雨滴径分布に基づく降雨水質の時間変化の解析

坂本 康*

Analysis of Temporal Change of Rainwater Quality
based on the Raindrop Size-Distributions

Yasushi Sakamoto

Neither total rainfall nor rainfall intensity can account for the temporal change of rainwater quality by itself. This paper shows that the introduction of raindrop size-distribution makes it possible to integrate the effects of total rainfall and rainfall intensity on rainwater quality, and can give the good estimation of electric conductivity and UV absorption due to $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration of rain water. The analysis was based on the several assumptions for probability density function of raindrop size-distribution, falling velocity of raindrops, and water quality of raindrops.

The results showed that the ratio of estimated load factor calculated on the basis of the raindrop size-distribution to the observed load linearly increased as total rainfall increased, and that the best estimation of temporal change of rainwater quality can be gotten in conditions of the raindrop size-distribution of exponential function, the raindrop falling velocity linearly increasing as droplet diameter increases, and the raindrop concentration linearly increasing as the surface area of unit volume water increases and as the falling velocity decreases.

Key words : acid rain, rainwater quality, raindrop size-distribution, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration

一雨の降雨の水質時間変化は、降り出してからある時点までの雨の総量、つまり累加雨量と、その時点での降雨強度との二つの因子のうち、いずれか一つの因子のみでは説明できない。本論文は、雨滴径分布関数を用い、累加雨量、降雨強度、両者の影響を統合すれば、降雨水質の時間変化を簡単な式で表現できることを示した。解析は、降雨水の pH、電気伝導度、および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に相当する紫外吸光度の観測データを対象とした。雨滴径分布の確率密度関数、雨滴の落下速度、雨滴の水質について種々の仮定を行い、それぞれの仮定で水質変化を検討した。

本研究の結果、電気伝導度、紫外吸光度に与える降雨強度の影響はそのときの雨滴径分布を用いて推定でき、累加雨量の影響は、雨滴径分布からえられる推定負荷量関数と実際の負荷量との比が累加雨量の一次関数となると仮定することで説明できた。また、種々の仮定の中で最も説明力が大きかったのは、雨滴径分布が指数分布で、雨滴落下速度は雨滴径に比例し、雨滴の濃度が雨滴の単位体積当りの表面積に比例し、落下速度に反比例すると仮定した場合であった。

キーワード：酸性雨、雨水水質、雨滴径分布、硝酸態窒素濃度

I. はじめに

現在、地球規模の環境汚染の問題として、酸性雨の問題がクローズアップされている。酸性雨は森林生態系、水資源の利用法に変化を強いるものであり、水文学の視点での研究が必要となってきた。

酸性雨の問題では、雨水の水質がどのような機構により決定されるかが重要な問題となる。この点については、さまざまなモデルが提案されている。例えば、Engelmann (1968) は、大気中の汚染物質の量が時間に関して

指数関数的に減少するとし、その指数パラメータの値を雨滴径分布と関係づける視点での研究をレビューしている。このような研究は現在も行われており、雨滴による汚染ガスの吸収についての物理化学理論モデルを用いて、降雨強度等の影響が検討されている（窒素化合物濃度については、Levine and Schwartz (1982)、Chang (1984)、芝ら(1987)）。また、気象学的なモデルも検討されている（Carmichael (1986)）。

しかし、種々のパラメータを導入した物理化学的理論モデルでは実用性に問題がある。そこで、降り出してからある時点までの雨の総量、つまり累加雨量と関係づけ

*山梨大学工学部 Yamanashi University

て水質変化を大きく捕える視点での研究もなされている。例えば、Junge (1963) は種々の降雨水質観測例をまとめ、各水質あるいは各地点を平均化した値では、濃度は累加雨量の指数関数として減少する傾向があることを示した。しかし、個々の水質、個々の降雨では時間的変化によるばらつきが大きく、ばらつきは降雨量が小さいほど大きくなる傾向があった。また、Chan and Chung (1986) は、降水、大気中の窒素酸化物等の減少速度を観測している。

