2012 年日本第四紀学会学術賞受賞記念論文

第四紀の風成塵・レスについて

成 瀬 敏 郎 *

これまで著者は、乾燥地域や氷河末端から風で運ばれる風成塵とその堆積物であるレスについて、日本列島をはじめ、中国、韓国、ヨーロッパ、イスラエル、アメリカ合衆国、ニュージーランドなどのレス地帯を調査し、レスの分布、研究史、堆積時期、気候変動とのかかわりを研究してきた。本論では、レスの研究史、レスの分布と堆積時期、風成塵の同定に ESR 酸素空孔量（以下、酸素空孔量とする）分析が有効であること、風成塵・レスの堆積量や粒径などが過去の風の強さを復元するのに有効であること、完新世土壌の母材に占める風成塵の役割の重要性について述べた。さらに中国と韓国の旧石器編年・対比にレス-古土壌による編年法が有用であること、日本列島において MIS 6 のレス層に前期旧石器が包含されていることを述べた。

キーワード：風成塵，レス，ESR 酸素空孔量，古土壌，第四紀

I. はじめに

山陰では、冬季から初夏にかけて雪や黄砂が降ると窓ガラスが淡黄褐色の泥で汚れることが多く、土壌中に黄砂が多量に混入しているのではないかと考えていた。大学で第四紀学を学ぶようになって、土壌母材の起源について興味を持ち始め、岩石や火山灰の風化物に加えて、風で運ばれた細粒物質-風成塵-もまた重要な母材ではないかと考え、関連文献を読んで本格的な研究に備えた。

やがて日本海や東シナ海の沿岸各地に分布する古砂丘の研究を行うようになって、各地の古砂丘砂層中にシルトを多く含む数枚の古土壌層が挟まれていることに気が付いた。当時は、このような古土壌の主母材が火山灰風化物や亜熱帯風化物、あるいは砂丘砂そのものがレスという考えがあった。しかし、古砂丘の多くが最終間氷期 (MIS 5e) 以降のものであったので、その間に火山灰の重鉱物が痕跡も残らないほど風化することや、最終氷期中に亜熱帯風化期が何度も存在すること、砂サイズの粒子をレスと定義づける考え方などに疑問を感じた。そこで、砂丘砂と古土壌の検討にも文献研究で知りえた風成塵の考えを取り入れることにした。

本格的な風成塵の研究は、1980 年に鳥取県で開かれたペドロジスト懇談会で偶然に岩手大学農学部の上上克

弘さんと出会い、私の考えを話したことに始まる。そして北九州で採取した古土壌試料を砂 (200~20 μm) とシルト (20~2 μm) 以下に篩い分けて分析してもらったところ、砂が現地物質、シルト以下の物質が風成塵という分析結果が得られた。

それをきっかけに本格的な風成塵の研究を開始し、井上さんが土壌化学的分析を、私が層序学的分析を担当とした (成瀬・井上, 1982, 1983)。調査地域は日本各地から始まり、韓国、中国、トルコに及び、やがて世界各地のレス地帯に拡大していった。

さらに、風成塵についての考えを確実なものにするために、レスに含まれる微細石英 (10 μm 以下) の酸素同位体比分析を行った (Naruse *et al.*, 1986)。その結果は、日本各地に堆積する古土壌中に、遠隔地から風で運ばれた細粒物質-風成塵-が多く含まれるという事実であった。その後、分析手法がより簡便な ESR 分析法の存在を知り、大阪大学の池谷元同さんや河野日出夫さん、岡山理科大学の豊田 新さんなどと共同で研究を進めるようになり、同法で風成塵の給源を解明することに専念した (成瀬ほか, 1996)。また、北海道大学の小野有五さんや国際日本文化研究センターの安田喜憲さんをはじめとする多くの方々と風成塵の堆積量と気候変動の関係を解明するために、韓国、中国、日本各地の泥炭地

2013 年 11 月 28 日受付。2014 年 1 月 25 日受理。

* 兵庫教育大学名誉教授 〒693-0032 鳥根県出雲市下古志町 598-1. E-mail : rsj20592@nifty.com

においてコア試料を掘削・分析し、両者の関わりについて研究を進めた。

さらに、福井県立大学の北川靖夫さん達と日本各地の土壤に含まれる微細石英の給源について研究を行ったほか、同志社大学の松藤和人さんや林田 明さんなどとともに中国や韓国のレス・古土壤と旧石器の調査を行い、旧石器編年研究を進めた。そして退職後に出雲市でレス調査を継続している途上で MIS 6 のレス層から前期旧石器が発見され、日本列島に人類が渡来した時期を解明できる可能性を見出した(松藤ほか, 2013)。

II. レスの研究史

レス (löss) は、ライン地溝帯に分布する細粒のシルト質土を指している。このレスが研究対象になったのは 1820 年代であり、学術用語としての löss は Leonhard (1824) が最初に使用している。彼はハイデルベルク近くのライン河谷に堆積する未固結でシルトサイズの土壤をレスと定義した。今日、私たちが使用している英語表記の loess は、Lyell (1834) によって命名されたものであるが、彼はライン地方や北米のレスを水成堆積物と考えていた。後に、Virlet-d'Aoust (1857) がレス風成説を提唱したが、本格的な風成説が誕生するのは Richthofen (1877) の中国黄土研究による。

風成塵・レスが過去の気候変動を反映したものとする研究が 20 世紀初期に始まり、レスが主に氷期に堆積し、古土壤が間氷期に生成したという考え方が広く受け入れられるようになった。その結果、19 世紀末から本格的なレス研究がヨーロッパ、南北アメリカ、中国、ニュージーランドで進むようになった。

1930 年代になると、今日の知見とあまり変わらないほどの精度をもつレスの世界分布図が発表されるなど、20 世紀前半にレス研究が急速に進展した。一方、中国黄土高原でも Teilhard de Chardin and Young (1930) によって、^{マラン}馬蘭黄土とその下位の紅色土が第四紀の風成堆積物とその風化物として認識されるようになった。

1970 年代になると古地磁気測定法がレス研究に導入され、ヨーロッパ各地でレス・古土壤の対比・編年が確立されるようになった。その結果、90 万年前頃から始まる約 10 万年周期で繰り返すレス-古土壤シークエンスが深海底コアの酸素同位体比から得られた気候変動周期にはほぼ一致することが知られるようになった。

中国の黄土高原では、1980 年代に洛川黄土が、1990 年代には^{ばらばら}宝鶏黄土が黄土層序の模式地になり、32 枚にも及ぶ古土壤層によって黄土が細分され、約 260 万年

間のレス-古土壤編年が行われるようになった。そしてヨーロッパのレスと同様に中国黄土の編年もまた深海底コアの研究結果に対比可能であることが明らかになった。

1990 年代には、グリーンランド氷床コア GRIP や南極氷床コアによる高時間分解能の気候変動が解明され、従来の気候変動観に変革をもたらした。中国黄土高原でも、黄土の粒度変化に着目した高時間分解能のモンスーン変動が解明された。

こうした研究を通じて、風成塵・レスが寒冷な氷期に多く堆積し、温暖な間氷期や後氷期において減少したことが知られ、レスが第四紀の高時間分解の気候変動を明らかにできる指示物のひとつであることが認識されるようになった(町田ほか, 2003)。

日本や韓国では 1980 年代に風成塵・レスの研究が本格的に行われるようになり、古砂丘砂層に埋没するレスや火山灰層の間に埋没するレス、更新世台地・石灰岩台地・玄武岩台地の上に堆積するレス質土壤などが各地で報告され、土壤・古土壤の母材として風成塵が重要物質であることが認識されるようになった(岡田, 1973; 成瀬・井上, 1982; 井上・成瀬, 1990; Inoue and Naruse, 1991; 溝田ほか, 1992; 鴈澤ほか, 1994)。

III. レスの分布

風で運ばれる細粒物に風成塵、東アジアでは黄砂・黄風などの名称が使われ、地表に堆積して層を成すものをレス・黄土と呼ぶ。レスは陸成でシルトを主体とする風成堆積物であり、主に石英、長石、雲母、粘土鉱物からなり、レスの給源地に石灰岩などが分布する場合は炭酸塩を含む(Pye, 1987)。

