



統合国際深海掘削計画 (IODP)
— 2003 年から 10 年の成果 —

アジアモンスーンの進化 と変動 : IODP 日本海・ 東シナ海掘削 (Exp. 346) を終えて

多田隆治

Evolution and variability of Asian Monsoon :
After finishing IODP expedition to the
Japan Sea and northern East China Sea

Ryuji Tada

たどりゅうじ : 東京大学大学院理学系研究科

アジアモンスーンは、水循環を通じて人々の生活に大きな影響を与えている。従って、アジアモンスーン降水の時間・空間変動様式やその振幅を知ることは、温暖化後の水循環を理解し、災害などへの対策を考える上でも重要である。アジアモンスーン降水の時空変動パターンやその制御要因を探る目的で、IODP Exp. 346 が 2013 年夏に実施された。ここでは、その研究背景を説明すると共に、成果の一端を紹介する。

1. はじめに

私達日本人は、春夏秋冬の明確な季節変化とそれを彩る景色の変化に特徴付けられた環境の元で、その情緒豊かな文化を育んできた。その明確な季節性を生み出しているのが、アジアモンスーンである。特に夏季モンスーンは、梅雨として列島に恵みの雨をもたらすと共に時には洪水を引き起こす。またから梅雨により引き起こされる干魃は、農作物の収穫を減らし、飢饉を引き起こす。従って、こうしたアジアモンスーンの挙動がどのような時間スケールでどのように変動するのか、そうした変動を引き起こしている要因は何か、を知ることが、日本を含む東アジアにおける文化の醸成、文明の盛衰を理解する上で重要であるとともに、地球温暖化に伴って、アジアモンスーンがどのような様式でどの程度変化しうるのかを知る上でも意味がある。

近年の気象学、気候学の進展は、東アジア夏季モンスーンの強さ（北西太平洋から大陸に吹き込み、そこで上昇流となって大気上層で発散する空気の対流の強さ）の変化に伴って、夏季降水の強さだけでなく、その空間分布も変化する事を明らかにした。そしてそれは、梅雨前線の北上の季節進行や北限の位置の変化として現れると考えられる。更に近年の研究は、梅雨前線の位置が偏西風ジェット的位置で規定され、春から夏にかけての偏西風の北上に伴って、北上することを示した (Sampe and Xie, 2011)。即ち、夏季モンスーン降水の空間パターンやその時間変動は、偏西風ジェットの挙動に大きく影響されているのである。

図1 東経 80-90 度付近における偏西風ジェット軸緯度の季節変動 (from Schiemann *et al.*, 2009).

では、偏西風ジェットの位置は、一年の中でどの様に変化し、その変化には何が影響しているのだろうか？図1は、チベット上空での偏西風軸の緯度が季節と共にどう変化するかを示した図である (Schiemann *et al.*, 2009)。図から明らかなように、冬の間、ヒマラヤ山脈南縁を通過していた偏西風ジェットは、5月初旬に突然チベット高原の北側へジャンプする。そして、9月頃までチベットの北側を通過し続け、10月頃に再びヒマラヤ山脈南側へと戻るのである。これは、ヒマラヤ山脈及びチベット高原が 5000 m を超える高度をもってそびえ立つ為にそれが障壁となり、その上を安定して偏西風が通過できない為である。つまり、ヒマラヤーチベットが存在するために、偏西風経路が二極化しているのである。これと似た偏西風ジェット軸のジャンプが数百年～数千年の時間スケールでも繰り返していたらしい事が、最近、日本海堆積物に含まれる風成塵の分析から明らかにされた (Nagashima *et al.*, 2007 ; 2011)。きっかけとなったのは、日本海堆積物に見られる明暗の縞模様の成因に関する研究である。

2. 第四紀日本海堆積物に見られる明暗互層とその成因

日本海深部に堆積した半遠洋性堆積物がセンチメートルから 10 センチメートルの明暗の層の繰



図2 日本海深部の第四紀半遠洋性堆積物に見られる明暗互層とそれに見とれるGiosan博士 (ウッズホール海洋研究所).

