

## II 丹沢山地の渓流水質

戸田浩人<sup>1)</sup>・白木克繁<sup>1)</sup>・石川芳治<sup>1)</sup>・内山佳美<sup>2)</sup>・笹川裕史<sup>2)</sup>・鈴木雅一<sup>3)</sup>

### Stream Water Chemistry in Tanzawa Region

Hiroto Toda, Katsushige Shiraki, Yoshiharu Ishikawa, Yoshimi Uchiyama, Hiroshi Sasakawa  
& Masakazu Suzuki

#### 要約

丹沢の中津川、世附川、中川、玄倉川上流域 63 地点の渓流水質と地形および植生を調査し、以下のような知見を得た。平水時であれば渓流水質の季節変化は小さく、採水地点ごとの差異が年間の水質の変動を上回った。母材風化由来が主な溶存物質濃度は、採水点の標高と負の相関がみられ、水温による風化速度の影響が示唆された。流域特性を重回帰の説明変数にして水質を解析すると、全調査流域を対象とすると標高、流域面積、崩壊地割合が多く選択されたが、決定係数が 50% を越えるものは少なかった。表層地質が異なる大流域ごとに重回帰分析をすると説明変数の選択が異なり、寄与率が高まることから、表層地質ごとに水質への影響要因を解析すべきといえる。無機態窒素の降雨による流入と大流域ごとの流出を算出したところ、世附川流域以外は水質浄化機能が低いと考えられた。今後、大流域ごとに特徴的な小流域の精査と継続的なモニタリングが必要である。

#### 1. はじめに

森林はそれが創る土壌を通して、土壌から溪流にかけての水の流れと質に影響し、その結果として渓流水の形成に大きく関与している。逆に、森林生態系外への物質の流出状態は渓流水質が反映しており、渓流水の特性を明らかにすることは、森林における物質循環や地力維持を考える上で重要である。森林流域の渓流水質に関する研究は、古くは Likens *et al.* (1970) によって、皆伐および除草剤施用による植生の除去が、とくに  $\text{NO}_3^-$  濃度の顕著な上昇を引き起こし、水質へ著しい影響を与えたことが報告されている。その後、渓流水の  $\text{NO}_3^-$  濃度に及ぼす森林伐採の影響について多くの研究がなされており（例えば、Vitousek & Melillo, 1979）、植生や林齢の影響なども調べられている（例えば、Vitousek, 1977）。

しかし、森林流域のもつ固有の要因、すなわち地形や土壌などの立地環境が、人為的インパクトと比較してどの程度の影響を渓流水質に及ぼしているかという検討は十分ではない。立地環境要因が、どのように渓流水質に影響を及ぼすか把握することは、森林流域の持つ水質浄化機能を評価し、将来的に人為的インパクトの影響の大きさを予測するための重要な情報となる。丹沢山地特有の森林流域へのインパクトとして、崩壊地、シカ採食圧による下層植生の消失、大都市圏からの大気汚染物質の長期に渡る流入などは、現在および将来に森林流域の水質浄化機能と渓流水質へ影響を及ぼすと考えられる。

本研究では、丹沢山地の森林流域から供給される渓流水質の現状を把握し、水質に影響を及ぼす要因を解析した。これによって、流域管理という観点から、将来的な丹沢山地の渓流水質の低下を予測し政策決定するための基礎的調査、モニタリングの必要性について考察した。

#### 2. 調査方法

中津川流域（宮ヶ瀬ダム上流）の 37 地点より、2004 年

8 月～2005 年 10 月（厳冬期を除く）の間、月 1 回の間隔で平水時に採水し分析に供した。なお、量水観測を実施している大洞沢は、週 1 回採水した。

丹沢山地のより広域的な渓流水質を明らかにするために、西丹沢の世附川流域（19 地点）、中川流域（27 地点）および玄倉川流域（17 地点）の計 63 地点において 2005 年 7 月 30 日と 11 月 26 日の 2 回、市民ボランティアによる採水を実施し、分析に供した。各採水地点から囲んだ流域の地形と植生について、GIS を用いて情報収集を行った。

中津川流域の調査では、採水時に pH、EC（電気伝導度）および水温を携帯式の機器を用いて測定した。採水した試料は冷蔵保存し、主要な溶存イオンとして、陰イオン 3 種類（ $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ ）と陽イオン 5 種類（ $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ）の測定を、イオンクロマト法によって行い、陰陽イオンのバランスから負荷電の不足分を重炭酸イオン（ $\text{HCO}_3^-$ ）として算出した。また、中津川流域の調査では、母岩の風化に係る  $\text{SiO}_2$  濃度を、モリブデン比色法により測定した。

#### 3. 結果と考察

##### (1) 水質の季節変動

週 1 回の間隔で採水している大洞沢の渓流水は、pH 7～8 の弱アルカリ性を示し、EC は  $100 \mu\text{S}/\text{cm}$  前後で安定していた。季節変動の少なさは、イオン濃度全般にあてはまり、 $\text{SiO}_2$  濃度も水温の季節変動に影響を受けなかった（図 1）。

