

산림유역 개발이 하천 출구의 토사 퇴적에 미치는 영향: 일본 쿠시로습지의 연구결과

안영상^{1*} · 中村太士²

¹국립산림과학원, ²북해도대학 산림관리보전학강좌

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

Young Sang Ahn^{1*} and Futoshi Nakamura²

¹Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

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

요약: 본 연구는 산림유역 개발이 하천 출구의 토사 퇴적에 미치는 영향을 규명하기 위해 토사 퇴적물에 함유된 세슘 농도를 분석하여 세슘총량과 토사 퇴적속도를 계산하였다. 세슘은 1954년 핵실험에 의해 최초 방출되었고, 토사의 입자에 흡착되어 퇴적하기 때문에 토사 퇴적물의 연대측정으로 이용되고 있다. 쿠시로습지유역의 대규모 산림은 1950년대 이후 농지로 개발되었고, 1954년 이후 하천 출구에서는 36~148 cm의 부유토사가 퇴적되었다. 세슘을 함유한 토사는 유역으로부터 유출되어 하천 출구에 퇴적하므로 하천 출구에서 세슘총량은 대조구보다 높은 값을 나타내었다. 또한 세슘총량은 토사 퇴적속도가 증가할수록 증가하였지만, 쿠쵸로강과 쿠시로강의 출구에서 세슘총량은 완만하게 증가하였다. 왜냐하면 쿠쵸로강과 쿠시로강에서 유로침식으로 발생한 토사는 세슘을 거의 포함하고 있지 않기 때문에 이들 하천 출구에서 토사퇴적은 증가하고 있었지만 세슘총량은 크게 증가하지 않았다.

Abstract: The purpose of this study was to examine the influence of land use change in the forest catchment on sedimentation rate at the outlets of rivers in Kushiro Mire that have been impacted by forest clearing, agricultural activity and river regulation. We analysed Caesium-137(Cs-137) concentration in sediment cores, and we estimated sedimentation rates and Cs-137 inventories over the last 50 years. Cs-137 from atomic bomb testing first entered the environment in 1954 which provides easily identifiable chronological markers in the sediment. Because Cs-137 is strongly absorbed into sediment particles, its redistribution occurs in association with sedimentary particles. Since the 1950s, the forest catchment areas draining into the mire have been developed intensively from forest areas to agricultural lands. The sediment accumulations at the outlets of rivers after 1954 ranged from 36 to 148 cm. The Cs-137 inventory is significantly greater than the reference sites which reflected natural accumulation conditions because sediment containing Cs-137 was carried from catchments into the outlets of the rivers. In addition, the Cs-137 inventory was correlated with the sedimentation rate. However, the Cs-137 inventories in Kuchoro and Kushiro river profiles were slowly increased with the sedimentation rates. This is because the sediment originating from scoured areas such as streambeds and banks contains a low level of Cs-137 concentration.

Key words : forest catchment, land use change, sediment accumulation, Caesium-137, Kushiro Mire

서론

산림벌채와 농업활동은 하천에 다량의 토사를 유출시키고(Davis, 1976; Nakamura *et al.*, 2002; Walling *et al.*, 2003; Ahn *et al.*, 2008), 이렇게 유출된 토사는 호소

와 범람원 등에 퇴적되어 지형과 식생을 변화시키는 원인이 되고 있다(Ahn *et al.*, 2006, 2009; Nakamura and Ahn, 2007). 또한 유출 토사에 흡착되어 있는 영양염류는 수질을 악화시킬 뿐만 아니라 토양을 부영양화시킨다(Nakamura *et al.*, 2002; Ahn *et al.*, 2008). 산림에서 생산된 토사는 바다까지 유출·퇴적되고 있어 토사의 이동 범위는 매우 광범위하다. 그러므로 외국의 경우, 수문환경

*Corresponding author
E-mail: ysahn@forest.go.kr

과 생물 서식지 변화에 관련한 원인 규명을 위해 유역단위(watershed scale)에서 토사 동태와 관련한 연구가 진행되고 있으나, 국내의 경우 산림유역에 국한된 범위의 토사 동태에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 따라서 상류의 산림 개발로 인한 수문환경 변화가 유역에 미치는 영향을 규명하기 위해서 광범위한 유역단위에서 토사 동태에 관한 연구가 필요하다.

