

名古屋大学タンデトロン AMS ^{14}C システムの現状と利用 (2013)
Status and Applications of a Tandetron AMS System at Nagoya University in 2013

中村俊夫^{1*}・南 雅代¹・小田寛貴¹・池田晃子¹・一木絵理¹・
箱崎真隆¹・太田友子¹・西田真砂美¹・池盛文数²・城森由佳²・
加藤ともみ³・早田 葵²・國田圭佑²・富山慎二²

Toshio Nakamura¹, Masayo Minami¹, Hiroataka Oda¹, Akiko Ikeda¹, Eri Hitoki¹, Masataka Hakozaiki¹, Tomoko Ohta¹, Masami Nishida¹, Kazufumi Ikemori², Yuka Jyomori², Tomomi Kato², Aoi Soda², Keisuke Kunita², Shinji Tomiyama³

¹名古屋大学年代測定総合研究センター

²名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Center for Chronological Research, Nagoya University, Chikusa, Nagoya 464-8602 Japan

² Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Chikusa, Nagoya 464-8602 Japan

*Corresponding author. E-mail: nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp

Abstract

An AMS system (Model 4130-AMS) dedicated to ^{14}C measurements, built by High Voltage Engineering Europe (HVEE), B.V., The Netherlands, was delivered to Nagoya University in 1996/97. Acceptance tests of its performance on carbon isotope measurements were completed in January of 1999, and routine measurements began in mid-2000. Since completion of the acceptance tests in early 1999, we have encountered a lot of troubles with the machine, particularly in 2002. Since the end of 2002, the machine has worked relatively well, expect for minor problems. The standard deviation (one sigma) of the $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio is around $\pm 0.3\%$ to $\pm 0.4\%$ (a bit larger than the uncertainty of about $\pm 0.3\%$ calculated from ^{14}C counting statistics) and that of the corresponding $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio is $\pm 0.03\%$ to $\pm 0.07\%$, as are tested for HOxII targets. The number of targets measured was 330, 1430, 2077, 1003, 1,979, 1679, 1772, 1115, 1339, 866, 1300, 1701, 1449, 1634, 1351 in each year from 1999 to 2013, respectively, and total number of targets measured by the end of 2013 is 21,024. We briefly describe the maintenance processes and application results of the AMS system in 2013.

The Tandetron AMS system at Nagoya University worked well in the early four months of 2013, with only minor failures. On 10th May, a noise from the accelerator tank became large, almost similar to the large noise generated on 24th October in 2012. The noise in 2012 was generated from the broken bearing mounted in the power generator that supplied electric power to a terminal turbo-pump mounted inside the tank. It took almost one month to replace it to a new one. So, this time soon opened the tank and checked inside the tank, but could find no special objects that might have generated the noise. Since we could not find the source of the noise, and the noise generated in the normal atmospheric pressure was not so large, we have decided to operate the machine under the small but explicitly existing noise. However, at a pressure of 6.5bar by SF₆ gas, the noise became far bigger and we could not operate the

machine. We opened the tank again checked every parts inside the tank more carefully, and finally found out that the noise is generated from the timing belt connecting the power motor at the high-energy end and rotating rod which is transferring mechanical power to the generator used for turbo-molecular pump operation. The belt was a bit too loose and swinging between the two gear wheels during transferring mechanical power. We tightened the belt and the noise disappeared. It took totally two month to notice the source of the noise.

On 22nd October, a big noise was generated again from the tank. This time, we also noticed that the terminal voltage was not stable. At the same condition of high-energy power supply, the terminal voltage readout was a bit low than the normal condition, and the readout decreased with time. We considered that the generating voltmeter (GVM) for measuring the high voltage of the accelerator is in the wrong, and decided to replace it to a new one. We replace it and readout of the high voltage became perfect.

Owing to these difficulties with the machine, the total number of graphite targets measured was 1351 in 2013, about 300 smaller in number than that in 2012 (1634).

