

新潟大学演習林における森林流域と草地流域の降雨流出過程の時系列解析

成田雅幸^{1*}・西籐 健²・川邊 洋²・権田 豊²

(平成21年1月13日受付)

要 約

本研究では、新潟大学農学部附属佐渡演習林内を流れる大倉川源流部に位置する林地流域と草地流域の水源涵養機能の評価を目的に、Cl⁻イオンをトレーサーとして用いた時系列解析を行い、流域内に分布する流路の通過時間を評価した。解析の結果、草地流域の流出には通過時間の比較的短い流出が寄与し、また、林地流域の流出には通過時間の比較的長い流出が寄与していることが示唆された。今回の結果から、林地流域と草地流域の渓流水は、それぞれ異なる流出過程を経て溪流へと流出していることがわかった。

新大農研報, 61(2):181-193, 2009

キーワード：佐渡、時系列解析、森林、水源涵養機能、流出時間

従来の森林の機能は、木材生産などの物質生産機能が注目されていた。しかし、林業の衰退や森林の乱伐などにより森林の消失が進行し、洪水や渇水の多発や地球温暖化などの問題が生じた。そのため、物質生産機能に加え、水源涵養機能、災害防止機能や環境保全機能などの多面的機能が注目されるようになった。

多面的機能の一つである水源涵養機能については、新潟大学農学部附属佐渡演習林においても研究が行われており、宮島(1991)、片井(2004)、齋藤(2005)の研究によって、演習林における洪水・渇水緩和機能が確認された。

新潟大学農学部附属演習林で確認された洪水・渇水緩和機能は、主に(1)蒸散・樹幹遮断による流量減少(2)発達した土壌による降雨に対する流出遅れの2つの作用によって成り立っている(片井、2004)。

森林の土壌は、長い時間をかけ形成された、きわめて不均質なものであり、土壌中の流路の保水性や透水性などの多様性は、きわめて高い。これにより、降雨の通過する土壌中の流路の違いによって、流入から流出までにかかる時間も大きく異なるため、地下水の挙動に関する知見が求められている(坪山、1994; 芳賀、2005)。

これらのことから、降雨が流域を通過して溪流へ流出するまでの時間(通過時間)の推定は、水源涵養機能を解明するために重要であるといえる。さらに、通過時間の推定は流出経路や水質形成プロセスを解明するための重要な知見となる。しかし、土壌中の水の動きは複雑・不可視であるため把握することは難しい。近年では、山地斜面における水の移動メカニズムに関わる研究が行われてきており、その実体が明らかにされつつあるところであるが、狭い範囲(数m²程度)の土壌を対象とした研究は多いのに対し、流域全体を評価した例は少ないのが現状である。

Kirchner. et al (2000) は、ある対象流域に流入した降雨と

そこからの流出水のCl⁻濃度に時系列解析を適用することによって、新しい水の圧力が古い水を押し出している現象を明らかにした。

この手法を用いれば、降雨流出過程で反応しない成分(たとえば塩化物イオン)をトレーサーとして用いた時系列解析により、流域の流出特性を明らかにすることができると考えられる。

新潟大学農学部附属佐渡演習林内には植生状態に著しい違いが見られる隣接した2つの流域があり、降雨にはトレーサーとなる海塩由来の塩化物が大量に含まれていることから、本研究の調査対象流域として好適であると考えた。

そこで本研究では、植生条件の異なる2流域における流出特性の違いを評価することを目的に、新潟大学農学部附属佐渡演習林における降雨と流出水のCl⁻濃度の時系列変化の調査を行い、林地流域と草地流域における、長短様々な通過時間を有する、土壌中の流路の分布状況を比較した。

2. 調査概要

調査地

(1) 位置

試験流域は、新潟県佐渡市相川町大字小田と大倉にまたがる新潟大学農学部附属フィールド科学教育研究センター佐渡ステーション18林班・19林班内にあり、大佐渡山地分水嶺から北西に流下して日本海に注ぐ大倉川の源流部に隣接して位置する林地流域と草地流域(以後、林地流域を林地、草地流域を草地と呼ぶことにする。)からなる(図1~3)。

(2) 地形

試験流域は、林地・草地ともに標高600m~800mの範囲に広がっている(図4)。面積はそれぞれ林地7.34ha、草地4.32haである。林地・草地の平均勾配はそれぞれ、23.5°、22.5°、最大勾配が30°、35°となっている。

¹ 新潟大学大学院自然科学研究科

² 新潟大学農学部

*代表著者: f08d021h@agr.niigata-u.ac.jp

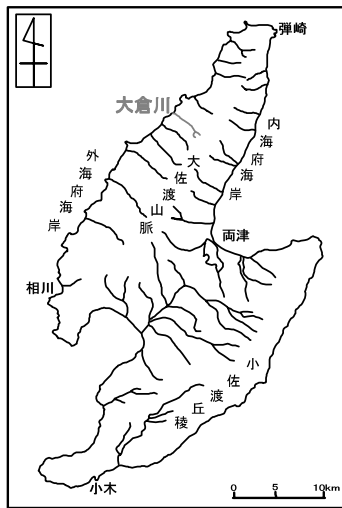
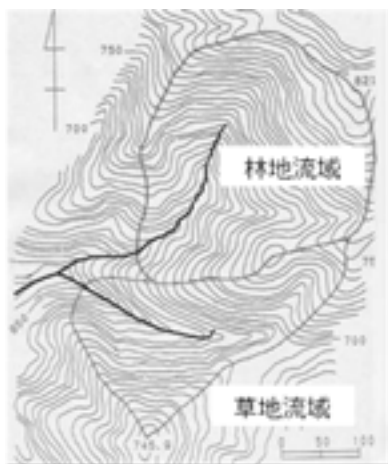
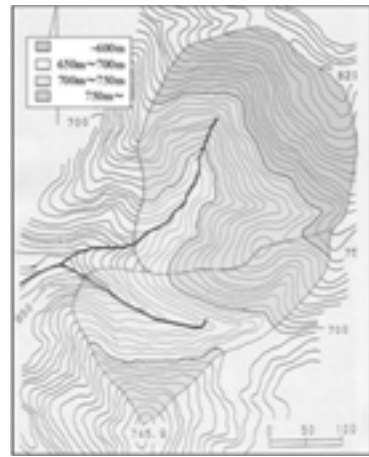
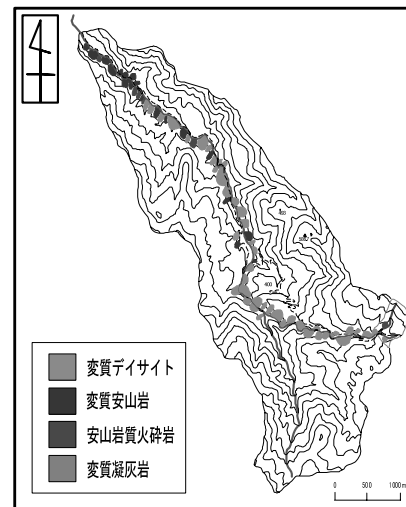