습지는 홍수예방과 수질정화 기능을 가지고 있으며(Johnston *et al.*, 1984; Cooper *et al.*, 1987; Winter *et al.*, 1988), 또한 생물의 다양한 서식지를 제공하고 있다(Harris, 1988). 그러나 인간활동으로 인한 영향으로 습지면적이 감소하고 있으며, 다양한 생물의 서식지도 파괴되고 있는 실정이다. 본 연구의 조사 대상지인 쿠시로습지(Kushiro Mire)는 일본 습지면적의 59%를 차지하는 일본 최대 규모의 습지이다. 쿠시로습지 상류는 산림으로 이루어져 있고, 습지에는 희귀한 동·식물이 서식하고 있어 습지의 중심부는 천연기념물(1967년), 람사르조약(1980), 국립공원(1987년)으로 지정되었다. 하지만 1950년대부터 정부 주도의 식량생산증진정책 일환으로 쿠시로습지 상류의 산림이 벌채되고 농지로 전환되면서 산림으로부터 다량의 토사가 습지로 유입·퇴적되어 왔다(Nakamura *et al.*, 1997, 2004; Ahn *et al.*, 2006; Mizugaki *et al.*, 2006). 이렇게 유입된 토사는 하천과 호수의 수질을 악화시켜 수중 생물의 서식지 환경을 변화시키고 있으며, 그 결과 쿠시로습지에 자생하는 희귀생물이 점점 감소하고 있다. 특히, 쿠시로습지에는 수분을 좋아하는 갈대군락이 넓게 분포하고 있었으나, 상류유역으로부터 유출된 다량의 토사 퇴적으로 인해 습지 토양이 건조화되면서 갈대군락이 감소하고 오리나무산림이 급속도로 증가하고 있다. 산림유역에서 벌채와 농업활동으로 유출된 토사는 하천 출구에 퇴적되고, 이 지역을 중심으로 식생변화가 나타나고 있다(中村 등, 2003; Nakamura and Ahn, 2007).

다량의 토사퇴적은 생물의 서식지를 변화시키는 등 환경에 많은 영향을 미치고 있어 환경복원을 위한 사업에서 토사동태에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다(中村, 2003; 中村 등, 2003; Nakamura and Ahn, 2007). 특히, 하류의 호소와 범람원의 토사 퇴적물을 이용한 장기간의 토사 동태 파악에 관한 연구가 많이 행해지고 있다(He *et al.*, 1996; Foster and Lees, 1999; Walling *et al.*, 2003; Ahn *et al.*, 2006; Mizugaki *et al.*, 2006). 왜냐하면 호소와 범람원은 상류유역으로부터 유출된 토사가 퇴적하기 때문에, 이곳에 퇴적된 토사는 장기간 유역의 토사동태를 이해하는 데에 필요한 자료를 보존하고 있다. 그러나 퇴적된 토사를 이용하여 장기간의 토사동태를 해석하기 위해서는 정확도가 높은 연대분석이 요구된다. 최근 100년 정도의 토사동태를 설명하기 위해서 방사성물질인 납(Pb-

210)과 세슘(Cs-137)을 이용한 연대측정법이 널리 사용되고 있다(He *et al.*, 1996; Foster and Lees, 1999; Walling *et al.*, 2003; Ahn *et al.*, 2006, 2009; Mizugaki *et al.*, 2006). 하지만 우리나라의 경우 다양한 물질을 이용하여 토사동태를 분석하는 사례가 극히 드물다. 방사성물질인 납과 세슘은 장기간 토사동태를 이해하는 데에 도움이 될 수 있으며 효율적으로 이용 가능한 분석방법이다.

