

放送大学鳥取学習センター地域貢献プロジェクト

“沙漠を緑に”
—地球環境問題を考える—

2016年10月8日（土）

鳥取大学農学部1号館大講義室

主 催 放送大学鳥取学習センター
共 催 日 本 砂 丘 学 会

スケジュール

【シンポジウム】

日 時：10月8日（土）13：00～17：10

会 場：鳥取大学農学部1号館大講義室

開会挨拶：放送大学鳥取学習センター所長 小林 一 13：00～13：05

座長解題：日本砂丘学会会長 山本 定博 13：05～13：20

講 演：

1. 乾燥地における水利用・水管理の現状と課題解決に向けて 13：20～14：00
鳥取学習センター・客員教授 北村 義信
(鳥取大学国際乾燥地研究教育機構・特任教授)

2. 塩性土壌における耐塩性の高い植物の利用 14：00～14：40
鳥取大学乾燥地研究センター・准教授 安 萍

3. 砂漠化と乾燥地の緑化 14：40～15：20
鳥取大学乾燥地研究センター・教授 山中 典和

4. 乾燥地はエネルギー資源の宝庫 15：20～16：00
鳥取大学地域学部・准教授 田川 公太郎

討 議 16：10～17：10

【エクスカージョン】

日 時：10月9日（日）9：30～16：00

視察先及び時間

9：30	鳥取駅南口発
10：00～11：00	鳥取大学乾燥地研究センター
11：15～12：15	鳥取砂丘ジオパークセンター
12：15～13：30	鳥取砂丘（昼食）
13：30～14：30	鳥取砂丘
14：30～15：30	砂の美術館
16：00	鳥取駅南口着

目 次

まえがき 放送大学鳥取学習センター所長 小林 一

講 演：

1. 乾燥地における水利用・水管理の現状と課題解決に向けて…………… 1
放送大学鳥取学習センター・客員教授 北村 義信
(鳥取大学国際乾燥地研究教育機構・特任教授)
2. 塩性土壌における耐塩性の高い植物の利用…………… 11
鳥取大学乾燥地研究センター・准教授 安 萍
3. 砂漠化と乾燥地の緑化…………… 15
鳥取大学乾燥地研究センター・教授 山中 典和
4. 乾燥地はエネルギー資源の宝庫…………… 19
鳥取大学地域学部・准教授 田川 公太郎

まえがき

鳥取学習センター所長 小林 一

放送大学鳥取学習センターでは、日本砂丘学会と協力して“沙漠を緑に ―地球環境問題を考える―”のテーマで公開シンポジウムを企画しました。

世界の乾燥地は陸地全体の約4割を占め、毎年、日本の九州と四国を合わせた面積で乾燥地が増加していると言われています。乾燥地の拡大は、飢餓や貧困、民族紛争等の社会経済的な混乱に影響を及ぼしており、当該地域における大きな社会問題となっていることが指摘されています。また、乾燥地面積の増大が世界的な気候変動にも影響することが推測されています。乾燥地の拡大に結びつく沙漠化への対処は、21世紀の人類に与えられた世界規模での課題となっており、国連レベルでもそのための活動が繰り返されています。

アジアモンスーン気候帯に位置し水資源に恵まれた日本では、乾燥地への関心はそれほど高くありません。しかし、乾燥地の拡大によって上記のような地球規模での自然的・社会経済的な影響が懸念されている中で、私たちは沙漠化の問題とは無関係ではいられなくなっています。黄砂やPM2.5に象徴される大気汚染、輸入食料に多くを依存する日本にとっての海外の食料生産に影響を及ぼす世界的な気象変動、地球温暖化による生活環境変化等は、国民が身近で感じるようになってきている事柄です。

本公開シンポジウムでは、私たちが直面するようになってきている沙漠化の問題について取り上げ、“沙漠を緑に”のテーマで地球環境を考える視点を中心にしながら、問題への理解を深めることをねらいとしました。講演は、日頃より農学や林学、エネルギー等の学術分野から世界の乾燥地を対象にして研究活動を行っておられる、日本砂丘学会所属の研究者にお願いしました。報告を通じて沙漠の緑化について学ぶと同時に、講演者と参加者による討議を通じて問題への理解を深めたいと思います。

本公開シンポジウムは、放送大学学園による平成28年度学長裁量経費を活用して開催します。主催する鳥取学習センター、および共催する日本砂丘学会の両機関では、それぞれの社会貢献活動の位置づけをもって取組みを行います。放送大学学園の学生、日本砂丘学会の会員のみならず、一般市民の皆様の幅広い参加により、本シンポジウムが実りあるものとなるよう祈念致します。

乾燥地における水利用・水管理の現状と課題解決に向けて

北村 義信^{1,2}

Present state of water use and management and toward the solution of problems

Yoshinobu KITAMURA^{1,2*}

Summary

In today's increasingly tight water resources, the manner of water use in agricultural sector has been strongly criticized by other water sectors. The background and causes of the increasing pressure onto agricultural water use are: 1) intensification of water conflicts among users, regions, and nations, and especially among riparian countries in transboundary river basins, 2) overexploitation of groundwater for irrigation and other uses due to scarcity of renewable water resources, causing degradation of groundwater quality, 3) increasing competition between urban and rural water users, causing frequent transfer of water rights from rural to urban users, 4) in some countries, especially in the most developed countries, higher priority in water allocation is given to environmental protection than to irrigation, 5) increasing instability of water resources due to the effect of global warming, and 6) reality that existing irrigation systems are still at low level of irrigation efficiency.

In this paper, the author revealed actual states of hydrology and water resources in drylands, and reviewed water use and management that have been practiced in drylands, and discussed their conservation and restoration for the practical application. Moreover, the author discussed not only measures how to cope effectively with the advance of global warming, but measures how to develop sustainable irrigated agriculture and water resources management in the future.

キーワード：乾燥地，従来型水資源，地球温暖化，非従来型水資源，水利用・管理

Key Words: Conventional water resources, Drylands, Global warming, Non-conventional water resources, Water use and management

1. はじめに

水資源のひっ迫が深刻化している現在，農業分野の水使用の在り方に対して，強い圧力がかかっ

¹ 放送大学鳥取学習センター（〒680-0845 鳥取市富安2-138-4）

² 鳥取大学国際乾燥地研究教育機構（〒680-0001 鳥取市浜坂1390）

¹ Tottori Study Center, The Open University of Japan (OUJ) (2-138-4 Tomiyasu, Tottori, 680-0845, Japan)

² International Platform for Dryland Research and Education (IPDRE), Tottori University (1390 Hamasaka, Tottori, 680-0001, Japan)

* Corresponding author, ykita@alrc.tottori-u.ac.jp

てきている。その背景には、水をめぐる国家間の競合の激化、再生可能水資源の不足に伴う地下水の過剰揚水と水質悪化、水をめぐる都市部と農村部の競合、環境保全からの水使用の制約、気候変動による水資源の将来的不安定化などがある。そして何より最大の問題として、灌漑の水利用効率の低さがあげられる。本論では、今後の地球温暖化の進行に対処し、持続可能な灌漑農業と水資源利用を展開していく方策について論じる。

2. 乾燥地の水利用・水管理の現状と課題

2.1 地球全体の水循環

大まかな地球全体の水文循環を年単位で見れば、海洋から約453,000 km³ y⁻¹の水が蒸発し、うち約90%は降水となって海洋に還元し、残り10% (約41,000 km³ y⁻¹) は卓越風により陸地にもたらされる。陸地からの蒸発散量は約72,000 km³ y⁻¹であるから、合わせて約113,000 km³ y⁻¹ (830 mm y⁻¹) の降水が陸地に降ることになる。この大部分は土壌水分や地下水を涵養する。そして、72,000 km³ y⁻¹が蒸発散して大気中に戻り、残り約41,000

km³ y⁻¹が河川水となって最終的に海洋に流出する (Falkenmark, 1977; Hawksworth and Bull, 2006)。

地球上の河川には約2,000 km³の淡水が常時流れているが、水量の地域間格差は大きい (第1表)。河川中の淡水量の半分は南米、4分の1はアジアに分布する。河川水の滞留時間を上記の地球全体の河川流量と河川水量で逆算すると、地球平均で17～18日となる。各地域における河川の水量、流量、滞留時間は第1表のように推定される。この河川中の淡水量は、再生可能水資源とみなすことができ、これをいかに賢く利用するかが人類生存のための生命線と言える。

第1表 河川中に存在する淡水量の地域別比較

地域	河川中の淡水量			滞留時間 (日)
	水量 (km ³)	年流量 (km ³ /yr)	1人当たり流量*	
ヨーロッパ	76	2,321	3,128	12
アジア	533	14,835	3,374	13
アフリカ	184	4,184	3,573	16
北アメリカ	236	6,945	19,454	12
南アメリカ	946	10,377	16,471	33
オーストラリア	24	2,011	50,275	4
計	2,000	41,000	5,588	17.8

出典: Gidrometizdat (1974)ほかを改変して引用

*1人当たり流量 (WSI=水ストレス指数) : m³ y⁻¹ c⁻¹ (c: capita)

(人口は2015年データ。出典: 統計ポータルサイト Statista)

2.2 ブルーウォーターとグリーンウォーター

地球の陸地において利用可能な淡水は、大きくブルーウォーター (BW: blue water) とグリーンウォーター (GW: green water) に分けて考えることができる。前者は河川水と地下水であり、後者は土壌中に貯留され土壌表面および植物の葉面から大気中へ蒸発散として放出される水である。

人類が利用できるBW (河川水約41,000 km³ y⁻¹) のうち、安定的に取水が可能な基底流出 (低水流出) は約14,000 km³ y⁻¹ (34%) で、残りの約27,000 km³ y⁻¹ (66%) は利用困難な直接流出 (洪水流出) である。さらに地下水流出のうち、5,000 km³ y⁻¹は人気のない地域を流れており、人類が容易に利用できるBWは9,000 km³ y⁻¹と推定される (UNDP et al., 2000; The World Bank, 2005)。