大洞沢以外の流域もまた、月 1 回の採水であるが、季節による水質の顕著な変動は認められなかった。したがって、渓流水質の調査では、平水時であれば季節変化を考慮する必要はないといえる。今後、大洞沢など水量観測を行っている流域で、出水時の濃度変化を調査していく必要がある。

##### (2) 平均溶存イオン濃度の特徴

中津川上流域における採水点ごとの水質を、 $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{NO}_3^-$  を代表として図 2 に示す。前述のように採取時期（季節）による変動が少ないため標準偏差が小さく、採水点ごとの差異が年間の水質の変動を上回った。

西丹沢も含め調査した全ての流域について、平均溶存イ

1) 東京農工大学大学院共生科学技術研究院 2) 神奈川県自然環境保全センター研究部 3) 東京大学大学院農学生命科学研究科

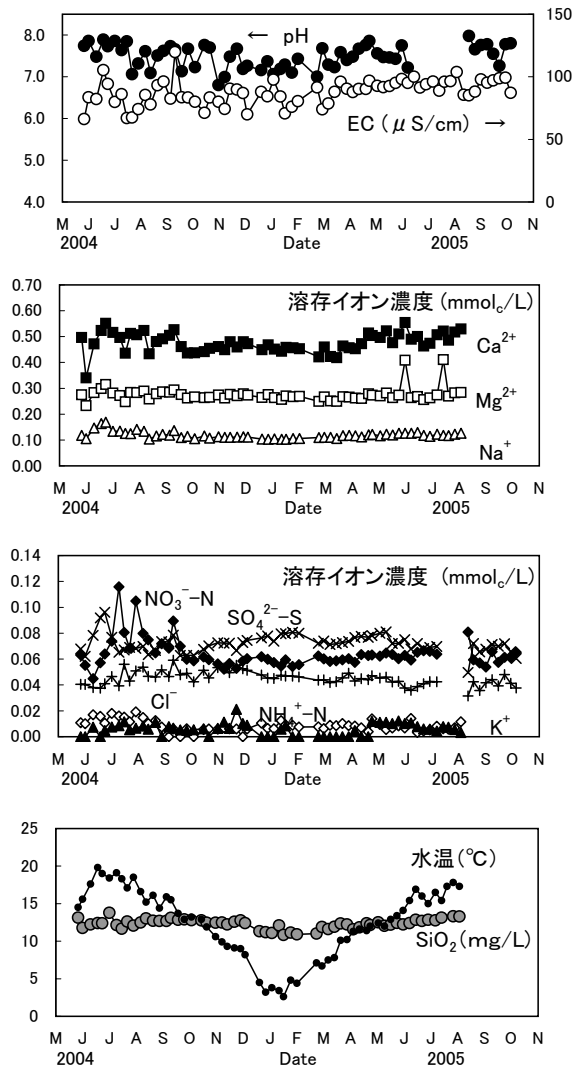


図1. 大洞沢における水質・水温の採水時期による変化

オン濃度を図3に示す。陽イオンでは  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \geq \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ \geq \text{K}^+$ 、陰イオンでは、 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$  の順に濃度が高かった。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  と  $\text{HCO}_3^-$  は、濃度が高いとともに元素間で正の相関がみられ(表1)、炭酸塩鉱物や斜長石の化学風化の影響が著しいと考えられる。 $\text{K}^+$  濃度が低いのは、丹沢深成岩帯がカリ長石に乏しいトータル岩であること(有馬・金子, 2006)を反映しており、中津川流域で採取した岩石の成分分析でも  $\text{K}^+$  含有率が著しく低かった(長田, 未発表)。

$\text{SO}_4^{2-}$  濃度が全般的に中津川流域に比べ西丹沢の流域で高かった。 $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は三宅島の火山ガス濃度との関連が指摘されており(有馬・金子, 2006)、太平洋側の南に開いている西丹沢の流域に対して、尾根を隔てて北東を向いてい

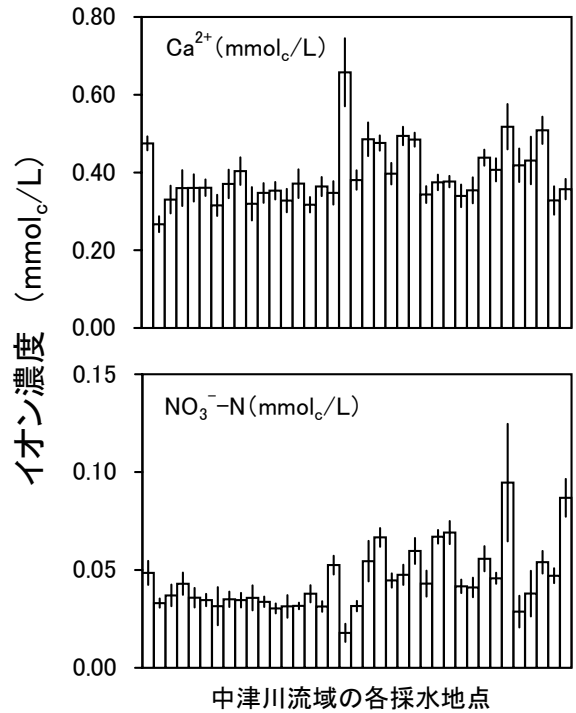


図2. 中津川流域の採水地点ごとの  $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{NO}_3^-$  濃度  
縦棒: 標準偏差

