

熱帯の風・雨・雲を測る ～赤道大気レーダーの挑戦～*

山本 真之**

1. はじめに

本総説では、インターネットなどで簡単に入手できる文献を参照しつつ、基礎的なところからインドネシアのスマトラ島にある赤道大気レーダーの紹介を行います。

リモートセンシングという言葉をご存じでしょうか。物体から放射あるいは散乱される電磁波を利用して、その物体の種類や状態を測定することをリモートセンシングと呼びます。リモートセンシングは、私たちにもとても身近な技術です。建物への不法侵入者を検知する赤外線センサーや監視カメラなどは、リモートセンシングの代表的な例です。近年、一人暮らしのお年寄りの家庭にある湯沸かしボットの使用状況をメールで連絡し、お年寄りの安否を確認するサービスが話題になりました¹⁾。これも、離れた場所での状態を知るという意味では、リモートセンシングと言えるでしょう。

気象状況の短期（数時間以下）・長期（数十年以上）の変化は、傘を携帯する・洗濯や布団干しをするといった日常生活から、水資源・農水産物の収穫・交通などの人間生活や産業に大きな影響を与えます。そのため、気象状況を監視するためにリモートセンシングが幅広く使われています。テレビやインターネットで目にする気象衛星ひまわりで観測された雲の画像²⁾や、気象レーダーで観測された雨の分布³⁾は、その代表的な例です。

2. 大気を観測するレーダー

2.1 大気レーダーと気象レーダー

レーダーは電波のパルスを目標物に当て、目標物からの散乱電波を受信し、標的の位置や状態を測定する装置です⁴⁾。レーダーは、大気の観測のみならず、車や船舶の衝突防止・航空管制・地中管の探査など、事故防止や安全確保に広く使われています。前述の気象レーダーは、雨粒からの散乱電波の強度を降水量に換算することで、雨の分布を観測します。気象レーダーでは、雨の分布を捉えるために、パラボラアンテナを回転させて全方位の観測を行います（図1a）。

大気の運動を表す風速の測定も、気象状況の把握・予測に不可欠です。風速の測定は、大気の屈折率の揺らぎを利用します。日常目にする星のまたたきや陽炎は、光が直進しないために、景色や物体がぼやけて見える現象です。光が直進しないのは、大気乱流の影響などにより温度や水蒸気が大気中で一様でないため、大気の屈折率が揺らぐためです。この大気の屈折率の揺らぎは、ごく僅かな電波を散乱します。大気の屈折率の揺らぎによる電波の散乱を利用して風速を測定するレーダーを、大気レーダー（またはウィンドプロファイラ）と呼びます。大気レーダーでは、アンテナを上方に向けて、アンテナの上の数百 m から数 km までの水平範囲の風速を測定します（図1b）。気象庁では、“局地的気象監視システム（WINDAS）”と呼ばれる小型大気レーダー観測網で得られた風速観測データを中央監視局に集め、スーパーコンピュータを用いた天気予報の精度向上に活用しています⁵⁾。WINDAS で用いられている小型大気レーダーは、生存圏研究所で開発されたものです。

*2011年8月2日作成 本稿は第7回生存圏研究所公開講演会（2010年10月24日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所レーダー大気圏科学分野
E-mail: m-yamamo@rish.kyoto-u.ac.jp

