



岐阜大学機関リポジトリ

Gifu University Institutional Repository

中国内モンゴルのエジナ河・居延三角州における胡楊(*Populus euphratica*)林の現状と回復の傾向の評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-06-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: WANG SIQINBILIGE メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12099/54541

中国内モンゴルのエジナ河・居延三角
州における胡楊 (*Populus euphratica*) 林
の現状と回復の傾向の評価

2015 年

岐阜大学大学院連合農学研究科

生物環境科学専攻

(岐阜大学)

WANG SIQINBILIGE

中国内モンゴルのエジナ河・居延三角
州における胡楊 (*Populus euphratica*) 林
の現状と回復の傾向の評価

WANG SIQINBILIGE

目次

学位論文で使⽤した図のリスト	iv
学位論文で使⽤した表のリスト	vi
要旨	vii
英文要旨 (Abstract)	x
序論	xiii
第 1 章 研究対象地の概要	1
1.1 研究対象地の位置	2
1.2 気候	3
1.3 地形、土壌、植生	6
1.4 水系	8
1.4.1 エジナ河について	8
1.4.2 西河 (ムレン河) について	9
1.4.3 東河 (エムノ河) について	9
第 2 章 土地被覆変化の特徴	11
2.1 はじめに	11
2.2 研究方法	13
2.2.1 現地調査概要	13
2.2.2 使⽤データ	14
2.2.3 解析方法	15
2.2.3.1 画像強調と判読キーの設定	16
2.2.3.2 土地被覆判読	17
2.2.3.3 土地被覆分類図の作成と	

分類精度評価	21
2.2.3.4 判読結果の分析	22
2.3 結果	23
2.3.1 分類精度の検証	23
2.3.2 土地被覆面積率	27
2.3.3 土地被覆面積率の変化	28
2.4 考察	30
2.4.1 画像判読	30
2.4.2 分類精度の検証	30
2.4.3 植生面積の変化の要因	31
第3章 胡楊林の現状と再生適地の判定	38
3.1 はじめに	38
3.2 研究方法	42
3.2.1 使用データ	42
3.2.2 解析方法	42
3.2.2.1 土地被覆の面積変化－解析	
対象地全域と河川から500m以内	43
3.2.2.2 対象全域での胡楊と紅柳の分布の変化	
－1977年以降の変化の追跡	43
3.2.2.3 胡楊と紅柳の変化パターンの確認	44
3.2.2.4 胡楊の回復傾向の判定	44
3.3 結果と考察	46

3.3.1 土地被覆の面積変化－解析対象地 全域と河川から 500m 以内	46
3.3.2 対象全域での胡楊と紅柳の分布の 変化－1977 年以降の変化の追跡	50
3.3.3 胡楊と紅柳の変化パターンの確認	51
3.3.4 胡楊の回復傾向の判定	53
3.3.5 胡楊の植林指針の検討	57
第 4 章 まとめ	60
謝辞	64
引用文献	65

学位論文で使用した図のリスト

- 図-1 黒河流域(図左)と居延三角州(図右)の地理的位置
(井戸の位置: ◆Hは26,27,42号井戸、◆Gは06号井戸.
上流域、中流域、下流域の区分は著者らが便宜上設定した。)
- 図-2 居延三角州の最高気温と最低気
- 図-3 居延三角州の年別降水量と可能蒸発量変
- 図-4 居延三角州の年別風速変化
- 図-5 居延三角州の地形図(旧ソ連製1942年の地形図より
作成)
- 図-6 エジナ河水系分図布
- 図-7 現地調査におけるGPS位置
背景:Landsat/TM 2010年6月11
- 図-8 解析フロー
- 図-9 居延三角州の主要な被覆の判読サンプル
- 図-10 現地調査におけるリファレンスマップ
背景:Google Earth 2010年10月10日
- 図-11 Google Earth画像による聞き取り調査
- 図-12 Landsatデータの判読による居延三角州の土地被覆分
類図
a) 1977年6月11日(湖が枯渇)、b) 1991年6月23日、
c) 2000年6月14日(湖が枯渇)、d) 2010年6月11日
- 図-13 シミュレーション画像
- 図-14 1977年～2010年のおもな土地被覆の面積率の変化

a) 植生、 b) 非植生

図 -15 正義峡（上流）と狼心山（中流）の水門における年別流量

図 -16 地下水位の経年変化

図 -17 エジナ旗における家畜頭数の経年変化

図 -18 1977年から2010年間の植生域の変化

図 -19 胡楊の拡大の測定方法

図 -20 1977年から2010年までの胡楊と紅柳の増減

a) 胡楊、b) 紅柳

背景：1991年のランドサット TM バンド 3

図 -21 河川から 500m 範囲内の胡楊と紅柳の分布

a) 1977年、b) 2010年

背景：a) 1977年のランドサット MSS バンド 2、

b) 2010年のランドサット TM バンド 3

図 -22 1977年から2010年間の胡楊と紅柳の分布変化の

例 背景：1991年のランドサット TM バンド 3

図 -23 胡楊の拡大所要年数 河川から 500m 以内の場合

背景：2010年のランドサット TM バンド 3

図 -24 胡楊の拡大所要年数 2010年の紅柳の分布域の場合

背景：2010年のランドサット TM バンド 3

学位論文で使用した表のリスト

表－1 使用したセンサの諸元

表－2 居延三角州における土地被覆類型の定義と判読キー

表－3 TM2010 の分類図の精度の検証

表－4 1977 年～2010 年の土地被覆の面積率

表－5 生の根の深さおよび生育条件となる地下水位

表－6 居延三角州の土地被覆の面積

表－7 研究対象全域の胡楊の 1977 年以降の変化

表－8 研究対象全域の紅柳の 1977 年以降の変化

要旨

中国内モンゴルエジナ河流域の居延三角州では、気候変動や人為的な変化により植生が劣化していると指摘されてきた。このため、現地調査に基づいて4時期のLandsat画像を判読して居延三角州における土地被覆と植生の変化を確認し、土地被覆変化の特徴と要因を明らかにすること、および、その結果に基づき、胡楊林の現状と今後の回復の傾向を判定し、現在の植生分布から考えられる胡楊の再生適地を明らかにして、胡楊の保護育成に資する情報を提供することを目的とした。

研究はLandsatデータの判読による植生分類と植生の変化の把握および、胡楊林に着目した回復傾向と再生適地の判定に大別される。

1) 4時期のLandsatデータによる植生分類と植生変化の傾向の解析

地上調査に基づきLandsat画像を利用して目視判読によって土地被覆を分類した。最初に2010年6月11日(Landsat/Thematic Mapper)とグーグルアースを併用して判読した後、その結果に基づいて3時期のLandsat画像1977年6月11日(Landsat/Multispectral Scanner)、1991年6月23日(Landsat/Thematic Mapper)、2000年6月14日(Landsat/Enhanced Thematic Mapper Plus)を分類し、居延三角州での土地被覆変化を解析した。

4時期の分類結果を比較して植生と非植生のカテゴリーの変化の傾向を解析した結果、1977年から2010年の間では疎林の面積が64%と著しく増加し、紅柳の面積が32%増加して植生が明らかに拡大

していた。また、砂地とゴビと裸地の面積はそれぞれ 21.4%、16.9%、28.9%減少し、疎林と紅柳とその他の林地に変わった。既存の資料によると 1940 年代から 1980 年頃までは森林が大規模に伐採されて軍用の建材や住民の燃料として使われたが、1980 年頃から薪の代わりに石炭が使われて木が伐採されなくなった。このため伐採跡地が疎林と紅柳とその他の林地に変化したと考えられた。

植生の生育に影響を及ぼす要因として気象要因と水分の供給条件、および人為的要因などが考えられる。気温と降水量について 1970 年から 2010 年の気象データにより分析したが、居延三角州の気候が極度に乾燥しているため、気候変化は植生の生育にはあまり影響しない。1977 年から 1991 年では、家畜の頭数が増加したが、植生の拡大を妨げるほどではなかった。河川流量と地下水位の経年変化は、居延三角州の上流側では植物の生育にあまり影響していない。しかし、下流側では、1977 年から 2010 年の間に植生は減少しており、1980 年前後に比べて地下水位が下って樹木が枯死した可能性があり、疎林が裸地や砂地に変化した。

これまでは居延三角州の植生が衰退しており、その要因として気候変動や河川水の大量取水が指摘されてきたが、本研究では 1977 年以降は植生が回復していることを明らかにし、取水による水分環境の劣化は小さいことを示した。居延三角州の植生の変化の主な原因は 1980 年以前の大規模な森林伐採であり、1980 年代から森林伐採が激減して政府の政策により森林が保護されたことにより、現在、森林は回復過程にあると考えられる。

2) 胡楊林の回復傾向と再生適地の判定

中国内モンゴル自治区のエジナ河・居延三角州では、1940年代から1980年代初頭にかけて胡楊(コヨウ、*Populus euphratica*)などが軍用の建材や燃料として大規模に伐採され、胡楊は絶滅危惧種に指定された。そこで、現地調査と1977年、1990年、2000年および2010年のランドサットデータの判読結果に基づいて胡楊の分布と回復の傾向を判定し、再生適地を明らかにすることを目的とした。GISでの解析によると、2010年までに人為的な攪乱はほぼ終わって植生の回復が始まり、一部のエリアでは胡楊への遷移が進んでいた。胡楊の1年間の拡大距離に基づいた、バッファリング解析では、胡楊が河川沿いの紅柳(コウリュウ、*Tamarix ramosissima*)林へ広がるのに、最低450年を要すると予想された。約40年間で大面積の森林が伐採されたが、回復には10倍以上の年月を要することになる。しかし、胡楊と他の樹種の混植や根切りが胡楊の更新を促すことが知られている。このため、土地被覆分類図とバッファリングの結果に基づいて判定した、胡楊の回復が見込める川沿いの紅柳林へ効果的に胡楊を混植し、拡大が止まっている胡楊林では根切りで更新を促進することにより再生に要する期間を短縮できると考えられた。

Abstract

Scientists pointed out that vegetation declined due to climate change and deteriorating environment by human in the Kyoen Delta of Ejina river in Inner Mongolia, China. Therefore, I aimed at identifying status of land-cover and vegetation changes and their causes, then judging current status and trend of expansion of Koyo popular and finding suitable areas for regeneration.

The study is divided into two parts, determining the land cover and vegetation changes, and identifying recovery status of Koyo popular forest and assessing suitable area for regeneration.

1) Analysis of land-cover mapping and vegetation changes

I visually interpreted four Landsat images by making field surveys in the Kyoen Delta. One image (a Thematic Mapper image (TM2010) acquired on June 11, 2010) was interpreted visually with high resolution images of Google Earth. Three other temporal Landsat images, which were a Multispectral Spectral Scanner, a Thematic Mapper, and an Enhanced Thematic Mapper Plus images obtained on June 11, 1977, June 23, 1991 and June 14, 2000, respectively, were interpreted based on the TM2010 interpretation, and then land cover changes were analyzed over the Kyoen Delta.

I found the following changes between 1977 and 2010: Open forest increased remarkably by 64% and Koryu tamarisk forest increased by 32%, resulting in an increase of green land. The areas of sandy soil, desert and bare land decreased by 21.4%, 16.9% and 28.9%, respectively, and changed to Open forest, Koryu tamarisk forest and Other forest. Logging records from the 1940's to the 1970's showed that trees had been cut largely for building material for the military and fuel for residents

until the late 1970s, after which fuelwood was largely replaced with coal. After logging stopped, the land changed to Open forest, Koryu tamarisk forest and Other forest.

Climate, water supply and human activity could impact on vegetation. However, climate change influenced little, since the area was extremely dry for vegetation growth. Number of domestic animals increased between 1977 and 1991, however, the increase showed little effect on vegetation expansion. Inter annual change of water flow in the river and water table level didn't show clear effect on vegetation in the upper stream. On the other hand, the water table level has been dropping since 1990 and the vegetation area decreased between 1977 and 2010 in the lower Kyoen Delta. Falling water table level appears to be the cause of the decrease of vegetation.

Global climate change and worsening water condition by water intake from the river were believed to be causes of vegetation declining. However, my results showed that vegetation was under recovery and dropping of water table level was not critical for vegetation. Large forest logging caused vegetation reduction before 1980 and forest was under recovery by reduction of logging and protection by the government.

2) Current status and regeneration area assessment of Koyo poplar forest

In the Kyoen River Delta, trees including Koyo poplar (*Populus euphratica*) had been extensively logged for building materials and fuel wood for military use from the 1940s to the 1980s. As a result, Koyo poplar has been designated as an endangered species. Here, we determined the current distribution and recovery trend of Koyo poplar based on Landsat data obtained in 1977, 1990, 2000 and 2010. We also

attempted to identify areas suitable for planting. Koryu tamarisk (*Tamarix ramosissima*) is a pioneer species along rivers and provides a protective habitat for Koyo poplar, which later becomes the climax species. A geographic information system (GIS) analysis showed that, as of 2010, human disturbance of the forest had almost ended and vegetation was recovering. Succession to Koyo poplar had started in some areas. A buffering analysis by GIS based on the annual recovery distance of Koyo poplar showed that it would take at least 450 years for Koyo poplar to recover in Koryu tamarisk forests. That means that the recovery would take 10 times as long as the period of disturbance. However, previous studies have shown that mixed planting of Koyo poplar and other tree species improves the growth of Koyo poplar seedlings and that root cutting improves bud blush from roots. The regeneration period for Koyo poplar could be shortened by planting Koyo poplar in Koryu tamarisk forests along rivers and by root cutting in Koyo poplar forests that had stopped regenerating by identifying suitable areas for regeneration using the landcover maps and the results of buffering.

序論

中国は世界で4番目に国土面積の広い国だが、内陸部の高地や砂漠が多くを占めるため、国土全体のうち、森林の占める割合は高くない。さらにその分布は均一ではなく、多くは東北地方（黒竜江省、吉林省、内蒙古自治区の東北側）と西南地方（四川省、雲南省、チベット自治区）に集中している（環境省，2012）。

歴代王朝の巨大建造物の木材供給と、18世紀の爆発的な人口増加による農地開墾を目的とした森林伐採などの原因で中国の森林は大幅に消失し、1940年代の森林被覆率は5~10%程度に低下していた（辻，2013）。この問題に対し、1970年代に入り、国際的に環境問題が議論されるようになると、中国政府指導者間で、自国の環境悪化に危機感が募るようになった（辻，2013）。1970年代末に改革開放が始まると、森林保護・育成に関する法整備が進み、森林関連の国家基本法として「中華人民共和国森林法」が制定された（1979年施行、1984年修正・公布、1998年改正、辻，2013）。また、1985年には「年間森林伐採限度量を策定することに関する暫行規定」が策定され、森林伐採量を木材成長量以下に厳しく制限し、森林保護を強く打ち出した（辻，2013）。

FAO（国連食糧農業機関）のFRA（世界森林資源評価）2010（FAO，2010）によると2010年時点で中国の森林面積は国土の21.9%にあたる2億686万haと推計されている。世界の森林面積の5.1%に相当し、ロシア、ブラジル、カナダ、アメリカに次いで世界第5位、人工林の面積は7,716万haで世界トップである。

一方、砂漠化は全地球的な問題で、人類の生存基盤にかかわる最も重要な環境問題の一つであり、脅威性が高いといわれ(宮本, 1990)、森林減少が主な原因の一つとして指摘されている(環境省, 2015)。UNEP(国連環境計画)の推定によると、砂漠化は地球上の地表面積の3分の1に影響を及ぼし、110カ国、あるいはその地域の10億人が砂漠化の影響を受け(国際連合広報センター, 2015)、中国も砂漠化の被害が大きいと予測される国である。中国の砂漠化は内モンゴルをはじめ9省におよび、全面積128.24万km²で、中国全土総面積の13.3%にあたる(姚, 1986)。特に、中国の西北部の内モンゴル・アラシャン盟(日本の県に相当する)は砂漠化の典型的な地域である。

エジナ河流域は、中国第2の内陸河である黒河下流域に位置し、アラシャン盟に位置する。黒河は流域の南の祁連山脈の氷河を源流とし、山麓の森林地帯を流れ、オアシス地帯、沙漠地帯を経て、最後にエジナ地域に入って、エジナ河と呼ばれる。エジナ河は狼心山水門から東と西の東河(エムノ河)と西河(ムレン河)に分かれ、「居延澤(ソゴノール湖とガションノール湖)」に流れこんで消滅する(総合地球環境学研究所)。黒河流域は、黒河上流部の山岳地域、中流部のオアシス地域、下流部の沙漠地域の大きく三つの地域に分けられる。エジナ地域は下流部の沙漠地域に位置し、居延三角州はエジナ地域に位置するオアシスである。

エジナ地域の居延三角州は、風と砂埃(砂塵)は黒河下流域と中流域への侵入を防止する役割を果たしている。居延三角州は、エジナ

地域の農業、畜産業及び酒泉衛星発射センター(中国のエジナ地域に位置する大型ロケット発射場)の維持や安定、または、黒河流域の生態系保護に重要な役割を果たしている生態系と言われる(趙・明 2013)。

前述のように内蒙古自治区の森林は東北側に集中しているが、西部のアラシャン盟のエジナ地域の居延三角州などで小面積に分布している。しかし、居延三角州の森林は1940代の軍隊の建築用木材として大幅に伐採され(Cha, 2010)、また、気候変動(中尾ら, 2007; 颯ら, 2014; 趙ら, 2012; 刘ら, 2012)などにより消滅しつつあるとされる。

近年、この森林伐採や水不足が原因で、1958年から1980年の間、居延三角州の胡楊(*Populus euphratica Oliv*)・紅柳(*Tamarix ramosissima Ledeb*)などが573 km² (年平均26 km²)減少した(楊 2002)。また、川沿いの広大な葦(*Phragmites australis(Cav) Trin ex Steud*)と紅柳がなくなった(Soyolcimeg 2007)。そして、1970年代に、東河(図-1)の東側の幅500m、長さ10kmだった天然の胡楊林が全部枯死した(罗, 2007)。居延三角州の胡楊は立木密度が世界で最も高いと言われ、内モンゴル自治区の政府は1992年にエジナ旗の胡楊林958haを保護林区とし、胡楊を絶滅危惧種に指定した(吉川ら, 2007)。

エジナオアシスで最も重要な胡楊林は1940年以降に大幅に減少したが、その後の経過は必ずしも明らかではないものの、1980年頃から胡楊林の保護活動が続いている。

このような、黒河流域の環境変化に関する研究は国際的に実施さ

れている。例えば、Chang ほか(2011)は Landsat/TM の 2001 年~2010 年の画像を解析し、植生被覆の変化を調べた。その結果、2001 年以前は気温や降水量など気候変動と河川水量の減少により、植生面積が減少したが 2001 年以降は黒河の水量が増加したことにより植生が回復していると報告した。楊ほか(2006)は Landsat/TM の 2001 年と 2002 年の 2 時期のデータを用いて植生被覆を数値分類し、植生が回復したとしている。しかし、気候変動や水環境の変化が植生の減少や回復などどの様に影響したのかについて、定量的に検討していない。さらに、リモートセンシング技術を利用して、エジナ河下流部の居延三角州における長期間の土地被覆の経年変化を詳しく判読し、胡楊の回復(拡大)状況を解析した研究は見あたらない。

リモートセンシングの特徴は、広い範囲を瞬時に観測することができる(観測の広域性と瞬時性)、繰り返し同じ場所を観測することができる(反復性)、直接現地に行かなくても現地の状態を知ることができる(非接触性)ことである(島, 2012)。そのため、広いゴビ砂漠、危険な山脈など調査に困難と費用を伴う、特に、広大な対象地を観測するのに有効である。また、人工衛星から地球を観測することは気象観測の分野から始まり、1960 年 4 月に米国の TIROS-1 が打ち上げられた(福田, 2011)。さらに、陸域の資源探査を目的としたランドサット(LANDSAT)は 1972 年にアメリカ航空宇宙局(NASA)により 1 号が打ち上げられた。これにより、全球のリモートセンシングデータを定常的に取得することが可能になり(福田, 2011)、2013 年に打ち上げられた 8 号まで継続されている。ランドサット 4 号から 8 号は約 705km の高度

