

コロラド州立大学大気科学研究所に滞在して
**Visiting the Cooperative Institute for Research in the Atmosphere,
Colorado State University**

小山 朋子*

Tomoko Koyama

Abstract

This is a brief summary of a one-year research abroad conducted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology as a visiting scientist at the Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Colorado State University in the United States.

はじめに

筆者は、平成15年12月から1年間文部科学省宇宙開発関係在外研究員として、コロラド州立大学大気科学共同研究所(Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Colorado State University: CIRA/CSU)に滞在する機会を得た。本稿は文部科学省研究開発局に提出した出張報告書に加筆修正を行ったものである。

1. Fort Collins (フォートコリンズ)

1年間滞在したFort Collinsは州都Denverから車で北へおよそ1時間あまり、西側にはロッキー山脈が連なり、東には大平原が広がるWyoming(ワイオミング)州との境に近い場所にある(図1、図2)。19世紀後半に軍事目的で砦(fort)を築いたのが、Fort Collinsのはじまりとのこと。年間あたりの晴天日数が300日を越えるような暮らしやすい気候も相まってか、「退職後に住みたい街」の全米ランキング上位の常連となっているようだ。地元の主産業は長い間畜産関係であったようだが、近年はDenverへの通勤圏内であるために急激な発展を遂げている。これはCaliforniaなど住宅価格の高



図1 アメリカ合衆国全図

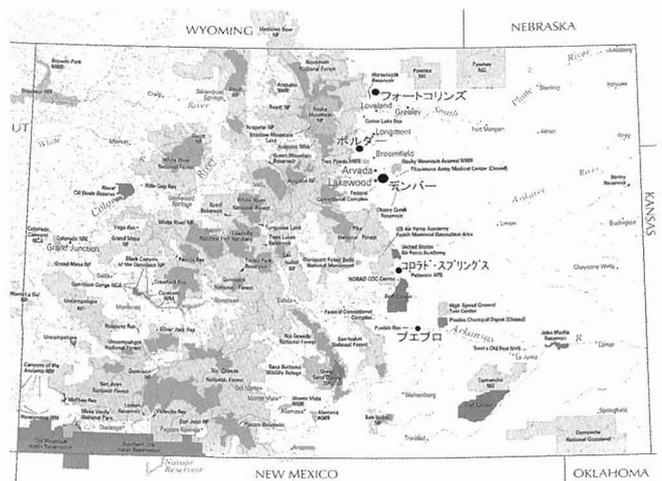


図2 コロラド州全図

* 気象衛星センターデータ処理部解析課
(2005年11月17日受領、2005年11月30日受理)

騰が止まらない他の地域から流入してくる人々が拍車を掛けていることもある。米国の国勢調査結果(2000～2003年)によれば、主要都市圏区域内で人口増加のスピードが最も速かったのが、すぐ隣のGreeleyであるということからもその様子が窺える。長い間牧草地だったような場所に宅地が次々と造成される光景は、余所者である筆者にとっても少々寂しく感じられた。その一方で、酪農家の典型的なスタイルであるカウボーイハット・ブーツにジーンズ姿の人々を見かけることもまだまだ珍しいことではない。

渡米するまでは大学以外にとりたてて何もないアメリカの田舎町を想像していたのだが、それは全くの杞憂に終わり、地域コミュニティと大学の交流が盛んなcollege townの良さを堪能させてもらった。全米有数の大都市に近く、アウトドアレジャーを満喫できる自然環境を目前にし、治安面の心配がいらぬこの街での暮らしは快適そのものだった。日本に比べて素気ない店構えの飲食店は、地元根付いていてとても魅力的であることが多かったし、そうした中から行きつけの場所も少しずつ増えた。日本より割安の映画館やライブミュージックが楽しめるビストロには毎週のように出かけ、気分転換に困ることはなかった(図3)。