以上の研究例では、降雨水質の時間変化を降雨特性による捕らえる研究はなされていず、また実測データによる裏付けも少ない。

著者ら (Takeuchi & Sakamoto (1984)) の電気伝導度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の観測結果では、降雨の濃度は、(1)降雨強度が大きいつきに低く、(2)降雨の降り始めに高い、傾向があった。(2)に関しては Junge (1963) に倣い累加雨量で整理する方法が有効だが、(1)については、雨滴径分布の影響が大きいと考えられる。

本論文は、降雨の雨滴径分布を用いて、観測された降雨水質の時間変化を簡単な式で表現しようとするものである。また、その際いくつかの仮定を用い、仮定の適合性もあわせて検討する。降雨水質のデータとしては、硝酸化合物量の目安として紫外部吸光度を用い、pH、電気伝導度とともに、その時間変化を検討した。

II. 降雨観測方法

1. 対象降雨

対象降雨は、1988年6月24日10時から18時、6月25日1時から21時の降雨とした。この間の総降雨量は18.5mm、降雨強度は0.5-3.5mm/hrであった。降雨は途中24日18時から25日1時までの中断期間があるが、以後の解析では一雨として検討した。また、降雨強度は転倒ます式自記記録計で観測した。

2. 降雨水質

試料水は、山梨大学土木環境工学科建物の屋上に設置した採雨装置で採水した。採雨装置は、アクリル板製の受け皿 (30cm×30cm) に受けた雨水を、フラクションコレクターによって1時間毎に三角フラスコに分注する仕組みになっている。

水質は、pH、電気伝導度、および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に相当する紫外部吸光度 ($\text{NO}_3\text{-N}$)_{Abs} を測定した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に相当する紫外部吸光度とは、以下のものである (APHA (1980))。

$$(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}} = (\text{波長220nmでの吸光度}) - 2 \times (\text{波長275nmでの吸光度})$$

これは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸収波長220nmでの吸光度に対する有機物等の影響を、波長275nmでの吸光度に基づきとり

除き、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に比例する吸光度を求めたものである。紫外部吸光度を指標として用いたのは、低濃度少量サンプルが使える点で雨水分析に適することによるが、将来、広い範囲の降雨水質を自動的に測定する方法として有力であると考えたためでもある。なお、pHの測定には pH メーター (TOA HM-5 ES)、電気伝導度の測定には伝導度計 (TOA CM-7 B) を用いた。

3. 雨滴径分布

雨滴径分布を機械的に継続して測定するためには高価な機器が必要である。そこで本研究では、より簡便に雨滴径分布を測定する方法として、Tanaka (1972) により提案された方法を用いた。この方法は、水溶性ポリビニルアルコールを塗布した盤の表面に水滴が落下したときにできる痕跡の直径と個数から、落下した雨滴の直径と個数を推定する方法である。本研究では、10cm角のアクリル盤を、ポリビニルアルコール (PVA-205、重合度500) を20倍の純水に溶解させた液につけて取り出し、乾燥させたものを測定盤とした。この測定盤を、資料水採取時間の中央時刻で4~10秒間雨滴にさらし、雨滴痕跡の径 d [mm] を測定し、次式により雨滴径 D [mm] を推定した。

$$D = 0.209d^{1.25} \quad (1)$$

この式中の値、1.25は Tanaka (1972) の式と同じ値であるが、0.209は Tanaka (1972) の値より大きくなっている。

以上の方法で求められる雨滴径分布は、ある瞬間数秒間に地上に到達する雨滴の雨滴径分布である。これに対し、1時間毎に採取した降雨の水質は、その1時間に大気中に存在していた雨滴の雨滴径分布に対応している。したがって、以下の解析では、観測した雨滴径分布そのものを用いるのではなく、観測雨滴径分布と降雨強度から推定した、その時間の平均的雨滴径分布を用いた。

