

平成22年 6月 8日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19780013  
 研究課題名 (和文) 乾燥地農業における水利用効率向上を目指した切葉栽培技術の理論モデル構築とその実証  
 研究課題名 (英文) Theoretical model development and demonstration of cultivation technology by defoliation to improve water use efficiency in dryland agriculture  
 研究代表者  
 辻 渉 (TSUJI WATARU)  
 鳥取大学・乾燥地研究センター・助教  
 研究者番号：60423258

研究成果の概要 (和文)：乾燥地における水・食料不足に対応するため、作物の下位葉を切除することで水利用効率を高め、水資源を保全しつつ子実収量を増加させる手法を考案した。その効果を実証し、理論を解明するために国内外において試験を行ったところ、土壌乾燥ストレス条件下で穂ばらみ期のソルガムに切葉を行うと子実収量が増加する傾向が認められた。これには不稔を軽減すること、気孔を開けて光合成速度を高く保つこと、同化産物の穂への分配を増加することが関与すると推察された。

研究成果の概要 (英文)：To tackle water and food deficit in drylands, I devised agricultural practice to enhance water use efficiency with conserving water resources and increasing grain yield of crops by defoliation. Pot and field experiments were conducted in Japan and overseas to demonstrate the effects of defoliation and elucidate its theory. I found that defoliation in booting stage under drought stress can increase grain yield of sorghum. This increment may attribute to mitigation of sterility, maintenance of photosynthetic rate through high stomatal conductance, and allocation increase of assimilates to spike.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	0	1,300,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	710,000	200,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,310,000	590,000	3,900,000

研究分野：作物生態生理学

科研費の分科・細目：農学・作物学・雑草学

キーワード：乾燥地農業，水資源，乾燥ストレス，食用作物，切葉，子実収量，水利用効率，国際貢献

## 1. 研究開始当初の背景

石油を巡って争われた 20 世紀に対し、21 世紀は「水の世紀」と呼ばれ、これまでの予測によれば、2025 年までに水資源の需要が供給を大きく上回る水危機を迎えることが確実視されている。特に、乾燥・半乾燥地域では、水資源の 70%以上を農業に費やしているため、水問題とは農業問題と言っても過言ではない。貴重な水資源を効率的に活用する方策を早急に確立しなければ、人間の生活環境や生態系が危機的な状況に陥るばかりでなく、現在も進行中である人口爆発による食料不足にも対応できないことは確実である。これまで乾燥地農業において切り札として位置づけられてきた灌漑は、過度に依存すれば地下水や河川などの淡水資源を枯渇させ、また不適切な管理を行えば土壌の塩類化を引き起こして、砂漠化を招くというリスクを内包している。また、灌漑設備の設置には多額の投資を必要とするため、乾燥地を擁する多くの発展途上国ではその建設が困難である。これらの問題は、穀物生産のような大規模で粗放的な栽培体系において特に顕著である。したがって、近い将来の「水危機・食料危機」に対応し、乾燥地の水資源を保全しつつ作物生産量を増大させるためには、作物自体の水利用効率を向上させる方策を確立しておく必要がある。これには、育種・分子遺伝学的手法と栽培学的手法が考えられるが、前者については、これまで有効な品種の作出に成功した例は少なく、またその研究の多くは未だ基礎的な段階にあるため、上記の問題に対処できるかは未知数である。以上の問題点を踏まえ、研究代表者は、乾燥地農業における水利用効率を向上させる節水栽培技術に関する研究プロジェクトを推進してきた。そのな

かで、研究代表者は作物自身の水消費量を抑えることによる水資源保全と、水欠乏下での作物生産増大を両立させる画期的な栽培学的手法を考案した。具体的には、「数枚の上位葉を残して下位葉を全て切除する」だけの単純な手法である。これまでの植物生産学の常識では、光合成器官である葉を切ると生産性が低下すると考えられてきたが、水ストレスが生じやすい乾燥地ではこの常識は通用しないと考えられる。既往の報告によると、水欠乏下では、葉面積に対する根長比 ( $RL/LA$ ) が大きくなるにしたがって、地上部の水分状態や気孔開度が高くなると考えられており (Sperry et al., 2002)、研究代表者もソルガムを用いて実験的にこの理論を実証した。この  $RL/LA$  を増加させるため、これまで育種学的に根量の多い品種を開発する試みがなされてきたが、根系への乾物分配量が増加するために必ずしも収量増加に結びついていないのが現状である。そこで、研究代表者は上記の理論に従って発想を転換させ、蒸散効率が低い、すなわち光合成活性が低いが無駄に蒸散する下位葉を切除して (以下、切葉とする)、相対的に  $RL/LA$  を高める手法を着想した。この切葉によって、個体あたりの水損失量を削減させ、土壌中に残存した水を長期に渡って上位葉に集中させることで光合成能力を高め、少ない葉でむしろ高いバイオマス・子実生産を達成するというアイデアである。このアイデアは、Passioura (1972) が乾燥地における作物生産では、土壌中の水分を枯渇させないことが高い子実収量を得るために重要であると指摘していることと一致しており、切葉が土壌乾燥条件下における作物収量を高めるという上記の仮説を支持する論拠のひとつになっている。

