

あかつきレベルデータパイプラインと 雲追跡

村上真也 (ISAS/JAXA)、堀之内武 (北海道大学)、
高木征弘 (京都産業大学)、はしもとじょーじ (岡山大学)、
山田学 (千葉工大)、山崎敦 (ISAS/JAXA)、
神山徹 (産総研)、小郷原一智 (滋賀県立大)、
今村剛 (ISAS/JAXA)、
あかつきデータ処理チーム

2016/03/28

あかつきレベルデータパイプライン

あかつきレベルデータパイプライン概要

- ▶ レベルデータパイプラインの説明
 - ▶ SPICE
 - ▶ FITS フォーマット
 - ▶ NetCDF フォーマット
 - ▶ ファイル命名規約
- ▶ パイプライン開発状況
- ▶ パイプライン開発課題

導入の導入: 用語説明

レベルデータって何?

- ▶ 数字が小さいほど生データに近い。
- ▶ ふつう0からはじまり、処理を段階的に施すに従って数字を増やす。
- ▶ それらを低次データ、高次データなどと言ったりもする。

パイプラインって何?

- ▶ レベルデータを生成するプログラム・スクリプトをパイプラインと言う。

導入

「あかつき」レベルデータパイプラインは、主に二つのプロダクトを生成する。

- ▶ L2b: 較正済み物理量データ+幾何情報
 - ▶ FITS フォーマット
- ▶ L3b: 緯度経度格子に補間した物理量データ
 - ▶ NetCDF フォーマット

レベルデータパイプライン以前

探査機上のデータの取扱い

- ▶ 圧縮形式
 - ▶ HIREW (可逆圧縮) ← 主にこちらを使用
 - ▶ JPEG2000 (非可逆圧縮)
- ▶ データレコーダ
 - ▶ ファイルシステムがあるわけではない
 - ▶ メモリ空間がどーんとあって、そこにポインタを指定して読み書きする
 - ▶ REC ポインタを動かして記録位置を設定
 - ▶ REP ポインタを動かして再生位置を設定

レベルデータパイプライン

- ▶ 地上局で受信されたテレメトリデータが宇宙研に送られ、SIRIUS というデータベースに保存される
- ▶ サーバー (リフォーマッタ, rfpc) で処理
 - ▶ パケットを SIRIUS から取ってくる
 - ▶ パケットをくっつけて画像を作る → Level 0
 - ▶ メタデータを付ける → Level 1a (FITS format)
 - ▶ カウント値から物理量に変換したりフラットで割ったりする → Level 1b
 - ▶ メタデータと幾何情報を付ける → Level 2 (FITS format)
 - ▶ 緯度経度座標系の格子データに画像を変換する → Level 3 (NetCDF format)
- ▶ 雲移動ベクトルを導出する → Level 4? (NetCDF format)

Level 0, Level 1

Level 0

- ▶ .img データ
- ▶ .ihd,.chd ファイルなどの付帯情報ファイル(メタデータ)もある
- ▶ これらは SDTP(宇宙データ転送プロトコル)により SIRIUS からデータ取得

Level 1

- ▶ FITS フォーマット
- ▶ SPICE toolkit が要らない範囲でヘッダを付ける
 - ▶ L1a: 未較正データ
 - ▶ L1b: 較正済みデータ

Level 2

- ▶ SPICE toolkit を使ってメタデータを計算し、FITS ヘッダに付ける
- ▶ SPICE toolkit を使ってピクセルの中心と端における幾何情報を計算して、FITS ファイルにする。
 - ▶ 幾何情報: 緯度、経度、ローカルタイム、入射角、出射角、天頂角、位相角
- ▶ 4つのカメラ (UVI, IR1, IR2, LIR) によって取られた画像が同じ向き (探査機+Y軸が上) を向くように画像を回転したり反転したりする。
- ▶ PDS(Planetary Data System) ラベルを作る
- ▶ DARTS のサーバへしかるべく置く

SPICE

SPICE: 観測データに伴う補助データを扱う仕組み

<https://naif.jpl.nasa.gov/naif/aboutspice.html>

- ▶ S: 探査機の軌道 (SPK)
- ▶ P: 惑星・衛星・彗星・小天体などの位置 (SPK,PCK)
- ▶ I: 探査機に搭載される機器の情報 (IK)
- ▶ C: 姿勢情報 (CK)
- ▶ E: イベント情報 (EK; ほとんど使われていない)

他にも以下のような “kernel” がある。

- ▶ 機器やアンテナの取り付け位置・向きなど (FK)
- ▶ 探査機の時計 (SCLK)、うるう秒 (LSK)

