

# 表面照射年代測定法による 与那国島海底遺跡年代測定の試み

木村 政昭\*, 松崎 浩之\*\*,  
坂本 理子\*, 植田 三恵\*, 市川 彩\*

\*琉球大学理学部地球物理学科 \*\*東京大学原子力研究所総合センター

Masaaki Kimura\*, Hiroyuki Matsuzaki\*\*,

Michiko Sakamoto\*, Mie Ueda\*, Aya Ichikawa\*:

Age determination of the submarine ruins of Yonaguni Island Okinawa  
by means of surface irradiation dating method

\*Department of Physics and Earth Science, College of Science, University of the Ryukyus

\*\*Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo

## Abstract

The surface irradiation dating method for the submarine samples recovered from Iseki Point of Yonaguni Island, Okinawa Prefecture, Japan is applied to find out the age of submarine ruins in this region. The measured result obtained from the  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages reveals that the undersea topography was exposed in the air less than 3,000 years, although the error range for the age is wide. In addition, the  $^{14}\text{C}$  age determination results of attached fossils on the walls of Iseki Point, the formation age of Iseki Point is estimated as around 10,000 years. Results of the analysis show that this dating method is appropriate for this area if this method is continued further to accumulate data establishing methodology of this dating technique.

## 1. はじめに

沖縄県与那国島 (Fig. 1) の海底に遺跡ポイントと呼ばれる人工的な海底地形が存在する。この遺跡ポイントはかつて陸域であった時期に人為的に形成された遺跡であることが明らかとなってきた (Kimura *et al.*, 2001)。本研究では、与那国島の南岸沖約100mの海中に存在する「遺跡ポイント」と呼ばれる海底地形の形成がいつごろ行なわれたか、すなわち遺跡形成がいつ頃行なわれたかを推定するため、海底地形を構成する岩石中の  $^{10}\text{Be}$  蓄積量から、当域の空中への露出年代を推定することにした。

表面照射年代測定法とは、宇宙線照射により岩石表面に生成される核反応物質の蓄積量に基づいた年代測定法である。この手法は、地形形成年代や表層堆積物の移動、あるいはこれらを司る風化・浸食過程の研究に多大な威力を発揮しつつある研究方法である。そこで本研究では、与那国島における海底を中心とした岩石試料を対象に、低緯度、低標高地域での表面照射年代測定法の確立を試み

## 表面照射年代測定法による 与那国島海底遺跡年代測定の試み

木村 政昭\*, 松崎 浩之\*\*,  
坂本 理子\*, 植田 三恵\*, 市川 彩\*

\*琉球大学理学部物質地球科学科、\*\*東京大学原子力研究総合センター

Masaaki Kimura\*, Hiroyuki Matsuzaki\*\*,

Michiko Sakamoto\*, Mie Ueda\*, Aya Ichikawa\*:

Age determination of the submarine ruins of Yonaguni Island Okinawa  
by means of surface irradiation dating method

\*Department of Physics and Earth Science, College of Science, University of the Ryukyus

\*\*Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo

### Abstract

The surface irradiation dating method for the submarine samples recovered from Iseki Point of Yonaguni Island, Okinawa Prefecture, Japan is applied to find out the age of submarine ruins in this region. The measured result obtained from the  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages reveals that the undersea topography was exposed in the air less than 3,000 years, although the error range for the age is wide. In addition, the  $^{14}\text{C}$  age determination results of attached fossils on the walls of Iseki Point, the formation age of Iseki Point is estimated as around 10,000 years. Results of the analysis show that this dating method is appropriate for this area if this method is continued further to accumulate data establishing methodology of this dating technique.

### 1. はじめに

沖縄県与那国島 (Fig. 1) の海底に遺跡ポイントと呼ばれる人工的な海底地形が存在する。この遺跡ポイントはかつて陸域であった時期に人為的に形成された遺跡であることが明らかとなってきた (Kimura *et al.*, 2001)。本研究では、与那国島の南岸沖約100mの海中に存在する「遺跡ポイント」と呼ばれる海底地形の形成がいつごろ行なわれたか、すなわち遺跡形成がいつ頃行なわれたかを推定するため、海底地形を構成する岩石中の  $^{10}\text{Be}$  蓄積量から、当域の空中への露出年代を推定することにした。

表面照射年代測定法とは、宇宙線照射により岩石表面に生成される核反応物質の蓄積量に基づいた年代測定法である。この手法は、地形形成年代や表層堆積物の移動、あるいはこれらを司る風化・浸食過程の研究に多大な威力を発揮しつつある研究方法である。そこで本研究では、与那国島における海底を中心とした岩石試料を対象に、低緯度、低標高地域での表面照射年代測定法の確立を試み

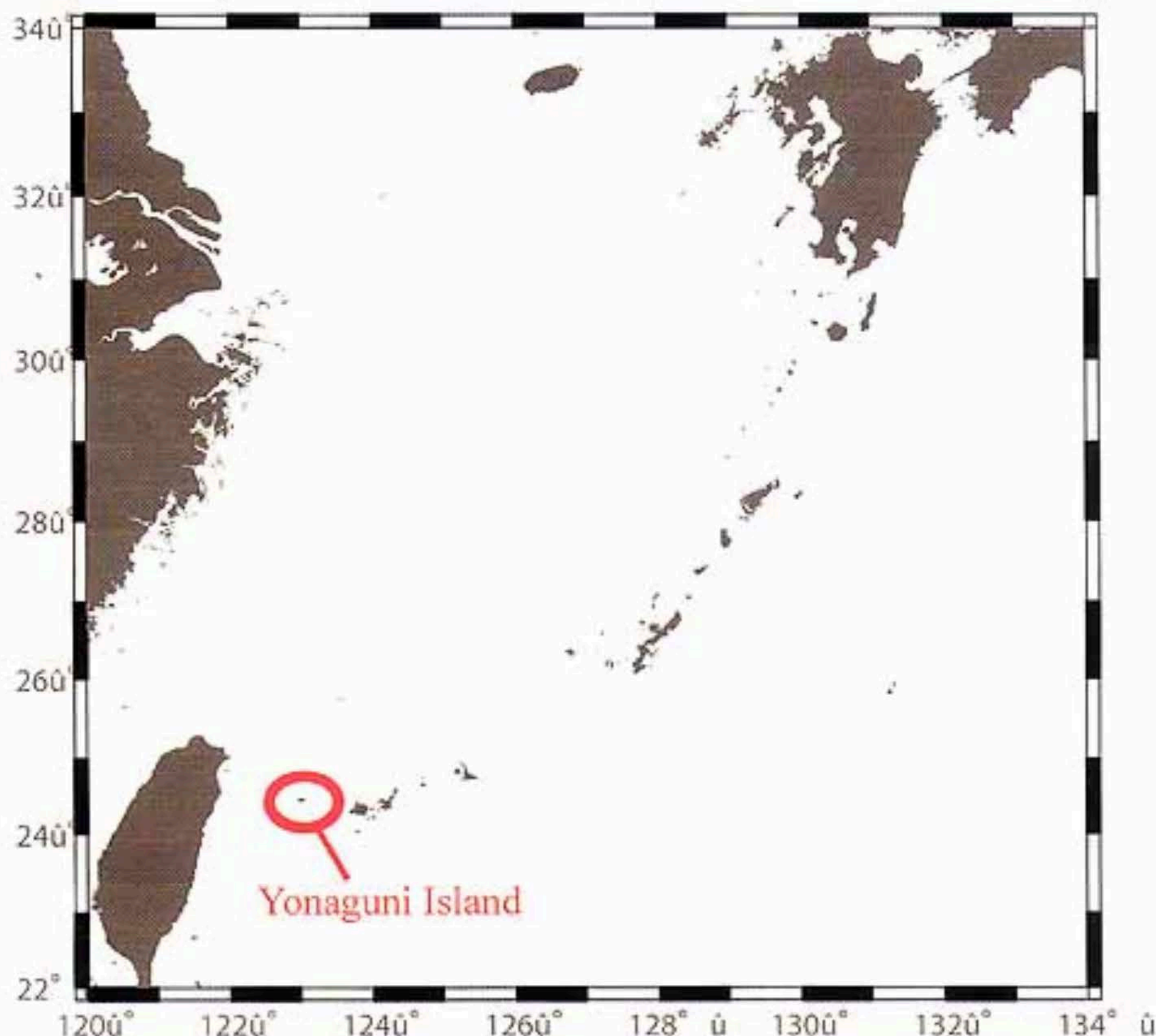


Fig. 1 : The location map of Yonaguni Island.  
The pink circle shows Yonaguni Island.

た。しかし、表面照射年代測定法に基づく露出年代測定の研究は、中・高緯度、高標高地域を中心に行なわれており、低緯度、低標高地域における研究例は少ない。そのため本研究は、低緯度、低標高地域での表面照射年代法が適切であるかどうかのチェックの意味も有する。本研究では、放射性核種である  $^{10}\text{Be}$  の石英中での生成量に基づいて露出期間の算出を行なった。また、 $^{26}\text{Al}$  の測定も同時に試みた (坂本, 2003)。

与那国島は琉球列島の最西端、台湾の東方約170kmに位置し、北緯 $24^{\circ}26'$ から $24^{\circ}28'$ 、東経 $122^{\circ}56'$ から $123^{\circ}02'20''$ の範囲にある。与那国島は、南北4km、東西11kmで、東西に伸長した六角形状を呈し、面積は約 $28.5\text{km}^2$ である (井龍・鈴木, 1990)。与那国島の地質 (Fig. 2) は、下位より下部中新統八重山層群、更新統琉球層群および完新世表層堆積物からなる (坂井ほか, 1978)。八重山層群は、与那国島の基盤を構成し、砂岩および砂岩泥岩互層よりなる。本層群は、岩質および互層のタイプによって下位より西崎層、久部良岳層、比川層および新川鼻層に区分される (矢崎, 1982)。本層群は、一般に北東-南西の走行を持ち、南東に $20^{\circ}$ 前後で傾斜し、全体として単斜構造をなす。本層群は、緩やかな傾斜不整合で琉球層群に覆われている。また、本層群中の砂岩層には節理がよく発達している。これは、本層群の一般走行とは斜交するが、周囲に確認あるいは推定さ

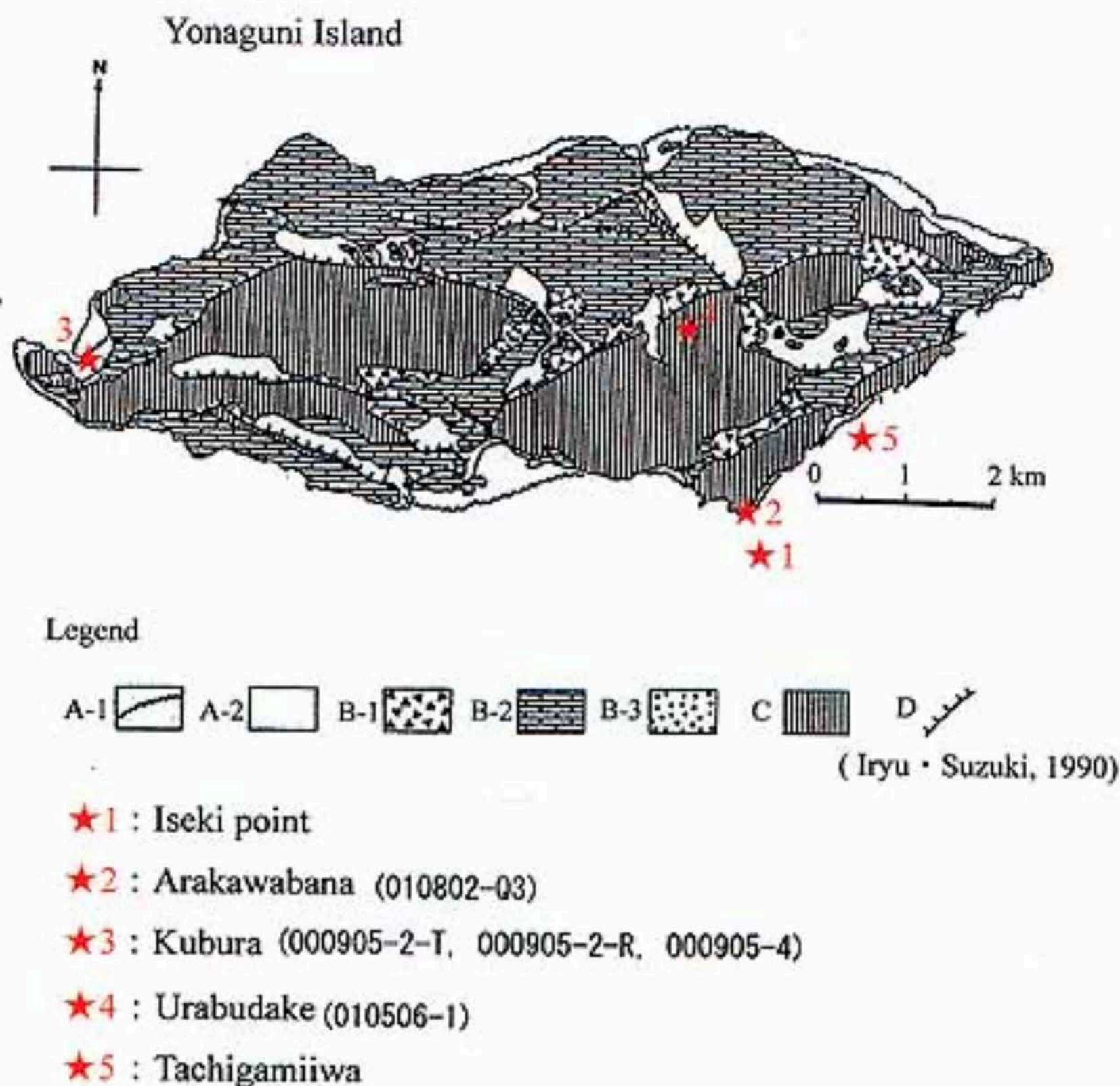


Fig. 2 : The geologic map of Yonaguni Island.

★: sampling sites, A-1; recent coral reef front, A-2; coast and lower sediments, B-1; law of gravel, B-2; limestone, B-3; sandstone · mudstone, C; Tertiary Yayeyama Group, D; faults.

れる断層と調和する方向を持つ。与那国島に発達する断層は、基盤の八重山層群と琉球層群を切っているが、異なる方向の断層系、すなわち北東-南西・北西-南東および東西系の3方向に識別される(坂井ほか, 1978)。琉球層群は下位より、トナン層、琉球石灰岩によって構成される。岩質は、琉球石灰岩として一括されている碎屑性石灰岩および礫性石灰岩と陸源碎屑堆積物である粘土層・砂層および礫層によって構成される。下位の八重山層群とは傾斜不整合であり、上位の宇良部砂礫層および隆起石灰岩など完新世の表層堆積物とも不整合をなしている。

遺跡ポイントに近い新川鼻からサンニヌ台にかけては、八重山層群が露出する。上部が頁岩優勢の砂岩頁岩互層、下部は砂岩優勢の砂岩頁岩互層の新川鼻層である(矢崎, 1982)。本研究の調査対象である「遺跡ポイント」は新川鼻層に類した地層から成る。

## 2. 調査およびサンプル採取

本研究においては、スクーバダイビングによる潜水調査(Photo 1)および海岸を中心とした陸上調査を行ない、海面下および陸上の試料を採取した。海底遺跡確認調査は1992年からスタートし

たが、本研究用のサンプルは、1999年から得られはじめた。採取した試料は、琉球大学理学部において精製し、東京大学原子力研究総合センターに設置されているタンデム加速器（タンデム型静電加速器）の加速器質量分析（Accelerator Mass Spectrometry 以下 AMS）法を用いて測定し、表面照射年代測定法に基づき露出期間を得た。



Photo 1 : Submarine survey in Iseki point by SCUBA diving.

試料の採取にあたっては次のような諸点に注意をはらった。本研究で露出期間の算出に用いた放射性核種は  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  である。そこで、酸素原子および珪素原子を分子中に多く含み、風化作用等に対しても比較的強い鉱物として石英 ( $\text{SiO}_2$ ) を処理対象の鉱物とした。試料の採取法は、試料の性質・露出状況によって大幅に異なるため、事前に十分検討する必要がある。本研究では、事前にこれらを十分に考慮し、採取場所や採取量などを決定した。採取場所については、次の点に注意をはらった。1) 地上に露出していた時代に見晴らしのよかったと考えられる地点。2) 全方位仰角  $30\sim 90^\circ$  までに障害物がない地点。3) 風化が進んで見かけが古そうな岩石が露出している地点。

試料の性質についても次の点に注意をはらった。1) 石英を多く含む砂岩。2) 砂粒が密で粒径  $0.5\sim 1.0\text{mm}$  (Coarse sand) が望ましい。3)  $1\text{mm}$  以上でも礫 (非単結晶) 質が少なければ可。4) 礫質が多い場合は、単結晶粒子サイズまで碎く必要がある。5)  $0.3\text{mm}$  (Fine sand) 以下の粒子が主体の場合、分析には不向きである。6)  $0.1\text{mm}$  (Very fine sand) 以下の砂粒子は分析不可能である。7) 砂岩中に顕著な石英脈がある場合は、それを採取する。

採取方法については、1) ハンマー、タガネを用いてなるべく深度方向に薄く採取する。2) 試料表面の傾斜角が浅いもの ( $10^\circ$  以下が望ましい) を採取する。3) 試料表面の傾斜角 (および走行) をクリノメーターを用いて計測する。4) 定方位試料の採取が望ましい。5) 現場の写真を撮る。

採取した試料は、海底15試料、陸上15試料の計30試料である (Table 1)。このうち、試料 no. 001020-K, 001021-M, 010801-N, 010802-P1, 010802-P2, 010802-P3, 010802-Q1, 010802-Q2, 010802-Q3, 010802-R, 010802-S1については、Photos 2~7に示す。試料は、2000年5月、10月、

2001年7月および2002年2月に行なわれた琉球大学海底調査団による第9、10、11および12次与那国海底調査において採取した。試料 no. 000905-1~000905-5 および010324-1, -2は、新嵩喜八郎氏に採取していただいた。試料 no. 010506-1 は橋本拓也氏に採取していただいた。Fig. 3に「遺跡ポイント」における試料採取場所を示す。

「遺跡ポイント」は階段状の地形が特徴である。そこで、階段状になった地形のそれぞれの段ごとに露出期間を測定し、その露出期間の差を明らかにすることを試みるために「遺跡ポイント」より試料 no. 000518-F, 000518-G, 000520-J, 001020-K, 010324-2, 020228-T, 020228-U, 020301-V を選定した。また、「遺跡ポイント」周辺域の海底および陸上についても露出期間の測定を目的とし、立神岩より試料 no. 000518-H, 新川鼻横の海岸より試料 no. 010802-Q3, 宇良部岳より試料 no. 010506-1 を選定した。また、与那国島八重山層群の $^{10}\text{Be}$  および $^{26}\text{Al}$  に関するバックグラウンドを明らかにするため、久部良より試料 no. 000905-2, 000905-4 を選定した。試料 no. 000905-2 は 000905-2-T および 000905-2-R の2試料に分けて測定を行なった。

Table 1: The sample list for the surface irradiation dating method, collected until now.

no.	sample no.	sampling site	altitude (m)	dip-strike	lithology	remark
1	000518-E	Iseki point (north side)	-5	N32E6N	sandstone	untreated
2	000518-F	Iseki point (main terrace)	-9.4	N18E6S	sandstone	broken
3	000518-G	Iseki point (upper terrace)	-6.9	N60E8S	sandstone	treated with HCl
4	000518-H	Tachigamiwa	0	/	sandstone	broken
5	000518-I	Iseki point (loop road)	-24	/	sandstone	—
6	000520-J	Iseki point (loop road)	-24.2	N38E10S	sandstone	measured
7	000905-1	Kubura	/	/	sandstone	untreated
8	000905-2	Kubura	/	/	sandstone	measured
9	000905-3	Kubura	/	/	sandstone	untreated
10	000905-4	Kubura	/	/	sandstone	measured
11	000905-5	Kubura	/	/	sandstone	untreated
12	001020-K	Iseki point (main terrace)	-11.2	/	sandstone	broken
13	001021-M	Iseki point (loop road)	-24	/	sandstone	—
14	010324-1	Iseki point (upper, sea level)	0	/	sandstone	untreated
15	010324-2	Iseki point (upper, land)	0	/	sandstone	measured
16	010506-1	Urabudake	231	/	sandstone	measured
17	010801-N	Kuburabari (shore)	1.2	N32E8W	sandstone	untreated
18	010802-P1	slope, side of Arakawabana	10	N20W10E	sandstone	untreated
19	010802-P2	slope, side of Arakawabana	3	N45E4E	sandstone	untreated
20	010802-P3	slope, side of Arakawabana	1	N32E8E	sandstone	untreated
21	010802-Q1	Iseki point (upper, land)	0	N20W26E	sandstone	untreated
22	010802-Q2	Iseki point (upper, sea level)	0	/	sandstone	untreated
23	010802-Q3	Arakawabana (shore)	8	12W	sandstone	measured
24	010802-R	Iseki point (main terrace)	/	/	sandstone	untreated
25	010802-S1	Arakawabana	5	/	sandstone	untreated
26	020228-T	Iseki point (loop road, lower the stairs)	-20.8	/	sandstone	measured
27	020228-U	Iseki point (triangle pool)	-4.4	/	sandstone	treated with HCl
28	020301-V	Iseki point (loop road, upper the stairs)	-16.4	/	sandstone	measured
29	020301-W	Iseki point (stand of kimura turtle)	-9.1	/	sandstone	untreated
30	020301-X	Tachigamiwa point (rock stage, under face rock)	-12.8	/	sandstone	untreated



001020-K  
 イセキポイント  
 (メインテラス)  $^{10}\text{Be}$ 用

sample no. 001020-K  
 sampling site : main terrace  
 lithology : sandstone



001021-M  
 イセキポイント (ル-70)  
 $^{10}\text{Be}$ 用

sample no. 001021-M  
 sampling site : loop road  
 lithology : sandstone



sample no. 010801-N  
sampling site : Kuburabari  
lithology : sandstone



sample no. 010802-P1  
sampling site : Arakwabana  
lithology : sandstone

Photo 3 : Samples collected from the coast for the surface irradiation dating method.





sample no. 010802-P2  
sampling site : Arakwabana  
lithology : sandstone



sample no.010802-P3  
sampling site : Arakwabana  
lithology : sandstone

Photo 4 : Samples collected from the coast for the surface irradiation dating method.



010802-Q<sub>1</sub>  
 新川鼻下海岸  
 代々上部(陸上)  
<sup>10</sup>Be用

sample no. 010802-Q1  
 sampling site : Iseki point (upper, land)  
 lithology : sandstone



010802-Q<sub>2</sub>  
 新川鼻下海岸  
 代々上部(水面)  
<sup>10</sup>Be用

sample no. 010802-Q2  
 sampling site : Iseki point (upper, sea level)  
 lithology : sandstone

Photo 5 : Samples collected from the coast for the surface irradiation dating method.