る中津川流域で火山ガスの沈着が少なかった可能性がある。

$\text{NO}_3^-$  濃度は全体的には低かったが、 $\text{NO}_3^-$  で  $1 \text{ mg/L}$  (約  $0.07 \text{ mmol/L}$ ) を超える流域がみられた。近年、丹沢山地で高いオゾン濃度が観測され、森林への影響が指摘されており(第3章第1節II)、今後、大気汚染に起因する森林生態系の窒素飽和による  $\text{NO}_3^-$  流出が懸念される(戸田, 2002)。

### (3) 流域特性と水質の単相関

採水点から上流の集水域を対象として、GISによって地形および植生状況を把握した(表2)。これらのGIS情報と各系流水の平均溶存イオン濃度との相関を求めたところ、多くのイオン濃度と負の相関が認められた要因は、採水点の標高であった(表3)。中津川流域では標高と  $\text{SiO}_2$  濃度の間にも負の相関 ( $r = -0.565$ ) が認められた(図4)。

また、中津川流域において標高は、採水時の水温と  $r = -0.857$  の負の相関がみられ(図4)、水温の高低が母岩の化学的風化に影響を及ぼしていると推察された。しかし、大洞沢の季節的な水温変化と各種イオン濃度の変化は連動していないことから、短期的な渓流水の水温が直接化学的風化を律則しているわけではなく、平均的に高い水温が土壌水や地下水のイオン濃度を高くさせていると考えられる。

標高に次いで多くのイオン濃度と相関が得られた要因は、

表1. 丹沢山地上流域における渓流水の溶存イオン濃度間の相関係数

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	$\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	総イオン
$\text{Ca}^{2+}$	1.000	0.471	0.459	ns	ns	0.450	0.223	0.335	0.768	0.941
$\text{Mg}^{2+}$		1.0000	0.412	-0.294	ns	ns	0.323	0.392	0.773	0.700
$\text{Na}^+$			1.0000	0.314	0.306	0.349	0.210	0.563	0.480	0.639
$\text{K}^+$				1.0000	0.309	0.274	ns	ns	ns	ns
$\text{NH}_4^+-\text{N}$					1.0000	ns	ns	ns	ns	ns
$\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$						1.0000	-0.202	ns	ns	0.376
$\text{NO}_3^- - \text{N}$							1.0000	0.343	0.326	0.288
$\text{Cl}^-$								1.0000	0.475	0.462
$\text{HCO}_3^-$									1.000	0.866

