

# 大型有機物片流出量の降雨 ならびに緯度傾度に対する変化

Large wood export along the gradients of latitude and precipitation

北海道大学大学院農学研究院 教授 中村 太士  
韓国・公州大学校産業科学大学山林資源学科 徐 正一

流域スケールにおける大型有機物片（LWD）流出量に与える降雨形態と強度の影響を知るため、日本列島の緯度によって異なる降雨パターンとLWD流出量の関係を明らかにした。同じ降雨強度で比べ、高緯度地域においてより多くのLWDが流出することが明らかになった。このマクロ解析結果を裏付けるため、現地調査を行った。その結果、北日本の場合には氾濫原、特に成熟した河畔林が生育する氾濫原が広く発達しており、LWD河道内滞留量も北日本で高い値を示した。台風の通過や集中豪雨の発生が頻繁な南日本では、強風や大雨によって多くのLWDが生産されるが、一方でLWD量が常に除去され、河道内滞留量は低いと考えられる（supply-limited）。これとは反対に、降雨量が全体的に少なく、また多くが降雪として供給される北日本では、輸送できる降雨の発生頻度が少ないため、生産されたLWDは、長期間流域内に滞留すると考えられる（transport-limited）。

キーワード：倒流木、日本列島、降雨パターン、ダム湖、攪乱、滞留時間

We examined the relationships between large woody debris (LWD) export and precipitation patterns and intensity by analyzing the data on the annual volume of LWD removed from reservoirs and the daily precipitation at or near the reservoir sites. The model selection revealed that the precipitation pattern and intensity controlling LWD export varied with latitude in the Japanese archipelago. We also examined differences in LWD distribution as a function of channel morphologies in six watersheds located in southern and northern Japan. In southern Japan, intense rainfalls initiate landslides and debris flows that introduce massive amounts of LWD into channels. The LWD temporarily stored on these bars is frequently moved and/or broken into smaller pieces by floods. Thus, fluvial export of LWD is supply-limited, with smaller accumulations and shorter residence times than in northern Japan. Conversely, in northern Japan, recruited LWD pieces accumulate in log jams on valley floors, particularly on floodplains, resulting in larger accumulations and longer residence times. In these watersheds fluvial export of LWD is transport-limited.

Key words : large woody debris (LWD), Japanese archipelago, precipitation pattern, reservoir, disturbance, residence time

## 1. はじめに

河川生態系は、物理的・化学的・生物的に陸上生態系と密接な関係を持っている（Webster and Patten 1979; Meyer and Edwards 1990; Bilby and Bisson 1998）。特に、河川の炭素循環における陸上生態系から河川生態系への供給は重要である（Vannote et al. 1980; Naiman et al. 1987）。河川生態系へ供給された大型有機物片（流木：LWD）は、多様な野生生物の生息地を創造および提供することで生物多様性を維持し、河川生態系に生息している生物へのエネルギー供給および栄養の循環に関与する（Harmon et al. 1986; Wipfli et al. 2007）。さらにLWDは全粒状有機物炭素の要素の一部として炭素循環に影響を与えて

いる（Bilby and Ward 1989; Wallace et al. 1995）。一方、LWDは土石流と共に流下して、下流の家屋や農耕地、橋梁や道路などに被害を与えてきたため、土石流対策とともに倒流木対策も重要な課題の一つである（Ishikawa 1989; Matsumura et al. 1990）。

筆者らは、全国200ヶ所程度のダムサイトで観測されたLWD貯留量に関するデータベースを構築した。そのなかで、一定程度の精度で、年間LWD流出量や降雨量などのデータが整備されている131基のダムについて、単位面積あたりの年間LWD炭素流出量（LWDC）を比較した（Seo et al. 2008参照）。その結果、小流域（6.5-20km<sup>2</sup>）においては流域面積が増加するにしたがって増加し、中程度の大きさをもつ流域（20-100 km<sup>2</sup>）でピークに達し、大流域（100-4,025km<sup>2</sup>）では頭打

