山地小流域内のアカマツ林における降雨成分の変化

Yea Sun Young¹・垣原登志子¹・井上章二²・Kun-Woo Chun³・江崎次夫⁴

Change of Precipitation Component in Pinus Forest Small Forested Watershed

Yea Sun Young¹, Toshiko Kakihara¹, Shouji Inoue², Kun-Woo Chun³ and Tsugio Ezaki⁴

Abstract: To analysis the absorbing function of forest in the single pinus forest, we measured the concentration of pH, EC cation and anion about the collected rainfall, stemflow, throughfall, soil solution and streamwater. We also described a mechanisms and process that affect the rain water which flows into the soil, when it reaches forest area through the bodies of trees. The pH of stemflow (6.33) was figured out the lowest value, as pH of throughfall (5.83), also lower compared with that of rainfall (6.03). The EC of stemflow (110 μ S/cm) and throughfall (63 μ S/cm) showed a higher value, compared with that of rainfall (37 μ S/cm). Density of Ca^{2+} showed the highest values among the cation and the results showed that Ca^{2+} concentration of stemflow and throughfall were affected by Ca^{2+} concentration of rainwater. Generally, concentration of anion was higher than that of cation, showing high values in the throughfall and soil solution.

Keywords: *Pinus desiflora*; Stemflow; Rainwater; Ion concentration; Soil solution

1 はじめに

現在、われわれの周囲では砂漠化や地球温暖化、酸性雨など様々な環境問題を抱えており、地球規模での環境破壊に関する関心は世界的にも高まっている。酸性雨は大気汚染と密接な関係があり、国境を越えて汚染されることもあり、世界各地で発生している。欧米各国や日本では、以前から深刻な森林の枯損が発生しており、これら森林の衰退原因の一つとして、酸性雨の影響が考えられる(Smith, 1990)。

近年、韓国や中国においては著しい工業の発展に伴い、地球温暖化を進行させる二酸化炭素が発生すると同時に、酸性雨の主な原因物質である二酸化硫黄(亜硫酸ガス)や窒素酸化物が大量に発生している。酸性雨は樹木を枯死させるだけでなく、土や水をはじめさまざまな生物にも影響を与えており、これに伴い、森林破壊、野生生物の減少といった問題も引き起こしている(李, 1989)。

これまでのところ韓国では、酸性雨に含まれている酸性降下物による森林土壌や樹木への影響に関する報告は認められているが、森林被害に対する具体的な研究はなされていない(Joo and Woo, 1993)。

韓国の植栽の現状をみると、針葉樹を中心に造林されている。一般的にみると、針葉樹は広葉樹に比べ葉面積

指数が大きいため、大気の酸性物質を濃縮し林床に流入する量が広葉樹に比べ大きいことが知られており、酸性雨や大気汚染物質移動の問題が起りやすいといわれている(Kim *et al.*, 2000)。

従って土壌が酸性化された針葉樹林では、広葉樹林に比べて硫酸や窒素など酸性化を促進する物質が多く蓄積され、その結果、森林の生産性の低下および森林生態系の衰退が問題になってくる。

本研究では降雨が樹体を通り、土壌を経て渓流水に移動する過程で起こる質的な変化を把握することを目的とし、森林小流域のアカマツ林において降雨をはじめ樹幹流、林内雨、土壌水および渓流水に関して水質調査を実施した。

2 調査概要

2.1 調査地の概要

調査地を図1に示す。調査対象地は韓国北東部の江原道春川市東面装学里内のアカマツ林で、調査地の流域面積は10haである。調査地域の母岩は花崗岩で土壌は褐色森林土である。調査木は、調査地内の溪流を中心に左岸・右岸の斜面で4本ずつ計8本(図1中の△印、●印)を選定した。調査対象木の標高は115m～135mの範囲であり、傾斜は0～32°である。

2.2 調査方法

降雨量は春川気象庁で測定したデータと、江原大学校山林科学大学2号館屋上に設置した自記雨量計で連続的に測定したデータを参考にした。

調査期間は1999年3月19日から2003年9月19日で、基本

¹愛媛大学大学院連合農学研究科博士課程, Ph.D. Student, the United Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama-shi, Ehime, 790-8566 Japan

²琉球大学農学部教授, Professor, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara-cho, Okinawa, 903-0120 Japan

³江原大学校山林科学大学教授 Professor, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon, 200-701 Korea

⁴愛媛大学農学部教授, Professor, Faculty of Agriculture, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama-shi, Ehime, 790-8566 Japan