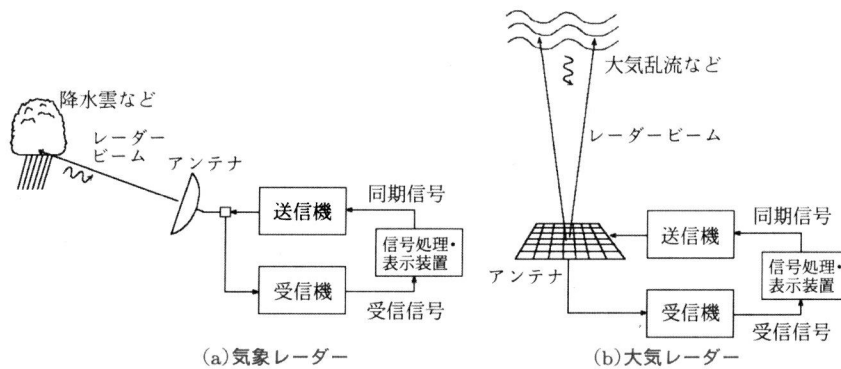


図1：気象レーダーと大気レーダーの基本概念図。

2.2 大型大気レーダー

地球の大気は地表から高度数 100 km の広い高度範囲に広がり、その高度毎に特有のさまざまな現象が発生します。成層圏である高度 15-35 km に発生するオゾンホールによる有害な紫外線の増加⁶⁾や、電離圏（高度 100 km 以上）に発生する電子密度擾乱に伴う GPS 衛星による位置測定精度の低下⁷⁾は、私たちの生活に大きく影響する代表的な例です。対流圏（高度約 10 km 以下）において積雲対流・地形（山岳など）などにより発生する大気の波（大気波動）のエネルギーは、大気の上方に伝搬し、成層圏・中間圏（高度約 10-100 km）における地球規模の大気循環や電離圏の電子密度擾乱に大きな影響を及ぼします⁸⁻¹⁰⁾。生存圏研究所では、高度 1 km から高度数 100 km の広い高度範囲にわたる大気計測を行うため、アンテナの直径約 100 m という大型の大気レーダーを開発し、さらに開発した大型大気レーダーを用いて大気現象を解明してきました。滋賀県甲賀市信楽町に設置された MU レーダーは、最新のデジタル信号処理技術を活用した性能向上により、観測開始から 25 年を経た今でも、世界最先端・最高性能の大気レーダーとして国内外の多くの研究者により活用されています¹¹⁾。MU レーダーには、対流圏の風速観測や電離層の電子密度観測などのさまざまな観測を行うため、ラジオの FM 放送（76-90 MHz）より少し低い周波数である 46.5 MHz（電波の波長で約 6.5 m）を使用しています。さらに、大気からの微弱な電波散乱を捉えるため、大型の放送局よりも大きい 1 メガワットという大きな送信出力を持っています。

3. 赤道大気レーダーで見る大気のすがた

3.1 なぜ、インドネシアなのか？

熱帯の気候と聞いて思い浮かぶイメージはなんでしょう。観光や仕事で熱帯を訪れたことのある多くの方は、燦燦と降り注ぐ太陽・温暖な気候・そして激しいわか雨（スコール）を想像されると思います。インドネシアとその周辺は海水面温度が世界で最も高く、海洋から豊富な水蒸気が供給されます。また、この地域は複雑な地形を持つ大小の島々が存在し、海陸や地形のコントラストにより発生する上昇気流が、高度 15 km 以上に到達する積乱雲を頻繁に発生させます。そのため、インドネシアは世界で最も降水量が多い地域であり¹²⁾、地球の水循環に大きな役割を果たしています。また、インドネシアでの強い上昇気流により成層圏に輸送される大気中の微量物質は、オゾン層の破壊や地球温暖化に大きく影響することが指摘されています¹³⁻¹⁴⁾。

インドネシアの活発な積乱雲活動に伴い発生する大気波動は、大気のエネルギーを成層圏・中間圏（高度約 10-100 km）に輸送し、準 2 年周期振動や半年周期振動といった、熱帯域特有の大気変動を発生させます¹⁵⁻¹⁶⁾。また、大気波動の一部は高度数 100 km 以上の大気最上層（電離圏）まで到達し、

熱帯域特有の電子密度擾乱であるプラズマバブルを引き起こします¹⁰⁾。

インドネシア及び付近における大気現象は日本における気象状況にも大きく影響します。例えば、インドネシア付近の熱帯域で発生し、その後北上して日本に到来する熱帯低気圧（台風）は、強風や大雨による大きな被害を時としてもたらしませんが、ダムのある山岳地帯に大雨を降らせることで水資源の確保に寄与するという側面を持ちます。また、エルニーニョ現象やラニーニャ現象は、日本から遠く離れた東太平洋の赤道付近で海水の温度が変化する現象です。しかし、エルニーニョ現象の影響は地球規模に及ぶため、エルニーニョ現象の発生時に日本は冷夏・暖冬の傾向があるなど、日本の天候にも大きな影響を及ぼします¹⁷⁾。エルニーニョ現象が発生するとインドネシアでは降水量が減るため、飢饉を引き起こす要因になります。そのため、エルニーニョ現象はインドネシアに住む人々にも非常に大きな関心事となっています。