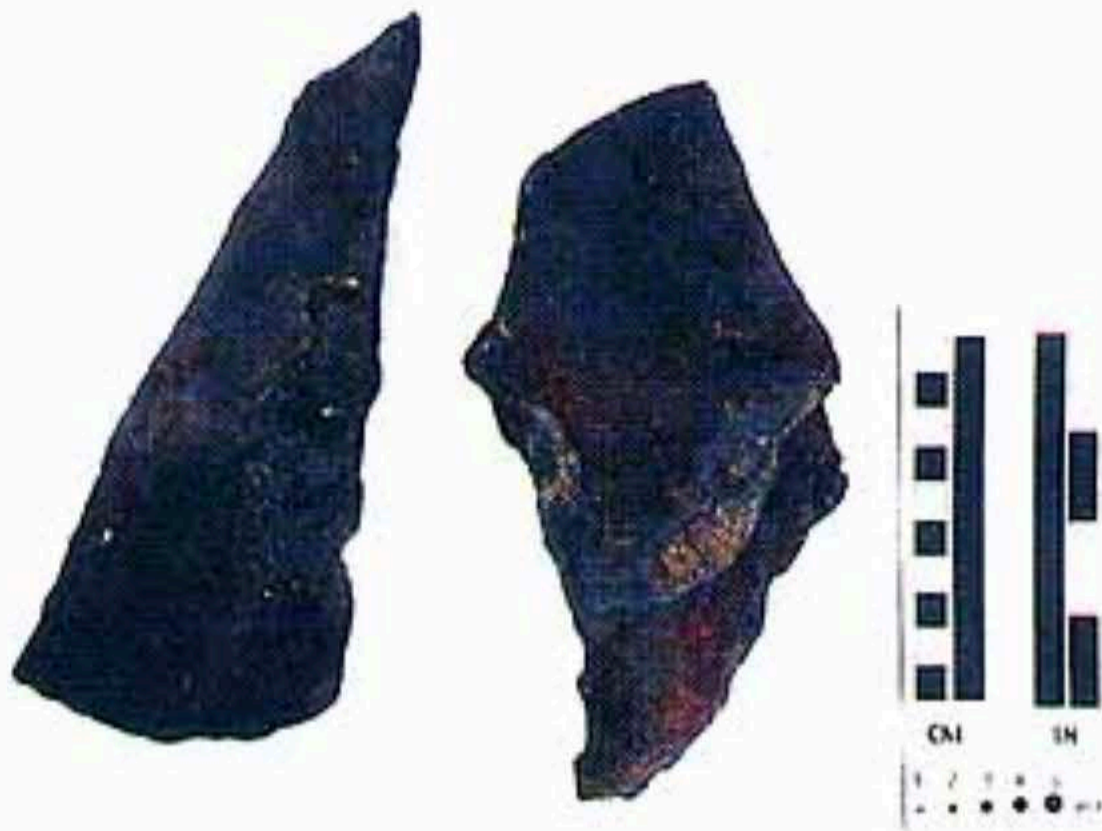


sample no. 010802-Q3  
sampling site : Arakwabana  
lithology : sandstone



sample no. 010802-R  
sampling site : main terrace  
lithology : sandstone

Photo 6 : Samples collected from the coast and the submarine Iseki Point for the surface irradiation dating method.



sample no. 010802-S1  
 sampling site : Arakawabana  
 lithology : sandstone

Photo 7 : Sample collected from the coast for the surface irradiation dating method.

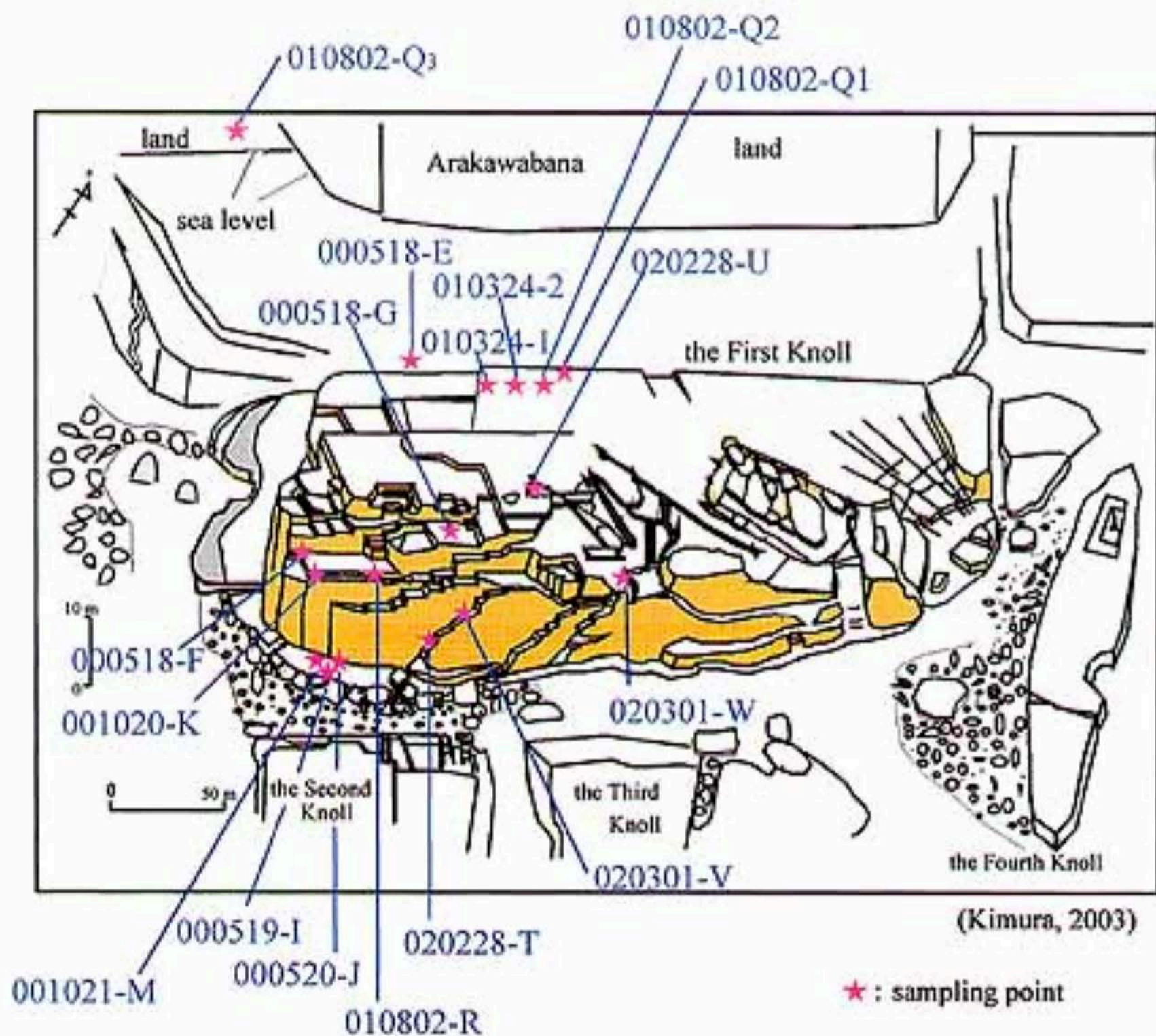


Fig. 3 : Sampling points in Iseki point.  
 Figure shows sampling points (★) and sample numbers.

### 3. 測定

#### 3-1. 表面照射年代測定法

表面照射年代測定法とは、宇宙線照射により岩石表面に生成される核反応物質の蓄積量に基づいた年代測定法である。本研究で露出期間の算出に用いた放射性核種は $^{10}\text{Be}$  (半減期:  $1.5 \times 10^6$ 年) および $^{26}\text{Al}$  (半減期:  $0.72 \times 10^6$ 年) である。

地球外からやってくる宇宙線は、非常に高いエネルギーを持つ。宇宙線は大気中の元素と衝突して急速にエネルギーを失うが、その際に各種の放射性核種を生成する。また地表物質に対しても、その表面に極少量ではあるが核反応生成物を生成する。岩石中 $^{10}\text{Be}$  および $^{26}\text{Al}$  は、宇宙線または宇宙線由来の中性子が鉱物中の酸素原子・珪素原子等をターゲットにして生じる破砕反応によっても生成される放射性核種である (兼岡, 1998)。

#### 3-2. 試料の精製

試料の精製は、Kohl and Nishiizumi (1992) に基づいて行なった。処理手順は以下の通りである。

- 1) ハンマー、鉄鉢を用いて試料を粉碎し、0.5mm open のメッシュを通し粒径を調整する。
- 2) 6N 塩酸により炭酸塩鉱物、鉄酸化物、粘土鉱物の除去を80°Cで14~24時間行なう。
- 3) 酸への溶解度の差を利用して、フッ酸、硝酸により石英以外の主要な珪酸塩の溶解および大気起源の $^{10}\text{Be}$  および $^{26}\text{Al}$  の除去を95°Cで9時間×3~4回行ない、純粋な石英を抽出する。
- 4) carrier の $^9\text{Be}$  を加える。
- 5) 硝酸、フッ酸、過塩素酸で石英の溶解、蒸発、乾固を繰り返し、Be および Al を分離する。  
なお、これらの試薬は以下の目的で使用した。
  - \* フッ酸は、珪酸塩鉱物を分解する。
  - \* 硝酸は、フッ酸だけでは分解しない酸可溶物を分解する。
  - \* 過塩素酸は、四フッ化珪素等を分解する。
- 6) 試料を一部分取し、 $^{26}\text{Al}$  の濃度を原子吸光分析法で分析する。
- 7) イオン交換法を用いて、Be および Al の分離、精製を行なう。
- 8) 塩酸 (30%)、アンモニア水 (28%) による溶解・再沈を利用し、 $^{10}\text{Be}$  および $^{26}\text{Al}$  の測定を妨害するホウ素およびマグネシウムの除去を行なう。  
(ホウ素およびマグネシウムはそれぞれ $^{10}\text{Be}$  および $^{26}\text{Al}$  の同重体イオンである)
- 9) 電気炉を使用して、酸化ベリリウムおよび酸化アルミニウムを生成する。
- 10) AMS 用のターゲット詰めを行なう。
- 11)  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  および $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  を AMS で測定する。

#### 3-3. X線回折法

粒径を調整し、塩酸およびフッ酸、硝酸による酸処理を行なった試料 No. 020228-T について、酸処理によって純粋な石英が抽出されているかどうか、X線回折法を用いて試料の組成を確認した。

X線回折法とは、単結晶あるいは多結晶物質にX線を照射し、結晶構造を解析する方法である。単結晶あるいは多結晶物質にX線を照射すると、X線の波長と結晶の原子間隔が同じ程度であるた

めに、各原子で散乱されたX線は相互に干渉して特定方向に強い回折X線を出す。これらの回折線を計数装置に記録し、その結果より結晶構造を解析することが可能である。

### 3-4. 原子吸光分析

岩石中の<sup>27</sup>Al濃度を測定するために、硝酸、フッ酸、過塩素酸による酸溶解後の試料を一部分取し、琉球大学機器分析センターにて原子吸光分析を行なった。

原子吸光分析とは、試料を高温で加熱し、目的元素を原子状態に解離させて光を照射し、各元素固有のスペクトル線の吸収強度から定量分析を行なう方法である。

### 3-5. 表面照射年代測定のデータ解析

測定データの解析は以下の通り行なった。

- 1) 測定値の計算に用いる標準 (Standard) 試料、実験ブランクを決定する。
- 2) 標準のm/k (measured/known) の平均値を算出する。
- 3) 標準の誤差 (Standard deviation : STDEV) を算出する。
- 4) 試料毎に測定データ (<sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be あるいは <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al) の平均値および誤差 (STDEV) を算出する。
- 5) 実験ブランクごとに測定データ (<sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be あるいは <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al) の平均値および誤差 (STDEV) を算出する。
- 6) 試料の平均値をブランクの平均値で減じ、それぞれの誤差を足し合わせる。
- 7) 6) で算出した値を標準の m/k の平均値で割る。これを試料毎の確定値とする。それぞれの誤差も伝搬させる。
- 8) 7) で算出した確定値を試料毎に <sup>10</sup>Be 濃度あるいは <sup>26</sup>Al 濃度に変換する。
- 9) <sup>10</sup>Be 濃度あるいは <sup>26</sup>Al 濃度を Lal (1991) および Stone (2000) に基づいて露出期間に換算する。

### 3-6. 露出期間への換算

#### 3-6-1. <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 確定値から濃度への換算

<sup>10</sup>Be 濃度の算出式は以下の通りである。

$$M_{10\text{Be}} = R_{\text{Be}} \times (C/A_{9\text{Be}}) \times 6.022 \times 10^{23}/Q \dots \text{(式1)}$$

$M_{10\text{Be}}$  : 石英 1g あたりの <sup>10</sup>Be 含有量 (atoms/g)

$R_{\text{Be}}$  : <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 確定値 (at./at.)

$C$  : carrier の <sup>9</sup>Be 量 (g)

$A_{9\text{Be}}$  : <sup>9</sup>Be の質量数=9.012

$Q$  : 石英量 (g)

#### 3-6-2. <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al 確定値から濃度への換算

<sup>26</sup>Al 濃度の算出式は以下の通りである。

$$M_{26\text{Al}} = R_{\text{Al}} \times \left\{ (I/Q) \times P \times 10^{-6} \times 6.022 \times 10^{23}/A_{27\text{Al}} \right\} \dots \text{(式2)}$$

$M_{26Al}$  : 石英 1g あたりの  $^{26}Al$  含有量 (atoms/g)

$R_{Al}$  :  $^{26}Al/^{27}Al$  確定値 (at./at.)

$l$  : 溶液量 (g)

$Q$  : 石英量 (g)

$l/Q$  : 希釈率

$P$  : 溶液中の  $^{27}Al$  濃度 (ppm)

$A_{27Al}$  :  $^{27}Al$  の質量数 = 26.98

### 3-6-3. $^{10}Be$ および $^{26}Al$ の生成率算出法

$^{10}Be$  および  $^{26}Al$  の生成率は宇宙線の照射強度に比例するため、原理的には [地磁気強度]、[標高]、[試料の表面傾斜] および [周囲の遮蔽] の4つの変数によって規定される (青木ほか, 1998)。Lal (1991) は、これらのうち前2者について定式化し、地球上の任意の地点 (緯度および標高) での  $^{10}Be$  および  $^{26}Al$  の生成率を算出する式および係数表 (Table 2) を示した。Lal (1991) に基づく生成率を算出する式は、以下の通りである (式3)。

Table 2 : Polynomial coefficients for production rates of  $^{10}Be$  and  $^{26}Al$  in quartz by Lal (1991).

latitude	Polynomial coefficients							
	a		b		c		d	
	$^{10}Be$	$^{26}Al$	$^{10}Be$	$^{26}Al$	$^{10}Be$	$^{26}Al$	$^{10}Be$	$^{26}Al$
0°	3.511	21.47	2.547	15.45	0.95125	5.751	0.18608	1.1154
10°	3.360	22.0	2.522	15.32	1.0668	6.444	0.18830	1.1287
20°	4.0607	24.84	2.734	16.61	1.2673	7.652	0.22529	0.3504
30°	4.994	30.55	3.904	23.67	0.9739	5.911	0.42671	2.5563
40°	5.594	34.21	4.946	29.92	1.3817	8.361	0.53176	3.1853
50°	6.064	37.08	5.715	34.57	1.6473	9.955	0.68684	4.1138
60-90°	5.994	36.67	6.018	36.38	1.7045	10.30	0.71184	4.2634

$$q(L, y) = a(L) + b(L)y + c(L)y^2 + d(L)y^3 \dots \text{ (式3)}$$

$q(L, y)$  : 緯度  $L$ 、標高  $y$  (km) における生成率 (atoms/y·g)

$a, b, c, d$  : 緯度による係数、誤差は  $^{10}Be$  :  $\pm 5\%$ 、 $^{26}Al$  :  $\pm 7\%$

また、Stone (2000) は、気圧が低くなるにつれ宇宙線フラックスは増加し、宇宙線を遮蔽する大気の影響は減少すると主張した。そして、宇宙線破碎率およびミューオン捕獲による核種生成率の気圧による影響についてそれぞれ独立して考慮するべきであると提唱し、それぞれの scaling factor を算出した。Stone (2000) に基づく scaling factor の算出式は、以下の通りである (式4~7)。式5に関する係数表は、Table 3に示す。

Table 3 : Scaling equation coefficients for the  $S(\lambda)$  by Stone (2000).

latitude $\lambda$	a	b	c	d	e	$M_{\lambda 1013.25}$
0°	31.8518	250.3193	-0.083393	7.4260E-05	-2.2397E-08	0.587
10°	34.3699	258.4759	-0.089807	7.9457E-05	-2.3697E-08	0.600
20°	40.3153	308.9894	-0.106248	9.4508E-05	-2.8234E-8	0.678
30°	42.0983	512.6857	-0.120551	1.1752E-04	-3.8809E-08	0.833
40°	56.7733	649.1343	-0.160859	1.5463E-04	-5.0330E-08	0.933
50°	69.072	832.4566	-0.199252	1.9391E-04	-6.3653E-08	1.000
>60°	71.8733	863.1927	-0.207069	2.0127E-04	-6.6043E-08	1.000

$$P(z) = P_s \exp\left\{-\frac{gM}{R\xi}[\ln T_s - \ln(T_s - \xi z)]\right\} \dots \text{(式4)}$$

$P(z)$  : pressure of standard atmosphere

$P_s = 1013.25 \text{ hPa}$  (sea level pressure)

$T_s = 288.15 \text{ K}$  (sea level temperature)

$\xi = dT/dz = 0.0065 \text{ K m}^{-1}$  (adiabatic lapse rate)

$M$  : molar weight of air

$g$  : acceleration due to gravity

$R$  : gas constant

$$gM/R = 0.03417 \text{ K m}^{-1}$$

$z$  : 標高 (m)

$$S\lambda(P) = a + b \exp[-P/150] + cP + dP^2 + eP^3 \dots \text{(式5)}$$

$S\lambda(P)$  : 緯度  $>60^\circ$ 、気圧1013.25hPaにおける宇宙線破砕率に基づいた、緯度 $\lambda$ 、気圧Pにおける宇宙線破砕率に関する scaling factor

$a, b, c, d$  : 緯度による係数

式5は、気圧1040~490hPa (高度およそ-20~6000m) の範囲に適用される。

$$M\lambda(P) = M_{\lambda 1013.25} \exp[(1013.25 - P)/242] \dots \text{(式6)}$$

$M\lambda(P)$  : 緯度  $>60^\circ$ 、気圧1013.25hPaにおけるミューオン捕獲による生成率に基づいた、緯度 $\lambda$ 、気圧Pにおけるミューオン捕獲による生成率に関する scaling factor



$M_{\lambda,1013.25}$  : 緯度による係数

$$F_{\lambda}(P) = f_{sp} S_{\lambda}(P) + (1 - f_{sp}) M_{\lambda}(P) \dots \text{(式7)}$$

$F_{\lambda}(P)$  : 緯度  $>60^{\circ}$ 、気圧1013.25hPaにおける核種生成率に基づいた、緯度 $\lambda$ 、気圧Pにおける核種生成率に関する scaling factor

$f_{sp}$  : 海面における破砕反応での生成率に関する係数

$$^{10}\text{Be} : f_{sp} = 0.974 \quad ^{26}\text{Al} : f_{sp} = 0.978$$

Stone (2000) は、緯度  $>60^{\circ}$ 、気圧1013.25hPaにおける核種生成率を  $^{10}\text{Be}=5.1 \pm 0.3 \text{ atoms/y} \cdot \text{g}$ 、 $^{26}\text{Al}=31.1 \pm 1.9 \text{ atoms/y} \cdot \text{g}$ と算出し、この値に $F_{\lambda}(P)$ をかけることで各緯度および気圧における $^{10}\text{Be}$ および $^{26}\text{Al}$ の核種生成率を算出することができるとした。

石英中での単位時間あたりの核種生成量は宇宙線の強度に影響される。式3に用いられている係数 $a \sim d$ は、地磁気緯度によって変化する値とされている。しかし、Nishiizumi *et al.* (1996) は Lal (1991) の係数表 (Table 2) を用いる場合には、地磁気緯度ではなく地理緯度を用いるべきであると主張している。また、青木ほか (1998) は日本アルプスにおける氷河性堆積物について $^{10}\text{Be}$ 年代測定を試み、地磁気緯度使用の妥当性を支持できる結果を得た。そして、過去数万年程度は日本周辺の地磁気緯度、地磁気強度が安定していた可能性を示唆し、日本周辺では生成率の算出に地磁気緯度を用いた方が妥当であると主張している。この問題については未だ最終決着が得られていないため、本研究では地磁気緯度、地理緯度の両方による生成率を算出した。また、Stone (2000) による提唱も尊重し、Lal (1991) および Stone (2000) 両者の算出式を用いて生成率を算出した。海底試料の標高については、標高を0として計算した。

#### 3-6-4. 露出期間算出法

露出期間への換算は、Lal (1991) による以下の式に従い行なった。

$$T = -\frac{1}{\lambda} \times \ln \left( 1 - \frac{\lambda N}{P} \right) \dots \text{(式8)}$$

$T$  : 露出期間 (年)

$\lambda$  :  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の壊変定数 (年 $^{-1}$ )

$$\lambda (^{10}\text{Be}) = 4.6 \times 10^{-7} \quad \lambda (^{26}\text{Al}) = 9.83 \times 10^{-7}$$

$N$  :  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の AMS による測定数 (atoms/g)

$P$  :  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の生成率 (atoms/y $\cdot$ g)

現在陸上に露出している試料について露出期間 ( $T$ ) を算出した場合、算出された値 ( $T$ ) はその地形形成年代を意味するが、現在海底にある試料について露出期間 ( $T$ ) を算出した場合は、算出された値 ( $T$ ) はあくまでその試料が陸上で露出していた期間を表わし、必ずしもその地形形成年代を表わすものではないということに注意が必要である。

本研究では、 $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の生成率を Lal (1991) および Stone (2000) に基づいて、それぞ

れ地磁気緯度、地理緯度を用いて算出したため、 $^{10}\text{Be}$  および  $^{27}\text{Al}$  についてそれぞれ4つの露出期間が得られた。

## 4. 測定結果

### 4-1. $^{10}\text{Be}$ の測定結果

粒径を調整し、塩酸およびフッ酸、硝酸による酸処理を行なった試料について、酸処理後の収率をTable 4に示す。また、Fig. 4-a, bに試料 no. 020228-T についてのX線回折データを示す。X線回折の結果は、試料の組成がほとんど100%近く石英であることを示した。従って、塩酸およびフッ酸・硝酸による酸処理を行なうことによって、処理対象である石英の抽出に成功したことが明らかになった。原子吸光分析結果に基づく岩石中の  $^{27}\text{Al}$  濃度をTable 5に示す。なお、試料 no. 000520-J, 000905-2-T および 000905-2-R については、坂本 (2001) による誘導結合 (ICP) 質量分析法による結果である。

