

# 電子スピン共鳴（ESR）・光ルミネッセンス（OSL） 計測と自然史・自然災害履歴の解明

高田将志（奈良女子大学・学長）

・ 自然史や自然災害履歴を解明するためには、関係する自然現象が“いつ”発生したかを特定することが重要になります。

・ ある地域で発生する自然災害の再来周期がわかれば、その発生リスクを評価することもできるでしょう。

・ 本講演では、ESR・OSL年代測定とその関連技術を中心に、それらを自然史や自然災害履歴の解明にどのように利用可能かについて紹介したいと思います。

P 1

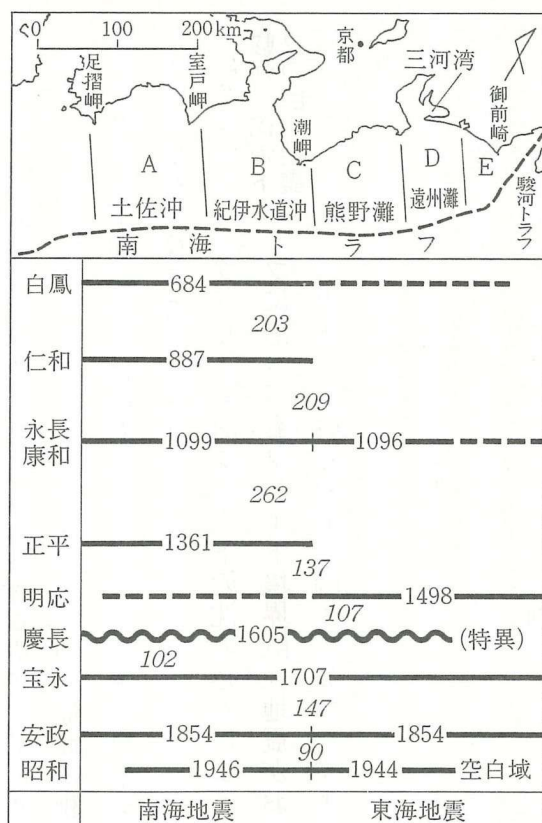
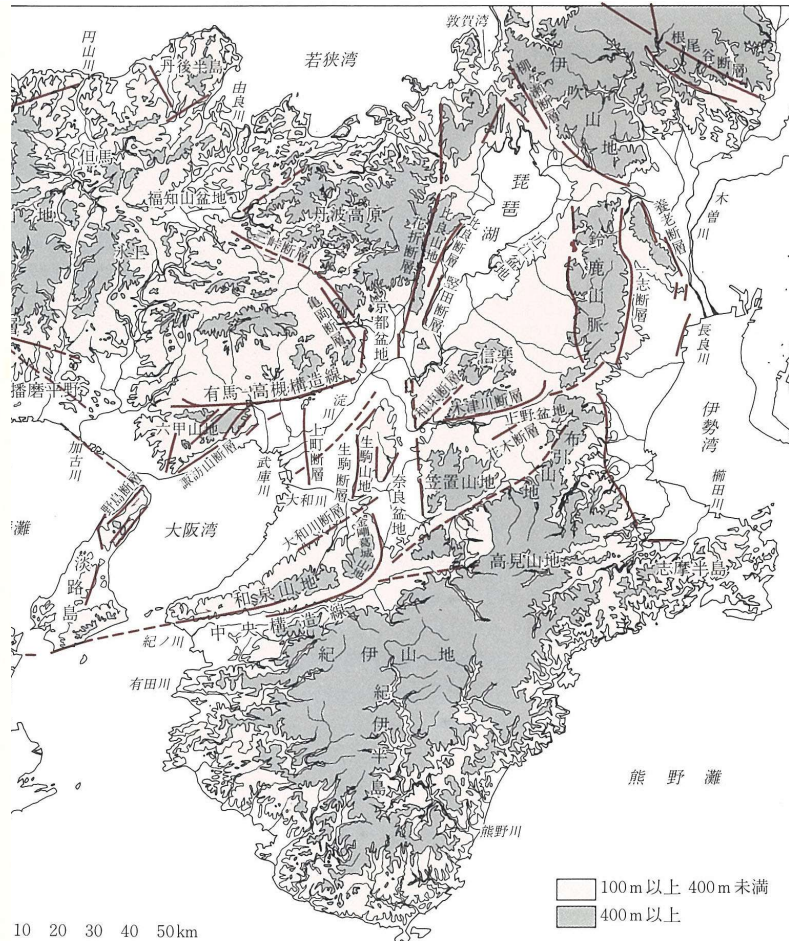


図 4-2 駿河・南海トラフ沿いの巨大地震のくり返し。破線は可能性の強いことを示す。数字は発生年，斜体の数字は発生間隔。



左：記録に残る南海・東南海・東海地震(石橋, 1994)

右：近畿圏の活断層(大場秀章ほか, 1995)

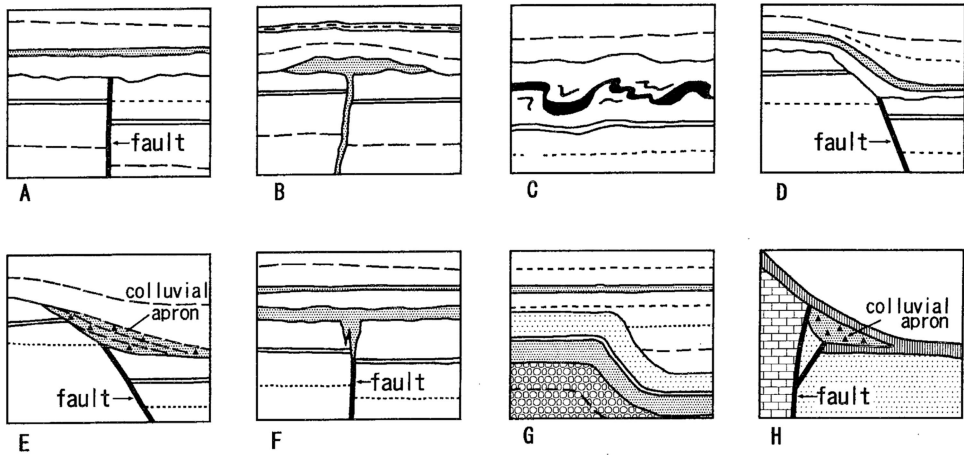
P 2

【南海トラフ巨大地震の再来周期】

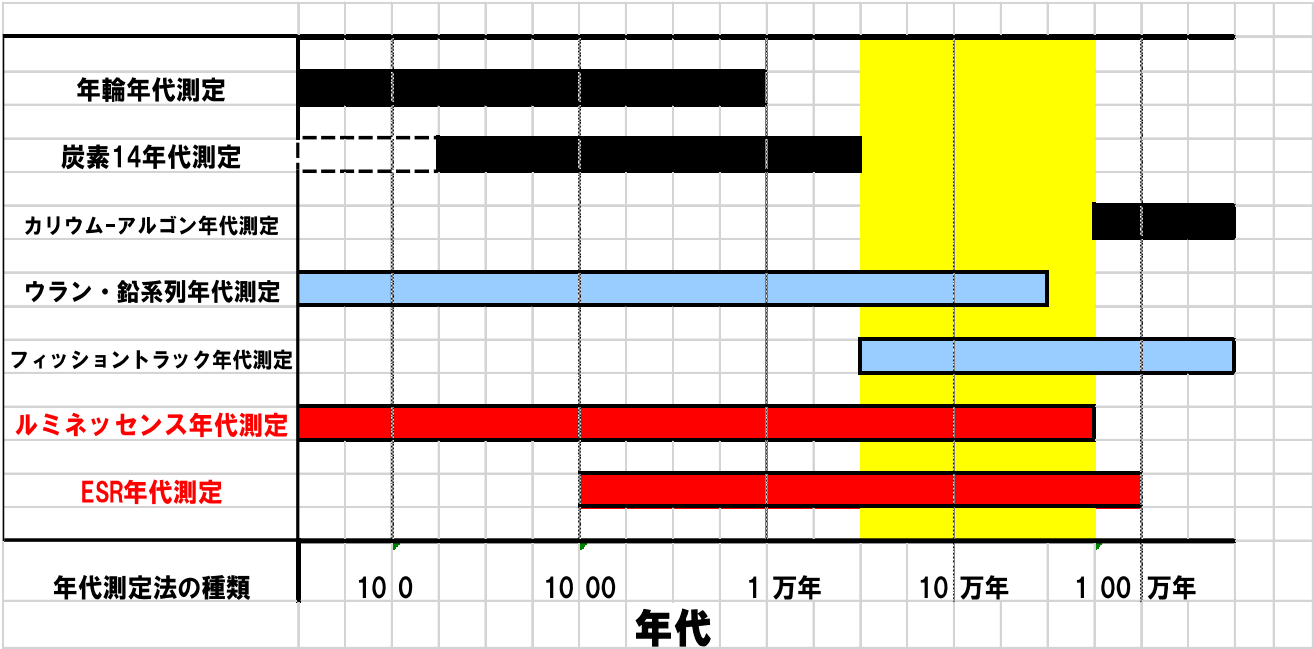
- ・1362年以降、90～147年間隔で発生
- ・1362年以前は、203～262年間隔で発生
- ・見かけ上、地震発生の間隔が現在に近づくにつれ、短くなっている？

