地すべり地中の埋木の年代測定と地すべりの周期について

林 徳 煌* 山口 真一**

The Decision of Moving Cycle of Landslides in Past Time by the Age Measurement of Bogwood Obtained from Landslide Area

by Lin Teh Hung and shin-ichi Yamaguchi

§ 1. はし が き

緩慢な地すべり地が急激な崩壊に変じて新しい地表面を生じたときとか、集水井工法などで深く掘り下げていった場合など、埋木を発見することがままある。見た外見はあまり腐蝕しておらず、ほんの数年または数十年前の崩壊で埋められたかのごとき感じがする。たまたま徳島県木屋平村森遠地すべり地で集水井くさく中発見された埋木を学習院大の木越研究室で ^{14}C による年代測定をお願いしたところ15400年 $\pm$ 400年という結果が得られ、その意外に古いことに驚かされた。たまたま著者の一人が台湾大学物理教室に滞在中、ここに非常に優秀で国際的に認められた年代測定の研究グループおよび装置のあることが分った。ちょうどその頃(昭和44年4月26日)死者8名、人家10戸の犠牲を出して著名になった新潟県北魚沼郡広神村水沢新田の地すべり地に巨大な埋木の発見されたことを知っていたので早速送付して貰い測定を行なった。採取は45年3月12日に行なわれた。その

写真-3 埋木より供試体採取状況, 昭和45年3月12日

結果も意外と大きく1370 $\pm$ 40年であった。年代測定の理論は簡単であるが、実際の操作は難かしく装置があってもなかなか実際に可動しているところは少ない。

地すべり関係で年代測定を行なった話は未だ聞いていないので、この優秀な測定法を紹介し、後半では地すべりの周期について論じてみた。

写真-1 台湾大学年代測定室

試料を燃焼させて生成せる CO_2 ガスを CaCO_3 として集め CaCO_3 を加熱分解させて、再び CO_2 にして液体 N_2 で冷却しドライアイスとして精製、測定用 CO_2 にしてフラスコに集める。

写真-2 台湾大学年代測定室

測定用 CO_2 をガスカウンターにつめて、約50時間掛けて測定する。

§ 2. 年代測定の原理について

自然界に宇宙線の中性子によって大気の上層で炭素14が生成され、これが炭酸ガスの形で存在することが1947年Libbyによって明らかにされた。通常大気中に存在する炭酸ガスは生物の呼吸、火山、温泉、噴気孔などによる地球内部からの供給源があり、これに成層圏から供給される放射能をもった炭素14炭酸ガスの量はほぼ一定で、常に一定量の炭素14が炭酸ガス中に含まれていたことがわかる。しかし19世紀の後半頃から人類の消費する石炭、石油量が急増したため、ここから供給された炭

* 台湾大学理学院化学系技士

** 京都大学防災研究所教授

酸ガスによって、放射能をもつ炭素14の濃度が2%ほど、薄められていることが測定されている。これは Suess 効果と呼ばれている。この炭酸ガスの供給と消費による大気中の炭酸ガス量の釣り合いは生物を媒介として形成される大きなサイクルによって現在ほぼ平衡に達しているものと考えられる。植物は生きている間は絶えず新しい炭酸ガスを取り入れて、同化作用を営むので空気中の炭素14と植物体中の炭素14濃度はほとんど同じである。

ところで植物は死ぬと同化作用は終わり、新しい外界の炭素14の補給が終わるので遺骸中に固定された炭素14は腐敗か燃焼によって炭酸ガスとなって放出されない限りのがられずその半減期約5600年によって β -崩壊し、次第に減少するばかりである。すなわち植物体中の炭素14の濃度を測定して、それを現在生きている植物体中の炭素14とくらべれば、その植物が死んでから現在までの過経年数がわかる。

§ 3. 測定について

3.1 木片試料の燃焼

まず木片をルツボに入れ、加熱炭化して得られた木炭を酸素気流中で燃焼させ、完全燃焼して得られた二酸化炭素を6Nアンモニア水に吸収させて回収した。二酸化炭素を吸収したアンモニア水を約80°Cに加熱し、同じく80°Cに加熱した反応量の塩化カルシウム溶液を加えて、二酸化炭素を炭酸カルシウムとして沈澱させ、濾別した沈澱に塩酸を滴加して、発生する二酸化炭素をまたアンモニア水に吸収させ、前と同じく、再び炭酸カルシウムの沈澱として回収した。さらに精製するため、沈澱を熱水中に懸濁して、吸引濾過、水洗の操作をくり返し水洗濾液にCl⁻反応がなくなるまで沈澱を洗滌した。この水洗操作は最後に生成して炭酸ガスの純度を左右し、微量不純物が計数管の特性を大きく変化させて、測定結果に大きな誤差を引き起すので特に注意して行なった。