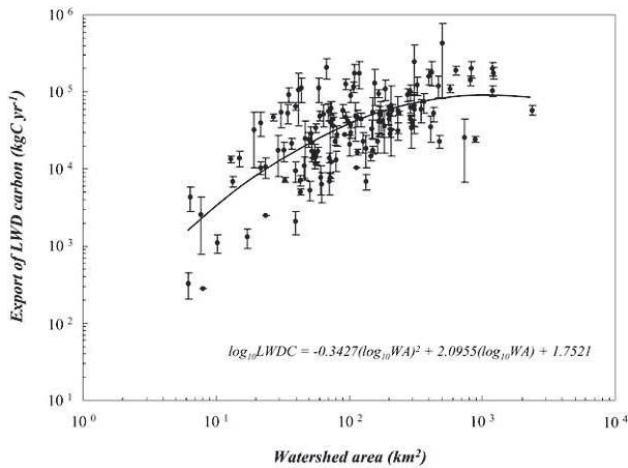


図-1 流域面積の違いによるLWD流出量の変化。  
(Seo et al. 2008)

ちになることが示された (図-1)。

さらに、年降雨量もLWDC流出量を増加させる一つの誘因であった。これは、降雨量が増加することによって斜面地下水位や流量が増加し、斜面崩壊や河岸侵食などが起こり、LWDの生産と供給が促進されるとともに、河道内のLWDを移動させるためであると考えられる。

以上の成果を背景として、本研究では、

- 1) 同じデータベースを使い、日本列島の緯度によって異なる降雨パターンとLWD流出量の関係をあ

きらかにすること

- 2) 上記の解析結果から得られた仮説を、現地調査から検証すること

の二つを目的とし、得られた成果を報告する。

## 2. 降雨強度とLWD流出量の関係

流域スケールにおけるLWD流出量に与える降雨形態と強度の影響を知るため、日本列島の緯度によって異なる降雨パターンとLWD流出量の関係を明らかにした。詳細は、Seo et al. (2012) を参照されたい。本研究において、調査地は、①上流に他のダムが存在せず、さらに②ダム管理所が直接観測しているLWDデータと日雨量データが7年以上ある42ヶ所のダム流域を対象とした (図-2)。その際、先の研究から流域サイズに伴うLWD流出量の差を考慮し、小流域 (<20km<sup>2</sup>; 10 sites)、中規模流域 (20 – 100km<sup>2</sup>; 14 sites)、そして大流域 (>100km<sup>2</sup>; 18 sites) の三つに分けた。一方、ダム管理所や最も近くの気象庁からの日雨量データとともに、土石流発生等に関連する3日の半減期を持つ実効雨量のデータベースを構築した。さらに日本列島の緯度によって異なる降雨パターンを考慮するために、調査対象流域に位置しているダムサイトの緯度を抽出した。LWDの流出に関与する最適モデルを選択する

