# 薬用植物「カンゾウ」による乾燥地の地盤環境改善 技術に関する基礎的研究

古川,全太郎

https://doi.org/10.15017/1441209

出版情報:九州大学, 2013, 博士(工学), 課程博士

バージョン:

権利関係:全文ファイル公表済

# 薬用植物「カンゾウ」による乾燥地の地盤環境改善技術 に関する基礎的研究

平成 26 年 2 月 古川 全太郎

# 薬用植物「カンゾウ」による乾燥地の地盤環境改善技術に関する

# 基礎的研究

# 目 次

第一章 序論	1
1.1 本論文の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	4
参考文献	6
第二章 既往の土地劣化対策事例及びカンゾウ生育研究	7
2.1 はじめに	7
2.2 乾燥地における土地劣化の原因	8
2.2.1 素因	8
2. 2. 2 誘因	9
2.3 乾燥地における土地劣化現象及びその被害	11
2.3.1 物理的な土壌劣化	11
2.3.2 化学的な土壌劣化	12
2.3.3 風食	13
2.4 乾燥地における既存の土地劣化対策技術	15
2.4.1 物理的・化学的な土壌劣化に対する対策	15
2.4.2 風食に対する対策	15
2.5 乾燥地における既存の地盤環境調査事例	16
2.5.1 タクラマカン砂漠北緑地域の塩類集積と土壌の物理的性質に関する調査	16
2.5.2 タクラマカン砂漠における地下水の成分調査	16
2.5.3 イスラエル・ネゲブ北部の砂地盤における透水性と塩類濃度に関する研究	16
2.5.4 中国・准噶尔(Dzungaria) 西部の風成による塩類集積過程の調査	16
2.6 植栽による地盤環境改善技術に関する研究及び事例	18
2.6.1 中国内蒙古自治地区阿拉善盟における砂漠化防止と緑化の試み	18
2. 6. 2 西オーストラリアの乾燥地における Eucalyptus sargentii の生育技術に関する	検討.18
2.6.3 中国における大規模造林技術	19
2.6.4 ダブルサック工法	20
2.7 カンゾウに関する基本事項	21
2.7.1 カンゾウの生態及び性状, 生育特性	21
2.7.2 日本におけるカンゾウ輸入の現状	24

2.8 日本国内における様々なカンゾウ栽培研究	26
2.8.1 ウラルカンゾウの筒栽培	26
2.8.2 施与培養液濃度がカンゾウの無機成分並びに GC 含有量に及ぼす影響	28
2.8.3 様々な環境要因に対する GC 酸蓄積の応答性の解析	28
2.8.4 その他の日本国内におけるカンゾウ生育研究の現状	29
2.9 まとめと課題の抽出	30
参考文献	31
第三章 モンゴル南部乾燥地地盤の物理・化学的環境特性	33
3.1 はじめに	33
3.2 調査地の地理的特性	35
3.3 調査地の気候特性	
3.3.1 調査地の気候区分	38
3.3.2 S₃-7(H)の気象状態の季節及び年間の変化	41
3.4 植物の生育に影響を及ぼす地盤の物理・化学的環境	44
3.4.1 地盤内の物理的環境が植物の生理的反応に及ぼす影響	45
3.4.2 植物体内における水ストレスの影響と水分恒数	48
3.4.3 カンゾウの水ストレスに対する応答実験	
3.4.4 地盤内の pH, EC が植物の生育に及ぼす影響	51
3.4.5 土壌の陽イオン、有機分及び地盤の栄養保持能力が植物の生育に与える影響	響52
3.4.6 各調査地の調査項目	55
3.5 調査地の物理的環境	57
3.5.1 粒度特性	57
3.5.2 S₃-7(H)の水分特性曲線と有効水分量	60
3.5.3 含水比の深度分布	61
3.5.4 原位置飽和透水係数	62
3.6. 調査地の化学的環境	64
3. 6. 1 pH ≥ EC	64
3. 6. 2 炭酸カルシウムと各種交換性陽イオン	65
3.6.3 陽イオン交換容量	67
3.6.4 硝酸態窒素, アンモニア態窒素, リン酸	67
3.7 自生カンゾウ根の成分及び品質	68
3.8 物理特性と化学特性の関連性及び自生地と非自生地の差異に関する考察	
3.9 まとめ	72
参考文献	74

<b>第四章 緑化土質材料を用いた地盤内水分・栄養環境に対するカンゾウ生育特</b>	性の把握.77
.1 はじめに	77
. 2 筒栽培における地盤環境がカンゾウの成長に及ぼす影響	79
4.2.1 生育実験に使用した材料及び初期条件	79
4.2.2 各土質材料の水分保持特性と水分量	82
4.2.3 各種土質材料の化学特性	83
4.2.4 カンゾウの生長度評価項目	84
4.2.5 t 検定による検定手順	84
4.2.6 各種土質材料で生育したカンゾウの成長	86
.3 乾燥地を模擬した地盤における筒栽培の応用とカンゾウ幼苗の初期生育特	性の把握.89
4.3.1 実験条件	89
4.3.2 筒径と筒高さがカンゾウの初期生育に与える影響	89
. 4 緑化土質材料と乾燥地模擬地盤を用いたカンゾウ生育実験	94
4.4.1 実験条件	94
4.4.2 地盤内の水分状態と添加した栄養分がカンゾウの生育に与える影響	96
.5 種々の物理・化学特性を有する緑化土質材料を用いたカンゾウ生育特性の持	_ <b></b>
4. 5. 1 実験条件	98
4.5.2 緑化土質材料の有効水分量・カルシウム添加量とカンゾウ生育の関係	99
.6 まとめ	102
参考文献	103
第五章 地盤環境改善技術の実装化に向けた実験的検討	
1.1 はじめに	
. 2 乾燥地における緑化土質材料の有用性の検証	
. 3 緑化土質材料の水分環境がカンゾウ生存率に及ぼす影響	
5.3.1 実験条件	
5.3.2 緑化土質材料の設置方法とカンゾウ生存率の関係	
5.3.3 緑化土質材料の混合比とカンゾウ生存率の関係	
5.3.4 緑化土質材料内の含水比及びマルチングの有無とカンゾウ生存率の関係	
i.4 まとめ	
参考文献	119
<b>第六章 総括</b>	121
ēl-⊈¢	105
射辞 	
寸録	127

# 第一章 序論

#### 1.1 本研究の背景と目的

近年、乾燥地における気候変動や人為的活動による砂漠化及び土地の劣化が顕著であり、 地球環境保全上の重大な問題となっている、砂漠化は、「乾燥、半乾燥、乾性半湿潤地域に おいて気候変動,人間活動等様々な要因に対して起こる土地の劣化(国連砂漠化防止会議, 1992 年アジェンダ 21)と定義される 1). 気候変動により乾燥地での降雨量が減少し, 地下水 位が低下し、表層を含む地盤そのものの物理・化学的な荒廃や劣化が起こり、その領域が 拡大し, 植生が減退している地域も多く存在する <sup>2)</sup>. また, 乾燥地に自生する植物の乱獲・ 家畜の過放牧により植生が減退している地域も多数存在する<sup>3)</sup>. 砂漠化は毎年 60000 km<sup>2</sup> の 速さで進行し、人口では全世界の 1/6 に及ぶ人々が作物の不作による飢餓や水不足等の被害 を受けている <sup>1)</sup>. 図 1-1 に,全世界の各地域における砂漠化が進行している土地,及び砂漠 化の危機に瀕している土地の面積を示す4. 図 1-1 より, 特にアジア地域においては, 砂漠 化の危機に瀕している地域は全体の約30%を占めており、砂漠化の進行が懸念されている. このような状況において、劣化した土地、あるいは砂漠化が進行している土地に対策を施 すことは急務であり、現在、工学・農学・理学的アプローチに基づく様々な対策技術の開 発が進められている、その中で、塩分を多量に含有するアルカリ性地盤が広く分布するモ ンゴル・中国の乾燥地域においては、その土地に自生する耐塩性の生態資源である薬用植 物「ウラルカンゾウ (Glycyrrhiza uralensis,以下カンゾウ)」を活かした土地劣化改善及び植 生の再生が国を挙げて検討されている.このため、地盤環境の改善と生態資源の保護の双 方を満たし、乾燥地における各地域が自主的、持続的にカンゾウの生育を行うことができ る,自立性に優れた「付加価値の高い地盤環境改善システム」の確立が必要とされている. モンゴル南部乾燥地に自生しているカンゾウを写真 1-1 に示す. カンゾウは主に中国・モ ンゴル等の乾燥地に自生し、日本の漢方薬の約 7 割に配合されている需要の高い漢方薬原 料である 5. しかし近年その需要の高さから乱獲され、自生カンゾウの個体数は激減してお り、2000 年には日本への輸出量が最も多い中国の国務院通達において、カンゾウ輸出規制 が設けられており 6, その他のカンゾウ輸出国もカンゾウ資源の逼迫に伴い輸出量が減少し ている<sup>7)</sup>. このような事実を受け, 2010年の COP10 では「貴重な遺伝資源」として取り上 げられたほどである <sup>8</sup>. さらに, 日本国内ではカンゾウは自生しておらず, 近年カンゾウ資 源の逼迫と共に農学・薬学の分野で栽培研究・薬理的研究が活発になされるようになって

いる,しかし,根に含まれる有効成分グリチルリチン(GC)含有率が高く,日本薬局方を満たす個体を効率よく,安定した品質を保ちながら栽培する方法は確立されていない,この上,生薬として利用しているカンゾウは100%輸入に依存しており,輸入価格は10年前の約1.5倍になっている%.これより,カンゾウの保護と生薬の安定供給は早急に解決すべき

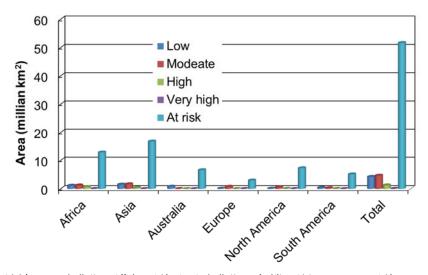


図 1-1. 各地域での砂漠化の進行面積及び砂漠化の危機に瀕している面積(UNEP, 1997)<sup>4)</sup>

課題である.

さらに、モンゴル南部におけるカンゾウ自生地・非自生地はこれまで、モンゴルの植物学者らによってカンゾウ及び他の植物の植生分布に関する調査は行われてきたが <sup>10)</sup>、詳細な地盤環境調査は行われていない.このような状況の中で、カンゾウ根の生育特性を活かした「付加価値の高い地盤環境改善システム」を提案・確立するためには、劣化した地盤にカンゾウを健全に定植させ、安価で簡易に、灌水・管理の手間のかからない定植技術を、地盤工学・土壌学の観点から検討する必要がある、

このため、まずカンゾウ自生地、非自生地及びカンゾウの植生が後退している地盤の水分・塩分・栄養分等の物理的・化学的環境を把握し、その差異を把握することで非自生化の原因を明らかにし、補わなければならない物理・化学的環境パラメータを特定する必要がある。従って、まず先に記したモンゴルにおける乾燥地の現状を踏まえ、モンゴル南部乾燥地において地盤環境調査を行い、対象とする乾燥地の物理・化学的環境を明らかする。これらのデータを踏まえ、カンゾウ定植に有効であると考えられる、現地の地盤環境に適合した、保水性・保肥性に優れた筒状の構造である「緑化土質材料」を新たに提示し、その物理・化学的機能とカンゾウ生育への有用性及び現地への適合性を日本国内におけるカンゾウ生育実験を通して検証する。

また、本技術を乾燥地域のコミュニティに提案するためには、上記のように安価で簡易な、また灌水・管理の手間がかからないカンゾウ生育方法を提案する必要がある、そこで、上記の生育実験の結果を反映し、カンゾウ非自生地において、安価で簡易、かつカンゾウ生育に必要な保水性と保肥性を担保する緑化土質材料を開発するために、モンゴル南部乾燥地の砂質土と培養土、及び動物性肥料分を混合した種々の緑化土質材料を提案する、これらの水分保持に着目した、無灌水条件下でのカンゾウ生育実験を行い、緑化土質材料の機能・効果を維持し、自立性を高めるための設置方法及び設置条件を検証する.



写真 1-1. 薬用植物「カンゾウ(Glycyrrhiza uralensis)」の地上部及び自生根

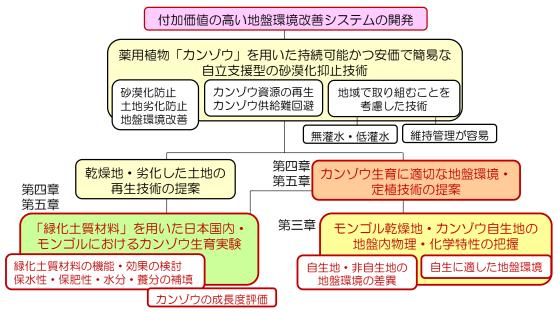


図 1-2. 地盤環境改善システムと本論文の位置づけ

#### 1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す.

### 第一章 序論

本研究の背景と目的,付加価値の高い地盤環境改善技術の必要性,位置づけを明確にし, 本論文の構成について述べている.

#### 第二章 既往の土地劣化対策事例及びカンゾウ生育研究

本研究を遂行する上で必要な土地劣化の原因や分類を明確化し、本論文で対象としている土地劣化問題の詳細を記し、それに対する砂漠化防止対策や緑化手法の事例を挙げ、工学・農学的視点から問題点を整理することで、自立支援的な対策技術の必要性を明らかにする。また、カンゾウの生育特性、枯渇問題やそれに伴う供給難の現状を述べ、土地劣化対策にカンゾウを用いる利点とこれまでの生育技術の課題をまとめることで、乾燥地の生態資源を活かし、地盤工学的観点を取り入れた改善技術を検討することの重要性を述べる。

#### 第三章 モンゴル南部乾燥地地盤の物理・化学的環境特性

乾燥地でカンゾウを健全に生育させる方法を検討する上で、まずカンゾウ自生地・非自生地の地盤環境の情報を得て、土地劣化・非自生化の状況及び原因を解明する必要がある。そこで第三章ではモンゴル南部乾燥地において、カンゾウ自生地とその植生が後退している非自生地の地盤環境の差異を把握するために、原位置での調査を行い、カンゾウ定植のために重要である地盤の物理・化学的環境を明確にした。地盤の物理的環境として粒度分布、土層構成、含水比、乾燥密度、有効水分量、透水係数等の特徴を深度分布に着目して示すとともに、化学的環境として pH、EC(電気伝導度)、CEC(陽イオン交換容量)、交換性陽イオン、有機分含有量等の分析を行い、これらの側面からカンゾウ自生地及び非自生地の特性及び差異を示す。

#### 第四章 緑化土質材料を用いた地盤環境改善適応策の検討

第三章で得られた結果を基に、カンゾウ幼苗の生育を保護することができる「緑化土質材料」を提案する、緑化土質材料は、カンゾウ幼苗を健全に生育させるための初期水分・栄養分を確保することを目的としたもので、乾燥地地盤より有効水分量、保肥性陽イオン交換容量を有する堆肥及び培養土等の材料から構成されている。この材料を乾燥地模擬地盤内に筒状の構造で設置し、カンゾウ生育実験を行う、さらに、乾燥地で用いる材料を模擬し、砂質土、炭酸カルシウム及び堆肥を混合し、各材料の混合比を変えた条件でのカンゾウ生育実験を行い、成長度を評価することで、緑化土質材料の適切な保水・保肥性を明確にする。

#### 第五章 地盤環境リスク低減技術の実装化に向けた実験的検討

モンゴル南部乾燥地の砂質土と培養土,及び動物性肥料分を混合した緑化土質材料を用いて,その適用性をカンゾウ非自生地での生育実験を通して検証する.生育実験は無灌水条件を想定し,材料の混合比,初期含水比,設置深さ,設置形式及び表層処理に着目した各種条件を設定し,カンゾウの生存率を比較することで効果的な緑化土質材料の設置方法の検討を行う.

#### 第六章 総括

第三章から第五章まで得られた結果を受け、本論文の総括及び地盤環境改善システム確立に向けた今後の課題をまとめる.

図 1-3 に、本論文の構成を示す.

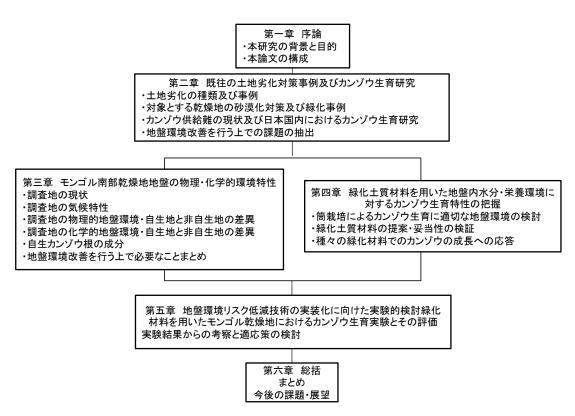


図 1-3. 本論文の構成

## 参考文献

- 1) UNEP: World Atlas of Desertification, 1992.
- 2) 遠藤勲,安部征雄,小島紀徳:沙漠工学,森北出版,pp.8,1998.
- 3) Zambyn B: Desertification in Mongolia, RALA REPORT NO. 200, pp. 107-113, 1997.
- 4) UNEP: Status of Desertification and Implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification, 1997.
- 5) 正山征洋, 宇都拓洋: 連載 目で見る漢方薬 1 甘草(カンゾウ), オンラインメドジャーナル, http://www.iyaku-j.com, 2009
- 6) 大西佳二, 甘草資源の現状と将来展望について, 第2回甘草シンポジウム論文集, pp. 5-7, 2004.
- 7) 吉川展司, 伊藤眞: 甘草およびその成分(グリチルリチン酸等)について, FFI Journal, Vol. 217, No. 1, 2012.
- 8) 村中俊哉,小森彩:植物遺伝資源確保に向けた有用遺伝子単離とその利用,生物工学第90巻(2012年第10号),pp. 623-624,2012.
- 9) 財務省貿易統計, 税関 Japan Customs, http://www.customs.go.jp/toukei/index.htm
- 10) Tuvshintogtokh, I., Mandakh, B., Yasufuku, N., Omine, K., Marui, A., Bat-Enerel, B., Yolk, Y.: SOME RESULTS OF ECOLOGICAL RESEARCH OF URALIAN LICORICE (*Glycyrrhiza uralensis Fisch.*) IN MONGOLIA, Proceedings of EAEP 2013, pp. 98-103, 2013.

# 第二章 既往の土地劣化対策事例及びカンゾウ生育研究

#### 2.1 はじめに

「付加価値の高い地盤環境改善システム」は、地盤環境の改善と生態資源の保護の双方を満たし、乾燥地における各地域が自主的かつ持続的にカンゾウの生育を行うことができる、自立性に優れた地盤環境改善システムを目指している。本システムを構築するためには、まず本論文が対象としている、解決すべき土地劣化問題を明確化する必要がある。また、乾燥地に植生を施すためには、植樹・植林の方法や乾燥地における地盤調査手法を把握しておく必要がある。そこで、2.2節及び2.3節において、本論文で対象としている土地劣化問題の種類とその原因、それにより起こる現象と被害を記し、2.4節にそれに対する砂漠化防止対策や緑化手法の事例を挙げ、工学・農学的視点から問題点を整理することで、自立支援的な対策技術の必要性を明確化する。また、2.5節に既存の乾燥地における地盤調査手法について述べ、地盤調査に当たり重要な物理・化学パラメータを把握する。さらに、2.6節において植生を用いた既存の砂漠化対策事例を挙げ、乾燥地に植生を施す場合の留意点と課題について述べる。

さらに、カンゾウは主にモンゴル・中国・オーストラリア等の乾燥地に自生する薬用植物の一種である。カンゾウの自生種及び自生地が減少すると、自生地の劣化・砂漠化に加え、生薬としてのカンゾウ供給の危機の二つの問題が生じる.

カンゾウを利用して乾燥地を緑化するためには、カンゾウの生態や特徴を明らかにすることが重要である。そこで本章では 2.7 節においてカンゾウの基本的性質、カンゾウの生育特性、枯渇問題やそれに伴う供給難の現状、2.8 節において日本国内において現在までに行われてきたカンゾウ生育研究事例を述べ、土地劣化対策にカンゾウを用いる利点とこれまでの生育技術の課題をまとめることで、乾燥地の生態資源を活かし、地盤工学的観点を取り入れた改善技術を検討することの重要性を述べる。

#### 2.2 乾燥地における土地劣化の原因

砂漠化は,「乾燥、半乾燥、乾性半湿潤地域において気候変動、人間活動等様々な要因に対して起こる土地の劣化(国連砂漠化防止会議、1992年アジェンダ 21)と定義される <sup>1)</sup>.この定義で「土地」とは地表面部分を構成する土壌・砂・水分等ある深さまでの部分の物質、その土地を被覆する植生を含んでおり、人間生活に関連したすべてのものである.「劣化」とは、土地に働きかける一つあるいは複合した作用により、資源の潜在性が減少することを意味する.土地の劣化とは具体的に、1)樹木の減少と消滅、2)牧草の減少と消滅、乾性植物の侵入、3)土壌の減少と消滅、4)土壌の固化、5)観光客等による地表面の破壊、6)砂の移動と堆積、7)ダストストーム、8)塩類の集積、9)ウォーターロギング等が現象として起こることを指す <sup>2)</sup>.これらの中で本論文が直接的に解決としているのは、1)樹木の減少と消滅であり、植生を施すことによってこれを達成することにより間接的に3)土壌の減少と消滅、6)砂の移動と堆積を防ぐことができると考えている.

これらの土地劣化の原因は素因(間接的な原因)と誘因(直接的な原因)に区分することができる.主な素因としては a)干ばつ, b)人口過剰, c)政治・経済政策の失敗等があり, 誘因としては a)過放牧, b)過伐採及び植物の乱獲, c)過耕作, d)過灌漑・不適切な水管理等が挙げられる. 2.2.1 節と 2.2.2 節において, 土地劣化の素因と誘因について述べる.

#### 2.2.1 素因

#### a) 干ばつ

干ばつの定義に関しては,150以上の定義が存在するが<sup>2)</sup>,どの定義も「長期間,降水が 平均降水量より少なく,植物や流水量等に負の影響を及ぼす状態」として定義されている.

#### b) 人口過剰

人口過剰に関しては、各地域で人口動態に相違があり、これが土地劣化の素因にならない地域から大きな素因になる地域まで範囲は様々であり、一般化することは困難であるとされている。人口の変動を引き起こす主な要因は、自然変化(出生と死亡の差)と社会変化(流入と流出の差)であるが、砂漠化が進行している地域は自然増加が大部分である。一方で、社会増加の割合が多い地域も存在する。人口が増加することにより、土地や地下水の利用・農業形態が変化し、結果として土地劣化を引き起こす。

#### c) 政治・経済政策の失敗

経済・政治政策が砂漠化の素因となる場合も具体的な範囲・区分を明確にすることは困難であるが、主には商品作物の導入などの過剰な農業開発、生態系を無視した移住政策、工業化、過剰取水、不適切な水管理等により土地劣化が起こる.

表 2-1. 乾燥地における地域別の土地劣化の誘因とその面積 3)

(単位100万ha)

		土地の劣化面積					
地域	乾燥地面積	過放牧	樹木過伐採	過耕作	不適切な土地 ・水管理	その他	小計
アフリカ	1286	184.6	18.6	54	62.2	0	319.4
アジア	1671.8	118.8	111.5	42.3	96.7	1	370.3
オーストラリア	663.3	78.5	4.2	0	4.8	0	87.5
ヨーロッパ	299.6	41.3	38.9	0	18.3	0.9	99.4
北米	732.4	27.7	4.3	6.1	41.4	0	79.5
南米	516	26.2	32.2	9.1	11.6	0	79.1
計	5169.1	477.1	209.7	111.5	235	1.9	1035.2

#### 2.2.2 誘因

表 2-1 に、乾燥地における地域別の土地劣化誘因とその面積を示す <sup>3)</sup>. 誘因は a)過放牧、b)樹木過伐採、c)過耕作、d)過灌漑・不適切な水管理に大別される。特に本論文が対象としているアジア地域は最も乾燥地の面積が大きく、過放牧、樹木過伐採、不適切な土地・水管理が土地劣化の主な原因であることがわかる.

#### a) 過放牧

過放牧とは、家畜が自生植物を摂食する量が、ある土地に自生している植生数及びその再生可能日数を上回ることであり、過放牧により植生が失われ地表面がむき出しになり、土壌侵食の原因となり、植生のさらなる枯渇化を招く悪循環が生じる. UNEP(1991)の資料によると、過放牧による砂漠化面積は全砂漠化面積の93%を占めており4)、本論文が対象としているモンゴルにおいてもこの問題は重要視されている.

従来の伝統的な牧畜は、遊牧民が多種の家畜を飼うことで生態系の利用する部分を多用化していた。さらに、生産量の少ない草地では移動することで一か所の摂食圧を低くしていた。しかし現在は遊牧民の定住化が進み、また食糧増産、人口増加のため家畜頭数は増加し、草地において局所的に大量の摂食が行われ土地の劣化を助長している5.特に対象としているモンゴル国に関しては1991年に民主化し、社会主義時代の遊牧協同組合(ネグテル)による家畜頭数管理や国の補助等の遊牧民への管理体制は無くなり、遊牧が自由化された6.市場経済移行後、自由化に伴って遊牧民も利益追求のため、家畜頭数の増加・畜割合の偏り、遊牧の移動の短縮や都市近郊への遊牧が多くなり、ある特定の草原へ大きな負荷がかかる。

#### b) 過伐採及び植物の乱獲

過伐採・乱獲はその土地の生産力・植物の成長スピード以上に自生する植物を採取することであり、その土地の生産力・再生力の低下を引き起こし、結果的に資源を枯渇させ、 その土地を荒廃させてしまうことが問題となっている。過伐採が誘因となる砂漠化は主に 樹木が燃料として大量に使用されている地域で起こり、主にサハラ以南のアフリカとイン ドの乾燥地帯で問題となっている。樹木は主に家庭用の薪炭,食規模工場の燃料として使用される。また、耕地開発のために伐採が行われる場合も多い<sup>2)</sup>.

また、カンゾウも乱獲されている植物の一種である。カンゾウや他の有用植物の乱獲は、その土地を劣化させるだけでなく、植物の個体数が減少し、市場価格の高騰を招く $^{7}$ . 乱獲によっておこる具体的な問題は2.7節において述べる。

#### c) 過耕作

耕地化は自然の植生の破壊行為である.そのため、植物生態系が脆弱な乾燥地帯での耕地化は土壌侵食を引き起こす誘因となり得る.乾燥地における伝統的な農業は、土壌の透水性・保水性を保持するための耕作方法や、連作を行わず休耕期間をおいて肥料分となる腐植物質の生成を促進させる等、肥沃な土壌を保持するための様々な工夫が行われてきたが、第二次世界大戦後の人口増加に伴う大規模な商品作物栽培、不適切な農機具の導入、休耕期間の短縮等に伴い伝統農業が失われ、耕地が劣化した。主な耕地の劣化現象は土壌侵食、腐植層の現象、土壌の固化などがある.

#### d) 過灌漑・不適切な水管理

耕作地に過剰に灌水することは塩害の原因となる.元来塩分を少量でも含んでいる水を多量灌水すると,地下水面が上昇する.これにより,塩類集積が起こり,自生する植物や地下水面が毛管上昇により地表に到達すると,水分が蒸発し,乾燥地の水は,極度に風化された土壌や岩石の間を通る際に塩を多量に溶解するために,可溶性塩濃度が非常に高い.降水量が可能蒸発散量よりも多いと降水は下方に浸透するので,土壌中の可溶性物質は水に溶けて流れ去っていく.乾燥地のような降雨量が可能蒸発散量よりも少ない気候では,土壌水の動きが上向きであるため,降水は乾燥した土壌に吸着されてしまい,溶脱による塩類の流出が起こらない.そのため,土壌中の交換性陽イオンの組成は,母材の塩基組成の影響を強く受ける.また,溶脱されずに土壌のある深さにとどまった塩類は,土壌の乾燥と共に沈積して塩類の集積層を形成する.農作物の周りの土壌の塩分濃度が高くなると,根の浸透圧ポテンシャルが土の浸透圧ポテンシャルを下回り,作物が水分を吸収できなくなり生育が悪化する.また,塩類集積が起こった層は固結し硬化するため,土壌の透水・透気性が悪化し、根の伸長も阻害される8.

表 2-2. 乾燥地における土壌劣化のタイプとその面積 <sup>9)</sup>

(単位100万ha) タイプ 種類 軽度 中度 強度 極強度 合計 水食 表層侵食 301.2 454.5 161.2 920.3 3.8 地形的侵食 42.0 72.2 56.0 2.8 173.3 1093.7 (55.6%) 合計 343.2 526.7 217.2 6.6 風食 表層侵食 230.5 213.5 9.4 0.9 454.2 地形的侵食 38.1 30.0 14.4 82.5 土壌堆積 10.1 0.5 1.0 11.6 268.6 253.6 24.3 1.9 548.3 (27.9%) 合計 化学的劣化 栄養分の流出 52.4 63.1 19.8 135.3 塩類化 34.8 20.4 20.3 0.8 76.3 工場汚染 4.1 17.1 0.5 21.8 酸性化 1.7 2.7 1.3 5.7 合計 93.0 103.3 0.8 239.1 (12.2%) 41.9 物理的劣化 土壌圧縮 34.8 22.1 11.3 68.2 ウォーターロギング 6.0 3.7 0.8 10.5

1.0

26.8

910.5 (46.4%)

0.2

12.3

9.3 (0.5%)

295.7 (15.1%)

4.6

83.3 (4.2%)

1964.4 (100%)

3.4

44.2

749 (38.1%)

#### 2.3 乾燥地における土地劣化現象及びその被害

合計

有機物堆積

土地劣化はその地域の自然的、社会的、経済的条件に応じて様々な様相を呈する.本節では、2.2 節で述べた誘因・素因より起こる土地劣化のメカニズムを述べる.表 2-2 に、土地劣化のタイプとその面積を示す.土地劣化現象は、土壌侵食、土地の物理、化学的劣化に大別される.本節では、これらの土地劣化の現象と被害を記し、対象地において想定される被害について把握する.

#### 2.3.1 物理的な土壌劣化

土壌の劣化は物理的、化学的劣化の二種類に分類され、これらの主な原因は灌漑、過放牧、過耕作である。不適切な灌漑による塩類集積や湛水によるグライ化が起こり、家畜の踏みつけによって固結化が進む。さらに土壌中の有機物の減少も土壌を劣化させる。

土壌の物理的な劣化は、その土壌の土性、密度、間隙比、透水性等が劣化し団粒構造が崩壊する。これが原因で、植物の生育が阻害され、それと同時に土壌の水食や風食を促進させ、化学性劣化や生物性劣化等の複合的な劣化を引き起こす。土壌の酸性化や塩類化等により土壌中の塩類に偏りが生じ、上記のような土壌劣化を引き起こすが、特にナトリウムイオンを多く含むソーダ質土壌は、脆弱な物理的組成要因を有し、団粒崩壊が生じやすい、特に土壌が硬化した場合は乾燥密度が大きく、湿潤時には粘土分散を生じ、泥流化して土壌間隙をふさぎ、透水性低下、クラスト化などの物理性劣化を引き起こすと同時に、侵食が促進される8.

衣 Z-3. 塩類工表 ジカ規				
塩類土壌の分類	pН	ECe	SAR	ESP
温知工場の万知		(mS/cm)	(Lmmol <sub>c</sub> ) <sup>-0.5</sup>	(%)
塩性土壌	8.5未満	4.0以上	13未満	15未満
ソーダ質土壌	8.5以上	4.0未満	13以上	15以上
塩性ソーダ質土壌	8.5未満	4.0以上	13以上	15以上

表 2-3. 塩類土壌の分類 11)

#### 2.3.2 化学的な土壌劣化

土壌中に存在する養分は、土壌溶液中に存在するか、もしくは土壌粒子に保持されている。土壌を構成する粘土鉱物は全体的に負に荷電しており、単位土壌重量あたりの負荷電量は陽イオン交換容量(Cation Exchange Capacity; CEC)として表され、これは土壌の種類によって様々な値をとる。カルシウムイオンやカリウムイオンは、作物の成長に必須な陽イオンであるが、CECの大小によって土壌に保持される量が決まる。すなわち、CECはその土壌が有する保肥性を表す。土壌粒子には正荷電も存在し、陰イオン交換容量(Anion Exchange Capacity; AEC)として表されるが、値が小さいため硝酸イオンのような陰イオンは土壌に吸着されることは少ない。陰イオンの多くは土壌中に存在するために、土壌水の下方流動とともに流亡しやすい。しかし陰イオンでもリン酸イオンは鉄、アルミニウム、Caと結合して土壌中を移動しにくいことが知られており、根による接触が吸収に重要であるといわれている80.

さらに、乾燥地では土壌水の下方流動が起こりにくいため塩類が土壌中に集積しやすく、 それが作物にもたらす塩害も一般的にみられる. 化学性が問題となる土壌は、農業に化学 的な土壌劣化が主な原因であり、塩類を集積させることによって作物の生産性を低下させ、 本来あるべき農業の持続性を低下させる.

乾燥地・半乾燥地の土壌に含まれる塩類は炭酸塩や硫酸塩、塩化物が主である.これらの塩類は種類によって水への溶解性が大きく異なるので、溶解のしやすさによって集積する深さが異なる.塩化物やマグネシウム、カリウム、ナトリウムの硫酸塩、およびカリウム、ナトリウムの炭酸塩は水への溶解性が高いので、最も深い場所に集積する.これを、可溶性塩類集積層という.溶解性の低い硫酸カルシウム(石膏)は可用性塩類集積層より浅い場所に集積し(石膏集積層)、最も溶解性の低い炭酸カルシウムの集積層はさらに浅い場所に形成される(炭酸カルシウム集積層).このため、炭酸カルシウム集積層の位置は下方浸透深の指標となる11).

