がなされるようになってきた。連続体岩盤モデルから個々の節理面を重視した不連続体モデル、節理性岩盤モデルへの移行である。

具体的には、1970年代以降個別要素法(Distinct Element Method)が大規模地下空洞での岩盤の挙動解析などに用いられ、さらに1980年代になってGoodman and Shi (1982)らが発展させてきたブロック理論(Block Theory)が頻繁に用いられるようになってきた。後者ではス

テレオ投影といった幾何学的手法も駆使され、岩盤斜面でも広く用いられるようになってきた。

これらの手法は、個々の節理面に沿った挙動を扱いながら全体の変形も扱うところに多くの努力が払われており、構造地質学でいえば褶曲の形成に伴う小断層の形成問題に類似している。これらの解析手法には当然構造地質学にとっても役立つものが含まれているに違いない。

(2)フラクチャーのもつ情報の抽出

岩盤中のフラクチャー面は方向をもったベクトル量であるが、間隔(spacing)の方向性も考慮すると、空間的な分布密度はテンソル量としてとらえることができる。分布の特徴を表すにはさらに面の大きさ分布も含める必要があり、分布密度をそれらを考慮したテンソル量で表すことが試みられている(たとえば、Oda, 1983)。そして、それらをもとに節理を含んだ岩盤の力学的挙動や透水性に関する理論的取扱いも試みられつつある(Oda, 1985; 山辺他, 1988; Hsieh et al., 1985; 中屋他, 1992)。

しかし、実際のフラクチャーからその情報を取り出す調査法は上記の理論面・解析面に比べ全く試行錯誤の段階にある。ある地域の節理

第1表 フラクチャー(断層・節理等)に直接関わる応用地質学的課題

(a) 強度

- ・断層粘土・破砕帯の強度
- ・フラクチャー面のせん断強度
- ・フラクチャー系岩盤の様々な強度
- ・フラクチャーの組み合わせによるクサビブロックの形成
- ・斜面、地下空洞・トンネル内でのフラクチャー系岩盤の安定性
- ・フラクチャー系岩盤の緩み過程

(b) 変形性

- ・断層粘土・破砕帯の変形性
- ・フラクチャー系岩盤の変形性
- ・断層部分での特異な変形性(不同沈下など)

(c) 透水性

- ・断層粘土・破砕帯の透水性
- ・フラクチャーの形態と透水性
- ・フラクチャー・ネットワークの幾何学的特徴と透水性

(d) 断層の将来の活動性

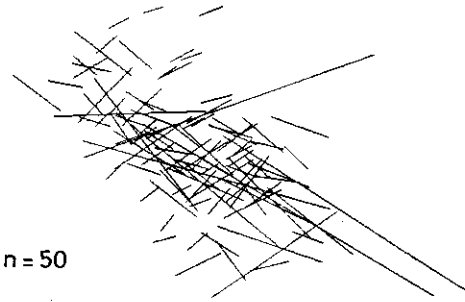
- ・断層に沿った変位の大きさ
- ・発生する地震動の大きさと特性

(クラック)系の全貌を3次元的にとらえる方法として、スキャンラインを設定して測定する方法もよく用いられているが、十分なものではない。

国際岩の力学委員会(ISRM)のフラクチャーに関する調査指針(ISRM Commission, 1980)は岩盤中のフラクチャーの形態や力学的性質をとらえるために提案されたものであり、これには第2表に示すような様々な調査項目が列記されている。面の走向・傾斜だけでなく、その間隔や間隙、面の凹凸等についても測定方法が考案されている。但し、この場合も個々のものについてはともかく、3次元的全貌での形態・性質をとらえる方法は確立されていない。

しかしながら、こういった情報は、基本となる形態や性状がそこでのより広い地質構造やその形成過程とも密接に結びついているはずであるから、力学的性質を考えるためだけでなく、構造の形成過程を考えるうえでも大いに参考になるに違いない。また、逆にこれらの情報に基づいた形成過程に関する構造地質学的知識が力学的性質を考えるうえでも大いに役立つこともあり得るであろう。

