

NSSL (NOAA/ERL) に滞在して

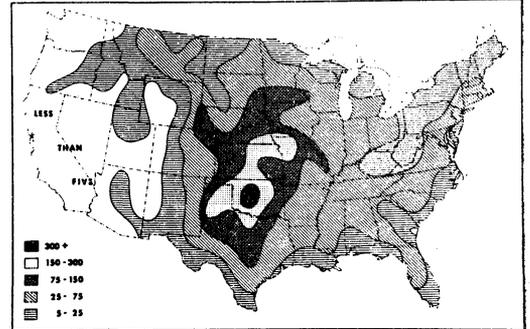
上田 博*

1. はじめに

“米国の気象学研究の中心地はどこか?”と聞かれたら、NCAR(National Center for Atmospheric Research)のあるコロラド州ボルダー市だと答える人が多い。確かに、予算・設備・人員から言ってもボルダー市の地位は揺らぐことはないだろう。しかし、中小規模擾乱の研究においては、オクラホマ州ノーマン市はめざましい発展を遂げており、ドップラーレーダー観測をてこに中小規模擾乱研究の一大基地になろうとしている。そのノーマン市に1年間滞在する機会を得たので、この研究機関とその様子の紹介を中心に滞在経験について報告する。

私は科学技術庁のパートギャランティの適用を受け、CIMMS (Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies) の支援を受け、NSSL (National Severe Storms Laboratory) で NEXRAD (Next Generation Weather Radar) のプロジェクトに参加した。取り組んだテーマは、航空機の離着陸時に大きな障害となる gust front を1台のドップラーレーダーで自動検出し短時間予測するアルゴリズムを開発することである。このテーマに1年間掛り切りになったので、ほとんど他の町を訪問することがなかった。しかし、ノーマン市にはオクラホマ大学、CIMMS、NSSL があるので1年間では学びきれない多くの事柄があった。

オクラホマは、吉崎 (1978) により“天気”に紹介されているような“アメリカの大平原に独特な雷雲”のよく発達するところとして知られる。NSSL の Kessler 所長編集 (1983) の“The Thunderstorms in Human Affairs**”のなかの米国における主な降雹の頻度分布



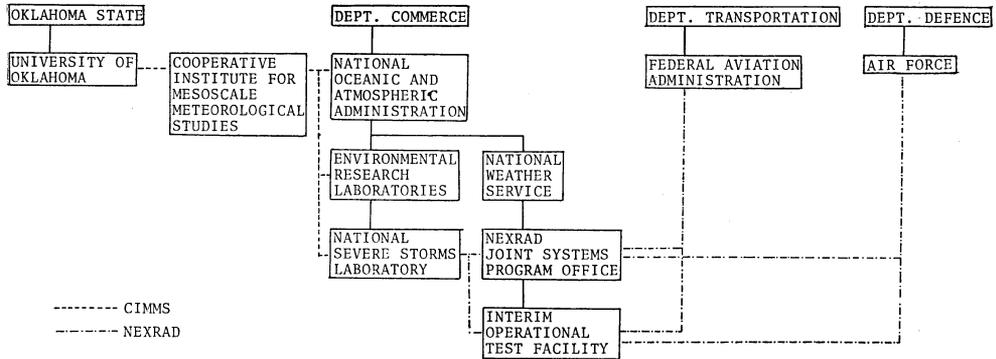
第1図 米国における主な降雹の頻度分布。1955年～1967年に、緯度2°、経度2°の中についてなされた、直径3/4インチ以上の降雹の報告数に基づく。竜巻の頻度分布もこの図とよく似ている (Kessler 編, 1983)。

(第1図)をみてみると、オクラホマ州にそのピークがあることがわかる。Thunderstorm の観測機会が多ことから、オクラホマ大学と NSSL は中小規模擾乱の研究にこれまで多くの成果をあげてきており、CIMMS ができてから両者の協力がさらに円滑に進むようになり、また、他の気象関係機関のノーマン市移転が計画され、ノーマン市は中小規模擾乱の観測研究の一大中心になろうとしている。さらに、農業と石油以外に大きな産業のないオクラホマ州に日本から、ハイテクノロジー関係の企業の進出が計画され、その意味でもオクラホマ大学のあるノーマン市の発展が目される。

