

9. わが国における酸性雨の陸水影響の現状と予測

Acidification of Surface Water and Its Prediction in Japan

宮永洋一* ・ 池田英史*

Yoichi MIYANAGA and Hideshi IKEDA

ABSTRACT; A Japanese nationwide survey was conducted by the Central Research Institute of the Electric Power Industry (CRIEPI) on stream water quality and soil chemistry in 253 mountainous watersheds in 1991. The result suggests that most of the watersheds have sufficient acid neutralization capacity (ANC) except a few ones with low ANC. These watersheds vulnerable to acid deposition need further research and monitoring in more detail. For the prediction of stream water quality, the Integrated Lake and Watershed Acidification Study (ILWAS) model developed in the United States was well applied to a Japanese watershed in the hydrological and water quality simulations during one year. However, it was found that the estimation of chemical weathering in the watershed is crucial to the reliability of long-term prediction using the ILWAS model. Therefore, future research is needed for better estimation of chemical weathering in watershed.

KEY WORDS; Acid deposition, acidification, prediction, acid neutralization

1. はじめに

わが国で全国規模の酸性雨の調査が始められたのは 1980 年代であり^{1,2)}、観測データの蓄積により、降水の pH は平均的には 5 前後であることが明らかになったが、土壌や陸水への影響については、まだ明確な結論が得られていない。しかし最近の研究により、酸性雨の影響のメカニズムの検討や、将来の酸性化の予測も可能になってきた。

ここでは、全国規模の河川水質や土壌に関するデータなどを基に、陸水水質の現状について述べるとともに、米国で開発された予測モデルをわが国の流域に適用して、長期的にみた場合の酸性化の可能性、予測の信頼性について検討する。

なお本研究は、通産省資源エネルギー庁からの受託研究として行ったものである。

2. 陸水水質の現状

2.1 酸性化指標

従来の陸水の酸性化指標としては、pH、アルカリ度(Alk)、 SO_4^{2-} などの水質項目や、それらの比、たとえば $\text{Alk}/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ などがある。

一般に、流域と陸水は酸に対して緩衝能を持つため、酸の沈着を受けても pH が急激に低下することはない。これに対して、アルカリ度は酸の中和に消費されるため、流域でのアルカリ度の生産速度を上回る酸の沈着を受ければ、陸水のアルカリ度は減少する。したがって、一般にアルカリ度は pH よりも鋭敏な酸性化指標といえる。また水質の組成も、pH より鋭敏に変化する傾向がある。米国では、酸性降下物の影響を受けやすい陸水の条件として、 $\text{Alk} \leq 0.2 \text{ meq/l}$ や $\text{Alk}/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \leq 0.2$ などが示されている^{3,4)}。

*; 電力中央研究所我孫子研究所環境科学部

Environmental Science Dept., Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry.

一方、こうした水質指標とは別に、流域の物質収支に基づいて酸中和能を評価する方法もある。次の Henriksen のモデルは、その一例である⁵⁾。

$$\text{Alk} = \text{Alk}_0 - [\text{H}^+](1-F)R \quad (1)$$

ここに、 Alk_0 : 人為起源の酸性沈着がない場合の湖水アルカリ度、 $[\text{H}^+]$: 降水の水素イオン濃度、 F : 湖沼に流入する酸のうち流域で中和される割合、 R : 降水の流出率。

この式は、流域の酸中和特性を Alk_0 と F で表している。しかし、通常のモニタリングデータから Alk_0 と F を求めるのは難しいため、あまり使いやすい指標とはいえない。そこで、ここでは次のような指標 ANR (Acid Neutralization Rate) を定義する。

いま、流域の単位面積当たりの酸の沈着量を q_{DH} 、流域内での CO_2 溶解による単位面積当たりの酸および HCO_3^- の生産速度を q_{CH} および q_{HCO_3} 、流域内での酸の中和速度を ANR、河川水のアルカリ度を Alk 、流出高を q とすると、物質収支は次式で表される。

$$\text{Alk} \cdot q = q_{\text{HCO}_3} - q_{\text{CH}} - q_{\text{DH}} + \text{ANR} \quad (2)$$