風で運ばれた風成塵・レスは陸上だけでなく、海洋底にも広く分布している。図 1 に示したレスの分布域は地球の陸地面積のおよそ 10% を占める。このレスの分布図はレスの厚さが 1 m 以上の地域を示したものであって、これより薄いレスは、図中に示した範囲以外にも広く分布している。例えばウクライナではレス分布域よりもレスを主母材にするチェルノーゼムの分布域のほうが広いのは上記の理由による(成瀬, 2009)。

レスの主な給源は氷河末端と砂漠である。氷河による岩盤の研磨作用によって生じた岩粉が氷河末端の扇状地に堆積した後、強い偏西風によって風下に運ばれて広域に堆積する。砂漠では沖積地、山麓地、内陸湖岸に堆積する細粒物質が風成塵になることが多いが、砂丘地で砂粒の塩類風化、風成粒同士の衝突による破碎作用などに

図 1 世界の陸上・海底のレスと氷床・砂漠の分布 (成瀬, 2009)

よって生じるシルトも風成塵の材料になる。このほか山岳地域では凍結破碎作用、急流を流れる河川水による破碎作用などによってシルトが生産される。

風成塵は、とくに氷期や完新世冷涼期における氷河地域や周氷河気候地域で凍結破碎作用が活発化し、砂漠の多くも拡大したために多量に生産され、さらにこの時期に偏西風や貿易風が強くなったので、世界各地に運ばれて厚いレス層を形成した。

レスの分布域は、ユーラシアでは西経 5° のフランス北部から東経 140° のオホーツク海沿岸まで、北緯 45° ~ 60° の範囲に帯状に広がる。この地域のレスは、スカンジナビア氷床をはじめとする北極域の大陸氷床から岩粉が供給され、強い偏西風によって風下に運ばれたものである。このほかユーラシアでは、西アジアの砂漠、中央アジアの砂漠、中国の内陸砂漠などから運ばれた砂漠レスが北緯 25° ~ 50° に分布する (成瀬, 2006, 2007)。

これらのレスについて、Pécsi (1995) が作成したユーラシア大陸の主なレスの編年図などによると、レスの堆積開始は黄土高原では、おそらくヒマラヤ山脈とチベット高原の隆起によって内陸部の砂漠が拡大し始め、砂漠起源の風成塵が黄土高原に供給されるようになったからであろう。ほぼ同じことが中央アジアの砂漠地帯にもみられ、黄土高原よりも若干遅れてレスが堆積し始めてい

る。北米ではアラスカ州、ワシントン州、オレゴン州、アイダホ州の 4 州と、中西部、ミシシッピ川流域にレスが分布している。北米のレスは、ローレンシア氷床とコルディレラ氷床からもたらされた岩粉と、大平原の西部に分布する砂漠で生産された風成塵が北西風によって風下に堆積したものである。

ヨーロッパでは、オーストリア、チェコ、ハンガリーなどでレスの堆積が約 90 万年前から始まり、フランスやドイツなどでも同じ頃からレスの堆積が始まっている。それは 90 万年前頃から 10 万年周期で気候が変動するようになり、氷期の気温がいっそう低下するようになったために氷河が拡大し、氷河起源の風成塵が増加したからである。こうしたレス-古土壌編年は、古地磁気測定だけでなく、熱ルミネッセンス、OSL、ESR などの年代測定が加わることによって確立された。

氷期には極域の寒気団と低緯度側の暖気団との間の温度差が大きくなり、両気団の境界を吹く偏西風が強くなった。この強い偏西風によって氷河末端に堆積した岩粉が遠隔地に運ばれ、やがて地表や海底に堆積した。このため氷河レスは偏西風帯にそって帯状に分布し、それを母材にチェルノーゼムやプレーリー土などの黒色土が生成された。

一方、氷期には海面が低下して海洋面積が縮小し、海

面温度も低かったため、海面から蒸発する水蒸気量が減少した。このため風成塵の給源となる砂漠が拡大して、ここから供給された大量の砂漠レスが風下地域に堆積した。とくにサハラ砂漠で舞い上げられた風成塵はサハラダストとして知られ、その多くが北東貿易風ハルマッタンによって大西洋海域に運ばれたほか、サハラ南部のサヘルや、北部の地中海一帯にも運ばれ、地中海沿岸の石灰岩上に生成するテラロッサの主母材になった (Naruse and Sakuramoto, 1991 ; Inoue *et al.*, 1998)。

砂漠レスの研究はオーストラリアやイスラエルでは1950年代から行われていた。砂漠では砂嵐がしばしば発生し、周辺地域に大量の風成塵が運ばれることがすでに大航海時代から知られていたが、長い間、レスとして認められなかった。

IV. 東アジアのレス

東アジアにはレスが広域に分布している。中央アジアや中国内陸の砂漠から大量の風成塵が供給され、黄土高原では約260万年間に最大で層厚300m近い黄土が堆積し、風下にあたる韓国、台湾、日本にも堆積した。

日本列島には、南西諸島から北海道まで、アジア大陸や干陸化した大陸棚起源の風成塵が堆積している。風成塵は土壌・古土壌の主母材としても重要であり、土壌中の2:1鉱物が風成塵に由来すること、非アロフェン質黒ボク土が風成塵の影響を強く受けていることなどが指

摘されている (Inoue and Naruse, 1987, 1991)。そして周辺海域の底にも風成塵堆積物が広域に分布している (Irino and Tada, 2000)。

南西諸島では琉球石灰岩上に発達する島尻マージや国頭マージなどの土壌中に風成塵が多く混入しており (成瀬・井上, 1990)、喜界島では水天宮古砂丘中に複数枚のレスが埋没している (成瀬・井上, 1987)。鹿児島県ではシラス台地上に堆積する1.8万年前の古土壌の主母材になっている (成瀬ほか, 1994)。そして北九州、山陰、北陸、東北の沿岸では古砂丘中にも数層のレスが埋没する (成瀬・井上, 1983) ほか、台地上 (溝田ほか, 1992) や火山灰層の間にもレスが埋没している。

北海道では重粘土や泥炭層に風成塵が多く含まれている (鴈澤ほか, 1994 ; Yoshinaga, 1996 ; 北川ほか, 2003) ほか、日本各地に堆積する泥炭層にも風成塵が多く含まれる。しかし、韓国や日本列島の場合は、中国黄土高原と違って粗粒な現地物質と混合している場合が多く、純粋な風成塵が集積したレスは少ない。

V. レスの堆積時期

北半球の氷期が始まった約280万年前以降、4.1万年周期の氷期-間氷期が繰り返すようになり、図2に示すように約260万年前からユーラシアでは黄土高原、タジキスタン (Bronger *et al.*, 1998)、ウクライナのドニエプル川中・下流域で氷期にレスが堆積し、間氷期に古

図2 過去480万年間の気候変動とレスの堆積開始時期
酸素同位体比曲線は Pisias *et al.* (1995)。

土壌が発達するようになった。黄土高原では L_{33} 黄土が 260 万年前頃から堆積を開始し、以後、 L_{33} の上に厚い黄土層 $L_{32} \sim L_{10}$ が堆積した。

しかし、これ以前にもレス堆積時期が存在したのであり、黄土高原では L_{33} 古土壌の下に堆積する紅粘土も風成堆積物の可能性があると考え、北米のテキサス州やニューメキシコ州では、第三紀中新世末から鮮新世にかけて厚さ 110m もの非氷河性レスと薄い風成砂が堆積している (Gustavson and Holliday, 1999)。

続いて約 170 万年前からオーストリアのクレムスでレスが堆積し始めた。しかし、当時は氷期が短く、気温低下が小規模であったために氷河や砂漠の規模が小さかった。このため、そこから供給される風成塵の量も少なく、レスの分布範囲は限定的であった。

約 90 万年前以降になると、10 万年周期の気候変動、氷期の長期化・気温の著しい低下などによって、氷河や砂漠の規模が拡大した。このため氷河や砂漠から供給される風成塵が増加し、世界的にレスの分布範囲が拡大した。この時期に、北米では約 100~70 万年前からコロンビア高原でレスが堆積し始め、さらにローレンシア氷床の南端部やミシシッピ川流域にもレスが堆積するようになった。

レスは図 1 に示した地域のほかにも広域に分布しており、土壌、泥炭、氷床・湖底・海底堆積物中に堆積した風成塵の分布範囲から判断すると、きわめて寒冷であった MIS 2 において北半球のほぼ全域が風成塵の影響を受けたと考えられる。