3.2 Modern Carbon Standard の作り方

Modern standard としてはアメリカの National

Fig. 1 Apparatus for combustion

Bureau of Standard が出している年代測定用として検定済みの標準シュウ酸を用いた。まず30gのNBSシュウ酸を300mlのH₂Oに溶解し、フラスコに入れて、160ml 6N H₂SO₄を加え、酸素ガスを通しながら550mlの4%KMnO₄溶液を滴加して炭酸ガスを発生させ、木片試料と同じく、炭酸カルシウムを作った。

3.3 Dead Carbon の作り方

大理石に塩酸を滴加して発生する二酸化炭素を集めて、木片試料と同じように処理して作った。

3.4 測定用二酸化炭素の発生

乾燥純炭酸カルシウム約15gを石英管に入れ、10⁻³mm Hgに減圧しながら500°Cで5時間加熱した後、750°Cで10分間加熱して微量の水分と酸素を除き、水分はdry ice trapで除いた。さらに温度を900°Cに上げ、純炭酸カルシウムを加熱分解、発生した二酸化炭素をliquid air trapで固化して集めた後、蒸発気化させて出した純二酸化炭素で先に3回貯蔵用フラスコを洗ってから注入貯蔵した。貯蔵フラスコから比例計数管内に注入するときはフラスコの一部をliquid airで冷却して二酸化炭素を固化し、フラスコは、比例計数管と同じく先に10⁻⁵mm-Hgに減圧して残留ガスを完全に除いてから注入した。

Fig. 2 Apparatus for preparation of carbon dioxide

3.5 測定装置

放射能の測定誤差として測定機械から出て来る誤差たとえばnoise以外に考えられるものに、宇宙線が測定管を透過して測定ガスを電離させて発生する誤差がある。それで透過力の強い宇宙線を防ぐために測定管を厚さ25cmの鉄板で完全に囲い、その上測定管のまわりにgas flow counterを取りつけ、透過して来る宇宙線を計測してanticoincidence circuitによって、宇宙線による計測値を差し引いているlow back ground counterが用いられている。

(イ) 中心比例計数管

内径4.4cm、長さ60cmの銅管から成り、

Fig. 3 Center counter and outer counter

Fig. 4 Block diagram of the electronic system

中心に径 0.005 cm のステンレス線が張られ、体積は約 921cm² である。

(d) シールド用比例計数管

中心比例計数管の外側にあって、径 12.8cm、長さ75 cm のステンレス管に20本の直径0.005cm のステンレス線を円状のアクリル樹脂板に張った multi-anode 比例計数管である。

3.6 測定機の調整について

中心 counter に sample CO₂ ガスを種々の気圧で封入し、電圧を徐々に増すと count 数も増し大体 5 kV で 150 counts/min となり、その後電圧を増しても一定で Plateau 域を形成する。さらに電圧を増すと連続放電域となる。この各圧力におけるプラトー曲線から operating voltage を定めているが、プラトーの始まる電圧に 300 V を加えた値を用いた (図-5 参照)。

同じようにして outer counter にメタンガスおよびプロパンガスを流したまま宇宙線によって遊離される電子を前と同じ原理に従ってプラトー曲線を求めているが、4.6~5.6kVの約1kVの範囲にプラトー部があり counter 特性として良好なことを示している。

次に outer counter がどこまで効果的に外部からの宇宙線の影響を除く働きをするかを確認してみた。center counter に 1 気圧の CO₂ を封入して電圧を上げていくと電圧の上昇と共に count 数も増加し、180c.p.m で一定となり 3.6~4.1kV までプラトーが続いていることが分る (図-6 参照)。この 180c.p.m は CO₂ 内の放射能と宇宙線の総和である。次に outer counter にメタン、またはプロパンガスを流しながら outer counter の電圧を上げていくと宇宙線による count 数も電圧の上昇と共に増加し約 800c.p.m で一定となり 4.8kV より 5.5kV までプ