図1：調査対象地の詳細

表1：調査木の概況

測定木	方位	樹冠幅 (長/短) (m)	標高 (m)	傾斜 (°)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	地下高 (m)
R-1	N70°W	10.0/9.0	125	17°	9.5	26	5.1
R-2	S30°W	6.0/5.0	125	26°	9.0	20	6.0
R-3	S60°W	5.0/5.0	125	25°	13.0	17	4.5
R-4	N50°W	5.0/4.0	135	2°	6.0	13	2.9
L-1	N70°E	9.0/7.5	125	10°	12.0	29	7.5
L-2	S70°E	5.0/4.5	125	32°	7.0	16	4.5
L-3	N87°E	5.5/4.5	130	32°	7.5	17	3.6
L-4	S30°E	8.2/7.0	115	16°	14.0	29	7.2

的には月1回の間隔で採水を行なった。樹幹流、林内雨、土壌水および渓流水に関しては、冬期(11月～2月)は積雪により採水が困難になるため測定は実施しなかった。

pHとECは、ORION社MODEL 1230を用いて現地で観測を行ない、その他の水質項目は実験室で実施した。

採水した試料は、0.2μmのMFでろ過後試験水とした。なお保存する場合は4℃で冷蔵保存した。

陰イオンの測定は、イオンクロマトグラフィー(DIO-NEX社DX120)で、陽イオンの測定は分光光度計(島津製作所AA-6800)を用いて分析した。

各測点の採水については調査地内の調査木より樹幹流と林内雨を採水し、土壌水の採水は図1に示した■の地点で、渓流水は◆の地点で採水した。なお土壌水は2地点で得た値の平均値を求めた。各調査木の位置と樹高・

胸高直径等は表1に示す。林外雨は、調査地内露場に直径22cmのポリエチレン製ロートを装着した20ℓのポリエチレン筒を用いて採水した。

林内雨は調査木樹冠の下で、林外雨採水と同操作で採水した。樹幹流はポリウレタンレーバーを樹幹に付け、シリコンチューブをつないでおこない、土壌水はライシメータを土壌表面から10cm深に設置して採水した。また渓流水は調査地内最下端部の溪流で採水した。

3 結果および考察

3.1 降雨量

図2に降水量の経時変化を示す。観測年により多少異なるが全般的にみると、11～3月の期間における過去5年間の

月平均降水量は50mmで、また6~9月の期間においては月平均降水量が100mm以上であった。結果より、6~9月の期間に降雨が集中していることがわかった。

2003年は降水量が1793.3mmと調査した期間の中では最も多く、特に夏季(7~9月)の期間に年間の約半分が集中していることがわかった。

図2: 降雨量の経時変化

3.2 黄砂の発生回数

表2に黄砂の発生回数を示す。観測は春川市気象庁で測定したデータを用いた。

過去5年間の結果より、黄砂の発生を月別にみると3月に発生回数が最も多いことがわかった。また、2001年は他の観測年に比べ発生回数が極端に多く、特に3月の発生回数と2000年および2001年の年間の回数とほぼ同数であり、1999年の約4倍、2003年の約2倍、黄砂が発生していることがあきらかになった。

表2: 黄砂の発生回数

年	3月	4月	5月	他の月	合計
1999	0	0	0	3	3
2000	6	4	0	0	10
2001	13	8	4	4	29
2002	6	4	0	0	10
2003	4	1	0	0	5

3.3 pHの経時変化

各測点におけるpHの経時変化を図3に、月のpH平均値と測定値の変動範囲を表3に示す。

表3より各測点のpH平均値は、土壌水>渓流水>降雨>林内雨>樹幹流の順であった。また、調査期間中にpH5.6以下(酸性雨)の降雨が確認できたのは10回であった。

林内雨のpH平均値は調査期間を通して6.0以下であり、季節による大きな変化はみられなかった。樹幹流の平均pHは林内雨と同様に調査期間を通して6.0以下であった。樹幹流のpHは3~5月に低い値を示し、6月以降に高くなる傾向がみられた。これは樹冠と樹皮に沈着していた酸性物質の溶脱と有機酸により変化するものと考えられる(真田ら, 1992)。

一方、渓流水や土壌水のpHが降雨のpHより高い値を示した要因としては、降雨発生時に、森林内樹木・地被植物、森林土壌あるいは母岩の土壌孔隙と土質の差により

多様な物質がイオン結合により反応した結果、溪流に流出したと推察される(Won et al., 1999)。

土壌水のpHは、1999年3月から2002年8月までのpHは8.0以上と高い値を示しているが、それ以降は6.0以下に低下していることが明らかになった。2002年9月以降濃度が低くなった要因としては、周辺の土地利用の形態が異なったためpHが低くなったものと思われる。