第4図は節理系に対応する線分分布を乱数で作り出してグラフィックスクリーン上に描いたものである。2次元のこれほど単純なものでも現実に近い分布特性をつくるのに位置、方向、長さに関して10以上のパラメータを要している。構造地質学でもフラクチャーの幾何学的形態については、面の走向・傾斜や変位だけでなく、こういったより多くの情報を抽出する努力が必要ではないだろうか。



第4図 コンピュータで作成した節理系の例。
大きくみて2系統の節理系であるが、個々の線分中心点の位置および走向の方位は正規分布に従うものとし、線分の長さは指数則に従うものとして乱数を用いて図化したもの。全部で10以上のパラメータを用いている。nは表した節理の合計数。

地質構造の表現とその多様性

(1) 表現・情報伝達の必要な応用地質学

さて、応用地質学という分野の際だった特徴として、調査や解析によって得られた情報を第三者に伝達する機会の多いことがあげられる。地質調査の結果を複数の第三者に示して理解してもらうには、情報を正確に伝える図面、換言すれば情報の正確な伝達媒体となり得る地質図等が必要となる。

フラクチャーをも含めた地質構造をこういった立場で表現しようとする、様々な表現が可能となり、とくに目的の違いを反映して構造地質学のそれとも大きく異なったものになる。同じ構造を対象としながらも多様な表現が可能な理由は、(i)フラクチャーに付帯して

第2表 ISRM 指針にあるフラクチャーの調査項目 (ISRM Commission, 1980)

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| 1. 方向 (orientation) | 6. 間隙幅 (aperture) |
| 2. 間隔 (spacing) | 7. 充填物 (filling) |
| 3. 連続性 (persistence) | 8. 浸透水 (seepage) |
| 4. 粗さ (roughness) | 9. セットの数 (number of sets) |
| 5. 壁面強度 (wall strength) | 10. ブロックサイズ (block size) |

いる属性の違いによるとともに、(ii)要求される「正確さ」の中身が微妙に異なるためであり、さらに、(iii)前述した構造そのものを正確に把握することの物理的困難性によるためでもある。

2つの地層間にある1本の断層に関して「断層関係」を重視するか、断層を構成する「フラクチャー系」を重視するか、あるいはそれから派生する「力学的弱部の位置」を重視するかは目的によって異なり、それが表現の違いとなる。フラクチャーを含む地質構造の応用地質学での取扱いを考えると、このような様々な表現が可能となるところに混乱を生ずる余地があるといえよう。

(2)地質構造の応用地質学としての表現

一般に応用地質学での断層表現にはその位置の正確さに加えて様々な工夫がなされている。目的に応じて破砕帯部分の幅を表示したり、粘土化した部分と角礫化した部分を違った記号で表示したりすることがある。また、節理レベルでは面が密着しているか開口しているかといった注釈がつけられたりする。

応用地質学分野での幅広い利用を考慮した断層表現の例に活断層のストリップマップがある(中田・岡田, 1990; 今泉, 1990; 松山・岡田, 1991)。既存の活断層分布図とは違って「位置的」正確さを実用レベルまで追求したものであり、将来起こり得る地表面変位の場所を表現するという意味で縮尺と表現での違いは大きい。

活断層に関しては断層の分布位置、形態に加えて、活動性などに関連した属性情報も必要となる。「日本の活断層—分布図と資料」(活断層研究会編, 1980)は活断層に確実度と活動度という2つの指標を付記している。確実度を導入することで潜在的可能性をもっているものも含め最大限表現できることになる。この考え方の延長として、断層そのものとその属性の図面上での表現についてそれらのフェジイ性も含めていくつかの提案がなされている(横田・升本, 1984; 永田, 1990, 1991)。

