

原 著

地球磁場強度とマイワシ *Sardinops melanostictus* 資源量の
長期変動に関する研究爲石 日出生^{*1,#} 八木 信行^{*1}^{*1} 東京大学大学院農学生命科学研究科, 〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1

現所属: 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻, 〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1

2022年5月24日受付, 2022年12月23日採録

Abstract

It is widely known that sardine have population cycles, and that the peak of their populations comes approximately every 60 years for multiple sardine species in distant ocean regions in the world. Until present, although various environment factors, such as oceanographic and climate conditions, were studied to explain the population cycles of sardine resources, Earth's outer liquid core has not been the subject of the study. The fluctuation of Earth's outer liquid core is not able to be directly observed. Available data are those obtained indirectly through the ray of geomagnetism from the Earth's outer liquid core. In this study, we used the geomagnetic data, and found out the followings: (i) a statistically significant correlation was identified between the Index of Geomagnetic Intensity (GEOM) and the Index of Sardine Scale Deposition Rate (SSDR: from 1840 to 2010) ($R^2=0.394$, $p=4.029E-20<0.001$) and (ii) a statistically significant correlation was also identified between the Index of GEOM and the Sardine Catch Volume in Japan (SCV: from 1910 to 2010) ($R^2=0.243$ ($p=1.61E-07<0.001$)). Consequently, it can be argued that the fluctuation of geomagnetic intensity from Earth's outer liquid core is one of the important factors that explain population cycles of sardine resources. Furthermore, we examined the variation of sardine resources back to 3000 years, 10,000 years and 800,000 years by using fluctuations of the geomagnetic intensity. As a result, in addition to the 60-year population cycle, we have found another population cycle that has population peaks in approximately every 300 years.

Keywords: Earth's liquid outer core, Geomagnetic intensity, Sardine scale deposition rate, Diatom temperature index

1. はじめに

人類の人口増加が言われている中、食糧資源の安定供給は重要な課題である。多くの魚種の中でマイワシは生産性が最も高く、養殖業並びに家畜の餌にもなり水産業全体の繁栄に影響し、数百年単位での資源管理や予測をする必要がある。このためマイワシは、持続可能性のある魚種として漁獲動向が注目される。

マイワシの漁獲量は、世界中の海域でその増減の周期と位相が一致する傾向を持つことが多くの論文で指摘されている (Kawasaki, 1983; Zupanovich, 1986; Chavez *et al.*, 2003; de Souza Moraes *et al.*, 2012; Oozeki *et al.*, 2019)。また、これらの論文では、地球規模の漁獲量の増減が資源量の増減に比例するものとして取り扱われ、本論文もこれに従った。そのマイワシ資源の長期変動の原因となる環境要因の研究は過去多く存在し、例えば北半球30°–90°Nの地上気温の長期変動とマイワシ漁獲量の関連 (Cushing, 1975)、杉の木の年輪から得た長期の気候変動とマイワシ漁獲量との関連 (平本, 1996)、さらに木の年輪から北アメリカの北西沿岸の気温 (40°–50°N, 130°–110°W) を1600–1990年まで抽出しマイワシの漁獲量と正の相関があることを発見している (Yasuda *et al.*, 2001)。海洋定点観測から得た水温長期変動とマイワシ漁獲量 (友定, 1988)、黒潮流路の長期変動とマイワシ漁獲量との関係 (青木ら, 1992)、PDO (pacific decadal oscillation) の変動とマイワシ漁獲量との関係 (高須賀, 2007; 友定, 2008) などがある。このように気温

の長期変動など気候変動、PDOの水温長期変動、NPIの気圧長期変動、黒潮変動など海流長期変動など、その多くが地球規模の流体要因として述べられている。

その中で、これまで関連が考えられてこなかったグローバルスケールの流体として地球深部の地球流体核 (外核) があり、これに関しても近年マイワシの漁獲変動と地球自転速度変動との関係を述べてきた (Tameishi *et al.*, 1989; 爲石ら, 2022)。地球自転速度変動の記録はわずか350年間しかなく、地球自転速度とマイワシ漁獲量の数十年スケールの変動との関係は議論できるが、マイワシの発生が260–340万年前 (浅沼ら, 2001) であることに比べれば、数百年～数千年オーダーの長期環境要因までは、十分に議論できていない。なお、46億年前の地球誕生以降の33–42億年前から存在する地球流体核の変動は、マイワシ発生からの長期変動を追える可能性のある流体環境と言える。

現在において流体核の変動を直接観測することは不可能であり、地磁気の変動を通して推定している (Holme & Viron, 2005)。この地磁気の変動は、堆積物から古地磁的に77万年前まで精度の高いデータが得られている (Guyodo & Valet, 1999)。地磁気変動には、約60年周期の変動が存在することが示唆されており (Currie, 1973a; Currie, 1973b; Braginsky, 1972; Roberts *et al.*, 2007)、マイワシ資源変動の60年周期説 (爲石ら, 2022) と時間スケールが一致している。また、地磁気が気候に関係しているとする研究があり (Hyodo *et al.*, 2011)、一方におい

て前述のとおりマイワシ資源は気候変動と関係していることから、地磁気はマイワシ資源の環境要因として関係する可能性があると考えられる。しかし、両者の関係を研究した例はまだない。

本論文の目的は、環境要因として唯一長期に亘って測定および推定記録のある地磁気変動の原因である地球流体核の変動とマイワシ資源の長期変動との関係を解明することにある。さらに、この地磁気との関係を明確にし、地球規模でのマイワシの長期変動の動向を考察することによって、今後のマイワシ資源の管理に役立てることにある。なお、マイワシ資源は数十年の変動を繰り返すので漁獲量は慣例的に資源量を代表し、堆積物の量も数百年の時間の経過から堆積物の多い時代は資源量も多いとしている (Kuwae *et al.*, 2017)。

2. 材料と方法

2.1 地球磁場の地磁気データ (Index of GEOM)

マイワシ資源の変動サイクルと同じ約60年の周期 (時間スケール) を持つ現象として、地磁気があることはすでに述べた。本論文では、流体の環境要因の一つとして地磁気データを参照する。地磁気は地球内部で変動する流体核の状態を示すデータとして捉えることができ、今回のマイワシ漁獲量 (資源量) との相関を検討するために、漁獲量のある1910~2010年の地磁気データを利用した。その長期の傾向を明確にすることは、マイワシ長期資源量変動予測や資源管理を行うために重要である。なお、地磁気データは1840~2010年の170年間を通して全体的に弱まる傾向にある。その傾向の中でも、弱まる傾向が小さくなっている時期、または弱まる傾向が大きくなっている時期などの変動がみられる。これらの変動傾向を明確にするために、磁場強度変化から線形トレンドを差し引いた値を求め、それを増幅することによって毎年のデータを指数 (地磁気モーメント指

