

北海道の新第三紀・第四紀更新世の大型植物化石群の示す古気候

成田敦史・大谷彩夏

Key Words

葉相観 (Leaf physiognomy)、北海道 (Hokkaido)、新第三紀 (Neogene)、第四紀 (Quaternary)、大型植物化石群 (Macrofossil flora)、古気候 (Paleo-climate)

1 はじめに

新生代新第三紀は日本海拡大に伴い、日本列島が大陸から分離して現在の位置まで移動したことで知られるダイナミックな時代である。このような新第三紀における日本列島の形成は、日本列島独自の植生形成をもたらす重要なイベントであり、日本列島各地より産出する植物化石群の組成的特徴や含まれる分類群が、次第に大陸との共通性を減じ、より現代の日本列島の植生に近づいてきたことが多くの先行研究で示されている（例えば、棚井 1992；成田 2021）。また、新第三紀の植物化石群とそれらから推定される陸上古気候がどのような状態だったのかを詳細に検討することは、日本列島の植生の成立過程を考える上で極めて重要である（植村 1991；成田 2021）。化石から古気候を復元する試みは、貝化石や、それらと鍾乳石を使った手法（Asami et al. 2021）など多くの先行研究があるが、地質時代の陸上古気候を知るためには植物化石を用いる他はない。そのため、これまで多くの先行研究により大型植物化石群や花粉化石群を用いた古植生と陸上古気候についての検討がなされてきた（例えば、植村 1993；Yabe 2011；成田 2021）。特に葉化石群については、各植物化石群において産出数が比較的多く、さらに葉の外部形態（葉相観）と気候条件が密接に関係していることも知られており（例えば、Wolfe 1978）、葉化石群から定量的な古気候条件についても推定されてきた（例えば、棚井・植村 1988；成田 2021）。しかし、そのような解析が日本列島のすべての葉化石群で行われているわけではなく、特に特定の地域内において、古気候条件の時代的变化を検討した研究は関東での事例（Yabe 2011）や、北海道においては成田（2021）などを除くと限定的である。

そこで本研究では、新第三紀前期中新世～第四紀前期更新世の北海道の植物化石群を対象に葉相観を用いた古気候解析を行い、成田（2021）などの先行研究で示された結果との比較を通して北海道の新第三紀から第四紀

更新世の気候変化について、課題とともに考察する。

2 研究手法および対象とする植物化石群

（1）葉相観による古気候条件の推定方法

化石から古気候を解析する方法はこれまでも多くの先行研究によって示されてきたが、地質時代の陸上古気候を調べるためには植物化石を用いる必要がある（植村 1993など）。植物化石を用いた古気候条件の推定法には、葉化石の表面に残された気孔の密度から推定する方法（Liu et al. 2016など）や、材化石の年輪から調べる方法（Philippe 2023など）もあるが、ここでは最も一般的な植物化石である葉の印象化石および圧縮化石の外部形態、すなわち葉相観を用いた方法で解析した。

葉相観による古気候解析の詳細は植村（1993）、矢部（2002）、成田（2018）などで示されているが、本稿で取り扱っている解析方法について概略を以下に示す。なお、葉相観による古気候解析を行うためには、対象とする葉化石群が、堆積場周辺の複数の植生由来の多数の分類群から構成されている必要があり、20種類以上の分類群（あるいは20形態以上の広葉樹化石）が含まれている必要がある（Wolfe 1993, 1995；植村 1993など）。

LMAによる年平均気温の計算

湿潤条件下の広葉樹の葉は、寒冷な地域ほど鋸歯をもつ葉（鋸縁葉）が多く、温暖な地域ほど鋸縁葉が少ないことが知られている（Wolfe 1978など）。すなわち、温暖地域では鋸歯を持たない葉（全縁葉）が多い。葉化石群中の全縁葉の割合を全縁葉率（E）とよび、それに基づいて地質時代の年平均気温（Mean Annual Temperature：MAT）を算出する方法がLeaf Margin Analysis（LMA）である（Wolfe 1978）。LMAでは、全縁葉率（E）とMATが一次関数の関係になり、その際に用いる式は複数考案されているが、ここでは最も一般的に用いられるWing and Greenwood（1993）による式を次に示す。

$$\text{MAT (}^{\circ}\text{C)} = 0.306 \times E + 1.141$$

なお、ここでいう全緑葉率 (E) とは、対象とする植物化石群の全広葉樹種数における全緑葉をもつ広葉樹の割合のことであり、

$$E = \frac{\text{全緑葉をもつ広葉樹種数}}{\text{全広葉樹種数}} \times 100 (\%)$$

と表せる。このWing and Greenwood (1993) で扱った式のp値 (有意確率) は0.001以下となり、相関係数Rについては $R^2=0.983$ 、標準誤差は 0.788°C であり、信頼性が高く、比較的誤差も小さい算定式である (成田 2018)。

LAAによる年間降水量の計算

降水量の多い地域ほど広葉樹の葉面積が大きくなり、降水量が少ない地域ほど葉面積が小さくなる傾向があることを利用して地質時代の年間降水量を算出する方法がLeaf Area Analysis (LAA) である (Wilf et al. 1998)。Wilf et al. (1998) では、年間降水量 (Mean Annual Precipitation : MAP) の自然対数値を、算定に用いる植物群の葉面積の自然対数値の平均 (MlnA) から求める形となっている。式は次のとおりである。

$$\ln (\text{MAP (cm)}) = 0.548 \times \text{MlnA} + 0.768$$

なお、MlnAは、

$$\text{MlnA} = \Sigma (a_i \text{ pi})$$

である。

ここで a_i とは葉面積の対数値の平均値 (葉面積をその大きさにカテゴリー分けしたそれらの対数値の平均値)、 pi とは各葉面積カテゴリーの葉化石の種数の割合である。なお、この式のp値は 10^{-15} 、相関係数Rについては $R^2=0.760$ 、標準誤差は 0.359cm であり、こちらも信頼性が高く、誤差も極めて小さい数式とされる (成田 2018)。ただし、計算結果については、局所的な水分供給や温度の影響も受けることが指摘されており、計算結果とその解釈には慎重を要する (Royer 2012など)。

CLAMPによる古気候条件の計算

CLAMP (Climate Leaf Analysis Multivariate Program : 気候と葉の多変量解析プログラム ; Wolfe 1993, 1995) は広葉樹葉の葉相観を用いた古気候解析法の一つであり、現在の植生から得られた葉相観データとその地域の気候データをもとに、多変量解析の一手法である正準対応分析 (Canonical Correspondence

