

3. 屋根雨水の水質特性

3.1 調査目的

雨水利用にあたっては、量の確保とともに利用に適した水質の確保が重要であり、集水面からの汚濁負荷の流出特性について明らかにしておく必要がある。集水面には建物の屋根面が利用される場合が多いが、個別降雨ごとに屋根面から集水される雨水について調査した事例は比較的少なく、利用時の水質を把握する観点から貯留槽内の雨水水質を測定しているものが多い。しかし事務所ビル等の貯留雨水は既に沈殿処理等を経たものが多く、長期間の貯留により水質が変化することも指摘されている¹⁾。

また、屋根面の汚濁負荷は、都市域の面源負荷を構成する1要素であり、雨水利用の観点のみならず、閉鎖性水域等の水質保全対策を検討していく上で、窒素、りん等の汚濁負荷量原単位のデータを数多く蓄積していく必要がある。

以上の諸点に鑑み、下水道研究室では屋根面を流下する雨水(屋根雨水)を対象とした調査を平成4年度より継続的に実施してきた。既に調査初期の成果は報告済みである²⁾ため、ここでは降雨初期の流出雨水を分離収集するようになった平成7年度以降の調査データに基づく検討結果についてとりまとめる。

なお、降雨特性や屋根面への汚濁負荷の堆積状況は地域によって異なるため、屋根雨水の水質も地域特性の影響を受けるものと考えられるが、本章の内容は、既存の調査結果との比較等を通じて、屋根雨水に関する基礎的資料として扱うことができるものとする。

3.2 調査方法

3.2.1 屋根雨水の収集

屋根雨水の収集は、茨城県土浦市に所在する土木研究所湖北総合実験施設(茨城県霞ヶ浦浄化センター内)の事務所建屋(写真 3-1 参照)において行った。

対象とした屋根は垂鉛メッキ鋼板製の折板屋根である。屋根面の諸元は、傾斜 1/100 (片勾配)、幅 10.9m、奥行き 9.1m、折板を考慮した総表面積 135m²、水平投影面積(集水面積) 99m²、地上高 GL +3.4m である(図 3-1 参照)。なお、事務所建屋の周辺には、対象屋根面への雨水の降下に特段の影響を与える施設は存在しない。

屋根面から流出する雨水は、3本の塩化ビニール製の立樋により排水施設へと導かれる。これらの立樋のうち中央の1本を改造し、降雨初期の流出雨水をポリタンク(初期雨水貯留槽:容量 20L)に分取し、これが満水となった後の流出雨水をドラム缶(初期カット雨水貯留槽:容量 200L)に集水した。雨水貯留槽の状況について写真 3-2 に示す。中央の立樋の集水面積は、樋の取付け位置から判断して屋根面全体の約 45%に相当すると仮定すれば、初期雨水貯留槽には降雨量 0.5mm に相当する雨水が分離貯留される。

貯留雨水の採水は、各貯留槽内で貯留雨水をよく攪拌した後に行った。初期雨水貯留槽は全ての対象降雨において満水となっていた。一方、初期カット雨水貯留槽は満水となっていない場合もあったが、槽内の貯

留水量は計測していない。なお、各貯留槽は採水後洗浄し、乾燥させてから次回の降雨に用いた。また屋根面は、建屋が平成4年に建設されて以来、調査期間中を含め、人為的な洗浄は1度も実施されていない。屋根面の状況について写真 3-3 に示す。

3. 2. 2 調査項目

調査は、平成 7 年度から 10 年度までの 38 降雨を対象として実施した。各調査対象降雨の概要については、巻末付録 (2) に示す。

屋根雨水の水質分析項目としては、濁度、色度、SS、溶解性 COD_{Cr}、溶解性 TOC、T-N、NO₃-N、NH₄-N、T-P、重金属類 (Zn, Fe, Cu, Pb) を選定した。これらのうち、濁度および色度については透過光測定法により、重金属類については原子吸光法 (フレームまたは電気加熱) により、それぞれ測定を行った。また溶解性成分については、孔径 1 μ m のガラス繊維ろ紙でろ過した試料を分析した。

また、屋根面の材質が屋根雨水中の重金属濃度に及ぼす影響を検討するため、対象屋根の樋に堆積した土砂、建屋脇の表土、土木研究所構内の表土を採取し、これらを固形物濃度で 100mg/L となるよう濃度調整したものを試料として、屋根雨水と同様の方法で重金属類の分析を行った。

