

風成塵・レスからみた最終間氷期以降のモンスーン変動

成瀬 敏郎*

Monsoon Changes Since the Last Interglacial Period Viewed from Eolian Dust and Loess

Toshiro NARUSE *

I. はじめに

氷河末端の扇状地や沙漠から舞い上がった細粒物質が風によって遠距離を運ばれ、主に氷晶核として地表や海底に降下堆積する現象が世界各地で知られている。こうした風で運ばれる物質を風成塵、黄風、黄砂などと呼び、陸上に堆積したものをレス、あるいは黄土と呼んでいる。

この風成塵・レスが過去の気候変動を反映したものとする研究が20世紀初頭に始まった。その結果、複数の古土壌によって細分されたレスが主に氷期に堆積し、いっぽう古土壌が間氷期に生成したものであると認識されるようになった。そして1930年代には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表わされるようになった。

1970年代になると古地磁気測定がレス研究に導入され、ヨーロッパ各地でレス・古土壌編年が確立されるようになった。約10万年周期で繰り返すレス・古土壌シークエンスは深海底コアの酸素同位体比から得られた気候変動周期とほぼ一致していたのである。

中国黄土高原では1980年代に洛川黄土が、1990年代に宝鷄黄土が30枚以上にも及ぶ古土壌層によって細分され、約250万年間のレス・古土

壌編年が行われるようになった。そしてヨーロッパと同様に中国黄土の編年も深海底コアの研究結果との対比が可能であった。

1990年代になると、グリーンランド氷床コアや南極氷床コアによる高精度分解能の気候変動が発表され、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精度分解能のモンスーン変動が明らかにされるようになった(町田ほか, 2003)。こうした研究を通じて風成塵・レスの堆積が寒冷な氷期に多く、温暖な間氷期や後氷期において少なく、高精度分解能の気候変動を明らかにできる良い指示物のひとつであることが認識されるようになった。

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、古砂丘や火山灰層の間に埋没したり、台地上に堆積しているほか、土壌・古土壌の母材として重要であることが認識されるようになった(成瀬・井上, 1982; 井上・成瀬, 1990; Inoue and Naruse, 1991)。

II. レスの分布と粒度

レスは世界の陸上だけでなく海底にも広域に分布している(図1)。レスは沙漠レスと氷河レスからなるが、1970年代まではレス研究がヨーロッパや北米において盛んであったために、沙漠レスは

* 兵庫教育大学

* Department of Geography, Hyogo University of Teacher Education

本稿は2003年6月20日に行われた講演をまとめたものである。

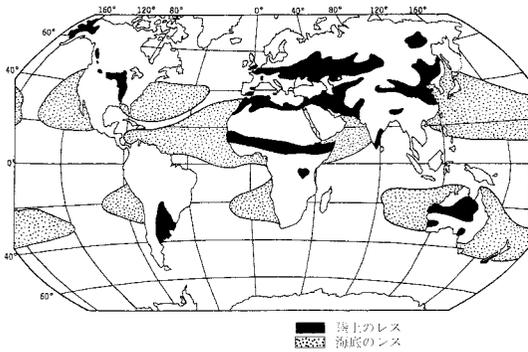


図 1 世界の陸上・海底のレス分布。

レスの範疇に含まれていなかった。しかし、沙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ていることがすでに大航海時代から人口に膾炙されており、オーストラリアやイスラエルでは沙漠レスの存在が 1950 年代から知られていた。

とくにサハラ沙漠で多く発生する砂嵐によって舞い上げられた風成塵はサハラダストとして知られ、その多くが貿易風によって大西洋海域に運ばれるほか、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ことが知られている (Naruse and Sakuramoto, 1991; Inoue *et al.*, 1998)。中国内陸沙漠からも大量の風成塵が供給され、黄土高原では約 250 万年前から最大 300 m 近い黄土が堆積し、風下にあたる韓国、台湾、日本では現在でもしばしば風成塵が飛来し、黄砂・黄風として知られている。

