

大和川における水温を考慮した BOD 負荷量の推定

ESTIMATION OF BOD LOADS CONSIDERING WATER
TEMPERATURE IN THE YAMATO RIVER CATCHMENTS

谷口正伸¹・井伊博行²・平田健正³・石塚正秀⁴

Masanobu TANIGUCHI, Hiroyuki II, Tatemasa HIRATA and Masahide ISHIZUKA

¹学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930)

²正会員 博(理) 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930)

³正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930)

⁴正会員 博(工) 和歌山大学助手 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930)

Calculated Pollutant load per unit production and actual pollutant load of Yamato River were estimated. The actual pollutant load was determined from measured flow rates and concentrations. As a result, actual BOD load showed seasonal changes with low values of summer and high values of winter. The change depended on temperature because a rate of decomposition of organic compound depends on temperature. The actual BOD loads between two pints along the Yamato River with no branch river and no drainage were measured and a rate of decomposition between them was calculated. The calculated seasonal BOD load from pollutant load unit production method including rate of decomposition showed the same pattern of the actual BOD load. The total BOD load value by unit production including decomposition calculated method was 4 times of the actual load. As BOD was not measured at flood condition, the actual BOD did not include floating material at the condition of high flow rate and then was smaller than the calculated load per unit production.

Key Words: Yamato River, water temperature, pollutant load per unit production, BOD, T-N, T-P

1. はじめに

大和川は急激な都市化に伴い水質汚濁が問題となっている。このため、昭和 57 年以降現在まで、BOD75%値において全国 1 級河川の中でワースト 1 位か 2 位を記録している。近年、排水規制の強化、下水道の整備、河川浄化施設の設置などにより水質の改善がみられるが、水質改善の効果が上がっていないのが現状である¹⁾²⁾。そのため、大和川では支流の石川流域における土地利用特性³⁾や環境同位体及び化学組成から見た石川流域の河川水と地下水の起源について⁴⁾研究が行われ、大和川における物質移動量の算定⁵⁾、大和川の BOD、アンモニア態窒素、陰イオン界面活性剤濃度の季節変動とその原因について⁶⁾研究がなされてきた。さらに、大和川の生活排水起源物質の水質変化から、BOD などの生活排水起源物

質濃度は水温が低下すると増加するという水温依存性があることがわかった⁷⁾。負荷量解析については、大和川と隣り合った流域である紀ノ川で解析が行われ、実測値との整合性が確認されている⁸⁾。そこで、本研究では大和川についても紀ノ川で用いた原単位法により、負荷量解析を行い、有機物由来の負荷源の推定を行った。また、実測負荷量に季節変動が観測され、水温が高くなると負荷量が減少し、冬に負荷量は最大値を示した。また、新たな流入のない区間の水質を比較することで、流下過程での有機物の分解が起こることが観測された。そこで、負荷量の水温依存特性と流下過程での分解特性を含む負荷量解析を試行した。