## 2. 研究の目的

本研究開始前に、国内外のフィールドにおいて予備的な実証試験を行ったところ、土壤乾燥下で切葉を行うと上位葉の光合成速度が改善する傾向が認められ、この手法の有用性が確認された。同時に、異なる水環境や栽培体系に応じた切葉手法の指針を確立するためには、切葉によって生じる SPAC 中の水分動態の変化や切葉強度と生産性との関係を理解する必要があるという研究課題を抽出した。

葉は水消費器官であると同時に、光合成を行う生産器官であるため、切葉による蒸散の抑制と同化産物量の減少はトレードオフの関係にあるといえる。したがって、過剰な切葉は、水消費を顕著に抑えるものの、収量を低下させる可能性がある。また、切葉は水ストレスが生じていない時に行うと収量減に繋がり、切葉する生育段階によっても収量ポテンシャルを減じる危険性を孕んでいる。したがって、水ストレスの強度に応じた切葉の時期や強度を検討し、到達収量の最適化を図る必要があろう。その際には、切葉から収量増加に至るプロセスを理論化し、そのモデルを構築することが最も有効な手法だと考えられる。そこで本研究では、以下の 2 項目を目的に「切葉」を適切に行うために必要な理論とモデルの確立、および乾燥地での実用化を目指した技術の実証を行う。

- 1) 理論とモデルの構築：切葉処理した個体の水消費とバイオマス生産の動態を精査し、乾物および子実収量増加に至るプロセスを明らかにする理論とそのモデルを構築する。
- 2) 現地での技術実証：様々な土壤水分条件下で切葉の時期や強度が収量におよぼす影響を実際の乾燥地において検証し、切葉技術のモデルケースを確立する。

## 3. 研究の方法

### (1) 国内圃場試験

グレインソルガム (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) の乾燥感受性品種 Tabat (スーダン原産) を供試材料に、鳥取大学乾燥地研究センターのビニルハウス内の砂質土壤で直播栽培実験を行った。栄養成長後期に、毎日灌水を継続する湿潤区と完全に停止する乾燥区を設けた。穂ばらみ期に 4 水準の切葉強度処理区、すなわち対照 (無切葉) 区、30%切葉区、60%切葉区、90%切葉区を設けた。処理期間中に、止葉の光合成速度および気孔コンダクタンス、1.0 m までの土壤体積含水率を測定した。収穫時に、地上部の部位別乾物重、子実収量、その構成要素 (粒数・100 粒重) および収穫指数 (穂重/地上部乾物重) を調査した。

### (2) 国内ポット試験

国内圃場試験と同じく Tabat を供試材料に、鳥取大学乾燥地研究センターのガラス室内でポット栽培実験を行った。砂質土壤を充填した 1/2000 a ワグネルポットに播種し、適宜灌水を行って栽培した。栄養成長中期に、圃場試験と同様の切葉強度処理を行い、同時にポット内の土壤体積含水率を 12% (湿潤区)、9% (弱乾燥ストレス区)、6% (強乾燥ストレス区) に維持する 3 水準の土壤水分処理を開始した。穂ばらみ期においても、栄養成長中期と同様の切葉強度処理区・土壤水分処理区を設けた。処理期間中に、最上位展開葉もしくは止葉の光合成速度、気孔コンダクタンスおよび水ポテンシャルを測定した。さらに、気孔コンダクタンスおよび土壤体積含水率の日変化を測定した。収穫時に、総乾物重、収量およびその構成要素を調査するとともに、処理期間中の水利用効率 (総乾物増加量/総灌水量) を算出した。