注: 調査した全流域を対象とした。大きな流域別でも傾向はほぼ同様である。

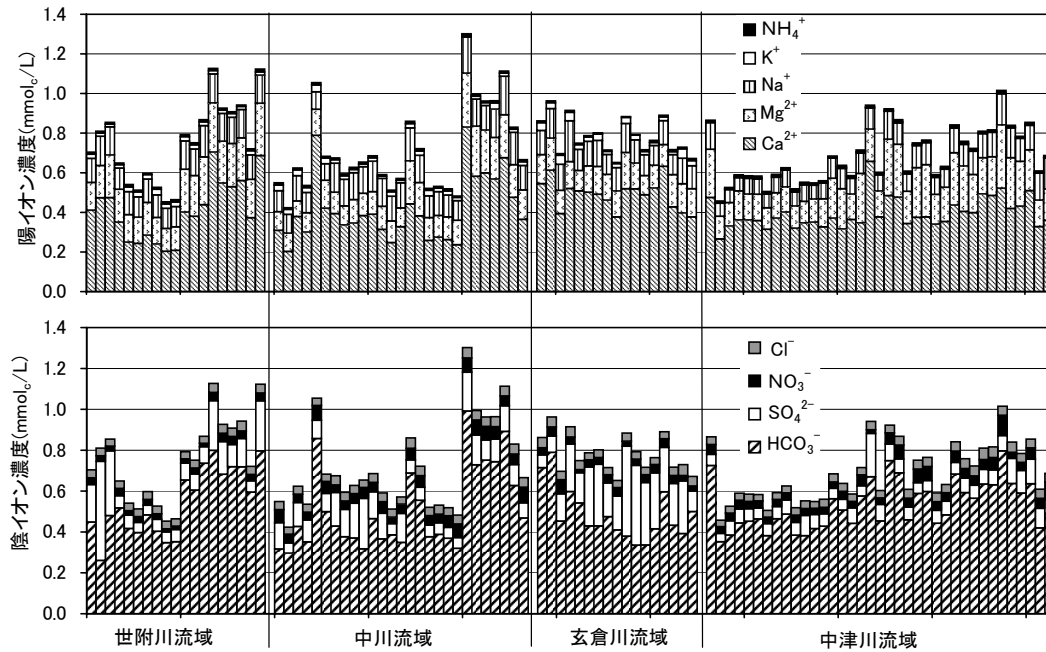


図3. 丹沢山地上流域の採水地点ごとの溶存イオン濃度

表2. 丹沢山地上流域の調査流域の地形・地質と植生

流域	表層地質	流域面積 (ha)	傾斜(角度)		標高 (m)	針葉樹 割合(%)	崩壊地 (%)	全谷			1次谷 2次谷*	
			最大	平均				1次谷	2次谷	全谷	1次谷	2次谷
全流域	平均	125.9	55	34	628	30.2	1.6	3.2	4.7	5.9	61.0	86.2
	(SD)	(149)	(5)	(3)	(155)	(28)	(3)	(4)	(5)	(7)	(18)	(14)
中津川	平均	116.0	53	35	585	42.4	2.9	2.6	3.5	4.5	68.0	88.3
流域	(SD)	(180)	(4)	(2)	(122)	(27)	(3)	(4)	(5)	(7)	(23)	(15)
世附川	平均	206.4	54	30	662	45.6	0.1	5.5	8.1	10.4	53.4	81.6
流域	(SD)	(147)	(3)	(2)	(109)	(29)	(0)	(4)	(6)	(7)	(6)	(10)
中川	平均	101.1	58	35	583	14.4	1.5	2.8	4.3	5.1	55.9	84.2
流域	(SD)	(87)	(4)	(2)	(168)	(15)	(1)	(3)	(4)	(5)	(13)	(16)
玄倉川	平均	97.0	57	35	764	7.2	0.2	2.8	4.0	4.9	61.3	89.9
流域	(SD)	(121)	(4)	(2)	(176)	(8)	(0)	(4)	(5)	(6)	(16)	(10)

\*:ここで2次谷とは2次谷以下の合計(1次谷+2次谷)の意味.

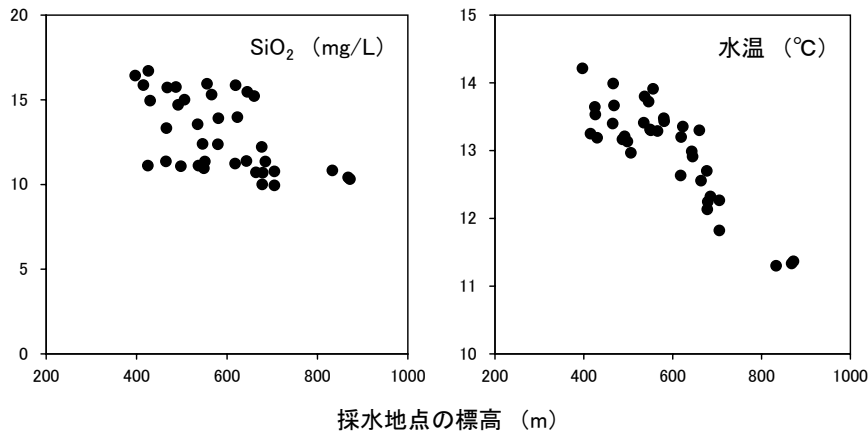


図4. 中津川上流域における採水地点の標高とSiO<sub>2</sub>濃度および平均水温との関係

全流域を対象としたときには崩壊地割合であった。この相関性は、平均の崩壊地割合が高い中津川流域で負、平均の崩壊地割合が最も低く、平均傾斜の緩い世附川流域で正となった(表2, 3)。急傾斜の崩壊地では岩盤が露出し、土壌深層への水が浸透せずに母材風化由来のイオン濃度が低く、緩傾斜地の崩壊地では土砂が堆積して逆に母材風化由来のイオンが溶出しやすい可能性がある。今後、個々の流域における崩壊地の特徴を把握する必要がある。

流域における植生の状況は、針葉樹林割合のみ検討した。針葉樹林割合と溶存イオン濃度には高い相関がみられず、全流域を対象とした場合、Mg<sup>2+</sup>濃度との間にやや

相関がみられた(表3)。大きな流域別では、中川流域において針葉樹割合とCa<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>との間でr = 0.6以上の比較的高い相関がみられた。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>は、肥沃な土壌において有機態窒素が無機化されNH<sub>4</sub><sup>+</sup>となり、そのNH<sub>4</sub><sup>+</sup>が硝化細菌によって硝化されることで生成する。これらの無機態窒素は、植物や微生物にとって容易に吸収可能な重要な養分である。中川流域の小流域では針葉樹林割合が高いと、森林生態系内において循環利用されるべき無機態窒素が流出していることになる。この現象が、針葉樹を人工造林したために生じたのか、人工造林が可能な肥沃な土地が多いために生じているかは、現段階では特