日本の筑波研究学園都市と比べると小規模な学園都市ながら、雑多な研究所の寄せ集め研究都市ではなく、ドップラーレーダー観測による中小規模擾乱研究を中心とした気象研究都市を指向するノーマン市は町づくりという観点からも注目に値する。以下に同市にある気象学研究に関係する機関と、そこでの私の滞在経験について述べ、最後にこれらの機関すべてに関係のある NEXRAD のプロジェクトについて述べる。まず初めは各機関の関係を示す組織図を第2図に示しておく。オクラホマ大学

* Hiroshi Uyeda, 国立防災科学技術センター。

** “The Thunderstorms in Human Affairs” は二宮 (1983) により“天気”に紹介された Thunderstorms Vol. 1~Vol. 3 のうち Vol. 1 を改訂増補したものである。現在 Thunder Storms Vol. 1 と Vol. 2 は品切れで、Vol. 2 と Vol. 3 はそれぞれ 1985 年春と秋に改訂版が University of Oklahoma Press から出版される予定である。



第2図 ノーマン市にある気象研究機関（太枠）組織図。点線は CIMMS との関係，1点鎖線は NEXRAD との関係を示す。

は州立，NSSL は NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) のなかの ERL (Environmental Research Laboratory) の一研究所であることなどがわかる。

2. オクラホマ大学気象学科

オクラホマ大学の気象学科は長い歴史を持ち，オクラホマ大学のなかでは重要な部門とみなされている。大学予算の削減が激しく，授業料値上げで学生数が激減するなか，これらの影響を最小限に留め，教官増も意図するなど活気のある学科である。このことは最後に述べる Weather Center の中心的な存在になることが期待されていることも大いに関係がある。

スタッフは Professor 4人，Associate Professor 3人，Assistant Professor 3人である。大学の外（主に NSSL）から Adjunct Professor 3人，Adjunct Associate Professor 5人，Adjunct Assistant Professor 2人が参加している。学生数はおよそ，学部学生80人，修士課程30人，博士課程5人で，大学院生のなかには NSSL のプロジェクトに参加したり，CIMMS の支援を受けている人達も多い。

気象学科の研究は各分野に亘り，特に理論と解析には定評がある。日本の気象研究者も過去に多数訪問している。私は学科の各研究を具体的に知る機会がなかったので，詳しいことは述べず，目についたことについてのみ述べる。計算機がよく使われているのは当然として，各種気象図面をカラー表示する装置があり，高層解析図，断面図等をカラー表示するプログラムを独自に作っている。いくつかの図面をテレビ画面上で任意に重ね合わせられるのは気象学の理解を助けるのに役立つと思われた。

また，別の部屋には NWS (National Weather Service) からのデジタルレーダー画像をテレビ画面にモニターし，各種の処理がなされている。これらの装置は，竜巻や電をもたらし積乱雲を自動車で追跡し近くで観測する，storm chasing team の参考資料としても利用されている。

私にとってありがたかったのは，気象学科で行っている週1回のセミナーである。オクラホマ大学の教官はもちろん，各大学・研究機関からの講演者が最近の話題を提供している。NSSL の研究者もこの場で発表するので，私が NSSL にいただけでは知り得ない NSSL の活動も知ることができた。

もう1つ印象に残ったのは，たまたま土曜日・日曜日に教室に行く機会があると，必ず若い教官が大学に出ていて研究活動をしていたことだ。土曜日・日曜日は休日のアメリカで，このように頑張っている人達をみると，日本人だけが頑張っていると思うのは大間違いで，少なくとも研究の分野では，“日本人は働きすぎる”という批判は全く当たらないと思った。

3. CIMMS

CIMMS は，1978年にオクラホマ大学と NSSL (NOAA/ERL) との協約によって設立された。その目的として，(1) オクラホマ大学，NSSL 両者の研究と教育の前進を効果的に進める，(2) 両機関で関心のある問題について研究者が集まって研究を進めるセンターの役割をはたす，(3) severe storm，短時間予測，アメリカ大平原の気象にかかわる中小規模擾乱の研究を推進する，などとなっている。

1980年に佐々木先生*が所長になられてから CIMMS

* 佐々木嘉和博士。

はめざましい発展を遂げている。具体的な活動で次のようなものが目立つ。1982年に NEXRAD のシンポジウムを主催、1983年に第1回の Conference on Mesoscale Meteorology を主催、1984年には Intensive Short Course on Mesoscale Meteorology and Forecasting を ERL と共催し、1985年には International Symposium on Variational Method in Geosciences の主催が予定されている。また国際会議、シンポジウム、気象教育など活発な活動がなされている。

