

中国黄土高原における退耕還林以前の森林分布復元とその成立要因分析

一米ソ偵察空中写真・地形図を用いた地生態学，歴史地理学，地理情報

学の融合—

研究代表者 原 裕太 東北大学災害科学国際研究所

## 1. はじめに

本プロジェクトの目的は、長年、砂漠化が大きな課題であった乾燥地、中国・黄土高原において、世界的な大規模植林事業「退耕還林」（1999年～）以前の森林分布を復元、定量化し、成立要因を推定すること、ならびにそのための冷戦期を中心とする空間情報の利用可能性を検討することである。

黄土高原では、世界で最もはげしい土壌侵食・土地劣化によって、無数のガリーが発達した特徴的な地形景観が卓越している。その主たる要因は、とくに明清期以降、今日に至る度重なる農地の拡大と植生劣化であると考えられている。以上に対して中国政府は、斜面耕地の緑化を通じて土壌侵食の防止と植生回復を目指す「退耕還林」政策を1999年から実施してきた。これは黄河の総合的な治水、防災対策であり、生態系の修復、気候変動緩和・適応策でもある。

世界の乾燥地では、農業活動は陸域生態系への悪影響の原因である一方、地域の主要な生業で食糧生産の手段でもある。その結果、砂漠化の被影響国のうち、具体的な対策を実施できている国は砂漠化対処条約が締結されて20年近くが経過してもなお、5%に留まっていた（UNEP 2012）。そのため、上記の黄土高原での一連の取り組み、その成果や課題は、国際的にも注目されている。

退耕還林が始まって20年が経過した今日、生態学や植物生理学によるモニタリングによると、植林地では早成外来樹種を導入した場所等を中心に、植樹の枯死や、水分含有率の低い土壌層の形成が各地で確認でき、植林地の場所や樹種の選定に対する課題が顕在化している。その間、環境史分野では史書の記述解読や土壌コアの花粉分析などから過去の植生を復元し、地域の植生劣化を定量化する試みを続けてきた。しかし、起伏の激しい地形状況が生育環境を多様化させていることから、地域植生の面的解明が困難なことが、分析方法上の課題として挙げられている。

本研究プロジェクトは上記の課題解決に向けて、中国の近現代史に係る自然環境の状況を定量的に把握しようとする初の試みであり、米ソ両大国が冷戦期に収集した空間情報の活用可能性を検証、検討するうえでも意義が大きい。なお、本研究プロジェクトは2019～2020年度にかけて実施する予定であったが、COVID-19の影響を受け、国内外での調査が制限を受けたため2022年度まで延長して実施した。

## 2. 中国黄土高原の概要と、当該地域における砂漠化対策の推移

上述のように黄土高原は中国北部に位置し、土壌侵食が深刻な乾燥、半乾燥温帯地域である（高山・木村 2008）。行政区としては、陝西省北部、甘肅省東部・中部、山西省、河南省北西部、寧夏回族自治区、内モンゴル自治区中部、青海省東部に属する。

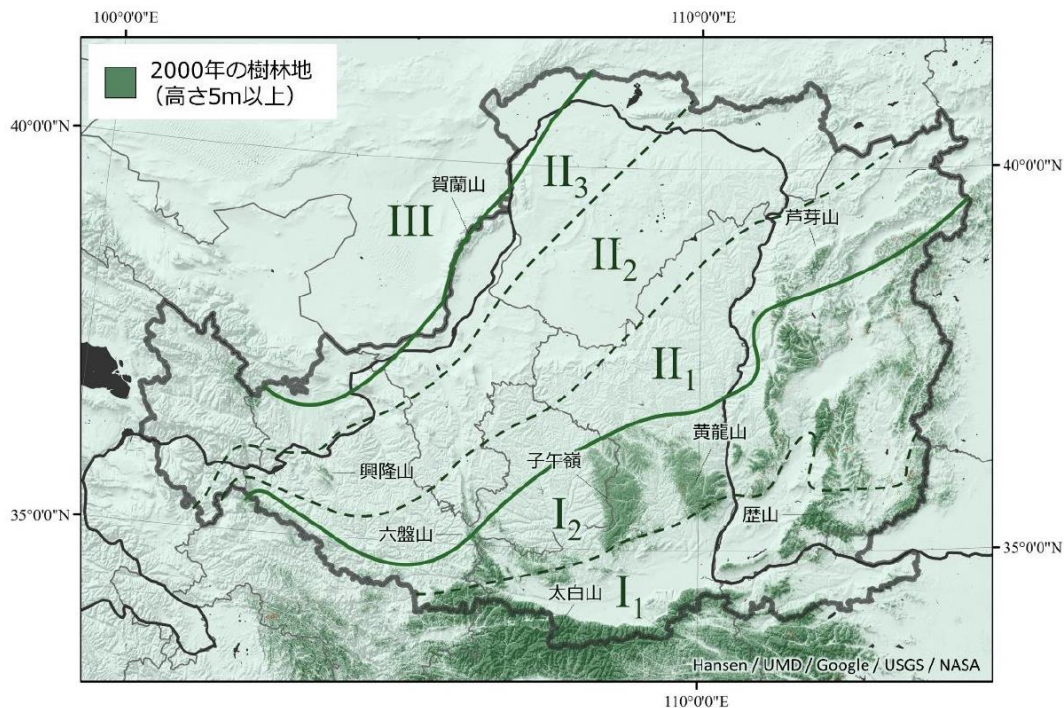
山西省北東部の海河流域と、内モンゴル自治区・モウス砂漠周辺の内流区を除いて、多くの範囲が黄河の中上流域に当たる（原 2019）。代表的な地形は黄土台地「塬」と黄土丘陵であり、黄土丘陵ではドーム状の「峁」（*mao*）や、なだらかな尾根が続く「梁」（*liang*）を中心とする起伏の激しい特有の丘陵地形が卓越している（原 2019）。

黄土高原の年平均降水量は 150～800mm 程度で、北西ほど少なく南東ほど多い。前後である。中央を占める黄土丘陵地域では、おおむね 350～600mm 程度の降水量がある。南東部の平原・盆地地帯や、森林植生の残る秦嶺山脈の北麓、黄龍山、子午嶺、六盤山脈などでは降水量が多く、600mm 以上の平均降水量がみられる（黄河水利委員会黄河誌総編集室編 2017）。

植生は、森林限界とされる年平均降水量 500mm 以上の、黄土高原中部から南東側の山地を中心に森林が分布している（図 1）。こうした地域は、暖温帯落葉広葉樹林地帯にし、ユーラシア大陸東部における落葉広葉樹林分布（ナラ林帯）の西端に位置している。一方、北西側半分は温帯草原地帯に属する。黄土高原地区の温帯草原地帯は、降水量の減少にともない南から森林草原地帯、典型草原（ステップ）地帯、半砂漠草原地帯に細分化される（原 2019）。

人口は、陝西省の省都で副省級市である西安市や山西省北部の大同市、河南省の洛陽市、青海省の西寧市の中心部で人口密度が高く 1km<sup>2</sup> 当たり 10,000 人以上ある。一方で農村部に目を向けると、ほとんどの行政区の人口密度は低い。関中平原や汾河流域の盆地帯では 300～1,000 人/km<sup>2</sup> 程度であるが、黄土丘陵では、ほとんどの行政区が 300 人/km<sup>2</sup> に満たず、100 人/km<sup>2</sup> 以下の行政区も多い（原 2019）。

黄土高原の土壤侵食対策は中華民国期に始まる。中華民国の建国当初、黄土高原に



- |                              |                                |            |
|------------------------------|--------------------------------|------------|
| I 暖温帯落葉広葉樹林地帯                | II 温帯草原地帯                      | III 温帯砂漠地帯 |
| I <sub>1</sub> 暖温帯南部落葉広葉樹林地帯 | II <sub>1</sub> 温帯森林草原地帯       |            |
| I <sub>2</sub> 暖温帯北部落葉広葉樹林地帯 | II <sub>2</sub> 温帯典型草原（ステップ）地帯 |            |
|                              | II <sub>3</sub> 温帯半砂漠草原地帯      |            |

図 1. 黄土高原における現在の植生分布と植生区分、主な森林地帯（原 2019）

における土壌侵食、土地劣化の全体像や地形発達、景観形成のメカニズム、空間的な広がり、全くわかっていなかった。そのため自然環境と社会状況の調査と実態把握、人材育成が図られ、観測や教育のための組織も作られた。土砂流出を緩和するチェックダム（砂防堰堤）研究も始動し、以上は共産党政権にも引き継がれた。これらの事業を支えたのは、欧米出身の科学者・技術者と、西欧や日本に留学した若手の中国人テクノクラートらであった。こうした民国期および欧米との繋がり、歴史的連続性は、現在の中国科学界ではほとんど知られていない（久馬 2012）。

中華人民共和国の建国後、1950年代には斜面上の荒地の緑化や生態系修復が実行に移された時期もあった（図 2）。注目された山西省の黄土高原の村の名前をとって「大泉山モデル」と呼ばれている。1938年以降に村人が進めた緑化活動の成果が毛沢東の知るところとなり、中国北部の土壌侵食は解決可能であるとして、1955年に「看，大泉山変了様子！（見よ、大泉山が変わった様子を）」の一文が全国に発表されると（上田 1999: 117-120）、国家建設に必要な木材資源の確保という目的もあって、黄河流域ではポプラなどの成長の早い樹種による単一造林が展開された（平野 2008）。

しかし、当時の喫緊の課題は飢餓と食糧不足の改善で、耕地面積を減少させることは困難であった。加えて、化学肥料が少なく水分や養分を土壌中に留めることで増産を図る手法が歓迎された。そのため侵食谷にチェックダムを造成することで下流への土砂流出を抑制し、堰堤内に生まれた新たな沃地で収量の多いトウモロコシを栽培する方法が、1960～1970年代の中国の農村政策の基本方針に位置付けられた。

ただし上記の土木工学的対処法にも課題が残されていた。上述のチェックダムの堆砂能力は、1980年代半ばには飽和し、流出土砂量が増加に転じるようになったのであ

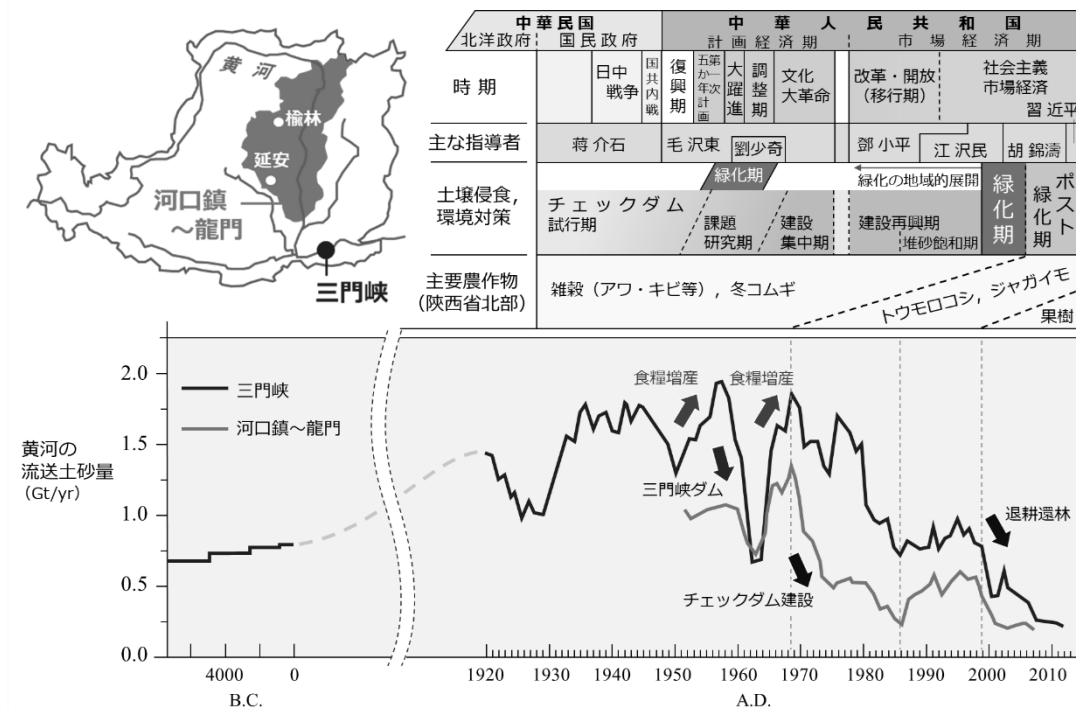


図 2. 近現代黄土高原における砂漠化対策の推移と農業変化 (原 2020)

