

堀川のCSO負荷量の推定とその削減策に関する研究

指導教員 富永晃宏 教授

中西祐貴

1. はじめに

堀川は名古屋市を南北に流れる流域面積が51.9km²の都市河川である。自己水源を持たず、他の河川からの導水と流域の下水処理水が主な水源で、また川の大部分が潮汐の影響を受ける感潮域となっていて流れが滞留しやすい。雨天時には流域に整備されている合流式下水道から雨水吐越流（以下CSO）が堀川に流入し、水質悪化の原因となっている。

流入するCSO流出特性を得るために現地観測と流量モニタリングを実施し、その結果を用いてCSO汚濁負荷の流出モデルを構築した。このモデルを用いて貯留・浸透によるCSO汚濁負荷の削減効果を検討した。

2. 現地観測・流量モニタリング

現地観測は堀川の上流部にあたる名古屋市北区で実施した。図-1に流域図を示す。この区間の堀川には雨天時には6か所の雨水吐口からCSOが流入するが、晴天時には庄内川からの導水のみの流入となる。観測地点から下流の猿投橋には落差工があり、下流の水深の影響を受けない順流域である。三階橋付近にあるポンプ所からは雨天時に矢田川へ排水される。

堀川の河道内の3か所に水位計を設置し、2分間隔で水位を計測した。三階橋付近では導水量の確認を、猿投橋の上流では80m離れた2点の水位差を利用した流量モニタリングを実施した。これは平水時に流量計測を行ない、マンニング式の

$$Q = \frac{1}{n} \frac{(bh)^{\frac{5}{3}}}{(b+2h)^{\frac{2}{3}}} \sqrt{I_e}$$

を用いてその時点の水深 h とエネルギー勾配 I_e から計算される流量 Q が等しくなるマンニングの粗度係数 n を求めるものである。計測を10回行いその結果、マンニングの粗度係数 $n=0.0325$ を得た。この値と2分おきの水位から2点間の水面勾配を加味した流量のモニタリングを行なった。

雨量計は名古屋市の雨量観測点の間隔を補うために採水地点に近いT邸に設置した。ティーセン法を用いて下水管路から推定される流域面積1.86km²に与えられる流域平均降水量を求めた。

採水は急激な濃度変化に対応するためにボトルを直接河川中に入れて最頻時に2分間隔で採水を行なった。採取したサンプルは速やかにBOD試験（圧力法）とSS試験（ガラス繊維ろ紙法）を実施した。

3. 雨天時観測結果

雨天時観測は5回実施し、その結果概要は表-1の通りとなった。CSO流出回数は観測時間中に流出があった回数である。CSO流出量とCSOによるBOD、SS負荷量は次のように計算している。観測時の流量・BOD

