

平成 21 年度 修士学位論文

乳幼児・子供骨置換速度の評価と安定同位体分析による  
古人骨集団の授乳習慣の復元

学籍番号 47086335 蔦谷 匠  
東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
先端生命科学専攻 人類進化システム分野  
(指導教員 米田 穰 准教授)

平成 22 年 1 月 29 日 提出

平成 22 年 3 月 9 日 改訂

# 目次

|   |    |
|---|----|
| Summary .....   | 3  |
| 序論 .....  | 5  |
| 1. 研究の背景 .....  | 5  |
| 2. 方法の原理 .....  | 8  |
| ■ 同位体食性復元 .....   | 8  |
| ■ 授乳習慣の復元 .....   | 10 |
| 3. 問題の所在と本研究の構成 .....                                     | 12 |
| 4. 用語の定義 .....  | 13 |
| ■ 離乳 .....  | 13 |
| ■ 離乳食 .....   | 13 |
| ■ 乳幼児 .....   | 13 |
| <br>  |    |
| 第1部 乳幼児・子供骨置換速度を考慮した離乳年齢推定のための新たなモデル：由比ヶ浜<br>南集団での検討      |    |
| 1. 背景 .....   | 16 |
| 2. 材料と方法 .....  | 19 |
| ■ 放射性降下物に含まれる $^{90}\text{Sr}$ の取り込みのデータ .....            | 19 |
| ■ 由比ヶ浜南遺跡 .....   | 20 |
| ■ 骨試料 .....   | 21 |
| ■ 前処理と同位体分析 .....   | 22 |
| 3. 結果 .....   | 23 |
| 3-1. 乳幼児・子供骨置換速度を考慮したモデルの開発                               |    |
| ■ 乳幼児・子供骨の1年間の置換速度の推定 .....                               | 23 |
| ■ 乳幼児・子供骨の0.5年間の置換速度の推定 .....                             | 25 |
| ■ 食物由来の乳幼児・子供骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値の計算 .....      | 26 |
| ■ 離乳による乳幼児・子供骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化のモデル化 ..... | 27 |
| 3-2. 骨コラーゲンの同位体分析とモデルの適用                                  |    |
| ■ 由比ヶ浜南遺跡試料の同位体分析 .....                                   | 28 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| ■ 先行研究のモデルとの比較 .....             | 29 |
| ■ 由比ヶ浜南集団へのモデルの適用 .....          | 30 |
| 4. 考察 .....                      | 32 |
| ■ モデルの妥当性の評価 .....               | 32 |
| ■ 由比ヶ浜南遺跡における授乳習慣 .....          | 34 |
| 5. 小結 .....                      | 36 |
|                                  |    |
| 第2部 炭素・窒素同位体分析による有珠モシリ集団の授乳習慣の復元 |    |
| 1. 背景 .....                      | 38 |
| 2. 材料と方法 .....                   | 40 |
| ■ 有珠モシリ遺跡 .....                  | 40 |
| ■ 骨試料 .....                      | 40 |
| ■ 前処理と同位体分析 .....                | 41 |
| 3. 結果 .....                      | 42 |
| ■ 試料について .....                   | 42 |
| ■ 大人の同位体比 .....                  | 42 |
| ■ 乳幼児・子供の同位体比 .....              | 43 |
| 4. 考察 .....                      | 45 |
| ■ 大人の食性 .....                    | 45 |
| ■ 乳幼児・子供の食性 .....                | 45 |
| 5. 小結 .....                      | 50 |
|                                  |    |
| 総括 .....                         | 51 |
| 謝辞 .....                         | 53 |
| 引用文献 .....                       | 54 |
| 図表 .....                         | 61 |
| 補遺 .....                         | 87 |

## Summary

It is important to reconstruct the breastfeeding and weaning practices in prehistoric populations, because it can produce valuable insights into the evolution of human life history and the past population dynamics. From the biological point of view, humans tend to wean their children earlier than most other apes do, and this is supposed to be a cultural adaptation. Stable isotope analysis of bone collagen has been used to reconstruct such breastfeeding and weaning practices of archaeological populations because it can reconstruct dietary habits of past population. However, stable isotope signatures of bone collagen were relative indicators of weaning ages, as previous studies have not been able to discuss breastfeeding and weaning practices quantitatively.

In the first chapter, in order to estimate the absolute ages of onset and completion of weaning, I propose a novel model which consider the turnover of infants and children bones, based on previously reported data on fallout  $^{90}\text{Sr}$  in human bones and dairy product in U.S.A.. Then, this was applied to the infants and children skeletons from the Yuigahama-minami site in Kamakura, the medieval (1200 AD - 1600 AD) capital of Japan. As a result, the estimated ages of onset and completion of weaning were 1.5 and 2.5 years old respectively. It is important to estimate the absolute ages of weaning when we consider the evolution of human life history and the past population dynamics.

In the second chapter, I attempted to reconstruct the breastfeeding and weaning practices of the Epi-Jomon hunter-gatherer population (the Usu-moshiri site: 3rd - 7th centuries) by using stable isotope analysis, and discuss the relationships between that practices and the diet of the population. Then, I applied the model which we developed in the first chapter and estimated the absolute ages of weaning. Isotopic studies which attempted to reconstruct the breastfeeding and weaning practices in prehistoric

hunter-gatherer-fishers are rare. Here, I show there are two types of breastfeeding and weaning practices in Usu-moshiri population who inhabited Hokkaido in the Epi-Jomon period. In one practice, some infants were weaned rapidly around the age of 3. And in the other practice, infants consumed  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  depleted foods soon just after their birth. It was indicated that the infants and children in latter practice consumed terrestrial foods (e.g.  $\text{C}_3$  plants and terrestrial animals) to some extent, while the all adults in Usu-moshiri population highly depended on marine mammals as their protein sources. On the contrary to previous views, these results suggest that the prehistoric hunter-gatherer-fishers were able to use various food resources as weaning food and their breastfeeding and weaning practices could vary with the surrounding environment.

## 序論

### 1. 研究の背景

先史時代のヒトの授乳習慣 (その集団において一般的な、授乳・離乳にかかわる行動様式) を復元することによって、ヒトの生活史の進化や過去の人口動態について重要な知見を得ることができる。たとえば、授乳期間の短縮は出生率の増加と密接な関係があると考えられており、出生率の増加は人口増加をもたらす大きな要因のひとつである (Kennedy, 2005)。授乳中の女性は月経周期の再開が遅れており、これは授乳の「避妊効果 (Contraceptive effect)」と呼ばれている (Quandt, 1995; MCNeilly, 2001)。出産後 6 ヶ月以降の「避妊効果」については懐疑的な見方もあるが、人類集団においては、授乳期間が短ければ次の妊娠までの間隔も短い傾向があると考えられている (Kennedy et al., 1988; Valeggia & Ellison, 2004)。したがって、授乳期間が短ければその集団の出生率は高く、出生率が死亡率よりも大きく増加すれば、集団の人口は増加していくと考えられる (Kennedy, 2005)。

ヒトは乳幼児死亡率を増加させることなしに、他の類人猿に比べて授乳期間を短縮させており、これは文化的適応のひとつと考えられている (スプレイグ, 2004; Sellen, 2007)。適切な離乳食の存在しない状況で授乳期間を短縮させることは、母親の出生間隔を短くする一方で、乳幼児が病原体に感染したり低栄養に陥ったりするリスクを高め、乳幼児・子供の死亡率を増加させ得る (Cunningham et al., 1991; Cunningham, 1995)。しかし、ヒトは多様な食資源や食物加工技術を利用して離乳食をつくり、乳幼児死亡率を増加させることなく授乳期間を短縮することができた (Sellen, 2007)。伝統的社会の多くでは離乳の終わりが 3 歳から 4 歳で、工業化社会ではさらに短くなっている (Dettwyler, 1995)。たとえば厚生労働省 (2007) の報告によると、平成 17 年の日本では、離乳食を利用する母子のうち約 92% が生後 6 ヶ月以内に離乳を開始し (n = 2596)、約 96% が生後 1 年 6 ヶ月以内に離乳を終了させている (n = 1958)。これらは、霊長類の研究から推定される「ヒト本来の生物学的な」授乳期間に比べて、明らかに短縮している。Stuart-Macadam (1995) は、ラクターゼ消失の年齢から類推した「ヒト本来の」授乳終了年齢を 2 歳から 5 歳程度であるとしている。Dettwyler

(1995) は霊長類の授乳期間を調べた研究をレビューして、「ヒト本来の」授乳終了年齢について、生後の乳幼児の体重が3倍から4倍に増加した年齢を考える場合には3歳から4歳程度、大人の体重の1/3に達した年齢を考える場合には4歳から7歳程度、大人女性の体重(g)に2.71という係数をかけた解が離乳日齢と等しくなるとする方法では2.8歳から3.7歳程度、妊娠期間を6倍した期間を考える場合には約4.5歳、大臼歯の萌出年齢と等しいと考える場合には5.5歳から6歳程度であるとしている(補遺1)。

離乳食の利用と授乳期間の短縮が、人類進化のどの段階で起きたかについてはいまだ議論がなされているが、特に完新世初期における生業の転換時期に、授乳期間の短縮が起きたとする説が注目されている。古人骨集団の年齢構成の研究から、多くの集団において、完新世初期の農耕開始時期に出生率が増加したことが示されている(Hassan, 1973; Bocquet-Appel & Naji, 2006) いくつかの生物考古学的研究は、穀物や乳を離乳食に利用して、授乳期間を短縮させたことが、この出生率増加のひとつの原因だったと推測している(Buikstra et al. 1986; Larsen 1995; Molleson et al., 1993)。彼らは、栽培された穀物の利用や土器などの調理技術の進歩によって、離乳食に適した柔らかい食物が容易に利用できるようになったとしている。しかし今のところ、過去の乳幼児・子供の食性からこの説を裏付ける証拠は提出されていない。

また、農耕の開始にともなって授乳期間が短縮したという説には反論も投げかけられている。Sellen & Smay (2001) は現代の133の「伝統的社会」の生業と授乳習慣を比較し、離乳食の導入時期は生業形態(農耕、牧畜、狩猟採集)と関係がないことを示した。しかし、現代の「伝統的社会」のデータをもとにした考察は、先史時代の授乳習慣のモデルケースとしては十分ではない。例えば20世紀の工業生産された乳幼児食が授乳期間を短縮させる大きな要因になることが示されており(Dettwyler, 1995)、現代の伝統的社会の研究では、こうした工業化以降の文化の影響を除いて議論することが難しい。

このようなヒトの文化的適応(特に生業形態や食性の変化)と授乳習慣の関係をより詳細に議論する際には、実際の過去の集団の授乳習慣を復元することができる同位体分析が

有用である（「2. 方法の原理」を参照）。骨コラーゲンの炭素・窒素安定同位体分析による食性解析の方法を応用して、乳幼児・子供の離乳年齢や離乳食を推定する試みが1980年代の終わりに始まり、これまでに多数の研究がなされてきた (Fogel et al., 1989; Katzenberg et al., 1993,1996; Schurr & Powell, 2005; Fuller et al., 2006b)。

しかし、古人骨の同位体分析を利用した授乳習慣の復元において、従来の研究では、離乳の開始・終了年齢や離乳食の同位体比を定量的に推定できなかった。これは、Richards et al. (2002) が論じているように、従来の研究には多くの仮定や制約が存在し、骨コラーゲンの安定同位体比の変化があくまでも相対的な指標にしかならないためである。すなわち授乳習慣の復元は、(i) 集団の全員が共通の授乳習慣をとっている、(ii) 離乳は比較的すみやかに進行する、(iii) 離乳食の同位体比は大人の食物の同位体比とほぼ等しい、との仮定の下におこなわれている。また、(iv) 分析に用いる試料の死因は往々にしてわからず、そうした乳幼児・子供の食性は典型的でないこともある、(v) 乳幼児・子供骨コラーゲンの置換速度 (Turnover rate) は不明である、という制約が存在する。

本研究の第1部では、これらの問題のいくつかに解決をもたらすことを目的に、乳幼児骨の安定同位体比の変化から、離乳の始まりと終わりの年齢を定量的に推定できるモデルを開発することを試みた。第2部では、炭素・窒素安定同位体分析を利用して、先史北海道の海洋性狩猟採集集団における授乳習慣の復元を試みた。また、第1部で開発したモデルの適用もおこなった。



## 2. 方法の原理

### ■ 同位体食性復元

先史時代の人類集団の食性 (なにを食べていたか) をあきらかにすることは、考古学や人類学における重要な研究テーマのひとつである。食資源の利用の実態を解明することで、人類の多様な環境適応について有益な知見を得ることができる。しかし、土器や石器などの人工遺物を研究する従来の考古学的手法や、現代の「伝統的社会」からの類推で議論をおこなう民族考古学的手法にはさまざまな制約があり、過去の人類集団が実際に何を食べていたのかを解明することは困難であった。たとえば、植物遺存体や動物の軟部組織はバクテリアによる分解の影響を受けやすく、現代まで残存することは例外的である。

こうした研究に対し、古人骨の同位体分析は過去の集団における食性を直接的に復元できるため有用である。同位体とは、同じ原子番号をもつ元素の原子において、質量数の異なる核種のことであり、同じ元素の異なる同位体は、化学的特性は同じだが、物理的特性が異なっている。すなわち、質量数の大きな同位体ほど原子の基準振動数が低く、化学反応しにくい。物理的特性の違いにより、生体反応や自然界の化学反応において、同位体の存在比に特有のかたよりが生じる。この存在比のかたよりをトレーサーとして、同位体分析では、人体などの体組織を構成する元素がなにに由来していたのかを推定できる。

同位体の存在比は一般にとっても小さいので、ある物質に含まれる同位体の割合は直感的に理解しやすい「同位体比」で表される。たとえば、同じ原子番号をもつ原子のうち、 $^{13}\text{C}$  および  $^{15}\text{N}$  の存在比は、それぞれ 1.1%、0.36% でしかない (ヘフス, 2007)。同位体比は、標準物質における同位体存在比 ( $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$  または  $^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$ ) に対する試料の同位体存在比の偏差を示す値であり、以下の式により  $\delta$  (デルタ) の記号を用いて表される。

$$\delta X (\text{‰}) = [ (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1 ] \times 1000$$

X は質量数の大きな同位体を、 $R_{\text{sample}}$  と  $R_{\text{standard}}$  はそれぞれ試料と標準物質における同位体

の存在比 (炭素安定同位体では  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、窒素では  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) を表す。単位には千分率 (‰ : パーミル) を用いる。標準物質は、炭素同位体比の場合には米国サウスカロライナ州 Pee Dee 層より産出するベレムナイト化石 (PDB) を、窒素同位体比の場合には大気中の窒素ガス (AIR) を用いる。

炭素・窒素安定同位体比 (以下、それぞれ  $\delta^{13}\text{C}$  値、 $\delta^{15}\text{N}$  値と表記) の分析は食性復元においてもっとも一般的に用いられている。摂取した食物の  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値は体組織の  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値に反映されるため、先史人類の遺体 (骨、歯、髪など) を分析することで、その個体の食性を復元できる。たとえば、 $\delta^{13}\text{C}$  値の分析は、 $\text{C}_3$  植物と  $\text{C}_4$  植物の区別や、陸生食物と海産食物の区別に用いられている (Tauber, 1981; Schwarcz & Schoeninger, 1991)。 $\delta^{15}\text{N}$  値の分析は、海産物由来のタンパク質が食性に寄与する割合の復元 (Chisholm et al., 1982; Schoeninger et al., 1983) や、食物網における栄養段階の復元 (Schoeninger & DeNiro, 1984) に用いられている。

このような  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の分析による食性復元には、古人骨試料から抽出したコラーゲンが利用されることが多い。コラーゲンは生体由来の有機物のなかでも比較的多くの窒素原子を含むタンパク質であり、他のタンパク質や植物由来の土壌有機物とは元素組成が大きく異なる。そのため、コラーゲンに含まれる炭素原子と窒素原子のモル量比 (C/N 比) を測定することで、試料の汚染を評価できるという利点がある。現生の動物骨を用いた実験からは、C/N 比が 2.9 から 3.6 の範囲外にある「コラーゲン」は、本来の同位体比を示さない可能性が高いことが示された (DeNiro, 1985)。コラーゲンが C/N 比の基準を超える原因は、外部からの有機物の混入、バクテリアや酵素の作用によるアミノ酸組成の大幅な変化であると考えられており、こうした土壌埋没中の変化は続成作用と呼ばれている。コンタミネーションの影響を評価するためのコラーゲン残存率 (VanKliken, 1999) や、元素組成を評価するためのコラーゲン中の炭素・窒素濃度とあわせて、C/N 比は続成作用の影響を評価する重要な指標である。

コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値は食物全体 (つまり炭水化物・脂質・タンパク質など) で

はなく、食物中に含まれるタンパク質の  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値と強く相関する (Ambrose & Norr, 1993; Tieszen & Fagre, 1993)。このことを利用して、コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値から食物タンパク質の  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値を推定することができる。

しかしながら、動物実験や野外調査から、食物タンパク質とそれを食べる動物体組織のあいだでは質量数の大きい同位体の生物濃縮 (Enrichment) がおこることが示されており、この濃縮の値には大きな変動があることも観察されている (DeNiro & Epstein, 1978, 1981; Schoeninger & DeNiro, 1984; Minagawa & Wada, 1984; Yoshinaga et al., 1996)。人骨コラーゲンの同位体比から食物の同位体比を推定する際には、いくつかの動物実験などから見積もられた、 $\delta^{13}\text{C}$  値で 4.5‰、 $\delta^{15}\text{N}$  値で 3.6‰という値を用いて補正をすることが多い (Ambrose, 1993; Yoneda et al., 2004; 補遺 2 参照)。

本研究では、特に授乳によって乳幼児体組織に生じる  $^{15}\text{N}$  の生物濃縮を利用して、過去の集団における授乳習慣を復元する。食物と体組織のあいだの生物濃縮は、食物連鎖における栄養段階 (生態系における生産者や消費者間の食う食われるの関係) の上昇にともなっておこるため (Bocherens & Drucker, 2003; Hedges & Reynard, 2007)、「栄養段階効果 (Trophic level effect)」とも呼ばれる。 $^{15}\text{N}$  の濃縮については、質量数の小さい  $^{14}\text{N}$  を含むアミノ基のほうがアミノ基転移反応において反応しやすく、尿として排出される窒素に食物より多くの  $^{14}\text{N}$  が含まれるためにおこると考えられている (Ambrose & DeNiro, 1986; Sponheimer et al., 2003a, 2003b)。一方、 $^{13}\text{C}$  の濃縮については、その機構がまだよくわかっていない。

## ■ 授乳習慣の復元

授乳中、乳幼児・子供体組織の  $\delta^{15}\text{N}$  値は母親の値より上昇し、離乳によって低下する。分娩以前では、胎児の体組織は母親の摂取する食物からつくられるので、胎児体組織の  $\delta^{15}\text{N}$  値は母親体組織の  $\delta^{15}\text{N}$  値と等しくなると考えられる。出生後に授乳が始まると、乳幼児・子供体組織の  $\delta^{15}\text{N}$  値は母親のそれより 2‰から 3‰上昇する (Fogel et al., 1989; Fuller et al. 2006a; 補遺 2B 参照)。これは、母親と乳幼児のあいだで、母乳を介して生物濃縮がおこる

ためである。授乳中の乳幼児は母親より栄養段階がひとつ上昇することになり（つまり、母乳を通じて「母親を食べている」ことになり）、 $^{15}\text{N}$  が濃縮する。その後離乳が始まり、 $\delta^{15}\text{N}$  値の低い離乳食が導入されると、乳幼児・子供体組織の  $\delta^{15}\text{N}$  値は徐々に低下していく。離乳が終了する（乳幼児・子供が母乳を飲まなくなる）と、子供骨コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値は大人と同じような値を示すようになると考えられる。この  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化のタイミングを分析することで、過去の集団における授乳習慣が推定されてきた (Fogel et al., 1989; Katzenberg et al., 1993,1996; Schurr & Powell, 2005; Fuller et al., 2006b)。

授乳によって  $^{13}\text{C}$  にも生物濃縮がおこるが、その値は 1‰程度とごく小さいため (Fuller et al., 2006a; 補遺 2A 参照)、骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値からは乳幼児や子供の食性復元がなされることが多い。 $\text{C}_3$  植物、 $\text{C}_4$  植物、動物の乳などの  $\delta^{13}\text{C}$  値の違いを利用して、離乳食の内容や導入時期が推定されている (Dupras et al., 2001; Fuller et al., 2006b; Jay et al., 2008)。

乳幼児・子供骨コラーゲンは、こうした離乳による  $\delta^{15}\text{N}$  値・ $\delta^{13}\text{C}$  値の変化を直接に反映しており、また、骨の無機質にパックされて比較的残存しやすいため、過去の集団の離乳時期を研究する際に有用な試料となる。

### 3. 問題の所在と本研究の構成

第1部の研究では、離乳にともなう乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化から、離乳の始まり（離乳食の導入）と終わり（母乳を完全に飲まなくなる）の年齢を定量的に推定できるモデルを開発することを目的とした。集団における平均的な授乳習慣を定量的に復元できれば（例えば、離乳年齢を正確に求める）、現代集団の離乳年齢との比較が可能になる。このような比較はヒトの生活史の進化や過去の人口動態について重要な知見をもたらすことができる。従来の研究では、離乳による  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化をモデル化せず定性的に評価していた、乳幼児・子供骨置換速度の年齢による変化を考慮していなかった、という2点の理由から、こうした比較をおこなうことができなかった。

第2部では、骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値分析を利用して、先史北海道における狩猟採集集団の授乳習慣の復元を試みた。 $\delta^{15}\text{N}$  値の変化に対しては、第1部で開発したモデルを適用した。本研究では特に、集団の食性や生業と離乳年齢の関係を検討することを目的とした。授乳習慣の復元の多くは陸生資源に依存した農耕集団についておこなわれている。しかし、本研究の対象とする先史北海道の集団は海洋性の食資源に高度に依存した狩猟採集集団であり、考古学的研究の知見などから、植物質食物の利用は少ないと考えられている。そのため、肉食性の高いと考えられる旧石器時代の授乳習慣に類する知見を期待できる。

## 4. 用語の定義

### ■ 離乳

本研究では、離乳を、始まりと終わりのある一連のプロセスととらえる。離乳という語の解釈は研究者によって異なり、2通りの定義が存在する (Katzenberg et al., 1996)。ひとつは本研究のように、離乳を、開始 (離乳食の導入) の年齢から終了 (母乳を完全に飲まなくなる) の年齢までつづく一連のプロセスとする定義である (Katzenberg et al., 1996; Millard, 2000; Sellen & Smay, 2001; Duplas et al., 2001)。もうひとつは、離乳を、離乳食の導入や母乳を完全に飲まなくなったときに起こる単一のできごと (event) とする定義である (Dettwyler, 1995; Stuart-Macadam, 1995; Schurr, 1997)。現在、多くの研究は前者の定義を採用しており、離乳による  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化をモデル化する際にも利便性が高いため、本研究では離乳をプロセスととらえる前者の定義を採用する。

### ■ 離乳食

本研究では、厚生労働省 (2007) の策定した『授乳・離乳支援のガイドライン』を参考に、離乳のプロセスが進行している期間内に、乳幼児の食性を母乳から切り替えるために与えられる食物を総称して離乳食と定義した。厚生労働省の定義では、ヒト以外の動物の乳は離乳食に含まれていない。しかし、動物の乳の利用は多様な食資源の利用という観点から議論できること、および、骨コラーゲンの炭素・窒素安定同位体分析では動物の乳の消費を明確に評価できないことから、本研究ではそれらも離乳食というカテゴリーに含めている。

### ■ 乳幼児

児童福祉法では、生後0日から満1歳未満の子は「乳児」、満1歳から小学校就学までの子は「幼児」、乳児と幼児を総称して「乳幼児」と定義されている。「子供」は乳幼児を含む20歳未満の子すべてを指す。しかし、古人骨の年齢推定には一定の誤差がともなうこと

から、過去の人類集団の授乳習慣を議論する際には、こうした厳密な定義はあまり意味をなさない。実際に、窒素同位体の分析から授乳習慣復元を試みた文献では、大人と異なる食物（母乳および離乳食）を摂取していた可能性がある子を「乳幼児：infants」と呼び、乳幼児に対して年齢が比較的大きく、大人と同じ食物を摂取していた可能性が高い子を「子供：children」と呼ぶことが多い。したがって本研究では、同位体比研究におけるこの定義を採用し、食性の違いという観点から、子全体を「乳幼児」および「子供」という 2 つの カテゴリーにわけて議論した。

## 第 1 部

乳幼児・子供骨置換速度を考慮した離乳年齢推定のための新たなモデル

: 由比ヶ浜南集団での検討



## 1. 背景

離乳年齢を定量的に議論するために、離乳による骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化をモデル化した先行研究には、Schurr (1997) と Millard (2000) がある。Schurr (1997) は離乳をできごとととらえ、離乳開始以前および以降の乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化をそれぞれ非線形モデル (指数関数) で表した。離乳開始以前では、測定した試料から回帰計算した指数関数にそって、乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値が増加していく。指数関数は、授乳されている乳幼児がとりうる最大の  $\delta^{15}\text{N}$  値・母乳と母親の食物のあいだの  $\delta^{15}\text{N}$  値の差・子供の成長速度から推定されるコラーゲンの合成速度によって決定されるとしている。離乳開始以降では、測定した試料の  $\delta^{15}\text{N}$  値と年齢の関係から推定した指数関数にそって、子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値が低下していく。指数関数は、離乳の終了した子供の  $\delta^{15}\text{N}$  値、母乳由来の  $\delta^{15}\text{N}$  値の高いコラーゲンが置換していく速度、目視で見積もった離乳開始年齢、の3つの要因によって決定されるとしている。

Millard (2000) は、Schurr (1997) のモデルを、生後数ヶ月間の大きな成長速度が数式に反映されていない、離乳の終了年齢を考慮していない、という2点において不完全であるとして、替わりのモデルを提案した。彼は乳幼児・子供の体重増加率と窒素のマスバランスを組み込んだ数式を用いた。また、離乳を一連のプロセスとみなして、離乳開始・終了年齢および離乳の進みかた (直線形、放物線形、逆放物線形、シグモイド形) を考慮してモデルをたてた。

しかし、これらの先行研究は、以下に述べる3点の理由から改良の余地がある。(1) 乳幼児・子供骨の置換速度 (Turnover rate) が正確に評価されていない。(2) 母親または大人体組織と乳幼児の体組織のあいだの  $^{15}\text{N}$  の濃縮係数を定数としてあらかじめ設定している。(3) 離乳食の  $\delta^{15}\text{N}$  値をあらかじめ人為的に設定している。これらの問題について、以下に詳しく述べる。

(1) Schurr (1997) は、急激な成長に起因する乳幼児・子供期の高い置換速度を考慮していない。Millard (2000) は、骨コラーゲンの置換速度はほかの体組織に含まれるタンパク質の

置換速度と同程度と仮定しているが、年齢が上の乳幼児や子供については、この仮定は現実的でない。生後数ヶ月や数年の期間においては、骨コラーゲンやほかの体組織のタンパク質の置換速度は 100% (年<sup>-1</sup>) に達すると推定されているが (Bryant & Loutit, 1964; Rivera, 1965; Fogel et al., 1997)、大人においては、骨コラーゲンの置換速度は軟部組織のそれよりずっと低くなる (Stenhouse & Baxter, 1979)。したがって、骨コラーゲンの置換速度は年齢増加にともなって、ほかの体組織タンパク質のそれより大きく減少していくと考えられる。しかし乳幼児・子供において、年齢による置換速度の変化は断片的にしか報告されていない。たとえば Hedges et al. (2007) は、1950 年代から 60 年代にかけての核実験に由来する大気 <sup>14</sup>C の取り込みの研究において、乳幼児・子供骨コラーゲンの置換速度の変化を推定している。しかし彼らは大人 (40 歳から 97 歳) の骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化から乳幼児・子供での置換速度を求めており、15 歳以下の乳幼児・子供について推定した値の信頼性には問題があると述べている。