Analysis: CCA) を用いて化石群集の葉相観が示す地質時代の気候条件を求める手法である (Wolfe 1995 ; 矢部 2002)。

CLAMPでは、年平均気温 (MAT) や最暖月の平均気温 (Warm Month Mean Temperature : WMMT)、最寒月の平均気温 (Cold Month Mean Temperature : CMMT)、月平均気温が 10°C を越える月の長さ (Length of the Growing Season : GROWSEA)、それらの期間の降水量 (Growing Season Precipitation : GSP)、それらの期間の月間平均降水量 (Mean Monthly Growing Season Precipitation : MMGSP)、最も湿度の高い3ヶ月間における降水量 (Precipitation during 3 Consecutive Wettest Months : 3-WET)、最も湿度の低い3ヶ月間における降水量 (Precipitation during 3 Consecutive Driest Months : 3-DRY)、相対湿度 (Relative Humidity : RH)、比湿 (Specific Humidity : SH)、エンタルピー (Enthalpy : ENTHAL) の11項目の古気候条件が算出される。これらはいずれも陸上古気候を考える際に重要であるが、後述するように、MATとWMMT、CMMTからは植生区分との対応関係が明確になり、降水量関連データやENTHALからは当時の古地理的な状況も推定できる。

なお、かつてCLAMPでは年間降水量 (MAP) の算出も可能であったが、誤差が大きいことが指摘され、現在は直接年間降水量の計算ができる形とはなっていない。

CLAMPデータセットおよびスコアシート、スプレッドシートはすべてウェブ上で公開されており、必要なデータをアップロードすることで解析自体もウェブを通して行うことが可能である (http://clamp.ibcas.ac.cn/CLAMP_Home.html ; 2025年11月現在、セキュリティの関係でWEB上での解析ができなくなっているが、近日中に再び解析可能となる見込みである)。

(2) 対象とする大型植物化石群

北海道内の新第三紀および第四紀更新世の植物化石群のうち、葉相観による古気候条件算出に必要な20種類以上の葉化石の得られた化石群を検討対象とする必要がある (Wolfe 1993, 1995 ; 植村 1993)。それらのうち、広葉樹化石の特徴が明確に分かる図版が示されている化石群として前期中新世の上ノ国植物群、中期中新世前期の虻羅、吉岡の両植物群 (図1) を今回の葉相観による古気候解析の検討対象とした。なお、成田 (2021) ではサキベンベツ、湖南、社名淵、十勝幌加、留辺蘂、タウシュベツの各植物化石群 (図1) の示す古気候データについて既に報告しているが、改めて今回の比較検討対象とした。また、旭川植物群 (図1) のCLAMPの解析結果については、SHとENTHALを除き大谷 (2023MS)

で示されているが、本植物化石群については、LMAによるMATについても改めて計算した。以上の諸データから新第三紀-第四紀更新世の古気候の変化について検討した。今回検討対象とした植物化石群の概要を以下に時代順に示す。なお、各植物化石群の年代やその決定に用いた年代測定法については先行研究をとりまとめた成田(2024)を基に取り扱うこととし、以下では各植物化石群を概ね時代順になるように①~⑩の番号を付してデータや植生の対応関係を明確化する。

①サキベンベツ植物群

報告当時の化石産出層の層序に基づき、前期中新世の化石群とされてきたが(Tanai 1971)、後に検討された微化石から、古第三紀始新世後期ないし前期漸新世の化石群である可能性が指摘されている(林ほか 2018; 成田 2024)。木本ではニレ属(*Ulmus pseudolongifolia*, *U. appendiculata*)が優占し、アスナロビシ属の*Hemitrapa hokkaidoensis*やカエデ属*Acer*、サワグルミ属*Pterocarya*に加え、スズカケノキ属の*Platanus acceroides*、針葉樹としてスイショウ属の*Glyptostrobus europaeus*やメタセコイア属の*Metasequoia occidentalis*など、北海道の古第三紀植物群と共通するものが含まれる。本植物化石群中では全35分類群が認められる。Wolfe(1979)で示されている東アジアの植生区分におけるMixed Mesophytic forestに相当する(成田 2021)。

②上ノ国植物群

ジルコンフィッシュントラック(ZFT、以下同様)から、約23-17 Ma (Ma; 百万年前、以下同様)の前期中新世前期の植物化石群である(Tanai and Suzuki 1963; 成田 2024)。クマシデ属の*Carpinus subcordata*を優占種とし、その他のカバノキ科各属(*Corylus*, *Alnus*, *Betula*)やシナノキ属*Tilia*、ブナ属のアンティポフブナ*Fagus antipofi*など43分類群から構成される。近似現生種の生態を考慮すると高地に生育するものを含む可能性が指摘されている(Tanai and Suzuki 1963)。

③虻羅植物群

ZFTから、約17.1-12.5 Maの中期中新世前期の化石群である(Tanai and Suzuki 1963; 成田 2024)。アンティポフブナ*Fagus antipofi*が優占し、メタセコイア属の*Metasequoia occidentalis*やトウ

ヒ属の*Picea ugoana*などの針葉樹も多く、カエデ属*Acer*やクマシデ属*Carpinus*など50分類群が含まれる(Tanai and Suzuki 1963)。近似現生種の生態を考慮すると、山地斜面あるいは高地に生育していた可能性のあるものが80%以上含まれているとされる(Tanai and Suzuki 1963)。

④吉岡植物群

放射年代値は得られていないが、化石群産出層と周辺層との層序等から中期中新世前期の植物化石群とされる(Tanai and Suzuki 1963; 成田 2024)。ケヤキ属の*Zelkova ungeri*が優占し、クリ属の*Castanea miomollissima*やカエデ属*Acer*など多数の広葉樹に加え、メタセコイア属の*Metasequoia occidentalis*やユサン属*Keteleeria*などの針葉樹も含み、全80分類群から構成される(Tanai and Suzuki 1963)。

⑤湖南植物群

K-Ar年代測定から、約13 Maの中期中新世後期の化石群である(植村 1991; 成田ほか 2012; Narita et al. 2020)。ブナ属のアケボノイヌブナ*Fagus palaeojaponica*を優占種とし、カエデ属*Acer*やカバノキ科(*Betula*, *Alnus*)、トウヒ属*Picea*など、主に葉や翼果の化石33分類群が産出する植物化石群である。そのような組成は、温帯落葉広葉樹針葉樹混交林植生を示す(Narita et al. 2020)。Wolfe(1979)で示されている東アジアの植生区分におけるMixed Northern Hardwood forestに相