から、地上を185kmの幅で観測しながら約99分かけて地球を一周し、一日14周する。しかし、同じ場所の上空へ戻ってくるのは16日後で(長谷川, 1998)、同じ場所について年間に約23シーンのデータが記録される。アメリカ地質調査所(USGS)のデータベースからはエジナ地域では同じ時期の雲がないデータは一年間に2回の頻度で観測されていることを確認できる。また、ランドサット4号以降にはセマティックマップパー(TM)、或いはその後継のセンサが搭載され、いずれも地上分解能は約30mである(平田, 2009)。30mの分解能では個々の樹木の形状を識別ができないが、植生タイプは樹高と樹冠の閉鎖率で特徴づけられることから、土地被覆や植生タイプを目視判読や数値分類が可能になる(越智, 2009)。このため、TMデータは植生の解析に利用でき、分類図の作成や土地被覆のモニタリングによく利用されている(越智, 2009)。

以上レビューから、以下の4点が現時点で検討すべき重要な課題と考えられる。

1. 気候変動の植生への影響

エジナ河上流の張掖とエジナ旗では1980年以降から気温が上昇し、温暖化の傾向が見られ、特にエジナ旗において顕著であると言われる(中尾ほか, 2007)。しかし、データ不足のため、温暖化が植生減少あるいは森林減少に及ぼす影響は十分には解明されていない。気候変動による植生の変化を予測するために検討が必要である。

2. 河川水量減少による地下水位の変化の植生への影響

1980年代初めから黒河中流域(張掖など)で、灌漑面積は1949

年の 8.26 万 ha から 1985 年の 23.59 万 ha まで 15.33 万 ha 増加した (Wang and Cheng, 1999)。そのため、中流域の灌漑による水消費量の増加は、下流域における深刻な水不足の主な原因と指摘され (窪田, 2007)、エジナ河の下流部の地下水位は低下し、植物が枯死したといわれる (秋山ほか, 2006)。しかしながら、地下水位の低下と植生の衰退の関係を明らかにした研究は見当たらず、居延三角州のオアシスの保護を考えるために、地下水位と植生の変化の関係を明確にする必要がある。

3. 植生の分布変化について

1958 年から 1980 年の間、居延三角州の胡楊や紅柳など植生は大幅に減少した (楊, 2002) とされるが、植生の分布域の変化の実態は明らかではない。1972 年に LANDSAT が打ち上げられて継続的に地表のデータが記録されてきたことから、1972 年以降の植生の分布の変化を定量的に解析できると期待される。居延三角州の植生分布の変化情報はオアシスの実態を示し、生態系保護の基礎資料となることから重要である。

4. 胡楊の分布変化の把握と予測

胡楊は居延三角州では重要な木本植物で、極相種でもあり、居延三角州の胡楊は立木密度が世界で最も高いと言われるが、胡楊は 1940 年以降に大幅に減少した (Cha, 2010)。胡楊は住民の生活に不可欠であり、極相種であることから居延三角州での自然破壊の実態を示す指標とも考えられる。今後の植生変化の指標として、胡楊の分布をモニタリグし、分布の変化を予測することは居延三角州での環

境変化及び人為インパクトを評価し、胡楊を保護するために重要である。

本研究は以上の4つの重要な検討課題のうち、LANDSAT データを利用して解析が可能な、植生分布の変化の詳細な解析と、胡楊の分布変化を把握して胡楊の回復を予測することを目的とした。

植生の分布の変化の解析では、なるべく長期間の植生変化を明らかにするため、利用可能な一番古い1977年から、最近の2010年までの4シーンのLandsat データを利用した。そして、現地調査に基づいて、Google Earth 画像を参照しながら、まず、2010年6月11日(Landsat/Thematic Mapper)の画像を目視で判読して、胡楊と紅柳を含む14項目の土地被覆を分類した。次いで2010年の判読結果に基づいて他の3時期の画像1977年6月11日(Landsat/Multispectral Scanner)、1991年6月23日(Landsat/Thematic Mapper)および2000年6月14日(Landsat/Enhanced Thematic Mapper Plus)を判読し、土地被覆変化を解析した。そして、エジナ河居延三角州における土地被覆と植生の変化を確認し、その要因を明らかにした。

胡楊の分布変化の把握と予測では、居延三角州における土地被覆の分類結果を利用して、胡楊と紅柳の分布の特徴と胡楊と紅柳の変化の特徴、さらに、胡楊の分布の現状を明らかにした。また、その結果に基づいて今後の胡楊の回復に要する年数を予測するとともに、現在の植生分布から考えられる胡楊の造林適地を明らかにして、胡楊の保護育成に資する情報を提供した。

本論文は上述した研究について成果を取りまとめたもので、主に序論と以下の4章で構成されている。第1章では研究対象地の中国内モンゴルのエジナ河流域居延三角州について位置と気候、地形、植生分布、河川の立地環境について説明する。そして、第2章では4時期14項目の土地被覆分類図を作成して、植生を含む土地被覆の経年変化を解析した。さらに、植生の変化の要因を気象、水分の供給条件、人為的影響などにより考察し、これらの要因と植生拡大の関係について検討した。第3章では、胡楊の分布を把握して、その結果に基づいて胡楊の回復を予測し、胡楊の保護育成に資する情報を提供することに力を入れた。第4章の結論では、第2章で得られた結果や考察に基づき、河川水量の減少による水不足が1958年以降に居延三角州で植生の減少を引き起こしているという一般的な見解(杨, 2002, 児玉, 2007, 罗, 2007)を見直す必要があることを指摘した。また、第3章の結果からは、わずか40年ほどで森林伐採による大規模な攪乱が生じたが、遷移による胡楊林の再生には400年を超える期間を要することを示し、攪乱の影響が大きいことを指摘した。現在、人為的な攪乱はほぼ終わり、この地域の植生が回復しつつあることを明らかにした。また、既存の知見に基づくと、胡楊林を再生するには、水分条件が良好な河川沿いで、若齢林の保護・育成、壮齢林や老齢林での樹下植栽や根切りによる萌芽更新の促進が有効で、土地被覆の判読結果は対象となる林分の把握に役立つことを指摘した。また、河川沿いの大面積の紅柳林、特に胡楊林から遠く離れた紅柳林に胡楊を植樹することが、胡楊の再生に効果的であることを指摘した。

第1章 研究対象地の概要

中国・内モンゴル・黒河下流域のエジナ河流域に位置する居延三角州を研究対象地として選択した。

祁連山に発した黒河は、エジナ河流域の唯一の生命線である。黒河下流のエジナ河は南から北へ流れ、全長は 250km、年平均流量は 4.67 億 m³、年平均流速は 200m³/秒である。黒河はエジナ流域のエジナ旗(日本の郡に相当する)の牧、農、林などの大切な水資源であり、居延三角州を涵養している。エジナ旗に位置する居延三角州は天然森林、草地などが集中したオアシスで、天然森林と湖沿いの草地面積は 3426.67km²、エジナ旗土地面積の 2.99%である(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。

エジナ旗は中国の内モンゴル自治区アラシャン盟の最西部に位置し、祁連山に発した黒河の下流域である。地理座標は東経 97° 10' 23" ~103° 7' 15"、北緯は 39° 52' 20" ~42° 47' 20" である。東はアラシャン右旗と接し、南は甘肅省金塔県と隣接し、西は甘肅省肅北モンゴル自治区県(日本の市町村に相当する)と、北はモンゴル国と接している。国境線は 514.69 km、東西は 488.59 km、南北は 324.22 km、総面積は 11.46 万 km² である。エジナ旗の面積は内モンゴルの面積の十分一で、アラシャン盟の面積の四分の一である。政府所在地のダライ・フブは東河(納林河)と西河(ムレン河)の間に位置している。エジナ旗の人口は 15,405 人(1990年)で、モンゴル族は 4,998 人、漢民族は 10,141 人である(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。

1.1 研究対象地の位置

中国・内モンゴル・黒河下流域のエジナ河流域に位置する居延三角州の北緯 41°51'~42°22'、東経 100°55'~101°24'、標高約 940m、面積が 1445km² の地域を対象地として選択した。文献により居延三角州のエリアの定義は異なるが、本研究では現在多くの住民が用いている、ダライ・フブ鎮(エジナ旗の政府所在地)を含む東河の支流で囲まれるエリアとした(図-1)。

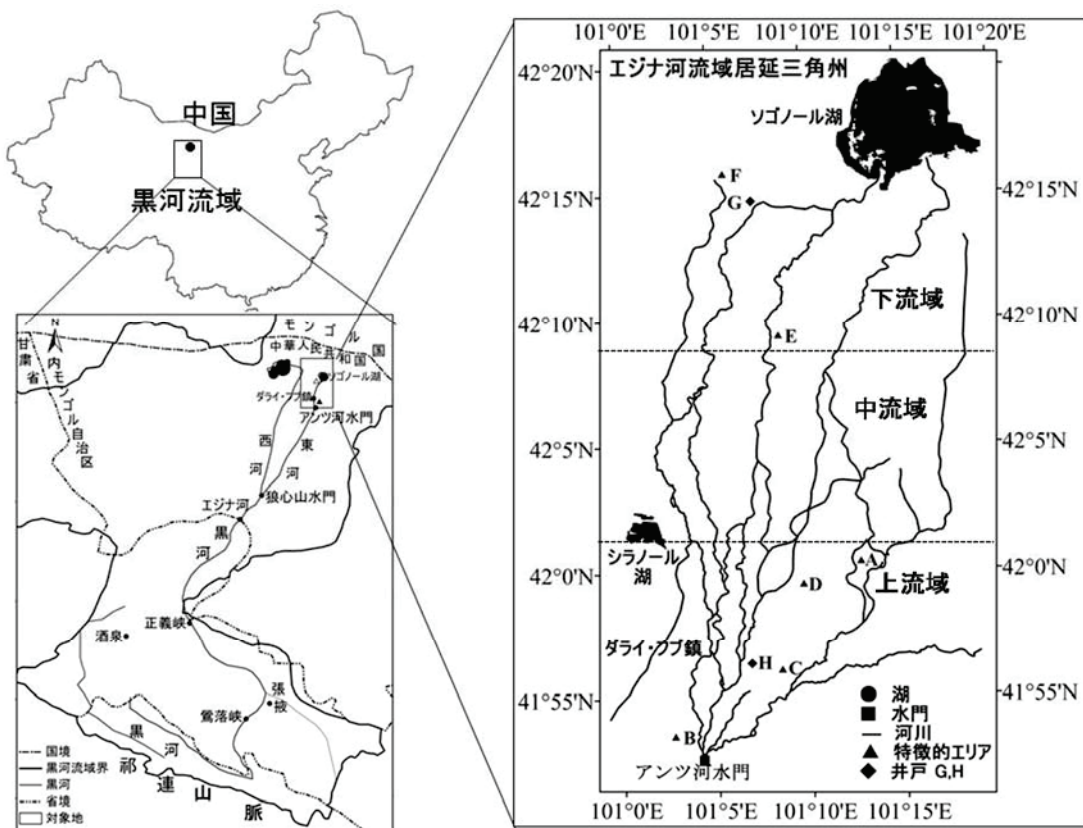


図-1 黒河流域(図左)と居延三角州(図右)の地理的位置
 (井戸の位置: ◆Hは 26,27,42号井戸、◆Gは 06号井戸.
 上流域、中流域、下流域の区分は著者らが便宜上設定した。)

1.2 気候

居延三角州は極めて強い大陸性気候で海から遠く離れているため、夏は酷暑、冬は酷寒で、極端な乾燥気候である。年最高気温は43.1℃、年最低気温は-37.6℃、平均気温は8.3℃である。超乾燥で降水量が非常に少なく、年平均降水量は37mm、可能蒸発量は3700~4000mm、相対湿度は35%程度、年平均風速は $4.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、年間8級($17.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 34ノット)以上の強風日数は52日である(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。図-2、図-3、図-4は居延三角州の1980年から2005年の居延三角州における年別気温と降水量と風速を表す。

1999年7月に最高気温が42.5℃、1980年~2005年の平均気温

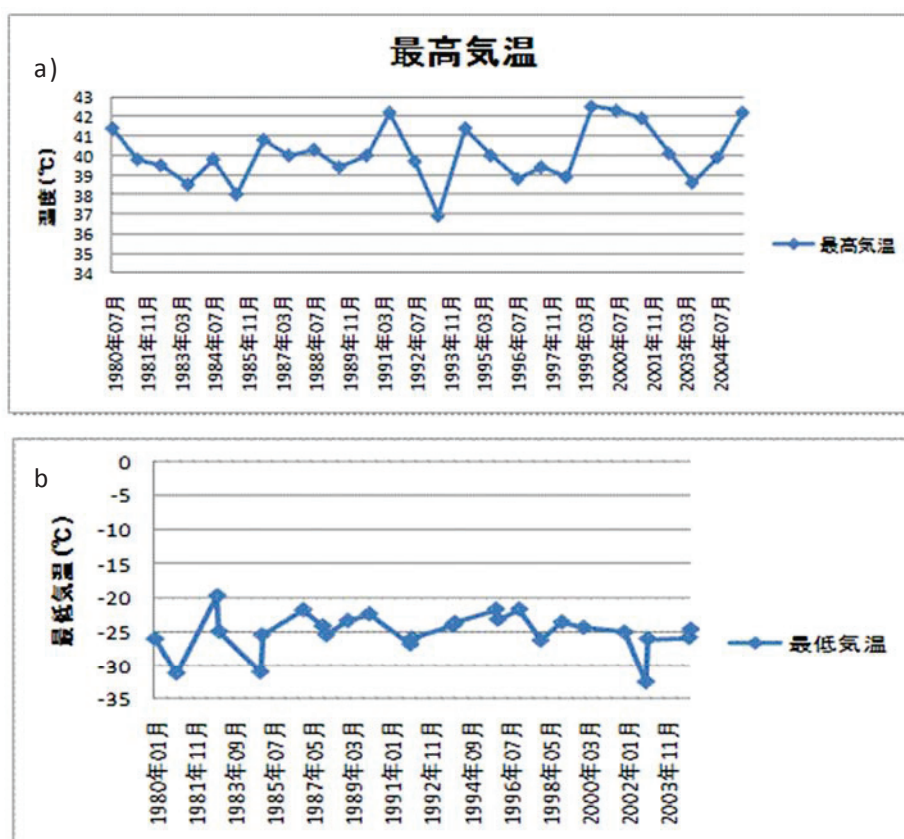


図-2 居延三角州の最高気温と最低気

が 40.1℃となり、夏の酷暑は 7 月に集中する(図-2a)。冬は最低気温が-31.3℃になり、12 月、1 月に集中する(図-2b)。1983 年の降水量は 7mm で最も低く、1995 年は 77.3mm で最大で、平均 32.7mm である。可能蒸発量は 2002 年には 2194.1mm と最も低く、2004 年には 4745mm で最も高く、平均 3233.8mm である(図-3)。

図-4 から以下の点を指摘できる。年平均風速は概ね 3.0 m/秒で、これは木の葉や小枝が揺れるほどで、浮塵である。海上では波頭が砕け、白波が現われ始める程度である。また、年間の最大風速の平均は



図-3 居延三角州の年別降水量と可能蒸発量変

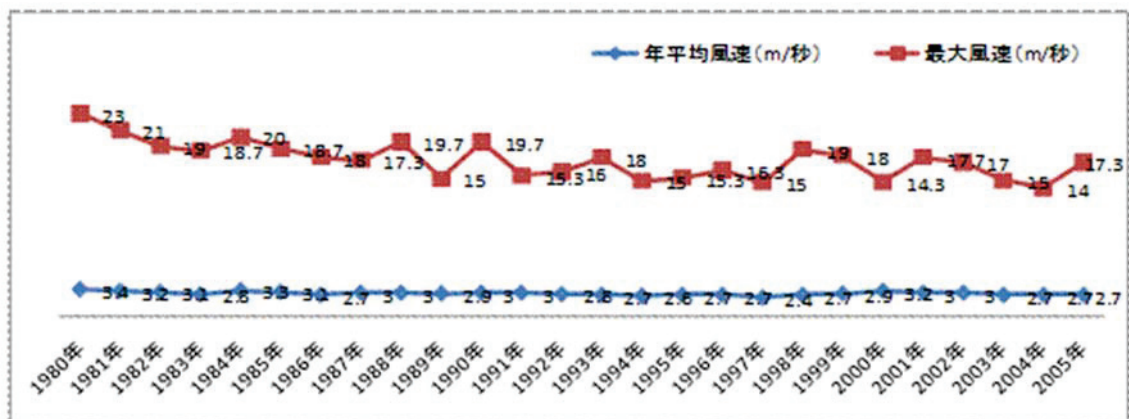


図-4 居延三角州の年別風速変化

17.4 m/秒であり、陸上では小枝が折れ風に向かって歩けず、中国の基準では8級の風、沙塵暴2級(中)に分類される。海上ではやや小さめの大波の波頭が碎けて水煙となり、泡は筋を引いて吹き流され、台風状態である。最大風速23 m/秒ということは、沙塵暴1級(強)である。このように乾燥した強風地帯であるため、エジナ旗は1992年に黄砂に襲われ、農作物と家畜などが大きなダメージを受けた。そして、1993年と1995年に強い黄砂が寧夏省、甘肅省、新疆、内モンゴルを襲った(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。

1.3 地形、土壌、植生

居延三角州はエジナ河の河岸の沖積平原であり、地勢は西南から東北へ緩やかに斜度を緩めて、三角州の周辺は高く中心部は低い平らな形で、海拔高度は900~1100mに及び、最低標高は820mである(図-5)。南は黒河下流域の上端の鼎新オアシス(甘粛省金塔県)、北は、ソゴノール(東湖)とガシオンノール(西湖)、西は山脈、東はバタンチリン砂漠に繋がる。

エジナ旗はユーラシア大陸の中心地域、ヒマラヤ山脈の運動により、青蔵高原は絶えず隆起し、南西の季節風を内陸に入ることを立ちふさがった。そのため、エジナ地域は乾燥高温で、降水量は少なく、可能な蒸発量が多く自然条件と人為的影響により、地質は粗末、有効な地層が薄い、土壌の塩類化が進み、有機物の成分が不足、土壌の生産力が低い、砂漠化土壌類型である。主に、グレー茶褐色の砂土、グレー草原土、アルカリ土、石質土などである(景愛, 2007)。

居延三角州には、天然自生の森林、主に、胡楊(*Populus euphratica Oliv*)・紅柳(*Tamarix ramosissima Ledeb*)、また、湖の砂浜や牧草地に葦(*Phragmites australis(Cav) Trin ex Steud*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides L*)などが分布し、エジナ旗総面積の27.57%を占め、牧業、農業、林業の盛んな地区である(額濟納旗志編纂委員, 1998b)。そして、ゴビ(被覆率10~30%)と砂漠(同10%弱)が広がっている(額濟納旗志編纂委員会, 1998)。

