

シンポジウム報告

「EARSeL 陸域雪氷リモートセンシングに関する 第5回ワークショップ、及びスイスとの 二国間セミナー参加報告」

気象研究所 青木輝夫

筑波大学 安仁屋政武

北海道大学・低温科学研究所 串田圭司

国立極地研究所・総合研究大学院大学 山内 恭

新潟大学 浮田甚朗

気象研究所 朽木勝幸

1. はじめに

青木輝夫（気象研究所）

独立行政法人日本学術振興会（JSPS）とスイス国立科学財団（SNSF）が共同で二国間交流事業「共同研究・セミナー」のための競争的資金を提供している。スイス連邦工科大学の大村纂教授と気象研究所の青木輝夫が、それぞれ両国の研究代表者になり、上記交流事業の資金を獲得し、2008年2月中旬にスイスで二国間セミナー（以下、「セミナー」と表記）を実施した。本セミナーはスイス側の要望で、European Association of Remote Sensing Laboratories（EARSeL）主催の「陸域雪氷リモートセンシングに関する第5回ワークショップ」（以下、「ワークショップ」と表記）との共同開催となった。日程はワークショップが2月11-13日、引き続きセミナーが2月14-15日で、共にベルン大学で実施された。

EARSeLとはヨーロッパを中心としたリモートセンシングに関係する研究所や研究室で組織された団体である。分野ごとに分かれた定期的なワークショップの開催や、web上に公開されるe-proceedingsの出版など、事実上学会と同等の活動を行っている。今回のワークショップは、EARSeLの中に組織された

Special Interest Group Land Ice and Snow（LIS-SIG）が開催し、座長はLIS-SIGの世話役を務めるベルン大学のDr. Stefan Wunderleである。余談であるが、なぜかこのグループでは海水が対象外になっている。本ワークショップは、衛星センサー技術やアルゴリズムの進歩に合わせて数年に1度開催され、今回で5回目を数える。今回は「陸域雪氷面のリモートセンシング：変化する気候—変化する雪氷圏」をサブタイトルとし、2件の招待講演を含む、43件の発表があった。



図1 ベルン大学のEARSeLワークショップ会場

一方、セミナーには日本側 7 名、スイス側 10 名が参加し、各自 30 分～1 時間の発表を行った。参加者は主に雪氷圏を対象としてフィールドワークやリモートセンシングを行っている研究者や解析・気候モデルの研究者である。タイトルには「変化しつつある雪氷圏はどのように地球温暖化に影響するか？」という名前が付けられた。このセミナーの目的は雪氷圏変動の実態把握と気候変動との関連についてそれぞれ専門の立場から講義を行い、共通の理解と今後の課題を提案するものである。その中で日本とスイスの連携を意識し、将来どのような共同研究が可能かという点についても検討した。

2. ワークショップ及びセミナー報告

安仁屋政武 (筑波大学)

例年 2 月の中旬は学年末で論文審査や会議が目白押しで 1 週間海外に出かけるのは不可能であったが、今年は奇跡的に空いており二つの会議に出席できた。ワークショップの参加者は 50 人程度で、私が思っていたより少なかった。4 年に 1 度の会合でヨーロッパと名が付きながら、参加者の国に偏りがあるのが気になった。特に雪氷研究が盛んなフランスからの発表が 1 つしかなかった。後で理由を聞いたら、「3 月にフランスで別の雪氷関係の会合があり、そちらの準備で忙しく来なかったのだろう」ということであった。また別の盛んな国 UK からウェールズから 1 人発表に來ただけであった。どこもかしこも最近では学会・会合が多すぎて、一つ一つの会議内容が薄くなっているのではないかと、という印象を持った。