り返しで特徴付けられる (図2) 事が、1989年に行われた国際深海掘削計画 (ODP) の第 127 次航海によって明らかにされた。当時 30 台前半だった筆者も堆積学者の一人として航海に参加したが、明灰色～帯緑灰色の明色層と暗灰色～黒灰色の暗色層が、海底直下から 100 m 以上に渡って、延々と続く様子を目の当たりにして、その神秘的な美しさに見惚れるとともに、その成因の不思議さに魅了されたのを、今でもはっきりと憶えている。

その後の研究で、こうした明色層と暗色層の繰り返し (ここでは明暗互層と呼ぶ) が日本海深部 (水深～500 m 以深) 全域に渡って対比可能で、同

時に堆積したものであることが明らかにされた (Tada *et al.*, 1992). これは、日本海が一つのシステムとして、何らかの環境変動にตอบสนองしてきたことを示唆する。では、明暗互層は、どのような環境変動を反映しているのだろうか？それを知るには、先ず明暗の色の変化が何を反映しているのかを理解する必要がある。泥質堆積物の色の黒さは、一般に、有機物の含有量を反映していると言われる。日本海堆積物も例外ではなく、主に有機物の含有量を反映することが知られている。また、日本海堆積物の有機物含有量は、表層での生物生産を反映するが、その生物生産量は、日本海における深層水の滞留時間 (~ 100 年) より長いタイムスケールでは、対馬海峡を通じて日本海に流入するリンなどの栄養塩流入量により制御されていると考えられる (Tada, 2004, 多田, 2012)。では、対馬海峡を通じて日本海に流入する栄養塩の流入量は、何により決まっているのだろうか？

対馬海峡を通じて日本海に流入する海流には、大きく分けて2種類ある。一つ目は、黒潮から分岐した狭義の対馬暖流で、比較的高い水温、塩分と低い栄養塩濃度で特徴付けられ、対馬の南側の海峡を通じて日本海に流入する。もう一つが台湾暖流で、南シナ海から台湾海峡を通り、中国の南に広がる大陸棚上を北東に向かって流れ、対馬の北側の海峡 (朝鮮海峡) から日本海に流入する (Takigawa *et al.*, 2005)。台湾暖流は、大陸棚上を流れる間に、大陸の河川の影響を受けて形成された東シナ海沿岸水と混ざり合う。東シナ海沿岸水は比較的低い水温、塩分と高い栄養塩濃度で特徴付けられるが、その分布は特に揚子江から流出する河川水の影響を強く受け、揚子江の流出量が大きい時には対馬海峡の入り口近くまで張り出す。つまり、日本海への栄養塩流入量は、東シナ海沿岸水の台湾暖流への寄与率の影響を受けており、それには揚子江からの河川流出が深く関わっていると考えられる (Tada *et al.*, 1999)。揚子江の集水域は、日本海の1.8倍もの広さを持ち、南中国の大部分を占めている。温暖湿潤な気候で特徴付けられることから、そこに降った雨の大部分は河川水

として東シナ海に流出することとなる。また、南中国に降る雨の大部分は、晩春から初夏にかけての梅雨と夏から秋にかけての台風によってもたらされる。つまり南中国における夏季モンスーン降水の強さを反映していると予想されるのである (Tada *et al.*, 1999)。

この様にして、日本海堆積物に見られる明暗互層は、揚子江の河川流出を介して南中国における夏季モンスーン降水の変動を反映している可能性が強いことは解った。では、明暗互層のリズムは何を現しているのだろうか？実は、こちらの疑問の答えの方が先に出ていたのである。1989年にODP第127次航海を終え、1992年にはInitial Reportに、明暗互層が、日本海の深部全域に渡って~100年以内の誤差で同時に堆積したものである事が報告されていた (Tada *et al.*, 1992)。ただ、そのリズムが何を表すのかは謎のままだった。そんな時に、グリーンランド氷床コアの解析から数百年~数千年のタイムスケールで繰り返す急激な気候変動 (Dansgaard-Oeschger Cycle : DOC) の存在が明らかにされたのである (Dansgaard *et al.*, 1993)。グリーンランド氷床コアの酸素同位体比記録と日本海堆積物の明るさの程度を表す指標 (L*) を比較したところ、両者は驚くべき程よく似たパターンを示した (図3)。理由は定かではないが、DOCにおける気候の温暖期 (亜間水期) に日本海では暗色層が、寒冷期 (亜水期) に明色層が、堆積していたのである (Tada *et al.*, 1999)。そこで、これが何を意味するかを検討し、その過程で、東アジア夏季モンスーンがDOCに連動して変動していた、と言う仮説に至ったのである。

