

水循環解析

—データの作成と利用—*

谷田貝 亜紀代**

1. 水循環

水循環という言葉からイメージするものは、一般人はもとより研究分野によってかなり異なり、学際的な研究組織に所属する筆者は困惑することも多い。気象分野で主として扱う大気中の水は、海洋や地表水・地下水・雪氷水に比べて量は少ないが、固体、液体、気体と姿を変え、全球を相対的に早く巡り、その過程で放射収支や熱収支に影響を及ぼすと同時に、その一翼を担っている。陸域に雨や雪として降る水は、人類や生態系にとって疑いも無く重要で、その量や時空間変動性の把握と将来予測は、近年の温暖化や砂漠化などの環境問題と関係し極めて重要な課題である。

しかし、どれだけの水蒸気がどこから輸送され、収束して降水となり、蒸発して大気に戻るかといった大気水循環や降水分布の議論は、どれだけ高精度のデータが得られるかにかかっていると一言でも過言ではない。そこで、本稿は水循環に関わる広域のデータセットの特徴について記述しながら、この20年ほどの当該分野の進展を見ることにする。

2. 大気水収支と客観解析データ

2.1 大気水収支法

大陸・全球規模で、大気水循環の評価を行う際には、比湿と風の情報が必要となる。比湿と風速の積を鉛直積分することにより、鉛直積算水蒸気フラックスが計算される。この(水蒸気フラックス発散量)+(可降水量の時間変化)は、細かい項を無視すれば地表面を介してやりとりする水の量、すなわち(蒸発散量)-(降水量)となる。この「大気水収支法」により、半世紀ほど前から全球、大陸規模の水循環の評価研究はなされてきた^{1,2)}。このような収支の議論は、

ゾンデなどの観測データを直接用いても行えるが、客観解析データの出現により飛躍的に進んだと言える。

4次元同化や再解析については、専門家が解説^{3,4)}しているので、水循環解析の解説に必要な点のみ若干説明することと定める。

2.2 客観解析・再解析

数値予報を行う際に、その初期条件を得るために、観測値とモデルによる予報値を混合して、3次元的大気(+陸面、土壌状態)のデータを格子点上に解析する。この観測値の空間内挿と予報値との混合(客観解析)は、多くの場合6時間ごとに間欠的に行う。その初期値(「解析値」を初期化したもの)から6時間積分した「予報値」は、次の解析に観測値と共に用いられる。このように観測値を繰り返し取り込む4次元同化システムで、客観解析データは作成される。広義には客観解析データには「解析値」だけでなく「予報値」も含むことがある。

現業客観解析データには、4次元同化システム(モデルと観測値の解析)の変更のシグナルが含まれるため、気候変動の研究に使用するには限界があった。そこで、気候研究のために過去の観測データを同一のモデルで作成し直すことが提唱され⁵⁾、1990年代から「再解析」プロジェクトが実施された。現在「再解析データ」は大気水循環変動の長期変化を議論する際に必要不可欠なものとなっている。長期再解析はその開始時点での最も開発のすすんだシステムで行われることが多いが、数十年分実行する時間的制約から、現業のモデルより解像度を落とすことが多い。そこで、長期的な変動を問題にせず、より高い解像度のものが必要な場合などには、現業の客観解析データも用いられる。なお解像度の点では、日本の長期再解析JRA-25^{3,6)}の前に実行された、「GAME再解析⁷⁾」は、期間は短いが高解像度はJRA-25よりも高く、プロジェ

* Analysis of hydrological cycle —Developments and utilization of gridded data sets—.

