

三瓶演習林における酸性雨長期モニタリング観測によるスギ人工林および落葉広葉樹林の林外雨,林内雨,樹幹流の化学的組成の変化

誌名	島根大学生物資源科学部研究報告 = Bulletin of the Faculty of Life and Environmental Science Shimane University
ISSN	13433644
著者名	片桐,成夫 山下,多聞 葛西,絵里香 尾崎,嘉信 寺田,和雄 長山,泰秀 金子,信博 新村,義昭
発行元	島根大学生物資源科学部
巻/号	7号
掲載ページ	p. 15-25
発行年月	2002年12月

三瓶演習林における酸性雨長期モニタリング観測によるスギ人工林および
落葉広葉樹林の林外雨, 林内雨, 樹幹流の化学的組成の変化

片桐成夫¹⁾・山下多聞²⁾・葛西絵里香³⁾・尾崎嘉信³⁾・
寺田和雄³⁾・長山泰秀¹⁾・金子信博⁴⁾・新村義昭⁵⁾

Long term trends in acid precipitation chemistry of *Cryptomeria japonica* stands and a deciduous
broad leaved forest in the Sanbe University Forest.

Shigeo Katagiri, Tamon Yamashita, Erika Kasai, Yoshinobu Ozaki, Kazuo Terada, Yasuhide Nagayama,
Nobuhiro Kaneko and Yoshiaki Shinmura

Abstract The long term trends in acid precipitation chemistry of *Cryptomeria japonica* stands and deciduous broad leaved forest dominated by *Quercus serrata* were monitored in the Sanbe University Forest from 1996 to 2001. The values of pH in rainfall and through-fall showed the range of 5.1-5.6. They were larger than that in stemflow of 3.7-3.9 in *C. japonica* stands. On the other hand, the pH in through-fall and stemflow in the deciduous broad-leaved forest showed higher range than in rainfall. The ion concentrations, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ and NO_3^- were higher in deciduous broad-leaved forest than *C. japonica* stands. The SO_4^{2-} concentration showed a reverse trend between both forests. The values of pH in rainfall and through-fall changed seasonally, and showed low value, 4.5 in winter and high value, 6.0 in spring. That in stemflow showed the same change as through-fall, but the range was lower by more than 1.0 in *C. japonica* stands. The Na^+ , Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations were high in winter and low in summer. These were influenced by the north-west wind of monsoon in winter.

Key word: Acid rain, pH, ion concentration, *Cryptomeria japonica* stand, deciduous broadleaved forest

はじめに

¹⁾ 島根大学生物資源科学部

Fac. of Life & Environmental Science, Shimane Univ.

²⁾ 島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター
Education & Research Center for Biological Resources, Fac.
of Life & Environmental Science, Shimane Univ.

³⁾ 島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター森
林科学部門三瓶演習林
Sanbe Forest, Forest Science Section, Education & Research
Center for Biological Resources, Fac. of Life & Environmental
Science, Shimane University

⁴⁾ 横浜国立大学大学院環境情報研究院
Graduate School of Environment and Information Sciences,
Yokohama National University

⁵⁾ 兵庫県淡路景観園芸学校

Awaji Landscape Planning and Horticulture Academy

ヨーロッパでは古くから酸性雨による森林の衰退が問題視され, さまざまな観測・研究が行われてきたが, 我が国では酸性雨に対する関心が向けられるようになったのは比較的最近である. しかし, 日本各地での酸性雨の観測により, スギ・ヒノキなどの針葉樹林での樹幹流の酸性度の強さ, 土壌の酸性化などが指摘されてきた(松浦ら1990, 松浦1992, 佐々ら1990). 長期にわたる酸性雨の観測については佐々木ら(2001)が九州地区の5年間の結果を報告しているが, このようなデータの蓄積が重要である. 全国演習林協議会では日本各地に点在する演習林での酸性雨の一斉観測の必要性が取り上げられ, 各演習林で観測がされるようになった. 島根大学でも1994年頃から降水, 林内雨, 樹幹流の観測を開始し, 1996年

から本格的に全国演習林協議会の長期モニタリング観測の一貫として、現在まで観測を継続している。

そこで1996年から2001年までの観測結果をとりまとめ、6年間の林外雨、林内雨、樹幹流のpH、ECおよびカチオン、アニオンの濃度の年変化および季節変化を明らかにすることを目的とした。本報告ではスギ人工林および落葉広葉樹林における林外雨、林内雨、樹幹流の化学的組成について整理したが、それぞれの量については長期観測のためオーバーフロー、貯留タンクからの漏れ、冬季の凍結による観測不能などにより欠測が生じ、精度にかけるため、pH、EC、イオン濃度のみを対象とした。

なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(1)(課題番号08506001、代表者川那辺三郎、平成8年度~10年度)及び基盤研究(A)(1)(課題番号11356005、代表者笹賀一郎、平成11年度~平成13年度)により行った。

調査地および調査方法

調査地は島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター三瓶演習林の多根団地のスギ人工林および獅子谷団地のスギ人工林、落葉広葉樹林である(図1)。三瓶演習林の年間降水量は2300mm前後、年平均気温は12.1℃で、冬季には積雪が最大60cmに達する。

林外雨はスギ人工林、落葉広葉樹林に隣接する裸地に直径20cmのプラスチック製ロートを地上2mに設置し、目盛りをつけたポリタンクに貯留した。林内雨はスギ人工林、落葉広葉樹林内に幅14cm、長さ100cmのエスロン製雨樋を地上1.3mに設置し、目盛りをつけたポリタンクに貯留した。樹幹流はスギ人工林ではスギ3個体、落葉広葉樹林ではコナラ3個体を対象とし、ウレタンラバー法を用いて測定を行った。

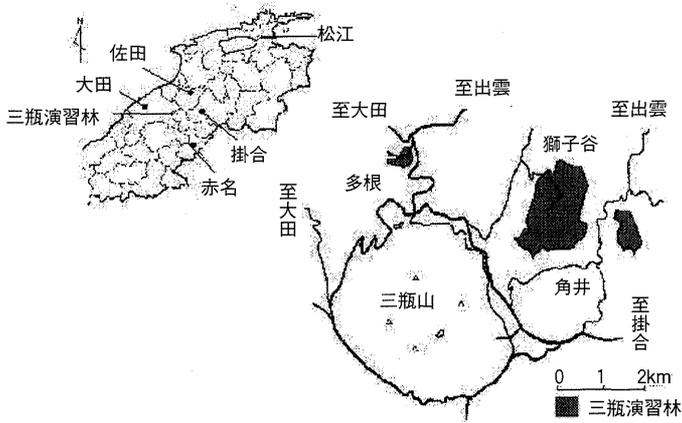


図1 調査地の位置図

観測は原則として2週間毎とし、タンク内の水量を測定したのち、一部を採水し、実験室に持ち帰った。持ち帰った試水は速やかに分析に供したが、分析までの間は冷蔵庫で保管した。

