

46. アメリカ合衆国における耕地の風食について

WIND EROSION ON AGRICULTURAL LAND IN THE USA

Survey of Literature and Assessment of the State of the Art

カール ノードストローム*・堀田 新太郎**

Karl F. Nordstrom* and Shintaro Hotta**

ABSTRACT: This paper provides a review of the recent literature on wind erosion on agricultural land in the USA, focusing on: 1) the amounts of soil removed; 2) the temporal and spatial scales of dust production; 3) the sources of dust; 4) methods of predicting aeolian sediment transport and losses; 5) impacts of blowing dust on biota and human health; 6) methods of controlling sediment loss from fields; and 7) government incentives to encourage better farm management practices. The review concentrates on literature from the past 5 years, supplemented by selected earlier studies that are frequently-cited or provide perspective on past conditions. Attention is focused on peer-reviewed journals because these sources are readily accessible for follow-up studies.

KEYWORDS : wind erosion, agricultural land, soil, wind erosion equation, dust bowl

1. 地球規模環境問題としての風食と砂塵の移動

風によって地表面から土粒子が大気中に飛散し、移動し、結果として地表面の土が失われる現象を風食と呼んでいる。地表面から大気中に飛散する微細な土粒子 (dust) を砂塵と呼ぶことにする。自動車の排気ガス、化石燃料の燃焼煤煙に含まれる微粒子 (粉塵) による問題は都市において普通に見られる。ダストの問題は室内においてもある。これらの粉塵、ダストに関する問題は耕地から発生する砂塵の問題と原因を異にするので、以降本稿にては扱わない。風食、土粒子の移動、堆積は地球の陸地の 1/3 以上の面積に生じている。砂塵は大気の組成、気候変動、酸性雨、土地に散布された除草剤、土壌の組成、風食を受けた土地・移動してきた土粒子が堆積した土地の肥料分と生産性、植物の成長、深海の堆積物の性質、人間の健康、地形の美観、に影響を与えている。風食は現在の大きな環境問題の一つである。風食の発生の回数は多分自然条件によって定まるものであろう。しかし、人間の活動は風食の発生回数と発生量を大きく増長している。乾燥地と半乾燥地地域における人口は急激に増加している。その結果として風食問題発生可能性を大いに高めている。風食の発生と土粒子の移動は森林の全面伐採、建設現場、新しい道路の建設、舗装されていない道路や駐車場、道路の路肩、火災を受けた土地、に生じている。風による砂塵の移動は大陸から大陸に生じている。例えば、アジアから北アメリカ、アフリカから北アメリカ、アフリカからヨーロッパ、南アメリカから南極大陸がその例である。砂塵はまた大気圏外の環境に影響を与える。耕地や自然裸地から発生する砂塵の移動はヨーロッパ、アフリカ、アジア、オーストラリア、南アメリカにも生じている地球規模な問題の一つである。アメリカ合衆国における耕地の風食は乾燥地と半乾燥地を越えて他の地域にも影響を及ぼす国家規模の問題である。本稿はアメリカ合衆国の耕地の風食に関する最近の文献のレビューである。文献の調査には 1) 風によって流失される土量、2) 砂塵発生の時間的、空間的広がり、3) 砂塵の発生源、4) 風による砂塵の移動量と流失量の予測方法、5) 砂塵が生物と人間の健康に与える問題、6) 風食制御方法、7) 良好な耕地管理を奨励するための政府の奨励策、に焦点を当てている。レビューはしばしば引用される過去の状況を正確に記述している文献を補足している過去 5 年に発表された文献を主にしているが、過去にレビューされた多くの文献も参照している。

* ルッテガー大学 海洋海岸研究所, Institute of Marine and Coastal Science, Rutgers University

** 日本大学 国際関係学部, The college of International Relations, Nihon University

2 風食によって耕地から失われる土砂量の規模

アメリカ合衆国の耕地から水食および風食によって流失する年平均土砂量は20億トンから68億トンの範囲にあると推定されている。少なくとも4つの要因、河川の作用、土の荒廃、風食、耕作、が耕地の侵食と堆積および土壌粒子の組成に関係している。水食は地形が険しい湿潤な地形、特に斜面の下側の勾配が相対的に急で地下水位の高い地形に生じる。風食は乾燥した耕作されていない地域にも生じる。風の土砂移動能力は水の移動能力よりはるかに小さく、風による年間侵食量は水による侵食量の約1/4程度である。しかし、流水による侵食は斜面に限られているが、風は耕地の全表面から微細な土粒子を流失させる。一回の嵐で数百トンの表土が流失することもある。カルホルニャー州、ロサンゼルス近く、アンデルポーバレーの幾つかの地区で1日に0.5mの表土が失われたことがあった。カルホルニャー州のある二つの盆地で、砂塵によって大気が最も汚染されたとき砂塵として大気中にあった10ミクロンより小さい土粒子の量は約440トン/日と推定されている。年間降雨量が約800mm/yearである比較的湿潤な中央ウエスコン州の幾つかの郡で、風食によって失われる年間土砂量は12~18億トンである。砂塵は道路、耕作されていない耕地、自然状態の地域からも発生するが、耕地表面から発生する砂塵の量との割合を定めることは困難である。その理由は発生する砂塵量と砂塵の土粒子構成は農作業と農作業に使用する農機具に関係するからである。南部アリゾナの乾燥地における砂塵に関する調査は、耕地から発生する砂塵は40%、舗装されていない道路からは40%、その他の地区から20%の砂塵が発生していることを示している。耕地の土壌侵食と土砂移動は耕地と耕地以外の両方に良くない結果を生じる。微細で軽い土粒子は不釣り合いなほど高い肥料分を含んでおり、その土壌の流失は肥沃な耕地をやせ地にする。しかし、耕地の侵食についての耕地以外の地域における問題は耕地における土壌の生産性の低下による損失より潜在的に大きい。そのため風食の問題を減じようとする意識は耕地以外の社会の人々が農民達より強く持っている。例えば、ニューメキシコにおいて耕地以外の地域に風食によって生じる一年間の損害は約4億6千6百万ドル、風食による農作物の減収による損失は約1000万ドルと推定されている。耕地の風食問題は合衆国全体における国家規模の問題である。

