

O uso de cinzas vulcânicas para correlações estratigráficas na margem leste do Mar do Japão

The use of tephras for stratigraphic correlation in the eastern margin of Japan Sea

Antonio Fernando Menezes Freire¹, Toshihiko Sugai², Ryo Matsumoto³

resumo

Este estudo é baseado em análises realizadas em amostras de cinzas vulcânicas (tefras) coletadas por testemunhadores a pistão (*piston-cores*) ao longo da margem leste do Mar do Japão. A caracterização de cinzas vulcânicas é baseada na combinação de diversos parâmetros como composição química e petrografia, além do conhecimento acerca da distribuição geográfica e estratigráfica. Foram coletados 12 testemunhos da costa oeste da cidade de Kanazawa até o oeste da Ilha de Hokkaido, mais de 500km a norte. As amostras foram analisadas através de microscópio eletrônico de varredura, associado ao espectroscópio por energia dispersiva (SEM-EDS), tendo suas composições químicas, constituintes minerais e formas de ocorrência comparadas com os registros catalogados em atlas de cinzas vulcânicas do Japão. Depósitos de cinzas piroclásticas, conhecidos como marcos vulcânicos Aso-1, K-Tz, Aso-4, AT e U-Oki, foram reconhecidos neste

estudo, promovendo a correlação estratigráfica dos sedimentos quaternários da margem leste do Mar do Japão. Datações por C^{14} em foraminíferos e identificação de associações de diatomáceas auxiliaram nestas correlações e, em associação com a identificação das cinzas vulcânicas, possibilitaram a criação de curvas de taxas de sedimentação. Através destas curvas, foi possível entender a distribuição dos sedimentos nos últimos 300 Ka da margem leste do Mar do Japão, sugerindo que as elevações e depressões do fundo do mar, reflexo da movimentação tectônica atual, controlam a distribuição vertical e lateral dos sedimentos. Quatro níveis de cinzas vulcânicas, não catalogados no atlas, foram identificados e denominados como Joetsu-1 (Jo-1), Joetsu-2 (Jo-2), Okushiri-1 (Ok-1) e Okushiri-2 (Ok-2), tendo suas características petrográficas e químicas reveladas neste estudo.

Palavras-chave: Bacia de Joetsu | cinzas vulcânicas | Mar do Japão | SEM-EDS | tefrostratigrafia | vulcanismo explosivo

¹ Petrobras. Cenpes - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello - Pesquisa e Desenvolvimento em Geociências. Geoquímica. fernandofreire@petrobras.com.br

² The University of Tokyo. Graduate School of Frontier Science. sugai@k.u-tokyo.ac.jp

³ The University of Tokyo. Graduate School of Science. ryo@eps.s.u-tokyo.ac.jp

abstract

This study is based on the analysis of tephra samples collected by piston-coring along the eastern margin of Japan Sea. The characterization of marker-tephras constitutes the basis of tephra studies and it is carried out using a combination of parameters, such as chemical composition, petrography, and stratigraphic and geographic distribution. Twelve piston-cores distributed from the north of central Honshu, offshore Kanazawa City, to the west of Hokkaido, more than 500km away, were used in this study. Samples were analyzed by SEM-EDS and their chemical composition and glass shard shapes were compared with those of cataloged marker-tephras in and around Japan. Main marker-tephras such as Aso-1, K-Tz, Aso-4, AT, and U-Oki were recognized and provided a good tephra correlation along the eastern margin of Japan Sea. Age control using C^{14} of foraminiferal tests and the identification of diatom assemblage supported the correlation between tephras and were used together to construct sedimentation rate curves. Seafloor topography strongly controls the accumulation rate, which are different between troughs and ridges in the latter condensed sections are present. Four unknown tephras were identified in this study and were called Joetsu-1 (Jo-1), Joetsu-2 (Jo-2), Okushiri-1 (Ok-1) and Okushiri-2 (Ok-2). Their petrographical and chemical characteristics are now available.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: Japan Sea | Joetsu Basin | pyroclastic deposits | SEM-EDS | tephrostratigraphy | volcanic ash

introdução

Camadas de cinzas vulcânicas constituem valiosos marcadores estratigráficos, sendo largamente estudados pelos cientistas japoneses ao longo das últimas décadas (Aoki, 2008; Furuta *et al.*, 1986; Machida e Arai, 2003; Sase *et al.*, 2008). A larga escala extraordinária de distribuição geográfica dos eventos piroclásticos, tanto nas ilhas que compõem o arquipélago japonês quanto em eventos localizados em países vizinhos, tem permitido o desenvolvimento de um vasto uso das cinzas vulcânicas no conhecimento estratigráfico do Quaternário.

Camadas de cinzas vulcânicas são frequentemente reconhecidas em sedimentos de águas profundas ao redor do Japão. Alguns destes níveis podem ser identificados e correlacionados através das características petrográficas e químicas, podendo ser correlacionados a diversas fontes vulcânicas do Japão e da Coreia. Muitas destas cinzas estão distribuídas por dezenas, centenas e até milhares de quilômetros de suas caldeiras vulcânicas, sendo carreadas pelos ventos dominantes provenientes do oeste (fig. 1) (Furuta *et al.*, 1986).

O termo tefra (*tephra*) designa todos os depósitos originados das explosões piroclásticas, incluindo-se as bombas, tufos, lápilis, escórias e cinzas, em ordem decrescente de granulometria. Assim, é comum o uso da palavra tefra para generalizar as camadas de depósitos piroclásticos espalhados pelos ventos na atmosfera e pelas correntes oceânicas na coluna d'água. O termo tefroestratigrafia (*tephrostratigraphy*) é internacionalmente aplicado à correlação estratigráfica baseada nos depósitos de cinzas vulcânicas.

Neste estudo, a identificação das tefras foi feita principalmente em camadas de cinzas, cuja granulometria equivale à fração areia muito fina a silte, nos sedimentos siliciclásticos. A identificação das cinzas foi baseada na comparação da forma e composição química dos cacos de vidro vulcânico (*volcanic glass shards*), revelados por lupa binocular, microscópio petrográfico e microscópio eletrônico de varredura, acoplado ao espectroscópio por energia dispersiva (SEM-EDS). As observações foram comparadas àquelas catalogadas e descritas por Machida e Arai (2003), tendo, ainda, o suporte de datações em testas de foraminíferos por C^{14} e identificação de associações de diatomáceas feitas pelo Dr. Fumio Akiba (comunicação verbal).

O objetivo deste estudo é promover uma correlação estratigráfica nos sedimentos do Quaternário da margem leste do Mar do Japão, partindo-se do norte da ilha central de Honshu, ao oeste da cidade de Kanazawa, até o oeste da Ilha de Hokkaido, mais de 500km ao norte, utilizando-se amostras coletadas por testemunhadores a pistão, operados em profundidades de água entre 800m e 3.600m (fig. 1).

geologia regional do Mar do Japão

O Mar do Japão é uma das mais típicas bacias do tipo *back-arc* do mundo (Tamaki e Isezaki, 1996).

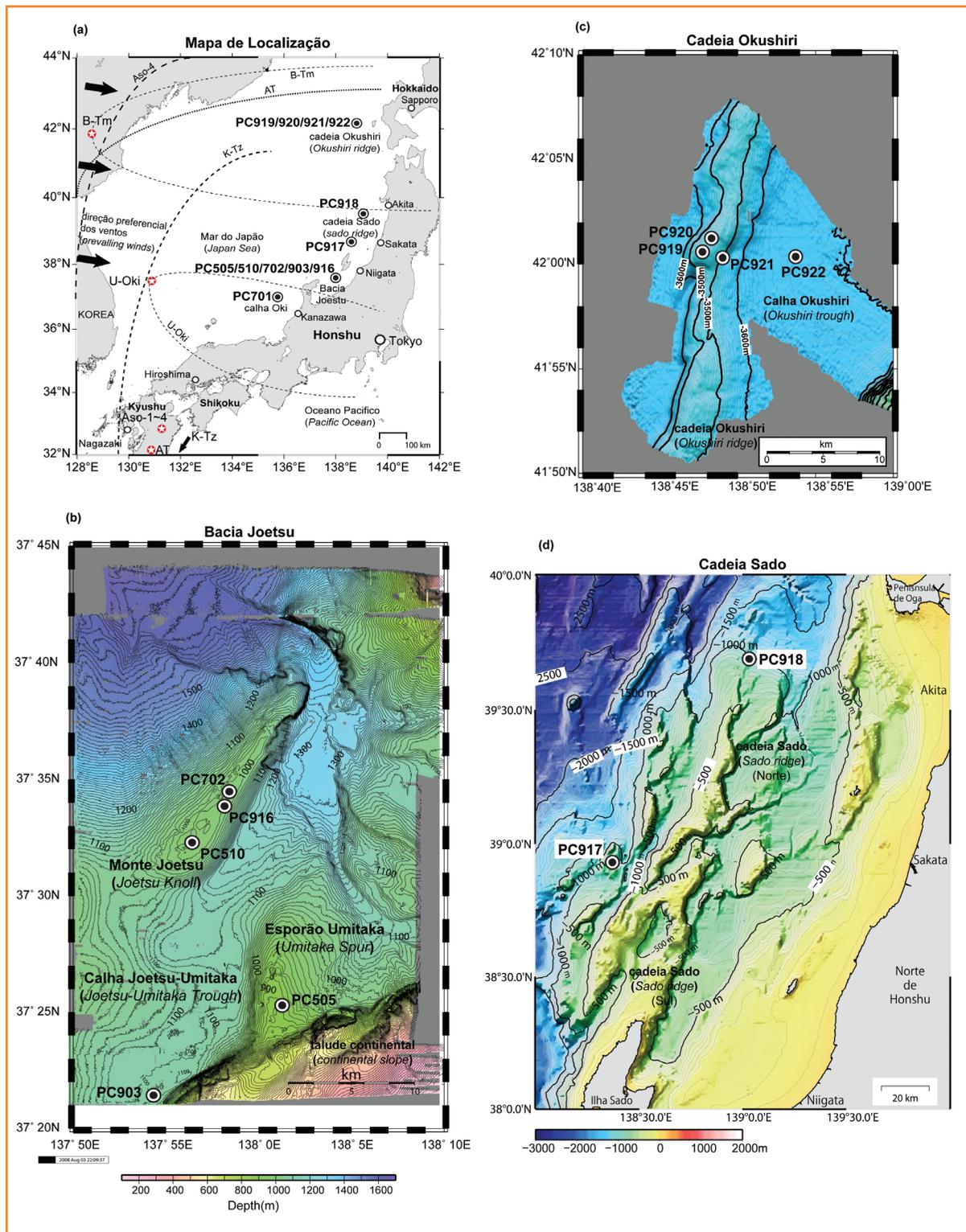


Figura 1
 (a) Mapa índice da área de estudo e localções de testemunhos. Flechas negras indicam a direção preferencial dos ventos W-E provenientes da Coreia e China. Linhas tracejadas indicam as distribuições das cinzas e estrelas, as caldeiras de marcos vulcânicos descritos por Machida e Arai (2003); (b) mapa de detalhe da Bacia Joetsu e localções dos testemunhos utilizados neste estudo, mostrando dois anticlinais denominados *Umitaka Spur* e *Joetsu Knoll*; (c) mapa de detalhe da Cadeia Okushiri e parte da calha Okushiri e localções dos testemunhos; (d) mapa de detalhe da Cadeia Sado e localções dos testemunhos. Ver detalhes no texto.

Figure 1
 (a) Index map and piston-cores location of the study area. Black arrows show the prevailing W-E wind from Korea and China. Dashed lines show marker tephra distribution, and stars indicate caldera locations based on Machida and Arai (2003); (b) detailed map and piston-cores location of Joetsu Basin showing the two anticlines *Umitaka Spur* and *Joetsu Knoll*; (c) detailed map and piston-cores location of Okushiri Ridge and part of Okushiri Trough; (d) detailed map and piston-cores location of Sado Ridge. See text for details.

Ela foi formada atrás do sistema de ilhas do Japão e foi iniciada através da abertura da margem leste da Eurásia há 25 Ma (Otofuji *et al.*, 1985). A abertura foi completada antes de 15 Ma com a formação de crosta oceânica na região denominada Bacia do Japão (Jolivet *et al.*, 1994). Desde o Plioceno médio,

o estilo tectônico está mudando do extensivo para o compressivo, formando uma série de estruturas anticlinais/sinclinais com alinhamento NNE-SSW ao longo da margem leste do Mar do Japão (Okui *et al.*, 2008), onde é observada uma zona de subducção incipiente (Takeuchi, 1996). Em alguns destes anticlinais, é

materiais e métodos amostragem

observado um sistema de falhamentos de plano axial NNE-SSW por onde ocorre intenso escape de gases, permanecendo parte destes aprisionada na zona de estabilidade de hidratos de gás (GHSZ), formando hidratos de metano e parte migrando para a coluna d'água, formando intensas plumas de metano (Freire, 2010; Freire *et al.*, no prelo).

Os sedimentos quaternários do Mar do Japão são principalmente lamosos, sendo caracterizados por alternâncias centimétricas a métricas de unidades bioturbadas com outras finamente laminadas chamadas de TLs (*thinly laminated*), as quais representam variações entre condições de fundo óxicas e anóxicas (Tada *et al.*, 1999). TLs, ou camadas escuras (*dark layers*), são consideradas como sido depositadas sob condições anóxicas a euxínicas, sugeridas por sua coloração escura, pouco conteúdo fossilífero e considerável quantidade de enxofre. Essas características provavelmente estão relacionadas a variações glacio-eustáticas, controladas por ciclos astronômicos (Yokoyama *et al.*, 1997).

Testemunhos a pistão (PC), com comprimentos de 6m a 9m, foram usados para amostrar os sedimentos de fundo. A operação de testemunhagem foi conduzida pelos navios de pesquisas R/V Umitaka Maru (cruzeiros UT), de propriedade da Universidade de Ciências e Tecnologias Marinhas de Tóquio, e R/V Kaiyo (cruzeiros KY), da Agência Japonesa de Ciência e Tecnologia Marinha (JAMSTEC). Os levantamentos foram realizados entre os anos de 2005 e 2009. Doze testemunhos representativos foram utilizados neste estudo: PC701, localizado na calha submarina Oki; PC505, PC510, PC702, e PC916, na Bacia de Joetsu; PC917 e PC918, na cadeia submarina de Sado; PC919, PC920, PC921 e PC922, na cadeia submarina de Okushiri (fig. 1) (tabela 1).

Tabela 1
Informações sobre testemunhos, cruzeiros e amostras. Cruzeiros de pesquisa UT (Umitaka Maru) e KY (Kaiyo).