(2) 母親または大人体組織と乳幼児の体組織のあいだの <sup>15</sup>N の濃縮係数は変動の幅が大きい。Fuller et al. (2006a) は、現代人の 5 組の母子の髪の毛または爪を用いて、濃縮係数を測定した。彼らは、この係数が 1.7‰ から 2.8‰ までの範囲にあったことを報告している。Waters-rist & Katzenberg (2009) は 25 例の古人骨集団について報告されている濃縮係数をまとめた。これらのうちの最大値は 4.4‰、最小値は 0.5‰ で、25 例の平均値は  $1.9 \pm 1.0\%$  (1 標準偏差) であり、ある程度のばらつきが観察された。

(3) 母乳由来のコラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値は母親の骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値からある程度推定できる一方で、離乳食由来のコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値は未知である。従来の研究では、離乳食由来のコラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値は大人の骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  平均値で近似されることが多いが、大人の食物とは異なる  $\delta^{15}\text{N}$  値をもつ食物が離乳食に使用されている可能性も考慮せねばならない。有史時代の集団では、離乳食の内容について記録した当時の文献が残されている場合もあるが (たとえば、Dupras et al., 2001; Mays et al., 2002; Keenleyside et al., 2009)、その内容から離乳食の  $\delta^{15}\text{N}$  値を推定するのは困難である。

第 1 部では、これらの問題を解決し、離乳の開始・終了年齢を定量的に求めることができる新しいモデルを提案する。まず、核実験によって生じた放射性降下物に含まれる  $^{90}\text{Sr}$  が取り込まれた、1960 年代の人骨・乳製品の  $^{90}\text{Sr}$  濃度のデータ (Rivera & Harley, 1965) にもとづいて、乳幼児・子供骨コラーゲンの置換速度を年齢ごとに推定した。次に、乳幼児・子供の離乳にともなう  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化をモデル化するための式に、これらの値を組み込んだ。そしてこのモデルを、先行研究で報告された北米開拓民集団 (Schurr, 1997) と、中世日本の集団 (下見, 2007) の測定データに適用して、妥当性を検証した。

## 2. 材料と方法

米国で 1950 年代から 60 年代にかけて測定された放射性降下物由来  $^{90}\text{Sr}$  の人骨・乳製品への取り込みのデータ (Rivera & Harley, 1965)、および、由比ヶ浜南遺跡から出土した中世の乳幼児・子供骨 46 個体と大人 7 個体についての骨コラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値測定データ (南ほか, 2007; 下見, 2007) を本研究の解析に使用した。

### ■ 放射性降下物に含まれる $^{90}\text{Sr}$ の取り込みのデータ

HASL Bone Program-163 (Rivera & Harley, 1965) が報告している、放射性降下物 (核実験や原子力事故で生じた放射性の塵) に含まれる  $^{90}\text{Sr}$  の取り込みのデータを利用して、子供骨コラーゲンの置換速度を新たに推定した。 $^{90}\text{Sr}$  は人工的に生成する放射性同位体で、半減期は 28 年である。1950 年代から 1960 年代にかけておこなわれた核実験により、大量の  $^{90}\text{Sr}$  が大気中に放出された。小規模の核実験で生成された  $^{90}\text{Sr}$  は対流圏に放出され、同緯度の比較的狭い範囲に降下する一方で、大規模の核実験では  $^{90}\text{Sr}$  が成層圏まで放出され、ゆっくりと世界中に拡散した後、対流圏に落ちてすみやかに降下する (Kulp et al., 1957)。 $^{90}\text{Sr}$  は雨とともに対流圏から地表に移行し、植物に取り込まれる。ヒトは主に、この植物や、植物を摂取した動物の乳などを通じて、 $^{90}\text{Sr}$  を体内に取り込む。Ca 原子と電子配置・電子半径が似ているため、 $^{90}\text{Sr}$  は Ca と類似した挙動を示す。 $^{90}\text{Sr}$  は体内に取り込まれた後、Ca と同じように、最終的に骨に蓄積する。 $^{90}\text{Sr}$  は半減期が長く体内被曝の危険性が大きいことと、世界中で汚染が観察されたことから、1950 年代から 1960 年代にさかんに研究がおこなわれた (Kulp et al., 1957, 1959, 1960; Eckelmann et al., 1958; Kulp & Schulert, 1962)。

HASL Bone Program (Health And Safety Laboratory) とは、 $^{90}\text{Sr}$  の取り込みや分布を調べるため、米国および世界各国で実施された試料採集プロジェクトである。コロンビア大学の Lamont 地質観測所が主導し、さまざまな地域における人骨や食物  $^{90}\text{Sr}$  濃度の調査や、 $^{90}\text{Sr}$  濃度をトレーサーとした代謝に関わる係数の推定などがなされた。乳幼児・子供骨置換速度の年齢による変化を評価するには、各年齢にわたって多くの試料を測定したデータが必

要になる。 $^{90}\text{Sr}$ の取り込みは、一連の研究によりデータが豊富に存在しているため、このような評価に適している。

本研究でデータを引用した HASL-163 (Rivera & Harley, 1965) は特に、限られた地域のなかで、食物  $^{90}\text{Sr}$  濃度と人骨  $^{90}\text{Sr}$  濃度の対応関係を取りながら、乳幼児・子供における取り込みに焦点をあてておこなった調査である。HASL-163 では、1962 年から 1964 年までの New York、San Francisco、Chicago における乳幼児・子供椎骨の  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値 ( $\text{pCi g}^{-1}$ : 放射線量の単位ピコシーベルト /g) と乳製品の  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値が、1 歳単位および 1 年単位でそれぞれ報告されている。人骨試料の採集には、(i) 病気などではなく事故によって死亡した個体であること、(ii) その地域に居住していた個体であること、(iii) 脊椎骨を採集して骨の種類による濃度差を小さくすること、という 3 つの必要条件がおかれた。New York と San Francisco のデータはこの条件に合致する妥当なデータであることが明記されており、本研究では特にこの 2 都市のデータをもとに骨置換速度を推定した。HASL-163 (Rivera & Harley, 1965) より引用した New York および San Francisco の乳幼児・子供骨および乳製品の  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  濃度は表 1 に示した。補遺 3 には乳製品  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値の詳細な経年変化を転載した。

#### ■ 由比ヶ浜南遺跡

由比ヶ浜南遺跡は 1995 年から 1997 年に発掘がおこなわれている中世の大きな墓地である。この遺跡は神奈川県鎌倉市の南端の海岸沿いにあり (図 1)、他のいくつかの中世の墓地も近隣にある。由比ヶ浜南遺跡の発掘により、14 世紀後期の層において、667 体が単体埋葬墓から、3108 体が集積埋葬墓から出土した (平田ほか, 2002; 松下, 2002)。単体埋葬墓からは 12 歳以下の個体が 128 体 (19%) 出土し、集積埋葬墓からは 15 歳以下の個体が 1298 体 (42%) 出土した。Nagaoka et al. (2006) は、由比ヶ浜南遺跡の乳幼児死亡率が極めて高い (juvenility index を使用して、初めの 1 年間の死亡率が 27.6%、5 年間の死亡率が 44.1%) ことを報告している。食性については、由比ヶ浜南遺跡に埋葬されていた大人は植物だけでなく、海産物も主なタンパク質源のひとつとしていたことが指摘されている (南ほか, 2007)。

日本の中世は鎌倉時代・室町時代・戦国時代を含み、およそ 12 世紀から 17 世紀まで約 400 年間続いた。この時代の初期には武士階級が政治的な力をつけ、鎌倉幕府をうち建てた。鎌倉は幕府の首都であり、中世の鎌倉は政治、経済、文化の中心であった。中世の鎌倉の人口は 7 万から 10 万人にのぼると見積もられており、この数字は現在の鎌倉の人口よりも大きい (河野, 1989)。しかし河野 (1989, 1995) は、当時の鎌倉は不衛生な環境で、病気が蔓延していたことを示し、Nagaoka et al. (2006) は、中世の人々が短命の傾向にあったことを議論している。

#### ■ 骨試料

分析に使用した試料はすべて、単体埋葬墓から出土し、年齢推定の可能な部位の残っていた人骨である (下見, 2007)。単体埋葬墓の人骨は、亡くなった後すぐに、または散乱しないうちに埋葬されたと考えられているので、一個体が簡単に同定できる。大人 (20 歳以上) については、南ほか (2007) が報告した同位体分析のデータ (女性 3 個体と男性 2 個体) を使用し、さらに下見 (2007) の報告した男女 1 個体ずつの分析結果もデータセットに加えた。骨部位の同定は共同研究者の澤田純明博士 (聖マリアンナ医科大学) がおこなった。サンプリング部位は、形態学的研究では比較的重要でない肋骨であり、試料は聖マリアンナ医科大学解剖学専攻の保管している骨から得た (下見, 2007)。

年齢は、共同研究者の長岡朋人博士・澤田純明博士 (聖マリアンナ医科大学) によって、歯の発達段階から推定された (Ubelaker, 1989)。ヒトを含む霊長類のいくつかの種にわたって、歯の発達・萌出状態と実年齢には厳密な相関関係があることが示されている (Smith, 1992)。そのため、歯の発達段階を観察することで、一定の誤差を含みながらも、古人骨の年齢を推定することができる。推定は原則として 1 歳刻みだが、範囲として示された年齢については中央値をポイント年齢として用いた。

## ■ 前処理と同位体分析

前処理と同位体分析は、下見 (2007) によっておこなわれた。

コラーゲンは Longin (1971) を改良した方法で、約 0.5g の骨片から抽出された (Yoneda et al., 2004)。まずはサンドブラスターと超音波洗浄により、物理的に汚れを落とす。次に 0.2M の水酸化ナトリウム溶液に一晩浸し、外部由来の有機物 (すなわち、フミン酸、フルボ酸) を除く。酸を純水 (Mili-Q 水) で洗い流した後、骨を凍結乾燥する。乾燥した骨は粉状になるように砕く。砕いた骨はセルロースチューブに入れ、1M の塩酸で透析をおこなう。これにより、骨の無機質と分子量の小さいフミンが除かれる。透析後、残った分画を遠心分離によって取りだし、純水中で一晩 90°C においてゼラチン化する。ゼラチン化した試料はガラスフィルターでろ過する。抽出したゼラチンは凍結乾燥し、これを同位体分析の試料として用いる。ここで残ったゼラチンは、保存状態のよいコラーゲンから構成されると考えられる。約 0.25mg のゼラチンを EA-IRMS (Calro Erba NA1500 元素分析計と Finnigan MAT 252 同位体比質量分析計を Finnigan MAT ConFlo II でつないだものからなる) で分析して、 $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値を測定する。EA-IRMS の測定誤差は  $^{15}\text{N}$  で 0.3‰、 $^{13}\text{C}$  で 0.2‰ である。元素分析計では炭素・窒素の存在比も測定できるので、これをもとにコラーゲンの保存状態の指標となる %C、%N、C/N 比を求めることができる。

### 3. 結果

#### 3-1. 乳幼児・子供骨置換速度を考慮したモデルの開発

##### ■ 乳幼児・子供骨の1年間の置換速度の推定

本研究では、乳製品の $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値は食物の $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値を代表している、骨の無機質と有機質(コラーゲン)の置換速度は等しい、という2点の仮定をおいた。 $^{90}\text{Sr}$ はCaと類似した挙動を示し、動植物体組織に取り込まれる。この時期の米国の人々は主に乳製品を通じてCaを摂取しており、 $^{90}\text{Sr}$ も同様に乳製品から主に取り込まれていたと考えられる(Kulp et al., 1957)。また、医科学の分野においては、骨無機質と骨コラーゲンの置換速度には相関関係があると考えられており、骨コラーゲンの分解産物の尿中濃度などから、骨無機質の置換速度が推定される(Khosla et al., 1998; Mora et al., 1999; Watts, 1999)。こうしたことから、これら2点の仮定は妥当であると考えられる。

ある年齢 $t$ における骨の $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値 $S_b[t]$ は

$$S_b[t] = S_b[t-1] \times (1 - T[t]) + S_d[t] \times F \times T[t] \text{ (式 1)}$$

として表される。 $T[t]$ は、 $t$ の時点で、 $t-1$ から $t$ までの1年間に合成された新しいコラーゲンが占める割合(置換速度)である。 $S_b[t-1] \times (1 - T[t])$ は、1年間の骨置換を経て骨に残存した分の $^{90}\text{Sr}$ を表す。 $S_d[t]$ は $t-1$ から $t$ までの食物(乳製品で代表されている)の $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値の平均であり、HASL-163で示された値を使用した(表1、補遺3)。 $F$ は食物と骨のあいだにおける、 $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値の分別係数(Discrimination Factor)である。消化管から吸収される際、Srには積極的な排除(Discrimination)がおこるため、食物と体組織を比較すると、Caに対する $^{90}\text{Sr}$ の存在比が変化している(Sillen & Kabanagh, 1982; Sillen & Smith, 1984)。この分別係数は乳幼児である程度大きな値を示し(Lengemann, 1963; Rivera & Harley, 1965)、それ以降では0.18から0.27の値を示すことが経験的にあきらかにされている(Sillen & Smith, 1984)。そのため、 $F$ は $t \leq 0.5$ のとき( $F_i$ )と $t > 0.5$ のとき( $F_o$ )で、それぞれ別な値を適用した。



$S_d[t] \times F \times T[t]$  は、1年間の骨置換を経て、骨に新たに蓄積した分の $^{90}\text{Sr}$ を表す。

本研究では、式1を用いて骨中の $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値の変化をモデル化し、実測値のデータと比較することで、乳幼児・子供骨の置換速度を推定した。HASL-163では、年齢ごとに試料の $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値の平均が示されている(表1参照)。まず、ある年代における、ある年齢の $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 平均値を $S_b[t-1]$ とおき(たとえば、1962年の2.5歳の値なら、New Yorkでは3.39、San Franciscoでは0.61)、1年後にそれがどのような値 $S_b[t]$ を示すかを、式1を用いて計算した。次に、最初に選んだ試料の1年後の一歳上に当たるところにデータが存在すれば(この場合には、1963年の3.5歳で、New Yorkでは4.00、San Franciscoでは1.13)、存在する実測 $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値と算出した $S_b[t]$ の差 $D_s$ を求めた。この操作をNew YorkおよびSan Francisco、全年齢・全年代についておこない、 $D_s$ はそれぞれ2乗して、データセット全体での $D_s^2$ 平均値を求めた。この結果と各年齢における試行の組み合わせは表2に示した。最後に、線形計画法を用いて平均値を最小にする $T[t]$ 、 $F$ ( $F_i$ と $F_c$ )を求めた。線形計画法は、線形モデルを使用し、目的関数を最小にする(または最大にする)変数の値を数学的に決定する方法である。目的関数は、値を決定したい変数によって解が変わる。線形計画法は、過去の食性復元の研究などで用いられている(Little & Little, 1997)。本研究ではMicrosoft Excel(ver. 2003)のソルバー機能を使用して、線形計画法を実施した。その際には、利用した骨 $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値データの外れ値を平滑化するために、 $0 \leq T[t] \leq T[t-1] \leq 1$ という条件を設けた。このようにして推定した1年ごとの骨置換速度と分別係数 $F$ は表2に示し、年齢に対する $T[t]$ の値だけを別に表3および図2に示した。

これらの計算により、1年分の骨置換速度 $T[t]$ について以下のことが示された。(i) 0歳から1.5歳では1.0に達しており、このあいだの代謝が活発であることを示唆している。(ii) 1.5歳から3.5歳で急激に減少する。(iii) 3.5歳から16.5歳までは比較的一定の値を示す。(iv) 16.5歳から19.5歳で徐々に低下する。こうした置換速度の変化は、ヒト乳幼児・子供の成長パターンと整合的である。 $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ 値の分別係数は $F_i$ ( $t \leq 0.5$ )で2.4、 $F_c$ ( $0.5 < t < 20$ )で1.8と計算された。これらは報告されている1.8から2.7という範囲(Sillen & Smith, 1984)に

おさまる値であり、計算結果が信頼できることを示唆している。

また、参考のために、実際の測定値とモデルを用いて計算した値を等しくさせるような仮想的な  $T[t]$  の値を、すべての個別の組み合わせについて独立に求め、表 2 に示した。-1 以上 2.4 以下の範囲におさまる仮想的な個別の  $T[t]$  については、結果を図 3A に示した。その範囲外にあった 5 つの個別の計算は表 2 のみに示してある。図 3A には、上述の線形計画法で求めた、組み合わせ全体において差を最小にする置換速度 (overall fitted  $T[t]$ ) も示した。F には線形計画法で得られた値 ( $F_i = 2.4, F_c = 1.8$ ) を用いた。また、New York と San Francisco の試料セットについても、線形計画法を用いてそれぞれのデータセット全体で差を最小にする置換速度の推定をおこない、仮想的な個別の  $T[t]$  とともに結果を図 3B・3C に示した。1.5 歳から 3.5 歳で置換速度が急激に減少する傾向は、都市のあいだや「全体」と「個別」のあいだにかかわらず、すべての計算結果に共通していた。

#### ■ 乳幼児・子供骨の 0.5 年間の置換速度の推定

本研究では、離乳による急激な  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化を詳細に記述し、およそ 0.5 年単位で推定された年齢ごとに実測値とモデル計算値の比較をおこなうため、推定した 1 年ごとの置換速度  $T[t]$  を、年齢  $t-0.5$  から  $t$  までの 0.5 年間の置換速度  $T_{1/2}[t]$  に変換した。1 より小さい  $T[t]$  については、 $T_{1/2}[t] = 1/2 \times T[t]$  として  $T_{1/2}[t]$  を求めた。求めた  $T_{1/2}[t]$  は表 4 および図 4 に示した。

しかし  $t = 1.5$  ( $T[1.5] = 1$ ) においては、置換速度が 100% よりも大きい可能性を検討しなければならない。なぜなら、 $t-1$  から  $t$  の 1 年間に合成された骨コラーゲン量が、 $t$  の時点で骨に存在するコラーゲン量より大きくなる可能性があるためだ。つまり、 $T[t]$  が 1 の場合には、潜在的な置換速度が見かけ上の置換速度を上回っている可能性がある。したがって、 $T[t] = 1$  となる 1.5 歳において 0.5 年分の置換速度を求める際、1 年あたりの見かけ上の置換速度  $T[t]$  に単純に 1/2 をかけるだけでは、本来の 0.5 年分の置換速度を過小評価してしまう恐れが

ある。

ここでは、骨コラーゲンの置換速度は直線的に減少していくと仮定して、 $T_{1/2}[3.5]$  ( $= 0.14$ ) と  $T_{1/2}[2.5]$  ( $= 0.38$ ) の延長線上に  $T_{1/2}[1.5]$  の値があるものとした。すなわち、1.0 歳から 1.5 歳のあいだの置換速度は  $T_{1/2}[1.5] = 2 \times T_{1/2}[2.5] - T_{1/2}[3.5]$  という式から求めた。潜在的な置換速度が 100%より大きい可能性はあるものの、データセットから求めた  $T_{1/2}[0.5]$  もこの直線の延長線上にのるため、ここで設定した仮定は妥当であると考えられる (図 4)。

#### ■ 食物由来の乳幼児・子供骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値の計算

ある年齢  $t$  の子供骨において合成されるコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値  $N_c[t]$  は

$$N_c[t] = (1 - p[t]) \times (N_m + E) + p[t] \times N_n \quad (\text{式 2})$$

と表せる (Millard, 2000)。 $p[t]$  は食物中に占める離乳食の相対的な割合である。 $N_m + E$  は母乳に含まれるタンパク質に由来するコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値を示している。 $N_m$  は母親体組織コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値であり、大人女性の骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均 (10.4) で近似した (mother)。E は母親体組織タンパク質と乳児体組織タンパク質の間の  $^{15}\text{N}$  の濃縮係数である (Enrichment)。この値は、現代で髪・爪ケラチンについて実験的に調べたもの (Fuller et al. 2006a) でも、過去の骨コラーゲンの研究 (Waters-rist & Katzenberg, 2009) でも、ある程度のバリエーションがあるので、変数とした。 $N_n$  は離乳食および母乳以外の食物に含まれるタンパク質から合成されたコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値である (non-milk)。これまで、離乳食の  $\delta^{15}\text{N}$  値が大人のおもものそれと異なる可能性は考慮されず、 $N_n$  は大人のおももの骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均で代用されてきた。しかし本研究では、大人のおもものとは異なる  $\delta^{15}\text{N}$  値を示す離乳食・食物が子供に与えられていた場合を考慮し、 $N_n$  を変数とした。

Millard (2000) にしたがって、食物中に占める離乳食の割合は  $p[t]$ 、離乳の開始年齢は  $t_1$ 、

離乳の終了年齢は  $t_2$ 、と表し、以下の場合分けを適用した。

(i)  $t < t_1$  のとき (母乳のみ):  $p[t] = 0$

(ii)  $t > t_2$  のとき (母乳なし):  $p[t] = 1$

(iii)  $t_1 \leq t \leq t_2$  のとき (離乳中) には、離乳の進みかたを考慮して 4 種類の式で表すことができる。すなわち、直線形:  $p[t] = (t - t_1) / (t_2 - t_1)$ 、放物線形:  $p[t] = [(t_2 - t) / (t_2 - t_1)]^2$ 、逆放物線形:  $p[t] = 1 - [(t_2 - t) / (t_2 - t_1)]^2$ 、シグモイド形:  $p[t] = 1/2 + 1/2 \times [(2t - t_1 - t_2) / (t_2 - t_1)]^{2/3}$  である。これら 4 つの式はそれぞれ独立にモデルにあてはめて計算し、対象とする集団の測定データにもっともよくフィットするものを採用した。

#### ■ 離乳による乳幼児・子供骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化のモデル化

ある年齢  $t$  における骨コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値  $N_b[t]$  は以下の式によって表すことができる。

$$N_b[t] = N_b[t-0.5] \times (1 - T_{1/2}[t]) + \int N_c[t] dt / 0.5 \times T_{1/2}[t] \text{ (式 3)}$$

$T_{1/2}[t]$  は上述した年齢  $t-0.5$  から  $t$  における 0.5 年間の骨コラーゲン置換速度である (表 4・図 4 参照)。 $N_b[t-0.5] \times (1 - T_{1/2}[t])$  は、0.5 年間の骨置換を経て、骨に残存している分の  $^{15}\text{N}$  を表す。 $\int N_c[t] dt / 0.5$  は  $t-0.5$  から  $t$  までの子供骨において合成されるコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均であり、式 2 より求めた。積分の範囲が 0.5 年なので、平均値を求めるために単位時間の 0.5 で割っている。生後間もない新生児体組織の  $\delta^{15}\text{N}$  値は母親のそれと等しいと考えられるので、 $N_b[0]$  は大人女性の骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均 (10.4) で近似した。 $\int N_c[t] dt / 0.5 \times T_{1/2}[t]$  は、0.5 年間の骨置換を経て、骨に新たに蓄積した分の  $^{15}\text{N}$  を表す。また、推定年齢が 9 ヶ月から 1 歳 (0.875 歳) とされた 1143B および 5121 に対しては、 $N_b[0.875]$  を個別に計算した。具体的には、 $N_b[0.875] = N_b[0.5] \times (1 - T_{1/2}[1.0] \times 0.75) + \int N_c[t] dt / 0.5 \times T_{1/2}[1.0] \times 0.75$  という式を用いた。 $t = 0.5$  から  $t = 0.875$  までの 0.375 年分の骨置換を考慮しているの

で、置換速度  $T_{1/2}[1.0]$  には  $0.75 (=0.375/0.5)$  という係数をかけている。

### 3-2. 骨コラーゲンの同位体分析とモデルの適用

#### ■ 由比ヶ浜南遺跡試料の同位体分析

使用した乳幼児・子供試料および大人試料とその  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値を、表 5 に示した (下見, 2007)。続成作用の影響は C/N 比と収率で測った。続成作用の影響が小さいと考えられている C/N 比の範囲は 2.9 から 3.6 だが (DeNiro, 1985)、292、1108、1130 はこの範囲外にあった。収率 (Yield) は、骨試料の乾燥重量に対する、抽出されたコラーゲンの乾燥重量の割合 (%) で表される。コンタミネーションの影響が小さいと考えられている収率の範囲は 1%以上だが (Van Klinken, 1999)、238 は 0.38%の収率しかなかった。これら 4 つの試料は議論から除いた。%C と %N の結果をみた限りでは、収率の計算できなかった 8 つの試料も保存状態は悪くないようである。

下見 (2007) が測定した 2 つの大人試料 (ID: 12、245) は、南ほか (2007) の測定した試料とおおむね類似した  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値を示した。 $t$  検定では、 $\delta^{13}\text{C}$  値 ( $t = 1.65, P = 0.15$ )、 $\delta^{15}\text{N}$  値 ( $t = 0.82, P = 0.44$ ) とともに、有意な差はみられなかった。両者を統合すると、 $\delta^{13}\text{C}$  値平均は  $-19.1 \pm 0.9\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  値平均は  $10.5 \pm 0.7\text{‰}$  だった。 $\delta^{15}\text{N}$  値の平均は女性で  $10.4 \pm 0.6\text{‰}$ 、男性で  $10.7 \pm 0.9\text{‰}$  であり、 $\delta^{13}\text{C}$  値の平均は女性で  $-19.4 \pm 0.8\text{‰}$ 、男性で  $-18.6 \pm 1.1\text{‰}$  だった。 $t$  検定では、 $\delta^{13}\text{C}$  値 ( $t = 1.07, P = 0.32$ ) および  $\delta^{15}\text{N}$  値 ( $t = 0.56, P = 0.59$ ) とともに、男女のあいだで有意な差はみられなかった。

乳幼児・子供の  $\delta^{15}\text{N}$  値・ $\delta^{13}\text{C}$  値を図 5 にプロットし、大人の平均値  $\pm 1$  標準偏差の範囲を示した。3.5 歳以下のすべての乳幼児・子供は、大人の平均値 ( $10.5 \pm 0.7\text{‰}$ ) より高い  $\delta^{15}\text{N}$  値を示した (図 5B)。Mann-Whitney の  $U$  検定をおこなった結果、99%水準で有意な差がみられた ( $U = 10.0, P < 0.01$ )。乳幼児・子供におけるこの  $\delta^{15}\text{N}$  値の上昇は授乳の結果であると考えられる。 $\delta^{15}\text{N}$  値は 1.5 歳から徐々に低下し、5 歳以降は概ね大人と同じような値を

示した。この変化は離乳によるものと考えられるが、骨の置換速度が未知であるため、正確な離乳年齢は推定できない。6歳以降の子供の $\delta^{15}\text{N}$ 値の平均 ( $10.7 \pm 0.9\%$ ) と大人のそれ ( $10.5 \pm 0.7\%$ ) のあいだに有意な差はなく ( $t = 0.62, P = 0.54$ )、ばらつきにも有意な差はなかった ( $F = 1.03, P = 0.52$ )。このことは、6歳以降の子供が、大人の食物と同じような $\delta^{15}\text{N}$ 値を示す離乳食・食物を摂取していたことを示唆している。