図 1 大倉川の位置

図 2 大倉川流域
(* 国土地理院地形図をもとに作成)図 3 試験流域
(* 国土地理院地形図をもとに作成)図 4 標高区分図
(国土地理院地形図をもとに作成)

(3) 地質

斎藤 (2005) によると、大倉川流域は大部分が変質安山岩、変質デイサイトで構成され、局所的に安山岩質火砕岩、変質凝灰岩が産出する地質となっている (図 5)。林地と草地は隣接していることもあり、地質は極めて類似していると推測できる。

図 5 大倉川流域ルートマップ
(斎藤、2005 より)

(4) 土壌

土壌は草地流域と林地流域で異なる。草地流域は、放牧地として長年使用されたため、層位が認められない受食型の Er 型土壌が主となっている。それに対し、林地流域では、ポドゾル化した土壌である Pw (i) 型が分布し、中・下部には Bb 型 (乾性褐色森林土 (緩斜地型))、Bd 型 (適順性褐色森林土) および Bd (d) 型 (適順性褐色森林土 (乾燥型)) などの土壌が分布する。

また、片井 (2004) によると、土壌の飽和透水係数、孔隙率、土壌厚は、いずれも草地より林地で大きい (表 1)。これらのことから、草地より林地の方が土壌は発達しているといえる。

表1 流域の土壌特性

	林地	草地
透水係数 表層 (cm/sec) 下層	0.096 0.038	0.034 0.031
孔隙率 表層 (%) 下層	82.8 72.9	73.7 72.4
平均土壌厚 (cm)	35	29

(5) 植生

1990年9月に宮島(1991)が行った植生調査によると、林地の98%、草地の36%はスギ、サワグルミ、アカメイタヤ、アオハダなどの針広混交林となっている(図6)。草地の63%はケンタッキー31フェスク、ウィーピングラブグラス、ススキなどの多年生草本により草生化している。

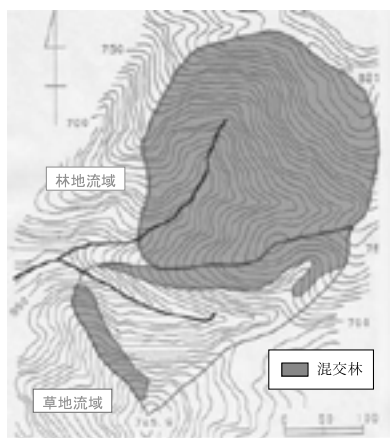


図6 針広混交林の分布図
(宮島、1991より)

(6) その他

冬期は、北西の季節風によってもたらされる降雪量が多く、測定が困難であるため、詳細な観測資料はないが、谷部で4~5m、山腹や尾根などで2~3mの積雪がみられる。

草地の右岸には湧水があり、常時流出が確認されている。

調査方法

林地流域と草地流域の通過時間を評価する目的で、水文観測(日降水量、日流出量)と、水質観測(EC、Cl⁻イオン濃度)の調査を行った。

(1) 水文観測

降水量

林地と草地の合流点付近に、気象観測装置(平均風向、風速、最大瞬間風向、風速、温度、湿度、降水量、日射量)を設置し、0.5mm転倒樹型雨量計(口径200mm、RT-5、池田計器)により降水量を30分ごとに計測した(図7)。

溪流の水位

林地と草地の流域出口付近には、同型・同規模の量水堰堤が設置されている。量水ノッチは90°型で、直高は1750mmである。量水堰堤の左岸側に貯水槽とパイプでつながった直径

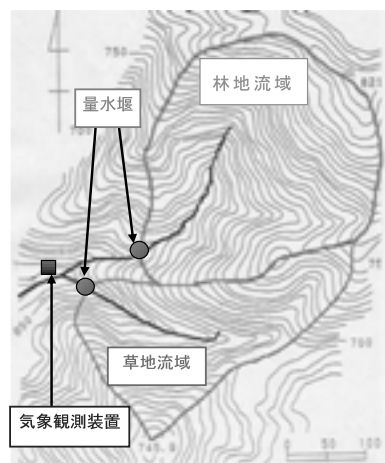


図7 量水堰、気象観測装置設置場所

50cmの観測井戸が設けられており、観測井戸の水位とノッチの越流水位が、等しくなるようになっているため、観測井戸の水位を計測することにより、ノッチの水位が計測できる。その観測井戸の上に鋼製プレハブ観測小屋を設置し、その中に水研62型自記水位計(横川ウェザックKK製)を置き、水位を常時計測している。

得られた水位 H (m)のデータを10分間隔で読み取り、式(1)によって各 H を流量 Q (m³/s)に換算した。

$$Q = 1.63 \times H^{2.5} \quad \dots (1)$$

得られた流量 Q の流域面積 A (m²)を考慮し、式(2)より10分間あたりの比流量 R (mm/10min)を求めた。

$$R = \frac{Q \times 600 \times 10^3}{A} \quad \dots (2)$$

(2) 水質観測

降雨

降雨は、林地と草地の量水堰付近にそれぞれ降雨採水器を設置して採水した。降雨採水器は、ロート(口径 草地:18cm、林地:21cm)と10Lポリタンクをホースで繋ぎ、ロートに降った降雨がポリタンクに溜まる仕組みである(写真1)。ロートとホースの接続部には、虫や葉などが侵入できないようにガーゼを敷いた。

草地の採水器で採水された降雨を林外雨、林地の採水器で採水された降雨を林内雨とする。演習林を訪れた際に、採水器によって採水された降雨のEC(電気伝導度)、Cl⁻濃度を測定した。また、草地の降雨採水器内にECセンサーを沈め、林外雨のECを10分間隔で自動測定した。

渓流水

渓流水は、量水堰上流部側の水質を測定した。渓流水を量水堰堤上流部側に設置した自動採水器(エスケーエス製)により採水(1日1回 午前11時00分)した(写真2)。ただし、2006年の調査では、林地の自動採水器が故障したため、草地のみ設置した。そのため、2006年の林地の渓流水は、演習林を訪れた際に直接採水した。このようにして採水されたサンプルのEC(電気伝導度)、Cl⁻濃度について測定した。また、林地と草地の渓流水は、ECセンサーにより10分間隔でECを自動測定した。



写真1 降雨採水器



写真2 自動採水機

測定に使用した器械

EC: 堀場製 conductivity meter ES-51

Cl⁻濃度: セントラル科学製 携帯用デジタル塩素イオンメーター sencionCl 型

日データの扱い

X 日 AM11 時に採水した渓流水サンプルの EC、Cl⁻濃度を x 日のデータとして扱い、その他のデータについても AM11:00 を基準にして扱った。よって、これより、X-1 日 AM11:00 ~ X 日 AM10:59 のデータを、x 日のデータとして扱うこととする。

