

富士山周辺の降水の水質

Water Quality of the Precipitation around the Mt. Fuji

檜山 哲哉¹⁾・佐藤 新²⁾・安原 正也³⁾・丸井 敦尚³⁾

鈴木 裕一⁴⁾・高山 茂美⁴⁾

Tetsuya HIYAMA¹⁾, Arata SATO²⁾, Masaya YASUHARA³⁾・

Atsunao MARUI³⁾, Yuichi SUZUKI⁴⁾ and Shigemi TAKAYAMA⁴⁾

I はじめに

ここ数年、地球環境に与える人間活動の影響について評価しようとした研究が数多く見受けられる。特に酸性雨に関する研究はその最たるものである。従来の酸性雨に関する研究は、次の二つの視点に注目したものが多かった。一つは、ある気象観測地点において数年間継続して降水を採取し、そのpHの時間的変動を追ったものであり、もう一つは、ある一時期に多数の観測地点で降水を採取し、pHの空間的分布を調べたものである。前者については、観測開始がごく最近であり、観測継続期間が比較的短いために、酸性雨の発生時期についての十分な議論が不可能になっている。ただ一つ言えることは、日本においては高度経済成長期以降、降水のpHが急速に下がり始めたということである。このことは、四日市市と熊本市における降水のpH観測値の時間変化(北野, 1995)を見れば、一目瞭然である。一方後者については、世界各地における観測結果が報告されており、最近における酸性雨による被害状況等の地理的情報が得られるようになってきている。日本

では、環境庁が精力的にこの問題に取り組んでおり、全国28ヶ所の国設大気測定所に酸性雨自動測定機を設置し、降水の化学成分の分析も行っている(北野, 1995)。しかし、あくまでも空間的分布にとどまっておき、降水の降下にもなうpHの鉛直的变化については、研究例がほとんど無い。酸性雨の状況を調べるためには、その空間的分布だけでなく、鉛直的分布、あるいは時間的変動を調べ、降水中の化学成分を定量分析することでその起源等を明らかにすることが肝要である。

富士山頂は3,776mの孤立峰であり、降水量分布に対する複雑な山岳地形の影響を無視できる。よって、降水中の化学成分の空間的・鉛直的分布、及び時間的変動の評価とその起源についての考察が比較的簡単である。土器屋ほか(1993)は富士山の降水の化学成分の季節変化を調べた。しかし、富士山の東麓斜面における観測結果しか得られていないために、富士山周辺全域での降水中の化学成分の空間的分布、鉛直的分布は明らかにされておらず、孤立峰という地形的特性を生かした研究が待たれていた。そこで本研究では、富士山頂および各斜面の降水を