表面照射年代測定結果は、Table 6-11に示す。選定した試料のうち試料 no. 000518-F, 000518-G, 000518-H, 001020-K, 010228-U については、処理途中で粒度が細かい等の理由で分析には不向きであることが判明したため、AMS による測定までは至らなかった。よって、現在までに採取された試料のうち AMS による測定まで至ったものは、試料 no. 000520-J, 000905-2-T, 000905-2-R, 000905-4, 010203-2, 010506-1, 010802-Q3, 020228-T, 020301-V の計9試料である。

AMS による測定を行なった試料のうち、試料 no. 010506-1 は Be が検出されなかったため、試料の精製段階において Be の回収に失敗したか、ごく最近削剥された可能性があるということが明らかになった。試料 no. 000520-J, 000905-2-T, 000905-2-R については、試料に対する実験ブランクの測定がうまくいかなかったため、測定結果の得られた実験ブランクのうち値の最も大きいものを使用して補正を行なった。その結果、試料 no. 000520-J については実験ブランクの値が試料の値を上回った。

試料 no. 000905-4 および 010324-2 については、試料の精製段階において  $^{10}\text{Be}$  の測定を妨害するホウ素の除去が不十分であったため、測定に影響が及んだ (Fig. 5-a~c および Fig. 6-a~c)。そのため、ホウ素による影響を考慮してデータ解析を行なった。その解析方法の概略は、ホウ素の影響が多かった実験ブランクについて、測定におけるスペクトルデータより実際のホウ素のカウント数と本来  $^{10}\text{Be}$  がカウントされるポイントでのホウ素のカウント数より、ホウ素の影響を算出する。そしてその割合を試料の測定データに対しても反映させ、それを真の  $^{10}\text{Be}$  カウント数と仮定して解析する。以上の理論に基づいてホウ素による試料への影響を考慮し、解析を行なった。

試料 no. 020228-T および 020301-V については、測定誤差が100%を超えた。

Table 4 : Collected rates for each samples after treated with acid.

sample no.	sampling site	sample weight for HCl (g)	sample weight after HCl (g)	collected rate after HCl (%)	sample weight for HF·HNO <sub>3</sub> (g)	sample weight after HF·HNO <sub>3</sub> (g)	collected rate after HF·HNO <sub>3</sub> (%)
000508-G	Iseki point (upper terrace)	420	/	/	/	/	/
000520-J	Isekioint (loop road)	298.75	223.92	75.0	204.081	102.6	50.3
000905-2-T	Kubura	411.8	318.8	77.4	167.2	95.0	56.8
000905-2-R	Kubura	309.29	247.92	80.2	203.761	90.13	44.2
000905-4	Kubura	323.61	256.38	79.2	/	/	/
000905-4	Kubura	333.01	287.05	86.2	221.755	108.69	49.0
010324-2	Iseki point (upper, land)	318.83	217.22	68.1	213.175	43.99	20.6
010506-1	Urabudake	330.58	259.45	78.5	530.677	232.34	43.8
010506-1		420	338.50	80.6			
010802-Q3	Arakawabana (shore)	320.07	269.95	84.3	223.296	117.15	52.5
020228-T	Iseki point (loop road, lower the stairs)	360	277.09	77.0	532.458	220.17	41.3
020228-T		344.6	278.64	80.9			
020228-U	Iseki point (triangle pool)	160.09	104.56	65.3	/	/	/
020301-V	Iseki point (loop road, upper the stairs)	725.22	395.02	54.5	394.241	59.15	15.0

a

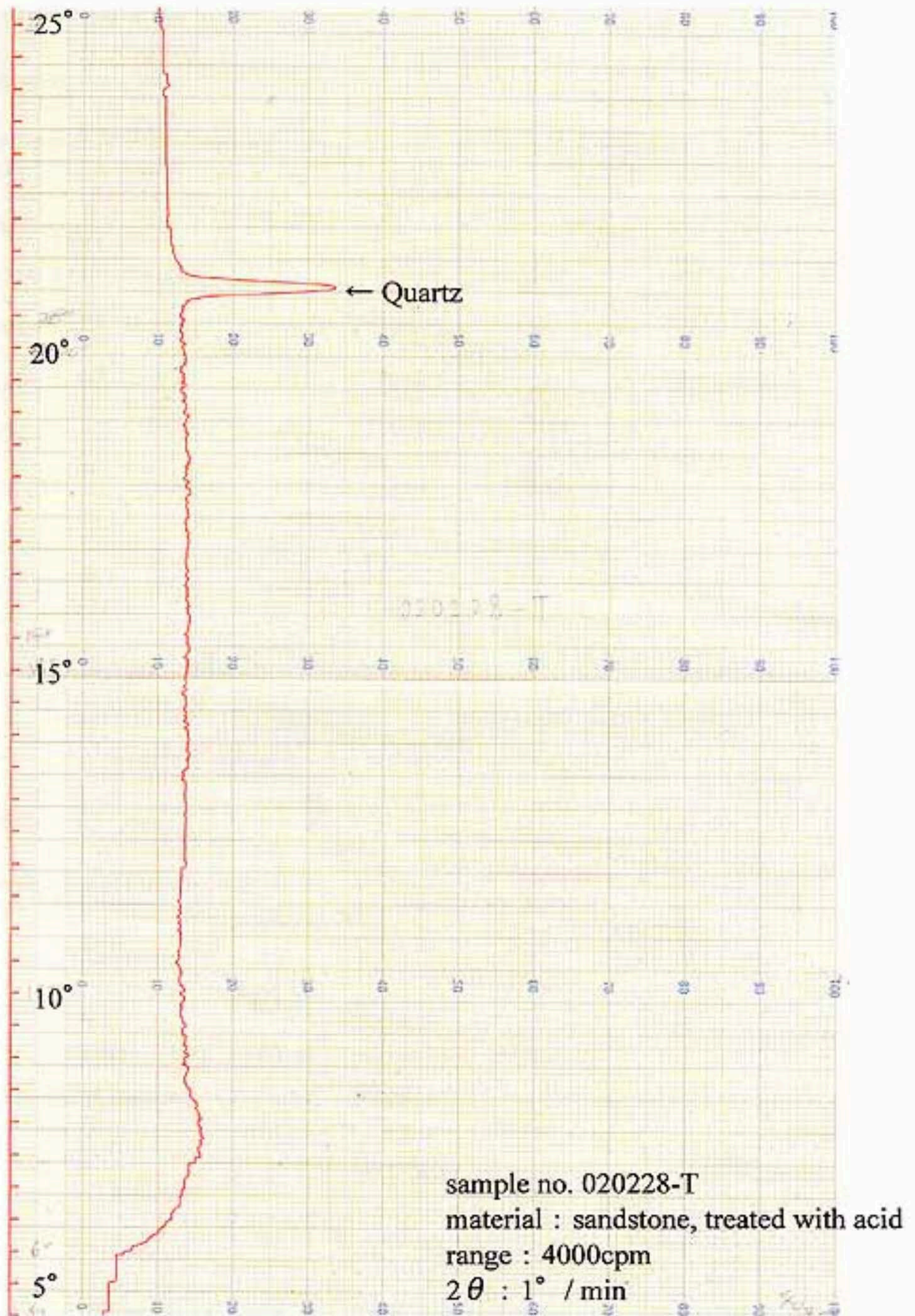


Fig. 4-a : X-ray diffraction of sandstone (no. 020228-T), treated with acid.  
Figure shows diffraction of quartz from 5° to 25°

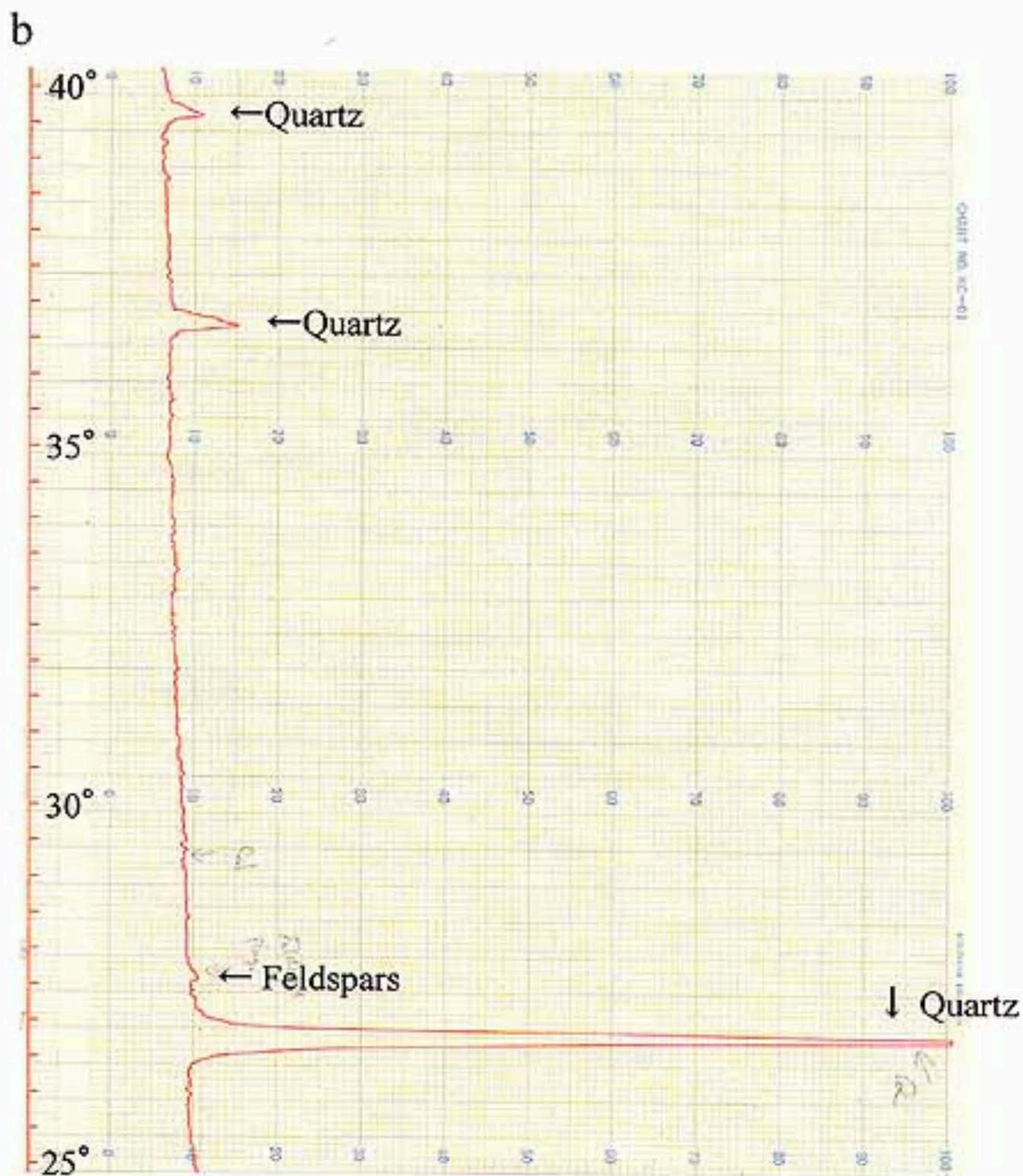


Fig. 4-b : X-ray diffraction of sandstone (no. 020228-T), treated with acid.  
 Figure shows diffraction of quartz from  $25^\circ$  to  $40^\circ$

Table 5 : Measured  $^{27}\text{Al}$  concentrations in quartz by atomic absorption analysis.

sample no.	quartz weight (g)	$^{27}\text{Al}$ extracted in part (g)	solution (g)	Al dilution rate	$^{27}\text{Al}$ (ppm)	$^{27}\text{Al}$ ( $10^{18}$ atoms/g)		
000520-J	86.76	4.88	99.39	1.15	289.40	7.40		
000905-2-T	70.13	5.67	100.36	1.43	145.70	4.65		
000905-2-R	70.38	5.31	99.46	1.41	161.00	5.08		
000905-4	107.64	7.51	104.08	0.97	475.52	10.26		
010324-2	43.60	4.92	102.57	2.35	326.48	17.14		
010506-1	115.40	5.59	102.46	0.89	591.52	11.72		
010802-Q3	115.92	5.11	80.03	0.69	522.51	8.05		
020228-T	216.52	5.91	101.40	0.47	828.10	8.66		
020301-V	Iseki point	-16.4	24.4	14.4	$3.80 \pm 0.23$	$3.23 \pm 0.19$	$23.2 \pm 1.39$	$19.7 \pm 1.18$

Table 8 : Measured  $^{10}\text{Be}$  by AMS and calculated exposure ages based on geomagnetic latitude following by Lal (1991).

sample no.	quartz weight (g)	$^{9}\text{Be}$ carrier (mg)	measured $^{10}\text{Be}$ counts	measured $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{10}\text{Be}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{10}\text{Be}$ age by geomagnetic latitude, Lal (years)	
000905-4	Kubura	0	24.4	14.4	$4.47 \pm 0.22$	$3.67 \pm 0.18$	$27.4 \pm 1.91$	$23.2 \pm 1.63$
010324-2	Iseki point	0	24.4	14.4	$4.47 \pm 0.22$	$3.67 \pm 0.18$	$27.4 \pm 1.91$	$23.2 \pm 1.63$
010506-1	Urabudake	231	24.4	14.4	$5.29 \pm 0.26$	$4.34 \pm 0.22$	$32.3 \pm 2.26$	$27.3 \pm 1.91$
010802-Q3	Arakawabana	8	24.4	14.4	$4.40 \pm 0.22$	$3.61 \pm 0.18$	$26.9 \pm 1.88$	$22.9 \pm 1.60$
020228-T	Iseki point	-20.8	24.4	14.4	$4.47 \pm 0.22$	$3.67 \pm 0.18$	$27.4 \pm 1.91$	$23.2 \pm 1.63$
020301-V	Iseki point	-16.4	24.4	14.4	$4.47 \pm 0.22$	$3.67 \pm 0.18$	$27.4 \pm 1.91$	$23.2 \pm 1.63$

Table 7 : Production rates of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  for each samples following by Stone (2000).

sample no.	sampling site	altitude (m)	latitude (degree)		angle (degree)	$^{10}\text{Be}$ production rate by Stone (2000) (atoms/yr.g.SiO <sub>2</sub> )		$^{26}\text{Al}$ production rate by Stone (2000) (atoms/yr.g.SiO <sub>2</sub> )	
			geogr.	geomag.		geogr.	geomag.	geogr.	geomag.
000520-J	Iseki point	-24.2	24.4	14.4	10	3.74±0.22	3.18±0.19	22.8±1.37	19.4±1.16
000905-2-T	Kubura	0	24.4	14.4	/	3.80±0.23	3.23±0.19	23.2±1.39	19.7±1.18
000905-2-R	Kubura	0	24.4	14.4	/	3.80±0.23	3.23±0.19	23.2±1.39	19.7±1.18
000905-4	Kubura	0	24.4	14.4	/	3.80±0.23	3.23±0.19	23.2±1.39	19.7±1.18
010324-2	Iseki point	0	24.4	14.4	/	3.80±0.23	3.23±0.19	23.2±1.39	19.7±1.18
010506-1	Urabudake	231	24.4	14.4	/	4.54±0.27	3.84±0.23	27.7±1.66	23.4±1.40
010802-Q3	Arakawabana	8	24.4	14.4	12	3.74±0.22	3.18±0.19	22.8±1.37	19.4±1.16
020228-T	Iseki point	-20.8	24.4	14.4	/	3.80±0.23	3.23±0.19	23.2±1.39	19.7±1.18
020301-V	Iseki point	-16.4	24.4	14.4	/	3.80±0.23	3.23±0.19	23.2±1.39	19.7±1.18

Table 8 : Measured  $^{10}\text{Be}$  by AMS and calculated exposure ages based on geomagnetic latitude following by Lal (1991).

sample no.	quartz weight (g)	$^9\text{Be}$ carrier (mg)	measured $^{10}\text{Be}$ counts	measured $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{10}\text{Be}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{10}\text{Be}$ age by geomagnetic latitude, Lal (years)
000905-2-T	70.1	0.30	3164	1.0364 ± 0.0311	29.44 ± 0.88	3	81,778 ± 6,784 - 6,119
000905-2-R	70.4	0.30	2702	1.0914 ± 0.0218	31.00 ± 0.62	2	86,207 ± 6,914 - 6,236
000905-4	107.6	0.30	308	0.0874 ± 0.0288	1.63 ± 0.54	33	4,439 ± 1,788 - 1,616
010324-2	43.6	0.10	54	0.0391 ± 0.0070	0.59 ± 0.11	18	1,612 ± 397 - 360
010802-Q3	115.9	0.10	648	0.1402 ± 0.0084	0.81 ± 0.05	6	2,234 ± 259 - 235
020228-T	216.5	0.30	244	0.0030 ± 0.0135	0.03 ± 0.13	456	75 ± 363 - 329
020301-V	9.2	0.32	45	0.0046 ± 0.0204	1.07 ± 4.69	439	2,912 ± 13,647 - 12,275

error of production rate: ± 5%

Table 9 : Measured  $^{10}\text{Be}$  by AMS and calculated exposure ages based on geographic latitude following by Lal (1991).

sample no.	quartz weight (g)	$^9\text{Be}$ carrier (mg)	measured $^{10}\text{Be}$ counts	measured $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{10}\text{Be}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{10}\text{Be}$ age by geographic latitude, Lal (years)
000905-2-T	70.1	0.30	3164	$1.0364 \pm 0.0311$	$29.44 \pm 0.88$	3	$66,863 \pm 5,526 - 4,988$
000905-2-R	70.4	0.30	2702	$1.0914 \pm 0.0218$	$31.00 \pm 0.62$	2	$70,470 \pm 5,630 - 5,080$
000905-4	107.6	0.30	308	$0.0874 \pm 0.0288$	$1.63 \pm 0.54$	33	$3,641 \pm 1,466 - 1,326$
010324-2	43.6	0.10	54	$0.0391 \pm 0.0070$	$0.59 \pm 0.11$	18	$1,322 \pm 326 - 295$
010802-Q3	115.9	0.10	648	$0.1402 \pm 0.0084$	$0.81 \pm 0.05$	6	$1,832 \pm 213 - 192$
020228-T	216.5	0.30	244	$0.0030 \pm 0.0135$	$0.03 \pm 0.13$	456	$61 \pm 298 - 269$
020301-V	9.2	0.32	45	$0.0046 \pm 0.0204$	$1.07 \pm 4.69$	439	$2,388 \pm 11,188 - 10,072$

error of production rate:  $\pm 5\%$ Table 10 : Measured  $^{10}\text{Be}$  by AMS and calculated exposure ages based on geomagnetic latitude following by Stone (2000).

sample no.	quartz weight (g)	$^9\text{Be}$ carrier (mg)	measured $^{10}\text{Be}$ counts	measured $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{10}\text{Be}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{10}\text{Be}$ age by geomagnetic latitude, Stone (years)
000905-2-T	70.1	0.30	3164	$1.0364 \pm 0.0311$	$29.44 \pm 0.88$	3	$93,081 \pm 8,842 - 7,811$
000905-2-R	70.4	0.30	2702	$1.0914 \pm 0.0218$	$31.00 \pm 0.62$	2	$98,136 \pm 9,050 - 7,994$
000905-4	107.6	0.30	308	$0.0874 \pm 0.0288$	$1.63 \pm 0.54$	33	$5,040 \pm 2,106 - 1,865$
010324-2	43.6	0.10	54	$0.0391 \pm 0.0070$	$0.59 \pm 0.11$	18	$1,830 \pm 475 - 422$
010802-Q3	115.9	0.10	648	$0.1402 \pm 0.0084$	$0.81 \pm 0.05$	6	$2,535 \pm 325 - 287$
020228-T	216.5	0.30	244	$0.0030 \pm 0.0135$	$0.03 \pm 0.13$	456	$85 \pm 418 - 370$
020301-V	9.2	0.32	45	$0.0046 \pm 0.0204$	$1.07 \pm 4.69$	439	$3,306 \pm 15,704 - 13,832$

error of production rate:  $\pm 6\%$



Table 11 : Measured  $^{10}\text{Be}$  by AMS and calculated exposure ages based on geographic latitude following by Stone (2000).

sample no.	quartz weight (g)	$^9\text{Be}$ carrier (mg)	measured $^{10}\text{Be}$ counts	measured $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{10}\text{Be}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{10}\text{Be}$ age by geographic latitude, Stone (years)
000905-2-T	70.1	0.30	3164	$1.0364 \pm 0.0311$	$29.44 \pm 0.88$	3	$78,951 \pm 7,473 - 6,515$
000905-2-R	70.4	0.30	2702	$1.0914 \pm 0.0218$	$31.00 \pm 0.62$	2	$83,224 \pm 7,646 - 6,758$
000905-4	107.6	0.30	308	$0.0874 \pm 0.0288$	$1.63 \pm 0.54$	33	$4,288 \pm 1,791 - 1,587$
010324-2	43.6	0.10	54	$0.0391 \pm 0.0070$	$0.59 \pm 0.11$	18	$1,557 \pm 404 - 359$
010802-Q3	115.9	0.10	648	$0.1402 \pm 0.0084$	$0.81 \pm 0.05$	6	$2,157 \pm 275 - 245$
020228-T	216.5	0.30	244	$0.0030 \pm 0.0135$	$0.03 \pm 0.13$	456	$72 \pm 356 - 315$
020301-V	9.2	0.32	45	$0.0046 \pm 0.0204$	$1.07 \pm 4.69$	439	$2,813 \pm 13,353 - 11,773$

error of production rate:  $\pm 6\%$

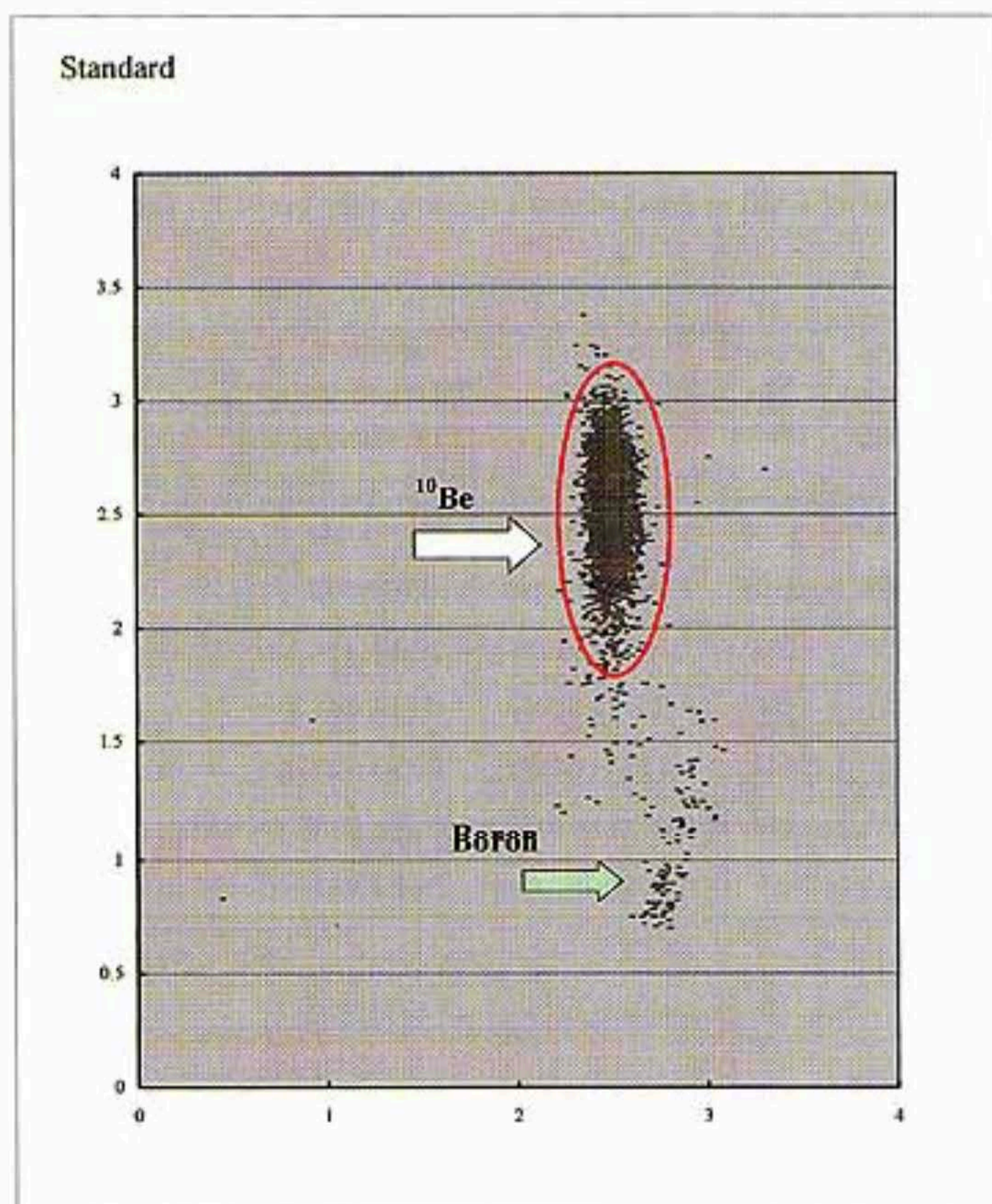


Fig. 5-a : The spectrum of a standard by AMS connected with no. 000905-4. Points in the red circle show those by  $^{10}\text{Be}$ . Points out of the circle show those by Boron. cycle: 5,000, live time: 500 second.

