

名古屋大学タンデトロン AMS ^{14}C システムの現状と利用 (2009)
Status and Applications of a Tandetron AMS System at Nagoya University in 2009

中村俊夫^{1*}・南 雅代¹・小田寛貴¹・池田晃子¹・宮田佳樹¹・太田友子¹・西田真砂美¹・
本田印南¹・大森貴之²・西本 寛²・林 和樹²・本庄浩司²・松本佳納²・城森由佳²・
山崎香奈³

Toshio Nakamura¹, Masayo Minami¹, Hirotaka Oda¹, Akiko Ikeda¹, Yoshiki Miyata¹,
Tomoko Ohta¹, Masami Nishida¹, Inami Honda¹, Takayuki Omori², Hiroshi Nishimoto²,
Kazuki Hayashui², Koji Honjyo², Kana Matsumoto², Yuka Jyomori², Kana Yamazaki³

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

³名古屋大学理学部地球惑星科学科

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

³ Department of Earth and Planetary Science, Faculty of Science, 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, 1771, 1115, 1339, 866 and 1300 in each year from 1999 to 2009, respectively, and total number of target measured is 14890.

Since November 1st, 2007, we had a scheduled shutdown of the AMS system, to improve the strength of the building, Furukawa Memorial Hall, against an outbreak of large scale earthquakes expected in the near future around Tokai area, central Japan. After completion of the repair, in June of 2008, we restarted ^{14}C measurements, in encountering again similar kinds of troubles as we had experienced before. An overhaul of the AMS system was performed by an engineer from HVEE in October of 2008. In 2009, we have encountered

two kinds of malfunction in generating high voltage. One was a fault of a power supply system that outputs stable DC 24V to the circuit boards for the control of high voltage of the 3MV accelerator. The other was a breakdown of a Zener diode assembly that protects damage on the control circuit system of the 3MV high voltage power supply from accidental high-voltage sparks. In both cases, we wasted away about two months to obtain the new spare parts to substitute the defective ones. However, we have measured 1300 targets in 2009, the figure bigger than the one recorded in the previous year.

Keywords: accelerator mass spectrometry, radiocarbon, early bronze age, cultural properties, Buddha statue

キーワード：加速器質量分析，放射性炭素，前期青銅器時代，文化財，仏像

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月に設置された High Voltage Engineering (HVE)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、およびイソプ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}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C ビームを分離させ、このときに Chopper を用いて ^{12}C ビーム強度を約百分の一に減衰させ、その後再集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)。

既に報告してきたように、2006年6月から耐震改修工事直前(2007年11月)までは加速器高電圧のスパークに悩まされてきた。高電圧のスパークが発生すると、インターロックが働いて炭素同位体測定が停止する。このスパークにより急激に解放される電気エネルギーにより電子部品などの破損がたびたび発生した。そこで、AMS 施設建物の耐震工事が行われた直後に(実質的に2007/11/1~2008/04/30の間システムの運転は完全停止となった)、高電圧絶縁ガスとして用いている六フッ化イオウ(SF_6)の脱水装置を設置した。この措置が功を奏し、これまで苦勞していた高電圧のスパークはほぼ治まった。しかし、加速器電源回路の部品の劣化に起因すると思われる破損など、装置の老朽化に伴う新たな機能障害が発生している。本稿では、2009年1月から2009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年代研究の一部を紹介する。共同利用研究の成果については本報告書に開催されている報告を参照されたい。

2. 2009年の一年間の運転状況の概要

AMS 施設建物の耐震工事が2007/11/1~2008/04/30の間に行われた。もちろん、この間は、AMS 装置は完全に停止した。工事完了後に、電源を投入し、まずクライオポンプの保守、 SF_6 循環脱水システムの導入を行った。この脱水システムの導入は大成功であった。このシステムの導入(2008年5/19-6/09)から2009年12月31日までの放電回数は計2回と激減している。

2008/10/02には、クライオポンプのコンプレッサーを交換した。これまで使っていたコンプレッサーは旧式で、定期保守部品の換えがもはや供給されていないとのことであった。10/28~11/14にかけて、オランダ国 HVEE 社の技師による耐震改修後のシステム点検を実施した。このときは、高電圧発生部のダイオード150個と加速管のブリーダー抵抗25個を交換

