

(34) 季節変化が大きい河川における浄化容量に関する研究

Research on the natural purification capacity in a river exhibiting large seasonal change

朱 春黙*、申 亨哲*、浮田 正夫**、中西 弘**

Chunmo ZHU*, Hegze SHEN*, Masao UKITA** and Hiroshi NAKANISHI**

ABSTRACT; This paper discussed the water quality, water quality model and natural purification capacity as well as their seasonal characteristics in Tumenjiang River, flowing through China, North Korea and Russia into Japan Sea. Following conclusions were obtained:

1. There were found good correlations between COD_{Cr}, BOD₅ and COD_{Mn} in the river water polluted by the wastewater from the pulp and paper mill.
2. The water quality model applicable to the mid-reaches of the River was introduced, including seasonal change of the natural purification capacity.
3. By utilizing the purification capacity efficiently, it was recommended to construct a stock lagoon and to store a part of the wastewater in winter, low-water season and discharge it in the period of high-water. The treatment cost required for this process was estimated to be 46 Chinese yuan (930yen)/ton pulp, and 209 Chinese yuan/t·p will be saved than that for the wastewater treatment of 60% cut corresponding to the present standard in China.

This study will be useful to "Tumenjiang Development Project" organized by UNDP.

KEYWORDS; water quality model, pulp and paper mill wastewater, international river, natural purification, environmental capacity

1. はじめに

河川の水質環境に係わる主な物理的関係項目は河川の流量(Q)、水温(T)、流速(U)などである。Q、T、Uの季節変化が大きい河川においては水域の浄化容量(汚濁負荷の受容能力)の変化も大きい。本研究は、寒温帯の大陸性季節風気候区に位置している中国、北朝鮮、ロシアの国境を流れて日本海へ注ぐ国際河川—図們江と流域内の主な汚染発生源(開山屯パルプ工場、図們市及び石硯製紙工場)を研究対象として、河川の水質状況の調査を行い、河川の水質モデル(Dobbins-Camp水質モデル)による解析、自浄作用、浄化受容容量(COD_{Cr}容量)及び浄化容量の季節性変化特性を把握することである。

1992年国連開発計画(UNDP)は今後20年以内に中国、北朝鮮、ロシア、日本、韓国およびモンゴルなど国の開発と国連の支持のもとで約300億ドル(3兆7200億円)の資金を投資して図們江下流の1万Km²の三角洲地域を総合開発することに関する「協議草案行動計画案」を制定した。現在、図們江は産業廃水による有

* 中国延辺朝鮮族自治州環境保護局 (Yanbian Environmental Protection Agency, China)

** 山口大学工学部社会建設工学科 (Department of Civil Engineering, Yamaguchi University)

機物質の汚染が甚だしく、合理的な水質規制案を提案して早速水質を改善することは将来、図們江地域開発する場合の重要な課題となっている。本研究は、季節変化が大きい河川における水質合理化規制の考え方を示すものであり、国連の「図們江地域共同開発案」研究にも役立つものと考えられる。

2. 対象河川区間の設定

2.1 対象河川区間

研究対象の区域は、図1に示す図們江の中下流の開山屯パルプ工場排水放流点（A₀）から図們（A₁）までの37kmの河川区間である。

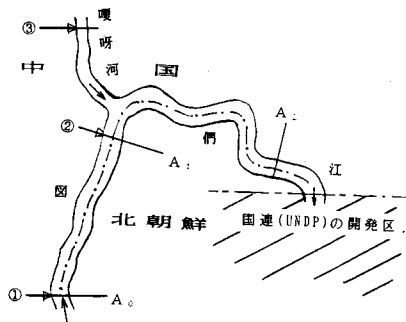


図1. 対象河川区間

記号の説明	
	国境線
	河川
①②③→	汚染源及び廃水排出地点
A ₀	上流基準地点
A ₁	下流規制地点I
A ₂	下流規制地点II

2.2 対象河川の自然環境特性

図們江は寒温帯の大陸性季節風気候区に位置している。多年間の平均気温は2～6℃で、年間降雨量は500～800mmであるが、その中、大部分が6～8月の梅雨期に降り、年間降雨量の60～70%がこの時期に集中している。流量と水温の季節変化は図2に示すように大きい¹⁾。