分析に供する試水は0.8μmのメンブレンフィルターを使用し吸引濾過をした。その後、pHについてはガラス電極式pHメーター(堀場(株)製:D-13)、ECについては導電率メーター(堀場(株)製:ES-12)を用いて測定した。溶存イオンの測定は、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} について行い、0.2μmのデイスポーサブルメンブレンフィルターユニットを使用し再度濾過し、陽イオンはイオンクロマトグラフィー(ダイオネクス(株)製・DX-100)、陰イオンは、イオンクロマトグラフィー(ダイオネクス(株)製・QIC)を用いて行った。

結果および考察

1. 6年間の平均pH、EC、イオン濃度の比較

三瓶演習林における長期間の林外雨、林内雨、樹幹流のpH、ECおよび各イオン濃度を概観するために、表1にスギ人工林、落葉広葉樹林におけるそれぞれの6年間の平均値を示し、附表1にそれぞれの採水装置毎の6年間の平均値、最大値、最小値を示した。なお、pHやイオン濃度は水量を考慮して加重平均を示すべきであるが、樹幹流量の測定に欠測を生じているので算術平均で示した。

pHについて見ると、スギ人工林では林外雨、林内雨は5.1~5.6であったのに対して樹幹流は3.7~3.9と小さく、強い酸性を示した。これに対して、落葉広葉樹林では林外雨が5.1と最も低く、林内雨、樹幹流ではスギ林とは逆に5.4~5.5と高くなった。これまでの多くの研究でスギ、ヒノキなどの針葉樹の樹幹流のpHが低くなること(安田1993、松浦1992、吉田ら1995、真田ら1991)、広葉樹の樹幹流のpHが高くなること(越地1994、佐々ら1991、井倉ら1994、幸喜ら1992)を指摘しているのと同じ結果である。

ECについては、スギ人工林、落葉広葉樹林ともに林外雨<林内雨<樹幹流の順に大きくなり、強い酸性を示したスギ人工林の樹幹流で非常に大きい値を示した。

溶存イオン濃度はスギ人工林、落葉広葉樹林ともに NH_4^+ を除いて、林外雨<林内雨<樹幹流の順に濃度が高くなった。獅子谷団地の両林分では樹幹流のイオン濃度は林内雨の約2倍となったが、多根団地のスギ人工林では樹幹

表1 三瓶演習林における林外雨，林内雨，樹幹流の pH, Ec, 各イオン濃度の平均，最大，最小値

		獅子谷スギ林			獅子谷コナラ林			多根スギ林		
		林外雨	林内雨	樹幹流	林外雨	林内雨	樹幹流	林外雨	林内雨	樹幹流
pH	Mean	5.09	5.60	3.91	5.10	5.38	5.51	5.39	5.20	3.71
	SE	0.40	0.44	0.31	0.40	0.42	0.43	0.41	0.55	0.41
	Max	7.06	7.65	7.42	7.28	7.23	7.37	8.77	7.44	7.56
	Min	3.81	4.28	2.56	3.68	4.06	4.59	3.61	4.01	2.56
Ec	Mean	30.6	55.4	162.5	29.8	48.5	90.4	39.4	73.5	366.4
	SE	2.4	4.4	13.1	2.3	3.8	7.1	3.0	7.8	40.2
	Max	133.3	240.0	649.0	140.0	232.4	593.7	378.0	382.0	1285.0
	Min	3.3	6.5	4.7	3.5	5.0	1.5	3.6	6.7	25.1
Ca	Mean	0.078	0.139	0.104	0.075	0.115	0.196	0.078	0.146	0.366
	SE	0.006	0.011	0.008	0.006	0.009	0.015	0.006	0.016	0.039
	Max	0.279	0.987	0.589	0.257	0.592	1.206	0.544	0.796	2.866
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.006	0.000	0.002	0.001
Mg	Mean	0.022	0.042	0.047	0.025	0.042	0.075	0.030	0.049	0.208
	SE	0.002	0.003	0.004	0.002	0.003	0.006	0.002	0.005	0.022
	Max	0.100	0.209	0.578	0.133	0.197	0.550	0.147	0.288	2.847
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	-0.053	0.000	0.002
K	Mean	0.011	0.078	0.066	0.013	0.050	0.125	0.016	0.062	0.133
	SE	0.001	0.006	0.005	0.001	0.004	0.010	0.001	0.007	0.014
	Max	0.119	0.437	0.533	0.235	0.406	0.650	0.466	0.228	0.797
	Min	-0.005	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	-0.012	0.008	0.015
Na	Mean	0.099	0.161	0.230	0.100	0.172	0.344	0.127	0.281	0.989
	SE	0.008	0.013	0.019	0.008	0.013	0.027	0.010	0.030	0.105
	Max	0.772	0.986	1.494	1.011	1.172	3.386	0.879	1.547	8.126
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.024
NH ₄	Mean	0.004	0.006	0.005	0.004	0.006	0.006	0.008	0.013	0.019
	SE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
	Max	0.045	0.046	0.118	0.044	0.086	0.081	0.114	0.121	0.545
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NO ₃	Mean	0.035	0.088	0.073	0.037	0.094	0.104	0.064	0.059	0.113
	SE	0.003	0.007	0.006	0.003	0.007	0.008	0.005	0.006	0.012
	Max	0.406	0.564	0.704	0.426	2.856	2.291	0.948	0.495	0.871
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
SO ₄	Mean	0.053	0.089	0.144	0.050	0.078	0.124	0.065	0.110	0.403
	SE	0.004	0.007	0.012	0.004	0.006	0.010	0.005	0.012	0.044
	Max	0.478	0.451	1.029	0.225	0.315	0.773	0.600	0.422	2.999
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.010	0.014
Cl	Mean	0.122	0.216	0.416	0.102	0.184	0.420	0.132	0.334	1.634
	SE	0.010	0.017	0.034	0.008	0.014	0.033	0.010	0.036	0.179
	Max	1.790	1.394	2.533	0.853	1.504	4.331	0.917	1.838	10.158
	Min	0.000	0.000	0.004	0.000	0.005	0.000	0.000	0.013	0.029