数; index GEOM) として抽出した。

一方、マイワシの発生が260~340万年前の新第三紀鮮新世である (浅沼ら, 2001) ことから、マイワシ資源の変動はできるだけ過去に遡って推測を試みた。地磁気変動に関する情報として、堆積物の磁化から推定される古地磁気強度データが利用でき、現在からマツヤマブリュンヌ地磁気逆転期までの77万年頃までは比較的正確に地磁気強度が推定されている (Guyodo & Valet, 1999)。この時間スケールを考慮し、データを1万年毎に抽出した。

2.2 資源量としてのマイワシの漁獲統計値 (1910年以降) データ

日本で漁獲統計がとられて以降 (農林水産省漁業・養殖業生産統計; 1910~2020)、マイワシ漁獲の豊漁期は、直近の2020年までに豊漁期の兆しの時期を含めると3回存在し、1920年から1940年の21年間を1回目、1970年から1990年の21年間を2回目、2011年から2020年の10年間を3回目とし、豊漁時代が3回存在している。また、豊漁期の地球規模の同期性・同位相性については、黒潮が流れる太平洋北西漁場のマイワシ資源は、カリフォルニア海流が流れる北太平洋東部漁場、および南太平洋のフンボルト海流が流れる南太平洋東部ペルー沖漁場では、一部小型浮魚においてその同周期性が崩れている魚種もみられているが、少なくとも2010年までは環太平洋で同期する傾向を維持している (Chavez *et al.*, 2003; Oozeki *et al.*, 2019)。さらに、大西洋でも南米ブラジル沿岸のブラジル海流域 (de Souza Moraes *et al.*, 2012)、スペインのビゴ沖漁場や地中海のアドリア海漁場 (Zupanovich, 1986) などの漁場において、その漁獲量の増減の周期と位相が地球規模で一致する傾向を持つことが指摘されている (Kawasaki, 1983)。

Table 1 Sardine scale deposition data (SSDR; 1840–2010)

year	Index SSDR	year	Index SSDR	year	Index SSDR	year	Index SSDR	year	Index SSDR	year	Index SSDR	year	Index SSDR	year	Index SSDR
1840	120	1860	70	1880	36	1900	38	1920	81	1940	62	1960	1	1980	221
1841	122	1861	67	1881	25	1901	39	1921	77	1941	65	1961	6	1981	211
1842	120	1862	64	1882	22	1902	38	1922	73	1942	68	1962	11	1982	201
1843	118	1863	61	1883	19	1903	36	1923	69	1943	64	1963	16	1983	191
1844	114	1864	58	1884	16	1904	34	1924	65	1944	61	1964	21	1984	181
1845	94	1865	55	1885	13	1905	32	1925	61	1945	59	1965	26	1985	171
1846	114	1866	48	1886	10	1906	29	1926	57	1946	49	1966	31	1986	161
1847	124	1867	44	1887	7	1907	26	1927	53	1947	39	1967	36	1987	151
1848	136	1868	45	1888	4	1908	23	1928	49	1948	29	1968	41	1988	141
1849	138	1869	42	1889	1	1909	20	1929	45	1949	19	1969	46	1989	131
1850	136	1870	39	1890	3	1910	19	1930	46	1950	9	1970	48	1990	108
1851	129	1871	37	1891	7	1911	18	1931	44	1951	8	1971	68	1991	98
1852	122	1872	35	1892	11	1912	17	1932	42	1952	7	1972	88	1992	88
1853	115	1873	33	1893	15	1913	11	1933	45	1953	6	1973	108	1993	78
1854	108	1874	31	1894	19	1914	21	1934	48	1954	5	1974	128	1994	68
1855	101	1875	32	1895	23	1915	31	1935	51	1955	4	1975	148	1995	58
1856	94	1876	33	1896	27	1916	41	1936	54	1956	3	1976	168	1996	48
1857	86	1877	34	1897	31	1917	51	1937	57	1957	2	1977	188	1997	38
1858	79	1878	35	1898	35	1918	61	1938	60	1958	1	1978	208	1998	28
1859	73	1879	36	1899	37	1919	71	1939	63	1959	1	1979	216	1999	20

The data set is configured as a table based upon Kuwae *et al.*, 2017.

2.3 別府湾鱗堆積物 SSDR (Sardine scale deposition rate) によるマイワシ資源量データ

1910年以降はマイワシ漁獲記録があり資源変動傾向を追うことが可能であるが、それ以前になると資源量を示すデータとして漁獲記録も存在しないので、別府湾の海底コアから柱状堆積物の中のマイワシの鱗の量を計測し指数化することで資源量変動とした。この鱗堆積指数の変動は、豊後水道の資源量を示すばかりでなく太平洋の北西部から中央・北東部を代表している (Kuwaie *et al.*, 2017)。この指数として1840~2010年は、毎年の別府湾鱗堆積物 (SSDR; Kuwaie *et al.*, 2017) データを使用した (Table 1)。

2.4 地磁気変動とマイワシ資源量変動との相関分析

地球磁場変動が地球の気候に関連する可能性があることは、すでに知られている (Courtilot *et al.*, 2007)。マイワシ資源変動も気候の影響を受けることから地磁気とマイワシ資源の対応関係を検討し、地球流体核が地磁気を通してマイワシ資源に関係していることを解明する。また、長時間に亘る古地磁気データが存在していることから、この磁気モーメント指数とマイワシ資源としての漁獲量変動および過去約3000年のマイワシ豊凶を指標とした別府湾の SSDR (Kuwaie *et al.*, 2017) との相関を検討し考察した。

ここで注意すべき点は、過去数百年に亘るマイワシ資源変動と地磁気変動の長期傾向を同時対応する点にある。すなわち、①地磁気の変動指数、②海底コアの堆積物によるマイワシ推定資源量との単位の異なるものを同時に比較する点にある。これに関しては、地磁気は時間経過から地球規模の指数変動で表現される。また、マイワシ資源は数量と空間の2点に分け、(1)マイワシの鱗

の堆積物の多い年は資源量も多く数千年の時間の経過の堆積物指数として表現し、(2)空間的にはマイワシ資源の増加期には「相変異」と言われ、分布域が内湾を含め日本周辺から太平洋全域に広がり、地磁気変動と同様に地球規模に分布するようになる傾向がある。いずれにしても、すべてが指数として表現され、また時間的にも長期的な傾向を見るものであることから、指数のグラフとして表現し比較した。

2.5 磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ資源量 (漁業生産量・SSDR) の疑似相関について

地球自転速度も地磁気変動も地球流体核変動が起源であることから、マイワシ資源と地磁気変動との関係は、自転速度変動を媒介にした疑似相関が考えられる。そこで、①マイワシ漁獲量 (SCV: 資源量) と地磁気の場合は、SCVと自転速度の相関において自転速度の要因を除いた残差と、地磁気と自転速度の相関から自転速度要因を除いた残差との、両方の残差の相関を求めた。また、②マイワシ堆積資源量 (SSDR) と地磁気の場合も、SSDRと自転速度の相関から自転速度の要因を除いた残差と、地磁気と自転速度との相関において自転速度の要因を除いた残差との両方の残差の相関を求めた。