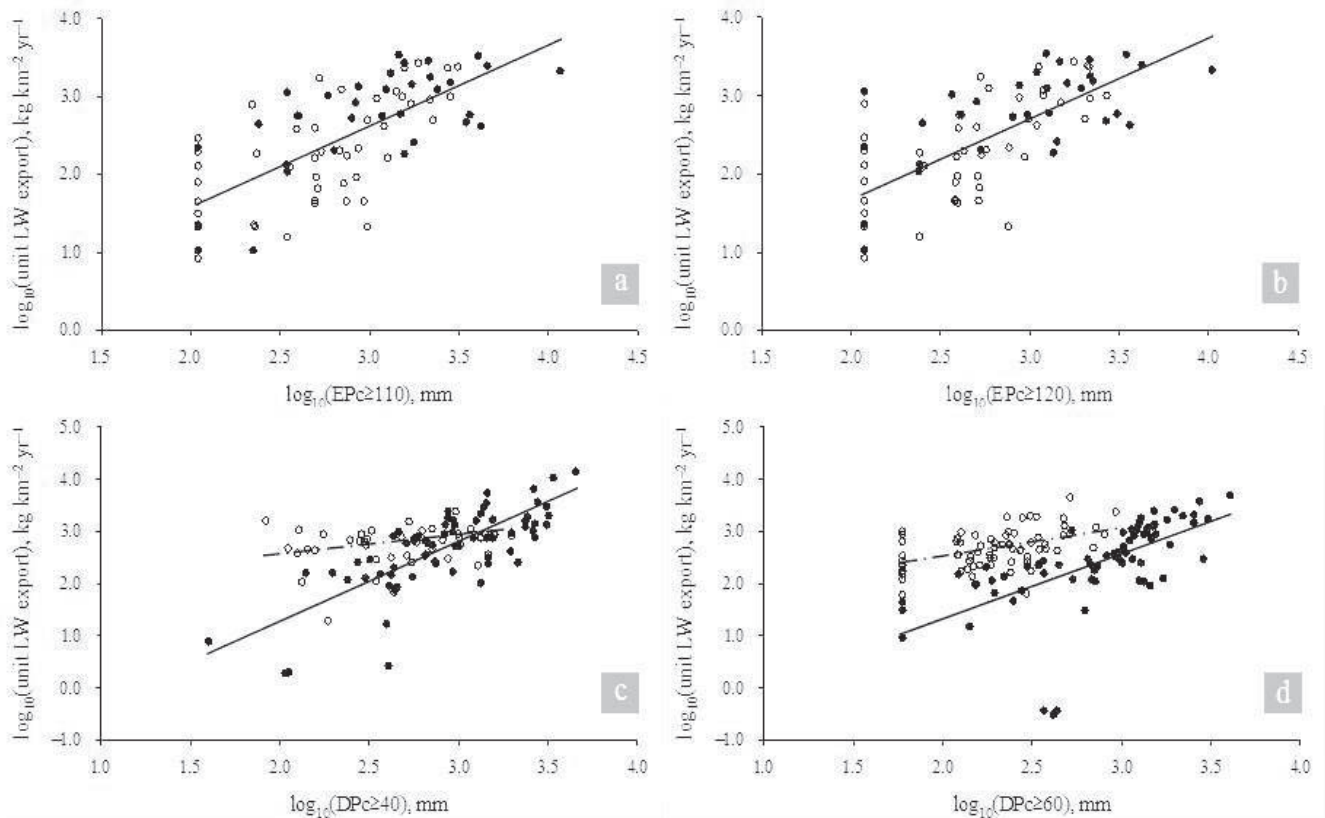


図-2 流域サイズ、降雨強度、ならびに緯度経度によるLWD流出量の違い (a,b:小流域、c:中規模流域、d:大流域)。(Seo et al. 2012)

ために、一般化線形混合モデル (GLMM) を用いた。目的変数は単位面積あたりのLWD流出量である。また説明変数は、①a mm以上の日雨量 (もしくは実効雨量) の年間合計 ( $DP_{c \geq a}$  or  $EP_{c \geq a}$ )、②緯度カテゴリ、また③それらの相互作用である。ここで、 $DP_{c \geq a}$ でのaは0から150mmまで10mmずつ増加 (0、10、20、…130、140、150) し、 $EP_{c \geq a}$ でのaは0から300mmまで10mmずつ増加 (0、10、20、…280、290、300) する。

