

火星大気データを地球大気解析ツールで解析できるようにするためのデータ整備 —MRO/MCS データの netCDF 化と GrADS による可視化—

野口克行*¹, 林寛生*²

Conversion of the MRO/MCS data into netCDF format and gridding of them for analysis
and visualization by the use of GrADS

by

Katsuyuki Noguchi*¹ and Hiroo Hayashi*²

Abstract

This paper presents a method to process data obtained by Mars Climate Sounder (MCS) onboard Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). The method includes two steps; the first step is the format conversion of original text data into netCDF (Network Common Data Form), and the second step is gridding of the data to be available for use by Grid Analysis and Display System (GrADS). The method proposed here will contribute to multidisciplinary use and/or educational use of such data for the Martian atmospheric science.

Keywords: netCDF, GrADS, Mars, atmospheric science, visualization

概要

本論文では、Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) 搭載の Mars Climate Sounder (MCS) による観測データの利用を広めるために行った環境整備について紹介する。元データのデータ量が膨大であり、データ構造もそのままでは解析等において取り扱いにくいいため、まずデータフォーマットを Network Common Data Form (netCDF) に変換することで、データの可搬性と可読性を高めた。次に、地球の大気・海洋科学分野で広く使われている Grid Analysis and Display System (GrADS) で扱えるようにデータの格子化を行い、解析と可視化が容易にできるようにした。このようにデータの取り扱いにおける敷居の高さを下げることによって、他分野の研究者の参入や学生教育におけるデータ利用への貢献が期待できる。

キーワード: netCDF, GrADS, 火星, 大気科学, 可視化

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-007/0010

* 平成 28 年 11 月 24 日受付 (Received November 24, 2016)

¹ 奈良女子大学大学院自然科学系 (Faculty of Science, Nara Women's University)

² 富士通エフ・アイ・ピー株式会社 (FUJITSU FIP CORPORATION)

1. はじめに

近年、日本において火星探査の機運が高まっている。日本が1998年に打ち上げた火星探査機「のぞみ」¹⁾は残念ながら火星周回軌道への投入には成功しなかったものの、その後複数の火星探査計画の検討が精力的に行われている^{2) 3) 4)}。火星探査機の本体や搭載機器の開発を進めることはもちろん重要だが、すでに諸外国によって複数の探査機が火星に送り込まれている以上、それらの探査機によって得られている既存データの解析を進めることで次期探査の目標とするサイエンスを深化させていくことも重要である。特に、米国によって取得された観測データは積極的に公開されており、誰でも容易に入手してデータ解析研究を進めることが可能である。

本論文で着目するデータは、2006年以来観測を続けている米国の火星探査機Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) に搭載された赤外放射計Mars Climate Sounder (MCS)⁵⁾の観測データである。MCSで取得された火星大気の大気赤外スペクトルから、気温や水蒸気量、氷量などが導出されている⁶⁾。MCSデータに含まれる火星大気の物理量は、地球の大気科学における手法を応用して解析ができるものも多い。そのため、データ解析環境さえ整えば、地球の大気科学研究者による利用の機会を増やすことも可能だと思われるが、現在までに蓄積されたMCSデータの観測高度プロファイル（観測物理量の高度分布）の数は数百万本と膨大な上、公開されているデータのディレクトリ及びファイル内の構造も扱いやすいとは言えない。データはいわゆるテキスト形式³⁾であるため、データの中身をテキストエディタ等ですぐに見ることのできる利点はあるものの、可搬性やデータ解析・可視化における取り扱い易さについては改善の余地があると思われる。筆者の研究グループは当初、このデータをテキスト形式のまま個々の高度プロファイルに分離することでデータ解析に使用していたが、ファイル数が膨大なためにファイルの検索効率やコンピュータ間の可搬性が悪く、また可視化等の処理を行う際にもデータの読み書きに時間が掛かり、取り扱いに困難を感じていた。火星を含む惑星大気観測では、通常、観測装置が受信した信号データを物理量に変換したデータは観測ミッションより提供されるが、幅広いサイエンス研究や教育に役立つような加工データ（例えば、全球格子化データ）は個々の研究者が作成しているのが現状である。また、可視化や解析に関わるツールは必ずしも観測ミッション側から提供されるとは限らず、MCSデータに関しても観測ミッション側からそのようなツールは提供されていない。

