



上空で測った数値の意味を探る

```

31,12,59797.122,839.88,49.96,41.97,14.81,20.29
20,59837.122,3,403.14,.1,.75923,150.1,200.2,839.93,110.27,36.416,154.19,204.8,-80.5,33999,-36.84,5450,694.5
20,59897.121,3,403.16,.09,.76057,150.1,200.1,839.91,110.44,36.381,154.43,205.3,-79.9,34000,-37.5450,695
20,59958.121,3,403.12,.095,.75477,150.2,200.1,839.94,110.46,36.346,154.66,205.8,-79.7,33997,-36.89,5450,693.8
20,60017.121,3,403.16,.085,.75593,150.2,200.2,840,110.48,36.326,154.9,202.4,-80.1,33998,-36.97,5450,691.1
20,60077.121,3,403.14,.128,.75878,150.1,200.2,839.88,110.29,36.31,155.14,200.5,-80.2,34009,-37.06,5450,689.4
20,60137.121,3,403.03,.139,.75878,150.1,200.1,839.96,110.29,36.294,155.37,201.1,-80.1,33992,-37.5450,689.1
20,60197.121,3,403.12,.106,.76012,150.1,200.2,839.95,110.35,36.279,155.61,200.4,-80.34003,-37.13,5450,686.3
20,60257.121,3,403.11,.106,.75388,150.1,200.2,839.96,110.42,36.277,155.84,200.2,-80.1,34004,-37.42,5450,684.8
20,60297.121,1,411.67,.099,.75744,150.1,167.7,839.99,110.55,36.277,156.09,199.8,-80.1,33975,-37.5,5450,684
20,60307.121,1,411.71,.095,.77886,150.1,167.7,839.98,110.37,36.277,156.14,198,-80.1,33984,-37.5,5450,682.3
20,60347.121,2,361.66,.047,.78153,150.3,175.5,839.81,110.56,36.277,156.29,198,-80.8,34018,-37.5,5450,681.8
20,60357.121,2,361.50,.109,.76547,150.1,175.6,839.83,110.54,36.277,156.33,198,-80.8,34012,-37.5,5450,682
:

```

唐突ですが、これ(↑)は何でしょう？ 一見、意味もなく並んでいるだけのたくさんの数字たち。しかし、一つ一つの行(ぎょう)、一つ一つの桁にそれぞれちゃんと意味があります。そして、これらの数字たちは、人の手(と機械)によって舞台の上の早着替えのように姿を変え、やがて目に見える形で、自らが持つ意味を表現するのです。その舞台を見てみましょう。

機械が自ら集めたデータ

連続観測方式(CME)では、機内に搭載された装置が、飛行している間、CO₂濃度をその場(上空)で自動的に測り続けます。ひと仕事終えて成田(または羽田)空港に戻ってきた観測装置は、貨物室の壁の中から取り出されるとすぐにジャムコ社で各種の点検を受けます。その際、観測データは電子ファイルの形で専用サーバにダウンロードされます。「ダウンロード完了しました」という連絡がジャムコ社から入ると、研究チームが作業を開始します。データを確認し、形を整えて「使えるもの」に変えていくのです。その作業の現場を、気象研究所の澤庸介(さわ ようすけ)さんの案内で見学させていただきました。

受け取ったままの状態の、いわゆる「生(なま)データ」。そこには、上の例のように数字の羅列が延々と続いています。映画「マトリックス」を思い出してしまいます。一つのファイルだけで数千行に及ぶそうで、ただただ圧倒されるばかり。

コンピューターの画面に並ぶ無数の数字は、模様のようにしか見えません。戸惑う私に澤さんがやさしく語りかけます。

「数字はカンマごとに区切られていて、それぞれが何を意味するのか、並び順で決まっています。」なるほど、切れ目と順番があるんですね。

「最初の数字は『ヘッダー』、つまり見出しです。31とか20という数自体に意味があるのではなく、その行が何を示すのかを見分けるためのものです。」なるほど。で、31と20はどう違うのでしょうか？

「31で始まる行は、日付、時刻、機内圧、装置温度(4か所)のデータです。測定の基本的情報を確認するためのものです。一方、20で始まる行はCO₂などメインのデータです。」20のほうが行の数が多いですね。