3 耕地から発生する砂塵の空間的、時間的様相

3.1 砂塵の発生しやすい地域

耕地の風食の問題は半乾燥地において激しい。合衆国における風食問題の約90%はミシシピー川以西に、そのうち約60%はグレートプレーンズと呼ばれている穀倉地帯に生じている。図-1は耕地の風食が最大の問題である半乾燥地あるいは亜湿潤地帯を示す。



図-1 耕地の風食発生地域

風食はカルホルニャー州、ワシントン州の乾燥し易い、しかも農業が経済的に重要である地域に生じている。耕地の風食の問題は乾燥地帯のある他の州、例えばニューメキシコ州、アリゾナ州にも発生している。しかし、これらの地域の農業規模は比較的小さく、風食問題についての関心は薄い。グレートプレーンズ地帯の中で風食問題が最悪な地域はテキサス州ルップック (Lubbock) 付近の南部高原地帯である(図-1)。ここでは合衆国最大年間 47.5 日砂塵嵐が発生している。土地は平坦で、土壌は第4紀世の風によって運ばれ堆積した砂と黄土 (Loess) から成っている。いくらかの牧場があるが、ほとんどは綿花畑である。綿花は5月に植え付けられ、11月に収穫される。収穫後は翌年の5月まで裸地のまま放置されている。北部グレートプレーンズの寒冷な地域では氷結-融解の風化作用があり、土塊を小さく砕く。そしてカナダからの強風によって風食が発生し易くなっている。カルホルニャー州の風食の多くは砂漠地帯に生じているが、耕地においても生じている。その例は気候が半乾燥の地中海型気候で長い乾燥した夏と秋があり、企業化された農業が 27,788 km² に渡って営まれているセントラルバレーである。1996年に、カルホルニャー州には約 76,000 の農場があり、その平均的な規模は 158 ha であった。農場には約 150 万人の労働者が雇用されていると推定されている。風食の問題はワシントン州のコロンビア高原にても生じている。高原の乾燥した東側地域では冬小麦が栽培されており、西側地域では灌漑農業が営まれている。乾燥した東側地域では2年間隔の輪作がなされており、秋の収穫後耕地の半分が裸地のまま放置されている。西側の灌漑農業地帯では収穫後乾燥した裸地で放置される。高原の周辺の土地は乾燥しており、草あるいは灌木がまばらに成育してのみで、風食が起き易い状況である。風の吹かない秋に大気中の砂塵濃度は 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の範囲にある。しかし、強風時には1時間当たりの濃度が 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えることがある。発生回数が少なく規模は大きくないが、風食の問題は乾燥が少ないウェスコン州やイリノイ州、あるいは湿潤な合衆国の南東部、北西部にても生じている。降雨量の多い地域でも、地表面が乾燥し易く風食を受け易い土地に収穫後、茎、枝葉などの残存物が少ない作物が栽培されている場合に風食の問題が生じる。地域特有の条件が風食発生の可能性を高め、局部的に激しい風食を生じさせることがある。例えば、ノースダコタのレッドリバー溪谷の表土はシルトと粘土から成っており、北部グレートプレーンズの中でも風食の激しい場所である。複雑な地形と気象条件の故に、カルホルニャー州では様々な異なった風食を生じている。高濃度の砂塵嵐は乾燥した地区に生じているが、年間最大の風食量がある地区は別にある。

3. 2 時間的概観

3. 2. 1 長期的動向

合衆国における風食に関する長期の量的データは限られている。風食は、都市化、栽培作物の変化、防風構造物の有無、除草剤使用の有無、土地管理計画の変更、耕作法、残存作物の管理など多くの経済的、社会的、政治的、技術的要因に関係している。それ故、特定の地区の風食に関する動向を説明することは出来ない。風食に関する最大の情報はグレートプレーンズにある。グレートプレーンズには風食に対して無防備な耕地が多くあり、精力的な研究がこの地で成されたからである。グレートプレーンズの南西部は中新世紀から風に依って運ばれた土砂が堆積し始めた。現在の表層の土壌も当時と同じである。この事実は風による土砂移動が長期間に渡っていることを示している。この土壌は日照りの時期には容易に再移動を始める。特に人間の行動が加わったとき移動は激化する。