本論文では、このMCSデータの取り扱いを少しでも容易にし、広く研究や教育で利用できるようにするため、二つの手法を提案する。まず、地球の大気・海洋科学分野で広く使われているNetwork Common Data Form (netCDF)⁷⁾というバイナリ形式に変換する。テキスト形式と比べて、バイナリ形式にすると読み書きに必要な計算機環境の整備（ライ

³⁾ NASA/PDS 及び ESA (欧州宇宙機関) の惑星科学データ部門 (PSA) における大気科学者は、大気データの高度プロファイルを主にテキスト形式で扱っていたため、現行データにもテキスト形式が採用された。

MROM_2xxxディレクトリ(xxx=001~110)

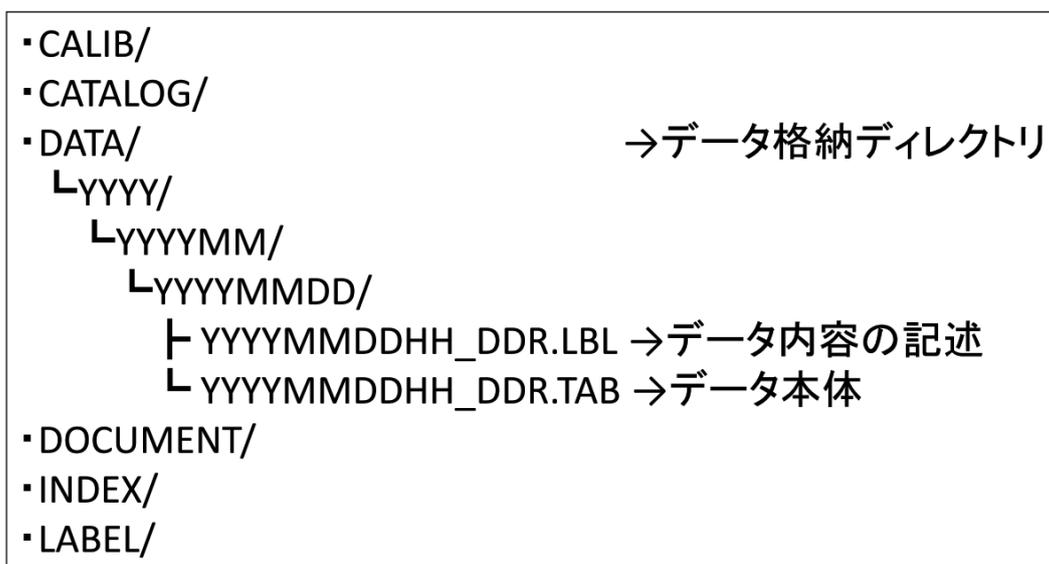


図1 公開されているMCSデータのディレクトリ構造。拡張子LBLファイル、TABファイルともにテキスト形式である。

ブラリ等のインストール)が必要になるものの、そのデメリット以上にデータの可搬性や解析における取り扱いやすさというメリットが得られる。netCDFの使用は無償であることもメリットとして挙げられる。次に、MCSデータを格子化して、解析・可視化ツールの一つであるGrid Analysis and Display System (GrADS)⁸⁾による処理を可能にする。GrADSもやはり地球の大気・海洋科学分野においてよく用いられている無償のソフトウェアである。他分野も含めてユーザ数が多く、インストールが簡単でインタラクティブに扱えるので初心者でも使いやすいといった利点も挙げられる。GrADSを火星の観測データに応用するにあたって問題となったのは、時刻系の違いである。火星の時刻系としては、地球と同様に火星上での1日を基準としたものの他に、公転軌道上における太陽との位置関係を基準としたものがよく用いられている。GrADSはこのような時刻系は想定していないため、新たに処理コマンドを作成するなどしてユーザがGrADS上でMCSデータを解析・可視化しやすくする工夫を行った。

2. 使用した元データ

本論文で用いるデータは、米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration : NASA) のPlanetary Data System (PDS) のWebサイト^{*4}において公開

^{*4} http://pds-atmospheres.nmsu.edu/data_and_services/atmospheres_data/Mars/Mars.html (2016年8月19日閲覧)

されているMRO MCS Derived Data Records (DDR) Version 4である。このデータのディレクトリ構造を図 1 に示す。地球時間で 1 ヶ月毎にディレクトリが分かれており、ディレクトリ名MROM_2xxxのxxxは 2006 年 9 月からの通算月を表す（つまり、2006 年 9 月は 001 である）。この 1 ヶ月毎のディレクトリはさらに日毎のディレクトリに分かれており、4 時間毎にひとまとまりのファイルが格納されている。データファイルには、データ本体が入っているファイル（YYYYMMDDHH.TAB）と、データ内容を記述するファイル（YYYYMMDDHH.LBL）の 2 種類が存在する。ただし、YYYYは西暦年、MMは月、DDは日、HHは時間を表す。ファイルは 4 時間毎であるが、欠測等で提供されていないプロファイルもあるため、1 つのTABファイルに含まれる高度プロファイル数は不定である。