降雨量のデータには、土浦のアメダスデータを用いた。

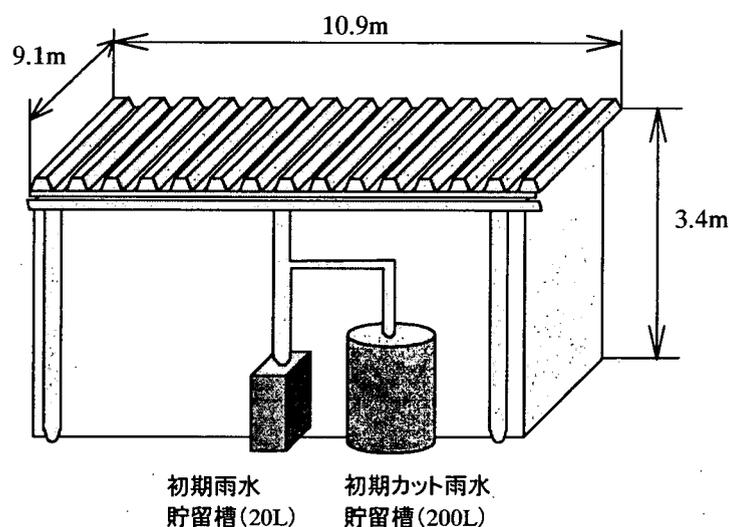


図 3-1 調査対象施設の概要

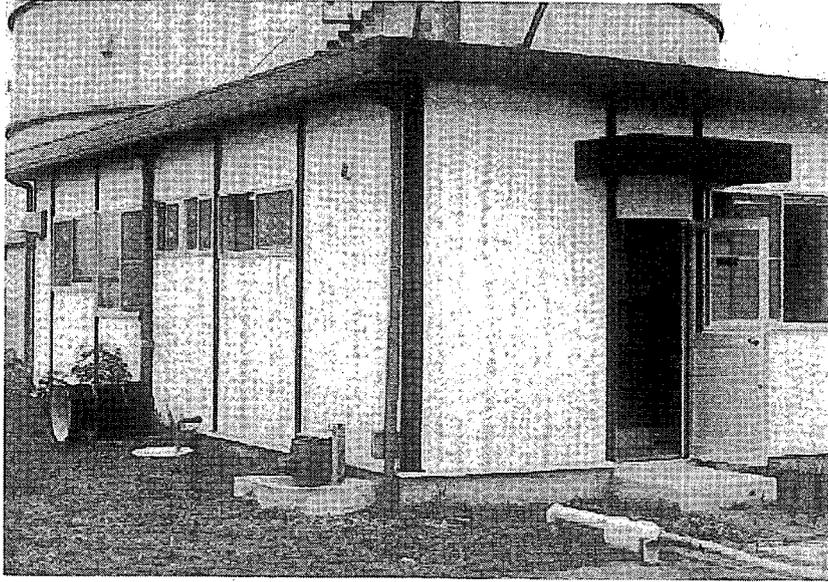


写真 3-1 調査対象事務所建屋の全景

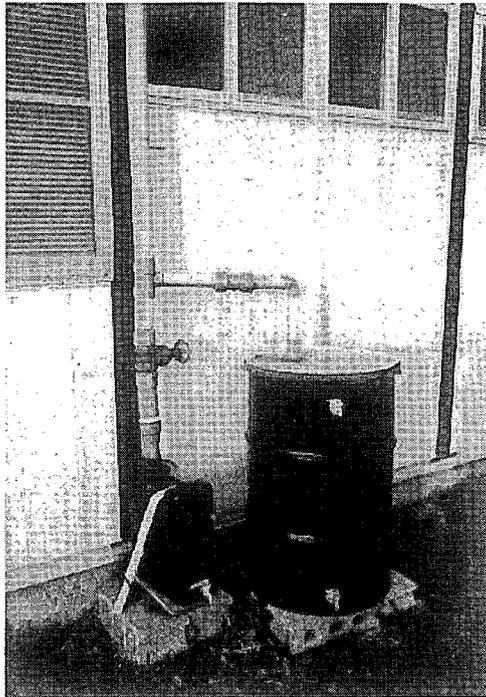


写真 3-2 初期雨水貯留槽(左)、初期カット雨水貯留槽(右)

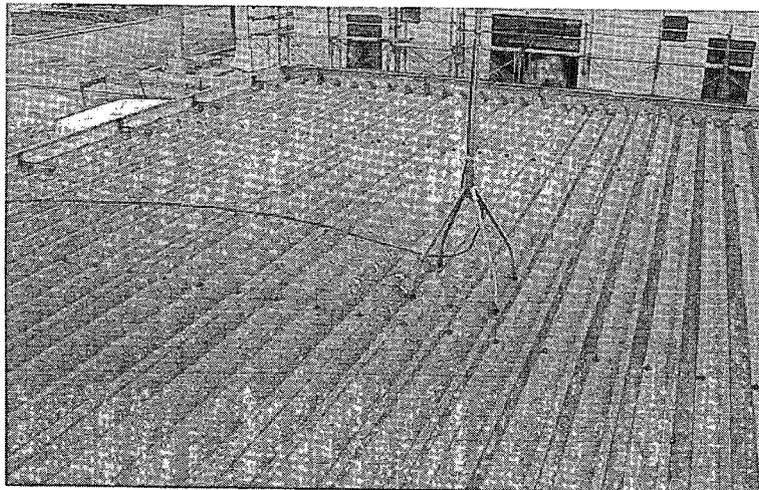


写真 3-3 屋根面の状況

3.3 結果及び考察

3.3.1 調査結果の概要

屋根雨水の水質分析結果の概要について表 3-1 に示す。ここで各項目のデータ数がばらついているのは、欠測のほかに、年度によって測定対象としなかった分析項目が存在するためである。なお、水質分析結果の詳細については、巻末付録 (2) に示す。