Keywords: accelerator mass spectrometry, radiocarbon, turbo molecular vacuum pump, power transfer system for accelerator terminal pump, timing belt

キーワード：加速器質量分析、放射性炭素、ターボ分子真空ポンプ、加速器ターミナルポンプ駆動システム、タイミングベルト

1. はじめに

名古屋大学年代測定総合研究センターに、1997年3月に完納された High Voltage Engineering (HVEE)社製 Tandetron (Model 4130-AMS)は、放射性炭素測定専用のシステムである。Cs スパッタ負イオン源 (Model 864B)、リコンビネーター、3MV ベースのタンデム加速器、110 度および 90 度曲げ角度の質量分析電磁石 2 台、33 度曲げ角度の静電デフレクタ、およびイソブタンガスを用いる電離箱型重イオン検出器からなる。リコンビネーターシステムにより、まず $^{12}\text{C}^-$, $^{13}\text{C}^-$, $^{14}\text{C}^-$ ビームを分離させ、このときに chopper wheel を用いて $^{12}\text{C}^-$ ビーム強度を約百分の一に減衰させ、その後 3 つのビームを再び結合して加速器に入射する。こうして炭素 ^{14}C 、 ^{13}C 、 ^{12}C の同時測定を行い、炭素の同位体比を高精度に測定できる。1999 年 1 月に $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比測定の性能検収を終了し、2000 年度から学内共同利用を開始した(Nakamura et al. 2000; 2004)。

2012 年末までの装置の運用、稼働状況については、これまでに発行された報告書 (名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 1988-2013) に概要を述べているので参考にされたい。2012 年は、2011 年と同様に定常的なトラブルがあったものの、10 月中旬までは順調に測定は進んだ。しかし、2012 年 10 月 25 日に、加速器本体からの雑音がひどくなり、加速器タンクを開けたところ、タンク内に設置してあるターボ分子ポンプ用電源の発電機の故障が判明した。発電機の交換に 1 ヶ月以上を要し、再測定を始めたのが 12 月 15 日となった。このため 2012 年の測定総数は 1634 個にとどまった。2012 年末における測定されたターゲット総数は 19,674 個でおわり、20,000 個を年内に達成することは出来なかった。その後、2013 年には、加速器タンクを 2 回も開放する事態になった。ターミナルポンプ作動時に激しい雑音が加速器短期内から発生した。もう一度は、加速器高電圧読み取りの Generating Volt Meter (GVM) の劣化である。加速器の高電圧が正しく読めないようになり、また、高電圧の読み値が時間と共に低い値にずれていく。本稿では、この 2 回の故障を中心に、2013 年 1 月から 2013 年 12 月末までの 1 年間の故障例など、運転の状況をまとめる。また、この期間に行われた ^{14}C

測定研究の一部を紹介する。共同利用研究による成果については本報告書に寄稿されているさまざまな分野における研究事例報告を参照されたい。

2. 2013 年の一年間の運転状況の概要

2013 年の 4 月までは、イオン源のターゲット交換機能の不具合、高エネルギー側の質量分析電磁石の電源冷却水パイプの目詰まりによる電源の温度上昇、などのこれまでと同様な定常的なトラブルがあったものの、ほぼ順調に測定が進んだ。この間、1 月月の前半は、高電圧の放電を避けるために特に SF₆ ガスの脱水をこまめに行った。2013 年 5 月 10 日ころに、加速器タンクの中から高周波の雑音が顕著になった。昨年 10 月に、加速器タンク内に設置してあるターボ分子真空ポンプ駆動用の電源を発生させる発電機の交換を行ったばかりであるが、そのときに似た雑音が聞こえたため、加速器タンクを開けて内部を点検することにした。加速器タンク内には、特段の異常が見られないため、閉じて SF₆ 絶縁ガスを満たし、¹⁴C 測定開始を試みたが、やはり以前同様の雑音が発生した。再度タンクを開けて点検した。最終的には、発電機を作動させるために加速器ターミナルに動力を伝える回転ロッドを電動モータで回転させるために動力を伝えるベルトの張り具合の問題であることが判明した。雑音を電子的に記録して、オランダのメーカーで聞いてもらったが原因は特定してもらえなかった。このために 2 ヶ月近くを無駄にしたことになる。