一方、ほとんどの乳幼児・子供骨コラーゲンの $\delta^{13}\text{C}$ 値は大人平均値の1標準偏差の範囲におさまった (図 5A)。20歳以下の乳幼児・子供骨コラーゲン $\delta^{13}\text{C}$ 値の平均 ( $-19.2 \pm 0.5\%$ ) と大人のそれ ( $-19.1 \pm 0.9\%$ ) のあいだに有意な差はなかった ( $t = 0.52, P = 0.61$ ) が、ばらつきには95%水準で有意な差があった ( $F = 5.67, P = 0.02$ )。

乳幼児・子供は形態的に未発達で、性別推定が不可能である場合が多い。そのため、乳幼児の食性の男女差による違いは検討しなかった。

#### ■ 先行研究のモデルとの比較

Schurr (1997) が報告し、Millard (2000) がモデルの検証に使用した、北米Indiana州のAngel集団の測定データ (補遺 4) に本研究で開発した方法を適用した。Angel遺跡 (西暦1300年から1450年) は開拓民の集団がのこした大規模な遺跡で、主な生業としてトウモロコシの農耕が営まれ、補助的に野生食物の採集がおこなわれていたことが指摘されている (Green & Munson, 1978)。乳幼児・子供骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値の分析データにそれぞれのモデルを適用し、Schurr (1997) は離乳開始年齢を1.5歳、Millard (2000) は開始が2.5歳で終了が3.5歳 (大人の骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値を基準に推定した $N_m$ を採用した場合)、または開始が3歳で終了が4歳 (乳幼児・子供の骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値を基準に推定した値を $N_m$ のかわりに採用した場合) であると推定している。

本研究では、まず、式3を用いて、骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値 $N_b[t]$ を0.5年ごとに連続的にモデル化した。次に、年齢を基準にして、試料の測定値とモデル化した $N_b[t]$ の差 $D_N$ を求めた。 $D_N$ はそれぞれ2乗して、データセット全体での $D_N^2$ 平均値を求めた。最後に、線形計

画法で  $D_N^2$  平均値を最小にするパラメータ (離乳の開始  $t_1$ 、終了年齢  $t_2$ 、離乳食に由来するコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値  $N_n$ 、母親骨と乳幼児骨コラーゲンのあいだの母乳を介した濃縮係数  $E$ ) の値を決定した。これらの計算は Millard (2000) の示した 4 種類の離乳の進みかたすべについて独立におこない、4 種のうち最小の  $D_N^2$  平均値を示したものを採用した。

計算の結果、開始 ( $t_1$ ) と終了 ( $t_2$ ) が 3.0 歳にほぼ同時に起こる離乳年齢が推定された (表 6、図 6)。これは、離乳がすみやかに終了したことを示していると考えられる。4 種の形のモデルのあいだにはほとんど違いがなく、試料測定値とモデル化した  $\delta^{15}\text{N}$  値との差の 2 乗  $D_N^2$  平均値の平均値は、放物線形と逆放物線形で 0.737、直線形とシグモイド形で 0.739 だった。そのほかのパラメータは 4 種の形のモデルにおいて同一で、離乳開始および終了年齢はどちらも 3.0 歳、母親体組織と子供体組織の間の濃縮係数は 1.8‰、離乳食タンパク質に由来する骨コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値は 7.4‰ と推定された。ただし、推定の際には、0.5 歳以下の乳幼児を 0 歳として扱った。

#### ■ 由比ヶ浜南集団へのモデルの適用

次に、式 3 を用いてモデル化した  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化と実際のデータを比較することで、由比ヶ浜南遺跡集団における離乳の開始・終了年齢を推定した。結果は表 7 および図 7 に示した。乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化ともっともよくフィットした (4 種のうちで  $D_N^2$  平均値が最小になった) のは、離乳の進みかたが直線形のモデルだった。このモデルでは、離乳は 1.5 歳から始まり 2.5 歳に終わる。母親体組織と子供体組織の間の濃縮係数は 2.7‰ と推定された。離乳食タンパク質に由来する骨コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値は 10.4‰ と推定された。試料測定値とモデル化した  $\delta^{15}\text{N}$  値の差の 2 乗  $D_N^2$  平均値は 1.629 であり、シグモイド形のモデルも非常に近い値を示した。4 種の形のモデルを比較すると、離乳の始まりの推定年齢はばらつきが比較的小さかった ( $1.4 \pm 0.1$  歳) のに対し、終わりの推定年齢はばらつきが大きかった ( $2.5 \pm 0.3$  歳)。F 検定をおこなった結果、始まりと終わりの推定年齢の分散のあいだには有意な差があった ( $F = 12.65, P = 0.03$ )。このことは、異なる離乳の進みかたを表

すモデルが適用されることにより、離乳開始の推定年齢はそれほど変化しないが、離乳終了の推定年齢はある程度変わり得ることを示唆している。より大きな推定年齢を示した逆放物線形のモデルを除き、離乳の開始・終了年齢はどの形のモデルでも互いに似通っていた。



## 4. 考察

### ■ モデルの妥当性の評価

1年後にあたる測定された<sup>90</sup>Sr/Ca値と、式1によってモデル化した値 $S_b[t]$ を等しくさせる仮想的な骨置換速度 $T[t]$ の値を、すべての個別の組み合わせについて独立に計算した結果では、それぞれの仮想的な $T[t]$ の値が大きくばらついていた(表2、図3)。また、仮想的な個別の $T[t]$ が0.0以上1.0以下の範囲に収まらないケースも数多くみられた。しかし、1.5歳から3.5歳で置換速度が急激に減少する傾向はいずれの計算結果においても同様であり、年齢による骨置換速度の変化には一定のパターンが観察された。本研究で分析に用いたデータでは、個体ごとの食性などのばらつきが考慮されておらず、そのことが $T[t]$ の大きなばらつきを生み出す原因のひとつになったと考えられる。今後、骨代謝の医科学的なマーカーを組みあわせて議論する、対応する食物の同位体比がより正確にわかっているデータセットを用いる、といった操作により骨コラーゲンの置換速度をさらに検討する必要がある。

本研究でおこなった計算では、生後数年間における骨コラーゲンの置換速度が100%(年<sup>-1</sup>)と推定され、この結果はほかの先行研究と整合的である。Fogel et al. (1997)によると、乳幼児の体組織タンパク質の置換は0.8年から1.6年で終了する。<sup>90</sup>Srの取り込みの研究から、Rivera (1965)は初期の乳幼児で骨の置換速度は1.0(年<sup>-1</sup>)程度であることを報告し、Bryant & Loutit (1964)は生後の最初1年間で骨の100%が置換することを報告している。Bryant & Loutit (1964)はさらに、生後の2年間での<sup>90</sup>Srの取り込み速度は、その後の取り込み速度よりも大きいことを報告している。これらの報告は、 $T_{1/2}[0.5]$ (0.0歳から0.5歳までの0.5年分の置換速度)と $T[1.5]$ (1.0歳から2.0歳までの1年分の置換速度)が1.0であったという結果および、1.5歳以降で $T[t]$ が急激に低下するという結果と矛盾しない。

Hedges et al. (2007)は、核実験に由来する<sup>14</sup>Cの取り込みから、主に大人における骨コラーゲンの置換速度を推定している。彼らの推定によると、思春期(16歳)の置換速度は0.098(年<sup>-1</sup>)で、成長の終わり(22歳)には0.036(年<sup>-1</sup>)にまで低下する(いずれも男女の平均値)：

本研究の図 2 参照)。本研究で推定した置換速度  $T[t]$  (16.5 歳で 0.20、19.5 歳で 0.10) は、これらにおおむね類似しているが、若干大きな値をとっている。しかし、彼らは大人 (40 歳から 97 歳) の骨試料から子供骨コラーゲンの置換速度を推定しているため、15 歳以下の子供骨置換速度の推定値はそれほど信頼できるものでないと議論している。実際、Hedges et al. (2007) によって推定された置換速度 (男女の平均値) を適用して 1 年ずつ計算していくと、40 歳の大人骨に存在するコラーゲンのうち、5 歳の時点から残っているものは全体の 1% の量、10 歳の時点から残っているものは 9% の量になるという結果が得られる。また、20 歳以下については本研究で推定した置換速度をあてはめて、同じように 1 年ずつ計算していくと、40 歳の大人骨に存在するコラーゲンのうち、5 歳の時点から残っているものは全体の 1% の量、10 歳の時点から残っているものは 4% の量になるという結果が得られる。したがって、本研究の結果は Hedges et al. (2007) の結果と必ずしも矛盾するものではない。

$^{90}\text{Sr}$  の取り込みの研究から、大人骨の置換速度について、Bryant & Loutit (1964) は 0.083 (年<sup>-1</sup>)、Rivera (1965) は 0.080 (年<sup>-1</sup>) と推定している。本研究で推定した置換速度は、これらに比べてすこし値が大きい ( $T[19.5] = 0.10$ )。しかし 16.5 歳の 0.24 (年<sup>-1</sup>) から速度が断続的に減少していることを考えれば、成長の終わりの時期にはもう少し小さな置換速度をとっている可能性が高いと考えられる。

Angel 集団における離乳習慣について、Schurr (1997) および Millard (2000) の推定と本研究で開発した方法の推定結果が異なっていた理由は、(1) 乳幼児・子供骨の置換速度の年齢による変化をある程度正確に評価したため、(2) 母親と乳幼児のあいだの母乳を介した  $^{15}\text{N}$  の濃縮係数を変数としたため、(3) 離乳食の  $\delta^{15}\text{N}$  値を変数としたため、である。それに加えて、Angel 集団の試料サイズが小さかったことも、違いが生じた原因のひとつではないかと考えられる。各年齢についてそれぞれ複数の個体が存在する由比ヶ浜集団の試料セットに比べて、Angel 集団の試料はあきらかにサイズが小さく、特に 0.5 歳から 7 歳までのデータはすべてあわせても 4 個体分のみである。サイズの小さい試料とモデルを比較すると、特定の年齢のみに対して最適な値を計算することになってしまい、集団全体の平均的

な授乳習慣を反映しないおそれがある。したがって、3歳頃にすみやかに授乳が終了するという今回の復元が、北米開拓民の離乳習慣を正しく反映していない可能性もあり得る。

線形計画法により本研究で算出された母親体組織と子供体組織の間の濃縮係数は2.7‰であり、先行研究で報告されている範囲（約2から3‰）に収まった（Fogel et al., 1989; Fuller et al., 2006a）。このことは、本研究で用いたモデルの信頼性を裏付けている。

中世由比ヶ浜南集団で示された離乳年齢（1.5歳に始まり、2.5歳に終わる）は、現代の「伝統的社会」の離乳年齢と比較して妥当と考えられる範囲におさまっている。Sellen & Smay (2001) は現代の「伝統的社会」の生業と授乳習慣の関係について議論している。彼らは、農耕を主な生業とする集団において、平均的な離乳の始まりは生後6ヵ月程度（n=31）で、平均的な離乳の終わりは生後27ヵ月程度（n=78）であることを示した。彼らはまた集団間のばらつきが大きいことも報告している（標準偏差は、離乳の始まりで6ヵ月程度、終わりで1年程度）。これらの集団と比べて、由比ヶ浜南遺跡で推定された離乳年齢はやや遅いが、両者の違いは無視できるほど小さい。

モデルは離乳年齢の誤差範囲を算出できないが、これは、データセットにもとから多くの誤差が含まれているためである。年齢推定には数ヶ月以上の誤差が存在し、食性には個人間のばらつきも存在する。推定に用いる生データの質を向上させることによっても、より詳細な議論が可能になると考えられる。

#### ■ 由比ヶ浜南集団における授乳習慣

骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化だけを見た場合には5歳から6歳程度で離乳が終了するようにみえるが、モデルを利用して推定した離乳終了年齢は2.5歳だった。これは、子供の年齢が大きくなるにつれて骨置換速度が低下していくためだと考えられる。これまで、乳幼児・年齢の小さい子供の骨置換速度は大きいと仮定され、食物の  $\delta^{15}\text{N}$  値が骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値に十分には反映されない可能性は無視されていた。しかし  $^{90}\text{Sr}$  を用いた検討から、1.5歳以

降で骨置換速度は急速に低下することが示唆された (図 2 参照)。この結果、乳幼児・子供の時期においてさえ、骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値が食物の  $\delta^{15}\text{N}$  値を反映するまでにある程度の時間差が生じてしまうおそれがある。

その一方で、授乳により上昇した  $\delta^{15}\text{N}$  値が低下をはじめめる年齢は、モデルを利用して推定した離乳開始年齢とほぼ同じであった (1.5 歳程度)。これは、乳幼児骨コラーゲンの置換速度が十分に大きいためだと考えられる。したがって、次の子供の妊娠に関係する離乳終了年齢を見積もる際には、乳幼児期の終わりから子供期における置換速度の低下の影響を十分に考慮する必要がある。

乳幼児・子供骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値および 5 歳以降の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、大人のそれとおおむね同じような値を示した。また、モデルを利用して推定された母乳以外の食物由来のコラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値は、大人の骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均と同じ値 (10.5%) を示した。大人は植物だけでなく海産物をも主なタンパク質源としていたことがあきらかにされており (南ほか, 2007)、これらの食物は離乳食としても利用されていた可能性が示唆される。また、子供の  $\delta^{13}\text{C}$  値のばらつきが大人のそれより有意に小さかったことから、食性の個人差が子供でより小さかった可能性が示唆される。これらのことから、子供の大部分は大人の食物と同じような  $\delta^{13}\text{C}$  値の離乳食・食物を摂取していたが、個人間の食性の差は大人よりも小さかったという、集団内に共通する離乳食摂取の習慣があったことがうかがえる。

## 5. 小結

第 1 部では、乳幼児・子供骨の置換速度を推定し、それを利用して、離乳の開始・終了年齢を定量的に推定できるモデルの開発を試みた。このモデルでは、本研究で新たに推定した骨置換速度の年齢による変化が考慮されている。乳幼児・子供骨置換速度の推定においては、食物の  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値は乳製品の  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値で代用できる、骨の無機質とコラーゲンの置換速度は等しい、という 2 つの仮定が含まれているが、これらの仮定は妥当なものであると考えられる。Schurr (1997) や Millard (2000) の提案したモデルに比べて、本研究で開発したモデルでは、(1) 乳幼児・子供骨の置換速度をある程度正確に評価している、(2) 母親と乳幼児のあいだの母乳を介した  $^{15}\text{N}$  の濃縮係数を変数としている、(3) 離乳食の  $\delta^{15}\text{N}$  値を変数としている、という 3 点において、離乳にともなう骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化をよりもっともらしく推定できる。しかしながら、過去の人類集団においてより正確に離乳年齢を復元するためには、歯芽形成にもとづく年齢推定の精度を向上させる必要がある。この点については今後の検討が必要だが、モデルを利用することで、由比ヶ浜南遺跡の授乳習慣の定量的な復元を試みることができた。由比ヶ浜南集団の離乳は 1.5 歳に始まり、2.5 歳に終わると推定された。この結果は、実際の離乳終了が、子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値が変化するのよりもかなり早い年齢だった可能性を示唆する。今後、本モデルを応用して、時代や地域の異なる他の集団の定量的な離乳年齢のデータが蓄積されれば、生活史の進化や環境適応の観点からヒトの授乳習慣を議論することがより容易になる。

## 第 2 部

炭素・窒素同位体分析による有珠モシリ集団の授乳習慣の復元

## 1. 背景

同位体を用いた授乳習慣復元は、穀物農耕の開始以降の集団については比較的数多くおこなわれているのに対し、穀物農耕の開始以前の狩猟採集漁撈集団については研究例が少ない。また、それらの研究では骨の置換速度 (Turnover rate) の変化は考慮されておらず、骨コラーゲンにおける  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化のみから離乳年齢が推定されている。たとえば、Clayton et al. (2006) は南アフリカ Matjes River Rock の狩猟採集集団 (7.5 千年から 2 千年前) の授乳期間を復元し、離乳が 2 歳頃に始まり 4 歳頃に終わると推定した。Fogel et al. (1989) はテネシー峡谷の前栽培農耕集団 (7.5 千年から 4 千年前) の授乳期間を復元し、離乳が生後 18 ヶ月から 20 ヶ月頃に始まると推定した。彼らは離乳の終了年齢については言及していない。Schurr & Powell (2005) は北米東部の、半定住的でウリ科植物の栽培をおこなっていた狩猟採集集団 (3 千年から 2.5 千年前) の授乳期間を復元し、離乳が 2 歳頃から始まり 5 歳頃に終わると推定した。Fogel et al. (1989) と Schurr & Powell (2005) は、先史時代の狩猟採集集団と、同じ地域に暮らした歴史時代におけるトウモロコシ農耕集団とのあいだで授乳習慣の比較をおこなっているが、生業の異なる両集団のあいだに大きな違いは認められなかった。このように、穀物農耕開始以前のさまざまな集団の授乳期間や離乳食の利用を復元することは、生業形態や食性と授乳習慣の関係を考察するうえで重要である。しかしこれまで、こうした報告は陸生食物に依存した先史狩猟採集集団に限られていた。

そこで本研究は、北海道先史時代の縄文文化の古人骨集団について、同位体分析と第 1 部で開発したモデルを用いて、授乳習慣を復元することを目的とした。北海道では、縄文時代の終わり (約 2800 年前) に穀物農耕を受け入れた本州と対照的に、縄文時代から近世にいたるまで狩猟採集漁撈が主要な生業であり、特に海生哺乳類・海生魚類の利用が重要であった (西本, 1985; 藤本, 1988)。同位体分析を利用した研究からも、植物質食物の利用はそれほど多くなく、海産物に高度に依存した食性がとられていたことが示されている (南川 2001; 米田 2002; Yoneda et al., 2002)。一般に、植物質食物に比べて海生哺乳類・海生魚類は  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値が高いので、乳幼児が植物質を利用した離乳食を与えられていれば、その

食性の変化は骨コラーゲンの同位体比に明確に現れると期待できる。



## 2. 材料と方法

### ■ 有珠モシリ遺跡

有珠モシリ遺跡は、北海道南西部の噴火湾（内浦湾）東岸沿岸に位置する面積約 10000m<sup>2</sup> の岩礁性の小島にあり（図 8）、1985 年から 1987 年にかけて発掘がおこなわれ、発掘時は有珠 10 遺跡と呼ばれていた（大島ほか, 1989, 1990）。噴火湾の沿岸地帯には、縄文時代や続縄文時代の貝塚が数多く分布しており、有珠モシリ遺跡もそのうちのひとつである。有珠モシリ遺跡からは、続縄文時代恵山期の埋葬人骨および散乱人骨が発見されており、二次的埋葬（大島ほか, 1989, 1990）や、2 例の子供 2 個体の合葬（Adachi et al., 2003, 2006）も報告されている。人骨のほかにも、動物骨、各種の骨角器（槍先、銚先、ヤス先、釣針、スプーンなど）、装身具、各種石器、土器が出土している（大島ほか, 1989, 1990）。また、南海産のイモガイの貝輪もみつかっており、本州弥生文化との交流があったことが示唆されている（大島ほか, 1989, 1990; 青野・大島, 2003）。

恵山文化は、続縄文時代の前期、2300 年前から 1700 年前にかけて、北海道の南西部（渡島半島～石狩低地帯）に広がっていた文化である（青野・大島, 2003）。恵山文化の集団は堅穴式の住居に定住し、海洋資源に高度に依存した狩猟採集集団であったと考えられている。複数の遺跡の動物遺存体の研究から、この時期の生業の中心は狩猟採集漁撈で、植物利用はそれほど多くなかったこと、特に冬季にオットセイが越冬する噴火湾では海獣狩猟が重要な生業であったことが示唆されている（西本, 1984, 1985）。骨コラーゲンの同位体分析をおこなった研究では、続縄文時代の集団においては、海獣や海生魚類が主要なタンパク源であったことが示されている（南川, 2001; 米田, 2002）。恵山文化では、鉄器の輸入などに本州の弥生文化との交流がみられるが、穀物農耕は受け入れず、生業基盤は縄文時代のような狩猟採集のままであったと考えられている（青野・大島, 2003）。

### ■ 骨試料

分析に使用した 39 点の乳幼児・子供骨試料はすべて年齢推定の可能な部位の残っている

ものである。乳幼児・子供の年齢は、歯の発達段階 (Smith, 1991; Ubelaker, 1989) および四肢骨の骨体の長さから推定した。歯の発達段階から年齢を推定しているものはすべて、顎骨をレントゲン撮影して、歯槽に埋存している歯の形成過程を評価した。この年齢推定は共同研究者の澤田純明博士 (聖マリアンナ医科大学) によっておこなわれた。推定年齢は機械的に小数点第 1 位まで算出してあるが、数ヶ月の誤差がある。範囲として示された年齢については中央値をポイント年齢として用いた。散乱骨が多いため、乳幼児・子供骨試料は年齢推定をおこなった個々の骨の一部分から得た。サンプリング部位は上顎骨、下顎骨、四肢骨のいずれかである。また、当研究室にて以前分析がおこなわれた大人骨試料 12 点も試料セットに加えた。大人骨のサンプリング部位は肋骨または中手骨であり、性別は骨盤の形態をもとに推定した。すべての試料は表 8 にリストした。試料は噴火湾文化研究所の保管している骨試料より、百々幸雄教授 (東北大学) の協力を得て採取した。

#### ■ 前処理と同位体分析

第 1 部と同様の方法 (pp. 22) でおこなった。

### 3. 結果

#### ■ 試料について

乳幼児・子供骨試料と大人骨試料における  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の分析結果を、表 8 に示した。続成作用の影響は C/N 比と収率 (Yeild) で評価した。続成作用の影響が小さいと考えられている C/N 比の範囲は 2.9 から 3.6 だが (DeNiro, 1985)、乳幼児・子供 39 点中では 14 点がこの範囲外にあった (表 8)。これらの試料は続成作用の影響で同位体比が変化している可能性があると考えて、議論から除いた。同位体分析の際には、一般的に、収率もコラーゲンの信頼性の基準となる。収率は、骨試料の乾燥重量に対する、抽出されたコラーゲンの乾燥重量の割合 (%) で表される。コンタミネーションの影響が小さいと考えられている範囲は 1%以上であり (Van Klinken, 1999)、すべての骨試料は十分な収率を有していた。

#### ■ 大人の同位体比

当研究室にて以前測定された大人骨コラーゲンの同位体分析結果を図 9 に示した (米田 穰, 私信)。解析に用いた女性骨は 5 個体で、 $\delta^{13}\text{C}$  値の平均は  $-13.8 \pm 0.2\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  値の平均は  $18.2 \pm 0.3\text{‰}$  だった (図 9A)。解析に用いた男性骨は 7 個体で、 $\delta^{13}\text{C}$  値の平均は  $-13.2 \pm 0.6\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  値の平均は  $18.6 \pm 0.6\text{‰}$  だった。男女のあいだで *t* 検定をおこなったところ、 $\delta^{13}\text{C}$  値の平均値には 95%水準で有意な差があり ( $t = 2.16, P = 0.05$ )、 $\delta^{15}\text{N}$  値には有意な差がなかった ( $t = 1.38, P = 0.20$ )。  $\delta^{13}\text{C}$  値、 $\delta^{15}\text{N}$  値ともに、男女のあいだで分散に有意な差はみられなかった ( $\delta^{13}\text{C}$  値 :  $F = 3.76, P = 0.07$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  値 :  $F = 2.07, P = 0.20$ )。男女を統合すると、 $\delta^{13}\text{C}$  値の平均は  $-13.4 \pm 0.6\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  値の平均は  $18.5 \pm 0.6\text{‰}$  となった。この値は、南川 (2001) が有珠遺跡より出土した人骨 9 点を測定した結果 ( $\delta^{13}\text{C}$  値の平均 :  $-13.3 \pm 0.7\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  値の平均 :  $18.1 \pm 0.6\text{‰}$ ) と非常によく似ている (図 9A : 南川 (2001) には平均値しか示されていないため、検定はおこなっていない)。

図 9B には、大人骨コラーゲンの同位体比とともに、利用された可能性のある食資源に由来するコラーゲンの同位体比も示してある。食資源の同位体比は、有珠遺跡の海生哺乳類

と海生魚類の骨コラーゲン同位体比 (南川, 2001)、および、現代日本の C<sub>3</sub> 植物の同位体比 (Yoneda et al., 2004) を参考にした。参考にした値はそれぞれ表 9 に示した。大人骨の同位体比の違いが非常に小さかったことから、南川 (2001) と本研究の測定値のあいだに違いはほとんどないことがわかる。食物から骨コラーゲンへの濃縮係数には、Ambrose (1993) を参考にして、 $\delta^{13}\text{C}$  値で 4.6‰、 $\delta^{15}\text{N}$  値で 3.4‰をあてはめた (Yoneda et al., 2004)。有珠モシリ集団において、主要なタンパク質源は海生哺乳類に大きく依存しており、それより  $\delta^{13}\text{C}$  値が低い食物もある程度は摂取されていた、ということが図 9B より示される。

#### ■ 乳幼児・子供の同位体比

乳幼児・子供の  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値を年齢に対して示し、大人の平均値と比較した (図 10)。多くの乳幼児・子供は大人の平均値と同じような  $\delta^{13}\text{C}$  値を示した一方で、G-5 1987/7、UU10/870721 G-5、G-8-11、UU10 G-13、17-65、UU10 G-9 (2) の 6 個体は大人平均値の 2 標準偏差の範囲 ( $-13.4 \pm 1.2 \text{ ‰}$ ) より低い  $\delta^{13}\text{C}$  値を示した (図 10A)。Mann-Whitney の *U* 検定をおこなった結果、これら 6 個体とその他の乳幼児・子供の  $\delta^{13}\text{C}$  値のあいだには 99%水準で有意な差がみられた ( $U=21, P<0.01$ )。また、これら 6 個体では、同じくらいの年齢カテゴリーで比較した  $\delta^{15}\text{N}$  値も低い傾向にあった (図 10B)。形態・副葬品・埋葬状況などを見る限りでは、これら 6 個体とそれ以外に差はない。また、 $\delta^{13}\text{C}$  値と  $\delta^{15}\text{N}$  値を二次元にプロットすると、これら 6 個体とそのほかの個体はあきらかに異なる範囲にわけられた (図 11)。こうした一連の結果は、この 6 個体とその他の乳幼児・子供の食性が異なっていた可能性を示している。そこで、これ以降の解析では、乳幼児・子供のデータを、 $\delta^{13}\text{C}$  値が低いグループ (上述の 6 個体: 以降「高  $^{13}\text{C}$  群」と表記) と、 $\delta^{13}\text{C}$  値が高いグループ (それ以外: 以降「低  $^{13}\text{C}$  群」と表記) にわけて考えることにした。

##### (1) 高 $^{13}\text{C}$ 群

高  $^{13}\text{C}$  群のほとんどの乳幼児・子供の  $\delta^{13}\text{C}$  値は大人の平均値  $\pm 1$  標準偏差の範囲におさ

まった (図 10A)。乳幼児・子供の  $\delta^{13}\text{C}$  平均値 ( $-13.5 \pm 0.4\text{‰}$ ) と大人のそれ ( $-13.4 \pm 0.6\text{‰}$ ) のあいだに有意な差はなく ( $t = 0.38, P = 0.71$ )、ばらつきにも有意な差はなかった ( $F = 1.35, P = 0.31$ )。一方、高  $^{13}\text{C}$  群すべての乳幼児・子供の  $\delta^{15}\text{N}$  値 (平均値  $20.2 \pm 1.0\text{‰}$ ) は、大人女性の平均値 ( $18.2 \pm 0.3\text{‰}$ ) より高い値を示した。Mann–Whitney の U 検定をおこなった結果、高  $^{13}\text{C}$  群と大人女性の  $\delta^{15}\text{N}$  値のあいだには 99%水準で有意な差がみられた ( $U = 15.0, P < 0.01$ )。この  $\delta^{15}\text{N}$  値の上昇は授乳の結果であると考えられる。 $\delta^{15}\text{N}$  値の年齢による変化をみると、4 歳から徐々に低下し、10 歳周辺の子供は大人と同じような値を示した。また、試料数は少ないが、10 歳前後の子供の  $\delta^{15}\text{N}$  値は大人の  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均 ( $10.5 \pm 0.7\text{‰}$ ) の 1 標準偏差の範囲におさまっている。これらのことは、有珠モシリ遺跡の高  $^{13}\text{C}$  群の乳幼児・子供が、大人の食物と同じような  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の離乳食を摂取していたことを示唆している。