地質構造の推定と構造運動の予測

(1)推定と予測が大事な応用地質学

応用地質学というと、岩石や岩盤の力学的・物理的性質を得ることが目的かのように思われがちであるが、実際には施工などに伴って発生する問題をまえもって予想し、対処を考えることの方がはるかに重要である。岩盤中のフラクチャーはその方向や性状によっては様々なかたちで実際問題に影響するので、これから波及する問題に対処するためには、たとえ直接的な把握が困難であっても、断片的な地形・地質情報から目的とする場所の地質構造・状態を推定することが必要となる。もちろんこの場合、地質構造やフラクチャーはそれらに含まれる属性(岩石・岩盤の物理的・力学的性質)にまで言及する必要がある。道路等の切土法面でも計画掘削面上の地質・岩盤状態、断層の存在、節理面の方向性や性状等を前もって推定しておくことに意味がある。

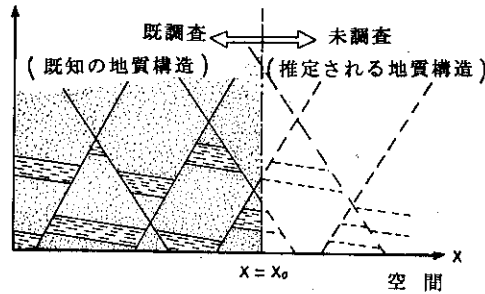
ただし、地質構造・状態の推定といってもボーリング調査等でかなりの精度・確実度で分かり得る場合と、距離的に離れていたりして分かり得ない場合がある。地質構造はもちろんのこと、岩盤の強度、変形性、透水性などに関して高精度の把握の要求されるダム基礎などは前者の例であり、トンネル計画地点での地質構造、岩盤状態、断層など物理的になかなかとらえにくいのは後者の例といえる。いずれであってもこの種の推定は応用地質学の立場では最も重要な課題である。

また、断層の将来における活動の予測はわが国では原子力発電所をはじめとして巨大構造物には不可欠であり、このため構造運動の予測(時間的な予測)も応用地質学の立場で同様に重要な課題である。したがって、地質構造に関わる推定・予測として、

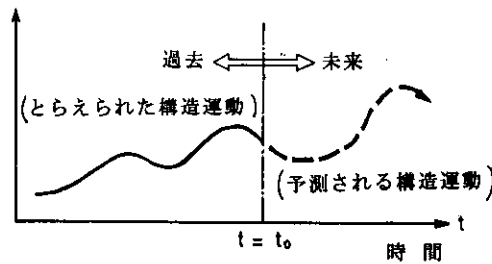
(i)地質構造(状態)の推定(空間的な予測)と、
(ii)構造運動の予測(時間的な予測)

という2つが応用地質学での本質的課題といえよう(第5図)。

(a) 地質構造(状態)の推定(空間的予測)



(b) 構造運動の予測(時間的予測)



第5図 地質構造の推定と構造運動の予測

(2) 推定・予測に向けての構造地質学的知識

推定・予測にあたっては、岩石・地層の分布や地質構造の空間的分布の規則性を見いだすことが重要であるとともにその時間的変化の理解も不可欠である。

岩盤状態が地表面象としての風化・劣化過程に加えて断層や節理分布等に規制されることを考えれば、その推定には、岩盤の緩み、劣化、風化などの地表面象とともに、フラクチャーの分布規則性の情報が必要である。また、フラクチャーが様々な時期の造構応力場を反映したものと考えれば、その形成過程とともに広域的な造構応力場と断層の活動性との関係などを含めた地体構造的考え方も必要となる。

それぞれの地質構造が一定の空間的広がりやなかでどのようにして形成されてきたか、そして将来どのように変化していくかである。これはまさしく構造地質学の課題そのものである。

地質構造とその形成に関する知識は最近では各種物理探査結果の解釈をするうえでも不可欠な要素となっている。この種の例として、スパー

カー探査によって地質断面図を描く際、全体の地質構造や断層変位の3次元空間分布までも考慮して表示していくようなシステムも作られている(Freeman, et al., 1990)。