본 연구는 쿠시로습지로 유입하는 하천 출구를 대상으로 산림유역에서 인간활동이 하천 출구의 토사퇴적에 미치는 영향을 밝히고자 방사성물질인 세슘을 이용하여 분석하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 및 조사방법

본 연구는 일본 홋카이도(北海道) 쿠시로시(釧路市)에 위치한 쿠시로습지(194 km²)를 연구 대상으로 선정하여 수행하였다(Figure 1). 조사지 상류유역의 산림은 1880년대부터 이주민이 유입하면서 연료생산을 위해 벌채가 시작되었지만, 이 시기의 벌채는 소규모로 이루어졌기 때문에 산림이 크게 훼손되지 않았다(Kumagai *et al.*, 2008). 그러나 1950년대부터 정부 주도의 식량증산정책으로 인해 산림에서 벌채와 농지개발이 이루어졌고, 특히 벌채된 산림은 우유생산을 위한 농업용지로 전환되었다(Table 1과 Figure 1).

쿠시로습지 상류의 산림벌채와 농지개발로 인한 토사 유출이 습지로 유입하는 하천 출구의 토사퇴적에 미치는 영향을 분석하기 위해, 습지로 유입하는 하천 출구의 5지점과 유역으로부터 토사 유입이 거의 없는 대조구 2지점에서 퇴적토사의 코어샘플(core sample)을 채취하였다(Figure 1). 유역으로부터 토사유입의 영향을 받지 않는 대조구를 선정하기 위해 홍수기에 탁수의 범람이 거의 발생하지 않은 지점을 선정하였다(Nakamura *et al.*, 2004). 퇴적 토사의 코어 샘플은 2007년 4월, 직경 5 cm의 피트샘플러(peat sampler)를 사용하여 채취하였고, 채취한 코아

Table 1. Land use changes around the Kushiro Mire.

Land use	Area (km ²)	
	1940s	2000s
Forest	2163	1676
-Natural	2163	1337
-Planted coniferous	-	83
-Planted deciduous	-	256
Agricultural land	2	548
River and lake	11	13
Uran land	13	77
Wetland floodplain	353	228

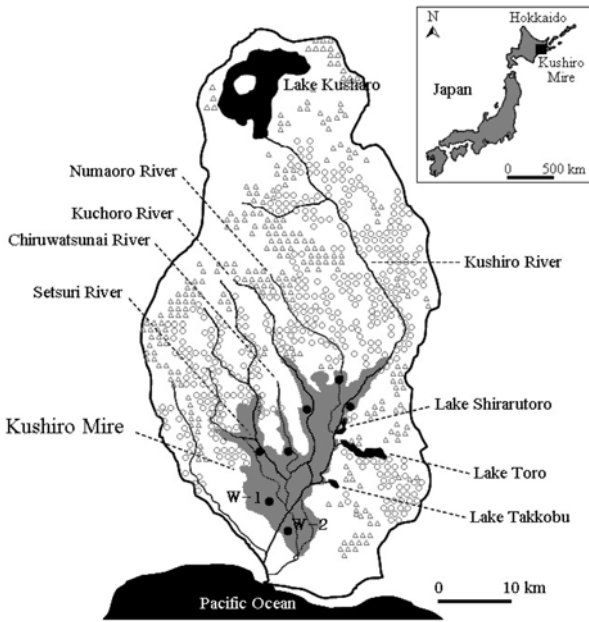


Figure 1. The outlets of the rivers in Kushiro Mire and the locations of sampling sites. The triangles and circles indicate the timber harvesting area and the agricultural land, respectively.

샘플은 2 cm 간격으로 구분하여 지퍼백으로 진공 포장한 후 -10°C 냉동고에 보관하였다.