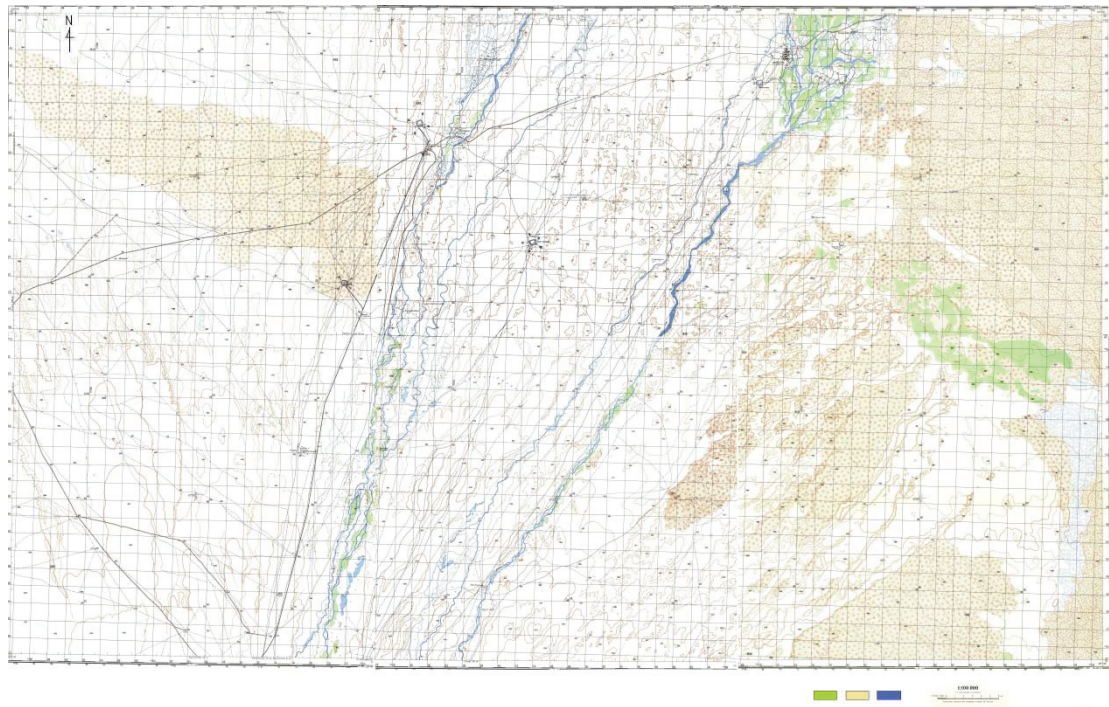


図-5 居延三角州の地形図（旧ソ連製 1942年の地形図より作成）

1.4 水系

1.4.1 エジナ河について

エジナ河は祁連山脈の北麓に発し、青海省、甘肅省、内モンゴルに跨って流れる黒河の下流域である(図-1)。黒河の狼心山からエジナ地域に入ってきた部分をエジナ河と呼び、長さは250km、幅は平均150m、水深は1.5mである。水深は非常に浅く、昔の人たちは皮の筏でエジナ河を渡るので「弱水流沙」とも呼ぶ(額濟納旗地名委員会, 1988)。

エジナ河の平均流量は200~300 m³/秒、最大流量は500~600 m³/秒である。50年代にエジナ河の年平均流量は12~13億 m³で、ソゴール湖、ガショーンノール湖、また、ジンストノール湖などに注ぎ、美しい大自然であった。60年代~70年代にかけて、年平均流量は10億 m³で、また湖の美しい景色が残っていた。80年代になると年流量は4億 m³になり、渇水年に2億 m³になり、森林の面積が減り、魚種類もなくなり、砂漠化が進んだ(楊, 2002)。

エジナ河は季節河であり、黒河水が毎年2回流れてくる。第一回目は3~4月になり、春の増水と言ひ、水量が比較的多い。第二回目は9~10月になり、秋の増水と言う。一年に三回流れてくる時もあり、7~8月で、洪水と言う。エジナ河は明朝(1368年~1644年)から中華民国(1912年~1949年)末期にかけて、5月、6月、7月を除いて基本的に河の流れがあり、年平均流量は20億 m³以上あった。また、1944年に西河(ムレン河)は一年間水の流れがあり、東河(エムノ河、オリド河)は1~2ヶ月だけ断流になったという歴史記載がある。流量の

変動は上流の降水と取水により決まる(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。

エジナ河は狼心山水門(エジナ河流域の水門)から西と東への二つに分かれて流れ、また19条の細流(図-6)があるのでエジナ・オアシスが生まれた。歴史的にはエジナ河に断流がなかったし、居延三角洲(弱水三角洲)は「天蒼蒼、野茫茫、風吹草低、見牛羊」と称賛された(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。

1.4.2 西河(ムレン河)について

エジナ河の西河をムレン河(ムレンゴロー、図-6)と呼ぶ。ムレン河の長さは150kmで、ガショーンノール湖に注ぐ。幅は20~50m、河道は沙地が多く、水深が一番深い時期では1.5~2m(河道の真ん中)、普通は0.5~1mで、流量は80m³/秒である。1950年代以降、ムレン河には流水が入ってこないため、面積が267km²あったガショーンノール湖は1961年に完全に枯渇した(額济纳旗地名委员会, 1988)。

1.4.3 東河(エムノ河)について

東河は、エムノ河(オリドゴロー)とも呼ばれる(図-6)。エムノ河の長さは160kmで、ソゴノールに注ぐ。幅は150mで河下は沙地が多く、水深が一番深い時1.5m(河道の中央)、普通は0.5~1m、最大流量は400~500 m³/秒で、普通は100~300 m³/秒である。過去にはソゴノールの面積は800 km²もあったが、現在は1950年代の35km²からさらに減少した。具体的には2005年には27 km²だったが、2006年の7月

18 日の湖水面積は 21 km² に減少した(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。

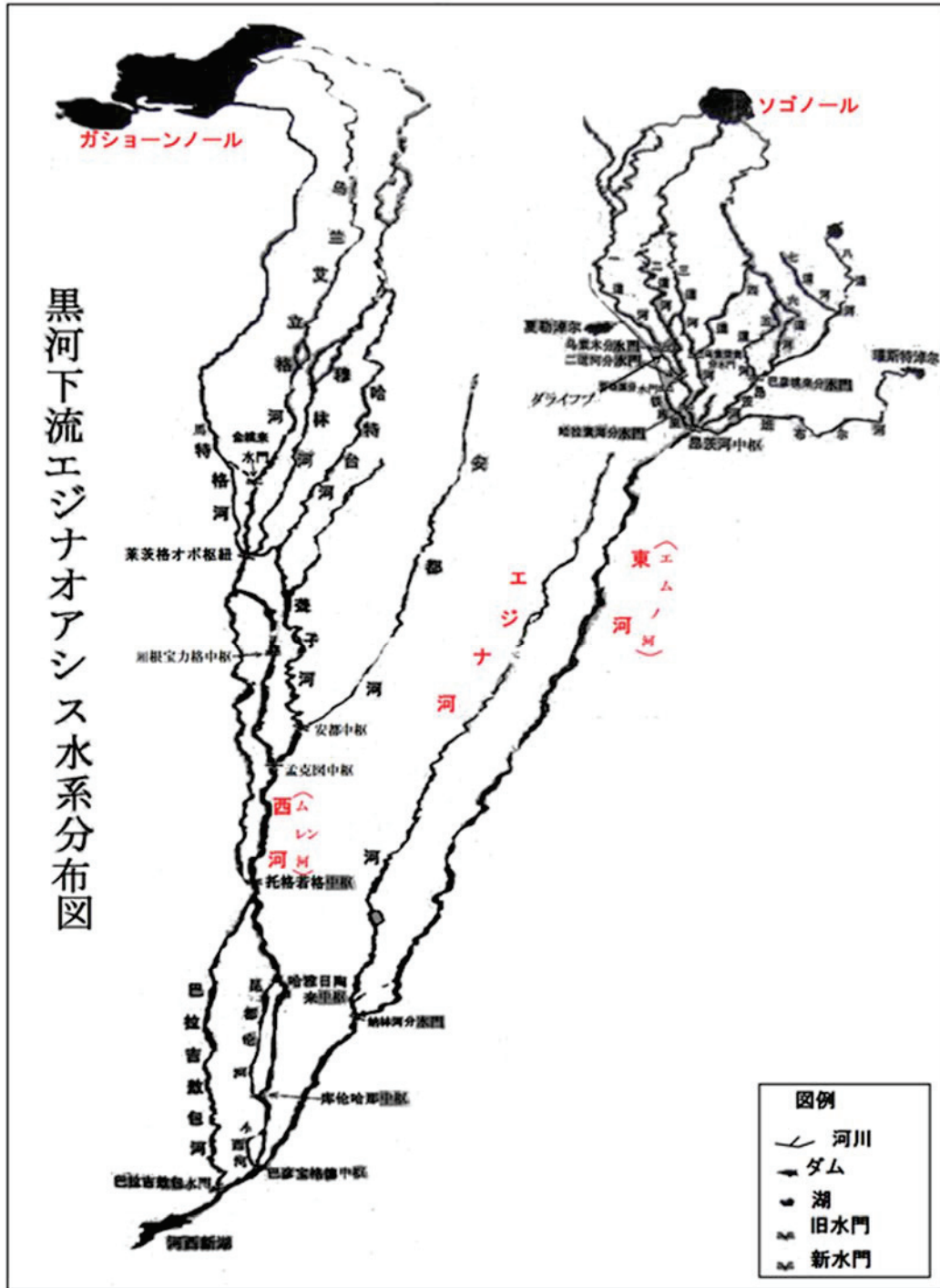


図 - 6 エジナ河水系分布図

第 2 章 土地被覆変化の特徴

2.1 はじめに

年降水量が 38.2mm、年可能蒸発量が 3653.0mm(額済納旗志
編纂委員会 1998)の黒河下流のエジナ河流域の人々にとって、黒河
は母なる河である。しかし、清代(1636年~1911年)から1950年後半
にかけて、人為的な影響と地球規模の気候変動などにより、エジナ河
が断流し、多くの湖が枯渇した(中尾, 2007)。エジナ河の年平均流
量は1940年代の10.5億 m³から1950年代に8億 m³、1970年代
には4億 m³まで減少し、1990年代に入って、平均2.5億 m³になり、
1991年には1.8億 m³しかなかったとされる(罗, 2007)。さらに、この限
られた水資源は秋と冬の植生の非生長期に流入し、生長期の春と夏
には流入しない(罗, 2007)。そのため、1958年から1980年の間、居
延三角州の胡楊(コトカケヤナギ、高木、*Populus euphratica*)、紅
柳(ギョリュウ、灌木、*Tamarix ramosissima*)などが573 km²(年平
均26 km²)も、水不足が原因で失われたとされる(杨 2002)。また、川
沿いの広大な葦原(イネ科ヨシ属の多年草、*Phragmites communis*)
と紅柳が消失した(B, 2007)。そして、1970年代に東河(図-1)の
東側に幅500m、長さ10kmで広がっていた天然生の胡楊林が全て
枯死した(罗, 2007)。さらに、ソゴノール湖(図-1)が1961年と1992
年に通年で枯渇し、1962年、1963年、1973年、1980年、1986年、
1990年の6年で合計8回枯渇した(杨, 2002)。

この問題に対し、1992年に中国国家水利部に特別委員会が設
置され、黒河下流域における水量配分に関する法案が策定された。こ

の結果、2000年にエジナ河に水が流れるようになり、2001年8月、中国国務院の「黒河流域近期治理規則」が批准されて、2002年にはさらに大量に放流されるようになった(秋山ほか, 2007)。

このような、黒河流域の環境変化に関する研究は国際的に実施されている。例えば、古野ほか(2008)の Terra/ASTER と MODIS、NOAA/AVHRR など時系列衛星データによる中国黒河流域の乾燥地域の環境変化の分析、Chang ほか(2011)の Landsat/TM データを用いた黒河下流域の植生変化の解析などがあげられる。しかし、エジナ河下流部の居延三角州における土地被覆の経年変化を詳しく判読し、解析した研究は見あたらない。本研究では、現地調査に基づき、Landsat の画像を目視で判読し、エジナ河居延三角州における土地被覆と植生の変化を確認し、その要因を明らかにすることを研究目的とした。

2.2 研究方法

2.2.1 現地調査概要

2011年9月に約二週間をかけて、エジナ河流域・居延三角州における対象地の土地被覆、植生分布などに関する現地調査を行った。おもに、土地被覆の現状を知るため、南端のアンツ河水門から北端のソゴノール湖まで南北約52km、東西約35kmの範囲を踏査した。森林において樹種、樹木の樹齢、分布、疎密度、枯損状況を、草地において草の種類、分布、生育状況、疎密度など、耕地において作物種類など、植生被覆の状況を確認した。また、18箇所ではGPS (Garmin eTrex、Garmin社、USA)を用いて地理座標を測定し、測定地周辺の植生の種類と地形などを調べた。

さらに、判読精度評価の参照データとして、2012年9月に池を除く13の土地被覆について、197箇所において現地の土地被覆を確認し、GPSを用いて地理座標を計測した(図-7)。当初は車で移動して、2km間隔の格子点について精度調査を実施する予定だった。しかし、対象地におけるオアシスの牧草地帯(灌木林を含む)は、太い鉄線に取り込まれ、また、流水時期だったため河川に水が流れて、等間隔で調査をすることが困難だった。そのため計画ルートを変更し、次のように調査を行った。1) オアシスの植生地帯(森林と草地など)の移動可能な場所では、計画通り2km間隔で調査して現状を把握した。2) 2カ所の紅柳林(灌木)では、オートバイでアクセス可能な場所で現地調査を行った。3) 非植生域(ゴビ、砂地、裸地など)は広大で被覆の変化が小さいため、4km間隔で調査して現状を把握した。砂地の中央

部に入ることが困難なため、砂地周辺から 4km 内部において調査し、現状を把握した。

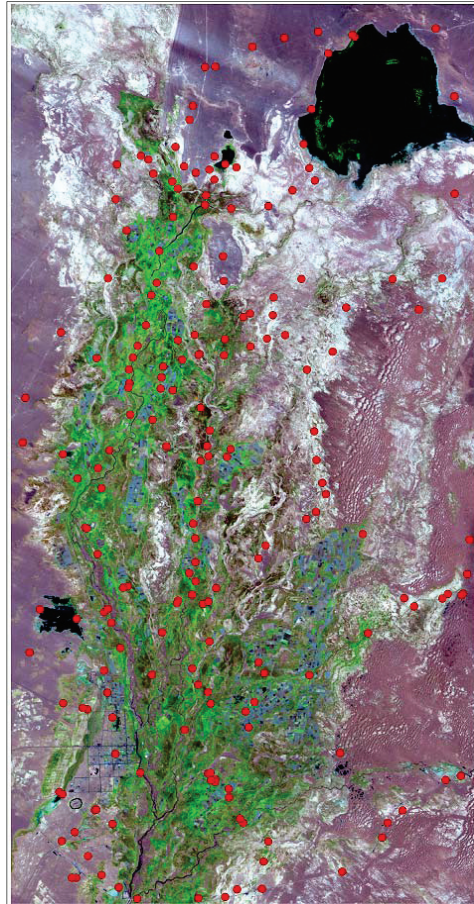


図-7 現地調査における GPS 位置
背景: Landsat/TM 2010 年 6 月 11

2.2.2 使用データ

解析には、投影座標系 UTM Zone47、地球楕円体 WGS84 に幾何補正済みの Landsat/MSS:1977 年 6 月 11 日 (以下 MSS1977 と略す)、Landsat/TM:1991 年 6 月 23 日 (以下 TM 1991 と略す) および 2010 年 6 月 11 日 (以下 TM2010 と略す)、Landsat /ETM+:2000 年 6 月 14 日 (以下 ETM+2000 と略す) と Google Earth

画像 2006 年 6 月 3 日と 9 月 1 日および 2010 年 5 月 9 日のデータを使用した(表 -1)。

表 -1 使用したセンサの諸元

衛星名	観測日 (入手元)	センサ名	バンド	波長域(μm)	空間分解能
Landsat-2 (1975.米国)	1977.6.11 (USGS)	MSS (Multispectral Scanner System)	4	0.5~0.6	80m
			5	0.6~0.7	
			6	0.7~0.8	
			7	0.9~1.1	
Landsat-5 (1984.米国)	1991.6.23 (USGS)	TM (Thematic Mapper)	1	0.45~0.52	バンド6は120m、 それ以外は 30m
	2		0.52~0.60		
	2010.6.11 (USGS)	3	0.63~0.69		
		4	0.75~0.90		
		5	1.55~1.75		
		6	10.4~12.5		
		7	2.08~2.35		
Landsat-7 (1999.米国)	2000.6.14 (中国科学院)	ETM + (Enhanced Thematic Mapper Plus)	1	0.45~0.52	バンド6は60m、 バンド8は15m、 それ以外は 30m
			2	0.52~0.60	
			3	0.63~0.69	
			4	0.75~0.90	
			5	1.55~1.75	
			6	10.4~12.5	
			7	2.08~2.35	
			8	0.52~0.90	

2.2.3 解析方法

現地調査に基づき、1977年~2010年の4時期のLandsatデータを用いて、カラー合成と画像強調を行い、目視判読により土地被覆を分類し、土地被覆変化を解析した。

解析には地理情報システム ArcGIS ver.10 (ESRI社、USA)と画像解析ソフト ERDAS IMAGINE 2011 (ERDAS社、USA)を利用した。解析フローは以下の通りである(図-8)。

植生の季節変化(フェノロジー)を考慮して、6月のデータを利用することとし、MSS1977、TM1991、ETM+2000 および TM2010 を使用し

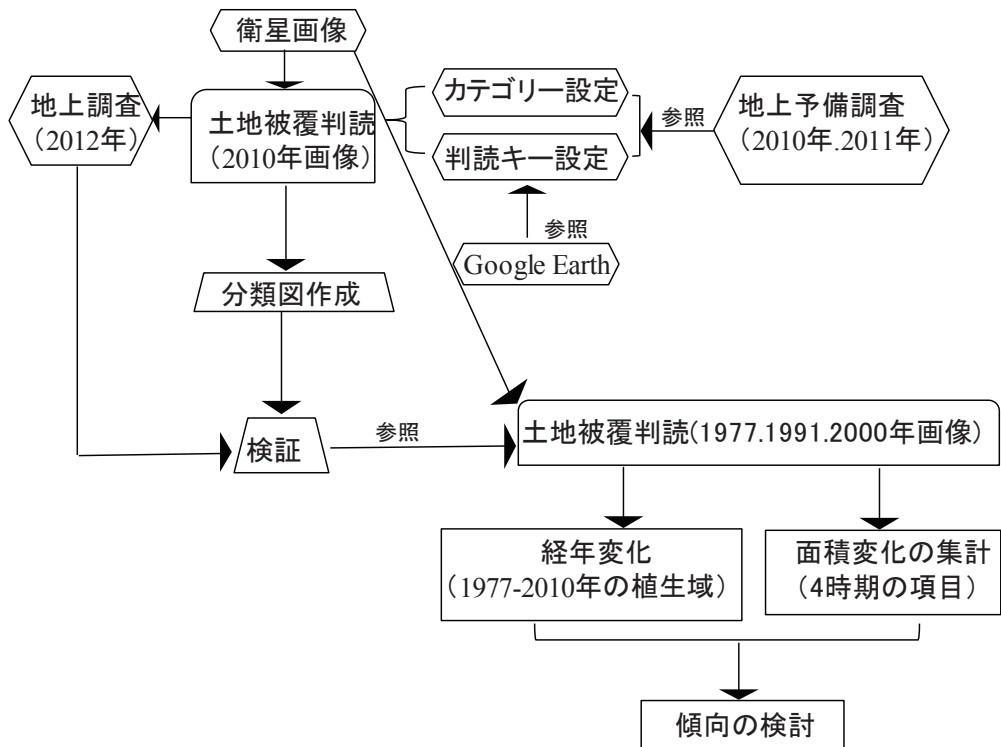


図-8 解析フロー

た。対象地では、6月は植物が開葉して生長期に入っており、目視判読に適している。

TM2010の画像を基準として、他の3時期の画像MSS1977、TM1991、ETM+2000から、明瞭な同一の地上基準点を16点選定して座標を計測し、比較した。その結果、2010年と1977年の画像の誤差が約±0.4画素で、2010年と1991年、2010年と2000年の画像の誤差が約±0.01画素であり、4時期の画像に大きいずれはなかった。

2.2.3.1 画像強調と判読キーの設定

TM, ETM+の band5, band4, band3 にそれぞれ RGB を配色してフォールスカラー合成し、植生を緑色で表示した。そして、MSS の band7, band5, band4 にそれぞれ RGB を配色してフォールスカラー合成して植生を赤色で表示した。画像強調では、被覆物の特徴を目立たせるように濃度変換を行った。濃度変換はヒストグラムによるコントラスト変換を行い、画像中の各濃度値の画素数を平坦化あるいは正規化することで、画像を見やすくした(長・井上, 2011)。

中国・国土資源部(2007)の土地被覆類型とその定義およびエジナ旗土地被覆現状(額济纳旗志编纂委员会, 1998)に基づき、居延三角州における土地被覆類型の定義を作成した(表-2)。Google Earth 画像および TM2010 の判読に先立ち、土地被覆類型の定義に基づいて、Google Earth 画像、エジナ旗森林資源分布図、内モンゴル自治区によって 2002 年より前に作成された黒河下流エジナオアシス水系分布図、地上調査の結果などを比較検討しながら判読キーを決定した(表-2)。そして、土地被覆類型の定義と判読キーおよび現地写真を参照しながら判読サンプルを作成した(図-9)。判読にあたって、土地被覆が分かりにくく、判読が困難な箇所については、2011 年 9 月に現地を調査したリファレンスマップを利用し(図-10)、GPS で地理座標を計測するとともに写真を撮影して地上の被覆を確認し、判読キーを修正した。