した。このように、耐震改修に伴う点検などを行ったため、2008 年内に測定したターゲットの個数は 866 個であった。

2009 年になって、1 月に、加速器制御回路にある定電圧電源が故障した。故障の原因は、安定化直流電源であることを突き止め、国産のパーツで代用することで修理を終えた。この取り替えに約 1 ヶ月を要した。2 月には、リコンビネータに不可欠な ^{12}C ビームチョッパーが真空漏れを起こした。このため磁気流体軸受を交換した。また 9 月にも、加速器の高電圧が発生できないトラブルが再度発生し、この故障の修理には 2 ヶ月を要した。このような故障があったが、測定は比較的順調に進行し、12 月末までの 1 年間に 1300 個のターゲットを測定することができた。これまでの ^{14}C 測定の経緯を表 1 に示す。

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 2009/12/31 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	12,724	2,136	214*
2008*	866	144	13,590	1,488	248**
2009	1,300	186	14,890	2,470	350***

*) 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。

**）有効使用月：6 ヶ月

***）有効使用月：7 ヶ月

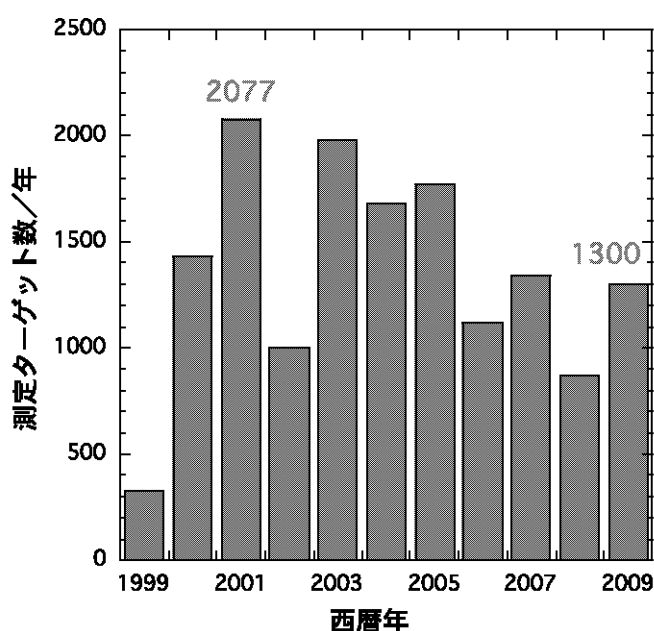


図 1 1999 年から 2009 年までの年ごとのターゲット測定数

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、2009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2号機の不具合の状況を示す。

表2 2009年における月あたりのターゲット測定数

月	測定番号 (13496～)	測定 数	batch数	コメント
1	13542	46	3	1/8-2/3 加速器制御電源の故障
2	13728	186	15	2/5-2/10 ^{12}C beam chopperの磁気流体軸受の真空漏れ, 磁気流体軸受の交換
3	13774	46	5	3/22-4/6 ターゲット交換の不良, 測定の途中停止多発
4	13960	186	13	4/17-5/6 ターゲットの位置決めをビーム出力を監視し ながら少しずつ調整
5	14151	191	13	
6	14289	138	12	
7	14289	0	0	7/5 古川記念館の臨時的停電により AMS システムの停 止 同日に送電復帰後, 真空ポンプ (TMP) 作動再開 7/14-7/15 加速器絶縁ガス SF6 の脱水作業
8	14383	94	7	8/11-8/12 HE 側電磁石電源冷却水詰まり, 送水パイプ洗 浄 (2009年1回目) 8/14 HE 側分析電磁石本体の2台を扇風機で強制空冷
9	14383	0	0	9/19-9/21 加速器絶縁ガス SF6 の脱水作業 9/23 HE 側電磁石電源冷却水詰まり, 送水パイプ洗浄 (2009年2回目) 同上冷却水配管の改良 9/24- 高電圧発生不可能となる. 回路の故障発生 9/24-11/2 故障原因の探求, 交換部品の到着待ち
10	14383	0	0	10/6 放射線発生装置の定期検査・定期確認
11	14518	135	17	11/2 部品交換, 電源出力試験, 加速器運転再開 11/15 全学停電 (8:00-18:00) 11/24-25 イオン源分解掃除 (アイオナイザー交換, Cs 1g 充填) 11/29 イオン源ターゲット交換誤作動, 圧縮空気制御 の点検
12	14796	278	18	12/14-12/15 クライオポンプヘッド4台の定期保守 12/21 HE 側の Q-pole 真空計の真空度が悪化, 原因不明, 真空計のセンサーの不良か, 調査中 12/27 イオン源ターゲット交換誤作動, 圧縮空気制御 の点検
		合計 1300		

