

地殻変動観測のためのドライティルト法

衣笠善博(環境地質部)
YOSHIHIRO KINUGASA

まえがき

地震予知や火山噴火予知のためには、地震の発生や火山の噴火に先立って現われる地殻変動を適確にとらえる事が不可欠である。ここではそれら地殻変動のうち傾斜の変化を観測する方法について紹介する。

ドライティルト法と題したが、特に複雑な機器を使う方法でもなければ、全く新しい方法というわけでもない。水準測量を繰り返す行い、水準点の高さの変化から傾斜変動を求めようとするものである。

水準測量のデータから傾斜変動を解析しようとする試みは古くは MIYABE (1931) によってなされ、「宮部の方法」と呼ばれている。MIYABE は房総半島の水準点、三角点の改測の結果を解析し、房総半島はいくつかの地塊に分かれ、それぞれの地塊ごとに傾動方向が異なる事を指摘した。

鈴木ほか (1974) は房総半島を一周する、国土地理院の水準測量のデータを解析し、傾斜の方向が不連続に変化する場所がある事から房総半島がいくつかのブロックに分かれる事や、全体としては海側に傾動している事を指摘した。

これらは、しかしながら、既存の水準点や三角点の測量に依存しており、観測点の配置が必ずしも傾斜変動を求めるのに適したようになされているわけではない。

また、改測の間隔も一般には数10年と長い。

SYLVESTER のプログレスレポートと LEE の CEL

筆者がドライティルトという言葉に接したのは1977年に Art SYLVESTER が米国地質調査所 (USGS) に提出したプログレスレポート (進捗状況報告) を見た時が最初である。当時アメリカでは南カリフォルニアのパームディール周辺の異常隆起が大きな問題となっており、各種の観測網が急速に展開されつつあった。USGS は大学の研究者からのプロポーザルを受け付け、審査し、研究費を配分していた。配分を受けた研究者は、従って年に何回かプログレスレポートを USGS に提出しなければならない。これらのレポートは普段は一般の研究者の目にふれる事は、まずないが、丁度その頃 USGS の

Willie LEE が地震学に関する論文を集め、データベース化するプロジェクトを進めていた。

LEE の目指していたのは、出版済みの論文だけではなく、むしろ、投稿前の原稿やレポート、会議の記録など最新の情報を集める事にあった。集められたドキュメントはコンピュータで処理され、Current Earthquake Literature (CEL) として希望者に配付されていた。

そのリストのなかで筆者の目についたのが SYLVESTER のレポートである。さっそくこのレポートを入手し読んでみると、なるほどプログレスレポートというだけの事はある。学術的な成果の記述より、いつどこに何点観測点を作ったとか、それに要した費用がいくらであったとか、作業が遅れたのは天候がどうであったとかいう内容である。

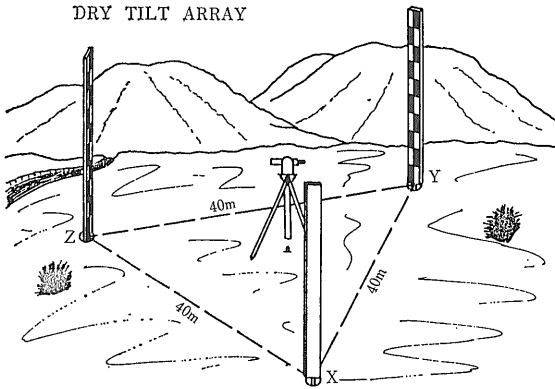
しかし、これらのプログレスレポートのなかには、処理に処理をかさねた (悪く言うと厚化粧をした) 学術論文の記述よりも、担当者のナマの声が書かれていて興味深いものもある。

筆者の興味を引いたのは、人件費は別として、水準儀と数10ドルの金属棒さえあれば地殻変動が測定できるという事であり、また読んで見て、技術的にはまだ改良の余地がありそうだと感じた。すなわち、数10ドルとちよとした改良で彼らの上を行けると思ったわけである。

レポートの性質上、プログレスレポートを直接引用する事はできないが、SYLVESTER (1978) には、かなり技術的な事も含めて記述されているので、興味ある人は参照していただきたい。

なぜドライなのか？

さて、ドライティルトという用語であるが、SYLVESTER (1978) の論文で筆者は Willie KINOSHITA らがすでにハワイで同様の観測を行っている事を知った (KINOSHITA et al. 1974)。KINOSHITA らはそこで Telescopic spirit-level tilting (アルコール気泡管式望遠鏡付水準儀による傾斜観測) という言葉を使っている。この「アルコール気泡管式望遠鏡付水準儀」というのはなんの事はないごく普通の水準儀のことである。



第1図 SYLVESTER (1978) によるドライティルト観測の模式図。

SYLVESTER (1978) は Dry Tilt という用語を使っているが なぜ Dry なのかを述べていない。筆者は初め水管傾斜計のように水を使わないからドライ(乾いた)と呼ぶのかと理解した。しかし KINOSITA et al. (1974) で Spirit (アルコール 強い酒) という言葉が使われている事から 同じドライでも Dry GIN や Dry MARTINI というように特に強い酒である事を示す形容詞であるとも解せられる。辞書には Dry の意味に「酒抜きの」という意味もある。観測は酒抜きで行う必要がある事は言うまでもない。

というわけで Dry の邦訳を決めかね 本手法をカナ書きでドライティルトと呼ぶ事にしたい。この Dry Tilt という用語は しかし筆者の好みという理由だけではなく Ken YAMASHITA によればハワイの火山学者の間やその他の所でも広く使われており (YAMASHITA 1981) 定着した用語と言えらる。

近年日本におけるほぼ同種の観測の実施例としては阿寺断層水準測量グループ (1978) が岐阜県坂下町で延長約 4 km の水準路線を設け その改測データの解析に前述の「宮部の方法」を用いている。また木股ほか (1980) は焼岳において水準点数10点 路線長500mの水準網を設けて観測を行っている。

観測方法 I SYLVESTER のドライティルト

まえがきに類する事を長々と書いたが ここでいよいよ観測方法を紹介することにする。

初等幾何学によれば 平面は3点の座標によって決定される。すなわち3点の座標から平面の傾斜の方向と傾斜量が求められる。3点の座標に変化があれば 平面の傾斜が変化する。すなわち傾斜変動が検出される。

第1図に SYLVESTER (1978) の描いた模式図を示す。

この図で X, Y, Z の3点は水準点であり それぞれの水準点に標尺を立てる。水準儀は 点X, Y, Z からなる三角形のほぼ中央にすえ 点X, Y, Z の上に立てた水準標尺を読む。三角形の辺長や辺の方向はテープやコンパスによって容易に求める事が出来る。こうして3点の座標は決定され この3点の乗っている平面の傾斜の方向と傾斜量が求まる。この後 時をおいて再び観測を行い平面の傾斜の方向と傾斜を求めればこの間の傾斜変化が求まる。

