

^{210}Pb 연대측정에 의한 일본 타코부호수의 토사퇴적속도 변화 분석

안영상^{1*} · 안기완¹ · 이계한¹ · 中村太士²

¹전남대학교 산림자원학부, ²북해도대학교 산림과학학부

Recent Changes of Sedimentation Rate in Lake Takkobu, Northern Japan, Determined ^{210}Pb Dating

Young Sang Ahn^{1*}, Ki-Wan An¹, Kye-Han Lee¹ and Futoshi Nakamura²

¹Division of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²Department of Forest Science, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

요약: 산림유역의 토지이용 변화가 호수의 토사퇴적속도에 미치는 영향을 조사하기 위해 ^{210}Pb 연대측정을 수행하였다. 평상시 타코부호수는 쿠시로강으로 유출되지만 쿠시로강의 수위가 증가하면 역류현상으로 인해 쿠시로강에 유출된 다량의 세립토사가 호수로 유입되고 있어 호수 유출지점의 토사퇴적속도를 증가시키고 있었다. 그래서 호수에서 유·출입하는 하천 주변의 토사퇴적물에서 ^{210}Pb 농도는 많은 양의 토사 퇴적의 영향으로 ^{210}Pb 농도가 희석되어 비교적 낮은 값을 나타내고 있었으며 지수함수적으로 감소하는 경향도 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서는 CRS 모델의 ^{210}Pb 연대측정법을 사용하였고, CRS 모델의 연대는 ^{137}Cs 연대(1963년)와 잘 일치하였다. 타코부호수에서 과거 100~150년 정도의 토사퇴적속도를 조사한 결과, 유역에서 인위적 개발이 없는 1880년대 이전 자연상태에서는 토사퇴적률이 0.01~0.03 g/cm²/year였고, 산림벌채와 하천공사가 시작된 1880년대~1940년대에는 0.03~0.09 g/cm²/year으로 토사퇴적이 증가하였다. 특히 유역에서 산림벌채, 하천공사, 농업개발과 임도 개설이 진행된 1980년대 이후에는 토사퇴적속도가 0.09~0.84 g/cm²/year로 자연상태보다 9~28배 증가하여 호수의 수심이 알아지는 현상을 가속시키고 있는 것으로 나타났다.

Abstract: ^{210}Pb dating was conducted to examine the influence of land use changes in the forest catchment on lake sedimentation. The Kushiro River, into which Lake Takkobu drains under regular flow conditions, contributed to an increased sedimentation rate in sampling point at the lake outflow because turbid water from the Kushiro River flows back into Lake Takkobu during floods. The elevated sediment flux from the catchment dilutes the ^{210}Pb concentration in sampling points at the inflow of the Takkobu River and the lake outflow, which causes fluctuations in the ^{210}Pb concentrations in sediment cores. The ^{210}Pb dating was estimated using the CRS (Constant rate of Supply) model. The dates by the CRS model in Lake Takkobu profiles were in good agreement with the dates by ^{137}Cs . Sedimentation rates reconstructed for the past 100-150 years suggested that sedimentation rates increased drastically following land use changes. While a natural sedimentation rate of 0.01-0.03 g/cm²/year is observed until the 1880s, whereas lake sedimentation accelerated to 0.03-0.09 g/cm²/year following land use changes such as deforestation and channelization, between the 1880s and 1940s. In particular, the sedimentation rates have been associated with deforestation, channelization, agricultural development and road construction, since the 1980s, and these rates were about 9-28 times higher than those under natural conditions, leading to accelerated lake shallowing.

Key words : forest catchment, land use change, fine sediment, lake sedimentation, lake shallowing, ^{137}Cs dating, ^{210}Pb dating, Kushiro Mire

서론

인간 활동이 활발해지면서 농업, 하천공사 및 산림벌채 등의 개발이 급속도로 증가하고 있으며, 이로 인해 강우 시 다량의 토사가 유출되고 있다(Nakamura et al., 1997,

2002; Walling et al., 2003; Mizugaki et al., 2006; Ahn et al., 2006; 2009; 2010). 토지이용 변화로 인해 산림에서 생산된 토사는 바다까지 유출·퇴적되고 있어 토사의 이동 범위는 매우 광범위하다고 할 수 있다. 특히 유출된 토사는 장기간동안 호수와 범람원 등에 퇴적되어 수질, 지형과 식생 등의 자연생태계를 변화시키는 원인이 되고 있다(Ahn et al., 2006; 2008; 2009; 2010; Ahn and Nakamura,

*Corresponding author
E-mail: ysahn@jnu.ac.kr

2009). 따라서 유역의 토지이용 변화에 따른 토사 유출이 환경에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 장기간의 토사 동태에 관한 연구가 필요하다.