同様の仮説は、Wang *et al.* (2001) により、南中国の鍾乳石の酸素同位体比の研究を元に提唱された。そちらの方が、図がより魅力的で、年代の制約もより厳密で、また、より直接的な証拠であったため、世の中には、そちらの方の研究がより広く知られることになった。詰めの甘さが大きな差を生んだ典型例で、私にとっては、ほろ苦い思い出である。ともあれ、この仮説は10年以上の月日を経て、つい最近になって私の指導学生に

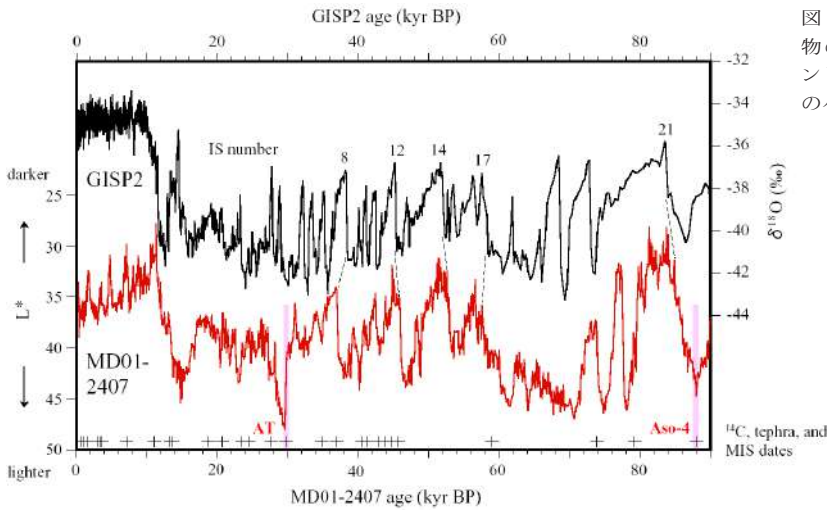


図3 日本海第四紀半遠洋性堆積物の明度(L*)変動とグリーンランド水床コアの酸素同位体比変動のパターンの比較。

よって検証された。彼女は東シナ海北部から採取されたピストンコア試料中から浮遊性有孔虫化石を抽出し、その殻の酸素同位体比と Mg/Ca 比を分析することによって、当時の海洋の表層水温と塩分の変動を復元した。そして、DOCの亜間水期に夏の表層塩分が低下していた事を見出したのである (Kubota, 2013)。

3. DOCにおける偏西風の役割

この仮説の検証と前後して、既に前述したように、偏西風ジェットがDOCに連動して南北に振動していた事も明らかにされた (Nagashima *et al.*, 2011)。現在の観測結果から類推すると、偏西風ジェットが南北に振動したのに伴って梅雨前線の位置が南北に移動し、それが南中国における夏季モンスーン降水の変動を引き起こした可能性が高い。もしこの仮説が正しければ、DOCに連動した偏西風ジェット軸の南北振動が、アジアモンスーンと北大西洋における気候変動を繋ぐ役割を果たしていたことになる。

偏西風ジェットが単に北大西洋高緯度域での気候、海洋変動を、東アジアを含む北半球中緯度域に伝播させる役割を担っているだけなのか、それともアジアモンスーンの変動が先であって、偏西風がその変動を北大西洋に伝えているのか、はた

また、偏西風ジェットあるいはITCZの振動自体がDOCの発生源であって、それが北大西洋や東アジアに伝わったのかは、DOCの起源やメカニズム解明に関わる大問題である。DOCの起源をめぐっては、いろいろな仮説が提唱されているが、それらのうち、北大西洋への水床の流出と、それに伴う深層水(北大西洋深層水:NADW)の形成のオンオフがDOCの発生源とする考え (Broecker *et al.*, 1990) は、恐らく最も広く知られた説だろう。この説では、北半球氷床の崩壊とそれに伴う北大西洋への淡水の流入がNADWの形成を一時的に止め、それが北大西洋域における急激な気候変動を引き起こすと共に、深層水循環(AMOC: Atlantic Meridional Ocean Circulation と呼ばれている)による熱輸送を通じてその変動を他地域に伝達させていた、としている。更に、それが引き起こした海面水温分布の変化を通じて、南北両半球における偏西風及びITCZの同位相での南北移動を引き起こしていたと考えられている (Broccoli *et al.*, 2006)。一方、アジアモンスーンの変動がDOCの原因と考える説では、赤道域における大気-海洋相互作用が、いわゆるBjerknes feedbackを通じて一種の自励振動系を生み出し、それが太平洋高気圧の強度や位置に影響を与えた可能性が考えられている (Mann *et al.*, 2005)。更に、偏西風