以上が「ドライティルト法による地殻変動の観測」の全てであり この観測に必要なものは 第1図からも明らかのように 人件費を別にすれば 標尺を含めて水準儀一式と 水準点として地面に埋め込む金属棒だけである。たったこれだけでパームデル周辺の異常隆起に伴う傾斜変動が求められた (第2図)。

観測方法 II 「宮部の方法」

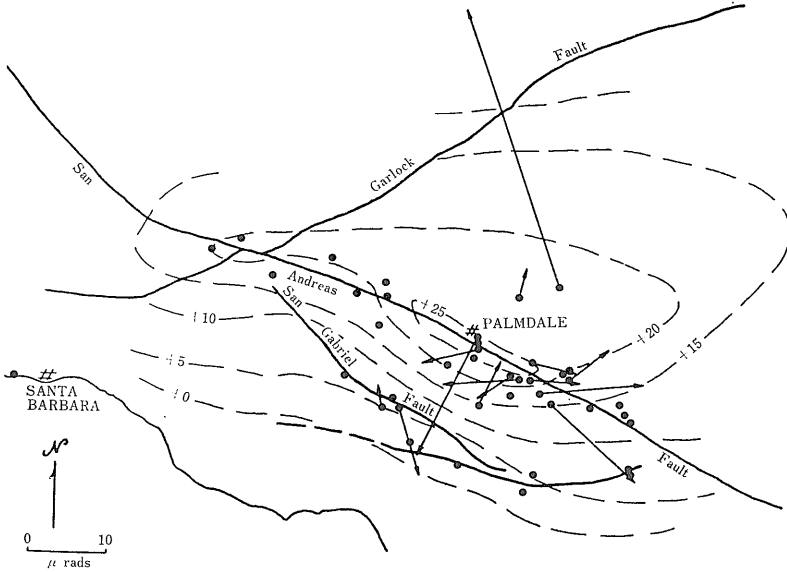
以上紹介した方法は 確かに簡便であり 有効な方法ではあるが この方法をそのまま日本で行う事にはそれほど魅力は感じられない。それは単に「直輸入」に過ぎないからである。魅力は 前述したように まだ改良の余地がありそうな所にある。外国から取り入れたアイディアに改良を加えて発展させるといふ日本人の取る最も普通のパターンではあるが。

さて その改良であるが SYLVESTER のレポートを読んですぐに思いついたのは 最初に紹介した「宮部の方法」である。これと組み合わせる事によって確実度と精度を上げる事が出来る事を思いついた。宮部の方法も水準測量から傾斜を求めるという点でドライティルトと同じであり SYLVESTER の Dry Tilt に触発されて宮部の方法の再検討を思いついたと言ふべきかも知れない。

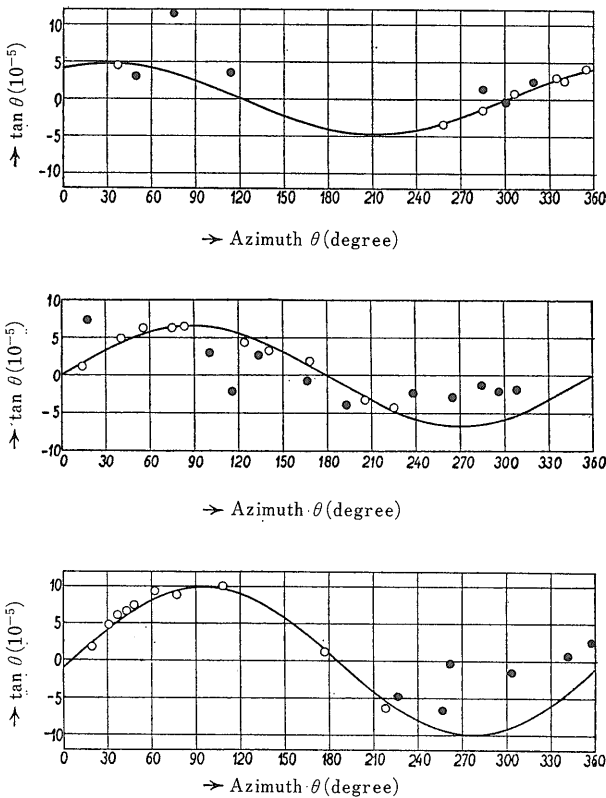
宮部の方法の基本は 多くの方向の傾斜を求め 最小自乗法である地域(ブロック)の傾動を求める さらに最小自乗法で決めたある地域の傾動と大きくかけ離れる点は別のブロックに属する点として ブロックの境界を決めるといふ所にある (第3図)。

SYLVESTER の Dry Tilt は3点のデータを使い解はユニークである。宮部の方法は解を最小自乗法で求めるという点で両者は大きく異なる。

はじめの部分で鈴木ほか (1974) も水準測量から房総半島の傾動を論じている事を紹介した。彼らは 彼らの方法を「宮部の方法を基本とし 一部改良した方法」と言っている。しかし 彼らの方法は3つの水準点の値から唯一の解を求めるという方法であり 宮部の方法



第2図 ドライティルト観測によって求められた南カリフォルニア パームデイル地域の傾斜変動。黒丸が観測網の位置を示し矢印は傾動ベクトルを示す。観測期間は1978年3月から4月。SYLVESTER (1978) より。



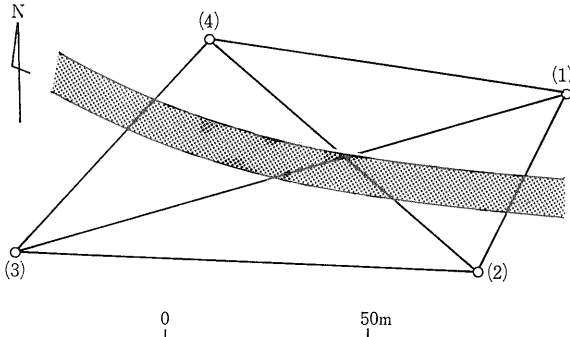
第3図 「宮部の方法」。

傾斜変化を縦軸にとり 方向別にプロットした図。白丸は同じ地塊にあると見なした点であり 黒丸は白丸によって決められたサインカーブから大きく離れているため別の地塊に属する点と見なされた。MIYABE (1931) より。

