

# ランドサットが捉えた富士山の吊し雲

荒川 正一\*

(平成10年9月30日受理)

## On the lee-wave cloud of Mt. Fuji as observed by Landsat TM-sensor

Shoichi ARAKAWA

(Received on September 30, 1998)

### 1. はしがき

富士山の吊し雲は、その山陰に現れる雲としては最も代表的な雲の一つで、河口湖測候所の山本三郎(1965)や湯山生(1974)らによって数多くの写真が紹介されている。富士山の吊し雲は色々な形をとって現れ、大井他(1974)、湯山によって、つばさ雲、渦状雲などと名付けられている。その発現条件もよく知られており、「強い南西風～西風が当地方に吹くとき、即ち発達した低気圧や台風が日本海上にあるとき」が好条件とされている。しかしながらこの雲がどの位置に、またどの高さに現れるかについてはまだ定かでない。山本、湯山らによる写真は数多くあるが、一枚の写真だけでは位置関係は分からない。

われわれは2点からの写真観測によりその雲の位置・高さを明らかにしようと、この7年間学生達と観測を続けている。しかし最初のうちはなかなか好条件に恵まれず空振りが多かった。'92年春にたまたま「山旗雲」に遭遇し、その観測研究報告を本誌第36集に発表した(荒川1996)。この1、2年ようやく吊し雲に遭遇することができ、そのとき撮影した写真群をただいま解析中である。

たまたま他の目的で、リモートセンシング技術センター(RESTEC)においてランドサットの目録写真を検索しているとき、富士山の吊し雲の場面を見つけた。この場合のランドサットデータを入手し、吊し雲の位置・高さ、構造などの解析を行うことができた。そしてこれらについて新しい知見を得ることができたのでここに報告する。

### 2. ランドサットによる富士山の吊し雲

ランドサットデータはフロッピーディスクの形でRESTECから入手した。そのデータはTM装置により測定されたもので、可視域3、近、中間赤外域3、熱赤外域1、計7つの波長帯(バンド)の受信データがバンド別に入っている。1画素のサイズは最小28.5m×28.5mであるが、今回は山と雲の両方を取り入れるため倍の57m×57mとした。また一画面は512ピクセル×400ラインから構成されている。この読み取り解析には、NEC航空宇宙システム発行のソフト:LODIAを用いた。LODIAによりわれわれは、バンドごとの画像、あるいは3つまでのバンドの合成画像を見ることができる。また画像内での輝度や距離、方位の解析、その他いくつかの統計解析ができる。

さて入手したデータの撮影時刻は、

1987年9月1日 9時48分30秒

図1にバンド2(0.52-0.60 $\mu$ m)、3(0.63-0.69 $\mu$ m)、4(0.76-0.90 $\mu$ m)の合成図を示す。この画像が雲の種類や雲の陰の解読に最も適しているようである。Fは富士山頂にかかる笠雲、AとBは共に風下にかかった吊し雲で、ここで問題とする雲である。図1から読みとった吊し雲の特性は表1に示すとおりである。

つまりこのときの吊し雲は、強い輝度の積雲系の雲(Aと呼ぶ)と弱い輝度の巻雲系の雲(Bと呼ぶ)とからなり、その位置は富士山から見て山中湖の方向(65°)に、Aは11km、Bは9kmの距離にある。

バンド6(10.4-12.5 $\mu$ m)の画像によれば(図2)、この吊し雲は中心部に低温域(高い雲頂高度)をもつ1つの雲のように見える。しかし図1の合成図を注意深く