◆ 水文データ

x 日の日比流量は、X-1 日 AM11:00 ~ X 日 AM10:59 までの流出量データを集計した値を示す。同様に、x 日の日降水量は、X-1 日 AM11:00 ~ X 日 AM10:59 までの降水量データを集計した値を示す。

◆ EC センサーによる自動測定

10 分間隔で自動測定した X 日 AM11:00 の EC を x 日のデータとして扱った。

3. 調査結果

渓流水の水文・水質観測を 2006 年 6 月 21 日 ~ 2006 年 12 月 12 日の期間に、降雨の水質観測を 2006 年 6 月 9 日 ~ 2006 年 12 月 12 日の期間に行った。ただし、2006 年の調査結果にはデータの欠落した期間が存在する。草地日流出量は 2006 年 9 月 24 日 ~ 2006 年 10 月 20 日、林地日流出量は 2006 年 7 月 27 日 ~ 2006 年 8 月 10 日、2006 年 9 月 28 日 ~ 2006 年 10 月 20 日の期間のデータが欠落している。降水量観測のデータが存在するのは、2006 年 8 月 2 日 ~ 2006 年 10 月 3 日の期間である。

渓流水の全サンプル数は、草地 90 サンプル、林地 8 サンプルである。

降雨のサンプル数は、回収後 ~ 次回の回収時まで採水された降雨を 1 サンプルとし、林外雨、林内雨とも 11 サンプルである。

調査の結果得られた降水量・流出量・EC・Cl⁻イオン濃度の時系列データをそれぞれ図 8 に示す。

データ欠落部の推定

時系列解析を行うためには、連続した日データが必要になる。しかし、得られたデータには欠落部が多く存在し、時系列解析に用いることはできない。日データの欠落部の推定は以下の方法で行った。

(1) 水文データの推定

佐渡演習林における日降水量、草地流域・林地流域における日比流量データのうち、雨量計の故障や水位記録用紙の不備などの理由によって、データを得ることのできない期間があった。

そこで、以下の期間における欠落した日降水量・日比流量のデータについて推定した。

1) 日降水量: 期間 2006 年 7 月 6 日 ~ 2006 年 8 月 1 日

2006 年 10 月 ~ 2006 年 12 月 12 日

2) 日比流量: 期間 (草地): 2006 年 9 月 24 日 ~

2006 年 10 月 20 日

期間 (林地): 2006 年 7 月 27 日 ~

2006 年 8 月 10 日

2006 年 9 月 28 日 ~

2006 年 10 月 20 日

1) 日降水量の推定方法

新潟県佐渡市小田で観測している 2006 年 6 月 ~ 2006 年 12 月 12 日の期間における x 日の日降水量を $FK(x)$ (mm) (新潟県佐渡地域振興局地域整備部提供) とし、同日に観測した演習林の日降水量を $FE(x)$ (mm) とする。

$FK(x)$ と $FE(x)$ の関係を見たところ、相関関係が得られた (図 9)。

よって、欠落した x 日の日降水量 $FEe(x)$ (mm) は、 $FK(x)$ と $FE(x)$ の近似直線である式 (3) より推定することとした。

$$FEe(x) = 1.2466 \times FK(x) \cdots (3)$$

この推定方法によって生じる、推定日降水量の誤差 (= 実測値 - 推定値) を図 10 に示す。誤差の標準偏差は ± 8.82 である。

2) 比流量の推定方法

2) - 1 草地比流量

x 日における草地流域の日比流量を $RL(x)$ (mm) とし、

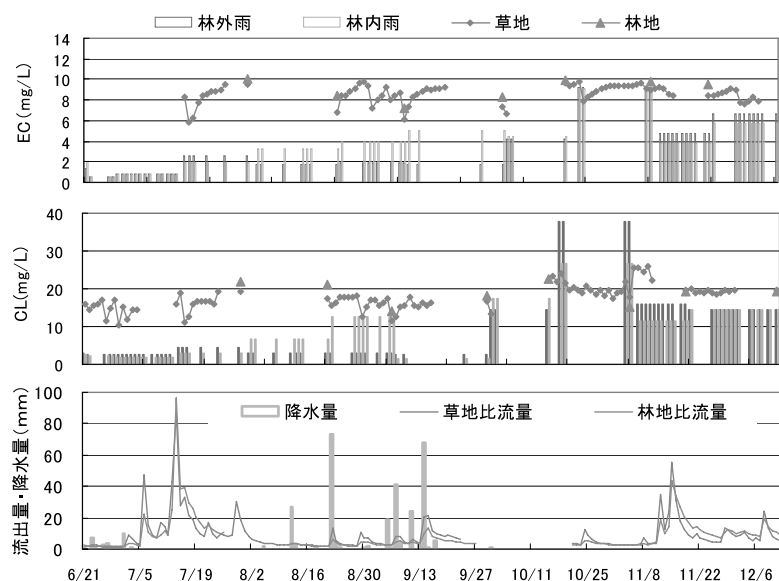


図8 調査結果（推定前）

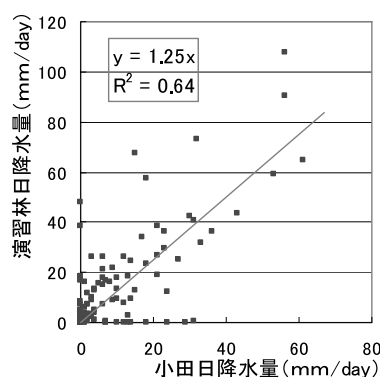


図9 小田降水量と演習林降水量の比較

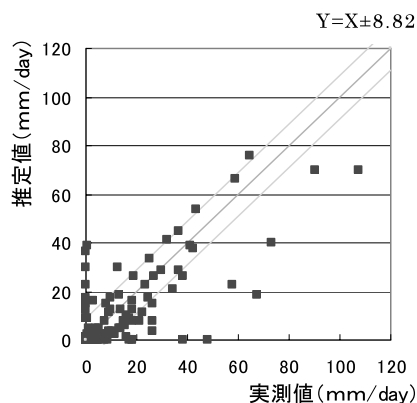


図10 推定日降水量の誤差

同日の午前11時に草地流域で採水したサンプルのECの値を $EC(x)$ (mS/m) とする。 $EC(x)$ と $RL(x)$ の関係を見たところ、相関関係が得られた（図11）。よって、欠落した x 日

