

# 年輪中の放射性炭素測定による 過去の超新星爆発同定の可能性

毛受弘彰<sup>1)</sup>、桑名宏輔<sup>1)</sup>、宮原ひろ子<sup>1)</sup>、増田公明<sup>1)</sup>、村木綏<sup>1)</sup>、中村俊夫<sup>2)</sup>

- 1) 名古屋大学太陽地球環境研究所  
〒464-8602 名古屋市千種区不老町 TEL:052-789-4329  
e-mail:menjo@stelab.nagoya-u.ac.jp
- 2) 名古屋大学年代測定総合研究センター

## 1 はじめに

我々は物質中の $^{14}\text{C}$ 濃度から、その物質が生成された年代、地球上の物質循環、太陽活動などとさまざまなことを知ることができる。本研究室では、年代の分かっている樹木年輪中 $^{14}\text{C}$ 濃度を測定することによって、太陽活動の研究を行なっている。しかし、この $^{14}\text{C}$ 濃度変化が超新星爆発によっても生じるというアイデアがロシアのKonstantinovとKocharov(1965,1967)によって提案されている。このアイデアに基づいて、アメリカのDamonら(1995,2000)は西暦998年から1025年の樹木年輪中 $^{14}\text{C}$ 濃度を測定し、西暦1006年に発生した超新星爆発SN1006によると考えられる濃度増加を報告している(図2)。Damonら(1995)はこの $^{14}\text{C}$ 濃度増加からSN1006による放射ガンマ線量を $10^{51}\text{erg}$ と見積もっている。このことが本当であれば、この結果はまだほとんど解明されていない超新星爆発による宇宙線加速を解明する手がかりになり、また $^{14}\text{C}$ 濃度変動による未発見超新星爆発を同定できる可能性を示唆するものである。しかし、このDamonらの結果では測定期間が短いために、太陽活動による $^{14}\text{C}$ 濃度変動が考慮されていないという問題点がある。そこで今回、我々は太陽活動による $^{14}\text{C}$ 濃度変動を考慮に入れ、Damonらによって報告された濃度増加が実際に超新星爆発によって生じたものであるかどうか検証を行なったので、これを報告する。

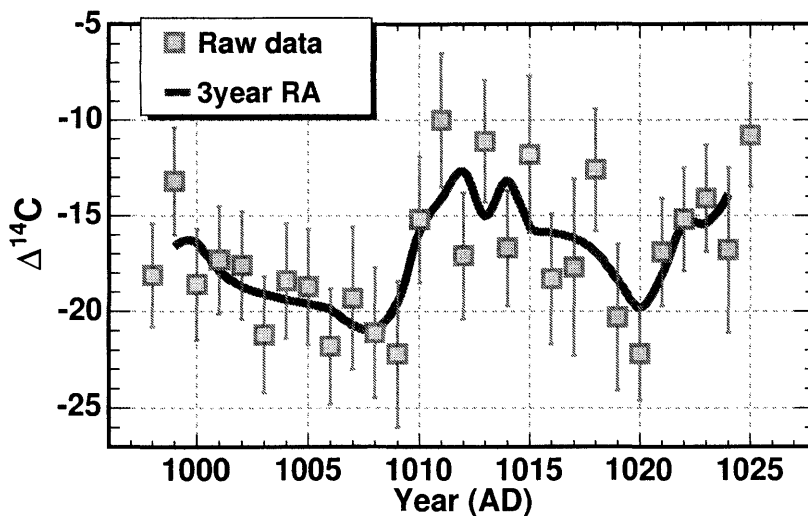


図 1: Damon ら (2000) の測定結果 (点)。実線は 3 年移動平均を示す。

## 2 超新星爆発と Kocharov のアイデア

### 超新星爆発

超新星爆発は大質量星が進化の最終段階で引き起こす爆発現象である。そのとき、星は太陽の数億から数十億倍もの明るさ（銀河一個分に相当）で輝く（超新星）。この超新星爆発には、星の中心部で炭素核反応が暴走して生じる炭素爆燃型と、星の中心にある鉄コアが重力崩壊を起こすことにより生じる重力崩壊型の2つがある（高原,1999）。この2つの超新星爆発のタイプの特徴を表1に示す。

銀河系内で発生した超新星爆発は、過去の文献や超新星残骸の観測から知ることができる。日本、中国、ヨーロッパなどの文献中の記録から、SN185、SN393、SN1006、SN1054、SN1181、SN1572、SN1604の7個の超新星が同定されている（SNの後の数字がその発生年を表す）。一方、超新星爆発によるガス放出の痕跡である超新星残骸は現在までに約230個が同定されている。

超新星爆発は、その爆発時に $10^{51}$ ergもの運動エネルギーを放出する。このような膨大なエネルギーを放出することと、1つの銀河あたり約30年に1度の発生頻度から、超新星爆発は宇宙線加速の主要なエネルギー供給源であると考えられている。実際に、超新星残骸（SN1006, Crab, RX J1713.7-3946）からは粒子加速の証拠となる高エネルギーガンマ線や非熱的電波、X線が観測されている。しかし、超新星爆発の $10^{51}$ ergもの放出エネルギーのうちどの程度が宇宙線の粒子加速に使われるかは0.01~30%と見積もられているだけで、まだほとんど解明されていない。

表 1: 超新星爆発のタイプごとの特徴 (高原,1999;Burrows,2000)

type	超新星の型	放出運動エネルギー	発生銀河	銀河あたりの発生頻度
炭素爆燃型	Ia	$10^{51}$ erg	すべての銀河	~1個/300年
重力崩壊型	II,Ib,Ic	$10^{51-52}$ erg	渦巻銀河	~1個/数十年

### Kocharov らのアイデア

この超新星爆発によるガンマ線放射によって大気中 $^{14}\text{C}$ 濃度増加が生じるというアイデアがロシアのKonstantinovとKocharovによって提案されている。この超新星爆発による大気中 $^{14}\text{C}$ 濃度増加のアイデアについて簡単に説明する（図2）。

超新星爆発の発生直後には強い粒子加速が生じ、さまざまな高エネルギー粒子が生成されると考えられる。このうち、荷電粒子は銀河系内磁場による散乱により発生直後に地球へ到達できない。また、中性子も崩壊により地球へ到達することはできない。そのため、地球へ到達できるのはガンマ線とニュートリノだけである。

地球へ到達したガンマ線は、大気中でカスケードシャワーを生じ、粒子数を増幅する。カスケードシャワー中の20MeV程度のエネルギーを持ったガンマ線の一部は、大気原子核と光子核子相互作用を起こして中性子を生成する。中性子は窒素原子核に吸収され、 $^{14}\text{C}$ を生成する。 $^{14}\text{C}$ は酸化され、二酸化炭素となり、大気圏を循環する。このプロセスによって超新星爆発によって大気中の $^{14}\text{C}$ 濃度が上昇することになる。

樹木は大気中の二酸化炭素を吸収し、1年ごとに年輪を形成する。そのため、超新星爆発による大気中 $^{14}\text{C}$ 濃度増加は樹木年輪中に記録されることとなる。

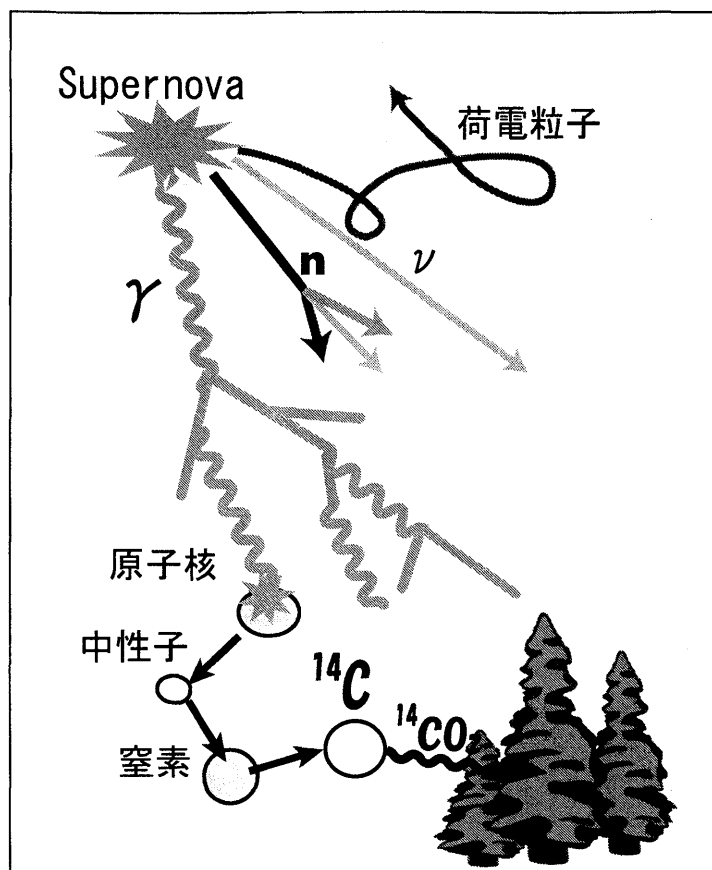


図 2: 超新星爆発による  $^{14}\text{C}$  生成過程

### 3 試料調製

Damon らの測定結果にみられた  $^{14}\text{C}$  濃度増加が本当に超新星爆発によるものであるかを太陽活動による  $^{14}\text{C}$  濃度変動を考慮に入れて検証する。そこで、測定期間は Damon らの測定の 998 年から 1025 年よりも長い、992 年から 1028 年とした。

測定試料には、図 3 に示す屋久杉 (年輪数 1480、北緯  $30^\circ$  東経  $130^\circ$  にて採取) を用いた。年輪の年代決定は、年輪年代法を用いて行なった。この屋久杉木片から年輪を 1 年ごとに剥離し、化学洗浄して年輪間を移動しないセルロース成分のみを抽出した。このセルロースを燃焼して二酸化炭素化し、さらに水素還元によりグラファイトを作成した。以下に調製手順を述べる。

#### 年輪の剥離

三角錐形に切り出した屋久杉木片からカッターナイフを用いて年輪を 1 年ごとに剥離する。

#### 塩酸酸性下亜塩素酸ナトリウムによる漂白

塩酸酸性下 (1.2 規定) で木片に亜塩素酸ナトリウム (試料の約 1.6 倍量) を反応させ、リグニン除去を行なう。その後、塩酸 (1.2 規定) で洗浄し、亜塩素酸ナトリウムを取り除く。

#### アルカリ、酸による洗浄

水酸化ナトリウム水溶液 (1.2 規定) によって洗浄し、ヘミセルロースを除去する。その後、

塩酸 (1.2 規定) で洗浄する。最後に蒸留水で試料に付着した薬品を洗い流し、オーブン (75 °C) で1日乾燥させる。

### 二酸化炭素生成

9mmφバイコール管に約5mgのセルロースと約1gの線状酸化銅を入れ、真空ラインで排気した後に封管する。これを電気炉 (850 °C) にて3時間加熱し、セルロースを燃焼させて、二酸化炭素を得る。

### 二酸化炭素の純化

真空ライン (図4) を用いて、燃焼時に生成した水や硫酸化物を除去するためコールドトラップによる純化を行なう。

### 鉄触媒下水素還元によるグラファイト生成

鉄粉約3mgを入れた9mmφバイコール管に、純化したガスとこれの2.1倍量の水素を入れ、封管する。これを電気炉 (620 °C) で6時間加熱し、グラファイトを生成する。

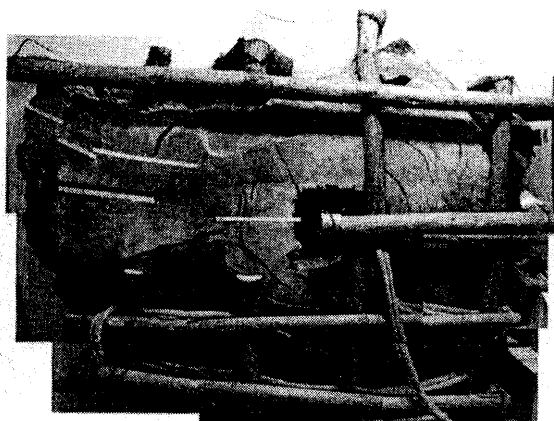


図 3: 屋久杉

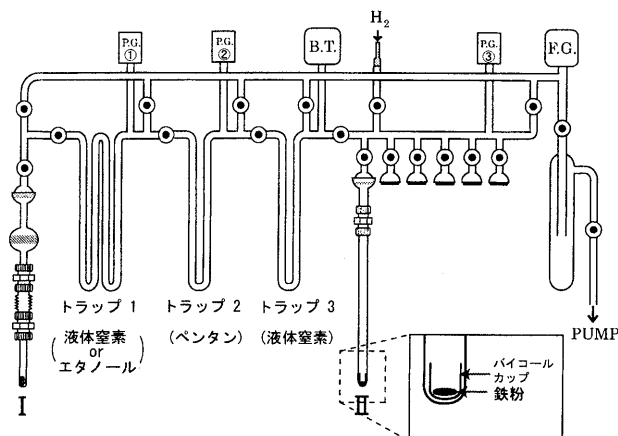


図 4: 二酸化炭素精製用真空ライン。PG はピラニー真空計、BT はデジタル圧力計、FG は広範囲真空計を示す。

## 4 測定結果

図5(a)に我々の測定結果をDamonらの測定結果とともに示す。また図5(b)に3年移動平均をとったものを示す。我々の測定の平均誤差は2.8%であった。Damonらと我々の測定結果には誤差範囲内で有意な差はなかった。