氷河レスは氷期に大陸氷床が拡大したヨーロッパや北米などに堆積しているほか、偏西風によって東方に運ばれた風成塵はチェルノーゼムやプレーリー土などの主母材になっている。このほか図示できないほどの厚さのレスは、図 1 に示す範囲以外にも広域に分布している。

東アジアにも広域に風成塵・レスが堆積している。韓国では台地や山地斜面に少なくとも MIS 9 以降に堆積した厚いレスが堆積しており、各地で出土する旧石器の多くは、レスの中から発見されている。しかし、表層に近い MIS 2 レスは人為

的に削剥されていることが多く、その層厚は数 10 cm 程度である (成瀬ほか, 1985)。

日本列島では、南西諸島から北海道まで広域にアジア大陸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。南西諸島では琉球石灰岩上に発達する島尻マージなどの土壌に風成塵が多く混入するほか (成瀬・井上, 1990)、喜界島では水天宮古砂丘中にレスが埋没している (成瀬・井上, 1987)。鹿児島県では入戸火砕流上に発達する古土壌の主母材である (成瀬ほか, 1994)、北九州、山陰、北陸、東北の各沿岸に発達する古砂丘中に数層のレスが埋没する (成瀬・井上, 1983) ほか、台地上や火山灰層の間にもレスが埋没している。北海道では重粘土に風成塵が多く含まれている。このほか後述するように日本各地に堆積する泥炭層には風成塵が多く含まれており、古環境変動復元に役立っている。

しかし、韓国や日本列島の場合は、中国黄土高原と異なって粗粒な現地物質と混合している場合が多く、純粋な風成塵層 レスはきわめて少ない。風成塵の堆積量とフラックスは、日本列島の場合は東に向かうほど減少する (Inoue and Naruse, 1987, 1991; 成瀬, 1993; Ono and Naruse, 1997) が、東北から北海道にかけて逆に増加する。風成塵・レスの層厚や粒度は、風下になるほど薄く、細粒化する。アメリカ中西部のウィスコンシン州の例ではレスの給源であるミズリー河沿いでは 38 ~ 53 μm であるが、東に向かって細粒化し、ミルウオーキーで 13 ~ 32 μm になる (図 2)。

III. 古風系の復元

風成塵を運搬するのは風であるので、風成塵の給源とその堆積地、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

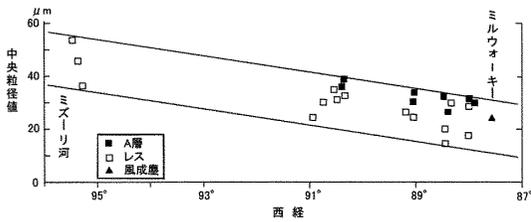
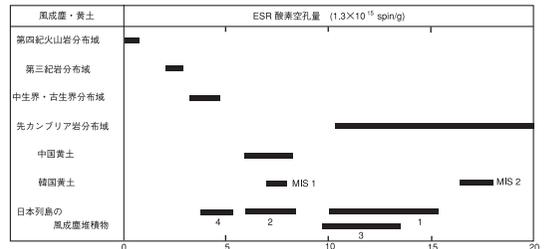


図 2 USA, ミズリー河～ミルウォーキー間のレス, 土壌, 風成塵の粒度変化.



