

コンピュータ・グラフィックスを用いる地磁気逆転現象のモデル化と地域活性化の検討

A Study on Geomagnetic Reversal Phenomena Computer Graphics Model and Regional Activation

梶原俊男[†] 大野邦夫[‡]
Toshio KAJIWARA and Kunio OHNO

[†] シクタンク暮ルネッサンス [†] Think Tank Go Renaissance
[‡] (株)モナビITコンサルティング [‡] Monavis IT Consulting Co.

Email: [†] 6175wnwk@jcom.home.ne.jp [‡] k-ohno@star.ocn.ne.jp

1. はじめに

本稿では、千葉縣市原市の養老川に面する川岸の崖に存在する地磁気逆転地層について紹介し、それに関心を持つ人々を中心に取り組まれている地域コミュニティ活動の現状と今後の展望について述べる。

地磁気の逆転に際して、個別の期間毎に名前が付けられているが、78万年前～12万年前の最近の期間の名称に関してはイタリアと千葉が候補になっている。千葉の名称を推進する観点で、現在市原市では特別天然記念物に指定して、地域の活性化の足がかりにすることを企画している。ここではその企画具体化の観点で、検討すべき内容を取り上げ、考察を加える。

2. 地磁気現象の基本モデル

2.1 地球の内部構造

まずは、地磁気現象についての理解が重要である。その概要をJAXAの高橋太氏による論文[1]で紹介する。地球には磁場が存在するが、地球や惑星の磁場は、コアで起こる電磁流体力学的な作用（ダイナモ作用）によって発生することが知られている。地球の場合は主に溶融した鉄から成る外核でダイナモ作用が生じている。図1は、地球の内部構造を示すが、外核は深さ2900～5100 kmに位置している。日本列島の北海道の端から九州の端までの距離が約3000kmなので、地表からこの距離の深さのまで掘ると、外殻の液体金属に達するということである。

導電流体である液体金属が磁場中で対流を起こすと電磁誘導の原理により電流が生じる。この電流による効果で新たに磁場が生じるが、生成される磁場が元の磁場を強化しオーム損失に打ち勝つならば、雪崩現象的に対流が強化され、導電流体の対流は持続することになる。地球の磁場はこの原理で生成されている。

このプロセスのエネルギー源は、惑星内部の熱で、コア自体が冷却される過程で熱対流が駆動されることに起因すると言われる。その詳細は不明であるが、内核との境界で鉄が凝固する際の現象と、その際に放出される潜熱が関与している模

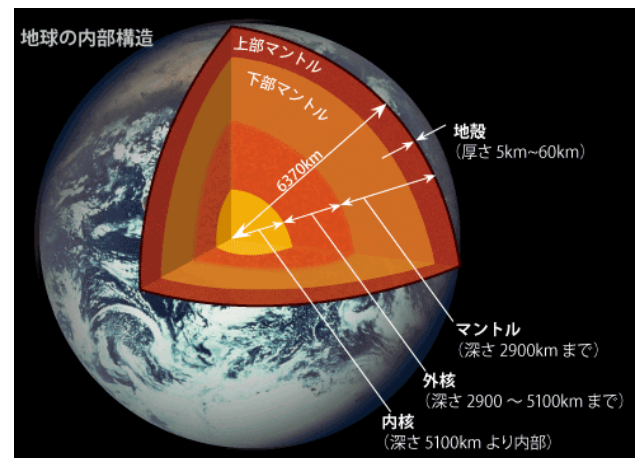


図1 地球の内部構造。地磁気を生じるダイナモは外核における溶融鉄の作用である。

様である。特に外核の鉄流体に溶融している軽元素が、鉄の凝固により浮力を得て、その成分が上浮することにより組成対流を生じることになるが、これが対流の要因として大きい模様である。

2.2 地球ダイナモ作用の方程式

なお上記の現象は、力学、電磁気学、流体力学、熱伝導といった物理現象が関与し、本質的に非線形現象であるために解析的に解くことは極めて困難であった。それでもコンピュータを用いて、有限要素法やルンゲクッタ法を用いて数値的に微分方程式を解く手法が確立してきたので、地磁気現象のモデル化も進展してきている。