の草地流域における日比流量 $RLe(x)$ (mm) は、 $EC(x)$ と $RL(x)$ の指数近似曲線である式（4）より推定することとした。

$$RLe(x) = 734.28 \times e^{-0.56 \times EC(x)} \cdots (4)$$

この推定方法によって生じる、草地推定日比流量の誤差を図12に示す。誤差の標準偏差は ± 5.55 である。

2) - 2 林地比流量

x 日における林地流域の日比流量を $RF(x)$ (mm) とする。林地流域においては、サンプル数が少ないため、 $EC(x)$ と $RF(x)$ に相関関係が見られなかった。そこで、 $RL(x)$ と $RF(x)$ の関係を見たところ、高い相関関係が得られた（図13）。よって、欠落した x 日の林地流域における $RF(x)$ (mm) は、 $RL(x)$ と $RF(x)$ の近似直線である式（5）により推定することとした。

$$RF(x) = 0.93 \times RL(x)^{0.99} \cdots (5)$$

この推定方法によって生じる、林地推定日比流量の誤差を図14に示す。また、誤差の標準偏差は ± 7.35 である。

(2) 水質データの推定

1) 渓流水水質の推定方法

草地・林地の渓流水を24時間間隔（毎日AM11:00測定）で採水したサンプルのEC、 Cl^- 濃度の日データのうち、採水器・バッテリーの不調、採水口が土砂で埋まるなどの理由によって、データのない期間があった。

そこで、2006年7月5日～2006年12月12日における、欠落した渓流水のEC、 Cl^- 濃度の日データについて推定した。

1) - 1 渓流水ECの推定方法

渓流水をAM11:00に1日間隔で採水した、 x 日のサンプルのECの値を $EC(x)$ 、10分間隔で自動測定したデータを $EC_o(x)$ (mS/m) とし、同日同時刻のECと EC_o の差を $G(x)$ (mS/m) とすると式（6）となる。

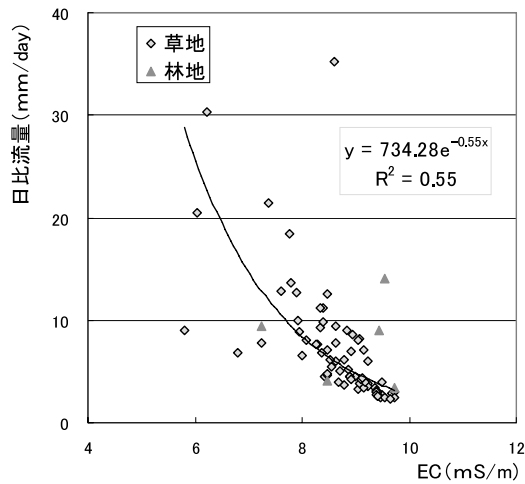


図11 渓流水 EC と日流量の関係

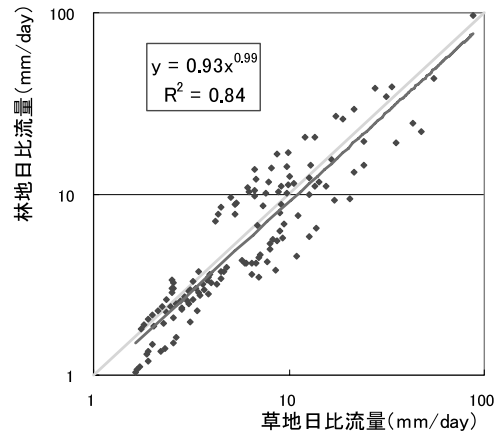


図13 林地と草地の日比流量の比較

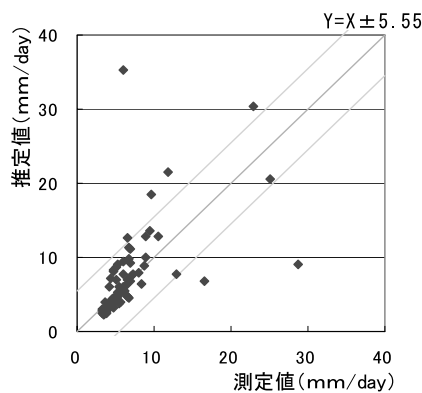


図12 草地推定日比流量の誤差

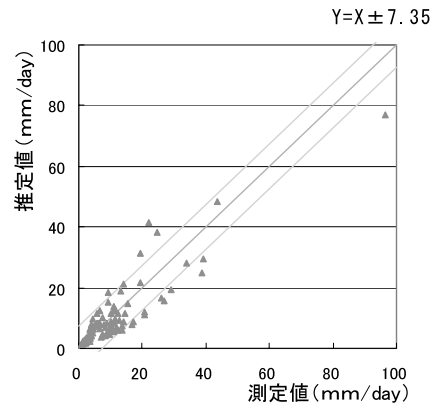


図14 林地推定日比流量の誤差

$$EC(x) = ECo(x) + G(x) \quad \cdots (6)$$

1 日間隔で採取したサンプルのデータが欠落した日の $ECe(x)$ (mS/m) を推定するために、欠落した日の α 日前と β 日後のデータを用いて、欠落した当日の EC と ECo の差 $Ge(x)$ (mS/m) を式 (7) により推定することとした。

$$Ge(x) = \frac{\beta \times G(x - \alpha) + \alpha \times G(x + \beta)}{\alpha + \beta} \quad \cdots (7)$$

このとき $ECe(x)$ は、式 (6) より式 (8) であらわされることとなる。

$$ECe(x) = ECo(x) + \frac{\beta \times (x - \alpha) + \alpha \times G(x + \beta)}{\alpha + \beta} \quad \cdots (8)$$

この推定方法によって生じる、渓流水の推定 EC の誤差を図 15 に示す。

この推定式によって生じる誤差の標準偏差は、草地で ± 0.39 、林地で ± 0.27 である。

1) - 2 Cl^- 濃度の推定方法

AM11:00 に 1 日間隔で採水した、 x 日のサンプルの Cl^- 濃度の値を $Cl(x)$ (mg/L) とし、 $Cl(x)$ と $EC(x)$ の関係を図 16 にそれぞれ示す。この図から、両者に相関関係がみられた。

よって、データが欠落した x 日の $Cl(x)$ (mg/L) は、 $EC(x)$ と $Cl(x)$ の近似直線である式 (9) より推定することとした。

$$\text{2006 年 草地: } CLe(x) = 1.99 \times EC(x) + 1.16 \quad \cdots (9)$$

$$\text{林地: } CLe(x) = 1.70 \times EC(x) + 3.46$$

推定 Cl^- 濃度の誤差を図 17 に示す。2006 年の誤差の標準偏差は草地 ± 2.52 、林地 ± 2.36 である。

2) 降雨水質の推定方法

降雨の水質は、演習林を訪れた際に、降雨採水器に採水された降雨を測定している。よって、その水質は、一定期間内に降った雨が混じり合ったものであり、降ったその時々降雨の水質を示しているのではない。今回の調査では、林外雨の採水器内の底に設置した EC センサーの自動測定により、蓄積していく降雨の水質変化を把握することができた。そこで、2006 年 7 月 5 日～12 月 12 日に降った、その時々降雨 EC 、 Cl^- 濃度について推定した。