III. 降雨水質の検討に用いた理論と仮定

1. 基礎式

雨滴径分布と降雨水質を関係づける基礎式は、以下の3式である。

$$R = \frac{\pi}{6} \cdot f N_{(D)} \cdot D^3 \cdot V_{(D)} \cdot dD \quad (2)$$

$$L = \frac{\pi}{6} \cdot f N_{(D)} \cdot D^3 \cdot C_{(D)} \cdot V_{(D)} \cdot dD \quad (3)$$

$$C_R = \frac{L}{R} \quad (4)$$

ここに、 R : 降雨強度 [LT^{-1}]、 L : 降雨により単位時間当りに単位面積に降下する汚染物質の重量、つまり汚染物質負荷量 [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$]、 C_R : 降雨水に含まれる汚染物質の濃度 [ML^{-3}]、 D : 雨滴の直径 [L]、 $N_{(D)}$: 直径 D の

図-1 地上観測雨滴径分布

雨滴が現われる確率の確率密度関数 $[L^{-4}]$, $C_{(D)}$: 直径 D の雨滴の水に含まれる汚染物質の濃度 $[ML^{-3}]$, $V_{(D)}$: 直径 D の雨滴の落下速度 $[LT^{-1}]$ である。

本研究では、上式の $N_{(D)}$, $V_{(D)}$, $C_{(D)}$ に種々の関数を仮定し、観測された降雨強度 (R), 雨水水質 (C_R), 負荷量 (L) の説明を試みた。

2. 雨滴径分布についての仮定

観測により得られた雨滴径分布を図-1に示す。各時刻の数秒間の雨滴径分布観測値ではばらつきが大きいので、ここでは、降雨強度、0.5, 1.0, 1.5mm/hrでの結果を総合したものを図に示した。

図より、直径 $D[m]$ の雨滴が現われる確率の確率密度関数、 $N_{(D)}$ として以下の2式を仮定した。

$$N_{(D)} = N_0 \cdot \exp(-\Lambda D) \quad (5)$$

$$N_{(D)} = N_0 \cdot D^2 \cdot \exp(-\Lambda D) \quad (6)$$

ここに、 N_0 , Λ : 雨滴径分布に関する定数である。

この他に対数正規分布についても確率紙を用いて検討したが、適合性がよくなかったので採用しなかった。

式(5)は、Marshall & Palmer (1948) により提案され、日本では Imai (1956) によって妥当性が検証された指数分布である。本研究では、この式を当てはめる場合には、 N_0 は降雨強度によらず一定とし、降雨強度により Λ のみが変わると仮定した。 N_0 としては、Imai (1956) の提案した値もあるが、観測結果から Marshall & Palmer (1948) の値、 $N_0 = 8 \times 10^6 [m^{-4}]$ を採用した。

式(6)は、Atlas ら (1984) が提案し、 $N_0 = \Lambda^3/2$ のときはガンマ分布に相当する。この式を当てはめる場合には、一般には N_0 も、 Λ も降雨強度により変化すると考えられるが、本研究では指数分布との比較のために N_0 は定数と仮定し、降雨強度により Λ のみが変わると想定した。 N_0 の値は、図-1に示した観測データの分布形とピークが一致し、かつ式(2)に式(6)を代入して計算した値が平均降雨強度1.2mm/hrに近くなる値として、 $N_0 = 8 \times 10^{15} [m^{-6}]$ を採用した。

図-1には、上記 N_0 を使って計算した式(5), (6)の値も

図-2 雨滴の落下速度と濃度

示した。また、以上の各式での積分領域は、観測データに基づき最大雨滴径 D_{max} を 2.0mm, 最小雨滴径 D_{min} を 0.01mm とした。

3. 雨滴の落下速度についての仮定

本研究では、直径 D の雨滴の落下速度 $V_{(D)} [m/s]$ として次式を仮定した。

$$V_{(D)} = k_1 \cdot D^a \quad (7)$$

ただし、定数 k_1 , a の値としては、以下の3通りを想定した。

① Allen 域での空気中の水粒子の落下速度:

$$a = 1, k_1 = 4.278 \times 10^9 [1/s]$$

② Atlas & Ulbrich (1977) の提案式:

$$a = 0.67, k_1 = 386.6 [m^{0.33}/s]$$

③ Chimera (1960) の提案式:

$$a = 0.5, k_1 = 142.0 [m^{0.5}/s]$$

①の k_1 の計算には、20°Cでの空気密度 (1.205kg/m³) と粘性係数 (1.81×10⁻⁵Pa·s) を用いた。

それぞれの場合の雨滴径 D と落下速度との関係を図-2に示す。図には、Gunn & Kinzer (1949) が測定した、蒸留水の水滴の落下速度 (20°C, 1気圧, 相対湿度50%の場合) も示した。また、雨滴の落下速度については、直径1mmで6.49m/s, 2mmで8.83m/sという例 (浅井ら (1986)) もあり、この図の値も妥当なものと考えられる。

雨滴の落下速度については、1mm以上の雨滴では雨滴の変形を考慮する必要があり (今井 (1950)), また、雨滴径の範囲により上記のどの式が当てはまるかが異なる可能性もあるが、本研究では、想定した0.01-2.00mmの範囲で同じ式が使えると仮定した。

4. 雨滴の水質についての仮定

本研究では、直径 D の雨滴の濃度、 $C_{(D)} [M/L^3]$ として、次式を仮定した。

$$C_{(D)} = k_2 \cdot D^b \quad (8)$$

ただし、定数 b の値としては、以下の2通りを想定した。

①雨滴の濃度が雨滴の単位体積当りの表面積に比例し、落下速度に反比例し、

$$C_{(D)} \propto \frac{1}{V_{(D)}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{\pi/6 \cdot D^3} \propto \frac{6}{k_1} \cdot D^{-1-a} \quad (9)$$

となる場合、つまり $b = -1-a$ の場合、

②雨滴の濃度が雨滴の単位体積当りの表面積にのみ比例する場合、つまり $b = -1$ の場合、

このうち、①の場合の雨滴径と雨滴の相対濃度を示す因子、 D^{-1-a}/k_1 との関係も図-2に示す。図によると直径0.1mmの雨滴と1.0mmの雨滴では、10倍以上の濃度差があることを想定している。

5. 降雨水質の説明因子

本研究では、第2章～第4章に示した仮定を組み合わせた $2 \times 3 \times 2$ の12通りの仮定を用い、雨滴径分布と降雨水質との関係を検討した。ただし、式(8)の k_2 は不明であり、また式(7)の k_1 等の値についても十分な根拠はない。この点を考慮して、以下の検討では、これらのパラメータを消去した以下の2式を雨滴径分布に關係した降雨水質説明因子として検討対象とした。

$$f_1 = \int N_{(D)} \cdot dD \quad (10)$$

$$f_2 = \int N_{(D)} \cdot D^{3+a+b} \cdot dD \quad (11)$$

このうち、式(10)は積分区間での雨滴の全個数に相当する関数である。本論では以下、 f_1 を推定個数関数と呼ぶ。

式(11)は、式(3)に式(7)、(8)を代入して得られる次式の一部である。

$$L = \frac{\pi}{6} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \int N_{(D)} \cdot D^{3+a+b} \cdot dD \quad (12)$$

つまり、 f_2 は雨滴径分布による負荷量の大きさの程度を示している関数であり、観測負荷量 $C_R \cdot R$ との関係が予想される値である。本研究では以下、 f_2 を推定負荷量関数と呼ぶ。

IV. 観測結果と考察

1. 降雨水質と降雨強度、累加雨量との関係

観測で得られた降雨水の電気伝導度、pH、および $(\text{NO}_3 - \text{N})_{\text{Abs}}$ と降雨強度との関係を図-3～5に示す。

図によると電気伝導度、 $(\text{NO}_3 - \text{N})_{\text{Abs}}$ には降雨強度が大きくなると値が指数関数的に小さくなる傾向が見られる。しかし、同じ降雨強度でもとりうる値の幅が大きい。pH は平均値は降雨強度によらずほぼ一定であるが、降雨強度が小さいほど値の幅が大きい。