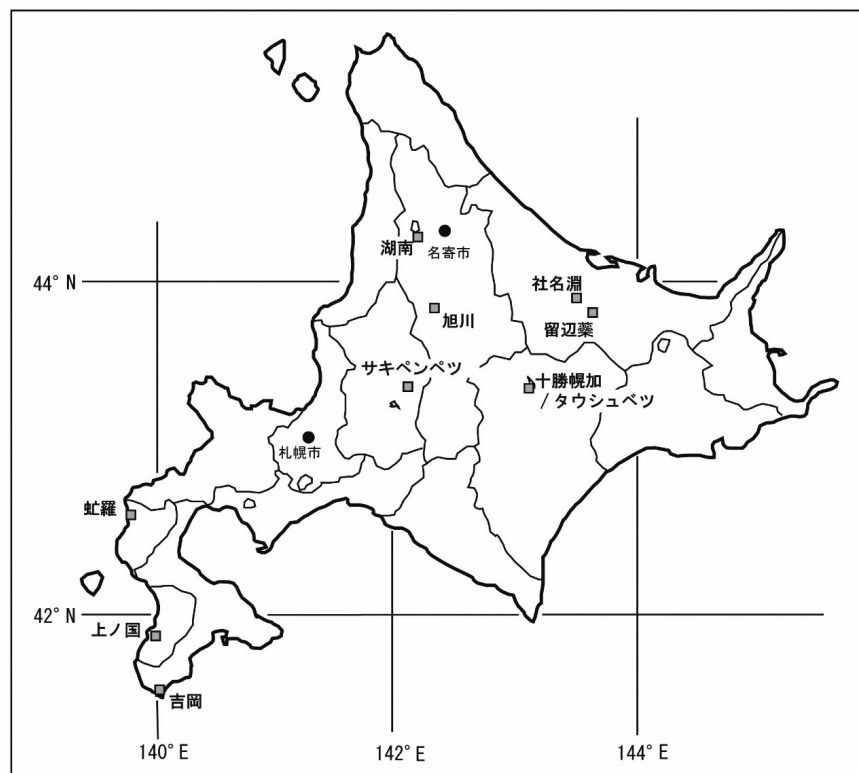


図1 本研究で主に扱う植物化石群の産地。成田(2024)を修正。

表1 葉相観による各植物化石群の示す古気候データ。成田（2021）に加筆。LMAから求めた年平均気温、LAAから求めた年間降植物化石群の名称に付した▲は高標高域または内陸部のデータを反映している可能性があることを示す。

	年代 (統/世)	①	②	③	④	⑤
		中期中新世 前期? 漸新世?	前期中新世	中期中新世 前期	中期中新世 前期	中期中新世 後期
CLAMP, LMA, LAAから推定された古気候条件	標準誤差	サキベンベツ	上ノ国	虻羅▲	吉岡	湖南
MAT(Mean Annual Temperature)[°C]	1.72	8.4	7.6	6.1	9.0	8.2
MAT(Mean Annual Temperature : LMA)[°C]	0.788	7.7	7.0	3.6	8.2	5.1
WMMT(Warm Month Mean Temperature)[°C]	1.80	30.2	20.6	19.5	22.7	20.3
CMMT(Cold Month Mean Temperature)[°C]	2.54	-2.62	-4.3	-6.4	-3.9	-3.14
MART(Mean Annual Range of Temperature)[°C]	-	22.8	24.9	25.9	26.6	23.5
GROWSEA(Length of the Growing Season)[month]	0.85	5.6	5.2	4.6	5.93	5.4
GSP(Growing Season Precipitation)[mm]	318.0	868	933	948	1269	616
MMGSP(Mean Monthly Growing Season Precipitation)[mm]	36.7	151	179	152	183	148
3 - WET(Precipitation during the three Wettest months)[mm]	138.1	531	741	655	682	463
3 - DRY(Precipitation during the three Driest months)[mm]	89.9	395	237	229	266	453
MAP(Mean Annual Precipitation : LAA)[mm]	580	1560	1320	1177	927	1830
RH(Relative Humidity)[%]	8.17	70.35	76.8	70.8	69.1	76.8
SH(Specific humidity) [g/kg]	0.98	6.1	6.5	4.6	5.3	7.25
ENTHAL(Enthalpy) [kJ/kg]	3.5	29.6	30.6	29.7	30.3	30.1

当する（成田 2021）。

⑥社名淵植物群

K-Ar年代測定から、約8.2-6.3 Maの後期中新世の植物化石群である（Tanai and Suzuki 1965；成田 2024）。アケボノイヌブナ*Fagus palaeojaponica*を優占種とし、フジキ属*Cladrastis*、ニレ属*Ulmus*、トウヒ属*Picea*など、主に葉や翼果化石70分類群の産出する植物化石群で、温帯落葉広葉樹針葉樹混交林植生を示すが、やや温暖要素の分類群を含む（Tanai and Suzuki 1965）。Wolfe（1979）で示されている東アジアの植生区分におけるMixed Mesophytic forestに相当する（成田 2021）。

⑦十勝幌加植物群

K-Ar年代測定から、約6.8 Maの後期中新世の植物化石群である（成田・乙幡 2023；成田 2024）。カバノキ属の*Betula miomaximowicziana*を優占種とし、カバノキ科（*Alnus*、*Betula*）、ナナカマド属*Sorbus*、カエデ属*Acer*、マツ属*Pinus*などを含み、主に葉や翼果の化石47分類群が産出する植物化石群である。組成的特徴は温帯落葉広葉樹針葉樹混交林植生を示すが、寒冷地や内陸の植生を示す可能性が指摘されている（成田・乙幡 2023）。Wolfe（1979）で示されている東アジアの植生区分におけるMixed Coniferous forestに相当する（成田・乙幡 2023）。

⑧留辺蘂植物群

放射年代値が得られていないが、化石群産出層と周辺層との層序等から、本植物群は前期鮮新世の植物化石群とされる（Tanai and Suzuki 1965；成田 2024）。アケボノイヌブナ*Fagus palaeojaponica*を優占種とし、カエデ属*Acer*、クマシデ属*Carpinus*、ハンノキ属*Alnus*、ツガ属*Tsuga*、ネズコ属*Thuja*などの葉や翼果化石50分類群の産出する植物化石群で、温帯落葉広葉樹針葉樹混交林植生を示す（Tanai and Suzuki 1965）。Wolfe（1979）で示されている東アジアの植生区分におけるMixed Mesophytic forestに相当する（成田 2021）。

⑨旭川植物群

放射年代値は得られていないが、化石群産出層と周辺層との層序等から、後期鮮新世の植物化石群とされる（大谷 2023MS；成田 2024）。アケボノイヌブナ*Fagus palaeojaponica*を優占種とし、トウヒ属*Picea*、カエデ属*Acer*、わずかではあるがツゲ属*Buxus*などを伴い、主に葉化石34分類群の産出する植物化石群である。組成は、暖温帯ないし冷温帯に分布する広葉樹針葉樹混交林植生を示す（大谷 2023MS）。なお、本植物群からはSHとENTHALを除くCLAMPによる古気候解析データは大谷（2023MS）で示されているため、それらも参考値として引用する。

