

# CORONA 偵察衛星写真の利用法と

## インド西部の予察的地形判読

熊原 康博

群馬大学教育学部

### 1 はじめに

空中写真は、地形の起伏や連続性など地表面の情報を広範囲にかつ精度よく得ることができ、地形学の分野で一般的に利用される基本的な資料である。ところが、インドでは、空中写真が軍事機密にあたるため、空中写真を入手することが極めて困難である。現在では、高精度の衛星写真がほぼ世界全域にわたって入手できるものの、依然として高価であり、広範囲を対象とした調査をおこなうにはコストがかかる。本報告では、空中写真の代替資料として、1997年にアメリカ合衆国政府から公開された CORONA 偵察衛星写真を用いて、インド西部の広い範囲の地表面の情報を入手できることを紹介する。CORONA 偵察衛星写真は後述するように、比較的高解像度であること、実体視が可能なこと、1960～70年代のやや古い時代の地表を撮影していること、他の衛星画像に比べ安価であることという優れた利点がある。

現在では、CORONA 偵察衛星写真は、地球科学分野をはじめ多くの分野で活用されている。例えば、2001年にインド西部グジャラート州でのブジ大地震 (Malik *et al.* 2001) や、2005年にカシュミール地方でのパキスタン大地震 (Kumahara and Nakata 2006) の起震断層の発見や、中国タリム盆地・トルファン盆地の活断層 (渡邊ほか 2006)、チベット南西部のカラコラム断層 (Murphy *et al.* 2006) の変位地形の認定にあたり、CORONA 偵察衛星写真が用いられた。また、考古学の研究分野でも CORONA 偵察衛星写真が活用されており、シルクロード周辺 (相馬 1999, 2000) やアルタイ山脈 (Goossens *et al.* 2006) における遺跡の立地環境や地形条件を明らかにしている。さらには、西・中部セネガルにおける最近 30 年間の土地利用変化を明らかにした研究 (Tappan *et al.* 2000) も行われている。

本報告の構成は、以下の通りである。次章で CORONA 偵察衛星写真の概要について述べる。第3章では、CORONA 偵察衛星写真の加工の方法について具体的に紹介する。第4章では、このプロジェクトで購入したインド西部の衛星写真について述べる。第5章では加工した衛星写真を用いて、ヒマラヤ前縁活断層の変位地形の予察的な判読を行い、衛星写真の有効性を検討したい。