大陸からの風成塵: 1 北海道～瀬戸内海 2 瀬戸内海～沖縄島 3 宮古島～与那国島
近畿からの風成塵: 4

図 3 岩石, 土壌, レスに含まれる石英の酸素空孔量

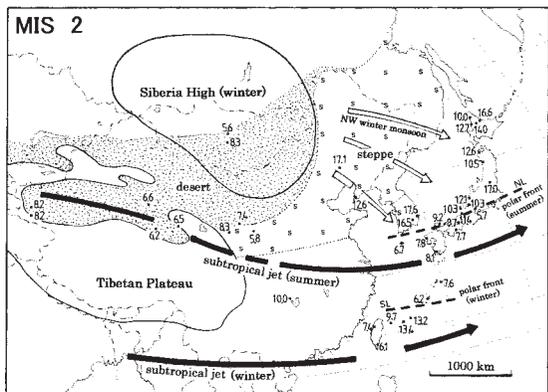
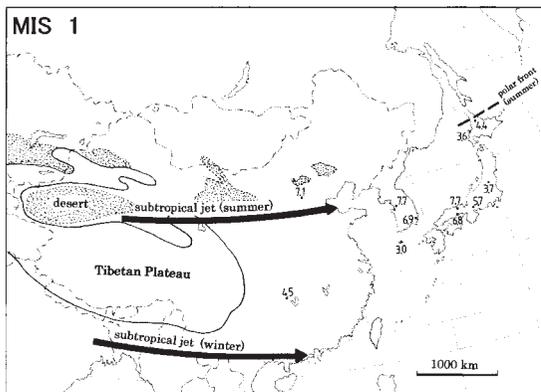


図 4 MIS 2 と 1 における風系.

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 (Rex *et al.*, 1969; 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同定するものである。日本列島では現地性石英は 5 ~ 10%, 風成塵石英は 15 ~ 17% であって, 両者の識別は可能であるが, 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難しい。すなわち給源地を特定することは現在のところ難しい状況である。そのため, 風成塵の給源地を明らかにする方法として成瀬ほか (1996), 成瀬・小野 (1997), Ono *et al.* (1997) は石英の ESR 分析法を開発した。

ESR 分析法によって求められた酸素空孔量が石英の大まかな生成年代を示し, 流水物質である

現地性粗粒石英と, 外来物質である微細な風成塵石英とでは数値が異なる。粗粒な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ほぼ同じ数値を示し, いっぽう微細石英はこれよりはるかに高い値 (年代が古い) を示す (図 3)。

中央アジアと東アジア各地で採取した風成堆積物のうち, 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 20 μm は, 東アジア大陸北方の先カンブリア紀岩地域, 韓国, 日本列島の瀬戸内海～関東を結ぶ線以北において 10 以上の値を示す (図 4)。

このことは, MIS 2 にシベリア高気圧が卓越してアジア大陸北方に広がる先カンブリア紀岩地域が極度に乾燥し, 降雪量は現在よりも減少し, 冬でも雪に覆われない沙漠が拡大した。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

ブリア紀岩地域から運ばれた風成塵が日本列島の瀬戸内海～関東を結ぶ線以北に堆積した。

すなわち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い (Toyada and Naruse, 2002)。

いっぽう、瀬戸内海から沖縄島間の地域は 5.7～8.7 の値を示し、タクラマカン沙漠や黄土高原の酸素空孔量と近似している。したがってこの地域には、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部の沙漠から、風成塵が夏季亜熱帯ジェット気流によって運ばれたことを示唆する。宮古島以南の地域は酸素空孔量が 10 以上と再び高くなる。このことはアジア南部あるいはインド、アラビア、サハラなどの先カンブリア紀岩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可能性がある。

温暖な MIS 1 になると、ポーラーフロントは北海道北部まで北上し、中国内陸部のゴビやタクラマカンなどの沙漠から夏季亜熱帯ジェット気流によって日本列島のほぼ全域に風成塵が運ばれるようになったことを示している。

IV. 風成塵とモンスーン変動

黄土高原では、粗粒な黄土は風成塵を運んだ冬季モンスーンが強い寒冷な時期のものであり、逆に細粒な黄土は冬季モンスーンが弱い温暖な時期のもので考えられている。日本列島では、夏季モンスーンが優勢な温暖期は粗粒な現地性流水物質が卓越し、逆に冬季モンスーンが強い寒冷期には細粒な風成塵が卓越すると考えられる。これを実証するために韓国済州島、岡山県細池湿原、兵庫県黒井盆地、岐阜県谷汲盆地、福井県中池見盆地、福島県矢の原湿原、北海道名寄盆地に堆積する泥炭を掘削し、ポーリングコア分析を進めている。