「そうです。31で始まるデータは10分ごとですが、20で始まるデータはもっと頻りに記録されます。水平飛行では1分ごと、上昇や下降しているときには10秒ごとです。」2種類の行を使い分けるんですね。

「実はもう一種類あります。101で始まる行です。それは、装置の電源が入ったときと、日付が変わったときだけ、時刻などごく基本的な数字を記録するものです。」

ここまでで既にちょっと複雑です。こんなふうに解釈できるでしょうか。データファイルを書籍に例えると、

- 文章一つずつの冒頭に付いているのが20という「しるし」、
- 段落ごとに付いているのが31で始まる小見出し、



CONTRAIL をドキュメントする(DoCONTRAIL)



- 章ごとに付いているのが 101 で始まる大見出し、
- 章がいくつか集まってできているのが書籍(ファイル)。

20 で始まる行は核心部分だけあって、それぞれの行に記録されている数字が多いですね。

「時刻、NDIR 出力値、標準偏差、水蒸気量、流量、供給圧、機内圧、セル圧力、緯度、経度、風速、風向、気圧高度、気温、電波高度、対地速度、の順に記録されています。」

……(困惑)。急にハードルが上がった気がします。時刻…。この「59837.122」が？

「そうです。時刻は秒で表します。日付が変わってから通算何秒経過したかというのがこの数字の意味です。一日は 60 秒 × 60 分 × 24 時間ですので、全部で 86400 秒あります。」なるほど。計算すると「59837.122」は 16 時 37 分 17 秒 122 ということになるようです。

ちなみに日付は 31 で始まる行の 2 つ目の数字ということでした。一年 365 日(うるう年は 366 日)を通し番号で表すので、上の例では 12 番目の日、つまり「1 月 12 日」です。意味不明だった数字の意味が少しずつ分かり始めてきました。

ところで、肝心の CO₂ のデータはどこにあるのでしょうか。「20 で始まる行の 4 つ目の数値がセンサーの出力値です。ただし、この数値をそのまま使えるわけではありません。」

先ほど「NDIR 出力値」と言っていた数値のことですね。NDIR は CO₂ の濃度を測るセンサーの種類のこと、ある波長の赤外線を CO₂ が吸収する性質を持つことを利用して測るためのもの、いわばこの観測装置の心臓部と言ってもよさそうです。しかし、センサーが出した数字の読み(単位はミリボルト(mV))は「素材」にすぎず、そのまま使うことはできないというのです。どうして？

「それは後で説明しましょう。ここでは、そのヒントとなる大切なことを覚えておいてください。それは、1 個前の数値、すなわち 20 で始まる行の 3 つ目の数字です。これはどの空気を測ったかの記号です。1 と 2 は標準ガスで 3 は外気です。」上の例では、下の 4 行が標準ガスで、その前の 8 行は外気ということが分かります。知りたいのは外気の CO₂ 濃度なのに、なぜ外気以外も測るのでしょうか？ 謎は深まるばかりですが、答えはお

預けです。

「5 つ目以降も大切なデータが続きます。例えば、6 つ目は、装置を流れている空気の中の水蒸気量。これが多いとセンサーが CO₂ を正確に測れないので、一定の値に達したらストップするように設定されています。」ただ測るだけでなく、測った数値をもとに自分自身をコントロールするとは、この装置はかなりお利口さんのようです。

「それから、1 分間あたり何 cc の空気が装置の中を流れているか(流量)があり、装置の入口部分の気圧(供給圧)、機内圧、測定部分の圧力(セル圧力)と続きます。セル圧力は 110 キロパスカルが基本設定です。つまり、1.1 気圧。ちなみに機内はだいたい 0.8 気圧に保たれています。」

「その時々々の位置情報としては緯度と経度を、気象データとしては風速、風向、気温を使います。客室の画面に映し出されるのでイメージが湧きやすいと思いますが、これらは飛行機自体が測っています。そのデータを自動的に受け取って大気観測装置に記録しています。」データの種類のそろそろ圧倒されてきます。

