

II-47

石狩川における水文・土砂水理環境の変遷に関する研究

北海道大学 工学部 正 員 藤 田 睦博
 北海道大学 工学部 正 員 長谷川 和義
 北海学園大学 工学部 正 員 山 口 甲
 北海道開発局 正 員 北 条 紘次

表-1 石狩川改修の変遷

1. はじめに

石狩川は、本邦において唯一の近代河川工学に基づいて河川改修がなされてきた河川である。したがって、他の河川に比較して過去の観測資料や河川測量結果も豊富に保存されているのが特徴である。蛇行河川で有名であった石狩川をかくも見事に改修した各位の英知に驚嘆するとともに、何故石狩川の改修が成功したかを水文学的に、水理学的にあるいは河川工学的に解明することは、学問的な興味のみならずこれからの低開発国の河川改修計画の立案にきわめて有効である。もとより、石狩川改修の成功は単に河道内の改修に依存するだけでなく、流域の開発、改修にも大きく依存しており、両者を総合的に評価しなければならない。ここでは、先ず、石狩川流域における代表地点として札幌、岩見沢、旭川の日降水資料を用いて流域へのインプットである降水特性の時系列的な変遷を調べた。さらに、流域開発の基盤として最も重要な低湿地の乾燥化に非常に有効な働きをしている捷水路に焦点をあて、その安定化がなぜ保たれ得たかにつき解析をおこなった。

明治2	開拓使設置	昭和2	豊平川捷水路着工
3		3	
4		4	
5		5	道産米300万石祝賀会
6		6	石狩川生振捷水路通水
7		7	旭橋完成、石狩川大洪水
8		8	当別、対雁捷水路通水
9		9	
10		10	道内人口3,068,282人
11	石狩川に水位観測所設置される	11	
12		12	十勝川統内捷水路通水
13		13	巴農場、砂浜捷水路通水
14		14	下達布、蛸の首捷水路通水
15		15	河西橋完成、枯木捷水路通水
16		16	豊ヶ丘、池の前捷水路通水
17		17	幌達布、穴栗捷水路通水
18		18	朱鞠内ダム完成、上新篠津捷水路通水
19		19	
20		20	緊急開拓事業実施要項
21		21	
22		22	菊水町捷水路通水
23		23	
24	道内人口57万人	24	狐森、川上捷水路通水
25		25	北海道開発法制定
26		26	北海道開発庁、北海道開発局発足
27	日清戦争	27	
28		28	鷹泊ダム完成、妹背牛橋下流、芽生捷水路通水
29	旧河川法成立	29	
30		30	月形大曲、中島、広里第2捷水路通水
31	全道大洪水	31	札幌内捷水路通水
32	石狩川で三角測量	32	桂沢ダム完成
33	河川横断測量	33	雨龍竜川捷水路通水
34	沼淵原測量	34	伊勢湾台風
35		35	第1次治水事業5ヶ年計画、江部乙第2捷水路
36		36	石狩川洪水、六戸島捷水路通水、大夕張ダム完成
37	岡崎文吉氏氾濫戻し流量を計算	37	石狩川洪水
38		38	
39		39	新河川法成立
40		40	
41	函館航路開設	41	
42		42	金山ダム完成
43		43	砂川捷水路通水
44		44	岩尾内ダム完成
大正1		45	
2		46	豊平峡ダム完成
3		47	オイルショック
4		48	
5		49	大雪ダム完成、石狩川大洪水
6		50	
7	石狩川生振捷水路着工	51	
8		52	
9	夕張川捷水路着工	53	
10	篠路第2捷水路通水	54	
11		55	漁川ダム完成
12	篠路第1捷水路通水	56	石狩川大洪水
13	旭川、深川、滝川	57	
14	市街地堤完成	58	
15	道内人口2,498,679人	59	
		60	
		61	
		62	
		63	定山渓ダム完成

2. 石狩川改修の経緯

表-1は、石狩川の主な改修工事を年代順に整理したものである。石狩川の改修工事が本格化したのは、大正7年の生振捷水路工事着工以後で、その後幾多の捷水路工事が完成し、石狩川はその延長距離が100kmも短くなったことはよく知られている。