東アジアでは、レスの分布範囲が拡大した約 90 万年前以降に、黄土高原では $L_9 \sim L_1$ が堆積し、東アジア一帯でも主に氷期にレスが堆積し始めた。やや寒冷な時期とされる MIS 5b と 5d にもレスが堆積し (下山ほか, 1989)、とりわけ MIS 2 と 4 にレスが広域に堆積した。当時のレスは、黄土高原をはじめ、韓国、日本列島の各地に分布している (成瀬, 2007)。

中国東北平原でも MIS 10 の L_4 が確認され、少なくとも約 35 万年前にはレスが堆積し始めている。東北平原では古土壌を変形させるインボルーションが発達し、アイスウェッジにレスが落ち込んでいることや、古土壌の初期磁化率が高く、レス層で低いことから、黄土高原のレスと同時期の氷期にレスが堆積し、間氷期に古土壌が発達したと考えられる (成瀬ほか, 2008)。

韓国では更新世段丘やペディメントの上に L_4 以降のレスが堆積し、図 3 のように地形面対比がレス-古土壌編年によって可能である。なお赤色 S_4 古土壌下には MIS

図 3 韓国のレス-古土壌編年と地形面の形成時期 (成瀬ほか, 2006)

レス欄: $L_0 \sim L_4$ はレス, $L_5?$ はレスの可能性がある層, 黒塗りは現成土壌, 灰色は古土壌, $L_5?$ 下の層は段丘礫層を示す。河成段丘・海成段丘・ペディメント欄: 黒塗部分は形成時期を示す。

12 に対比される L_5 が堆積する可能性があるが、まだ確定的ではない (成瀬ほか, 2006; Yu *et al.*, 2007)。

土壌侵食が著しく、風成塵堆積量が少ない日本列島のレスの厚さは薄く、更新世台地や石灰岩台地、玄武岩台地の上に累積する土壌、古砂丘の埋没古土壌、あるいは火山灰層の間に挟まるローム層などに多量に混入した層として広域に認められる。例えば、後述するように鳥取県倉吉市桜では約 30 万年前から風成塵が多量に混入した古土壌層が火山灰層の間に何層も認められる (成瀬ほか, 2005a)。

VI. レスと古土壌の特徴

レスの色調や風化程度は、平均気温や降水量の違いによって地域的に異なる。中国大陸の中西部および北部のレスは灰黄色であるが、降水量の多い中国東南部や韓国では風化が進んで淡黄褐〜黄橙色 (10YR~7.5YR) を呈し、日本列島では淡褐色である。

古土壌の色は中国東北部では黒味を帯びているが、南に行くにしたがって赤みを帯びる。例えば、古土壌のうち MIS 3 の古土壌は中国東北平原では黒色、中国東部では茶褐色、韓国では褐色を呈する。

MIS 5 の古土壤は MIS 3 のものよりも赤みが強く (7.5YR~10R), 南に向かうほど赤みを増す。例えばこの時期の古土壤は、北海道北部やシベリアでは 7.5YR~10YR, 黄土高原や中国東北平原, 北海道や東北地方では 5YR, 中国東部や韓国, 関東~九州では 2.5YR~5YR, 南西諸島では 10R を呈する。

MIS 11 の古土壤はさらに赤みを帯び、灰白色の網紋

状構造が発達する赤色土 S4 はレス-古土壤の層序関係を決めるうえで重要な鍵層である (成瀬ほか, 2008)。長江以南では MIS 11 から下部の古土壤は網紋紅土と呼ばれている。

韓国レスは、年降水量が 1,300 mm 以上で気温が高いために、黄土高原の黄土よりも風化が進んでいる。例えば、ソウルの東に隣接する徳沼のレス (北緯 37°35') と、ソウルの南 150 km にあり、黄海沿岸に位置する大川のレス (北緯 36°20') は、 $Mn+MgO : CaO+Na_2O : K_2O$ の三組成のうち、中国黄土よりも $CaO+Na_2O$ が減少しており、溶脱作用が進んでいる (図 4)。大川でレスの風化・溶脱が進んでいる理由は、大川は徳沼より海に近く降水量が多いためである (Yoon *et al.*, 2007)。日本列島に飛来する黄砂は黄土高原古土壤レスの組成範囲に近似しており、大気中を輸送する過程で CaO が酸性物質の中和に消費されるために、黄土高原の黄土よりもやや CaO が減少している。

VII. 風成塵の運搬と風

地表に堆積する 20~70 μm の粒子は地表付近を吹く 6~10 m/秒の風で舞い上げられて風成塵となり、やや遠くまで運ばれる。20 μm 以下の細粒物質は数千 m の上空に舞い上げられ、高層を流れるジェット気流によって遠距離に運ばれる。このため、風成塵の中央粒径値は風下に向かって細粒化し、砂漠に近い場所では 70 μm , 黄土高原では 10~40 μm , 日本列島では 3~15 μm , ハワイ諸島では 0.5~2 μm となる (図 5)。

風成塵を運搬するのは風であり、風成塵の給源とその

図 4 黄土高原と韓国のレス、および日本に飛来した黄砂の化学組成

Yoon *et al.* (2007) に加筆。

図 5 北太平洋をめぐるレス、遠洋性堆積物、風成塵などの中央粒径値 (成瀬, 2006)

堆積地、そして堆積年代がわかれば、過去のジェット気流、貿易風、偏西風などの挙動が復元可能である。現在と氷期では大気循環が異なり、風系も異なっていたと予想されるので、過去の風系を復元するためには風成塵の給源とその飛来コースを明らかにする必要がある。

風成塵の給源を求める方法のひとつに微細石英の酸素同位体比分析がある (Syers *et al.*, 1969 ; Mizota and Matsuhisa, 1985 ; Naruse *et al.*, 1986)。この方法は、石英の酸素同位体比の違いによって現地性石英と外来物質である風成塵を識別するものである。日本列島では現地性石英は 5~10%、風成塵石英の酸素同位体比は 15~17% であって、両者の識別は可能ではあるが、アジア大陸のどこから風成塵が飛来したのかを識別することは現在までのところ難しい。

このほか風成物質の産地同定については、電子スピン共鳴 (ESR) 法による石英の酸素空孔量 (成瀬ほか, 1996 ; Toyoda and Naruse, 2002)、ストロンチウム同位体 (Yokoo *et al.*, 2004)、ウラン系列 $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ (古川ほか, 2005)、石英の熱蛍光カラー画像 (TLCI) (鴈澤ほか, 1995) などが有効である。

Yokoo *et al.* (2004) は、黄土高原の黄土に含まれる酸難溶性鉱物の Sr-Nd 同位体組成が、風上に位置する砂漠の細粒物質や風下にあたる北西太平洋の風成塵・海洋底堆積物と同じであるので、いずれも砂漠から運ばれ

たものとした。そして風成塵の輸送過程で水溶性および酸可溶性鉱物が溶解し、残った酸難溶性鉱物が土壌に添加されたと考えた。

VIII. ESR 分析法による酸素空孔量測定

1. 東アジアのレス

ESR 分析法によって求められた酸素空孔量 (単位は 1.3×10^{15} spin/g) は石英の大まかな生成年代を示し、現地性の粗粒石英と、外来物質である微細な風成塵石英とでは数値が異なる。粗粒石英の酸素空孔量は現地に分布する岩石に含まれる石英の年代値と相関があり、微細石英はこれとは異なる値を示す。

中央アジアと東アジア各地で採取したレス堆積物のうち、最終氷期中の最寒冷期 MIS 2 に堆積した風成塵・レスに含まれる微細石英 (粒径 $20 \mu\text{m}$ 以下) は、東アジア大陸北方の先カンブリア系の分布地域、中国東北平原、黄土高原、韓国、日本列島の瀬戸内海~関東を結ぶ線以北において酸素空孔量が 10 以上の値を示す (図 6)。

このことは、MIS 2 にシベリア高気圧が優勢になったためにアジア大陸北方に広がる先カンブリア系の分布地域が極度に乾燥し、冬でも雪に覆われない砂漠が拡大したことと関係する。そして、シベリア高気圧から吹き出す北西季節風によって先カンブリア系の分布地域から運ばれた風成塵が、日本列島の瀬戸内海~関東を結ぶ線

図 6 中央・東アジアのレスに含まれる微細石英の酸素空孔量と古風系
Toyoda and Naruse (2002) に新たなデータを追加。

以北に堆積した (Ono *et al.*, 1997).