¹⁾ 日本学術振興会・特別研究員(現:名古屋大学大気水圏科学研究所) ²⁾ 筑波大学大学院・環境科学研究科

³⁾ 工業技術院・地質調査所 ⁴⁾ 筑波大学地球科学系

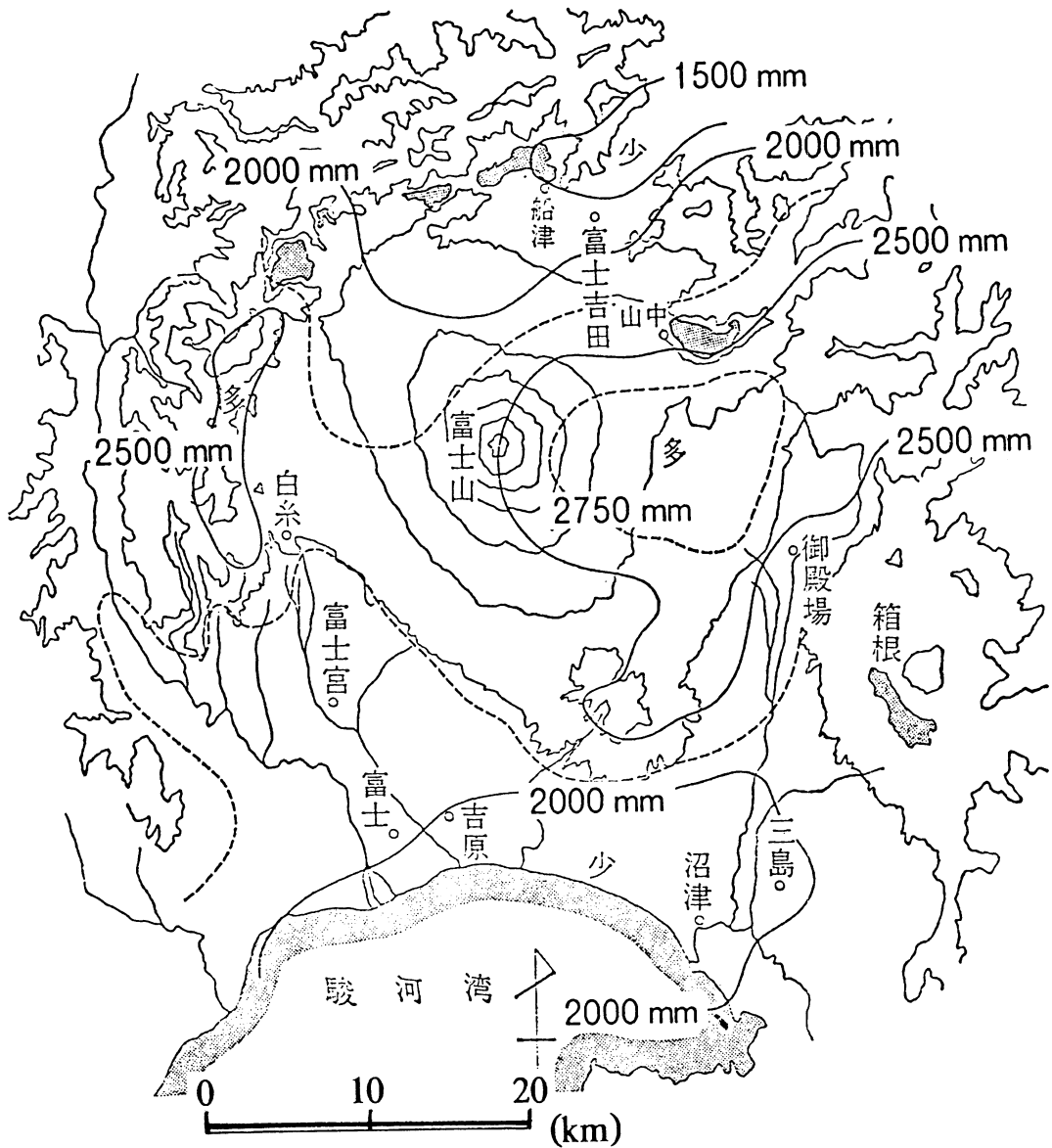


図1 富士山周辺の年総降水量の分布 (30ヶ年平均値)
 (木澤ほか, 1969を一部改変)

1年間採取し、降水中の化学成分を定量分析し、その鉛直的分布と空間的分布を明らかにした。

II 富士山周辺の降水量の分布特性

富士山頂では厳しい気象条件により、藤村(1971)による報告以外には、現在までに降水量の観測値は報告されていない。この原因は、強風のた

め鉛直方向よりも水平方向の降水を採取してしまうために、気象庁による降水量測定法では降水量を評価できないためである(土器屋ほか, 1993)。しかし、大まかな富士山周辺の年総降水量の空間分布が木澤ほか(1969)により得られている(図1:巻末注1参照)。図1によれば、年総降水量は富士山の東麓斜面で比較的多く、富士山西麓の天守山地でも

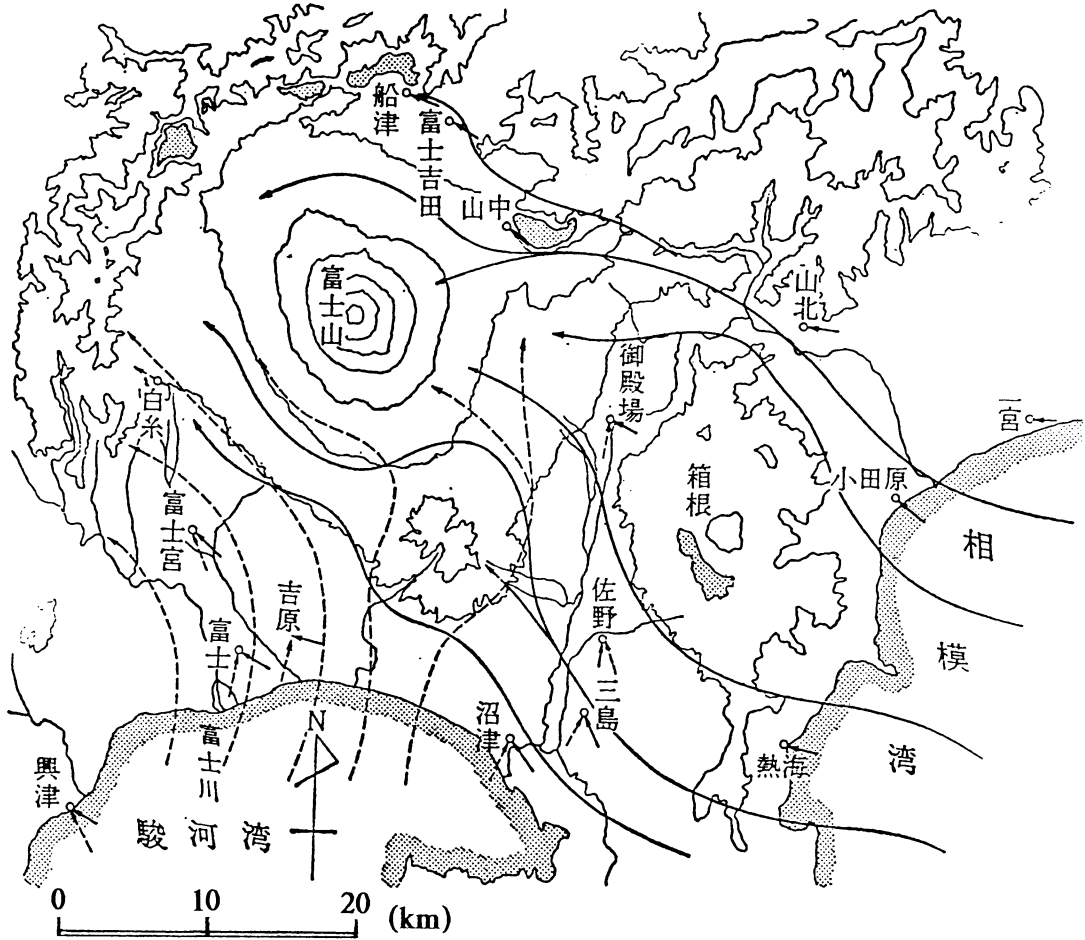


図2 富士山麓における地表面近くの風の流線
 太実線は低気圧が遠州灘海上にある場合、点線は華北や日本海上に低気圧がある場合。
 (木澤ほか, 1969を一部改変)