Table 1
Piston-cores information, cruises identification and samples collected. Research vessels UT (Umitaka Maru) and KY (Kaiyo).

testemunhos (PC)	localização	latitude	longitude	"profundidade (m)	"recuperação (m)	cruzeiro ID	amostra ID
PC505	Espigão Umitaka (sul)	37°26'29"	138°00'43"	904	8,74	KY-05-08	505-5 505-6
PC510	Monte Joetsu (sul)	37°32'25"	137°56'16"	980	4,23	KY-05-08	510-5
PC-701	Calha Oki	37°05'09"	135°20'04"	1674	7,25	UT-07	701-2 701-6
PC702	Monte Joetsu (centro)	37°34'21"	137°57'50"	983	4,95	UT-07	702-3
PC903	Calha Joetsu-Umitaka	37°15'12"	137°52'51"	782	4,67	UT-09	903-5
PC916	Monte Joetsu (norte)	37°34'20"	137°58'59"	1001	4,00	UT-09	916-4
PC917	offshore Sakada (sul da Cadeia Sado)	38°56'18"	138°22'19"	970	1,86	UT-09	917-2-1 917-2-2
PC918	offshore Akita (norte da Cadeia Sado)	39°34'54"	139°05'06"	998	3,67	UT-09	918-3 918-4
PC919	Cadeia Okushiri	42°00'43"	138°48'04"	3403	4,98	KY-09-05	919-5-1 919-5-2
PC920	Cadeia Okushiri	42°01'02"	138°48'05"	3409	4,26	KY-09-05	920-4 920-5-1
PC921	Cadeia Okushiri	42°00'19"	138°49'15"	3509	6,88	KY-09-05	921-3 921-4-1 921-5
PC922	Calha Okushiri	42°00'20"	138°53'43"	3682	5,41	KY-09-05	922-1

subamostragem e métodos analíticos

amostragem e análise das cinzas vulcânicas

Um total de 36 amostras de cinzas vulcânicas foi coletado nos testemunhos. As amostras foram lavadas em água deionizada e peneiradas em malha de 75 μ m, para separar as cinzas vulcânicas dos constituintes siliciclásticos. Após secagem a 60°C, as amostras foram observadas em lupa binocular e cerca de 10mg de cacos de vidros vulcânicos foram separados visualmente. Seções polidas foram preparadas com estes grãos e analisadas no equipamento JEOL JSM-6390LA *Scanner Electronic Microscope–Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)*, do laboratório de petrologia do Departamento de Estudos do Meio Ambiente Natural da Universidade de Tóquio, utilizando-se tensão de aceleração de 20 keV, corrente de análise entre 67 Å e 76 Å e o diâmetro de feixe entre 60 Å e 62 Å, em modo T3 PHA.

A forma e a composição química dos cacos de vidro vulcânico foram comparadas com os registros contidos no atlas de marcos de tefras regionais, compilado por Machida e Arai (2003). Uma amostra padrão da cinza regional AT foi analisada antes das análises das amostras coletadas para estimar o desvio analítico padrão e calibragem do equipamento. O erro analítico para as composições químicas foi menor que 0,05%, para SiO₂ e, menor que 0,01%, para outros elementos maiores, usando a amostra da cinza AT como referência. Uma pequena variação entre as composições químicas reveladas neste estudo e as catalogadas por Machida e Arai (2003) é aceitável, devido às diferenças entre os métodos analíticos usados neste estudo (EDS) e os compilados no atlas (ICP-MS, WDS e EDS).

amostragem e análise de foraminíferos para datação por C¹⁴

Testas de foraminíferos planctônicos foram coletadas no PC701 (Calha Oki), PC916 (Bacia de Joetsu) e PC918 (Cadeia Sado). As amostras coletadas em quatro horizontes no PC701 contêm a espécie de água quente *Neogloboquadrina dutertrei*, a cerca de 0,80m de profundidade. Três espécimes de águas frias *Globigerina umbilicata* foram coletados a 2,60m, 3,63m e 4,34m de profundidade, respectivamente. Três espécimes de *Globigerina umbilicata* foram coletados no PC916 a 2,50m, 3,73m e 4,75m de profundidade, respectivamente, enquanto um espécime da mesma espécie foi coletado no PC918 a 0,65m de profundidade. As

idades baseadas em C¹⁴ foram fornecidas pelo laboratório *Beta Analytic Radiocarbon Dating*, dos EUA. Para calibração, foi utilizado o banco de dados MARINE04 e o programa INTCAL04 *Radiocarbon Age Calibration* executável, versão 5.0.2 (Talma e Vogel, 1993). A correção local para efeito de reservatório não foi aplicada.

identificação e amostragem de associações de diatomáceas

Um total de 201 amostras foi coletado para identificação das associações de diatomáceas em oito testemunhos: PC903 e PC916 (Bacia Joetsu); PC917 e PC918 (Cadeia Sado); além de PC919, PC920, PC921, e PC922 (Cadeia Okushiri) (Fumio Akiba, comunicação verbal). O intervalo de amostragem foi de aproximadamente 20cm com a preparação de lâminas não processadas, usando lamínulas de 18mm x 18mm, em meio *Pleurax* (Akiba, 1986). As lâminas foram examinadas em microscópio petrográfico com luz normal e aumento de 500 vezes no laboratório *Diatom Minilab Akiba Co*. Cem frústulas de diatomáceas foram contadas para cada amostra e, após, as lâminas foram digitalizadas.

resultados

descrição dos testemunhos a pistão

Cinco unidades litológicas foram identificadas nos testemunhos da Calha Oki e da Bacia Joetsu, sendo nomeadas de unidades 1 a 5, em ordem crescente de idade (Freire *et al.*, 2009). A unidade 5 é composta por lama cinza clara bioturbada, depositada em condições de fundo óxicas durante o início do Último Máximo Glacial (LGM) (Oba *et al.*, 1991). A unidade 4 (TL-2) é caracterizada por finas laminações cinza escuras a negras, correspondente ao marco estratigráfico conhecido como TL-2, largamente observado no Mar do Japão (Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1999). Segundo estes autores, esta unidade foi depositada sob condições anóxicas a euxínicas de fundo durante o LGM.

A unidade 3 é constituída por lama cinza clara, levemente bioturbada, considerada por Freire *et al.* (2009) como sendo o registro estratigráfico da transição das condições anóxicas do LGM para o ambiente óxico do Holoceno, causado pela elevação do nível do mar e o conseqüente incremento na oxigenação

do fundo, resultantes da melhor comunicação das águas do Mar do Japão com as águas do Oceano Pacífico (Oba *et al.*, 1991).

A unidade 2 (TL-1) é semelhante à unidade 4 (TL-2), sendo constituída por finas laminações cinza escuras a negras, correspondente ao marco estratigráfico conhecido como TL-1, que, ao exemplo de sua semelhante do LGM, é largamente observada no Mar do Japão (Tada *et al.*, 1999; Oba *et al.*, 1991). Segundo estes autores, este horizonte representa o início da sedimentação holocênica e sua coloração escura deve-se ao baixo nível de oxigenação causado pela forte entrada de água doce, resultante do degelo da neve e geleiras das montanhas em volta do Mar do Japão, ao final do LGM. A entrada de água doce teria causado a estratificação das águas do Mar do Japão e dificultado a circulação e a conexão das águas profundas com as rasas e, conseqüentemente, com a atmosfera. A unidade 1 é composta por lama cinza clara bioturbada e representa as condições de fundo óxico que perduram até o presente (Oba *et al.*, 1991).

Essas 5 unidades não são bem reconhecidas ao norte da margem leste do Mar do Japão, tanto na área da Cadeia Sado, como ao oeste de Hokkaido, Cadeia Okushiri, tornando difícil a correlação mediante esses marcos estratigráficos. Por outro lado, as profundidades d'água maiores que 3.000m impossibilitam a correlação estratigráfica utilizando foraminíferos ou outros constituintes calcários. A profundidade de compensação dos carbonatos (CCD) no Mar do Japão é rasa, por volta dos 2.000m, significando que grande parte das carapaças calcárias de organismos planctônicos e bentônicos são dissolvidas abaixo desta profundidade (Oba *et al.*, 1991; Yokoyama *et al.*, 2007). Nestas áreas, a correlação estratigráfica vem sendo feita com o uso, não muito preciso, de zoneamento de diatomáceas, uma vez que este zoneamento é feito em intervalos de tempo iguais a 8 ka. Desta forma, a identificação de cinzas vulcânicas regionais é crítica para correlacionar os sedimentos quaternários da parte central com aqueles mais profundos localizados ao norte, ao longo da margem leste do Mar do Japão.

zoneamento de diatomáceas

Os sedimentos coletados pelos testemunhos a pistão mostraram-se ricos em diatomáceas, podendo ser subdivididos em quatro zonas denominadas A, B, C e D, em ordem crescente de profundidade (Fumio Akiba, comunicação verbal). Esta subdivisão foi baseada na

delimitação da ocorrência de duas espécies de diatomáceas, presentes no Mar do Japão: *Fragilariopsis dolilus* e *Thalassiosira hyperborea* (Koizumi, 1984, 1985, 2006). A primeira é uma espécie de água quente, comumente encontrada na zona A, presente na sedimentação holocênica. A última é uma espécie de águas frias e de baixa salinidade, geralmente associada a períodos glaciais, presente na zona C. A zona B é um intervalo transicional entre as zonas A e B, sendo a zona D o horizonte mais profundo analisado. As zonas A, B, C e D representam intervalos de tempo e variam de 0-8 ka, 8-15 ka, 15-24 ka, e >24 ka, respectivamente.

descrição e resultados analíticos das cinzas vulcânicas

As amostras de cinzas vulcânicas foram coletadas quando presentes nos testemunhos, sendo seus constituintes observados em lupa binocular com aumento de 10x e 80x. Quando detectados minerais opacos, as amostras também foram observadas em microscópio petrográfico. Todas as amostras foram observadas no microscópio eletrônico de varredura (SEM). As figuras 2, 3 e 4 mostram fotomicrografias representativas das amostras de cinzas vulcânicas analisadas.

cinzas vulcânicas quaternárias na Calha Oki (Oki Trough)

Duas camadas de cinzas foram reconhecidas a 1,88m e 5,95m de profundidade no PC701. A camada superior possui 1,5cm de espessura, apresentando os cacos de vidro sob a forma de púmice (pm) na fração granulométrica de areia muito fina (amostra 701-2) (fig. 2). Este nível de cinzas ocorre a cerca de 50cm acima do limite superior da unidade 2 (TL-1) (fig. 5). Raros fenocristais de clinopiroxênio (cpx) foram observados. Geoquimicamente, a maior característica desta tefra é o conteúdo relativamente baixo de sílica (cerca de 62%), além dos altos conteúdos de alumínio (20%) e álcalis (12%) (tabela 2).

O nível de cinza inferior (701-6) (fig. 2) contém um exemplo típico de bolha de vidro (*bubble wall glass*) (bw), localizado a 5,95m de profundidade, dentro da unidade 5 (fig. 5), cerca de 50cm abaixo do limite basal da unidade 4 (TL-2). Trata-se de uma cinza com granulometria na faixa de areia fina a média, possuindo espessura de 15cm (tabela 2). Não foram observados fenocristais. Um alto teor de sílica (78%) é a principal assinatura desta tefra (tabela 2).

cinzas vulcânicas quaternárias na Bacia Joetsu (Joetsu Basin)

Um nível de cinza do tipo bw, similar àquele encontrado na parte inferior do PC701 (701-6), foi observado no PC510 (510-5) a 3,14m de profundidade, na parte sul do monte submarino de Joetsu, na Bacia Joetsu (fig. 1). Teor de sílica da ordem de 79% e ausência de fenocristais caracterizam geoquimicamente esta tefra (tabela 2). Este nível de tefra, com espessura de 7cm, não foi encontrado em nenhum outro testemunho na área da Bacia Joetsu (fig. 5).

Dois níveis de cinza de tipo misto (bw+pm) foram encontrados nas partes superior (903-5, 505-5, 916-4 e 702-3) e média (505-6) da unidade 4 (TL-2) dos testemunhos PC505, PC702, PC903 e PC916 da Bacia Joetsu (fig. 1). Esses níveis de cinza foram observados como níveis esbranquiçados a amarelados, difíceis de serem separados apenas por aspectos macroscópicos, o que exige análise sob lupa binocular, que revela uma notável diferença granulométrica (fig. 4). O nível superior possui espessura em torno de 1cm e ocorre no topo da unidade 4 (TL-2), enquanto o nível inferior, também com espessura média de 1cm, está localizado na parte mediana da unidade 4 (TL-2). O nível superior parece estar distribuído mais amplamente, uma vez que o nível inferior não está presente em todos os testemunhos estudados (fig. 5). A correta identificação destes níveis é importante para o posicionamento estratigráfico dentro da unidade 4 (TL-2), uma vez que nem sempre é possível visualizar ambos os níveis.