산지 호수는 주변의 개발로 인하여 다량의 토사가 유입되어 수심이 얕아지면서 면적이 감소하고, 수질도 악화되고 있는 실정이다(Ahn et al., 2006; 2008; 2010). 본 연구의 조사 대상지인 타호부호수는 일본 홋카이도(北海道)지역의 쿠시로습지에 위치하고 있다. 쿠시로습지는 일본 최대 규모이고, 또한 습지에는 희귀한 동·식물이 서식하고 있어 습지의 일부는 천연기념물(1967년), 람사르조약(1980) 및 국립공원(1987년) 등으로 지정되었다. 그러나 제2차 세계 대전(1940년대) 이후 쿠시로습지와 호수를 포함한 주변의 산림유역은 식량생산증진정책의 영향으로 벌채되고 농경지로 전환되었다. 이러한 산림유역의 개발은 다량의 토사를 습지와 호수 등으로 유입·퇴적시키고 있다(Nakamura et al., 1997; 2004; Ahn et al., 2006; Mizugaki et al., 2006; Ahn and Nakamura, 2009).

습지와 호수 등에서 다량의 토사퇴적은 지형과 서식지 환경을 변화시키고 있어 환경복원을 위한 사업에서는 장기간의 토사 동태에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Nakamura, 2003; Ahn et al., 2006; 2009; 2010), 특히 최근(약 100~150년 정도)의 토사 동태를 설명하기 위해서는 방사성물질인 ^{210}Pb 와 ^{137}Cs 연대측정법이 널리 사용되고 있다(He et al., 1996; Foster and Lees, 1999; Walling et al., 2003; Ahn et al., 2006; 2009; 2010; Mizugaki et al., 2006). 그리고 ^{210}Pb 연대측정은 CIC(Costant Initial Concentration) 모델과 CRS(Constant rate of Supply) 모델을

이용하여 계산한다(Appleby et al., 1978; 1979). CIC 모델은 토사퇴적물의 표층에 공급되는 ^{210}Pb 의 농도가 일정하다면 토사퇴적물 중의 ^{210}Pb 의 농도는 토사퇴적물의 깊이에 비례하여 지수함수적으로 감소할 것이라는 가정에서 계산하는 ^{210}Pb 연대측정법이다. 그러나 실제 호수와 범람원 등의 토사퇴적물에는 ^{210}Pb 농도의 감소가 일정하게 나타나지 않고 임의적으로 변화하는 경우도 있다(Ahn et al., 2010). 이러한 경우는 CIC 모델로 설명할 수 없어 CRS(Constant rate of Supply)모델이 고안되었다(Appleby et al., 1979). 즉 토사퇴적물에 ^{210}Pb 공급은 일정하고, ^{210}Pb 농도는 공급되는 토사량에 의해 농도가 변한다는 것이다. 따라서 ^{210}Pb 연대측정법은 ^{137}Cs 연대측정법 등과 같은 다른 연대측정법을 참고자료로 사용하여 ^{210}Pb 연대측정의 정확도를 검증하고 있다(Walling et al., 2003; Ahn et al., 2010). 또한 방사성물질인 ^{210}Pb 와 ^{137}Cs 는 세립토사에 흡착되어 호수와 범람원 등에 퇴적하므로 이들의 총량(inventory)을 분석하면 정성적인 측면에서 장기간 토사 동태를 효율적으로 이해할 수 있다(Ahn and Nakamura, 2009).

본 연구는 일본 북해도지역의 쿠시로습지에 위치한 타호부호수를 대상으로 산림유역의 토지이용 변화가 호수의 토사퇴적에 미치는 영향을 밝히고자 ^{210}Pb 연대측정을 이용하여 분석하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 및 조사방법

