

# デジタル三次元空間における実体視地形解析への ステレオスコピック技術の応用

## Stereoscopic Technology and Its Implication for Geomorphological Analysis and Digital 3D-Spaces

澤柿 教伸\*, ダモダール ラムサル\*\*

Takanobu SAWAGAKI\* and Damodar LAMSAL\*\*

キーワード：実体視, 地形学, GIS, リモートセンシング, 写真測量

Key words: stereoscopy, geomorphology, GIS, remote sensing, photogrammetry

### I. はじめに

地形学において、ステレオペア空中写真を実体視することによって地形を解析することは、ごく一般的な手法である。具体的には、反射式簡易実体鏡を用いる基本的かつ簡易なものから、解析図化機を用いて、商用利用や公的基準認定にも耐える精密地形図を作成すること（建設大臣官房技術調査室, 1996）まで、技術的にも精度的にも多様な手法が用いられている。

近年では、人工衛星の可視光センサーによるステレオペア画像から、空中写真と同様の図化処理ができるようになった。しかし、人工衛星画像のステレオ解析においては、画像情報を数値データとして扱い、パターンマッチングなどの数値的解析によって標高値を算出し、最終的には、ラスタ型数値標高モデル（ラスタ DEM）を作成することが主目的化されている傾向にある。このため、人工衛星画像解析に、人間の両眼視差認識に基づいた実体視解析が適用されている例は少ないのが現状である。

写真測量と人工衛星を用いたりリモートセンシングのこれまで流れを概観した Gruen (2005) の指摘によると、写真測量技術と人工衛星リモートセ

ンシング技術は、そもそも成り立ちからしてそれぞれ独自に発展してきたという。ゆえに、同じ対象物であっても、解析に用いる手法もアプローチも異なってしまったのだという。Gruen (2005) はまた、近年、双方のデータのデジタル化に伴って、写真測量分野と人工衛星リモートセンシング分野の技術が収束し始めていることも指摘している。しかし、その技術的収束がもたらす具体例が示されているわけではない。特に、写真測量分野が基本としてきたステレオ実体視がどのように人工衛星リモートセンシング分野の解析技術と収束していきつつあるのか、という展望についてはほとんど触れられておらず、今後の展開に期待する、と締めくくられているにすぎない。

そこで本稿では、実際にステレオ画像を用いた地形解析に携わった経験に基づいて、近年の技術的進歩がもたらした「収束」の地形学における本質の意味を考えてみたい。まず、写真測量やリモートセンシング技術にまつわる近年の進展を概観し、次いで、両分野の技術的収束によって可能となった融合の例を、「実体視空間」と「デジタル三次元空間」という概念の提示とともに解説する。さらに、今回筆者らが「TIN オフセット法」

\*北海道大学大学院地球環境科学研究院 / Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Japan

\*\*北海道大学大学院環境科学院 / Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Japan

と定義した手法を紹介し、その再現性の検証結果に基づいて、デジタル三次元空間プラットフォームにおいても人間の視覚視認に基づいた実体視解析が有効であることを議論する。

## II. 写真測量とリモートセンシングにおける近年の進展

### 1. 技術的融合の経緯

地球観測を専用とする最初の人工衛星は、1972年に運用が開始された「ランドサット」であった。搭載されたMSSセンサーによって、解像度80mのデジタル画像が提供され、単画像を基本とするものの、複数年次におけるデジタル画像の取得が可能となった。

一方、70年代当時の写真測量は、アナログ解析機器が広く用いられていた。アナログとはいえ、近距離撮影の高解像度なステレオ画像という点では、衛星観測に対しては優位にあった。80年代初頭からは、写真測量も徐々にデジタル化されるようになったが、当初は処理速度も遅く、狭い範囲への適用に限られていた。Gruen (2005)はこの状況を、デジタル処理の面では写真測量の優位性を発揮するには至らなかった、と評している。

光学センサーを搭載する近年の観測衛星は、ステレオ画像を撮影できるようになっているものが多く、数メートル程度の解像度も得られるようになってきた。三次元での地理参照が可能のように二次処理されたデータが提供されているものもある。従来から写真測量の分野で用いられてきた実体視の手法や写真測量技術は、今後、人工衛星観測においてもより重要になってくるだろうし、逆に、人工衛星観測で発達した様々なデジタル処理技術は、写真測量技術に新たな展開を導くものとなりうることは確かであろう。その際、データフォーマットの相互変換が重要となるが、異なるセンサープラットフォームで得られた画像の自動処理を進展させてきた衛星画像処理技術の貢献は、大いに期待される場所である。

