

西三河平野西南部油ヶ淵低地下の更新統古地磁気層序

羽田 裕貴^{1,*}・中谷 是崇¹・水野 清秀¹

HANEDA Yuki, NAKATANI Koretaka and MIZUNO Kiyohide (2022) Subsurface Pleistocene magnetostratigraphy under the Aburagafuchi Lowland in the southwestern Nishi-mikawa Plain, central Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73 (1), p. 1–17, 6 figs, 4 tables.

Abstract: We conducted paleomagnetic, rock-magnetic, and tephra analyses for the 80 m-deep core GS-HKN-1, which was drilled at the Aburagafuchi Lowland, Hekinan City, Aichi Prefecture in 2018, to constrain the depositional age of the subsurface Pleistocene in the Nishi-mikawa Plain. Progressive alternating field demagnetization was conducted for samples obtained from 73 horizons, and then we assigned paleomagnetic polarity zones based on resulting paleomagnetic inclinations. In combination with the previously reported palynostratigraphy, it is thought that a polarity transition between 40.44 and 40.75 m within a non-marine mud bed is correlated to the Matuyama–Brunhes (M–B) boundary. The stratigraphic position of the M–B boundary is consistent with those in oxygen isotope stratigraphy from the Boso Peninsula, and North Atlantic. Volcanic glasses in muddy beds below the M–B boundary are likely admixture of several reworked tephra beds, based on large deviations of those refractive indexes and major and trace element components. In the future, additional thermomagnetic experiments, and pollen analysis are required to evaluate the magnetostratigraphy and correlate muddy beds to Marine Isotope Stages.

Keywords: magnetostratigraphy, Pleistocene, Matuyama–Brunhes boundary, EDX, element analysis, LA-ICP-MS, Nishimikawa Plain, Aichi Prefecture

要 旨

2018年に愛知県碧南市繩手町で掘削されたオールコアボーリング試料GS-HKN-1を用いて、古地磁気、岩石磁気、およびテフラ分析を実施した。全73試料に対して段階交流消磁を施し、磁化ベクトルの伏角方位を用いて地磁気極性を判定した。また、先行研究による花粉化石層序との比較に基づき、地磁気極性年代表との対比を行った。その結果、松山–ブルン境界に相当する極性境界は、相対的な海水準低下を示す非海成泥層中の40.44～40.75 m区間に置かれると考えられる。これは、詳細な古地磁気–酸素同位体複合層序が報告されている房総半島の陸上セクション、および北大西洋の深海底コアの報告と矛盾しない。古地磁気極性境界より下位の泥質層に含まれる火山ガラスは、その屈折率、主成分・微量成分組成から、複数の二次堆積テフラの混合が示唆され、堆積年代決定に有用な火山灰層は見つけることができなかった。今後、段階熱消磁などの追加実験や詳細な花粉化石層序による泥質層と海洋酸素同位体ステージの対比が必要である。

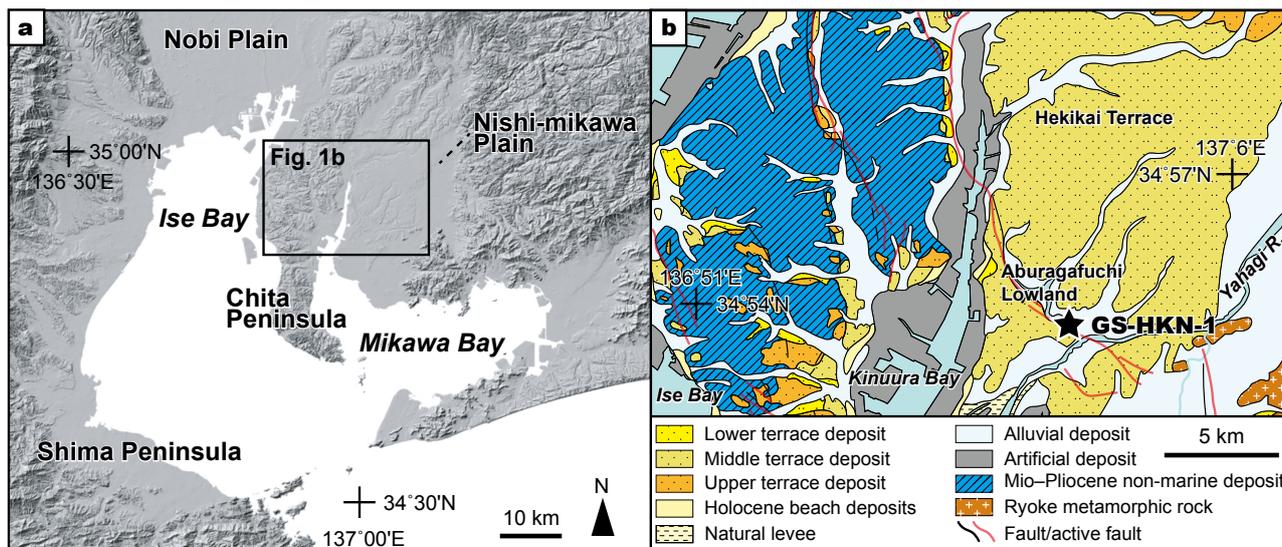
1. はじめに

西三河平野は愛知県中央部に位置し、矢作川および境川の営力により形成された平坦な台地と沖積低地が、幅約20 km、長さ約40 kmにわたって北北東–南南西方向に分布する。町田ほか(1962)による総括的な地形発達史の研究により、西三河平野では、北東から南西に向かって階段状に低くなる5面の段丘面が認定されている。これらは、高位から藤岡面、三好面、拳母面、碧海面、越戸面と呼ばれ、それぞれ鮮新統東海層群、および更新統三好層、拳母層、碧海層、越戸層によって構成される(町田ほか、1962)。臨海部や矢作川、境川、およびその支流沿いには沖積低地が分布する(牧野内、2005；堀、2018)。

西三河平野地下に分布する更新統の層序と堆積環境は、ボーリング試料の堆積相解析や微化石分析によって議論されてきた(森、1984；桑原ほか、1985；森山、1994；森山ほか、1994、1997)。珪藻化石分析や貝殻片の産出から、複数の海成層の存在が明らかにされており、氷河性海水準変動に関連した堆積環境の変化が指摘されてい

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

* Corresponding author: HANEDA, Y., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: y.haneda@aist.go.jp



第1図 コア掘削サイトの位置と周辺の地質図。(a) 伊勢湾および三河湾周辺の陰影起伏図。国土地理院発行の図に加筆 (<https://www.gsi.go.jp/>)。 (b) GS-HKN-1 コア掘削サイト周辺の地質図。20万分の1日本シームレス地質図(産総研地質調査総合センター, 2018)に基づいて作成。

Fig. 1 Locality of the coring site and geology around Aburagafuchi Lowland. (a) Shaded-relief map around Ise and Mikawa bays modified from Geospatial Information Authority of Japan. (b) Geological map around the GS-HKN-1 core based on the Seamless Digital Geological Map of Japan, 1: 200,000 (Geological Survey of Japan, AIST, 2018)

る(森, 1984; 桑原ほか, 1985; 森山, 1994; 牧野内ほか, 2011)。海成層の堆積年代は, 珪藻化石および花粉化石群集とその変化を, 濃尾平野地下の更新統と対比することで推定された(森, 1984; 桑原ほか, 1985; 森山, 1994)。また, 2017年から開始された伊勢湾・三河湾沿岸域の地質・活断層調査の一環で, 碧南市の油ヶ淵低地で80 mのオールコアボーリングが掘削された。このGS-HKN-1コアの花粉化石分析から, 大阪湾沿岸域の更新統における海洋酸素同位体ステージ(MIS: Marine Isotope Stage) 16~21に相当する花粉化石群集帯の存在が報告された(阿部ほか, 2019)。しかし, 西三河平野地下の更新統は微化石層序以外の年代制約に乏しく, その堆積年代の推定には検証の余地がある。

そこで, 本研究では, 西三河平野の地下層序に新たな年代制約を提供することを目的として, GS-HKN-1コアの古地磁気および岩石磁気分析を実施し, 古地磁気極性境界の認定と対比を検討した。その結果, GS-HKN-1コアに松山-ブルン境界を認定した。また, 松山-ブルン境界より下位の泥質層に含まれる火山ガラスの主成分, および微量元素分析を実施したので結果を報告する。

2. 試料と手法

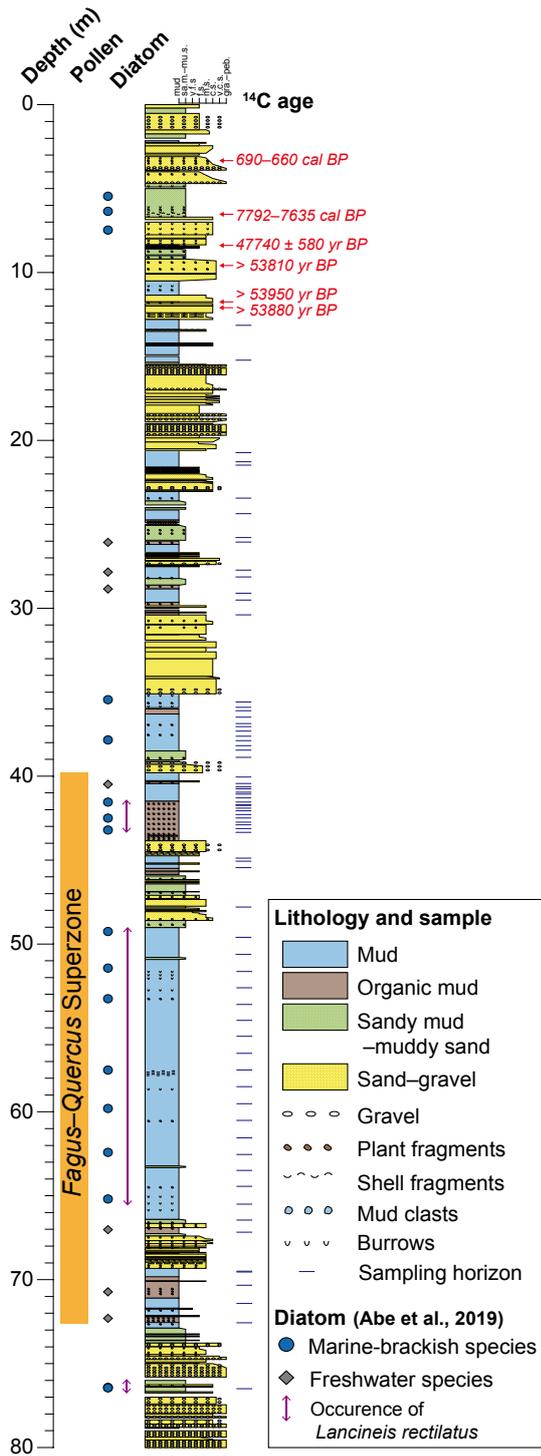
2.1 ボーリング試料

GS-HKN-1コアは, 産業技術総合研究所地質調査総合センターが平成29年度より実施している伊勢湾・三河湾沿岸域の地質・活断層調査の一環として, 西三河平野の

地下地質構造や地下層序を明らかにするため2018年に採取された。掘削地点は, 愛知県碧南市繩手町の畑地(34°53'27.4"N, 137°1'27.8"E, 孔口標高:1.38 m, 第1図), 掘削長は80 mである。GS-HKN-1コアでは, 堆積相解析, 珪藻化石・花粉化石分析, 放射性炭素年代測定(阿部ほか, 2019)およびCNS分析(太田・阿部, 2019)が実施された。その結果, GS-HKN-1コアは沖積層, および海成・河成泥質層と河成砂~砂礫層で構成される更新統に区分され, 少なくとも5つの海進・海退に伴う堆積サイクルが認定された(阿部ほか, 2019)。また, 深度39.85~75.78 m区間の泥層から, 大阪層群における*Fagus-Quercus*超帯(MIS 16~21; 本郷, 2009; 楡井・本郷, 2018)に対比される花粉化石群集を見出されていることから(阿部ほか, 2019), 西三河平野地下更新統の堆積開始年代は少なくとも約900 kaまで遡る可能性がある。さらに, GS-HKN-1コアでは, 関東平野で有用な年代指標である海生化石珪藻*Lancineis rectilatus* (Naya, 2010)が産出するが(阿部ほか, 2019; Naya, 2019), 中部地方におけるその産出年代は不明である。

2.2 試料採取

放射性炭素年代が報告されている深度12.82 mより下位の泥質層を対象に, 73層準から古地磁気および岩石磁気分析用の試料を採取した(第2図)。試料採取には容積7 cm³のポリカーボネイト製キューブを使用し, コア中央にキューブを手で押し込むことで, 各層準につき1試



第2図 GS-HKN-1 コアの岩相，花粉化石分帯，珪藻化石産出層準，および古地磁気試料の採取層準。阿部ほか(2019)を一部改変。Fagus-Quercus 超帯は大阪層群における花粉化石分帯に基づく(本郷, 2009; 楡井・本郷, 2018)。

Fig. 2 Columnar section of the GS-HKN-1 core with pollen and diatom data, and horizons of paleomagnetic samples modified from Abe et al. (2019). Fagus-Quercus Superzone is from a local pollen zone for the Pleistocene Osaka Group (Hongo, 2009; Nirei and Hongo, 2018).