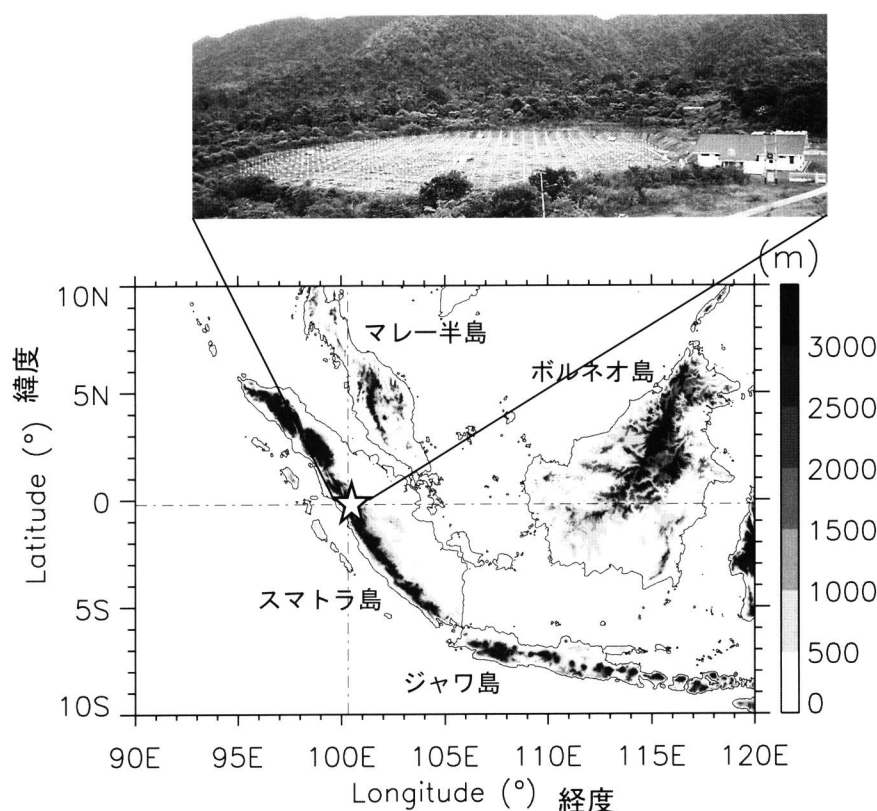


図2：赤道大気レーダーの設置位置（☆印）と外観。

3.2 赤道大気レーダー観測システム

インドネシアは、地球規模の大気現象の把握及び予測に非常に重要であるにもかかわらず、インドネシアにおける大気観測は十分実施されていません。日本では WINDAS による対流圏下層の風速の観測のほか、ラジオゾンデと呼ばれる気球搭載センサーを用いた温度・風速の定常的な観測が実施されています¹⁸⁾。しかし、インドネシアは東西 5,000 km にわたり広がる広大な国であるにもかかわらず、ラジオゾンデの定常観測点はわずか 12 点しかありません。そのため、大気の観測に基づくインドネシアの気象現象の解明は、未だに不十分です。特に、大気の下層から上層まで観測できる大型大気レーダーがないために、高度 1 km から高度数 100 km の広い高度範囲にわたる大気を詳しく観測することができませんでした。

赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar；略称 EAR）は、2001 年に生存圏研究所がイン