ヘッダ行に続く観測物理量の高度分布としては、指定された各気圧面における気温、ダスト量、水蒸気量、水氷雲量、ドライアイス雲量の各量とそれらの誤差、及び周縁 (limb) 観測のタンジェントポイントの高度、緯度、経度が格納されている。なお、ドライアイス雲量に関しては、現時点 (Ver.4) ではまだデータの検証が十分ではないとのことで欠損値 (-9999) が与えられている。

3. データ整備

3.1 データの netCDF 化

ここでは、2 章で述べたMCSデータのnetCDF形式への変換について説明を行う。netCDFは、OSやプラットフォームに依存することなく多次元データの読み書きが可能な自己記述型のデータ形式で、地球の大気・海洋科学分野で広く使われている。netCDFを扱うために必要なライブラリやツールは、開発元である米国の University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) の unidata プロジェクトの Web サイト^{*5}から取得できる。

あるデータを netCDF 化するには、最低限 1 つの次元を持たせる必要がある。MCS データには既に高度と言う次元が含まれているので、これをそのまま netCDF の 1 つ目の次元にすればよい。MCS データの気圧面はどの高度プロファイルでも同じであるため、気圧を軸にとって 1 つ目の次元とし、各物理量を変数として格納することとした。これらのデータを取得時刻の順に並べることで 2 つ目の次元とし、2 次元の netCDF データとして整備した。なお、netCDF 化するファイルの単位は、上述の MROM_2xxx ディレクトリ単位（つまり 1 ヶ月毎）とした。

このデータセットは、元のデータに平均等の操作を加えることなく単純に netCDF 化しているため、元データに含まれる情報を損なうことなく可読性・可搬性のみを向上させたものである。読み出し速度については、ファイルの単純な読み込みであれば 100 倍程度向上した。なお、圧縮性についてはそれほど劇的な向上はなく、テキストデータ (1 火星年当たり 12GB 弱) に対して netCDF データ (1 火星年当たり 9GB 弱) のサイズは 7 割程度で

^{*5} <http://www.unidata.ucar.edu/> (2016 年 8 月 19 日閲覧)

ある。しかし、昨今は市販の安価なハードディスクでも容量が数 TB 程度あり、圧縮の必要性は強くないと言える。

3.2 GrADS 利用のためのデータ格子化

前述したように、本論文ではMCSデータの解析や可視化を容易にするため、GrADSの利用を提案する。GrADSは4次元格子（経度、緯度、鉛直層、時間）上に配置された地球科学データに対するアクセス、操作、表示のための対話型ツールである。GrADSではnetCDFを含む様々な格納形式のデータファイルを扱うことができる。GrADSのソフトウェア本体及び関連するドキュメント等は、開発元のWebサイト^{*6}から配布されている。

図1で示されたMCSデータは、高度プロファイルが取得順に格納されているだけの状態である。このデータを緯度・経度・時間方向にも格子化して4次元方向に自由に切り出せるようにすることが最終的な目標である。GrADSで利用するためには、データを4次元格子点に落とす作業（=格子化）が必要だからである。空間方向の次元のうち、鉛直方向はオリジナルのプロファイルデータが既に固定された気圧面で提供されているため、そのまま鉛直方向の次元として用いることとし、水平方向である経度と緯度に関してはそれぞれ5度ずつの間隔で平均を取ることで格子化した。