SS, T-N, T-P の平均値を既存の調査結果と比較したものが図 3-2 ~ 3-4 である。これらのうち湖北は著者らの実施した平成5年度までの調査データ²⁾、北九州、神戸、山形、千葉のデータは和田³⁾がとりまとめたもの、三鷹のデータは鳴津ら⁴⁾の調査によった。図より、今回の調査結果は T-P が若干高めであったが、全体として既存の調査結果と大きく異なるものではなかった。なお初期雨水の SS, T-P が相対的に高い値となっているが、これは既存の調査データが初期雨水を含めた平均値となっていることによる。

表 3-1 屋根雨水調査結果

項目	単位	初期雨水			初期カット雨水		
		平均値	最大値	n	平均値	最大値	n
濁度	(度)	4	18	38	1	4	38
色度	(度)	7	28	38	3	7	38
SS	(mg/L)	182	713	38	20.3	86.6	38
CODcr	(mg/L)	5.5	10.7	29	4.5	12.4	27
TOC	(mg/L)	2.6	8.0	29	2.2	6.5	27
T-N	(mg/L)	2.0	7.8	18	0.98	1.71	18
NO3-N	(mg/L)	0.52	1.85	37	0.42	1.91	37
NH4-N	(mg/L)	0.77	3.12	29	0.50	1.66	29
T-P	(mg/L)	0.40	1.34	18	0.10	0.40	18
Zn	(mg/L)	0.46	1.11	32	0.23	0.51	32
Fe	(mg/L)	6.27	29.9	32	0.90	3.93	32
Cu	(mg/L)	0.060	0.17	32	0.009	0.031	32
Pb	(mg/L)	0.036	0.18	32	0.011	0.062	32

* n はデータ数

* CODcrおよびTOCは溶解性

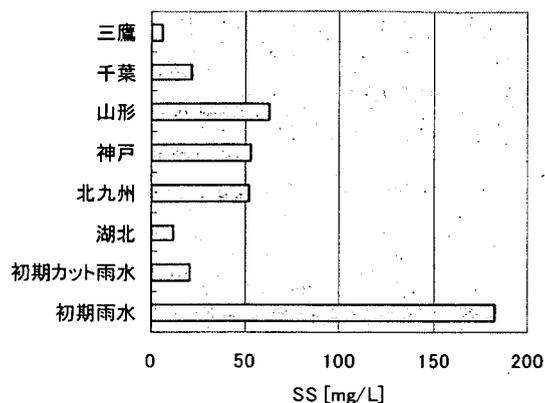


図3-2 既存調査結果との比較 (SS)

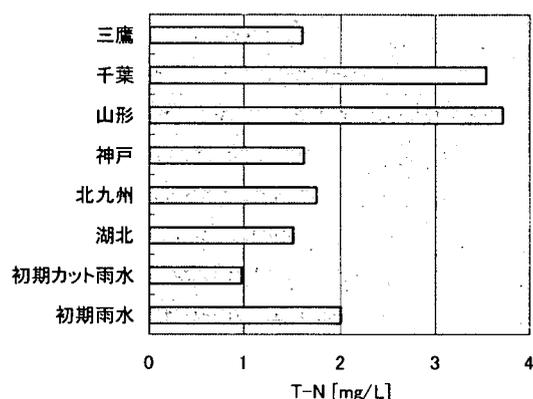


図3-3 既存調査結果との比較 (T-N)

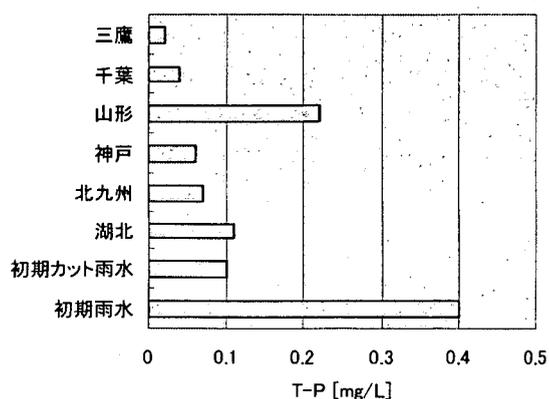


図3-4 既存調査結果との比較 (T-P)

3.3.2 初期雨水分離の効果

初期雨水の測定値に対する初期カット雨水の測定値を残存率として定義し、この指標を用いて初期雨水分離の効果を評価した。残存率が小さいほど、初期雨水分離の効果が大きいものと考えられる。

残存率の計算結果を図 3-5 に示す。ここで図中の値は、各調査対象降雨ごとの測定値から残存率を計算し、これを平均したものである。これによれば、SS、Fe、Cu の残存率が特に小さく、初期雨水分離の効果が大きかった。濁度、色度、T-N、T-P、Zn、Pb の各項目については残存率が5割程度であった。また溶解性成分である溶解性 COD_{Cr}、溶解性 TOC、NO₃-N、NH₄-N の各項目は残存率が概ね1程度であり、初期雨水分離による効果が小さかった。

残存率の大小は各項目の粒子性の程度によるものと考えられるため、各項目と SS との相関を調べた。例として、残存率の小さい Fe、Cu、残存率が5割程度の T-P、およびほぼ1に近い NO₃-N について、図 3-6 ~ 3-9 に示す。特に Fe と SS の相関が大きく、初期雨水、初期カット雨水とも同様の傾向を示していた。逆に NO₃-N については R² の値がほぼゼロに近く、SS との相関は低かった。