2.3 汚染源及び水質汚染の状況

図們江の汚染発生源は主に中国側の開山屯パルプ工場（図1, ①）と哑呀（야야）河の下流にある石硯製紙工場（図1, ③）である。その他の産業廃水の影響もあるが、その廃水量や汚染物質の負荷で比べて見れば、極めて小さい割合に過ぎない。図們江は有機物質の汚染が著しく、特に開山屯パルプ工場（図1, A₀）排水口以下の下流の有機物質汚染は深刻である。工業排水中に含まれる汚濁物質の種類は多様で、汚染源の違いによってその量と種類も違う。それぞれの汚染源に対して、その汚染物質の環境に与える影響の大きさを比較するために、中国では各種の汚濁物質量をそれぞれ水質評価基準値で除した値の和をとることによってその汚染物質の量と種類を一つの基準に数量化する、いわゆる“「等標化」処理”を行なっている。この数量化したデータは、その基準に含めた汚染物質のすべての種類を包括したものであり、公正な比較ができる。そ

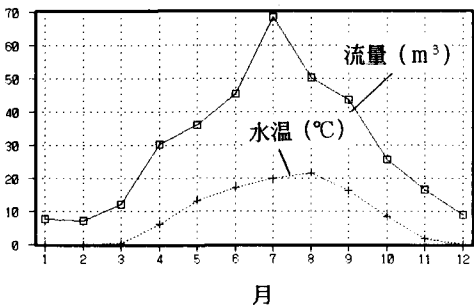


図2. 流量、水温の変化（図1、A₁）

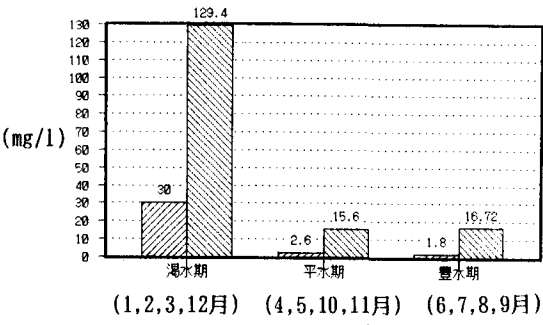


図3. 対象河川区間のBOD、COD_{Mn}濃度変化（図1、A₁）

の方法により、汚染源が環境に与える影響について評価を行い、環境の総合管理に根拠が提供できる。汚染源の等標汚染負荷量の割合で言うと、上記両工場は中国側における汚染負荷量の89%を占めており、主要な有機物質汚染源であると認められる。項目別等標負荷の割合で言うと、CODcrとBOD₅が74.4%を占め、河川は有機性物質で汚染されていることが明かになった(表1)。また環境保護局の毎月1回水質測定データを用いて整理した。図3に示すように、河川流量の季節変化が大きいため、水質の変化も大きい。

表1 対象河川区間の汚染源及び汚濁物質の総合評価

汚染源	廃水排出量 (t/d)	CODcr (t/d)	BOD ₅ (t/d)	SS (t/d)	等標汚染負荷 割合(%)
開山屯パルプ工場 (図1、①)	93400	220.5	56.3	234.9	57.2
図們市 (図1、②)	12600	8.0	0.9	4.3	1.5
石硯製紙工場 (図1、③)	88400	191.6	43.3	31.6	33.1
等標汚染負荷 割合(%)		46.7	28.2	22.9	
評価基準(C ₀) (mg/l)		200	80	250	

3. 河川自浄作用に関する検討

3.1 自浄作用の水質モデル

対象河川区間のBOD₅-DO流下変化特性から次のようなDobbins-Campモデルの採用可能が明かとなり、

$$dB/dt = -(k_1 + k_3) \cdot B \quad \text{-----(1)}$$

$$dD/dt = -k_1 \cdot B + k_2 (D_s - D) \quad \text{-----(2)}$$

$$dL/dt = U \quad \text{-----(3)}$$

上記の式(1), (2), (3)より、次のような自浄作用の数理モデルが得られる。

$$B_t = B_0 \cdot \exp(-(k_1 + k_3) \cdot L/U) \quad \text{-----(4)}$$

$$D_t = D_s - (D_s - D_0) \cdot e^{-k_2 \cdot t + k_1 \cdot B_0 / (k_1 - k_2 + k_3)} \cdot (e^{-(k_1 + k_3) \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t}) \quad \text{---(5)}$$

ここで、B₀、D₀-----上流地点のBOD、DO許容濃度(mg・l⁻¹) k₃-----沈降あるいは吸着によるBOD除去

B_t、D_t-----下流地点のBOD、DO目標濃度(mg・l⁻¹) に対する速度係数(d⁻¹)