CIMMS のもう1つの特徴は、海外から(米国内も含む)研究者を数カ月から数年間招へいし各種のプロジェクトに参加させていることだ。オクラホマ大学、NSSL のプロジェクトに参加する外国人は CIMMS に籍を置き、大学の管理を受けるシステムがとられ、滞在中の生活基盤の確立の助けになっている。

私は CIMMS から滞在費の支援を受け、NSSL で NEXRAD のプロジェクトに参加し、研究活動をすると共に、CIMMS の中にもオフィスをいただいた。NSSL は人が多く、専用の作業機を確保するのが大変だったのに比べると、CIMMS は静かで落ちついて研究のできる場であった。書きものをしたり、じっくり問題を考えるときには CIMMS に行くことにした。

CIMMS にオフィスをいただいたおかげで、主に CIMMS で仕事をしている、米国、カナダ、中国、台湾、インド、フランスなど各国からからの研究者と知り合うことができた。また、CIMMS で行われているセミナーは独特で、おもしろいテーマがあるごとに CIMMS の研究者や米国内外からの CIMMS 訪問者の講演が行われる。セミナーの後にゆっくり個人的に議論できる良さがある。

CIMMS では中国人の頑張りが目立ったが、全員一生懸命で、フランス人の短期滞在者がいたときには、所長の佐々木先生自身が土曜日・日曜日にも出て来て議論をしているのを何度もみかけた。土曜日・日曜日にも必ずだれかが出てきているので、仕事をする上での良い緊張感を私に与えてくれた。CIMMS のオフィスで思ったのは、日本の気象研究者は気象予算の少ない分を他国民以上の努力で頑張れば良いと思っていたが、米国は外国から人材をお金で集められるのだから、このままでは日本と米国の差は広がる一方なのではないかということだった。さらに、最近の中国の気象学発展に関する力の入れ方からすると日本が中国に追い越されるのは間近なのではないかと心配される。やはり、気象の分野でも、研

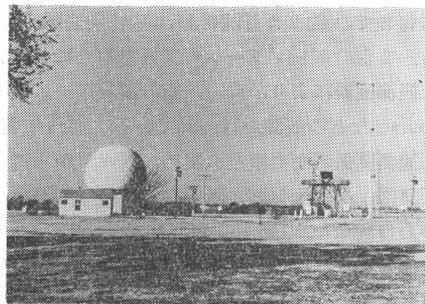


写真1 NSSL の波長 10 cm のドップラーレーダーレドーム。NSSL の敷地内にあり、周囲に各種測器が設置されている。

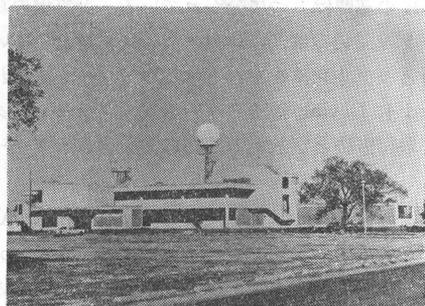


写真2 正面からみた NSSL。背後に NWS の標準レーダー WSR-57 のレドームがみえる。

究費や気象事業に予算をもっと確保する必要があるのではないかと思ったりした。

4. NSSL

NSSL は 1964 年にノーマン市に設立され、それ以来 Kessler 博士が所長を努めている。NSSL の歴史を簡単にみてみると、1970年に ERL の一研究所になり、1971年に波長 10 cm のパルスドップラーレーダーが完成し(写真1)、1972年に現在の建物(オクラホマ大学のメインキャンパスから北に約 6 km の地点にあるノースキャンパスに移った(写真2)。1973年にノーマン市から北西約 40 km のシヤロン地点にも波長 10m のパルスドップラーレーダーが完成した。ドップラーレーダーの他に、440m のテレビ塔に取り付けた気象測器、ゾンデ、落雷観測網を総合的に利用して severe storm の観測を実施している。

