毛烏素砂地における *Agriophyllum squarrosum*(L.) Moq. (沙米)の地下水位による発現頻度の違いと光合成特性

大藪崇司¹⁾・戸田健太郎²⁾・水野由芽²⁾・中島敦司³⁾

- 1) 兵庫県立大学自然・環境科学研究所 / 兵庫県立淡路景観園芸学校 Institute of Natural and Environmental Sciences, Univ. of Hyogo Prefec./Awaji Landscape Planning and Horticulture Academy takashi_oyabu@awaji.ac.jp
- 2) 大阪府立大学生命環境科学研究科 Grad. School of Life and Environmental Science, Osaka Prefec. Univ.
- 3) 和歌山大学工学部システム工学科 Faculty of Systems Engineering, Wakayama Univ.

摘要: 中国内モンゴル自治区毛烏素砂地は、近年、牧民の過放牧などにより地表面の植生が荒らされ、砂が動かない固定砂丘から半固定砂丘、流動砂丘へと砂漠化が進行している。その半固定砂丘から流動砂丘にかけて植生分布が見られる *A. squarrosum* に着目し、地下水位からの比高と群落の発現頻度の関係を調べた。また、同一個体内で着葉位置が 15cm, 30cm, 45cm と異なる葉の光合成能力を測定した。その結果、地下水位からの比高で 107cm から 509cm の間で *A. squarrosum* は出現し、地下水位から 327cm 以上離れたコドラートでは *A. squarrosum* のみ成立した。また、個葉レベルでの最大光合成速度は、地上 15cm 葉が $6.20 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、30cm 葉が $5.59 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、45cm 葉が $2.18 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と上部葉ほど減少した。

キーワード: 最大光合成速度、地下水位、半乾燥地、比高、毛烏素砂地、*A. squarrosum* 群落の発現頻度

OYABU, Takashi, TODA, Kentaro, MIZUNO, Yume and NAKASHIMA, Atsushi: **The appearance frequency by ground-water level and characteristic of photosynthesis rate of *Agriophyllum squarrosum*(L.) Moq.(Shami) at Mu Us Desert in Inner Mongolia.**

Abstract: Recently, desertification progresses at Mu Us Desert in Inner Mongolia, vegetation is damaged by the over-use of nomads. This changed fixed dunes to semi-fixed and flux dunes. We investigated the distribution of *A. squarrosum* in the semi-fixed and flux dunes. The relative elevations from the ground-water level to *A. squarrosum* colony were researched. Moreover, the photosynthetic abilities of leaves growing at three layers (height 15cm, 30cm and 45cm) were measured.

As a result, *A. squarrosum* appeared between 107cm and 509cm in the relative elevation from the ground-water level. In addition, *A. squarrosum* was only present in a quadrat away from 327cm or more in the relative elevation from the ground-water level. Pmax in each individual leaf measured at the height of 15cm from the ground was $6.20 \mu\text{molm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, at 30cm was $5.59 \mu\text{molm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and at 45cm was $2.18 \mu\text{molm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The Pmax at the upper leaf(45cm) is less than that of the lower leaf(15cm, 30cm).

Key words: Maximum photosynthetic rate(Pmax), groundwater level, semi-arid land, Relative elevation, Mu Us Desert, Appearance frequency of *A. squarrosum* colony,

1. 研究の目的

中国内モンゴル自治区毛烏素砂地では、牧民の過放牧などにより植生が衰退し^{4,12)}、砂が動かない固定砂丘から半固定砂丘そして流動砂丘へと砂漠化が進行している¹¹⁾。半固定砂丘や流動砂丘の地表面は、乾いた砂が堆積し風によって飛ばされやすい状態となっている。砂の移動は、冬期のシベリア高気圧から起こる北西風によって砂丘全体が同じ形状のまま年間数メートルも移動し、新たな土地を侵食しながら拡大している¹⁰⁾。砂丘地における水分変動についてみると、降雨の際には急速に砂中に浸透し地下水までの毛管連絡が形成