地球外核によるダイナモ作用は、

- (1) 電磁誘導方程式
- (2) 運動方程式
- (3) 熱方程式（熱伝導と対流）
- (4) 磁場の連続の式（単極子は存在せず）
- (5) 流体の連続の式（非圧縮性流体）

を連立させて、初期条件、境界条件を与えることにより解くことができる。

以上の基本方程式群を連立させて大まかな地球のデータを入れて解くわけであるが、変数を減らすために式を無次元化して解くのが有効な工学的な手法である。これは単に変数が減るだけでなく、解の性質の変化を無次元パラメータの値で提示することが可能となるからである。地球ダイナモ方程式の解法のために、下記の4種類の無次元パラメータが定義されている。

- E (エクマン数) : 粘性力とコリオリ力の比
- Ra (レイリー数) : 浮力と粘性力の比
- Pr (プラントル数) : 熱拡散と粘性拡散の比
- Pm (磁気プラントル数) : 磁気と粘性の拡散比

地球ダイナモ作用は、これらのパラメータに基づいて議論されている。

2.3 粘性が大きいと仮定したモデル解

図2は、比較的性質が分かりやすい解の例を示している。そ

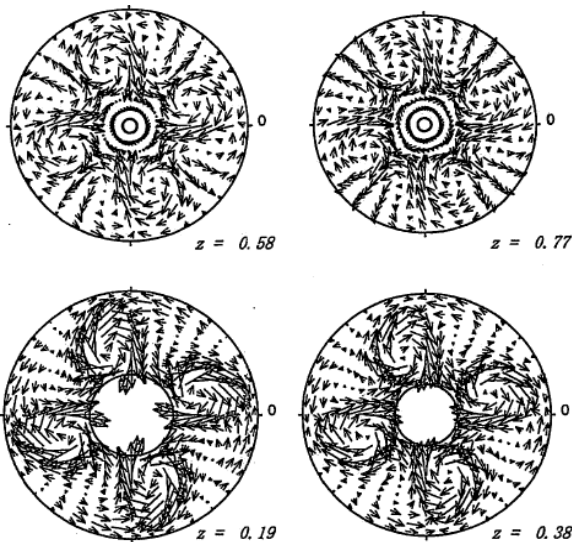


図2 北から見た赤道面に平行な各断面での流れの水平成分。zは赤道面からの距離。

のためにエクマン数を 10^{-4} として粘性を仮想的に大きな値に取っているが、実際の値は極めて低い値である。レイリー数も計算が容易な臨界値程度の値にしている。対流構造は柱状に回転軸方向に伸びた時計回りと反時計回りの成分を持つ対流セルが4ペア存在している。この図では、赤道面から北極までの相対的な位置の比(z)を、0.19、0.38、0.58、0.77の場合について示している。図3はその状況を示している。赤道面から $z=0.58$ に至るまで時計回りと反時計回りの対流セルが4ペア存在しているが、 $z=0.77$ になるとその様子が減衰していることが分かる。

図4は、赤道面に近い $z=0.19$ での流れと磁場の回転軸方向の成分を示している。図2と連携させて見ると、対流が時計回りに生じているセルで強い磁場が発生していることが分かる。この現象は、対流セルにおける金属流体の流れが関係する。要するに対流が時計回りに生じているセルでは赤道面から上

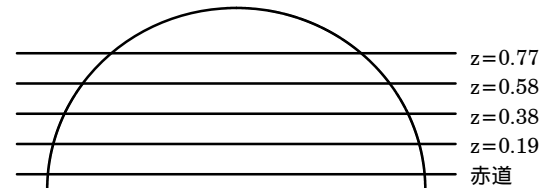


図3 zのイメージ (赤道面からの距離)

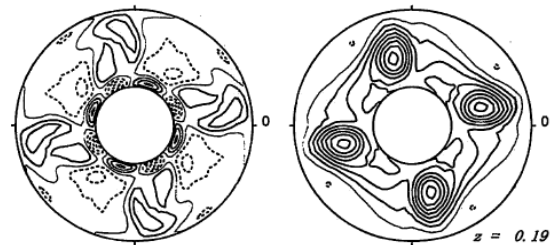


図4 赤道面に平行な断面内での流れ及び磁場での回転軸方向成分の等高線。実線(破線)は正(負)の値を示す。

昇する流れが生じており、その流れによる移動が磁場をさらに強めると考えられる。それに対し、反時計回りのセルでは流れが下降するので下向きの磁場が弱められるのである。対流が時計回りに生じているセルでは、螺旋状に高い緯度に向かって上昇し、反時計回りのセルでは螺旋状に下降していく状況と察せられる。