Colorado州では全米の中でも健康に関する意識が高

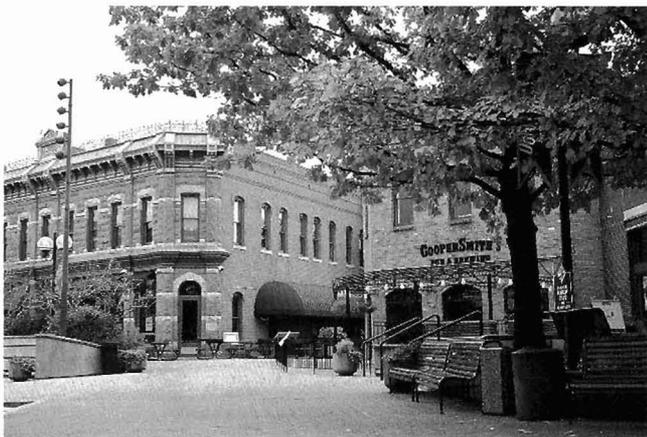


図3 Old townと呼ばれるFort Collinsの中心街。歴史あるこれらの建物は、ディズニーランドのメインストリートのモデルとなった。

いようだが、市街地に自転車専用レーンが整備されている場所が多く自転車通勤する人も少なくない。ただし日本で一般的なカゴ付軽快車のようなタイプの自転車は目にしたことがなく、ロードレーサーやマウンテンバイクが主流である。こうした住民の健康意識を反映するように、Fort Collinsでは2003年10月以来、公共の場所や飲食店内では一切禁煙となっている。ちなみに市の条例は芝生の手入れや雪かきといった項目に及び罰則規定も含まれているが、これには少々行き過ぎの感が否めない。

2.Colorado State University (コロラド州立大学, CSU)

街のはじまりとともに1870年代に設立された農学校(Agricultural College of Colorado)が前身であり、当時の学生達は“Aggies”と呼ばれていたそうである。その名残として街の西側斜面には白い大きな“A”の文字が描かれており(図4)、毎秋にOBや新入生らによって塗り直されるのが恒例行事となっている。現在のCSUは2万5千人弱の学生を擁する州立大学でFort Collinsの顔とも言える存在である(図5)。全米大学ランキングでの学部レベルの位置付けはそれほど高くないが、地域畜産業に貢献してきた獣医学部を筆頭として、工学・

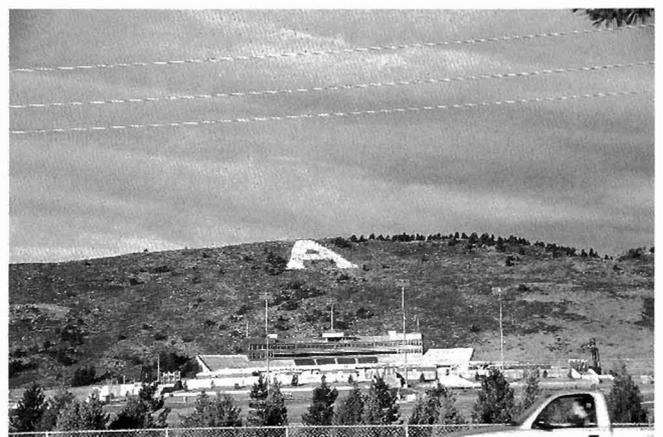


図4 街の西側斜面にある大きなAの文字と手前のHughes Stadium。カレッジフットボールの試合がある時には、試合開始時間前からTailgate Partyで盛り上がる人々で埋め尽くされる。

化学・環境学関連分野のプログラムでは高い評価を受けている。なお、気象学関係者には馴染みのNational Center for Atmospheric Research (米国国立大気センター, NCAR)の所在地であり、女子マラソン高地トレーニングでも有名なボルダーにはUniversity of Colorado (コロラド大学, CU)があるが、これは全く別の州立大学であり、アメリカンフットボールをはじめとする各種競技でCSUのライバルとなっている。同校は全米屈指の一流校と言われており、卒業生の中にはスペースシャトル爆発事故で亡くなった日系宇宙飛行士のLt. Col. Onizukaがいる。その他州内では、Colorado SpringsのAir Force Academy (空軍士官学校)やGoldenのColorado School of Mines (コロラド鉱山大学)も名高い。