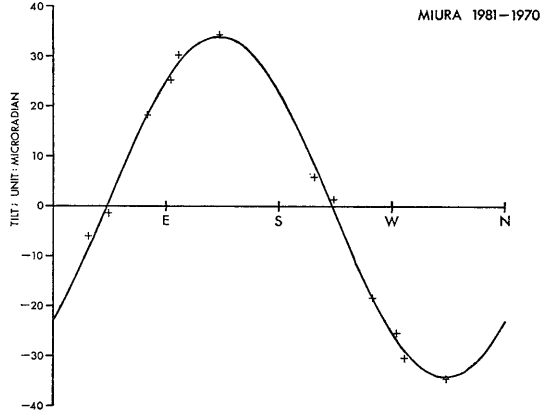
というより SYLVESTER の Dry Tilt と同じ方法である。

さてここまでは 改良されたドライティルト法一宮部の方法一の基本は数多くの水準点の観測を行い 最小自乗法で傾斜変動を解析する事にあることを述べてきたが MIYABE (1931) は最小自乗法で決めた傾動から著しく離れた水準点は別の地塊に属する点として取り扱っている。しかし同じ地塊にあっても 何らかの原因 たとえば たまたま不安定な岩盤上に設置された水準点や人為的に乱された水準点などのデータは最小自乗法の解から大きく離れた値をとるので発見が容易である。余談だが 中国で大衆参加によって地震予知が成功しているのと比較し アメリカでは人為的な影響(妨害)を American Public Participantion in Earthquake Prediction (アメリカ式地震予知への大衆参加)と呼んでいる人もいる。

前に ドライティルト法を改良する事により確実度と精度を上げる事が出来る事を思いついたと述べたが 確実度を上げるというのは 上に述べたようにして事故点が容易に明らかになり 事故点のデータを除いても残りの点で傾斜を求められるということである。3点では 傾斜はユニークに決まるが事故点の発見はできない。すなわち 3点のうちいずれかが事故点であっても その事がわからないまま答えが求まってしまう危険がある。精度を上げる事が出来るというのは 最小自乗法は一種の平均であり 数多くのデータ



第4図 北武断層の観測網の図形。
この形は角観測を精度良く行うために決められた図形である。



第5図 北武断層での解析例。 KINUGASA (1981) より。

を使う事により精度が上がるし 誤差を見積る事も出来る事を指す。

ケーススタディー

さて いよいよ実働開始と行きたい所ではあるが 上に送った方法がいくら簡便であるとは言っても なにがしかの研究費を必要とするし そのためには他人を説得する必要がある。 そのためには上に述べたようなレビューだけではパンチ不足であるような気がし なんとか自前のデータで実例を示す必要が感じられた。 幸い筆者は三浦半島を横断する北武断層周辺の地殻変動を明らかにする目的で繰り返し精密三角測量を実施しており この三角測量では三角点の高さを求めるために一等水準測量相当の水準測量を実施している。 北武観測網では観測点は4点と少ないが 解がユニークになる3点より1点多く最小自乗法が使える事と 観測網の大きさが50m~150m と手ごろな大きさであることから (第4図) この水準測量のデータを解析してみる事にした。

第5図は1970年の値と1981年の値とを使って解析した結果である。 横軸が方向で縦軸が傾斜量である。 すなわち この図の一番左の+印は N28°E 方向 (第4図で2号点から1号点を望む方向) で -6マイクロラジアン の傾動があった事を示している。 S28°W にプロットした点は逆に第4図で1号点から2号点を望む方向の傾斜で 当然の事ながら量は N28°E 方向の傾斜と等しく符号は逆となっている。 このようにして第5図には 第4図に示される6方向の傾斜が正・反あわせて12点としてプロットされている。 そしてこれらの点は見事にサインカーブの上に乗っているではないか! この事は1970年から1981年の間に観測網全体が S48°E の方向に

1984年12月号

42マイクロラジアン傾斜した事を示している (第5図は傾いて下がる傾斜の量をプラスに取って表示されている)。

「見事に乗っているではないか!」と自画自賛したのは第5図を見るだけで納得される事と思うが さらに付け加えていうなら この図に示した例では標準偏差σは1.6マイクロラジアンである。 一般に地殻変動の観測では100万分の1 (傾斜では1マイクロラジアン) の精度が一応の目安とされており 標準偏差1.6マイクロラジアンというのは一応満足出来る値である。

さらにこの解析から ドライティルトのケーススタディーの副産物として 北武断層はこの期間に縦ずれの変位をしていない事が明らかになった。 なぜなら 第5図に示されるように 4点からなる観測網全体は南東方向に傾動しており 第3図のように明らかにカーブから離れる点はない。 もし縦ずれの変位があったなら プロットされた点はバラバラに分散する事が予想されるからである。

ここで使った観測網は三角測量のために設置された網であり その図形は角観測の精度を上げる事を目標に菱形を理想形とし 現地の地形や土地利用の制限からやむをえず決められた図形である。 その結果 点(1)-(4)の方向と(2)-(3)の方向はほぼ平行しており さらに (1)-(2)と(4)-(3)もほぼ平行に近い。 従って 第5図にプロットされた点もある方向にかたまっており 南北に近い方向のデータが少ない。 最大傾斜の方向を精度良く (従って最大傾斜量も精度良く) 決めるためにはプロットされるべき点がある方向に適当にばらまかれている事が望ましい。 この事は既存の観測網を使うのではなく 全く新しくドライティルト用の観測網を作る場合はドライティルトの理想図形を念頭において設計すれば満足される。

以上 このケーススタディーの結論は 一等水準相当の測量によって100万分の1(マイクロラジアン)程度の精度で傾斜変動が求められるという事であり さらに観測方法を検討すれば精度の向上も期待されるという事である。

観測方法Ⅲ 改良ドライティルト法

SYLVESTER の方法 官部の方法のレビューと 北武断層でのケーススタディーにより 行うべき観測は一等水準もしくはそれを上回る精度の水準測量であり 観測点は4点以上かつ観測方向が特定の方向に集中していない事が必要とされる。さらに 簡便で安価でなければならない。

まず水準測量の精度であるが 一等水準測量の誤差の制限は 往復差 $2.5\sqrt{S}$ mm 閉合差 $2.0\sqrt{L}$ mm とされている。ここでSは往復2点間の距離 Lは水準路線を一周してもとの点に戻るまでの距離であり 共に単位は km である。この一等水準の精度を上回る精度を目指して 誤差の制限を $1.0\sqrt{S}$ mm $1.0\sqrt{L}$ mm とする事は妥当であろう。もちろんこの制限を満たすためにはそれなりの注意をはらわなければならない。