### 2. ステレオ実体視技術の現状

家電製品にも使われる汎用技術のなかで、近年著しい進展が見られる技術の一つに、ステレオスコピック技術の低価格化と普及が挙げられる。映

画やテレビ映画やテレビなどを通じて一般にもよく知られるようになった、いわゆる「3Dビジョン」と呼ばれるビジュアル機材のコンシューマー化である。この3Dビジョン技術は、空中写真のステレオペアを実体視することでその起伏や形態を記載して分類や解析を行ってきた地形解析の伝統的な手法においても応用可能であることは明らかであろう。

写真測量技術においても、ステレオ写真の実体視が基礎となっており、かつては機械式だった図化機から、コンピュータと融合した解析図化機とよばれるシステムへと発展してきた。とはいえ、実体視で高精度測量を行う実際の場面においては、精密に調整された光学機器が必要であり、しかも、実体視とその操作は光学機器が担い、その出力はPCのスクリーンが担当する、というふうには、プラットフォームとしては分離されたままの時代がながく続いた。また、解析図化機を使いこなす技術の習得や修練に多くの経験と時間が必要とされ、機器自体も高価であり、だれでも気軽に使える機材とはほど遠い存在であった。

このため、高精度で測量値を取得できる技術的ポテンシャルが保証されてはいたものの、写真判読の成果を学術的に提示する条件として、図化機の使用自体があまねく必須とされてきたとは言えない。すなわち、簡易実体鏡を覗きながら手書きで既存の地図上にトレースすることでも、実体視判読の成果として十分に許容されてきたのである。

### 3. 「実体視空間」と「デジタル三次元空間」

3Dビジョンあるいはステレオスコピックモニターの登場でようやく、光学機器に頼っていた「実体視空間」の認識と、三次元地形データの計算機上の表現形態である「デジタル三次元空間」とのカップリングが可能となった。

ここでは「実体視空間」に対応する語として「デジタル三次元空間」という語を用いるが、「デジタル三次元空間」とは、X-Y-Zの空間座標数値データセットによって再現される仮想空間のことで、ビジュアルには、3Dレンダリングソフトウェアによっていかにも立体的であるかのようにPC画面上に再現される映像のことを指す。3Dレンダ

リング画像は、通常の PC モニターに表示できるし、紙に印刷することもできる。しかしそれは、あくまでも「見た目」が立体的に表現されているのであって、平面上に描画された出力結果から 3D 空間情報を引き出すことは容易ではない。

一方、「実体視空間」は、人間の左右の目の視差を利用しているため、シャッター式や偏光式、あるいはアナグリフと呼ばれるメガネを通してステレオペア画像を見ることによってはじめて被写体を立体的に認識することができる。「実体視空間」からは、従来の解析図化機に用いられている技術そのままに、三次元の空間情報を引き出すことが可能である。

かくして、ステレオスコピックモニターを用いることによって、一つのスクリーン上で、ステレオペアの実体視を行いながら 3D 地形データを取得・操作・編集できる時代が到来した。

#### 4. ALOS 衛星の優位性

人工衛星による地球観測技術面での発展としてここで取り上げたいのは、2006 年から 2011 年にわたって運用された陸域観測技術衛星「ALOS (だいち)」(宇宙航空研究開発機構, 2005) の成果である。

ALOS は、高解像度のセンサーを搭載した新世代の観測衛星の一つであり、搭載しているパンクロマチック立体視センサー (PRISM) とよばれる光学センサーによって、前方・直下・後方の 3 方向視のステレオペアを 2.5 m という水平解像度で取得できる性能を持つ。また、ALOS によって取得されたデータは JAXA と RESTEC で高次処理され、利用者が地理的に標定済みの画像を取得することができるようにルーチン化されている (RESTEC, 2010)。具体的には、RPC (Rational Polynomial Coefficients) という衛星画像の画素を地理座標へ変換するパラメータ付加情報を用いることで、航空写真作業で必要だった内部標定や外部標定といった面倒な手続きを経ることなく、すぐに緯度経度や標高といった地理情報を取得できる実体視モデルを構築できる (内田, 2008; 佐藤・水田, 2008; Tadono et al., 2009)。

ALOS 画像は 15 km 四方の範囲をカバーしている。これに対して空中写真は、一つのステレオ

ペアあたり、せいぜい数 km 四方の範囲しか実体視できない。広範囲をカバーするには、複数のステレオペアをシフトさせながら実体視していく必要がある。

これらのことから、RPC によって標定済みと見なすことができる ALOS PRISM ステレオペアモデルは、2.5 万分の 1 の図幅何枚分にも相当するリファレンスにもなりうる可能性を持っている。しかも、ステレオ実体視ができるので、等高線や地図記号に頼っていたこれまでの平面的な対地同定に比べて高精度の同定が容易に可能となるのである。