図5は、コア表面での半径方向成分の磁場とその直下での流れの等高線を示す。ともに実線は正、破線は負の値を示す。北半球では磁場が正となり、南半球では負となっている。金属流体の流れは、南北半球の中緯度から高緯度において湧出しと流入の領域が観察され、赤道近辺の低緯度の領域では弱い湧出しとなっている。

2.4 粘性を減少させた場合のモデル解

図6は、エクマン数の変化による解の状況の変化を示している。上二つは 10^{-5} 、下二つは 10^{-6} でのプロットである。(a)・(c)は赤道面での流線、(b)・(d)はコア表面上での磁場の半径方向成分を示す。(a)・(c)に相当する 10^{-4} の場合が図4の左側の図に相当する。エクマン数が小さくなる、すなわち粘性が小さくなると対流セルが増大し、微細な対流が沢山生じるようになり、状況が複雑になることが分かる。(b)・(d)は、 10^{-4} の場合だと図5の左側の図に相当する。全ての場合に共通して北半球では磁場が正となり、南半球では負となっているが、巨

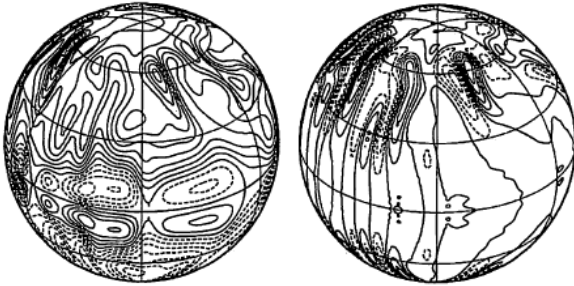


図5 コア表面での半径方向成分の磁場（左）と直下での流れの等高線。実線（破線）は正（負）の値を示す。

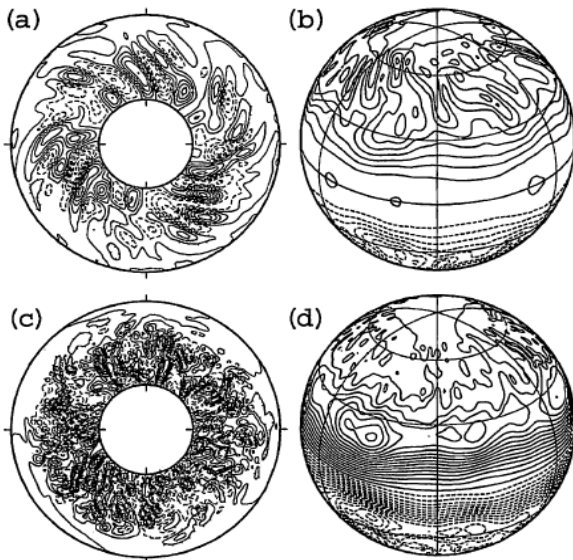


図6 エクマン数の変化による流れと磁場の構造。上二つは 10^{-5} 、下二つは 10^{-6} でのプロット、(a)・(c)は赤道面での流線、(b)・(d)はコア表面上での磁場の半径方向成分を示す。

視的なダイポール（双極子）としては、エクマン数が小さくなるに従い安定性が增大する様子が見てとれる。すなわち、微視的なダイポールが増大して解は複雑になるが、その結果として統計的には安定なダイポールで模擬されるようになるのである。

2.5 磁場が逆転する状況

以上において、浮力と粘性の比であるレイリー数は臨界値程度の値にしていたが、粘性項の減少に合わせてレイリー数を臨界値の数十倍に増大させると激しい対流が起こる。図7はその状況を示すが、横軸に磁気レイノルズ数、縦軸にエルザッサ数を取っている。磁気レイノルズ数の R_m は磁場の方程式における拡散項と生成項の比である。液体金属の粘性の減少に伴い拡散項が増大し R_m も増大する。ダイナモ作用による磁場が維持されるには R_m が十分に大きくなければならない。要するに安定した磁場の状態を確保するには、生成され