土壌水への CO_2 の溶解平衡から、 $q_{\text{HCO}_3} \approx q_{\text{CH}}$ と仮定すると、次式が得られる。

$$\text{ANR} = \text{Alk} \cdot q + q_{\text{DH}} \quad (3)$$

式(3)と式(1)を比較すると、ここで導入した ANR は、Henriksen モデルにおける Alk_0 と $F \cdot q_{\text{DH}}$ の和に相当する。式(3)の右辺各項は、いずれも通常のモニタリングデータから算定可能である。

2.2 国・自治体のモニタリングデータ等による検討

全国の主要な河川・湖沼では、国や自治体が定期的に水質調査を行っており、1958 年以降のデータが「水質年表」「日本河川水質年鑑」および「全国公共用水域水質年鑑」に記載されている。ただし、アルカリ度のデータは少なく、全国規模で比較可能なデータは pH のみである。これらの資料から、1990 年までの 254 河川と 123 湖沼について、pH の長期間の変化を調べたところ、火山や鉱山などの影響でもともと酸性化している地点を除けば、酸性雨と同じ pH5.6 未満の地点はなく、また長期的な酸性化の傾向もみられなかった^{6,7)}。

環境庁は、1983～85 年に中部～北部の 97 湖沼の水質調査を行い、湖水 $\text{pH} \geq 5.6$ かつ $\text{Alk} \leq 0.2 \text{ meq/l}$ の 24 カ所(25%)については、今後酸性雨の影響を受けやすい湖沼であるとしている⁸⁾。また、田中らが 1990～91 年に全国の花崗岩地域 13 カ所の山地河川で測定した pH は 6.18～8.52、 Alk は 0.01～1.03 meq/l (原論文の単位は誤りと思われる)で、単純平均した $\text{Alk} \leq 0.2 \text{ meq/l}$ の地点は 2 カ所(15%)である⁹⁾。こうした特定の調査結果をみると、潜在的には酸性雨の影響を受けやすい地点が存在することが推測される。

2.3 酸性化指標による検討

電力中央研究所では、1991 年に火山・鉱山などの直接の影響がない全国 253 カ所の山地河川を選び、水質と流域土壌の調査を行った(土壌は 100 カ所のみ)。データの概要を表 1 に示す。

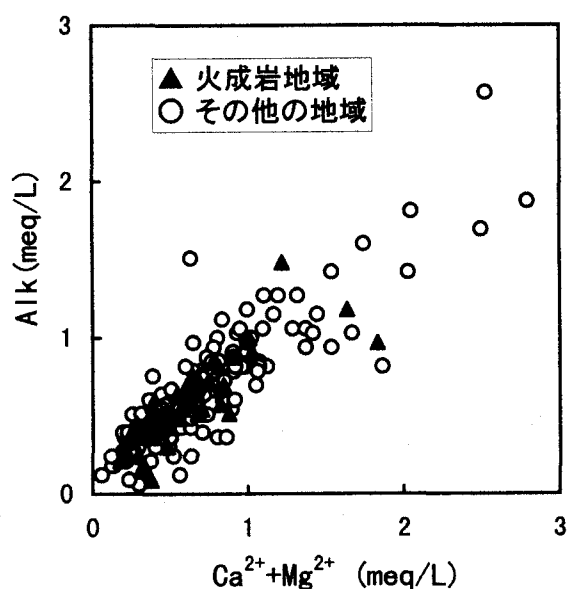
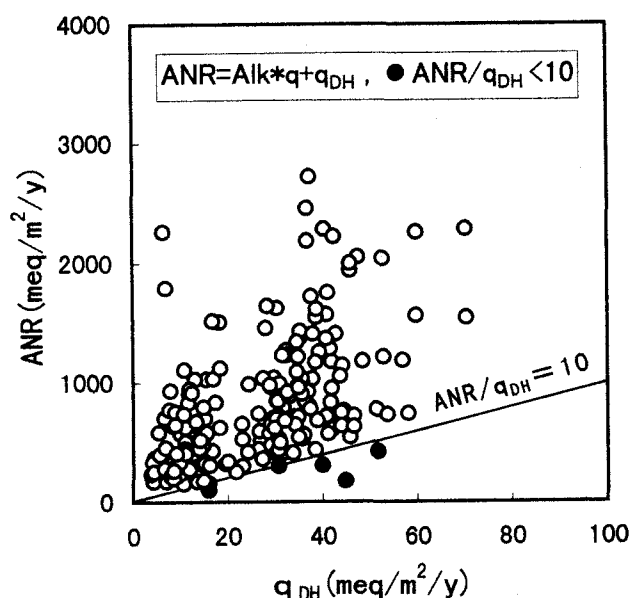
この調査結果では、 $\text{Alk} \leq 0.2 \text{ meq/l}$ の地点は 9 カ所(4%)であり、北海道および青森、岩手、宮城、群馬、長野、岐阜、愛媛の各県に位置している。