表 2-3 に塩類土壌の分類を示す. 塩類土壌は土壌中の pH, 飽和抽出液の電気伝導度 (Electric Conductivity; EC<sub>e</sub>), ナトリウム吸着比(Sodium Absorption Ratio; SAR), 交換性ナトリウム率(Exchangeable Sodium Percentage; ESP)により, 塩性土壌, ソーダ質土壌, 塩性ソーダ質土壌に分類される. SAR, ESP は式(2.1), (2.2)により表される <sup>8)</sup>.

$$ESP = \frac{C_{Na}}{CEC} \times 100 \tag{2.1}$$

$$SAR = \frac{C_{Na}}{\sqrt{(C_{Ca} + C_{Mg})/2}}$$
 (2.2)

ここに、ESP: 交換性ナトリウム率(%)、SAR: ナトリウム吸着比(( $L \cdot mmol_c$ )-0.5)、 $C_{Na}$ 、 $C_{Ca}$ 、 $C_{Mg}$ : 交換性ナトリウム、カルシウム、マグネシウムイオン濃度( $mmol_c$ /L)、CEC: 陽イオン交換容量(meq/100g)

塩性化は、塩が近家土壌に集積して土壌溶液の浸透圧が上昇するために、作物の水分吸収が抑制される浸透圧害と塩類の中の特定のイオンがもたらすイオン害がある。土壌の交換性ナトリウム率(Exchangeable Sodium Ratio; ESP)が15以下、飽和抽出液の電気伝導度が4dS/m以上の土壌を塩性土壌といい、それに至る過程が塩性化である。

ソーダ質化は、ナトリウムイオンを多く含む水を灌漑することによって  $Na^+$ が土壌中のカルシウムイオン、マグネシウムイオンと交換し、ソーダ質土壌が生じる。ソーダ質土壌は  $EC_e$  (飽和抽出液の電気伝導度)が 4 以下、ESP が 15 以上と定義されている  $^{10}$ ).

土壌の塩性化は必ずしも害をもたらすばかりでなく、塩の主体が Ca や Mg のような必須元素であれば植物の成長に有利に働く場合もある。植物に過度に吸収された Na がもたらす直接被害、拮抗作用によって  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ といった必須陽イオンの吸収が抑制される害、土壌の pH が上昇して必須重金属の不可給化、団粒構造が破壊され、粘土粒子が分散されることによる物理性の悪化等が挙げられる。

#### 2.3.3 風食

土壌表面の侵食現象は、水による侵食(水食)と、風による侵食(風食)に大きく分けられる. 本論文で対象とする土地は風食の被害が顕著であるため、ここでは風食について詳細を述べる.

風食は地表面を吹く風の剪断力(引きちぎろうとする力)によって土粒子に剪断応力(剪断力に対抗する力)が働き、それが限界値を超えるときに土粒子が動き始める現象である <sup>12)</sup>. 風食は一般に、土粒子の①分散②運搬③堆積という三段階の過程に分けられる. ①及び②は重力に勝る運動エネルギーを持った地表風の乱流の影響によって土粒子が分散し運ばれる現象で、この作用はデフレーション(deflation)と言われる. また、③は風の運動エネルギーがある限度以下に減衰したときにデフレーションが止まり、堆積が始まる現象である <sup>11)</sup>. このような風食により、地表面が削られ土壌が損失し、その土地の肥沃度を奪う. また、植生が存在する場合は風により表層の土壌を失い、根の露出によるダメージを受ける. さらに、運搬された砂は他の場所に堆積し、その地点の植生にも影響を及ぼす <sup>13)</sup>.

地盤の受食性は土壌の性質、気候、地表面の粗度(摩擦速度)、植生被覆及び風向に沿った

地域の長さで決定される. Bagnold と河村は地表面の粗度と摩擦速度の関係を導き,それらの関係を基に風食による土壌損失量を求める式について様々な検討がなされた. 土壌損失量と摩擦速度はそれぞれ,以下の式(2.3),(2.4),(2.5),(2.6)によって表される<sup>12),13),14)</sup>.

$$q = C(d/D)0.5U_*^3 \rho/g \tag{2.3}$$

$$q = K_k (U_* - U_{*ct})(U_* + U_{*ct})^2 \rho / g$$
(2.4)

$$U_* = \sqrt{\tau/\rho} \tag{2.5}$$

$$U_{*ct} = A\sqrt{(\sigma - \rho)/\rho} gd \tag{2.6}$$

ここに、q: 単位幅単位時間あたりの飛砂量(g/m・s)、C: 気候的関数、d: 代表粒径(mm)、D: 標準粒径(0.25mm)、 $U_*$ : 摩擦速度(cm/s)、 $\rho$ : 空気の密度(g/cm³)、g: 重力加速度 (m/s²)  $K_k$ : 定数( $\Rightarrow$ 0.28)、 $\tau$ : 風によるせん断応力(N/m²)、 $U_{*ct}$ : 限界摩擦速度(cm/s)、A: レイノルズ数による定数で約 0.1 の値を示す。 $\sigma$ : 砂の密度 (g/cm³)

Thronthwaite は気候的関数 C を、平均風速及び降雨量と蒸発散量の差で表した  $^{15)}$ . また、Skidmore、Fischer および Woodruff は FORTTRAN IVを利用して解析的に q を求める手法を発展させた  $^{16)}$ . また、Chepil や Pasak は野外観測と風洞実験により、風食強度を実験的に求めている  $^{17)}$ .

#### 2.4 乾燥地における既存の土地劣化対策技術

#### 2.4.1 物理的・化学的な土壌劣化に対する対策

物理的な土壌劣化は、土壌中の有機分、塩分の方よりにより化学的な土壌劣化を誘発する. 物理的・化学的な土壌劣化を引き起こさないようにするためには作物の養分吸収率(作物の養分吸収量/施肥量)を最大にする、すなわち養分(塩)の土壌中の残存量をできるだけ少なくする施肥技術が必要である. 特に乾燥地における過剰の施肥は土壌の塩性化を招きやすい. また、養分の吸収率は灌漑と密接に関わっている. 乾燥地で広範に利用されている表面灌漑はコストがかからないが、灌漑水中の塩類を土壌に多量に付加する一方で、養分の流亡や地下水汚染を引き起こす恐れがある. これに対して、一旦塩類によって劣悪化した土壌を修復するには大量の水で土壌を洗浄するリーチングや、耐塩性の植物を用いて塩分を吸収させる等の方法があるが、どのような方法を用いるにしても生産を停止し、劣悪化が著しい場合は耕地を放棄せざるを得ない. これを避けるには常に土壌の塩類濃度やpHを管理し、適正範囲に維持する必要がある8.

#### 2.4.2 風食に対する対策

風食の被害を防止する対策として、生物的、物理的、化学的防風・防砂法が挙げられる. 生物的防砂法とは、高木・中木・低木樹や草本植物を播種・植栽して砂面を被覆し、地表の風を弱めて砂の移動を防止する方法であり、砂丘固定法、砂丘周辺の防砂林の造成法、農地内の保護林の造成法等が挙げられる。地表面を被覆する方法として、耐乾性の植物を播種・移植させる草生法、ワラをシャベルで砂中に押し込み埋める草方格という方法がある<sup>7)</sup>。

物理的防砂法は工学的被覆防風・防砂法とも呼ばれ、ネットや網、壁などを造成する防風垣、粘土、礫などによる被覆法が例として挙げられる。また前述の草法格もこれに分類される場合がある。防風垣は 1~5m 程度の防風・防砂垣、防風・防砂ネット、土壁、石垣、板塀、フェンスなどを列状、格子状、帯状に配置して防風、防砂を行う方法である。石礫粘土被覆法とは、石、礫、砂、粘土、塩塊、スラグ、アスファルト、ネット、フィルムなどで砂丘を包むマルチ被覆法である。石、礫、砂では 2~5cm、土類では 10~15cm の厚さに被覆すると効果的である 8.

化学的防砂法は、地表面を凝固させるアスファルト・高分子・ゴム乳剤などで砂面を被覆し、砂を固める固砂法、吸湿性資材、土壌改良材などを鋤込み、混入する地表面改良法が挙げられる。前者に関しては、速効性はあるが経済的に負担が大きく、後者は水が少しでも得られる農地、特に園芸施設での使用に大きな効果を発揮するが、降水量が極めて少なく、不規則な降雨形態である広大な乾燥地域では吸湿剤の使用効果は低く、経済的負担や材料自体の使用後の廃棄、処理の問題で好ましくない場合が多い8).

#### 2.5 乾燥地における既存の地盤環境調査事例

乾燥地における地盤調査はこれまで、乾燥地における農地開発を主目的として、塩類集積メカニズムの解明、植生の保護、土地の劣化具合の診断や、乾燥地における農地の地盤環境モニタリング等、様々な観点からサンプリング及び長期的な観測がなされてきた.以下にその研究事例を示す.

#### 2.5.1 タクラマカン砂漠北緑地域の塩類集積と土壌の物理的性質に関する調査 18)

神谷らは、中国新疆ウイグル自治区のタクラマカン砂漠北緑地域において、灌漑による 塩類集積の原因を解明するために、塩類集積の被害のない地点と被害を受けた地点の土壌 サンプリングを深さ別に行い、土層構成、密度、粒度分布、含水比、電気伝導率及び透水 係数を測定し、年間を通した地下水位と電気伝導率変動を観測している。その結果、塩類 が集積しやすい土壌は細粒分が多く、透水性の低い土壌であることがわかり、さらに塩類 集積地において、一冬を超えると電気伝導率が上昇する傾向も観測している。

#### 2.5.2 タクラマカン砂漠における地下水の成分調査 19)

地盤内の塩分・有機分はその土地の地下水の塩類濃度に影響を受ける。塩類集積の過程において、水分のみ蒸発し、地下水に含まれる塩分は地盤内に滞留するためである。Ju らは、中国のタクラマカン砂漠において、Andier river 周辺域の地下水の成分を調べたところ、 $HCO_3$ ,  $SO_4$ <sup>2</sup>, CI<sup>2</sup>と Na<sup>4</sup>の関連性が顕著に表れているということがわかった。また、下流域においては  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ と強い相関があるということがわかっている。

#### 2.5.3 イスラエル・ネゲブ北部の砂地盤における透水性と塩類濃度に関する研究 20)

EISENBERG らは、イスラエルの Negev 砂漠北部の半乾燥地において、乾燥農業を行うための灌漑政策に対する提案を行うため、9 地点において深さ別のサンプリングを行い、粘土分含有率、陽イオン交換容量、交換性陽イオン、塩化物イオン、硫酸イオン、電気伝導率について詳細な分析を行っている。その結果、灌漑政策は当該地域において有効であるということが、ESP 値や EC 値を確認することで明らかになった。

#### 2.5.4 中国・准噶尔 (Dzungaria) 西部の風成による塩類集積過程の調査<sup>21)</sup>

Jilili らは、中国の准噶尔(Dzungaria) 西部に位置する Ebinur 塩湖より、風により飛来する塩分と、土壌の塩性化の関係を調査するために、塩湖周辺の 3 地点において、地表面の土壌の塩分を測定した。地点 I (湖近隣の東部)、II (湖近隣の西部)、及びIII (湖より 100km 東に離れた地点)の表層の炭酸、硫酸、塩化物、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム及びカリウムイオンを測定した結果、地点 I が最も飛来塩分の影響を受けており、地点 II においては硫酸塩による塩性化が支配的であった。一方で、湖から離れた地点III は塩性化の影響

をほとんど受けていなかった。また、各地点の深さ別の塩分濃度を調査すると、地表面の塩分が概ね高く、深くなるにつれ塩分濃度は低くなる傾向にあり、地表面が飛来塩分の影響を強く受けている可能性があることが示唆された。

このように、乾燥地で植物を生育させるためには、土壌学・地盤工学の観点から幅広く地盤調査を行い、かつ根が伸びる深さも考慮した深さ別の土壌の物理性や化学性を把握しなければならない。特に地盤内の含水比、イオン濃度、有機物濃度は植物の生育に重要と考えられる。このような調査方法・調査項目を参考にして、第三章の地盤環境調査を行った。

#### 2.6 植栽による地盤環境改善技術に関する研究及び事例

砂漠化の被害を、本論文と同様に植生を用いて地盤工学・土壌学の観点から解決しようと試みている事例は多数存在する.砂漠化対策は直接的な対策技術だけではなく、その土地の経済政策を整えることによって間接的に土地の劣化を防ぐ方法もある.

そこで、本節では近年のアジア・オーストラリア・アフリカについての砂漠化防止対策 技術や、経済政策についての取り組みを述べる.

#### 2.6.1 中国内蒙古自治地区阿拉善盟における砂漠化防止と緑化の試み22)

中国内蒙古地区阿拉善盟では、「西部大開発」のスローガンのもと内陸地域の開発を強力に推し進めた結果、道路、都市開発が行われ、良好な植生が減少する可能性がある。また、放牧を限られた地域に限定させることにより、砂漠化を助長する危険性がある。

これらの背景を踏まえ、現地に住む人々や研究者らが、様々な方法で砂漠化地域・荒廃 地域の緑化に取り組んでいる.

道沙子という地区では飛行機播種を行い,飛行機播種に必要と言われている年間降水量200mmを下回る地域で,播種する植物や播種法,播種の時期を工夫することで,緑化を成功させた.沙地への適用性の高い先駆植物である Artemisia で風により流動する砂を固定し、その後花棒などで造林するという方法や,飛砂による被覆が厚くなると発芽率の低下が懸念されるが,砂の飛来が多い春期を避けた播種を行うことによって発芽率を高めている。また,種子が地表に露出したままだと発芽率は低くなると予想されるが,種子にコーティングを施すことにより解決させている。このような知見の組み合わせにより,より効率的に大規模の緑化を行うことを目的としている。

また、阿拉善の砂漠・沙地や高山は、過放牧が植生破壊の大きな原因になっており、放牧民を集約的な牧畜に転換させないと緑化は難しいと考えられている。このような背景から、阿拉善左旗郊外において、地区の共産党委員会による行政指導により、放牧民の定住化や経済的自立を目的とした施設が設けられている。ここでは放牧民がビニールハウスや酪農施設により生産活動を行い、生産品を企業が買い取って加工・販売する計画である。

さらに、薬用植物を人工的に栽培して乱獲を防ぎ、産業化しようという試みもある. 漢 方薬や健康食品の原料になる薬用植物の中には、乾燥地や塩類土壌に適した種がいくつか あり、カンゾウもその一種であるとされている. 梭梭という寄生植物にホンオニクという 植物を寄生させて栽培を行っている事例もある. 寄生植物となる低木の栽培を伴うため、 栽培自体が緑化としても有効であると期待されている.

2. 6. 2 西オーストラリアの乾燥地における Eucalyptus sargentii の生育技術に関する検討 <sup>23)</sup> 植林技術に関する研究・取組みも活発に行われている. 小島らは, 西オーストラリアの Wickepin においてユーカリ(Eucalyptus sargentii)の植栽実験を様々な方法で行い, 各条件での

生存率とバイオマス量について評価している. 地表を 60cm 程度削り, 畝を作る方法(Ripping), 直径 10cm, 深さ 1m の孔を掘り, その孔に植栽する方法(Hole), 孔を掘ってその中に塩ビパイプを埋める方法(Pipe)の 3 種の条件で生育実験を 6 箇所で行い, 4 年間の生存率と地上部の背丈, バイオマス量の関係について評価している. その結果, Ripping 条件と, Hole 条件で孔の中に現地の腐葉土を混合した条件で生存率も高いことがわかり, さらに塩類集積が問題になっている地域では Pipe 条件で現地の腐葉土を混合した条件での方法も有効であるということが明らかになった. さらに, ウォーターロギングが問題になっている地域では, Ripping 条件が特に有効であるということもわかっている.

# 2.6.3 中国における大規模造林技術 5)

中国において、華北地区、東北地区、西北地区の13省、市、自治区にまたがる三北防護林は、風砂の害や土砂流出の激しい地域に造成される大防護林帯である。西は新疆ウイグル自治区ウズベリシャンコウからはじまり、東は黒竜江浜県にいたる東西4480km、南北560~1460km の地域での森林造成に取り組んでおり、中国北部の551県に及ぶ、総面積は407万km²で、国土42.4%を占める大規模な造林を行っている。工事は1978年から始まり、2050年までの73年間続ける予定である。総造林面積は35.6万km²で、そのうち人工造林面積は26.9万km²、封山封砂育林面積は7.6万km²、空中播種造林は1.1万km²で、工事が完成した時には、森林率は元の5.1%から14.9%まで増えることになる。

造林に適した植生の種類に関しては、内蒙古自治区には多くの灌木樹種が生育しているので、環境変動の適応性が高い在来樹種を用いることができる。例えば、梭梭、沙拐棗、タマリクス、臭柏、小葉錦鶏児、白沙蒿等が適している。毛烏素沙地の緑化には油蒿、檸沙柳、楊柴等の灌木樹種が植栽されている。また、常緑針葉樹の臭柏は耐寒性、耐乾性に優れた灌木で、枝や葉は密に茂り、匍匐枝は不定根を発生させながら砂の上を伸長し、風食や砂による埋没にも強く、貧栄養な条件下において数十年安定な群落を形成し、土壌生成作用など生態的な機能に優れている。この他、経済的に有用な樹種として選抜された、沙棘、旱柳、麻黄等が植栽されている。外来種である樟子松の生育が良好である。

防風林造成のためには、植栽の効果が速やかに発揮されるように、すなわち植生が健全に生育するように植生密度に注意しなければならない。植生密度が高いと植物からの蒸発散作用が大きく、結果として地下水位の低下が起こり、土壌水分が不足し、植生が枯死してしまった事例もある。このようなことが起こらないようにするためには、水資源を十分に利用し、かつ過剰に消費しない植生密度を、植栽する植物の種類に応じて考慮する必要がある。

播種時期に関しては、中国では春期と秋季が適期とされている.これは、春に凍結土壌が融解し、表層の含水率が高まることと、秋は雨期であるから、播種には適しているが、越冬までの生育期間が短いため、不利になる.一方で、秋季の播種は翌春の発芽・発根が早くなるという利点もある.

定植方法については、面が平らなスコップを用いて、まず表層の砂を取り除き、地表面にスコップを差し込んで隙間を空け、その隙間に苗木を差し込んで植栽する方法が最も簡単である。作業効率も良く、根系が壁にしっかりと寄りかかるために水分吸収が容易である。この方法は、乾燥している層が10cm以下であり薄く、含水率が2%以上の斜面で行われている。

水源が不足しており、乾燥している層が 10cm 以上の地域では、座水植栽法が行われている. これは径が約 30cm の孔の中に水を注ぎ、その直後に植栽する方法である.

ポット苗を用いた方法も用いられており、甘粛省の治砂研究所が行った降水量 100mm の 乾燥地での試験によると、梭梭と沙拐棗のポット苗の活着率はそれぞれ 41%と 31%であっ た. 大興安嶺の林業局が行った降水量 426mm の半乾燥地における実験では、落葉松のポッ ト苗の活着率は裸苗より 30%以上高かった.

### 2.6.4 ダブルサック工法 <sup>24), 25)</sup>

ダブルサック工法は、熱帯乾燥地等において幼樹や樹木の根を土壌中深くに伸長させ、自ら土壌水分を獲得できるように根系を深く誘導するための植樹工法である。あらかじめオーガー等によって基盤土壌を掘削し、その円筒孔に外筒と内筒を垂直に埋め込み。根系の初期伸長を誘導し、成長を助長する方法である。外筒と内筒は生分解性ビニールやクラフト紙などを素材としている。内筒には有機質系土壌資材や肥料を混合し、種子や根が深く垂直に伸長できる構造にしている。内筒内に根が十分に伸長すると、内筒の素材を根が突き破り、外筒内に伸長できる二重構造になっている。さらに、外筒内に根が伸長し、根が筒内に充実すると、外筒素材を突き抜け、基盤土壌に根が伸長することを期待した方法である。このような工法が考案されたのは、熱帯乾燥地で植生する樹木は水分・養分を吸収するために地中深くに根系を発達させていること、地温が上昇すると土壌表層が著しく乾燥するため、植樹した樹木や植物の幼苗は生育維持が極めて困難であること、また、浅根性樹木類等は移植後の枯死率が高いこと等を現地で観察し、実験的に検証してきた経緯がある。土壌基盤に円筒孔を掘削することで、少量の雨水を基盤土壌に浸透させることができる。本工法を考案した発想は、不透水層を掘削により破壊して基盤土壌に浸透した水分を樹木成長のために利用し、熱帯乾燥条件でも安定的に生育させることである。

現在、ジブチ共和国やエチオピア国においても本工法の有用性を検証するための植生実験が行われている。エチオピア国の Anano 地域ではトウダイグサ科の Jatropha 属植物やワサビノキ科 Moringa 属を対象にダブルサックを用いた植生実験が実施されている。このような工法によって熱帯乾燥地で樹木類を生育させ、樹林の形成が可能になれば、樹陰下での強度な日射の減少、気温上昇抑制、空中湿度維持等微気象緩和効果が期待できる。

#### 2.7 カンゾウに関する基本事項

本節において, 2.7.1節ではカンゾウの植物学的・薬用植物学的な基本的性質, 2.7.2節では日本におけるカンゾウの輸入に関する現状を記す.

#### 2.7.1 カンゾウの生態及び性状, 生育特性 26)

- 1) 植物名 学名 *Glycyrrhiza urarensis Fisher*(ウラルカンゾウ)及び *Glycyrrhiza Glabra Linne*(スペインカンゾウ) 生薬名 甘草
- 2) 生薬としての利用部位

根またはストロン(種子から発芽したもの(実生苗)ではなく,生長した根から発生するストロン(新しい茎,地下茎))を生薬として利用する.図 2-1 に,実生苗とストロン苗の概念図を示す.

#### 3) 植物の性状

マメ科の多年性草木.大きな主根があり、これより四方に地下茎(ストロン)を走出する.根の長さは成長すると 1~2m に達する.茎は堅硬で、短毛で密に覆われている.また、鱗片状または点状あるいは小刺状の腺体がある. 花期 6~7 月、果期 7~8 月.

Glycyrrhiza urarensis Fisher は、中国東北部、華北、西北部、モンゴル、シベリアに自生し、茎は匍匐、またはやや斜上して高さ 40~70cm、葉は奇数葉状複製し、小葉は 9~17 枚、卵形または倒卵形あるいは楕円形、長さ 2.5~5cm、全縁、両面は短毛および腺点覆われるが変異が大きい、総状花序は淡紫~赤紫色の花を密につける。さや果は線状長球形、湾曲して鎌形あるいは環状、表面は網状の腺体で覆われる。

Glycyrrhiza Glabra Linne は、地中海沿岸から小アジア、イラン、ロシア、中国西部に自生し、茎は直立して高さ 40~90(100)cm、葉は奇数羽状複生し、小葉は 9~19 枚、長卵状ひ針形または狭長楕円形、裏面は腺点で覆われる、総状花序は淡紫色の花を密に付ける。さや果は偏平、長楕円形、表面は平滑または短刺で覆われるが変異が大きい。

#### 4) 生薬の特徴および産地

根はほぼ円柱形を呈し、径 0.5~3cm、長さ 1m 以上にも及ぶ.外面は暗褐色~赤褐色で、縦じわがあり、しばしば皮目、小芽およびりん片葉をつける.横断面は、皮部と木部の境界がほぼ明らかで、放射状の構造を現し、しばしば放射状の裂け目がある.ストロンに基づくものでは髄を認めるが、根に基づくものではこれを認めない.味は甘い.

主な産地は *Glycyrrhiza urarensis* に関しては中国(内蒙古,吉林省,黒竜江省,遼寧省,河 北省,新疆),及びロシア, *Glycyrrhiza Glabra* に関しては中国(内蒙古,新疆),ロシア,イ ラン、パキスタン、アフガニスタン、トルコ、スペイン、エジプトに分布する.

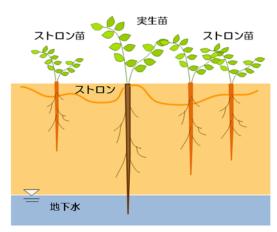


図 2-1. 実生苗とストロン苗の概念図

#### 5) 栽培種の特性

日本市場において、G. urarensis を基原とし、中国東北地方で採取されるものを「東北甘草」と呼び、G. Glabra を基原とするものを「西北甘草」と呼ぶ、G. urarensis は、冷涼な乾燥した気候を好み、砂漠植生を示す乾燥地や草原に自生し、土壌はアルカリ性を好む、G. Glabra は、やや乾燥した気候を好み、川沿いや道路脇の草原に自生し、土壌はアルカリ性を好むが、日本の酸性土壌でもよく生育する。

#### 6) 根に含まれる成分について

トリテルペン配糖体としてグリチルリチン,グリチルリチン酸(以下 GC),フラバノン配糖体としてリクイリチン,リクイリチゲニンなど,その他にイソフラバン,イソフラボン,ポリアミンなどが含まれる.

### 7) 地域適性及び生育特性(G. Glabra)

#### a)気候区分

寒さの区分は-6℃-10℃,暖かさの区分は暖かさ指数(各月の平均気温から 5 度を引き、この値が負となるときは 0 としたときの総和) 140 未満

b)日照条件 月間 50 時間~200 時間

#### 8) 土壤区分

土壌分類 ポドソル性褐色土壌,酸性褐色土壌,黄褐色土壌等で生育する.

排水のよい山地,砂地を好むが,土壌は必ずしも肥沃でなくとも良い. また,遮光の必要性はない

9) 薬効成分グリチルリチン(グリチルリチン酸)(Glycyrrhizin)について 4

化学式 C<sub>42</sub>H<sub>62</sub>O<sub>16</sub> (分子量: 822.94)で表されるグリチルリチンの構造式を図 2-2 に示す.

用途は漢方処方薬であり、かぜ薬、解熱鎮痛消炎薬、鎮痛鎮痙薬、鎮咳去痰薬、健胃消化薬とみなされる各種処方およびその他の処方に極めて高頻度で配合される.粉末、エキスの形で配合剤に用いる.薬用として処方できるカンゾウはカンゾウ重量に対して GC が2.5%以上(表 2-4)含まれているものである.また、砂糖の 30~50 倍の甘さを持つため、薬用

# 第二章 既往の土地劣化対策事例及びカンゾウ生育研究

として使用できないカンゾウは、甘味料や菓子、ルートビアという飲料にも使用される<sup>23)</sup>. 3)配合漢方処方名:小柴胡湯、甘草湯、葛根湯、安中散など

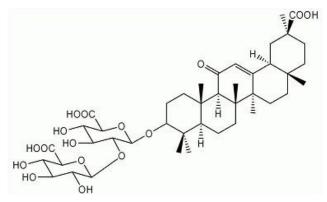


図 2-2.グリチルリチン酸の構造式

2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1			
エキス含量	希エタノールエキス 25.0%以上		
灰分	7%以下		
酸不溶性灰分	2%以下		
乾燥減量	12%以下(6 時間)		
グリチルリチン酸	2.5%以上		

表 2-4. 日本薬局方の試験の適否 26)

#### 2.7.2 日本におけるカンゾウ輸入の現状

カンゾウは様々な用途で利用される需要の高い薬用植物である.しかし、漢方薬原料として日本でカンゾウ栽培は行われておらず、その100%を輸入に依存している.図 2-3 に、日本で使用されている代表的な薬用植物とその使用量を示す<sup>27)</sup>.図のようにカンゾウは日本国内で最も使用量が多い生薬である.日本の漢方薬の約7割に処方されており、需要の高い漢方薬原料と言える.

さらに図 2-4 に、日本における 1990 年~2010 年までの各国からのカンゾウ輸入量の推移を示す  $^{28),29)$ . 図より、総輸入量は過去の 17 年間で 1/10 程度に減少していることがわかるが、ここ近年輸入量の変動は少ないこともわかる.

さらに、図 2-5 に世界各国のカンゾウ輸入単価の推移を示している <sup>29)</sup>.図 2-4 の輸入量の減少や中国国務院は輸出規制を受け、2000 年から輸出規制をはじめ、この煽りを受け 2004 年頃から価格が高騰し、2010 年には 2004 年の約 1.5 倍の値段に価格が上昇している。これらの背景から、薬用植物資源としてのカンゾウ供給難や価格高騰に関しても、急速に解決しなければならない問題であるということがわかる。

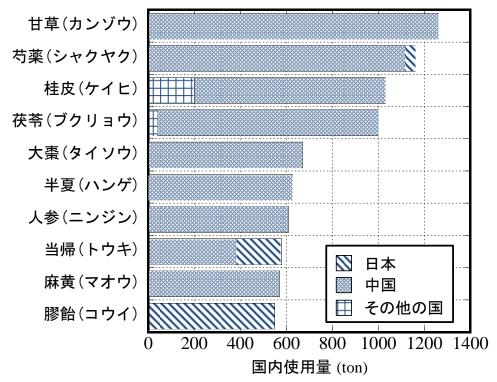


図 2-3. 生薬の種類と使用量 27)

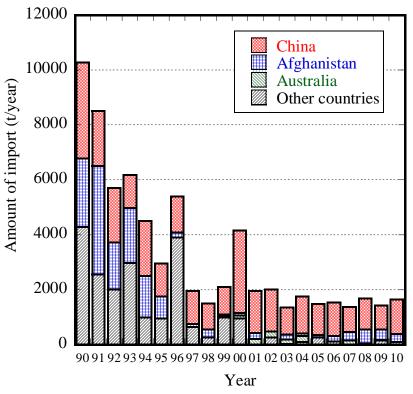
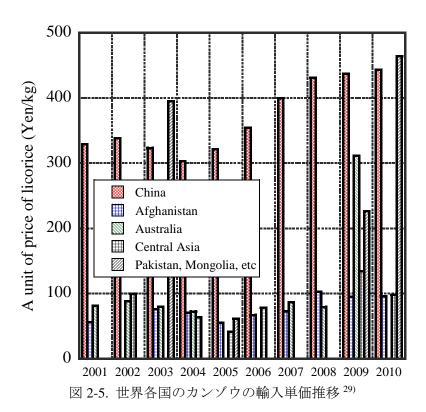


図 2-4. 日本における各国からのカンゾウ輸入量推移 28),29)



#### 2.8 日本国内における様々なカンゾウ栽培研究

日本国内における栽培研究は、カンゾウ輸入価格の高騰を受け、主に高品質カンゾウを 栽培し、カンゾウ自給率を高める事を目的とした栽培実験が盛んに行われている.

既存のカンゾウ生育実験は主としてカンゾウの物理的な生育方法・生育技術と,カンゾウ成長に適切な土壌・施肥濃度環境の検討に分類されるが,以下にその事例を示す.

#### 2.8.1 ウラルカンゾウの筒栽培 30), 31), 32)

原産地と異なる環境条件である日本で甘草を栽培する場合,耕土の深さ,土質,気象条件,地下水位などを考慮して栽培方法を検討する必要がある.尾崎らは,地面の上に立てた直径 10cm,高さ 1mの筒に甘草の種または苗を植え付け,そこから発生した根が極性に従って伸びる特性を利用した栽培を試みた.

実験試料は、京都薬用植物園において、60cm 角のコンクリートポットで保存栽培されているウラルカンゾウを使用している。各方面から入手したウラルカンゾウ 15 系統を、ストロン苗、培養苗、実生苗(種を筒に直接植え付けたもの)の成長を比較した。なお、カンゾウ属植物の種子については硬実で吸水性が低い恐れがあるので、一昼夜 25℃の水に浸漬処理を行った。ある系統の無処理区では、発芽が始まったのがうえつけ 21 日後であったのに対し、処理区では 6 日目に発芽が見られ、発芽率は 50~87%であった。塩ビ筒に播種したウラルカンゾウは、発芽後の根の伸長が著しく、播種 2 ヶ月後には 70cm 下の地表面に接するところに根端部が見られた。また、萌芽した茎数は 1~3 本で、生育最盛期の草丈は、ある系統では 1m 以上の値を示した。

実験に使用した土質としては、廃棄植物を腐敗させて作成した粗朶土を篩にかけ、乾燥 牛肥と石灰を混合したものを用いた.栽培は屋外の圃場と無加温ハウス内で実施し、適宜 灌水ならびに薬剤散布を行った.

2002年に、1年間栽培品として、15系統のうち6系統について、一部を掘り上げて地下部の形状と生育量ならびにその成分量について調査した。

甘草屋敷(山梨県)系統については、培養苗をコンクリートポットに植え付けて栽培年次による生育と成分量を検討してきた。主根基部の太さは2年間栽培したもので2.5cmを計測したことから、植物の生育そのものには問題がないことがわかった。また、そのGC含量は3年間栽培品で4.0%以上の値を示し、成分的にも優良な系統であることが判明した。このことから、培養苗を含めてすべての材料を供試できる甘草屋敷系統を中心に実験を進めた。なお、使用した種苗の系統については表2-5に示す。

系統間の比較実験には、No.419、208、331、211 の 4 系統の実生苗、ストロン苗について それぞれ検討した。

実生苗の地下部は No.458 の主根基部が 2.33cm の太さを示し、その他の系統はいずれも 1.5~1.6cm であった. また, 基部から 60cm 下の太さは No.458 および 308 が 1cm 以上を示し、

その根の重さ(湿潤状態)では 150g 前後の値であった. 次にストロン苗では, 系統間に大きな差が見られ, No.419 の根基部が 2.17cm で, 50cm 下でも 1.71cm であり, その根重は 290g で本実験の最高値を示した.

GC 含量は根の位置(基部からの長さ)によって異なり、基部から先端に向かって高くなる傾向が見られ、それらは実生苗において顕著なものであった。実生苗では No.211 および No.308 の先端部で 2.5%以上の値を示した。一方、ストロン苗では No.419 を除く 3 系統の検体全てが 2.5%以上であった。

供試する材料としては実生苗(RP),培養苗(CP),ストロン苗(SP)があり、それらを実験材料として供試できる No.211 および 419 の 2 系統について比較している.