2.2.3.2 土地被覆判読

判読には判読キー(表-2)と判読サンプル(図-9)および地上調査の

表-2 居延三角州における土地被覆類型の定義と判読キー

カテゴリー	土地被覆類型 (2007発行)	判読キー			[a] 判読 難易
		Google Earth (2006.2010)	Landsat/TM (RGB=5.4.3)	Landsat/MSS (RGB=3.2.1)	
胡楊 (高木)	樹冠被覆度 \geq 30%の高木 林地	やや黒めの緑、不定形の 塊	緑～やや白っぽい緑	エンジ～やや白っぽい エンジ	難
紅柳 (灌木)	樹冠被覆度 \geq 40%の灌木 林地	黒めの緑、不定形な塊	黒色～黒めの緑、 ややカーペット状	黒色～黒めの赤、 ややカーペット状	容易
疎林	樹冠被覆度10~30%の疎 林	深緑、疎らに分布	薄い緑、疎らに分布	薄い赤、疎らに分布	容易
その他の林 地	人工林、不成績造林、樹 木苗の圃場及び混交林	緑、四角・長方形、 整然としたパターン	鮮やかな緑、茶色と緑の 混ざり合い、四角・長方 形、整然としたパターン	鮮やかな赤、四角・長方 形、整然としたパターン	難
草地	主に自然草本、また、疎 林、灌木林内の草本植物 が生える土地、人工的草 地を含む	薄いカーキ色、河川と耕 地の周りに分布	鮮やかな緑、河川と耕地 の周りに分布	鮮やかな赤、河川と耕地 の周りに分布	難
河川	自然的、人工的に形成さ れた水面	黒色、細長い	黒色、細長い	黒色、細長い	容易
湖	自然に形成された溜水区	黒色、円形または長方形 に近い	黒色、円形または長方形 に近い	黒色、円形または長方形 に近い	容易
池	天然及び人工的に形成さ れた溜水区、湖より小面積	黒色、不定形	黒色、不定形	黒色、不定形	やや難
市街地	都市と町における用地	灰色、白、赤などの混 合、全体に円錐状だが町 の中は長方形	薄い灰色、全体に円錐状	黄色っぽい、全体に円錐 状	容易
農村 (集落)	農村における生活住宅用 地	灰色、白、赤などの混 合、東西、南北に延びた 長方形、バオは円形	オレンジ色、東西、南北に 延びた長方形	薄くオレンジ色、灰色っぽ い、東西、南北に延びた 長方形	やや難
砂地	地表は砂に覆われ、基本 的に植物がない土地、砂 浜を含めない	明～暗の灰色、風紋	紫と白で、風紋	明るい灰色で、風紋	やや難
ゴビ	地表は主に碎石に覆わ れ、植生被覆率は5%未満 の土地	のっぺりとした暗い灰色	のっぺりとしたコーヒーマ ン色	のっぺりとしたコーヒーマ ン色	容易
裸地	地面は土質に覆われ、基 本的に、植生が生えない 土地	白～明るい灰色、不定形	白くて、不定形	白くて、不定形	難
耕地	農作物を耕作するための 土地	緑～明るい灰色で、矩形 や扇形など	青緑、矩形や扇形など	暗いえび茶、矩形や扇形 など	容易

[a] 判読難易の基準： 難は、面積が狭いか様々なパターンがあり、識別が困難な地物。容易は、面積が広くて土地被覆が単純で、識別が簡単な地物。

写真を参考にした。

TM2010 を目視で判読して土地被覆をポリゴン化し、ポリゴンごとの土地被覆項目を判定した。判読が難しい場所では、Google Earth 画像を参照して判読した。Google Earth を活用した理由は、1) 研究対象地の Google Earth 画像は灌木の樹冠形を判読できるほど高解像度で、目視判読の参考になること、2) 無償で閲覧(利用)できることである。

No	カテゴリー	Google Earth(2006,2010)		Landsat/TM2010 (RGB=5,4,3)	Landsat/MSS1977 (RGB=3,2,1)	現地写真(2012)
1	胡楊 (高木)	[d] 	[a] 			
2	紅柳 (灌木)	[d] 	[b] 			
3	疎林	[d] 	[a] 			
5	草地	[d] 	[b] 			
11	砂地	[a] 				
12	ゴビ	[b] 				
13	裸地	[b] 				
14	耕地	[c] 				

[a] 2006年6月3日、[b] 2010年5月9日、[c] 2006年9月1日、[d] 右の図の部分拡大。[e] 紅いポリゴンは表2の代表的なエリア

図-9 居延三角州の主要な被覆の判読サンプル

づき 2012 年の現地調査点との距離が 100m 以内の 4 箇所を除いて 96 箇所を判読に利用した。

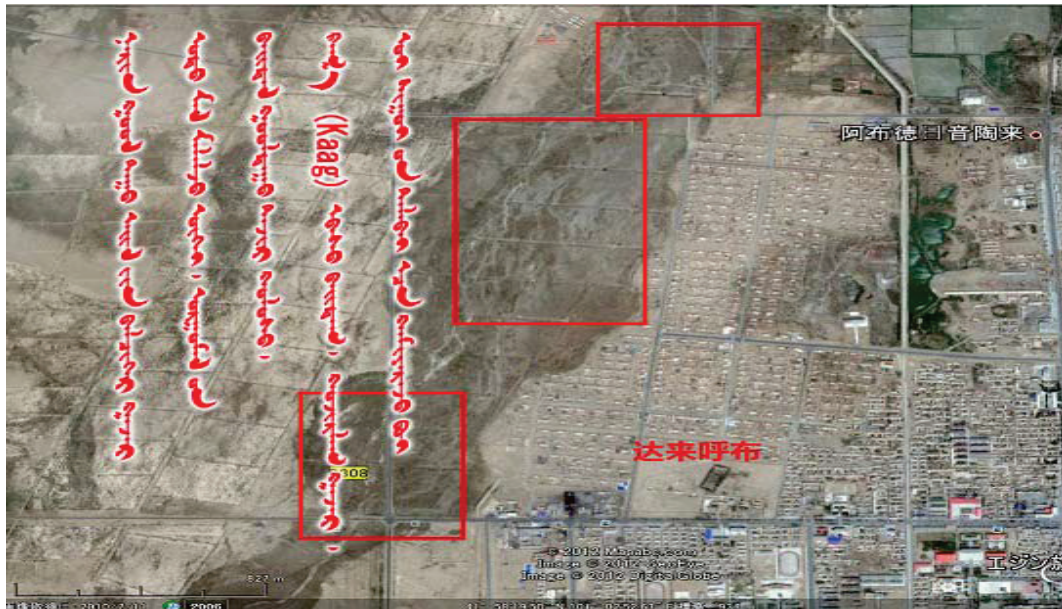


図-11 Google Earth 画像による聞き取り調査

*Google Earth(GeoEye-1 2010 年 7 月 11 日)。縦書きのモンゴル文字で、「ナリナー河沿いの牧草地、現在は放牧してない、植物は葦、成長の悪い草、または、アルカリ土壌など、森林局が管理している」とコメントがある。

2.2.3.3 土地被覆分類図の作成と分類精度評価

14 カテゴリーの判読結果から、土地被覆分類図を作成した(図-12)。また、MSS1977 と TM2010 の判読結果の植生域(胡楊、紅柳、疎林、草地、耕地)を集約し、植生域の増加域、非変化域、減少域を表すマップを作成し、植生域の変化の特徴について検討した。

精度検証は次の手順によった。1) 各検証点の地理座標を基に、半径約 50m の円形の検証エリアを設定した。2) 地上調査時に検証点から東西南北の四方位を撮影した写真を参照して、検証エリア内が一様であることを確認した。3) 検証点の被覆が一様でなかった草

地とその他の林地、および、検証点 が得られなかった池を表 3 の精度検証から除外した。4) 検証点を中心とする3×3画素について分類結果と検証データをクロス集計し、Kappa 係数により分類精度を評価した(Congalton 1991, 表-3)。

TMより性能が劣るMSSの画像(MSS1977)について、TM2010からMSSデータ相当のシミュレーション画像を作成して(図-13)MSS1977と比較し、判読の妥当性を検討した。TM2010を3×3画素の移動ウィンドウで平均化して90mにリサンプリングした後、band2, band3, band4をそれぞれMSS1977のband4, band5, band7にヒストグラムをマッチングして輝度値を揃え、シミュレーション画像とした。

2.2.3.4 判読結果の分析

4時期の判読結果について、カテゴリー別の面積と経年変化の傾向を集計し、特徴を分析した。1977年と2010年間の植生域(胡楊、紅柳、疎林、その他の林地、草地、耕地)の変化を図化し、植生変化に関連すると考えられる要因について、既存の資料に基づいて経年変化との関連を検討した。

2.3 結果

2.3.1 分類精度の検証

2012年の197箇所の現地調査点のうち、2011年の調査点から100m以内の距離の4点と草地とその他の林地の17点を削除し、残った176点(検証点)を利用して分類精度を検証した。さらに、水位の変化のために検証点を得られなかった池も除いて、残りの11カテゴリーについて精度を評価した(表-3)。

表-3のなかで、「判読結果」とは土地被覆の目視判読結果を意味し、「参照データ」とは現地調査で確認した土地被覆で、教師となり得る参照データである。プロデューサー精度とは各項目の対角要素の画素数を列合計の画素数で割った値で、制作者が意図した通りに分類されているかを示す。ユーザー精度とは、各項目の対角要素の画素数を行合計の画素数で割った値で、利用者が分類図をどの程度信

表-3 TM2010の分類図の精度の検証

		参照データ										単位:画素数		
		胡楊	紅柳	疎林	河川	湖	ゴビ	砂地	裸地	市街地	農村	耕地	行合計	ユーザー精度
判 読 結 果	胡楊	157	0	0	0	0	0	0	0	9	0	166	95%	
	紅柳	51	214	0	0	0	0	9	9	0	0	292	73%	
	疎林	3	0	213	0	0	0	9	18	0	0	243	88%	
	河川	0	9	0	36	0	0	0	0	0	0	45	80%	
	湖	0	0	0	0	18	0	9	0	0	0	27	67%	
	ゴビ	0	0	0	0	0	225	0	0	0	0	225	100%	
	砂地	8	3	18	18	0	0	117	0	0	0	164	71%	
	裸地	2	11	0	0	0	9	0	180	0	0	202	89%	
	市街地	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	18	100%	
	農村	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	54	100%	
	耕地	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	144	149	97%
列合計		221	242	231	54	18	234	144	207	18	63	153	1585	
プロデュー サー精度		71%	88%	92%	67%	100%	96%	81%	87%	100%	86%	94%		
総合精度=87% [b]		Kappa=85%												

[a] 十分な数の検証点を得られなかった草地、その他の林地と池を精度評価の対象から除外した。

[b] 総合精度=対角要素画素数/総画素数=(1376/1585)×100=87%で表される。

頼できるかを判断する目安となる(村上, 2010)。TM 2010 を用いた分類図の総合精度は 87%、Kappa 係数は 85%であった(表-3)。Kappa 係数は、分類結果が実際のカテゴリーと一致する程度を示す(Congalton, 1991)。胡楊と河川のプロデューサー精度は 70%前後で、やや低かったが、残りの 9 カテゴリーの精度は 80%を超えて高かった(表-3)。他の 3 時期の MSS1971、TM1991、ETM+2000 については、当時の情報(例えば Google Earth 画像など)が極めて少なく、判読精度は評価していない。

一方、MSS1977 の判読精度について TM2010 を用いてシミュレーション画像(図-13)を作成して検討した。MSS1977 とシミュレーションした TM2010 データを同じカラー合成で強調表示し、同じ場所の森林(胡楊、紅柳、疎林、その他の林地)を比較した。その結果、各森林タイプとも 2 つの画像の色調が良く一致した。4 つの森林タイプは、樹冠の色だけではなく、樹高と樹冠の疎密度で特徴づけられることから、MSS1977 でも森林タイプの判読が可能だったと考えられる。この比較により、MSS1977 でも森林をはじめとする各カテゴリーの判読精度は高いと判断した。判読の基準にした TM2010 と同じ仕様のセンサ(表-1)のデータ(TM1991 と ETM+2000)の場合、TM2010 に基づいて判読したので、これらの画像の判読精度は TM2010 の精度に近いと考えられる。

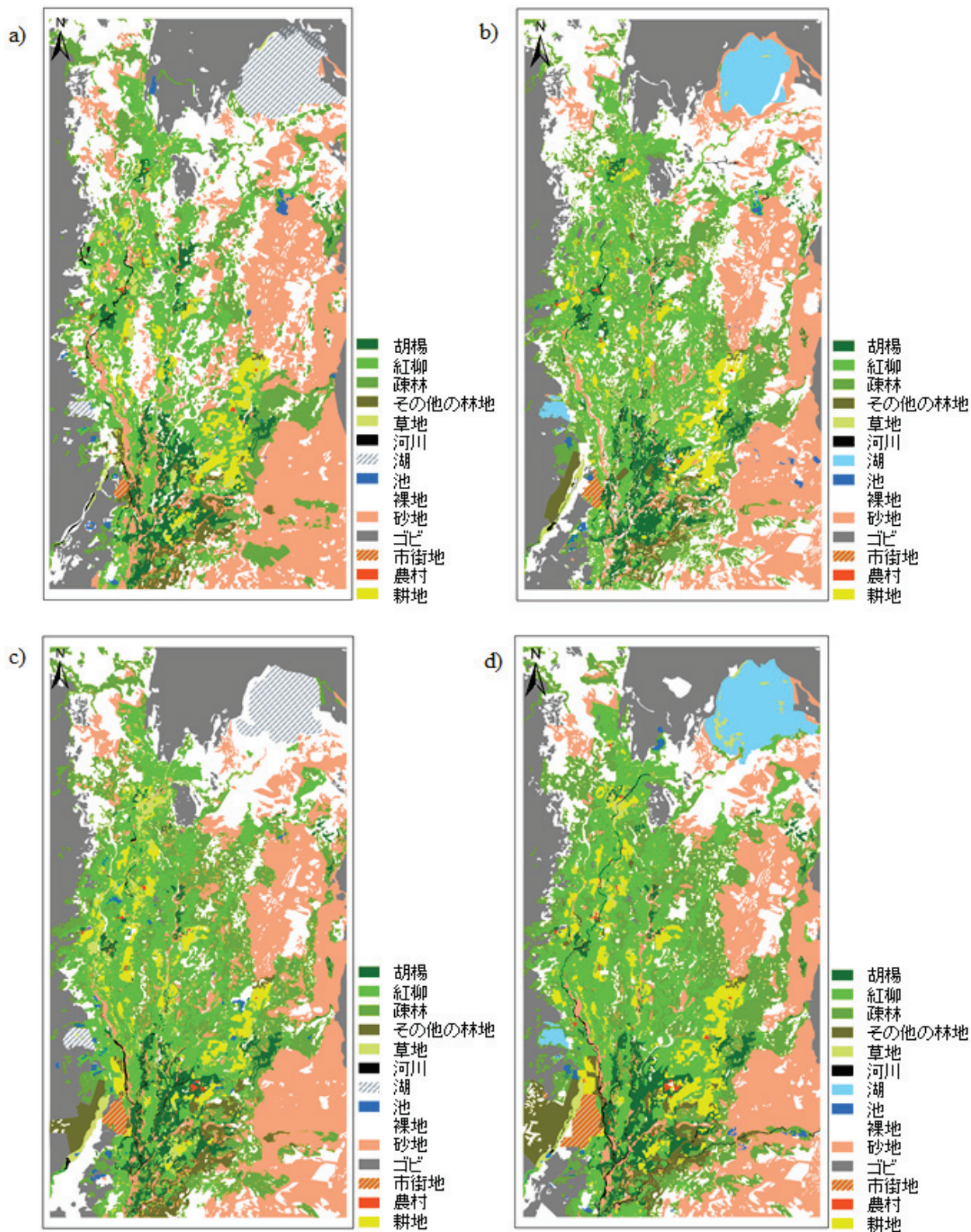
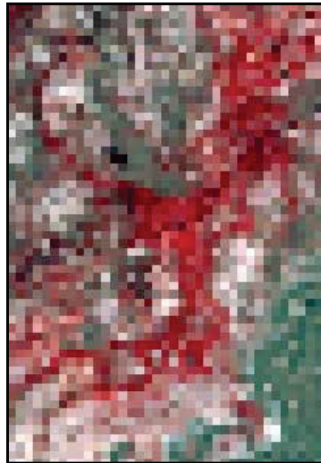


図-12 Landsat データの判読による居延三角州の土地被覆分類図

a) 1977年6月11日（湖が枯渇）、b) 1991年6月23日、
c) 2000年6月14日（湖が枯渇）、d) 2010年6月11日



MSS1977年6月11日

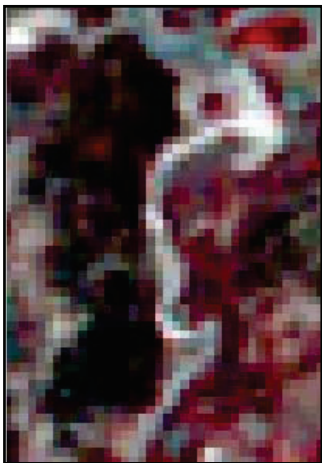


TM2010年6月11日

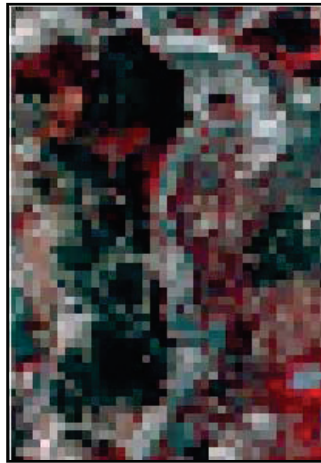


google Earth2006年9月1日

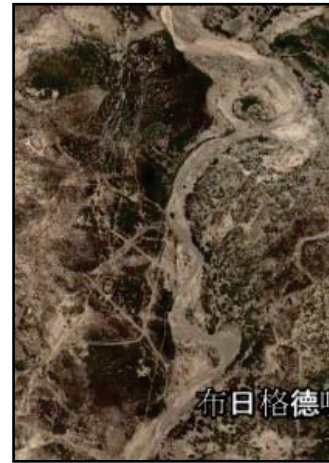
胡楊



MSS1977年6月11日

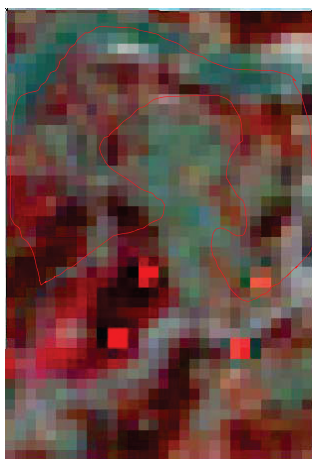


TM2010年6月11日



google Earth2010年6月22日

紅柳



MSS1977年6月11日



TM2010年6月11日



google Earth2010年9月1日

その他の林地

図-13 シミュレーション画像

2.3.2 土地被覆面積率

4 時期の土地被覆分類図(図-12)を集計して得られた土地被覆別の面積率(表-4)から、土地被覆の特徴が次の様に明らかになった。研究対象地では、池と市街地と農村の面積が狭く、土地被覆変化への影響は小さい。また、耕地とその他の林地は人間活動により変化する。そのため、以下ではおもに、自然の被覆の胡楊、紅柳、疎林、草地、河川、湖、ゴビ、砂地、裸地の面積変化の特徴について分析し、考察する。

胡楊は全面積の3.6~3.9%を占め、1977年以降増減し、2000年以降の変化はわずかだった。紅柳は全面積の11.7~15.5%を占め、1977年~1991年に明らかに増加していた。1991年~2000年にはやや減少したが、2000年~2010年には増加した。1977年~2010年の間では面積は増加していた。疎林は全面積の10.6~17.5%を占め、1977