3. 結果

3.1 磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ資源量 (漁業生産量・SSDR) の変動との相関

磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ漁獲量 (資源量: SCV) 1910~2010年までの変動傾向、および1840~2010年までのマイワシ堆積量指数 (SSDR) の傾向を Fig. 1 に示した。

これによると index GEOM の磁気モーメント指数が小

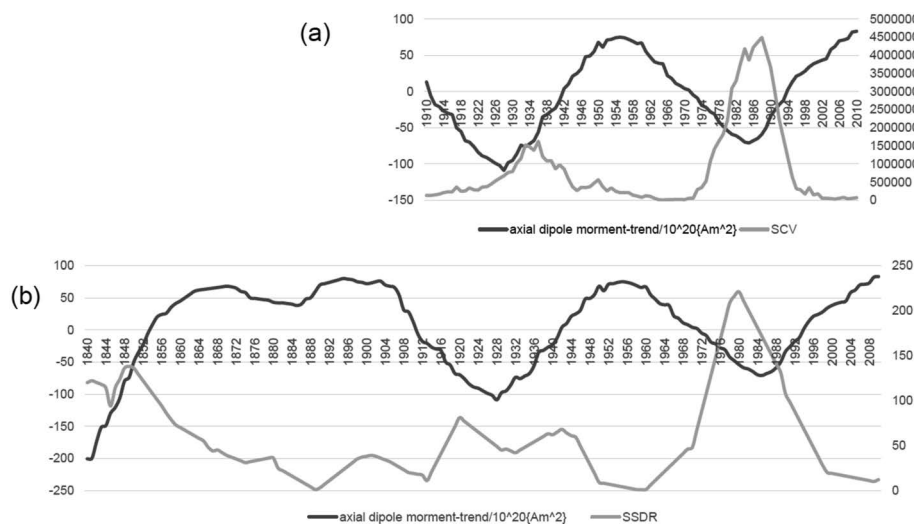


Fig. 1 Long-term relationship between index of earth's geomagnetic intensity (index of GEOM) and Japanese sardine catch volume (SCV) 1910–2010(a). Long-term relationship between Index of Earth's Geomagnetic Intensity (the Index of GEOM) and Japanese Sardine Scale Deposition Rate (SSDR) 1840–2010(b). The left vertical axis indicates the Index of GEOM, the right axis indicates Sardine Catch Volume SCV(a), and SSDR(b). Black line represents variation of the Index of GEOM, dark line shows variation of SCV(a) and SSDR(b). These figures show opposite trends between Index of GEOM and SCV(a), SSDR(b). Sources: SCV data is from Statistical Information Department of Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 1984–2014, Annual Statistics of Fishery and Fish Culture. And Japan fisheries information service center, 2021. Tsunagaru information, Osakana, <http://www.osakana-hiroba.jafic.jp/>. Index of GEOM is from Geomagnetic observatory, 2020. Website of Japan Meteorological Agency, <http://www.kakioka-jma.go.jp/>

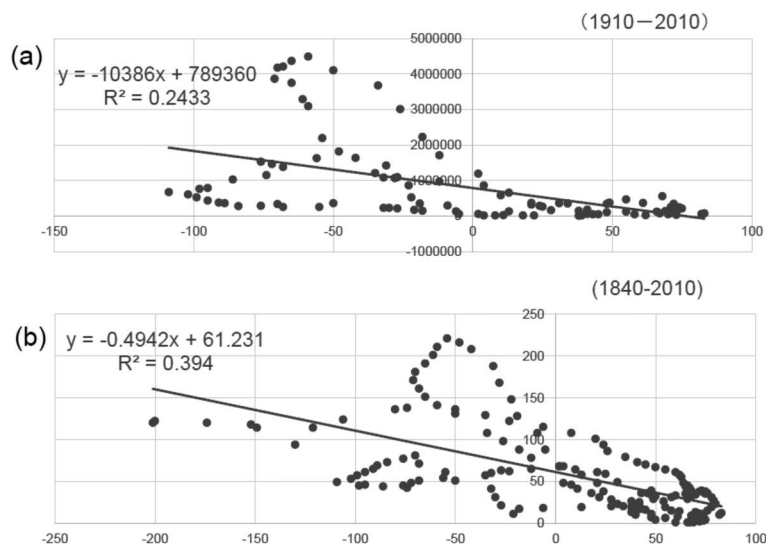


Fig. 2 Relationship between the Index of Earth's Geomagnetic Intensity (Index of GEOM; horizontal axis) and (a)Japanese Sardine Catch Volume (SCV; vertical axis), (b)Sardine Scale Deposition Rate (SSDR; vertical axis). (Data; as same as Fig. 1)

Table 2 Relationships between LOD (length of day; 5-yr mean), SCV (sardine catch volume), SSDR (sardine scale deposition rate), NPP (north pacific primary production), PDO (pacific decadal oscillation), NPI (north pacific index), AAM (atmospheric angular momentum) and index GEOM (geomagnetic intensity). R of C.C. represents the relationship of correlation coefficient

	LOD(5-year mean) (1951-1972)	SCV (1910-2010)	SSDR (1840-2010)	NPP (1948-2002)	PDO (1901-2010)	NPI index (1901-2010)	AAM(5-year mean) (1961-1998)
GEOM							
R of C.C.	0.733398*	0.493203 *	0.627687 *	0.328756	0.306663	0.177505	0.428773*
R ²	0.537874	0.24325	0.393991	0.10808	0.094043	0.031508	0.183846
p-value	p=0.0001<0.001	p=1.606E-07<0.001	p=4.029E-20<0.001	p=0.014<0.05	p=0.001<0.005	p=0.064<0.1	p=0.007<0.01

*Mark indicates p-value less than 5 percent (It means significance level).

さくなる傾向（地磁気が弱くなる傾向）を示した時期には、マイワシの漁獲量および堆積量指数は増加する傾向がみられ、逆に磁気モーメント指数が大きくなる傾向（地磁気が強くなる傾向）を示した時期には、マイワシの漁獲量および堆積量指数は減少する傾向を示した。

さらに、地磁気モーメント指数とマイワシ資源量との回帰分析を行ったところ、磁気モーメント指数とマイワシ漁獲量（資源量：1910～2010）変動は有意な相関を示した（決定係数 $R^2=0.243$, $p=1.61E-07<0.001$ ）。その相関式は $y=-10386x+789360$ （ただし、 x は地磁気モーメント指数、 y はマイワシ漁獲量）であった。②磁気モーメント指数とマイワシ堆積資源量（SSDR: 1840～2010）でも有意な相関を示した（決定係数 $R^2=0.394$, $p=4.029E-20<0.001$ ）。その相関式は $y=-0.4942x+61.231$ （ここで、 y はマイワシ堆積資源量）を示し、両者ともに負の相関であった（Fig. 2）。

3.2 磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ資源量 (漁業生産量 SCV・SSDR) の疑似相関の結果

磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ資源量 (漁業生産量 SCV・SSDR) とは、地球自転速度 (LOD; Length of day) を媒介にした疑似相関の可能性を検証した。その結果、① LOD 要因を除いた残差の index GEOM とマイワシ漁業生産量 SCV とは有意な相関を示した (決

定係数 $R^2=0.704$, $p=1.07E-06<0.001$)。また、② LOD 要因を除いた残差の index GEOM とマイワシ SSDR も有意な相関を示した (決定係数 $R^2=0.443$, $p=0.0007<0.001$)。以上のことから、マイワシ資源 (SCV, SSDR) と地磁気は、統計上の計算から LOD を媒介にした疑似相関でないことを確認できた。

4. 考察

4.1 磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ資源量 (漁業生産量・SSDR) の相関に関する考察

結果からは、磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ漁獲量 (SCV) および磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ堆積資源量 (SSDR) の両者とも有意な相関があることが発見された。これについての過去の報告はなく、新しい発見といえる。

さらに、地球流体核から派生する地磁気強度は、地球自転速度変動と関係していることはすでに研究されており (Holme & Viron, 2005), 本研究においても決定係数 $R^2=0.5379$ ($p=0.0001<0.001$) の有意な相関が認められた (Table 2)。

これらのことは、すでに論述されている地球自転速度がマイワシ漁獲量 (資源量) と関係した (Tameishi *et al.*, 1989; 爲石ら, 2022) ことと同様に、地磁気変動もマイ

ワシ資源に関係しており、両者とも地球流体核が起源であることが原因となっている。

このことは、地球自転速度変動は流体核の変動から派生しており、地磁気も同様にこの流体核から派生しているので、両者は流体核変動に起因する点で共通している。また、地磁気も流体核から起因していることで、マイワシ資源の変動が地球自転速度による大気角運動量の変動や海洋の変動と関係している(爲石ら, 2022)のと同様に、地磁気の変動もマイワシ資源と有意な相関を示したものと考えられる。

4.2 餌生物の基礎生産量からのマイワシ資源量変動と地球磁場変動との関係

北太平洋中央海域において、水温変動を示す指数と

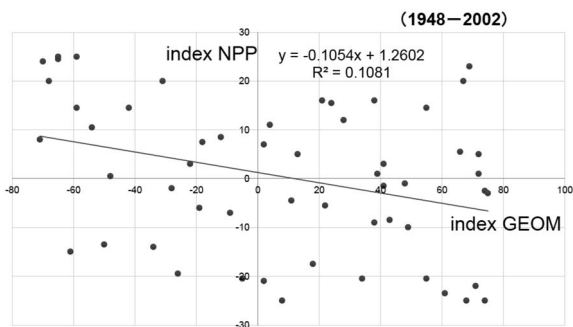


Fig. 3 Relationship between the Index of Earth's Geomagnetic Intensity (Index of GEOM; horizontal axis) and North Pacific Primary Production (NPP; vertical axis). (Data: same as those used for Fig. 1 and Tameishi *et al.*, 2022)

して PDO (pacific decadal oscillation; 太平洋十年振動指数) が使用され(野口ら, 2018), この PDO は北太平洋中央海域の基礎生産量 (NPP; North pacific primary production) の経年変化との間に有意な相関 ($R^2=0.4883$, $p<0.001$; 爲石ら, 2022) が存在することが既存研究で報告されている。くわえて NPP がマイワシ資源の長期変動を左右することも、すでに述べた(爲石ら, 2022)。また、このマイワシ漁獲量(資源量)は60年周期の変動を示すことも報告されており(坪井, 1987-a, 1987-b, 1988; Baumgartner *et al.* 1992; 杉本ら, 2005; 爲石ら, 2022), 地球自転速度変化の60年周期(爲石ら, 2022)と同様に、この60年周期には地球流体核の変動が関係していると考えられる (Buffett, 2014)。さらに、磁気強度変動は、古地磁気学の発展により77万年前からの長い変動が分かっているが、地球自転速度変動はせいぜい500年間が計算されている程度である。

また、結果からマイワシ資源変動がこの地磁気変動と有意な負の相関があることが示された。この理由としては、マイワシ資源変動が北太平洋中央海域の水温指標である PDO 指数や気圧・気温指標である NPI 指数と関係していることはすでに述べており(爲石ら, 2022), これら PDO と NPI は両者とも基礎生産量 NPP との相関は高い (PDO: $R^2=0.49$ ($R=0.70$), $p<0.001$; NPI, $R^2=0.62$ ($R=0.79$), $p<0.001$.) ことが分かっている(爲石ら, 2022)。一方、自転速度変動 (LOD) と PDO と NPI とは相関が高く、LOD と地磁気強度指数 (GEOM) との相関も高いので(爲石ら, 2022), 地磁気強度の変

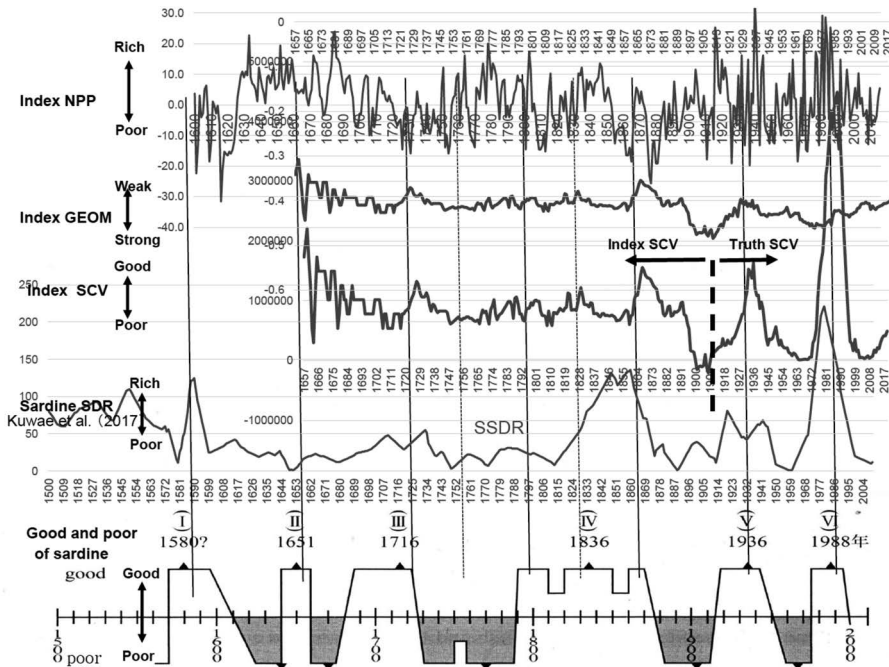


Fig. 4 Relationship between NPP, index GEOM, SCV, SSSDR, Good and poor of sardine. (Data; same as those used for Fig. 1 and Tameishi *et al.*, 2022)

The Index of Earth's Geomagnetic Intensity (Index of GEOM) shows correlations not only with the Index of Japanese Sardine Catch Volume (SCV; middle), but also Japanese Sardine Scale Deposition Rate (SSDR; 7-yr mean) from 1500 to 2010 (Kuwaie *et al.*, 2017). Furthermore, the Index GOEM also shows correlations with modified Japanese Sardine stock status "good and poor periods" from 1560 to 2020 compiled by Sugimoto *et al.*, 2005. Vertical solid line means the good years.