多い。一方河口湖から富士吉田市にかけての桂川に沿う平野部では年総降水量が少なくなっている。三島市、沼津市から富士市にかけての駿河湾沿岸地域では2,000mm以下と比較的少ないのも特徴的である。この年総降水量分布には、富士山周辺における地表面近くの風の流線分布が影響していると考えられる。富士山周辺の風の流線を、図2(木澤ほか, 1969より引用)に示す。図2によれば、低気圧が遠州灘海上に存在する場合の風の流線は相模湾から富士山の東麓にかけて、箱根山を回り込んでの流線(図2の実線)が2つ存在する。一方、低気圧が日本海上に存在する場合には、駿河湾から富士山の西麓に向か

う流線(図2の点線)が存在する。図2の実線の風系は、日本の南岸沿いに低気圧が通過する場合にみられる風系であり、いわゆる「南岸低気圧型」の気圧配置を示す場合にみられる。一方図2の点線の風系は、日本の東方海上が高圧部、西方の華北方面が低圧部となっている場合の、いわゆる「東高西低型」の気圧配置を示す場合にみられる。木澤ほか(1969)によれば、富士山麓に日降水量が20mm以上あった時の気圧配置型を百分率で示せば、図2の実線の風系が出現する割合は年間52%であり、図2の点線の風系が出現する割合は年間11%となる。つまり富士山麓の降水は、その大部分が図2の実線・点

線双方の風系により生じていると考えられる。以上により、図1と図2から、富士山東麓の降水は、相模湾から供給され、富士山西麓の降水は駿河湾から供給されるものと考えられる。一方、河口湖周辺の水蒸気の主な供給源は相模湾であるが、富士山東麓での流線の斜面上昇により水蒸気が降水となって奪われるために、その先の河口湖周辺では年総降水量が少なくなるものと考えられる。

III 研究方法

1) 降水の採水

降水採水装置の設置地点の分布を図3に示す。降水採水装置は、空間的、鉛直的にまばらに設置することが望ましい。そこで、山頂と東・南・西・北の各斜面に少なくとも1個以上の採水装置を設置するようにした。装置の数に限りがあるので、自動車でのアプローチが比較的簡単な南斜面と北斜面に限り、標高を変えて複数の装置を設置した。その結果、山頂に1ヶ所、東斜面と西斜面に1ヶ所、南斜面に3ヶ所、北斜面に2ヶ所の計8ヶ所に採水装置を設置している。山頂においては、装置の設置・撤収が可能な夏季に、採水の開始・終了を設定した。これにあわせて山麓斜面上の装置も設置・撤収した。したがって本研究における降水の採水期間は、1993年8月下旬から1994年8月中旬までの約1年間とした。

2) 降水採水器

降水の採水は、嶋田・三条(1987)に基づき降水採水器を作成し、図3の各地点に設置した。採水器の概観については、風早・安原(1994)が八ヶ岳において使用したものと同様のものである(風早・安原, 1994のFig.4を参照のこと)。この採水器によって得られた降水サンプルは、同時に安定同位体の測定にも使用している。採水器に取り入れられているピンポンボールによって、採水器から外への蒸発を防ぐことができる。同位体比が既知の少量の水をタンクに入れ、約一ヶ月放置する予備試験により、この採水器では、サンプルの同位体比に変化がないことが確かめられている。したがって、本採水器によれば、蒸発による化学成分の変化をも防ぐことが可能であると考えられる。

採水装置の設置に際しては、風による装置の転倒や表流水の混入等を防ぐため、装置全体を塩化ビニル製容器に入れ、数十センチメートルの穴を掘り、装置全体を固定した。ただし、土粒子等かはね返り、装置内に混入するのを防ぐため、降水受入部分が地表面から数十センチメートル突出するように固定した。

3) 水質分析方法

採取した降水は実験室に持ち帰り、不純物を取り除くためにろ過(pore size $0.22\ \mu\text{m}$ のメンブランフィルターを使用)して測定に用いた。陰イオンのうち HCO_3^- についてはJISK0101に基づき、MR混合指示薬でpH4.8アルカリ度(1/100N硫酸滴定)として定量分析した。その他の陰イオン(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})は、筑波大学地球科学系・鈴木研究室のイオンクロマトアナライザー(日本ダイオネクス社, QIC, IonPac AS4A)により分析した。陽イオン(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})及び SiO_2 については、筑波大学分析センターのプラズマ発光分光分析装置(Nippon Jarrell Ash社, ICAP-757v)を用いて定量分析を行なった。