【活断層の再来周期】

- ・活断層によって切られる地層と活断層の上端を覆う地層などの年代測定によって活断層の活動時期を推定することができる。



第1図 event発生の認定に用いられている地質構造の例 (渡辺、1996、原図)  
Allen (1986)；岡田 (1990) に加筆。



ESR・OSL年代測定法の特徴

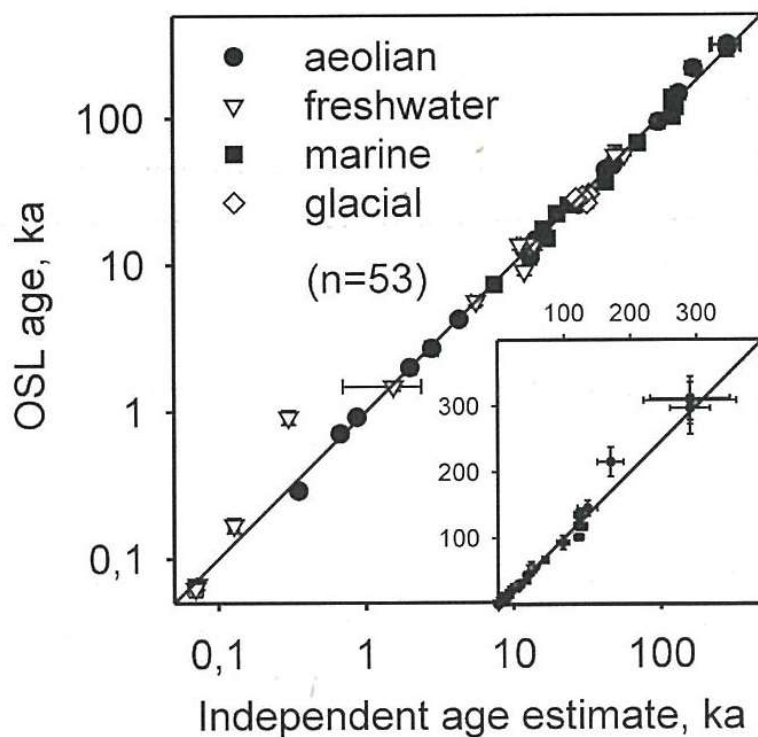
(特徴その1) 人類紀(現在を含む第四紀と呼ばれる最新の地質時代)を対象とする<sup>14</sup>C年代測定やカリウム-アルゴン年代測定などの主要な年代測定技術ではカバーできない時代の年代測定を得意とする。

# 年代測定に用いられる試料

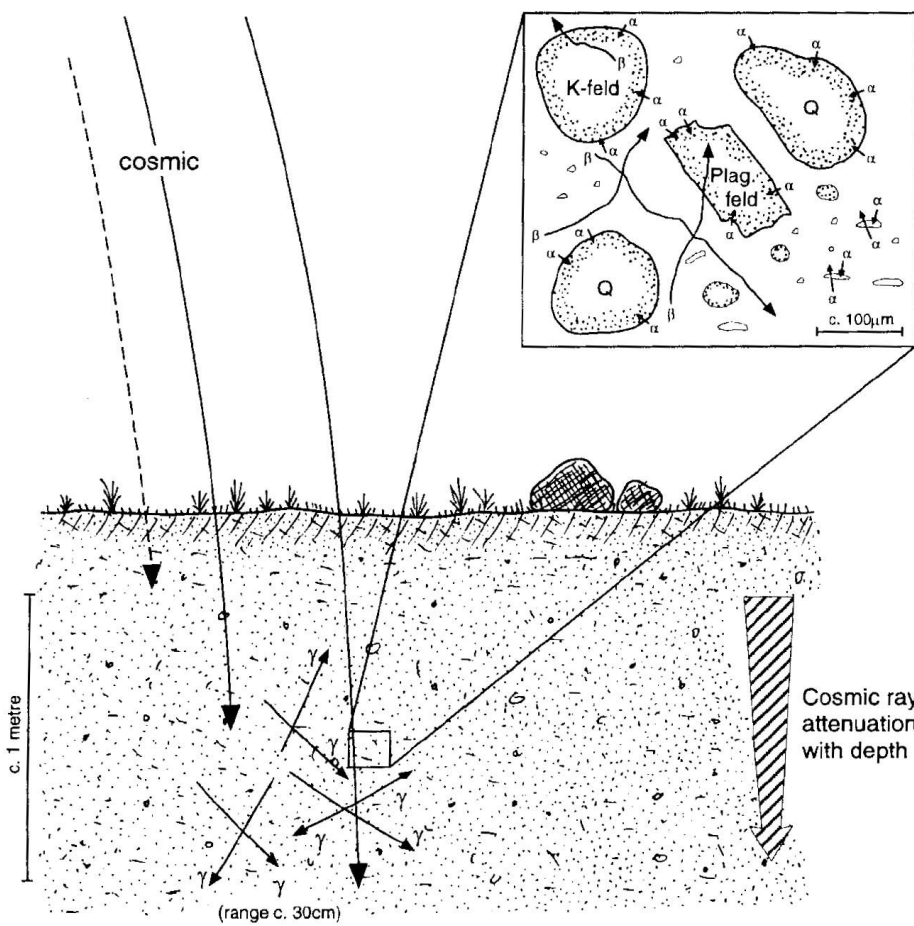
|               |     |     |     |          |    |     |   |             |       |             |                        |
|---------------|-----|-----|-----|----------|----|-----|---|-------------|-------|-------------|------------------------|
|               |     |     |     |          |    |     |   |             |       | ◎           | 年輪年代                   |
|               | ○   |     | △   |          | ○  | △   | ◎ | △           | ◎     | ◎           | 炭素14( <sup>14</sup> C) |
| ◎             |     |     |     |          |    |     |   |             |       |             | K-Ar                   |
| ◎             | ◎   |     | △   |          |    | ◎   | △ | △           | △     |             | Pb, U系列                |
| ◎             |     | ◎   |     |          | ○  |     |   |             |       |             | フィッシュントラック             |
| ○             |     |     | ◎   | ◎        |    | ○   |   |             |       |             | ルミネッセンス                |
| ○             | ◎   |     | △   | △        |    | ○   | ◎ | ○           | △     |             | ESR                    |
|               |     |     |     |          |    |     | ○ | △           | △     |             | アミノ酸ラセミ化               |
|               |     | ○   |     |          |    |     |   |             |       |             | 黒曜石水和                  |
| ○             |     |     | ○   |          |    | △   |   |             |       |             | 古地磁気                   |
| 物・火山噴出<br>火成岩 | サンゴ | 黒曜石 | 堆積物 | 焼土<br>焼石 | 鉱滓 | 鍾乳石 | 貝 | (エナメル<br>歯) | 骨、角、牙 | 植物・木材<br>化石 |                        |

(特徴その2) 他の年代測定法では測定できない試料を対象とすることができる P 5

## 既知年代試料とOSL年代値との比較 (Murry and Olley, 2002)







## 地層中に含まれる石英・長石の被曝 (Aitken, 1998)

- 地層中の微量放射性物質 (U, Th, K, Rb) から放出される  
 $\alpha$  (アルファ) 線  
 $\beta$  (ベータ) 線  
 $\gamma$  (ガンマ) 線

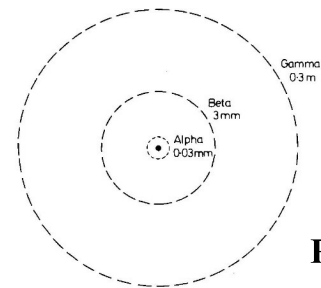
と、宇宙からやってくる

宇宙線 (Cosmic Ray)

によって、堆積物や岩石中の造岩鉱物は、常に被曝している。

- 1年間にその鉱物が被曝する量を、年間線量と呼ぶ。

- 地層中に含まれる水の量 (含水比) によって、年間線量の値は変化する。



P 7

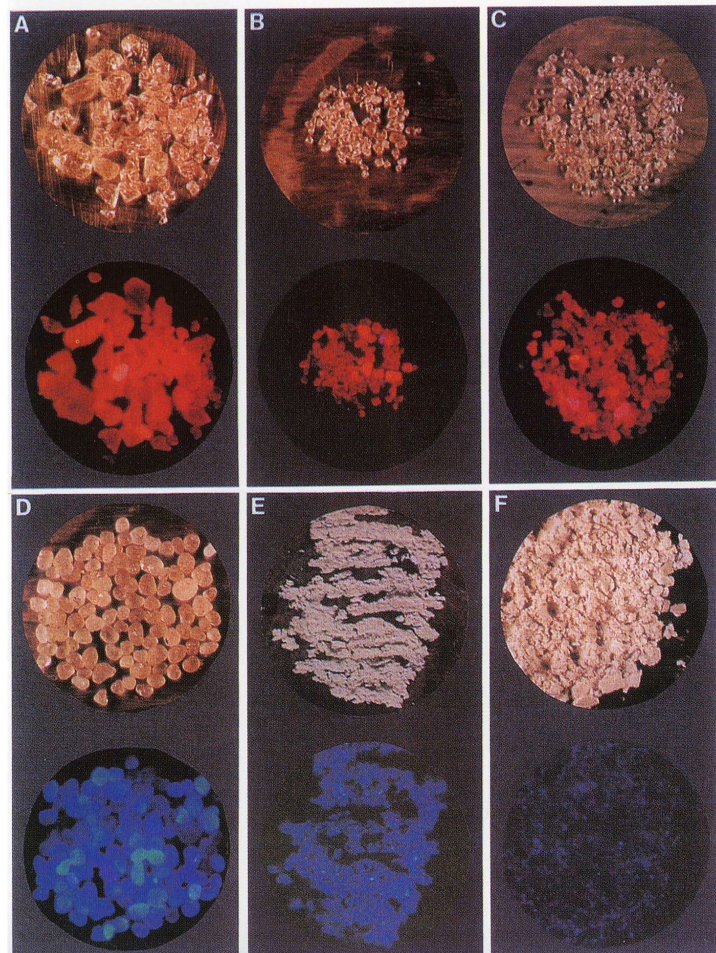
## 鉱物の発光現象 —石英の場合—

→ 光から遮光されて、土中で自然放射線に長期間被曝した石英は、熱や光を加えると**発光**する。

(ルミネッセンス)