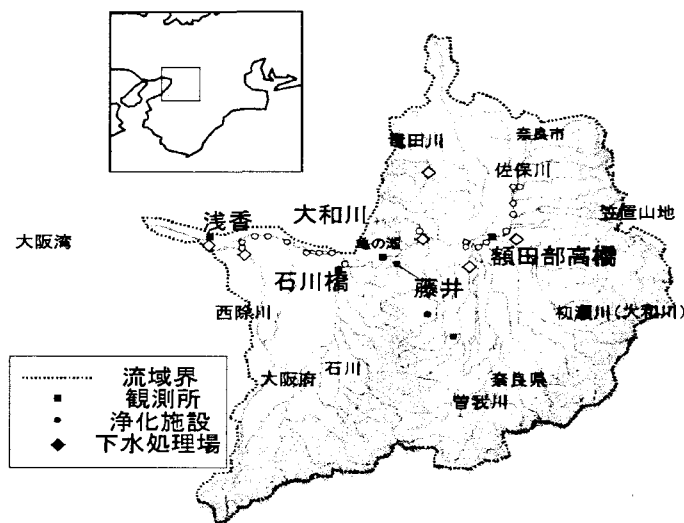


図-1 大和川流域の概略

2. 研究対象地の概要

図-1は大和川流域の概要を示す。大和川は奈良県と大阪府南部を流れる全長68kmの1級河川である。大和川は笠置山地から始まり、佐保川、曽我川、竜田川などの奈良盆地の水を集め、奈良県と大阪府の境にある亀の瀬の渓谷部を経て、大阪平野に流入している。奈良盆地を囲む山地や奈良盆地の基盤は透水性の小さい火成岩からなり、奈良盆地の水は全て亀の瀬に集まる。この後、石川や西除川等を合わせ、大阪湾に注いでいる。流域面積は1070km²であり、奈良県、大阪府の41市町村に約200万人の人が生活している。また、1999年の下水道普及率は奈良県が57.8%、大阪府が55%と低くなっている⁹⁾。

3. 汚濁負荷量解析

負荷源を解明するため、大和川流域での汚濁負荷量を算定し、実測値との比較検討を行った。汚濁負荷量は自然系（水田、その他農用地、森林）、生活系、産業系に分類し、それぞれ原単位法を用いて算定した。自然系、生活系、産業系の各汚濁源から発生する量を発生負荷量として、それに流達率を乗じ、河川に排出される量を排出負荷量とする。

(1) 生活系排出負荷量

生活系からの排出負荷量を求めるには、1人1日あたりの発生原単位に流域内の人口を乗じることによって求められる。ここで河川への排出量を評価するには、市町村別に流域内の生活用水の処理形態を考慮する必要がある。1：公共下水道、2：合併処理槽、3：単独処理槽、4：し尿収集、5：その他、に分けて算定する。次に、処理形態別人口に処理形態別の排出率をかけることによ

表-1 処理形態別人口(人)

市町村名	人口	下水道	合併浄化槽	単独浄化槽	し尿収集	その他
大阪市	890	770	0	51	69	0
堺市	181539	74165	7862	37738	61774	0
富田林市	126084	72716	10795	18212	24289	72
河内長野市	118917	34679	51650	11363	20751	474
松原市	133648	58485	9741	12475	52947	0
柏原市	33621	9676	3604	10666	9662	13
羽曳野市	120565	32016	6152	43154	39243	0
藤井寺市	66215	23358	4389	20855	17613	0
大阪狭山市	56396	52992	1123	1306	953	22
太子町	14083	4440	2003	5134	2312	194
河南町	16326	7304	2999	1248	4282	493
千早赤阪村	5946	469	2262	1089	1478	647
美原町	38144	10047	9221	6711	12022	143
奈良市	322901	233820	6864	62015	17238	2964
大和高田市	75432	20169	4815	29815	20591	42
大和郡山市	94905	66009	7625	11834	9437	0
天理市	67817	45541	3473	7657	11091	55
橿原市	124201	48839	7581	33562	33781	438
桜井市	63816	25609	6753	10006	21345	103
御所市	35151	3287	412	8968	20498	1986
生駒市	104894	35028	27285	35424	6616	541
香芝市	63050	19532	8925	26340	8157	96
平群町	20803	0	8925	9367	2444	68
三郷町	23430	7900	6101	2477	6952	0
斑鳩町	28961	0	750	18021	10159	31
安堵町	8940	0	2505	1406	5029	0
川西町	9693	9667	0	2	24	0
三宅町	8334	4841	28	2455	1010	0
田原本町	33365	15292	1513	9387	5483	1690
高取町	8198	50	213	1867	5467	601
明日香村	7058	2744	0	1428	2106	780
新庄町	19409	9335	0	4200	5639	234
当麻町	15485	10726	498	2261	1998	3
上牧町	24472	18010	627	2797	3024	14
王寺町	23947	10182	3356	7482	2927	0
広陵町	31623	21991	210	5984	3415	22
河合町	20407	13131	214	4394	2566	102
大阪府	912374	381117	111801	170002	247395	2058
奈良県	1236292	621703	98673	299149	206997	9770
計	2148666	1E+06	210474	469151	454392	11828