以上の考察より、初期雨水分離は粒子性成分の除去に効果があると結論づけられる。これは、屋根雨水中の粒子性成分は主に屋根面に堆積している SS 分に起因し、これらの大部分が降雨初期において流出し、その後は流出雨水中にほとんど供給されないためと考えられる。一方、既存の調査結果⁴⁾、⁵⁾ では、溶解性成分も降雨初期に高い濃度で流出し、その後降雨の継続とともに低減すると報告されているが、今回の調査結果からはこのような現象を捉えることができなかった。この点についてさらに検討を深めるためには、溶解性成分を多く含む降雨水起源の負荷量を測定する必要があると考えられる。

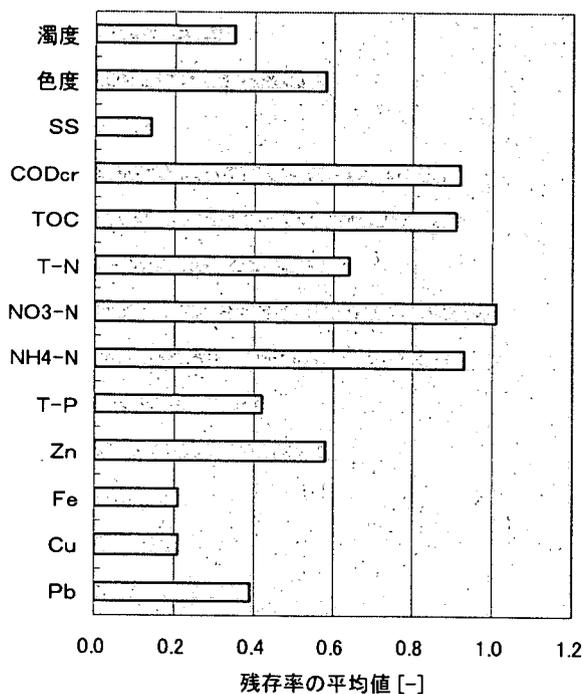


図 3-5 初期雨水分離の効果

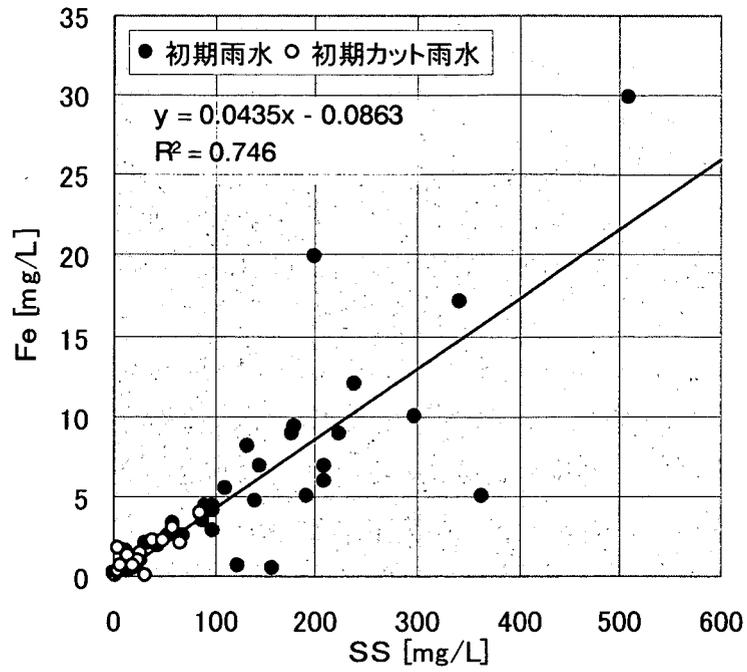


図3-6 SSとFeの相関

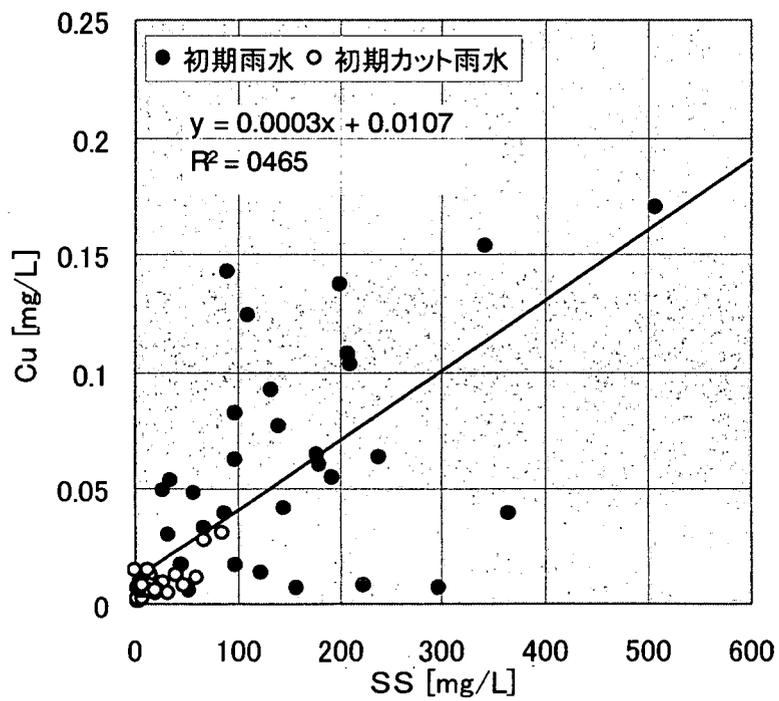


図3-7 SSとCuの相関

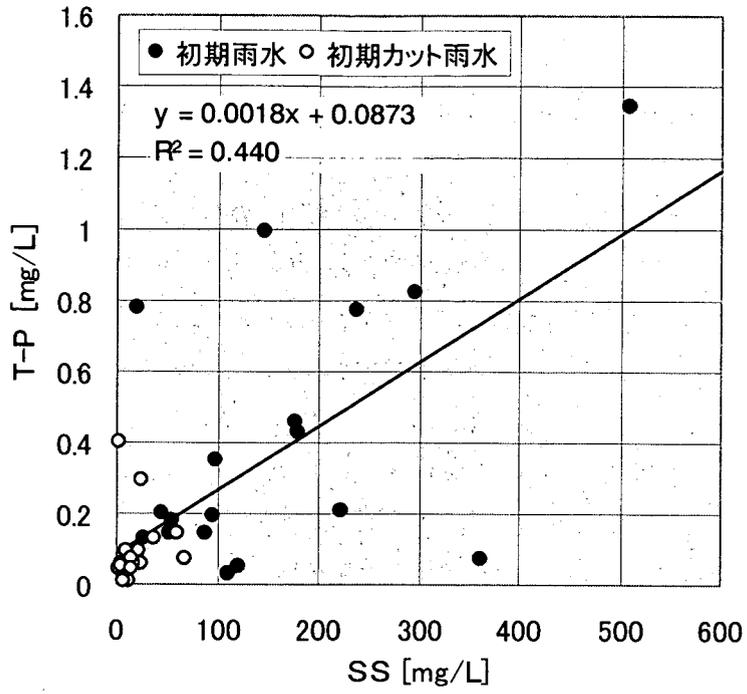


図3-8 SSとT-Pの相関

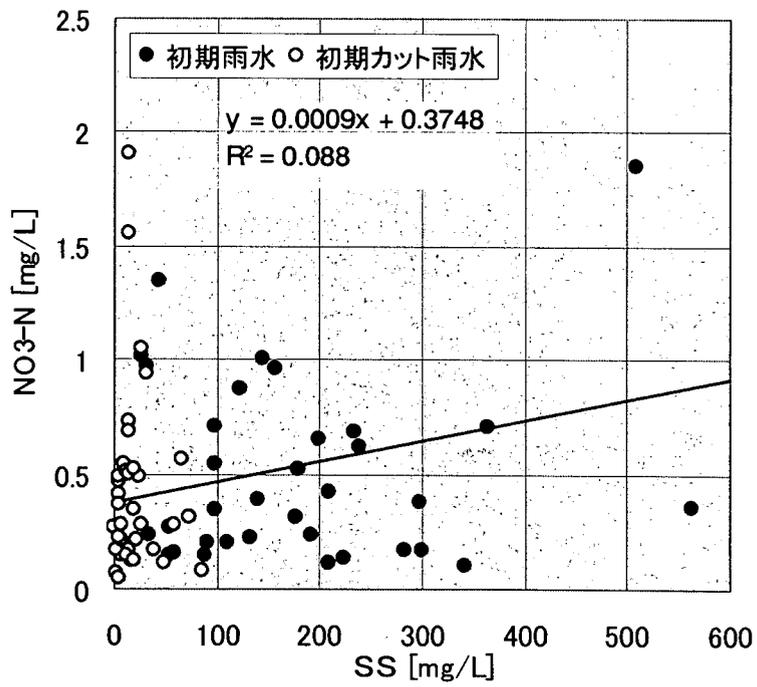


図3-9 SSとNO₃-Nの相関

3.3.3 各種水質基準との比較

