

■ 第 3 セッション ■

---

人口衛星から見た  
タクラマカン砂漠と砂漠化



報 告

石 山 隆



質 疑 応 答

.....  
2006年6月3日

●司会（藤田）— では、次は千葉大学の石山先生の「人工衛星から見たタクラマカン砂漠と砂漠化」についてお話をいただきます。

今日は石山先生からいろいろな写真をご提供いただきまして、ロビーにも展示してあります。

われわれもタクラマカン砂漠調査のときに、偶然、石山先生にお会いしました。空の上のほうからいろいろと写真を撮っているけれども、実際に現地に行ってみないとわからない点もいろいろありますので、現地で実際に確認をしながらの調査をされています。

このシンポジウムを実施しようというときに、真っ先に候補者として挙げさせていただきました。それでは、どうぞよろしくお願いたします。

### ◆第3セッション報告◆

## 人工衛星から見たタクラマカン砂漠と砂漠化

石山 隆

<千葉大学>

千葉大学の石山と申します。私は以前から中国のタクラマカン砂漠の周辺について、リモートセンシング技術によって地表面の変動を衛星データから調査をしています。

近年、衛星データは衛星のセンサーの発達により、特に ADEC というプロジェクトが進行中です。そこでは主にダストストーム（dust storm：砂塵嵐）の観測が盛んにおこなわれています。

ダストストームそのものは気象と深くかかわりますから、大陸規模の研究になります。一方、タクラマカン砂漠周辺の砂漠化、荒漠化は、かなりローカルなことを詳細に調べる必要があります。

タイトルは「人工衛星から見たタクラマカン砂漠と砂漠化」ですから、リモートセンシング（遠隔探査）技術を使った地表面の観測の話をしていきます。リモートセンシングとは、人工衛星から地表面を調査することです。データそのものは昔の写真とは違い、すべてデジタルでとれます。得られたデータは、解析ソフトによっていろいろな環境解析がおこなわれます。

【図2】はリモートセンシングの定義です。リモートセンシング（Remote Sensing）は国によって言い方が違いますが、中国語では「遙感（ヤオカン）」、フランス語では「Teledetection（テレデクション）」と言っています。リモートセンシングとは、遠くから非接触で地表面を測定することです。

【図3】は1999年に打ち上げられた米国のTERRA（テラ）という人工衛星で観測したタクラマカン砂漠全域です。緑の部分がオアシスで、黄色に見えるところが砂漠地帯です。上がテンシャン（天山）山脈で、下の雪のあるところが、クンルン（崑崙）山脈です。

【図4】はちょうど春に、タクラマカン砂漠をダストストームが通過しているところです。このようにダストストームのような大きなものは、全域をカバーするような中間解析度の人工

衛星のセンサーが適しています。これでダストストームがどのように移動しているかということがよくわかります。これは人工衛星 TERRA に搭載された MODIS（モーディス）というセンサーによって得られた画像です。TERRA という衛星には、多国のセンサーが相乗りで、日本で開発したセンサーも1つ乗っています。それは ASTER（アスター）と言います。

【図5】はMODISによって得られた画像を解析した結果でダストイベントの発生地域はどこが多いかを示した図です。タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、赤色のところが頻度の高いところです。ダストストームは中央アジア、中国を經由し、韓国から日本に移動します。また、最近の研究では、サウジアラビアやインドのタール砂漠でも発生が確認されています。一部は、これがアフガニスタンなどで発生したものが、パミール高原を越えてタクラマカン砂漠まで流れてきます。

さて本題ですが、私の主な研究は、植生指数の分布から推測したオアシスの状態とか、タクラマカン砂漠の南と北のオアシスを土地被覆の変動の調査です【表1】。

衛星データから地表状態を解析するとき、よく使われるのが「植生指数」という数値です【図6】。この概念は非常に簡単です。衛星データの近赤外の数値と、可視部の赤の波長を、このような簡単な式で計算して得られたものが植生指数です。これは代表的な例ですが、植生の密なところの可視部の入射量が100としますと、密なところの赤バンドの反射が小さくなります。一方、近赤外部では植生は強く反射します。

また、乾燥地のようなまばらな植生地では、このように近赤外の反射は密なところよりも低くなり、可視部の赤バンドでは逆に反射率が高くなります。例えば、このような値では、乾燥地の植生指数は0.14、密な植生指数は0.7というように対比的な値になります。