2007年のBWの年間取水状況は、農業用水が2,635.7 km³ y⁻¹ (70%), 工業用水が753.1 km³ y⁻¹ (20%), 生活用水が376.5 km³ y⁻¹ (10%) であり、全体で3,765.3 km³ y⁻¹となる (The World Bank, 2010)。これは再生可能水資源の9%に相当するが、容易に利用できるBWの42%をも占めていることになる。世界の主要河川流域におけるBWのひっ迫度を第1図に示す (Hoekstra and Mekonnen, 2011) が、ひっ迫度の高い地域は乾燥地に集中している。乾燥地では、地下水流出がほとんど見込めないことから、直接流出を捕捉・集水し利用する技術を高度化・効率化することが重要である。

地球上の陸地にもたらされるGWは72,000 km³ y⁻¹である。ある試算によると、世界の食料生産において約6,800 km³ y⁻¹の水が蒸発散により消費



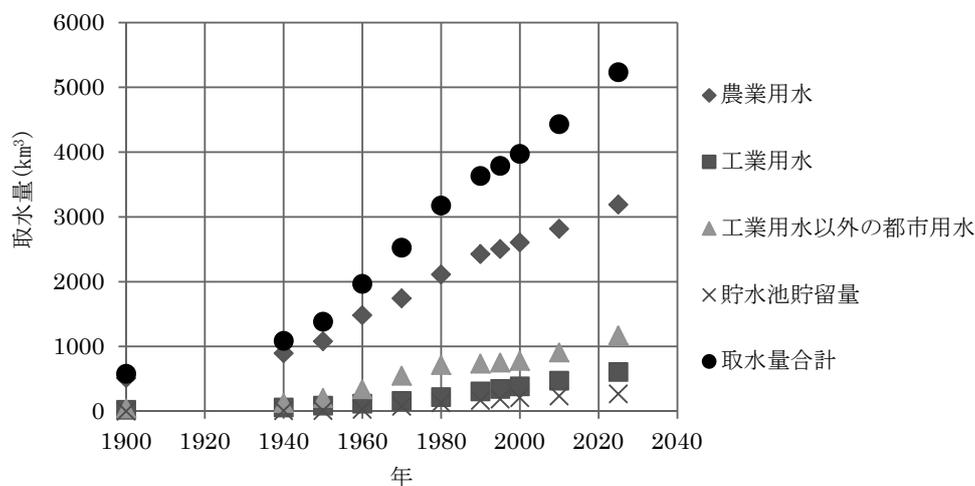
第1図 世界の主要河川流域におけるGWのひっ迫度 (出典：Hoekstra and Mekonnen (2011))

されている。この量のうち、 $1,800 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ は20%の灌漑農地で消費されたGW起源のものであり、残りの $5,000 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ は80%を占める降雨依存農地で消費されたGW起源のものである (Falkenmark and Rockstrom, 2006)。したがって、GWの約7%が降雨依存農地で利用されていることになる。今後、途上国の人口増加に伴う食料不足や飢餓問題を改善していくためには、灌漑農地に加えて降雨依存農地の食料生産性を高める努力が求められ、GWの有効利用が鍵となる。GWは、非生産的な蒸発による消費を極力抑えて、生産的な蒸散による消費が増えるように改善していく必要がある。土壌の肥沃管理、ウォーターハーベスティングなどの土壌・水管理を適正に行えば、蒸発散量に占める蒸発量の割合が減り、かつ収量も増えることにより、降雨依存農地の水生産性は著しく向

上すると考えられる (Falkenmark and Rockstrom, 2006)。

2.3 世界の取水量の推移

第2図は1900年以降の世界の取水量の推移 (実績, 予測) を分野別に示したものである (UNESCO, 1999)。これによると、1900年の $579 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ (うち消費水量 $331 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) から2000年には $3,973 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ (うち消費水量 $2,182 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) と約7倍 (消費水量は6倍) に増加している。取水量 (消費水量) 割合は、農業用水が66% (84%) を占め、工業用水が約10% (2%)、工業用水を除く都市用水が約20% (4%)、貯水池が約5% (10%) となっている。取水量の地域格差は大きく、2000年の世界の淡水使用量の約57%、消費水量の70%はインド、パキスタン、中国など世界の主要灌漑国を抱えるアジ



第2図 世界の部門別取水量の推移 (出典：UNESCO, 1999)

アに集中している (UNESCO, 1999)。また、アフリカ大陸における全取水量の50%は北アフリカが占めている。

2025年には世界の淡水取水量 (消費水量) は、 $5,235 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ ($2,765 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) と2000年の1.3倍 (1.3倍) に増加することが予想される (UNESCO, 1999)。すなわち、世界の淡水取水量 (消費水量) は当面10年ごとに10-12% (約10%) ずつ増えることが予想される。農業用水の取水量 (消費水量) は、灌漑農地が2000年の2.64億haから2025年には3.29億haに拡大すると予測され、 $2,605 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ ($1,834 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) から $3,189 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ ($2,252 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) と1.2倍 (1.2倍) に増加することが見込まれている (UNESCO, 1999)。とりわけアフリカと南米地域において顕著な増加が予想される。工業用水の取水量 (消費水量) は、2000年の $384 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ ($53 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) から2025年には $607 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ ($74 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) と1.6倍 (1.4倍) に増加することが見込まれている (UNESCO, 1999)。工業用水以外の都市用水については、2000年の $776 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ ($88 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) から2025年には $1,170 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ ($169 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$) と1.5倍 (1.9倍) に増加することが見込まれている (UNESCO, 1999)。

2.4 各水利用部門間の取水をめぐる現状と課題

農業用水は多くの国・地域で主要な水利用部門であり、灌漑がそのほとんどを占める。灌漑農業の重要性を示す表現として、「世界の農地の約20%の灌漑農地で、世界食料の約40%が生産されている」(FAO, 2011) と言われるが、このことは灌漑農地の単位面積当たり収量が降雨依存農地のそれの2~3倍高いことを意味し、灌漑の食料生産に及ぼす効果が認識できる。しかし、水資源のひっ迫が深刻化している現在、農業分野の水使用のあり方に対して、強い圧力がかかってきており、農業用水の取水比率は減少傾向にある。

工業用水のほとんどは水循環系に還元するが、化学物質や重金属でひどく汚染される場合も多く、環境面に及ぼす影響が大きい。工業用水の使用量は、今世紀前半は上述のように増加傾向を示すが、各国ともに循環給水システムの導入を目指すことが予想されることから、将来的には減少傾向に転じると考えられる。

生活用水は1人当たり 100 L d^{-1} で十分であり、これを生活用水の基本最小値とする考えがある (Clarke, 1993)。しかしながら、1人当たり取水量は地域格差が大きく、北米と欧州の先進国都市部では $500\sim 800 \text{ L d}^{-1}$ まで達するが、アジア、アフリカ、中南米の発展途上農業国では $50\sim 100 \text{ L d}^{-1}$ と低い (UNESCO, 1999)。さらに、水資源が不十分な地域では $10\sim 40 \text{ L d}^{-1}$ 程度しかない。特にサブサハラ・アフリカにおいては $1.5\sim 50 \text{ L d}^{-1}$ (平均約 10 L d^{-1}) で、その農村部では、人口の2/3に相当する人々が、安全な水を自宅の200m以内に確保できない状況にあるといわれている (Rosen and Vincent, 2001)。

世界の水利用をめぐる最近の傾向と課題について整理すれば、以下のようになる。

2.4.1 水をめぐる国家間の競争の激化

地球上には263の国際河川がある。その流域面積は全陸地面積のほぼ半分を占め、地球上の再生可能淡水供給量の60%を流下させ、世界人口の約40%が生活を営んでいる (Giordano, and Wolf, 2003)。国際河川流域にある国数は145カ国にも及び、各国の人口増加とも相まって、流域関係国間で取水をめぐるし烈な争奪戦が展開されつつある。この傾向は、ヨルダン川、アララ海流域、チグリス・ユーフラテス川、ナイル川、インダス川など乾燥地を流れる国際河川流域においてより深刻である。

2.4.2 再生可能水資源 (河川水) の不足にもなう地下水の過剰揚水

地球上には約 $1,050 \text{ km}^3$ (全淡水の30%) の地下水が存在するが、経済的に利用可能な800m以下に分布するものはその約半分である (環境省, 2110)。灌漑にはこの地下水が利用されるが、涵養量を上回る過剰揚水が行われ、地下水の枯渇が進んでいる帯水層が多い (インド北西部、アラビア半島、サハラ北部ヌビア帯水層、米国セントラルバレー、オガララ帯水層など)。2000年の地球全体の地下水取水量は $734 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ で、地下水賦存量は毎年 283 km^3 ずつ減少していると報告されている (Wada et al., 2010)。

また、高能力のポンプを備えた深井戸の多用により、従来から乾燥地で活用されてきたカナート

など持続可能な伝統的地下水利用システムの機能が損なわれるケースが見受けられる。カナートは優れた技術であり、世界的にその保全管理に努めていく必要がある。

2.4.3 水をめぐる都市と農村の競合（都市による水資源の囲い込み）

この傾向は、灌漑農地を多く抱えるアジア地域において顕著である。都市（都市用水）は経済力を背景に、農村（農業用水）から水利権を買い取るケースが多い。米国のコロラド州、オーストラリア、メキシコなどでは農業用水から都市用水への水利権譲渡が認められている。

2.4.4 環境保全からの水使用の制約（環境保全分野への水配分の増加）

環境保全への水配分の割合は、先進諸国を中心に顕著な増加傾向にある。米国カリフォルニア州で新規に農業用に開発された水資源量のうち、環境保全への水配分割合が農業用水への水配分割合を上回った事例もある。