図 2 セミナー参加者の様子

ワークショップの発表で一番印象深かったのは気象研究所の Teruo Aoki *et al.* の “Physically based snow albedo model and satellite retrieved snow parameters” であった。素人の私にもよくわかり、このような研究が気候モデルにとって非常に重要であることが理解できた。他にコロラド大学/National Snow and Ice Data Center (NSIDC) の Julianne Stroeve *et al.* による “Arctic Sea Ice in 2007: A Year to Remember” は、その内容はすでに報道されているが、第一人者による発表でそれなりに面白かった。Ph.D. を終えたばかり、あるいはまだ博士論文の発表が多く、若い力が後に続いているのを感じた。

セミナーでの著者の発表は “Some Problems in Automated Delineation of Glacier Margins using Remote Sensing Data - Some Examples from the Patagonia Icefield” というタイトルで、氷山を多量に生産する calving glacier の問題について話した。興味を引いた発表は私の分野に近い、チューリッヒ大学の Frank Paul による “The impact of climate change on the Cryosphere in the Alps” であった。改めてスイスの氷河研究の長い歴史を見せつけられ、それをベースにした先端に行く研究がうらやましくもあった。思わず私が続けているパタゴニアの氷河を対象とした研究がこのレベルに達するのはいつのことだろうか、と考えた。

青木輝夫 (気象研究所)

ワークショップで印象に残った発表は 2 件の招待講演である。1 件はハンブルグ大学の Hans Storch による発表で、気候研究のための衛星データ利用の可能性と限界について、気候モデルによる大気場の再現実験に衛星サウンディングデータを用いることにより示した。その中で、衛星データは非常に重要で、気候研究に必要不可欠な反面、一般に衛星センサーの寿命が気候研究の時間スケールに対して短いため、同一仕様のセンサーが連続して打ち上げられない場合に問題も大きいことを指摘した。2 件目は European Space Agency (ESA) の Mark Drinkwater で、彼は ESA の “Living Planet Programme” と名付け

られた地球観測衛星計画について紹介した。ESA は今後 10 年間に 15 の衛星 (2004 年から数えると 18 の衛星) を打ち上げる計画である。その中には雪氷観測用あるいは雪氷観測に利用可能な衛星として、重力場を測定する Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE; 2008 年打上げ予定)、1 号機の打上げを失敗したのち再挑戦となる CryoSat-2 (2009 年打上げ予定)、そして、将来ミッションとして、X 及び Ku バンドの合成開口レーダを搭載し、従来よりも雪氷表面の観測に適した COLD REGIONS Hydrology High-resolution Observatory (CoReH2O) など、ユニークなセンサーが含まれ、光学センサーや気象衛星を加えると、非常に充実した観測態勢となる。彼は今こそ雪氷圏を理解するのに最大のチャンスであるとしている。

著者はセミナーでは積雪の光学特性、積雪の汚れが気候に与える効果、積雪物理量の衛星リモートセンシングについて発表した。その中で強調した点は、大気中の吸収性エアロゾル (主に、黒色炭素とダスト) が雪氷面に沈着し、アルベドを低下させることにより温暖化を加速する効果を持っていることである。長期間の積雪面上放射収支と積雪断面観測、及び大気-積雪系の放射伝達モデルによって、積雪面の放射特性が積雪粒径と不純物濃度に大きく依存していることを示した。この結果を基に、積雪粒径と不純物濃度に依存して変化する積雪アルベド物理モデルを開発し、気候モデルに組み込んだ。その気候モデルによって、吸収性エアロゾルが積雪面の放射特性に与える影響を調べた結果、吸収性エアロゾルが積雪面アルベドの変化を通じて全球放射収支に与える放射効果は、黒色炭素とダストの相乗効果によって増幅され、黒色炭素単独の見積もりでは実態を過小評価している可能性があることを示した。また、地球上の積雪に不純物が全く含まれない仮想的な条件では、夏になってもシベリア北部、東部、カナダ北部で積雪が残るという結果が得られた。このことは夏期の季節積雪の分布に積雪不純物が重要な役割を持っていることを示している。さらに、衛星リモートセンシングによる積雪粒径と不純物濃度を抽出する技術を用いることにより、衛星データから気候モデルで計算した積雪物理量を全球で