時間方向についての格子化は、少し工夫が必要である。火星での時刻の単位としては、Mars Year (MY), Solar Longitude (Ls), Local True Solar Longitude (LTST) がある。MYは火星における年を表し、公転周期がMYの1年に対応する（これは、地球時間で約2年に相当する）。MY1は1955年4月に始まると定義されており、2015年6月から2017年5月まではMY33となる。Lsは火星の季節を表す。これは、火星の公転軌道上での位置を表すもので、北半球の春分点を0度（または360度）とし、夏至を90度、秋分を180度、冬至を270度とするものである。火星の公転軌道は楕円であるため、公転速度は一定ではない。それ故、1度あたりのLsに含まれる実際の時間の長さも一定ではない。LTSTは、その場所での太陽の南中時刻を正午12時とする局所時刻系である。火星の1日は地球とほぼ同じ（約24時間40分）であるため、火星の1日を24等分した長さが火星での1時間とされる。ただし、MCSデータにおいては、LTSTを0から1までの間に正規化した値が格納されている。ここでは、Lsを時間方向の次元に取ることとし、5度ごとに平均を取って格子化した。一方、MYについては各火星年に対して、また、LTSTについては火星における昼（0.375~0.875）と夜（0.875~1.0または0.0~0.375）に対してファイルを分けることとした。このように格子化したMCSデータは、第3章で述べたオリジナルの高度プロファイルデータの整理と同様に、netCDF形式でファイルに格納した^{*7}。なお、今回は便宜上、上

^{*6} <http://cola.gmu.edu/grads/> (2016年8月19日閲覧)

^{*7} MY28-MY33の6火星年の各年については、昼と夜に対してそれぞれデータファイルを作成するものとして、計12個作成した（本論文執筆時点）。ただし、MY28については観測開始以前のLsに対して、MY33についてはまだデータが提供されていないLsに対して、ともに欠損値を挿入した。

述のような緯度・経度・Lsおよび時刻のグリッド幅を設定したが、ユーザが目的に応じて自由に変更できるようなルーチンを研究室内部にて整備済みである。

本来、GrADSは地球の大気・海洋科学分野のデータを扱うソフトウェアであるため、各次元については地球における空間・時間であることが想定されている。それ故、上述のように火星の空間・時間を扱うMCSデータを4次元格子化してnetCDF形式で格納しても、そのままではGrADSで扱うことができない。空間方向の次元（経度、緯度、気圧面）は地球における同等の次元として認識されるが、時間方向の次元として採用したLs（角度の単位で0~360度の範囲の値を取る）は地球における「時間」としては認識されないためである。そこで、データ記述ファイル（data-descriptor）^{*8}を導入し、Lsを強制的に地球時間へ対応させるようにした。具体的には、データ記述ファイルの中でLs=0度に対応する日時と格子間隔（Lsで5度）に相当する時間間隔（日数）を記述した。このように、データ記述ファイルを介してデータファイルを開く^{*9}ことで、上述の形で格子化したMCSデータをGrADSによって扱うことができるようになった。

なお、GrADSに元々備わっている機能だけではLsの値を指定したり設定されているLsの値を確認したりすることはできないため、これを実現するためのコマンド（GrADSスクリプト）を別途用意した。具体的には、「lsget」というコマンドによって現在設定されているLsの値を調べ、「lsset」というコマンドによってLsの値を指定する。ただし、Lsの間隔は地球における時間間隔と線形には対応しないので、Lsに対応する本来の地球時間とGrADSが表示する見かけ上の時間情報は一致しないという問題は残っている。

このように整備したMCSデータを実際にGrADSで可視化した例について、図2に示す。ここでは、まず、xdfopen コマンドによってデータ記述ファイルを開き、経度・緯度・気圧・Lsの範囲をそれぞれ設定し、display コマンドによって気温変数(t)をプロットしている。

^{*8} 通常は拡張子がctlで、CTLファイルとも呼ばれる。

^{*9} CFもしくはCOARDS規約に従った記述をされたnetCDFファイルをGrADSで開くにはsdfopenというコマンドを使うが、ここではデータ記述ファイルを介してnetCDFファイルを開くためxdfopenというコマンドを用いる。