表-2 発生原単位及び処理形態別排出率

	発生原単位 g/1人/day	下水道	合併+ ゴミプラ	単独浄 化槽	し尿収集	その他
BOD	58	7.0%	10.0%	80.0%	67.5%	50.0%
T-N	11	61.0%	49.0%	76.7%	16.9%	50.0%
T-P	1.3	39.0%	65.0%	50.0%	31.0%	50.0%

って、処理形態別の排出負荷量の和が各市町村の排出負荷量となり、各市町村の合計が流域における排出負荷量となる。式(1)に生活系排出負荷量の算定式を示す。

$$Lpl = \sum_i \sum_j (G_L \times P_i \times R_{ij} \times B_j \times 365 / 10^6) \quad (1)$$

ここに Lpl は生活系排出負荷量(t/year)、 i は各自治体である。 j は各処理形態を表し、また、 G_L は発生原単位(g/人/day)、 P_i は各自治体の人口、 R_{ij} は処理形態別普及割合(%), B_j は処理形態別排出率(%)を表す。表1は流域内市町村の人口及び、処理形態別人口を示す。表2に生活系発生原単位及び処理形態別排出率を示す。生活系発生原単位のBOD、T-N、T-P及び処理形態別の排出率と下水道の排出率は、流域下水道整備総合計画調査 指針と解説¹⁰⁾の値を用い、単独処理槽、合併処理槽、汲み取り式

に関してはそれぞれ、発生原単位のうち、生活雑排水とし尿に含まれる割合から、それぞれの処理率を計算して求めた。以上により、式(1)によって求めた各市町村の生活系排出負荷量の総和を大和川流域における生活系排出負荷量とする。

(2) 産業系排出負荷量

産業系の排出負荷量は、流域内市町村の中分類ごとに定められた排出原単位に流域内の事業所数の割合を乗じたものを流域全体で合計する。表-3 に中分類別排出原単位の計算結果を示す。また、式(2)に産業系排出負荷量の式を示す。

$$D = \sum_i \sum_j (G_j \times M_{ij} \times C_{ij} \times 365 / 10^6) \quad (2)$$

ここで、 i は自治体別、 j は中分類別に、 D は産業系排出負荷量(t/year)、 G_j は中分類 j の排出原単位(g/day/百万円)、 M_{ij} は自治体 i の中分類 j の工業出荷額(百万円)、 C_{ij} は自治体 i の中分類 j の総事業所数に占める割合である。ここで、排出原単位は式(3)で示される。

$$G_j = \frac{\sum_k J_k \times K_k}{\sum_k M_k} \quad (3)$$

ここで、 k は中分類 j における細分類、 J_k は細分類 k の工場排水水質(mg/L)、 K_k は細分類 k の工場排水量(m³/day)、 M_k は細分類 k の工業出荷額(百万円)である。式(3)で示されるように、排出原単位を求めるにあたり、細分類別工業出荷額、工場排水量が必要である。しかし、対象流域内での全自治体で細分類別の出荷額が整備されていないため、今回は平成12年工業統計調査産業細分類別工業統計表¹¹⁾を用いて大阪府平均の原単位を求めて、利用することにした。再分類 k の排水量は細分類の排水量原単位(m³/day/百万円)に大阪府の細分類出荷額を乗じて求めた。また、事業2所等から発生した汚濁物質は公共用水域には直接排出されずに、水質汚濁防止法や下水道法により、一定の排水基準を満たしてから排出される¹⁰⁾。今回は規制対象の事業所に関するデータが得られなかったため、平均排水量50m³/s以上、かつ工場発生水質が水質汚濁防止法の排水基準値より高い細分類では排水水質として排水基準値を用いた。

(3) 自然系負荷量

表-4 に自然系の土地利用別排出原単位の計算結果を示す。自然系からの排出負荷量も生活系、産業系と同様に排出原単位(kg/km²/year)に土地利用別面積(km²)を乗じて求めた。ここで、自然系の排出負荷量は処理されずに直