2.1. Department of Atmospheric Science

熱帯気象学者であるProf. Herbert Riehlによって1961年に設立された。大学組織としては工学部(College of Engineering)の傘下にある。修士・博士課程のみのプログラムで所属学生数は100人弱であるが、学部生向けの一般気象学講座も開設されている。大学内でのPrograms of Research and Scholarly Excellence (優秀学術研究プログラム)のひとつに認定されており、大気科

学関連教育機関としても世界的に高い評価を受けている(図6)。CSUの衛星気象学・リモートセンシング分野の研究はUniversity of Wisconsin-Madison (ウイソコンシン州立大学マジソン校)と並び賞されるが、全球気候モデル・領域予報モデル・熱帯気象力学といった分野での優れた研究も良く知られているところである。そのためか気象関連業務に携わる米空軍士官が大学院生として複数在籍しており、彼らの迷彩色の軍服姿を時々見かけることもあった。

さて、米国の大学院に関してここで簡単に紹介したい。入学予定者は日本と異なり書類選考のみで決定されるが、大学側から指定されるGRE®(Graduate Record Examinations)などの公的適正能力テストをあらかじめ受けておく必要がある。留学生の場合はTOEFL® (Test of English as Foreign Language)を主とする語学試験も加わるため、一年近くの準備期間が必要となってくる。米国には陸海空の士官学校などを除いて国立大学というものはなく、州立大学が日本の国立大学に相当するが、州内からの進学かどうかによって学費が随分と変わる。2005-2006年のCSU大学院フルタイムの学費は、秋・春の2 semester (学期)分で州内生5000ドル、州外生160000ドル余りとなっている。CSUの大学院生は通常2年目から州内生と認められるが、これは米国永



図5 コロラド州立大学メインキャンパス内にあるLory Student Center。大学生協やカフェテリアなどがあり、学生や教授にとっての憩いの場となっている。



図6 Foothills CampusにあるDepartment of Atmospheric Science。鹿や狐などの動物を見かけることもある。

住権のない留学生に適應されることはない。ビジネススクールやロースクールなど実務系大学院の学生とは異なり、学術系の大学院生は通常返還不要の奨学金を受けている場合が多いが、研究分野や大学自体の資金力などによって受け取る金額は異なるようだ。ただし、有給で勉強している大学院生にとって長い夏休みはない。こうした情報の詳細はインターネット上に数多く掲載されているのでそちらに譲る。

学位取得までの過程は大学や学部にもよるが、大学院生は入学後最低9ヶ月間coursework(履修科目)にほとんどの時間を費やすことになる。基礎となる科目の各講座に出席することはもちろん、次々と出される宿題や課題提出に加え、約4ヶ月のsemesterを通じて2-3回の記述試験が待っている。評価は試験結果だけによるものではないが、平均して一定の成績を修めていないと奨学金打切りはもとより放校処分となる。これをクリアして、5月半ばからのsummer schoolの期間によく各自の研究を開始することが出来る。このsummer schoolは学期に準じ単位取得も可能だが、大抵は調査研究やインターンシップに充てられている。卒業するまでその他いくつかの難関があるが、それを乗り切る気力や体力も学生にとって不可欠である。



図7 Department of Atmospheric Science とCIRA両方の建物であるATS-CIRA Research Center. リモートセンシングに関わる研究者や大学院生のofficeがあり、筆者もここで1年間を過ごした。

2.2. CIRA

CIRAは約20年前に設立されたコロラド州立大学傘下の組織であり、National Oceanic and Atmospheric Administration (海洋大気庁, NOAA)のRegional and Mesoscale Meteorology Branch (地域・メソスケール気象部門, RAMMB)がCIRA内に設置されていることもあって(図7)、研究者は連邦政府所属であったり、州政府所属であったりする。衛星運用業務を直接的に行っているわけではないが、GOESやNOAAなどのデータアーカイブを持ち、衛星画像を主としたディスカッションが学生らを交え毎日行われている(図8)。財源はCSUとNOAAに加え、Department of Defense (国防省, DoD)やNational Park Service (国立公園局, NPS)などの政府関係団体が研究テーマ毎にスポンサーとなっている。そうした中でCIRAが他にいくつもある同様な形態の研究所と競合し、研究財源を保持するためにも広報活動に力が入っているのが見て取れた。