表 1 年間のターゲット測定数と測定時間（1999 年の測定開始から 2013/12/31 まで）

年	測定ターゲット（個）			測定時間（時間）	
	年間	月平均	積算数	年間	月平均
1999	330	28	330	352	29
2000	1,430	119	1,760	2,234	186
2001	2,077	173	3,837	3,161	263
2002	1,003	84	4,840	1,545	129
2003	1,979	165	6,819	3,219	268
2004	1,679	140	8,498	2,837	239
2005	1,771	148	10,269	3,456	288
2006	1,115	159	11,384	1,584	264
2007*	1,339	134 ¹⁾	12,723	2,136	214 ¹⁾
2008*	866	144 ²⁾	13,589	1,488	248 ²⁾
2009	1,300	186 ³⁾	14,889	2,470	350 ³⁾
2010	1,701	155 ⁴⁾	16,590	3,027	279 ⁴⁾
2011	1,449	140 ⁵⁾	18,039	2,856	286 ⁵⁾
2012	1,634	163 ⁵⁾	19,673	3,204	320 ⁵⁾
2013	1,351	169 ⁶⁾	21,024	2,795	349 ⁶⁾

1) 耐震工事（実質的には 2007/11/1-2008/06/20）の間は、年代測定装置は停止した。

2) 有効使用月：6 ヶ月

3) 有効使用月：7 ヶ月

4) 有効使用月：11 ヶ月

5) 有効使用月：10 ヶ月

6) 有効使用月：8 ヶ月

次の大きなトラブルは、またしても加速器タンクの中からであった。10 月 22 日頃に、タンク内からの雑音が大きくなると共に、加速器高電圧の安定な制御ができなくなり、負荷される高電圧が次第に低下した。設定した電圧に対して、読み出し電圧が高いため、制御回路が電圧を低くするように指示する。こうして加速器に負荷される高電圧は次第に下がってくる。このように加速器高電圧が不安定な状況では、¹⁴C 測定ができないため、高電圧の読み出しに係わる Generating Volt Meter (GVM) の点検を行うことにした。11 月の始めに GVM の交換を行ったところ、加速器高電圧は安定を取り戻し、¹⁴C 測定ができるようになった。以上

のように5月中旬から6月いっぱい、さらに10月後半から11月前半にかけて ^{14}C 測定が不可能な状況が続き、最終的に12月末までの1年間に1,351個のターゲットを測定することとなった。加速器タンクにトラブルがあった昨年よりも300個近く減少した。2013年末までに測定したターゲットの総数は21,024個である。このように2013年には、最近の目標であった測定総数20,000を超えることができた。 ^{14}C 測定を開始した1999年からこれまでににおける ^{14}C 測定の経緯を表1及び図1に示す。

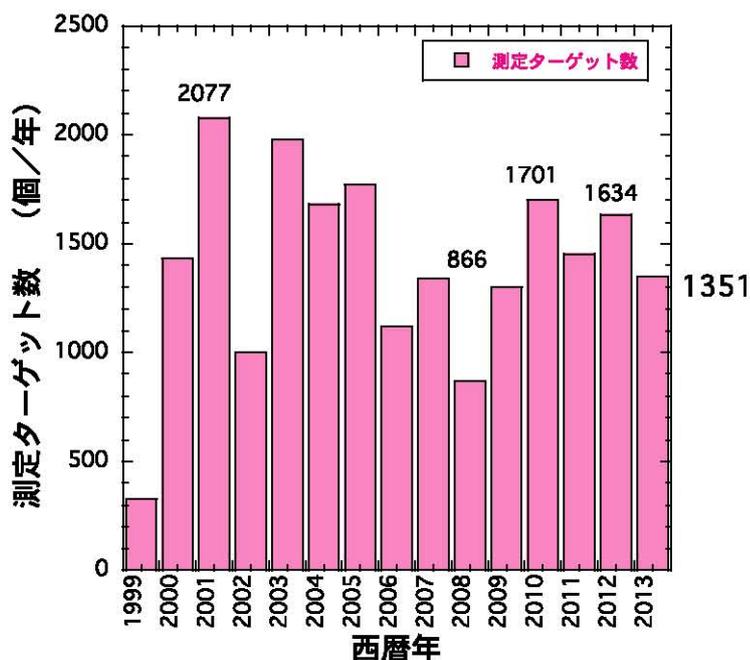


図1 1999年から2013年末までの年ごとのターゲット測定数

3. HVEE タンデトロン加速器質量分析計の故障の詳細

表2に、2013年における各月あたりのターゲット測定数及びタンデトロン加速器質量分析計の不具合の状況を示す。表2に挙げた項目のうち、特に、加速器タンク内に設置されているターボ分子ポンプの駆動のための動力伝達に用いられるベルトの調整、加速器高電圧の読み取りに用いられるGVMの取替について、以下に説明を加える。