地下部を比較すると、根の太さは No.211 において SP>CP>RP を示した。No.419 については、どの苗でも基部の太さは  $1.5\sim1.9$ cm を示し、その根重は RP 区が高い値を示した。

供試材料による GC 含量は、RP>CP>SP を示す傾向が見られ、全体的に低含量の No.419 で顕著であった。No.211 では SP 区の根基部を除くすべての区で 2.5%以上を示し、特に RP 区ではいずれも 5%を超える高い値であった。一方、生育旺盛な No.419 では CP 区および CP 区の先端部のみが 2.5%以上であり、系統間の格差が認められた。

これまでの圃場栽培では、ストロンはあらゆる方向に細長く伸長し、通常 1 本の主根が 太く発達すると思われ、収穫時の掘り上げに多大な労力が必要となる。今回の筒栽培方法 は、植え付けた種苗から発生した根が極性に従って伸長する特性を利用したものである。 実際の栽培で、根は筒の下まで伸長して直根性のゴボウに類似した形状となった。

筒栽培の利点としては、筒を抜くだけで真っ直ぐな根を簡便に収穫でき、それは生薬としての調製が容易である。また、立体的な栽培法であるため、植栽密度を高めて収穫量を増加させることができる。さらに、栽培年次の明白な根を収穫できることから、各種比較・処理試験などに応用できる。一方、筒として塩ビパイプを利用する場合、コスト面に問題があり、また、栽培初期にパイプの設置、植え付け、灌水などに手間を有する。今回の栽培実験で、1年栽培ですでに生薬「甘草」の基準値である 0.5cm 以上の根径、ならびに 2.5%以上の GC 含量を示すものもあった。

	表 2-3. 使用したガンノリの糸統と導入先				
導入番号	系統名	導入先			
419		USSR (Hortus Botanicus Instituti Vilar)			
458		USSR (Hortus Botanicus Instituti Plantarum Medicinalium Moscow)			
308	東京大学薬学部	東京大学薬学部			
145	北京植物園	中国科学院植物研究所北京植物園			
230	丸善	新潟薬科大学(林氏)			
208	名寄試験場	大阪薬科大学(草野教授)			
331	北海道医療大学	大阪薬科大学(草野教授)			
211	甘草屋敷(山梨県塩山市)	甘草屋敷(山梨県塩山市;尾崎和男採集)			
260	中国瀋陽薬科大学	近畿大学友田教授から培養苗(96.09.12に中国瀋陽薬科大学より分譲)			
2	中国新彊ウイグル自治区栽培品	近畿大学(角谷助手)			
180	北海道大学中央標本園	北海道大学薬学部付属植物園採種品(尾崎和男)			

表 2-5. 使用したカンゾウの系統と導入先

資料提供:武田薬品 京都薬用植物園

# 2.8.2 施与培養液濃度がカンゾウの無機成分並びに GC 含有量に及ぼす影響(ロックウールによる栽培)<sup>33)</sup>

佐藤らは、施肥の無機成分濃度とカンゾウの生育及びカンゾウの生育量、グリチルリチン含有量を、ロックウールを用いた生育実験において調査した.具体的には、3種類の異なる濃度の液肥を施肥してカンゾウ生育を行い、カンゾウ内の無機成分及びグリチルリチン酸を分析することにより、営利目的での生育を目指す上で最も効率的で、また、植物への過剰な施肥を避けるための知見を得ようとした.

ロックウールとは、輝緑石を千数百度の高熱で溶かし、綿状にしたあとに成形したもので、従来の土を用いた栽培に対し無菌であり土壌伝染性病害の心配がない上、通気性、保水性、保肥性に優れていることから営利目的、また栄養生理研究のための溶液栽培において使われている栽培資材である。培養液処理として、一般的に用いられている大塚培養液 A 処方(N:P:K:Ca:Mg=18.6:5.1:8.6:8.2:3.0me/l)の 1/8 単位区 (右の処方を 1/8 倍に薄めたもの)、同 1/4 単位区、同 1/2 単位区を設けた。各処理区 5 株を供試し、点滴灌水装置により 1 日 4 回、底面から培養液が排出されるまで培養液をかん液した。収穫後、植物体の地上部・地下部の乾物重量、植物体中の無機成分と GC の分散分析および多重比較を行った。

地上部・地下部の乾物重量を各条件で比較したところ, 1/4 単位区の培養液を施与した個体が地上部・地下部ともに最も高い値を示し,他の濃度を与えた条件より有意差が認められた.

地上部・地下部のカリウム及びリン(無機成分)の含有量を比較したところ,地上部では培養液濃度が高くなるにつれカリウム,リンともに含有量が高くなる傾向が認められ,1/2 単位区では他の処理区よりも有為的に高かった。地下部では培養液濃度が高くなるにつれ,リンは含有率が上昇する傾向に、カリウムでは1/4区で高い傾向にあったが,双方とも有意差は認められなかった。

GC 含有率に関しては、地下部のみデータを収集した。1/4 区で 2.52% と最も高く、1/2 区 (1.46%) との間に有意差が認められた。1/2 区と 1/8 区(2.0%)、1/4 区と 1/8 区の間には有意差は認められなかった。

このように、ロックウールで栽培した場合は大塚 A 処方の 1/4 単位区が GC 含量にとっては有効であるということがわかった.

#### 2.8.3 様々な環境要因に対する GC 酸蓄積の応答性の解析 34)

林らは、北海道名寄市における医薬基盤研究所の圃場において、直播による無施肥区と施肥区を1年生から5年生まで設け、貧栄養が根重とGC含有量へ及ぼす影響について検討している。各年次に炭酸カルシウムを100g/ha、窒素、リン酸、カリウムをそれぞれ施肥し、各年度でGC含有率と根重を解析した結果、無施肥区では根重とGC含有率が著しく低下した。このことから、貧栄養ストレスがGC蓄積に及ぼす影響は低いと判断された。

また、排水性の良好な褐色低地土と排水不良の灰色低地土において直播栽培したところ、

灰色低地土は褐色低地土よりも根重さが高かったことに対し、GC 含有率は有意に低いことが確認された. このことからも、乾燥ストレスが GC の蓄積に影響している可能性が示されている.

# 2.8.4 その他の日本国内におけるカンゾウ生育研究の現状

現在,日本国内の企業や農学・薬学の研究機関が様々な方法でカンゾウの自給を目的とした生育研究を行っている.表 2-6 に,2.8.1,2,8,2 節の内容を含む,その他の研究事例を示す.

鹿島建設と千葉大学の共同研究では、カンゾウを水耕栽培するための植物工場を設立し、栽培、収穫、出荷の効率化・安定化を図っている。元来、水耕栽培では主根を肥大化させることは困難であるとされている。しかし、植物工場において厳格に温度、湿度、日照、施肥条件を管理することによって、短期間で根を肥大化させ、GC含有率の高い個体を生育させることに一部成功している。

また、乾燥地の気候を利用した方法として、株式会社ツムラは中国において大規模なカンゾウ栽培を試みている. 70ha の敷地において栽培を行い、中国で既に栽培法の特許を取得し、日本への輸出を目指している.

研究内容	企業・大学	場所	特徴と現状
			筒状の容器で栽培することにより、施肥・灌水の管理が容易
		山口県岩国市	圃場栽培より収穫が容易で労力とコスト削減を望める
	武田薬品工業	熊本県合志市	筒栽培においてカンゾウの優良系統選抜、筒の長さ、筒の配置間隔等に
筒栽培	新日本製薬	青森県 (予定)	ついて実験的検討がなされている
	大阪薬科大学他	山形県(予定)	栽培年数2年を目途に、GC含有率2.5%、生根重200g以上を目指す
		島根県(予定)	新日本製薬では、熊本県合志市で500m2の試験栽培を行っている。青
			森、山形、島根での栽培も予定している。
	鹿島建設 千葉大学 医薬基盤研究所		気温・湿度・日照・施肥条件などを厳格に管理できる「植物工場」において
水耕栽培 水耕栽培		鹿島建設	カンゾウの水耕栽培を行っている。
小新私垣			1~1.5年で目標GC含有率に達する生育方法を見出した
	<b>区米</b> 基监训 九川		平成23年度、第9回産学官連携功労者として表彰を受けた
国内生産を目指した	医薬基盤研究所		甘草の国内生産方法を、土壌栄養条件、土壌水分、土壌硬度、湿度・凍
育種に関する取組み	<b>区米</b> 基监训 九川		結条件など多方面から検討している
大規模栽培	ツムラ		中国で栽培法の特許を取得
			日本への輸出を目指す
			粘土質の土壌にすることでGC含有率平均3.5%を達成
			70haの栽培と一部収穫に成功している

表 2-6. 日本国内におけるカンゾウ研究事例 30)-36)

#### 2.9 まとめと課題の抽出

本章 2.2, 2.3, 2.4 節より, 土地劣化の誘因と素因, 及びそれにより起こる現象のメカニズムと被害について述べた. 気象データの詳細は第三章で示すが, 対象としているモンゴル南部乾燥地は「乾燥」及び「沙漠」気候に区分されるが, 年間の降雨量が年によってバラバラであり, 不安定な地域である. このような土地で植物栽培を安定に行うためには, 植物生育に必要な水分の供給や地盤内の水分保持が課題となる. 加えて, 持続的にカンゾウ栽培を行うためには, 定植や管理の手間がかからない方法, すなわち定植する際の作業の労力や, 灌水の頻度を最小限にとどめる方法を考案することが重要となる. これらの点に留意してカンゾウ定植方法を提案しなければならない.

そのため、詳細は第三章にて述べるが、植生の生育を目的とした地盤環境調査においては、地盤内の水分保持という観点から、地盤の物理的環境として粒度分布、土層構成、含水比、乾燥密度、有効水分量、透水係数が重要な調査項目である。また、化学的環境としてpH、EC(電気伝導度)、CEC(陽イオン交換容量)、交換性陽イオン、有機分含有量も植物生育に重要な環境因子であり、これらの分析をカンゾウ自生地・非自生地にて行う。

加えて、カンゾウの性状や既往の生育技術に関しては、根の成長を促進させ、地下水位 に到達する期間を短くすることで、地下水到達後はそこから自律的に水分を吸収すること で健全な生育が保たれる。これより、定植・灌水後しばらく根圏に水分を保ち、主根を真 っ直ぐに生育できる可能性がある「ダブルサック法」「筒栽培」を応用することは乾燥地に おけるカンゾウ生育に有効な手段であると考えられる.しかし,カンゾウ生育に適切な地 盤内の水分・栄養環境の詳細な検討はなされていないのが現状であり、これを明らかにす ることで適切な緑化方法を提案できると考えられる.加えて、カンゾウ自生地において過 去に詳細な地盤環境調査は行われておらず、カンゾウが自生できる環境も不明確である. これら二つの問題を解明するために、カンゾウ自生地・非自生地において上記の項目を調 査し、自生地と非自生地の差異からカンゾウ生育に重要な環境因子を明らかにするととも に,筒状の容器に着目して,生育に適切な地盤環境をカンゾウ生育実験において把握する 必要がある。そこで、第三章において、モンゴル南部、カンゾウ自生地・非自生地におい て原位置での地盤環境調査を行った結果を記し、自生地と非自生地の地盤内物理・化学的 環境を明確にし、自生地と非自生地の差異より、カンゾウが自生するために補うべき地盤 環境を明確化する、また、第四章において筒状の容器に着目し、様々な地盤環境において カンゾウ生育実験を行い、カンゾウ生育に適切な地盤環境を明らかにする.

#### 参考文献

- 1) UNEP: World Atlas of Desertification, 1992.
- 2) 赤木祥彦: 砂漠化とその対策 乾燥地帯の環境問題,東京大学出版会,pp.32-35,71-77,113-116,2005
- 3) UNEP: Status of Desertification and Implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification, 1997.
- 4) UNEP: Status of Desertification and Implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification, 1991.
- 5) 吉川賢, 山中典和, 大手信人: 乾燥地の自然と緑化, 共立出版, pp.142-150, 188-192, 2004.
- 6) 志賀永一, モンゴル遊牧研究のための調査基礎資料:トゥブ県バヤンツァガン郡の指導者からの聞き取り, 農業経営研究 31 pp.167-177, 2005.
- 7) 農林水産省資料:薬用植物に関する農林資産省の取り組み, http://www.maff.go.jp/j/keikaku/pdf/yakuyou\_sesaku1.pdf (2014 年 1 月閲覧)
- 8) 山本太平: 乾燥地化学シリーズ第三巻 乾燥地の土地劣化とその対策, 古今書院, pp.6, 10,17-18, 81-85, 158-159, 2008.
- 9) Oldeman L.R., R.T.A. Hakkeling and W.G. Sombrock: World map of the atatus of human-induced soil degragation, an explanatory note, Second revised editions, Degradation Environment Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD), International Soil Reference and Information Center/United Nations Environment Programme Wageningen/Nairobi, 1991.
- 10) 井上光弘,望月秀俊: 3-1-1 土壌の診断法(21 世紀の乾燥地科学-人と自然の持続性-恒川 篤史編),古今書院,pp.84-91,2007.
- 11) 松本聰, 世界における塩類集積土壌の分布とその特性, 塩集積土壌と農業, 日本土壌肥料学会編, 博友社, pp. 11-38, 1991.
- 12) Holy, M. (岡村俊一,春山元寿共訳):侵食-理論と環境対策-,森北出版,pp.128,1983.
- 13) 河村竜馬:飛砂の研究,東大理後見法,vol. 5, No. 3.4, pp. 95-112, 1951.
- 14) R.A.Bagnold (著金崎肇訳): 飛砂と砂丘の理論, 創造社, pp. 59, 75 1963.
- 15) Hudson,N., and Jackson D.C.:Results achieved in the Measurement of Erosion and Run-off in Southern Rhodesia, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> Inter-African Soil Conference*, 1959.
- 16) Holy, M., Riha J., and Sladek J.: J. Society and the Environment, Prague, 1975.
- 17) Pasak, V., Wind Erosion on Soils, Sceientific Monographs, VUM Zbraslav 3, 1970.
- 18) 神谷光彦,長谷川周一,山本忠男,長澤徹明:タクラマカン砂漠北緑地の塩類集積と土 壌の物理的性質,地盤工学会誌 60-1(648), pp.20-23, 2012.
- 19) Qian, J., Han, X., WanGC., Du, H., Zu, R., Gao, Q.: Research on the Hydrochemical Characteristics of Groundwater at the Southern Edge of Taklimakan Desert and along the Southern Desert Highway, China, Procedia International Sciences, Vol.10(B), pp.1473-1480, 2011

- 20) Eisenberg, J., Dan, J. and Koyumdjisky, H.: Relationships Between Moisture Penetration and Salinity In Soils of The Northern Negev (Israel), *Geoderma*, Vol. 28, pp. 313-344, 1982.
- 21) Abuduwaili, J., Guijin, M.: Eolian Factor in the Process of Modern Salt Accumulation in Western Dzungaria, China, *Eurasian Soil Science*, 2006, Vol.39, No.4, pp.367-376, 2006
- 22) 阿部淳, 荒木英樹, 安萍, 清水英幸, 李建民, 郭玉海, 稲永忍: 中国内蒙古自治地区阿拉善盟における砂漠化防止と緑化の試み, 根の研究 (Root Research) 14(2), pp.51-58, 2005
- 23) Kojima, T., Wakamori, Y., Koizumi, K., Kurosawa, K., SAITO, M., and Suganuma H.: Selection of Afforestation Methods for Eucalyptus sargentiias a Countermeasure to Climate Change and Salinity Problem: *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 22, No. 1, pp. 33-36, 2011.
- 24) 日本沙漠学会編:沙漠の事典, 丸善株式会社, pp.228, 2009
- 25) 髙橋久光,和泉里佳,高橋新平,福永健司,志和地弘信:熱帯乾燥地におけるダブルサック工法が樹木の生育に及ぼす影響,沙漠研究,15-2,115-118,2005
- 26) 薬用植物 栽培と品質評価 第10号, 薬事日報社, pp51-57, 2008.
- 27) 菱田敦之: 医薬基盤研究所薬用植物資源研究センター北海道研究部栽培研究室-日本に おける薬用植物の普及とその課題-, 和漢薬, No.706, pp. 4-7, 2012.
- 28) 山本豊, 近年の市場品流通の変遷と中国における実用栽培について, 第4回甘草に関するシンポジウム講演要旨集 pp1-5, 2008.
- 29) 財務省貿易統計, 税関 Japan Customs, http://www.customs.go.jp/toukei/index.htm (2014 年 1 月閲覧)
- 30) 尾崎和男: ウラルカンゾウ(GCycyrrhiza uralensis. Fisher)の系統選抜について, 第3回甘草に関するシンポジウム講演要旨集, pp. 12-18, 2006.
- 31) 尾崎和男: ウラルカンゾウの筒栽培について, 第 2 回甘草シンポジウム講演要旨集, pp.12-16, 2004.
- 32) 末岡昭宣: ビニールハウス内でのウラルカンゾウの筒栽培, 第4回甘草シンポジウム講演要旨集, pp46-49, 2008.
- 33) 佐藤卓,池田英男,古川一,村田雄司,供田真由子:施与培養液濃度がカンゾウ (GCycyrrhiza GCabra Linn.)の無機成分並びにグリチルリチン含有量に及ぼす影響,薬学雑誌 124(2004) pp705-709, 2004.
- 34) 林茂樹, 柴田敏郎: カンゾウの国内生産を目指した栽培と育種に関する取り組み, 第5回甘草シンポジウム講演要旨集, pp. 6-13, 2011.
- 35) 吉松嘉代,河野徳昭,乾貴幸,渕野裕之,川原信夫,工藤善,高橋豊,新穂大介,田村幸吉,大月典子,穐山浩:人口水耕栽培システムにより生産した甘草等漢方薬原料生薬の実用化に向けた実証的研究,第6回甘草に関するシンポジウム講演要旨集,pp. 51-61, 2013.
- 36) ツムラ News Release:http://www.tsumura.co.jp/corporate/release/2011/pdf/20110418kanzo.pdf (2014 年 1 月閲覧)

# 第三章 モンゴル南部乾燥地地盤の物理・化学的環境

#### 3.1 はじめに

前述したように、対象とするモンゴルは乾燥地であり、カンゾウ生育域は 2000 年後期まで減退していた. 図 3-1 に、モンゴル国バヤンホンゴル(Bayanhongor)県の Baatsagaan 及び Bogd 地域におけるカンゾウの資源としての生育量(Estimated reserves)と、生薬として利用できる量(Productive resources)を示す <sup>1)</sup>. どちらの地域も、2012 年の生育量と生薬として利用できる量は、1985 年のこれらと比較すると 1/2 以下にまで減少している。従って、貴重な生物資源を保護するという観点からもカンゾウの保護は重要な課題であるということがわかる.

カンゾウが自生している自生カンゾウの植生状況,あるいは生育そのものは当該地域の気象環境や地盤環境に依存していると考えられ、自生している地盤の物理・化学的環境がカンゾウ生育に適した環境であることが推測できる。自生しているカンゾウに関しては、現在までに広域的な植生分布調査がモンゴルの研究機関によって定期的に行われている<sup>2)</sup>. 2012 年の時点でのモンゴル全域におけるカンゾウ自生地点を図 3-2 に示す。これにより、カンゾウはモンゴル北東部、北部、西部、南部に広く分布していることがわかるが、特に南部において分布域が広いことがわかる。このような植生分布に関する調査は行われているが、カンゾウ自生地や非自生地において本格的な地盤環境調査は過去行われた例がなく、現地の地盤データそのものが把握できていない状況である。

上記の背景より、生物資源としてのカンゾウを保護すると同時に、植生減退地域における原因の解明、また乾燥地の劣化問題を解決するためには、第一に当該地域の気象環境を含めた地盤環境を総合的に把握することが必要不可欠である.

そこで本章では、モンゴル南部・カンゾウ自生地及びカンゾウの植生が後退した非自生地において、気象環境を含めた、植物の生育に重要と考えられている地盤内の物理的環境及び化学的環境に関して調査を行う。これらの結果より、カンゾウ生育に適した自生地の地盤環境と、非自生地の地盤環境を比較することによって、非自生化・荒廃化の原因を考察するとともに、自生に適した環境と、カンゾウ生育に重大な影響を及ぼす環境因子を特定する。

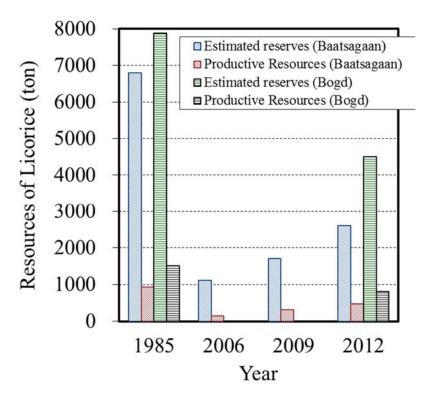


図 3-1. カンゾウの資源としての生育量(Estimated reserves)と 生薬として利用できる量(Productive resources)の変遷(Bayanhongor, Mongolia)<sup>1)</sup>

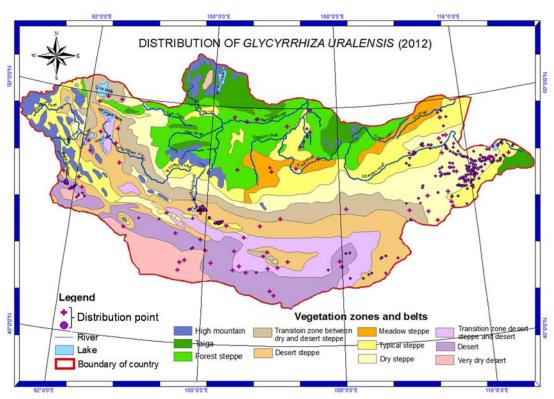


図 3-2. モンゴル全域におけるカンゾウ自生地点 2)

#### 3.2 調査地の地理的特性

モンゴル国全域の地図と調査位置を図3-3に示す. 主な調査地は,首都ウランバートル (Ulaanbaatar)から南西に650 km以上離れたバヤンホンゴル(Bayanhongor)県ボグド(Bogd)村周 辺地(S<sub>3</sub>)と、そこからさらに西に150 km 程度向かったバヤンホンゴル(Bayanhongor)県バト サガン(Baatsagaan)村周辺地( $S_1$ )である. 調査エリアは前節の図3-2より, 最も広く分布して いるモンゴル南部を主な調査エリアして選定した. 各調査地の拡大地図を図3-4に示す. 地 点名の末尾に記す(H)は、カンゾウ自生地(Habitat)、(NH)は非自生地(Non-Habitat)を表してい る. いずれの地も北緯45度程度であり、高度は1200 m程度である. 写真3-1に各調査地の概 観を示す.S1 は25×5 km<sup>2</sup>の地内にあり,非自生地のS1-2(NH)と自生地のS1-3(H)は70 m程度 しか離れていない,自生地と非自生地の境界のような地点である.S3に関しては15×5 km² の地点である. S3の植生状況は極端であり, S3の中で植生が全くない箇所もあれば多種の植 物が繁茂する植生に恵まれた地点もある. そのため, 自生地のS3-7(H) と非自生地のS3-3(NH) において様々なデータを得られる可能性があるためこの土地を選定した. S3-3(NH)に関して は約30年前にモンゴル科学アカデミー植物研究所(Institute of Botany, Mongolian Academy of Science)が人工的にカンゾウ栽培を行っていたが、干ばつ等を伴った気候変動により荒廃し てしまった土地である. そのため、土地劣化のメカニズムを解明できる可能性がある. S<sub>3</sub>-7(H)に関しては地下水位が比較的高く、アヤメ(Iris sanguinea)等の他の植物も繁茂する地 域であり、植生にとって比較的生育しやすい環境であると推察される.

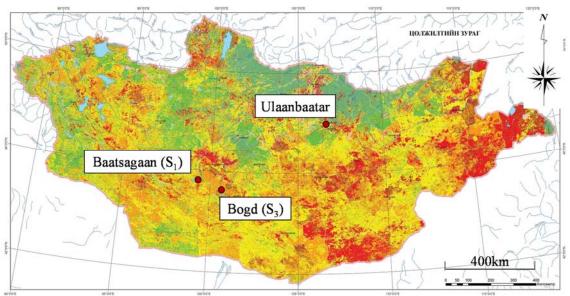


図 3-3. モンゴル国全域の地図及び調査位置

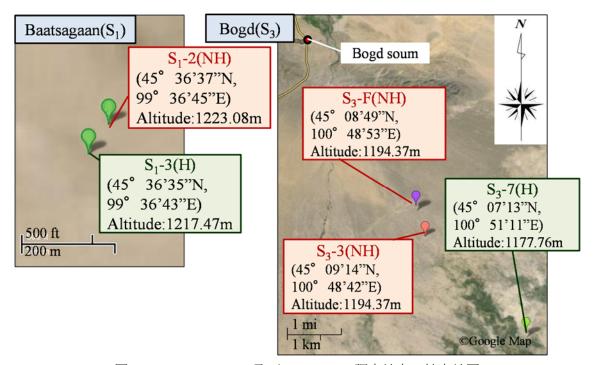


図 3-4. Baatasagaan (S<sub>1</sub>)及び Bogd (S<sub>3</sub>)の調査地点の拡大地図

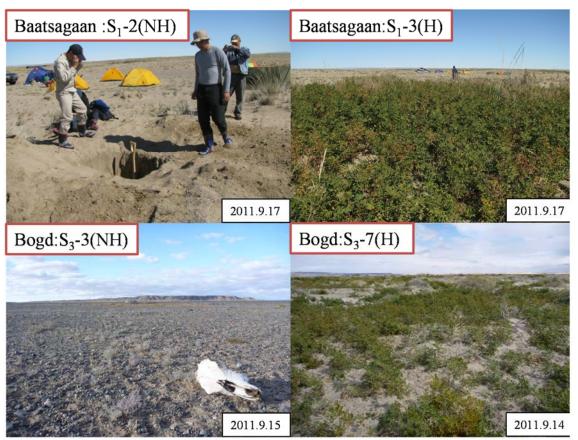


写真 3-1. 調査地の概観

#### 3.3 調査地の気候特性

# 3.3.1 調査地の気候区分

調査地の経年的な気候変動を把握するため、 $S_3$ -7(H)から 10km 程度離れた、Bayanhongor 県 Bogd 村(図 3-4 の Bogd soum)で観測された 1994 年から 2011 年までの気象データを示す. なお、このデータはモンゴル国気象庁から提供されたものである.

図 3-5 に 1994 年から 2011 年までの年最高・最低・平均気温と平均湿度をそれぞれ示す. 最高・最低・平均気温に関しては 18 年間通してほとんど変わらず, 18 年間の最高気温は 40.5  $^{\circ}$ C、最低気温は-40.5  $^{\circ}$ C、平均気温は約 4.5  $^{\circ}$ Cである. それに対して平均湿度は年によって大きく変わっており、特に 2002 年からは大きく見ると低下傾向にある.

図 3-6 に,1994 年から 2011 年までの年間降水量を示す。年間降水量は年によって様々であり,経年的に変化しているわけではない。測定期間の中では平均年間降水量は76.5 mm ,最大年間降水量は155 mm 程度である。

表 3-1 (a)に年間平均降水量と平均気温で気候区分できる de Martonne が考案した乾燥指数  $I^{3)}$ と、表 3-1 (b)に W. Köppen が考案した乾燥限界  $K^{4)}$ を示す。 de Martonne の乾燥指数 Iに Bogd 村の年平均気温と年平均降水量を当てはめると I=5.28 となり、概ね表中の「沙漠」に区分される。なお、「沙漠」とは第二章に示したように「降雨が少なく、荒廃した土地」のことを指しており、「砂漠」と同義であるが、その土地の土壌の種類によって「土沙漠」、「砂沙漠」、「礫沙漠」、「岩石沙漠」等に分類される 5)。本論文はこのような土地を「砂漠」または「乾燥地」と記述するが、表中の用語は引用文献のとおりに記述する。また、W. Köppenの乾燥限界 Kにおいて「主に夏に雨が降る地方」の式に平均気温を代入すると K=370 となり、降水量が年間 76.5 mm の地域は「沙漠(Desert)」に区分される。

さらに、月平均気温から可能蒸発散位 PET を経験的に計算し、月ごとの降水量と比較して気候を区分する Thornthwait の気候区分  $I_m$   $^{3)}$ を表 3-1 (c)に、可能蒸発散量 PET と年降水量 P の比を用いる、国連環境計画(UNEP)が提案する気候区分  $^{3)}$ を表 3-1 (d)に示す。 Thronthwait の気候区分  $I_m$  によると、過去 18 年ではどの年も  $I_m$  = -48  $\sim -47$  程度であり、「乾燥」に区分される。また、Thronthwait の方法により求めた可能蒸発散量の平均値を UNEP の気候区分  $^{4}$  に用いると、過去 18 年間のうちどの月も P/PET = 0.19  $\sim 0.21$  となり概ね「乾燥地域」に区分される。このように、調査地域はいくつかの気候区分において「乾燥地域」または「沙漠」に区分されることがわかる。

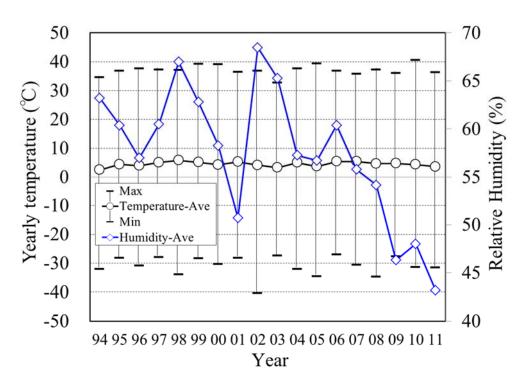


図 3-5. Bogd 村の気温と湿度 (1994 年~2011 年) (モンゴル国気象庁データ)

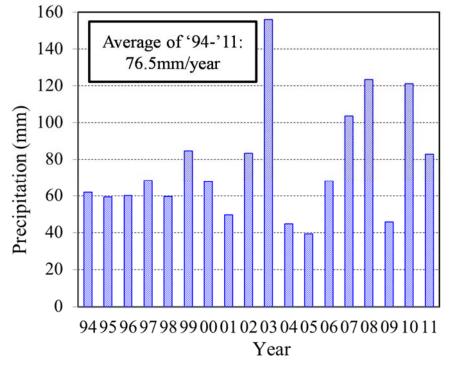


図 3-6. Bogd 村の年間降水量(1994 年~2011 年) (モンゴル国気象庁データ)

# 表 3-1. 気候区分

# de Martonne の乾燥指数 $\it P$

# (b) W. Köppen の乾燥指数 K<sup>4)</sup>

# de Martonne (1926) の乾燥指数 (I)

P: 年降水量 (mm/year) t + 10t: 年平均気温 (°C)

Iの値が 5以下のとき 沙漠 10以上のとき 乾燥農業が可能 20まで 灌漑農業

30以上のとき 森林形成

# W. Köppen (1931) の乾燥限界 (K)

一年中ほぼ均等に

雨が降る地方 K = 20 (t + 7)

9.9

K = 20 (t + 14)主に夏に雨が降る地方

主に冬に雨が降る地方 K=20t

t: 年平均気温 (°C)

K > P > K/2K/2 > P

ステップ (Steppe) 沙漠 (Desert)

# (c) Thornthwait の乾燥指数 $I_m^{4)}$

### Thornthwait (1948) の気候区分( $I_m$ )

 $PET = 16(10T_n / I)^a$ 

PET: 月可能蒸発散量 (mm/month)

 $I = \sum_{i=1}^{12} (T_i / 5)^{1.514}$ 

 $T_n$ : 月平均気温 (℃) I: 熱指数

a:べき乗数  $T_i$ : 月平均気温 (℃)

 $a = (492430 + 17920I - 77.1I^{2} + 0.675I^{3}) \times 10^{-6}$ 

 $I_m = (100s - 60d)/n$ 

s: 月ごとの水過剰量の 年間積算値(降水量>可能蒸発散量 となった月の(降雨量-可能蒸発散量))

d: 月ごとの水不足量の年間積算値(可能蒸発散量>降水量 となった月の(可能蒸発散量-降水量))

n: 可能蒸発散量の年積算値

 $I_m > 100$ 過湿潤  $-20 < I_m < 0$ 乾燥半湿潤

 $20 < I_m < 100$ 湿潤 -40 < I<sub>m</sub> < -20 半乾燥

 $0 < I_m < 20$ 

湿性半湿潤  $-60 < I_m < -40$  乾燥

# (d) UNEP の気候区分 4)

#### UNEPの気候区分 (1992) 全陸地面積に 区 分 条 件 対する割合 (%) P/PET < 0.05極乾燥地域 7.5 雨期はない 0.05 < P/PET < 0.2乾燥地域 12.1 年降水量:200 mm未満(冬雨季) 300 mm未満(夏雨季) 0.20 < P/PET < 0.50半乾燥地域 17.1 年降水量:500 mm未満(冬雨季) 800 mm未満(夏雨季), または降 雨の季節的偏りが著しい地域 乾燥半湿潤地域 0.5 < P/PET < 0.65

# 3.3.2 S<sub>3</sub>-7(H)の気象状態の季節及び年間の変化

調査地の季節による気象の変化,また年間の気温,湿度,降雨の状況を把握するため,2011年6月5日~2013年9月7日まで,S₃-7(H)において長期的な気象データの計測を行った.概観を写真 3-2 に示す.図 3-7 に気温、図 3-8 に湿度,図 3-9 に降雨量をそれぞれ示す.なお、図の値は1時間に一度測定した値を、14日ごとの最大・最小・平均値である.気温,湿度,降雨は,ウェザートランスミッターWXT520(VAISALA 社製)にて,地表面から高さ1.5 m の箇所を1時間ごとの測定間隔で測定した.電源はソーラーバッテリー(サンケイ理化・東京測器共同製作)にて供給している.図 3-7、3-8 より,1年を通して測定した 2012年の年平均気温は約 2.7℃であり,平均湿度は 45%である.また,2012年の年累積降雨量は約180mm であるが,2 月下旬に降雨は少ないものの平均湿度が急激に上昇している.気象センサーは,降雨は測定できるが降雪は測定できない仕様である.しかし,写真 3-3 のようにこの期間に降雪があったことが確認されており,年降水量は 200 mm 程度であると予想できる.