ジェットの振動を発生源と考える場合は、太陽活動の変化が大気上層のオゾン濃度の変化を通じて温室効果を変化させ、それが偏西風に影響した可能性が考えられる (Shindell *et al.*, 2001)。

一般に、複数の現象の因果関係を探る場合、現象の前後関係を調べることが多いが、それは必ずしも容易ではない。何故なら、三者 (北大西洋の気候と AMOC, EASM, 偏西風) の関係が、単に原因と結果と言うような単純なものではなく、恐らく、相互作用をし合って変動を増幅する過程が内在しているからである。しかも、変動に前後関係があったとしても、その時間差は数百年以下である可能性が高く、年代測定精度の限界に近い、あるいはそれを越えている。

そこで、私達は、別のアプローチを取ることにした。もし、氷床の崩壊に伴う AMOC のオンオフが DOC 生み出しているとする説が正しいのなら、氷床の崩壊に伴う北大西洋域への氷山の流出と、それに伴う AMOC の弱化あるいは一時的停止は、数百年~数千年スケールでのアジアモンスーンの急激な変動にとって必要条件という事になる。であれば、偏西風の南北振動や EASM の数百年~数千年スケールでの変動がいつから始まり、その周期や振幅が時代と共にどの様に変化してきたのかを復元して、それを北大西洋における Ice-rafted Debris (IRD) や大西洋における AMOC の記録と比較することにより、EASM の数百年~数千年スケールの変動が氷床の崩壊とそれに伴う AMOC の減衰或いは IRD 出現を常に伴ってきたのか、それとも両者は必ずしも 1:1 に対応していなかったのか、必ずしも 1:1 に対応していなかったとしたら、対応し出したのはいつからか、と言った問いに答えることが出来るだろう。そのためには、長く、連続的で、時間解像度の高い EASM の変動記録の取得が必要となる。

EASM の高解像度で連続な記録としては、南中国の鍾乳石の記録が有名である (Wang *et al.*, 2005 ; Cheng *et al.*, 2009) が、約 60 万年前までたどるのがやっとなのである。また、鍾乳石の酸素同位体比が、本当に夏季モンスーン降水の変動量を反映し

ているかどうかについても、論議を呼んでいる (LeGrande and Schmidt, 2009)。また、鍾乳石の酸素同位体比やその変動は、ごく狭い集水域の値を反映しているに過ぎない。一方、中国北西部に広く分布するレス堆積物は、夏季モンスーン降水の変動を帯磁率の変動として反映すると言われているが (Maher and Thompson, 1995)、年代推定精度や時間解像度が一般に低く、数百年~数千年スケールの変動は、余り良く記録されていない。

それに対して、既に上述した様に、日本海半遠洋性堆積物は、EASM の数百年~数千年スケールでの変動を揚子江の河川流出変動を介して明暗互層の形で長期に渡り記録している。既に上で述べたように、1989 年の IODP の第 127 次航海での掘削で、明暗互層が海底下 100 m 以上に渡って続いたことが明らかにされている。また、これら明暗互層は、少なくとも過去 80 万年前までは、日本海深部全域に渡って対比追跡が可能であることが示されたが、それ以前については、コアギャップや年代モデルの精度の問題から、対比が出来なかった。また、数百年~数千年スケールの明暗互層の出現については、概ね 150 万年前から始まったと推定されたものの、その年代推定精度は低く、日本海深部全域に渡るものかどうかははっきりしなかった。さらに、1 地点で 1 ホールしか掘削しなかったため、明暗互層の周期や振幅とそれらの時代変化を調べるには至らなかった。