2.4.5 気候変動による水資源の将来的不安定化

IPCC第4次・第5次評価報告書（IPCC, 2007；IPCC, 2014）によれば、中東、アフリカ南部、北アメリカ西部、ヨーロッパ西部などの乾燥地では、水資源賦存量（総降水量－総蒸発散量）が10～30%減少すると予想されている。したがって、農業が干ばつの影響を受ける頻度は増大し、その範囲も拡大することが予想される。

乾燥地ではさらに、干ばつの発生頻度の増大と同様に洪水の発生頻度も高まり、洪水リスクが増大すると考えられる。特に、干ばつで植生が減少した状態で、強度の大きな降雨の発生頻度が増大すれば、直接流出成分が増えて基底流出成分が減少する。このため、低水時の河川水利用が困難になる。

また、温暖化により氷河の融解時期が早期・長期化し、融解量が増えることにより、氷河の縮小が進んでいる。乾燥地を流れる河川のなかで、氷河を源流としているものは多く、氷河の縮小が、各流域で営まれている灌漑農業、生活の持続可能性に及ぼす影響はすこぶる大きい。

2.4.6 依然として低い灌漑効率

灌漑効率は、灌漑地区において水源から供給さ

れる水量のうち作物に有効に吸収される水量の割合であり、送配水路系の送配水効率と圃場での適用効率の積によって表される。灌漑方法は地表灌漑、スプリンクラー灌漑、マイクロ灌漑に分類できる。このうちマイクロ灌漑（局所灌漑）は、パイプラインを介して低圧で水を各作物体にピンポイントで効率よく供給する方式で、適用効率の高い灌漑方法である。送配水路系が開水路で灌漑方法が地表灌漑である地区では灌漑効率が30～42%、送配水路系が管水路でスプリンクラー灌漑を採用した地区では70%強、管水路とマイクロ灌漑を適用した地区では86%と報告されている（Rohwer, et al., 2007）。ますます厳しくなる水不足に対処するためには、灌漑効率を高めて消費水量を減らし、用水量を減らすことが重要である。

2.5 非従来型水資源の開発の重要性

従来型の水資源のひっ迫に伴い都市排水（グレイウォーター）の再生利用と、海水・塩水の淡水化利用が積極的に推進されるようになっている。何れも逆浸透膜（RO）技術の目覚ましい進歩に基づくもので、先進国、中東産油国を中心に普及している。ROによる高度処理水を帯水層に注入して涵養した後、それを揚水して生活用水、灌漑用水として再利用するシステムが多く見られる。その代表的なものが、米国カリフォルニア州オレンジ郡衛生管区（OCSD）と同水道管区（OCWD）が連携して運営している高度処理水を地下水涵養するシステム（GWRS）（Markus and Deshmukh, 2010）、およびイスラエルのシャフダン排水処理施設（Ministry of Industry Trade and Labor of Israel, 2013）である。

海水・塩水の淡水化でもイスラエルは低コスト化に成功している。アシュケロン淡水化施設は、世界最大の逆浸透膜施設で1日32万 m^3 の生産能力を持ち、1 m^3 当たり0.57ドルで生産している。この施設で、イスラエルの総消費水量の5～6%を生産しているという（Ministry of Industry Trade and Labor of Israel, 2013）。

3. 持続可能な灌漑農業と水資源利用に向けて

3.1 地球温暖化が水資源に及ぼす影響とその対策

3.1.1 干ばつの頻発

干ばつの影響を受ける頻度は増大し、その範囲も拡大することが予想される。したがって、干ばつに対する高精度早期警報システムの活用はもとより、非従来型水資源の活用等水資源の多様化、灌漑システムの整備、より効率的な水利用、節水技術の導入、降雨依存農地においてはウォーターハーベスティング (WH)、洪水利用等の導入を積極的に進めるべきであろう。

3.1.2 洪水の頻発（低水利用型灌漑から洪水利用型灌漑へ）

温暖化により、乾燥地を中心に今まで恒常河川であったものが季節河川あるいは間欠河川に転じる傾向が強くなると懸念される (IPCC, 2014)。したがって、河川の低水利用が困難になり、洪水利用を前提とした水利用・灌漑技術を構築していく必要がある。また、洪水を効率よくストックできる貯水池、地下水涵養ダム等の活用が有効と考えられる。

3.1.3 土壌侵食による土壌の劣化

IPCC第5次評価報告書 (IPCC, 2014) によれば、地球規模での推定において (CO₂濃度が2倍になると仮定して)、土壌侵食は1980年代に比べて2090年代までに約14%増えると推定されている。特に、もっとも土壌侵食が増えると予想されるのは半乾燥地域であり、オーストラリアやアフリカでは、40～50%も増えると推定されている。農地においては、そこで行われている土地管理法によって大きく左右される。例えば、中国の黄土高原で従来型の土地管理法を継続する場合、2010～2039年の間に-5～195%も土壌侵食量が増えるが、保全的耕起法の下では26～77%まで抑えることができる。土地管理法は流域レベルで土壌侵食を軽減するが、21世紀末には、気候変動が土壌侵食に及ぼす影響が、土地利用の変化が土壌侵食に及ぼす影響の2倍も大きいと推定される。温暖化の影響が大きいものの、この問題を少しでも

軽減していくためには、土壌侵食防止工法の適用や雨水・洪水利用を前提とした土壌の保全と管理に関する技術を構築していく必要がある。

3.1.4 地下水補給量の減少→地下水賦存量の減少

乾燥亜熱帯地域のほとんどでは、地下水補給量が減少し、地下水涵養量、地下水賦存量が減少すると予想されている (IPCC, 2007; IPCC, 2014)。また、温暖化に伴い降水量に占める降雪量の割合が減少していく傾向にあることも、地下水涵養量の減少に影響する。今までにも増して、地下水の過剰揚水を避けるための監視体制を整備し、その保全管理に努めていく必要がある。なお、海岸帯水層においては、海面上昇よりも、人為的な揚水の影響の方がはるかに大きいいため、揚水量が少なくても海水の侵入を招き汚染される危険があるので注意を要する。

3.1.5 氷河の早期融解と縮小

温暖化により氷河の融解時期が早まり、融解量が増えることにより、氷河の縮小が進んでいる。氷河が平衡状態にあれば、寒冷年あるいは湿潤年には水を貯留し、温暖年には放流することにより、水資源の経年変動を低く抑える機能を有する。しかしながら、氷河が縮小すればその影響力は低下し、水供給がより不安定なものとなる。温暖化がこのまま進めば、それに伴い氷河の単位面積当たり融解量が増加し、氷河面積が激減していく。中国の氷河の場合、年間融解量は2010～2050年の間に最高になると推定されている (IPCC, 2014)。乾燥地を流れる河川の中で、氷河を源流としているものは、インダス川、ガンジス川、アマダリア川、シルダリア川、イリ川、黄河など多い。氷河の後退が、各流域で営まれている灌漑農業、生活の持続可能性に及ぼす影響はすこぶる大きい。

特に懸念されるのは、上流から下流に至るまで灌漑農業が行われている河川流域での水質問題である。上流側の灌漑農地からの排水は、次々と河川下流域に還元するため下流側ほど河川水の塩類濃度は高くなる。このような河川の源流で氷河が後退あるいは消滅すれば、河川流量が大幅に減少するとともに、河川水の塩類濃度が急上昇し、下流域の灌漑農業は立ち行かなくなる。

水河の動向と河川流域への影響を追尾・監視するための体制を早急に整備し、対策を詰めていく必要がある。

3.1.6 塩害発生頻度の増大

塩害は、地中の塩類が地表に上昇し、土壌の塩類濃度が高まることによって起こる。これは自然に起きる現象であるが、乾燥や地表面の裸地化、地下水位を上昇させる過剰な灌水によって増幅される。したがって、温暖化は塩類集積を助長し、塩害発生頻度を増大させることになる。加えて、集積した塩類を溶脱するためのリーチング用水の確保が困難になるため、適切な対策を講じておく必要がある。

4. 乾燥地で期待できる持続可能な灌漑農業・水資源利用

4.1 地表水と地下水の複合利用

地表水と地下水の複合的な利用形態は、持続可能な水利用技術として有効と考えられる。この方法はパキスタン、インド、エジプト、アメリカなどの乾燥地で広く用いられている。パキスタンのパンジャブ州の場合、大規模な地表灌漑に加えて、排水目的で設置した管井を給水目的にも活用できるようにした給排水統合システムである。

大規模な地表灌漑で調整しきれなくて生じる地下水位の上昇、土壌水分の過剰を管井で制御して、加湿・湛水状態（WL）を防止し、かつ地表水に不足が生じた場合は余剰な地下水を揚水して有効土層の水分不足を補うことのできる完結型のシステムである。いわば地下の帯水層に貯留施設を持った灌漑システムで、需要に応じた柔軟な水供給が可能である。地表水に余剰が生じた場合には、帯水層の貯留能力を活かしてストックしておき、河川からの取水を平滑化し、不足分は地下揚水で補う。また、地下に貯留することで蒸発損失が削減でき、地下水涵養が行えるので、基底流量の増加に寄与することもできる。地下水位制御のため揚水した水は、その水質に応じて灌漑、リーチング等に利用する。

地表水と地下水の複合利用は、両者を水循環の一連のものとして捉え、余剰地表水の地下への涵養・貯留、地表水不足時の地下水の揚水利用、地

下水位の異常な上昇抑制のためのポンプ排水等、適切な管理が時空を越えてできるというところにその特徴がある。地下水の水質保全が前提となるので、システムの慎重な監視と管理が求められる。

4.2 地下ダム・地下水涵養ダム

地下ダム・地下水涵養ダムは、乾燥地の水資源を効率的に利用していく上で、有効な方法であり、気候変動に伴う水資源の将来的な不安定化に対処していく上で、活用可能な技術である。上述のように、乾燥地では干ばつや洪水はそれぞれ頻発する傾向にあるため、洪水時の流出水、降雨時の雨水をストックしておき、干ばつ時に利用するという水利用の平滑化が不可欠である。