\* 環境情報学科 地球環境学研究室

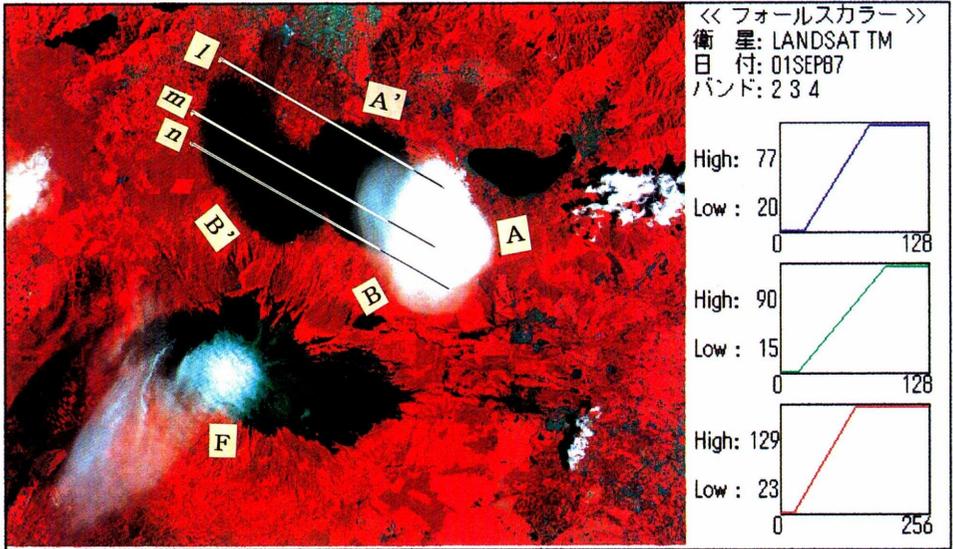


図1 富士山の吊し雲を捉えたランドサット画像。1987.9.1.9h48'.5. バンド2(約0.57 $\mu$ m), 3(約0.66 $\mu$ m), 4(約0.85 $\mu$ m)の合成画像。F:富士山頂の笠雲, A, Bが吊し雲, Aは積雲系でメイン, Bは巻雲系の雲, A', B'はそれぞれの影, l, m, n3本のラインは太陽光の方向に向いている。この上で輝度値を読んだ。

表1 図1から読みとった吊し雲の特性

1. 雲Aは強い輝度 雲Bは弱い輝度, 薄いベール状	C u系 高さ~ 6,500m [雲の高さは表2から] C i系 高さ~ 10,000m
2. 富士山から雲Aまでの距離	11 km
3. 富士山から見た雲Aの方位	65° ENE
4. 雲Aのスケール 形はハート型	縦軸方向 4.5 km 横軸方向 5.5 km
5. 雲B 横方向に伸びた繭型	雲Aよりやや大きめ 雲Aより約2 km富士山寄り

見, またその画像の雲の陰が2つあることを見るとき, この雲は低い雲Aと高い雲Bの2つの雲からなっているとみなされる。すなわち図2の温度分布は次のように解釈される:

図3に示すように, 雲Bは透けて見えるが故にそれ自体の温度の他に, 一部その下の物体の温度にも影響されている。雲B1域では地面温度にも感応してやや高温に現れ, また雲B2域は雲Aの雲頂温度にも感応して最低温度となって現れているのである。と。

