

GPS で見える地殻変動とプレートの動き

松本 剛^{*} (琉球大学理学部), 中尾 茂 (東京大学地震研究所)

要約:

我が国でGPSを用いた基線長変動観測研究が開始されてから10年以上が経過し、現在は国土交通省国土地理院が日本全国に電子基準点を構築し、業務として国土の地殻変動モニタリングを行うに至っている。これら電子基準点データの示す地殻変動・プレート運動は、データ取得から推論を経てモデル形成に至る過程を明快に示すことが可能であり、地震・地殻変動・プレート運動などの基礎を学ぶ高等学校の地学科目に於いて、教材として選定するに相応しい。本稿では、高等学校で教えられる地球の変動とプレートテクトニクスの内容を整理し、その履修過程でGPS観測を副教材として取上げることの意義とともに、副教材案を提示する。

1. 序

地学 (= 宇宙地球科学) は一種の応用科学であり、物理学・化学、或いは一部生物学などの基礎理論を応用して宇宙・地球に起こる自然現象を解明する科学である。従って、まずはこれら自然現象を科学的な手法を以って観察・観測・計測し、その結果をもとに基礎科学の理論を当てはめて推論し、自然現象のメカニズム、原動力、当然の帰結としてこの様な自然現象の生起する過程を紐解いて行くことが、本来の方法であると言える。しかしながら、対象は宇宙・地球全体を扱うこと、或いはこれら観測には特殊な機械装置を使用することが多く、全ての生徒が屋外のフィールドワークを行って基礎データを取得すると云うわけにはいかない。その様なわけで、高等学校で地学を学ぶ際にはこれらの本来の手順をスキップして、まずは知識から入ると云う方法を取らざるを得ないのが実情である。このような問題点を打開するためには、本来の観察・観測・計測の実験が不可能であっても、それに近い環境を教室で再現して「擬似体験」することにより、データ取得からその整理・処理・解析、その結果を考察した上でモデル化、新たな仮説の設定と云う過程を通して、科学の方法を学ぶ機会を提供する必要がある。近年はインターネットの普及によって、居ながらにして多くの情報を引き出すこと

が出来る。国公立調査研究機関が業務として行った観測の成果は原則として公開しなければならず、またどの機関も、業務内容の周知や最新の成果の普及のためにインターネットを活用しており、また、頻繁に見学会を開催するなど、「教育・啓蒙」(education and public outreach)は今や洋の東西を問わずこれら調査研究機関の業務の中でも比重が高くなりつつある。この意味で、工夫次第ではインターネットを活用した調査観測の「擬似体験」も学習の中に取り入れることが可能となって来ている。

2. 高校地学におけるプレートの概念の取扱

高等学校の理科のうち地学関連科目に於いては、プレートテクトニクスが扱われる。以下、高等学校学習指導要領に示されたプレートテクトニクス関連分野を列挙する。

理科基礎

「プレートテクトニクス説の成立」：モデル実験やコンピュータシミュレーションなどを通して、大西洋中央海嶺の発見が契機となり地球表層の運動がプレートの動きで説明できるようになるまでの過程を平易に扱い、地殻や地表に見られる地学現象がそれによって説明できるようになったことにも触れる。

理科総合B

「地球の変動」：プレートの動きによる世界の大山脈の形成などの大地の変動について理解させる。プレートの動きによる大地の変動を平易に扱う。その際、世界の大山脈の形成など典型的な事例を取り上げ、それに関連して、褶曲や断層、不整合にも触れる。プレートの移動の原因については深入りしない。

地学I

「地球の内部構造と構成物質」：地球表層の形成と活動を中心に平易に扱う。プレートの概念も扱い、マントル内部の運動にも簡単に触れる。構成物質については、岩石を中心に扱い、鉱物については主要なものにとどめる。

「火山と地震」：地震及び火山活動をプレートの運動と関連させて扱うこと。地球内部のエネルギー源については深入りしない。

地学 II

・プレートの動きと地殻の変化

「プレートの動き」：海洋プレートの生成・移動・消滅を中心に扱う。

「大地形の形成」：プレート境界の種類と大地形の関係、大陸地殻の成長を中心に扱う。

・日本列島の変遷

「島弧としての日本列島」：日本列島の地質構造や火山・地震に見られる特徴を、日本付近のプレート境界と関連させて扱う。その際、地殻熱流量にも触れる。

この様に、高等学校で教えられる地学では、プレートの概念、またその原動力としてのマントル内部の運動、更に、地震・火山活動とプレート運動との関連性が扱われる。また、地学では、プレートの動きや地殻の変化を観察・実験などを通して探究し、現在の地球の変動の様子、地球の進化や日本列島の変遷を理解させ、地球を動的に捉えられる様方向付けをすること、特に、日本付近のプレート境界と関連させて扱うこと（現高等学校学習指導要領）が求められている。

また、特に地学 II ではプレートテクトニクスが内容の根底にあり、全指導課程を通じてプレートの動きや地殻の変化を観察、実験などを通して探究し、現在の地球の変動の様子、地球の進化や日本列島の変遷を理解させ、地球を動的にとらえることができるようにすることが求められている。すなわち、固体地球の現象をプレートテクトニクスによって統一的に説明する様な内容・体系となっている。

プレートの概念の確立は取りも直さず現代地球科学の歴史そのものである。大陸の海岸線の類似から着想された仮説が海洋観測によって得られた様々な証拠に基づいて次第に認知され、また観測精度の向上によって体系立った理論となっていったものである。プレート運動の原動力とされるマントル対流についても、最近の全地球地震波トモグラフィーとそれに基づく数値シミュレーションなどによってほぼ確からしいと認知されるに至っている。しかしながら、これら「証拠」とされる海洋プレート上の大洋中央海嶺・海溝・ホットスポットなどの特徴的な地形、海洋プレート上に現れる地磁気正負異常による地球磁場反転史などは、あく