SPICE kernel

特徴

- ▶ 拡張子: カーネルの種類とテキストかバイナリかを表す
 - ▶ bsp: binary, spk
 - ▶ ti: text, ik
- ▶ テキストの場合: ドキュメントとデータが一体になった構造
 - ▶ データのはじまりは `\begindata` で示す
 - ▶ ドキュメントのはじまりは `\begintext` で示す

SPICE kernel の例

The values of PIXEL_SAMPLES and PIXEL_LINES are equal to the diameter of each filter, in counts.

```
\begindata
```

```
INS-5610_PIXEL_SIZE           = ( 0.013, 0.013 )
INS-5610_PIXEL_SIZE_UNITS     = 'mm'
INS-5610_PIXEL_SAMPLES        = ( 1024 )
INS-5610_PIXEL_LINES          = ( 1024 )
INS-5610_CCD_CENTER           = ( 512.5, 512.5 )
INS-5610_START_OF_PIXEL       = ( 1, 1 )
INS-5610_END_OF_PIXEL         = ( 1024, 1024 )
```

```
...
```

```
\begintext
```

VCO_UVI_V05.TI より抜粋

SPICE toolkit

SPICE kernel を活用するライブラリ

- ▶ C, Fortran, IDL, Matlab で提供されている
- ▶ <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>

CPS 月惑星探査育英会のページに詳しく書いてある

<https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/>

FITS フォーマット

FITS フォーマットは天文業界でよく使われる形式。

- ▶ FITS ファイルは HDU の集まりで構成される。
- ▶ HDU(Header/Data Units) はヘッダ部とデータ部に分かれる。
- ▶ ヘッダは 1 レコード 80 文字 (改行などの区切り文字なし！)
- ▶ キーワード = 値 の形式で書かれる。
- ▶ 先頭から 9 文字目に必ず = が来る (つまりキーワードの長さは最大 8 文字)
- ▶ ヘッダもデータも 2880 byte の整数倍

具体的には「FITS の手引き」に詳しい。

https://ww1.fukuoka-edu.ac.jp/~kanamitu/fits/jdoc/fits_t53.pdf

FITS フォーマットの例

LIR_20151207T052601_10_L2B_00.FIT のプライマリ HDU

```
SIMPLE = T / conformity to FITS standard
BITPIX = -32 / number of bits per data pixel
NAXIS = 0 / number of data axes
EXTEND = T / possibility of presence of extensions
FMTTYPE = 'VCO IMAGE LIR' / Type of format in FITS file
FSTYPEVER= 2013091801 / Version of FMTTYPE definition
SPCECRFT= 'VCO' / Name of spacecraft
TELESCOP= 'VCO' / Telescope used to acquire data
ORIGIN = 'ISAS/JAXA' / Organization responsible for the data
NEXTEND = 1 / Number of standard extensions
CNTTYPE = 'LEVEL2 PROCESSED IMAGE' / the type of data content
CNTVER = 2013091201 / Version of data content
HISTORY Using LIR_L1b.cc program compiled at Feb 6 2016 16:43:55
DATE = '2016-03-02T14:46:44' / Date of file creation
END
```

FITS スタンドアードのヘッダキーワード

- ▶ DATE 日時
- ▶ ORIGIN データの生成者
- ▶ COMMENT コメント
- ▶ HISTORY ヒストリ
- ▶ DATE-OBS 観測日時
- ▶ TELESCOP 望遠鏡
- ▶ INSTRUME 機器
- ▶ OBJECT 観測対象
- ▶ SIMPLE FITS Standard に準拠しているか
- ▶ BITPIX ピクセルあたりのビット数 (負は浮動小数点数)
- ▶ NAXIS 次元の数
- ▶ NAXISn n次元目の軸の長さ
- ▶ END 終了のキーワード
- ▶ XTENSION エクステンションの種類

FITS ヘッダあかつき固有キーワード

プレフィックス

- ▶ P_ Level 1 共通キーワード
- ▶ S_ Level 2 共通キーワード
- ▶ UV_ UVI 関係キーワード
- ▶ I1_ IR1 関係キーワード
- ▶ I2_ IR2 関係キーワード
- ▶ LI_ LIR 関係キーワード

例:

- ▶ P_ID 機器の NAIF ID(VCO_UVI_365 など)
- ▶ S_CLDALT 仮定している雲高度

FITS ヘッダキーワード辞書

FITS ヘッダキーワードは「辞書」が用意されている (随時アップデート)。

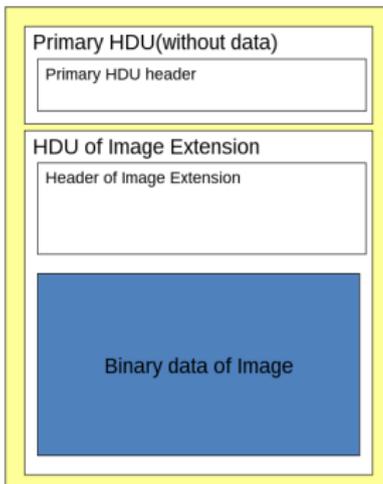
<https://www.cps-jp.org/~akatsuki/members-only/related-data/L2-headerkeywords/>