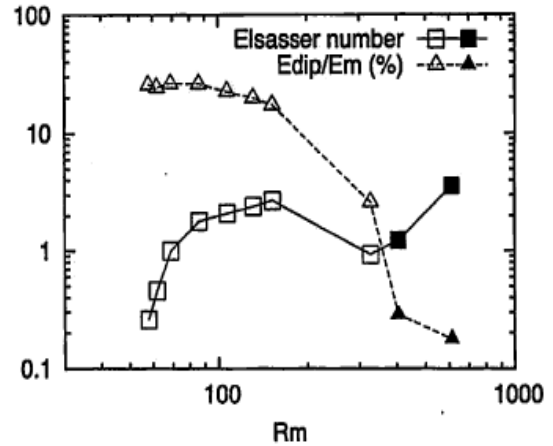


図7 エルザッサ数（四角形）と全磁場エネルギーに対する双極子成分（三角形）の磁気レイノルズ数依存性。黒塗りの記号は逆転を起こす解を示す。

る磁場が迅速に拡散される必要がある。エルザッサ数は運動方程式におけるローレンツ力とコリオリ力の比で、磁場の強さを示す。 R_m が200程度になると磁場はいったん弱くなり、その後 R_m が400程度になると再度上昇する。他方、双極子成分は R_m の増加に対して減少し続ける。 R_m が400以上でエルザッサ数が増大し磁場が強くなるのに対して、磁場が強くなるにも関わらず双極子成分が減少するのは、非双極子成分が大きくなることを意味し、双極子磁場が逆転し得ることを意味する。

3. 房総半島における地磁気逆転地層

3.1 地磁気逆転の歴史

以上述べたようなメカニズムで地磁気逆転は起こり得るのであるが、これまでの調査から過去に繰り返し逆転が起こったことが確かめられている。その概要を簡単に紹介する。図8は、過去200万年までの経緯を示している[2]。黒が現在と同様の磁極で、白が逆の磁極である。最近では78万年前に逆転が起こっているとされている。図9は過去1億6000万年前まで遡った地磁気変化を示す[2]。図8の時間軸は、図9の時間軸の最初の部分を160倍に拡大している。図9の幅は約12cmなので、左端の0.75mmの部分図8に相当することになる。

3.2 白亜紀のスーパーカロン

約1億年前の白亜紀にはかなり長期間の空白が存在するが、これは地球の歴史においては希な現象と言える。これは1億2000万年前から8000万年前までの4000万年くらい前まで磁場の逆転が存在しない期間が継続したのである。この期間はスーパーカロンと呼ばれる地磁気が強く安定した時期であった。この現象は図10に示すパンゲア超大陸の分裂にも関係している可能性が議論されている[2]。それによると、白亜紀のスーパーカロンが生じる前にコアとマントルの間で変化が生じ、そこから高温の物質が上昇し、大規模なマグマ活動が全

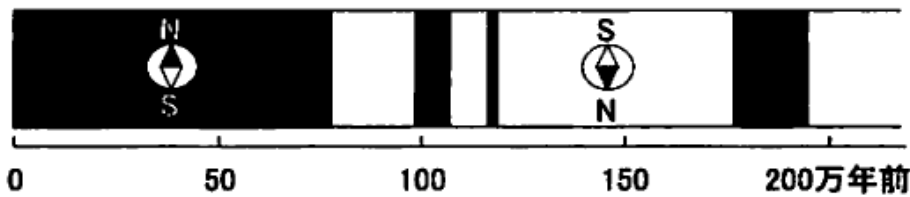


図8 過去200万年前までの磁気逆転経緯



図9 過去1億6000万年前までの磁気逆転経緯

地球規模で生じた。その結果マントル上でプレート移動が生じて、パンゲア超大陸の分裂が開始された。さらに中心核表面は冷却され、それに起因して対流運動が活発になり地磁気が強くなり安定したというメカニズムの仮説モデルである。真偽の程度は不明だがスケールの大きな話である。[3]