たとえば水準儀 標尺は共に毎回同じものを使い さらに観測のたびごとに検定を受ける。標尺の上端及び下端 50cm は読定しない 視準距離を 30 m 以内 25 m 程度とする 晴天下及び強風時には観測を行わない 等々の注意が必要である。さらに偶然誤差を避けるために 同じ観測網で3回の観測を行い その平均値を採用する事にした。3回の観測は同じ日に連続しては行わない事にした。これらの制限 手順は一等水準の制限手順より相当厳しいが 実行可能ではない。またこれ以上厳しい制限は水準儀の持つ精度から現実的ではないし 本来の目標である「簡便かつ安価」という精神に反する事になる。

次に観測網については 4点以上で観測方向が特定の方向に集中しない事が必要とされる。さらに 辺の長さ(2点間の距離)があまりバラバラでは個々の観測精度がバラバラになるので 出来るだけ等しい事が望ましい。

正四角形～正八角形を描いてみる。正四角形では上下の辺 左右の辺は互いに平行であり 辺の数はそれぞれ2つでも方向としては1つずつしかない。対角線を含めて4方向である。正五角形ではどれ1つとして平行な辺はない。さらに対角線を含めると10方向となる。正四角形に比べて 点の数を1.25倍にするだけで方向は2.5倍となる。これはうまい話である。しからばもう1点ふやして正六角形にするとどうなるである

うか? 確かに辺と対角線の合計の数は15と多くはなるが それらの辺や対角線は平行なものが多く 方向の数は6となる。正五角形に対し点の数を1.2倍にして方向の数は0.6倍となる。点の数を費用と読みかえ方向の数を効果と読みかえると 正六角形は正五角形に比べ 金ばかりかかって逆に効果が下がる事になる!

さらに点の数をふやしn角形とすると辺の数と対角線の数の合計は $n(n-1)/2$ と急激に増加するが 辺の長さに比べて対角線の長さが長くなりすぎ 精度の揃った観測という条件に反する事になる。さらに「簡便安価」の精神に反する。むやみに点をふやすより 点数を適正な数に留め 観測場所をふやした方が得策であると考えられる。若干の贅沢が許されるとしたら正五角形の中心にもう1つ点をふやす事である。これにより点数6 辺と対角線の合計15 方向15で 正七角形に比べ6方向少ないが 辺と対角線の長さの差は正七角形の場合よりもずっと少なくなる。

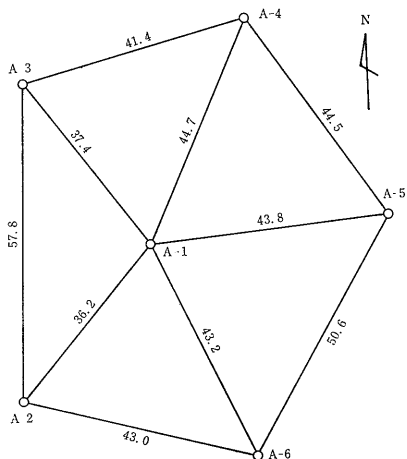
これで網の形は有心の五角形と決まった。次は網の大きさである。小さい方の制限は水準儀についている望遠鏡のピントが合う距離で 一等水準儀は約2mである。大きい方は技術的には無制限であるが 経費という大きな問題がある。経費の事はとりあえずしておくとし 2mから無限大までの間を考えるとその間は連続ではなく1つだけ不連続点がある。それは水準儀を1回だけ据えて観測出来る距離と 水準儀と標尺を移動させながら尺取り虫のごとく観測を行わなければならない距離の間の不連続であり 不連続点は視準距離の制限×2となる。一等水準測量の視準距離の制限は50mであるので不連続点は100mとなる。ドライティルトでは前述のように一等水準よりさらに精度を上げるために視準距離を25m程度とする事にした。このため不連続点は50mという事になる。

不連続点より長い方をとるか短い方をとるかについては 距離は長いにこした事はない。しかし長くするとそれだけ経費が増えるのと 水準儀 標尺の移動に伴う誤差が入ってくる。とすると答えは $25m \times 2 = 50m$ 程度という事になる。

以上を要約すると 図形は有心五角形 一辺の長さは50m程度の水準網で往復差・閉合差の制限をそれぞれ $1.0\sqrt{S}$ mm $1.0\sqrt{L}$ mm の水準測量——これが改良されたドライティルト法である。

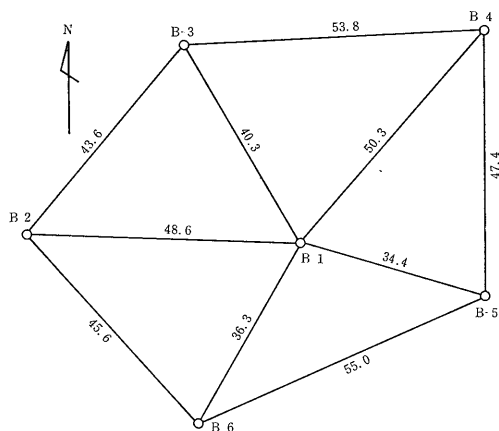
大島での観測

次に観測場所の選択である。筆者は地震予知に関する仕事に従事している事から 地震予知に直接関係した



第6図 観測網Aの図形.

A-1～A-6が水準点. 辺と対角線上の
数値は距離(m).



第7図 観測網Bの図形.

地域 たとえば 伊豆半島や東海地域で実施したいのは山々ではある. しかし ケーススタディーの結果ではこの手法の精度(標準偏差)が1.6マイクロラジアンであった事から 相当の精度の向上は期待されるものの 地震予知にいなきり適用する事はためらわれた. 地震予知以外と言うとまず思いつくのが火山噴火予知である. 幾つかの火山では噴火の前に顕著な地殻変動がある事が知られており またその大きさも本手法で捕捉するのに十分な大きさである. 事実 日本以外では YAMASHITA (1981) によれば ハワイはもちろんのことスプリエール火山やインドネシアのいくつかの火山でもほぼ同様の観測が行なわれている.

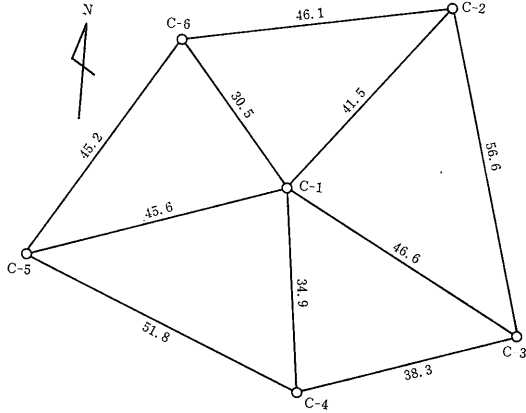
目標を火山噴火予知に決めたら次は売り込みである. 噴火予知の担当者の所に行き 本手法が簡便 安価であり ケーススタディーの結果火山噴火の前兆をとらえるには十分高精度であるかを説いた. この説得はさして困難ではなかった. 次はどの火山で観測を実施するかであるが これは噴火予知の担当者の意向に従うより他はない. 噴火予知の担当者の意向は三宅島か 伊豆大島という事であった.

