KFA1000 宇宙写真と SPOT 画像の比較

Comparison of KFA1000 Space Photo with SPOT Image

長 幸平*, 木村 宏*
竹内 章司*

*Kohei Cho, Hiroshi Kimura,
Shouij Takeuchi*

Abstract: A KFA1000 space photo was compared with a SPOT image for same test site, and characteristics of both images were evaluated. Photo interpretation and power spectral analysis proved that the KFA1000 photo has more high spatial resolution than the SPOT image. In case of enlarging digital image, such as SPOT image, Cubic Convolution method is suggested to sharpen the image. Shading and small scratches were found on the KFA1000 film. The scale of the film was found to be larger than the specification due to the satellite altitude variation.

1. はじめに

近年、衛星画像の高分解能化に伴ない、衛星画像を用いた地図作成に対する関心が高まって来ている。フランスの地球観測衛星 SPOT に搭載された HRV センサは CCD を採用することによりモノクロなら 10m, カラーでは 20m の高分解能デジタル画像の取得を可能としている。一方、ソ連の人工衛星 COSMOS-1951 に搭載された高分解能カメラ KFA1000 で撮影された宇宙写真は、デジタルデータではないが、公称空間分解能 5 m といわれ、現在、一般に入手可能な衛星画像の中では、SPOT 画像をのしぐ最も高い空間分解能を有する衛星画像として注目されている。

本研究では、同じ日に撮影された同じ地域の KFA1000 宇宙写真と SPOT 画像を用い、地図作成において重要な要素となる解像度等を中心に、両画像の特徴を定性的に比較評価した。

2. 衛星画像の観測諸元

KFA1000 宇宙写真および SPOT 画像の観測諸元を表 1 に示す。また、解析に使用したオリジナルデータの諸元を表 2 に示す。解析に使用した画像は共に 1988

年 6 月 6 日に観測された関東地方のもので、両画像は図 1 に示すようにオーバラップしている。このうち、テストサイトとして成田空港周辺を選定した。テストサイトの KFA1000 宇宙写真を図 2 に示す。

なお、使用した SPOT 画像は宇宙開発事業団で受信処理されたものである。

図 1. 解析画像の観測領域

* (財)リモート・センシング技術センター

Remote Sensing Technology Center of Japan (RES-TEC)

「写真測量とリモートセンシング」Vol.28, No.3, 1989

表 1. KFA1000 宇宙写真と SPOT 画像の観測諸元

	KFA1000宇宙写真	SPOT 画像	
搭載人工衛星	COSMOS-1951号	SPOT 1号	
観測高度	272.8km	832km	
センサ系	KFA1000カメラ 焦点距離 $f=1007.38\text{mm}$	HRV センサ(リニアアレイ CCD) 焦点距離 $f=1082\text{mm}$	
撮像方式	フレーム方式	プッシュブルーム走査方式	
記録方式	アナログ (スペクトルゾーナル・ネガフィルム)	デジタル (8ビット)	
観測範囲	75km	60km	
観測モード	—————	パンクロマチック・モード	マルチスペクトルモード
観測波長	570～670nm 670～800nm	510～730nm	バンド1 500～590nm
			2 610～680nm
			3 790～890nm
空間分解能 (衛星直下点)	約 5 m (フィルム解像力：145～160本/mm)	10m	20m

今回は使用していない。

表 2. オリジナル解析データの諸元

	KFA1000宇宙写真	SPOT 画像
観測年月日	1988年 6月 6日	
シーン ID	Film 2346 Frame 24928	332-278
観測モード	—————	パンクロマチック・モード 入射角：L2.3
記録媒体	密着ポジフィルム	CCT
画像の種類	2色カラー合成画像 570～670nm：赤発色 670～800nm：緑発色	白黒濃淡画像

© SOJUZKARTA

図 2. 成田空港周辺の KFA1000 宇宙写真

(新東京国際空港公団提供)

図 3. 成田空港の空中写真

3. 視覚的評価

すでに各種地図の整備されている我が国において地図の作成・更新を前提とした場合、衛星画像は1/25,000以上に拡大して使用することが要求されよう。ここではまず、両画像の解像度や拡大方法等について視覚的な評価・検討を行なった。

(1) 解 像 度

図4、図5は成田空港の旅客ターミナルビル周辺を約1/10,000に単純拡大したKFA1000宇宙写真とSPOT画像である。参考のため同地域の空中写真を図3に示す。両拡大画像を比較すると、以下のようなことがわかる。両画像共、エプロンに止まっている航空機（ほとんどがジャンボジェット機）を多数捉えているが、SPOT画像では、主翼と胴体が一体化してしまい、広い羽を広げたようにボケてしまっているのに対し、KFA1000宇宙写真では細い主翼が明瞭に認識できる。また、空港の施設や幹線道路も、KFA1000宇宙写真の方がより細かく認識しやすい。SPOT画像がすでに分解能10mとして高い評価を得ていることから考えて、KFA1000宇宙写真が10m以上の分解能を有していることは明確である。