水量およびCLAMPのWMMTとCMMTの差から求めたMARTをグレーで示した。他の解析結果はいずれもCLAMPによる。

⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	現代				
後期中新世	後期中新世	前期鮮新世	後期鮮新世？	前期更新世 前期					
社名淵	十勝幌加▲	留辺蘂	旭川	タウシュベツ▲	洞爺	天塩	糠平	鉛川	田沢
10.6	8.4	10.0	11.8	8.7	7.7	4.7	3.9	6.8	9.2
9.2	5.7	11.9	4.8	6.7					
23.4	20.1	21.6	26.0	21.8	21.5	19.0	18.6	20.2	22.9
-1.61	-2.47	-0.88	-1.34	-3.83	-5.2	-10.3	-10.7	-5.1	-2.9
25.5	22.5	22.5	27.3	25.6	26.7	29.3	29.3	25.3	25.8
6.6	5.5	6.2	7.3	5.7	5.5	4.5	4.3	5.6	5.7
776	459	511	1617	629	710	590	780	680	1130
171	102	138	270	140	129	131	181	136	198
548	482	419	919	546	470	460	540	490	790
529	169	433	855	203	360	340	500	370	560
2211	1336	1655	3548	1541	1280	1380	1600	1450	2230
75	79.4	78.9	75.5	80.3	75.0	77.0	76.0	75.0	75.0
7.25	6.72	8.3	-	6.86	6.3	7.0	6.0	6.2	6.5
30.28	30.8	30.6	-	30.87	29.7	29.5	29.2	29.6	29.9

⑩タウシュベツ植物群

K-Ar年代測定から、約1.2 Maの前期更新世前期の化石群であり、新第三紀の植物化石群ではないが（成田・乙幡 2023；成田 2024）、新第三紀直後の年代の化石群として本植物群を比較対象として取り上げる。広葉樹ではウダイカンバ*Betula maximowicziana*類縁種を優占種とし、シナノキ属*Tilia*、ヒルムシロ属*Potamogeton*、カエデ属*Acer*、トウヒ属*Picea*などを伴い、主に葉や翼果の化石42分類群の産出する植物化石群で、十勝幌加植物群と同様、温帯落葉広葉樹針葉樹混交林植生を示すが、寒冷地や内陸の植生を示す可能性が指摘されている（成田・乙幡 2023）。Wolfe (1979) で示されている東アジアの植生区分におけるMixed Northern Hardwood forestに相当する（成田・乙幡 2023）。

3 結果

本研究では、新たに②上ノ国、③虻羅、④吉岡植物群の示す古気候条件をLMA、LAA、CLAMPにより算出した。加えて、⑨旭川植物群のLMAによるMATも新たに計算した。それら以外の6つの植物化石群（①、⑤～⑧、⑩）の古気候データについては成田（2021）から示したものを比較のために引用した。

(1) LMAによるMAT

前期中新世の②上ノ国植物群は、広葉樹化石の全縁葉率が約19.2%であったため、MAT（年平均気温）は7.0℃となった（表1）。中期中新世前期の③虻羅植物群と④吉岡植物群ではそれぞれ棚井・植村（1988）で全縁葉率が8%、23%と示されていたため、これらを用いてLMAによる計算を行った結果、それぞれ3.6℃、8.2℃を示した（表1）。また、後期鮮新世の⑨旭川植物群では全縁葉率が12.0%であったため、MATは4.8℃となった（表1）。

(2) LAAによるMAP

前期中新世の②上ノ国植物群のMAP（年間降水量）は1,320mm、中期中新世前期の③虻羅植物群と④吉岡植物群ではそれぞれ1,177mm、927mmを示した（表1）。なお、後期鮮新世の⑨旭川植物群については、後述のCLAMPにより得られた3-WETと3-DRYの差が小さいことから、それぞれの解析値の和を2倍し、3,548mmとして算出している（大谷 2023MS；表1）。