A cinza superior apresenta-se na fração areia fina a média, com grãos um pouco menores que 1mm, enquanto a cinza inferior possui grãos menores que 0,5mm, da ordem de areia muito fina a silte (fig. 4). Fenocristais de cpx podem ser observados sob microscópio petrográfico em ambas as tefras. Já as imagens do SEM, revelaram que os cacos de vidro são compostos tanto por bw como por pm, com predomínio do primeiro tipo (fig. 4). Geoquimicamente, a cinza superior é caracterizada por um teor em sílica maior (79%) que o da cinza inferior (75%) (tabela 3).

cinzas vulcânicas quaternárias na Cadeia Sado (Sado Ridge)

Um nível de cinza com granulometria fina a média, com cerca de 2cm de espessura, ocorre a

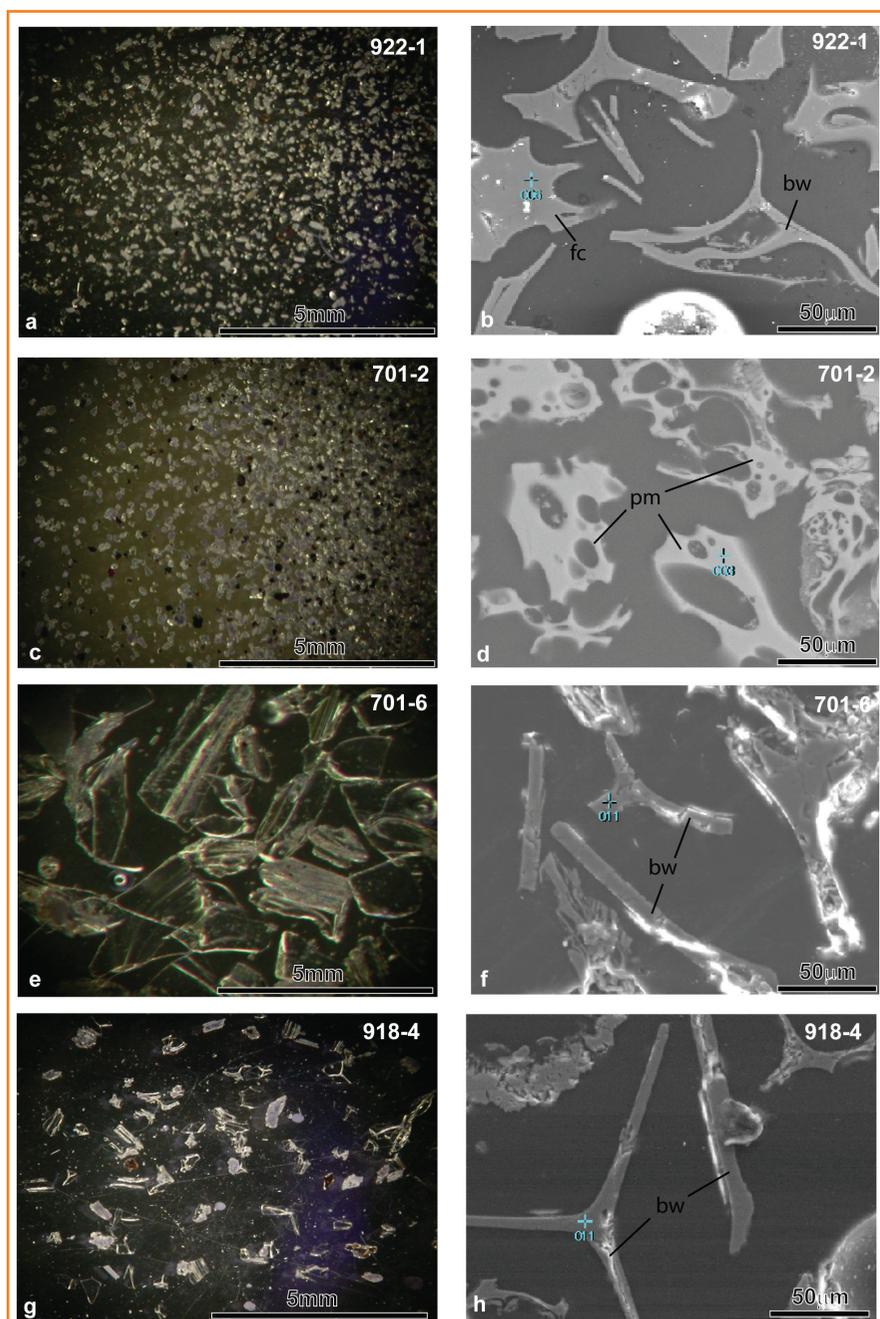


Figura 2 – Fotografias de cinzas vulcânicas obtidas em lupa binocular com aumento de 10x (do lado esquerdo) e imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (SEM) (do lado direito): (a-b) B-Tm; (c-d) U-Oki; (e-f) AT; (g-h) Aso-4. Identificação das amostras no canto superior direito. Tipo de caco de vidro vulcânico: (bw) bolha de vidro; (pm) púmice; (fc) fenocristal. Para localização das amostras, ver figuras 5, 6 e 7.

Figure 2 – Tephra images using 10x binocular view (left side) and SEM (right side): (a-b) B-Tm; (c-d) U-Oki; (e-f) AT; (g-h) Aso-4. Samples ID at the right upper corner. Volcanic glass shards shape: (bw) bubble wall; (pm) pumice; (fc) phenocryst. For samples location, see figures 5, 6 and 7.

1,24m no testemunho PC917 (917-2-1). Agulhas carbonáticas e fenocristais de cpx ocorrem neste nível de cinza (fig. 3). Um teor relativamente alto

Tabela 2

Composição química de elementos maiores dos cacos de vidro vulcânico analisados neste estudo (SEM-EDS) e aqueles reportados por Machida e Arai (2003), nas linhas em cinza claro (EDS, WDS, ICP-MS). Fenocristais: af (feldspato alcalino), am (amfibólio), bi (biotite), cpx (clinopiroxênio), opx (ortopiroxênio), ho (hornblenda), qt (quartzo); tipo do caco de vidro vulcânico: bw (bolha de vidro), pm (púmice); granulometria: F (fina), M (média), Vf (muito fina); n: número de observações; sd: desvio padrão; std: amostra padrão; o conteúdo de ferro total é dado em FeO.

Table 2

Major elements chemical composition of volcanic glass shards and characteristics of tephra analyzed in this work (SEM-EDS) and reported by Machida and Arai (2003) in light gray lines (EDS, WDS, ICP-MS). Phenocrysts: af (alkaline feldspar), am (amphiboly), bi (biotite), cpx (clinopyroxene), opx (orthopyroxene), ho (hornblende), qt (quartz); glass shape: bw (bubble wall), pm (pumice); grain size: F (fine), M (medium), Vf (very fine); n: number of observations; sd: standard deviation; std: standard sample; the total iron content is given in FeO.

amostra	prof. (m)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	n (grãos)	n (amostras)
922-1	0,40	75,69	0,27	12,29	4,45	0,14	0,08	0,49	2,83	3,79	13	1
sd		3,89	0,08	2,20	0,46	0,06	0,07	0,43	0,17	0,56		
B-Tm		75,44	0,22	10,60	4,17	0,07	0,05	0,21	4,74	4,42		17
sd		3,56	0,11	2,00	0,26	0,06	0,05	0,41	0,39	0,49		
701-2	1,90	62,91	0,59	19,90	3,28	0,17	0,12	1,58	4,42	7,03	10	1
sd		0,26	0,09	0,26	0,13	0,03	0,05	0,17	0,33	0,31		
U-Oki		61,56	0,45	20,12	2,95	0,15	0,28	1,51	6,67	6,33		11
sd		0,47	0,09	0,31	0,18	0,05	0,10	0,16	0,73	0,52		
510-5	3,14	79,43	0,12	12,67	1,17	0,07	0,16	1,16	2,32	2,92	12	1
sd		0,61	0,07	0,12	0,04	0,03	0,05	0,41	0,22	0,10		
701-6	6,00	77,84	0,16	12,56	1,23	0,02	0,07	1,02	3,58	3,51	11	1
sd		0,34	0,03	0,28	0,18	0,02	0,04	0,12	0,41	0,34		
918-3	2,50	80,41	0,12	12,64	1,04	0,10	0,13	0,69	2,11	2,77	5	1
sd		0,36	0,03	0,18	0,35	0,03	0,07	0,34	0,24	1,09		
920-5-1	3,82	80,09	0,16	12,70	1,24	0,09	0,15	0,81	1,76	3,02	6	1
sd		0,68	0,09	0,52	0,43	0,03	0,10	0,40	0,28	0,62		
AT std		79,66	0,14	12,65	1,30	0,05	0,20	1,06	2,23	2,98	36	1
sd		0,73	0,06	0,18	0,11	0,04	0,05	0,08	0,38	0,28		
AT		78,40	0,11	12,25	1,22	0,02	0,12	1,09	3,29	3,36		21
sd		0,46	0,03	0,24	0,06	0,04	0,05	0,03	0,32	0,11		
918-4	3,07	73,81	0,42	15,87	1,58	0,08	0,51	1,18	3,00	3,58	10	1
sd		1,36	0,12	0,34	0,59	0,03	0,14	0,32	0,17	0,15		
921-5	4,60	73,33	0,43	15,37	1,67	0,11	0,45	1,15	3,36	4,12	10	1
sd		0,81	0,04	0,34	0,23	0,05	0,11	0,25	0,20	0,15		
Aso-4		72,54	0,43	14,90	1,62	0,11	0,40	1,20	4,51	4,31		43
sd		0,69	0,05	0,37	0,12	0,03	0,08	0,21	0,22	0,34		
917-2-1	1,24	79,89	0,19	12,92	1,07	0,04	0,25	0,93	2,58	2,14	10	1
sd		0,50	0,04	0,26	0,16	0,03	0,04	0,15	0,40	0,52		
K-Tz		79,33	0,20	11,96	1,09	0,04	0,24	1,08	2,92	3,20		9
sd		0,27	0,00	0,33	0,03	0,05	0,10	0,04	0,38	0,05		
917-2-2	1,79	66,93	0,16	18,70	3,22	0,27	0,25	1,41	4,35	4,74	12	1
sd		1,32	0,04	0,31	0,19	0,06	0,15	1,59	0,63	0,24		
Aso-1		68,80	0,63	15,22	3,27	0,10	0,63	1,98	3,72	5,18		6
sd		0,29	0,05	0,24	0,07	0,00	0,20	0,13	0,31	0,20		

de sílica (79%) caracteriza esta tefra (tabela 2). Um segundo nível de cinza muito fina, com cerca de 1cm de espessura, é observado a 1,79m no PC917 (917-2-2) (fig. 3). O conteúdo de grãos do tipo bw é maior que os do tipo pm. Um teor relativamente baixo de sílica (67%) e um teor relativamente alto em alumínio (19%) caracterizam esta tefra (tabela 2).

Um nível de cinza muito fina a fina, do tipo bw, ocorre numa camada de 2cm no PC918 (918-3) a 2,50m (fig. 5). Raros grãos de cpx e um teor de sílica de 80% caracterizam esta tefra (tabela 2). Além deste, outro nível de cinzas do tipo bw com 1cm de espessura é observado no PC918 a 3,07m de profundidade (918-4) (fig. 5). Grãos de cpx e um teor de sílica por volta de 74% são as principais características deste nível (tabela 2).

fenocristais	tipo do vidro	espessura (mm)	gran.	marco vulcânico	idade da tefra (ka)	fonte de referência
cpx	bw, pm	10	F/Vf			Este trabalho (Calha Okushiri)
af, cpx	pm, bw			B-Tm (H)	1,0	Machida and Arai (2003)
cpx	pm	15	M/F			Este trabalho (Calha Oki)
bi, am, cpx	pm			U-Oki	10,7	Machida and Arai (2003)
cpx	bw>>>pm	70	F			Este trabalho (Bacia Joetsu)
cpx	bw>>>pm	150	M/F			Este trabalho (Calha Oki)
cpx	bw	20	Vf			Este trabalho (norte da Cadeia Sado)
cpx	bw	10	Vf			Este trabalho (Cadeia Okushiri)
cpx	bw		F			Este trabalho (Ilha Shikoku)
opx, cpx	bw, pm			AT	28-29	Furuta <i>et al.</i> (1986) Sase <i>et al.</i> (2008) Machida e Arai (2003)
cpx	bw	10	F			Este trabalho (norte da Cadeia Sado)
cpx	bw	50	F/Vf			Este trabalho (Cadeia Okushiri)
ho, opx, cpx	bw, pm			Aso-4	87,0	Machida and Arai (2003) Aoki (2008)
cpx	bw>>>pm	20	F/M			Este trabalho (sul da Cadeia Sado)
opx, cpx, qt	bw, pm			K-Tz	112-115	Furuta <i>et al.</i> (1986)
cpx	bw>>>pm	10	Vf			Este trabalho (sul da Cadeia Sado)
opx, cpx	pm, bw			Aso-1	250-270	Machida and Arai (2003)

cinzas vulcânicas quaternárias na Cadeia Okushiri (Okushiri Ridge)

Um nível de cinza muito fina com 1cm de espessura foi observado no PC920 (920-5-1) a 3,82m de profundidade, onde poucos grãos do tipo bw foram encontrados. Grãos de cpx e um alto teor de sílica (80%) caracterizam esta tefra. Outro nível de cinza do tipo bw, fina a muito fina, com 5cm de espessura,

foi observado no PC921 a 4,60m de profundidade (921-5), onde fenocristais de cpx foram encontrados (tabela 2). Teores de sílica de aproximadamente 73% e de alumínio, em torno de 15%, caracterizam quimicamente esta tefra.

Um nível misto (bw+pm) de cinza muito fina (922-1) com 1cm de espessura foi observado no PC922 a 0,40m de profundidade (fig. 2), na Calha Okushiri

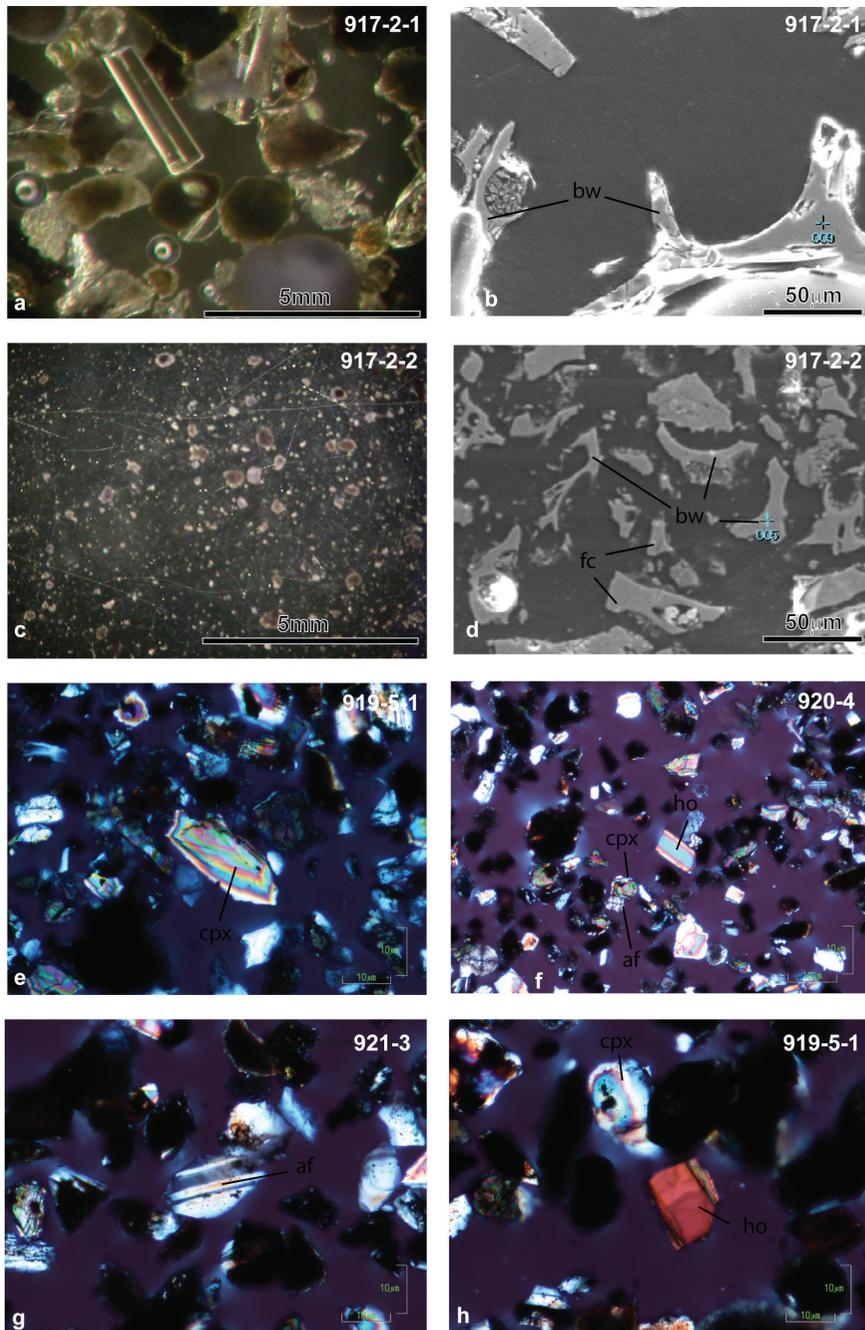


Figura 3 – Fotografias de cinzas vulcânicas obtidas em lupa binocular com aumento de 10x (a e c) e imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (SEM) (b e d): (a-b) K-Tz; (c-d) Aso-1. Microfotografias sob luz polarizada em microscópio eletrônico (e-f-g-h). Identificação das amostras no canto superior direito. Tipo de caco de vidro vulcânico: (bw) bolha de vidro; (fc) fenocristais: (cpx) clinopiroxênio; (af) feldspato alcalino; (ho) hornblenda. Para localização das amostras, ver figuras 5, 6 e 7.