までも過去のプレート運動史を示す間接的な証拠に留まるものである。現在のプレート運動とされている動きは、これら過去のプレート運動史をもとに推定・外挿されたものに過ぎない。日本列島などで起こっている地震・火山現象の原動力となる現在の地球表面のダイナミックな動きの具体的なイメージを掴み、これら諸現象の理解を深めるためには、現在の地球表面の運動を直接観測し、その観測データに基づいて地殻変動やプレート運動の絶対量を推論する方法を学ぶ必要がある。このための手法として、GPS（汎地球測位システム）VLBI（超長基線干渉測位法）音響干渉測位法による海底基線長観測などの研究が進められているが、中でもGPSは今や最も簡便にプレート運動を知ることの出来るシステムとして広く普及し、世界中で同一基準・同一精度により継続観測が展開されている。

本稿では、GPSによるプレート運動の直接観測を高校地学での学習内容として採用することを提案する。

3. GPS（汎地球測位システム）

GPSは、高度約20000kmの軌道の上に配備された複数の人工衛星及びその追跡・制御のための地上局ネットワークから成る電波航法システムである。1973年に米国防総省によって開発が開始され、1993年12月に正式に運用開始となり、地球上のどの地点でも天候や時間帯に関係なく、位置・速度・時間についての正確な情報が提供されるに至った。衛星配置のイメージを図1に、GPSの諸元を表1に、それぞれ示す。

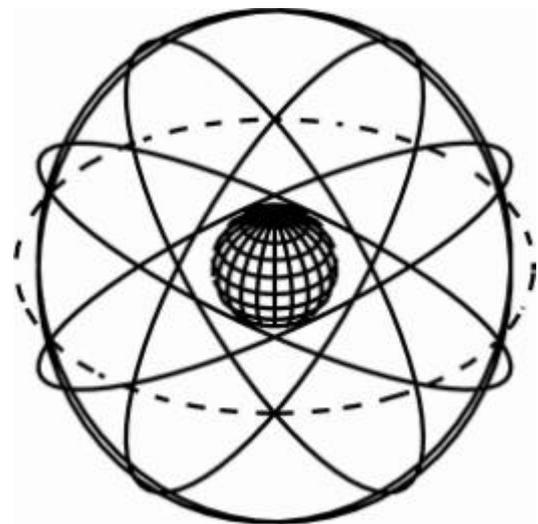


図1：GPS衛星軌道のイメージ図（M. Rothacher, 1999, つくばGPS国際シンポジウム初心者向講義資料より）。

衛星個数	4~6個×6軌道面 28衛星稼動中 (2004年3月10日現在)
衛星設計寿命	7.5年
軌道半径	26,561km
周回周期	12恒星時間(約11時間58分)
軌道傾斜角	55度
送信電力	L1: C/Aコード: 約26W P(Y)コード: 約13W L2: P(Y)コード: 約4W
搬送波周波数	L1: 1,575.42MHz (10.23MHz×154) L2: 1,227.6MHz (10.23MHz×120)
測距信号	C/Aコード: L1波で送信, 民生用に開放 P(Y)コード: L1, L2で送信, 軍用
地上受信精度 (仰角5度以上)	L1: C/Aコード: > -160 dBW P(Y)コード: > -163 dBW L2: P(Y)コード: > -166 dBW
単独測位精度	C/Aコード: 約100m (SA時) 約10m (SA解除後) P(Y)コード: <1m

表1: GPSの諸元(電子通信学会WWWをもとに一部内容更新)。

軌道傾斜角55°の6軌道を60°ずつの間隔で配置し、各軌道上に4~6個の衛星を配備している。これら衛星から発せられる電波を受信して衛星からの距離(実際には電波到達時間に光速を乗じて得られる擬似距離)を求め、更に衛星電波に含まれる位置情報・軌道情報をもとに、地球上での位置(緯度・経度・高度)を求めるシステムである。衛星は時刻制御のため、1ナノ秒(10⁻⁹秒)の精度の原子時計(セシウム・ルビジウムなどの標準周波数発信装置)を搭載しているが、それに比べて受信機の時計は精度が悪いので、通常は4衛星以上からの電波を受信し、それによって3次元位置及び時計のずれを求める。2004年3月現在、28衛星が稼動中であり、これにより、常時6~10衛星を同時に捉えることが出来る。地球重力ポテンシャルの影響により、各衛星の詳細な軌道要素は時々刻々変化するが、それについては、米コロラドスプリングスにある制御基地とその他世界中に4箇所ある追跡基地(ハワイ・アセンション・ディエゴガルシア・クエゼリン)で常時衛星を追跡し、その結果を解析して各衛星の軌道を再決定し、衛星電波の内容のうちのalmanac,

ephemerisの部分を更新している。これらはGPS衛星電波を通じて受信機に入力されるため、「放送暦」と呼ばれているが、あくまでも予測値である。航海用としてはこれで充分であるが、精密測位のためには実際の衛星暦による再計算が必要であり、そのためにはGPS衛星の追跡によって正確な衛星暦を後日決定し、これを用いなければならない。その衛星暦の再決定のサービスを行っているのが米航空宇宙局(NASA)の下部組織であるInternational GPS Service(IGS)であり、全世界の365箇所の衛星追跡センター(2004年3月現在)での測定結果をもとに、「精密暦」を公開している。