### 2 CORONA 写真の概要

1960年代から70年代のいわゆる冷戦時代に撮影された米軍偵察衛星写真は、従来機密扱い

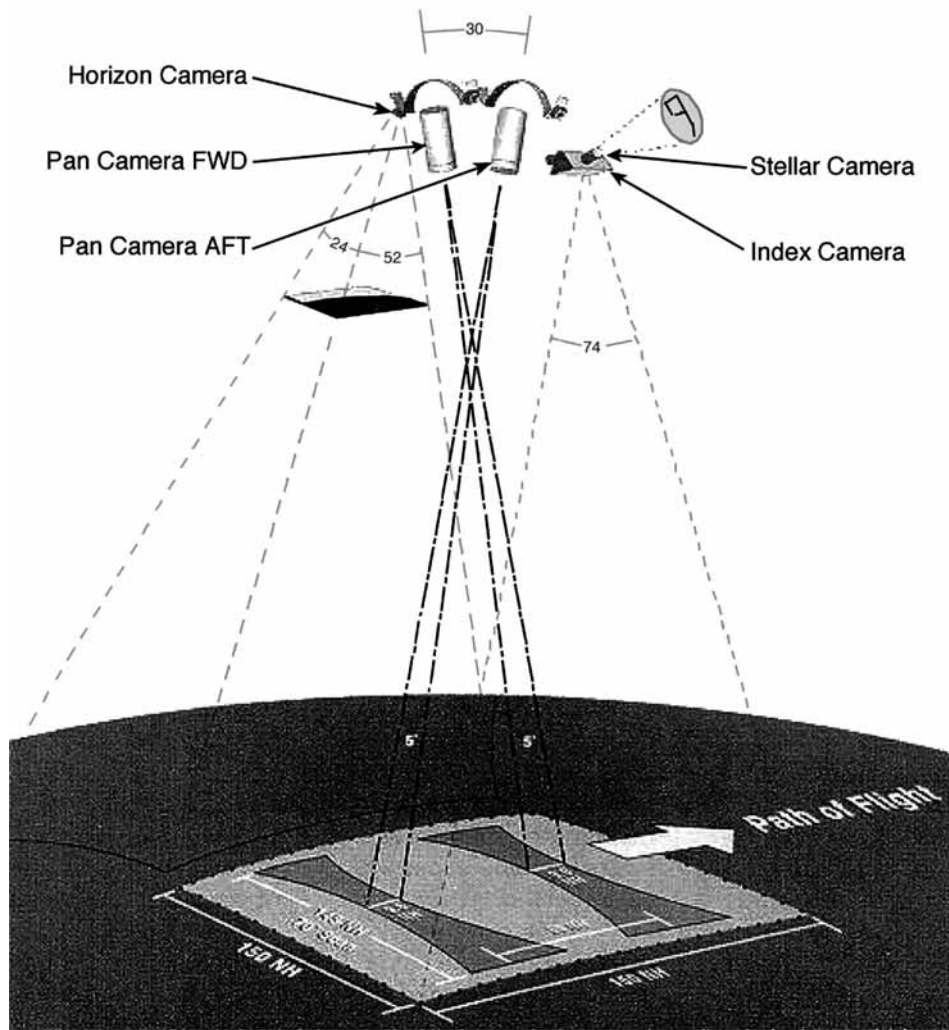


図1 CORONA 衛星写真による写真撮影の模式図 (Campbell 1996, Altmaier et al. 2002 による)

で非公開であった。その主たる目的は、旧ソビエト連邦のミサイル発射能力を把握すること、合衆国政府機関による地図作成であったとされている。その後、1995年2月に、偵察衛星写真の機密解除を指示する大統領令により、一般に利用できるようになった。公開された米軍偵察衛星写真は、アメリカ合衆国における衛星写真撮影の第一世代にあたる「CORONA (コロナ)」「ARGON (アルゴン)」「LANYARD (ランヤード)」と呼ばれるプロジェクトによって収集された。公開された米軍衛星写真は、ほぼ全世界にわたって1960年から1972年にかけて撮影され、その総数は86万枚以上に達している。すべての衛星写真は、ウェブ上 (<http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>) で検索することができ、アメリカ地質調査所 (USGS) を通じて一般に販売されるようになった。さらに衛星写真は、当初ネガ、ポジのフィルム媒体、ネガのダイレクトプリントの紙媒体での提供であったが、現在では、スキャンされた画像が入ったDVDでの提供やインターネットを通じたダウンロードへと変更され、利便性が向上している。

3つのプロジェクトのうち、コロナプロジェクトは、アルゴン (KH-5)、ランヤード (KH-6) プロジェクトと比較して、衛星写真の撮影数が最も多く、提供する情報の詳細さで最も主要なものとして位置づけられる (小方 1998, 1999; 小方ほか 1998)。コロナプロジェクトは、KH-1, KH-2, KH-3, KH-4, KH-4A, KH-4B の6種の仕様がある。これら6種の仕様のうち、撮影枚数が多く、研究において利用価値が高いと思われる実体視が可能な KH-4, KH-4A, KH-4B 衛星シリーズに