Figure 3 – Tephra images using 10x binocular view (a and c) and SEM (b and d): (a-b) K-Tz; (c-d) Aso-1. Microphotographs by petrographic microscope (e-f-g-h). Samples ID at the right upper corner. Volcanic glass shards shape: (bw) bubble wall; (fc) phenocrysts: (cpx) clinopyroxene; (af) alkaline feldspar; (ho) hornblende. For samples location, see figures 5, 6 and 7.

(fig. 1). Geoquimicamente, a maior característica desta tefra é a bimodalidade no teor de sílica, com grãos apresentando teores de SiO₂ por volta de 69% em contraste com outros, nos quais os teores são ao redor de 76%. O teor de ferro em torno de 4% é outro parâmetro característico desta tefra (tabela 2).

Dois níveis de cinza mista (bw+pm) com 1cm de espessura foram identificados por SEM-EDS (fig. 4) em testemunhos da área de Okushiri ao oeste de Hokkaido (fig. 1), tendo suas composições químicas reveladas neste estudo (tabela 3). No nível superior (919-5-1, 920-4 e 921-3) (fig. 3), é observada grande quantidade de fenocristais, principalmente cpx e feldspatos alcalinos (af), enquanto no nível inferior (919-5-2, 920-5-1 e 921-4-1) apenas grãos de cpx são observados sob microscópio petrográfico.

Em termos de granulometria, a tefra superior é mais grossa que a inferior, com grãos translúcidos e opacos entre 1mm e 2mm na primeira e por volta de 0,5mm a 1mm na última (fig. 4). Ambas as tefras possuem quantidade maior de cacos do tipo bw em relação à de cacos do tipo pm.

Vários níveis de escórias vulcânicas (granulometria >2mm) pretas e coloridas são observados em todos os testemunhos da área de Okushiri, mas sua utilização na correlação estratigráfica com base em suas características químicas e petrográficas não foi possível. Isto deve-se à grande variação destas características de grão para grão dentro da mesma amostra, o que impossibilitou sua extrapolação para outros testemunhos. Os níveis de escória estão aparentemente dispostos de forma aleatória, podendo ser interpretados como resultado de movimentos de massa que retrabalharam os níveis vulcânicos originais. Esta interpretação é corroborada pela presença de vários níveis de *debris* lamosos observados nos testemunhos.

Discussão correlação com os marcos vulcânicos regionais

Uma comparação entre as formas dos grãos, constituintes minerais e composição química das cinzas vulcânicas encontradas neste trabalho com aquelas descritas no atlas de tefras de Machida e Arai (2003)

foi realizada na tentativa de identificar possíveis marcos vulcânicos regionais. A tabela 2 mostra os resultados analíticos obtidos no SEM-EDS e as características petrográficas observadas nas amostras estudadas, além das potenciais correlações com os registros catalogadas por Machida e Arai (2003), para efeito de comparação. Já a tabela 3 contém os dados analíticos e petrográficos de quatro tefras inéditas – sem correspondentes no atlas – reveladas neste estudo, na Bacia Joetsu e ao oeste da Ilha Okushiri (fig. 1).

Baegdusan-Tomakomai (B-Tm)

A composição química da amostra 922-1 (tabela 2) é muito similar à da tefra regional chamada Baegdusan-Tomakomai (B-Tm), produzida pela erupção que ocorreu há cerca de 1 cal ka BP (1.000 anos calibrados antes do presente), cuja caldeira vulcânica causadora está localizada na Coreia (Machida e Arai, 2003). Trata-se de importante marco vulcânico utilizado no Japão e Coreia em estudos arqueológicos. Este nível foi observado apenas no topo do testemunho PC922 (fig. 5). A assinatura bimodal no teor de sílica é responsável pela classificação desta tefra em dois tipos: alta e baixa B-Tm, descritos por Machida e Arai (2003). Esta característica peculiar foi bem observada na amostra 922-1, o que torna segura sua identificação.

Ulreung-Oki (U-Oki)

Baseado na forma do caco de vidro vulcânico e na composição química (tabela 2), a amostra de tefra do tipo púmice 701-2 do PC701 (fig. 2) da Calha Oki (fig. 1) foi identificada como proveniente do vulcanismo Ulreung-Oki (U-Oki), ocorrido a 10,7 cal ka BP (Fukusawa, 1995; Machida e Arai, 2003). Apesar de esta tefra ser um importante marco vulcânico do Mar do Japão, devido ao seu peculiar baixo conteúdo relativo em sílica, o que facilita sua identificação, o espriamento destas cinzas foi restrito à parte centro-sul da Ilha de Honshu (fig. 1). Por esta razão, esta tefra não foi observada em nenhum outro testemunho coletado na área estudada.

Aira-Tanzawa (AT)

Diversas amostras foram correlacionadas com este importante marco vulcânico na área de estudo (fig. 5). As amostras 701-6 (Calha Oki), 510-5 (Bacia Joetsu), 918-3 (norte da Cadeia Sado), e 920-5-1 (Cadeia Okushiri) têm a forma e a composição química

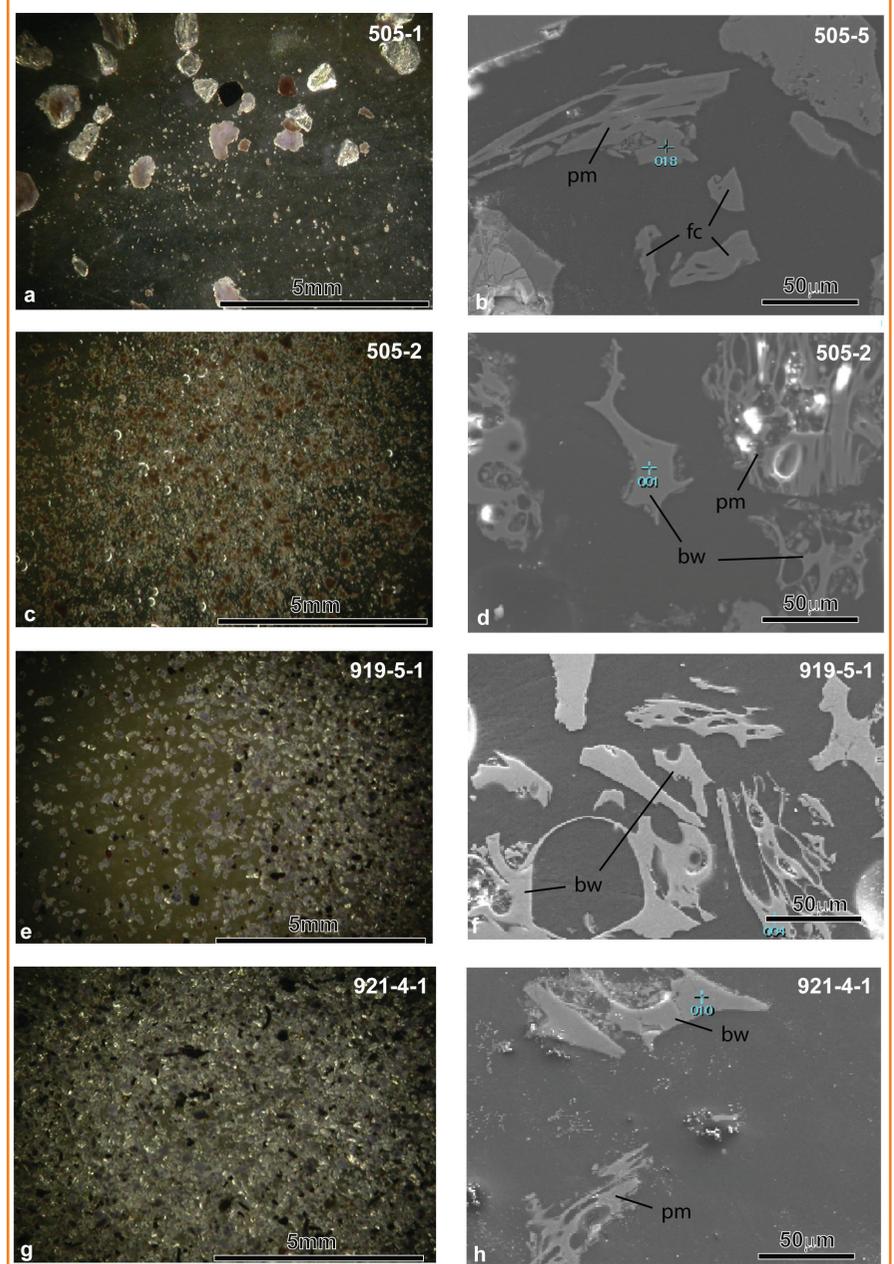


Figura 4 – Fotografias de cinzas vulcânicas obtidas em lupa binocular com aumento de 10x (do lado esquerdo) e imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (SEM) (do lado direito): (a-b) Jo-1; (c-d) Jo-2; (e-f) Ok-1; (g-h) Ok-2. Identificação das amostras no canto superior direito. Tipo de caco de vidro vulcânico: (bw) bolha de vidro; (pm) púmice; (fc) fenocristal. Para localização das amostras, ver figuras 5, 6 e 7.

Figure 4 – Tephra images using 10x binocular view (left side) and SEM (right side): (a-b) Jo-1; (c-d) Jo-2; (e-f) Ok-1; (g-h) Ok-2. Samples ID at the right upper corner. Volcanic glass shards shape: (bw) bubble wall; (pm) pumice; (fc) phenocryst. For samples location, see figures 5, 6 and 7.

dos cacos de vidro vulcânicos bem similares àquelas da tefra AT (tabela 2), cujo vulcanismo ocorreu a 28-29 cal ka BP (Sase *et al.*, 2008), catalogada por Machida e Arai (2003).

Tabela 3

Composição química de elementos maiores dos cacos de vidro vulcânico analisados neste estudo (SEM-EDS). Fenocristais: af (feldspato alcalino), cpx (clinopiroxênio); tipo do caco de vidro vulcânico: bw (bolha de vidro), pm (púmice); granulometria: F (fina), Vf (muito fina); n: número de observações; sd: desvio padrão; std: amostra padrão; o conteúdo de ferro total é dado em FeO.

Table 3

Major elements chemical composition of volcanic glass shards and characteristics of tephra analyzed in this work (SEM-EDS). Phenoclasts: af (alkaline feldspar), cpx (clinopyroxen); glass shards shape: bw (bubble wall), pm (pumice); grain size: F (fine), Vf (very fine); n: number of observations; sd: standard deviation; std: standard sample; the total iron content is given in FeO.

amostra	prof. (m)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	n (grãos)	n (amostras)
505-5 sd	4,13	80,37 0,30	0,27 0,03	12,30 0,10	1,41 0,10	0,06 0,04	0,29 0,06	1,14 0,08	1,99 0,25	2,18 0,13	10	1
702-3 sd	2,84	79,80 0,25	0,30 0,05	12,41 0,14	1,39 0,05	0,06 0,02	0,31 0,04	1,21 0,05	2,22 0,20	2,32 0,09	12	1
903-5 sd	4,47	79,31 0,22	0,29 0,04	12,39 0,14	1,41 0,07	0,05 0,02	0,32 0,03	1,18 0,08	2,52 0,09	2,55 0,06	11	1
916-4 sd	3,67	79,07 0,46	0,31 0,03	12,37 0,15	1,44 0,09	0,08 0,04	0,31 0,04	1,23 0,12	2,70 0,35	2,52 0,11	12	1
Jo-1 média" sd		79,64 0,31	0,29 0,04	12,37 0,13	1,41 0,08	0,06 0,03	0,31 0,04	1,19 0,08	2,35 0,22	2,39 0,10		
505-6 sd	4,95	75,44 0,21	0,55 0,02	13,73 0,11	2,87 0,09	0,12 0,04	0,76 0,04	2,69 0,09	2,16 0,14	1,68 0,04	11	1
919-5-1 sd	2,06	77,45 0,23	0,46 0,04	13,14 0,10	2,51 0,09	0,17 0,07	0,58 0,05	2,37 0,10	1,76 0,11	1,56 0,05	12	1
920-4 sd	3,39	76,71 0,49	0,46 0,05	13,45 0,16	2,59 0,19	0,10 0,03	0,59 0,07	2,26 0,13	2,08 0,40	1,78 0,10	11	1
921-3 sd	3,10	76,40 0,40	0,46 0,06	13,37 0,22	2,52 0,33	0,08 0,06	0,53 0,04	2,24 0,16	2,44 0,26	1,97 0,06	10	1
"Ok-1 média" sd		76,85 0,37	0,46 0,05	13,32 0,16	2,54 0,20	0,12 0,05	0,57 0,05	2,29 0,13	2,09 0,26	1,77 0,07		
919-5-2 sd	2,31	78,48 1,47	0,31 0,09	13,09 0,48	2,36 0,46	0,07 0,02	0,43 0,17	2,18 0,44	1,93 0,14	1,16 0,09	8	1
921-4-1 sd	3,16	79,52 0,24	0,26 0,05	12,60 0,10	2,03 0,05	0,05 0,03	0,32 0,05	1,87 0,10	2,09 0,09	1,27 0,06	10	1
Ok-2 média sd		79,00 0,86	0,28 0,07	12,84 0,29	2,19 0,26	0,06 0,03	0,37 0,11	2,03 0,27	2,01 0,12	1,22 0,08		

A espessura do nível de cinza AT é maior na Calha Oki (701-6; 15 cm), decaindo para norte na Bacia Joetsu (510-5; 7cm). O nível não foi observado ao sul da Cadeia Sado, na costa da cidade de Sakata, reaparecendo a norte na costa da cidade de Akita, com 2 cm de espessura (918-3), e na Cadeia Okushiri (920-5-1), com 1cm, representando a parte distal da erupção AT ocorrida a mais de 800km ao sul, na Ilha de Kyushu (fig. 1). Isto mostra a potência desta erupção ocorrida durante o LGM.