본 연구는 일본 홋카이도의 쿠시로습지(194 km²)내에

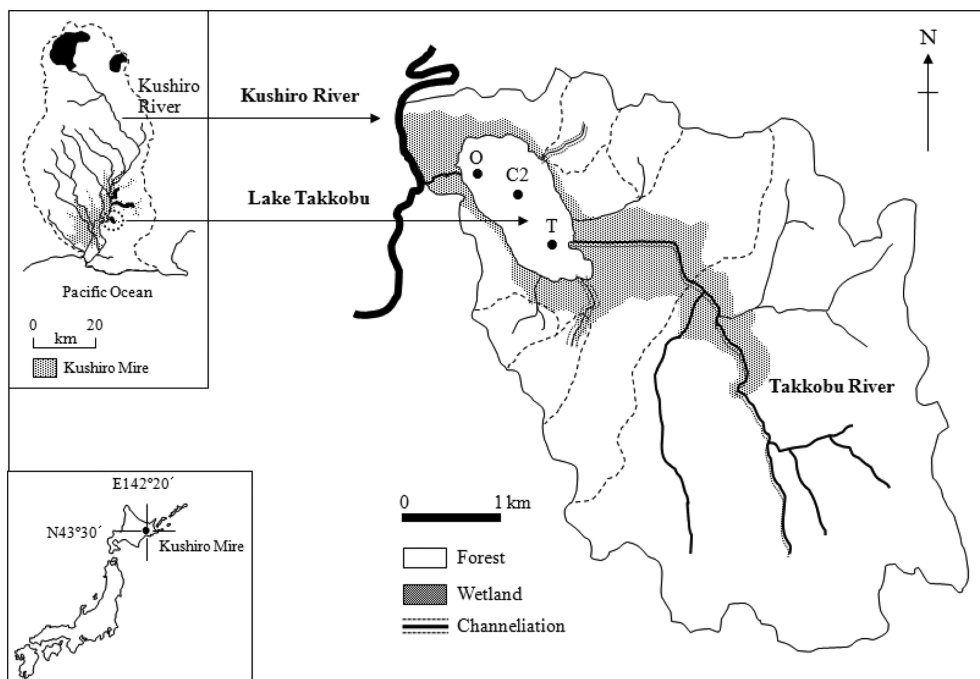


Figure 1. Location of Lake Takkobu and the lake sampling points.

Table 1. Site characteristics of Lake Takkobu and land use changes.

Catchment area	26.2 km ²
Lake area	1.3 km ²
Average water depth	1.0 m
Average annual inflow	15.0 × 10 ³
Land use changes	
- 1880s : Deforestation, Channelization	
- 1940s : Deforestation, Channelization, Agricultural development	
- 1940s-1990s : Deforestation, Channelization Agricultural development, Road construction	

위치한 타코부호수를 연구 대상지로 선정하여 수행하였다(Figure 1). 타코부호수 면적은 1.3 km²이며, 평균수심이 1.0 m일 정도로 매우 작은 산지 호수이다(Table 1). 호수 유역은 산림으로 둘러 싸여 있고 유역면적은 26.2 km²이다. 타코부호수 상류유역의 산림은 1880년대부터 이주민이 유입하면서 연료생산을 위해 참나무 벌채가 시작되었고, 벌채한 참나무를 숲으로 만들어 대도시에 운송하여 판매하였다(Ahn et al., 2006). 특히 생산된 숲의 원활한 운송을 위해 호수 주변의 습지에 운하를 만들어 일본 본토까지 판매하기도 하였다. 이러한 숲 생산 때문에 호수 주변의 산림은 점점 쇠퇴하였다(Kumagai et al., 2008). 또한 1940년대 이후 정부 주도의 식량증산정책으로 인해 산림을 벌채하고 농지로 개발하였고, 특히 벌채된 산림은 우유생산을 위한 초지로 전환되었다(Ahn et al., 2006). 대면적의 농업용지 확보를 위해 하천 주변의 범람원이 농경지로 변환되었고, 이 과정에서 하천공사도 수차례 실시되었다. 또한 황폐된 산림은 1950~60년대에 일본잎갈나무(*Larix leptolepis*)를 식재하여 산림 복구도 병행하였다(Kumagai et al., 2008). 1980년대에 들어오면서 호수 주변의 산림은 참나무 맹아가 성장하여 비교적 울창하게 되었고, 인공조림하였던 일본잎갈나무도 성장하여 임도 설치와 함께 산림벌채가 활발하게 행해지고 있다(Table 1; Ahn et al., 2006).

평상시 타코부호수는 호수에서 쿠시로강으로 유출되고 있지만, 강우와 용설(融雪) 등으로 쿠시로강의 수위가 증가하면 쿠시강이 호수로 역류한다(Ahn et al., 2008). 그리고 쿠시로강의 역류로 인한 세립토사의 유입량이 호수 유역에서 유입된 양보다 더 많다는 연구가 발표되었다(Ahn et al., 2008). 그래서 타코부호수는 호수 유역과 쿠시로강 유역의 영향을 동시에 받고 있다.

²¹⁰Pb 연대측정을 이용하여 산림유역에서 토지이용 변화가 호수의 토사퇴적에 미치는 영향을 밝히고자 주요 유·출입하천 주변과 중앙부의 3개 지점에서 퇴적토사의 코어샘플(core sample)을 채취하였다(Figure 1). 퇴적 토사의 코어 샘플은 2003년 직경 7.5 cm의 스테인리스의 중력

식 샘플러(stainless modified gravity core)를 사용하여 채취하였고, 채취한 코어 샘플은 1 cm 간격으로 구분하여 지퍼백으로 진공 포장한 후 -10°C 냉동고에 보관하였다(Ahn et al., 2006).