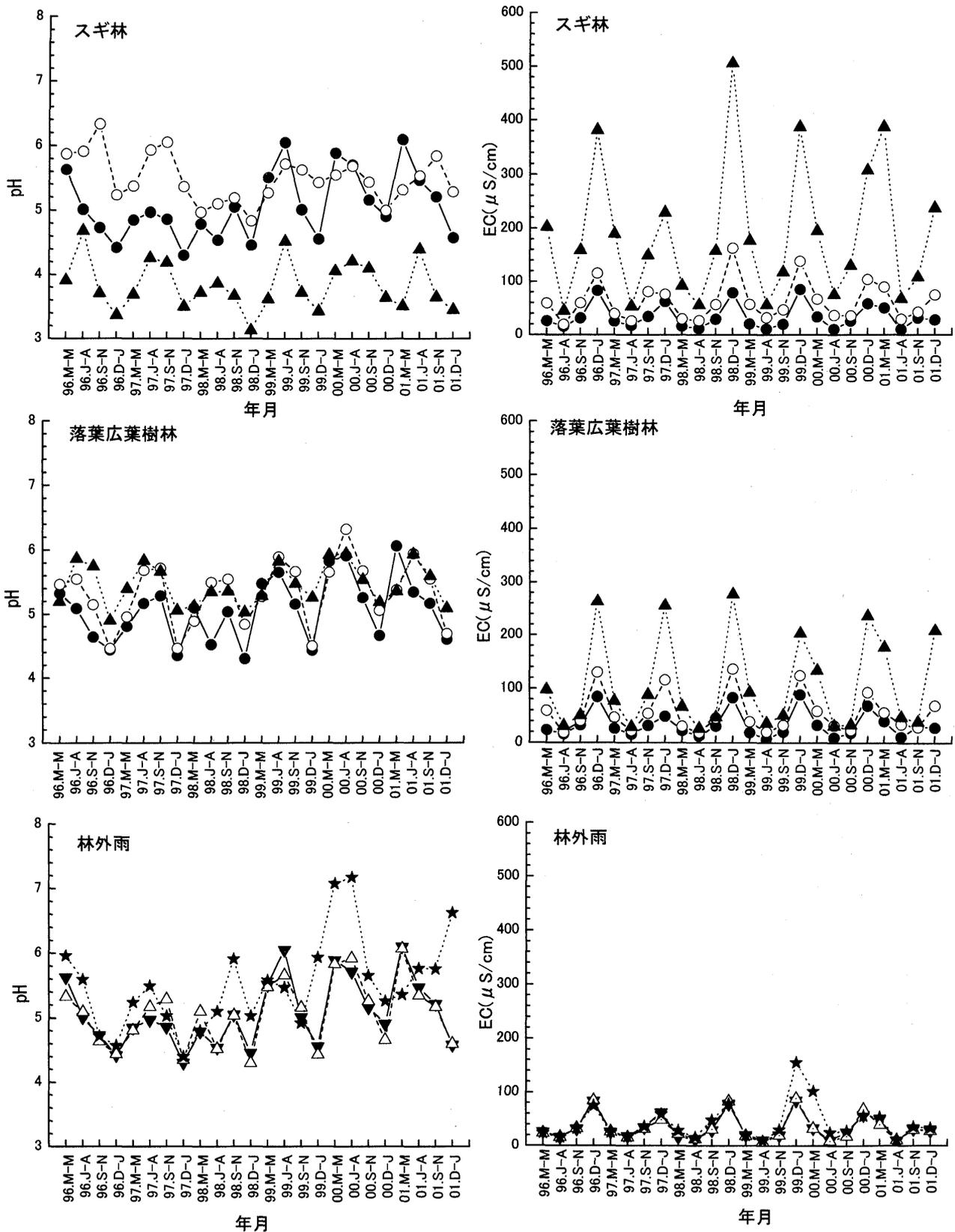
単位：Ec は $\mu\text{S/cm}$, Ca, Mg, K, Na, NH₄, NO₃, SO₄, Cl は meq/L

流のイオン濃度が林内雨の Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻で5倍, Na⁺で4倍, Ca²⁺で3倍と大きな差が見られた。

獅子谷団地でのスギ人工林と落葉広葉樹林を比較すると、林外雨の場合いずれのイオンも差がみられず、林内雨の場合も K⁺, Na⁺, Cl⁻の濃度が落葉広葉樹林でやや低くなるが、大きな差はみられなかった。樹幹流の場合は Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NO₃⁻の濃度が落葉広葉樹林で高

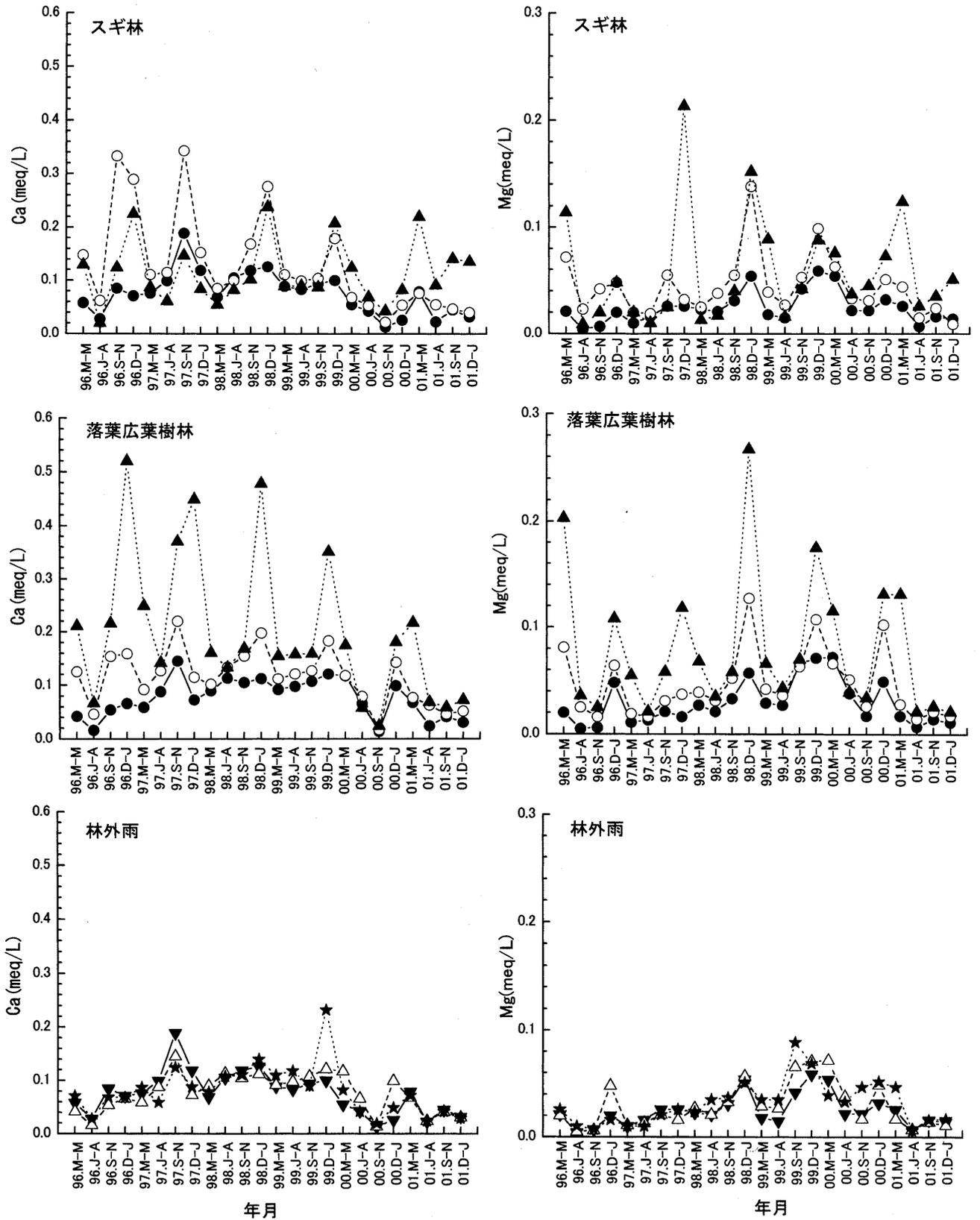
く、SO₄²⁻濃度がスギ人工林で高かった。この傾向は pH がスギ人工林で低くなったのと同じである。