済州島

韓国済州島の西帰浦マールには流水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 μm 以下の風成塵物質である (Yatagai *et al.*, 2002)。このマール底には約 2.6 万年前まで、アジア北方の先カンブリア紀岩地域から北西季節風によって運ばれた風成塵が堆

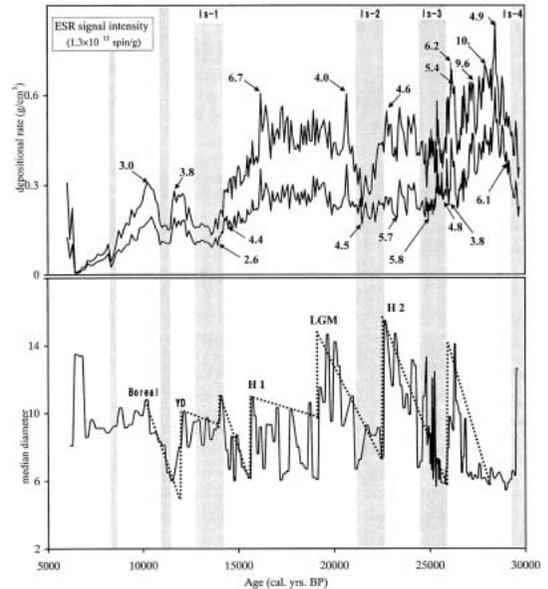


図 5 韓国済州島西帰浦マールコアの無機物堆積量，ESR 信号強度，粒度の変化。

積していた。約 2.5 万年前から海水準が低下しはじめ、第三紀層が広く分布する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岩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、マール底に堆積するようになった。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 (図 5)。

最終氷期中のハイニンリッヒイベント H2, H1 といったとくに寒冷な時期に風成塵が多く堆積し、逆にインタースタディアル Is-4 ~ Is-1 などの温暖期に減少している。それは寒冷な時期に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。いっぽう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、給源地の湿潤化が風成塵の供給量を減少させた可能性がある。

Is-4 ~ Is-1 の温暖期において 20 μm 画分量に変化がなく、> 20 μm 画分量に減少がみられるのは、細粒な 20 μm 画分は依然として多く運ばれていたが、> 20 μm の粗い風成塵を運ぶことのできる風が弱くなったことを示唆しているのである

う。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向かって徐々に粗粒化し、Is-4 ~ Is-1 にいきなり細粒化するの、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された ボンドサイクル ことを表わしている。

中池見盆地

福井県中池見盆地では MIS 5 において、粗粒な無機物量の堆積が多く、そのほとんどが流水物質からなる。とくに Is-24 ~ Is-21 などの温暖期に無機物堆積量が増加している(図 6)。MIS 4 になると、全体に無機物堆積量は減少するが、ところどころにスパイクが認められる。スパイクは粗粒な無機物からなり、酸素空孔量が低いので、Is-20 ~ Is-18 などの温暖期に夏季モンスーンが強くなり、流水物質が堆積したのであろう。DKP の直後にも粗粒な無機物が急増するので、5 万年前に夏季モンスーンが強くなり、降水量が増加した時期が存在したと考えられる。

その後は全体に無機物量が激減するが、ところどころにスパイクが認められる。スパイク部分の微細石英の酸素空孔量が高いので、先カンブリア紀岩地域から北西季節風によって運ばれた風成塵が多くなったことを意味する。なお各スパイクはそれぞれ寒冷な H5 ~ H1 に対比できよう。さらにスパイクの直後に粗粒化するの、済州島と同じように寒冷期直後の急激な温暖化に伴って夏季モンスーンが強くなり、降水量が増加したことを示唆している(チョードリほか, 2001)。

MIS 1 になると、無機物量が激減するとともに酸素空孔量も低くなるので、この時期になると、先カンブリア紀岩地域からは風成塵が運ばれなくなり、かわって中国内陸沙漠から夏季亜熱帯ジェット気流によって酸素空孔量がやや低い風成塵 黄砂 が中池見盆地に飛来するようになったことを示唆している。そして粗粒な無機物が増加するようになり、夏季モンスーンの強まりによって流水物質が増加したことを示唆している。