表-4 1977年~2010年の土地被覆の面積率

カテゴリー	面積率(%)			
	1977	1991	2000	2010
胡楊(高木)	3.6	3.9	3.6	3.7
紅柳(灌木)	11.7	15.0	14.1	15.5
疎林	10.6	13.3	16.2	17.5
その他の林地	1.5	1.5	2.4	3.0
草地	1.4	0.8	2.3	1.2
河川	0.2	0.2	0.3	0.4
湖	4.0	2.6	3.0	4.0
水域	0.3	0.3	0.3	0.3
裸地	22.6	21.2	18.8	16.1
砂地	22.9	21.4	19.8	18.1
ゴビ	18.1	17.3	16.0	15.1
市街地	0.1	0.3	0.4	0.8
農村(集落)	0.1	0.2	0.2	0.2
耕地	2.4	2.4	2.7	4.2

年以降一貫して増加し、増加率が高かった。裸地は全面積の16.1~22.6%を占め、1977年以降減少し、分類結果によると、裸地から疎林への変化が顕著だった(図-12)。草地は全面積の0.8~2.3%を占め、年により増減し、不安定だった。

河川は、全面積の0.2~0.4%を占め、1977年~1991年にはやや減少したが、1991年以降は一貫して水面が増加し、増加率が高かった。ゴビは全面積の15.1~18.1%を占め、1977年以降は、一貫して減少する傾向であり、減少部分はその他の林地と草地や裸地に変化していた(図-12)。砂地は全面積の18.1~22.9%を占め、1977年以降ずっと減少しており、減少部分には疎林に変化していた(図-11)。

2.3.3 土地被覆面積率の変化

土地被覆について1977年に対する土地被覆面積率で集計した結果(図-14)、1977年~2010年にかけて疎林が顕著に広がり、1.64倍に増加した。また、紅柳(灌木林)が1.32倍となり、草地の面積が激しく変化していることが分かった(図-14a)。そして、砂地と裸地およびゴビの面積は、ほぼ同じ比率で減少し、河川は2010年には1977年の2.2倍に拡大していることが明らかになった(図-14b)。

以上、居延三角州では占有面積の広い森林(紅柳、疎林)が増加し、沙地、ゴビ、裸地が減少していることから植生が回復して緑地が拡大していることが明らかになった。

また、1977年に植生域(胡楊、紅柳、疎林、その他の林地、草地、耕地)で2010年に非植生域だったエリアは108km²、1977年に非植

生域で 2010 年に植生域だったエリアは 305 km²、そして 1977 年と 2010 年とも植生域だったエリアは 346 km² だった。植生域は 1977 年に 454 km² だったが、2010 年には 651 km² まで広がっていた。

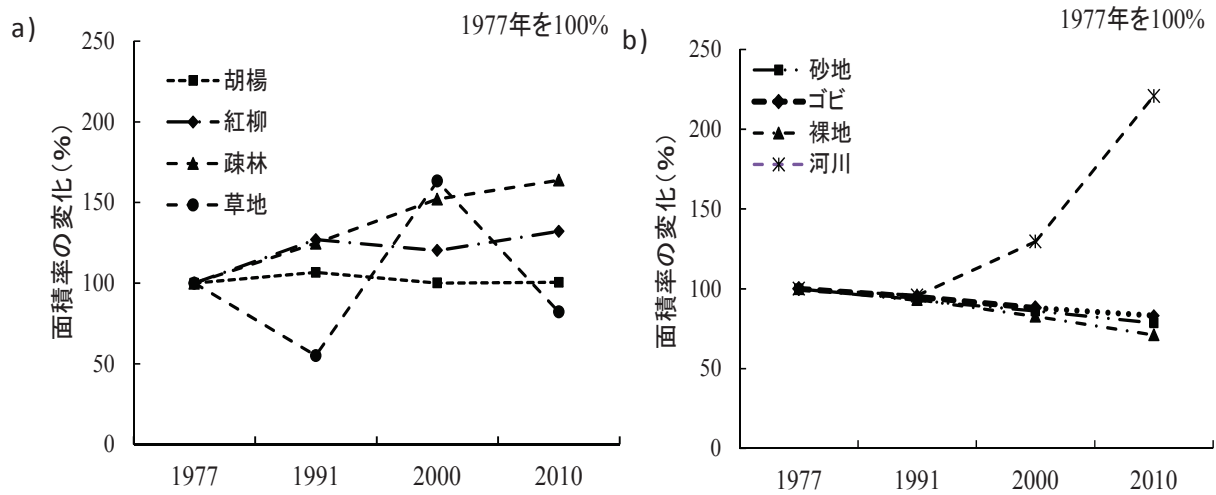


図-14 1977年～2010年のおもな土地被覆の面積率の変化

a) 植生、b) 非植生

2.4. 考察

2.4.1 画像判読

判読では、まず TM2010 画像を判読し、それから、TM 1991、また ETM+2000 と MSS1977 の画像を判読した。このような判読の流れは、分類精度を考えると確実性が高い利点がある。これは、TM2010 の判読結果は 1)植生は 1~2 年では変化が小さく、2011 年~2012 年の地上調査の時と 2010 年の TM 観測時では植生の違いはわずかで検証が可能なこと、2) センサの性能が比較的高く、良好な判読結果を期待でき、3)判読の補助情報 (Google Earth 画像) が得られるためである。

TM2010 の強調画像では土地被覆を判読しやすく、また、Google Earth で TM の判読結果と判読キーを確認し、修正しながら判読できた。そして前述の通り、TM 1991 と TM 2010 の画像は同じ季節、同じセンサのデータなので、TM2010 の経験に基づいて、同じ基準で 1991 年の画像を判読できた。また、ETM+2000 も同じ仕様のセンサから得られたデータで、TM2010 に準じて判読できた。一方、MSS1977 は、当時の情報 (例えば Google Earth 画像など) が極めて少ないため判読はやや難しく、分類精度の評価ができない。しかし、TM2010 と TM1991 の 2 時期の判読経験に基づいて ETM+2000、MSS1977 の順に判読したことから、分類の確実性を向上させることができたと考える。

2.4.2 分類精度の検証

草地とその他の林地は混在して現れた。このため表 3 の精度評価か

ら除外したが、地上調査点の地理座標と地上写真および植生分布の特徴を記録した野帳に基づき、目視で精度を検討した。草地を地上写真で判断すると10箇所では紅柳が約15%、砂地が約10%混在していた。これより、草地の判読精度は75%程度と考えられる。

その他の林地の場合は人工林と混交林などの分布を考慮して判読した。7箇所のその他の林地を地上写真で確認すると、ゴビにおける疎な混交林（胡楊と紅柳など）が約60%、人工林が約40%混在していた。これより、その他の林地の判読精度はほぼ100%と考えられる。

胡楊は紅柳林に誤分類された箇所が多かったが、樹冠率が高い場合、紅柳は衛星画像では胡楊に似ていて判読が困難だった。また、疎で面積の狭い胡楊が多く、草地と砂地と裸地に誤分類され易くて精度が落ちたと考える。

河川の場合、6月はエジナ河の流量が少なく、河は狭くなり河床が表れる場所がある。一方、衛星画像が6月で、現地調査が9月であったため、水位が違って判読精度を低く評価したと考えられる。

2.4.3 植生面積の変化の要因

植生の生育に影響を及ぼす要因として1)気温や降水量などの気象要因、2)河川水量や地下水位などの水分の供給条件、3)森林伐採や家畜の飼育および人口増加など的人為的要因などが考えられる。入手した資料に基づいて、これらの要因と植生拡大の関係について検討した。

気温と降水量（王，2013）については、経年変化が植生の生育に

影響する場合と、年々の変動がフェノロジーに影響する場合が考えられる。まず、経年変化について考える。この地域の年降水量は1970年頃に約38mmだったが1995年頃には約30mmにまで減少し、2010年には約36mmまで回復した。しかし、この地域の可能蒸発量は年間2000~3600mmとされていて、雨水だけでは植物が生育できないほど乾燥していることから、降水量の変化は植生の生育にはあまり影響しないと考えられる。年平均気温は1970年代の約8℃から2000年には約9.5℃まで上昇した。気温上昇は水の蒸発を増加させるが、降水量と同じ理由で植生の生育にはあまり影響しないと思われる。

気象の季節変化については以下のように考えられる。衛星データが観測された1977年、1991年、2000年、2010年の日平均気温は4月には10℃を超えて降水量が増加したので、この頃に植物は開葉すると考えられる。衛星データはいずれも6月に観測されていることから、観測時には植物は葉を開き終えて十分に茂っていたと考えられ、植物の季節変化は判読結果に影響していないと判断した。

正義峡水門（上流）と狼心山水門（中流）で、河川流量が計測されているが居延三角州の南のアンツ河水門（下流）では流量が計測されていない。このため、上流の2つの流量データ(楊, 2002)から下流での流量の経年変化のパターンを推測した。正義峡－狼心山－アンツ河の3つの水門は、それぞれ約185kmと約100km離れている。このため、上流と中流の流量、中流と下流の流量が比例するのかが、既存資料で下流の水量変化を判定するポイントになる。

1988年から2009年までの上流と中流の年間の流量を回帰分析

した結果、相関係数が 0.976 で非常に高い相関があること、次式で上流の流量から中流の流量を推定できることが分かった。

$$F_m = 0.7196 \times F_u - 1.985$$

ここで、 F_m は中流の年間流量（億 m^3 ）、 F_u は上流の年間流量（億 m^3 ）である。

Google Earth で確認したところ、狼心山水門とアンツ河水門の間の耕地面積は、正義峡水門と狼心山水門の間の耕地面積と同程度なことから、下流の流量も中流の流量にほぼ比例して減少すると判断した。つまり、上流の流量変化パターン（図 -15）が下流の流量変化パターンを表すと考えた。上流では、1977 年から 1991 年の間では年ごとのバラツキが大きいですが、流量は約 10 億 m^3 だった。1991 年から 2001 年の間では 7 億 m^3 ほどに水量が減少していて、2002 年から 2010 年にかけて水量が増加し、回復したと判断される（図 -15）。このため、1991 年から 2001 年では下流でも水量が減少したと考えられる。この間では中流の流量が 1~2 億 m^3 と少なく（図 -15）、下流の居延三角州では流量の減少が、植生の生育を防げた可能性を指摘できる。

研究対象地内の 4 箇所の井戸で測定された地下水位（楊，2002）の経年変化を図 -16 に示す。3 箇所の井戸（26,27,42 号井戸）は互いに隣接し、アンツ河水門に近い居延三角州の上流側に位置しているが、1 箇所（06 号井戸）は下流側のソゴノール湖の近くにある（図 -1）。

アンツ河水門に近い上流側の 3 つの井戸の水位はほぼ同じで、1991 年から 2003 年末まで 50cm ほど水位が下がった後は、27 号井

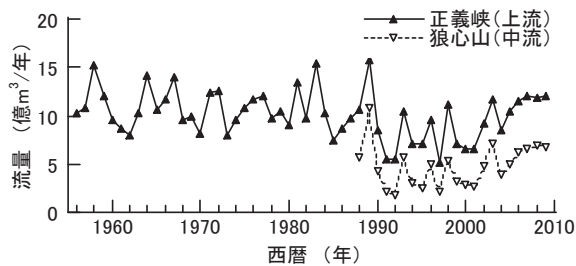


図-15 正義峡(上流)と狼心山(中流)の水門における年別流量
(楊 2002 の数値データから作図)

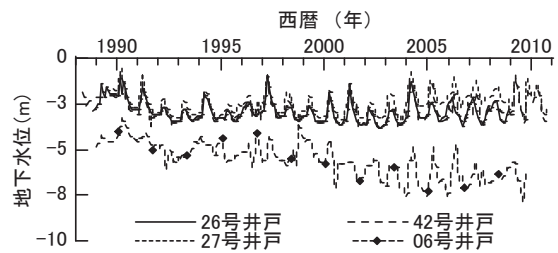


図-16 地下水位の経年変化
(楊 2002 の数値データから作図)

戸と42号井戸では回復傾向と判断される。狼心山水門の流量は1991年頃から2001年頃までが少ない時期で(図-15)、上流側の地下水位の変化(図-16)とかなり良く一致していた。

一方、下流側のソゴノール湖近くの地下水位は2004年まで下がり続けて約5~7mとなった。衛星データの判読や地上調査により、06号井戸の周辺では現在でも植物は枯れていないことを確認している。このため、地下水位が5m程度でも植生は生育可能と判断できる。

エジナに生育する植物の根の深さ(表-5)と地下位および枯損発生についての報告(苏ほか, 2004)によると、壮齢の胡楊と紅柳の根はそれぞれ深さ5mと3mに達し、枯損が発生する地下水位は約5mである。草本の苦豆子では根の深さは1.6mで枯損発生時の地下水位は約3mである。これに基づくと植生への地下水位の影響は以下のとおりと考えられる。

上流側では、地下水位は3.5m以上と高く、壮齢の木本植物が枯れる(減少する)要因ではないが、幼齢の木本と草本の植物は枯れる恐れがある。

表-5 生の根の深さおよび生育条件となる地下水位

植物名	根の深さ(m)		枯損の発生水位(m)		適正水位(m)
	幼齢	中・老齢	幼齢	中・老齢	
胡楊	1.3	3~5	3.5	5.5	1~5
紅柳	0.8~1.5	2~3	2.0	5.0	1~5
苦豆	0.5~1.6		3.0		1~3

下流側では地下水位はかなり低く、草本だけではなく木本の植物が枯れる恐れが高い。下流域では1990年頃に比べて、地下水位が低い状態が続いているため、枯損のリスクが高まっていると考えられる。

家畜頭数と耕地面積および人口の変化と森林伐採について検討した。

家畜頭数は1971年から1980年の間には2,000万頭から3,500万頭まで増加し、1980年から1991年までは横ばいだった(児玉, 2005, 図-17)。1980年頃までは放牧していたので、家畜の増加は植生が減少する要因と考えられるが判読によれば1977年と1991年の間に植生面積は増加した。1990年から2000年までは家畜頭数が半分に激減し、植生の回復にはプラスの要因である。2001年からは放牧が禁止され(児玉 2005)、さらに植生回復にプラスとなった。1991年

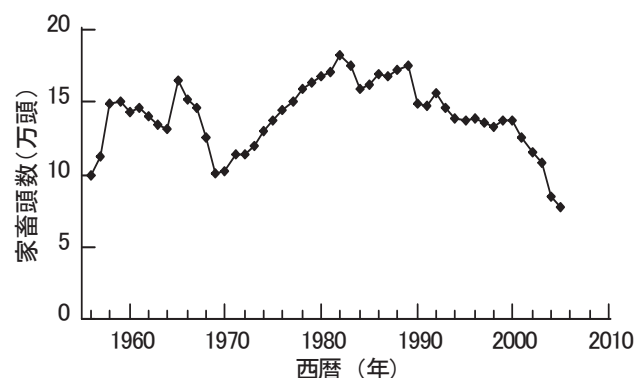


図-17 エジナ旗における家畜頭数の経年変化 (児玉 2007 の数値データから作図)

以降の植生回復には家畜頭数の減少と放牧禁止が好影響をもたらしたと考えられる。

人口は1970年頃の約8,000人から2006年の約17,000人まで単調に増加しているが(児玉, 2005)、植生への影響は不明である。

森林については、1940年~1950年代に大量の胡楊が軍用の建材として伐採され、木材運搬のために河川をせき止めたため、下流に水が流れなくなった時期があった(Cha, 2010)。また、1970年末までは森林を伐採して燃料を得ていたが、1980年頃から燃料は薪から石炭に替り、胡楊などを柵で囲んで保護したので、森林は伐採されなくなった(聞き取り調査)。また、1960年代から1990年頃の間では、胡楊と灌木林に虫害が発生して木が枯れたことがあった(額济纳旗志编纂委员会, 1998)。このように、森林伐採が1980年頃まで続いていた。

以上のことからこれらの要因は、研究対象地での植生変化に次の様に作用したと考えられる。

- 1)1940年代から1980年頃まで胡楊と灌木林を建材や燃料として利用し、大幅に伐採した。このため、1977年時点では植生のエリアは狭かった。
- 2)1980年頃から伐採されなくなったので、伐採跡地で植生の遷移が始まり、現在は森林に遷移する途中と考えられる。このため、判読結果に表れたように灌木の紅柳と疎林が拡大した。
- 3)1977年から1991年では、家畜の頭数の増加が植生拡大に対しマイナスに作用したが、植生の拡大を防げるほどではなかった。
- 4)1991年から2010年にかけて、家畜の頭数の減少と放牧禁止は

植生の拡大にプラスに作用した。

- 5) 河川流量と地下水位の経年変化は、居延三角州の上流側では植物の生育にあまり影響していない。しかし、下流側では、1977年から2010年の間に植生は減少しており(図-18)、1980年前後に比べて地下水位(図-16)が下って樹木が枯死した可能性がある。この地域では疎林が裸地や砂地に変化した。

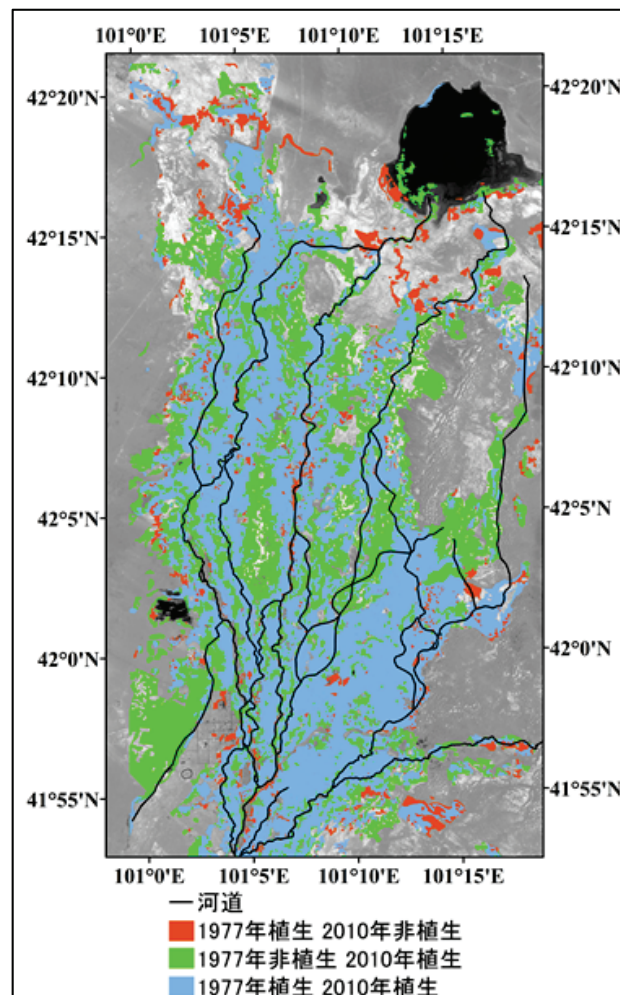


図-18 1977年から2010年間の植生域の変化

第 3 章 胡楊林の現状と再生適地の判定

3.1 はじめに

エジナ河下流域の居延三角州は中国の西北部の乾燥地の荒漠地帯に位置する牧業、農業、林業の盛んな地区で、中国の最大の牧業オアシスである(趙・明, 2013)。主に天然生の胡楊(*Populus euphratica*)と紅柳(*Tamarix ramosissima*)と沙棗(*Elaeagnus angustifolia*)が森林を形成し、湖の砂浜や牧草地に葦類、苦豆子(マメ科多年草、*Sophora alopecuroides*)などが分布して、植生はエジナ旗(日本の郡に相当する)の総面積の 27.6%を占める(額済納旗志編纂委員会, 1998)。