ヨーロッパからの移民が来る前は、グレートプレーンズのほとんどの領域は樹木の少ない背の高い草が繁茂する広大な草原であった。しかし、1850年代から耕地への転換がはじまり、草原の大領域は耕地化された。その結果、土壌の湿度と肥沃さが減じ、乾期に風食を受け易くなった。バイソンは絶滅し、代わりに家畜が飼育された。草原は耕され、一年作物が栽培されるようになった。貯水池、運河が建設され、水文体系が変わった。樹木が植えられ、火災が抑制された。ガソリン駆動の機械が普及し、平らな開放された草原への出入りを容易にした。カンサス州のトラクターは1915年の3,000台から1930年の66,000台に増加した。カンサス州南西部の小麦畑は1925年から1930年の間にやく50%増加した。1920年代になされた調査によれば、8000万エーカーの耕地が風食を受けており、その内2000万エーカーの耕地が既に耕作が放棄されていたことを示している。1930年代の早魃期に風食が激化した。ダストボールとして知られる災害が発生する。

3. 2. 2 ダストボールとその遺産

ダストボールは環境悪化と社会混乱によって国民の心を傷付け、国民の記憶に鮮明な印象を残した北アメリカにおける良く知られた環境災害である。この災害の引き金となった旱魃が始まった時期は国家経済の悪化と穀物価格の下落が始まった時期に一致する。その結果、多くの農民は農業を放棄し、耕地は風食に晒されることになった。ダストボールはグレートプレーンズにおいて最も深刻であった。ダストボールの発生している地域では、人間には深刻な呼吸器系の病気が生じ、砂塵を吸入した家畜は死に、塗装は砂塵により研磨され、自動車やトラクターのエンジンは砂塵を吸い込み故障し、商店の商品や家内の家具は砂塵により汚染され、そして清掃のために費やされる費用が高んだ。グレートプレーンズ以外の地域にも同じように悪影響があった。巨大な砂塵雲は東部合衆国の空を覆い、日光を遮り日中の空を暗くした。砂塵は上空の西風に乗る、大西洋を超えてヨーロッパの国々に砂塵の雨を降らした。

ダストボール以前の風食に関する問題は Bates(1911)に詳しい。しかし、ダストボールは風食に関する精力的な研究開始の契機を与えた。土壌に関する調査が開始され、風食管理計画が州政府、合衆国政府によって立てられ、実行された。風食研究のための風洞が開発され、風食とその制御に関する数多くの研究論文や報告が発表された。これらの成果は Chepil and Woodruff(1963)によってまとめられている。

ダストボールの副産物として重要な事柄は、その後の風食管理のために合衆国政府農務省に土壌保全局 (the Soil Conservation Service(現: the Natural Resource Conservation Service))が創設されたことである。この部局は農民が行う土壌保全事業の遂行、風食制御のための新しい方法の試行等を援助している。風食に関する他の重要な政府部局は農務省 (USDA: United State Department of Agriculture)の the Agricultural Research Service である。この部局の役割は低価格の土壌保全技術を開発し、試行し、農民にその技術を移転することにある。Soil Conservation Service の重要な刊行物は 1964 年に発行された “A guide for wind erosion control on cropland in the Great Plains States” と 1988 年に発行された “the wind erosion chapter of the National Agronomy Manual” である。

3. 2. 3 最近の動向

砂塵嵐は間欠的に発生する。グレートプレーンズにおける砂塵嵐の年間の発生は風速、表土の被覆状況、表土の湿潤状態など、環境要因の季節的な変化によって異なるが、ピークは春期にある。コロンビア高原では秋に、合衆国南東部では冬期後半から春季前半の表層に作物が無く、土地は耕され、降雨の無い強風が吹く季節にピークがある。1 日間では温度が高くなる午後に砂塵嵐が発生することが多い。乾燥した裸地の場合、砂塵嵐の濃度は風速 4 m/s 以上で日平均風速に明らかに関係している。

旱魃は土壌の湿潤度、作物の生育、収穫後の残存枝葉の量に影響し、表土の流失の可能性を高める。旱魃の年の表土流失量は湿潤な年の 11~6100 倍と推定されている。アンデルポーバレーにて旱魃であった 1990 年と 1991 年に発生した風食は異常に激しかった。その理由は、以前に何年か続いた旱魃によって自然の植生が枯死し、多くの農場が耕作を放棄し、耕作から羊の飼育に農業が転換していたことなどにある。

気候変動は耕地からの砂塵発生に大きな影響を与えない。しかし、農作業自体が砂塵の発生に重要な要因である。1950 年代中頃の旱魃はダストボール時代の旱魃より長く、激しかった。しかし、砂塵嵐による問題は比較的厳しくはなかった。地表面が乱されていなければ、強風は風食発生の主要因とはなり得ない。

