

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20700675

研究課題名（和文） 海岸砂丘発達史復元のための統合調査解析手法の確立

研究課題名（英文） Integrated investigations of the coastal dune evolution

研究代表者

田村 亨（TAMURA TORU）

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員

研究者番号：10392630

研究成果の概要(和文):日本の海岸砂丘は過去の気候変動や人間活動に関連して発達してきた。その堆積物は逆に、これらの事象の重要な記録だが、近年は手法の限界から研究が進展してこなかった。鳥取砂丘に地中レーダと砂の年代測定による新しい調査手法を適用し、過去 500 年間の発達史を詳細に明らかにした。ここで確立した手法を他地域の砂丘に使い、完新世の気候変動の理解や、気候変動と人間活動が海岸地形環境に及ぼす影響を深く探ることが可能になった。

研究成果の概要(英文): Japanese coastal dune fields have been formed in relation to past climate changes and human activities. Dune deposits are thus regarded as an important geological record of these past phenomena, but have not been well explored in recent years due to methodological restriction. I applied a new methodology combining ground-penetrating radar and optically-stimulated luminescence dating to the Tottori dunes, and clarified the process of the dune evolution over the past 500 years. This method, if applied to other dune fields, enables improving the understanding of the recent to modern climate changes and of the influence of the climate changes and human activity on the coastal environment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学

キーワード：砂丘，鳥取，地中レーダ，気候変動，完新世，風成堆積作用，海岸，更新世

1. 研究開始当初の背景

日本の海岸砂丘の発達史は、1960～70年代に、露頭調査、土器などの遺物、放射性炭素による年代測定により、盛んに研究された（多田, 1975）。海岸砂丘は、北海道から九州まで、さらには喜界島などの離島と、様々な

地域の沿岸域に分布し（Endo, 1986; 成瀬, 1989）、大部分は完新世に形成されている。

従来の砂丘発達史の研究は、砂丘砂層中に発達する「クロスナ層」（豊島・赤木, 1965; 遠藤, 1969）を鍵層に行われてきた。このクロスナ層は、砂丘砂と多量の炭質物が混ざり

あった黒色の砂層で、過去に砂丘が植生に覆われ固定されてきた土壌層である。クロスナ層は全国の砂丘に発達し、およそ同時期に形成されたとされる(遠藤, 1969; 井関, 1975)。放射性炭素年代と遺物より、クロスナの時期は主に、縄文中期から弥生までの旧期、古墳から奈良時代までの新期の、二回に分かれる。旧期は 2000 年以上に及ぶが、新期は比較的短く、クロスナ層がない所もある。クロスナ層を鍵層に、旧期以前の砂丘が旧砂丘、旧期と新期クロスナの間が新砂丘 I、新期クロスナ以後が新砂丘 II である(遠藤, 1969)。

砂丘砂層とクロスナ層はそれぞれ、砂丘の活動期と固定期とに対応する。これらの繰り返しは、気候などの変動を反映すると考えられている。降水量の増加は植生を促し、風量や風速の増加は砂の運搬を増す。また、砂丘砂の供給源は海浜であり、海面の低下で海岸線が遠ざかれば、砂の供給は減少するか、砂浜が広がることで砂の供給が増大する。これまで日本列島沿岸の海岸砂丘の発達史が盛んに論じられたが、見解の一致はない。また、クロスナ層の年代や枚数も地域により異なる(角田, 1975)。岡本ほか(2000)は、下北半島で過去 3000 年間に 3 度の砂丘固定期を認めており、過去 1000 年間では、砂丘の活動が、砂鉄採取や森林伐採など人間活動と関連する可能性も指摘されている(成瀬, 1989)。

以上総括される国内での海岸砂丘の発達史についての研究は、80 年代以降はほぼ放置されている。原因は手法上の手詰まりにある。当時、地層の観察と試料採取は、露頭の分布に依存し、砂丘堆積物の年代も直接ではなく、クロスナ層の放射性炭素年代に基づいていた。砂丘堆積物の空間的な把握に制約があり、また、高分解能の編年は不可能であった。