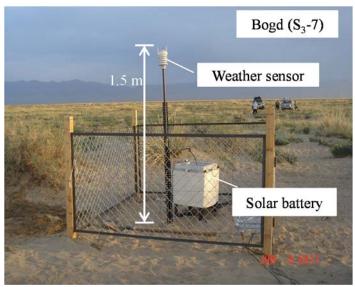
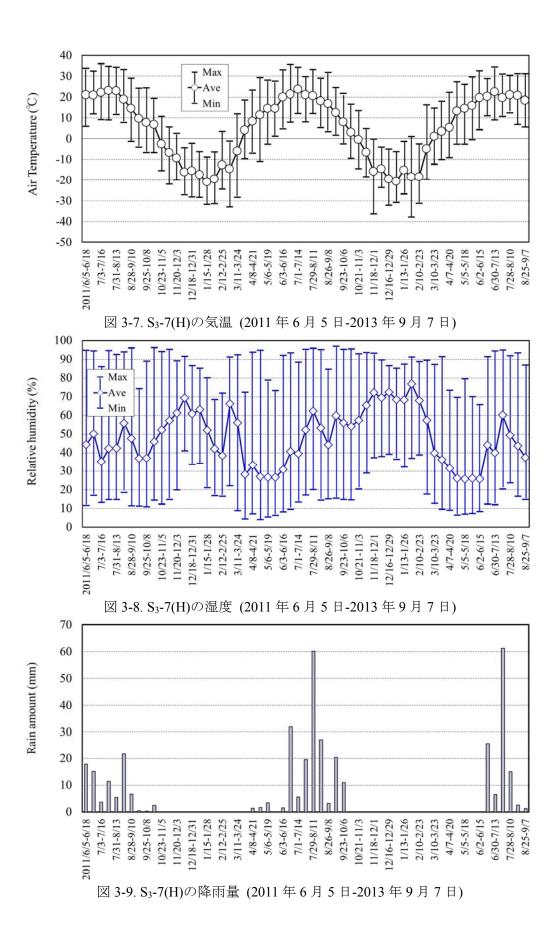


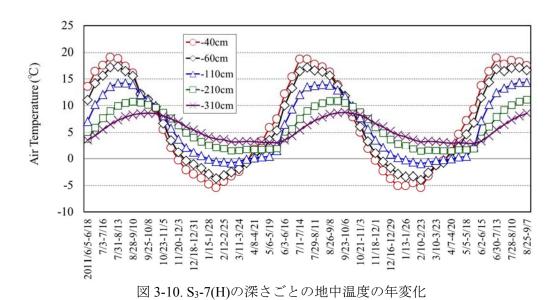
写真 3-2. S<sub>3</sub>-7(H)の長期モニタリングの外観



写真 3-3. S<sub>3</sub>-7(H)の積雪の様子



さらに、図 3-10 に深さ約 3m 程度までの土中温度の年変化を示す。土中温度は、写真 3-2 の気象・地盤環境計測システムの地下に埋設した熱電対式温度センサー(サンケイ理化製) により測定した。図 3-10 には深さ 40,60,110,210,310 cm の温度を記している。図 3-10 より、深さ 40,60cm 程度の浅い箇所では気温変化の影響を大きく受けており、110,210,310cm では年間を通じて多少の温度変化はあるものの、気温の変化に大きく影響を受けていない。また 210cm と 310cm の箇所は、気温が氷点下に達しても氷点下に達さず+3  $^{\circ}$   $^{\circ}$  から+10  $^{\circ}$  の範囲で変動している.



# 3.4 植物の生育に影響を及ぼす地盤の物理・化学的環境

本論文で扱う「地盤環境」とは、第二章でも記したように、地盤の物理的環境と化学的環境を意味する。物理的環境は、地下水位や降雨、降雪、植物根の吸水、地表面の蒸発等で決定される地盤内の水分状態、地盤内の含水比分布、さらには粒度分布や乾燥密度、またはそれらに由来する透水性や保水性、水分特性を選定し調査を行う。化学的環境は、保肥性や地下水の塩類濃度、土壌面蒸発に由来する地盤内の塩類濃度やイオン濃度、有機分濃度、及びそれらの分布等とする。また、地盤の物理的環境と化学的環境は密接に関わっている。概念図を図 3-11 に示す。本節では、それぞれの地盤環境項目が植物の生育に及ぼす影響について述べる。

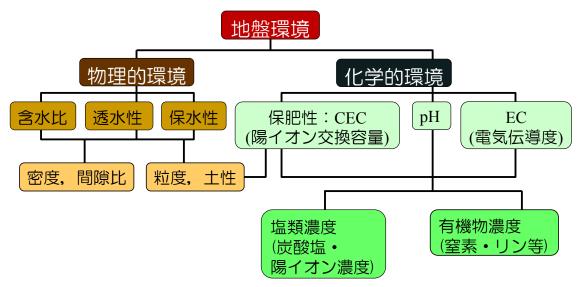


図 3-11. 植物の生育に影響を及ぼす地盤環境要因

# 3.4.1 地盤内の物理的環境が植物の生理的反応に及ぼす影響

植物にとって水分は不可欠な存在である. 植物体に含まれる水の割合である含水量は植物種, 生育段階などによって異なるが, 一般的に草本植物(生長しても木にならない植物)では生重量の80~90%を水が占めており, 木本植物(木になる植物)においても生重量の約50~80%が水である<sup>6,7)</sup>. 本節では, 植物の生育と水ポテンシャルの関係, 及び土壌の水ポテンシャルとカンゾウ生育の関係の把握を試みた生育実験について述べる.

植物体の水分状態の程度を表す尺度として、含水量、含水率、水ポテンシャルなどが用いられる.含水量や含水率は、式(3.1)のように一般的に植物体の単位乾燥重量当たりの水分当量または水分の占める割合で示す。また、葉においては単位面積当たりの水分重量もしくは水分の占める割合で表わす場合もある。

含水率(%) = 
$$\frac{生重量 - 乾燥重量}{$$
 乾燥重量 ×100 (3.1)

含水率は、同一の植物種間で比較する場合はあまり問題ないが、異なる植物種間での比較に用いることは難しい。例としては、葉の構造は植物種によって違うため、含水量や含水率は大きくことなり、種によっては10倍以上の差がある。また、含水量が多い種が必ずしも耐乾燥性が高いわけではないため、含水量を葉の水分状態の指標として用いる際には注意が必要である。

植物細胞内の代謝などに影響を及ぼす水分状態とは、細胞内における水分量ではなく、水がどのようなエネルギー状態にあるかということである。このような植物体や土壌の水分状態を捉えるためには、水ポテンシャルを用いる。水ポテンシャルは、式(3.2)に示すように、対象系の単位体積に含まれる全水分子の全自由エネルギーである。すなわち、水ポテンシャル $\phi_w$ は、対象とする系の化学ポテンシャル $\mu_w$ と純水の化学ポテンシャル(単位質量あたりのエネルギー) $\mu_0$ の差を水の部分モル体積(ある成分を 1mol 加えたときの溶液の体積変化) $V_w$ で割って、圧力の単位(MPa)で表したものである。

$$\phi_w = \frac{\mu_w - \mu_0}{V_w} \tag{3.2}$$

水ポテンシャルが高い方から低い方に向かって水は移動する。例えば、活発に活動を行っている植物においては、水ポテンシャルは根>茎>葉の順に高く、水は地下部から地上部へ移動している。また、植物が吸水するためには、根の組織の水ポテンシャルが土壌水の水ポテンシャルより低くなければならない。また、植物細胞の水ポテンシャル $\Psi_{\nu\nu}$ は、式(3.3)に示すように、浸透圧によって生じる浸透ポテンシャル $\Psi_{\nu\nu}$ 、膨圧によって生じる圧ポテン

シャル $\Psi_p$ ,表面張力や毛管力によって生じるマトリックポテンシャル $\Psi_m$ ,および水の位置(高さ)によって生じる重力ポテンシャル $\Psi_a$ の総和で表すことができる.

$$\psi_{w} = \psi_{os} + \psi_{p} + \psi_{m} + \psi_{g} \tag{3.3}$$

マトリックポテンシャル $\Psi_m$ は、細胞壁などに吸着している水によるものであり、通常は無視することができる。すなわち、植物が吸水を続けるためには、膨圧を一定に保ちつつ、浸透ポテンシャルを低下させる必要がある。

一方、土壌の水ポテンシャルに関しては、重力ポテンシャル $\phi_g$ 、マトリックポテンシャル $\phi_m$ 、静水圧ポテンシャル $\phi_p$ 、空気圧ポテンシャル $\phi_a$ 、浸透ポテンシャル $\phi_b$ の総和として表わされる. すなわち、以下の式(3.4)によって表すことができる.

$$\phi_T = \phi_g + \phi_m + \phi_p + \phi_a + \phi_s \tag{3.4}$$

重力ポテンシャル $\phi_s$ は、重力場における基準面との高さの差によるポテンシャルであり、マトリックポテンシャルとも言われる。 $\phi_m$ は水と土壌の固相部分の間に働く毛管力(付着力)に由来するポテンシャルであり、土壌が飽和状態のときは、間隙に表面張力が発生しないので作用しない。静水圧ポテンシャル $\phi_n$ に関しては、土壌が飽和状態にあるとき、土壌には静水圧がかかるために発生するポテンシャルである。飽和土壌の最上部から土壌中のある地点までの高さの差がhであるとすると、この地点の静水圧ポテンシャルは $\phi_n = \rho_w gh$ となる。空気圧ポテンシャル $\phi_n$ は、土壌中の空気圧に起因するポテンシャルである。これは土壌空気の圧力 $\phi_n$ にと基準圧力 $\phi_n$ との差、すなわち、ゲージ圧に等しい。浸透ポテンシャル $\phi_n$ については、土壌水が溶質を含むことにより生じるポテンシャルであり、土壌溶液の浸透圧を $\phi_n$ (Pa)とすると、浸透ポテンシャル $\phi_n$ 、浸透ポテンシャル水頭  $\phi_n$ 、は次の式(3.5)、式(3.6)で表すことができる。

$$\phi_{\rm s} = -\pi \tag{3.5}$$

$$H_s = -\pi / \rho_w g \tag{3.6}$$

また、基準面を測定位置とすると重力ポテンシャル $\phi_g$  =0、土壌が不飽和状態にある場合、静水圧ポテンシャル $\phi_p$  =0 であり、空気圧ポテンシャルはゲージ圧とすると $\phi_a$  =0、土壌の水には塩分が含まれないと仮定すると、浸透ポテンシャル $\phi_s$  =0 である。すなわち、(3.4)式はマトリックポテンシャルが支配的となり、式(3.4')とみなすことができる。

$$\phi_T = \phi_m \tag{3.4'}$$

さらに、マトリックポテンシャルの絶対値をサクションと呼び、これは土壌中に形成された空隙が、水を吸引できる力(圧力)を表すものである。すなわち、一般的にサクションが小さい程土壌は乾いているといえる。

土壌の持つ水ポテンシャルが植物体の持つ水ポテンシャルより高い、すなわち、 $\psi_w < \phi_w$ であれば植物の根は土壌から水分を摂取することが容易であり、逆に植物体が持つ水ポテンシャルのほうが低い状態、すなわち、 $\psi_w > \phi_w$ であれば植物は土壌から水分を摂取することが困難となる。

植物は気孔を介して二酸化炭素を取り込むと同時に、蒸散によって体内の水分を大気中に逃してしまう。このとき、根からの水分供給が少ない、もしくは過剰に蒸散してしまうと、水が植物の生長を制限する水ストレスが生じる。このような水ストレスの発生原因生長抑制パターンとして、土壌が乾燥しすぎて根が水を吸えない、根の量が少ない、あるいは植物体中を水が通りにくいため、水の獲得能力が小さい、気孔が閉じて光合成ができない、光合成を行う細胞が機能しないなどが挙げられる。

さらに水ストレスは、一般的に植物の生長を低下させる。過大で急性的な水ストレスに よって植物が枯死する場合もあれば、穏やかな水ストレスであっても長期間晒されると、 死に至ってしまう個体の数も著しく増加する。

水ストレスの影響は最終的には生長阻害や枯死という形で表れるが、それに至るまでには植物体内で様々な応答が行われている。灌水量の低下による水ストレスによって植物の生長は低下するが、それぞれの植物器官の生長応答は異なる。一般に、水ストレスによる生長阻害は、葉や茎などの地上部で著しく、地下部(根)の阻害程度は地上部に比べて低いまなわち、給水機能を担う根の生長を促進させる一方、個葉の面積を小さくし、できるだけ植物体内からの水の損失を抑え、水ストレスからの回避性を高めていると考えられる。

根の生長が葉の生長よりも水ストレスの影響を受けにくいのは、少量であっても利用可能な水を使って吸水器官である根を優先的に生長させるためであると考えられる.このような場合、根の水ポテンシャルは葉の水ポテンシャルに比べて高く維持されており、根においても成熟部に比べて生長部である根端では、溶質の蓄積などによって膨圧が高く維持され、水ポテンシャルも高いため、根の生長も抑制されにくくなっている<sup>8)</sup>.

#### 3.4.2 植物体内における水ストレスの影響と水分恒数

植物体内で水ストレスが生じる主な原因は、蒸散量が吸収量を上回っているためである. 植物は主に気孔を介して水蒸気が大気中に放出される.そのため、気孔が閉鎖し、蒸散を抑制することによって葉の水ポテンシャルの低下は抑えられる.

次に、土壌の水ポテンシャルと植物の反応の関係を表 3-2 に、水分恒数を水分特性曲線中に記したものを図 3-12 に記す。3.4.1 節の最後で述べたように、土壌の水ポテンシャルが低いと植物体は水分の吸収が困難になる。植物の生育と対応させたマトリックポテンシャルを水分恒数と名づけ、これが指標として用いられている。図 3-12 のマトリックポテンシャルの値は、水分恒数を表している<sup>9</sup>. 植物の光合成や蒸散が低下するポテンシャル値は生長阻害水分点とされ、およそ 50~100kPa、植物が一時的に萎れ、灌水すれば元通り回復するような水分恒数を初期萎れ点、植物が枯死する点を永久萎れ点とよび、600kPa~1617kPaである。圃場容水量は、「大量の降雨後、2~3 日目に排水性の良い土が保持する水分」として一般的に定義されており、おおむね 3~6kPa のポテンシャル値を用いる。植物は圃場容水量よりも多水分状態でも水を吸収するが、水が多すぎると土壌空気と大気のガス交換が不十分となり根の呼吸が妨げられる。そこで、圃場容水量と生長阻害水分点間を易有効水分、圃場容水量と永久萎れ点間を有効水分といい、灌漑計画ではこの範囲内で土壌水分を制御する。

水分が減少していくと、日変化を繰り返しながら、葉や根の水ポテンシャルは低下していく. 気孔閉鎖は、必ずしも乾燥土壌条件下で起こるのではなく、土壌湿潤状態においてもたびたび起こる. 例えば、土壌水分が十分であっても晴天日の日中に蒸散が盛んで根からの水分供給が追い付かない場合や、空気が乾燥(湿度が低下)している場合等に起こり、気孔閉鎖とともに純光合成速度の低下などが認められる.

表 3-2. 土壌の水ポテンシャルと植物の反応 <sup>9)</sup>

水分量		土中2	水の分類	水分恒数	水ポテンシャル kPa pF		作物の性質	
多い	重力水			最大容水量			土中の空気が不足して 湿害が起きる	
	毛管水	有効水	吸湿しやすい水分	圃場容水量	3~10	1.5~2.0	容易に水を吸収することが できる 生長良好	
↓	<b>↓        </b>		吸湿しにくい水分	生長阻害水分点	50~100	2.7~3.0	水を吸収しにくくなる	
少ない	吸湿水			永久萎れ点	600 ~1617	3.8~4.2	水を吸収しにくくなる吸収 できず枯死する恐れ	

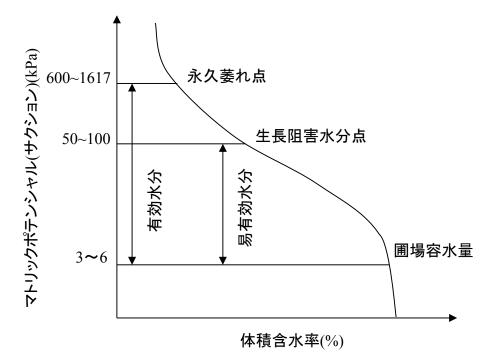


図 3-12. 水分特性曲線と水分恒数 9)

# 3.4.3 カンゾウの水ストレスに対する応答

筆者は丸居、永渕らと共に、直径 10cm、高さ 50cm の塩ビ筒に 2 年生のカンゾウを定植させ、塩ビ筒を電子天秤の上に置き、深さ 10cm ごとに水分センサー( $\text{ECH}_2\text{O}$  プローブ、Decagon 社製)を取り付け体積含水率の変化と重量の変化を測定した  $^{10}$  . 土表面を覆い蒸発を防ぎ、重量の変化からカンゾウの水分吸収量、すなわち蒸散量も測定した. なお、使用した土質は硅砂 7 号を乾燥密度  $1.4\text{g/cm}^3$  で充填したものである.

図 3-13 に枯死までの各高さの体積含水率の減少と、筒重量の減少のグラフを示す.この図より、2 年生カンゾウの生育限界水分条件を推察することができる.

図 3-13 より 28 日後あたりから蒸散速度が遅くなり、40 日以降蒸散量と体積含水率の減少が止まっていることがわかる。これより、2 年生カンゾウは水の供給がなくても 40 日以上生きる乾燥に強い植物であるということがわかる。また、3.5.2 節の保水性試験により求めた  $S_3$ -7(H)のサクション値と図 3-14 の体積含水率とを照らし合わせると、カンゾウが生育できる境界の体積含水率が 5%(含水比では 3.6%)前後であり、5%程度の水分を保てばよいと考えられる。また、永久萎れ点で葉が枯れたが、実験後水を与えると再生し、新たに葉をつけた。このことから、カンゾウは一度枯れたような状態になっても、もう一度吸水すると細胞が活性化し復活する生命力の高い「よみがえり植物」である可能性がある 4. しかし、1 個体で 2 年生のカンゾウのみ実験を行ったため、この値が一般的なカンゾウの生育限界水分条件とは言い難い。今後は各生育段階で、複数のサンプルをとり、カンゾウの生育限界水分条件の把握を試みる必要がある。

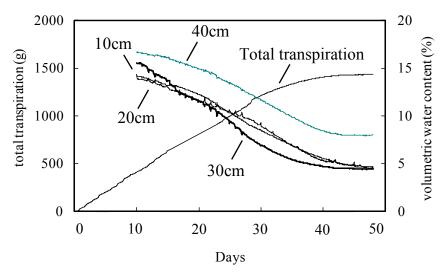


図 3-13. カンゾウ生育時の蒸発散量と生育土壌の体積含水率の関係 10)

# 3.4.4 地盤内の pH, EC が植物の生育に及ぼす影響

土壌の pH は,植物の生育に大きな影響を及ぼす.植物の根は酸性でもアルカリ性でも障害を受ける.pH が 4 程度の酸性ではアンモニアを硝酸に酸化する細菌の活動が阻害されるため,アンモニアから硝酸への変化の中間物である亜硝酸が土に集積し,植物が障害を受ける場合もある  $^{3}$ )。また,EC (Electric Conductivity,電気伝導率)に関しては土壌の塩類濃度を把握することに用いられる.電気伝導率と陰イオンまたは陽イオンと EC は,次のような相関がある  $^{11}$ ).

$$C = 9.016EC$$
 (3.7)

ここで、Cはイオン濃度(mmolc/l)、ECは電気伝導率(dS/m または mS/cm)である.

しかし、現在の測定技術では土中に pH センサーを直接差し込み、測定することは困難である。そのため、地盤工学会の基準では乾燥した土壌と蒸留水を重量比 1:5 で混合し土壌を沈殿させ、懸濁液の pH を測ることを基準としている 12).

pH, EC による土壌の簡易診断方法を図 3-14 に示す <sup>13)</sup>.

高 pH・高 EC 型土壌は、pH が 7 以上、EC が 1mS/cm 以上の土壌で、肥料成分が過剰に蓄積していることを示している. 作物の背丈が伸びず、果菜類では着果不良となる. 根は伸びず、コルク化している場合が多い. 土壌改良資材や肥料を多量に施与している場合が多い.

低 pH・高 EC 型土壌は、pH が 5.5 以下、EC が 1mS/cm 以上の土壌である。pH 低下の原因は塩基成分の不足ではなく硝酸や硫酸のような陰イオンの蓄積によるため、EC 値が高くなる.

高 pH・低 EC 型土壌は, pH が 7 以上, EC が 0.4mS/cm 以下の土壌であり, 塩基成分は多いが窒素肥料は少ない. 作物は黄緑色化し, ひ弱な生育となる.

低 pH・低 EC 型土壌は、pH が 5.5 以下、EC が 0.4mS/cm 以下の土壌であり、全体に肥料成分が不足している。このため、作物の葉色は淡く黄色味が強くなる。養分を追加すればいいだけなので、土壌改良は容易である。

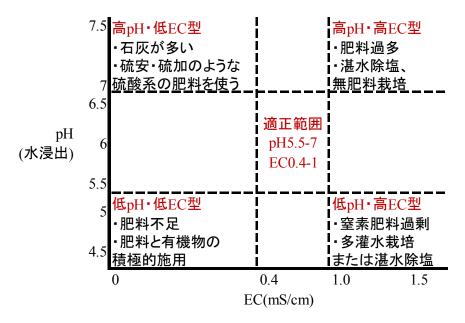


図 3-14. pH・EC の値が一般的な植物に及ぼす影響 12)

# 3.4.5 土壌の陽イオン、有機分及び地盤の栄養保持能力が植物の生育に与える影響

植物の根は土中水から栄養分を吸収する. そのため、土中水の成分は植物の生育に影響を及ぼす. 以下の表 3-3 に、植物の生育に影響を及ぼす主な成分と、各成分が植物体の生育に必要な理由を記す.

本論文では、植物の生育に加え、塩類集積の観点からも特に 3 種の交換性陽イオン  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ の深さ方向の分布に着目する。 CEC はこの交換性陽イオンが土粒子にどれだけ吸着できるかを表す保肥性の指標である。

窒素, リン酸等の有機分は一般的な植物の生育にとっての必須要素である <sup>12)</sup>. 窒素は植物体に欠かせないタンパク質の構成成分として重要な成分であり, 特に植物が利用しやすいのは無機態の硝酸態窒素, アンモニア態窒素である. リン酸は細胞膜成分のリン脂質や核酸の構成成分になり, 呼吸やエネルギー伝達に関与する.

また、土壌は表 3-3 の陽イオンを吸着する働きを持っている。土粒子に吸着している状態のイオンを交換性陽イオンという。交換性陽イオンは、土粒子表面に電気的に結合している状態の陽イオンであり、交換性陽イオンは土中の水に含まれる水溶性陽イオンと容易に交換することができる。また植物根は水素イオン(根酸)を放出してそれらを陽イオンと交換し、養分として交換性陽イオンを得る 9.

交換性陽イオン吸着のメカニズムは砂質土の場合,その多くの土壌に含まれる粘土鉱物の構造は,結晶性ケイ酸塩鉱物である  $^{14}$ )。これは,ケイ素(Si)4 面体層とアルミニウム 8 面体層が上下に結合したものが 1 つの単位となっており,これが数十枚重なり合っている.模式図を図 3-15 に示す.

粘土鉱物の粒子が負電荷を持つ原因の一つは Si-4 面体の Si が Al に置換したり, Al-8 面

体の Al が Mg に置換されることによるものである. これを同型置換という. Si-4 面体内の同型置換に基づく負荷電は, Al-8 面体内の荷電よりも陽イオンに対する吸収力が強くなっている. この機構による負電荷はまわりの溶液の pH の影響を受けない.

さらに、粘土の結晶格子の末端に現れる破壊原子価 $[O^-H^+]$ や $[SiO^-H^+]$ の水素イオン $H^+$ の解離によって発生する負電荷が原因となる.粘土自体の負電荷の他、有機物中のカルボキシル基 $(COO^-H^+)$ 、フェノール性OH 基 $(O>O^-H^+)$ そしてイミド基 $(>N^-H^+)$ に含まれる水素イオンの解離による負電荷がある  $^{15}$ .

水素イオンの解離で発生する負電荷はpHが下がって周りの溶液の水素イオンが増えると、 粘土や有機物中のH+の解離度が下がり負電荷が減少する.

これらの負電荷をもった粘土鉱物に肥料成分中の陽イオンを与えると、あらかじめ保持されていた陽イオン( $H^+$ や  $Ca^{2+}$ )と交換され、種々のカチオンを吸収・保持する.これを陽イオン交換作用という.土壌に保持される主な陽イオンとしては、表 3-3 の  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH^{4+}$ ,  $H^+$ 等である.また、土壌に保持されている状態のイオンを交換性陽イオンという.また、土が保持できる陽イオンの量を陽イオン交換容量(CEC: Cation Exchange Capacity)といい、CEC が高い程養分を多量に保持できる.また、保持された陽イオンのうち  $H^+$ 以外の陽イオン(塩基)の占める割合が高い程養分を多く保持しているといえる.

一般に砂質土は養分が流失しやすく、粘土質の土では流失しにくいが、これは大きい砂質土の土粒子は陽イオン交換容量が小さいのに対し、粘土は陽イオン交換容量が大きいことを示している. 粘土の中でも直径が 0.002mm 以下の粒子(コロイド)は養分を保持する能力が高くなる.

表 3-3. 植物の生育に影響を及ぼす主な土壌成分の吸収過程とその影響 13)

元素名	記号	吸収課程	植物に必要な理由
炭素	C	大気から二酸化炭素(CO2)として	
水素	Н	土壌溶液から水(H2O)として	有機物を構成する養分で、
酸素	О	大気、土壌空気から酸素分子 $(O_2)$ として 土壌溶液から水 $(H_2O)$ として	植物・動物の元になる元素
アンモニア態窒素	NH <sub>4</sub> -N	土壌溶液からアンモニウム(NH4 <sup>+</sup> )として	細胞を作るタンパク質の主成分
硝酸態窒素	NO <sub>3</sub> -N	土壌溶液からアンモニウム(NO3)として	細胞が正常に働くために必要
リン	P	土壌溶液からリン酸イオン(H2PO4-,HPO42-)として	細胞が正常に働くために必要
カリウム	K	土壌溶液からカリウムイオン(K <sup>+</sup> )として	果実の肥大を助けるのに必要
カルシウム	Ca	土壌溶液からカルシウムイオン(Ca <sup>2+</sup> )として	①細胞壁を作るのに必要 ②土壌の酸性化(pHが低い)を防ぐ
マグネシウム	Mg	土壌溶液からマグネシウムイオン(Mg <sup>+</sup> )として	葉緑素の主成分なので必要
硫黄	S	土壌溶液から硫酸イオン $(SO_4^{2-})$ として	
亜鉛	Zn	土壌溶液から亜鉛イオン(Zn <sup>+</sup> )として	
銅	Cu	土壌溶液から銅イオン(Cu²+)として	── ── 必要量は他の元素に比べ少なく、
鉄	Fe	土壌溶液から鉄イオン(Fe <sup>3+</sup> )として	大抵は元の土壌に含まれている
マンガン	Mn	土壌溶液からマンガン酸イオン(M n²+)として	量で充分である。
ホウ素	В	土壌溶液からホウ酸 $(K^+)$ として	──しかしごくまれに欠乏症が起こると、業の色が黄変したりする。
モリブデン	Mo	土壌溶液からモリブデン酸イオン(MoO4¯)として	
塩素	C1	土壌溶液から塩化物イオン(CI)として	
ケイ素	Si	土壌溶液からモノケイ酸 $(H_4SiO_4)$ として	



# 3.4.6 各調査地の調査項目

図 3-3, 写真 3-1 の  $S_1$ -2(NH),  $S_1$ -3(H),  $S_3$ -3(NH),  $S_3$ -7(H)の各地点にトレンチを掘削し,写真 3-5 のように深さごとにサンプリングを行う. 調査項目と試験方法を表 3-4 に示す. カンゾウや一般的な植物の生育に影響すると考えられるパラメータである地盤の物理的特性,すなわち粒度分布,含水比を室内試験において測定する. さらに  $S_3$ -7(H)に関しては乱さないサンプリングを行った試料の保水性試験を行い,水分特性を把握する. また,現地において原位置飽和透水係数を測定する. 地盤の化学的特性に関しては、pH, EC, CEC, さらに炭酸カルシウム(CaCO $_3$ )と交換性陽イオン( $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ), 硝酸態・アンモニア態窒素,リン酸の含有量を計測する. 各調査項目の 詳細な試験方法についてはそれぞれの項で記す.



写真 3-5. S<sub>3</sub>-7(H) のサンプリングの様子

表 3-4. 調査項目と実験方法

Soil physical properties

Investigation B	۵		Experimantal method	Category of experiment		Soil chemical properties		site	Investigation	<u> </u>	Experima	Category of experiment	
	Datsagaatt S	S	ıtal metho	f experim		al prope	S		Salsagaan		Experimantal method	î experim	
	S <sub>1</sub> -3(H)	S <sub>1</sub> -2(NH)	ьd	ent		rties	S <sub>3</sub> -7(H)	S <sub>3</sub> -3(NH)	S <sub>1</sub> -3(H)	S <sub>1</sub> -2(NH)		ent	
0	0	0	JGS 0211 JGS 0212	pH/EC			0	0	0	0	Guelph Well Permeameter (GWP) method	In-situ permeability	In-situ test
0	0	0	Semi-micro Shollenberger method	CEC			0	0	0	0	JIS A 1203 JGS 0121	Water content (directly measured)	
0	0	0	Atomic absorption method	Exchangeable cation (Mg2+, K+, Na+)	Labora		0	0	0	0	Laser diffraction and scattering method	Grain size distribution	Laboratory test
0	0	0	JIS A 1226 JGS 0221	Ignition loss (CaCO <sub>3</sub> )	Laboratory test		0				Pressurization method Centrifuging method	Water holding capacity	
0	0	0	Phenol sulfric acid method	NO3-N		,	. '	'	. '		•	'	
_	_	_			1	ı							

Haper method Distillation method

Extraction method by using 2.5% ascetic acid

0000

00

0

ZH4-N

 $P_2O_5$ 

#### 3.5 調査地の物理的環境

3.3 節に示したように乾燥地は降雨が少なく蒸発散量が降雨量を上回るので、カンゾウ及び乾燥地に自生する植物の生育には土壌の水分保持特性と地下水環境が影響していると考えられる. 従って、対象地の地盤内水分環境を把握し、カンゾウ自生地と非自生地の差異を把握できれば、カンゾウの生育に適した水分環境を知る足がかりとなる. 地盤内の水分特性・透水性はその地盤の粒度、密度、間隙比等で決まる. そこで本節では、各調査地において深さ 1~2 m 程度までの粒度分布及び土性、S<sub>3</sub>-7(H)の深さ方向の水分特性、有効水分量、各調査地の深さごとの含水比、原位置飽和透水係数を示す.

### 3.5.1 粒度特性

図 3-16~図 3-19 に各調査地の深さ別の粒径加積曲線,表 3-5~表 3-8 に粒径加積曲線から 求めた  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ , 均等係数  $U_c$ , 及び曲率係数  $U_c$ 'を示す. 粒径加積曲線に示す 値は, レーザー回折式粒度分布測定装置 SALD-3100(島津製作所製)により求めた値を標準正 規分布で補正したものである 16. これらの粒径加積曲線を基に、図 3-20(a)の地盤工学会基 準 <sup>17)</sup>と図 3-20(b)の日本農学会基準 <sup>18)</sup>により分類した深さごとの土性区分を図 3-22 に示す. 地盤工学会基準は 75~2 mm を礫(Gravel, G),2~0.075 mm を砂(Sand, S),0.075 mm 以下を 細粒分 (Fine, F)として表し,それぞれの通過質量百分率を図 3-20(a)にあてはめたものであ る. 図 3-20(b)は, 2 mm 以下の細粒の砂分を対象としている三角形であり, 2~0.02 mm を 砂(Sand, S),0.02~0.002 mm をシルト(Silt, 記号 Si),0.002 mm 以下を粘土(Clay, 記号 C)と して表し、それぞれの通過質量百分率を図 3-20(b)にあてはめたものである.これらの土性 区分に即して、測定した土の深さ別の土性を判断した. なお図 3-16~図 3-19 より、調査地 盤の粒径は概ね 2 mm 以下であり、図 3-20(b)の土性区分の方が鋭敏に土性区分できると考 えられるため,以下の考察は図 3-20(b)の区分を中心に述べる.図 3-21 より,自生地と非自 生地で土層構成に目立った差異は見られず、またどの調査地も深さごとに土性は異なるが、 どの深さも主に砂質-シルト質の地盤で構成されていることがわかる. また, 各サイトに共 通して深さ 60~80 cm で, シルト分を多く含む層であることがわかる. 図 3-20(b)の SL, L, SiCL はローム質土, S, LS は砂質土に分類され,一般的には前者のほうが後者よりも保水 性や保肥性が高いと言われている 19). このような土層構成が、地盤環境に与えている影響 については次節より示す.