4. IODP Exp. 346 日本海東シナ海掘削

IODP Exp. 346 では、数百年~数千年スケールの EASM 変動を反映していると考えられる日本海半遠洋性堆積物の明暗互層の堆積がいつから始まり、時代と共にどう変化したかを明らかにする事を目的として、2013 年の夏に日本海の 7 地点と東シナ海北部の 2 地点を掘削し、総延長 6.135 km の堆積物を回収した (図 4)。Sampling Party はこれから、現在は船上で収集したデータのコンパイルや予備的解析を行っている段階だが、これまでの予察的な解析結果から明暗互層はおよそ 2.6 Ma 頃に出現し、日本海深部全域に渡って対比可能

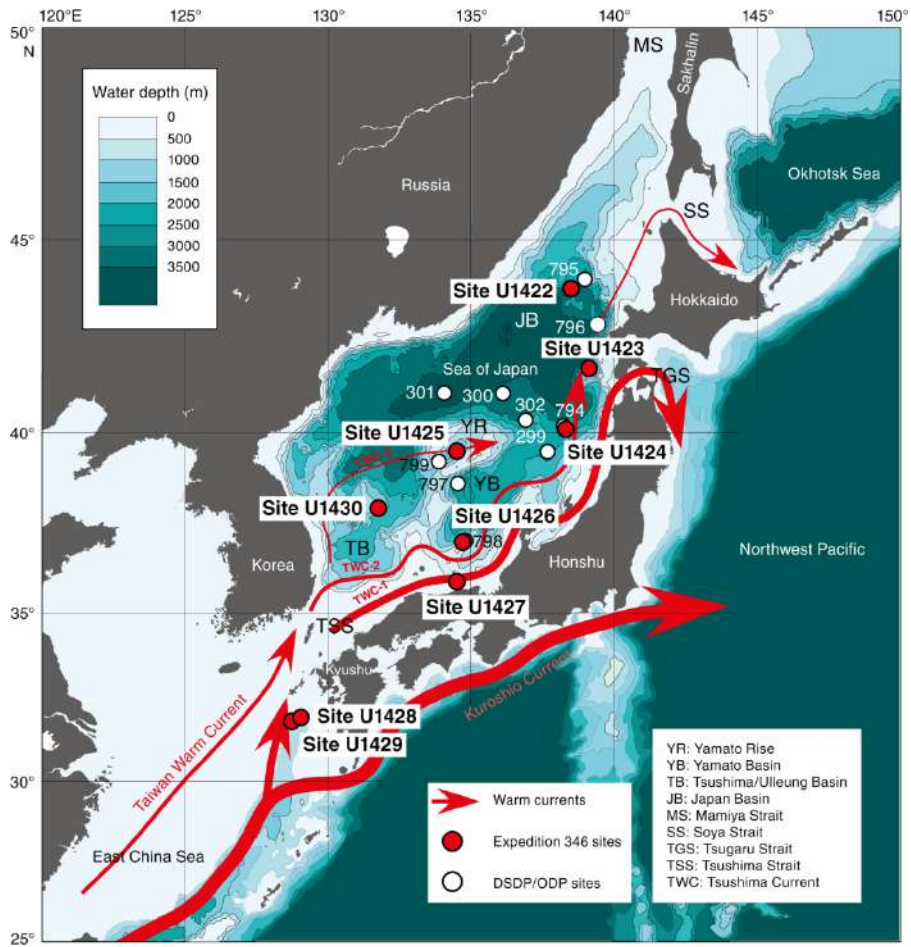


図4 IDOPEX Expedition 346による日本海, 東シナ海北部掘削地点.

で、およそ 1.2 Ma 以降、数百年～数千年スケールでの明暗互層の堆積が明確かつ連続的になったことが明らかになった。2.6 Ma という年代は、本格的な北半球氷床の形成開始時期とほぼ一致し、一方、1.2 Ma という年代は、氷期の氷床サイズがまだ小さく、その体積の変動が地球軌道要素の変動に伴う日射量分布変動（いわゆるミランコビッチサイクル）に線形に応答し、約 4 万年の地軸傾動周期に連動して変化していたいわゆる 4 万年ワールドから、氷期の氷床サイズが大きくなり、その体積の変動が、ミランコビッチサイクルに非線形に応答して約 10 万年の離心率変動周期に連動し