元来は航海用・航空機用測位のために開発されたシステムであるが、現在はカーナビゲーション装置、GPS付携帯電話などを通して、一般にも普及しつつある。また、高精度の原子時計を搭載していることから、受信信号を精密な時計として使用することも出来る(例えば移動観測用地震計の時刻合わせなど)。

GPSが現代地球科学に果たした役割は大きい。単独測位であっても、旧来の電波航法装置と比較すれば格段の測位精度の向上を果たしており、ほぼ時期を同じくしたマルチナロービーム音響測深機の普及と相俟って、信頼性の高い精密海底地形図の作成が可能となり、海洋底地球科学は革命的な進展を果たした。海洋プレート生成域に当たる大洋中央海嶺の拡大軸が数十km~100km程度のセグメント構造をなし、セグメント間の断層も、トランスフォーム断層のみならずnon-transform discontinuity(NTD)などの形態も見られること、或いは、大陸・島弧の周辺に発達する凹地の中には円形の急斜面に縁取られ、大規模な海底地這りの痕跡を示すものがあることなどの重要な成果が次々と出されている。また、潜水調査船の活躍によって、海底熱水活動や光合成によらない特異な生態系を構成する「化学合成生物群集」などが発見され、またこれらの地点の長期モニタリングなども行われているが、これらについても、潜航調査中の基準となるべき母船の位置が不確かでは到底達成し得ないことであり、数十m以内の精度で(当時)測位可能なGPSの普及に負うところが大きい。

この様な用途の他、衛星からの搬送波の位相差を複数地点で観測することにより、これら地点間の基線長がcmオーダーの精度で測定可能であることが、運用開始当時より注目されていた。本邦では1990年頃より、東京大学地震研究所や建設省(現国土交通省)国土地理院など

が中心となって、簡便且つ精密な地殻変動観測への応用に関する研究が併せて進められていた。

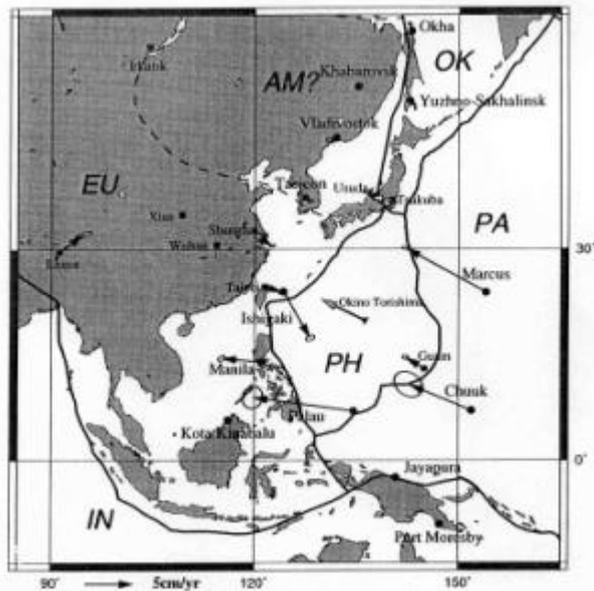


図 2 : GPS 大学連合による西太平洋 GPS 連続観測網(WING)による 1995 年 7 月から 1996 年 10 月に掛けての観測結果(小竹・加藤・中尾・他, 1998 による)。ユーラシアプレートに対する相対変位とその 95% 信頼区間で示される。

東京大学地震研究所は「GPS 大学連合」を組織し、地球物理分野の教育・研究を行う全国大学の協力を得て、日本国内の地殻変動観測キャンペーンや国際共同研究などによる西太平洋 GPS 連続観測(WING)、伊豆半島稠密観測などを展開した。図 2 はそのうちの WING の一環として 1994 ~ 1995 年の間実施された環フィリピン海観測により求められた各測点の変位ベクトル(ユーラシアプレートを基準とする)である。

一方、国土地理院は国土測量業務のための測器の性能評価と測定データの品質向上、各種測量の基準点の管理、広域地殻変動モニタリングの目的で GPS による基線長観測を行って来た。

併せて、日本国内の GPS 関連の研究者の横断的な情報交換の場でもある「GPS-JAPAN」グループも発足し、或いは、日本測地学会講演会での地殻変動セッションで GPS 関連の発表が徐々に増加し始めたのもこの頃である。測器メーカーの方もそれに合せて性能向上と機器のダウンサイジング、データ取得ソフト・処理ソフトの改良を重ねた結果、今や陸上での測量(公共測量・一般測量)や建設現場でも GPS が活用されるに至っている。

4 . 国土地理院による全国電子基準点

国土交通省国土地理院は、日本全国に約 25km 間隔で「電子基準点」を設置しており、その点数は現在 1000 点を越えている(図 3)。これら観測データは国土地理院本院に集積され、直ちに解析が行われて、各基準点間の基線長変動、相対的な変位が求められる。また、各基準点間の基線長変化グラフ、過去 1 年間の変動のベクトル図などの形でこれら観測データが可視化されている。また、地震などのイベントがあった直後には震源付近の観測点のデータを示し、併せて地震に伴う地殻変動量の評価結果を求めている。これら生データ及び解析結果はインターネットを通じて公開されている。この様に、世界にも類を見ない密な測量の結果、東北日本のプレート収斂域に面した三陸地方での歪、沖縄トラフの拡大、フィリピン海プレート・ユーラシアプレート間相対運動などが明瞭に示されている。