IV 降水の水質の鉛直的分布

降水のpHと標高との関係を図4に示す。標高に対してpHの増減が小さいが、南西斜面では、高度の低下とともにpHの若干の低下が見受けられる。北東斜面の標高1,000m付近の2つの地点では、山頂よりもpHが若干高くなっているが、この原因は不明である。ここで言えることは、本研究で採取した降水サンプルは、降水採水器の中で1年間放置されたものであるため、採水器の中で降水サンプルと容器内の空気との間で二酸化炭素交換が行われ、pHの値が変化してしまった可能性があることである。今後、この種の研究を行う場合には、一雨毎のpHの測定が望まれる。

同様に降水の電気伝導度と標高との関係を表したものが、図5である。高度の低下に対する電気伝導度の増加が顕著であり、人間活動による大気汚染や海送塩の降水への混入が原因として考えられるが、そのどちらに原因の重さがあるかは、この図からだ

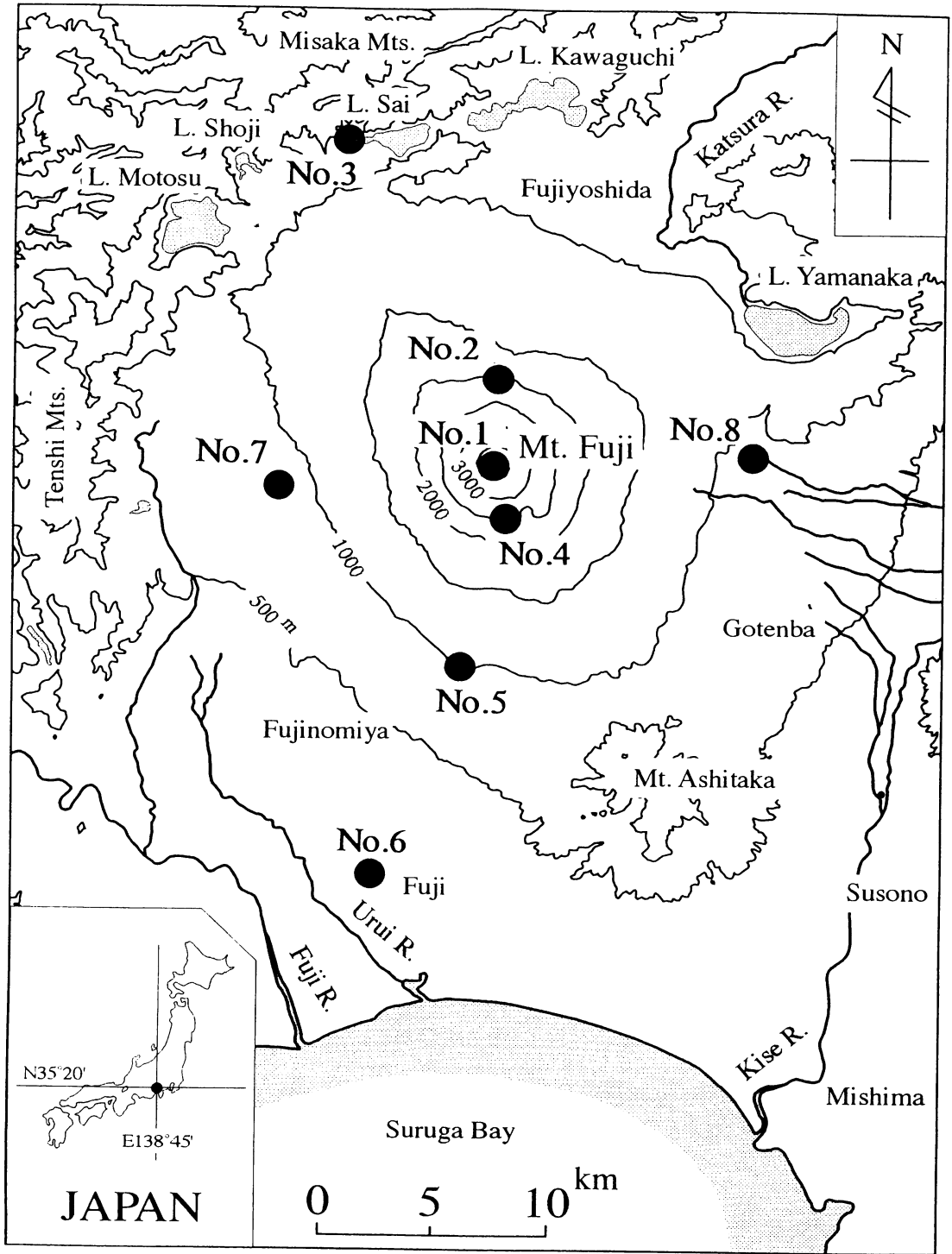


图3 降水採水地点分布

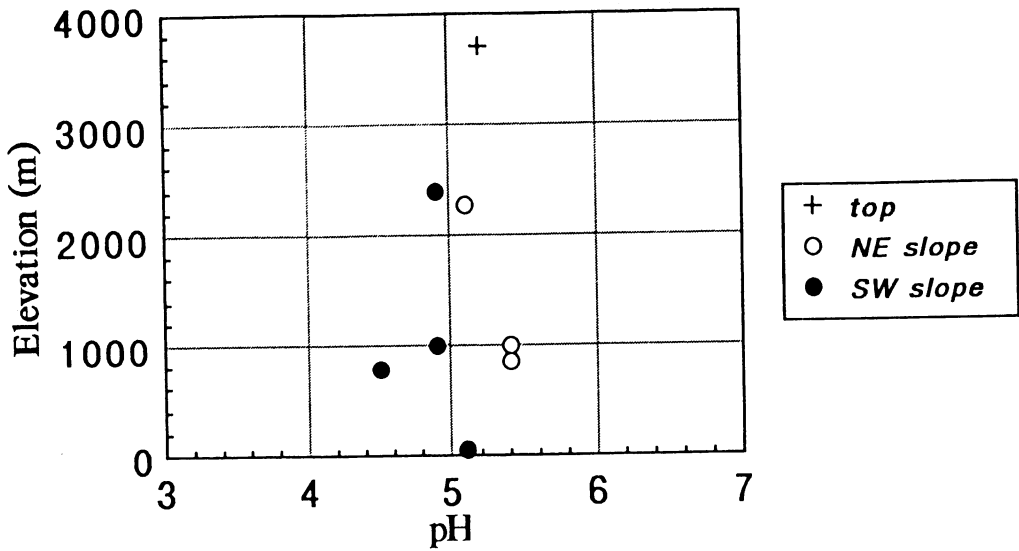