3.3 火山と堆積物による地磁気の記録

次にこのようなデータがどのようにして得られたかを説明する。それは主に火山によるデータと海底の堆積によるデータに大別される。火山によるデータは、溶岩を中心とするものであるが、高温の岩石は磁化されることはない。高温の岩石が冷却される過程で、キュリー点以下の温度になると地磁気に影響されて磁化されるのである。火山岩が磁化された年代は、包含される同位元素の分析により高い精度で同定される。海底の堆積の場合は、細かい粒子が徐々に堆積する場合に磁性を持つ粒子（シルトあるいは泥サイズの磁性鉱物）は磁場に影響されて堆積する。従って個々の粒子はかなりのばらつきを持って磁性に影響されるが、統計的にはかなり正確な磁化方向が得られるのである。さらに堆積した地層の年代は、生物の化石の種類や包含する放射性元素（ウランやカリウムなど）の分析等により算出推定される。

3.4 千葉県市原市田淵の地層とGSSP

千葉県市原市田淵の養老川岸に最後の地磁気逆転の証拠となる地層が露出している。その一例を図11に示す。赤いペグと青いペグにおいて地磁気の逆転が観察され、黄色いペグがその移行時期に対応する。この移行時期が図8の左端の黒い領域と隣接する白い領域の境界における逆転で77～78万年前と言われている。

このような地層は、国際標準模式層断面及び地点（Global Boundary Stratotype Section and Point 略称：GSSP）によ

り国際地質年代区分を実証する国際標準としてグローバルな視点で統一的に管理されている[4]。そのほとんどは、化石記録に基づく古生物学的変化が設定の基準となっているが、地磁気による場合も含まれる。GSSPの策定は1977年に始まり、2015年までに66箇所GSSPが定められているとのことである。

GSSPでは、区分境界に最も適した地層が露出した地層（セクション）に地域名を付けることになっている。さらにその崖内で次の地質時代を始まりを示す連続性の良い模式層の一点にその時代の始まりとなる模式地点として金色の杭（Golden Spike）が打たれ、その崖の杭から世界共通の新たな地質時代が始まることにしている。Golden Spikeが存在する地層の具体例を図12に示す。これは、エディアカラ紀の区分を示すもので、オーストラリア南部フリンダース山脈にあるエディアカラ丘陵に存在する地層である。この写真の下方に、円形の金属板が写っているが、これがGolden Spikeである。その拡大写真を図13に示す。エディアカラ紀は、新新生代クライオジェニアン（Cryogenian）の終わりから古生代カンブリア紀の始まりまでの約6億2000万年前から5億4200万年前までの期間で、原生代の最後の区分である。2004年に国際地質科学連合（IUGS）が、先カンブリア時代層序小委員会の勧告に基づきGSSPとして認定した。

市原市田淵の養老川岸の地層は、258万年前から始まる地球の寒冷化と人類の出現で特徴付けられる「新生代第四紀」の区分に関係している。新生代第四紀は、更新世と完新世に区分され、さらに更新世は、前期、中期、後期に区分され、前期はジェラシアン（Gelasian）時代とカラブリアン（Calabrian）時代に2分される。しかしカラブリアン時代の終わりはまだ国際的に決まっていない。また後続する更新世中期の地質時代名も国際的な命名がなされていない。そこで千葉