表1 コロナ衛星写真の諸元

KH (key Hole)	KH-1	KH-2	KH-3	KH-4	KH-4A	KH-4B	KH-5	KH-6
プロジェクト名	CORONA						ARGON	LANYARD
運用期間	1959.6- 1960.9	1960.10- 1961.10	1961.9- 1962.1	1962.2- 1963.12	1963.8- 1969.10	1967.9- 1972.5	1961.2- 1964.8	1963.3- 1963.7
撮影が成功した ミッション番号	9009	9013, 9017, 9019	9022, 9023, 9025, 9028, 9029	9031, 9032, 9035, 9037, 9038, 9039, 9040, 9041, 9043, 9044, 9045, 9047, 9048, 9050, 9051, 9053, 9054, 9056, 9057, 9062	1001, 1002, 1004, 1006-1031, 1033-1052	1101-1112, 1114-1117	9034A, 9046A, 9058A, 9059A, 9065A, 9066A	8003
撮影枚数	1,432	7,246	9,918	101,743	517,688	188,526	38,578	910
実体視可否	×			○			×	○
衛星の平均高度 mile(km)	90-250 (145-400)				100 (160)	81 (130)	174 (280)	93 (150)
焦点距離 inch(cm)	24 (58.8)						3.0 (7.6)	66(161.7)
焦点面の大きさ inch(cm)	約2.18×29.8 (5.5×75.7)						約4.5× 4.5(11.4× 11.4)	約4.5× 25(11.4× 61.3)
カメラタイプ	パノラマ						フレーム	パノラマ
地上の撮影範囲 mile(km)	9.5×130~26×360 (15×209~42×579)				10.6×144 (17×232)	8.6×117 (14×188)	300×300 (483×483)	7.5×40 (12×64)
焦点面での解像度 (線/mm)	50-100				120	160	30	160
地上での解像度 ft(m)	25 (7.6)				9 (2.7)	6 (1.8)	460 (140)	6 (1.8)
フィルム上での 縮尺	1 : 275,000~760,000				1 : 305,000	1 : 247,000	1:4,250,000	1:100,000
引伸の許容倍数 (倍)	<10						8	16
プレビュー画面の 縮尺(ft/pixel)	530				430		4000	180
フィルム幅 mm	70						5 inch (20.3mm)	5 inch (20.3mm)

熊原・中田 (2000) より作成

について紹介する (図1、表1)。

これらの運用期間は、KH-4が1962年2月から1963年12月、KH-4Aが1963年8月から1969年10月、KH-4Bが1967年9月から1972年5月である。

撮影が成功したミッションの数は、KH-4Aが49と最も多く、KH-4が20、KH-4Bが17である。これら3つの仕様によって撮影されたおよそ80万枚の写真は、公開された衛星写真全体のうちおよそ93%を占めている。

衛星の平均高度は、最も低いKH-4Bが81マイル(130km)、KH-4が90~250マイル(145~400km)、KH-4Aが100マイル(160km)である。搭載しているカメラの焦点距離は24インチ

(58.8cm)、焦点面の大きさは 2.18×29.8 インチ (5.5×75.7cm) で、焦点距離と焦点面の大きさは 3つの仕様すべて同じである。

カメラタイプは、すべて縦に比べ、横が著しく長いパノラマタイプである。通常カメラの横方向は東西に相当し、縦方向は南北に相当するので、東西に長い写真になる。写真の横方向は東西方向と斜行することは多いが、横方向が南北になることはない。

1枚の写真が撮影する地上の範囲は、KH-4が最大 26×360 マイル (42×579km)、KH-4Aが 10.6×144 マイル (17×232km)、KH-4Bが 8.6×117 マイル (14×188km) である。

焦点面での解像度は、KH-4が公称 1mm あたり 50～100 線、KH-4Aが公称 1mm あたり 120 線、KH-4Bが公称 1mm あたり 160 線とされる。地上での解像度は、KH-4が 25 フィート (およそ 7.6m)、KH-4Aが 9 フィート (およそ 3m)、KH-4Bが 6 フィート (およそ 2m) とされる。ただし、この分解能はもっともよい条件下での値と考えた方がよい。フィルム上での縮尺は、KH-4がおよそ 27 万 5 千分の 1～76 万分の 1、KH-4Aがおよそ 30 万 5 千分の 1、KH-4Bがおよそ 24 万 7 千分の 1 となる。