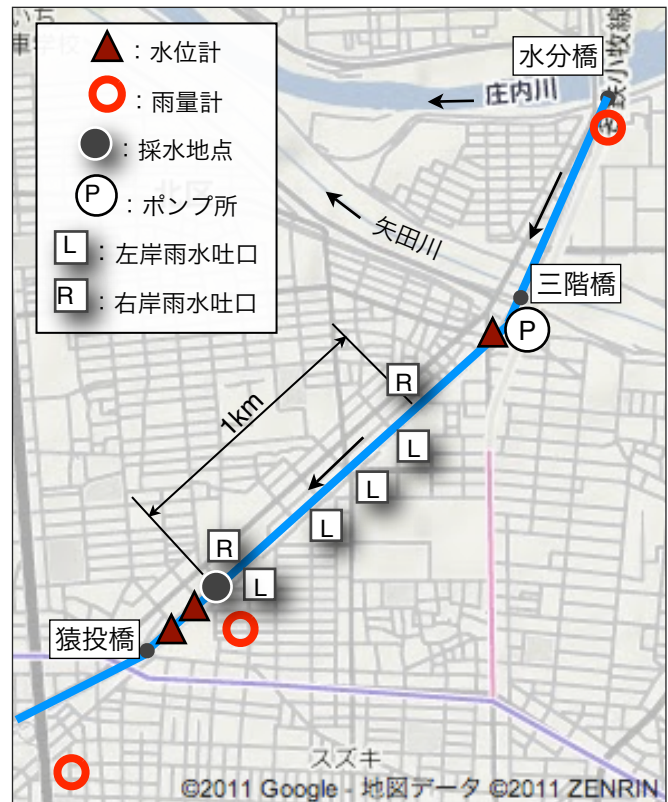


図-1 流域と観測地点

表-1 雨天時観測の結果

日付	6/15	7/29	9/8	10/24	12/3
時間	15-25	0-10	7-14	17-23	0-7
総降水量 (mm)	49.3	12.0	32.4	9.9	44.1
最大10分間降水量 (mm/10min)	5.0	2.6	5.3	1.5	6.1
SS最大濃度 (mg/L)	155	105	243	36.5	262
BOD最大濃度 (mg/L)	22.8	65.8	41.8	22.3	58.2
CSO流出回数 (回)	4	1	2	1	1
先行無降雨日数 (日)	22	13	25	15	10
CSO量 (m ³)	5892	581.8	4545	51.1	8483
BOD負荷量 (kg)	106.1	75.2	114.8	11.4	181.4
SS負荷量 (kg)	538.4	120.8	637.4	36.6	1262

濃度およびSS濃度はそれぞれ線形補間して、流量に濃度を掛けて負荷量とする。これらには導水とCSOの両方が混ざったものであるため、導水による流量と負荷量をそれぞれ差し引く必要がある。導水量はCSO流出前後の平均流量を線形補間した。導水BOD負荷量は平水時に採水したものの平均濃度である6.0mg/Lとして、補間した導水量に掛けた。導水SS負荷量は導水流量 Q_{wc} に依存しており、導水のSS濃度 C_{ss} を求める関係式として

$$C_{ss} = 54.68Q_{wc}^3 - 106.73Q_{wc}^2 + 71.26Q_{wc} - 4.65$$

を定義した。その値に導水流量を掛けて導水SS負荷量とした。CSO流出量、SS負荷量とBOD負荷流量のCSO起因分はそれぞれの観測時の値から導水起因分を差し引いて求めた。

ここでは6月15日の観測結果を示す。図-2に水位計の水位と流量の時系列変化を、図-3に降水量と流量の時系列変化を、図-4に流量とBOD、SS濃度の時系列変化を、図-5にCSO量とCSOによるBOD、SS負荷量の時系列変化を示している。

三階橋下流地点での水位は23時まで変化がほとんど見られないのに対して、猿投橋上流では4回の水位上昇がありCSO流出があったことがわかる。23時すぎからの三階橋下流地点で水位変動は庄内川導水を停止する際の特有な変動である。

いずれのCSO流出の前に強い降雨があったことがわかる。16時すぎ、17時半ごろ、19時半ごろと21時30分から23時30分にかけての降雨でCSO流出が4回発生している。

BODおよびSS濃度はCSO流出と同時に高い値を示している。BOD濃度は1回目と2回目のCSO流出のサンプルを分析にかけておらず未知である。3回目のCSO流出時のBOD濃度は4回目のCSO流出時のいずれの値よりも高いため、先行CSO流出で汚濁の多くが流出していると考えられる。一方でSS濃度は流量が多い4回目のCSO流出で最大となっており、流量の依存性が高いといえる。

1回目と2回目のCSO流出のサンプルを分析にかけていないため、そのときのBOD負荷流出量は0ではなく未知である。3回目と4回目のBOD負荷流出量のピーク値はほぼ同じ値をとっており、流出回数の影響を大きく受けることが明らかとなった。それに対してSS負荷はCSO流出量依存性が強く、4回目の流出量が最大となった。SS負荷流出量のピークは流量のピークとほぼ同じタイミングにきているが、流出量が低下に転じるとSS負荷流出量は急減し、その度合いは流量よりも大きい。

5回の現地観測を実施したことによって、流出初期に汚濁流出が高負荷となるファーストフラッシュ特性が確認され、この地区からのCSO流出量・汚濁負荷流出量を求めることができた。

4. CSO流出モデル

まず降雨からCSO流出量を求めるモデルを構築する。この流域と周辺の地区からは強雨時にポンプ所を通じて矢田川に排水される。この地区からポンプ所へ流入する量の時間分布が未知であり、MOUSEなどでシミュレーションを行なった場合に適切に評価できているかが確認できない。半年間にわたって流量モニタリングできているため、それから計算されるCSO流出量と10分間降水量の関係からモデルの構築を行なった。

