降雨時における集団茶園流域の河川水質と流出負荷特性

山 本 富 久* 中曾根 英 雄**
 黒 田 久 雄** 加 藤 亮**

Characteristics of River Water Quality and Storm Runoff Load from Collective Tea Field Catchment

Tomihisa YAMAMOTO*, Hideo NAKASONE**,
 Hisao KURODA** and Tasuku KATOU**

* Department of Agricultural Science, Shuchi High School, Mori 92-1, Shuchi, Shizuoka 437-0215, Japan

** Department of Regional Environmental Science, School of Agriculture, Ibaraki University, Ami-Chuoh 3-21-1, Inasiki 300-0393, Japan

Abstract

In this study, we discuss the storm runoff load for a collective tea field catchment. The study area was Makinohara plateau, in Shizuoka, Japan. The water quality and discharge were measured during a storm period. Heavy rain occurred due to a Bai-u front or cyclone during the rainy and typhoon seasons from June to September. Compared with clear weather days, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration during heavy rain decreased to 1/3. However the T-P and COD concentrations increased 2~23 times. The average recovery rate of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration was $3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Hysteresis was observed in the relation between the discharge and the loads. The loads $\text{NO}_3\text{-N}$ becomes higher when discharge was decreased than when it was increased. On the other hand, the load of T-P showed a reverse tendency, and the load of COD was similar, too. The loads in periods of storm runoff are heavily affected by the amount of rainfall and antecedent conditions.

Key words : collective tea field, storm runoff load, rainy and typhoon seasons, heavy rain, hysteresis

1. はじめに

茶樹は永年性の需葉作物であるため^{1,2)}, 古くから肥料の中でも、特に窒素肥料の重要性が認識されていた^{3,4)}。このことから、高品質茶の高生産のため、茶園における年間施肥窒素量は、一時期 $1,000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ を大幅に超えていた⁵⁾。

こうした茶園での過剰な施肥は、周辺の河川や地下水など、公共用水域における硝酸態窒素による水質汚染の原因であることが指摘された⁶⁾。このことから、茶栽培の指導機関は、茶栽培における施肥基準の遵守、適正施肥、施肥管理の改善を推進している⁷⁾。

この現状の中で、降雨時における茶園流域からの流出負荷を正確に把握することは重要なことである。そのため、晴天時の観測データから求めた流出負荷のみではなく、大雨や強雨などの降雨時を含めた観測結果を基に算出した流出負荷の検討が必要である。

降雨時における流出負荷に関する先駆的な研究として、中曾根⁸⁾らが行った調査事例がある。その後、降雨時に

における流出負荷の重要性が認識され、これに関した研究が活発に行われるようになった。これらの研究には、一般河川^{9,10)}、農業地域の小河川¹¹⁾、水田地域¹²⁾、森林流域¹³⁾、養豚地域¹⁴⁾や海外における事例^{15,16)}などがあるが、研究数は少ない。さらに既往の研究は、窒素濃度が最大 $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度で、総降雨量が 10~100mm 程度の流出を対象としたものである。高排出負荷地域である茶園流域における降雨時の流出負荷を対象としたものや、一連の断続した総降雨量が 300mm、日降雨量が $100 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、時間降雨強度が $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ を超える記録的な降雨を対象とした研究は、今後の課題の一つである。

こうした梅雨期の長雨や台風時の大雨、強雨、豪雨は、洪水を引き起こすことが多く¹⁷⁾、観測には非常に大きな危険を伴うことが考えられる。しかし、こうしたときの窒素やリンなどの流出負荷は、「洪水時の負荷は相当大きく、それは無視できないばかりか、むしろ主役である」ともいわれている¹¹⁾。

また、梅雨期の長雨や台風による一連の断続的な強雨に見舞われた時、流域の土壌中には、先行降雨が滞留し

* 静岡県立周智高等学校生産科学科 〒437-0215 周智郡森町森 92-1

(現在静岡県立天竜林業高等学校環境システム科 〒431-3314 浜松市二俣町二俣 601)

** 茨城大学農学部地域環境科学科 〒300-0393 稲敷郡阿見町中央 3-21-1

ているため¹⁸⁾、一降雨時の流出負荷とは大幅に異なることが考えられる。

さらに茶の栽培が行われている平坦な台地流域からの流出負荷は、特異的な土壌、地形・地質学的条件、その時季の降雨の水文学的性質、独特な茶専作の栽培環境にも大きく影響されることが考えられる。