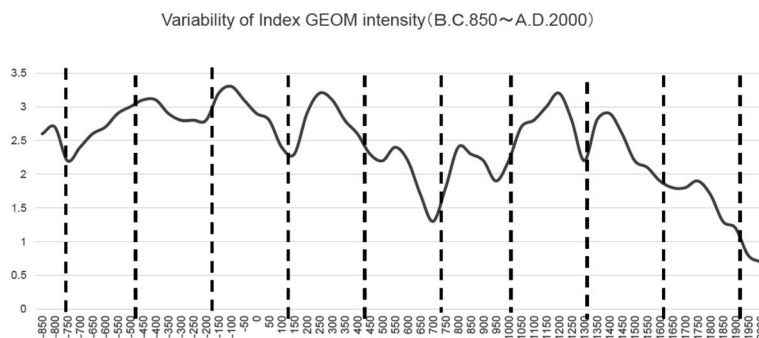


Fig. 5 Variability of the Index of GEOM intensity (B.C.850–A.D.2010). Vertical dotted line indicates the weak intensity point of GEOM. Approximately 300-year cycles can be identified. The vertical dotted lines correspond with the vertical lines of Fig. 6.

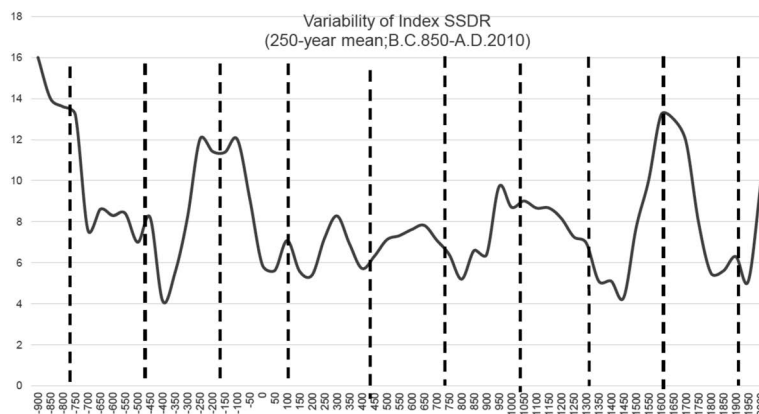


Fig. 6 Variability of Index of SSSR (B.C.850–A.D.2010)

Vertical dotted line indicates the high catch volume period of the Index of SSSR. Approximately 300-year cycles can be identified. The vertical dotted lines correspond with Fig. 5.

動は基礎生産量 (NPP) との相関が考えられる。しかし、実際には $R^2=0.1081$ と相関がないとも受け取られるような非常に弱い負の相関であった (Fig. 3)。しかし、Fig. 4 の1660年以降の長期傾向の動向からは、地磁気強度指数とNPP指数とが同じ傾向であることや有意性のある ($p=0.014<0.05$) とも推察される。これらの結果に関しては、今後の研究が待たれる。

なお、さらに長期変動の古地磁気学分野においては、450万年前から現在まで珪藻温度指数は明らかにされており (小泉, 2011)、特に77万年前 (深度400.2m) の地磁気逆転時には地磁気強度が弱まっており、同時に海面が高くなる間氷期に当たり、珪藻類の割合も高いことが示されている。このことは、地磁気強度が弱まる時期は、温暖化となり海水準プロキシ (痕跡の代理指標) が高くなる間氷期に当たり、珪藻類は逆に多くなることを意味している (Hyodo, *et al.*, 2006; Kitaba, *et al.*, 2013)。これは、上述の地磁気変動とNPPとの関係が負の相関になることと一致している。

以上のことから地磁気変動は、マイワシの餌となる珪藻類を主体とする基礎生産量変動に関係することによって両者の関係が裏付けられ、地磁気変動とマイワシ資源変動とが負の相関を示したものと考察される。

4.3 磁気モーメント指数 (index GEOM) とマイワシ資源量 (漁業生産量・SSDR) の周期性と長期変動

地磁気強度の60年の周期に関してはすでに述べたが、さらに長期の周期を検討する。Fig. 5は、B.C.850年～A.D.2000年までの地磁気強度を示した図であり、若干の例外を除き磁気強度の弱い時期はB.C.770年、B.C.470年 (例外)、B.C.170年、A.D.130年、A.D.430年、A.D.730年、A.D.1030年、A.D.1330年、A.D.1630年、A.D.1930年付近にあり、地磁気強度に60年周期以外に約300年の周期性があると推察される。

一方、マイワシ資源量の長期変動をみるために、マイワシ鱗堆積量で示した資源量を3000年に亘って長期傾向を検討した。このために、50年毎のデータを抽出しさらに移動平均し、その傾向をみた (Fig. 6)。その結果、B.C.770年、B.C.470年、B.C.170年、A.D.130年、A.D.430年 (例外)、A.D.730年、A.D.1030年、A.D.1330年、A.D.1630年、A.D.1930年付近に資源のピークが表現され、約300年周期性が認められた。このピーク時期は地磁気強度が弱まる時期 (Fig. 5) と一致し、さらに加 (Kuwaie *et al.*, 2017) が述べているマイワシの300年周期説を支持するものとなった。

さらに、考古地磁気学的に推定された双極子モーメント指数を用いてA.D.2000年～B.C.1万年までの地磁気変動の議論が可能となった (Knudsen *et al.*, 2008)。こ

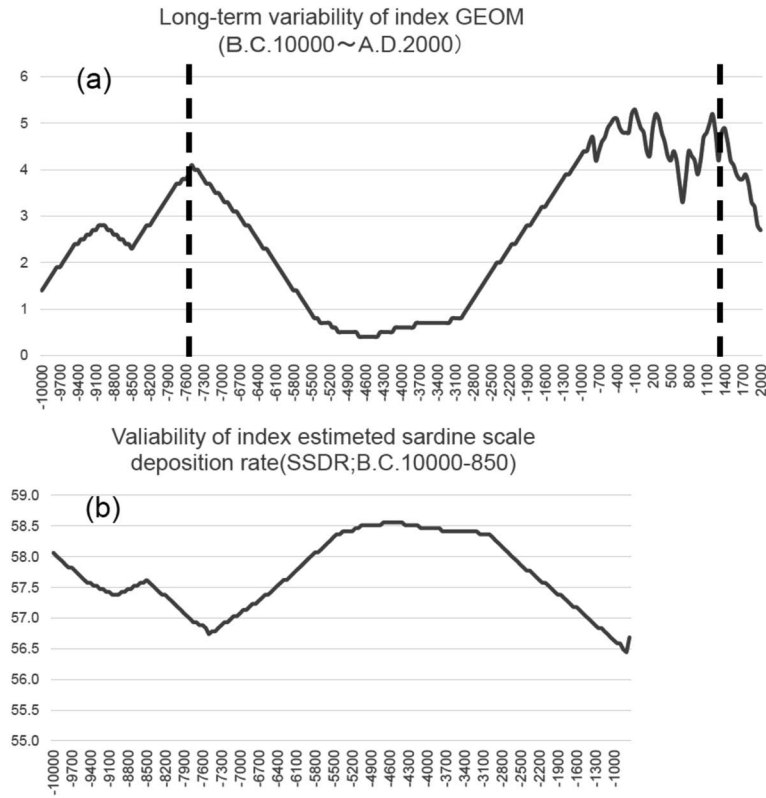


Fig. 7 Variability of index GEOM intensity (a) and estimated SSDR (b)
 Index GEOM have two peak periods (a). Approximately 9000 year interval exists between the previous peak (B.C. 7600 year; black dotted line) and the most recent peak (A.D. 1400year; black dotted line).