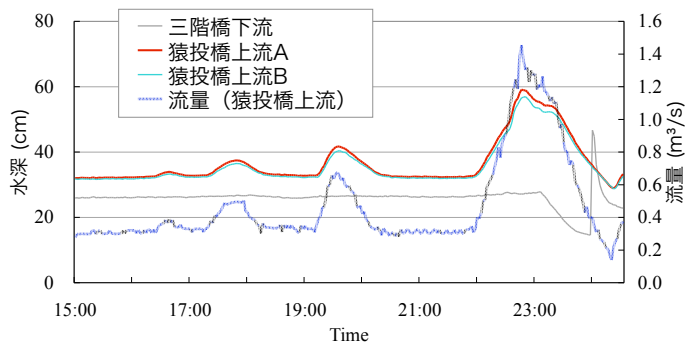


図-2 水位と流量 (6月15日)

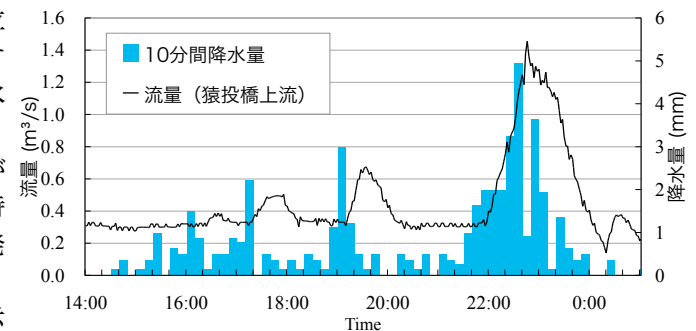


図-3 降水量と流量 (6月15日)

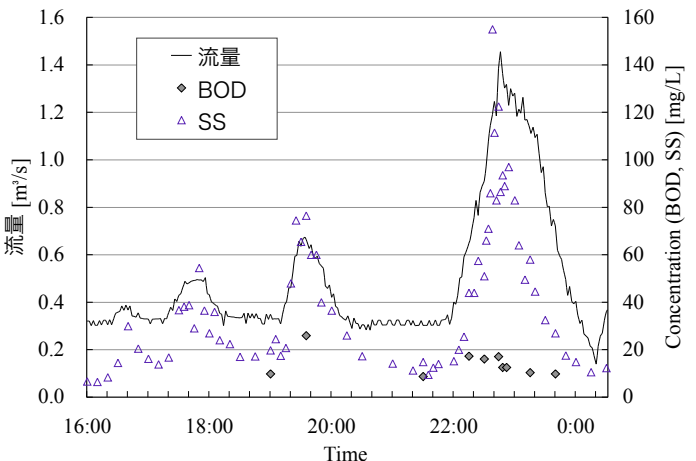


図-4 流量とBOD, SS濃度 (6月15日)

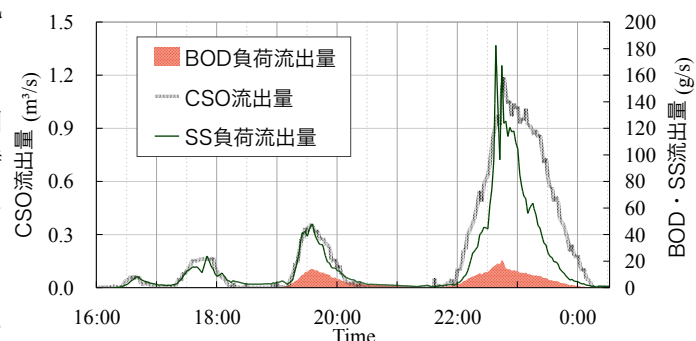


図-5 CSO流出量・汚濁負荷流出量 (6月15日)

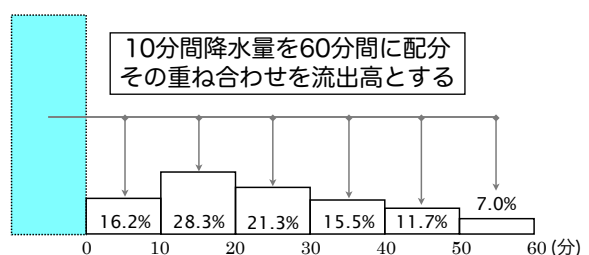


図-6 流出高の考え方

降雨に対する流出高 q (mm)をその時点から60分前までの10分間降水量 r を用いて次のように定義した。

$$q(t) = \sum_{i=1}^6 a_i r(t - i\Delta t)$$

$$\Delta t = 10\text{min}, a_1 = 0.162, a_2 = 0.283, a_3 = 0.213, a_4 = 0.155, a_5 = 0.117, a_6 = 0.070$$