表-3 中分類別汚濁負荷排出原単位(g/百万円/day)

中分類	BOD	T-N	T-P
12食料品製造業	21.35	1.60	0.31
13飲料・たばこ・飼料製造業	24.79	2.67	0.27
14繊維工業	52.38	10.19	1.69
15衣服・その他の繊維製品製造業	7.97	1.30	0.09
16木材・木製品製造業	2.66	0.06	0.03
17家具・装備品製造業	3.37	6.07	11.17
18パルプ・紙・紙加工品製造業	251.69	37.54	4.97
19出版・印刷・同関連産業	0.62	0.20	0.04
20化学工業	23.05	10.76	1.26
21石油製品・石炭製品製造業	2.86	0.32	0.12
22プラスチック製品製造業	5.81	0.22	0.19
23ゴム製品製造業	1.52	0.21	0.16
24なめし革・同製品・毛皮製造業	70.94	13.32	1.55
25窯業・土石製品製造業	18.76	1.69	0.20
26鉄鋼業	14.76	5.11	0.91
27非鉄金属製造業	5.23	3.61	0.31
28金属製品製造業	5.82	1.94	1.48
29一般機械器具製造業	2.61	0.61	0.38
30電気機械器具製造業	2.22	0.58	0.07
情報通信機械	2.22	0.58	0.07
電子部品・デバイス	2.22	0.58	0.07
31輸送用機械器具製造業	9.51	1.39	1.11
32精密機械器具製造業	6.30	0.50	1.02
34その他の製造業	1.69	2.55	2.40

表-4 土地利用別汚濁負荷排出原単位(kg/km²/year)

	BOD	TN	TP
田	7078	1280	165
その他農用地	1694	6710	72
森林	1586	440	34

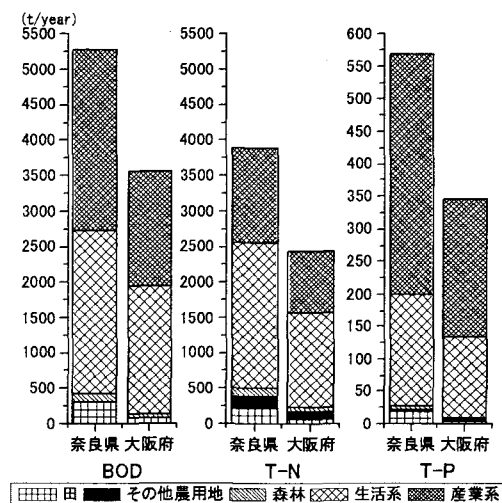


図-2 原単位法による負荷量計算結果

接河川に流れるため、発生源単位をそのまま排出原単位に用いる。ここで、発生源単位は全国でもあまり整備されておらず、大和川流域でも資料が見当たらないことから、大和川と紀ノ川では原単位が大きく変わるとは考えられないこと、また大和川と紀ノ川で自然系の発生負荷量が大幅に異なるとは考えられないため、紀ノ川で用いた排出原単位をそのまま用いた。