** Akiyo YATAGAI, 総合地球環境学研究所。
akiyo@chikyu.ac.jp

© 2007 日本気象学会

† Global Energy and Water cycle Experiment/Asian Monsoon Experiment (GEWEX/GAME) プロジェクト特別観測期間の再解析。

クト期間の現地取得データとの比較を含む水循環解析にも用いられている。また、現業客観解析・再解析データは、メソモデル・地域気候モデルの境界条件として、より細かい時間空間スケールの水循環解析にも用いられている。

2.3 客観解析値の水循環解析への利用と注意点

これら客観解析データの出現により、データが格子点上に得られる利便性から、より簡易に水蒸気収束量計算、水循環過程が把握されるようになった⁸⁾。

ここで大気側の水循環を考える場合に、蒸発散量は重要な要素の1つである。精度のよい蒸発量の直接観測が行われている地点は少なく、また観測があっても陸面の不均一性のため広域を代表するとは言い切れない。そこで、広域の蒸発量を求める有効な方法は収支解析または数値モデルである。このため、大気水収支により計算された蒸発散量は、広域の水循環解析に広く用いられている。ただし、水収支式の残差として蒸発散量を見積もる際には、客観解析とグリッド降水量の双方の誤差が含まれることに注意が必要である。既存のグリッド降水データは山岳域の降水量を過少評価したものが多く、そのため、山岳の周辺や乾燥地域で大きな負の蒸発量という異常値を生み出すこともあった^{1,9)}。このように収支解析の点からも降水データは極めて重要である。降水データセットについて詳しくは3節で述べる。

これら客観解析とグリッド降水（水蒸気）データによる、水蒸気収束、降水、可降水量、蒸発などの組み合わせにより Recycling Ratio を定義し、水循環の変化を論じた研究がある^{10,11)}。ただし山地は、客観解析データやモデルによる水蒸気収束、降水の見積もりの信頼性が低いので、対象地域からはずされることもある¹⁰⁾。再解析データにより水循環解析を行う際の注意点については、拙著¹²⁾を参照されたい。

2.4 予報値の利用と注意点

前述のように「予報値」は、観測を基とする初期値（解析値）から、モデルを用いて予報した結果なので、モデルのバイアスを含み、観測値からは離れる。しかし、現時点ではまだ解析値としては得られないことの多い、蒸発量などの地表面フラックスや降水量などの物理量を算出しているため、予報値も水循環解析にしばしば用いられる。再解析では、いわゆる天気予報をする必要はないが、モニタリングなどのため24時間予報まで計算することがある。降水量の予報値は00, 12世界時からの12-24時間予報値を足して日降水量としたものを公開することもあり、利用にあたっては予報時間の情報に注意が必要である。

陸面モデルによる予報値は、かつては解析値を使った大気水収支に比べて信頼度が低かったが、近年では

モデルの改良が進んだので有用なこともある¹³⁾。ただし予報値は、陸面モデルの構成だけでなく、それに地表面被覆などの境界値パラメータや降水量や地上気温などの気象情報をどう与えているのかにもよるので、使用にあたってはそれらに注意する必要がある。

降水量に関しては、同化手法のひとつである4次元変分法がECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 現業や気象庁のメソ数値予報では現業化され、さまざまな観測データの同化が可能になった。日本ではレーダーアメダス解析雨量の同化による予報の改善が報告されている¹⁴⁾。将来、再解析に降水の同化を行うようになれば、水循環の見積もりが大きく改善するのではないかと期待している。

3. 広域降水・水蒸気データ

広域水循環の解析研究分野では、客観解析・再解析プロダクトが改良・公開されてきたこの20年間、それらと独立な降水や水蒸気観測データ、陸面境界条件（植生・雪氷など）とを相補的に用いて診断解析や収支解析を行ってきた。また、大気中の雲や水蒸気は放射・熱収支の一翼を担っており、この点から水循環過程の気候への影響を診断する研究分野でも、衛星資料を頻繁に用いてきた。そこでここでは、広域解析に使われる降水データ、水蒸気データについて述べる。

3.1 降水グリッドデータ

公開されたグリッド降水データとして古くはLegates and Willmott¹⁵⁾の雨量計に基づく気候値が知られる。後述するように雨量計に基づくデータセット作成の流れはあるが、1980年代から衛星資料から降水量を推定する試みが始まり、この20年間飛躍的な進歩を見せている。

衛星から降水量を推定する際に主に用いられるセンサは赤外とマイクロ波である。赤外からは、静止気象衛星の雲頂温度から降水量を求める¹⁶⁾。全球降水観測の点からは、1986年のマイクロ波（受動センサ）観測の開始は、大きな転機となっている。海上は、マイクロ波の射出で比較的精度がよく降水量は求められるが、陸上は、雲に含まれる氷の結晶によるマイクロ波の散乱から雨量を推定している。