獅子谷団地と多根団地のスギ人工林を比べると、林外雨の場合 Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻, Cl⁻の濃度が多根団地で高くなり、NO₃⁻濃度は獅子谷団地の2倍となった。林内雨の場合は Na⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻, Cl⁻濃度が多根団地でやや高くなった。樹幹流については両団地間で大きな差



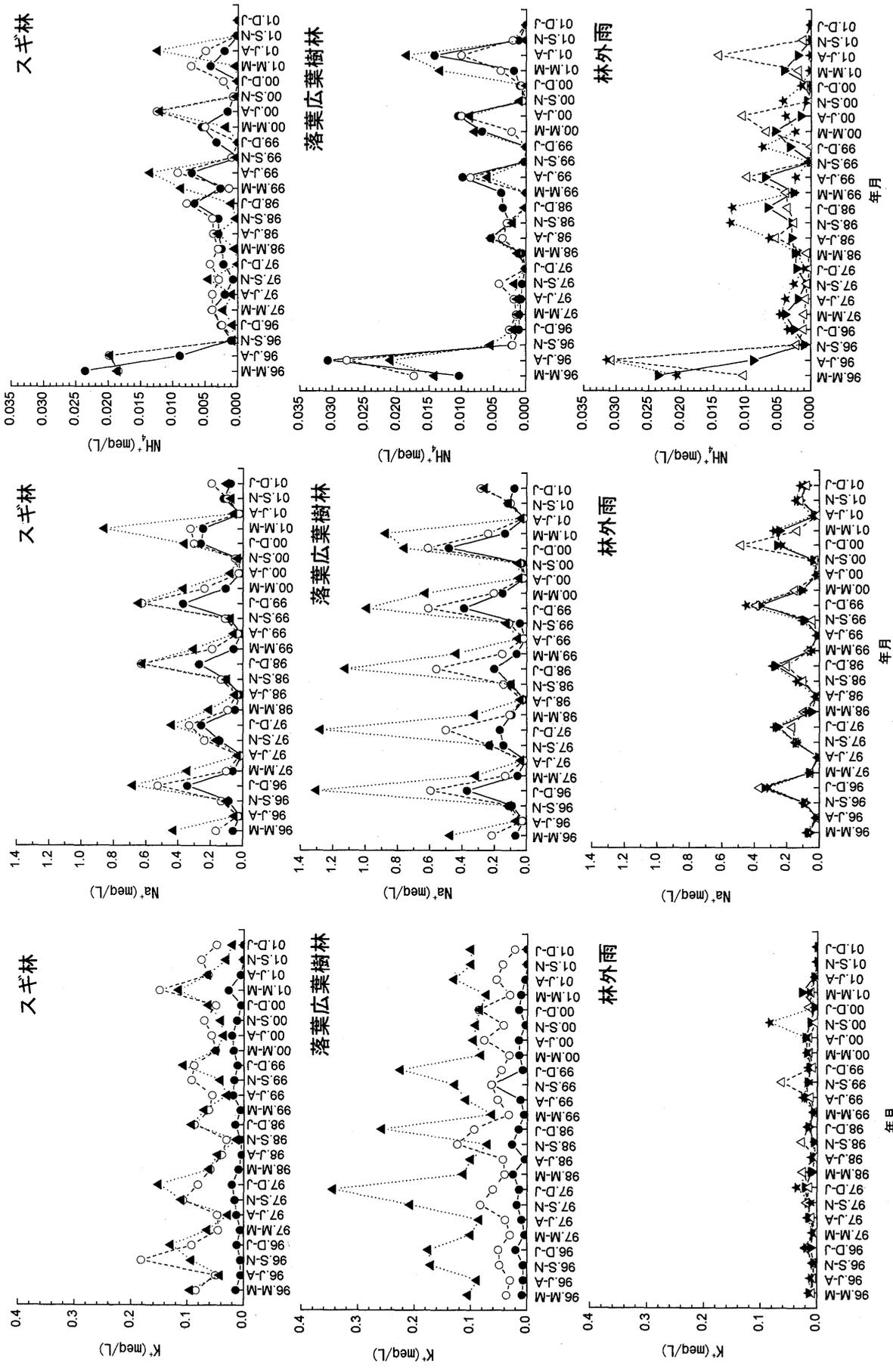
上4図 ● 林外雨 ○ 林内雨 ▲ 樹幹流 下2図 ▼ 獅子谷スギ林 △ 獅子谷落葉広葉樹林 ★ 多根スギ林

図2 三瓶演習林における林外雨，林内雨，樹幹流のpH，Ecの6年間の長期変動



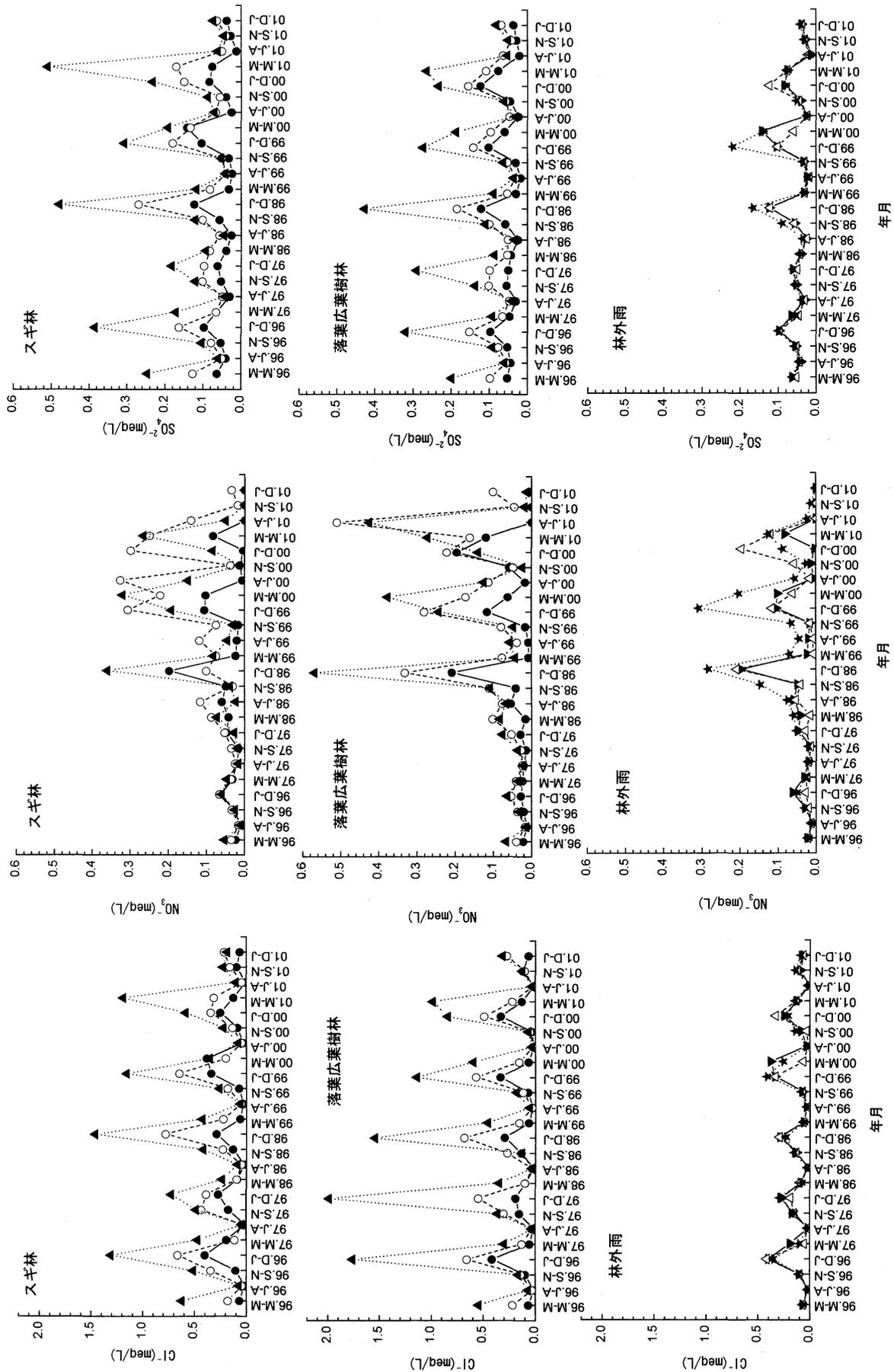
上4図 ● 林外雨 ○ 林内雨 ▲ 樹幹流 下2図 ▼ 獅子谷スギ林 △ 獅子谷落葉広葉樹林 ★ 多根スギ林