2. ²¹⁰Pb 측정방법

²¹⁰Pb(반감기 22.3년)는 우라늄계열에 속하는 방사성물질로 토양 중에 함유된 ²³⁸U로부터 생성되어 ²²⁶Ra(반감기 1622년)의 방사성 분열로 토양 중에 일정량 분포한다. 한편 ²³⁸U로부터 생성된 ²²²Rn(반감기 3.8일)은 가스 상태로 대기 중에 분산된 후 ²¹⁰Pb로 변환되어 강우와 함께 지표면에 유입된다. 이때 강우와 함께 호수와 범람원에 낙하한 ²¹⁰Pb는 수중의 세립토사에 흡착되어 퇴적된다. 호수나 범람원 등에 퇴적된 토사를 이용하여 연대분석을 실시하는 ²¹⁰Pb는 ²²²Rn 상태로 대기에 분산되어 변환된 ²¹⁰Pb의 농도 변화를 이용한다. 따라서 퇴적된 토사에 함유된 총 ²¹⁰Pb(²¹⁰Pb total)에는 ²²⁶Ra 기원의 ²¹⁰Pb(supported ²¹⁰Pb)와 대기의 ²²²Rn 기원의 ²¹⁰Pb(unsupported ²¹⁰Pb)가 함유되어 있다. 즉,

$$^{210}\text{Pb total} = \text{supported } ^{210}\text{Pb} + \text{unsupported } ^{210}\text{Pb}.$$

따라서 unsupported ²¹⁰Pb의 방사능 측정의 경우, ²²⁶Ra 기원의 ²¹⁰Pb는 ²²⁶Ra(²¹⁴Pb)과 방사평형을 이루기 때문에 ²¹⁰Pb total에서 ²¹⁴Pb의 농도를 빼어주어 ²¹⁰Pb 연대측정을 실시한다. 즉,

$$\text{Unsupported } ^{210}\text{Pb} = ^{210}\text{Pb total} - ^{214}\text{Pb}.$$

방사성 연대분석(²¹⁰Pb와 ¹³⁷Cs)을 실시하기 위해 채취한 코어샘플을 105 에서 24시간 건조한 후, 토사샘플을 2~3cm 간격으로 혼합하여 분석용 용기에 넣고 밀봉하였다. 방사성(²¹⁰Pb, ²¹⁴Pb과 ¹³⁷Cs) 농도(Bq/g) 분석은 일본 북해도대학 아이소토프종합센터(Central Institute of Isotope Science)에서 고순도 Ge검출기(HPGe detector, Ortec, USA)와 다채널 분석기(Multichannel analyzer, SEIKO EG & G MCA7700, Japan)를 이용하여 측정하였다(Ahn et al., 2010).

²¹⁰Pb와 ²¹⁴Pb의 농도를 분석하기 위해 각각 46.5 keV와 352.0 keV에서 80,000초 동안 측정하였고, 토사퇴적물의 시료는 측정용기에 담고 밀폐시켜 ²²²Rn과 모핵종인 ²²⁶Ra과 방사평형에 도달할 수 있도록 20일 이상 보관한 후 분석하였다. 핵실험에 의해 대기로 유출된 인공방사성물질인 ¹³⁷Cs는 661.6 keV에서 측정하였다.

3. ²¹⁰Pb 연대측정 모델과 ²¹⁰Pb 총량(²¹⁰Pb inventory)

호수 토사퇴적물의 표층에 공급되는 unsupported ²¹⁰Pb의 농도가 일정하다면 토사퇴적물 중의 unsupported ²¹⁰Pb

의 농도는 토사퇴적물의 깊이에 비례하여 지수함수적으로 감소할 것이다. 이러한 지수함수적으로 감소하는 경향을 ^{210}Pb 연대측정법으로 이용하는 것을 CIC(Costant Initial Concentration) 모델이라고 한다(Appleby et al., 1979). 그러나 실제 토사퇴적물에는 표층의 unsupported ^{210}Pb 농도가 깊은 층의 농도보다 낮은 경우도 존재한다(Ahn et al., 2010). 즉 unsupported ^{210}Pb 농도 분포가 지수함수적으로 일정하게 감소하지 않는다는 것이다. 이러한 경우는 CIC 모델로 설명할 수 없다. 그래서 CRS(Constant rate of Supply) 모델이 고안되었다(Appleby et al., 1979). 즉 토사퇴적물에 unsupported ^{210}Pb 공급은 일정하고 공급되는 토사량에 의해 농도가 변한다는 것이다. 예를 들어, 대기에서 기원되는 unsupported ^{210}Pb 농도는 퇴적되는 토사량이 증가하면 퇴적물 중의 unsupported ^{210}Pb 농도는 낮아지고, 퇴적되는 토사량이 감소하면 unsupported ^{210}Pb 농도가 증가한다는 것이다. 그리고 ^{210}Pb 연대측정법의 검증을 위해 ^{137}Cs 연대측정법을 참고자료로 사용하고 있다(Ahn et al., 2010). 본 연구에서 분석한 ^{137}Cs 농도 자료는 Ahn et al. (2006)의 연구결과를

참고하였다.