4 風食の原因

風食に影響を及ぼす要因は現地の土壌条件 (土粒子の粒径と粒径分布、土の粘着性、耕地の幅、表層の湿潤度などによって定まる)、風の強度 (気候、天気、地形、風上側にある防風構造物などによって定まる)、地表面の被覆状況 (植生の特性によって定まる) などである。土の耕し、作物の植付けと収穫、灌漑、耕地幅の変更、栽培作物の変更、収穫後に残す茎・枝葉の量など人間の行動が風食発生を増長したり、減じたりする。風によって移動する土粒子は浮遊、跳躍、転動・匍匐の運動形態で移動する。粗い土粒子は跳躍、転動・匍匐で移動するが、移動距離は短く、元の場所の近くに堆積し、場合によっては元の場所に吹き戻される。しかし、微細な土粒子は砂塵となって空中を浮遊し、遠くに運ばれ元の場所に戻ることは無い。

4. 1 農作業

多様な農作業があるが、農作業自体が地表面の状況を変え、砂塵発生の可能性を高める。砂塵発生の可能性を高める農作業は、耕し、均し、雑草除去、種蒔、施肥、刈取り、切断、野焼き、堆肥埋め込み、除草剤散布などである。栽培のための準備農作業と収穫作業と比較すると、全農作業の67%は準備作業であり、33%が収穫作業である。しかし、発生する砂塵の82%は準備作業から、残り18%が収穫作業からと推定されている。準備作業から砂塵の発生が多いのは、準備作業では土と農機具の接触が多く、また準備作業は土の湿潤が少ない時に為されるからである。栽培する農作物によって発生する砂塵の量が相違するのは、栽培する植物の成長特性（植物の含水量と生産量、収穫の時期）と栽培に必要な農作業の種類とその量に依るものである。

4. 2 放牧

合衆国には約1億2百万頭の牛・子牛が飼育されており、約9百万の牧場・飼育場がある。馬と羊の飼育は少ない。しかし、羊の放牧は地表面の被覆植生に与える影響は大きい。放牧は植生の高さを小さくし、地表面近傍での減風効果を低める。家畜の踏みつけは地表面を乱し、微細な土粒子を大気面に曝し、結果として地表面は風食を受け易くなる。砂塵は放牧地・牧場からも発生するが、これらについての研究、情報はほとんど無い。しかし、数少ない研究によれば、放牧地・牧場から発生する砂塵量は耕地から発生する量に比べてはるかに少ない。

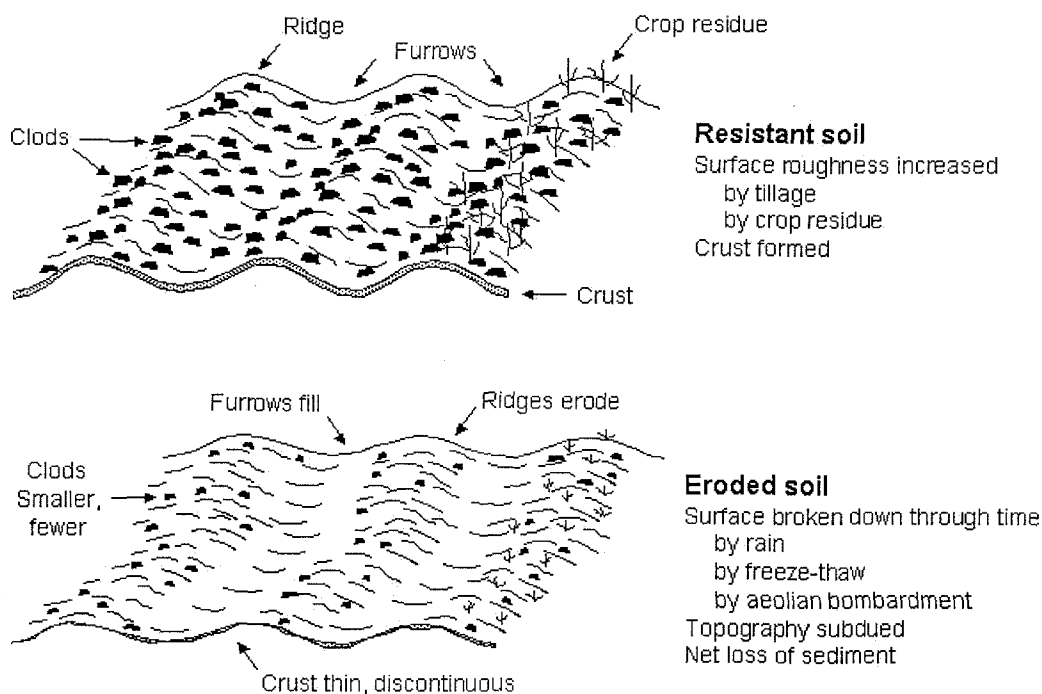
4. 3 耕地の放棄

人口増加、水資源需要増加、灌漑コストの高騰などにより、休耕地や耕地の放棄が増加している。これらの土地では背丈の高い植物の生育を欠き、土地管理がおろそかになり、結果として砂塵が発生し易くなる。乾燥地におけるこれらの土地に植生を再生することは難しい。地表面は1年生の種の生育に適した状態に人間によって改造されており、1年生種は周期的に枯死し、風食を受け、多年種が生育し難く成っているからである。これらの土地はまた放牧地として使用されたり、オフロードカーが侵入したり、他の人間の行動によって地表面が乱され、植生の再生が妨げられる傾向がある。

