

7. 土壌中の肥料の蓄積と流出

岡田亮介（筑波大学院・環境科学研究科）

田瀬則雄（筑波大学地球科学系）

根岸基治（株式会社日さく）

7.1 蓄積量の試算

茶樹の生育には窒素が硫酸アンモニウムのかたちで大量に施肥されている。硫酸アンモニウムは水に容易に溶けて NH_4^+ と SO_4^{2-} に分かれる。 NH_4^+ は畑地のように酸化条件下ではその大半が硝化されて NO_3^- となり流動性が増す。そのために植物の生育に利用されず根圏に達した NO_3^- は水の浸透に伴い下方へ浸透してやがて地下水や河川水に流出する。しかし、土壌には有機態として土壌中の窒素サイクルに組み込む場合や NH_4^+ または NO_3^- かたちで土粒子（おもに粘土鉱物と腐植）表面へ吸着するなどによって窒素を保持する能力があり、土壌層が厚く、かつ長年施肥が継続されてきた地域では土壌中には相当量の NH_4^+ や NO_3^- 、 SO_4^{2-} といった化学肥料が蓄積していると考えられる。

そこで土壌中の粘土鉱物や腐植に蓄積された、硝酸性窒素および硫酸イオン量の試算を図2-1に示した、A地点およびB地点を対象にして行った。なお、ここで蓄積量とは水によって抽出し得る水溶性成分と0.01MのNaOHによって抽出し得る交換性成分量の和であり、交換可能なイオンの総量とみなす。計算式は次の通りである。

$$\text{A地点（茶園）における蓄積量【kg/10a】} = \int_0^{12.5} (\gamma_D \times \text{EI}_D) dD \cdots (1)$$

$$\text{B地点（栗林）における蓄積量【kg/10a】} = \int_0^{11.5} (\gamma_D \times \text{EI}_D) dD \cdots (2)$$

ここで、D：土壌の厚さ(m)…ボーリング結果よりA地点（茶園）は12.5m、B地点（栗林）は11.5mとした。 γ_D ：深度Dにおける仮比重(g/cm^3)…三相分布の測定から0.22~0.62とした。 EI_D ：深度Dにおける交換態イオン量($\text{me}/100\text{g}$)…水溶性無機イオンと交換態陰イオンの定量方法は次に述べる通りである。 EI_D の分析結果を表7-1にまとめた。

1) 水溶性無機イオンの定量方法

風乾土：超純水比を1：50に調整した後、室温で1時間振とうした。懸濁液を0.2 μm のメンブランフィルターでろ過し、pHを測定するとともに筑波大学分析センター設置のサプレッサー型のイオンクロマトグラフィーで液相中の無機態陰イオン(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})を定量した。データは風乾土100g当たりの電荷量で現した。

2) 交換態陰イオンの定量

亀和田（1994）の方法を用いた。すなわち、乾土 2 g 相当の風乾土に 0.01M の NaOH 水溶液を 100mL 加え、1 時間振とう後にろ過した。ろ液は高 pH で抽出したために多量の腐植を含んでいるので、カット分子量 10,000 の遠心（約 4,000G で 90 分）限外ろ過処理をした後、0.2 μ m のメンブランフィルターでろ過した後に、溶存する陰イオン（Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻）をイオンクロマトグラフィー（ノンサプレッサー型）を用いて定量した。交換態イオン量はこの値から先に示した水溶性陰イオン量の差を me/100 g の単位で換算した。

蓄積量【kg/10a/m】の鉛直分布を A 地点を図 7-1、B 地点を図 7-2 に、蓄積量の計算結果を表 7-2 に示す。

表 7-1 農地別の水溶性（水溶性量）および交換性（NaOH 抽出量）イオン量

土地利用	NO ₃ ⁻ イオン量(me/100g)		SO ₄ ²⁻ イオン量(me/100g)	
	水溶性	交換性	水溶性	交換性
A 地点 (茶園)	0.04~4.66	0.06~4.82	0.00~ 16.01	0.08~ 25.72
B 地点 (栗林)	0.00~0.37	0.04~0.43	0.01~1.34	0.12~7.16

表 7-2 硝酸性窒素および硫酸の蓄積量

土地利用	NO ₃ -N蓄積量 (Kg/10a/層)			SO ₄ 蓄積量 (Kg/10a/層)		
	水溶性	交換性	合計	水溶性	交換性	合計
A 地点 (茶園)	755 (76%)	244 (24%)	999 (100%)	2,532 (25%)	7,610 (75%)	10,143 (100%)
B 地点 (栗林)	62 (56%)	49 (44%)	111 (100%)	935 (18%)	4,379 (82%)	5,314 (100%)