Aso-4

As amostras 918-4 (norte da Cadeia Sado) e 921-5 (Cadeia Okushiri) são correlativas (fig. 5) com o marco

vulcânico Aso-4 (88 cal ka BP) (Sase *et al.*, 2008), catalogado por Machida e Arai (2003). Ao exemplo da caldeira AT, a caldeira Aso-4 está localizada ao sul do Japão na Ilha Kyushu, distante mais de 800km (fig. 1). Estudos recentes identificaram cacos de vidro vulcânico da tefra Aso-4 em sedimentos de fundo no Oceano Pacífico, a mais de 2.900km da caldeira original (Aoki, 2008).

Kikai-Tozurahara (K-Tz)

A amostra 917-2-1 contém cacos de vidro vulcânico com forma e composição química (tabela 2) bastante similares às do marco vulcânico Kikai-Tozurahara (K-Tz), produzido pela erupção que, segundo Machida

fenocristais	tipo do vidro	espessura (mm)	gran.	marco vulcânico	idade da tefra (ka)	fonte de referência
cpx	pm>>>bw	10	F	Jo-1	~19	Este trabalho (Bacia Joetsu)
cpx	pm>>>bw	10	Vf			
cpx	pm>>>bw	10	F			
cpx	pm>>>bw	10	F			
cpx	pm>>>bw	10	F	Jo-2	~22	Este trabalho (Cadeia Okushiri)
cpx/af	pm, bw	10	Vf	Ok-1	~27	
cpx/af	pm, bw	10	Vf			
cpx/af	pm, bw	10	F/Vf			
cpx	pm, bw	10	Vf	Ok-2	~30	
cpx	pm, bw	10	F/Vf			

e Arai (2003), ocorreu entre 112 e 115 cal ka BP. Esta caldeira está localizada ao sul da Ilha de Kyushu (fig. 1), próximo às fontes das cinzas AT e Aso-4, revelando que aquele local foi vulcanicamente ativo em várias fases do Pleistoceno.

Aso-1

Aso-1 é um marco vulcânico cuja erupção ocorreu entre 250 e 270 cal ka BP (Machida e Arai, 2003), sendo um importante marco estratigráfico no Mar do Japão (Aoki, 2008). A composição química da amostra 917-2-2 é, em geral, similar à da cinza Aso-1 (Machida e Arai, 2003), com algumas ressalvas (tabela 2). O testemunho PC917 está localizado a sul

da Cadeia Sado (fig. 1) e amostrou os sedimentos mais antigos observados neste estudo, atestado pela presença do importante marco estratigráfico Aso-1.

identificação e catalogação dos marcos vulcânicos Joetsu-1 (Jo-1) e Joetsu-2 (Jo-2)

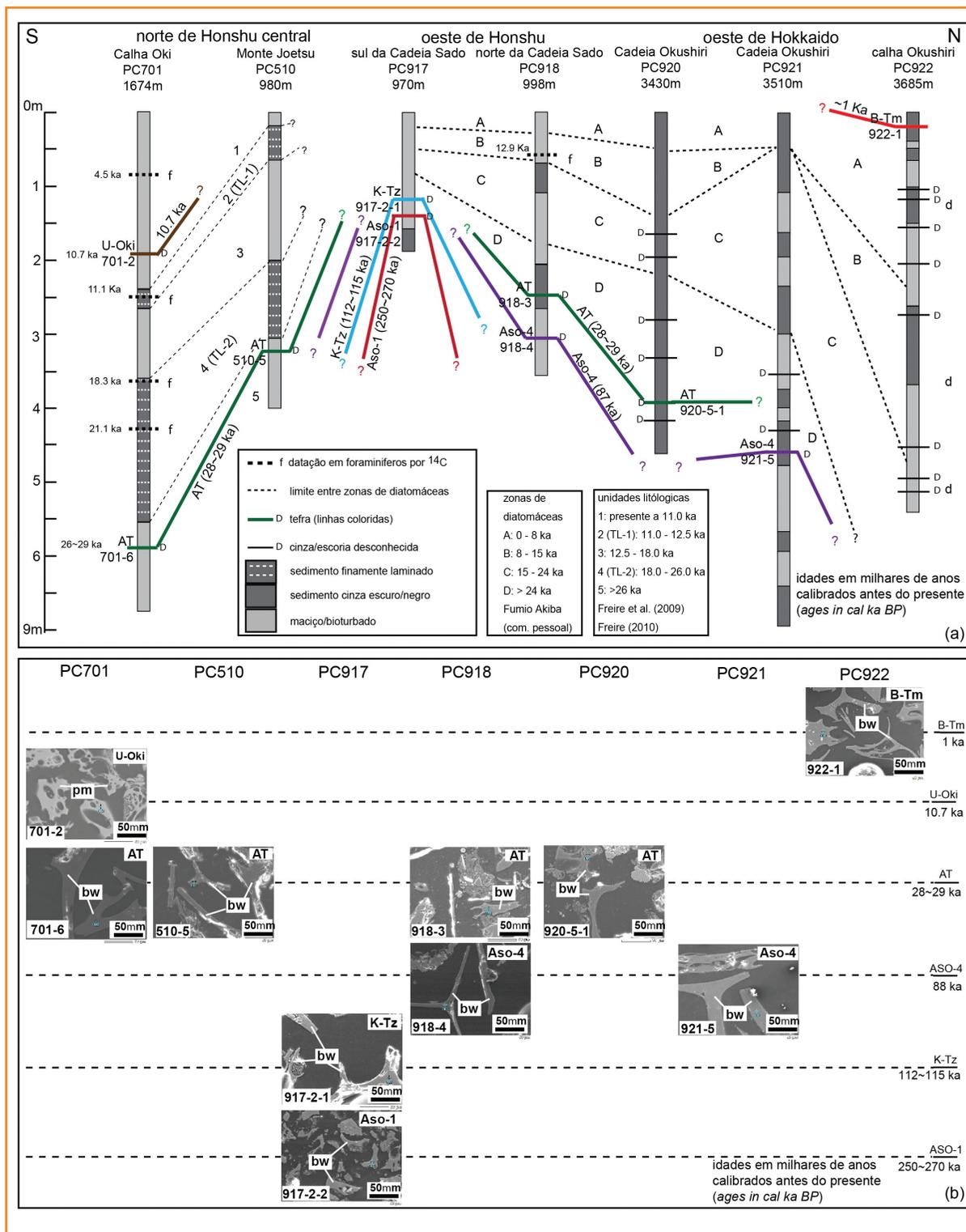
As amostras 505-5, 702-3, 903-5, 916-4, e 505-6 foram analisadas por SEM-EDS e tiveram suas formas (fig. 4) e composições químicas (tabela 3) comparadas a outras registradas no atlas de marcos vulcânicos de Machida e Arai (2003), sem revelar a existência de seus análogos. Assim, dois níveis não catalogados foram identificados nas partes superior e média da unidade estratigráfica 4 (TL-2), denominadas neste estudo como

Figura 5

(a) Correlação regional de testemunhos a partir da região central de Honshu até o oeste de Hokkaido baseada em tefroestratigrafia, datação por C^{14} em carapaças de foraminíferos, zoneamento de diatomáceas e unidades sedimentares; (b) Imagens dos cacos de vidro vulcânico por microscópio eletrônico de varredura (SEM). Para localização dos testemunhos, ver figura 1. Zoneamento por diatomáceas por Dr. Fumio Akiba (comunicação verbal).

Figure 5

(a) Piston-cores regional correlation from the north of central Honshu to the west of Hokkaido based on tephrostratigraphy, C^{14} dating, diatom zones, and sediment units; (b) SEM images of the glass shards analyzed. For piston-cores location, see figure 1. Diatoms zonation by Dr. Fumio Akiba (personal communication).



Joetsu-1 (Jo-1) e Joetsu-2 (Jo-2), respectivamente (fig. 6). Tanto as características petrográficas (fig. 4) como a composição química dos cacos de vidro vulcânico destes potenciais marcos vulcânicos foram revelados e disponibilizados por este estudo (tabela 3), possibilitando um melhor rastreamento estratigráfico da unidade 4 (TL-2) ao longo do Mar do Japão.

Okamura *et al.* (1991), Kikkawa e Ikehara (1994) e Ikehara (2003) descreveram e denominaram a cinza NJ-2 (*Northern Japan-2*) em nível estratigráfico supostamente similar à unidade 4 (TL-2), em amostras de sedimentos marinhos ao oeste da Península de Oga, em três testemunhos coletados ao noroeste da Cadeia Sado. Como discutido anteriormente, a

profundidade d'água abaixo da CCD, nesta região, dificulta a datação por C^{14} em testas de foraminíferos devido à sua escassez, tornando imprecisa a utilização dos marcos estratigráficos representados pelas várias camadas finamente laminadas de cores escuras (TLs). Caso a unidade litológica descrita pelos autores seja de fato a unidade 4 (TL-2), esta cinza estaria no mesmo posicionamento estratigráfico da cinza Jo-1. Entretanto, a composição química reportada pelos autores como sendo característica da cinza NJ-2 não contém informações sobre o conteúdo de SiO_2 , um importante parâmetro para identificar e correlacionar tefras no Mar do Japão (Furuta *et al.*, 1986).

Além disso, os outros elementos maiores analisados e reportados não são similares àqueles das tefras Jo-1 e Jo-2 descritas neste estudo (tabela 3), levando a crer que NJ-1 e Jo-1 não são correlacionáveis. Uma completa análise com SEM-EDS na cinza NJ-2 é necessária para que a relação entre NJ-2 e Jo-1 seja estabelecida, incluindo o conteúdo de SiO_2 e suas características petrográficas. De qualquer forma, as caldeiras vulcânicas originais, tanto da NJ-2 (Ikehara, 2003) quanto para Jo-1 e Jo-2, são desconhecidas.

De uma forma geral, Jo-1 e Jo-2 podem ser individualizadas pela forma, tamanho e composição química dos cacos vulcânicos, representando uma importante tefra para correlacionar os sedimentos do Último Máximo Glacial (LGM) na Bacia Joetsu e, talvez, ao longo da margem leste do Mar do Japão.

identificação e catalogação dos marcos vulcânicos Okushiri-1 (Ok-1) e Okushiri-2 (Ok-2)

Como discutido anteriormente, para as tefras Jo-1 e Jo-2 na Bacia Joetsu, duas outras tefras foram identificadas na Cadeia Okushiri (*Okushiri Ridge*) a oeste da Ilha de Hokkaido, norte do Japão. Ao exemplo de Jo-1 e Jo-2, não houve correlação com nenhuma tefra catalogada por Machida e Arai (2003), o que significa tratar-se de tefras desconhecidas até o presente estudo. Aqui, elas foram denominadas Okushiri-1 (Ok-1) e Okushiri-2 (Ok-2) (fig. 4). Ok-1 foi amostrada nos testemunhos PC919 (919-5-1), PC920 (920-4), e PC921 (921-3), enquanto Ok-2 foi identificada nos testemunhos PC919 (919-5-2) e PC921 (921-4-1) (fig. 7).

controle de idade e taxas de sedimentação

As unidades litológicas 1 a 5 são facilmente identificadas e correlacionadas entre os testemunhos

localizados na Calha Oki e na Bacia Joetsu (Freire *et al.*, 2009; Freire, 2010). Assumindo que os limites destas unidades litológicas são sincrônicos em ambas as áreas e que as taxas de sedimentação são constantes nas duas locações, a profundidade, em metros abaixo do substrato marinho (mbsf), pode ser convertida para idade em milhares de anos calibrados antes do presente (cal ka BP) nos testemunhos PC701 e PC510 (fig. 8).

As idades dos sedimentos foram inicialmente determinadas no PC701, onde houve o reconhecimento dos marcos vulcânicos U-Oki e AT, além da datação absoluta em foraminíferos através do C^{14} . Posteriormente, estas idades foram extrapoladas para os sedimentos da Bacia Joetsu, onde um pequeno número de datações com C^{14} no PC916 confirmaram idades similares (Suzuki, 2010) (tabela 4). O topo da unidade 5 é mais velho que 26,0 cal ka BP, enquanto o marco vulcânico AT (28-29 cal ka BP) foi observado tanto no PC701 como no PC510. A unidade 4 (TL-2) foi depositada entre 26,0 e 18,0 cal ka BP, dentro do período de esfriamento global chamado LGM. Já a unidade 3, representa a transição entre o LGM e o início do Holoceno, período compreendido entre 18,0 e 12,5 cal ka BP. A unidade 2 (TL-1), correspondente ao início do Holoceno, representa a sedimentação entre 12,5 e 11,0 cal ka BP, logo após o evento de resfriamento conhecido como *Younger Dryas*, ocorrido por volta de 12,5 cal ka BP (Kennett *et al.*, 2003). A unidade 1 representa a sedimentação mais recente que 11,0 cal ka BP até o presente.

Graças a este confiável controle estratigráfico entre os testemunhos da Bacia Joetsu e a Calha Oki, as idades dos marcos vulcânicos Jo-1 e Jo-2, revelados neste estudo, puderam ser estimadas utilizando-se uma taxa de sedimentação de 125 mm/ka para a deposição da unidade 4 (TL-2), durante o LGM (tabela 4). Para Jo-1, localizada próximo ao topo da unidade 4 (TL-2) (fig. 6), é proposta uma idade estimada ao redor de 19 cal ka BP. Já para Jo-2, localizada na parte mediana da unidade 4 (TL-2) (fig. 6), a idade proposta é de 22 cal ka BP. Esta última deve ser utilizada com ressalvas, já que apenas uma amostra foi identificada nos testemunhos.

