

# 兵庫県における最終氷期の風成塵の堆積とモンスーン変動

吉井 克行

キーワード：風成塵，酸素空格子（ESR）信号強度，モンスーン

## 1. はじめに

環境問題は、21世紀を迎えようとしている我々人類が直面している最大の課題である。問題解決にあたっては、一地域、一国による取り組みだけでは何ともし難い問題であることは、温暖化・酸性雨・オゾンホール拡大などの現象が、地球規模で起きていることから明かである。例えば、酸性雨の原因物質である硫酸化物や窒素酸化物は、偏西風などによって国境を越えて拡散している。硫黄を多く含む石炭の消費量が多く、しかも大気汚染抑制の進んでいない中国からの酸化物に汚染された高い濃度の酸性雨が、山陰や北陸地方などを中心とする西南日本各地に降っていることが広く知られている。これらの問題も風系、すなわち大気の循環運動と密接なかわりを持っている。このようなことから環境問題をより深く理解するには、環境変化の重要因子を人類活動のみに求めるのではなく、地球がくり返してきた大規模な環境変動サイクルを高精度で検出し、それらの総合として地球環境の変化をとらえる必要があると考えられる。そのためには、多角的な分析によるデータの量的な充実をいっそう図るとともに、より高精度な気候変動の復元を可能とする連続性のあるデータの蓄積が重要となる。

日本列島に分布する台地上の土壌や、古砂丘・火山灰層中の古土壌、あるいは完新世に堆積した土壌が、アジア大陸からの広域風成塵や陸化した海底や近隣地域から飛来した風成塵の影響を強く受けている事実が、次第に明らかになりつつある。そして風成塵の供給・運搬・堆積といった一連の作用は、最終氷期の大気循環、地形、植生などの自然環境変化と深くかわっており、風成塵が最終氷期の古環境を明らかにする上で、有効な指標となることも知られてきた。

日本列島では本州中部以北には中国北部やシベリアに起源をもつ風成塵石英粒子が分布しており、最終氷期最寒冷期には冬の北西モンスーンが強まったこと、また、沖縄から本州中部にかけてはアジア内陸部の砂漠やチベット高原から運ばれた風成塵石英粒子が分布しており、偏西風の影響下にあったことが今までの研究で明らかとされている（成瀬ほか、1996）。したがって、兵庫県はその位置が日本列島の中央部に近く、古風系の中緯度・高緯度コース間の漸移帯の存在やその可能性（成瀬、1996）について検討できる新たなデータを得ことができると考えられる。

## 2. 調査地域における層序の概要

調査地は兵庫県水上郡春日町大崎周辺で、ボーリング地点は東経135度03分37秒、北緯35度09分31秒である。調査地から東約5 kmには七日市遺跡があり、ここは県下最大級の弥生時代遺跡であると共に、西日本最古で最大級の旧石器遺跡でもある。また、調査地の南約1 kmには本州で最も低い中央分水界（分水嶺、標高95m）がある。ここから南に向かった