独立した機関として学術研究を行っているCIRAと、気象衛星運用を目的としている気象衛星センターでは、調査研究業務への取り組み方が当然のように異なる。まずgrant proposal、つまり各プロジェクトの目的や計画などを示してその研究費用を申請するところか



図8 午後3時から行われるディスカッションの様子。夏から秋にかけては全世界の熱帯擾乱の動向を見守る。

ら研究者の仕事は始まる。無事にgrantが獲得できたとしても成果が上がらなければ研究規模の縮小になりかねないため、どの研究グループものんびりとはしてられない。最悪の場合、担当プロジェクトの消滅と同時に失職する研究者・技術者が出てくる。CIRAのような研究所にとっての財産は研究者・技術者そのものということになるため整ったサポート体制も当然だが、これは同時により良い研究環境を求めて移転する研究者の多さの証に他ならない。

2.3. DoD Center for Geophysics/Atmospheric Research (CG/AR)

国防省とCIRAが共同設置の気象・水象の研究を行っている組織で、CG/ARと呼ばれている。実質的には組織というよりスポンサーが国防省である研究プロジェクト群の名称という意味合いが強い。1986年に始まったCG/ARだが、研究成果に対するレビューは厳しく年次・四半期毎に国防省所属の専門家によって行われる。CIRAにおけるデータ同化関連プロジェクトの財源はCG/ARによるものが多く、筆者も出張終了後のアメリカ気象学会年次総会参加などのための援助を受けた。このデータ同化関連プロジェクトは、全天候型衛星データ同化技術開発とカルマンフィルタ等の先鋭データ同化手法開発に携わる2つのグループに大別されている。

筆者は、データ同化技術の専門家であるDr. Vukićević 率いる前者のグループにお世話になった。グループの主要メンバーはセルビア・モンテネグロ(旧ユーゴスラビア)出身のDr. Vukićevićに加え、インド出身の放射の専門家Dr. Sengupta、フランス出身の雲力学の専門家Dr. Fowlerという米国外出身者と、衛星気象学の専門家Dr. Jones、プログラマーのMs. McKeown、アドミニストレーターのMr. Fasslerらの米国内出身者で構成されていた。しかしそれを「国際色豊かである」と意識することがなかったのは、移民による貢献を国力の源泉としてきた米国文化の中に置かれていたからに違いない。

3. 研究概要

3.1. GOESサウンダ赤外データのデータ同化にむけて

近年の衛星データ同化技術による数値予報の精度向上は目を見張るものがあるが、同化される領域は晴天域に限られてきた。これは、複雑な雲物理過程等が数値モデルに取り込まれていないといった技術的な問題や、曇天域での多大な放射計算量等が制約となっていたからである。CIRAは世界に先駆けて曇天域を含む領域でのデータ同化を目指し、Regional Atmospheric Modeling and Data Assimilation System(RAMDAS)と呼ばれる4次元変分法によるデータ同化システムが構築された。GOESイメージャ赤外データを用いた全天候型の数値実験ではその優位性が示されたが、曇天域における鉛直方向の温度と水蒸気の情報の不十分さが予報精度の向上の妨げとなることも示唆された(Greenwald et al. 2002, 2004; Vukicevic et al. 2004, 2005)。今回の調査は、大気温度と水蒸気鉛直分布測定が可能なGOESサウンダのデータ同化を効率的に行う準備段階ということになる。

調査にあたって利用されたのが、RAMDAS一部のVISIROOと呼ばれる観測演算子のアジョイントモデル部分である。このツールを使うことで、大気温度と水蒸気の微小変動に対するコスト関数の勾配の計算、すなわち感度測定が可能となり、データ同化に有効なサウンダチャンネルの情報等が得られることになる。この数値実験の結果は、光学的厚さを変数として表すことで雲の状態と関連付けした考察が可能である。実験結果からは、

- ・ 晴天域もしくは薄い巻雲のある領域では、勾配の変直分布がサウンダ各チャンネルの荷重関数に対応すること。
- ・ 厚い雲に覆われた領域では、雲の上部や内部での感度が比較的高いこと。