ドネシア・スマトラ島に設置した大型大気レーダーです¹⁹⁾ (図2)。赤道大気レーダーの運用は、生存圏研究所とインドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) により行われています。赤道大気レーダーにはフェーズドアレイアンテナ²⁰⁾が用いられています。図3に赤道大気レーダーのアンテナ素子配置を示します。直径 110 m の円形領域に 560 本のアンテナ素子が配置されており、それぞれのアンテナ素子に送受信機が取り付けられています。赤道大気レーダーでは、それぞれのアンテナ素子から放射される電波の進みや遅れ (位相) を制御することで、観測したい方向にレーダービームを向けます。フェーズドアレイアンテナを用いることにより、大気中の現象を素早く捉えることを目的に、最大で毎秒 5,000 回の早さで観測方向を変えることができます。アンテナ素子に取り付けられた送受信機はそれぞれ約 180 ワットの送信出力を持つため、560 本のアンテナ素子全体で 100 キロワットの電波の送信を行います。

赤道大気レーダーが設置された赤道大気観測所には、気象レーダー・レーザーレーダー (ライダー)・流星レーダー・電離圏観測レーダーなどの大気の下層から上層までを網羅する観測機器も併設されており、熱帯域で随一の充実した観測拠点となっています。

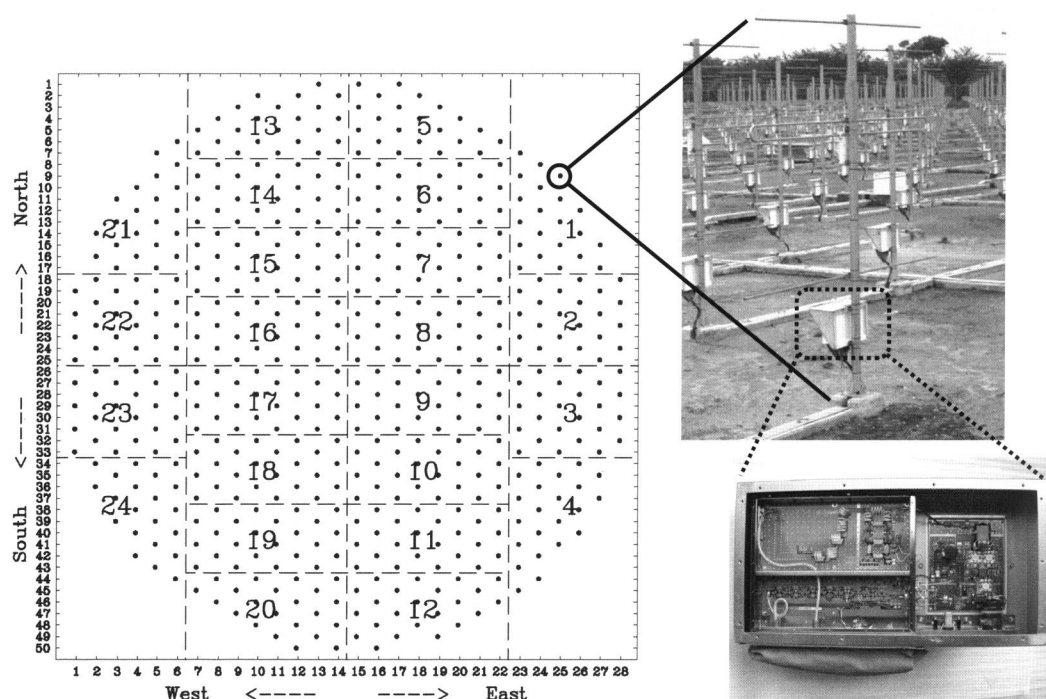


図3：赤道大気レーダーのアンテナ配置 (左)、アンテナ素子 (右上)、及び送受信機の内部 (右下)。

3.3 赤道大気レーダーで見る降水と大気不安定のすがた

赤道大気レーダーを用いた研究テーマは、高度範囲だけ見ても対流圏から電離圏に至るまで非常に幅広いのですが、ここでは、筆者が共同研究者と取り組んだいくつかの研究成果に絞って紹介します。