る（図 2）。加えて国内の穀物生産は、1990 年代後半には過剰となって価格が低迷するようになり、農家は所得の伸び悩みに直面した。また WTO への加盟を控え、農産物の国際競争力強化のために国内主産地が優先的に保護され、条件不利な黄河中上流域では小麦栽培が大幅に縮小する現象もみられるようになる。加えて、1998 年には各地で大規模水害が発生し、主要因の一つとして山地の開墾による植生劣化と下流域の河床上昇であると指摘されるようになった（原 2019）。

こうした状況を踏まえ、土砂流出の根本原因への対策として「退耕還林」が 1999 年に始まった。斜面耕地の緑化と育林が進められ、水源涵養と土壌侵食の緩和が実現した。付随して食糧・生活支援や税制優遇もなされた。黄土高原の陝西省、甘肅省は政府のモデル地域として真っ先に退耕還林が実施された地域であり、陝西省には国のモデル県も設けられ、積極的な造林が進められ、景観は大きく変化した（図 3）。



図 3. 黄土丘陵における退耕還林地の景観  
(国のモデル地域である陝西省呉起県にて 2015 年筆者撮影)

### 3. 調査資料

本研究ではプロジェクトタイトルおよび下記の通り、冷戦時代に米ソ両大国が収集、作成した空間情報を用いた。

#### 3.1 米軍偵察衛星画像（1960 年～）

米軍偵察衛星画像（CORONA、LANYARD、GAMBIT、HEXAGON プログラム）である。これらは 1960～1970 年代に世界中を撮影した人類史上最初期の人工衛星で、1990～2010 年代にかけて機密解除された。画像の多くは米国地質調査所（USGS: United States Geological Survey）の Web サイト Earth Explorer においてアーカイブされ、注文も可能である。

宇宙からの地表面情報の収集プログラム（初期の CORONA プログラム）は 1960 年 8 月に開始され、1972 年にかけて 86 万枚以上の画像を収集した。当初の数年間、撮影は散発的で、地上分解能は比較的 low、1962 年までは最大 7.6 m 程度であった（David



2015)。しかし 1960 年代半ばまでにカメラやその他の技術は大きく進歩し、地上分解能も大幅に向上した。1963 年に飛行を開始した CORONA KH-4A と GAMBIT-1 (KH-7) では、最終的にそれぞれ 2.7 m と 0.6 m の最大解像度を達成した (David 2015)。

そのため、これらの偵察衛星画像、とくに CORONA プログラムの画像は、活断層 (Suzuki et al. 2021) や遺跡の発見 (Challis et al. 2002)、森林伐採地の特定 (Nita et al. 2018; Rendenieks et al. 2020)、氷河動態の解析 (Pieczonka and Bolch 2015; Lovell et al. 2018) 等、様々なテーマで利用されている。

### 3.2 ソ連軍参謀本部作成地形図 (1970 年代)

ソ連軍参謀本部軍事測量局は、世界のほぼ全域を網羅する詳細な地図の作成に取り組んだ。計画の全容はいまだ解明されていないが、作成された地図は 100 万枚を超えるとの試算もある。作成された地図には地形図と市街図があり、そのほかに縮尺や形状の特殊な地図も存在する (Davies and Kent 2019: 30-31)。軍用地形図の標準仕様が定められたのはレーニン時代の 1921 年である。1961 年の偵察衛星 Zenit (Зенит) の打ち上げ成功以降は、偵察衛星画像、対象国の地図、諜報員が収集した現地情報等を総合的に利用して地形図が作成された (Davies and Kent 2019: 22-24, 74-75, 81)。

本研究では、ソ連の崩壊を契機として国際市場に出回ったソ連国外の地図のうち、岐阜県図書館が所蔵する、中国の 10 万分の 1 中縮尺地形図 (以下、ソ連製軍用地形図)

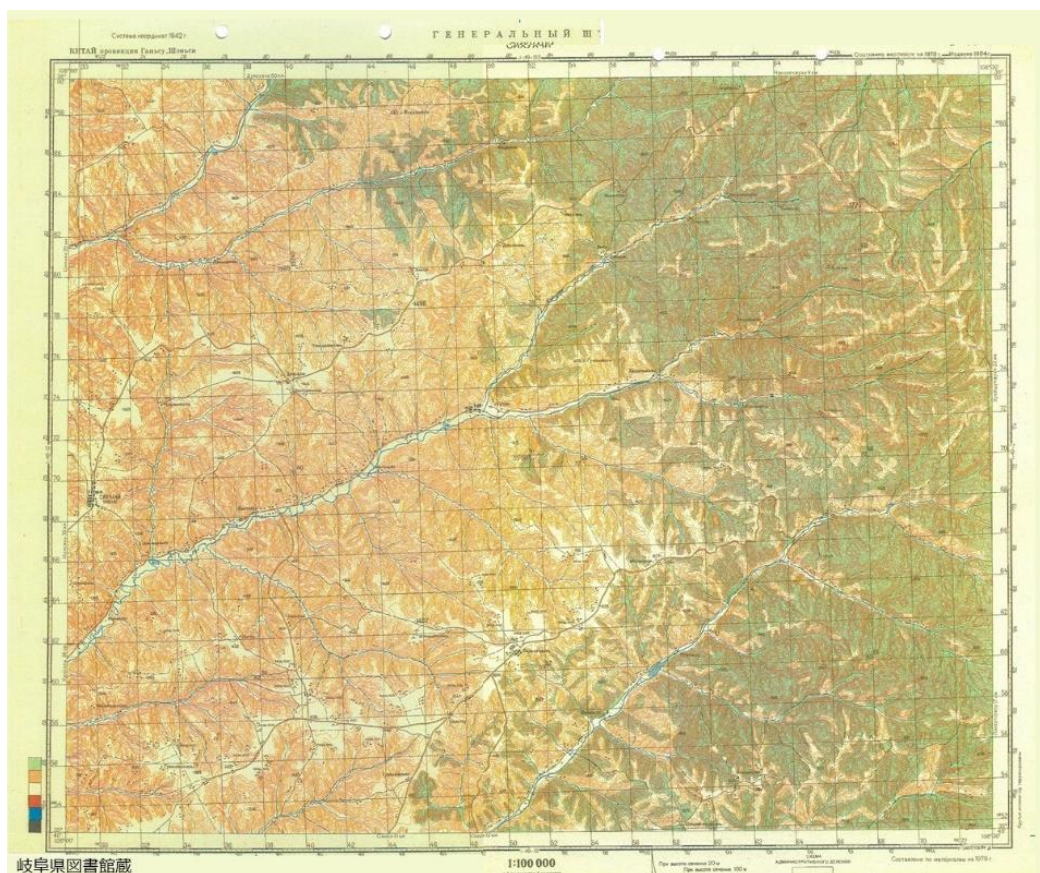


図 4. 陝北黄土高原を描いたソ連製軍用地形図 (10 万分の 1) の例 (岐阜県図書館蔵. 同館にて筆者複写)

(図4)を収集し、分析に利用した。

これらの地図は戦術目的で作成されたと考えられている (Davies and Kent 2019: 39)。地図には緯線と経線に基づいた図郭線が引かれ、都市の規模ごとに20種類に階層化された地名、耕作地の種類、礼拝所、航行可能性を含む河川情報、鉄道、道路、橋(わかる場合には積載量の情報を含む)、森林や植生、建物の特徴等が地図記号等を用いて詳細に記されており、とくに河川や森林は戦争時に進行の妨げになることから丁寧に記述されたと考えられている (Davies and Kent 2019: 24)。また、地図は大判で多色塗りであるが、ほとんどずれがなく高精度であると指摘されている (Davies and Kent 2019: 22-24)。

本研究の対象地である黄土高原中部の中心都市・延安市街について、ソ連製軍用地形図と複数の米軍偵察衛星画像と比較した結果を図5に示す。図5からは、本プロジェクトが必要とする森林、疎林地、市街地の広がり、水土流失を緩和するためのチェックダムの分布等を、詳細に記述していることがわかる。そのため、中華人民共和国・計画経済期(～1979年)の土地利用・土地被覆を把握するうえで有用なデータの一つといえる。

### 延安市中心部 Yan'an city center

Soviet military map  
1:100,000 (1978 survey)

US reconnaissance images  
KH-9 Hexagon (Nov.1974) KH-4 Corona (Nov.1964)