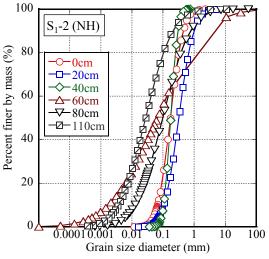


図 3-16. 深さごとの粒径加積曲線(S<sub>1</sub>-2(NH))

100 S <sub>1</sub> -3 (H)
₹ 80 × 80
% 80 Segree
1300m 140 — 140cm 160cm
20
0.00010.001 0.01 0.1 1 10 100 Grain size diameter (mm)

図 3-17. 深さごとの粒径加積曲線(S<sub>1</sub>-3(H))

表 3-6. 深さごとの粒径パラメータ(S<sub>1</sub>-3(H))

表 3-5. 深さごとの粒径パラメータ(S<sub>1</sub>-2(NH))

Depth		$D_{30}$	$D_{50}$	$D_{60}$	$U_c$	$U_c$
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	- с	- с
0	0.07	0.12	0.17	0.21	3.15	0.98
20	0.11	0.21	0.32	0.40	3.76	0.98
40	0.10	0.14	0.18	0.20	1.89	0.99
60	0.18	0.02	0.07	0.13	76.43	0.94
80	0.01	0.04	0.10	0.15	11.76	0.97
110	0.004	0.01	0.03	0.04	11.26	0.97

100  $S_3$ -3(NH) Percent finer by mass (%) ->-0cm →30cm 60 <del>∇</del>80cm -□-100cm 40 **160cm** 20 Grain size diameter (mm)

図 3-18. 深さごとの粒径加積曲線(S<sub>3</sub>-3(NH))

Depth  $D_{10}$  $\overline{D_{30}}$  $D_{50}$  $D_{60}$  $U_c$ (cm) (mm) (mm) (mm) (mm) 20 0.11 2.29 0.99 0.17 0.22 0.26 40 0.09 0.14 0.18 0.21 2.26 0.99 60 0.05 0.07 0.10 0.99 0.12 2.65 80 0.003 0.02 0.08 0.16 59.51 0.95 120 0.16 0.21 0.25 0.27 1.65 0.99 140 0.30 0.36 0.41 0.43 1.43 1.00 160 0.02 0.08 0.21 0.33 15.63 0.96 100  $S_3$ -7(H)

80 Percent finer by mass (%) ->-0cm -□-30cm **♦**50cm 60 <u></u>

→ 70cm <del>∇</del> 100cm - 150cm 40 **1**240cm 20 0.0001 0.001 0.01 Grain size diameter (mm)

図 3-19. 深さごとの粒径加積曲線(S<sub>3</sub>-7(H))

表 3-7. 深さごとの粒径パラメータ(S<sub>3</sub>-3(NH))

Depth	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{50}$	$D_{60}$	<b>1</b> 7	, ,
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	$U_c$	$U_c$
0	0.08	0.14	0.20	0.24	2.91	0.99
10	0.11	0.21	0.32	0.40	3.76	0.98
30	0.001	0.004	0.008	0.01	6.97	0.97
50	0.18	0.23	0.27	0.30	1.60	0.99
80	0.01	0.04	0.10	0.15	11.76	0.97
100	0.07	0.32	0.90	1.47	20.41	0.96
160	0.06	0.32	1.03	1.81	30.11	0.96

表 3-8. 深さごとの粒径パラメータ(S<sub>1</sub>-7(H))

Depth	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{50}$	$D_{60}$	<b>1</b> 7	$U_c$ ,
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	$U_c$	$U_c$
0	0.12	0.19	0.26	0.31	2.62	0.99
30	0.002	0.01	0.03	0.05	18.50	0.96
50	0.002	0.006	0.01	0.02	10.20	0.97
70	0.002	0.009	0.02	0.04	13.99	0.97
100	0.002	0.007	0.02	0.02	9.75	0.97
150	0.001	0.003	0.005	0.007	5.56	0.98
240	0.08	0.12	0.15	0.17	2.00	0.99

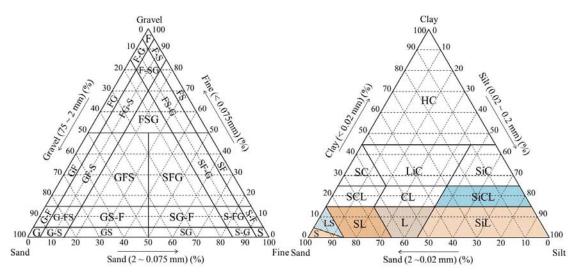


図 3-20(a). 地盤工学会における土性区分 17) 図 3-20(b). 日本農学会における土性区分 18)

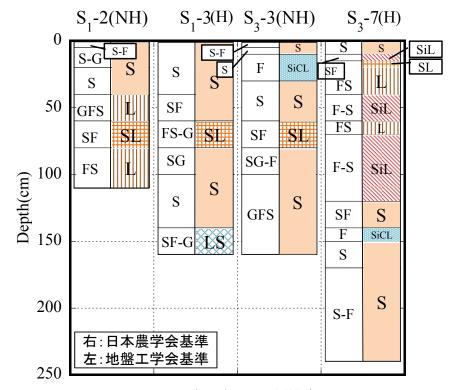


図 3-21. 各調査地の土層構成

# 3.5.2 S<sub>3</sub>-7(H)の水分特性曲線と有効水分量

図 3-22 に、調査サイト  $S_3$ -7(H)についての深さごとの水分特性曲線を示す。図 3-22 の水分特性曲線に関しては、各試料は直径 5 cm、高さ 5 cm の採土円筒を用いて乱さない供試体のサンプリングを行い、pF 0 (0.01 kPa)~ pF 2.2 (16.17 kPa)まで吸引法、pF 2.5 (32.27 kPa)~pF 4.2 (1617 kPa)までを遠心法  $^{20}$ にて測定した排水過程の実験値である。実験に使用した試料から求めた深さ方向の乾燥密度を図 3-23 の左に、また図 3-22 から求めた深さ方向の有効水分量を図 3-23 の右に示す。有効水分量は、図 3-22 の測定値から式(3.8)により求めた.

$$AM = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \left\{ V_{w}(i) + V_{w}(i+1) \right\} \times \left\{ pF(i+1) - pF(i) \right\}$$
(3.8)

ここに, AM: 有効水分量(%), i: 測定点の番号, pF(i): i 番目の pF 値(pF(1) = 1.8, pF(n) = 4.2) ( $pF = \log_{10}|H|$  H: マトリックポテンシャル(cm)),  $V_w(i)$ : i 番目の体積含水率(%)

図 3-23 左より、乾燥密度は深さによって大きく異なり、深さ 120 cm 程度まででは 1.50 ~1.65 g/cm³ 程度である. また、深さによって水分特性曲線は大きく異なるので、それに従って有効水分量も異なることがわかる. さらに有効水分量は体積含水率の関数であるため、一般的には乾燥密度が大きくなると有効水分量も大きくなるが、図 3-21 の L 層、SiL 層付近、すなわち一般的に保水性が高いとされている土性の層またはその周辺は、S 層と比較すると乾燥密度が低いにもかかわらず有効水分量が高くなっていることがわかる. このことから、有効水分量は土層構成と関連することが再確認された.

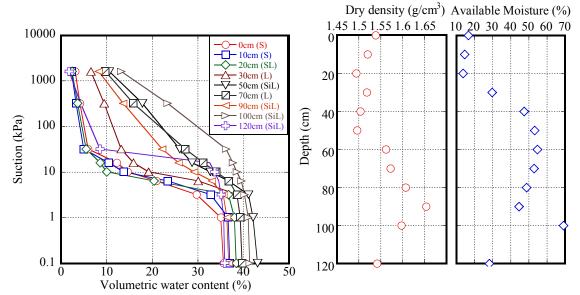


図 3-22. S<sub>3</sub>-7(H)の深さ方向の水分特性曲線

図 3-23. S<sub>3</sub>-7(H)の深さ方向の有効水分量と 乾燥密度(左:乾燥密度,右:有効水分量)

# 3.5.3 含水比の深度分布

図 3-24 に各調査地の深さ方向の含水比を示す. まず S<sub>3</sub>-7(H)について述べると, 図 3-23 の有効水分量が高い層で概ね含水比が高いことがわかる. 一方, 120cm 程度の有効水分量が 低い層は, 60~120cm の層に存在する SiL 層よりも地下水位に近い位置にあるにもかかわら ず、含水比が低いことから、この図からも土層構成と水分保持特性は関連性があることが 確認できる. また,図 3-24より,深さ方向の含水比はS<sub>3</sub>-7(H)以外はどの深さにおいても0 ~5%の範囲である. S<sub>3</sub>-7(H)の地下水位は, 2011 年 6 月は地表面から-150cm, 2011 年 9 月は -240cm であることを確認している. さらに  $S_3$ -7(H)では, 図 3-10 の地中温度を測定してい る深さと同じ深さで体積含水率も測定しているが、最も深い測定位置である 310cm の体積 含水率は、常に 50~60%の値を示していることから、310cm の深さでは地下水により地盤 が飽和状態にあり,従って地下水は年間を通して 310cm 以下にはならなかったことが推測 できる. また, S<sub>3</sub>-3(NH)は地下水位が確認できず, S<sub>1</sub>周辺は, 井戸の水位を観測すると-350cm 程度であった. S<sub>3</sub>-7(H)と同じ土性及び密度の場合,同程度の水分特性であると仮定すると, 含水比 2%(体積含水率 3%)程度ではどの土性でも永久萎れ点付近であるかもしくは超えて おり, 植物にとっては過酷な水分環境にあることがわかる. さらに S₁-2(NH) 及び S₃-3(NH) と  $S_1$ -3(H)のような自生地と非自生地で似た水分分布の地点が存在し、3 地点の深さ 160 cm までの含水比は平均するとそれぞれ約 1.5, 2.3, 1.3%であることから, 地表から 2m 以浅にお いて含水比が低くても自生できることが示唆された. さらに, 3.4.3 節で示した丸居ら 10) が行ったカンゾウ生育実験では,筒内の最も低い体積含水率は 5%(含水比約 3.5%)であった ため, カンゾウが生育できる境界の含水比は 5%前後であり, 5%程度の水分を保てばよいと 推測できる.

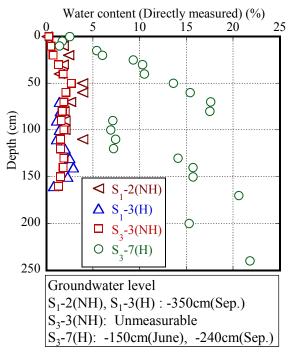


図 3-24. 各調査地の深さ方向の含水比 (2011.9)

# 3.5.4 原位置飽和透水係数

原位置飽和透水係数は、ゲルフ式ウェルパーミアメーターにより測定した。ゲルフ式ウェルパーミアメーターとは、現地地盤に小孔を削孔し、孔に吸水することにより擬似的な飽和透水係数を求める試験装置である  $^{20)}$ . 図  $^{3-25}$  に装置の概念と概要を示す。使用した装置は、 $^{2800}$  K1 (Soil Moisture equipment. corp)である。マリオット式の給水タンクに水を入れ、エアーチューブの高さを調節して掘削ウェル内に定水位  $^{12}$  を与え、ウェルの  $^{12}$  以下の側壁と孔底から土中に入る浸潤量を測定する。時間の経過とともに浸潤量が一定になれば、これを定常浸潤量  $^{12}$  とみなして試験を終了する。すなわち、ウェル内を水で満たししばらくウェルの壁周辺に透水させ、ウェル周辺地盤を擬似的に飽和状態にすることによって、周辺現場での定水位飽和透水係数  $^{12}$  km $^{12}$  を求めることが可能である。 $^{12}$  km $^{13}$  は以下の式( $^{12}$ )によって求めることができる。

$$k_{wfs} = \frac{CQ_s}{2\pi H^2 + C\pi a^2 + \left(\frac{2\pi H}{\alpha^*}\right)}$$
(3.9)

ここに、 $k_{wfs}$ : 原位置飽和透水係数 (cm/s)、C: 形状係数、 $Q_s$ : 定常 浸潤量(cm³/s)、H: 掘削孔底部からの水位(cm)、a: 掘削孔の内半径 (cm)、 $\alpha^*$ : 土壌パラメータ(cm¹) 土壌パラメータ $\alpha^*$ も同様に土の組織・構造分類に応じて推奨され、今回は「非構造性材料と細砂を含む、粘土からロームまでの大半の土、および一般の土の最初の選択値」である $\alpha^*$ =0.12cm¹を採用した.形状係数 C は定水位 H と掘削孔の内半径 a の比(H/a)、地盤の粒度によって決定される.今回は、C にない数値解析的に求めたC にないる。 3.10)を採用した.

$$C = [(H/a)/(\{2.074 + (0.093H/a)\}]^{0.754}$$
(3.10)

本調査の掘削孔は深さ 20cm, 直径 6cm 程度である. 上記のパラメータで  $k_{wfs}$  を計算した結果を表 3-9 に示す. 表 3-9 より, 自生地も非自生地も, どの地域も表層 20 cm の飽和透水係数は  $10^{-4}\sim10^{-2}$  cm/s 程度で, 一般的な砂質土の透水係数を示している. また,  $S_3$ -7(H)のみ深さ 240 cm でも測定しているが, 地表面とほぼ同じ値を示している. これは, 深さ 240 cm の土性が地表面と同じ砂質土(S)であることから, 同程度の透水係数を有したと考えられる.

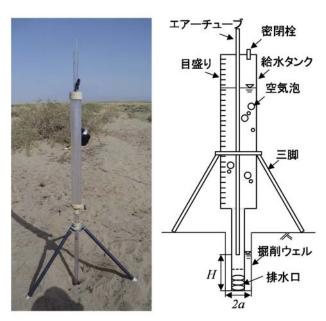


図 3-25. 原位置飽和透水係数測定装置の概要

表 3-9. 各調査地の原位置飽和透水係数

Site name	Depth (cm)	$k_{wfs}$ (cm/sec)
S <sub>1</sub> -2(NH)	20	$2.3 \times 10^{-3}$
S <sub>1</sub> -3(H)-1	20	$7.9 \times 10^{-3}$
S <sub>1</sub> -3(H)-2	5	$4.6 \times 10^{-3}$
S <sub>3</sub> -3(NH)-1		$8.0 \times 10^{-3}$
S <sub>3</sub> -3(NH)-2		$1.8 \times 10^{-2}$
S <sub>3</sub> -7(H)-1	20	$4.4 \times 10^{-3}$
S <sub>3</sub> -7(H)-2	20	$4.2 \times 10^{-3}$
S <sub>3</sub> -7(H)-3		$1.3 \times 10^{-4}$
S <sub>3</sub> -7(H)-4		$3.0 \times 10^{-3}$
S <sub>3</sub> -7(H)-5	240	$5.7 \times 10^{-3}$

#### 3.6 調査地の化学的環境

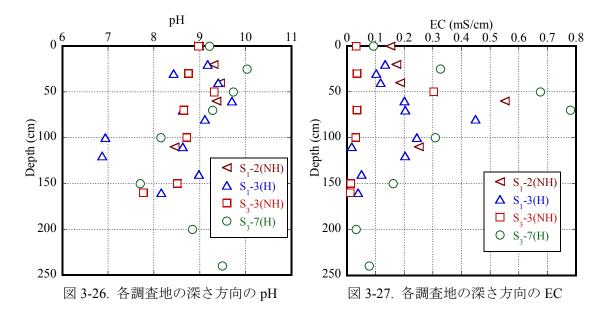
前述したように、植物の生育に影響を及ぼす地盤内の化学的環境として土壌の pH, 電気 伝導率(Electric Conductivity, EC), 水溶性・交換性陽イオン、陽イオン交換容量(Cation Exchange Capacity, CEC), 炭酸塩及び窒素、リン酸含有量等が挙げられる. pH は地盤の酸度 を表す指標であり、EC は地盤内の塩類濃度を表す指標である. 炭酸塩、特に炭酸カルシウムは、降雨が少なく化学的風化の進みやすい乾燥地では、水に溶けにくいので表層 1~2m 以内の浅い層に卓越して含有される 4ので、カンゾウの生長初期段階、すなわち根が地下深くまで到達していない状態の生育において重要である. さらに、乾燥地においては交換性カルシウムよりも炭酸カルシウムのほうが支配的である.

そこで 3.6 節では、上記に挙げた土壌の化学的パラメータの自生地と非自生地の差異と、 それに加えて土壌の化学性と物理性の関連性に関する考察を示す.

#### 3. 6. 1 pH ≥ EC

図 3-26 に調査地の深さ方向の pH, 図 3-27 に EC 分布を示す. pH と EC はそれぞれ, 地盤工学会の試験基準 JGS-0211,0212 に従い測定した  $^{13}$ ).

図 3-26 より  $1\sim2$  m 程度の浅層域では、どの調査地、どの深さにおいても pH は概ね  $7\sim10$  程度であり、アルカリ性地盤であることがわかる.図 3-27 に示す EC の深さ方向の分布では概ね  $0.1\sim0.8$ mS/cm の値をとり、他の塩類集積地や乾燥地のデータと比較すると決して高い値とは言えない  $^{22)}$ . しかし図 3-26 と図 3-27 に共通しているのは、カンゾウ自生地、非自生地に関わらず深さ  $50\sim100$ cm の間で共通して pH と EC が高いことである.これは、3.5.1 節で述べたような土層構成が影響していると考えられる. すなわち、保肥性が S 層よりも比較的高い SL、L、SiL 層に塩類が保持されたと考えられる.



# 3.6.2 炭酸カルシウムと各種交換性陽イオン

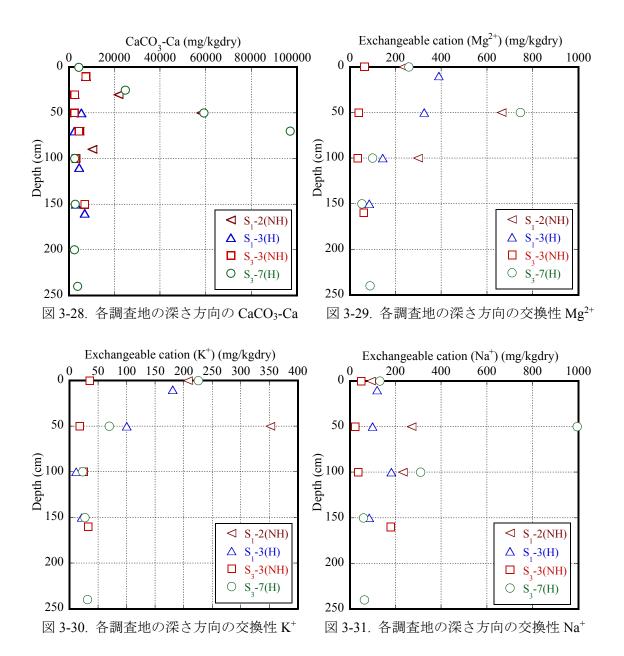
図 3-28 に深さごとの炭酸カルシウムをカルシウム分に換算した値,図 3-29 から図 3-31 に深さごとの各調査地の交換性陽イオン 3 種( $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ )を示している.交換性陽イオン に関しては、0.05 M 酢酸アンモニウムと 0.0114 M 塩化ストロンチウムの混合溶液で処理し、 $0.4 \mu m$  ポアフィルターでろ過した土の濾液を原子吸光光度計 ANA-182 (東京光電株式会社製) にて測定した  $^{23}$ . また,交換性カルシウムに関しては,酢酸アンモニウムで処理すると炭酸塩( $CaCO_3$ )も含んだ値も測定してしまうという問題点がある.また,一般的に乾燥地では塩類集積により炭酸カルシウムを多量に含む層が存在することも知られている  $^{4}$ . 石灰質の試料の強熱減量に関しては,540  $^{\circ}$   $^{\circ}$ 

図 3-28 は、炭酸カルシウムを測定した後、炭酸カルシウムに含まれるカルシウムの重さに換算した値(CaCO<sub>3</sub>-Ca)の深さ方向の分布を示している.カルシウムは他の交換性陽イオンに比較して 10~100 倍高い値を示し、S<sub>3</sub>-7(H)の最も多く含まれる深さでは土壌の質量の 10% 近くを炭酸カルシウムが占めている箇所も存在する. 3.7 節に示す表 3-11 においても、モンゴルに自生するカンゾウ根の成分もカルシウムが高くなっていることから、炭酸カルシウムがカンゾウの生長や成分に多大な影響を及ぼしていることが推測できる. 従って、カンゾウ生育にカルシウム分は不可欠であると予想できる.

また、図 3-29 と図 3-31 より、交換性  $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ に関して  $S_3$ -3(NH)以外で  $50\sim100$ cm 程度の深さで陽イオン量が高いことがわかる.これは、3.5.1 節でも説明したとおり地盤の土層構成が影響しているのではないかと考えられる.

一方で  $S_3$ -3(NH)は  $60\sim80$  cm に SL 層が卓越し、pH や EC も  $60\sim80$  cm 程度で高いにもかかわらず炭酸カルシウムと 3 種の交換性陽イオンの値が全体的に低いことがわかる. しかし、pH と EC は  $60\sim80$  cm 程度で高いことから、水溶性陽イオンはpH と EC を高める程度には存在していると考えられる.

さらに、3.5.1 節にも記したが、L層を含む保肥性が中程度の層に塩類が堆積していると考えられる. 加えて、降雨や蒸発、地下水位等の外部からの塩類を含んだ水分の流入・流出もこのような地盤環境になった要因として挙げられる. 実際、現場で体積含水率や EC を簡易に測定できる WET センサー(Delta-T 社製)で  $S_3$ -7(H)の地下水の EC を測定したところ、約1.0~mS/cmであり、塩分を含んでいることがわかっている.



	衣 3-10. 嗣重地の文英田勝行 なっこ 有機力の比較										
		pН	EC	CEC	CaCO <sub>3</sub> -Ca	ex-c Mg <sup>2+</sup>	ex-c K	ex-c Na <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> -N	NH4-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
site	depth (cm) /unit		mS/cm	cmolc/kgdry					ng/kgdry		
S1-2(NH)	0-10	8.98	0.152	2.1	-	310	70	240	34.1	50	11
S <sub>1</sub> -3(H)	140	8.98	0.051	2.1	6489	70	30	60	0.4	50	4
S <sub>3</sub> -3 (NH)	20	-	-	1.9	-	40	40	50	0.6	50	11
	0	10.26	0.24	5.2	-	190	310	810	5.8	50	6
S3-7(H)	50	1.08	0.62	5.6	-	500	1100	1430	3.3	40	10
	240	9.49	0.08	2.1	3841	90	100	770	0.8	60	15
Potting	(a)	6.35	1.57	21.3	-	870	1700	304	391	708	400
compost	(b)	7.37	0.23	49.9	-	1300	160	750	38.7	590	90

表 3-10. 調査地の交換性陽イオンと有機分の比較

# 3.6.3 陽イオン交換容量

表 3-10 に自生地・非自生地の表層付近の pH, EC 及び CEC と,図 3-28 で示した方法で 測定した炭酸カルシウム中のカルシウム分(CaCO<sub>3</sub>-Ca),図 3-29~図 3-31 で示した各種交換 性陽イオンをまとめたものである。 CEC は Semi-micro shollenberger 法にて測定した  $^{25)}$ . また,比較のために第四章で取り扱う培養土のデータも示す。 表中の培養土(a)はタキイ種苗株式会社の育苗培土,培養土(b)はアイリスオーヤマ株式会社の粒状培養土である。表 3-10 よりどの地盤も CEC は培養土(a),(b)と比較すると低く, $1/20\sim1/10$  程度である。従って調査地は保肥性の低い地盤であることがわかる。

# 3.6.4 硝酸態窒素,アンモニア態窒素,リン酸

表 3-10 には硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N),アンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N),リン酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)も示している. NO<sub>3</sub>-N はフェノール硫酸法,NH<sub>4</sub>-N は Harper 法にて処理した土壌を蒸留滴定法にて測定した  $^{25}$ )。これも比較のために上記の培養土  $^{26}$ 1 種のデータも示している。表  $^{26}$ 3 表  $^{26}$ 1 は 以下の有機分含有量であることがわかる。これより,調査地が一般的な植物にとって過酷な地盤環境にあることが改めて推察される。カンゾウはマメ科の多年草であり,一般的なマメ科の植物は土中の窒素を他の植物と比べて必要とせず,根に根粒菌という空気中の窒素を固定する微生物と共生して必要な窒素分を補うことが知られており,実際に根粒菌が付着している個体の存在も確認している  $^{26}$ 1 根粒菌が付着した自生カンゾウ根を写真  $^{26}$ 3 に示す。

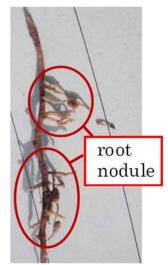


写真 3-6. 根粒菌が付着したカンゾウ根

#### 3.7 自生カンゾウ根の成分及び品質

表 3-11 にモンゴル南部に自生する個体 (Southern Mongolia)と日本国内で様々な条件で生育実験を行った個体(Cultivated in Fukuoka)の GC 含有率と、根に含まれる Ca, Mg, K, Na 含有率を示す。比較のため、モンゴルの  $S_1$ -3(H),  $S_3$ -7(H)以外の自生地(Other sites in Mongolia)及び中国銀川(Yinchuan)の自生カンゾウと著者らが福岡で生育実験を行った根(Japan)のデータも示す。また、図 3-32 にモンゴル南部に自生しているカンゾウと、筆者が日本において 2年間様々な条件でカンゾウ生育を行った個体の GC 含有率を示す。なお、図 3-32 と表 3-11の生育個体は別個体である。なお、GC 含有率は HPLC 法にて測定した  $^{27}$ )、測定原理と測定方法の詳細は付録に記す。根の Ca, Mg, K, Na 含有量については、王水にて処理した後、マイクロウェーブで液状にし、それを希釈した液体を原子吸光法にて測定した.

表 3-11 より、自生カンゾウの生育年数は不明であり、測定値は 0.15 % から 11.68 % までばらつきはあるが、日本において様々な土壌条件で生育させた二年生の苗よりも全体的にGC 含有率が高く、平均値は 3 倍以上であることがわかる.このことから、自生地の環境がGC の蓄積に適していることが改めて推測できる.また表 3-11 より、自生カンゾウ根は特にカルシウム含有量が高いということがわかる.これは、3.6.2 節においても示したが、自生地地盤内の炭酸カルシウムの量が他の塩類と比較して圧倒的に高いことが原因であると考えられる.さらに表の右端の Ca 含有量と K 含有量の比(Ca/K)からわかるように、日本で実験的に栽培されたカンゾウは Ca より K の含有量が高く、モンゴルの自生種は逆に K 含有量よりも Ca 含有量が高い根が多い.これらの結果から、土壌中のカルシウムはカンゾウの根の成分に影響を与え、GC 含有率を高める一要因となっていると考えられる 28).

表 3-11. 自生カンゾウと栽培カンゾウの GC 含有率と成分

Site	No.	GC content(%)	Ca (mg/kgdry)	Mg (mg/kgdry)	K (mg/kgdry)	Na (mg/kgdry)	Ca/K
S <sub>1</sub> -2	$S_1$ -2-1	-	28900	7740	10700	-	2.70
	S <sub>3</sub> -7-1	2.54	23800	5910	5860	460	4.06
S <sub>3</sub> -7	$S_3$ -7-2	3.45	20300	4160	6850	-	2.96
	$S_3$ -7-3	-	21700	3650	6500	-	3.34
	$S_3-7-4$	2.80	17000	4180	3630	-	4.68
	S <sub>4</sub> -1-1	11.68	8300	5220	11600	920	0.72
041	S <sub>5</sub> -1-1	7.41	7800	5520	10500	1100	0.74
Other sites in Mongolia	$S_3$ -4-2	4.94	16300	4060	5300	310	3.08
iii wiongona	$S_3-5-3$	4.30	19100	7330	4490	1190	4.25
	SA-15	2.36	22500	3550	3690	-	6.10
China	Yincheon-1	-	7100	2000	5000	650	1.42
Japan	Fukuoka-1	-	9100	1530	19700	380	0.46
Japan	Fukuoka-2	-	4800	1200	7800	32	0.62

(注): -の欄は未測定

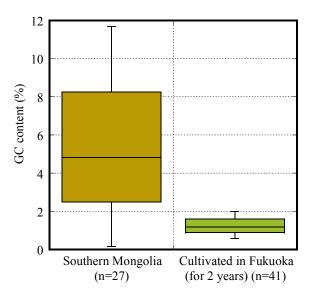


図 3-32. 自生カンゾウと栽培カンゾウの GC 含有率

#### 3.8 物理特性と化学特性の関連性及び自生地と非自生地の差異に関する考察

3.5 節 $\sim$ 3.6 節において,自生地・非自生地の物理的・化学的環境を示した.本節では, 前節までで得られたデータを基に,カンゾウ生育に適している環境と,非自生地  $S_1$ -2(NH),  $S_3$ -3(NH)が非自生化に至った原因について考察する.

各調査地において、深さ別のシルトと粘土分を合わせた含有率、すなわち 0.2mm 以下の 粒径を有する粒子の含有率と含水比、EC、カンゾウの生育にとって重要な塩分と推察できる炭酸カルシウムの関係をそれぞれ図 3-33~3-35 に示す. 各地点の系列の右側には、その地点の地下水位を記している.

まず、カンゾウが健全に自生している  $S_3$ -7(H)に関しては、地下水位が年間で 150~240cm と比較的浅い域に存在する。これが毛管作用により地表面近くまで上昇し、カンゾウ根圏の水分を平均で 11%に保持している。そして、粒径の細かい層、すなわちシルト分と粘土分の含有率が高いと含水比が高くなる傾向にある。これは図 3-23 で示したように、有効水分量が高い層の含水比が高いことと同義である。さらに、上昇した地下水は塩分を含んでおり、蒸発することにより、特にシルトと粘土分の含有率が多い箇所の EC が高く、カルシウム含有量も高い傾向にある。このことから、地下水が比較的高く、養分としての塩類が滞留されている環境でカンゾウは健全に生育することが推測できる。

 $S_1$ -2(NH)と  $S_1$ -3(H)については、70m 程度しか離れていないので同じような気象・地下水環境と見なしてよい.この 2 地点の地下水位は-350cm であり、 $S_3$ -7(H)と比較して低く、体積含水率の深さごとの平均も  $S_1$ -2(NH)で 2.3%、 $S_1$ -3(H)で 1.3%であるため、シルト分を含む層に水分や塩類が滞留せず、 $S_3$ -7(H)と比較して水分、塩分に乏しい環境である.この様な土地であるので、カンゾウの植生が後退していると考えられる.

 $S_3$ -3(NH)に関しては、地下水位が確認できないほど低く、塩分を含んだ地下水が流入しないので塩類環境にも乏しい。図 3-33~35 からも明らかであるが、それぞれの項目で細粒分含有率が高くても含水比、EC、炭酸カルシウムは低いことがわかる。

加えて、前節のカンゾウ根中のカルシウム含有率のデータより、カンゾウの根圏において地盤内の含水比とカルシウムを自生地  $S_3$ -7(H)のように保つことができれば、非自生地においても生育が可能であることが示唆された.

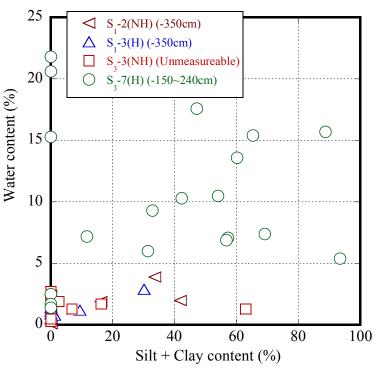
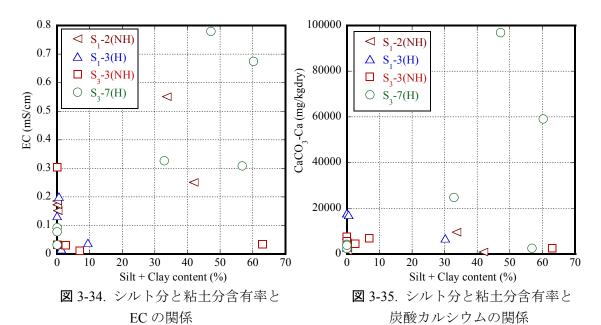


図 3-33. シルト分と粘土分含有率と含水比の関係



#### 3.9 まとめ

第三章では薬用植物「カンゾウ」を用いた持続可能かつ自立支援を目的とした砂漠化防 止技術を見出すために、モンゴルにおける乾燥地(カンゾウ自生地及び非自生地)において地 盤環境調査を行い、得られた知見からカンゾウ自生地と非自生地の違いや乾燥地地盤の物 理的環境と化学的環境の関連性に関する考察を行った。その結果、

- 1) 調査地であるバヤンホンゴル(Bayanhongor)県ボグド(Bogd)村は過去 18 年間を通して平均 気温は 4.5  $\mathbb{C}$ , 降雨量は平均 76.5 mm/年である. この気象状態は de Martonne の乾燥指数ではほぼ「沙漠」に区分され,Köppen の乾燥限界では「砂漠地帯」に区分される. また,Thornthwait の方法より求めた可能蒸発散量から UNEP の気候区分を行った場合,乾燥地域に区分される. また,Bogd 村付近の  $S_3$ -7(H)の気象データから,調査地は昼夜・夏冬の寒暖の差が最大で 70~80  $\mathbb{C}$ 程度の地域であることがわかった.
- 2)4地点のカンゾウ自生地と非自生地を重点的に調査した結果,いずれの調査地も地下1~2m程度の浅い域では不均質な砂質-シルト質の地盤であることがわかった.さらに,4地点共通して50~100cmの間に粒径の細かいシルト分を多く含む層が存在することがわかった.
- 3) 自生地と非自生地の  $1\sim2$  m 程度の深さの含水比分布を調査したところ、水分状態の違いと室内実験の結果から、自生できる境界の水分状態が 5%程度であることが示唆された。また自生地  $S_3$ -7(H)において、シルト分を多く含む層は砂分を多く含む層と比較すると有効水分量が高く、保水性を有する層が存在することがわかった。さらに、表層の原位置飽和透水係数は自生地・非自生地共に概ね  $10^4\sim10^2$  cm/s であり、一般的な砂質土の透水性を示した。
- 4) 調査地の pH はどの層でも概ね  $7\sim10$  程度であり,アルカリ性地盤であった.また,地盤内栄養環境は特にカルシウム分が多く,最も多い箇所では土壌中の 10%程度が炭酸カルシウムである層も存在した.自生地はシルト分を多く含む層に炭酸カルシウムや交換性陽イオンが蓄積され,その結果同じ層の pH,EC は他の層と比べると高くなることがわかった.しかし非自生地  $S_3$ -3(NH)はシルト分を多く含む層を有するにも関わらずカルシウム分や交換性陽イオンは他の地と比較して低いこともわかり,降雨も少なく地下水位の低い地では塩分の動きもなく,カンゾウの生育に不適切な環境になることが示唆された.
- 5) 自生地・非自生地共に栄養(交換性陽イオン)を吸着できる能力を表す CEC が低く,一般的な植物栽培に用いる培養土の 1/10 程度の保肥力であることがわかった. また,アンモニア態窒素・硝酸態窒素・リン酸といった有機分が圧倒的に低いことがわかった.
- 6) 自生するカンゾウ根のカルシウム分は日本で生育した栽培品と比較して平均で約3倍高く,日本において様々な土壌条件で生育させた2年生の苗よりも全体的にGC含有率が高く,平均値は3倍以上であり、地盤内のカルシウム分はカンゾウ生育に重大な影響を及ぼすことが示唆された.
- 7)  $S_3$ -7(H)は他の地点を比較すると、地下水位が高く、それにより地下 250cm までの含水比

も平均で 5~10 倍高く、シルト分と粘土分を含む層にカルシウム分が滞留し、地下水が比較的高く、養分としての塩類が滞留されている環境でカンゾウは健全に生育することが示唆された.