料を採取した。

2.3 古地磁気分析

各試料に対して，自然残留磁化(NRM：natural remanent magnetization)の測定および段階交流消磁(pAFD：progressive alternating field demagnetization)を，国立極地研究所の磁気シールドルーム内に設置されたSRM-760R パスルー型超電導岩石磁力計(2G Enterprises社製)を用いて行った。pAFDは，ピーク磁場が0～10 mTの範囲では2.5 mT刻みで，10～60 mTの範囲では5 mT刻みで，60～80 mTの範囲では10 mT刻みで，合計16段階で行った。各消磁段階の残留磁化ベクトルは直交面投影図(Zijderveld, 1967)に表した。

2.4 岩石磁気分析

本研究では岩石磁気実験として，全ての試料に対して，帯磁率，帯磁率異方性測定，および人工磁化(非履歴残留磁化，飽和等温残留磁化，逆等温残留磁化)の着磁・残留磁化測定を行った。また，9つの試料に対して等温残留磁化の段階着磁実験を行った。これら岩石磁気実験はすべて国立極地研究所にて実施した。以下に，岩石磁気分析の詳細を記述する。

帯磁率(κ)は，試料中に含まれる強磁性鉱物の全含有量を反映する。帯磁率測定は，KLY-3S Kappabridge帯磁率計(AGICO社製)を用いて，消磁を施す前の全ての試料に対して行った。

非履歴残留磁化(ARM：anhysteretic remanent magnetization)は，試料に直流磁場を加えながら，交流磁場の振幅を徐々に減衰させることで獲得される残留磁化である。その強度は，交流磁場の最大振幅と直流磁場強度に比例するが，これらが一定の場合は試料中の強磁性鉱物の含有量，粒径，および磁気相互作用に依存する(小玉, 1999など)。また，帯磁率が試料中の全強磁性鉱物量を反映するのに対して，ARMは比較的細粒な強磁性鉱物に着磁される。そのため，ARM強度から算出するARM帯磁率(κ_{ARM})と帯磁率の比(κ_{ARM}/κ)は，磁性鉱物の粒径の相対的な指標となる(Banerjee et al., 1981; King et al., 1982)。ARMの着磁は，直流磁場強度を0.03 mT，交流磁場の最大振幅を80 mTの条件下で，SRM-760Rパスルー型超電導岩石磁力計を用いて行った。また，ARM帯磁率はARM強度を印加磁場強度0.03 mTで規格化することで算出した。

堆積物中に含まれる強磁性鉱物の推定は，残留磁化のキャリアを特定する上で重要である。そこで，試料中の強磁性鉱物を推定するために，等温残留磁化(IRM：isothermal remanent magnetization)の着磁実験を行なった。IRMは，一定の温度下において，試料に人工的な外部磁場を与えることで獲得される磁化であり，NRMに比べて多磁区サイズの磁性粒子への寄与が大きい。外部磁場

強度、あるいは試料中に含まれる強磁性鉱物の含有量が増加すると、IRM強度は大きくなる。そのため、IRMの着磁実験は、試料中の強磁性鉱物の含有量や種類などを推定するために用いられる。

まず、泥層および有機質泥層から採取した9つの試料に対して、外部磁場10 mTから3000 mTの範囲の計30段階にて、IRMの着磁と残留磁化測定を実施した。この結果、段階着磁実験を行なった試料は、概ね2000 mTで磁化が飽和した。そこで、外部磁場が2000 mTで獲得されたIRMを飽和等温残留磁化(SIRM: saturation isothermal remanent magnetization)として、他の全ての試料にSIRMを着磁・磁化測定を行なった。その後、SIRMとは逆向きに、外部磁場100 mT, 300 mTの順で試料に逆等温残留磁化(BIRM: back-field isothermal remanent magnetization)を着磁し、磁化測定を行なった。IRM着磁と磁化測定にはそれぞれ、MMPM10パルス磁化装置(Magnetic Measurement社製)およびNMB-89スピナー磁力計(夏原技研製)を用いた。

強磁性鉱物はそれぞれ特有の保磁力分布をもつ。そのため、人工磁化の段階着磁曲線あるいは段階消磁曲線の成分分離によって、堆積物に含まれる強磁性鉱物を推定することが可能である(Kruiver *et al.*, 2001; Heslop *et al.*, 2002; Maxbauer *et al.*, 2016など)。そこで、9つの試料のIRM段階着磁実験によって得たIRM獲得曲線に対して、保磁力成分の分離を試みた。成分分離には、Maxbauer *et al.* (2016)によるウェブアプリケーションMAX Unmixを用いた。解析には、元の段階着磁データをSF (smoothing factor) = 0.3ないし0.4でスプライン補完したIRM獲得曲線を微分することで得たIRM獲得効率曲線を用いた。

また、SIRMおよびBIRMの磁化測定結果から、S比($S_{0.1T}$, $S_{0.3T}$: Bloemendal *et al.*, 1992)を算出した。 $S_{0.1T}$, $S_{0.3T}$ はそれぞれ、保持力が100 mT以下、300 mT以下の強磁性鉱物が担うIRMとSIRMの比であり、試料中のフェリ磁性鉱物(マグネタイトやマグヘマイトなどの低保磁力の強磁性鉱物)と反フェロ磁性鉱物(ヘマタイトやゲータイトなどの高保磁力の強磁性鉱物)の相対的な含有量の指標である。その値が1より低いほど、試料中の反フェロ磁性鉱物量が多いことを示す。これらパラメータの算出にはBloemendal *et al.* (1992)による以下の計算式を用いた。

$$S_{0.1T} = (1 - \text{BIRM}_{0.1T} / \text{SIRM}) / 2$$

$$S_{0.3T} = (1 - \text{BIRM}_{0.3T} / \text{SIRM}) / 2$$

なお、 $\text{BIRM}_{0.1T}$ および $\text{BIRM}_{0.3T}$ は、それぞれ外部磁場100 mTおよび300 mTにおけるBIRM強度である。

2.5 テフラ分析

深度50.22～72.38 mの泥質層を対象に、テフラ分析を行った。計37試料を、超音波洗浄とふるいによる水洗いを繰り返して泥粒子を除去し、60°Cで数時間乾燥

させた後、0.063～0.25 mmの粒子を分析用試料とした。その結果、十分な量の火山ガラスを含む3試料(52.25～52.30 m, 58.42～58.47 m, 59.85～59.90 m)に対して、屈折率、主成分、微量元素分析、および偏光顕微鏡下での火山ガラスの形状の観察を行った。火山ガラスの形状の分類は岸・宮脇(1996)に従った。火山ガラスの屈折率には、温度変化型屈折率測定装置MAIOT(古澤, 1995)を用いた。

火山ガラスの主成分分析は、 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* (総FeをFeOとして計算した値), MnO , MgO , CaO , Na_2O , および K_2O の9成分について実施した。分析は株式会社古澤地質に依頼し、エネルギー分散型X線分析装置(EDX)EMAX Evolution EX-270(HORIBA製)と走査型電子顕微鏡SU1510(HITACHI製)を用いた。分析条件は、加速電圧15 kV, 試料電流0.3 nA, およびビーム径約90 nmで4 μm 四方を走査させ、ライブタイムを50秒として、ファイローゼット($\varphi(\rho Z)$)法にて主成分化学組成の補正計算を行なった。

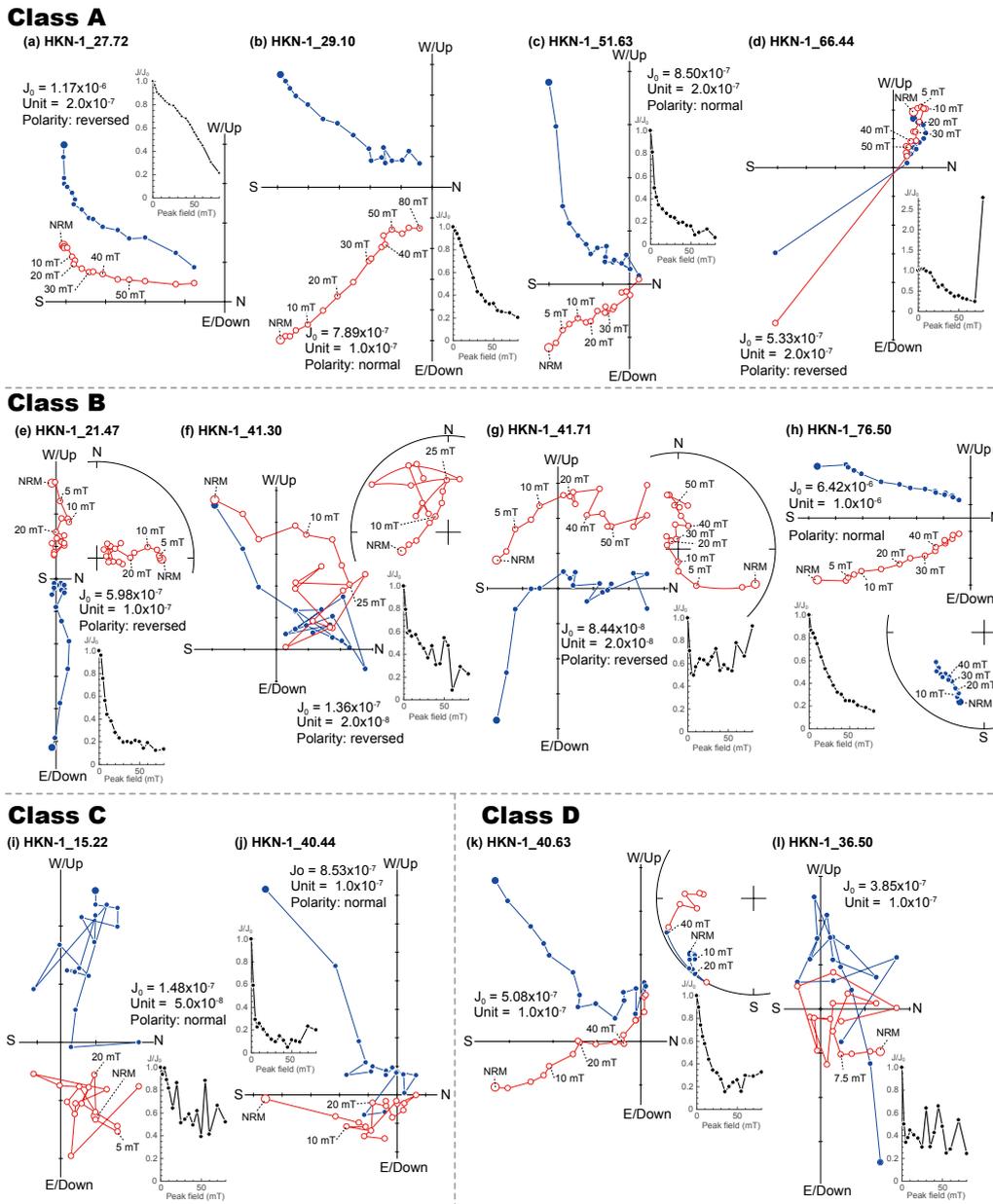
微量元素分析は株式会社古澤地質に依頼し、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計(LA-ICP-MS)を用いた。ICP-MSは、Thermo Fisher Scientific社製iCAP Qc, レーザーアブレーション装置(LA)は、TELEDYNE社製LSX-213 G2+を用いた。LAによる試料導入のキャリアガスおよび干渉イオンの分離のためのコリジョンガスには、Heガスを使用した。標準試料には、Kimura *et al.* (2015)と同様に、USGS発行のGSE-1Gガラスを用いた。なお、分析は1試料あたり火山ガラス11～13粒子に対して実施した。

3. 結果

3.1 磁化ベクトル

pAFDの結果を第3図に示す。GS-HKN-1コアの試料は、全体を通して磁化の安定性が悪く、ほとんどの試料で磁化方位の算出が困難であった。そこで、本研究では、直交面投影図上に示した消磁ベクトルをクラスA～Dの4つに区分し、極性判定を試みた。また、GS-HKN-1コアは定方位試料として採取されていないため、古地磁気偏角を用いた議論はできない。そのため、極性判定は古地磁気伏角に基づき、伏角が正(下向き)の場合は正帯磁、負(上向き)の場合は逆帯磁とした。

クラスAの試料は、直交面投影図の原点に向かって消磁される磁化成分を含み(第3図a-d), 全73試料のうち11試料が分類される(第1表)。磁化成分は、おおむね10 mT以下の成分(低保磁力成分)と15 mT以上の成分(高保磁力成分)に分けられる。これら2つの磁化成分は、直交面投影図上でやや曲線の消磁経路を描く場合があり(第3図a, c), 保磁力分布が一部重なる2種類以上の強磁性鉱物が磁化を担っていることを示唆する。また、クラスAの磁化は、おおむね40 mT以上で消磁経路が原点からそ



第3図 段階交流消磁の結果の代表例。残留磁化の安定性に基づいて、測定結果をクラスA (a-d)、クラスB (e-h)、クラスC (i-j)、およびクラスD (k-l)に分類。分類の詳細は本文を参照。それぞれの消磁結果は直交面投影図および磁化減衰図で示し、(e-h)および(k)については等面積投影図も示した。直交面投影図は横軸をベクトルの南北方向ないし水平面、縦軸を東西方向ないし上下方向として図示した。直交面投影図上の青丸および赤丸は、それぞれ残留磁化ベクトルの水平面および鉛直面への投影を示す。磁化減衰図(黒丸)は、横軸を交流磁場のピーク磁場の値、縦軸を磁化強度(J)を消磁前の磁化強度(J_0)で規格化した値(J/J_0)として図示した。等面積投影図上の青丸および赤丸は、それぞれ残留磁化ベクトルの下半球および上半球への投影を示す。試料番号は深度を表す。 J_0 : 消磁前の磁化強度(単位はkA/m); Unit: 直交面投影図の各目盛幅(単位はkA/m)。

Fig. 3 Results of progressive alternating field demagnetization (pAFD) for representative samples on orthogonal vector diagrams. Results are classified into class A (a-d), class B (e-h), class C (i-j), and class D (k-l), based on remanence stability. In orthogonal vector diagrams, the horizontal axis is the north-south direction or horizontal plane of vectors, and the vertical axis is the east-west direction or vertical direction. Closed blue and open red circles in orthogonal vector diagrams indicate horizontal and vertical components, respectively. Magnetization decay diagrams, indicated by closed black circles, show normalized NRM intensities (J/J_0) on each pAFD level. Closed blue and open red circles in equal-area projections indicate remanence vectors projected on the lower and upper hemispheres, respectively. Specimen numbers indicate sampling depth. J_0 : NRM intensity before conducting pAFD (unit is kA/m); Unit: each scale width in orthogonal vector diagrams (unit is kA/m).