4. 4 耕された地表面からの砂塵の発生

土の風食の受け易さ（感受性）に影響する土の特性は、粘土や有機物の含有量など土の本質的特性、および耕された後の地表面の凹凸、土塊の大小、空中に曝らされている土の粒度分布などの動的な特性に関係する。耕された後の地表面の高低差あるいは凹凸は使用する農機具やトラクターの車輪により、大小があったり、方向付けられたり、あるいは方向付けられなかったりする。乾燥した土の粒度分布は風食感受性の一つの指標となる。粒径が0.84mm以上の鉱物は一般的には風によって移動はしないと考えられている。しかし、粒径0.2mm程度の土粒子は風によって移動する。降雨は地表面に地中にある土より多少堅い薄い殻を作り、風食を受け難くする。地表面にある土塊や表層は雨滴の衝撃、凍結－融解の風化作用を受け、破壊され、小さくなりより風食を受け易くなる。土塊や表層は砂塵嵐の中で落下する土粒子の衝撃で破壊されたり、乱されたりする。微粒子の粘着力は風の揚圧力に対して抵抗があるが、跳躍している砂粒子の着地衝撃によって容易に失われる。砂塵嵐が発生しているとき、地表面から空中に飛散する土粒子のかなりの量は地表面に落下する土粒子の衝撃によって生じている。風によって畝は削られ、溝は埋められ、地表面は平らになり、より風食を受け易くなる。地表面は1回風食を受けるとさらに風食を受け易くなる。風食を経験した地表面は前回より小さい風速で前を上回る風食を受けることがある。図－2は風食に抵抗力のある地表面と風食を経験した地表面の模式図である。

土地の耕し方と栽培する作物の種類は風食感受性に影響する。冬小麦畑の土壌に含まれている0.84mmより大きい土粒子の量はトウモロコシ畑や大豆畑より多い。大豆畑は風食を受け易い。



図－２ 風食に抵抗力のある地表面と風食を経験した地表面の模式図

5 風食量の推算

5.1 風食量推算式 (Wind Erosion Equation) の開発

1950年代に風食量の推算のための推算式が Chepil と彼の共同研究者によって発表された。その後、推算式は何度か修正改善され、現在その推算式は Wind Erosion Equation (WEQ) として呼ばれている。WEQ は現地の条件を用いて現地の風食量を推算する道具として、耕した後の地表面の粗さ、植生の被覆度、防風構造物の特性、風食を減ずるための農場の幅・風向きに対する角度などを決定する指針として、設計されている。WEQ は合衆国において風食量推算のための主要な推算式として使用されており、幾つかの国家的調査に使われている。特に、WEQ は耕地管理方法の評価をするのに有効である。WEQ は風食量の推算方法として現在世界中で使用されている。WEQ は式 (1) で示される (Chepil and Woodruff 1963)。

$$E = f(I, C, K, L, V) \quad (1)$$

ここに E は風食量 (ton/acre/year)。 I は粒径が 0.84mm より大きい土粒子の量の % から定まる侵食指標。 C は現地の風速、現地の平均的地表面湿潤度、日照地点の気候から定まる無次元風条件指標。 K は平均的な土塊の大きさ、畝の高さから定まる地表面粗度。 L は主風に曝露されている地表面の最大長さ。 V は植生の種類、量、成育方向などから定まる植生被覆指標。要因 I, C, K, L, V の決定は複雑で容易ではない。各々の要因は相互に関係し、決定には多くの図表と試行錯誤を必要とする。その為、計算図表、計算モデル、コンピューターモデルが開発されている。

WEQ はもともと一様で平坦な大面積の耕地から流失する 1 年間の平均的な風食量を算定することを目的としている。従って、WEQ は次のような問題を含んでいる、1) ある一定の長期間を対象としているため、ある特定の短期間の砂塵嵐に適用できない、2) 耕地の形状、土の風食感受性などの時間的空間的変動が考慮されていない、3) ある特定の日照地点に基く気候係数を使用していること、4) 寒冷な地域における凍結－融解作用、降雪などが考慮されていないこと、5) 風向に直角な方向の畝の高さのみで地表面の粗度を表現していること、6) 植生被覆度指標は風洞実験に基いており、現地実験に基いていないこと、などである。それ故、WEQ の使用における修正が試みられ、1) 期間変動への対応、日風食損失量の推算方法、2) 最近までの幅広い大量のデータによる C の補正、3) 収穫後の残存枝葉、栽培作物の成長、異なった作物の混植の効果などを考慮した V の補正、4) 耕した後の時間経過を考慮した I の補正、などがなされている。

5. 2 他の風食量推算方法

USDA, Agricultural Research Service は Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) と呼ばれている新しい風食量推算式を開発した。このモデルは風食量を定める要因として、耕地の規模・形・主風に向対する傾き、土の特性、栽培作物の種類、収穫量、収穫時の作物の高さと茎の数、農作業の種類とその量、灌漑の割合と水量、防風施設の高さ・密度・間隔・主風向に対する傾き、近隣山地の傾き、などが取り入れられている。このモデルは気象条件、耕し・埋め込み、などによる地表面残存植物量の減少を考慮することが出来るし、また耕しによる地表面粗度の変化、降雨や灌漑による地表面粗度の減少にも対応できる。