2. 세슘분석 방법

세슘은 인공 방사성물질로 핵실험에 의해 대기로 유출되어 강우에 의해 지상으로 낙하한다. 이러한 세슘은 물에 용해되지 않으나 시간이 지날수록 농도가 감소되는 반감기(30.2년)를 지니고 있다. 세슘은 1954년 핵실험에 의해 최초로 대기 중에 방출되었고 1963년에 최대량이 방출되었다(He et al., 1996; Ahn et al., 2006, 2009; Détriche et al., in press). 이렇게 방출된 세슘은 강우와 함께 낙하하여 토사에 흡착되어 호소와 범람원 등에 퇴적한다. 그래서 토사 퇴적층의 최초 세슘농도는 1954년, 최대 세슘농도는 1963년의 연대로 사용되고 있으며, 이들 연대는 토사의 퇴적속도 계산에 이용되고 있다(Ritchie et al., 1983; He et al., 1996; Walling et al., 2003; Ahn et al. 2006, 2009; Détriche et al., in press).

본 연구에서는 1954년 이후의 토사퇴적을 조사하기 위해 채취한 코아샘플을 105°C에서 24시간 건조한 후, 토사샘플을 4 cm 간격으로 혼합하여 세슘분석용 용기에 넣고 밀봉하였다. 세슘농도(Bq/g) 분석은 일본 북해도대학 아이소토프중합센터(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., 2006, 2009).

3. 세슘총량(Cs-137 inventory)과 토사 퇴적속도

세슘총량은 코아샘플의 단위면적(1 cm²)에 함유된 세슘의 총량을 의미한다. 세슘총량($C_{s,inv}$ mBq/cm²)은 다음과 같이 계산하였다.

$$C_{s,inv} = (W_i \times C_i)$$

여기서, W_i 는 단위면적(1 cm²)에 함유한 토사 퇴적물의 건조량(g/cm²)이고, C_i 는 세슘농도(Bq/g)이다. 세슘은 토사에 흡착되어 토사와 함께 퇴적하므로 세슘총량은 정성적 해석측면에서 토사의 동태를 파악하는 데에 유용하다(He et al., 1996; Ahn et al., 2009; Détriche et al., in press).

코아샘플에서 세슘의 농도가 검출된 최초의 층을 세슘이 최초로 대기 중에 방출된 1954년으로 가정하고, 1954년대 이후부터 토사의 평균퇴적속도를 추정하였다. 토사의 평균퇴적속도(SR; cm/year)는 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$SR = D/C$$

여기서, D 는 1954년 이후 퇴적한 토사의 깊이(cm)이고, C 는 1954년부터 코아샘플을 채취한 시기(2007년)까지의 시간 간격(year)이다.

4. 통계분석

하천 출구와 대조구간의 세슘총량의 차이는 Microsoft office Excel 2003(Statcel2, Japan)을 이용하여 5% 유의수준에서 t -test로 비교하였다. 그리고 t -test를 실시하기 전에 세슘총량의 변수들의 안정을 위해 변수값을 log(x)화하였다(Ahn et al., 2008).

결 과

1. 세슘농도 분석

각 조사지에서 채취한 퇴적토사에서 세슘이 검출되었고, 세슘의 농도분포를 Figure 2와 3에 표시하였다. 하천

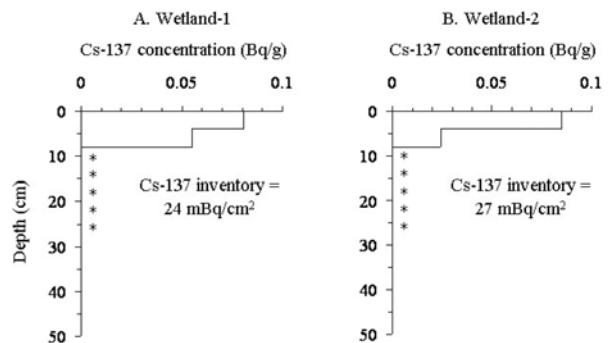


Figure 2. The Cs-137 concentration profiles at the reference sites. An asterisk indicates that the Cs-137 concentration was below the detection limit.

Table 2. Average and standard deviation as well as a comparison of Cs-137 inventory between reference sites and the outlets of the rivers using Student's *t*-test.