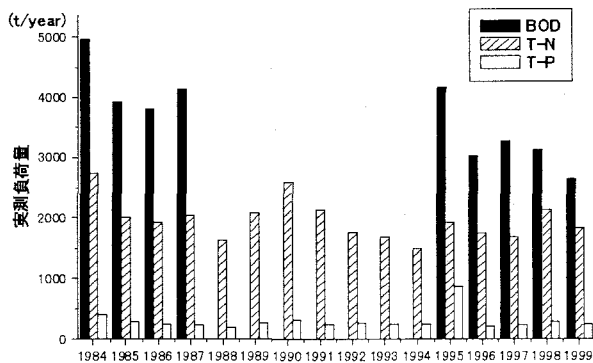


図-3 実測負荷量の経年変化

(4) 負荷量解析結果について

図-2 は都道府県別の BOD, T-N, T-P の排出負荷量の計算結果を示す。この結果は生活、産業、自然系別に求めたものを合計し発生負荷量を求めたものに、それぞれの流達率を乗じたものである。ここで流達率は比流量と流達率に比較的關係があると報告されていることから⁹⁾、大和川流域で適用すると BOD, T-N, T-P の流達率はそれぞれ 0.25, 0.73, 0.69 と求められる。奈良県と大阪府の排出負荷量を比較すると、排出負荷量は奈良県が高い。BOD は生活系と産業系の割合が多く、T-N は生活系の割合が多く、T-P は産業系が 6 割以上と高い。また、自然系の BOD, T-N, T-P の排出負荷量が低いことから、排出負荷量のほとんどは生活系や産業系の人間活動が原因であると言える。

4. 実測負荷量の経年変化について

図-3 は奈良県の最下流部、藤井地点における 1984 年から 1999 年の BOD, T-N, T-P の実測負荷量の経年変化を示す。なお、BOD は 1988 年から 1994 年までのデータは取られていない。1 年の実測負荷量は 1 ヶ月毎に 1 回の水質データとその日の流量データを 1 ヶ月の日数分かけたものを 12 ヶ月合計したものである。水質測定は増水時には行われていないため、実測負荷量は低水流量時の年間負荷量を示し、洪水時の負荷量は含まれていない。BOD は 1987 年以前の 4000t/year に比べ 1996 年以降 3000t/year と減少する傾向が見られる。一方、T-N や T-P はそれぞれ約 2000t/year, 300t/year と、全体としてあまり変化は見られない。図-2 の原単位法による負荷量解析結果と比較すると、原単位法の BOD, T-N は実測値より 2000t/year 多く試算され、算定した負荷量の差は大きい。実測負荷量と原単位法で算出された負荷量の差の原因の 1 つとして、河川底に沈殿し、洪水時に移動する有機物が、現地観測(実測負荷量)で測定されていないことが考えられる。一方、原単位法での発生するすべての有機物が負荷量として計算されるこの違いが差として表れると