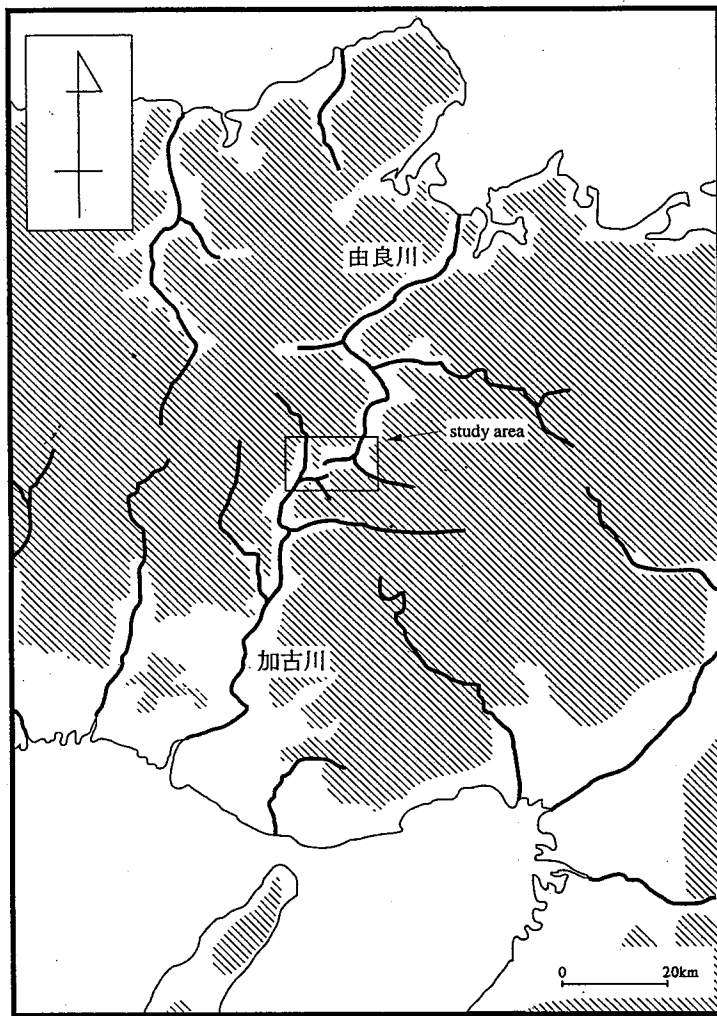


図1 兵庫県河川図および研究地域

水は、加古川を下り瀬戸内海へ流れ込み、北へ向かった水は、黒井川から竹田川、由良川と下り日本海へ流れ込む。このあたりは「氷上回廊」と呼ばれ、古くから瀬戸内側と日本海側とを結ぶ交通の要所となっていた。水分かれ周辺では頻繁に「河川争奪」が起っており、調査地域である黒井川周辺は明治時代まで沼地が広がっていたと考えられる。

水田の地表から採取した堆積物のコア（深度10.0m）のうち、深度1.00mより上位の泥炭層は農地として使用されていたため、攪乱を受けている。また、深度1.39mから1.55mにAT火山灰層が挟まれている。したがって、分析を行う堆積物のコアは、深度1.55m～8.10mまでのAT火山灰直下からとした。深度1.55m～8.10mの堆積物を4cmずつにわけ、1～139までの番号をつけた。層相は基本的には泥炭と粘土層のくり返しである。

春日掘削試料の年代については、Center for Isotope Research, Groningen Univ. に依頼し、AMS14C年代測定法により、次のような結果が得られている。

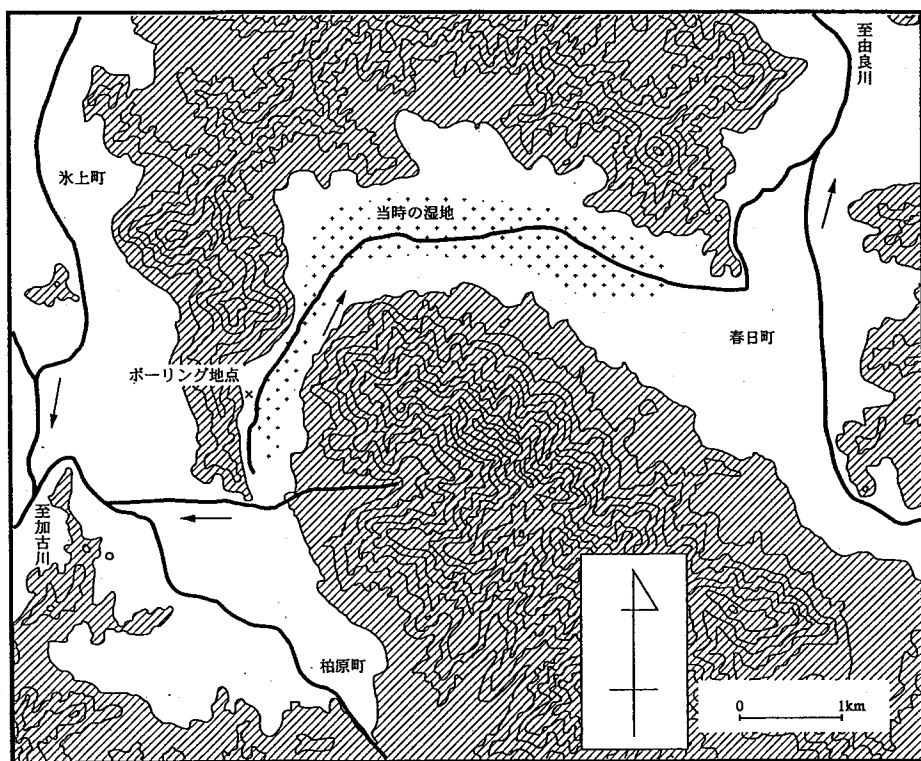


図2 調査地域およびボーリング地点

- 23層 :  $32180 \pm 690$  yrs B.P. (GrA-10448)
- 41層 :  $35940 \pm 1040$  yrs B.P. (GrA-10489)
- 58層 :  $44000 \pm 2600$  yrs B.P. (GrA-10490)
- 100層 :  $45100\text{--}51000$  yrs B.P. (GrA-10491)
- 131層 :  $>43800$  yrs B.P. (GrA-10493)

火山灰対比も試みたが、115層で角閃石が若干混入している程度であり、火山灰層がなく、対比することはできなかった。

### 3. 分析方法

- ・全無機物の堆積量測定
- ・ $\leq 20 \mu\text{m}$  無機物の堆積量測定
- ・粒度分析
- ・X線回折
- ・電子スピン共鳴 (ESR) 分析