されるが、その後、乾燥してくると表層から乾砂層が形成され流動砂が起りやすい状態となる。砂丘地は地下水位が低い¹⁾ため、植物群落の安定的な定着は認められないが、降雨時に発芽して、その後、地下水や結露に依存して生育するアカザ科 *A. squarrosum* の群落が成立する。*A. squarrosum* は C4 植物で、流動砂丘頂上部から中腹部の砂が比較的良好な生育場所に侵入してくる先駆種である。中国雑草原色図鑑¹³⁾によると、1年生草本、葉は互生、両性花、穂状花序、春4~6月の降雨後に発芽し、9月頃まで生育した後、結実して、根系と地上部が分離し、球状になった地上部が風によって転がり、遠くまで種子が散布される風散植物とされる。これ

までの *A. squarrosus* に関する既往研究として、小橋ら³⁾により砂丘地に成立する *A. squarrosus* の生育過程が報告されており、5月から9月までのフェノロジーについて詳細に調べられている。また、根系調査を行い主軸長10数cmにて直根30cm、主軸長40～50cmになると直根100cmに達すると報告している。戸部⁹⁾は、*A. squarrosus* の種子発芽特性として種子が砂に埋もれ暗条件下で砂中の水分条件が良好なときに発芽すること、塩化ナトリウム水溶液接触後も高い発芽能を維持する特性をもつことを報告している。また、Mo et al.⁷⁾によると、*A. squarrosus* は葉水分ポテンシャルが-0.6MPa以下に低下すると光合成量が減少するのに対し、*Bassia dasyphylla* Kuntze は葉水分ポテンシャルが-1.2MPaから-4.8MPaにかけて低下するにつれ光合成量が漸減すると報告している。さらに砂丘下層の土壌含水率は、半固定砂丘の方が流動砂丘より低いことを明らかにし、*A. squarrosus* が半固定砂丘で生存できない要因と推測している。しかし *A. squarrosus* と地下水位の関係について、どのような比高の砂丘地に成立するのか調べられていない。そこで本研究では、不安定な砂丘を固定化することで流砂を防ぎ、農地や放牧地として利用されている丘間低地(灘地)を保全するうえで重要な *A. squarrosus* の成立要因を地下水位からの比高により明らかにした。さらに、*A. squarrosus* は、根系を伸長させる際、直根を深く伸長させ土壌水分の多い層まで到達したところで側根を発達させ吸水しているという報告⁶⁾がある。そこで、今回出現した *A. squarrosus* の中から生育の良い個体の基礎的な生理生態である光合成特性を現地で測定することとした。その際、地下水位からの比高が大きところで成立している *A. squarrosus* の同一個体内での水ストレスに対する反応を見るため着葉部位別に個葉レベルでの光合成能を明らかにした。

2. 研究方法

本研究の対象地は、オルドス高原の南部に位置する毛烏素沙地開発整治研究中心(38° 58' N, 109° 07' E, 標高1,315m)から半径約2km内外とした(図-1)。調査期間は、2006年8月7日から同月14日までとした。対象地の気象条件については、神近ら¹⁾が詳細に報告している。また、地下水については、前中⁵⁾が丘間低地における地下水位として1.5m程度であると報告している。今回は調査期間中の環境計測にとり、温湿度計(RS-11, ESPEC)を砂丘上部と下部に、土壌水分・土中温度・電気伝導度(EC)を同時に計測できるDIK-360A(大起理化工業)を砂丘上部の深度50cmに埋設した。

対象地の選定については、対象地を広域的に踏査し、流動砂丘地や半固定砂丘地に成立する *A. squarrosus* 群落5箇所を試験区として設定した。各試験地には、5m×5mのコドラートを3～7箇所設置し、出現樹種名、被度を調査した。

また、丘間低地から砂丘上部にかけて連続的に植生が認められた1調査区では、2m×2mのコドラートを27箇所連続設置し、出現樹種名、被度を調査した。

各コドラートにおける環境要因として、地下水位からの比高、土壌硬度(コドラート内四隅と中央部でN₅値とN₁₀値を測定し5箇所平均値とした。土壌硬度の測定は、太さ14mm、長さ50cm、先端角60度の鉄棒に1.2kg落錘を10cm自由落下させて計測した。)、斜面傾斜角、傾斜方位を求めた。地下水位は、最も低地にあるコドラートにおいてハンドオーガ(1m)により地表を掘削し、地表面から地下水位までの距離として調査した。ハンドオーガが地下水位まで到達しないほど地下水位が低いときは直接掘削し地下水位を確認した。比高は、地下水位を計測した地点から水準儀によってコドラートの四隅を水準測量しその平均値をコドラートの値とした。