D_s-----DO飽和濃度 L -----排出地点から規制地点

t -----流下時間(d) までの河川延長(Km)

k₁-----脱酸素係数(d⁻¹) U -----流速(Km・d⁻¹)

k₂-----再ばっ気係数(d⁻¹) T -----水温(℃)

3.2 k₁、k₂、k₃とQ、T、Uとの関数関係

脱酸素係数k₁は水温Tの関数であり、次式で表される。

$$k_1 = a_1 \cdot a_2^{(T-20)} \quad \text{-----(6)}$$

再ばっ気係数k₂は流量Qと水温Tの関数であり、次式で表される。

$$k_2 = a_3 \cdot Q^{0.4} \cdot a_5^{(T-20)} \quad \text{-----(7)}$$

BOD沈降速度係数k₃は流量Q或いは流速Uの関数であり、次式で表される。

$$k_3 = a_6 \cdot e^{-a_7 \cdot U} - a_8 \quad \text{-----(8)}$$

定数a₁、a₂・・・a₇、a₈は河川の流量、流速、水温及びBOD、DO濃度の観測数値によって決められる。

すなわち、図們江のn個の区間、観測回数m回のBOD、DO観測値を用い、まずn組の観測値と(4)、(5)式によ

る計算値の適合度をもっとも良い 観測回ごとm組の全区間共通の k_1 、 k_2 、 k_3 の値を求める。次いでこれらの値と観測回ごとの流量、水温、流速を用いて、式(6)、(7)、(8)により、もっとも適合度の良い $a_1 \sim a_8$ が決定される。適合度の判定はKoivo-Philipsの方法による。

図們江においては、次のような関数関係があることが明らかになった²⁾。

氷結期	$k_1 = 0.146$	非氷結期	$k_1 = 2.653 \cdot 1.117^{(T-20)}$
(1, 2, 3, 12月)	$k_2 = 0.119Q^{-0.45}$	(4~11月)	$k_2 = 0.433Q^{0.148} \cdot 1.104^{(T-20)}$
	$k_3 = 2.756 \cdot e^{-0.051 \cdot U} - 0.31$		$k_3 = 2.756 \cdot e^{-0.051 \cdot U} - 0.31$

3.3 k_1 と k_3 の変化特性

図4と図5に k_1 と k_3 の変化特性を示す。図4に示すように氷結期には河川の水温が低く、静穏のため k_1 の値も小さい($k_1 \leq 0.146$)。図5から河川の流速 $U = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($43.2 \text{ km} \cdot \text{d}^{-1}$)の時 $k_3 = 0$ で、汚濁物質の沈降が発生しないこと、 $U < 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の時汚濁物質の沈降が発生すること及び $U > 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の時は主に汚濁物質の掃流浮上が発生することを示している。

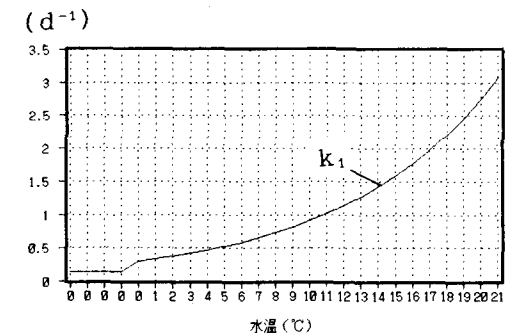


図4. k_1 の変化

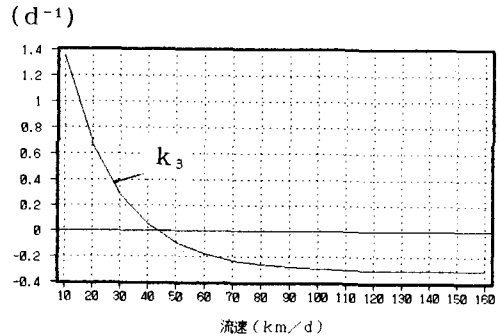


図5. k_3 の変化

4. 河川の浄化容量に関する検討

中国の環境行政では、ある河川水域における汚濁物質総量規制基準を算定する時、いわゆる「環境容量総量規制」と言う方法を採用している。即ち、ある河川区間において、下流側規制地点に位置する規制地点の環境目標値(水質基準値)を満足する条件での浄化容量を、その河川区間に排出しうる許容負荷量すなわち環境容量と考える。年間で浄化容量が最小月の浄化容量を年間通じての、河川区間の許容負荷量とするのである³⁾。