居延三角州の位置するエジナ旗では気候変動に伴う気温上昇が顕著で(中尾, 2007; 頤ら, 2014; 趙ら, 2012; 刘ら, 2012)、温暖化が居延三角州の植生減少の一つの理由とされてきた。また、黒河の中流(エジナ河の上流)での耕地の増加による河川水の過剰な取水の影響で、1970年代以降の河川水の消費量の増加がエジナ河流域の深刻な水不足を招き、植生衰退の原因になったと指摘されてきた(窪田, 2007; Gong and Dong, 1998; 徐ら, 2013; 潘ら, 2006)。しかし、居延三角州では1940年代から1980年頃にかけて胡楊や紅柳の森林が大規模に伐採されたが(Cha, 2010)、1977年以降は紅柳を含む植生の面積が増加している(オウ・栗屋, 2015)。元々、エジナ旗では年降水量が約 37.9mm に対して年間の可能蒸発量が 3769.6mm と極度に乾燥して(額済納旗志編纂委員会, 1998)、気候は植物の生育に適さない。一方、河川水は1991年から2001年に

かけて減少したが回復し、地下水位は上流部で安定しているが下流部で低下し続けている(楊, 2002)。

胡楊はヤナギ科、ヤマナラシ属、コトカケヤナギ亜属の高木で、和名はコトカケヤナギといい、ヤナギ科の中で最も古い種類の一つで原始的なヤナギである(吉川ら, 2007)。胡楊は居延三角州の河岸の主要樹種であり、唯一森林を形成する高木である(戴ら, 2009)。胡楊林は居延三角州の極相であり、住民にとっては混牧林の場や畑の防風林でもあるとともに、胡楊材は居延三角州では唯一の建材であり、燃料や製紙の原料としても利用されてきた(吉川ら, 2007)。このため、胡楊が失われると代替の建材が得られず、住民にとって不可欠の木材資源である。紅柳はギョリュウ科、タマリクス属の落葉小高木や灌木で(戴ら, 2009)、日本ではギョリュウと呼ばれる。紅柳林は居延三角州の面積の60%を占め、主に放牧地として利用されている(趙・明, 2013)。紅柳は河川沿いや氾濫原や河道の間の砂丘やゴビ(砂礫が広がる草原)などに広く分布する。沙棗はグミ科グミ属の高木と小喬木の落葉樹で和名は無い。沙棗は耐乾性が強く、胡楊と同じく防風林に用いられ、主に家畜飼料になるが建築には使えない(額济纳旗地名志, 1988)。なお、中国語の発音をカタカナに直すと、概ね胡楊はコヨウ、紅柳はコウリュウ、沙棗はサソウと記せる。

胡楊林の林床には主に紅柳、苦豆子などが出現するが、胡楊は紅柳の樹冠下で萌芽して成長し、やがて紅柳をしのいで群落を形成する。胡楊の稚樹は紅柳の樹冠下で発芽して成長するので、紅柳は胡楊にとって先駆種であるとともに、紅柳の枝が胡楊の稚樹を家畜の摂食

から保護する役割を担っている(吉川ら, 2007)。居延三角州の気候は極端な乾燥気候であるため、胡楊は種子の発芽率が極めて低い(吉川ら, 2007)ことから、自然状況で種子による胡楊の再生は期待できず、植林以外に胡楊を回復させる手段は無いとされ(Cha, 2010)、胡楊と紅柳など灌木を混植して胡楊の稚樹の成長を促進できることが知られている(額済納旗地名委員会, 1988)。一方、胡楊は水分条件が良く、塩類集積がなければ、根萌芽による更新が活発に起こり次世代林が形成されるため、根萌芽による繁殖は乾燥した荒漠ではより普遍的な繁殖方法である(吉川ら, 2007)。胡楊林の林間の空き地に沙棗を植栽して胡楊の側根の萌芽更新を促したり(孫・姚, 2000)、拡大の止まった胡楊の側根を根切りして萌芽を生じさせることができる(孫・姚, 2000; 田ら, 2009)。また、壮齢の胡楊と紅柳の根はそれぞれ深さ5mと3mに達し、両樹種とも地下水位が約5m以下になると枯損が発生する(苏ら, 2004)。このように、紅柳の存在は胡楊の生育にとって更新条件として重要で、紅柳林の存在は地下水が胡楊の生育に十分な水位であることを示していると判断される。

以上のような状況から、居延三角州でもっとも重要な樹木である胡楊の分布域の変化の実態を明らかにし、今後の保護の指針となる資料を提供することは有意義であると考えられる。上述のように居延三角州の気候は極端に乾燥していて、地下水も含めた水分条件が悪いエリアでは胡楊の再生は困難である。紅柳は胡楊の先駆種であり、両樹種とも同じような土壌水分の条件で生育できると考えられ、紅柳林の林床で胡楊の稚樹が生育できる可能性が高い。このため、胡楊が拡

大して生育可能なエリアとしては、主に水分条件が良い河川沿いと紅柳林が考えられる。

オウ・栗屋(2015)は居延三角州において、現地調査に基づいて1977年、1991年、2000年と2010年の地球観測衛星ランドサット画像で土地被覆を判読し、土地被覆変化を解析して報告した。既報では、植生の変化に焦点を絞って解析し、1977年から2010年の間に森林面積が顕著に増加し、砂地と裸地およびゴビの面積が減少したことを明らかにしたが、胡楊や紅柳の分布域の変化の詳細については未解析だった。しかし、判読カテゴリーは胡楊、紅柳などの植生と非植生の合計14カテゴリーに及び、この判読結果を利用して胡楊と紅柳の変化を解析できる。

このような背景から、本研究は居延三角州の胡楊や紅柳などについての現地調査とグーグルアース画像と1977年から2010年までのランドサット画像の判読結果(オウ・栗屋, 2015)に基づいて、地理情報システム(GIS)による分析で胡楊の分布と変化の実態を明らかにし、その結果に基づいて今後の回復の難易を判断し、現在の植生分布から考えられる胡楊の再生適地を明らかにすることを目的とした。

3.2 研究方法

3.2.1 使用データ

本研究ではランドサットの 4 時期のデータを利用して目視判読した土地被覆分類図を解析に利用した(オウ・粟屋, 2015)。4 時期のデータは 1977 年 6 月 11 日(ランドサット 2 号、マルチスペクトラルスキャナ MSS)、1991 年 6 月 23 日(同 5 号、セマティックマッパー TM)、2000 年 6 月 14 日(同 7 号、エンハンスドセマティックマッパープラス ETM+)、2010 年 6 月 11 日(同 5 号、TM)に観測された。土地被覆分類図では、植生として胡楊、紅柳、疎林、その他の林地、草地、耕地、および非植生として裸地、砂地、ゴビ、河川、湖、池、市街地、農村の 14 カテゴリーを分類している。面積が狭くて十分な数の検証点を得られなかった、草地、その他の林地、池を除く 11 カテゴリーの分類精度については *Kappa* 係数が 85%で精度は高い。

3.2.2 解析方法

過去の胡楊の分布図や土壌水分などの立地因子の分布図が無いことから、今後の分布の拡大を正確に予測することは困難である。そこで解析は、1)1977 年から 2010 年の間の全域および河川から 500m 以内のエリアにおける各土地被覆の面積変化を集計し、2) 胡楊と紅柳の 1977 年時点の分布域についてのその後の時系列変化を把握し(全域)、3)胡楊と紅柳の変化パターンを把握して研究対象地での胡楊と紅柳の変化の特徴を把握する。次いで 4) 河川から 500m のエリアと紅柳のエリアについて胡楊からの距離を算出し、胡楊の 1 年間の

拡大距離で除して拡大の所要年数に換算し、胡楊の拡大の難易の目安とする。そして、解析結果と胡楊の保護と再生に関する既存の情報に基づいて、胡楊の保護・拡大の方策と優先的なエリアを示す。解析には地理情報システム ArcGIS ver.10 (ESRI 社, USA)を利用した。

3.2.2.1 土地被覆の面積変化－解析対象地全域と河川から

500m 以内

解析対象地全域について主要な 9 カテゴリー(胡楊、紅柳、疎林、その他の林地、草地、耕地、裸地、砂地、ゴビ)の面積を集計して土地被覆の変化の傾向を把握するとともに、胡楊と紅柳について 1977 年と 2010 年の変化を図化して、拡大と減少の地域的な傾向を検討した。現在、胡楊は主に河川沿いに生えていて、河川から 60m を過ぎるあたりから林床に紅柳が出現し始め、90~200m 付近で高密度の群落を形成する(吉川ら, 2007)。そして、胡楊は河川からおおむね 500m の範囲に生育することから、河川から 500m のバッファを設定し、500m 以内のエリアでの胡楊と紅柳の分布域を確認するとともに、土地被覆の面積を集計して胡楊と紅柳の分布の特徴を検討した。

3.2.2.2 対象全域での胡楊と紅柳の分布の変化－1977 年以降の変化の追跡

1977 年の胡楊あるいは紅柳を対象に 1977 年と 1991 年、1977 年と 2000 年、1977 年と 2010 年の判読結果の間の土地被覆ポリゴンの重なりをインターセクト解析(橋本, 2012)により解析して、胡楊と紅柳の時系列的な被覆変化を検証した。前節では単純集計で変化

を検証したが、本節では解析対象地全域について、1977年の胡楊と紅柳の分布域の1991年以降の変化を追跡し、変化の特徴について検討した。

3.2.2.3 胡楊と紅柳の変化パターンの確認

1977年の判読結果で面積が比較的広くて判読精度が高く、この地域での変化の特徴を良く表していると考えられる胡楊と紅柳のエリアを3箇所ずつ選択した。この3箇所は、胡楊については拡大および減少したエリアと紅柳に変化したエリアの3箇所、紅柳については拡大および減少したエリアと紅柳から胡楊へ変化したエリアの3箇所である。減少は主に疎林と非植生に変化したエリアを指す。これら6箇所について、1977年から2010年までの変化の特徴を検討した。

3.2.2.4 胡楊の回復傾向の判定

1977年と2010年の判読結果で、胡楊の判読精度が高いと確認されたエリアについて、胡楊が拡大した10箇所を選んで拡大距離を計測した。胡楊の分布の変化は決して大きくないことから、最初(1977年)と最後(2010年)の判読結果を利用して拡大の平均速度を求めた。場所により胡楊の拡大距離は様々であるが、本研究では拡大速度のポテンシャルを把握することを目的とし、明らかに拡大している10箇所を選んだ。手順は、まず、1977年の胡楊の各エリアの直線的な縁を基準線とした。次いで、各基準線に約60m~90m間隔で4~6本の垂線を設定した。そして、基準線と2010年の判読結果での胡楊の

エリアの縁までの距離を計測し(図-19)、10箇所での1年間の平均値を求め、さらに10箇所の平均値を計算して1年間の拡大距離とし、これを最良の条件での拡大距離と考えた。次いで多重バッファリング(橋本, 2012)によって2010年の胡楊林からの距離を計算し、これを1年間の拡大距離で除して拡大に要する年数(拡大所要年数)と読み替えて、50年間隔で胡楊の拡大所要年数をマッピングした。拡大所要年数は距離に基づく根萌芽による拡大の難易を表し、河川から500m以内のエリアの場合と、2010年の紅柳の分布域の場合の2通りをマッピングし、今後の胡楊の拡大について検討した。

以上の1~4の解析結果と既存資料に基づき、胡楊の効果的な植林の方策について検討した。以下では、拡大所要年数は自然に回復する場合の距離に基づく相対的な難易を表し、植林を計画するうえでの一つの目安と考える。これと現在の胡楊と紅柳の分布および胡楊の拡大に関する知見を考慮して、胡楊の回復に適したエリアと方法について考察する。

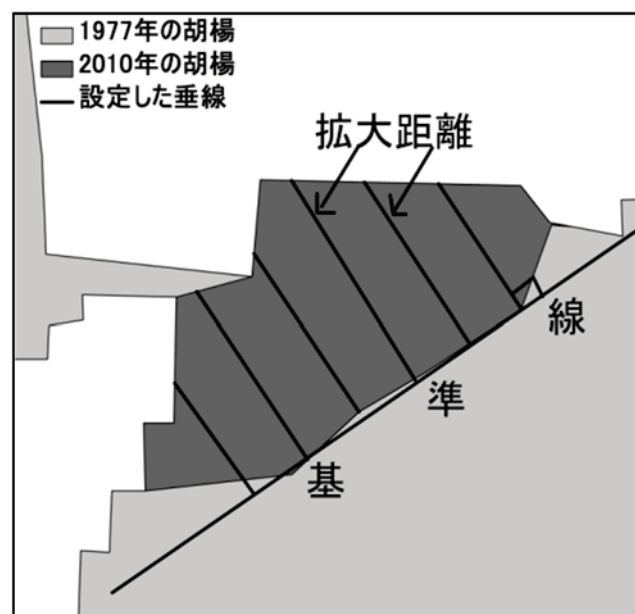


図-19 胡楊の拡大の測定方法

3.3 結果と考察

居延三角州の気候は極端に乾燥していて、砂地と裸地のように地下水も含めた水分条件が悪い地域では胡楊の再生は困難である。一方、前述のように、紅柳は胡楊の先駆種であり、両樹種とも地下水位が5mを下回ると枯損することを考えると、紅柳林の林床で胡楊の稚樹が生育できる可能性が高い。このため、胡楊が拡大可能なのは、主に水分条件が比較的良い河川沿い、および、すでに紅柳が成林しているエリアと考えられる。以下では、バッファリングで推定した回復所要年数は自然に回復する場合の相対的な時間差を表すと考え、これと現在の胡楊と紅柳の分布を考慮して、胡楊の回復に適したエリアと方法について考察する。

3.3.1 土地被覆の面積変化－解析対象地全域と河川から500m

以内

居延三角州では1977年以降は植生が回復し、非植生域が減少している(オウ・栗屋, 2015)。面積に増減はあるものの胡楊の面積変化は小さく、紅柳は1977年から1991年の間に約54km²(32%)拡

表-6 居延三角州の土地被覆の面積

カテゴリー	全域の面積(km ²)				河川から500m以内の面積(km ²)			
	1977	1991	2000	2010	1977	1991	2000	2010
胡楊(高木)	52.7	56.1	52.7	52.9	33.0	33.5	32.6	33.2
紅柳(灌木)	169.9	215.6	204.3	224.3	74.7	99.2	88.8	95.1
疎林	153.9	192.0	234.1	252.0	52.5	52.5	66.0	72.2
その他の林地	21.6	21.5	34.9	43.8	10.2	8.2	12.5	13.9
草地	20.2	11.1	33.0	16.6	6.4	6.6	17.7	13.4
裸地	328.1	305.8	271.3	233.1	66.9	48.5	39.4	31.7
砂地	332.6	308.7	286.1	261.4	59.8	58.7	49.6	38.2
ゴビ	262.7	249.5	231.1	218.2	7.7	3.9	3.5	3.2
耕地	35.3	33.8	38.6	60.9	11.2	11.1	12.1	21.4

大し、疎林は 2010 年には約 98 km^2 (64%) 拡大した(表 -6)。その他の林地は面積が狭くて植生面積の変化に及ぼす影響は小さいが増加傾向で、耕地は 2000 年以降に著しく拡大した。植生とは対照的に裸地と砂地とゴビの面積はそれぞれ約 95 km^2 (29%)、 71 km^2 (21%)、 45 km^2 (17%) 減少し、とくに裸地は面積が広いうえに、 328 km^2 から 233 km^2 へと大幅に減少した。

胡楊はおもに上流域に集中しているが河川から離れるほど減少し、1977 年から 2010 年の間では上流域では拡大エリアと減少エリアが拮抗していた。中流域と下流域では 3 箇所で大きく減少していることが目立った(図 -20a)。3 箇所のうちの 2 箇所は 1977 年から 1991 年の

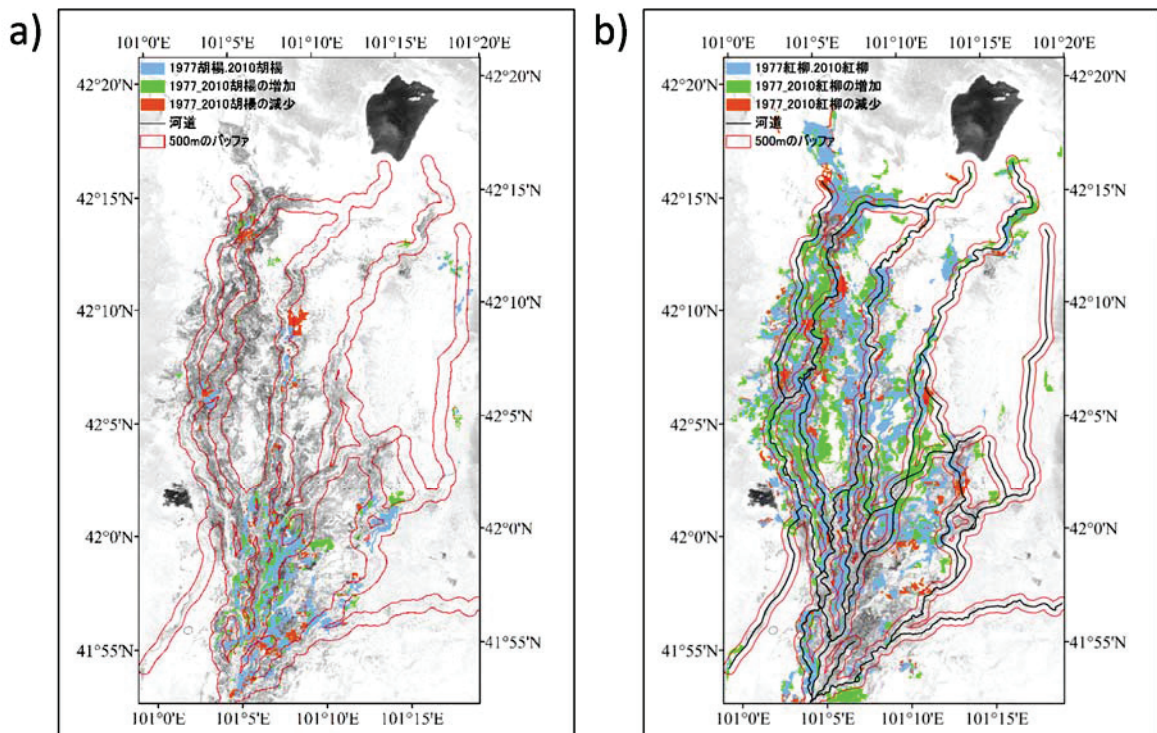


図 -20 1977 年から 2010 年までの胡楊と紅柳の増減 a) 胡楊、b) 紅柳

背景 : 1991 年のランドサット TM バンド 3

間に減少したが、1940年から1980年頃にかけての伐採域(Cha, 2010)に位置し、伐採によって減少したと考えられる。紅柳の分布は拡大しているが、大面積で減少したエリアも多く(図-20b)、耕地に転換された箇所が多い。紅柳は胡楊が分布していない中流域と下流域で拡大しているが、東部ではほとんど拡大していない。

河川から500m以内のエリアでも、胡楊は中流域より下流側では非常に少なく、下流域ではわずかに広がるだけだった(図-21a)。中流と下流で胡楊が少ないのは、1940年代から1980年頃までの伐採(Cha, 2010)によるものと考えられる。紅柳は東部には分布しないが、西部では下流で面積が狭くなるものの広く分布していた(図-21b)。1977年と2010年の判読結果を比較すると、河川から500m以内のエリアでは胡楊に顕著な変化はないが、西部では紅柳が広がっていた(図-20, 図-21)。

河川から500m以内のエリアでの土地被覆を集計した結果、土地被覆の変化の特徴は次の通りだった(表-6)。1977年以降の胡楊の面積変化はわずかだった。紅柳については、1991年から2010年の間に判読面積の増減があるが、1977年から1991年の間に面積が顕著に増加し、その後、安定しつつあると考えられた。疎林は1991年以降に拡大していた。その他の林地は1991年に一旦減少したが、その後は増加した。草地は年により判読面積が増減して不安定だったが増加傾向と思われ、砂地、裸地、ゴビは一貫して減り続けた。裸地と砂地の面積は広いため減少面積も大きかったが、減少率からは1977年から2010年にかけて裸地とゴビの減少率がそれぞれ53%、58%と顕