今のところサイエンスチームにのみ公開
(そのうち一般に公開される)。

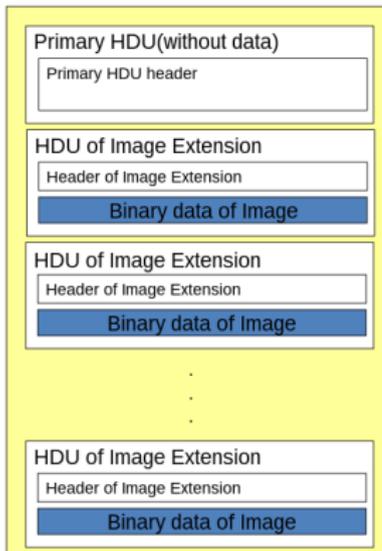
あかつき FITS ファイル

「あかつき」 L2b では Primary HDU に IMAGE エクステンションを 1 個以上付加した形式。

FITS file for radiance



FITS file for Geometry Information



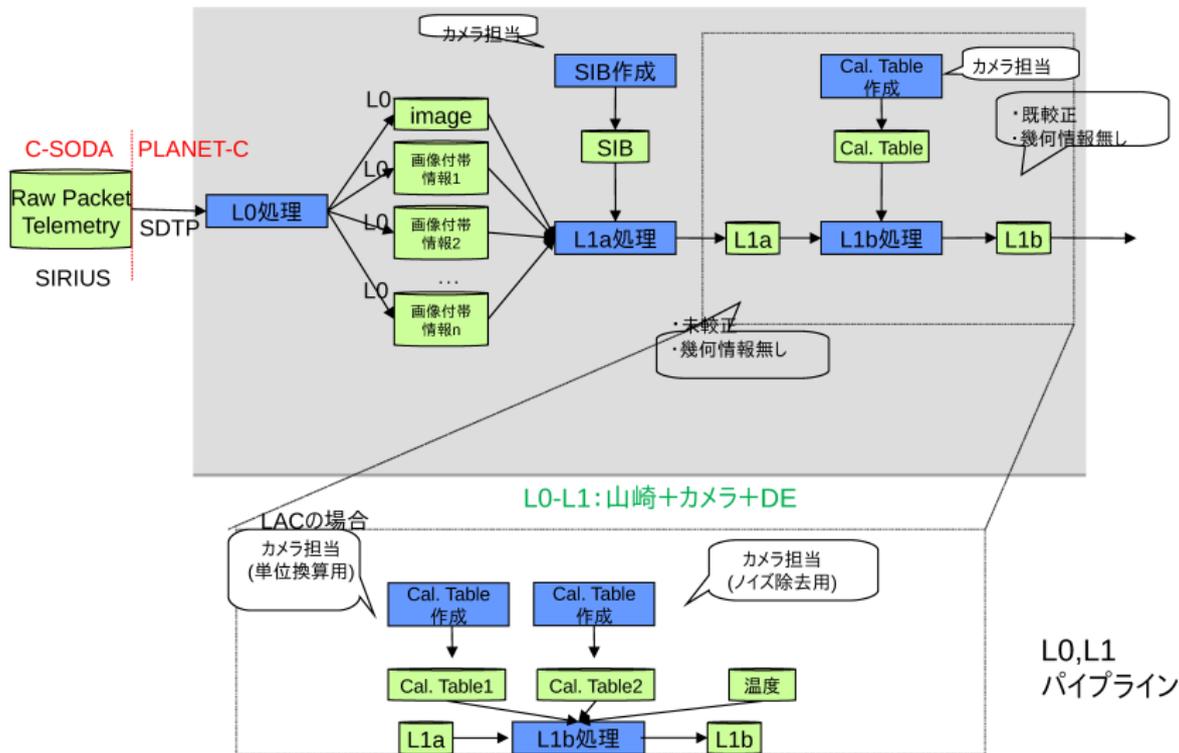
FITS を扱えるソフトウェア

単体のソフトウェアとしては ds9, fv が有名。ライブラリや統合環境は色々ある。

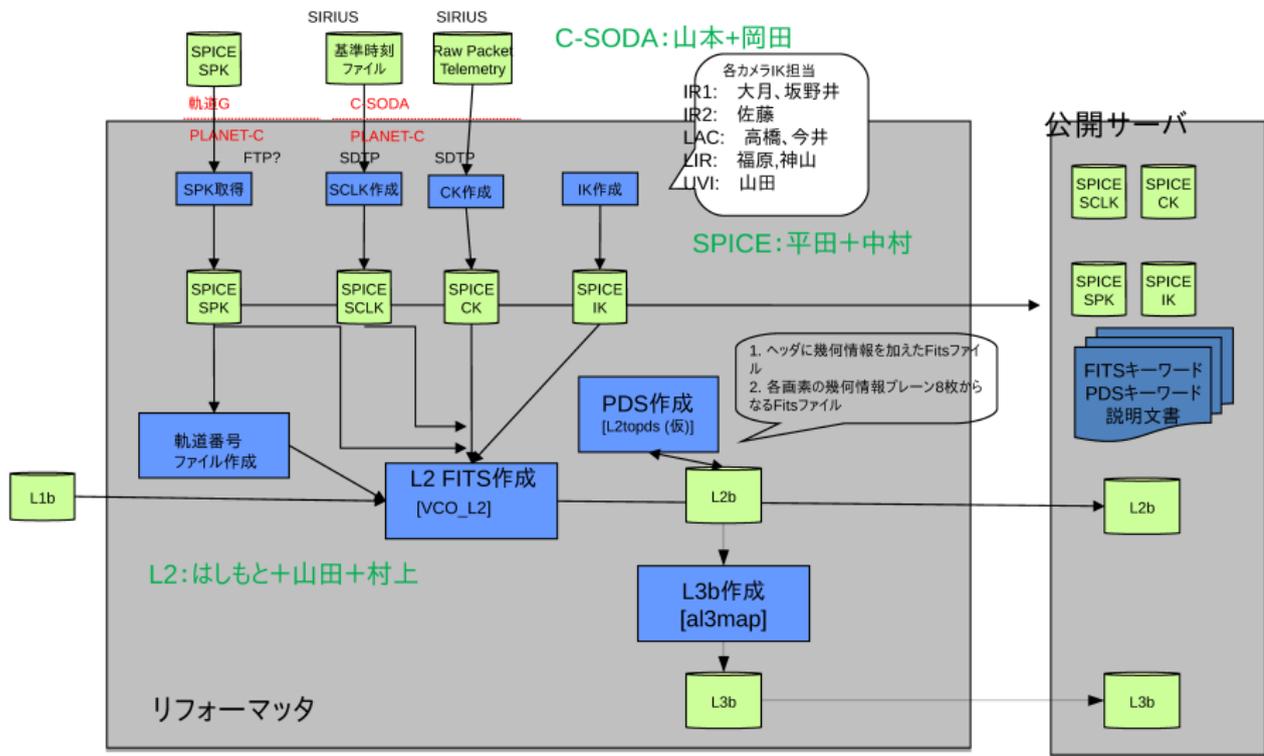
The screenshot displays the SAOImage ds9 software interface. The title bar reads "SAOImage ds9". The menu bar includes "ファイル", "編集", "表示", "フレーム", "ピンポイント", "ズーム", "スケール", "色", "領域", "WCS", "解析", and "ヘルプ". The main window shows a Venus image with a green coordinate system. The left sidebar contains fields for "ファイル名" (V0265_0009_UV2-12b.FITSISEX_VMC_UV-LEVEL2b), "天体名" (VENUS), and WCS coordinates. The