KH-4, KH-4A, KH-4B では前方視 (Forward)、後方視 (Afterward) の 2 台のカメラを搭載しており、同じ地域を撮影する前方視と後方視の写真 2 枚 1 組で実体視をおこなうことができる。前方視と後方視それぞれのカメラは約 30 度の角度で離れている。衛星写真のうち、パノラマタイプは、写真の中心でレンズが鉛直になるよう撮影されていることから、写真の左右の両端で大きく歪んで撮影されている。また、カメラ自体が傾いて撮影されていることもあり、鉛直に写真をみることができないことも多い。

地球表面を膨大な枚数の写真が撮影されているが、地域的に均一に撮影されているわけではない。写真検索から衛星写真の撮影範囲を比較すると、南半球の国や西欧諸国や日本はほとんど撮影されていない。一方、旧ソ連や中国などの旧共産圏やインドを含むアジアの発展途上地域・紛争地域では、繰り返し何度も撮影されており、アメリカの関心に大きな地域差が認められる (熊原・中田 1999)。このことは、現在でも空中写真を手に入れることは難しいこれらの地域ほど、数多くの写真の中から、雲が少なく鮮明な程度の良い写真を選ぶ機会が増えることになる。

### 3 CORONA 偵察衛星写真の効率的な加工

写真は、細長い形状をしているため、そのままの状態では判読するにはきわめて不便である。また、プリントアウトした際でも、同じような色調の写真が多く、必要な写真や実体視ができるペアーの写真を探すのは大変である。ここでは、画質を落とさず、判読しやすく、かつ整理しやすい衛星写真の処理方法について述べる。なお、本研究で用いたアプリケーションソフトは、Adobe 社 Photoshop CS3、Acrobat Professional である。

#### A 分割画像の統合

購入した画像は、スキヤニングの都合と考えられるが、4分割されており、それぞれ分割した両隣の画像とオーバーラップしている。ただし、オーバーラップの幅は写真によって異なるため、はじめに一枚の画像に統合する必要がある。この作業は Photoshop 上でおこなう。上の

レイヤーの画像を少し透明にすると、オーバーラップしている箇所でマッチングすることが容易である。統合した後、フィルムの周囲の黒い部分を削除する。

## B 画像解像度の変更

購入時の画像解像度は 1209.523dpi であり、1 の作業により幅約 75cm、高さ 5.5cm 程度の画像となっている。この画像を画像ファイルの容量を変更せず、300dpi に変更する。その結果、画像の大きさは幅約 300cm、高さ 22cm となる。

## C 画像の再分割

再分割の方針は、分割した画像が A4 用紙にぎりぎり入る大きさにすること、その画像の南北方向を A4 の長辺になること、ペアー写真と同じ地域の範囲にすることである。どの画像も同じ位置で分割させるため、分割のガイドとしてグリッドを設定する。便宜上ファイルのグリッド線の間隔を 15.3cm にする。これにより、一枚の画像が 20 分割されることになる。次に、長方形選択ツールのスタイルを幅 2000px、高さ 3000px（300dpi では幅 16.9cm、高さ 25.4cm）に設定する。なお、後方視の写真は南北が逆になっているので、180° 回転させてからおこなう。グリッドが長方形選択ツールよりも一回り小さいので、グリッドを頼りに必ず両隣の範囲も少し含めるようにコピーし、別のファイルにペーストする。これにより隣の画像をオーバーラップさせることができる。もし、さらに拡大したいときには、やはり画像ファイルの容量を変更しないで、A3 用紙などに拡大印刷するとよい。