調査結果(表 3-1)を、水道および雑用水利用に関する水質基準(表 3-2)と比較した。

調査結果の平均値を雑用水利用に関する各水質基準と比較すると、(今回調査結果と比較できる項目については)いずれも基準を満足していた。水道水質基準との比較では、初期雨水で濁度、色度、Fe が、初期カット雨水で Fe が基準を満足しなかった。また初期カット雨水において、調査結果の最大値を水道水質基準と比較した場合には、Fe に加え、濁度、色度、Pb も基準を満足しなかった。

有機性の汚濁については直接の比較はできないが、KMnO₄消費量の水道水質基準(10mg/L以下)から換算されるCODMnの値が2.53mg/Lであるのに対し、初期カット雨水の溶解性CODCrの平均値が4.5mg/Lであり、この値がCODMnの値の2倍弱であることから、水道水質基準を乗り越えてクリアーできる程度ではないかと考えられる。

雨水利用に適した初期雨水排除(分離)量については、小原ら⁵⁾は水道水質基準(KMnO₄消費量および濁度)を達成するため初期雨水排除量として0.5mmが必要としている。同様に越川ら⁶⁾は水道水質基準を達成するために初期雨水排除量として2～3mmが必要であると、また北林⁷⁾は屋根面の汚れは降雨開始後1.5mmの降雨量で洗い流されるとしており、既存の調査結果には若干の相違が見受けられる。