^{210}Pb 총량($^{210}\text{Pb}_{\text{inventory}}$, mBq/cm^2)과 ^{137}Cs 총량($^{137}\text{Cs}_{\text{inventory}}$, mBq/cm^2)은 코어샘플의 단위면적(1 cm^2)에 함유된 unsupported ^{210}Pb 와 ^{137}Cs 의 총합을 의미하며, 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$^{210}\text{Pb}_{\text{inventory}} \text{ or } ^{137}\text{Cs}_{\text{inventory}} = (W_i \times ^{210}\text{Pb}_i \text{ or } ^{137}\text{Cs}_i)$$

여기서, W_i 는 단위면적(1 cm^2)에 함유한 토사 퇴적물의 건중량(g/cm^2)이고, $^{210}\text{Pb}_i$ 또는 $^{137}\text{Cs}_i$ 는 각각 unsupported ^{210}Pb (이하 ^{210}Pb 로 표기)와 ^{137}Cs 농도(Bq/g)이다. ^{210}Pb 와 ^{137}Cs 는 강우시 세립토사에 흡착되어 호수 등에 퇴적하므로 이들 방사성물질의 총량은 정성적 해석측면에서 토사의 동태를 파악하는 데에 유용하게 사용될 수 있다(Ahn and Nakamura, 2009).

결 과

1. ^{137}Cs 와 ^{210}Pb 농도 분석

호수에서 채취한 퇴적토사에서 ^{137}Cs 과 ^{210}Pb 가 검출되

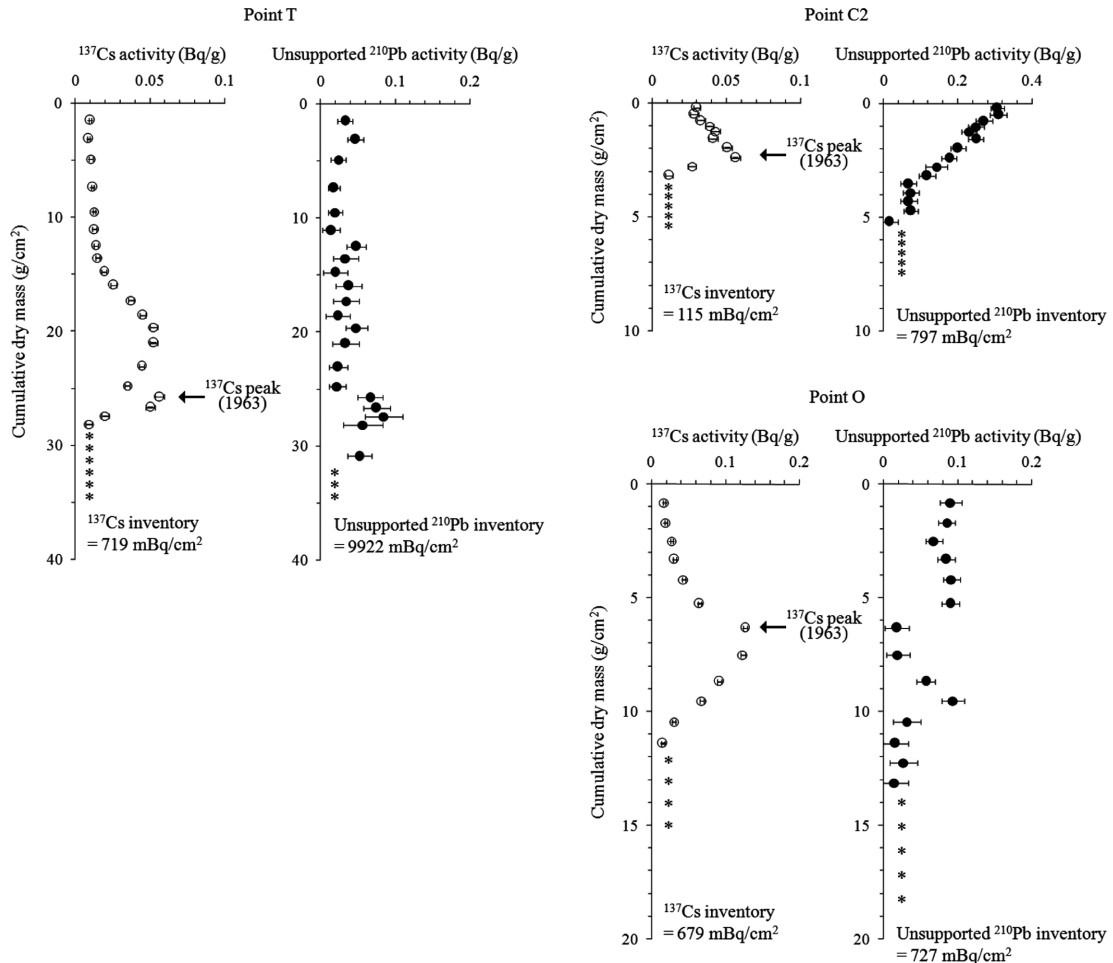


Figure 2. Profiles of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb activities, and inventories of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb . Asterisk indicates that the ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb concentrations are under the detection limit.