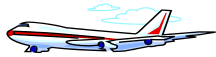
「忘れてはいけないのがラジオアルチです。」ら、ラジオアルチ？ 何ですか、それ？

「電波高度と呼ばれるものです。アルチは Altitude (高度)の略ですね。地面に向かって電波を発射して、そのはね返りで地表面からの高度を測ります。この連続観測装置は地面から 1200 フィート(約 366 メートル)以上の高さで作動するように設定されています。それより低いところの空気には地上からの汚染が混ざっていることが多いので、装置を通さないようにしているわけです。」なるほど。

「このラジオアルチと別に、プレッシャーアルチというものも測っています。」情報量の多さに、私の心理的プレッシャーも急上昇してきました。が、気を取り直して説明を聞きましょう。

「プレッシャーアルチは文字通り圧力高度のことで、空気の圧力を測って高度を計算するものです。通常の飛行データとしては主としてこちらを使います。」なるほど、『海拔〇メートル』というのがプレッシャーアルチのこのようです。

「例えばヒマラヤ高山帯の上空では、プレッシャーア



CONTRAIL をドキュメントする(DoCONTRAIL)



ルチが 10000 メートルあっても、ラジオアルチは 3000 メートルしかない、という状況があります。」

ちなみに、空港はそれぞれ標高が違いますし、同じ空港でも高気圧が来ている日と低気圧が来ている日では気圧が違うので、空港近くではラジオアルチを使うそうです。目的によって両方を使い分けているのですね。

使えるデータに変えていく

以上見てきたような生データを、いよいよ解析に使える形に変えていきます。「早着替え」の作業です。

最初に**時刻を調節**します。前述のとおり飛行機には位置情報を測る機器があり、位置と同時に時刻も記録しています。位置情報のみならず時刻情報も飛行機の機器のほうが大気観測装置内の時計より正確なので、飛行機の時計を基準に装置の時計を直します。

次に、**使いたいデータファイルのみ残す**作業をします。例えば、装置にデータを残す方法は記録媒体への「上書き」で、毎回初期化するわけではありません。このため、古いデータファイルがまだ残っている場合があります。日付を見て、古いものは取り除く作業をここでするのです。

このようにふるいにかけられたデータファイルですが、まだ注意が必要です。同じファイルのなかに複数のフライトのデータが入ってしまっていることがあるからです。これは、装置の電源が入ったまま 2 つの航路を飛ぶと発生する現象です。そこで、**フライトごとにファイル**を分ける作業をします。ちなみに、このような加工はすべてプログラムで自動的に行います。

そして、いよいよ CO₂ 濃度のデータです。ところで、先ほどの澤さんの説明によると、外気だけを測るのではなく、他に 2 種類の標準ガスも測るということでした。なぜ、わざわざ 3 種類の空気のサンプルを測るのでしょうか？ 外気だけではだめなのでしょうか？

「外気を測った測定値だけでは十分に信頼できません。なぜなら、温度などの条件が少しでも変わると、CO₂ センサーの読みもずれてしまいます。『ドリフト』と呼ばれる現象です。そこで、標準ガスの出番です。標準ガスという CO₂ 濃度を高めと低めにそれぞれ設定した 2 種類の圧縮空気を CME は積んでいるのです。」なる

ほど。

「例えば、高いほうを 403.09ppm、低いほうを 350.34ppm というように事前に地上の実験室で正確に測っておきます。上空で測ると CO₂ センサーの読みにドリフトが起こりますが、外気を測ったときのズレと標準ガスを測ったときのズレを比べるのです。これが分かれば、**外気の CO₂ 濃度の測定値に対して、ドリフト(ズレ)分を補正**できます。こうして初めて信頼できるデータとなるのです。」そこまで繊細な観測なのですね。

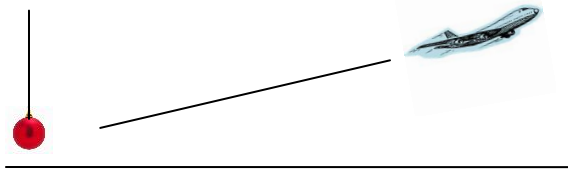
「例えば 389.32ppm というように、装置は 0.01ppm 単位で測っていて、誤差 0.2ppm 以内という精度をもっています。それでも、条件が刻々と変わる中で精度を安定させるには、装置自体の能力では足りません。そこで、標準ガスの出番があるのです。」納得です。