## 石英の赤色ルミネッセンスの発見

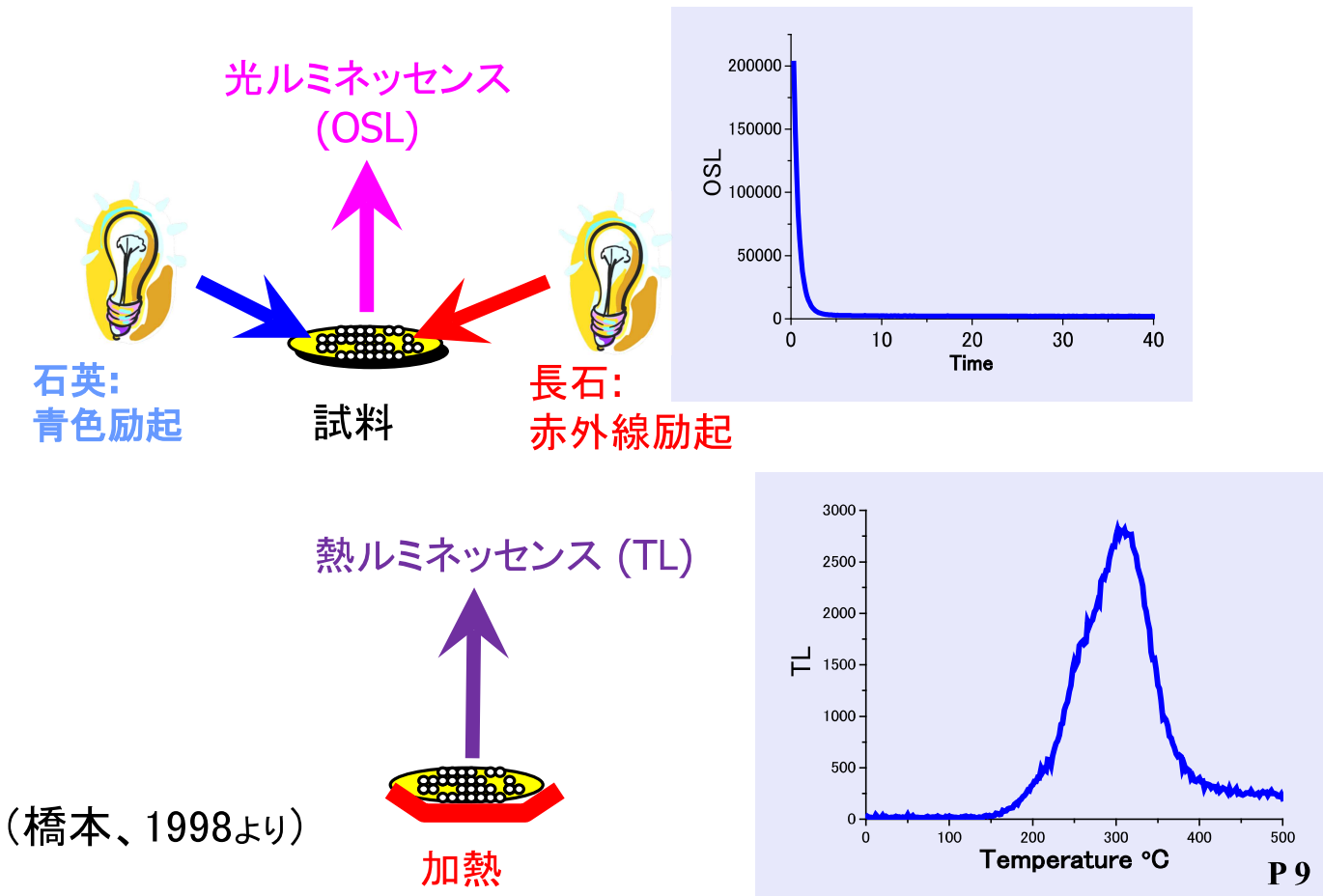
→ Hashimoto et al. (1986),  
Nuclear Tracks Radiat. Meas.,  
11.



P 8



## 2. ルミネッセンス現象と年代測定への応用



## 太陽光によるTL信号の減衰

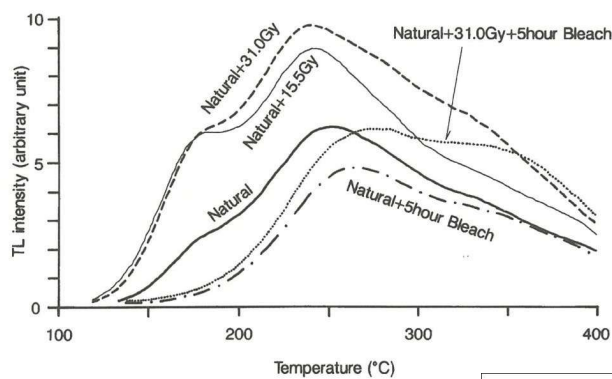


図2 石英TL信号の光ブリーチ特性. 試料は飯豊山地残雪砂礫地の表面から1cm深までの砂から抽出 (粒径125~250ミクロン). 地表面に露出している砂でもTL信号は0と見なせないことがわかる. 抽出した試料に光を5時間を当てた場合, 31Gyの放射線を照射した後に5時間当てた場合のいずれでも, 減衰しているのは350℃以下のTL信号である.

(高田・長友、1999)

(Takada et al., 1995)

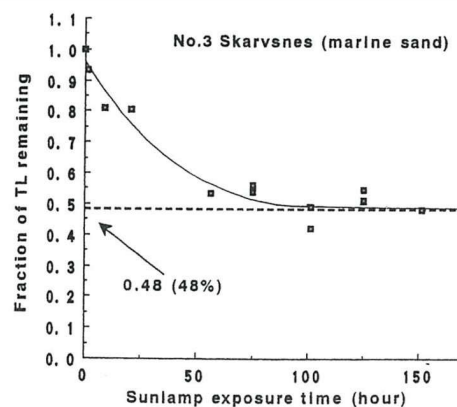


Fig. 5. The fraction of the TL for Sample No. 3 evaluated at a glow-curve temperature between 250 and 270°C remaining after a sunlamp exposure against exposure time

# 石英と長石の光フリーチ特性

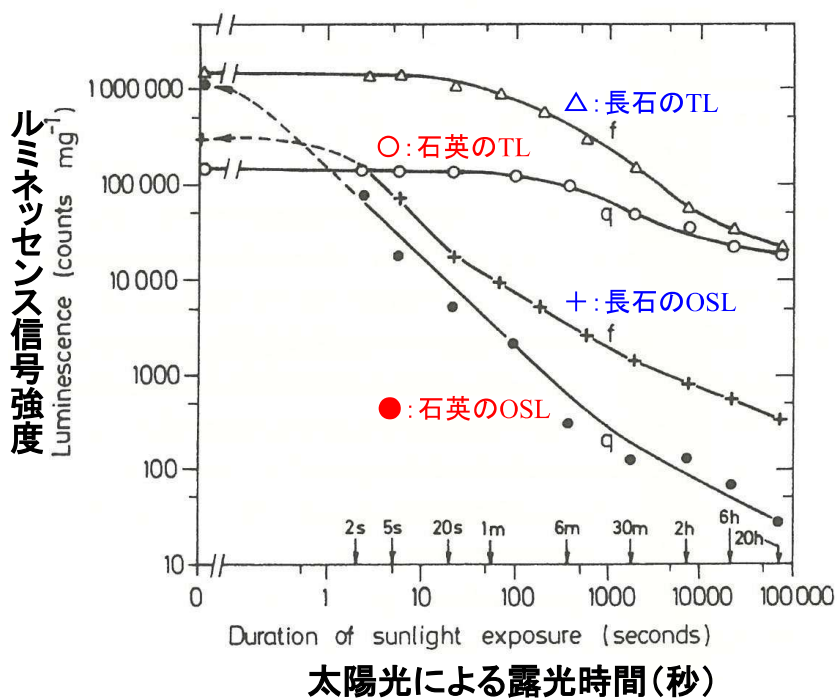


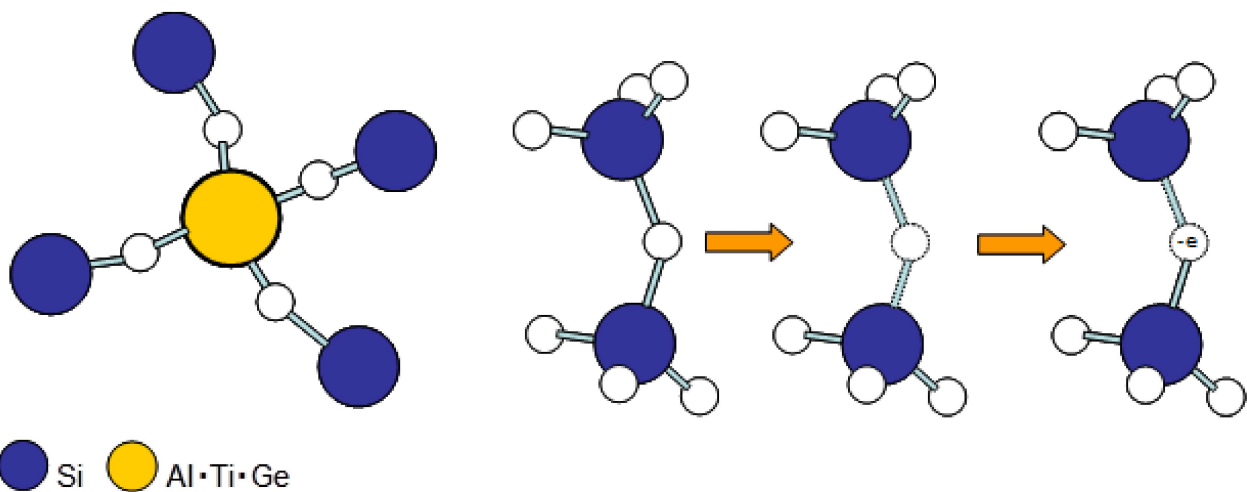
図3 石英と長石のTL/OSL信号の光フリーチ特性 (Godfrey-Smith *et al.*, 1988). 縦軸は光照射した時に残存する信号強度. 514nmの緑色光で励起したOSL信号 (検出中心波長380nm, q●: 石英, f+: 長石) と石英320~330℃ (q○), 長石310~320℃ (fΔ) のTL信号 (検出中心波長400nm) について示されている. 横軸は光照射の時間.