可能蒸発散量が $2,000 \text{ mm y}^{-1}$ を超える乾燥地では、地表ダムの場合蒸発損失が大きく貯水効率が著しく悪くなる。しかも、地表ダムの場合、激しい水面蒸発による貯水の塩類濃度の上昇、水が媒介する伝染病（マラリア、住血吸虫症など）の発生なども懸念される。

その点、地下ダム、地下水涵養ダムは、このような問題は懸念する必要がなく、雨季に捕捉した洪水、雨水を乾季まで健全にストックできるので、今後乾燥地あるいは砂漠化地域の水資源確保の有効な手段として注目される。

4.3 水蒸気の利用

ユニークな水資源の形態として、大気中に存在する水蒸気がある。特に、冷涼海岸砂漠地域では沖合を流れる寒流の影響で、ほとんど雨が降らないが、霧が発生し易く、動植物の生育を可能にしているところも多い。冷涼海岸砂漠に類するアタカマ砂漠に位置する南米のペルー、チリの海岸部ではフォッグトラップを用いて霧から水分を集める水利用が行われてきた。

従来から、網板状のペルー方式、網板を円筒形にしたチリ方式があるが、最近では、例えば縦 $2\text{m} \times$ 横 24m (48 m^2)あるいは縦 $4\text{m} \times$ 横 12m (48 m^2)などの平面型のナイロン網目のコレクターが多く用いられている。このタイプでは網目パネルの底部に設置した樋で集水する。チリではこのタイプのコレクターが網目の素材等により、ラッ

シェル網目 (Raschel mesh) などという商品名で販売されている (UNEP, 1998)。チリとペルーの霧の発生頻度は、それぞれ年間365日、210日であり、平均集水量はそれぞれ $3.0 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ および $9.0 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と報告されている (UNEP, 1998)。集霧効率は季節的には春～夏に高く、冬に低い。場所的には、霧が風によって内陸に動いている海岸地域でもっとも効率よく集霧できる。また、この技術は標高400～1200m付近の層積雲に存在する水を集水することも可能であり、山岳地域における多目的の水供給にも適用できる。

この方法はチリ、ペルーのほか、ナミブ砂漠、モーリタニア西岸部、オーストラリア西部海岸部、北米カリフォルニア半島などで適用可能である。

4.4 排水の再利用・再生利用

水資源の逼迫が顕著で、新たな淡水資源の経済的開発が限界に達したかに見える今日、都市下水・排水も貴重な水資源として見直す必要がある。特に、乾燥地においては、河川の基底流における下水・排水の比率は高まる一方で、好むと好まざるとを問わず下水・排水を高度処理して、再資源化する必要性に迫られている。近年、逆浸透膜法 (RO) の技術革新・低コスト化が進み、造水コストの一層の低減に関しても明るい見通しが得られるようになってきた。先進地域である米国、イスラエルで見られるように、RO法を基幹とする下水・排水の再生処理は今後さらに増えると考えられる。イスラエルのシャフダン排水処理・再利用施設は、年間約 0.13 km^3 ($34 \text{ 万 m}^3 \text{ d}^{-1}$ ：イスラエルの総排水のほぼ3分の1に相当)の排水を浄化し、一旦帯水層へ涵養して最低90日間滞留させた後、揚水してパイプラインで南部のネゲブ砂漠方面へ送水し、灌漑に利用される。

排水の再利用も今後積極的な取り組みを行う必要がある。再生可能な水資源に限界のあるエジプト・ナイルデルタでは、その対策として排水を希釈利用して不足する用水を確保しようとする施策が取られている。デルタ内では大規模な排水再利用が行われている。また、同国のメガプロジェクトである北シナイ農業開発計画も、ナイルデルタで生じた排水を再利用する前提で進行中である。

この計画では、ナイル川の水と二つの排水路の水を1：1の割合で混合し、エルサラーム水路でスエズ運河東側のシナイ半島北部に年間 4.45 km^3 を送水し、総面積16.8万haの灌漑に利用することになっている。排水の希釈による再利用においては、希釈後の塩分濃度を $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ 以下に管理することが重要である。また、排水再利用を行うことによる土壌、作物および地下水に及ぼす長期的影響については、今後慎重に監視する必要がある。

4.5 先進的節水灌漑—マイクロ灌漑

乾燥地で安定的な農業生産を行うためには、作物への水の供給 (灌漑) は不可欠の条件である。しかしながら、乾燥地での灌漑行為は必ず塩類集積を誘発する。塩類集積をできるだけ軽減するためには、節水灌漑がその基本となる。例えば、点滴灌漑のような灌漑効率の高い精緻な灌漑を行う場合は、排水の負荷が軽減され、塩類集積の影響も軽微で済み、塩類の集積状況をみながら適度にリーチング (溶脱) を行えばよい。この場合、排水対策にさほど経費を費やす必要がない。

一方、灌漑効率の低い水盤灌漑などの地表灌漑を行う場合、排水の負荷が大きくなり、塩類集積も無視できなくなる。このため、排水対策に多額の経費を費やす必要がでてくる。すなわち、乾燥地で安易に地表灌漑を前提とした安価な灌漑計画を選択すれば、完成後塩類集積問題が深刻化する場合が多く、その事後対策として排水改善のために多額の投資を余儀なくされる。この場合、大規模な計画ほどより高い代償を払わされることとなる。パキスタンのインダス川沿岸では、毎年農地の排水対策に多額の経費負担を強いられている。

現在実用段階の灌漑方法で、最も効率の高いものは点滴灌漑法であり、次のような特長を有する：①低圧で灌水を行うため、土壌面蒸発を制限し、水の浪費を最小限に抑えることができる。またシステムを用いて肥料や薬液を供給するため、②肥料や薬液の必要量を減らし、作物の疫病に対する予防・制御能力を効果的に高めることができる。灌漑計画の立案に当たっては、事情が許せば先進的な節水灌漑を基幹にすべきで、そのことが事後の問題発生リスクを軽減する。

4.6 水生産性を最大にする節水灌漑—不足灌漑

乾燥地において、持続可能で有効な灌漑方法として注目されているのが、不足灌漑 (DI) である。不足灌漑は、乾燥地など水資源がひっ迫する地域において、供給水量をぎりぎりまで抑えて供給する灌漑方法で、水生産性が最大になること(単位水量当たりの収量が最大になること)、かつ収量を最大化するよりもむしろ安定化することを目標として行われる。収量の減少およびその結果として生じる経済的損害をできるだけ抑えつつ、供給水量を可能な限り切り詰めるのが不足灌漑である。

DIについての研究は、乾燥地を対象に数多く行われているが、多くの作物において極端な収量減をもたらすことなく、水生産性を高めることの可能性が確認されている。しかしながら、季節によってはある程度最低限の水分量は確保されることが前提となる。作物の乾燥耐性は遺伝子型と生育段階によってかなり変動するので、DIの実施には、乾燥ストレスに対する作物の応答について正確な知識が必要となる (Geerts and Raes, 2009)。

不足灌漑を達成させるうえで、よく取られる栽培方法として、次のようなものがある。

- 1) 収益性の高い区画から順に灌水を行う方法：作物の生育状態と収穫日に応じて、優先順位が低くて灌水量をそう多く必要としない区画の灌水を削減して、より収益性の高い区画から優先的に灌水を行う方法である。
- 2) 期待収量に基づいて区画の灌水を優先配分する方法：収量があまり見込めない区画の灌水を減らし、高収量が期待出来る区画には期待値に応じて優先的に供給する方法である。
- 3) 生育の劣る作物個体を取り除き (間引き)、灌水の無駄を無くす方法。
- 4) 作物用水量を減少させるため、土壌面蒸発を極力なくす方法。

5. おわりに

水利用は人類が生存していく上で、不可欠な活動であるが、一方で環境の劣化の原因ともなる両刃の剣であることを、十分に認識しておかなければ

ならない。私達は、持続可能な水利用のあり方について、気候風土にうまく調和し、地域で伝承されてきた世界各地の伝統的水利用から多くを教えられる。一方で、特に近世の大規模計画の失敗例からも多くを学ぶことができる。失敗例の多くに共通していることは、計画が利他的であることだ。事業のライフサイクルが非常に短く、次世代への配慮が欠落しており、結局は負の遺産を次世代に残すことになる。有限な水資源を活かすも殺すも私たち人間次第であり、次世代に配慮した可逆的で持続可能な賢い水利用システムの構築に向けて、知識・英知を結集していく必要がある。

その意味でも、水資源管理の効率性を適切に表現できる新たな評価指標を開発し、国レベル、地域レベルの水管理のあり方を評価するなど、政策決定にも適用していくことは意義がある。ヴァーチャルウォーター (VW) やウォーターフットプリント (WF) の概念は、一般人に対しても説得力があり、限りある水資源を保全し、有効で賢明な利用をグローバルに展開していくうえで、有効なツールになると期待される。水資源の乏しい乾燥地においては、食料の安全保障は必ずしも自給に固執せず、VWやWFの観点から、輸入を含めた経済的な食料確保戦略を柔軟な発想で考えることも大切である。

引用文献

- 1) Clarke, R. (1993): *Water--The international crisis*, The MIT Press, Massachusetts, p8.
- 2) Falkenmark, M. (1977): Water and Mankind ? A Complex System of Mutual Interaction. *AMBIO*, 6(1).
- 3) Falkenmark, M. and Rockstrom, J. (2006): The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129-132.
- 4) FAO (2011): *The state of the world's land and water resources for food and agriculture: managing systems at risk (SOLAW)*, 285p.
- 5) Geerts, S. and Raes, D. (2009): Deficit irrigation