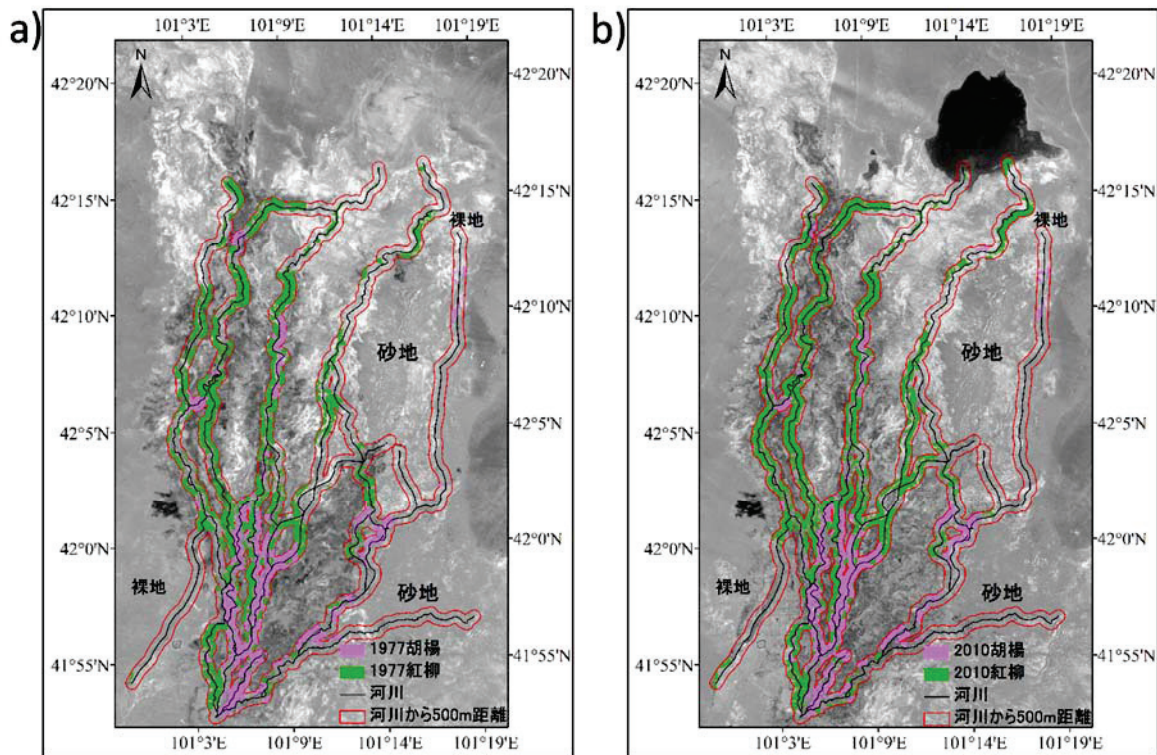


図-21 河川から500m範囲内の胡楊と紅柳の分布 a) 1977年、b) 2010年
 背景:a) 1977年のランドサットMSSバンド2、b)2010年のランドサットTMバンド3

著だった。耕地は2000年から2010年にかけての増加が著しかった。

このように河川から500mの範囲内では、胡楊の変化はわずかだったが、土地被覆の変化が顕著だった。とくに1977年には砂地と裸地はこのエリアの約40%を占めていたが、これらの被覆は減少し続け、2010年には約22%に狭まった。これに対し、1977年から2010年にかけて、紅柳と疎林などが増加し、植生が回復し始めていた。全域および河川から500m以内のエリアでは、疎林やゴビなどで面積が変化した時期に差が生じたが、植生が拡大して非植生が減少する傾向は同じだった。

この地域では裸地から草本、次いで灌木から疎林・紅柳、そして胡

楊の順に植生が遷移すると考えられ、胡楊が極相種である(吉川ら, 2007; 李ら, 2014)。極相種の胡楊は上流域で拡大したものの全体では面積は横ばいだったが、先駆種の紅柳や疎林は増加した。なお、植林地は南部に存在するが面積が狭くて地域が限られている。従って本研究の解析結果は、森林の攪乱後に遷移によって植生が回復していることを示していると考えられる。1980年代から保護政策により胡楊林と紅柳林を柵で囲んで家畜を休牧にしたが(額済納旗志編纂委員会, 1998)、植生の生育に適した河川から500m以内のエリアでは、その効果が上流域での胡楊の拡大や河川沿いの紅柳の拡大という形で現れたと言えよう。以上のように、現在は人為的な強い攪乱はほぼ終わり、この地域の植生が回復しつつあると判断された。

3.3.2 対象全域での胡楊と紅柳の分布の変化－1977年以降の変化の追跡

土地被覆が大きく変化したのに対して胡楊の変化がわずかだったが(表-6)、各土地被覆の総面積の変化の集計では図-20に現れた変化の実態が分かりにくい。そこで、胡楊と紅柳の1977年の分布エリアについて1977年以降の変化を検討した。これにより、1977年時点の胡楊と紅柳がその後どの様に変化したかを確認できる。

1977年に52.4km²だった胡楊は1991年に38.4km²に減少した(表-7)。500m以内のエリア内の面積を単純に集計した結果(表-6)では、胡楊の変化は認めにくかったが、表-7の結果は1980年頃まで伐採が続いていたこと(Cha, 2010)と合致する。1991年以降は胡楊

表-7 研究対象全域の胡楊の
1977年以降の変化

	変化面積(km ²)			
	1977	1991	2000	2010
胡楊(高木)	52.4	39.2	38.7	41.4
紅柳(灌木)		1.1	1.1	0.7
疎林		3.9	4.8	4.4
その他の林地		0.7	0.5	1.7
草地		0.7	4.0	1.1
裸地		2.5	0.3	0.1
砂地		3.8	2.0	2.0
ゴビ		0.0	0.0	0.0
耕地		0.6	1.1	1.1
合計		52.4	52.4	52.4

表-8 研究対象全域の紅柳の
1977年以降の変化

	変化面積(km ²)			
	1977	1991	2000	2010
紅柳灌木	169.9	131.3	130.8	144.6
胡楊(高木)		2.5	2.8	1.7
疎林		13.6	13.1	10.3
その他の林地		0.7	0.5	1.7
草地		4.5	11.6	2.4
裸地		7.1	3.1	1.9
砂地		6.7	3.9	2.0
ゴビ		0.8	0.4	0.3
耕地		2.7	3.8	5.1
合計		169.9	169.9	169.9

の面積の変化はわずかだった。1991年時点で胡楊は、主に裸地、砂地、疎林に変化していた。1991年以降の変化をみると2010年までに裸地と砂地が減って、耕地とその他の林地が増加した。1977年から1991年の間に減少した胡楊の跡地は、自然に植生が回復したエリアと人為的に耕地に転換されたエリアに分かれたことを示している。

紅柳についても面積は1977年に169.9km²だったが1991年に131.4km²に減少していた(表-8)。減少したエリアでは紅柳は1991年には疎林、次いで草地、裸地、砂地に変化し、その跡地は疎林などの自然に植生が回復したエリアと、人為的に耕地に転換されたエリアに分かれた。また、2000年以降に紅柳が増加したが、これは2001年以降に「退牧還草」と呼ばれる紅柳やザゴ(灌木、*Haloxylon ammodendron*)と周辺の植物を保護するため鉄柵で囲んで禁牧とした政策(児玉, 2005)により、紅柳の再生が進んだためと考えられる。

3.3.3 胡楊と紅柳の変化パターンの確認

このように胡楊と紅柳は1977年以降に増減している場所があること

から、居延三角州での胡楊と紅柳の変化の特徴を確認した(図-22)。胡楊については、中流域のエリア A(図-1 地点 A, 図-22a)は 1991 年時点で胡楊が顕著に拡大し、その後も拡大していた。Cha (2010)によるとこの付近の胡楊は面積が広くて若齢であり、1980 年代から保護区に指定されたため、保護政策の効果が現れたと考えられる。紅柳の場合、上流域のアンツ河水門近くのエリア B(図-1 地点 B, 図-22b)では 1991 年に広い範囲で疎林に変化した。1991 年以降は紅柳が回復して 2010 年時では広い範囲に拡大していた。この紅柳は水門に近接していたため、水分条件が比較的良くて拡大できたと考えられる。

上流域のエリア C(図-1 地点 C, 図-22c)は 1977 年に胡楊が分布していたが、1991 年以降は高密度の紅柳に変化し、その後は紅柳の面積がやや増加した。この地域では成木の胡楊が何らかの理由で減少したが、胡楊の稚樹は紅柳林の下で良好に成長できること(楊, 2002; 吉川ら, 2007)、高密度の紅柳の存在は土壌水分の条件が比較的良いことを示していると思われ、胡楊の稚樹が生育できる可能性が残されていると考えられる。しかしながら、胡楊の再生の可能性については現地調査を実施して判断することが必要だろう。上流域のエリア D(図-1 地点 D, 図-22d)は紅柳から胡楊に変化した箇所。1991 年には紅柳は広い範囲で胡楊に変化した。この変化は植生の遷移を表していると考えられる。一部は砂地と裸地に変わったが、近年のグーグルアース画像の判読結果からは耕地開発と考えられた。

胡楊および紅柳とも下流域では減少したエリアが生じた。下流域の

エリア E (図 -1 地点 E, 図 -22e) は胡楊が 1991 年に広い範囲で疎林に変化し、面積は若干変化したが 1991 年以降も疎林のままだった。下流域のエリア F (図 -1 地点 F, 図 -22f) は 1991 年では紅柳が顕著に減少し、広い範囲で疎林と裸地、砂地に変化した。1991 年以降は砂地と裸地が減少し、耕地が増えて草地が増減したが、疎林は変わらなかった。一部が畑に転換されたことから、この紅柳林の変化は開発による可能性が高い。

以上のように 1980 年頃まで続いた胡楊と紅柳の伐採 (Cha, 2010) はほぼ終わり、その跡地は自然に植生が回復したエリアが多く、保護政策も回復に効果的であると考えられた。地点 A, B の胡楊と紅柳は若齢で面積が広く、水分条件が比較的良い場所に成林していることから、今後、胡楊と紅柳の遷移が進むだろう。しかし、地点 E と F のような下流の森林の場合、胡楊と紅柳の面積は狭くて水分条件が悪いため、自然の再生が困難であると考えられる。

3.3.4 胡楊の回復傾向の判定

10 箇所 の胡楊林で計測した 33 年間の拡大距離は 119.8m から 1493.8m で、平均は 396.2m だった。これより胡楊の一年間の拡大距離は最小約 3.6m、最大約 45.3m、平均で約 12m となった。吉川ら (2007) が拡大距離を 10m と報告しており、本研究の解析結果は妥当と判断された。ただし、これは条件が良いケースの平均値で、実際には拡大していない部分が多い。本研究では年間 12m 拡大すると仮定して拡大所要年数を計算したが、これは最良の条件での楽観的な判

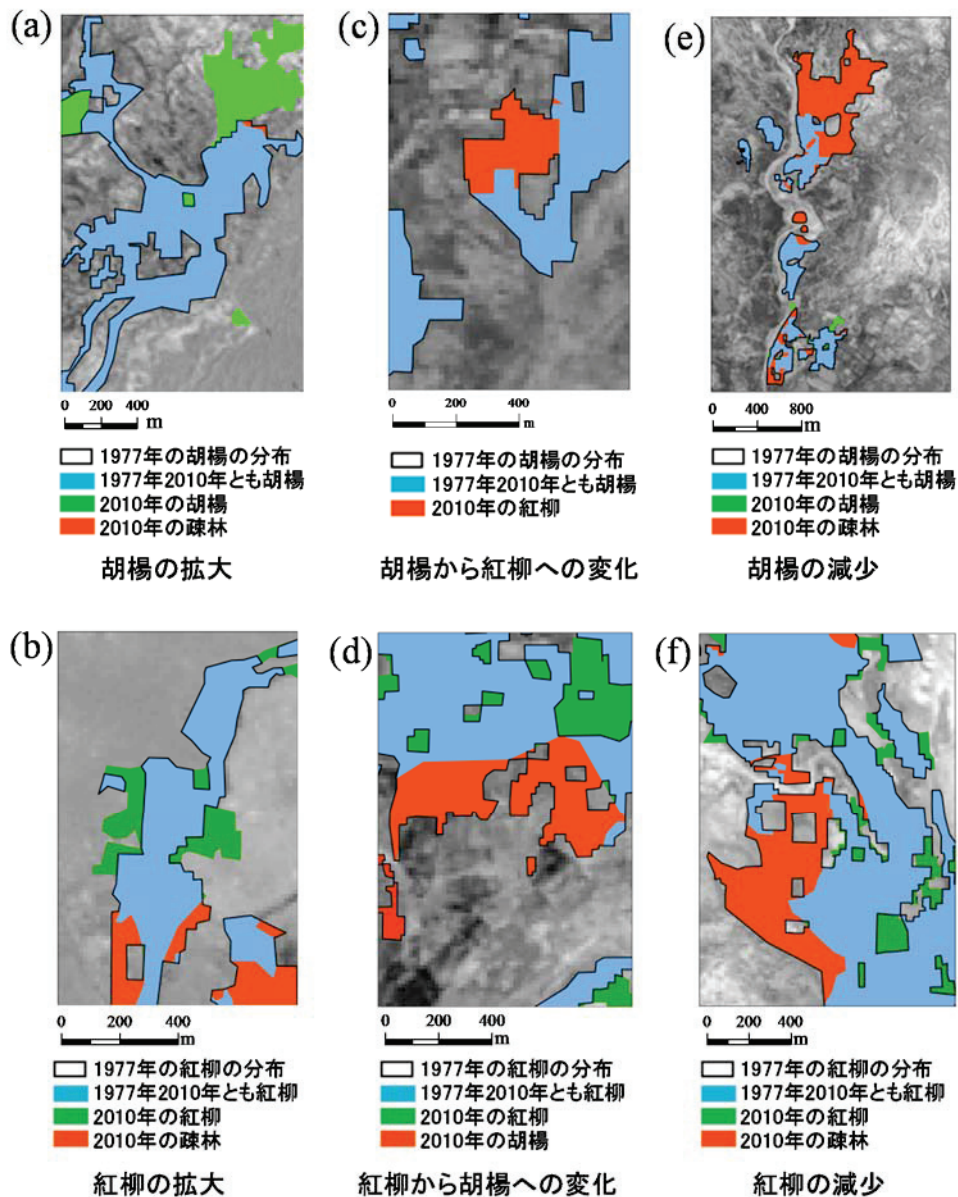


図-22 1977年から2010年の間での胡楊と紅柳の分布変化の例

背景:1991年のランドサットTMバンド3

定であり、実際に回復するには判定結果以上に長い年月を要することを最初に申し添える。また、ArcGISの多重バッファリングでは特定のエリアを対象にした距離階を計算できなかったため、下流で胡楊が離散的に分布している場所では、裸地などで隔たった他地域の胡楊からの距離階が示されて、拡大所要年数の精度が低かった。

最初に地上調査などから拡大が困難と判断したエリアを説明する。東部の砂漠地帯は放流の中止により、西南部の裸地は河川水の減少により水が行き渡らない(聞き取り調査)ため水分条件が悪化している。2010年のTMの可視チャンネルの輝度が高く(図-21b)、植生がほとんど分布してないことから、土壌が乾燥して広域で水分条件が悪いと判断した(図-23, 24 ハッチング部分)。そのため、これらの地域を除いて胡楊が再生する見込みのあるエリアについて検討した。

胡楊は河川から500m以内で林を形成することが多いこと(吉川ら, 2007)と、胡楊は紅柳林の下で稚樹が育ち(吉川ら, 2007)、紅柳よりも根が深いことから(苏ら, 2004)、紅柳林においては胡楊が生育できる見込みが高い。このことを勘案して、a)河川から500m以内のエリアと、b)現在の紅柳林の分布域の2つのケースを設定した。

前述したように、河川から500m以内のエリアでは、胡楊は上流域で密度が高くて面積が広いが、河川から離れるほど疎らとなり、下流ではわずかに分布するだけだった(図-20a, 4)。胡楊は居延三角州の極相種であるが、全域が胡楊林になることはなく、河辺林として成立すると言われる(吉川ら, 2007)。従って、胡楊は河川沿いに広がることが予想される。この点を踏まえて回復の傾向について考える。胡楊が隣接して広く分布している上流域と中流域では、年間12mの速度での拡大所要年数は50年から150年と推定され比較的回復しやすい地域と考えられる。中流東部では胡楊は小面積で離散しているため、拡大所要年数は150年から350年と推定され、上流域に比べてやや回復が困難になるだろう(図-23)。

判読結果からは、500mのバッファの外側でも、胡楊は紅柳の分布域へ広がっている箇所があることを確認した。紅柳の分布域は胡楊の分布域(図-20)より広く、河川から500m以上離れた場所も多い(図-24)。紅柳エリアへの胡楊の拡大の可能性については以下のような特徴を指摘できる。上流域では胡楊の分布域が広くて密度が高いため早く拡大し終わり、中流域の西部では上流域よりも拡大に時間を要するものの、紅柳の分布域が広いことから、胡楊が拡大可能なエリアは多く残されている可能性がある。下流域では胡楊林が疎なため拡大所要年数は650年に及ぶと推定され、拡大が困難と考えられる地域であり、地下水位は低下し続けて2010年には5~8mになった(楊, 2002; オウ・栗屋, 2015)。一方、壮齢の胡楊と紅柳の根はそれぞれ深さ5mと3mに達し、両樹種とも地下水位が約5m以下になると枯損が発生する(蘇ら, 2004)。このため、水条件が悪化している下流域では、紅柳が広がっていても胡楊が拡大できる見込みは低いと考えられる。この地域を除いた中流域の紅柳への胡楊の拡大所要年数は約450年と推定され、上流よりも拡大が困難なことが予想された。1940年代から1970年代末までのわずか40年間で森林は大規模に伐採されたが(Cha, 2010)、現在、回復できる見込みがあるエリアでも、回復には10倍以上の年月を要することになる。一方、河川から500mバッファ内の面積集計(表-6)では、1999年以降は胡楊も紅柳も面積の変化はわずかなことから、実際に回復するまでには推定結果よりさらに年月を要することは明白で、40年間の森林伐採がこの地域の森林生態系に大きな傷跡を残したと言えよう。

3.3.5 胡楊の植林指針の検討

居延三角州は河川の水路網に位置し、河岸に最も近い所では胡楊の高木の純林が成林しているが、60mを過ぎるあたりから林床に紅柳が出現し始め、河岸から遠のくほど増えて、紅柳は高密度の群落を形成する(楊, 2002; 吉川ら, 2007)。また、紅柳林の下に胡楊の稚樹が生育すること(吉川ら, 2007)や、紅柳よりも胡楊のほうが根が深いこと(蘇ら, 2004)を参考に、胡楊が回復できる可能性を考慮して居延三角州のエリアを3つのタイプに分類する。タイプ1:河川から500mのバッファ内の紅柳が生えているエリアで、水分条件が良くて胡楊が紅柳と共生して順調に成長すると考えられる。タイプ2:河川から500m以上離れた紅柳の広がっているエリアで、紅柳が生育していることから土壌水分の条件は比較的良いと考えられ、胡楊が生育できる可能性