第1表 古地磁気および岩石磁気分析の結果.

Table 1 Results of the paleomagnetic and rock-magnetic measurements.

Core depth (m)	Lithology	Polarity	Stability	Inclination (°)	MAD (°)	Range (mT)	NRM int. (kA/m)	κ (SI)	κ ARM (SI)	κ ARM/ κ	S -0.3T	S -0.1T	SIRM (kA/m)
13.12	mud	-	D	-	-	-	1.27E-07	9.33E-05	1.93E-05	0.21	0.96	0.80	9.86E-05
15.22	mud	N	C	-	-	-	1.48E-07	9.03E-05	1.85E-05	0.21	0.96	0.81	7.67E-05
20.73	mud	N	B	-	-	-	8.35E-07	9.54E-05	7.18E-05	0.75	0.96	0.81	1.70E-04
21.27	mud	R	B	-	-	-	8.50E-07	1.01E-04	2.06E-05	0.20	0.95	0.79	9.21E-05
21.47	mud	R	B	-	-	-	5.98E-07	7.75E-05	2.07E-05	0.27	0.96	0.80	8.04E-05
23.44	mud	N	A	48	12.2	30-50	4.24E-07	1.35E-04	5.26E-05	0.39	0.87	0.63	1.80E-04
24.36	mud	N	C	-	-	-	4.43E-07	1.32E-04	4.31E-05	0.33	0.88	0.65	1.42E-04
25.78	sandy mud	-	D	-	-	-	1.20E-07	4.00E-05	1.83E-05	0.46	0.94	0.63	9.62E-05
26.05	mud	-	D	-	-	-	2.12E-07	1.05E-04	3.92E-05	0.37	0.89	0.68	1.25E-04
27.72	mud	R	A	-13.8	8	30-50	1.17E-06	1.40E-04	3.24E-05	0.23	0.87	0.62	1.31E-04
28.13	mud	N	A	61.4	14.6	20-50	5.13E-07	1.29E-04	3.03E-05	0.24	0.86	0.60	1.36E-04
29.10	mud	N	A	40.8	7.8	20-40	7.89E-07	1.19E-04	5.12E-05	0.43	0.89	0.68	1.19E-04
29.52	mud	N	B	-	-	-	5.95E-07	1.54E-04	3.11E-05	0.20	0.89	0.66	1.06E-04
30.40	peaty mud	N	C	-	-	-	3.35E-07	9.25E-05	3.14E-05	0.34	0.90	0.69	6.35E-05
35.58	mud	N	C	-	-	-	3.38E-07	1.07E-04	6.87E-05	0.64	0.94	0.74	2.16E-04
35.92	mud	-	D	-	-	-	2.00E-07	1.14E-04	7.30E-05	0.64	0.95	0.77	2.08E-04
36.10	peaty mud	N	C	-	-	-	3.00E-07	1.48E-04	8.40E-05	0.57	0.95	0.77	2.54E-04
36.50	mud	-	D	-	-	-	3.85E-07	1.22E-04	6.97E-05	0.57	0.95	0.75	2.14E-04
36.88	mud	N	B	-	-	-	4.76E-07	1.08E-04	7.16E-05	0.66	0.94	0.73	2.25E-04
37.06	mud	N	C	-	-	-	3.01E-07	1.27E-04	8.39E-05	0.66	0.95	0.75	2.69E-04
37.36	mud	-	D	-	-	-	2.99E-07	1.26E-04	8.49E-05	0.67	0.94	0.75	2.92E-04
37.64	mud	N	C	-	-	-	4.84E-07	1.20E-04	9.02E-05	0.75	0.94	0.75	2.88E-04
37.88	mud	N	B	-	-	-	4.51E-07	1.02E-04	7.50E-05	0.73	0.93	0.73	2.50E-04
38.22	mud	N	B	-	-	-	1.19E-06	1.12E-04	7.63E-05	0.68	0.92	0.72	2.55E-04
38.45	mud	N	C	-	-	-	2.66E-07	1.04E-04	6.38E-05	0.61	0.91	0.72	2.41E-04
38.90	mud	-	D	-	-	-	1.31E-07	8.76E-05	4.47E-05	0.51	0.93	0.75	1.65E-04
40.05	mud	-	D	-	-	-	2.23E-07	1.09E-04	2.48E-05	0.23	0.95	0.77	9.95E-05
40.44	mud	N	C	-	-	-	8.53E-07	1.26E-04	9.66E-05	0.77	0.91	0.73	2.75E-04
40.63	mud	-	D	-	-	-	5.08E-07	1.59E-04	2.01E-04	1.27	0.96	0.83	3.65E-04
40.75	mud	R	C	-	-	-	2.42E-07	1.71E-04	1.27E-04	0.74	0.95	0.80	2.41E-04
40.95	mud	R	C	-	-	-	2.27E-07	1.49E-04	7.39E-05	0.50	0.92	0.73	1.57E-04
41.08	mud	R	C	-	-	-	7.56E-08	1.26E-04	7.88E-05	0.63	0.93	0.74	1.75E-04
41.30	mud	R	B	-	-	-	1.36E-07	1.09E-04	6.27E-05	0.57	0.93	0.74	1.45E-04
41.53	peaty mud	-	D	-	-	-	1.40E-07	1.16E-04	8.39E-05	0.72	0.97	0.82	1.25E-04
41.71	peaty mud	R	B	-	-	-	8.44E-08	9.52E-05	7.22E-05	0.76	0.97	0.83	9.97E-05
41.75	peaty mud	R	B	-	-	-	1.35E-07	7.46E-05	6.02E-05	0.81	0.97	0.83	7.60E-05
41.90	peaty mud	N	C	-	-	-	2.88E-07	1.08E-04	7.32E-05	0.68	0.97	0.82	1.11E-04
42.07	peaty mud	R	B	-	-	-	6.60E-07	1.24E-04	9.44E-05	0.76	0.97	0.81	1.58E-04
42.30	peaty mud	R	B	-	-	-	1.96E-07	1.17E-04	7.64E-05	0.66	0.97	0.82	1.12E-04
42.50	peaty mud	-	D	-	-	-	9.44E-08	1.06E-04	6.95E-05	0.66	0.97	0.82	1.09E-04
42.74	peaty mud	R	B	-	-	-	7.49E-08	1.09E-04	6.48E-05	0.59	0.97	0.82	9.84E-05
42.90	peaty mud	-	D	-	-	-	1.48E-07	9.00E-05	6.34E-05	0.70	0.97	0.82	8.96E-05
43.12	peaty mud	R	B	-	-	-	1.31E-07	8.94E-05	7.24E-05	0.81	0.97	0.82	1.02E-04
43.36	peaty mud	R	B	-	-	-	7.15E-08	8.45E-05	6.58E-05	0.78	0.98	0.84	8.89E-05
44.88	peaty mud	R	C	-	-	-	6.45E-07	1.62E-04	1.07E-04	0.66	0.94	0.75	3.82E-04
45.06	mud	R	B	-	-	-	1.05E-06	1.37E-04	6.39E-05	0.47	0.91	0.66	2.25E-04
45.44	mud	R	B	-	-	-	1.38E-06	1.07E-04	7.19E-05	0.67	0.93	0.69	2.39E-04
47.80	sandy mud	N	B	-	-	-	1.45E-06	1.55E-04	2.49E-04	1.61	0.97	0.88	9.36E-04
49.60	sandy mud	R	B	-	-	-	3.42E-07	1.06E-04	1.05E-04	1.00	0.95	0.75	2.27E-04
50.60	mud	-	D	-	-	-	6.35E-07	1.35E-04	1.52E-04	1.12	0.95	0.81	4.59E-04
51.63	mud	N	A	28.7	22.6	30-55	8.50E-07	1.11E-04	1.37E-04	1.23	0.92	0.70	4.41E-04
52.60	mud	-	D	-	-	-	1.99E-07	1.04E-04	1.20E-04	1.15	0.93	0.71	3.48E-04
53.60	mud	R	B	-	-	-	8.48E-07	1.06E-04	1.07E-04	1.02	0.93	0.71	2.94E-04
54.55	mud	R	B	-	-	-	2.22E-07	8.80E-05	8.54E-05	0.97	0.94	0.72	2.11E-04
55.50	mud	R	B	-	-	-	1.99E-07	9.62E-05	9.44E-05	0.98	0.93	0.71	2.52E-04
56.52	mud	R	B	-	-	-	1.99E-07	1.12E-04	1.01E-04	0.90	0.93	0.73	3.10E-04
57.50	mud	R	C	-	-	-	1.45E-07	1.08E-04	9.56E-05	0.89	0.88	0.65	3.51E-04
58.50	mud	-	D	-	-	-	1.94E-07	1.22E-04	1.15E-04	0.94	0.87	0.65	4.34E-04
59.50	mud	-	D	-	-	-	1.68E-07	1.13E-04	1.20E-04	1.07	0.92	0.71	3.99E-04
60.50	mud	R	A	-46.2	13.6	15-35	1.25E-06	1.97E-04	2.09E-04	1.06	0.97	0.88	1.02E-03
61.54	mud	R	A	-51.5	3.8	20-55	3.57E-06	2.92E-04	3.73E-04	1.28	0.99	0.92	2.21E-03
62.55	mud	R	B	-	-	-	1.00E-06	1.62E-04	2.31E-04	1.43	0.96	0.87	7.49E-04
63.48	mud	R	A	-42.9	6.6	15-40	3.96E-06	4.25E-04	6.58E-04	1.55	0.99	0.92	2.92E-03
64.44	mud	R	A	-52.9	3.1	20-45	5.97E-06	3.73E-04	7.65E-04	2.05	0.98	0.92	3.25E-03
65.50	mud	R	A	-46.5	12.4	20-50	1.74E-06	1.88E-04	3.65E-04	1.95	0.96	0.87	1.10E-03
66.44	mud	R	A	-59.2	10.8	15-50	5.33E-07	1.12E-04	1.46E-04	1.31	0.90	0.73	3.43E-04
67.16	mud	R	B	-	-	-	4.72E-06	1.93E-04	5.59E-04	2.90	0.97	0.87	1.59E-03
69.50	mud	R	B	-	-	-	1.71E-06	1.38E-04	1.19E-04	0.86	0.90	0.67	3.31E-04
69.55	mud	R	B	-	-	-	1.43E-06	1.43E-04	1.31E-04	0.91	0.90	0.68	3.40E-04
70.33	peaty mud	R	B	-	-	-	4.66E-06	1.40E-04	1.06E-03	7.58	0.93	0.77	4.80E-04
71.41	mud	R	B	-	-	-	1.71E-06	1.42E-04	1.40E-04	0.99	0.89	0.72	4.13E-04
72.58	peaty mud	-	D	-	-	-	1.22E-06	1.40E-04	1.25E-04	0.89	0.88	0.68	4.41E-04
76.50	sandy mud	N	B	-	-	-	6.42E-06	2.67E-04	5.10E-04	1.91	0.99	0.94	2.26E-03

れるように減衰する傾向がある。なお、クラスAの試料では、直交面投影図上で原点に向かって直線的に減衰する成分を初生磁化と判断して、連続する5点以上のデータを用いて主成分分析を行い(Kirschvink, 1980)、磁化ベクトルの伏角方位を算出した(第1表)。