	Reference Average±S.E. (n=2)	The mouth of the rive Average±S.E. (n=5)	Student's <i>t</i> -test	
			<i>t</i>	<i>p</i>
Cs-137 inventory (mBq/cm ²)	26±3 (n=2)	159±83 (n=5)	4.79	<0.01

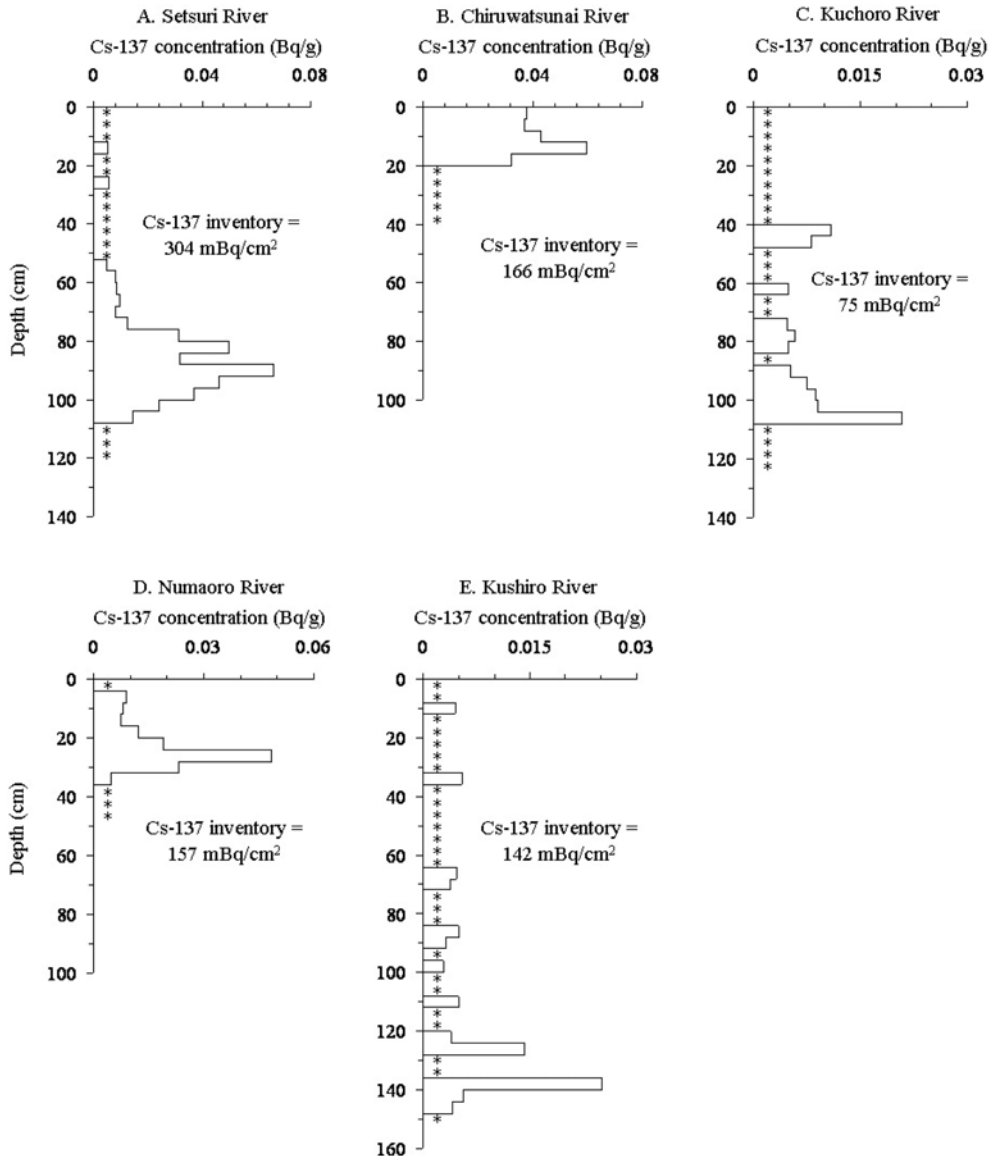


Figure 3. The Cs-137 concentration profiles in the outlets of the rivers in Kushiro Mire. An asterisk indicates that the Cs-137 concentration was below the detection limit.