添字は1が10分前、6が60分前を意味する。10分間降水量側から考えた流出高の概念は図-6のようになる。係数はCSO流出量と最も関係が強くなるように設定したものである。この係数から降雨から約20分後に流出のピークが現れることがわかる。

この流出高とCSO流出量との関係を図-7に示す。おおむね線形の関係がみられ、流出高 q (mm)とCSO流出量 Q_c (m^3)との関係式を以下のようにできる。

$$Q_c = 257.37(q - 0.50)$$

この式から流出高 q が0.50(mm)を上回るとCSO流出が発生すると考えることができる。なお決定係数は $r^2=0.860$ となった。

5. 汚濁負荷流出量モデル

次にCSO流出量からBOD負荷量およびSS負荷量を求めるモデルを構築する。現地観測でのCSO流出量、BOD・SS負荷流出量データを線形補間して、その時間変化率であるCSO流出量変化率 dQ_c/dt と、BOD・SS負荷流出量変化率 dB/dt 、 dS/dt とほぼ線形関係にあることから、関係式が次のように得られる。

$$B(t) = \int_0^t \alpha \left(\frac{dQ_c}{dt} \right) dt, S(t) = \int_0^t \beta \left(\frac{dQ_c}{dt} \right) dt$$

比例係数 α 、 β は流出回数によって減少し表-2の通りとなった。この概念を図-8に示す。

CSO流出が増加するとその勾配に比例してSS・BODの負荷流出の勾配も大きくなる。汚濁負荷の流出にはある程度で頭打ちになることが観測から分かったため、表-3のように汚濁負荷流出量の1分あたりの上限値を設定した。その場合がパターン2のようになるが、CSO流出量の減少が始まると同時にBOD・SS負荷流出量も減少するようにした。またCSO流出回数が増えるほどCSO流出量変化率に対するBOD・SS負荷流出量変化率が小さくなる傾向が見られた。そのため流出回数ごとに分けて分析を行ない、比例係数 α 、 β の値と汚濁負荷流出量の1分あたりの上限值はそれぞれ異なる値とした。

なお、先のCSO流出終了から12時間以内に次のCSO流出が始まった場合に連続降雨と定義した。

6. モデルの再現性確認

観測時のCSO流出量、BOD・SS負荷流出量について、CSO流出モデルと汚濁負荷流出量モデルを使って降雨量から推定されるものと比較を行なった。その結果を図-9と図-10に示す。6月15日の1回目と2回目のCSO流出時は現地観測でのBOD量の推定を行なっていないため省略した。