図3 三瓶演習林における林外雨，林内雨，樹幹流のCa，Mg濃度の6年間の長期変動



上6図 ●—●—スギ林 ○—○—林外雨 ▲—▲—落葉広葉樹林 下3図 —●—スギ林 △—△—落葉広葉樹林 ☆—☆—多根スギ林

図4 三瓶演習林における林外雨、林内雨、樹幹流のK, Na, NH₄濃度の長期変動



上6図 ●—林外雨 ○—林内雨 ▲—樹幹流 ▼—スギ林 △—落葉広葉樹林 ★—多根スギ林

下3図 三瓶演習林における林外雨、林内雨、樹幹流のCl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻濃度の長期変動

があり、多根団地の Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Cl^- 濃度が獅子谷団地の4倍, Ca^{2+} , SO_4^{2-} が3倍, K^+ が2倍となった。この差は pH の差以上に大きい。獅子谷団地のスギが50年生であるのに対して多根団地のスギが30年生と樹齢が異なり、測定個体のサイズの違いが影響していると考えられる。ただし、多根団地では1998年以降観測を行っていないので、単純には比較できないことも考慮する必要がある。

2. 6年間の pH, EC, イオン濃度の季節変化

獅子谷団地のスギ人工林および落葉広葉樹林の林外雨、林内雨、樹幹流と多根団地の林外雨の pH, EC, イオン濃度の変化傾向を見るためにそれぞれ3ヶ月毎に平均を求め、図2に pH, EC を、図3に Ca^{2+} , Mg^{2+} 濃度を、図4に K^+ , Na^+ , NH_4^+ 濃度を、図5に NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 濃度を示した。

林外雨の pH は6年間を通して12-2月の冬季に4.5前後の低い値を示し、3-5月の春に6.0前後の高い値を示した。三瓶演習林では冬季に北西の季節風が吹きつけ降雪を伴うこと、春には黄砂現象が見られることが大きく影響している。林内雨は冬には同様の傾向を示すが、夏又は秋に高くなる傾向を示した。秋に pH が上昇するのは樹冠から K^+ , Na^+ 等のカチオンの溶脱が影響していると考えられる。樹幹流についても林内雨と同様に傾向を示し、スギ人工林では林内雨、林外雨に比べて pH 値が1以上低くなった。しかし、落葉広葉樹林では林外雨、林内雨と差がなく、最も高い pH を示す場合もあった。

EC は林外雨、林内雨、樹幹流ともに冬季に高く、夏に低い傾向を示した。中でも樹幹流の EC はスギ人工林、落葉広葉樹林ともに冬季に高く、季節変化は明瞭であった。

森林内に負荷される降水の pH が低いと土壤の酸性化を引き起こすことはよく知られている。そこで本調査地の土壤の pH を1999年3月から12月まで調べた結果(土肥2000)をみると、林内平均でスギ人工林5.15、落葉広葉樹林5.24とわずかにスギ人工林で強い酸性を示した。樹幹周辺の土壤の pH を比較するとスギ人工林で4.41、落葉広葉樹林で5.42とスギ人工林で土壤の酸性化が明らかに進んでいる結果を示している。本調査地においても一般に言われているようにスギ人工林では樹幹流の pH が低く、樹幹周辺から土壤の酸性化が進んでいた。

Ca^{2+} , Mg^{2+} 濃度は、スギ人工林、落葉広葉樹林ともに林外雨では9-11月または3-5月に高く、林内雨は9-11月または12-2月に高かった。樹幹流については12-2月に高い濃度を示した。林外雨の K^+ 濃度は年間を通し

て大きな変動はなかったが、林内雨の K^+ 濃度は落葉期の9-11月に高い値を示した。樹幹流の K^+ 濃度は Ca^{2+} , Mg^{2+} と同様に12-2月に高かった。

Na^+ , Cl^- の濃度は冬に高く、夏に低い傾向が顕著に見られ、冬季の北西の季節風によって運ばれてくる海塩の影響が明瞭に現れている。

林外雨の NH_4^+ 濃度は特に一定した傾向は認められなかった。林内雨、樹幹流の NH_4^+ 濃度は気温の上昇する6-8月に高い傾向を後半4年間(1998-2001年)に示した。温度の上昇に伴い有機態窒素の無機化が進行するためと考えられる。

NO_3^- , SO_4^{2-} 濃度は、 NH_4^+ 濃度とは異なり、夏には低く、12-2月から3-5月に高くなる傾向が見られる。大陸における冬季の NO_x , SO_x の排出量の増加とそれらが季節風により運ばれてくることや海塩由来の SO_4^{2-} が影響していると考えられる。

以上のように長期間にみた場合、三瓶演習林では冬季の季節風の影響が強く現れ、pH の冬季の低下、 SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} などの濃度の冬季の上昇が、林外雨、林内雨、樹幹流に共通して現れていた。三瓶演習林は日本海に面する大田市から内陸へ10kmほど入った、標高1126mの孤立峰三瓶山の山麓に位置するため、日本海側の各地で観測された富山(安田1993)、山形(上木ら1990)などと同様に冬季の北西の季節風の影響が強いものといえる。