2) - 1 林外雨 EC の推定

2006 年 7 月 5 日～12 月 12 日の期間において、 x 日に降った降雨 EC を $ECre(x)$ とする。ここで、 EC センサーの自動測定による x 日の降雨 EC を $ECro(x)$ とすると、 $ECre(x)$

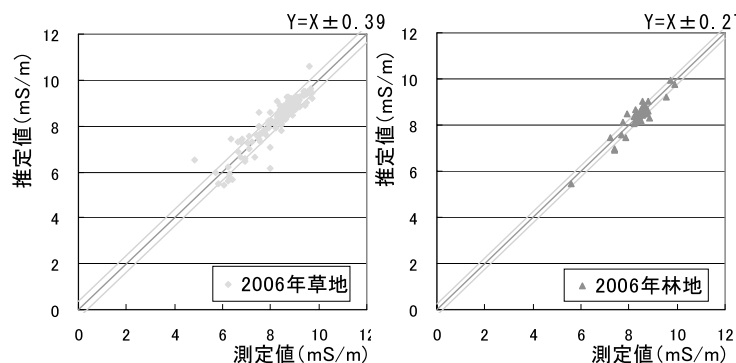
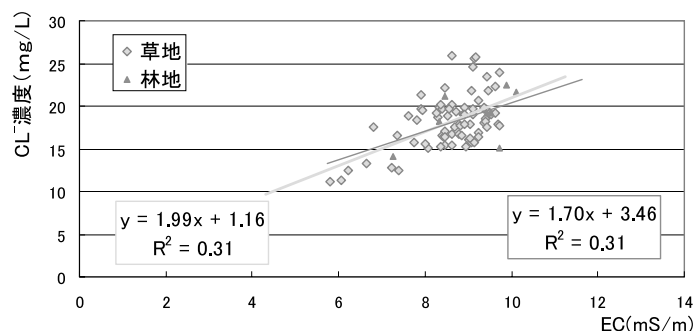
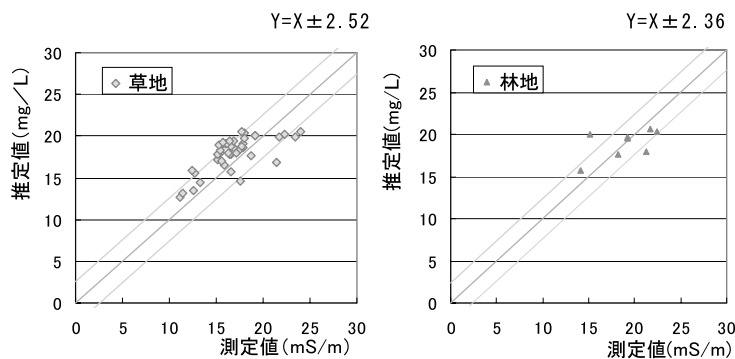


図15 渓流水の推定 EC の誤差


 図16 渓流水の Cl^- 濃度と EC の関係

 図17 渓流水の推定 Cl^- 濃度の誤差

を式 (10) より求めた。

$$ECr(x) = ECf(x) \cdots (10)$$

つまり、EC センサーの自動測定による EC の値を、そのまま降雨 EC の値とした。この方法で EC センサーが測定しているのは、蓄積していく降雨の変化であり、降っている降雨そのものを測定しているわけではない。

正確な値を捉えることはできないが、ある程度の降雨の変動を捉えることはできると考え、今回はこの方法を用いた。

2) - 2 林内雨 EC の推定

x 日に演習林を訪れた際に、測定した林内雨サンプルの EC の値を $ECf(x)$ (mS/m)、林外雨サンプルの EC の値を $ECr(x)$ (mS/m) とし、 $ECr(x)$ と $ECf(x)$ の関係を見たところ、高い相関関係が得られた (図 18)。

よって、データの欠落した x 日の林内雨 EC である $ECfe(x)$ は、 $ECr(x)$ と $ECf(x)$ の近似直線である式 (11) より推定することとした。

$$ECfe(x) = 0.78 \times ECr(x) + 1.16 \cdots (11)$$

この推定式によって生じる誤差を図 19 に示す。誤差の標準偏差は ± 1.14 である。

2) - 3 降雨 Cl^- 濃度の推定

x 日に演習林を訪れた際に、測定した林外雨サンプルの EC、 Cl^- 濃度の値を、それぞれ $ECr(x)$ 、 $Clr(x)$ とする。同様に、林内雨のサンプルの EC、 Cl^- 濃度の値を、それぞれ $ECf(x)$ 、 $Clf(x)$ とする。 $ECr(x)$ と $Clr(x)$ 、 $ECf(x)$ と $Clf(x)$ の関係を見たところ、高い相関関係が得られた (図 20)。

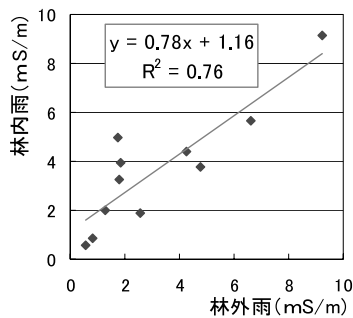
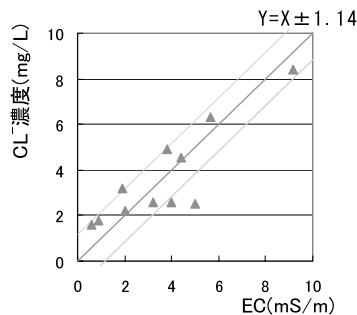