本研究は、茶の栽培が盛んで、国内最大の集団茶園地帯を形成する静岡県牧ノ原台地を調査地とし、降雨時、中でも、特に梅雨期の長雨や台風時の強雨の流出時における河川水質と流出負荷の特性について検討を行った。

2. 調査地域

調査河川は、静岡県牧ノ原台地北西地域を集水域とする丹野川である。その流域の概要を Fig.1 に示す。土地利用は、茶園が 65.3ha(58.6%)、林地が 44.5ha(40.0%)、道路や宅地は 1.6ha(1.4%)である。台地上はほとんどが茶園として利用され、茶単作地帯を形成し、段丘崖は山林である。台地における降雨は、Fig.2 に示す水理地質学的断面から分かるように、表層土、牧ノ原礫層を浸透し、不透水の第三紀層泥岩上から湧出し¹⁹⁾、丹野川の河川水に流出する。

3. 茶の栽培環境

台地の表層土は赤黄色土壌で、強酸性土壌である²⁰⁾。その下層土は、緻密で透水性が悪い²¹⁾。

静岡県における茶園の施肥基準は、普通園で目標の摘採量を 1ha 当たり $18,000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ としたとき、肥料成分で、窒素が $540\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ 、リンが $180\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ 、カリウムが $270\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ である²²⁾。茶園の施肥量と、その時期を Table 1 に示す。茶園での窒素施肥は、1 回の上限の施肥量が 1ha 当たり $100\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 程度とし、施肥間隔を 20 日以上とするため、実際には年間 7 回前後に分施されていた。

近年、茶園での施肥量は「茶の栽培履歴」への記録、提出が義務化されたため、施肥基準は遵守されていると考えられる。肥料のほとんどが複合肥料で、一部緩効性肥料も使用され、その他堆肥や菜種油粕、大豆油粕などの有機質肥料も施していた。茶園は施肥時に中耕し、秋冬季に野草などの粗大有機物で被覆されていた。

4. 調査方法

4.1 水文調査

調査は、2000 年から 2003 年までのうち、大雨、強雨に見舞われた期間に行った。

降雨量は、約 4km 北方に位置する牧ノ原地域気象観測所が観測したデータを用いた²³⁾。調査対象は、一連の断続した降雨のうち、総降雨量が 289~550mm、日降雨量が $141\sim228\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、または時間降雨強度が $24\sim75\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ の降雨である。

水位測定と採水定点を Fig.1 に示す。水位観測は、丹

野川の採水定点に水位計を設置し、調査期間中 1 時間間隔で測定した。流量観測は、試水回収時に行い、H-Q 曲線を作成した。それを用いて、水位計のデータから流量を算出した。これを比流量に換算し、水質濃度を乗じて比負荷を求めた。

4.2 採水および水質分析

水質調査における採水頻度は、水質や流出負荷の測定精度に大きく影響する^{24,25)}。既往の研究では、降雨時の採水頻度は、数十分から十数時間の間隔であるが^{8,11-14)}、本調査では 24 時間間隔の頻度で採水を行った。

これは、次のような理由からである。すなわち、調査地は、Fig.2 に示すように、全域が通年、茶樹で覆われた茶園地帯で、緩やかな起伏をもつ台地流域であること、表土の下層土は排水不良で降雨が滞留しやすいこと、さらに、その下層の礫層間には複数の難透水の粘土層が存

Fig.1 Study area

Fig.2 Hydrogeologic section

Table 1 Fertilizer

Season	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Monthly of ten days
Spring	100.0	90.0	130.0	Late in Feb. ~ early in Mar.
Budding	60.0	-	-	Late in Mar. ~ early in Apr.
Summer I	110.0	-	-	In mid-May
Summer II	110.0	-	-	Early in Jul.
Autumn	160.0	90.0	140.0	Early in Sept.
Total	540.0	180.0	270.0	

* Unit : $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

在し、対象とした総降雨量が大きく、地層中に宙水を形成、保持、貯留されること²⁶⁾、また、河川水は、台地を構成する礫層底部の地下水流動により供給されることなどがその理由である。