3. 石狩川流域における降水特性の変遷

図-1～3は、札幌、旭川、岩見沢における年降水量(4月～3月)、降雨量(4月～11月)、降雪量(雨量に換算12月～3月)の経年変化を示している。降水量に関する特別な経年変化は見られない。年降水量の変動は、ほとんどが4～11月の降雨量の変動に対応しており、12～3月の降雪としての降水量の変動は小さい。

図-4～6は、二日連続降雨量として50mm以上の年間における頻度の経年変化を示している。札幌では、約30年周期の変動が見られるが、全体として特別な傾向を見つけられない。すなわち、石狩川流域においては、年降水量、洪水を引き起こすような短期間大降雨の発生頻度の経年変化を認めることができない。

一方、かつては融雪期に毎年のように生じた春の洪水もなくなり、夏期の洪水も最近では希になってきている。しかしながら、ここに示したように、降水量資料を見る限り必ずしも降水量が減少しているわけではなく、石狩川の改修や流域内の他の治水事業の効果によるものと思われる。

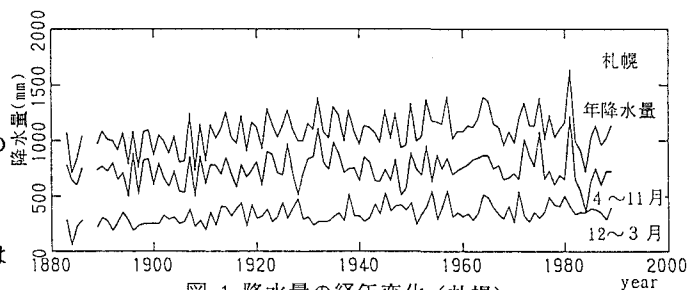


図-1 降水量の経年変化 (札幌)

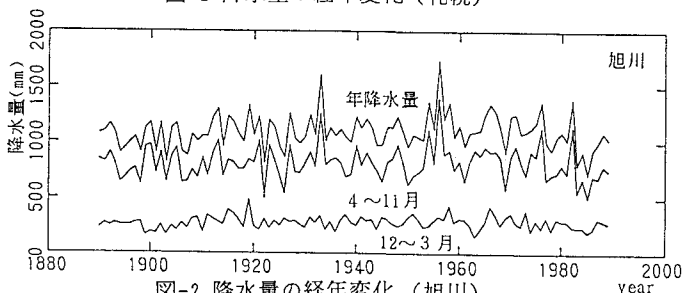


図-2 降水量の経年変化 (旭川)

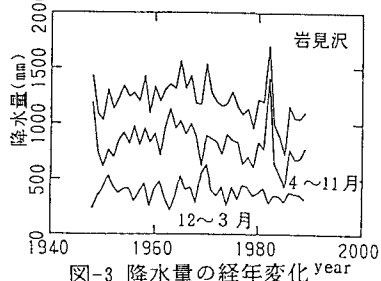


図-3 降水量の経年変化 (岩見沢)

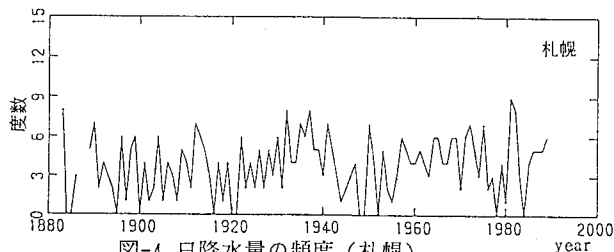


図-4 日降水量の頻度 (札幌)

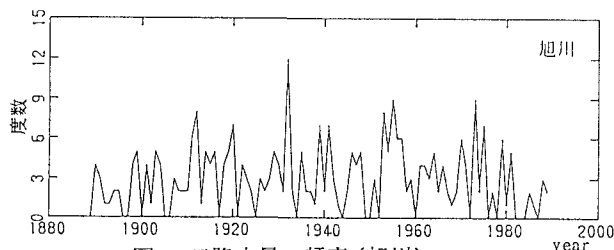


図-5 日降水量の頻度 (旭川)