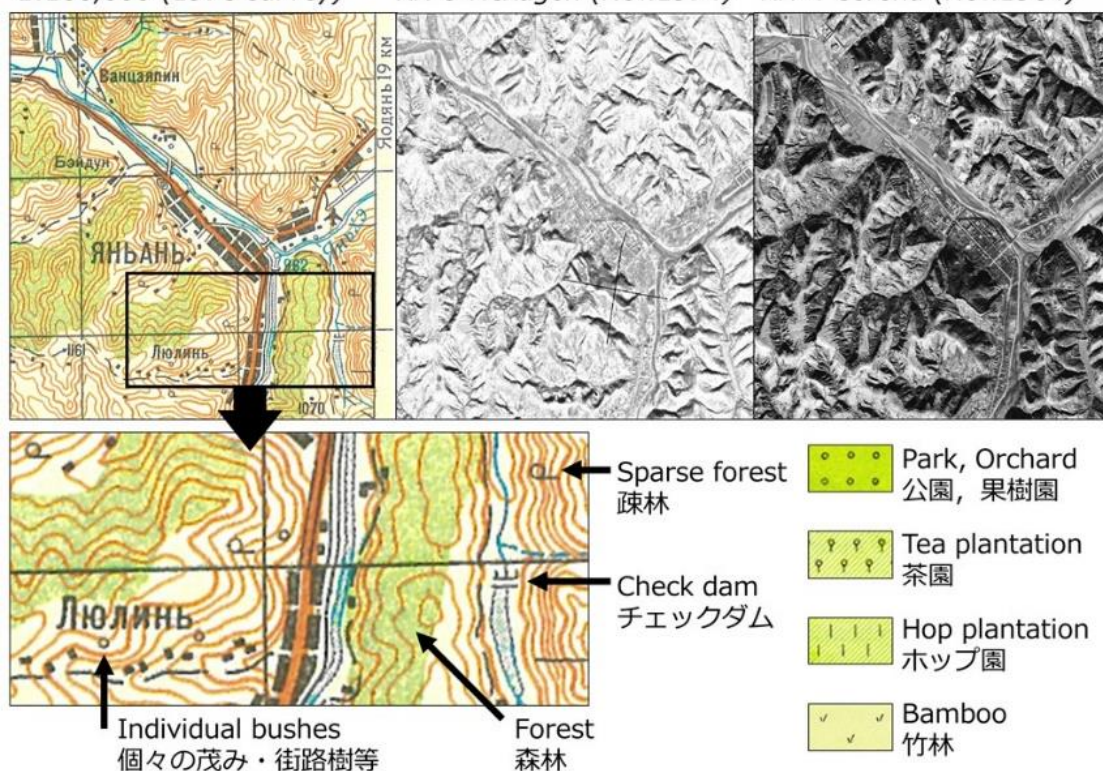


図5. 対象地域におけるソ連軍参謀本部作成地形図(10万分の1)に記された土地利用・土地被覆情報と、同一地域の米軍偵察衛星画像との比較



### 3.3 米国立公文書館所蔵の空中写真（1940～1960 年代）

米国立公文書館は過去に米国が撮影・収集し、機密解除された空中写真を保管している。同館 Web サイトには、所蔵する米国外の空中写真に関する概要が記載されている。これによると資料は3つの Record Group に分けられており、それぞれ Record Group 120（第一次世界大戦での米軍記録（1918 年））、263（中央情報局（CIA）の記録：U-2）、373（国防情報局（DIA）の記録：米国、ドイツ、日本の航空機による海外写真）に大別される（US National Archives 2023）。同サイトによると、Record Group 120 の撮影対象は欧州各国で、中国および周辺の写真は Record Group 263、373 に属すると思われる。

地球環境の分野では、米軍偵察衛星画像以前に撮影された古い偵察機や気球による空中写真はあまり注目されてこなかった。その代表的なものが Record Group 263 に属する米国の高高度偵察機 U-2 で、1956 年から 1970 年代にかけてソ連、東欧、中国、中東、東南アジア、キューバ上空の偵察を行った。これらの写真は、最大 0.4m の地上分解能に達している（Hammer and Ur 2019）。これらは GeoEye-1 以前の時代に入手可能な空間情報の中で最も解像度が高く、米軍偵察衛星画像では判読できない家屋や詳細な地形を解読することができる（Price 2019）。これらの写真の数千枚は 1997 年に機密解除された（Price 2019）。U-2 空中写真は、1950 年代半ばから後半にかけての、誰もがアクセスできるほぼ唯一の高解像度画像であり、1960 年代から 1970 年代を通じて世界で最も高い地上解像度の空間情報である。

しかし、U-2 空中写真は、リモートセンシングアプローチを用いる何人かの考古学者や人文地理学者によって部分的に紹介、利用されてきただけであり（Sato et al. 2016; Hammer and Ur 2019; Price 2019）、学術研究において広く利用されてきたわけではない。

U-2 偵察機によって撮影された空中写真がほとんど活用されてこなかった理由は2つある。1つは、写真がデジタル化されておらず、研究者はカンザス州の低温保管施設に空輸依頼した後、メリーランド州カレッジパークにある米国立公文書記録管理局 III（米国立公文書館II）に直接足を運ばなければならない。しかも、1 度のミッションで撮影された写真は膨大で、ネガフィルムは多数のフィルム缶に分けられ、撮影順に番号が振られていないため、ネガフィルムを 1 本ずつ確認しないと必要な情報にたどり着けない。しかも、一度に空輸申請できるフィルム缶の数には制限があり、2022 年に空輸申請したときは 10 缶までだった。つまり、アクセスは非常に面倒で、空中写真の解析を開始するまでに膨大な時間を要するからである（Price 2019）。

もう 1 つの理由は、リモートセンシング分野の研究者の間では、過去の古い写真そのものは機密解除されているが、写真がいつ、どこで撮影されたかといった他の関連する重要な情報は機密解除されておらず、これらの詳細については経験則に基づく推測をせざるを得ないと考えられてきたことである（Price 2019）。

さらに、Record Group 373 に属する写真セットについては、これまでほとんど知られておらず、国立公文書館の Web サイトでも第二次世界大戦中に米国および日独が撮影した空中写真を所蔵している、といった基本的な情報を除いて、詳細については説明されていない。そのため本プロジェクトではこの時代の空中写真、および偵察ミッションの実態把握を進め、一部の画像を用いて 1940 年代の土地被覆を判読した。



#### 4. 研究手法

##### 4.1 米ソ偵察情報を用いた計画経済期中国における森林被覆復元

本研究では、黄土高原において今日まで最も連続的に森林環境が残る陝西省延安市の子午嶺・黄龍山とその北に位置する延安市街までのエリアを選定して分析を行った。

まず上述のように比較的信頼できる地図情報として、ソ連製軍用地形図（1/10万）を用いた。岐阜県図書館所蔵の地形図をカラー複写により入手した後、図6のようにGIS上に読み込み、地形図に記された緯度経度情報を用いて幾何補正した。なお、同地形図はA3よりも大判であるため、左右それぞれ分けてA3で印刷している。

その後、森林被覆として記されている緑色のエリアはポリゴンデータとして、その周辺の疎林地の地図記号についてはポイントデータとして作成した。疎林地は地図記号の周辺に一定の広さで広がっていると考えられることから、適宜同時期の米軍偵察衛星画像も参照しながら、本研究では周辺1.5kmをバッファリングして疎林地と定義した。

ソ連製軍用地形図から得られた1978年の森林および疎林地の空間情報は、図6の3の通りである。1978年は改革開放が始まる1年前であり、計画経済期末期の当該地域の土地利用・土地被覆の状態を示している。

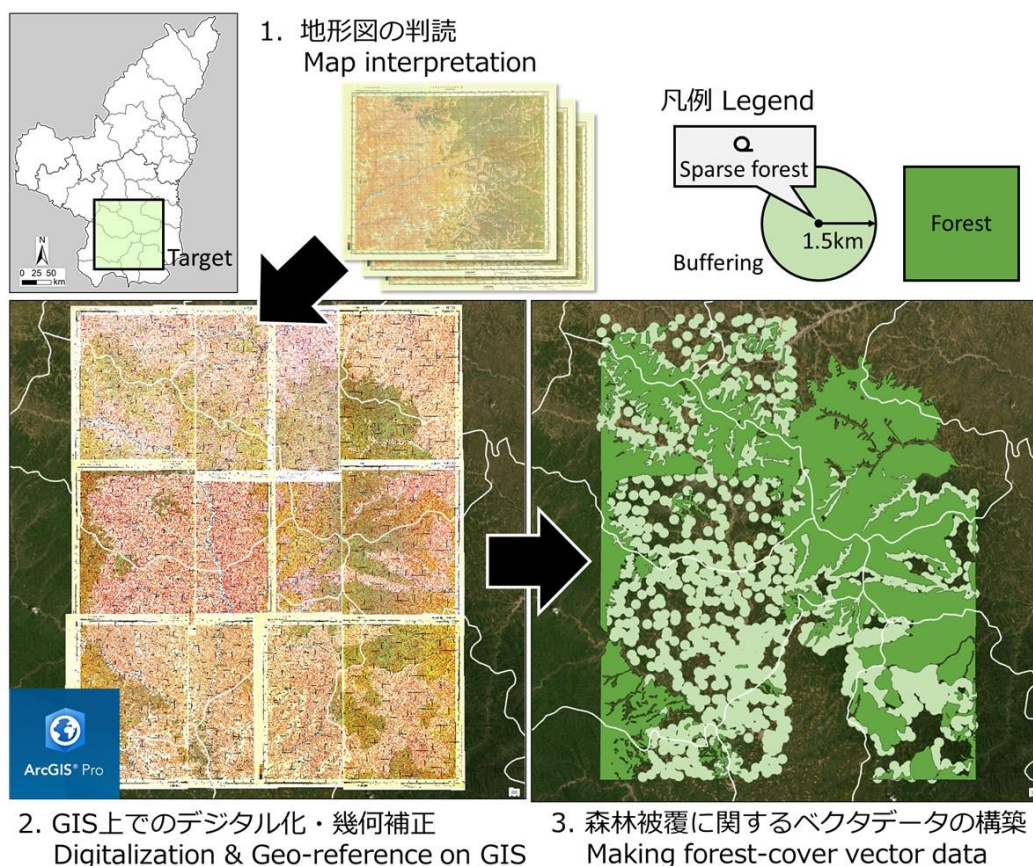


図6. ソ連製軍用地形図のデジタル化と森林被覆情報の抽出

## 4.2 周辺の伝統建築ヤオトンの分布復元、米軍偵察衛星画像の利用可能性

黄土高原を特徴づけるものの一つが伝統的な横穴住居・ヤオトンである。木材が少ない当該地域において資材が少なくても建設でき、かつ室内の温度変化を安定的に保つことができることから、自然環境と共生した風土建築と評価されている。本プロジェクトでは米軍偵察衛星画像の利用可能性の検証を兼ねて、同画像を用いて失われたヤオトンの位置の特定、空間分布復元を試みた。ヤオトンには平らな地面の地下に中庭を設ける「下沈式」と、崖の斜面に横穴を掘る「靠崖式」の大きく2種類がある。

本研究ではまず、4.1の対象地に分布する靠崖式ヤオトンの判読を、フィールドデータを活用して試みたが、建築物の特性と分解能の限界から困難であった。

そこで、黄土高原の南部（甘粛省、陝西省、山西省、河南省）に分布する下沈式ヤオトンの抽出を試みた。当該分析で使用した画像は、DS1111-1063 AF-18, -19, -20, -21 (Mission Designator: CORONA KH-4B) で、USGS より購入した。画像は1970年7月26日に撮影されたもので地上分解能は最高約1.83mである。これらの画像は元々パノラマカメラで撮影され、フィルムに記録されているため歪んでいる (Goossens et al. 2016)。本研究では、歪みが最も大きい左右の画像の4分の1を無視した。そのうえで、使用した画像は道路の交差点やその他の安定した地表の特徴を地上制御点 (GCP) として使用し、そのためにESRI社のWorld Imagery layer (2021年に撮影された高分解能WorldView-2カラー画像を正射投影) を利用した。これらのGCP (画像ごとに合計50点以上) は、米軍衛星画像とWorldView-2画像を注意深く判読し、手動で選択した。米軍衛星画像は、ArcGIS Pro上で3次多項式を用いて補正された。

教師データとしては、日本の調査団が実施したフィールドの結果 (窯洞考察団 1988) を用いて同じ場所の衛星画像と比較した (図7)。洛陽郊外の当該村では、90%以上の高い精度でヤオトン判読できたため、目視判読を盆地一帯に広げて分析を行った。