- as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96 (9) : 1275-1284.
- 6) Gidrometizdat (National Committee for the IHD, USSR) (1974): *World water balance and water resources of the earth*. Leningrad, 638p.
 - 7) Giordano, M.A. and A.T. Wolf. (2003): Sharing waters: Post-Rio international water management. *Natural Resources Forum*, 27(2). pp. 163-171.
 - 8) Hawksworth, D.L. and Bull, A.T. (2006): *Marine, freshwater, and wetlands biodiversity*. Springer, Dordrecht, The Netherland.
 - 9) Hoekstra, A.K. and Mekonnen, M.M. (2011): Global water scarcity: monthly blue water footprint compared to blue water availability for the world's major river basins. *Value of Water Research Report Series*, No.53. UNESCO-IHE, Delft.
 - 10) IPCC (2007): *Summary for policymakers*. 27p.
 - 11) IPCC (2014): *Summary for policymakers*. 32p.
 - 12) 環境省 (2110) : 環境白書 (平成21年版) .
 - 13) Markus, M. and Deshmukh, S. (2010): An innovative approach to water supply—The groundwater replenishment system. *World Environmental and Water Resources Congress 2010*, pp. 3624-3639. doi: 10.1061/41114(371)369.
 - 14) Ministry of Industry Trade and Labor of Israel (2013): *Water: the Israeli experience: the national water program*.
 - 15) Rohwer, J., Gerten, D. and Lucht, W. (2007): Development of functional irrigation types for improved global crop modelling. *PIK Report*, No. 104. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
 - 16) Rosen, S. and Vincent, R. (2001): Household water resources and rural productivity in Sub-Saharan Africa: a review of the evidence, *African Economic Policy Discussion Paper*, No. 69.
 - 17) The World Bank (2005): *Irrigation and drainage: rehabilitation, Water Resources and Environment (Technical Note E.2)*, The World Bank, Washington, D.C.
 - 18) The World Bank (2010): *2010 World development indicators*. The World Bank, Washington, D.C.
 - 19) UNDP, UNEP, The World Bank and WRI (2000): *World resources 2000-2001: people and ecosystems*. Elsevier Science, Oxford, UK.
 - 20) UNEP (1998): *Sourcebook of alternative technologies for freshwater augmentation in Latin America and the Caribbean*. Nairobi: UNEP, 125p.
 - 21) UNESCO (1999): *World water resources at the beginning of the 21st century, prepared in the framework of the UNESCO*.
 - 22) Wada, Y., van Beek, L.P.H., van Kempen, C.M., Reckman, J.W.T.M., Vasak, S. and Bierkens, M.F.P. (2010): Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37, L20402.

塩類土壌における耐塩性の高い植物の利用

安 萍^{1*} 邵 揚¹ 松浦 朝奈² 井上 知恵³

キーワード：塩類土壌，塩生植物，栽培技術，植物選抜，農業利用

1. はじめに

塩類土壌は世界中に広く分布しており，全ての大陸に塩類土壌がある。世界中の塩類土壌の総面積は，日本国土面積の約10倍であり，塩類化の最も深刻な地域はアジア太平洋地域である（表1，FAO, 2016）。中でも，中央アジア，中東地域の国々

第1表 世界塩類土壌の分布

Regions	Total area	Saline soil	%
Africa	1899.1	38.7	2.0
Asia-pacific region and Australia	3107.2	195.1	6.3
Europe	2010.8	6.7	0.3
Latin America	2038.6	60.5	3.0
Near East region	1801.9	91.5	5.1
North America	1923.7	4.6	0.2
Total	12781.3	397.1	3.1

が土壌の塩類化が極めて深刻である。

土壌の飽和抽出液のECは，2dS/m以上であれば塩類土壌になる（Abrol et al., 1988）。塩含有率によって地上の景観が異なる。塩含有率の低い土壌（EC<4dS/m）は，作物の収量が低下するが畑として利用することが多い（写真1）。塩含有率が中程度の土壌（EC4-8 dS/m）は，土壌をリーチングしてから作物栽培に利用する場合もある（写真2）。高塩含有率の土壌（EC8-16 dS/m）は，作物栽培ができず，塩生植物が生育する景観が多い（写

真3）。最も塩含有率の高い土壌（EC>16dS/m）は，塩生植物でも生育できず裸地のままの場合が多い（写真4）。農地の二次塩類化により，深刻な場合は農地を放棄することがある。



写真1 中国河北省南皮県塩性土壌でのコムギ畑。



写真2 ウズベキスタン国シルダリア洲塩性土壌の畑をリーチングする様子。



写真3 中国河北省黄驊県塩生土壌に生育する塩生植物。

¹ 鳥取大学乾燥地研究センター（〒680-0001 鳥取市浜坂1390）

² 東海大学農学部（〒862-8652 熊本県熊本市東区渡鹿9-1-1）

³ 神戸大学農学部（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）



写真4 中国新疆ウイグル自治区の塩生土壤。

2. 塩類土壤での植物

植物は塩性条件下での成長反応によって、大まかに塩生植物と非塩生植物に分類される (Lin, 2004)。塩生植物は塩類土壤でも成長が維持され、一生を完結できる。一方、非塩生植物は塩類土壤では成長が抑制され、死に至る場合もある。植物に対して、高濃度の塩は根の周りの浸透ポテンシャルの低下、高濃度のナトリウムの毒性、植物が吸収する栄養素のバランスの破壊、土壤の硬化などの害を及ぼす (Dudley, 1992)。すなわち、発芽、苗立ち、栄養成長、開花、生殖成長、果実と子実の形成など、全ての成長過程を阻害する。これらの過程は、細胞分裂、伸長、器官形成、細胞質内の生理生化学代謝が阻害されるために起こるのである (Munns, 1993)。

塩類土壤、特に塩含有量の高い土壤は、ほとんど利用されていないのが現状である (An et al., 2013)。一方、全世界では、1600種以上の塩生植物があり、食用・薬用・牧草・緑化・木材・炭・脂質・繊維・芳香剤・バイオ燃料・土壤の除塩などに利用することができるものもあると考えられる (Aronson, 1989)。塩類土壤の野生種は、現地の環境に適しているため、経済価値の高いものを選抜できれば、大規模な栽培化が可能である。これらの土壤の農業利用が可能になれば、環境に大きな負荷をかけることなく、農地の拡大を通じて地域経済の発展に貢献できると考えられる。

3. 塩生植物の栽培利用

野生種の塩生植物を作物として大規模に栽培するには、3つの課題、すなわち、1) 経済価値の高い塩生植物の選抜、2) 利用価値の高い塩生植物の生態生理特性の解明、3) 地下水の塩水を利用した栽培技術の確立、を解決する必要がある。1) については、現地住民からの伝統知識や利用法を聞き取り、また資料検索などによって植物に関する情報を収集し、利用価値の高いものを選定するという基礎的な調査が必要である。2) と3) については、有望な植物種について対象となる形質を研究し、植物の生理学的生態学的特性を把握し、その上で栽培技術を開発する。これらの研究内容は農学分野の研究者が貢献すべき課題である。

私達は塩生植物 *Suaeda salsa* について研究調査をした結果、本植物は野菜、飼料、土壤の除塩および燃料作物に利用できることを明らかにした。栽培実験の結果によると、本植物はリン吸収能力はとても高く、NaCl 500 mM条件下でも体内のリン含有量は正常レベルを維持することができた。このことは、本植物を栽培するときリン酸肥料を軽減できると示唆された。漢方薬のクコよりも薬用効果と健康増進効果があると言われた黒果クコ (*Lycium Ruthenicum*) はNaCl 100mMの条件下でも発芽できることが発見され、高塩濃度の土壤でも播種が可能とのことが示された。このように塩生植物について研究を積み重ねることで、現地環境に相応しい、収量と経済価値の高い有用植物を特定できると期待される。

塩類土壤が広く分布している地域で、塩生植物がこれまで大規模に栽培利用されていなかったのは以下の制限要因が推測される。1) 食糧生産が強調され、主要作物以外の作物の栽培は重視されなかった、2) 栽培技術が十分開発・普及されていない、3) 消費者のニーズと販路が確立されていない。農学分野の研究者には特に経済価値の高い塩生植物の探索とその栽培技術の開発・確立が求められている。

引用文献

- 1) Abrol, I.P., J.S.P. Yadav, F.I. Massoud: Salt Affected Soils and their Management (chapter 3), *Fao Soils Bulletin* 39, FAO, Rome, 1988
- 2) An, P., S. Kajiwara, T. Inoue, X. Li and S. Inanaga: Cultivation of halophytes in saline soils, *Sand Dune Research*, 60(1), 9-18 (2013)
- 3) Aronson, J.A. Haloph-A data base of salt tolerant plants of the world, Office of Aid Sudies. Turson, Arizona: The University of Arizona (1989)
- 4) Dudley, L.M.: Salinity in the soil environment. Pp. 13-30. In: Handbook of Plant and Crop Stress. (Eds. Pessaraki, M.), Marcel Dekker, New York (1992).
- 5) FAO, Soil Portal (2016) <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>
- 6) Lin, X. Halophytes Research, Science Press, Beijing (2004)
- 7) Munns, R.: Physiological Processes Limiting Plant Growth in Saline Soils: Some dogmas and hypotheses, *Plant Cell Environment*, 16: 15-24 (1993)

砂漠化と乾燥地の緑化

山中 典和

1. 乾燥地の無い日本で乾燥地を考える

乾燥地は世界の陸地面積の約41%を占めている。そこには世界人口の約3分の1にあたる人々が暮らしており、砂漠化や干ばつなど、解決すべき問題が数多く存在している。私たちの暮らす日本は、雨の多い国で乾燥地ではない。砂丘は有るが、砂漠は無いのである。乾燥地で生じている問題は日本人の大多数にとっては、遠い国で生じていることであり、時たまニュースで知る程度である。しかし、乾燥地で生じている様々な問題は私たちの暮らしと、実は無関係ではない。国境を越えて、大陸の乾燥地から日本にやってくる黄砂問題もその一つである。

黄砂は、乾燥地で生じている問題が直接日本に影響を与える例である。古くから日本にやってくる黄砂だが、近年PM2.5の問題と合わさって、私たちの健康に与える影響が注目を集めるようになってきている。鳥取は日本海を間に挟んで大陸と向き合っており、まさに黄砂が最初に日本に到達する地域である。