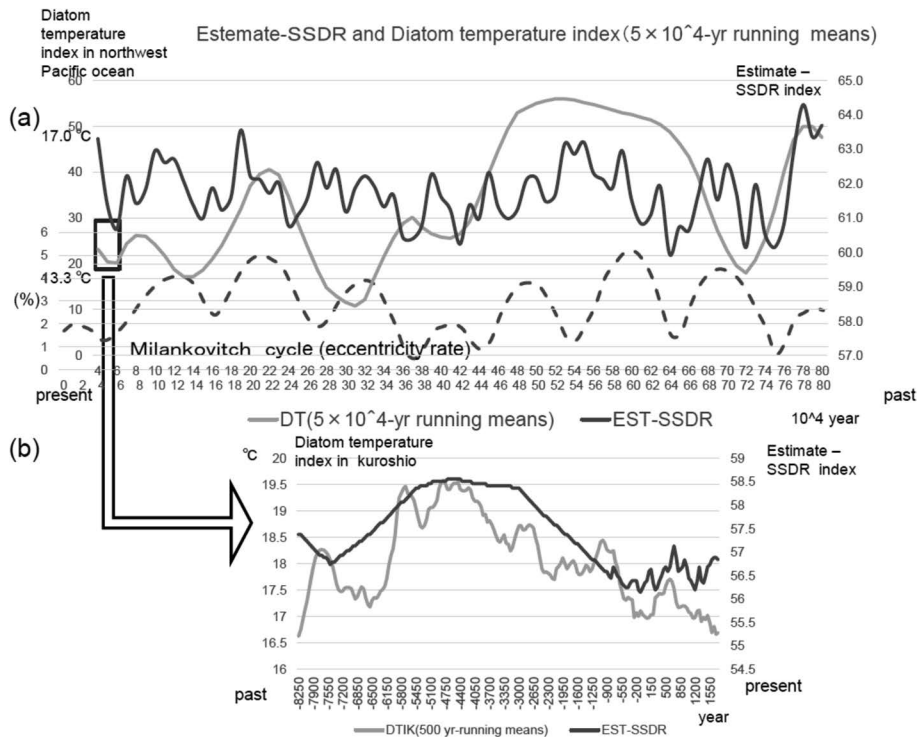


Fig. 8 (b); Super long-term variability of estimated index SSDR (black line). Sardine rich periods mostly corresponds with the trend of Diatom Temperature Index in Kuroshio (DTIK) (dark line; St. 38°-38'N, 153°-50'E). (a) (b); Horizontal axis shows long-term years ((a); B.C.4×10⁴-B.C. 78×10⁴ years: left side of this horizontal axis indicates at present, (b); B.C.8250-A.D.1750: right side indicates at present). Vertical axes show estimated index SSDR (right axis) and diatom temperature index (left axis; off Kashima beach in Japan. 36°-12'N, 141°-47'E). (a); And more dashed line shows Milankovitch cycle (eccentricity rate; Fukuyama, 1992). Sardine rich periods of estimated index SSDR corresponds with the trend of Milankovitch cycle (dissection rate; dashed line)

ここで用いた双極子モーメント指数は、指数=VADM (10^{22}Am^2)-7で定義され、また、VADMは仮想軸双極子モーメント (Virtual axial dipole moment) を意味する。双極子モーメント指数の図から地磁気の強い2つの山が確認され (Fig. 7(a))、この山と山の間隔が約9000年を示した。一方、地磁気強度とマイワシ資源量が負の相関であることから、Fig. 7(b)に示されるように少なくとも B.C.5000年~B.C.1000まではマイワシ資源が豊富であったと推定される。

Fig. 8は、77万年前からの双極子モーメント指数によりマイワシ資源量指数 (縦軸右側の目盛) を推定し、図示したものである。この時代のマイワシ資源変動の原因は、当然ながら人間による漁獲の影響はなく、植物プランクトンの珪藻の餌生物の増減や水温などの自然環境による生き残り、他の生物の捕食関係や自然死亡などによることを意味している。なお、灰色の線は珪藻温度指数の変動を示し (Fig. 8(a); 珪藻温度指数は縦軸の左側目盛)、77万年前からの北西太平洋中緯度 (亜極前線) の海水温変動および餌となる暖流性温暖種の珪藻の変動を復元したものである。海底の珪藻質堆積物を採掘し、暖流系温暖種の割合を珪藻温度指数として指数化している。この指数割合は、珪藻の暖流系温暖種の量を暖流系温暖種と寒流系寒冷種の合計の量で割って抽出している。この指数割合の変動は、同一水塊内の海水温変化や珪藻の暖流系温暖種の占める割合をかなり正確に表し、77万年前からの海水温変動や餌生物環境の変動を示している。また、マイワシが地上に誕生した約300万年前は、鮮新世後期の水温の高い温暖期であり (Cronin & Dowsett, 1991)、珪藻の餌生物環境と共にマイワシの発生に適している時代であったと推察される。このマイワシ発生年代が高い水温環境であったことが原因で、この図からも海水温が高い傾向の時、すなわち珪藻の温暖種が多い時代にマイワシ資源が多くなっている傾向がみられたものと考えられる。

さらに、約1万年前 (B.C.8250-A.D.1750の1万年間) においても、同様の傾向が確認でき (Fig. 8(b))、黒潮水域内の鹿島沖コアから得られた珪藻の表層海水温をウェーブレット変換解析した結果、380-250年周期を示した (小泉, 2011)。マイワシの餌である珪藻の量の増減についても、上記のマイワシ資源の300年周期説を裏付けるものとなった。また、この一万年間の鹿島沖黒潮水域の温暖種の珪藻量から得られた水温変動と推定マイワシ鱗堆積量 (SSDR; 資源量) も有意な相関を示した (決定係数 $R^2=0.6594$, $p=2.01E-48<0.001$; Fig. 9)。なお、約80万年前からの推定マイワシ資源量変動は、その資源量増大期とミランコヴィッチ・サイクル (離心率; 福山, 1992) の増大期とが一致しており、有意な相関 (決定係数 $R^2=0.237$, $p=7.15E-06<0.001$) も認められた。このことにより、ミランコヴィッチ・サイクルと地球流体核 (地磁気) との関連や日射量変動とマイワシの餌生物との関連について、今後の議論する余地として残された。