表 3. 丹沢山地の上流域における渓流水の溶存イオン濃度と流域特性との相関係数

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	総イオン
<b>&lt;全流域&gt; n=92</b>										
流域面積	ns	-0.213	ns	ns	ns	ns	-0.280	-0.286	ns	ns
最大傾斜	ns	-0.488	ns	0.295	0.208	ns	ns	ns	ns	ns
平均傾斜	ns	-0.224	ns	ns	ns	ns	0.222	0.209	ns	ns
標高	-0.340	-0.517	-0.382	ns	-0.227	0.270	-0.373	-0.602	-0.617	-0.457
針葉樹割合	ns	0.552	ns	-0.357	ns	ns	ns	ns	0.345	0.204
崩壊地割合	-0.233	ns	-0.374	-0.373	ns	-0.258	ns	ns	ns	-0.303
1次谷沢長	ns	-0.216	ns	ns	ns	ns	-0.284	-0.281	ns	ns
2次谷以下沢長	ns	-0.205	ns	ns	ns	ns	-0.283	-0.256	ns	ns
全沢長	ns	-0.199	ns	ns	ns	ns	-0.284	-0.262	ns	ns
1次谷割合	ns	ns	ns	-0.218	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2次谷以下割合	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>&lt;東丹沢・中津川流域&gt; n=37</b>										
流域面積	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.349	-0.336
最大傾斜	-0.396	-0.713	-0.508	ns	ns	ns	-0.445	-0.451	-0.599	-0.618
平均傾斜	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
標高	-0.625	-0.460	-0.731	ns	-0.431	-0.419	ns	-0.522	-0.640	-0.680
針葉樹割合	ns	0.457	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0.384	0.371
崩壊地割合	-0.397	-0.421	-0.401	ns	ns	ns	ns	-0.415	-0.452	-0.482
1次谷沢長	ns	-0.418	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.378	-0.357
2次谷以下沢長	ns	-0.407	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.371	-0.345
全沢長	ns	-0.411	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.366	-0.343
1次谷割合	ns	0.327	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2次谷以下割合	ns	0.377	ns	ns	ns	ns	ns	0.332	ns	ns
<b>&lt;西丹沢・世附川流域&gt; n=17</b>										
流域面積	ns	ns	ns	ns	0.526	ns	ns	ns	ns	ns
最大傾斜	ns	ns	ns	ns	0.627	ns	ns	ns	ns	ns
平均傾斜	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0.487	ns	ns
標高	-0.597	ns	ns	ns	ns	ns	-0.504	-0.663	ns	-0.557
針葉樹割合	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
崩壊地割合	0.574	0.483	ns	ns	0.585	ns	ns	ns	0.439	0.552
1次谷沢長	ns	ns	ns	ns	0.602	ns	ns	ns	ns	ns
2次谷以下沢長	ns	ns	ns	ns	0.568	ns	ns	ns	ns	ns
全沢長	ns	ns	ns	ns	0.566	ns	ns	ns	ns	ns
1次谷割合	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2次谷以下割合	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>&lt;西丹沢・中川流域&gt; n=23</b>										
流域面積	ns	ns	ns	ns	-0.482	ns	ns	ns	ns	ns
最大傾斜	ns	ns	0.395	ns	ns	ns	-0.486	ns	ns	ns
平均傾斜	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
標高	-0.750	-0.750	-0.629	ns	ns	ns	-0.435	-0.720	-0.808	-0.773
針葉樹割合	0.615	0.725	ns	ns	ns	ns	0.687	0.499	0.646	0.617
崩壊地割合	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
1次谷沢長	ns	ns	ns	ns	-0.443	ns	-0.396	-0.392	ns	ns
2次谷以下沢長	ns	ns	ns	ns	-0.463	ns	-0.394	ns	ns	ns
全沢長	ns	ns	ns	ns	-0.475	ns	ns	ns	ns	ns
1次谷割合	ns	ns	ns	ns	ns	0.387	ns	ns	ns	ns
2次谷以下割合	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>&lt;西丹沢・玄倉川流域&gt; n=15</b>										
流域面積	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
最大傾斜	ns	ns	ns	ns	0.545	ns	ns	ns	ns	ns
平均傾斜	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0.494
標高	ns	-0.535	ns	-0.628	ns	0.561	ns	-0.844	-0.582	ns
針葉樹割合	-0.544	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
崩壊地割合	ns	ns	0.519	ns	ns	ns	ns	0.557	ns	ns
1次谷沢長	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2次谷以下沢長	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
全沢長	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
1次谷割合	ns	ns	ns	ns	ns	0.547	ns	ns	ns	ns
2次谷以下割合	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

nsは95%確率で相関なし。相関係数が記載されているものは95%以上の確率で相関あり。

定できない。また、他の流域と比べて中川流域で針葉樹割合が高いことはなく（表 2）、針葉樹人工林の流域における位置や伐採、植栽年も考慮する必要がある（小柳ほか、2004; 浦川ほか、2005）。なお、硝化の過程では H<sup>+</sup> を生成するため酸性となるが、渓流水が酸性化していることはなく、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> などの塩基で十分に緩衝しているといえる。