## D 画質の調整、保存

レベル補正でコントラストを強調させた後、tif 形式で保存する。ファイル名には後方視か前方視かがわかるように A か F をいれておくとよい。こちらでは、08\_10DF56\_16.tif とし、左から、衛星写真のシリーズ番号（後述）、シリーズ内での最北からの番号、後方視か前方視か、番号の名、左から何番目のファイルかをわかるようにしている。

## E 画像の PDF 化

tif ファイルのままであると、プリントする際、一枚ごとにプリント処理をする必要があり、膨大な枚数の画像を処理するときには不便である。作業効率を高めるため、Acrobat Professional を用いて、複数のファイルを一つの PDF ファイルにする。この場合は、一度の処理で、すべてのファイルを印刷することができる。また、ヘッダ機能で、このファイルの名称とページをいれておけば、すべてのファイルにファイル名がつけられることになり、オーバーラップしているところにいれておけば、判読のじゃまにならない。

## 4 インド西部の CORONA 偵察衛星写真

本プロジェクトで購入した写真の範囲を、同じ Entity ID のものを便宜上一つのシリーズとして西から順に番号を付して、図 2 に示した。また、シリーズごとの諸元を表 2 にしめした。例えば、シリーズ 15 では、図 2 の範囲で示した中に、前方視の写真が 33 枚、後方視の写真が 34

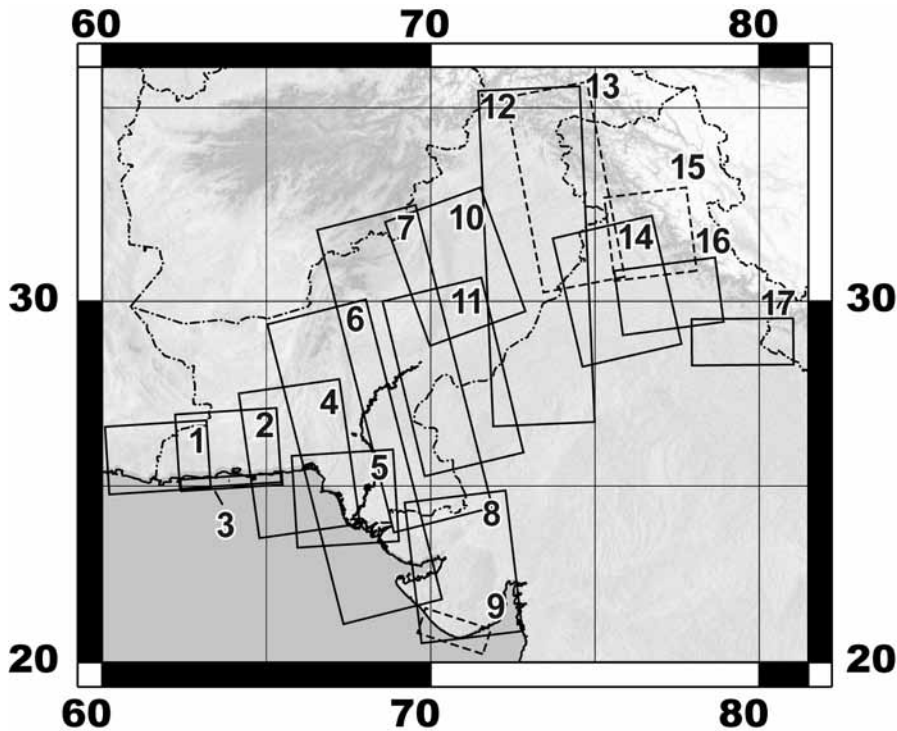


図2 購入した CORONA 衛星写真の範囲 (破線のシリーズは KH-4B のタイプ)