このTERRAのMODISというデータから植生指数を求めた画像が、【図7】のようになっています。オアシスは、植生指数が高くなるのが分かります。

この植生指数はいったい何に対応しているのかが重要です。【図8】はわれわれが現地に行き、実際に地表面で植生被覆率を計測している場面です。この植生指数の計測にはいろいろな方法がありますが、この方法は100メートルのひもを張り、そこに植物がどのくらい生えているかで計算します。100メートルのひもをクロスに張り何カ所も測りました。

【図8左下】の図は、植生指数と植生被覆率の実測値との関係を示したものです。

【表2】は、TERRAのMODISの衛星データから求めたタクラマカン砂漠のオアシスの面積です。植生指数から、それぞれのオアシスの面積がどのくらいあるかを示したものです。そして、植生指数の高い値（NDVI 0.69-0.9）を灌漑農地とします。砂漠の交錯地帯からすべてを含んだもの、すなわちオアシスの周辺の植物の薄いところからオアシスの内部までを計算したものがこちらです（NDVI 0.4-0.9）。これらの両者の比をとったものが（Ratio of NDVI）です。

これからわかることは、ここはタクラマカン砂漠の北縁です。それから下が南縁です。北のほうは、植生指数の比が高くなります。これはどのようなことを示しているのかと言いますと、農地の利用面積が大きいということです。また、逆にそれは利用可能な水が多いということにもなります。

逆に南縁では農地として利用率が低いことになります。それは利用可能な、例えばクンルン山脈からの水が非常に少ないということになります。また、低い値ほど農地開発のポテンシャルが大きなオアシスとも言えます。

【図9】は水資源と農耕地の面積、また灌漑地の面積をプロットしたものです。水資源があ

れば灌漑農地をいくらでも拡大できるわけです。一方、これは農耕可能なオアシスです。これも 50 億立方メートルまでは耕作可能地として、水資源が 50 億立方メートルくらいまでは直線関係ですが、それ以上になると飽和してしまいます。ホータン（和田）、アクス（阿克蘇）、カシュガル（喀什）などの大きなオアシスには農耕可能地がありますが、塩害など不適切な水管理によって農耕地が減ってしまうことを意味しています。

今まで求めた衛星データから、砂漠とオアシスの面積をまとめてみました。オアシスの面積が約 23,000 平方キロで、東京都の約 10 倍の面積に匹敵します。この 23,000 平方キロが砂漠化の脅威にさらされているとも言えます【表 3】。

また、タクラマカン砂漠全域の面積は約 30 万平方キロになります。オアシスと砂漠の面積の比率は、オアシスの周辺までを全部含めたものと砂漠耕作地帯と砂漠の面積の比率が 7.5 パーセントです。逆に純粋にオアシスの内部だけの比率は 1.67 パーセントです。いろいろな研究発表で、オアシスがダストストームの抑制になっているという報告はありますが、私が見た限りではほとんど抑制には寄与していないと思います。

参考に衛星データから求めたタクラマカン砂漠の全域の面積は約 30 万平方キロですが、参考文献では『The New Encycopedia Britanica, Fifteen Ed.』では 27 万平方キロです。もう一つの文献（『The International Geographic Encyclopedia and Atlas, London, 1979』）では 32 万平方キロでした。私の求めたデータは、ちょうどその間でした。

今日の報告のハイライトにもなっています土地被覆変動について報告します。調査したエリアは北縁のアクス、アワト（阿瓦提）、南縁はピーシャン（皮山）が中心となります。

【図 10】は 1990 年ごろに調べた衛星データから解析した南縁の小さなオアシスです。オアシスのさらに小さなある地区の植生被覆率の変動を調べてみました。

左側が 1973 年の画像です。真ん中が 1988 年です。これから差画像を解析すると、56 パーセントほど農地が増えていることがわかりました。

このころは衛星データがまだタクラマカン砂漠全域をカバーしておらず、データの精度低いものでした。衛星データの一つのピクセルの分解能は 80 メートルです。これはホータンとチラの間の小さなオアシスです。これで面積が 56 パーセント増えたことがわかりましたが、さらに 1988 年と 2001 年を比較すると逆に縮小していました。おそらく植生域は、人間がいろいろと活動することによって増えたり、減ったりしているのではないか、ということが予想されます。