#### (4) 流域特性と水質の重相関

渓流水の水質形成には、1つの流域特性だけでなく複合した要因が影響していると考えられる。平均の溶存イオン濃度を目的変数、流域特性を説明変数として変数増加法による逐次選択法で重回帰分析（久米、1971）を行った（表 4）。全流域を対象として、すべてのイオン濃度に対して選択された説明変数は標高であり、次いで流域面積と崩

壊地割合が多く選択された。しかし、決定係数（寄与率）が 0.5 を越えるイオン濃度は Mg<sup>2+</sup> と Cl<sup>-</sup> の 2 つで、重回帰で 50% 以上説明できるものは少なかった。

大きな流域ごとに多く選択された説明変数をみると、中津川流域では標高と最大傾斜、世附川流域では最大傾斜と崩壊地割合、中川流域では標高と針葉樹割合、玄倉川流域では標高のほか特に多い要因がみられない、というように異なっていた。世附川流域で標高が選択されないのは採水地点の標高差が他の流域に比べて小さいためと考えられる。一方、世附川流域で選択された崩壊地割合は平均値も標準偏差も小さいことから、渓流水質に影響する崩壊地が多いと推察され、流域に対する規模だけでなく崩壊地の位置も要因分析に加える必要がある。中川流域で選択された針葉樹割合も、他の流域に比べて平均値や標準偏差

表 4. 丹沢山地上流域における渓流水の溶存イオン濃度の流域特性による重回帰分析

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	総イオン
<b>&lt;全流域&gt; n=92</b>										
流域面積	-	-0.171	-0.208	-0.196	-	-	-0.171	-0.464	-0.326	-0.225
最大傾斜	-	-0.339	-	0.366	0.286	0.210	-0.315	0.181	-	-
平均傾斜	-	-0.245	-	-0.261	-0.215	-	0.186	-	-0.260	-
編 標高	-0.345	-0.601	-0.491	0.123	-0.248	0.279	-0.471	-0.677	-0.674	-0.500
相 針葉樹割合	-	0.202	-0.266	-0.175	-	-	-0.285	-	-	-
関 崩壊地割合	-0.242	-	-0.374	-0.430	-0.197	-0.294	-	-0.224	-	-0.312
係 1次谷沢長	-	-	-0.245	-	-	-	-	-	-	-
数 2次谷以下沢長	-	-	0.294	-	-	-	-	-	-	-
全沢長	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1次谷割合	-	-	-	-	-	-	-0.153	-	-	-
2次谷以下割合	-	-	-	-	-	0.156	-	-	-	-
重相関係数	0.409	0.775	0.649	0.627	0.417	0.431	0.590	0.727	0.686	0.576
決定係数	0.167	0.601	0.421	0.393	0.174	0.186	0.348	0.528	0.471	0.332
<b>&lt;東丹沢・中津川流域&gt; n=37</b>										
流域面積	-0.423	-	-	-	-0.242	-	-	-	-	-0.263
最大傾斜	-	-0.735	-0.742	-	-	-	-0.547	-0.443	-0.473	-0.430
平均傾斜	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
編 標高	-0.693	-0.512	-0.841	-	-0.471	-0.419	-	-0.515	-0.724	-0.767
相 針葉樹割合	-	-	-0.539	-	-	-	-0.319	-	-	-
関 崩壊地割合	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
係 1次谷沢長	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
数 2次谷以下沢長	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.279	-
全沢長	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1次谷割合	-	-	-0.342	-	-	-	-	-	-	-
2次谷以下割合	-	-	-	-	-	-	-0.276	-	-	-
重相関係数	0.707	0.799	0.893	-	0.483	0.419	0.560	0.644	0.833	0.868
決定係数	0.500	0.638	0.797	-	0.234	0.175	0.314	0.415	0.695	0.754
<b>&lt;西丹沢・世附川流域&gt; n=17</b>										
流域面積	-	-	-	-	-0.467	-	-	-0.375	-	-
最大傾斜	-0.436	-0.365	-	-	0.131	-	-0.733	-0.527	-	-0.381
平均傾斜	-	-	-	0.354	-	-	-	0.625	-	-
編 標高	-0.690	-	-	-	-	-	-0.884	-0.831	-	-0.618
相 針葉樹割合	-	0.412	-	-	-	-	-0.734	-	0.400	-
関 崩壊地割合	0.582	0.627	-	-	0.496	-	-	-	0.495	0.537
係 1次谷沢長	-	-	-	-	0.539	-	-	-	-	-
数 2次谷以下沢長	-	-	-	-	-	-	-0.530	-	-	-
全沢長	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1次谷割合	-0.663	-	-	-	-	-	-0.691	-	-	-0.631
2次谷以下割合	0.520	-	-	-	-	-	-	-	-	0.478
重相関係数	0.888	0.682	-	0.354	0.819	-	0.893	0.883	0.567	0.859
決定係数	0.788	0.466	-	0.125	0.671	-	0.797	0.779	0.322	0.737
<b>&lt;西丹沢・中川流域&gt; n=23</b>										
流域面積	-	-	-	-	-0.482	-	-	-	-	-
最大傾斜	-	-0.354	0.460	-	-	-	-	-	-	-
平均傾斜	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
編 標高	-0.626	-0.670	-0.615	-	-	-	-	-0.809	-0.712	-0.661
相 針葉樹割合	0.370	0.406	-0.141	-	-	-	0.735	-	0.414	0.365
関 崩壊地割合	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
係 1次谷沢長	-	-	-	-	-	-	-	-0.627	-	-
数 2次谷以下沢長	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
全沢長	-	-	-0.556	-	-	-	-	-	-	-
1次谷割合	-	-	0.449	-	-	0.387	-	-	-	-
2次谷以下割合	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
重相関係数	0.789	0.861	0.838	-	0.482	0.387	0.782	0.841	0.844	0.807
決定係数	0.622	0.741	0.702	-	0.233	0.150	0.611	0.707	0.713	0.651
<b>&lt;西丹沢・玄倉川流域&gt; n=15</b>										
流域面積	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
最大傾斜	-	-	-	-	0.545	-	-	-	-	-
平均傾斜	-	-	-	-	-	-	0.579	-	-	0.659
編 標高	-	-0.738	-0.464	-0.628	-	0.600	-	-0.859	-0.710	-0.469
相 針葉樹割合	-0.544	-	-0.585	-	-	-	-	-	-0.537	-
関 崩壊地割合	-	-	0.740	-	-	0.567	-	-	-	-
係 1次谷沢長	-	-	-	-	-	-	0.435	-0.456	-	-
数 2次谷以下沢長	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
全沢長	-	-	-	-	-	-	-0.403	-	-	-
1次谷割合	-	0.628	0.616	-	-	0.595	-	-	-	0.650
2次谷以下割合	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
重相関係数	0.544	0.754	0.804	0.628	0.545	0.780	0.663	0.879	0.728	0.758
決定係数	0.296	0.568	0.646	0.395	0.297	0.608	0.440	0.772	0.530	0.575