等が分かった。これは赤外サウンディングデータが同化される場合、どのように数値予報が修正されるかを示唆したものと言える。詳細についてはKoyama et al. (2005, Mon. Wea. Rev.に投稿済)を参照いただきたい

い。

3.2. 経過

平成15年12月6日 渡航

研修・研究のための環境整備 (12月)

- ・ Windows/Linuxシステムのセットアップ、必要となる各種アプリケーションのインストールを行った。
- ・ Dr. Vukićević及び関係者との打合せを行った。所属する研究グループ内では、GOESイメージャ観測を利用した曇天域を含んだデータ同化実験で成果が得られていることから、GOESサウンダ観測データについて調査研究を進めることとなった。対象となる観測データは、これまでに行われた数値実験に倣いAtmospheric Radiation Measurements (大気放射計測, ARM)の中心施設所在地に対応するもので、期間は2000年3月20-24日とした。
- ・ GOES衛星関連の参考資料の収集及び調査対象期間のGOES-8, -10サウンダデータの取得を行った。

GOESサウンダの基本機能確認 (1月前半)

- ・ GOES-8, -10サウンダの打上げ前及び軌道上最新の各スペクトル応答関数の比較を行った。可視領域では両センサーとも経年劣化が見られたこと、同衛星搭載のイメージャによる空間的・時間的に高分解能の観測が可能であることからこの可視領域データを調査対象から外すこととした。
- ・ 数値計算、統計解析、ビジュアライゼーション等のためのソフトウェアIDL (Interactive Data Language) の自己研修を行った。

キャリブレーション (1月後半・2月)

- ・ GOESサウンダの最新キャリブレーション参照テーブル (GVAR-Rad-Temp-ModeA) を取得し、対象期間全データのキャリブレーションを行った。

ナビゲーション (3-5月)

- ・ McIDAS (Man computer Interactive Data Access System) フォーマットで保存されているGOESイメージャデータ用の既存のナビゲーションアプリケーション (IDLおよびFORTRAN環境のもの) を入手し、改造してサウンダデータのナビゲーションを試みた。しかしGOESイメージャとGOESサウンダではそのセンサーの特性等の違いがあり、フォーマットタイプが一緒でもファイル構成が異なるため、短期間に既存アプリケーションの改造を行うことが不可能と分かった。そこで、McIDASシステムそのもののナビゲーション機能を利用し、マニュアル処理でデータファイル毎にナビゲーションを行った。

リマッピング (6-8月)

データ同化実験を行うためには、衛星観測データ観測地点と数値モデル格子の位置合わせ、すなわちリマッピング処理が必要である。

- ・ 前述のキャリブレーション及びナビゲーション処理されたデータを統合し、バイナリ形式の一時プロダクトとして保存。その後、IDLの地図関連処理機能を利用しリマッピングを試みたところ、僅かながらそれぞれの結果にずれが生じた。
- ・ Dr. Jonesからリマッピングのずれに関する助言を受けた。上記の問題を解決するため、CIRAで開発された衛星データを一元的に利用するためのシステムであるDPEAS (Data Processing and Error Analysis System)のリマッピング機能を利用することを決定。しかしDPEASによるリマッピングの結果にも同様なずれが見られた。こうしたずれは経度方向に現れ、McIDASシステムのナビゲーション処理の過程で生じることが分かった。この問題を解決するために、DPEASシステムの中でリマッピングの際に経度データをフィルタリングすることにした。このスキームは近傍データを二次元で等方向に平均化するものだが、最適となる処

理範囲は統計的な実験を行って決定した。

観測演算子プログラムの修正 (9-10月中旬)

- ・ Dr. Vukićevićから観測演算子プログラム (VISIROO) について説明を受けた。
- ・ VISIROOを使ってGOESサウンダデータを処理するためのプログラム改修を行い、必要に応じて確認作業となる数値実験を行った。

予備段階における数値実験 (10月下旬以降)

- ・ 同化による数値予報へのインパクトを調査するための予備実験を開始。曇天域の温度場及び湿りの場において観測波長域または高度を変化させることにより、結果も変化することが示された。
- ・ 以降の数値実験はモデル領域を広げた上で、Dr. Vukićević、Dr. Sengputaらによって継続された。