クラスBの試料は、安定な磁化を保持しておらず、消磁に伴ってステレオネット上で大円を描く(第3図e-h)。全73試料のうち30試料がクラスBに分類される(第1表)。磁化はおおむね20～25 mT以下の成分(低保磁力成分)と30 mT以上の成分(高保磁力成分)に分けられる。低保磁力成分に比べて、高保磁力成分は明瞭な消磁経路を示さない場合がある(第3図f, g)。クラスBの試料は、伏角の上下方向に基づいて極性判定が可能である。

クラスCの試料は、安定な磁化を保持しておらず、消磁に伴ってステレオネット上で大円を描かない(第3図i-j)。全73試料のうち15試料がクラスCに分類される(第1表)。10 mT以下で直線的な磁化成分を保持する場合がある(第3図j)。クラスCの試料は、伏角の上下方向に基づいて極性判定が可能である。

クラスDの試料は、安定な磁化を保持しておらず、極性判定が不可である(第3図k-l)。全73試料のうち17試料がクラスDに分類される(第1表)。消磁に伴ってステレオネット上で大円を描く磁化でも、伏角が直交面投影図の水平面に交わるデータは、極性判定ができないものとしてクラスDに分類した(例えば、第3図k)。

3.2 古地磁気層序

第4図に、クラスAからクラスCの磁化ベクトルから判断したGS-HKN-1コアの古地磁気極性を示す。それぞれの層準のプロットサイズは、消磁ベクトルの安定性(クラス区分)を示す。深度15.22～40.44 mの区間は正帯磁が卓越する正磁極帯(HKN-N1帯)、深度40.75～71.41 mの区間は逆帯磁が卓越する逆磁極帯(HKN-R1帯)である。なお、HKN-N1帯では、深度21.27 m, 21.47 m, 27.72 mで伏角が上向き逆帯磁を示すデータが、HKN-R1帯では、深度41.09 m, 41.90 m, 47.80 m, 51.63 mで伏角が下向き正帯磁を示すデータが得られている。

GS-HKN-1コアの最下部層準の砂質泥層から採取された試料(76.50 m)は、クラスBの正帯磁を示す(第3図h, 第4図)。この試料の72 cm上位には礫層を挟み、最下部砂質泥層とその上位の泥層が別の堆積ユニットに分けられることから(阿部ほか, 2019)、個別の正磁極帯(HKN-N2帯)として扱う。

3.3 岩石磁気特性

岩石磁気分析結果の深度プロファイルを第4図に示す。NRM強度は、深度13.12～59.50 mの層序区間ではおおそ一定の値で推移するが、60.50 m以深では上位層準の10倍に増加し、61.54 m, 64.44 m, 67.16 m, 70.33

mおよび76.50 mの5層準で特に高い値を示す。同様に、ARM帯磁率は、60 m以深の層序区間で大きく変動し、NRM強度と同じ層準で特に高い値を示す。帯磁率およびSIRMも、NRM強度、ARM帯磁率と同様の変動パターンを示すが、70.33 mのピークは確認できない。なお、ARM帯磁率は60 mより上位層準では帯磁率より値が小さい、あるいは同等であるが、60 mの下位層準では帯磁率より高い値を示す。このことは、 $\kappa_{\text{ARM}}/\kappa$ 比に反映されており、60 m以深で1より大きい値がみられる。

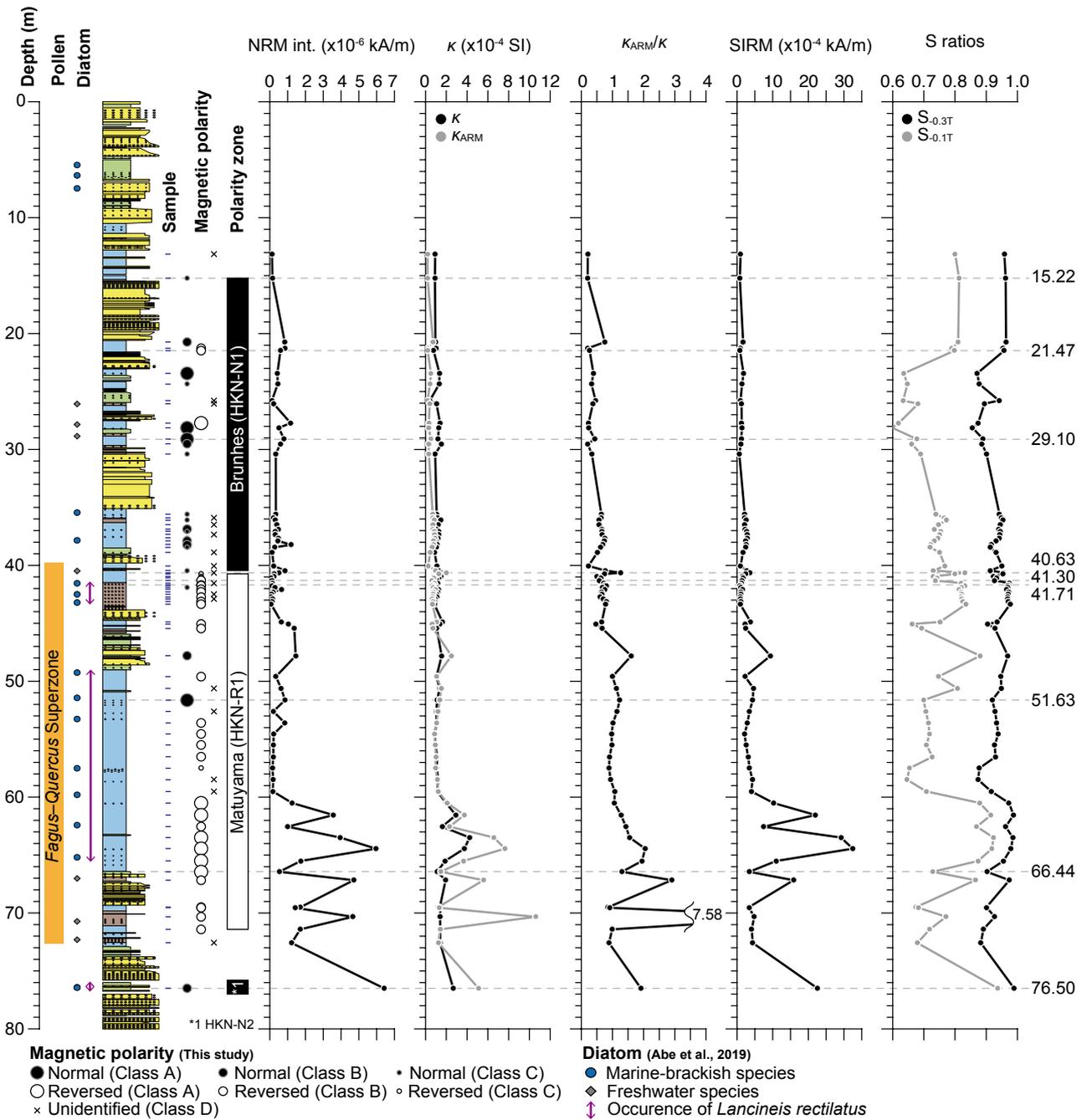
$S_{-0.3T}$ および $S_{-0.1T}$ は、それぞれ0.86～0.99および0.60～0.94の間で変動する。これらS比は、23.44～30.40 m, 40.44～41.30 m, 45.06 m, 57.50～58.50 mの層序区間で特に小さい。60 mより下位の層準区間では、NRM強度およびARM帯磁率が低い層準でS比も減少する。

IRM段階着磁データの解析結果は第5図および第2表に示す。図の縦軸および横軸は、それぞれIRM強度の微分と対数表示の外部磁場強度を示している。本研究で得られた9試料のIRM獲得効率曲線は、3つないし4つの保磁力成分(component)を想定することによって説明可能である。これら成分は、全IRMを占める割合(寄与率、TC)が大きい方から第一成分、第二成分、第三成分、および第四成分とした。

15.22 m, 21.47 m, 29.10 mの3試料のIRM獲得効率曲線からは、約10～17 mT, 30～35 mT, 78～97 mT, および200 mT以上の4つの保持力成分が想定される(第2表)。いずれの試料も78～97 mTの成分の寄与率が最も大きく、第一成分となる。15.22 mと21.47 mでは、約16～17 mTの第二成分の寄与率が32～37%で次いで大きく、29.10 mの第四成分(保磁力[Bh]: 10 mT, TC: 2%)に類似する。また、15.22 mと21.47 mの第三成分(Bh: 35 mT, TC: 14～20%)および第四成分(Bh: >200 mT, TC: 5～11%)に類似する成分は、29.10 mではそれぞれ第二成分(Bh: 30 mT, TC: 39%)、第三成分(Bh: 477 mT, TC: 12%)となる。

40.63 m, 41.30 m, 41.71 m, 51.63 m, 66.44 mの5試料のIRM獲得効率曲線からは、3つないし4つの保磁力成分が想定される(第2表)。第一成分は、これら5つの試料で共通しており、その保磁力は47～54 mT、寄与率は55～78%である。第二成分以下では、寄与率の違いはあるが、保磁力が100～250 mTの成分と10 mT前後の成分が想定される。また、51.63 mおよび66.44 mの試料からは、寄与率は約3%と小さいが、1000 mTを超える保磁力成分が含まれる。

76.50 mの試料からは、3つの保磁力成分が想定される(第2表)。第一成分の保磁力は30 mTで、15.22 mおよび21.47 mの第三成分(Bh: 35 mT, TC: 14～20%)、あるいは29.10 mの第二成分(Bh: 30 mT, TC: 39%)に近い。第二成分は56 mTの保磁力をもち、これは40.63～66.44 mの第一成分(Bh: 47～54 mT, TC: 55～78%)に類似する。第三成分の保磁力は5 mTで、その寄与率は1%と低い。



第4図 GS-HKN-1コアの古地磁気層序および岩石磁気特性の深度方向プロファイル。水平の点線は、第5図で示した段階IRM着磁実験を実施した試料の層準を示す。

Fig. 4 Magnetostratigraphy and profiles of rock-magnetic properties of the GS-HKN-1 core. Horizontal dashed lines indicate samples for the stepwise IRM acquisition experiment, shown in Fig. 5.

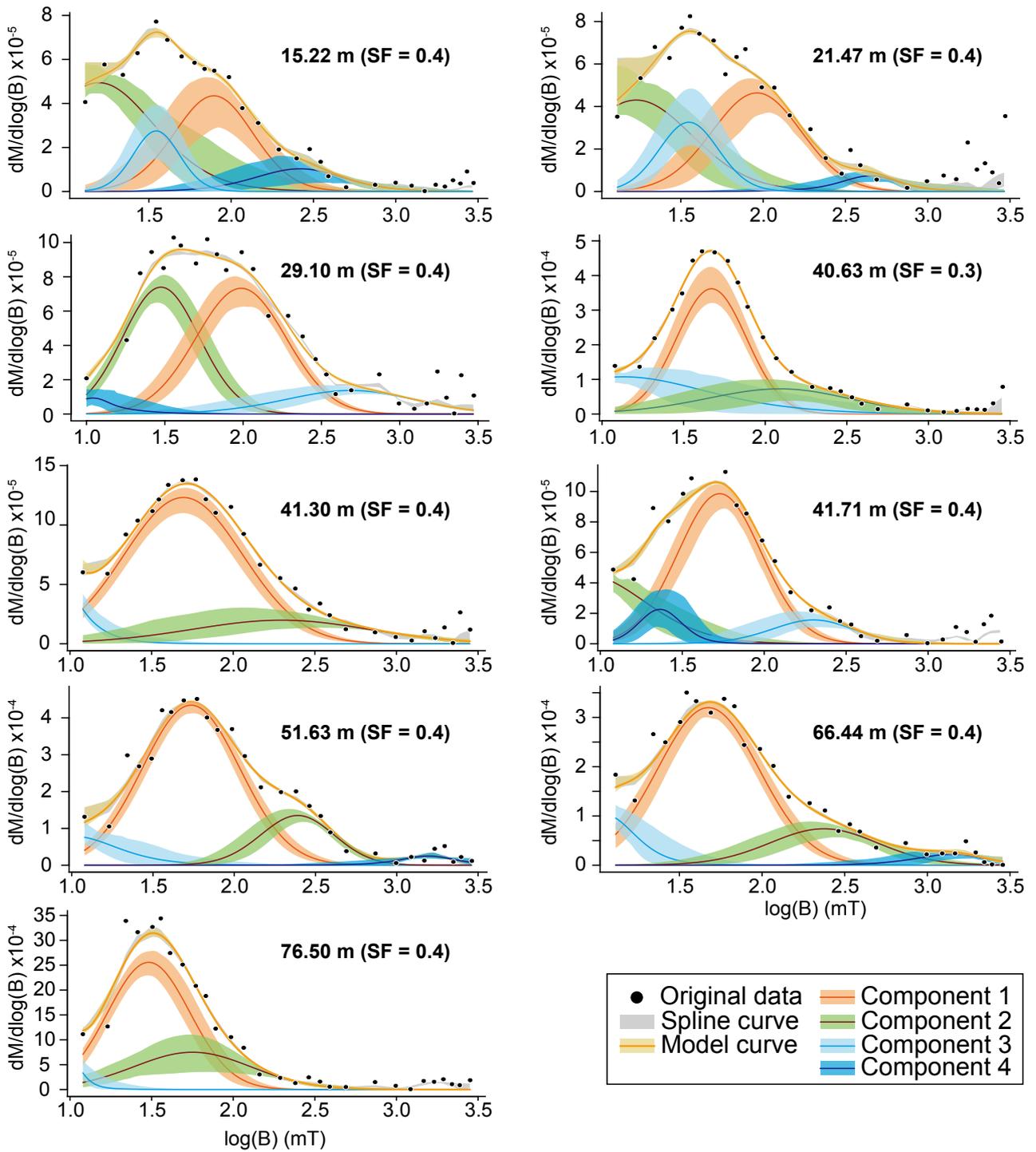
3.4 テフラ分析

3.4.1 GS-HKN-1コアのテフラ

第6図および第3表、第4表に、個別の火山ガラス分析データを示す。

深度 52.25 ~ 52.30 m : 0.063 ~ 0.25 mmの粒子中に、粒

数比にして2.1%の火山ガラスを含み、その形状はほとんどがバブルウォール型である。平行型およびスモールバブル型も少量含まれる。屈折率(n)は、1.504を示す1粒子を除くと、1.497 ~ 1.502 (1.500) (括弧内はモード：以下同様)と低い。火山ガラスの主成分組成では、含有