Gruen (2005) も述べているように、地球観測衛星がデジタルで取得したステレオペア画像は、技術的にはシームレスに写真測量技術でも扱うことができるようになった。低高度で航空撮影された写真も、高々度から人工衛星で撮影された画像も、同じ航空写真測量プラットフォーム上で扱うことができるのである。その意味で、ALOS PRISM ステレオペアデジタル画像が RPC の適用によって PC 上で即座に標定可能な状態で表示できるようになった意義は大きい。

#### 5. 偵察衛星画像公開と多時期画像の比較可能性

前述したように、ランドサットのマルチテンポラルな画像の利用可能性は大きな飛躍ではあったが、残念ながらステレオ実体視はできない。一方、LANDSAT 以前の 1960 年代から 70 年代にかけては、合衆国が Corona や Hexagon といった、諜報活動を目的とした人工衛星ミッションを実施し、アナログフィルムによるステレオペア画像が得られていた (McDonald, 1995; Day et al., 1998; Surazakov and Aizen, 2010)。つまり、60 ~ 70 年代にはすでに、人工衛星によってステレオ写真が撮影されており、諜報活動上の注目地域に至っては、複数の時期の異なる画像が取得されている場合すらある。

こうして Corona や Hexagon によって得られたステレオ画像は、冷戦終結後に一般公開され、現在ではフィルムをスキャンしたデジタルデータで取得可能である。2000 ~ 10 年代の現時点で ALOS PRISM ステレオ画像が得られていることとあわせて考えると、Corona/Hexagon から

ALOSに至るこの40～50年間の複数時期のステレオ衛星画像が得られたということでもある。つまり、ほぼ半世紀間の地表変化を、衛星ステレオ画像を用いて広範囲に比較検討することが可能となったということもでき、その意義は決して小さくない。

ただし、Corona/Hexagonはレンズ歪みが大きく、写真測量技術を適用するにはそれなりの幾何補正が必須であるという問題がある。近年では、いくつかの研究によって、補正アルゴリズムや代替手法が提案されるようになってきた（たとえば、Altmaier and Kany, 2002; Bolch et al., 2008; Surazakov and Aizen, 2010 など）。これらの歪んだ衛星画像を幾何補正する際のリファレンスとしても、ALOS PRISM RPCモデルを用いることは可能である(Lamsal et al., 2011)。両者はステレオ実体視が可能なので、対地標定作業において、既存の地図を用いるよりも遙かに容易で高精度に同一地点を特定できることも大きな利点の一つである。

### Ⅲ. 実体視空間とデジタル三次元空間との融合の例

#### 1. 実体視と不整三角形網(TIN)との親和性

本章では、前章で紹介した近年の技術的進展によって可能となりつつある、実体視空間とデジタル三次元空間との融合の実例を提示していくが、まず、空間情報を扱う上で両者に親和性の高いデータフォーマットとして、不整三角形網(TIN: Triangulated Irregular Network)を紹介する(図1)。

TINは、実体視地理情報システム(GIS)で三次元の地表面を表現するためのデジタルデータ構造の一つで、X,Y,Zの3次元情報を持ったノードと呼ばれる点を重複なく結び、それによってできる三角形の集合で地表面を表現するものである。

地形の特性に関わらず、等間隔の格子状にデータポイントが配列しているラスタ DEM に対して、TINで表現された地形モデルは、ベクターDEMとも呼ばれ、地形を表現する上で重要と思われる場所に任意にノードを配置することができる。言い換えると、ノードの位置の選定がTINデータの有用性にかかわるということでもある。その意味で、ノードの配置には、たとえば山頂、

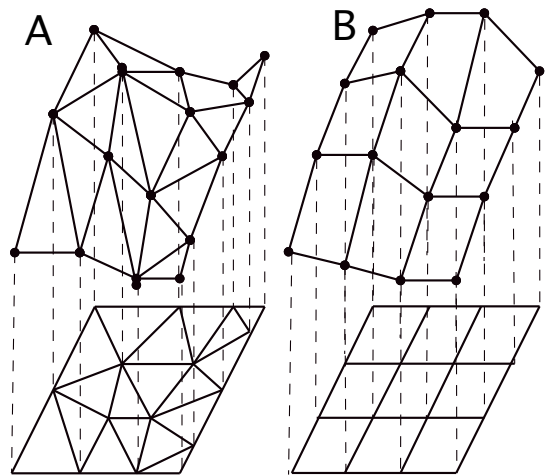


図1 A:不整三角形網(TIN)とB:等間隔のメッシュ状に配列したラスタ DEMで表現される地形の模式図

斜面の末端、尾根、谷底、くぼ地、鞍部などのような地形の変換点が適切であるとされている。また、地形の起伏が小さい場所ではノードの数を少なくしたり、逆に起伏が大きい場所は多くのノードを配置したりするのが適切であるとされる。これはまた、データポイントの重要性にかかわらず規定されたグリッドに従ってデータポイントを配列させなければならないラスタ DEMに比べて、データポイントを少なくすることができることも意味する。