(Godfrey-Smith *et al.*, 1988)

P 11

## ESR信号を生み出す石英中のAl中心、Ti中心、E1' 中心モデル

(池谷(1987)を参考に、島田 (2008)が作成)



P 12

# 天然石英粒子のESR信号

(島田, 2008)

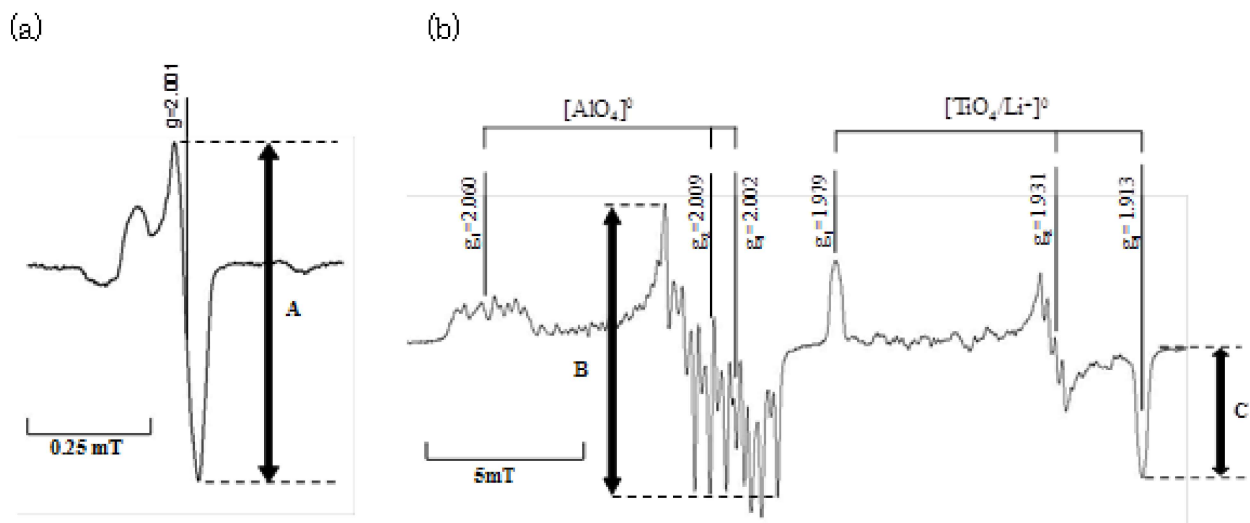


図 2-8.(a)E<sub>1</sub>' 中心信号(試料; 鈴鹿花崗岩) (b)Al、Ti-Li 中心信号(試料; 那智山流紋岩質溶岩)  
A: E<sub>1</sub>' 中心信号強度 B: Al 中心信号強度 C: Ti-Li 中心信号強度.

P 13

## The principle of ESR dating (Ikeya, 1993)

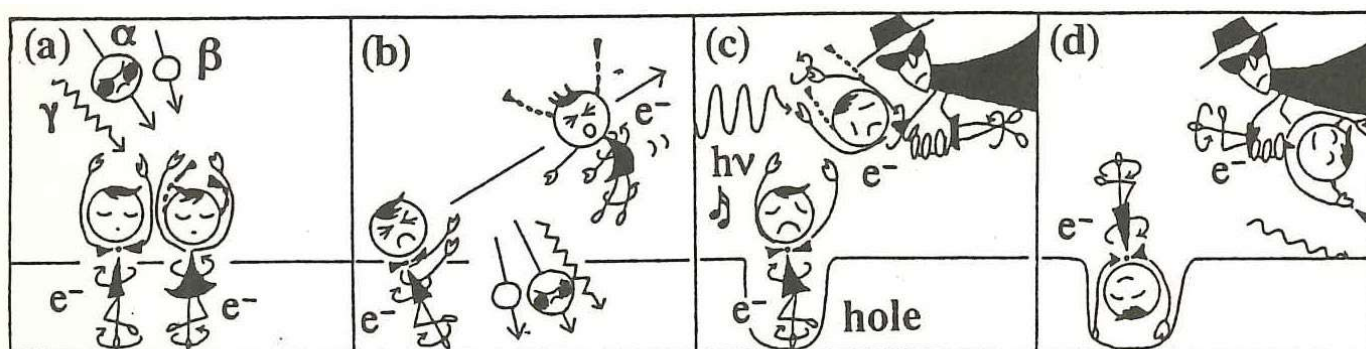


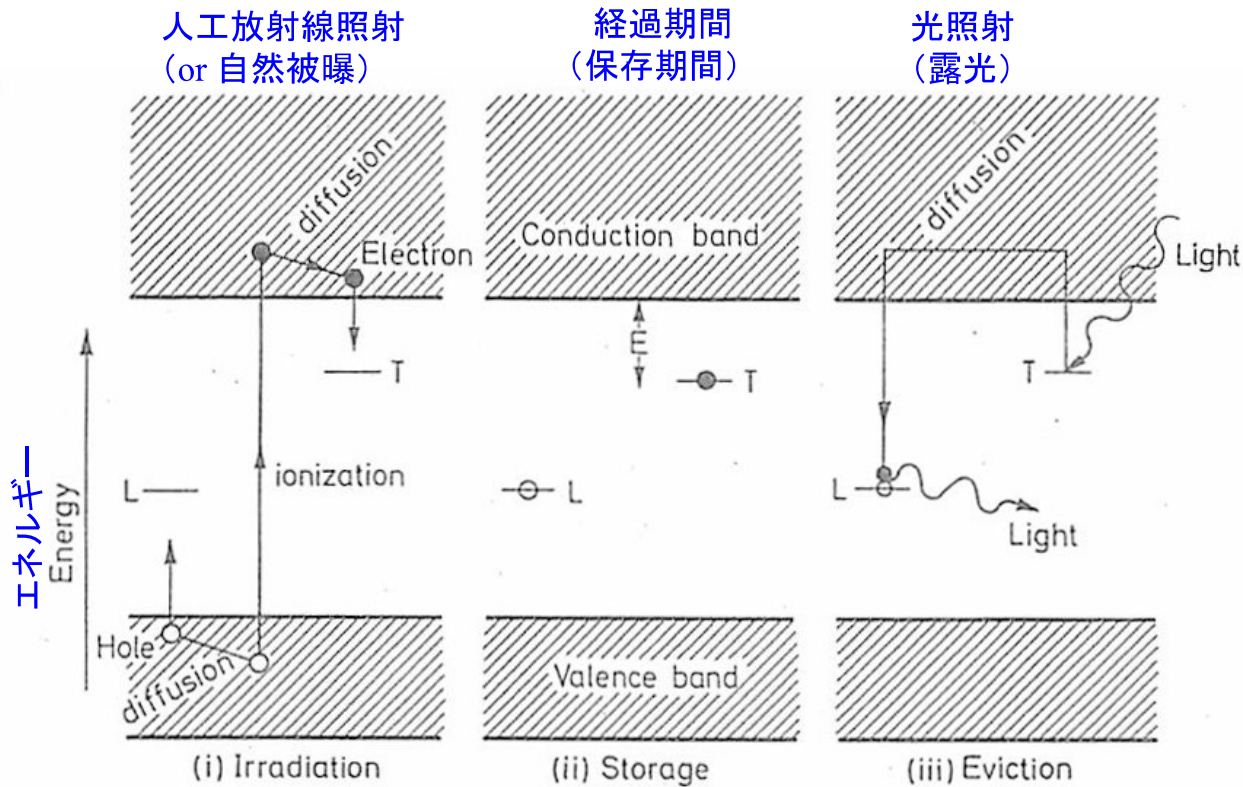
Figure 3.1 The principle of ESR dating. (a) Paired electrons are spinning in opposite directions, (b) ionization by  $\alpha$ -,  $\beta$ - or  $\gamma$ -rays knocks off one of the paired electrons (girl) leaving the other (boy) in a hole, (c) the unpaired electron (girl) is trapped by an impurity (gangster), and (d) the spin direction of unpaired electrons is changed by microwave absorption. The concentration of unpaired electrons in proportion to the TD or ED is determined with ESR.

P 14



# バンドモデルで表した O S L 過程

(Aitken, 1998)



P 15

## 試料採取と年代測定の流れ (橋本, 1998より)

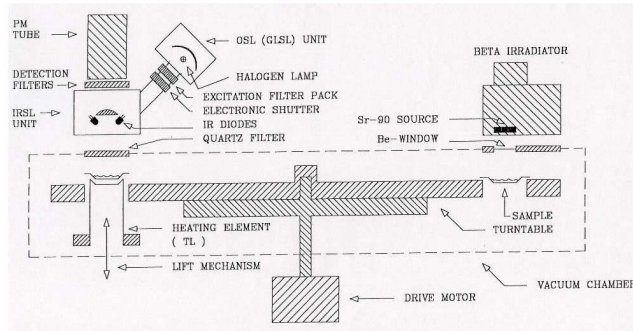


図 ルミネッセンス年代測定手順

P 16

# リソ研究所 (デンマーク) のOSL測定装置

(Riso研究所の説明書より)



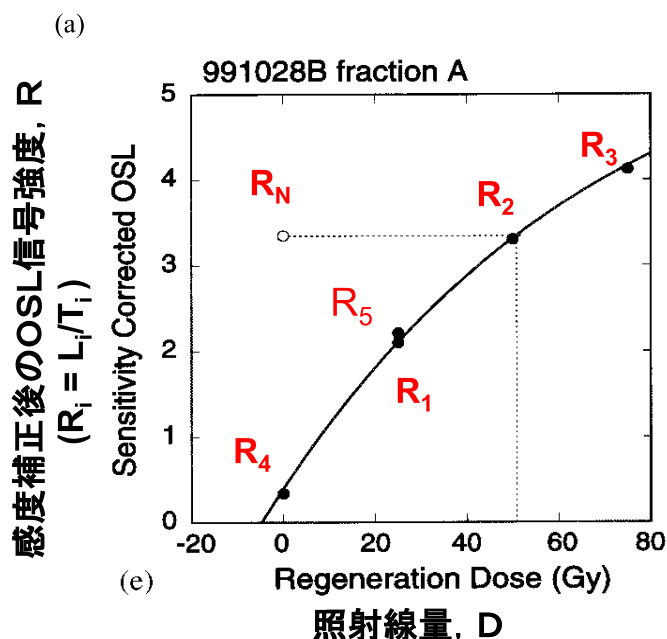
奈良女子大学で使用している RISO 研究所製の測定機器

P 17

## 蓄積線量(等価線量)測定の手順

SAR (single aliquot regenerative dose) protocol

Murry and Wintle (2000), Radiation Measurement, 32, 57-73.