本調査においては初期雨水分離量は常に一定(0.5mm)であったため、ここでいう適切な初期雨水排除量について厳密な評価はできない。しかし、初期カット雨水の水質が、平均値で水道水質基準を概ね満足できるレベルにあり、最大値に対しては不適合の項目が多かったという調査結果から、常に水道水質基準に適合した良好な屋根雨水水質を得るためには、初期雨水排除量が0.5mmでは十分とはいえないものと考えられる。

表 3-2 各種水質基準

項目	単位	水道水(A)	親水用水(B)	修景用水(B)
濁度	(度)	2以下	5以下	10以下
色度	(度)	5以下	10以下	40以下
Zn	(mg/L)	1.0以下	-	-
Fe	(mg/L)	0.3以下	-	-
Cu	(mg/L)	1.0以下	-	-
Pb	(mg/L)	0.05以下	-	-
NO ₃ -N	(mg/L)	10以下	-	-

(A): 水質基準に関する厚生省令(1992)

(B): 下水処理水の修景・親水利用水質検討マニュアル(案)
建設省高度処理会議(1990)

* いずれも今回調査結果と比較できる部分のみを抜粋

屋根雨水中の重金属濃度に及ぼす屋根面の材質の影響を調査するため、重金属類について追加調査を行った。調査方法は前述(3. 2. 2)のとおりである。なお、土研構内の表土を調査対象としたのは、屋根雨水を下水処理場内で採取していることから、測定された屋根雨水中の重金属濃度に対する下水汚泥焼却灰等の影響について確認するためである。

調査結果を表 3-3 に示す。樋堆積土砂中の重金属濃度(固形物 100mg あたり)は、建屋脇表土の値と比べて2~3倍程度高かった。特に Fe, Zn, Pb は屋根材(亜鉛メッキ鋼板)に多く含まれていることから、これらは屋根面から溶出したものと考えられる。また、建屋脇表土と土研構内の測定値を比較すると、いずれの項目も建屋脇表土の値が高かったが、これは屋根面からの溶出による影響と比較して無視できる程度であった。

表 3-3 の結果ならびに表 3-1 の平均値における各重金属濃度の構成比(Fe を1としたもの)を表 3-4 に示す。樋堆積土砂の構成比は他の表土と比較して Pb が高い程度であり、構成比から溶出の影響を明らかにすることはできなかった。次に樋堆積土砂と初期雨水中の構成比とを比較すると、Zn はほぼ同じであるが、初期雨水中の Cu の割合は高く、Pb の割合は低かった。初期雨水中の Cu の由来は明らかではない。また初期カット雨水中の構成比と比較すると、初期カット雨水中の Zn の割合が高かった。これは溶解性の Zn によるものと考えられる。

屋根雨水中の重金属については、新国技館(銅屋根)での貯留雨水中の Cu が、最大値で水道水質基準を超える 3.1mg/L であったと報告されている⁸⁾。この Cu 濃度は今回調査結果と比べ1~2桁高い値であり、屋根面の材質の違いに起因するものと考えられる。

以上の考察から、金属製の屋根面は重金属の供給源として機能するものと結論づけられる。屋根雨水の利用を考える場合、また面原負荷としての重金属類を考える場合には、屋根面からの溶出の程度に対し留意する必要がある。

表 3-3 重金属類の含有量比較

調査対象	Zn	Fe	Cu	Pb
樋堆積土砂	0.21	4.01	0.014	0.044
建屋脇表土	0.15	2.67	0.008	0.016
土研構内表土	0.09	2.51	0.005	0.004

*単位はいずれも、mg/100mg固形物

表 3-4 重金属類の構成比比較

調査対象	Zn	Fe	Cu	Pb
樋堆積土砂	0.052	1	0.003	0.011
建屋脇表土	0.056	1	0.003	0.006
土研構内表土	0.036	1	0.002	0.002
初期雨水	0.073	1	0.010	0.006
初期カット雨水	0.256	1	0.010	0.012

* Feを1とした場合。初期雨水、初期カット雨水は平均値

3.3.4 降雨特性との関係

一般に、雨天時の汚濁負荷流出量は、先行晴天日数(汚濁負荷の残存量)、最大降雨強度(汚濁負荷の洗い出し作用の強さ)、一雨降雨量(汚濁負荷流出の総量)等により影響を受けるものとされている。本調査においては、降雨初期の雨水を定量分離貯留しているが、対象降雨における全ての流出負荷量を把握できていない。よって、これらのファクターのうち流出負荷の総量に影響すると考えられる最大降雨強度と一雨降雨量については検討を行わないこととし、屋根面の汚濁負荷残存量を代表する指標である先行晴天日数を検討対象に選んだ。