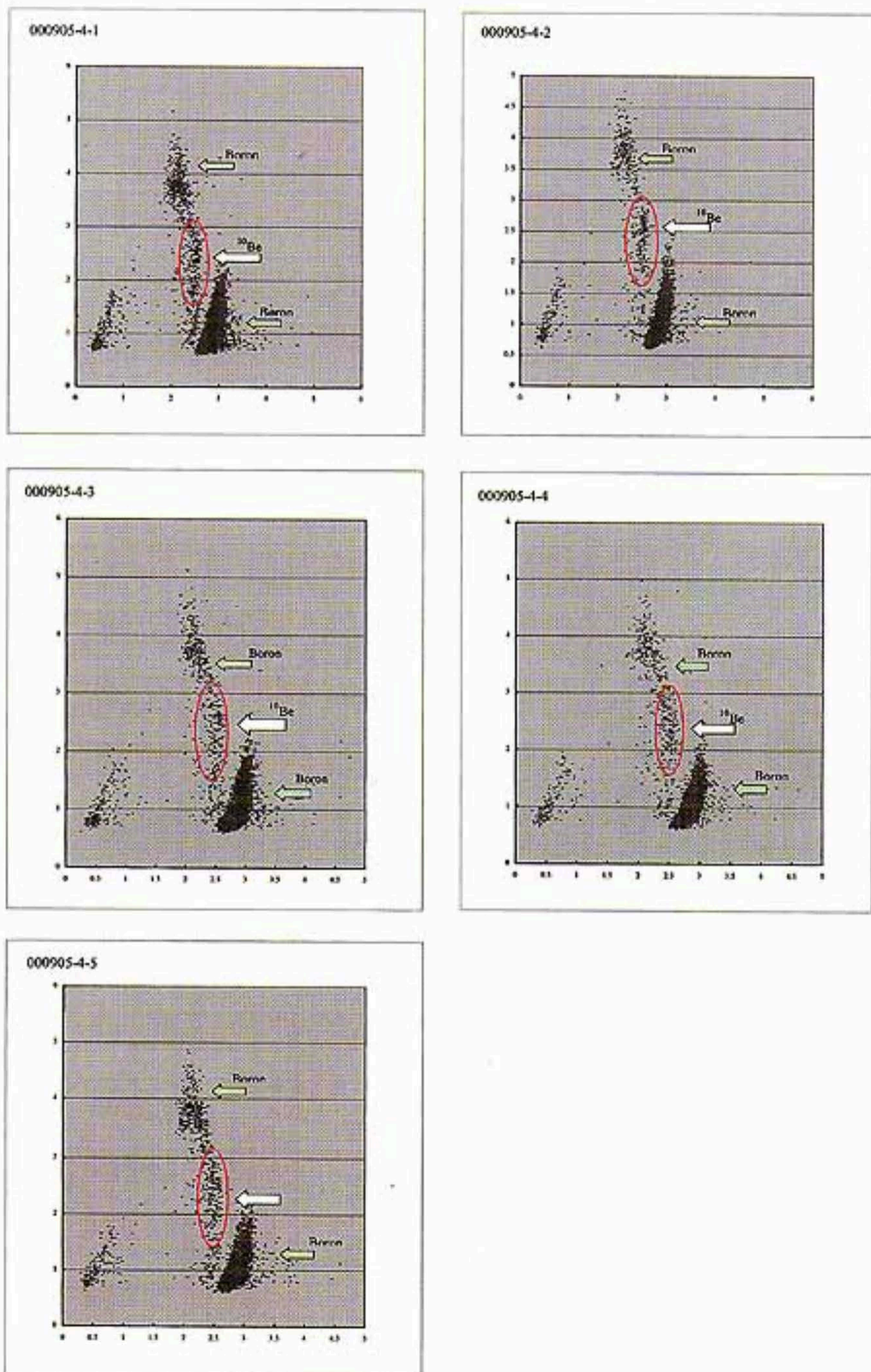


Fig. 5-b : The spectrum of no. 000905-4 by AMS.  
 The red circle based on a standard (Fig. 5-a).  
 Points in the circle by  $^{10}\text{Be}$ . Points out of the circle by Boron.  
 cycle: 600, live time: 60 second.

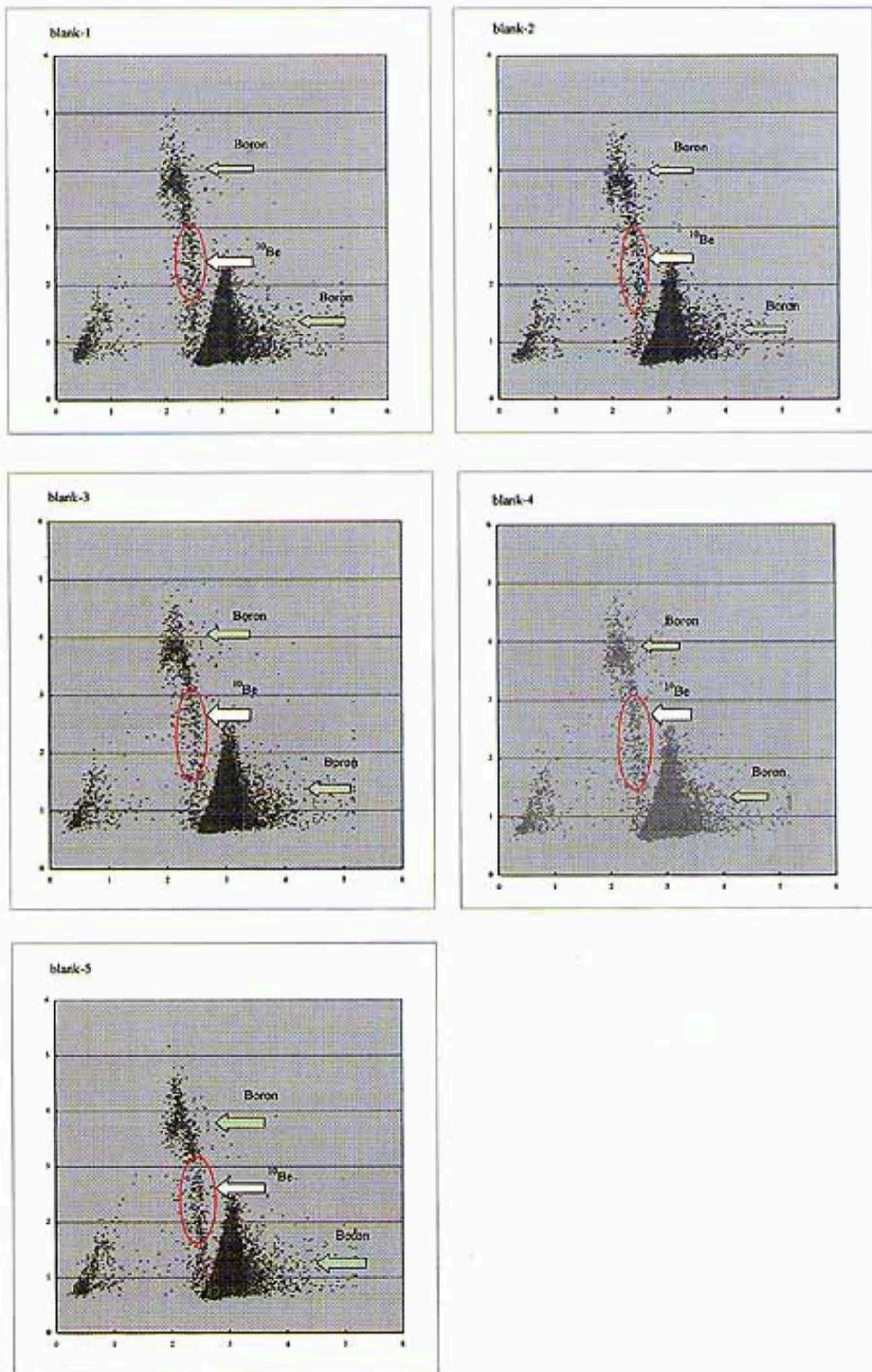


Fig. 5-c : The spectrum data of the blank by AMS connected with no. 000905-4. The red circle based on a standard (Fig. 5-a). Points in the circle by  $^{10}\text{Be}$ . Points out of the circle by Boron. cycle; 2,400, live time; 240 second.

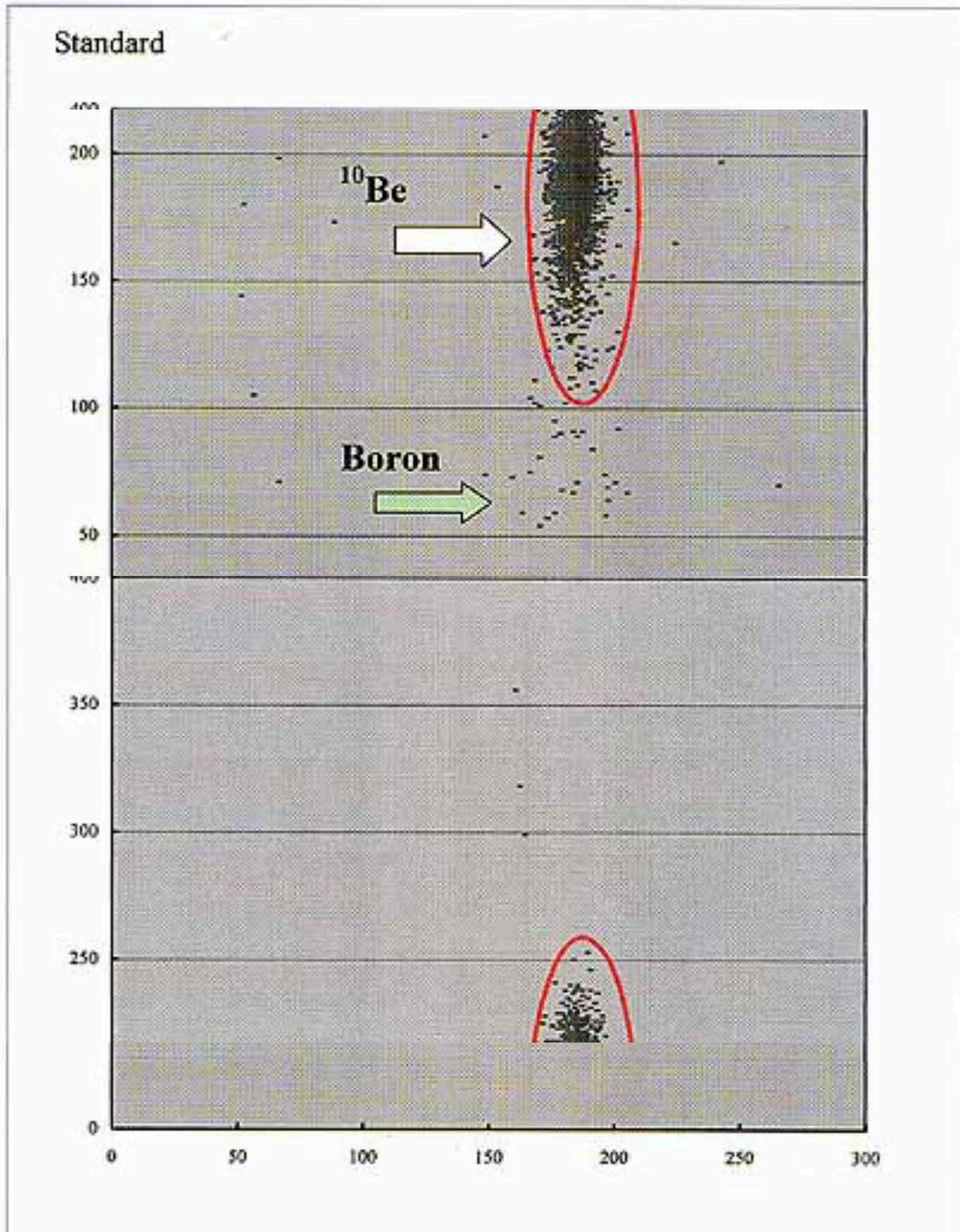


Fig. 6-a : The spectrum of a standard by AMS connected with no. 010324-2.  
 Points in the red circle by  $^{10}\text{Be}$ . Points out of the circle by Boron.  
 cycle: 500, live time: 50 second.

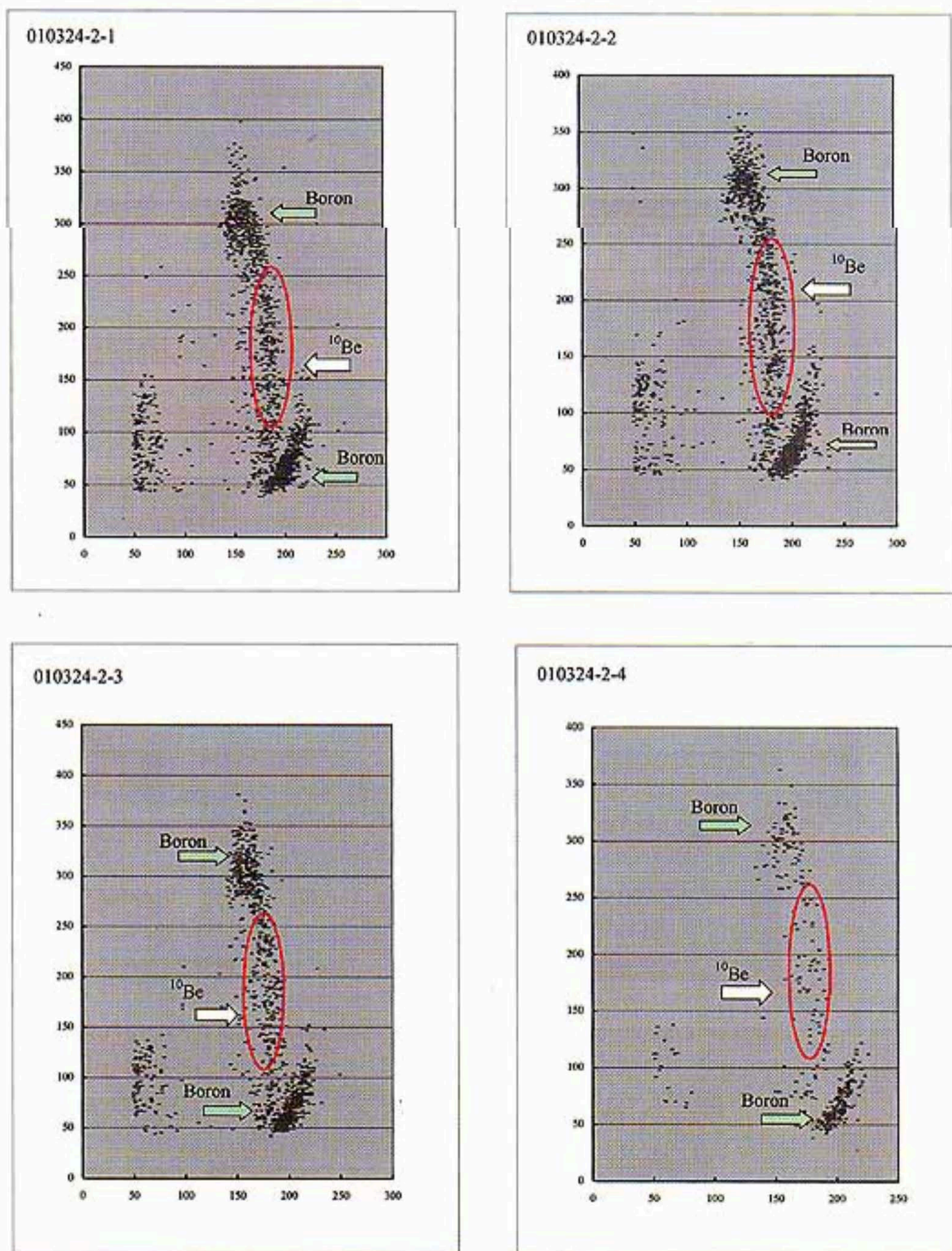


Fig. 6-b : The spectrum data of no. 010324-2 by AMS.  
 The red circle based on a standard (Fig. 5-a).  
 Points in the circle by  $^{10}\text{Be}$ . Points out of the circle by Boron.  
 cycle: 6,000, live time: 600 second.

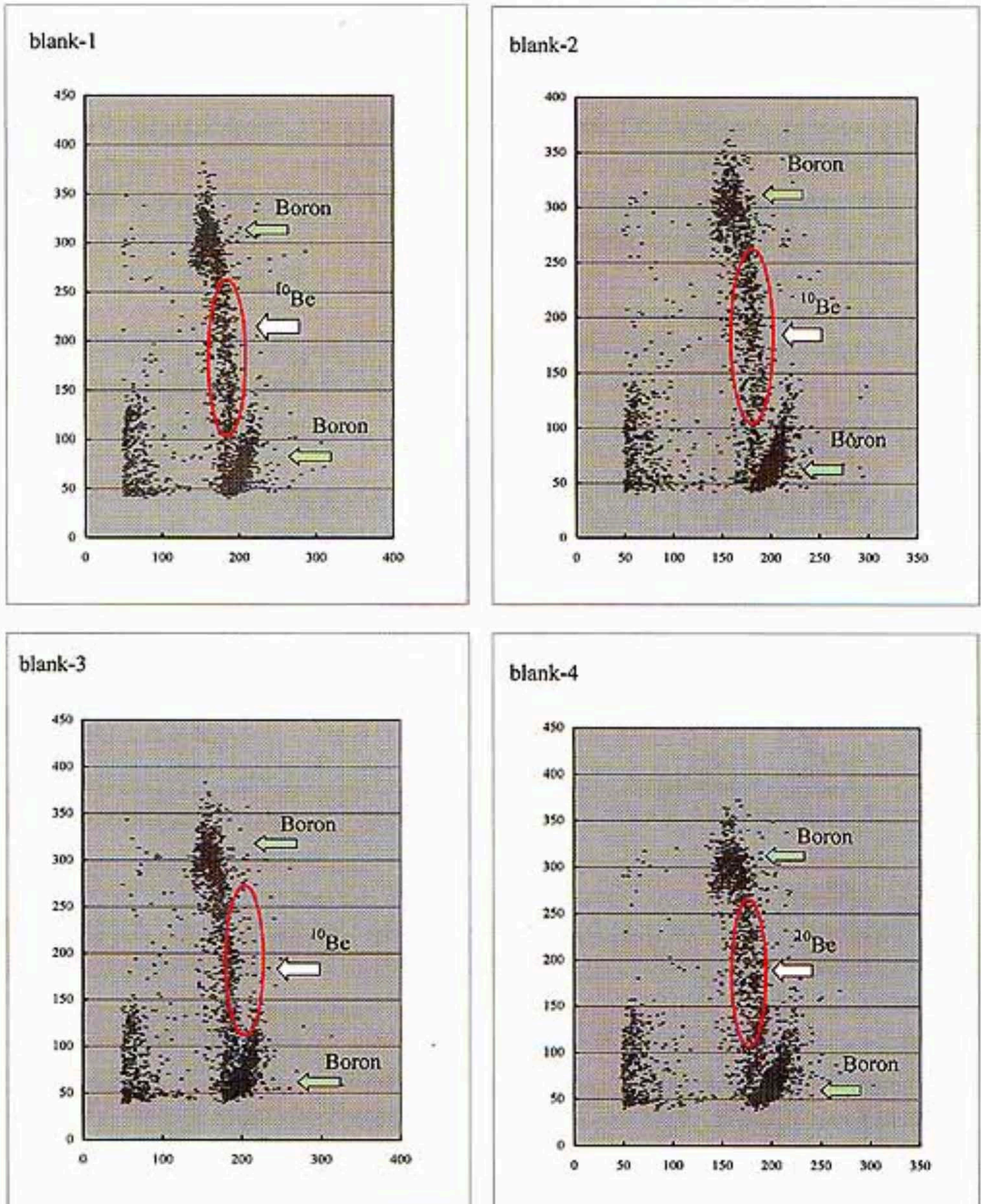


Fig. 6-c : The spectrum data of the blank by AMS connected with no. 010324-2.  
 The red circle based on a standard (Fig. 6-a).  
 Points in the circle by  $^{10}\text{Be}$ . Points out of the circle by Boron.  
 cycle: 3,000, live time: 300 second.