図4 降水のpHと標高との関係

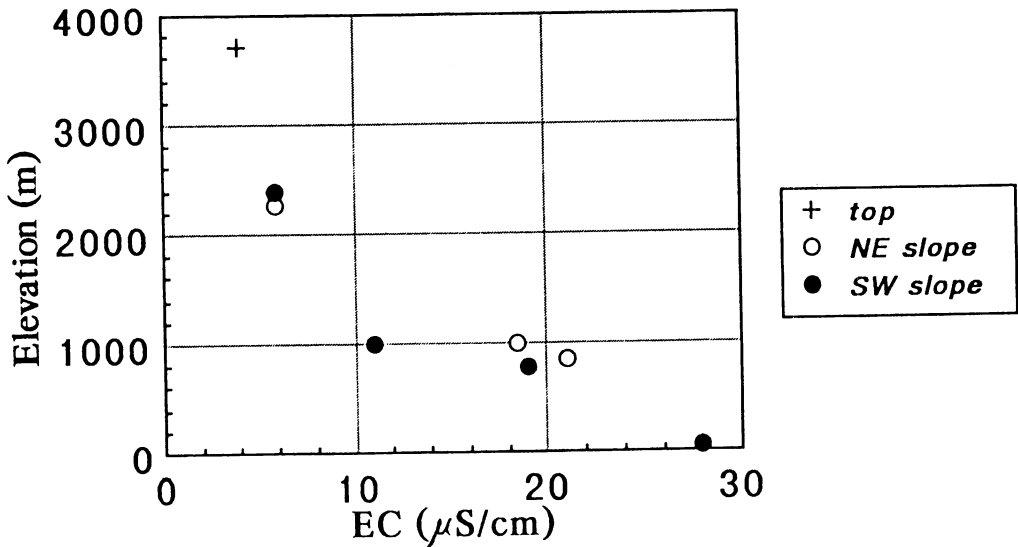


図5 降水の電気伝導度と標高との関係

けでは判別することができない。そこで、降水中の化学成分と標高との関係を図6に示す。北東、南西の各斜面別に、陰イオン、陽イオン別に表現してある。図6の陰イオン((a)(c)の両図)に注目すると、北東斜面、南西斜面ともに、高度の低下とともに Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の各イオン濃度が高くなっている。一方陽イオン((b)(d)の両図)では、高度の低下にともなうイオン濃度の増加は、 Ca^{2+} に顕

著にみられる。 Na^+ や K^+ には顕著な増加がみられないことから、高度の低下にともなう電気伝導度の増加とpHの低下には、海送塩の降水への混入よりも、人間活動による大気汚染物質の降水への混入の影響の方が大きいと考えられる。あるいはまた、黄砂等の砂塵の混入も考えられるが、この判別については、特に春季の集中観測が必要になってくる。

土器屋ほか(1993)は、標高が低くなるにつれて

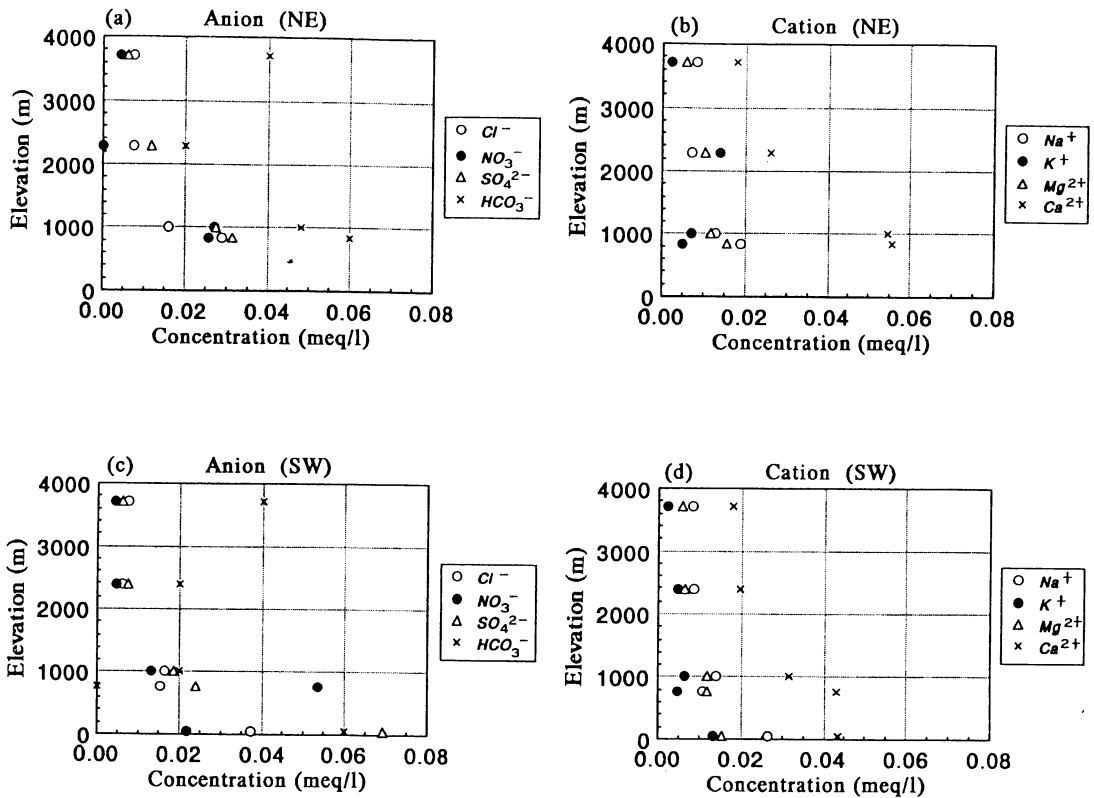


図6 降水の化学成分と標高との関係
 (a) 北東斜面における陰イオン濃度と標高の関係
 (b) 北東斜面における陽イオン濃度と標高の関係
 (c) 南西斜面における陰イオン濃度と標高の関係
 (d) 南西斜面における陽イオン濃度と標高の関係

表1 降水採水地点と水質分析結果一覧

地点番号	地点名	斜面方向	標高 (m)	水温 (°C)	pH	電気伝導度 (μS/cm)	降水量 (mm)	Cl ⁻ (mg/ℓ)	NO ₃ ⁻ (mg/ℓ)	SO ₄ ²⁻ (mg/ℓ)	HCO ₃ ⁻ (mg/ℓ)	Ca ²⁺ (mg/ℓ)	K ⁺ (mg/ℓ)	Mg ²⁺ (mg/ℓ)	Na ⁺ (mg/ℓ)
1	富士山頂	—	3700	7.7	5.2	3.9	373.5	0.27	0.26	0.29	2.44	0.19	0.08	0.36	0.07
2	五合目	北東	2280	14.5	5.1	5.9	433.8	0.27	0.00	0.56	1.22	0.17	0.55	0.52	0.13
3	漁眠荘	北東	1010	—	5.4	18.5	563.9	0.57	1.68	1.34	2.93	0.30	0.28	1.10	0.14
4	新五合目	南西	2390	12.6	4.9	5.8	746.7	0.21	0.28	0.37	1.22	0.20	0.18	0.40	0.08
5	天照教社	南西	1000	18.8	4.9	11.0	590.6	0.59	0.83	0.90	1.22	0.32	0.25	0.64	0.15
6	富士市	南西	60	29.3	5.1	28.0	440.5	1.32	1.36	3.33	3.66	0.61	0.51	0.87	0.19
7	養鶏場	南西	780	—	4.5	19.0	522.7	0.54	3.33	1.15	0.00	0.25	0.18	0.86	0.15
8	須走料金所	北東	850	—	5.4	21.0	516.8	1.03	1.59	1.52	3.66	0.44	0.19	1.11	0.19

pHが低くなり、その原因として窒素酸化物の影響を考えている。本研究では、北東、南西斜面ともに、標高が低くなるにつれて硝酸イオン濃度だけでなく、硫酸イオン濃度も増加していた。したがって、pHの低下には、窒素酸化物だけでなく、硫酸酸化物の