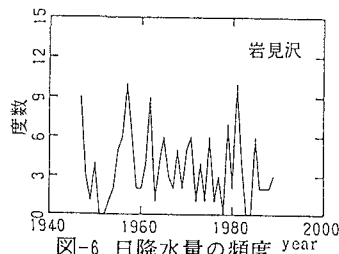


図-6 日降水量の頻度 (岩見沢)

4. 石狩川捷水路の安定要因

4-1. 捷水路の効果

石狩流域の開発にとって、捷水路工の実施はきわめて大きな意味をもった。現在までに本川だけでも29の捷水路が完成し、60kmの流路短縮が果たされている。その結果、①流速増加による洪水流下能力の増大、②河床低下による洪水水位の低下、③河床低下による沖積地地下水位の低下、④弯曲部解消による流路平面変動の抑制、⑤勾配増加による幅・水深比の減少--それによる砂州波高増大および複列化の鎮静、など河川工学的にみて非常に有効な効果がもたらされた。これらがいまって低湿地開発を可能にし成功させてきたものと言える。

捷水路工法は世界の各地でも実施されているが、必ずしもうまくいくわけではなく失敗例も少なくない。図-7は、山口(1985)によって収録されたMississippi川Green ville地域における捷水路工実施後の河道状況の一例(Wirkly et al.)である。3つの捷水路が連続し流路延長が1/4にまで短縮しているが、捷水路下流部における堆積が激しく、中州の発生・分流路形成・川幅増加が止まず、特に航路維持が問題になっている。護岸・水制の群れが流路維持の苦勞を物語っている。これに似た例が石狩川でもないわけではない。雨龍川合流部において施工された江

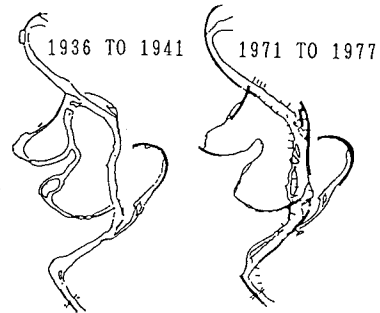


図-7 Green ville 捷水路変遷図

部乙第2・六戸島捷水路は、自然振幅を期待して掘られた50m幅水路が洪水のたびに浸食され、広がった河道内に複列砂州が発生して深刻な流路変動をまねき、維持安定に多くの費用を必要とした。

4-2. 不安定化の要因

石狩川捷水路が全体として安定し、成功例として高い評価を受けることになった要因、逆に通水後の流路変動が激しく成功にいたらなかった事例の要因はどこにあるのであろうか。上述の例で共通しているのは、捷水路部に過剰土砂の堆積が発生していることである。堆積によって河床が高まり、局所河床勾配が減少して幅/水深比が大きくなるとさまざまな流路の不安定化が起こる。すなわち、①砂州の複列化・みお筋の変動による振幅の激化、②流路弯曲時の浸食速度の増大化、③横断面の動的平衡(緩勾配ほど幅/水深比減少)の困難化、④流路の分裂化、などである。過剰土砂は、①捷水路による局所的急勾配化がもたらすことがあるほか、②支川流入、③河岸堆積物からの横流入、などによりもたらされる。Mississippiの例は①にもとづくものであり、江部乙の例は②にもとづくものと考えられる。

4-3. 石狩川捷水路の安定化要因

図-8~11はそれぞれ、石狩川中間地域のうちKP44(旧美唄川合流点)~KP106(雨龍川合流点)をとりだし、平均河床高、低水路幅、低水路平均水深、および幅

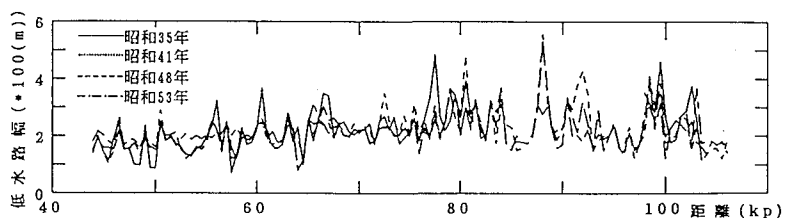


図-8 低水路幅の経年変化

/水深比の年度比較をおこなったものである。図によれば、平均河床高が年度を追って低下していることが分かる。これは捷水路の影響によるものであるが、重要なことは低下が全体的に起こり、局所的な堆積が現れていないことである。図-8～11によると、低水路幅、低水路水深、幅/水深比の経年変化はほとんど見られない。これを距離に対して平均化すると、表に示すように幅が年度を追ってわずずつ減少し、幅/水深比もほぼその傾向にあることが分かる。顕著な傾向はこれらの分散であり、いずれも年度が下るとともに減少している。特に幅と幅/水深比の分散が明瞭な減少傾向