第 1 部で開発した方法を用いて、このグループにおける離乳年齢を定量的に推定した結果を表 10 に示す。試料の  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化にもっともよくフィットした (4 種のうちで  $D_N^2$  平均値が最小になった) のは、離乳の進みかたが直線形および逆放物線形のモデルだった。これらのモデルではパラメータの値がほぼ同一で、離乳の開始と終了はともに 3.2 歳と推定された。母親体組織と子供体組織の間の濃縮係数は 3.0‰、離乳食タンパク質に由来する骨コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  値は 18.2‰と推定された。 $D_N^2$  平均値は 0.484 だった。シグモイド型を除いて 4 種の形のモデルで推定された結果に大きな違いはなかった。図 12 には逆放物線形のモデルによって得られた結果を示した。

## (2) 低 $^{13}\text{C}$ 群

低  $^{13}\text{C}$  群には、0 歳のときに大人女性の平均値よりも低い  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値をとり、年齢が上がるにつれて同位体比が上昇していく傾向があるように見える (図 10)。この傾向は、試料サイズが小さいためにそれほど明確ではないが、有珠モシリ遺跡の高  $^{13}\text{C}$  群の乳幼児・子供が、生後すぐに  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の低い食物を摂取し、その後、徐々に同位体比の高い食物を摂取するようになっていったことを示唆している。

## 4. 考察

### ■ 大人の食性

骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値には男女の平均値のあいだで有意な差がみられ、このことは、男女の食性に多少の違いがあったことを示唆している。女性の  $\delta^{13}\text{C}$  値のほうが男性より低い傾向にあることから、食性に占める陸生食物の割合が、男性より女性で若干高かったことが推測される。5 世紀から 12 世紀に北海道の北東部で栄えたオホーツク文化に属するウトロ遺跡・浜中二遺跡では、男女の骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値に差がないことが報告されており (米田, 2002)、男女の食性の違いという点においても、先史時代の北海道にはそれぞれの環境に適応した時代差・地域差があったことがうかがえる。

食資源の  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値と比較すると、有珠モシリ集団において、主要なタンパク質源は海生哺乳類に大きく依存しており、それより  $\delta^{13}\text{C}$  値が低い陸生の食物 ( $\text{C}_3$  植物や陸上動物) もある程度は摂取されていた、と考えられる (図 9B)。恵山文化の集団は海洋資源 (特に海生哺乳類) に大きく依存していたことが、動物遺存体や道具の組成についての考古学的研究 (西本, 1984; 青野・大島, 2003) や同位体分析 (南川, 2001; 米田, 2002) から示されており、本研究の結果はその傾向と矛盾しない。恵山文化においては、雑穀栽培がおこなわれていた可能性も議論されているが、栽培された農作物が主要な食資源となることはなかったと考えられている (青野・大島, 2003)。したがって、有珠モシリ遺跡で摂取されていた陸生食物が植物質のものであった場合、その多くは採集活動によって得られた野生のものである可能性が高い。

### ■ 乳幼児・子供の食性

本研究で使用した乳幼児・子供試料では、39 個体中 14 個体 (36%) の C/N 比が、続成作用の影響が小さいと考えられている 2.9 から 3.6 (DeNiro, 1985) の範囲外にあった (表 8)。しかしながら、以下に述べる 3 点の理由から、この結果は必ずしも試料全体の信頼性を下げはしない。(i) 範囲外にあった 14 個体のうち 7 個体の C/N 比は 3.7 であり、これらは続

成作用の影響をそれほど強く受けているわけではないと推定される。(ii) C/N比が範囲外にあった個体をデータセットに加えても、全体的なパターンにほとんど変化はなかった。(iii) 39 個体のうち 25 個体 (66%) が 5%を越える十分なコラーゲン収率を示しており (Schoeninger et al., 1989; Ambrose, 1990)、収率の観点からは骨コラーゲンの保存状態は良好であると言える。

#### (1) 高 $^{13}\text{C}$ 群における授乳習慣

高  $^{13}\text{C}$  群に着目すると、乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値は 4 歳までは高い値を保ち、4 歳以降で低下していく (図 10B)。乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の低下は 7 歳程度までつづき、10 歳までには大人骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均  $\pm 1$  標準偏差範囲内におさまる。陸生の食資源に依存した過去の狩猟採集集団のいくつかでは、 $\delta^{15}\text{N}$  値が 2 歳前後で低下し始めることが示されている (Fogel et al., 1989; Schurr & Powell, 2005; Clayton et al., 2006)。また、韓国における新石器時代の穀物農耕集団 (2500 年から 2300 年前) では、 $\delta^{15}\text{N}$  値が 1.5 歳程度から低下することが報告されている (Choy & Richards, 2009)。有珠モシリ集団において  $\delta^{15}\text{N}$  値が低下し始める年齢はそれらより遅いように見える。このことは、授乳習慣は生業というより、どのような食資源を利用するかによって変化し得ることを示唆している。

測定結果に第 1 部で開発したモデルを適用すると、実際には 3.2 歳で離乳が始まり、その後すみやかに終了していたという推定結果が得られた。また、このとき推定された乳幼児における  $\delta^{15}\text{N}$  値の濃縮係数は 3.0‰であり、現代人での観察から得られた妥当と考えられる範囲 (2‰から 3‰) におさまっている (Fuller et al., 2006a)。骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化のパターンを観察する限りでは、離乳は 4 歳までに始まり、7 歳から 10 歳程度までつづいているように見える。7 歳程度まで離乳がつづいているように見えるのは、置換速度が比較的遅いため、母乳に含まれるタンパク質に由来する  $\delta^{15}\text{N}$  値の高いコラーゲンが、子供の骨に長期間残っているためだと考えられる。

高  $^{13}\text{C}$  群の乳幼児・子供 (平均値:  $-13.5 \pm 0.4$  ‰) と大人 (平均値:  $-13.4 \pm 0.6$  ‰) の骨コ

ラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値のあいだには、平均値もばらつきも有意な差がなかった。さらに、10歳周辺の高  $^{13}\text{C}$  群の子供は大人と同じような  $\delta^{15}\text{N}$  値を示した。これらのことは、このグループの子供が、離乳時および離乳後に大人の食物と同じような  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値を示す食物 (海生哺乳類と多少の陸生食物) を与えられていたことを示唆している。

高  $^{13}\text{C}$  群の7歳未満の乳幼児・子供の  $\delta^{13}\text{C}$  平均値 ( $-13.5 \pm 0.4\text{‰}$ ) と、大人女性の  $\delta^{13}\text{C}$  平均値 ( $-13.8 \pm 0.2\text{‰}$ ) のあいだには有意な差がみられなかったが (Mann-Whitney の  $U$  検定:  $U = 36.0, P = 0.09$ )、全体的に乳幼児・子供の  $\delta^{13}\text{C}$  値のほうが大人女性より高い傾向がある。母乳のみを摂取する乳児では、母親に比べて  $\delta^{13}\text{C}$  値が約 1‰増加することが報告されており (Fogel et al., 1989; Fuller et al., 2006a)、この結果はその報告と矛盾しない。 $\delta^{13}\text{C}$  値は  $\delta^{15}\text{N}$  値に比べて値の増加が小さいため、試料の個体間のばらつきによって、授乳による値の上昇分が弱められてしまったのではないかと考えられる。

高  $^{13}\text{C}$  群の乳幼児・子供では、年齢と骨コラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の変化のパターンにばらつきが少なく (図 10)、集団全体として見たとき、年齢変化にともなう同位体比の変化が明確に表れている。このことは、高  $^{13}\text{C}$  群内の授乳習慣に、個人差があまりなかったことを示唆している。あるいは、レントゲン撮影により、一部の乳幼児・子供の推定年齢の精度を高めたことが関係している可能性も考えられる。

第 1 部で開発したモデルを適用した結果、有珠モシリ集団では離乳が急速に進み、授乳の終了と母乳以外の食物の導入が同時におこるという結果が得られた。以下に述べる 3 点の理由から、この結果は妥当だと考えられる。(i) 現代の「伝統的な」狩猟採集集団である Dobe !Kung 族の民族学的研究では、乳幼児・子供に 3 歳から 4 歳程度まで母乳を与えるが、母親が次の妊娠に気づいたところで急に授乳を終了させる、という習慣が記録されている (Howell, 1979)。前述したように、現代の「伝統的社会」の習慣は必ずしも先史時代の人類集団のモデルケースとはならないが、この報告は 3 歳前後の子供に対してすみやかに授乳を終了する可能性があり得ることを示している。(ii) アイヌ文化を観察した民族学的な記録には、「離乳の時期は一定せず、自然に止る迄飲ませるが普通である」という記述があり、



特別な離乳食が存在しなかったことが示唆されている (西鶴, 1942)。 (iii) レントゲン撮影を利用した詳細な年齢推定にも数ヶ月程度の誤差はあり、実際にはその範囲内で離乳が段階的に進行していた可能性があり得る。

## (2) 低 $^{13}\text{C}$ 群における授乳習慣

低  $^{13}\text{C}$  群の乳幼児・子供骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値は、0 歳で大人女性の平均値より 2‰から 3‰低く、年齢が増加するにつれ大人の平均値と同じような値にまで上昇していく (図 10A)。大人女性の同位体比のばらつきは非常に小さいため、母乳を与えていた母親の摂取していた食物の同位体比が極端に低かったという説明はあり得そうもない。また、乾燥した気候条件などのように、食性以外に骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値を変化させ得る要因も見いだせない (Heaton et al., 1986; Ambrose & DeNiro, 1987)。したがって、このことは、このグループの乳幼児・子供は生後まもなくから  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の低い食物 ( $\text{C}_3$  植物や陸生動物) を比較的多く摂取し、年齢が増加するにしたがって大人と同じような  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の高い食物 (海生哺乳類) を摂取するようになっていった可能性を示唆している。

一般に、衛生状態の良くない状況で生後 6 ヶ月以内の乳幼児に母乳以外の食物を与えることは、乳幼児の死亡率を極端に高めることがあきらかにされている (Cunningham et al., 1991; Cunningham, 1995; Stuart-Macadam, 1995)。同位体分析による授乳習慣の復元では、その年齢で死んだ個体を試料として用いる。0 歳児における低  $^{13}\text{C}$  群の個体の比率が特に高いことは、このグループの乳幼児・子供が母乳以外の食物を与えられており、それゆえ死亡率も高かったことを反映している可能性がある。

生後まもなくから与えられた食物として、代用乳の可能性をあげることができる。続縄文文化の伝統の一部が受け継がれるアイヌ文化には代用乳が存在したことが記録されている。1900 年代にカラフト島に暮らしたアイヌ集団を記録した民族誌によれば、カズノコをつぶし、ハナウドをほそく刻み、クロユリの根を煮たものを混ぜ、アザラシの油を加えて加熱攪拌したものが代用乳として用いられていた (西鶴, 1943)。もし母乳の出が悪い、ある

いは母親が死亡したなどの場合に、同様の代用乳が恵山文化でも使用されていたとすれば、有珠モシリ集団でも、 $C_3$  植物を利用した同じような代用乳が用いられていてもおかしくない。こうした代用乳を摂取した乳幼児・子供の体組織は  $\delta^{13}C$  値・ $\delta^{15}N$  ともに比較的低い値を示すことが期待される。

## 5. 小結

本研究は、海産物を主要なタンパク質源とする狩猟採集集団の授乳習慣を報告した、はじめての事例である。有珠モシリ集団において、離乳は3.2歳ですみやかに終了する。この年齢は、先史時代の陸生狩猟採集集団における（骨置換速度の変化を考慮していない）2歳前後という年齢（Fogel et al., 1989; Schurr & Powell, 2005; Clayton et al., 2006）より遅い。また、有珠モシリ集団には、母乳以外の陸生食物を生後すぐから与えていた乳幼児・子供グループがあったことも示された。この食物は、後のアイヌ文化で観察されたような代用乳かもしれない（西鶴, 1943）。離乳の際には、どちらのグループにおいても大人の食物と同じような $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{15}\text{N}$ 値を示す食物（海生哺乳類）が与えられていたようである。

これまで研究されてきた植物質中心の食性をもつ集団では、母乳と代用乳の $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{15}\text{N}$ 値の差が小さいので、このようなグループの存在は検出できないと考えられる。一方、有珠モシリ集団では、母親の依存する主要なタンパク質源が海生哺乳類であり、 $\text{C}_3$ 植物に比べて $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{15}\text{N}$ 値があきらかに大きいので、植物を含む代用乳を利用していた可能性のある乳幼児・子供を検出できた。陸生食物に依存している集団に代用乳を使用していた個体が混在していた場合、離乳にともなう $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化にノイズが含まれてしまうかもしれない。

以上の結果から、穀物農耕をもたない先史時代の狩猟採集集団でも、食性や環境などにあわせて授乳習慣を変化させ得ることが示される。有珠モシリ遺跡の続縄文集団では代用乳を用いていた可能性が示されたが、離乳食を積極的に用いて授乳期間を短縮させていなかった可能性も同時に示された。これは中世集団と異なる授乳習慣である。このように、さまざまな集団について授乳習慣を復元することで、ヒト集団の多様な環境適応の一端を知ることができる。今後より多くの集団について、授乳習慣の復元が必要である。

## 総括

第1部では、放射性降下物に含まれる<sup>90</sup>Srの取り込みのデータから乳幼児・子供骨置換速度 (Turnover rate) を推定し、推定した値を組み込んで、離乳にともなう骨コラーゲン $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化を表すモデルを開発した。このモデルを中世日本の集団に適用して解析をおこなった結果、離乳は1.5歳に始まり、2.6歳に終わると推定された。この結果は、一定以上の個体数があれば、モデルを利用して古人骨集団内に共通する離乳年齢を定量的に推定できる可能性があることを示している。

乳幼児・子供骨置換速度の評価は、同位体以外の指標や窒素同位体以外の元素にも応用できる可能性を有している。たとえば、骨に含まれるSr元素とCa元素のモル存在量を比較することで離乳年齢を推定しようと試みた研究がおこなわれているが (Sillen & Smith, 1984)、こうした研究に骨置換速度の評価を持ち込むことで、より正確な離乳年齢の推定が可能になる。また、1950年代から60年代にかけておこなわれた核実験により大気<sup>14</sup>C濃度が一時的に急増したため、法医学の分野では、これを利用して白骨死体などの死亡時期を推定することがある。推定の際には骨コラーゲンの置換速度を考慮して補正をおこなう必要がある。大人の骨についてはこうした補正の試みがなされているが (Geyh, 2000)、乳幼児・子供については例がない。乳幼児・子供骨コラーゲンの置換速度が年齢ごとに評価できれば、大人以外の人骨についてもこのような補正が可能になる。

農耕を主な生業としていたと考えられる由比ヶ浜南集団は、海洋資源の狩猟採集を主な生業としていた有珠モシリ集団に比べて離乳の開始・終了年齢が早かった。また、先史狩猟採集集団のなかで比較すると、有珠モシリ集団の離乳年齢は、陸生資源に依存した集団の離乳年齢より遅かった。この結果は、表面的には、栽培や農耕という生業の獲得により、離乳食に適した柔らかい植物質食物が容易に「利用できる」ようになり、離乳年齢が早まった、という仮説を支持するようにみえる。しかし、有珠モシリ集団の低<sup>13</sup>C群の乳幼児・子供は一定量の陸生C<sub>3</sub>植物を摂取していた可能性があり、このような単純な仮説はもっともらしくない。この結果はむしろ、有珠モシリ集団は植物質食物を「利用できなかった」

のではなく、海洋資源の豊富さのために、植物質食物を「利用しなかった」可能性を示唆する。もしこの推論が正しければ、「植物質をほとんど利用しない」という有珠モシリ集団の食性は、北海道の本州とは異なる環境への適応であったと考えることができる。

今後、陸上食物を中心とした縄文時代 (狩猟採集) および弥生時代 (水稲農耕) の人類集団に本研究で開発した方法を応用することで、本州における適応と、植物質食物がヒトの生活史の進化に果たした役割を検討できるだろう。

## 謝辞

本研究における機器分析は、国立環境研究所においてなされた。分析の際には、向井人史博士 (国立環境研) にご協力をいただいた。

由比ヶ浜南遺跡の骨試料は、平田和明教授 (聖マリ医大) 長岡朋人博士 (聖マリ医大)、澤田純明博士 (聖マリ医大) にご提供いただいた。また、骨試料の年齢推定もおこなっていただいた。

有珠モシリ遺跡の骨試料は、北海道噴火湾文化研究所の大島直行博士 (噴火湾文化研)、青野友哉氏 (噴火湾文化研)、百々幸雄教授 (東北大) にご提供いただいた。サンプリングの際には、研究所職員の皆さまにお世話になった。骨試料の年齢推定は澤田純明博士 (聖マリ医大) におこなっていただいた。

論文執筆にあたり、南雅代准教授 (名古屋大)、石田肇教授 (琉球大)、天野哲也教授 (北海道大)、小野裕子博士 (北海道大) には有益な示唆をいただいた。

また、指導教員である米田穰准教授には、本研究をおこなうにあたり熱心なご指導と的確なアドバイスを賜った。人類進化システム分野の河村正二准教授、太田博樹助教には、本研究の方針について有益な示唆をいただいた。試料の処理については、金澤京子氏から多くのご指導を賜った。由比ヶ浜南遺跡の骨試料の同位体分析結果については下見光奈氏のデータを使用させていただいた。先史人類学研究室の鶴野光博士、および、内藤裕一氏・覚張隆史氏・瀧上舞氏・Mark Diab 氏をはじめとする人類進化システム分野の学生の皆さまには、実験その他多くの場面でお世話になった。

以上の方々に謹んで感謝の意を記したい。

## 引用文献

- Adachi N, Dodo Y, Ohshima N, Doi N, Yoneda M, and Matsumura H. 2003. Morphologic and genetic evidence for the kinship of juvenile skeletal specimens from a 2,000 year-old double burial of the Usu-Moshiri site, Hokkaido, Japan. *Anthropological Science* 111 (3):347-363.
- Adachi N, Suzuki T, Sakaue K, Takigawa W, Ohshima N, and Dodo Y. 2006. Kinship analysis of the Jomon skeletons unearthed from a double burial at the Usu-Moshiri site, Hokkaido, Japan. *Anthropological Science* 114 (1):29-34.
- Ambrose SH. 1990. PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF BONE AND TOOTH COLLAGEN FOR ISOTOPIC ANALYSIS. *Journal of Archaeological Science* 17(4):431-451.
- Ambrose SH. 1993. Isotopic analysis of paleodiet: Methodological and interpretive considerations. In: Sandford M, editor. *Investigations of Ancient Human Tissue: Chemical Analyses in Anthropology*. Langhorne: Gordon and Breach. p 59-130.
- Ambrose SH, and Deniro MJ. 1986. THE ISOTOPIC ECOLOGY OF EAST-AFRICAN MAMMALS. *Oecologia* 69(3):395-406.
- Ambrose SH, and Deniro MJ. 1987. BONE NITROGEN ISOTOPE COMPOSITION AND CLIMATE. *Nature* 325(6101):201-201.
- Ambrose SH, and Norr L. 1993. Experimental evidence for the relationship of the carbon isotope ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate. In: Lambert J, and Grupe G, editors. *Prehistoric Human Bone, Archaeology at the Molecular Level*. Berlin: Springer-Verlag. p 1-38.
- Bocherens H, and Drucker D. 2003. Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: Case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *International Journal of Osteoarchaeology* 13 (1-2):46-53.
- Bocquet-Appel JP, and Naji S. 2006. Testing the hypothesis of a worldwide neolithic demographic transition - Corroboration from American cemeteries. *Current Anthropology* 47 (2):341-365.
- Bryant FJ, and Loutit JF. 1964. ENTRY OF STRONTIUM-90 INTO HUMAN BONE. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 159 (976):449-&.
- Buikstra JE, Konigsberg LW, and Bullington J. 1986. FERTILITY AND THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE IN THE PREHISTORIC MIDWEST. *American Antiquity* 51 (3):528-546.
- Charnov EL, and Berrigan D. 1993. Why do female primates have such long lifespans and so few babies? *or* Life in th slow lane. *Evolutionary Anthropology* 1 (6):191-194.
- Chisholm BS, Nelson DE, and Schwarcz HP. 1982. STABLE-CARBON ISOTOPE RATIOS AS A MEASURE OF MARINE VERSUS TERRESTRIAL PROTEIN IN ANCIENT DIETS. *Science* 216 (4550):1131-1132.
- Choy K, and Richards MR. 2009. Stable isotope evidence of human diet at the Nukdo shell midden site, South Korea. *Journal of Archaeological Science* 36(7):1312-1318.

- Clayton F, Sealy J, and Pfeiffer S. 2006. Weaning age among foragers at Matjes River Rock Shelter, South Africa, from stable nitrogen and carbon isotope analyses. *American Journal of Physical Anthropology* 129 (2):311-317.
- Cunningham AS, Jelliffe DB, and Jelliffe EFP. 1991. BREAST-FEEDING AND HEALTH IN THE 1980S - A GLOBAL EPIDEMIOLOGIC REVIEW. *Journal of Pediatrics* 118 (5):659-666.
- Cunningham SA. 1995. Breastfeeding: Adaptive behavior for child health and longevity. In: Stuart-Macadam P, and Dettwyler KA, editors. *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*. New York: Aldine de Gruyter. p 243-264.
- Deniro MJ. 1985. POSTMORTEM PRESERVATION AND ALTERATION OF INVIVO BONE-COLLAGEN ISOTOPE RATIOS IN RELATION TO PALEODIETARY RECONSTRUCTION. *Nature* 317 (6040):806-809.
- Deniro MJ, and Epstein S. 1978. INFLUENCE OF DIET ON DISTRIBUTION OF CARBON ISOTOPES IN ANIMALS. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 42 (5):495-506.
- Deniro MJ, and Epstein S. 1981. INFLUENCE OF DIET ON THE DISTRIBUTION OF NITROGEN ISOTOPES IN ANIMALS. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 45 (3):341-351.
- Dettwyler KA. 1995. A time to wean: The hominid blueprint for the natural age of weaning in modern human populations. In: Stuart-Macadam P, and Dettwyler KA, editors. *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*. New York: Aldine de Gruyter. p 39-73.
- Dupras TL, Schwarcz HP, and Fairgrieve SI. 2001. Infant feeding and weaning practices in Roman Egypt. *American Journal of Physical Anthropology* 115 (3):204-212.
- Dupras TL, and Tocheri MW. 2007. Reconstructing infant weaning histories at Roman period Kellis, Egypt using stable isotope analysis of dentition. *American Journal of Physical Anthropology* 134 (1):63-74.
- Eckelmann WR, Kulp JL, and Schulert AR. 1958. STRONTIUM-90 IN MAN .2. *Science* 127 (3293):266-274.
- Fogel ML, Tuross N, Johnson BJ, and Miller GH. 1997. Biogeochemical record of ancient humans. *Organic Geochemistry* 27 (5-6):275-287.
- Fogel ML, Tuross N, and Owsley DW. 1989. Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archeological populations. *Annual Report of the Director of the Geophysical Laboratory*. Washington: Carnegie Institution. p 111-117.
- Fuller BT, Fuller JL, Harris DA, and Hedges REM. 2006a. Detection of breastfeeding and weaning in modern human infants with carbon and nitrogen stable isotope ratios. *American Journal of Physical Anthropology* 129 (2):279-293.
- Fuller BT, Molleson TI, Harris DA, Gilmour LT, and Hedges REM. 2006b. Isotopic evidence for breastfeeding and possible adult dietary differences from Late/Sub-Roman Britain. *American Journal of Physical Anthropology* 129 (1):45-54.
- Geyh MA. 2001. Bomb radiocarbon dating of animal tissues and hair. *Radiocarbon* 43 (2B):723-730.
- Green TJ, and Munson CA. 1989. Mississippian Settlement Patterns in Southwestern Indiana. In:



- Smith BD, editor. *Mississippian Settlement Patterns*. New York: Academic Press. p 293-330.
- Harvey PH, and Cluttonbrock TH. 1985. LIFE-HISTORY VARIATION IN PRIMATES. *Evolution* 39 (3):559-581.
- Hassan FA. 1973. MECHANISMS OF POPULATION-GROWTH DURING NEOLITHIC. *Current Anthropology* 14 (5):535-542.
- Heaton THE, Vogel JC, Vonlachevallerie G, and Collett G. 1986. CLIMATIC INFLUENCE ON THE ISOTOPIC COMPOSITION OF BONE NITROGEN. *Nature* 322(6082):822-823.
- Hedges REM, Clement JG, Thomas CDL, and O'Connell TC. 2007. Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: Modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *American Journal of Physical Anthropology* 133 (2):808-816.
- Hedges REM, and Reynard LM. 2007. Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *Journal of Archaeological Science* 34 (8):1240-1251.
- Howell N. 1979. *Demography of the Dobe !Kung*. New York: Academic Press.
- Jay M, Fuller BT, Richards MP, Knusel CJ, and King SS. 2008. Iron age breastfeeding practices in Britain: Isotopic evidence from Wetwang Slack, East Yorkshire. *American Journal of Physical Anthropology* 136 (3):327-337.
- Katzenberg MA, Herring DA, and Saunders SR. 1996. Weaning and infant mortality: Evaluating the skeletal evidence. *Yearbook of Physical Anthropology, Yearbook Series Vol 39* 39:177-199.
- Katzenberg MA, Saunders SR, and Fitzgerald WR. 1993. AGE-DIFFERENCES IN STABLE CARBON AND NITROGEN ISOTOPE RATIOS IN A POPULATION OF PREHISTORIC MAIZE HORTICULTURISTS. *American Journal of Physical Anthropology* 90 (3):267-281.
- Keenleyside A, Schwarcz H, Stirling L, and Ben Lazreg N. 2009. Stable isotopic evidence for diet in a Roman and Late Roman population from Leptiminus, Tunisia. *Journal of Archaeological Science* 36 (1):51-63.
- Kennedy GE. 2005. From the ape's dilemma to the weanling's dilemma: early weaning and its evolutionary context. *Journal of Human Evolution* 48 (2):123-145.
- Kennedy KI, Rivera R, and McNeilly AS. 1989. CONSENSUS STATEMENT ON THE USE OF BREASTFEEDING AS A FAMILY-PLANNING METHOD. *Contraception* 39 (5):477-496.
- Khosla S, Melton LJ, Atkinson EJ, and O'Fallon WM. 2001. Relationship of serum sex steroid levels to longitudinal changes in bone density in young versus elderly men. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 86(8):3555-3561.
- Kulp JL, Eckelmann WR, and Schulert AR. 1957. STRONTIUM-90 IN MAN. *Science* 125 (3241):219-225.
- Kulp JL, and Schulert AR. 1962. STRONTIUM-90 IN MAN V - CONCENTRATION IN BONES OF CHILDREN HAD BEEN DROPPING, BUT RECENT TESTS WILL REVERSE THE TREND. *Science* 136 (3516):619-&.