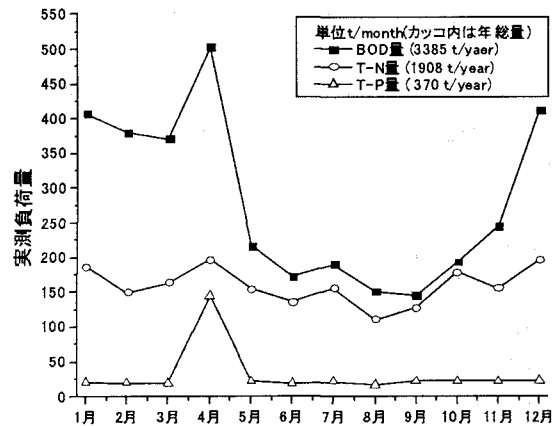


図-4 藤井の BOD, T-N, T-P 実測負荷量の変化

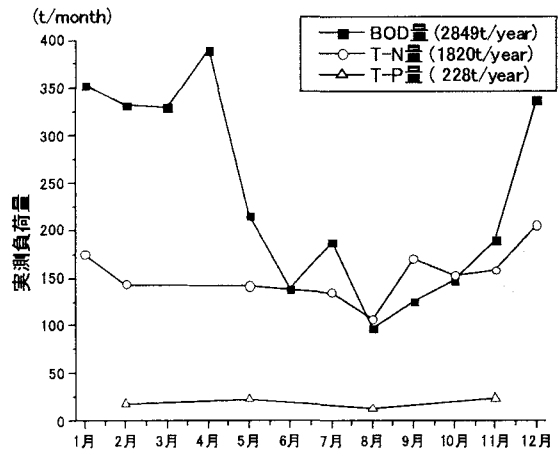


図-5 国豊橋の BOD, T-N, T-P 実測負荷量の変化

考えられる。

5. 実測負荷量の月変化について

4 章での年間負荷量を考察したが、季節変動を見るために、図-4 に藤井における BOD, T-N, T-P の 1995 年から 1999 年の平均値による実測負荷量の月変化を示す。12 月から 4 月にかけて BOD の実測負荷量は高く、5 月から 11 月まで減少している。BOD の負荷源は主に生活系や産業系であり、夏に人間活動が低下するために、生活系や産業系の負荷量が減少するとは考えにくい。そのため、有機物が藤井に到達するまでに、分解率の違いによりこの変化が現れていると考えられる。一方、T-N は BOD と同様の変化をしているが、その変化は小さい。また、T-P は 4 月を除き、ほぼ一定であり変化は小さい。このことから、T-N, T-P は 1 年でほぼ一定の負荷量であることがわかった。

図-5 は国豊橋における 1995 年から 1999 年の平均値による BOD, T-N, T-P の実測負荷量の月変化を示す。国豊橋は藤井の下流に位置し、藤井と国豊橋の間は亀の瀬と呼ばれ、溪流であるため、この区間に新たな負荷源は

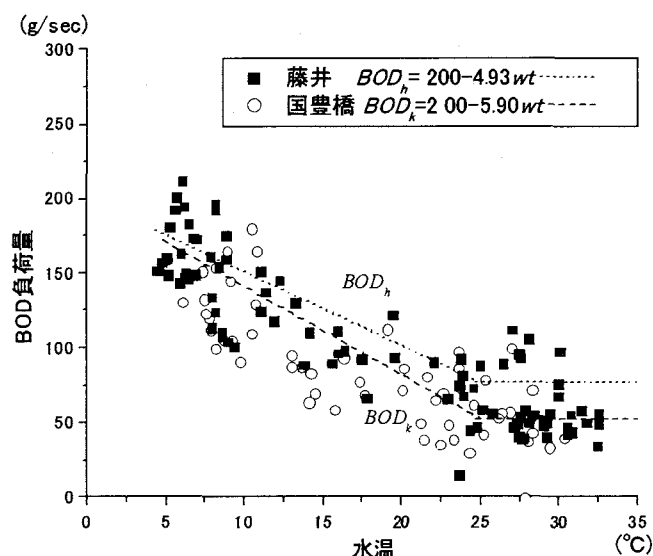


図-6 藤井の BOD 実測負荷量と水温の関係

存在しない。このことからこの区間での実測負荷量変化を見ることにより、分解の影響を考察することができる。BOD は藤井と同様に 12 月から 4 月にかけて高く、5 月から 11 月まで減少している。T-N、T-P は変化が少なく、藤井より減少しているが、藤井と同様に季節による変化が見られない。しかし、BOD は T-N、T-P とは異なり、藤井と同様に夏には減少する季節変化があることから負荷量に季節変化を考慮しなければならない。

6. BOD 実測負荷量と水温の関係

図-6 に藤井、国豊橋における BOD 実測負荷量の水温との関係を示す。有機物は生物により分解されるため、分解は水温に大きく依存する⁷⁾。藤井、国豊橋の実測負荷量はともに水温が増加すると減少する傾向が見られる。水温により細かく見ると、その減少量は異なっており、5°C 付近では藤井、国豊橋ともに同様の負荷量であるが、温度が高くなるにつれて、国豊橋の負荷量が減少していることがわかる。一般に、5°C になると有機物を分解する菌は活動を停止し、温度が高いほどその活性は高い¹²⁾。このことから、水温が高いほど分解量が多く、藤井と国豊橋間で温度が高いほど実測負荷量が減少していると考えられる。以上の結果から、新たに流下過程での分解を考慮した方法を提案する。水温と実測負荷量に水温が増加すると負荷量が減少するという関係が見られたことから、藤井、国豊橋では、以下の式のように、水温と BOD 負荷量(g/sec)の関係を求めることができる。