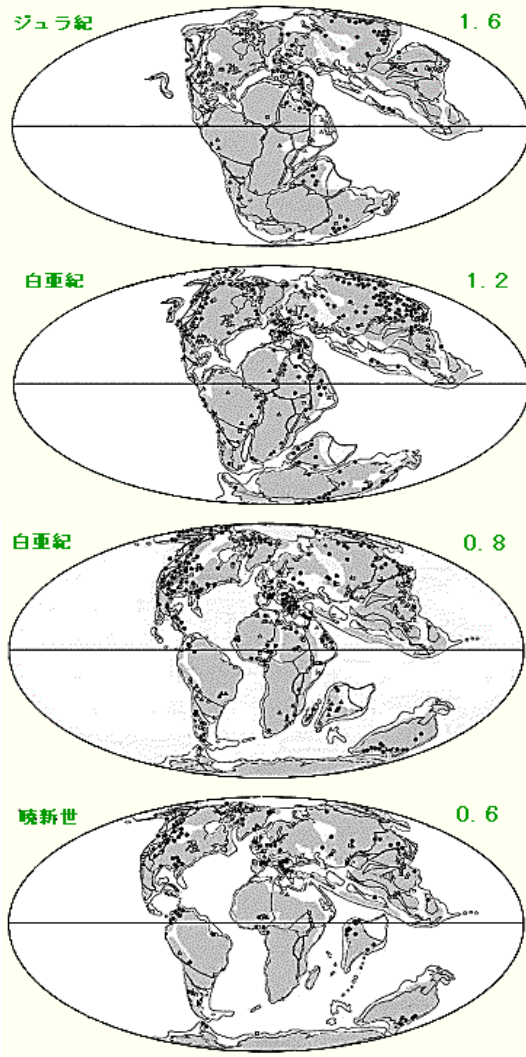


図10 白亜紀におけるパンゲア大陸の分裂

県市原市田淵の崖を国際的模式露頭として「千葉セクション」とし、イタリアのカラブリアン時代の終わり、つまり更新世中期の始まりとする提案が出されている。

このような、地球の歴史にとって貴重な遺産が存在することから、このような資産を有効に活用することが今後の地域社会にとって極めて重要と考えられるのである。

4. 地域コミュニティ活性化の可能性

4.1 非ビジネス分野での活動

地磁気の逆転現象は、ビジネスに直結するようなテーマではないが、地球上に生きる我々にとっては素朴な興味を抱かせてくれる事象である。このような素朴な知的な興味は、智を愛する学問としての哲学の素であり、学習、教育、を通じた人材育成にとって極めて重要である。

地磁気の話は、地球物理学に属すが、地磁気が電荷を持つ宇宙線粒子を遮断することにより地球を防護し、その効果としてオーロラを生じること等は重要な事実である。地磁気



図11 市原市田淵の養老川岸の地磁気逆転地層

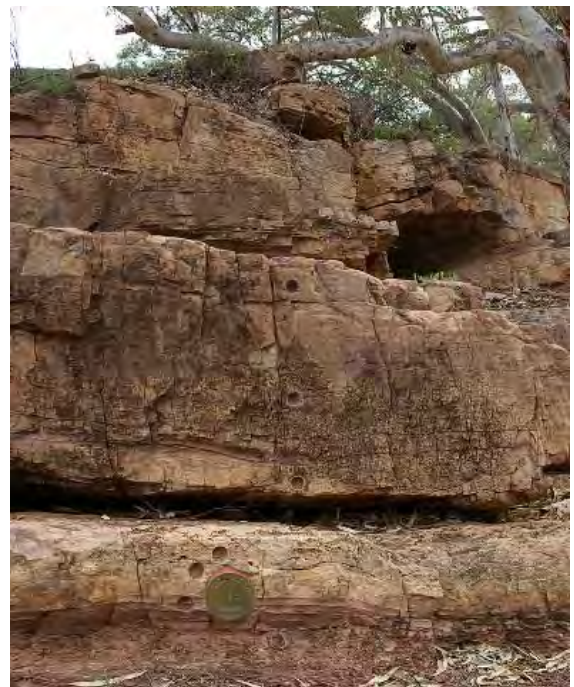


図12 オーストラリア南部エディアカラ丘陵の地層に打ち込まれたGolden Spike

の変化が地球環境に影響を与え、さらに地球上の生物の盛衰などにも関係している可能性の議論も存在する。

4.2 自然を通じた人材育成



図13 エディアカラ丘陵のGolden Spike

そのようなことを考えると、地磁気に関心を持つことを通じて、自然環境や生物進化にまで思いを巡らせることが可能であろう。さらに地球以外の多くの天体も磁場を持っている。例えば木星には強い磁場があり、その結果として木星表面の縞模様や大赤斑は存在している。木星の縞模様は、渦の列であることが知られているが、その状況は図6のC図の状況を類推させてくれて、地球における液体金属も類似の現象ではないかと推察させてくれる。そのように考えると、地磁気逆転現象は天文学や宇宙論にも結びつくと思われる。

なお、GSSPのGolden Spikeに象徴される、地層の年代区分は、対応する時期の生物の化石から、地球上の生物の進化の歴史と関係するので、そのような分野に興味を持つ少年少女にとっては興味深い対象であろう。地磁気の逆転地層に関連した博物館を作れば、小学校の理科の授業のフィールドワークとしては効果的であり、小学校の遠足には極めて好都合な場所になるのではあるまいか。