これらの水文気象学的条件からみて、台地流域が多量の降雨に見舞われると、降雨は浸透後、地層内に滞留する。このため、そこからの流出形態は、長期にわたり非常に緩慢であるとされている²⁷⁾。このことから、本調査での採水頻度は、本流域の流出に対し水質データの捕捉が可能である。また、この測定間隔は、降雨後の流出水量の低減に伴う水質変動を追跡しやすいことも考えられる。以上のことから採水定点に自動採水器を設置し、1日1回、午前6時に定時採水を行った。

水質分析用の試水は、1週間毎に回収し、試験室に保冷しながら輸送し、分析に供した。硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)はイオンクロマトグラフ法、全リン(T-P)は環境省告示法、CODは過マンガン酸カリウム法により測定した。

5. 調査結果および考察

5.1 降雨の水文学的性質

Table 2 に 2000 年から 2003 年における年間降雨量とその平年値、6 月から 9 月までの多雨期（以下、多雨期という）における降雨量を示す。多雨期の総降雨量は、年間降雨量の 50.3% を占め、特に梅雨期の降雨量と台風がもたらす降雨量が非常に多く、重要な水資源となっている²⁸⁾。

調査対象とした降雨の水文学的性質を Table 3 に示す。これらは、総降雨量が 200~300mm を超える大雨、または時間降雨量が 30~50mm $\cdot\text{h}^{-1}$ を超える強雨である¹⁸⁾。それらには、豪雨を伴うことが多く、すべて多雨期に生じたものである。この降雨は、梅雨期の前線、台風、低気圧や雷雨に伴って発生する^{29,30)}。

牧ノ原地域における年間降雨量の平年値は、2,141mm $\cdot\text{y}^{-1}$ であり、これらの一連の断続した総降雨量は 13.5~25.7% に達する。最大日降雨量は 2002 年 7 月 10 日の 228mm $\cdot\text{d}^{-1}$ (1979 年の観測開始以降、史上 (以下、史上という) 4 位、時間降雨強度 51mm $\cdot\text{h}^{-1}$)、最大時間降雨強度は、2001 年の 8 月 21 日の 75 mm $\cdot\text{h}^{-1}$ (日降雨量 173 mm $\cdot\text{d}^{-1}$) であった。

過去 30 年間の観測結果では、台風の年間接近数、年間上陸数は、多雨期にそれぞれ 81.5%、96.2% を占め、これによる降雨が非常に多い。近年、年間降雨量(2003 年、2,568mm $\cdot\text{y}^{-1}$ 、史上 4 位)、月間降雨量(2003 年 8 月、593mm $\cdot\text{month}^{-1}$ 、史上 4 位)、日降雨量(2002 年、228mm $\cdot\text{d}^{-1}$ 、史上 4 位)、時間降雨強度(2001 年、75mm $\cdot\text{h}^{-1}$ 、史上 6 位)に、記録的な値がみられる。

5.2 降雨時の水質の経時変動

降雨流出時における $\text{NO}_3\text{-N}$ 、T-P、COD 濃度の単純平均は、それぞれ 20.1mg $\cdot\text{l}^{-1}$ 、0.020mg $\cdot\text{l}^{-1}$ 、2.3mg $\cdot\text{l}^{-1}$ であった。No.1~No.5 の降雨時の $\text{NO}_3\text{-N}$ 、T-P、COD 濃度の経時変動を Fig.3~6 に示す。また、その降雨前濃度とピーク濃度の関係を Table 4 に示す。

No.1~No.5 の降雨時での観測をととして、Fig.3~6 に示す $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と日降雨量、比流量との関係は、弱い逆相関 (各々 $r = -0.41$, $r = -0.43$, 各々 $n=100$, $P<0.0001$) があり、有意であった。

各降雨時における降雨前の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は 20~30mg $\cdot\text{l}^{-1}$ であるが、最低濃度は 8~10mg $\cdot\text{l}^{-1}$ と、約 1/3 の濃度に一挙に低下した。既往の研究では、降雨流出時の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、低下するものが多いとされる事例¹¹⁾やその変動が少ないもの¹²⁾が報告されている。本調査では、降雨流出時の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、すべて低下した。

こうした差異は、調査地の地形・地質学的条件、土地利用、作物の栽培環境、排出負荷量、さらに対象とした降雨の水文学的性質などの影響によるものと考えられる。

本調査地における降雨流出時の $\text{NO}_3\text{-N}$ は、茶園土壌中の残留窒素が多量の降雨によって溶脱・希釈され、表面流出水および下層へ浸透したものが、礫層底部から流出し、河川水に供給されたと考えられる。