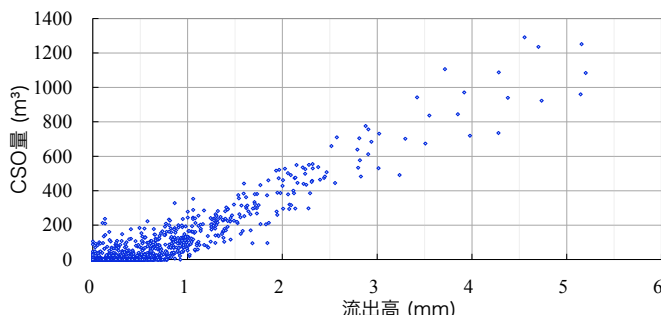


図-7 流出高とCSO流出量の関係

表-2 汚濁負荷流出量モデルの比例係数 α 、 β

流出回数	1回目	2回目	3回目	4回目
α (BOD)	55.0	21.1	12.6	6.35
β (SS)	97.4	75.7	47.9	41.2

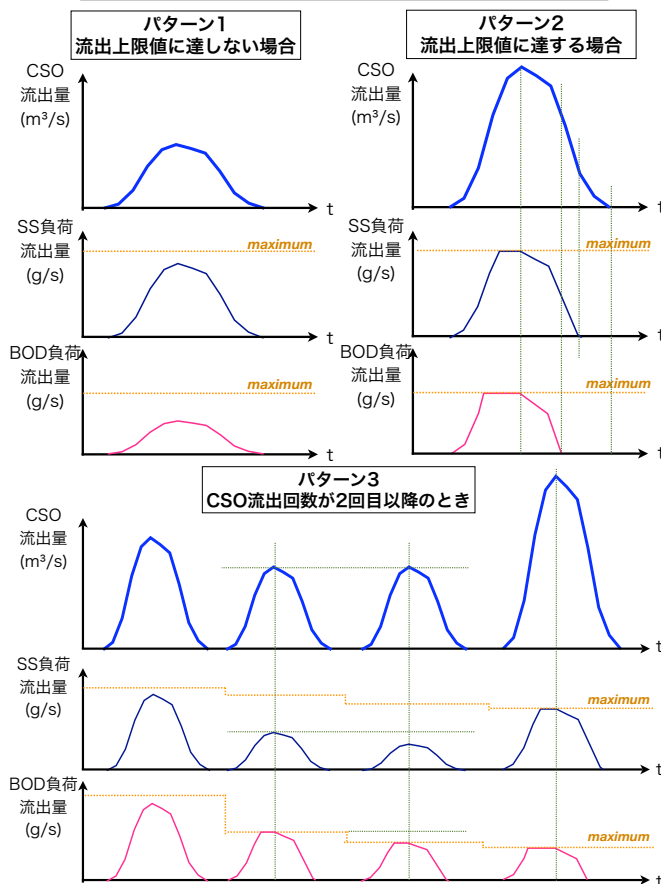


図-8 降雨波形と汚濁負荷流出の概念図

表-3 流出汚濁負荷の設定上限値

流出回数	1回目	2回目	3回目	4回目
BOD (kg/min)	3.20	1.75	1.30	1.00
SS (kg/min)	22.0	19.8	17.6	15.4

CSO流出量は概ね再現できているとすることができ。ただし流出が少ないときに過大に、流出が大きいときに過小となる傾向がみられる。BOD・SS流出負荷量もCSO流出量の誤差の影響を受けている。観測データに対するモデルの出力結果のそれぞれの合計の比は、CSO流出量が95.8%、BOD負荷流出量が96.2%、SS負荷流出量が96.8%となった。そのため誤差は見られるが再現性が得られていると判断した。

7. 月別流出量の推定と負荷削減策の効果

CSO流出モデルと汚濁負荷流出量モデルを用いて2007年～2009年の3年分の汚濁負荷量を推定した。また、各戸貯留あるいは分流化によって流出高を5%、10%、15%カットする負荷削減のシナリオを設定し、その効果を検討した。それぞれのケース名をCase 1, Case 2, Case 3としている。その結果を図-11から図-13に示す。

CSO量の削減量が多かったのは降水量の多い夏期であった。しかし削減率は大きくならなかった。これは夏の平均降雨強度が大きいためと考えられる。BOD・SS負荷流出量も同様に夏期に削減量が多いが、削減率は低くなる。汚濁負荷の流出量は6月に最多となっている。6月は梅雨でやや強い降雨の回数が多いため、また7月や8月は強い雨が長時間継続することがあり、その場合にCSO量が過大とならないように流出汚濁負荷の上限値を設定しているなどの理由が挙げられる。

1年間での汚濁負荷削減効果を表-4に示した。CSO流出率とBOD・SS負荷流出削減率はほぼ同じ割合となっている。流出高のうち15%を流出させないようにすると汚濁負荷の流出を24%カットすることができる。名古屋市の道路率は約18%あり、道路排水を分流化をすると道路負荷の流出は免れないが未処理下水の流入の削減が可能といえる。流域全体で考えると、貯留や分流化による堀川への汚濁負荷削減のインパクトは大きいといえる。

8. おわりに

本研究ではCSO流出量とその削減策を得るために、現地観測と水位モニタリングを行いCSO流出特性を得た。それを用いて簡単な2種類直列の流出シミュレーションモデルを構築し、当該流域からの汚濁負荷流出量と、貯留による流出汚濁負荷のインパクトを得ることができた。流域で降雨の貯留の進めることで都市河川の水環境改善がなされることに期待したい。

参考文献

1) 中村栄一(1980): 合流式下水道対策の検討(第II報)-汚濁流出シミュレーション, 第16回衛生工学研究討論会講演論文集, p154-159

表-4 貯留による1年間での汚濁負荷削減効果

Case	現況	Case 1 5%カット	Case 2 10%カット	Case 3 15%カット
CSO量 (1000m ³)	146.2	133.8	121.8	110.0
削減率 (%)	-	8.5	16.7	24.7
BOD負荷量 (kg)	6475.1	6003.3	5525.0	4928.6
削減率 (%)	-	8.5	15.9	23.9
SS負荷量 (kg)	21036.3	19564.8	17894.1	16040.7
削減率 (%)	-	8.2	16.0	24.7