さらに、前述したように、ラスタ DEMでは、山頂や稜線などの特徴的な地形上に標高点があるとは限らず、正確な高さや山稜の形状を得られないといった問題に直面することもしばしば経験する。そのような粗いラスタ DEMでも、それをTINフォーマットに変換してから、特徴的な地形の変換点にノードを追加する編集作業を加えることで、より現実に近い地形モデルに修正することも可能である。この作業自体、「実体視空間」を参照しながら写真測量の原理に基づいて行われるため、精度的にもラスタ DEMを向上させることができるといえよう。

総じて、TINの作成・編集作業は、写真判読のような人間のインテリジェンスに依存した作業とよい親和性があり、データ分布が画一的なラスタ DEMに比べて、人間が編集可能な程度に適度にデータ量を集約できる、という特徴を有して



いるといえる。

## 2. ステレオスコピック技術による「実体視空間」と「デジタル三次元空間」のカップリング

前章で述べたように、ステレオスコピック技術の低価格化と普及によって3Dビジョンと呼ばれるビジュアル機材が安価に入手可能となり、写真測量技術にも応用できるようになった。その結果、「実体視空間」と「デジタル三次元空間」のカップリングが可能になった訳であるが、カップリングを実現するハードとソフトウェアの組み合わせの具体例として、Leica Photogrammetry Suite (LPS) が挙げられる。

LPSは、コアモジュールと呼ばれる中核的な基本機能に、さまざまな用途に特化した各種のアドオンモジュールを組み合わせて使う統合ソフトウェアである。航空写真から衛星センサーまでの多様なデータや座標系・投影法に対応しており、地形データ作成の中核となるものとして、空中三角標定・自動画像点測定・オルソ偏位修正・オルソモザイクの作成・自動内部標定などの機能を有している。LPSの性能が最大限に発揮されるのは、ステレオスコピックモニターを用いた場合で、空中三角標定が済んだステレオペア画像をPCの画面上で「実体視空間」を操作することが可能となる(図2)。LPS等のソフトウェアとステレオスコピックモニターの組み合わせによって生み出される「実体視空間」をのぞき込みながら、従来の



図2 ステレオスコピックモニターの例  
PLANAR社SD2020. 20インチ液晶モニターが上下に2枚あって左右のステレオ画像をそれぞれ表示し、間にあるハーフミラーで合成された画像を偏光めがねで実体視する。

GISで行われてきたのと同様の、ラインやポリゴンなどのフィーチャーの描画が可能である。また、実体視空間の中にデジタル三次元空間としてのTINを構築していくこともできる。

このような「実体視空間」と「デジタル三次元空間」のカップリング作業は、光学機器部と計算機部が分離していた解析図化機では不可能なことであった。この技術自体は、プロフェッショナルなレベルでは1990年代から実現してはいたものの、近年のコンシューマー化・低価格化によって、より広く普及する可能性がでてきた点に意義がある。さらに、手書きで判読結果を地図上にトレースしていた時代には、定性的な評価にとどまらざるをえなかった解析が、今後は、より定量的にできるようになったともいえる。むしろ、技術的なしきいが下がった以上は、あえて旧来の判読手法を続けることに何らかの正統な理由付けが必要とされるようになるかもしれない。すでに、マニュアルで実体視判読した成果は、GISで解析した結果と整合させるには精度不足である、として許容しない傾向さえでてくるようになった。これは、リモートセンシング畑から見ると当然で、奇異に見られるかもしれない。しかし、そのような分野間ギャップこそが、Gruen (2005)の指摘したことであり、互いの距離が縮まるにつれて表出してくる変革として予想されたことなのである。

## 3. ステレオスコピック技術による自動生成DEMの検証と補正

「実体視空間」と「デジタル三次元空間」のカップリングという技術によって応用が期待できる一例として、自動生成DEMの検証が挙げられる。

近年の画像解析技術の発展により、イメージマッチングの原理を応用して、ステレオペア画像からラスタースタ DEMを自動生成することが可能となりつつある。その一例として、ALOS PRISM画像からラスタースタ DEMを自動生成するアルゴリズムが開発されている(Ukita et al., 2011)。自動プロセスによって生成されるラスタースタ DEMは、計算理論上は画像ピクセルの解像度まで密度を高めることが可能である。しかし、生成されたラスタースタデータすべてが実際の地表面とマッチしているとは限らず、少なからず検証が必要となる。ま