bottom status bar shows a series of numerical values: 4.19e+07, 8.38e+07, 1.26e+08, 1.68e+08, 2.10e+08, 2.52e+08, 2.94e+08, 3.36e+08, 3.78e+08.

ファイル	編集	表示	フレーム	ピンポイント	ズーム	スケール	色	領域	WCS	ヘルプ
開く	保存	ヘッダ	ページ設定	印刷	終了					

パイプライン処理概要(1/2)



パイプライン処理概要(2/2)



Level 3

緯度経度格子に補間した物理量を NetCDF フォーマットで提供する。

処理

- ▶ 撮像した金星ディスクの「ふち (リム)」の位置を使って、探査機の向いている方向を補正する (リムフィッティング) (Ogohara, *et al.*, 2012)
- ▶ 光学系による画像のゆがみを補正する (Kouyama, *et al.*, 2013)
- ▶ 緯度経度格子に補間する (双線形補間; 2880x1440 の格子にマッピング)

NetCDF フォーマット

NetCDF(Network Common Data Form) は気象業界でよく使われる格子データ格納フォーマット。以下は `ncdump(1)` により NetCDF ファイルをテキストダンプしたもの (CDL; Common Data Language)。

```
netcdf V0265_0009-0018_UV2 {  
dimensions:
```

```
    longitude = 120 ;  
    latitude = 60 ;  
    time = 1 ;
```

