
はじめに

我が国の年平均降水量は1700 mm程度で、世界平均の800 mmの2倍以上である。鳥取県の年降水量は1900 mm程度と我が国の平均よりも多く、鳥取砂丘は砂漠ではなく、乾燥地でもない。乾燥地とは単に乾燥した土地ではなく、降水量や蒸発量等によって極乾燥地域、乾燥地域、半乾燥地域、乾燥半湿潤地域の四つに区分されており、乾燥した土地の総称である。乾燥地は世界の土地の41%を占め、世界人口の1/3が住む。乾燥地では、乾燥の程度や気温に応じてさまざまな形態の農業が行われており、乾燥地独特の作物もあるが、湿潤地と同様の穀類、野菜類、果樹類も多く栽培されている。乾燥地で行われている農業は実は人類にとって大変重要であり、それなくして世界人口を養うことはできない。むしろ乾燥地こそが世界人口を養うのに重要な位置を占めている。アメリカ中西部の大穀倉地帯は乾燥地である。中南米、ヨーロッパ、オーストラリア、中国の大農業地帯も乾燥地である。我が国は米国の乾燥地グレートプレーンズで栽培されたトウモロコシ、コムギ、ダイズを多く輸入しており、国民の食生活は乾燥地農業に依存していると言っても過言ではない。

乾燥地は豊富な日射が作物の光合成、すなわち作物生産に有利である。また、砂漠の気候に象徴されるように昼夜の寒暖差が大きく、夜間の呼吸が少ない。これも作物生産に有利である。さらに、病害・病虫・雑草が少ないので農薬使用量が少ない。これらのことは乾燥地が農業の適地であることを意味している。逆に湿潤地は農業の不適地である。乾燥地農業に携わる我々が指摘されるのは「乾燥地のような不利な条件で農業をやるよりは日本のような湿潤地で農業をやるほうがいいのでは」であるが、誤解である。しかし、その有利性を生かすには湿潤地以上にきめ細かい農業技術を必要とする。それが実行されないと、土壌が劣化し、場合によっては砂漠化につながる環境

破壊をもたらす。

乾燥半湿潤地域を除く乾燥地では作物栽培に灌漑が必須である。しかし、農業での過剰な水消費がもたらす環境破壊として、アフリカのチャド湖や中央アジアのアラル海の縮小、アメリカ合衆国中部のオガララ帯水層の減少などがよく知られている。一方、乾燥地農業の現場で最も大きな問題は、水不足を別として、土壌の塩類集積がもたらす作物の塩害である。塩害地は放棄され、砂漠化につながる。砂漠化とは「植生に覆われた土地が不毛地になっていく現象」と定義されており、その87%が人為的な要因によるものとされている。人為的要因の主な原因の一つが過剰灌漑による塩類集積である。塩類集積がもたらす作物の塩害は乾燥地とは無縁の我が国においても発生することがある。降雨が遮断されるハウス内や海浜の農地では塩害が発生する。東日本大震災の津波で植物が枯死した原因は塩害である。

乾燥地の土地利用の大部分は放牧地である。降水量が増すにつれて耕地の割合が高くなる。本書では放牧は取り扱わず、耕地、すなわち作物栽培に限り、土壌塩類化の防止と塩類土壌の修復および利用について述べる。まず、塩害の発生に至る土壌への塩類集積、作物の耐塩性、塩害発生の抑制技術を紹介し、持続可能な乾燥地農業を提案する。第1章では世界の乾燥地の分布と各乾燥地の特徴を述べる。第2章では乾燥地で行われている農業の形態と主要作物について述べる。第3章では土壌の塩類集積に至る水と塩の挙動について述べる。第4章では土壌中の塩類が植物の生理に及ぼす影響、塩に対する作物の抵抗性すなわち耐塩性の生理機構、および塩を生育に必要とする好塩性植物群の生理について述べる。第5章では土壌への塩類集積を軽減・修復する物理学的手法、塩害を軽減する化学的手法、好塩性植物群を利用した土壌塩類化の防止と塩類集積土壌の修復手法、植物共生微生物を用いた植物の耐塩性向上について述べる。第6章では第5章までの内容を総合して持続可能な乾燥地農業を提案する。近年、国際連合食糧農業機関（FAO）は乾燥地養殖を推進している。乾燥地は発展途上国が多く、人口増加率が高い。そこに住む人々に動物性タンパク質を供給することが目的である。乾燥地養殖と作物栽培を組み合わせ、単位水量あたりの食料生産を向上させる試みも紹介する。