(3) CLAMPによる各古気候条件

②上ノ国植物群のCLAMPの解析結果は、MAT（年平均気温）が7.6℃、WMMT（最暖月の平均気温）が

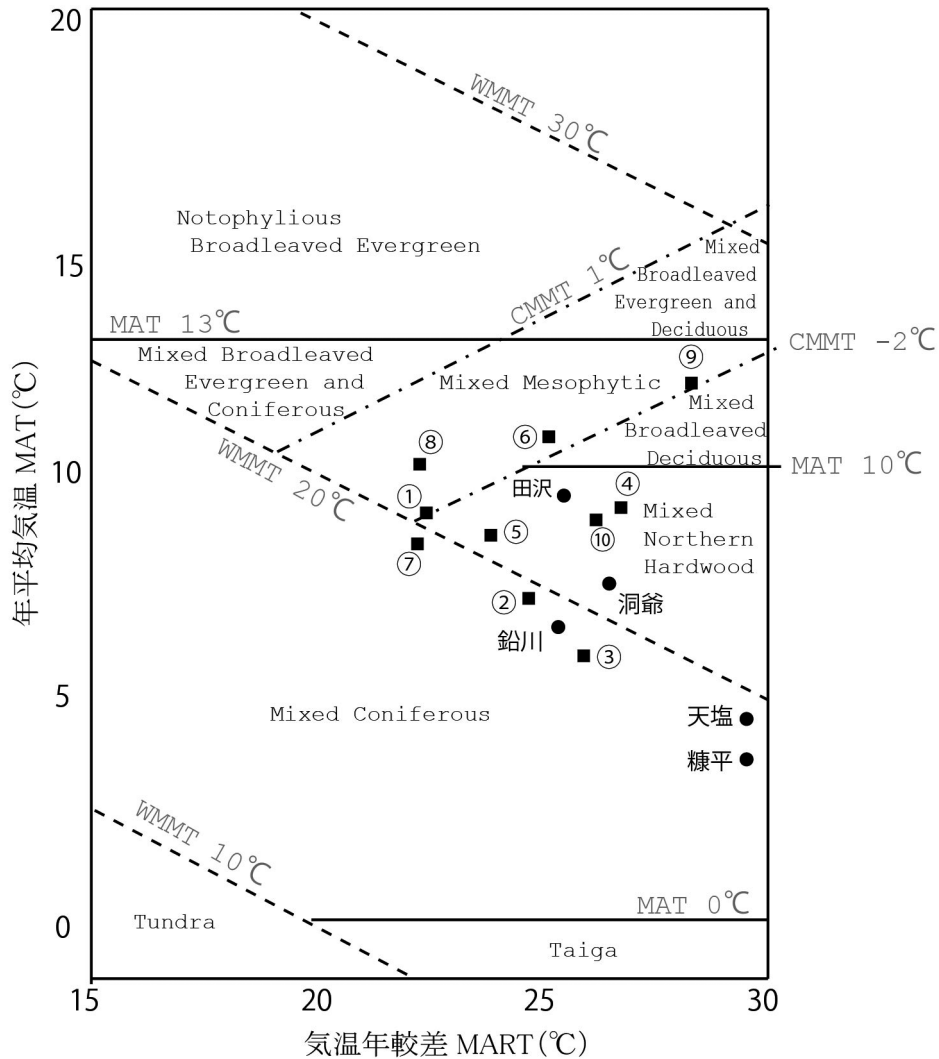


図2 東アジアの植生区分 (Wolfe 1979) における各植物化石群の植生および比較対象とする現代の5地域 (洞爺、天塩、糠平、鉛川、田沢)の植生。
 図中の番号は以下の各植物化石群に対応：①サキベンベツ (漸新世? 中期中新世前期?)、②上ノ国 (前期中新世)、③虻羅 (中期中新世前期)、④吉岡 (中期中新世前期)、⑤湖南 (中期中新世後期)、⑥社名淵 (後期中新世)、⑦十勝幌加 (後期中新世)、⑧留辺蘂 (前期鮮新世)、⑨旭川 (後期鮮新世?)、⑩タウシュベツ (前期更新世前期)

20.6°C、CMMT (最寒月の平均気温) は-4.3°C、GROWSEA (月平均気温が10°Cを越える月の長さ) が5.2ヶ月、GSP (月平均気温が10°Cを越える期間の降水量) が933mm、MMGSP (月平均気温が10°Cを越える期間の月間平均降水量) は179mm、3-WET (最も湿度の高い3ヶ月間の降水量) と3-DRY (最も湿度の低い3ヶ月間の降水量) がそれぞれ741mmと237mm、RH (相対湿度) が76.8%、SH (比湿) が6.5g/kg、ENTHAL (エンタルピー) が30.6kJ/kgであった (表1)。また、CLAMPから直接算出されないが、WMMTとCMMTの差から年較差 (MART) は24.9°Cとなった。得られたMATとMARTからは東アジアの植生区分におけるMixed Coniferous forest (Wolfe 1979) に相当する (図2)。

③虻羅植物群のCLAMPの解析結果は、MATが6.1°C、WMMTが19.5°C、CMMTは-6.4°C、GROWSEAが

4.6ヶ月、GSPが948mm、MMGSPは152mm、3-WETと3-DRYがそれぞれ655mmと229mm、RHが70.8%、SHが4.6g/kg、ENTHALが29.7kJ/kgであった (表1)。WMMTとCMMTの差からのMARTは25.9°Cとなった (表1)。得られたMATとMARTからは東アジアの植生区分におけるMixed Coniferous forest (Wolfe 1979) に相当する (図2)。

④吉岡植物群のCLAMPの解析結果は、MATが9.0°C、WMMTが22.7°C、CMMTは-3.9°C、GROWSEAが5.93ヶ月、GSPが1,269mm、MMGSPは183mm、3-WETと3-DRYがそれぞれ682mmと266mm、RHが69.1%、SHが5.3g/kg、ENTHALが30.3kJ/kgであった (表1)。WMMTとCMMTの差からのMARTは26.6°Cとなった (表1)。得られたMATとMARTからは東アジアの植生区分におけるMixed Northern Hardwood forest

