相模湖・津久井湖窒素排出源調査結果

宮下雄次*、三村春雄*2

Results of research on Nitrogen source in the watersheds of Lake Sagami and Lake Tsukui.

by

Yuji MIYASHITA and Haruo MIMURA

Abstract

In Lake Sagami and Lake Tsukui, which make up about 60 percent of tap water source in Kanagawa Prefecture, abnormal growth of phytoplankton in summer seasons has been an issue since the 80's. It is known that high concentrations of nitrogen and phosphorus in these lakes cause phytoplankton. To clarify the origin of nitrogen compounds, we investigated the amount of total nitrogen in river water flowing into the two lakes.

We measured river water quality and river flow rate at 42 points of a branch of river flowing into these lakes. We also calculated the loading dose of nitrogen flowing out of the watershed, as well as that flowing into the watershed by precipitation, based on the water quality of rainfall and through fall. Furthermore we computed the forestland area and residential area in each watershed from land use maps.

The results of comparing the loading dose of nitrogen of river water and that of precipitation showed that the outlet of nitrogen through the river water is approximately 44 percent of the loaded nitrogen by precipitation in the watershed.

1. 経緯

相模湖・津久井湖では、昭和50年代後半からアオコの異常発生が見られるようになり、両湖は県民の貴重な水源湖沼であることから「相模湖・津久井湖総合保全対策推進会議」（三副知事、関係部長等で構成）を平成３年度に設置し、全庁を上げて総合的な水質保全対策を推進してきた。これまでの総合保全対策の着実な推進により、アオコの異常発生は抑えられ、BODなどの有機性汚濁物質の環境基準を達成している。しかし、両湖の窒素、りん濃度は、アオコなどの植物プランクトンが異常発生する濃度の６～14倍と、アオコの異常発生がいつ起きてもおかしくない状況となっており、窒素、りんの削減対策の検討・実施の時期に来ている。

「推進会議」では、こうした現状を踏まえ、県民の水道水の６割をまかなう相模川水系の水がめである両湖の水質を改善し、安全で良質な水を供給するために窒素、りん削減対策の検討を進めることとしている。

2. 調査背景及び目的

相模湖・津久井湖に流入する河川水の硝酸性窒素、亜硝酸性窒素等の窒素排出源としては工場排水、未処理の生活雑排水、畑地への過剰施肥、畜産廃棄物の不適正処理のほか、降水などとされている。平成６年時点の相模湖・津久井湖流域における全窒素の発生源別排出負荷量については、原単位法による算出が行われており、それによると自然系が69%、生活系が21%、産業・観光・畜産系が8%とされている（（株）地域交流センター企画、1997）。

原単位法による発生源負荷量の算定のような汚染原因からのアプローチに対し、近年、地下水や河川・湖沼水中の窒素同位体比が、化学肥料や有機肥料、し尿、降水など汚染起源ごとに特徴的な値を示すことを利用した硝酸性窒素汚染原因調査手法が用いられるようになってきた。

神奈川県内では、これまで神奈川県大和市（三村ほか、1999（地下水を対象））や、相模湖町茶畑圃場（宮下、2002a（土壌水及び地下水を対象））、神奈川県地下水メッシュ

*　神奈川県温泉地学研究所　　〒250-0031　神奈川県小田原市入生田586
*2　神奈川県環境農政部大気水質課　　〒231-8588　神奈川県横浜市中区日本大通１
論文，神奈川県温泉地学研究所報告，第36巻，1－24, 2004.

調査環境基準超過地点（宮下、2002 b（地下水を対象））などにおいて、窒素同位体比を用いた窒素汚染機構解明調査を実施し、地下水や土壌水中の窒素同位体比の分布や、硝酸性窒素濃度との関係などについて明らかにしてきた。

そこで、本調査では、相模湖・津久井湖並びにこれらに流入する河川水及び降水中の窒素負荷量及び窒素同位体比を測定し、各流域ごとの汚染源について解析を行った。

3．調査地域の概要

桂川は、山梨県の富士山北麓や山中湖（54.7 km²）・河口湖（126.4 km²）、忍野八海の湧水を源流とし、神奈川県に入って相模川となり、相模湖、津久井湖の２つのダム湖を経て相模湾に注ぐ、総延長 113 km、流域総面積 1,680 km² の一級河川である。

桂川の支流の１つである笹子川が大月市で桂川と合流してから、相模湖・津久井湖に至るまで、ほぼ東に流下する地域では、北側に秩父山地、南側に丹沢山地の山々が連なり、河川は深い渓谷をなして流下している。津久井湖から下流は沖積平野となっており、川幅も広くなっている。

桂川・相模川は相模ダム・城山ダムをはじめとする多くのダムや堰があり、ダム流域が占める面積は約 1,415 km² と相模川流域面積 1,680 km² の 84％となっている。

4．調査項目及び分析・解析方法

本調査は、津久井湖を末端とする相模湖・津久井湖流域を対象にし、温泉地学研究所による調査地点選定のための予備調査（平成 12 年 12 月及び平成 13 年４月実施）を経て、平成 13 年度に実施した。

本調査は、

⑴　相模湖・津久井湖流域 49 地点における河川水の採水及び流量の測定（平成 13 年９月実施）

⑵　平成 13 年５月～ 11 月までの７ヶ月間の地域内３カ所での降水調査

⑶　土地利用現況図をもとにした流域土地利用解析

の三つの調査から構成されている。

これらの調査のうち、⑴の河川水の採水及び流量の測定は㈳神奈川県薬剤師会への委託により、また、⑴で採水した試料の分析及び⑵の降水の採取及び分析は環境科学センターにおいて、また⑶の土地利用状況解析及び平成 12 年度の予備調査は温泉地学研究所においてそれぞれ行い、各調査結果の調整及び調査結果のとりまとめは、神奈川県環境農政部大気水質課を中心に、環境科学センター及び温泉地学研究所で行った。

河川水及び降水の採取地点、河川水調査地点並びに水系網図を図１に示した。

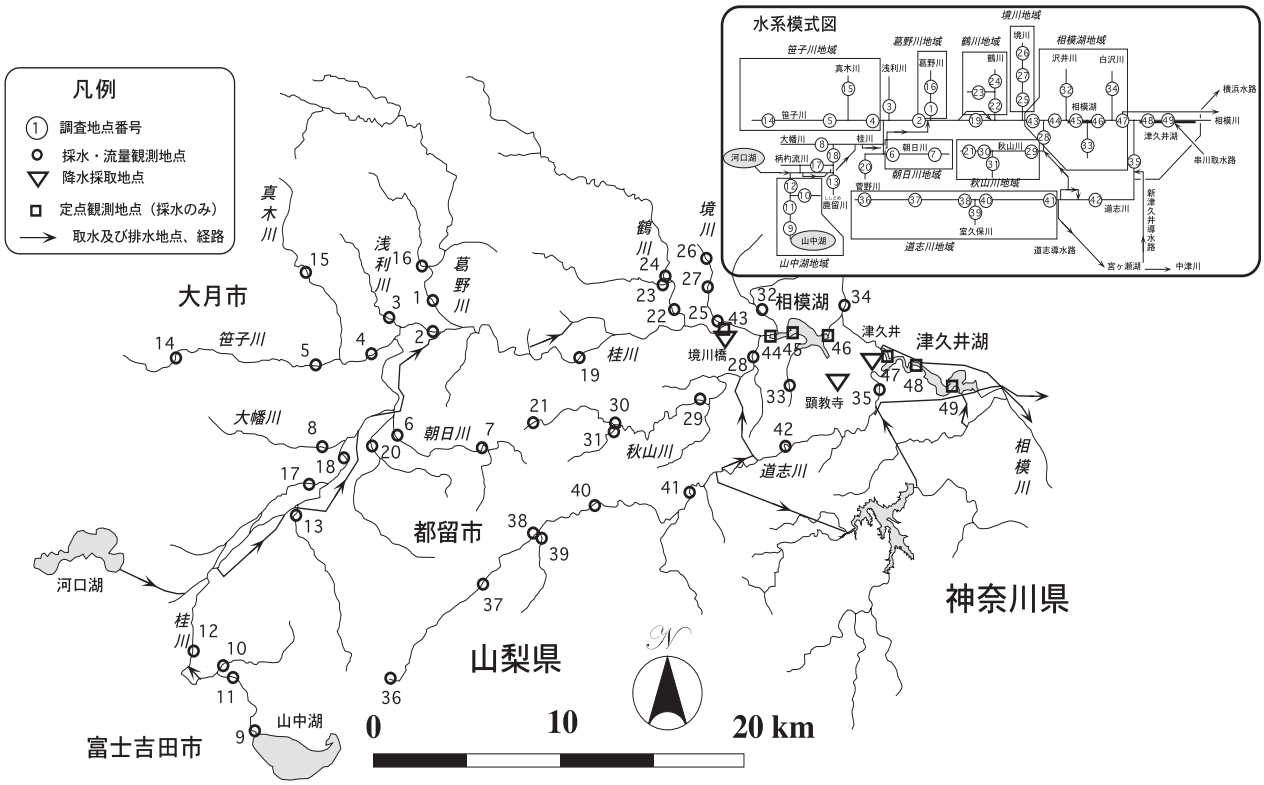

図１　調査地点及び水系模式図
Fig.1　Sampling points and schematic diagram of drainage network

4．1．河川水調査

相模湖・津久井湖の上流には、道志川、秋山川、柄杓流川、境川など大小様々な支川がある。今回の調査では、各支川ごとに土地利用や窒素負荷量の比較を行うことが出来るように、主な支川の末端部及び源流部を中心に調査地点を定め、図1に示した1～42までの地点で、平成13年9月3日～7日に現地調査を行った。河川水調査では、主要溶存成分及び窒素安定同位体比分析用の採水、水温、pH、電気伝導度の測定及び河川流量の測定を行った。

また、平成13年9月4日に、地点43～49までの相模湖4地点及び津久井湖3地点において、湖沼水の採水を行った。

採水を行った河川水及び湖沼水は、環境科学センターにおいて、主要溶存成分（ナトリウムイオン（Na^{+}），カリウムイオン（K^{+}），カルシウムイオン（Ca^{2+}），マグネシウムイオン（Mg^{2+}），アンモニウムイオン（NH_4^{+}），フッ化物イオン（F^{-}），塩化物イオン（Cl^{-}），硫酸イオン（SO_4^{2-}），重炭酸イオン（HCO_3^{-}），硝酸イオン（NO_3^{-}），亜硝酸イオン（NO_2^{-}），全窒素（T－N）及び全リン（T－P））の分析を行った。

各成分の測定は、陽イオン及び陰イオン成分については、イオンクロマトグラフ法で、重炭酸イオンについては0.1N塩酸による滴定により、全窒素についてはTN計で、また全リンについては、ペルオキソニ硫酸カリウム分解法により行った。

さらに、採水した試料について、窒素同位体比の測定を行った。

自然界の主要元素の一つである窒素（N）には質量数の異なる二つの安定同位体（^{14}Nと^{15}N）が存在し、その存在比は^{14}Nが99.634%、^{15}Nが0.366%とほぼ一定である。窒素の同位体比は空気中の窒素の同位体比を基準に、千分率偏差（$\delta^{15}N$(‰)）で次式のように表される。

$$\delta^{15}N = (R_{(sample)} / R_{(air)} - 1) \times 1000 \ (‰),\ R = {}^{15}N / {}^{14}N$$

窒素同位体はその質量数の違いにより、アンモニアの揮散や硝化、脱窒、生物濃縮作用などの様々な過程を通して同位体分別が生じ、反応の基質に質量の大きい^{15}Nが濃縮され、同位体比が高くなっていく。このため、生成過程の異なる化学肥料や家畜糞尿などではそれぞれ異なった窒素同位体比を持ち、これらの同位体比の違いを手がかりに、供給源や汚染源を推定することが出来る。

窒素供給源別の窒素同位体比については幾つかのレビューによれば、降水で－8～＋2‰、化学肥料で－7.4～＋6.8‰、家畜ふん尿で＋10～＋22‰、下水処理水で＋8～＋15‰、有機肥料で＋10‰以上、畑地土壌が＋2～＋8‰などの値が報告されている（平田（1996）、環境省水環境部地下水・地盤環境室監修（2002）など）。

窒素同位体比の測定は、環境科学センターで採水試料の濃縮を行った後に、昭光通商（株）に委託し、軽元素同位体比質量分析計によって測定を行った。

4．2．降水調査

降水による窒素負荷量を評価するため、降雨採取を行った。図1中にその地点を▽印で示した。

津久井降雨採取地点：沼本ダムの約200m西方に位置する神奈川県農業総合研究所津久井試験場内の気象観測露場

境川橋降雨採取地点：山梨県及び神奈川県境に位置する境川橋右岸側

顕教寺降雨採取地点：津久井試験場の約3km西南西に位置する顕教寺敷地内の林地

の各地点にSIBATA社製大気降下物全量採取器を設置し、津久井試験場及び境川橋では全降下物を、顕教寺では林内雨（スギ樹冠を通過した降水等）を、それぞれ1ヶ月単位で平成13年7月～11月まで濾過採取を行った。採取した各月の降水試料については、採取量の測定を行い、環境科学センター及び昭光通商（株）において、河川水と同じ方法で、各成分の分析を行った。

また、降水量の季節変化及び地域変化については、気象庁観測のアメダスデータ、神奈川県農業総合研究所津久井試験場観測データ及び3地点での降雨採水器に捕集された降水量を元に比較を行った。

さらに、降水による流域への窒素負荷量を算出するために必要な流域降水量の算出を、平成13年度の期間について、神奈川県及び山梨県内における26地点の気象庁アメダス月降水量データを用いて、Kriging法により地点降水量データをグリッド化して行った。Kriging法によるグリッド化には、コンタリング・三次元表面マッピングソフトウェアSurfer 7（Golden Software, Inc.）を用い、北緯35°20′～45′、東経138°41′15″～139°18′45″までの範囲を100×100グリッドに分割し、各グリッドについて月降水量データを算出し、流域ごとに平均化して、流域平均降水量を算出した。

4．3．流域土地利用解析

相模湖・津久井湖流域における各河川水の水質や窒素同位体比と、土地利用について比較を行うために、国土地理院発行の1/50,000地形図をもとに各採水地点を末端とする小流域を設定し、神奈川県及び山梨県発行の1/50,000土地基本分類図を用いて、各小流域における流域土地利用の解析を行った。