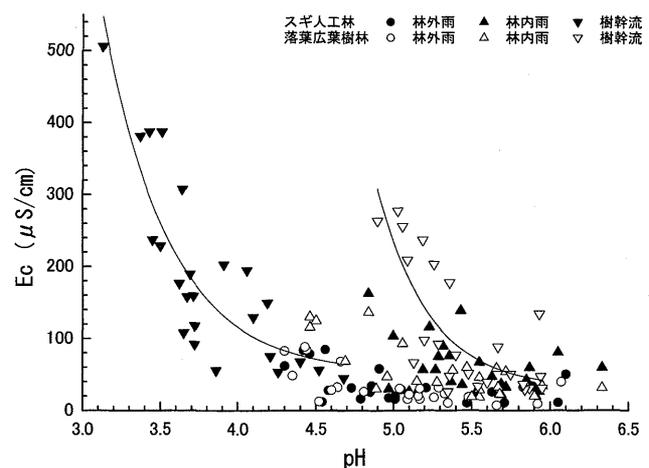


図6 林外雨、林内雨、樹幹流の pH と Ec の関係

3. 林外雨、林内雨、樹幹流の化学的性質の関係

降水の化学的性質は水量、溶存するイオン量などによってさまざまな反応を示すと考えられる。図6に pH と EC の関係を3ヶ月毎の平均値を用いて、林外雨、林内雨、樹幹流について示した。仙石ら(1994)は亜高山帯針葉樹林の樹幹流の pH と EC の関係は減少指数関数になるこ

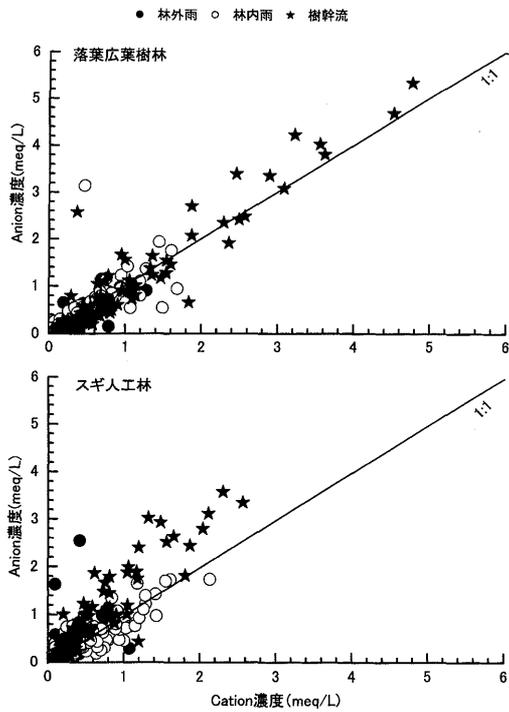


図7 Cation 濃度と Anion 濃度の関係

とを報告している。ここでもスギ人工林の樹幹流は pH の低い範囲で指数関数的に EC が高くなる傾向にあり、落葉広葉樹林でも同様の傾向があるものの pH の範囲が 5~8 と狭く、5 前後で指数関数的に増加している。この点がスギ人工林と異なり、溶存イオンの種類の違いがあることを示唆している。林内雨、林外雨については両林分ともにスギ樹幹流の減少指数関数回帰の線上にほぼ一致している。このようにスギ人工林の樹幹流中には pH を低下させる酸性物質が多く含まれ、落葉広葉樹林の樹幹流中にはカチオン類が多く含まれているものと考えられる。

そこで、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ のカチオンの合計と Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} のアニオンの合計との関係を図 7 に示した。降水中のカチオンとアニオンは基本的にはバランスを保ち、両者の関係は図上で傾き 1 の直線上に集まるはずである。林外雨、林内雨はおおむねイオンバランスがとれているが、樹幹流はカチオン濃度が低い傾向にあり、特にスギの樹幹流では傾きが 1.5 程度とカチオン濃度がアニオンの 2/3 となった。ここでのアニオン濃度には HCO_3^- が含まれていないので、それを考慮すると