3.1 加速器タンク内のターボ分子ポンプの駆動のためのベルトの調整

ターボ分子ポンプの駆動のための動力伝達システムは、加速器タンク内の高電圧側に設置されており、加速器タンクの最奥にACモーターが取り付けられている。加速管に平行に取り付けられた回転ロッドをモーターの動力で回転させ、この回転力を用いて加速器タンク中央に設置されている発電機を駆動させて発電し、その電気をを用いてターボ分子ポンプを駆動する。タンデム加速器の低エネルギー側加速管（負イオンを加速する）と高エネルギー側加速管（陽イオンを加速する）の間に荷電変換カナルがありここで、負イオンをアルゴン原子に衝突させて負イオンから電子をはぎ取り陽イオンへ変換する。この際に、この反応が効率良く進むようにアルゴンガスを負イオンの進路にコンデンスさせる機能を持つのがターボ分子ポンプである。加速管の両端に拡散するアルゴンガスを集めて荷電変換カナルの中央にはき出す。こうしてアルゴンガス濃度の高い空間が負イオンの進路に作られる。

M-G Modification SET 取付写真

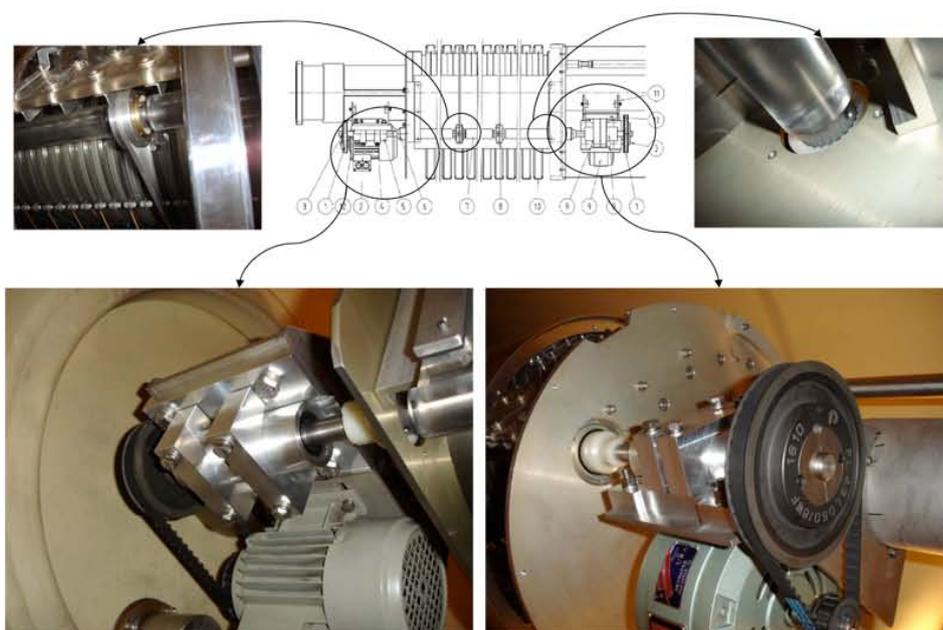


図2 加速器タンク内に設置されているターボ分子ポンプの駆動のための動力伝達システム

加速器タンクから聞こえる雑音源として、回転ロッドを取り付けているベアリングやモーター、発電機などを疑ったが、特定することが困難であった。時間を浪費しながら試行錯誤をするうちに、雑音源として、動力を伝えるベルト（図2、左下の写真に写っているベルト）が浮かび上がった。ベルトが緩んでいると、プーリーの歯とのかみ合わせがおかしくなり、噛み合わせがずれて回転することが発生した。これが、雑音の発生源となっていた。ベルトの張りを調整したら、雑音がなくなった。