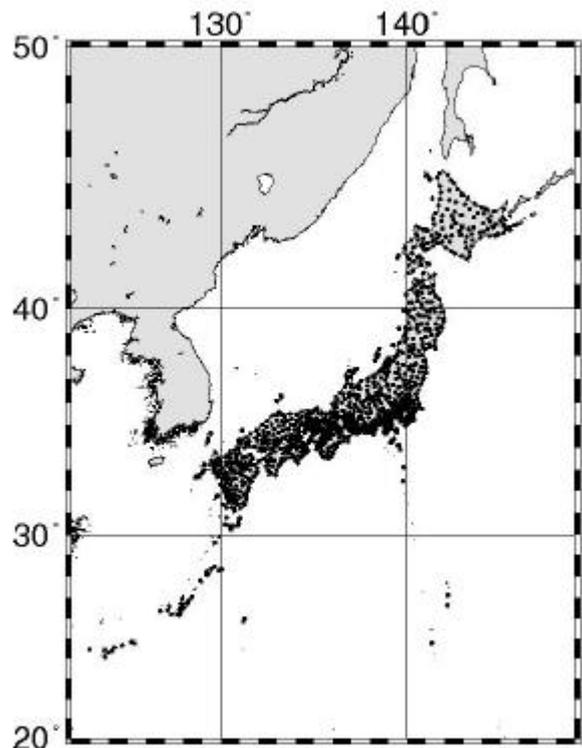


図 3 : 国土地理院による全国電子基準点の分布。

5 . 高等学校地学のための教材の提案

上記電子基準点データは、現在のプレートのダイナミックな運動、及びその地震・火山・地殻変動などとの関連性を学ぶ高校地学の教材として相応しい内容である。電子基準点の実データを用いて、データ取得からモデル形成に

至る道筋を示すカリキュラム「GPS で見る地殻変動とプレートの動き」を以下に提案する。記載方法は、学習指導要領に倣った文体となっている。

「GPS で見る地殻変動とプレートの動き」

(1) GPS の原理

GPS の基本原理、最低 4 衛星からの受信電波により、世界中至る処で同じ条件で位置が求められること、カーナビゲーション装置や携帯電話などに応用され、既に広く一般社会に普及していることを学ぶ。

(2) GPS による地殻変動観測

近接した複数の観測点で同じ GPS 衛星からの電波を同時に受信することによって、より精密な測位を行うことができること、また、GPS 衛星からの信号の搬送波の位相差を測定することによって、地点間の基線長が高精度に求められること、またこれを長期間観測することによって、基線長の時間変動を求めることができ、これがとりも直さず地殻変動の直接測定であることを学ぶ。

(3) GPS 観測による基線長変動

特定の地域に於いて、その中に含まれる代表的な複数の基準点間に於いて、(2) の原理によって観測された過去 1 年間の基線長変動のグラフを例として提示し、変動値を読み取る。それらのデータをもとに、基準点間の基線長変動値を把握し、その地域差、周辺海域の特徴的な地形との位置関係などを考察する。併せて、これら基線長変動に基づき、各地点の過去 1 年間の位置変化が求められることを理解する。

(4) 地殻変動・プレート運動による位置変化

地殻変動・プレート運動により、陸地が絶えず変形を受けており、その結果、地球上における各地点の位置を表す緯度・経度も変化していることを理解する。また、このことが複数の基線長解析によって得られることを理解するとともに、代表的な複数の基準点について、基線長解析処理後変換された各地点の位置変化データを示し、その大きさを把握する。

(5) 現在の地殻変動とプレート運動

(4) で示された位置変化データをもとに、ベクトル図(特定の地点を基準として他地点がどの方向にどれだけの速さで運動しているか)を描かせ、変動の特徴を読み取らせる。またそ

の結果を考察し、海溝・トラフなど周辺海域の特徴的な地形との位置関係、深発地震分布との関係などの考察を行う。

6 . 教材例

以下、本節は、高等学校地学で扱われる副教材を意図した体裁とする。

* * * *

「GPS で見る地殻変動とプレートの動き」

(1) GPS の原理

GPS は、高度約 20,000km を飛行する人工衛星からの電波を受信することによって精密な位置を求めるための航法システムである。人工衛星の位置はあらかじめ予報されているので、受信機は人工衛星から受信点までの距離(正確には電波到達時間に光速度を乗じて得られる擬似距離)を計算し、それをもとにして受信点の位置が求められる。位置には、緯度・経度・高度の 3 要素が含まれるが、受信機の時計は人工衛星に搭載された時計ほどには正確ではないので、受信機の時計の進み遅れも未知数と扱い、計 4 個の未知数を求めなければならない。このため、位置の計算には 4 個以上の衛星からの電波を同時に受信することになる。航海用や航空機用としてだけでなく、陸上を含めて世界中至る処で同じ条件で位置が求められることから、カーナビゲーション装置や携帯電話などに応用され、現在では広く一般社会に普及している。

(2) GPS による地殻変動観測

衛星から地上に到達する電波は、電離層や大気の影響を受ける。しかし、近接した複数の地点で、同じ GPS 衛星からの電波を同時に受信すれば、衛星或いは大気の状態による共通の誤差要因を除去することができ、より精密な測位を行うことができる。また、GPS 衛星からの信号の搬送波を複数地点で受信し、その位相差、すなわち、1 波長のうちのどの部分を受信したかを各地点で測定することによって、地点間の直距離(基線長)を精度良く求められることができる。またこれを長期間観測することによって、基線長の時間変動を求めることができ、地殻変動を直接に、しかも簡便な方法で測定することができる。

(3) GPS 観測による基線長変動

国土交通省国土地理院は、日本全国に約 25km 間隔で「電子基準点」を設置しており、その点数は現在 1000 点を越えている。ここでは、常時 GPS 連続観測が行われている。

