

固体地球物理学分野の現状と将来

福田洋一

(京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻固体地球物理学講座)

1. はじめに

国際高等研究所フェロー研究会として開催されてきた「京大地球物理学研究の百年」(その1)、(その2)では、志田順先生以来の京都での地球物理学研究の歴史、発展について諸先輩のお話を伺ってきた。これを受け、(その3)では現状から将来の展望をテーマに、固体地球物理学分野についての話をするようにということが、竹本先生からいただいた宿題であった。お引き受けはしたものの、しかしこれは、そう容易いことではないことにすぐに気付いた。その一つの理由は、現在では「固体地球物理学分野」に分類される研究分野は広範な分野に及んでおり、しかもそれぞれが高度に専門化していることである。京大地物に関連したものだけでも、その現状を学問的にレビューし将来展望を行うことは、とても私自身の力量の及ぶところではなく、最初から諦めざるを得なかった。一方、京大地物の教育・研究組織としては、現に大講座としての「固体地球物理学講座」があり、大学院の地球惑星科学専攻には、「固体地球物理学関係の分科」が存在している。少なくともこれら「固体地球物理学」を冠した組織の現状を説明しておく必要はあろう。また、今の学部・大学院教育がどのような構成、カリキュラムでなされているかを紹介することは、それほど無駄でもないように思われた。そこで、まず現状の教育システム・カリキュラムの概要を説明し、その内容を示すことで固体地球物理学のどのような分野をカバーしているかについても触れることにした。その後、学問的な意味での現状としては、私自身が関連している衛星重力に関する研究を紹介し、それを一つの例として、現在の地球物理学研究の面白さや特殊性、また内在する問題やそれへの関わりについて考えたい。

2. 地球物理学教室と学部カリキュラム

少し硬い話から始めると、現在、京都大学理学部は理学科1学科制であり、その中に数理学系、物理科学系、地球惑星科学系、化学系、生物科学系の5つの系があり、さらに、地球惑星科学系の中に地球物理学と地質学鉱物学の2つの(専門)分野があると、学生にとっては科目履修の際のバイブルである「教科の手引き」に記載されている。地球物理学教室と呼んでいるのは、この地球物理学分野のことであり、その中には、太陽惑星系電磁気学、大気圏物理学、水圏地球物理学および固体地球物理学の4つの(大)講座がある。従来の1~7講座(今でもその呼び名を使っているが)は、教室のホームページ(http://www.kugi.kyoto-u.ac.jp/lab_staff.html#lab)では、「研究室」という呼び方をしており、固体地球物理学講座には測地学、地震学、活構造学の3つの研究室がある。ちなみに、現在、固体地球物理学講座の教員は、教授3、准教授3の6名である。このほかに、附属の地球熱学研究施設(教員9名)および地磁気世界資料解析センター(教員4名)があり、特に地球熱学研究施設は、固体地球物理学関係の教育研究に大きく関わっている。

次に、学生が地球物理学を履修する際の流れをみると、2回生から3回生に進級するときに、まず地球惑星科学系地球物理学分野に系登録をする必要がある。現在、理学部の卒業要件の一つとして「系登録後2年以上在学すること」と明記されており、これは、もし3回生進級時に系登録ができなければ、自動的に卒業が遅れることを意味している。地球物理学分野の系登録定員は厳格に29名で、系登録をするためにはそれまでの単位履修に関して一定の条件があるため、系登録は学生にとって大変重要な関門である。なお、系登録をすることによる履修上の恩恵は、課題演習(3回生

向け)、課題研究(所謂卒業研究、4 回生向け)を履修できるようになることである。もちろん、1~2 回生向けにも地球物理学関連の講義や演習は行われているし、また、3 回生以降も、通常の講義や実習等については系登録に関係なく受講することができる。しかし、課題演習と課題研究は系登録が必須要件であり、学生にとって、地球物理を選択したことを一番実感できる瞬間かもしれない。