以上のように、新たな箇所の故障が発生する一方で、同一箇所の繰り返し故障が継続しており抜本的な対策をとることが不可欠となっている。

4. SF₆ ガスの露点の監視

名古屋大学では SF₆ 循環脱水システムの導入を行っており、この脱水システムの導入が大成功であったことを述べた。SF₆ 露点の測定は、電子式の露点計（浜田電機製作所（株）製）を用いて行っている。当初、1999 年に導入した製品は、露点の読みが低めになるように校正がずれてしまったようである。露点の数値的には問題ないが、しばしば高電圧放電が発生した。そこで、2004 年にもう一台を購入した。それらを直列に接続して、SF₆ の露点を測定しているが、新しい方の露点計の読みは、古い方の露点計の読みより約 20 度高い方にずれている。しかし、それぞれの数値が変動してもずれ幅は常に一定値となることから、測定の直線性は良いが校正がずれていると結論できる。そこで、それぞれの露点計について、個別に設定値を決め、露点はその設定以下になるように注意することとした。今のところ、この方式で高電圧放電を防ぐことができてきている。加速器高電圧用の絶縁ガス SF₆ の露点（水分含有率を示す）の経年変動を図 2 に示す。SF₆ 用の脱水装置を取り付けたあとに発生した放電を赤い矢印（2008/6/24、2008/12/8）で示す。

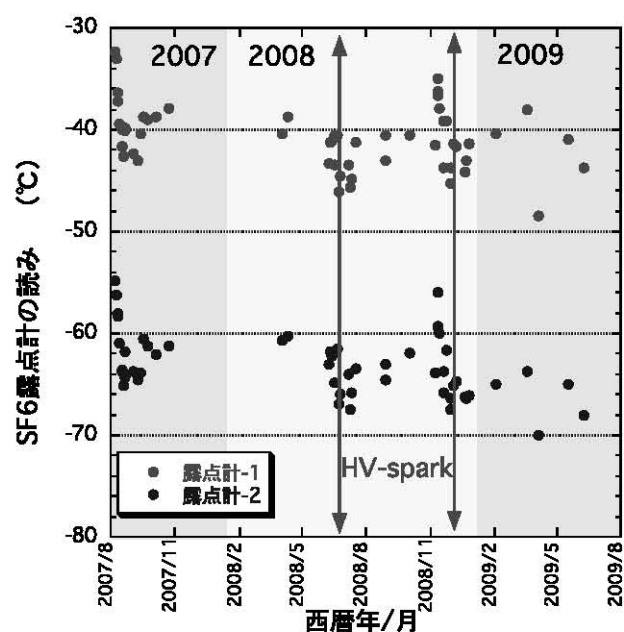


図 2 加速器高電圧用の絶縁ガス SF₆ の露点（水分含有率を示す）の経年変動
赤い 2 本の矢印は、2008 年に発生した 2 回の高電圧の放電発生日を示す。

5. ¹⁴C 測定の実用研究

名古屋大学タンデトロン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、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 1988-2009）。

シンポジウムにおいて紹介した(1)シリアのガーネム・アル＝アリ遺跡の編年の構築、(2)合木製の仏像の製作年代、に関する研究の概要を以下に紹介する。

5. 1 シリアのユーフラテス河中流域にあるガーネム・アル＝アリ遺跡の年代

ガーネム・アル＝アリ遺跡は、ユーフラテス河中流域に位置する人口約 20 万人の都市であるラッカから約 40km 下流の右岸の最低位段丘面上に位置する（齊藤 2009）。現在のユーフ

ラテス河岸から 2.5km 南に離れている。この遺跡が、国土館大学イラク古代文化研究所の大沼克彦教授を代表者として文部科学省科学研究費補助金「特定領域研究」の調査対象として選定され、2006 年から発掘調査が開始された（特定領域ホームページ：<http://homepage.kokushikan.ac.jp/kaonuma/tokuteiryouiki/>）。星野光雄名古屋大学大学院環境学研究科教授（現在、名古屋大学名誉教授）を代表者に、同「特定領域研究」に属する計画研究の一つとして、同遺跡の理化学的調査が 2007 年 3 月から開始された。遺跡から採取した遺物などの ^{14}C 年代測定が実施されている。これまでの年代研究の経過は、中村ほか（2009a, 2009b, 2009c）にまとめられている。