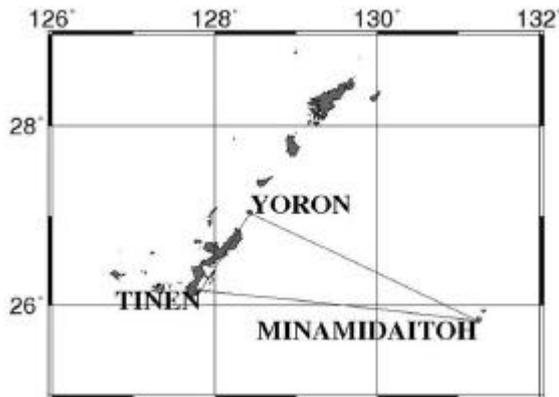


図 : GPS 観測の行われている 3 基準点 (与論=YORON, 知念=TINEN, 南大東=MINAMIDAITOH) の位置関係。

そのうち、図 に示す、与論(YORON)・知念(TINEN)・南大東(MINAMIDAITOH)の 3 基準点について、そのうちの 2 地点ずつを選んで、1 年間の基線長の変動を測定した結果を図 ~ に示す。図 は 2003 年 2 月から 2004 年 2 月までの間に南西諸島の南大東・与論間で観測された基線長変動をプロットしたものである。また、図 は、同時期に、同じく南西諸島の知念(沖縄島南部)・与論間で観測された基線長変動をプロットしたものである。また、図 は、同時期に、知念・南大東間で観測された基線長変動をプロットしたものである。これらのグラフから、それぞれの 2 基準点ずつの 1 年間の平均的な基線長の変動値 (1 年当りの伸縮の長さ) を読取ってみよう。

これらの図より、南大東・与論間は過去 1 年間に約 8.5cm 短くなっていることが読み取れる。また、知念・南大東間についても 1 年間に約 7.6cm 短くなっている。これに対して、知念・与論間の過去 1 年間の距離変化は約 0.2cm であり、前の 2 例に比べて極端に小さい。

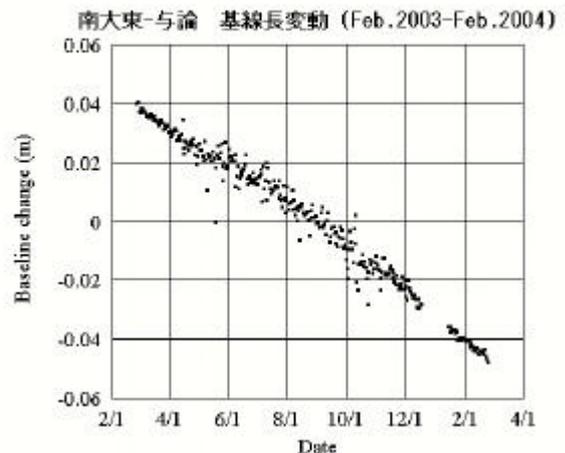


図 : 2003 年 2 月から 2004 年 2 月にかけての南大東 ~ 与論基準点間の基線長変動 (国土地理院による)。

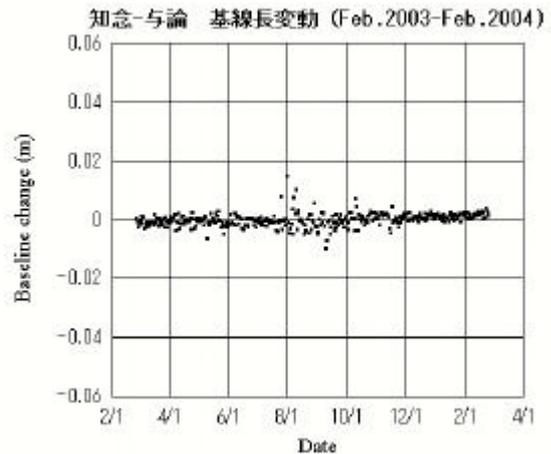


図 : 2003 年 2 月から 2004 年 2 月にかけての知念 ~ 与論基準点間の基線長変動 (国土地理院による)。

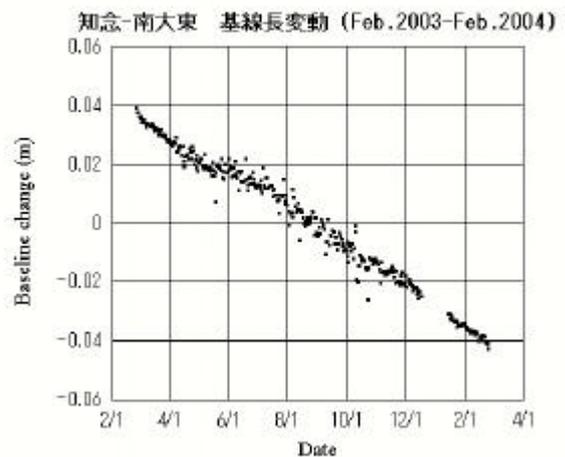


図 : 2003 年 2 月から 2004 年 2 月にかけての知念 ~ 南大東基準点間の基線長変動 (国土地理院による)。

与論・知念は同じ琉球島弧に属しており、このデータは島弧内の隣同士の島との間の相対運動が僅少であることを示している。変形がゼロでないことは、局所的な地殻変動があることによるとも見られなくはないが、測定精度やデータのばらつきを考慮すると、この様に結論付けるためには更に長期間の観測が必要であろう。