初期雨水水質 (SS, COD_{Cr}, NO₃-N, Fe) と先行晴天日数との関係について、図 3-10 ~ 3-13 に示す。

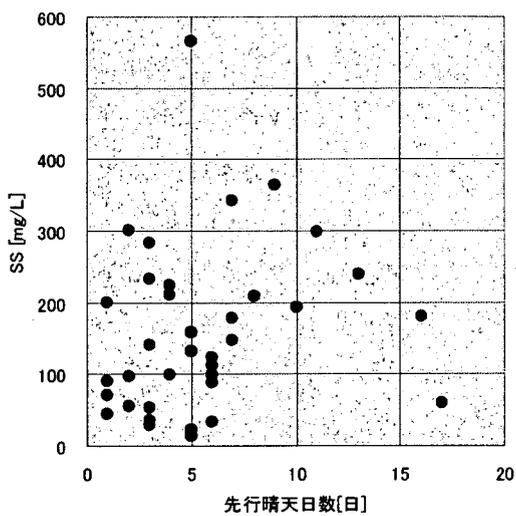


図3-10 先行晴天日数とSSとの関係

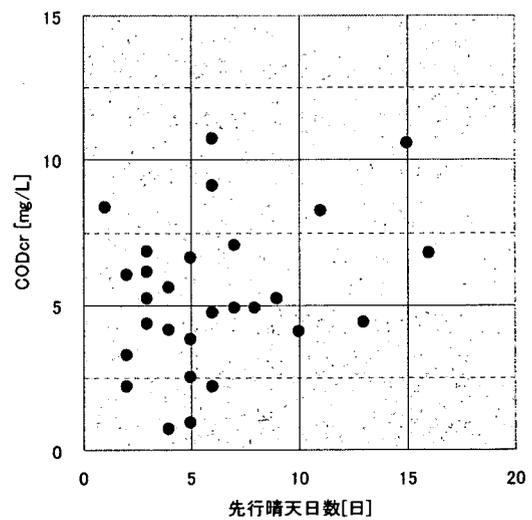


図3-11 先行晴天日数とCOD_{Cr}との関係

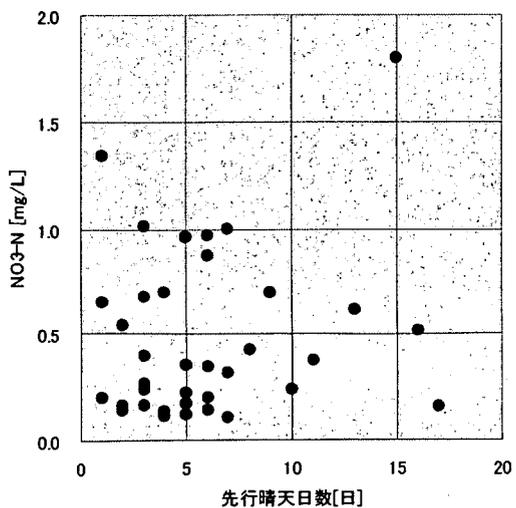


図3-12 先行晴天日数とNO₃-Nとの関係

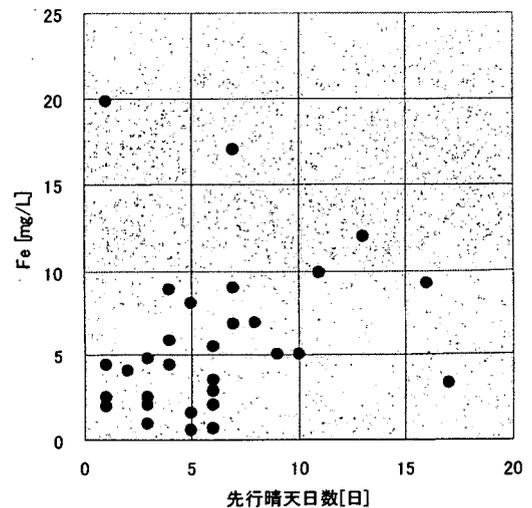


図3-13 先行晴天日数とFeとの関係

図から、先行晴天日数の増大とともに各水質項目とも初期雨水濃度が高くなる傾向が見受けられるが、ばらつきも大きく、直線で近似できるほどではなかった。このような検討の精度を上げるためには、降水量、貯水量等を厳密に管理した上で調査する必要がある。

3.3.5 汚濁負荷量原単位の算出

閉鎖性水域の水質保全対策を検討するためには、発生源別の汚濁負荷量原単位が必要である。いわゆる流総指針¹¹⁾においては市街地、山林、水田、降雨等の原単位データがとりまとめられているが、下水道事業として面源負荷対策を実施するためには、市街地を構成する屋根、道路等の工種別の原単位データが必要とされる。そこで、調査結果を汚濁負荷量原単位 (kg/ha/年) の形で整理することを試みた。

今回の調査では、初期雨水と初期カット雨水のそれぞれの水質データが得られていること、初期カット雨水の貯留水量を計測していないこと等を考慮して、表 3-5 に示す計算手法を定め汚濁負荷量原単位を算出した。なお各降雨を 1mm と 6mm で分類しているが、これは a) 初期雨水貯留槽が 0.5mm、初期カット雨水貯留槽が 4.5mm の降雨量に相当すること、b) 降雨データの最小単位が 1mm であること、c) 集水に当たって降雨損失が見込まれること、の3点を考慮したものである。また各降雨区分に対応する流出係数は、一般的な屋根面の流出係数 0.9¹²⁾ を標準とし、1mm までの初期降雨については、損失が大きいことおよび初期雨水貯留槽の容量を考慮して 0.5 とし、逆に 6mm を超える部分については損失がないものと仮定してこれを 1 とした。

計算対象とした降雨は、屋根雨水の調査期間とあわせて、平成 7 年度から 10 年度の4年間の全降雨とした。また独立降雨は、降雨終了後の屋根面の汚濁負荷堆積量の回復を考慮し、前後 24 時間連続無降雨の場合と定義した。