3. 2 加速器高電圧の読み取りに用いられる GVM の取替

2013年10月22日あたりから、加速器高電圧の安定が悪くなった。設定した電圧に対する加速器高電圧電源の出力が徐々に下がり、設定して電圧に対して、実際に付加されている高電圧が低下していることが予想された。実際、徐々にではあるが分析電磁石の設定値に対して、 $^{13}\text{C}^{3+}$ 、 $^{12}\text{C}^{3+}$ ビーム強度が弱くなり、ビーム強度を元に戻すには、電磁石の磁場を弱くする必要がある。すなわち、高電圧設定値に対して、実際の電圧値は低い方にシフトしている。また、同時にタンク内から雑音が発生していることが確認された。そこで、Generating Volt Meter (GVM)を疑った。GVMは、固定翼と回転翼の金属導板に誘起される起電圧から、非接触で加速器高電圧を読み取る装置である。10年以上前に、GVMを回転させるコイルが焼けてGVM装置のモーターを取り替えたことがあった。モーターのベアリングが消耗して回転が不安定になり雑音を発すると同時に、回転の不安定から、高電圧を正しく読み取ることができなくなったと想像される。幸い、以前に購入した予備品があったことから、モーターを取り替えることにした。旧理学部の装置開発グループの協力を得てモーターを取り替えることができた。モーターが変わったために、付加されている実際の高電圧と新しいGVMを用いて出力される高電圧の読みが、これまでと比べて数10kV高めにずれていることが明らかになった。GVMの回路を調整しても（ポテンショメーターを調整すると改善されるが、メーターが振り切れても、その改善は不十分な状態である）、改善されない。しかし、AMS ^{14}C 測定には、特段の支障がないため、この状態で ^{14}C 測定を開始することにした。



写真1 加速器タンクの中央後ろ側にヘソのように飛び出している GVM 装置



写真2 加速器タンクの外から見た GVM 装置



写真3 取り外した GVM 装置



写真4 GVM 装置のモーター部分の取り外し交換



写真5 加速器タンク内で見える GVM 装置の構造

表2 2013年における月あたりのターゲット測定数と装置保守・運転の概要

月	測定番号 (NUTA2- 19585~)	測定数	batch数	コメント
1	19752	172	16	1/5-1/7 SF ₆ 乾燥作業 1/14-1/17 SF ₆ 乾燥作業 1/18 イオン源稼働不良, ターゲットが詰まる 1/28 AC 電源に瞬間停電発生, 装置のほとんどがダウンしたが, 破損はなし.
2	19896	144	15	2/3 ターゲット交換失敗 (Serial loadNext command failed) 2/13 ターゲット交換失敗 (Serial loadNext command failed) 2/19 ターゲット交換失敗 (Serial loadNext command failed)
3	19946	50	10	3/24 臨時の停電(13:00-16:00) 3/25 イオン源の X 線遮蔽 3/25 ¹⁴ C 検出器のイソブタンガスの詰め替え 3/31 加速器高電圧ダウン(@2450KV), リセット OK
4	20090	144	12	4/1-4/3 SF ₆ 乾燥作業 4/8 ¹⁴ C 測定を再開
5	20188	98	10	5/10 加速器から, 高周波の「チリチリ.....」という音が聞こえてくる. 5/12 加速器タンクから周期的な雑音が出てくる. Terminal pump を off にすると音は消えた. Terminal pump 駆動系からの雑音と思われる. タンクオープンを決意 5/13-5/14 SF ₆ ガスの回収 5/15 タンク開, タンク内部の点検, 特段の異常は確認できず. 5/16-5/20 タンク閉, タンク内の排気, SF ₆ ガスの充填 5/21-5/28 Terminal Pump を on にすると異常音が発生 5/28 SF ₆ ガスの再回収 5/30-5/31 タンク開, タンク内部の点検
6	20188	0	0	6/11 異常音の発生源がベルトによるものと判明した. ベルトの調整を厳密に実施した. 6/14 タンク閉, タンクの排気 6/17 SF ₆ の充填 6/18-7/1 SF ₆ の脱水の継続
7	20335	147	13	7/10-7/12 HE Magnet 電源の整流器を交換
8	20459	124	12	8/21-8/22 SF ₆ の脱水
9	20606	147	14	9/23 Ion Source の target 交換のトラブル
10	20705	99	7	10/21 Ion Source の target 交換のトラブル (Serial LoadNext command failed) 10/22 Ion source の Cs 温度制御系のトラブル, 点検, 保守 10/22 加速器高電圧の不安定, タンク内から雑音の発生. GVM の不良と判明した. 10/24-11/2 SF ₆ の回収