출구의 세슘총량은 쿠쵸로강(Kuchoro River) 75 mBq/cm²로부터 세쓰리강(Setsuri River) 304 mBq/cm² 범위로 분포하고 있었다. 세슘은 토사에 흡착되어 이동·퇴적하므로 대조구(Wetland-1과 2)에서 24~27 mBq/cm²의 세슘총량 값은 토사의 유입이 적다는 것을 설명하고 있다. 세슘을 함유한 토사는 유역으로부터 유출되어 하천 출구에 퇴적하므로 하천 출구에서 세슘총량은 대조구보다 높은 값을

나타내었다(Table 2). 그러나 2개 지점의 대조구에서 표층의 세슘농도는 하천 출구 표층의 농도보다 높게 나타나고 있었으며, 찌루와수나이강(Chiruwatsunai River)의 출구를 제외한 다른 4지점의 표층에서는 세슘농도가 검출되지 않았다(Figure 3).

하천 출구의 모든 조사지에서 세슘농도의 최대값이 뚜렷하게 나타나고 있었으며, 최대값 아랫부분에서 세슘농

Table 3. Depth of Cs-137 layer in 1954 and sedimentation rate after 1954 in the Kushiro Mire.

	Reference		The outlet of the river				
	Wetland-1	Wetland-2	Setsuri River	Chiruwatsunai River	Kuchoro River	Numaoro River	Kushiro River
Cs-137 layer in 1954 (cm)	4	4	108	20	108	36	148
Sedimentation rate (cm/year)	0.15	0.15	2.04	0.38	2.04	0.68	2.79

도가 급격히 감소하는 전형적인 세습농도 분포를 나타내고 있었다(Figure 3). 따라서 본 연구에서는 세습이 최초로 검출된 깊이를 세습이 최초로 대기 중에 방출되어 토사와 함께 퇴적한 1954년으로 추정하였다. 이러한 연대분석 결과를 토대로 하면, 1954년 이후의 토사퇴적은 찌루와수나이강 출구가 20 cm로 가장 적었고, 쿠시로강(Kushiro River)이 148 cm로 찌루와수나이강보다 7배 많은 토사가 퇴적되었다고 판단할 수 있다(Table 3).

2. 토사의 퇴적속도

1954년 이후 하천 출구에서 평균토사 퇴적속도는 0.38~2.79 cm/year였고, 유역으로부터 부유토사의 유입이 거의 발생하지 않은 대조구에서는 0.15 cm/year로 조사되었다(Table 3). 특히 쿠시로강 출구는 평균 2.79 cm/year의 토사 퇴적속도의 최대값을 나타냈다.

쿠쵸로강과 쿠시로강의 출구를 제외한 3개의 조사지점(세쓰리강, 찌루와수나이강, 누마오로강)에서는 토사 퇴적속도가 증가할수록 세습총량은 급격히 증가하였다(Figure 4). 그러나 쿠쵸로강과 쿠시로강의 출구에서는 토사 퇴적속도가 증가함에 따라 세습총량이 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있었다.

고 찰

쿠시로습지 상류유역의 산림은 1950년대 정부주도의 식량증진사업으로 벌채되어지거나 대규모의 농지로 전환되어(Figure 1), 이들 유역으로부터 다량의 토사가 하천으로 유입되고 있다(Nakamura *et al.*, 1997, 2004; Ahn *et al.*, 2006; Mizugaki *et al.*, 2006). 쿠시로습지로 유입하는 하천의 출구는 완만한 경사를 지니고 있어 유역으로부터 유출된 토사가 쉽게 퇴적하기 때문에, 하천 출구의 토사 퇴적속도는 0.38~2.79 cm/year를 나타내고 있었다(Table 3).