図3: pHの経時変化

3.4 ECの経時変化

各測定におけるECの経時変化を図4に、ECの平均値と測定値の変動範囲を表3に示す。

表3より各測点のEC平均値は、土壌水>樹幹流>林内雨>渓流水>降雨の順であった。渓流水は季節による大きな変化はみられなかった。大類・相場(1995)によると、山地渓流水のECは30~150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲であるといわれており、本調査の測定値もこの範囲内で推移していた。

図4: ECの経時変化

樹幹流と林内雨のEC平均値は、期間中を通して春季(4~5月)に高く、特に2000年と2001年のEC平均値は、300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を超える高い値であった。

また、樹幹流と林内雨を降雨量と比較すると、降雨量が少ない10~5月は高い値を示し、降雨量が多い7~9月は低

い値であった。

これらの要因として植物成長期による影響が考えられる。成長休止期である冬季に養分が篩部組織に蓄積されるため春季に高い値を示し、反対に植物成長期である夏季と秋季には蓄積された養分が消費され、成分が減少するため、夏季から秋季にかけて低い値を示すものと思われる(李, 1995)。

もう1つの要因は降雨量による影響であり、降雨発生間隔が短くなるため、相対的に樹体内の吸着物質が減少し、その溶存イオン濃度が低下すると考えられる。(全ら, 2001)。

これらのことから、ECの値の増減は、降雨量の多少による影響をはじめ、黄砂などの乾性降下物の量や発生回数による影響と、樹皮の吸着容易性および樹皮の溶脱成分により変化すると推察される。

3.5 イオン濃度の変化

各測点における陽イオンの経時変化を図5に、平均値と測定値の変動範囲を表3に示す。

① Ca^{2+} :

表3より各項目の Ca^{2+} 平均値は、土壌水>樹幹流>林内雨>降雨>渓流水の順であった。樹幹流、林内雨および土壌水の Ca^{2+} 濃度は、他の測点に比べ高い値を示した。季節別にみると、樹幹流と林内雨の Ca^{2+} 濃度はEC濃度と同様に春季に高い値であることがわかった。

降雨中の Ca^{2+} 濃度と樹幹流、林内雨、土壌水、渓流水の Ca^{2+} 濃度の関係を、統計プログラムSPSSを用いて検討した。

降雨と樹幹流の Ca^{2+} 濃度の相関係数は0.824で、降雨と林内雨は0.819であり、ともに正の相関がみられた。

また、降雨と土壌水、渓流水の間には有意な関係は認められなかった。なお、土壌中の Ca^{2+} 濃度は、降雨の影響より母岩および岩石の含有成分をはじめ、風化や他のイオンの含量に影響をうけているのではないかとと思われる。

② Na^{+} :

表3より各測点の Na^{+} 平均値は、渓流水>樹幹流>土壌水>降雨>林内雨の順であった。

樹幹流、林内雨、土壌水および降雨の Na^{+} 濃度は低い値を示し、渓流水の Na^{+} 濃度は他の測点に比べ3倍以上の高い値を示した。

降雨と樹幹流、林内雨、土壌水、渓流水中の Na^{+} 濃度との相関関係をみると、降雨と樹幹流、林内雨および土壌水の Na^{+} イオン濃度との間に正の相関がみられた。

③ K^{+} :

表3より各項目の K^{+} 平均値は、樹幹流>林内雨>土壌水>降雨>渓流水の順であった。

降雨と渓流水中の K^{+} 濃度は低い値であり、林内雨と土壌水中の K^{+} 濃度は、降雨と渓流水の3倍以上の値を示し、また樹幹流は4倍以上の高い値を示した。これは K^{+} 濃度が他のイオンに比べ移動性が強く、樹木は成長しながら継続的に溶脱が起きるためであると考えられる(江崎ら, 1998)。

K^{+} 濃度は土壌内の岩石に由来する元素であるため、流出水中の K^{+} 濃度は地質の影響をうけていると思われる。

降雨中の K^{+} 濃度と樹幹流、林内雨、土壌水および渓流水中の K^{+} 濃度の関係をみると、全ての測点において正の相関がみられた。

④ Mg^{2+} :

表3より各項目の Mg^{2+} 平均値は、林内雨>土壌水>樹幹流>渓流水>降雨の順であった。

Mg^{2+} 濃度は全ての測点において、季節による変化は認められなかった。しかし、2001年8月以降は全ての測点が同じ値で推移していることがあきらかになった。

降雨中の Mg^{2+} 濃度と、樹幹流、林内雨、土壌水および渓流水中の Mg^{2+} 濃度の関係は、降雨と樹幹流、林内雨、渓流水との間に正の相関がみられた。

図5: 陽イオンの経時変化

3.6 陰イオンの変化(NO_3^- , SO_4^{2-})