表1 全国河川水質調査結果の概要

採水時期	地点数	地点標高 (m)	pH	Alk	Ca ²⁺	Mg ²⁺ (meq/L)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
1991/9-11	253	0-1750	6.1-8.9	0.06-2.57	0.04-1.72	0.02-2.35	0.02-1.56	0-0.22

図1に示すように、Alk と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ の間には良好な相関があり、ほとんどの地点は自然河川の条件である $\text{Alk}/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 0.6 \sim 1.2$ の範囲内にある。米国の酸性化した湖沼の水質条件である $\text{Alk}/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \leq 0.2$ かつ $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \leq 0.2 \text{ meq/l}$ に当てはまる地点はなかった。ただし、この限界に近い地点が青森県と宮城県の2カ所で確認され、これらの河川水のpHは5.8~6.6で、流域の土壌が薄く、酸性雨に対する感受性が高い河川であると推測される。なお、図1には流域の主要な地質が火成岩のものとそれ以外とを区別してプロットしてあるが、火成岩地質の流域で $\text{Alk}/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ の値が特に低い傾向はみられない。

図2は、陽イオンと陰イオンのそれぞれの合計値の比が0.8~1.2以内となる206カ所について、式(3)で求めたANRと q_{DH} の関係を示したものである。降水量はアメダスデータを用い、蒸発量をThornthwaiteの式で計算して、降水量-蒸発量を流出高とした。また酸沈着量は降水濃度×降水量で計算し、乾性沈着量は考慮しなかった。206地点全てが $\text{ANR}/q_{\text{DH}} > 1$ となり、酸沈着量が現在の数倍まで増加した場合に酸性化の可能性が考えられる $\text{ANR}/q_{\text{DH}} < 10$ の地点は、青森、宮城、広島、山口、徳島、愛媛の各県に位置する6カ所(2%)であった。

図1 河川のAlkと $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ の関係図2 流域のANRと q_{DH} の関係

2.4 文献による検討

上記の検討結果から、現状では全国の大部分の河川が十分な酸中和能を持っているが、一部に中和能の小さい流域も存在し、それらは北海道、東北、関東、中部、中国、四国などの山岳地域の一部と考えられる。表2は、他の研究者による陸水の酸性化に関する最近の報告例であるが、いずれもこの範囲の地域が調査対象になっている¹⁰⁻¹³⁾。

pHや各種イオンのデータから、すでに酸性化の兆候を示しているとみられるのは乗鞍岳の湖沼群や南会津の融雪期の河川などで、こうした地域では、今後も土壌や陸水に関する継続的な調査が望まれる。

表2 わが国における陸水の酸性化に関する報告例

No.	地点	県	標高(m)	調査時期	データの概要(meq/l)	文献
1	青木湖	長野	820	1976-1989	10年間で年平均 pH0.6 低下	栗田ら ¹⁰⁾
2	姫川	長野	—	1975-1989	10年間で年平均 pH0.4 低下	栗田ら ¹⁰⁾
3	犀川	長野	800	1977-1989	10年間で年平均 pH0.5 低下	栗田ら ¹⁰⁾
4	蘭川	長野	—	1992-1994	pH6.9, Alk=0.128, BC=0.169	鹿角ら ¹¹⁾
5	鶴ヶ池	岐阜	2700	1992	pH5.5, Alk=0.022, BC=0.040	川上 ¹²⁾
6	権現池	岐阜	2810	1992	pH5.6, Alk=0.022, BC=0.023	川上 ¹²⁾
7	南会津	福島	830	1991-1994	融雪期に pH5.6, HCO ₃ ⁻ =0.076 に低下	鈴木 ¹³⁾