SS, T-N, T-P の汚濁負荷量原単位計算結果を、流総指針中の市街地、降雨の原単位データと比較したものが表 3-6 である。SS, T-N, T-P とも今回の調査結果は、流総指針における市街地の最小値より少し大きい程度の値となった。今回の計算では、降雨量 6mm を超える部分の水質について、水質項目によらず一律初期カット雨水の 1/2 の濃度を与えて計算しているが、この部分に相当する降雨量は総降雨量の約 70 % を占めており、計算結果に大きく影響する。例えば、残存率が大きく、降雨水起源の負荷量も多いと考えられる T-N につ

表 3-5 汚濁負荷量原単位の算出方法

①: 対象期間の各独立降雨の総降雨量を整理。
 ②: 降り始めからの降雨量により、各独立降雨の降雨量を3分類。
 A: 降り始めから1mmまでの部分
 B: 1mmを超えて、6mmまでの部分
 C: 6mmを超える部分
 ③: 3分類の降雨の対象期間中の総和を求める。
 ④: 各分類に対して、次の屋根雨水水質と流出係数をあてる。

分類	屋根雨水水質	流出係数
A	初期雨水水質	0.5
B	初期カット雨水水質	0.9
C	初期カット雨水水質の1/2	1

⑤: ③と④をかけあわせて、各降雨分類ごとの汚濁負荷量を算出したのち、これらを足しあわせて汚濁負荷量原単位とする。

表 3-6 汚濁負荷量原単位の計算結果

項目	SS	T-N	T-P
今回調査結果	182	6.6	0.74
市街地: 最大値	2,390	39.6	6.5
市街地: 平均値	737	16.2	1.9
市街地: 最小値	105	4.5	0.6
降雨: 最大値	-	30.6	2.62
降雨: 平均値	-	11.3	0.53
降雨: 最小値	-	4.5	0.09

* 市街地、降雨のデータは流総指針による
 * 単位はいずれも、kg/ha/年

いてみると、計算結果が流総指針における降雨の平均値よりも小さかった。これは、上述の濃度の仮定が必ずしも適切でないことを示唆しているものと考えられる。

よって、屋根雨水の汚濁負荷量原単位を精度よく算出するためには、降雨初期だけでなく、降雨後半の屋根雨水(もしくは降雨水)も対象とした調査が必要であると考えられる。

3.4 まとめ

- ①降雨初期の雨水を分離することは、SS, 重金属類、T-P等の粒子性成分の除去に効果大きい。
- ②0.5mm相当の初期雨水排除により、平均水質として水道水質基準を概ね満足する水質が得られたが、この排除量は常に良好な水質を得るためには十分とはいえない。
- ③金属製の屋根面は重金属の供給源として機能する。雨水利用に当たっては集水面の材質による影響を考慮する必要がある。
- ④先行晴天日数の増大とともに初期雨水水質の濃度が高くなる傾向が見受けられるが、ばらつきも大きく、直線で近似できるほどの相関は得られなかった。
- ⑤屋根雨水の汚濁負荷量原単位について一定の条件の下で算出した結果、SSで182 kg/ha/年、T-Nで6.6 kg/ha/年、T-Pで0.74 kg/ha/年となった。

参考文献

- 1). 岩波洋:建築物における雨水利用に関する研究(その2. 細菌衛生上の検討)、空気調和・衛生工学会講演会論文集, pp.69-72, 1984.
- 2). T. Sakakibara : Roof Runoff Storm Water Quality, Proc. 7th International Conference on Urban Storm Drainage, Hannover, pp.157-162, 1996.
- 3). 和田安彦:非特定汚染源負荷の流出量とその特性、環境技術, Vol. 14, No. 1, pp. 97-101, 1985.
- 4). 嶋津暉之、和波一夫:雨水の地下浸透に関する研究(その2) - 各種雨水排水の水質と流出特性 -、東京都環境科学研究所年報 1997、pp. 256-268.
- 5). 小原伸一、青木一義、山田賢次、紀谷文樹:市街地における雨水利用を目的とした初期雨水の性状とその排除量に関する検討、空気調和・衛生工学会講演会論文集, pp.53-56, 1987.
- 6). 越川康夫、村川三郎:収集雨水汚濁防止を目的とした初期雨水排除量の検討、日本建築学会計画系論文報告集第 350号、pp. 8-17, 1985.
- 7). 北林正行:雨水利用システムを活用したビルの実例、PPM, Vol.23, No. 8, pp. 64-71, 1992.
- 8). 岡本章、田中英夫、佐藤正章:新国技館の大空間空調と雨水利用(その4)雨水利用システムの実態、空気調和・衛生工学、Vol. 60, No. 8, pp. 67-73, 1986.
- 9). 岩波洋:大林組技術研究所本館における雨水利用システム、太陽エネルギー、Vol.11, No.1, pp.46-52, 1985.
- 10). 鈴木聖史:都立施設における雨水利用と今後の課題、空気調和・衛生工学, Vol. 67, No.1, pp.33-39, 1993.
- 11). 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説(平成 11 年版)、(社)日本下水道協会, 1999.
- 12). 下水道施設計画・設計指針と解説 前編 -1994 年版-、(社)日本下水道協会, 1994.