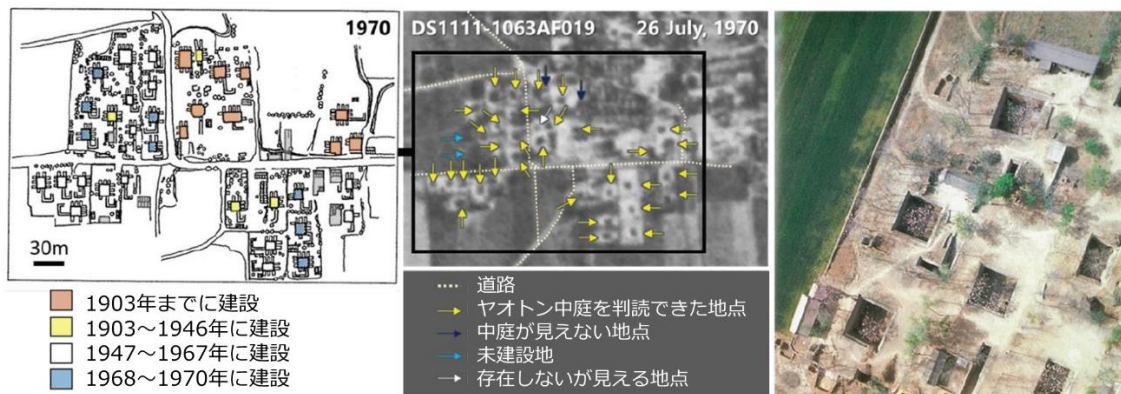


図7. 洛陽郊外の村におけるヤオトン建設年代、米軍偵察衛星画像での見え方、および写真 (窯洞考察団 1988)

## 4.3 1940~1960年代の空中写真の探査・収集と、全体像の把握

### 4.3.1. 偵察ミッションに関する機密解除文書の収集

リモートセンシングを専門とする研究者による先駆的な研究 (Hammer and Ur 2019;

Sato et al. 2016) は、公開された空中写真や米国立公文書館 II で利用可能なインデックスを頼りに写真やミッションの存在を探索してきたが、彼らは政治史や軍事史分野の研究者やジャーナリストらが扱ってきた公文書記録にはアクセスしていない。

そこでまず、米国情報公開法 (FOIA) に基づいて開示された CIA 機密文書の電子データベースである「Freedom of Information Act Electronic Reading Room」を用いて、関連文書を網羅的に検索し、収集した。具体的には、U-2、Idealist、Overhead Reconnaissance などの用語と個々のミッション番号を入力し、ヒットしたすべての文書 (pdf ファイル) を閲覧して内容を精査した。個々のミッション番号は、米国立公文書館 II の索引データ、Pedlow and Welzenbach (1992: 337-338) が収録する付録表、および CIA Freedom of Information Act Electronic Reading Room から収集した偵察ミッションリスト (CIA 1964) を用いて特定した。この調査により、各大陸と地域の偵察任務数のリストが発見された (CIA n.d.)。

#### 4.3.2. GIS による偵察飛行経路と偵察頻度の分析

次に、中国北部とその周辺地域をカバーする偵察飛行経路や目標地点の緯度経度情報が記載された地図、評価図を収集した。正確には、カスピ海の東側から東経 154 度までの広域を対象として調査を行った。

評価図は基本的に、CIA Freedom of Information Act Electronic Reading Room において上記収集ミッション番号を入力し、各偵察ミッションの報告書「coverage summary report」(例: CIA 1963) (図 8) を網羅的に収集した。場合によっては、Pedlow and Welzenbach (1992: 136, 169, 227) に収録されるソ連と中国の飛行経路図も利用した。

得られた経路情報を ArcGIS Pro にインポートし、地図をジオリファレンスして手作業で線データに変換し、これを用いて空間的な線密度を計算した。この分析は、米軍偵察衛星が本格運用される前の 1956 年から 1963 年までを対象としている。

新たに発見された地域別偵察数に関するリストを適宜参照し、全ミッションの何割が判明しているかを確認しながら進めた。把握すべき飛行経路の漏洩を最大限防止するためであり、かつ、その割合を可能な限り増やすためである。

なお、得られた結果の特徴とその意味、文書の真正性、内容の信頼性については、U-2

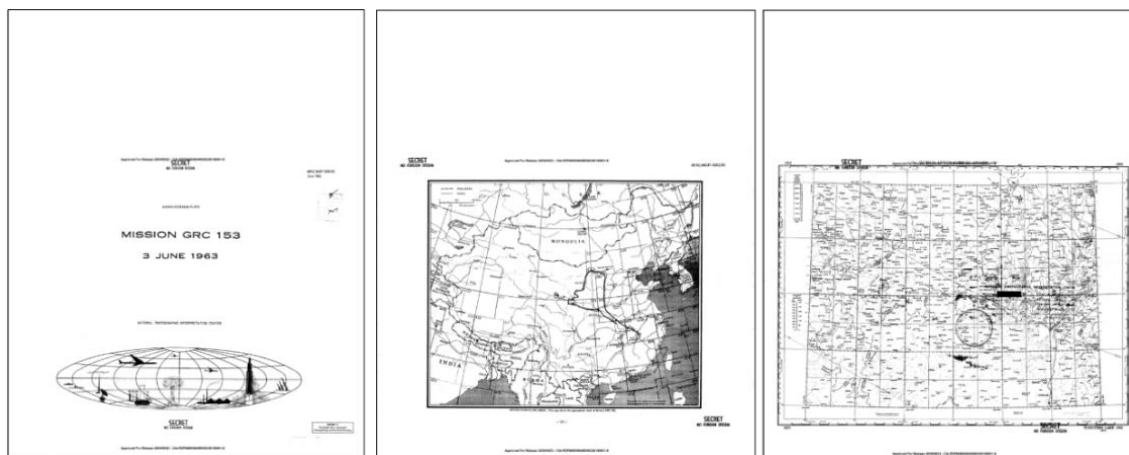


図 8. Coverage summary report の例 (表紙、飛行経路図、評価図)



偵察ミッションの背景を記した関連機密解除文書や政治史・軍事史研究の成果を用いて、適宜確認しながら進めた。例えば、1992年に編纂され、機密解除後の2016年に再公表された "*The Central Intelligence Agency and Overhead Reconnaissance 1954-1974*" (Pedlow and Welzenbach1992) は、関連する重要な機密解除文書である。北大西洋条約機構 (NATO: North Atlantic Treaty Organization) 欧州連合軍最高司令部 (SHAPE: Supreme Headquarters Allied Powers Europe) の歴史室長 Allied Powers Europe 氏と、米陸軍情報部 (MIS: Military Intelligence Service) の退役軍人で元 CIA 職員である Donald E. Welzenbach 氏によってまとめられ、パイロットの名前やコードネーム、資金提供や偵察対象、外国政府との関係など、大量の情報が含まれている。この機密解除文書には、CIA がどの地域で、いつ、なぜ偵察を行ったかについて、これまで知られていなかった示唆に富む情報が数多く含まれており、本研究の議論において重要な役割を果たす。

#### 4.3.3. 米国立公文書館Ⅱ訪問と情報収集

2022年11月29日から12月9日にかけて、約2週間にわたって米国メリーランド州にある米立公文書館Ⅱを訪問し、調査を行った。2024年3月現在、感染症対策による入館者の制限や休館は行われておらず完全に開放されているが、2020年以降、COVID-19パンデミックの影響によって休館状態になり、その後も周辺地域で感染者がでると閉館する不安定な状況が続いた。2022年の訪問時は、開館しているものの各 Research Room 単位で入館者数が制限されており、事前にコンタクトして利用予約を行い入館した。なお、初めて入館する際には、資料の取り扱いに関するeラーニングの受講とWebテストの合格が必要であった。なお、米国立公文書館の利用方法全般は、仲本(2008)が詳細をまとめており、申請者も事前に参考にしようとして同館を訪問した。

調査は空中写真を取り扱う Cartographic Research Room (図9) と、静止画を扱う Still Picture Research Room において実施した。Cartographic Research Room では、1940年代以降に撮影された空中写真のネガフィルム缶 (図10) の閲覧申請を行い、カンザス州の保管庫から届けられ次第室内で閲覧した。10缶分のフィルムの調査が終了次第、返却と新たな缶の閲覧、空輸申請を行うことになるが、新たな缶が届くまでの時間(数日



図9. 米国立公文書館Ⅱの Cartographic Research Room の様子



間) を利用し、Still Picture Research Room において、古写真の収集、分析を進めた。

収集した古写真とは、招聘外国人顧問官として 1920 年代と 1940 年代に訪中し、黄土高原等で生態環境や貧困問題の改善に取り組んだローダミルク博士 (W. C. Lowdermilk : 1888-1974) が残した写真資料である。ローダミルク博士の撮影写真は土地利用や土壌保全に関するコレクション約 58,000 点の一部として収蔵されていた (図 11)。これらは断片的かつ限られた地域の情報ではあるものの、撮影地点の当時の景観を把握することに役立つと考えられる。また、これまで利用されて来なかった史料であり、本調査ではそのコレクションの特徴、傾向の把握にも取り組んだ。



図 10. 閲覧した空中写真のネガフィルム缶の一部  
(2022 年 12 月筆者撮影)



図 11. ローダミルク博士の写真コレクション  
(2022 年 12 月撮影)

## 5. 結果と考察

### 5.1 米ソ偵察情報を用いた計画経済期中国における森林被覆復元

4.1 で示した図 6 のプロセスのように、ソ連製軍用地形図を活用することで、改革開放が始まる直前、計画経済期末期の土地利用・土地被覆を復元することができた。ソ連製軍用地形図の描写の特徴をみると、森林内に存在する開発地や斜面方向による森林の有無、森林か疎林かといった密度の差が丁寧に描かれている様子がわかる(図 12)。

ソ連製軍用地形図と 2000 年の土地被覆データ (Globe Land 30) を用いてその差異、すなわち 1978~2000 年の変化を分析した。Globe Land 30 は、Landsat と中国の人工衛星の情報を用いて作成した 30m 分解能の全球土地被覆データである (Chen et al.: 2015)。

その結果、図 13 のような結果が得られた。図 13、14 では、1978 年の森林、疎林地、その他と、2000 年の森林、草地および低木地、市街地および畑地、水域の、計 12 通りを色分けして表示している。またその上に、ソ連製軍用地形図から判読した 1978 年時点で存在したチェックダムの分布を示した。ここからは西側の子午嶺、東側の黄龍山とともに、コアな森林被覆は 1978 年から存在しているものの、子午嶺の東側と、黄龍山の南側を中心に、ソ連製軍用地形図では森林として扱われていなかった多くの場所が 2000 年には森林として扱われていることがわかった。一方、子午嶺の南側と黄龍山の北側では、森林面積はそれほど変化がない一方で、谷筋を中心に森林被覆が高標高側に縮小している可能性が示された。これには、侵食による影響等が示唆される。加えて、とくに子午嶺・黄龍山と延安市街地を隔てる北側の森林地帯でその傾向が強くみられた(図 14)。

土壌侵食対処法であるチェックダムの分布、密度との関係性を考察すると、2000 年にかけて森林が回復したとみられる場所とその周辺ではチェックダムが少なく、反対に森林の縮小が示唆される場所とその周辺でチェックダムの分布密度が高かった。このことから、森林再生によって侵食をコントロールする場所と、チェックダムによって土砂流出を食い止めようとする場所が平行に存在していた可能性、その背景として森林再生の余地の違いや土地被覆変化の違いが関係していた可能性が示唆された。