Table 5 に降雨後の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の最小値と最大値を示す。最低の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、8~10mg $\cdot\text{l}^{-1}$ で、その後、上限の 24~27mg $\cdot\text{l}^{-1}$ に回復した。このとき、降雨後 1~

Table 2 Annual Precipitation

Year	2000	2001	2003	Normal
Precipitation	1,987	1,997	2,564	2,141
Jun.~Sept.	1,059	1,051	1,284	1,042

Unit: mm $\cdot\text{y}^{-1}$

Table 3 Rainfall of each runoff

Rainfall No.	Storm runoff Period (y/m/d)	Amount of rainfall (mm)	Maximum Rainfall intensity (mm $\cdot\text{d}^{-1}$)	Maximum Rainfall intensity (mm $\cdot\text{h}^{-1}$)	Preceding Fine days (day)	Preceding Monthly rainfall (mm $\cdot\text{m}^{-1}$)	Preceding Monthly rain day (day)	Factor
No.1	2000/6/8 ~ 2000/6/29	447	141	24	6	140	8	Rainy season
No.2	2001/8/21 ~ 2001/8/22	289	173	75* ¹	8	99	7	Typhoon
No.3	2001/9/1 ~ 2001/9/11	366	209	31	8	380	8	Typhoon
No.4	2002/7/6 ~ 2002/7/19	333	228* ²	51	4	292	14	Typhoon
No.5	2003/8/8 ~ 2003/8/22	550* ³	147	32	5	239	17	Typhoon

*¹: Observational record rank 6, *²: Observational record rank 4,

*³: 2003/Aug.593 mm $\cdot\text{month}^{-1}$, Observational record rank 4

Table 4 Minimum, Maximum concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$, T-P and COD in each runoff

Rainfall No.	$\text{NO}_3\text{-N}$			T-P			COD		
	Before rain (mg $\cdot\text{l}^{-1}$)	Minimum (mg $\cdot\text{l}^{-1}$)	Ratio* ¹	Before rain (mg $\cdot\text{l}^{-1}$)	Maximum (mg $\cdot\text{l}^{-1}$)	Ratio* ²	Before rain (mg $\cdot\text{l}^{-1}$)	Maximum (mg $\cdot\text{l}^{-1}$)	Ratio* ^{2*}
No.1	23.8	7.9	3.0	0.009	0.045	5.0	1.5	7.1	4.7
No.2	32.2	9.1	3.5	0.016	0.044	2.8	1.1	15.2	13.8
No.3	28.3	9.6	3.0	0.005	0.044	8.8	1.5	4.2	2.8
No.4	18.5	8.2	2.3	0.004	0.092	23.0	1.8	4.0	2.2
No.5	27.4	8.1	3.4	0.011	0.057	5.2	0.9	3.5	3.9
Average	26.0	8.6	3.0	0.009	0.056	6.2	1.4	6.8	4.9

*¹: Before rain/Minimum, *²: Maximum/Before rain

Fig.3 Changes of discharge and concentrations in runoff No.1

Fig.5 The changes of discharge and concentrations in runoff No.4

Fig.4 Changes of discharge and concentrations in runoff No.2, No.3

Fig.6 Changes of discharge and concentrations in runoff No.5

Table 5 Rate of recovery (NO₃-N)

Rainfall No.	Minimum (mg·l ⁻¹)	Maximum (mg·l ⁻¹)	Recovery (day)	Rate (mg·l ⁻¹ ·d ⁻¹)
No.1	7.9	25.1	5	3.2
No.2	9.1	26.7	8	2.9
No.3	9.6	26.5	10	2.8
No.4	8.2	24.2	14	3.0
No.5	8.1	24.8	8	3.1
Average	8.6	25.5	9	3.0

2日間における濃度の回復速度が大きく、その後、5～14日かけて漸近的に回復した。降雨後、NO₃-N濃度は、放物線状に増大した。これは降雨直後ほど、流域からのNO₃-N溶脱量の低減よりも、流出水量の低減のほうが速いためと考えられる。