AICによるモデル選択を行った結果、LWDのサイズに比べて河川の規模が相対的に小さな小流域では110mm、もしくは120mm以上の実効雨量の年間合計のみが説明変数として選択された (図-2)。おおよそ半減期3日の実効雨量が100mmを越えると斜面崩壊が起こり始め、200mmを終えると危険度がかなり高いとすることができる (National Research Institute of Earth Science and Disaster Prevention 2002)。したがって、110～120mm以上の実効雨量により土石流も含むマス・ムーブメントが発生し、河川の規模に関わらず多くのLWDが本流まで運搬され、本流の水位上昇によって浮上し、流出すると考えられる。一方、中規模ならびに大流域では、それぞれ40mm、60mm以上の日降雨量の年間合計、緯度、それらの相互作用が説明変数として選択された。一般的に、河川幅による制約がない河川において、LWDの移動や滞留を関与する最も重要な要因は水深に対するLWDの半径である (Braudrick and Grant 2001)。したがって、LWDのサイズに比べて河川の規模が大きな中規模流域ならびに大流域ともに、豪雨期に水位が上昇し、LWDが運搬されると考えられる。しかし、本研究での結果をみると、同じ降雨強度で比べると、高緯度地域においてより多くのLWDが流出することが明らかになった。日本は南北に長い国であり、台風、低気圧を伴う集中豪雨の発生頻度、ならびに降雪の分布に関して大きな地域差を有している。台風の通過や集中豪雨の発生が頻繁な南日本では、強風や大雨によって多くのLWDが生産されるが、一方で頻繁な降雨発生によって流域内に溜まっているLWD量が常に除去され、河道内滞留量は低いと考えられる (supply-limited)。このため、同じ降雨強度で比較すると、緯度の高い地域とくらべて、LWD流出量は少ないと考えられる。これとは反対に、降雨量が全体的に少なく、また多くが降雪として供給され、台風の通過や集中豪雨の発生頻度が少ない北日本では、強風や大雨によるLWDの生産量が少ない。しかし、春期の融雪による河岸侵食は、相対的に多くのLWDを生産するが、輸送で

きる降雨の発生頻度が少ないため、生産されたLWDは、長期間流域内に滞留すると考えられる (transport-limited)。従って、同じ降雨強度で比べると、LWDの流出量は高く推移すると考えられる。

### 3. 現地調査による検証

2.で示された仮説を検証するため、現地調査を実施した。詳細は、Seo et al. (2015) をご覧いただきたい。

調査地は、四国の梁瀬、初瀬、永瀬ダム流域と、北海道の定山溪、桂沢、大雪ダム流域である。ここで、梁瀬と定山溪ダム流域、初瀬と桂沢ダム流域、また永瀬と大雪ダム流域の規模は、次のとおりである。南日本の梁瀬、初瀬、永瀬ダム流域の集水面積は、それぞれ102km<sup>2</sup>、172km<sup>2</sup>、299km<sup>2</sup>であり、流域内の河川長は98km、184km、283kmである。北日本の定山溪、桂沢、大雪ダム流域の集水面積は、それぞれ103km<sup>2</sup>、151km<sup>2</sup>、288km<sup>2</sup>であり、流域内の河川長は102km、145km、284kmである。

現地調査は2009年の8月から11月までの平水時 (北海道では8月と9月、四国では10月と11月) に実施した。これまでの研究より、LWD流出量に影響を及ぼす最も重要な要因は、流域サイズ (もしくは流域内の位置) であるため、できる限り①同じ集水面積を持ち、②延長400mを持つ複数の調査セグメントを選定した。調査セグメントの箇所数は、それぞれの流域の総流路長の5%水準になるように選定した。その結果、梁瀬と定山溪ダム流域で10ヶ所、初瀬と桂沢ダム流域で15ヶ所、永瀬と大雪ダム流域で25ヶ所の調査セグメントを選定した。

各調査セグメントでの調査項目は、ダムサイトからの各調査セグメントまでの距離、平均河川幅、単位距離あたりの直径1m以上の巨礫数、河道内地形面の面積、単位距離あたりのLWD滞留量、LWDの小片化と腐朽度であった。ここで、河道内地形面は、平水時の流路 (Low-flow channel)、砂礫堆など植生のない地形面 (Bar)、若齢林分が発達した氾濫原 (Non- or Young-forested floodplain)、成熟林分が発達した氾濫原 (Mature-forested floodplain) に区分した。また、小片化については、根+幹+枝+葉の形を持つ1stクラス、根+幹+枝の形を持つ2ndクラス、根+幹の形を持つ3rdクラス、根もしくは幹だけの形を持つ4thクラスに区分し、腐朽度については、新鮮な樹皮を持つ1stクラス、ゆるい樹皮を持つ2ndクラス、硬い木質部を持つ3rdクラス、軟らかい木質部を持つ4thクラスに区分した。一方で、単位距離あたりのLWD