ガーネム・アル＝アリ遺跡では、遺跡の表面に散乱する土器片が採取され、それらの土器の特徴から遺跡の年代は前期青銅器時代の中頃から後半の時期を主体とするが、前期青銅器時代の全期間をカバーする可能性があるかと推定されている（木内 2007）。一方、ガーネム・アル＝アリ遺跡のスクエア 2 トレンチの 2009 年 3 月の発掘調査から、明白な建築層が第 1 層から第 8 層まで確認されており、それらの地層から採取した木炭について、名古屋大学にて実施された ^{14}C 年代測定から、ガーネム・アル＝アリ遺跡の編年が表 3 のように得られている。 ^{14}C 年代測定からは、更に人間活動の痕跡として木炭層を含む最上部堆積層の存在が確認された。表 3 に示されるように、現時点では、この遺跡において紀元前 3100 年から紀元前 2000 年頃までの居住地あるいは一時的な訪問場所として人間集団が活発に活動した痕跡がみられることが、年代測定研究から明らかとなった（中村ほか 2009c）。この「特定領域研究」は、2009 年度末で終了となるが、年代解析はさらに継続される予定である。

表 3 ^{14}C 年代測定によるガーネム・アル＝アリ遺跡スクエア 2 トレンチの第 1～第 8 建築層と人間活動の痕跡が残される最上層の編年

建築層	校正暦年代
最上層	2400-2050 cal BC
第 1、2 層	2650-2350 cal BC
第 3、4 層	2850-2500 cal BC
第 5 層	2900-2650 cal BC
第 6、7、8 層	3100-2900 cal BC

5. 2 合木製の仏像の制作年代

由緒ある古寺などに所有されている木製の仏像などについて制作年代を調べるために ^{14}C 年代測定がしばしば用いられている。今回は、光背、本体、座部、台座が別々の木材で作成され、それらを組み上げて仕上げられた人体とほぼ同じ程度の大きさの仏像について、その制作年代を推定するために ^{14}C 年代測定を行った。分割できることから、部分的に後世に取り替えられた可能性がある。そこで、光背部、頭部、身体部、台座部の 4 カ所から試料を採取して年代測定を行った。その結果、頭部・身体部が 1020～1094 ^{14}C BP、光背・台座部が 115～149 ^{14}C BP の ^{14}C 年代が得られた。この結果から、光背・台座部は、後世（江戸時代中期以降から近代までのある時期）に取り替えられたものであろう。一方、頭部・身体部の制作年代は（実は、それらの部分を構成している木材の、できるだけ最外年輪に近い年輪の年代としかいえない。原材料の伐採年ではない）、 ^{14}C 年代を校正して cal AD 890～1040 と得られる。おそらく平安時代（AD794～AD1192）の前半に制作されたものであろうと推定できることが解った。

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で、名古屋大学全学技術支援センターの教育・研究技術支援室の皆様には大変お世話になっていきます。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北村敏勝・甲昭二の両氏には、同事業所で準備されている保守用の部品類をお貸し頂くなど、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

- 木内智康 (2007) 表採遺物から見た各遺跡の時代. 文部科学省科学研究費補助金「特定領域研究」Newsletter セム系部族社会の形成, 6, 18-23.
- 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(1988～2009)名古屋大学年代測定総合センター. (I～XX).
- 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.
- 中村俊夫・星野光雄・田中 剛・吉田英一・齋藤 毅・東田和弘・桂田祐介・青木義幸・於保 俊・太田友子 (2009a) シリア Tell Ghanem al-Ali 遺跡発掘試料及びその周辺地域の段丘堆積物試料の ^{14}C 年代. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, XX, 103-111.
- 中村俊夫・星野光雄・田中 剛・木内智康・太田友子 (2009b) シリア Tell Hammadin 遺跡から採取した木炭の ^{14}C 年代. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, XX, 139-144.
- 中村俊夫・星野光雄・田中 剛・吉田英一・齋藤 毅・東田和弘・桂田祐介・長谷川敦章・太田友子 (2009c) シリアのユーフラテス河中流域にある Tell Ghanem al-Ali 遺跡発掘資料の ^{14}C 年代. 文部科学省科学研究費補助金「特定領域研究」「Integrated research in the Bishri Mountains on the Middle Euphrates=セム系部族社会の形成」Newsletter, 16, 16-21.
- 齋藤 毅 (2009) Tell Ghanem al-Ali 周辺に発達する河成段丘. 文部科学省科学研究費補助金「特定領域研究」「Integrated research in the Bishri Mountains on the Middle Euphrates=セム系部族社会の形成」Newsletter, 16, 10-15.