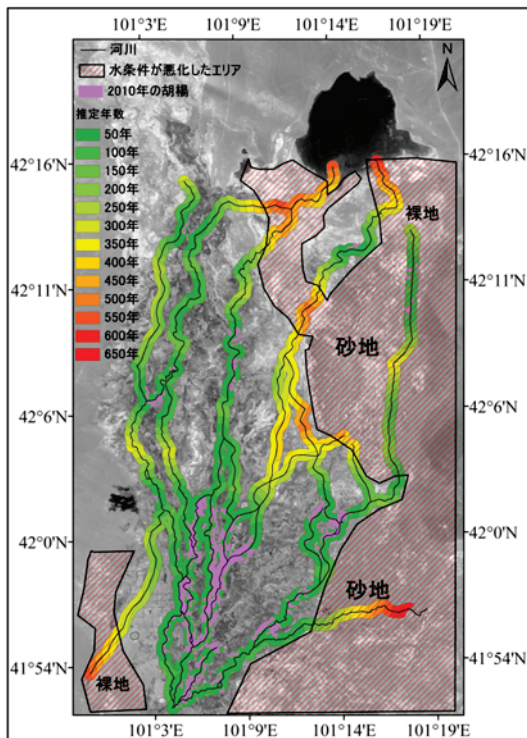


図-23 胡楊の拡大所要年数
河川から500m以内の場合

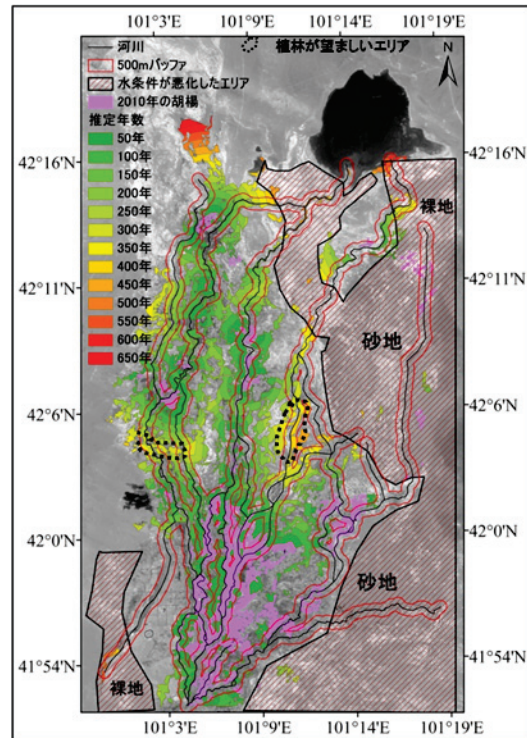


図-24 胡楊の拡大所要年数
2010年の紅柳の分布域の場合

背景:2010年のランドサットTMバンド3

がある。胡楊の稚樹が生育できるほど地下水位が高ければ、植林が可能と考えられる。タイプ3:河川から500m以内だが紅柳が生えていないエリアは土壌水分の条件が不良な可能性がある。胡楊を植林できるか否かは今後の植生の回復状況から判断することになるだろう。当面は回復の見込みが最も高いタイプ1のエリアで胡楊の拡大を促し、植林に務めることが適切である。

胡楊林の育成については、以下の点を指摘できる。胡楊が隣接している紅柳のエリアでは、胡楊が根萌芽によって自然に拡大している林分(吉川ら, 2007)を保護し、胡楊の拡大が止まっている林分では沙棗の植栽や根切りによって萌芽更新を促す(孫・姚, 2000; 田ら, 2009)ことが考えられる。一方、胡楊林に隣接していない紅柳林では、胡楊の種子の発芽率が極めて低い(吉川ら, 2007)ことから、他の樹種との混植で胡楊を回復させる(額済納旗地名委員会, 1988)ことになる。

このため、ランドサット画像の判読結果に基づいて、河川沿いで胡楊が拡大しているエリア、拡大が止まっているエリアと紅柳林のエリアを判定し(図-20, 24)、それぞれ、胡楊の保護の充実、根切りによる萌芽更新、混植による胡楊の稚樹の育成による再生計画を立案することが有効と考えられる。とくに胡楊から遠く離れて拡大所要年数が大きい河川沿いの面積の広い紅柳林(図-24)に胡楊を植栽して、新たな拡大の起点を生み出すことが、居延三角州に胡楊を再生させる効果的な手段と考えられる。一例を挙げると、シラノールノ湖の東北部と地点Dの北側は紅柳の疎林が広がるが(図-1, 23, 24)、胡楊林から離

れているため、胡楊の回復が遅いと判断した場所である。立地条件から両地点とも水分条件が比較的良いと考えられるため、このような紅柳林に胡楊を植栽することが胡楊林の拡大には効果的だろう。

居延三角州では植生遷移と胡楊回復の徴候が現れているが、根萌芽に頼る拡大では回復に400年以上の長い期間を要すると予想された。植林は胡楊の回復に重要な役割果たし、効果的な保護と植林の計画を立案して実行することが、胡楊の回復に必要である。

第 4 章 まとめ

地球温暖化による気候変動の影響で、エジナ河流域居延三角州には、高温が続き、降水量が減少し、風力が強まり、環境悪化が悪化している。また、清代から今日にかけて、エジナ河上流域の農業灌漑による過剰取水がエジナ河流域の深刻な水不足を招き、植生衰退の原因になったと指摘されてきた。これまでは以上のような理由で居延三角州の植生が衰退したというのが通説だった。このため、居延三角州の植生の実態を把握することが急務であると考えられた。そこで、現地調査に基づき、Landsat の画像を目視で判読し、エジナ河居延三角州における土地被覆と植生の変化を確認し、その要因を明らかにして、さらに、森林（胡楊林）の分布と変化の実態を確認し、その結果に基づいて今後の回復の難易を判断し、現在の植生分布から考えられる胡楊の再生適地を明らかにすることを目的とした。

衛星データの判読に先立ち、また、中国・国土資源部（2007）の土地被覆類型とその定義およびエジナ旗土地被覆現状（額濟納旗志編纂委員会 1998）に基づき、居延三角州における土地被覆類型の定義と判読キーおよび判読サンプルを作成した。これらに基づいて、居延三角州の 1977 年から 2010 年までの土地被覆の変化と植生の変化を Google Earth 画像を参照しながら、4 時期の Landsat 画像を判読して 14 カテゴリーの土地被覆に分類した。まず、TM2010 年の画像を目視で判読して土地被覆を分類した。次いで TM2010 年の判読結果に基づいて他の 3 時期の画像 MSS1977、TM199 および ETM+2000 を判読し、土地被覆変化を解析した。

土地被覆判読結果は胡楊などの植生が35%、ゴビなどの非植生が65%を占めていた。通説に反して、1977年から2010年の間に植生域(紅柳、疎林)が拡大して、非植生域(砂地、裸地、ゴビ)が減少していた。植生変化の原因を文献に基づいて検討すると、1940年代から1980年頃にかけて胡楊や紅柳の森林が大規模に伐採されたが(Cha, 2010)、1977年以降は紅柳を含む植生の面積が増加していた。一方、河川水は1991年から2001年にかけて減少したが回復し、地下水位は上流部で安定していたが下流部で低下し続けていた(楊, 2002)。水分条件が植生の衰退を招いたとされてきたが下流部を除くと植生は回復傾向だった。しかし、下流側では、1977年から2010年の間に植生は減少しており、1980年前後に比べて地下水位が下って樹木が枯死した可能性がある。この地域では疎林が裸地や砂地に変化した。

この地域の植生は1980年以前の伐採によって失われたと考えられる。特に、胡楊と灌木林を建材材料や燃料として利用し、大幅に伐採した(cha, 2010)。このため、1977年時点では植生のエリアは狭かった。胡楊などの伐採に対して、1980年頃から保護政策を実施したことにより伐採が止まって、伐採跡地で植生の遷移が始まり、現在は森林に遷移する途中と考えられる。このため、判読結果に表れた灌木の紅柳と疎林の拡大は遷移によるものと考えられる。1991年から2010年にかけて、放牧や禁牧政策を行い、一方、家畜の頭数が減少したことなどが植生の回復を促したと考えられる。

結論として、以下の点を指摘できる。居延三角州の植生は1970

年代以前の森林伐採による森林破壊を経て現在、回復過程にある。しかし、1990年頃からの河川流量の減少が引き金となって地下水位が下がり、下流側では植物が枯死しはじめている可能性が高い。河川水量の減少による水不足が1958年以降に居延三角州で植生の減少を引き起こしているというのが一般的な見解だったが(楊 2002, 児玉 2007, 羅 2007)、本研究の結果は、これまでの見解を見直す必要があることを示唆している。

このように過度の森林利用があったが、今後は森林の回復を見守りつつ、住民のニーズに応じて、牧業の維持、人口増加に対応した食糧供給および森林の保護と利用のバランスに配慮して、土地利用計画を決めることが重要であろう。

以上、主に土地被覆や植生の変化について分析し、1977年から2010年にかけて植生域(森林の紅柳や疎林)が顕著に拡大し、非植生域(砂地と裸地など)の面積が減少したことを明らかにしたが、胡楊や紅柳の分布域の変化や変化パターンなどについては解析していなかった。しかし、土地被覆判読では胡楊、紅柳などの植生と非植生の合計14カテゴリーを分類していたので、この判読結果を利用して胡楊と紅柳の変化を解析した。

居延三角州では極相種である胡楊は軍用の建築材料や燃料などとして大規模に伐採されたため、胡楊は絶滅危惧種に指定された。胡楊は河川沿いに約500mの範囲で森林を形成し、紅柳林の下で稚樹が育つ。両方の条件を満たすエリアが胡楊の再生適地と考えられる。判読結果に基づいて、胡楊と紅柳の拡大あるいは減少の特徴を

検討し、胡楊が拡大した10箇所を選んで拡大距離を計測した。計測した拡大距離(1年間に約12m)を利用して、バッファリングにより胡楊が拡大するのに要する年数を地図化した。この結果を利用して、河道から500mのバッファ内での胡楊の拡大の特徴と2010年の紅柳の分布域への胡楊の拡大の特徴について検討した。バッファリングに基づいた解析では、胡楊が河川沿いの紅柳林へ広がるのに、胡楊林の密度が高い上流域では150年程度だが、胡楊林が少なく胡楊林の間の距離が離れている中流域では最低450年もの年月を要すると判定された。実際に回復するまでには推定結果よりさらに年月を要することは明白で、40年間の森林伐採がこの地域の森林生態系に大きな傷跡を残したと考えられる。

一方、胡楊は根萌芽や胡楊と他の樹種の混植や根切りなどが胡楊の成長に効果的なことが知られており、この知見に基づくと、胡楊が隣接しない大面積の紅柳林へ効果的に胡楊を混植し、拡大が止まっている胡楊林では根切りで更新を促進して再生に要する期間を短縮できると考えられた。ランドサット画像の判読結果は胡楊林間の距離と河川との近接性や紅柳林の分布を示すことから、根切りや植林の候補地を選定するのに有効と期待される。本研究では、植生分布の現状と、これまでの回復の実態に基づいて胡楊の再生について検討したが、今後は、水分環境などの環境要因を加えて、多面的に検証する必要があると考えられる。また、必要に応じて現地調査により、胡楊の再生適地を確認し、地元の人と協力して植林に向けた可能性などを検討することが重要であろう。

謝 辞

研究を実施するにあたり、ご指導および審査をしていただきました岐阜大学流域圏科学研究センターの栗屋善雄教授、応用生物科学部の平松研教授、並びに静岡大学の連合農学研究科の水永博己教授に深く感謝いたします。画像解析については、岐阜大学の流域圏科学研究センターの研究員の河合洋人氏、後藤誠二郎氏、福田夏子氏、留学生のホウウイリス氏、現地調査では、内モンゴル・エジナ旗水利局のハス副局長及び地元の知識人に援助していただいた。様々な資料の収集については、内モンゴル師範大学の包玉海教授に協力していただき、さらに、鹿児島大学農学部の芝山道郎教授、内モンゴル師範大学の包玉龍博士から解析方法について貴重なコメント、そして、留学生のアラタンナブチ氏に助言していただいた。ここで、記して、深くお礼を申し上げます。

引用文献

- 秋山知宏・山崎祐介・王根緒・藤田耕史・中尾正義・窪田順平・小長谷有紀，2007，黒河流域における水利用がその下流域の水循環に与えた影響，沉卫荣編，黒水城人文与环境研究，中国人民大学出版社，北京，pp. 189-211.
- B, S., 2007, Ezenii baigal orchin hiigeed tuuniig hamgaalah asuudliin tuhai (エジナオアシスにおける生態環境の保全及び対策), Cha. Choidandar 編: 卫拉特蒙古历史文化研究, 民族出版社, 北京, pp. 510-513, (in Mongolian).
- Cha, S., 2010, Ezenii tooroin soyol (エジナの胡楊の文化), 内蒙古文化出版社, 呼伦贝尔, pp. 1-32, (in Mongolian).
- Chang, Y., Bao, D., and Bao, Y., 2011, Satellite monitoring of the ecological environment recovery effect in the Heihe River downstream region for the last 11 years. *Procedia Environmental Sciences*, Vol.10, pp. 2385-2392.
- 長幸平・井上吉雄，2011，画像強調と特徴抽出（スペクトル情報），日本リモートセンシング学会編：基礎からわかるリモートセンシング，理工図書株式会社，東京，pp. 199-217.
- Congalton, R. G., 1991, A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, Vol.37, pp. 35-46.
- 戴晟懋・孟和・高润宏，2009，荒漠绿洲额济纳胡杨与怪柳生态位分异过程研究. 干旱区资源与环境, Vol. 23, No. 4. pp.

179-183.

额济纳旗地名委员会, 1988, baigali gazarzuin bodit biy(自然と地理), 巴达拉虎编;额济纳旗地名志, 内蒙古日报青年出版社, 呼和浩特, pp. 155-177,(in Mongolian).

额济纳旗志编纂委员会編, 1998, 第一编地理, 额济纳旗志, 方志出版社, 北京, pp. 63-110.

FAO, 2010, Global forest resources assessment 2010 main report. FAO, Rome, pp.11-21.

福田徹, 2011, 日本の地球観測衛星計画30年, リモートセンシング学会誌, Vol. 31, No. 2. pp. 159-167.

古野義明・中山裕則・遠藤邦彦・穆桂金, 2008, 時系列衛星データによる閉塞湖水域変動解析に基づく乾燥地域の環境変化分析ー中国黒河流域を対象としてー. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No. 43, pp. 325-335.

Gong, J. and Dong, G., 1998, Environmental degradation of the Ejina Oasis and comprehensive rehabilitation in the lower reaches of the Heihe River. Journal of Desert Research, Vol. 18, pp. 44-49.

長谷川均, 1998, リモートセンシング理解するためのA to F, 長谷川均編, リモートセンシングデータ解析の基礎, 古今書院, 東京, pp. 10-44.

平田泰雅, 2009, 高分解能衛星データの森林モニタリングへの利用, 日本森林学会誌, Vol. 91, pp.136-146.

- 金晓媚, 2010, 黑河下游额济纳绿洲荒漠植被与地下水位埋深的定量关系(黑河下流域被覆及び地下水位関係), 地学前縁, Vol. 17, pp. 181-186.
- 景爱, 2007, 从绿洲到沙漠-居延绿洲消失的自然因素与人类活动(オアシスから砂漠まで-居延オアシスの消滅した自然的要因及び人間活動), 沉卫荣編, 黑水城人文与环境研究, 中国人民大学出版社, 北京, pp. 10-20.
- 環境省, 2012, 企業とNGO/NPOの協働による世界の森林保全活動情報 中華人民共和国, <http://www.env.go.jp/nature/shinrin/fpp/worldforest/index4-8.html> (2015年11月アクセス).
- 環境省, 2015, 環境白書. 環境省, 東京, pp.179.
- 国際連合広報センター, 2015, http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/desertification/ (2015年11月アクセス).
- 児玉香菜子, 2005, 第2章 「生態移民」による地下水資源の危機-内モンゴル自治区アラシャン盟エゼネ旗における牧畜民の事例から, 小長谷有紀・シンジルト・中尾正義編: 中国の環境政策 生態移民-緑の大地、内モンゴルの砂漠化を防げるか?, 昭和堂, 京都, pp. 56-76.
- 児玉香菜子, 2007, エゼネの五〇年. 中尾正義・フフバートル・小長谷有紀編: 中国辺境地域の50年 黒河流域の人びとから見た現代史, 東方書店, 東京, pp. 159-182.

- 窪田順平，2007，黒河流域の自然と水利用．中尾正義・フフバー
トル・小長谷有紀編：中国辺境地域50年 黒河流域の人びとから見た現代史，東方書店，東京，pp. 17-40.
- 李小琴・张小由・高冠龙，2014，额济纳绿洲荒漠化过程中植物群落生态学特性研究（エジナオアシスの砂漠化における植生群落生態学特徴の研究）．干旱区资源与环境，Vol. 28，pp. 66-70.
- 刘蔚・马骏・席海洋・刘东琳・常宗强，2012，黒河下游额济纳绿洲土地生产潜力的动态变化及影响因素分析（黒河下流域エジナオアシスの土地生産力の変化及び影響要因分析）．冰川冻土，Vol. 34，pp. 1336-1345.
- 罗桂环，2007，近80年来额济纳河河流的环境变迁．自然科学史研究，Vol. 26 增刊，pp. 31-42.
- 村上拓彦，2010，分類精度，加藤正人編：森林リモートセンシング第3版－基礎から応用まで－，日本林業調査会，東京，pp. 177-189.
- 中尾正義，2007，黒河流域の水不足問題とカラホト研究．沉卫荣編，黑水城人文与环境研究，中国人民大学出版社，北京，pp. 128-136.
- 越智士郎，2009，画像オブジェクトに基づく高分解能衛星画像での土地被覆分類手法の検討，東南アジア研究，Vol. 46，No. 4，pp. 578-592.
- オウスチンビリゴ・栗屋善雄，2015，中国内モンゴルのエジナ河・居延三角州における土地被覆変化の特徴．システム農学会，Vol. 31，

No. 3. pp. 67-79.

潘世兵·路京选·张建立·孙涛, 2006, 黑河流域额济纳绿洲生态保护措施及其效应分析(黑河流域のエジナオアシスの生態保護対策及び成果分析). 地理与地理信息科学, Vol. 22, No. 3 pp. 106-112.

島重章·白間宏紀, 2012, 衛星リモートセンシングによる庄原災害調査と検証, 広島工業大学紀要, No. 46. pp. 85-90.

苏建平·仵彦卿·黎志恒·温小虎·张应华, 2004, 黑河下游河岸绿洲区包气带土壤水分与植被生长状况的研究. 西北植物学报, Vol. 24, pp. 662-668.

田永祯·司建华·程业森·赵菊英·白莹, 2009, 荒漠河谷胡杨残林复壮更新试验. 研究干旱区资源与环境, Vol. 23, No. 9, pp. 155-159.

孙洪祥·姚云峰, 2000, 济纳绿洲胡杨林更新复壮技术研究, 干旱区资源与环境, Vol. 14, No. 5, pp. 69-73.

辻美代, 2014, 中露国境木材産業の共生・共栄, 流通科学大学論集—経済・情報・政策編, Vol. 22, No. 2, pp. 111-126.

Wang, G., Cheng, G., 1999, Water resource development and its influence on the environment in arid areas of China—the case of the Hei River basin. Journal of Arid Environments, Vol. 43, pp. 121-131.

王志勇·于静洁·敖登花, 2013, 近50年来额济纳三角洲气象要素变化, 南水北调与水利科技, Vol. 11, No. 3, pp. 1-5.

- 顔耀文・姜海兰・王学强・马宗义・陈云海, 2014, 1963-2012年
黑河下游额济纳绿洲的时空变化(1963-2012年における黒河
下流域エジナオアシスの経時変化). 干旱区地理, Vol.37, No.
4, pp. 786-792.
- 徐永亮・于静洁・王平・闵雷雷, 2013, 额济纳三角洲地下水位年
内动态变化特征分类分析(エジナオアシスの地下水位の年間変
化特徴の分類分析). 干旱区资源与环境, Vol. 27, No. 4, pp.
135-140.
- 杨柄禄, 2002, 第一章土壤与植被, 冰川与湖泊. 阿拉善盟黑
河工程建设管理局主编: 额济纳河, 阿拉善盟黑河工程建设
管理局, アラシャン, pp. 1-31.
- 吉川賢・門田有佳子・三木直子・石井義朗・坂本圭児, 2007,
黒河流域における胡楊(*Populus euphratica*)林の保全について,
沉卫荣編, 黑水城人文与环境研究, 中国人民大学出版社,
北京, pp.212-237.
- 赵敏丽・刘普幸・朱小娟・张克新, 2012, 黑河下游绿洲胡杨物候
期对1960~2010年气候变暖的相应(黒河下流域オアシスの胡
楊の生物季節変化及び1960~2010年の気候温暖化との相関).
西北植物学报 Vol. 32, No. 10, pp. 2108-2115.
- 赵雪・明永飞, 2013, 黑河分水后额济纳绿洲怪柳(*Tamarix*
ramosissima)和苦豆子(*Sophora alopecuroides*)群落的恢复
(黒河の配水によるエジナオアシスの紅柳や苦豆子の群落回復).
中国沙漠, Vol. 33, No. 6, pp. 1684-1691.

中国·国土资源部, 2007, 土地利用现状分类, In

<http://www.ptlc.gov.cn/hsip/tabid/684/InfoID/11794/frtid/70>

5/Default.aspx, 中国·国土资源部, 北京.