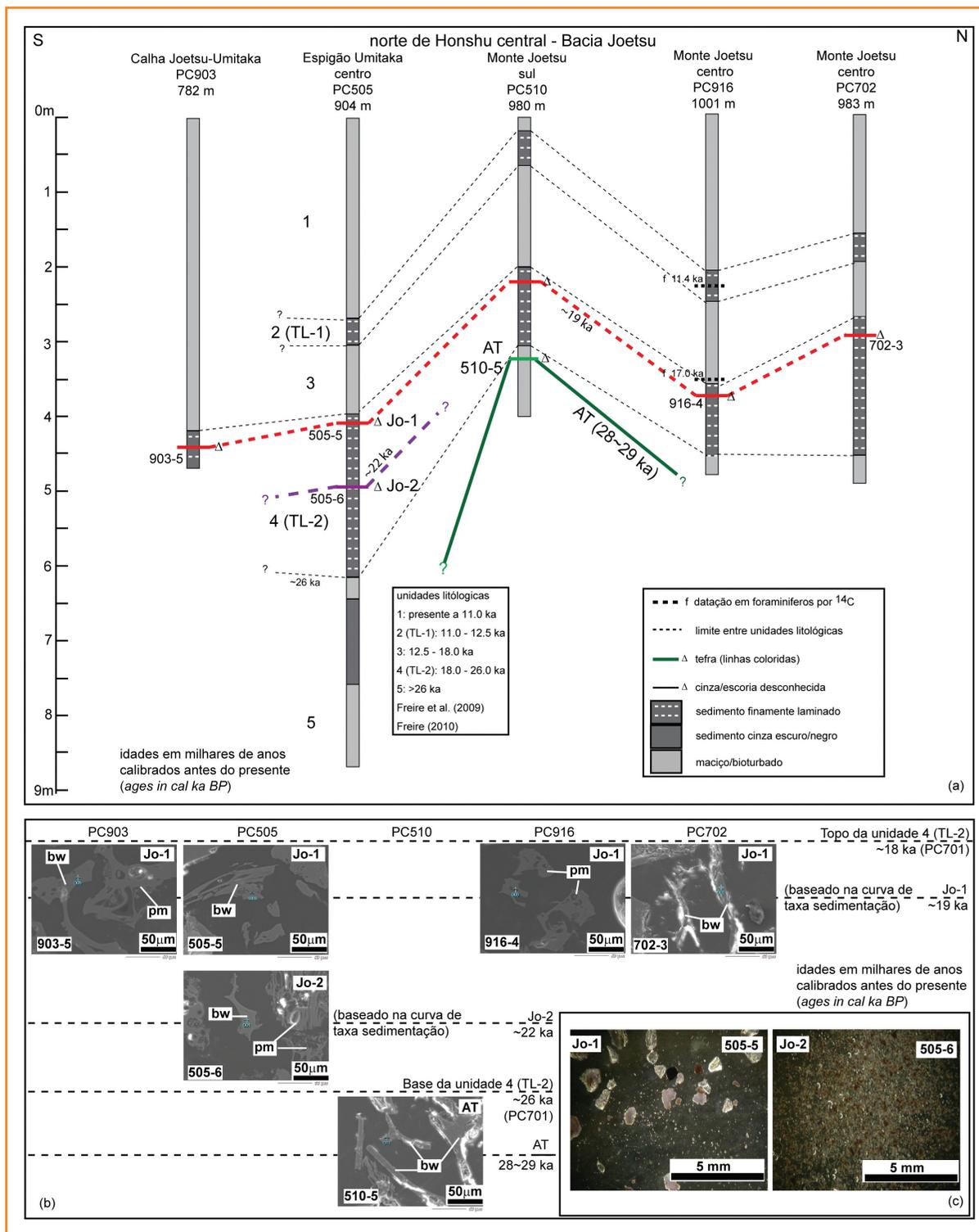
Por outro lado, as unidades litológicas 1 a 5 não podem ser utilizadas para correlação estratigráfica entre a Bacia Joetsu e as áreas das cadeias Sado e Okushiri, ambas a norte, uma vez que a identificação dessas unidades não é tão segura naquelas áreas. Uma amostra contendo foraminíferos planctônicos foi

Figura 6

(a) Correlação regional de testemunhos ao longo da Bacia Joetsu baseada em tefroestratigrafia, datação por C^{14} em carapaças de foraminíferos e unidades sedimentares; (b) Imagens dos cacos de vidro vulcânico por microscópio eletrônico de varredura (SEM); (c) Imagens aumentadas em 80x por lupa binocular dos cacos de vidros vulcânico. Para localização dos testemunhos, ver figura 1.

Figure 6

a) Piston-cores correlation along the Joetsu Basin based on tephrostratigraphy, C^{14} dating and sediment units; (b) SEM images of the glass shards analyzed; (c) 80x ash samples images under binocular view. For piston-cores location, see figure 1.



coletada a 0,65m de profundidade no PC918 e indica uma idade de $12,9 \pm 0,34$ cal ka BP por C^{14} (Suzuki, 2010) na parte norte da Cadeia Sado. Não foram encontradas testas de foraminíferos nos testemunhos coletados na área de Okushiri, onde a profundidade de água é maior que 3.500m e, portanto, abaixo da CCD do Mar do Japão.

Por serem de natureza silicosa, as diatomáceas podem ser utilizadas para datações relativas em áreas situadas abaixo da CCD. Um zoneamento estratigráfico baseado nesses organismos foi realizado ao longo da margem leste do Mar do Japão (Fumio Akiba, comunicação verbal), permitindo-se inferir um controle razoável de idade para os sedimentos coletados na

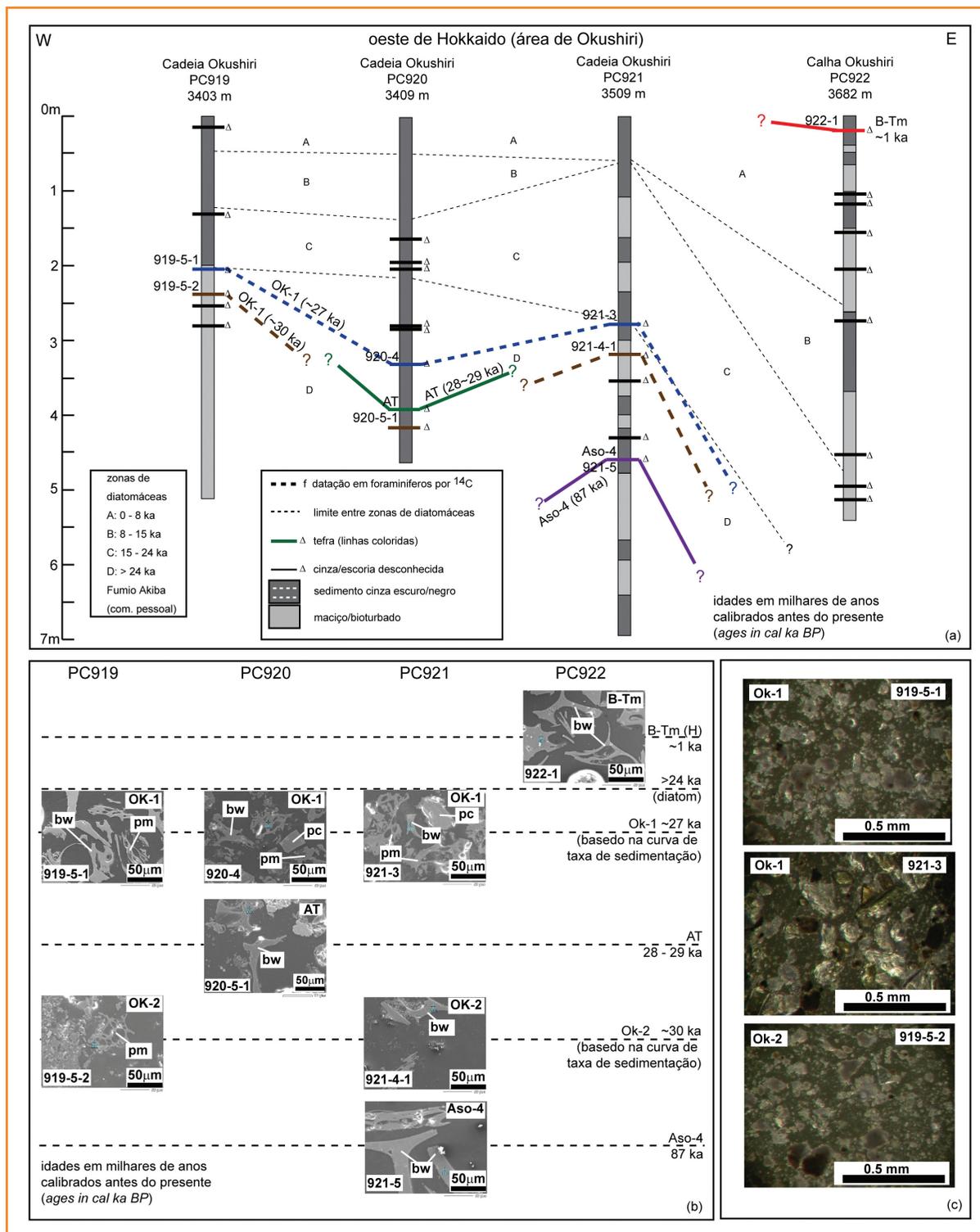


Figura 7
 (a) Correlação regional de testemunhos ao longo da Cadeia Okushiri baseada em tefroestratigrafia e zoneamento de diatomáceas; (b) Imagens dos cacos de vidro vulcânico por microscópio eletrônico de varredura (SEM); (c) Imagens aumentadas em 80x por lupa binocular dos cacos de vidros vulcânico. Para localização dos testemunhos, ver figura 1. Zoneamento de diatomáceas por Dr. Fumio Akiba (comunicação verbal).

Figure 7
 a) Piston-cores correlation along the Okushiri Ridge based on tephrostratigraphy and diatom zones; (b) SEM images of the glass shards analyzed; (c) 80x ash samples images under binocular view. For piston-cores location, see figure 1. Diatoms zonation by Dr. Fumio Akiba (verbal communication).

área de Okushiri. Naquele estudo foram identificadas quatro zonas de diatomáceas, utilizando-se os mesmos testemunhos usados neste estudo, tornando possível a integração entre os diversos métodos.

O topo da zona D, correspondente aos sedimentos mais antigos que 24 cal ka BP, foi observado a 2,29m em profundidade inferior à do marco vulcânico AT

(28-29 cal ka BP), observado no PC920 (920-5-1) a 3,82m de profundidade. Uma taxa de sedimentação de 340 mm/ka foi inferida para o intervalo entre AT e o limite da zona de diatomácea D (tabela 4). Por outro lado, uma taxa menor de sedimentação, cerca de 25 mm/ka (tabela 4), é sugerida no PC921, entre a zona D a 3,01m de profundidade e o marco vulcânico

Aso-4 (88 cal ka BP) a 4,60m (fig. 8), não tendo sido observado a presença do marco AT.

A profundidade do potencial marco vulcânico Ok-1 coincide com o limite superior da zona D (>24 cal ka BP) no PC919 e no PC921 (fig. 7). Contudo, a profundidade de Ok-1 no PC920 é de 3,39m e não coincide com o topo da zona D neste poço, a qual é observada a 2,29m de profundidade (fig. 7). Isto sugere a ocorrência de erosão, que eliminou parte da zona D nos testemunhos PC919 e PC921. Utilizando-se a taxa de sedimentação de 340 mm/ka, sugerida no PC920 (tabela 4) para o intervalo entre AT (28-29 cal ka BP) e o topo da zona D (>24 cal ka BP), uma idade estimada em 27 cal ka BP é proposta para Ok-1.

Como Ok-2 não foi claramente identificada no PC920, o uso desta idade para estabelecer a taxa de sedimentação não é muito preciso naquele testemunho. Uma amostra coletada a 4,04m de profundidade, logo abaixo do marco vulcânico AT, foi analisada por SEM-EDS, mas, devido aos poucos grãos encontrados, sua composição química não foi claramente definida. Por outro lado, o marco AT não foi observado nos testemunhos PC919 e PC921 (fig. 7), tornando imprecisa a relação estratigráfica entre AT e OK-2.

Os marcos Ok-1 e Ok-2 foram identificados no PC921 (921-3) a 2,80m e 3,16m de profundidade, respectivamente (fig. 7). Além disto, o marco vulcânico Aso-4 também foi identificado no PC921 a 4,60m de profundidade (921-5), apesar do marco AT estar ausente, sugerindo diversos processos erosivos (fig. 7). Considerando a idade proposta de 27 cal ka BP para Ok-1 e 88 cal ka BP para Aso-4 (Sase *et al.*, 2008), uma taxa de sedimentação de 25 mm/ka pode ser inferida para este intervalo (tabela 4), resultando em uma idade aproximada de 30 cal ka BP para Ok-2, um pouco mais antiga que AT.

correlação regional ao longo da margem leste do Mar do Japão

A margem leste do Mar do Japão é composta por uma complexa sucessão de calhas e cadeias alinhadas nos sentidos N-S e NNE-SSW (Tamaki e Isezaki, 1996) (fig. 1). Uma incipiente subducção das crostas suboceânicas e oceânicas é observada ao longo da sutura, originando um sistema de vários sinclinais e anticlinais com bordas falhadas (Kobayashi, 1983; Nakamura, 1983).

A formação de um prisma acrecionário é sugerida através da imbricação de falhas de empurrão com mergulho para a bacia, além do enrugamento da

topografia de fundo, que gera o sistema sinclinal-anticlinal observado. O tectonismo ativo, até o presente, forma o relevo do fundo e controla as taxas de sedimentação. Seções sísmicas mostram deslocamentos de mais de 100m no relevo na Cadeia Sado, indicando que a margem leste do Mar do Japão é tectonicamente ativa, desde o Plioceno médio até o presente (Tamaki e Isezaki, 1996).

A ocorrência dos marcos vulcânicos K-Tz (112-115 cal ka BP) e Aso-1 (250-270 cal ka BP) em sedimentos superficiais mais rasos que 2m no PC917 na Cadeia Sado, associado à ausência dos marcos AT (28-29 cal ka BP) e Aso-4 (88 cal ka BP) (fig. 5), indicam um hiato deposicional causado por erosão ou não-deposição de ambos os marcos na parte sul da Cadeia Sado. A zona de diatomácea D (>24 cal ka BP) está presente, mas não é possível inferir com exatidão a idade, devido ao fato da datação com diatomáceas ser referente a uma zona bioestratigráfica, o que representa um intervalo de tempo.

Baseado na correlação entre as tefras (*tephrostratigraphy*), unidades litológicas, datação de testas de foraminíferos por C^{14} e zoneamento de diatomáceas, foi possível sugerir curvas de taxas de sedimentação para Calha Oki, Bacia Joetsu, Cadeia Sado, e Cadeia Okushiri (fig. 8). A análise das curvas sugere que a coluna sedimentar depositada durante os últimos 300 mil anos é menos espessa na parte sul da Cadeia Sado (PC917) que aquelas observadas na parte norte da Cadeia Sado (PC918), Calha Oki (PC701), Bacia Joetsu (PC510) e Cadeia Okushiri (PC920 e PC921).

A taxa de sedimentação em PC917 e PC918 (tabela 4), localizados nas porções sul e norte da Cadeia Sado, respectivamente (fig. 1), é muito menor que aquela sugerida para as demais áreas, indicando que este não é um ambiente favorável à deposição de sedimentos (fig. 5). Soerguimentos causados pela subducção incipiente e consequente formação de um prisma de acreção, conforme proposto por Nakamura (1983), Kobayashi (1983), e Tamaki e Isezaki (1996), pode explicar as baixas taxas de sedimentação na Cadeia Sado (fig. 8).