当時はポーラーフロントが瀬戸内海～関東を結ぶ地域に存在した可能性が高く、北海道の重粘土 (八幡ほか, 1997; 北川ほか, 2003) やローム (岡田, 1973; 鴈澤ほか, 1994; 吉永, 1995), 福井県の加越台地上の土壌 (Kitagawa *et al.*, 2005) など北方アジア起源の風成塵の影響を強く受けている。

一方、瀬戸内海から沖縄本島にかけての微細石英の酸素空孔量の値は 5.7~8.7 を示し、タクラマカン砂漠の値 6.6~8.2 に近似している。これは、現在の黄砂と同じようにタクラマカンやゴビといった中国内陸砂漠から風成塵が夏季亜熱帯ジェット気流によって運ばれた可能性もあるが、その理由については測定数を増やして確かめる必要がある。

宮古島以南の微細石英の酸素空孔量は 10 以上に高くなるので、この地域には中国中・南部の先カンブリア系の分布地域から冬季亜熱帯ジェット気流によって風成塵が運ばれたと考えられる。古川ほか (2005) も宮古島、北大東島、南大東島に分布する土壌のウラン系列を測定し、中国中・南部起源の可能性を示唆している。

大山東麓の鳥取県倉吉市桜の露頭では、氷期に対比される層に含まれる微細石英の酸素空孔量が 10 以上を示すものが多いので、氷期に大陸起源の風成塵が北冬季節風によって多量に運ばれ、堆積したことを示している (図 7)。

2. 大陸と大陸棚起源の韓国西岸のレス

韓国では大陸起源の風成塵のほかに、氷期に陸化した黄海や東シナ海の海底から運ばれた風成塵が加わる。済

図 7 鳥取県倉吉市桜露頭の火山灰・古土壌層序と ESR 値 (成瀬, 2006)

古土壌：網掛け部分は古土壌。7.5YR4/6 などの表記は色調を表す。

MIS：網掛け部分は間氷期、および重間氷期を示す。

州島では2万年前には風成塵の堆積量が $0.4\sim0.5\text{ g/cm}^3$ であったものが、完新世中期の約5,000年前になると 0.05 g/cm^3 に減少する(Yatagai *et al.*, 2002). 両者の差が8~10倍と大きいのは、氷期に大陸だけでなく陸化した黄海からもたらされた風成塵も付け加わったことが大きいと思われる。この海域の海底には黄河上流域から運ばれた物質が大量に堆積している。

一方、韓国北部の全谷里では粗粒石英の酸素空孔量が15.3であり、近隣に分布する先カンブリア系の石英の酸素空孔量値に一致するのに対して、レスに含まれる微細石英の酸素空孔量は $8.0\sim8.7$ である。同様に、中西部にある萬水里の微細石英の酸素空孔量は $7.8\sim9.2$ 、南西端部にある長洞里の微細石英の酸素空孔量も $9.3\sim10.3$ を示した(成瀬ほか, 2008)。西海岸に近いこれら3地点の値が低いのにに対して、東海岸に近い2地域のレスに含まれる微細石英の酸素空孔量は16.5と17.6であった(図6)。

このように、西海岸に近い3地点のレスに含まれる微細石英は、MIS 2, 4, 6の3時期ともに大陸から運ばれた風成塵だけであれば、酸素空孔量が15以上を示すはずであるが、 $7.8\sim10.3$ を示すのは、各ステージにおいて陸化した黄海海底から舞い上がった酸素空孔量の低い風成塵が多量に混入した結果と考えられる。

IX. 高精度な気候変動の指標としての風成塵・レス

世界各地の陸上堆積物や海底コアの分析によって、全球的に風成塵フラックスが氷期に増加し、間氷期に減少したことが明らかになっている(Ono *et al.*, 1997; 成瀬, 1998)。

黄土高原では粗粒黄土が冬季モンスーンの強い寒冷期に堆積し、細粒な黄土が冬季モンスーンの弱い温暖な時期に堆積しており(An *et al.*, 1991; Xiao *et al.*, 1995), 黄土中の石英もハインリヒイベント IRD 期に粗粒化したことが判明している(Porter and An, 1995)。

1980年代になると、グリーンランド DYE 3 コアに記録された新ドリマス期などの気候変動と風成塵堆積量の増減を解明した Dansgaard *et al.* (1989) の研究をはじめとして、多くの研究によって風成塵が最終的に極域に運ばれて氷床中に保存されること、風成塵が気候変動に敏感に反応する物質であり、高時間分解能の気候変動研究にとって優れた指標になることが指摘されている。

1. 南 極

過去42万年間のボストークコアの高精度研究によって、寒冷期に増加し、温暖期に減少する風成塵が古気候

変動復元の有効な指標になることが明らかにされた(Petit *et al.*, 1990, 1999)。

さらに東南極の標高3,233 m (南緯 $75^{\circ}06'$, 東経 $123^{\circ}21'$)において掘削された EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) Dome C のデータは、風成塵が過去74万年間にわたって $10^1\sim10^2$ 年オーダーの古環境変動を復元できる物質であること、古環境変動の指標物質のなかで、生物学的指標は気候変動との間に時間的なずれが生じるのに対して、無機物である風成塵は気候変動にすばやく対応することが明らかになった。そして大陸氷床や砂漠から供給された風成塵量は、この研究によって氷期に増加し間氷期に減少すること、氷期の風成塵量が間氷期よりも最大25倍も増加したことなどが明らかにされた(EPICA community members, 2004)。

2. サハラ沖

最終氷期にスカンジナビア氷床などから離流した海水が北緯 $40^{\circ}\sim45^{\circ}$ 以北の大西洋海底にもたらした IRD (ice-rafted detritus) 層は、6時期のものからなる(Heinrich, 1988)。この6時期に対応してサハラ砂漠上空を吹く北東貿易風ハルマッタン(高度1 km 以下)とサハラ大気層(SAL: Saharan air layer)(高度1~3 km)が強まり、サハラ風成塵が多く運ばれたことが大西洋底 MD03-2705 の37 m コアに記録されている(Jullien *et al.*, 2007)。

このコアから、約7万年前以降における風成塵量は MIS 1 で少なく、寒冷な MIS 2 や 4 で多く、MIS 3 でやや減少していること、新ドリマス期(YD)とハインリヒイベントに対応する LLE (low-latitude events) 1~5 期の寒冷期に増えたという結果が得られている。

こうしたサハラ中西部における風成塵の主な給源は、サヘル(セネガル、南モーリタニア、南マリ)、北・西サハラ(北西モーリタニア、モロッコ、西アルジェリア)、中央サハラ(北マリ、南アルジェリア)の3地域である。これらの地域にはセネガル川やニジェール川沿いの沖積地、ホガル高原などの山麓地、および内陸湖岸が広がっており、ここが主な風成塵の給源地になっている。これらの給源地は氷期に乾燥し、とくに LLE や YD に乾燥したために風成塵供給地になったとされる。

3. タスマン海

オーストラリア大陸とニュージーランドの間に位置するタスマン海の中央部、南緯 $30^{\circ}\sim45^{\circ}$ の海底で掘削した計6本のコアを Hesse (1994) が分析した結果、約40万年間にオーストラリア大陸の砂漠から運ばれた風成塵量($\text{g cm}^{-2}\text{ ka}^{-1}$)が氷期に増え、間氷期に減少したことが明らかになった。風成塵が最も多く運ばれた海域は氷期

と間氷期では異なり、氷期には北上(南緯 $30^{\circ}33' \sim 33^{\circ}$)、間氷期には南下(南緯 $33^{\circ} \sim 36^{\circ}29'$)し、氷期と間氷期とでは緯度 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 、距離にして 350 km ほど異なり、氷期の風成塵量は間氷期の 1.5~3 倍であった。

4. 日本海

長島ほか(2004)は、秋田沖約 150 km の日本海海底(北緯 $40^{\circ}09'36''$ 、東経 $138^{\circ}12'05''$)で掘削した KT94-15-PC コア 600 cm を分析した。コアに含まれる中央粒径値 $5.3 \sim 8.3 \mu\text{m}$ の正規分布を示す粗粒な粒子を大陸起源の風成塵と仮定し、過去 14 万年間の含有量と中央粒径の変動を求めたところ、その変動率は Dansgaard-Oeschger (D-O) サイクルにはほぼ一致し、夏季モンスーンの強さと偏西風の弱さが数千年と数万年の周期変動を示すとした。そして風成塵堆積量は MIS 1 と MIS 5 で極端に少なく、MIS2, 4, 6 で多く、MIS 3 がそれに続き、それは全球的な風成塵堆積量やフラックスの変動に一致した。