国外の砂丘研究は、最近、新展開を迎えつつある。その要因は、(1) 地中レーダ、(2) 石英 OSL 年代測定の発展に集約される。(1) 地中レーダ探査は、地中に電波を発信し、その跳ね返りを受信して地下構造を探査する手法である。探査断面では、砂丘堆積物のフォーセット面や、セット境界などの堆積構造が見られることが経験的に知られている。このため地中レーダを用いれば、露頭がなくても砂丘の内部構造を 3 次元的に明らかにすることができる。(2) 石英 OSL 年代測定は、石英や長石の粒子に光刺激を与えると生じる発光の強度に基づく方法である。発光強度は粒子が受けた自然放射線により時間とともに大きくなるのが、途中で太陽光を受けると 0 にリセットされる。砂丘堆積物の粒子は、最後に太陽光を浴びて埋積された時から現在まで自然放射線を受けるため、その発光強度を測定すれば、堆積年代が明らかになる(Huntley et al., 1985)。石英粒子の光学的特性の多様性から、当初は発光強度から放射線の

蓄積量を求める手法に問題があったが、SAR 法(Murray and Wintle, 2000)により改善され、最近は精度が上がった。この方法の長所は砂丘堆積物の年代を直接求めることである。

2. 研究の目的

この研究の目的は、地中レーダと OSL 年代とを組み合わせた調査手法により日本を代表する海岸砂丘である、鳥取砂丘の完新世における発達史を詳細に明らかにすることである。砂丘堆積物のフォーセットの傾きや 3 次元探査から砂丘の移動方向や移動速度や活動期ごとの砂丘堆積物の体積を求め、砂丘活動期・固定期の年代を高分解能で決定すること、この新しい研究手法を確立して適用することで、日本の海岸砂丘の発達史に関する研究の停滞を打開することをねらう。

3. 研究の方法

研究は、(1) 調査地の選定と地形調査、(2) 砂丘堆積物の地中レーダ探査・露頭調査、(3) ハンドオーガーによる分析用試料の採取と地層観察、(4) OSL 年代測定、の 4 段階で行った。

(1) 調査地の選定と地形調査

まず初めに、鳥取砂丘の中で地中レーダ探査の測線位置を現地での地形調査から選んだ。また、砂丘東部は天然記念物の特別保護地区、西部は鳥取大学乾燥地研究センターの敷地内であり、これらの調査許可手続きなども合わせて行った。

(2) 砂丘堆積物の地中レーダ探査・露頭調査

選定した測線において地中レーダ探査を、鳥取砂丘東部における露頭で露頭観察と試料採取を行った。

地中レーダ探査は 2008 年 7 月 23 ~ 28 日、2009 年 4 月 19 日、5 月 25・26 日の 3 回に行った。3 次元的な把握を可能にするために、クレストと直交する測線を、東部で 3 本、西部で 4 本とり、東部で第 II 砂丘列のクレストと平行な測線を 1 本設定した。これら測線の位置を図 1 に示す。

(3) ハンドオーガーによる試料採取と分析

ハンドオーガーによる堆積物試料採取は、地中レーダ探査で得られた砂丘堆積物の地質断面と露頭の柱状図を参考に採取した。堆積物の掘削のために、豪州 Dormer Engineering 社製のオーガーを用いた。

(4) OSL 年代測定

砂丘堆積物の OSL 年代測定は、英国 Sheffield 大学で行った。この方法は、石英が、地中に埋積して自然放射線を被曝した後、光を当てるとその埋積中の被曝量に応じた分だけ発光する性質(Optically-Stimulated Luminescence (OSL): 光励起ルミネッセンス)を応用し、堆積物の堆積年代を求める。手順は、発光の強度から自然放射線の被曝量の見

積もり、および自然放射線の大きさ（年間線量）の見積りの2つで、最後に自然放射線被曝量を年間線量で割り、砂の埋積時間を求めることができる。ここでは、石英 SAR 法 (Murray and Wintle, 2000) を用いた。



図1 .鳥取砂丘の空中写真 .測線位置を示す .

