

乾燥地の防風施設による気象改良特性

真木 太一

(九州大学大学院農学研究院)

摘 要

中国のトルファンや敦煌などの乾燥地において、大きくは沙漠化防止・緑化のために、1990年より気象観測、特に防風施設(防風林・垣・ネット)による微気象改良の評価を裸地とオアシスで実施してきた。防風林による気象・気候改良・改善という立場から、減風特性や気温・地表温・湿度の気象特性について、距離による各気象変化を測定した。その結果は気候緩和効果として評価されている。その後、草方格による微気象改良について、現地の敦煌や国内での実験圃場で実験・観測を行ってきた。また、防砂、風食防止という立場から、それぞれの現場において防風林、ネットを用いて評価してきた。そして、草方格については、非常に簡単な単に砂面にワラを格子状に埋めていく技術として、防砂が非常に顕著に現われることは経験的に判っていたが、その効果評価を行った。また同時に、草方格には気象変化も起こすことについては定性的に判っていたが、具体的に微細気象の評価は全くといってもよいほど実施されていなかったため、その気象変化・改良について、定量的に評価した。次に、設定が比較的楽で、すぐに効果を発揮する防風ネットについても、防砂効果事例として堆砂状況を測定した。さらには、乾燥地でのオアシスは、農地においても気候的に穏やかなイメージがあるが、その沙漠とオアシスの境界での気象改良による作物の増収効果・品質向上効果について、防風施設による作物の草丈変化から評価した。これらに関しては、これまでに発行してきた多くの論文・単行本を¹⁾⁻¹⁰⁾参考文献として示した。なお、防風施設の防風・防砂効果や生態的影響評価、経済的評価例も示した。

キーワード：オアシス、乾燥地、気象・気候、沙漠、防風施設

1. はじめに

沙漠とオアシスの気候の差異を評価するには、防風施設の乾燥地における気象特性を論じなければならぬ。現在、地球温暖化が進行しているが、著者が研究フィールドとして実施してきた中国においても、例外なく温暖化が進行している。このため種々の気候変化が現れて来ている。逆にそのような気候変化があるからこそ、地球温暖化の問題は重要である。ここでは、乾燥地として中国を対象に、本課題について解説することとした。

乾燥地の典型として沙漠を取り上げる。その対になるのがオアシスである。中国の乾燥地にはオアシスがあるが、気象観測は都市、すなわちオアシスで行われている。このため、地球温暖化はオアシス都市の気候変化であると表現できるかも知れない。さて、ここで中国タクラマカン沙漠周辺の近年約50年間の気候をみると、夏季の気温が下がり、冬季の気温が上昇している。また、夏季の降水量が増え、冬季は余り変わっていない

状況¹¹⁾にあり、気候緩和となっている。従って、黄砂(ダストストーム)の発生も1950年代より明らかに減少して来ているが、しかしながら近年、1990年頃より北京の北西部、黄土高原を含む内モンゴルやモンゴル国で増加している¹²⁾。例えば、2000年頃の北京における黄砂は激しく、首都空港が閉鎖されたこともあった。今後、中国は2008年にオリンピックを控えて、黄砂防止などの環境改善に躍起になっている。

中国における防風施設(林、垣、網、草方格)についての文献は多くある¹³⁾⁻¹⁷⁾。これらによると、防風林など立型の防風施設による防風・気象改良効果や作物収量増についてはかなり多く記述されている。また一方、草方格については、造成法の記述やその効果としての輸砂量が約1/3になる記述¹³⁾はあるが、草方格に限っての気象改良効果、特に風速についての資料は見当たらない。

以上のように、乾燥地では防風施設を導入することで気候緩和し、オアシスの環境を保っている。ここでは防風施設として防風林、防風ネット、草方格を取り上げ、主にそれらの気象改良・

改善に関する気象特性変化について記述する。また、防風・防砂効果や生態的・経済的影響の評価例も示した。

2. 草方格による気象改良効果

2.1 昼間の観測結果による草方格の効果評価

愛媛大学構内で1 m×1 mの基盤の目状のイナワラ草方格を用いて実験・観測を行った⁷⁾。2000年8月7日～8日のデータを図1に示す。草方格は0 cmに1列目があり、計6列ある。なお、各気象要素はワラの高さ15 cmの1/2の7.5 cm高で測定した値である。また基準風速は風上側1.5 m地点の高さ7.5 cmの値である。

まず、図1 (A)における、8月7日14時の最高気温が出る時間帯のデータによると、相対風速(U_r 、基準風速に対する相対値)はワラ列の後方10 cm付近で減風し、最低値である基準風速の45%～50%になっている。そして、ワラ列間の中央より後方で70%～85%まで回復するような変化

形態を示す。

地表面温度(T_s 、地表温)はワラ列直後の2 cm付近でワラ列の日陰のため最も低く、ワラ列間で高く50℃を超えているが、比較的溫度変化は小さく安定している。また、気温(T_a)は5 cm付近で最低値を示し、地表温より低く、かつ地表温よりも大きく変動している。相対湿度(RH)は気温とは逆の典型的な変化形態を示している。

2.2 早朝の観測結果による草方格の効果評価

2000年8月8日5時の最低気温の出る時間帯のデータを図1 (B)～(D)に示す。図1 (B)のように、風速は各ワラ列の風下側5～10 cmで最低風速値を示し、概して80 cm付近でかなり回復して80%～90%の極大値を取り、その風下で再び減風する変化パターンを示す。それらは各ワラ列で類似した変化形態を示しており、また昼間(日中)の場合とも類似した変化形態を示している。なお、6列目以降でワラ列がなくなると、急激にもとの風速に戻っている。