### (3) インドの乾燥地における圃場試験

インド Hyderabad 近郊の Patancheru に本部を置く ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 国際半乾燥熱帯作物研究所) において, グレインソルガムの乾燥感受性系統 R16 を対象に圃場実験を行った。乾季 (Rabi) 期間中に適宜灌漑しながら栽培を行い, 穂ばらみ期に土壤水分処理 (灌水を継続する湿潤区と完全に停止する乾燥区) を開始した。栄養成長後期もしくは開花期に達した時に, 対照 (無切葉) 区, 30% 切葉区, 60% 切葉区, 80% 切葉区を設けた。登熟期に止葉の気孔コンダクタンス, 蒸散速度, 光合成速度および水ポテンシャルを測定した。また茎熱収支 (ヒートバランス) 法を用いて個体あたりの蒸散速度 (= 吸水速度) の日変化, および土壤水分量の経時的变化をモニタリングし, 最後に子実収量を測定した。

### (4) 中国の乾燥地における圃場&ポット試験

中国河北省石家庄市近郊の Luancheng 県にある中国科学院 奕城農業生態試験站 (Luancheng Agro-Eco Experimental station, Chinese Academy of Sciences) において, 冬コムギを材料に圃場およびポット実験を行った。乾季が始まる 10 月に播種し, 異なる土壤水分条件 (湿潤区および乾燥区) においた個体が出穂期もしくは開花期に達した時に, 対照区 (無切葉), 弱切葉区 (上位 3 葉を残す), 中切葉区 (上位 2 葉を残す) および強切葉区 (上位 1 葉を残す) の 4 つの切葉強度処理区を設けた。登熟期に止葉の光合成速度を測定するとともに, 土壤水分の減少から蒸発散量を推定した。収穫期に表層土壤における根長密度, 地上部の部位別乾物重, 子実収量とその構成要素を測定した。以上のデータから子実への乾物再転流, 水利用効率を算出した。

## 4. 研究成果

### (1) 国内圃場試験

子実収量について, 湿潤区では切葉強度処理区間に差異が認められなかったのに対し, 乾燥区ではいずれの切葉強度でも無切葉に比べて増加した。その構成要素を検討したところ, 乾燥区における収量の増加は 100 粒重ではなく, 粒数の増加に起因していた。この結果は, 切葉が土壤乾燥ストレスによる不稔を軽減したことを示唆している。一方, 地上部乾物重について, 湿潤区では切葉強度が増すにつれて減少したのに対し, 乾燥区では処理間に差異は認められなかった。また, 収穫指数については湿潤区・乾燥区ともに切葉強度が増すにつれて大きくなった。これらの結果を考え合わせると, 湿潤条件下では切葉によって乾物重が減少するが, 収穫指数 (穂への同化産物の分配率) が高くなるため子実収量に変化しない, また乾燥ストレス条件下では切葉による小さい葉面積で乾物生産量が増加するとともに, 収穫指数が高くなるため子実生産が増加したといえる。光合成速度および気孔コンダクタンスについて, 湿潤区では切葉強度処理区間に差異が認められなかったのに対し, 乾燥区ではいずれの切葉区でも増加し, その傾向は 90% 切葉区で顕著であった。しかし, 切葉処理期間中の土壤水分の低下程度については処理区間の差異は認められなかった。以上の結果より, 土壤乾燥ストレス条件下における切葉は子実収量を増加させる効果があり, これは止葉の気孔開度・光合成の増加を通じた乾物生産量とその穂への分配率の増大および不稔の軽減によるシンク容量の維持に起因すると考えられた。また土壤水分量の推移から, 切葉は個体あたりの吸水量に影響しないと推察された。

## (2) 国内ポット試験

子実収量について、栄養成長中期切葉では、湿潤区および弱乾燥ストレス区において切葉強度処理区間の顕著な差異は認められず、強乾燥ストレス区ではいずれの切葉処理区でも出穂しなかった(90%区の1個体を除く)。穂ばらみ期切葉では、湿潤区では顕著な差異は認められなかったが、弱および強ストレス区では圃場実験と同様に切葉による収量増加がみられた。また、収量構成要素、地上部乾物重、収穫指数についても圃場実験と同様の傾向を示した。処理期間中の総灌水量はいずれの土壤水分処理区においても切葉処理間に差異は認められなかったが、水利用効率は切葉強度が増すにつれて向上し、強ストレス区ではその傾向が顕著であった。栄養成長中期および穂ばらみ期切葉ともに、湿潤区における光合成速度および気孔コンダクタンスは切葉処理区間に顕著な差は認められなかったが、弱ストレス区では切葉強度が増すにつれて高くなり、強ストレス区では90%区でのみ高い値を示した。しかしながら、水ポテンシャルについては切葉処理間の差異は認められなかった。気孔コンダクタンスと土壤水分量の日変化を検討したところ、切葉処理による体積含水率の変化は認められなかったが、気孔コンダクタンスは湿潤区では切葉処理間の差異がなかったのに対し、弱および強ストレス区では切葉強度が増すにつれて高くなる傾向が認められ、特に昼において顕著であった。