4 . 研究成果

主要な成果として 地中レーダ探査と OSL 年代測定の結果を述べる .

(1) 地中レーダ探査

重点的に探査を行った TTD01 の結果をここでは記述する . TTD01 は、幅がそれぞれ 500m 程度の砂丘列 III と砂丘列 II のクレストを横切る (図 1, 2) . 砂丘列 III では、40 ~ 120m および 280 ~ 520m の区間でそれぞれ陸側、海側に傾く強い反射面が見られる . 280m 地点でローム層の露出に連続することから、古砂丘を覆うローム層を表すと考えられる .

砂丘列 III の陸側と海側、砂丘列 II の海側斜面を除く部分では、主に陸側に傾斜する高さ 20m 以下のフォーセット層理が見られる . さらには再活動面や侵食面が認められ、フォーセット境界面とともに堆積ユニットの境界を示す . 陸側傾斜のフォーセットは、秋 ~ 冬の季節風で砂丘が移動し、大部分の堆積物が形成されたことを示す .

砂丘列 II の海側では表層を除き、層理が水平から海側に傾斜し、ユニット境界も海側傾斜である . 表層のユニットは、海岸線から 20m 内陸の後浜限界まで連続し、海岸線から 150m まで、陸側傾斜の層理を示す . ここでは、海面付近に強い反射面があり、その下位には数度の勾配で海側傾斜する下に凸の反射面がある . 強い反射面は地下水面で、地下水面下の海側傾斜の層理は、海浜が海側に前進して形成されたものと考えられる .

(2) OSL 年代

OSL 年代は、地中レーダ断面の層序と矛盾しない (図 2) . TTD01 における年代値の幅は、 $-0.01 \pm 0.01 \sim 0.45 \pm 0.04 \text{ka}$ (ka : 千年前 ; 試料採取の 2009 年を基準) で、全試料が 16 世紀以降の年代値を示す . 負の等価線量を示す試料も、誤差を考慮すれば矛盾のない値である . 年代値分布にはクラスターがあり、 $0.44 \sim 0.45 \text{ka}$ (2 試料) , $0.35 \sim 0.37 \text{ka}$ (3 試料) , $0.15 \sim 0.19 \text{ka}$ (5 試料) , $0.12 \sim 0.13 \text{ka}$ (3 試料) ,

ほか 0.07ka 以降のもの (7 試料) , 0.30ka が 1 試料である .

TTD01 では、砂丘列 II で 300 年前以降、砂丘列 III で 450 年前以降の年代値が得られた . 砂丘列 II においては、海側に傾斜する層理を示すユニットからの P10-2 (150-190 年前) と P10-3 (270-330 年前) との間が侵食面で区切られ、両者間には 100 年程度の年代差がある . 両ユニットは陸側で陸側傾斜の侵食面に切られ、そこからフォーセット面の陸側前進があり、現在のフォーセット面に近い P9-3 では、30-50 年前である . 砂丘列 II 表層の大部分を形成したフォーセット面の移動は、190 ~ 30 年前の間に顕著に起った . 砂丘列 II の陸側部は、トラフの堆積物を覆う . トラフから砂丘列 III の海側斜面は、堆積ユニットが断続的に陸側へ付加する . 最下位の P7-2 (410-490 年前) は、わずかに上位の P6-1 (330-390 年前) より約 100 年古い . 次に侵食面と再活動面を一枚ずつ伴う P6-1 から P5-1 までの区間では、320-380 年前 ~ 330-390 年前と、ほとんど年代差がなく、ごく短期間で堆積したといえる . 顕著な侵食面を挟む P5-1 と P4-2 (120-140 年前) との間には約 200 年の時間差があり、堆積速度の減少や侵食が考えられる . P4-2 から P3-2 (100-140 年前) の間は時間差が小さく、ここも短期間に急速な堆積があった . 再活動面を挟む P3-2 と P3-1 (50-70 年前) の間は、同じ掘削孔だが約 50 年の時間差がある . このように、P7-2 から P3-1 までのサクセションの年代値は、全て層序と整合的で、約 450 年前から現在にかけて陸側付加で形成されたと考えられる . なお、平均値で 140 ~ 340 年前の年代値を示す試料はない . P1-2 は P7-2 とほぼ同じ、400-480 年前の年代を示し、上位に不連続面をもって重なるユニットの P1-1 は、170-210 年前と、砂丘列 III の陸側は、おそらくこれらの年代に 2 段階で堆積したと考えられる .