やがて、陸域の雨量計、マイクロ波散乱、海上のマイクロ波射出、赤外、再解析データの予報値などを組み合わせ、GPCP (Global Precipitation Climatology Project)¹⁷⁾や、CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation)¹⁸⁾などの全球規模の2.5度月降水量グリッドデータが作成された。両者の大きな違いは、GPCPは高緯度地域の雨量計の捕捉率（蒸発、主として降雪時など風の影響）補正を行っているが、CMAPでは行っていない点である。

現在では、GPCP, CMAP データとも半月データセットが作成されているが、GPCP pentad といわれる半月データセットは、CMAP 半月データをもとに、GPCP 月降水量を分割することで作成されている¹⁹⁾。また、赤外観測を基本とする 1 度グリッド日降水量データセット GPCP1DD (GPCP 1degree daily)²⁰⁾も、GPCP 月降水量 (2.5 度格子) に量が合うように調整されている。ここでデータ作成者らが一番の課題としているのは、陸域の定量性の不確かさである²¹⁾。それらの陸域のデータの質を決めているものは、雨量計のデータであるが、GPCP, CMAP には速報値である GTS (Global Telecommunication System: 世界気象通信網) に含まれる全球約 6000 地点しか用いられていない。

1990 年代後半から人工衛星による地球観測が進み、衛星観測を基本とする高分解能の降水データは複数作成された。特に、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) は降雨観測を主目的とした衛星であり、低高度観測のため空間分解能が高い。また初の衛星搭載レーダー (能動型マイクロ波) PR が、降雨の鉛直プロファイルを海陸・昼夜を問わず計測した意義は大きいといえる。

静止気象衛星の雲・水蒸気画像や太陽非同期軌道衛星の TRMM は、降水・水循環の日変化の解明に大きな役割を果たした。複雑な地形や海岸線、島嶼の日変化を含む水循環過程の解明は、客観解析データには難しい点も多く、今後も衛星の活躍が期待される。

今世紀になって、雲風ベクトルとマイクロ波降水量推定値を組み合わせたプロダクト²²⁾など複数の衛星、複数のセンサを組み合わせた時間空間分解能の高いプロダクトも複数公開されている。それらの検証評価が重要な課題となり、IPWG^{††}は、Program to Evaluate High Resolution Precipitation Products (PE-HRPP) というプロジェクト活動を通じて高分解能降水プロダクトの評価を行っている。また、GEWEX の Radiation Panel の Assessment of Global Precipitation プロジェクトは、各種降水データの現状の診断レポートを公開している。(http://cics.umd.edu/~yin/GPCP/ASSESSMENT/assessment.html)。

このような特長の一方で、衛星に基づく降水データは、1) 基本的に遠隔測定なので地上で測定するより精度は低い、2) 長期的なデータがない、3) TRMM/PR は観測幅が狭く (約 200 km) サンプリングによるバイアスが大きい、といった制約がある。衛

星は広範囲をカバーし不可欠な観測手法であるが、雨量計が収集できる場所では雨量計による高分解能、高精度プロダクトが、長期データが必要な場合や、極値を扱う場合、衛星の検証を行う点から期待される。

3.2 雨量計に基づく降水グリッドデータ

雨量計による月降水量グリッドデータセットは複数作成公開されており^{23,24)}、陸域水循環の長期変化研究に用いられている。これらのデータ作成過程では、月降水量平年値と平年値からの偏差 (もしくは割合) に分けて空間内挿を行っている。これは、地形に依存する定常成分と、その月々の偏差である擾乱成分に分けることで、地形による影響を表現しようとしたもので、欠測時の空間パターンの内挿を気候値が助ける効果がある。その結果単に降水量を内挿するよりも結果は改善される²⁴⁾。

これら月降水量データセットは、多くは GHCN (Global Historical Climatology Network) 収集データ等、月降水量値として報告・編集したものから作成されている。その観測地点は GTS の日降水量地点よりも多く、また現地の気象担当者が月降水値を計算しているため、品質チェック (QC) の点で信頼ができる。(GTS は 0 mm と欠測の区別がつかない、単位が間違っているなどの問題を含むことがある)。