(2) 拡大方法の検討

写真は、基本的に化学反応に基づくアナログ画像であり、拡大していくとやがてはぼけてくるものの、画像としての連続性は常に保たれる。これに対してSPOT画像のようなデジタル画像は、どんなに分解能が良くても、拡大を続けてゆくとやがては1画素に対応する矩形がタイルのように認識できるようになり、視覚的に画像としての連続性が失われて来る。約1/10,000に単純拡大した石油タンク群のKFA1000宇宙写真とSPOT画像を図6と図7a)にそれぞれ示す。図6の拡大したKFA1000宇宙写真を見ると、全体的にぼけては来ているものの、丸いタンクがなめらかな円として明瞭に認識できる。一方、図7a)の拡大SPOT画像は、丸いタンクが矩形のパターンとなっており、円として認識できない。

一般に、人間の目は、30cm程度の距離から画像を見たとき、白黒の格子縞が1mm間に5～10本以下になるとそれぞれの格子が認識できるようになるといわれ

る。SPOT画像の分解能は10mであるから1/50,000以上に単純に拡大して行くと1mm間の画素数が5以下となり、各画素が矩形で認識されるようになってしまい、画像としての連続性が徐々に失われ、対象物が認識しにくくなる傾向がある。こうした場合、画像としての連続性を保ちながらデジタル画像を拡大する有効な方法としてキュービックコンボリューション(Cubic Convolution)が知られている。

キュービックコンボリューションは、SINC関数($\text{SIN}x/x$)または類似の3次関数を重み関数として重乗加算する内挿法で、最近隣法等に比べ内挿による原画像の周波数特性の劣化を抑える特徴がある。ここでは、重み関数として以下の3次式を用いた。

$$h(x) = \begin{cases} 1-2|x|^2+|x|^3 & |x| \leq 1 \\ 4-8|x|+5|x|^2-|x|^3 & 1 < |x| \leq 2 \\ 0 & 2 < |x| \end{cases} \quad (1)$$

図7b)は同じ石油タンク群の部分をキュービックコンボリューションで拡大したSPOT画像であるが、図7a)の単純拡大画像に比べ画像の連続性がかなり改善され、判読が容易になっていることがわかる。このように、デジタル画像の拡大では、視覚的な画像の連続性を考慮する必要がある。

(3) 縮 尺

一般に、衛星の高度は、地球の歪みな重力の影響等で多少変動し、観測された画像に影響を与える。しかし、SPOT画像のようなデジタル画像は、地上局でのリサンプリング処理により画素サイズが常にほぼ一定(SPOT画像では10m)に保たれている。これに対し、KFA1000のような宇宙写真は、衛星高度の変動がそのまま写真の縮尺や観測幅を左右する。

今回使用したKFA1000宇宙写真のフィルム上の距離と地図上の距離を比較した結果を表3に示す。これから、写真の実際の縮尺は約1/280,000と推定された。これは、観測時、公称衛星高度に対して少なくとも32km程度(約12%)の変動があったことを示唆しているが、衛星高度の低さを考慮するとこの程度の衛星軌道の変動はやむを得ず、起こりうる誤差として認識しておく必要がある。

(4) 周辺減光とキズ

KFA1000宇宙写真のフルシーンを見ると、光学系による周辺減光が認められる。従って解析にあったては、

© SOJUZKARTA

図4．成田空港の拡大 KFA1000 宇宙写真
(縮尺：約 1 / 10,000)

© CNES

図5．成田空港の拡大 SPOT 画像
(縮尺：約 1 / 10,000)

(縮尺 1/10,000) © SOJUZKARTA

図 6. 石油タンクの拡大 KFA1000 宇宙写真

隣接シーンのオーバーラップ率が60%有ることを利用し、対象地域が比較的シーンの中心にある画像を選定することが望ましい。

また、今回、ソ連のソユーズカルタ社から直接購入した KFA1000宇宙写真にはフィルムの製造工程でついたものと推定される細かな傷がかなり認められた。かなり細かい傷なので2～3倍の拡大では問題にならないが、今回のように10倍程度に拡大する場合は目立ってしまうことがある。画像自体は充分拡大に耐えるものなので品質管理の改善が望まれる。

a) 単純拡大

b) キュービックコンボリューションによる拡大

図 7. 石油タンクの拡大 SPOT 画像 (© CNES) (縮尺：約 1/10,000)

表 3. KFA1000 宇宙写真の縮尺評価

No.	KFA1000フィルム上の距離	1/250,000地勢図上の距離	縮 尺
1	4.90cm	13.7km	1/280,000
2	13.00cm	36.0km	1/277,000
3	12.20cm	33.8km	1/277,000
4	17.30cm	48.6km	1/281,000
5	10.52cm	28.6km	1/272,000
6	15.75cm	43.9km	1/279,000
平 均			1/278,000