実際の課題演習、課題研究の内容、実施方法についても、最近、大きな変更を行った。以前は、課題演習は通年科目であり、實際上、各研究室が対応して実施していた。しかし現在は、半期ごとに前期はDA (固体系)、DB (流体系)、後期がDC (固体系)、DD (流体系) の4 つの演習科目として実施している。この内、前期のDA, DB は比較的基礎的な内容やさまざまな分野に共通する課題が選ばれ、後期のDC, DD では、教員が幾つかのテーマを提示し、学生は選択した一つのテーマについて半期間を通した演習を行うというスタイルがとられている。具体的に、固体関係のDA では、測地学、活構造学、地震学、地球熱学の4 つの課題について、学生が各分野の内容を概観できるように、各数回ずつ順番にすべてを履修させるようにしている。一方、後期のDC では、2009 年度の例として、「宇宙測地データに触れる」、「計算弾性力学」、「活断層と内陸直下型地震」、「地球の鼓動を探る」、「マグマから噴火まで」の5 つのテーマが提示されており、学生はこれらのうちの一つを選び半期をかけた実習を行っている。なお、ある課題に希望が集中するような場合には人数の調整を行っている。

次に課題研究(卒業研究)であるが、これも現在は、T1 (電磁気圏)、T2 (大気圏・水圏)、T3 (固体圏) の大括りのいずれかの課題を選択し、学生は担当教員の指導でテーマを選び、学習・研究を行うスタイルをとっている。T3 での具体的な研究テーマとして「教科の手引き」に例示されているものは、

マントルとコアの構造、地殻構造、地震波の数値計算と応用、マントル対流とプレート運動、岩石の破壊機構、高温・高圧下の物性、地震発生過程、応力場の形成と活構造、歴史地震、地震前兆現象の仕組み、地震観測法、超伝導重力計や絶対重力計を用いた地球潮汐・地球自由振動・重力時間変動の研究、GPS や SAR を用いた地殻変動の研究、衛星重力や衛星高度計など衛星データの応用研究、活構造と地形形成、地震の長期予測、海溝型巨大地震の発生履歴、地下構造探査の実験と理論、地震波動の特性と地震動災害、火山活動の解析、マグマと地球内部の物質循環

である。固体地球物理といっても卒業研究のテーマでさえこのように多様であり、さらに、これらはいくつまでも例であって、学生が必ずこれらのテーマを選ぶということでもない。実際、ここに挙げた以外のテーマが選ばれることも少なくない。教員の共通の希望としては、どこまで実践できているかどうかは別として、「テーマは学生自身が考え自分で決める」ということである。

なお、課題研究を大括りに分類したことで、T3 では、研究室の枠を越え、週1 回、関連の院生も含めすべての学生が参加するゼミを行っており、また、年度末には合同で研究成果の発表会を実施している。研究テーマが多様になる一方で、専門に閉じこもらないための方策の一つである。

3. 大学院での教育研究分野

以上は学部教育の話であるが、大学院では、防災研究所、生存圏研究所の教員にも、協力講座構成員として教育に参加していただいている。もちろん学部教育でも防災研や生存研の教員に協力していただいているが、学部の場合は、毎年、学内非常勤講師の委嘱手続きを経てのことであり、基本的には理学部教員(教室および附属施設)が責任を負っている。一方、大学院の教育では、協力講座構成員を含めた分科が実質的な責任を負うことになっている。固体地球物理学関係の分科としては、測地学及び地殻変動論、地震学及び地球内部物理学、火山物理学、地殻物理学及び活構造論、環境地圏科学、地球熱学の6 つがあり、関連教員の総数は約50 人ともなる。参考のため、2010 年1 月現在の固体関連分科の構成員リストを資料として添付する。なお、各構成員の専門分野等についての詳細は、<http://www.kugi.kyoto-u.ac.jp/deps/bunka/kousei.html> を参照していただきたい。