(3) 砂丘砂堆積量の定量化

TTD01 において、年代値と地中レーダ断面とを組み合わせることで、年代ごとの砂丘堆積物の量 (保存量) を定量化した (図 3) .

10 年あたりの砂丘砂の堆積量は、得られた OSL 年代値のクラスターに伴い、特徴的な変化を示す . 320 ~ 390 年前 (西暦 1620 ~ 1690 年) に堆積量が高く、単位幅あたり 300m^3 ($300 \text{m}^3/\text{m}$) 程度で、その後 1690 ~ 1820 年では $100 \text{m}^3/\text{m}$ と著しく減少する . 1820 年ごろに急増し、1820 ~ 1910 年には、 $400 \sim 600 \text{m}^3/\text{m}$ 、その後 1960 ~ 1980 年に $600 \text{m}^3/\text{m}$ のピークを持つが、おおむね $400 \text{m}^3/\text{m}$ 程度に減少する .

(4) 鳥取砂丘の発達過程・時期

測線 TTD01 を豊島・赤木 (1965) による鳥取砂丘の模式断面と比較すると、砂丘列 III の海側と陸側斜面のローム層を覆う堆積物の内部にクロスナ層が想定され、砂丘列 III

の表層と砂丘列Ⅱ全体が新砂丘Ⅱに対応する。鳥取砂丘のクロスナ層には古墳時代末期の遺物を含むとされ、全体が450年前よりも若いTTD01の堆積物は、このクロスナ層よりも上位で、遠藤(1969)の新砂丘Ⅱに相当する。このため、今回探査した堆積物は、クロスナ層と砂丘砂層との関係ではなく、最上位の新砂丘Ⅱの堆積期の中での変動を記録している。図3に示す通り、鳥取砂丘では、最近500年間において、17世紀末から19世紀初頭にかけて風成砂の堆積量が減少した時期、反対に17世紀および19世紀から現在まで堆積量の大きい時期があった。

1620~1690年と、19世紀初頭から現在までの飛砂量の絶対値は、過去ほど堆積物の保存が悪いはずなので、定量的に比較できないが、前者は現在と同程度かそれより大きな堆積量があった可能性がある。とりわけ、1640~1660年には、誤差範囲を考慮した復元結果より堆積量が集中していたかもしれない。この時期は、小氷期でも太陽活動が最も低下したマウンダー極小期にほぼ一致し、気候の寒冷化が冬季の強風が続く時間(storminess)の増加につながったとも考えられる。立石(1974)は、日本の海岸砂丘における防砂林の構築開始が、17世紀から18世紀初頭に集中していることを指摘している。立石はそれらが戦国騒乱による海岸林の荒廃や海岸林伐採で飛砂が起こりやすくなったことに加え、潟湖であった沖積平野に新田開発が及び、飛砂対策が必要になったことなど、社会的な要因を考察している。中世には多くの砂丘に樹木が茂っていたといわれ、一変して飛砂が激しくなったのは、社会的要因に加えて気候変動も関連した可能性がある。