NO₃-N の蓄積量は A 地点では 999 Kg/10a であるのに対して、20 年間施肥を中止している B 地点では 111 Kg/10a とその量は 10 分の 1 であった。水溶成分が A 地点で 76%、B 地点でも 56% と半分以上が水溶性であることから NO₃-N は流亡しやすい成分といえる。実際に作物は多量の窒素を施用した場合でも栽培によって土壤中の窒素含有はかなり減少することが知られており、さらに作物に利用されなかった施用窒素の大部分は浸透水中に見出されることから溶存割合が大きいことが理解できる。

SO₄²⁻ の蓄積量は B 地点でも 5,314Kg/10a と A 地点（10,143 Kg/10a）の半分ほどの量が蓄積していた。これは SO₄²⁻ が A 地点で 75%、B 地点で 82% もの量が交換性で存在しているために、流亡しにくく、土壤中に残留していたためと考えられる。

7.2 硝酸性窒素および硫酸イオンの年間溶脱量

年間溶脱量 = Q × C で求めることができる。ここで Q は年間に流出する土壤水

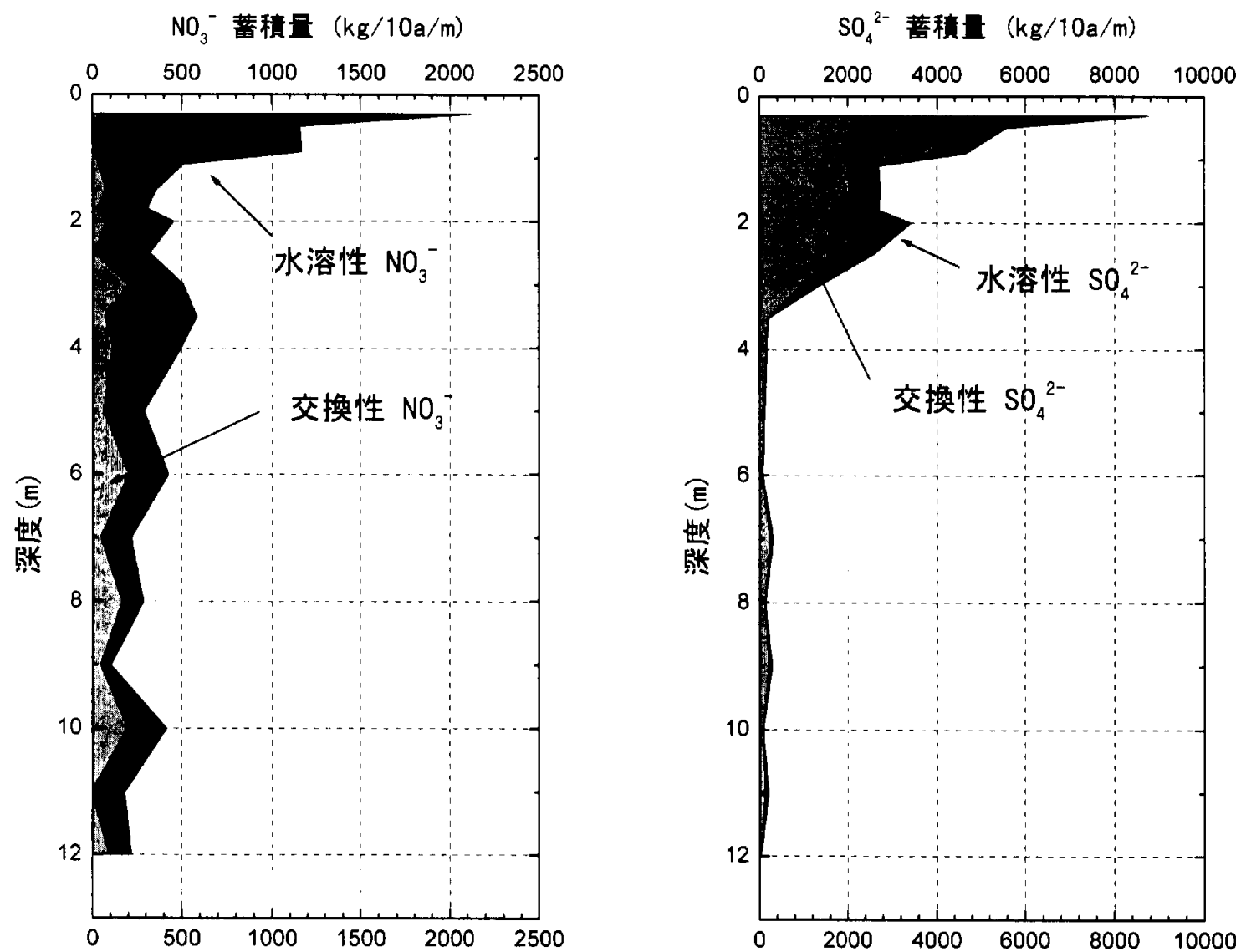


図7-1 A地点(茶畑)における硝酸イオンおよび硫酸イオン蓄積量のプロファイル

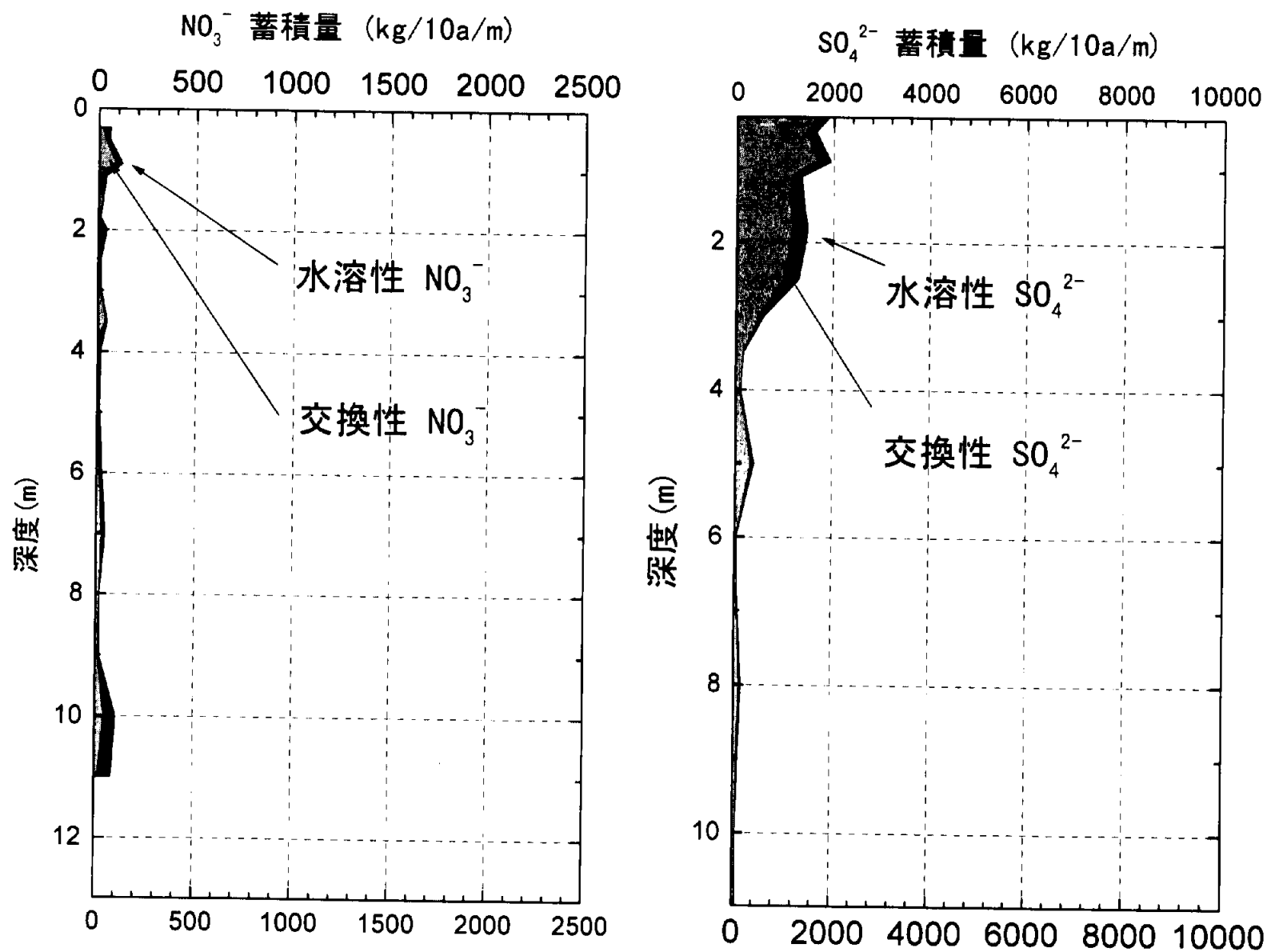


図 7-2 B 地点(栗畑)における硝酸イオンおよび硫酸イオン蓄積量のプロファイル

量、Cは流出する土壤水に溶存しているイオン濃度である。