三宅島は 比較的短い間隔で噴火を繰り返しており 他の観測が殆どなされていないという点で魅力的である. 伊豆大島も 火山地質の詳細が明らかになっており 噴火予知のための様々な観測が行われているという点で魅力的である. 他の観測が行われていない場所で観測を行うという事は処女地に足を踏み込む魅力であり 他の観測が行われている所で行うという事は 本手法の有効性の検証が行え また得られた結果の解釈にあたって他の多くのデータを使えるという魅力がある. どちらを

取るかといわれれば 本手法の最初の観測である事から有効性の検証が行えるという点で伊豆大島の魅力は大きい. さらに 筆者の本業が地震予知であり 伊豆大島は伊豆半島や相模湾に面しており 伊豆大島火山で得られたデータは地震予知のためのデータとして役立てられる可能性もあり 最終的には伊豆大島を選ぶ事にした.

さて いよいよ大島に出かけ用地の選定という事になったが その頃 東京大学地震研究所の中村一明さんが既に大島でドライティルトの観測を準備されているという事を知った. 先を越されたショックと同好の士を得た心強さではなはだ複雑な心境である. とにかく様子を聞いて見ると 中村さんの用意された観測網は4点からなる図形で 2つの対角線方向の傾斜を観測し 傾動ベクトルを求めようとするものであった. この方式は水管傾斜計による傾斜観測と同じ考え方に立つものであり ドライティルトとしては KINOSHITA et al. (1974) の流れをくむものである. とにかく中村さんが日本における先駆者であり 以後はその経験を教えて頂くと共に 協力して行く事となった. そのようなわけで 用地選定の時期を中村さんの第1回目の観測の時に併せて行い 観測地点の選定も大島火山の特徴を考慮した事はもちろんであるが 中村さんの観測網の存在を念頭において行った.

その結果 とりあえず 大島の西海岸の長根岬公園内(以下A網と呼ぶ)と 御神火茶屋の東南約 0.6kmの地点(B網)及び剣が峰の北北東 1.1 km (C網)の3ヶ所に観測網を配置する事にした(第16図参照). 設置すべき図形の理想は前述の通りであるが やはり現地に行ってみると理想通りとは行かない. 長根岬公園のA網は公園全体の大きさや花壇など公園施設の配置による制限から 最終的には第6図のような図形となった. B網



第8図 観測網Cの図形。

C網についても同様に現地の地形や岩盤の状況から第7図及び第8図のような図形を設置した。実際の測量作業は測量会社の熟練した測量士によって行われた。

観測結果

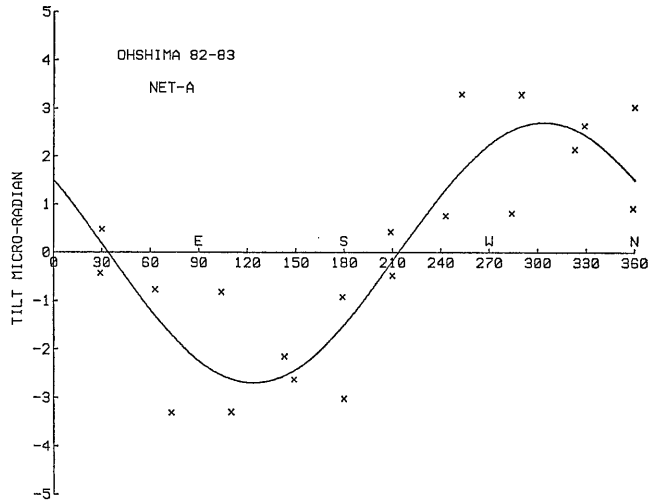
観測は 1982年2月に第1回目を行い 以後 1983年2月 1984年2月と毎年同じ時期に行っている。また 1984年8月下旬から伊豆半島と大島の間で群発地震の活動が活発になり 大島の極く近くでも地震が発生するようになった。このため急遽第4回目を行う事を決め 9月11日から観測を行った。

まず 第1回目と第2回目の観測から1982年2月～1983年2月の間の傾斜変動を求める事にする。第9図は観測網Aについて ケーススタディーの場合と同じように 方向別に傾斜量をプロットしさらに最小自乗法で全体を最も良く満足するようなサインカーブを求めて描いたものである。かなりばらついてはいるが 縦軸の目盛りからもわかるように傾斜量は数マイクロラジアンであり 観測精度はある程度満足出来るもののように思えた。ちなみにこの例では標準偏差は1.4マイクロラジアンで ケーススタディーの場合をわずかながら上回っている。とりあえず 観測網B, Cの結果とも併せてこの結果を発表してしまった(衣笠ほか 1983, 地質調査所 1983)。

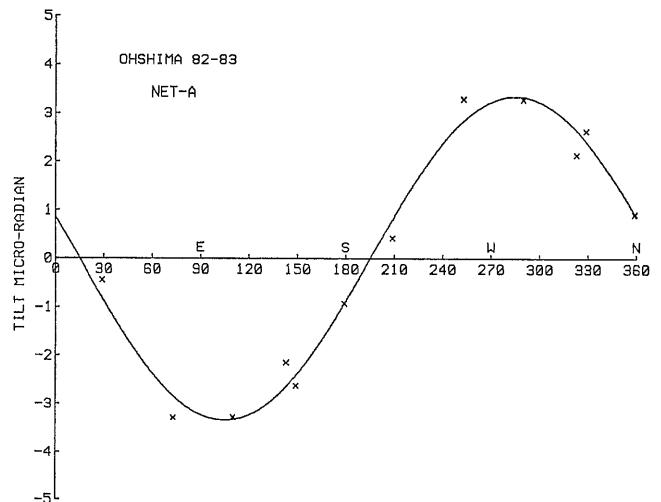
文字通り発表してしまった後で 発表した内容は本手法の最も重要な特徴を生かしきって

ないという事に気がついた。それは本手法が多数の水準点(この場合6点)からなる観測であり 「官部の方法」の紹介の所で述べたように事故点の発見が可能であるという事である。第9図のなかで事故点はどれか?