## (3) インドの乾燥地における圃場試験

土壤乾燥ストレス条件下で栽培したソルガムに対して切葉を行うと、その時期に関わらず日中を通して止葉の気孔コンダクタンスが高まるのが乾燥地の現場圃場でも確認された。また、気孔コンダクタンスは切葉

強度が増すにつれて増加し、それに伴って光合成速度および蒸散速度も増加した。しかしながら、気孔コンダクタンスの増加は、葉身の水状態の改善に起因していなかった。一方、茎熱収支法による個体あたりの蒸散速度(=吸水速度)の測定の結果、切葉個体は無切葉個体よりも蒸散速度が低いことが明らかとなった。また、土壤水分量の変化を経時的に精査したところ、切葉処理区では土壤深層における水分減少量が小さい、すなわち水分消費量が少ないことが分かった。これらの結果は、切葉処理によって植物の水利用効率が高まることを示唆しているが、子実収量は切葉処理によって増加しなかった。これらの結果より、切葉処理は作物の個体あたりの水消費量を減少させつつ、上位葉の光合成速度を高めることが明らかとなった。

## (4) 中国の乾燥地における圃場&ポット試験

冬コムギでは、いずれの切葉強度およびその時期においても、対照区(無切葉区)に比べて子実収量が有意に減少した。その低下程度は、湿潤土壤条件では20%以上であったのに対し、乾燥土壤条件では12%であった。また、開花期よりも出穂期の切葉のほうが子実収量の低下程度が大きく、その主要因は粒重の低下であった。中切葉区では子実収量は変化しなかったが、弱切葉区ではやや減少した。根長密度は、湿潤土壤条件で開花期に強切葉した区で有意に低下したが、乾燥土壤条件では増加した。弱切葉および中切葉区における子実への乾物再転流は増加し、その結果、収穫指数が高くなった。切葉しなかった上位葉の光合成速度は全ての土壤水分条件で増加した。切葉により蒸発散量が減少したが、それよりも子実収量の減少のほうが大きかったため、水利用効率が低下した。これらの結果より、切葉は冬コムギの水利用効率の向上

には寄与しないが、非常に乾燥した条件では蒸発散量の低下を通じて生存率の向上に貢献する可能性が示唆された。

国内での研究の結果、土壤乾燥ストレス条件下において穂ばらみ期に切葉を行うと子実収量が増加し、その程度は土壤水分量・切葉強度の影響を受けることが明らかとなった。これには不稔を軽減すること、気孔開度を高めて光合成速度を高く保ち、生産した同化産物を穂へ多く分配することが関与すると推察された。これにより、切葉処理による子実収量増加に至る理論的なプロセスの一端を明らかにすることが出来た。この成果を実際の乾燥地の現場の圃場で検証したところ、生理的な応答はほぼ同様であったが子実収量の増加は観察されなかった。これには土壤乾燥ストレスの程度が関与していると考えられるため、今後は個体あたりの光合成速度が最大になり、最終的な子実収量の増加に結びつくような、土壤水分量に応じた最適な切葉時期および強度を明らかにする必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Shao, L., Zhang, X., Hideki, A., Tsuji, W. and Chen, S., Effects of defoliation on grain yield and water use of winter wheat. *Journal of Agricultural Sciences*, 148: 191-204, 2010, 査読有
- ② Tsuji, W., Takeda, I. and Araki, H., Effects of defoliation on photosynthesis and grain yield in sorghum under drought stress. *Proceedings of 9th International Conference on Development of Drylands, Sustainable*

*Development in Drylands -Meeting the Challenge of Global Climate Change-*, p.38. 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 辻 渉・武田一平・荒木英樹, 土壤乾燥ストレス条件下における下位葉切除がソルガムの光合成および子実収量に及ぼす影響. 日本作物学会第225回講演会, 2008年3月27-28日, 農林水産省農林水産技術会議事務局筑波事務所.
- ② Tsuji, W., Araki, H., Sekiya, N., Kashiwagi, J., Krishnamurthy L. and Muranaka, S., Behavior of stomatal conductance and water use of a defoliated sorghum plant under water deficit condition. 日本作物学会第225回講演会, 2008年3月27-28日, 農林水産省農林水産技術会議事務局筑波事務所.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 渉 (TSUJI WATARU)

鳥取大学・乾燥地研究センター・助教

研究者番号: 60423258

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: