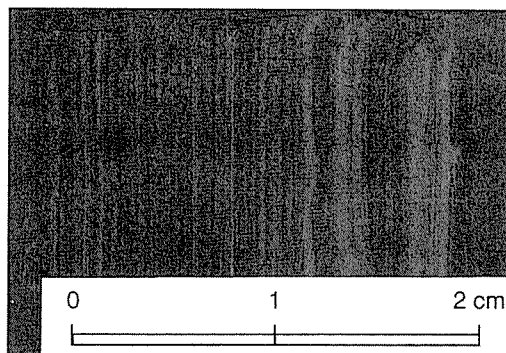


## 퇴적물의 나이테에 주목한 탄소 14시계의 보정

### 1. 머리말

「나이테」라 하면 나무의 나이테를 상상할지 모르겠지만, 나무의 나이테와 마찬가지로 퇴적물, 산호 또는 얼음바닥에도 나이테가 새겨져 있을 때가 있다. 우리가 주목하고 있는 것은 호수밑바닥의 퇴적물에 새겨진 나이테이다. 「호수밑바닥 퇴적물의 나이테」라고 말하면 쉽사리 상상할 수 없지만 어떤 호수 늪 또는 해양에서는 퇴적과정의 계절변화가 호트러지지 않고, 바코드와 같은 줄무늬가 기록되어 있는 것이 있다. 우리는 이 나이테가 새겨진 퇴적물을 「연호(年縞)퇴적물」이라 부르고 있다.

후쿠이켄(福井) 수이게쓰호(水月湖)의 호수바닥에서 세계적으로는 거의 유례가 없는 과거 10만년동안 연속적으로 생긴 연호(年縞) 퇴적물이 발견되었다. 문부성의 중점영역연구인 「문명과 환경」 프로젝트로 1993년 가을 수이게쓰호의 밑바닥에서 굴삭깊이 75m 까지의 불교란(不攪亂)퇴적물이 채집되었다. 이 퇴적물에는 주로 봄이 오기전 식물 플랑크톤의 발생으로 형성된 흰빛을 띤 층이 새겨져 있다(그림1). 그 흰층의 수를 조심스럽게 헤아리면 퇴적물의 형성년대(연호편년(編年))를 구할 수 있다.



[그림] 수이게쓰호의 연호편. 흑백 한쪽은 1년

또한 안성맞춤인 것은 호주주변 육상식물의 잎이나 작은 가지, 곤충이 퇴적물에 많이 들어있다. 이러한 육상기원의 생물유체화석에 대한 C-14 연대측정을, 미량시료의 C-14 연대측정에 효과적인 가속기질량분석법(AMS법)으로 분석해 보면, 연호편년과는 독립적으로 퇴적물의 연대(C-14 연대편년)를 구할 수 있다. 이와 같은 두가지 다른 방법으로 얻은 편년이 일치하고 있으면 별 문제는 없지만 실제로는 큰 차이가 있다. 이 엇갈림은 C-14연대측정을 사용하는 고고학자에 있어서는 중대한 문제인 것이다. 또 이 「C-14시계의 착오」는 왜 일어났을까, 어떠한 메카니즘으로 일어났는가는 과거의 지구환경 변천을 탐구하고 지구환경변경의 메카니즘 해명을 연구대상으로 하고 있는 연구자에게는 매우 흥미깊은 연구대상이다. 왜냐면, C-14 시계의 착오는 우주나 지구의 변동과는 친밀한 관계가 있기 때문이다.

현재 수이제쓰호의 연호퇴적물에 대한 해석에서 과거 5만년간의 C-14시계의 특징이 밝혀지려고 하고 있다. 인간이나 지구환경변동의 역사를 고려한 새로운 정보가 얻어질 것이다. 여기에 연호퇴적물에 주목한 C-14시계의 보정(C-14 연대 측정법으로 얻은 연대를 진짜 연대로 보정) 전문적으로 말하면 「C-14 연대 캘리브레이션 년대역의 확대」의 현황에 대하여 소개한다.

## 2. C-14 연대의 보정

C-14연대는 과거의 자연이나 인간의 이벤트년대를 결정할 필요가 있는 광범위의 연구에 있어서 유효한 연대측정 방법의 하나이다.