て変化していたいわゆる 10 万年ワールドへの転換期に当たる。この予察の結果は、数百年～数千年スケールの EASM の変動には、大きくて不安定な氷床の存在が必要である可能性を示唆し、今後のより詳細な解析を通じた解明が待たれる。

日本海堆積物にはまた、大陸起源の風成塵が大量に含まれる (Irino and Tada, 2000, 2003)。この風成塵の供給源には大きく分けて 2 つあり、その運搬機構も異なっている (Nagashima *et al.*, 2007)。その一つはタクラマカン砂漠であり、タリム盆地の地表を覆う細粒碎屑物が盆地内で起こった砂塵嵐によって北部チベット斜面に沿って 5 km を超

える高度まで巻き上げられ、偏西風に乗って10 kmを越す高高度を、太平洋を越えて北半球全域に飛散される(Uno *et al.*, 2009)。先にも述べた様に、現在の気候下では偏西風ジェットがヒマラヤの南側からチベットの北側にジャンプするのは4月から5月頃であり、9月頃までチベットの北に居座るが、10月にヒマラヤの南側にもどる。前述したように、こうした偏西風ジェット経路の季節進行は、氷期と間氷期、そして亜氷期と亜間氷期で異なると考えられ、DOCの亜氷期にはヒマラヤの南に留まって居た期間が長かったと考えられている(Nagashima *et al.*, 2011)。

もう一つの供給源はゴビ砂漠であり、主に春先に発生する移動性低気圧に伴って起こった砂塵嵐によって高度2~3 kmまで巻き上げられた風成塵が、移動性低気圧と共に東に運ばれるのである。このタイプの風成塵は、比較的低高度を運ばれるため、一番目のタイプの風成塵に比べて運搬距離が短い傾向がある。

日本海へは、この2つの供給源から風成塵が供給されるが、その比は時代により大きく変化していた(Nagashima *et al.*, 2007, 2011)。これまでは、年代モデルの時間解像度が数千年~数万年間隔とそれ程細くなかったため、その比の変化がどちらの供給源の風成塵フラックスが変化した結果生じたのか、良く解らなかつた。今回のIODP Exp. 346では、U1424地点(秋田沖)とU1425地点(大和堆中央部)において、高時間解像度でのOSL年代測定を計画し、そのためのsamplingを行った。これにより、これまで行われなかつた明色層と暗色層の間での風成塵を初めとした様々な構成要素のフラックスの変化が明らかにされるものと期待される。

更に今度の航海では、シリカの続成が進んでおらず、比較的容易に構成粒子をほぐす事ができるオパールA帯の堆積物が、U1425地点では約9 Maまで、U1430(対馬海盆)地点では約12 Maまで連続的に回収出来た。特に200 mを越える埋没深度から、半固結堆積物を乱さず回収出来たのは、Half stroke APC(Advanced Piston Corer)によると

ころが大きい。この結果、12 Maまで遡って風成塵粒子を抽出し、その粒度や構成粒子の鉱物、化学組成、石英のESR(電子スピン共鳴)信号強度などを測定することが可能となった。これにより、数百年~数千年スケールでのEASM変動に伴う偏西風ジェットの挙動の時代変化やアジア大陸内陸部の乾燥化の開始時期、その時代進行についても明らかにされるものと期待される。