### 3. 雲の陰を利用した高さの推算

#### 1) 太陽の位置

まず観測時の富士山地区における太陽の方位角, 高度角を求める。理科年表, 暦の部の解説(日の出, 南中, 日の入)を参照。

地図より問題の雲の場所の緯度( $\phi$ ), 経度( $\lambda$ )を読む。

$$\phi = 35^{\circ}46'.5 \text{ N}$$

$$\lambda = 138^{\circ}50'.0 \text{ E} = 9.2556 \text{ h} \quad (1)$$

この日, この地における南中時刻(T)は,

$$T = 12 \text{ h} - (\lambda - \lambda_0) - \Delta T \quad (2)$$

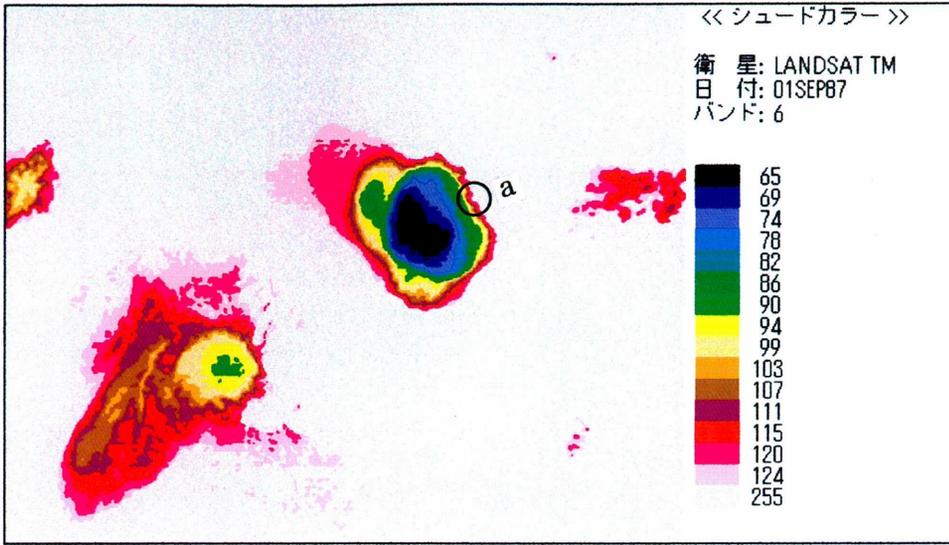


図2 雲の構造を調べるべく、低温部の方に焦点を合わせて解像したバンド6(約 $11.3\mu\text{m}$ )の画像。雲はレベル値約110以下か。吊し雲の中心部はレベル値70以下の低温域。この構造については図3参照。a域はレベル値が混んでいるところ。

但し、 $\lambda_0 = 135^\circ$ は日本標準時(明石)の経度。

$\Delta T$ は世界時0h(日本時9h)における近時差で、9月1日は限りなく0に近い(理科年表1987年)。

ここでは $\Delta T = 0$ とする。すると、

$$T = 11 \text{ h } 44 \text{ m } 22 \text{ s} \quad (3)$$

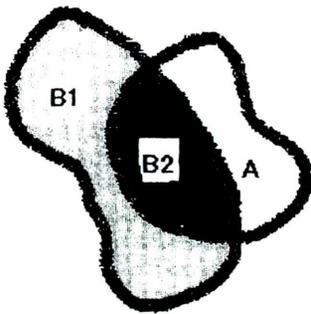


図3 図2のレベル値分布解釈のための分解図。雲Aは厚い雲であるが雲Bは透けて見え、薄い雲と考えられる。レベル値の低い黒い部分(B2域)は雲AとBの重なったところで雲Bの温度のほか、垂直に発達した雲Aの温度にも感応して最低温度となっている。この黒い域の左側(B1域)は雲Bのほか地面温度の影響を受けてやや高温。黒い域の右側は雲A域。

図4の天球座標において、球面三角形 $Z S_\odot P$ にcos則を適用、太陽高度角 $h$ は、

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos H \quad (4)$$

但し、 $\delta$ は太陽の赤緯(1987.9.1)、 $H$ は観測時の太陽の時角(南中時から測った時間、午後の方へ+)で、共に次のように求まる。

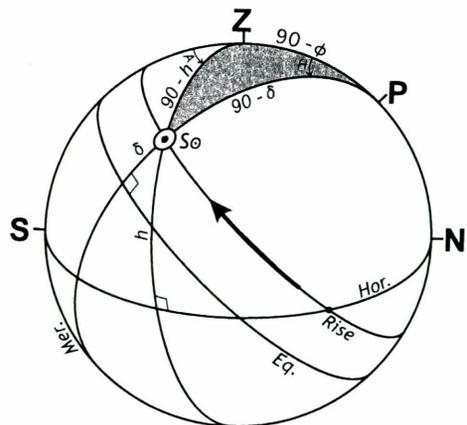


図4 太陽の位置を表す天球座標。Zは天頂、Pは天の北極、Hor.は地平線、Eq.は天の赤道、Mer.は子午線、 $S_\odot$ は太陽である。

$$\delta = 8^{\circ}33'20''$$

$$H = 9h48'30'' - 11h44'22''$$

$$= -1h55'52''$$

$$= -28^{\circ}.967$$

(5)