また、経済のグローバル化により、私たちが日々に口にする食料にも乾燥地由来のものが多く含まれるようになってきた。乾燥地での農業が干ばつなどにより被害を受けると輸入国である日本にも影響が及ぶことになる。

さらに日本は、国際条約である「砂漠化対処条約」の締約国でもあり、国際社会の一員として乾燥地における問題に取り組む責務を負っている。乾燥地で生じる砂漠化や干ばつ等の問題は人類共通の解決すべき課題であるとともに、乾燥地のない日本としても真剣に取り組むべき問題でもある。

鳥取大学乾燥地研究センター（〒680-0001鳥取市浜坂1390）

2. 乾燥地が抱える環境問題 “砂漠化”

砂漠化とは、「乾燥地域、半乾燥地域及び乾燥半湿潤地域における種々の要素（気候の変動及び人間活動を含む）に起因する土地の劣化」と砂漠化対処条約に定義されている。

ここに示されているように、砂漠化は気候変動や人間活動によってもたらされるが、特に影響が大きいとされているのが、人間活動としての「過放牧」、「過耕作」、「過伐採」等である。これらの要因により、まずは土地の表面を覆っている植生の劣化が引き起こされ、土壌流亡のような土壌劣化につながってゆく。

「過放牧」とは、放牧する家畜の数が適正数よりも多くなることである。草原の場合、家畜の放牧により草資源が消費される。これが過放牧状態になると、家畜による資源消費が草原の回復力を上回るようになり、草の密度や草丈が低下し、極端な場合には土地の裸地化を引き起こす（写真1）。



写真1. 過剰な放牧により、地面が裸地化する（中国内モンゴ）

東アジアの草原地帯で植生の劣化が進み、植生による土地の被覆が破壊されると、強い風が直接土壌を侵食し、いわゆる砂嵐が出現する。強風により空中に舞い上がった細かな土の粒子が黄砂となり、風下域の日本にも降ってくる。

「過開墾」とは、耕作地の過剰開発である。食料増産を目指し、自然植生を耕作地に転換することが続けられているが、一歩誤ると、深刻な土壌流亡が引き起こされる。

中国の黄河流域に広がる黄土高原では、陝西省の延安地区を中心として自然植生としての森林伐採が激しくなり、森林消失が顕著になった。さらに伐採後の樹木根系もきれいに抜き取って畑地の造成が盛んに行われた。まさに、“耕して天に至る”の例えのように、山頂まで耕作地が拡大していった。その結果、乾燥地の少ない雨が地面を侵食し、せっかく整備された耕作地も侵食により失われつつある（写真2）。



写真2. 過開墾により、土壌侵食が深刻化する（中国陝西省）

「過伐採」とは森林資源の過剰な収奪のことである。乾燥地でも森林が成立する地域では、用材利用を目的とした直接的な森林伐採、焼畑目的の火入れ、あるいは畑地拡大のための森林伐採等によって、森林の消失あるいは質の低下が引き起こされる。

途上国では、エネルギーを森林資源に依存して



写真3. 日々の食事のために木材資源が使われる（アフリカ・マリ共和国）

生活している人々が多く存在する（写真3）。日々の食事を作るのに必要な薪炭材の採集にしても、採集量と森林の再生力のバランスが取れている間は大きな問題とならないが、森林の再生力を上回る量の資源収奪を続けると、資源量の低下を引き起こし、極端な場合は土地の裸地化につながる場合も少なくない。

3. 砂漠化の解決に向けた取り組み

砂漠化の解決には、まず植生劣化を防ぐための総合的な取り組みが必要である。特に、植生劣化の背景にある人口問題や貧困など、乾燥地の国々が抱える社会問題の解決が不可欠である。さらに砂漠化を引き起こす要因それぞれに対応した対策が必要となる。過放牧に関しては、植生の劣化につながらないような適正な家畜の頭数管理が必要であり、過伐採に関しては、過剰に森林資源を採取しなくては生活が成り立たない状況を改善してゆくことが大切である。例えば、食事を作る“かまど”を改良し、燃焼効率を向上させることで薪炭材の消費を抑えることができ、植生劣化の防止にもつなげることができる。アフリカ等を中心に燃焼効率の良い“改良かまど”の普及が進められている。

また、緑化は砂漠化の対処療法として最も有効な手段の一つであり、様々な国で、緑化を通じた砂漠化の防止や対処が行われている。しかし、砂漠化対処のための緑化といっても、その内容は様々である。木を植えることを例にとっても、環境改善のための風食防止、水食防止、塩類集積防止等の目的があり、より人々の生活に身近なものとして、住居や町の周りを囲む防風林の造成や、人々が憩う木陰の創出も重要である。さらに、樹木の利用を目的とした植林でも、用材利用から、薪炭材利用、果実や種子の利用など多様な目的が存在する。

日本に最も近い乾燥地を有する国である中国では、緑化を通じた砂漠化対策が盛んに行われており、緑の長城計画と呼ばれている長大な緑化ベルトの造成や、過耕作の管理と緑化による砂漠化対策を目指す退耕還林・還草政策などが進められて

いる。

乾燥地の無い日本も国際協力機構等の機関を通じた砂漠化対策への貢献を続けている。また、青年海外協力隊として、多くの若者が海外の現場で砂漠化と向き合っている。さらに、様々なNPO、NGO等を通じて、多くの日本人が乾燥地での緑化に取り組んでいる。

4. 乾燥地緑化に持続可能性を考える

このように世界各地で進められている乾燥地の緑化であるが、様々な課題を背負っているのも現実である。乾燥地での緑化でまず考える必要があるのは、その地域の自然環境のもとの持続可能性である。現在の技術からすれば、植物が生育できない砂漠でも、灌漑を行うことで緑化することは可能である（写真4）。しかし、広大な砂漠で



写真4. 雨がほとんど降らない砂漠でも、お金と人力を投入すれば緑化は可能である（中国タクラマカン砂漠）

灌漑施設を維持するには膨大な資金と人力を必要とする。このような緑は、資金の投入が滞れば、大部分が消えてゆく運命にある。

現在、世界中で求められているのは、このような、砂漠を緑化することではなく、本来植物が育つ自然環境にありながら、砂漠化してしまった土地を緑化という手段で修復・復元することである。もともと砂漠で植物が生育しない土地を緑化することと、砂漠化した土地を緑化することは意味が異なるということをまず理解する必要がある。

また、砂漠化土地の修復においても、自然環境を考慮し、持続可能な緑化を進めることが大切で

ある。乾燥地で植物の成長を制限する最も重要なものは水であり、水無しで植物を育てることはできない。鍵になるのは、まずは、その土地に降る雨の量である。草原や灌木林しか養えないような雨量のもとでは、水消費の大きな高木を植えることは大きな危険性をはらんでいる。樹木、特に高木は成長するに伴い、水の要求量が大きくなる。植栽直後で、苗がまだ小さい時には、植栽木を養うのに十分な雨量であっても、成長に伴い、樹木が要求する水分量と雨によりもたらされる水の量のバランスが崩れると、せっかく植えた樹木に枯死や成長不良が生じてくる（写真5）。

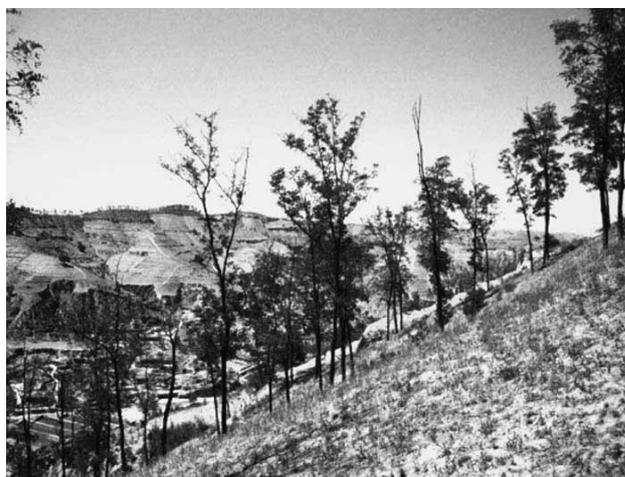


写真5. 枯死や先枯れが広がる乾燥地の植林地（中国陝西省）

基本的な考え方として、本来、森林が成立しないような乾燥地では高木になる樹木はできるだけ植えるべきでなく、元々の自然植生である、草地または灌木群落の回復につながる緑化を考える必要がある。

雨が比較的多く、元々森林が成立していた場所では、高木の植栽も可能である。しかし、乾燥地の厳しい自然環境下では、木を植えるに当たっても様々な考慮が必要である。例えば、地形は植物の生育に必要な環境条件に大きな影響を与える。一つの山を例にしても、尾根の部分は水が少なく、乾燥が進むのに対し、谷部では比較的水分条件が良い。また、斜面の方向についても、北半球では、南斜面が日射を強く受けるために乾燥しやすくなる。このような地形による環境の変化を考慮して、適切な樹木を植栽してゆくことも必要となる（適

地適木植栽)。

また、近年では植栽する樹種について、成長の良い外国からの移入植物を使うのではなく、その土地の環境条件によく適応した、自生の樹種を用いることも求められるようになってきている。

この他、植生の修復、再生には植物のことだけを考えるのでは不十分であり、特に植物の生育に深く関与する土壌中の微生物を考慮した緑化が求められる。最終的にはその土地に最も適応した、植物、微生物、動物等からなる安定した生態系（写真6）を目指した修復、再生へ取り組みが必要である。



写真6. 森林が成立する降水量限界付近の自然林。持続可能性の高い安定した生態系と考えられる（中国陝西省）

参考文献

1. 吉川賢・山中典和・大手信人編：「乾燥地の自然と緑化」共立出版2004
2. 吉川賢・山中典和・吉崎真司・三木直子編「風に追われ水が蝕む中国の大地」学報社2011
3. 恒川篤史他「乾燥地を救う知恵と技術」丸善2014

乾燥地はエネルギー資源の宝庫

田川 公太郎¹

Drylands is rich repository of primary energy resources in the world

Kotaro TAGAWA¹

Summary

In this paper, the current situation of primary energy resources, which includes fossil fuels and renewable energies, is showed to discuss about the energy supply for combating the desertification and greening the desert in dryland. The practical cases about the thermal power, photovoltaic, and wind power generation system for agriculture production in drylands are also introduced to consider the application of renewable energy for greening the desert.