4. スペクトルの比較

次に KFA1000 宇宙写真と SPOT 画像のスペクトルを比較した。スペクトル強度の強弱は情報量の大小に等しいと考えてよい。まず、約10倍に拡大した KFA1000 宇宙写真をスキャナで読み込み、その濃度を R(赤), G(緑), B(青)のデジタルデータに A/D 変換した。読み込みのアパーチャは $50\mu\text{m}$ 、分解後の 1 画素は地表約 1.43m 、オリジナル SPOT データの画素の $1/7$ に相当する。次に、比較する SPOT データは KFA1000 宇宙写真のデジタルデータと画素サイズをあわせるため、オリジナルの SPOT データをキュービックコンボリューション法により 7 倍に拡大した。

比較場所としては、観測波長の違いによる影響を少なくするため、比較的白黒のパターンの多い航空機整備施設が並ぶ成田空港南東部約 $730\text{m} \times 730\text{m}$ の領域を選定した。表 2 が示すように、KFA1000 宇宙写真は青発色がないので、B(青)を除く R(赤)および G(緑)成分のスペクトルを比較した。比較部分の画像を図 8 に示す。

SPOT と KFA1000 の真のスペクトルをそれぞれ $S(w)$ 、 $K(w)$ とすれば、測定されるスペクトル振幅比 SPOT/KFA1000 は次式で表せる。

$R(w) = \{|U(w)||S(w)|\} / \{|V(w)||K(w)|\}$ (2)
ここで $U(w)$ はキュービックコンボリューション法による拡大での SPOT データのスペクトルの変化、 V

(w) は写真処理や濃度分解処理による KFA1000 宇宙写真のスペクトル劣化関数 ($|V(w)| \leq 1$) である。式 (1) に示すキュービックコンボリューション法の重み関数から求めた $|U(w)|$ は、図 9 中の点線に示すように高周波領域で劣化する。

スペクトル振幅比 SPOT/KFA1000 の結果を合わせて図 9 に示す。横軸の範囲は SPOT の最高空間周波数までで、両端が SPOT の最高分解能 (10m) に相当する。また白色ノイズ成分を除去するため、あらかじめスペクトル振幅の最小値を除してから比を求めた。

KFA1000 の R(赤)成分および G(緑)成分のスペクトル振幅比 $R(w)$ が $|U(w)|$ とよく一致することから、SPOT の最高空間周波数までの範囲では、

$$|S(w)| / \{|V(w)||K(w)|\} \approx 1 \quad (3)$$

と考えられる。一方、劣化関数の絶対値 $|V(w)|$ は 1 以下で高周波数領域ほど小さいから、高周波領域では

$$|S(w)| / |K(w)| < 1 \quad (4)$$

と推定できる。これは、KFA1000 宇宙写真が写真処理や濃度分解処理の影響 ($V(w)$) による画質低下にもかかわらず、高周波領域では SPOT よりもスペクトル強度が強いこと、即ち、SPOT よりも細かな空間分解能を有することを示唆している。

ただし、図 8 の画像が示すように、観測波長の違いのために比較画像の見え方は完全には一致しない。従って、ここで行なったスペクトルの比較が、観測波長の違いを無視していることに留意する必要がある。

© SOJUZKARTA/© CNES

KFA1000	KFA1000
R	G
SPOT	

図 8. スペクトル比較に使用した画像

図 9. スペクトル振幅比 SPOT/KFA1000
(横軸の範囲は SPOT の空間周波数帯)

5. ま と め

同じ日に撮影された同じ地域の KFA1000宇宙写真と SPOT 画像を用い、解像度等の定性的な比較評価を行なった。これまでに高分解能衛星データとして定評のある SPOT 画像を基準として KFA1000宇宙写真を評価したところ、SPOT 画像以上の解像度を有することが確認された。しかし、同時に、KFA1000宇宙写真には、周辺減光や細かい傷など写真方式特有の欠点も指摘された。一方、SPOT 画像は、解像力の点で KFA1000宇宙写真にやや劣るものの、デジタル画像として画質の改善、画像合成等各種処理が比較的容易であるなどの利点がある。従って、両衛星画像の利用

にあたっては、観測波長の違い、デジタル／アナログの違い、それぞれの長所欠点を考慮し、目的に応じた適切な使い分け、役割り分担が重要と思われる。

なお、本研究を進めるにあたり、新東京国際空港公団に資料を提供していただいた。また、千葉大学の石山教官、㈱パスコの岡本氏、零石氏にもご協力いただいた。ここに、記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 竹内,「TM 画像の写真出力におけるキュービック内挿の効果」,日本写真測量学会年次学術講演会論文集 pp115~118(1985)
- 2) 宇宙開発事業団,「地球観測データ利用ハンドブックーランドサット編・改訂版ー」,リモート・センシング技術センター, pp 2-43~47(1986)