枚から構成されていることになる。範囲の東西が、ちょうどフィルムの横方向に一致し、前後の番号の写真と少しずつオーバーラップしながら、範囲内を撮影している。本プロジェクトで購入した写真の枚数は 854 枚。撮影範囲の面積はおよそ 150 万  $\text{km}^2$  に達し、日本の約 4 倍の面積に達する。17 シリーズの内、シリーズ 9、13、15 の写真が 1970 年代に撮影されたもので、KH-4B の高解像度のものである。

## 5 CORONA 偵察衛星写真を用いた地形判読

図3は、写真は、1970年1月28日に撮影されたシリーズ15の1枚であり、KH-4Bタイプの高解像度のものである。撮影範囲は、チャンディーガル北西方約90km付近のシワーリク丘陵とパンジャブ平原の境界のヒマーラヤ前縁である。この地域の活断層は、Yeats and Lillie (1991) がまとめたヒマーラヤ前縁帯の断層分布でも示されておらず、活断層に関する情報が極めて乏しい地域にあたる。今回、この地域の写真判読を行った結果、シワーリク丘陵の西縁に沿って、断層変位地形が連続して認められた。後期更新世に形成されたと推定される段丘面がシワーリク丘陵の開析谷の中には複数認められるものの、断層から下流では、それらの分布が絶たれている。また、少なくとも高度の異なる段丘面が2面(H,L面)認められ、断層の累積性が認められる。H面の断層崖は上方に凸型の丸みを帯びた撓曲変形をしている。Google Earthから高度差を調べると、H面は沖積面から約20m、L面は10mの比高差が推定される。以上のような変位地形の観察に基づくと、シワーリク丘陵を隆起させるような逆断層タイプの活断層が想定される。なお、この地域のGoogle Earthの写真は比較的高解像度の写真が使用されており、Google Earth上でこの地域を鳥瞰的にみると、H面の断層崖の高低差は認識できるが、L面の

表2 購入した衛星写真の諸元

series	Acquisition date	Entity ID	Camera type	start(north)	end(south)	number
series1	03-May-65	DS1019-1055	Forward	43	54	12
			AFT	48	59	12
series2	13-May-67	DS1041-1053	Forward	158	169	12
			AFT	157	167	11
series3	15-Oct-65	DS1025-2181	Forward	24	28	5
			AFT	30	31	2
series4	14-Oct-65	DS1025-2135	Forward	14	28	15
			AFT	20	35	16
series5	29-Sep-66	DS1035-2134	Forward	88	101	14
			AFT	88	101	14
series6	13-Oct-65	DS1025-2119	Forward	24	71	48
			AFT	30	78	49
series7	12-Oct-65	DS1025-2103	Forward	35	75	41
			AFT	40	81	42
series8	31-Dec-65	DS1028-2102	Forward	47	72	26
			AFT	52	78	27
series9	30-May-72	DS1117-2072	Forward	166	171	6
			AFT	171	176	6
series10	11-Oct-65	DS1025-2087	Forward	21	39	19
			AFT	28	46	19
series11	27-Feb-67	DS1039-1071	Forward	64	88	25
			AFT	64	88	25
series12	15-May-67	DS1041-1083	Forward	86	137	52
			AFT	86	138	53
series13	15-Sep-71	DS1115-1072	Forward	226	268	43
			AFT	234	274	41
series14	25-Sep-65	DS1024-1039	Forward	30	63	34
			AFT	38	70	33
series15	28-Jan-71	DS1115-2282	Forward	30	63	34
			AFT	38	70	33
series16	08-Oct-65	DS1025-1039	Forward	27	34	8
			AFT	31	40	10
series17	25-Sep-65	DS1112-1088	Forward	30	63	34
			AFT	38	70	33
Total						854

断層崖のそれでは認識することができない。活断層の認定にあたっては、より微細な変位地形を認定することが重要であり、CORONA 偵察衛星写真ではそれが可能となる。さらに、写真判読により、断層運動の歴史を解明するトレンチ掘削調査の候補地点を効率よく選ぶことができる。例えば、断層崖が浸食によって後退していないかどうか、下盤側に土砂が埋積していないかどうか、細粒な堆積層が期待されるかどうかを写真判読から判断することができる。このような作業が現地調査の前に検討できることは、限られた日数しかない海外調査では大きなアドバンテージとなりうるだろう。