参考文献

- [1] Broccoli, A. J., Dahl, K. A., and Stouffer, R. J., Response of the ITCZ to Northern Hemisphere cooling, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01702, doi:10.1029/2005GL024546, 2006.
- [2] Broecker, W. S., G. Bond, M. Klas, G. Bonani, and W. Wolff, A salt oscillator in the glacial Atlantic?, 1., The concept, *Paleoceanography*, 5, 469-477, 1990.
- [3] Cheng, H., R. L. Edwards, W. S. Broecker, G. H. Denton, X. King, Y. Wang, R. Zhang, and X. Wang, Ice age terminations, *Science*, 326, 248-252, doi:10.1126/science.1177840, 2009.
- [4] Dansgaard, W., S. J. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C. H. Hammer, C. S. Hvidberg, J. P. Steffensen, A. E. Sveinbjornsdottir, J. Jouzel, and G. Bond, Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, 218-220, 1993.
- [5] Irino, T. and Tada, R., Quantification of aeolian dust (Kosa) contribution to the Japan Sea sediments and its variation during the last 200 kyr, *Geochemical Journal*, 34, 59-93, 2000.
- [6] Irino, T. and Tada, R., High resolution reconstruction of variation in aeolian dust (Kosa) deposition at ODP site 797, the Japan Sea, during the last 200 ky, *Global Planetary Change*, 35, 143-156, 2003.
- [7] Kubota, Y., Millennial scale changes in East Asian summer monsoon in the East China Sea during the last glacial period and the Holocene, PhD Thesis, University of Tokyo, 169 p., 2013.
- [8] LeGrande, A. N. and Schmidt, G. A., Sources of Holocene variability of oxygen isotopes in paleoclimate archives. *Climate of the Past* 5, 441-455, 2009.
- [9] Maher, B. A. and Thompson, R., Palaeorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols. *Quaternary Research*, 44, 383-391, 1995.
- [10] Mann, M. E., Cane, M. A., Zebial, S. E. and Clement, A., Volcanic and solar forcing of the tropical Pacific over the past 1000 years, *Journal of Climate*, 18, 447-456, 2005.
- [11] Nagashima, K., Tada, R., Tani, A., Toyoda, S., Sun, Y., and Isozaki, Y., Contribution of aeolian dust in Japan Sea

sediments estimated from ESR signal intensity and crystallinity of quartz, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Q02Q04, doi:10.1029/2006GC001364, 2007.

[12] Nagashima, K., Tada, R., Tani, A., Sun, Y., Isozaki, Y., Toyoda, S., Hasegawa, H., Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period, *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 1214-1220, 2011.

[13] Sampe, T. and Xie, S. -P., Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband : environmental forcing by the Westerly Jet, *Journal of Climate*, 23, 113-134, 2010.

[14] Schiemann, R., Luthi, D., Schar, C., Seasonality and interannual variability of the Westerly Jet in the Tibetan Plateau region, *Journal of Climate*, 22, 2940-2957, 2009.

[15] Shindell, D. T., G. A. Schmidt, M. E. Mann, D. Rind, A. Waple, Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum, *Science*, 294, 2149, 2001.

[16] Tada, R., Onset and evolution of millennial-scale variability in Asian monsoon and its impact on paleoceanography of the Japan Sea, in Clift, P. *et al.* (eds.) *Continent-ocean interactions within east Asian marginal seas*, AGU Monograph Series 149, 283-298, 2004.

[17] 多田隆治, 日本海堆積物と東アジア・モンスーン変動－IODP日本海・東シナ海掘削に向けて－, 第四紀研究, 51, 151-164.

[18] Tada, R., Koizumi, I., Cramp, A., and Rahman, A., Correlation of dark and light layers, and the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea, in *Proceedings of ODP, Scientific Results*, 127/128, Pt. 1, edited by K. A. Pisicotto, J. C. Ingle, Jr., M. T. von Breyman, J. Barron, *et al.*, pp. 577-601, Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1992.

[19] Tada, R., Irino, T., and Koizumi, I., Land-ocean linkage in orbital and millennial timescales recorded in Late Quaternary sediments of the Japan Sea, *Paleoceanography*, 14, 236-247, 1999.

[20] Takikawa, T., J. H. Yoon, and K. D. Cho, The Tsushima warm current through Tsushima Straits estimated from ferry-boat ADCP data. *J. Phys. Oceanogr.* 35, 1154-1168, 2005.

[21] Uno, I., Eguchi, K., Yumimoto, K., Takemura, T., Shimizu, A., Uematsu, M., Liu, Z., Wang, Z., Hara, Y., and Sugimoto, N. (2009) Asian dust transported one full circuit around the globe, *Nature Geoscience*, 2, 557-560.

[22] Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., An, Z. S., Wu, J. Y., Shen, C. -C., and Dorale, J. A., A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China. *Science*, 294, 2345-2348, 2001.

[23] Wang, Y. J., H. Cheng, R. L. Edwards, Y. Q. He, X. G. Kong, Z. S. An, J. Y. Wu, M. J. Kelly, C. A. Dykoski, and X. D. Li, The Holocene Asian monsoon : links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308, 854-857, 2005.