期間中の各測点の NO_3^- と SO_4^{2-} の平均値と各測点における測定値の変動範囲を表3に、各イオンの経時変化を図6に示す。

表3より各項目の NO_3^- 平均値は、土壌水>樹幹流>林内雨>降雨>渓流水の順であった。

次に SO_4^{2-} 濃度を示す。 SO_4^{2-} 平均値は、樹幹流>土壌水>林内雨>降雨>渓流水の順であった。

結果より、ほとんどの測点において陰イオンの濃度は陽イオンに比べて高い濃度を示した。

土壌水に溶出している SO_4^{2-} 濃度の大部分は汚染物質により大気中から降下したものであると思われる。また、土壌中の NO_3^- 濃度は大気からの降下物(黄砂等)以外に土壌内微生物等の影響も受けていると考えられる。また、樹幹流と林内雨の測点において、 SO_4^{2-} および NO_3^- 濃度が降雨より高い値を示したのは、人為的な汚染物質である硫酸化物(SO_x)や窒素酸化物(NO_x)などの乾性沈着物が降雨により森林内に流入されるためであると考えられる。

降雨、樹幹流、林内雨および土壌水の NO_3^- 濃度は降雨量が少ない春季と秋季に高い値を示し、降水量が多い夏季に低い値を示した。これは夏季に集中して多量の降雨が発生することにより流出水量が増加し、イオン成分が希釈されるため低い値を示すものと考えられる。

一方、樹幹流と林内雨の SO_4^{2-} 濃度と NO_3^- 濃度において季節的な変化をみると、同様の変動を示した。

陰イオン濃度は2001年に150ppmと他の年に比べ高い値を示した。この要因としては、2001年は他の年に比べ黄砂の発生日数が多かった点と、降雨量が少なかったため陰イオン濃度が高い値を示したのではないかとと思われる。

陰イオン濃度は、季節的による大きな変化はみられなかった。樹幹流、林内雨、土壌水は、降雨に比べ高い値を示した。陰イオン濃度の高低は降雨量の増減により変化することがわかった。

降雨の NO_3^- 濃度と樹幹流、林内雨、土壌水および渓流水中の NO_3^- 濃度との関係を見ると、降雨と樹幹流および土壌水の間に正の相関がみられた。

また、降雨の SO_4^{2-} 濃度と樹幹流、林内雨、土壌水および渓流水中の SO_4^{2-} 濃度との関係は、降雨と林内雨および土壌水の間に正の相関がみられた。

図6: 陰イオンの経時変化

4 まとめ

江原道春川市東面装学里で、4年半調査した結果を下記にまとめた。

表3: 降雨等の各調査項目の pH, EC, 陽イオンおよび陰イオンの平均値と変動範囲

		降雨	樹幹流	林内雨	渓流水	土壌水
pH	平均値	6.03	5.33	5.83	6.48	7.74
	範囲	4.38-7.87	4.49-5.84	4.98-6.46	5.27-7.90	5.04-9.08
EC ($\mu\text{S/cm}$)	平均値	37	110	63	51	203
	範囲	5-214	11-619	10-291	40-87	10-329
Ca^{2+} (ppm)	平均値	1.83	6.22	3.55	1.35	9.67
	範囲	0-7.19	0.46-45.42	0.09-28.65	0-6.35	0.68-21.08
Na^{+} (ppm)	平均値	1.56	2.32	1.51	7.49	1.64
	範囲	0.35-8.27	0.46-10.11	0.13-9.21	4.98-9.83	0.58-4.97
K^{+} (ppm)	平均値	1.47	6.62	4.68	1.12	4.17
	範囲	0.55-4.79	1.54-14.47	1.16-14.07	0.50-2.56	1.43-6.12
Mg^{2+} (ppm)	平均値	0.45	2.62	1.99	0.99	3.44
	範囲	0.02-1.82	0.09-10.88	1.16-14.07	0.50-2.56	1.43-6.12
NO_3^- (ppm)	平均値	3.69	15.01	7.40	3.35	23.31
	範囲	0.13-22.59	0.6-139.28	0.49-59.25	0.24-15.4	0.92-77.05
SO_4^{2-} (ppm)	平均値	7.05	13.21	8.75	6.41	8.92
	範囲	0.45-97.97	0.65-147.11	0.45-60.05	0.48-19.20	1.84-35.29