流域土地利用は、昭和55年～平成2年に調査・発行さ

表１　採水地点及び水質分析結果
Table 1　Results of field survey and analyses of water quality

番号	調査地点名称	河川名	支川名	流域面積	流量	比流量	採水年月日	天候	気温	水温	pH	電気伝導度	流量	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_2^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	T-N	T-P	$\delta^{15}N$	NO_2^--N	NO_3^--N	全窒素負荷量
				km^2	m^3/sec	$m^3/sec/km^2$			℃	℃		mS/m	m^3/sec	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	‰	mg/L	mg/L	kg/day
1	宮古橋	桂川	葛野川	111.8	4.11	0.037	2001.9.7	曇	25.5	20.3	7.56	9.8	4.11	4.35	0.13	1.26	2.07	11.06	0.00	1.79	0.00	3.23	16.87	0.24	0.75	<0.01	2.8	0.00	0.73	266.3
2	強瀬橋	桂川		591.6	12.31	0.021	2001.9.7	晴	25.5	20.5	8.20	14.8	12.31	6.68	0.10	1.37	4.19	15.21	0.00	5.19	0.00	5.72	13.83	0.44	1.43	0.03	5.2	0.00	1.29	1521
3	和出橋	桂川	浅利川	14.1	0.23	0.016	2001.9.7	晴	25.4	19.7	7.77	13.2	0.23	4.90	0.10	1.75	3.32	14.86	0.00	2.31	0.00	5.50	20.13	0.32	1.31	<0.01	4.2	0.00	1.24	28.0
4	西方寺橋	桂川	笹子川	90.6	3.22	0.036	2001.9.7	晴	25.5	20.5	7.83	11.7	3.22	5.19	0.14	1.67	2.81	13.27	0.00	3.65	0.00	4.74	12.41	0.31	1.08	<0.01	3.7	0.00	1.07	300.5
5	法雲寺橋	桂川	笹子川	57.6	2.20	0.038	2001.9.7	曇	26.0	21.2	7.81	11.9	2.20	3.79	0.00	0.67	2.26	10.03	0.00	2.82	0.00	4.97	14.90	0.32	1.54	<0.01	3.1	0.00	1.12	292.7
6	沢戸橋	桂川	朝日川	27.8	0.38	0.014	2001.9.8	曇	22.7	15.7	7.34	13.3	0.38	5.38	0.09	0.39	3.83	15.39	0.00	2.54	0.00	5.41	10.01	0.42	1.63	<0.01	4.0	0.00	1.22	53.5
7	宮の前橋	朝日川	大旅川	15.5	0.37	0.024	2001.9.8	曇	22.0	15.6	7.58	8.7	0.37	3.03	0.09	0.19	2.35	10.86	0.00	1.18	0.00	2.33	3.67	0.32	0.69	<0.01	0.7	0.00	0.53	22.1
8	大鹿橋	桂川	大幡川	21.7	0.69	0.032	2001.9.8	曇	24.6	17.5	7.65	15.2	0.69	6.11	0.12	0.47	4.11	16.84	0.00	5.38	0.00	4.43	25.01	0.34	1.29	<0.01	4.3	0.00	1.00	76.9
9	山中湖湖尻	桂川		64.4	0.21	0.003	2001.9.7	曇	22.2	22.0	7.84	9.0	0.21	3.12	0.03	0.86	3.55	8.41	0.00	2.57	0.00	0.10	2.78	0.37	0.21	<0.01	-	0.00	0.02	3.8
10	大橋	桂川	新名庄川	19.4	1.13	0.058	2001.9.7	曇	21.2	15.7	7.51	16.3	1.13	5.82	0.10	2.07	6.40	14.98	0.00	3.79	0.00	7.80	7.08	0.57	1.88	0.07	8.5	0.00	1.76	183.5
11	出口橋	桂川		72.5	0.14	0.002	2001.9.7	曇	22.1	15.8	7.62	18.6	0.14	6.11	0.12	2.56	9.33	17.05	0.00	5.45	0.00	14.98	8.54	0.58	3.71	0.04	8.2	0.00	3.38	44.9
12	海沢橋	桂川		122.3	0.33	0.003	2001.9.7	曇	22.2	14.6	8.06	13.8	0.33	6.12	0.07	1.62	5.09	12.00	0.00	2.64	0.00	4.12	4.54	0.52	0.94	0.13	5.2	0.00	0.93	26.8
13	鹿留川	桂川	鹿留川	33.3	1.00	0.030	2001.9.7	曇	25.0	18.4	7.89	11.5	1.00	5.36	0.04	1.10	3.64	10.79	0.00	2.65	0.00	3.82	7.07	0.38	0.84	0.05	4.4	0.00	0.86	72.6
14	中橋	桂川	笹子川	5.0	0.28	0.056	2001.9.7	曇	23.0	17.0	7.59	8.3	0.28	2.79	0.03	0.55	1.94	10.08	0.00	1.40	0.00	4.25	5.49	0.28	0.88	<0.01	1.1	0.00	0.96	21.3
15	桑西橋	笹子川	真木川	16.2	0.81	0.050	2001.9.7	曇	21.3	16.5	7.55	6.0	0.81	2.24	0.03	2.29	0.99	5.83	0.00	0.96	0.00	2.79	3.51	0.19	0.59	<0.01	0.4	0.00	0.63	41.3
16	小俣川	葛野川	小俣川	26.2	1.34	0.051	2001.9.7	曇	24.4	18.4	7.39	7.1	1.34	3.51	0.09	1.31	1.64	7.07	0.00	1.28	0.00	3.81	9.62	0.18	0.86	<0.01	2.1	0.00	0.86	99.6
17	柄杓流川	桂川	柄杓流川	21.7	4.59	0.211	2001.9.7	曇	25.7	18.3	7.91	17.1	4.59	8.19	0.12	1.71	7.27	15.97	0.06	5.82	0.15	7.10	12.73	0.51	1.69	0.12	7.1	0.05	1.60	670.2
18	桂川高架下	桂川		365.9	5.98	0.016	2001.9.8	曇	20.8	15.8	7.92	16.8	5.98	8.26	0.10	1.62	6.22	14.71	0.05	5.49	0.15	6.96	12.37	0.51	1.82	0.11	6.4	0.05	1.57	940.3
19	志お せ橋	桂川		754.3	6.04	0.008	2001.9.6	晴	22.9	18.5	7.94	13.1	6.04	5.05	0.04	1.09	3.09	12.66	0.00	2.89	0.00	4.63	17.45	0.33	1.24	0.01	4.9	0.00	1.05	647.1
20	石運橋	桂川	菅野川	39.3	1.17	0.030	2001.9.8	曇	22.6	16.0	7.68	12.5	1.17	4.77	0.11	0.88	3.98	14.09	0.00	2.39	0.07	4.89	9.08	0.40	1.46	<0.01	4.5	0.02	1.10	147.6
21	鶴鶴神社	秋山川		0.3	0.01	0.038	2001.9.8	霧雨	19.8	15.9	7.81	10.7	0.01	4.17	0.11	0.26	3.00	13.60	0.00	1.66	0.00	3.95	6.20	0.38	0.97	<0.01	0.9	0.00	0.89	0.8
22	八ツ沢橋	桂川	鶴川	97.2	2.04	0.021	2001.9.6	晴	21.3	18.5	8.07	13.6	2.04	5.18	0.04	0.92	3.33	14.76	0.00	2.78	0.00	5.76	19.52	0.31	1.39	0.04	4.6	0.00	1.30	245.0
23	仲間川	鶴川	仲間川	21.5	0.41	0.019	2001.9.6	晴	23.7	19.7	8.04	15.0	0.41	6.01	0.04	0.91	4.17	15.60	0.00	3.93	0.00	6.84	20.98	0.35	1.62	0.02	4.7	0.00	1.55	57.4
24	八米橋	桂川	鶴川	74.1	1.70	0.023	2001.9.6	曇	25.7	19.0	7.85	12.5	1.70	4.50	0.06	0.80	2.91	13.83	0.00	2.07	0.14	5.22	18.74	0.28	1.18	0.02	3.2	0.04	1.18	173.3
25	境沢橋	桂川	境川	8.4	0.12	0.014	2001.9.6	曇	23.7	19.4	8.08	39.3	0.12	20.81	0.27	2.22	13.18	37.93	0.00	15.87	0.00	15.19	87.61	0.60	3.67	0.21	10.9	0.00	3.43	38.1
26	御霊	桂川	境川	2.6	0.05	0.019	2001.9.6	曇	23.4	17.1	7.51	25.8	0.05	7.04	0.45	1.22	11.56	25.03	0.00	3.94	0.00	11.52	55.75	0.44	4.06	0.02	7.2	0.00	2.60	17.5
27	石船	桂川	境川	5.0	0.08	0.016	2001.9.6	曇	23.4	17.3	7.83	24.5	0.08	8.41	0.34	1.55	10.63	25.25	0.00	6.54	0.00	15.85	48.22	0.41	4.35	0.02	7.9	0.00	3.58	30.1
28	秋山川橋	秋山川		62.9	2.42	0.038	2001.9.4	曇	21.4	19.2	7.84	14.5	2.42	5.11	0.03	0.27	3.11	13.66	0.00	3.18	0.00	5.47	10.56	0.49	1.74	0.02	3.3	0.00	1.24	363.8
29	秋山大橋下	秋山川		34.6	1.24	0.036	2001.9.8	小雨	20.8	18.0	7.93	12.3	1.24	4.72	0.10	0.33	3.39	15.36	0.00	2.11	0.00	4.88	7.32	0.43	1.17	<0.01	3.2	0.00	1.10	125.3
30	落合橋	秋山川		14.7	0.48	0.033	2001.9.8	霧雨	20.5	17.4	7.94	12.9	0.48	5.25	0.11	0.36	3.63	16.11	0.00	2.73	0.00	5.60	6.96	0.45	1.35	<0.01	3.5	0.00	1.27	56.0
31	大の入橋	秋山川	大の入川	7.3	0.22	0.030	2001.9.8	霧雨	20.5	15.9	7.80	8.8	0.22	3.71	0.08	0.29	2.30	10.72	0.00	1.41	0.00	3.47	4.41	0.33	0.68	<0.01	0.4	0.00	0.78	12.9
32	沢井川	沢井川		17.5	0.51	0.030	2001.9.6	晴	25.4	20.2	8.00	13.5	0.51	5.59	0.05	0.83	3.13	14.97	0.00	2.95	0.00	6.37	18.40	0.31	2.16	0.01	3.9	0.00	1.44	95.2
33	新大橋	篠原川		3.4	0.05	0.015	2001.9.4	曇	22.0	18.7	7.66	13.5	0.05	6.69	0.01	0.50	3.08	12.16	0.00	2.72	0.00	6.27	9.26	0.42	2.14	0.02	2.7	0.00	1.42	9.2
34	底沢	白水沢		7.3	0.16	0.022	2001.9.4	雨	19.7	18.3	7.60	11.9	0.16	5.65	0.03	0.71	2.49	12.24	0.01	3.34	0.00	6.42	15.11	0.32	1.62	<0.01	2.4	0.00	1.45	22.4
35	井天橋	道志川		143.0	0.68	0.005	2001.9.4	雨	22.2	20.7	8.03	13.2	0.68	5.68	0.02	0.49	2.86	13.18	0.00	2.73	0.00	4.30	10.21	0.37	1.47	<0.01	3.7	0.00	0.97	86.4
36	山伏峠北	道志川		0.3	0.03	0.115	2001.9.4	曇	19.4	13.5	7.48	6.1	0.03	3.20	0.08	0.83	2.58	9.18	0.00	1.48	0.00	2.58	5.13	0.19	1.19	<0.01	-1.5	0.00	0.58	3.1
37	下善之木	道志川		20.4	1.29	0.063	2001.9.4	曇	21.1	15.3	7.49	8.6	1.29	2.48	0.05	0.96	1.76	5.63	0.00	0.96	0.00	0.88	5.64	0.30	0.63	<0.01	3.0	0.00	0.20	70.2
38	池之原橋	道志川		40.3	3.79	0.094	2001.9.4	曇	20.6	16.1	7.64	9.2	3.79	3.37	0.04	0.70	2.71	10.28	0.01	1.56	0.00	2.94	5.78	0.31	1.04	<0.01	3.2	0.00	0.66	340.6
39	室久保川	道志川	室久保川	10.0	0.47	0.047	2001.9.4	曇	21.1	16.6	7.61	9.2	0.47	3.48	0.08	1.74	2.23	8.71	0.00	1.16	0.00	2.72	9.12	0.24	1.09	0.012	-0.7	0.00	0.61	44.3
40	梅キャンプ場	道志川		62.9	3.77	0.060	2001.9.4	曇	21.0	16.3	7.72	9.4	3.77	3.47	0.05	0.79	2.80	10.76	0.00	1.47	0.00	2.96	6.97	0.33	0.97	<0.01	2.7	0.00	0.67	316.0
41	両国橋	道志川		103.5	4.68	0.045	2001.9.4	曇	21.3	17.3	7.64	10.2	4.68	3.21	0.06	0.62	2.53	10.95	0.00	1.39	0.00	2.99	7.16	0.36	0.78	0.03	2.1	0.00	0.68	315.4
42	亀見橋下	道志川		122.6	3.34	0.027	2001.9.4	曇	23.3	19.6	7.96	10.1	3.34	3.73	0.08	0.62	2.80	11.71	0.00	1.78	0.00	2.98	7.24	0.37	1.04	<0.01	2.0	0.00	0.67	300.1
43	境川橋	相模湖		897.0	-	-	2001.9.5	曇	21.3	16.7	7.54	15.6	-	5.93	0.13	1.10	3.62	11.52	0.02	5.18	0.17	5.93	14.01	0.40	0.53	0.09	6.0	0.05	1.34	-
44	日連大橋	相模湖		965.1	-	-	2001.9.5	曇	22.7	20.7	8.48	13.0	-	4.94	0.09	0.80	3.11	11.77	0.01	3.56	0.00	4.68	11.53	0.39	1.42	0.04	4.7	0.00	1.06	-
45	勝瀬橋	相模湖		985.0	-	-	2001.9.5	曇	23.9	23.1	9.24	12.8	-	4.34	0.05	0.83	2.66	9.28	0.00	3.46	0.12	4.78	12.83	0.35	1.45	0.03	5.4	0.04	1.08	-
46	相模湖大橋	相模湖		999.7	-	-	2001.9.5	曇	24.0	23.2	9.18	12.8	-	4.70	0.05	0.93	2.86	10.17	0.00	3.52	0.12	4.73	12.78	0.34	1.51	0.03	5.4	0.04	1.07	-
47	沼本ダム	津久井湖		1021.7	-	-	2001.9.5	曇	25.6	19.1	7.46	14.2	-	5.94	0.08	1.21	3.82	13.15	0.01	3.96	0.19	6.16	13.65	0.40	1.71	0.05	4.8	0.06	1.39	-
48	名手橋	津久井湖		1173.3	-	-	2001.9.5	曇	26.3	23.0	8.83	12.0	-	5.28	0.06	1.06	3.30	11.80	0.01	3.40	0.12	5.64	11.29	0.36	1.80	0.09	4.4	0.04	1.27	-
49	湖央部	津久井湖		1177.2	-	-	2001.9.5	曇	25.6	23.1	8.66	11.8	-	4.61	0.09	0.87	2.90	10.30	0.00	3.32	0.14	5.52	10.51	0.34	1.62	0.03	4.7	0.04	1.25	-
min.				0.3	0.01	0.002			19.4	13.5	7.34	6.0	0.01	2.24	0.00	0.19	0.99	5.63	0.00	0.96	0.00	0.10	2.78	0.18	0.21	0.01	-1.5	0.00	0.02	0.8
max.				1177.2	12.31	0.211			26.3	23.2	9.24	39.3	12.31	20.81	0.45	2.56	13.18	37.93	0.06	15.87	0.19	15.85	87.61	0.60	4.35	0.21	10.9	0.06	3.58	1521
ave.				215.3	1.76	0.037			22.9	18.3	7.87	13.2	1.76	5.26	0.09	1.02	3.89	13.28	0.00	3.19	0.03	5.39	14.08	0.37	1.47	0.05	3.9	0.01	1.22	194.8

れた、1/50,000 土地基本分類図(図幅名：丹波、五日市、甲府、都留、上野原、八王子、富士山、山中湖、秦野)を用い、各図幅(図幅の緯度長 10′, 経度長 15′)を緯度方向 15″・経度方向 22.5″づつの 40 × 40 グリット(計 1,600 グリッド)に分割した。

解析を行った図上では、1 グリッドは約 1 cm× 1 cmの大きさとなり、実距離は一辺が約 500 mに相当する。実際には場所によって同じ緯度・経度間隔でも実距離が異なるため、使用した図幅の平均値から、1 グリットの大きさを 0.26192 km^2 として、流域面積等を算出した。

解析範囲は、北緯 35°20′～45′、東経 138°41′15″～139°18′45″までの 100 × 100 グリッドとなり、そのうち対象流域に含まれるグリッドは全体の約半分の 4,495 グリッドであった。各グリッド内の代表的な土地利用を、土地基本分類図の判読により数値コード化し、グリッドデータを作成した。数値コード化した土地利用情報を、各小流域ごとに集計し、各コードのグリッド数から、各流域土地利用面積及び流域面積を算出した。

５．調査結果

５．１．河川水調査結果

平成 13 年 9 月 3 日～7 日に 42 地点で実施した河川水調査においては、各調査地点ごとに調査票を作成し、現地測定データを記録するとともに、採水地点及び河川流量の計測測線のスケッチ及び調査地点の写真撮影を行った。

また、湖沼水については、地点 43 から 46(相模湖)、及び地点 47 から 49(津久井湖)までの計 7 地点において、平成 13 年 9 月 4 日に採水を行った。これらの地点のうち、相模湖の勝瀬橋(地点 45)以外の調査地点は、神奈川県の公共用水域水質測定計画における湖沼測定点に設定した。

各地点番号、調査地点名称、支川名、調査日、流域面積、河川流量及び河川水質調査結果を表１に示した。なお、窒素成分については、硝酸イオン(NO_3^-)及び亜硝酸イオン(NO_2^-)の測定値をもとに、硝酸性窒素(NO_3^--N)及び亜硝酸性窒素(NO_2^--N)濃度に換算し、それぞれを記載した。

5．1．1．河川流量について

採水調査時における河川流量の分布を水系模式図上に円グラフで示した（図 2）。

河川流量の測定を行った 42 地点中、最大流量は桂川中流部の強瀬橋地点（地点 2）の 12.31 m^3/ sec、最少流量は秋山川最上流部の雛鶴神社地点（地点 21）の 0.01 m^3/ sec であった。

相模湖・津久井湖流域では、桂川の上～中流部にあたる河口湖畔から猿橋町まで、同じく桂川中流部の上野原町大野ダム付近、道志川下流域から宮ヶ瀬湖及び秋山川へ、宮ヶ瀬湖から道志川最下流部へなど、ダムへの取水などを目的とした幾つかの導水路が設置されている。これらの水利系統を、図 1 の水系網模式図及び水系図中に、矢印付きの実線で表した。

これら導水路による取水・排水の影響により、流下するにしたがって河川流量が増加する傾向のほかに、桂川中流部の強瀬橋地点（地点 2：12.31 m^3/ sec）から、その下流の志おせ橋地点（地点 19：3.04 m^3/ sec）のように、導水路の前後においては、河川流量が大きく増減していることが明らかとなった。

また、河川流量を流域面積で除した比流量（ m^3/sec/ km^2）についても、河川 42 地点の平均値が 0.037（表 2）であったのに対し、山中湖からの流出河川となっている地点 9, 00, 12 や、桂川中流部の上野原町大野ダム付近での取・排水区間の地点 19、道志川最下流部における横浜水道による取水地点下流の地点 35 では、それぞれ 0.002 ～ 0.008 と平均の 1/5 ～ 1/10 程度の小さい値となった。反対に、河口湖から取水された水が桂川を経て柄杓流川に入る地点 17 では、0.211 という平均の約 5 倍にあたる大きな値を示し、人為的な影響もしくは地形・地質的に特異な地点であることが明らかとなった。

上述のように、河川流量が取水や排水の影響により局地的に大きく増減する場合、流域からの負荷量を上流から下流へと連続的に評価することは、非常に困難であると考えられる。このため、河川水の取・排水による影響のない地域を選定し、流下に伴う水質等の変化についてはこれらの地域ごとに検討することとした。選定した地域は図 1 の水系網模式図中に枠組みで示した山中湖地域・朝日川地域・笹子川地域・葛野川地域・鶴川地域・境川地域・秋山川地域・相模湖地域・道志川地域の 9 地域 37 地点である。

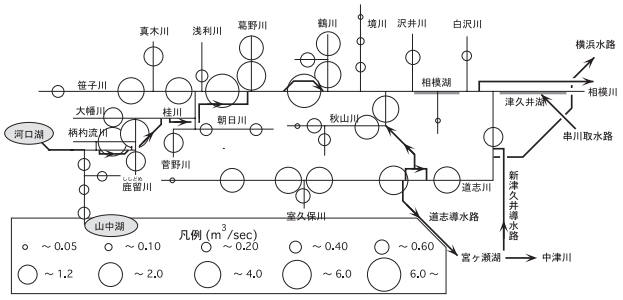

図 2　河川流量分布 (2001.09.03 ～ 09.07 : m^3/sec)

Fig.2　Distribution of river flow rate(2001.09.03 ～ 09.07 m^3/sec)

5．1．2．河川水中の主要溶存成分について

各地点における河川水及び湖沼水の水質の特徴を明らかにするために、河川水及び湖沼水中の主要溶存成分をトリリニアダイアグラム（図 3）及びパターンダイアグラム（図 4）で示したものを水系図上にプロットし、地点水質を比較した。

トリリニヤダイヤグラムは、陽イオン（Na^+＋K^+とCa^{2+}＋Mg^{2+}）と陰イオン（Cl^-＋SO_4^{2-}＋NO_3^-とHCO_3^-）の当量百分率を、菱形の各辺の軸にプロットした菱形のキーダイヤグラムと、陽イオン（Na^+＋K^+とCa^{2+}とMg^{2+}）及び陰イオン（Cl^-とSO_4^{2-}＋NO_3^-とHCO_3^-）の当量百分率を、三角形の各辺の軸にプロットした二つの三角ダイヤグラムを組み合わせたものである。

また、パターンダイヤグラムは、水中に溶存する主要８成分（陽イオン４成分： Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、及び陰イオン４成分：Cl^-、HCO_3^-、SO_4^{2-}、NO_3^-）の各濃度を当量で表し、中心より左右に３本の水平軸状にプロットし、各点を直線で結んで図形を形作ったものである。

図３のトリリニアダイアグラムから、相模湖・津久井湖流域の源流地域の河川水は、硝酸性窒素などの汚染の影響が少ない地下水や降水の水質に近い、アルカリ土類炭酸塩領域の最も端に位置しているのに対し、流下するに従って硝酸イオンや硫酸イオン等の汚染物質が増加するアルカリ土類非炭酸塩の領域へと水質が変化する傾向が認められた。また、人為的な影響を受けやすい陰イオン成分とは逆に、主に地質起源によって水質が形成される陽イオン成分については、組成比がほぼ一定で、地点間に大きな違いは認められなかった。