図18 林外雨と林内雨の関係

図19 林内雨推定 Cl^- 濃度の誤差

よって、データが欠落した x 日の林外雨の Cl^- 濃度である $CLre(x)$ は、 $ECr(x)$ と $Clr(x)$ の近似直線である式 (12) より推定することとした。同様に、データの欠落した x 日の林内雨の Cl^- 濃度である $CLf(x)$ は、 $ECf(x)$ と $Clf(x)$ の近似直線である式 (13) より推定することとした。

$$\text{林外雨: } CLre(x) = 2.59 \times ECr(x) \cdots (12)$$

$$\text{林内雨: } CLfe(x) = 2.57 \times ECf(x) \cdots (13)$$

この推定式によって生じる誤差を図21に示す。誤差の標準偏差は林外雨で ± 8.19 、林内雨で ± 4.11 である。

推定後データ

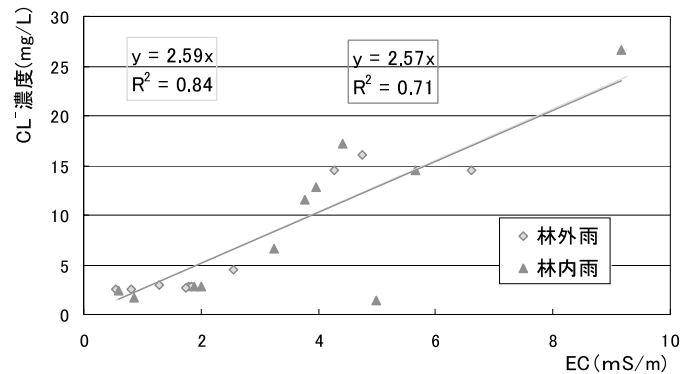
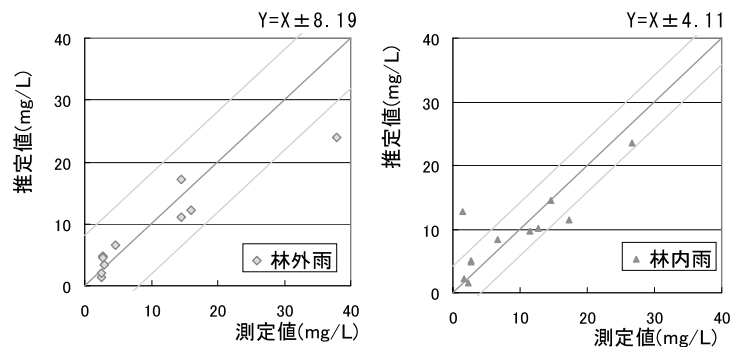
推定の結果得られた2006年7月日～12月12日の推定後の $\text{EC} \cdot \text{Cl}^-$ 濃度・比流量のデータを図22に示す。また、推定後の比流量と Cl^- 濃度から求めた Cl^- フラックスを図23に示す。

解析方法

フーリエ解析

降雨の通過する土壌中の流路によって、降雨の現在の流出に対する寄与の程度も変わっていくと考えられる。

ここで、流入から流出までに要する時間である通過時間を τ 日とする。また、現在である t 日における流出を $c_S(t)$ 、 $t - \tau$ 日における降雨を $c_R(t - \tau)$ とし、 τ 日目の降雨 $c_R(t - \tau)$ の現在の流出 $c_S(t)$ に対する寄与の程度を $h(\tau)$ とすると、式 (14)

図20 降雨の EC と Cl^- 濃度の関係図21 降雨の推定 Cl^- 濃度の誤差

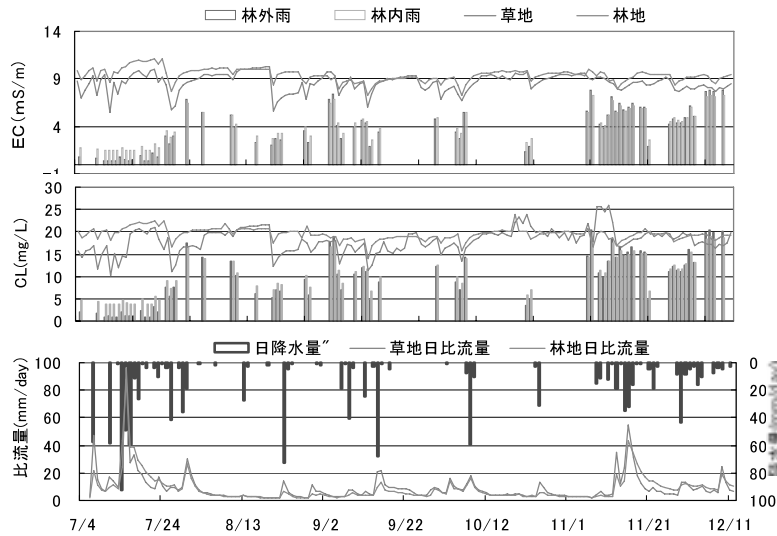
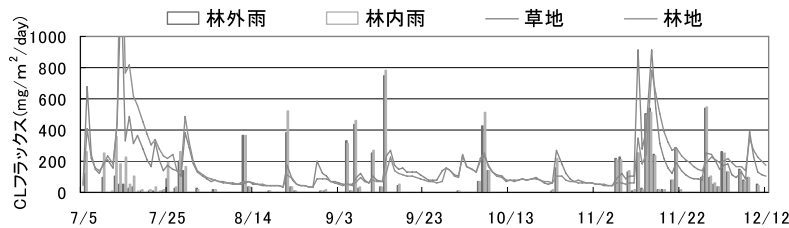


図22 推定後日データ


 図23 推定後 Cl^- フラックス

が成り立つ。

$$c_s(t) = \int_0^\infty h(\tau) c_R(t - \tau) d\tau \quad \dots (14)$$

式 (12) が成り立つとき、 $c_s(t)$ 、 $h(\tau)$ 、 $c_R(t - \tau)$ のそれぞれのフーリエ変換である $C_s(f)$ 、 $|H(f)|$ 、 $C_R(f)$ を用いて、式 (15) が成り立つ。

$$\begin{aligned} C_s(f) &= H(f) \cdot C_R(f) \\ \therefore |C_s(f)|^2 &= |H(f)|^2 \cdot |C_R(f)|^2 \quad \dots (15) \end{aligned}$$

f : 周波数

ここで、 $|C_s(f)|^2$ 、 $|H(f)|^2$ 、 $|C_R(f)|^2$ は、それぞれ $c_s(t)$ 、 $c_R(t - \tau)$ のパワー・スペクトルである。式 (13) より、 $|H(f)|^2$ は (流出のパワー・スペクトル) / (降雨のパワー・スペクトル) で表されることがわかる。この関係を用いて、降雨の現在の流出に対する寄与の程度である $h(\tau)$ を求めるため、まず、 $|H(f)|^2$ を求め、その $|H(f)|^2$ から $h(\tau)$ への変換を試みた。解析には 7 月 5 日～12 月 12 日の期間 (161 日) の Cl^- フラックスのデータを用い、標本数は 256 である。

交差相関

交差相関は、2 つの時系列データ x_1 、 x_2 、 \dots 、 x_t と y_1 、 y_2 、 \dots 、 y_t において、時系列を一期ずつずらして相関を取る方法である。タイムラグが τ であるときの 2 つの値の相関を示す交差相関係数 C_τ は、式 (16) で定義される。

$$C_\tau = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (x_t - \bar{x})(y_{t+\tau} - \bar{y})}{\left\{ \sum_{t=1}^{N-\tau} (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^{N-\tau} (y_{t+\tau} - \bar{y})^2 \right\}^{1/2}} \quad \dots (16)$$