### 4. 無機物の堆積量と古環境の復元

#### (1) 近隣地域における無機物の堆積量と先行研究との比較

図4は前田(1989)が行った春日・七日市遺跡の木本花粉化石の算出頻度図である。これ

Core: Kasuga

Interval: 1.0-10.0m

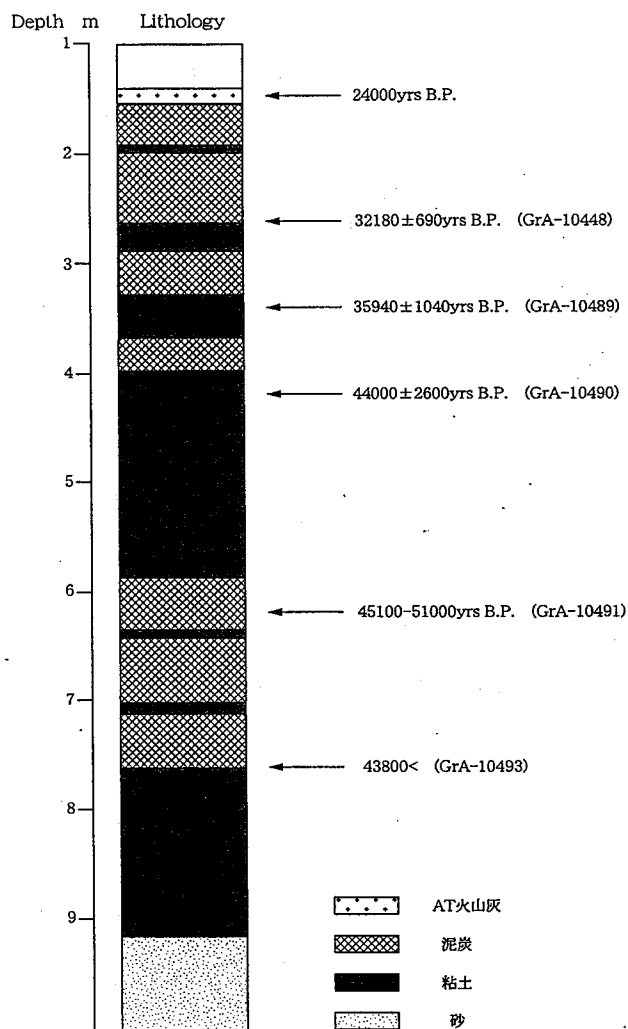


図3 春日町掘削試料の層相と地層年代

によると、5~4万年前頃の丹波地方はスギ属 (*Cryptomeria*) とハンノキ属 (*Alnus*) を主要な構成要素とし、トウヒ属 (*Picea*)、ツガ属 (*Tsuga*)、マツ属 (*Pinus*)、モミ属 (*Abies*) などの針葉樹がこれに続く温帯性針葉樹林の植生であったことが明かになっている。これに対し、この後AT降灰までの期間である4~2.5万年前頃になると、針葉樹の占める割合は低下し、かわってコナラ亜属 (*Lepidobalanus*)、ハシバミ属 (*Corylus*)、カバノキ属 (*Betula*) などが針葉樹を上回って優占する温帯性針広混交林の植生が成立する。この時期は最終氷期における相対的な小温暖期であったと指摘している。

これらの結果を春日町の風成塵堆積量変化と対比させてみると、相対的に5~4万年前頃では風成塵の堆積量は多く、4~2.5万年前頃では少なくなっている点において対応していると言