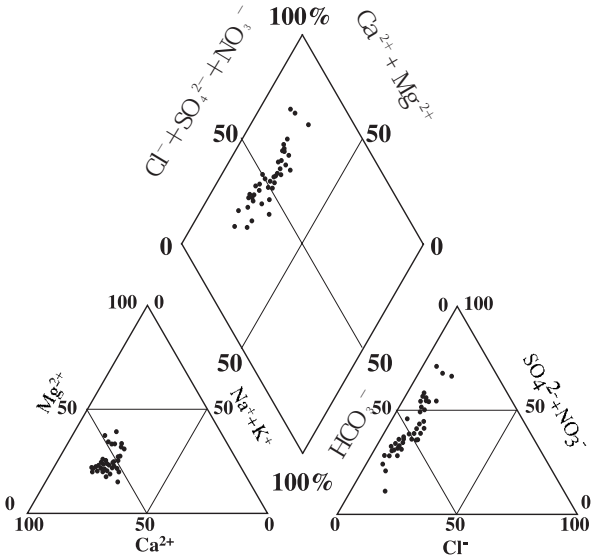

図３　河川水及び湖沼水のトリリニアダイヤグラム

Fig.3　Trilinear diagram of surface water

一方、水質組成と溶存濃度をプロットの形と大きさで表しているパターンダイアグラム（図 4）から、境川地域の 3 地点（地点 25, 26, 27）で陽イオン成分、陰イオン成分ともに他より高い、特徴的な濃度を示していることが明らかとなった。また、源流部地点（地点 15, 16, 36）ではイオン濃度が他の地点より相対的に低かったが、それ以外の地点では、イオン濃度に大きな差が認められなかった。調査地点中、最も全窒素濃度が高い地点は、境川地域の中流部（地点 27）の 4.35 mg / L、最も低い地点は山中湖からの流出部である桂川最上流部（地点 9）の 0.21 mg/ L であった。

5．1．3．窒素負荷量について

河川水中の全窒素濃度と採水時に測定された河川流量の積から、河川水によって流域から流出する窒素の負荷量を算出した（表 1 及び図 5）。この図から、全窒素負荷量は源流部で小さく、流下するに従い増加する一般的な傾向が認められた。河川流量が測定された 42 調査地点中、もっとも全窒素負荷量が大きい地点は、桂川中流部の強瀬橋（地点 2）の 1520.9 kg/day、もっとも小さい地点は秋山川源流部の雛鶴神社（地点 21）の 0.8 kg/day 、平均は 194.8 kg/day であった。

全窒素負荷量が最大及び最小となった地点は、それぞれ河川流量が最大（地点 2：12.31 m^3/ sec）及び最小（地点 21：0.01 m^3/ sec）の地点でもあった。これに対し、全窒素濃度が最も高かった境川では、河川流量が 0.05 ～ 0.12 m^3/ sec と他の支流と比べて小さかったことから、窒素負荷量としては、17.5 ～ 38.1 kg/day と他の支流よりも小さな値となった。

これらのことから、全窒素負荷量を決定する最も大きな要因として、河川水中の全窒素濃度よりも河川流量が大きな役割を占めていることが明らかとなった。

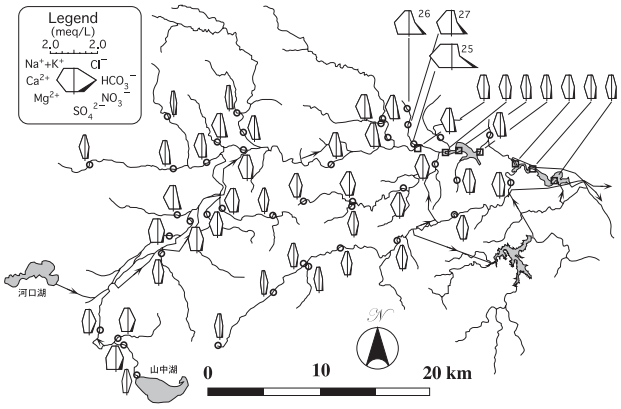

図 4　河川水及び湖沼水のパターンダイヤグラム分布図
Fig.4　Distribution of pattern diagrams of surface water

5．1．4．窒素安定同位体比について

河川水及び湖沼水の窒素安定同位体比は、河川水中の窒素濃度が低くいため同位体比の測定ができなかった桂川最上流部の山中湖湖尻地点（地点 9）を除いた河川水及び湖沼水 48 地点中の窒素同位体比の値は、最低－1.5‰、最高－10.9‰、平均は＋3.95‰であった。

神奈川県大和市における、地下水中の硝酸性窒素濃度と窒素同位体比の関係から窒素汚染起源について考察した調査（三村ほか、1999）において、地下水中の窒素同位体比が＋6‰以上の場合、し尿・生活排水・家畜糞尿系に起因し、＋6‰以下ならば自然・無機肥料系に起因するとの関係が得られている。

本調査において窒素同位体比の分析結果が得られた 48 地点中の 41 地点では窒素同位体比が＋6‰以下であり、＋6‰を超える高い値を示した7地点は、桂川上流域の2地点（地点10：＋8.5‰、地点11：＋8.2‰）、柄杓流川地点（地点17：＋7.1‰）、桂川高架下地点（地点18：＋6.4‰）及び境川地域3地点（上流より地点26：＋7.2‰、地点27：＋7.9‰、地点25：＋10.9‰）であり、桂川中・上流域及び境川流域に限定されていた。これら河川水中の窒素同位体比の高い地点では、平均値より高い硝酸性窒素濃度を示すことから、窒素同位体比と窒素濃度との間には、何らかの相関関係があるものと推察された。この河川窒素同位体比と窒素濃度との関係については、6 章で考察を行った。

一方、支流の源流部では± 1‰程度の低い窒素同位体比を示した。この値は降水や無機化学肥料が示す窒素同位体比の範囲内であることから、これらのいずれかが窒素起源であることが推察された。また、これら源流部で低い窒素同位体比を示す支川では、流下するに従い同位体比及び窒素濃度が上昇する傾向が認められた。これに対し、桂川・相模川本川では、最上流部の山中湖地域で最も高く、その後流入する支川の低い同位体比の影響を受けながら、多少のばらつきを示しながら徐々に同位体比が低下していく傾向が認められた。

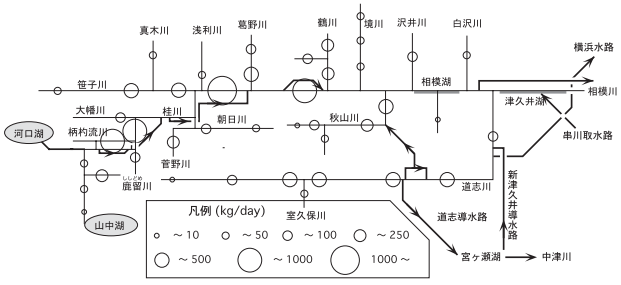

図 5　河川水中の全窒素負荷量分布図 (2001.09.03. ～ 09.07)
Fig.5　Distribution of total nitrogen load of river water (2001.09.03. ～ 09.07)

表２　降水中に含まれる溶存成分濃度
Table 2　Ion concentration in precipitation

※1，※2，※3

津久井試験場（林外雨）	開始日	終了日	捕集水量(ml)	降水量(mm)	電気伝導度(mS/m)	pH	Na+ (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	F^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	$\delta^{15}N$ (‰)	全窒素 (mg/L)
2001年5月	5/3	6/2	6 270	1 99.7	1.41	4.94	0.12	0.44	0.05	0.13	0.34	0.00	0.11	0.00	1.56	1.96		0.70
2001年6月	6/2	7/3	3 390	1 08.0	3.41	4.14	0.11	0.38	0.07	0.14	0.24	0.00	0.40	0.00	2.49	3.24		0.86
2001年7月	7/3	8/1	4 130	1 31.5	2.21	4.68	0.09	0.64	0.06	0.06	0.35	0.00	0.10	0.00	2.51	2.03	2.3	1.06
2001年8月	8/1	8/31	8 550	2 72.3	2.23	4.55	0.62	0.28	0.14	0.14	0.23	0.00	1.15	0.00	1.12	1.73	−0.37	0.47
2001年9月	8/31	9/28	1 6160	5 14.6	1.61	4.71	0.75	0.16	0.04	0.10	0.14	0.00	1.33	0.00	0.48	1.17		0.23
2001年10月	9/28	11/1	1 0360	3 29.9	1.03	4.80	0.13	0.10	0.01	0.03	0.09	0.00	0.29	0.00	0.50	0.91		0.19
2001年11月	11/1	12/1	3 970	1 26.4	2.47	4.43	0.66	0.17	0.07	0.11	0.51	0.00	1.85	0.00	4.34	4.83		1.12
7～11月平均				275.0	1.91	4.63	0.45	0.27	0.06	0.09	0.26	0.00	0.95	0.00	1.79	2.13	0.50	0.61

境川橋（林外雨）	開始日	終了日	捕集水量(ml)	降水量(mm)	電気伝導度(mS/m)	pH	Na+ (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	F^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	$\delta^{15}N$ (‰)	全窒素 (mg/L)
2001年7月	7/3	8/1	3 210	1 02.2	2.12	6.45	0.27	0.73	0.19	0.62	0.71	0.00	1.50	0.00	2.19	1.90	−0.85	1.07
2001年8月	8/1	8/31	8 080	2 57.3	1.69	4.68	0.46	0.15	0.12	0.21	0.38	0.00	0.98	0.00	1.06	1.53	−0.98	0.36
2001年9月	8/31	9/28	1 4950	4 76.1	1.40	4.77	0.86	0.11	0.12	0.15	0.18	0.00	1.38	0.00	0.35	1.03		0.16
2001年10月	9/28	10/31	9 100	2 89.8	0.68	5.27	0.11	0.08	0.21	0.07	0.23	0.00	0.38	0.00	0.30	0.86		0.13
2001年11月	10/31	12/1	3 470	1 10.5	1.37	4.80	0.28	0.14	0.50	0.10	0.34	0.00	1.68	0.00	4.21	4.42		1.06
7～11月平均				247.2	1.45	5.19	0.39	0.24	0.23	0.23	0.37	0.00	1.18	0.00	1.62	1.95	−0.94	0.55
林外雨平均値																	−0.2	0.607

顕教寺（林内雨）	開始日	終了日	捕集水量(ml)	降水量(mm)	電気伝導度(mS/m)	pH	Na+ (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	F^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	$\delta^{15}N$ (‰)	全窒素 (mg/L)
2001年7月	7/3	8/1	9 20	2 9.3	2 3.30	6.93	3.40	8.65	1 1.54	3.82	1 1.99	0.01	9.11	1 0.17	3 9.57	1 7.15	8.0	1 8.74
2001年8月	8/1	8/31	6 180	1 96.8	6.13	6.01	1.95	1.47	2.36	1.18	3.06	0.03	4.03	0.00	8.90	7.45	5.3	3.15
2001年9月	8/31	9/28	9 490	3 02.2	3.68	4.95	1.41	0.57	0.89	0.41	0.91	0.00	3.31	0.00	3.81	3.60	2.4	1.30
2001年10月	9/28	10/31	1 0880	3 46.5	4.14	5.05	0.60	0.67	1.37	0.29	0.84	0.00	3.18	0.00	7.53	2.61		2.22
2001年11月	10/31	12/1	3 310	1 05.4	7.54	4.37	1.78	0.86	5.80	0.83	2.13	0.65	3.96	0.00	8.90	4.57		2.67
7～11月平均				196.1	8.96	5.46	1.83	2.44	4.39	1.31	3.79	0.14	4.72	2.03	1 3.74	7.08	3.8	2.338
津久井との比				71.3%														

※１：窒素安定同位体比の７～11月平均は降水量加重平均値として算出
※２：全窒素濃度は、アンモニアイオン、亜硝酸イオン及び硝酸イオン濃度の合計より算出

５．２．降水調査結果

対象流域のほぼ最下流部に位置し、大気降下物全量採取器を設置した、農業総合研究所津久井試験場には、神奈川県農林水産情報センターによる気象観測局が設置され、毎正時の気温、湿度、風向、風速、日照時間、日射量、地温及び降水量を観測しており、データはwebにより公開されている。また、気象庁によるアメダス観測が、神奈川及び山梨県内では26地点(内、対象流域内では５地点：相模湖、大月、上野原、河口湖及び山中)で行われている。本調査ではこれらの気象観測データを用いて、降水量の地域分布について解析を行った。また捕集した降水の降水量と水質分析結果、降水量、窒素同位体比及び計算で求めた全窒素濃度の平均値を表２に示した。

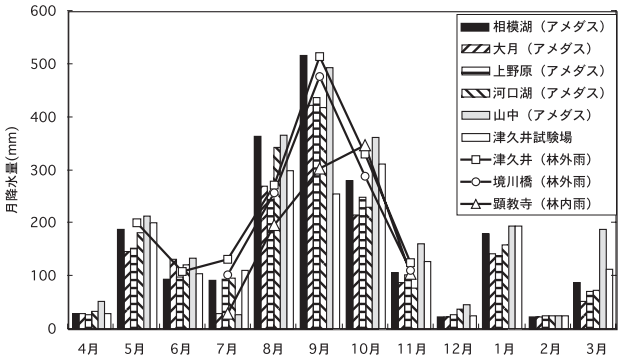

図６　2001(平成13)年度月降水量
Fig.6　Precipitation per month in 2001

５．２．１．降水量の季節変化及び地点間の差について

平成13年度の月降水量について、農業総合研究所津久井試験場、気象庁アメダス観測点及び３ヶ所で実施した全量降下物採取装置による月捕集量(mm換算)を図６に示した。6個所の気象観測地点における2001年度の降水量は1572～2264mmであり、降水量の多い月に地点間での降水量の差が大きくなる傾向は認められるが、降水量の季節的な変化は、各地点で同様の傾向を示した。また、一般的に、降水量は標高と比例する関係があることが知られているが、本調査期間中においては、標高と降水量との関係は認められなかった。

なお、2001年９月における津久井試験場の降水量が、他の地点に比べて半分程度となっていることについて、現地における確認等によって、雨量計への障害により、９月９～１日における降水が正しく観測されていなかったためであることが判明した。

５．２．２．林内雨及び林外雨の降水量と水質について

林地における樹冠上部への降水(林外雨)と、樹冠部を通過して林床面で採取される林内雨では、降水量は、樹冠部に付着した雨滴の蒸発の影響によって林内雨量は減少し、溶存物質濃度は、樹冠での雨滴の蒸発による濃縮や、樹冠に付着した乾性降下物の取り込み、植物への吸着や溶脱などにより変化し、一般的には林内雨の濃度は、林外雨に比べ高くなることが知られている。

なお、林地への降水としては、林床面で捕集される林内雨と、樹幹部を伝わって流れ落ちる樹幹流とに分けることができる。樹幹流の量は、林外雨の約１割程度と言われているが、林外雨・林内雨に比べて溶存成分濃度が高く、樹木の根部直近に浸透することから、樹木に対する影響の大きさが指摘されている。しかし、流域レベルにおける樹幹流の影響は、対象とする現象のスケールの違いや測定精度の問題から、定量的に評価することが難しいため、本調査においては誤差範囲に含まれるものとした。

図６中に折れ線グラフで表示されている２地点の林外雨捕集地点における降水量変化から、津久井及び境川橋地点で測定された林外雨量は、ほぼ気象観測地点と同程度であり、降水がほぼ全量捕集されていることが確認された。しかし、一方で、樹冠を通過して地表面に達する林内雨量は、気温の高い７～９月は、津久井における林外雨に比べて約半分程度という結果が示された。これは前述したように樹冠部に補足された雨滴が蒸発や、樹冠流へ分配することにより、林内雨量／林外雨量比が低下したものと考えられる。図7-aに津久井地点における降水捕集量に対する、境川及び顕教寺地点における捕集量をプロットした図を示した。図中の実線は原点を通る傾き１の直線であり、この線上にあれば津久井と同じ降水量であることを示している。

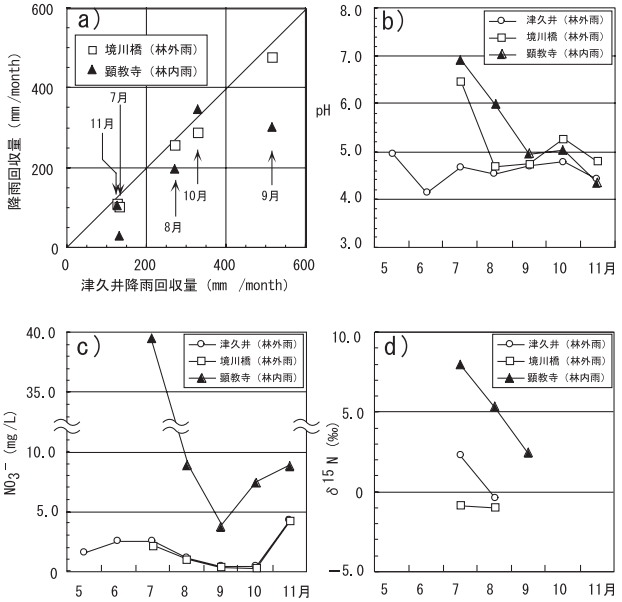

図７　津久井、境川橋、顕教寺における月降水量 (a)、pH (b)、硝酸イオン濃度 (c) 及び窒素同位体比 (d)

Fig.7　Seasonal changes of monthly precipitation (a), pH (b), concentration of nitrate ion (c) and rate of stable isotope of nitrogen (d)

一方、降水の水質については、林外雨である津久井と境川橋に比べ、林内雨を捕集した顕教寺地点では、電気伝導度や各種溶存成分濃度で、数倍から数十倍の値を示した。また、降水のpHについては、林外雨で 4.1 ～ 6.5（津久井平均 4.6、境川橋平均 5.2）、林内雨で 4.4 ～ 6.9（平均 5.5）であった。pH 5.6 を越える月は５月～ 11 月の観測期間中２ヶ月のみであり、他の月はpH 5.6 以下の酸性雨の領域であった（図 7- b）。また、硝酸イオン濃度を示した図 7- cから、林外雨の２地点はほぼ同じ値を示すが、林内雨（顕教寺）の硝酸イオン濃度は 2001 年７月を除いて、林外雨（津久井、境川橋）に比べて約３倍であることが明らかとなった。2001 年７月については林外雨（津久井）に比べて捕集量が 20%程度と低く、蒸発による濃縮やその他の影響が強く現れたものと考えられた。

本調査で得られた林外雨の全窒素濃度（津久井平均 0.661、境川橋平均 0.553 mg / L）は、田淵（1985）による国内５地点の全窒素濃度の平均値（0.07 mg / L）や、環境庁・酸性雨対策検討会大気分科会（1990）による東京武蔵野市での全窒素濃度（1.3mg / L）、神奈川県（1994）による 1992 年～ 1993 年の神奈川県内 23 地点での全窒素濃度（0.52 ～ 3.09 mg / L、平均 1.59 mg / L）、高橋ら（1990）による、1989 年９月～翌年８月の山梨県内 13 地点での全窒素濃度（0.181 ～ 0.758 mg / L、平均 0.419 mg / L）等と比較した場合、同程度もしくは若干低い結果となった。