図1 (C)で気温(T_a)と地表温(T_s)の比較をする

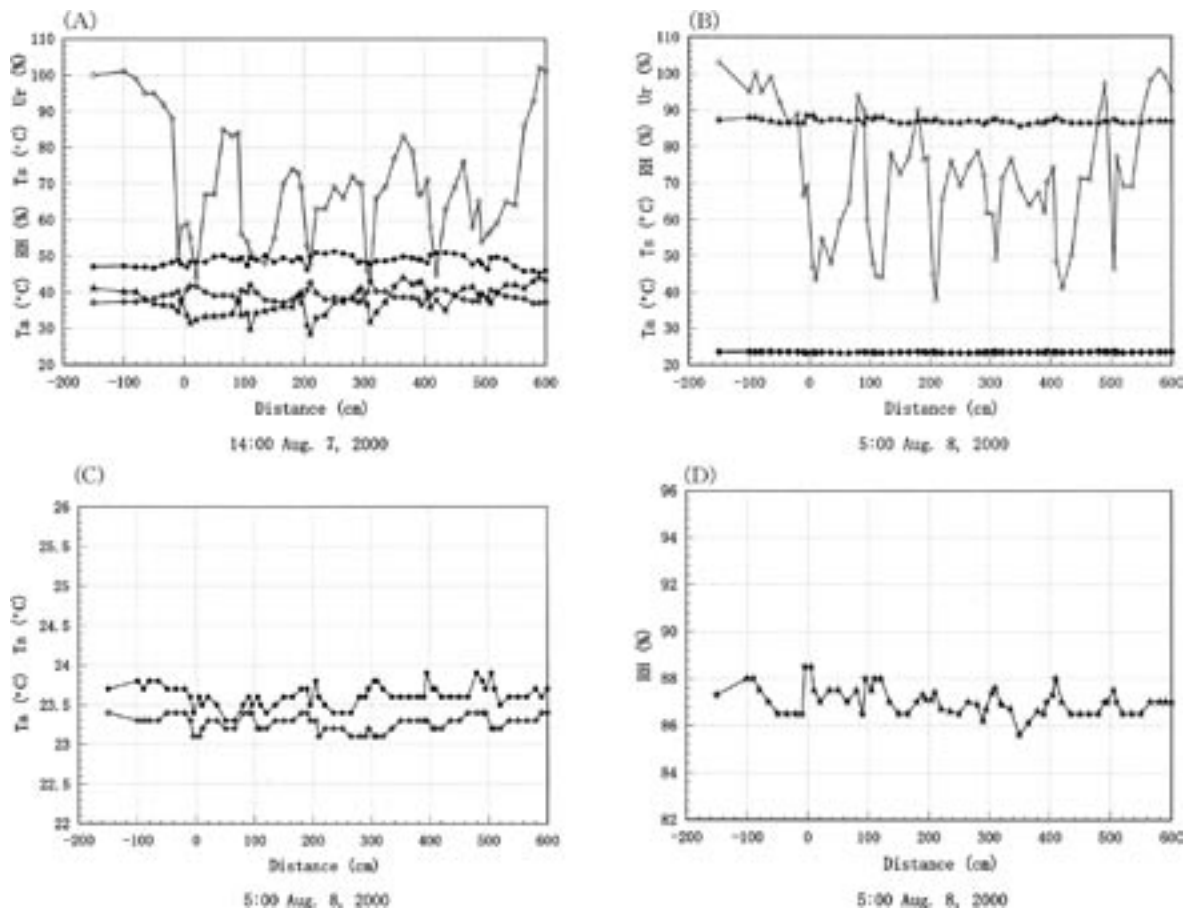


図1 (A)：2000年8月7日14時における草方格による相対風速(U_r)、地表温(T_s)、気温(T_a)、相対湿度(RH)の水平分布の変化。
(B)、(C)、(D)：2000年8月8日5時における4気象要素の水平分布の変化。
0 cmは1列目のイナワラ列(高さ15 cm)で6列ある。

と、地表温の方が少し高く、地表面からの放熱があることが判る。また、それらの変化傾向は比較的よく類似しているが、ワラ列付近では気温が列の通過後、低温化しているのに対して地表温がまだ高い状態を示す。一方、図1(D)の相対湿度(RH)の変化傾向は気温とは逆の変化であり、ワラ列付近で高く、列間で低くなっている。

以上のように風速はワラ列付近で減風し、列間でかなり回復して、再び次の列で減風する。地表温は日中では列間で高く、気温はワラ列後方10 cm付近で高く、列間で低くなっている。相対湿度は気温の変化とは逆である。夜間・早朝では地表温は列間で低く、気温は列間の後方で高くなっている。相対湿度は気温とは逆の変化形態である。

3. 中国敦煌における草方格による堆砂と気象改良効果

3.1 草方格による堆砂

中国敦煌におけるアシワラ草方格は写真(図2)のように高さ約3 cmであり、相当程度が砂に埋

まった状態の草方格であり、防風・防砂効果としては設定当初の非常に有効な役目をかなりの期間果たした結果とはいえ、大量の砂が押し寄せない限り、一般的にはこの状態で相当長期間にわたって効果が継続するものである。