これに対して、与論・知念の属する琉球島弧と南大東島との間には、明らかな相対運動があり、しかもその運動が定常的であることが、このデータから示される。琉球島弧と南大東島との間には、南西諸島海溝があり、この海溝を挟んで両側は異なった動きをしていることが推論される。これまでの地球科学の知識では、南西諸島海溝の西側に当る琉球島弧の下で活発な地震活動が起こっていることや、琉球島弧の西側で火山・熱水活動が起こっていることなどは、琉球列島の属するユーラシアプレートの下に、南大東島の属するフィリピン海プレートが沈み込んでいることに端を発する現象であるとされているが、GPSの観測結果はまさに両プレート間の収束が現在も尚起こっていることを示していることになる。南大東・琉球列島間

の観測データは、日本周辺では数少ないプレート収束境界の直接観測の可能な基線である。

(4) 地殻変動・プレート運動による位置変化
(3) で示されたように、大地は地殻変動・プレート運動により、絶えず変形を受けており、その結果、地球上の座標に当る各地点の緯度・経度も絶えず変化していることになる。しかしその変化は極めて小さい。10cmの南北方向の変化は緯度の0.003秒となるため、通常は各地点の緯度・経度の値そのものを年々書き換えることはない。しかし、各地点の緯度・経度方向の変化量は、(3) で示されたような複数の基線長解析の積み重ねによって求めることができる。国土地理院では、このような全電子基準点の過去1年間の緯度・経度方向の変位を計算し、公開している。表 には、同じく南西諸島域の複数の基準点について、GPS基線長観測から求められた位置変化を示す。各地点とも、年間数cmの水平変位が観測されている。同時に、鉛直変位も求めることができるが、年間変位は1cm以下のところがほとんどである。

基準点番号	基準点名	緯度 (°)	経度 (°)	東西変位 (m)	南北変位 (m)	鉛直変位 (m)
950494	NAZE	28.3991	129.4890	0.0266	-0.0335	-0.0007
950495	YORON	27.0322	128.4323	0.0334	-0.0362	-0.0082
950497	MINAMIDAITOH	25.8312	131.2278	-0.0350	0.0189	-0.0107
960737	KUNIGAMI	26.8593	128.2484	0.0362	-0.0373	-0.0108
950499	YONAGUNI	24.4542	122.9428	0.0396	-0.0835	0.0043
960745	TINEN	26.1686	127.8262	0.0364	-0.0407	-0.0074
960747	IRABU	24.8280	125.1710	0.0364	-0.0437	-0.0073
960751	HATERUMAJIMA	24.0615	123.7958	0.0461	-0.0601	-0.0041

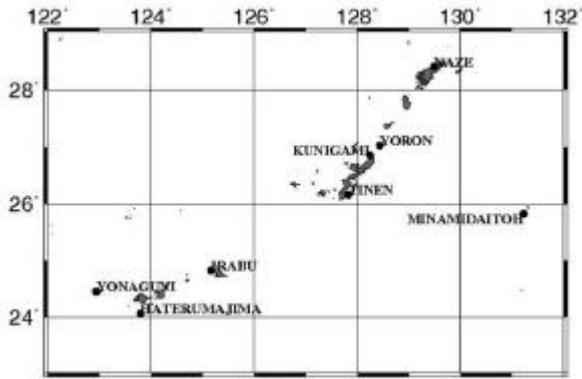
表 : 2003年2月15日~2003年2月24日、及び、2004年2月13日~2004年2月22日の電子基準点観測をもとにした各基準点の年間変動量(国土地理院による)。東向・北向・上向をそれぞれ正とする。

(5) 現在の地殻変動とプレート運動

今度は表 のデータをもとにして、各基準点が1年間にそれぞれどれ程変位したかを理解するために、ベクトル図を描いてみることにしよう。ベクトル図は通常は、域内の基準点の中から1点を選び、これを不動と仮定して、各点のこの点に対する変位をベクトルすなわち大きさと方向を示す矢印で表現する。ここでは琉球島弧に属する与論基準点を不動点として、これに対する相対変位を求め、その結果を適当な長さを基準として(例えば、緯度1度に相当する