一方、林内雨の全窒素濃度（顕教寺平均2.338mg / L（8～11月平均））は、大河内ら（1995）による1991～1993年の丹沢大山における平均値（スギ林；1.45mg / L、モミ；1.88mg / L）や、小林ら（1995）による六甲山系の中腹における1993年度の調査結果（スギ林；2.06mgLやヒノキ；1.43mg / L、コナラ；0.866mg / L）と比べて、ほぼ同程度から樹種によっては２～３倍程度の値であった。なお、文献中で全窒素濃度が示されていない場合においては、硝酸イオン濃度とアンモニウムイオン濃度の合計を全窒素濃度とした。

図 7- dに、各地点における降水中の窒素同位体比を示した。降水中の窒素同位体比は、津久井試験場で－0.37 ～ 2.3、境川橋で－0.98～＋0.85‰であった。一方林内雨は、＋2.4～＋8.0‰と林外雨に比べて数‰高い値を示した。この原因として、樹冠部に付着した雨滴内でアンモニアの硝化反応による同位体濃縮や、樹冠部に付着した乾性降下物の影響などが考えられた。

５．２．３．流域降水量について

調査地域内６個所の気象観測地点における平成 13 年４月から翌年３月までの一年間の降水量の差は約 700 mmあり、最も降水量が多い山中観測地点おける一年間

の降水量は、最も少ない大月観測地点の1.4倍であった。このため、各流域への降水による窒素化合物の負荷量を算定するためには、降水量の地域分布を算出する必要があると思われる。

この問題に対応するため、本調査では平成16年度について、表3に示した、神奈川県及び山梨県内における26地点の気象庁アメダス月降水量データを用いて、各流域への降水量を算出した。

4.2.章に示した方法で算出した等降水量線を図8に示した。降水量は富士山や箱根火山のある南西側が多く、内陸部及び相模川中下流部が少ない傾向がみられた。

年流域平均降水量は、山中湖や富士山麓斜面を含む地点9を流出口とする流域が最も多い2398 mmを示し、最少は調査地点中最も北西に位置する大月市真木川の調査地点15を流出口とする流域の1413 mmであった。全地域の平均値を示す、調査地域最下端、地点49を流出口とする流域の平均降水量は1810 mmであった。

表3　神奈川県及び山梨県内のアメダス気象観測地点における2001(平成13)年度月降水量
Table 3 Monthly precipitation in 2001 fiscal year in AMEDAS weather survey point of Kanagawa and Yamanashi Prefectures

アメダス地点番号	地点名	北緯 度	北緯 分	東経 度	東経 分	標高 m	月降水量(mm) 2001年 4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	2002年 1月	2月	3月
46001	相模湖	35	36.7	139	11.8	188	29	189	94	91	363	517	281	106	23	180	23	88
46046	相模原	35	34.2	139	22.4	149	38	230	109	63	268	300	301	158	27	138	23	216
46061	臼古	35	32.9	139	39.2	57	47	176	177	69	272	250	330	133	41	109	26	100
46076	丹沢湖	35	24.4	139	2.8	330	55	217	136	21	402	545	397	137	53	140	27	140
46091	海老名	35	26.0	139	23.2	18	42	219	123	54	209	253	287	129	39	123	13	135
46106	横浜	35	26.2	139	39.4	39	64	195	141	47	162	216	306	140	42	105	34	101
46136	平塚	35	20.6	139	18.4	20	39	185	95	24	183	253	254	108	36	110	25	175
46141	辻堂	35	19.0	139	27.2	5	52	177	110	16	195	212	246	122	38	117	33	107
46161	箱根	35	13.1	139	2.7	850	142	369	340	44	502	904	544	203	80	208	58	209
46166	小田原	35	15.1	139	9.3	28	70	243	152	9	186	195	287	110	46	137	37	149
46211	三浦	35	10.5	139	38.0	42	59	175	147	2	182	165	328	140	50	114	38	92
49036	大泉	35	51.5	138	23.5	867	26	134	134	36	216	211	163	46	30	86	17	51
49051	剣ノ峰	35	49.6	138	38.6	1735			144	25	332	272						
49076	日向山	35	47.7	138	17.5	1180			216	27	285	428						
49086	韮崎	35	42.6	138	27.3	351	17	180	121	42	269	247	168	60	22	100	20	78
49106	大菩薩	35	43.9	138	50.4	1684			84	42	325	609						
49142	甲府	35	39.9	138	33.4	273	18	148	109	39	257	64	181	60	17	99	22	75
49151	勝沼	35	39.7	138	43.6	382	13	124	101	57	206	319	159	58	19	97	20	63
49161	大月	35	36.4	138	56.5	364	29	147	132	29	270	423	215	87	22	142	24	52
49171	上野原	35	37.1	139	7.0	251	27	152	99	95	244	437	249	103	27	137	25	71
49186	八町山	35	32.5	138	25.0	930	33	180	165	87	269	359	235	94	25	144	32	114
49196	上六一色	35	31.6	138	37.1	552	28	171	121	48	297	350	230	95	25	116	25	133
49236	中富	35	27.9	138	26.7	226	31	193	141	103	292	413	248	94	22	148	27	108
49251	河口湖	35	29.9	138	45.8	860	34	181	122	96	343	418	229	78	38	158	25	74
49256	山中	35	26.1	138	50.5	992	53	213	133	28	365	494	362	161	45	195	26	189
49316	南部	35	17.1	138	27.0	141	52	246	265	131	477	490	408	152	62	184	40	216

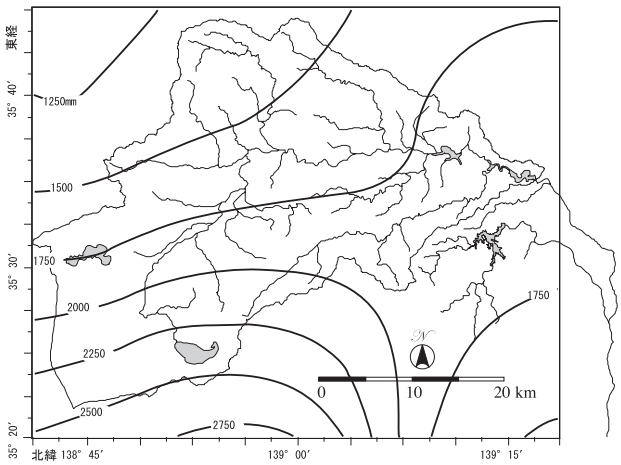

図8　平成13年度等降水量線図
Fig.8 Contour map of annual precipitation in 2001 fiscal year

このように地域別に流域降水量を見た場合、流域南側の山中湖地域や道志川地域の降水量が多く、反対に北側・内陸側の笹子川地域や葛野川、鶴川地域などで平均よりも少ない降水量を示した。

5．3．流域土地利用解析結果

一般的に、ある地点における河川水の水質は、その地点を末端とする集水域(流域)の降水や地質、土地利用状況や河川水の取水・排水など、その流域における自然環境や人間活動の影響を総合的に反映していると考えられる。特に窒素化合物など人間活動と密接な繋がりのある物質については、降水や地質等による広域的な負荷や、農業活動に伴う点源及び面源負荷、生活排水などによる局所的な影響など、系内への物質の流入経路について見ても、実に多岐にわたっているといえる。

本章では、これらの要因のうち土地利用と河川水の水質との関係について明らかにするため、各流域ごとの土地利用面積比率を算定し、河川水の水質との比較を行った。

5.3.1.流域土地利用面積比率の算出と各流域ごとの特徴

本調査では、各採水地点を末端とする流域ごとの土地利用面積を算定するため、神奈川県及び山梨県により昭和55年～平成2年に調査・発行された1/50,000土地基本分類図(図幅名：丹波、五日市、甲府、都留、上野原、八王子、富士山、山中湖、秦野)を用いて、数値データを作成した。

数値データは、相模湖・津久井湖より上流の流域を含む北緯35°20′～45′、東経138°41′15″～139°18′45″までの地域を100×100グリッド(メッシュ)に分割し、各土地利用をコード化した後、流域ごとに集計した。この時、1つのグリッド(メッシュ)の大きさは、緯度方向15″・経度方向22.5″、一辺の長さが約55 mのメッシュとなり、100×100グリット中、対象流域が含まれ

表4　土地利用解析データソース
Table 4 Land use analysis data source

使用図幅名	神奈川県発行 調査年度	山梨県発行 調査年度
丹波		平成2年度
五日市	昭和61年度	昭和61年度
甲府		昭和58年度
都留		昭和61年度
上野原	昭和61年度	昭和61年度
八王子	昭和61年度	
富士山		昭和55年度
山中湖	昭和62年度	昭和56年度
秦野	昭和62年度	昭和56年度

コード	神奈川県発行 土地利用区分名	山梨県発行 土地利用区分名
0	流域外	流域外
1	田	田
2	普通畑	普通畑
3	樹園地(果樹・桑・茶等)	桑園
5	野草・裸地	原野
6	針葉樹	針葉樹林
7	広葉樹	広葉樹林
8	伐採跡地	未立木地
9	その他森林	竹林
10	水面・河川・水路	河川・湖
12	一般住宅地	市街地・村落
17	ゴルフ場・遊園地等	運動施設
18	公園用地	公共施設・公園緑地
25		別荘地・休養施設

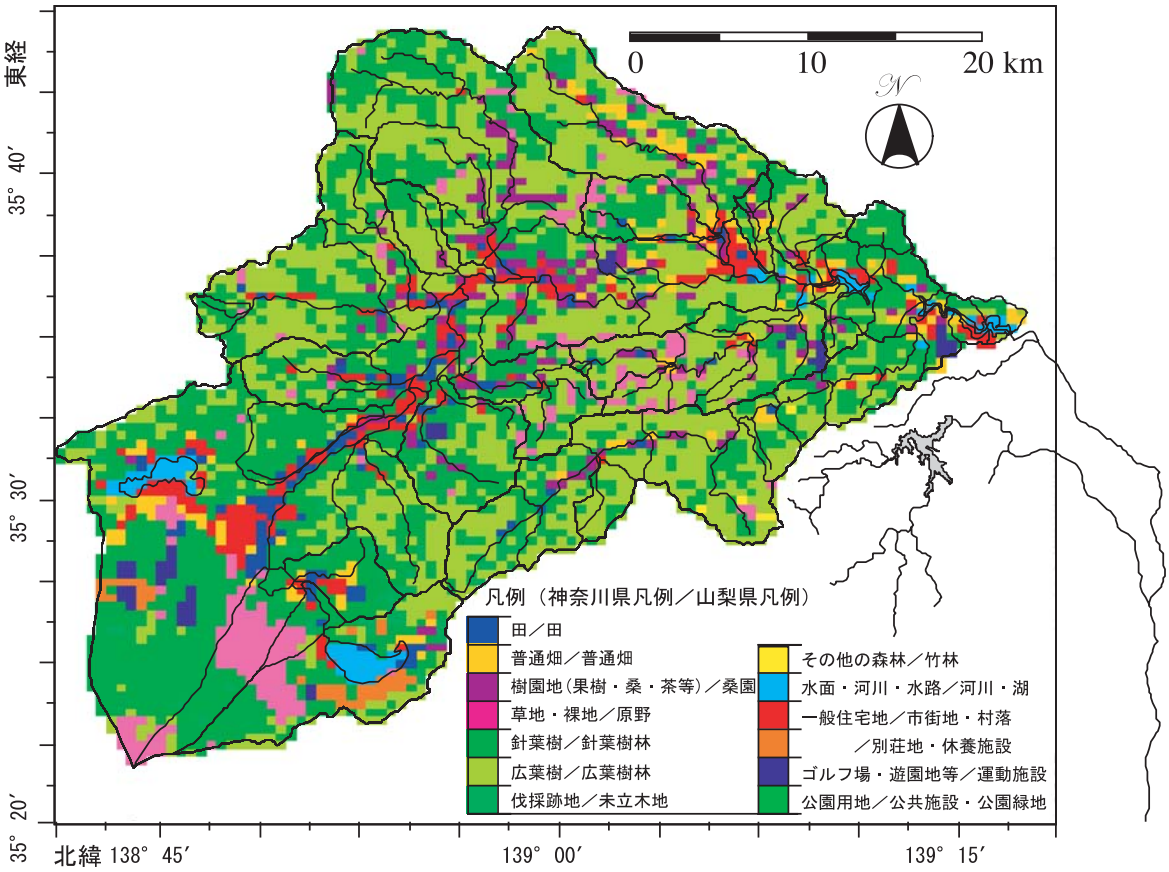

図 10　土地利用分類図
Fig.10　Land use classification map

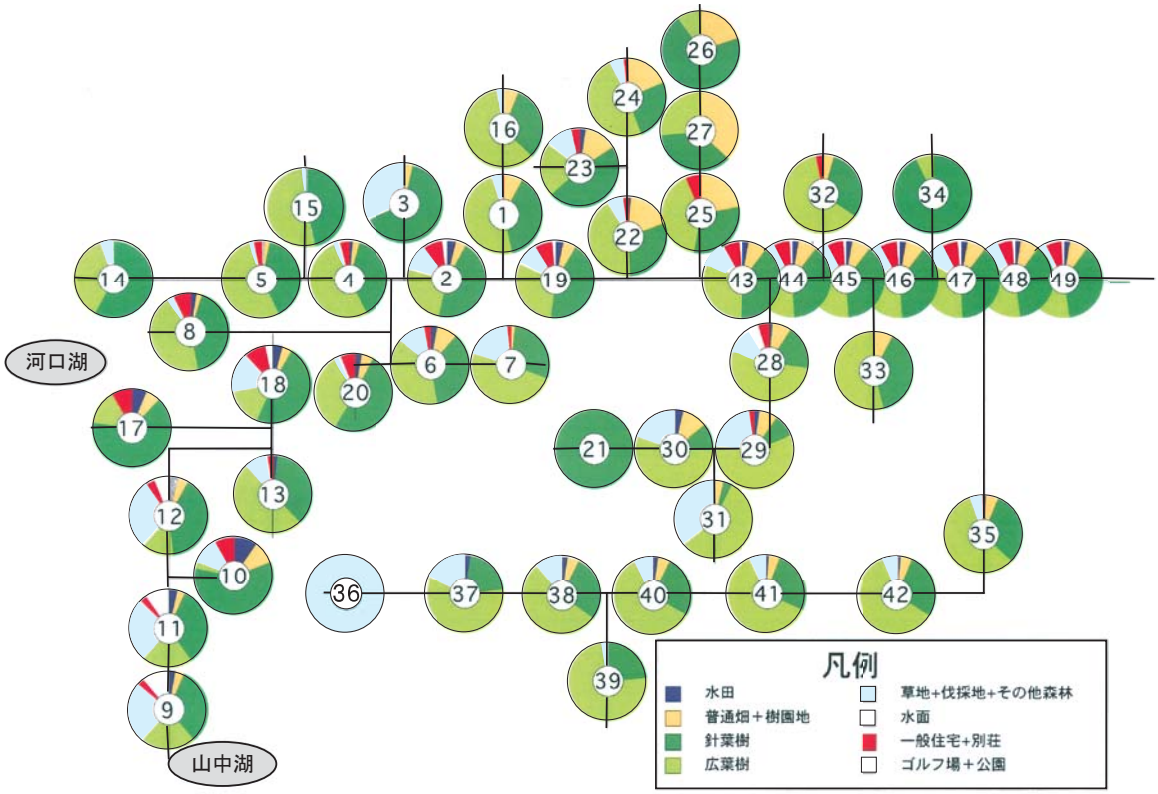

図 11　流域別土地利用比率水系模式図
Fig.11　Schematic diagram of rate of land use in sub-basin

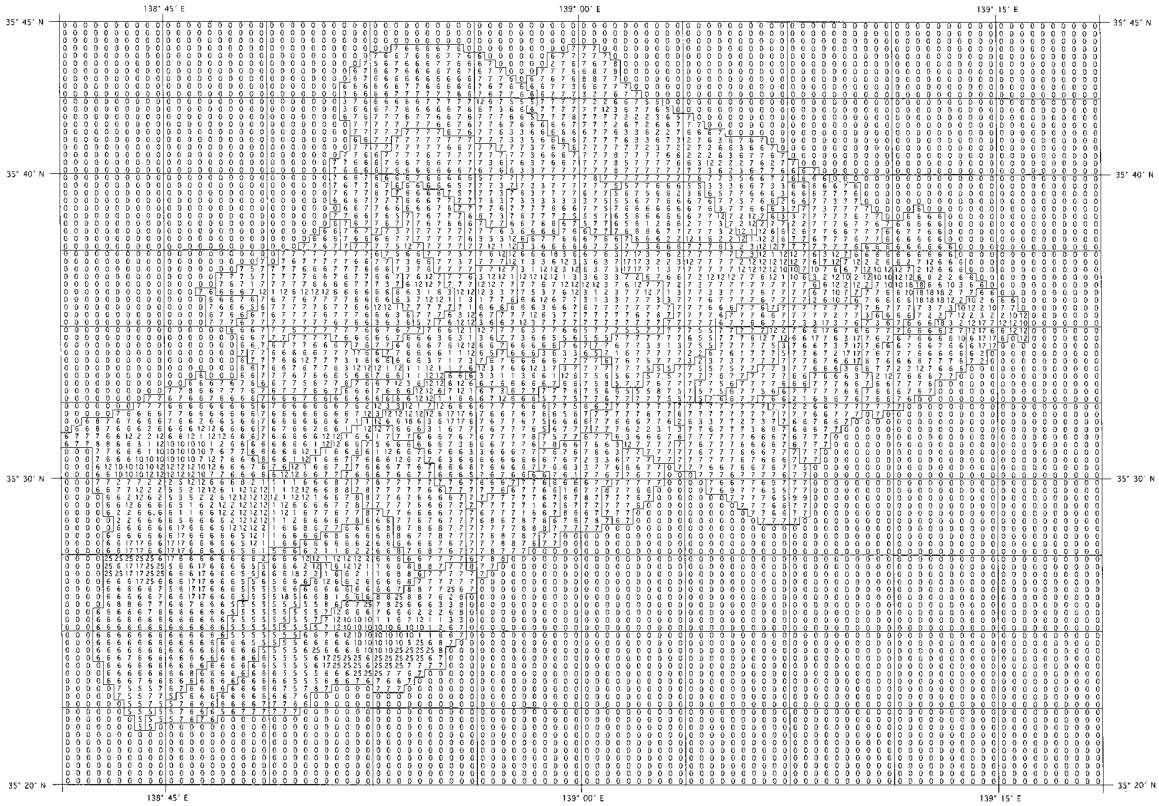

図９　土地利用コード番号（各コード番号の土地利用区分については表５参照）
Fig.9　Mesh map of code number for land use (See land use code number in Table 5)

るグリットは約半分の 4,495 グリッドであった。

解析に用いた土地利用分類図の一覧を表４に、各土地利用コード番号を表５に、対象地域を 500 mメッシュに分割した時の流域境界と土地利用コードの平面図を図９に、各土地利用を色分けし、水系図と重ね合わせた土地利用分類図を図 10 にそれぞれ示した。

解析に用いた土地利用図が昭和 50 年代作成のものを含むため、現在とは土地利用が異なる地域もあると考えられるが、解析の結果、森林（針葉樹及び広葉樹）が流域全体の多くの面積を占め、河川や湖沼に沿って住宅地や水田、畑、樹園地などが分布するといった現在と同様の傾向が示された。また、最上流部の富士山麓部には、草地・裸地／原野が広がるなど、地域的な特徴も見られた。

また図 11 は、各流域ごとの土地利用面積比率を円グラフにプロットし、水系模式図上に並べた図である。各円グラフの中心の数字は地点番号を表し、それぞれ各採水地点から上流部分の土地利用面積比率を表している。この図から、各支流では源流部に近いほど、森林域の比率が高くなる傾向が認められた。また、境川地域や鶴川地域など、左岸側の一部の支流地域では、畑地や樹園地の占める割合が、他の流域に比べて相対的に高いことが示された。

５．３．２．各流域の土地利用面積比率と河川水の水質の関係

各流域の土地利用面積比率と河川水の水質との関係を、特徴的な関係を示した以下の３グループの土地利用【畑地（普通畑＋樹園地）、住宅地（住宅地＋別荘地）及び林地（針葉樹＋広葉樹＋伐採跡地＋その他森林）】と、３項目の水質【塩化物イオン濃度、硝酸性窒素濃度及び窒素同位体比】について、全地域及び取水・排水のない９地域で検討を行った。

５．３．２．１．全調査地点における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図12-1- a～fに、全調査地点における土地利用面積比率と、河川水の水質との関係を示した。

図で、横に並んだ３つのグラフはそれぞれ縦軸（水質）が同じであり、縦に並んだ３つのグラフはそれぞれ横軸（土地利用比率）が同じである。また、図中の数字は採水地点番号を、破線は一次回帰直線を、矢印は流下方向をそれぞれ示している。

各流域における代表的な３グループの土地利用面積比率は、畑地（普通畑＋樹園地）が0～37%、住宅地（住宅地＋別荘地）が0～13%、林地（針葉樹＋広葉樹＋伐採跡地＋その他森林）が 59～100%となっていた。

河川水の水質についてみると、塩化物イオン濃度は、境川最下流部(地点 25)を除いて1～6mg / Lの範囲に、硝酸性窒素濃度は境川流域及び山中湖流域の１地点で、３mg / L前後の相対的に高い値を示したほかは２mg / L以下の範囲に、そして窒素同位体比については、－1.5～＋10.9‰まで一山型でそれぞれ分布していた。

また、各土地利用面積比率と水質との間には、畑地及び住宅地面積比率とは正の相関が、林地面積比率との間には、負の相関関係が認められた。

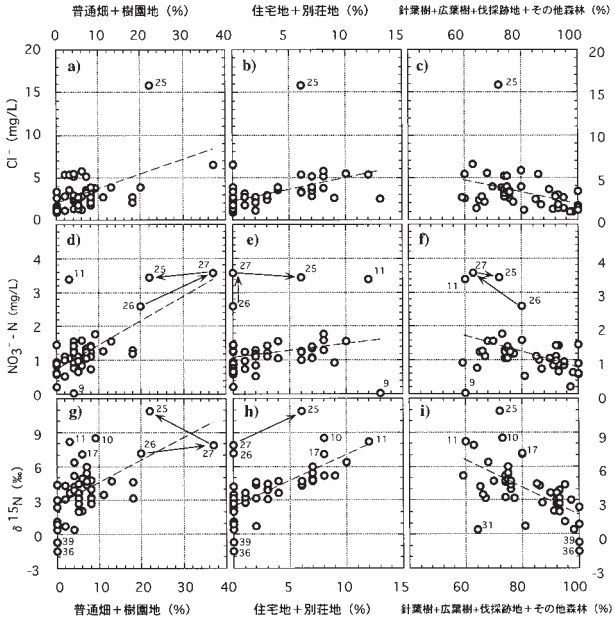

図 12-1　全流域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素並びに窒素安定同位体比との関係 (→は流下方向)

Fig.12-1 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in researched area

5．3．2．2．山中湖地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-2 に、山中湖地域４地点(地点 9、10、11、12)における土地利用と水質との関係を示した。この地域では、硝酸性窒素濃度や窒素同位体比で地点間の差が大きく、土地利用と水質との関係についても、全地域で見られた傾向(畑地及び住宅地が正、林地とは負)とは異なる傾向を示す(図 15-2- a , c , d , e , f , i)地点が多く見られた。

この原因としては、この地域では山中湖や忍野八海湧水群を中心とした、観光地開発が進んでいることから、昭和 56 年の土地基本分類調査時から土地利用が大きく変化している可能性や、局地的な人為的負荷の影響の可能性、湧水等による河川への局地的な涵養による水質変化、山中湖水の影響(桂川最上流地点で、山中湖直下の地点 9)などが考えられる。

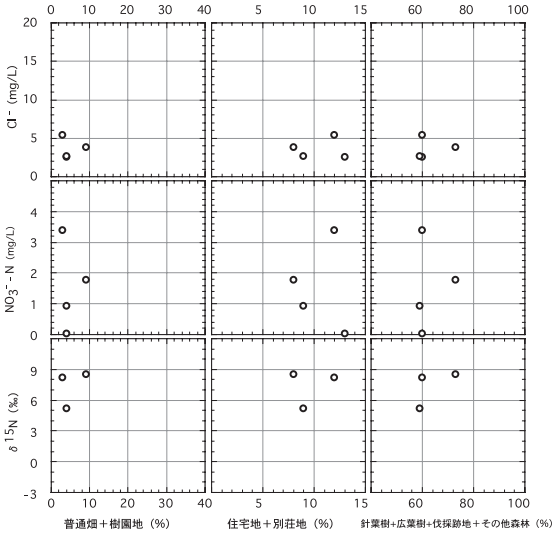

図 12-2　山中湖地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係

Fig.12-2 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Yamanaka-ko area

5．3．2．3．朝日川地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-3 に、朝日川地域２地点(地点 6、7)における土地利用と水質との関係を示す。なお、図中の矢印は、河川の流下方向を示している。

各プロットは、全地点における傾向と一致し、分布もほぼ一般的な範囲内であった。図中の矢印の方向から、この地域では流下するに従って、林地の面積比率の低下と、畑地及び住宅地面積比率の上昇が起こり、河川水中の溶

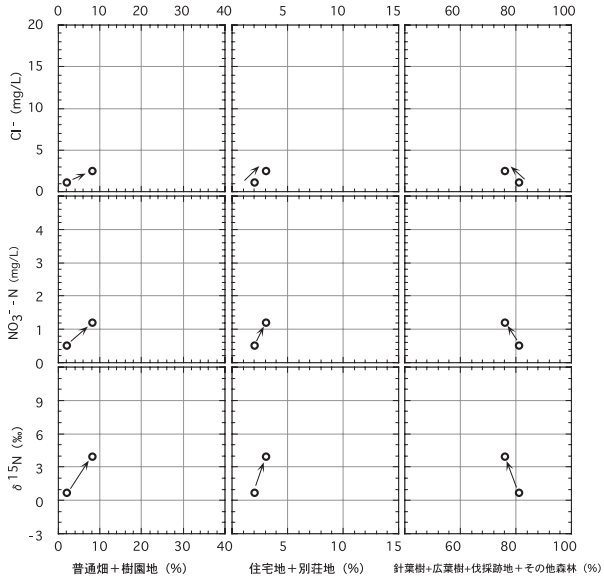

図 12-3　朝日川地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係 (→は流下方向)

Fig.12-3 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Asahi-gawa area

存物質(塩化物イオン、硝酸性窒素)濃度と窒素同位体比の上昇が起きていることが明らかになった。

5．3．2．4．笹子川地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-4 に、笹子川地域 4 地点(地点 4、5、14、15)における土地利用と水質との関係を示した。なお、図中の破線は一次回帰直線を示している。

この地域は源流域に近いことから、全体的に林地面積比率が 90%以上と高く、畑地や住宅地面積比率は 0 ～ 5%と極めて小さかった。河川水の水質との関係では、朝日川地域と同様に、流下するに従って林地面積比率が減少し、溶存物質濃度が上昇する傾向が見られた。

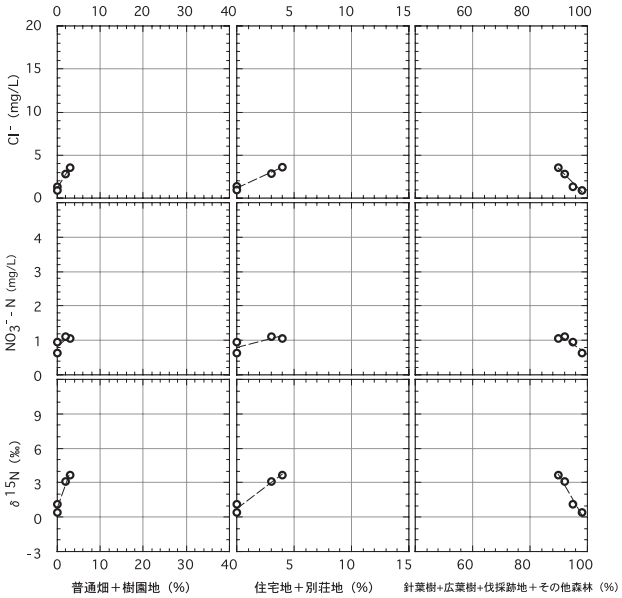

図 12-4　笹子川地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係

Fig.12-4 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Sasago-gawa area

5．3．2．5．葛野川地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-5 に、葛野川地域 2 地点(地点 1、16)における土地利用と水質との関係を示した。また、図中の矢印は、河川の流下方向を示している。

この流域では、流下するに従い硝酸性窒素濃度が低下しており、他の地域とは異なる傾向(図 15-5- d～f)が見られたが、それ以外は他の地域とほぼ同様の傾向と分布を示した。下流の地点の方が硝酸性窒素濃度が低かった理由として、上流の地点 16 の河川(小俣川)は、葛野川に合流する支川であり、小俣川が葛野川に合流後、地点 1 で採水する配置となっており、この時、上流の地点 16 の河川流量は下流の調査地点 1 の約 1/3 であったことなどから、支川(地点 16 のある小俣川)の影響が小さかったものと推察される。

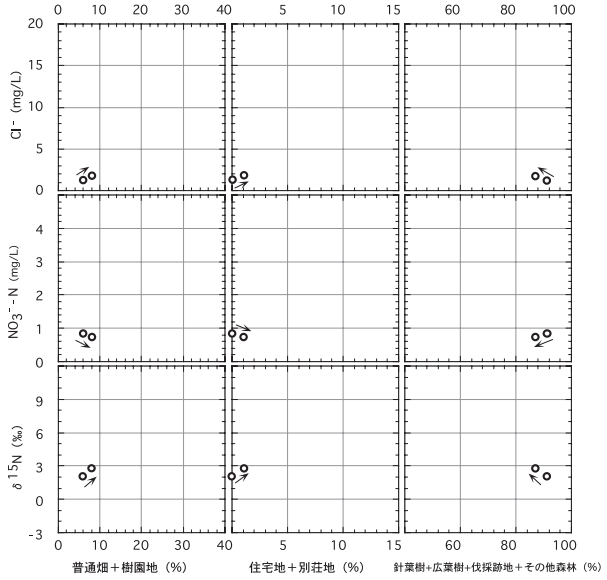

図 12-5　葛野川地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係 (→は流下方向)

Fig.12-5 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Kuzuno-gawa area

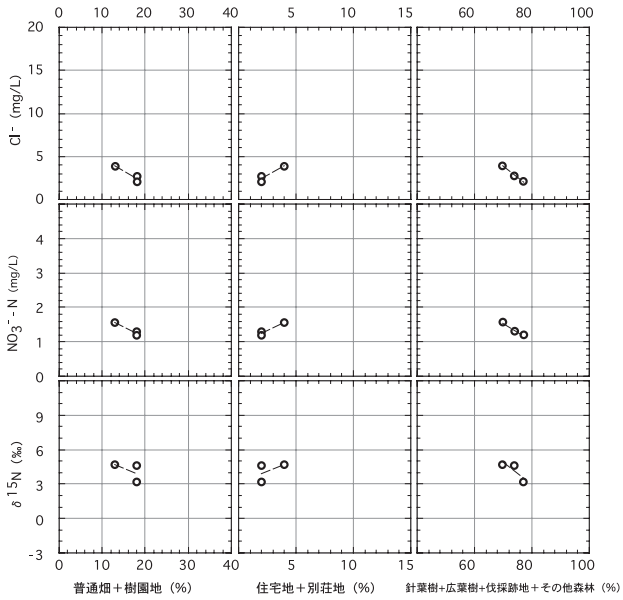

図 12-6　鶴川地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係

Fig.12-6 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Tsuru-kawa area

5．3．2．6．鶴川地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-6 に、鶴川地域 3 地点（地点 22、23、24）における土地利用と水質との関係を示した。また、図中の直線は一次回帰直線を示している。

この地域では、住宅地と林地については、全体的な傾向と一致する傾向が見られたが、畑地との関係においては、全体とは逆の傾向がみられた。このことについては、地点 23 が鶴川の支川（仲間川）であり、流域面積も小さいことなどから、土地利用面積比率計測時の誤差や土地利用データ調査年度が古いことなどによると推察される.

5．3．2．7．境川地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-7 に、境川地域 3 地点（地点 25、26、27）における土地利用と水質との関係を示した。図中の数字は地点番号を、矢印は流下の方向を示している。

河川水中の塩化物イオン濃度は、最下流部（地点 25）が最も高く、上流 2 地点の 5 ～ 4 倍の濃度を示していた。この流域では畑地の比率が 20 ～ 40%と他の地域に比べて高く、現地調査において斜面部を中心に茶畑が広く分布していることが確認された。また、土地利用と水質との間に直線的な関係が認められるものは、畑地と硝酸性窒素（図 12-7-d）及び林地と硝酸性窒素（図12-7-f）のみであった。

また、これらの関係についても、図中に矢印で示したように、流下に伴う一定方向の変化ではなく、中間の地点 27 から下流の地点 25 で逆行する関係が認められた、この区間では大きな支流の合流などは見られなかったことから、この区間に湧出する地下水や河川への排水などの影響が地点 27 の上流と下流で大きく異なっているものと推察される。

5．3．2．8．秋山川地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-8 に、秋山川地域 4 地点（地点 21、29、30、31）における土地利用と水質との関係を示した。図中の直線は一次回帰直線を示している。

秋山川河川水の溶存物質濃度は全体的に低く、窒素同位体比も降水に近い値を示していた。土地利用と各水質との関係については、全体とほぼ同様の傾向を示していた。なお、林地と窒素同位体比との関係図（図 12-8- i）において、窒素同位体比が一番低い地点で、林地比率が最も低くなっていたが、この地点（地点 31）では、解析に用いた土地利用分類図で流域面積の約 32%が裸地・原野に区分されていたため、相対的に林地率が低下し、全体的な分布から外れたところにプロットされたことが判明した。

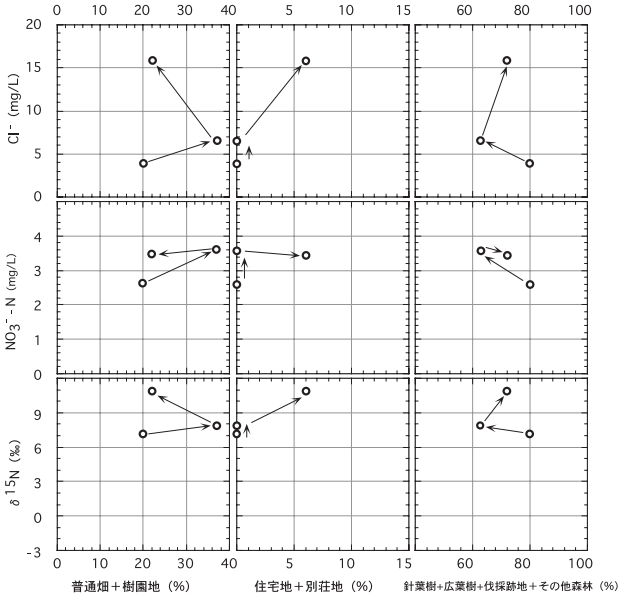

図 12-7　境川地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係 (→は流下方向)

Fig.12-7 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Sakai-gawa area

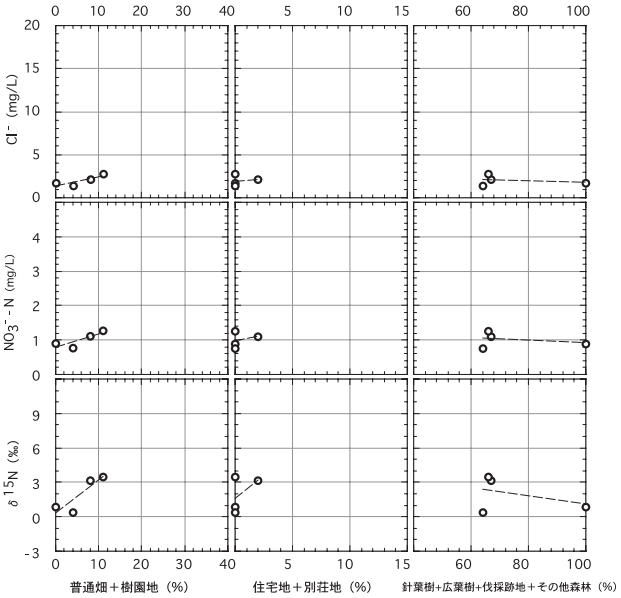

図 12-8　秋山川地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係

Fig.12-8 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Akiyama-gawa area

5．3．2．9．相模湖地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-9 に、相模湖地域 9 地点（地点 26、32、33、34、43、44、54、46、47）における土地利用と水質との関係を示した。図中の直線は一次回帰直線を示している。

この地域では、採水地点の約半分が相模湖と相模湖と津久井湖の中間にある沼本ダムにおける湖沼水である。このため、これらの地点では、土地利用面積比率がほとんど同じ値となっている。

土地利用比率と水質との関係では、硝酸性窒素濃度と各土地利用比率との関係が逆の傾向を示していた。このことは、塩化物イオン濃度は他の地点と同様の傾向を示していることや、湖沼水の窒素同位体比が、相対的に高いことなどから、湖沼部で表流水が滞留することによって、硝酸性窒素濃度に変化が生じたのではないかと推察された。

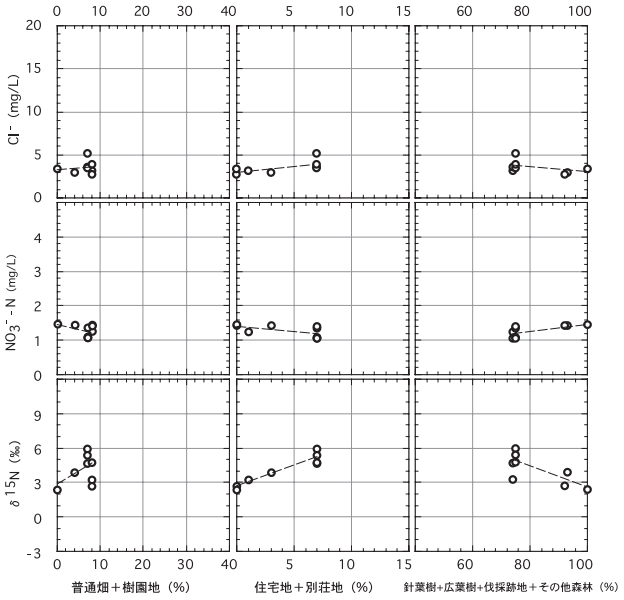

図 12-9　相模湖地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係
Fig.12-9 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Lake Sagami area

5．3．2．10．道志川地域における土地利用面積比率と河川水の水質の関係

図 12-10 に、道志川地域 6 地点（地点 36 ～ 41）における土地利用と水質との関係を示した。また、図中の直線は一次回帰直線を示している。

この地域は源流域に近いことから、全体的に林地面積比率が 90%以上と高く、各最上流採水地点では、それぞれ林地が 100%を示した。それに対し畑地や住宅地面積比率は 0 ～ 5%と極めて低く、住宅地はメッシュとしてはほとんど計上されなかった。

土地利用と水質との間には、全体と同様の傾向が認められたが、塩化物イオン濃度はほとんど変化が見られなかった。また林地率 100%の 2 流域では、窒素同位体比が 0‰以下の値を示した。

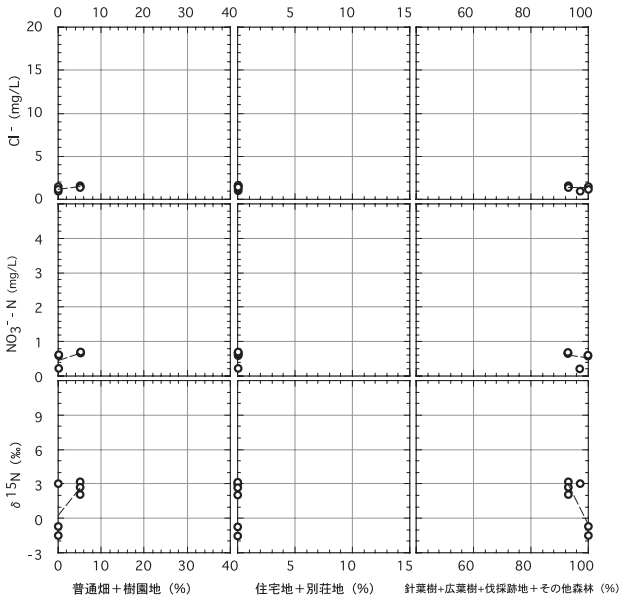

図 12-10　道志川地域における土地利用面積比率と塩化物イオン、硝酸性窒素、窒素同位体比との関係
Fig.12-10 Relationship between rate of land use and chloride ion, nitrate nitrogen, stable isotope of nitrogen in Doshi-gawa area

6．考察

前章の調査結果から、相模湖・津久井湖流域における河川水・湖沼水中の溶存物質濃度は、流域全体では流下するに従って上昇する傾向が見られるが、地域ごとに濃度差や傾向に違いがあることが明らかとなった。また、河川流量の人為的な増減によって負荷量が大きく変化することや、降水中に含まれる窒素酸化物の量が林外雨と林内雨で大きく異なること、さらには、流域土地利用面積比率と河川水の水質との間に、明瞭な関係の認められる地域と認められない地域があることなど、相模湖・津久井湖流域における河川水の硝酸性窒素の起源を解明するためには、幾つかの要素について、それぞれ検討する必要があると考えられた。

そこで、本章では、これまで得られたデータをもとに、6.1 章において河川及び湖沼水中の各種溶存成分濃度の相互関係、6.2 章において降水による窒素負荷量の算出、6.3 章で主に窒素酸化物に着目した降水と河川水の比較、及び 6.4 章において地域別窒素収支解析を行い、相模湖・津久井湖流域における河川水への硝酸性窒素排出源についての考察を行った。

6．1. 河川水中の溶存成分の比較

一般的に、河川・湖沼水の水質を形成する機構としては、溶存物質のうち、陽イオン成分は地質による要因が大きく、反対に陰イオン成分は降水や排水など人為的要因が大きことが知られている。そこで、この章では、各イオン成分間及び、硝酸性窒素濃度と窒素安定同位体比との関係について考察を行った。

6．1. 1. 各イオン成分間の関係

硝酸イオン濃度と他のイオン濃度との相関を見たところ、ナトリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオン、T－Nとの間に強い正の相関が見られた。

全調査地点での硝酸イオンと塩化物イオン濃度の関係を見たところ、両者の間には正の相関が認められた(図13-a)。図中の実線は一次回帰直線を示し、図中の数字は採水地点番号である。回帰直線より上側(塩化物イオン濃度が卓越)に大きくずれている地点として、地点8、9、25が挙げられ、回帰直線より下側(硝酸イオンが卓越)に大きくずれている地点として、地点11、26、27が挙げられる。これらの地点では、それぞれ局地的な影響により、水質が大きく変化していると考えられる。

図13-bに電気伝導度と硝酸イオン濃度との関係を示した。電気伝導度は塩化物イオン濃度と相関が高いため、塩化物イオン濃度と相関のある硝酸イオン濃度との間にも、見かけ上の相関関係が見られたものと推察される。

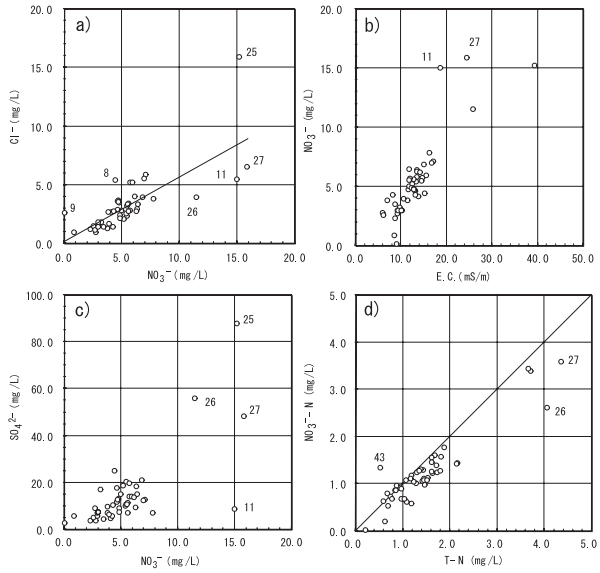

図13　各種溶存成分の関係(a：硝酸イオン濃度－塩化物イオン濃度、b：電気伝導度－硝酸イオン濃度、c：硝酸イオン濃度－硫酸イオン濃度、d：全窒素濃度－硝酸性窒素濃度)

Fig.13 Relationship between concentration of nitrate ion and chloride ion (a), electric conductivity (b), concentration of nitrate ion and sulfuric ion (c), concentration of total nitrogen and nitrate nitrogen (d)

また、図13-cに硝酸イオンと硫酸イオンの関係を示した。近年の研究では、窒素飽和(6.3参照)が極度に進行した流域からの流出水では、硝酸イオン濃度と硫酸イオン濃度が逆相関を示す事例(松田・川上、2002)や、地下水中における脱窒過程により、硫酸イオンが増加する可能性(田瀬・井岡、2002)についてなどの報告がある。

しかし、本調査においては、硝酸イオンと硫酸イオンとの間には正の相関があり、しかも硫酸イオン濃度が高い3地点はいずれも硝酸イオン濃度の高い境川地域における採水地点であったことから、この境川流域における地域的な影響であることが推察された。

図13-dに全窒素濃度と硝酸性窒素の関係を示した。図中の直線はT-N濃度＝NO_3^--N濃度の関係を示している。図からほとんどがこの直線付近にプロットされたことから、全窒素成分の多くが硝酸性窒素であることが明らかとなった。また、直線から大きく外れた地点としては、境川地域(地点26,27)や、境川が相模川に合流した直後の地点(地点43)などがあり、境川地域などでは、アンモニウムイオンが相対的に高く検出されていた。

硝酸イオンと塩化物イオンの間に正の相関が見られたことは、硝酸イオンを増加させる原因として、塩化物イオンを同時に増加させる生活排水などの影響が大きいことを示唆している。しかし、土地利用がほぼ100%林地であり、生活排水の影響が考えにくい源流域からの河川水においても、1mg/L程度の硝酸性窒素が流出していることから、生活排水以外のバックグラウンド的な窒素負荷要因があることがあわせて推察された。

6．1. 2. 硝酸性窒素濃度と窒素安定同位体比の比較

神奈川県大和市や神奈川県における地下水中の硝酸性窒素汚染に関する研究では、硝酸性窒素濃度と窒素同位体比の関係から、汚染原因について推定した結果が報告されている。しかしこれらの研究はどちらも地下水についての研究であり、河川水と比較すると硝酸性窒素濃度が1桁高い値となっている。

本調査地点における硝酸性窒素濃度と窒素同位体比の関係を図14に示した。図中の直線は一次回帰直線を示し、数字は採水地点番号を示している。硝酸性窒素濃度と窒素同位体比は正の相関関係にあり、河川水中の硝酸性窒素濃度の上昇とともに、有機肥料や下水処理水などといった、農業活動や生活排水などを示唆する窒素同位体比に近づくことが明らかとなった。また、図中の黒丸は、各支流における最上流採水地点を示している。

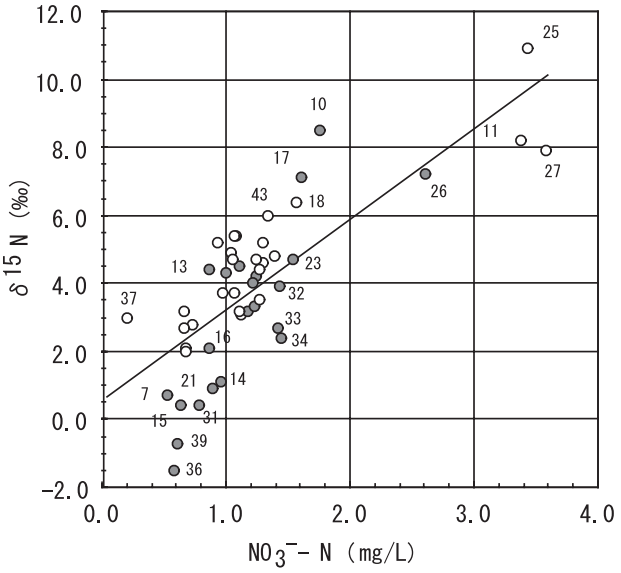

図 14　硝酸性窒素濃度と窒素同位体比との関係 (黒丸は、各支流における最上流採水地点を示す)
Fig.14 Relationship between concentration of nitrate nitrogen and stable isotope of nitrogen

最上流部の地点のプロットは、図の左下及び中央付近に多く分布し、特に窒素同位体比が＋ 2‰未満の地点は全て最上流部の地点で占められていた。河川水中の窒素同位体比が低い地域は、道志川、笹子川、秋山川、朝日川など、流域南側及び北西側の源流部に主に分布しており、これらの地域では他に窒素汚染原因が考えられないことや、本調査で測定された降水中の窒素同位体比(林外雨平均－0.2‰、林内雨平均＋3.8‰)の範囲内であることなどから、降水による窒素負荷によるものと推察された。

6．2．降水による窒素負荷量の算出

降水中に含まれる窒素化合物については、酸性雨問題の立場から様々な調査や研究が行われており、日本を含むアジア地域を対象とした、窒素化合物を含む酸性物質についての長距離輸送モデルに基づく比較研究や検証などが行われている(電力中央研究所、2001 など)。

一方、流域スケールにおける、降水による地表面への窒素化合物の入力量を算定するためには、降水中の酸性物質量の分布とともに、樹冠における溶出や吸着などの影響についても考慮する必要があり、林内雨及び樹幹流の広域観測ネットワークが不可欠である。

しかし、現時点では、幾つかの試験流域で観測が行われているだけであり、人間活動エリアを含む本調査地域のような広域での観測は行われておらず、林地や林地以外といった広域での土地利用を考慮した上での降水の影響を定量的に評価することが必要であると考えられる。

そこで、本章では、本調査で得られた降水の観測データをもとに、降水による流域への全窒素負荷量の算定を試みた。降水による全窒素負荷量の算出には、降水量と降水中の全窒素濃度を時間的・地域的に明らかにする必要がある。本解析では、5.2.2 章で得られた林外雨量と林内雨量の値をもとに平均値(表 2)を算出し、林外雨及び林内雨の水質は、降水量によらず年間を通して一定であると仮定した。

各流域への降水量は、5.2.3 章で算出した流域平均降水量を用い、各流域における林地(針葉樹＋広葉樹＋伐採跡地＋その他森林)への降水量は、表 2 に示した林外雨(津久井)に対する林内雨(顕教寺)への降水量の比率を乗じて算出した。

これらのデータをもとに、各流域ごとに林外地降水量と林外雨の水質から林外雨負荷量を、そして林地降水量と林内雨の全窒素濃度から林内雨負荷量をそれぞれ算出し、両者の合計として流域合計負荷量(kg/day)とフラックス(単位面積負荷量 : g・ha^{-1}・day^{-1})を算出し、計算結果を表 6 に示した。また、図 15- a に各流域ごとの降水による全窒素負荷量を、林地分及び林外地分に分けて棒グラフで示した。なお流域面積の違いから、多くの流域では全窒素負荷量が 1000 kg/day 以下であったことから、図 15- a においてハッチがけで示した 100 kg/day 以下の部分を拡大したものを、図 15- b に示した。