先ほども言いましたが、1999 年に打ち上げられた人工衛星 TERRA に日本のセンサー（ASTER）が搭載されています。その ASTER の開発時には、その ASTER で観測すべき項目の策定に、私も参加しました。そのときに NASA に観測して欲しいエリアの要求を出しました。特にタクラマカン砂漠周辺の衛星データが非常に少なかったため、タクラマカン砂漠全域を観測するように要求しました。

現在では、衛星データはタクラマカン砂漠全域をカバーできています。そこでまず、ASTER のデータを集めてモザイクしました【図 11】。それとなるべく古い人工衛星のデータを探しました。地球観測衛星ができたのが 1972 年です。それ以前の古い衛星データがないか調べてみると、CORONA という衛星がありました。このアメリカの CORONA は軍事衛星です。まだ旧ソ連とアメリカの冷戦時代に、アメリカが中央アジアのミサイル基地を偵察するため打ち上げた衛星です。しかし、そのデータは残念ながらグレースケールでした。この衛星のデータを集

めて現在と比較し目視判読しました。意外なことにかなり植生域が増えているところもあるし、逆に植生域が減ったところもありました。これはなかなかおもしろいと思い、本格的に解析してみようということになりました。

【図 12】はタクラマカン砂漠の南縁のピーシャン（皮山）からユーテン（于田）くらいまで調べた土地被覆変化の画像で、植生域がどのように変動しているかという地理的な位置を示したものです。この方向は植生が増えています。ここがちょうど東経 79 度くらいです。ここはホータンです。ここでは植生域が増えていることがわかります。ここでは貯水池をたくさんつくり、農耕地を開拓しました。逆に隣の小さなところ、ピーシャンの下流は植生域が減少しています。

北縁では、アクスを研究対象としました。午前中の藤田先生の話にもありましたが、ここは開拓民を導入して、積極的に農耕地の開発をしています。

【表 4】がタクラマカン砂漠をとりまく山岳地帯の氷河の統計値です。天山山脈地域の氷河の面積です。これを見ても天山山脈が圧倒的に多いことがわかります。カラコルム山脈とクンルン山脈よりもはるかに多いです。

これは年間に氷河から流れ出る水の量を示したものです。カラコルム山脈、クンルン山脈は、北の天山山脈よりも数値的にはそれほど劣っていないように見えますが、実際にタクラマカン砂漠に流れるのはクンルン山脈水系だけで、これにはカラコルム山脈の水系も入っていますので、カラコルム山脈の面積を差し引かなければなりません。実際にはタクラマカン砂漠に流れるのは非常に少ないことがよくわかります。

【図 13】が先ほど言いました CORONA 衛星の画像です。1969 年のアクス周辺の画像です。それから下のほうが 2000 年の ASTER の画像です。これを ISO データ分類と最尤法分類という手法で解析してみました。

藤田先生の講演にもありましたアクスでは、中国政府の政策による大規模な農地開発がおこなわれました。大規模に開拓民を導入したアクス市の人口の推移がグラフになっています。【図 14 左】に示したように 1953 年に 70 万人でしたが 1999 年には 170 万人と急激に人口が増加しました。また、1970 年から 2002 年までのアクス周辺だけの植生域の変動を衛星データから求めたものです。【図 14 右】が 1970 年から 2002 年までのアクスの植生域の変動を示した数値です。また、これは先ほどの人口の変動と重ねると、植生域の変動が人口の変動につれて増えていることがわかります。

さて、【図 15】は 1969 年の CORONA 画像から植生域を抽出してカラーコード化したものです。この赤色のところが植生域です。アクスからアワト、これがホータン河で、これがタリム河です。ここがアワトです。

一方、【図 16】が 2000 年の土地被覆分類です。先ほどのものは残念ながらグレースケールでしたので土地被覆分類の詳細なものができません。2000 年のものはマルチスペクトル画像ですから、土地被覆分類ができるようになりました。

その 2000 年の ASTER 画像から解析したのものによると、赤色が農地以外の植生域です。これは雑草とか、タマリスクとかポプラなどが含まれます。

青色がトウモロコシ、二毛作小麦です。水色が綿花栽培です。緑色が水稻です。

【表 5】がアクスオアシスにおける 1969 年と 2000 年の農地区分の各面積です。1969 年は、グレースケールのため詳細な農地区分ができませんでしたので、植生域だけの面積が 2,507 平