CO₂ のデータが整うと、続いてデータファイルごとに出発地と到着地などの情報を加えます。また、**高度の推移**をグラフにします。離陸して上昇、水平飛行、下降して着陸、という軌跡を線でつなぐとお皿に載ったプリンのような形になります。

プリンの上の平らな部分は上空の高いところでの横方向の傾向(水平分布)を調べるために使うデータです。



一方、プリンの側面の急斜面はある地点の縦方向の傾向(鉛直分布)を調べるために使います。目的が違うので、プリンの角のところで**データに境目**を付けておきます。この境目を付ける作業は以前は人の手でやっていましたが、今ではプログラムで自動的に処理します。それでも最後は**人間の目で確認**します。



余談ですが、「鉛直」というと鉛を糸で垂らした角度、つまり地面と垂直の方向の意味です。でも、飛行機はロケットのように真っ直ぐ上に飛び立つわけではありません。旅客機の上昇・下降角度は機種や積んでいる燃料の量などの条件によって違いますが、CONTRAIL のデータを見るとせいぜい 10 度程度。鉛直とは程遠いです。それなのに、なぜ鉛直



CONTRAIL をドキュメントする (DoCONTRAIL)



分布と呼ぶのでしょうか？

理由は二つあります。一つは割合の問題です。後ほど出てくる「プリン」の図を見ると、国際線の長距離フライトでは、上空での水平飛行が大部分を占め、上昇や下降の部分はごくわずかであることが分かります。だから、富士山でなくプリンなのです。ましてや地球全体という規模で考えれば、上昇・下降部分はごく狭い範囲に収まっています。

もう一つは、空気の動き方に関係します。地球の大気は、水平方向には動きやすい(混ざりやすい)のですが、鉛直方向には動きにくい(混ざりにくい)という性質を持っています。従って、10 度程度という低い角度で上昇(または下降)していても、そこから得られるデータからは、水平方向より鉛直方向の違いを主に反映しています。こういった理由から、鉛直分布と呼ばれるのです。

測装置が空気を測った地点と、実際に空気を採取した地点のズレのことです。「観測装置が入ってきた空気を測るのですが、そこを流れる外気のサンプルは、実際には 40 秒ほど前に採取されたものです。この 40 秒の差を補正します。具体的には、採取した地点のほうを正確なものとして、観測地点を修正します。」

40 秒の間に飛行機はどのくらいの距離を進むのでしょうか？ 時速 864km(マッハ 0.8)で水平飛行している場合には、40 秒で 9.64km の計算。なんと、10km 近くも進んでいます！

「水平飛行中の観測なら 40 秒差ではそれほど測定値は変わりません。でも、離陸後や着陸前は、40 秒の間に高度が大きく変わるので、必ず補正しなければなりません。」

このほか、様々なことを確認し、疑いのあるデータには目印を付けておきます。原因と対策をあとで考えるための作業です。

ここまで終わったら、仕上げとして、予め決めてあるレイアウト上に必要なデータを見やすく配置します。実際に通過した航路(地図上に曲線を引いて示す)や、先ほどのプリン、CO₂ 濃度の推移などです。澤さんが気づいたことなどもメモしておきます。

「着替え」はさらに続く

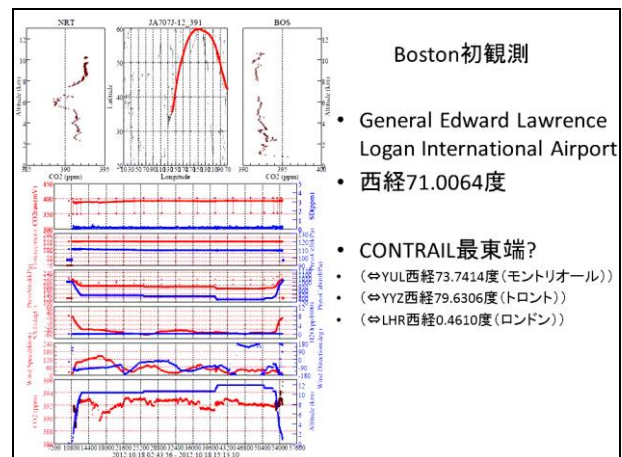
「次に・・・」と言って澤さんが隣の机に移動します。別のコンピューターを使うようです。「ここまでは Windows 上で処理しました。ここからは Linux を使います。」