MIS2 の日本海の表層水は低塩分濃度の水に覆われ、

とくに日本海側の気候は寒冷乾燥化しており(Oba *et al.*, 1991; 大場ほか, 1995; Irino and Tada, 2000), KT94-15-PC コア掘削地点に近い東北地方では MIS 2 において乾燥化が著しく流水物質が極端に減少し、風成塵が主に堆積するような環境であった。

X. 気候変動と風成塵・レス

世界各地のレスや海底コアの高精度・高分解能の研究によって、更新世において全球的に風成塵フラックスが氷期・亜氷期に増加し、間氷期・亜間氷期に減少したことがはっきりした。

韓国済州島の西帰浦マールには流入物質をもたらすような水系は発達せず、マール内に堆積する無機物のほとんどが $60 \mu\text{m}$ 以下の風成塵である。マール底には約 2.6 万年前まで、アジア北方の先カンブリア系の分布地域から北西季節風によって運ばれた風成塵が堆積した。約 2.5 万年から海水準が低下し始め、東シナ海が干陸化していった。このため陸化した海底から第三紀~中生代の

図 8 済州島マールコアに記録された堆積量変化と中央粒径値 (Yatagai *et al.*, 2002)

岩石に由来する酸素空孔量の低い風成塵が多く供給されるようになり、マール底に堆積した。この傾向は再び海水準が上昇し、東シナ海が水没するまで続いた(松岡ほか, 1995; Yatagai *et al.*, 2002)。

図 8 に示すように、冬季モンスーンが強かったハイネリヒイベント H2, LGM, H1 の寒冷期に風成塵堆積量が増加し、インタースタディアル Is 4~Is 1 などの相対的な温暖期に風成塵が減少している。それは寒冷な時期に風成塵の給源地が乾燥するとともに、風成塵を運ぶ風が強くなったことによる。一方、温暖な時期には冬季モンスーンが弱くなって風成塵が細粒化するとともに、給源地の湿潤化によって風成塵の供給量が減少したことを示唆しているのではないだろうか。

相対的に温暖な Is 4~Is 1 には 20 μm 以下の風成塵量に変化がなく、20 μm 以上の量が減少するのは、こうした時期には 20 μm 以上の粗い風成塵を運ぶ強さの風が弱まったことをも示している。また風成塵の中央粒径値が H2 や H1 といった寒冷な時期にむかって徐々に粗粒化し、Is 4~Is 1 に急に細粒化するのは、ゆっくりとした寒冷化・冬季モンスーンの強まりと、それに続く急激な温暖化・夏季モンスーンの強まりが繰り返したことによるであろう。

一方、日本列島では、岡山県細池湿原の背後山地から小河川が流れ込む場所では夏季モンスーンが優勢な温暖期に粗粒な流水物質が増加し、冬季モンスーンが強い寒冷期にそれが減少し、細粒な風成塵が卓越している(成瀬ほか, 2005b)。

このように済州島のマールや細池湿原において風成塵を指標にしたアジアモンスーン変動が明らかになっただけでなく、北大西洋海底コアに記録された北西ヨーロッパ気候変動との間に、少なくとも過去 12 万年間にわたって大気テレコネクションが働いた可能性がある。

XI. 最終氷期末期~完新世の気候変動と土壌生成

2000 年代に入ると、最終氷期末期から完新世における風成塵・レスを対象にした高時間分解能の環境変動研究が進んだ。この時期における 10^2 年精度の分析によって、完新世には地域的に若干の相違はあるものの、Bond *et al.* (2001) や Mayewski *et al.* (2004) によって、8,100 年前、5,900 年前、4,200 年前、2,800 年前、1,400 年前の計 5 期の冷涼期の存在と近世の小氷期の存在が指摘されている。

黄土高原では約 1 万年前に馬蘭^{まらん}レスの堆積が終了し、その後、So 古土壌が発達する降水量増加期に移行し、

さらに 5,500 年前以降になると完新世レスが堆積する環境に変化している。さらに Porter and Zhou (2006) は、1.2 万年前以降に計 15 回の気候悪化期である北大西洋 drift ice 期(ヘマタイトで着色された粒子、火山ガラス、碎屑質炭酸塩の堆積期)に対応して、黄土高原ではレス・砂丘砂・有機質シルトが堆積した事実を明らかにし、完新世の複数回の冷涼期にレスや砂などの風成物質が堆積する環境が繰り返し起こったとした。

韓国の済州島では、完新世における $10^1 \sim 10^2$ 年オーダーの風成塵の挙動について、Lim *et al.* (2005) は EQF (eolian quartz flux) が 6,500~4,000 年前と 2,000 年前以降で少なく、4,000~2,000 年前に増加したことを指摘している。

完新世にはレスの堆積が減少するとともに、最終氷期に堆積したレスの表層部にチェルノーゼムに代表されるような土壌が発達するようになった。土壌の形成開始時期を整理したのが図 9 である。中国黄土の南限にあたる

図 9 北半球のレス層上に発達する完新世土壌の生成開始時期(成瀬, 2009)

北緯 30° の中国湖南省では、腐植に富むレス表層部の土壌最下部から採取・抽出した腐植酸の ^{14}C 年代は、LGM (最終氷期最盛期) が終了した約 17,000 年前を示す (成瀬, 2006). 北緯 38°~40° の黄土高原では黒壙土^{ヘルイトウ}が 13,200 ~12,000 年前から発達するようになった (Madsen *et al.*, 1996). アメリカ合衆国中西部のレス分布域 (北緯 37°~42°) では、10,200~11,700 年前に土壌生成が始まり (Park, 1998), 北緯 61° のアラスカ州では 7,000 年前以降に土壌が発達するようになった (Muhs *et al.*, 2004). ヨーロッパでは、北緯 53° のドイツで 9,500 年前に土壌生成が始まっている (Gerlach *et al.*, 2006). さらにこれよりやや低緯度にある内陸部の中央ヨーロッパ (北緯 46°~50°) では 8,600 年前 (Eckmeier *et al.*, 2007), ウクライナ (北緯 52°) では 7,500 年前に土壌生成が始まっている (Gerasimov, 1973). これらのデータから、ユーラシア西部の北緯 46°~53° では 7,500~9,500 年前に完新世土壌の発達を開始されたことがわかる.

以上のようにレス表層部の土壌生成は、北緯 40°~50° では新ドリラス期 (12,700~11,700 年前) 前後から始まっており、その生成開始年代は低緯度ほど早く、高緯度ほど遅れる (成瀬, 2009).

地表ではたえず堆積・侵食作用が繰り返している。完新世の気候は氷期に比べれば温暖で安定しているが、上述のように複数回の冷涼期が存在し、冷涼期には砂漠や氷河などから運ばれた風成塵や、風上に砂丘地が広がっている地域では風成砂が風下に運ばれたことが世界各地から報告されている。とくに風成塵や風成砂の量が多い地域では、完新世土壌の間に複数枚のレス層や風成砂層が挟まれている。一方、量が少ない地域では風成層として肉眼では確認できないが、間欠的に風成塵や風成砂が土壌母材として添加されたことが明らかになっている。

図 10 に示すように、アラスカ州の Matanuska Valley では、氷河性堆積物の上に 7,000 年前から古土壌が生成し始め、レスを狭んで 4 枚の古土壌・土壌が発達する (Muhs *et al.*, 2004). カナダのマニトバ州の砂丘が広がる地域では、砂丘地から風で運ばれる砂丘砂の堆積量が減少する時期に古土壌が発達する (Wolfe *et al.*, 2000).

北米大平原中央部のネブラスカ州では風上側に砂丘地帯が広がる。この砂丘地帯から運ばれた風成塵や風成砂が冷涼期に堆積した結果、完新世風成層が厚さ 6 m にも達する。ここでは最終氷期に対比される Peoria loess 上に 12,000 年前以降の完新世古土壌 Brady soil が発達し、古土壌の間に薄い 4 枚のレスが挟まる (Miao *et*

図 10 完新世レス・古土壌の層序と完新世の温暖期・冷涼期
1: Matanuska valley, Alaska, 2: Manitoba, Canada, 3: Nebraska, USA, 4: Chinese loess plateau, 5: Mayewski *et al.* (2004) による完新世の温暖期と冷涼期 (W: 温暖期, C: 冷涼期).

al., 2007). この Brady soil の上には 4 層の完新世レス Bignell loess が堆積する (Jacobs and Mason, 2004). 中国黄土高原西部では、最終氷期の馬蘭黄土上に 4 層の完新世黄土と 5 層の古土壌・土壌が堆積する。これら 4 地域の完新世レス・風成砂と古土壌のうち、完新世の温暖期や冷涼期に対比可能なものが見受けられる (図 10).