以上のようなフィールド的な発想を若い少年少女に与えたいものである。そのような自然環境は都会では得られないものである。現在の学童や生徒への教育が結果的に受験を目指す教育になっておりその弊害は極めて大きい。そのような教育を変える取り組みが地域でできないものかと多くの教育関係者は考えているのではあるまいか。そのような問題への一つの挑戦として、自然への素朴な興味を起こさせることを試みたい。

4.3 クラブ活動の活性化

小学校や中学校には天文部や物理部といった部活動が行われていると思う。筆者の一人の大野は、中学高校時代に物理

部と山岳部に所属し、自然を通じて多くの知識を得た。物理部では、ハンダ付けを教わり同調や増幅の電気回路を学び、さらに電磁誘導や放電現象等について学んだものであった。山岳部では丹沢や秩父、八ヶ岳、南北アルプスの山に登り、谷川の水の源流が川の流れていく状況、吹雪の翌日の雪景色の美しさ、かつて氷河が存在したカールに雪渓が残る高峰の荘厳さなど、自然の環境に感嘆したものであった。さらに満天の漆黒の夜空に輝く星や天の川を見て、何十光年、何百光年の彼方から届く光を見ている自分の存在を不思議に感じたものであった。

そのような素朴な感覚が自然現象への興味、さらにはニュートン力学が微積分という数学的な手法で明快に解釈されること等を知り、それを活用する工学分野に関心を持ち、その分野を職業として選択した経緯がある。自然から直接学ぶことは学校で教師に教わって学ぶよりもはるかに力強く印象深いものである。地磁気逆転のような事象を題材として、そのような学び方を推進することは価値あることである。

そのように考えると、小・中・高の自然科学系の学習の野外活動として取り組むことが有効であろう。具体的には制約の多い授業よりは、クラブ活動のような取り組みに地域のボランティアが参加して、活動を盛り上げるような試みが行われることが期待される。

4.4 アクティブラーニング

教育学習分野におけるアクティブラーニングが話題になっている。文部科学省の定義によると、アクティブラーニングとは、「教員による一方向的な講義形式の教育とは異なり、学修者の能動的な学修への参加を取り入れた教授・学習法の総称。学修者が能動的に学修することによって、認知的、倫理的、社会的能力、教養、知識、経験を含めた汎用的能力の育成を図る。発見学習、問題解決学習、体験学習、調査学習等が含まれるが、教室内でのグループ・ディスカッション、ディベート、グループ・ワーク等も有効なアクティブ・ラーニングの方法である。」とされている[5]。

従来の授業中心の受身の授業から、自ら活動的に学ばせる教育方針への移行と解釈される。人が学習を通じて知識や価値観、倫理、道徳を習得する状況は、前向きに興味を持つ場合と受身でいやいやながら学ぶ状況とは、雲泥の相違がある。

このような実践的な学習は、ジョン・デューイ[6]を中心とする米国のプラグマティズム哲学が推進した教育思想であり、戦後の日本の教育の民主化を提案した米国教育使節団の思想でもあった[7]。米国教育使節団は1946年と1950年の2度にわたって来日し、中央集権化された日本の教育を地域を中心とする多様性を包含する教育に改めることを提言した。その提言に基づき戦後の教育改革が実施され新教育制度が制定された。しかしながらその後の日本の教育は受験教育を背景とする中央集権的な伝統に縛られ、地域に根ざした教育の多様化は進展しなかった[8]。

受験教育は、競争に勝つことに価値を抱かせる教育であり、決して好ましいものではないが、情実や派閥等による不透明な選抜を排除する公正・公平な評価であることには違いない。従って、興味を持って自然を学びつつそれで実力を付けて受験競争にも勝つような取り組みが望まれる。アクティブラーニングの目標は、そのような手法に置くべきであろう。興味を持って自然を学ぶという状況を、地磁気逆転を契機にする物理現象への興味やクラブ活動に結び付け、理系分野のアクティブラーニングに結び付けることが考えられる。そのような活動を軸にした地域の活性化が考えられる。