(1)と(5)式の値を(4)式に代入すると

$$\sinh = 0.7879$$

$$h = 52^{\circ}.0$$

(6)

また,  $\sin$  則より,

$$\sin A = \cos \delta \cdot \sin H / \cos h$$

$$A = -51^{\circ}.4$$

(7)

すなわち, 太陽の高度角 ( $h$ ) と方位角 ( $A$ ) はそれぞれ (6) と (7) で与えられる.

## 2) 雲の高さの計算

以上の準備に基づき, 図1において太陽光線の方向に雲と影にまたがる直線を引き, その上で各ピクセルにおける輝度を読みとった.  $l, m, n$  3本の直線上の輝度分布を図5に示す. 雲や影の縁で輝度が急変している. 図5と図1を見比べながら雲A, Bおよび影A', B'それぞれの縁を特定し, AA', BB'の距離を求めた. またそれに  $\tan h$  を乗じて雲の高さを求めた. 各直線上で求めた雲と影の間の距離と雲の高さを表2に示す.

平均して, 雲Aの高さは約6,500m, またBの高さは約10,000mと推定された [表1に転載]. ここで求めた雲の高さは雲の影を作っている部分の高さであって, 通常の雲底高度とは違う. そして当然のことながらこの値の方が高い.

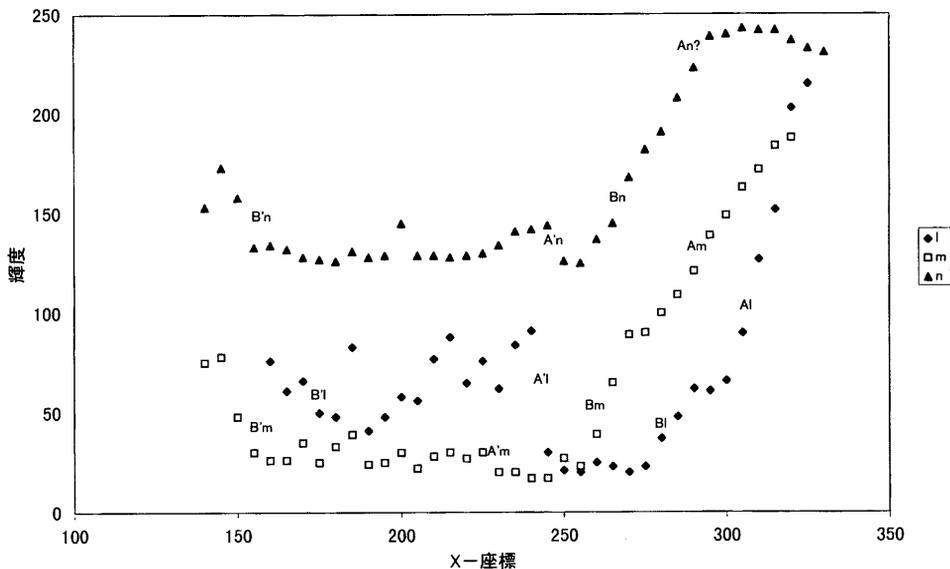


図5 図1中のライン  $l, m, n$  に沿った輝度分布. 横軸は読みとり点のX座標.  $n$  線上の輝度は100目盛り持ち上げてある. バンド4の輝度が最も敏感に反応するので, これの輝度値を書いた. ライン  $n$  の上では雲Aの縁がBに隠されて不確かなので計算していない. 代わりに雲Aの右上部のコブ  $p$  とそのかげ  $p'$  を用いた.