XII. レス層序からみた旧石器編年

韓国では、台地や山地斜面の上に MIS 11 以降に堆積した最大 7 m のレス-古土壌が堆積しており、レス層の上部には AT や K-Tz が挟在している (Naruse *et al.*,

図 11 韓国全谷里遺跡の柱状図、質量磁化率、旧石器出土層準
松藤（編）(2008) に資料を追加。S：古土壤、L：レス。

図 12 出雲市湖陵町板津の地層と旧石器包含層 (松藤ほか, 2013)
DMP：大山松江軽石, SK：三瓶木次軽石, SUn：三瓶雲南軽石, SS：三瓶砂原軽石。

2003). レス-古土壌の初磁化率はレスで低く, 古土壌で高い. 古土壌の中でもとくに MIS 5 の古土壌が最も赤みを帯び, 初磁化率が最も高い (Hayashida, 2003). 各地で出土する旧石器の多くはこのレスと古土壌の中から発見されるが, 表層に近い MIS 2 のレスは人為的に削剥されていることが多く, その厚さは数 10 cm 程度でしかない (成瀬^{ちようせ}ほか, 1985; 松藤 (編), 2008).

韓国北部の全谷里遺跡^{ちやんごくに}では約 50 万年前に玄武岩が堆積し, その後, レスと古土壌が累積した. このレスと古土壌層は気候変動にしたがって堆積・生成したものであることが, 図 11 に示すように火山灰や FT 年代, 質量磁化率によって確立されている. この遺跡では約 30 万年前から 6 層準の旧石器包含層が確認されている (林田ほか, 2008; 松藤, 2008).

日本では, 島根県出雲市多伎町砂原において, MIS 5e に形成された海成段丘上に赤褐色古土壌が堆積し, この赤褐色古土壌中からスクレイパーなどの前期旧石器が出土した (砂原遺跡学術発掘調査団, 2013). さらに, ここから北東 5.5 km 離れた同市湖陵町板津の宅地造成地からも旧石器が発見された (松藤ほか, 2013).

この板津露頭では, MIS 7e に対比される海成礫層上に MIS 7c~a に対比される厚さ 125 cm の赤色土 (5R) が堆積する. 赤色土の上には厚さ 40 cm, 明褐色 (7.5YR) のレスが堆積する (図 12). レス層の上部には厚さ 15 cm の大山松江軽石 (DMP) が挟まる. このレス層の上には MIS 5e に対比される古砂丘砂層と, 古砂丘を覆う赤褐色の古土壌 (MIS 5e), 古土壌の上には三瓶木次軽石 (SK) が堆積する. この DMP は約 13 万年前より古く, SK は約 11 万年前のものである (町田・新井, 2003).

発見された板津旧石器は, DMP より下位の MIS 6 に対比されるレス層から出土しているので, MIS 6 の氷期に人類が陸橋を経て大陸から渡来した蓋然性の高いことが明らかになった.

XIII. まとめにかえて

1982 年に北九州と与那国島のレスについて論文を発表したのを嚆矢として (成瀬・井上, 1982), 風で舞い上げられた風成塵が遠隔地に運ばれ, 地表や海底に堆積することを発表してきた. さらに風成塵堆積物の各種分析により, 過去の風系やモンスーン変動などを復元できる可能性についても研究を進めた.

レスは, ユーラシアの黄土高原, タジキスタン, ウクライナのドニエプル川中・下流域で約 260 万年前から堆積し始め, 約 90 万年前から始まった 10 万年周期の

気候変動に対応してレスの分布範囲が拡大していった.

最終氷期最盛期が終了したところから風成塵の供給が激減し, レス表層にはチェルノーゼムなどに代表される腐植を多量に含む土壌が発達し始めた. 腐植に富む土壌の多くは北緯 38° 以北では新ドリマス期前後から, 自然と人為の両作用を受けながら発達するようになった.

レスは風積成堆積物の特徴として空隙に富むために, 土壌侵食に対して脆弱で, 侵食を受けやすい. しかし, 風成塵は土壌侵食を受けながらも完新世のほぼ全期間にわたって, 量的には少ないものの依然として添加され続け, 貴重な土壌母材になった. とくに完新世の冷涼期に比較的多くの風成塵や風成砂が供給され, 土壌に添加された.

東アジアに広く分布する風成物質に着目して, 同地域の気候変動の解明に努めるとともに, さらに新たな分析法を取り入れることによって, 第四紀の環境変動, 気候変動, 旧石器の時代編年に関した高時間分解能で新たな研究展開が期待できるのではないだろうか.

私が勤務した大学の研究環境は必ずしも十分とはいえなかったが, 風成塵の研究に取り組み始めて 30 年以上もの間, じつに多くの方々から研究グループに加えていただいたり, 諸分析を行っていただいたりして, 継続して研究を進めることができた.

私が行った研究の成果は十分なものではなかったが, 今後も風成塵とその堆積物についての研究が進展することを願うとともに, これまでお世話になった多くの方々から感謝の意を表したい.

引 用 文 献

- An, Z.S., Kukla, G., Porter, S.C. and Xiao, J.L. (1991) Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 18, 125-132.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. and Bonani, G. (2001) Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294, 1257-1266.
- Bronger, A., Winter, R. and Heinkele, T. (1998) Pleistocene climatic history of East and Central Asia based on paleopedological indicators in loess-paleosol sequences. *Catena*, 34, 1-17.
- Dansgaard, W., White, J.W.C. and Johnsen, S.J. (1989) The abrupt termination of the Younger Dryas climate event. *Nature*, 339, 532-534.