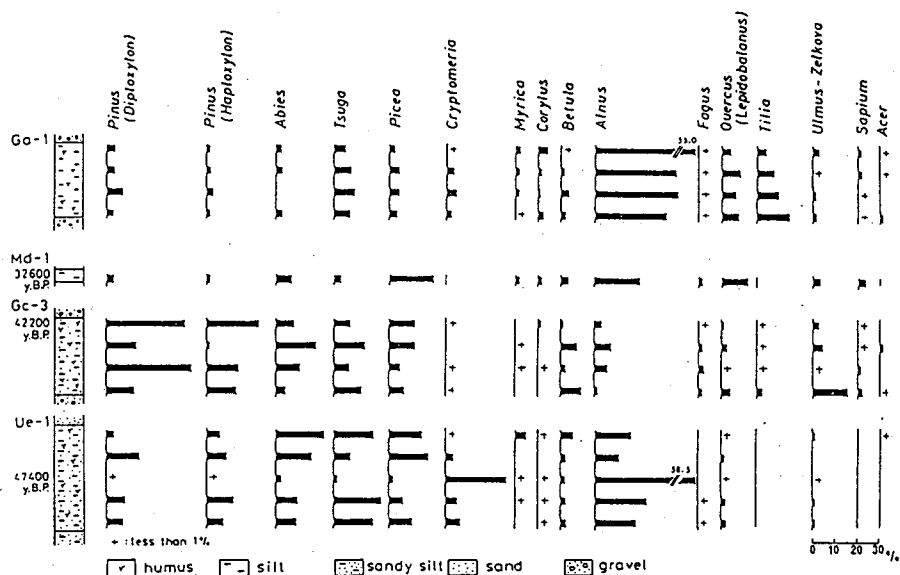


図4 春日・七日市遺跡の木本花粉化石の産出頻度図

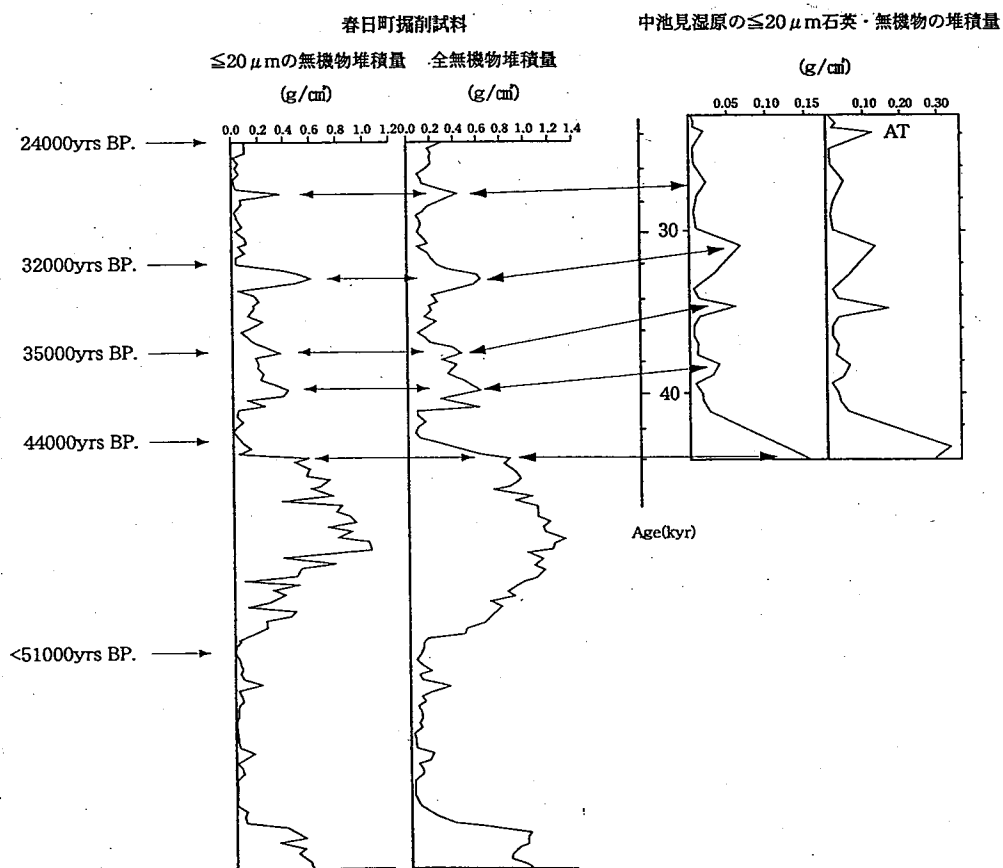


図5 春日町掘削試料の全無機物 $\leq 20 \mu\text{m}$ 無機物堆積量と中池湿原の $\leq 20 \mu\text{m}$ 石英・無機物の堆積量との対比

える。しかし、4~2.5万年前までには数回、風成塵堆積量のピークがあり、必ずしも一致しているとは言えない。これは急激な寒冷化に植生が順応しないうちに再び小温暖期に戻ったのではないかと考えられる。つまり、これらの時期の気候変動は、花粉の出現率の変化に現れないほど、急激でかつ短期間に起こったことを示唆している。

このことから、本論では風成塵の堆積量の多い時期を寒冷期に、少ない時期を温暖期に対比できると考えた。

これを裏づけるように、鈴木(1996)が行った福井県中池見湿原の $\leq 20 \mu\text{m}$ 無機物・石英の堆積量の変化は、春日町掘削試料で明らかにされた風成塵の堆積量変化とよく対応している(図5)。鈴木(1996)によると、27000yBP.頃、31000yBP.頃、35000yBP.頃、38500yBP.頃、42500yBP.頃の5つの時期に広域風成塵の飛来が活発化した可能性を示し、それらの時期がいずれも寒冷期であるという。

これらに対応する春日町の風成塵の堆積量の多い時期は、27000yBP.頃・32000yBP.頃・35000yBP.頃・37000yBP.頃・45000yBP.頃の5つの時期である。

そのほか、柳(1995)は、三方町黒田低地の泥炭堆積物の分析を行い、70000~60000yBP.にも広域風成塵の堆積量が顕著に増加することを指摘し、この時期も寒冷・乾燥期と考えた。これについては、春日町掘削試料の最下層の131~139層が、黒田低地の風成塵の増加期に対応するのではないかと考えられる。