11	20754	49	3	11/8 加速器タンク開, GVM の交換 11/9 タンク閉, タンクの排気 11/11 SF ₆ ガスの充填 11/14 SF ₆ ガスの脱水作業 11/17 全学停電(8:00~18:00) 11/21 イオン源保守 (ターゲットグリップの調整) 11/23 HE Magnet 電源の冷却水パイプの掃除 11/24 1ヶ月ぶりに ¹⁴ C 測定を再開
12	20931	177	15	12/25 Ion Source の自動立ち上げの際に TMP が停止, 点検 12/29 ¹⁴ C 測定中に加速器高電圧が突然ダウン (@2570KV), 原因不明
		合計 1351	合計 127	

4. ¹⁴C 測定の実用研究 : 弥生時代とされる地層から出土したウマの臼歯の年代測定

香川県高松市上東原遺跡^{かみひがしはら}にて弥生時代の地層からウマの臼歯が出土した。これまで、弥生時代以前に属するとされるウマの遺体は確認されていないため、考古関係者の興味を引いている。そこで、臼歯そのものを年代測定することで、弥生時代の日本にウマが存在したことを確認することが期待された。上東原遺跡から出土したウマの臼歯は粘土質土壌中に埋まっており、かなり風化が進んでいた。この臼歯が名古屋大学に持ち込まれ、名古屋大学年代測定総合研究センターに設置されているタンデム加速器質量分析計を用いて放射性炭素 (¹⁴C) 年代測定が実施された。

ウマの臼歯から抽出されたアルカリ可溶性画分 (HA: KGWHB-1HA) および臼歯のエナメル質から回収されたハイドロキシアパタイト (KGWHB-3AP) につき得られた ¹⁴C 年代及び較正暦年代を表 3 に示す。

同じ試料から抽出した 2 種の炭素成分であるが、互いに異なった ¹⁴C 年代を示した。KGWHB-1HA は、臼歯が出土した堆積層の推定年代 (弥生時代) と一致している。この画分は、歯牙コラーゲンほとんど回収が困難であったため、臼歯を脱灰後の残留固形物からアルカリ水溶液で抽出したフミン酸である。従って、臼歯が本来持っていた有機物ではなく、臼歯が土壌中に埋まっていた間に、土壌中の有機物が臼歯の風化に伴って臼歯中に侵入してきた物質である可能性が高い。実際、KGWHB-1HA は堆積層の推定年代とほぼ一致している。

一方、ハイドロキシアパタイトは臼歯の無機成分を構成する主要素であり、考古学分野において骨や歯の ¹⁴C 年代測定に利用されつつある。まだ開発の段階といえるが、今回、ハイドロキシアパタイトを用いた年代測定を試みた。その結果は、6 世紀中葉から 7 世紀中葉の範囲を示した。この年代値は、弥生時代の日本ではウマの存在が確認されていないことと調和的である。

今回の ¹⁴C 年代測定では、測定対象であるウマの臼歯の保存が悪くゼラチンコラーゲンの抽出が困難であった。このため二次的に用いられる方法で抽出した炭素成分を用いて ¹⁴C 年代測定を行った。このようなことから確定的な結論は難しく、試料を保存して今後の研究に期待したい。

表3 ウマの臼歯から抽出されたフミン酸（臼歯のアルカリ可溶性分画）及び無機成分（ハイドロキシアパタイト）の抽出量とそれらの¹⁴C年代測定結果および校正暦年代

試料番号	試料材料	化学処理後の試料重量(mg)	回収されたCO ₂ の重量(mgC)(%)	δ ¹³ C _{PDB} * (‰)	¹⁴ C age (BP)	¹⁴ C年代を暦年代に校正した年代 (Reimer et al. 2009)** 校正年代範囲(±2σの範囲) (可能性の確率: probability)	測定番号 (NUTA2-)
KGWH B-1HA	ウマの臼歯	2.04 (フミン酸)	0.368 (18.0%)	-20±1	2575±90	896 – 481 cal BC (90.0%) 469 – 415 cal BC (5.4%)	20474
KGWH B-3AP	ウマの臼歯	908.80 (ハイドロキシアパタイト)	4.753 (0.52%)	-10±1	1446±30	cal AD 1028-1154 (95.4%)	20867