- Kulp JL, Schulert AR, and Hodges EJ. 1959. STRONTIUM-90 IN MAN-III. *Science* 129 (3358):1249-1255.
- Kulp JL, Schulert AR, and Hodges EJ. 1960. STRONTIUM-90 IN MAN .4. *Science* 132 (3425):448-454.
- Larsen CS. 1995. BIOLOGICAL CHANGES IN HUMAN-POPULATIONS WITH AGRICULTURE. *Annual Review of Anthropology* 24:185-213.
- Lawrence RA. 1989. *Breastfeeding: A Guide for the Medical Profession*. St. Louis.
- Lee PC, Majluf P, and Gordon IJ. 1991. GROWTH, WEANING AND MATERNAL INVESTMENT FROM A COMPARATIVE PERSPECTIVE. *Journal of Zoology* 225:99-114.
- Lengemann FW. 1963. Over-all aspects of calcium and strontium absorption. In: Wasserman RH, editor. *The Transfer of Calcium and Strontium Across Biological Membranes*. New York: Academic Press. p 85-96.
- Little JDC, and Little EA. 1997. Analysing prehistoric diets by linear programming. *Journal of Archaeological Science* 24 (8):741-747.
- Longin R. 1971. NEW METHOD OF COLLAGEN EXTRACTION FOR RADIOCARBON DATING. *Nature* 230 (5291):241-&.
- Mays SA, Richards MP, and Fuller BT. 2002. Bone stable isotope evidence for infant feeding in mediaeval England. *Antiquity* 76 (293):654-656.
- McNeilly AS. 2001. Lactational control of reproduction. *Reproduction Fertility and Development* 13 (7-8):583-590.
- Minagawa M, and Wada E. 1984. STEPWISE ENRICHMENT OF N-15 ALONG FOOD-CHAINS - FURTHER EVIDENCE AND THE RELATION BETWEEN DELTA-N-15 AND ANIMAL AGE. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 48 (5):1135-1140.
- Molleson T, Jones K, and Jones S. 1993. DIETARY CHANGE AND THE EFFECTS OF FOOD PREPARATION ON MICROWEAR PATTERNS IN THE LATE NEOLITHIC OF ABU-HUREYRA, NORTHERN SYRIA. *Journal of Human Evolution* 24 (6):455-468.
- Mora S, Pitukcheewanont P, Kaufman FR, Nelson JC, and Gilsanz V. 1999. Biochemical markers of bone turnover and the volume and the density of bone in children at different stages of sexual development. *Journal of Bone and Mineral Research* 14(10):1664-1671.
- Nagaoka T, Hirata K, Yokota E, and Matsu'ura S. 2006. Paleodemography of a medieval population in Japan: Analysis of human skeletal remains from the Yuigahama-minami site. *American Journal of Physical Anthropology* 131 (1):1-14.
- Paige DM, Leonardo E, Cordano A, Adrianze.B, Graham GG, and Nakashim.J. 1972. LACTOSE INTOLERANCE IN PERUVIAN CHILDREN - EFFECT OF AGE AND EARLY NUTRITION. *American Journal of Clinical Nutrition* 25 (3):297-&.
- Prowse TL, Saunders SR, Schwarcz HR, Garnsey P, Macchiarelli R, and Bondioli L. 2008. Isotopic and Dental Evidence for Infant and Young Child Feeding Practices in an Imperial Roman Skeletal Sample. *American Journal of Physical Anthropology* 137 (3):294-308.
- Quandt SA. 1995. Sociocultural aspects of the lactation process. In: Stuart-Macadam P, and

- Dettwyler KA, editors. *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*. New York: Aldine de Gruyter. p 127-143.
- Richards MP, Mays S, and Fuller BT. 2002. Stable carbon and nitrogen isotope values of bone and teeth reflect weaning age at the Medieval Wharram Percy site, Yorkshire, UK. *American Journal of Physical Anthropology* 119 (3):205-210.
- Rivera J. 1965. HUMAN BONE METABOLISM INFERRED FROM FALL-OUT INVESTIGATIONS. *Nature* 207 (5004):1330-&.
- Rivera J, and Harley JH. 1965. The HASL bone program: 1961-1964. US Atomic Energy Commission Health and Safety Lab Report No 163.
- Schoeninger MJ, and Deniro MJ. 1984. NITROGEN AND CARBON ISOTOPIC COMPOSITION OF BONE-COLLAGEN FROM MARINE AND TERRESTRIAL ANIMALS. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 48 (4):625-639.
- Schoeninger MJ, Deniro MJ, and Tauber H. 1983. STABLE NITROGEN ISOTOPE RATIOS OF BONE-COLLAGEN REFLECT MARINE AND TERRESTRIAL COMPONENTS OF PREHISTORIC HUMAN DIET. *Science* 220 (4604):1381-1383.
- Schoeninger MJ, Moore KM, Murray ML, and Kingston JD. 1989. Detection of bone preservation in archaeological and fossil samples. *Applied Geochemistry* 4(3):281-292.
- Schurr MR. 1997. Stable nitrogen isotopes as evidence for the age of weaning at the Angel site: A comparison of isotopic and demographic measures of weaning age. *Journal of Archaeological Science* 24 (10):919-927.
- Schurr MR, and Powell ML. 2005. The role of changing childhood diets in the prehistoric evolution of food production: An isotopic assessment. *American Journal of Physical Anthropology* 126 (3):278-294.
- Schwarcz HP, and Schoeninger MJ. 1991. STABLE ISOTOPE ANALYSES IN HUMAN NUTRITIONAL ECOLOGY. *Yearbook of Physical Anthropology* 34:283-321.
- Scrimshaw NS, and Murray EB. 1988. THE ACCEPTABILITY OF MILK AND MILK-PRODUCTS IN POPULATIONS WITH A HIGH PREVALENCE OF LACTOSE-INTOLERANCE. *American Journal of Clinical Nutrition* 48 (4):1083-1159.
- Sellen DW. 2007. Evolution of infant and young child feeding: Implications for contemporary public health. *Annual Review of Nutrition* 27:123-148.
- Sellen DW, and Smay DB. 2001. Relationship between subsistence and age at weaning in "preindustrial" societies. *Human Nature-an Interdisciplinary Biosocial Perspective* 12 (1):47-87.
- Sillen A, and Kavanagh M. 1982. Strontium and paleodietary research: A review. *American journal of physical anthropology* 25(s3):67-90.
- Sillen A, and Smith P. 1984. WEANING PATTERNS ARE REFLECTED IN STRONTIUM-CALCIUM RATIOS OF JUVENILE SKELETONS. *Journal of Archaeological Science* 11 (3):237-245.
- Smith BH. 1991. *Standards of human tooth formation and dental age assessment*. New York: Wiley-Liss.

- Smith BH. 1992. life History and the Evolution of Human Maturation. *Evolutionary Anthropology* 1 (4):134-142.
- Sponheimer M, Robinson T, Ayliffe L, Roeder B, Hammer J, Passey B, West A, Cerling T, Dearing D, and Ehleringer J. 2003a. Nitrogen isotopes in mammalian herbivores: Hair delta N-15 values from a controlled feeding study. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(1-2):80-87.
- Sponheimer M, Robinson TF, Roeder BL, Passey BH, Ayliffe LK, Cerling TE, Dearing MD, and Ehleringer JR. 2003b. An experimental study of nitrogen flux in llamas: is N-14 preferentially excreted? *Journal of Archaeological Science* 30(12):1649-1655.
- Stenhouse MJ, and Baxter MS. 1979. The uptake of bomb 14C in humans. Berkeley: University of California Press.
- Stuart-Macadam P. 1995. Breastfeeding in prehistory. In: Stuart-Macadam P, and Dettwyler KA, editors. *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*. New York: Aldine de Gruyter. p 75-99.
- Tauber H. 1981. C-13 EVIDENCE FOR DIETARY HABITS OF PREHISTORIC MAN IN DENMARK. *Nature* 292(5821):332-333.
- Tieszen LL, and Fagre T. 1993. Effect of diet quality and composition on the isotopic composition of respiratory CO<sub>2</sub>, bone collagen, bioapatite, and soft tissues. In: Lambert J, and Grupe G, editors. *Prehistoric Human Bone, Archaeology at the Molecular Level*. Berlin: Springer-Verlag. p 121-155.
- Ubelaker D. 1989. Human skeletal remains. Washington, DC: Taraxacum.
- Van Klinken GJ. 1999. Bone collagen quality indicators for palaeodietary and radiocarbon measurements. *Journal of Archaeological Science* 26 (6):687-695.
- Waters-rist AL, and Katzenberg MA. 2009. The Effect of Growth on Stable Nitrogen Isotope Ratios in Subadult Bone Collagen. *Int J Osteoarchaeol*:10.1002/oa.1017.
- Watts NB. 1999. Clinical utility of biochemical markers of bone remodeling. *Clinical Chemistry* 45(8B):1359-1368.
- Yoneda M, Suzuki R, Shibata Y, Morita M, Sukegawa T, Shigehara N, and Akazawa T. 2004. Isotopic evidence of inland-water fishing by a Jomon population excavated from the Boji site, Nagano, Japan. *Journal of Archaeological Science* 31 (1):97-107.
- Yoneda M, Tanaka A, Shibata Y, Morita M, Uzawa K, Hirota M, and Uchida M. 2002. Radiocarbon marine reservoir effect in human remains from the Kitakogane Site, Hokkaido, Japan. *Journal of Archaeological Science* 29 (5):529-536.
- Yoshinaga J, Minagawa M, Suzuki T, Ohtsuka R, Kawabe T, Inaoka T, and Akimichi T. 1996. Stable carbon and nitrogen isotopic composition of diet and hair of Gidra-speaking Papuans. *American Journal of Physical Anthropology* 100(1):23-34.
- 青野友哉, 大島直行. 2003. 恵山文化と交易. 野村崇, 宇田川洋. 『続縄文・オホーツク文化』. 札幌: 北海道新聞社. p 10-29.
- 大島直行, 石田肇, 百々幸雄, 川内基. 1989. 北海道有珠10遺跡. *日本考古学年報*. p 347-352.
- 大島直行, 石田肇, 松村博文, 百々幸雄, 川内基. 1990. 北海道伊達市有珠10遺跡. *日本考古学年報*. p 386-390.

- 河野真知郎. 1989. 発掘から試算した人口. 『よみがえる中世 3』. 東京: 平凡社. p 61-63.
- 河野真知郎. 1995. 『中世都市鎌倉』. 東京: 講談社.
- 厚生労働省. 2007. 授乳・離乳の支援ガイド.
- 西鶴定嘉. 1942. 『樺太アイヌ』. 東京: 樺太文化振興会.
- 西鶴定嘉. 1943. 『樺太アイヌの民俗』. 東京: 樺太文化振興会.
- 下見光奈. 2008. 古人骨の同位体分析による授乳習慣の復元. 平成19年度東京大学大学院修士学位論文.
- スプレイグ D. 2004. 『サルの子育て、ヒトの子育て—人生計画の生物学』. 京都: 京都大学学術出版会.
- 西本豊弘. 1984. 北海道の縄文・続縄文文化の狩猟と漁撈. 国立歴史民俗博物館報告書. p 1-16.
- 西本豊弘. 1985. 北海道の狩猟・漁撈活動の変遷. 国立歴史民俗博物館研究報告. p 53-74.
- 平田和明, 奥千奈子, 星野敬吾, 塘総一郎, 高橋慎一. 2002. 由比ヶ浜南遺跡の単体埋葬遺構出土人骨について. 由比ヶ浜南遺跡発掘調査団, 『由比ヶ浜南遺跡』. 鎌倉. p 1-240.
- 藤本強. 1988. 『もう二つの日本文化』. 東京: 東京大学出版会.
- ヘフス J. 2007. 『同位体地球化学の基礎』. 東京: シュプリンガー・ジャパン.
- 松下孝幸. 2002. 神奈川県鎌倉市由比ヶ浜南遺跡出土の中世人骨. 由比ヶ浜南遺跡発掘調査団, 『由比ヶ浜南遺跡』. 鎌倉. p 1-134.
- 南川雅男. 2001. 炭素・窒素同位体分析により復元した先史日本人の食生態. 国立歴史民俗博物館研究報告. p 333-356.
- 南雅代, 中村俊夫, 平田和明, 長岡朋人, 鶴澤和宏. 2007. 鎌倉由比ヶ浜埋葬人骨および獣骨の地球化学的分析. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書. 名古屋. p 134-143.
- 米田穰. 2002. 骨が語る食生活. 西秋良宏, 宇田川洋, 『北の異界』. 東京: 東京大学出版会. p 94-96.

## 图表

表 1. 人骨と乳製品の  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値 ( $\text{pCi g}^{-1}$ ) の平均 (Rivera & Harley, 1965)。

実際のデータはある年齢範囲の”Age period”ごとに人骨  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値 (Ca 元素 1 g あたりの  $^{90}\text{Sr}$  放射線量) を表しており、本研究ではその範囲の中央値を”Point age”として用いた。A は New York の、B は San Francisco のデータで、それぞれ西暦 (1961 年から 1964 年)、乳製品の平均値、子供・乳幼児骨の平均値を示してある。”m”は生後の月齢、”y”は生後の年齢である。

|     |            |           | New York |      |      |      |      |
|-----|------------|-----------|----------|------|------|------|------|
|     |            |           | Year     | 1961 | 1962 | 1963 | 1964 |
| A   | Age period | Point age | Dairy    | 13   | 30   | 32   |      |
|     | from to    |           | Bone     |      |      |      |      |
|     | 0m         | 0m        | 0        |      | 3.57 | 5.97 | 6.90 |
|     | 1m         | 1y        | 0.5      | 3.99 | 4.07 | 7.60 | 7.87 |
|     | 1y         | 2y        | 1.5      | 2.64 | 3.39 | 6.13 | 4.94 |
|     | 2y         | 3y        | 2.5      | 2.56 | 2.23 | 4.00 | 5.97 |
|     | 3y         | 4y        | 3.5      | 2.14 | 2.49 | 2.79 | 3.21 |
|     | 4y         | 5y        | 4.5      | 1.45 | 2.02 | 2.22 | 4.36 |
|     | 5y         | 6y        | 5.5      | 1.51 |      | 2.40 | 2.69 |
|     | 6y         | 7y        | 6.5      | 1.24 | 1.71 | 1.92 | 2.55 |
|     | 7y         | 8y        | 7.5      | 1.20 | 1.77 |      | 3.84 |
|     | 8y         | 9y        | 8.5      |      | 1.60 | 1.89 | 3.58 |
|     | 9y         | 10y       | 9.5      | 1.50 | 1.42 | 1.62 | 4.92 |
|     | 10y        | 11y       | 10.5     |      |      |      | 3.19 |
|     | 11y        | 12y       | 11.5     |      |      | 2.09 | 2.55 |
|     | 12y        | 13y       | 12.5     | 0.66 | 1.64 | 2.59 | 4.26 |
|     | 13y        | 14y       | 13.5     |      | 1.60 |      | 3.21 |
|     | 14y        | 15y       | 14.5     |      | 1.43 | 2.07 | 2.89 |
|     | 15y        | 16y       | 15.5     |      | 1.21 |      | 3.30 |
|     | 16y        | 17y       | 16.5     | 1.63 | 1.76 | 2.07 | 2.46 |
| 17y | 18y        | 17.5      | 1.21     | 1.73 | 1.94 | 2.97 |      |
| 18y | 19y        | 18.5      | 1.00     | 1.68 | 1.92 | 2.72 |      |
| 19y | 20y        | 19.5      |          |      | 1.94 | 2.06 |      |

|     |            |           | San Francisco |      |      |      |      |
|-----|------------|-----------|---------------|------|------|------|------|
|     |            |           | Year          | 1961 | 1962 | 1963 | 1964 |
| B   | Age period | Point age | Dairy         | 5.2  | 12.6 | 13.8 |      |
|     | from to    |           | Bone          |      |      |      |      |
|     | 0m         | 0m        | 0             | 0.57 | 0.85 | 1.64 | 2.24 |
|     | 1m         | 1y        | 0.5           | 0.57 | 1.20 | 2.53 | 2.87 |
|     | 1y         | 2y        | 1.5           |      | 0.61 | 5.44 | 3.25 |
|     | 2y         | 3y        | 2.5           | 1.28 | 1.47 | 1.76 | 2.43 |
|     | 3y         | 4y        | 3.5           | 1.29 | 1.24 | 1.13 | 1.82 |
|     | 4y         | 5y        | 4.5           | 1.00 | 1.29 | 1.69 |      |
|     | 5y         | 6y        | 5.5           |      | 0.66 | 2.38 | 2.26 |
|     | 6y         | 7y        | 6.5           |      | 1.11 | 1.06 | 1.45 |
|     | 7y         | 8y        | 7.5           | 0.46 | 0.74 | 1.50 | 2.05 |
|     | 8y         | 9y        | 8.5           |      |      | 0.82 |      |
|     | 9y         | 10y       | 9.5           | 1.19 | 0.83 |      | 1.41 |
|     | 10y        | 11y       | 10.5          | 0.00 | 0.53 | 1.58 |      |
|     | 11y        | 12y       | 11.5          | 0.40 |      |      | 1.30 |
|     | 12y        | 13y       | 12.5          |      |      | 1.32 | 1.39 |
|     | 13y        | 14y       | 13.5          | 0.67 |      | 1.00 |      |
|     | 14y        | 15y       | 14.5          |      |      |      | 2.16 |
|     | 15y        | 16y       | 15.5          |      | 1.28 | 1.20 | 1.13 |
|     | 16y        | 17y       | 16.5          |      | 1.04 | 1.40 | 1.57 |
| 17y | 18y        | 17.5      |               | 1.43 | 1.35 | 1.40 |      |
| 18y | 19y        | 18.5      |               |      | 0.92 | 0.93 |      |
| 19y | 20y        | 19.5      |               | 0.76 | 0.32 | 2.01 |      |

表 2.  $^{90}\text{Sr}$  の取り込みのデータから推定した骨置換速度およびその他のパラメータ。

”Turnover rate”には、組み合わせ全体において $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  実測値と計算値の差を最小にする骨置換速度 ( $T_{1/2}[0.5]$ および  $T[t]$ ) を示した。F は  $^{90}\text{Sr}$  に対する分別係数 ( $F_i$ : 0.5 歳以下、 $F_c$ : 1.5 歳以上)。”City”には、データの得られた都市 (NY: New York、SF: San Francisco) を示した。また表には、各組み合わせについて個別にシミュレーションをおこなった結果も示した。測定データとして与えられる  $S_b[t-1]$  ( $t = 0.5$  のときのみ  $S_b[t-0.5]$ )、 $S_b[t]$ 、その間の乳製品の  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値の個別の組み合わせに対して、仮想的な  $T[t]$  の値を個別の組み合わせそれぞれについて独立に計算した結果を”Hypothetical  $T[t]$ ”に示した。個別に計算された仮想的な  $T[t]$  が -1 以上 2.5 以下の範囲に収まらない組み合わせは、それぞれ\*で明示してある。

| t   | Age period |      | Turnover rate | F              | City    | Year period | Dairy | $S_b[t-1]$ | $S_b[t]$ | Hypothetical $T[t]$ s |
|-----|------------|------|---------------|----------------|---------|-------------|-------|------------|----------|-----------------------|
|     | from       | to   |               |                |         |             |       |            |          |                       |
| 0.5 | 0          | 0.5  | 1.00          | 0.24 ( $F_i$ ) | NY      | 1962-3      | 30    | 3.57       | 7.60     | 2.18                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1963-4      | 32    | 5.97       | 7.87     | 2.13                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1961-2      | 5.2   | 0.57       | 1.20     | 1.82                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1962-3      | 12.6  | 0.85       | 2.53     | 1.52                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1963-4      | 13.8  | 1.64       | 2.87     | 1.44                  |
| 1.5 | 0.5        | 1.5  | 1.00          | 0.18 ( $F_c$ ) | NY      | 1961-2      | 13    | 3.99       | 3.39     | 0.38                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1962-3      | 30    | 4.07       | 6.13     | 1.42                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1963-4      | 32    | 7.60       | 4.94     | 1.56                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1961-2      | 5.2   | 0.57       | 0.61     | 0.10                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1962-3      | 12.6  | 1.20       | 5.44     | 3.79 *                |
| SF  | 1963-4     | 13.8 | 2.53          | 3.25           | 68.21 * |             |       |            |          |                       |
| 2.5 | 1.5        | 2.5  | 0.76          | 0.18 ( $F_c$ ) | NY      | 1961-2      | 13    | 2.64       | 2.23     | 1.66                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1962-3      | 30    | 3.39       | 4.00     | 0.29                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1963-4      | 32    | 6.13       | 5.97     | 0.67                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1962-3      | 12.6  | 0.61       | 1.76     | 0.67                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1963-4      | 13.8  | 5.44       | 2.43     | 1.04                  |
| 3.5 | 2.5        | 3.5  | 0.27          | 0.18 ( $F_c$ ) | NY      | 1961-2      | 13    | 2.56       | 2.49     | 0.42                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1962-3      | 30    | 2.23       | 2.79     | 0.17                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1963-4      | 32    | 4.00       | 3.21     | -0.42                 |
|     |            |      |               |                | SF      | 1961-2      | 5.2   | 1.28       | 1.24     | 0.12                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1962-3      | 12.6  | 1.47       | 1.13     | -0.40                 |
| SF  | 1963-4     | 13.8 | 1.76          | 1.82           | 0.08    |             |       |            |          |                       |
| 4.5 | 3.5        | 4.5  | 0.27          | 0.18 ( $F_c$ ) | NY      | 1961-2      | 13    | 2.14       | 2.02     | -0.47                 |
|     |            |      |               |                | NY      | 1962-3      | 30    | 2.49       | 2.22     | -0.09                 |
|     |            |      |               |                | NY      | 1963-4      | 32    | 2.79       | 4.36     | 0.51                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1961-2      | 5.2   | 1.29       | 1.29     | 0.00                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1962-3      | 12.6  | 1.24       | 1.69     | 0.42                  |
| 5.5 | 4.5        | 5.5  | 0.27          | 0.18 ( $F_c$ ) | NY      | 1962-3      | 30    | 2.02       | 2.40     | 0.11                  |
|     |            |      |               |                | NY      | 1963-4      | 32    | 2.22       | 2.69     | 0.13                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1961-2      | 5.2   | 1.00       | 0.66     | 7.96 *                |
|     |            |      |               |                | SF      | 1962-3      | 12.6  | 1.29       | 2.38     | 1.06                  |
|     |            |      |               |                | SF      | 1963-4      | 13.8  | 1.69       | 2.26     | 0.67                  |



表 2. つづき

| t    | Age period |      | Turnover rate | F                      | City | Year period | Dairy | S <sub>b</sub> [t-1] | S <sub>b</sub> [t] | Hypothetical T[t]s |
|------|------------|------|---------------|------------------------|------|-------------|-------|----------------------|--------------------|--------------------|
|      | from       | to   |               |                        |      |             |       |                      |                    |                    |
| 6.5  | 5.5        | 6.5  | 0.27          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1961-2      | 13    | 1.51                 | 1.71               | 0.23               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1963-4      | 32    | 2.40                 | 2.55               | 0.04               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1962-3      | 12.6  | 0.66                 | 1.06               | 0.24               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 2.38                 | 1.45               | -5.79 *            |
| 7.5  | 6.5        | 7.5  | 0.27          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1961-2      | 13    | 1.24                 | 1.77               | 0.46               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1963-4      | 32    | 1.92                 | 3.84               | 0.48               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1962-3      | 12.6  | 1.11                 | 1.50               | 0.32               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 1.06                 | 2.05               | 0.67               |
| 8.5  | 7.5        | 8.5  | 0.27          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1961-2      | 13    | 1.20                 | 1.60               | 0.34               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1962-3      | 30    | 1.77                 | 1.89               | 0.03               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1962-3      | 12.6  | 0.74                 | 0.82               | 0.05               |
| 9.5  | 8.5        | 9.5  | 0.27          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1962-3      | 30    | 1.60                 | 1.62               | 0.01               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1963-4      | 32    | 1.89                 | 4.92               | 0.76               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 0.82                 | 1.41               | 0.34               |
| 10.5 | 9.5        | 10.5 | 0.27          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1963-4      | 32    | 1.62                 | 3.19               | 0.37               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1961-2      | 5.2   | 1.19                 | 0.53               | 2.84 *             |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1962-3      | 12.6  | 0.83                 | 1.58               | 0.50               |
| 11.5 | 10.5       | 11.5 | 0.27          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | SF   | 1963-4      | 13.8  | 1.58                 | 1.30               | -0.29              |
| 12.4 | 11.5       | 12.5 | 0.27          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1963-4      | 32    | 2.09                 | 4.26               | 0.57               |
| 13.5 | 12.5       | 13.5 | 0.26          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1961-2      | 13    | 0.66                 | 1.60               | 0.54               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1963-4      | 32    | 2.59                 | 3.21               | 0.19               |
| 14.5 | 13.5       | 14.5 | 0.26          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1962-3      | 30    | 1.60                 | 2.07               | 0.12               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 1.00                 | 2.16               | 0.75               |
| 15.5 | 14.5       | 15.5 | 0.26          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1963-4      | 32    | 2.07                 | 3.30               | 0.32               |
| 16.5 | 15.5       | 16.5 | 0.20          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1962-3      | 30    | 1.21                 | 2.07               | 0.20               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1962-3      | 12.6  | 1.28                 | 1.40               | 0.12               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 1.20                 | 1.57               | 0.28               |
| 17.5 | 16.5       | 17.5 | 0.14          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1961-2      | 13    | 1.63                 | 1.73               | 0.13               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1962-3      | 30    | 1.76                 | 1.94               | 0.05               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1963-4      | 32    | 2.07                 | 2.97               | 0.24               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1962-3      | 12.6  | 1.04                 | 1.35               | 0.24               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 1.40                 | 1.40               | 0.00               |
| 18.5 | 17.5       | 18.5 | 0.10          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1961-2      | 13    | 1.21                 | 1.68               | 0.40               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1962-3      | 30    | 1.73                 | 1.92               | 0.05               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1963-4      | 32    | 1.94                 | 2.72               | 0.20               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1962-3      | 12.6  | 1.43                 | 0.92               | -0.57              |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 1.35                 | 0.93               | -0.35              |
| 19.5 | 18.5       | 19.5 | 0.10          | 0.18 (F <sub>c</sub> ) | NY   | 1962-3      | 30    | 1.68                 | 1.94               | 0.07               |
|      |            |      |               |                        | NY   | 1963-4      | 32    | 1.92                 | 2.06               | 0.04               |
|      |            |      |               |                        | SF   | 1963-4      | 13.8  | 0.92                 | 2.01               | 0.67               |

表 3.  $^{90}\text{Sr}$  の取り込みから推定された 1 年あたりの骨置換速度 ( $T[t]$ )。  
 ただし最初の推定値のみは半年分に相当する速度である ( $T_{1/2}[t]$ )。

| Age period |      | t    | Turnover rate |
|------------|------|------|---------------|
| from       | to   |      |               |
| 0          | 0.5  | 0.5  | 1.00          |
| 0.5        | 1.5  | 1.5  | 1.00          |
| 1.5        | 2.5  | 2.5  | 0.76          |
| 2.5        | 3.5  | 3.5  | 0.27          |
| 3.5        | 4.5  | 4.5  | 0.27          |
| 4.5        | 5.5  | 5.5  | 0.27          |
| 5.5        | 6.5  | 6.5  | 0.27          |
| 6.5        | 7.5  | 7.5  | 0.27          |
| 7.5        | 8.5  | 8.5  | 0.27          |
| 8.5        | 9.5  | 9.5  | 0.27          |
| 9.5        | 10.5 | 10.5 | 0.27          |
| 10.5       | 11.5 | 11.5 | 0.27          |
| 11.5       | 12.5 | 12.5 | 0.27          |
| 12.5       | 13.5 | 13.5 | 0.26          |
| 13.5       | 14.5 | 14.5 | 0.26          |
| 14.5       | 15.5 | 15.5 | 0.26          |
| 15.5       | 16.5 | 16.5 | 0.20          |
| 16.5       | 17.5 | 17.5 | 0.14          |
| 17.5       | 18.5 | 18.5 | 0.10          |
| 18.5       | 19.5 | 19.5 | 0.10          |