全点を使って求めたサインカーブからの残差のリストを作って見ると 1号点に関する辺 対角線の傾斜観測値と計算値の差が大きい事がわかった。従ってとりあえず1号点を事故点という事にして除外し 残りの点に関するデータを使って再び計算を行う。今度は2号点に関する辺 対角線の残差が大きい。今度は2号点も事故点として 2号点に関するデータを取り除く事にする。……段々心細くなってきた……その結果 残りの



第9図 1982年2月～1983年2月の観測網Aにおける傾斜変動。すべての点に関するデータを使用。



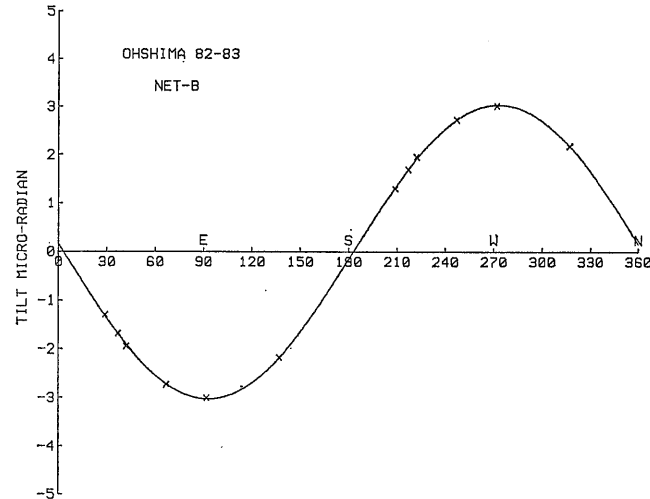
第10図 同 事故点にかかわるデータを除いた結果。

辺と対角線の残差は全て1マイクロラジアン以下になった。標準偏差(σ)は0.3マイクロラジアンにまで改善された(第10図)。B, C網についても同様に残差を頼りに事故点を除いて行くとB網では3号点と5号点を除いて $\sigma=0.02$ (第11図) C網では1号点と3号点を除いて $\sigma=0.29$ (第12図)と改善された。これらの標準偏差は目標とした「1マイクロラジアン程度の観測」を十分に満足する値である。

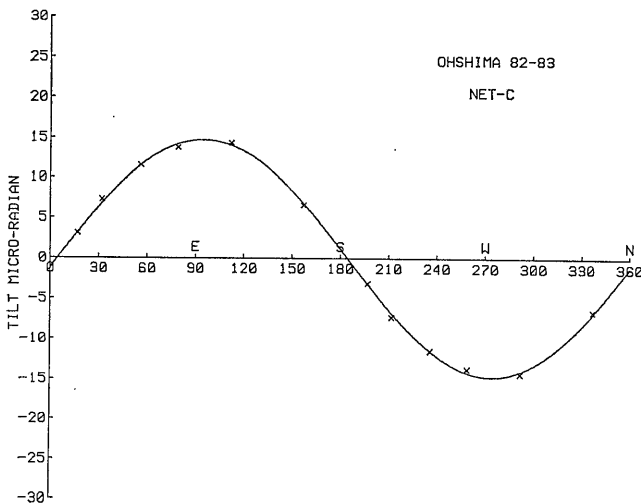
この事故点を除外して解析した結果は1984年2月の観測結果と共に発表した(衣笠ほか1984, 地質調査所1984)。

よみがえる観測点

観測点の事故の原因は今のところ不明である。設置した岩盤が悪かったのか 馬に蹴られたか牛に踏まれたか あるいは「火山噴火予知への大衆参加」なのか。とにかく一年間の間に幾つかの観測点が事故にあうようである。しかし観測点が次々と事故に会い次第に健全な観測点が少なくなり ついには解析が出来なくなるというわけではない。なぜならある期間にある観測点が馬に蹴られたとすると確かにその期間その点に



第11図 同 観測網B.



第12図 同 観測網C.

ここでは傾斜変動が大きいため 縦軸のスケールを第10, 11図とは違えて描いてある。

関するデータは使えなくなるが 次の期間に同じ観測点が再び馬に蹴られるとは限らない。

従って 次の期間の前・後の観測値は再びその点が事故を受けていなければ使える。

このような事は実際にあった。A網で第1回と第2回の間には事故を受けたのは1号点と2号点であったが 第2回と第3回の間には事故は2号点にだけ起きている。従って1号点は第2回の観測以後よみがえったと言える。

また第3回と第4回の間で2号点と4号点に事故が考えられる。従って2号点は第1回から第4回までの間事故を受けっぱなしという事になる。このような点は岩盤に問題があったとも考えられ よみがえる可能性は少ないと思われるので 時期を見て改埋をしたいと考えている。

このように観測点の事故 蘇生や改埋すべき点の発見は本手法が多数の観測点(と言っても6点だが)からなる観測方式であるからであり解がユニークな3点観測では全く不可能である。

ではどの程度の確率で観測点が事故を受けているであろうか? 観測点設置後第4回までに約2年半を経過している。観測点の数は3つの観測網をあわせて18点である。従って $18 \times 2.5 = 45$ 点年を経過した事になる。この点年という数え方は原子炉の事故評価などで用いられている炉年という数え方の借り物である。この間に事故点となったのは12.5点年である(1つの点が1年の間に事故を受ければ1点年とし 第1回から第4回までの全ての期間について事故点と評価された場合は2.5点年とし それらの合計の値) この事から1つの点が1年間に事故を受ける確率は $12.5/45 = 0.28$ である。逆に一年間健全である確率は0.72である。

3点観測では3つの点すべてが健全でなければならぬ。3つの点すべてが健全である確

率は0.72の3乗すなわち 0.37である。言いかえると一年の間をおいた3点観測では満足な結果が得られるのは3つに1つという事になる。しかも満足な解がどれかという事さえもわからない。しからば本手法はどうか？ 観測点は6点であり 解析は少なくとも4点のデータがあれば行える。6点のうち4点以上が健全である確率は0.78であり 一応満足出来る確率と言えるであろう。さらに この確率は事故点の改埋等により改善される可能性がある事は言うまでもない。