最近では、Spring Program と言って、4月初めから

6月初旬までの約2カ月間行われる特別観測が定着している。2台のドップラーレーダーを中心にゾンデや各種地上観測機器により、竜巻、雹、雷放電、gust front、downburstなどの観測が行われている。毎日午前11時30分に観測関係者を会議室に集め、NWSから送られる地上天気図、高層天気図、断面図、衛星写真等を示し、午後からのstormの発達の可能性を議論し、その日の観測体制を決定している。NCARや大学などの他機関からの参加者はこの会議で紹介される。観測の最盛期には観測参加人員は100人程度になっていると思われる。また、被害が起こった場合には被害調査グループも編成される。特別観測関係の磁気テープがざっと数えて1万本ほど棚に納められていたのには驚かされた。

NSSLの部門は3つに分かれている。計算機の維持とプログラム開発の部門、Peater S. Ray博士の率いる気象解析とモデリングを中心とするグループ、それと、Richard J. Doviak博士の率いるドップラーレーダーのデータ取得方法と雷放電の観測に力を入れるグループがある。

特に、最近Doviak博士のグループはNEXRADの関係で1台のドップラーレーダーによるsevere stormの各現象の実時間測定と解析に力を入れている。私のテーマのgust frontの自動検出方法の開発もその一環としてなされたものである。また、DoviakとZrnich, 両博士はドップラーレーダーの基礎からドップラーレーダーを使った気象観測方法についての本を出した(Doviak and Zrnich, 1984)。電子工学の専門家だった彼らが、1970年代はじめのNSSLのドップラーレーダー(波長10cm)建設に参加し、安定した測定ができるようにし、最近では気象解析に力を入れ、現業へのドップラーレーダーの利用方法を考えていくようになった姿を目の当たりにしてこの本を読むと、彼らのこれまでの仕事の集大成であることが良く理解できた。

NSSLでは、2台のドップラーレーダーのデータ解析にはNCARの大型計算機を使い、1台のドップラーレーダーのデータ解析には、ノーマン地点のドップラーレーダー制御用の計算機を使っている。後者の計算機はNSSL所有の計算機で、何時間使っても無料なので安心して使える。私は、研究テーマ上この計算機を使った。しかし、この計算機を使う人が多く、混んできると計算時間が遅くなるので、大きな計算をする時には土曜日・日曜日を利用するなどの苦勞があった。

NSSLの研究者で土曜日・日曜日に出て来る人は、特

別観測の期間以外は、かなり少なく、平日も5時になると帰る人が多いので、やはりお役所だなと思われる面もあった。しかし、注意深くみても、夜遅くまで残っている人もいるし、その人達とは土曜日・日曜日でも計算機室で顔を合わせることもあったので、やはりやる人はやっているのだと思った。

一番刺激を受けたのは、オクラホマ大学や他の大学からの大学院生が各種のお金の支援を受けてNSSLに入り、時間を問わず計算機を使ってドップラーレーダーのデータを解析していることだった。彼らとの議論は、ドップラーレーダーとsevere stormの理解に非常に役立った。また、彼らにしても、私のような外国人研究者の開発した手法をいち早く自分の解析に利用できるのだから、その意味でも国立の研究所で研究するメリットは大きいと思われる。多数の学生が国立試験研究機関で仕事をして、自分の修士論文や博士論文をまとめていることは、日本で聞いていた通りで、研究所にとっても学生にとっても利益のあることだと思った。NSSLにいる大学院生で一番印象に残ったのはDoviak博士と仕事をしている中国からの修士課程の女子大学院生だった。彼女に、米国に残りたいかと質問したところ、中国では多数の気象研究者を求めており、米国でPH. D.を取って帰ると歓迎されるので、米国で良い仕事をして中国に帰りたいと目を輝かせて答えた。日本とは事情が全く異なるようだ。研究者もその国のその時代の求めに応じて育つものなのだろうか。

5. IOTF

IOTF (Interim Operational Test Facility) はJSPO (NEXRAD Joint System Program Office) の組織で、NEXRADで要求されるデータの具体的・実用的な解析方法や表示方法の研究を目的として設立され、1981年にNSSLの建物の中にオフィスを持った。IOTFにはNWSを中心に、NSSLやAir Forceなどから人が集まり、Keneth E. Wilkをチーフに活発な活動が行われており、数年のうちに独自のドップラーレーダーをノーマン市内に作り、より現業目的に添った観測解析を行うことが予定されている。

私は最初の3カ月間このIOTFの部屋の中に机を借りたのでIOTFの人達と話す機会を得た。NSSLのドップラーレーダーは100°程度のsector scanを主に行っているのに対し、彼らは360°回転のPPI scanによるドップラーレーダー情報の解析に力を入れる予定だと話し