それぞれの水質を累加雨量に対してプロットしたものを図-6に示す。図の各点は1時間毎に測定して得られた値に対応する。また、図の上部には1時間毎の平均降

図-3 電気伝導度と降雨強度との関係

図-4 pH と降雨強度との関係

図-5 $(\text{NO}_3 - \text{N})_{\text{Abs}}$ と降雨強度との関係

雨強度も示してある。図の、累加雨量7.0mmの点、つまり9時間目の点での電気伝導度、 $(\text{NO}_3 - \text{N})_{\text{Abs}}$ が一度高くなっているが、これは、この時刻の前の7時間、一時降雨が停止したことによるのかもしれない。

図によると、電気伝導度、 $(\text{NO}_3 - \text{N})_{\text{Abs}}$ は累加雨量が増えるにつれ値が低くなり、pH は値が高くなる傾向が見られる。電気伝導度、 $(\text{NO}_3 - \text{N})_{\text{Abs}}$ は累加雨量に対し指数関数的に減少しているようにも見えるが、累加雨量

図-6 累加雨量、降雨強度、各水質の変化

 図-7 $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ 負荷量と累加雨量との関係

4.0-5.0mm, 17.0-17.5mmの点を見ると、明らかに降雨強度が低いときに大きな値を示している。

負荷量と累加降雨量との関係を $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ について、図-7に示す。

図によると、図-6と同様に、累加雨量が大きくなると負荷量が小さくなる傾向は見られるが、バラ付きが大きく、両者の関係を簡単式では表現できない。

これらの図から、降雨強度、累加雨量、それぞれ単独では、電気伝導度、 $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ のような水質の変化を十分説明できず、両者を共に考慮する必要があることが分かる。本研究では、以下、雨滴径分布を考慮して、降雨水質変化の解析を試みる。

2. 実測負荷量と推定個数関数 f_1 との関係

実測負荷量 $C_R \cdot R$ と推定個数関数 f_1 との関係を図-8に示す。雨滴水に含まれる汚染物質が、雨滴形成のときに取り込まれる場合、つまり、レイン・アウトによる場合、個々の雨滴の核となる汚染物質量が一定ならば、雨滴水の集まりである降雨水に含まれる汚染物質量は、ほぼ個数に比例すると考えられ、これだけである程度水質を説明できる可能性がある。

図によると、 f_1 では降雨強度と水質との関係と同程度の関係しか得られない。したがって、雨滴落下中に汚染物質を取り込むウォッシュ・アウト現象の寄与が大きく、雨滴の大きさ、落下速度の影響が大きいと考えられる。

 図-8 $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ 負荷量と推定個数関数 f_1 との関係

 図-9 $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ 負荷量と推定負荷量関数 f_2 との関係

 図-10 $f_2/C_R \cdot R$ と累加雨量との関係

3. 実測負荷量と推定負荷量関数 f_2 との関係

実測負荷量 $C_R \cdot R$ と推定負荷量関数 f_2 との関係を図-9に示す。図によると、推定個数関数 f_1 と降雨強度との関係以上にランダムになっている。このことから、その時の雨の状態だけでは負荷量は説明できないといえる。

そこでそれまでの降雨履歴に関する量として、累加雨量の影響を考慮した。累加雨量の影響は式(12)の k_2 に現われると想定し、図-10のように、推定負荷量関数 f_2 の実測負荷量 $C_R \cdot R$ に対する比を累加雨量に対してプロットした。

図によると、 $f_2/(C_R \cdot R)$ と累加雨量とはほぼ線形関

表-1 各仮定での $f_2/C_R \cdot R$ と累加雨量(mm)との関係の回帰式の定数と相関係数(1)

a, b	$N_{(D)} = N_0 \cdot \exp(-\Delta D)$		
	A	B	R
1.00, -2.00	5.36×10^{-5}	3.19×10^{-4}	0.813
0.67, -1.67	5.89×10^{-5}	3.39×10^{-4}	0.813
0.50, -1.50	5.31×10^{-5}	2.92×10^{-4}	0.810
1.00, -1.00	4.17×10^{-8}	1.82×10^{-7}	0.804
0.67, -1.00	4.79×10^{-7}	2.25×10^{-6}	0.805
0.50, -1.00	1.43×10^{-6}	6.67×10^{-6}	0.802