### 参考文献

- 1) Kobayashi, T., Shinkai, A., Yasufuku, N., Omine, K., Marui, A. and Nagafuchi, T.: Field Surveys of Soil Conditions in Steppe of Northeastern Mongolia, *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 22, No. 1, pp. 25-28, 2011.
- 2) Tuvshintogtokh, I., Mandakh, B., Yasufuku, N., Omine, K., Marui, A., Bat-Enerel, B., Yolk, Y.: SOME RESULTS OF ECOLOGICAL RESEARCH OF URALIAN LICORICE (*Glycyrrhiza uralensis Fisch.*) IN MONGOLIA, *Proceedings of EAEP 2013*, pp. 98-103, 2013.
- 3) 内蒙古沙漠開発研究会:中国の乾燥地における沙漠化の機構解明と動態解析, p. 8, 1989.
- 4) 吉川賢, 山中典和, 大手信人: 乾燥地の自然と緑化, 共立出版, pp.1-8, 38-39, 54-55, 2004.
- 5) 遠藤勲, 安部征雄, 小島紀徳:沙漠工学, 森北出版, pp.9-11, 1998.
- 6) 伊豆田猛(編著): 植物と環境ストレス, コロナ社, pp. 145-147, 2006.
- 7) Kramer, P.J.: Water Relations of Plants, Academic Press, New York, 1983.
- 8) Frensch, J.: Primary responses of root and leaf elongation to water deficits in the atmosphere and soil solution, *J. Exp. Bot.*, pp.985-989,1997.
- 9) 久馬一剛, 庄子貞雄, 飯塚昭三, 服部勉, 和田光史, 加藤芳朗, 和田秀徳, 大羽裕, 岡島秀夫, 高井康雄: 新土壤学, pp. 73-76, 113-114, 朝倉書店, 1984.
- 10) Marui, A., Nagafuchi, T., Shionogi, Y., Yasufuku, N., Omine, K., Kobayashi, T. and Shinkai, A.: Soil Physical Properties to Grow the Wild Licorice at Semi-arid Area in Mongolia, *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 22, No. 1, pp. 33-36, 2011.
- 11) Marion, G. M. and Babcock, K. L. 1976. Ptredicting specific conductance and salt concentration in dilute aqueous solutions. *Soil Science*. 122,181-187, 1964
- 12) 藤村俊六郎, 安西徹郎, 加藤哲郎: 土壌診断の方法と活用, 農文協, pp. 87-104, 226-227, 1996.
- 13) 地盤工学会編:土質試験基本と手引き 第二回改訂版, pp. 66-69, 丸善, 2010.
- 14) 小田原孝治,和田信一郎:普及指導員研修資料,pp. 3, 10, 2007.
- 15) 川口桂三郎:土壤学概論,養賢堂, pp.66-67, 1985
- 16) 荒木功平: 不飽和土の数値力学モデルに関する基礎的研究, 鹿児島大学学位申請論文, pp.31-33, 2006.
- 17) 地盤工学会編:土質試験の方法と解説 第一回改訂版, 丸善, p. 221, 2000.
- 18) 土壤物理研究会編:新編 土壤物理用語事典, 養賢堂, pp.37-38, 2002.
- 19) 土 壌 の 基 礎 知 識 , 農 林 水 産 省 資 料 , http://www.maff. go.jp/j/seisan/kankyo/hozen type/h sehi kizyun/pdf/ntuti4.pdf, 2012 年 8 月閲覧
- 20) 地盤工学会編:不飽和地盤の挙動と評価, pp. 57-59, p. 71, 2004.
- 21) Zhang, Z. F., Groenevelt, P. H. and Parkin, G.W.: The well shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter, *Soil Tillage Res.*, Vol. 49, pp. 219-221,

1998.

- 22) Eisenberg, J., Dan, J. and Koyumdjisky, H.: Relationships Between Moisture Penetration and Salinity In Soils of The Northern Negev (Israel), *Geoderma*, Vol. 28, pp. 313-344, 1982.
- 23) 土壌標準分析・測定法委員会編:土壌標準分析・測定法, pp. 155-160, 博友社, 2003.
- 24) 新城俊也: 強熱減量試験による石灰質土のカルシウム含有量の測定, 土と基礎, Vol. 51, No. 4, pp. 32-34, 2003.
- 25) 土壤養分測定法委員会編:土壤養分分析法, pp. 34-38, 184-192, 239-245, 養賢堂, 1957.
- 26) 植村誠次:根粒菌と根粒植物, URBAN KUBOTA, No. 14, pp. 22-25, 1977.
- 27) 佐藤卓,池田英男,古川一,村田雄司,供田真由子:施与培養液濃度がカンゾウ(Glycyrrhiza glabra Linn.)の無機成分並びにグリチルリチン含有量に及ぼす影響,薬学雑誌 124(2004) pp705-709, 2004.
- 28) 清塘悠, 大嶺聖, 安福規之, 小林泰三, 古川全太郎, 新開敦: 甘草 (カンゾウ) の生育 に及ぼす地盤環境の影響-モンゴル現地地盤調査結果との比較(英題: -Influences of soil properties on growth of Licorice –Comparison with the result of In-situ soil investigation at Mongolia-), 第 46 回地盤工学研究発表会講演概要集, (社) 土木学会, pp.2151~2152, 2011.

# 第四章 緑化土質材料を用いた地盤内水分・栄養環境に対する カンゾウ生育特性の把握

#### 4.1 はじめに

カンゾウを乾燥地地盤に健全に定植させ、枯死させることなく生育を続けさせるためには、非自生地においてカンゾウの根圏周辺の環境を改善する必要がある.

第三章の地盤環境調査の結果より、カンゾウは特に炭酸カルシウムを多く含有する砂質-シルト質の地盤に自生していることがわかり、このような地盤環境がカンゾウの生育に特 に影響を与えていると考えられる.

加えて、第二章でも示したように、現在日本国内において様々な研究機関がカンゾウ生育に関する研究に取り組んでいるが<sup>1)</sup>、カンゾウにとって適切な地盤環境を検討している研究や事例は少なく、地盤環境がカンゾウ生長に与える影響の評価が十分に行われていないのが現状である.

このような現地の環境とカンゾウ生育研究の現状を踏まえ、カンゾウ生育に適切な地盤 環境を把握し、その上で水分やカルシウム含有量が少ない非自生地においてカンゾウを健 全に生育させるための方法を検討しなければならない.

「健全な生育」とは、カンゾウ根が地下水を吸収できる深さまで早急に伸長することに加え、薬用成分グリチルリチン(Glycyrrhizin, GC)含有率が高く生育することである.このため、高品質なカンゾウをできるだけ速く生長させる為の地盤環境を検討することが必要である.

さらに、「付加価値の高い地盤環境改善技術」は、定植作業、灌水、管理の手間のかからないカンゾウ生育方法を目指している。これより、非自生地の地盤を少ない労力で、根圏周辺の地盤環境を改変する方法として、「緑化土質材料」を考案する。概念図を図 4-1 に示す。

緑化土質材料とは、筒状の構造をなす容器にカンゾウ幼苗の生育に適切な水分・栄養分を有する土質材料を充填したものであり、これを乾燥地地盤に設置し、この中にカンゾウ苗を定植させる.緑化土質材料の保水・保肥力や元来含有している水分・栄養分・塩分により、根圏周辺の地盤環境をカンゾウ生育に適切な状態に保ち、根の伸長を促進させ、低い箇所に存在する地下水に早急に根が到達し、自立的に生育するための補助をすることが狙いである.

これらの事柄を踏まえ、第四章では、カンゾウ幼苗の生育に適切な地盤環境を明らかにするために、種々の土壌水分、栄養状態における緑化土質材料を用いた生育実験を、日本国内において乾燥地を模擬した地盤を用いて行う.

一般的な植物及びカンゾウの生長に影響を及ぼす地盤環境要因は,第三章の地盤環境調査項目と同様であり,物理的環境(間隙比,粒度分布,土性,乾燥・湿潤密度,含水比等)と化学的環境(炭酸塩,水溶性・交換性陽イオン濃度,有機分含有量,pH,EC,CEC等)が挙げられる。そこで,第四章でもこれらの地盤環境,特に緑化土質材料が有する保水力と保肥力及びカルシウム含有量に着目した実験条件を設定し,これに対するカンゾウの生育の応答を確認する。さらに,前述したように乾燥地で早期に生長する方法も検討しなければならない。そこで,各実験において生育したカンゾウ根に関して,主に生育1年もしくは2年以内の生長度を対象に生長度評価を行う。

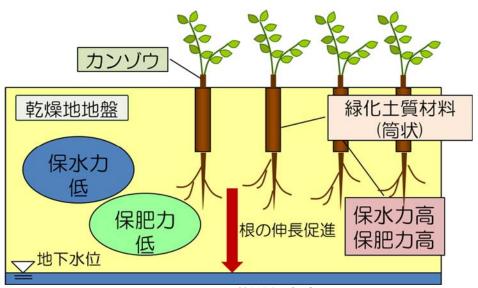


図 4-1. 緑化土質材料の概念図

### 4.2 筒栽培における種々の地盤環境がカンゾウの生長に与える影響

4.1 節で記したように、付加価値の高い地盤環境改善技術を提案する為には、カンゾウ根が地下水を吸収できる深さまで健全に、かつ早急に伸長することに加え、根に含まれる薬用成分 GC 含有率が高い個体を安定して生育させることができる地盤環境を把握する必要がある.

生育実験の方法に関して、まずカンゾウの生育に関して基本的なデータを得るために、現在日本で実証的研究がなされている、「筒栽培<sup>2)、3)、4)</sup>」を採用した。筒栽培とは、第二章の既往のカンゾウ栽培研究で記したように、カンゾウを縦方向に長く、横方向に広がりのない筒状の容器で栽培することにより側根の伸長を抑え、GC が含まれる主根の生長を促すことを狙いとした、優良な個体を栽培できる可能性があるカンゾウ生育方法である。筒栽培は一つの筒につき一個体ずつ生育させるため、根が広がる範囲を抑え、個体相互間での根の絡み合いがなくなり、収穫も圃場栽培と比べ比較的容易になる方法である。さらに、一個体ずつ個別で生育させることにより、一個体あたりが消費する養分等の地盤環境パラメータを明確に把握することができる。筒栽培の概観を写真 4-1 に示す。この方法で GC 含有率の高い個体を栽培することができれば、国内での生育技術に加え、乾燥地でもこの方法を応用したカンゾウ生育技術を提案できる可能性がある。そこで 4.2 節では、異なる物理・化学特性を有する土質材料 3 種を生育に使用し、1 年及び 2 年間の生育において土質特性がカンゾウの生長に及ぼす影響についての検討を行う。

#### 4.2.1 生育実験に使用した材料及び初期条件

本生育実験九州大学伊都キャンパス屋外実験フィールド内のビニールハウスにおいて実施された.実験材料は、硅砂 7 号 (Silica sand No.7)、一般的な植物生育用の培養土(a)(Potting compost(a)、アイリスオーヤマ、ゴールデン粒状培養土)、及び硅砂 7 号と培養土を乾燥重量比1:1(Silica sand+Potting compost(a))で混合したものを採用した.各試料の写真を写真 4-2 に、使用した土質の土粒子密度、初期含水比、初期乾燥密度を表 4-1 に示す。初期含水比及び初期乾燥密度は、材料を筒内に充填する際に充填が容易になるように、また、カンゾウ生育に必要な初期の水分を材料中に補うために、試行錯誤において決定した。

実験材料の物理的特性として,第三章と同様の方法で標準正規分布を用いて補正した  $^{5)}$  粒径加積曲線を図  $^{4-1}$  に,粒度特性及び土性の分類を表  $^{4-2}$  と表  $^{4-3}$  に示す.比較のため,第三章で示した  $^{5}$   $^{7}$ (H)の表層の粒径加積曲線も示している.図  $^{4-1}$  ,表  $^{4-2}$  ,表  $^{4-3}$  より,硅砂  $^{7}$  号は,均等係数  $^{4}$   $^{5}$  曲率係数  $^{5}$   $^{7}$ (H)の表層と類似しており,自生地地盤と同様の物理特性を有していると考えられるため,カンゾウが健全に生育する可能性があることから採用した.

また,一般的な植物生育に適している培養土(a)と,その中間的特性を有すると考えられる硅砂 7 号と培養土(a)を混合した材料を用いて,材料内に含まれる栄養分と物理・化学特

性を調節し、カンゾウ生育に適切な環境の把握を試みた.

以上3種の材料を、写真4-1に示すような直径10cm、高さ50cmの塩ビ筒に、各種試料を表4-1に示す含水比及び湿潤密度で充填し、カンゾウ幼苗を定植させた。なおカンゾウ幼苗は育苗ポットにおいて2~3週間生育させ、筒内に移植したものを使用した。発芽処理やポットでの生育方法は付録にて示す。なお、筒内への灌水は適宜行い、各条件において1年及び2年間生育させたカンゾウの生長度を測定した。生長度に関しては、4.3節において述べる。

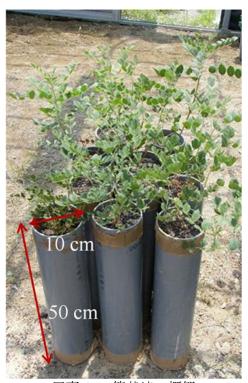


写真 4-1. 筒栽培の概観

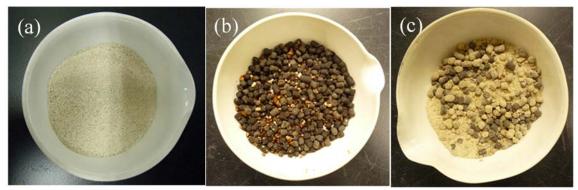


写真 4-2. 実験に使用した試料((a)Silica sand (b)Potting compost (c)Silica sand+Potting compost)

表 4-1.各試料の初期物理特性

X : 51日 : (1 - 1/2/31   1/2 - 1/3   1/2 - 1/3   1/3										
Type/Index	Initial water	Soil particle	Initial wet	Initial dry						
1 ype/maex	content	density	density	density						
Unit	%	g/cm <sup>3</sup>								
硅砂7 <del>号</del>	30	2.66	1.66	1.28						
(Silica sand No.7)	30	2.00	1.00	1.20						
培養土	73	2.40	1.04	0.60						
(Potting Compost)										
硅砂+培養土	45	2.55	1.69	1.17						
(Silica sand +Potting compost)	73	2.33	1.09	1.1/						

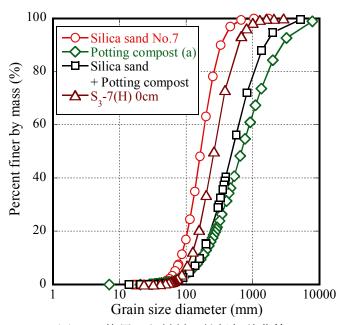


図 4-2. 使用した材料の粒径加積曲線

表 4-2. 使用した材料の粒度特性

Soils	D <sub>10</sub> (μm)	D 30 (μm)	D 50 (μm)	D 60 (μm)	Uc	Uc'
Silica sand No.7	0.08	0.12	0.17	0.19	2.30	0.99
Potting compost (a)	0.17	0.38	0.68	0.89	5.23	0.98
Silica sand+Potting compost	0.16	0.31	0.49	0.61	3.81	0.98
S <sub>3</sub> -7(H) 0cm	0.0001	0.19	0.26	0.31	2.62	0.99

表 4-3. 使用した材料の土性区分

Soils	Sand	Silt	Clay	soil texture	Gravel	Sand	Fine	soil texture
Sons	(%)	(%)	(%)	(JASS)	(%)	(%)	(%)	(JGS)
Silica sand No.7	99.99	0.02	0.00	S	0.00	92.71	7.29	S
Potting compost (a)	99.94	0.06	0.00	S	47.56	50.38	2.07	SG
Silica sand+Potting compost	99.99	0.01	0.00	S	0.34	98.07	1.60	S
S <sub>3</sub> -7(H) 0cm	99.93	0.00	0.00	S	0.07	97.57	2.36	S

## 4.2.2 各土質材料の水分保持特性と水分量

各土質材料の保水性を把握するために、カンゾウを定植していない筒において、筒高さ 10cm, 20cm, 40cm の 3 箇所に水分センサー(1006-18T サンケイ理化製)とテンシオメーター (UNSUC サンケイ理化製)を取り付け、筒の上から 100ml 灌水した後 1 週間の体積含水率 とサクションを経時的に測定し、植物が実際に水分を取り込む状態での水分特性を把握した 5 の底の透水は自由である.

図 4-3 は、排水過程における水分特性曲線を表している。図 4-3 より、同じサクション値においても培養土は体積含水率を高く保ち、保水性に優れていることがわかる。 硅砂 7 号は狭いサクション変化内で体積含水率の変化が著しい材料、すなわち保水性の低い材料である.

また,各土質の有効水分量を第三章の式(3.8)を用いて,50 kPa までの水分量を比較すると, 硅砂 7 号は AM=58.05, 培養土は AM=68.84, 硅砂 7 号+培養土は AM=58.64 となり, 硅砂 7 号<硅砂+培養土<培養土の順に有効水分量が大きいということがわかる.

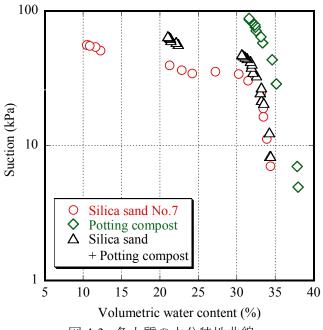


図 4-3. 各土質の水分特性曲線

#### 4.2.3 各種土質材料の化学特性

生育実験に使用した土質の化学特性である pH, EC, CEC, 無機分として交換性陽イオン 4 種( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ),有機分として硝酸態窒素,アンモニア態窒素,可給態リンを,以下の表 4-4 に示す.なお,表中の Lower limit は定量下限値未満である.

表 4-4 の CEC に関して述べると、一般的に栄養を保持しやすいとされている土壌(多腐植質黒ボク土)では 30~40 (meq/100 gdry)と言われているが  $^6$ 、これを満たしているのは培養土のみであることがわかる。しかし、第三章の 3.6.3 節にも示すように、CEC が低い乾燥地の地盤で自生しているので、CEC が高い土壌と低い土壌でカンゾウの生長の差異を確認するためには有効な条件である。

pH に関して述べると、カンゾウはアルカリ土壌を好むとされているので、硅砂とマサ土には苦土石灰 (CaCO<sub>3</sub> 55%、 $MgCO_3$  他 45%の混合物 pH13.2、EC7.52 mS/cm)を重量比500:1 で混合した。そのため、pH はアルカリ性を示しており、CEC が低いので陽イオンを吸着しにくく、3 種の土質材料の中で EC が最も高い。

また、各土質の pH と EC を第三章の 3.4.4 節、図 3-14 と照らし合わせると、硅砂 7 号、硅砂+培養土は低 EC・高 pH 土壌、硅砂 7 号は中 EC・高 pH 土壌であることがわかる.

さらに各土質の成分に関して述べると、培養土が有する交換性陽イオンが他の土質より も全体的に高いことがわかる。特にカルシウムとマグネシウム、硝酸態窒素の量に土質間 の顕著な差があることもわかる。このような地盤の化学的環境が、カンゾウの生育に及ぼ す影響の確認を次節より行う。

Index	pН	EC	CEC	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	$K^{+}$	Na <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Unit	-	mS/cm	meq/100gdry	mg/kgdry							
Silica sand No.7	8.44	0.67	6.0	350	13	15	32	1	Lower limit	110	
Potting compost(a)	7.37	0.23	49.9	4510	1300	750	160	590	39	90	
Silica sand +Potting compost(a)	8.09	0.29	27.95	2430	657	383	96	295	19	100	

表 4-4. 使用した土質の化学特性

### 4.2.4 カンゾウの生長度評価項目

前述したように、カンゾウは根を薬用として取り扱う植物である.そのため、カンゾウの生育を確認する際には根の生長が最も重要である.従って高品質で重量の大きく、さらには速く根を伸ばすための条件を見出すために、根長、根重、根に含まれる有効成分である GC 含有率を根の生長度を評価する項目として選定する.

カンゾウ生育に適切な条件を見出すために、上記の生長度を測定した上で、その条件に有意性があるかどうかを判断しなければならない. 以下 4.2.5 節において、有意性の検定方法を示す.

## 4.2.5 t検定による検定手順

2 つの異なる条件において得られた結果について、その条件の効果が有意であるかを確かめる場合、t 検定が有効である. t 検定は以下のa)~c)の比較を行う場合に有効である  $^{7}$ .

- a)検体が同じで、異なる二つの条件で測定したとき、それぞれの条件下での母集団平均が等 しいかどうかの比較を行う場合
- b)検体が異なっていても、対になり得る二つのデータを比較する場合
- c)ある条件 A を一定にして、またある条件 B が異なる 2 つの検体から得られたデータを比較し、条件 B の違いによって得られたデータに有意差があるかどうか比較する場合 t 検定は以下の d) $\sim$ f)の前提条件を確認した上で行わなければならない.
- d) 帰無仮説 H<sub>0</sub>:2 群の母平均値に差はない
- e) 対立仮説  $H_1:2$  群の母平均値に差がある、すなわち等分散性を検定する
- f) 有意水準 a で両側検定を行う(片側検定も定義できる)

次に、等分散性の検定を行う。ある条件における A 群、 B 群のケース数を  $n_a$ 、 $n_b$ 、平均値を $\bar{X}_a$ 、 $\bar{X}_b$ 、不偏分散を  $U_a$ 、 $U_b$ とする。不偏分散の大きい方を  $U_a$ 、小さい方を  $U_b$ とし、それぞれに対応するケース数(個体数)を  $n_a$ 、 $n_b$ とする。不偏分散 U は標本分散の期待値であり、母集団の分散 $\sigma$ を用いて以下の式(4.1)で表される。

$$U = \frac{n-1}{n}\sigma^2 \tag{4.1}$$

上式により得られる二つの異なる母集団における標本分散を用いて、検定統計量  $F_{\theta}$  を式 (4.2)により計算する.

$$F_0 = \frac{U_a}{U_b} \tag{4.2}$$

 $F_0$ は,第 1 自由度が  $n_a$ -1,第 2 自由度が  $n_b$ -1 の F 分布に従う.片側有意確率を  $P = Pr\{F \ge F_0\}$  とする.検定を行うために,F 分布表( $\alpha = 0.05$ ,  $\alpha = 0.025$ ,  $\alpha = 0.01$ ,  $\alpha = 0.005$ ) $^{7}$ ,または F 分布の上側確率の計算を参照する.

次に、帰無仮説の採否を決める.

 $2P > \alpha$ のとき、帰無仮説を採択する. これより、「2 群の母分散は等しくないとはいえない」といえる.

 $2P \le \alpha$ のとき、帰無仮説を棄却する.これより、「2 群の母分散は等しくない」といえる.両側検定の結果を文章で記述するときに、「正確な有意確率は 2P である」ということなる.

2 群の分散が等しいと仮定できる場合、または、等分散性の検定で帰無仮説が採択された場合、通常のt検定を行う.

2 群をプールした分散の推定値  $U_e$  を式(4.3)により計算する.

$$U_e = \frac{(n_a - 1)U_a + (n_b - 1)U_b}{n_a + n_b - 2} \tag{4.3}$$

得られた  $U_e$ を用いて、検定統計量  $t_0$ を式(4.4)により計算する.

$$t_0 = \frac{\left|X_a - X_b\right|}{\sqrt{U_e \left(\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}\right)}} \tag{4.4}$$

 $t_0$  は自由度が  $v = n_a + n_b - 2$  の t 分布に従う.

また、2 群の等分散性が疑わしい場合、または、等分散性の検定で帰無仮説が棄却された場合、Welch の方法による t 検定を用いる。検定統計量  $t_0$  を(4.5)式により計算し、自由度 v が(4.5)式の t 分布に従う。

$$v = \frac{\left(\frac{U_a}{n_a} + \frac{U_b}{n_b}\right)}{\frac{U_a^2}{n_a^2(n_a - 1)} + \frac{U_b^2}{n_b^2(n_b - 1)}}$$
(4.5)

上式の $\nu$ は整数値にならないので、補間法により  $t_0$ の有意確率を求めるか、コンピュータを用いて求める.

別法としては次のようにすればよい. 小数点以下を切捨てた自由度に対するパーセント点を  $t_L$  としたとき, $t_0$ > $t_L$  ならば帰無仮説を棄却する. 小数点以下を切上げた自由度に対するパーセント点を  $t_U$ としたとき, $t_U$ > $t_0$  ならば帰無仮説を採択する.  $t_L$ > $t_0$ > $t_U$  のときは  $t_L$ ,  $t_U$  から補間法によってパーセント点  $t_X$  を求め, $t_X$   $\leq t_0$  なら帰無仮説を棄却, $t_X$ > $t_0$  なら帰無仮説を採択する. 有意確率を  $P=P_r\{\mid t\mid \geq t_0\}$ とする.

最後に、帰無仮説の採否を決める.

 $P>\alpha$ のとき、帰無仮説を採択する.「2 群の母平均値に差があるとはいえない」といえる.  $P \leq \alpha$ のとき、帰無仮説を棄却する.「2 群の母平均値に差がある」といえる.

## 4.2.6 各種土質材料で生育したカンゾウの生長度

4.2.1 節で述べた実験条件において、ウラルカンゾウの栽培実験を2年間行い、生育1年目及び2年目の根長、根重、GC含有率を測定した.

GC 測定は HPLC 法 (High Performance Liquid Chromatography, 高速液体クロマトグラフィー)にて行った <sup>8)</sup>. 測定方法の詳細は付録に記す.

図 4-4~図 4-6 に各土質で 1 年間,及び 2 年間栽培した個体の根長(Root length),根重 (Root weight),GC 含有率 (GC content)を示それぞれ示す.図中には各条件で 3 個体測定したものの最大値,最小値,平均値及び第一位四分点,第三位四分点を示している.また,系列上部の%値は,硅砂 7 号のみでの生育を行った場合と各条件を t 検定で比較した有意水準を,n.s.は有意差が見受けられないこと(not significant)を意味している.なお,収穫したカンゾウの一例を写真 4-3 に示す.

図 4-4~4-6 より、1 年目は培養土のみで栽培した個体の根長・根重・GC 含有率が平均値としては高く、硅砂のみで生育した場合との有意差が認められ、平均値でそれぞれ 1.5 倍、15 倍、12 倍高かった。また、硅砂と培養土を混合した条件も、培養土のみと比較すると低いが、根重と GC 含有率において、硅砂のみで生育した場合と比較して有意に高いことが明らかになった。これは、カンゾウを幼苗から生育させる場合、保水・保肥性の優れた材料で生育させた方が、生育が良好であるということを意味している。

2年間生育した個体に関しては、保水・保肥に優れる土質材料でも、個体差による生長度のばらつきが激しく、どの生長度に関しても硅砂のみで生育した場合と有意差が認められなかった.しかし、平均値に関しては、特に硅砂と培養土(a)を含む土質で栽培した個体はGC含有率が高くなっている.これは培養土(a)が有する水分保持特性と、CECの高さ、元来の栄養成分の含有量に加え、硅砂と培養土を混合したことによる適度な有効水分量、CECによりカンゾウの生長を促したことによるものと考えられる.

一方で、硅砂 7 号のみで生育させた場合は、モンゴルの群生地と同じように硝酸態窒素・その他の交換性陽イオンが少ないにも関わらず、生育が良好ではなかった.

以上の結果より、乾燥地において栄養分の少ない土壌でカンゾウが生育しているのは、カンゾウ種子すべてが生き残るわけではなく、強い個体のみが発芽し生き残り、さらに第二章の 2.7 節でも述べたように、生存している強い個体はストロンによって繁殖しているためと考えられる 9. 従って、カンゾウを小さい幼苗の状態から育てる場合、培養土のような水分と養分保持能力を持った土で生長を促す必要があり、特に生育 1 年目の根圏周辺の水分・栄養分を補填する必要がある.



写真 4-3. 各条件で 2 年間生育した個体 (上段: 硅砂 7 号,中段,培養土,下段,硅砂 7 号+培養土)

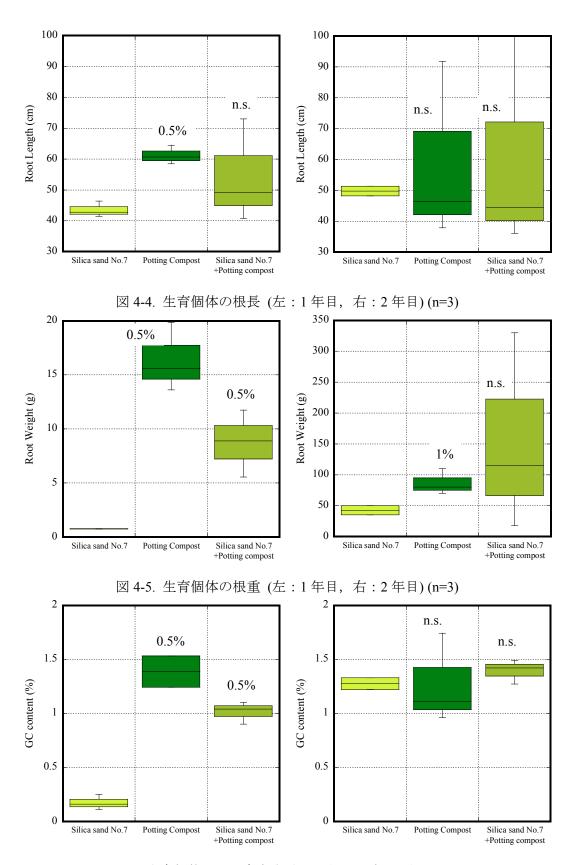


図 4-6. 生育個体の GC 含有率(左:1年目,右:2年目) (n=3)

#### 4.3 乾燥地を模擬した地盤における筒栽培の応用とカンゾウ幼苗の初期生育促進実験

4.2.6 節の生育実験と、第三章の地盤環境調査の結果より、乾燥地で自生している個体は貧水分・貧栄養状態にも関わらず生長している事に対して、国内栽培品は栄養が少なく肥沃でない土質では比較的生育が悪いという事がわかった。加えて、第二章 2.7 節でも述べたようにカンゾウ自生種は主にストロン(走行茎)により増殖している 9ので、モンゴルのような地盤環境・気象環境において種子から発芽してから間もない幼苗から生育させることは困難な環境にあると推測できる。従って、カンゾウの生えていない S3-3(NH)のような非自生地に新たにカンゾウを種子または幼苗から生育させる為には、何らかの形で地盤内の水分と栄養を補い幼苗の生長を促す、または枯死させない方法を検討する必要がある。そこで 4.3 節では、乾燥地を模擬した地盤に、保水性・保肥性に優れる培養土を充填した筒を設置し、乾燥地模擬地盤に健全に根が伸長する、すなわち、乾燥地の地盤環境下における筒状の土質材料の適用可能性を確認するための生育実験を行った。

#### 4.3.1 実験条件

本生育実験は九州大学伊都キャンパス屋外実験フィールド内の恒温室において実施された.図 4-7 のように、乾燥地を模擬した地盤を硅砂 7 号で作成し、その上に培養土(b)(Potting compost(b)、育苗培土、タキイ種苗株式会社)を詰めた塩化ビニール製筒を置きカンゾウ幼苗を植え、下の乾燥地模擬地盤に根がどれだけ伸長するか、また他の生長度も比較した.実験の概観を写真 4-4 に示す.表 4-5 に培養土(b)の栄養条件を、表 4-4 の硅砂 7 号、培養土(a)のデータも併せて示す。培養土(b)を選択した理由は、有効水分量も硅砂と比較して高く、さらに CEC と交換性カルシウムイオンが 4.2 節の実験の硅砂+培養土に近い土質材料であり、幼苗の生育を保証できる可能性があると考えたからである.

なお,図4-8に培養土(b)の粒径加積曲線,表4-6に粒度特性,図4-9に遠心法<sup>10)</sup>にて測定した培養土(b)の水分特性曲線を図4-9に示す.初期乾燥密度は0.25g/cm³である.図4-2の3種の材料と比較すると、硅砂7号+培養土の曲線と最も類似していることがわかる.

実験に使用した筒形状については、使用する培養土の量や現地での作業効率と 4.2 節の筒形状を考慮して、筒径 5cm、7cm、高さ 10cm、20cm、50cm をそれぞれ選定した.この筒に表 4-5 に記す乾燥密度で培養土を充填し、生育実験を 3 ヵ月間行った.なお、灌水は週一回、各筒に 50ml ずつ行った.

## 4.3.2 筒径と筒高さがカンゾウの初期生育に与える影響

図 4-10 に生育試験結果を示す. 生長評価項目は 4.2 節と同様に, 根重, 根長及び GC 含有率ある. なお, 図の灰色の塗りつぶし部分は筒高さを, 三角のプロットは模擬地盤への根の伸びを表す.