表2 太陽光の方向に引いた直線上の輝度分布から読みとった雲の影の距離とそれから求めた雲の高さ

直線	AA'の距離	雲Aの高さ	BB'の距離	雲Bの高さ
$l$	4,090m	6,300m	6,590m	9,500m
$m$	4,290m	6,660m	7,230m	10,300m
$n(p)$	$p$ 4,260m	$p$ 6,500m	7,690m	11,000m

注: 雲の高さは影のある場所の標高 (1,100m ~ 1,200m) を加えたもの. 即ち海拔高度.

ライン  $n$  上では雲Aの縁がBに隠されて不確かなので, 代わりに雲Aの右上部のコブ  $p$  について計算した.

#### 4. 気象的背景

本節ではこのときの気象的背景、特に地上天気図と高層気象の状態について述べる。

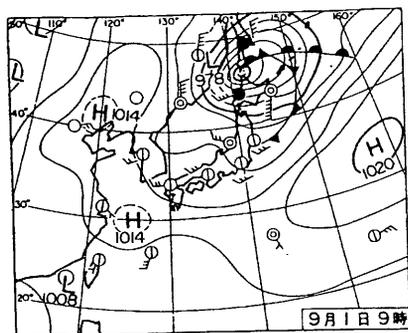


図6 当日の地上天気図. 1987. 9. 1. 0900J  
日本列島は西～南西の強風が吹いている。

このときの地上天気図は図6に示すとおり、日本海北部に発達した低気圧がある。この低気圧は前日日本海において台風12号から温帯低気圧に変わったもので、前日から中部日本に強い南西風を吹かせている。これは富士山の吊し雲にとって典型的な気圧配置である。

高層の状態は浜松の高層データを見る(表3)。まず風速は700hPa(高度3,100m)から300hPa(高度9,700m)の高さまで20m/s以上とやや強く、好条件となっている。風向は230°(SW)～250°(WSW)の風であ

るから、吊し雲は富士山のちょうど風下に位置していることになる。

A, B 2つの雲の層に対応してやや高湿度の層が見られる。630hPa(4,000m)～500hPa(5,900m)の層では71～57%、また300hPa(9,700m)では34%で、いずれも上下の層と比べ高湿度となっていた。

また静的安定度をみると、850～700hPa層は絶対安定の状態であるが、700hPa(3,100m)より上層では0.57～0.81℃/100mの気温減率をもち、条件付き不安定な成層状態であった。従って、この層でいったん雲が作られると対流雲がさらに上層へ発達する可能性がある。

#### 5. 雲の構造と若干の考察

雲Bが図1において透けて見えること、その影B'も影A'に比べて薄く地物が垣間見えること。および図3のところでも述べた解釈ができることなどから、雲BはCi系の雲と見られる。その高さはほぼ10,000mと見積もられた。

雲Aは鉛直に発達したCu系の雲と思われる。それは次の理由による。1) 図2中、雲Aの縁a部においてレベル値が120から90まで急変していること。{利用ハンドブック(文献参照)によればレベル値は温度の二乗に比例する}。2) 比較的高湿度の層が4,000mから6,000mの層にあること。3) また高さ3,000mから対流圏上部まで条件付き不安定な成層をなしていること。などの理由である。これまでの分類によるところの楕円吊し(通称UFO型吊し、図7a)または渦状吊し(図7b)のよう

表3 浜松における高層気象データ 1987. 9. 1. 0900J

気圧 hPa	高度 m	気温 °C	遞減率 °C/100m	湿度 %	風向 風速 m/s
1,000	81	27.3	—	71	WNW 2
900	1,004	20.7	0.72	56	W 9
850	1,496	17.2	0.71	63	WSW 11
800	2,011	15.5	0.33	42	WSW 15
700	3,136	11.3	0.37	21	WSW 20
600	4,406	4.0	0.57	64	WSW 22
500	5,866	-5.1	0.62	57	WSW 21
400	7,585	-14.9	0.58	13	SW 26
350	8,582	-21.7	0.68	29	SW 24
300	9,701	-29.1	0.66	34	SW 25
250	10,982	-37.8	0.68	26	SW 18
200	12,481	-50.0	0.81	—	SW 16