N = 全データ数 $\tau = 0 \sim N-1$

ここで、降水量と流出量の 2 つの時系列データを用いて、過去の降雨が現在の流出にどの程度影響を与えているのかを相互相関係数の値から推測し、降雨が流出に影響を与えるまでのタイムラグ (通過時間) を評価した。

解析には 7 月 5 日～12 月 12 日の期間 (161 日) の Cl^- フラックスのデータを用い、データ数は 161 である。

フーリエ解析と交差相関の関係

交差相関関数 C_{io} は、降雨の自己相関関数 C_{ii} と、降雨の τ 日後の流出に対する寄与度 $h(\tau)$ を用いて、式 (17) で表せる。

$$C_{io}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) C_{ii}(t - \tau) d\tau \quad \dots \text{式 (17)}$$

これは、フーリエ解析で用いた式 (12) の降雨と流出を、それぞれ、交差相関と自己相関に置き換えた形になっている。また、式 (15) が成り立つとき、交差相関のスペクトルであるクロススペクトル $S_{io}(f)$ は、 $h(\tau)$ のフーリエ変換であるシステム関数 $H(f)$ と、入力自己相関のフーリエ変換 $S_{ii}(f)$ を用

いて式 (18) で表せる。

$$S_{io}(f) = H(f) \cdot S_{ii}(f) \\ \therefore |S_{io}(f)|^2 = |H(f)|^2 \cdot |S_{ii}(f)|^2 \quad \cdots \text{式 (18)}$$

式 (18) より、入力のカロススペクトル $S_{io}(f)$ は、システム関数 $H(f)$ と入力のカロススペクトル $S_{ii}(f)$ の積に等しいという関係にある。この関係式より、 $|H(f)|^2$ は、(交差相関のカロススペクトル)² / (入力の自己相関のカロススペクトル)² で表すことができる。

つまり、フーリエ解析と交差相関は、ともに $h(\tau)$ を用いた応答関数で表すことができる。このことから、この2つの解析方法はまったく無関係な解析ではなく、むしろ互いに密接な関係にあるということが出来る。

解析結果および考察

フーリエ解析

Cl^- フラックス ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$) のパワースペクトルを図24に示す。

図24より、流出の $|C_S(f)|^2$ は、降雨の $|C_R(f)|^2$ より大きいことがわかる。次に、式(16)より $|H(f)|^2$ を求めた。 $|H(f)|^2$ の図25に示す。

図25より、 Cl^- フラックスから得られた $|H(f)|^2$ は、草地、林地とも両対数軸上で直線、つまり、べき乗則で近似され、そ

の傾きは草地より林地で大きいことがわかる。また、9日あたりにピークがあることが確認できる。

通過時間の分布のパワースペクトルである $H(f)$ は、林地・草地ともべき乗則で近似される。このべき乗則の近似式 (19、20) の関係をそれぞれ逆フーリエ変換し、 τ 日前の降雨の現在の流出に対する寄与の程度 $h(\tau)$ を得た (図26)。

$$\text{草地: } H(f) = 0.74 \times \lambda^{0.44} \quad \cdots (19)$$

$$\text{林地: } H(f) = 0.52 \times \lambda^{0.64} \quad \cdots (20)$$

図26からわかることを次に述べる。

- ① 林地と草地の両流域ともに、土壌中の流路には、通過時間の短いものから長いものまで様々存在している
- ② τ のごく短い範囲の $h(\tau)$ は、それより長い τ の範囲の $h(\tau)$ より高くなる
- ③ 林地の $h(\tau)$ は、草地の同じ通過時間の $h(\tau)$ より高い

これは、降雨の一部が、パイプ流や地表流などのように素早く溪流に流出し、その一方、残りの降雨は長短様々な期間、土壌中に保持された後、溪流に流出していることを示している。また、同じ通過時間をもつ降雨の溪流への流出に対する寄与は、草地より林地で顕著である。

交差相関

降雨と溪流の Cl^- フラックスを用いて算出した交差相関係数

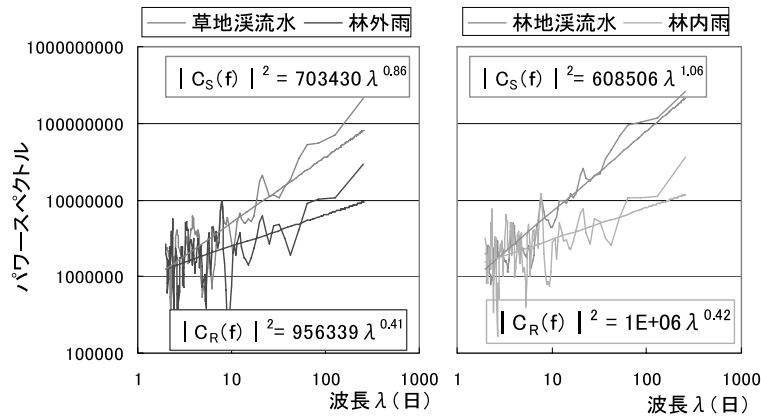


図24 Cl^- フラックスのパワースペクトル

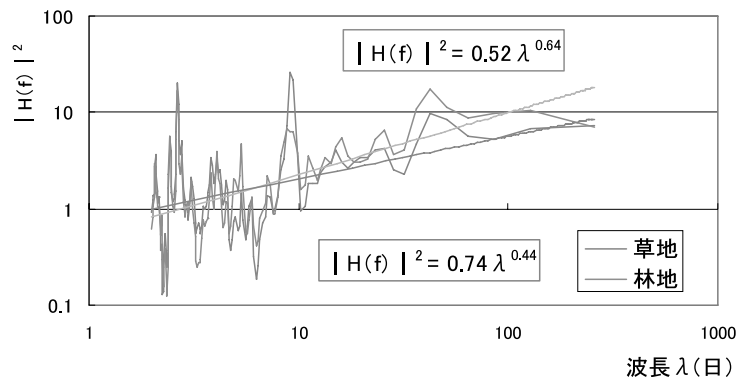


図25 Cl^- フラックスから求めた $|H(f)|^2$

のグラフを図 27 に示す。

図 27 より、相関値のピークは、草地が $\tau = 0$ であるのに対して、林地は草地から 1 日遅れて $\tau = 1$ のときにピークを示している。これは、降雨直後の流出過程が草地と林地で異なることを示している。つまり、草地の流出は降雨後速やかに排出されるのに対して、林地の流出は降雨が流域内に貯留された後、1 日遅れて排出されることを意味している。