放射線照射,  $D_i$

プレヒート(220°C, 10秒)

OSL測定  
(125°C 100秒,  $L_i$ )

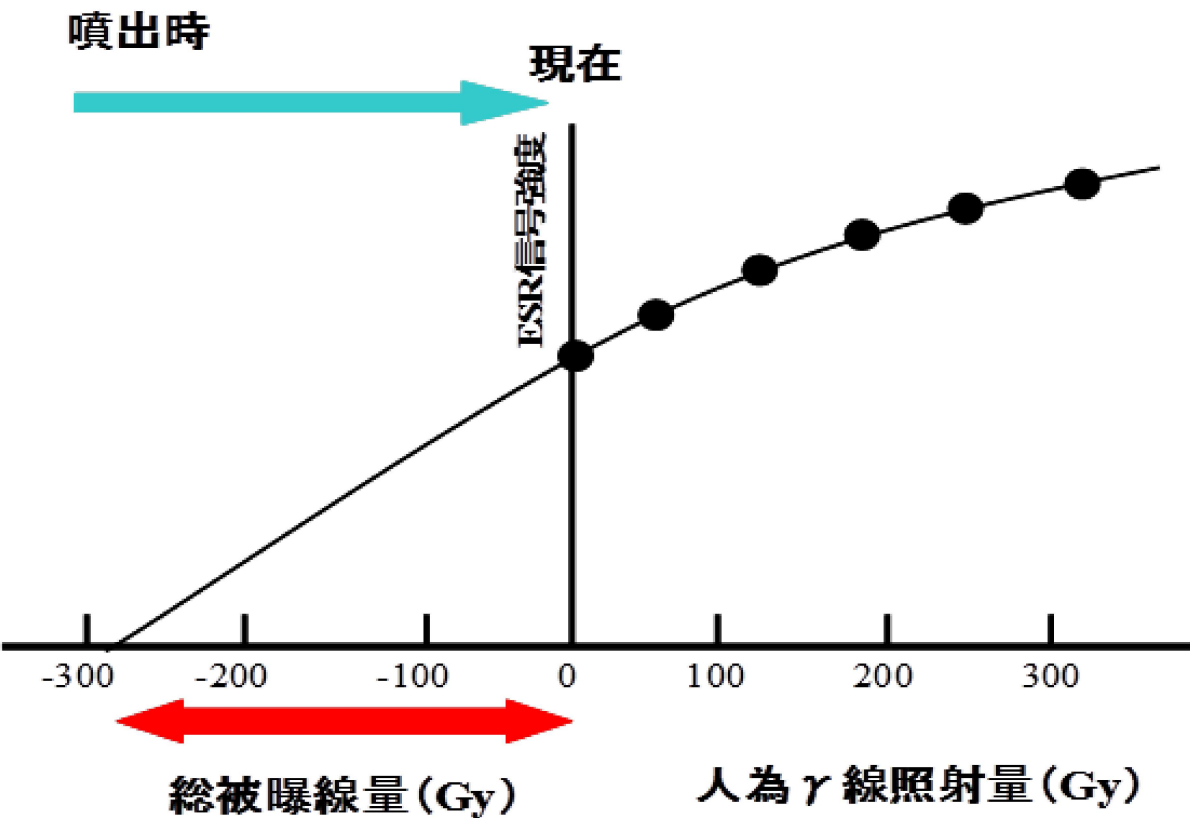
テストドーズ照射,  $D_t$

カットヒート(160°C)

テストドーズOSL測定  
(125°C 100秒,  $T_i$ )

P 18

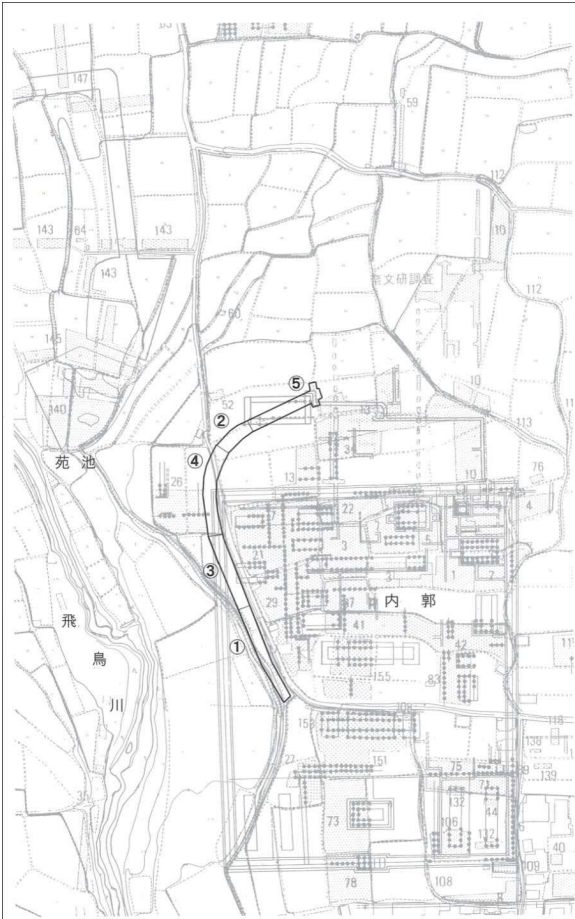
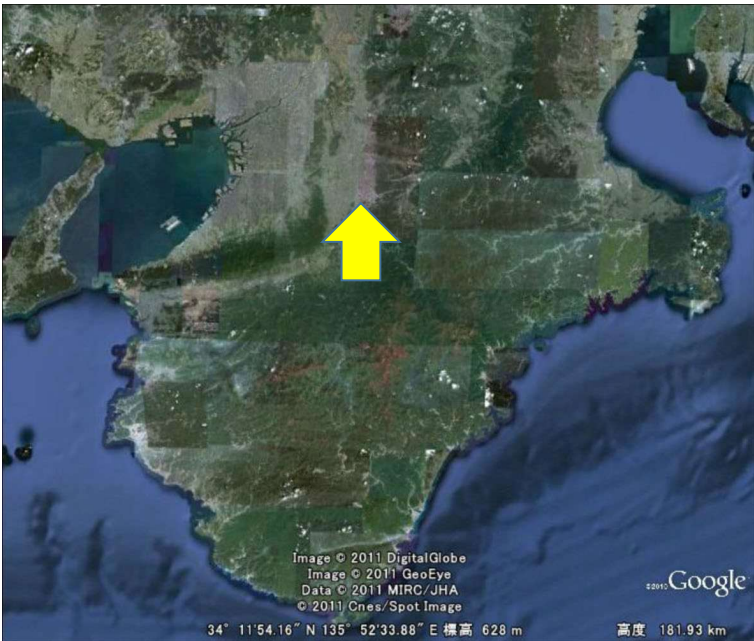
天然試料のESR信号から試料が浴びた総被曝線量を求める方法（付加線量法）（島田，2008）



P 19

明日香(奈良県)

明日香板蓋宮  
(飛鳥京跡)