平成16年12月5日 帰国

3.3. 出席した会議など

- ・ CSUでのダイナミックデータ同化AT786の聴講 (2004 spring semester)
- ・ 2004年5月に開催された第3回GOES利用者会議 (Bloomfield, Colorado)
- ・ 2004年8月に開催された国際光学会総会の気象及び環境衛星会議 (Denver, Colorado)
- ・ 2005年1月に開催された第85回アメリカ気象学会総会 (San Diego, California)

4. 異文化交流

米国ならではのユニークな経験は滞在中に色々あったが、最も印象に残ったことのひとつとして、地元の小学校でゲストスピーカーになったことを挙げたい。あるCIRA職員の子弟が通っていたCharter School(チャータースクール)と呼ばれる学校をボランティアとして訪ねたのだが、そこでは特色あるカリキュラムが組まれており、小学校5年生にあたるそのク

ラスでは鎖国時代の日本について学んだばかりということだった。話す内容は日本に関する事なら何でもということだったので、横浜在住の友人の子供をモデルに日本の小学生の日常を紹介することにした。過去に筆者自身が帰国子女のスライドに興味深く見た記憶があったため、30枚ほど用意したスライドを見せながら日米の衣食住の違いについて話をした。アメリカの小学生にとって珍しい電車通学や給食などに反応するだけでなく、スライドごとに次々と質問を繰り返す彼らの鋭い観察力には本当に驚かされた。この一時間は、米国の初等教育事情を垣間見る良い機会になっただけでなく、30人余りの生徒が最後まで熱心に聞いてくれたことが非常に嬉しかった。この「特別授業」は拍手喝采で終わったが、同席した父兄によればその後しばらくクラスの中では日本に関する話題で持ちきりとなったそうだ。その後生徒全員から届いた礼状は、何よりの記念の品となった。

おわりに

長期出張に快く送り出してくださった気象衛星センターの皆様をはじめ文部科学技術省、気象庁の関係官の方々には大変お世話になりました。また、滞在先で指導いただいたCIRA所長のProf. Vonder HaarとDr. Vukićević、写真の提供をいただいたDr. Adriana Beltran-Przekurat、その他色々とお言いただいたコロラド州立大学関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- Greenwald, T. J., R. Hertenstein, and T. Vukicevic, 2002: An All-Weather Observational Operator for Radiance Data Assimilation with Mesoscale Forecast Models. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 1882-1896
- Greenwald, T. J., T. Vukicevic, L. D. Grasso, and T. H. Vonder Haar, 2004: Adjoint sensitivity analysis of an observational operator for visible and infrared cloudy-sky radiance assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,

130, 685-705

- Koyama, T., T. Vukicevic, M. Sengupta, T. Vonder Haar, and A. S. Jones, 2005: Analysis of information content of IR sounding radiances in cloudy conditions. *Mon. Wea. Rev.*, Submitted.
- U.S. Census Bureau (P. J. Mackun), 2005: Population Change in Metropolitan and Micropolitan Statistical Areas: 1990-2003. U.S. *P25-1134*
- Vukicevic, T., T. Greenwald, M. Zupanski, D. Zupanski, T. Vonder Haar, and A.S. Jones, 2004: Mesoscale Cloud State Estimation from Visible and Infrared Satellite Radiances. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 3066-3077
- Vukicevic, T., M. Sengupta, A. Jones, and T. Vonder Haar, 2005: Cloud Resolving Data Assimilation: Information content of IR window observations and uncertainties in estimation. Preprints. *J. Atmos. Sci.*, Accepted.

参考にしたウェブサイト

日米教育委員会

<http://www.fulbright.jp/>

Cooperative Institute for Research in the Atmosphere

<http://www.cira.colostate.edu>

Department of Atmospheric Science

<http://www.atmos.colostate.edu>

National Atlas of the United States

<http://nationalatlas.gov>

The Official Web Site for the City of Fort Collins, Colorado
USA

<http://www.ci.fort-collins.co.us/>

Welcome to Colorado State University

<http://welcome.colostate.edu>