← 次元

```
variables:
```

```
    float longitude(longitude) ;  
        longitude:long_name = "longitude" ;  
        longitude:units = "degrees_east" ;  
    float latitude(latitude) ;  
        latitude:long_name = "latitude" ;  
        latitude:units = "degrees_north" ;  
    double time(time) ;  
        time:long_name = "observation time" ;  
        time:units = "hours since 2000-1-1 00:00:00 UTC" ;  
        time:comment = "average of time variables in input L3a files" ;  
    float U(time, latitude, longitude) ;  
        U:long_name = "zonal velocity" ;  
        U:units = "m s-1" ;  
        U:missing_value = -6.e+36f ;  
    float V(time, latitude, longitude) ;  
        V:long_name = "meridional velocity" ;  
        V:units = "m s-1" ;  
        V:missing_value = -6.e+36f ;
```

変数

NetCDF の特徴

- ▶ データとともにメタデータを格納できる。
- ▶ 配列指向のデータを扱う。
- ▶ 様々な言語からアクセス可能。
 - ▶ 公式ライブラリは C, C++, FORTRAN 77, Fortran 90, Java

NetCDF あかつき規約

- ▶ Level 3 の NetCDF 変数を規定
 - ▶ 軸は longitude, latitude, time の 3 つ
 - ▶ 変数は radiance, inangle, emangle など
 - ▶ 変数*angle は short で格納される
 - ▶ Level 2 データの FITS キーワードを引き継いだ変数 (P_..., S_... など)
 - ▶ FIT_STAT: 楕円フィッティングのステータス
 - ▶ D_...: L2 の S_... を楕円フィッティングで修正したもの
- ▶ 規約は一般に公開される予定

レベルデータパイプライン開発状況

- ▶ L0 に関しては山崎敦氏 (ISAS/JAXA)、福原哲哉氏 (NICT) によって作成済み。
- ▶ L1,L2 に関しては、山田学氏 (千葉工大) によって作成済み。
 - ▶ 細かいメンテナンスを村上が行なっている。
- ▶ L3 に関しては、「あかつき」データ処理チームの小郷原一智氏 (滋賀県立大学)、高木征弘氏 (京産大) らによって作成済み。

ファイル命名規約

例: LIR_20151207T052601_10_L2B_00.FIT

- ▶ LIR: name of camera used (UVI,IR1,IR2,LIR)
- ▶ 20151207T052601: time of the observation (YYYYMMDDTHHmmSS)
- ▶ 10: ID of the filter, etc. (derived from SPICE ID)
- ▶ L2B: level of the data
- ▶ 00: version of the product

レベルデータパイプライン開発課題

▶ L1

- ▶ 較正関係 FITS ヘッダキーワードを導入
- ▶ 使用した観測プログラムを FITS ヘッダに書き込む (担当: 村上)
 - ▶ テレメトリからは実行した観測プログラムが分からない (!)
- ▶ IR1/IR2 の使用フィルタ推定バグとり (担当: 村上)

▶ L2

- ▶ PDS 対応 (ラベル、ドキュメンテーション; 担当: 村上+NASA PSPs; 別途紹介)
- ▶ SIS 作成 (別途紹介)
- ▶ カメラ取り付けアラインメントの調査 (FK のアップデート)

▶ L3

- ▶ UVI 以外の機器の画像のリムフィッティング
- ▶ あかつき Level 3 NetCDF 規約のドキュメンテーション

雲追跡

雲追跡概要

- ▶ 雲追跡とは?
- ▶ 雲追跡ツール開発状況
- ▶ Venus Express VMC UV のデータを用いた雲追跡

雲追跡とは?

雲の模様の変位を追跡して、雲の移動ベクトル(雲追跡ベクトル)を導出する。

- ▶ このベクトルを Cloud Motion Vector(CMV) と呼ぶ
- ▶ 地球気象業界では大気追跡風 (AMV) と呼んでいる
- ▶ 画像処理でいうところの移動体追跡

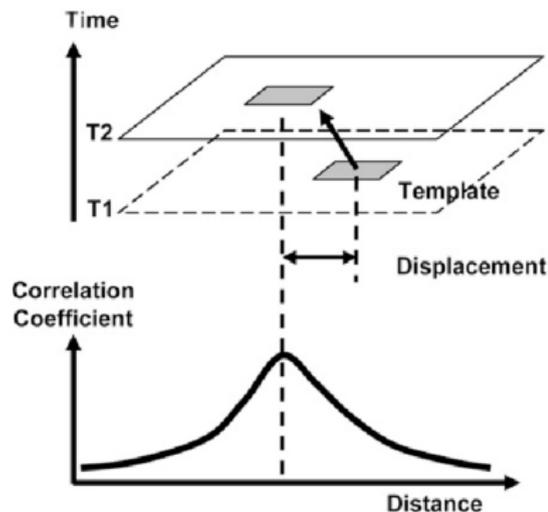
雲が風に完全に馴染んで動いていると**仮定する**と、雲追跡ベクトルは風ベクトルと等しい(パッシブトレーサー仮定; Hubert and Whitney, 1971)。