このように近隣の地域で復元された寒冷期の存在と、春日町の風成塵堆積量から推定された寒冷期は、時期的によく一致している。また、131~139層の最下層を柳(1995)に従って6万年前前後とすると、6~5万年前にかけて2回のピークがあり、これらの時期も寒冷期であった可能性を指摘できる。

## (2) 世界における無機物の堆積量と先行研究成果との比較

図6は、グリーンランドGRIP 2(北緯72度58分、西経38度48分)の氷床コアから得られた酸素同位体比(Groote et al.,1993; Meese et al.,1994)とHeinrich events (as dated by Vidal et al.,1997)を春日町掘削試料の $\leq 20 \mu\text{m}$ 無機物の堆積量に対比したものである。

この酸素同位体比は春日町掘削試料の全無機物・ $\leq 20 \mu\text{m}$ 無機物の堆積量と非常によく対応している。特に明確に対応しているのは、32000yBP.頃、35000yBP.頃、37000yBP.頃、45000yBP.頃、52000yBP.頃に見られる酸素同位体比の増加期と風成塵堆積量増加期の5つの時期である。また、131~139層の最下層を6万年前前後とすると、54000yBP.頃、58000yBP.頃の時期も対応していると言える。

ところで、Heinrich events とは、ローレンタイド氷床の北部セクターの崩壊による大量の氷山流出を意味する。すなわち、Heinrich events は寒冷化が極まった時に起こり、その直後には持続時間の長い温暖期が来ることが明かにされている。それによると、26000yBP.頃(Heinrich events 2, 以下Hとする)、32000yBP.頃(H 3)、40000yBP.頃(H 4)、47000yBP.頃(H 5)に寒冷化が極まったとされ、これは春日町掘削試料の27000yBP.頃、32000yBP.頃、37000yBP.頃、45000yBP.頃に対比することができる。

このように、春日町における全無機物・ $\leq 20 \mu\text{m}$ 無機物の堆積量が増加する時期は、近隣の中池見湿原や黒田低地で示された気候変動(寒冷期)の時期とよく一致し、さらにはグリーンランドなどの寒冷期に対比できることが明かとなった。このことは少なくとも北半球における気候の寒冷化が同時性をもったものであったこと、さらに、春日町における広域風成塵の堆積量変動が、気候変動の影響を如実に反映したものであることを表している。