滞留量 ( $\text{m}^3/\text{km}$ ) を流域からの年間LWD流出量 ( $\text{m}^3/\text{yr}$ ) で除すことによって、定常状態を仮定した年間当たりのLWD移動距離 ( $\text{km}/\text{yr}$ ) を求めることができる。また、その逆数は、回転年 (turn-over time) を表し、単位距離あたりのLWD平均滞留期間 ( $\text{yr}/\text{km}$ ) を求めることができる。これらの数値を算出した。以上のデータのうち、ダムサイトからの各調査セグメントまでの距離と年間のLWD移動距離を比較し、LWDの移動可能距離以内の調査セグメントを抽出し、解析対象の調査セグメントとした。

LWDの移動に影響を与える要因として、調査セグメントでの河川幅に対するLWDの長さや直径1m以上の巨礫の数を比較した結果、河川幅に対するLWDの長さは北日本の調査流域でやや大きく、直径1m以上の巨礫の数は南日本の調査流域でやや多かったが、統計的には南・北日本の有意な差は現れなかった。

これに対して、LWDが滞留する地形面がどの程度発達しているか、その面積と割合を検討した結果、南・北日本で有意な差が現れた。つまり、南日本の場合はBarがFloodplainより広く発達しているが、北日本の場合はFloodplain、特にMature-forested floodplainが広く発達していることが分かった。日本列島の降雨強度と降水量の地理的変異と地形・地質的特徴から、洪水攪乱の頻度や強度の違いとして現れ、その結果、北日本で広い氾濫原が発達したと考えられる。

一方、LWD河道内滞留量は、北日本で高く、南日本で低い値を示した (図-3)。さらに、すべてのLWDのうち、群形態 (log-jam) のLWDが占有している割合も、南日本に比べて広い氾濫原が発達した北日本で高いことが分かった。この点は、2. のダムによるLWD貯留量のマクロ解析からも推測された傾向であり、LWDの流出について、北日本のtransport-limited、南日本のsupply-limitedの傾向を裏付けた結果であると考えられる。

一般的に、LWDは、流下移動中に水深や流速と河床や河岸の相互作用などの物理的摩擦を受けて小片化される (Nakamura and Swanson 1993; Seo and Nakamura 2009; Seo et al. 2010)。本調査の結果、移動率の高い南日本において、小片化された (1st ~ 4th) に向けてより小片化したLWDを指す) LWDの占める割合が高くなることが示された (図-4)。また、LWDの腐朽度は、大気と触れているか水没しているかによって大きく影響を受ける (Hyatt and Naiman 2001; Richardson et al. 2005)。北日本では、広い氾濫原や扇状地などのLWDの貯留域が広く発達し、浅く緩い流れが卓越することによって下流域へのLWDの運搬

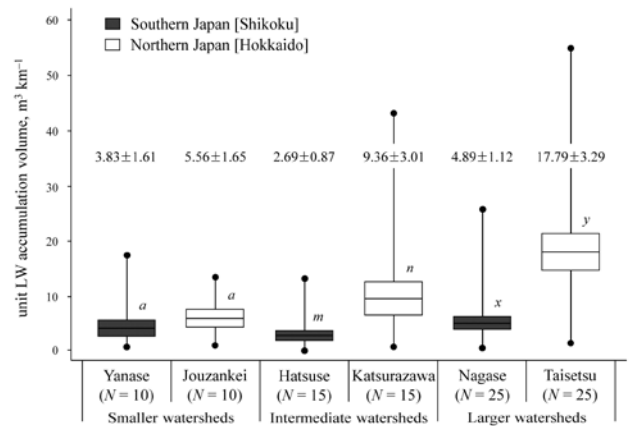


図-3 南・北日本調査流域におけるLWD現存量 (平均±標準誤差)。(Seo et al. 2015)