3. 陸水の酸性化の予測

3.1 予測手法

流域の表層土壌が酸性雨を中和できなくなるまでの年数は、pH の低い人工酸性雨を使った加速実験で土壌の酸中和容量(ANC)を測定し、ANC を年間の酸沈着量で割れば一応求められる。このような方法で、実際にわが国の森林土壌の酸性化を定量的に予測した例もある¹⁴⁾。しかし加速実験では、鉱物の化学的風化による酸中和能を測定できないため、流域の実際の酸中和能に対して過小評価になりやすい。

もう一つの予測手法は、流域における酸の中和作用およびその他の水質変化のメカニズムを数式化した数値モデルを用いて、流域の地形、降水量、酸の沈着量、土壌化学性などの条件を与え、水や各種イオンの場所的、時間的变化を数値計算する方法である。欧米では、1980年代に ILWAS (Integrated Lake and Watershed Acidification Study)¹⁵⁾、MAGIC (Model of Acidification of Groundwater In Catchment)¹⁶⁾などのモデルが米国で開発され、実用化されている。

3.2 山地河川の長期的な水質変化の予測

全国の河川水質調査の結果から、流域の酸中和速度が中程度と考えられる高知県の吉野川支流の小流域を対象に、1993年10月～1994年9月に降水・地中水・河川水の連続調査および地層のボーリング調査等を行い、その結果を基に ILWAS モデルによる水質変化の予測計算を行った。計算では、流域の深さ 16m までを深度方向に4層(0.5, 0.5, 7, 8m)に分け、気象、酸沈着量、土壌化学性、透水係数等は実測値を与えた。流域の概要を表3と図3に示す。

表3 予測計算を行った流域の概要

河川	吉野川水系東谷川
流域面積	2.97 km ²
標高	600～1,400 m
地質	変成岩
土壌	褐色森林土
植生	広葉樹、針葉樹
観測期間	1993/10～1994/9
降水量	2,147 mm
年平均降水 pH	4.9
年平均河川 Alk	0.439 meq/L
ANR	822.7 meq/m ² /y
Q _{DH} (湿性)	23.3 meq/m ² /y