Considerando idades médias de 113,5 cal ka BP para K-Tz (112-115 cal ka BP), e 260 cal ka BP para Aso-1 (250-270 cal ka BP), o intervalo sedimentar de 55cm entre os marcos vulcânicos Aso-1 e K-Tz no PC917 representa uma taxa de sedimentação aproximada de 8 mm/ka entre os dois níveis estratigráficos (tabela 4). As zonas de diatomáceas A (0-8 cal ka BP), B (8-15 cal ka BP), C (15-24 cal ka BP) e D (>24 cal ka BP) (Fumio Akiba, comunicação verbal) estão presentes no PC917 (fig. 8), mas estão todas contidas no intervalo de 1,0m de profundidade

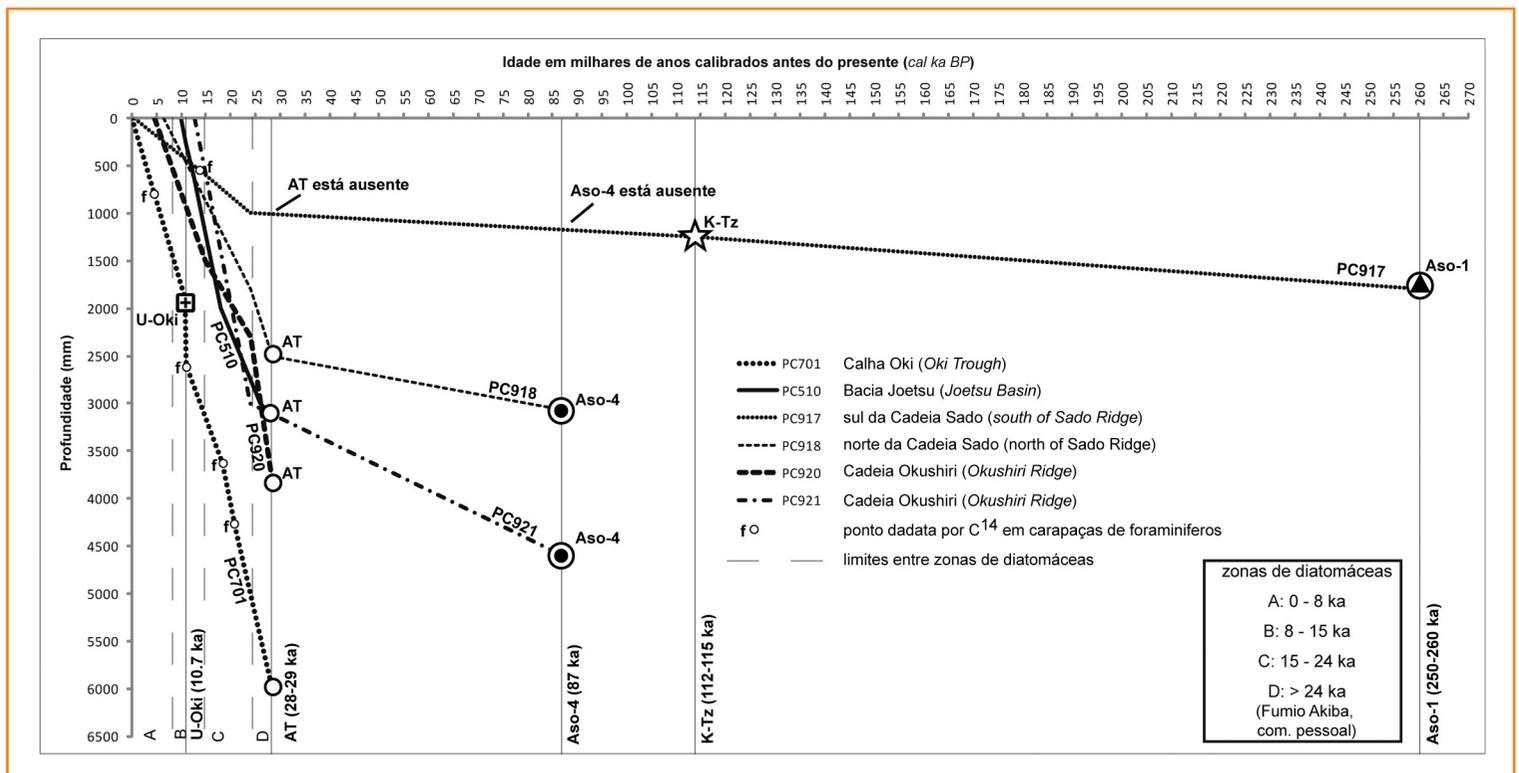


Figura 8

Curvas de taxas de sedimentação ao longo da margem leste do Mar do Japão baseadas em tefroestratigrafia, datação por C^{14} em carapaças de foraminíferos, zoneamento de diatomáceas e unidades sedimentares. Zoneamento de diatomáceas por Dr. Fumio Akiba (comunicação verbal).

Figure 8

Sedimentation rate curves along the eastern margin of Japan Sea based on tephrostratigraphy, C^{14} dating, diatom zones, and sediment units correlation. Diatom zonation by Dr. Fumio Akiba (verbal communication).

abaixo do fundo do mar, indicando a deposição de uma seção condensada (fig. 5). O fato de os marcos vulcânicos AT e Aso-4 estarem ausentes no PC917 indica que erosão ou não-deposição gerou um hiato deposicional em algum momento entre o datum Aso-4 (88 cal ka BP) e o da zona de diatomáceas D (>24 cal ka BP).

O incremento na taxa de sedimentação de 50-125 mm/ka (fig. 8) durante a deposição dos sedimentos do LGM (unidade 4 TL-2) para cerca de 280 mm/ka no início do Holoceno (unidade 2 TL-1), na Bacia Joetsu (tabela 4), pode ser explicado pela proximidade com o talude da bacia (fig. 1), como proposto por Freire *et al.* (2009) e Freire (2010). Porém, constitui uma surpresa a ocorrência de alta taxa de sedimentação variando de 137-276 mm/ka na Cadeia Okushiri (tabela 4), onde a grande distância da costa da Ilha Hokkaido, localizada mais de 100km ao leste (fig. 1), sugeriria baixo aporte sedimentar siliciclástico terrígeno. Em geral, cadeias e calhas parecem controlar as taxas de sedimentação devido ao contínuo soerguimento estrutural (Tamaki e Isezaki, 1996).

características químicas dos marcos vulcânicos Jo-1, Jo-2, Ok-1, e Ok-2 baseados em elementos maiores

As tefras descritas neste estudo têm elevado conteúdo de SiO_2 (76 a 80%), contudo, um baixo

conteúdo em álcalis (Na_2O+K_2O) (3% a 5%). Jo-1, Jo-2, Ok-1 e Ok-2 possuem uma composição riolítica subalcalina (fig. 9), de acordo com o diagrama SiO_2 versus Na_2O+K_2O , proposto por Park *et al.* (2005). Todas estas cinzas são plotadas no campo sódico, de acordo com o diagrama Na_2O versus K_2O (fig. 9). O conteúdo de álcalis sugere que Jo-1, Jo-2 e Ok-1 pertencem à série calcoalcalina, enquanto Ok-2 pertence à série toleítica (fig. 9). O conteúdo de metais de transição ($TiO_2+FeO+MnO$) em Jo-1 (1,76%) representa cerca da metade do conteúdo observado em Jo-2 (3,54%), enquanto o conteúdo de SiO_2 é menor.

Jo-1 e Ok-1 podem ser classificadas como cinzas riolíticas sódicas calcoalcalinas, com granulometria variando de fina a média. Jo-2 é uma cinza riolítica muito fina a siltica, com composição sódica calcoalcalina, enquanto Ok-2 é uma cinza riolítica sódica toleítica, com granulometria de fina a muito fina.

conclusões

Este estudo possibilitou chegar às seguintes conclusões:

unidade litológica	fonte de datação	prof. (mm)	idade em cal ka BP	taxa de sedimentação (mm/ka)	unidade litológica	fonte de datação	prof. (mm)	idade em cal ka BP	taxa de sedimentação (mm/ka)
(a)					(b)				
1	estimada	0	Presente?	177*	1	estimada	0	Presente?	175*
1	C14foram	800	4,490 ± 40	177	2	Topo da unidade 2 (TL-1)	250	11	175
1	U-OkI	1900	10,700 ± 100	1750	2	Base da unidade 2 (TL-1)	600	13	280
2 (TL-1)	C14foram	2600	11,100 ± 70	133	4	Topo da unidade 4 (TL-2)	2000	18	125
4 (TL-2)	C14foram	3630	18,334 ± 70	254	4	Base da unidade 4 (TL-2)	3000	26	56
4 (TL-2)	C14foram	4340	21,078 ± 60	221	5	AT	3140	28 - 29	
5	AT	6000	28 - 29		(d)				
(c)					(d)				
?	estimada	0	Presente?	7*	?	estimada	0	Presente?	65*
?	diatom. A-B	190	8	7	?	diatomácea A-B	330	8	65
?	diatom. B-C	240	15	63	?	C14foram	650	12,886 ± 34	62
?	diatom. C-D	810	24	5	?	diatomácea B-C	780	15	113
?	K-Tz	1240	112-115	8	?	diatomácea C-D	1800	24	156
?	Aso-1	1790	250-270		?	AT	2500	28 - 29	10
(e)					(f)				
?	estimada	0	Present?	137*	?	estimation	0	Presente?	276*
?	diatom. A-B	540	8	137	?	diatomácea B-C	520	15	276
?	diatom. B-C	1500	15	88	?	diatomácea C-D	3000	24	25
?	diatom. C-D	2290	24	340	?	Aso-4	4600	87	
?	AT	3820	28-29						

Tabela 4 – Taxas de sedimentação: (a) PC701 na Calha OkI; (b) PC510 na Bacia Joetsu; (c) PC917 e (d) PC918 na Cadeia Sado; (e) PC920 e (f) PC921 na Cadeia Okushiri. *Taxas de sedimentação estimadas.

Table 4 – Sedimentation rates: (a) PC701 at OkI Trough; (b) PC510 at Joetsu Basin; (c) PC917 and (d) PC918 at Sado Ridge; (e) PC920 and (f) PC921 at Okushiri Ridge. *Estimated sedimentation rates.

1) Uma boa correlação estratigráfica ao longo da margem leste do Mar do Japão pôde ser feita baseada no uso de cinzas vulcânicas, suportada por dados de datação por C^{14} em carapaças de foraminíferos e zoneamento por diatomáceas. A correlação regional mostrou que os marcos vulcânicos regionais, conhecidos como AT e Aso-4, estão ausentes na parte sul da Cadeia Sado, enquanto os marcos mais antigos, conhecidos como K-Tz e Aso-1, ocorrem naquela área. Isto pode indicar a deposição de uma seção condensada e sugere um hiato deposicional causado por erosão ou não-deposição de algum intervalo estratigráfico compreendido entre 87 e 24 cal ka BP. A topografia do fundo do mar, resultado da atividade tectônica compressiva desde a metade do Plioceno, parece controlar fortemente as taxas de sedimentação.

2) Quatro níveis de cinzas vulcânicas foram identificados e descritos neste estudo, podendo, a partir de agora, ter suas formas e composições químicas disponíveis para serem usadas em correlações estratigráficas ao longo da margem leste do Mar do Japão. Jo-1 e Ok-1 podem ser classificadas como cinzas riolíticas sódicas calcoalcalinas, com grãos sob a forma bolha de vidro e púmice variando de finos a médios. Jo-2 é uma cinza muito fina a siltica, com composição química e forma semelhante às anteriores, enquanto Ok-2 é uma cinza riolítica sódica de série toleítica, com finos grãos mistos.

agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda de Eijiro Iwasaki, Ishihara Takeshi, Yuichi Niwa, e Kei Kojima, pelo suporte técnico durante as análises em SEM-EDS; agradecimentos são dirigidos também a Yusuke Saganuma e Hitoshi Tomaru, pelos comentários e discussões científicas; a Takayuki Tomiyama e Hideaki Machiyama, pelo suporte técnico durante amostragens adicionais no centro de testemunhos da JAMSTEC em Kochi.

Agradecimentos especiais a Adriano Roessler Viana, Almério Barros França, Dimas Ferreira da Silva Coelho, Edison José Milani, José Antonio Cupertino, Luiz Antonio Freitas Trindade, Mario Carminatti e

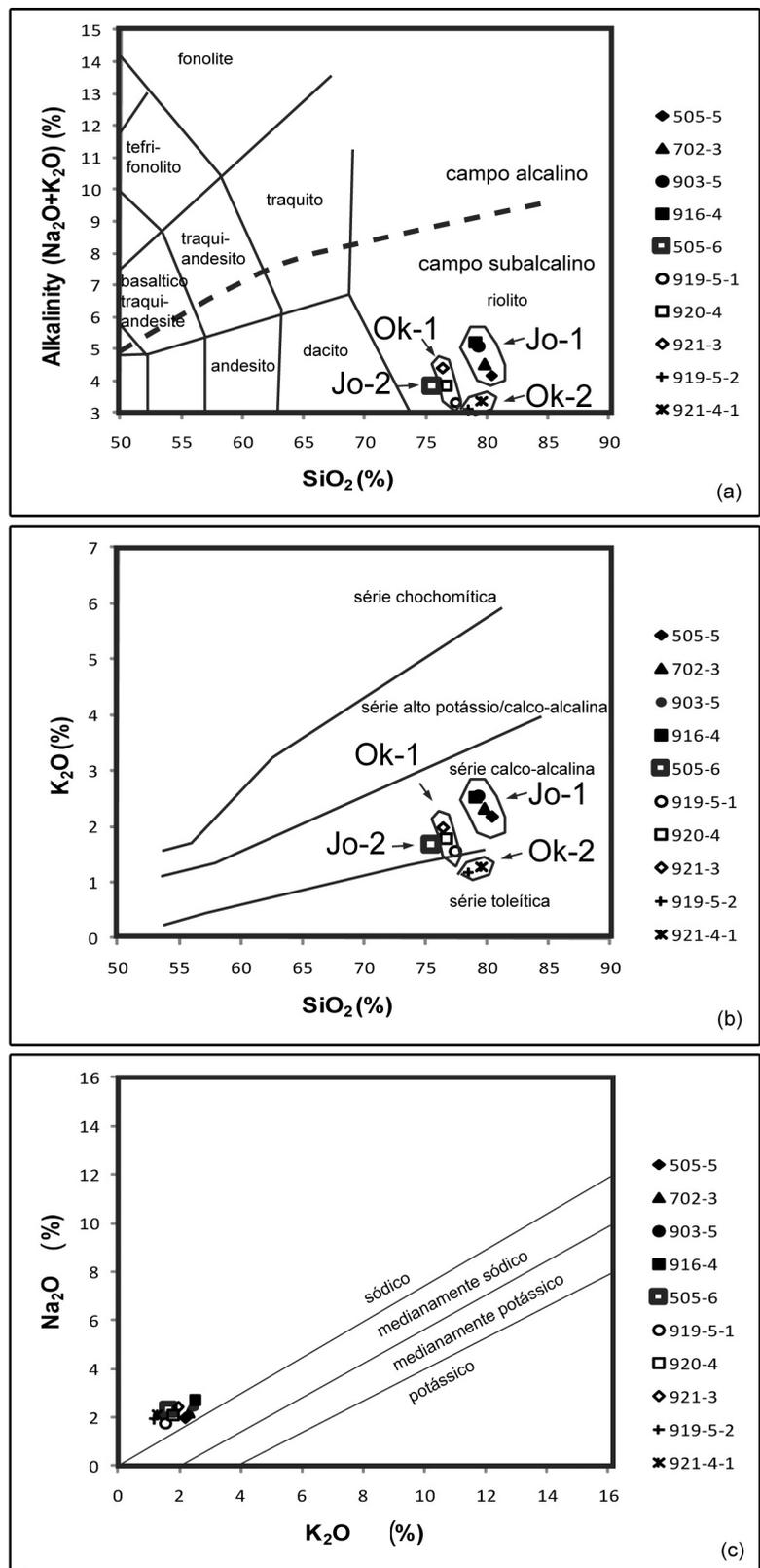


Figura 9 – Diagramas para caracterização de cinzas vulcânicas (a) alcalinidade, (b) teor de potássio e (c) Na₂O versus K₂O. Modificado de Parker et al. (2005).