었고, 퇴적토사 깊이별 농도분포를 Figure 2에 표시하였다. 호수 퇴적물에는 ¹³⁷Cs의 최대값이 명확히 나타났고, ¹³⁷Cs 농도의 최대값 아랫부분에서 급격히 감소하는 전형적인 농도 분포를 나타내고 있었다(Ahn et al., 2006). 따라서 ¹³⁷Cs의 최대값이 검출된 깊이를 ¹³⁷Cs가 최대로 대기 중에 방출되어 토사와 함께 퇴적한 1963년으로 추정하였다(Ahn et al., 2006; 2009; 2010). ²¹⁰Pb 농도 분포의 경우, 호수 중심부(Point C2)는 지수함수적으로 일정하게 감소하였지만, 하천의 유·출입구에 가까운 지점(Point T와 O)에는 깊이별 지수함수적 농도 감소하는 경향이 나타나지 않았다(Figure 2).

호수 중심부(Point C2)의 ²¹⁰Pb 농도 분포는 0.015~0.311 Bq/g였고, 하천의 유·출입구에 가까운 Point T와 O의 경우 각각 0.014~0.084 Bq/g과 0.016~0.094 Bq/g였다(Figure 2). 호수 중심부의 ²¹⁰Pb 농도가 하천의 유·출입구에 가까운 지점보다 높은 경향을 나타냈다.

타코부강 입구 근처(Point T)에 위치한 ¹³⁷Cs과 ²¹⁰Pb 총량은 각각 719과 9922 mBq/cm²로 가장 높았다. ¹³⁷Cs과 ²¹⁰Pb는 세립토사에 흡착되어 이동·퇴적하므로 하천 입구의 높은 ¹³⁷Cs과 ²¹⁰Pb의 총량 값은 토사의 퇴적이 높다는 것을 반영하고 있었다.

2. ²¹⁰Pb 연대측정

²¹⁰Pb 농도는 호수 중앙부(Point C2)에서 퇴적물의 깊이가 증가함에 따라 ²¹⁰Pb 농도의 지수함수적 감소 경향이 나타났지만, 하천의 유·출입구에 가까운 지점(Point T와 O)에서는 퇴적물 깊이별 일정한 농도 변화 경향이 나타나지 않았다(Figure 2). 따라서 ²¹⁰Pb 연대측정은 CRS 모델을 이용하였고, 이 결과는 ¹³⁷Cs 연대측정(1963년)과 잘 일치하여 CRS 모델의 ²¹⁰Pb 연대측정의 정확성이 높음을 증명하였다(Figure 3). ²¹⁰Pb 연대측정의 결과, Point T는 과거 98년, Point C2는 152년 및 Point O는 127년까지 연대측정이 가능하였다(Figure 3).

3. ²¹⁰Pb 연대측정을 이용한 토사퇴적속도

타코부호수 유역의 토지이용 시작은 1880년대 이후 산림을 벌채하여 숲을 생산하였고, 1898년에는 숲을 운반하기 위해 수로공사(운하)를 실시하였다(Ahn et al., 2006). 숲 생산을 위한 산업이 발달하면서 유역의 산림은 점차 쇠퇴해졌고, 그 결과 자연히 숲의 산업도 점차 사라졌다. 1940년대에 이르러서는 식생증산정책의 일환으로 낮은 산림지대와 범람원을 중심으로 농경지 개발이 진행되었고, 대규모 농경지 개발을 위해 하천의 수로를 직선화하는 등의 하천공사를 실시하였다. 그러나 1950년대 이후 황폐된 산림을 복구하기 위해 일본잎갈나무 등을 조림하였지만 1980년에 이르러 목재생산을 위해 임도 등을 개설하면서 대규모의 산림벌채가 진행되고 있다. 따라서 1880년대 이전의 토사퇴적은 인간의 영향이 없는 자연상태의 토사 동태를 반영하고 있으며, 1880년대~1940년대는 산림벌채와 수로공사, 1940년대~1980년대는 산림벌채, 농업개발 및 수로공사, 그리고 1980년대 이후는 농업개발, 수로공사, 임도개설, 산림벌채의 토사 동태를 반영하고 있는 것으로 사료되었다(Table 1).

타코부호수의 토사퇴적은 인위적 영향이 없는 자연상태의 경우 0.01~0.03 g/cm²/year로 비교적 낮은 토사가 퇴적되고 있었지만, 1880년대 이후 산림벌채, 수로공사, 농업개발 및 임도개설 등의 토지이용이 진행되면서 0.09~0.84 g/cm²/year로 급격하게 증가하였다(Table 2). 특히 하천의 유·출입구에 가까운 지점(Point T와 O)에서는 최근 토사

Table 2. Average sedimentation rates of Lake Takkobu between 1880s and 2000s using the CRS model ²¹⁰Pb dating.