方キロメートルです。それから大まかですが、2000年の農地の区分を表にしたものです。この円グラフは、アクスオアシスにおける2000年の農地区分の面積比です。綿花が圧倒的に多いことがわかります。また、農地以外の植生のほかに、トウモロコシと二毛作小麦が7パーセント、水稻が6パーセントということがわかりました。

アクスオアシスにおける31年間の土地被覆変化をまとめたものが【表6】です。裸地から植生域に変化したのが3,175平方キロ、植生域から裸地に変化したのが864平方キロ、そして植生域のまま、変化なしが1,524平方キロ、裸地などが含まれる植生域以外で変化なしが圧倒的に多いことがわかります。

【表7】は、1969年から2000年までの31年間に、裸地から植生域に変化した地域の土地利用区分です。綿花栽培が多いのは中央政府が綿花を推奨していることが大きな理由だと思えます。綿花が68パーセント、トウモロコシと二毛作小麦が6パーセント、水稻が5パーセント、農地以外が21パーセントです。

【図17】が逆に荒漠したエリアです。これはCORONAとASTERのデータを比較して求めたもので、赤色が荒漠した地域です。特に荒漠化したのは、水利用の失敗で、特に農地が塩類集積して放棄された地域が主に多いようです。

ここが特に塩類集積が多い地域です。これも実際に現地写真で撮ったものですが、このように、まるで雪が積もっているかのように塩類集積が多く見られます。

アクス地域のまとめをみると、植生域は拡大しています。農地も拡大しています。特に綿花栽培地が拡大していることがわかりました。また、荒漠した地域は、土壌の塩類集積が原因で農地を放棄した地域だと思えます。

アクスの周辺を調査すると、水が多いうえに塩類沼沢地もかなりあります。日本の北海道のサロマ湖に生えている厚岸草（アッケシソウ）と同じものが、アクスの沼沢地で花期になりたくさんの花が咲いていました。

【図18】からが砂漠の南縁の調査になります。これはまだ未完ですが、一部をご紹介します。

ご存じのように、南縁はクンルン山脈からの利用可能な水が少ないのです。ここが南縁のホータンオアシスです。これはチラです。これはユーティエン、これがピーシャンとクジという小さなオアシスがあります。ちょうどホータンのやや西側です。

これを先ほどと同じようにCORONAとASTERの画像を比較して、土地利用の分類をしたものが【図19】です。そして、赤色が裸地から植生域に変化したもの、青色は植生域から裸地になってしまったところ、緑色に変化なしのところ。このように、オアシスの下流域ではかなり植生域が減少しています。逆にオアシスの上流や内部は、灌漑をすることによって農地を増やしています。

【表8】はピーシャンオアシスにおける40年間の土地被覆をまとめたものです。ピーシャンでは、裸地から植生域に変化したものが75平方キロ、植生域が裸地に変化したもの107平方キロ、植生域のまま変化なしが160平方キロで、荒漠地のままが圧倒的に多くて1,280平方キロになります。これをまとめると、荒漠地が80パーセントに達しています。ですから、ほとんど昔と変化していないということが予想されます。

全体をまとめると、北縁では植生域の拡大、特に綿花栽培を主とした農地の拡大です【表9】。しかし、見かけでは荒漠化が停滞しているように見えますが、実際にはそうではありません。

せん。豊富な利用可能な水資源による植生域、農地の拡大に対するリバウンドが起きています。南縁の小さなオアシス群では、河川下流における植生域が減少しています。

今後のわれわれの課題は、荒漠化の原因をさぐることです。いろいろと複雑な要因がありますので、なかなか難しい問題です。そのなかで、塩類集積土壌の分布を何とか人工衛星のデータから解析できないだろうかということで、現在、私の研究室の学生が衛星データを解析しています。しかし、塩類集積土壌と砂漠を、衛星データの画像から区別するのがなかなか難しい問題です。

それから、先ほど藤田先生から何度もお話ができましたが、新疆では水管理システムが複雑で、社会的な背景を理解しないと、タクラマカン砂漠の荒漠化を追究することは難しいと思います。