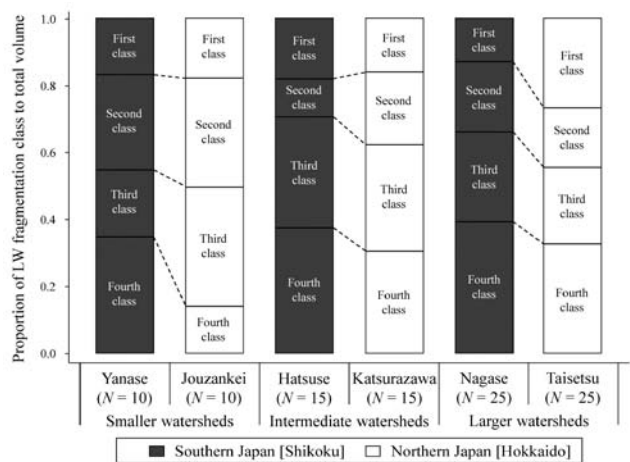


図-4 LWDの小片化に関する比較 (a : 1<sup>st</sup> class, b : 2<sup>nd</sup> class, c : 3<sup>rd</sup> class, d : 4<sup>th</sup> class)。(Seo et al. 2015)

は制限され、貯留されたLWDが長く滞留する可能性が高い。その結果、北日本で腐朽度の高いLWDが多くなったと考えられる。特に、腐朽度は、どの程度、河道内に停滞しているか、相対的な滞留時間 (residence time) を表していると考えられ、LWDの年間流出量 ( $\text{m}^3/\text{yr}$ ) と各調査セグメント内のLWD滞留量 ( $\text{m}^3/\text{km}$ ) の関係から 単位距離あたりのLWD滞留時間を推定した結果、北日本のほうが相対的に長いこと、またそれらの傾向が中規模ならびに大規模流域で明瞭になることが分かった (図-5)。

#### 4. おわりに

ここで述べた大型有機物片の研究は、全国200ヶ所程度のダムサイトで観測されたLWD貯留量に関するデータベースによって可能になった。大型有機物片フラックスは、これまでの流域有機物研究からは無視されていたものであり、これだけの地点数でそのフラックスが計測できたのは、世界でも初めてである。今後

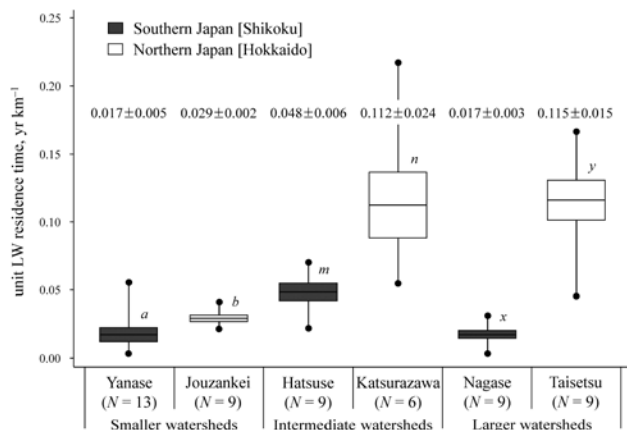


図-5 LWDの滞留時間に関する比較。(Seo et al. 2015)

も継続的な観測が必要である。

また、こうしたデータベースは、基礎データとしてのフラックス推定に有効であるばかりでなく、年間ダム湖に貯まる流木量を緯度傾度、降雨傾度に沿って推定することが可能になり、ダム管理にも大いに活用できると思われる。

また、一方で全国の河川では、砂州や砂礫堆、氾濫原に樹木が侵入して大いに繁茂する“樹林化”が顕著になっており、LWDの生産や移動様式も変化すると考えられる。さらに地球温暖化に伴う降雨量の増大は、LWDフラックスを増加させる可能性があり、適応策を検討する上でも重要な基礎的知見を提供すると考える。

## 参考文献

Bilby R. E. & Bisson P. A. (1998) Function and distribution of large woody debris. *River Ecology and Management* (ed. R. J. Naiman & R. E. Bilby), pp. 324-346. Springer, New York.