세습은 강우와 함께 낙하하고 토사에 흡착되어 호소와 범람원 등에 퇴적하므로 토사의 퇴적양에 따라 세습의 농도가 결정된다(He *et al.*, 1996; Ahn *et al.*, 2009). 예를 들어, 강우와 함께 낙하한 세습은 많은 양의 토사에 흡착되면 세습의 농도가 토사에 희석되어 농도가 낮아지고, 적은 양의 토사에 흡착되면 세습의 농도는 높아진다. 따라서 대조구 표층의 세습 농도는 외부에서 유입되는 토사의

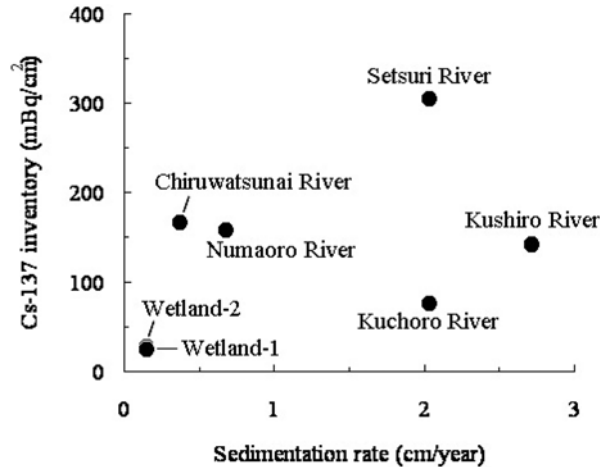


Figure 4. Correlation between the sedimentation rate and the Cs-137 inventory. The sedimentation rate is based on annual sediment accumulations between 1954 and 2007.

양이 적기 때문에 0.08 Bq/g의 높은 농도를 보이고 있는 반면, 토사의 유입량이 많은 하천 출구 표층의 세습농도는 0~0.04 Bq/g로 낮은 농도값을 나타내고 있었다(Figure 2와 3). 특히 유역내 산림벌채와 농지개발이 활발하게 이루어지고 있는 세쓰리강, 쿠쵸로강, 누마오로강 그리고 쿠시로강 출구의 표층에서는 다량의 토사유입으로 인해 세습농도가 희석되어 세습이 검출되지 않았다고 판단되었다(Nakamura *et al.*, 1997, 2004). 이 분석결과는 현재 쿠시로습지 상류유역으로부터 하천 출구로 다량의 토사가 유입되고 있음을 강하게 시사하고 있다.

쿠시로습지로 유입하는 하천 출구에서 토사동태를 이해하기 위해 세습총량과 토사 퇴적속도와의 상관관계를 비교한 결과(Figure 4), 토사퇴적이 증가함에 따라 세습총량도 증가하고 있어 유역으로부터 유출된 토사가 하천 출구에서 퇴적되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 쿠쵸로강과 쿠시로강의 출구에서는 다량의 토사가 퇴적되고 있음에도 불구하고 세습총량은 다른 지점과 비교하여 상대적으로 완만하게 증가하였다(Figure 4). 쿠쵸로강과 쿠시로강의 유로는 대부분 농지개발을 위해 직선화되었고, 이로 인해 유속이 급격하게 빨라지면서 하안침식과 하상침식이 진행되어 많은 토사가 유출되고 있다(Nakamura *et al.*, 1997, 2004; Nakamura and Ahn, 2007). 이렇게 하천 유로의 침식으로 발생한 토사는 대기로부터 낙하한 세습을

거의 포함하고 있지 않기 때문에(Walling and Woodward, 1992; Wallbrink and Murray, 1993; Wallbrink *et al.*, 1998), 하천 출구에서 토사의 퇴적을 증가시키고 있지만 세습총량 증가에는 거의 기여 하고 있지 않는 것으로 판단되었다. 또한 쿠쵸로강과 쿠시로강유역에서 다른 유역보다 많은 토사가 유출되어 세습의 농도를 희석시켜 세습총량이 완만하게 증가하였다고 판단되었다(He *et al.*, 1996; Ahn *et al.*, 2009).