①pH平均値は、土壌水>渓流水>降雨>林内雨>樹幹流の順であった。アカマツ林では降雨が森林地を通過する際、樹幹流や林内雨の形態で通過し、樹幹流や林内雨のpHは降雨のpHより低い値であることがわかった。

②EC平均値は土壌水が一番高い値を示し、降雨が一番低い値を示した。なお樹幹流、林内雨のEC平均値は、春季に高い値を示した。

③黄砂の発生回数が他の年に比べて多く、降雨量が少ない月に、EC値が $300 \mu\text{S/cm}$ を超えることが明らかになった。

④ Ca^{2+} 濃度は陽イオンの中で一番高い値を示した。降雨をはじめ樹幹流、土壌水などには Ca^{2+} 濃度が多く含まれており、降雨日数や降雨量などに関係があると思われる。また降雨に含まれている Ca^{2+} 濃度は樹幹流と林内雨の Ca^{2+} 濃度に影響を与えることが分かった。

⑤渓流水の Na^+ 濃度は降雨等の Na^+ 濃度に比べ、3倍以上の高い値を示した。

⑥ K^+ 濃度は樹幹流や林内雨で高い値を示しており、樹体で溶脱が起きているため、樹幹流や林内雨で高い値を示したものと思われる。

⑦陰イオンの濃度はほとんどの測点において陽イオンの濃度より高い値を示した。また NO_3^- 濃度および SO_4^{2-} 濃度は樹幹流、林内雨および土壌水で高い値を示した。

⑧樹幹流と林内雨は黄砂の発生日数が多かった年にECをはじめ陽イオン、陰イオン濃度が高い値を示していることから、黄砂の影響が森林にも影響をおよぼしているものと考えられる。

以上の結果より、森林地を降下する降雨成分の季節的变化は降雨量や黄砂などの影響を受けていると思われる。

5 おわりに

4年半の調査データを基に針葉樹(アカマツ林)における降雨と樹幹流および林内雨、土壌水、渓流水の関係を考察した。今後は日本の針葉樹および広葉樹における降雨と樹幹流、林内雨、土壌水ならびに渓流水について同様の調査を実施し、両者の比較検討を行なう予定である。

引用文献

- [1] 全槿雨・芮宣榮・江崎次夫 (2001): 韓国春川市近郊のアカマツ林内における降雨成分の動態, 日本雨水資源化システム学会第9回研究発表会講演要旨集, pp.46-50.
- [2] 江崎次夫・河野修一・藤久正文・福島忠雄・岩本 徹・朴完根・幸喜善福 (1998): 樹幹流の樹種特性と季節変動, 日本雨水資源化システム学会誌, 3 (2), pp.25-32.
- [3] Joo, Y.T. and Kim, Y.C. (1993): Effects of Artificial Acid Rain on Chemical Properties of Korean Forest Soil, *J. Korean For. Soc.* 83(3), pp.280-285.
- [4] Kim, K.J., Kun, W.C., Ezaki, T. and Inoue, S. (2000): The Amount of Stemflow and Throughfall by Rainfall in *Pinus densiflora* Forest, *J. of Rainwater Catchment Systems*, 5(2), pp.13-19.
- [5] 金珉植・西門 原・全槿雨 (2001): 江原道春川市地域における個樹種樹幹流及び電気伝導度変化, 韓国林学会誌, 90(4), pp.413-419.
- [6] 李景俊 (1995): 樹木生理学, ソウル大学校出版部, pp.508-514.
- [7] 李壽熾 (1989): 大気汚染および酸性雨が森林生態系の土壌酸度および養料の分布に与える影響, 韓国林学会誌, 78(1), pp.11-25.
- [8] 真田勝・大友玲子・真田悦子・太田誠一 (1992): 林内外における降水のpHおよび塩基特性, 日林北支論誌, 40, pp.41-43.
- [9] Min, H.L., Jin, S.H., Eui, J.H. and Chan, K.S. (1989): A study on the chemical composition of precipitation on during the period of sandy dust phenomena. *J. KAPRA*, 5(2), pp.1-11.
- [10] 大類清和・相場芳憲 (1995): 森林小集水域での水質変化の過程, 水文・水資源学会誌, 8 (4), pp. 367-381
- [11] Smith, W.H. (1990): *Air Pollution and Forests, Interaction between Air Contaminants and Forest Ecosystem*, Springer-Verlag, New York, pp. -618.
- [12] Won, S., Min, S.K. and Kun, W.C. (1999): Study on Water cycle process in *Pinus densiflora* pH values and EC, *J. Res. For. Kangwon. Nat. Univ.*, No19, pp. 28-32.

この論文の公開の質疑または討議は2005年6月30日まで受付けます。