Bilby R. E. & Ward J. W. (1989) Changes in characteristics and function of woody debris with increasing size of streams in western Washington. *Transactions of the American Fisheries Society* 118: 368-378.

Braudrick C. A. & Grant G. E. (2001) Transport and deposition of large woody debris in streams: A flume experiment. *Geomorphology* 41: 263-283.

Harmon M. E., Franklin J. F., Swanson F. J., Sollins P., Gregory S. V., Lattin J. D., Anderson N. H., Cline S. P., Aumen N. G., Sedell J. R., Lienkaemper G. W., Cromack K. & Cummins K. W. (1986) Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* 15: 133-302.

Hyatt T. L. & Naiman R. J. (2001) The residence time of large woody debris in the Queets River, Washington, USA. *Ecological Applications* 11: 191-202.

Ishikawa Y. (1989) Studies on Disasters Caused by Debris Flows Carrying Floating Logs Down Mountain Streams. PhD thesis, Kyoto University, 121pp.

Matsumura K., Hashida Y. & Kasai S. (1990) Effect of

trapping floodwood by grid type sabodam. *Shinsabo* 43: 9-12.

Meyer J. L. & Edwards R. T. (1990) Ecosystem metabolism and turnover of organic carbon along a blackwater river continuum. *Ecology* 71: 668-677.

Naiman R. J., Melillo J. M., Lock M. A., Ford T. E. & Reice S. R. (1987) Longitudinal patterns of ecosystem processes and community structure in a subarctic river continuum. *Ecology* 68: 1139-1156.

Nakamura F. & Swanson F. J. (1993) Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms* 18: 43-61.

National Research Institute of Earth Science and Disaster Prevention (2002) Landslide disaster prediction support system. Tsukuba, Japan. (<http://www.bosai.go.jp/>)

Richardson J. S., Bilby R. E. & Bondar C. A. (2005) Organic matter dynamics in small streams of the Pacific Northwest. *Journal of the American Water Resources Association* 41: 921-934.

Seo J. I. & Nakamura F. (2009) Scale-dependent controls upon the fluvial export of large wood from river catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 786-800.

Seo J. I., Nakamura F. & Chun K. W. (2010) Dynamics of large wood at the watershed scale: A perspective on current research limits and future directions. *Landscape and Ecological Engineering* 6: 271-287.

Seo J. I., Nakamura F., Nakano D., Ichiyanagi H. & Chun K. W. (2008) Factors controlling the fluvial export of large woody debris, and its contribution to organic carbon budgets at watershed scales. *Water Resources Research* 44: W04428.

Seo, J. I., Nakamura, F., Akasaka, T., Ichiyanagi, H and Chun, K. W. (2012) Large wood export regulated by the pattern and intensity of precipitation along a latitudinal gradient in the Japanese archipelago. *Water Resources Research* 48, W03510.

Seo, J. I., Nakamura, F., Chun, K. W., Kim, S. W., and Grant, G. E. (2015) Precipitation patterns control the distribution and export of large wood at the catchment scale. *Hydrological Processes* 29: 5044-5057.

Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R. & Cushing C. E. (1980) The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 130-137.

Wallace J. B., Whiles M. R., Eggert S., Cuffney T. F., Lugthart G. J. & Chung K. (1995) Long-term dynamics of coarse particulate organic matter in three Appalachian Mountain streams. *Journal of the North American Benthological Society* 14: 217-232.

Webster J. R. & Patten B. C. (1979) Effects of watershed perturbation on stream potassium and calcium dynamics. *Ecological Monographs* 49: 51-72.

Wipfli M. S., Richardson J. S. & Naiman R. J. (2007) Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems: Transport of organic matter, invertebrates, and wood down headwater channels. *Journal of the American Water Resources Association* 43: 72-85.