は小さいほうであった。前述のように針葉樹人工林の伐採、植栽年なども考慮する必要があると考えられる。

大きな流域ごとの決定係数で 0.5 を越えるものは、中津川流域と世附川流域で 5 つずつ、中川流域で 7 つ、玄倉川流域で 6 つと、重回帰で 50% 以上説明できるイオン濃度が全流域を対象とした場合より多くなった。これは、各流域の主な表層地質が異なっていることから、同じ流域特性でも渓流水質への影響が異なるためと考えられる。今後、表層地質が同じ流域のデータを蓄積し、地質ごとに地形、植生など渓流水質への影響の現れ方がどのようなメカニズムで異なるかを明らかにすることで、森林管理のためのきめ細かい情報が提供可能となる。

また、大きな流域ごとに特徴的なイオン濃度を示す流域を踏査し、いくつかをモニタリング・サイトとして継続調査し、時系列的な変化を把握していく必要がある。

#### (5) 無機態窒素の流入と流出

窒素を除き、母材に含まれる元素は母材風化によって付加される。一般に、降雨（大気）から森林生態系へ流入した窒素は、養分として循環系に取り込まれ溪流に流出しない。これが森林の水質浄化機能の一つである。

本調査で実施した各小流域の渓流水の年平均溶存物質濃度を、流域面積で加重平均することで、大きな流域の溪流から流出する溶存物質濃度を推定した（表 5）。溪流

表 5. 丹沢山地上流域における降雨および渓流水の溶存物質の加重平均濃度

	Ca	Mg	Na	K	NH <sub>4</sub> -N	SO <sub>4</sub> -S	NO <sub>3</sub> -N	Cl	Inorg.-N*
降雨**	0.24	0.11	0.40	0.06	0.17	0.41	0.18	0.75	0.34
中津川流域	7.44	1.74	2.12	0.23	0.11	1.19	0.53	1.36	0.64
世附川流域	7.86	2.12	2.92	0.79	0.16	2.47	0.38	1.36	0.53
中川流域	7.88	1.75	3.03	0.74	0.13	1.61	0.69	1.51	0.82
玄倉川流域	9.53	1.60	2.71	0.87	0.11	3.25	0.52	1.37	0.64

\*: Inorg.-N = NH<sub>4</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N, \*\*: 降雨の算出方法は第2節Ⅲ.1を参照.