鳥取砂丘での17世紀末の飛砂の減少、19世紀初頭からの飛砂の上昇は、人間活動に影響された可能性は低い。砂丘東部では、戦後はおろか現在まで防砂林は構築されてこなかった(立石, 1974)。砂丘西部でも防砂林が作られたのは、約100年前以降である。したがって、飛砂の減少は、防砂林構築など現地での何らかの人間活動による影響ではない。同様に、防砂林が存在しないことから、飛砂の上昇に関しても、森林伐採の影響ではない。一方、河川からの堆積物供給量の増減は、飛砂活動に影響をおよぼす可能性がある。貞方(1985)が指摘したように、江戸以降は中国山地一帯で、花崗岩を大規模に崩して砂鉄を採取する鉄穴流しが盛んに行われ、流出土砂が下流の地形形成に大きな影響をおよぼした。しかし、千代川流域においては良質な砂鉄は得られず、鉄穴流しが発達していないため、人為活動による堆積物供給の急激な変化も考えられない。以上より、17世紀以降の鳥取砂丘の飛砂活動の変遷は、何らかの気候変動を反映していたと考えられる。

ここで飛砂活動の原因となる気候変動については、単純な結論を得ることは出来ないが、1) 気候の寒冷化もしくは降雨の減少による樹木草本の枯渇、2) 降雨の上昇による堆積物供給の増加、3) 冬季北西季節風の強まり(絶対強度の上昇、強風持続時間の増加)、の3つが考えられる。Clarke and Rendell(2009)は、ヨーロッパの海岸砂丘の堆積年代についてまとめ、16世紀末から20世紀末までの400年間は、それ以前の中世温暖期にくらべて飛砂活動が全体に上昇しているとした。しかし、19世紀以降での歴史記録に基づく詳細な飛砂上昇期については、地域間の多様性が大きいことも指摘している。Bateman and Godby(2004)は、英国南部の風成砂から、鳥取と同時期の飛砂活動の上昇を明らかにしているが、直接比較はできない。鳥取砂丘での過去450年間における飛砂活動の変動は、現在までに至る数十~百年スケールの気候変動と関連しているはずだが、その関係を議論するには他の砂丘地における同様の研究や、他指標による気候変動の検討が必要である。

鳥取砂丘の発達と、その外的な要因との関係は不明だが、得られた結果は、砂丘地形の発達をうまく説明する。TTD01では、1620~1690年に砂丘列Ⅲの海側斜面で砂が大きく陸側に付加し、またこれは1870~1910年にも起きた。これらの時期の間に、砂丘列Ⅱの海側斜面では海側への付加が起っている。また1870~1910年では、砂丘列Ⅲの付加速度が鈍ったのに対し、砂丘列Ⅱ表層の大部分はこの時期に陸側へ付加している。したがって、約1870~1910年を境に、陸側付加の堆積中心が砂丘列Ⅲから砂丘列Ⅱに移っている。海側への付加は、海浜に砂が付加し、海岸線が前進して土台ができることが条件である。仮に海浜への堆積物供給が一定であれば、飛砂の少ない時期には砂が付加して海浜が前進する。その後飛砂が若干上昇し、砂丘を陸側に大きく付加させるほどでもない、大きく前進した海浜の砂は、砂丘の海側斜面に付加する。こうして形成されるユニットが、砂丘列Ⅱの海側斜面に見られる150~190年前(P10-2)、270~330年前(P10-3)のものに対応する。飛砂がさらに強くなると、海浜から砂丘海側斜面全体を侵食し、砂が陸側に付加し、フォーセットの移動を促す。ここで、砂丘列Ⅱは、飛砂の休止期間の後、供給砂が過剰になることで高まりとなって、そこに堆積中心が成立し、砂丘列Ⅲまで届く砂が減少したといえる。このように、TTD01の年代値は、砂丘列が独立した高まりになる原因に、断続的な飛砂活動があることを示している。