風食量を推算する他の計算モデルとして、Wind Erosion Prediction System (WEPS), がある。このシステムの特長はパーソナルコンピューターと既存のデータベースを使用することを意図して開発されていることにある。このシステムは、1) 実際の侵食過程のシミュレーション、2) 現地で検証されていない条件の外挿、3) 1回の砂塵嵐による侵食量の算定、4) 砂塵嵐の発生確率の予測、5) 現地で新たに作業があった場合に生じる計算要因変化の推定、6) 風食の時間的空間的変動の予測、が可能である。WEPSは浮遊、跳躍、転動・匍匐による侵食量を個々に計算することが可能である。この事実は耕地外に生じる問題の推測に有効である。WEPSは風に対する地表面の侵食感受性を日あるいは時間毎に補正しながら侵食過程をシミュレートするシステムである。図-3にシステム構成を示す。システムはユーザーインタフェース、メインルーチン、4つのデータベース、7つのサブモデルから構成されている。

WEPSに関する技術解説書は公刊されていないが、USDA, Agricultural Research Service, Wind Erosion Research Unit のウェブサイトから得られる。

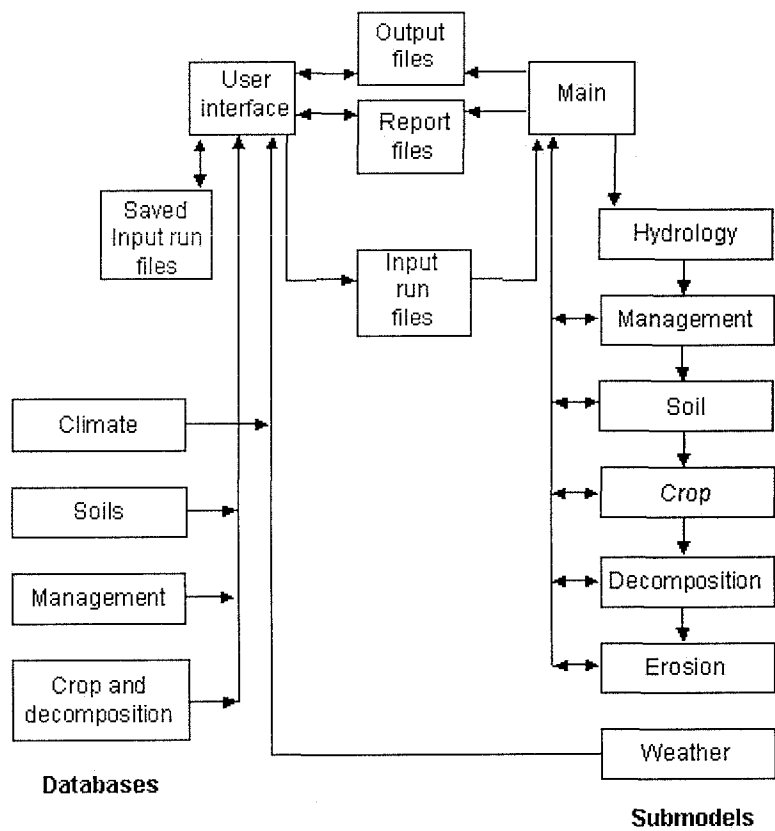


図-3 WEPSシステムの構成

6 風食、砂塵嵐から発生する問題

6. 1 土壌、植物、水域への影響

風食は土壌の保水能力を減じ、土壌中の栄養分を減じ、土壌構造を悪化させ、結果として収穫量の低下をもたらす。砂塵は植物を摩滅し、植物を埋め、太陽光を遮る。砂塵の堆積は貯水池の貯水量を減じ、水路や排水路を塞ぎ、水生生物に悪影響を与え、レクレエーション水域を汚濁し、砂塵に含まれる肥料分や除草剤は水質を

汚染し、水処理コストを高め、上水道システムに損害を与える。

6. 2 人体、健康への影響

浮遊する砂塵は人間の健康を損ねる。砂塵による健康障害には次のようなものがある。皮膚の炎症や病気、目の炎症、動悸、種々の呼吸器系の病気（喘息、肺気腫、肺繊維症など）、アレルギー、肺癌と皮膚癌へのリスク、などである。人間の呼吸器系は $10\mu\text{m}$ より大きい粒子を効果的に捕捉するが、粒径がそれより小さくなるほど捕捉が出来ない。合衆国政府、環境保護局（Environmental Protection Agency, EPA）は大気保全基準（National Ambient Air Quality Standards）を定めているが、その基準指標に $10\mu\text{m}$ 粒子の大気中濃度（ PM_{10} ）を用いている。EPA 基準は1日間の PM_{10} 濃度が $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ を、一年間の日算術平均濃度が $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 超えないことを求めている。カルホルニャー州基準は1日の PM_{10} 濃度が $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えない事を求めている。以上は砂塵に関する基準であり、車の排気ガスや排煙に関する微粒子の基準ではない。