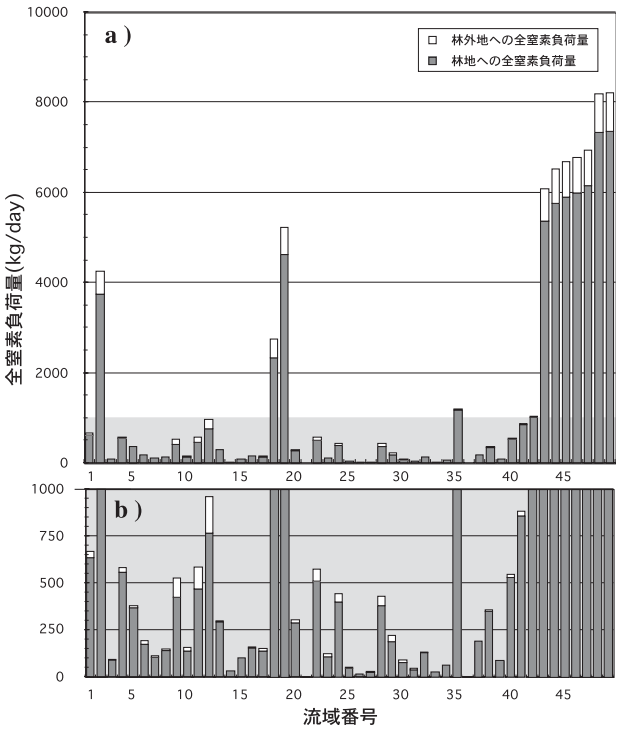

図 15　流域別の降水による全窒素負荷量
Fig.15 Total nitrogen load of precipitation

表６　降水及び河川水の全窒素負荷量及びフラックス
Table 6　Flux of total nitrogen loads in river water

流域番号	流域面積 km²	降水による全窒素負荷量（input）林地への全窒素負荷量 林地面積 km²	林地平均降水量 mm	林床到達降水量 mm	林地全窒素負荷量 kg/day	林地全窒素フラックス g・ha⁻¹・day⁻¹	林外地への全窒素負荷量 林外地面積 km²	林外地平均降水量 mm	林外地全窒素負荷量 kg/day	林外地全窒素フラックス g・ha⁻¹・day⁻¹	流域への全窒素負荷量 流域全窒素負荷量 kg/day	流域平均全窒素フラックス g・ha⁻¹・day⁻¹	河川水による全窒素負荷量（output）河川流量 m³/sec	全窒素濃度 mg/L	河川水全窒素負荷量 kg/day	input/output	備考	降水中の全窒素負荷量－林地吸収分 流域負荷量 kg/day	フラックス g・ha⁻¹・day⁻¹
RB01	111.8	97.43	1427	1017	634.8	65.1	14.41	1485	35.6	24.7	670.3	59.9	4.11	0.75	266.3	2.52		314.9	28.2
RB02	591.7	435.57	1882	1342	3742.9	85.9	156.10	1986	515.7	33.0	4258.6	72.0	12.31	1.43	1521	2.80		2162.6	36.6
RB03	14.1	13.62	1490	1062	92.7	68.0	0.52	1534	1.3	25.5	94.0	66.5	0.23	1.31	28.0	3.36		42.1	29.8
RB04	90.6	81.20	1506	1074	558.4	68.8	9.43	1543	24.2	25.7	582.6	64.3	3.22	1.08	300.5	1.94		269.9	29.8
RB05	57.6	52.91	1529	1090	369.5	69.8	4.71	1537	12.1	25.6	381.5	66.2	2.20	1.54	292.7	1.30		174.6	30.3
RB06	27.8	21.22	1796	1281	174.0	82.0	6.55	1777	19.4	29.6	193.4	69.7	0.38	1.63	53.5	3.61		95.9	34.5
RB07	15.5	12.57	1826	1302	104.8	83.4	2.88	1812	8.7	30.1	113.5	73.4	0.37	0.69	22.1	5.14		54.8	35.5
RB08	21.7	18.60	1655	1180	140.6	75.6	3.14	1683	8.8	28.0	149.4	68.7	0.69	1.29	76.9	1.94		70.7	32.5
RB09	64.4	38.76	2400	1711	424.8	109.6	25.67	2395	102.3	39.8	527.0	81.8	0.21	0.21	3.8	138.7	※	289.2	44.9
RB10	19.4	14.14	2158	1539	139.4	98.6	5.24	2171	18.9	36.1	158.3	81.7	1.13	1.88	183.5	0.86	※	80.3	41.4
RB11	72.6	43.22	2385	1700	470.7	108.9	29.34	2380	116.1	39.6	586.8	80.9	0.14	3.71	44.9	13.07	※	323.2	44.5
RB12	122.3	72.29	2326	1658	767.7	106.2	50.03	2323	193.3	38.6	961.0	78.6	0.33	0.94	26.8	35.86	※	531.1	43.4
RB13	33.3	31.69	2034	1450	294.4	92.9	1.57	1878	4.9	31.2	299.3	90.0	1.00	0.84	72.6	4.12		134.4	40.4
RB14	5.0	4.71	1491	1063	32.1	68.1	0.26	1508	0.7	25.1	32.8	65.8	0.28	0.88	21.3	1.54		14.8	29.7
RB15	16.2	15.98	1412	1007	103.0	64.5	0.26	1459	0.6	24.3	103.6	63.8	0.81	0.59	41.3	2.51		46.0	28.3
RB16	26.2	23.83	1438	1025	156.5	65.6	2.36	1478	5.8	24.6	162.3	62.0	1.34	0.86	99.6	1.63		74.6	28.5
RB17	21.7	17.29	1773	1264	140.0	81.0	4.45	1817	13.5	30.2	153.4	70.6	4.59	1.69	670.2	0.23	※	75.0	34.5
RB18	365.9	248.04	2065	1472	2339.1	94.3	117.86	2086	408.9	34.7	2748.0	75.1	5.98	1.82	940.3	2.92	※	1438.1	39.3
RB19	754.3	566.01	1790	1276	4626.4	81.7	188.32	1914	599.7	31.8	5226.1	69.3	6.04	1.24	647.1	8.08	※	2635.3	34.9
RB20	39.3	33.26	1899	1354	288.4	86.7	6.02	1844	18.5	30.7	306.9	78.1	1.17	1.46	147.6	2.08		145.4	37.0
RB21	0.3	0.26	1757	1252	2.1	80.2	0	0	0	0	2.1	80.2	0.01	0.97	0.8	2.63		0.9	34.4
RB22	97.2	72.29	1545	1101	509.9	70.5	24.88	1582	65.5	26.3	575.4	59.2	2.04	1.39	245.0	2.35		289.9	29.8
RB23	21.5	14.93	1594	1137	108.7	72.8	6.55	1602	17.5	26.7	126.2	58.7	0.41	1.62	57.4	2.20		65.3	30.4
RB24	74.1	57.10	1531	1092	399.3	69.9	17.02	1569	44.4	26.1	443.7	59.9	1.70	1.18	173.3	2.56		220.1	29.7
RB25	8.4	6.02	1697	1210	46.7	77.5	2.36	1694	6.6	28.2	53.3	63.6	0.12	3.67	38.1	1.40		27.2	32.5
RB26	2.6	2.10	1690	1205	16.2	77.2	0.52	1675	1.5	27.9	17.6	67.3	0.05	4.06	17.5	1.01		8.6	32.8
RB27	5.0	3.14	1697	1210	24.4	77.5	1.83	1690	5.2	28.1	29.5	59.3	0.08	4.35	30.1	0.98		15.9	32.0
RB28	62.9	46.62	1789	1275	380.8	81.7	16.24	1795	48.5	29.9	429.3	68.3	2.42	1.74	363.8	1.18	※	216.1	34.4
RB29	34.6	23.31	1772	1263	188.6	80.9	11.26	1776	33.3	29.5	221.9	64.2	1.24	1.17	125.3	1.77		116.2	33.6
RB30	14.7	9.69	1751	1248	77.5	80.0	4.98	1755	14.5	29.2	92.0	62.7	0.48	1.35	56.0	1.64		48.6	33.1
RB31	7.3	4.71	1802	1285	38.8	82.3	2.62	1798	7.8	29.9	46.6	63.6	0.22	0.68	12.9	3.62		24.9	34.0
RB32	17.3	15.98	1780	1269	129.9	81.3	1.31	1778	3.9	29.6	133.7	77.4	0.51	2.16	95.2	1.40		61.0	35.3
RB33	3.4	3.14	1907	1360	27.4	87.1	0.26	1909	0.8	31.8	28.2	82.8	0.05	2.14	9.2	3.07		12.9	37.9
RB34	7.3	7.33	1915	1366	64.1	87.5	0	0	0	0	64.1	87.5	0.16	1.62	22.4	2.86		28.2	38.5
RB35	143.0	132.27	1939	1382	1171.1	88.5	10.74	1904	34.0	31.7	1205.1	84.3	0.68	1.47	86.4	13.95	※	549.3	38.4
RB36	0.3	0.26	2209	1575	2.6	100.9	0	0	0	0	2.6	100.9	0.03	1.19	3.1	0.85		1.2	45.8
RB37	20.4	19.91	2094	1493	190.3	95.6	0.52	2058	1.8	34.2	192.1	94.0	1.29	0.63	70.2	2.74		85.5	41.9
RB38	40.3	37.45	2048	1460	350.2	93.5	2.88	1967	9.4	32.7	359.7	89.2	3.79	1.04	340.6	1.06		163.5	40.5
RB39	10.0	9.95	1978	1410	89.9	90.3	0	0	0	0	89.9	90.3	0.47	1.09	44.3	2.03		39.6	39.8
RB40	62.9	58.15	2003	1428	531.8	91.5	4.71	1933	15.2	32.1	547.0	87.0	3.77	0.97	316.0	1.73		249.2	39.6
RB41	103.5	96.12	1958	1396	859.4	89.4	7.33	1912	23.3	31.8	882.7	85.3	4.68	0.78	315.4	2.80		401.5	38.8
RB42	122.6	113.67	1943	1386	1008.8	88.7	8.91	1902	28.2	31.6	1037.0	84.6	3.34	1.04	300.1	3.46	※	472.0	38.5
RB43	897.1	668.68	1759	1254	5370.2	80.3	228.39	1862	707.3	31.0	6077.5	67.7		0.53			※	3070.2	34.2
RB44	965.2	717.92	1761	1255	5772.5	80.4	247.25	1857	763.7	30.9	6536.2	67.7		1.42			※	3303.6	34.2
RB45	985.1	735.21	1761	1256	5913.5	80.4	249.87	1856	771.6	30.9	6685.1	67.9		1.45			※	3373.5	34.2
RB46	999.7	745.42	1763	1257	6002.8	80.5	254.32	1858	785.9	30.9	6788.7	67.9		1.51			※	3427.2	34.3
RB47	1021.7	761.93	1767	1260	6148.7	80.7	259.82	1860	803.9	30.9	6952.5	68.0		1.71			※	3509.3	34.3
RB48	1173.4	896.81	1793	1278	7342.9	81.9	276.59	1863	857.3	31.0	8200.2	69.9		1.80			※	4088.2	34.8
RB49	1177.3	898.39	1793	1279	7356.7	81.9	278.94	1864	864.8	31.0	8221.6	69.8		1.62			※	4101.8	34.8
Average	232.3	176.6	1820	1298	1451.6	83.1	60.41	1823	175.0	28.0	1626.6	73.4	1.76	1.47	194.8	※2.29		754.0	※34.4

※：人為的な取水・排水の影響のため、平均値算出からは除外

表２に示した降水の観測値より、林内雨の量は樹冠に遮られることで、林外雨の約 0.7 倍と少なくなっている。その一方で林内雨に含まれる全窒素濃度は林外雨の約４倍であったことから、林地と林外地の面積比率が 1:1 の場合、林地への全窒素負荷量は林外地の約 2.8 倍と見積もられる。実際には各流域中の 60 ～ 100%を林地が占めていることから、降水による全窒素負荷量は、構造的に林外地に比べて林地の方が高くなるといえる。

調査地点中、最も下流に位置する地点 49（津久井湖湖央部）を末端とする流域は、調査対象とする地域全体をその流域内に含むことから、流域 49 における負荷量は本地域の合計値、フラックスは本地域の全体の平均値と見なすことが出来る。これによると、降水による相模湖・津久井湖流域全体への全窒素負荷量は 8221.6kg/day となり、そのうちの 89%が林地への降水によるものと計算された。また、単位面積あたりの負荷量であるフラックスは、林地が 81.8 g・ha⁻¹・day⁻¹、林外地が 31.0 g・ha⁻¹・ day⁻¹ となり、林地へのフラックスは林外地の 2.6 倍となった。

本調査で得られた全窒素フラックスの値は、林外雨については神奈川県における県内 23 地点の平均値（31.6 g・ha⁻¹・day⁻¹:1991 ～ 1992 年度の平均値）や、大河内ら（1995）による丹沢大山における林外雨（27.0g・ha⁻¹・day⁻¹:1991 ～ 1993 年の平均値）とほぼ同じ値であった。また林内雨については、大河内ら（前出）による丹沢大山における林内雨（スギ；66.9 g・ha⁻¹・day⁻¹:1991 ～ 1993 年の平均、モミ；84.0 g・ha⁻¹・day⁻¹:1992 ～ 1993 年の平均）と同程度の結果であり、小林ら（1995）による六甲山山中における林内雨（スギ；57.6 g・ha⁻¹・day⁻¹、ヒノキ；41.3 g・ha⁻¹・day⁻¹、コナラ；30.8 g・ha⁻¹・day⁻¹）の 1.4 ～ 2.7 倍という結果であった。

林外雨については、本調査結果と過去の他の調査について、ほぼ同様の結果が得られたのに対し、林内雨については、他の調査結果を含めて林内雨フラックスにばらつきがみられた。この理由として、調査地域の違いによ

る林外雨フラックスの違いや、樹種による違いなどの要因が考えられることから、今後はより詳細な観測に基づく算定が必要であると考えられる。

6．3．降水と河川水の比較

酸性雨による陸地への影響として、古くから湖沼水や土壌の酸性化の問題が指摘されているが、近年、降水中に含まれる窒素酸化物に着目した、『窒素飽和（現象）』という問題が指摘され始めている。窒素飽和とは、通常の状態では、植物の生育に必要な栄養源としての窒素分が不足しているため、ほとんど河川水に窒素成分が流出することの無い森林や山地などの水源地域において、降水などによる窒素分の供給が過剰となり、森林が窒素分を完全に吸収することが出来なくなり、地下水や河川水へ窒素成分が流出している状態を指している（Aber *et. al*.,1989など）。

本調査地域においても、流域内の100%近くが林地で占められている多くの流域から、予備調査の結果も参考にすると、年間を通して窒素分が河川へ流出していると考えられ、窒素飽和現象が生じている可能性が考えられる。

森林が窒素飽和の状態に達すると、これまで制限因子として働いていた窒素分が大量にあることから、当初は成長が促進されるが、その状態が続くと、やがて森林は窒素分を全く吸収しなくなり、次第に森林が衰退していくといわれている。これら森林や山地源流域における系外からの主な窒素の供給源として、降水中に含まれる窒素酸化物が指摘されており、特に大都市圏に近い山地では、窒素酸化物による酸性雨の影響が大きいと言われている。

6.2章の考察の結果、降水によって流域にもたらされる全窒素負荷量のうち、89%が林地への降水による負荷であることが明らかとなった。このことは、流域中に占める林地の面積が多いほど、降水によって流域内にもたらされる全窒素負荷量が増加することを示唆している。一方、流域の土地利用と水質との関係について示した5.3.2章の結果から、流域内の林地面積比率が上昇すると河川水中の窒素濃度が低下する傾向が明らかにされている。

仮に森林が窒素分を吸収する機能が無かった場合、流域から排出される河川水中の窒素濃度は、林地面積比率に比例して高くなるはずである。しかし、実際には、林地面積比率と負の相関がみられることから、林地によって窒素分が消費され濃度が低下していることが推察される。

そこで、本章では、降水によって系内に入ってくる全窒素負荷量と、河川水として系外に排出される全窒素負荷量を比較し、林地による窒素吸収量について考察を行った。

図16は、河川水中の全窒素負荷量の値が得られた42地点における降水と河川水中の全窒素負荷量の関係をプロットした図である。図15同様、流域面積が大きく異なる地点が含まれるため、図16-bは図16-aの原点付近部分（図16-aハッチがけ部分）を拡大したものである。また、図中の数字は流域番号を、実線は全プロットによる一次回帰直線を、破線は原点を通る傾き1の直線である。この図からプロットのほとんどが破線の右側に位置し、河川水として系外に排出される数倍の全窒素量が、降水として流域内に負荷されていることが示された。

河川水によって流域から排出される全窒素負荷量は、人為的な河川水の取水や排水などによって大きく異なってくる。図16において、地点番号を付けて白丸で示した地点は、山中湖や忍野八海湧水群からの流出や、導水路からの取水・排水等の影響を受ける地点9, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 28, 35, 42である。これらの地点の多くは、図16において回帰直線から大きくはずれた場所にプロットされた。

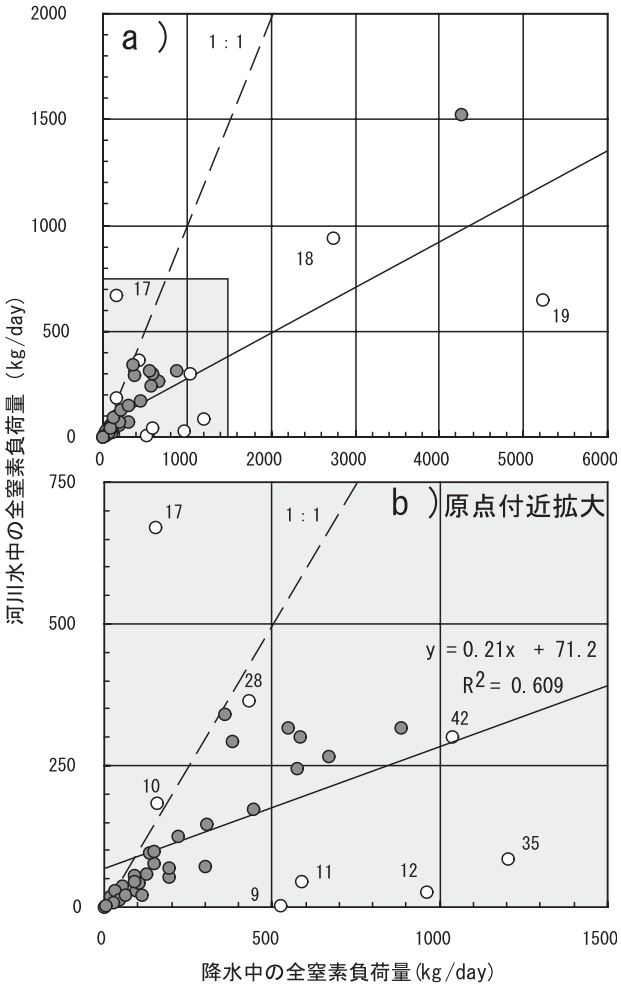

図16　降水中の全窒素負荷量と河川水中の全窒素負荷量との関係（○は特定の影響を受けている地点）
Fig.16　Relationship between total nitrogen loads in river water and precipitation

上記10地点と、河川流量が測定されなかった湖沼水の地点43～49を除外した、残り32地点において、流域内に降水として入ってきた全窒素負荷量が、河川水として流域外に排出される全窒素負荷量の何倍かを示す、降水による負荷量を河川水の負荷量で除したinput/outrut比の平均値を算出した。その結果、流域番号26,36以外は全て1より大きく、最小は流域番号36の0.85、最大は流域番号7の5.14、32流域の平均は2.29となり、降水による窒素負荷は河川水として流出する負荷量の約2倍と算出された(表6)。

実際には降水による負荷以外にも、生活排水など人為的な負荷が考えられることや、降雨時の飽和地表流や水田や河川・湖沼水面上への降水など、降水が土壌水や地下水を経ずに直接河川に流出する流出機構が存在するなど、流域全体のデータを用いて林地における窒素吸収量を算出することは困難であると考えられる。そこで、人為的な影響が少なく、水田や湖沼などの影響も少ないと考えられる、源流域における降水と河川水の窒素負荷量の関係から、林地における窒素吸収率について検討を行った。

図17-aは、各支流の最上流採水地点を末端とする16流域における降水中の全窒素負荷量と河川水中の全窒素負荷量の関係を示した図である。図中の実線は一次回帰直線を示し、両者の関係は原点付近を通り、傾き0.42の直線でよく近似された。

しかし、図17-aにプロットされた16流域においても、林地の面積比率は64～100%であり、各支流の最上流採水地点であっても、流域内に存在する畑地や住宅地の影響が含まれていることが考えられる。

そこで、林地の土地利用面積比率が100%である4流域における、降水と河川水の関係を図17-bに示した。図17-bにプロットされた4流域は、図20-aにおいて黒丸で示された地点である。この結果、図17-bにおけるプロットは、図17-aとほぼ同じ傾き0.44の直線で近似された。この結果は、林地へ降水としてinputされる全窒素負荷量のうち、56%が森林に吸収され、残りの44%は、河川に流出していることを示しており、窒素飽和現象が起きていることが推察された。

しかし、一方で、図17-aにおいて、流域番号31や33、7など、河川への流出率が他の流域に比べて低い、すなわち、回帰直線よりも下にプロットされている流域も幾つか見られることから、森林や流域によっては、より高い窒素吸収率を示し、窒素飽和に達していない流域が存在する可能性も併せて示された。

そこで、これらの推察結果を踏まえ、土地利用が林地

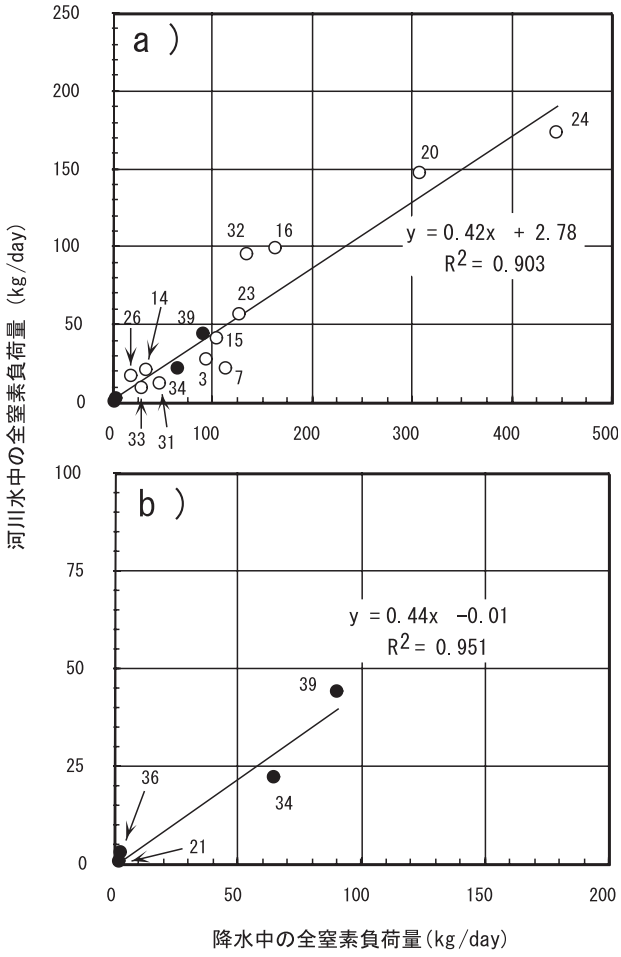

図17　降水中の全窒素負荷量と河川水中の全窒素負荷量との関係 (a) 各支流最上流に位置する16流域、(b) 土地利用が林地100%の4流域 (●)

Fig.17 Relationship between total nitrogen loads in river water and precipitation in 16 basins located in most upper sampling point of each river(a), in 4 basins where land use is 100% by forest(b)

と区分されたグリッドでは、林内雨による全窒素負荷量のうち、56%が林地グリッド内で吸収されると仮定した場合の全窒素負荷量を「降水中の全窒素負荷量－林地吸収分」として、河川水中の全窒素負荷量と比較したものを図18に示した。図18-aと図18-bの関係や図中の記号については、図16と同様である。さらに表6に、林地吸収後の全窒素負荷量と、その値を各流域面積で除したフラックスの値を示した。

この図から、降水によるinputから林地における吸収分を減算して求めた負荷量と、流域からのoutputとなる河川水中の全窒素負荷量の関係は、主に人為的な取水・排水の影響を受けている、図中に白丸で示した10流域が1：1の関係を示す破線上から大きく外れたことにより、回帰直線の傾きは0.42となったが、それらを除くと1：1の破線の近傍に、多くの流域が分布しており、河川水中の全窒素負荷量の多くの部分は、降水によって流域内