*) $\delta^{13}\text{C} = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{sample}} / ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{PDB}} - 1.0] \times 1000$ (‰),

ここで、PDBはPee Dee Belemniteの略記で炭酸カルシウムからなる矢石類の化石であり、¹³C/¹²C比の標準体として用いられる。



写真6 香川県高松市上東原遺跡から出土したウマの臼歯



写真7 香川県高松市上東原遺跡から出土したウマの臼歯

5. おわりに

名古屋大学タンデム加速器年代測定システムによる¹⁴C年代測定では、約5千年前よりも若い試料について、ほぼ定常的に±20～±30年の誤差（1標準偏差）で年代測定が可能である(Nakamura et al. 2004 ; 2007)ため、暦年代との比較が必然とされる文化財科学や考古学関連のさまざまな資料の年代測定についての利用が期待されている。また、年代測定に限らず、環境研究などにも幅広く利用されている（名古屋大学加速器質量分析計業績報告書1988-2013）。これらの応用研究は、今回のシンポジウムでも報告された。この稿で、改めて紹介することは行わない。本報告書にまとめられているさまざまな報告を参照して頂きたい。

謝辞

タンデトロン加速器質量分析計の改造や保守、さらに運転のための消耗品類の開発などにおいて、名古屋大学全学技術支援センターの教育・研究技術支援室（旧理学部 装置開発室）の皆様には大変お世話になっています。特に、鈴木和司、鳥居龍晴、松下幸司の3氏には、当センターを担当し様々に支援して頂いています。また、ガラス工作室の野田敏昭、夏目秀子、岡本久和の3氏には、試料調製用のガラス真空装置の修理など、日本原子力研究開発機構むつ事務所の関 武雄・甲 昭二の両氏には、同型のAMSを使用していることから、さまざまな情報を交換するなどして便宜を図って頂いています。さらに、装置の故障の際には、放射線医学総合研究所基盤技術センター研究基盤技術部の酢屋徳啓、株式会社エリコンのシステム部所属の関野達也の両氏に、そしてタンデトロン加速器質量分析計の輸入代理店の小倉一郎氏は多大なご支援を頂いています。ここに、記して関係者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(1988～2013)名古屋大学年代測定総合センター. (I～XXIV).
- Nakamura, T., E. Niu, H. Oda, A. Ikeda, M. Minami, H. Takahashi, M. Adachi, L. Pals, A. Gott dang, and N. Suya (2000) The HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.*, B172, 52-57.
- Nakamura, Toshio, Etsuko Niu, Hirotaka Oda, Akiko Ikeda, Masayo Minami, Tomoko Ohta and Takefumi Oda (2004) High precision ^{14}C measurement with the HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.* B223-224, 124-129.
- Nakamura, T., Miyahara, H., Masuda, K., Menjo, H., Kuwana, K., Kimura, K., Okuno, M., Minami, M., Oda, H., Rakowski, A., Ohta, T., Ikeda, A., and Niu, E. (2007) High precision ^{14}C measurements and wiggle-match dating of tree rings at Nagoya University, *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.*, B259, 408-413.

縄文ウマ研究関連文献リスト

1. 近藤 恵・松浦秀治・中井信之・中村俊夫・松井 章 (1992) 出水貝塚縄文後期貝層出土ウマ遺存体の年代学的研究. *考古学と自然科学*, (26): 61-71.
2. 松井 章 (1992) 動物遺存体から見た馬の起源と普及. 「日本馬具大鑑 第1巻-古代上-」(日本馬具大鑑編集委員会編), pp.33-44, 吉川弘文館, 東京.
3. 松浦秀治 (1991) イオン電極を用いた骨中のフッ素の定量. *国立歴史民俗博物館研究報告*, 29: 235-244.
4. 松浦秀治・近藤 恵 (1993) 縄文時代にウマはいなかった? -骨の古さを測る. *化学と工業*, 46: 335-336.
5. 近藤 恵・松浦秀治・中村俊夫・中井信之・松井 章 (1994) “縄文馬”はいたか. *名古屋大学加速器質量分析計業績報告書*, V, 49-53.