必ずしもこの仮定は正しくないことに留意する (例: 山岳波に伴ってできる雲)

雲追跡アルゴリズム

前提: 等間隔の緯度経度格子にマッピングされたデータ (あかつき Level 3 プロダクト) を使う。

- ▶ 方法は古典的なテンプレートマッチング、相互相関法を使う
 - ▶ テンプレートを適当な大きさに決めておいて、画像のあちこちに動かして相互相関係数を計算する。相関係数が正でもっとも大きいところを探す



Kouyama, et al. (2012)

「物理的でないベクトル」にどう立ち向かうか (1/2)

単純にやると、「物理的でないベクトル」が現れる。

- ▶ テンプレートサイズを大きくすると誤マッチング(「物理的でないベクトル」へのマッチ)が減る傾向がある
 - ▶ 空間スケールの大きな速度場を求めることになる
 - ▶ 大気現象の空間スケールと時間スケールはおおむね比例関係にある (Orlanski, 1975)
 - ▶ 求めたい時間スケールの現象に対応する空間スケールを持つテンプレートを選ぶ必要がある
- ▶ ひまわり 8号で採用されている方法 by 下地和希氏 (気象庁)
 - ▶ 異なるサイズのテンプレートによって得られた相関曲面を重ね合わせる
 - ▶ 大きなスケールと小さなスケールの両方のスケールからの寄与を相関曲面に反映させられる

「物理的でないベクトル」にどう立ち向かうか (2/2)

単純にやると、「物理的でないベクトル」が現れる。

- ▶ より洗練された方法を使い、「物理的でないベクトル」の出現頻度を下げる
 - ▶ Ikegawa & Horinouchi(2016, hereafter IH16)
 - ▶ 複数ペアの画像から得られる相関曲面たちを重ね合わせる
 - ▶ 相関曲面を空間平均する
 - ▶ 「物理的でないベクトル」を訂正する (relaxation labeling: Evans, 2000; Kouyama, *et al.*, 2012)
- ▶ 「物理的でないベクトル」を品質評価により棄却する
 - ▶ IH16
 - ▶ 地球気象業界の品質管理法を使う (QI: Quality Indicator, (Holmlund, 1998))
 - ▶ 金星大気には無批判には適用できない

雲追跡ツール開発状況

▶ 状況

- ▶ 基本的な部分は一通り小郷原・高木らにより作成済み (Ogohara, *et al.*, 2012)
- ▶ 新たな開発項目については村上・堀之内が行なった
 - ▶ IH16 の実装
 - ▶ ひまわり 8 号方式の相関曲面の重ね合わせの実装
 - ▶ 「物理的でないベクトル」を訂正する手法の改良

▶ 課題

- ▶ 評価手法の開発、適用
- ▶ 既存の評価手法の試用
- ▶ 地図投影法に依存しない雲追跡

実際のデータを用いたテスト

- ▶ Venus Express(VEx; 2006-2014)
 - ▶ VMC UV (365 nm, 未同定吸収物質)

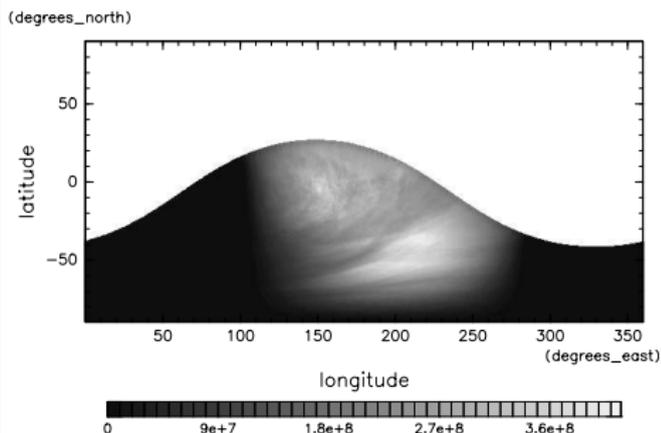
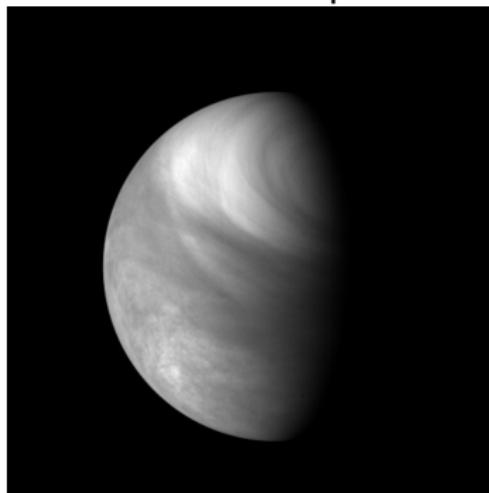
雲追跡に関わる設定