4.1 河川環境でのCODcr~BOD₅及びCODcr~COD_{Mn}の相関関係

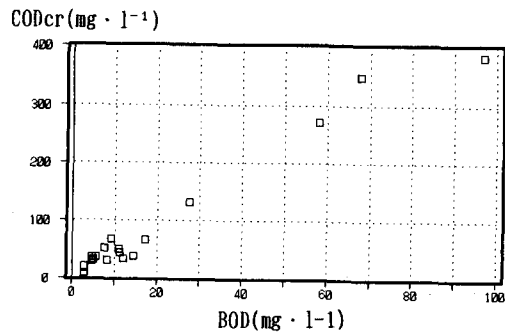


図6 河川環境でのCODcr~BOD相関関係

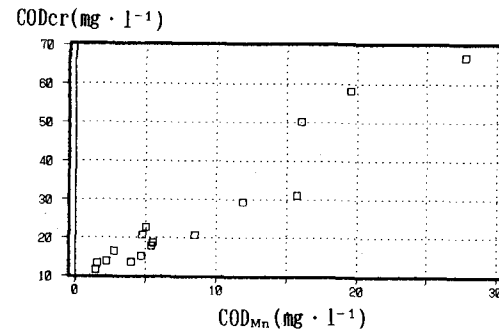


図7. 河川環境でのCODcr~COD_{Mn}相関関係 (図7)

上述のように図們江は有機物質による汚染が甚だしく、汚濁物質が単一なのが特徴である。本研究はBODとCODcrを規制項目として、河川規制地点の許容濃度と河川区間の浄化容量の季節変化特性を把握ことにする。

図們江における紙・パルプ廃水による有機物質汚染における河川環境でのCOD_{Cr}~BOD₅とCOD_{Cr}~COD_{Mn}相関関係を把握するため、1987年に実施したBOD₅、COD_{Mn}の観測結果とCOD_{Cr}観測結果について回帰分析を行った。その結果、回帰式は次式のようになり、決定係数は $r^2=0.968$ と $r^2=0.920$ で良好な結果が得られた。

$$\text{COD}_{\text{Cr}} = 4.30 \cdot \text{BOD}_5 + 5.19 \quad \text{-----(9)}$$

$$\text{COD}_{\text{Cr}} = 2.18 \cdot \text{COD}_{\text{Mn}} + 7.62 \quad \text{-----(10)}$$

4.2 河川の浄化容量

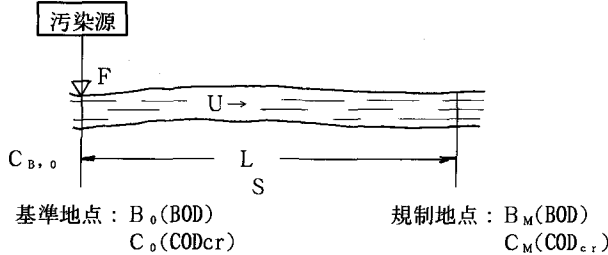


図8. 河川区間の浄化容量の試算説明図

下流規制地点のBOD目標値が B_M の場合、汚染源排出地点のBOD許容濃度 B_0 は式(4)より次式で表わせる。

$$B_0 = B_M \cdot \exp \left[(k_1 + k_3) \cdot L / U \right] \quad \text{-----(11)}$$

B_0 ---- 目標値に対応する上流規制地点のBOD₅濃度値($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

B_M ---- 下流規制地点のBOD₅目標値($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

中国における「環境容量」の概念は、先に述べたようにある河川区間の規制地点の水質目標を満足させる河川の浄化容量を指すもので、COD_{Cr}を用いて次の式で定義する。

$$S(i) = 0.0864 \cdot (C_0(i) - C_{B,0}) \cdot Q(i) \quad \text{-----(12)}$$

$S(i)$ ---- 河川区間のCOD_{Cr}環境容量($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)

$C_{B,0}$ ---- 上流水のCOD_{Cr}濃度値($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

C_0 ---- 目標値に対応する上流基準地点のCOD_{Cr}濃度値($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

$Q(i)$ ---- 流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

i ---- 月(1, 2, ..., 11, 12)

式(9)、(11)および式(12)から次のような S と B_M 、 $C_{B,0}$ 、 L 、 U の関数関係式を得る。

$$S = 0.0864 Q \cdot \{ (4.30 B_M + 5.19) \cdot \exp \left[(k_1 + k_3) \cdot L / U \right] - C_{B,0} \} \quad \text{-----(13)}$$