にもたらされた全窒素負荷を、林地によって吸収しきれずに排出された分で占めていることが推察された。

また、降水による窒素負荷量から林地吸収分を差し引いた全窒素フラックスは、他の排出源が無いと仮定した場合の面源原単位と見ることが出来る。相模川水質汚濁対策研究会(1991)による平成３年の報告書では、相模川流域における全窒素の面源原単位として、23.1～78.2 g・ha^{-1}・day^{-1}を用いており、本調査結果における値(最少 28.2、最大 45.8、平均 34.4 g・ha^{-1}・day^{-1})は、これらとほぼ同程度の値であった。

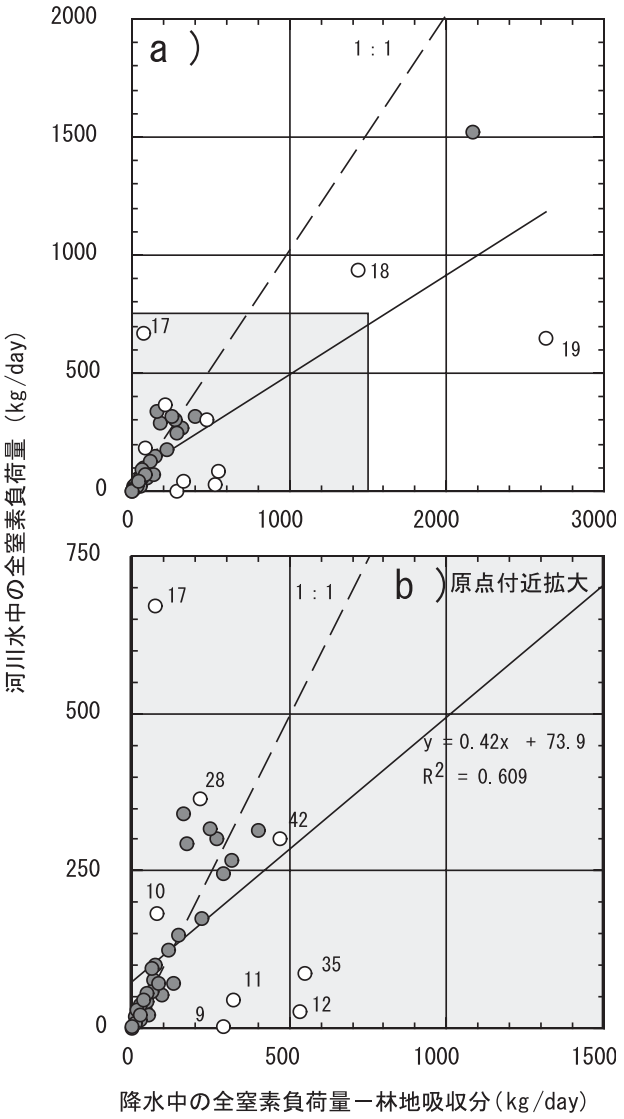

図 18　降水中の全窒素負荷量－林地吸収分と河川水中の全窒素負荷量との関係 (○印については、図 16 参照)

Fig.18　Relationship between total nitrogen loads of precipitation for an absorbed part by forest and total nitrogen loads in river water

６．４．流域別窒素収支解析

６．４．1．窒素収支解析

流域窒素収支において、負荷される主なinputの項目は、これまでの考察で示された降水による窒素負荷の他、人為的な窒素負荷として、従来の調査などで指摘されているような、生活排水や産業、畜産などが挙げられる。これに対し、流出する主なoutputの項目は、河川水や地下水による流出の他、6.3. 章で示された林地における吸収や、農地における消費、湖沼や湿地など水域における窒素の消費や脱窒などが挙げられる。

本調査ではこれらのうち、降水(input)、河川水(output)及び林地における吸収(output)について、調査及び推定を行い、降水による負荷と林地における吸収率で、河川水中の窒素負荷量の多くの部分を説明できるものと考察した。

窒素同位体比から検討した場合においても、河川水中の窒素同位体比の平均値が＋3.95‰であったのに対し、林内雨の平均値が＋3.8‰とほぼ同じ値を示していたことから、この考察に大きな矛盾はないものと推察される。

6.3. 章の考察で示された、降水による入力としての負荷量、河川水としての出力としての負荷量及び林地における窒素吸収量を用いて、流域窒素収支を算定した場合、その差として表される項目は、生活排水や産業、畜産などによる人為的な窒素負荷や、農地や水域における窒素消費や脱窒などによる浄化作用とみなすことができる。また、この他に人為的な取水・排水がある場合、流域窒素負荷量収支に大きな影響を与えることが、これまでの考察結果から明らかにされている。

図 19 は、流域ごとに図 18 の縦軸であるoutputとなる河川水中の全窒素負荷量と、図 18 の横軸であるinputとなる降水による全窒素負荷量から、林地における吸収分を引いた量との差の窒素量をフラックスで表したグラフである。この値は、流域窒素収支を表しており、フラックスがプラスの流域では、生活排水や産業、畜産など何らかの人為的な窒素負荷があると推測され、反対にマイナスの流域では、農地や水域における窒素消費や脱窒などによる浄化作用が生じていることが推察される。

なお、図中で白抜きで示された棒グラフは、河川水の取水・排水の影響があるため、対象地域から除外された地点(表５備考欄※印)を示している。

図中で最大のフラックスを示した流域は、河川水の取水・排水の影響により対象地域から除外された地点 17 であり、他の地点よりほぼ一桁大きい値となった。この地点では、比流量が 0.211 m^3/ sec / km^2 あり、平均の 10 倍近いことから、河口湖水の流入による影響によるものと考えられた。

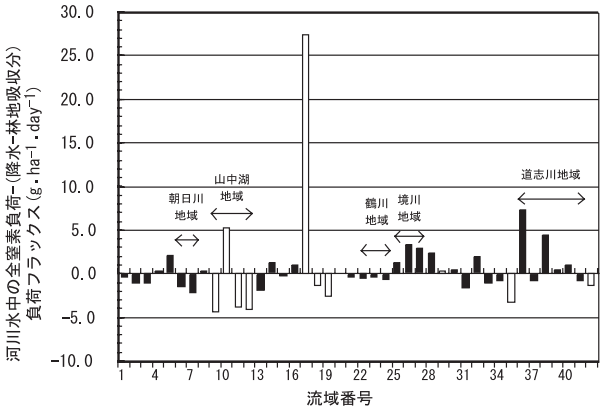

図 19　河川水から降水の負荷を差し引いた全窒素負荷フラックス (白抜きの棒グラフは河川水の取水・排水の影響があるため、対象地域から除外された地点)

Fig.19　Flux of total nitrogen loads in river water deducting total nitrogen loading dose in precipitation after removal of absorbed part by the forest

図 19 から、河川水中の窒素濃度や窒素同位体比が高く、流域内における人為的な窒素負荷が推察された境川流域では、3 g・ha^{-1}・day^{-1} 程度の降水以外の窒素負荷フラックスが算出された。一方、朝日川地域や鶴川地域では、地域内の全地点がマイナスの値を示していた。

なお、道志川地域では、地点 36、38 で大きな正のフラックスが示されたが、この 2 地点では、河川流量が流域面積と比較して大きく(比流量は地点 36 が 0.115、地点 38 が 0.094、42 調査地点の平均が 0.037 m^3/sec/km^2)、フラックスの算出時に分子となる負荷量に対して分母となる流域面積が小さかったため、大きなフラックスが算出されたものと考えられた。また、山中湖地域におけるフラックスが大きい地点については、この地点が忍野八海湧水群からの流出水であることから、この地点に特有な現象であると推察された。

6．4．2．流域別窒素収支解析

6.4.1. 章では、各流域ごとに窒素収支を推定し、人為的起源や農地や水域における窒素消費の有無について検討を行った。河川水の場合、採水地点A_1とその下流にあるA_2における 2 地点で負荷量が算出できた場合、地点A_1と地点A_2の負荷量の差は、2 つの流域の重複していない部分($A_{2\text{-}1}$)からの寄与として求めることができる。

そこで、本考察では、完全混合モデルを用いて、各地域ごとに流域別窒素収支解析を行い、流域の差として表される各エリアからの寄与について算定を行った。

完全混合モデルを適用する為に、以下の仮定を行った。

・質量保存則が成立し、河川水路内での水の蒸発、取水や排水はないものとする。

・河川水の水質や流量変化は、支流との合流以外は、流域内の平均的な地下水が河床に湧出(もしくは河川水から地下水への涵養)することで起きているものとする。

・河床からの湧水は、流域内では均等で、河川に入った瞬間に完全混合されものとする。

上流から地点A_1、A_2における河川流量を上流よりQ_1、Q_2河川水の濃度や同位体比をN_1、N_2、算出する各区間で涵養される水の濃度や同位体比を$N_{1\text{-}2}$、とすると、(1)式が成り立つ。

$$Q_2 \times N_2 = Q_1 \times N_1 + (Q_2 - Q_1) \times N_{1\text{-}2} \qquad (1)$$

(1)式を未知の値である$N_{1\text{-}2}$について整理すると(2)式が得られる。

$$N_{1\text{-}2} = (Q_2 \times N_2 - Q_1 \times N_1) / (Q_2 - Q_1) \qquad (2)$$

この式をもとに、地域内に湖沼地点を含む相模湖地域以外の 8 地域 15 区間で解析を行った結果、朝日川地域、鶴川地域を除く 6 地域 10 区間で窒素収支解析結果が得られた。

解析結果の得られなかった 5 区間では、河川流量が減少、もしくはほとんど変化していないのに、窒素負荷量が増加(あるいは河川流量の増加に対し窒素負荷量が減少)していたことから、本調査ではとらえることの出来なかった窒素起源や、消費機構があるものと推察された。解析を行った 8 地域 15 区間における全窒素濃度と窒素同位体比を表 7 に示した。なお、表中の備考欄に結果が得られた 10 区間に○印を、解が得られなかった 5 区間に×印をつけて区別した。

表 7 に解析結果として示された各区間に湧出する地下水中の全窒素濃度の多くが 1 mg / L前後であったのに対し、境川流域では 2.3 ～ 4.9 mg / Lという高い値を示した。また、窒素同位体比についても同様に、他の区間では河川水とほぼ同様の＋3～＋4‰に対し、境川地域では＋9.1～＋16.9‰とかなり高い値となった。

この境川流域においては、土地利用比率と河川水の水質との関係について検討した 5.3.2.7. 章において、中間の地点 27 の上流と下流で河川水への影響が異っているとの結果が得られたが、このモデル計算よって、上流区間と下流区間では、窒素濃度だけでなく窒素同位体比も大きく異なり、下流区間では特に下水処理水(＋8～＋15‰)や有機肥料(＋10‰以上)、家畜糞尿(＋10～＋22‰)などに見られるような、極めて高い窒素同位体比を持つ地下水が、河川に湧出していることが明らかとなった。

表７　流域別窒素収支解析結果
Table 7　Results of nitrogen balance analysis

地域	採水地点	現地調査・水質分析データ						解析結果		備考
		河川流量	変化量	全窒素濃度	全窒素負荷量	変化量	窒素同位体比	全窒素濃度	窒素同位体比	
		m^3/sec		mg/L	kg/day		‰	mg/L	‰	
山中湖地域	9	0.21		0.21	3.8		-			
	↓	↓	-0.07	↓	↓	41.1	↓	-6.80	-	×
	11	0.14		3.71	44.9		8.2			
	+	+		+	+		+			
	10	1.13		1.88	183.5		8.5			
	↓	↓	-0.94	↓	↓	-202	↓	2.48	9.61	○
	12	0.33		0.94	26.8		5.2			
朝日川	7	0.37		0.69	22.1		0.7			
	↓	↓	0.01	↓	↓	31.4	↓	36.34	126.1	×
	6	0.38		1.63	53.5		4.0			
笹子川地域	14	0.28		0.88	21.3		1.1			
	↓	↓	1.92	↓	↓	271.4	↓	1.64	3.39	○
	5	2.2		1.54	292.7		3.1			
	+	+		+	+		+			
	15	0.81		0.59	41.3		0.4			
	↓	↓	0.21	↓	↓	-33.5	↓	-1.85	22.70	×
	4	3.22		1.08	300.5		3.7			
葛野川	16	1.34		0.86	99.6		2.1			
	↓	↓	2.77	↓	↓	166.7	↓	0.70	3.14	○
	1	4.11		0.75	266.3		2.8			
鶴川地域	24	1.7		1.18	173.3		3.2			
	+	+		+	+		+			
	23	0.41		1.62	57.4		4.7			
	↓	↓	-0.07	↓	↓	14.3	↓	-2.36	-28.8	×
	22	2.04		1.39	245.0		4.6			

※備考欄の×印は解析解が得られなかったことを示す

7．まとめ

相模湖・津久井湖流域における河川水中の窒素の起源を明らかにするため、河川流量の測定、河川水、林外雨及び林内雨の水質分析及び流域土地利用解析を行った。

その結果、本調査対象地域においては、降水として降下する窒素が森林に吸収されきれずに、一部が河川に流出している窒素飽和現象が起きており、流域面積の多くを占める林地からの窒素流出により、河川水中の窒素濃度が全体的に押し上げられているという窒素流出機構の存在が推察された。

また、幾つかの流域や地域において、土地利用と河川水中の硝酸性窒素や窒素同位体比との間に、正もしくは負の相関関係が認められ、河川に湧出する地下水の全窒素濃度と窒素同位体比についてのモデル計算から、窒素排出源の推定や全窒素濃度についての算定を行った。

これらの解析により、相模湖・津久井湖流域における河川水・湖沼水中の窒素起源として、以下の要素が示された。

⑴ 降水によって流域にもたらされる全窒素量のうち、89%が林地への降水によるものである。

⑵ 窒素飽和の影響により、林地への降水中に含まれる全窒素量の 44%が吸収されずに、河川へ流出する。

⑶ 窒素収支の算定がされた 31 流域中約半分の 16 流域において、林地による吸収分を考慮した降水起源による全窒素量が、河川水中の全窒素量の全てを占めていた。

⑷ 流域内の住宅地面積比率の上昇は、河川水中の硝酸性窒素濃度と塩化物イオン濃度を上昇させ、生活排水等の影響が示唆された。

⑸ 河川に湧出する地下水の多くが、その区間の河川水や林内雨とほぼ同程度の全窒素濃度、窒素同位体比であると算出されたのに対し、境川地域では、他の流域に比べて数倍の全窒素濃度の地下水が河川に湧出し、窒素同位体比も有機肥料や下水処理水、家畜糞尿起源を示す 9.1 ～ 16.9‰という高い値を示した。

一方、調査対象とした相模湖・津久井湖流域全体においては、取水・排水などの人為的な水利用による河川水量の増減の影響が大きいことや、湖沼部における負荷量の算出や、湖沼内部における窒素循環について調査・検討する必要があり、流域全体での評価にはより詳細な観測データが必要であるといえる。

なお、今回の調査結果は、比較的低水位時における値を用いて年平均値として扱っており、年間総河川流出量の多くの部分を占める高水位時においては、河川流量や河川水中の全窒素濃度が、本調査と異なる傾向が示される可能性がある。さらに、本調査で指摘された窒素飽和については、飽和による窒素流出のパターンが様々であることや、森林衰退との関係についても不明なことが多いことから、今後経年的に調査を行う必要があると考えられる。

また、本流域において最も寄与の大きかった酸性雨による窒素負荷の問題については、今後は降水中の窒素化合物や硫黄化合物などについての空間的な分布とともに、水質や個々の負荷量、林内雨や樹幹流など森林内での変化などについても調査・検討し、詳細なデータをもとに再度負荷量について検討を行う必要があるものと考えられる。

謝辞

本調査を行うにあたり、神奈川県環境農政部大気水質課水質調整班椎橋副技幹(現工業保安課川崎駐在事務所)には、調査計画の立案、実施及び結果の取りまとめの各段階において、多大なるご協力とご指導を賜りました。ここに記して感謝いたします。

本論文は、平成 13 年度行政依頼調査「相模湖・津久井湖窒素発生源実態調査」における報告書「相模湖・津久井湖窒素排出源調査結果報告書(平成 14 年 3 月)」をまとめたものである。

参考文献

Aber,J.D. Nadelhoffer,K.J. Steudler,P. and Melillo, J.M. (1989) Nitrogen S a tur a tion in Northern Forest Ecosystems, BioScience, **39(6)**, 378-386.

地域交流センター企画(株) (1997) 平成８年度桂川・相模川流域環境基礎調査に係る桂川・相模川流域の水質汚濁負荷量調査，46p.

電力中央研究所 (2001) 酸性雨の総合評価，電中研レビュー，**43**, 92p.

平田健正 (1996) 土壌・地下水汚染と対策，環境庁水質保全局水質管理課・土壌農薬課監修，丸善，304p.

神奈川県 (1994) 酸性雨に係る調査研究報告書 , 286p.

環境省水環境部地下水・地盤環境室監修 (2002) 硝酸性窒素による地下水汚染対策の手引，公害研究対策センター，359p.

環境庁酸性雨対策検討会大気分科会 (1990) 酸性雨対策調査報告書，5-29.

小林禧樹、中川吉弘、玉置元則、平木隆年、正賀充 (1995) 森林樹幹への酸性沈着の影響評価 , 環境科学会誌 , **8(1)**, 25-34.

松田住子、川上智規 (2002) 窒素飽和森林土壌における硝酸イオンと硫酸イオンの逆相関について，(社)環境科学会 2002 年会一般講演・シンポジウムプログラム，pp.232-233.

三村春雄、福井博、飯田和義、宮下雄次、石坂信之、横山尚秀 (1999) 硝酸性窒素による地下水汚染対策検討調査－神奈川県大和市の汚染機構解明調査－，神奈川県環境科学センター研究報告，**22**，26-32.

宮下雄次 (2002a) 茶畑における土壌水及び地下水への施肥の影響について，日本水文科学会発表要旨集，**16**，35-36.

宮下雄次 (2002b) 神奈川県における地下水中の窒素同位体比について，(社)環境科学会2002年会一般講演・シンポジウムプログラム，86-87.

大河内博、細野哲也、丸山文隆、井川学 (1995) 丹沢大山における酸性降下物とスギ、モミ樹幹との相互作用 , 環境科学会誌 , **8(3)**, 305-315.

相模川水質汚濁対策研究会 (1991) 相模川水質汚濁対策研究調査総合報告書 , 228p.

田淵俊雄 (1985) 降水中の窒素とリン，水質汚濁研究，**8(8)**，486-490.

高橋照美、内田裕之、清水源治、堤充紀 (1990) 山梨県における酸性降下物の年間降下量 , 山梨衛公研年報 , **34**, 72-74.

田瀬則雄、井岡聖一郎 (2002) 地下水帯における硝酸性窒素の消失と水文地質について，(社)環境科学会 2002 年会一般講演・シンポジウムプログラム，pp.90-91.