산림유역 개발로 인한 토사유출이 하천 출구의 토사퇴적에 미치는 영향을 밝힌 본 연구의 결과를 통하여, 산림의 개발은 토사의 유출을 증가시켜 하류의 지형을 변화시키고 있음을 알 수 있었다. 그리고 본 연구에서 토사의 동태 파악을 위해 사용한 방사성물질인 세습은 토사의 정성적·정량적 해석에 유용하다고 사료되었다.

인용문헌

1. 中村太士. 2003. 河川・濕地における自然復元の考え方と調査・計画論-釧路濕原および標津川における濕地, 氾濫源, 蛇行流路の復元を事例として-. 應用生態工學 5: 217-232.
2. 中村太士, 中村隆俊, 渡 応修, 山田浩之, 仲川康則, 金子正美, 吉村暢彦, 渡 辺綱男. 2003. 釧路濕原の現状と自然再生事業の概要. 保全生態學研究 8: 129-143.
3. 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: 321-334.
4. 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: 1650-1660.
5. 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: 267-281.
6. Cooper, J.R., Gilliam, J.W., Daniels, R.B. and Robarge, W.P. 1987. Riparian areas as filters for agricultural sediment. *Soil Science Society of America Journal* 51: 416-420.
7. Davis, M.B. 1976. Erosion rates and land-use history in southern Michigan. *Environmental Conservation* 3: 139-148.
8. Détriché, S., Rodrigues, S., Macaire, J.J., Bonté, P., Bréhéret, J.G., Bakyono, J.P. and Jugé, P. in press. Caesium-137 in study sediments of the River Loire (France): Assessment of an alluvial island evolving over the last 50 years. *Geomorphology*.
9. 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: 1067-1086.
10. Harris, L.D. 1988. The nature of cumulative impacts on biotic diversity on wetland vertebrates. *Environmental Management* 12: 675-693.
11. He, Q., Walling, D.E. and Owens, P.N. 1996. Interpreting the ¹³⁷Cs profiles observed in several small lakes and reservoirs in southern England. *Chemical Geology* 129: 115-131.
12. Johnston, C.A., Bubenzer, G.D., Madison, F.W. and McHenry, J.R. 1984. Nutrient trapping by sediment deposition in a seasonally flooded lakeside wetland. *Journal of Environmental Quality* 13: 283-290.
13. 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: 223-232.
14. Mizugaki, S., Nakamura, F. and Araya, T. 2006. Using dendrogeomorphology and ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb radiochronology to estimate recent changes in sedimentation rates in Kushiro Mire, Northern Japan, resulting from land use change and river channelization. *Catena* 68: 25-40.
15. Nakamura, F. and Ahn, Y.S. 2007. Landscape restoration: A case practice of Kushiro Mire, Hokkaido. pp. 209-233. In : S.K. Hong, N. Nakagoshi, B.J. Fu and Y. Morimoto, eds. *Landscape Ecological Applications in Man-Influenced Areas: Linking Man and Nature Systems*. Springer. Japan
16. 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: 213-229.
17. 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: 65-79.
18. 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: 279-289.
19. Ritchie, J.C., Cooper, C.M., McHenry, J.R. and Schiebe, F.R. 1983. Sediment accumulation in Lake Chicot, Arkansas. *Environmental Geology* 5: 79-82.
20. 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: 3245-3269.
21. Walling, D.E. and Woodward, J.C. 1992. Use of radiometric fingerprints to derive information on suspended sediment sources. pp. 153-164. In: J. Bogen, D.E. Wall-

- ing and T.J. Day, eds. Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins. IAHS Publication No. 210.
22. Wallbrink, P.J. and Murray, A.S. 1993. Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes. *Hydrological Processes* 7: 297-304.
23. Wallbrink, P.J., Murray, A.S. and Olley, J.M. 1998. Determining sources and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee River, New South Wales, Australia, using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb . *Water Resources Research* 34: 879-887.
24. Winter, T.C. 1988. A conceptual framework for assessing cumulative impacts on the hydrology of nontidal wetlands. *Journal of Environmental Management* 12: 605-620.
-
- (2009년 9월 2일 접수; 2009년 9월 22일 채택)