3.2 昼間の観測結果による草方格の効果評価

2001年9月23日、15時半の U_r 、 T_s 、 T_a 、RH、 U (風速)の変化を図3(A)~(C)に示す。敦煌の草方格は1 m×1 mであり、広範囲に分布しているため、先端からの変化形態が求められず、かつ



図2 中国敦煌におけるほとんど埋まったアシワラの草方格。

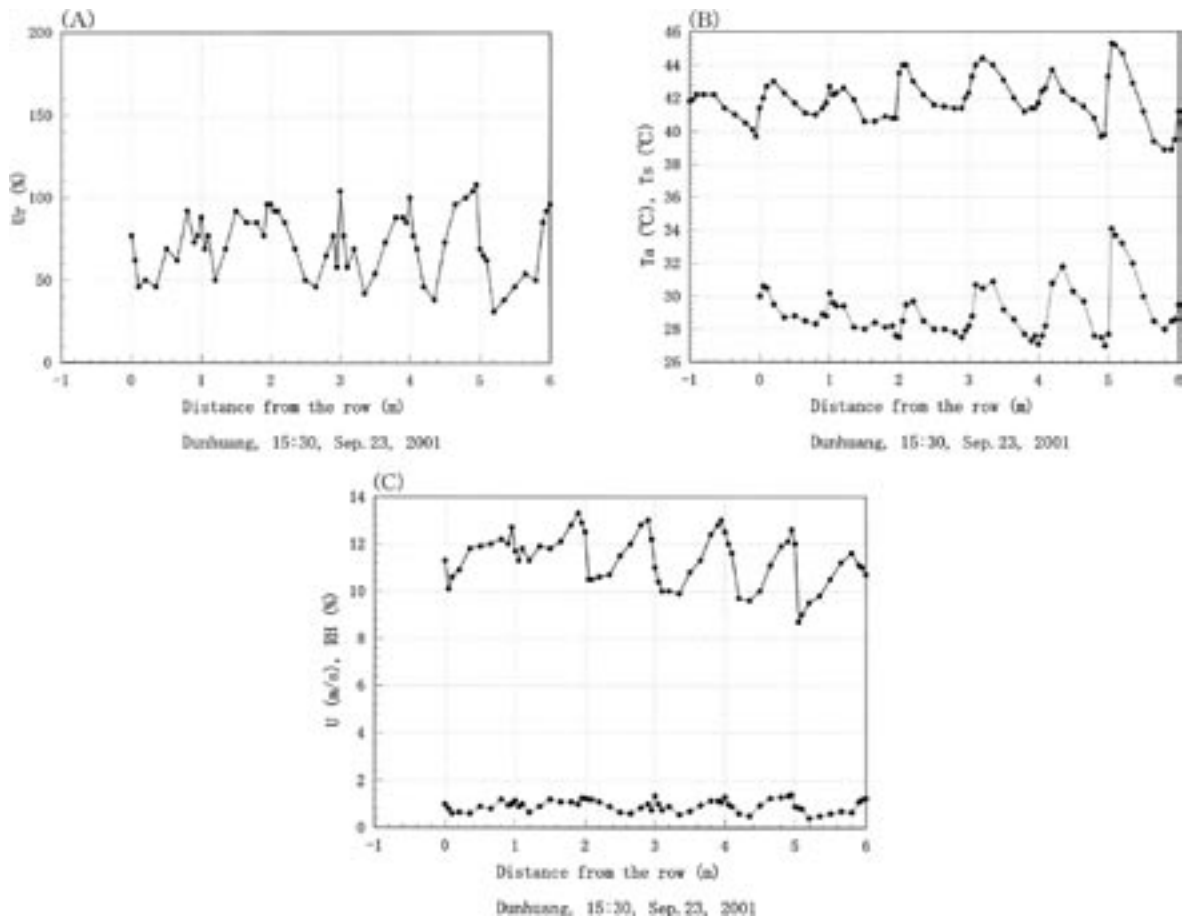


図3 (A)~(C) : 2001年9月23日15時半の各気象要素(風速(U)など)の水平分布。

また列よっての気象変動がある。このため、従来の観測結果によると、5～6列になれば平均の特性が得られる¹⁰⁾として、図3には7列の草方格による変化状況を示した。

次に、それぞれの変化をまとめて、草方格の列間の0～1mについて平均化して示した。そして1.0m付近の変化を見やすくするために、0～0.2m間の変化を繰り返して、1～1.2mに示し、全体として1～1.2m間の平均的な変化形態を図4(A)～(C)に示した。これらは図3と対になるものであり、両者を比較しながら参照されたい。

風速(U)については、ワラ列付近では砂が堆積して観測高度が高いために、ワラ列上の0cm付近で基準風速に対する相対風速(Ur)が最も大きく、20～30cm付近で小さくなっている。次に、地表温(Ts)についてはワラ列後方の20cm付近で最も高く、ワラ列の90cm(前方の風上、-10cm)付近で最も低くなっている。気温(Ta)についてもほぼ同様である。相対湿度(RH)については気温の逆の変化形態を示し、20cm付近で最低、90～95cm(-10～-5cm)付近で最高である。