我々の測定結果にも1012年に $4.1 \pm 1.7\%$ の $^{14}\text{C}$ 濃度増加がある。しかし、今回の我々の測定ではDamonらの測定よりも測定期間を長くしたことにより、Damonらの結果では分からなかった990年代前半の $^{14}\text{C}$ 濃度の立ち上がり部分と1020年代後半の立ち下がり部分が明らかになり、 $^{14}\text{C}$ 濃度が周期的な変動をしていることがわかる。

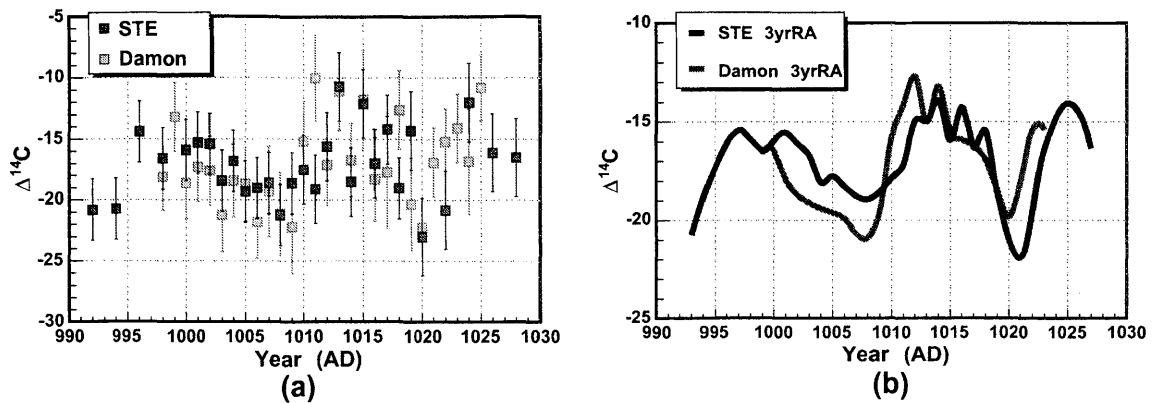


図 5: (a):測定結果 (黒点)。灰色の点は Damon らの測定結果を示す。(b):測定結果の 3 年移動平均 (黒線)。灰色の線は Damon らの測定結果の 3 年移動平均を示す。

## 5 考察

今回の測定結果では、 $^{14}\text{C}$  濃度増加とともに周期的な変動をみてとることができた。そこで、この 1012 年の  $^{14}\text{C}$  濃度増加が超新星爆発のガンマ線放射よると考えた場合と、太陽の周期活動にともなう変動であると考えた場合の二つの視点から考察する。

### 5.1 超新星爆発の視点

1012 年の約 4% の  $^{14}\text{C}$  濃度増加が超新星爆発 SN1006 によるものであると考え、超新星爆発によるガンマ線放射量を算出する。

計算には、超新星爆発によるガンマ線放射を以下のように仮定した。

- 等方的
- 放射継続時間は数年間
- エネルギースペクトルは指数-2.5 のべき型

地球大気に入射したガンマ線による中性子生成量は、モンテカルロシミュレーション (プログラム GEANT4) を行なって算出した (図 6)。大気中で生成された中性子による  $^{14}\text{C}$  生成効率を 65% と仮定すると、仮定したガンマ線のスペクトルとシミュレーション結果から大気入射ガンマ線 (>10MeV) による  $^{14}\text{C}$  生成量は平均 130 個/erg となる。