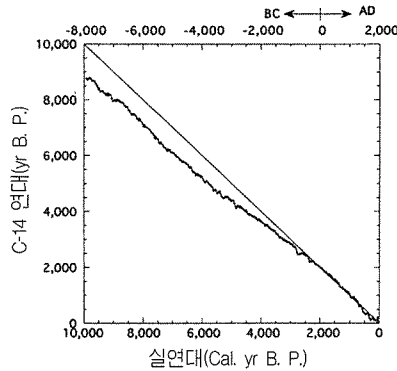
방사성동위원소인 탄소14(C-14)는 우주선기원의 2차적인 중성자와 대기중의 질소원자의  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  반응으로 끊임없이 생성되고 있는 우주선기원인 방사성동위원소의 하나이다. 생성후 C-14는 대기중의 산소에 의하여 순간적으로 산화되어 방사성이산화탄소( $^{14}\text{CO}_2$ )로 된다. 그후, 안정동위원소인  $^{12}\text{CO}_2$ 나  $^{13}\text{CO}_2$ 와 함께 지구 규모의 탄소순환을 통해서 급속히 확산하여, 광합성으로 생물에 섭취된다.

식물이 죽으면 대기로 부터의 탄소 섭취가 정지되어 식물에 들어있는 C-14는 방사붕괴하여 감소하게 된다. 따라서 식물화석에 남아있는 C-14의 농도를 측정하여 얼마만큼 C-14가 붕괴하였는가를 구하면 그 식물의 「죽은 연대」를 구할 수 있다. 이것이 고고학이나 고환경변동해석에 종종 사용되고 있는 C-14연대측정법(또는 방사성 탄소 연대측정법)의 기본이다.

C-14는 반감기 5,730년으로서 일정한 율로 방사붕괴하여 질소로 변하는 것은 사실이지만 과거로 거슬러 올라가면 생물에 들어있는 C-14 농도는 변동하고 있다. 과거로 거슬러 올라가도 생물에 들어 있는 C-14농도는 일정하다는 가정하에서 얻

어진 C-14 연대는 실연대와는 어긋나고 있다. 즉 C-14연대는 실연대가 아닌 것이다.

이 어긋남, 즉 실연대와 C-14연대의 관계를 나타낸 것이 「C-14 연대 캘리브레이션(calibration)곡선」이다. 이 곡선은 이론적으로 구할 수는 없으며 실험적으로 구해야 한다. [그림2]는 수목년륜연대학으로 실연대가 결정된 목재의 C-14연대측정을 근거로 얻어진 C-14 연대 캘리브레이션 곡선이다. 과거 11,000년 동안에 대하여 대체로 C-14연대가 실연대 보다 새로운 경향을 보이고 있다.



[그림2] 수목년륜에서 얻은 C-14연대 캘리브레이션

더욱이 과거로 거슬러 올라가도 이 경향은 계속될 것인지 현대 남유럽이나 남반구의 타스마니아섬 등의 지역에서 목재화석의 조사가 진행되고 있지만 아직 [그림2]에 나타난 C-14연대 캘리브레이션 연대역을 확대시킬 결정적인 목대는 발견하지 못하였다.

수목년륜의 분석으로 밝혀진 C-14연대 캘리브레이션곡선의 연대역확대는 ①우라늄계열의 연대측정법으로 연대결정(실연대와 가정)된 산화석의 C-14연대 측정, ②호수, 늪, 해양의 연호퇴적물에 대한 연호편년(실연대)과 C-14 연대를 비교한다는 두가지 방법이 있다. 1993년에 간행된 Calibration (Radiocarbon, 35 (1993))에는 잠정적 이지만 ①의 방법으로 작성된 C-14연대 캘리브레이션 곡선이 채용되었다.

그러나 ① 방법으로는 산화석의 계속성장작용이나 변질에 의한 우라늄계열 연대나 탄소 14 연대에 불확실성이 있고 또 시간분해능이 낮다는 문제가 있다. 이 잠정적인 C-14연대 캘리브레이션의 신뢰성을 평가하기 위해서도 다른 방법으로

C-14연대 캘리브레이션곡선이 작성되어야 한다고 바라게 되었다.

최근, 퇴적물의 채집기술 및 해석기술의 향상, AMS법에 의한 C-14연대측정의 고정도(高精度)화 그리고 미량시료의 측정기술에 진전이 있었다. AMS법으로는 100 $\mu$ g의 탄소만 들어있는 시료에서도, 고정도의 C-14연대측정이 가능하다. 연대 측정시료 크기의 제약이 완화되었다.

이와 같은 새로운 연대측정기술을 연호퇴적물의 연대측정에 응용하면, C-14연대 캘리브레이션 곡선 연대역이 확대될 것이라 생각되어 세계 각지의 연구기관에서 연호퇴적물에 주목한 C-14연대 캘리브레이션 곡선 작성에 관한 연구가 개시되었다. 우리도 과거 5만년간(동위원소농축법을 사용하지 않는 C-14 연대측정법의 한계)의 C-14 연대 캘리브레이션곡선을 작성하는 것을 하나의 연구목적으로 수이게쯔호의 연호퇴적물을 분석하였다.