た、画像のコントラストが低い箇所や起伏の激しい箇所、あるいは雲・霞・人工的な突起物など画像マッチングに適さないイメージ部ではエラーが発生しやすく、その補正も必要である（図3A）。自動生成出力成果の検証と補正に際しては、別の方法で得られたラスターデータとの差分によって検証する方法もあるが、「実体視空間」にラスターDEMをカップリングさせれば、一目瞭然の結果として不一致箇所を特定することが可能である。

むしろラスターDEMで問題となるのは、自動生成DEMの密度が高くなればなるほど、狭い領域に配置されるグリッド数が二次関数的に増加し、手作業で修正できる限界を超えてしまうことである。ラスターデータにこだわる限り、自動生成DEMは、かえって扱いにくいエラーを含むデータセットとなってしてしまうことになる。そのような不一致箇所の修正に際しては、実体視空間におけるTINの生成によって補正を施すことが可能である（図3B）。

#### 4. ステレオスコピック技術による多時期ステレオ画像の比較分析

カップリング技術のもう一つの応用例として、複数の異なる時期に撮影されたマルチテンポラルなステレオ画像の比較分析がある。たとえば、60年代に撮影されたCoronaステレオペアからTINデータを取得し、そのTINデータを2000年代に撮影されたALOSステレオペアの実体視空間にカップリングさせると、TIN空間と実体視空間の差分として、二つの撮影年代間に発生した地形変化を読み取ることが可能となる。さらに、新しいほうの実体視空間にフィットするように古いTINノードをずらす編集を加えることで、新しい画像に対するTINデータを生成することができる。つまり、同じ地域の画像の場合、新旧どちらかの画像でTINを生成しておけば、もう一方のTINは既成のTINを修正するだけで完成することになる。このような差分修正の手法を、ここでは「TINオフセット」と呼ぶことにする（図4）。

図5は、ネパール・ヒマラヤの標高約5,000 m

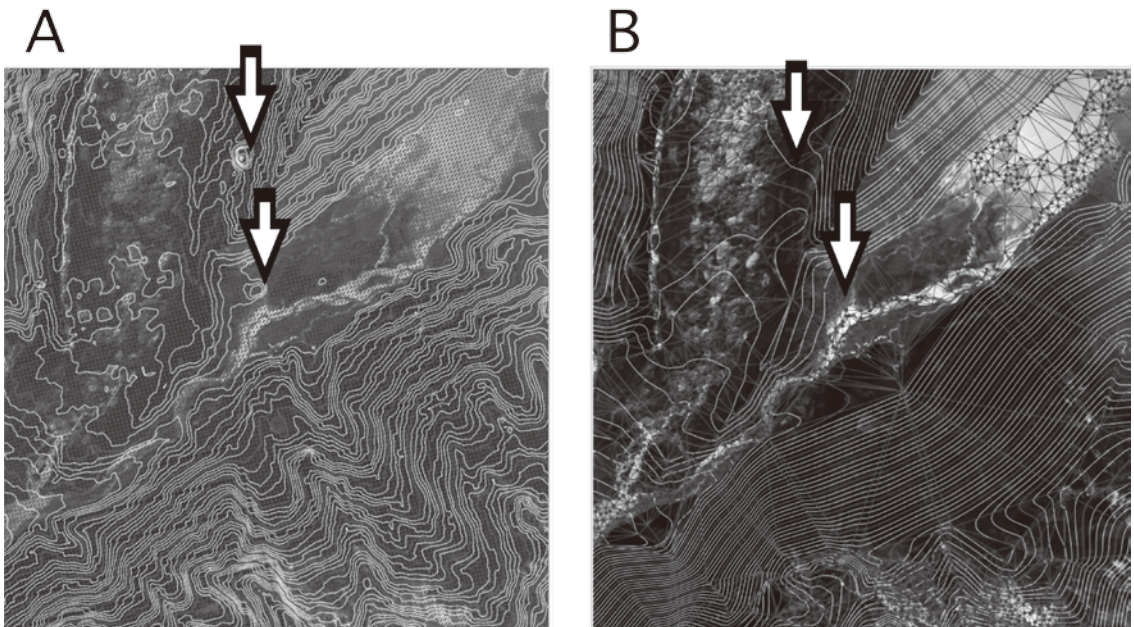


図3 A：自動生成されたラスターDEMを使って描画された等高線図の例。矢印の箇所にある突起部は自動生成エラー。細かい点は、格子状に並んだデータポイントであるが、自動生成エラーを校正するには大量のポイントを修正する必要があることがわかる。B：Aと同様の範囲を、編集作業中のTINによって描画した等高線図の例。実体視空間から読み取りながらTINを作成しているため、Aにみられる矢印の箇所のエラーはない。また編集に要するノード数も少なくて済む。