3.3 早朝の観測結果による草方格の効果評価

2001年9月24日6時半の平均的な変化形態を図5(A)～(C)に示す。

図5(A)の相対風速(Ur)の最高風速はワラ列上0cmであることが判る。一方、最低風速は5cm付近にあり、また、列間の50～65cmでもかなり小さい値を示す。そして20cm付近がかなり大きく、変化形態が異なっている。これについてはワラ列直後はワラ列による直接の減風であるが、その後の20～30cmの相対的に強い風はワラ列を越えてきた風の吹き下ろしのためと考えられる。また、それには一般風の1m/sのような弱風が関与していると思われる。

次に地表温(Ts)は、まだ日が出ていない早朝であるため、気温(Ta)より2℃も低い。特に、放射冷却が関与して、気温逆転が非常に顕著である。変化形態は風の弱い列間の30～40cm付近で最も高く、ワラ列直前で最も低くなっている。また、気温については、大きい変化はみられず、変化形態は地表温変化のそれとは逆のようになっている。一方、相対湿度(RH)では変動しているが気温とほぼ逆で、地表温の変化に類似している。

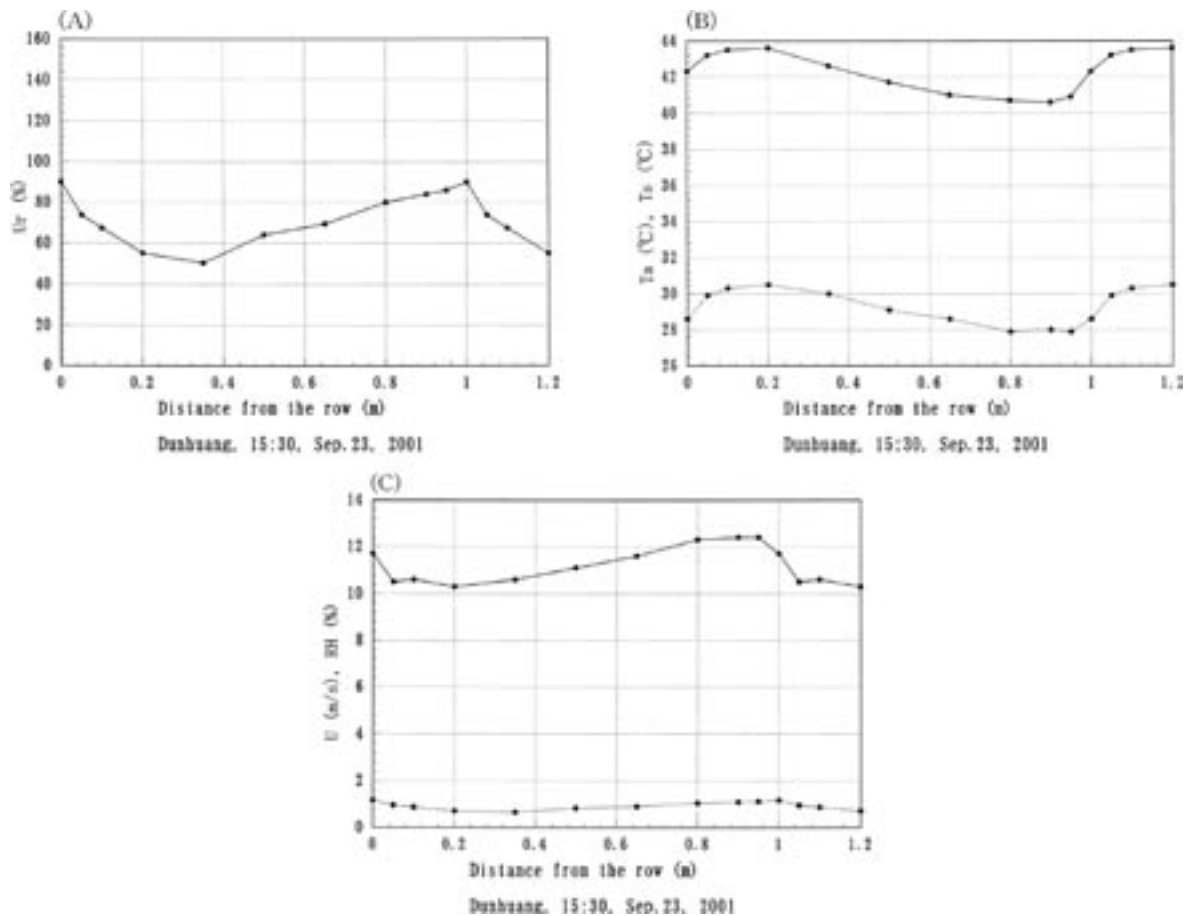


図4 (A)～(C)：2001年9月23日15時半の各気象要素の平均化した水平分布。

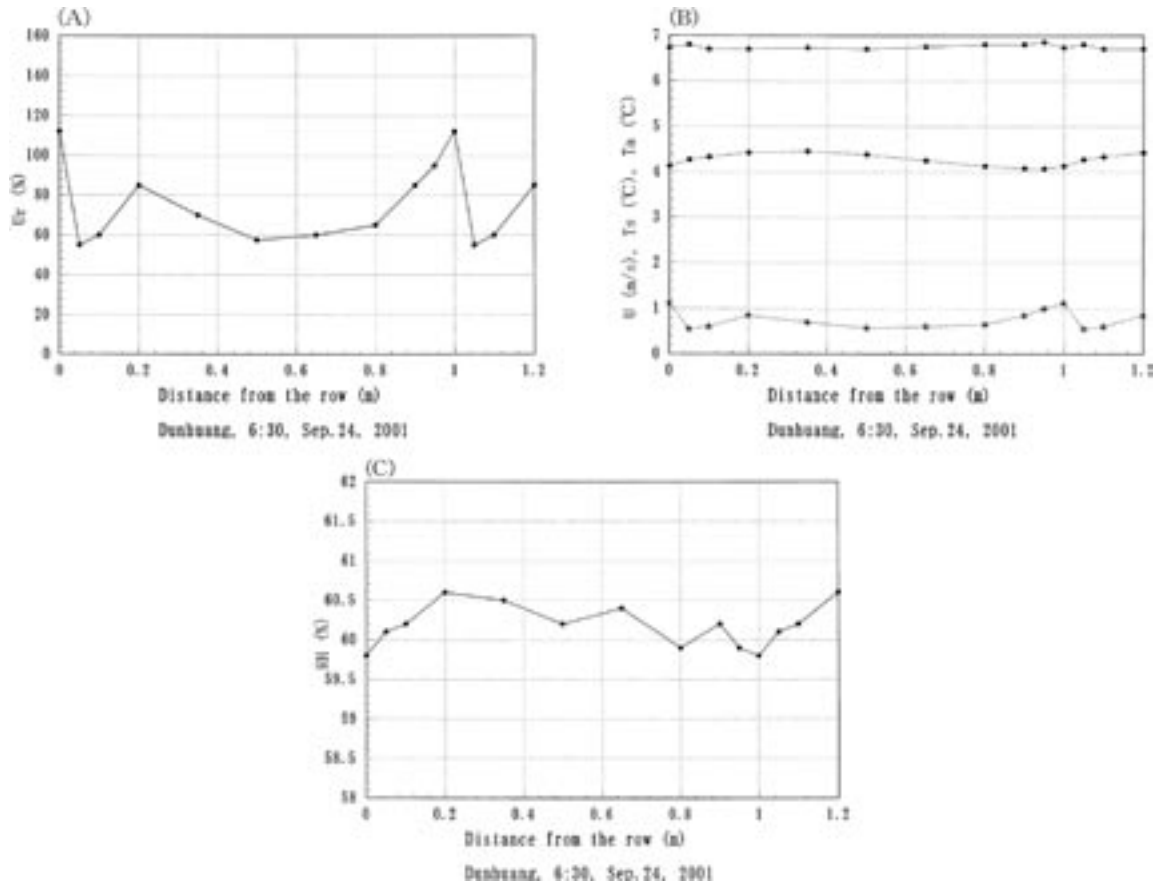


図5 (A)～(C)：2001年9月24日6時半の各気象要素の平均化した水平分布。

4. タマリスク防風林による堆砂と気象緩和効果

4.1 防風林による堆砂状況

観測は中国トルファン乾燥地で行った^{2),7)}。タマリスク防風林は高さ4.6 mであり、密閉度は上層部が50%、下層部は100%、中層部が80%～90%であり、平均85%である。林帯幅12.0 m、その中央には約1.5 mの堆砂がある。堆砂の高いところは2.5 m、低いところでも0.5 mの堆砂が観測された。従って、地上部は約3 mであり、1/3は砂に埋まった状態にある。なお、防風林は長さ1 km以上に渡って設定されている。