#### 4-2. $^{26}\text{Al}$ の測定結果

岩石中で  $^{10}\text{Be}$  と同様に、 $^{26}\text{Al}$  が生成される。そこで、 $^{10}\text{Be}$  と比較することで、サンプル岩石の露出年代をチェックすることができるはずである。そこで  $^{26}\text{Al}$  測定を行なった。岩石中での  $^{26}\text{Al}$  の生成率は  $^{10}\text{Be}$  の約6倍である (Lal, 1991)。しかし、岩石中の Al 存在度は Be の1000倍以上あるので、 $^{26}\text{Al}$  の検出は  $^{10}\text{Be}$  に比べてかなり難しいとされている (兼岡, 1998)。

AMS による測定を行なった試料の結果は Table 12-15 のようである。そのうち、久部良で得られた試料については、 $^{26}\text{Al} / ^{27}\text{Al}$  が AMS による測定限界を超えてしまったため、測定結果が得られなかった。従って、それらについては試料中の  $^{26}\text{Al}$  濃度が低かったことが考えられる。また測定データより、試料 no. 020301-V については Al が検出されなかったため、試料の精製段階において Al の回収に失敗した可能性も示唆される。

#### 4-3. $^{10}\text{Be}$ および $^{26}\text{Al}$ 生成率

1. Lal (1991) に基づく  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の生成率：以上の測定結果より、生成率を求めた。露出期間の算出に用いた Lal (1991) に基づく各試料の  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の生成率を Table 6 に示す。生成率は、地磁気緯度と地理緯度の両者を用いて算出した。また、試料の傾斜角に対する補正も行なった。

日本列島周辺の地磁気緯度は、およそ [地理緯度 - 10度] である (古川, 1999)。この緯度の差より、 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$  それぞれについて地理緯度を用いて算出した Lal (1991) に基づく生成率は、地磁気緯度を用いて算出した生成率の約1.2倍の値を示した。

2. Stone (2000) に基づく  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の生成率：露出期間の算出に用いた Stone (2000) に基づく各試料の  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の生成率を Table 7 に示す。生成率は、地磁気緯度と地理緯度の両者を用いて算出した。また、試料の傾斜角に対する補正も行なった。

Stone (2000) に基づいて生成率を算出した場合においてもまた、地磁気緯度および地理緯度の差より、 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$  それぞれについて地理緯度を用いて算出した生成率は、地磁気緯度を用いて算出した生成率の約1.2倍の値を示した。

#### 4-4. $^{10}\text{Be}$ の露出年代

地磁気緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間：Lal (1991) および青木ほか (1998) に従い、地磁気緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間を Table 8 に示す。

##### 1) 「遺跡ポイント」および新川鼻

「遺跡ポイント」の試料について試料 no. 010324-2 が約1,600 ± 400年間、試料 no. 020228-T が約80 ± 350年間、試料 no. 020301-V が約3,000 ± 14,000年間露出していたという結果が得られた。また、新川鼻の試料である、試料 no. 010802-Q3 が約2,200 ± 300年間露出していたという結果が得られた。

##### 2) 久部良

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約82,000 ± 7,000年間、試料 no. 000905-2-R が約86,000 ± 7,000年間、試料 no. 000905-4 が約4,400 ± 1,800年間露出していたという結果が得られた。

地理緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間: Nishiizumi *et al.* (1996) に従い、地理緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間を Table 9 に示す。

1) 「遺跡ポイント」および新川鼻

「遺跡ポイント」の試料について試料 no. 010324-2 が約  $1,300 \pm 300$  年間、試料 no. 020228-T が約  $60 \pm 300$  年間、試料 no. 020301-V が約  $2,400 \pm 11,000$  年間露出していたという結果が得られた。また、新川鼻の試料である、試料 no. 010802-Q3 が約  $1,800 \pm 200$  年間露出していたという結果が得られた。

2) 久部良

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約  $67,000 \pm 5,000$  年間、試料 no. 000905-2-R が約  $70,000 \pm 5,500$  年間、試料 No. 000905-4 が約  $3,600 \pm 1,400$  年間露出していたという結果が得られた。

地磁気緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間: 地磁気緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間を Table 10 に示す。

1) 「遺跡ポイント」および新川鼻

「遺跡ポイント」の試料について試料 no. 010324-2 が約  $1,800 \pm 500$  年間、試料 no. 020228-T が約  $90 \pm 400$  年間、試料 no. 020301-V が約  $3,300 \pm 16,000$  年間露出していたという結果が得られた。また、新川鼻の試料である、試料 no. 010802-Q3 が約  $2,500 \pm 300$  年間露出していたという結果が得られた。

2) 久部良

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約  $93,000 \pm 9,000$  年間、試料 no. 000905-2-R が約  $98,000 \pm 9,000$  年間、試料 no. 000905-4 が約  $5,000 \pm 2,000$  年間露出していたという結果が得られた。

地理緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間: 地理緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{10}\text{Be}$  の露出期間を Table 11 に示す。

1) 「遺跡ポイント」および新川鼻

「遺跡ポイント」の試料について試料 no. 010324-2 が約  $1,600 \pm 400$  年間、試料 no. 020228-T が約  $70 \pm 350$  年間、試料 no. 020301-V が約  $2,800 \pm 13,000$  年間露出していたという結果が得られた。また、新川鼻の試料である、試料 no. 010802-Q3 が約  $2,200 \pm 250$  年間露出していたという結果が得られた。

2) 久部良

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約  $79,000 \pm 7,000$  年間、試料 no. 000905-2-R が約  $83,000 \pm 7,500$  年間、試料 no. 000905-4 が約  $4,300 \pm 1,800$  年間露出していたという結果が得られた。

以上の結果を基に、Lal (1991) に基づき算出した地磁気緯度、地理緯度での  $^{10}\text{Be}$  露出期間および Stone (2000) に基づき算出した地磁気緯度、地理緯度での  $^{10}\text{Be}$  露出期間を試料毎に示したグラフを Fig. 7~13 に示す。図に示すように、どの条件で露出期間を算出するかによって、結果に差が生じた。



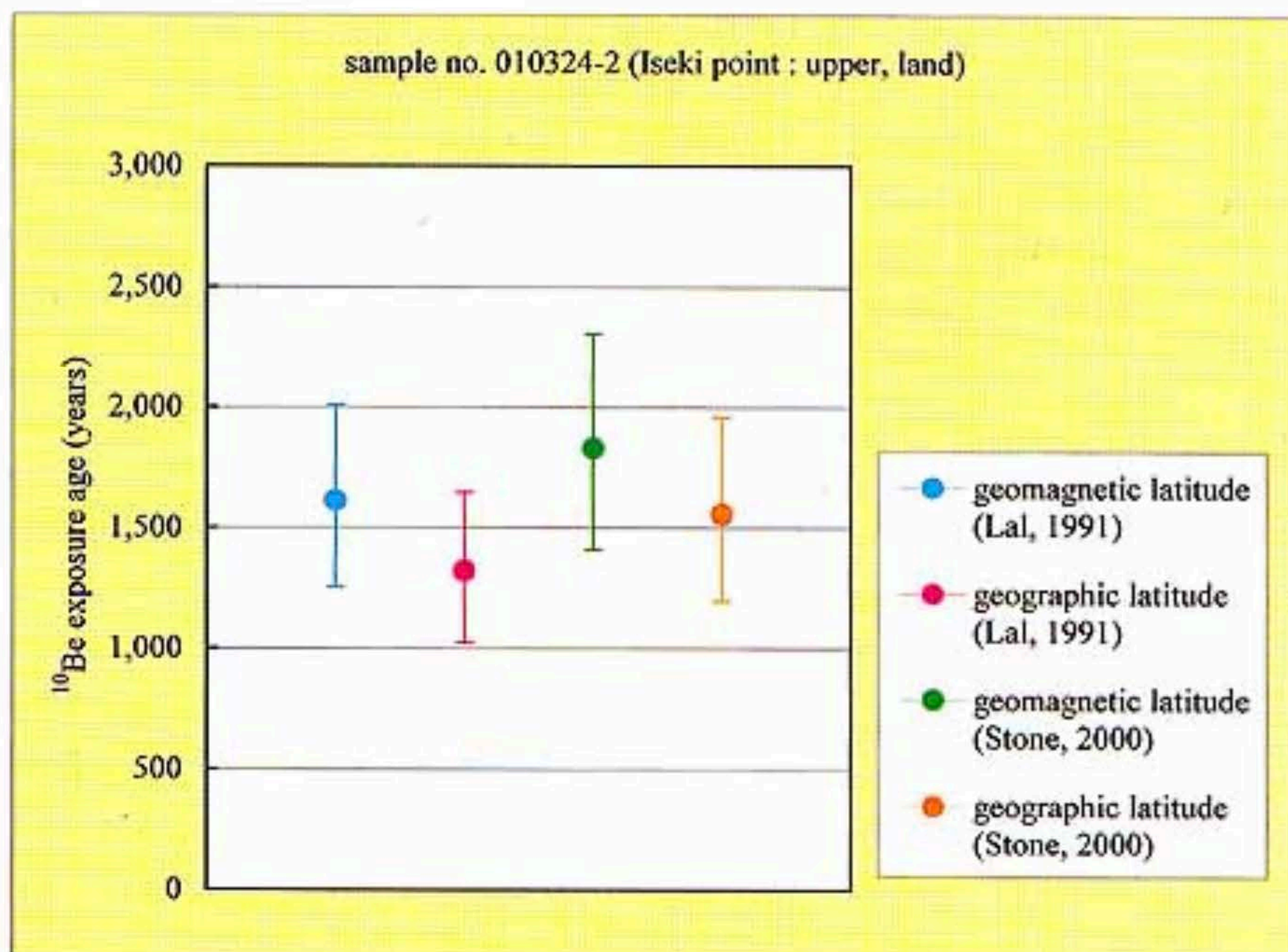


Fig. 7 : Calculated  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages for no. 010324-2.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

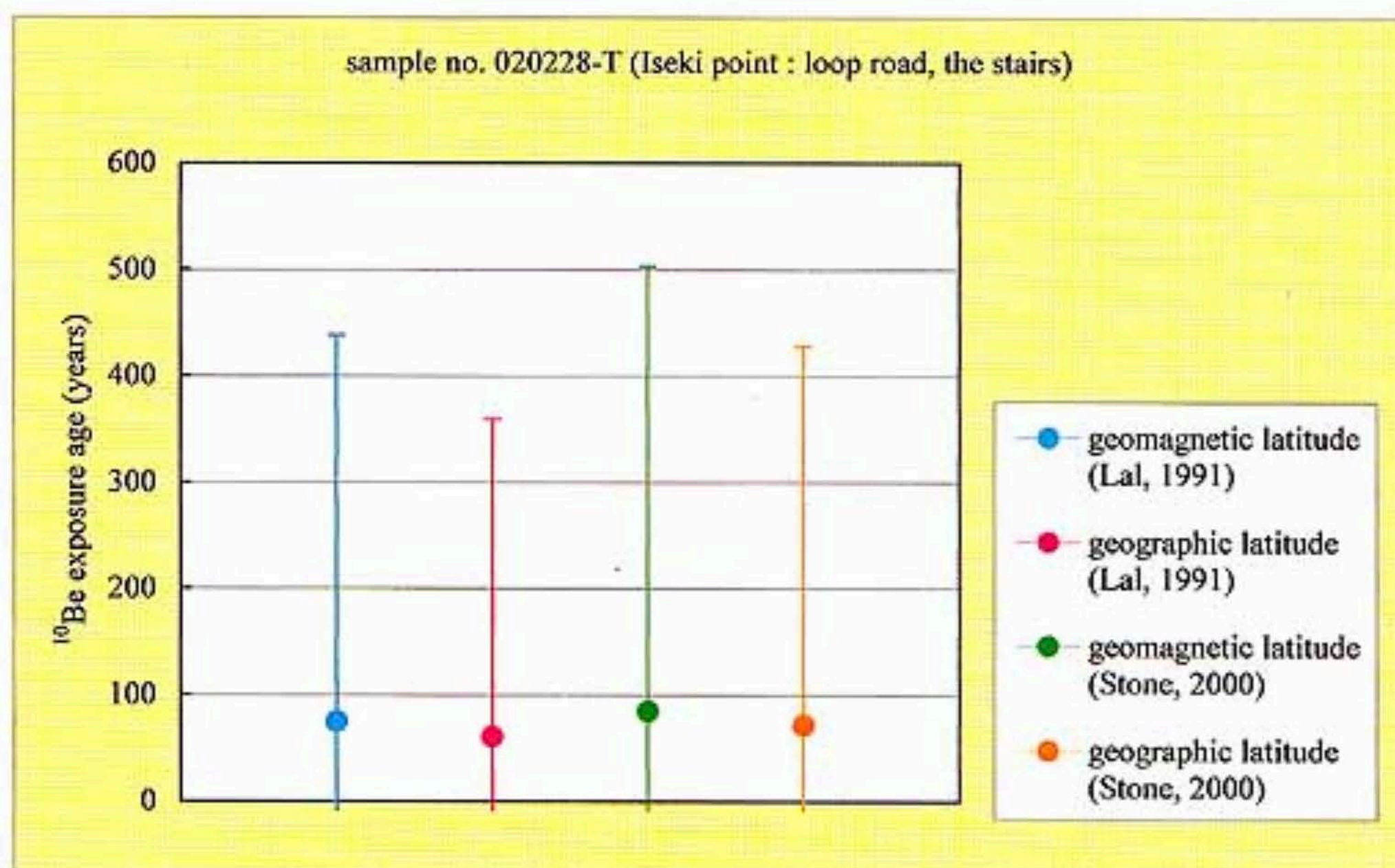


Fig. 8 : Calculated  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages for no. 020228-T.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

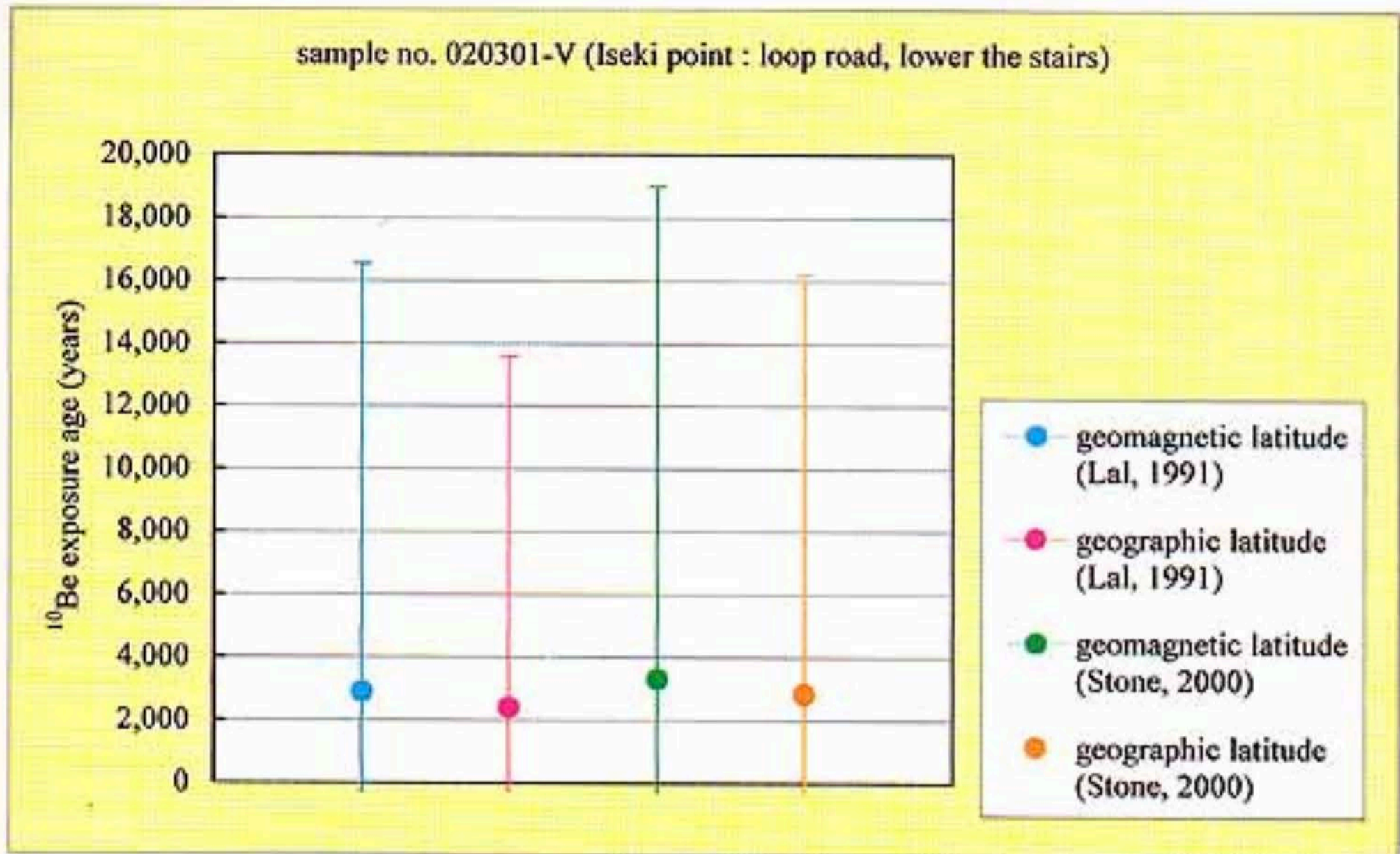


Fig. 9 : Calculated  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages for no. 020301-V.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

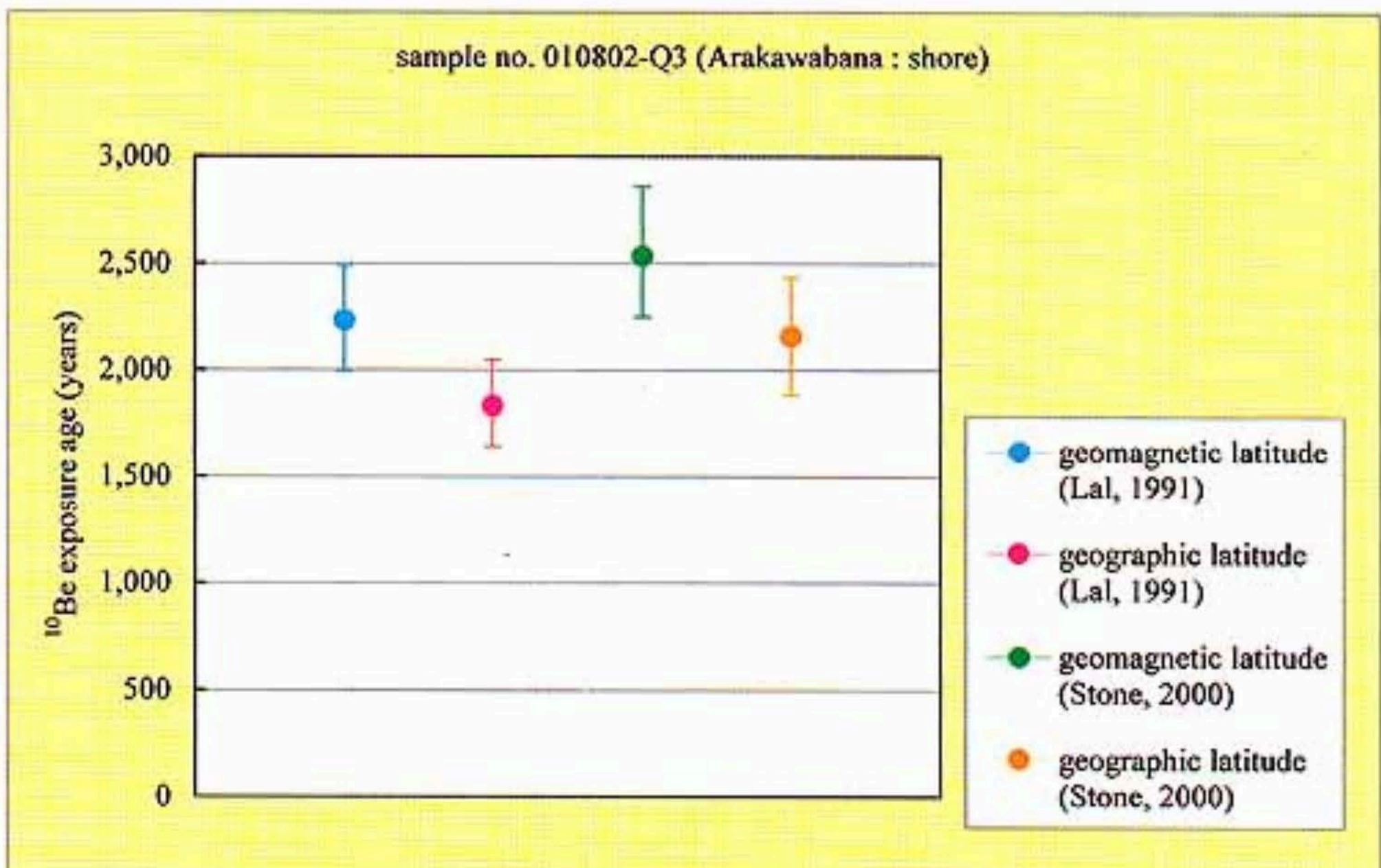


Fig. 10 : Calculated  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages for no. 010802-Q3.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