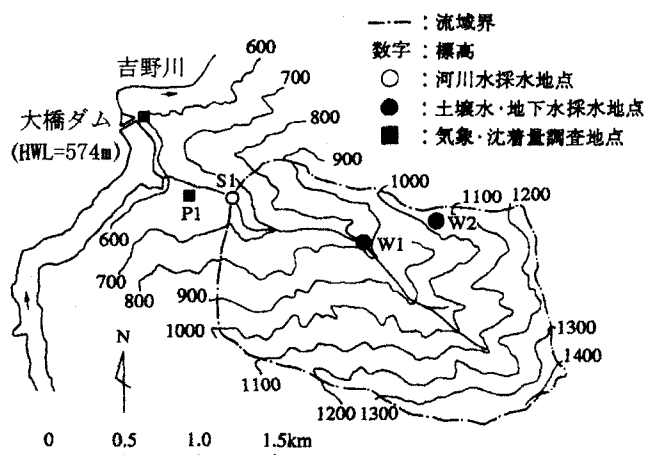


図3 流域の平面図

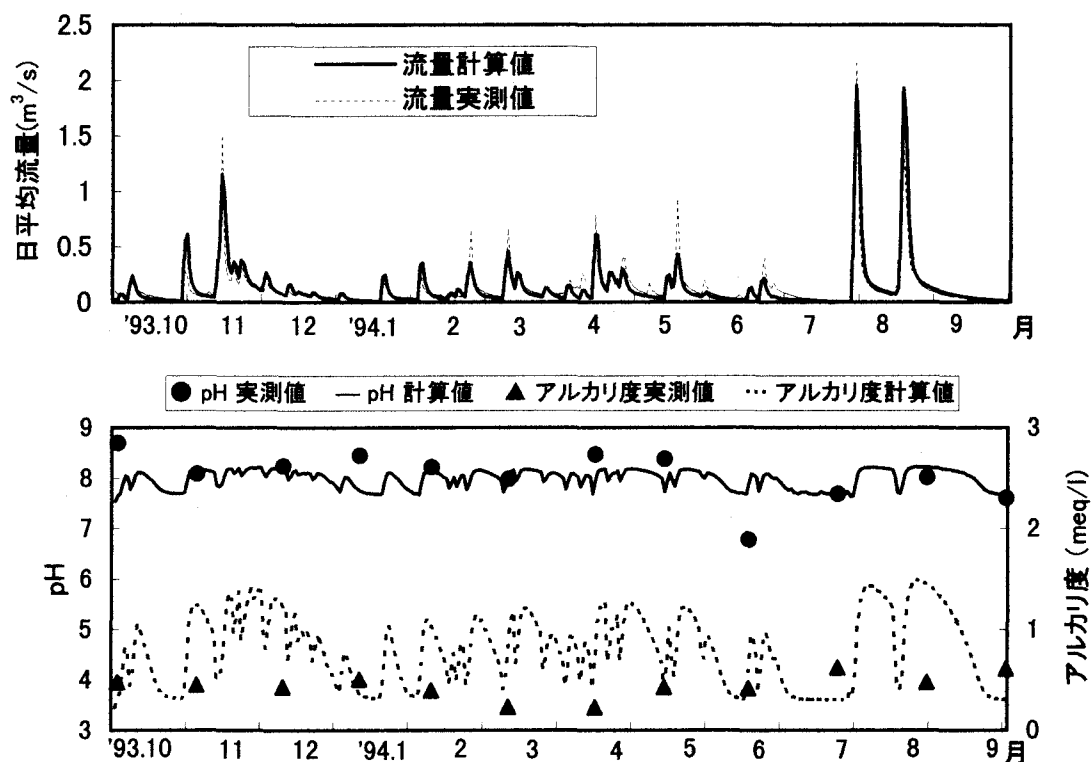


図4 河川流量と水質の再現計算結果

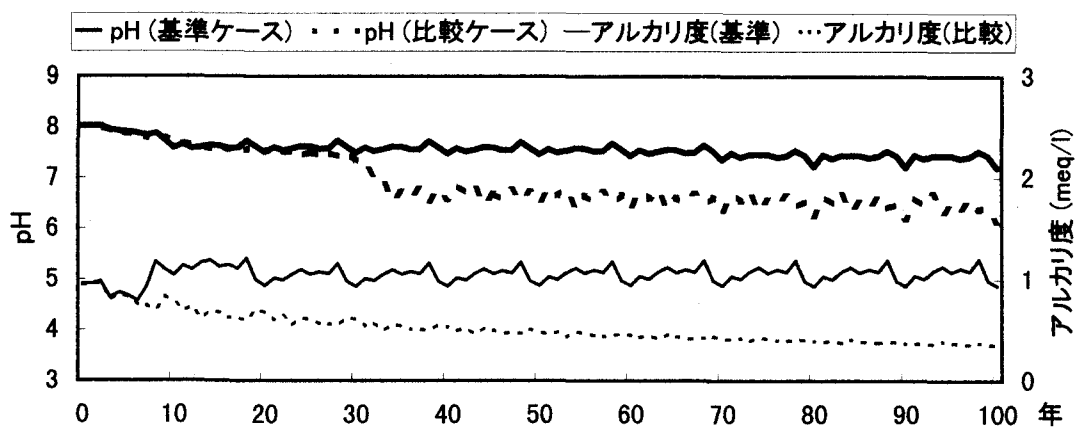


図5 河川水質の長期予測計算結果

まず、河川流量およびpHとアルカリ度の1年間の再現性は図4のようになり、流量と水質の数値の大きさは概ね一致した。この計算に用いた鉱物の風化による中和速度は、流域における鉱物組成の実測値および珪酸や塩基の年間の収支から、著者らの手法で表4のように推定した¹⁷⁾。

表4 風化速度の推定値 (mmol/m²/y)

斜長石	緑泥石	白雲母	方解石
48.7	11.5	5.9	448.5

次に、100年間の長期予測計算結果を図5に示す。現状の条件をそのまま延長した「基準ケース」では、現状レベルの酸沈着量 50.7 meq/m²/y (湿性+乾性) が100年間続いても、河川の水質は安定していて酸性化は起こらない。しかし、仮に表4の鉱物の風化のうち方解石の寄与がないとした場合の「比較ケース」では、数十年後には河川水の酸性化の兆候が現れ、その後徐々に酸性化が進んでいく。流域の表層 0.5m の交換性