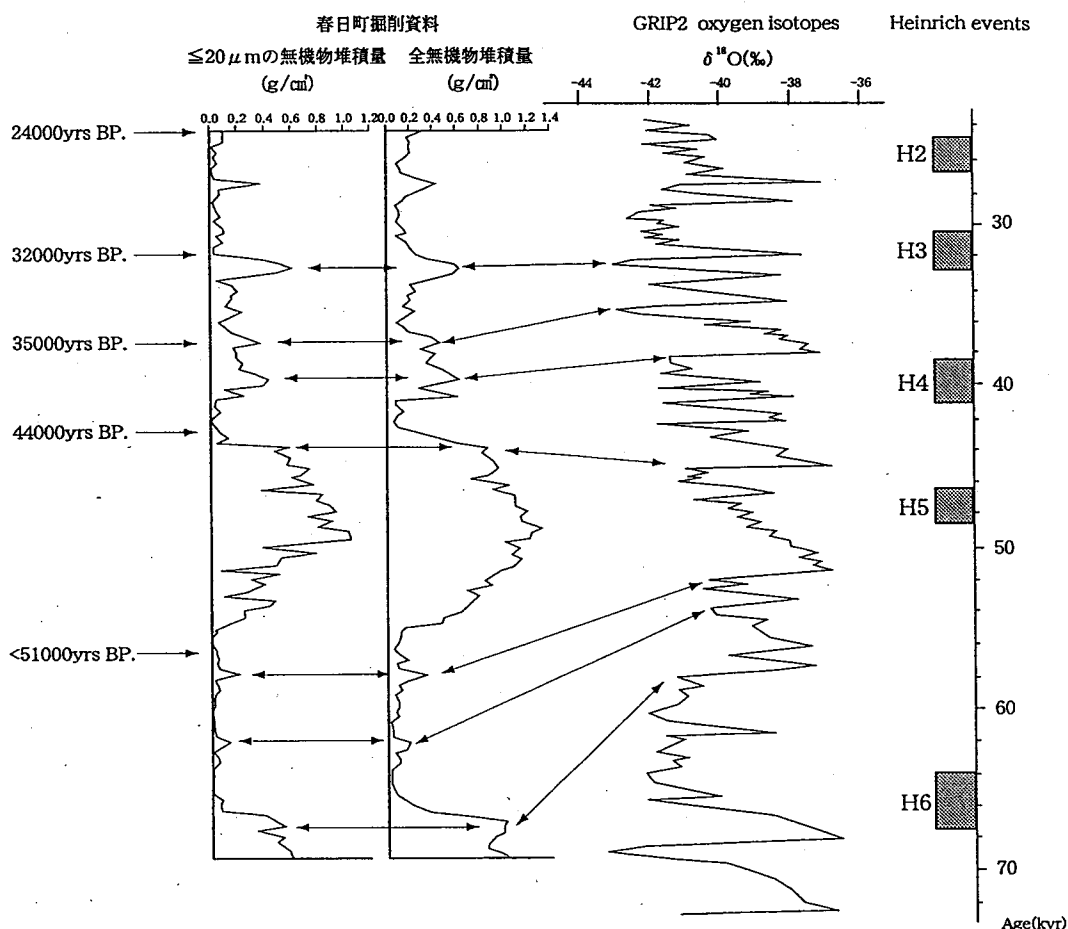


図6 GRIP2の酸素同位体・Heinrich eventsと春日町掘削試料の全無機物 $\leq 20 \mu\text{m}$ 石英・無機物の堆積量との対比 (1): Grootes *et al.*, (1993) (2): Vidal *et al.*, (1997)

### (3) 古環境の復元

春日町の泥炭堆積物について、全無機物の堆積量、 $\leq 20 \mu\text{m}$ 無機物の堆積量、粒度分析、X線回折、ESR分析を行った結果から、当時の古環境は次のように要約できる。

- 1) 春日町における風成塵起源の $\leq 20 \mu\text{m}$ 無機物堆積量の顕著な増加期は、27000yBP.頃・32000yBP.頃・35000yBP.頃・37000yBP.頃・45000yBP.頃・60000yBP.頃の6つの時期である。このほか比較的少ないが、54000yBP.頃・58000yBP.頃の2つの時期も堆積量の増加する時期と言える。このような時期は、最終氷期中の寒冷期に対比できる可能性が高い。
- 2) 最終氷期に春日町に飛来した風成塵は、大きく3つのグループに分けられる。
  - 1, 60000yBP.頃～35000yBP.頃にかけてESR値がおおむね11.0以上の風成塵が堆積している。これらの風成塵は、シベリアやモンゴル高原に広がる先カンブリア紀岩石の露出地帯から飛来したものである。
  - 2, 32000yBP.頃に堆積した風成塵は、中国黄土高原のレスと同じようなESR値を示している。この時期には今日の黄砂現象と同じようなdust現象が頻繁に発生し、中国内

陸部の乾燥地帯から風成塵が飛来していたと考えられる。

3, 27000yBP. 頃に堆積した風成塵は、ESR値が4.6という低い値を示している。これは、中国黄土高原起源の5.8~8.5というESR値を示す風成塵と、現地性の低いESR値を示す土壌とが混合して、このような低い値となったと考えられる。よって、この時期に堆積した風成塵も中国黄土高原を起源としている可能性がある。

3) これまで日本国内で酸素空格子信号強度が10以上の高い値を示す先カンブリア紀露岩地域を起源とする風成塵の分布域は、成瀬ほか(1996)による北海道羽幌(10.0)、苫前(12.7)、青森県牛潟(12.6)、柳(1995)による福井県黒田低地(10.3・11.1・15.3)、