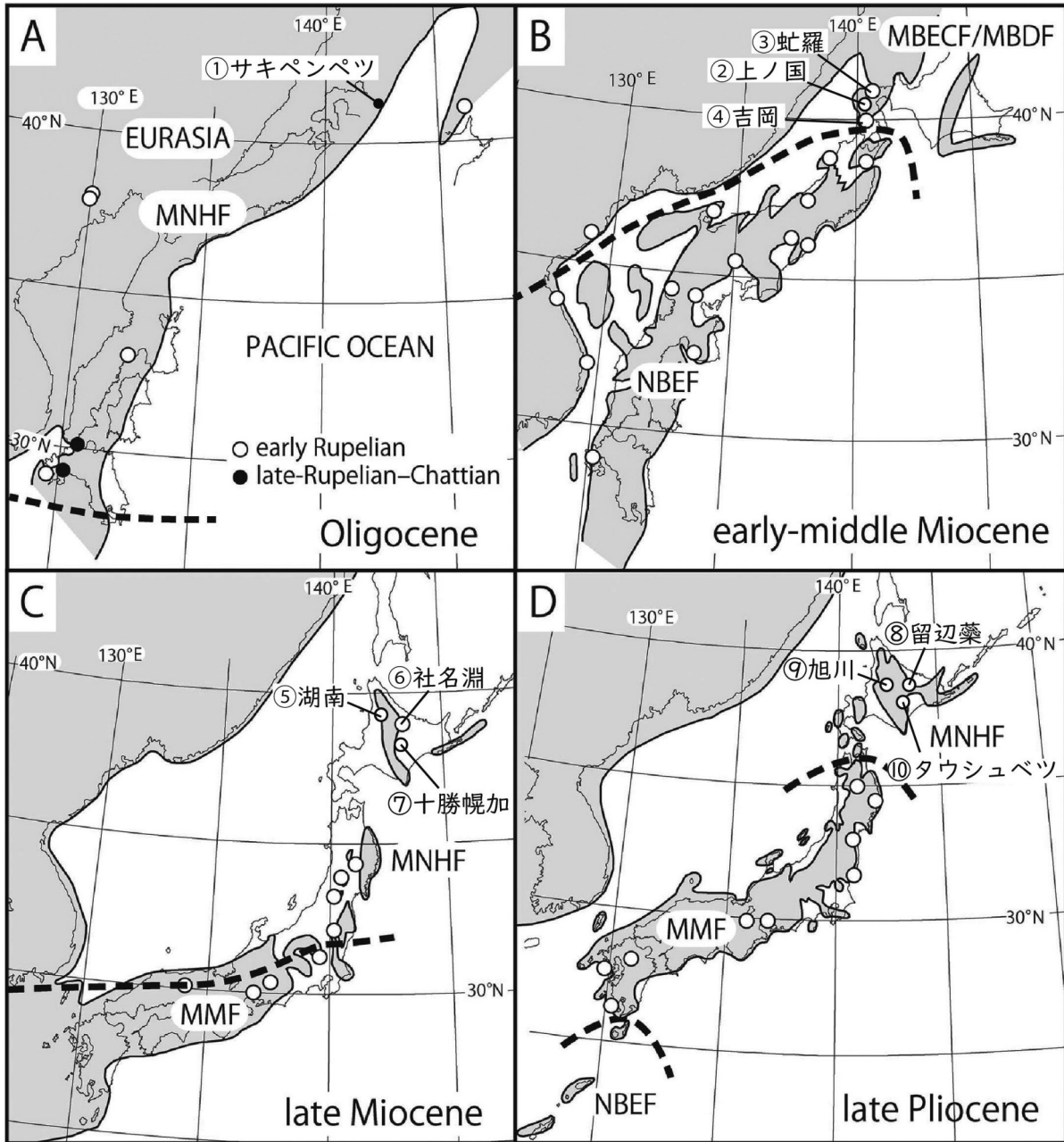


図3 新第三紀の古地理と本稿で取り上げた植物化石群の位置。Yabe et al. (2019) Fig.1に加筆。

A : 漸新世 (古地理図は26-30Ma)、B : 中期中新世前期 (古地理図は約16.5Ma)

C : 後期中新世 (古地理図は約10Ma)、D : 後期鮮新世 (古地理図は約2.5Ma)

MNHF : Mixed Northern Hardwood forest、MBECF : Mixed Broadleaved Evergreen and Coniferous forest、MBDF : Mixed Broadleaved Deciduous forest、NBEF : Notophyllous Broadleaved Evergreen forest、MMF : Mixed Mesophytic forest

(Wolfe 1979) に相当する (図2)。

4 考察

(1) 上ノ国、虻羅、吉岡植物群の示す前期中新世から中期中新世前期の古気候

今回、新規にCLAMPやLAAによる古気候データ算出を行った②上ノ国、③虻羅、④吉岡の3植物群の示す古気候条件について考察する。日本列島では、主に前期

中新世に阿仁合型植物群が、前期中新世末-中期中新世前期にかけては台島型植物群が認められており (Tanai 1961など)、植物化石群の組成的特徴からこの間に高温多湿な気候に変化したとされている (Tanai 1961; 佐野ほか 2022)。得られている放射年代値や含まれる植物化石の組成を考慮すると、②上ノ国植物群は阿仁合型に、③虻羅植物群と④吉岡植物群は台島型に属することになる (Tanai 1961; 棚井 1992; 棚井・植村 1988)。これら道南地域の各植物化石群の示す古気

候条件を比較すると、前期中新世（②上ノ国）から中期中新世前期（③虻羅・④吉岡）にかけて年間降水量（MAP）、相対湿度（RH）、比湿（SH）は減少したと解釈することが可能で（表1）、少なくとも今回得られた解析結果から多湿化したことは示唆されない。ただし、GSPの値については前期中新世の②上ノ国と中期中新世前期の③虻羅では大きな差異が認められないものの、前期中新世の②上ノ国よりも中期中新世前期の④吉岡の方が大きな値を示しており、この点で見ると、植物の生育に適した平均気温が10°Cを上回る月に十分な降水（④吉岡のGROWSEA 5.93か月；表1）があった可能性は考えることができる。一方、気温については、②上ノ国植物群と③虻羅・④吉岡の両植物化石群の気温データを比較することで、前期中新世から中期中新世前期にかけての温暖化を想定することができるが、③虻羅と④吉岡の両植物群で気温データの傾向が異なっている。すなわち、③虻羅と②上ノ国を比較すると、③虻羅はMATとCMMTが低下するが、同時代とされる④吉岡植物群と②上ノ国を比較するとMAT、WMMT、CMMTの各気温データに加え、GSPも顕著な増加を示す（表1）。このように②上ノ国と④吉岡の気温諸データからは中期中新世の温暖化に関係するような気温上昇を考えることができるが、②上ノ国と③虻羅の比較からはそれを認めることができない。古地理的な環境を考慮すると、棚井・植村（1988）で指摘されているように、③虻羅植物群の方がより高標高域の植生を反映した古気候データを、④吉岡植物群が比較的低い標高域の植生を反映したデータを示すなど、中新世当時の標高差を示していると解釈できる。なお、当時の標高を示す古気候データの指標としてENTHALが用いられるが（例えば、Su et al. 2019）、②上ノ国、③虻羅、④吉岡の三者では誤差を考慮するとそれらの差が見られず（表1）、中新世当時の標高差について明確に示すことはできない。

今回の解析結果のうち、MATとMARTをもとに東アジアの植生区分（Wolfe 1979）を検討すると、②上ノ国植物群、③虻羅植物群は現代の糠平や天塩、鉛川と同様の針葉樹混交林（Mixed Coniferous forest）に相当し、④吉岡植物群は現代の田沢湖や洞爺湖周辺と同様の北方硬葉樹混交林（Mixed Northern Hardwood forest）に属している（図2）。この植生区分の解釈には、例えば④吉岡植物群は本研究においてMixed Northern Hardwood forestとしていたが、先行研究（Yabe et al. 2019；図3）では同植物群の産出地域はMixed Broadleaved Evergreen and Coniferous forestあるいはMixed Broadleaved Deciduous forestとしているなど、いくつかの齟齬も含まれており、先述のような植物化石群の堆積当時の地形の相違など、今後のさらなる検証が

必要になる。少なくとも中期中新世には当時の古地理的な位置づけを反映した植生の差異が認められた可能性が考えられる（図3）。

日本列島を含む東アジアの気候はアジア・モンスーンの影響下にあり、そのアジア・モンスーンは4つのステップで強化し、約15 Ma前後には一時的にモンスーンが強化されたと考えられている（多田 2005）。その影響が多少なりとも3つの植物化石群の示す古気候データに表れていることも考えられるが、各植物化石群の年代的な位置づけが正確に行えていないことや中新世当時の日本列島が激しい地殻変動の影響下にあったことを考慮すると、今回の結果からモンスーンの影響があったと断定するのは難しい。

（2）新第三紀から第四紀初期の気候変化と道内の植物化石群

寒冷気候とされる古第三紀漸新世から新第三紀前期中新世になると気候は温暖化し、その後、中期中新世前期には顕著な温暖気候となるが、中期中新世後期以降、冷涼な気候が続き、鮮新世には一時的に温暖化するものの、第四紀更新世には一層気温が低下したことが多くの先行研究で知られている（佐野ほか 2022；原 2024など）。