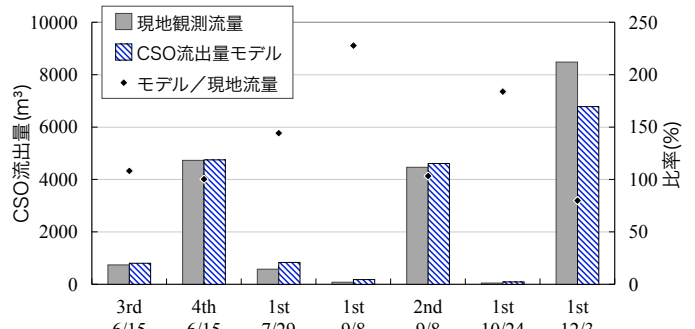


図-9 観測流出量とモデルCSO流出量

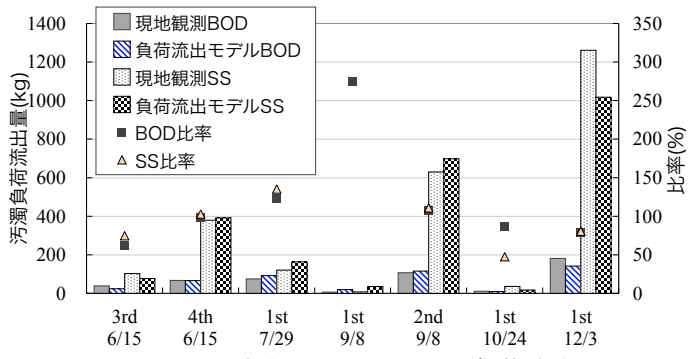


図-10 観測流出量とモデル汚濁負荷流出量

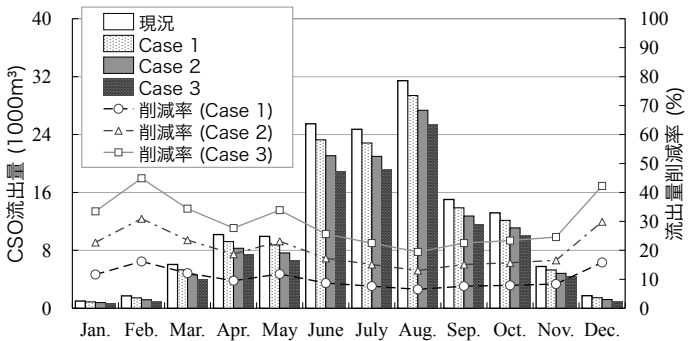


図-11 CSO流出量の月別削減効果

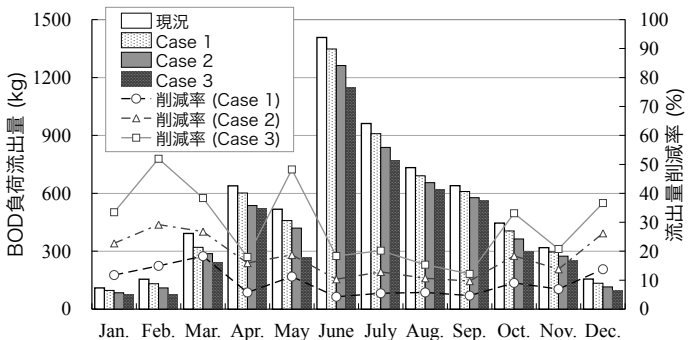


図-12 BOD汚濁負荷量の月別削減効果

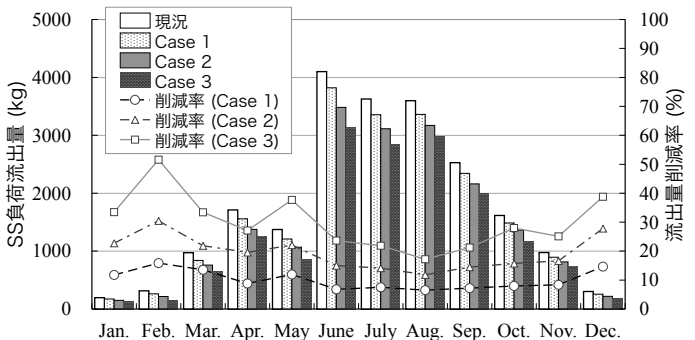


図-13 SS汚濁負荷量の月別削減効果