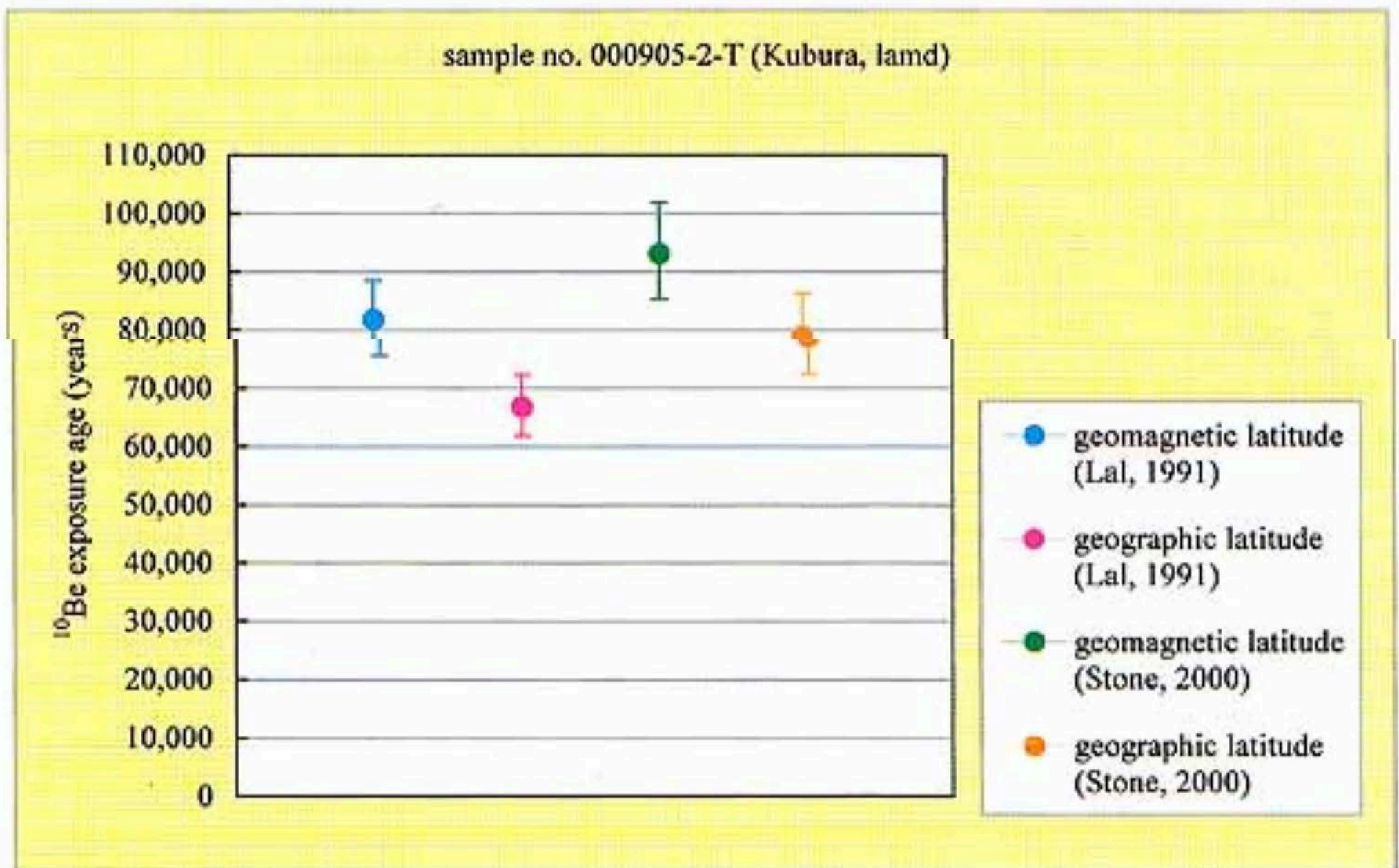


Fig. 11 : Calculated  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages for no. 000905-2-T.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

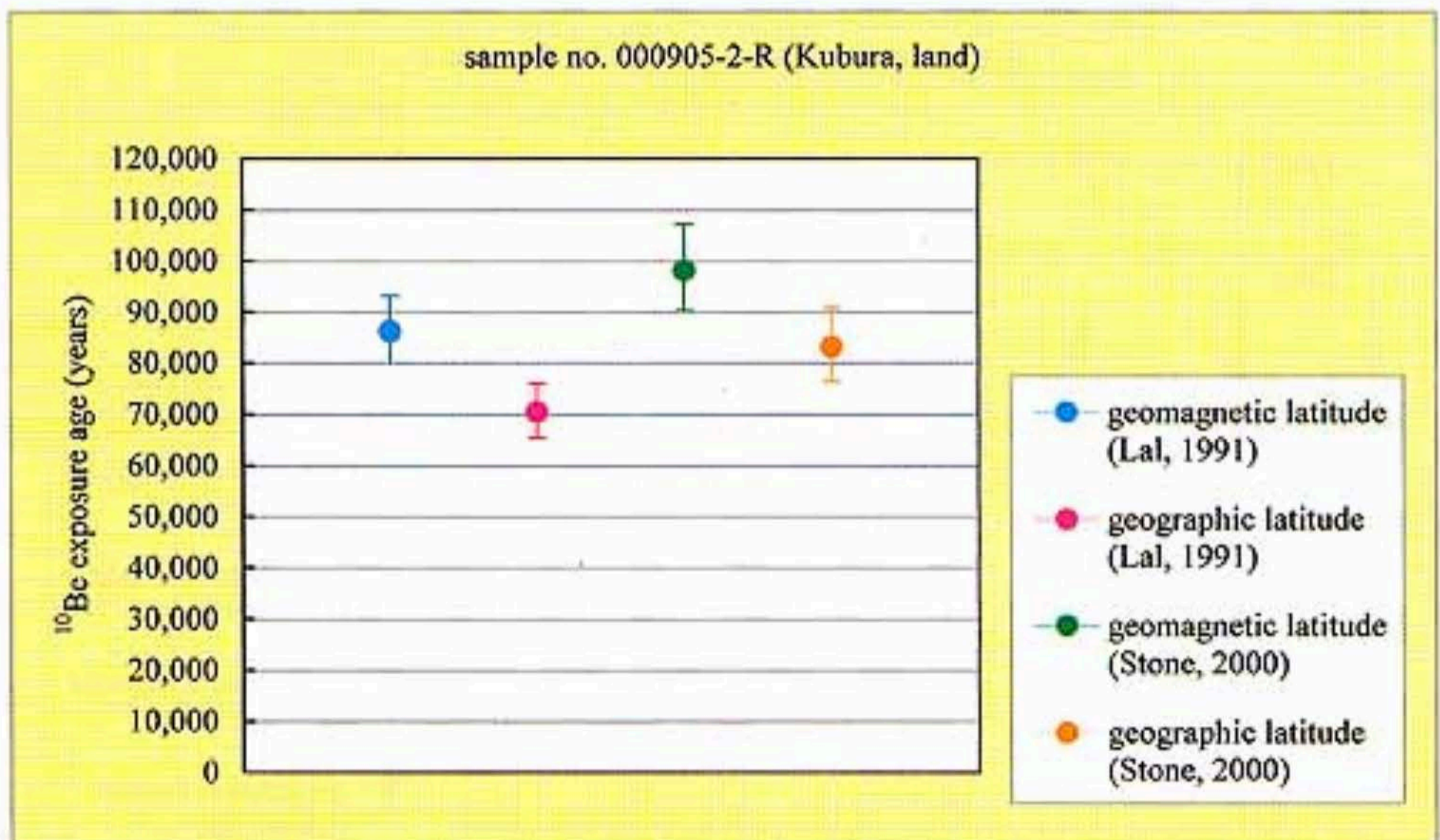


Fig. 12 : Calculated  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages for no. 000905-2-R.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

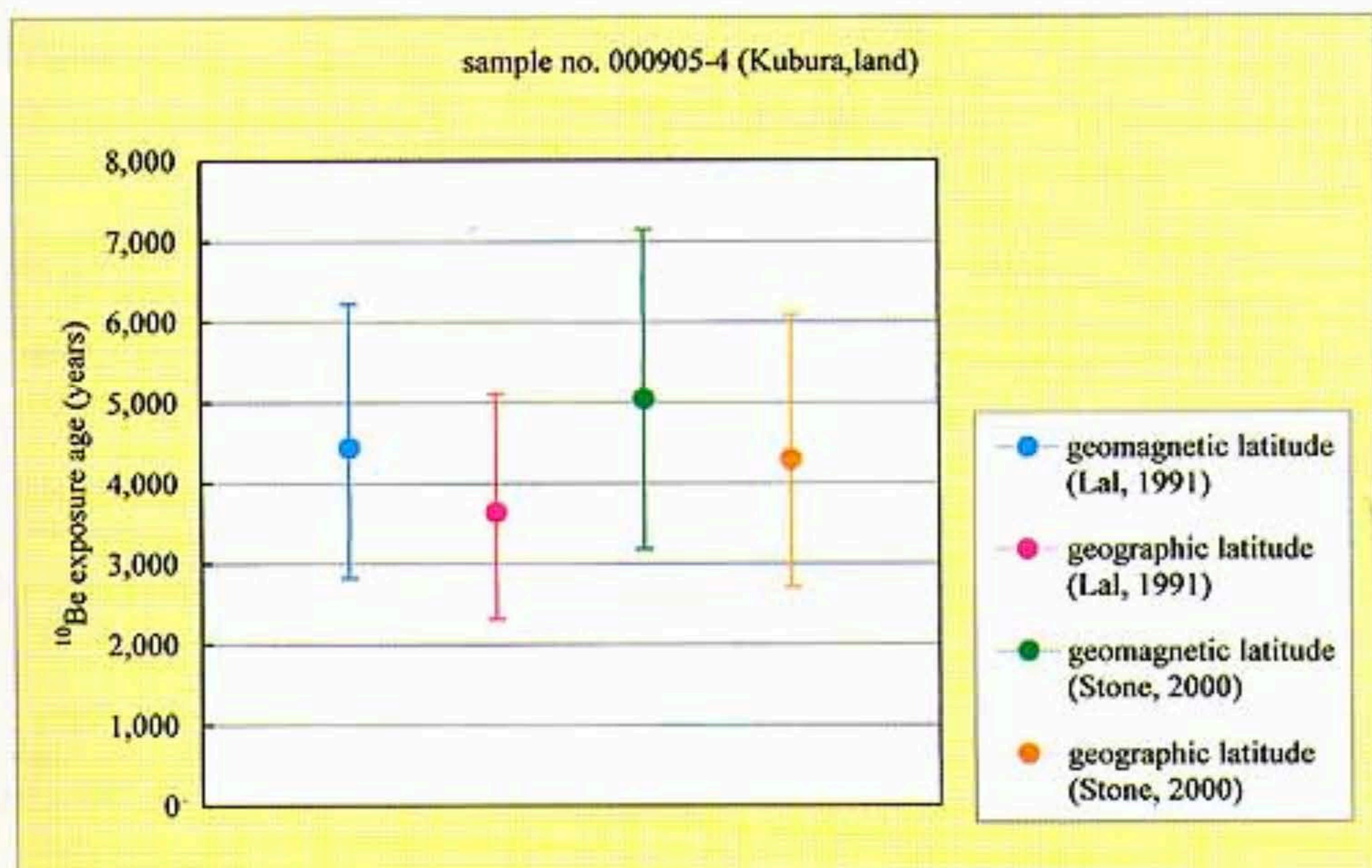


Fig. 13 : Calculated  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages for no. 000905-4.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

#### 4-5. $^{26}\text{Al}$

地磁気緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間：地磁気緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間を Table 12 に示す。

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約  $76,000 \pm 26,000$  年間、試料 no. 000905-2-R が約  $71,000 \pm 23,000$  年間露出していたという結果が得られた。

地理緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間：地理緯度を用いた Lal (1991) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間を Table 13 に示す。

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約  $64,000 \pm 22,000$  年間、試料 no. 000905-2-R が約  $60,000 \pm 20,000$  年間露出していたという結果が得られた。

地磁気緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間：地磁気緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間を Table 14 に示す。

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約  $91,000 \pm 30,000$  年間、試料 no. 000905-2-R が約  $85,000 \pm 27,000$  年間露出していたという結果が得られた。

地理緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間：地理緯度を用いた Stone (2000) に基づく  $^{26}\text{Al}$  の露出期間を Table 15 に示す。

久部良の試料について試料 no. 000905-2-T が約  $77,000 \pm 25,000$  年間、試料 no. 000905-2-R が約  $72,000 \pm 22,000$  年間露出していたという結果が得られた。

以上の結果を基に、Lal (1991) に基づき算出した地磁気緯度、地理緯度での  $^{26}\text{Al}$  露出期間および Stone (2000) に基づき算出した地磁気緯度、地理緯度での  $^{26}\text{Al}$  露出期間を試料毎に示したグラフを Fig. 14 および Fig. 15 に示す。

Table 12 : Measured  $^{26}\text{Al}$  by AMS and calculated exposure ages based on geomagnetic latitude following by Lal (1991).

sample no.	$^{27}\text{Al}$ ( $10^{18}$ atoms/g)	measured $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{26}\text{Al}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{26}\text{Al}$ age by geomagnetic latitude, Lal (years)
000905-2-T	4.654	$0.367 \pm 0.084$	$170.80 \pm 39.28$	23	$76,252 \pm 26,133 - 22,180$
000905-2-R	5.079	$0.315 \pm 0.069$	$159.99 \pm 35.20$	22	$71,251 \pm 23,332 - 19,852$

error of production rate:  $\pm 7\%$

Table 13 : Measured  $^{26}\text{Al}$  by AMS and calculated exposure ages based on geographic latitude following by Lal (1991).

sample no.	$^{27}\text{Al}$ ( $10^{18}$ atoms/g)	measured $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{26}\text{Al}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{26}\text{Al}$ age by geographic latitude, Lal (years)
000905-2-T	4.654	$0.367 \pm 0.084$	$170.80 \pm 39.28$	23	$64,444 \pm 21,911 - 18,669$
000905-2-R	5.079	$0.315 \pm 0.069$	$159.99 \pm 35.20$	22	$60,240 \pm 19,583 - 16,718$

error of production rate:  $\pm 7\%$

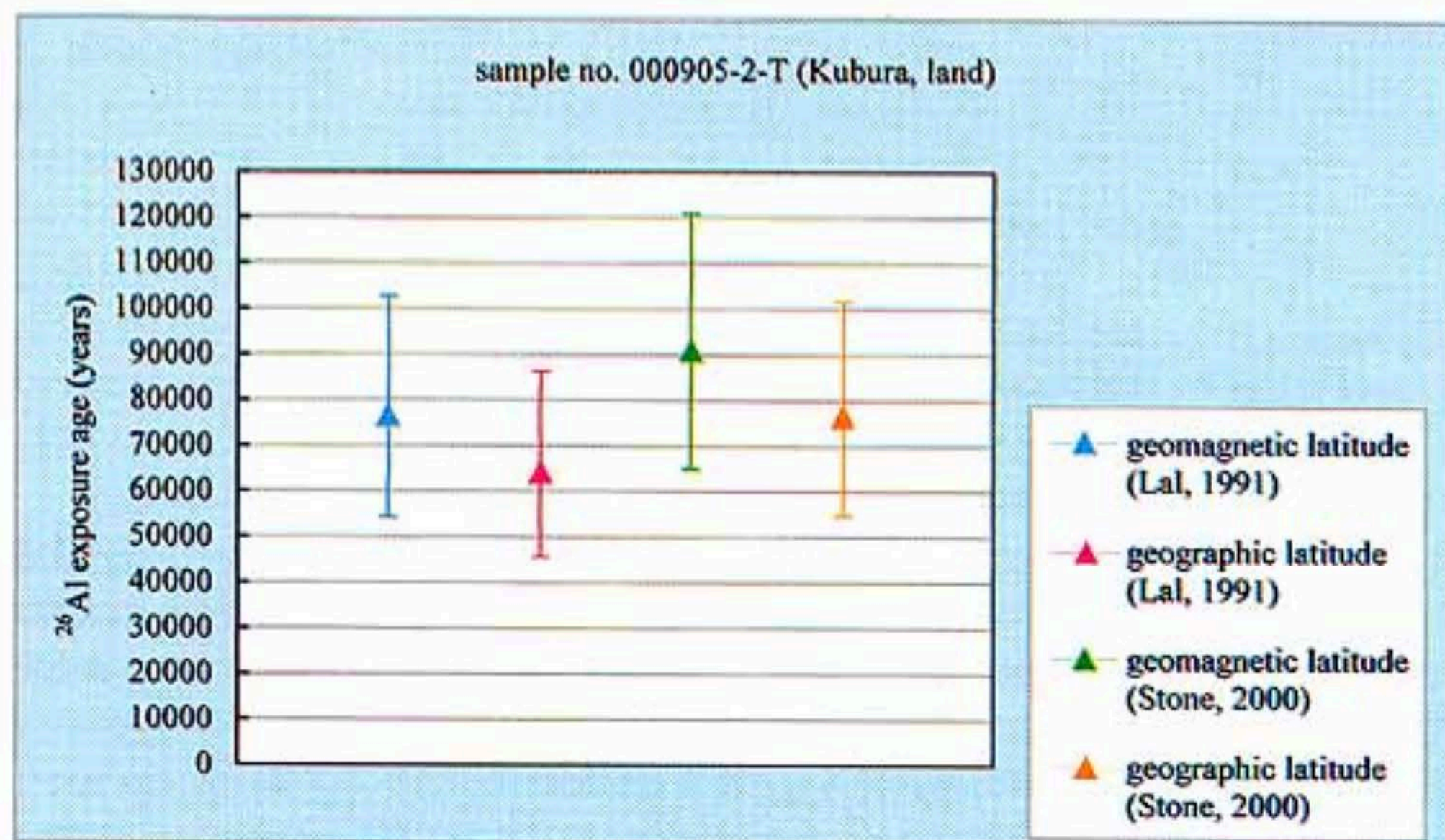
Table 14 : Measured  $^{26}\text{Al}$  by AMS and calculated exposure ages based on geomagnetic latitude following by Stone (2000).

sample no.	$^{27}\text{Al}$ ( $10^{18}$ atoms/g)	measured $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{26}\text{Al}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{26}\text{Al}$ age by geomagnetic latitude, Stone (years)
000905-2-T	4.654	$0.367 \pm 0.084$	$170.80 \pm 39.28$	23	$90,602 \pm 29,975 - 25,863$
000905-2-R	5.079	$0.315 \pm 0.069$	$159.99 \pm 35.20$	22	$84,620 \pm 26,692 - 23,097$

error of production rate:  $\pm 6\%$

Table 15 : Measured  $^{26}\text{Al}$  by AMS and calculated exposure ages based on geographic latitude following by Stone (2000).

sample no.	$^{27}\text{Al}$ ( $10^{18}$ atoms/g)	measured $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ( $10^{-12}$ )	calculated $^{26}\text{Al}$ concentration ( $10^4$ atoms/g)	error (%)	$^{26}\text{Al}$ age by geographic latitude, Stone (years)
000905-2-T	4.654	$0.367 \pm 0.084$	$170.80 \pm 39.28$	23	$76,575 \pm 25,098 - 21,751$
000905-2-R	5.079	$0.315 \pm 0.069$	$159.99 \pm 35.20$	22	$71,552 \pm 22,376 - 19,439$

error of production rate:  $\pm 6\%$ Fig. 14 : Calculated  $^{26}\text{Al}$  surface exposure ages for no. 000905-2-T.

The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

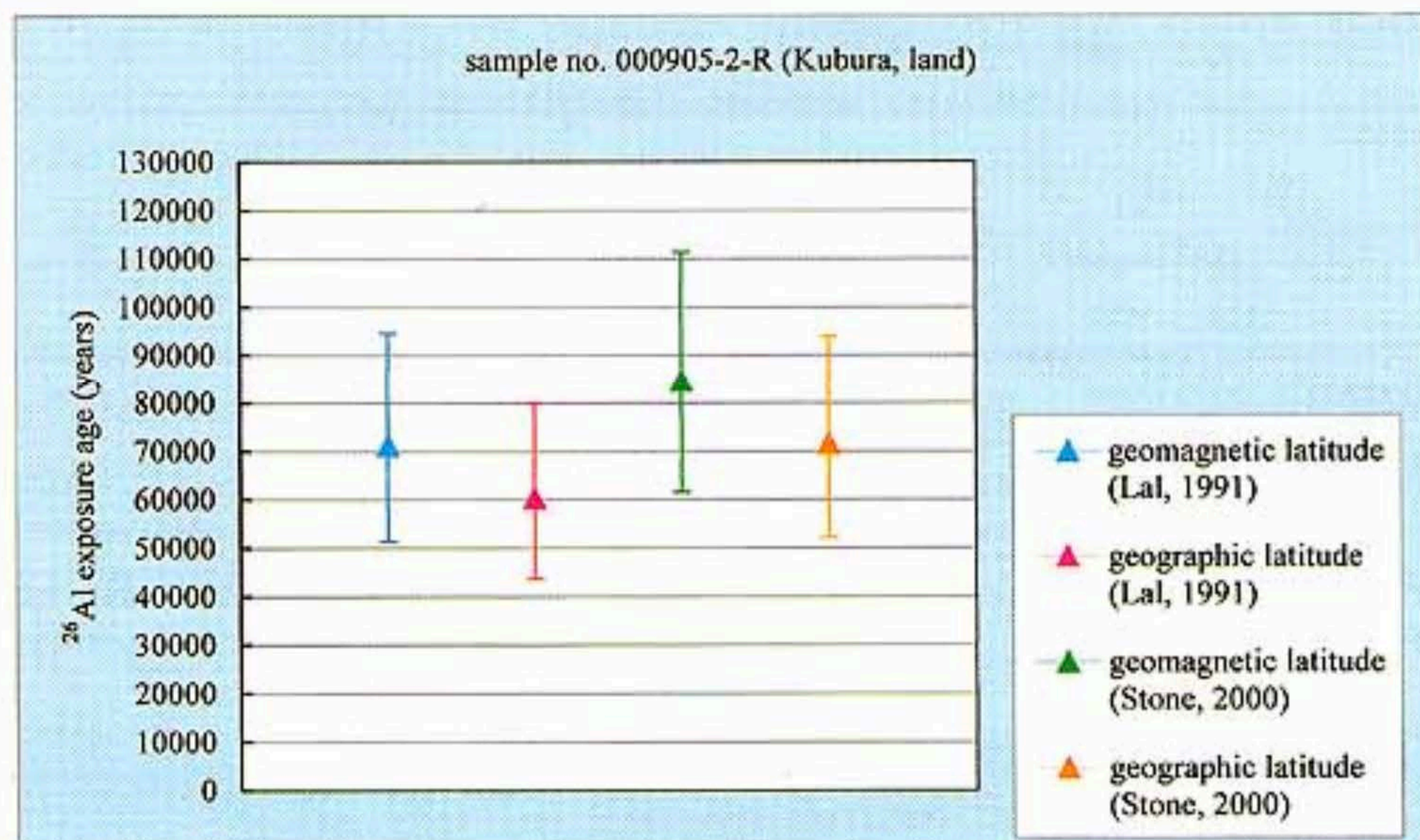


Fig. 15 : Calculated  $^{26}\text{Al}$  surface exposure ages for no. 000905-2-R.  
The vertical bars show errors by the measurement and production rates.