表 4. 0.5 年間の骨コラーゲンの置換速度推定値。

$T_{1/2}[t]$ は年齢  $t-0.5$  から  $t$  までの骨コラーゲン置換速度であり、 $T[t]$ から推定した。

| Age period |      | t    | $T_{1/2}[t]$ |
|------------|------|------|--------------|
| from       | to   |      |              |
| 0.0        | 0.5  | 0.5  | 1.00         |
| 0.5        | 1.0  | 1.0  | 0.84         |
| 1.0        | 1.5  | 1.5  | 0.69         |
| 1.5        | 2.0  | 2.0  | 0.53         |
| 2.0        | 2.5  | 2.5  | 0.38         |
| 2.5        | 3.0  | 3.0  | 0.26         |
| 3.0        | 3.5  | 3.5  | 0.14         |
| 3.5        | 4.0  | 4.0  | 0.14         |
| 4.0        | 4.5  | 4.5  | 0.14         |
| 4.5        | 5.0  | 5.0  | 0.14         |
| 5.0        | 5.5  | 5.5  | 0.14         |
| 5.5        | 6.0  | 6.0  | 0.14         |
| 6.0        | 6.5  | 6.5  | 0.14         |
| 6.5        | 7.0  | 7.0  | 0.14         |
| 7.0        | 7.5  | 7.5  | 0.14         |
| 7.5        | 8.0  | 8.0  | 0.14         |
| 8.0        | 8.5  | 8.5  | 0.14         |
| 8.5        | 9.0  | 9.0  | 0.14         |
| 9.0        | 9.5  | 9.5  | 0.14         |
| 9.5        | 10.0 | 10.0 | 0.14         |
| 10.0       | 10.5 | 10.5 | 0.14         |
| 10.5       | 11.0 | 11.0 | 0.14         |
| 11.0       | 11.5 | 11.5 | 0.14         |
| 11.5       | 12.0 | 12.0 | 0.14         |
| 12.0       | 12.5 | 12.5 | 0.14         |
| 12.5       | 13.0 | 13.0 | 0.13         |
| 13.0       | 13.5 | 13.5 | 0.13         |
| 13.5       | 14.0 | 14.0 | 0.13         |
| 14.0       | 14.5 | 14.5 | 0.13         |
| 14.5       | 15.0 | 15.0 | 0.13         |
| 15.0       | 15.5 | 15.5 | 0.13         |
| 15.5       | 16.0 | 16.0 | 0.12         |
| 16.0       | 16.5 | 16.5 | 0.10         |
| 16.5       | 17.0 | 17.0 | 0.09         |
| 17.0       | 17.5 | 17.5 | 0.07         |
| 17.5       | 18.0 | 18.0 | 0.06         |
| 18.0       | 18.5 | 18.5 | 0.05         |
| 18.5       | 19.0 | 19.0 | 0.05         |
| 19.0       | 19.5 | 19.5 | 0.05         |

表 5. 由比ヶ浜南遺跡より出土した試料の  $\delta^{13}\text{C}$  値および  $\delta^{15}\text{N}$  値 (下見, 2007)。

\* は議論から除いた試料、下線は南ほか (2007) からの引用。"Estimated age"には推定された年齢範囲、"Midpoint age"にはその中央値が示されている。

| ID              | Estimated age | Midpoint age | Sex | $\delta^{13}\text{C}$ | $\delta^{15}\text{N}$ | %C   | %N   | C/N   | Yield |
|-----------------|---------------|--------------|-----|-----------------------|-----------------------|------|------|-------|-------|
| 235             | 0             | 0            | -   | -19.0                 | 14.6                  | 44.0 | 15.7 | 3.3   | ND    |
| 1056            | 0             | 0            | -   | -19.6                 | 12.2                  | 42.6 | 15.2 | 3.3   | ND    |
| 1084            | 0             | 0            | -   | -19.6                 | 15.0                  | 42.9 | 14.1 | 3.5   | ND    |
| 5121            | 9m-1y         | 0.875        | -   | -18.7                 | 12.3                  | 48.4 | 17.6 | 3.2   | 7.1   |
| 1143B           | 9m-1y         | 0.875        | -   | -19.4                 | 11.9                  | 44.8 | 16.1 | 3.2   | 3.6   |
| 243             | 0.5-1.5       | 1            | -   | -18.7                 | 13.5                  | 42.5 | 15.6 | 3.2   | 7.9   |
| 1168            | 1             | 1            | -   | -19.6                 | 12.4                  | 39.3 | 13.7 | 3.3   | 2.3   |
| 65              | 1-2           | 1.5          | -   | -19.0                 | 13.7                  | 44.3 | 15.6 | 3.3   | 4.3   |
| 179             | 1-2           | 1.5          | -   | -19.6                 | 13.3                  | 42.1 | 15.3 | 3.2   | 5.3   |
| 176B            | 1-2           | 1.5          | -   | -18.7                 | 14.5                  | 40.1 | 15.1 | 3.1   | 4.8   |
| 36B             | 2             | 2            | -   | -19.0                 | 13.6                  | 41.8 | 15.3 | 3.2   | 7.4   |
| 130             | 2             | 2            | -   | -18.6                 | 12.4                  | 43.5 | 15.5 | 3.3   | 5.7   |
| 172             | 2             | 2            | -   | -18.7                 | 12.9                  | 41.3 | 15.2 | 3.2   | 4.2   |
| 203             | 2             | 2            | -   | -19.2                 | 12.4                  | 41.0 | 14.9 | 3.2   | ND    |
| 271             | 2             | 2            | -   | -18.9                 | 11.6                  | 42.6 | 14.9 | 3.3   | 1.8   |
| 54              | 3             | 3            | -   | -19.7                 | 12.0                  | 41.7 | 15.2 | 3.2   | 3.1   |
| 1115            | 3             | 3            | -   | -18.8                 | 12.8                  | 46.3 | 17.1 | 3.2   | 3.8   |
| 1047B           | 3             | 3            | -   | -19.8                 | 11.8                  | 44.3 | 15.9 | 3.3   | 4.4   |
| 111             | 3-4           | 3.5          | -   | -18.8                 | 12.1                  | 43.4 | 15.7 | 3.2   | 9.0   |
| 8               | 4             | 4            | -   | -19.4                 | 10.9                  | 46.1 | 17.3 | 3.1   | 8.7   |
| 138B            | 4             | 4            | -   | -19.4                 | 10.3                  | 42.5 | 15.5 | 3.2   | 8.2   |
| 211A            | 4             | 4            | -   | -19.5                 | 10.7                  | 42.7 | 15.4 | 3.2   | 8.0   |
| 232A            | 4             | 4            | -   | -17.9                 | 11.9                  | 42.4 | 15.5 | 3.2   | 6.4   |
| 1189B           | 4             | 4            | -   | -19.3                 | 12.1                  | 41.5 | 14.9 | 3.3   | 3.1   |
| 1076            | 4-5           | 4.5          | -   | -19.7                 | 10.1                  | 42.7 | 14.5 | 3.4   | 4.4   |
| 107             | 5             | 5            | -   | -19.3                 | 11.1                  | 49.4 | 17.5 | 3.3   | 3.6   |
| 148             | 5             | 5            | -   | -19.1                 | 11.1                  | 43.0 | 15.3 | 3.3   | 3.7   |
| 5C              | 6             | 6            | -   | -19.4                 | 9.2                   | 42.5 | 15.3 | 3.3   | 4.2   |
| 248             | 6             | 6            | -   | -19.2                 | 12.2                  | 42.6 | 14.7 | 3.4   | ND    |
| 23              | 7             | 7            | -   | -20.0                 | 9.5                   | 42.2 | 15.2 | 3.2   | 3.9   |
| 27B             | 7             | 7            | -   | -20.1                 | 11.2                  | 42.6 | 14.9 | 3.3   | 4.9   |
| 60              | 6-8           | 7            | -   | -19.4                 | 10.5                  | 40.9 | 15.2 | 3.1   | 3.4   |
| 118F            | 7             | 7            | -   | -19.9                 | 10.7                  | 43.5 | 15.2 | 3.3   | 5.2   |
| 232B            | 7             | 7            | -   | -17.9                 | 10.9                  | 42.7 | 15.3 | 3.3   | 2.7   |
| 254             | 8             | 8            | -   | -19.0                 | 10.6                  | 45.3 | 16.1 | 3.3   | 4.9   |
| 206A            | 8             | 8            | -   | -19.4                 | 10.8                  | 46.0 | 16.4 | 3.3   | 4.4   |
| 156             | 9             | 9            | -   | -19.1                 | 11.8                  | 43.2 | 16.9 | 3.0   | 11.7  |
| 22              | 10            | 10           | -   | -19.0                 | 9.9                   | 43.3 | 15.3 | 3.3   | 3.1   |
| 72              | 12-14         | 13           | -   | -18.7                 | 11.6                  | 40.4 | 14.2 | 3.3   | 2.9   |
| 110B            | 12-14         | 13           | -   | -19.3                 | 10.5                  | 46.0 | 16.1 | 3.3   | 3.3   |
| 200B            | 12-14         | 13           | -   | -20.1                 | 9.7                   | 42.7 | 15.4 | 3.2   | 6.8   |
| 145A            | 15-19         | 17           | -   | -18.6                 | 12.0                  | 46.4 | 17.0 | 3.2   | 3.8   |
| 238 *           | 4-5           | 4.5          | -   | -20.7                 | 11.9                  | 34.0 | 11.7 | 3.4   | 0.4 * |
| 292 *           | 4-5           | 4.5          | -   | -18.5                 | 9.9                   | 42.7 | 13.0 | 3.8 * | ND    |
| 1108 *          | 7             | 7            | -   | -20.1                 | 10.4                  | 42.0 | 12.4 | 3.9 * | ND    |
| 1130 *          | 10            | 10           | -   | -20.0                 | 11.2                  | 43.3 | 12.4 | 4.1 * | 1.4   |
| 12              | Adult         | -            | M   | -19.8                 | 11.7                  | 51.7 | 17.9 | 3.4   | ND    |
| 245             | Adult         | -            | F   | -20.0                 | 10.1                  | 42.3 | 14.0 | 3.5   | ND    |
| <u>315-100</u>  | Adult         | -            | F   | -18.2                 | 11.3                  | -    | -    | -     | -     |
| <u>315-150</u>  | Adult         | -            | F   | -19.8                 | 10.1                  | -    | -    | -     | -     |
| <u>315-205</u>  | Adult         | -            | M   | -17.7                 | 9.9                   | -    | -    | -     | -     |
| <u>315-249B</u> | Adult         | -            | F   | -19.6                 | 10.0                  | -    | -    | -     | -     |
| <u>315-1093</u> | Adult         | -            | M   | -18.4                 | 10.5                  | -    | -    | -     | -     |

表 6. Angel 集団の  $\delta^{15}\text{N}$  値測定結果に対して、4 つの形のモデルを適用した結果の比較。

“ $t_1$ ”は離乳の開始の推定年齢、“ $t_2$ ”は離乳の終了の推定年齢。“ $N_n$ ”と“ $N_m$ ”は母乳以外の食物タンパク質に由来するコラーゲンおよび母乳に由来するコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  推定値。“E”は母親と乳幼児・子供体組織のあいだの母乳を介した濃縮係数推定値。“Mean  $D_N^2$ ”はモデルによって推定した  $\delta^{15}\text{N}$  値と測定値との差のデータセット全体における平均である。

| <b>Tempo</b>      | <b><math>t_1</math></b> | <b><math>t_2</math></b> | <b><math>N_n</math></b> | <b><math>N_m</math></b> | <b>E</b> | <b>Mean <math>D_N^2</math></b> |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|--------------------------------|
| Linear            | 3.0                     | 3.0                     | 7.4                     | 8.3                     | 1.8      | 0.739                          |
| Parabolic         | 3.0                     | 3.0                     | 7.4                     | 8.3                     | 1.8      | 0.737                          |
| Reverse parabolic | 3.0                     | 3.0                     | 7.4                     | 8.3                     | 1.8      | 0.737                          |
| Sigmoid           | 3.0                     | 3.0                     | 7.4                     | 8.3                     | 1.8      | 0.739                          |

表 7. 由比ヶ浜南集団の  $\delta^{15}\text{N}$  値測定結果に対して、4つの形のモデルを適用した結果の比較。

“ $t_1$ ”は離乳の開始の推定年齢、“ $t_2$ ”は離乳の終了の推定年齢。“ $N_n$ ”と“ $N_m$ ”は母乳以外の食物タンパク質に由来するコラーゲンおよび母乳に由来するコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  推定値。“E”は母親と乳幼児・子供体組織のあいだの母乳を介した濃縮係数推定値。“Mean  $D_N^2$ ”はモデルによって推定した  $\delta^{15}\text{N}$  値と測定値との差のデータセット全体における平均である。

| <b>Tempo</b>      | <b><math>t_1</math></b> | <b><math>t_2</math></b> | <b><math>N_n</math></b> | <b><math>N_m</math></b> | <b>E</b> | <b>Mean <math>D_N^2</math></b> |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|--------------------------------|
| Linear            | 1.5                     | 2.5                     | 10.5                    | 10.4                    | 2.7      | 1.629                          |
| Parabolic         | 1.3                     | 2.3                     | 10.5                    | 10.4                    | 2.7      | 2.233                          |
| Reverse parabolic | 1.5                     | 3.0                     | 10.5                    | 10.4                    | 2.7      | 2.333                          |
| Sigmoid           | 1.4                     | 2.3                     | 10.6                    | 10.4                    | 2.7      | 1.631                          |

表 8. 有珠モシリ遺跡より出土した試料の  $\delta^{13}\text{C}$  値および  $\delta^{15}\text{N}$  値。

\* は議論から除いた試料。サンプリングをおこなった骨部位は”Sample”に示した。“Estimated age”には推定された年齢範囲が、“Midpoint age”にはその中央値が示されている。年齢推定の方法は”Estimation method”に記した。”S”は Smith (1991) の方法、“U”は Ubelaker (1989) の方法、“B”は骨体の長さからおこなった方法を示している。S と U の試料については、レントゲン写真を撮影し、詳細な年齢推定をおこなった。”C/N”は抽出したコラーゲンの C / N 比。”Yield”は骨コラーゲンの収率で、骨試料の乾燥重量に対する、抽出されたコラーゲンの乾燥重量の割合 (%) で表される。

| ID                  | Sample   | Estimated age | Midpoint age | Estimation method | Sex | $\delta^{13}\text{C}$ | $\delta^{15}\text{N}$ | %C   | %N   | C/N | Yield |
|---------------------|----------|---------------|--------------|-------------------|-----|-----------------------|-----------------------|------|------|-----|-------|
| G-5 1987/7          | humerus  | 0.0           | 0.0          | B                 | -   | -15.8                 | 17.4                  | 42.9 | 14.1 | 3.5 | 10.4  |
| UU10 G-11           | tibia    | 0.0           | 0.0          | B                 | -   | -13.1                 | 19.9                  | 43.8 | 14.5 | 3.5 | 17.2  |
| UU10 G-4 1          | tibia    | 0.0           | 0.0          | B                 | -   | -14.2                 | 20.2                  | 41.7 | 14.1 | 3.5 | 11.0  |
| UU10/870721 G-5     | radius   | 0.0           | 0.0          | B                 | -   | -16.3                 | 16.4                  | 43.7 | 14.3 | 3.6 | 20.4  |
| UU10 G-9 (2)        | radius   | 0.0           | 0.0          | B                 | -   | -16.5                 | 17.7                  | 42.4 | 13.6 | 3.6 | 2.8   |
| UU10 G-20-16 Mound  | femur    | 0.5           | 0.5          | B                 | -   | -13.3                 | 21.7                  | 42.7 | 13.9 | 3.6 | 13.4  |
| H-5 Layer 1 2 (1)   | humerus  | 1.5           | 1.5          | B                 | -   | -13.4                 | 20.7                  | 44.2 | 14.9 | 3.5 | 6.8   |
| 17-66               | humerus  | 1.5--2.0      | 1.75         | B                 | -   | -14.1                 | 21.1                  | 44.4 | 14.8 | 3.5 | 5.8   |
| UU10 H-5 Layer I c  | radius   | 2.5           | 2.5          | B                 | -   | -12.8                 | 21.1                  | 43.3 | 14.6 | 3.5 | 10.8  |
| 17-65               | tibia    | 2.0--4        | 3            | B                 | -   | -15.5                 | 19.5                  | 41.4 | 13.6 | 3.6 | 2.3   |
| G-5-221             | tibia    | 3             | 3            | B                 | -   | -13.6                 | 21.1                  | 43.8 | 14.4 | 3.5 | 3.3   |
| UU10 F-5 G-9        | ulna     | 2.5--4        | 3.25         | B                 | -   | -13.7                 | 21.2                  | 45.2 | 14.7 | 3.6 | 3.7   |
| UU10 G-9 (1)        | maxilla  | 4             | 4            | U                 | -   | -14.0                 | 20.0                  | 42.3 | 14.3 | 3.5 | 6.9   |
| UU10(H-5) G-12      | maxilla  | 4             | 4            | U                 | -   | -13.3                 | 21.3                  | 44.0 | 15.3 | 3.4 | 9.5   |
| G-8-11              | mandible | 4.2           | 4.2          | S                 | -   | -16.7                 | 18.1                  | 41.4 | 13.8 | 3.5 | 7.9   |
| UU10 F-5 South belt | femur    | 4--5          | 4.5          | B                 | -   | -13.8                 | 20.5                  | 44.5 | 14.5 | 3.6 | 4.3   |
| G-5-106             | mandible | 5.1           | 5.1          | S                 | -   | -13.8                 | 19.8                  | 45.1 | 14.5 | 3.6 | 9.4   |
| H-4 B3 Grave 1 2    | mandible | 5.9           | 5.9          | S                 | -   | -12.9                 | 19.3                  | 41.0 | 13.6 | 3.5 | 8.2   |
| G-5 B3 369          | mandible | 6.0           | 6.0          | S                 | -   | -13.0                 | 19.4                  | 44.5 | 14.5 | 3.6 | 17.3  |
| UU10 G-13           | mandible | 6.4           | 6.4          | S                 | -   | -14.8                 | 18.5                  | 43.1 | 14.4 | 3.5 | 14.1  |
| UU10 G-13-45        | maxilla  | 7             | 7            | U                 | -   | -13.3                 | 19.5                  | 44.0 | 14.9 | 3.4 | 9.6   |
| UU10 G-6・17         | humerus  | 7--8          | 7.5          | B                 | -   | -14.3                 | 18.8                  | 41.7 | 13.5 | 3.6 | 4.2   |

表 8. つづき

| ID                  | Sample     | Estimated age | Midpoint age | Estimation method | Sex | $\delta^{13}\text{C}$ | $\delta^{15}\text{N}$ | %C   | %N   | C/N   | Yield |
|---------------------|------------|---------------|--------------|-------------------|-----|-----------------------|-----------------------|------|------|-------|-------|
| UU10 G-10-100       | maxilla    | 8             | 8            | U                 | -   | -13.3                 | 19.8                  | 41.9 | 13.7 | 3.6   | 13.9  |
| G-5-180             | mandible   | 9.6           | 9.6          | S                 | -   | -13.2                 | 18.6                  | 44.1 | 14.2 | 3.6   | 5.5   |
| 850724 G-5-1        | mandible   | 9.8           | 9.8          | S                 | -   | -13.6                 | 18.8                  | 42.4 | 13.8 | 3.6   | 4.6   |
| G7P1 Neonate *      | humerus    | 0.0           | 0.0          | B                 | -   | -15.4                 | 18.4                  | 44.4 | 14.2 | 3.7 * | 4.6   |
| UU10 G-6・29 *       | humerus    | 2.0           | 2.0          | B                 | -   | -14.0                 | 20.9                  | 43.9 | 13.3 | 3.9 * | 3.5   |
| UU10 G-6・1 *        | mandible   | 4.4           | 4.4          | S                 | -   | -13.5                 | 21.3                  | 42.3 | 12.7 | 3.9 * | 7.2   |
| UU10 G-15 *         | femur      | 4-5           | 4.5          | B                 | -   | -14.1                 | 19.7                  | 41.8 | 13.0 | 3.7 * | 3.8   |
| G-5 B3 377 *        | femur      | 4-5           | 4.5          | B                 | -   | -13.3                 | 18.3                  | 42.8 | 12.9 | 3.9 * | 3.1   |
| H-5 Layer 1 2 (2) * | humerus    | 4-5           | 4.5          | B                 | -   | -15.0                 | 19.4                  | 44.9 | 14.4 | 3.7 * | 3.0   |
| UU10 G-4 Mound *    | femur      | 5             | 5            | B                 | -   | -13.0                 | 19.1                  | 42.7 | 13.5 | 3.7 * | 7.5   |
| UU10 G-16 *         | humerus    | 4-6           | 5            | B                 | -   | -15.0                 | 18.3                  | 43.3 | 13.4 | 3.8 * | 5.0   |
| 17-43 *             | mandible   | 5.2           | 5.2          | S                 | -   | -15.1                 | 19.4                  | 41.6 | 13.3 | 3.7 * | 9.6   |
| 3B 217-ka *         | mandible   | 5.5           | 5.5          | S                 | -   | -14.9                 | 19.3                  | 43.7 | 13.3 | 3.8 * | 7.7   |
| G-5 B-3 363 *       | mandible   | 6.3           | 6.3          | S                 | -   | -13.1                 | 19.6                  | 42.9 | 13.1 | 3.8 * | 7.4   |
| G-5-129 *           | radius     | 7-8           | 7.5          | B                 | -   | -14.3                 | 18.8                  | 44.4 | 14.2 | 3.7 * | 4.4   |
| G5 B5 288 *         | maxilla    | 8             | 8            | U                 | -   | -22.0                 | 19.2                  | 35.7 | 6.4  | 6.5 * | 4.9   |
| 3A 217-d *          | mandible   | 10.4          | 10.4         | S                 | -   | -15.6                 | 19.3                  | 43.5 | 13.7 | 3.7 * | 25.4  |
| Usu10-7(2)          | metacarpal | Adult         | -            | -                 | F   | -13.9                 | 18.5                  | -    | -    | 3.3   | -     |
| USU10-10            | rib        | Adult         | -            | -                 | F   | -13.8                 | 18.1                  | -    | -    | 3.1   | -     |
| USU10-14            | rib        | Senile        | -            | -                 | F   | -14.1                 | 17.7                  | -    | -    | 3.2   | -     |
| Usu10-16A           | rib        | Adult         | -            | -                 | F   | -13.7                 | 18.3                  | -    | -    | 3.1   | -     |
| Usu10-16B           | rib        | Adult         | -            | -                 | F   | -13.5                 | 18.5                  | -    | -    | 3.1   | -     |
| USU10-1             | rib        | Adult         | -            | -                 | M   | -13.2                 | 19.4                  | -    | -    | 3.2   | -     |
| Usu10-2             | rib        | Adult         | -            | -                 | M   | -13.7                 | 18.0                  | -    | -    | 3.3   | -     |
| USU10-4             | rib        | Adult         | -            | -                 | M   | -12.8                 | 19.6                  | -    | -    | 3.2   | -     |
| Usu10-7(1)          | metacarpal | Adult         | -            | -                 | M   | -13.9                 | 18.4                  | -    | -    | 3.3   | -     |
| USU10-13            | rib        | Adult         | -            | -                 | M   | -12.8                 | 18.6                  | -    | -    | 3.2   | -     |
| Usu10-15            | rib        | Adult         | -            | -                 | M   | -12.2                 | 18.0                  | -    | -    | 3.3   | -     |
| Usu10-17            | rib        | Adult         | -            | -                 | M   | -13.7                 | 18.5                  | -    | -    | 3.2   | -     |



表 9. 有珠モシリ集団の大人の食性復元に利用した、利用された可能性のある食資源の  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値。

| Food sources       | $\delta^{13}\text{C}$ |     | $\delta^{15}\text{N}$ |     | n  | Reference           |
|--------------------|-----------------------|-----|-----------------------|-----|----|---------------------|
|                    | Mean                  | SD  | Mean                  | SD  |    |                     |
| Marine mammal      | -13.8                 | 1.4 | 15.8                  | 1.9 | 7  | 南川, 2001            |
| Marine fish        | -12.2                 | 0.9 | 14.2                  | 1.1 | 6  | 南川, 2001            |
| $\text{C}_3$ plant | -25.4                 | 1.2 | 1.60                  | 2.4 | 16 | Yoneda et al., 2004 |

表 10. 有珠モシリ集団の  $\delta^{15}\text{N}$  値測定結果に対して、4 つの形のモデルを適用した結果の比較。

“ $t_1$ ”は離乳の開始の推定年齢、“ $t_2$ ”は離乳の終了の推定年齢。“ $N_n$ ”と“ $N_m$ ”は母乳以外の食物タンパク質に由来するコラーゲンおよび母乳に由来するコラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  推定値。“E”は母親と乳幼児・子供体組織のあいだの母乳を介した濃縮係数推定値。“Mean  $D_N^2$ ”はモデルによって推定した  $\delta^{15}\text{N}$  値と測定値との差のデータセット全体における平均である。

| <b>Tempo</b>      | <b><math>t_1</math></b> | <b><math>t_2</math></b> | <b><math>N_n</math></b> | <b><math>N_m</math></b> | <b>E</b> | <b>Mean <math>D_N^2</math></b> |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|--------------------------------|
| Linear            | 3.2                     | 3.2                     | 18.3                    | 18.2                    | 3.0      | 0.484                          |
| Parabolic         | 3.1                     | 3.1                     | 18.4                    | 18.2                    | 3.0      | 0.486                          |
| Reverse parabolic | 3.2                     | 3.2                     | 18.3                    | 18.2                    | 3.0      | 0.484                          |
| Sigmoid           | 0.3                     | 6.2                     | 18.3                    | 18.2                    | 3.2      | 0.488                          |