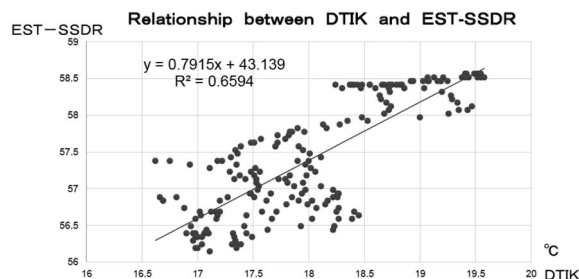


Fig. 9 Correlation between DTIK (Diatom Temperature Index in Kuroshio; horizontal axis) (Koizumi, 1985) and estimated SSDR (Sardine Scale Deposition Rate; vertical axis) for 10000 years

5. まとめ

本研究は、60年の周期をもつマイワシ資源変動に加えて300年周期を有することが示唆されている点に注目し、この長周期変動を誘引する要因として今まででは考えられていなかった自然環境要因として、地磁気変動を取り扱った。以下、本研究をまとめる。

- (1) 地磁気変動は、地球深部の地球流体核から派生し、この流体核は地球自転変動、気候変動、海洋変動を通して、マイワシ長期資源変動と関係していた。
- (2) 地磁気変動とマイワシ漁獲量変動 (SCV) との相関は、今後の研究に待たなければならないが、比較的有意な相関が示した。その決定係数は $R^2=0.243$, ($p=1.605E-07<0.001$) であった。また地磁気変動と別府湾のマイワシ堆積資源量 (SSDR) との相関も有意な相関を示した (決定係数 $R^2=0.394$, $p=4.029E-20<0.001$)。
- (3) この有意な相関を示した理由は、数十年から数千年の時間スケールにおいて、地球流体核の活動が弱まると地磁気強度も弱まり、同時に流体核変動と固体地球 (マントル対流) とのエネルギー保存則により、マントル回転 (地球自転速度; LOD) は速くなる (地磁気と地球自転速度とは負の関係で、決定係数 $R^2=0.54$, $p=0.0001<0.001$ で有意)。なお、地球自転速度とマイワシ資源との関係はすでに述べた (爲石ら, 2022)。
- (4) この相関の物理環境は、① AAM (大気角運動量) と地磁気との相関は、決定係数 $R^2=0.184$ であり ($p=0.007<0.01$)、②水温の指数である PDO と地磁気とは、決定係数 $R^2=0.094$ ($p=0.001<0.005$) であり、両者ともあまり良い相関とは言えなかった。
- (5) マイワシの餌環境の理由としては、①マイワシ成魚が植物プランクトンを直接摂取でき (中井, 1938)、②地球規模の植物プランクトンを北太平洋中央海域の基礎生産量 (NPP) を代表とし (野口ら, 2017)、この NPP は PDO と有意な相関を示した (決定係数 $R^2=0.4883$, $p<0.001$; 爲石ら, 2022) が、③地磁気変動と NPP には、あまり有意な相関がみられなかった (決定係数 $R^2=0.108$, $p=0.014<0.05$)。しかしながら、総合的には④地磁気変動は各種の流体要因との間にその影響に強弱はあるものの、地磁気変動はマイワシ資源の変動を起こす環境要因として重要であることと考察

された。

- (6) 地球規模の流体変動からマイワシ資源変動の周期性は、地磁気変動が60年周期であること、マイワシ資源変動が水温変動にも強く影響を受け、太平洋中央海域の水温変動が50~70年(60年)の周期(見延, 2014)であることもマイワシ資源変動の60年周期説を裏付けた。
- (7) さらに、B.C.850年~A.D.2000年までの地磁気強度およびマイワシ鱗堆積量で示した資源量を3000年の長期に亘って検討した結果、マイワシ資源変動に60年周期のほか300年周期説(Kuwaie *et al.*, 2017)も確認できた。
- (8) この300年周期説は、①鹿島沖コアから得られた珪藻の表層海水温のウェーブレット変換解析により珪藻温度指数が380~250年周期であった(小泉, 2011)こと、②この周期を示したの鹿島コアの珪藻温度指数変動(B.C.8250~A.D.1750の1万年間)は、推定マイワシ鱗堆積量(採掘実測値;加, 2021)と有意な相関(決定係数 $R^2=0.6594$, $p=2.01E-48<0.001$)であったことから、マイワシの300年周期説を裏付けたものと考察される。

謝辞

本研究をまとめるに当たって地球惑星科学特に地磁気に関して細部に亘ってご指導いただきました東京大学地震研究所清水久芳教授、また同大学大学院理学部準教授馬場聖至博士、水産資源分野では東京大学大学院農学生命科学研究科教授高須賀明典博士、愛媛大学沿岸環境科学研究センター准教授加三千宣博士に深甚の謝意を申し上げます。

参考文献

- 青木一郎, 小松輝久, 1992. ニューラルネットによるマイワシ未成魚漁獲量の測. 水産海洋研究, 56, 113-120.
- 浅沼 剛, 松岡 教理, 2001. ニシン目魚類の分子系統学的研究. 弘大農生報, 4, 1-15.
- Baumgartner, T. R., Andy, S. & B. Vicenteferreira, 1992. Reconstruction of the history of Pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millennia from sediments of the Santa Barbara Basin, California. CCOFI Rep., 33, 24-40.
- Braginsky, S. I., 1972. Analytic description of the geomagnetic field of past epochs and determination of the spectrum of waves in the core of the Earth, II. Geomagn. Aeron., 14, 947-957.
- Chao, B. F., Dehant, V. M., Gross, R. S., Ray, R. D., Salstein, D. A., Walkins, M. M. & C. R. Wilson, 2000. Space geodesy monitors mass transports in global geophysical fluids. Eos T. AGU, 81(22), 247-250.
- Chavez, F. P., Ryan, J. & S. E. Luch-Cota, 2003. From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. Science, 299(5604), 217-221.
- Courtillot, V., Gallet, Y. I., Mouël, J. L., Fluteau, F. & A. Genevey, 2007. Are there connection between the Earth's magnetic field and climate? Earth Planet. Sci. Lett., 253(3-4), 328-

339.