第5図 段階IRM着磁実験の結果。横軸と縦軸は、それぞれ外部磁場およびIRMの獲得効率を表す。黒点と灰色の帯は、それぞれ段階IRM着磁実験の生データとそのスプライン補完曲線を示す。保磁力分布(オレンジ、緑、水色、紫の曲線と帯)は、スプライン補完曲線を最もよく説明できるモデル曲線(黄色の線と帯)を成分分離することで得た。帯の太さは、95%信頼区間を表す。SF: スムージング係数。

Fig. 5 Results of the progressive IRM acquisition. Horizontal and vertical axes indicate the applied field and acquisition efficiency of IRM in log scales, respectively. Black closed circles and gray shades are original data of the IRM acquisition experiment, and its spline fit, respectively. Coercivity distributions (orange, green, light blue, and purple lines and shades) are deconvoluted from the model curve (yellow line and shade), which best fits the spline curve. The shaded area represents error envelopes of 95% confidence intervals. SF: smoothing factor.

第2表 IRM獲得曲線の保磁力成分. *SF*: スムージング係数; *Bh*: 保磁力; *DP*: 分散パラメータ; *TC*: 寄与率.
 Table 2 Coercivity components obtained by deconvoluting the IRM acquisition curves. *SF*: smoothing factor; *Bh*: mean coercivity; *DP*: dispersion parameter; *TC*: contribution.

Depth (m)	SF	Component 1			Component 2			Component 3			Component 4		
		<i>Bh</i> (mT)	<i>DP</i> (mT)	<i>TC</i> (%)	<i>Bh</i> (mT)	<i>DP</i> (mT)	<i>TC</i> (%)	<i>Bh</i> (mT)	<i>DP</i> (mT)	<i>TC</i> (%)	<i>Bh</i> (mT)	<i>DP</i> (mT)	<i>TC</i> (%)
15.22	4	78.23	1.74	38.16	15.62	2.23	37.12	35.06	1.38	14.18	266.86	1.93	10.55
21.47	4	91.46	1.87	43.02	16.94	2.21	32.14	35.34	1.51	19.90	443.52	1.60	4.94
29.10	4	97.11	1.94	46.53	29.88	1.76	38.98	476.83	2.61	12.44	10.01	1.51	2.05
40.63	3	46.89	1.64	54.89	120.60	2.71	22.69	13.10	3.34	22.42	-	-	-
41.30	4	49.50	2.31	77.87	201.38	3.49	19.25	0.48	2.81	2.88	-	-	-
41.71	4	53.50	1.80	66.67	7.98	2.34	14.60	197.33	1.78	10.66	23.23	1.35	8.06
51.63	4	54.26	2.00	74.29	244.41	1.68	17.85	10.05	1.93	5.39	1565.47	1.60	2.48
66.44	4	47.25	2.04	72.25	237.65	2.13	18.60	10.36	1.61	5.58	1413.15	1.72	3.56
76.50	4	30.39	1.78	69.06	56.22	2.36	29.88	5.06	1.44	1.06	-	-	-

率の平均値でSiO₂が77.3%, Al₂O₃が12.7%, FeO*が1.0%, CaOが1.1%, Na₂Oが3.2%, K₂Oが4.3%付近にクラスターが識別できる. また, 含有率の平均値でSiO₂が77.8%, Al₂O₃が12.3%, FeO*が0.9%, CaOが1.0%, Na₂Oが2.8%, K₂Oが4.8%付近にもクラスターがみられる. なお, 微量元素組成では, Baが800 ppm前後, かつVが10 ppm以上と, 本検討試料中で最も高い値をもつ火山ガラスを少量含む.

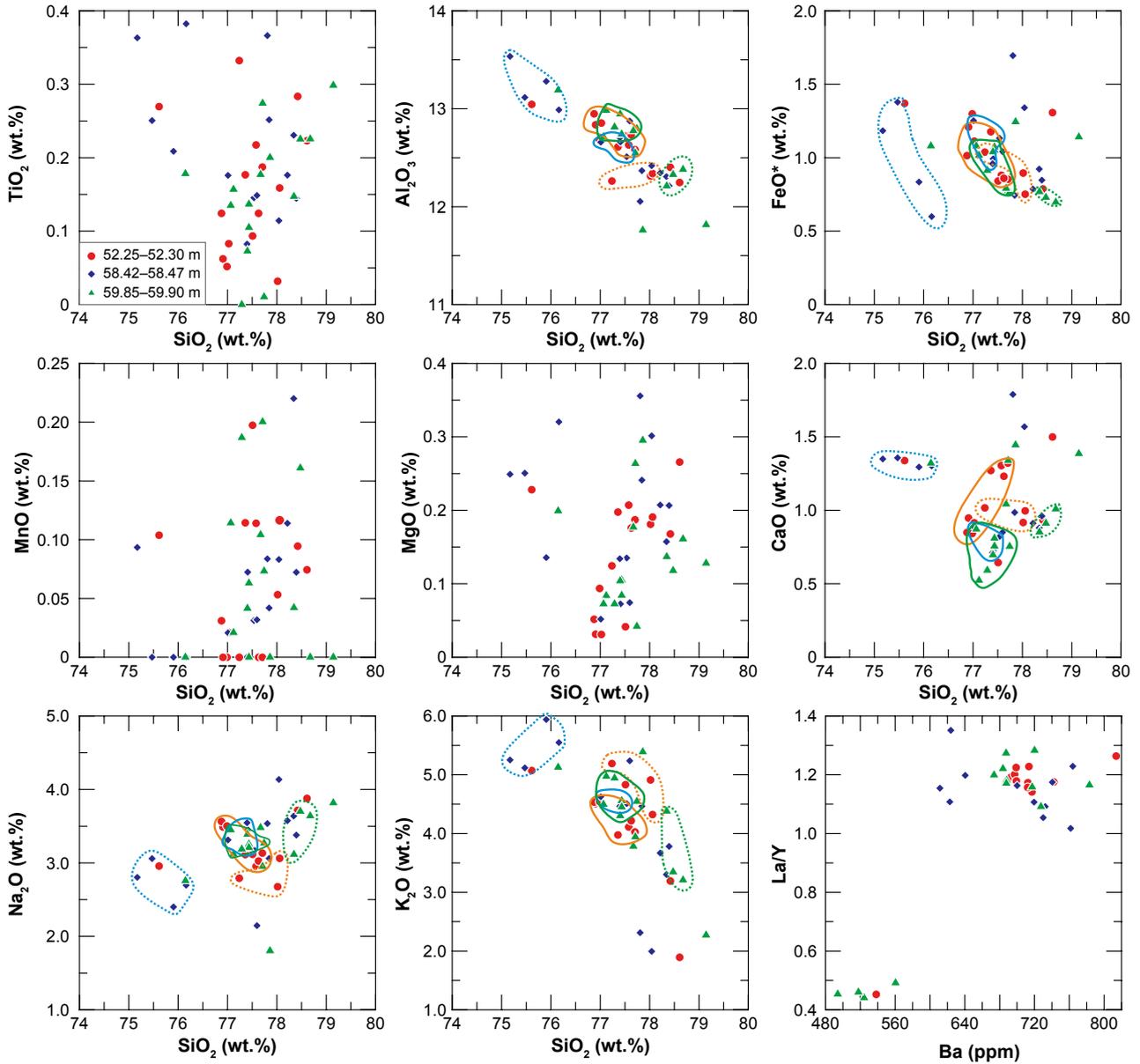
深度58.42 ~ 58.47 m: 0.063 ~ 0.25 mmの粒子中に, 粒数比にして2.7%の火山ガラスを含み, その形状はほとんどがバブルウォール型である. 平行型およびスモールバブル型も少量含まれる. 火山ガラスの屈折率(n)は, 1.496 ~ 1.504 (1.499)である. 火山ガラスの主成分組成では, 含有率の平均値でSiO₂が77.3%, Al₂O₃が12.6%, FeO*が1.1%, CaOが0.8%, Na₂Oが3.4%, K₂Oが4.5%付近にクラスターが識別でき, 52.25 ~ 52.30 m試料のK₂Oが4.3%付近にクラスターを形成するガラスとほぼ一致する. また, SiO₂が75.7%, Al₂O₃が13.2%, FeO*が1.0%, CaOが1.3%, Na₂Oが2.7%, K₂Oが5.5%付近にもクラスターがみられる. なお, 微量元素組成では, Vが14 ppm前後と比較的高い値を示す火山ガラスを少量含む.

深度59.85 ~ 59.90 m: 0.063 ~ 0.25 mmの粒子中に, 粒数比にして1.9%の火山ガラスを含み, その形状はほとんどがバブルウォール型である. 平行型およびスモールバブル型も少量含まれる. 火山ガラスの屈折率(n)は, 1.505を示す1粒子を除くと, 1.496 ~ 1.500 (1.498)と低く, 本論で検討した3試料のうちレンジは最も小さい. 火山ガラスの主成分組成では, SiO₂が77.4%, Al₂O₃が12.8%, FeO*が1.0%, CaOが0.7%, Na₂Oが3.3%, K₂Oが4.6%付近にクラスターが識別できる. これは, 52.25 ~ 52.30 m試料と58.42 ~ 58.47 mにみられるK₂Oが4.3%付近および4.5%付近にクラスターを形成するガラスとほぼ一致する. また, SiO₂が78.5%, Al₂O₃が12.3%, FeO*が0.7%, CaOが0.9%, Na₂Oが3.5%, K₂Oが3.6%付近にもクラスターがみられる. なお, 微量元素成分では, 少数ではあるがLa/Yが0.5程度の火山ガラスを含む. これらの火山ガラスはBaが500 ppm前後と, 検討試料中では比較的小さい.

4. 議論

4.1 強磁性鉱物の推定

IRM獲得曲線の解析から, GS-HKN-1コアの泥質堆積物中には, < 10 mT, 10 ~ 17 mT, 30 ~ 35 mT, 47 ~ 56 mT, 78 ~ 97 mT, 120 ~ 480 mT, および> 1000 mTの保磁力分布をもつ強磁性鉱物の存在が示される(第5図). 一般に, 安定した堆積残留磁化を担うマグネタイト(磁鉄鉱)やマグネタイトの低温酸化によってつくられるマグヘタイト(磁赤鉄鉱)の保磁力は, 磁区構造に依存



第6図 検討試料に含まれる火山ガラスの主成分組成。赤色の丸、青色の菱形、緑色の三角マークは、それぞれ52.25~52.30 m, 58.42~58.47 mおよび59.85~59.90 mの泥層に含まれる火山ガラスのデータを示す。オレンジ、水色、黄緑色の実線および点線の領域は、特徴的なクラスターを示す。

Fig. 6 Major element components of volcanic glasses in examined samples. Red circles, blue diamonds, and green triangles indicate original data of volcanic glasses obtained from 52.25–52.30 m, 58.42–58.47 m and 59.85–59.90 m depths in the GS-HKN-1 core. Areas, which are closed by solid and dashed lines (orange: 52.25–52.30 m; light blue: 58.42–58.47 m; light green: 59.85–59.90 m) indicate characteristic clusters.

して10 ~ 100 mTの範囲で変化する(例えば, Day *et al.*, 1977; Kodama and Hinnov, 2014). また, 還元的な堆積環境で形成され, 二次的な磁化(二次磁化)として化学残留磁化を担うグレイナイト(硫化鉄)も, マグネタイトやマグヘマイトと類似した保磁力分布を示す(Roberts *et al.*, 2011). そのため, グレイナイトは, 堆積物あるいは堆積岩から初生磁化を抽出する際にしばしば障害となる

(Roberts, 2011; Okada *et al.*, 2017など). GS-HKN-1コアから得られた磁化ベクトルの大半は, 本研究のクラスBに分類され, ステレオネット上で大円を描くように消磁される(第3図). これは, マグネタイト, マグヘマイト, およびグレイナイトのように, 保磁力分布が類似した強磁性鉱物が担う磁化がオーバーラップしているためだと考えられる. また, クラスCやクラスDの消磁ベクトルに

第3表 GS-HKN-1コアに含まれる火山ガラスの主成分組成. アスタリスクは、各クラスターに含まれるデータとその平均を示す(*: 第6図の実線で囲まれたデータ; **: 第6図の点線で囲まれたデータ)

Table 3 Major element composition of volcanic glass in the GS-HKN-1 core. Asterisks indicate datum, which is included in each cluster (*: datum closed by solid line in Fig. 6; **: datum closed by dashed line in Fig. 6).