伊豆東方沖の群発地震と ドライティルト

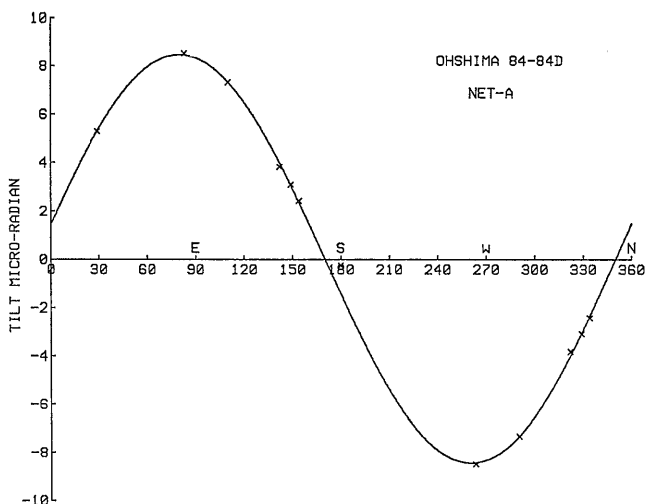
以上で本手法に関する技術的な評価は一応整った事になるので あとは観測を繰り返し ならんかの異常が現われるのを待つ事になる。そしてその時期は以外に早く訪れた。

8月30日の夕刻から伊豆半島東方沖に群発地震が発生しはじめ 翌9月1日からは有感地震も発生するようになった。9月5日の15時頃からは 1時間あたりの地震回数は100回を超えるようになった。さらに同日16時17分にはマグニチュード4.8の地震が 6日3時48分にはマグニチュード4.6の地震が発生し いずれも大島 網代 館山で震度Ⅲが観測された。

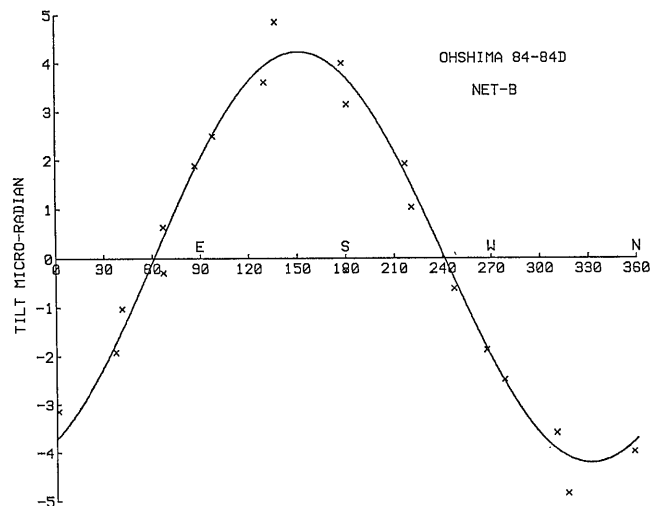
この群発地震の発生した場所は 大島の北西20 km 前後の所で 1980年伊豆半島東方沖地震 (M=6.7) 前後に群発地震が発生した場所であり 1983年1月にもほぼ同じ場所で群発地震が発生した。

今回の群発地震が上述のように1980年伊豆半島東方沖地震の前後に群発地震が発生した場所に一致する事から 9月3日に地震予知連絡会強化地域部会が急遽開催された。その結果 群発地震の状況と共に 「現在までのところ前回 (1983年1月) のものと同規模な活動であり 震源域地震活動の推移 地殻変動連続観測等の結果を総合的に判断すると このままの状態が続く限りでは 大きな地震が発生する可能性は少ない。ただし 発生地域の場所が変わったり 活動が著しく活発化した場合には要注意と考えられるので 今後もお注意深く監視して行きたい」との見解が発表された。

またその後 地震研究所の観測によると 大島でS-Pの短い地震 すなわち大島に近い所に震源を有する地震も発生しているらしいという情報を得た。



第13図 1984年2月～1984年9月の観測網Aにおける傾斜変動。事故点にかかわるデータは除外。第10図と比べれば 傾斜の方向がほぼ逆転している事が読み取れる。

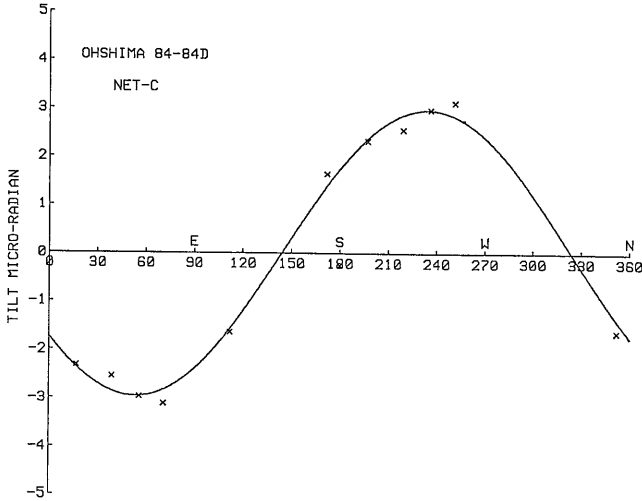


第14図 同 観測網B。

これらの事は 伊豆半島東方沖から大島に極く近い所にかけて何事かはわからないけれど地殻活動が進行中である事を示している。

何事が起きているのか またそれはドライティルトで観測されるようなものなのか？ とりあえず早急に観測を行う事にする。

観測は9月11日から開始された。11日というのは今回の群発地震の活動のピークが5日であったとはいえ活動期のなかであり 前日の10日にも1つのピークがあった。また 地震研究所の観測では大島島内及び付近



第15図 同 観測網C.

の地震回数は6日がピークであり、その後11日から15日にかけて再び活発になっている。このように活動期のまっ最中に観測が行えたのは多くの関係者の理解があってこそであり感謝にたえない。

観測結果は現在解析中であるが、とりあえずの暫定結果を示す。第13図から第15図までが1984年2月から今回までの間の傾斜変動を示す図である。これらは1枚の図にうまくおさまる様に縦軸の目盛りを第10図～第12図とは変えてあるので注意して頂きたい。縦軸の目盛りは違っていても、第13図～第15図と第10図～第12図を比較すると、傾動方向がほぼ逆転している事が読み取れる。

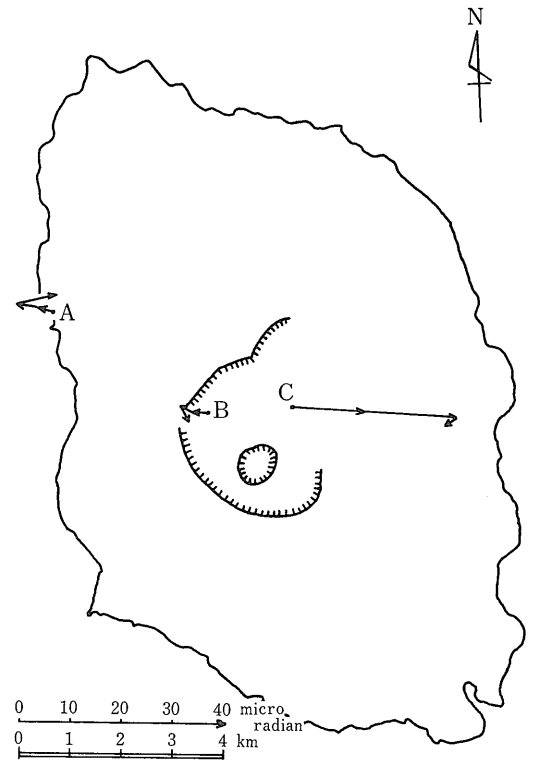
さらに1982年2月から今回までの傾動ベクトルを示した第16図においては、観測網A及びBにおいては、この半年間の傾動はその前2年間の傾動をほぼキャンセルするものである事、C網においても、量こそ小さいがセンスとしては逆転している事が読み取れる。