	Average sedimentation rate (g/cm ² /year)			
	Before 1880s	1880s-1940s	1940s-1980s	After 1980s
Point T	-	0.09	0.23	0.84
Point C2	0.01	0.03	0.05	0.09
Point O	0.03	0.06	0.16	0.24

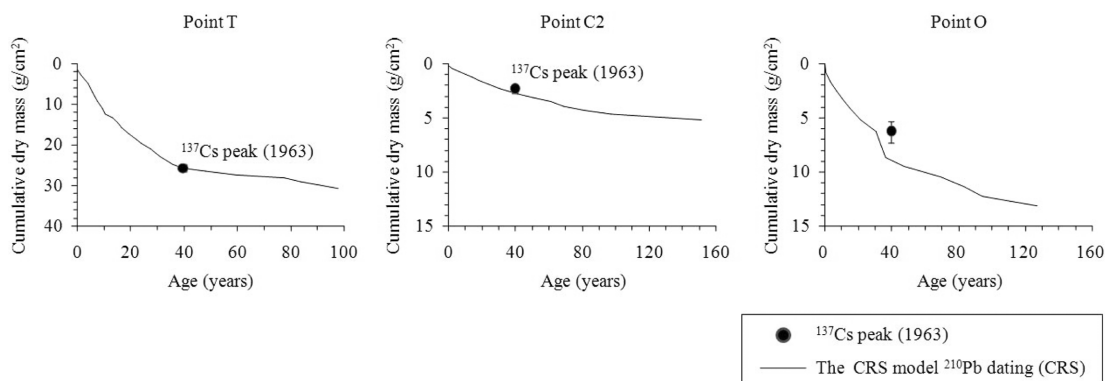


Figure 3. Dates in the lake cores calculated using the ²¹⁰Pb CRS model together with date determined from ¹³⁷Cs stratigraphy.

퇴적속도가 0.24~0.84 g/cm²/year로 매우 높은 값을 나타내었다.

고찰

타코부호수의 유역은 1880년대부터 숲을 생산하기 위해 산림이 벌채되거나 범람원에서는 배를 이용한 운송을 위해 하천의 폭을 넓히는 유로공사를 실시하였고, 1940년대부터는 식량생산증진을 위한 대규모 농지개발사업과 하천 직선화 공사가 진행되었다(Table 1). 최근에는 1950년대 인공조림한 일본잎갈나무의 목재수확을 위해 임도를 개설하고 산림을 벌채가 행해지고 있다. 또한 타코부호수는 쿠시로강의 수위가 증가하면 역류가 발생하여 쿠시로강으로부터 대규모의 세립토사가 유입되고 있고, 연간 유입되는 세립토사의 60% 이상이 역류에 의해 유입되는 것으로 보고되었다(Ahn et al., 2008). 따라서 타코부호수의 토사퇴적은 호수 유역과 쿠시로강 유역의 영향을 동시에 받고 있는 실정이다. 일반적으로 호수로 유입되는 토사는 하천에 가까운 지점에 퇴적되는 경향을 나타내고 있는데 (Ahn et al., 2010), 타코부호수에서도 하천의 유·출입구에 가까운 지점(Point T와 O)에서 토사퇴적속도가 높게 나타났다(Table 2).

²¹⁰Pb는 강우와 함께 낙하하고 토사에 흡착되어 호수와 범람원 등에 퇴적하므로 토사의 퇴적량에 따라 ²¹⁰Pb의 농도가 결정된다(Ahn et al., 2010). 예를 들어, 강우와 함께 낙하한 ²¹⁰Pb는 많은 양의 토사에 흡착되면 ²¹⁰Pb의 농도가 토사에 희석되어 농도가 낮아지고, 적은 양의 토사에 흡착되면 농도가 높아진다. 따라서 호수 중앙부(Point C2)의 ²¹⁰Pb 농도가 높은 이유는 외부에서 유입되는 토사의 양이 적기 때문에 높은 값을 보이고 있는 반면, 토사의 유입량이 많은 하천 유·출입구(Point T와 O)의 ²¹⁰Pb 농도는 상대적으로 중앙부보다 낮은 농도 값을 나타냈고 농도 변화 경향이 일정하게 나타나고 있지 않았다(Figure 2). 특히 최근 유역내 산림벌채와 농지개발이 활발하게 이루어지고 있는 타코부강 출구에서는 다량의 토사유입으로 인해 ²¹⁰Pb가 희석되어 농도가 가장 낮게 나타났다. 이러한 분석결과를 하천 유·출입구에서 다량의 토사가 퇴적되고 있음을 시사하고 있었다.

타코부호수의 토사퇴적속도는 유역의 토지이용이 활발할수록 증가하고 있었다(Table 1과 2). 특히 현재 호수의 평균 수심은 1.0 m로 매우 얕은 상황인데(Table 1), 최근 유역의 토지이용으로 토사 유입이 많아져 수심이 감소하면서 호수 면적도 점차 감소되고 있는 것으로 보고되고 있다(Ahn et al., 2006). 그리고 유역에서 호수로 유입된 토사는 하천의 유·출입구를 중심으로 퇴적되고 있음이 밝혀져, 타코부호수의 지형변화(토사퇴적)를 저감시키기

위해서는 유역에서 생산된 토사를 조절할 수 있는 하천 중간부에 유사지 조성 및 하천의 사행화를 통한 수변림 조성 등이 제안되고 있다.