- Eckmeier, E., Gerlach, R., Gehrt, E. and Schmidt, M.W.I. (2007) Pedogenesis of chernozems in central Europe—a review-. *Geoderma*, 139, 288–299.
- EPICA community members (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, 623–628.
- 古川雅英・赤田尚史・卓 維海・郭 秋菊・檜崎幸範・床次真司 (2005) 自然放射能からみた東アジアにおけるレスと風成塵起源土壌の特徴. *エアロゾル研究*, 20, 306–312.
- 鴈澤好博・柳井清治・八幡正弘・溝田智俊 (1994) 西南北海道—東北地方に広がる後期更新世の広域風成塵堆積物. *地質学雑誌*, 100, 951–965.
- 鴈澤好博・渡辺友東子・伴 かおり・橋本哲夫 (1995) 石英粒子の天然熱蛍光を利用したテフラ起源と風成塵起源堆積物の識別方法—上北平野, 天狗岱面上の中期更新世の段丘堆積物を例として. *地質学雑誌*, 101, 705–716.
- Gerasimov, I.P. (1973) Chernozems, buried soils, and loesses of the Russian plain : Their age and genesis. *Soil Science*, 116, 202–210.
- Gerlach, R., Baumewerd-Schmidt, H., Borg, K., Eckmeier, E. and Schmidt, M.W.I. (2006) Prehistoric alteration of soil in the Lower Rhine Basin, north-west Germany—archaeological, ^{14}C and geochemical evidence-. *Geoderma*, 136, 38–50.
- Gustavson, T.C. and Holliday, V.T. (1999) Eolian sedimentation and soil development on a semiarid to subhumid grassland, Tertiary Ogallala and Quaternary Blackwater Draw Formation, Texas and New Mexico High Plains. *Journal of Sedimentary Research*, 69, 622–634.
- Hayashida, A. (2003) Magnetic properties of the Quaternary sediments at the Chongokni Paleolithic site : a preliminary result. Bae, K., Jeon, B. and Kim, Y.Y. (eds) *Geological formation of the Chongokni paleolithic site and paleolithic archaeology in East Asia*, 157–160 : Yeoncheon County and Hanyang University.
- 林田 明・福岡浩司・横尾頼子・浅井健司・楊 振宇 (2008) 東アジアの風成堆積物の磁気特性—古地磁気編年と環境復元をめざして. 松藤和人編「東アジアのレス—古土壌と旧石器編年」: 57–66, 雄山閣.
- Heinrich, M. (1988) Origin and consequences of cycle ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, 29, 143–152.
- Hesse, P.P. (1994) The record of continental dust from Australian in Tasman Sea sediments. *Quaternary Science Reviews*, 13, 257–272.
- Inoue, K. and Naruse, T. (1987) Physical, chemical, and mineralogical characteristics of modern eolian dust in Japan and rate of dust deposition. *Soil Science and Plant Nutrition*, 33, 327–345.
- 井上克弘・成瀬敏郎 (1990) 日本海沿岸の土壌および古土壌中に堆積したアジア大陸起源の広域風成塵. 第四紀研究, 29, 209–222.
- Inoue, K. and Naruse, T. (1991) Accumulation of Asian long-range eolian dust in Japan and Korea from the late Pleistocene to the Holocene. *Catena Supplement*, 20, 25–42.
- Inoue, K., Saito, M. and Naruse, T. (1998) Physicochemical, mineralogical, and geochemical characteristics of lacustrine sediments of the Konya Basin, Turkey, and their significance in relation to climatic changes. *Geomorphology*, 23, 229–243.
- Irino, T. and Tada, R. (2000) High-resolution reconstruction of variation in aeolian dust (Kosa) deposition at ODP Site 797, the Japan Sea, during the last 200 ka. *Global and Planetary Change*, 35, 143–156.
- Jacobs, P.M. and Mason, J.A. (2004) Paleopedology of soils in thick Holocene loess, Nebraska, USA. *Mexicana de Ciencias Geologicas*, 21, 54–70.
- Jullien, E., Grousset, F., Malaizé, B., Duprat, J., Sanchez-Goni, F. M., Eynaud, F., Charlier, K., Schneider, R., Bory, A., Bout, V. and Flores, J.A. (2007) Low-latitude “dusty events” vs. high-latitude “icy Heinrich events”. *Quaternary Research*, 68, 379–386.
- 北川靖夫・成瀬敏郎・齋藤萬之助・黒崎督也・栗原宏彰 (2003) 北海道北部の重粘土における微細 (3–20 μm) 粒子および粘土鉱物の層位別分布—重粘土の母材への風成塵の影響—. *ペドロジスト*, 47, 2–13.
- Kitagawa, Y., Imoto, H., Saito, M., Kurihara, H., Fujie, K., Toyoda, S. and Naruse, T. (2005) Mineral

- composition of clay fractions and oxygen vacancies in silt-sized quartz in soils on the Kaetsu Plateau, Fukui, central Japan, possibility of eolian dust brought from northern Asia as parent material of soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51, 999-1010.
- Leonhard, K.C. von (1824) *Charakteristik der Felsarten*, 3. 232 p, Joseph Englemann Verlag.
- Lim, J., Matsumoto, E. and Kitagawa, H. (2005) Eolian quartz flux variations in Cheju Island, Korea, during the last 6500 yr and a possible sun-monsoon linkage. *Quaternary Research*, 64, 12-20.
- Lyell, Ch. (1834) Observation on the loamy deposit called 'loess' in the valley of the Rhine. *Geological Society of London Proceedings*, 2, 83-85.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編 火山灰アトラス—日本列島とその周辺. 336 p, 東京大学出版会.
- 町田 洋・大場忠道・小野 昭・山崎晴雄・河村善也・百原 新 (2003) 第四紀. 323 p, 朝倉書店.
- Madsen, D.B., Elston, R.G., Bettinger, R.L., Cheng, X. and Kan, Z. (1996) Settlement patterns in assemblages from the Pleistocene/Holocene transition of north central China. *Journal of Archaeological Science*, 23, 217-231.
- 松藤和人 (編) (2008) 東アジアのレス—古土壌と旧石器編年. 280 p, 雄山閣.
- 松藤和人・成瀬敏郎・渡辺満久・菊池強一・上峯篤史・山内靖喜・武島正幸・面 将道 (2013) 島根県出雲市板津発見の前期旧石器. *旧石器考古学*, 78, 1-12.
- 松岡勲充・金 文洪・竹村恵二・長岡信治・李 竣伯 (1995) 韓国・済州島で採取したボーリング試料の地質年代と層相. 長崎大学教養部紀要 (自然科学), 35, 135-145.
- Mayewski, P.A., Rohling, E.E., Stager, J.C., Karlen, W., Meeker, L.D., Mayerson, E.A., Gasse, F., Kreueld, S., Holmgren, K., Thorp, J.L., Rosquist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R.R. and Steig, E.J. (2004) Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62, 243-255.
- Miao, X., Mason, J.A., Swinehart, J.B., Loope, D.B., Hansen, P.R., Goble, R.J. and Liu, X. (2007) A 10,000 year record of dune activity, dust storms, and severe drought in the central Great Plains. *Geology*, 35, 119-122.
- Mizota, C. and Matsuhisa, Y. (1985) Eolian additions to soils and sediments of Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 28, 369-378.
- 溝田智俊・下山正一・窪田正和・竹村恵二・磯 望・小林 茂 (1992) 北部九州の緩斜面上に発達する風成塵起源の細粒質土層. *第四紀研究*, 31, 101-112.
- Muhs, D.R., McGeehin, J.P., Beann, J. and Fisher, E. (2004) Holocene loess deposition and soil formation as competing processes, Matanuska valley, southern Alaska. *Quaternary Research*, 61, 265-276.
- 長島佳菜・多田隆治・松井裕之 (2004) 過去 14 万年間のアジアモンスーン・偏西風変動—日本海堆積物中の黄砂粒径・含有量からの復元. *第四紀研究*, 43, 85-97.
- 成瀬敏郎 (1998) 日本における最終氷期の風成塵堆積とモンスーン変動. *第四紀研究*, 37, 189-197.
- 成瀬敏郎 (2006) 風成塵とレス. 197 p, 朝倉書店.
- 成瀬敏郎 (2007) 世界の黄砂・風成塵. 174 p, 築地書館.
- 成瀬敏郎 (2009) 北米とユーラシアのレスの分布, 年代, 土壌生成に及ぼす意義. *ペドロジスト*, 53, 38-45.
- 成瀬敏郎・井上克弘 (1982) 北九州および与那国島のレス. *地学雑誌*, 91, 164-180.
- 成瀬敏郎・井上克弘 (1983) 山陰および北陸の古砂丘に埋没するレスについて. *地学雑誌*, 92, 116-129.
- 成瀬敏郎・井上克弘 (1987) 喜界島の石灰質風成砂層の ^{14}C 年代. *地球科学*, 41, 198-201.
- 成瀬敏郎・井上克弘 (1990) 大陸よりの使者—古環境を語る風成塵—. *サンゴ礁地域研究グループ編「日本のサンゴ礁地域 1 熱い自然」*: 248-267, 古今書院.
- Naruse, T. and Sakuramoto, Y. (1991) Dating the paleosols in loessial deposits in Netivot, Israel by electron spin resonance. *Hyogo University of Teacher Education journal*, Ser. 2, Language studies, social sciences, fine arts and music, 11, 147-153.
- 成瀬敏郎・井上克弘・金 萬亨 (1985) 韓国の低位段丘上に堆積するレス土壌. *ペドロジスト*, 29, 108-117.
- Naruse, T., Sakai, H. and Inoue, K. (1986) Eolian dust origin of fine quartz in selected soils, Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki-kenkyu)*, 24,