前述のように観測地点の気候値を使った内挿手法のため、データが少ない時でも空間分布の特徴は気候値が反映される。しかしこの方法では、雨量計観測がない山岳部や複雑地形域の降雨分布の補正は出来ない。そこで非常に精度のよい気候値を作成することが、現在重要な課題となっている。日本の気象庁で作成されるメッシュ気候値²⁵⁾や、米国で作成される PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model)²⁶⁾という気候値は、標高や斜面など地形的な特徴と、降水量の統計的な関係を考慮して月降水量気候値を作成しており、雨量計に基づくデータセットや現業目的の地形性降水量の補正に用いられている。

日単位の降水量観測データは、月降水量値ほどは整備、公開されていないため、グリッドデータセットは地域的なものに限られてきた。アジアでは最近東アジア²¹⁾とインド²⁷⁾の雨量計に基づく日降水量グリッドデータが公開されている。これらも、月降水量と同様に気候値からの偏差もしくは割合を内挿している。前者²¹⁾では、PRISM を気候値の補正に用いることにより、中国・モンゴルについては地形効果を表現している。

雨量計に基づくデータセットは、空間代表性の問題を含んでおり、また現在のところ以下の理由により、真値より過少評価している傾向が強いとされる。1)

^{††} International Precipitation Working Group, WMO の CGMS (Coordination Group for Meteorological Satellites) の一部として 2001 年に組織されたもの。

山岳地域に地点が少ない, 2) 雨量計の捕捉率, 3) 欠測表記の問題 (無降雨と欠測の区別がつかない, GTSなどに欠測を0 mmと誤報する場合), GPCP, CMAPなどのmerged analysisの陸域もGTSに依存するため同様の問題を含み, それらが河川流量等と比較して過少評価であることはすでに報告^{11,28)}されている。

3.3 水蒸気データ

海上の可降水量はマイクロ波リモートセンシングにより, かなり精度よく計算される。これに対し陸域は, ゾンデがあればその鉛直積算可降水量が信頼でき, ポイントではGPSを使った計測なども行われている。リサイクリングを含む全球水循環の解析⁹⁾には, NVAP (The NASA Water Vapor Project)²⁹⁾とよばれるゾンデとマイクロ波と赤外による統合グリッドデータセットが用いられてきた。

水蒸気プロファイルは, 対流の立ち方が問題となる熱帯気象分野や, 水蒸気の上部対流圏・下部成層圏の運搬プロセスを研究する分野では, 大変重要な意味を持つため, 衛星とモデルを組み合わせて水蒸気の鉛直プロファイルを求めようという試みがなされてきている。またUpper Tropospheric Humidity (UTH) がTOVS (TIROS (Television InfraRed Operational Satellite) Operational Vertical Sounder)などの赤外面像や静止気象衛星の赤外 (水蒸気) チャネルから計算され, 対流圏上層部の水蒸気の流れの理解に用いられたことがあるが, 下部成層圏や上部対流圏の水蒸気は衛星から直下を観測するのではなく, 掩蔽法で大気上層をかすめて観測したものも, 用いられるようになった。いずれにせよ, 上部対流圏や下部成層圏の水蒸気は, 衛星を含む観測網の整備が期待される。

近年気象分野でも, 水の同位体 (酸素 $\delta^{18}\text{O}$ と水素 δD) が用いられるようになり, 降水の起源や海から蒸発した水の陸域での再蒸発過程をラグランジュ的に解析する研究も増えてきている。気象学的には, 氷河のアイスコアなど降雪であったものを含む降水だけでなく, 水蒸気同位体が計測されるようになったことが, 水循環の素過程から全球規模の流れの理解に大きな役割を果たすと考えている。この点で, 衛星から水素同位体 (δD) が計測されるようになり³⁰⁾, 降水からの蒸発や陸域の植生の水循環への影響も衛星から評価できるようになってきているので, 今後この分野の発展と伝統的な水収支の議論との双方の視点から全球水循環の理解が深まることが期待される。