²¹⁰Pb 연대측정법을 이용하여 유역 토지이용 변화에 의한 토사유출이 호수 토사퇴적에 미치는 영향을 밝힌 본 연구의 결과를 통하여 산림 유역의 개발은 토사의 유출을 증가시켜 하류에 위치한 호수 지형을 급격하게 변화시키고 있음을 알 수 있었다. 우리나라 산림습원의 경우도 산림 벌채와 임도 개설 등의 토지이용 변화로 인해 다량의 토사가 습원으로 유입되어 습원의 육지화가 가속화되고 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 산림습원의 육지화가 진행되고 있는 지역에서는 토사의 주요 유입구에 토사를 조절할 수 있는 시설의 설치가 필요하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 일본 학술진흥재단(13460061, 14506039)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

인용문헌

Ahn, Y.S., Mizugaki, S., Nakamura, F., and Nakamura, Y. 2006. Historical change in lake sedimentation in Lake Takkobu, Kushiro Mire, northern Japan over the last 300 years. *Geomorphology* 78(3-4): 321-334.

Ahn, Y.S. and Nakamura, F. 2009. Influence of land use change in the forest catchment on sediment accumulation at the outlets of rivers; Results of a study in Kushiro Mire, northern Japan. *Journal of Korean Forest Society* 98(6): 669-675. (abstract in Korean)

Ahn, Y.S., Nakamura, F., and Chun, K.W. 2010. Recently history of sediment dynamics in Lake Toro and applicability of ²¹⁰Pb dating in a highly disturbed catchment in northern Japan. *Geomorphology* 114(3): 284-293.

Ahn, Y.S., Nakamura, F., Kizuka, T., and Nakamura, Y. 2009. Elevated sedimentation in lake records linked to agricultural activities floodplain, northern Japan. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(12): 1650-1660.

Ahn, Y.S., Nakamura, F., and Mizugaki, S. 2008. Hydrology, suspended sediment dynamics and nutrient loading in Lake Takkobu, a degrading lake ecosystem in Kushiro Mire, northern Japan. *Environmental Monitoring and Assessment* 145(1-3): 267-281.

Appleby, P.G. and Oldfield, F. 1978. The calculation of ²¹⁰Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment. *Catena* 5(1): 1-8.

Appleby, P.G., Oldfield, F., Thompson, R., Huttenen, P., and Tolonen, K. 1979. ²¹⁰Pb dating of annually laminated lake sediments from Finland. *Nature* 280: 53-55.

Foster, I.D.L. and Lees, J.A. 1999. Changes in the physical

- and geochemical properties of suspended sediment delivered to the headwaters of LOIS river basins over the last 100 years: A preliminary analysis of lake and reservoir bottom sediments. *Hydrological Processes* 13(7): 1067-1086.
- He, Q., Walling, D.E., and Owens, P.N. 1996. Interpreting the ^{137}Cs profiles observed in several small lakes and reservoirs in southern England. *Chemical Geology* 129(1-2): 115-131.
- Kumagai, Y., Ahn, Y.S., and Nakamura, F. 2008. Recent human impact on vegetation in Takkobu, northern Japan, reconstructed from fossil pollen in lake sediments. *Journal of Forest Research* 13(4): 223-232.
- Mizugaki, S., Nakamura, F., and Araya, T. 2006. Using denudation and ^{137}Cs and ^{210}Pb radiochronology to estimate recent changes in sedimentation rates in Kushiro Mire, Northern Japan, resulting from land use change and river channelization. *Catena* 68(1): 25-40.
- Nakamura, F. 2003. Restoration strategies for rivers, floodplains and wetlands in Kushiro Mire and Shibetsu River, northern Japan. *Ecology and civil engineering* 5(2): 217-232. (abstract in Japanese)
- Nakamura, F., Kameyama, S., and Mizugaki, S. 2004. Rapid shrinkage of Kushiro Mire, the largest mire in Japan, due to increased sedimentation associated with land-use development in the catchment. *Catena* 55(2): 213-229.
- Nakamura, F., Mieko, J., Kameyama, S., and Mizugaki, S. 2002. Changes in riparian forest in the Kushiro Mire, Japan, associated with stream channelization. *River Research and Applications* 18(1): 65-79.
- Nakamura, F., Sudo, T., Kameyama, S., and Mieko, J. 1997. Influences of channelization on discharge of suspended sediment and wetland vegetation in Kushiro Marsh, northern Japan. *Geomorphology* 18(3-4): 279-289.
- Walling, D.E., Owens, P.N., Foster, I.D.L., and Lees, J.A. 2003. Changes in the fine sediment dynamics of the Ouse and Tweed basins in the UK over the last 100-150 years. *Hydrological Processes* 17(16): 3245-3269.

(2013년 6월 21일 접수; 2013년 10월 23일 채택)