地下水位からの比高392cmを示したコドラートから高さ52.3cm、葉張64.6cmの *A. squarrosus* を掘り取り、室内にて携帯用光合成蒸散測定装置(LI-6400+LED冷光源チャンパー, LI-COR社)を使用して光合成蒸散速度を計測した。測定葉は、地上から15cm、30cm、45cmと3階層から選択した。測定時のチャンパー内温度は外気温と同じ30℃、リファレンスCO₂濃度は400ppmに設定した。光合成有効光量子束密度(光強度)は、1500、1000、600、300、100、50、20、0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ と減衰させ、Light-Curve測定で最小待ち時間120秒、最大待ち時間180秒で測定した。測定に入る前に光合成を安定させるため葉をチャンパーにはさみ、1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の光強度を十分に照射した後、測定を開始した。得られた光-光合成曲線は、非直角双曲線式⁸⁾
$$P = (\phi I + P_{\max} - \{(\phi I + P_{\max})^2 - 4 \phi I \theta P_{\max}\}^{0.5}) / q - R$$
にて回帰し、P_{max}の比較を行った(初期勾配: ϕ , 最大光合成速度:P_{max}, 曲線の凸度: θ , 呼吸速度:Rとした)。

図-1 調査区域(黒点は踏査地を示した)

Fig. 1 Study area (The black dots indicate the research points).

3. 結果および考察

3.1 調査期間中の気象条件

調査期間中の温湿度の変化について図-2に示した。最高気温は8月7日14時に39.7度を、最低気温は8月14日6時に14.4度を砂丘下部の温湿度計で観測した。日較差の大きな日には、19.5度を記録した。また、相対湿度(RH)は、晴天日であった8月7日に23%と低い値を示したが、11日の降雨後は、天候が回復せず50%以上を保っていた。

土壌水分・土中温度・電気伝導度については図-3に示した。土壌水分は、9%~10%で推移していたが、11日の降雨時は一時的に16.3%と高い値を示した。しかし、1時間後には10%まで低下し、浸透能の高さが認められた。また、表層の土壌水分変動はさらに激しいものと思われた。土中温度は、気温ほど変動しなかったものの日較差として2℃ほどの変動が認められ、降雨後は漸減傾向を示した。

3.2 広域的な踏査による調査プロットでの結果

広域的な踏査により設定した5試験区におけるプロットの立地環境、総種数および *A. squarrosum* の分布状況を表-1に示した。調査区4プロット2および調査区5プロット2, 3については、斜面方位と地下水位データの欠損があったが、*A. squarrosum* の植生がなかったためそのままデータを掲載した。*A. squarrosum* が成立していたプロットにおける土壌硬度は、地表から5cmまでの N_5 値として4.2が最大で、最小値は1.8であった。また、 N_{10} 値については16.6が最大で最小値は5.4であった。*A. squarrosum* の成立要因として、砂層の浅いところが軟らかく風による攪乱を比較的良好に受けるような条件下で群落を形成していることが明らかとなった。斜面傾斜角は最大16°を示し、急斜面でも *A. squarrosum* は成立した。傾斜方位については違いが認められなかった。

A. squarrosum が成立していた中で地下水位からの比高が最小であったのは、調査区3プロット4での107cmであっ

た。*A. squarrosum* が成立していたプロットでは、地下水位からの比高が大きくなるにつれて被度は上昇し、比高509cmの調査区2プロット4では7%となった。また、地下水位からの比高が307cm, 509cmでは、植被率の47%, 33%を *A. squarrosum* が占め、優占種となる傾向が認められた。

3.2 連続コドラート試験区での結果

丘間低地から砂丘上部にかけて連続的な植生変化を示した砂丘地における *A. squarrosum* の分布状況について表-2に示した。連続コドラート試験区の斜面傾斜角は平均4.3度、傾斜方位はN25Eであった。土壌硬度については計測できなかったが、流動砂丘上での群落であったため、 N_5 値、 N_{10} 値とも広域的な調査での最大土壌硬度である4.2, 16.6を上回ることはないと思われた。