- Cronin, T. M. & H. J. Dowsett (eds.), 1991. Pliocene climate. Quat. Sci. Rev., 10(2/3), 1-296.
- 地磁気観測所2020. 気象庁ホームページ, <http://www.kakiokajma.go.jp/>
- Currie, R. G., 1973a. Geomagnetic line spectra-2 to 70 years. Astrophys. Space Sci., 21(2), 425-438.
- Currie, R. G., 1973b. The 60year spectral line in length of day fluctuation. S. Afr. J. Sci., 69, 180-182.
- Cushing, D. H., 1975. Marine Ecology and Fisheries. Cambridge University Press, Cambridge.
- de Souza Moraes, L. E., Marcolino Gherardi, D. F., Katsuragawa, M. & E. Tavares Paes, 2012. Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis* Steindachner, 1879) spawning and nursery habitats: spatial-scale partitioning and multiscale relationship with thermohaline descriptors. ICES J. Mar. Sci., 69(6), 939-952.
- 福山 薫, 1992. 過去200万年における日射量の変化と気候変動モデル. 安成哲三・柏谷健二編著, 地球環境変動ミランコヴィッチ・サイクル, 古今書院, 3-24.
- Guyodo, Y. & J. Valet, 1999. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr. Nature, 399(6733), 249-252.
- 漁業情報サービスセンター, 2021. つながる情報, おさかなひろば. <http://www.osakana-hiroba.jafic.jp/>(令和3年(2021)2月1日最終アクセス).
- 平本紀久雄, 1996. イワシの自然誌「海の米」の生存戦略. 中公新書1310, 中央公論社, 東京, 154-155.
- Holme, R. & O. de Viron, 2005. Geomagnetic jerks and a high-resolution length-of-day profile for core studies. Geophys. J. Int., 160(2), 435-439.
- Hyodo, M., Biswas, D. K., Noda, T., Tomioka, N., Mishima, T., Itota, C. & H. Sato, 2006. Millennial to submillennial-scale features of the Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity transition from Osaka Bay, southwestern Japan. J. Geophys. Res., 111(B2), B02103.
- Hyodo, M., Matsu'ura, S., Kamishima, Y., Kondo, M., Takeshita, Y., Kitaba, I., Danhara, T., Aziz, F., Kurniawan, I. & H. Kumai, 2011. High-resolution record of the Matuyama-Brunhes transition constrains the age of Javanese Homo erectus in the Sangiran Dome, Indonesia. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 108(49), 19563-19568.
- Kawasaki, T., 1983. Why do some pelagic fishes have wide fluctuations in their numbers? Biological basis of fluctuation from the viewpoint of evolutionary ecology. FAO Fish. Rep., 219, 1065-1080.
- Kitaba, I., Hyodo, M., Katoh, S., Dettman, D. L. & H. Sato, 2013. Mid-latitude cooling caused by geomagnetic field minimum during polarity reversal. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 110(4), 1215-1220.
- Knudsen, M. F., Henderson, G. M., Frank, M., Niocail, C. M. & P. W. Kubik, 2008. In-phase anomalies in Beryllium-10 production and palaeomagnetic field behaviour during the Iceland Basin geomagnetic excursion. Earth Planet. Sci. Lett., 265(3-4), 588-599.
- Koizumi, I., 1985. Late Neogene paleoceanography in the western North Pacific. In Heath, G. R., Burckle, L. H., *et al.* (eds.) Init. Repts. DSDP, 86, 429-438.
- 小泉 格, 2011. 珪藻古海洋学. 東京大学出版会, 東京, 67-

- 68.
- Kuwae, M., Yamamoto, M., Sagawa, T., Ikehara, K., Irino, T., Take-mura, K., Takeoka, H. & T. Sugimoto, 2017. Multidecadal, centennial, and millennial variability in sardine and anchovy abundances in the western North Pacific and climate-fish linkages during the late Holocene. *Prog. Oceanogr.*, 159, 86–98.
- 見延庄士郎, 2014. 素過程から数十年スケールに及ぶ海洋大気結合変動の解析研究—2013年度日本海洋学会賞受賞記念論文. *海の研究*, 23(5), 147–169.
- 中井甚二郎, 1938. マイワシの鰓耙の構造と食餌との関係について. *水産研究誌*, 33, 547–561.
- 野口真紀, 千葉早苗, 田所和明, 2018. 北太平洋における10年規模の気候変動と海洋低次生態系の応答. *海の研究*, 27(1), 43–57.
- 農林水産省統計情報部, 1984–2014. 漁業・養殖業生産統計年報. 農林水産省.
- Oozeki, Y., Niquen Carranza, M., Takasuka, A., Ayon Dejo, P., Kubota, H., Tam Malagas, J., Okunishi, T., Vasquez Espinoza, L., Gutierrez Aguilar, D., Okamura, H. & R. Guevara Carrasco, 2019. Synchronous multispecies alternations between the northern Humboldt and Kuroshio Current system. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 159, 11–12.
- Roberts, P. H., Yu, Z. J. & C. T. Russell, 2007. On the 60-year signal from the core. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 101(1), 11–35.
- 杉本隆成, 黒田一紀, 坪井守夫, 加 三千宣, 2005. 資源変動の歴史の変遷—古文書と堆積物コアに基づく海洋環境と生物生産の推定. *月刊海洋*, 422, 563–567.
- 高須賀明典, 2007. 気候変動からマイワシ資源変動に至る生物過程. *日本水産学会誌*, 73(4), 758–762.
- Tameishi, H., Takahashi, H. & H. Shinomiya, 1989. The relationship between long term variations in the stock of the sardine *Sardinops melannactica* and the velocity of earth rotation. *Proceeding of the International Symposium, Long-term Variability of Pelagic Fish Populations and Their Environment*, 311–318.
- 爲石日出生, 八木信行, 清水久芳, 2022. 地球自転速度とマイワシ *Sardinops melanostictus* 漁獲量の長期変動に関する研究. *海洋理工学会誌*, 27(1), 1–14.
- 友定 彰, 1988. 水温の長期変動とマイワシ漁獲量との関係. *水産海洋研究会報*, 52(4), 332–333.
- 友定 彰, 2008. 海洋環境からみた1910年代と70年代におけるマイワシ資源の増加. *月刊海洋* 40(3), 195–202.
- 坪井守夫, 1987-a. 本州・四国・九州を一周したマイワシ主産卵場(1). *東海区水研業績C集*, さかな, 38, 2–18.
- 坪井守夫, 1987-b. 本州・四国・九州を一周したマイワシ主産卵場(2). *東海区水研業績C集*, さかな, 39, 7–24.
- 坪井守夫, 1988. 本州・四国・九州を一周したマイワシ主産卵場(3). *東海区水研業績C集*, さかな, 40, 37–49.
- Yasuda, I., Sugisaki, H., Watanabe, Y., Minobe, S. & Y. Oozeki, 2001. Interdecadal variations in Japanese sardine and ocean/climate. *Fish. Oceanogr.*, 8(1), 18–24.
- Zupanovich, S., 1986. Causes of fluctuation in sardine catches along the eastern coast of the Adriatic Sea. *Anali. Jadranskog Inst.*, IV, 89–401.

* * * * *

Long-term Relationship between the Earth's Geomagnetic Intensity and the Resources of Japanese Sardine (*Sardinops melanostictus*)

Hideo Tameishi*^{1,#}, Nobuyuki Yagi*¹

*¹ Graduate School of Agriculture and Life Science, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

The University of Tokyo Graduate School and College of Arts and Sciences, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

Received: May, 24, 2022, Accepted: 2022, December. 23