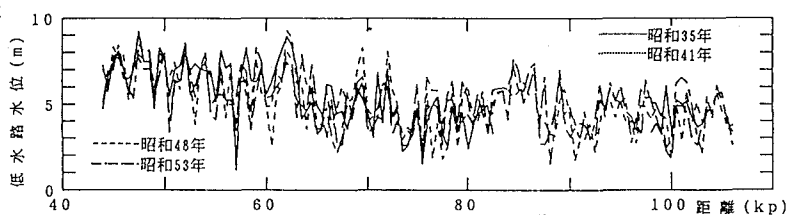


図-9 低水路水深の経年変化

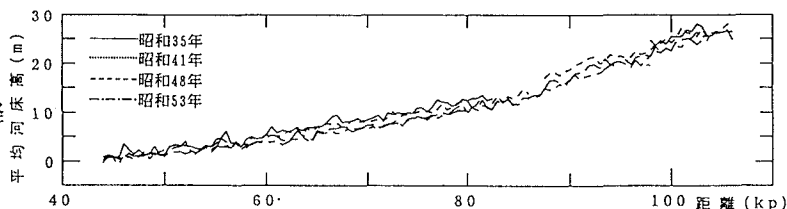


図-10 平均河床高の経年変化

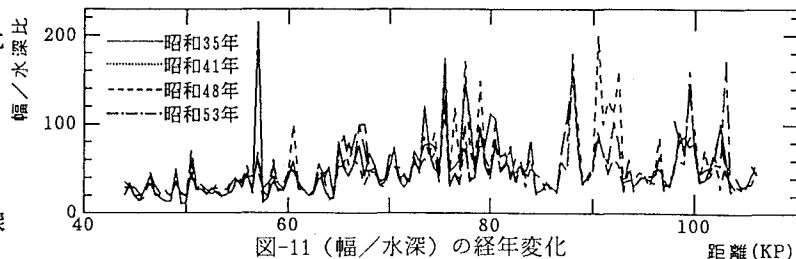


図-11 (幅/水深) の経年変化

を示している。このことは、河道改修の進捗を抜きに考えられないであろうが、河床低下にともなう縦断勾配減少の反映とも考えられ、動的平衡断面が要求する条件へ推移している。また、この区間の砂州の大部分が単列にとどまり、複列化・中島形成の可能性がますます減っていることを物語っている。流路安定の証左である。それでは、こうした局所堆積のない河床低下が何故起こっているのだろうか。大正10年「篠路第2」の通水から昭和44年「砂川通水」にいたるわずか48年間に、29の捷水路を下流からほぼ順を追って次々に完成させたこと、このことが全体的河床低下をもたらす要因になっていることは十分考えられる。石狩川捷水路を安定化し得た要因の第一は、まさにこの点にあると言えそうである。同時に、これまでの開発過程で多数のダムが建設され、砂防事業が進められた結果、本川への土砂供給が大きく減っていることが挙げられる。安定化の第二の要因と考えられるが、従来この点に関する考察はあまりなされてこなかったようである。次節において詳しい検討をおこなうことにする。

表-2 B、h、B/hの変化

	年	平均	分散
B	S35	223.5	6084.0
	S41	222.9	5756.7
	S48	213.7	4206.4
	S53	217.7	2784.5
h	S35	5.4	3.3
	S41	5.1	2.8
	S48	5.0	2.4
	S53	5.3	2.5
B/h	S35	50.8	1220.8
	S41	52.1	1204.4
	S48	49.3	782.7
	S53	47.1	726.4

5. 横流入流砂量が流路変動におよぼす影響

5-1. 土砂水理学的検討

横流砂量のある1次元河床変動式は次のように与えられる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_B}{\partial x} - \frac{q_{By}}{B} \right) \quad (1)$$