Fig. 5 The plateau curves of the center and outer counter

Fig. 6 Counts of the center with and without the anticoincidence when the applied voltage is varied

ラーターが続いている。次に両方の counter を働かすのであるが、先に求めた center counter の operating voltage

Fig. 7 Counts of the center counter with anticoincidence when the voltage of the outer counter

を最初から center counter に与え outer counter の方は電圧を次第に上げていって center counter の count 数を求めると anticoincidence が利いていない 180c.p.m から始まって anticoincidence の作用と共に count 数が減少し大体 16c.p.m に落着いて一定となる。このときの outer counter の operating voltage は 4.8~5.3kV である。したがって、この測定より anticoincidence が効いていることおよび center counter に 1 気圧の試料をいれたときの両 counter の operating voltage 域を決定できる (図-7)。

最後にこのようにして、各種気圧のもとにおいて測定した結果を図にプロットし零気圧のときの値を推定すると Dead Carbon の c.p.m と一致するかどうか確認して、測定結果の信頼度確かめている (図-8)。

Fig. 8 Pressure test of the center counter

3.7 測定結果および得られた結果

(イ) Sample の封入気圧

$$P_1 = 1520 \text{ mm-Hg}$$

$$P_2 = 1368 \text{ mm-Hg}$$

$$P_3 = 1216 \text{ mm-Hg}$$

(ロ) Operating voltage

$$V_1 = 5.3 \text{ kV}$$

$$V_2 = 5.1 \text{ kV}$$

$$V_3 = 4.6 \text{ kV}$$

outer counter はすべて 4.7kV

(ハ) 測定時間

$$t_1 = 1175 \text{ min}$$

$$t_2 = 1081 \text{ min.}$$

$$t_3 = 915 \text{ min.}$$

(ニ) 測定時の温度

$$T_1 = 273 + 22$$

$$T_2 = 273 + 20$$

$$T_3 = 273 + 20$$

(ホ) 0°C への換算圧力

$$P_{01} = 1407 \text{ mm-Hg}$$

$$P_{02} = 1275 \text{ mm-Hg}$$

$$P_{03} = 1133 \text{ mm-Hg}$$

(ヘ) Gross counts

$$N_1 = 13.85 \pm 0.11 \text{ c.p.m}$$

$$N_2 = 13.01 \pm 0.11 \text{ c.p.m}$$

$$N_3 = 11.92 \pm 0.11 \text{ c.p.m}$$

(ト) Back counts

$$N_{b1} = 4.51 \pm 0.06 \text{ c.p.m}$$

$$N_{b2} = 4.57 \pm 0.06 \text{ c.p.m}$$

$$N_{b3} = 4.37 \pm 0.05 \text{ c.p.m}$$

(チ) Net counts

$$n_1 = 9.34 \pm 0.11 \text{ c.p.m}$$

$$n_2 = 8.44 \pm 0.11 \text{ c.p.m}$$

$$n_3 = 7.55 \pm 0.11 \text{ c.p.m}$$

(リ) Net counts を 0°C における気圧数で割り 1 mm-Hg の count 数を求める

$$n_{01} = 0.006638 \text{ c.p.m/mmHg}$$

$$n_{02} = 0.006620 \text{ c.p.m/mmHg}$$

$$n_{03} = 0.006664 \text{ c.p.m/mmHg}$$

$$\bar{n}_0 = \frac{n_{01} + n_{02} + n_{03}}{3} = 0.006641 \text{ c.p.m/mmHg}$$

(ヌ) N.B.S も同様に 0°C に補正して平均する

$$N_1' = 16.27 \text{ c.p.m}$$

$$N_2' = 14.96 \text{ c.p.m}$$

$$N_3' = 13.80 \text{ c.p.m}$$

$$n_{01}' = 0.08418 \text{ c.p.m/mmHg}$$

$$n_{02}' = 0.008279 \text{ c.p.m/mmHg}$$

$$n_{03}' = 0.008187 \text{ c.p.m/mmHg}$$

$$\bar{n}_0' = 0.008295 \text{ c.p.m/mmHg}$$

(ル) N.B.S は dating の場合 95% として計算する

$$x = \frac{\bar{n}_0}{0.95 \times \bar{n}_0'} = 0.8428 \text{ c.p.m/mmHg}$$

(ロ) 年代 t は

$$t = 5570 \times \frac{\log 0.8428}{\log 1/2} = 5570 \times \frac{0.07428}{0.3010} = 1370$$