さて、図6の高倍距離は防風林の高さHの倍数で表した距離で、風上側をマイナス、風下側をプラスで表す。

4.2 昼間の観測結果による防風林の効果評価

図6(A)に1990年7月2日12時の観測結果を示す。風向はENEで45°の斜め風であり、基準風速は3.0 m/sである。

従って、相対風速(Ur)は15 Hで基準風速に回復しており、効果範囲がやや狭い。地表温(Ts)は-2 Hと2～10 Hで80°C程度であり、非常に高温である。防風林内の地表温とは約30°Cの格差

で非常に大きい。

また、気温(Ta)は-2～15 Hで昇温しており、特に防風林内と直後で約42°Cと非常に高温となっている。また、場所による差では2 Hで3°Cも高い。相対湿度(RH)は夜間・早朝と異なり、防風林内だけが高く、防風林通過後は気温の上昇のために却って低くなっているが、絶対湿度では増加している。なお、日中における葉温の変化は地表温のそれよりも気温のそれに類似しており、夜間や早朝の放射冷却に起因して冷却された変化状態とは、異なった特徴がある。

4.3 早朝の観測結果による防風林の効果評価

図6(B)に1990年7月2日6時の観測結果を示す。風向はWNW、基準風速は2.0 m/sの弱風である。防風林に対して風向はほぼ直角であり、かつ弱風のため風の減風範囲が広がっている。早朝のため、風上側は日陰で気温・地温は低く、風下側が高くなっている。また、0 Hの相対湿度は基準値よりも7%も高くなっており、防風林による加湿効果が高く、その影響は30 Hまで達している。また、葉温(表面葉温)は気温、または地表温の変化形態に、より類似している。すなわち、葉温は鼠瓜の値であり、地表を這って地面に近いことが関与して、早朝においては気温よりも地表温によ