P 20



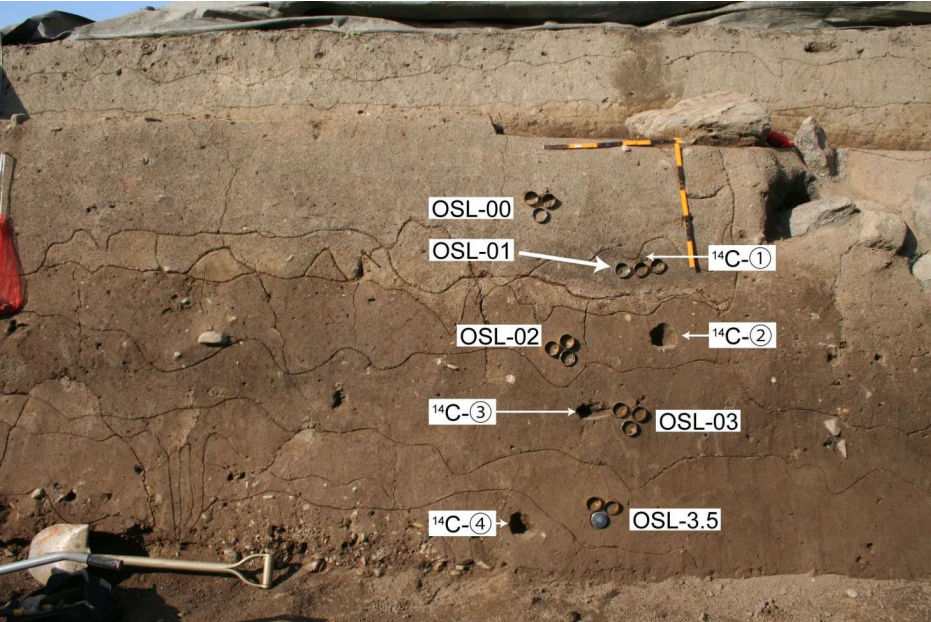


図 調査地点における遺跡関連堆積層と<sup>14</sup>C年代測定試料・OSL年代測定試料採取層準

表1. 調査地点におけるAMS <sup>14</sup>C 年代

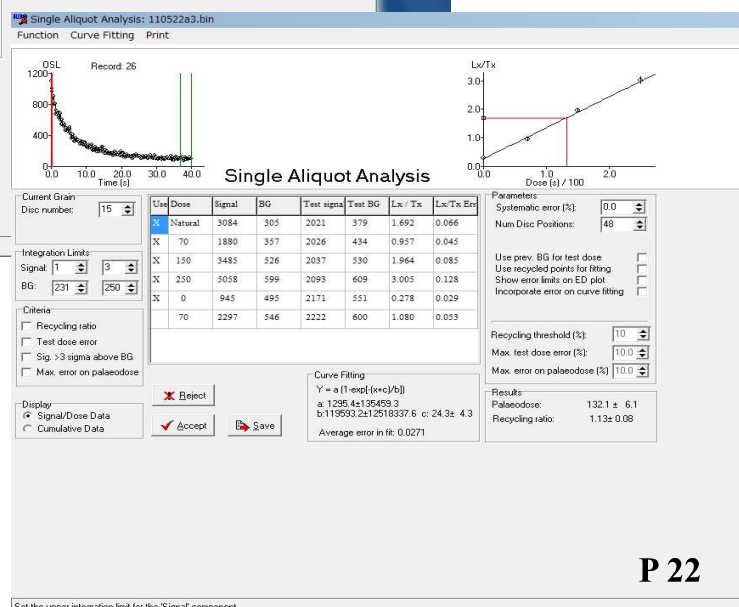
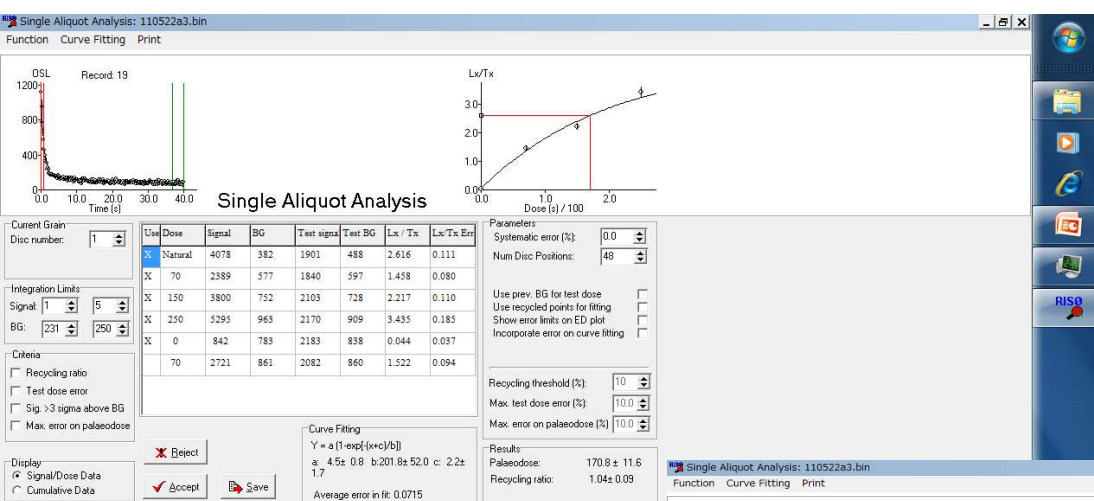
| Sample name       | Material         | Code        | Measured radiocarbon age | δ <sup>13</sup> C | Conventional radiocarbon age <sup>1)</sup> | Calibrated radiocarbon age <sup>2), 3)</sup>                                           |
|-------------------|------------------|-------------|--------------------------|-------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <sup>14</sup> C-① | Charred material | Beta-274707 | 1640±40                  | -27.1             | 1610±40                                    | Cal BP 1570 to 1400 (Cal AD 380 to 550)                                                |
| <sup>14</sup> C-② | Organic sediment | -           | -                        | -                 | -                                          | -                                                                                      |
| <sup>14</sup> C-③ | Organic sediment | Beta-274708 | 7510±50                  | -23.1             | 7540±50                                    | Cal BP 8420 to 8300 (Cal BC 6470 to 6350)<br>Cal BP 8250 to 8220 (Cal BC 6300 to 6270) |
| <sup>14</sup> C-④ | Organic sediment | Beta-275837 | 8370±50                  | -20.2             | 8450±50                                    | Cal BP 9530 to 9420 (Cal BC 7580 to 7460)                                              |

1) Stuiver and Polach (1977)

2) Database of INTCAL04 is used.

3) A simplified approach of Talma and Bogel (1993) to calibrating <sup>14</sup>C dates is used.

P 21



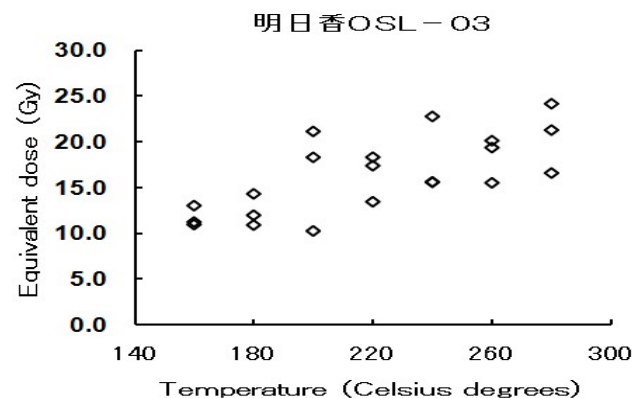
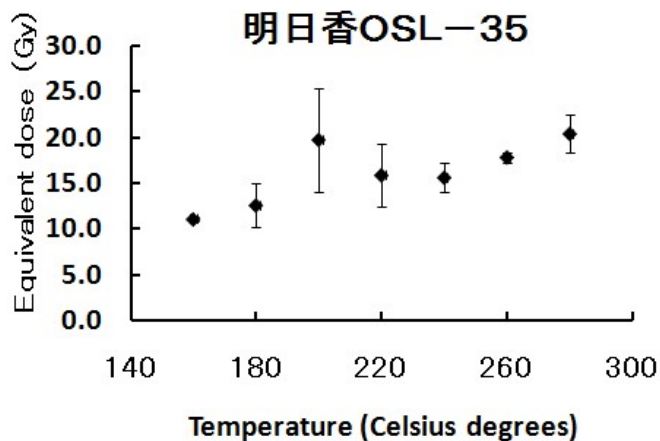
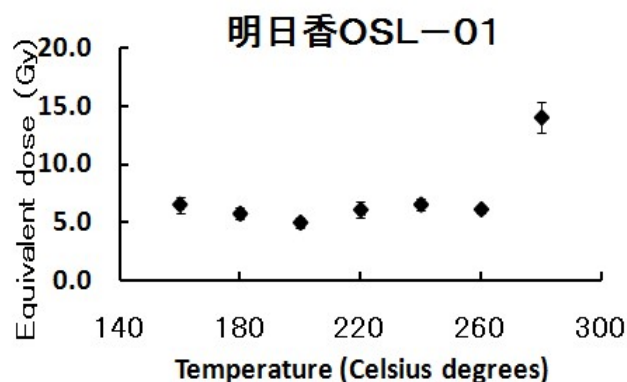
P 22

Set the upper integration limit for the 'Signal' component

## プレヒートプラートの検出

OSL測定前の熱処理温度の違いによって蓄積線量のばらつくことがある

↓  
蓄積線量が安定 (Preheat plateau) した温度領域の信号を年代測定に用いる



P 23

## 飛鳥板蓋宮遺跡関連OSL年代測定結果

| 表 飛鳥板蓋宮遺跡のOSL試料 |            |            |   |      |             |   |      |          |   |      |               |           |                       |   |      |
|-----------------|------------|------------|---|------|-------------|---|------|----------|---|------|---------------|-----------|-----------------------|---|------|
| サンプル名           | 深度<br>(cm) | U<br>(ppm) |   |      | Th<br>(ppm) |   |      | K<br>(%) |   |      | water content |           | cosmic ray<br>(Gy/ka) |   |      |
|                 |            |            |   |      |             |   |      |          |   |      | present       | saturated |                       |   |      |
| OSL-00          | 75         | 0.44       | ± | 0.13 | 6.81        | ± | 0.71 | 1.34     | ± | 0.16 | 0.096         | 0.214     | 0.18                  | ± | 0.01 |
| OSL-01          | 100        | 0.35       | ± | 0.14 | 6.20        | ± | 0.47 | 1.05     | ± | 0.16 | 0.130         | 0.224     | 0.17                  | ± | 0.01 |
| OSL-02          | 130        | 1.22       | ± | 0.38 | 8.29        | ± | 0.37 | 1.57     | ± | 0.16 | 0.196         | 0.205     | 0.17                  | ± | 0.01 |
| OSL-03          | 150        | 0.58       | ± | 0.19 | 4.96        | ± | 0.64 | 1.37     | ± | 0.16 | 0.193         | 0.201     | 0.16                  | ± | 0.01 |
| OSL-3.5         | 180        | 1.19       | ± | 0.05 | 7.24        | ± | 0.88 | 1.57     | ± | 0.16 | 0.221         | 0.225     | 0.15                  | ± | 0.01 |

表 飛鳥板蓋宮遺跡関連OSL年代測定結果

| サンプル名   | Dose rate(Gy/ka) |             |             | 蓄積線量<br>(Gy) | 年代(ka)      |             |             |
|---------|------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|         | Max.             | Present     | Min.        |              | Min.        | Present     | Max.        |
| OSL-00  | 2.10 ± 0.49      | 1.88 ± 0.44 | 1.70 ± 0.40 | 3.72 ± 0.83  | 1.70 ± 0.40 | 1.88 ± 0.44 | 2.10 ± 0.49 |
| OSL-01  | 1.82 ± 0.14      | 1.60 ± 0.12 | 1.47 ± 0.11 | 3.79 ± 0.34  | 2.08 ± 0.25 | 2.37 ± 0.28 | 2.58 ± 0.30 |
| OSL-02  | 2.72 ± 0.14      | 2.23 ± 0.11 | 2.21 ± 0.11 | 6.04 ± 0.25  | 2.22 ± 0.15 | 2.71 ± 0.18 | 2.73 ± 0.18 |
| OSL-03  | 2.09 ± 0.14      | 1.73 ± 0.12 | 1.71 ± 0.12 | 12.40 ± 1.21 | 5.92 ± 0.71 | 7.18 ± 0.85 | 7.23 ± 0.86 |
| OSL-3.5 | 2.62 ± 0.14      | 2.10 ± 0.11 | 2.09 ± 0.11 | 15.83 ± 3.93 | 6.05 ± 1.54 | 7.55 ± 1.92 | 7.57 ± 1.93 |