表-2 各仮定での $f_2/C_R \cdot R$ と累加雨量(mm)との関係の回帰式の定数と相関係数(2)

a, b	$N_{(D)} = N_0 \cdot D^2 \cdot \exp(-\Delta D)$		
	A	B	R
1.00, -2.00	1.78×10^{-4}	9.65×10^{-4}	0.809
0.67, -1.67	1.69×10^{-4}	8.61×10^{-4}	0.808
0.50, -1.50	1.34×10^{-4}	6.87×10^{-4}	0.808
1.00, -1.00	7.87×10^{-8}	3.43×10^{-7}	0.796
0.67, -1.00	9.26×10^{-7}	4.44×10^{-6}	0.803
0.50, -1.00	2.71×10^{-6}	1.22×10^{-5}	0.800

係があることが分かる。つまり、累加雨量の増加と k_2 の減少との間には、線形関係がある。これは雨が降り続けると空気中の汚染物質が減り、降雨水に取り込まれる可能性も減るためと解釈できる。

図-10の関係に対する回帰式

$$f_2/(C_R \cdot R) = A \times (\text{累加雨量}) + B \quad (13)$$

について、最小二乗法による定数 A 、 B の推定値、および $f_2/(C_R \cdot R)$ の推定値と実測値との相互相関係数、 R を、各仮定に対して表-1、2に示す。

$f_2/(C_R \cdot R)$ と累加雨量との間に線形関係が最もよく適合する仮定がより正しい仮定と考えると、以下の場合が最適な仮定といえる。

- ①雨滴径分布が指数分布($N_{(D)} = N_0 \cdot \exp(-\Delta D)$)。
- ②雨滴落下速度は雨滴径に比例($V_{(D)} = k_1 \cdot D$)。
- ③雨滴の濃度が雨滴の単位体積当りの表面積に比例し、落下速度に反比例($C_{(D)} = k_2 \cdot D^{-2}$)。

②の仮定が適切であったのは、図-1によると雨滴の大部分は1.5mm以下であり、図-2によるとこの範囲では、②の仮定が実測値と適合しているからである。分布形については図-2の相対濃度因子の大きさからみて小さい径の部分の適合度の影響が大きいが、実際には地上観測データに対して0.2mm以下では適合しない指数分布でも、十分水質は説明できている。これは、水質を決定する上空での雨滴径分布は指数分布であるが、地上で観測される分布は落下中の小粒子の吸着、蒸発により上空での分布とは異なった分布になるためと推定できる。③の仮定が適当であることは、ウォッシュ・アウトの影響が大きいことを示唆している。

図-11 累加雨量と $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ の実測値、推定値

上記の式(13)を使って $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ の時間変化を推定した結果を、実測値とともに図-11に示す。また、この推定法による平均相対誤差は22%であった。

図によると、 $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ の実測値と推定値は、降雨中断・再開後の2時間を除きかなりよく一致する。とくに、累加雨量4.0-5.0mm, 17.0-17.5mmの点では降雨強度の影響をよく再現している。電気伝導度も $(\text{NO}_3\text{-N})_{\text{Abs}}$ よりは劣るが、推定値と実測値がかなりよい一致を示した。また、途中中断があるにもかかわらず、全体を一雨として扱ってもよい推定結果が得られることは、ウォッシュ・アウトの影響が大きいことを示唆している。

V. まとめ

本研究により、雨滴径分布の概念を導入することで降雨水質の時間変化を説明できることを示した。この考え方によれば、推定負荷量関数と実測負荷量との比を累加雨量と関係づける式(13)中の2つの定数 A 、 B の意味づけが、今後検討すべき課題となる。これらに対し、大気中の汚染物質残存量、雨滴への捕捉機構の概念を導入して検討を加えていけば、雨水水質変化をより正確に簡便に表現するモデルが構築できると考えられる。