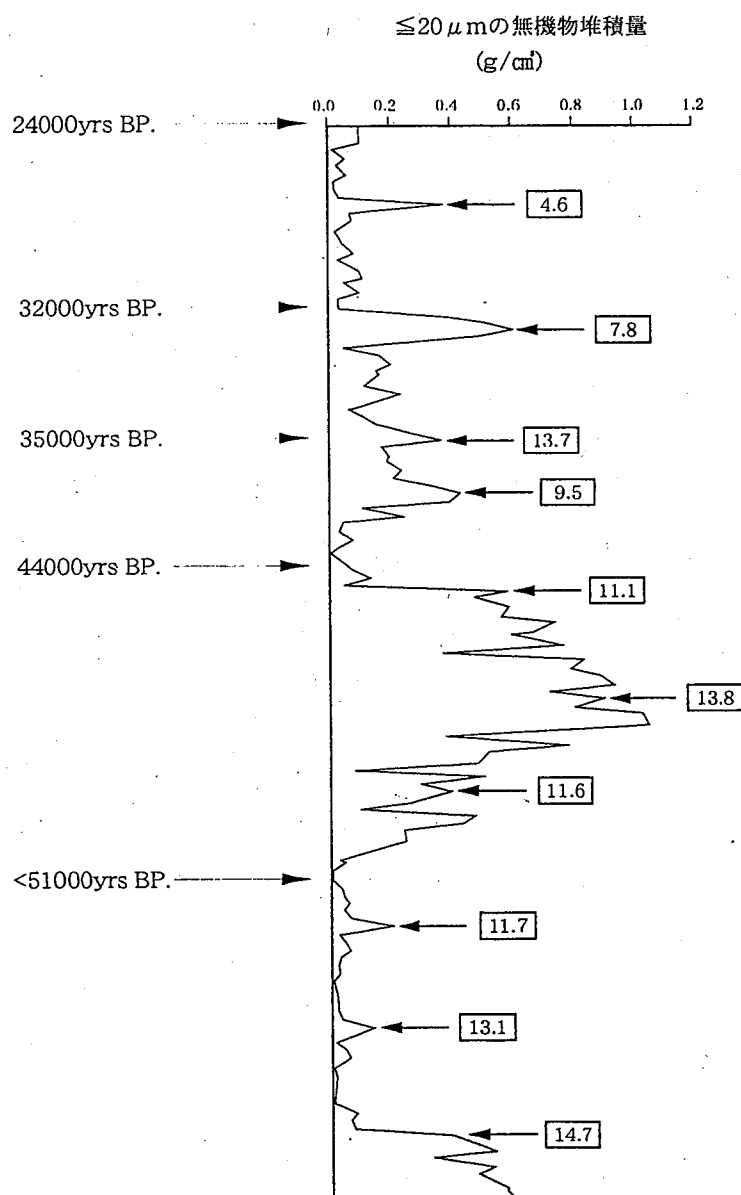


図7 春日町の $\leq 20 \mu m$ 無機物堆積量と酸素空格子信号強度 (単位:  $1.3 \times 10^{15} \text{spin/g}$ )



鈴木 (1997) による福井県中池見湿原 (10.1・10.2・10.8・11.7・12.1・12.3) などで確認されている。本研究の兵庫県春日町においても新に7試料がこの値を示した。以上のことから、高緯度コースの卓越風によって運ばれたと考えられる風成塵の南限を、兵庫県中北部地域まで下げることができる。また、黄土高原を起源とする中緯度コースの風成塵も同時に確認されていることから、この地域が両コースの古風系の漸移帯にあたると考えられる。

## 5. 結論

以上のことから、兵庫県における最終氷期の風成塵の堆積とモンスーン変動は以下のように整理される。

- (1) 春日町掘削試料中の $\leq 20 \mu m$ 無機物の堆積量変化から、27000yBP. 頃・32000yBP. 頃・35000yBP. 頃・37000yBP. 頃・45000yBP. 頃・60000yBP. 頃の6つの時期に広域風成塵の飛来が活発化したと考えられる。また、わずかながら堆積量が増加する54000yBP. 頃・58000yBP. 頃の2つの時期にも広域風成塵の飛来が活発化した可能性があり、これらの時期はいずれも寒冷期にあたると考えられる。

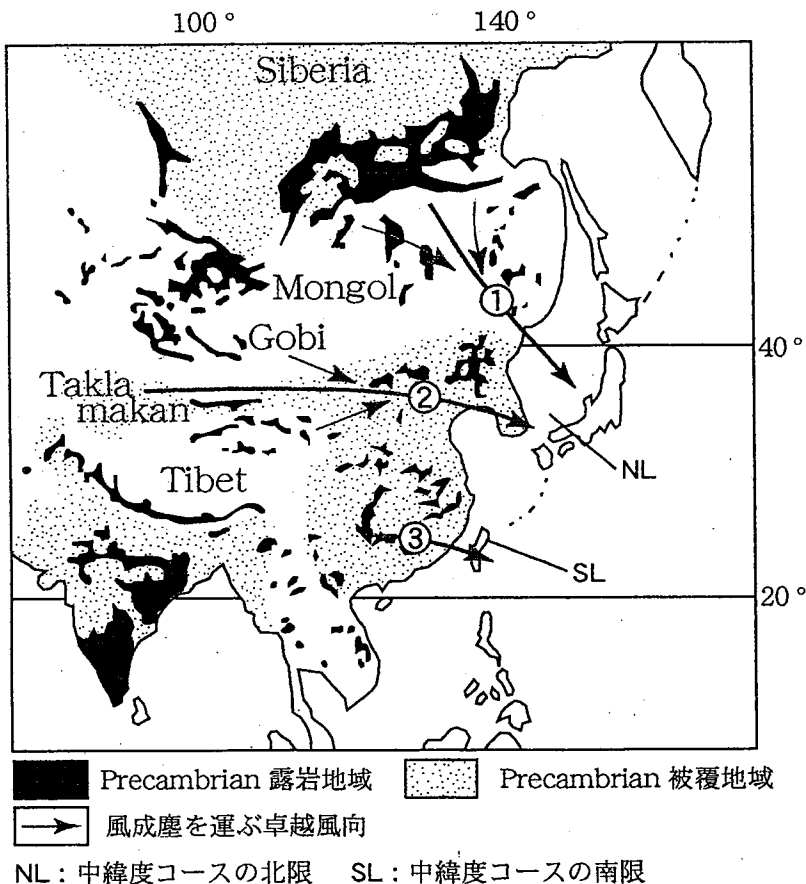


図8 風成塵の供給源と飛来コースの推定  
(成瀬ほか, 1997 を改図)