ただし、 x :流下方向距離、 z :基準面からの河床高、 t :時間、 q_B : x 方向流砂量、 q_{By} :横流入流砂量、 B :平均流路幅、 λ :空隙率である。

いま、長期の変動を考えることにし、流砂量式としてMeyer Peter-Muller型の簡略式(2)を用い、横流入流砂量は一定であるものと仮定する。

$$q_B = K \tau^{3/2} \sqrt{s g d^3} = K \frac{\sqrt{g}}{s} (h I)^{3/2} \quad (2)$$

ここに、 h :長期平均の水深、 I :河床勾配、 K :流砂量係数などであり、他は慣用の記号にしたがっている。

(2)を(1)に代入して高次項を省略すると、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{3K}{2s} h \sqrt{ghI} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{q_{By}}{(1-\lambda)B} \quad (3)$$

上式拡散項にかかる係数は本来 (x, t) の関数であるが、長期変動を考える場合には一定と見なすことができよう。そこで次の置き換えをおこない、(3)を(3)'にて表す。

$$\frac{1}{1-\lambda} \frac{3K}{2s} h \sqrt{ghI} = \kappa^2 (\text{const.}) \quad \frac{q_{By}}{(1-\lambda)B} = \omega (\text{const.}) \quad \frac{\partial z}{\partial t} = \kappa^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \omega \quad (3')$$

ところで、いま考えようとしているのは w の影響であり、ある初期条件のもとでの斉次解、すなわち w のないときの変動(基本的河床変動)については考えず、その上に重なる非斉次解の性質を調べることにする。このときの初期条件・境界条件は、次のように斉次なものとして十分であろう。

$$t=0 \quad \text{にて} \quad z_2=0 \quad x=0 \quad \text{にて} \quad z_2=0 \quad (4)$$

この w の影響のみを考慮した解を基本河床変動と区別するために z_2 とおくと、解は次式となる。

$$z_2 = \omega \left[\frac{x\sqrt{t}}{\sqrt{\pi} \kappa} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa^2 t}\right) - \frac{x^2}{2\kappa^2} + \left(\frac{x^2}{\sqrt{\pi} \kappa^2} + \frac{2t}{\sqrt{\pi}}\right) \int_0^{\frac{x}{2\kappa\sqrt{t}}} \exp(-\beta^2) d\beta \right] \quad (5)$$

したがって、 w の流入によって起こる河床勾配の変化は、

$$\Delta I = \omega \left[-\frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi} \kappa} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa^2 t}\right) + \frac{x^2}{\kappa^2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\kappa\sqrt{t}}} \exp(-\beta^2) d\beta\right) \right] \quad (6)$$

となり、また、その変化速度は次になる。

$$\frac{\partial \Delta I}{\partial t} = -\frac{\omega}{\sqrt{\pi} \kappa \sqrt{t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa^2 t}\right) (<0) \quad (7)$$

上式は常に負であり、 w の存在が河床勾配を緩くさせ続けることが分かる。河床の上昇速度は、

$$\frac{\partial z_2}{\partial t} = \frac{2\omega}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\kappa\sqrt{t}}} \exp(-\beta^2) d\beta (>0) \quad (8)$$

であり常に正値をとるので、 w が河床を上昇し続けるように働くことが分かる。次に、断面が流量 Q を流すように形成されるものと考え、幅 B 、水深 h 、勾配 I が次式で規定される。ただし、 C_f は摩擦係数である。

$$Q = \sqrt{\frac{C_f}{g}} B h^{2/3} I^{1/2} \quad (9)$$

洪水敷高を H とすれば、 $h=H-z$ なので上式および(8)式とともに次の関係式を導くことができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B}{h} \right) = \frac{B}{2h} \left[\frac{5}{h} \frac{2\omega}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\kappa\sqrt{t}}} \exp(-\beta^2) d\beta + \frac{\omega}{\sqrt{\pi} \kappa \sqrt{t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa^2 t}\right) \right] > 0 \quad (10)$$