降水雲内の風速の鉛直成分 (鉛直風速) は、降水粒子の生成や成長を決定する重要な物理量であるにもかかわらず、その観測は困難であることが知られています。しかし、MU レーダーや赤道大気レーダーなどの 50 MHz 帯の周波数を用いる大型大気レーダーは、降水雲内の鉛直風速を鉛直数 100 m 以下、時間 1 分以下の優れた分解能で測定できます。図4は降水雲中の鉛直風速の非常に細かい変化を赤道大気レーダーで捉えた観測事例です。13 時半頃までは、活発な積雲内での乱れた鉛直風速の変動を捉えており、14 時半から 17 時半までは、高度 6-12 km において層状性降水雲の中に存在する緩

やかな上昇気流を捉えています。この観測結果は、降水粒子の成長メカニズムに新たな知見を与えるものです。2010 年の 12 月には、降水粒子の成長機構をさらに明らかにすることを目的に、赤道大気レーダー・気象レーダー・ライダー・ラジオゾンデの同時観測キャンペーンが実施されました。

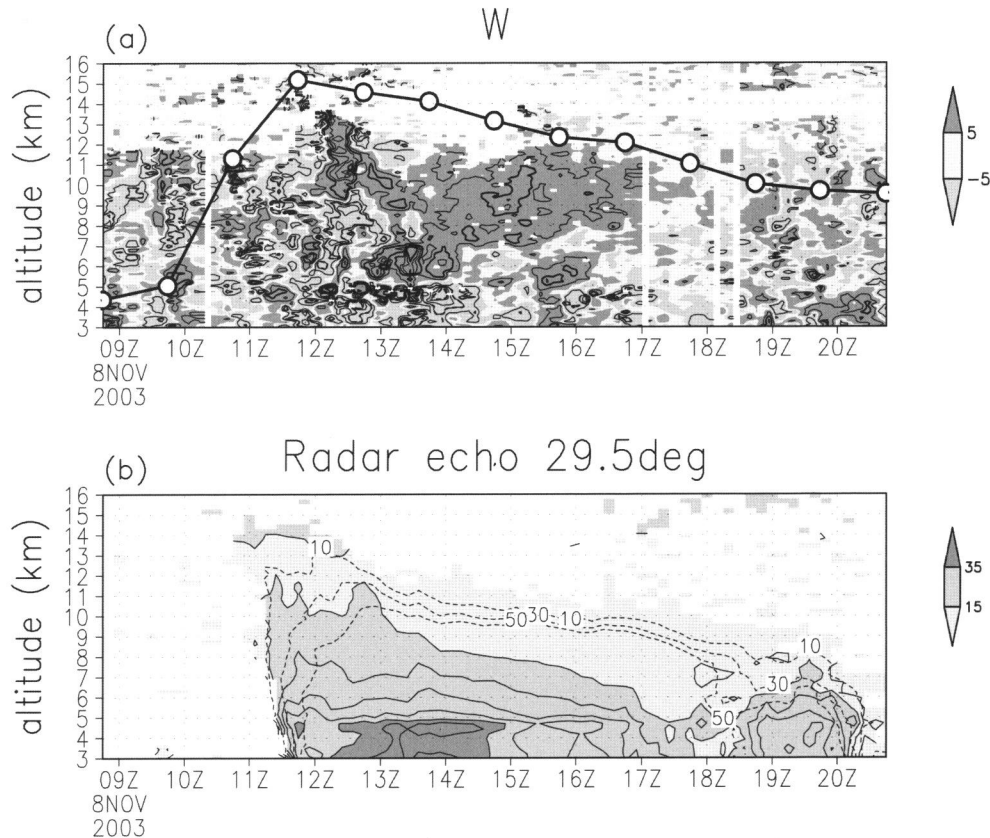


図 4 : (a) 赤道大気レーダーで観測された鉛直風速の時間高度変化。横軸は時間（単位は時）であり、縦軸は海拔高度（単位は km）である。正の鉛直風速は地面に対する上昇を、負の値は下降を示す。等値線は 20 cm/s 毎に示されている。(b) 気象レーダーで観測されたレーダー反射因子（降水粒子の大きさと数の指数）の時間高度変化。単位は dBZ で、値が大きいほど大きい降水粒子が多く存在することを示す。等値線は実線で 5 dB 毎に示されており、点線は % で示した赤道大気レーダー周辺における降水雲の存在頻度を示す。