以上のことを用いて、SN1006 によるガンマ線放射量は次式のように計算できる。

$$E_{\gamma \text{ total}} = \Delta^{14}\text{C}_{\text{increase}} \times {}^{14}\text{C}_{\text{atmosphere}} \div R_{\text{eff}} \times \frac{4\pi D_{\text{SN}}^2}{\pi R_{\text{earth}}^2} \quad (1)$$

$$\simeq 4 \times 10^{50} [\text{erg}] \quad (2)$$

ここで、 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{increase}}$  は  $^{14}\text{C}$  濃度の増加量 (4%)、 $D_{\text{SN}}$  は SN1006 天体までの距離 (2kpc)、 $R_{\text{earth}}$  は地球半径 ( $6.4 \times 10^6 \text{m}$ )、 $R_{\text{eff}}$  はガンマ線による  $^{14}\text{C}$  生成量 (130 個/erg)、 $C_{\text{atmosphere}}$  は大気中  $^{14}\text{C}$  総量 ( $4 \times 10^{28}$  個) を示す。

算出された  $4 \times 10^{50}$  erg は、超新星爆発による放出エネルギー  $10^{51}$  erg よりも小さい。そのため、超新星爆発による宇宙線加速効率と宇宙線からのガンマ線生成効率を考えると大きな値ではあるが、4‰の  $^{14}\text{C}$  濃度増加が超新星爆発によるものであることを完全に否定することは出来ない。

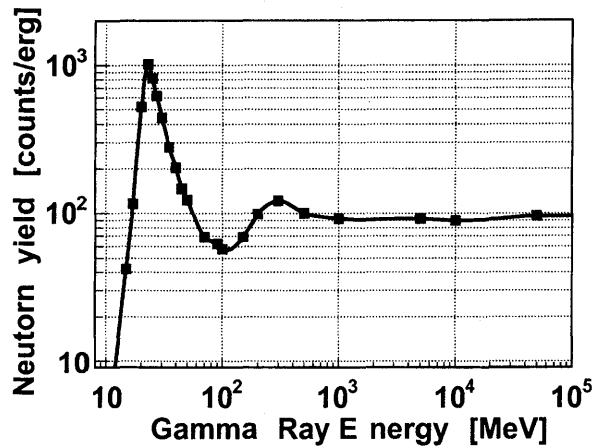
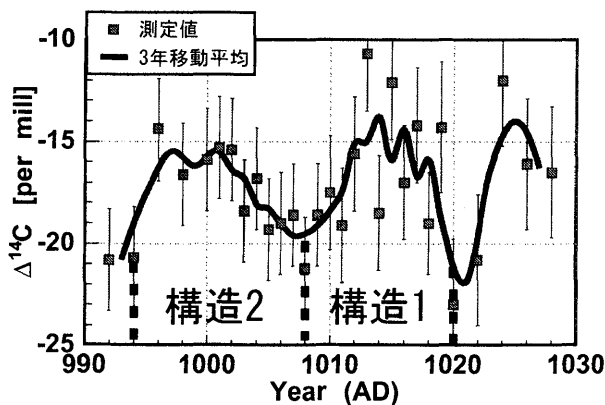


図 6: 大気入射ガンマ線による中性子生成量のシミュレーション結果。横軸は入射させたガンマ線のエネルギーを示し、縦軸は1erg あたりに規格化した中性子生成個数を示す。

## 5.2 周期的変動の視点

次に今回の測定結果の周期性を考察する。今回の測定では、測定期間を長くしたことによって、Damon らの結果では分からなかった2つの山型構造が明瞭に見られた。そこで、この2つの山型構造を2つの領域に分けて、1008年から1020年を構造1、994年から1008年を構造2(図7)とし、それらの周期、増減幅を見積もったものを表2に示す。

表2から、構造1の方が少し大きな増減幅を示しているがこの2つはほぼ等しい構造を持っていることがわかる。また、その周期、増減幅は太陽活動の約11年の周期変動にともなうものとほぼ一致している。このことから、1012年の4‰の増加はその大部分が太陽活動によるものである可能性が高い。



	期間(年)	周期	増減幅
構造1	1008-1020	~12年	~6‰
構造2	994-1008	~14年	~5‰

表 2: 2つの山型構造の周期と増減幅

図 7: 測定結果に見られる2つの山型構造。

## 6 まとめ

Damon らによって報告されている 1010 年の  $^{14}\text{C}$  濃度増加が本当に超新星爆発 SN1006 によるものであるかを検証するため、我々は 992 年から 1028 年の年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度測定を行なった。その結果、1012 年に 4‰ の  $^{14}\text{C}$  濃度増加が見られた。シミュレーションの結果から、これが超新星爆発 SN1006 によるものである可能性を完全に否定することはできない。しかし、我々の測定では測定期間を長くしたことにより、Damon らの測定では明瞭でなかった周期的な変動をみてとることができ、それは太陽 11 年周期活動による変動の構造と等しいものであった。このことから、1012 年の  $^{14}\text{C}$  濃度増加の大部分は太陽活動によるものである可能性が高いと考えられる。