効果も考えられる。

V 降水の水質の空間的分布

富士山周辺の降水の水質分析結果を表1に、またその空間的分布を図7にヘキサダイアグラムで表現

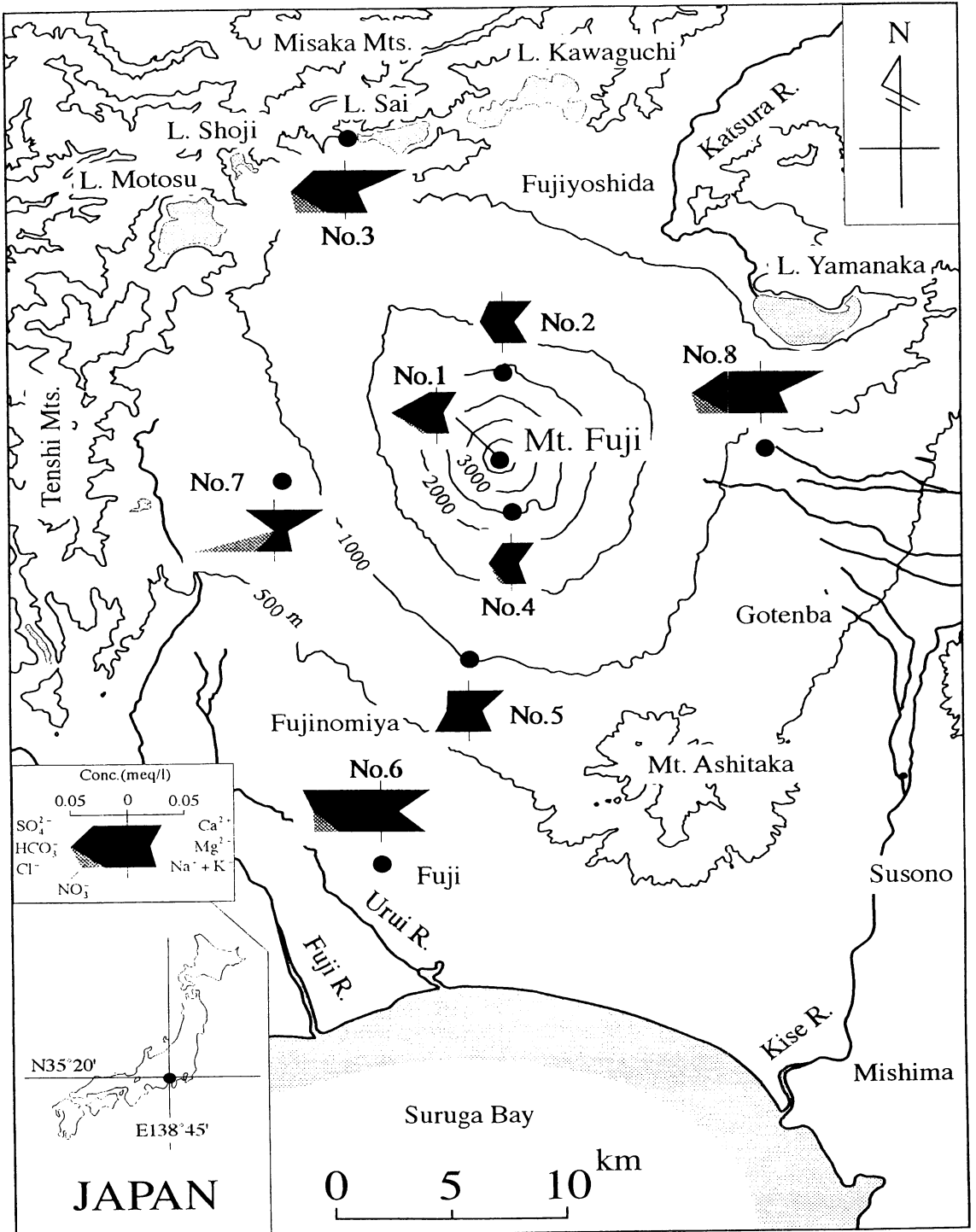
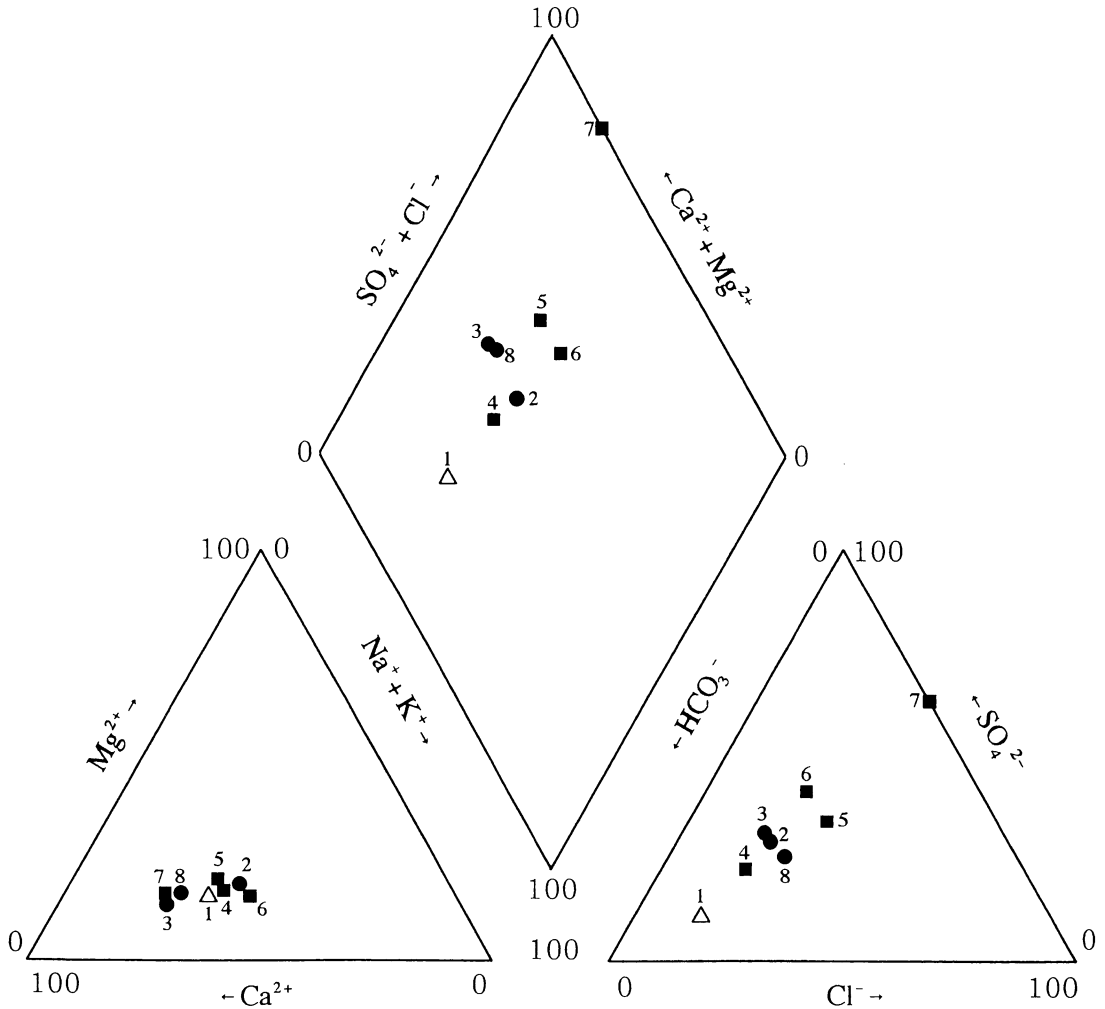