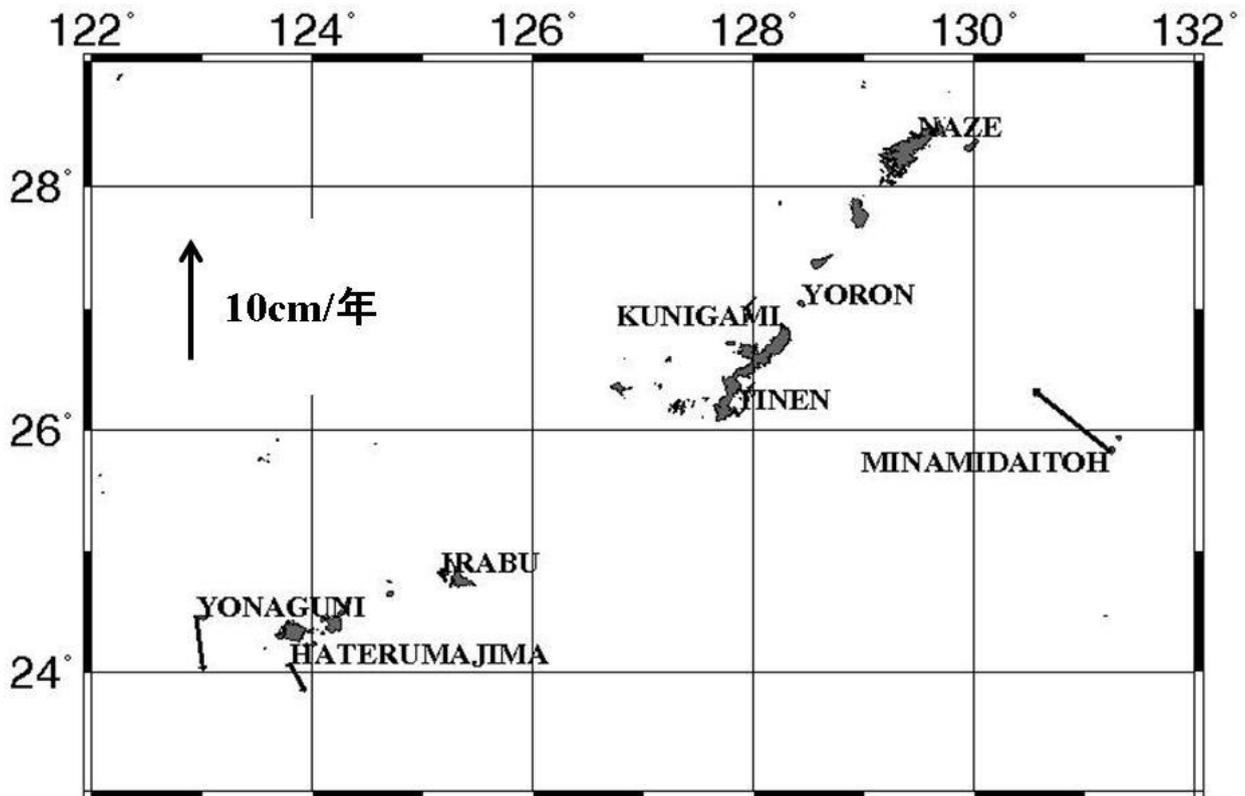
長さを10cm/年として)、図 の白地図に記入してみよう。

例えば、南大東については、東西方向の相対変位は、 $-0.0350 - 0.0334 = -0.0684$ (m)、南北方向の相対変位は、 $0.0189 - (-0.0362) = 0.0551$ (m)であるから、変位ベクトルは大きさ8.78cm、方位 141° (東を0度とし、反時計回りに計測)となる。この様にして、表 に挙げた基準点の全てについて、与論基準点を不動点と仮定した変位ベクトルを示したものが、図 である。琉球列島上の名瀬・知念についても、



与論に対する相対変位はあるが、その量は年間1cmに満たない。宮古列島の伊良部についても同様、相対変位は年間1cm以下である。一方、八重山諸島の与那国、波照間については、南向きの相対変位が卓越し、与那国については年間4.8cm、波照間にも年間2.7cmの相対変位が見られる。

図：表1に対応した基準点を示した白地図。



図：各電子基準点の年間水平変位量を表わすベクトル図。

このベクトル図の描画結果を考察するため、周辺の海底地形を図中に重ねてみることにする(図)。南大東島と与論島との間には南西諸島海溝があり、南大東島の属するフィリピン海プレートはここで与論島の属するユーラシアプレートの下に沈みこんでいる。南大東基準点での変位ベクトルは、この様な、フィリピン海プレートとユーラシアプレートとの相対運動を表わしている。

これに対して、与那国・波照間両基準点については、これらの点の北側に位置する沖縄トラフとの関係を考える必要がある。沖縄トラフは琉球列島に沿って台湾島東方より九州西方まで分布している舟状海盆であり、その凹地内の微地形を見ると、東西方向の地溝(グラーベン)が雁行配列している。これは、この地域でフィリピン海プレートとユーラシアプレートとの相対運動を補償する様な中国大陸縁辺が分裂

を起こす運動が生じたことに伴い発達した地形である。中でも、八重山列島の北側でトラフの凹地の幅が最大となっており、水深もトラフの中ではこのあたりで最も深く、約 2200m である。このことから、現在もこのような中国大陸縁辺の分裂・拡大が続いているものと考えることができる。隣の宮古列島に属する伊良部基

準点ではこれほどの大きさの変動は見られないことから、伊良部から名瀬までの間は、局所的な変動はあるものの、現在のところは大きい断層運動などは起こっていないことになる。