本稿では新第三紀の植物化石群から算出された古気候条件を示したが、高標高域の影響がやや大きいと考えられる中期中新世前期の③虻羅、後期中新世の⑦十勝幌加、前期更新世の⑩タウシュベツの各MAT、および後期鮮新世と考えられる⑨旭川植物群のLMAによるMATを除くと、漸新世から前期中新世にかけて冷涼化し（①サキペンベツから②上ノ国；8.4°C / 7.7°C → 7.6°C / 7.0°C）、前期中新世から中期中新世前期にかけて温暖化し（②上ノ国から④吉岡；7.6°C / 7.0°C → 9.0°C / 8.2°C）、中期中新世前期から中期中新世後期にかけて再び冷涼化（④吉岡から⑤湖南；9.0°C / 8.2°C → 8.2°C / 5.1°C）した後、後期中新世から鮮新世にかけて温暖化（⑤湖南から⑥社名淵・⑧留辺蘂・⑨旭川；8.2°C / 5.1°C → 10.6°C / 9.2°C）している（表1）。③虻羅、⑦十勝幌加のMATは、同時代の他の植物化石群の示すMATよりも低く、高標高域のデータの影響が強く表れていると考えることも可能である。⑩タウシュベツ植物群もCMMTやMARTのデータ等から高標高域を示すと考えられるが（成田・乙幡 2023）、③虻羅や⑦十勝幌加の場合のような比較対象となる同時代の他の植物化石群がないために十分な判断ができず課題は残る。

⑨旭川植物群については、CLAMPから得られたMATとMARTを基に東アジアの植生区分を検討すると、Mixed Mesophytic forestとなるが（図2）、その植生と

しては全縁葉率 (E=12.0%) がかなり低い。また、⑨旭川植物群のMATについては、CLAMPによる値とLMAによる値に大きな開きがある (表1)。⑨旭川植物群の葉化石の多くは保存状態が悪く、広葉樹葉化石の分類群数や全縁葉率の計算に影響が出ている可能性も考えられる。

一方、MATの値の変化に比べると、LAAによるMAPの値は、各植物化石群でそれらの差が明確で (表1)、いずれの植物化石群においてもそれらの組成的特徴から予想される値よりも大きい傾向にある (表1)。特に、後期鮮新世と考えられる⑨旭川植物群の示すMAPは3,548mmとなっており、現代の東北地方や北海道の値に比べてもはるかに大きい値を示す (表1)。CLAMPによって算出されたMMGSP、3-WET、3-DRYの値も同様に大きい (表1)。LAAによるMAPの値は葉化石の堆積過程や気温の影響もあることは既に指摘されているが (棚井・植村 1988; Wolfe and Uemura 1999)、CLAMPで示されたGSP、MMGSP、3-WET、3-DRYの各種降水量のデータも同様に増加傾向を示すことから、鮮新世では前期から後期にかけて多少なりとも降水量が増加した可能性を考えることもできる。後期鮮新世には、夏季モンスーン、冬季モンスーンいずれも増加し、特に夏季モンスーンは一時的に大きく増加していることが指摘されている (多田 2005)。後期鮮新世の⑨旭川植物群はそのようなモンスーンの強化を反映している可能性はある (表1)。

以上のように、葉化石群の示す葉相観の各古気候データを、新第三紀から第四紀更新世の気候変化との関連性や当時の古地理、モンスーンの強化と関連付けて解釈することは概ね可能である。しかし、葉相観による陸上古気候の解析は、堆積当時の広範囲の植生を代表する葉化石群を対象とするため、異なる標高域の平均値になっている可能性が指摘されていたり (例えば、Spicer and Yang 2010; Royer 2012)、解析そのものにも不確実性が残っていたりなど (Spicer et al. 2011)、限界がある。

今回は植物化石群の葉相観から陸上古気候データの産出とそれらの変化について論じた。上記のような課題を含むものの、葉化石群から陸上古気候を推定するために必要な気候条件を示した意義は大きい。ただし、葉相観に限らず特定の手法のみに偏った解釈をするのではなく、海洋古気候との関連性の検討など、古気候解析のクロスチェックともに検討していくことが重要である。

5 まとめ

(1) 北海道内から産出した新生代新第三紀～第四紀更新世の葉化石群を用いて、それらの葉相観から陸上の古気候条件について解析結果を示した。前期中新世の上ノ国、中期中新世前期の虻羅、吉岡植物群の古気候条件については特にCLAMPとLAAにより新たに古気候データを示した。得られた気温データからは、ほぼ同時代と考えられる虻羅と吉岡の両植物化石群の反映する標高差を示している可能性が示唆された。

(2) 新生代新第三紀から第四紀更新世にかけての北海道の陸上の気温や降水量の変化は、当時の古地理やモンスーンの強化などに関連付けて解釈することが可能であるが、葉相観のみによる解釈には限界があることは留意しなければならない。

謝辞

本報告で取り扱った旭川植物群の調査においては、前北海道教育大学函館校の紀藤典夫教授に現地調査にご同行いただくなど各種ご支援をいただいた。記して感謝申し上げる。

引用文献

- Asami, R., Hondo, R., Uemura, R., Fujita, M., Yamasaki, S., Shen, C-C., ... and Iryu, Y. 2021. Last glacial temperature reconstructions using coupled isotopic analyses of fossil snails and stalagmites from archaeological caves in Okinawa, Japan. *Scientific Reports* 11 : Article number: 21922 (2021) .
- 林 圭一・川上源太郎・加瀬善洋 2018. 芦別市サキベンベツ川流域に露出する“礫岩卓越層”から得られた渦鞭毛藻シスト化石群集に基づく地質年代とその意義 (予察) . 日本地質学会北海道支部平成30年度例会予稿.
- 原 正利 2024. 日本の温帯落葉広葉樹林のフロラと植生の歴史—ブナ林を中心として—. 植生学会誌 41 : 11-32.
- Liu, X. Y., Gao, Q., Han, M. and Jin, J., H. 2016. Estimates of late middle Eocene pCO₂ based on stomatal density of modern and fossil *Nageia* leaves. *Climate of the Past* 12 : 241-253.
- 成田敦史 2018. 葉化石から推定する古気候—基本原理と教育への応用—. 地学教育と科学運動 80 : 37-44.
- 成田敦史 2021. 北海道名寄地域産中期中新世植物化石群の古植生と古環境. 中央大学博士論文.
- 成田敦史 2024. 北海道の新第三系から産出した植物化石リストおよび各分類群の層位的分布. 北海道博物館研究紀要 9 : 19-35.
- 成田敦史・植村和彦・松本みどり・矢部 淳 2012. 北海道士別市北西、湖南から産出する中期中新世植物化石群. 化石 92 : 5-18.
- Narita, A., Yabe, A., Uemura, K. and Matsumoto, M. 2020. Late middle Miocene Konan Flora from northern Hokkaido, Japan. *Acta Palaeobotanica* 60 : 259-295.
- 成田敦史・乙幡康之 2023. 北海道中央東部糠平湖周辺の後期