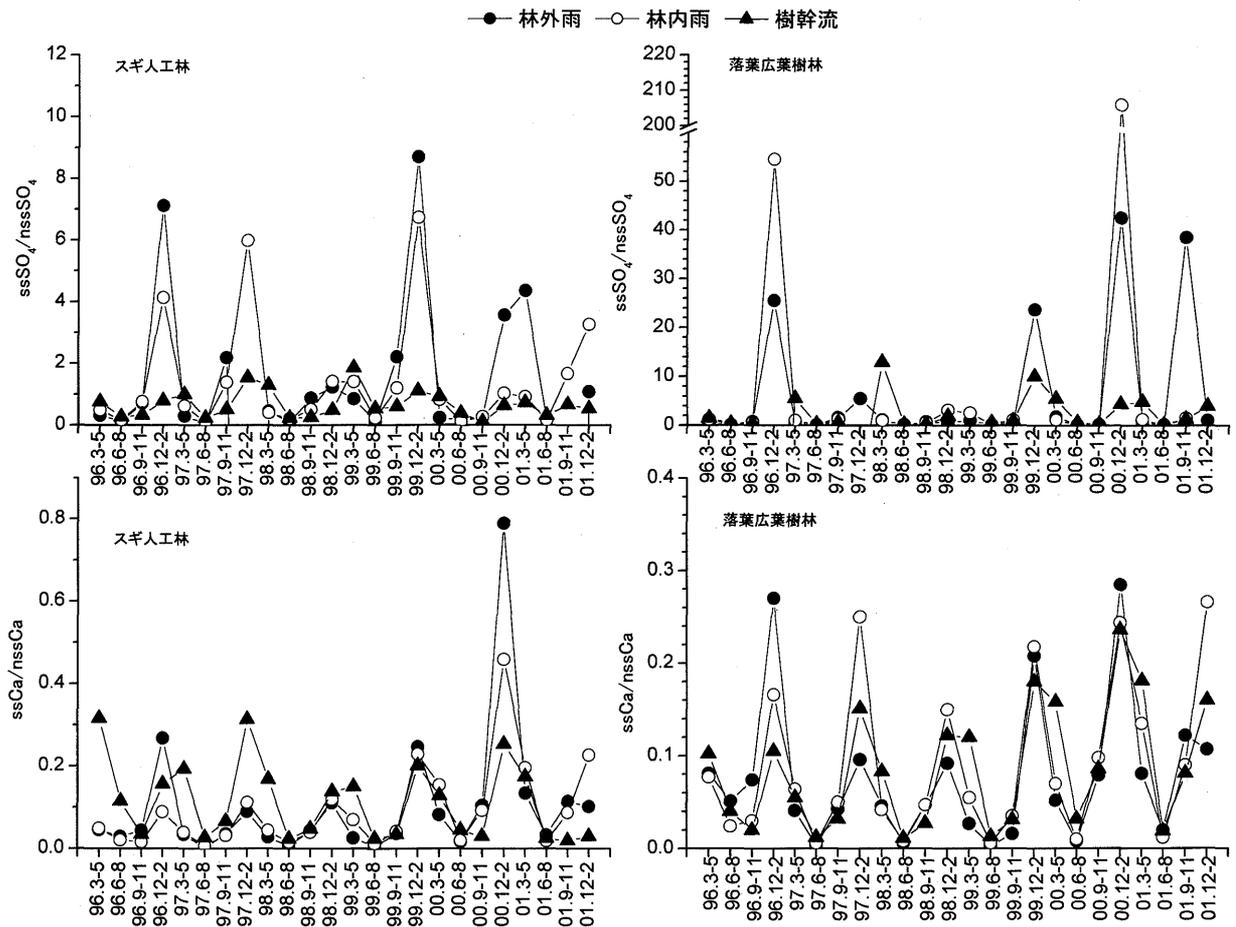


図8 Ca および SO_4 イオンの海塩由来と非海塩由来の比の変化

カチオン濃度はさらに低いと言える。このカチオンの低濃度がスギ樹幹流の pH を低くしている原因の一つと考えられる。

一方、三瓶演習林は前述したように日本海側の孤立峰で三瓶山の山麓に位置し、海塩の影響を強く受けており、特に冬季に Na^+ や SO_4^{2-} イオンの濃度が顕著に高くなった。そこで、 SO_4^{2-} および Ca^{2+} イオンについて海塩由来のものと非海塩由来のものに分けて検討した。図 8 は海塩由来イオン/非海塩由来イオンの比を求めて示したものである。 SO_4^{2-} イオンは海塩由来のものが非海塩由来のものの数倍から数十倍になり、特に 12 月～2 月の冬季に著しく高くなっている。これに対して Ca^{2+} イオンは ss-Ca/nss-Ca 比が 1 以下で非海塩由来の方が年中多い傾向にあるが、冬季に他の季節に比べて高くなった。 Na^+ 、 Cl^- イオンも冬季に高くなっていることから三瓶演習林では明らかに冬季に日本海からの北西の季節風によって海塩の影響を受けていた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、島根大学生物資源科学部森林環境学講座の専攻生、北見奈緒子 (1996 年卒)、小藤隆一 (1998 年修)、土肥奈都子 (2001 年修)、釜屋悦子 (2000 年卒)、木崎理恵 (2001 年卒)、片山裕子 (2002 年卒) の各氏には観測、分析を分担していただいた。また、島根大学附属三瓶演習林の技能補佐員、三浦恒雄、後長正行、森山勲氏には観測、採水などの協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表する。

引用文献

土肥奈都子 (2000) 森林表層土壌の緩衝能による酸性雨の水質変化。島根大学農学研究科修士論文：1-66

- 井倉洋二・吉村和久・久保田勝義・中尾登志雄・荒上和利 (1994) 九州山地中央部における降水および樹幹流の pH と溶存成分。九大演報 71: 1-12
- 越地正 (1994) スギ及びケヤキ林の雨水成分の季節変化。45 回日林関東支論: 147-148
- 松浦陽次郎・堀田庸・荒木誠 (1990) 関東地方におけるスギ林表層土壌の pH 低下。森林立地 32(2): 65-69
- 松浦陽次郎 (1992) 樹幹流と土壌の酸性化の実態。森林立地 34(1): 20-25
- 真田勝・太田誠一・大友玲子・真田悦子 (1991) 札幌近郊におけるトドマツ、エゾマツ人工林の樹幹流・林内雨および林外雨について。森林立地 33(1): 8-15
- 佐々朋幸・後藤和秋・長谷川浩一・池田重人 (1990) 盛岡市周辺の代表的森林における林外雨、林内雨、樹幹流の酸性度ならびにその溶存成分—樹種による樹幹流の pH 固有値。森林立地 32(2): 43-58
- 佐々木重行・桑原康成・高宮立身・春海賢一・横尾謙一郎・水久保孝英・前迫俊一・漢那賢作 (2001) 酸性雨等森林被害モニタリング第 1 期における九州地区の特徴。森林立地 43(2): 45-52
- 仙石鐵也・原光好・森澤猛・石塚和裕 (1994) 亜高山帯針葉樹林における酸性雨の観測と実態—pH, EC および化学性について—。森林立地 36(2): 64-72
- 上木勝司・飯田俊彰・上木厚子・石田朋靖・塚原初男・桑原英男 (1990) 山形県日本海沿岸における降水中の酸性降下物の実態。山形大紀要 (農学) 11(1): 143-148
- 安田洋 (1993) どんな雨が降っているのか?—酸性雨の現状と地域性—。日土肥誌 64(4): 448-455
- 吉田桂子・平井敬三・三浦覚・森貞和仁 (1995) 高知市における過去 3 年間の酸性雨モニタリング結果。日林関西支論 4: 43-46