Key Words: primary energy, fossil fuels, renewable energy, electric power generation, desalination, drylands

1. はじめに

乾燥地に豊富に存在するエネルギー資源には、例えば、中東地域の原油や天然ガスなどの化石燃料や、広大な沙漠空間に降り注ぐ太陽エネルギーなどが容易に挙げられる。化石燃料は、世界のエネルギー供給の基盤として世界各国へ供給されている。また、沙漠の太陽エネルギー利用に関しては、太陽エネルギーを電力に変換し、送電ネットワークを連係して世界へ送電することが構想されている (Chatzivasileiadis et al., 2013)。このように、乾燥地は世界のエネルギー供給庫として重要な役割を果たしていると言えることができる。

自然環境の修復や農業生産によって、沙漠を緑に変えていくためには、それに必要な水資源をいかに確保するのが極めて重要となる。機械技術により水資源を確保する手段として、地下水の揚水、灌漑水の供給、海水や塩水等の脱塩処理や下水処理水の利用などが考えられているが、いずれ

も電力の供給が必要となる。

また、乾燥地に位置する開発途上国では、そこに暮らす人々が調理用燃料や暖房用燃料を得ようとして、集落近くの森林や樹木を過度に伐採する。その結果、土地の劣化、植生の減少、農業生産性の低下を引き起こすことになり、人為的に緑を喪失する事態に陥っている。したがって、乾燥地における沙漠緑化を推進するにあたって、豊富に存在する多様なエネルギー資源を有効活用し、水資源を確保するとともに、そこに暮らす人々の生活や社会環境に適応する技術や方策を考慮することも必要と考えられる。

本発表では、乾燥地のエネルギー資源として、主に化石燃料および自然エネルギーの賦存状況について述べ、さらに沙漠緑化へのエネルギー供給に資する自然エネルギー利用技術について話題提供する。

2. 乾燥地の化石燃料—石油を例として—

地球内部から採掘される化石燃料やウラン資源、太陽、風力、水力、地熱等の自然エネルギーを一次エネルギーといい、私たちは一次エネルギーを電気や都市ガスなどの使いやすい形態に転

¹ 鳥取大学地域学部 (〒680-8551 鳥取市湖山町南4-101)

¹ Faculty of Regional Sciences, Tottori University (4-101 Koyama-cho Minami, Tottori, 680-8551, Japan)

¹ Author: tagawa@rs.tottori-u.ac.jp

第1表 世界の主要地域・国における原油生産量および確認埋蔵量

地域・国名	1日あたりの原油生産量 ($\times 10^3$ バレル/日)			シェア (%)	確認埋蔵量 ($\times 10^3$ 百万バレル)			シェア (%)
	2005	2010	2015	2015	1995	2005	2015	2015
北米								
アメリカ	6,900	7,550	12,704	13.0	29.8	29.9	55.0	3.2
カナダ	3,041	3,332	4,385	4.9	48.4	180.0	172.2	10.2
メキシコ	3,767	2,961	2,588	2.9	48.8	13.7	10.8	0.6
計	13,708	13,843	19,676	20.9	127.0	223.6	238.0	14.0
中南米								
ベネズエラ	3,308	2,838	2,626	3.1	66.3	80.0	300.9	17.7
ブラジル	1,713	2,137	2,527	3.0	6.2	11.8	13.0	0.8
その他	2,307	2,373	2,559	3.0				
計	7,328	7,348	7,712	9.1	83.7	103.6	329.2	19.4
ヨーロッパおよびユーラシア								
ロシア	9,597	10,366	10,980	12.4	113.6	104.4	102.4	6.0
カザフスタン	1,294	1,676	1,669	1.8	5.3	9.0	30.0	1.8
アゼルバイジャン	445	1,023	841	1.0	1.2	7.0	7.0	0.4
ノルウェー	2,961	2,136	1,948	2.0	10.8	9.7	8.0	0.5
イギリス	1,843	1,361	965	1.0	4.5	3.9	2.8	0.2
その他	1,383	1,137	1,060	1.2	5.8	5.5	5.0	0.2
計	17,523	17,699	17,463	19.4	141.2	139.5	155.2	9.1
中東								
サウジアラビア	10,931	10,075	12,014	13.0	261.5	264.2	266.6	15.7
イラク	1,833	2,490	4,031	4.5	100.0	115.0	143.1	8.4
イラン	4,216	4,420	3,920	4.2	93.7	137.5	157.8	9.3
アラブ首長国連邦	2,919	2,895	3,902	4.0	98.1	97.8	97.8	5.8
クウェート	2,668	2,561	3,096	3.4	96.5	101.5	101.5	6.0
カタール	1,151	1,638	1,898	1.8	3.7	27.9	25.7	1.5
その他	1,831	1,748	1,237	1.5				
計	25,549	25,827	30,098	32.4	663.3	755.5	803.5	47.3
アジアおよび太平洋地域								
中国	3,642	4,077	4,309	4.9	16.4	15.6	18.5	1.1
インド	737	882	876	0.9	5.5	5.9	5.7	0.3
インドネシア	1,096	1,003	825	0.9	5.0	4.2	3.6	0.2
オーストラリア	570	548	385	0.4	3.8	3.7	4.0	0.2
その他	1,933	1,914	1,951	2.0	8.4	11.4	10.8	0.7
計	7,978	8,424	8,346	9.1	39.1	40.8	42.6	2.5
アフリカ								
アンゴラ	1,282	1,863	1,826	2.0	3.1	9.0	12.7	0.7
ナイジェリア	2,527	2,535	2,352	2.6	20.8	36.2	37.1	2.2
アルジェリア	1,990	1,689	1,586	1.6	10.0	12.3	12.2	0.7
エジプト	672	725	723	0.8	3.8	3.7	3.5	0.2
リビア	1,745	1,656	432	0.5	29.5	41.5	48.4	2.8
その他	1,595	1,674	1,456	1.6	4.8	8.6	15.2	1.1
計	9,811	10,142	8,375	9.1	72.0	111.3	129.1	7.7
世界 合計	81,896	83,283	91,670	100.0	1,126.2	1,374.4	1,697.6	100.0



第1図 中国内陸部での石油探掘
(中国新疆ウイグル自治区)



第2図 世界の全天日射エネルギー量の分布

換して利用している。世界の一次エネルギー供給のうち、化石燃料やウラン資源が約9割を占めている。これらの資源はエネルギー密度が高いが、有限である。本節では、乾燥地の一次エネルギー資源の代表例として、原油生産の現状について述べる。

世界の地域・国々における1日あたりの原油生産量と確認埋蔵量を第1表に示す（BP Statistical Review of World Energy, 2016）。2015年の世界における1日あたりの原油生産量は9,167万バレル/日であり、2005年に比べて1.1倍と増加している。2015年における1日あたりの原油生産量の第1位はアメリカであり、次いでサウジアラビア、ロシアの順となる。乾燥地に限ると、サウジアラビアに代表される中東諸国の原油生産量が、世界の32.4%を占めている。アラビア半島のペルシャ湾地域に多くの油田地帯が集まっており、その代表的なものに、世界最大の埋蔵量をもつサウジアラビアのガワール油田がある。サウジアラビアの近隣では、アフワーズ油田があるイラン、西クルナ油田があるイラク、およびブルガン油田をもつクウェートが続いている。また、アフリカでは、サハラ沙漠の南側にあるアンゴラやナイジェリア、北側に位置するアルジェリアでの原油生産量が多い。さらに、東・中央アジアでは、中国北西部の新疆ウイグル自治区のカラマイ油田、東北部の大慶油田（第1図）、カザフスタンの原油生産量が増加しており、乾燥地の内陸部においても石油資源が存在する。

世界の埋蔵確認量は $1,698 \times 10^3$ 百万バレルであり、油田開発や資源探査の進展により、1995年に比べて1.5倍に増加している。原油産出国での埋蔵確認量も年々増加しており、南米のベネズエラが世界1位であり、サウジアラビア、ロシアの順が続いている。世界の石油埋蔵量のうち、中東地域の埋蔵量が47.3%を占めており、将来にわたり採掘可能な原油資源が、乾燥地に豊富に存在していることがわかる。

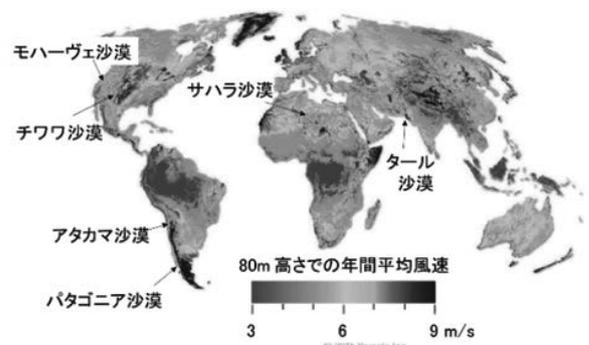
乾燥地に位置する多くの国で原油の生産量や確認埋蔵量が増加しており、世界の原油供給における乾燥地の重要性が非常に高いことがわかる。しかし、原油をはじめとする化石燃料は有限な資源

であり、いずれその資源が枯渇することを念頭においておかねばならない。

3. 乾燥地の太陽・風力エネルギー資源

化石燃料の消費によって排出される温室効果ガスの増加により、地球温暖化が深刻化している。その影響を受けて、乾燥地の途上国では異常気象や干ばつ等による甚大な被害が発生している。温室効果ガスの排出削減を目指して、化石燃料による従来型エネルギーの供給を節減するとともに、自然エネルギーの利用拡大が世界的に求められている。本節では、乾燥地の太陽エネルギーおよび風力エネルギー賦存状況について述べる。