2015年の国連サミットで採択された持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals : SDGs）（2016～2030）はミレニアム開発目標（Millennium Development Goals : MDGs）（2001～2015）を前身とするものである。SDGsでは17の目標が設定されたが、その中には「飢餓に終止符を打ち、食料の安定確保と栄養状態の改善を達成するとともに、持続可能な農業を推進する」「陸上生態系の保護、回復および持続可能な利用の推進、森林の持続可能な管理、砂漠化への対処、土地劣化の阻止および逆転、ならびに生物多様性損失の阻止を図る」と本書と同じ目標が設定されている。

乾燥地農業は貧困や飢餓を抱える乾燥地のみならず、我が国のような湿潤地域に住む人々に対する食料の供給にとってもますます重要となる。また、地球温暖化の進行は主要作物、特にトウモロコシやダイズの収量の低下を招くと予測されている。持続的な乾燥地農業の達成は不可欠である。本書がそれに多少とも貢献できれば幸いである。

本書は鳥取大学乾燥地研究センター長の山中典和博士の勧めで計画されたものである。乾燥地の塩害に詳しい著者に恵まれ、完成することができたのは幸いである。また、鳥取大学の馬場貴志博士と蕪木絵実博士には本書の取りまとめに多大な協力をいただいた。感謝申し上げます。また、本書刊行の申し出を快諾され、編集に大きな力を貸していただいた技報堂出版株式会社および同社編集部長石井洋平氏と伊藤大樹編集部に感謝申し上げます。

2019年2月

藤山 英保

目 次

| | | |
|--------------|---------------------------|-----------|
| 第 1 章 | 乾燥地の分布と特徴 | 1 |
| 1.1 | 乾燥地の分布 | 1 |
| 1.2 | 世界の乾燥地の特徴と農業 | 4 |
| 第 2 章 | 乾燥地農業 | 11 |
| 2.1 | 灌漑水源 | 11 |
| 2.2 | 灌漑農業 | 18 |
| 2.3 | 降雨依存（無灌漑）農業 | 22 |
| 2.4 | 洪水農業 | 24 |
| 第 3 章 | 乾燥地土壌における塩類動態と塩類集積 | 27 |
| 3.1 | 乾燥地域の土壌劣化（土壌塩類化） | 27 |
| 3.2 | 乾燥地土壌の断面内に分布する塩類 | 29 |
| 3.3 | 乾燥地域に分布する灌漑水 | 31 |
| 3.4 | 乾燥地域に分布する二つの劣化土壌 | 36 |
| 3.4.1 | 塩性土壌とソーダ質土壌 | 36 |
| 3.4.2 | 塩性土壌の特徴と生成機構 | 38 |
| 3.4.3 | ソーダ質土壌の特徴と生成機構 | 42 |
| 3.5 | 土壌診断 | 46 |
| 3.5.1 | 野外における土壌診断 | 47 |
| 3.5.2 | 乾燥地における土壌診断 | 49 |

| | | |
|------------|---------------------------------------------|-----------|
| 3.5.3 | 土壌の化学性 | 51 |
| 3.5.4 | 土壌中の塩類濃度 | 52 |
| 3.5.5 | 土壌の pH | 55 |
| 3.5.6 | 簡易な土壌診断機器 | 56 |
| 3.6 | 乾燥地域に分布する土壌の特徴と土壌塩類化の実態 | 56 |
| 3.6.1 | 大規模灌漑農業開発によってもたらされた土壌劣化 カザフスタン・シルダリア川下流域 | 57 |
| 3.6.2 | 土壌保全の鍵を握る節水灌漑 メキシコ・カリフォルニア半島 | 59 |
| 3.6.3 | 土壌の性質によって異なる土壌塩類化 中国・陝西省・洛恵渠灌漑区の農地 | 61 |
| 3.7 | 土壌塩類化に対する今後の農地管理のあり方 | 64 |