P 24



# 調査地点における遺跡関連堆積層と $^{14}\text{C}$ 年代・OSL年代の比較

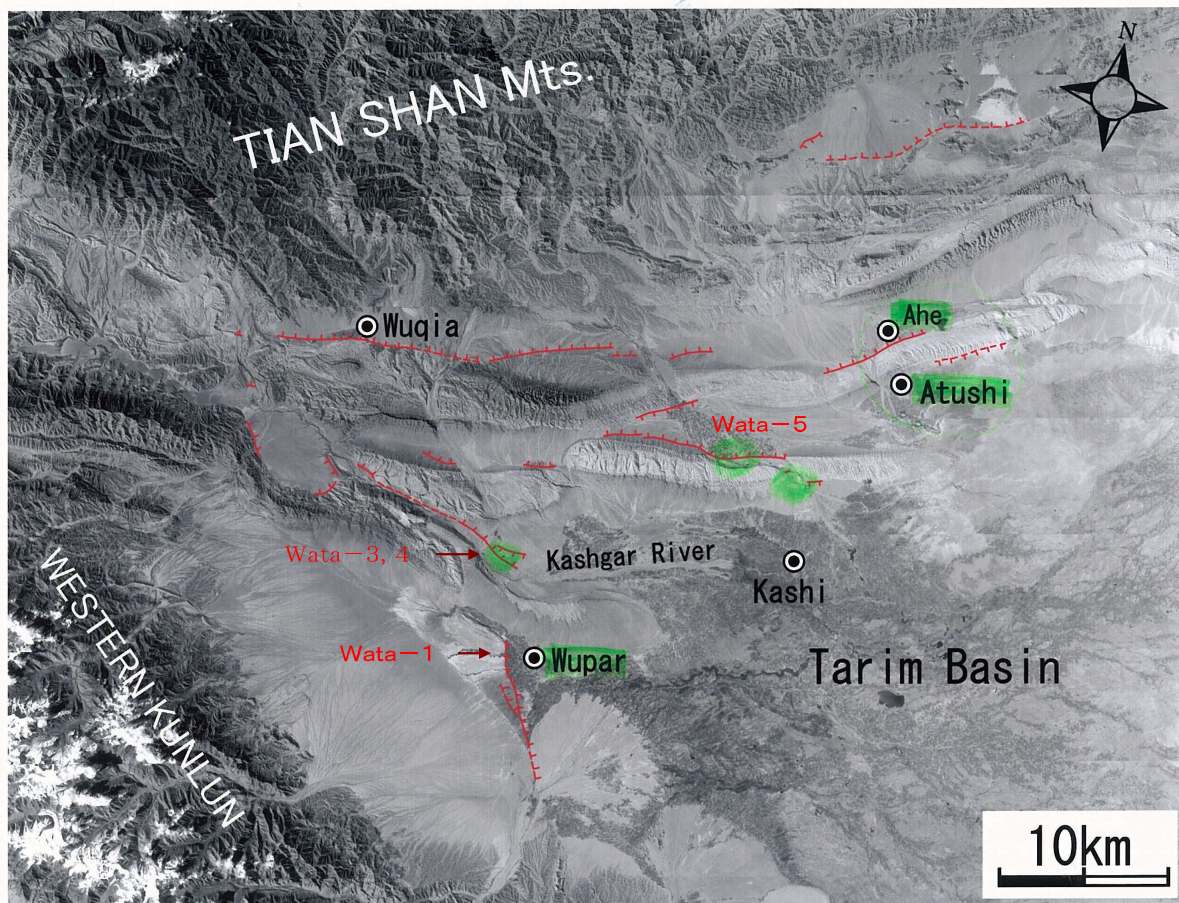
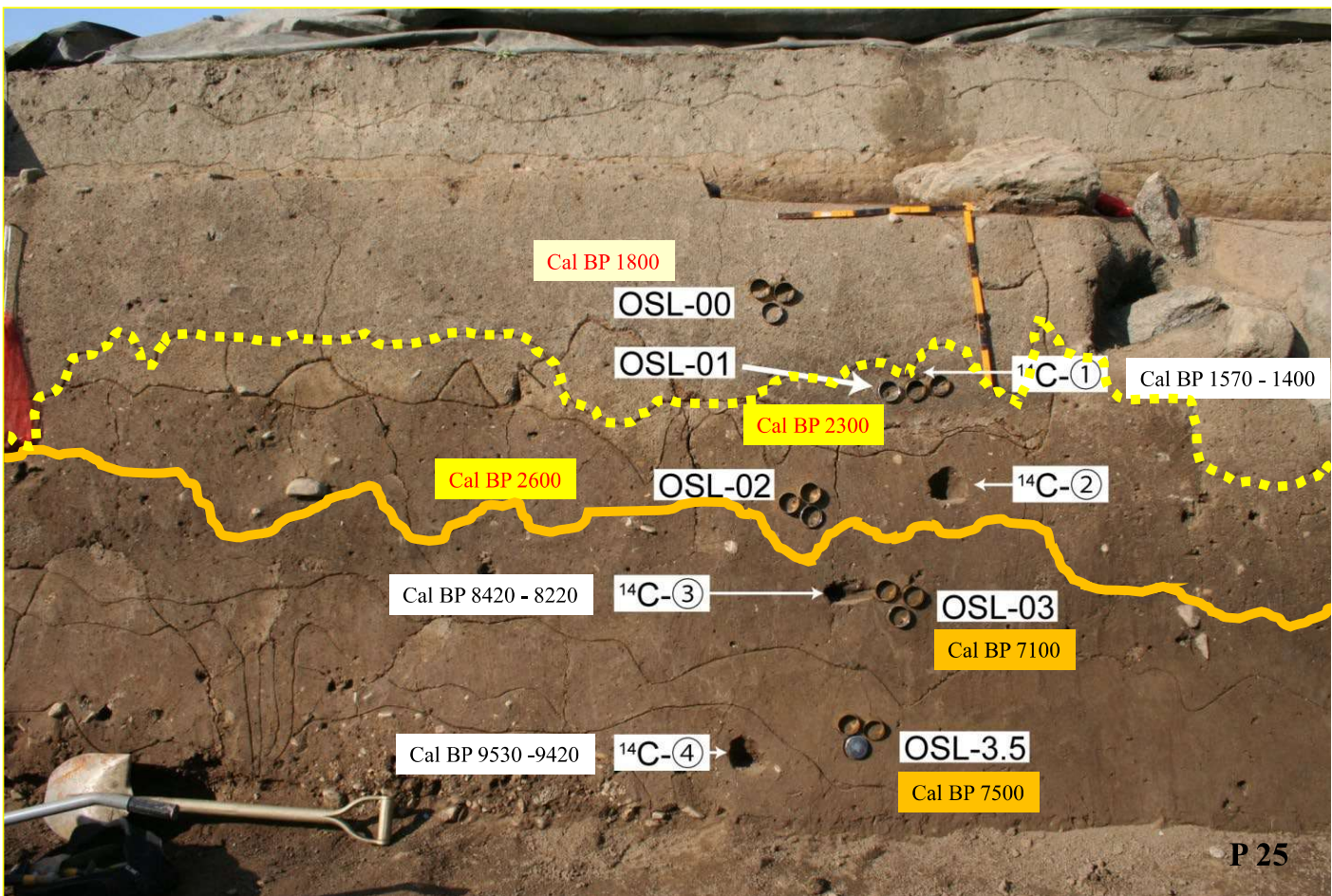


FIG. 調査地域位置図



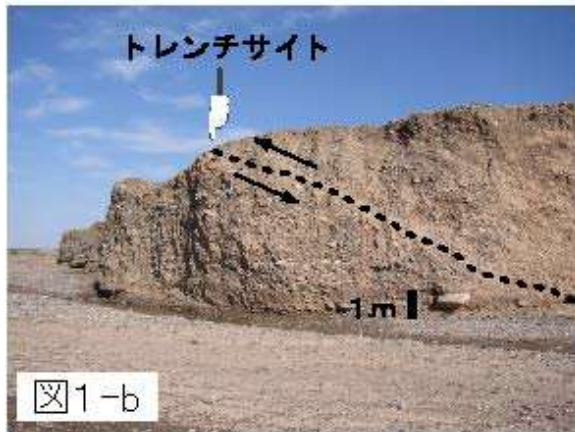
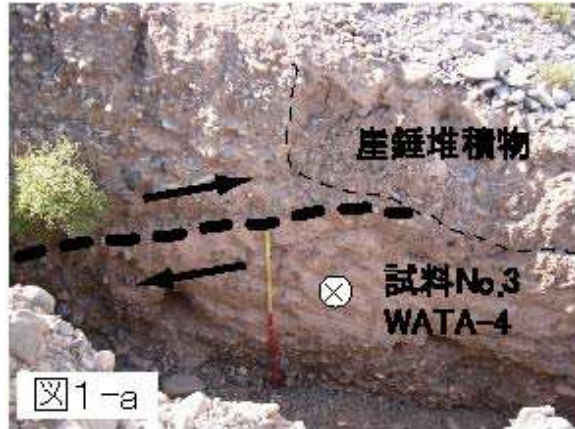
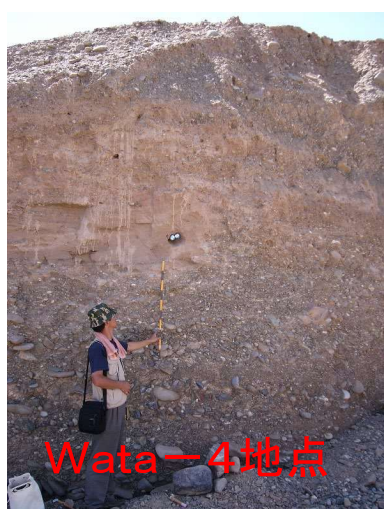


図1 タリム盆地西縁における活断層  
(a)トレンチ壁面とOSL年代測定試料  
(b)付近の段丘崖に見られる断層露頭

図2 Wata-1地点の露頭写真

P 27



P 28



表1 活断層トレンチ壁面試料と関連堆積物のOSL年代(中国タリム盆西縁カシュガル周辺)

Table 1-a. Samples for dating analysis

| No. | Sample name | Location     |              |            | Sample depth (cm) | Cosmic Ray (Gy/ka) |
|-----|-------------|--------------|--------------|------------|-------------------|--------------------|
|     |             | Latitude     | Longitude    | a.s.l. (m) |                   |                    |
| 1   | Wata-1      | N39°18'13.9" | E75°30'46.2" | 1450       | 120               | 0.218 ± 0.011      |
| 2   | Wata-3      | N39°26'57.1" | E75°26'52.7" | 1600       | 340               | 0.157 ± 0.008      |
| 3   | Wata-4      | N39°26'51.3" | E75°27'18.1" | 1600       | 75                | 0.234 ± 0.012      |
| 4   | Wata-5      | N39°36'22.5" | E75°55'26.4" | 1520       | 35                | 0.250 ± 0.012      |

Table 1-b. U, Th, K content<sup>a</sup> of the sediment including the samples and annual external dose estimate.

| No. | U (ppm)     | Th (ppm)    | K <sub>2</sub> O (%) | Grain diameter (μm) | Water content (%) | alpha dose <sup>b</sup> (Gy/ka) | Beta dose <sup>c</sup> (Gy/ka) | Gamma dose <sup>d</sup> (Gy/ka) | Cosmic ray <sup>e</sup> (Gy/ka) | External dose (Gy/ka) |
|-----|-------------|-------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1   | 2.36 ± 0.16 | 9.40 ± 0.73 | 1.67 ± 0.21          | 90-150              | 0.73              | ±                               | 1.62 ± 0.14                    | 1.08 ± 0.06                     | 0.22 ± 0.01                     | 2.93 ± 0.15           |
| 2   | 1.64 ± 0.34 | 4.76 ± 0.30 | 1.37 ± 0.22          | 90-150              | 0.51              | ±                               | 1.23 ± 0.14                    | 0.71 ± 0.06                     | 0.16 ± 0.01                     | 2.09 ± 0.16           |
| 3   | 2.32 ± 0.20 | 9.12 ± 0.90 | 2.14 ± 0.21          | 2-8                 | 4.26              | 0.99 ± 0.07                     | 1.97 ± 0.14                    | 1.11 ± 0.06                     | 0.23 ± 0.01                     | 4.31 ± 0.17           |
| 4   | 1.55 ± 0.29 | 5.43 ± 0.70 | 1.35 ± 0.22          | 90-150              | 1.28              | ±                               | 1.21 ± 0.14                    | 0.72 ± 0.07                     | 0.25 ± 0.01                     | 2.18 ± 0.16           |

<sup>a</sup> Measured by the way of high-resolution gamma spectrometry.