6. 3 気候への影響

対流圏に浮遊しているエアロゾルのかなりの量を砂塵が占めている。砂塵は熱の輻射に関与し、局地的な気候に影響を及ぼしている。砂漠からも砂塵が発生しているが、むしろ砂漠周辺の人間の活動がある非自然的な状況にある地域から発生する砂塵の量が多い。アフリカやアジアにおいては砂塵による気候への影響は深刻である。北アメリカの砂塵は主としてグレートプレーンズから発生しているが、その気候への影響はアフリカやアジアにおけるほど深刻ではない。しかし、グレートプレーンズから発生している砂塵雲は局地的な天気にも深刻な影響を与えている。砂塵と気候との原因・結果の相互関係は複雑で未だよくわかってはいない。

7 風食制御法

風食を防御する方法は幾つかある。それらは、1) 防風構造物、2) 栽培作物の選択と収穫方法、3) 耕し方、4) 農機具と農機具使用法の改善、5) 地表面処理、などである。

7. 1 防風構造物

防風構造物に関する文献は多い。文献は数値シミュレーション、風洞実験、現地観測など多岐に渡っている。防風構造物には樹木による防風林と人工的な障害物であるフェンスがある。防風林は植林された林と元々森林であった土地を耕地に転換するとき防風林として一部を残した林がある。防風林は風速、風に晒される土地面積、風に晒される時間、風食糧、跳躍によって発生する砂塵、などを減ずる。防風林はその他に、防雪、耕地の防御、野生生物の生息地として種の保全・多様性の保持、局地気象の緩和（旱魃へのリスク減少）、などの効果がある。防風林の長所の一つはその耐久性にある。防風林の効果は昔から理解されていた。グレートプレーンズでは早くから防風林が植林されており、政府は100年以上に渡って造林の援助をしている。今では防風林はグレートプレーンズの風景の重要な要素となっている。1930年代、1940年代に造林された防風林の多くは現在必要と考えられている幅より広い。現在では1列の植林が普通になっている。2列から5列の植林は野生生物の保存、耕地の防御に使用されている。防風林の立木の高さ、植付け間隔、枝葉の繁茂空隙が減風、風食防止に影響する。防風林に直角に風が吹く場合、防風林の効果が期待できる範囲は立木の高さの約30倍程度である。平均的な防風林では風下側立木高さの約10倍の範囲では60–80%、20倍の範囲では20%程度減風する。防風林に使用する林木としては、落葉が無く年間を通じてほぼ同程度の防風効果がある針葉樹が落葉のある広葉樹より良い。木材やネットを使用したフェンスは防風林と同じ減風機能を持っている。フェンスは防風林が生育するまでの時間的余裕が無い場合に使用される。フェンスは設置時に多くの労働と材料が必要であるが、設置後直ちに効果を発揮し耐久性がある。

7. 2 栽培作物の選択と収穫方法

単位高さ当りの茎、葉、果実の数は地表面近傍の風の流れに影響する。栽培する作物の種類は地表面の土の状況に影響する。収穫後に残された茎、葉の量、高さ、残存方向は地表面に作用する風の力、地表面の湿潤度

に影響を及ぼす。結果として、栽培作物の選択と収穫方法は風食感受性に影響を持つことになる。南テキサス高原では残留物の少ない綿花から残留物の多いとうもろこしに転換している。耕作放棄耕地や休閑地では非換金作物を栽培し地表面を被覆することも行われている。

7. 3 耕し方

耕地の耕しは砂塵発生の可能性を高める。しかし、耕地が耕されるとき、大きな土塊が地表面に形成され飛散しやすい微細な土粒子は土塊の下に埋め戻され砂塵の発生は抑止される。耕しによって地表面に畝と溝が形成されれば地表面の粗度が大きくなり、跳躍している土粒子を捕捉し、砂塵量を減ずることが出来る。荒く耕した大きな畝と溝は地表面近傍の砂塵量を 93%、1 m の高さの砂塵量を 24-33% 程度減じ、砂塵発生限界摩擦速度を 45 cm/s から 65 cm/s に高めたというドラマチックな事実が報告されている。しかし、この方法は収穫後に栽培作物残留物を多く残す方法に比べて望ましい方法ではない。この方法は残留物を多く残せない半乾燥地の耕地に適当な方法である。

収穫後、作物が栽培されていない期間の風食を防止するために、栽培作物の残留物を十分に残し、耕さないでそのまま放置するという、保全耕し法（conservation tillage）と呼ばれる方法がある。二次的な耕しをしないことにより、耕地にトラクターを入れる回数を減ずることができ、風食への抵抗力を増強する。保全耕し法の利点は、1) 流失土砂の減少、2) 土壌への有機物供給、3) 収穫されなかった穀物、放置残留植物による野生生物生育地としての効用、4) 農作業減少による燃料使用量の減少、結果として炭酸ガス放出の減少、などがある。1993 年までは、保全耕し法は増加の傾向があった。その後はあまり変動が無い。1996 年の時点で全合衆国の耕地の約 36% に保全耕し法が行われている。

7. 4 農機具と農機具使用法の改善

使用する農機具と作業法を改善することで砂塵の発生を減ずることができる。市販されているアーモンド収穫機の簡単な改造で発生する全砂塵発生量を 1/9、呼吸器系疾患に関係する微細な砂塵の発生量を 1/6 に減じた報告がある。トラクターの運転スピードは砂塵の発生に大きな影響を与える。低スピードの運転は砂塵の発生を効果的に減ずる。太陽光の少ない湿潤度の高い早朝あるいは夕方に農作業をすることが砂塵の発生を抑える方法でもある。