* * * *

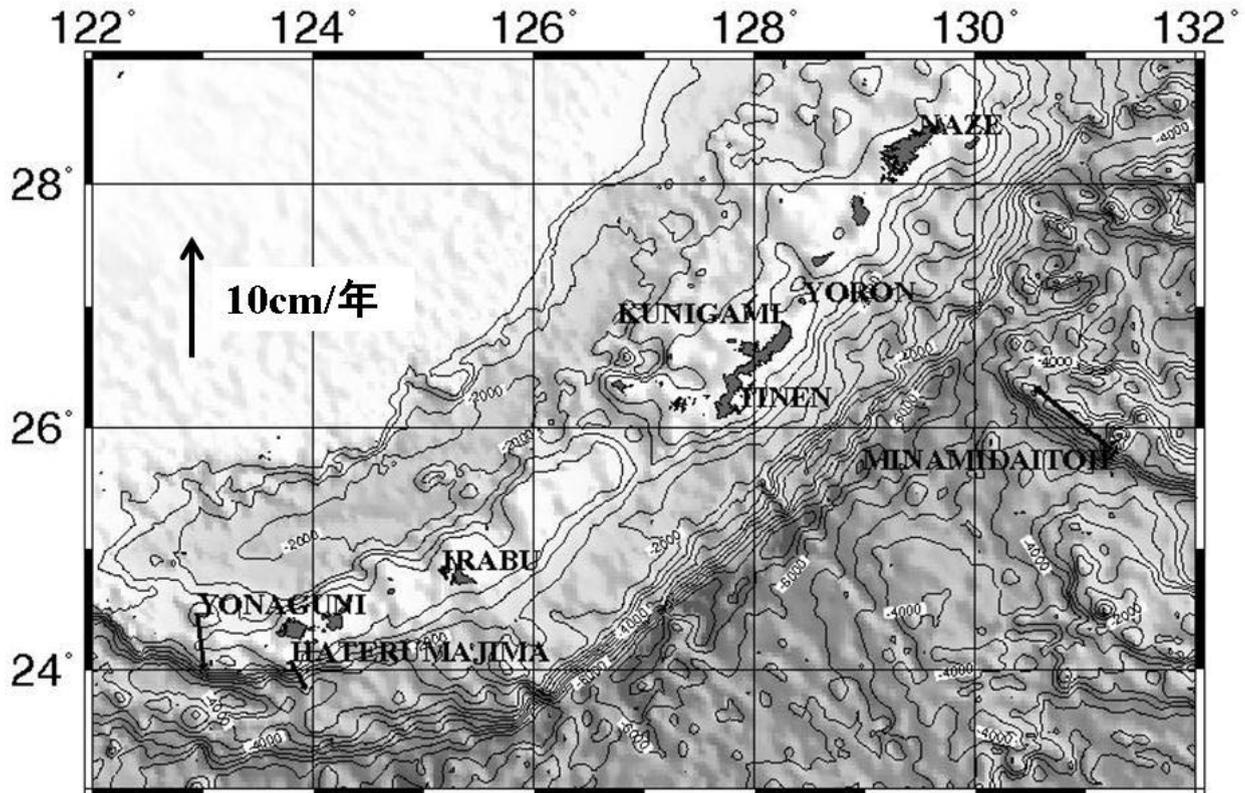


図 : 各電子基準点の年間水平変位量を表すベクトル図に海底地形図を重ねたもの。

7. 課題研究への展開

GPS 観測データに基づくプレート運動・地殻変動の理解については、本稿で副教材として提示されたものの他、国土地理院のホームページ上で公開されているデータのうち、学校周辺の基準点のデータを取得し、これを用いて変位ベクトルを求めて付近のプレート境界、活断層との因果関係を考察することも有効である。この実習を通して、海底の拡大、プレートの沈み込みなどのダイナミックな運動が遠方で起こっている現象ではなく、それがもとで各自の住む大地が緩やかではあるが確実に移動していることを実感出来ると言う効果が期待される。

また、地学 II では「課題研究」が必修と定められており、「地学についての発展的、継続的な課題を設定し、観察、実験などを通して研究を行い、地学的に探究する方法や問題解決の能力を身に付けさせる」ため、地学 I・II で扱われた内容から特定の地学的事象を選び、これに関する研究、また、自然環境に関する地学的調査を指導することとなっている。ここでは、適当な課題を設けて、適切な時期に研究を行うこととし、創意ある研究報告書の作成や研究発表を行わせること、研究を行うに当たっては、課題や仮説の設定、実験の計画、情報の収集、野外観察、調査、数的処理（統計処理・定量的な扱い）、分類、データの解釈、推論など探究の方法を習得させること、その際、

解決すべき課題についての情報の収集・検索、結果の集計・処理などに、適宜コンピュータなどを活用させることなど、地学研究の手法に関するトレーニングも兼ねた内容となっている（高等学校学習指導要領より）。

このような「課題研究」として、GPS 観測データをもとに、更に進んだ学習を行うことも、プレート運動・地殻変動に関する理解を深めるために重要である。この場合は、例えば過去1年以内に大規模な地震の発生した地域を選び、その周辺の基準点でのGPS 観測データを取得し、地震前後でどのような基線長変動が起こったかなどを求め、変動過程を考察すると云ったことも、課題として加えると、より効果的である。

謝辞：

本稿をまとめるに当たっては、国土交通省国土地理院による電子基準点観測データを使用させて頂いた。また、日本測地学会評議会、特に、国土地理院に所属する評議員からは、貴重な意見や助言を頂いた。地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会特別公開セッション「新しい地学教育の試み-地球惑星科学から「高校地学」へ-」の世話人の方々には、本件発表の機会を提供して頂いた。これら関係各位に謝意を表す次第である。

参照資料：

<http://gps.faa.gov/>
<http://www.gsi.go.jp/CRUST/>
<http://www.eprc.eri.u-tokyo.ac.jp/GPS/>
<http://www.ieice.or.jp/jpn/books/kaishikiji/199912/19991201.html>
<http://bg66.soc.i.kyoto-u.ac.jp/forestgps/>
<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/gpstut99.ps>
小竹美子・加藤照之・中尾 茂・他，西太平洋 GPS 連続観測網データの解析について（その1），測地学会誌，44，1-19，1998.
小竹美子，GPSデータ解析に基づく西太平洋のテクトニクスの研究，東京大学地震研究所彙報，75，229-334，2000.

尚、本稿で使用した図の一部は、GMT (Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1991, Free Software helps Map and Display Data, EOS Trans. AGU, 72, 441, 445-446, 1991)によって描画された。海底地形データは Sandwell らによる水深値(人工衛星アルティメトリと観測船による測深とに基づく，Sandwell, D. T., and W. H. F. Smith, Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, J. Geophys. Res., 102, 10039-10054, 1997)を使用した。GMT は

http://gmt.soest.hawaii.edu/gmt_mirrors.html

より、また Smith らの海底地形データは

http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html

より、それぞれ入手可能であるが、これらを利用して得られた成果物には上記文献を引用することが求められている。詳細は上記サイトを参照のこと。

松本 剛：tak@sci.u-ryukyu.ac.jp

中尾 茂：nakao@eri.u-tokyo.ac.jp