<sup>b</sup> Presumed alpha effectiveness of fine grains;  $\alpha = 0.08 \pm 0.01$

<sup>c</sup> Including the correction of the water content and the attenuation effect of beta ray for a particle diameter.

<sup>d</sup> Including the correction of the water content.

<sup>e</sup> Estimated by the equation of Prescott and Hutton (1988, 1994).

6000～18,000年前の更新世末～完新世の堆積物を断層が切ることから、活断層であることがわかる。

Table 1-c. OSL ages

| No. | Sample name | Preheat Plateau (□) | Equivalent dose <sup>a</sup> (Gy) | Annual dose (Gy/ka) | OSL age (ka) |
|-----|-------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------|
| 1   | Wata-1      | 160-180             | 36.4 ± 4.1                        | 2.93 ± 0.15         | 12.4 ± 1.5   |
| 2   | Wata-3      | 160-200             | 16.1 ± 2.8                        | 2.09 ± 0.16         | 7.7 ± 1.4    |
| 3   | Wata-4      | 160-220             | 52.3 ± 7.0                        | 4.31 ± 0.17         | 12.1 ± 1.7   |
| 4   | Wata-5      | 160-240             | 32.2 ± 5.3                        | 2.18 ± 0.16         | 14.8 ± 2.7   |

<sup>a</sup> Measured by the SAR protocol of Murray and Whittle (2000).

P 29

## 東南極 エンダービーランド

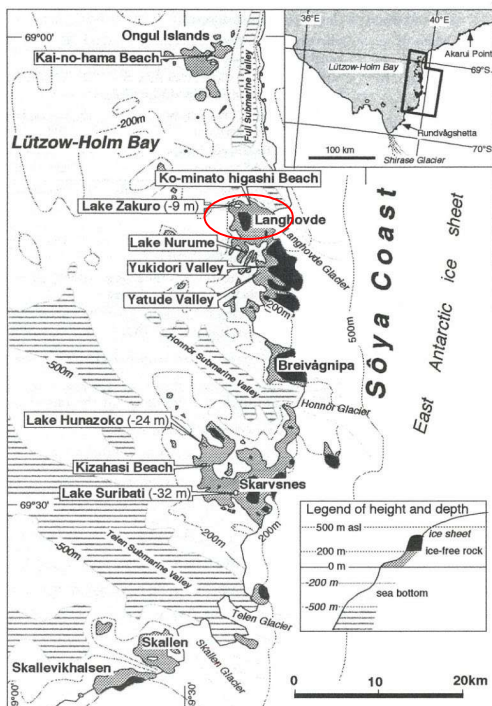


Fig. 2. Location map of the northern part of the Sōya Coast. Contour lines of 200 m and 500 m on land are quoted from the 1:250,000 topographic map (Lützow-Holm Bay) published by the Geographical Survey Institute, Japan. Isobaths of 500 m and 200 m are quoted from MORIWAKI and YOSHIDA (1990).

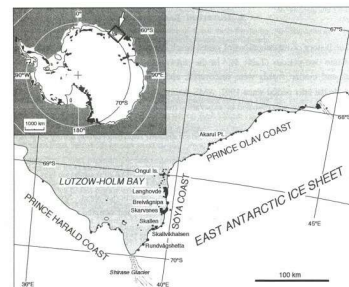
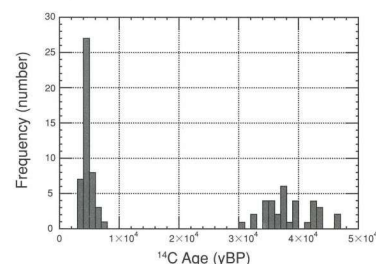
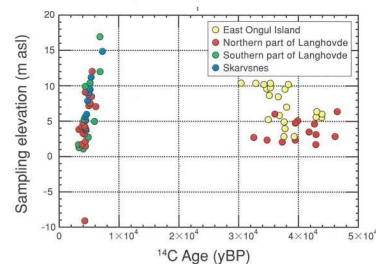


Fig. 1. Index map around Lützow-Holm Bay.



Upper: The relationship between AMS <sup>14</sup>C dating ages and sampling elevation of in situ *Laternula elliptica* around Lützow-Holm Bay  
Lower: The frequency distribution of AMS <sup>14</sup>C dating ages of in situ *Laternula elliptica* around Lützow-Holm Bay

All <sup>14</sup>C dating ages were treated with  $\delta^{13}C$  and background corrections, without reservoir correction.  
Data sources: Maemoku et al. (1997) and Mura et al. (1998a,b)

P 30



## 貝化石 (アラゴナイト) のESR信号

(Takada et al., 1995)

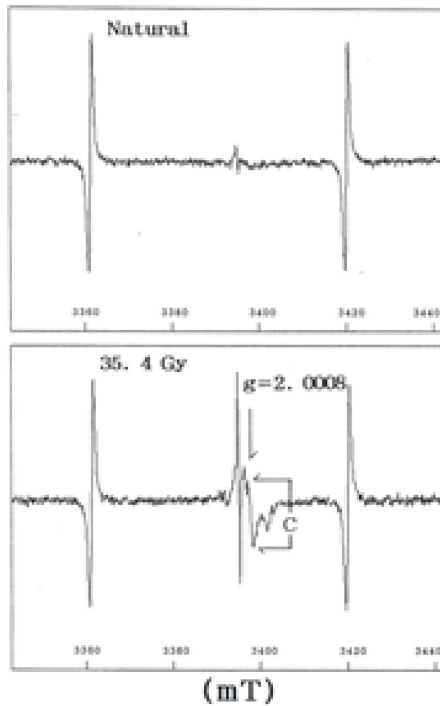


Fig. 2. ESR spectra of aragonitic shells (upper) and that after artificial gamma irradiation of 35.4 Gy (lower) in Sample No. 1. The microwave power was 1 mW with a scan speed of 1.25 mT/min and 100 kHz field modulation at 0.03 mT. The measurements were made at room temperature. "C" indicates the ESR signal C ( $g=2.0008$ ).

P 31

## ESR年代 (貝化石、リュッツホルム湾) (Takada et al., 2003)

Table 4  
ESR ages of in situ fossil molluscs around the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica

| No. | Sample code | a.s.l.<br>(m) | $^{14}\text{C}$ age<br>(yr BP) | Lab. code   | Species             | Equivalent dose<br>(Gy) | Annual dose<br>Max.-Min.<br>(mGy/yr) | ESR age<br>Max.-Min.(ka)    |
|-----|-------------|---------------|--------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 1   | 951224-1a   | 3.9           | $3480 \pm 70$                  | Beta-109391 | <i>L. elliptica</i> | $5.4 \pm 0.3$           | 3.56-3.20                            | $1.7 \pm 0.1 - 1.5 \pm 0.1$ |
| 2   | 951227-4a   | 2.4           | $34,720 \pm 330$               | Beta-109403 | <i>L. elliptica</i> | $168 \pm 35$            | 3.87-2.96                            | $57 \pm 12 - 43 \pm 12$     |
| 3   | 951227-4c   | 1.8           | $42,820 \pm 690$               | Beta-109405 | <i>L. elliptica</i> | $193 \pm 12$            | 3.28-2.53                            | $76 \pm 5 - 59 \pm 5$       |
| 4   | 960206-1-c  | 10.4          | $35,320 \pm 520$               | Beta-100324 | <i>L. elliptica</i> | $295 \pm 86$            | 4.02-3.16                            | $93 \pm 27 - 73 \pm 27$     |
| 5   | 960206-1-d  | 10.4          | $32,840 \pm 220$               | Beta-116846 | Tubes of polychaeta | —                       | —                                    | —                           |
| 6   | 960206-1-g  | 9.8           | $35,200 \pm 330$               | Beta-116847 | <i>L. elliptica</i> | —                       | —                                    | —                           |
| 7   | 960206-1-I  | 9.7           | $37,740 \pm 490$               | Beta-100328 | <i>L. elliptica</i> | $500 \pm 20$            | 3.24-2.41                            | $207 \pm 8 - 154 \pm 8$     |
| 8   | 960206-1-k  | 8.6           | $35,160 \pm 350$               | Beta-100330 | <i>L. elliptica</i> | $735 \pm 126$           | 3.62-2.91                            | $253 \pm 43 - 203 \pm 43$   |
| 9   | 960206-1-r  | 5.7           | $42,840 \pm 930$               | Beta-100335 | <i>L. elliptica</i> | $444 \pm 57$            | 2.74-2.34                            | $190 \pm 24 - 162 \pm 24$   |

14C年代測定で得られている3万年前よりも古い貝化石の年代値の中には、加速器14C年代測定の限界値である5万年前よりも、より古い年代を示す試料が含まれている可能性が高いのではないかと

P 32