SN1006 は地球からの距離が 2kpc と比較的近傍で発生した炭素爆燃型超新星爆発である。このことから、炭素爆燃型超新星爆発では、太陽活動による変動に勝るような  $^{14}\text{C}$  濃度変動を検出できる可能性は少ないと考えられる。しかし、重力崩壊型超新星爆発は、 $10^{51-52}\text{erg}$  と炭素爆燃型の 10 倍のエネルギーを放出する可能性があり、顕著な  $^{14}\text{C}$  濃度増加を生じる可能性が高い。そこで、今後、SN1006 と同程度の距離にあり、重力崩壊型の超新星爆発である SN1054 を対象にした測定を予定している。

### 謝辞

本研究を行なうにあたり、名古屋大学年代測定総合研究センターの池田晃子さん他センターの皆さんには加速器質量分析計による測定や試料調製全般にあたり多大な御指導や御協力を頂きました。福島大学の木村勝彦先生には屋久杉の年輪年代決定のために、年輪幅解析を行なって頂きました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

本研究の一部は、文部科学省研究拠点形成費補助金（21 世紀 COE プログラム No.G-4 「太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学」）、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 B、代表者：増田公明、課題番号 14340071）および日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費、代表者：宮原ひろ子）を用いて行われました。

### 参考文献

- Konstantinov, B.P., and Kocharov, G.E., 1965, *Doklady Akad.Nauk.*, **165**,63-64.  
 Konstantinov ,B.P., and Kocharov, G.E., 1967, Physival-Technical Institute, Preprint 064, 43.  
 Damon,P.E., *et al.*, 1995, *Radiocarbon*, **37**, 599-604.  
 Damon,P.E., *et al.*, 2000, *Radiocarbon*, **42**, 137-150.  
 高原文朗, 1999, 宇宙物理学, 朝倉書店.  
 Burrows, A., 2000, *Nature*, **403**, 727-733.

Possibility of Past Supernova Detection with  $^{14}\text{C}$ 

Hiroaki MENJO<sup>1)</sup>, Kohsuke KUWANA<sup>1)</sup>, Hiroko MIYAHARA<sup>1)</sup>,  
Kimiaki MASUDA<sup>1)</sup>, Yasushi MURAKI<sup>1)</sup>, Toshio NAKAMURA<sup>2)</sup>

- 1) Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan TEL: +81-52-789-4329  
e-mail: menjo@stelab.nagoya-u.ac.jp
- 2) Center for Chronological Research, Nagoya University

**ABSTRACT**

It was suggested by Konstantinov and Kocharov that gamma ray emission from a supernova explosion produces detectable amount of  $^{14}\text{C}$  in atmosphere of the earth. According to the idea, Damon et al. measured the  $^{14}\text{C}$  content in tree rings from AD 998 to AD 1025 and detected  $\Delta^{14}\text{C}$  increase of about 6 ‰ in AD 1010, which corresponds to an appearance of SN1006 (the supernova explosion that occurred in AD 1006). If the  $\Delta^{14}\text{C}$  increase is really due to the gamma-ray emission by SN1006, the result must be important for the study of cosmic ray acceleration by supernova explosions. However, it is not clear if the  $\Delta^{14}\text{C}$  increase in AD 1010 is caused by SN1006, because  $\Delta^{14}\text{C}$  variation caused by solar activity is not considered.

To test the possibility of solar activity, we extended the duration of measurement of tree ring samples. We have measured tree rings of Yaku cedar from AD 992 to AD 1028 and determined  $\Delta^{14}\text{C}$  with the precision of  $\pm 2.8$  ‰ by the accelerator mass spectrometry (AMS). Our result agrees with Damon's within the measurement error. Comparison of the 5 years before AD 1011 with the 5 years after shows an average increase of  $4.1 \pm 1.7$  ‰, which is similar to that of Damon. However, we can see the cyclic feature in the variation, which is similar to the 11-year cycle variation by solar activity as to a cycle length and the amplitude. Therefore, most part of  $\Delta^{14}\text{C}$  increase in AD 1012 is considered to be the variation caused by solar activity.

We plan the measurement intended for SN1054, which is a type II supernova. Kinetic energy of type II supernovae is evaluated to be larger than that of type I supernovae (ex : SN1006). So, SN1054 would be more detectable.