$$\text{藤井} : BOD_h = 200 - 4.93 \, wt \quad (0 < wt < 25)$$

$$BOD_h = 76.75 \, (wt \geq 25) \quad (4)$$

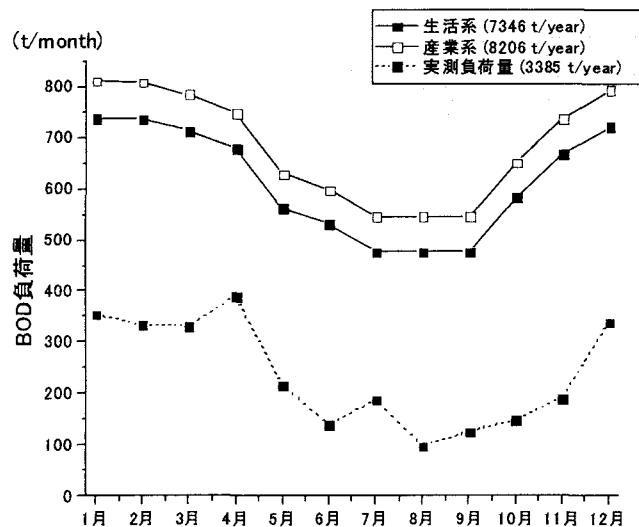


図-7 BOD 負荷量計算結果と実測値との比較

$$\text{国豊橋} : BOD_k = 200 - 5.90 \, wt \quad (0 < wt < 25)$$

$$BOD_k = 52.5 \, (wt \geq 25) \quad (5)$$

wt は水温を示す。一般に、生物の活性は 25°C をピークに 40°C まで活性が高い¹²⁾。このことから、25°C 以上では藤井、国豊橋ともに負荷量が横ばいになっていることは、生物の活性の温度依存性と一致し、25°C 以上であれば、25°C の値を適用可能であることを示している。式(4)、(5)をもとに wt°C における 1km あたりの分解率は式(6)、(7)で表される。

$$BOD \text{ 分解率}(wt) / km = \frac{BOD_k}{BOD_h} \times \frac{1}{7} \times 100 \times 100 \quad (6)$$

$$(0 < wt < 25)$$

$$BOD \text{ 分解率}(wt) / km = 9.7\% / km \quad (wt \geq 25) \quad (7)$$

ここで藤井と国豊橋では約 7km 離れており、BOD 分解率は、水温によって異なる。この式により水温と污染源からの距離を考慮に入れて計算することができる。

7. 分解率を基にした BOD 負荷量の算定

図-7 は水温を考慮に入れた奈良県での BOD の排出負荷量の計算結果を示す。また、排出負荷量の算定式を式(8)に示す。生活系、産業系のそれぞれの負荷量は市町村ごとに求められ、それぞれの市町村から藤井までの距離と水温に依存した分解率により計算される。

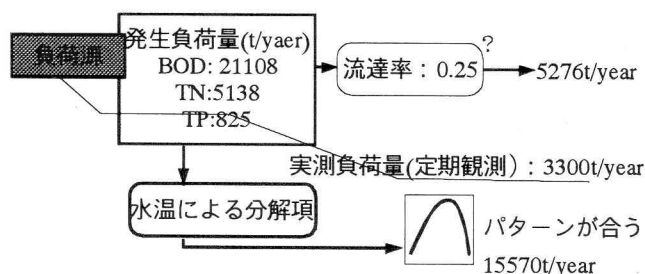


図-8 負荷量計算のまとめ

$$BODr(m) = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^L (BODj(m) \times BOD分解率(wt)) \quad (8)$$

(L = 負荷源からの距離(km): T = 市町村数)

$BODr(m)$ は m 月における排出負荷量、 $BODj(m)$ は市町村 j における m 月の発生負荷量を示す。市町村 j における m 月の発生負荷量を藤井までの距離分解率を乗じ、合計したものである。図-7からBOD負荷量は12月から4月は高く、5月から10月までは低い傾向を示し、実測値と同様の变化傾向を示した。しかし、計算値は実測値よりかなり高い値で算出され、一致しない結果となった。しかし、季節変動を負荷量に反映することができ、BOD分解率も季節変動によく一致した。