- (2) 春日町に堆積する風成塵が、年代的にみてHeinrich eventsなどの寒冷期に対比できる可能性があり、北半球における気候の寒冷化が同時性をもったものであり、さらに春日町の広域風成塵の堆積量変化と世界的な気候変動との間に強い関連があると考えられる。
- (3) 風成塵中の石英の酸素空格子信号強度の分析により、時期によって、広域風成塵を運んだ主要な風系が異なる可能性が明らかとなった。春日町ではH2やH3に対比される可能性がある時期には、主として中央アジアから夏季の亜熱帯ジェット気流により、中緯度コースを風成塵は飛来した。またH4からH5に対比される可能性がある時期には、主としてアジア大陸の北方のシベリア・モンゴルから冬季の北西モンスーンにより、高緯度コースを風成塵は飛来したと推定される(図8)。
- (4) 現在のところ高緯度コースの卓越風によって運ばれたと考えられる風成塵の南限は、兵庫県中北部地域である。また、黄土高原を起源とする中緯度コースの風成塵も同時に確認されていることから、この地域が両コースの古風系の漸移帯にあたると考えられる。

## 参考文献

- 福澤仁之, 大井圭一, 山田和芳, 岩田修二, 鳥居雅之 (1997): 日本海-黄土地帯-地中海トランセクトにおける過去240万年間の大気循環変動-チベット/ヒマラヤの上昇史との関係-。地学雑誌 (Journal of Geography), 106, 240-248
- Gerard Bond, Wallace Broecker, Sigfus Johnsen, Jerry McManus, Laurent Labeyrie, Jean Jouzel, and Georges Bonani (1993): Correlations between climate records from North Atlantic Sediments and Greenland ice. NATURE, Vol.365, 143-147
- Helge W. Arz, Jurgen Patzold, and Gerold Wefer (1998): Correlated Millennial-Scale Changes in Surface Hydrography and Terrigenous Sediment Yield Inferred from Last-Glacial Marine Deposits off Northeastern Brazil. QUATERNARY RESEARCH, 50, 157-166
- 石坂隆 (1991): 黄砂の性状と発源地の推定。名古屋大学水圏科学研究所編「大気水圏の科学 黄砂」, 109-123, 古今書院
- 前田保夫 (1989): 最終氷期における兵庫県丹波地方の植生史。第四紀研究 (The Quaternary Research), 27, 229-232
- 成瀬敏郎, 柳精司, 河野日出夫, 池谷元伺 (1996): 電子スピン共鳴 (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 (The Quaternary Research), 35, 25-34
- 成瀬敏郎, 小野有五, 平川一臣, 岡下松生, 池谷元伺 (1997): 電子スピン共鳴 (ESR) による東アジアの風成塵石英の産地同定-アイソトープステージ2の卓越風復元への試み。地理学評論, 70A-1, 15-27
- 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 (Journal of Geography), 106, 205-217
- 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 (The Quaternary Research), 37, 189-197
- 大井圭一, 福澤仁之, 岩田修二, 鳥居雅之 (1997): 中国内陸部のレス・古土壌堆積物と日本海深海堆積物の粘土鉱物からみた東アジアにおける過去240万年間のモンスーン・偏西風変動。地学雑誌 (Journal of Geography), 106, 249-259
- 小野有五 (1997): HIREAM計画とPAGES-PEP II。月刊地球, 19-8, 515-520
- 鈴木裕治, 成瀬敏郎, 池谷元伺, 岡下松生, 黄清華, 安田喜憲 (1997): 福井県敦賀、中池見湿原泥炭層中の風成塵からみた古気候変動。月刊地球, 19-7
- 多田隆治 (1997): ダンスガード・サイクル-突然かつ急激な気候変動と日本海海洋変動-。第四紀研究

(The Quaternary Research), Vol.67, No.8, 597-605

多田隆治 (1998): 数百年～数千年スケールの急激な気候変動—Dansgaard-Oeschger Cycle に対応する地球システムの応答—. 地学雑誌 (Journal of Geography), 107, 218-233

W. Dansgaard, S.J.Johnsen, H.B.Clausen, D.Dahl-Jensen, N.S.Gundestrup, C.U.Hammer, C.S.Hvidberg, J.P.Steffensen, A.E.Sveinbjornsdottir, J.Jouzel, and G.Bond (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. NATURE, Vol.364, 218-220

柳精司 (1995): 山陰東部と北陸西部における最終間氷期以降の広域風成塵の堆積量と古環境. 兵庫教育大学修士論文 (未公刊)

山田和芳, 福澤仁之, O.D.P. 第 161 次航海乗船研究者一同 (1997): 地中海深海堆積物 (ODP site 974B) で検出された過去 450 万年間の気候変動. 地学雑誌 (Journal of Geography), 106, 218-225