- 295-300.
- 成瀬敏郎・横山勝三・柳 清司 (1994) シラス台地上のレス質土壌とその堆積環境. 地理科学, 49, 76-84.
- 成瀬敏郎・柳 清司・河野日出夫・池谷元伺 (1996) 電子スピン (ESR) による中国・韓国・日本の風成塵起源石英の同定. 第四紀研究, 35, 25-34.
- Naruse, T., Bae, K., Yu, K., Matsufuji, K., Danhara, T., Hayashida, A., Hwang, S., Yum, J. and Shin, J. (2003) Loess-paleosol sequence in the Chongokni Paleolithic site. Bae, K., Jeon, B. and Kim, Y.Y. (eds.) Geological formation of the Chongokni paleolithic site and paleolithic archaeology in East Asia : 143-156, Yeoncheon County and Hanyang University.
- 成瀬敏郎・北川靖夫・岡田昭明・豊田 新・矢田浩太郎・赤嶺和江 (2005a) 鳥取県倉吉市桜における火山灰層間に埋没する古土壌の母材—風成塵の意義. 日本第四紀学会講演要旨集, 35, 80-81.
- 成瀬敏郎・鈴木信之・井上伸夫・豊田 新・蓑輪貴治・安場裕史・矢田具真一 (2005b) 岡山県細池湿原にみられる過去 3 万年間の堆積環境. 地学雑誌, 114, 811-819.
- 成瀬敏郎・田中幸哉・黄 相一・尹 順玉 (2006) レス—古土壌編年による韓国の更新世段丘・山麓緩斜面の形成期に関する考察. 地学雑誌, 115, 484-491.
- 成瀬敏郎・兪 剛民・渡辺満久 (2008) 東アジア旧石器編年構築のための 90 万年前以降のレス—古土壌層序と編年. 松藤和人編「東アジアのレス—古土壌と旧石器編年」: 67-86, 雄山閣.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T. (1991) Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. Paleogeography, 6, 499-518.
- 大場忠道・村山雅史・松本英二・中村俊夫 (1995) 日本海隠岐堆コアの加速器質量分析 (AMS) 法による ^{14}C 年代. 第四紀研究, 34, 289-296.
- 岡田昭明 (1973) 支笏降下軽石堆積層中の粘土鉱物. 地質学雑誌, 79, 363-375.
- Ono, Y., Naruse, T., Ikeya, M., Kohno, H. and Toyoda, S. (1997) Origin and derived courses of eolian dust quartz deposited during marine isotope stage 2 in East Asia, suggested by ESR signal intensity. Global and Planetary Changes, 18, 129-135.
- Park, K. (1998) Paleoclimatic reconstruction in the central Great Plains using environmental magnetism and stable isotope. Journal of Korean Geographical Society, 33, 377-394.
- Pécsi, M. (1995) The role of principles and methods in loess-paleosol investigation. Geojournal, 36, 117-131.
- Petit, J.R., Mounier, L., Jouzel, J., Korotkevich, Y.S., Kotlyakov, V.I. and Lorius, C. (1990) Palaeoclimatological and chronological implications of the Vostok core dust record. Nature, 343, 56-58.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 399, 429-436.
- Pisias, N.G., Mayer, L.A. and Mix, A.C. (1995) Paleoclimatology of the Eastern equatorial Pacific during the Neogene: synthesis of LEG 138 drilling results. Pisias, N.G., Mayer, L., Janecek, T., Palmer-Julson, A. and vanAndel, H. (eds.) Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 138, 5-21.
- Porter, S.C. and An, Z. (1995) Correlation between climate events in the north Atlantic and China during the last glaciation. Nature, 375, 305-308.
- Porter, S.C. and Zhou, W. (2006) Synchronism of Holocene East Asian monsoon variations and North Atlantic drift-ice tracers. Quaternary Research, 65, 443-449.
- Pye, K. (1987) Aeolian dust and deposits. 334 p, Academic Press.
- Richthofen, F. von (1877) China, 1. 758 p, D. Reimer.
- 下山正一・溝田智俊・新井房夫 (1989) 福岡平野周辺で確認された広域テフラについて. 第四紀研究, 28, 199-206.
- 砂原遺跡学術発掘調査団 (2013) 砂原旧石器遺跡の研究—鳥根県出雲市多伎町砂原所在砂原遺跡発掘調査報告書. 68 p, 砂原遺跡学術発掘調査団 (代表: 松藤和人).
- Syers, J.K., Jackson, M.L., Berkheiser, V.E., Clayton, R.N. and Rex, R.W. (1969) Eolian sediment influ-

- ence on pedogenesis during the Quaternary. *Soil Science*, 107, 421-427.
- Teilhard de Chardin, P. and Young, C.C. (1930) Preliminary observations on the preloessic and post-pontian formation in Western Shansi and Northern Shensi. *Memoirs of the Geological Survey of China*, Ser. A. 8, 10-30.
- Toyoda, S. and Naruse, T. (2002) Eolian dust from the Asian deserts to the Japanese Islands since the last Glacial maximum : the basis for the ESR method. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 23, 811-820.
- Virlet-d'Aoust, P.H. (1857) Observations sur un terrain d'origine meteorique ou de transport aerien qui existe au Mexique, et sur le phenomene des trombees de poussiere auquel il doit principalement son origine. *Geological Society of France Bulletin*, 2nd ser., 16, 417-431.
- Wolfe, S.A., Muhs, D.R., David, P.P. and McGeehin, J.P. (2000) Chronology and geochemistry of late Holocene eolian deposits in the Brandon Sand Hills, Manitoba, Canada. *Quaternary International*, 67, 61-74.
- Xiao, J., Porter, S.C., An, Z., Kumai, H. and Yoshikawa, S. (1995) Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 yr. *Quaternary Research*, 43, 22-29.
- 八幡正弘・五十嵐八枝子・藤原嘉樹・西戸裕嗣 (1997) 湖沼性堆積物中の粘土粒子の起源と堆積環境—中央北海道名寄地域の剣淵盆地の鮮新—更新統を例にして—。地下資源調査所報告, 68, 57-79.
- Yatagai, S., Takemura, K., Naruse, T., Kitagawa, H., Fukusawa, H., Kim, M. and Yasuda, Y. (2002) Monsoon changes and eolian dust deposition over the past 30,000 years in Cheju Island, Korea. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 23, 821-831.
- Yokoo, Y., Nakano, T., Nishikawa, M. and Quan, H. (2004) Mineralogical variation of Sr-Nd isotopic and elemental compositions in loess and desert sand from the central Loess Plateau in China as a provenance tracer of wet and dry deposition in the northwestern Pacific. *Chemical Geology*, 204, 45-62.
- Yoon, S.O., Park, C.S., Hwang, S.I. and Naruse, T. (2007) Weathering characteristics and origins of loess-paleosol sequence at Daecheon area, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 281-296.
- 吉永秀一郎 (1995) 気候変動の指示者としての十勝ローム層の諸性質の変化。第四紀研究, 34, 345-358.
- Yoshinaga, S. (1996) Variations in rates of accumulation of tropospheric fine quartz in tephra, loess and associated paleosols since the last Interglacial at age, Tokachi Plain, northern Japan, and paleoclimatic inference. *Quaternary International*, 34-36, 139-146.
- Yu, K.-M., Shin, J.-B. and Naruse, T. (2007) Loess-paleosol stratigraphy of Dukso area, Namyangju city, Korea (South). *Quaternary International*, 96-103, 176-177.

The paper for the 2012 Japan Association for Quaternary Research Academic Award

Eolian dust and loess in the Quaternary

Toshiro Naruse*

Loess began its deposition at the beginning of the Quaternary. Through the enlargement of glaciers and deserts during the glacial stages, the productivity, depositional volume, and grain size of eolian dust increased. In East Asia, huge amounts of eolian dust have also been deposited on the land surface of various localities and sea floors by westerly winds and the northwestern winter monsoon blown from the Siberian High. The significance of eolian dust study has been recognized in Japan and Korea since the 1980s. Evidence from drilling cores of ocean floors and lands in East Asia has suggested that eolian dust and loess show a clear relationship between dust flux maxima and glacial stages, and depositional volume of eolian dust can also be used as a paleo-environmental indicator. Several periods of enhanced dust deposition derived from the Asian glaciers and deserts to China, Korea, Japan,

and peripheral sea floors can be correlated with cold periods such as Heinrich events. Eolian dust additions to soils also made important contributions to primary productivity in East Asia during the Holocene. The alternation of loess and paleosol has been regarded as an excellent proxy record of the strength of Asian summer and winter monsoons over the past 2.6 Myr. Accordingly, loess-paleosol stratigraphy constitutes an important record of variations in the East Asia monsoon climate. Among the methods of analyzing the loess from various areas, ESR signal intensity of finer quartz grain than 20 μm is a useful marker for the identity of eolian dust and its resource area. Paleolithic chronology can be determined by loess-paleosol sequences in China, Korea, and Japan. A paleolith from Itazu site, Izumo City in Japan was discovered from a MIS 6 loess layer.

Keywords : eolian dust, loess, ESR signal intensity, paleosol, Quaternary

* Emeritus Professor, Hyogo University of Teacher Education, 598-1 Shimokoshi-cho, Izumo City, 693-0032, Japan.
E-mail : rsj20592@nifty.com