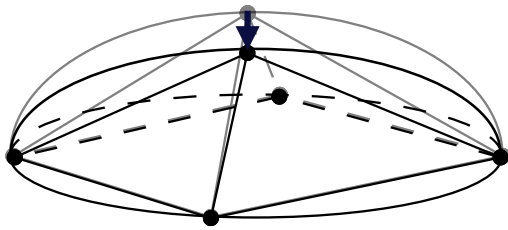


図4 TINオフセット法の概略

実体視空間上の地表面を半球で示す。それに整合するように設置したTINノードを点で表し、ノード間をつなぐ三角網を線で示している。同地域の実体視空間で撮影年代が異なるような場合、年代間の変化量は図中の矢印で示した変化量として視認できる。この差分だけTINノードを垂直移動させることで、変化が認められた領域だけデジタル三次元データを再編集することが可能となる。

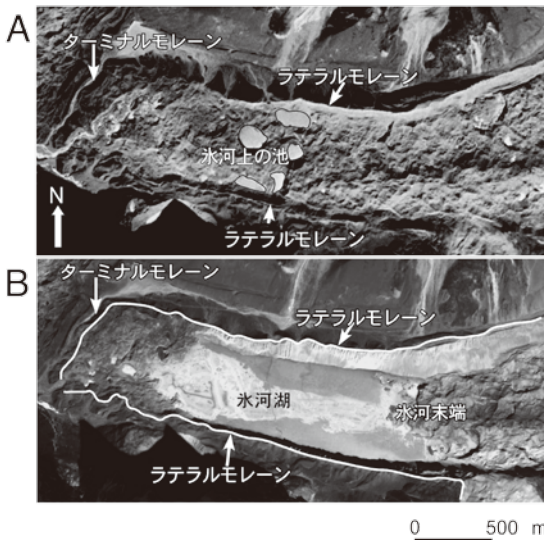


図5 ネパール・ヒマラヤ標高 5,000 m付近にあるイムジャ氷河湖の発達過程  
A：1964年に撮影されたCorona画像；B：2006年に撮影されたALOS PRISM画像。

にあるイムジャ氷河末端の変化を、1964年撮影のCorona画像と2007年撮影のALOS PRISM画像とで比較したものである。1964年当時は、氷河の末端はターミナルモレーンの内側までびっしり氷でつまっていた。その後の氷河の融解に伴って1980年代にはモレーンの内側に水たまりが形成されはじめ (Watanabe et al., 1994), 2006年現在では、長さ約2 km, 幅約700 mの氷河湖に

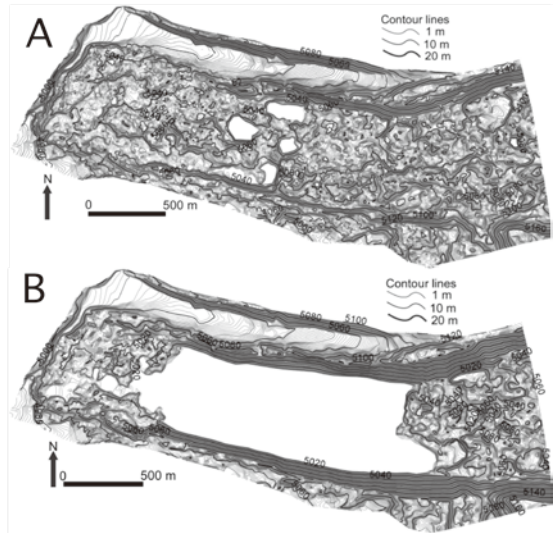


図6 A：TINオフセット法により1964年撮影のCoronaステレオペアの実体視空間にカップリングさせたTINから生成した等高線図および  
B：2006年撮影のALOS PRISMステレオペアからTINデータにもとづいて描画した等高線図

成長している (Watanabe et al., 2009; Lamsal et al., 2011)。

図6 Bは、2006年撮影のALOS PRISMステレオペアからLPSを用いてTINノードを取得し、それによって構築されたベクトルDEMから等高線図を描画したものである。図6 Aは、ALOSのTINを1964年撮影のCoronaステレオペアの実体視空間にカップリングさせた後、TINオフセット法 (図4) により実体視空間にフィットさせたものから変換した等高線図である。

基盤岩のようなほとんど地形変化がないと想定される領域において、TINデータを修正する必要があると認められないほどマルチテンポラルにフィットしていることは、実体視空間をステレオ視することで視覚的に確認済みである。しかし、この視覚的確認プロセスについては、人的認知過程が介在するため「主観的」とする評価も少なからずある。そのように判断する傾向は「実体視空間」のトレーニングを受けずに「デジタル三次元空間」を主に扱ってきた研究者に多い。