(5) まとめと今後の課題

本研究課題は、地中レーダ探査、砂掘削用ハンドオーガー、OSL年代測定を組み合わせた統合的な地質調査手法によって海岸砂丘

を詳細に探査し、その手法を確立することが第一の目的であった。地中レーダでは十分な探査深度が得られ、OSL年代も断面画像による層序とよく一致するものが得られたことから、この統合的探査手法は、よく機能している。ここで得た結果から、鳥取砂丘の発達時期や、その砂丘内での多様性、海岸線変化や気候変動など外的・内的要因による発達過程への影響など、従来の露頭観察と遺物による年代決定では不可能な、詳細な地形・地質・地理学的な成果が得られた。

今後の課題は、まず調査地の鳥取砂丘において、今回掘削できなかった砂丘列ⅠやⅡの深部の年代を決定し、砂丘列の正確な開始時期を探ることや、古砂丘の年代を測定することが上げられる。さらに、ここで確立した手法は、例えば、庄内、屏風山、新潟、出雲など、他の地域の砂丘地にも適用でき、その結果から、砂丘発達時期の地域間対比や発達過程の多様性を明らかにすべきである。これにより、日本列島における過去 1000 年から現在までの気候変動の理解や、気候変動や人間活動が海岸地形環境に及ぼした影響を探ることが、当研究成果からの発展的課題である。

(6) 引用文献

- Bateman M.D., Godby S.P. (2004) Late-Holocene inland dune activity in the UK: a case study from Breckland, East Anglia. *Holocene*, 14, 579–588.
- Clarke M.L., Rendell H.M. (2009) The impact of North Atlantic storminess on western European coasts: A review. *Quaternary International*, 195, 31–41.

- 遠藤邦彦 (1969) 日本における沖積世の砂丘の形成について *地理学評論* 42, 159–163.
- Endo K. (1986) Coastal sand dunes in Japan. *Proceedings of the Institute of Natural Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, Earth Sciences*, 21, 37–52.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith D.I., Thewalt, M.L.W. (1985) Optical dating of sediments. *Nature*, 313, 105–107.
- Murray A.S., Wintle A.G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57–73.
- 成瀬敏郎 (1989) 日本の海岸砂丘. *地理学評論*, 62A, 129–144.
- 岡本 透・大丸裕武・池田重人・吉永秀一郎 (2000) 下北半島北東部に分布するヒバ埋没林の成因に関わる人為的影響. *第四紀研究*, 39, 215–226.
- 貞方 昇 (1985) 山陰地方における鉄穴流しによる地形改変と平野形成. *第四紀研究*, 24, 167–176.
- 角田清美 (1975) 日本海および東シナ海沿岸の主な海岸砂丘地帯の形成期と固定期について. *第四紀研究*, 14, 251–276.
- 多田文男 (1975) 日本における砂丘生成に関する研究史. *第四紀研究*, 14, 177–182.
- 立石友男 (1974) 日本海沿岸における海岸砂丘林の造成過程. *日本大学自然科学研究所研究紀要*, 9, 15–44.
- 豊島吉則・赤木三郎 (1965) 鳥取砂丘の形成について. *鳥取大学学芸学部研究報告*, 16, 32–45.