V. おわりに

風で舞い上がった物質が風下に運ばれ、やがて

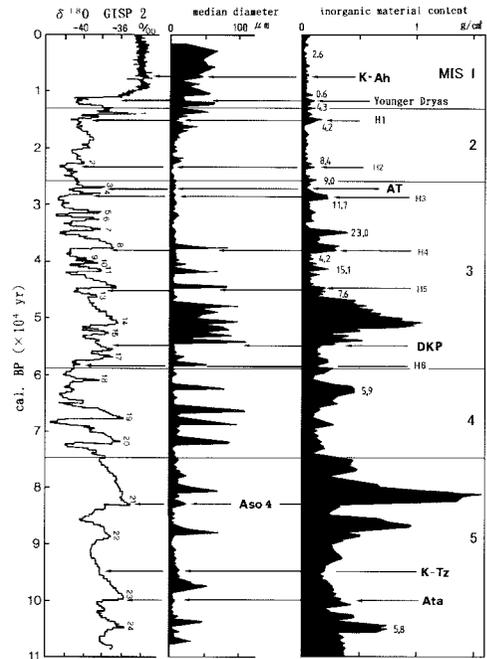


図 6 過去 11 万年間における福井県中池見盆地泥炭コアの無機物堆積量, ESR 信号強度, 粒度の変化。

地表や海底に堆積する。それを注意深く観察し、かつ採取した試料を分析することによって、過去の風系やモンスーン変動などを復元できる可能性があることを述べた。風成塵に関する分析のうち、とくに ESR 分析法は上記の目的を達成するためには威力を発揮しそうである。今後も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工夫する考えである。そうすることによって第四紀の高精度分解能の環境変動、気候変動に関する研究に新たな展開が期待できるのではないだろうか。

文 献

- チョードリ, M.E.K.・北田奈緒子・成瀬敏郎・矢田真一・鈴木 宏・吉井克行・豊田 新 (2001) 福井県中池見盆地と兵庫県黒井盆地にみられる過去 110,000 年間の古環境変動。地学雑誌, **110**, 725-733.
- Inoue, K. and Naruse, T. (1987) Physical, chemical, and mineralogical characteristics of modern eolian dust in Japan and rate of dust deposition.

- Soil Science 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.
- 町田 洋・大場忠道・小野 昭・山崎晴雄・河村善也・百原 新編著 (2003) 第四紀学。朝倉書店。
- 成瀬敏郎 (1993) 東アジアにおける最終間氷期以降の広域風成塵の堆積量変化。地形, **14**, 265-277.
- 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・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¹⁴C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。古今書院, 248-267.
- 成瀬敏郎・小野有五 (1997) レス・風成塵からみた最終氷期のモンスーンアジアの古環境とヒマラヤ・チベット高原の役割。地学雑誌, **106**, 205-217.
- Naruse, T. and Sakuramoto, Y. (1991) Dating the paleosols in loessial deposits in Netivot, Israel by electron spin resonance. 兵庫教育大学研究紀要, **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. 第四紀研究, **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.
- Ono, Y. and Naruse, T. (1997) Snowline elevation and eolian dust flux in the Japanese Islands during isotope stages 2 and 4. *Quaternary International*, **37**, 45-54.
- 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.
- Rex, R.W., Syers, J.K., Jackson, M.L. and Clayton, R.N. (1969) Eolian origin of quartz in soils of Hawaiian Islands and in Pacific pelagic sediments. *Science*, **163**, 277-279.
- 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. 地形, **23**, 811-820.
- Yatagai, S., Takemura, K., Naruse, T., Kitagawa, H., Fukusawa, H., Kim, M.-H. and Yasuda, Y. (2002) Monsoon changes and eolian dust deposition over the past 30,000 years in Cheju Island, Korea. 地形, **23**, 821-830.