こうした危惧を払拭するには、人間の両眼視差認識に基づく「実体視空間」の信憑性を実証しておく必要がある。そこで、ステレオ実体視による

TIN 生成作業の再現性の良さを示すために、両者の実体視空間からそれぞれ独自に TIN を作成し、それらの差分を計算した (図7)。この際、TIN データ 2 m メッシュのラスタ DEM に変換して差分計算をやすくしている。また、地形変化がほとんどないと仮定できるモレーン外周部のみをマスキングして抽出し、本来「差分がゼロ」となるべき地域と仮定したうえで、そこにどれだけの差分が現れるかを検証した。

Corona と ALOS 画像からそれぞれ独自に TIN を生成しているため、設定する TIN ノードの位置は同一ではあり得ず、また高さ方向の読み取りには作業誤差も存在し、両者を完全に一致させることはそもそも不可能である。それでも、ヒストグラム (図7B) に示すとおり、両者の差分はほぼ ± 2 m 内外に収まっている。このことは、

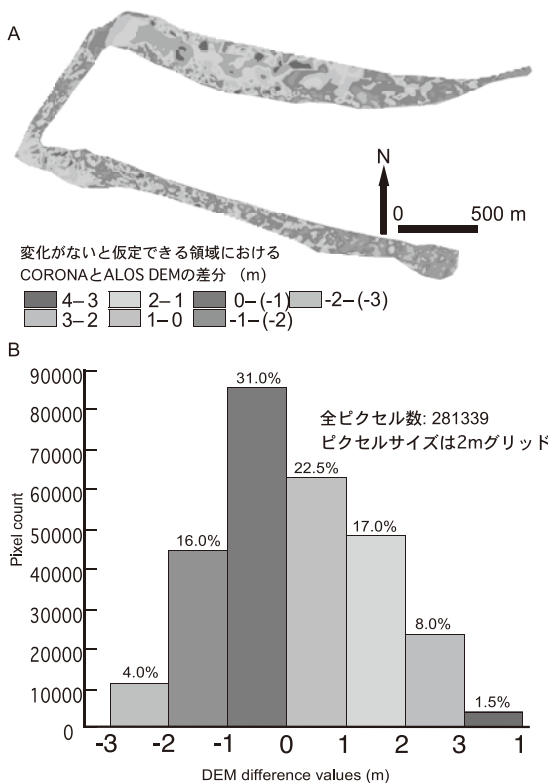


図7 A: ALOS と Corona それぞれの実体視空間から作成した TIN を、2 m メッシュのラスタ DEM に変換して得た差分 (地形変化がほとんどないと仮定できるモレーン外周部のみをマスキングして抽出している) および B: 差分ピクセルのヒストグラム

TIN 生成作業の再現性の良さを明確に示していると評価できる。

一方、TIN オフセット法は、実体視空間内で変化がないと視認できた領域では TIN の補正を施さないため、原理的に変化のないところの差分はゼロとなり、純粹に変化があった (と視認した) 箇所のみを差分を数値的に表現することができる (変化分をオフセットする実体視認識の再現性については前述したとおり)。このように、TIN オフセット法は、作業量を簡素化し、地形学的に意味のある変化を抽出できるという点で、優れた方法であると結論できる。

以上のように、TIN を用いた差分法には、独自に生成した TIN どうしの比較と TIN オフセット法の二つの方法があることになるが、そのどちらをより客観的とするかは、おそらく研究者によって判断の分かれるところであろう。しかし、ステレオ写真の実体視を伝統的に受け入れてきた地形学の分野においては、人間の目による視差センサーを信頼する基盤は確固としており、より作業量を軽減できる TIN オフセット法を推奨してもよいのではないかと考える。

#### IV. まとめ

本稿では、写真測量と人工衛星を用いたりリモートセンシング技術にまつわる近年の進展を概観し、ステレオスコピック技術を用いた「実体視空間」と「デジタル三次元空間」との融合の実例を示し、実体視解析の可能性について論じた。その要点は以下のようにまとめられる。

- 1) 衛星画像と空中写真を合わせると、過去 40 年にわたる多時期ステレオ画像が取得可能である。
- 2) 冷戦時代に撮影されたステレオ衛星画像は歪みが大きく、これまで空中三角測量に用いるには適さなかったが、画像補正技術が開発されるようになっており、またその標定には、ALOS PRISM データが高精度リファレンスとして使える。
- 3) デジタル実体視解析プラットフォームでは、ラスタ DEM よりも、TIN のほうが実体視作業との親和性が高い。
- 4) TIN オフセット法を用いれば、多時期ステレオ