ここでのNO₃-N濃度の回復速度は、降雨直後の最小値と、その後の回復過程での最大値、または、ほぼ上限に達した値との濃度差を、その間の日数で除したものと

た。降雨 No.1～No.5 の NO₃-N 濃度の回復速度は 2.8～3.2mg·l⁻¹·d⁻¹、平均 3.0mg·l⁻¹·d⁻¹であった。各降雨における NO₃-N 濃度の回復速度は、降雨量の影響が少なく、僅差であった。鈴木¹¹⁾らの成果から NO₃-N 濃度の回復速度を算出すると、1mg·l⁻¹·d⁻¹以下であり、それが1日程度でほぼ回復した。このような降雨後の NO₃-N 等の水質濃度の回復速度について、これまで報告された事例はない。

No.1は、ほかのケースと異なり、梅雨による長雨の影響を大きく受けた。このケースでは、日降雨量が100mm以下の降雨が継続したとき、低下した濃度を維持し、1～2日の無降雨日に濃度が大幅に回復し、その後、日降雨量が100mm·d⁻¹を超える降雨により、長雨により低下した濃度よりもさらに低下した。

No.4は、21日間のうち、15日間の断続した先行総雨量292mmにより、既に流出濃度が18.5mg·l⁻¹を示し、それが日降雨228mm·d⁻¹(7月10日)により一挙に9.5mg·l⁻¹

まで低下した。その後、比較的少雨(7月16日 35mm・d⁻¹)に見舞われ、さらに 8.2 m・l⁻¹まで低下した。

水質項目間では、NO₃-N と T-P、COD の関係は、ともに弱い逆相関 (各 $r = -0.38$, $n=100$, $P<0.0001$) を示した。一方、T-P と COD の関係は、弱い相関 ($r = 0.31$, $n=100$, $P<0.0001$) があつた。このことから、前述のように NO₃-N は、降雨流出時は濃度が低下するのに対して、逆に T-P、COD は降雨流出に伴い降雨前の濃度よりもピーク濃度のほうが高く示された。この T-P、COD の両者には、降雨流出時における流出機構等に類似性があると考えられる。T-P、COD の中で、No.2 の COD は降雨前後の濃度 (降雨後/降雨前) 比は、13.8 と最も大きくなった。このとき、総降雨量は 289mm で、さらに時間降雨強度は 75mm・h⁻¹ と最大であつた。こうした大雨、かつ強雨によって生起する掃流や移流により、流域内の有機物が流出したと考えられる。

No.4 は、2002 年 7 月 10 日に日降雨量 228mm・d⁻¹ を生起し、史上 4 位の記録であつた。このとき、T-P のピークは 7 月 16 日に出現し、降雨前後の水質の濃度比は 23.0 にも達し、それ以降も大きな変動を示した。これは、7 月 10 日の大雨により、高濃度の T-P を含んだ流出水が、浸透水として一旦台地の礫層内に貯留され、それが遅延後、礫層内の地下水流動に伴って流出したと考えられる。

この河川水は、礫層底部から地下水に供給されたものである。このときの T-P 濃度は、台地を構成する礫層など地質構造の影響による「水質の不連続性」がもたらさ

れていると考えられる³¹⁾。

以上のことから、茶園流域からの流出水の水質は、水文気象学的条件の影響を大きく受けるが、茶園における施肥量や施肥時期などの影響を確認することはできないことが分かった。

5.3 降雨時の比負荷の経時変動

降雨時の比負荷の経時変動を Fig.7~10 に示す。また、降雨前の比負荷とピーク比負荷を Table 6 に示す。

NO₃-N 比負荷のピークは、約 3,600~7,500mg・s⁻¹・km⁻² で、鈴木¹¹⁾らの事例である 200mg・s⁻¹・km⁻² の 18~38 倍に達する。この差異は、本調査では、茶園流域からの流出水の NO₃-N 濃度が非常に高く、さらに総降雨量が多いため、比流量が大きかったことなどが考えられる。

各降雨時の NO₃-N 比負荷変動は、総降雨量が大きいときに明確なピークを示す。一方、T-P 比負荷も NO₃-N と同様な変動を示すが、No.4 は、ほかのケースと比較して、ピークは小さい値を示す。これは、No.4 は、先行晴天日数が少なく、降雨前の月間降雨日数が 14 日で、さらに月間総降雨量が 292mm と大きいいためである。こうした先行条件の影響を大きく受け、228mm・d⁻¹ と最大の日降雨量であつたが、T-P 比負荷のピークとしては最も低い値を示した。さらに 7 月 10 日の日降雨量 228mm・d⁻¹ による比負荷より、7 月 16 日の日降雨量 35mm・d⁻¹ による比負荷のほうが大きな値を示し、その後も変動を示した。