## 5. 考察

### 5-1. 測定精度についての考察

本研究では、表面照射年代測定を行なうために、現在までに採取した試料の中から14試料を選定した。しかし、そのうち AMS による測定まで至った試料は9試料、測定結果が得られた試料については  $^{10}\text{Be}$  で6試料、 $^{26}\text{Al}$  で2試料である。そこで、測定まで至らなかった試料、および測定までは至ったが測定結果の得られなかった試料についてその原因を考察する。

まず、試料の精製段階における要因である。試料 no. 000518-F、000518-H、001020-Kについては、試料を粉砕した時点で粒度が細かすぎるため分析が不可能であることが判明した。試料 no. 000518-G、010228-U については、塩酸による酸処理後、石英の抽出が不可能であることが判明した。このように、岩質によっては測定が制限される場合がある。

試料 no. 010506-1 については、 $^{10}\text{Be}$  測定結果より、Be のイオン電流があまり出ていないことから、試料の精製段階で、Be を回収できなかったことが想定できる。

試料 no. 000520-J については、 $^{10}\text{Be}$  測定において試料に対する実験ブランクの測定がうまくいかなかったため、測定結果の得られた別の試料に対する実験ブランクのうち、値の最も大きいものを使用して補正を行なった。その結果、試料の測定値が負の値になってしまったため、その結果を用いて解析ができなかった。つまり、イオン交換法によるBeの分離、精製の段階でこの試料に対する実験ブランクのBeの回収に失敗したことが、この試料について正確な結果を得ることができなかった原因である。

試料 no. 000905-4 および 010324-2 については、 $^{10}\text{Be}$  測定結果は得られたものの、試料の精製

段階において<sup>10</sup>Beの測定を妨害するホウ素の除去が不十分であったため、測定に影響が及んだと考えられる。これは、硝酸、フッ酸、過塩素酸を用いて石英を溶解する際に、この2試料については長時間閉鎖系の状態で実験を行なったことが原因であるかもしれない。通常、石英を溶解する際はテフロンビーカーに試料を入れ、開放系の状態で溶解および蒸発、乾固を繰り返す。しかしこの2試料については、テフロンビーカーの上にテフロン製の時計皿で蓋をし、閉鎖系の状態で石英の溶解速度を速めようと試みた。その結果、ホウ素が十分に揮発せず、試料に残った状態になったと考えられる。

試料 no. 020301-V については、AMS による<sup>10</sup>Beの測定誤差が100%を超えた。これは、試料の<sup>10</sup>Be量が少ないことにより、<sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Beが小さくなったことが原因であると考えられる。そのため、測定誤差の影響を強く受けた。その原因については、この試料の酸溶解時において分析する石英量が極端に少なくなってしまうこと、つまり、<sup>10</sup>Be量が減ってしまったことにあると考えられる。

試料 no. 020228-T についても、AMS による<sup>10</sup>Beの測定誤差が100%を超えた。この試料についても、<sup>10</sup>Be量が少ないことにより、<sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Beが小さくなったことが原因であると考えられ、そのため、測定誤差の影響を強く受けた。その要因については、試料 no. 020228-T は精製した石英量も十分にあることから、試料の露出期間が短い可能性が考えられる。

<sup>26</sup>Alの測定に関しては、試料 no. 000905-2-T および 00090502-R を除いた全ての試料において、測定結果が得られなかった。これは、<sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>AlがAMSによる測定限界を超えてしまったことが原因であると考えられ、<sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Alが小さすぎた可能性が示唆される。つまり、宇宙線照射により岩石中に生成された石英中の<sup>26</sup>Alが多過ぎたことが第一の原因ということが考えられ、従って測定限界を超えてしまった試料については、<sup>10</sup>Be測定結果に基づく露出期間が数千年以下であるということを示唆するのではないだろうか。

以上により、露出期間が数千年以下の試料については表面照射年代測定法に基づいた<sup>26</sup>Alの測定が難しいことが明らかになった。しかし、試料 no. 000905-2-T および 00090502-R については測定結果が得られたことから、露出期間が数万年以上の試料については表面照射年代測定法に基づいた<sup>26</sup>Alの測定が可能であるということが言えるであろう。またこの2試料より<sup>10</sup>Be測定結果と相関する結果が得られたことおよび測定限界を超えてしまった試料についても、予想できる結果であったことから、試料精製からAMSによる測定に至るまでcontamination等の可能性が無いことが明らかになった。なお、試料 no. 020301-V については、測定結果よりAlのカレントがあまり出ていないことが示され、試料の精製段階においてAlの回収に失敗した可能性も示唆される。

#### 八重山層群の<sup>10</sup>Beおよび<sup>26</sup>Al含有量

本研究では、試料のバックグラウンドを明らかにするため、久部良より得られた与那国島八重山層群の試料 no. 000905-2, 000905-4 を選定し測定を行なった。測定結果から数千年～数万年という露出期間が算出され、陸上に長期露出していたサンプルについては大きな測定値が得られることが判明した。

そこで、与那国島における半減期に基づいた<sup>10</sup>Beの理想減衰線を Lal (1991) による式8に基づいて作成し、バックグラウンドによる露出期間への影響を予想した。まず、本研究の対象である八重山層群は、約2,300万年前～1,400万年前に堆積したとされている(矢崎, 1982)。また、八重山層群を緩やかな傾斜不整合で覆う琉球層群は約130万年前から堆積し始めたとされている。従って、



八重山層群は約130万年前までに約1,300万年間露出していた可能性が考えられる。次に、八重山層群の起源は古第三系以前の古陸にあるため、本層群堆積以前の露出による $^{10}\text{Be}$ の蓄積が考えられる。ここではその露出期間を、古第三系と八重山層群の間の不整合期(木崎, 1985)より約2,000万年と想定した。そこで、両者の可能性を考慮し、Fig. 17-aに露出期間を1,300万年間と想定した $^{10}\text{Be}$ 濃度が約130万年前の埋没期間によってどのように減衰していくか、Fig. 17-bに露出期間を2,000万年間と想定した $^{10}\text{Be}$ 濃度が約2,000万年前の埋没期間によってどのように減衰していくかを示し、バックグラウンドを予想した。

Fig. 17-aより、1,300万年前の露出期間後埋没し、130万年経過した石英中の $^{10}\text{Be}$ 濃度は、Lal (1991), 地磁気緯度で $381.2 \times 10^4 \text{atoms/g}$ 、Lal (1991), 地理緯度で $464.3 \times 10^4 \text{atoms/g}$ 、Stone (2000), 地磁気緯度で $335.5 \times 10^4 \text{atoms/g}$ 、Stone (2000), 地理緯度で $394.7 \times 10^4 \text{atoms/g}$ である。これらの値は、年代値に換算すると約140万年である。本研究で得られた測定結果ではこれより少ない $^{10}\text{Be}$ の値を示したことから、前者の期間における $^{10}\text{Be}$ の蓄積量は、本調査地域においては影響が無いと考えることができる。よって、後者の可能性を考慮する。

本研究で用いた試料は下部中新統八重山層群であるため、埋没期間を約2,000万年と想定し、その場合の試料に対する影響をFig. 18に示した。2,000万年前の露出期間後埋没し、2,000万年経過した石英中の $^{10}\text{Be}$ 濃度は、地磁気緯度で $0.081 \times 10^4 \text{atoms/g}$ 、地理緯度で $0.098 \times 10^4 \text{atoms/g}$  (Lal, 1991)、地磁気緯度で $0.071 \times 10^4 \text{atoms/g}$ 、地理緯度で $0.083 \times 10^4 \text{atoms/g}$  (Stone, 2000)である (Fig. 18)。これらの値は、年代値に換算すると約200~300年程度である。従って、バックグラウンドによる影響がこの程度であるならば、本研究において算出された露出期間の信頼性は高いと考えられる。しかし、ミューオンの地中への浸透等による影響を考えた場合、実際に測定を行ないバックグラウンドを明らかにすることは、今後の大きな課題と言えよう。

#### 表面照射年代測定法の低緯度、低標高地域への適用における問題

本研究において、表面照射年代測定法の低緯度、低標高地域の岩石試料への適用を試みた結果生じた問題について考察する。Stone (2000) は、あらゆる標高において気圧が標準気圧より20~40 hPa 低い南極における生成率をStone (2000) を用いて算出した場合、Lal (1991) を用いた場合より生成率が、25~30%高くなることを指摘している。本研究において、与那国島の「遺跡ポイント」を中心とした地点における生成率は、Stone (2000) を用いて算出した場合、Lal (1991) を用いた場合より約10~20%低くなった。この結果より、Stone (2000) は、低気圧(高標高)地域だけではなく、低標高地域における生成率にも大きな影響があると言える。つまり、これまでにLal (1991) に基づいて算出された露出期間が、低気圧(高標高)地域においては短くなる可能性、低標高地域においては長くなる可能性が考えられる。

従って、今後、生成率の算出にLal (1991) およびStone (2000) のどちらを用いるべきかを明らかにすることが重要である。また、生成率の算出に地磁気緯度および地理緯度のどちらを用いるべきかについても明らかにするべきであろう。さらに、生成率の算出に標高および気圧が大きく影響する可能性を考える場合、海底地形の露出期間を算出するにあたって、標高および気圧をどのように設定するかも重要な課題ではないだろうか。なお、海底における宇宙線レベルは非常に低く、実質的には無視できる程度であることが報告されている(古川, 1999)。

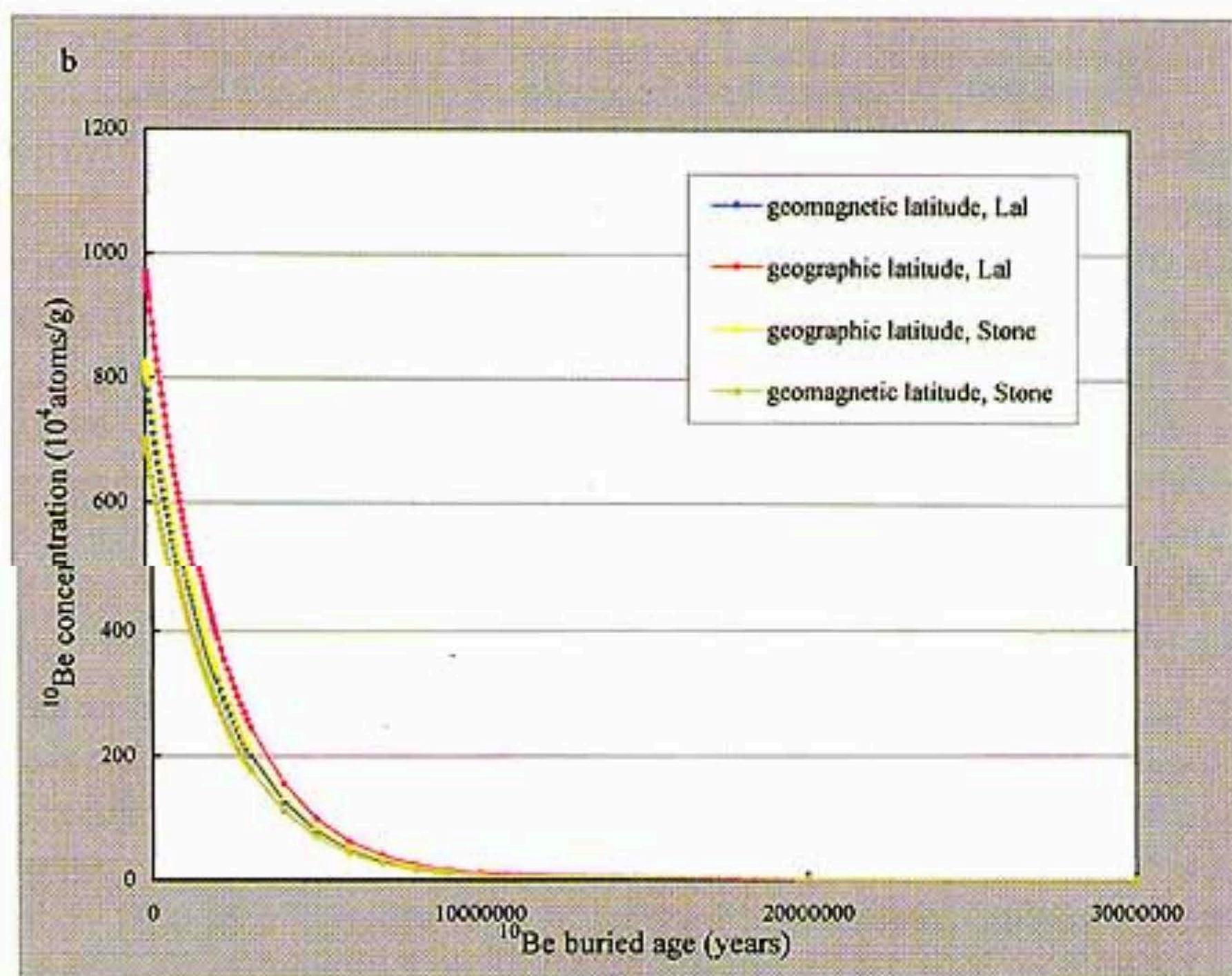
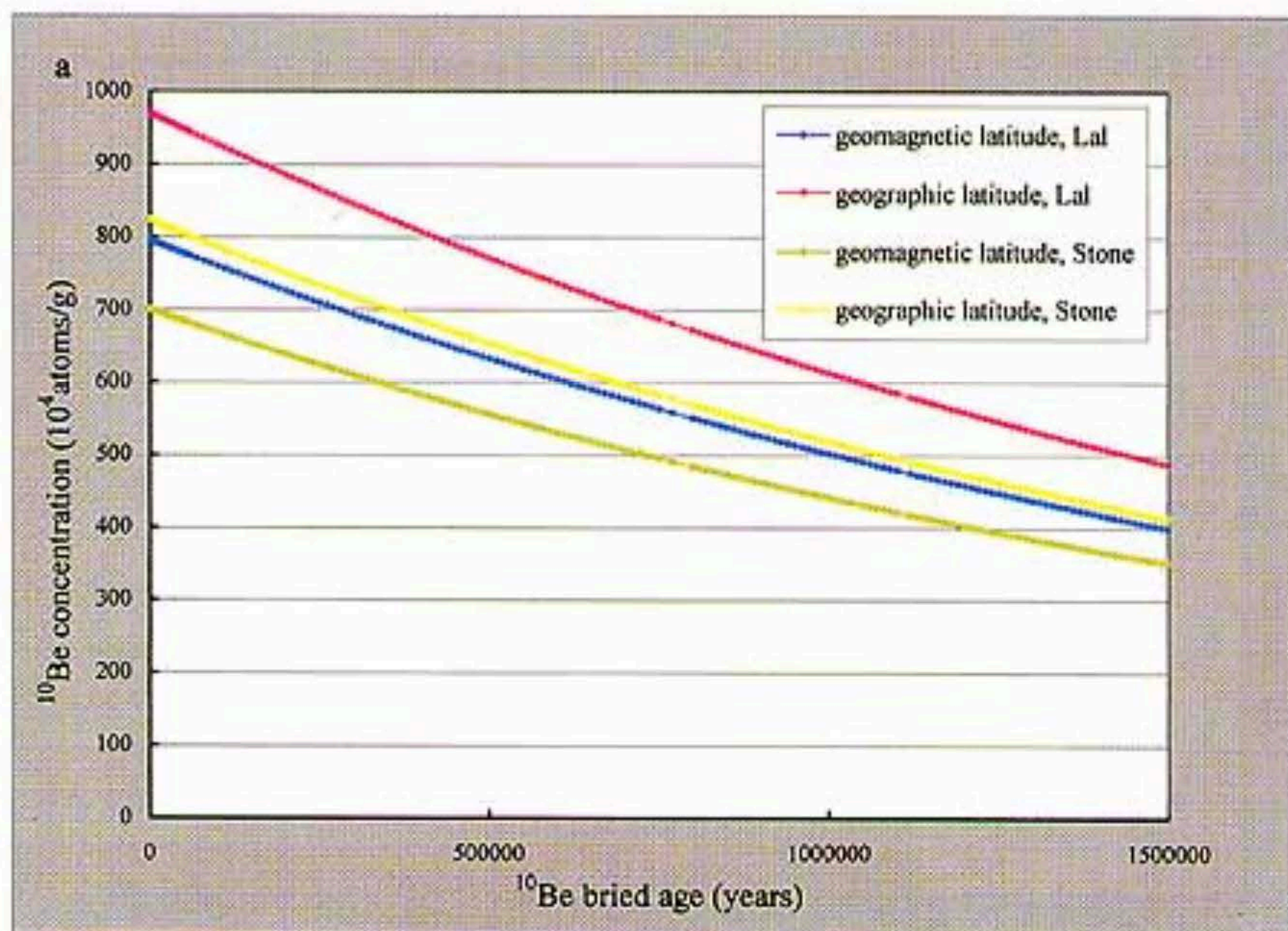


Fig. 17 : Ideal decaying curves of  $^{10}\text{Be}$  based on the equation 6 by Lal (1991) in Yonaguni Island.  
 a; exposure age is 13Ma, buried age is 1.3Ma.  
 b; exposure age is 20Ma, buried age is 20Ma.

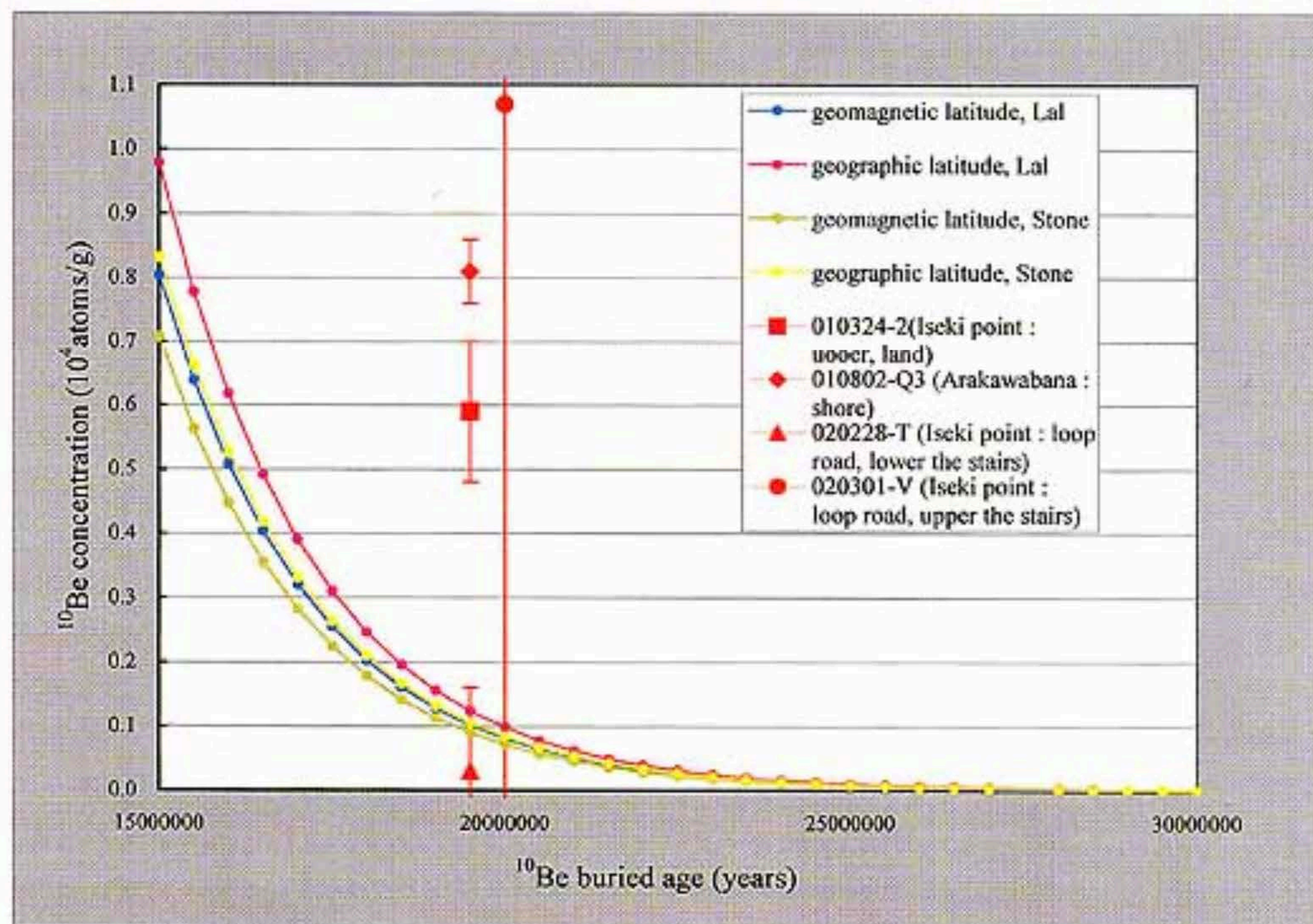


Fig. 18 : Ideal decaying curves of  $^{10}\text{Be}$  based on Lal (1991) in Yonaguni Island and measured  $^{10}\text{Be}$  concentrations for samples of Iseki point and the surrounding.

## 5-2. 与那国島海底地形の形成年代

前述のように、各試料採取地点の  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  の生成率算出に地磁気緯度、地理緯度のどちらを用いるか、また、Lal (1991)、Stone (2000) のどちらに基づくかによって、4つの露出期間が得られた。「遺跡ポイント」および新川鼻の試料について得られた露出期間を、Fig. 16に示す。

試料 no. 010324-2 は、「遺跡ポイント」上部より採取した試料である。ここは、現在陸上に露出している場所である (Photo 8)。また、海面に非常に近いことから、波による浸食の影響が大きいことが考えられる場所でもある。この試料の露出期間は、Lal (1991) に基づいた場合、地磁気緯度で約1,600 ( $\pm 400$ ) 年間、地理緯度で約1,300 ( $\pm 300$ ) 年間と算出された。また、Stone (2000) に基づいた場合、地磁気緯度で約1,800 ( $\pm 500$ ) 年間、地理緯度で約1,600 ( $\pm 400$ ) 年間と算出された。平均すると、1,600年となる。しかしこの試料は、測定においてホウ素の影響が示唆され、また Be のカレントが弱かったため、露出期間を断定することが厳しい状況にある。よって本研究では算出された露出期間を参考値とし、この試料に対する露出期間を約2,300年以内の期間であるという解釈にとどめておきたい。以上を基に Lal (1991) に基づいた場合、誤差を含めて地磁気緯度で約2,000年間、地理緯度で約1,600年間でそれぞれ上限値とした露出期間となる。同様に、Stone (2000) に基づいた場合、地磁気緯度で約2,300年間、地理緯度で約2,000年間である。

試料 no. 020228-T、020301-V はそれぞれ、「遺跡ポイント」の水深20.8m、16.4mの地点より採取したものである (Photo 10)。前者の露出期間は、Lal (1991) に基づいた場合、地磁気緯度

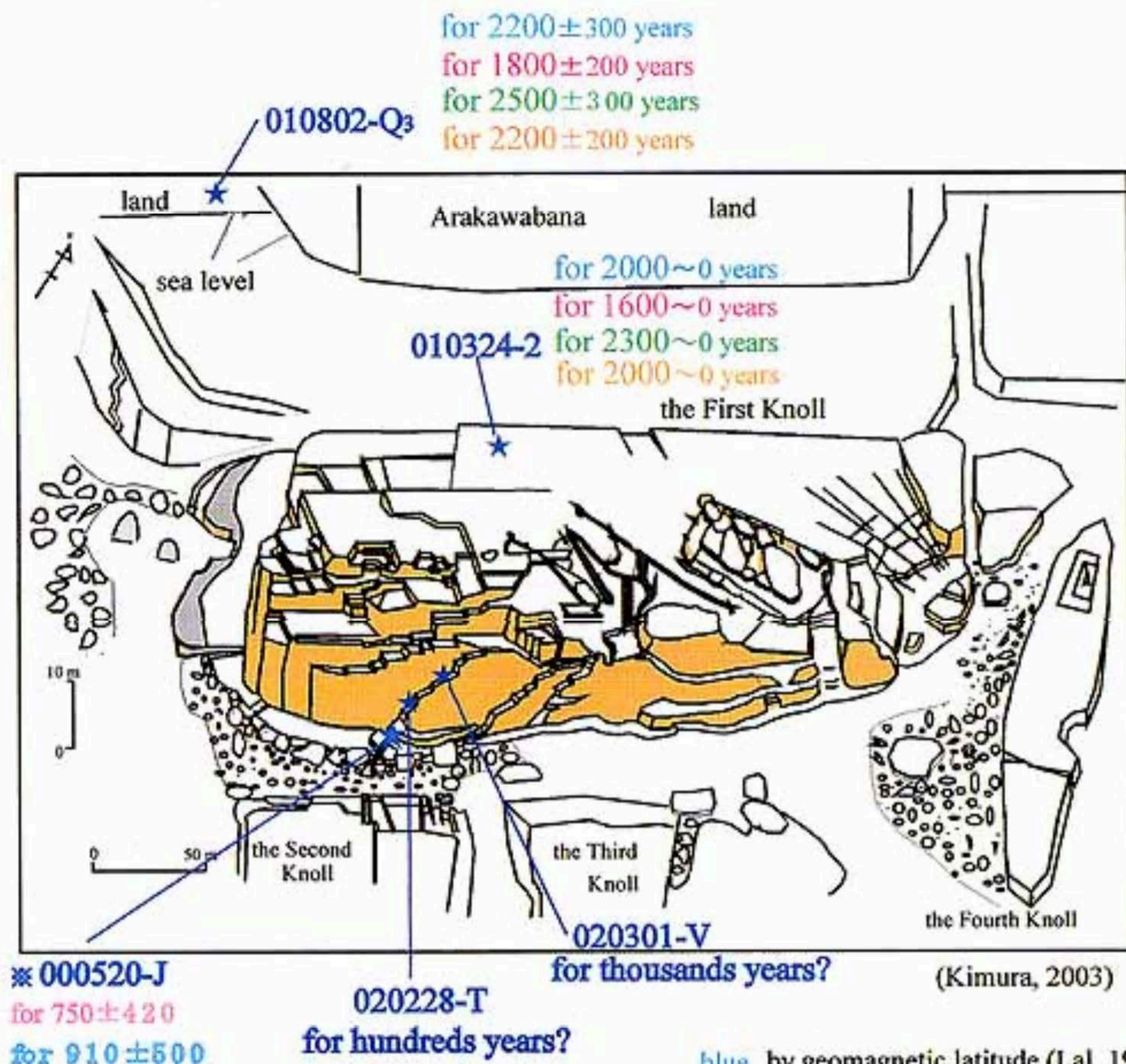


Fig. 16 : <sup>10</sup>Be surface exposure ages of Iseki point and the surrounding.