- ▶ 衛星天頂角が71度以上の位置の輝度を除外して計算した
 - ▶ 画像の歪み避け
- ▶ 太陽天頂角が85度以上の位置の輝度を除外して計算した
 - ▶ 昼夜の区別のため
- ▶ 求める雲追跡ベクトルについて
 - $-200 \cos(\text{緯度}) \text{ m/s} \leq U \leq 0 \text{ m/s}$,
 - $-60 \text{ m/s} \leq V \leq 60 \text{ m/s}$ を仮定した

VEx VMC UV(365 nm) 画像

軌道番号 0265 画像インデックス 0009

金星視直径 ~ 370 pixel

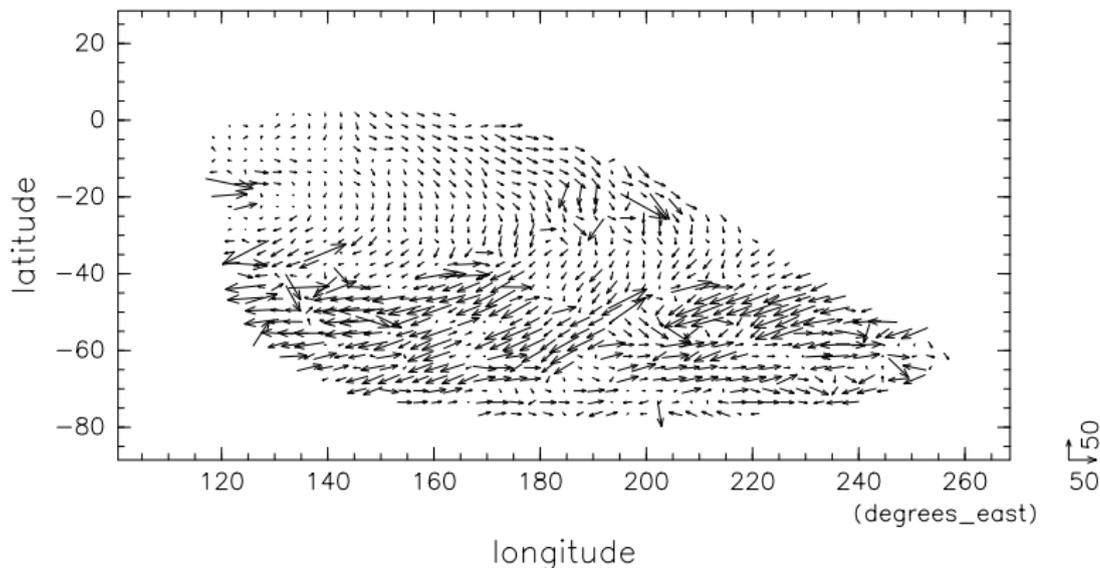


雲追跡の結果

$\Delta t = 1\text{h}$, ($U + 100 \cos(\text{緯度})$ m/s, V)

VEx VMC 軌道番号 0265、UV 画像 0009 と 0018 を使用。テンプレートサイズ 48x48、相関曲面の空間平均 (IH16) なし

(degrees_north)