図7 ヘキサダイアグラムによる降水の水質の空間分布



- | | | |
|---------|----------|--------------------------|
| 1. 富士山頂 | 5. 天照神社 | △ 山頂
■ 南西斜面
● 北東斜面 |
| 2. 五合目 | 6. 富士市 | |
| 3. 漁眠荘 | 7. 養鶏場 | |
| 4. 新五合目 | 8. 須走料金所 | |

図8 パイパーダイアグラムによる降水の水質特性

した。北東斜面側では、標高に関係無く、 $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型の水質組成を示し、標高が低くなるとやや NO_3^- が多くなることからわかる。一方、南西斜面側では、標高が高い新五合目を除いた3地点

(No.5の天照神社、No.6の富士市、No.7の養鶏場)では、ダイアグラムが他の地点と比較して互いに大きく異なっている。これは、風の流線(図2)から考えると、愛鷹山の西側を駿河湾から富士山西麓に

向かう風系においては、人間活動による大気汚染物質の降水への混入が大きいことを裏付けている。汚染源としては、富士市付近にあると考えられるが、この詳細と汚染物質の起源を明らかにするためには、さらに調査・研究を行なう必要がある。

図8に、採取・分析した水質の全データを、山頂、南西斜面、北東斜面別にパイパーダイアグラムで表現した。この図から、降水中の化学成分組成は、陽イオンよりも陰イオンの方が空間的、鉛直的な変化が大きいことがわかる。また斜面別では、北東斜面よりも南西斜面の方が化学組成の空間的、鉛直の変化が大きい。南西斜面では、山頂から標高が低くなるにしたがって、陰イオンの水質組成が HCO_3^- 型から $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 型に変化していることが読み取れる。その結果、pHの高度にともなう減少が引き起こされており(図4)、上述した大気汚染の影響が顕著であることが伺える。

VI おわりに

本研究により、富士山周辺の降水の水質の鉛直的・空間的变化特性が、地表近くの風系や降水量分布と密接に結びついていることが明らかとなった。降水の水質の鉛直的・空間的变化は、富士山の北東斜面よりも南西斜面側において顕著であり、人間活動を起源とする大気汚染物質が、降水に大きく混入していることが明らかとなった。降水の水質の地域的な差異は、富士山の湧水・地下水の水質の空間的分布にも大きく影響しているものと推察できる。したがってこの種の研究は、環境問題のみならず、水文学的研究の基礎的なものとして最も重要な位置にあると

言える。

今後、酸性雨研究を行う場合には、降水のpHだけでなく、溶存物質量の定量分析が必要不可欠であることが言える。またそのデータは、できる限り一雨毎の観測値を取得すべきであろう。

注

- 1) 木澤ほか(1969)によるオリジナルの図では、降水量の値が1オーダー小さく、明らかに誤りである。よって図1には、オリジナルに10倍した値を入れた。

参考文献

- 風早康平・安原正也(1994)：湧水の水素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程。ハイドロロジー, **24**, 107-119.
- 北野 康(1995)：新版 水の科学。NHKブックス, 254p.
- 木澤 綏・飯田陸治郎・松山資郎・宮脇 昭(1969)：富士山—自然の謎を解く—。NHKブックス, 253p.
- 嶋田 純・三条和博(1987)：降水中の安定同位体測定用採取装置について。第1回日本水文科学会秋季学術大会予稿集, 30-31.
- 土器屋由紀子・坪井一寛・丸田恵美子(1993)：富士山の降水の化学成分の季節変化。天気, **40**, 539-542.
- 藤村郁雄(1971)：富士山の気象。富士山総合学術調査報告(富士急行), 220-296.