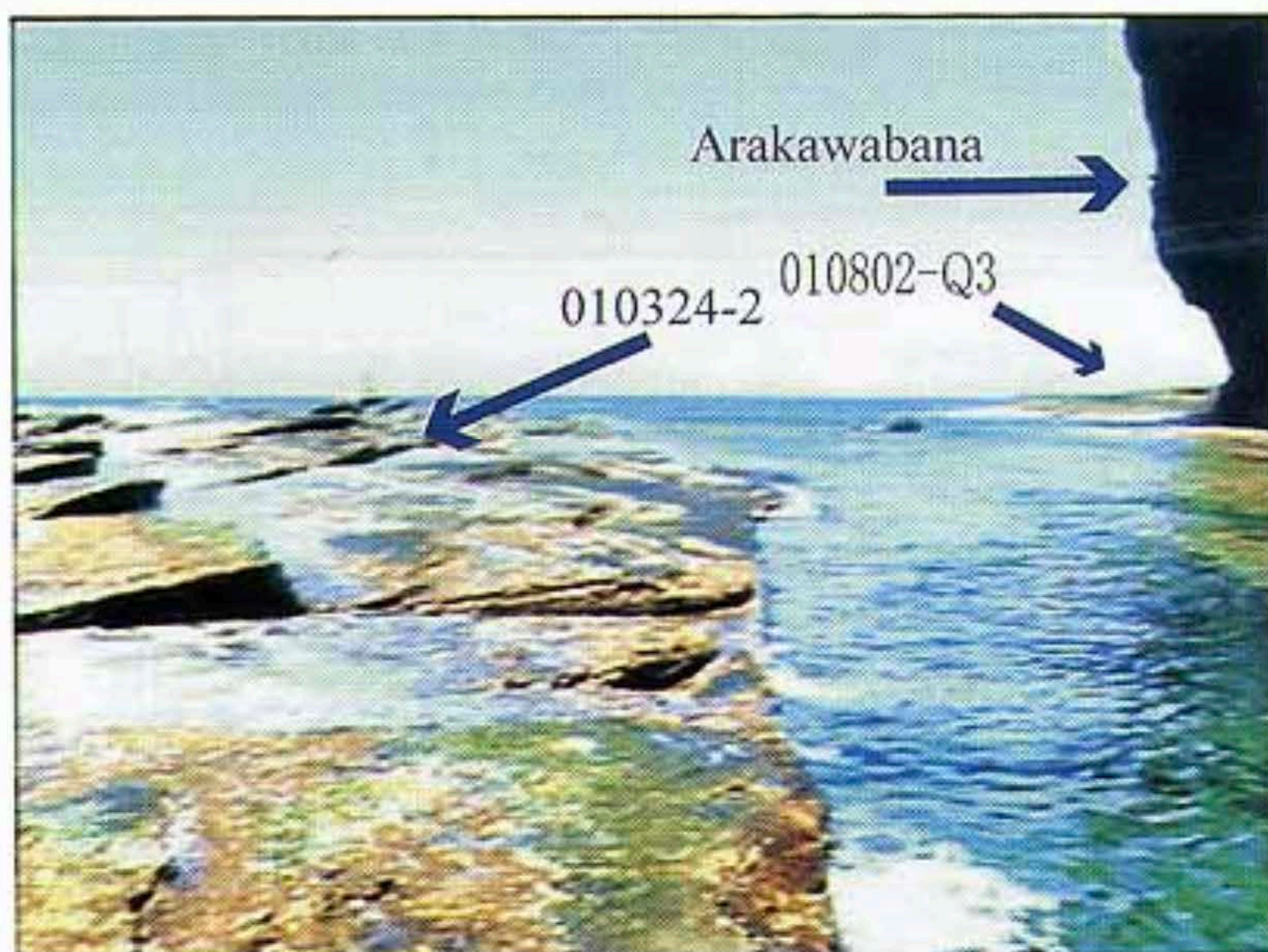


Photo 8 : The sampling site of no. 010324-2.  
This site is the upper part of Iseki point, where is always above sea level.

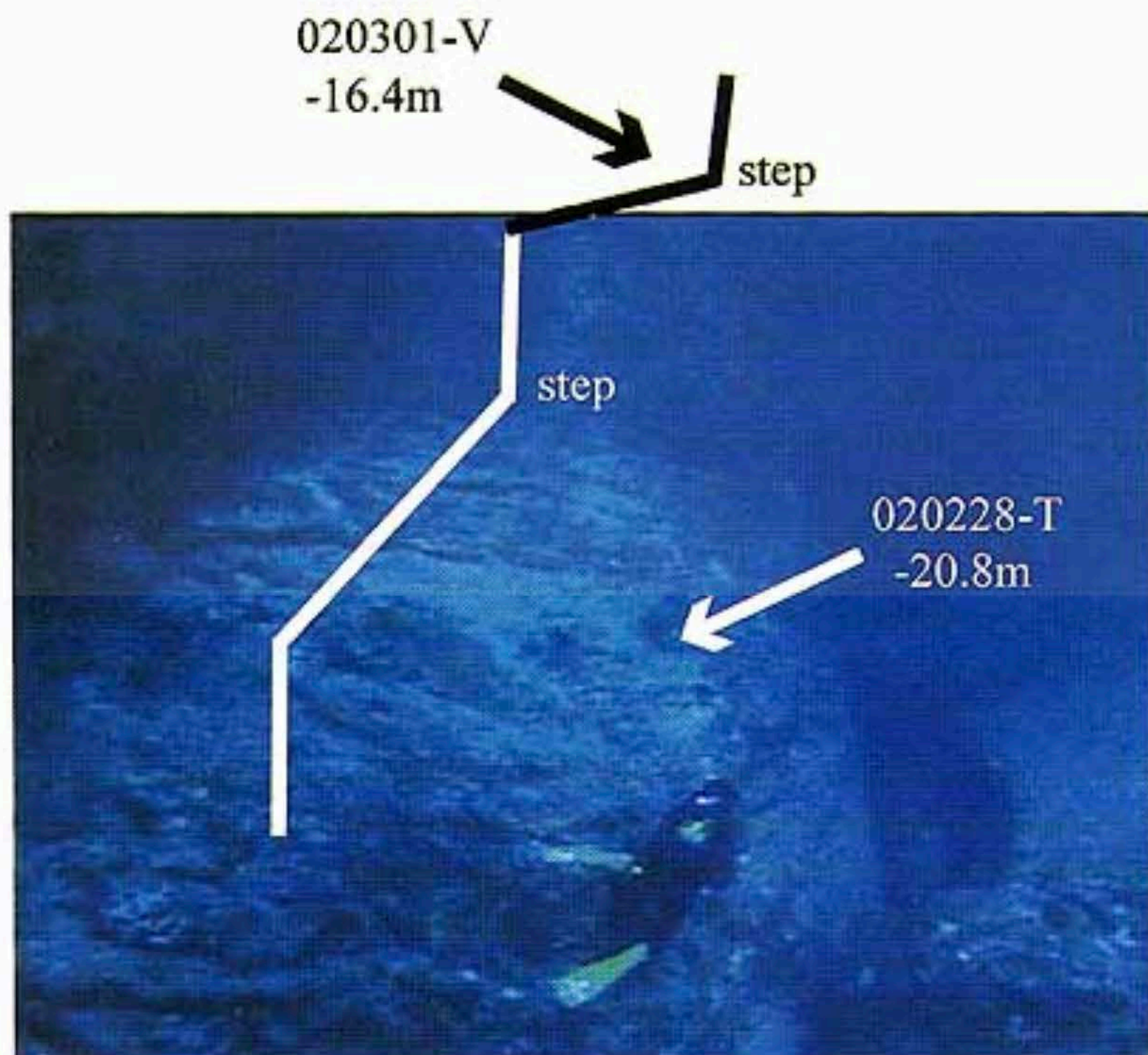


Photo 10 : The sampling site of no. 020228-T and 020301-V.  
This site is the stairs of loop road, Iseki point.

で約80 (±350) 年間、地理緯度で約60 (±300) 年間、Stone (2000) に基づいた場合、地磁気緯度で約90 (±400) 年間、地理緯度で約70 (±350) 年間と算出された。平均80年となる。また後者は、それぞれ約3,000 (±14,000) 年間、約2,400 (±11,000) 年間、約3,300 (±16,000) 年間、約2,800 (±13,000) 年間と算出された。平均2,900年となる。しかし、これらの試料については、測定誤差が100%を超えてしまったため、信頼できる値とは言えない。従ってこれらの値を正確な露出期間とみなすことはできない。しかし、020301-Vについては、測定によって、<sup>10</sup>Beの中央値が堆積後の残存量を有意に超える値を示す (Fig. 18) ことから、かつてこれらの試料が陸上に露出していた可能性を示唆すると考えられる。また、020228-Tについては、<sup>10</sup>Beの蓄積量はきわめて小さい。これは近年、海底で石がぶつかるなどして削剥された可能性も示唆される。また、000520-Jについて、Kimura *et al.* (2001) において地磁気緯度で910±500年、地理緯度で750±420年と出ているが、これについては実験ブランクがうまく測定できなかったためにこの値をそのまま年代値として用いることは適さない。そのため、今回は参考程度に記載しておく。

以上をまとめると、遺跡ポイントについては、水中部分から海面上のものについてそれぞれ露出年代の中央値が80年、2,900年、1,600年となる。それぞれ誤差を考慮すると、500年以内、20,000年以内、2,300年以内と言える。これらはそれぞれ遺跡ポイント低所 (水深20.8m)、中位置 (水深16.4m)、最高所 (海面上1m) のサンプルについての値である。また、ループ道路の水深25mから採取した岩石の露出年代が1,000年 (Kimura *et al.*, 2001) と出されている。これは後のテストでBoronの混入が指摘されたため、それより若い露出年代となる。中位の20,000年という誤差範囲は広すぎるのと、これが現実の出来事を反映しているとする、氷期の自然露出時間を示しているかもしれないので、これを省略する。すると、深所が1,000年以内で上部が2,300年以内ということとなる。<sup>14</sup>Cの結果 (Kimura *et al.*, 2001) と合わせると、これは遺跡ポイントがおおよそ10,000年以内に形成されてそれ以後沈水したと仮定して矛盾なさそうに見える。中央値では2,900年が最古であるから、水深16mの地点水没前3,000年前頃遺跡ポイントは削剥された可能性がある。それによると、今から12,000~11,000年ほど前となる。一方、最大値を求めると、30,000年近く前という値もとれなくはない。しかし、Kimura *et al.* (2001) のものを含めた地点の中央値が1,000~2,900年を示していることと、中央値1,600年に対する誤差からの最大値が2,300年という例もあることから、本地形はかつて陸上で形成され、形成されてからほぼ3,000年より短時間で水没したという可能性は否定できない。また、数値的には確かなことが言えなくとも、すでに考察したように、遺跡ポイントの海底部分がかつて陸に出た可能性がある。

試料 no. 010802-Q3 は、与那国島南東にある新川鼻横の海岸、標高8mの地点より採取した試料である。ここもまた、現在陸上に露出している場所である (Photo 9)。この試料の露出期間は、Lal (1991) に基づいた場合、地磁気緯度で約2,200 (±300) 年間、地理緯度で約1,800 (±200) 年間、Stone (2000) に基づいた場合、地磁気緯度で約2,500 (±300) 年間、地理緯度で約2,200 (±250) 年間と算出された。したがって、この試料については、この期間陸上に露出していると考えるのが妥当であり、現在より約2,000~3,000年程度前に何らかの作用により地形が削られた可能性が示唆される。この地点は海岸であるため、波による浸食の影響などが考えられるが、与那国島において、現在より約2,000~3,000年前までに海水準が現在の標高8m近くまで上昇したという報告はない。一方、サンプリング地点は対称的な階段地形が認められることから、人が削った可能性もある。従って、この地点がどのような影響を受けて削られたかを明らかにすることは、今後の課

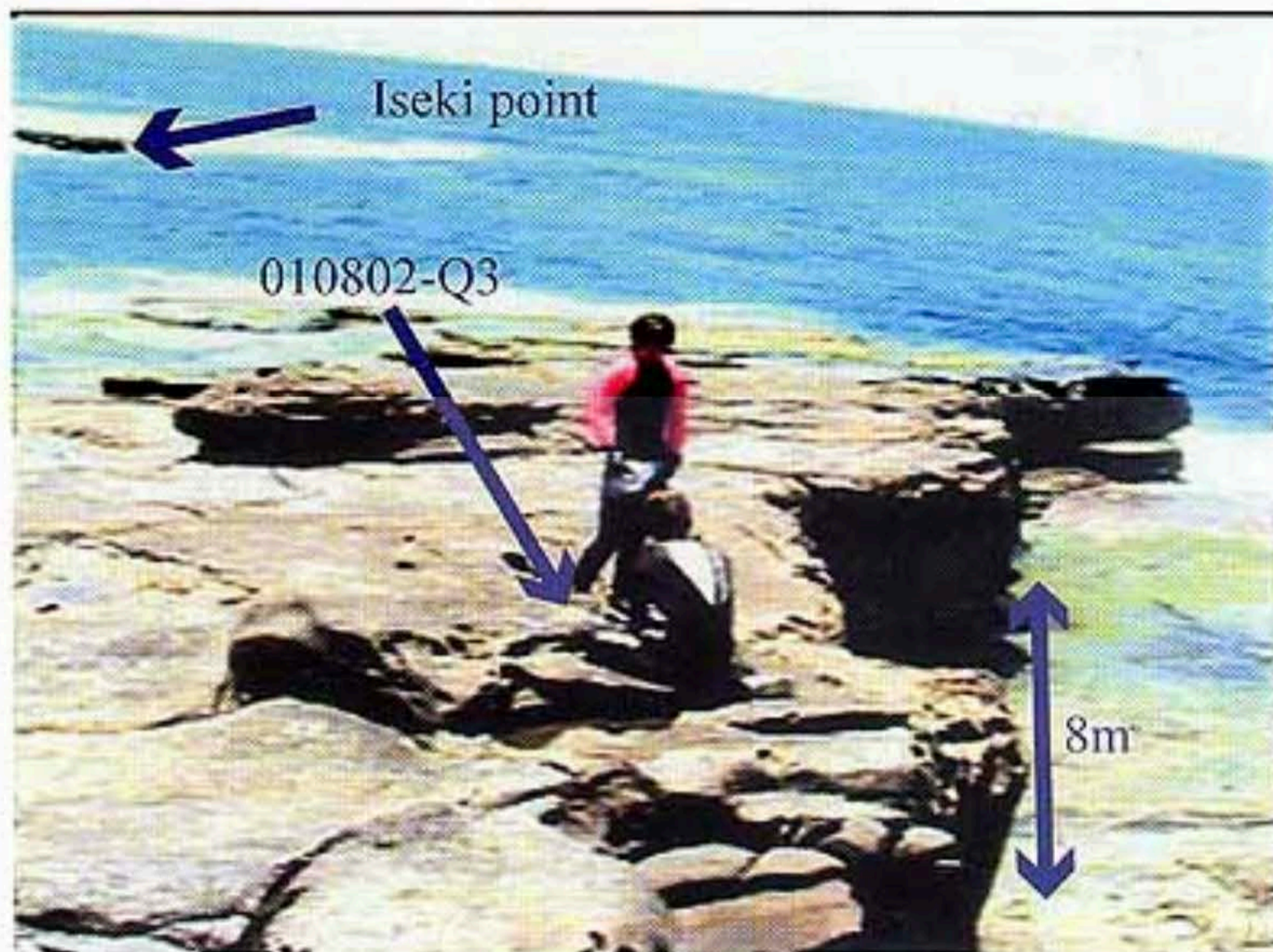


Photo 9 : The sampling site of no. 010802-Q3.  
This site is the coast of on shore Arakawabana.

題と言えるであろう。

終わりに、本手法をさらに確立させるために必要となる条件および問題点を以下に記し、今後の研究に供したい。

- 1) 露出期間が短い可能性がある試料に対しては、精製する石英量を十分に検討する。
- 2) 調査地域の  $^{10}\text{Be}$  および  $^{26}\text{Al}$  含有量 (バックグラウンド) を明らかにする。
- 3) 試料に対する実験ブランクを慎重に測定し、試料に関して信頼のおける結果を得る。
- 4) 生成率の算出を Lal (1991) および Stone (2000) のどちらを用いて行なうべきか明らかにする。
- 5) 生成率の算出に地磁気緯度および地理緯度のどちらを用いるべきか明らかにする。
- 6) 測定試料数の増加による、データの蓄積が望まれる。

## 6. まとめ

- 1) 表面照射年代測定法は、これまで研究報告が比較的多かった中高緯度および高標高地域に適しているだけでなく、本調査地域のような低緯度、低標高地域への適用も可能と思われる。
- 2) 海底試料の測定結果より過去数万年間で、与那国島海底遺跡ポイントは、およそ2,000年以内地表に露出した可能性があることが示唆された。
- 3) 本結果と、付着物の  $^{14}\text{C}$  年代測定法結果 (Kimura *et al.*, 2001) とを合わせると、本海底遺跡ポイントの人工的地形形成は今からおよそ10,000年以前のいつかに形成された可能性が推定される。

4) 与那国島陸上である新川鼻下の海岸平坦面の露出面形成後、約2,000~3,000年ほどたっている。

## 謝辞

本研究を進めまとめるにあたり、東京大学原子力研究総合センターの小林紘一助教授（当時）をはじめタンデム加速器研究部門の方々には表面照射年代測定に関する御協力をいただいた。山本聰教授をはじめとする琉球大学理学部の諸先生方、琉球大学機器分析センターの方々には、試料の化学処理を行なう際、御指導・御協力をいただいた。また与那国島での試料採取においては、サーウェスヨナグニの新嵩喜八郎氏をはじめとする潜水スタッフの方々、琉球大学海底調査団のメンバーに数々の御協力をいただいた。本論文は、琉球大学理学部杉山卓也先生に一読いただいた。以上、紙面を持って謝意を表します。

## 文献

- 青木賢人・今村峯雄・池田安隆： $^{10}\text{Be}$  露出年代法による日本アルプスにおける氷河前進期の絶対年代推定. MALT REPORT 1998, 東京大学原子力研究総合センター, 52-58, 1998.
- 古川雅英：アジアにおける自然放射線レベルの空間分布とその地球科学的背景. 放射線生物研究, 34 (2), 111-131, 1999.
- 井龍康文・鈴木淳 (1990) : 与那国島の琉球層群に見られる Halimeda の石灰岩の堆積環境, 化石, 49, 13-22.
- 兼岡一郎：「年代測定概論」. 東京大学出版, 315pp., 1998.
- Kimura, m., Nakamura, T., Kobayashi, K., Yagi, H., Ishikawa, Y., Ueda, M., Sakamoto, M., and Chihara, T. : Research for submarine ruins off Yonaguni, Japan. Reprinted from the Bulletin of the faculty of Science University of Ryukyus, No.72, 49-72, 2001.
- 木崎甲子郎編著：「琉球弧の地質誌」. 沖縄タイムス社, 278pp., 1985.
- Kohl, C. P. and Nishiizumi, K. : Chemical isolation of quartz for measurement of *in-situ* - produced cosmogenic nuclides. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 56, 3583-3587, 1992.
- Lal, D. : Cosmic ray labeling of erosion surfaces : *in situ* nuclide production rates and erosion models. Earth and Planetary Science Letters, 104, 424-439, 1991.
- Nishiizumi, K., Finkel, R. C., Klein, J., and Kohl, C. P. : Cosmogenic production of  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  in water targets. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, Vol. 101, No.B10, 22,225-22,232, 1996.
- 坂井卓・浜田正平・辻和毅・鈴木勲・黒川陸生：八重山群島与那国島の地質. 琉球列島の地質学研究, 第3巻, 61-79, 1978.
- 坂本理子：表面照射年代測定法の与那国島海底サンプルの適用, 琉球大学大学院理工学研究科修士論文, 2003 (M.S.), 2001年度琉球大学理学部物質地球科学科卒業論文, 2001 (BS.).



Stone, J.O. : Air pressure and cosmogenic isotope production, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol. 105, No.B10, 23, 753-23, 759, 2000.

矢崎清貫：与那国島地域の地質，地域地質研究報告 5万分の1図幅，宮古島（19）第7号，地質調査所，1-54，1982.