(リ) 標準偏差の式を展開して誤差範囲をきめるが、今までの測定結果を計算してみると大体約 3% に落ち着くので、 1370 ± 40 年が得られる。

§ 4. 地すべりの周期について

日本の地すべりは、ほとんどの場合旧地すべりの跡に生じている。ということは各地域に周期的に発生することが予想される。すなわち周期は大地すべりによって安定化した地盤が、風化、地盤変動、堆積、浸蝕などの過程を通じて再び不安定になるまでの期間で、当然地質、地形、気候その他あらゆる要因の影響を受けるので一概に推定することはできない。しかし大地すべりが起きて数年後に再び大地すべりが発生するとは誰も思わない。胡桃や由比の地すべり地に再び大崩壊に近い将来起るとは思えない。しかしあと数百年先になるとどうか分らない。そういう観点から考えると木屋平の 15400 年、水沢新田の 1370 ± 40 年は大体の地すべりの周期の桁を暗示するものであろうか。

日本の地すべり地は大体 6000 箇所といわれている。そこで地すべり性大崩壊の生ずる周期が、1000 年に 1 回、2000 年に 1 回、15000 年に 1 回あるとして、それぞれの場合について年間発生件数の確率を計算してみた。たとえば 2000 年に 1 回の周期で発生する場合、年間 n 回発生する確率は

$${}^{6000}C_n \left(\frac{1}{2000} \right)^n \left(\frac{1999}{2000} \right)^{6000-n}$$

である。

ここに

$${}^{6000}C_n = \frac{6000!}{n!(6000-n)!}$$

である。

この式によって計算した結果を表-1 および図-9 に示す。

1000 年周期では年 5 回、6 回発生の確率が最大、2000 年周期では年 2 回、3 回発生の確率が最大、15000 年周期ではむしろ発生しない年の方が多いという結果になり、発生件数が少な過ぎる感じもする。しかし写真-3 に示すような大樹が埋れるような大崩壊性地すべりの発生はそんなに多くなく、年数回というのは正しいというような感じもする。もしそうすると崩壊性地すべりの周期は千年の桁となり、われわれが潜在的に考えていた数十年周期の概念を大きく変えねばならないと思う。

Fig. 9 Probability of occurrence of large failure type landslide

§ 5. 結 語

年代測定技術は非常に有効で各分野にわたって面白い知識を供給して呉れる。しかし実際の測定技術はなかなか難しく、信頼できる結果を出してくれるところは世界でも数が少ない。そのせいか崩壊性地すべりの中から発見された埋木の年代測定がなされたことは今までできなかったことがなかったが、ここに発表された 1370 ± 40 年は信頼のおける値である。これくらいの値が崩壊性地すべりの周期と考えると、日本での年間発生率は平均4回前後である。大木が埋れるくらいの大崩壊であるので、これも案外正しい値かも知れない。インドネシアは非常に地すべりの多いところであるのは日本人技術者の方が良

表-1 発生確率表

発生件数 1年当り	1000年周期	2000年周期	15000年周期
0	0.00	0.05	0.68
1	0.02	0.15	0.27
2	0.04	0.23	0.05
3	0.09	0.23	0.01
4	0.13	0.17	0.00
5	0.16	0.10	
6	0.16	0.06	
7	0.14	0.02	
8	0.11	0.01	
9	0.07	0.00	
10	0.04		
11	0.02		
12	0.01		
13	0.01		
14	0.00		

く知っているが、あちらの地質調査所の担当官に尋ねると、年間5回ぐらいの発生だと答えていたが彼の頭の中にやはり、こういう大崩壊性の地すべりを頭に画いたからであろうか。

今後さらに地すべり地中の埋木の年代測定を続けたいので、御存知の方があればお知らせ頂きたい。

この測定を心よく許可し御協力下さった台湾大学物理教室許雲基教授。測定および計算のお世話になった同黄家裕副教授。埋木の採取および送付に御協力頂いた新潟県小千谷土木事務所横山好雄所長、京都大学防災研究所高田雄次助教授に厚く謝意を表したい。