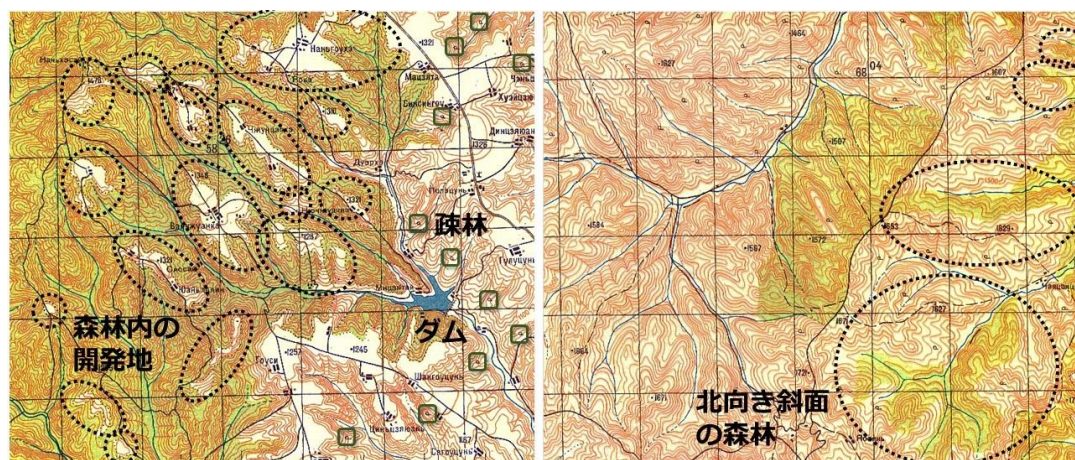


図 12. 対象地域の子午嶺、黄龍山におけるソ連製軍用地形図の描写



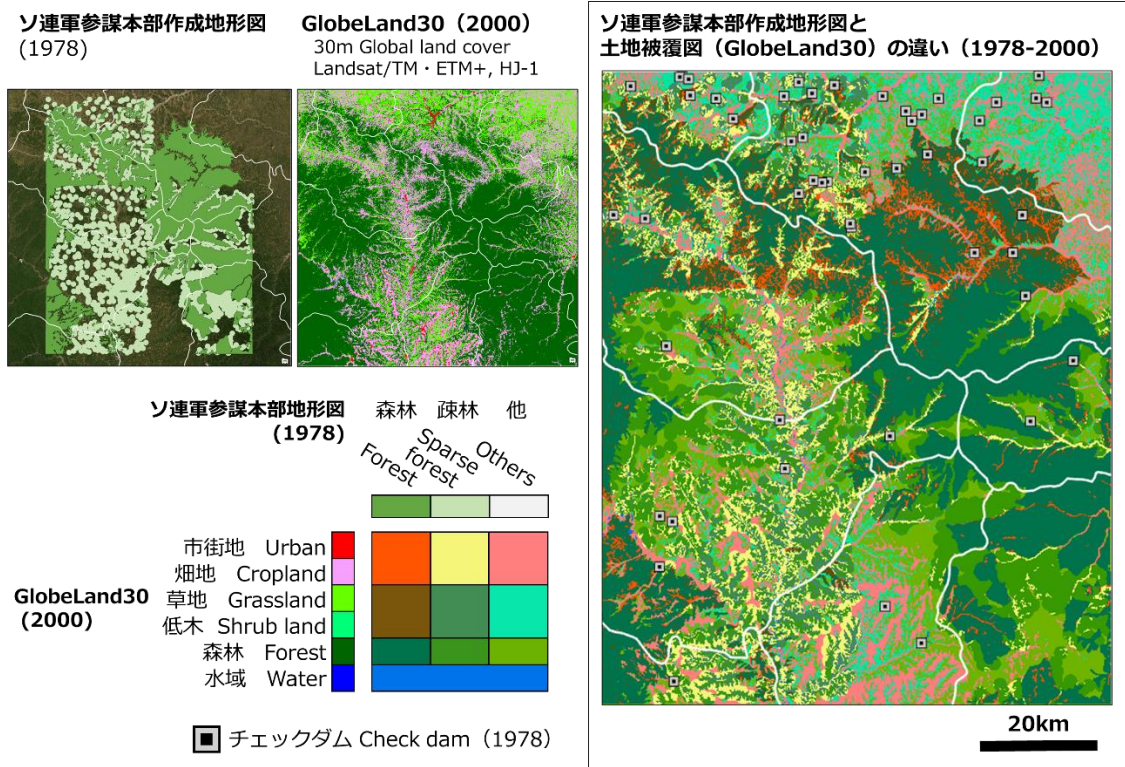


図 13 ソ連製軍用地形図と Globe Land 30 の比較、オーバーレイの結果

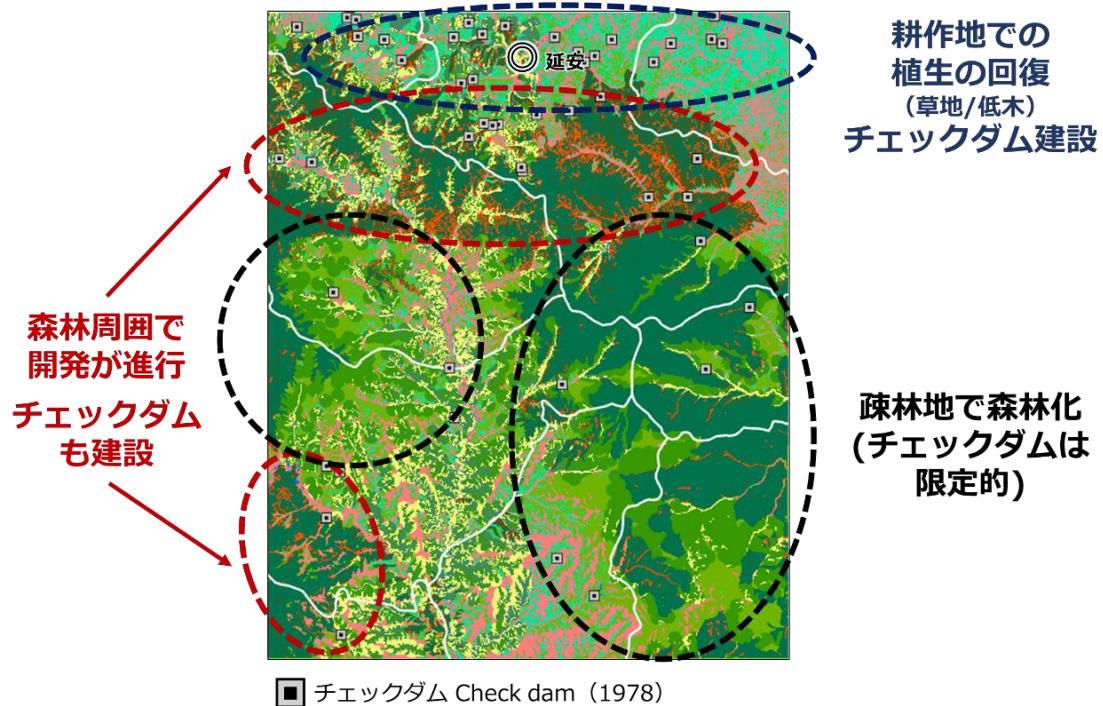


図 14 ソ連製軍用地形図と Globe Land 30 の比較から推定される変化の特徴

## 5.2 米軍偵察衛星画像によるヤオトン集落の分布復元と改革開放期の開発影響

図 15 のように下沈式ヤオトンの中庭を判読した。さらに、洛陽 (Luoyang) 盆地全域において 1970 年における下沈式ヤオトンの分布を推定した (図 16)。その結果、洛陽盆地全域で合計 7,668 点のデータが得られた。この結果は、建築文化の観点から、盆地が黄土高原に含まれていたことを証明している。

村落レベルで比較すると、盆地東部の限られた地域では、西部に比べて下沈式ヤオトンの密度が高い傾向にある。一方、盆地西部の洛陽市街地の背後では、ヤオトン密度が中程度の集落が広く連続的に分布している傾向があった。

盆地レベルで比較すると、下沈式ヤオトンは盆地を取り囲むように西・北・東に分布し、洛陽市の北から西、鞏義 (Gongyi) 市周辺の黄土台地上に多く見られた。しかし、盆地南部では下沈式ヤオトンはほとんど観察されなかった (図 16)。これは黄土高原の建築・文化・農村社会の研究において重要な発見である。

地形的な要因についてみてみると、下沈式ヤオトンは黄土台地で観察され、山地や氾濫原、河岸段丘上ではみられなかった。これは、下沈式ヤオトンが地下水位の高い場所や急傾斜地では成立しにくいことを示していると考えられる。また、SRTM1 Arc-Second Global DEM との重ね合わせを行うことで、点データの位置する地点の標高や斜面は緩斜面であることが明らかになり、ほとんどの点 (79.4%) は標高 180~310m に位置していた。盆地内の地域別にみると、東部のヤオトンの立地は、西部 (洛陽市街地の背後) に比べて標高が低い傾向にあった。これは、東部地域が下流側に位置し、地下水位も西部に比べて深いためだったと推察される。

1970 年の下沈式ヤオトン分布 (図 15) から、1970 年代に撮影された衛星画像や空中写真を参照する必要性、特に洛陽盆地の景観復元を理解する必要性が明らかになった。

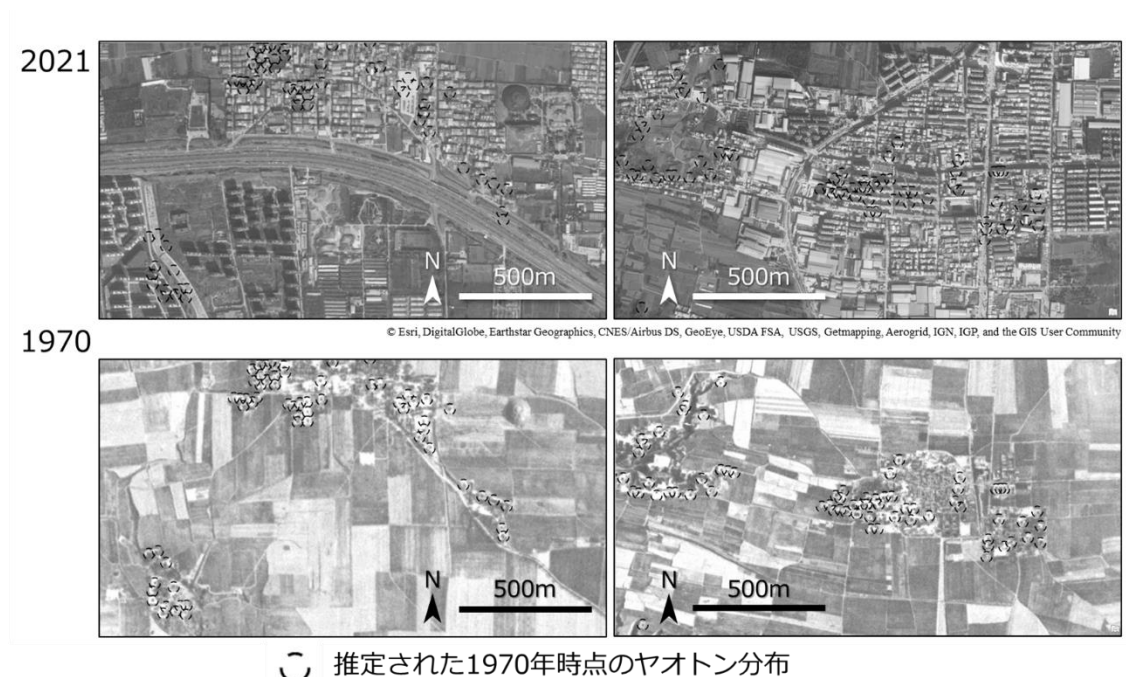


図 15. 1970 年の洛陽におけるヤオトンの判読、および都市開発による消滅事例



図 15 は、1970 年と 2021 年に撮影された衛星画像（WorldView-2）の比較である。また、1970 年当時の下沈式ヤオトンの推定位置が両画像で確認されている。図 15 のように、ヤオトンが放棄されたり埋め立てられたりしただけでなく、埋め戻された後に近代的な住宅や高層ビル、工場、道路などが建設されたために、その痕跡が景観から消えてしまったケースも散見された。また侵食谷は、この地域の人間活動によって大きく変容したようである。この事例は、「下沈式ヤオトンの埋立地は軟弱地盤であるため、下沈式ヤオトンの敷地では建築物の建設が困難である」（審洞考察団 1988）という先行研究の主張が、必ずしもすべてのヤオトンサイトの状況を反映していないことを示している。また、近年撮影された画像を用いて 1970 年以前の景観や地形を推定することが困難な場合があることも証明された。ここで提示された証拠は、建築や文化的景観の研究のみならず、地質学的な研究においても重要な示唆を与えるものである。