検証できる可能性を示した。

セミナーで印象的だったのはスイス連邦雪・雪崩研究所の Martin Schneebeli による積雪の物理特性を測定する新技術についての発表である。それは μ CT スキャナーによって積雪の一部分の 3 次元構造を測定する技術である。これによりアルベドと関連の深い光学的有効粒径の客観測定が可能となる。ただし、最小の分解能が数十 μm であるため、新雪の場合には十分な精度が確保できない問題がある。彼らはまた波長 $0.8\mu\text{m}$ の近赤外光を利用したサーモグラフィを用いて、積雪断面の粒径を可視化する技術も提案している。この波長は我々が衛星リモートセンシングで利用している波長域と同じで、同様の原理を現場観測に用いている点がおもしろいと感じた。もう一つ印象的だった発表は、スイス連邦工科大学の Andreas Roesch による大気大循環モデル (GCM) で用いる積雪アルベドパラメタリゼーションの話である。彼は気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 4 次報告書 (IPCC, 2007) に提出された GCM で採用されている積雪及び海水アルベドパラメタリゼーションを比較し、それぞれの問題点を整理して示した。特に大きな問題の一つが、サブグリッドスケールにおける地形の効果である。大抵のモデルはグリッド中の積雪面積 (snow cover fraction) を積雪水量 (snow water equivalent) の関数として表している。単純な両者の関係式では地形の効果が反映されないため、山岳域では大きな誤差となる。Roesch らは両者の関係がサブグリッド中の標高分布の標準偏差の関数とすることにより、アルベドの再現性を向上させた。

上記研究者 2 名とは今後の情報交換と将来の連携を約束し、私にとっては大変実りあるセミナーであった。

串田圭司 (北海道大学)

著者はこれまで主として植生を対象にリモートセンシングを研究してきたので、ワークショップで積雪のリモートセンシングの最新の成果の発表を聞くことは新鮮であり、どの発表も印象深かった。特に、ハンブルグ大学の Hans Storch の気候に関するパラメータのリモートセンシングに関す

る考察は、積雪を扱ったものではないが、印象深かった。彼は波高という一つのパラメータを例として、どの程度の精度、頻度の衛星データが波高の予測に必要なかを、衛星データを使った数値実験で考察した。気候モデルと衛星データとの結合・統合、そのための衛星開発を考えると、重視すべき研究と思った。積雪の変動は、アルベドや地表面熱収支を通じて、気候と大いに関わってくるため、積雪のリモートセンシングは、気候モデルの研究とともに、今後より進展していく分野と思った。フィンランド気象研究所の Jouni Pulliainen やインスブルック大学の Hermut Rott の発表にあったように、積雪リモートセンシングでは植生の影響を考えなければならない。また、植生の地理的分布と積雪の地理的分布は相互に関係する。植生と積雪を合わせたリモートセンシングが今後の研究として興味深いと思った。

セミナーでの著者の発表は、シベリアのカラマツ林で、生物測定と二酸化炭素収支のパラメータに基づいて考察し、葉面積指数 (LAI) と林床植被率 (FVC) が純一次生産 (NPP) の指標となることを示した。さらに、Landsat ETM+画像を用いて、これらの指標とそれに対応した NPP の地理的分布を得た。この見積りはカラマツ個葉と林床の分光測定と放射伝達モデル研究による。その結果、LAI と FVC は実測値と合っており、見積もった NPP ($222 \pm 24 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) は、2000 年から 2006 年の気象タワー観測と土壌呼吸観測による NPP ($130 - 280 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) と整合していた。本研究では、LAI, FVC, 年 NPP の地理的分布を二酸化炭素収支と分光特性のパラメータと対応した形で示した。これら地理的分布は、将来の観測、モデル、リモートセンシングによる相互評価研究に役立つであろう。