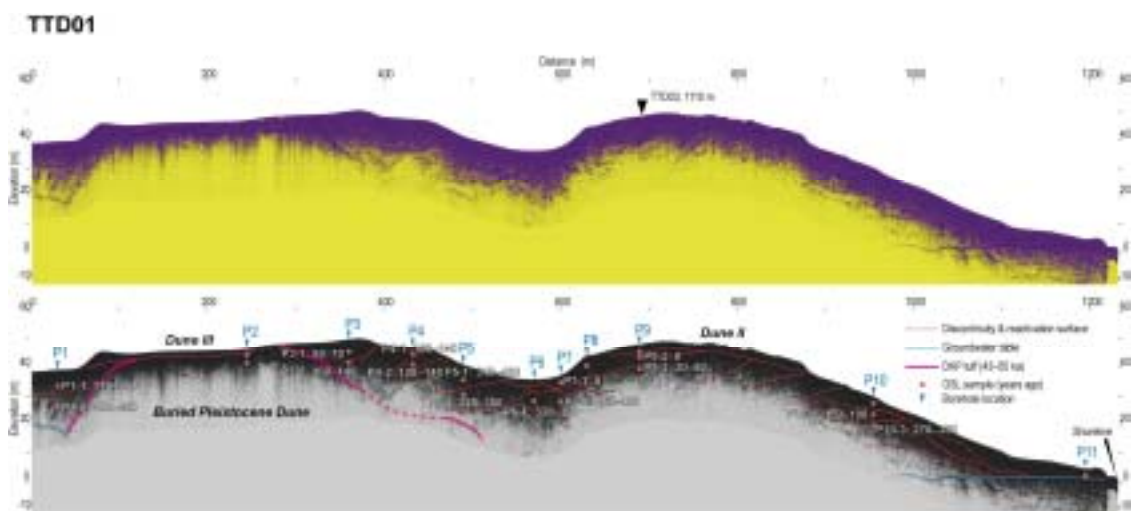


図2 . TTD01 の地中レーダ断面と OSL 年代 . 測線位置は、図 1 に示す .

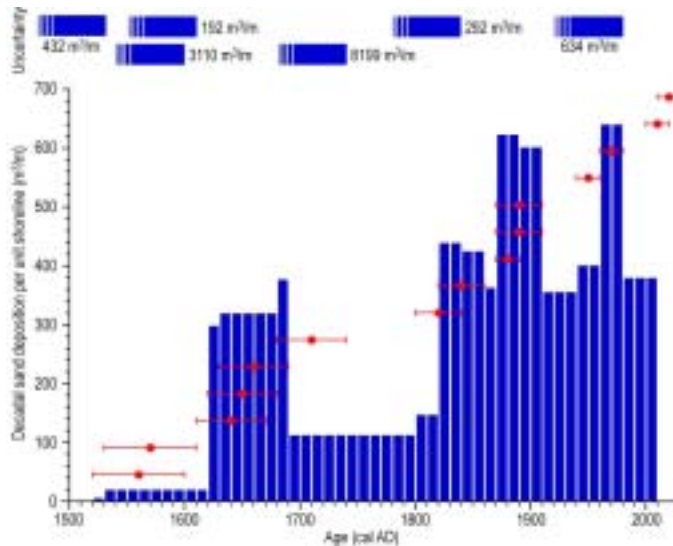


図3 .TTD01における10年ごとの風成砂堆積の時間変化．赤で示すのは OSL 年代値と誤差範囲．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

Tamura T., Kodama Y., Saitoh Y., Watanabe K. (2009) Ground-penetrating radar profile of shore-oblique transverse coastal dunes. 27th IAS Meeting of Sedimentologists, Alghero, Italy, 2009年9月21日.

田村 亨・小玉芳敬・齋藤 有・渡辺和明 (2009)鳥取海岸砂丘の地中レーダ断面．日本地球惑星科学連合2010年大会,千葉, 2009年5月12日.

田村 亨・小玉芳敬・齋藤 有・渡辺和明 (2009)海岸砂丘の地中レーダ断面：鳥取砂丘の例．日本堆積学会2009年大会,枚方,2009年3月28日.

6．研究組織

(1)研究代表者

田村 亨 (TAMURA TORU)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員

研究者番号：10392630

(2)研究協力者

小玉 芳敬 (KODAMA YOSHINORI)

鳥取大学地域科学部・准教授

Mark D. Bateman

Department of Geography, University of Sheffield・Reader

渡辺 和明 (WATANABE KAZUAKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主幹

齋藤 有 (SAITOH YU)

同志社大学・大学院工学研究科・特別研究

員

松本 弾 (MATSUMOTO DAN)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・特別研究員