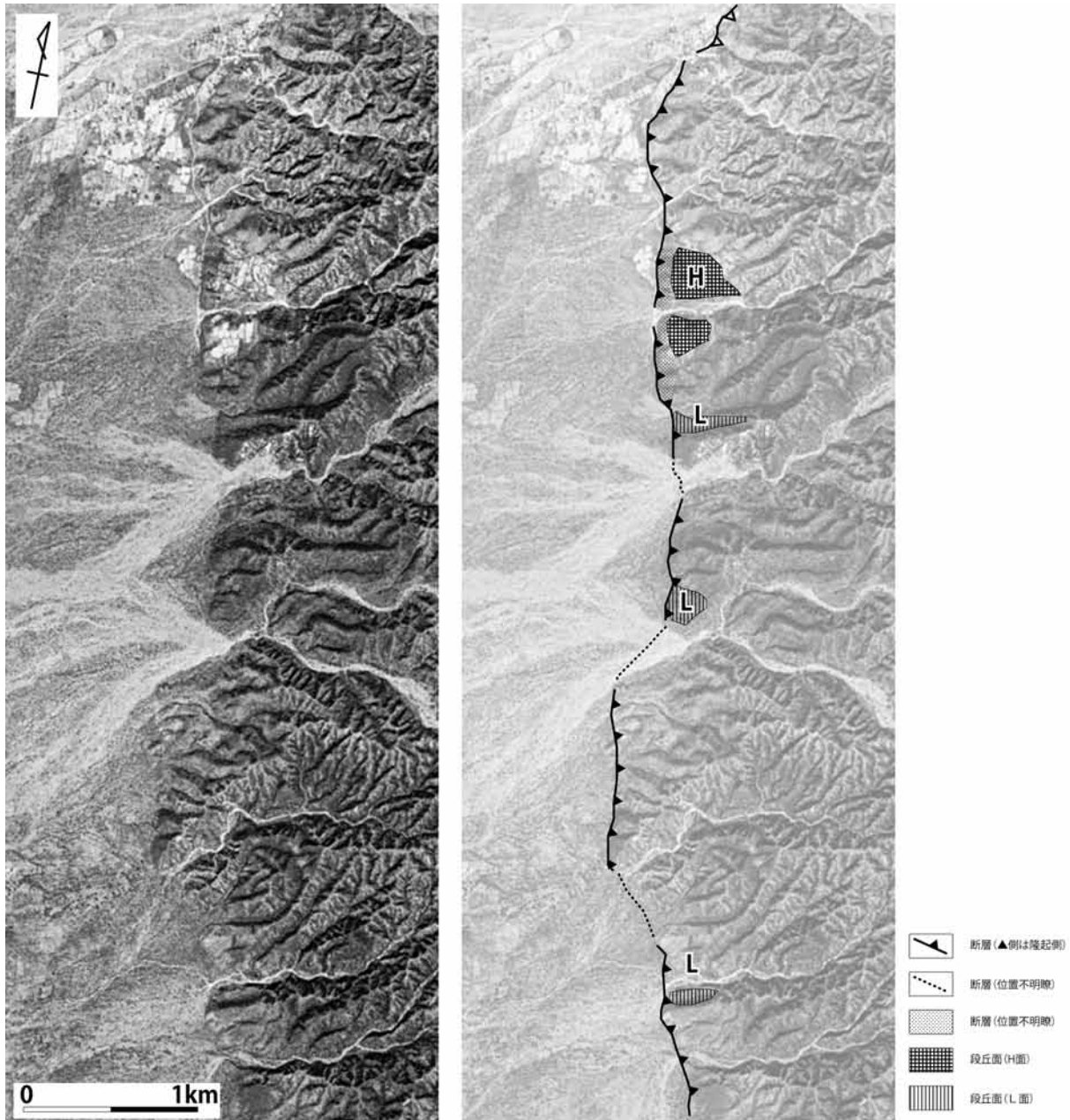


図3 チャンディーガル北西の CORONA 衛星写真と断層判読

## 6 おわりに

本報告では、CORONA 偵察衛星写真の概要、新たに行った写真の処理方法、購入した写真の撮影範囲を述べるとともに、CORONA 偵察衛星写真の活用例としてヒマラヤ前縁帯の活断層の変位地形の抽出について予察的に検討を行った。今後、インド・パンジャブ州を中心に地形判読を実施し、この地域の活断層を認定したい。

### 謝辞

本報告の作成に際して、広島大学大学院教育学研究科の前壘英明先生には、衛星写真の入手



全般に便宜を図っていただいた。群馬大学教育学部学生 小池史高君には CORONA 偵察衛星写真の補正にご協力いただいた。記してお礼申し上げます。

#### 【引用・参考文献】

- Campbell, J. B. (1996) *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis
- Goossens, R., A. D. Wulf, J. Bourgeois, W. Gheyle and T. Willems (2006) Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai Mountains. *Journal of Archaeological Science* 33: 745-755.
- 熊原康博・中田 高 (2000) 「発展途上地域における米軍偵察衛星写真の地形学的研究への応用」『地誌研年報』9、129-155 頁.
- Kumahara, Y., and T. Nakata (2006) *Active faults in the epicentral area of the 2005 Pakistan earthquake*. Special Publication. No. 41, Research Center for Regional Geography, Hiroshima University.
- Malik, J. N., Nakata, T., Sato, H., Imaizumi, T., Yoshioka, T., Philip, G., Mahajan, A. K., and Karanth, R. V. (2001). January 26, 2001, The Republic Day (Bhuj) earthquake of Kachchh and active faults, Gujarat, Western India. *Journal of Active Fault Research, Japan* 20: 112-126