大気中の不安定に伴い発生する大気混合は、大気中のエネルギーや物質の輸送を理解する鍵となります。水平風速の鉛直方向の変化が大きい領域では、ケルビン・ヘルムホルツ不安定（シアー不安定）と呼ばれる不安定現象により、大気の成層構造が崩されて大気混合が発生します。ケルビン・ヘルムホルツ不安定は、しばしば雲にその形状を見ることができます²¹⁾。図 5 に、ケルビン・ヘルムホルツ不安定に伴い発生した大気不安定波の観測結果を示します。受信エコー強度の時間高度変化より、大気不安定により発生した大気混合の鉛直スケールは 1 km 程度であることがわかります。さらに、ラジオゾンデなど他の観測データと組み合わせることで、発生した大気不安定波の水平スケールが 5-7 km 程度であることや、熱帯域の対流圏と成層圏の境界付近に存在する赤道ケルビン波と呼ばれる大規模な大気波動がこの高度で潰れる（砕波する）ことが、ケルビン・ヘルムホルツ不安定の発生要因になることも解明されました。

図 5 に示すような大気不安定波の微細構造を捉えるために、赤道大気レーダーでは、レンジイメージング（複数の周波数を送信し適応信号処理を行うことで、鉛直方向の分解能を 30 m 程度に高める

技術) を用いています。経済成長が著しく進むインドネシアでは、人間生活に影響を与える物質が大量に大気中に放出されており、大気中におけるこれらの物質の拡散や輸送機構を知ることが求められています。近年、大気レーダーの新しい観測手法として、レンジイメージングと同時にアンテナを分割した多チャンネル受信を行うことで、大気乱流の立体構造を捉える3次元イメージング技術の開発が進んでいます。近い将来、赤道大気レーダーに大気乱流の3次元イメージング測定機能が備えられることで、熱帯大気中における物質の拡散や輸送機構が解明されることが期待されています。

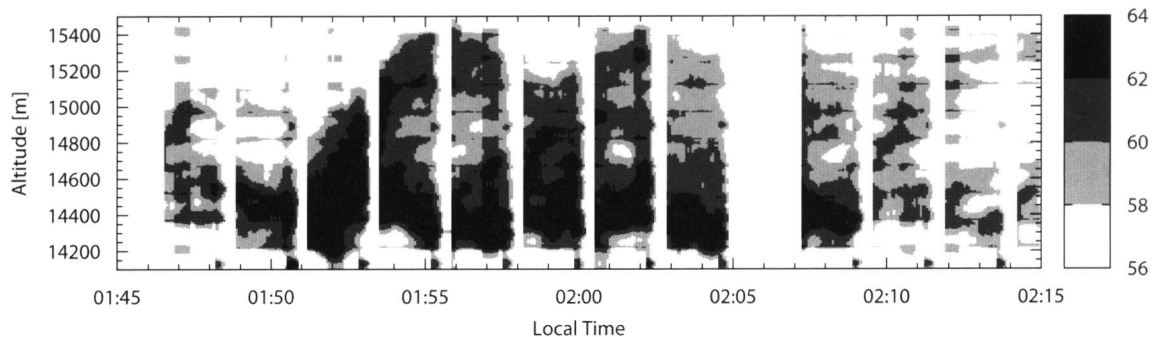


図5：赤道大気レーダーで捉えた、ケルビン・ヘルムホルツ不安定の発生に伴う受信エコー強度の時間高度変化。横軸は時間（単位は時：分）であり、縦軸は海拔高度（単位は m）である。濃淡で示す受信エコー強度の単位は dB である。

4. おわりに

本総説では、インターネットなどで簡単に入手できる文献を参照しつつ、大気を観測するレーダーシステムの概要と、赤道大気レーダーで見る大気のすがたを紹介しました。赤道大気レーダーに少しでも興味を持っていただければ、筆者にとっては望外の喜びです。