レオ画像の比較解析の作業量を軽減できる。

地形解析分野における近年の技術進歩とコンシューマー化には目覚ましいものがあり、写真測量と衛星リモートセンシングの技術的な融合が進行しつつある裏で、異なる研究文化間での戸惑いが見受けられるのも事実である。しかし、単に情緒的にお互いの文化の違いを感じ取っているだけでは進展は望めない。むしろ、そのような違いを顕在化させて前向きに受け止めていくことが要求されるであろう。また、ステレオ写真判読という、地形学が伝統的に行ってきた解析手法についても、定性的記載からより定量的な計測、そしてデジタル化へと、最低限要求される解析水準が高度化する可能性もある。本稿が、そのような意識改革の一助となることを期待したい。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学グローバル COE プログラム「統合フィールド環境科学の教育研究拠点形成」の「人材育成自由企画」の資金援助を得た。本稿をまとめるにあたり、北海道大学大学院地球環境科学研究院の平川一臣・渡邊悌二の両氏からは有益な助言をいただいた。衛星データ解析に関して、独立行政法人宇宙航空研究開発機構の田殿武雄氏、ならびに財団法人リモートセンシング技術センターの山之口勤氏から多くのサポートをいただいた。名古屋大学の藤田耕史氏、北海道大学低温科学研究所の杉山 慎氏、北海道大学理学部の古屋正人氏には、氷河のリモートセンシング解析に関して議論していただいた。心より感謝申しあげる。

#### 参考文献

宇宙航空研究開発機構 (2005) : 地球観測データ利用ハンドブックー ALOS 編一, ドラフト版. [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/ALOS\\_HB\\_DRAFT\\_JP.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/ALOS_HB_DRAFT_JP.pdf).

内田 修 (2008) : ALOS/PRISM の RPC モデルのデジタル図化機による精度検証業務. 先端測量技術, 97-98, 92-103.

佐藤壮紀・水田良幸・小井戸今朝己・大野裕幸 (2008) : ALOS/PRISM の RPC モデルを用いたステレオ図化機精度検証. 日本写真測量学会平成 20 年度年次学術講演会発表論文集, 107-108.

建設大臣官房技術調査室監修 (1996) : 『建設省公共測量作業規程 解説と運用』 社団法人日本測量協会.

Altmaier, A. and Kany, C. (2002) : Digital surface model

generation from CORONA satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(4), 221-235.

Bolch, T., Buchroithner, M.F., Peters, J., Baessler, M. and Bajracharya, S. (2008) : Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/Nepal using spaceborne imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 1329-1340.

Day, D.A., Logsdon, J.M. and Latell, B. (Eds.) (1998) : *Eye in the Sky: The Story of the Corona Spy Satellites*. Smithsonian Book, Washington DC.

Gruen, A. (2005): Photogrammetry and remote sensing -a convergence of technologies. 写真測量とリモートセンシング, 44, 1-3.

Lamsal, D., Sawagaki, T. and Watanabe, T. (2011) : Digital terrain modelling using Corona and ALOS PRISM data to investigate the distal part of Imja Glacier, Khumbu Himal, Nepal. *Journal of Mountain Science*, 8(3), 390-402.

McDonald, R. A. (1995): CORONA: Success for space reconnaissance. A look into the Cold War, and a revolution for intelligence. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 689-720.

RESTEC (2010): The Geometric Accuracy Evaluation Results of RPC (Ver.1.9).

Surazakov, A.B. and Aizen, V. B. (2010) : Positional accuracy evaluation of declassified Hexagon KH-9 mapping camera imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Journal*, 76(5), 603-608.

Tadono, T., Shimada, M., Murakami, H. and Takaku, J. (2009): Calibration of PRISM and AVNIR-2 onboard ALOS 'Daichi'. *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, 47(12), 4042-4050.

Ukita, J., Narama, C., Tadono, T., Yamanokuchi, T., Tomiyama, N., Kawamoto, S., Abe, C., Uda, T., Yabuki, H., Fujita, K. and Nishimura, K. (2011) : Glacial lake inventory of Bhutan using ALOS data: Part I: methods and preliminary results. *Annals of Glaciology*, 52 (58), 65-71.

Watanabe, T., Ives, J.D. and Hammond, J.E. (1994) : Rapid growth of a glacial lake in Khumbu Himal, Himalaya: prospects for a catastrophic flood. *Mountain Research and Development*, 14(4), 329-340.

Watanabe, T., Lamsal, D. and Ives, J.D. (2009) : Evaluating the growth characteristics of a glacial lake and its degree of danger of outburst flooding: Imja Glacier, Khumbu Himal, Nepal. *Norsk Geografisk Tidsskrift (Norwegian Journal of Geography)*, 63(4), 255-267.