Depth (m)	Count	Major element composition of volcanic glass (%)									Total
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
52.25–52.30	1	78.42	0.28	12.40	0.79	0.09	0.17	0.93	3.72	3.19	100
	2*	76.91	0.06	12.84	1.21	0	0.03	0.95	3.49	4.51	100
	3	75.61	0.27	13.04	1.37	0.10	0.23	1.34	2.96	5.07	100
	4*	76.88	0.12	12.95	1.02	0.03	0.05	0.85	3.56	4.54	100
	5*	77.58	0.22	12.63	0.88	0.11	0.21	1.31	2.95	4.11	100
	6*	77.51	0.09	12.72	0.84	0.20	0.04	0.64	3.12	4.83	100
	7**	78.02	0.03	12.31	0.90	0.05	0.18	0.92	2.68	4.91	100
	8*	77.36	0.18	12.61	1.18	0.11	0.20	1.27	3.11	3.98	100
	9*	77.03	0.08	12.85	1.11	0.02	0.03	0.92	3.46	4.49	100
	10	76.99	0.05	12.68	1.30	0	0.09	0.84	3.50	4.54	100
	11	78.61	0.22	12.25	1.31	0.07	0.27	1.50	3.88	1.89	100
	12*	77.71	0.19	12.58	0.85	0	0.19	1.32	3.13	4.03	100
	13**	77.24	0.33	12.26	1.04	0	0.12	1.02	2.79	5.19	100
	14**	78.06	0.16	12.34	0.75	0.12	0.19	1.00	3.06	4.32	100
	15*	77.63	0.12	12.74	0.86	0	0.18	1.23	3.03	4.22	100
Average*	77.32	0.13	12.74	0.99	0.06	0.12	1.06	3.23	4.34	-	
S.D.*	0.34	0.06	0.13	0.15	0.07	0.08	0.25	0.24	0.30	-	
Average**	77.77	0.17	12.31	0.90	0.06	0.17	0.98	2.84	4.81	-	
S.D.**	0.46	0.15	0.04	0.14	0.06	0.04	0.05	0.20	0.44	-	
58.42–58.47	1**	75.17	0.36	13.54	1.18	0.09	0.25	1.35	2.80	5.25	100
	2**	75.91	0.21	13.28	0.84	0	0.14	1.29	2.40	5.94	100
	3**	75.47	0.25	13.12	1.38	0	0.25	1.36	3.06	5.12	100
	4*	77.54	0.15	12.51	1.13	0.03	0.14	0.82	3.18	4.51	100
	5*	77.41	0.08	12.66	0.99	0.07	0.07	0.72	3.46	4.53	100
	6	78.39	0.14	12.21	0.85	0.07	0.21	0.96	3.38	3.78	100
	7	78.04	0.11	12.42	1.34	0.08	0.30	1.57	4.14	2.00	100
	8	78.34	0.23	12.31	0.92	0.22	0.16	0.88	3.64	3.30	100
	9	78.21	0.18	12.34	0.79	0.11	0.21	0.91	3.58	3.67	100
	10**	76.16	0.38	12.99	0.60	0	0.32	1.30	2.70	5.55	100
	11*	77.40	0.08	12.70	0.96	0	0.13	0.71	3.55	4.47	100
	12*	77.01	0.18	12.66	1.25	0.02	0.05	0.89	3.31	4.63	100
	13	77.81	0.37	12.05	1.70	0.08	0.36	1.79	3.54	2.31	100
	14	77.84	0.25	12.37	0.74	0.04	0.24	0.99	3.06	4.46	100
	15	77.60	0.15	12.87	1.04	0.03	0.07	0.85	2.15	5.24	100
Average*	77.34	0.12	12.63	1.08	0.03	0.10	0.79	3.37	4.53	-	
S.D.*	0.23	0.05	0.09	0.13	0.03	0.04	0.08	0.16	0.07	-	
Average**	75.68	0.30	13.23	1.00	0.02	0.24	1.33	2.74	5.46	-	
S.D.**	0.44	0.08	0.24	0.35	0.05	0.08	0.03	0.27	0.36	-	
59.85–59.90	1	77.71	0.27	12.55	0.77	0.20	0.26	1.34	2.95	3.94	100
	2**	78.35	0.15	12.21	0.77	0.04	0.14	0.85	3.12	4.38	100
	3*	77.12	0.16	12.98	1.02	0.02	0.08	0.52	3.12	4.97	100
	4*	77.74	0.01	12.80	0.77	0.07	0.04	0.75	3.27	4.55	100
	5*	77.07	0.14	12.71	1.08	0.11	0.07	0.87	3.45	4.50	100
	6*	77.43	0.11	12.74	1.05	0	0.11	0.76	3.26	4.56	100
	7	76.15	0.18	13.19	1.08	0	0.20	1.32	2.76	5.13	100
	8	77.86	0.20	11.76	1.24	0	0.30	1.44	1.80	5.39	100
	9**	78.48	0.23	12.33	0.73	0.16	0.12	0.91	3.70	3.35	100
	10**	78.67	0.23	12.38	0.70	0	0.16	1.01	3.64	3.21	100
	11	79.14	0.30	11.81	1.14	0	0.13	1.39	3.82	2.27	100
	12*	77.43	0.14	12.74	1.07	0.06	0.08	0.81	3.21	4.45	100
	13	77.67	0.18	12.77	0.79	0.10	0.18	1.04	3.48	3.78	100
	14*	77.40	0.07	12.95	1.04	0.04	0.10	0.70	3.39	4.30	100
	15*	77.29	0	12.81	0.91	0.19	0.07	0.59	3.19	4.94	100
Average*	77.36	0.09	12.82	0.99	0.07	0.08	0.72	3.27	4.61	-	
S.D.*	0.23	0.06	0.11	0.11	0.06	0.02	0.12	0.11	0.25	-	
Average**	78.50	0.20	12.31	0.73	0.07	0.14	0.92	3.49	3.65	-	
S.D.**	0.17	0.05	0.09	0.04	0.08	0.02	0.08	0.32	0.64	-	

西三河平野地下更新統の古地磁気層序 (羽田ほか)

第4表 GS-HKN-1 コアに含まれる火山ガラスの微量元素組成

Table 4 Trace element composition of volcanic glass in the GS-HKN-1 core.

Depth (m)	Count	La/Y	Trace element (ppm)																
			Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce
52.25-52.30	1	1.2	5.0	2.6	0.2	0.3	1.1	0.5	40.8	18.2	172.1	113.3	24.1	122.4	13.3	6.6	692.8	28.7	53.8
	2	1.2	5.2	2.5	0.2	0.3	1.9	0.5	41.9	18.0	176.2	111.0	24.2	123.8	13.7	6.5	699.3	28.7	50.2
	3	1.1	4.9	2.4	0.2	0.3	1.0	0.5	44.4	19.9	173.6	110.3	25.1	122.6	13.2	6.3	717.0	28.6	52.8
	4	1.2	5.0	2.7	0.2	0.3	1.0	0.8	39.0	18.3	178.1	109.6	24.0	123.8	13.6	6.4	697.4	28.9	50.8
	5	1.2	5.1	2.5	0.2	0.4	1.9	0.7	38.4	17.8	176.1	110.5	24.0	120.6	13.5	6.5	699.0	29.4	51.3
	6	1.2	5.1	2.6	0.5	0.3	1.0	0.8	41.2	18.0	177.0	108.0	23.6	116.4	13.7	6.7	699.1	27.9	51.7
	7	1.2	5.0	2.5	0.2	0.3	1.0	0.5	39.1	18.3	167.6	110.2	24.5	122.3	13.9	6.3	712.5	28.8	51.6
	8	1.2	5.1	2.6	0.2	0.3	1.0	1.1	46.8	18.8	176.7	108.0	23.8	125.3	13.2	6.8	713.7	29.2	52.8
	9	1.2	5.2	2.5	0.2	0.3	1.5	0.5	41.9	19.2	177.8	111.6	24.8	124.5	13.2	6.6	742.1	29.1	54.8
	10	1.2	5.2	2.5	0.2	0.3	1.0	0.5	42.6	18.4	177.4	108.8	24.7	124.2	13.3	6.4	712.2	28.5	62.6
	11	1.3	5.8	10.1	0.0	1.1	0.0	1.2	38.5	24.7	303.4	109.8	26.7	180.6	10.8	8.8	813.7	33.8	65.5
	12	1.6	6.6	11.2	1.2	1.2	0.0	0.0	38.4	22.9	284.2	114.9	21.1	174.0	10.2	8.5	775.1	33.9	67.2
	13	0.5	7.6	3.7	2.8	1.1	-3.3	4.3	44.6	16.0	51.0	103.9	48.8	189.8	6.3	1.6	538.3	22.1	38.8
58.42-58.47	1	1.1	5.6	2.0	0.0	0.3	0.1	1.1	40.6	18.0	181.5	113.2	24.8	135.4	13.3	6.4	719.6	27.4	56.9
	2	1.1	5.3	1.9	0.0	0.2	0.1	1.1	40.7	17.4	184.8	120.2	26.0	132.7	13.8	8.4	730.1	27.4	55.2
	3	1.2	5.0	1.5	0.0	0.3	0.1	0.4	40.9	18.1	183.5	114.2	22.7	126.3	12.7	5.3	700.0	26.4	57.5
	4	1.2	5.5	1.9	0.0	0.2	0.1	0.4	40.4	17.4	170.6	114.8	21.6	125.8	13.1	6.0	764.0	26.5	48.6
	5	1.2	5.8	1.5	0.0	0.3	0.6	1.1	38.2	17.5	189.1	113.3	23.9	128.0	13.2	6.2	740.5	28.1	56.8
	6	1.1	5.0	2.0	0.0	0.3	0.1	0.4	41.7	17.2	181.1	98.8	24.6	128.6	14.0	6.2	732.3	26.9	48.3
	7	1.0	5.1	2.0	0.0	0.3	0.1	0.9	40.0	17.8	185.6	103.7	24.7	129.2	13.7	6.1	761.6	25.1	53.6
	8	1.2	4.4	14.8	3.4	1.4	6.5	5.0	24.9	18.1	203.6	130.1	23.9	214.5	13.2	7.5	640.5	28.7	50.5
	9	1.4	3.6	14.8	1.1	1.3	4.4	2.7	24.9	21.4	214.8	133.8	24.0	223.5	11.6	7.5	624.0	32.5	53.5
	10	1.2	4.4	13.4	1.8	1.3	2.4	2.7	28.8	16.0	182.1	119.3	24.1	205.6	11.3	7.5	611.4	27.8	48.3
	11	1.1	3.5	14.8	1.5	1.3	2.1	2.4	25.6	20.5	226.7	137.4	25.2	190.8	13.2	7.8	622.8	27.9	47.5
59.85-59.90	1	1.2	4.9	2.6	0.1	0.3	1.0	0.4	39.8	17.8	168.2	117.3	23.9	122.1	13.1	6.7	673.6	28.6	54.6
	2	1.2	5.4	2.4	0.1	0.4	2.7	0.4	42.3	17.5	177.3	112.0	24.2	125.2	14.0	6.6	688.0	28.5	46.6
	3	1.1	4.7	2.3	0.1	0.4	0.7	0.4	47.8	21.6	171.6	110.5	26.0	122.6	12.9	6.1	727.4	28.4	52.3
	4	1.2	4.9	2.9	0.1	0.3	0.7	1.1	35.9	18.1	181.6	109.0	23.7	125.4	13.8	6.3	683.8	29.0	47.8
	5	1.3	5.2	2.4	0.1	0.4	2.6	0.8	34.4	17.0	177.1	110.9	23.7	118.1	13.5	6.5	687.4	30.2	48.9
	6	1.2	5.1	2.8	0.9	0.3	0.7	0.9	40.7	17.4	179.2	105.4	22.8	108.8	14.1	6.9	687.7	26.7	49.7
	7	1.2	4.8	2.4	0.1	0.2	0.7	0.4	36.1	18.1	158.2	110.4	24.8	121.9	14.4	5.9	717.3	28.8	49.6
	8	1.3	5.1	2.7	0.1	0.3	0.7	1.6	53.1	19.2	178.5	105.3	23.2	128.7	12.9	7.2	720.1	29.8	52.3
	9	1.2	5.3	2.4	0.1	0.3	1.9	0.4	42.4	20.1	180.9	113.4	25.4	126.8	13.0	6.8	783.1	29.6	56.8
	10	0.4	7.7	4.2	0.4	0.8	2.2	1.7	43.8	13.5	58.5	88.8	44.8	172.7	6.5	1.9	524.3	19.7	38.0
	11	0.5	7.6	3.3	1.0	0.8	3.4	0.7	36.5	14.0	47.7	96.5	45.4	167.5	6.0	1.7	517.8	20.9	37.7
	12	0.5	6.9	3.8	0.9	1.0	2.9	1.3	35.9	13.3	55.7	98.1	42.0	174.6	6.5	1.9	494.1	19.0	38.0
	13	0.5	6.6	0.0	1.3	0.0	0.0	1.7	49.7	15.5	75.6	97.5	57.5	276.4	8.0	2.8	560.4	28.3	54.0