また、No.5 は、8 月 11 日の総降雨量が 195mm で、8 月 15 日前後の総降雨量は 355mm である。T-P 比負荷は

Fig.7 Changes of loads in runoff No.1

Fig.9 Changes of loads in runoff No.4

Fig.8 Changes of loads in runoff No.2, No.3

Fig.10 Changes of loads in runoff No.5

Table 6 Maximum specific load of NO₃-N, T-P and COD in each runoff

Runoff No.	NO ₃ -N			T-P			COD		
	Before rain (mg·s ⁻¹ ·km ⁻²)	Maximum (mg·s ⁻¹ ·km ⁻²)	Ratio	Before rain (mg·s ⁻¹ ·km ⁻²)	Maximum (mg·s ⁻¹ ·km ⁻²)	Ratio	Before rain (mg·s ⁻¹ ·km ⁻²)	Maximum (mg·s ⁻¹ ·km ⁻²)	Ratio
No.1	829.0	4848.1	5.8	0.600	6.228	10.4	79.1	1753.7	22.2
No.2	664.6	6984.1	10.5	0.331	7.888	23.8	21.9	6196.4	282.9
No.3	251.0	7502.0	29.9	0.179	10.890	60.8	58.8	974.4	16.8
No.4	690.2	6541.9	9.5	0.114	2.842	24.9	54.4	1249.2	23.0
No.5	737.5	3611.3	4.9	0.312	10.100	32.4	24.7	1108.2	44.9
Average	634.5	5897.5	9.3	0.307	7.590	24.7	47.6	2251.0	47.3

10mg・s⁻¹・km⁻²程度で、ほぼ等値であった。これは、前述の地質構造による地下水帯内での「水質の不連続性」に起因すると考えられる³¹⁾。

5.4 降雨時の比流量と比負荷の関係

降雨 No.1～No.5 について、降雨前および降雨後における比流量を Table 7 に示す。また、Fig.11～15 に比流量と比負荷の関係を示す。

Fig.11 をみると、NO₃-N、T-P、COD ともに明確なヒステリシスが存在する。Fig.12、Fig.13 も同様な変動を示した。この中で NO₃-N は、反時計回りのヒステリシスを示すが、T-P、COD はともに時計回りのヒステリシスを示した。これは、NO₃-N が溶存態であることから、多量の降雨によって希釈されて濃度は低下し、流出水量は急激に増大し、比負荷はピークを示したと考えられる。

流出水量の低減時は、増水時より比負荷は大きくなった。これは茶園土壌では、降雨により土壌水分が増加するため、施肥窒素が土壌溶液中に多量に溶存し、流出する。これが降雨後、表面流出水の急減により希釈効果は低下し、これにより流出水の NO₃-N 濃度は比較的急に上昇したためと考えられる。

一方、T-P、COD は水中で懸濁態を示すものが多いため、多量の降雨に見舞われると、その時の掃流作用によ

り流出水の水質濃度は一挙に増大し、このために比負荷は急激に大きくなった。その後、流出水量と流出濃度がともに急激に低下するため、増水時よりも低減時のほうが低い比負荷でヒステリシスを示すと考えられる。

7月10日 (Fig. 14) に228mm・d⁻¹の降水量に見舞われ、一挙に比負荷は増大した。その後、次第に流出量が低減したが、その過程で再び降雨に見舞われたため、比負荷が一時的に増加したものである。このため、NO₃-N のヒステリシスは反時計回り、COD は増水時と減水時で、ほぼ可逆的な経路を戻り、その間の降雨流出により一時的に増大を示すが、時計回りで、ほぼ平常時の比負荷に回復した。

一方、T-P の変動は、その流出量が低減する過程で、T-P 濃度のピークが出現したため、平常時の流出水量に低減しても5倍程度の比負荷を示した。これは、流出水量よりも降雨による流出 T-P 濃度の影響のほうが大きいためである。

Fig. 15 は、それぞれ二重のループ状のヒステリシスを示している。これは、1度目の多量の降雨により、流出負荷量は急激に増大し、その後、低減した。そして、その低減する過程で、再度、多量の降雨に遭遇したため、平常時の流出水量に回復する前に、流出負荷量は再び増大したものである。