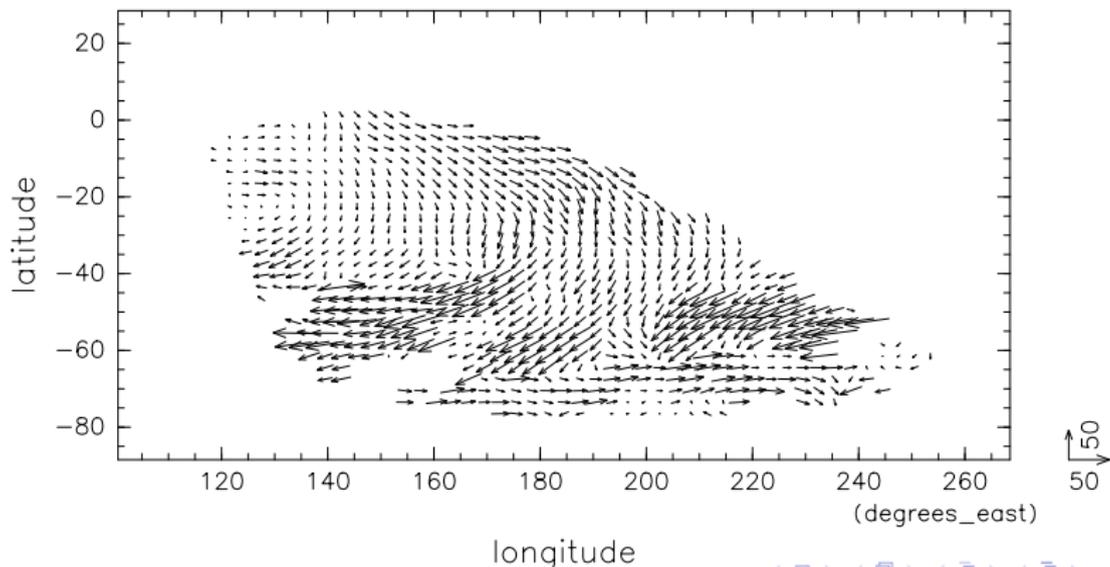


雲追跡の結果

$$\Delta t = 1\text{h}, (U + 100 \cos(\text{緯度}) \text{ m/s}, V)$$

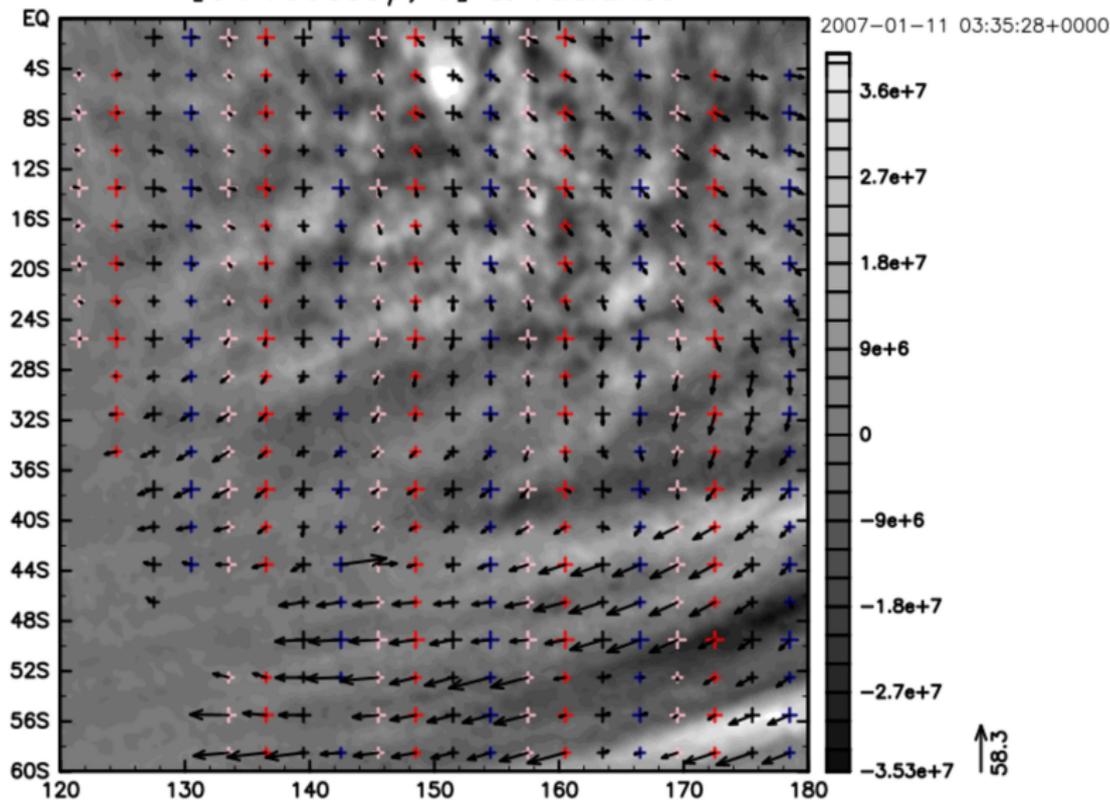
VEx VMC 軌道番号 0265、UV 画像 0009 と 0018 を使用。テンプレートサイズ 60x60、相関曲面の空間平均 (IH16) あり、ベクトル訂正 (relaxation labeling) あり

(degrees_north)



雲追跡チェック画像

[U+100cos ϕ , V] & radiance



まとめ

「あかつき」データパイプラインと雲追跡について詳しく紹介した。

- ▶ あかつきデータパイプラインでは二つのプロダクトを生成する。
 - ▶ I2b: 較正済み物理量データ+幾何情報, FITS フォーマット
 - ▶ L3b: 緯度経度格子に補間した物理量データ, NetCDF フォーマット
- ▶ 雲追跡では古典的な相互相関法を使ったテンプレートマッチングを用いる。
 - ▶ 新たな技術を採り入れつつ開発中
 - ▶ 特に評価手法の開発が急務

end