セミナーの他の発表では、気候モデルのための積雪パラメータをリモートセンシングで見積もる話題として、気象研究所の Teruo Aoki の他に、スイス連邦工科大学の Andreas Roesch の発表が印象に残った。積雪と植生のアルベドのパラメータの設定を変え、GCM の計算結果を比較した。積雪水量、積雪面積、森林の放射伝達モデルなどを簡単なものから複雑なものまで与えた。積雪パラメータは大循環モデル (GCM) の計算結果



図 3 セミナー参加者の集合写真

ひいては気候変動に少なからぬ影響を与えるということが印象的であった。今後、植生リモートセンシングを研究するうえでも積雪のことも念頭に置きながら進めていきたいと思う。

山内 恭¹⁾ (国立極地研究所)

スイスー日本二国間セミナーの実現に尽力された青木輝夫博士に誘われ出席した二日間の会議であった。スイスの氷河研究者が中心ということで、私にとっては、相手側は全て初顔合わせであった。雪氷研究者を中心とする中で、私は雲の働き、放射を通じ気候に大きく影響する極域の雲について語った。雪氷研究者は、雪氷の変化が気候に直接効くことを考えているが、実は大気の影響—ここでは雲の振る舞いを通じてしか気候に影響し得ないことに注意を喚起したつもりである。近年の北極域での著しい変化は、夏の海水域の急減であるが、北極域の春から夏にかけては雲量が増加しているとの結果が様々な研究から出されている。その結果、海水減少によるアルベド減少は雲の増加で補償されている、即ち雪氷圏の変化は雲により相殺されているということであり、言われてきた氷ーアルベド・フィードバックが実は違うのではないかという可能性もある。ちなみに、雲が増加したことが海水減少にどう寄与したかは不明であるが(逆の寄与も)、短波、長波が打ち消しあい、余り大きくは効いていないと評価されている。

感動した発表はローザンヌ環境流体力学・水文

¹⁾ セミナーのみ参加

学研究所の Hendrick Huwald による雪氷面での熱収支観測についてのものである。大変精緻な観測で、例えば積雪層での温度分布測定、細かい熱伝対の集まりないし光ファイバーを巻いた筒を積雪層に入れて温度分布を測ろうというもので、積雪中から連続して大気下層も同じ間隔で温度が測られる。これらを使った結果極めて詳細な積雪中から表面をはさんで大気下層までの温度鉛直分布が得られる。これにより、地表面熱収支の内の雪中の熱伝導が正確に計算できること、困難であった真の雪面温度が導出できること、下層大気の温度分布を併せてみるができることなど、30 年近く前に筆者が関わった熱収支観測（南極みずほ基地における POLEX-South 観測 1979～1981）で達成できずに悔しく思った課題が見事解決されている。積雪層の中の空気の動きを、CO をトレーサーとして測定する話も意欲的であった。大変基礎的だが、極めて重要な課題の達成で、セミナーのスイス側代表を勤められた大村先生も予想通り絶賛されていた。

その他、多くの発表から見えているのは、近年の温暖化による氷河の明瞭な縮退であるが、その温暖化への応答時間がどのくらいであるのかに興味をもった。それは、氷河の特性により異なり、主に氷河のスケールによるとのこと。したがって小さい氷河の場合には比較的短い時間の変動に対応して後退→前進を繰り返すのに対し、大きい氷河の場合には長い時間での平均的応答、一様な前進ないし後退を長期間続けるということ。気候変動への氷河の応答が、1 万年スケールの現象なのか、1 千年スケールなのか 10 年、1 年スケールのものなのか、明らかな答えが期待される。

世界遺産のベルンの街並みとともに楽しませていただいた 2 日間であった。

浮田甚朗²⁾ (新潟大学)

セミナーでの著者の発表は、“Northern Hemisphere sea ice variability: Link to the Tropics and preconditioning for Arctic Changes” である。近年、北極の海水面積が急速に減少している。2007 年 9 月にはそれまでの観測史上最小であった 2005 年 9 月と比べても大きく (23%) 減少し、