4. おわりに

地球環境問題と関係して, 温暖化による水循環の変化³¹⁾, 極端な降水現象の評価, 流域の水収支に与える

人間活動の影響評価が近年重要な課題となり, 定量性にすぐれたデータが必要とされている。「日本はデータセットを作る研究が少ないですね, どうしてですか?」と言われ当惑した国際会議³²⁾から10年後の今, 筆者は日降水量グリッドデータ作成に携わっており (<http://www.chikyu.ac.jp/precip/index.html>), ここでは降水量データについて多少詳しく記述した。ここまでの水循環の議論が可能になったのは, 各国気象機関の観測, データ収集, QC, 開発に関わられた方のお陰であり, 謝意を表したい。

参考文献

- 1) Starr, V. P. and J. P. Peixoto, 1958 : *Tellus*, **10**, 189-194.
- 2) Peixoto, J. P. and A. H. Oort, 1983 : *Variations of the Global Water Budget*, Reidel, 5-56.
- 3) 大野木和敏, 2007 : *天気*, **54**, 773-776.
- 4) 三好健正, 本田有機, 2007 : *天気*, **54**, 287-290.
- 5) Bengtsson, L. and J. Shukla, 1988 : *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **69**, 1130-1143.
- 6) Onogi, K. *et al.*, 2007 : *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- 7) 谷田貝亜紀代ほか, 2000 : *水文・水資源学会誌*, **13**, 486-495.
- 8) Trenberth, K. and C. J. Guillemot, 1995 : *J. Climate*, **8**, 2255-2272.
- 9) Yatagai, A., 2003 : *Hydrol. Process.*, **17**, 2871-2884.
- 10) Trenberth, K. 1999 : *Climatic Change*, **42**, 327-339.
- 11) Trenberth, K. E. *et al.*, 2007 : *J. Hydrometeor.*, **8**, 758-769.
- 12) 谷田貝亜紀代, 2002 : *水文・水資源学会誌*, **15**, 323-325.
- 13) Betts, A. *et al.*, 1998 : *J. Geophys. Res.*, **103**, 23079-23085.
- 14) 斉藤和雄, 牧原康隆, 2007 : *天気*, **54**, 622-631.
- 15) Legates, D. R. and C. J. Willmott, 1990 : *Int. J. Climatol.*, **10**, 111-127.
- 16) Arkin, P. A. and B. N. Meisner, 1987 : *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 51-74.
- 17) Huffman, G. J. *et al.*, 1997 : *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 5-20.
- 18) Xie, P. and P. Arkin, 1997 : *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.
- 19) Xie, P. *et al.*, 2003 : *J. Climate*, **16**, 2197-2214.
- 20) Huffman, G. J. *et al.*, 2001 : *J. Hydrometeor.*, **2**, 36-50.
- 21) Xie, P. *et al.*, 2007 : *J. Hydrometeor.*, **8**, 607-626.
- 22) Joyce, R. J. *et al.*, 2004 : *J. Hydrometeor.*, **5**, 487-503.
- 23) Mitchell, T. D. and P. D. Jones, 2005 : *Int. J. Climatol.*, **25**, 693-712.
- 24) Chen, M. *et al.*, 2002 : *J. Hydrometeor.*, **3**, 249-266.
- 25) 気象庁, 2000 : *気象庁メッシュ気候値2000解説*, 70 pp.
- 26) Daly, C. *et al.*, 1994 : *J. Appl. Meteor.*, **33**, 140-158.
- 27) Rajeevan, M. *et al.*, 2006 : *Current Science*, **91**, 296-306.
- 28) Fekete, B. M. *et al.*, 2004 : *J. Climate*, **17**, 294-304.
- 29) Randel, D. L. *et al.*, 1996 : *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1233-1246.
- 30) Worden, J. R. *et al.*, 2006 : *J. Geophys. Res.*, **111**, D16309.
- 31) Allen, M. R. and W. J. Ingram, 2002 : *Nature*, **419**, 224-232.
- 32) 安成哲三ほか, 1997 : *天気*, **44**, 181-188.