7. 5 地表面処理

風速が 18 m/s を超えた時、散水は砂塵の発生を阻止する効果を発揮する。農作業時に散水をすれば砂塵の発生を抑えることができる。しかし、散水の効果は短時間で散水した水が乾燥すれば、その効果は失われる。パウダー、ポリマー、動植物性製品などの多くの表面処理剤がある。しかし、一般に耕地に使用するには高価過ぎる。1971 年の調査では、1 エーカー当りの表面処理の費用は 10-50 ドルであった。石油系の表面処理剤があるが、これらは耕地への使用は適切ではない。

8 土地管理改善への政府の奨励策

合衆国と州政府は農民が環境に優しい農業に換えることを援助するための奨励金、教育プログラム、積極的な援助を用意している。農民が風食の生じ難い耕作法を採用するかどうかを決定する最大の要因は経済性である。例えば、防風構造物の建設費は減税の対象となる。農務省、資源保護局（Natural Resources Conservation Service）は農民や牧場経営者に分担金や補助金が支給できる多様なプログラムを用意している。土壌保全・水環境保全・資源保護などへの取組、連邦及び州政府の環境保全を遵守する土地所有者、費用効果のある農業システムへの転換、などが対象となる。三つの法律、the Soil Bank Program of the 1956 Agricultural Act, the Conservation Reserve Program of the 1985 Flood Security Act, the 1990 Farm Act がある。これらの法律は、休農、休農地の土壌改善、地表面の乱れの少ない耕し方の利用、水食・風食を減ずる収穫後の残存植物の利用、などに経済的援助を与えている。

9 情報源

本稿は文献調査に基づくアメリカ合衆国における耕地の風食問題の概略である。本稿は選ばれた約 150 編の文献調査結果である。風食研究に関する文献は合衆国以外にも膨大にあるが本稿では参照していない。

耕地の風食に関する文献は, Agronomy Journal, Journal of Soil and Water Conservation, Journal of the Soil Science Society of America, Soil Science, and Transactions of the American Society of Agricultural Engineers に多い。耕地の風食に関する研究に貢献し, 本稿で参照した主な研究者は D.V. Armbrust, J.D. Bilbro, W.S. Chepil, H. Clausnitzer, D.W. Fryrear, L.J. Hagen, L. Lyles, E.L. Skidmore, J.E. Stout, N.P. Woodruff, T.M. Zobeck らである。Journal of Geophysical Research は耕地の風食以外の風による土砂移動に関する文献のよい情報源である。その他州政府, 合衆国政府が農業従事者のために用意した文献類は多い。これらの文献は本稿では参照していない。

Bibliography of Aeolian Research (<http://www.csrl.ars.usda.gov/wewc/biblio/bar.html>), USDA, Agricultural Research Service, Wind Erosion Research Unit at Kansas State University. のウェブサイトは風による土砂移動に関する文献の良い情報源である。

本稿では約 150 の文献を参照, 引用しているが紙面に限りがあるので全部は記でない。代表的な幾つかの参考文献に記しておく。参照, 引用した全文献を知りたい方は著者に直接請求下さい。

謝辞

We would like to express our appreciation to Mrs. Ted M Zobeck and John Tatark of the Agricultural Research Service, USDA, and Dr. Nancy L. Jackson, New Jersey Institute of Technology, for their considerable assistance and advice.

本研究は平成 13 年度日本大学学術助成金, 国際総合研究 01-003, 「国土侵食防止についての研究」によるものである。記して著者らは関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- Armbrust, D.V., Dickerson, J.D., Skidmore, E.L. and Russ, O.G. (1982) : Dry soil aggregation as influenced by crop and soil tillage. *Journal of the Soil Science Society of America* 46: 390-393.
- Bilbro, J.D. and Fryrear, D.W. (1985) : Effectiveness of residues from six crops for reducing wind erosion in a semi-arid region. *Journal of Soil and Water Conservation* 40: 358-360.
- Chepil, W.S. and Woodruff, N.P. (1963) : The physics of wind erosion and its control. *Advances in Agronomy* 15: 211-302.
- Clausnitzer, H., and Singer, M.J. (1996) : Respirable-Dust Production from Agricultural Operations in the Sacramento Valley, California. *Journal of Environmental Quality* 25: 877-884.
- Fryrear, D.W., Bilbro, J.D., Saleh, A., Schomberg, H., Stout, J.E. and Zobeck, T.M. (2000) : RWEQ: Improved wind erosion technology. *Journal of Soil and Water Conservation* 55: 183-189.
- Hagen, L.J. (1991) : A wind erosion prediction system to meet user needs. *Journal of Soil and Water Conservation* 46: 106-111.
- Stout, J. E. and Zobeck, T. M. (1996) : The Wolfforth Field Experiment: a wind erosion study. *Soil Science* 161: 616-632.
- Zobeck, T.M. (1991) : Soil properties affecting wind erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 46: 112-118.
- Tegen, I. and Fung, I. (1995) : Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research* 100 (D9): 18,707-18,726.
- Tinus, R.W. (ed.) (1976) : Shelterbelts on the Great Plains. Publication 78, Great Plains Agricultural Council.