塩基含有量の実測値は 8.1 eq/m^2 であり、これは現状の酸沈着量の 160 年分を中和できる容量だが、土壌中では CO_2 の溶解による酸の生成があるため、風化による中和作用がなければ土壌は急速に塩基を失い、河川水のアルカリ度が低下し、酸性沈着の影響を受けやすくなるものと考えられる。

したがって、流域における酸性沈着の中和において、鉱物の風化は主要な役割を果たしており、またその評価を適切に行うことが、長期予測の信頼性を高める上で重要といえる。

4. 結論と今後の課題

全国の河川水質データの検討や最近の文献の調査結果から、現状では大部分の流域が十分な酸中和能を持っていると考えられるが、一部に中和能の小さい流域も存在し、酸性化の兆候もすでに現れている。こうした地域では、今後も土壌や水質に関する継続的な調査が望まれる。酸性雨の長期的な影響の予測には、ここで紹介した ILWAS モデルなどが適用可能であるが、特に鉱物の風化による中和作用の評価が予測結果に大きく影響するため、その信頼できる推定手法を確立する必要がある。著者らは、流域における鉱物組成や年間の物質収支のデータから風化速度を推定する手法を提案したが¹⁷⁾、今後この手法の信頼性と実用性の向上を図り、予測モデルに反映させていきたいと考えている。

謝辞 本研究の実施にあたり、四国電力株式会社、新日本気象海洋株式会社、Electric Power Research Institute, Tetra Tech Inc. ならびに電力中央研究所泊江研究所大気科学部の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下正明: 環境庁における酸性雨調査研究の現状、公害と対策、27,106-111,1991.
- 2) 酸性雨検討会: 酸性雨の実態調査、電中研報告、T91019,1992.
- 3) Hendrey, G.R., Galloway, J.N., Norton, S.A., Schofield, C.L., Shaffer, P.W. and Burns, D.A.: Geological and hydrochemical sensitivity of the eastern United States to acid precipitation, USEPA-600/3-80-204, 1980.
- 4) Schindler, D.W.: Effects of acid rain on freshwater ecosystems, Science, 239, 149-157, 1988.
- 5) Henriksen, A.: A simple approach for identifying and measuring acidification of fresh water, Nature, 278, 542-545, 1979.
- 6) 清野通康, 石川雄介: 日本の河川湖沼の水質現況ならびに火山性無機酸性湖研究の概要、電中研調査報告、484016, 1985.
- 7) 池田英史, 宮永洋一: 酸性雨の陸水影響とその予測手法-現状と課題、電中研調査報告、U92055, 1993.
- 8) Japan Environment Agency: Interim Report of Acid Precipitation Survey in Japan, 1987.
- 9) 田中敦, 多田満, 河合崇欣: 日本の広域変成帯の河川水質、日本地球化学会年会講演要旨集、1-1, 1992.
- 10) 栗田秀実, 堀順一, 浜田安雄, 植田洋匡: 中部山岳地域河川上流域における河川・湖沼 pH の経年的低下と酸性雨の関係について、大気汚染学会誌 28(5), 308-315, 1993.
- 11) 鹿角孝男, 宮島勲, 塩沢憲一: 長野県南西部における酸性雨の地域的特徴と陸水域への影響、1994 年度日本地球化学会年会講演要旨集、125-126, 1994.
- 12) 川上智規: 乗鞍岳湖沼群の水質に対する降雨の影響、環境工学研究論文集 30, 73-80, 1993.
- 13) 鈴木啓助: 山地小流域における融雪時の pH 低下、1995 年度日本水文科学会学術大会講演予稿集、32-32, 1995.
- 14) 戸塚績, 三宅博, 伊豆田猛: 酸性雨が陸域生態系におよぼす影響の事前評価-総合考察、文部省「人間環境系」研究報告集、G028-N11-01, 201-218, 1990.
- 15) Gherini, S.A., Mok, L., Hudson, R.J.M., Davis, G.F., Chen, C.W. and Goldstein, R.A.: The ILWAS model, formulation and application, Water Air Soil Pollut. 26, 425-459, 1985.
- 16) Cosby, B.J., Wright, R.F., Hornberger, G.M. and Galloway, J.N.: Modelling the effects of acid deposition, Water Resources Research 21(11), 1591-1601, 1985.
- 17) 池田英史, 宮永洋一: 鉱物の化学的風化による酸中和能の流域比較、第 6 回地球環境シンポジウム講演集、1998.