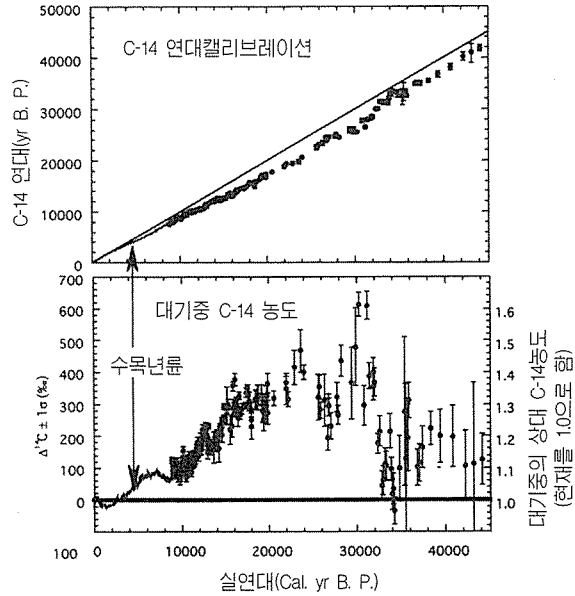
### 3. 과거 5만년간의 C-14 연대 캘리브레이션 곡선

연호퇴적물에 주목하여 C-14 연대 캘리브레이션곡선 연대역의 확대를 시도한 연구결과는 5년동안에 여러 자연과학잡지에 보고되었다.

우리는 세계에서 가장 오래동안 연속된 연호가 새겨진 수이게쯔호 연호 퇴적물을 연구대상으로하여 네델란드 호로닌겐대학 동위원소연구센터와 공동으로 과거 5만년간의 C-14 연대 캘리브레이션곡선의 작성에 들어갔다. 그 성과에 대해서는 미국의 과학잡지 Science, 279 (1993)에 발표하였다.

[그림3]에 수이게쯔호의 연호퇴적물에서 추정된 C-14연대 캘리브레이션 곡선(윗그림)과 그 시대의 대기중 C-14 농도 변동(아래그림)을 나타내었다. 수이게쯔호의 연호퇴적물에서 추정된 C-14연대 캘리브레이션곡선은, 앞에서 말한 우라늄계열의 연대측정법으로 연대결정된 산호화석의 C-14연대측정에서 추정된 잠정적인 C-14연대 캘리브레이션곡선과 과거 2만년간에 대하여 일치하고 있다. 또한 다른 우주선기원의 방사성동위원소인 Be-10이나, 지자기 강도의 경년(經年)변동에서 추정된 대기중 C-14농도 변동과 과거 5만년간에 대하여 대략 일치하고 있는 경향이다. 또 약 3만년전에 C-14연대와 실연대의 연대차가 가장 확대되어 있고 C-14연대가 실연대보다 5천년 정도 새로운 경향이 있다는 것을 밝혔다.

수이게쯔호의 연호퇴적물분석으로 밝혀진 C-14 연대 캘리브레이션곡선의 미세 구조에 주목하면 대기중의 C-14 농도에 100~1,000년 정도의 변동을 볼 수 있다. 대기중 C-14 농도의 변동을 야기하는 원인에 대해서 ① 해양 대순환의 변동에 따른 지구규모 탄소순환의 변동, ② 지자기변동(지자기의 장기 변동이나 excursion)에



[그림3] 수이게쯔호 연호퇴적물에서 구한 과거 5만년간의 C-14 연대 캘리브레이션

따라 지구에 날라오는 우주선 선속의 변동, ③ 초신성폭발에 의한 은하 우주선의 변동 (C-14 생성률의 변동) 등 여러가지의 우주·지구 물리학적, 지구화학적인 요인이 관련되어 있다고 해석할 수 있다. 그러나, 최종 빙기(氷期)의 대기중 C-14의 변동을 규제하고 있는 메커니즘을 정량적으로 설명하기 위해서는 앞으로 데이터의 축적, 또 그 데이터를 해석해야 할 것이다.

#### 4. 맺음

방사성동위원소의 하나인 C-14의 특성을 이용한 C-14시계의 보정이 과거 5만년동안에 대하여 가능케 될 것 같다. 가까운 장래 인간이나 자연의 역사가 실연대 스케일로 논의될 것으로 생각된다. 고분해능으로 신뢰할 수 있는 C-14연대 캘리브레이션곡선을 구축하기 위하여 고밀도의 AMS 탄소14 연대측정, 또 수이게쯔호의 연호편년에 대한 신뢰성의 평가에 전력해야 할 것이다. **KRIA**

(국제일본문화연구센터 北川浩之)