6つの分科に関連する固体地球物理学の一つの特徴として、2つ以上の分科に所属する教員が大勢居ることである。これはある意味では当然のことであり、各研究分野が専門化を進める一方で、学際的・境界領域の研究分野も増えてきている。また、多くの教員が、例えば測地学会と地震学会、火山学会と地震学会とによって複数の学会に所属し研究活動を行っていることも事実である。しかし、学生の側から見ると、このことは必ずしも都合の良いことばかりではない。現在、大学院修士課程の入学試験では、分科毎に合格者を決めているため、教員は複数の分科に属しているのに学生はどれか一つの分科を明示的に決める必要があり、やや矛盾を感じる。あるいは学生が必ずしも本人の研究テーマとしてもっとも適切な分科を選んでいないように思われるケースがあることも確かである。大学院修士課程の定員は、これまでの42名から33名に変わることになっており、今後、入試方法の改革とも関連して分科をどうするかといった問題も議論が進められるであろう。

4. 衛星重力研究

以上述べたように、京都大学の固体地球物理学分野に関わる教員は、教室でこそ6名であるが、熱学研究施設を加えると15名、さらに大学院の協力講座まで含めると約50名となり、関連する研究分野は（それでも固体地球物理学分野をすべてカバーするとは思えないが）大変広範な領域に及んでいる。これらすべてについてその学問的な現状や将来展望を述べることは不可能であるので、最近の一つの例として、衛星重力ミッション GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) に関連する研究を紹介したい。

GRACE は、2002年3月に米、独が共同で打上げに成功した低高度（約500km）の同一軌道上を約200kmの間隔で飛んでいる双子衛星である。GRACE では、この2つの衛星間の距離の変化をマイクロ波レーダーで正確に測定する Low Low Satellite to Satellite Tracking (L-L SST) と呼ばれる方式で、地球の重力異常だけでなく、その時間的変化の測定にも成功している。GRACE が測定する重力の時間的変化は、地球表面や内部での質量移動を伴うすべての現象に起因するものであり、グローバルな水循環、南極やグリーンランドの氷床融解、また、スマトラ地震に伴う重力変化なども観測されている。

GRACE によって初めて実現した衛星による重力変化の測定は、重力の応用研究の守備範囲を格段に広げた。例えば、GRACE を用いることにより、陸水の変動、特に、これまでは直接測定することのできなかった広域の地下水変動が実測できるようになった。これは、安定な水資源確保や管理に不可欠な情報である。また、地球温暖化の影響で極域氷の融解は大きな問題となっているが、GRACE を用いた研究で、グリーンランドの氷床融解が最近加速していることや、南極でも、大陸全体としてはわずかながら氷の量が減少しているらしいといった結果が得られている。南極での大陸氷床が増えるのか減るのかは難しい問題で、実は GRACE のデータだけではそれに明確に答えることはできない。GRACE は全ての質量変化の総和を測定しているが、南極では、氷床の変動と同時に、所謂 PGR: Post Glacial Rebound（最近はより広い概念として GIA: Glacial Isostatic Adjustment と呼ぶことが多い）、すなわち、過去の氷河期の氷床が融解したことによる固体地球の粘弾性的な応答に伴う質量変化も測定しているからである。南極では氷床変動と PGR による質量変化が同程度のオーダーであり、PGR の見積もりが現在の氷床変動の見積もりに大きな影響を与えている。その点を考慮した上で、南極大陸全体でわずかに氷が減っているというのが、現在のほぼ共通した見解である。氷床の消長を見積もるのにマンツルの粘性率が関連しているというのは、たいへん面白いところである。

これらの例のように GRACE は重力場の研究にブレークスルーをもたらしており、このことは、海外の学会での研究発表の件数にも如実に表われている。GRACE が打ち上げられたのは2002年であり、そのデータが一般に公開されるようになったのは2004年以降のことである。その後、2007年のペルージャでの IUGG/IAG の重力に関連するポスターセッションでは、タイトルの一部として「GRACE」を含むものは153件中19件、口頭発表では、61件中17件とさらに高比率であった。また、昨年（2009年）9月にアルゼンチンで開催された IAG 学術総会での重力場測定に関連のセッションでは、もはや衛星観測に関連する発表件数が地上観測を上回るまでになっている。