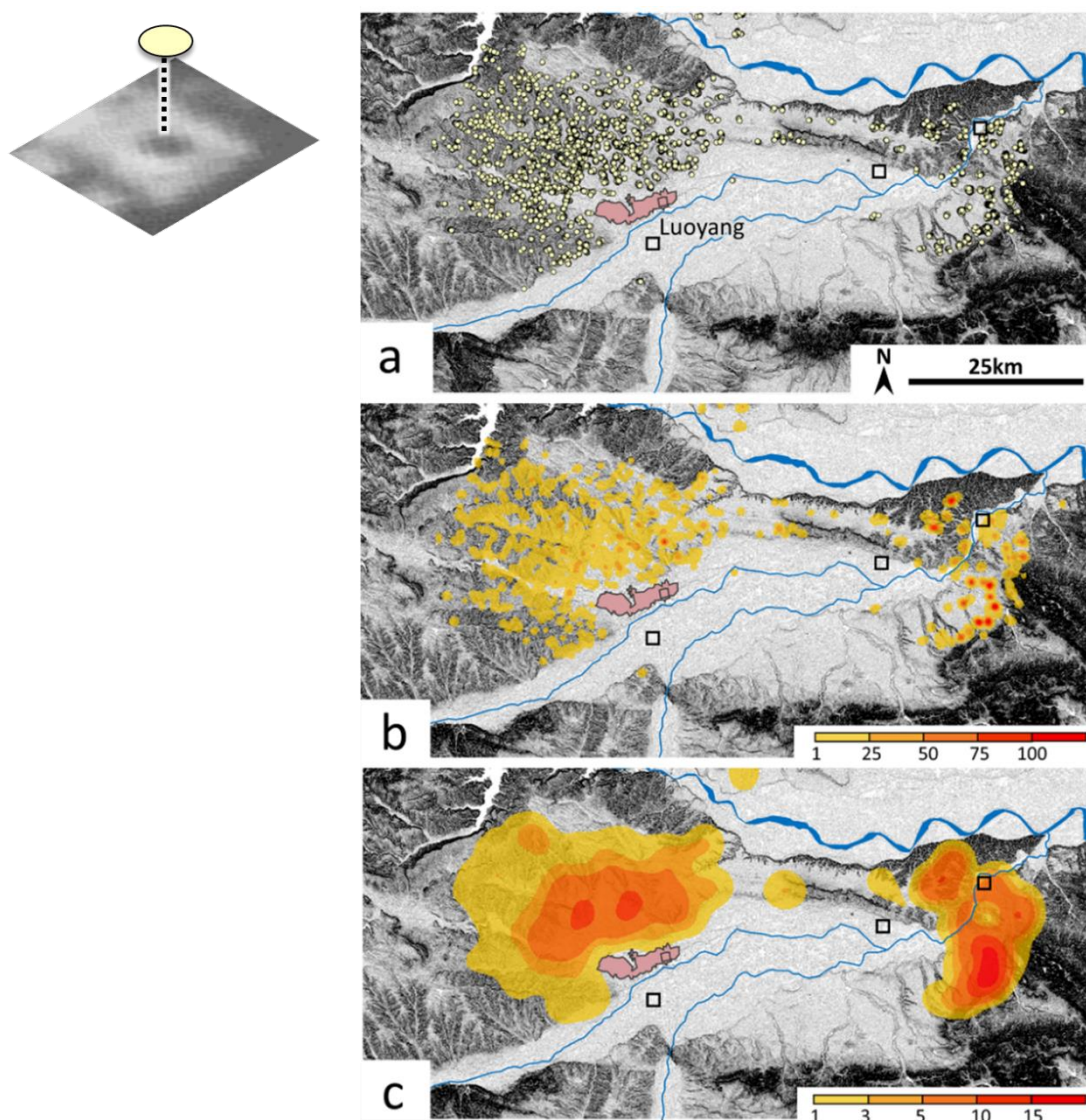
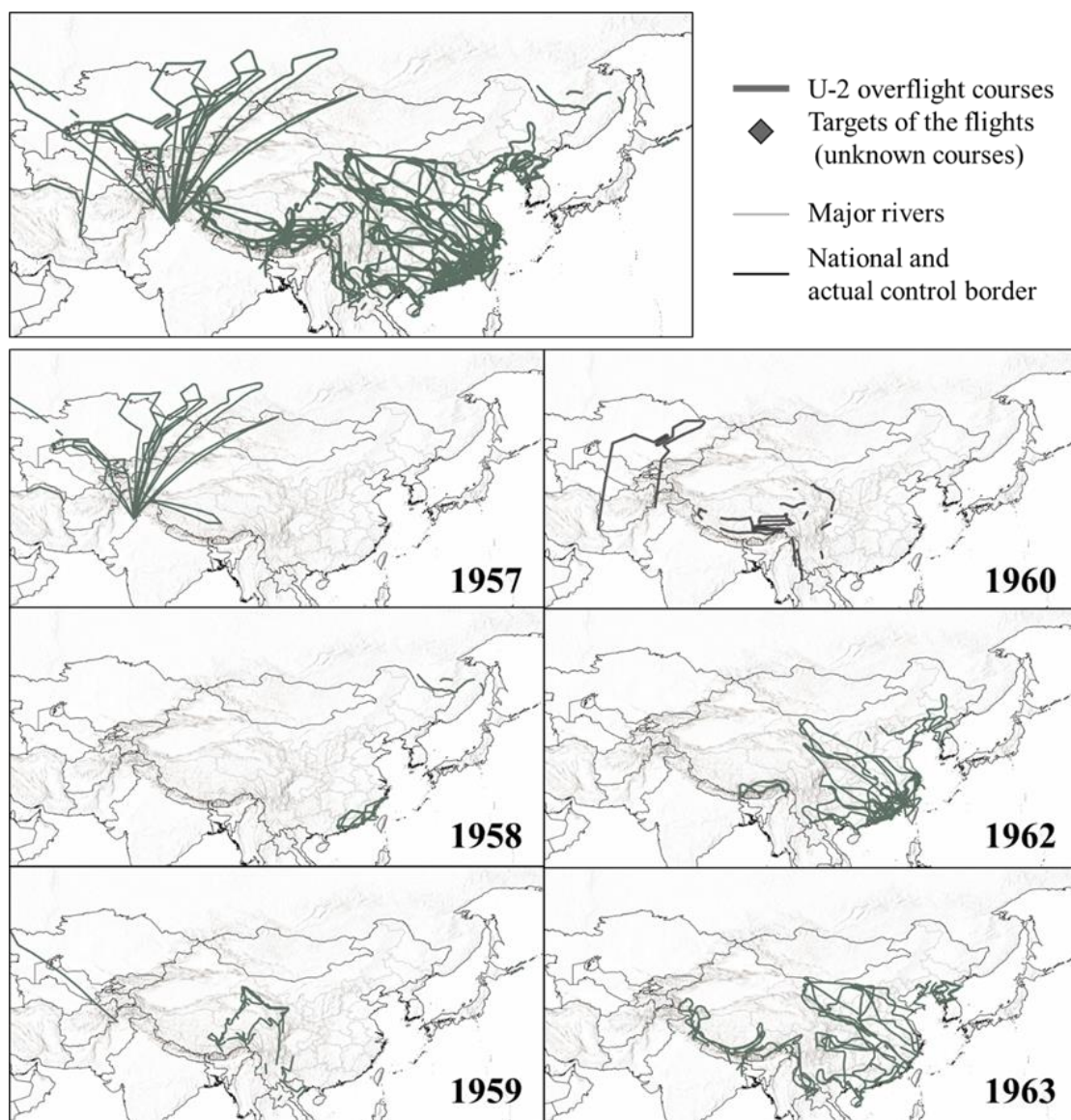


図 16. 下沈式ヤオトンの分布 (a) とカーネル密度推定による単位面積当たりのヤオトン数 (b : bandwidth 1km、c : bandwidth 5km)

### 5.3 U-2 空中写真の実態解明：高頻度空撮エリアの特定

機密解除文書（CIA n.d.）の発見により、U-2 の偵察ミッション数は、1956～1968 年にかけて全世界で計 470 に上ることがわかった。このうち中国領内を撮影したミッションは 1957 年以降で、全体の約 3 割を占め、多くは台湾、一部はパキスタンが起点になっていた。また、中国とソ連、ベトナム、ネパール、モンゴル等、複数の国を横断するミッションも存在した。

図 17 は、1956 年から 1963 年までの東アジア、中央アジア、ヒマラヤ・チベット、インドにおける偵察飛行経路（不明の場合は偵察目標地点）をプロットした地図である。1956 年には調査地域に偵察飛行は存在しなかった。対ソ連ミッションでは、1956 年から 1963 年までの偵察地域の 96.2%（26 件中 25 件）（ヨーロッパ側を含む）が確認された。図 3 の地域には、少なくとも 15 回の偵察ミッションがあった。また、図



17. 東アジア、中央アジアでの U-2 偵察飛行経路：1956～1963 年

対中国ミッションの「NEFA（インド北東辺境管区）－ネパール－チベット－中国」と「北朝鮮－マンチュリア」の両カテゴリーのなかで明らかにできた偵察飛行経路は、58 ミッション中 56 ミッション（96.6%）であった。この調査により、1958 年と 1960 年のすべての偵察飛行経路が明らかになった。また、「ラオス－ベトナム－カンボジア」ミッションの一部で、中国領内での偵察ミッションを見つけることができた。

さらに米軍偵察衛星の運用が本格化する 1963 年以前の偵察頻度の地域的特徴を図 18 に示した。これは図 17 に示したラインデータを基に、GIS を用いて密度解析した結果である。