てくれた。彼らの仕事のうちで一番感心したのは、高性能のカラーディスプレイを使い、ドップラーレーダーの情報を中心に各気象情報を地形上に重ねて表示し、移動させるなどの工夫をこらしていることだ。数時間先以内までの予測や飛行機の管制などの現業には大いに役立つ仕事だと思われた。

6. その他の機関

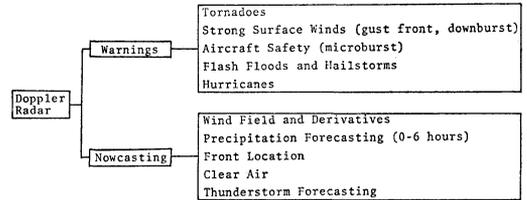
オクラホマ州の州都オクラホマ市には、日本の気象庁にあたる NWS の気象台があり、天気予報を行っている。ここから各種の気象情報がオクラホマ大学や NSSL にも送られている。オクラホマ空港にある NWS の気象レーダーは飛行機の運行の安全にも役立っている。

米国に来て感心したのは、テレビ局自体が一般市民向けの天気予報では重要な役割を果たしていることである。米国全体のレーダー合成画像や衛星写真はもちろん NWS 提供のものであるが、テレビ局に雇われた気象の専門家が天気予報を行っている。あるテレビ局では、気象の専門家を10人程度スタッフとして雇い、通常レーダーはもちろんドップラーレーダーまで所有し、特色のある天気予報を行っている。米国におけるテレビ局の全般的な役割については浜田 (1982) の報告などに詳述されている。

最近ノーマン市で注目される話題は、Weather Center (仮称) が同市にできるだろうということである。これは、NWS, NSSL, CIMMS, NEXRAD 関係の機関の他にいくつかの研究機関が協力してできるもので、相互の発展を推進するための共同センターになることが期待されている。Weather Center ができると、オクラホマ大学にとっては、気象学科だけでなく、電子工学や計算機関係の分野に及ぼす影響も大きい。また、オクラホマ州にとっても、Weather Center はハイテクノロジー産業推進の1つの核になることが期待される。ノーマン市に Weather Center ができつつある背景には NEXRAD 計画があり、その計画推進のために、NSSL をはじめとするノーマン市にある機関の寄与の大きかったことがあげられる。また、NEXRAD の本部がワシントン市からノーマン市に移転することも計画されている。

7. NEXRAD

NEXRAD とは、全米に展開されている百数十台の通常レーダーを1990年をめどにドップラーレーダーに置き換えようという計画である。1976年～1979年に大学や研



第3図 NEXRAD 計画で現業化をめざして行われている研究項目。

究機関がドップラーレーダーを持ちより、オクラホマで大掛かりな共同観測を行い、竜巻の観測に成功した。この成功の後にドップラーレーダー網展開の気運が高まり、NEXRAD は最終的に、Dept. Commerce, Dept. Defence, Dept. Transportation の共同プロジェクトとして発足した。各省からそれぞれ NOAA, Air Force, Federal Aviation Administration が色々な形でプロジェクトに参加している (第1図参照)。NEXRAD について、最近では藤原 (1984) の報告などがあるので、以下では最近の研究の方向についてのみ述べる。

NEXRAD では、ドップラーレーダーの諸元を検討し、どのような気象現象をどのように観測するかについてのプログラムを事前に作成しておく作業が進んでいる。これらの内容は研究の進展につれて少しずつ変化するので最終的にどうなるかについて明らかなことは言えないが、1例として、1982年に CIMMS 主催で行われた NEXRAD Doppler Radar Symposium/Workshop での Wilson (1982) の発表内容をもとに、予報・警報へのドップラーレーダーの利用項目を私なりに第3図にまとめた。このように多くのテーマがあり、さらに多くの問題を扱うことになると考えられる。

2台以上のドップラーレーダーによる観測研究は、武田 (1980) が気象研究ノートに米国の研究を中心に紹介した以後も急速な進歩を遂げている。たとえば、私は帰国途中にボルダー市に立ち寄り、NCAR の CP-2 レーダーをみせてもらったが、これは2波長、2偏波のドップラーレーダーで、バルーン式のレドームも移動式というものであった。この CP-2 と共にドップラーレーダー CP-3, CP-4 を駆使して Microburst の研究をしている JAWS (Joint Airport Weather Studies) のグループの人達と議論をする機会があった。Wilson et al. (1984) の研究にみられるように Microburst などの詳細な構造まで明らかにしようとしているなど、2台以上のドップラーレーダーを用いた観測の進展には驚かされるばかり