水は降雨に比べ、NH<sub>4</sub>-Nを除き、すべて高濃度であった。NH<sub>4</sub>-NはNO<sub>3</sub>-Nへ形態変化するため、NH<sub>4</sub>-NとNO<sub>3</sub>-Nの合計で無機態窒素 (inorg. N) とすると、やはり渓流水で降雨より高濃度となる。宮が瀬ダムで調査している中津川から流入する総窒素濃度は、平成12～16年で平均0.68mg/Lであり、本調査の平均窒素濃度は0.64mg/Lとほぼ一致した。調査期間1年間(2004年7月から2005年6月)の降雨3250mmの半分が蒸発散で失われ、1625mmが渓流水になると仮定すると、無機態窒素が降雨で約12kg/ha流入し、中津川、世附川、中川、玄倉川流域からそれぞれ10.4, 8.6, 13.3, 10.3kg/ha流出する計算となる。概算ではあるが、世附川流域以外は水質浄化機能が高度に発揮されている状態とはいえない。

前述のように、突出した高い窒素濃度の小流域もみられた。これら窒素濃度の高い流域は、関東山地の窒素飽和が懸念されている流域(Ohrui & Mitchell, 1997; Ohte *et al.*, 2000; 戸田, 2002)と同程度であった。関東山地では、首都圏からの大気汚染物質の流入による、森林生態系の窒素飽和現象が懸念されており(戸田, 2000)、丹沢山地も例外ではないと考えられる。なお、Aber *et al.* (1989)によれば、地上部の植生が養水分を盛んに吸収する成長期である夏期に、渓流水のNO<sub>3</sub>-N濃度が高くなる現象は、窒素飽和のステージ2(窒素が飽和した状態)に相当する。これは、欧米の冬雨型の気候下における窒素飽和の基準であり、我が国をはじめとする夏雨型の気候で、同様の基準で窒素が飽和した状態と判断するのは早計であるが、渓流水の窒素濃度が高い流域は、その原因を究明するとともにモニタリングによる監視が必要である。

#### 4. おわりに

丹沢山地上流域の渓流水質の現状から、水源としての課題が以下のように挙げられる。地形および植生の渓流水質への影響要因は、表層地質を考慮した流域ごとの解析を蓄積する必要があり、丹沢山地のみならず広域的な比較が不可欠である。本調査は平水時を対象としており、大洞沢など水量観測流域を充実させ、出水時の水質変化を明らかにする必要がある。また、本総合調査に基づき、大きな流域ごとに特徴的ないくつかの小流域をモニタリング・サイトとして設定し、詳細な流域特性の把握と物質循環調査を実施することで、大気環境や崩壊地復旧、オーバーユースやシカ採食圧、人工林の森林管理などが森林生態系の公益的機能へ及ぼす影響を明らかにしていく必要がある。

#### 謝辞

本調査をすすめるにあたり、東京農工大学農学部(当時)長田梨江氏に協力いただいた。ここに記して御礼いたします。

#### 文 献

- Aber, J. D., K. J. Nedelhoffer, P. Steudler, & M. Melillo, 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystem. *BioScience*, 39: 378-386.
- 有馬 眞・金子慶之, 2006. 丹沢山系の地球化学的特性と生態リスクアセスメント. 生態環境リスクマネジメントへのアプローチ—丹沢山系から相模湾まで—第5回シンポジウム講演要旨集, pp.7-15.
- 久米 均, 1971. 重回帰分析. 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤正共著, 多変量解析法, pp.25-157. 日科技連, 東京.
- Ohrui, K. & M. J. Mitchell, 1997. Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Application*, 7: 391-401.
- Ohte, N., M. J. Mitchell, H. Shibata, N. Tokuchi, H. Toda & G. Iwatsubo, 2000. Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and Northeastern United States. *Water Air and Soil Pollution*, 130: 649-654.
- 小柳信宏・戸田浩人・久保井喬・生原喜久雄, 2004. 北関東地方の高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域における炭素と窒素の動態特性. 日本林学会誌, 86: 134-143.
- Likens, G. E., F. H. Bormann, N. M. Jhonson, D. W. Fisher & R. S. Pierce, 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecological Monograph*, 40: 23-47.
- 戸田浩人・2002. 陸上生態系の物質循環からみた窒素飽和による汚染の構図. 資源環境対策, 38: 1067-1072.
- 戸田浩人・笹賀一郎・佐藤冬樹・柴田英昭・野村 睦・市川 一・藤戸永志・鷹西俊和・清和研二・塚原初男・飯田俊彰・谷口憲男・中田 誠・桑原 繁・内田武次・春田泰次・井上 淳・八木久義・塚越剛史・蔵治光一郎・二田美穂・小野 裕・鈴木道代・今泉保二・山口法雄・竹中千里・万木 豊・川那辺三郎・安藤 信・中西麻美・西村和雄・山崎理正・長山泰秀・土肥奈都子・片桐成夫・小藤隆一・新村義昭・井上章二・江崎次夫・河野修一・藤久正文・岩松 功・今安清光・中村誠司・塚本次郎・野上寛五郎・榎木 勉, 2000. 全国大学演習林における渓流水質. 日本林学会誌, 82: 308-312.
- 浦川梨恵子・戸田浩人・生原喜久雄, 2005. 高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採が土壌および渓流水の水質に及ぼす影響. 日本森林学会誌, 87: 471-478.
- Vitousek, P. M., 1977. The regulation of element concentrations in mountain streams in the northeastern United States. *Ecological Monograph*, 47: 66-87.
- Vitousek, P. M. & J. M. Melillo, 1979. Nitrate losses from disturbed forest: patterns and mechanisms. *Forest Science*, 25: 605-619.