本研究の仮定の中で最も影響が大きい仮定は、雨滴径分布の仮定である。現在、上空での雨滴径分布については、間接的データとして、レーダー雨量計のレーダー反射因子が知られている。このようなデータを用い、さらに吸光度による広範な水質測定網を構築できれば、将来は広域的な酸性雨の観測と解析への道も開けるであろう。

引用文献

- 浅井富雄, 内田英治, 河村武監修 (1986): 気象の事典, 平凡社, p. 102.
 今井一郎 (1950): 雨滴の落下速度について, 気象誌集, Vol. 2, No. 8, pp. 113-118.
 芝定孝, 伊藤龍象, 末石富太郎 (1987): 降雨強度と雨滴による汚染ガス吸収, 第42回土木学会年次学術講演会

- 講演概要集, 第2部, pp. 732-733.
- APHA (1980) : *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 15th edition, American Public Health Association, New York, pp. 368-369.
- Atlas, D., and C. W. Ulbrich (1977) : Path- and Area-Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation in the 1-3 cm Band, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 16, pp. 1322-1331.
- Atlas, D., C. W. Ulbrich, and R. Meneghini (1984) : The multiparameter remote measurement of rainfall, *Radio Sci.*, Vol. 19, No. 1, pp. 3-22.
- Carmichael, G. R., L. K. Peters, and T. Kitada (1986) : A Second Generation Model For Regional-Scale Transport/Chemistry/Deposition, *Atmospheric Environment*, Vol. 20, No. 1, pp. 173-188.
- Chan, W. H., and D. H. S. Chung (1986) : Regional Scavenging of SO_2 , SO_4 , NO_3 , and HNO_3 , *Atmospheric Environment*, Vol. 20, No. 7, pp. 1397-1402.
- Chang, T. Y. (1984) : Rain and Snow Scavenging of HNO_3 Vapor in the Atmosphere, *Atmospheric Environment*, Vol. 18, No. 1, pp. 191-197.
- Chimera, A. M. (1960) : Meteorological radar echo study, Final Rept., Contract AF33 (616) -6352, Cornell Aeronaut. Lab., Buffalo, New York.
- Engelmann, R. J. (1968) : The Calculation of Precipitation Scavenging, in *Meteorology and Atomic Energy*, Ch. 5-4, pp. 208-221.
- Gunn, R., and G. D. Kinzer (1949) : The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air, *J. Meteorology*, Vol. 6, No. 4, pp. 243-284.
- Imai, I. (1956) : Precipitation Streaks and Raindrop Size-distributions, *Papers in Meteorology and Geophysics* (気象研究所研究報告), Vol. 7, No. 2, pp. 107-123.
- Junge, C. (1963) : Chemical Composition of Precipitation, in *Air Chemistry and Radio Activity*, Ch. 4. 3, Academic Press, pp. 31-315.
- Levine, S. Z., and S. E. Schwartz (1982) : In-Cloud and Below-Cloud Scavenging of Nitric Acid Vapor, *Atmospheric Environment*, Vol. 16, No. 7, pp. 1725-1734.
- Marshall, J. S., and W. M. K. Palmer (1948) : The Distribution of Raindrops with Size, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 5, pp. 165-166.
- Takeuchi, K., and Y. Sakamoto (1984) : Discharge Characteristics of NO_3^- for the Analysis of Basinwide Circulation of Water and Environmental Pollutants in a Small River Basin, *J. Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 73-85.
- Tanaka, T. (1972) : The Method for Measuring Water Droplets by Means of Polyvinyl Alcohol (Proval) Film, *Papers in Meteorology and Geophysics* (気象研究所研究報告), Vol. 23, No. 4, pp. 287-307.
- 昭和52年 東京大学工学部都市工学科卒業
- 昭和54年 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻修士課程修了
- 昭和54年 山梨大学工学部環境整備工学科助手
- 昭和62年 山梨大学工学部土木環境工学科講師
- 現在に至る
- 工学博士