上記の式(13)から河川的环境容量は、河川の流量、流速、水温、上流水質及び水質規制目標、河川区間距離の関数であることは明らかである。

$$S = f(Q, U, T, B_M, C_{B,0}, L) \quad \text{-----(14)}$$

4.3 規制地点の許容濃度及び環境容量の季節変化特性

河川の自然関係項目である流量、流速、水温の季節変化が大きい河川においては、脱酸素定数 k_1 と沈降定数 k_3 の変化も図9に示すように大きい。

河川区間の距離 L が定数の場合、河川区間の環境容量は次式で表わせる。

$$S = f_1(B_M, C_{M,0}, Q, T, U) \quad \text{-----(15)}$$

中国における地表水の水質環境基準は表2であり、図們江の対象区間の水質目標は表3である。

中国の現状では、処理施設の投資と処理費用の間の関係から、十分な内部処理が行われていない。すなわち、河川での分解、自浄作用を利用し、現段階では環境を犠牲する形で河川に工業廃水の排出を許している。排出地点の下流、図1の $A_0 \sim A_1$ 区間は、主に工業廃水の排出区として排出地点の汚濁物質を、下流規制地点(図1、 A_1)の水質目標を満足するように規制

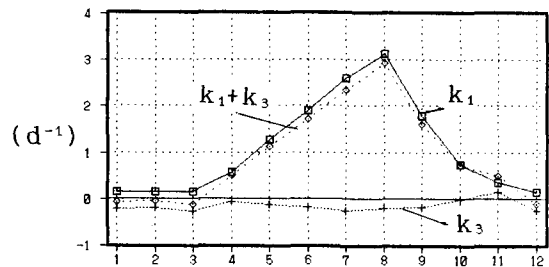


図9. k_1 、 k_3 、 $k_1 + k_3$ の変化

表2 中華人民共和国地表水質環境基準 (GB3838-88)

級類	適応範囲	(mg/l)	
		BOD ₅	COD _{Mn}
I級	上流水、国家自然保護区	3以下	≤2
II級	集中式飲料水の水源地利類保護区、珍貴魚類保護区	≤3	≤4
III級	集中式飲料水の水源地利類保護区、一般的魚類保護区及び水浴区	≤4	≤6
IV級	工業用水区及び娛樂用水区	≤6	≤8
V級	農業用水区、一般的景觀水域	≤10	≤10

表3 河川区間の功能区及び水質目標⁴⁾

功能区名	功能	水質目標(mg/l)	
		BOD ₅	COD _{Mn}
開山屯上流 (図1、A ₀ 上流)	工業用水区	6	8
開山屯下流 (図1、A ₀ 下流)	工業廢水排出区、農業用水区	下流規制地点の水質目標を満足させる	
図們 (図1、A ₁ 上流)	工業用水区	6	8

すればよいとの考え方をとっている。図10は、上流基準地点(図1、A₀)と下流規制地点A₁における水質目標を中華人民共和国地表水質環境基準IV級(BOD=6mg・l⁻¹, COD_{Mn}=8mg・l⁻¹)とする場合の工場排水放流後のA₀における月別許容濃度と許容負荷量の変化を示したものであるが、これらの季節変化は相当大きいものとなっている。

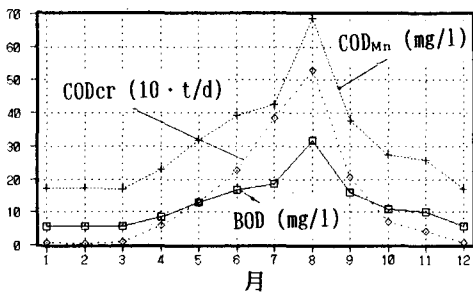


図10. 排出地点の許容濃度と負荷量

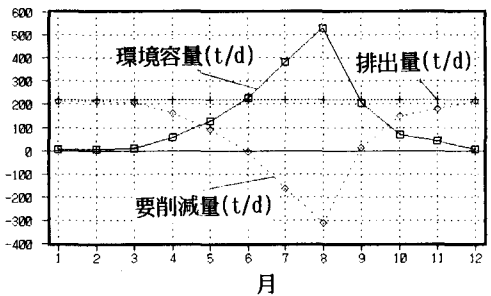


図11. 河川区間の月別環境容量と削減量

4.4 水質目標値と汚染源の汚濁物質削減量との定量的関係

規制地点の河川水質を満足させる汚染源の汚濁物質(CODcr)の削減量は次式で表す。

$$H = F - S \quad \text{----(16)}$$

H ---- 汚染源のCODcr削減量 (t/day)