- 新生代の古植生と古環境:後期中新世十勝幌加植物群と前期更新世タウシュベツ植物群. 地質学雑誌 129 : 289-305.
- 大谷彩夏 2023MS. 大型植物化石に基づく鮮新世の古気候—北海道旭川の気温・降水量の推定—. 北海道教育大学函館校卒業論文.
- Philippe, M. 2023. Palaeoclimate and fossil woods—is the use of mean sensitivity sensible? *Acta Palaeontologica Polonica* 68 : 561-569.
- Royer, D. L. 2012. Climate Reconstruction from Leaf Size and Shape: New Developments and Challenges. *The Paleontological Society Papers* 18 : 195-212.
- 佐野貴司・矢部 淳・齋藤めぐみ 2022. 日本の気候変動500万年史 四季のある気候はいかにして誕生したのか (ブルーボックス). 講談社.
- Spicer, R. A. and Yang, J. 2010. Quantification of uncertainties in fossil leaf aleoaltimetry: does leaf size matter? *Tectonics* 29, article no. TC6001.
- Spicer, R. A., Bera, S., Bera, S. D., Spicer, T. E. V., Srivastava, G., Mehrotra, R., Mehrotra, N. and Yang, J. 2011. Why do foliar physiognomic climate estimates sometimes differ from those observed? Insights from taphonomic information loss and a CLAMP case study from the Ganges Delta. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 302 : 381-395.
- Su, T., Spicer, R. A., Li, S.-H., Xu, H., Huang, J., Sherlock, S., ... and Zhou, Z.-K. 2019. Uplift, climate and biotic changes at the Eocene-Oligocene transition in south-eastern Tibet. *National Science Review* 6 : 495-504.
- 多田隆治 2005. アジア・モンスーンの進化と挙動—そのヒマラヤチベット隆起とリンケージ—. 地質学雑誌 111 : 668-678.
- Tanai, T. 1961. Neogene floral change in Japan. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series IV*, 10 : 119-398.
- Tanai, T. 1971. The Miocene Sakipenpetsu Flora from Ashibetsu Area, Central Hokkaido, Japan. *Memoirs of the National Science Museum, Tokyo* 4 : 128-172.
- 棚井敏雅 1992. 東アジアにおける第三紀森林植生の変遷. 瑞浪市化石博物館研究報告 19 : 125-163.
- Tanai, T. and Suzuki, N. 1963. Miocene floras of southwestern Hokkaido, Japan. Tertiary floras of Japan, Miocene floras. *The Collaborating Association of Commemoration 80th Anniversary, Geological Survey of Japan, Tokyo* : 9-149.
- Tanai, T. and Suzuki, N. 1965. Late Tertiary floras from North-eastern Hokkaido, Japan. *Palaeontological Society of Japan, Special Paper* 10 : 1-117.
- 棚井敏雅・植村和彦 1988. 北海道西南部および本州北端部の台島型植物群 (中新世). 国立科学博物館専報 21 : 7-16.
- 植村和彦 1991. 北海道名寄地域の温根別および仁宇布産の中期中新世植物群. 国立科学博物館専報 24 : 17-26.
- 植村和彦 1993. 大型植物化石群に基づく新生代の古気候変化の推定. 化石 54 : 37-44.
- Wilf, P., Wing, S. L., Greenwood, D. R. and Greenwood, C. L. 1998. Using fossil leaves as paleoprecipitation indicators: An Eocene example. *Geology* 26 : 203-206.
- Wing, S. L. and Greenwood, D. R. 1993. Fossils and fossil climates: the case for equable Eocene continental interiors. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London series B* 341 : 243-252.
- Wolfe, J. A. 1978. A Paleobotanical Interpretation of Tertiary Climates in the Northern Hemisphere: Data from fossil plants make it possible to reconstruct Tertiary climatic changes, which may be correlated with changes in the inclination of the earth's rotational axis. *American Scientist* 66 : 694-703.
- Wolfe, J. A. 1979. Temperature parameters of humid to mesic forests of Eastern Asia and relation to forests of other regions of Northern Hemisphere and Australasia. *U. S. Geological Survey Professional Paper* 1106 : 1-37.
- Wolfe, J. A. 1993. A method of obtaining climatic parameters from leaf assemblages. In *U. S. Geological Survey Bulletin*, 2040, United States Government Printing Office, Washington.
- Wolfe, J. A. 1995. Paleoclimatic estimates from Tertiary leaf assemblages. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 23 : 119-142.
- Wolfe, J. A. and Uemura, K. 1999. Forum: Using fossil leaves as paleoprecipitation indicators: An Eocene example: Comment and Reply. *Geology* 27: 91-92.
- 矢部 淳 2002. 大型植物化石から推定されるタイ北部第三紀の古気候. 霊長類研究 18 : 143-157.
- Yabe, A. 2011. Early Miocene Floras and Climate in the Eastern NE Honshu, Japan. Chiba University.
- Yabe, A. Jeong, E., Kim, K. and Uemura, K. 2019. Oligocene-Neogene fossil history of Asian endemic conifer genera in Japan and Korea. *Journal of Systematics and Evolution* 57 : 114-128.

Paleoclimate Indicated by Neogene to Pleistocene Plant Macrofossil Assemblages in Hokkaido

NARITA Atsufumi and ÔTANI Sayaka

Using fossil leaf assemblages from Hokkaido that were deposited between the Neogene and the Pleistocene, we analyzed the terrestrial paleoclimatic conditions based on their leaf physiognomy using Leaf Margin Analysis (LMA), Leaf Area Analysis (LAA), and Climate Leaf Analysis Multivariate Program (CLAMP). New paleoclimatic data was obtained for the paleoclimates of the Kaminokuni flora (Early Miocene), the Abura and the Yoshioka floras (early Middle Miocene), particularly via CLAMP and LAA. The temperature data inferred from the Kaminokuni and the Yoshioka floras indicate a warming trend potentially related to the Middle

Miocene climatic warming. In contrast, the Abura and the Yoshioka floras, both of which are regarded as early Middle Miocene floras, showed a marked difference in their reconstructed temperature values, suggesting that the two assemblages likely formed at different paleoelevations.

Changes in terrestrial temperature and precipitation in Hokkaido from the Neogene to the Pleistocene can be interpreted in relation to paleogeographic evolution and the intensification of the monsoon system at that time. However, it should be noted that interpretations based solely on leaf physiognomy have inherent limitations.