いずれにせよ、これらの推定・予測には、応力場、歪分布に基づく構造間関係などについて力学的知識を背景とした構造地質学の協力が不可欠となるであろう。

おわりに一構造地質学的发展

以上述べてきたように、構造地質学の独占場と思われがちな地質構造やフラクチャーは応用地質学など他分野でも重要な研究課題であり、そこでは独自の学問的發展が続いている。

学問的性格からくる違いさえ認識しておけば、共通の対象に対する方法を共有し、互いに補完または干渉しあうことによってさらなる發展が期待できるであろう。しかし、現在の構造地質学がこれら周辺分野からの要請に対して十分に答えるかという点、必ずしも十分でなく、

他分野にとってのベースになり得ないところに現在の構造地質学の問題があるような気がする。

「正確に把握する」という基本をとってみても、地質構造把握の不十分さを克服する努力が必要である。たとえば、1970年代以降活発にすすめられてきた活断層のトレンチのような努力が構造地質学の幅広い分野でも進められてもいいのではないだろうか。

このように構造地質学をそれを取りまく広い範囲から眺めると、構造地質学の置かれている状況が見えてくる。これを構造地質学の今後の発展方向を考えるうえで少しでも役だてていただければ幸いである。

文 献

- Gignoux, M., 1955, Géologie des Barrages et des Aménagements Hydrauliques. Masson et Cie Éditeurs, 343p.
- Goodman, R. E. and Shi, Gen-Hua, 1982, Geology and rock slope stability—Application of the key block concept for rock slope. *Proc. 3rd Int. Conf. on stability in surface mining*, 347-373.
- Freeman, B., Yielding, G. and Badley, M., 1990, Fault correlation during seismic interpretation. *First Break*, **8**, 87-95.
- Hsieh, P. A., Newman, S. P., Stiles, G. K. and Simpson, E. S., 1985, Field determination of the three dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 2 Methodology and Application. *Water Resources Research*, **21**, 1667-1676.
- 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*, **8**, 91-96.
- ISRM Commission on classification of rocks and rock masses, 1980, Basic Geotechnical Description of rock masses(BGD). *Int. Jour. Rock Mechanics. Min. Sci. & Geomechanics. Abstr.* **18**, 85-110.
- 松山紀香・岡田篤正, 1991, 空中写真判読による六甲山地南麓部の活断層詳細図—試作例—. *活断層研究*, **9**, 69-92.
- 永田秀尚, 1990, 小断層の土木地質学的な表現—論理と実例—. *構造地質*, no.37, 41-49.
- 永田秀尚, 1991, ファジイ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, 85-88.
- 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成基準について. *活断層研究*, **8**, 59-70.
- 中屋真二・西垣 誠・河野伊一郎, 1992, 亀裂方位情報を利用したクロスホール試験による岩盤の三次元透水パラメータの測定法. *地下水学会誌*, **34**, 81-98.
- Oda, M., 1983, A method for evaluating the effect of crack geometry on the mechanical behaviour of cracked rock masses. *Mechanics of Materials*, **2**, 163-171.
- Oda, M., 1985, Permeability tensor for jointed rock masses. *Geotechnique*, **35**, 483-495.
- 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, 363p.
- 植村 武・水谷伸治郎編, 1979, 地質構造の形成. 岩波講座「地球科学」, **9**, 岩波書店, 294p.
- 山辺 正・小田匡寛・原 夏生, 1988, クラックテンソルによる異方弾性変形解析と実岩盤への適用性に関する考察. 埼玉大学工学部建設系研究報告, **18**, 85-102.
- 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*, **6**, 309-314.
- 横田修一郎, 1990, 地質図作成過程の分析(2)—視点の違いによる様々な地質モデル. *情報地質*, **1**, 205-210.