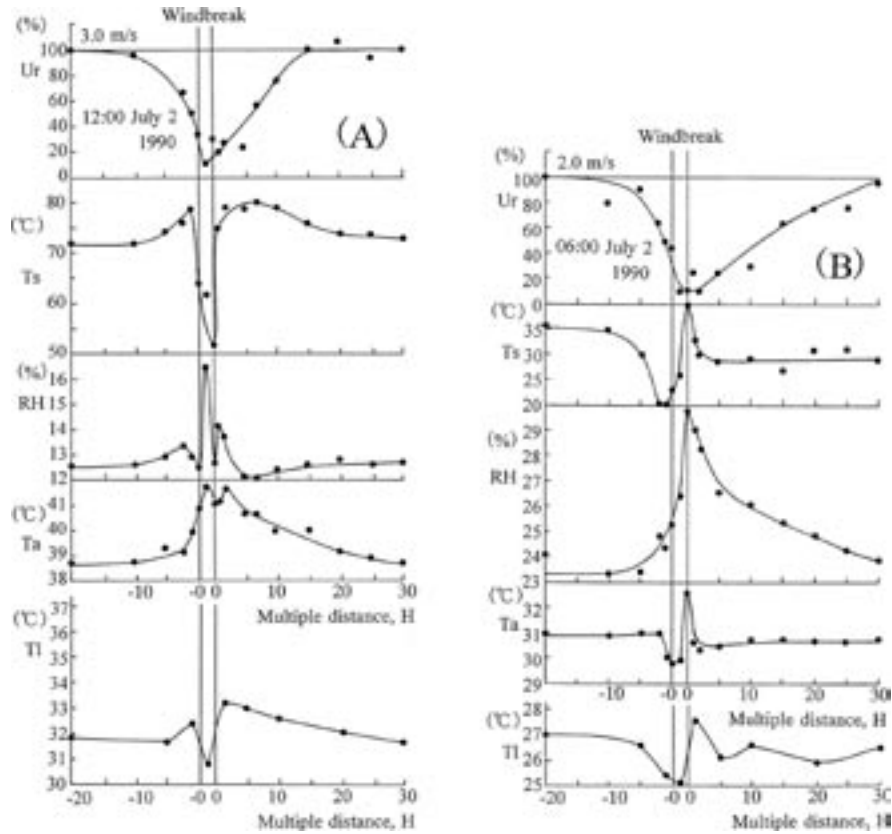


図6 1990年7月2日12時(A)と6時(B)の相対風速(Ur), 地表温(Ts), 相対湿度(RH), 気温(Ta), 葉温(Tl)の水平分布。

り近い変化形態となっている。これらの観測結果は典型的な防風林による気象改善効果である。

4.4 防風施設の地域別効果の差異

防風施設について、一般にその効果範囲については高倍距離として規格化しているの、基本的には風速、気温などが変化しても同じであるが、実際には細かい条件によってある程度異なる。すなわち地表面の粗さが大きくなれば、言い換えれば、凹凸が大きくなれば若干効果範囲が狭くなる。また、大気安定度によっても、強い安定・不安定では効果は幾分小さくなる。なお、これら効果についてやその他の効果・機能の差異については真木¹⁾を参照されたい。

その他、地域の差、例えば乾燥地、半乾燥地、半湿潤地などの気候的な差異によっても物理的にはほとんど変わらない。しかし、防風効果の評価として、その防風施設による長期間の効果の評価になると当然異なってくる。それは降水量の差によって、例えば植林した防風林の活着・生長を考えると、明らかに雨の少ない乾燥地では効果を果たすようになる期間が長くかかるなどのために、十分な効果を発揮させるのが難しいことになる。また、それを造成する場合にも当然費用が多くなることになる。これらについては防風施設のプラス・マイナスの効果について記述されているの

で、真木¹⁾を参照されたい。

5. 防風ネットの防風による堆砂効果

中国トルファンにおける2種の防風ネット(密閉度、Aネット:30%、Bネット:40%) (図7の写真)による約半年間と約1年間における堆砂状況は、それぞれ図8(A)と図8(B)のとおりである²⁾。なお、防風ネットは高さ2.0 mで、防風ネットの下方は約5 cm空けてある。図8(A)では、A、Bネットともに3 H付近でそれぞれ、約30 cmと約40 cmである。堆砂がなくなるのはAネットで15 H、Bネットで10 Hである。すなわち、密閉度の高い防風ネットの場合には堆積が高くなるが、堆積がなくなるのが早く、僅かに堆積している地点でみると、Bネットでは7 H、Aネットでは10 H程度となり、密閉度の低い方が後方まで続いていることが判る。

一方、防風ネットによって風上側に5~10 cmの堆積があるが、この場合にも風下の場合と対称である。なお、防風ネットの下側は風食が激しく、堆積砂はない状況である。次に、実質約1年の堆積の状態(図8(B))によると、この場合はBネットのみであり、2タイプの堆積の状態が観測された。実線の方は防風ネットの下側には風食に

よって堆積がないが、鎖線の方は防風ネットが埋まっている。これは大量の砂が押し寄せて来た結果であり、例えば高さ数十cmの小さい砂丘の移動や障害物がネットに掛った場合に発生する。この場合には防風ネットが砂で埋まることになる。この状態になるとかなり速く、防風ネットが埋まりはじめ、効果がなくなる堆砂状態へと加速されることになる。

従って、この埋没を防止するには、密閉度は40%以下が適当であり、密度のあまり高いネットが適することになるが、もちろん30%以下になれば防風・防砂効果自体が小さくなる。一方、密閉度が60%を越えると埋没する可能性が大きいことになり、場合によっては50%でも埋没の可能性が大きくなる。これを防ぐにはネットの下方を10cm以上空けておく必要がある。