その要因として地球温暖化が指摘されている。しかしながら、北極域での放射収支、海洋、大気による熱の移流、さらには氷-アルベド・フィードバックの実態は極めて限られた範囲でしか明らかにされていない。本発表では、北極の海水面積の減少に関して低緯度からの寄与があるという作業仮設の概要を紹介した。その骨子は、再解析データ期間における ENSO の振幅の増大、それに伴う冬季北大西洋ストーム・トラックの変動、アイスランド低気圧の強化、北大西洋海水ダイポールの形成及び持続、夏のシベリア沿岸での大気擾乱に伴う開放水面の増大と薄氷の生成、海水流動による薄氷の広がり、という一連の流れで、各々のプロセスについて主に大気・海水データの解析より示した。

セミナーでは、最初の講演者であるスイス工科大学の大村先生が、近年の雪氷圏変動について総括的に非常に分かり易く解説されていた。また、スイスの研究者はディテールまで非常に行き届いた研究を行っているという印象を強く受けた。あと、ローザンヌ環境流体力学・水文学研究所の Hendrik Huwald により紹介があった光ファイバーを筒に巻きつけて空間解像度を上げた温度プロファイラーは、個人的に大変興味深かった。というのは、Huwald は彼が海水の熱力学モデルの研究を行っていた院生時代からの知己で、測器の開発という違った方面で才能を発揮しているという事を知り、大変うれしく思った次第である。

朽木勝幸 (気象研究所)

ワークショップで印象に残った発表は、チューリッヒ大学の Stefan Rey による “Towards combined spectrodirectional reflectance measurements and detailed snow microstructure studies” で、様々な測器を統合的に使用して積雪の微物理構造と放射特性の研究を進めている現状と今後の方針についての報告があった。積雪の微物理構造の測定では、micro computer tomographer (μ -CT) や NIR-photography によって積雪構造を視覚的に測定した結果が紹介された。放射特性の測定では、積雪層内の透過率の鉛直分布を 1 cm の鉛直分解能で測定した結果や、下向き散乱光と雪面からの反射光の角度分布を自動で

²⁾ セミナーのみ参加

測定し、雪面の双方向反射率を求めることのできる装置 (FIGOS) の紹介があった。将来的には衛星搭載センサ (CHRIS-Probe) による雪面の方向別反射率との比較も加え、多様な空間スケールから積雪の放射特性と微物理構造の研究を進めていく予定とのことであった。

セミナーにはオブザーバーとして参加した。スイス側の発表では、積雪構造や熱収支の測定手法に関する内容が印象的であった。スイス連邦雪・雪崩研究所の Martin Schneebeli は、 μ -CT を用いた 3 次元の積雪物理構造とその変質過程の室内実験結果、snow micro-penetrometer と NIR-photography を用いて測定した積雪密度と積雪粒子の非表面積との関係を示した。また、ローザンヌ環境流体力学・水文学研究所の Hendrik Huwald は、fiber optics による詳細な雪温の鉛直分布や CO をトレーサーとして積雪中の物質輸送を測定する手法を紹介した。このような測定手法の開発・改良

は、積雪構造や熱収支の定量的理解を深めるのみならず、積雪モデルやリモートセンシングへの応用においても非常に重要な分野であると感じた。

謝 辞

本セミナーは独立行政法人日本学術振興会 (JSPS) とスイス国立科学財団 (SNSF) との二国間交流事業「共同研究・セミナー」による支援を受けた。スイス側の研究代表者であるスイス連邦工科大学の大村纂教授、スイス側の組織化やセミナーの準備をして頂いたスイス連邦工科大学の Andreas Roesch 博士、SNSF への申請書を書いて頂いた ESA の Jens Nieke 博士、セミナー会場を提供頂いたベルン大学の Stefan Wunderle 博士に対し、深く感謝する。また、日本及びスイスのセミナー参加者からは大変興味深い発表を頂いた。ここに記して感謝する。

(2008 年 5 月 7 日受付)