これは大変大ざっぱな言い方ですが、地球温暖化でタクラマカン砂漠をとりまく山岳地帯の氷河の面積が縮小しています。これは昨年アメリカ物理学会でNASAが報告したのですが、急激に天山山脈、クンルン山脈という大きな山岳地帯、もちろんカラコルム山脈も含まれます。これらの氷河面積が非常に縮小しているとのこと。これは今日、明日の問題ではありませんが、将来の中央アジアのオアシスに与えるダメージは、じわりじわりと出てくることは間違いありません。

【図 20】は荒漠化に影響を与える要因としての典型的な写真をいくつか現地で撮影したものです。

これはホータンのロプ地区の画像です。タクラマカン砂漠のホータン河に沿った森林地帯です。森林地帯と言っても幅はわずかなものです。タクラマカン砂漠の地下水で生きている植生を農民が伐採します。これはリヤカーに所帯道具一式乗せて、3、4日くらいで何百キロを往復します。たまたま、私もタクラマカン砂漠の真ん中へ車に入ったのですが、夜中にテントの周りで農民が木を伐採していました。つまり、禁止されているため昼間は伐採することができないわけです。夜中から明け方にかけてこっそりと伐採するわけです。伐採したものは自分で使うわけではありません。自分の家で使う分だけ残して、残りを業者に売っています。

これはよく言われることですが、ヒツジやヤギの過放牧、これの始末の悪いことは、蹄（ひづめ）によって土が硬くなってしまいます。塩類集積土壌と蹄によって、さらに硬くなります。そうすると植生の再生がほとんど不可能になります。

また人口の増加です。そして塩類の集積です。そして、砂丘のオアシスへの侵入、絶え間なく押し寄せる砂丘の砂。これをどのように防ぐのかということです。

これで発表を終わりますが、最後に人工衛星データのタクラマカン砂漠の画像で美しいものをお見せしたいと思います。

【図 21】これがタクラマカン砂漠の南東です。チェモーとニヤの間に、大きな扇状地があります。ここにはほとんど人が住んでいません。これがASTERがとらえた扇状地です。非常に美しい扇状地形です。この青色が水が流れているところです。この扇状地の幅は縦横が60キロです。いかに大きいかということがわかつてと思います。貝殻を広げたような美しい扇状地です。

【図 22】はほとんどの方がご存じの耳のかたちをしたロプノールです。昔、タリム河や孔雀河からロプノールへ水が流れていましたが、今は水が一滴もありません。

これも同じASTERがとらえたロプノールです。この赤色がオアシスで植生を示します。ここは塩類集積していて、ほとんど植生がありません。

以上で終わります。どうもありがとうございました。



●**司会**— どうもありがとうございました。最後は大変魅力的な人工衛星写真を見せていただきました。石山先生は芸術家的なセンスもおありになるのかなと思いながら拝見させていただきました。たくさん的人工衛星画像を、古いものから集められ比較して、それをある程度、計測しながら植生地の決定されました。砂漠の面積が 30 万平方キロメートルという説明はとても新鮮に思いました。

お一人ほどですが、ご質問がありましたら。人工衛星からもこのような分析ができるということですが。はい、どうぞ。

●**質問者**— 愛知大学の渡辺です。例えば、綿花の収穫量が、中国政府が発表する前にどのくらいあるかとか、これから収穫量のようなデータなどできるのでしょうか。

●**石山**— 不可能ではないです。非常に私も興味があります。中国政府はなかなか新しいデータを発表しませんから、そのようなことを実施すればおもしろいと思います。私自身は荒漠化のことを一番に考えていますので、いろいろと手を出しすぎてしまうと、散漫になってしまうといけませんので。

●**司会**— あとはよろしいでしょうか。

●**質問者（渡辺）**— 綿花などについては、日本にとっても予測ができると値段の問題も大きな影響を与えるのではないかと思います。

●**石山**— 特に先ほどの綿花とか水稻の現地情報は、われわれと共同研究をしている新疆農業大学の研究者の情報がかかり入っています。そのようなものは衛星データの解析のなかで、教師データとして取り込まれています。

●**司会**— どうもありがとうございました。以上で3人の発表が終わりました。ここで、コメンテーターの方のコメントと質疑に移りたいと思いますが、長時間に渡りましたので、10分間の休憩をとり4時5分からスタートしたいと思います。よろしくお願いたします。