研究室で大量のボンベに囲まれながら、2 台のコンピューターを駆使してデータを処理する澤さん。

「一定以上にバラつきのあるデータを除きます。バラつきが大きすぎるということは、測定のうえで何らかの不具合があったか、あるいは代表性が低いデータである可能性が高いからです。」これも自動的に処理するそうです。

次に、時差の調整をします。ここでいう時差とは、観



これは 2012 年 10 月 18 日に成田～ボストン路線で初めて観測したときの例。左半分が定型レイアウト。その中央上が航路図、両側は出発地・到着地付近の CO₂ 濃度の鉛直(高度別)分布、一番下の青線が高度の推移(「お皿にのったプリン」、赤線が CO₂ 濃度の推移。右のメモは備忘録。

以上が、毎回必ず行うデータ処理の流れです。作った資料はその都度 JAL やジャムコと共有し、不具合がないかお互いに確認します。不具合の疑いがあれば、一刻も早くそれを特定し、適切に対処するためにこの資



CONTRAIL をドキュメントする(DoCONTRAIL)



料が役立ちます。

先ほどコンピューター2台を使い分けている話があり、「なんだかすごいことをやっているらしいぞ」という印象が更に大きくなりましたが、実は一発の操作ですべての処理をできれば望ましいとのこと。これまで、携わってきた何人かの人がそれぞれの目的のためにプログラムを独自に作り、今もそれぞれを別々に動かしているために処理工程が数段階になるそうです。

澤さんは言います。「いずれ、時間の余裕がもしできたら、すべての処理を一つの過程にまとめたたいと考えています。」データは科学研究の命。それを扱う過程に対しても一種の美学があるのでしょう。

今回見たデータ処理は、正確な観測を継続していきつつ基礎資料を作るための作業という意味合いが強そうです。一方で、科学研究として新たな知見を探索するには、ほかの様々な観点から処理し、解析していくことになります。例えば、気象庁の気象データを、CONTRAILの観測データと合わせて解析したりします。

生データから、舞台上の早着替えのようにどんどん姿を変えながら整えられていく様子的一端を見せてもらったおかげで、かなり難しそうなおデータ処理と解析の世界が少し身近に感じられました。

おまけ

先ほど、31で始まる行についての澤さんの説明では、装置の温度を4か所で測っているとのことでした。これについて、国立環境研究所の町田敏暢(まちだとしのぶ)さんが次のように補足してくれました。

「機内圧の次は、セル温度(NDIRの心臓部の温度)、ポンプ温度(最も温度が上がる可能性がある)、機内温度(CMEの箱の外の温度)、内部温度(CMEの箱の中の温度)の順で並んでいます。

それぞれがどのような意味を持つのか、上の例で見ると、次のことが分かります。」

●機内圧は839.88hPa。これは上空を飛行しているときの通常の圧力。つまり正常。

●セル温度は49.96度。50度に温度調整しているので、これも正常。

●ポンプは41.97度。内部温度より高いのでポンプが回っている証拠。しかも正常な温度範囲で安全であることを示している。

●機内温度は14.81度で正常の範囲。ちなみにCMEは貨物室に搭載されているので、これは貨物室の温度。一方、客室は通常もう少し高い温度に調節されている。

●内部温度は20.29度。CMEの箱の内部にはまだ暖かい空気が残っており、更に内部機器の発熱があるので箱の外(機内温度)より暖かい。これも正常。

町田さんの説明を聞くと、どの数値も決して無駄なものではなく、ちゃんと意味を持っていることが改めて分かります。機内圧と4か所の装置温度を見ることで、正常な状態で装置が作動していたかどうかを判断できます。ここで異常が見つければ、記録された数値も信頼できないことになります。

このように、はっきりした目的のもとにひとつひとつの値が測られ、記録され、そして活用されているんですね。