図 4-10 の通り, 筒直径が 5cm, 筒高さが 10cm の場合では下地盤に 30cm 根が伸長し, さ

らに GC 含有率も生根重も高い個体を生育させることができた. これにより, 筒栽培による 初期の生長促進の有益性が示唆された. また, 少ない培養土で栽培した個体の方が生育が 良好であったことから, 作業効率を上げることができる可能性がある. さらに, 筒直径 5cm と 7cm で生育した個体を比較すると, 直径 5cm で生育した個体のほうが根重の重い個体を 生育させることができることがわかった. これは筒の拘束効果によるものと推測される.

以上の結果より、培養土のような栄養に富む地盤環境から、乾燥地を模擬した硅砂地盤 に根を伸長させることができる、すなわち乾燥地においても本方法は有効であるというこ とが示された.

しかし、現地での作業や材料費・運搬費等のコストを考えると、塩ビ筒を用いることは 妥当ではないと考えられる。そこで、次節より塩ビ筒の代替品として有効であると考えられるビニール筒袋を用いた生育実験について述べる。

さらに、乾燥地模擬地盤の水分・栄養環境についての検討も行う必要があるため、次節では乾燥地模擬地盤の地盤環境がカンゾウの生長に及ぼす影響について述べる.

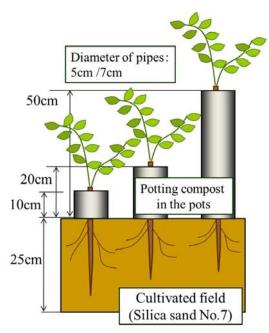


図 4-7. 筒栽培の応用実験の概念図



写真-4-4. 筒栽培の応用実験の様子

表 4-5. 培養土(b)の実験条件

T.				Exchangeable cation						
Items	рН	EC	CEC	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>			
Units		mS/cm	meq/100gdry	mg/kgdry						
Potting compost (b)	6.35	1.570	21.3	1450	870	1700	304			
Turning		Water	soluble cation		Organic matter					
Items	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	$PO_4^{3-}$			
Units		mg/kgdry								
Potting compost (b)	299	102	142	159	1130	854	17493			

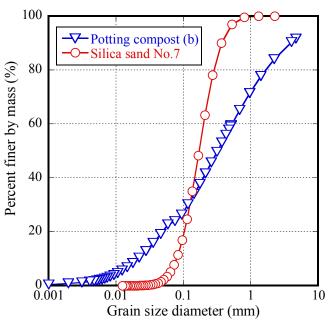


図 4-8. 培養土(b)の粒径加積曲線

表 4-6. Potting compost(b)の実験条件

		$D_{10}$	D30	D50	D 60	Uc	Uc'		
	(	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	OC	00		
Potting		26.77	116.74	323.79	530.03	19.80	0.96		
compost (	(b)	Sand	Silt (%)	Clay	soil texture	Gravel	Sand	Fine	soil texture
	(%	(%)	SIII (%)	(%)	(JASS)	(%)	(%)	(%)	(JGS)
		70.63	28.14	1.23	SL	34.87	41.19	23.95	SFG

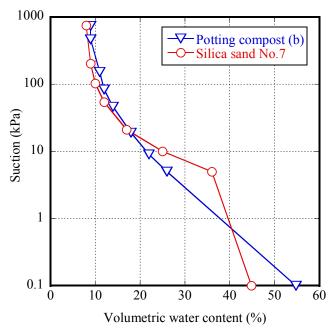


図 4-9. 培養土(b)の水分特性曲線

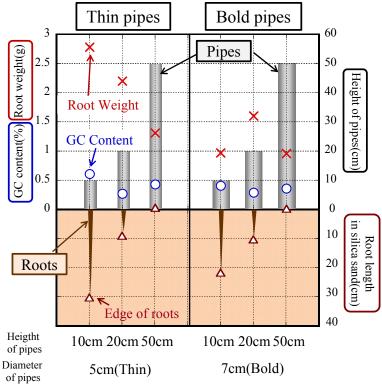


図 4-10. 筒直径・高さの違いによるカンゾウの生長度比較

## 4.4 緑化土質材料と乾燥地模擬地盤を用いたカンゾウ生育実験

4.3 節の結果より、カンゾウは初期の生長段階を栄養に富む、また栄養吸着力が比較的高い材料内で生育させることによって、貧栄養状態の乾燥地を模擬した地盤にも根を健全に伸長させ、生長することが明らかになった。そこで、次に乾燥地模擬地盤の地盤内水分環境・栄養環境とカンゾウ生育の関連性について検討するために、緑化土質材料を用いた乾燥地を模擬した地盤で地盤内の水分環境やカルシウム環境がカンゾウの生長に与える影響を定量化するための実験を行った。

## 4.4.1 実験条件

本生育実験は佐賀県東松浦郡玄海町の玄海町薬用植物栽培研究所にて実施された. ガラスハウスを二棟使用し, いずれも深さ 250 cm まで乾燥地模擬地盤 (硅砂 7 号, Fine sand) で構成されている. ハウス内の概観を写真 4-5 に示す.

このような模擬地盤に直径 6 cm, 長さ 25 cm の筒状のビニール袋に, 4.3 節で使用したものと同様の培養土を詰め緑化土質材料 (Potting compost (J), タキイ種苗株式会社の育苗培土)とし,カンゾウ幼苗を定植させたものを 30 cm 程度の間隔で定植させた. 表 4-5 に緑化土質材料の pH, EC 及び CEC と乾燥地模擬地盤と緑化材料の交換性陽イオンと,窒素やリン等の肥料成分を示している. 緑化土質材料は 4.3 節で使用したものと同じである.

表 4-6 及び第三章より、緑化土質材料は乾燥地模擬地盤の 10 倍程度 CEC が高く、養分となる陽イオンを多量に吸着できる材料であることがわかる. なお、実際の乾燥地地盤の CEC も低く、模擬地盤と同程度である. さらに、緑化土質材料は圧倒的に肥料成分を含み、幼苗の初期生育に適していると言える. これらの実験条件とカンゾウ生育の関係を以下に示す.

肥料条件は地盤内の有機分を補うためのぼかし肥料と堆肥を混合したもの (Organic compost, 有機肥料), 乾燥地の地盤環境を想定し,溶解度や混合物質の異なる二種の石灰である有機石灰(炭酸カルシウム分 89.3%)及び苦土石灰(炭酸カルシウム分 45%) (いずれも炭酸カルシウム, CaCO<sub>3</sub>を主体とした土壌改良材)を付与した条件,またそれらの付与濃度を変えた条件も加え,計7条件で実験を行った.なお,表中の1st year, 2nd year とは,生育開始時の施肥量と,生育2年目に行った追肥量を表している.



写真 4-5. 佐賀県玄海町薬用植物園の概観と緑化土質材料

表 4-6. 乾燥地模擬地盤に添加した肥料条件

	Kind of manure		Amount of additional manure or lime (g/m²)									
No.	or lime	Calci		_	Magnesium		Pottasium		gen	Phosphorus		
	Of Hill	carbona	te(Ca)	(M	g)	(k	(2)	(N	)	(F	<b>P</b> )	
	Year	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	
1	Organic compost	7.50	22.50	3.00	9.00	12.60	37.80	8.40	25.20	13.80	41.40	
2	Organic compost1/2	3.75	11.25	1.50	4.50	6.30	18.90	4.20	12.60	6.90	20.70	
3	Organic compost1/8	0.94	2.81	0.38	1.13	1.58	4.73	1.05	3.15	1.73	5.18	
	Organic compost + Magnesium lime	135.00	405.00	15.00	45.00			-		-	-	
5	Magnesium lime	67.50	202.50	7.50	22.50	-	-	-	-	-	-	
6	Magnesium lime1/2	142.50	427.50	18.00	54.00	12.60	37.80	8.40	25.20	13.80	41.40	
7	Organic lime	133.95	401.85	0.98	2.93	0.26	0.78	0.42	1.26	0.35	1.05	

### 4.4.2 地盤内の水分状態と添加した栄養分がカンゾウの生育に与える影響

4.4.1 で示した実験条件において、幼苗の状態で実験地盤に定植し、灌水は週2度行い、約7か月および1年7ヵ月間生育させた. なお、生育期間の中でカンゾウはどの個体も緑化材料外に根を伸長させており、緑化材料外の水分及び追肥した肥料分を吸収しており、カンゾウの生育は添加した肥料の影響を受けていると考えられる.

それぞれの条件での生長度を図 4-11~4-13 に示す. 横軸の番号は表 4-6 の条件と同じであり,各条件の左側のデータが生育 7 か月後,右側のデータが生育 1 年 7 か月後を示している. なお,根重は 2 年目のみ計測を行ったので,2 年目のデータのみ示している.

図 4-12, 4-13 より, 4~7 番の有機石灰及び苦土石灰を加えた条件の根重は、硅砂 7 号のみで同期間生育した個体と比較して、2 を除き有意に高く、GC 含有率も 2,3 を除き有意に高いことがわかる。ここで改めて、乾燥地と同じような石灰分を加えた条件で生長が良好になることも伺えた。

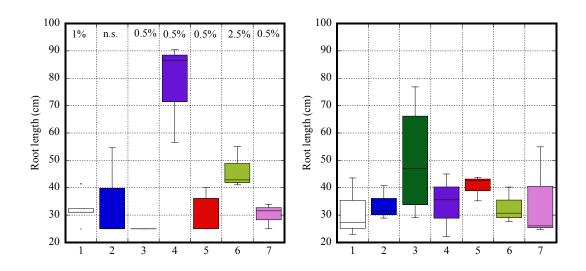


図 4-11. 各水分・栄養条件での根長(左:1年目,右:2年目) (n=3~5)

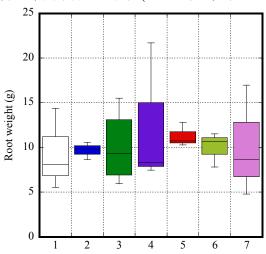


図 4-12. 各水分・栄養条件での根重(2 年目のみ) (n=3~5)

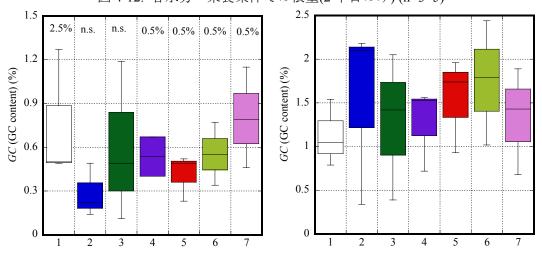


図 4-13. 各水分・栄養条件での GC 含有率(左:1年目,右:2年目) (n=3~5)

## 4.5種々の物理・化学特性を有する緑化土質材料を用いたカンゾウ生育特性の把握

#### 4.5.1 実験条件

4.3 節では、乾燥地模擬地盤に添加したカルシウム分とカンゾウ生長の関連性について述べた.しかし、実際に乾燥地地盤にカンゾウ苗を定植させる場合、その土地の栄養環境・塩類環境を大規模に改変することは困難であり、コストがかかることも問題である.カンゾウの生育を良好にし、かつするためには、使用する緑化土質材料を適切な栄養状態にすることが最も簡易で提案しやすい方法である.さらに、緑化材料の製作の手間やコストを抑えるため、現地での調達が容易である家畜の糞と、炭酸カルシウム分を多量に含んだ砂を模擬するため、硅砂 7 号と有機石灰、家畜の糞を模擬した堆肥を混合して緑化材料を作製し、緑化材料内部のカルシウム分とカンゾウ生長の関係を把握した。実験は 4.4 節で述べた玄海町薬用植物栽培研究所の一区画で行った。肥料添加実験と同様に、乾燥地を模擬した硅砂 7 号地盤に緑化土質材料を約 30cm の間隔で埋め込んだ。実験の様子を写真 4-6 に示す。また、緑化土質材料の硅砂 7 号-有機石灰-堆肥混合率を 4 種用いて実験を行った。配合比とそれぞれの pH、EC、交換性カルシウムイオン、水溶性カルシウムイオン含有量、添加した有機石灰、炭酸カルシウム含有量を表 4-7 に示す。

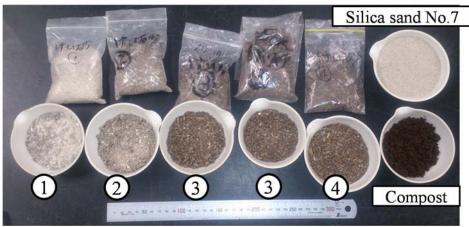


写真 4-6. 緑化土質材料

		<b>1</b> 4-7. 脉	11上負的何以	大峽木口			
Ind	lex	C 17.	Wet density	Dry density	Total weight		
Uı	nit	Condition	g/c	$m^3$	gwet/pot	gdry/pot	
Mixing ratio	4.0:4.0:0.5	1)	0.85	0.80	600	567	
of Silica sand	1.0:1.0:0.5	2	0.78	0.73	550	442	
No.7/CaCO <sub>3/</sub>	0.5:0.5:1.0	③10cm	0.66	0.40	188	112.8	
	0.3.0.3.1.0	③25cm	0.00	0.40	470	282	
Compost	0.0.1.0.1.0	<b>(4)</b>	0.64	0.60	450	300	

表 4-7. 緑化土質材料の実験条件

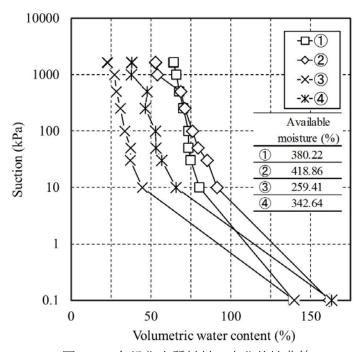


図 4-14. 各緑化土質材料の水分特性曲線

表 4-8. 緑化土質材料の実験条件
x Soils and pH EC CEC Ca<sup>2+</sup>

Inde	X	Soils and	pН	EC	CEC	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	$K^{+}$	Na <sup>+</sup>	CaCO <sub>3</sub> -Ca	
Unit conditions			mS/cm	meq/100gdry	mg/kgdry						
Sili	ca sand No.	7	8.81	0.19	1.20	350	13	15	32	-	
Compost			8.70	2.05	205.35	12884	5753	24448	7169	-	
CaCO <sub>3</sub>			8.80	2.92	-						
Mixing ratio	4.0:4.0:0.5	1	9.14	2.45	24.62	9945	1286	1471	1716	95.36	
of Silica sand	1.0:1.0:0.5	2	9.49	3.32	69.80	8397	3106	9807	3967	65.56	
No.7/CaCO <sub>3/</sub>	0.5:0.5:1.0	③10cm	9.64	6.41	137.58	10080	3380	12242	4272	6.90	
	0.5.0.5.1.0	325cm	7.0 <del>4</del>	0.41	137.36	10080	3380	12242	42/2	33.61	
Compost	0.0:1.0:1.0	4	9.71	7.07	205.35	13542	3876	12252	4943	53.64	

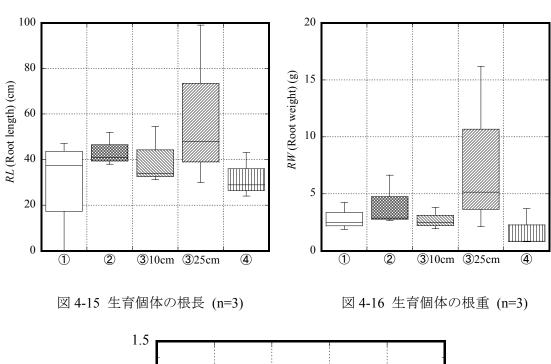
1.0:1.0:0.5, 0.5:0.5:1.0, 0.0:1.0:1.0 として緑化土質材料を作製した.表の下には各土質の初期 pH, EC,交換性及び水溶性カルシウムイオン、緑化土質材料一つにおける湿潤重量、それに対する添加カルシウム量を示している。各緑化土質材料はそれぞれ直径  $10\,\mathrm{cm}$ , 高さ  $25\,\mathrm{cm}$  であるが、0.5:0.5:1.0 の初期 pH はモンゴルと同様にアルカリ性であるが、EC は堆肥、有機石灰の割合が高くなるにつれて高くなり、植物が生育できなくなると言われている EC=  $4.0\,\mathrm{mS/cm}$  以上の条件を二つ作成した。

緑化材料の水分特性曲線を図 4-14 に示す. また, それぞれの土質の有効水分量も図中に示している. 図 4-14 より, 有効水分量は②, ①, ④, ③の順に大きい.

## 4.5.2 緑化土質材料の有効水分量・カルシウム添加量とカンゾウ生育の関係

さらに、添加した炭酸カルシウム含有量と 1 年 6 か月生育を行った個体の生長度の関係をそれぞれ図 4-15~17 に示す。図 4-16、図 4-17 より、添加したカルシウムと根長、根重には相関関係が見られないが、GC 含有率に特に相関があることがわかった。

また、乾燥地模擬地盤にカルシウム分を添加した実験と同等の生育年数の個体と比較すると同様の傾向を示していることから、特に土壌中の炭酸カルシウムに反応して生育が良好になることが明らかになった.



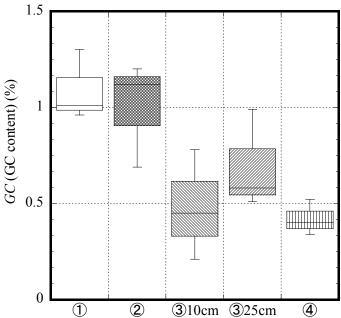


図 4-17. 生育個体の GC 含有率(n=3)

#### 4.6 まとめ

本研究は、薬用植物「カンゾウ」を利用した付加価値の高い自立支援型の砂漠化防止技 術の開発のため、様々な地盤内の水分及びカルシウム環境とカンゾウの生育についての関 連性を評価するための実験を行った. その結果,

1) 筒栽培における 3 種の土質を用いた生育実験では、1 年目は培養土のみで栽培した個体の生長が全体的に高かったが、2 年目の平均値は、生根重にバラつきはあるが硅砂と培養土の混合砂が高くなっている。これは硅砂と培養土を混合したことによる適度な排水性と、土壌の適度な養分含有量、さらには陽イオン交換容量が原因となったと考えられる。さらに、乾燥地の粒度に近い硅砂 7 号で育てた個体は生長度も良好とはいえなかった。これは、陽イオン交換容量が低く、かつ土壌そのものに含まれる栄養分が少なかったためであると考えられる。カンゾウを苗から育てる場合適度な栄養と水分が必要であるということが示唆された結果であるといえる。

- 2) 筒栽培を応用して乾燥地を模擬した地盤に健全に伸長するかの確認を行った生育実験では、筒直径が 5cm、筒高さが 10cm の場合では下地盤に 30cm 根が伸長し、さらに GC 含有率も根重も高い個体を生育させることができ、筒栽培による初期の生長促進の有益性が示唆された。また、少ない培養土で栽培した個体の方が生育が良好であったことから、作業効率を上げることができる可能性がある。さらに、筒直径に関しては直径 5cm で生育した個体のほうが根重の重い個体を生育させることができることがわかった。
- 3) 乾燥地を模擬した地盤に緑化土質材料を埋め込んで生育実験を行った結果,生育期間 7 か月では、根の深さまでの水分量が多い方がカンゾウの生長度,特に根重が高くなり、生長初期には地表面に水分を確保しなければならないことが示唆された。また、乾燥地模擬地盤に添加したカルシウムの濃度が高いと生長度も大きくなることがわかった。また、追肥を行い1年7か月の生育実験を行っても、カルシウム添加量が高いとカンゾウの生長度が高いことは傾向として変わらないことがわかった。
- 4) 現地で調達できる材料を想定して作成した緑化土質材料を用いてカンゾウを生育した結果、モンゴルのカンゾウ自生地と同様に、土壌中のカルシウムの濃度が高い、または添加した炭酸カルシウム量が多いと、根長、根重には有意差が認められなかったが、GC 含有率が有意に大きくなることがわかった。例えば、緑化土質材料内に炭酸カルシウムの量が 3 倍多いと、GC 含有率は 2 倍になることが明らかになった.

## 参考文献

- 1) 林茂樹, 柴田敏郎: カンゾウの国内生産を目指した栽培と育種に関する取り組み, 第 5 回甘草シンポジウム講演要旨集, pp. 6-13, 2011.
- 2) 尾崎和男: ウラルカンゾウ(Glycyrrhiza uralensis. Fisher)の系統選抜について, 第3回甘草に関するシンポジウム講演要旨集, pp. 12-18, 2006.
- 3) 尾崎和男: ウラルカンゾウの筒栽培について, 第2回甘草シンポジウム講演要旨集, pp.12-16, 2004.
- 4) 末岡昭宣: ビニールハウス内でのウラルカンゾウの筒栽培, 第 4 回甘草シンポジウム講演要旨集, pp46-49, 2008.
- 5) 荒木功平: 不飽和土の数値力学モデルに関する基礎的研究, 鹿児島大学学位申請論文, pp.31-33, 2006.
- 6) 藤村俊六郎, 安西徹郎, 加藤哲郎: 土壌診断の方法と活用, 農文協, p. 105, 226-227, 1996.
- 7) 薩摩順吉:理工系の数学入門コース 確率・統計,岩波書店,pp.98-150, 215-217, 1989
- 8) 吉川展司, 伊藤眞: 甘草およびその成分(グリチルリチン酸等)について, FFI Journal, Vol. 217, No. 1, 2012.
- 9) 薬用植物 栽培と品質評価 第10号, 薬事日報社, pp51-57, 2008.
- 10) 地盤工学会編:不飽和地盤の挙動と評価, pp. 57-59, 2004.

## 第五章 地盤環境リスク低減技術の実装化に向けた実験的検討

#### 5.1 はじめに

第四章のカンゾウ生育実験の結果より、乾燥地を模擬した地盤内水分・栄養環境下において、保水性・保肥性が乾燥地地盤の数倍~数十倍高い緑化土質材料を乾燥地模擬地盤に設置し、根圏周辺の水分と栄養分を補うことでカンゾウ幼苗の生育が良好になることが示された。しかし、実際の乾燥地の地盤環境・気象環境下においては、緑化土質材料が適用できるかどうかは不明である。乾燥地でのカンゾウ生育において、カンゾウの生長を良好にすることや品質を高めることは重要であるが、まず非自生地のような水分・栄養面で過酷な環境で生存できるかどうかが重要である。また、付加価値の高い地盤環境改善技術は、地域の人々が容易に取り掛かることができる方法を提示することで、現地に根付く技術となり得る。すなわち、定植作業が容易であり、安価な方法で、灌水やその他の維持管理の労力を抑えた条件下においてカンゾウを健全に生育させる方法を提案しなければならない、従って、現地で安価に手に入る材料でカンゾウ生育に効果的な緑化土質材料を作製し、また緑化土質材料を設置する手間や、灌水の手間のかからない方法を考案して、カンゾウ生育実験を行う必要がある。

そこで、第五章ではモンゴル南部乾燥地、主に地点  $S_3$  周辺で調達した砂質土と培養土、及び動物性肥料分を混合した緑化土質材料を用いて、その適用性をカンゾウ非自生地での生育実験を通して検証した。

生育実験は無灌水条件を想定し、材料の配合率、初期含水比、設置深さ、設置形式及び 表層処理に着目した各種条件を設定し、カンゾウの生存率を比較することで効果的な緑化 土質材料の設置方法を検討した。

#### 5.2 S<sub>3</sub>-3 (NH) における緑化土質材料の有用性の検証

モンゴル・カンゾウ非自生地において大規模な生育実験を行う前に、第三章で示した Bogd の非自生地  $S_3$ -3(NH)において、緑化土質材料を用いた簡易的な生育実験を行った.実験サイトの地図を図 5-1 に示す.カンゾウは根の一部を切り取り、切り取った根を再び地盤内に埋めることで、切り取った部分と埋める地盤の環境が適切であればそこから新たな個体として生育することができる性質を有する.そこで、カンゾウ根または種子を  $S_3$ -7(H)から採取し、根は芽が出てくる節を含む状態で緑化土質材料内に植え、生育に必要な水分と養分を補填する.使用した材料は、モンゴル産の培養土(Potting Compost(M))である.実験ケースを図 5-2 に示す.直径 6 cm、長さ 25 cm 及び 50 cm のビニール袋に緑化土質材料を充填し、図 5-2 の Case-1~3 のような状態で現地地盤に埋めた.

図 5-2 に示すように、Case-1 は長さ 50 cm の筒袋を、緑化土質材料の表面が地表に出るように現地盤に埋め込み、その中に種子を各材料に 10 粒ずつ植えた条件、Case-2 は Case-1 と同じ条件で種の代わりに根を植えた条件、Case-3 では地表面と水平に緑化土質材料を埋め、その中に根を植え、発芽できるように上部に切れ込みを入れた条件である。現地地盤である  $S_3$ -3(NH)の表層と緑化土質材料の pH,EC 及び CEC の比較を表 5-1 に、炭酸カルシウムと各種交換性陽イオン( $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ )及び有機分( $NH_4$ -N, $NO_3$ -N, $P_2O_5$ )を図 5-3 に示す。なお、実験方法は第三章、第四章と同様に pH,EC は JGS-0211,02123 に従って測定し  $^{20}$ ,CEC は Semi-micro Schollenberger 法にて測定した  $^{30}$ . また、交換性陽イオンは酢酸アンモニウム溶液で抽出した土壌溶液を原子吸光法にて測定し $^{40}$ ,  $NO_3$ -N はフェノール硫酸法, $NH_4$ -N は Harper 法にて処理した土壌を蒸留滴定法にて測定した  $^{50}$ . 表 5-1 より、緑化土質材料は現地盤より pH は低いが、EC 及び CEC が約 10 倍高い材料であることがわかる。また図 5-3 より、第三章でも示したが、非自生地地盤はほとんど栄養分を含んでおらず、緑化土質材料は特にカルシウムとリンが豊富な材料である。

このような地盤環境及び実験条件において、カンゾウ種子または根を 2011 年 9 月から 2012 年 6 月までの約 9 ヵ月間生育させた. その間の最大気温は 29.2  $^{\circ}$ C、最低気温は-33.0  $^{\circ}$ C、平均気温は-3.5  $^{\circ}$ C、最大湿度は 96.2 %、最低湿度は 4.1 %、平均湿度は 46.4 %である. このような気象環境下に緑化土質材料を 9 か月置いた場合の Case-1 の緑化土質材料内の含水状態を表 5-2 に示す. 表 5-2 より、現地の気温・湿度・降雨条件下では地下 10 cm 以下の 9 か月後の含水比は地表面付近の含水比の 25 倍以上であり、緑化土質材料の保水性が十分なものであると確認でき、また地下 10 cm 以下に材料を埋めると蒸発の影響を受けず、長期間の保水効果が期待できることが明らかになった. また、表 5-3 は各条件での実験結果を発芽率、または発根率にて示している. 表 5-3 より種からの発芽は 0 %であったが、Case-2 や Case-3 の 10 cm 及び 20 cm 埋めた材料で栽培した苗の発芽が確認できた. 発芽の様子を写真 5-1 に示す. このことから、表面の含水比が 3%程度の土地でも保水性と保肥性の高い材料内で生育させることにより、カンゾウを生育できる可能性を見出した.

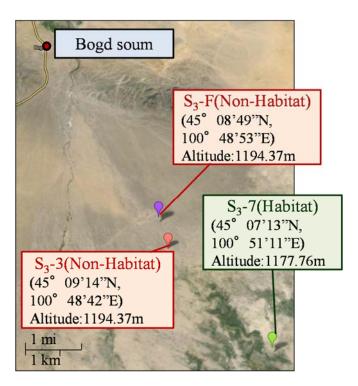


図 5-1. サイト S<sub>3</sub> の見取り図

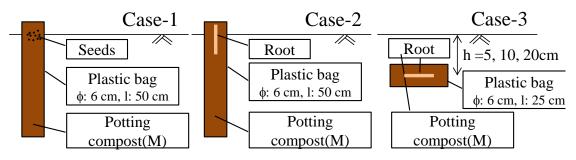


図 5-2. 緑化土質材料の適用実験 実験条件

表 5-1. 使用した緑化土質材料と非自生地の現地地盤の pH, EC, CEC

	pН	EC	CEC
name/unit	ı	mS/cm	meq/kgdry
Southern Mongolia (Non Habitat, 20 cm)	9.17	0.13	1.9
Potting compost (M)	8.46	1.051	28.1

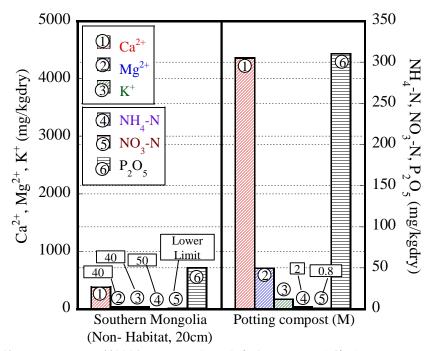


図 5-3. 使用した緑化土質材料と現地地盤 (非自生地) の,交換性陽イオン,有機分

表 5-2. 緑化土質材料内の含水比(Case-1)

Depth (cm)	Water content (%)
0	2.49
10	56.09
20	49.81
30	44.48
40	74.07



写真 5-1. 発芽の様子

表 5-3. 緑化土質材料の適用実験 発芽・発根率

	Seeds	Rhizome (Vertical)	Rhizome (Horizontal)
Case-1	0%		
Case-2		20%	
Case-3			50% (5cm is failed, 10cm, 20cm is succeeded)

# 5.3. 緑化土質材料の水分環境がカンゾウ生存率に及ぼす影響

5.2 節において緑化土質材料を用いると非自生地でも植生が回復する可能性があることが明らかになったので、次に図 5-1 のカンゾウ非自生地である  $S_3$ -3(NH)から 2km 程度離れた非自生地  $S_3$ -F(NH)に、新たに  $S_3$ -7(H)から採取したカンゾウ根を定植させる実験を行った。写真 5-2 に  $S_3$ -F(NH)の概観を、写真 5-3 に緑化土質材料の埋設と発芽の様子を示す。  $S_3$ -F(NH)のエリアも同様に乾燥した栄養分の低い土壌で形成されている。  $S_3$ -F(NH)の深さ別の含水比分布を図 5-4 に、炭酸カルシウムの深さ別分布を図 5-5 に示す。比較のため、  $S_3$ -3(NH)と  $S_3$ -7(NH)の分布も示している。図 5-4, 5-5 より、 $S_3$ -F(NH)は  $S_3$ -3(NH)と同様に水分、炭酸カルシウム分布は表層以外、共に低い値を保っており、水分・養分面で枯渇した土地であることがわかる。そこで 5.2 節において適用性が確認された緑化土質材料を用いてカンゾウ生育実験を行う。また、5.1 節でも示したように、本技術は安価で簡易な技術を目指しているため、調達に手間のかからない土質材料を混合した緑化土質材料を用いて植生実験を行



写真 5-2. S<sub>3</sub>-F(NH)の概観



写真 5-3. 緑化土質材料の埋設と発芽の様子

い,各条件におけるカンゾウの生存率の結果からカンゾウ生育に適切な緑化土質材料を検 討した.

#### 5.3.1 実験条件

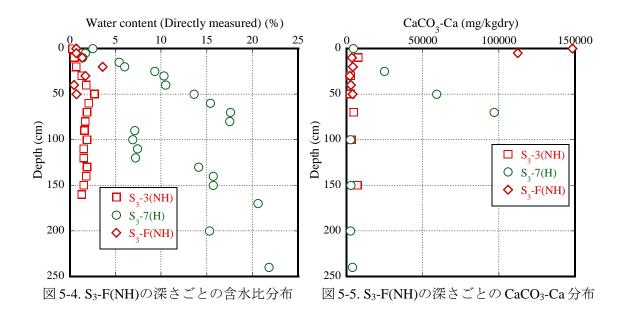
実験条件として、現地で調達した材料の水分状態を使用した緑化土質材料の設置条件を 図表 5-1 に示す. 図表中の VR-1 は, Ulaanbaatar より調達した培養土(Ulaanbaatar Compost, UB)と $S_3$ -7(H)より採取した炭酸カルシウムを含む砂質土( $S_3$ Sand)をそれぞれ混合比0%, 5%, 10%, 20%で混合した材料を, 直径 6cm, 高さ 25cm のプラスチック製の筒袋に充填し緑化 土質材料とし, これにカンゾウ根を一筒につき一本入れ, 地表面から 10cm に垂直に埋めた 条件である. VR-2 は, S<sub>3</sub>Sand と Bogd 付近で調達した乾燥肥料(Local Compost, LC)をそれぞ れ乾燥重量に対しての混合比 0%, 10%, 20%で混合した材料を, 上記と同じプラスチック 製の筒袋に充填したものを緑化土質材料とし, これを地表面から 10cm に垂直に埋めた条件 である. HR-1, HR-3 はそれぞれ S<sub>3</sub>Sand と UB を 0, 5, 10, 20%で混合した緑化土質材料を地 表面から 10cm 及び 20cm に水平に埋めた条件である.HR-2 は S3Sand と LC を 0, 10, 20%で 混合した緑化土質材料を地表面から 20cm に埋めた条件である. 緑化土質材料を設置する深 さは、5.2 節より地表面 10cm 以浅は 10cm 以下に比べて蒸発が激しく、土壌の含水比が著 しく低下するという結果を基に選定した、緑化土質材料上部は芽が出てこられるように開 いておき S<sub>3</sub>-F(NH) より 5km 程度離れた川から採取した水を 250ml 加え, 下部は根が地下に 伸長できること及びと筒内の湿害を避けるために直径 1cm 程度の穴を 3 箇所程度開けるよ うにした.