さて、この結果をどう解釈するか？ 解釈の1つは今回の群発地震の活動と関係付ける解釈である。この半年間の傾動は群発地震の活動域に最も近い観測網Aで最も大きく、B、Cと活動域から遠ざかるに従って傾動の量は小さくなる。この事は群発地震と傾動の関係を示唆するように見える。

もう1つの解釈は年周変化である。今回の観測は9月に行ったが、それ以前の3回はいずれも2月初旬に行っている。この事から、毎年2月の観測では山体が膨らむような変動が進んでいるように見えるが、それ以外の季節には別の動き、たとえば9月頃には山体が収縮するような動きをしている可能性も全く否定するわけには

いかない。

これに似た様な年周変化の例としては御前崎の上下変動がある。静岡県掛川と御前崎との間の水準路線は



第16図 過去2年半の間の傾斜ベクトル図。

A, B, Cは観測網を示し、矢印はdown tiltingの方向と大きさを示す。

地震予知のために頻りに測量が繰り返されている。そして掛川に対し御前崎が全体的な沈降を示しながら冬期間の観測では沈降をし 夏期の観測では冬期間の沈降の多くの部分をキャンセルするように変動をする事が明らかにされている。この年周変化のメカニズムについては現在関係機関によって調査・研究が進められているがとにかく地殻変動は観測が精密になればなる程年周変化との問題が生じてくる事は確かである。

今回検出された傾斜の逆転現象に対し上に述べた2つの解釈のうちのどちらを取るべきかは現時点では明確な解答を持っていない。年周変化の可能性は来年2月に行う予定の観測の結果によってある程度の事は明らかになるであろうし年周変化の状況が明らかになればそれを差し引いた残りが群発地震の活動によるものと考え適当なモデル計算により何事が起きたのかについて言及する事も可能となるであろう。

おわりに

以上地殻変動のうち傾斜変動を観測する方法としてドライティルト法を紹介すると共にその精度や確実度などについても言及した。さらに実例として伊豆大島で1982年2月からの観測結果を示し1984年8月末から始まった伊豆半島東方沖の群発地震の活動の期間中に行った観測では傾斜変動の逆転現象が検出された事を示した。

ここで紹介した手法は他の観測と併用あるいは他の観測に先立って行う事によっても効力を発揮する事を付け加えておきたい。傾斜変動を観測する方法としては他に水管傾斜計やボアホール傾斜計 水平振子型傾斜計などがある。これらは連続観測が出来るという利点があるものの常にドリフトの問題がつきまとう。これに対しドライティルト法はドリフトが入り込む余地がない。従ってドライティルト法をこれらの観測と併用する事によりドリフトの影響を評価出来 短周期から長周期までの広い範囲の傾斜変動を議論する事が出来る。

また水管傾斜計では水管をどのように配置するかが大きな問題であるがあらかじめドライティルトによりその地域の傾斜変動の特性が明らかになっていれば最も効果的な水管の配置が行える。もちろん水管傾斜計の設置後はドリフトのチェックに使える事は上に述べた通りである。

日本の火山のなかには観測が殆どあるいは全く行われていない火山が多い。観測が行われているのは伊豆大島火山や桜島火山といったほんの数ヶ所にしかすぎない。

い。本手法は簡便 安価でしかも確実に傾斜変動をとらえる事が出来る事から 未監視の火山の監視には最も適した方法の一つであるといえよう。

解析や考察が不十分なまま冗長な文章を書いて来たが筆者がどのようなきっかけでドライティルトに取り組みどのような過程を経て観測を行なうに至ったかを知って頂きたく書いたためである。御容赦頂きたい。

最後に 地震研究所中村一明助教授からは常に貴重な助言と励ましを頂いている。また東京都大島支庁及び大島町からは観測用地についての便宜をはかって頂いている。ここに厚く感謝致します。

文 献

- 阿寺断層水準測量グループ (1978) 阿寺断層付近の精密水準測量 (その1). 地球科学 vol. 32, p. 259-261.
- 地質調査所 (1983) 伊豆大島火山のドライティルト観測 (1983-1982). 火山噴火予知連絡会会報 No. 28, p. 39-41.
- 地質調査所 (1984) 伊豆大島火山のドライティルト観測 (1984). 火山噴火予知連絡会会報 No. 31, p. 38-40.
- 木股文昭・藤井 巖・中村 勝 (1980) 焼岳における精密水準測量による傾斜観測. 測地学会第53回講演要旨集 p. 76-77.
- KINOSHITA, W. T., D. A. SWANSON, and D. B. JACKSON (1974) The Measurement of crustal deformation related to volcanic activity at Kilauea Volcano, Hawaii. in CIVETTA et al. ed., *Physical Volcanology*. Elsevier Pub. Co., p. 87-115.
- KINUGASA, Y. (1981) Crustal Strain on and around an Active Fault —An example from the survey on the Kitatake fault—. *Jour. Geodetic Soc. of Japan*, vol. 27, p. 309-311.
- 衣笠善博・相原輝雄・小野晃司 (1983) 伊豆大島火山のドライティルト観測 (演旨). 火山 第2集 vol. 28, p. 189.
- 衣笠善博・小野晃司・中村一明 (1984) 伊豆大島火山のドライティルト観測 (演旨). 火山 第2集 vol. 29, p. 145-146.
- MIYABE, N. (1931) Blocks in the Earth's Crust and their Movements, Part I and Part II, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 9, p. 256-270, 407-427.
- 鈴木尉元ほか4名 (1974) 房総半島の水準点変動と地質構造との関連性. 地質調査所月報 vol. 25, p. 19-35.
- SYLVESTER, A. G. (1978) The Dry Tilt Method of Measuring Crustal Tilt. USGS Open-File Report, No. 79-370, p. 545-568.
- YAMASHITA, K. M. (1981) Dry Tilt: A Ground Deformation Monitor as Applied to the Active Volcanoes of Hawaii. USGS Open-File Report, No. 81-523, p. 1-17.