8. まとめ

大和川においてBOD、T-N、T-Pについての負荷量解析を行った。その結果、主なBODの負荷は生活系と産業系に起因し、T-N、T-Pも同様に生活系と産業系に起因した。また、BODは12月から4月にかけての負荷量が大きく5月から11月にかけて減少する傾向が見られたが、T-N、T-Pは季節による変化は見られなかった。ここで、図-8に示すように、従来の原単位法によるBOD負荷量は年間で求めるため、BOD負荷量の季節変動が反映されず、水温依存性のあるBODには流量のみの項(流達率)で計算される。生活や産業系の発生負荷量が季節変動するとは考えられないが、河川の実測負荷量は季節変動を示す。このBODの原単位法による負荷量に季節変動を反映させるために、水温による分解項を加えた方法を新たに提案した。BODの分解項を求めるために、流入河川がなく、負荷が新たに入らない藤井と国豊橋間での負荷量と水温との関係について解析を行った。水温が低下すると負荷量が減少しており、藤井と国豊橋では25℃までは水温が増加するとBODの分解率が増加した。その分解率をもとにBOD負荷量を計算すると、従来の原単位

法による負荷量解析結果とは総量は大きく異なったが、実測のBOD負荷量と季節変化パターンは一致した。河川底に沈殿し、洪水時に移動する有機物が、現地観測(実測負荷量)で測定されていないことを考慮に入れる必要があるが、BODの負荷量の季節変動のパターンを再現できた。しかし、水温による分解項だけでは誤差が大きい。今後、洪水時の負荷量が、2倍以上推定されるため、このことを考慮することにより、ある程度の精度で負荷量が算出できると考えられる。有機物の分解量を算定できたことは今後、さらなる河川でのメカニズムの解明、モデルやシミュレーションを用いて将来予測を行うのに重要であろう。

参考文献

- 1) 大和川清流ルネッサンス21協議会:水環境改善緊急行動計画 大和川清流ルネッサンス21.
- 2) 大和川工事事務所: <http://www.yamato.moc.go.jp/>
- 3) 平田健正・井伊博行・長谷部正彦・江種伸之・坂本康・桑川高德・西山幸治・酒井信行・岩崎宏和:土地利用特性の河川水質に及ぼす影響—大阪府石川流域—, 土木学会論文集, No.614/II-46, pp. 97-107, 1999.
- 4) 井伊博行・平田健正・長谷部正彦・江種伸之・坂本康・桑川高德・西山幸治・酒井信行・堀井壮夫:環境同位体及び化学組成から見た石川流域の河川水と地下水の起源について, 水工学論文集43巻, pp. 205-210, 1999.
- 5) 窪原拓馬・井伊博行・平田健正・江種伸之・石塚正秀・谷口正伸・伊勢達男・宮川勇二:大和川流域における物質移動量の推定, 水工学論文集46巻, pp. 229-234, 2002.
- 6) 井伊博行・谷口正伸・平田健正・江種伸之・石塚正秀・窪原拓馬・伊勢達男・宮川勇二:大和川のBOD, アンモニア態窒素, 陰イオン界面活性剤濃度の季節変動とその原因について, 水工学論文集46巻, pp. 235-240, 2002.
- 7) 谷口正伸・井伊博行・平田健正・石塚正秀:大和川の生活排水起源物質の水質変化, 水工学論文集48巻, pp. 1465-1470, 2004.
- 8) 谷口正伸・井伊博行・平田健正・江種伸之・荒木直哉:紀ノ川の水質特性と流域内の物質負荷量の算定について, 環境工学論文集48巻, pp. 161-169, 2003.
- 9) 応用地質株式会社:大和川流域水質保全検討(その2)業務報告書, 2001.
- 10) 建設省都市局下水道部監修:流域下水道整備総合計画調査指針と解説, 日本下水道協会, 1999
- 11) 経済産業省経済産業政策局調査統計部:平成11年工業統計調査 産業再分類別統計表(経済産業局別・都道府県別表), 財団法人 経済産業調査会, p.464, 2001.
- 12) 山崎真司:微生物のおはなし, 日本規格協会, 1996.

(2004.9.30 受付)