まず、全体的な傾向として、中国に対する偵察回数の合計はキューバに対する偵察回数よりも多かったが、領土が広いために中国やその周辺地域では同じ頻度での偵察が実現できておらず、地域差が大きいことがわかった。

中国本土では台湾海峡周辺（上海から広東省にかけての中国東部・南部沿岸地域）の偵察頻度が圧倒的に高かったが、東アジア～中央アジアにかけての内陸地域にも複数のホットスポットが存在することがわかった。そこには、チベット高原東部および南部（ラサとカムド）、甘粛省中部、四川省、雲南省、新疆ウイグル自治区西部、カザフスタン東部、シルダリヤ川沿い、キルギスタンの一部地域、ラダック、インドのジャンムー・カシミール州等が該当した。本プロジェクトの対象地である黄土高原については、全域はカバーされていないものの、上記の甘粛省のほか、5.1 で分析を行った陝西省北部の黄土高原を横断する偵察飛行も存在し、情報収集されていることがわかった。

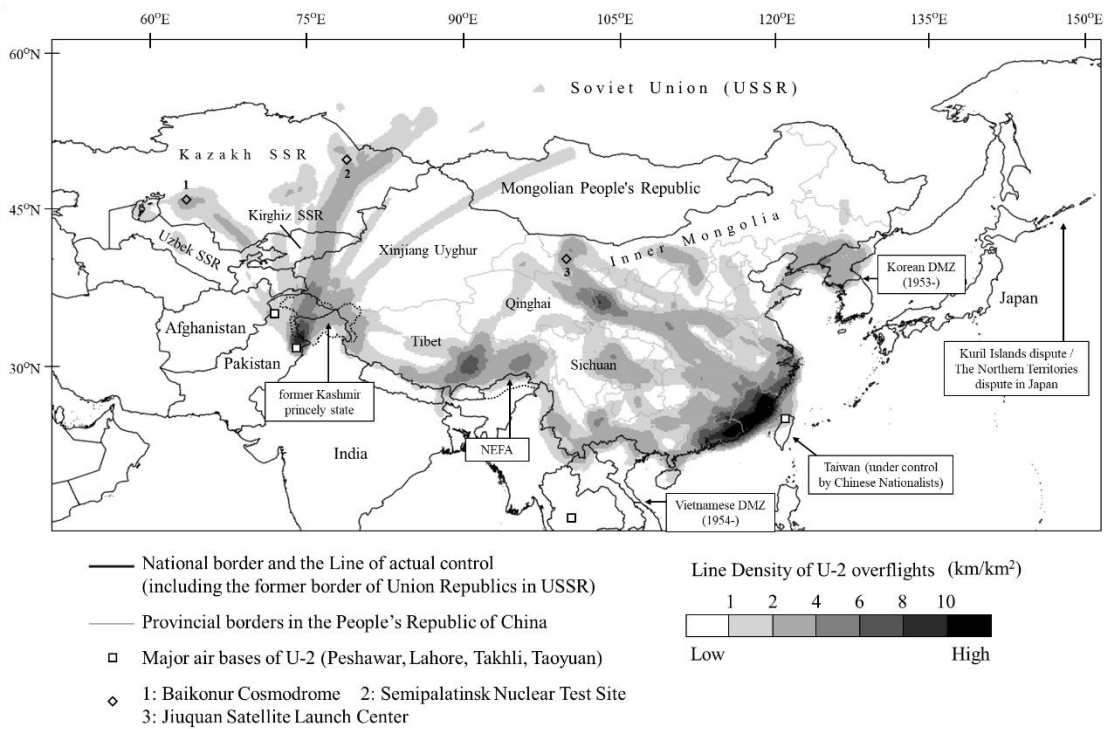


図 18. 東アジア～中央アジアにおける U-2 偵察飛行の頻度：1956～1963 年



このうち黄土高原を横断した Mission GRC176 のネガフィルムを閲覧、情報を収集し、空中写真の利用可能性を確認した。図 19 はその一部であるが、これをみると、斜面耕地上の収穫物のまともり一つ一つまで、はっきりと視認できる。このエリアでは、丘陵一帯が耕地として開発されており、植生が残されている場所を見つけることが困難な状況であったこともみてとれる。

なお、このミッションは Sato et al. (2016) では明らかにできていなかった新発見の偵察飛行経路であり、そこから具体的なネガフィルムの画像まで入手できたのは重要な発見であった。この発見により、黄河本流沿い以外のより内陸の黄土丘陵においても、1960 年代前半の土地被覆を詳細に把握できる可能性が示された。

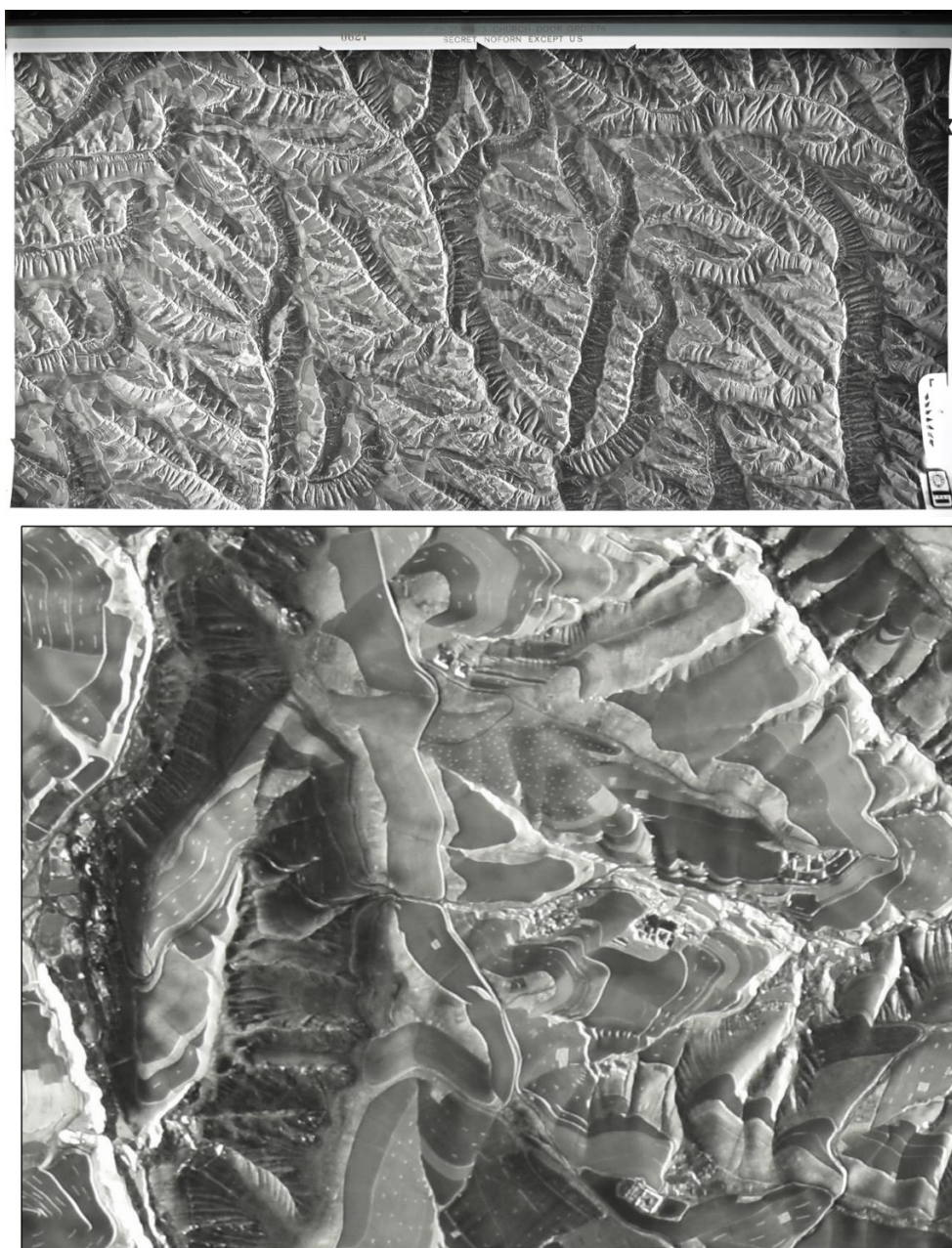


図 19. U-2 偵察機 (Mission GRC176) が撮影した黄土丘陵 (1963 年 9 月)



#### 5.4 1940年代に撮影された空中写真、景観写真の利用可能性

米国立公文書館が所蔵する1940年代の空中写真については、写真の構図と地上分解能から大きく2種類の特徴があることがわかった。1つは直下視画像であり、分解能も比較的高かった。たとえば陝北黄土高原の中心都市・延安周辺では1945年に撮影された直下視画像が複数存在し、当時の土地被覆、耕地分布、都市域、河道、城壁等を判読できた(図20)。もう1つは斜め視画像であり、河北省、山西省、陝西省等で広範囲を連続的に撮影していた。ただし、斜め視画像の場合は、色褪せていたり、地上分解能があまり高くなかったりするケースも散見され、状態が良くかつ機体に近い場所に限って耕地や集落の分布まで判読可能であった。

限られたエリアではあるが、黄土高原各地の空中写真記録が存在した。このうち延安や太原の周辺では、民国期(1940年代)からすでに市街地周囲の丘陵地は広く農業開発が進み、自然植生を判読することが極めて困難な場所が多いことがわかった。図20は延安市中心部とその周辺の黄土丘陵を捉えているが、丘陵の尾根はほとんど耕地になっており、森林被覆を確認することができない。

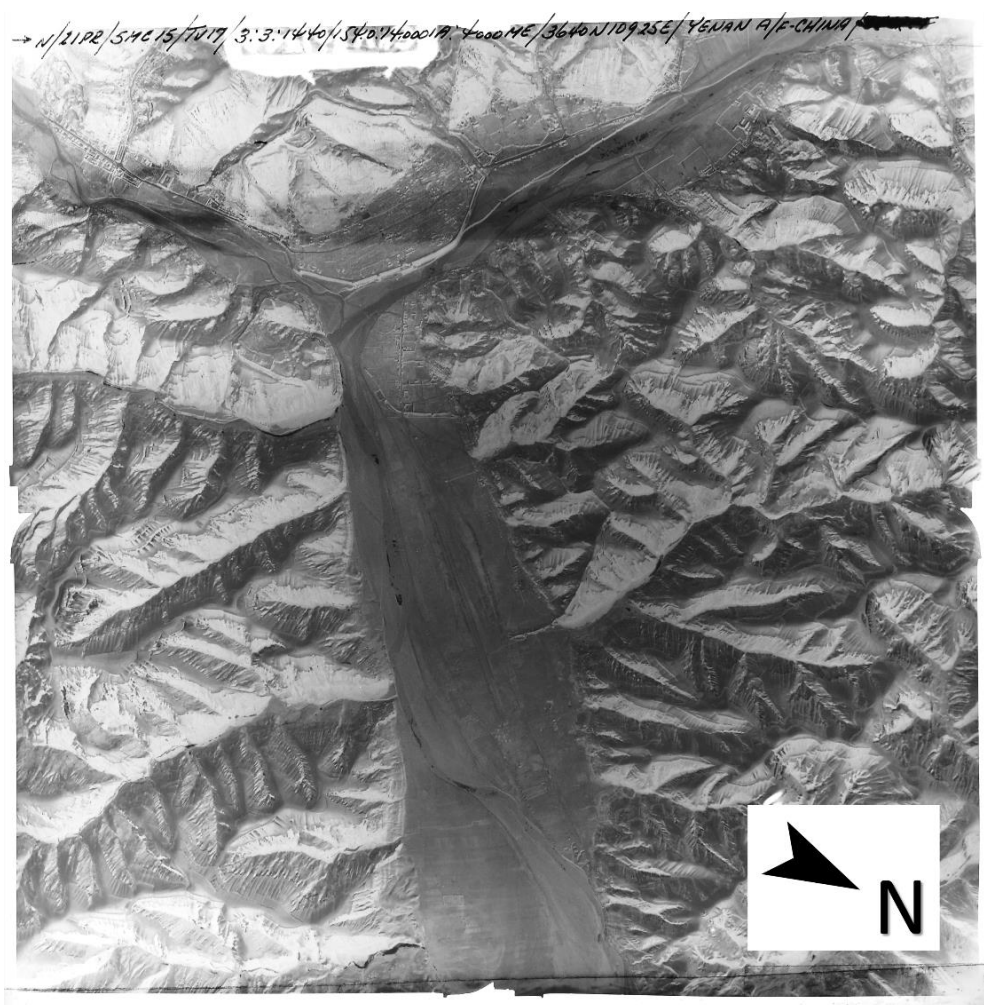


図20. 1945年に撮影された延安市街地の直下視画像  
(米国立公文書館蔵. 2022年筆者撮影)