第4章 植物の塩応答 69

| | | |
|------------|--------------------------------|------------|
| 4.1 | 塩害発生機構 | 69 |
| 4.1.1 | 塩ストレスによる吸水阻害と浸透圧ストレス | 70 |
| 4.1.2 | 塩ストレスによる特異的なイオンの吸収と イオンストレス | 83 |
| 4.1.3 | 塩ストレス下における活性酸素種の発生と 酸化ストレス | 88 |
| 4.2 | 耐塩性機構 | 92 |
| 4.2.1 | 塩類腺、塩類嚢によるナトリウムイオンの排除 | 93 |
| 4.2.2 | ナトリウムイオンの取り込み・輸送と排除 | 95 |
| 4.2.3 | 浸透調節と耐塩性 | 99 |
| 4.2.4 | 活性酸素の消去と耐塩性 | 105 |
| 4.2.5 | 植物ホルモンと耐塩性 | 109 |
| 4.3 | 植物の好塩性 | 113 |
| 4.3.1 | 塩濃度と植物の生育 | 113 |
| 4.3.2 | 好塩性植物 | 115 |

| | |
|-------------------|-----|
| 4.3.3 好塩性機構 | 116 |
| 4.3.4 好塩性機構に関する知見 | 119 |
| 4.3.5 耐塩性と好塩性 | 126 |

第5章 塩類集積の防止と塩類土壌修復 137

| | |
|--------------------------|-----|
| 5.1 物理学的手法を用いた防止と修復 | 137 |
| 5.1.1 土壌面蒸発の抑制 | 137 |
| 5.1.2 表面剥離法による除塩 | 139 |
| 5.1.3 塩類捕集シートによる除塩 | 141 |
| 5.1.4 リーチングによる除塩 | 142 |
| 5.1.5 より効率的なリーチングのために | 145 |
| 5.2 化学的手法を用いた防止と修復 | 147 |
| 5.2.1 塩性土壌の改良 | 147 |
| 5.2.2 ソーダ質土壌の改良 | 147 |
| 5.2.3 アルカリ性を伴ったソーダ質土壌の改良 | 153 |
| 5.2.4 土壌塩類化の防止と塩類集積土壌の修復 | 154 |
| 5.3 植物を用いた防止と修復 | 155 |
| 5.4 微生物を用いた防止と修復 | 162 |
| 5.4.1 菌根菌の生態と塩類土壌修復への利用 | 162 |
| 5.4.2 根圏細菌の生態と塩類土壌修復への利用 | 170 |
| 5.4.3 内生菌の生態と塩類土壌修復への利用 | 174 |

第6章 持続可能な乾燥地農業のために 185

| | |
|---------------------|-----|
| 6.1 節水 | 188 |
| 6.2 土壌の塩類化とソーダ質化の防止 | 188 |
| 6.3 塩類土壌の修復 | 190 |
| 6.3.1 物理学的手法を用いた修復 | 190 |
| 6.3.2 化学的手法を用いた修復 | 190 |

| | |
|------------------------|-----|
| 6.3.3 植物を用いた修復 | 191 |
| 6.3.4 微生物を用いた修復 | 192 |
| 6.4 ま と め | 192 |
| 索 引 | 197 |

執筆者一覧

はじめに

鳥取大学乾燥地研究センター 藤山英保 (ふじやま ひでやす)

第1章

鳥取大学乾燥地研究センター 藤山英保

第2章

鳥取大学乾燥地研究センター 藤山英保

第3章

鳥取大学農学部 遠藤常嘉 (えんどう つねよし)

第4章

4.1

広島大学大学院生物圏科学研究科 実岡寛文 (さねおか ひろふみ)

4.2

広島大学大学院生物圏科学研究科 実岡寛文

4.3

鳥取大学乾燥地研究センター 藤山英保

第5章

5.1

鳥取大学乾燥地研究センター 藤巻晴行 (ふじまき はるゆき)

5.2

鳥取大学農学部 遠藤常嘉

5.3

鳥取大学乾燥地研究センター 藤山英保

5.4.1

鳥取大学乾燥地研究センター 谷口武士 (たにぐち たけし)

5.4.2

山梨大学生命環境学部 片岡良太 (かたおか りょうた)