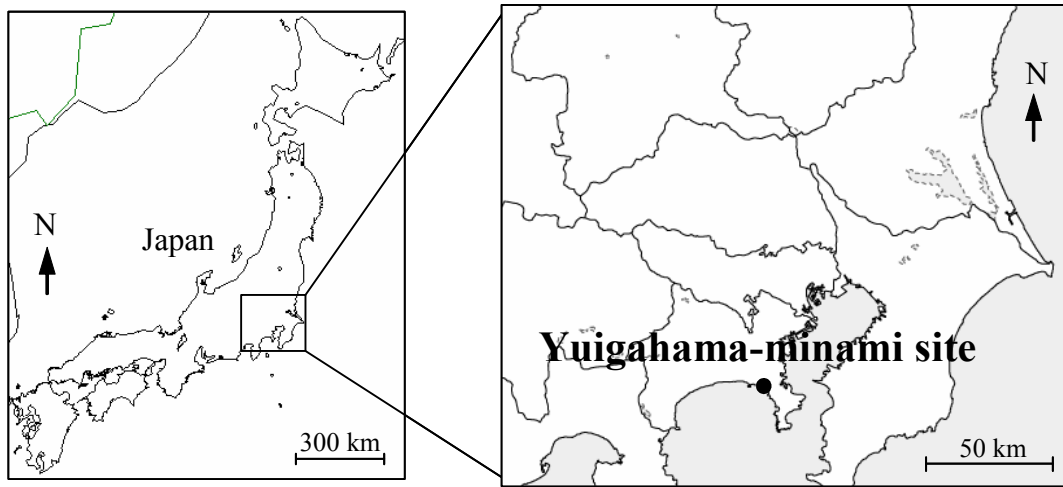


図 1. 由比ヶ浜南遺跡の位置。

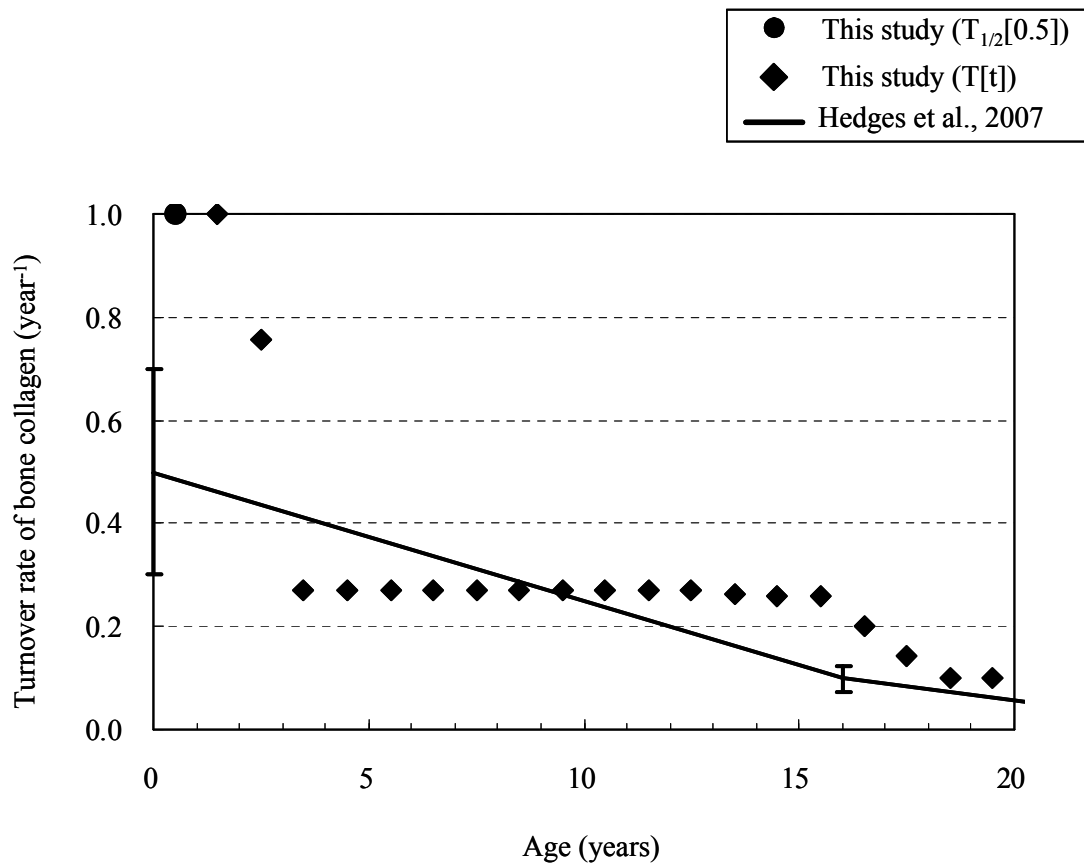


図 2. 骨コラーゲン置換速度の推定値。

本研究で  $^{90}\text{Sr}$  の取り込みから推定した値と、Hedges et al. (2007) が  $^{14}\text{C}$  の取り込みから推定した値を示した。

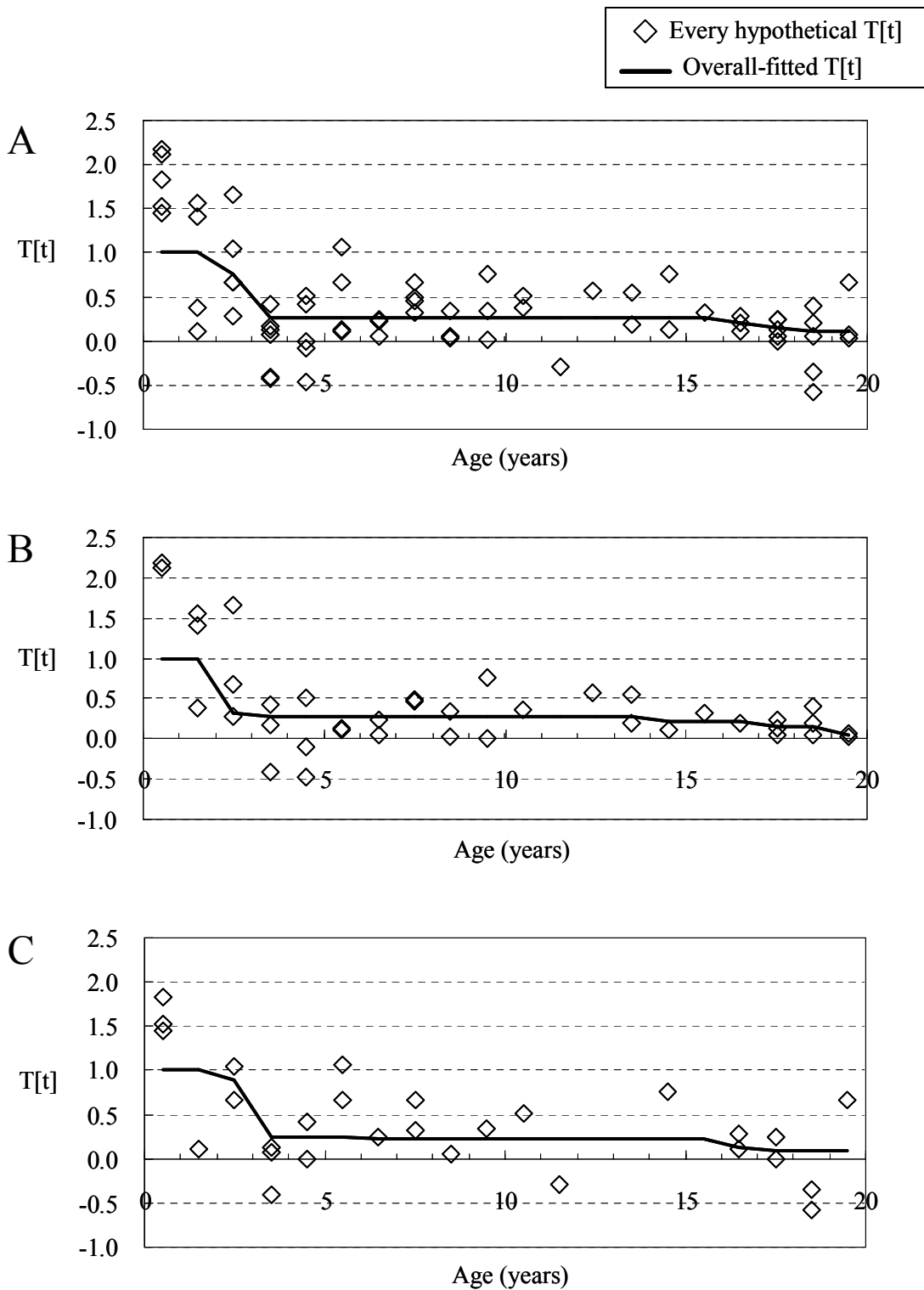


図3. 仮想的な個別の  $T[t]$  と、線形計画法で求めたデータセット全体に対して最適な骨置換速度。  
 A、B、C はそれぞれ、New York、San Francisco、両都市を混合した試料セット、について計算をおこなった結果。 $T[0.5]$  には便宜的に  $T_{1/2}[05]$  を 2 倍した値を示した。 $-1.0$  以上  $2.5$  以下の範囲に収まらない 5 つの個別な計算結果は図示されていない。

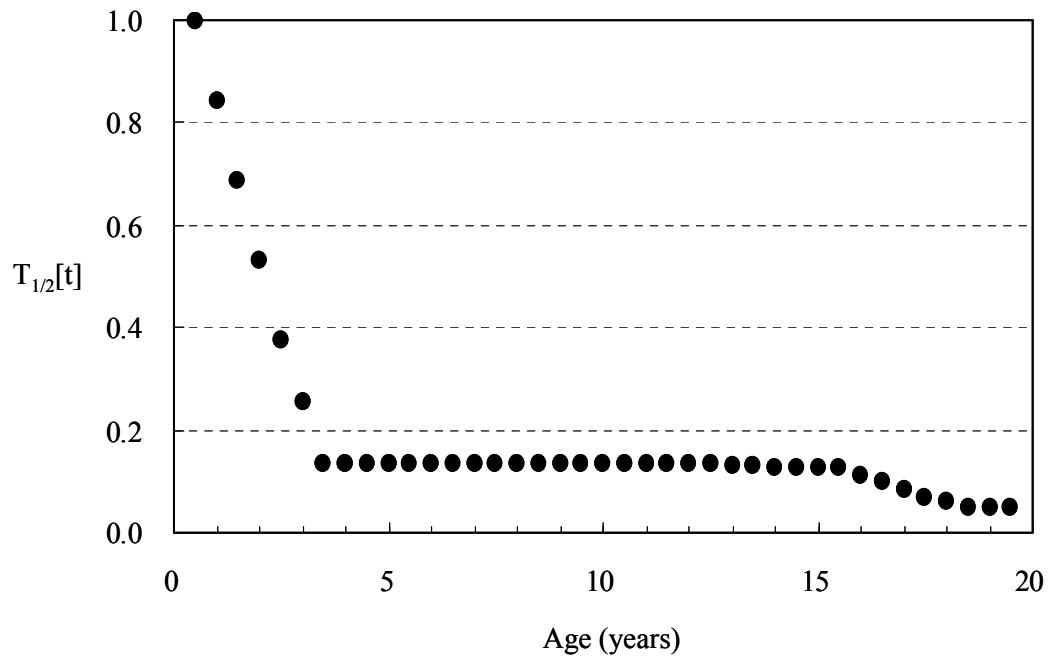


図 4. 0.5 年間ごとの骨コラーゲンの置換速度推定値。

$T_{1/2}[t]$ は年齢  $t-0.5$  から  $t$  までの骨コラーゲン置換速度であり、 $T[t]$ から推定した。 $T_{1/2}[0.5]$  と  $T_{1/2}[1.5]$  は  $T_{1/2}[3.5]$  と  $T_{1/2}[2.5]$  を結んだ直線の延長線上にある。

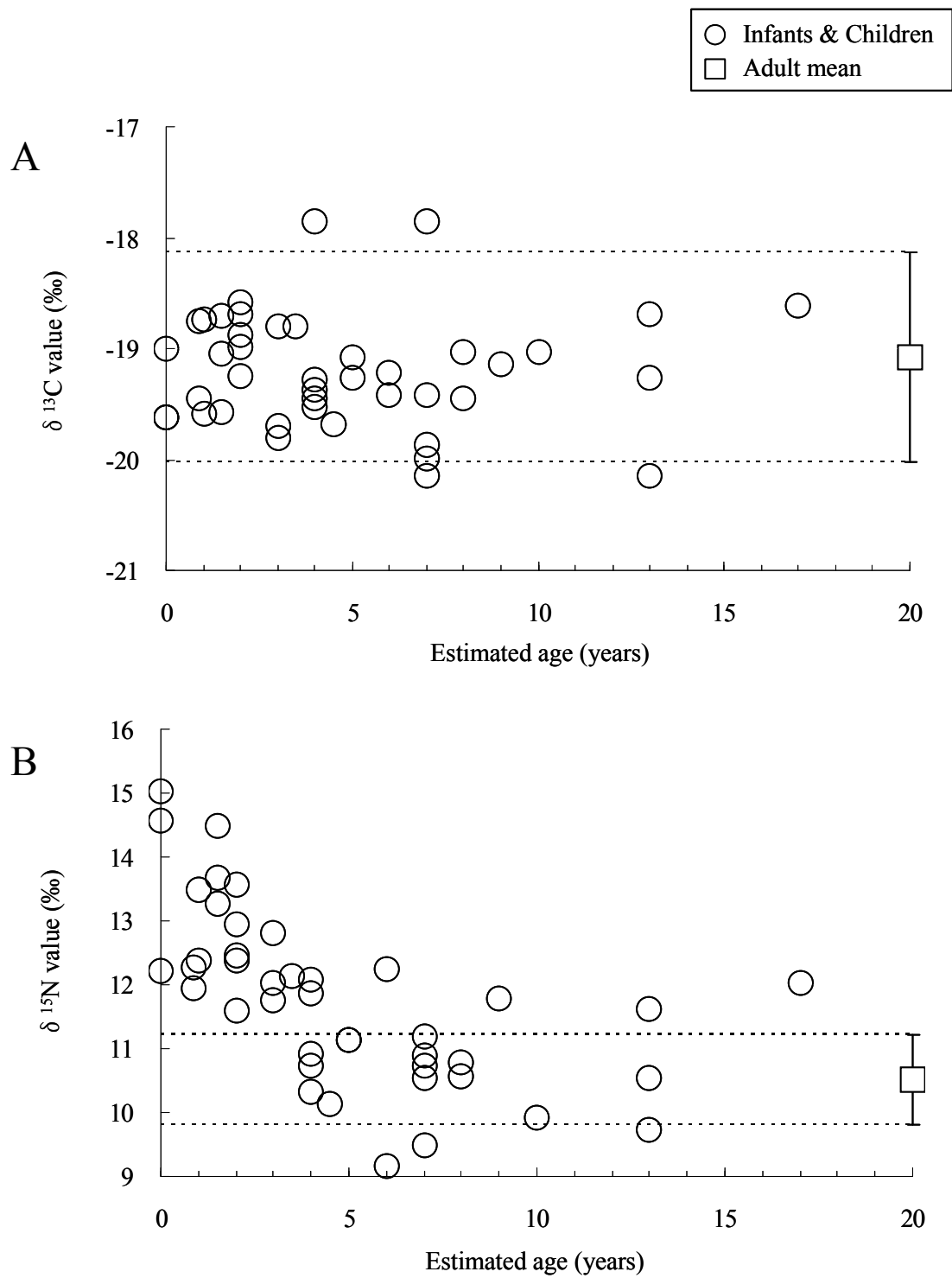


図5. 由比ヶ浜南遺跡の子供・乳幼児骨コラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値 (A) および  $\delta^{15}\text{N}$  値 (B)。大人骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の平均と1標準偏差の範囲もそれぞれ示してある。

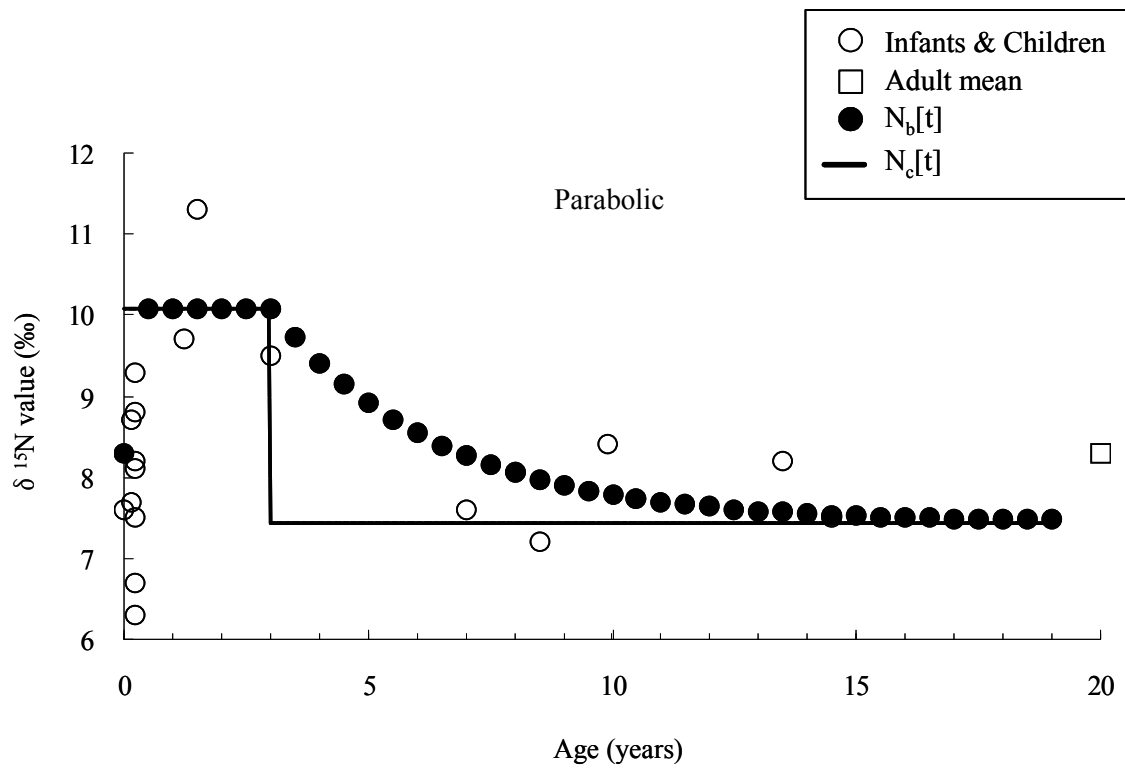


図 6. Angel 集団のモデル化した授乳習慣。

モデルから推定された乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化 (●)、骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の測定値 (○)、モデル化した最近 0.5 年間の食物に由来する骨コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  (—)、大人の  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均 (□) が、年齢に対して示されている。異なる進みかたの形をもつ 4 つのモデルのうち、放物線形のものを示した。



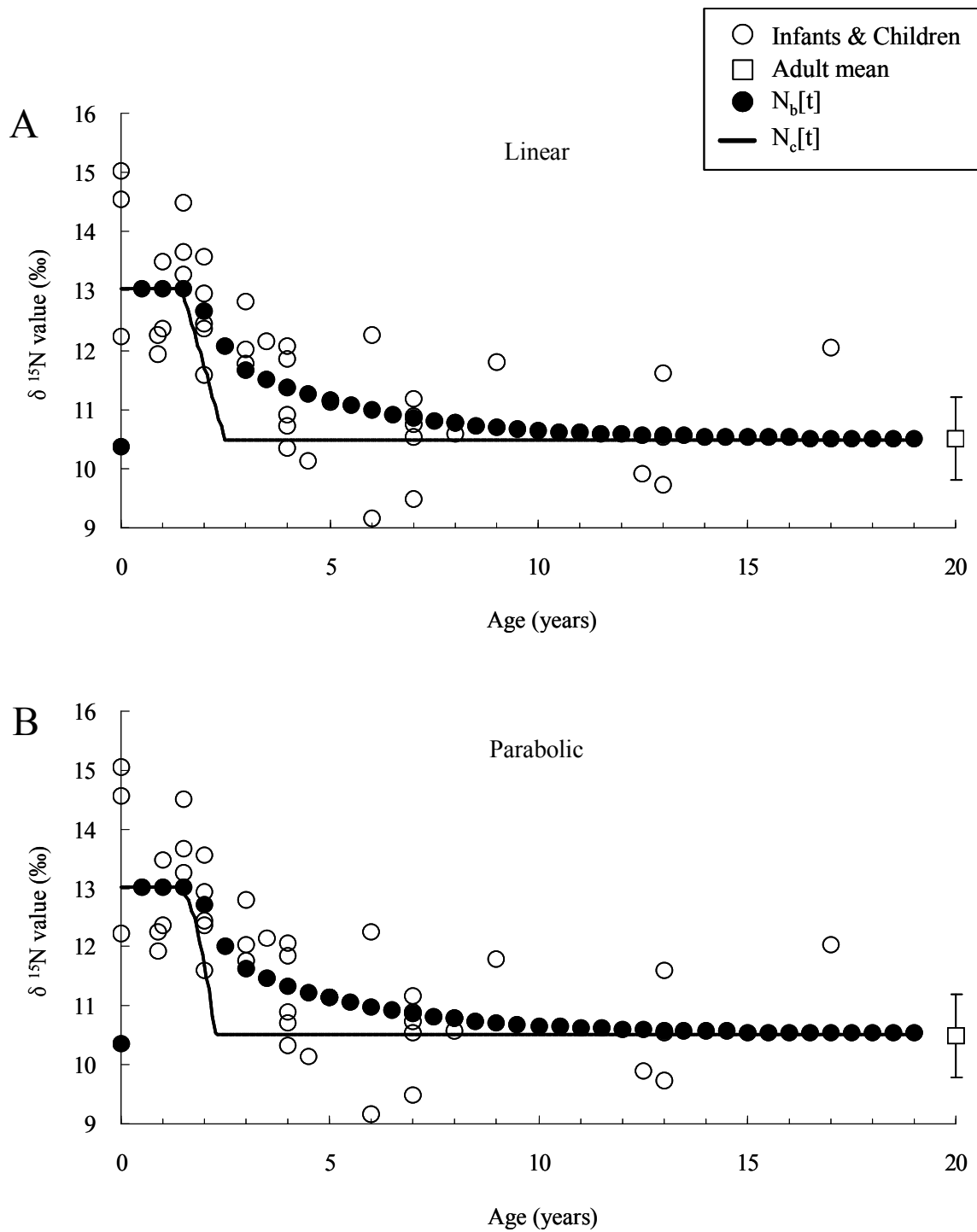
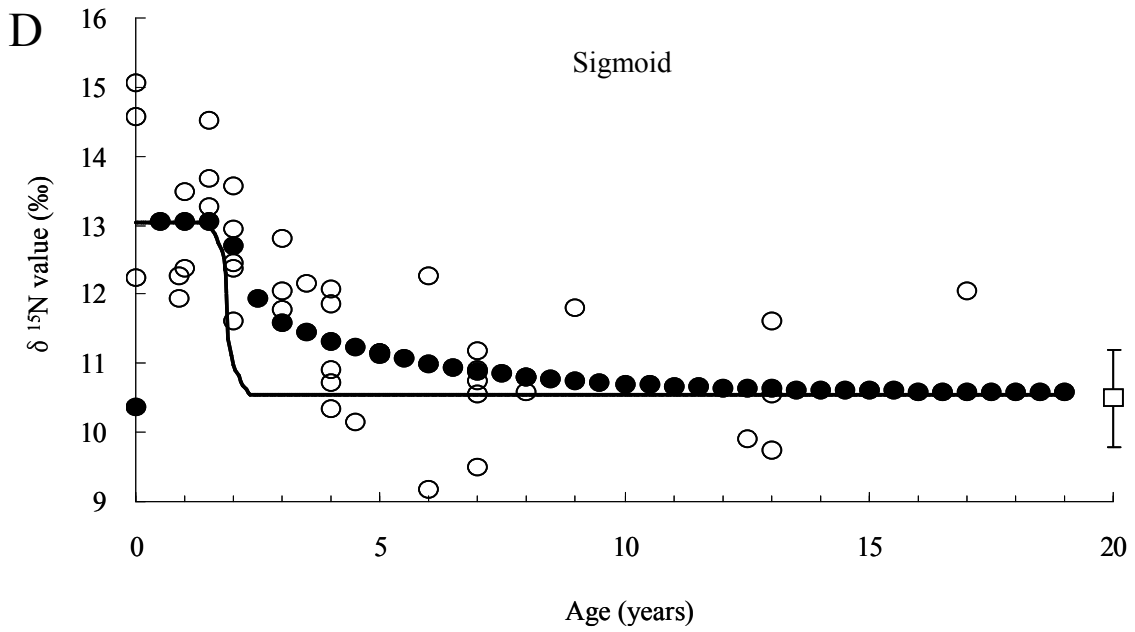
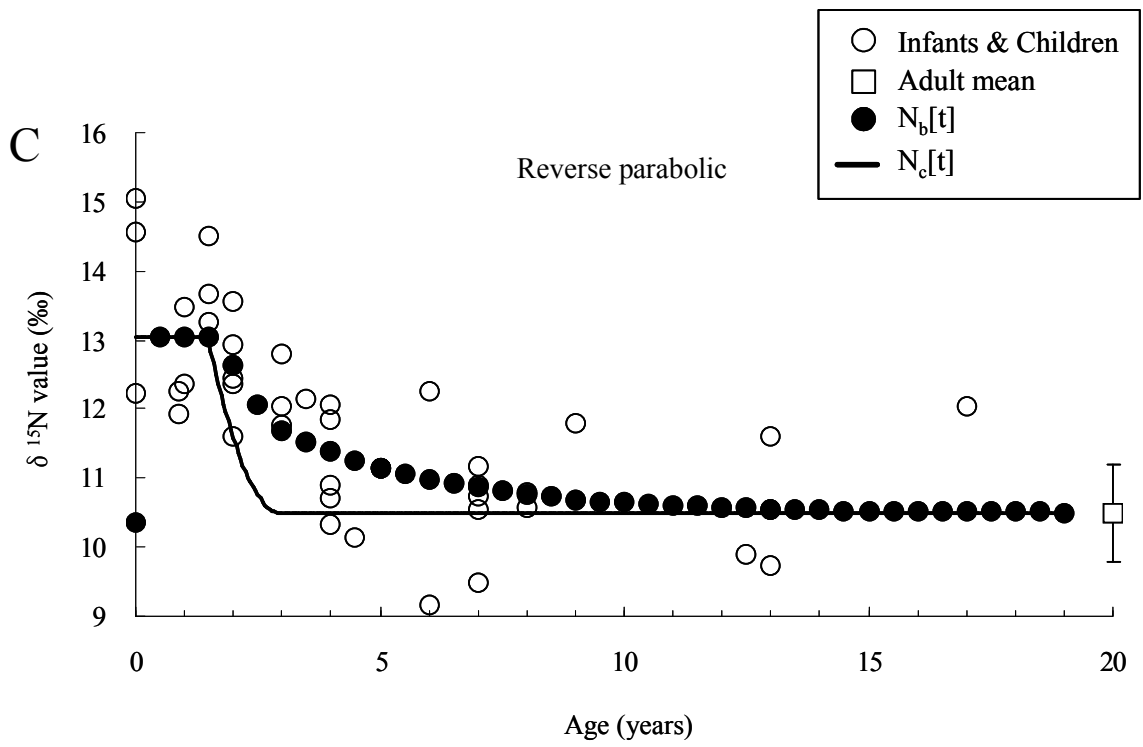


図 7. 由比ヶ浜南集団のモデル化した授乳習慣。

モデルから推定された乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}N$  値の変化 (●)、骨コラーゲン  $\delta^{15}N$  値の測定値 (○)、モデル化した最近 0.5 年間の食物に由来する骨コラーゲンの  $\delta^{15}N$  (—)、大人の  $\delta^{15}N$  値の平均と 1 標準偏差 (□) が、年齢に対して示されている。異なる進みかたの形をもつ 4 つのモデル (A:直線形、B:放物線形、C:逆放物線形、D:シグモイド形) がそれぞれ示されている。