ところで、地球の重力場やその変動を測定する GRACE は、まさに測地学の研究対象そのものである。しかし、その実際の利用研究に目をやると、スマトラ地震は固体地球物理の範疇だが、水循環や地下水変動、氷床変動など、どこが固体地球物理ということになりそうなものばかりである。これは重力に限ったことではなく、GPS による水蒸気や電離層電子密度の研究、海面高度計による海流ダイナミクスの研究など、同様の例は幾らでもあるし、また、今後益々増えることであろう。衛星重力は、このような学際的な地球科学の面白さを象徴的に教えてくれている。

5. まとめにかえて

GRACE に関連した研究は、現在の地球科学研究における特質、あるいは考慮すべき問題点の幾つかを浮き彫りにしてくれている。以下、思い浮かぶキーワードを列举してみる。

「新しい手法・手段の出現とその変化の速さ」、「大型プロジェクト化」、「実用性の追及」

「学際性と専門性」、「衛星観測と地上観測」、「グローバルとローカル」

これらは、固体地球物理あるいは地球物理に限らず、現在の科学研究一般に通じるものかもしれない。また、それぞれの価値判断はともかく、今後の研究を進める上で注意を払うべきことであろう。

今回の研究会のテーマは「現状と将来の展望」ということであり、まとめとしては、GRACE に代表されるような現在の地球科学研究の特性も考え合わせ、何らかの「将来展望」をする必要があるのであるが、これは、正直なところ荷が重過ぎる。戦略として京大地球物理をどう発展させるかといった議論は当然必要だろうが、それこそ先輩諸賢の意見を拝聴したいところである。現役の教員として語る所は、現在から未来に向かい、後輩、学生に何かを伝えていくかということであろう。最初にやや詳しく現状の教育カリキュラムの説明をしたのも、その状況の一部を紹介したかったためでもある。しかし、具体的に何を伝えるのか。もし、京大地球物理に 100 年の時代を越えて伝えるべき伝統のようなものがあるとすると、そのような表面的な制度あるいは研究環境の変化に左右されるものであるはずがない。諸先輩から何を受け継ぎそれをどのように伝えていくのかは、これまでの自戒もこめて、考え続けて行くべき宿題とさせていただきたい。

資料：2010 年 1 月現在の固体地球物理関係分科の構成員

測地学及地殻変動論：

教室：福田洋一、宮崎真一

防災：橋本学、川崎一郎、大谷文夫、寺石眞弘、森井亙、徐培亮

地震学及地球内部物理学：

教室：中西一郎、平原和朗、久家慶子、宮崎真一 熱学：大倉敬宏

防災：飯尾能久、川崎一郎、西上欽也、橋本学、Mori, James J.、大見士朗、
片尾浩、澁谷拓郎、竹内文朗、柳谷俊、深畑幸俊、遠田晋次、加納靖之、福島洋

火山物理学：

熱学：鍵山恒臣、古川善紹、大倉敬宏、宇津木充

防災：石原和弘、井口正人、味喜大介、山本圭吾、為栗 健

地殻物理学及活構造論：

教室：堤 浩之 熱学：竹村恵二 防災：岩田知孝、松波孝治、関口春子、浅野公之

環境地圏科学：

防災：石原和弘、千木良雅弘、関口秀雄、釜井俊孝、末峯章、諏訪浩、井口正人、
福岡 浩、寺嶋智巳、山本圭吾、汪癸武、王功輝、味喜大介、為栗健

地球熱学：

熱学：竹村恵二、大沢信二、川本竜彦、山本順司、柴田知之、鍵山恒臣、
古川善紹、大倉敬宏、宇津木充 教室：福田洋一

(教室：地球物理学教室、 熱学：地球物理学研究施設、防災：防災研究所)

注：複数の分科に所属する教員はそれぞれの分科に重複して記載