2001 年に運用を開始した赤道大気レーダーは、運用開始から 10 年を迎えました。この 10 年の間に地球シミュレータをはじめとする気象モデルの飛躍的発展²²⁾や、人工衛星搭載レーダーによる雲観測²³⁾など、熱帯の気象現象を知る他の手段がますます充実してきました。赤道大気レーダーは、大気下層である対流圏における降水や大気重力波、大気上層である電離圏におけるプラズマバブルなど、従来は未知であった赤道大気中の諸現象を次々と解明してきました。しかし、熱帯気象の現象解明とその予測に向けては、まだまだ取り組むべき課題があります。赤道大気レーダー及びその周辺の観測機器の発展・充実はもちろん、この 10 年に飛躍的に発展した気象モデルや観測手段とも連携しながら、さらに知恵を絞って熱帯気象における課題を解明していくことが必要となっています。赤道大気レーダーがこれから解明するべき課題に、筆者も日々わくわくしながら取り組んでいます。

参考文献

- 1) 象印マホービン株式会社, みまもりほっとライン—親の元気がポットでわかる—, <http://www.mimamori.net/>
- 2) 気象庁, 気象衛星ひまわりによる衛星画像, <http://www.jma.go.jp/jp/gms/>
- 3) 気象庁, レーダー・ナウキャスト(降水・雷・竜巻), <http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>
- 4) Wikipedia, レーダー, <http://ja.wikipedia.org/wiki/レーダー>
- 5) 気象庁, ウィンドプロファイラについて, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/windpro/kaisetsu.html>
- 6) 学研教育出版, オゾンホールとは何ですか? | 環境なぜなぜ 110 番 | 学研サイエンスキッズ, <http://kids.gakken.co.jp/kagaku/ecol10/answer/a0009.html>

- 7) 石井守, 超高層大気の乱れから電波を守る, NICT NEWS 2006 年 11 月号 (No.368),
<http://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/0611/research/index.html>
- 8) 小倉義光, 成層圏と中間圏内の大規模な運動, 一般気象学第 2 版, 東京大学出版会, 248-266, 1999.
- 9) 佐藤薫, 中緯度の研究,
<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kaoru/Research/mid-latitude-region/index.html>
- 10) 小川忠彦, 大気の波動が引き起こす赤道熱圏・電離圏の擾乱, STEL Newsletter, 48, 1-3.
<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/pub/ste-nl/newsletter48clr.pdf>
- 11) 京都大学生存圏研究所, MU レーダー, <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/>
- 12) 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター, GSMP 降水プロダクトの動画や図の例 (“GSMP_MWR(気候値, 1998-2006)”を参照), http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMP_crest/htmlf/sample_j.html
- 13) 国立環境研究所 環境情報メディア 環境展望台, アメリカ海洋大気庁、オゾン層破壊物質として N_2O が最大の要因と指摘, <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=2730>
- 14) 国立環境研究所 環境情報メディア 環境展望台, トリフルオロメタン、地球温暖化を加速,
<http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=3240>
- 15) 内藤陽子, 赤道準二年周期振動 (QBO) について,
<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/mete/J/benkyo/QBO/>
- 16) 廣田勇, 赤道大気, グローバル気象学, 東京大学出版会, 115-129, 1992.
- 17) 気象庁, エルニーニョ/ラニーニャ現象, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/index.html>
- 18) 気象庁, ラジオゾンデによる高層気象観測について,
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/upper/kaisetsu.html>
- 19) 京都大学生存圏研究所, 赤道大気レーダー, <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>
- 20) 深尾昌一郎, 浜津享助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング改訂第 2 版, 京都大学学術出版会, 245-256, 2009.
- 21) Wikipedia, ケルビン・ヘルムホルツ不安定性
<http://ja.wikipedia.org/wiki/ケルビン・ヘルムホルツ不安定性>
- 22) 海洋研究開発機構, 地球シミュレータセンター, <http://www.jamstec.go.jp/esc/index.html>
- 23) CloudSat, <http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>