A. squarrosum は、プロット13からプロット27までの間で認められ、地下水位からの比高としては127cmから392cmの間であった。プロット13から比高が大きくなるに伴い出現種数の減少が認められ、プロット23(地下水位からの比高327cm)以上では、*A. squarrosum* のみが成立していた。*A. squarrosum* が最も優占していたのは、プロット17で植被率の80%を占めていた。

3.3 *A. squarrosum* の光合成特性について

A. squarrosum の着葉位置別の光-光合成曲線について、図-4に示した。地上15cm高の個葉における P_{max} と R は、 $P_{max}=6.20 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $R=4.55 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 地上30cm高では $P_{max}=5.59 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $R=3.22 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 地上45cm高では、 $P_{max}=2.18 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $R=4.55 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。今回の結果から *A. squarrosum* の P_{max} は、着葉位置が高いほど低下する傾向が認められた。これは *A. squarrosum* の発芽後の成長形態として、主軸が伸びたあと根元から十字に4本の側枝を発生させ展葉を行う³⁾ことから、最も成熟した葉が低い位置にあり着葉位置が高くなるにつ

図-2 調査地における温湿度変化

Fig. 2 Changes in temperature and humidity on research points.

図-3 調査地における土壌水分、土中温度、ECの変化

Fig. 3 Changes in soil moisture, underground temperature and electric conductivity on research points.

表-1 5試験区におけるコドラートの立地環境、総種数および *A. squarrosus* の分布状況Table1 Quadrat environment, number of total species and distribution of *A. squarrosus* on five research plots.

調査区No	調査区1				調査区2				調査区3							調査区4					調査区5		
プロットNo	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	1	2	3
面積 (m ²)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
植被率 (%)	60	45	30	35	45	60	40	15	15	15	25	45	40	30	35	45	60	20	45	25	75	40	35
地下水位からの比高 (cm)	118	125	131	114	148	154	314	509	307	239	124	107	171	162	264	135	117	161	164	194	106	-	-
土壌硬度 (N5)	2.6	2	1.8	3	5.4	14.8	2	1.8	2.4	2.6	3	4.2	2.6	2	2.2	2	4	2	2.8	2.4	11.8	1.2	2
土壌硬度 (N10)	10.2	6.8	7.2	12.2	16.4	37.6	7.6	5.4	9.4	7.8	11.2	16.6	9.2	9.4	8.8	8.8	13.2	7.6	8.8	8.8	28	5.6	7.8
斜面傾斜角 (度)	4	3.5	11	3.3	1	0.5	8.5	16	9	7.5	4	1.5	2	1.5	4.5	6.5	0.5	5.5	3.5	2	3	8.5	6.5
傾斜方位	S75E	N40E	N45E	S42E	N50W	S38W	S65W	S58W	N40W	S43W	S55W	N63W	S24W	N50E	S60E	S65W	-	S29W	N35W	S18E	N35W	N80W	S29W
<i>A. squarrosus</i> 被度 (%)	+	1	1	-	-	-	-	7	5	1	-	+	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
出現種数	12	8	8	13	13	16	6	4	7	7	14	16	12	7	8	11	23	13	15	14	19	7	6

表-2 連続コドラート試験区におけるコドラートの立地環境、総種数および *A. squarrosus* の分布状況Table2 Quadrat environment, number of total species and distribution of *A. squarrosus* on the continuous quadrat research plot.

プロットNo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
面積 (㎡)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
植被率 (%)	85	80	70	70	65	35	60	60	60	60	30	50	50	35	5	30	10	5	15	20	7	7	1	0.5	0.5	0	0.5
地下水位からの比高 (cm)	99	99	99	100	99	100	101	102	104	108	108	109	127	157	185	206	219	229	246	268	289	308	327	347	366	382	392
<i>A. squarrosus</i> 被度 (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	1	1	+	8	1	-	3	3	+	1	+	+	-	+
出現種数	12	12	12	15	15	14	16	15	14	16	12	10	5	3	2	2	2	3	2	2	2	3	1	1	1	0	1

図-4 *A. squarrosus* の着葉部位別の光合成特性

Fig. 4 Characteristics of photosynthesis in leaves growing at three different layers.