Figure 9 – (a) alkalinity, (b) potassium content, and (c) Na₂O versus K₂O diagrams. After Park et al. (2005).

Sylvia Maria Couto dos Anjos, pelo valioso suporte gerencial durante os estudos. Aos colegas Akihiro Hiruta, Gilmar Vital Bueno, Nilo Sighenhiko Matsuda e Renato Oscar Kowsmann, por todo o apoio pessoal e logístico.

Agradecimentos aos revisores deste artigo pelos comentários e sugestões.

referências bibliográficas

AKIBA, F. Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy in the Nankai Trough and Japan Trench, and modified lower Miocene through Quaternary diatom zones for middle-to-high latitudes of the North Pacific. **Initial Reports DSDP**, v. 87, p. 393-481, 1986.

AOKI, K. Revised age and distribution of ca. 87 ka Aso-4 tephra based on new evidence from the northwest Pacific Ocean. **Quaternary International**, v. 178, p. 100-118, 2008.

FREIRE, A. F. M.; MENEZES, T. R.; MATSUMOTO, R.; SUGAI, T.; MILLER, D. J. Origin of the organic matter in the Late-Quaternary sediments of the eastern margin of Japan Sea. **Journal of the Sedimentological Society of Japan**, v. 68, n. 2, p. 117-128, 2009.

FREIRE, A. F. M. **An integrated study on the gas hydrate área of Joetsu Basin, eastern margin of Japan Sea, using geophysical, geological and geochemical data**. 247 f. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade de Tóquio, Japão, 2010.

FREIRE, A. F. M.; MATSUMOTO, R.; SANTOS, L. A. Structural-stratigraphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of Japan Sea. **Marine and Petroleum Geology**, v. 30, p. 1-12, 2010.

FUKUSAWA, H. Non-glacial varved lake sediment as a natural timekeeper and detector on environmental changes. **Quaternary Research** (Tokyo), v. 34, p. 135-149, 1995.

FURUTA, T.; FUJIOKA, K.; ARAI, F. Widespread submarine tephra around Japan. **Marine Geology**, v. 72, p. 125-142, 1986.

IKEHARA, K. Late Quaternary seasonal history of the North-Eastern Japan Sea. **Journal of Oceanography**, v. 59, p. 585-593, 2003.

JOLIVET, L.; TAMAKI, K.; FOURNIER, M. Japan Sea, opening history and mechanism: a synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. 11-22, p. 237-259, 1994.

KENNETT, J. P.; CANNARIATO, K. G.; HENDY, I. L.; BEHL, R. J. **Methane hydrates in Quaternary climate changes: the clathrate gum hypothesis**. Washington: American Geophysical Union, 2003, 216p.

KIKKAWA, K.; IKEHARA, K. Distribution and stratigraphy of tephra in the Japan Sea: summary. In: Okamura, Y. (Ed.) Preliminary Reports on Research in the 1993 Fiscal Year: Marine Geological Investigation of the Eastern Margin of Central Japan Sea. **Geological Survey of Japan**, Tsukuba, p. 174-181, 1994.

KOBAYASHI, Y. Initiation of subduction of plates. **Chikyuu, Earth Monthly**, 1983. v. 3, p. 510-518, 1983. (in Japanese).

KOIZUMI, I. The Japan Sea after last glacial stage: diatoms with special reference to the analysis of KH-79-3, C-3 core. **Monthly-Chikyuu**, v. 6, p. 547-552, 1984.

KOIZUMI, I. Last glacial sediments from the seafloors around Japan. **Monthly-Kaiyo**, v. 7, p. 338-343, 1985.

KOIZUMI, I. The Japan Sea and Circum-Japan Sea áreas – their establishment and change of natural environments. **Katokawa-gakugei-shuppan**, Tokyo, 145 p. 2006.

MACHIDA, H., ARAI, F. **Atlas of tephra in and around Japan**. Tokyo: University of Tokyo press, 338p. 2003.

NAKAMURA, K. Possible nascent trench along the eastern Japan Sea as the convergent boundary between Eurasian and North American Plates. **Bulletin Earthquake Research**, Institute University of Tokyo, v. 5, n.10, p. 711-722, 1983.

OBA, T.; KATO, M.; KITAZATO, H.; KOIZUMI, I.; OMURA, A.; SAKAI, T.; TAKAYANA, T. Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the

last 85,000 years. **American Geophysical Union, Paleoceanography**, v. 6, p. 499-518, Washington, 1991.

OKAMURA, Y.; ARITA, M.; OKUDA, Y. Geological studies of the continental shelf of the eastern margin of the central Japan Sea. **Geological Survey of Japan**, FY1991 Report offshore Aomori to Niigata, v. 146-159, 1991.

OKUI, A.; KANEKO, M.; NAKANISHI, S.; MONZAWA, N.; YAMAMOTO, H. An integrated approach to understanding the petroleum system of a frontier deep-water area, offshore Japan. **Petroleum Geosciences**, v. 14, p. 1-12, 2008.

OTOFUJI, Y., MATSUDA, T., NOHDA, S. Opening mode of the Japan Sea inferred from the palaeomagnetism of the Japan Sea. **Nature**, v. 317, p. 603-604, 1985.

PARK, M. H.; KIM, J. H.; KIM, I. S.; RYU, B. J.; YU, K. M. Tephrostratigraphy and paleo-environmental implications of late Quaternary sediments and interstitial water in the western Ulleung Basin, East/Japan Sea. **Geo-Mar Letter**, v. 25, p. 54-62, 2005.

SASE T.; MACHIDA H.; HOSONO M. Fluctuations of opal phytolith assemblage in the Tachikawa and Mussashino Loam formations in southwest Kanto, central Japan: Changes in vegetation, climate, terrace, and soil-facies since marine isotope stage 5.1. **The Quaternary Research**, v. 47-1, p. 1-14, 2008.

SUZUKI, M. **Reconstruction of the environment of Japan Sea for the last 33,000 years based on foraminiferal assemblage and isotopic ratios: Consideration on anomalies of benthic environment**. 70 p. Master Thesis – The University of Tokyo, 2010. (in Japanese).

TADA, R.; IRINO, T.; KOIZUMI, I. **Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in the late Quaternary sediments of the Japan Sea**. *Paleoceanography*, 1999. v. 14, p. 236-247.

TAKEUCHI, A. **Recent Crustal Movements and Strains Along the Eastern Margin of Japan Sea Floor**. In: ISEZAKI, N. *et al.* (Eds.). *Geology and Geophysics of the Japan Sea*, 1996. p. 385-398, 1996. (Japan-URSS Monography Series 1).

TALMA, A. S.; VOGEL, J. C. A. Simplified Approach to Calibrating C14 Dates. **Radiocarbon**, v. 35, n. 2, p. 317-322, 1993.

TAMAKI, K.; ISEZAKI, N. Tectonic synthesis of the Japan Sea based on the collaboration of the Japan-URSS monograph project. In: ISEZAKI, N. *et al.* **Geology and Geophysics of the Japan Sea**, Japan-URSS Monograph Series, 1996. v. 1, p. 483-487.

YOKOYAMA Y.; KIDO Y.; TADA R.; MINAMI I.; FINKEL R.C.; MATSUZAKI H. Japan Sea Oxygen Isotope Stratigraphy and Global Sea-Level Changes for the Last 50,000 Years Recorded in Sediment Cores from Oki Ridge. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v. 247, p. 5-17, 1997.

expanded abstract

This study promotes a tephrostratigraphic correlation along the eastern margin of the Japan Sea, from the north of central Honshu, offshore Kanazawa city, to the Okushiri Ridge located near the Okushiri Island, in the west of Hokkaido, more than 500km away (fig. 1). Twelve piston-cores were collected at water depths varying from around 800m to 3,600m from this region. (table 1).

Tephra layers constitute valuable stratigraphic markers and they were widely studied around the Japanese Islands during recent decades (Aoki, 2008; Furuta et al., 2006; Machida, 1999; Machida and Arai, 2003; Suzuki, 2007). The extraordinarily large scale and widespread volcanism in and around Japan has enabled the development of a Quaternary tephrochronology that provides a valuable tool in the progress of regional Quaternary research. In deep-sea sediments around the Japanese Islands, tephra layers are frequently recognized, and some tephtras can be identified by petrographic and chemical features and correlated to source volcanoes of both Japan and Korea. Most tephtras were distributed over more than several hundred kilometers from the source volcanoes, presumably carried by the dominant westerly wind (fig. 1) (Furuta et al., 1986).

Marker-tephra characterization constitutes the basis of tephra studies using a combination of parameters, such as chemical composition, petrography, and stratigraphic and geographic distribution. This study identified tephtras based on shape and chemical composition comparison of volcanic glass shards, obtained by SEM-EDS analysis, with those described in the atlas of tephtras in and around Japan (Machida and Arai, 2003). This correlation was also supported by C^{14} dating using foraminiferal tests and diatom assemblage identification.

Main marker-tephtras such as Aso-1, K-Tz, Aso-4, AT, and U-OkI were recognized (figs. 2 and 3) (table 2) and provided a good tephtra correlation along the eastern margin of the Japan Sea (fig. 5). The regional correlation shows that both AT and Aso-4 marker-tephtras are absent in the southern part of Sado Ridge, while the older marker tephtras K-Tz and Aso-1 are present (figs. 1 and 5). This indicates a condensate depositional column and suggests a depositional gap caused by erosion or non-deposition sometime between 87 ka and 24 cal ka BP at Sado Ridge. The seafloor topography strongly controls the sedimentation rate.

Two unknown mixed pumice- and bubble wall-type tephtras were found in the upper (903-5, 505-5, 916-4 and 702-3) and in the middle part (505-6) of Unit 4 (TL-2) in piston-cores PC505, PC702, PC903 and PC916 of Joetsu Basin (fig. 1). These tephtras were observed as white to light yellow tephtras and it is not an easy task to identify one from the other only by petrographic textures (fig. 4). The upper layer has a thickness of 10mm and occurs in the top of unit 4 (TL-2), while the lower, also 10mm thick, is located in the middle of unit 4 (TL-2). The upper one seems to be more widely distributed than the lower one because the latter does not appear in all the analyzed piston-cores (fig. 6).

The upper layer is characterized by a fine grain size around 0.5mm to 1mm, while the lower is a very fine ash (fig. 4). Translucent and opaque crystals are also observed in a grain size ranging from 0.5mm to 1mm in the upper layer, while they are smaller than 0.5mm in the lower one. Cpx grains can be identified using a petrographic microscope in both tephtras, and SEM images revealed the glass shape as both pumice- and bubble wall-type, the former in a higher amount (figs. 4 and 6). Geochemically, the upper tephtra is characterized by a higher silica content (about 79%) than the lower one, which has silica content around 75% (table 3). The two unknown tephtras identified in this study at Joetsu Basin were called Joetsu-1 (Jo-1) and Joetsu-2 (Jo-2). Jo-1 can be classified as sodic calc-alkaline rhyolitic ash with grain size varying from fine to medium, while Jo-2 is a very fine sand to silt sodic calc-alkaline rhyolitic ash (fig. 9), and now have their petrographic and chemical characteristics available (table 3).

At Okushiri area, two other unknown mixed pumice- and bubble wall-type tephtras were identified by SEM images (fig. 4) in the west of Hokkaido (fig. 1). The chemical compositions of both tephtra layers are now available (table 3) and could promote correlation around the western side of Hokkaido (fig. 7). One upper tephtra characteristic, here called Okushiri-1 (Ok-1), is the high amount of phenocrysts, composed mainly of cpx and alkaline feldspars (af), while only cpx appeared under petrographic microscope observation in the lower tephtra, called Okushiri-2 (Ok-2) (fig. 4) (table 3).

In terms of grain size, Ok-1 and Ok-2 have translucent and opaque crystals around 0.2mm (fig. 4). Both tephtras have glass shards such as pumice- and bubble wall-type, the former in a higher amount (figs. 4 and 7). Ok-1 can be classified as sodic calc-alkaline rhyolitic

ash with grain size varying from fine to medium, while Ok-2 is a fine to silt sodic tholeiite rhyolitic ash (fig. 9).

Several black and colored scorias are present in all the piston-cores collected in the Okushiri area, but it was not possible to correlate its chemical composition, shape and petrographic settings. All parameters strongly vary between the ash grains of a unique sample, which difficult the correlation among samples. Scoria layers seem to be randomly dispersed around the late Quaternary sediments of the Okushiri area, and may represent re-working by slump movements.

These tephtras are potential volcanic markers providing more stratigraphic accuracy of the LGM sediments, in particular in the Joetsu Basin and Okushiri Ridge (figs. 6 and 7). The age of these tephtras was estimated based on an age control using C^{14} of foraminiferal tests, recognized marker tephtras, lithologic units and diatom assemblage zonation, generously provided by Dr. Fumio Akiba (personal communication). This age control provides the correlation of tephtras (figs. 5, 6 and 7) (table 4) and was used to construct sedimentation rate curves (fig. 8). Jo-1 has an estimated age of 19 cal ka BP, while an age around 22 cal ka BP is inferred for Jo-2, both at Joetsu Basin. For Ok-1 and Ok-2, ages of 27 cal ka BP and 30 cal ka BP, respectively, are proposed using the sedimentation rate curves obtained at Okushiri Ridge.