F ---- 汚染源のCODcr現況排出量 (t/day)

S ---- 河川の許容排出負荷量 (t/day)

式(13)を式(16)に代入すると次式を得る。

$$H = F - 0.0864Q \{ (4.3B_M + 5.19) \cdot \exp [(k_1 + k_2) \cdot L/U] - C_{B,0} \} \quad \text{----(17)}$$

図11は汚染源①の汚濁物質排出量が一定で、A₀とA₁の水質目標が上述の環境基準IVであるとした場合A₀～A₁河川区間の許容負荷量と汚染源①に要求される月別汚濁物質(CODcr)削減量を表している。

4.5 季節別環境容量を利用した規制案

表4に、汚染源①に対する3つの総量規制案の比較を示している。方案1は当該河川区間の浄化容量すな

わち環境容量が年間最小の月の値を採用するものである。環境保全の面からは理想的であるが、河川区間の浄化容量を十分に利用することができないし、汚染源において汚濁物質の97%を削減する必要があるので、現在の中国の環境行政にはそぐわない。

表4 年間の最小浄化容量による総量規制（方案1）と季節別浄化容量による
総量規制案（方案2）の比較

	方案1 年間の最小 浄化容量(2月) を採用する	方案2 季節の浄化容量を利用し貯留池を建設する			方案3 パルプ工場について 60%の削減を義務づ ける
		渇水期 (1, 2, 3, 12月)	平水期 (4, 5, 10, 11月)	豊水期 (6~9月)	
削減ないし貯 留すべき負荷	93803 (t/年)	25545 (t/季)	17513 (t/季)	-13958 (t/季)	42240 (t/年)
要削減率 (%)	97%	(25545+17513-13958)/(25545+17513)=0.68 貯留池における要除去率 68 %			60%
対策 費用(年)	3,910万円 78,220万円	220万円 4,400万円			1,210万円 24,200万円

方案3は現在中国で実施が計画されている、パルプ工場の負荷削減率は60%という総量規制案であるが、対策費用が高いし、汚濁物質の除去率も必ずしも十分ではない。

河川区間の浄化容量と汚染源の現況排出量の比較（図11）から見ると豊水期（6～9月）の浄化容量は汚染源のCODcr排出量より大きいので、河川の浄化容量を効果的に利用することができる。方案2は排水の調節貯留池を建設し、渇水期と平水期に一部分廃水を貯留して、豊水期に排出する方法である。

方案3に対する対策費用は中国におけるパルプ工業の排水処理の実情をもとにして算出した除去CODcrあたりの処理単価を用いて計算した。方案1の対策費用の算定にあたっては、日本におけるパルプ工業の排水負荷原単位の推移を参考にして処理単価を60%削減の方案3の場合の2倍として計算した。方案2については、谷間をとめて貯留池とする建設費とポンプ運転費を考慮して試算した。

方案2によるパルプ排水対策費用は46元（930円）／t・h³で、方案1より367元（7,341円）／t・h³節減できるし、方案3よりは209元（4189円）／t・h³節減することができる。ただし、このような考え方は環境保全に対する理想的な対策ではなく、当面の応急的な対策であり、経済の向上安定とともに改善されるべきものと考えられる。

5. おわりに

季節変化が大きい河川について、自浄作用数値モデルを運用し、浄化容量を効果的に利用する対策を提案した。今後の課題として季節変化が大きい河川における規制濃度と許容濃度、浄化容量の数理化モデルに関する研究、水質規制と汚染源の汚濁物質削減量及び対策費用の便益分析、河川規制地点の最適規制濃度、規制地点と汚染源の最適規制総量に関する研究を続け、より合理的な規制案を提案したいと考えている。

参考文献

1) 朱 春黙・申 亨哲・浮田 正夫：中・露・朝国境河川図們江の三角洲地域開発における環境汚染問題と改善対策、資源環境対策、Vol29, No. 7, pp. 7-12(1993).
2) 候 蘭杰：環境科学学報、6, 114-118(1982).
3) 朱 春黙・申 亨哲：季節変化が大きい河川における排污許可証による汚濁物質総量規制に関する研究、中国環境管理論文集, 112-114(1991).
4) 申 亨哲・朱 春黙：延辺朝鮮族自治州水環境保護計画(1991-2000年)(1991).