Q（年間に流出する土壤水量）は表層及び土壤中側方流が起きないと仮定すれば年浸透量＝年流出水量となる。浸透量は月降水量から月蒸発量を差し引いた値を積算して求めたが、蒸発量は高橋（1979）の式より推定した。この式は月平均気温、月降水量から蒸発散量を推定する Thornthwaite の式を改良してものである。気象データには青梅観測所の最近 29 年間(1970-1998)の平均値を利用した。その結果、降雨浸透量は 869.5mm（降水量は 1480mm）と推定された。この値はわが国の平均地下水涵養量 1mm/日（菅原，1972）に比較するとかなり大きく、火山灰土壤に覆われた台地の水収支をよく示していると考えられる。また C（土壤水濃度）には土壤溶液を直接遠心分離した。この際に下方に浸透し得る水を研究対象とするために有効水分を採取した。また、土壤水と地下水の交流する深度の直上の土壤水中濃度を対象とする必要がある。近隣農地内にボーリングした観測井における定期観測の結果、孔内水位が地表面下 8 m 程度まで上昇することが明らかとなった。しかし、この調査結果から地下水が若干被圧されていることも明らかとなり、地下水水位が何 m まで上昇し得るのかは明らかにできない、地下水の影響は 8 m 程度まで上昇する可能性がある。そこで年間溶脱量の試算には地下水の影響を受けていないと考えられる深度 8 m の土壤水濃度（表 7-3）を利用した。

表 7-3 深度 8 m における $\text{NO}_3\text{-N}$ および SO_4^{2-} 濃度

土地利用	$\text{NO}_3\text{-N}$	SO_4^{2-}
A 地点 (茶園)	41.5 mg/L	8.8 mg/L
B 地点 (栗林)	1.3 mg/L	5.5 mg/L

したがって、年間溶脱量の試算式は次の通りとした。計算結果を表 7-4 に示す。

年間溶脱量【kg/10a/年】

$$= Q(\text{年間に流出する水の量}) \times C(\text{土壤水濃度}) \text{【mg/L】} \quad (3)$$