以上のように防砂ネットとしては、密閉度は40%程度(30%~50%)が適当ということになる。なお、農地の防風については後述するように50%程度、あるいは60%程度までが適することになる。



図7 高さ2mの2種類の防風ネット設定と砂堆の状況。

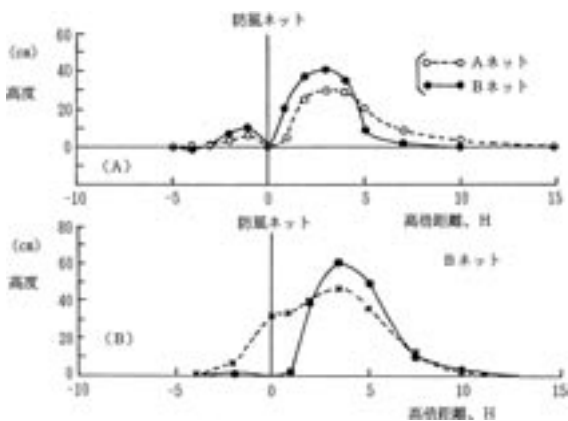


図8 2種類の防風ネットによる半年間(A)と1年間(B)の堆砂状況。
密閉度：Aネット30%、Bネット40%。

6. 作物への効果

乾燥地、沙漠が防風林で保護されると、そこはオアシスになり、作物栽培が可能となる。逆にいえば、沙漠で作物栽培、すなわち農業を行うには防風林がなければ、満足な作物はできない。ましてや、収量増を期待し、品質を良くするには、防風林がなければ不可能である。

さて、ここでは中国トルファンにおける混交防風林(図9の写真、胡楊：ポプラ(*Populus diversifolia*)、榆：ニレ(*Ulmus pumila*))の気象改良効果による作物の草丈増の状況を図10に示す³⁾。コウリヤン3種とトウモロコシの草丈の増加が読み取れる。これらの防風林の場合にはトウモロコシでは2Hに、コウリヤンでは3~8Hに最高値があり、平均的には5H付近に最高値が認められる。また、コウリヤン1の場合には2列の混交防風林であり、2列目防風林によるの効果が極大値として16H(-2~-3H)付近に認められ、典型的な分布パターンとして示されている。なお、乾燥地ではワタ、トウモロコシ、コウリヤンにおい



図9 胡楊・榆などの混交林(左右)と収穫終了期のワタ畑(中央)。遠方のトウモロコシは防風林による草丈への増加効果が認められる。

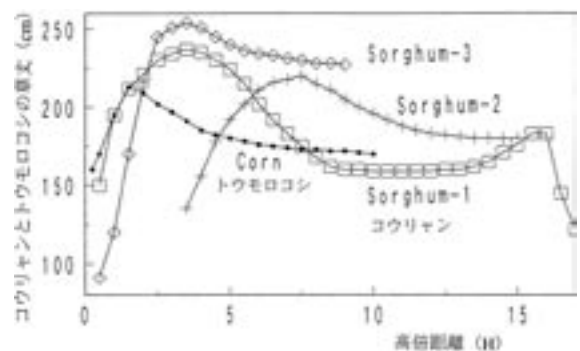


図10 防風林によるトウモロコシ、コウリヤンの草丈への効果変化。
コウリヤン1は2列の防風林に挟まれた場合の測定結果であり、その他は1列の防風林による草丈変化である。

でも草丈を高くすれば、収量が増加すること、すなわち草丈と収量の相関係数は高いことは、真木ほか³⁾が紹介した。従って、乾燥地では草丈を高くすることが必要である。

7. 防風施設による効果の比較

各種防風施設による効果の比較事例として、中国寧夏回族自治区塩池県高沙窩(毛烏素沙漠、38°N、107°E、海拔1,480 m)での1990~1993年の調査結果を示す¹⁸⁾。気候は年降水量270 mm、年平均気温 8.2 °C、最高気温 32.8°C、最低気温 -29.6°C、年平均風速 2.8 m/s、冬・春季の主風向は北西風である。沙漠化地域(砂丘高 2 m)の内の植林実施地区50 haは、植被率15%以下、15%~40%、40%以上の3地域に区分される。流動砂丘面積55%、砂丘間低地面積45%である。また、湿潤型流動砂丘(地下水位2m以上)が49%、半湿潤型(2~3 m)が15%、乾燥型(3 m以下)が36%を占める。喬木、灌木、草本を主に2 m × 3 mで植栽した場合の3年間の効果について、気象・地象・植生などからの評価結果を示す。

平均風速低減率21%、平均気温は8.2°Cから7.9°Cに低下、夏季降温1.0°C、冬季昇温0.7°C、地温不変、年蒸発量223 mm減少、水分率10.4%低下、植被率10%未満から74.3%に増加、植被群落変遷開始、動植物種増加、流動砂丘固定化、砂丘移動速度は549から18.5 cm/yearに激減、輸砂量は2.66から0.009 m³/mに減少、土壌化の兆候、皮殻形成、砂中含水量増加、保水力増加、浸透性減少、有機物・肥料分増加、化学性質改善が認められ、明らかに効果状況が解明された。

次に、同地における草方格・防風ネットなどの防風施設による砂丘移動速度、砂輸送量に関して調査事例を表1¹⁸⁾に示す。表のように、草方格などの格子状の方格についてはほとんど砂丘移動や砂の移動は止まり、また立型の防風網(ネット)、防風柵では40%~80%減少していることが判かる。