である。

一方、1台のドップラーレーダーによる観測解析方法は2台以上のドップラーレーダーによる観測解析方法に比べると遅れていた感があった。1台のドップラーレーダーではビーム方向の風速成分しか測れないからである。しかし、現業化をめざす NEXRAD の観測網では、解析や予報をしたい地域を覆うレーダーの数は、殆んどの場合1台だけである。それで、1台のドップラーレーダーの観測から最大限に気流の情報をひき出そうとする研究が近年急速に CIMMS や NSSL などで行われている。特に、竜巻, mesocyclone, downburst, gust front, など、激しい気象災害をもたらす現象を1台のドップラーレーダーを用いて実時間で検出し予測する方法の開発が盛んだ((Sasaki, 1984)など)。私の参加したプロジェクトも、この方向に沿って gust front を実時間で自動検出し予測する方法を開発しようというものであった。研究内容については学会発表と Uyeda・Zrnice' (1984) にゆずるが、折返しと地形エコーなどの問題を残しながらも良く gust front を自動検出できるようになったので、NEXRAD で実用化されるだろうとのことであった。

8. おわりに

ノーマン市が中小規模擾乱研究の1つの中心地として大きく発展しようとしている最中に1年間滞在することができ、私にとっては良い刺激になった。ノーマン市の今後の発展を見守りたい。

日本でもドップラーレーダーによる気象観測が本格的に始まり、NSSL などではすでに気象研究所の観測結果に関心を示している。しかし、米国と比べると日本のドップラーレーダーの台数は非常に少ない。気象衛星とアメダスで測定できる雲頂と地上の情報だけではわからなかった、それらの間にある降水と風の3次元的な分布を測定できるドップラーレーダーの増加は、気象災害防止軽減の方法を開発する上で不可欠だと考えられる。複雑な地形をもつ日本では地域的な特性を考慮したドップラーレーダー観測方法の開発も必要だと考えられる。NEXRAD のような大規模な計画は難しいとしても、大

学や、国立試験研究機関の協力によるドップラーレーダーに関する研究の推進、特に現業化を指向する研究の必要性を痛感した1年間の米国滞在だった。また、ドップラーレーダーデータの情報量は膨大なので、将来の共同研究のためには、共通フォーマットなどを作ることを今から考えておく必要があると思われる。

最後に、私の渡米から滞在中の各種の面倒をみて下さり、2カ月に1回の割合のミーティングのたびに、私の研究に対して理論的な批判や議論を下さり、私が良いアイデアを思いつくヒントを下さった佐々木先生に深く感謝致します。また、Kessler 所長をはじめ NSSL の皆様に、私の研究推進の上で多くの御支援をいただいたことを感謝致します。

文 献

- Doviak, R.E. and D.S. Zrnice', 1984: Doppler radar and weather observation, Academic Press Inc., pp. 458.
- 藤原美幸, 1984: 第21回レーダー気象会議に出席して(II), 天気, 31, 231-234.
- 浜田忠昭, 1982: 米国における気象災害に対する心構えと報道, 天気, 29, 185-193.
- Kessler, E. 編, 1983: The thunderstorm in human affairs, Univ. of Oklahoma Press, pp. 186.
- 二宮洗三, 1983: E. Kessler 編, "Thunderstorms" Vol. 1, Vol. 2 および Vol. 3, 天気, 30, 76.
- Sasaki, Y.K., 1984: Variational wind analysis using single Doppler radar observation: Singularity model, CIMMS Report No. 56 (in preparation).
- 武田喬男, 1980: レーダを利用した最近の研究, 気象研究ノート, 139, 109-144.
- Uyeda, H. and D.S. Zrnice', 1984: Automatic detection of gust fronts, FAA Report (to be published).
- Wilson, J.W., 1982: Single Doppler observation for forecasting and warning, Proc. of the NEXRAD Doppler Radar Symposium/Workshop, 6-30.
- , 1984: Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection, J. Appl. Meteor., 23, 898-915.
- 吉崎正寛, 1978: アメリカの雷雲について, 天気, 24, 351-373.