れ幼葉となり光合成が充分に行われていなかった可能性が推測された。また, Kitao et al^[2] は, 乾燥ストレス下で形成された葉について, クロロフィル蛍光反応測定法により水分ストレスを受け気孔コンダクタンスが低下し葉内 CO₂ 濃度が低下した際, 光化学系での過剰な電子の集積を避けるため光呼吸やメーラー反応として電子の消費を増やすと示唆している。測定日より前の環境として, 暫く降雨がなかったことが水分ストレスとなっていたことも要因と思われた。また, 気孔コンダクタンスの変化からも 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光飽和時に 15cm 葉では $0.059 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ だったものが 45cm 葉では $0.051 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と上部葉の方が小さくなっていた。しかし, 15cm 葉では光強度が低下するにつれて $0.100 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで漸増していることから光合成が行われ

ていたのに対し, 30cm 葉, 45cm 葉では漸減傾向を示していた。

4. まとめ

広域的な踏査によるコドラート調査より *A. squarrosus* の分布については, 夏季の地下水位からの比高として 107cm 以上の場所で群落を形成し, 地下水位からの比高が大きくなるにつれて優占的に群落を形成させる傾向が認められた。また, 連続コドラート調査では, 地下水位からの比高として 127cm 以上において *A. squarrosus* 群落が成立し, 327cm 以上では *A. squarrosus* のみとなった。地下水位からの比高が大きくなると植物への水分供給が難しくなるため *A. squarrosus* 以外の植物は適応が難しくなることが示唆された。また, 光合成能は着葉部位によって異なり, 上部着葉ほど水分ストレスの影響が顕著に表れた。これは気孔コンダクタンスの変化でも認められた。今後, 比高の異なる場所で採取した *A. squarrosus* の個体間での光合成特性や生育段階の違いによる光合成能の変化について把握することで, 分布可能域の判断につながるのではないと思われる。

今回の調査にあたり現地での便宜を図っていただきました内蒙古農業大学の王林和教授および張国盛副教授に心から厚く御礼申し上げます。また, 岡山大学農学部吉川賢教授, 三木直子准教授, 石井義朗氏には, 調査調査に際し多大なる御協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 神近牧男・山本太平・松田昭美 (1988) 中国毛烏素砂漠の気象特性について (1), 鳥取大学砂丘研究所報告 27:

- 15-20.
- 2) Kitao M・T T. Lei・Koike T・Tobita H・Maruyama Y (2003) Higher electron transport rate observed at low intercellular CO₂ concentration in long-term drought-acclimated leaves of Japanese mountain birch (*Betula ermanii*), *Physiologia Plantarum* 118(3): 406-413.
- 3) 小橋澄治・吉川賢・増田拓郎 (1988) 毛烏素沙地の砂丘上に生育する沙米の生長過程, 緑化研究第 10 号 167-199.
- 4) 小林達明 (1990) 中国ムウス砂地の成因と土地分類, 日本緑化工学会誌 15 巻第 4 号 43-57.
- 5) 前中久行・大窪久美子 (1993) 中国内蒙古毛烏素沙地の植生と沙漠緑化, 名城大学農学部学術報告 29 号 53-63.
- 6) Masayuki Nemoto・Xiaoyun Lu (1992) Ecological characteristics of *Agriophyllum squarrosum*, a pioneer annual on sand dunes in eastern Inner Mongolia, China. *Ecological Research*(7):183-186.
- 7) Mo W., Natori T., Jiang S., Nishimura N. and Omasa K. (1997) Response of photosynthesis and water use to drought in two desert annuals, *Agriophyllum squarrosum* and *Bassia dasyphylla*, *Journal of Arid Land Studies*(7) 185-195.
- 8) S. von Caemmerer (2000) *Biochemical Models of Leaf Photosynthesis*, CSIRO Publishing, pp165.
- 9) 戸部和夫 (2004) 中国の砂漠地域に分布する植物種の初期生長過程におよぼす環境要因の影響, 東京大学博士論文乙第 15921 号, pp232.
- 10) 徳岡正三 (2003) 砂漠化と戦う植物たちーがんばる低木ー, 研成社, 東京, pp241.
- 11) 吉川賢 (1998) 砂漠化防止への挑戦, 中公新書, 東京, pp215.
- 12) 吉川賢・山中典和・大手信人 (2004) 乾燥地の自然と緑化, 共立出版, 東京, pp246.
- 13) 財団法人日本植物調節剤研究協会・中華人民共和国農業部農薬検定所 (2000) 中国雑草原色図鑑, 全国農村教育協会, 東京, pp424.

(2007.7.2 受理)