4.5 国土と地球を理解する人材の育成

グローバル化の進展で、グローバル人材の育成が産業界や教育分野で語られて久しいが、世界を目指して情報発信し活動するには、日本の国土を理解して語れるようになる必要があるのではないだろうか。最近では地政学のような地理情報と政治外交との関係を分析する学問分野が注目されるようになり、グローバル人材は世界を地球儀的な視野で俯瞰することが求められている。そのためには、自分が生活している地域を日本の国土の中に位置付け、生活の場としての地域を語れる人材の育成が重要と思われる。

日本における地磁気観測の現状や過去の歴史に関しては、国土交通省の国土地理院が担当しており、関連する研究や広報活動を行っている。従ってその活動や成果を踏まえて地域での活動に取り組むことも重要と思われる。国土地理院の敷地内に地図と測量の科学館があり[9]、地磁気を含む地理情報技術とその歴史に関して学ぶ場が用意されている。さらに国土地理院には出前講座の制度があり、申請すれば技術の紹介なども行っている[10]。

アクティブラーニングの一環として、郷土を知り、国土を知った上で、グローバル人材としての素養は確立されると思われる。そのような観点で、千葉県市原市田淵の地磁気逆転の地層について学び、郷土の理解を出発点に、国土、世界を知ると共に、地球とその内部についての知識を深め、さらに天体や宇宙に関して思いを馳せるような人材の育成を試みたいと考える次第である。

5. まとめ及び考察

以上、地磁気現象に関する技術的な内容を紹介し、それを媒介にする地域活性化の可能性を検討した。直接ビジネスに結び付くテーマではないので長期的に取り組みたいと考える。そうすると、教育や人材育成が対象となる。それも就職に関係する実学教育や職業訓練とも異なる分野である。

従って自然を学ぶことを通じた人材育成が中核的になる。そのような経緯から、小中学校のクラブ活動や自然科学分野を中心とするアクティブラーニングの実践を取り上げたが、具体的な方針となると全く未知数である。取りあえず着手してただどしく模索する以外に方法は無いと思われる。

なお、78万年前の地磁気逆転に関しては、その名称をイタリアの特定の地域と議論しているということなので、その交流を通じた地域コミュニティ同士の連携も考えられる。イタリアは既に成功した観光立国であり、地域的な産業の育成などに関しては優れた経験と実績を有している。そのような国際交流を通じて、地域人材の育成を計る可能性も存在すると思われる。

6. おわりに

以上、地磁気逆転の技術的内容の基本的な観点の紹介と、その事実を記録した地層の存在に興味ある対象として考え、それを出发点に地域活性化の可能性を考察したが、検討は未だ端緒に過ぎない。今後の活動を具体的に考え、試みて行くことが必要である。

なお、本検討を進めるに当たり、国土地理院地理地殻活動研究センターの藤原智地理地殻活動総括研究官から地磁気現象並びに日本における地磁気の研究状況とその歴史に関する情報提供を頂き、地域での教育活動への可能性に関しては、市原市教育委員会 生涯学習部 ふるさと文化課の忍澤成視 係長から情報を頂きましたので謝意を表します。

文献

- [1] 高橋太; “地球惑星ダイナモシミュレーションの新たな発展”, 地学雑誌, Vol.114, No.2, pp123-131, (2005)
- [2] 綱川秀夫; “地磁気逆転X年”, 岩波ジュニア新書397, 岩波書店 (2002)
- [3] SCIENCE127; “超大陸パンゲアの成立と分裂のあらまし”, <http://www.geocities.jp/acaradisco55/Taikou/science127.html>
- [4] Wikipedia; “国際標準模式層断面及び地点”, <https://ja.wikipedia.org/>
- [5] 文部科学省; “定義集”, http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2012/10/04/1325048_3.pdf
- [6] J・デューイ; “民主主義と教育”, 春秋社 (1950)
- [7] 文部科学省; “米国教育使節団報告書(要旨)”, http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/others/detail/1317998.htm
- [8] 永井道雄; “近代化と教育”, 東京大学出版会 (1969.10)
- [9] 国土地理院; “地図と測量の科学館”, <http://www.gsi.go.jp/MUSEUM/>
- [10] 国土地理院; “出前講座”, <http://www.gsi.go.jp/DEMAE/demae.htm>