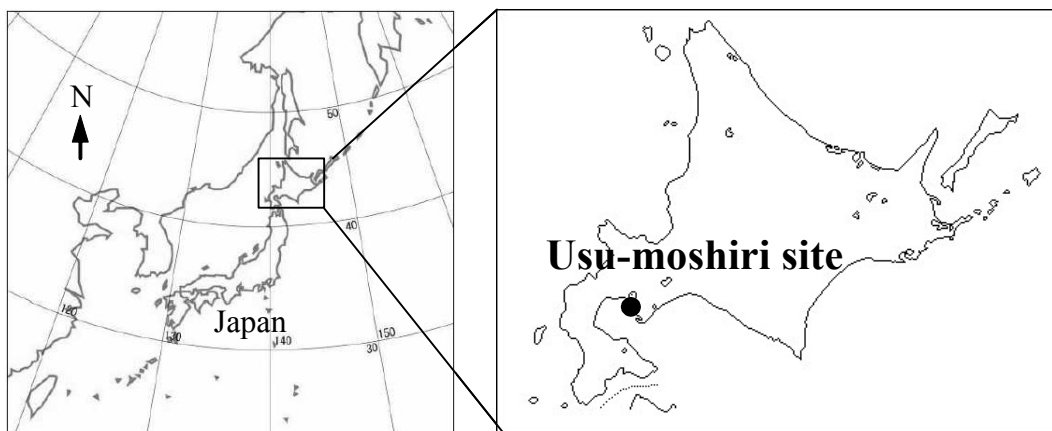


図 8. 有珠モシリ遺跡の位置。

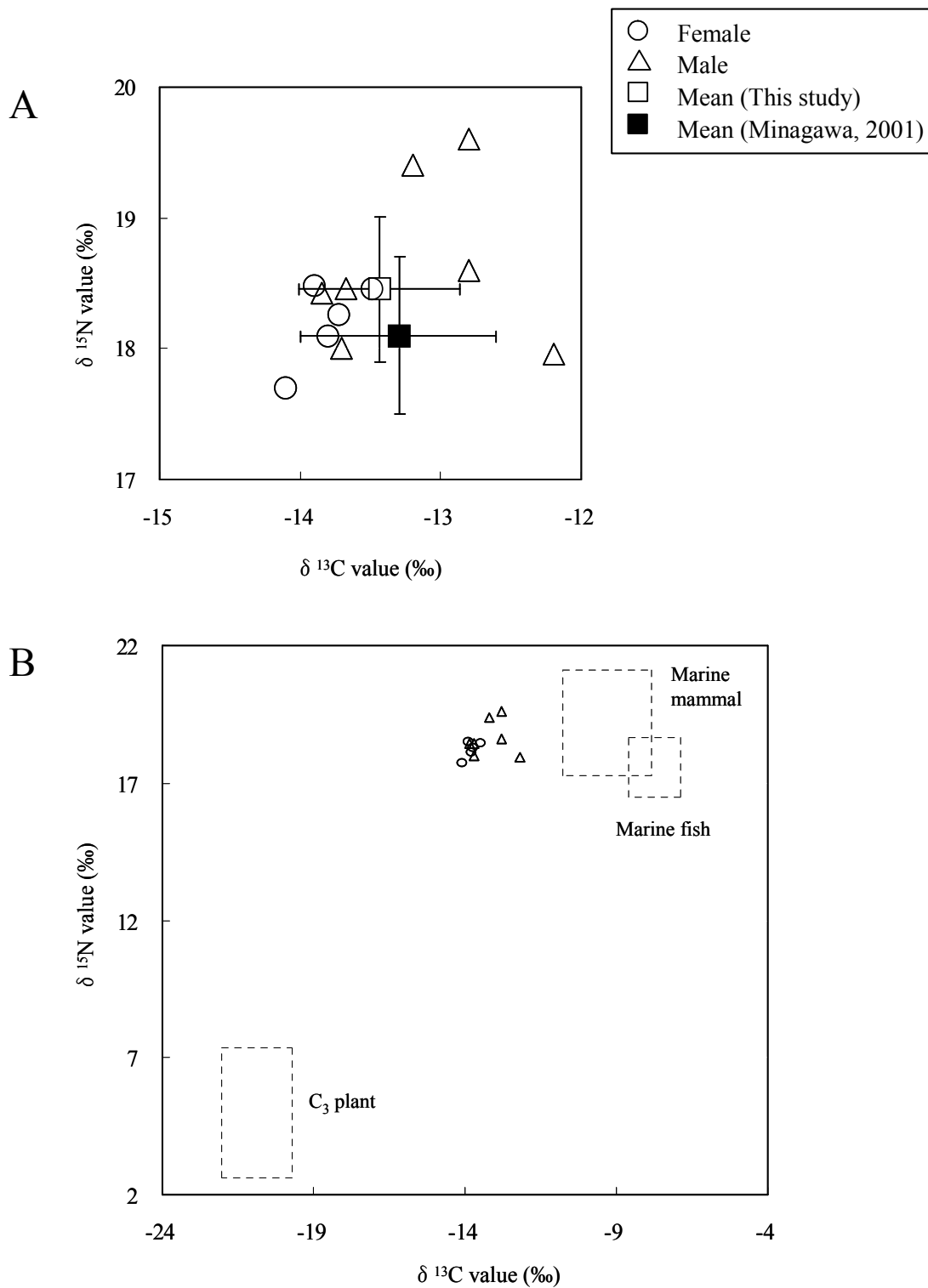


図9. 有珠モシリ遺跡の大人骨コラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値および  $\delta^{15}\text{N}$  値。

A は B の拡大図で、本研究で得られた値と南川 (2001) の報告した値を示した。B には利用された可能性のある食資源由来の骨コラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値が示してある (表9参照)。濃縮係数の補正には  $\delta^{13}\text{C}$  値で 4.5‰、 $\delta^{15}\text{N}$  値で 3.6‰を用いた (Ambrose, 1993; Yoneda et al., 2004)。

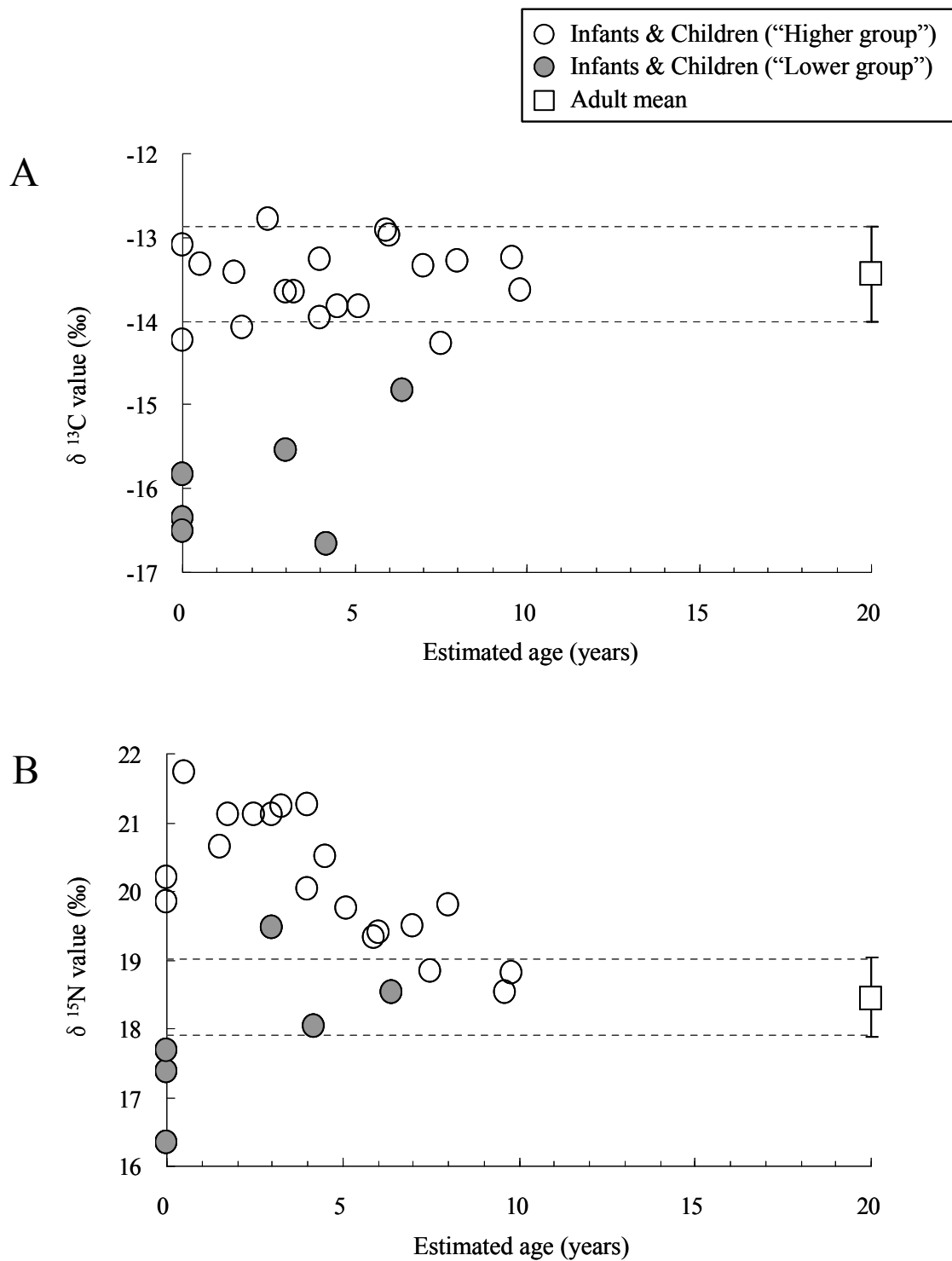


図 10. 有珠モシリ遺跡の子供・乳幼児骨コラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値 (A) および  $\delta^{15}\text{N}$  値 (B)。  
 大人骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の平均と 1 標準偏差の範囲もそれぞれ示してある。灰色の丸は低  $^{13}\text{C}$  群の個体である。

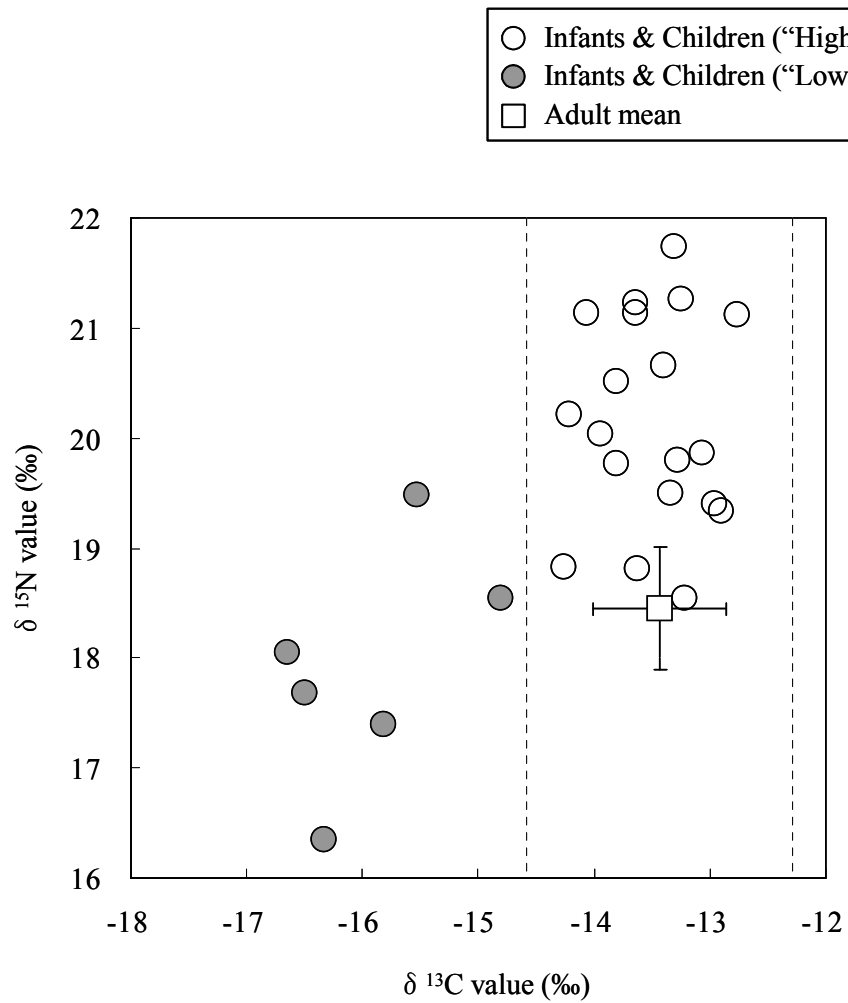


図 11. 有珠モシリ遺跡の乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の二次元プロット図。  
 本研究で測定した大人骨コラーゲンの  $\delta^{13}\text{C}$  値・ $\delta^{15}\text{N}$  値の平均と1標準偏差 (エラーバー)、 $\delta^{13}\text{C}$  値の2標準偏差 (点線) の範囲もそれぞれ示してある。灰色の丸は、低  $^{13}\text{C}$  群の個体である。

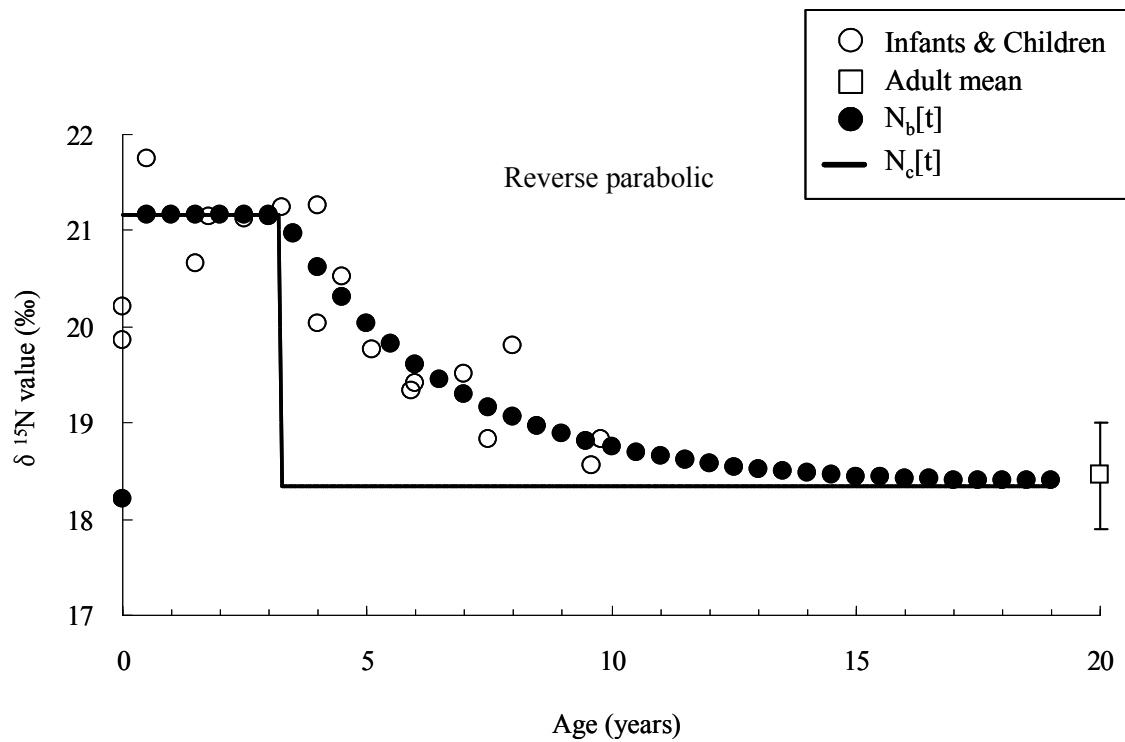


図 12. 有珠モシリ集団のモデル化した授乳習慣。

モデルから推定された乳幼児・子供骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の変化 (●)、骨コラーゲン  $\delta^{15}\text{N}$  値の測定値 (○)、モデル化した最近 0.5 年間の食物に由来する骨コラーゲンの  $\delta^{15}\text{N}$  (—)、大人の  $\delta^{15}\text{N}$  値の平均と 1 標準偏差 (□) が、年齢に対して示されている。異なる進みかたの形をもつ 4 つのモデルのうち、逆放物線形のものを示した。

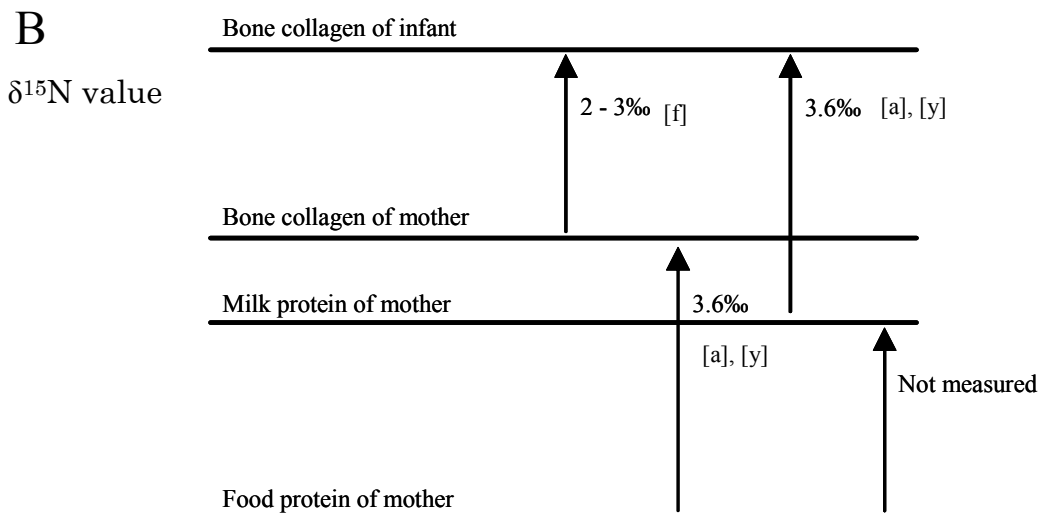
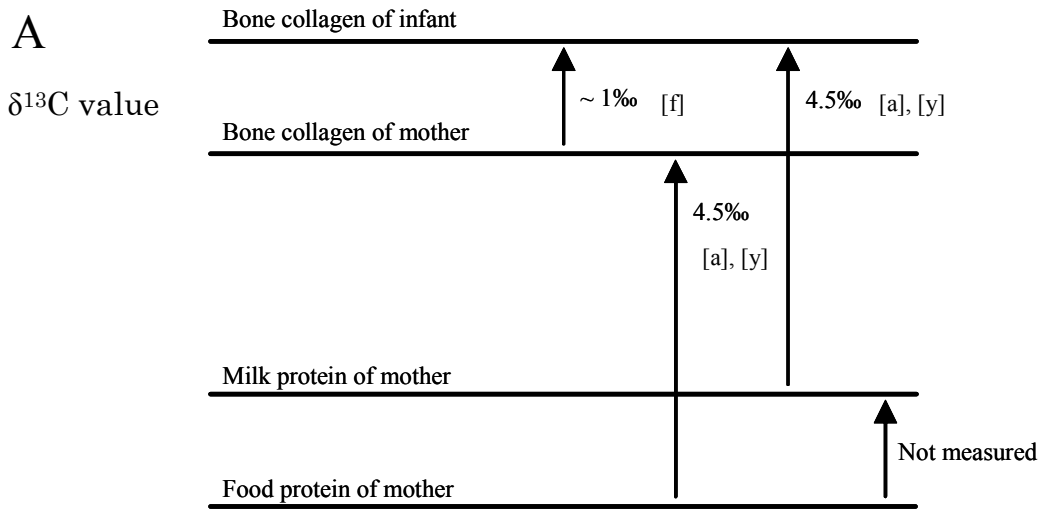
補遺



補遺 1. 霊長類の研究から推定された「ヒト本来の生物学的な」授乳終了年齢。

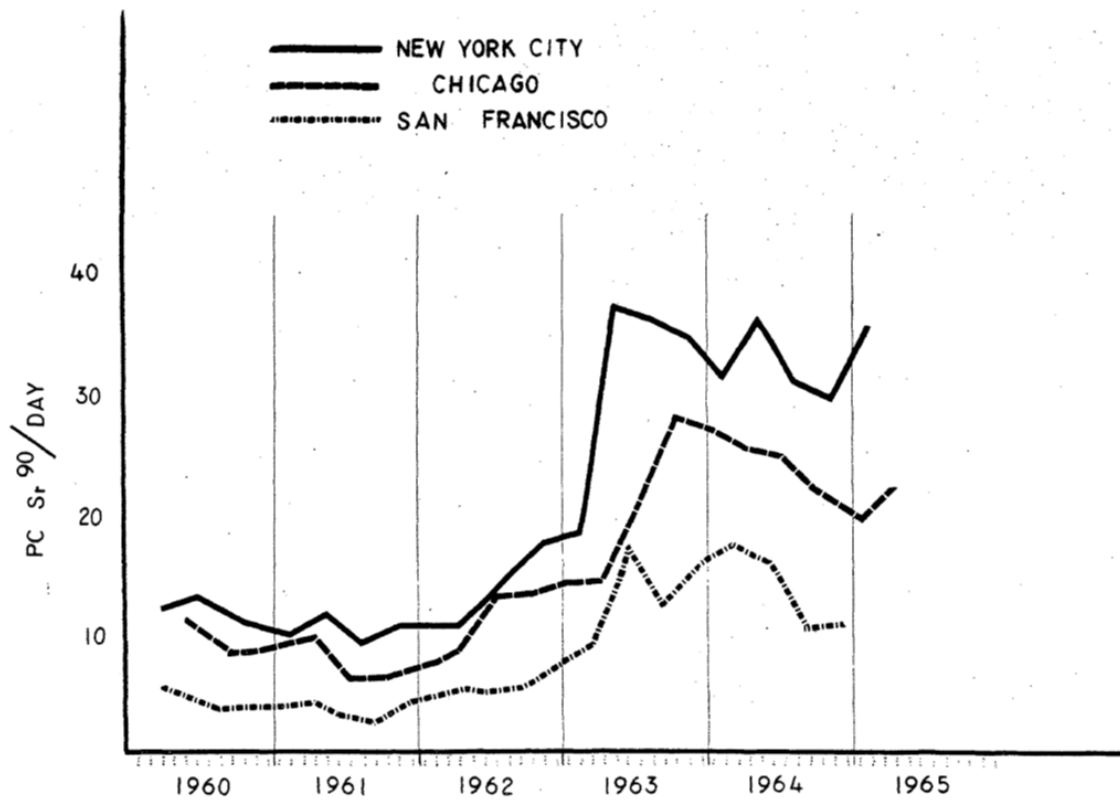
“Life-history variable”には推定の根拠となったパラメータを示した。”Original references”には、Stuart-Macadam (1995) または Dettwyler (1995) が推定の根拠として引用した文献を示した。

| <b>Life-history variable</b> | <b>Age at cessation of breastfeeding (years)</b> | <b>Review</b>  | <b>Original references</b>                     |
|------------------------------|--|----------------|--|
| Lactose intolerance          | 2 - 5  | Stuart-Macadam | Peige et al., 1972<br>Scrimshaw & Murray, 1988 |
| Birth weight                 | 3 - 4  | Dettwyler      | Lawrence, 1989<br>Lee et al., 1991             |
| Adult weight                 | 4 - 7  | Dettwyler      | Charnov & Brrigan, 1993                        |
| Female body weight           | 2.8 - 3.7  | Dettwyler      | Harvey & Clutton-Brock, 1985                   |
| Length of gestation          | 4.5  | Dettwyler      | Harvey & Clutton-Brock, 1985                   |
| Eruption of permanent molar  | 5.5 - 6  | Dettwyler      | Smith, 1992                                    |



補遺 2. ヒトの母子のあいだの生物濃縮にともなう  $\delta^{13}\text{C}$  値 (A) ・  $\delta^{15}\text{N}$  値 (B) の変化。

図中で上に向かうほど、質量数の大きい同位体が濃縮し、同位体比が増加していく。食物と体組織コラーゲンの間の濃縮係数は  $\delta^{13}\text{C}$  値で 4.5‰ (A)、 $\delta^{15}\text{N}$  値で 3.6‰ (B) である。母と乳幼児体組織コラーゲンの間の母乳を介した濃縮係数は  $\delta^{13}\text{C}$  値で約 1‰ (A)、 $\delta^{15}\text{N}$  値で 2‰ から 3‰ 程度 (B) である。食物と母乳のあいだの濃縮係数は、ヒトではまだ調べられていない。[a] は Ambrose, 1993、[y] は Yoneda et al., 2004、[f] は Fuller et al., 2006a より引用した値を示している。



補遺 3. 乳製品  $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$  値の詳細な経年変化 (Rivera & Harley, 1965: Figure 2より転載)。

補遺 4. Angel 集団の測定データ (Schurr, 1997: Table 2. より転載)。

| Burial | Extraction yield (%) | C:N ratio | $\delta^{15}\text{N}$ | Ageing data and ages |              |            |          |                  |                              |
|--------|----------------------|-----------|-----------------------|----------------------|--------------|------------|----------|------------------|------------------------------|
|        |                      |           |                       | Femur (mm)           | Humerus (mm) | Epiphyseal | Dental   | Overall estimate | Midpoint age (yr from birth) |
| R12A03 | 19.85                | 3.28      | 8.7                   | 75                   | 63           |            | nd       | foetal-0.5       | 0.167                        |
| S11D06 | 7.66                 | 3.15      | 7.2                   | 274                  | 195          |            | 8-9      | 8-9              | 8.5                          |
| W10C03 | 6.79                 | 3.46      | 9.7                   |                      | 114          |            | 1-1.5    | 1-1.5            | 1.25                         |
| W10D07 | 18.1                 | 3.40      | 11.3                  | 147                  | 110          |            | 1-2      | 1-2              | 1.5                          |
| W10D13 | 7.36                 | 3.28      | 9.5                   |                      | 128          |            | c. 3     | 2.5-3.5          | 3                            |
| W10D32 | 7.26                 | 3.57      | 8.2                   |                      | 72           |            | 3-9 mos  | 0-0.5            | 0.25                         |
| W10D38 | 6.47                 | 3.26      | 9.3                   | 65                   | 54           |            | 0-0.5    | 0-0.5            | 0.25                         |
| W10D46 | 12.17                | 3.55      | 7.6                   |                      | 62           |            | neonate  | neonate          | 0                            |
| W10D53 | 5.62                 | 3.43      | 6.7                   | 74                   | 64           |            | neonate  | 0-0.5            | 0.25                         |
| W11A01 | 7.65                 | 3.33      | 7.6                   |                      |              |            | 6-8      | 6-8              | 7                            |
| W11A12 | 4.29                 | 3.45      | 8.0                   |                      |              | 12-14      | nd       | 12-14            | 13                           |
| W11A14 | 7.92                 | 3.31      | 7.5                   | 84                   |              |            | nd       | 0-0.5            | 0.25                         |
| W11A28 | 17.47                | nm        | 6.3                   | 74                   |              |            | nd       | 0-0.5            | 0.25                         |
| W11A35 | nm                   | 3.30      | 11.1                  | 80                   |              |            | nd       | 0-0.5            | 0.25                         |
| X11B25 | 16.75                | 3.63      | 8.2                   |                      |              |            | 12-15    | 12-15            | 13.5                         |
| X11B27 | 9.8                  | 3.37      | 8.1                   | 74                   | 64           |            | nd       | 0-0.5            | 0.25                         |
| X11B29 | 8.1                  | 3.23      | 7.7                   | 67                   | 58           |            | nd       | foetal           | -0.167                       |
| X11B30 | 16.43                | 3.44      | 8.8                   | 80                   | 67           |            | nd       | 0-0.5            | 0.25                         |
| X11B31 | nm                   | 3.47      | 10.2                  |                      |              |            | 18 mos-2 | 0.5-3            | 1.75                         |
| X11C09 | 4.74                 | 3.29      | 7.7                   |                      |              | 16-17      | nd       | 16-17            | 16.5                         |
| X11C14 | 12.06                | 3.61      | 8.4                   |                      |              | 5-15       | 8-10     | c. 9             | 9                            |
| X11C26 | 3.06                 | 3.05      | 6.7                   |                      |              |            | 18 mos-2 | 1.5-2            | 1.75                         |
| X11C31 | 10.48                | 3.13      | 7.5                   |                      |              | 14-15      | nd       | 14-15            | 14.5                         |
| Mean   | 9.13                 | 3.22      | 8.3                   |                      |              |            |          |                  |                              |
| s.d.   | 5.44                 | 0.70      | 1.3                   |                      |              |            |          |                  |                              |
| Min.   | 3.06                 | 3.06      | 3.1                   |                      |              |            |          |                  |                              |
| Max.   | 19.85                | 3.63      | 11.3                  |                      |              |            |          |                  |                              |