Depth (m)	Count	La/Y	Trace element (ppm)																
			Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
52.25-52.30	1	1.2	6.1	18.7	3.6	0.5	3.2	0.6	3.4	0.7	2.2	0.4	2.4	0.4	3.6	0.9	23.8	12.5	2.8
	2	1.2	6.1	18.5	3.7	0.6	3.2	0.6	3.4	0.7	2.3	0.3	2.5	0.4	3.5	0.9	23.4	12.6	2.9
	3	1.1	6.0	18.8	3.7	0.5	3.3	0.6	3.2	0.7	2.2	0.4	2.4	0.4	3.5	0.9	24.4	12.0	2.9
	4	1.2	6.1	18.8	3.6	0.6	3.2	0.6	3.3	0.7	2.2	0.4	2.4	0.4	3.5	1.0	24.8	12.3	2.9
	5	1.2	6.1	18.9	3.7	0.5	3.2	0.6	3.5	0.7	2.3	0.4	2.3	0.4	3.6	1.0	24.4	12.2	2.9
	6	1.2	6.1	18.9	3.7	0.6	3.3	0.6	3.4	0.7	2.2	0.4	2.3	0.4	3.6	0.8	24.2	12.4	2.9
	7	1.2	6.0	18.6	3.7	0.6	3.1	0.6	3.4	0.6	2.2	0.4	2.4	0.4	3.5	0.9	23.9	12.4	2.9
	8	1.2	6.1	18.7	3.6	0.6	3.1	0.6	3.3	0.6	2.2	0.4	2.3	0.4	3.6	1.0	24.1	12.2	3.0
	9	1.2	6.0	18.9	3.7	0.6	3.3	0.6	3.3	0.7	2.3	0.3	2.4	0.4	3.6	0.9	25.1	12.3	2.9
	10	1.2	6.5	22.3	5.1	0.6	3.9	0.6	4.0	0.9	2.7	0.4	2.5	0.5	3.4	0.8	23.0	12.7	3.1
	11	1.3	7.1	19.4	5.3	0.8	3.5	0.7	2.9	0.9	2.0	0.4	2.5	0.5	6.4	0.9	23.2	20.5	4.3
	12	1.6	5.7	20.9	4.9	0.6	3.6	0.7	2.5	0.7	2.0	0.2	2.3	0.3	5.8	1.2	23.3	19.6	4.5
	13	0.5	4.3	19.1	3.8	0.8	5.0	0.8	5.5	1.3	3.4	0.6	5.7	0.7	4.7	0.5	18.5	6.4	1.6
58.42-58.47	1	1.1	5.9	19.3	3.8	0.6	3.2	0.6	3.5	0.7	2.1	0.3	2.6	0.4	3.2	0.9	22.0	11.9	2.8
	2	1.1	6.0	21.6	3.7	0.6	3.5	0.6	3.3	0.6	2.2	0.3	2.4	0.5	3.5	0.9	22.4	12.5	2.9
	3	1.2	5.6	19.9	3.7	0.5	3.3	0.4	3.0	0.7	1.9	0.3	2.3	0.3	2.9	1.0	22.6	12.3	3.0
	4	1.2	6.1	19.0	3.8	0.6	3.3	0.5	3.1	0.6	1.9	0.3	2.2	0.3	3.0	0.9	22.1	12.3	2.9
	5	1.2	5.7	20.8	3.9	0.6	3.2	0.6	3.3	0.7	1.9	0.3	2.5	0.5	3.1	1.0	22.5	12.0	3.1
	6	1.1	6.2	19.5	3.9	0.6	2.8	0.5	3.1	0.7	2.2	0.3	2.3	0.3	2.7	0.9	22.1	12.6	2.8
	7	1.0	5.5	18.1	3.6	0.6	3.1	0.5	2.8	0.7	2.0	0.3	2.1	0.3	2.6	0.9	22.2	12.5	2.9
	8	1.2	5.8	21.1	3.7	0.8	3.6	0.5	3.5	0.8	2.8	0.4	2.5	0.5	5.0	1.1	23.2	20.4	3.2
	9	1.4	5.5	21.5	3.3	0.7	3.5	0.5	3.6	0.7	2.8	0.4	2.5	0.4	5.6	1.2	23.7	20.6	3.6
	10	1.2	5.4	20.6	3.6	0.7	3.0	0.5	3.3	0.7	2.6	0.4	2.4	0.5	4.2	1.3	22.5	21.6	3.4
	11	1.1	5.5	21.2	3.6	0.7	3.6	0.5	3.4	0.8	2.7	0.4	2.5	0.4	4.8	1.1	23.4	19.8	3.5
59.85-59.90	1	1.2	6.0	18.2	3.4	0.5	3.0	0.6	3.4	0.7	2.2	0.4	2.4	0.4	3.7	0.9	23.3	12.8	2.7
	2	1.2	6.2	17.8	3.6	0.6	3.1	0.6	3.3	0.7	2.3	0.3	2.6	0.4	3.4	1.0	22.6	12.9	2.9
	3	1.1	5.9	18.4	3.5	0.5	3.2	0.6	2.9	0.6	2.0	0.4	2.4	0.4	3.5	1.0	24.7	11.5	2.9
	4	1.2	6.1	18.4	3.3	0.5	3.1	0.7	3.3	0.7	2.1	0.4	2.3	0.4	3.5	1.0	25.6	12.3	2.8
	5	1.3	6.0	18.7	3.6	0.5	3.2	0.6	3.6	0.6	2.4	0.4	2.2	0.4	3.6	1.0	24.8	11.9	2.9
	6	1.2	6.0	18.6	3.6	0.6	3.2	0.6	3.3	0.6	2.2	0.4	2.3	0.4	3.7	0.7	24.3	12.4	2.9
	7	1.2	5.8	18.1	3.5	0.5	3.0	0.7	3.3	0.6	2.1	0.4	2.5	0.4	3.5	0.9	23.7	12.4	2.9
	8	1.3	6.1	18.3	3.4	0.5	3.0	0.6	3.2	0.6	2.0	0.4	2.3	0.4	3.7	1.0	24.1	11.9	3.1
	9	1.2	5.8	18.7	3.6	0.6	3.3	0.5	3.2	0.6	2.3								

は、しばしば10 mT以下の直線的な磁化成分が含まれる(第3図j, l)。この低保磁力の磁化成分は、粒径が比較的大きい多磁区構造のマグネタイトやマグヘタイトが担う二次磁化であると考えられる。さらに、IRM獲得効率曲線の解析結果は、数百～数千mTの保磁力をもつヘマタイト(赤鉄鉱)やゲータイト(水酸化鉄)などの強磁性鉱物の存在を示唆する(第5図; Tauxe, 2010; Kodama and Hinnov, 2014)。いくつかの試料は、80 mTまでpAFDを施した後も、15～20%程度の磁化を残すことから(第3図a-e, h)、これら高い保磁力をもつ強磁性鉱物が残留磁化の一部を担っていると考えられる。

4.2 GS-HKN-1 コアの岩石磁気特性

NRM強度、帯磁率、ARM帯磁率、 $\kappa_{\text{ARM}}/\kappa$ 比、およびSIRMは、深度60 m以深で大きく変動し、それより上位の層序区間とは明瞭に異なる変化をする(第4図)。これらの岩石磁気パラメータは、61.54 m, 64.44 m, 67.16 m, 70.33 m, および76.50 mの5層準で、最大の値をとる。一方、62.55 m, 66.44 m, 69.55 m, および72.58 mでは、比較的低い値を示し、S比の減少を伴う。このことから、深度60 m以深の層序区間では、試料に含まれる強磁性鉱物の種類および量比が大きく変動したことを示す。すなわち、62.55 m, 66.44 m, 69.55 m, および72.58 mの試料では、ヘマタイトやゲータイトなどの高保磁力かつ磁化強度が小さい強磁性鉱物の含有量が増加したために、NRM強度やS比が低下したと考えられる。このことは、S比が高い76.50 mの保磁力分布に比べて、比較的低いS比をもつ66.44 mでは、200 mT以上の高保磁力成分が存在することからも支持される(第5図)。69.55 mおよび72.58 mにみられるS比の顕著な低下は、これらの層準を含む泥層から非海生珪藻群集の産出が報告されていることから(阿部ほか, 2019)、非海成層の堆積環境に関連すると考えられる。なお、NRM強度や帯磁率などの岩石磁気パラメータに大きな変動はないが、珪藻化石群集から淡水環境での堆積が指摘されている23.44～30.40 m区間においても(第2図; 阿部ほか, 2019)、S比は低い値を示す(第4図)。深度30 mより上位の試料の保磁力分布は、同程度の寄与率を持つ2種類の強磁性鉱物の存在を示し、この特徴は深度30 mより下位の試料ではみられない(第5図)。以上から、西三河平野の更新統の岩石磁気特性が変動する要因の一つとして、相対海水準変動による堆積環境の変化が考えられる。

4.3 古地磁気極性の対比

古地磁気測定の結果、2つの正磁極帯(HKN-N1帯: 15.22～40.44 m, HKN-N2帯: 76.50 m)と1つの逆磁極帯(HKN-R1帯: 40.75～71.41 m)を設定した(第4図)。GS-HKN-1 コアでは、予察的な花粉分析によって更新統の堆積年代が推定されており(阿部ほか, 2019)、古

地磁気層序と組み合わせることにより詳細に堆積年代を制約することが可能である。深度39.85～75.78 mは、*Quercus* subgen. *Lepidobalanus* (コナラ属コナラ亜属; 相対産出頻度: 5.1～66.7%)と*Fagus* (ブナ属; 相対産出頻度: 4.8～45.5%)の産出で特徴付けられ、大阪層群の花粉化石分帯である*Fagus-Quercus*超帯(MIS 16～21)(本郷, 2009; 楡井・本郷, 2018)に相当すると推定されている(阿部ほか, 2019)。そのため、HKN-N1帯およびHKN-R1帯は、それぞれブルン正磁極期、松山逆磁極期に、その境界が置かれる39.85～43.85 mの泥質層はMIS 19に対比される。また、HKN-N2は、松山逆磁極期中の正磁極亜帯のいずれかに相当すると考えられる。

阿部ほか(2019)は、GS-HKN-1 コアの珪藻化石分析から、*Fagus-Quercus*超帯に含まれる41.60～43.25 m, 49.30～62.50 m, および76.50～76.52 mの海成層から、浅海生の化石珪藻である*Lancineis rectilatus*の産出を報告した。*L. rectilatus*は、関東平野中央部のボーリングコアからも産出が報告されており、層序指標としての有用性が指摘されている(納谷, 2019)。テフラ層序、古地磁気層序、および花粉層序から、関東平野における*L. rectilatus*の産出範囲は約1.45～0.7 Ma (MIS 17)に制約されている(納谷ほか, 2017; Naya, 2019)。一方、GS-HKN-1 コアにおける*L. rectilatus*の産出上限はMIS 19の泥層であり、関東平野における終産出年代(MIS 17, 納谷ほか, 2017; 納谷, 2019; Naya, 2019)と矛盾しない。ただし、濃尾平野においてはMIS 11付近の層準においても*L. rectilatus*が産出する可能性が指摘されており(納谷, 2019)、中部地方における浅海成層の年代指標として利用できるか、さらに検討が必要である。

また、HKN-N1帯(27.72 m)およびHKN-R1帯(51.63 m)において、地磁気エクスカージョンの可能性があり、磁極帯の極性とは逆向きの伏角を示すクラスAの消磁結果がそれぞれ1層準から得られた(第3図a, c, および第4図)。花粉化石層序から、GS-HKN1 コア下限の年代は少なくともMIS 21まで遡る(阿部ほか, 2019)。MIS 21以降の間氷期から報告されている地磁気エクスカージョンには、Kamikatsura (MIS 22–21あるいはMIS 22), Osaka Bay (MIS 17), La Palma (MIS 15c–b), Orphan Knoll (MIS 13a), Bermuda (MIS 11c), Portuguese Orphan (MIS 9a), Pringle Falls (MIS 7dおよび7d), Iceland Basin (MIS 7–6), Blake (MIS 5e–d), Post-Blake (MIS 5c), Skalamaelifell (MIS 5c)などがある(Channell *et al.*, 2020)。27.72 mは松山–ブルン境界より上位の地磁気エクスカージョンのいずれかに、51.63 mは松山–ブルン境界より下位の地磁気エクスカージョンに相当する可能性がある。

4.4 松山–ブルン境界の層位と堆積環境

GS-HKN-1 コアにおける松山–ブルン境界の層位と堆積環境の関係について検討する。HKN-N1帯とHKN-R1

帯の境界は40.44～40.75 mに置かれ(第4図), 松山-ブルン境界に対比されると考えられる. 40.50～40.55 mの泥層試料からは淡水生珪藻化石が, それより下位の41.50～43.85 mの有機質泥層からは海生珪藻化石が産出する(阿部ほか, 2019). そのため, 39.85～43.85 mの泥質層は, MIS 19の中の海水準変動に対応した堆積環境を反映している可能性がある. また, GS-HKN-1コアでは, CNS 元素組成の変動が主に淡水-海水間の堆積環境変動を反映している可能性が指摘されている. 40.50～40.55 m試料は, 下位の有機質泥層の試料(深度41.60 mおよび42.55 m)に比べて, 低い全有機炭素/全窒素(C/N)比と高い全有機炭素/全硫黄(C/S)比で特徴付けられ, 海水の侵入が少なかったことを示す(太田・阿部, 2019). 以上のことから, 少なくとも40.50～40.55 m層準では, 41.50～43.85 mの有機質泥層よりも海水準は相対的に低かったと考えられる.