各緑化土質材料の初期含水比、pH, EC, 及び水溶性陽イオン4種( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ),及び炭酸カルシウムを表 5-4 に示す。 $S_3S$  は第三章で示した塩類滞留の影響により、水溶性カルシウムイオンと水溶性ナトリウムイオンを多く含む土壌である。またこの砂は前述したように水溶性カルシウムイオンの他に水に溶け込んでいない炭酸カルシウムも多量に含有する土壌である。また,UB 条件と LC 条件で比較すると,pH は 2種類とも  $8\sim 9$  前後であり変わらないが,UB を混合した条件の方が高い EC を保っている。さらに、水溶性陽イオンに関しては 4種とも同じ混合比では LC 混合条件の方が高いが,炭酸カルシウム含有量は UB 条件のほうが全体的に高い。

緑化土質材料の設置については、一筒につき根は一本加え、土中に縦に設置する方法 (Vertical-Root 以下 VR)と横に寝かせて設置する(Horizontal-Root 以下 HR)二つの方法をとる こととした. これはカンゾウの主根は縦に伸長するが、ストロンと呼ばれる根の一部は横向きに広がるように伸長するためどちらも適当な設置法であると考えたからである.

各条件で作成した緑化土質材料を、一条件につき  $5\sim10$  個作成し、これを乾燥地地盤内に設置した、 $S_3$ -F(NH)の見取り図を図 5-6 に示す、図中の S-1, S-2 はカンゾウ種子を埋めたものであり、本章では議論しない、図中の上段、下段で VR-1,2, HR-1,2,3 は同条件であるが、下段の網掛けしている部分には、表層処理としてマルチングを施している。これは、この

地域が降水量より蒸発量の方が卓越するため、簡易的な蒸発防止策として採用したものである。ビニールは Bogd 村で調達し、緑化土質材料を埋めた場所の真上を被覆し、 $S_3$ -F(NH) 周辺で取れる石などを被せて風による剥離を防ぐ仕様にした。また、ビニールには切れ込みを加え、芽が出られるように施した。ビニールマルチングを施した様子は、写真 5-2 に示している。なお、VR は各土壌材料につき 20 個(マルチング 10 個、裸地 10 個)、そのほかは 10 個(マルチ 5 個マルチなし 5 個)ずつ設置した。



Vertical Root-1(VR-1)

Vertical Root-2(VR-2)

Horizontal Root-1(HR-1)

Horizontal Root-2(HR-2)	S <sub>3</sub> Sand:UB=0%, 5%, 10%, 20%
Horizontal Root-3(HR-3)	S <sub>3</sub> Sand:LC=0%, 10%, 20%
VR-1, VR-2 HR-1,	HR-3 HR-2
10 cm 10 cm 25 cm 6 cm	20 cm
	25 cm 6 cm 25 cm
6 om	S <sub>3</sub> -7+potting compost (UB or LC) 6, 10 %, 20 %) + water (250ml)

S<sub>3</sub>Sand:UB=0%, 5%, 10%, 20%

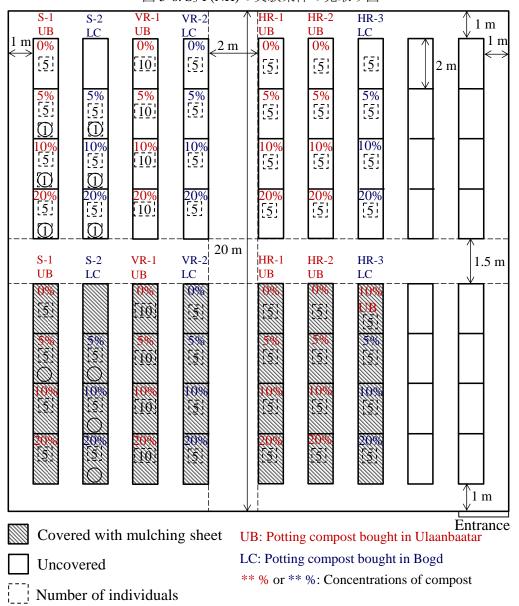
S<sub>3</sub>Sand:UB=0%, 5%, 10%, 20%

S<sub>3</sub>Sand:LC=0%, 10%, 20%

<b>及</b> 3-4. 秋心工真প科·2/初生·七子村庄											
Soil Type	Initial water content	initial dry density	pН	EC	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	$K^{+}$	Na <sup>+</sup>	CaCO <sub>3</sub> -Ca		
Unit	%	g/cm <sup>3</sup>		mS/cm	mg/kgdry						
S <sub>3</sub> Sand (0%)	6.03	1.33	10.03	0.33	56.96	48.71	47.14	446.57	24807.74		
UB5%	10.14	1.21	9.65	0.32	50.03	60.16	194.78	628.90	13997.97		
UB10%	12.43	1.12	9.32	0.23	82.10	40.37	165.52	341.45	7572.75		
UB20%	17.95	0.93	8.19	0.39	120.79	48.35	243.00	412.91	11633.14		
UB	27.42		7.83	0.65	212.99	75.07	641.94	360.03	5855.50		
LC5%	7.20	1.25	-	-	-	-	-	-	-		
LC10%	7.35	1.18	8.13	0.17	89.48	143.15	1163.91	1299.72	7950.36		
LC20%	7.71	0.92	9.14	0.11	97.82	223.15	768.74	2506.69	6615.79		
LC	9.91		9.39	0.41	514.11	1188.99	1960.94	6103.49	8188.35		

表 5-4. 緑化土質材料の物理・化学特性

図 5-6. S<sub>3</sub>-F(NH)の実験条件の見取り図



#### 5.3.2 緑化土質材料の設置方法とカンゾウ生存率の関係

5.3.1 節の方法で 2013 年 5 月に埋めた緑化土質材料を,同 9 月に各条件で根の生存を確認した。各条件における生存率と,生存を確認した時点での緑化土質材料の含水比を表 5-5,表 5-6 に示す。表 5-5 はマルチングなしの条件(Non-mulching),表 5-6 はマルチングあり (Mulching)の条件を示している。生存の確認方法として,表中の Under は,地上部(葉)はないが根を地中に伸張させている状態,Over は生存して地上部も存在する状態,Dead は枯死を確認した状態であり,各条件の個体数に対して Under と Over の和を生存率(Alive Ratio)として表している。また,生育 4 か月後の緑化土質材料の VR の条件に関しては上部から5cm 程度(Top),下部から5cm 程度(Bottom)の9月に根の生存確認を行うとともに緑化土質材料の含水比を計測し,その結果も表中に示している。

設置方法と生存率の関係を図 5-7 に示す. 左図の UB 条件では,同じ 10cm 程度の深さに設置した条件でも, VR-1 より HR-1 の方が生存率が 3 倍以上になっている. これはおそらく,採取した根の状態が水平方向に伸長しているものが多かったため,自生している状態に近い状態に戻すことにより,生存率が上昇したものと考えられる. 従って,HR 条件が幼苗で有効かどうかは,今後の現地での生育実験を通して確認する必要がある.

また, HR-1 と HR-2 で比較すると, 浅い箇所に設置した条件の方が, 生存率が高いことがわかった. 深く埋めると根に負荷がかかり, 生存率が低減したものと考えられる.

一方で、LC 条件では VR 条件でも HR 条件でも生存率に差は見受けられなかった. 以上のことから、設置のしやすさや生存率を考慮すると、緑化土質材料設置時に掘削の労力が少なくて済み、生存率が高い HR-1 条件が方法として良好なのではないかと考えられる.

# 5.3.3 緑化土質材料の混合比とカンゾウ生存率の関係

図 5-8 に、緑化土質材料の混合比と生存率の関係を示す。図 5-8 より、UB、LC 共に、砂質土に 10%混合した条件の生存率が高いことがわかる。表 5-5、表 5-6 を見てみると、保水性が高いと推察される UB、LC を 10%以上混合することによって、混合しない条件、または混合比 5%の条件と比較して、4 か月後の含水比を概ね高く保っていることがわかる。さらに、特に LC において混合比 20%での生存率が下がっている理由としては、水溶性ナトリウム含有量が高く、根の生育に悪影響を及ぼしたのではないかと考えられる <sup>7)</sup>. 従って、UB も LC も、10%程度の混合比で混合した緑化土質材料を用いれば、コストも抑えることができ、適切な水分・栄養状態が保たれる条件になり得ることが示唆された。

# 5.3.4 緑化土質材料内の含水比及びマルチングの有無とカンゾウ生存率の関係

表 5-5, 5-6 中の含水比を計測した条件において、マルチングを施した条件と施さない条件での、各条件での平均の含水比と生存率の関係を図 5-9 に示す。図 5-9 より、マルチングを施さなかった場合含水比と生存率に一意的な関係はなく、4 か月で 5%まで含水比を保持できたとしても生存できる可能性が少ないことがわかる。一方でマルチングをした条件に関

しては、含水比が高いと生存率が上がる傾向にあることがわかった.

さらに、さらに図 5-10 に、全条件においてのマルチング条件と非マルチング条件の生存率と、生存した条件(Alive)及び枯死した条件(Dead)の緑化土質材料内の含水比の平均値を示す。図 5-10 より、マルチングをした条件ではしない条件の約 3 倍生存率が上がることがわかり、生存した条件も枯死した条件もマルチングの有無で含水比 1%程度、Alive 条件で比較すると 1.5 倍程度水分を多く保持できていることがわかった。この結果と第三章及び図5-4 の含水比分布より、地盤内の含水比を 3%以上に保つことができれば、生存率・発芽率を上昇させることができると考えられる。また、マルチングをしたことにより地表面からの蒸発を防ぐことができたことに加え、地表面の温度が低下せず、生育に適した環境を創ることができたと推測できる。

 $5.3.2 \sim 5.3.4$  節の結果より総合的に判断すると、 $S_3 S$  and と UB、LC を 10%の割合で混合した緑化土質材料を水平方向に、深さ 10 cm 程度に設置し、マルチングを施した条件がカンゾウ生存に効果的な地盤内の環境・栄養環境を創り出す可能性があるあることが示された.

表 5-5. 各条件の生存率と含水比 (Non-Mulching)

Non-mulching								Water content (%)						
Conc	litions	Individuals	Alive		Dead	Alive ratio		initial		Alive	;	Dead		
Conditions		muividuais	Under	Over	Dead	Alive	e rauo	muai	Top	Bottom	Average	Top	Bottom	Average
VR-1	UB0	10	3	0	7	3/10		6.03	1.9	1.4	1.65	1.2	1.8	1.5
	UB5	10	0	0	10	0/10		10.14				2.1	4.5	3.3
	UB10	10	2	0	8	2/10		12.43	1	3.3	2.15			
	UB20	10	3	0	7	3/10	6/40	17.95	4.0	5.5	4.75	2.5	3.3	2.9
VR-2	LC0	5	0	0	5	0/5		6.03						
	LC5	5	0	0	5	0/5		7.20	3.1	6.7	4.9	3.2	4.9	4.05
	LC10	5	2	0	3	2/5		7.35						
	LC20	5	0	0	5	0/5	5 2/20	7.71						
HR-1	UB0	5	1	0	4	1/5		6.03	0.4		0.4	0.8		0.8
	UB5	5	0	0	5	0/5		10.14				2.1		2.1
	UB10	5	1	0	4	1/5		12.43						
	UB20	5	0	0	5	0/5	2/20	17.95				1.9		1.9
HR-2	UB0	5	1	0	4	1/5		6.03						
	UB5	5	0	0	5	0/5		10.14						
	UB10	5	0	0	5	0/5		12.43				0.1		0.1
	UB20	5	0	0	5	0/5	1/20	17.95						
HR-3	LC0	5	0	0	5	0/5		6.03				1.6		1.6
	LC5	5	0	0	5	0/5		7.20	1.6		1.6	2.7		2.7
	LC10	5	0	1	4	1/5		7.35						
	LC20	5	0	1	4	1/5	2/20	7.71						

表 5-6. 各条件の生存率と含水比 (Mulching)

Mulching								Water content (%)						
Comé	litions	Individuals	Alive		Dead	Alive ratio		initial	Alive			Dead		
Conditions		maividuais	Under	Over	Dead			muai	Top	Bottom	Average	Top	Bottom	Average
VR-1	UB0	10	0	1	9	1/10		6.03	3.6		3.6	1.9	2.4	2.15
	UB5	10	2	0	8	2/10		10.14	2.9	3.7	3.3	1.5	4.7	3.1
	UB10	10	3	1	6	4/10		12.43	3.3	3.6	3.45	3.1	2.6	2.85
	UB20	10	2	0	8	2/10	11/40	17.95	2.1	3.9	3	5.1	2.9	4
VR-2	LC0	5	-					6.03						
	LC5	5	3	1	1	4/5		7.20	3.1	6.7	4.9	3.2	4.9	4.05
	LC10	5	-					7.35						
	LC20	5	-				4/5	7.71						
HR-1	UB0	5	0	1	4	1/5		6.03	2.9		2.9	2		2
	UB5	5	0	0	5	0/5		10.14				3.3		3.3
	UB10	5	0	1	4	5/5		12.43	3.6	3.3	3.45			
	UB20	5	3	2	0	5/5	11/20	17.95	5.6		5.6			
HR-2	UB0	5	0	0	5	0/5		6.03						
	UB5	5	0	0	5	0/5		10.14						
	UB10	5	0	0	5	0/5		12.43				2.1		2.1
	UB20	5	0	0	5	0/5	0/20	17.95						
HR-3	LC0	5	0	0	5	0/5		6.03						
	LC5	5	0	0	5	0/5		7.20						
	LC10	5	2	3	0	5/5		7.35	2		2			
	LC20	5	-				5/15	7.71						

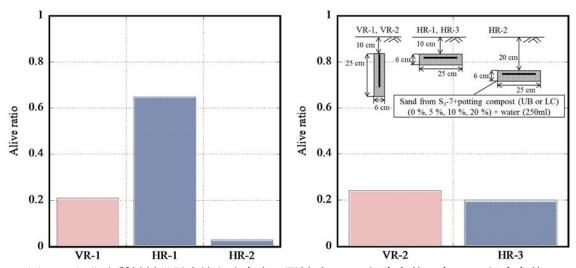


図 5-7. 緑化土質材料設置方法と生存率の関係(左: UB 混合条件,右: LC 混合条件)

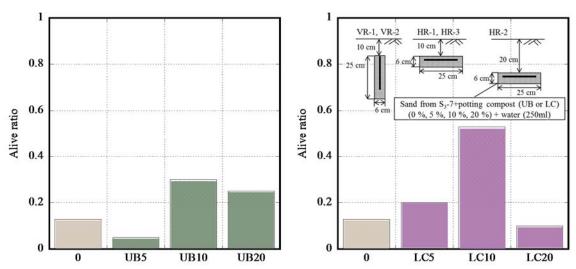


図 5-8. 緑化土質材料の混合比と生存率の関係(左: UB 混合条件,右: LC 混合条件)

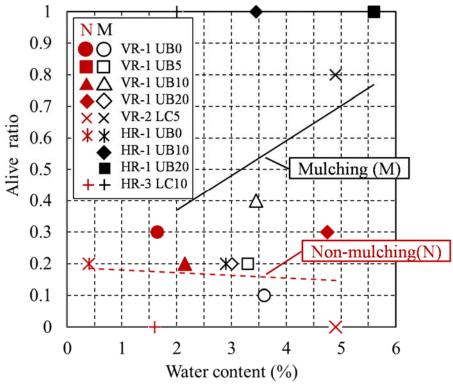


図 5-9. 緑化土質材料内の含水比と生存率の関係

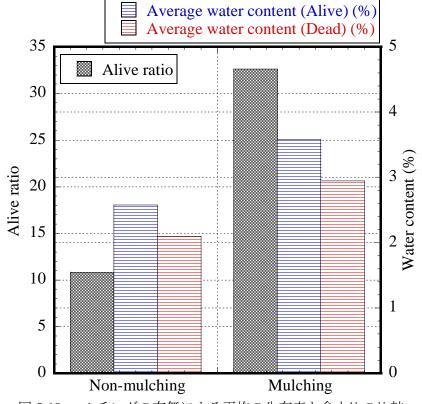


図 5-10 マルチングの有無による平均の生存率と含水比の比較

#### 5.4 まとめ

本章では、モンゴル乾燥地において付加価値の高い砂漠化防止技術を提案することを目的に、カンゾウ非自生地において土壌環境、使用する緑化土質材料の設置方向、設置深さ、混合比、表層処理としてのマルチングの有無に着目したカンゾウの生育実験を行った。その結果を以下に示す。

- 1) モンゴル南部・カンゾウ非自生地  $(S_3-3(NH))$  において、緑化土質材料の妥当性を確認するためのカンゾウの生育実験を行った結果、周辺地盤の含水比が 3% 以下であり、さらに貧栄養である地盤環境においても、9% カ月間で 50%以上の含水率を保持した緑化土質材料の保水力によってカンゾウを生育させることができる可能性が示唆された.
- 2) 緑化土質材料の設置方法に関しては、元来伸長していた根の方向である、水平方向に設置した条件での生存率が高い傾向を示した.
- 3) 緑化土質材料の混合比に関しては、カンゾウ生育にとって境界の含水比 3%以上を保ち、かつナトリウム含有量の少ない条件での生存率が高い傾向を示した。すなわち、現地で調達できる材料である UB, LC を  $S_3$ -7(H)の砂質土に、乾燥重量比で 10%程度混合した条件での生育が良好であった。
- 4) 表層処理としてのマルチングの有無に関しては、生育期間 4 か月では、マルチングを施した条件において、施さない条件と比較して約 1.5 倍含水量を保持できることが示され、その結果生存率も非マルチングの条件と比較して約 3 倍となった.
- 5) 2)~4)より、 $S_3$ Sand と UB、LC を 10%の割合で混合した緑化土質材料を水平方向に、深さ 10cm 程度に設置し、マルチングを施した条件がカンゾウ生存に効果的な地盤内の環境・栄養環境を創り出す可能性があることが示された。

なお、本実験は自生しているカンゾウ根の一部を採取して行ったものである. 種子から の発芽は困難であったため、今後はカンゾウを種子から 1 か月程度生育させた幼苗を用いて乾燥地での生育実験を行い、緑化土質材料の適切な設置方法・混合比を明らかにしなければならない.

また、今後はモンゴルにおいて生育実験サイトを多地点に増やし、様々な地盤環境において適切な緑化土質材料の配合比や初期含水比について検討し、その土地に適合したカンゾウ定植・生育方法について提案しなければならない.

### 参考文献

- 1) 古川全太郎, 安福規之, 大嶺聖, 丸居篤, 亀岡廉: 砂漠化対策技術の確立に向けた薬用植物「カンゾウ」の生育と地盤内水分・カルシウム環境の関連性の評価方法に関する検討 (英題: A Study about Evaluation Method of the Relationships between Soil Water/ Calcium Environment and Growth of Licorice Aimed at Combating Desertification), 第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, (社) 地盤工学会, pp. 55~58 頁, 2013.
- 2) 地盤工学会編:土質試験基本と手引き 第二回改訂版, pp. 66-69, 丸善, 2010.
- 3) 土壌標準分析・測定法委員会編:土壌標準分析・測定法, pp. 155-160, 博友社, 2003.
- 4) 土壤養分測定法委員会編:土壤養分分析法, pp. 34-38, 184-192, 239-245, 養賢堂, 1957.
- 5) 新城俊也: 強熱減量試験による石灰質土のカルシウム含有量の測定, 土と基礎, Vol. 51, No. 4, pp. 32-34, 2003.
- 6) Kameoka, R., Yasufuku, N., Omine, K., Furukawa, Z., Tuvshintogtokh, I., Mandakh, B., Bat-Enerel, B., Yolk, Y.: Geo-environmental field survey with cultivation of licorice in Mongolian arid land for combating desertification, Proceedings of JS-Okinawa 2013, pp.75 -80, 2013.
- 7) 山本太平: 乾燥地化学シリーズ第三巻 乾燥地の土地劣化とその対策, 古今書院, pp. 16-18, 2008.

# 第六章 総括

本論文は、乾燥地において、付加価値の高い地盤環境改善システムの提案を目的として、 乾燥地に自生する貴重な薬用植物である「カンゾウ」と「緑化土質材料」を用いた土地劣 化防止・地盤環境改善技術の開発と提案及び、その妥当性の検証を、モンゴルにおける乾 燥地・カンゾウ自生地、非自生地の調査や日本国内におけるカンゾウ生育実験を通して行った内容を記している。以下に本論文の各章ごとの要約と総括し、今後の課題を記す。

第一章では、本論文および本研究の背景と目的及び本研究の位置づけを明確化し、各章 の内容と構成を記した。

第二章では、本研究を遂行する上で必要な土地劣化の原因や分類を明確化し、本論文で対象としている土地劣化問題の詳細を記し、それに対する砂漠化防止対策や緑化手法の事例を挙げ、工学・農学的視点から問題点を整理することで、自立支援的な対策技術の必要性を明らかにした。また、カンゾウの生育特性、枯渇問題やそれに伴う供給難の現状を述べ、土地劣化対策にカンゾウを用いる利点とこれまでの生育技術の課題をまとめることで、乾燥地の生態資源を活かし、地盤工学的観点を取り入れた改善技術を検討することの重要性を述べた。

第三章では、カンゾウ生育に適切な地盤環境を把握するため、またカンゾウの後退の原因およびカンゾウ生育に重大な影響を及ぼしている地盤環境因子を特定するため、カンゾウ自生地・非自生地の地盤内の物理的・化学的環境を把握するため、モンゴル南部Bayanhongor 県において原位置気象・地盤環境調査を行い、現地地盤の物理・化学特性を原位置及び室内試験によって明らかにした、得られた成果を要約すると以下の通りである。

- 1) 調査地は過去 18 年間を通して平均気温は 4.5  $\mathbb{C}$ , 降雨量は平均 76.5 mm/年である. この 気象状態は、様々な気象学的気候区分において「沙漠」及び「砂漠地帯」に区分される. Bogd 村付近の  $S_3$ -7(H)の 2011 年~2013 年の気象データから,調査地は昼夜・夏冬の寒暖の差が最大で 70~80 $\mathbb{C}$ 程度の地域であることがわかった.
- 2) 4 地点のカンゾウ自生地と非自生地の地盤環境調査を行った結果、いずれの調査地も地下  $1\sim2~m~$  程度の浅い域では不均質な砂質-シルト質の地盤であることがわかった。 さらに、4 地点に共通して  $50\sim100~$ cm の間にシルト分を多く含む層が存在することがわかった。
- 3) 自生地と非自生地の  $1\sim2$  m 程度の深さの含水比分布を調査したところ、水分状態の違いと室内実験の結果から、自生できる境界の水分状態が体積含水率 5% 程度であることが示唆された. また自生地  $S_3$ -7(H)において、シルト分を多く含む層は砂分を多く含む層と比較す

ると有効水分量が高く,保水性を有する層が存在することがわかった. さらに,表層の原位置飽和透水係数は自生地・非自生地共に概ね  $10^{-2}\sim 10^{-3}$  cm/s であり,砂質土の透水性を示した.

- 4) 調査地の pH はどの層でも概ね  $7\sim10$  程度であり,アルカリ性地盤であった.また,地盤内栄養環境は特にカルシウム分が多く,土壌中の 10%程度が炭酸カルシウムである層も存在した.また,自生地はシルト分を多く含む層に炭酸カルシウムや交換性陽イオンが蓄積され,その結果同じ層の pH,EC は他の層と比べると高くなることがわかった.しかし非自生地  $S_3$ -3(NH)はシルト分を多く含む層を有するにも関わらずカルシウム分や交換性陽イオンは他の地と比較して低いこともわかり,降雨も少なく地下水位の低い地では塩分の動きもなく,カンゾウの生育に不適切な環境になることが示唆された.
- 5) 自生地・非自生地共に栄養(交換性陽イオン)を吸着できる能力を表す CEC が低く,一般的な植物栽培に用いる培養土の 1/10 程度の保肥力であることがわかった. また,アンモニア態窒素・硝酸態窒素・リン酸といった有機分が圧倒的に低いことがわかった.
- 6) 自生するカンゾウ根のカルシウム分は日本で生育した栽培品と比較して平均で約3倍高く,日本において様々な土壌条件で生育させた2年生の苗よりも全体的にGC含有率が高く, 平均値は3倍以上であり、地盤内のカルシウム分はカンゾウ生育に重大な影響を及ぼすことが示唆された.
- 7)  $S_3$ -7(H)は他の地点を比較すると、地下水位が高く、それにより地下 250cm までの含水比も平均で 5~10 倍高く、シルト分と粘土分を含む層にカルシウム分が滞留し、地下水が比較的高く、養分としての塩類が滞留されている環境でカンゾウは健全に生育することが示唆された。

第四章では、地盤内の水分・栄養環境がカンゾウの成長に及ぼす影響を定量的に把握するため、また乾燥地においてカンゾウの生育および成長に影響を及ぼしている地盤環境要因を特定するために、様々な地盤環境において生育実験を行い、カンゾウの成長に影響を及ぼす地盤環境要因の特定とその関連性の定量化を行った。これらの結果から、カンゾウ生育実験を通して乾燥地のような栄養分が少ない地盤にカンゾウを定植させる技術の提案と、その技術の妥当性の確認及び良好な条件の検討を行った。得られた成果を要約すると以下の通りである。

1) 筒栽培における 3 種の土質を用いた生育実験では、1 年目は培養土のみで栽培した個体の成長が全体的に高かったが、2 年目の平均値は、生根重にバラつきはあるが硅砂と培養土の混合砂が高くなった。これは硅砂に培養土を混合したことにより保水性と、土壌の適度な養分含有量、さらには陽イオン交換容量が付与されたことが原因となったと考えられる。さらに、乾燥地の粒度に近い硅砂 7 号で育てた個体は成長度も良好とはいえなかった。これは、陽イオン交換容量が低く、かつ土壌そのものに含まれる栄養分が少なかったためであると考えられる。これより、カンゾウを幼苗から育てる場合適度な栄養と水分が必要で

あるということが示唆された.

- 3) 筒栽培を応用して乾燥地を模擬した地盤に健全に伸長するかの確認を行った生育実験では、筒直径が 5cm、筒高さが 10cm の場合では下地盤に 30cm 根が伸長し、さらに GC 含有率も根重も高い個体を生育させることができ、筒栽培による初期の成長促進の有益性が示唆された。また、少ない培養土で栽培した個体の方が生育が良好であったことから、作業効率を上げることができる可能性がある。さらに、筒直径に関しては直径 5cm で生育した個体のほうが根重の高い個体を生育させることができることがわかった。
- 4) 乾燥地を模擬した地盤に緑化土質材料を埋め込んで生育実験を行った結果,生育期間 7 か月では,水分量が多い方がカンゾウの成長度,特に根重が高くなり,成長初期には地表面に水分を確保しなければならないことが示唆された.

第五章では、第四章で述べた緑化土質材料を応用し、現地で調達した砂質土、動物性肥料としての家畜の糞、及び培養土を混合した材料用いた生育実験を実地盤において行い、その妥当性を簡易的に確認した結果を示した。さらにその結果を踏まえ、カンゾウ非自生地において植生実験サイトを設け、緑化材料の変えた様々な条件で植生実験を行い、特に緑化土質材料内の水分状態とカンゾウ生存率の関係を明らかにした。

- 1) 緑化土質材料の設置方法に関しては、元来伸長していた根の方向である、水平方向に設置した条件での生存率が高い傾向を示した.
- 2) 緑化土質材料の混合比に関しては、カンゾウ生育にとって境界の含水比 3%以上を保ち、かつナトリウム含有量の少ない条件での生存率が高い傾向を示した。すなわち、現地で調達できる材料である UB, LC を  $S_3$ -7(H)の砂質土に、乾燥重量比で 10%程度混合した条件での生育が良好であった。
- 3) 表層処理としてのマルチングの有無に関しては、生育期間 4 か月では、マルチングを施した条件において、施さない条件と比較して約 1.5 倍含水量を保持できることが示され、その結果生存率も非マルチングの条件と比較して約 3 倍となった.
- 4) 1)~3)より、 $S_3$ Sand と UB、LC を 10%の割合で混合した緑化土質材料を水平方向に、深さ 10cm 程度に設置し、マルチングを施した条件がカンゾウ生存に効果的な地盤内の環境・栄養環境を創り出す可能性があることが示された。

本論文では、乾燥地における地盤環境改善技術の開発を目的として、希少種である薬用 植物を乾燥地地盤に定植させることによって付加価値の高い砂漠化防止技術を提案するこ

とを目的とした実験を行い、モンゴル Bogd 村周辺における気象・地盤環境調査の結果を基に、日本国内で乾燥地を模擬した生育実験を行い、地盤内の水分環境・養分環境がカンゾウの生育に及ぼす影響を検討した。さらに、その結果を踏まえ、カンゾウ幼苗を生育させるための緑化土質材料を提案し、カンゾウ被自生地において、カンゾウを生存させるために有効な方法を提案した。

以上,本論文で得られた結論を要約したが,これらの結論を受けて今後の展望や課題を述べる.

- ・保水性・保肥性の低い乾燥地地盤に新たに直接カンゾウ幼苗を定植させ、健全に生育させることは困難であり、乾燥地地盤よりも保水性、保肥性の高い材料である緑化土質材料を用いた生育方法は有効であることが示された。さらにモンゴル・カンゾウ非自生地における生育実験において、緑化土質材料とマルチングを用いることによって根圏の含水比が保持され、生存率が高まったことから、水分確保と水分の管理は最も重要であることが示唆された。しかし本方法はできるだけ灌水の手間がかからない方法を目指しているため、定植直後の灌水とそれの確保が重要であり、今後の検討課題である。
- ・生育実験の範囲内では、地盤内に添加した炭酸カルシウム量、及び緑化土質材料内に含まれる炭酸カルシウム量が多い程生育が良好であることがわかった。しかし、最適な炭酸カルシウム量は明らかにすることができなかった。今後は緑化土質材料内の最適な炭酸カルシウム含有量を見出すために、緑化土質材料に対するカルシウム混合比をさらに高めた実験を行う必要がある。
- ・生育実験は日本(福岡)の気温・湿度条件,あるいは日照条件で行ったため,温度に対するカンゾウ成長への応答の検討がなされていない.第三章でも示したように,対象地は昼夜・夏冬の寒暖差が激しく,一般的な植物にとっては過酷な環境と推測できる.今後は気温・地中温度及び湿度が生育へ及ぼす影響も把握しなければならない.
- ・今後は緑化土質材料を用いた定植を現地の人々に普及させ、カンゾウの植生エリアを拡大するため、現地盤と緑化土質材料の水分、栄養分とカンゾウ生存率の関係を統計的に明らかにし、その土地それぞれに適した緑化土質材料を提案し、現地の人々も容易に、自主的に行え、最終的には大規模な範囲で適用できる技術の考案をしなければならない.
- ・非自生地における生育実験は、自生しているカンゾウ根の一部を採取して行ったものである。種子からの発芽は困難であったため、今後はカンゾウを種子から 1 か月程度生育させた幼苗を用いて乾燥地での生育実験を行い、緑化土質材料の適切な設置方法・混合比を明らかにしなければならない。
- ・今後はモンゴルにおいて生育実験サイトを多地点に増やし、様々な地盤環境において適切な緑化土質材料の配合比や初期含水比について検討し、その土地に適合したカンゾウ定植・生育方法について提案しなければならない。そのため、乾燥地域の人々の意見を取り入れながら実験サイトを選定し、協働で実験を行う必要がある。

# 謝辞

本論文は、九州大学大学院安福規之教授の御指導のもとに、著者が九州大学在籍中の研究成果の一部及び九州大学大学院修士課程・博士課程在籍中の研究成果をまとめたもので、本論文をまとめるにあたり、多くの方々に御指導、御協力を頂きました.

安福規之教授には、大変御多忙な身でありながら貴重な時間を割いて研究の進み具合を 気遣って頂きました。また、人として、研究者としての心構えやものの考え方について多 くのことを教えていただきました。ここに深く感謝致します。

九州大学大学院 三谷泰浩教授には、本論文を取りまとめるにあたり副査を引き受けていただき、貴重なご指導を頂きました.厚く御礼申し上げます.また、長崎大学大学院 大嶺聖教授(前九州大学大学院 准教授)には、本論文の副査及び、学部生から現在まで著者の研究のご指導を頂き、研究の進め方、考察から実験方法まで懇切丁寧な御指導をしていただき心より感謝しております.九州大学大学院 ハザリカ・ヘマンタ教授には、修士課程2年次より検討会、学会発表の際には的確な御意見・ご指導を頂きました.

福井大学大学院 小林泰三准教授(前九州大学大学院 助教),九州大学大学院 石藏良平助教,山梨大学大学院 荒木功平助教(前九州大学大学院 特任助教)には,著者が学部生・修士課程の頃から研究上の指導だけでなく公私にわたり様々な相談をさせていただきました.

中島通夫技官には、実験装置作製や、実験圃場の作業の際に多大なる御協力を頂きまことに感謝しております。著者が実験を円滑に進め、論文をまとめることができたのも中島さんのおかげです。本当にありがとうございました。伊東亜紀事務員には、我々が研究に専念できるような環境を作って頂きました。誠にありがとうございます。

また,本研究は薬学部や農学部との共同研究で成り立っております.薬学部の田中先生, 農学部の丸居先生に感謝致します.

さらに、本研究はモンゴルの研究者と共に取組み、その成果を記したものです。乾燥地 調査に協力いただいたモンゴル科学アカデミーの皆様には厚く御礼申し上げます。

加えて、玄海町役場及び玄海町薬用植物栽培研究所のスタッフの皆様にはハウス・圃場の灌水、維持管理において多大なるご助力を頂きました。本当にありがとうございました.

共に乾燥地・カンゾウに関する研究を行った清塘悠氏,新開敦氏,岩崎正隆氏,亀岡廉氏,灘波真裕子氏には本研究を進めるに当たり多大な協力を頂きました.

また,九州大学地盤工学研究室の卒業生,修了生並びに在校生の皆様には,本研究に多大なご助力を頂きました.ここに感謝の意を表します.

最後に、両親、姉妹、親戚をはじめとして数多くの方々の精神的、経済的な支えがあって9年間の研究室生活を無事に終えことができました。ここに深い感謝の意を表し、本論文の結びとさせて頂きます。ありがとうございました。

# 付録

- 1. カンゾウの発芽方法について
- 2. 交換性及び水溶性陽イオン測定に関する土壌処理方法について
- 3. 有効成分 GC 含有率測定方法について

4.