ここで $Q = \text{降雨浸透量【869.5mm/年】} \times \text{面積【10a】} = 869.5\text{m}^3/10\text{a}$

表 7-4 $\text{NO}_3\text{-N}$ および SO_4^{2-} の年間溶脱量

土地利用	$\text{NO}_3\text{-N}$	SO_4^{2-}
A 地点 (茶園)	36.1 kg/10a	7.7 kg/10a
B 地点 (栗林)	1.1 kg/10a	4.2 kg/10a

$\text{NO}_3\text{-N}$ の年間溶脱量は A 地点(茶園)では 36.1 kg/10a もの窒素が流出していた。B 地点(栗林)からは 1.1 kg/10a と降水と同程度の量であり、茶園では栗林の

30 倍の窒素が年間に溶脱していた。

SO_4^{2-} の年間溶脱量は A 地点（茶園）では 7.7 kg/10a、B 地点では 4.2 kg/10a となり、施肥量の大半が土壤中に蓄積しており、ほとんど流出していないと考えられる。

なお、ここで得られた溶脱量は降雨時を除く平常の状態におけるプロファイルから試算した値であるので、平常状態における溶脱量と考えるが妥当であろう。つまり、降雨時のように土壤水の下方浸透が盛んに生じる状態では、硝酸イオンや硫酸イオンも土壤水と共に比較的速やかに溶脱すると考えられる。

7.3 硝酸性窒素および硫酸イオンの滞留時間

滞留時間は次式のように蓄積した水溶性成分を年間溶存量で除すことで試算した。

$$\text{滞留時間(年/土壤層)} = \frac{\text{8mまでの水溶性蓄積量(kg)}}{\text{年間溶脱量(kg/yr/土壤層)}} \quad (4)$$