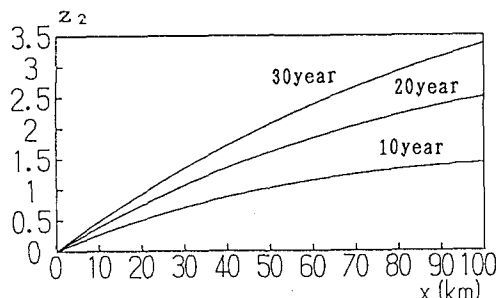


図-12 横流砂量流入による河床変化への影響

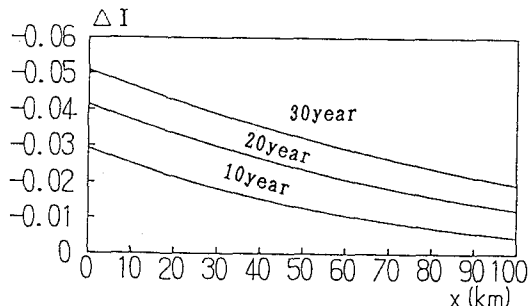


図-13 横流砂量流入による河床勾配変化への影響

この式も常に正なので、幅/水深比もまた時間とともに増え続けることになる。図-12～14は、それぞれ式(5)、(6)、(10)を表すものである。 κ^2 の値は表-2から求め、 w は次に述べる石狩流域の比堆砂量から推定した。もしダムが存在しなければ10年程度でも1m近くの河床上昇となり、1/100もの勾配減少を招き、 B/h も見るべき増加を遂げることになる。もちろん、基本的河床変動があるのでこのままが直接現れるわけではなく、また線形化による過大評価もあるが、横流入流砂量の影響は決して無視できないことが分かる。

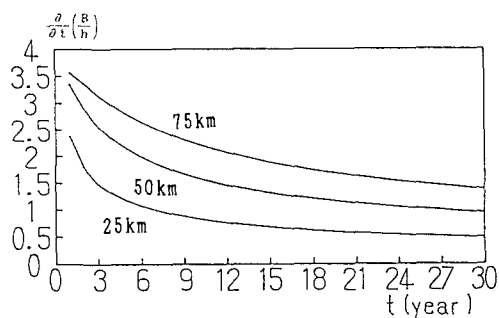


図-14 横流砂量流入による
(B/h)の時間変動への影響

5-2. 石狩川流域ダム群の比堆砂量

図-15は、昭和60年までの実績でみた石狩川流域ダム群の比堆砂量を示すものである。支川流域ごとに異なった傾向を示すので、先述した本川区間に対応するダムにつき平均値を求めると $178\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ ほどになる。この区間の流域面積は 5873km^2 なので単純に積をとって総流入量を出し、流路区間長で平均化した上で w を求めると $w=0.158\text{m/year}$ になる。もし、ダムが造られず砂防事業がなされなかった場合には、このままの数字が本川の負担としてかかり、上に述べたような影響が捷水路部にもおよぶことになる。これらのダムのうち、最下流部にあるものの流域面積の和を求めると 2973km^2 （全体の50.6%）ほどになる。砂防ダムの実態が調べられていないので正確な数字にはし得ないが、全体としてこの比率以上に流入流砂量が抑止されているものと推定される。石狩川捷水路の安定にとって、これらが有効に機能したことは十分考えられる。

【参考文献】(1)山口甲(1985):河相変動論(序説)、北海道開発局小樽開発建設部、昭和60年3月(2)山口甲(1990):沖積河川における河道計画に関する研究、博士論文(3)Wirkly, B.R. and J.H. Brooks: Navigation and flood control through geometric alignment, Hy. Branch U.S. Army Engrg. District Vicksburg Corps of Engrg. Vicksburg Miss.

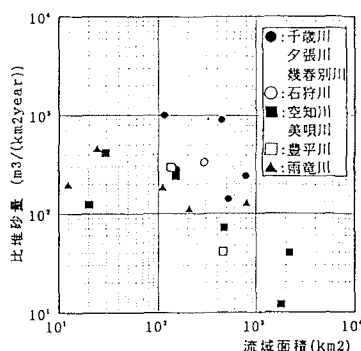


図-15 石狩川における比堆砂量
と流域面積の関係