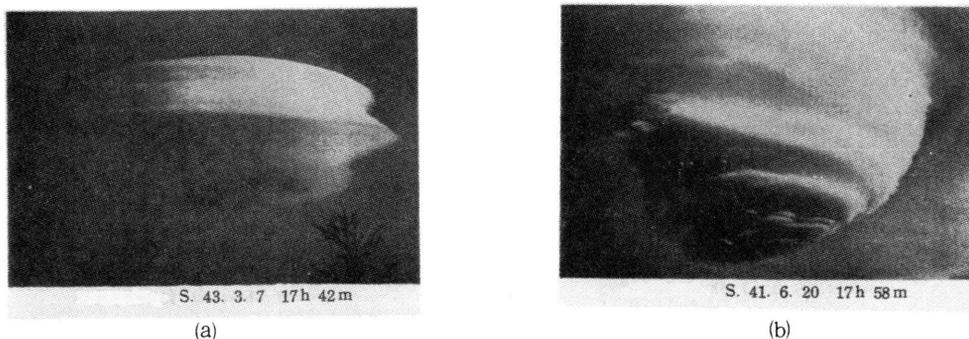


図7 本解析から想像される吊し雲. (a) 楕円吊し. (b) 渦状吊し. 共に湯山(1974)より引用.

な形状をしていたと思われる. このように立体的な雲の影は単純なものではなく, UFOの笠の大きさや形, または雲頂部の形などに影響されると思われる. 雲Aの高さ6,500mとはそうした条件の下で解釈されるべきである.

吊し雲は, 富士山の山岳波における第1波頂部にできると考えられる. 静的に安定な大気には Brunt-Vaisala 振動と呼ばれる自由振動が存在する. この振動数Nは,

$$N^2 = g \frac{\Gamma_a - \Gamma}{T} \quad (8)$$

ただし, Tは気温(K),  $\Gamma$ は気温減率(K/m),  $\Gamma_a$ は乾燥断熱減率(=1K/100m), gは重力加速度(=9.8 m/s<sup>2</sup>)である. この場合T = 265K,  $\Gamma = 0.62\text{K}/100\text{m}$ として, Nを求めると

$$N = 1.185 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

となる. これに対応する周期( $\tau$ )は,

$$\tau = 2\pi / N = 530\text{s} = 8.8 \text{ min} \quad (10)$$

となる. 富士山を這い上がった空気その後この周期で振動しながら風速Uで風下に流されるとき, 描く波長の波長(L)は,

$$L = U \cdot \tau = 22\text{m/s} \times 530\text{s} = 11.7\text{km} \quad (11)$$

となる. これはちょうど富士山頂から吊し雲までの距離11kmと符合する.

## 6. あとがき

本研究はリモートセンシング技術センター (REST EC) との共同研究として行った研究である. 同センターの小森和子さんには種々のお世話をいただいた. 本学渡辺不俊教授には計算機の扱いについて常々お世話になっ

ている. 以上の方々に感謝申し上げる.

環境情報専攻1998年卒業生の大河内紀子さん, 渡辺深央さんは卒業研究として研究の一部を担当した. 彼女らの労を多としたい.

## 文 献

- 山本三郎 (1965): 雲, 山と溪谷社  
 湯山 生 (1974): 富士山の雲, 気象研究ノート, 118, 23 - 38  
 大井正一・山本三郎・曲田光夫 (1974): 富士山の雲と大気の成層状態, 気象研究ノート, 118, 39 - 53  
 荒川正一 (1996): 富士山の山旗雲の研究, 東京家政大学研究紀要第36集, 11 - 15  
 理科年表 1987年版 丸善  
 宇宙開発事業団地球観測センター編 (1995): 地球観測データ利用ハンドブック, リモートセンシング技術センター