- 小方 登 (1998) 「偵察衛星写真でみるシリアのヘレニズム植民地都市」『ユーラシアにおける都市圏郭の成立と系譜に関する比較地誌学的研究』科学研究費補助金研究成果報告書基盤研究 (A)(2)、193-204 頁.
- 小方 登・高田将志・相馬秀廣 (1998) 「自然地理学・人文地理学における米国偵察衛星写真の応用」『日本地理学会春季学術大会発表要旨』no.53、402-403 頁.
- 小方 登 (1999) 「衛星画像と衛星写真について」『衛星画像による東アジアの都城の復原に関する歴史地理学的研究』科学研究費補助金研究成果報告書基盤研究 (B)(2)、6-7 頁.
- 相馬秀廣 (1999) 「CORONA 衛星写真からみたウズン・ダティ遺跡付近-西域南道托弥国とのかかわり-」『国立歴史民族博物館研究報告』81、227-245 頁.
- 相馬秀廣 (2000) 「トルファン盆地の遺跡の立地条件-CORONA 衛星写真の判読を中心として-」『シルクロード学研究』8、37-78 頁.
- Tappan, G. G., Hadj, A., Wood, E. C. and Lietzow, R. W., Use of argon, corona, and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in West-Central Snegal. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 2000, 66: 727-735.
- 渡邊三津子・高田将志・相馬秀廣 (2006) 「CORONA 衛星写真・衛星画像を利用した地形調査: 中国タリム盆地・トルファン盆地の活断層を中心として」『地形』27、171-185 頁.
- Yeats R. S. and R. J. Lillie (1991) Contemporary tectonics of the Himalayan frontal fault system: folds, blind thrusts and the 1905 Kangra earthquake. *Journal of Structural Geology*, vol.19, no.2: 215-225.