附表 三瓶演習林内のスギ人工林，落葉広葉樹林の林外雨，林内雨，樹幹流の6年間のpH，Ecおよびイオン濃度の平均値，最大値，最小値

	獅子谷コナラ林												多根スギ林																
	林外雨			樹幹流			林外雨			樹幹流			林外雨			樹幹流													
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3											
pH	Mean	5.12	4.81	5.36	5.74	5.86	3.89	3.80	3.96	5.11	4.95	5.34	5.42	5.15	5.54	5.53	5.42	4.50	4.49	4.45	5.71	5.04	5.15	5.06	5.14	5.27	3.66	3.72	3.64
	SE	0.41	0.54	0.43	0.46	0.66	0.32	0.31	0.32	0.41	0.56	0.43	0.43	0.59	0.44	0.45	0.43	0.54	0.52	0.55	0.63	0.54	0.56	0.56	0.56	0.59	0.42	0.42	0.42
	Max	7.06	6.51	7.75	7.62	7.59	7.42	7.95	7.99	7.28	6.41	7.24	7.23	7.02	7.74	7.12	7.24	7.03	5.99	6.42	8.77	7.00	7.38	7.06	7.44	7.33	7.56	5.89	5.90
	Min	3.81	3.92	3.99	4.30	4.38	2.42	2.51	2.75	3.68	4.05	3.94	4.03	4.03	4.45	4.56	4.48	3.61	3.71	3.68	3.61	3.53	3.86	4.01	3.97	4.02	2.45	2.66	2.58
Ec	Mean	30.5	31.7	55.1	57.5	44.9	158.7	165.9	155.3	29.3	31.4	47.5	44.1	54.8	89.9	83.6	97.0	118.5	115.8	109.6	45.9	34.0	33.5	84.4	73.0	58.8	405.9	306.4	377.6
	SE	2.4	3.5	4.5	4.6	5.1	13.0	13.7	12.7	2.3	3.6	3.8	3.5	6.4	7.2	6.7	7.8	14.3	13.5	13.5	5.1	3.6	3.6	9.3	8.0	6.6	46.3	34.9	43.9
	Max	133.3	122.2	227.0	290.0	203.0	745.0	687.0	755.0	140.0	150.7	207.0	260.0	258.0	938.0	647.0	645.0	741.0	650.0	606.0	378.0	130.0	111.3	437.0	327.0	220.0	1406.0	961.0	2690.0
	Min	3.2	3.4	5.6	5.9	6.8	4.6	4.5	4.8	3.1	3.9	4.2	5.0	4.7	6.0	1.5	5.8	5.1	4.9	4.7	5.7	3.7	3.5	6.8	7.0	5.9	35.5	7.8	24.1
Ca	Mean	0.084	0.074	0.106	0.157	0.188	0.123	0.094	0.088	0.076	0.061	0.103	0.111	0.133	0.179	0.182	0.214	0.276	0.230	0.224	0.085	0.076	0.064	0.138	0.151	0.139	0.376	0.374	0.346
	SE	0.007	0.008	0.009	0.013	0.021	0.010	0.008	0.007	0.006	0.007	0.008	0.009	0.015	0.014	0.015	0.017	0.033	0.027	0.028	0.009	0.008	0.007	0.015	0.017	0.016	0.043	0.043	0.040
	Max	0.301	0.257	0.938	1.186	0.837	0.639	0.610	0.556	0.257	0.211	0.277	0.470	0.714	1.459	1.135	1.277	1.817	1.902	1.482	0.544	0.357	0.267	0.790	0.803	0.743	3.183	3.060	2.767
	Min	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.010	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.001	0.000	0.000
Mg	Mean	0.022	0.014	0.033	0.049	0.034	0.054	0.041	0.042	0.026	0.016	0.038	0.038	0.042	0.063	0.076	0.080	0.076	0.071	0.053	0.041	0.020	0.021	0.053	0.047	0.038	0.172	0.216	0.230
	SE	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005	0.005	0.006	0.006	0.009	0.008	0.007	0.004	0.002	0.002	0.006	0.005	0.004	0.020	0.025	0.027
	Max	0.100	0.061	0.176	0.243	0.141	0.488	0.837	0.667	0.134	0.132	0.199	0.196	0.293	0.608	0.866	0.557	0.764	0.335	0.272	0.147	0.117	0.124	0.385	0.356	0.234	3.041	2.980	3.660
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001	0.002	-0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
K	Mean	0.011	0.011	0.080	0.082	0.061	0.056	0.060	0.078	0.012	0.012	0.055	0.042	0.046	0.139	0.119	0.110	0.098	0.073	0.071	0.017	0.014	0.016	0.071	0.051	0.059	0.115	0.135	0.142
	SE	0.001	0.001	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.006	0.001	0.001	0.004	0.003	0.005	0.011	0.010	0.009	0.012	0.009	0.009	0.002	0.001	0.002	0.008	0.006	0.007	0.013	0.015	0.016
	Max	0.119	0.167	0.529	0.372	0.232	0.364	0.612	0.791	0.235	0.229	0.763	0.184	0.294	0.732	0.741	0.536	0.409	0.263	0.319	0.466	0.107	0.134	0.228	0.232	0.191	0.425	1.013	1.104
	Min	-0.003	-0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.019	-0.012	-0.003	-0.004	0.009	0.006	0.005	0.010	0.008	0.002
Na	Mean	0.100	0.093	0.170	0.154	0.131	0.208	0.216	0.246	0.096	0.105	0.162	0.153	0.204	0.306	0.348	0.365	0.360	0.399	0.352	0.130	0.126	0.121	0.328	0.284	0.215	0.915	0.953	1.082
	SE	0.008	0.010	0.014	0.012	0.015	0.017	0.018	0.020	0.008	0.012	0.013	0.012	0.024	0.025	0.028	0.029	0.043	0.046	0.044	0.014	0.013	0.013	0.036	0.031	0.024	0.105	0.109	0.125
	Max	0.772	0.651	0.981	0.991	0.891	1.435	1.458	2.074	1.011	0.846	1.040	1.271	1.424	4.049	3.442	3.454	2.736	2.844	2.447	0.879	1.021	0.635	1.676	1.736	1.144	7.621	7.963	8.793
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.017	0.019	0.000	0.000	0.001	0.006	0.005	0.003	0.029	0.010	0.011
NH ₄	Mean	0.004	0.005	0.005	0.004	0.008	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.006	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.008	0.006	0.003	0.008	0.013	0.013	0.012	0.010	0.016	0.008	0.027
	SE	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003
	Max	0.049	0.077	0.058	0.050	0.063	0.132	0.174	0.068	0.044	0.059	0.093	0.079	0.072	0.133	0.105	0.096	0.069	0.082	0.112	0.043	0.080	0.192	0.133	0.225	0.157	0.452	0.219	1.520
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NO ₃	Mean	0.031	0.029	0.083	0.082	0.031	0.091	0.079	0.028	0.035	0.017	0.075	0.095	0.043	0.063	0.091	0.133	0.054	0.072	0.066	0.099	0.027	0.026	0.058	0.058	0.044	0.100	0.108	0.100
	SE	0.002	0.003	0.006	0.006	0.003	0.007	0.006	0.002	0.003	0.002	0.006	0.007	0.005	0.005	0.007	0.010	0.006	0.008	0.007	0.011	0.003	0.003	0.006	0.006	0.004	0.010	0.011	0.010
	Max	0.406	0.175	0.617	0.590	0.245	1.402	0.921	0.325	0.426	0.056	0.881	0.831	0.212	1.115	1.397	0.776	0.481	0.516	0.717	0.948	0.171	0.199	0.538	0.555	0.480	0.790	0.965	0.859
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SO ₄	Mean	0.051	0.058	0.087	0.089	0.075	0.131	0.142	0.151	0.050	0.074	0.072	0.086	0.117	0.118	0.134	0.156	0.148	0.135	0.069	0.069	0.058	0.065	0.123	0.107	0.089	0.420	0.382	0.397
	SE	0.004	0.006	0.007	0.007	0.008	0.011	0.012	0.012	0.004	0.006	0.006	0.010	0.009	0.009	0.011	0.019	0.017	0.017	0.008	0.006	0.006	0.007	0.013	0.012	0.010	0.048	0.044	0.047
	Max	0.478	0.418	0.572	0.511	0.272	1.082	0.877	1.127	0.225	0.153	0.312	0.303	0.427	0.922	0.829	0.806	1.011	0.979	0.818	0.600	0.168	0.201	0.483	0.469	0.327	3.384	2.857	3.290
	Min	0.000	0.009	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.015	0.014	0.000	0.009	0.008	0.010	0.010	0.009	0.015	0.011	0.013	
Cl	Mean	0.113	0.147	0.223	0.211	0.190	0.397	0.403	0.417	0.097	0.114	0.172	0.167	0.223	0.370	0.417	0.454	0.494	0.510	0.462	0.132	0.126	0.139	0.402	0.334	0.250	1.620	1.507	1.799
	SE	0.009	0.016	0.018	0.017	0.022	0.033	0.033	0.034	0.008	0.013	0.014	0.013	0.026	0.030	0.034	0.036	0.060	0.059	0.057	0.014	0.013	0.015	0.044	0.036	0.028	0.185	0.172	0.211
	Max	1.790	2.582	1.276	1.745	1.233	2.623	2.470	3.236	0.641	1.064	1.134	1.717	1.732	5.280	4.617	5.006	4.576	3.951	3.490	0.917	0.577	0.838	1.991	2.163	1.263	10.157	11.623	17.281
	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.019	0.024	0.000	0.000	0.000	0.015	0.013	0.008	0.038	0.015	0.032

単位：EcはμS/cm, Ca, Mg, K, Na, NH₄, NO₃, SO₄, Clはmeq/L