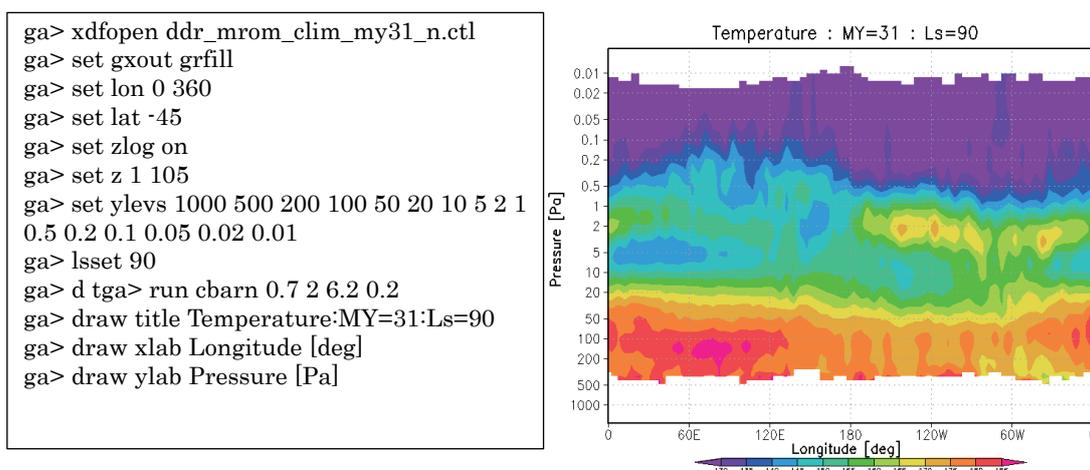


図 2 GrADS のコマンド例 (左) とそのコマンドで作成された図 (右). コマンド例において, 「ga>」は GrADS のプロンプトを表す. 図は, MY31, 南緯 45 度, Ls=90 度における気温の経度・気圧断面図である. 東経 50–100 度にかけて存在するヘラス盆地の上空 200–100 Pa 付近に気温の極大が現れている.

4. まとめ

米国 NASA の PDS で公開されている火星探査機 MRO 搭載の MCS 観測データの取り扱いを容易にするために, 二つの手法を提案した. まず, 配布されているテキスト形式のデータを netCDF 形式に変換して整理しなおすことで, データの可搬性と可読性を高めた. 次に, データを格子化して地球の大気・海洋科学分野で広く使われる GrADS で扱えるようにすることで, データの解析と可視化を容易にした.

本論文で解説をした MCS データ (netCDF 化及び格子化したデータ) は, 著者の所属する大学の Web サーバー^{*10}において一般に公開している. また, 学内における学生教育での利用も検討している. 今後, データ利用者からの意見も参考にして更なる改良を進めて行くとともに, 他の火星大気データについても同様な整備を実施することを目指したい. 本論文で紹介したような手法で整備したデータが他分野の研究者や学生にも広く使われることで, 火星大気研究の裾野が広がることを期待している.

なお, 本研究で行った第 1 段階の netCDF 化は情報量を失わない (可逆) ため, 本来はデータ配布元で実施されるべき内容かもしれない. 実際, PDS 内部の研究者からも将来的にはユーザの希望に応じたデータ形式の変換ツールを開発・配布する可能性が示されている.

^{*10} http://www.e.ics.nara-wu.ac.jp/~nogu/work/mars/database/mro_mcs/index.html (2016 年 8 月 19 日閲覧)

謝辞

MCS データは, NASA の PDS より配布されているものを使用させていただいた. また, MCS データの使用に際し, NASA Jet Propulsion Laboratory の Armin Kleinboehl 博士からは貴重なアドバイスをいただいた.

参考文献

- 1) Yamamoto, T. and K. Tsuruda, The PLANET-B mission, *Earth Planets Space*, 50, 175-181, 1998.
- 2) 佐藤毅彦, 久保田孝, 宮本英昭, 岡田達明, 松岡彩子, 今村剛, 尾川順子, 川口淳一郎, MELOS ワーキンググループ, MELOS 複合探査の概要と科学目標「火星はなぜ赤いのか?」, *日本惑星科学会誌「遊・星・人」* 18(2), 66-68, 2009.
- 3) 藤田和央, 佐藤毅彦, 火星着陸探査技術実証 WG, 火星着陸探査技術実証ミッション計画, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1H09, 2014 年 11 月 12 日~14 日, 長崎ブリックホール.
- 4) 藤本正樹, MMX 計画, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, PCG10-16, 2016 年 5 月 22~26 日, 幕張メッセ.
- 5) McCleese, D. J., et al., Mars Climate Sounder: An investigation of thermal and water vapor structure, dust and condensate distributions in the atmosphere, and energy balance of the polar regions, *J. Geophys. Res.*, 112, E05S06, 2007.
- 6) Kleinboehl, A., et al., Mars Climate Sounder limb profile retrieval of atmospheric temperature, pressure, and dust and water ice opacity, *J. Geophys. Res.*, 114, E10006, 2009.
- 7) Rew, R. K., G. P. Davis, S. Emmerson, and H. Davies, *NetCDF User's Guide for C, An Interface for Data Access, Version 3*, 1997.
- 8) Doty, B. and J.L. Kinter III, The Grid Analysis and Display System (GrADS): A practical tool for earth science visualization. Eighth International Conference on Interactive Information and Procession Systems, Atlanta, Georgia, 5-10 January, 1992.