第6章

鳥取大学乾燥地研究センター 藤山英保

第 1 章

乾燥地の分布と特徴

1.1 乾燥地の分布

世界の乾燥地は乾燥度指数（Aridity Index：AI）によって四つの亜型に区分される（表 1.1）¹⁾。AI は年間降水量（P）を年可能蒸発散量（Potential evapotranspiration：PET）で割った値である。蒸発散量（Evapotranspiration）とは土壌表面からの蒸発量（Evaporation）と植物表面から蒸発する蒸散量（Transpiration）を合わせた量である。可能蒸発散量とは「短い緑草で地表を覆われた土壌中に、水分が十分に存在する場合、地表面と植物を通して蒸発および蒸散する水の量」である²⁾。AI < 0.05 は最も乾燥した地域で、極乾燥地域（Hyperarid）と呼ばれる。0.05 ≤ AI < 0.20 は乾燥地域（Arid）と呼ばれる。0.20 ≤ AI < 0.50 は半乾燥地域（Semiarid）と呼ばれる。乾燥地域と半乾燥地域には雨季と乾季があり、冬雨型の地域は夏雨型よりも蒸発量が少ないので降水量は少なくとも同じ亜型になる。0.50 ≤ AI < 0.65 は乾

表 1.1 乾燥地の統計データ

| 亜型 | 乾燥度指数 | 2000 年時点の面積 | | 優占生物群系 | 2000 年時点の人口 | |
|-------|-----------|-------------------------------------------|--------------------|--------|-------------|--------------------|
| | | 面積 [×10 ⁶ km ²] | 陸地面積に 対する割合 [%] | | 全体 [千人] | 世界人口に 対する割合 [%] |
| 極乾燥 | < 0.05 | 9.8 | 6.6 | 砂漠 | 101 336 | 1.7 |
| 乾燥 | 0.05-0.20 | 15.7 | 10.6 | 砂漠 | 242 780 | 4.1 |
| 半乾燥 | 0.20-0.50 | 22.6 | 15.2 | 草地 | 855 333 | 14.4 |
| 乾燥半湿潤 | 0.50-0.65 | 12.8 | 8.7 | 林地 | 909 972 | 15.3 |
| 合計 | | 60.9 | 41.1 | | 2 109 421 | 35.5 |

乾燥半湿潤地域 (Drysubhumid) と呼ばれる。かろうじて灌漑なしに農業ができる地域であり、降雨依存 (無灌漑) 農業という形態の農業が行われている。0.65 ≤ AI は湿潤地域 (Humid) である。我が国の国土はすべて湿潤地域である。四つの乾燥地域を合わせると 6 000 万 km² で世界の陸地の 41.3% を占める。そこには世界人口の 3 分の 1 にあたる 21 億人が暮らしている。その 90% が発展途上国に住んでいる。一人あたりの GDP が低く、乳幼児死亡率が高いなど、人間の福利のレベルが低い³⁾。一方で、乾燥地では世界の食料の 44% が生産されている³⁾。乾燥地の分布を図 1.1 に示す。乾燥地域は砂漠の周辺、半乾燥地域は乾燥地域の周辺、乾燥半湿潤地域は半乾燥地域の周辺に形成される。湿潤地域は乾燥半湿潤地域の周辺に存在することがわかる。

四つの乾燥地域の分類とは異なるが、砂漠 (Desert) と呼ばれる地域がある。砂漠は篠田⁴⁾によると、年降水量 200 mm あるいは 254 mm (10 インチ) 以下の地域に対応する。おおよそ極乾燥地域と乾燥地域の範囲と見なされる (表 1.1)。砂漠の形成には場所ごとに四つの原因がある。第 1 が南北回帰線付近に形成される砂漠であり、最も面積が大きい。赤道では上昇気流が発生