このとき、NO₃-N のヒステリシスは二重の反時計回り、COD のそれは、二重の時計回りを示した。T-P は、1度目の降雨により反時計回りを示し、2度目の断続した降雨で、比負荷は急激に低下した。これは2度にわたる断続した降雨により、濃度が低下したためである。

Rainfall No.	Before rain	Maximum	Ratio
No.1	0.023	0.346	15.0
No.2	0.021	0.426	20.3
No.3	0.044	0.435	9.9
No.4	0.035	0.406	11.6
No.5	0.028	0.401	14.3
Average	0.030	0.403	13.4

Unit : m³・s⁻¹・km⁻²

Fig.11 Hysteresis of loads in runoff No.1

Fig.12 Hysteresis of loads in runoff No.2

Fig.13 Hysteresis of loads in runoff No.3

Fig.14 Hysteresis of loads in runoff No.4

Fig.15 Hysteresis of loads in runoff No.5

5.5 降雨時のL-Q式

調査対象とした降雨 No.1 から No.5 について、降雨前からほぼ平常時の流出水量に回復するまでの期間の比流量と、それに対する比負荷の L-Q を Fig.16 に示す。

降雨 No.1 から No.5 をとて、NO₃-N、T-P 比負荷と比流量の相関係数は、それぞれ $r = 0.94$, $r = 0.81$ (各々 $n=100$, $P<0.0001$) と高く、COD 比負荷のそれは $r = 0.66$ ($n=100$, $P<0.0001$) とやや高かった。それらを比較すると、NO₃-N 負荷が最も大きく、COD、T-P の順となっている。武田¹²⁾らの研究では COD 負荷が最も大きく、T-N、T-P 負荷の順となっている。この差異は、本調査地が NO₃-N の高排出負荷地域であるためである。一方、武田¹²⁾らが行った水田群での事例のほうが、T-P 濃度が 10 倍程度高く、T-P 負荷も大きかった。

多雨期における総降雨量は、年間降雨量の約 50% を占めている。このため、梅雨期や台風期に生じた大雨、強雨に伴う NO₃-N 流出負荷は、そのときの流出水量に大きく影響され、総流出負荷量は非常に大きく、「水質災害」ともいえる現象が生起していると考えられる。

6. ま と め

本研究では、静岡県牧ノ原台地における集団茶園流域を調査地とし、特に大きな降雨流出時の河川水質と流出負荷特性について検討を行った。その結果を要約すると、次のようである。

1) 降雨前の NO₃-N 濃度は、月間の先行降雨量、先行降雨日数に大きく影響された。NO₃-N の降雨前後の水質濃度 (降雨前/降雨後) 比の平均は 2.8、T-P、COD の降雨前後の濃度 (降雨後/降雨前) 比の平均はそれぞれ 6.2、4.9 で、最大は T-P の 23.0 であった。

2) 降雨時の NO₃-N 濃度は、大きな降雨のとき、先行条件の影響を大きく受けて、1/3 程度に低下した。T-P、COD は 2~10 倍程度に上昇した。NO₃-N 濃度の回復速度は、降雨後 1~2 日間で最も大きく、平均 $3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ であった。

3) 比流量と比負荷の関係では、NO₃-N は反時計回りのヒステリシスを示し、T-P、COD は時計回りのヒステリシスを示した。短期間に再度、大雨に見舞われると、それぞれ二重のヒステレシスを示した。

4) 降雨時の L-Q 式では、NO₃-N、T-P は相関が高く ($r = 0.94$, $r = 0.81$)、COD はやや高い相関 ($r = 0.66$) を示した。NO₃-N 負荷は流出水量の影響を最も受けやすく、次に

Fig.16 The relations between discharge and loads

COD、T-P の順であった。

5) 降雨前の比負荷に対し、降雨時のピーク負荷は最大で、NO₃-N が約 30 倍、T-P は約 60 倍、COD は約 280 倍にも達した。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費 (基盤 A, 14206027, 代表者 茨城大学農学部 中曽根英雄教授) の助成を受けて行われた。現地測定に際し、静岡県菊川市の関係各課のご支援を頂いた。ここに記して、感謝の意を表する。

(原稿受付 2005 年 10 月 19 日)