さらに、米国立公文書館が所蔵するローダミルク・コレクションの写真の全数を調査した結果、中国で撮影された写真は780枚に上り、5箱に分けて管理されていることがわかった。全て1943年に撮影されたアナログ写真で、撮影地域は黄土高原、チベット高原を含む内陸4省（甘粛省363枚、四川省167枚、陝西省145枚、青海省105枚）であった。

写真は台紙に1枚ずつ貼られ、台紙には英語で通し番号、撮影年月日、国名、および被写体の人名、地名、作物名を含む特徴、計測値等の補足説明が書かれていた。被写体の特徴をみてみると、図21のような景観写真が最も多く、その他にガリーや栽培作物、収穫の様子、家畜に焦点を当てた写真、調査チームや政府関係者らとの集合写真も一定数存在した。

また1940年代の空中写真で得られた結果と同様に、コレクションには、甘粛省や陝西省を中心に、視界に広がる丘陵地のほぼ全域を耕地（斜面耕地または段々畑）が覆う景観の写真が数多く収録されていた。以上の結果からは、こうした景観が半世紀前、中華人民共和国が建国される前までにはすでに一般的に広がっていたことが改めて強く示唆される。



図21. 1943年にローダミルク博士によって撮影された  
陝北黄土高原の黄龙山（上）と甘粛省の黄土丘陵（下）  
（米国立公文書館蔵. 2022年筆者撮影）

## 6. おわりに

本プロジェクトにより、米ソ偵察空間情報を用いることで、退耕還林以前の森林、社会環境の変化とその地域性を明らかにできることが示された。さらに、米国の機密解除文書の解析と米国立公文書館への訪問、同館での資料収集を通じて、1940～1960年代に中国（民国期、計画経済期）を撮影した高分解能な空中写真が、米国立公文書館には数多く所蔵されており、これらを利用することで、時代を遡って黄土高原の土地利用・土地被覆、景観変化を明らかにできる可能性が強く示唆された。

ただし、本プロジェクトでは、COVID-19の制限が残り、渡航費が高騰するなかで、渡米調査は1度・約2週間と限られた。上述のようにそのなかで多くの成果がえられたが、黄土高原に関する米国立公文書館が所蔵する空中写真を網羅的に閲覧、収集することはできなかった。これらは今後の課題である。本プロジェクトの成果を基礎に引き続き情報収集と分析を続けていくことで、20世紀後半の土地利用・土地被覆変化をより広い範囲において連続的に明らかにできると思われる。加えて、米軍偵察衛星画像では困難であった崖式ヤオトンの判読も、U-2偵察機の斜め視画像を入手できれば実現できる可能性がある。

## 謝辞

米国立公文書館IIのアーキビストには資料収集に当たりご助言を頂きました。岐阜県図書館にも資料収集のご協力を頂きました。U-2偵察ミッションの全容解明に当たっては、大阪大学大学院人文学研究科の佐藤廉也教授にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 本研究プロジェクトによる主な業績一覧

### 【論文】

1. Hara, Y. 2022. Restoration of the distribution of pit-type yaodong dwellings in the 1970s using US military reconnaissance satellite images in Luoyang Basin, China. *Journal of Arid Land Studies* 32(S): pp.253-257

### 【MISC】

2. 原 裕太・佐藤廉也 2022. 東アジア・中央アジアにおけるCIA運用U-2の偵察経路と頻度の推定：CIA機密解除文書を用いた試行. 『日本地理学会発表要旨集』102. DOI: 10.14866/ajg.2022a.0\_39
3. 原 裕太 2022. (書評) 高村弘毅 (2021): 『写真で見るタクラマカン沙漠縁辺の自然と人』古今書院, 192p. 『地理』67(2) p.105.

### 【学会発表】

4. 原 裕太 2024. 米国立公文書館が所蔵する1940～1960年代中国の空中写真：その特徴と可能性. 日本沙漠学会第35回学術大会.
5. 原 裕太 2023. 古写真にみる民国期内陸中国の雑穀景観—米国人林学者 W.C.ローダ



ミルクの記録より. 2023 年雑穀研究会総会.

6. 原 裕太・佐藤廉也 2022. 東アジア・中央アジアにおける CIA 運用 U-2 の偵察経路と頻度の推定: CIA 機密解除文書を用いた試行. 2022 年日本地理学会秋季学術大会
7. Hara, Y. 2021. Restoration of the distribution of pit-type Yaodong dwellings in the 1970s using US military reconnaissance satellite images in Luoyang Basin, China. DTXIV International Conference on Arid Land
8. 原 裕太 2020. 米ソ偵察情報を用いた計画経済期中国における森林被覆復元の試み: 陝西省北部の黄土高原を例に. Japan Geoscience Union - American Geophysical Union Joint Meeting 2020

## 引用文献

UNEP 2012. *Global Environmental Outlook 5: Environment for the future we want*. Malta.

高山 成・木村玲二 2008. 黄土高原の気候. 山中典和編『黄土高原の砂漠化とその対策 乾燥地科学シリーズ 5』9-17. 古今書院, 東京.

原 裕太 2019. 砂漠化の対処において農業生産構造の転換が果たした役割と課題—中国・陝西省北部の黄土高原を事例に—. 京都大学博士学位論文.

黄河水利委員会黄河誌編集室編 2017. 『黄河誌: 卷二 黄河流域の概要』河南人民出版社, 鄭州, 中国. (中国語) 黄河水利委員会黄河志編輯室編 2017. 『黄河志: 卷二 黄河流域 综述』河南人民出版社, 鄭州, 中国.

久馬一剛 2012. 中国土壌学の近代化に寄与した二人のアメリカ人——John Lossing Buck と Walter Clay Lowdermilk——. 肥料科学 34: pp.21-32.

上田 信 1999. 『森と緑の中国史——エコロジカル-ヒストリーの試み』岩波書店, 東京.

平野悠一郎 2008. 現代中国における指導者層の森林認識. アジア研究 54(3): 71-87.

原 裕太 2020. 中国・黄河流域における食と農の変容: 「持続可能」を模索した 100 年. アグリバイオ=Agricultural Biotechnology 4(8): pp.39-43

David, J. E. 2015. *Spies and shuttles: NASA's Secret Relationships with the DoD and CIA*. Smithsonian National Air and Space Museum, Washington D.C., U.S.

Suzuki, Y., Nakata, T., Watanabe, M., Battulga, S., Enkhtaivan, D., Demberel, S., Odonbaatar, C., Bayasgalan, A., Badral, T. 2021. Discovery of Ulaanbaatar Fault: A New Earthquake Threat to the Capital of Mongolia. *Seismological Research Letters* 92(1), pp. 437-447. doi: 10.1785/0220200109

Challis, K., Priestnal, G., Gardner, A., Henderson, J., O'Hara, S. 2002-2004. Corona Remotely-Sensed Imagery in Dryland Archaeology: The Islamic City of al-Raqqa, Syria. *Journal of Field Archaeology* 29, pp. 139-153. doi: 10.2307/3181489

Nita, M. D., Munteanu, C., Gutman, G., Abrudan, I. V., Radeloff, V. C. 2018. Widespread forest cutting in the aftermath of World War II captured by broad-scale historical Corona spy satellite

- photography. *Remote Sensing of Environment* 204, pp. 322-332. doi: 10.1016/j.rse.2017.10.021
- Pieczonka, T., Bolch, T. 2015. Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between ~ 1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery. *Global and Planetary Change* 128: pp.1-13. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.014
- Davies, J. and Kent, A. J. 2019. 藤井留美訳『レッド・アトラス：恐るべきソ連の世界地図』。日経ナショナル・ジオグラフィック，東京。 Davies, J. and Kent, A. J. 2017. *The Red Atlas: How the Soviet Union Secretly Mapped the World*. University of Chicago Press, US.
- US National Archives 2023. Foreign Aerial Photography, Cartographic and Architectural Records. <https://www.archives.gov/research/cartographic/aerial-photography/foreign-photography>
- Prince, M. 2019. Declassified U-2 spy plane photos are a boon for aerial archaeology: Images from the 1950s and '60s have a better resolution than Google Earth. *Science*. doi: 10.1126/science.aax5949
- Sato, R., Kobayashi, S., Jia, R. 2016. Aerial photographs of mainland China acquired by U-2 spy planes: their characteristics and potential uses. *Teledetekcja Środowiska*, Tom 54 (2016/1), pp. 61-74.
- Hammer, E., Ur, J. 2019. Near Eastern Landscapes and Declassified U2 Aerial Imagery. *Advances in Archaeological Practice* 7(2), pp. 107-126. doi: 10.1017/aap.2018.38.
- Goossens, R., Wulf, A. D., Bourgeois, J., Gheyle, W., Willems, T. 2006. Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai Mountains. *Journal of Archeological Science*, 33(6): pp.745-755.
- 審洞考察団 1988. 『生きている地下住居：中国の黄土高原に暮らす4000万人』 彰国社，東京。
- Pedlow, G. W. and Welzenbach, D. E. 1992. *The Central Intelligence Agency and Overhead Reconnaissance 1954-1974*. History Staff, Central Intelligence Agency (CIA), Washington D.C., U.S.
- CIA 1964. *Idealist Photographic Reconnaissance Missions - Far East Area*, Freedom of Information Act Document Number CIA-RDP33-02415A000100220006-9
- CIA 1963. *Mission GRC 153*. CIA-RDP66B00664R000200190001-8.
- 仲本和彦 2008. 『研究者のためのアメリカ国立公文書館徹底ガイド』 凱風社，東京。
- CIA n.d. *Idealist Mission History*, Freedom of Information Act Document Number CIA-RDP33-02415A000400300002-1.
- Chen J. et al. 2015. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 103: pp.7-27. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002