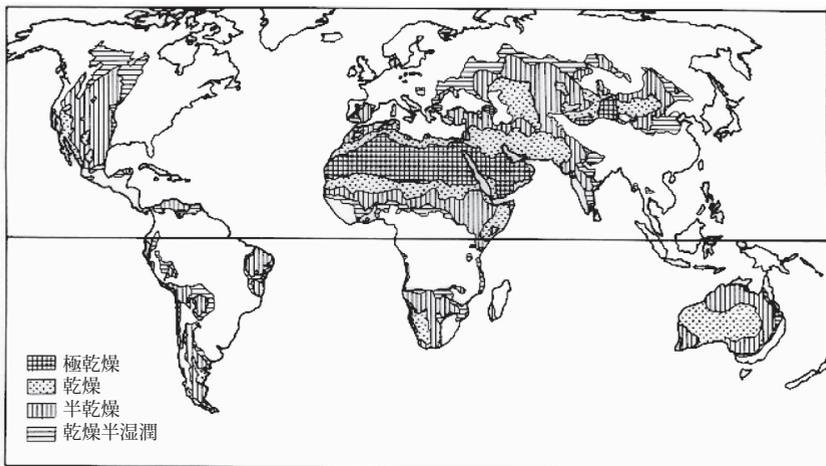


図 1.1 世界の乾燥地の分布 (提供: 鳥取大学・北村義信)

するために直下の地域には大量の降雨があり、熱帯雨林が形成される。雨を降らせたあとの乾燥した空気は南北 20～30 度帯（亜熱帯高圧帯）に吹き降り、砂漠が形成される。サハラ、中近東（アラビア半島・イラン）、オーストラリア、メキシコの砂漠がこれに相当する（写真 1.1）。第 2 は大陸の内部に形成される砂漠である。海岸から遠く離れている地域は空気に含まれる水分が少ないために降雨が少なく、砂漠となる。中国・新疆ウイグル自治区のタクラマカン砂漠がその代表である（写真 1.2）。第 3 は寒流によって形成される砂漠である。海水温が低いと地表付近の空気が冷やされる。空気は温度の低い層が下にあるときに安定し、上昇気流は発生しにくいために降雨が極端に少なくなり、砂漠が形成される。アフリカのナミブ、南アメリカのアタカマ、メキシコ・カリフォルニア半島などである（写真 1.3）。第 4 は高い山脈の風下に形成される砂漠である。山脈を吹き上がる風は雨や雪として水分を放出し、反対側に吹き降りる空気は水分を含まない。いわゆるフェーン現象である。アンデス山脈東部のアルゼンチンのパタゴニアが代表である。木村⁵⁾によると、表 1.1 の概念を用いると砂漠は全陸地面積のおよ

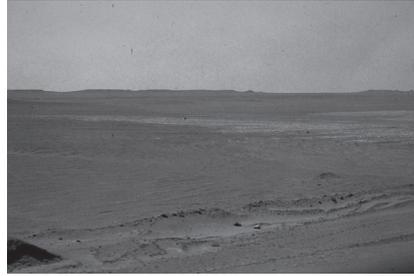


写真 1.1 草 1 本生えていないイランのルート砂漠（撮影：藤山英保）



写真 1.2 中国・新疆ウイグル自治区タクラマカン砂漠の砂丘（撮影：藤山英保）

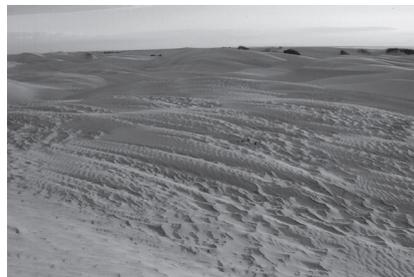


写真 1.3 メキシコ・カリフォルニア半島のピソカイノ砂漠（撮影：藤山英保）

持続可能な乾燥地農業のために

—土壌塩類化防止と塩類土壌修復—

定価はカバーに表示してあります。

2019年2月20日 1版1刷 発行

ISBN978-4-7655-3473-4 C3051

監修者 鳥取大学乾燥地研究センター

編著者 藤 山 英 保

発行者 長 滋 彦

発行所 技報堂出版株式会社

日本書籍出版協会会員
自然科学書協会会員
土木・建築書協会会員

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町 1-2-5

電話 営業 (03)(5217)0885

編集 (03)(5217)0881

F A X (03)(5217)0886

振替口座 00140-4-10

<http://gihodobooks.jp/>

Printed in Japan

Toward Sustainable Dryland Agriculture

— Preventing Salt Accumulation in Soil and Remediating Salt-affected Soil —

© Hideyasu Fujiyama, 2019

装幀 ジンキッズ 印刷・製本 昭和情報プロセス

落丁・乱丁はお取り替えいたします。

JCOPY 〈出版者著作権管理機構 委託出版物〉

本書の無断複写は著作権法上での例外を除き禁じられています。複写される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話：03-3513-6969, FAX：03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。