(原稿受理 2006 年 5 月 26 日)

参 考 文 献

- 1) 田邊貢 (1934) 実験茶樹栽培法及製茶法, p.125, 地球出版。
- 2) 静岡県茶業連合会編 (1953) 茶業実典, p.70, 地球出版。
- 3) 上林熊次郎, 江口高康編 (1877) 茶業必要 下, p.19, 和泉屋。
- 4) 大石貞男 (1981) 明治維新と茶業 - 牧之原開拓史考, pp.116-117, 静岡県茶業会議所。
- 5) 大石貞男 (1985) 茶栽培全科, p.122, 農山漁村文化協会。
- 6) 永井茂 (1991) 地下水汚染の水文学的アプローチ, 地下水学会誌, 33, 145-154。
- 7) 静岡県農業水産部編 (2002) 静岡県土壌肥料ハンドブック, p.160, 静岡県肥料協会。
- 8) 中曽根英雄, 中村良太 (1984) 降雨時における鳥川の水質変動と汚濁負荷の流出について, 農業土木学会論文集, 111, 35-42。
- 9) 海老瀬潜一 (1985) 降雨による土壌層からの河川への NO₃ の排出, 衛生工学論文集, 21, 57-69。
- 10) 山口高志, 吉川勝秀, 奥石洋 (1980) 河川の水質・負荷量に関する水文学的研究, 土木学会論文報告集, 293, 49-63。
- 11) 鈴木誠治, 田淵俊雄 (1984) 農業地域小河川における流出負荷量の季節変化と年間総量について, 農業土木学会論文集, 114, 33-38。
- 12) 武田郁郎, 國松孝男, 小林慎太郎, 丸山利輔 (1990) 降雨時における水田群からの汚濁負荷流出 - 水田群からの汚濁負荷流出に関する研究 (1) -, 農業土木学会論文集, 147, 79-85。
- 13) 黒田久雄, 田淵俊雄, 菊池英樹, 鈴木正道 (1991) 森林小集水域における流出水の濃度と流出負荷, 農業土木学会論文集, 154, 25-35。
- 14) 志村もと子, 田淵俊雄 (2003) 養豚地域における降雨増水時の流出窒素負荷の変動, 農業土木学会論文集, 255, 287-293。
- 15) Grosz, J.R. (1978) Nitrogen Input to Stream Water from Forests along an Elevational Gradient in New Mexico, Water Research, 12, 725-734。
- 16) Jacobs, T.C. and Gillian, J.W. (1985) Riparian Losses of Nitrate from Agricultural Drainage water, J. Environ Qual, 14(4) 472-478。
- 17) 川畑幸夫編著 (1971) 水文気象学, p.9, 地人書館。
- 18) 日本気象学会編 (1998) 気象科学事典, p.291, p.62, 東京書籍。
- 19) 土師一 (2001) 静岡県の地形と地質, p.66, 内外地図。
- 20) 河合惣吾 (1965) 本邦における茶園土壌に関する研究, 農林省茶業試験場研究報告, 2, 1-235。
- 21) 永塚鎮男 (1997) 原色日本土壌生態図鑑, pp.49-50, フジ・テクノシステム。
- 22) 静岡県農業水産部 (2003) 茶生産指導指針, p.39, 静岡県経済連。
- 23) 日本気象協会 (2000-2003) 静岡県気象月表, 平成 13 年 1 月 ~ 平成 15 年 12 月。
- 24) 田淵俊雄 (1992) 農業集水域における水質測定の回数と平均値の精度, 農業土木学会論文集, 160, 71-72。
- 25) 田淵俊雄, 黒田久雄 (1993) L-Q 式による流出負荷量算出に与える測定頻度の影響, 農業土木学会論文集, 164, 1-10。
- 26) 山本莊毅編 (1979) 陸水, p.278, 共立出版。
- 27) 金子良 (1974) 農業水文学, p.46, 共立出版。
- 28) 藤村重任監修 (1964) 水資源総論, pp.2-4, 地人書館。
- 29) 二宮浩三, 新田尚, 山岸栄二郎共編 (1997) 気象の百科事典, pp.129-130, オーム社。
- 30) 高瀬信忠 (1998) 河川水文学, p.40-41, 森北出版。
- 31) 鶴巻直二 (1979) 地下水ハンドブック, p.145, 建設産業調査会。