第2図に世界の全天日射エネルギー量の分布を示す（Vaisala, 2015）。図中には代表的な沙漠の位置を示している。地球上に降り注ぐ1時間あたりの日射エネルギー量は 4.3×10^{11} GJであり、これは2001年の世界におけるエネルギー消費量よりも大きいことが示されている（Lewis et al., 2006）。また、世界の沙漠で受ける6時間あたりの日射エネルギー量は、人類が1年間で消費するエネルギー量に相当するとの試算もなされている（Xu et al., 2016）。地域・国別にみると、中東や北アフリカ諸国の乾燥地、ならびにアメリカ、オーストラリア、中国など世界の沙漠地周辺における日射エネルギー量が大きい。乾燥地は人口密度が小さく、未利用で広大な土地が広がっていることから、太陽エネルギーを利用した大規模な太陽光発電所や太陽熱発電所の導入が期待されている。



第3図 世界の地上80m高さにおける年間平均風速の分布

第3図に、世界の地上80m高さにおける年間平均風速分布を示す (Vaisala, 2015)。アフリカのサハラ沙漠、南米にあるアタカマ沙漠やパタゴニア沙漠、中国の北西部のゴビ沙漠やタクラマカン沙漠 (第2図 参照) の周辺地域における平均風速が大きいことがわかる。風力エネルギーから電力を得る風力発電は、その風車要素技術の進歩により、風力エネルギーから電気を取り出す変換効率が向上し、その結果、発電コストが大きく低減している。自然エネルギーの中でも、風力発電は経済的に成り立つ発電技術として世界に受け入れられており、世界の風力発電の導入容量は着実に増加している。すでに、風力発電の導入国として、国内に沙漠が広がっている中国、アメリカおよびインドでは風力発電の導入が強力に推進されており、これら3カ国で世界全体の風力発電導入容量の58%を占めていることは注目すべき点である。

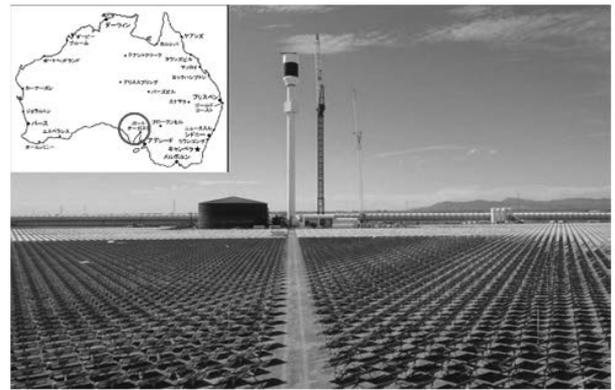
風力エネルギーは、風速の3乗に比例するので、風力発電を導入する場合には風況が良好な場所を選定することが必須である。風速分布からもわかるように、沙漠周辺地域の風力エネルギー賦存量が大きいことから、世界の乾燥地での風力発電の導入拡大が期待できる。

4. 沙漠緑化に向けた自然エネルギー利用

本節では、太陽および風力エネルギーを利用して電力を生産し、沙漠緑化に必要となる水資源の確保や現地での農業生産に電力供給している事例を紹介する。

太陽エネルギーから電力を生産する代表的な技術として、太陽熱発電と太陽光発電が挙げられる。

太陽熱発電は、桶型放物面や平面を有する反射鏡や反射レンズを駆使して、太陽光線を1点に集め、そこで発生する熱エネルギーを熱伝達媒体に蓄え輸送する。蒸気生成プロセスを経て、発電タービンを回転させて電力を得る。発電タービンを利用することができるので、100MW以上の大規模な発電に拡張することができる。輸送した熱エネルギーを蓄熱設備で貯蔵することで、需給の時間差や曇りの日でも、熱エネルギーを有効に利用して発電することができる優位性をもっている。



第4図 タワー集光式太陽熱発電所 (オーストラリア)

第4図に、オーストラリア南部のポートオーガスタに建設されているタワー集光方式太陽熱発電所の外観を示す (AALBORG CSP, 2015)。発電所の敷地面積は140,000m²であり、その敷地内に23,700個程度の平面型反射鏡が設置されている。広い敷地に設置された反射鏡によって太陽光を反射し、高さ127mのタワー上部の1ヶ所に集光する。集光部で熔融塩等の熱伝達媒体に熱が吸収され、その温度は数百度に到達する。この太陽熱発電所の年間供給能力は、熱エネルギー供給量20,000MWh/yearおよび電力供給量1,700MWh/yearである。また、熱エネルギーを活用して海水脱塩処理による淡水製造を行い、その淡水を灌漑してビニルハウスでのトマト栽培が計画されている。その規模は、年間淡水供給量250,000m³/yearであり、栽培面積200,000m²のビニルハウスで、年間150,000 t/yearのトマトを生産する計画である。

次に、太陽光発電は日射エネルギーを直接電気に変換する技術であり、高い変換効率を有する太陽電池の開発が世界的に進められている。乾燥地で導入される太陽光発電システムは、数MW出力の大規模メガソーラーから、2～3枚の太陽電池パネルからなる数100Wの簡易発電システムまで幅広く導入されている。送電網が未熟な地域で太陽電池を利用する大きな魅力は、送電網に接続せずに利用できる分散型電源であること、ディーゼル発電機のように燃料や稼働部が必要なことからメンテナンスが簡易なことである。小規模の太陽光発電は、飲料水や生活用水を得るための井戸の揚水ポンプや、家屋の照明ランプの電源として利



第5図 分散型電源としての太陽光発電設備
(チュニジア)

用されている。

第5図は、チュニジア南部の遠隔地における家畜の水飲み場に設置されている太陽光発電システムである。ここは、放牧している家畜の飲料用として、太陽電池による電力を利用して地下水を揚水しタンクに貯水して、必要に応じて水を供給す

る。この地はサハラ沙漠の北端部であるが、送電線は届いておらず、近くに集落も無い場所で、厳しい自然環境下に太陽光発電システムが設置されているだけであった。

第6図に、スペイン・カナリア諸島に位置するグランカナリア島で風力発電を利用した技術事例を示す。カナリア諸島はアフリカ北西部モロッコの沖合に位置しており、4つの島からなりたっている。その中で最も大きいグランカナリア島の面積は1,560km²で、島周囲の全長は236kmであり、年間平均気温は20.7℃、年間降水量は250mm以下である。この島で消費される水は、約30%が天然の水源から供給されており、残りは生産水量71,000m³/dayを有する海水淡水化施設から供給されている。スペイン本土およびアフリカ大陸から遠く離れたこの島において、水やエネルギー資源を島内で確保することは離島ゆえの課題である。ここでは、風力発電による電力で海水を淡水化し、その生産水を作物栽培に灌漑する農業生産事業が行われている。風力発電設備は定格出力660kWの風力発電機4基からなり、その合計出力は2.64MWである。海水淡水化設備には逆浸透膜法を採用し、生産能力2,500m³/dayを有する逆浸透膜モジュール群が2列設置されている。2012年に現地で事業



第6図 風力発電と海水淡水化による淡水製造と農作物栽培への応用
(スペイン・グランカナリア島)

担当者に聞き取り調査を行ったところ、日常の運転では、気象データに基づいて、風力発電の発電電力量を予測し、その電力による淡水化と電力会社の電力による淡水化にかかる運転コストを比較しながら、システムの運転を管理しているとのことであった。風力発電機が定格出力で運転している場合、発生電力の40%を海水淡水化設備に供給し、残りの60%相当の電力を電力会社に売電しており、その売電価格は0.013ユーロ/kWhで、電力会社から電力を買う場合の価格0.018ユーロ/kWhよりも若干低い設定であった。製造した淡水は隣接する貯水施設（容積160,000m³）に蓄え、風速が低く風力発電による発電電力が少ないときに貯水タンクから灌漑用水を配水し、風力発電の電力が多い場合には淡水製造、貯水、灌漑用水の配水、および余剰電力の売電を計画的に実施する。作物栽培は面積150haの農場で行われており、トマトや豆類、トウガラシ類、メロンやレモンなどが収穫されている。このような運用ができるのは、グランカナリア島の風況が良く（年間平均風速10m/s程度）、発電量が期待できることと、スペイン国内の電力買い取り制度が充実していることが主な要因である。

5. おわりに

沙漠化防止や沙漠の緑化に必要なエネルギー供給技術について考えるために、乾燥地に潜在する莫大なエネルギー資源の賦存状況、および水資源の確保、農業生産、人々の暮らしなどに資する自然エネルギー技術の実用事例について紹介した。

わが国のエネルギー資源の一部が乾燥地から供給されていることを考えると、乾燥地は私たちにとって全く無関係な地域ではないことがわかる。資源の少ないわが国で、沙漠化防止の取り組みや、乾燥地の開発途上国のエネルギー・環境問題の解決に積極的に協力することの意義を考えていただく機会になることを期待したい。

引用文献

1) AALBORG CSP 2015, Integrated energy system based on CSP at <http://www.aalborgcsp.com/>

- projects/ integrated-energy-system-based-on-csp-australia/ (2016. 3.25)
- 2) BP Statistical Review of World Energy, 2016 at <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf> (2016. 9.2)
- 3) Chatzivasileiadis, S., D. Ernst and G. Andersson : The Global Grid, *Renewable Energy*, 57, 372-383 (2013)
- 4) Lewis N.S. and D.G. Noser : Powering the planet : chemical challenges in solar energy utilization, *PNAS*, 103, 15729-15735 (2006)
- 5) Vaisala : Free Wind and Solar Resource Maps, http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Scientific%20papers/Vaisala_global_wind_map.pdf (2016. 7.6)
- 6) Xu, X., K. Vignarooban, B. Xu, K.Hsu and A.M. Kannan : Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1106-1131 (2016)