最後に、経済的効果¹⁸⁾については、主目的が沙漠化の進行を防止することであり、また乾燥・無灌漑条件下で実施されたものであるため、純利益で評価することは不可能である。したがって、ここでは総生産額と投入費用との差でもって評価している。

1990~1992年の投入額1,900万円は1989年当時の換算で527,060元であり、以下の費用から考えると少し余裕がある。すなわち、50 ha造成費301,397元、総合償却費(固定資産)14,217元、林業科学研究費83,790元、管理・保育・保護費74,173元で、合計473,557元である。

生産額は喬木304,848元、灌木68,050元、草本121,878元、苗木24,500元、草本種子26,973元で合計546,249元である。したがって、72,672元の利益であり、収益率(経済公益率)15.3%であるとしている。しかし、労働賃や環境への影響などの効果についての評価がないが、経済的には十分有益であることが判かる。

8. おわりに

乾燥地、沙漠における防風施設による気象改良・緩和効果、防砂効果、作物の草丈増加・品質向上等について記述してきた。これらは1990年代に観測したものである。これらの観測結果が中国乾燥地の微気候改良や、ひいては、草方格による大規模な気象改良まで拡大できればと願っている。その参考資料となれば幸いである。今後は、この草方格に保水剤を組み合わせる気象改良を行い、沙漠化防止ができ、沙漠が緑化できれば、この上もない喜びであると考え、全世界の乾燥地に少しでも多く普及することを期待して、写真集⁵⁾なども含めて広報活動を行い、努力している。なお、現在、中国銀川市の南部にある靈武市で林野庁関係による黄砂防止のための草方格の効果評価を植林との関係から実験している。今後を期待したい。

表1 各種防風施設(沙障)の防砂効果¹⁸⁾

項目	麦草方格	沙柳方格	沙蒿方格	化繊ネット	化繊ネット	固砂袋	固砂袋	樹枝粗朶	一列化繊ネット	複列化繊ネット	流動砂丘
減少率(%)	1 m 格子	1 m 格子	1 m 格子	全面状	一部分	1.5×2 方格	2 m 条状	立型	立型	立型	対照区
砂丘移動速度(A)	97.6	60.7	98.4	85.0	57.9	46.5	43.1	85.4	39.8	44.2	0.0
砂丘移動速度(B)	98.7	92.5	99.1	92.1	77.3	68.6	56.7	92.4	65.6	66.6	0.0
輸砂量(A)	99.9	95.2	99.8	97.8	63.8	83.6	83.1	85.3	54.2	74.6	0.0
輸砂量(B)	99.9	99.1	99.9	99.4	50.5	79.1	77.0	92.6	47.1	65.1	0.0

注) (A)：1990年4月~1991年7月、(B)：1991年8月~1992年7月

参考文献

- 1) 真木太一(1987)風害と防風施設. 文永堂出版, 301p.
- 2) 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治(1993)中国トルファンの乾燥地における防風ネットによる微気象改良と飛砂防止. 農業気象, 49(3), 159-167.
- 3) 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治(1994)中国トルファンの乾燥地における2列の防風林による気象, 堆砂, 作物への影響. 農業気象, 49(4), 247-255.
- 4) 真木太一(1996)中国の砂漠化・緑化と食料危機. 信山社, 191p.
- 5) 真木太一(1998, 2004)緑の沙漠を夢見て. メディアファクトリー, 九州大学大学院農学研究大学院気象環境学研究室, 128p.
- 6) 真木太一(1999)写真で見る中国の食糧・環境と農林業. 筑波書房, 174p.
- 7) 真木太一・伊藤代二郎・西川 敦・杜 明遠(2000)中国乾燥地トルファンの防風林が微気象と植物葉温に及ぼす影響. 沙漠研究, 10(2), 157-166.
- 8) 真木太一・真木みどり(2000)砂漠の中のシルクロード. 新日本出版社, 206p.
- 9) 真木太一(2003)大気環境学. 朝倉書店, 140p.
- 10) 真木太一(2004)砂漠化問題への取り組みー主に中国の砂漠化ー. 新農業環境工学, 養賢堂, 71-82.
- 11) Du, M., M. Yoshino, Y. Fujita, S. Arizono, T. Maki and J. Lei(1996)Climate change and agricultural activities in the Taklimakan Desert, China, in recent years. *J. of Arid Land Studies*, 5(2), 173-183.
- 12) Yoshino, M. (2002) Secular variations of sand-dust storm and blown sand occurrence in the Taklimakan Desert, NW China. *J. of Arid Land Studies*, 11(2), 253-258.
- 13) 治沙造林学編委会(1984)治沙造林学. 中国林業出版社, 323p.
- 14) 趙 松喬(1985)中国干旱地区自然地理. 科学出版社, 216p.
- 15) Kaifu, X. (1990) *Protective Plantation Technology*. Publishing House of Northeast Forestry Univ. China, 470p.
- 16) 朱 震達ほか(1994)中国土地沙質荒漠化. 科学出版社, 256p.
- 17) 江 愛良(2002)農業気象学・気候学・農業生態学研究. 気象出版社, 307p.
- 18) JOFCA(1993)砂漠化地域森林復旧技術指針策定調査事業中国寧夏回族自治区塩池県(毛烏素沙漠)総括報告書. 海外林業コンサルタント協会, 147p.

(受付2004年11月20日、受理2005年3月11日)