有孔虫化石の海洋酸素同位体記録から, MIS 19は, MIS 19c, 19b, 19aの3つのサブステージに区分される(Railsback *et al.*, 2015; Haneda *et al.*, 2020a). 松山-ブルン境界は, 北大西洋の深海底コアや房総半島における酸素同位体層序のMIS 19cから19bへの海水準低下期に置かれることが明らかになっており(Channell *et al.*, 2020; Haneda *et al.*, 2020b), 前期-中期更新世境界のGSSP(国際境界模式層断面とポイント: Global Boundary Stratotype Section and Point)では 772.9 ± 5.4 kaの年代値が報告されている(Haneda *et al.*, 2020b; Saganuma *et al.*, 2021). HKN-N1帯とHKN-R1帯の境界, すなわちGS-HKN-1コアで推定された松山-ブルン境界の層位は非海成泥層に置かれることから(第4図), 深海底堆積物コアなどの酸素同位体層序における松山-ブルン境界の層位と矛盾しない.

しかし, 39.85～43.85 mの泥質層の磁化ベクトルの安定性は悪く, 初生的な磁化方位を抽出できていない. そのため, 段階熱消磁などによる追加の検証が必要である.

4.5 テフラの検討

本研究では, 松山逆磁極帯の泥質層を対象にテフラの検討を行い, 3試料では火山ガラスが粒数比にして1.9～2.7%含まれていることを見出した. しかし, これらの試料に含まれる火山ガラスは, その含有率が3%以下であり, テフラの降灰層準を示すといえるほどの有意な濃集層を形成していない. また, その屈折率および主成分・微量元素組成のばらつきが大きいことから(第6図, 第3表, 第4表), 前期更新世以前の複数の起源を持つテフラが二次堆積し, 混在したものであることが示唆される. これらのテフラの起源を検討するため, Kimura *et al.* (2015)に示された鮮新世から前期更新世の37枚の広域テフラの主成分および微量成分化学組成値と比較した. しかし, これら広域テフラに対比できる火山ガラスは見

出すことができなかった. 従って, 今回比較対象としなかったほかの広域テフラも含めて, GS-HKN-1コアの松山-ブルン境界より下位層準の火山ガラスの起源について, 今後さらなる検討が必要である.

5. まとめ

本研究では, 愛知県碧南市縄手町の油ヶ淵低地で掘削されたGS-HKN-1コアの古地磁気層序を検討した. その結果, 2つの正磁極帯(HKN-N1帯: 15.22～40.44 m, HKN-N2帯: 76.50 m)と1つの逆磁極帯(HKN-R1帯: 40.75～71.41 m)を認定した. 阿部ほか(2019)によって報告された花粉化石層序との比較により, HKN-N1帯はブルン正磁極期, HKN-R1帯は松山逆磁極期, HKN-N2帯は松山逆磁極期中の正磁極亜期のいずれかに対比される. 松山-ブルン境界の層位は, 40.44～40.75 m区間の非海成泥層の中に置かれる可能性がある. 本研究の古地磁気層序は, 油ヶ淵低地下の更新統の堆積開始年代が, 前期更新世まで遡ることを示す. また, HKN-N1帯およびHKN-N2帯において, 各磁極帯の極性と逆向きとの, 安定な磁化方位がそれぞれ1層準から得られた. これらは, 地磁気エクスカージョンによる磁化方位の短期的な反転を示す可能性がある. しかし, 松山-ブルン境界の層位も含めて, 段階熱消磁などの追加実験による検証が必要である.

極性境界より下位の層準に含まれる火山ガラスの屈折率, 主成分および微量元素分析を行なった. その結果, 検討した火山ガラスは, 複数のテフラの二次堆積に由来するものと考えられ, GS-HKN-1コアの堆積年代の制約に用いることはできなかった.

本研究の古地磁気層序は, 西三河平野の地下更新統に対し新たな年代制約を与える. 一方, 古地磁気極性境界より下位の層準では, 堆積年代の制約に有用なテフラは含まれていない. GS-HKN-1コアの下部更新統の堆積年代を明らかにするには, 詳細な花粉化石層序を構築し, 大阪湾や関東平野といった花粉化石群集と海洋酸素同位体ステージの対応関係が明らかになっている地域と比較・検討する必要がある.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 産業技術総合研究所の阿部朋弥博士には, 柱状図データの提供とテフラ試料の採取に関してお世話になった. 国立極地研究所の菅沼悠介准教授には, 古地磁気・岩石磁気分析でお世話になった. 本稿は, 国立極地研究所の菅沼悠介准教授および産業技術総合研究所の宇都宮正志博士, 納谷友規博士, 中島 礼博士による建設的な意見によって大きく改善された. 以上の皆様に御礼申し上げます.

文献

阿部朋弥・中島 礼・納谷友規(2019)西三河平野南西部,

- 油ヶ淵低地におけるボーリング調査. 地質調査総合センター速報, no. 79, 71–86.
- Banerjee, S.K., King, J. and Marvin, J. (1981) A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies. *Geophysical Research Letters*, **8**, 333–336.
- Bloemendal, J., King, J.W., Hall, F.R. and Doh, S.-J. (1992) Rock magnetism of late Neogene and Pleistocene deep-sea sediments: relationship to sediment source, diagenetic processes, and sediment lithology. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 4361–4375.
- Channell, J.E.T., Singer, B.S. and Jicha, B.R. (2020) Timing of Quaternary geomagnetic reversals and excursions in volcanic and sedimentary archives. *Quaternary Science Review*, **228**, 106114.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A. (1977) Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **13**, 260–267.
- 古澤 明 (1995) 火山ガラスの屈折率測定および形態分類とその統計的な解析に基づくテフラの識別. 地質学雑誌, **101**, 123–133.
- Haneda, Y., Okada, M., Kubota, Y. and Suganuma, Y. (2020a) Millennial-scale hydrographic changes in the northwestern Pacific during marine isotope stage 19: teleconnection with ice melt in the North Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters*, **531**, 115936.
- Haneda, Y., Okada, M., Suganuma, Y. and Kitamura, T. (2020b) A full sequence of the Matuyama–Brunhes geomagnetic reversal in the Chiba composite section, Central Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 44.
- Heslop, D., Dekkers, M.J., Kruiver, P.P. and van Oorschot, I.H.M. (2002) Analysis of isothermal remanent magnetization acquisition curves using the expectation-maximization algorithm. *Geophysical Journal International*, **148**, 58–64.
- 本郷美佐緒 (2009) 大阪堆積盆地における中部更新統の花粉生層序と古環境変遷. 地質学雑誌, **115**, 64–79.
- 堀 和明 (2018) 第 I 章 地形と地質. 新編知立市史 8 資料編 自然, 1–94.
- Kimura, J.-I., Nagahashi, Y., Satoguchi, Y. and Chang, Q. (2015) Origins of felsic magmas in Japanese subduction zone: Geochemical characterizations of tephra from caldera-forming eruptions <5 Ma. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **16**, 2147–2174.
- King, J., Banerjee, S.K., Marvin, J. and Özdemir, Ö. (1982) A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, **59**, 404–419.
- Kirschvink, J.L. (1980) The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, **62**, 699–718.
- 岸 清・宮脇理一郎 (1996) 新潟県柏崎平野周辺における鮮新世～更新世の褶曲形成史. 地学雑誌, **105**, 88–112.
- 小玉一人 (1999) 古地磁気学, 東京大学出版会, 東京, 248p.
- Kodama, P.K. and Hinnov, L. A. (2014) *Rock Magnetic Cyclostratigraphy*. Wiley-Blackwell, Oxford, 167p.
- Kruiver, P.P., Dekkers, M.J. and Heslop, D. (2001) Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, **189**, 269–276.
- 桑原 徹・吉野道彦・森 忍 (1985) 西三河地区(碧海盆地)の地下水盆構成について, 一色・碧南観測井の微化石分析結果による再検討. 地盤地下の実態とその対策に関する調査研究報告書, 第10報, 愛知県環境部, 29–56.
- 町田 貞・太田陽子・田中真吾・白井哲之 (1962) 矢作川下流域の地形発達史. 地理学評論, **35**, 505–524.
- 牧野内 猛 (2005) 第1章 地形と地質. 新編安城市史 11 資料編 自然, 2–92.
- 牧野内 猛・加藤麻衣・大石康雄・塚本将康・武邑圭司・大島 武・杉浦 武 (2011) 愛知県安城市の地下地質. 地質学雑誌, **117**, 79–94.
- Maxbauer, D.P., Feinberg, J.M. and Fox, D.L. (2016) MAX UnMix: A web application for unmixing magnetic coercivity distributions. *Computers & Geosciences*, **95**, 140–145.
- 森 忍 (1984) 愛知県碧南市地下における更新統のケイソウ群集. 瑞浪化石博物館研究報告, **11**, 93–99.
- 森山昭雄 (1994) 西三河平野, 碧海層の堆積構造と海水準変動. 地理学評論, **67A**, 723–744.
- 森山昭雄・伊勢野暁彦・谷口和穂・吉野道彦 (1994) 西三河平野, 碧海層の花粉組成と最終間氷期の気候変動. 日本第四紀学会講演要旨集, **24**, 60–61.
- 森山昭雄・橋爪 厚・石原 秀 (1997) 化石ケイソウ群集による碧海層の堆積環境の変遷と油ヶ淵断層による変位. 愛知教育大学研究報告(自然科学編), no. 46, 61–69.
- Naya, T. (2010) *Lancineis rectilatus* sp. nov., a new fossil species from Pleistocene sediments in Japan. *Diatom Research*, **25**, 111–124.
- 納谷友規 (2019) 第四紀の層序指標としての海生珪藻化石—浅海域における生層序指標としての新たな可能性—. 第四紀研究, **58**, 289–301.
- Naya, T. (2019) Stratigraphic distribution and biostratigraphic utility of the fossil diatom *Lancineis rectilatus* in

- the central Kanto Plain, central Japan. *Quaternary International*, **519**, 131–143.
- 納谷友規・本郷美佐緒・植木岳雪・八戸昭一・水野清秀 (2017) 関東平野中央部の地下に分布する鮮新–更新統の層序と微化石分析. *地質学雑誌*, **123**, 637–652.
- 楡井 尊・本郷美佐緒 (2018) 中部日本における前期末～中期更新世の花粉生層序. *第四紀研究*, **57**, 143–155.
- Okada, M., Suganuma, Y., Haneda, Y. and Kazaoka, O. (2017) Paleomagnetic direction and paleointensity variations during the Matuyama-Brunhes polarity transition from a marine succession in the Chiba composite section of the Boso Peninsula, central Japan. *Earth, Planets and Space*, **69**, 45.
- 太田雄貴・阿部朋弥 (2019) 西三河平野南西部堆積物を用いた CNS 元素分析(速報). *地質調査総合センター速報*, no. 79, 87–93.
- Railsback, L.B., Gibbard, P.L., Head, M.J., Voarintsoa, N.R.G. and Toucanne, S. (2015) An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages. *Quaternary Science Reviews*, **111**, 94–106.
- Roberts, A. P., Chang, L., Rowan, C. J., Horng, C.-S. and Florindo, F. (2011) Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe₃S₄): An update. *Reviews of Geophysics*, **49**, RG1002.
- 産総研地質調査総合センター (2018) 20万分の1日本シームレス地質図V.2. <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (閲覧日: 2021年6月25日)
- Suganuma, Y., Okada, M., Head, M.J., Kameo, K., Haneda, Y., Hayashi, H., Irizuki, T., Itaki, T., Izumi, K., Kubota, Y., Nakazato, H., Nishida, N., Okuda, M., Satoguchi, Y., Simon, Q. and Takeshita, Y. (2021) Formal ratification of the Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Chibanian Stage and Middle Pleistocene Subseries of the Quaternary System: the Chiba Section, Japan. *Episodes*. doi:10.18814/epiiugs/2020/020080
- Tauxe, L. (2010) *Essential of Paleomagnetism*. University of California Press, London, 489 p.
- Zijderveld, J.D.A. (1967) A.C. demagnetization of rocks: analysis of result. In Collinson, D.W., Creer, K.M. and Runcorn, S.K., eds., *Methods in paleomagnetism*. Elsevier, New York, 254–286.

(受 付 : 2021年8月2日 ; 受 理 : 2022年1月11日)