次に、 $\tau = 1 \sim 18$ の範囲に注目すると、草地より林地のほうが高い相関を示している。また、草地の相関が $\tau = 10$ のときに相関値 0 を示しているのに対して、林地の相関は $\tau = 20$ で相関値 0 になる。これらのことから、草地よりも林地のほうが過去の降雨の影響を強く受けていることを示している。つまり、草地の流出には過去 10 日間の降雨が強く影響しているのに対して、林地の流出には過去 20 日間の降雨が強く影響しており、林地流域には長い通過時間を持つ流路が草地より多く分布しているということが出来る。

$60 < \tau < 70$ の範囲で林地・草地ともに相関値が大きな相関値の変動が見られた。これは降雨の周期性が強く反映されたためであると考えられる。

おわりに

本研究では、新潟大学佐渡演習林の森林土壌による流出遅れを評価することを目的とし、①フーリエ解析、②交差相関を用いた時系列解析、を行い、林地流域と草地流域における、長短様々な通過時間を有する土壌中の流路の分布状況を評価した。解析結果を次にまとめる。

(1) 降雨と溪流に含まれる Cl^- フラックスをフーリエ変換することで、 τ 日前の降雨の現在の流出に対する寄与度 $h(\tau)$ のパワースペクトルを得ることができた。さらに、得られたパワースペクトルはべき乗則により近似されることがわかり、そこから $h(\tau)$ を逆フーリエ変換で求めることができた。この結果から、流域に降った降雨は、土壌中の様々な流路を通過し、溪流に流出していることがわかった。

(2) 降雨と溪流に含まれる Cl^- フラックスを用いて交差相関係数を算出した。その結果、相関のピークが草地と林地で異なることがわかり、草地では $\tau = 1$ のとき、林地では $\tau = 2$ のときにピークが現れた。このことから流域に降った降雨は草地では降雨直後に流出するのに対して、林地では降雨から 1 日遅れて溪流へ流出していることがわかった。また、降雨後 2 日以上たつと、降雨の影響は林地の方が長く続き、草地よりも降雨の影響を強く受けることがわかった。

本研究により、 Cl^- イオンをトレーサーとして用いることで、新潟大学佐渡演習林における流域単位での水の動きを把握することができた。また、降雨と溪流の Cl^- イオンのフラックスで交差相関をとることにより、草地流域と林地流域における降雨直後の流出特性の違いを明確に表現できた。今後、他流域における流出の遅れを評価することで、地域間での流出特性の違いを評価できると考えられる。本研究で得られた知見が佐渡演習林の流出特性を比較検討するうえでの基礎資料となることが期待される。

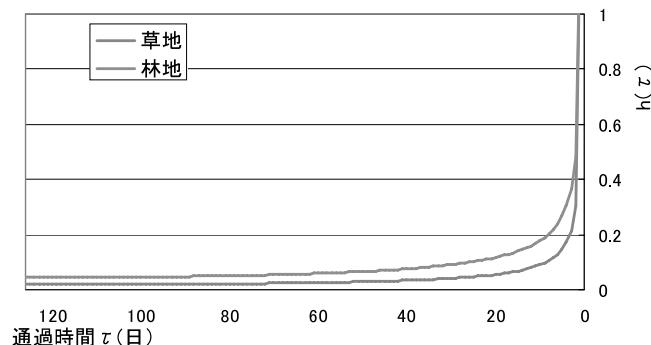


図26 Cl^- フラックスから求めた $h(\tau)$

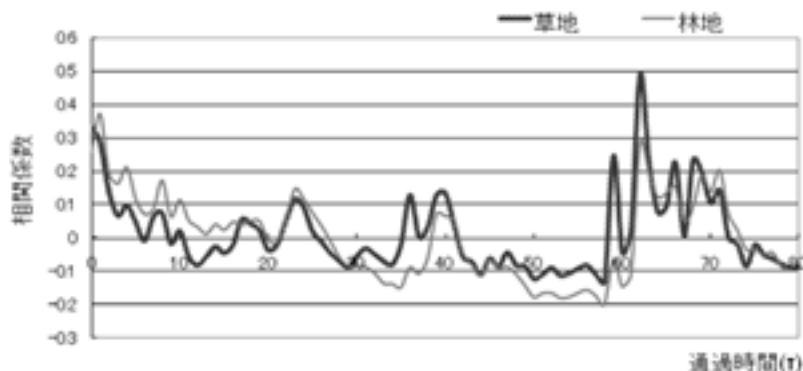


図27 Cl^- フラックスから求めた交差相関係数の分布

謝辞

最後に、本研究を行うにあたり、指導教官である川邊洋教授には、基礎知識の指導から、調査、解析、発表方法など、あらゆる点で多大なご助力、ご指導を賜った。権田豊准教授にも基礎知識の指導から解析にいたるまで、あらゆる点でご教授賜った。さらに、新潟大学農学部附属フィールド科学教育センター森林生態部佐渡ステーションの本間航介准教授、ならびに、同ステーションの皆様方には現地調査の際に大変お世話になった。また、本研究を遂行するにあたり、ご協力いただいた全ての方々に深くお礼を申し上げ、ここに感謝の念を記す。

引用文献

芳賀弘和 . 2005. 0次谷花崗岩流域における流出ピークの遅れと流出経路 . 砂防学会研究発表会概要集 , No.42: 86-87

片井直樹 . 2004. 佐渡演習林における流出解析 . 平成15年度新潟大学農学部生産環境科学科卒業論文 : 33

Kirchner, J. W., Feng, X. & Neal, C. 2000. Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments. *Nature*, Vol.403: 524–527

宮島義男 . 1991. 大倉流域における林地・草地における流出比較に関する研究 . 平成3年度新潟大学大学院農学研究科修士論文 : 151

齋藤健志 . 2005. 佐渡大倉川流域の水文地質学的研究 . 平成16年度新潟大学理学部地質科学科卒業論文 : 52

坪山良夫 . 1994. Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment. *Water resources research*, Vol.30, No.4: 879-890

The time series analysis of the rain outflow process of forest basin and the grassland basin in the Niigata University practice forest

Masayuki NARITA¹, Takeshi NISHITOH², Hiroshi KAWABE^{2*} and Yutaka GONDA²

(Received January 13, 2009)

Abstract

The purpose of this study is evaluation of Public Function of Forests, Especially, the Water-Source Conservation of forest basin and the grassland basin located in the Okura River source department drifting to Sado practice forest attached to the Niigata University department of agriculture. As a result of analysis, It was suggested that a comparatively short outflow of passage time contributes to the outflow of the grassland basin, and long outflow of passage time contributed to the outflow of the forest basin. This result shows that the mountain stream water of forest basin and the grassland basin flows out into the mountain stream each after a different outflow process.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 61(2):181-193, 2009

Key words : Chronological order analysis, Forest, Outflow time, Water Source Conservation, Sado

¹ Graduate School of Science and Technology, Niigata University

² Faculty of Agriculture, Niigata University

* Corresponding Author: kawabe@agr.niigata-u.ac.jp