ここで、8 m までの水溶性蓄積量を用いたのは溶脱量の試算のときと同様に地下水の影響を取り除くためである。計算結果を表 7-5 に示す。

表 7-5 $\text{NO}_3\text{-N}$ および SO_4^{2-} の滞留時間

土地利用	$\text{NO}_3\text{-N}$	SO_4^{2-}
A 地点 (茶園)	16.8 年	319.3 年
B 地点 (栗林)	18.2 年	203.1 年

B 地点では 16~17 年間施肥をしていない。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の滞留時間は 18.2 年であることから、深度 8 m 以下に見られた硝酸イオン濃度の増加は 16~17 年前の施肥の影響である可能性もある。また、 SO_4^{2-} の滞留時間は 203.1 年となることから地表面下 1 m 程度の深さに 16~17 年前の施肥の影響が残っている計算である。実際に水溶性硫酸イオンのピークは 2 m に現れ、3.5 m までには土壤水中からその大半が消失するという上層に偏ったプロファイルとなる。

滞留時間の逆数を取ることで年間降下速度を求めることができる。この際に、土壤層の厚さはボーリング調査結果から A 地点（茶園）で 12.5 m、B 地点（栗林）で 11.5 m とした。

$$\text{年間降下速度(cm/年)} = \frac{\text{土壤の厚さ(cm)}}{\text{滞留時間(年)}} \quad (5)$$

計算結果を表 7-6 に示した。関東ローム層中の土壤水の年間降下速度は 128 cm/年（樫根ら，1980），138 cm/年（Shimada，1988）とされていることから、 $\text{NO}_3\text{-N}$

は土壤水のおよそ 0.5 倍の降下速度で比較的速やかに溶脱し、 SO_4^{2-} はおよそ茶園で 0.03 倍 (33~35 分の 1)、栗林 0.05 倍 (20~21) と緩やかに溶脱している実態が明らかとなった。

表 7-6 $\text{NO}_3\text{-N}$ および SO_4^{2-} の年間降下速度

土地利用	$\text{NO}_3\text{-N}$	SO_4^{2-}
A 地点 (茶園)	74.4 cm/年	3.9 cm/年
B 地点 (栗林)	63.2 cm/年	5.7 cm/年

このように不飽和土壤における溶液中の陰イオン (Cl^-) の浸透速度は水よりも遅れる (佐久間ほか, 1975) 結果が報告されており、その速度は土壤中での陰イオン吸着の選択性に関係があるとされ、選択性の順番 (硫酸イオン \gg 硝酸イオン \approx 塩化物イオン) と同じ順番で遅れることが報告されている (Bolt ほか, 1980)。実際に硝酸イオンは硫酸イオンに比べて茶園で 19 倍、栗林で 11 倍の速度で浸透していた。

B 地点の栗林では SO_4^{2-} の降下速度が茶園のそれよりも速かったのは栗林の土壤 pH が高く、土壤水濃度が低濃度であったために吸着が抑えられたために降下速度が増加したと推測される。また、それに伴って栗林の $\text{NO}_3\text{-N}$ は吸着される割合が増加したために降下速度が遅くなったと考えられる。

引用文献

- 梶根 勇 (1980) : 環境トリチウムで追跡した関東ローム層中の土壤水の移動. 地理学評論, 55(4), 225-237 p.
- 亀和田國彦 (1994) : 畑地における土壤中陰イオン含量 (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) の垂直分布. 日本土壤肥料学雑誌, 65(3), 255-265.
- 佐久間敏雄・飯塚文男・岡島秀夫 (1975) : 畑土壤における水分と無機塩類の挙動 第 1 報 カラム中の水と塩素イオンの挙動. 日本土壤肥料学雑誌, 46(4), 126-132.
- 菅原正巳 (1972) : 流出解析法. 共立出版, 257.
- 高橋浩一郎 (1979) : 月平均気温・月降水量より蒸発散量を推定する式. 天気, 26(12), 759-762.
- Bolt, G. H. and Bruggenwert, M. G. M., 岩田進午・三輪睿太郎・井上隆弘・陽 捷行訳 (1980) : 土壤の化学. 学会出版センター, 304p.
- Shimada, J. (1988) : The mechanism of unsaturated flow through a volcanic ash layer under humid climatic conditions. Hydrological Processes. 2, 43-59.