

II-42

水没植生の年成長変化にともなう 水位—流量曲線の変化

北海道大学 正 員 長谷川 和義
北海道大学工学部 学生員 勝 見 哲史
北海道開発局 正 員 品 川 守

1. はじめに

植生を伴う河川水理に関する研究は非常に多方面にわたっており、水理学分野においても最も活発な分野になっている。この背景には、河川の自然環境を生かした川づくりの要請が近年ますます高まっていることがあげられよう。

しかし、植生の成長に伴う水理現象の年変化を扱った研究は少なく、特に水位—流量関係を論じた論文はほとんど見あたらない。本研究安平川水系美々川において北海道開発局によって実施された詳細な植生調査の結果に基き、水草の成長—枯衰による抵抗変化のモデル化を試みたものである。抵抗あるいは流量予測をおこなう際、植生の成長特性、分布特性、個々の繁茂状態を把握することが極めて重要である。しかし、これらは年度によっても様々に変わり一般化が極めて難しい。本研究では、可能な限りこれらを定量化し、簡単に入手可能な変量との相関を調べ一般化につとめた。

2. 美々川における植生の特徴

2-1 調査地点と調査法^{1), 2)}

図-1は、調査対象となった安平川水系美々川の植苗橋近傍を示すものである。A地点、B地点の二箇所の河床に一辺50cmの正方形を設けて調査域とし、上流側1/4の部分は、水生植物の本数、草丈、葉幅、茎径を測定し、残りの部分は水生植物の本数のみを測定した。さらに、平成4年7月29日、30日、平成3年8月2日、3

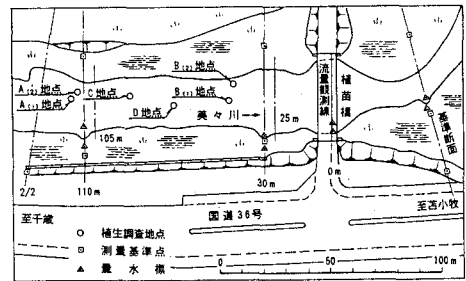


図-1 水生植物調査地点位置図

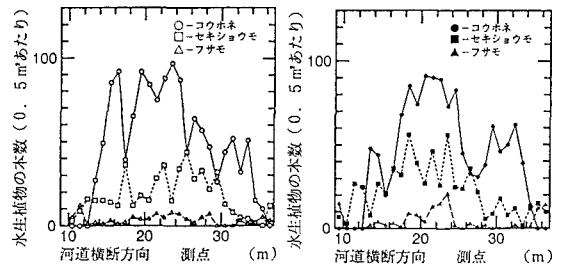


図-2 平成4年度水生植物の分布(7/30) 図-3 平成3年度水生植物の分布(8/3)

日にそれぞれ測線23m, 103m, 20m, 100mにおいて、50cm幅で、1m間隔毎に区切り、横断植物採取を行い、水生植物の種類、本数、草丈、植種毎の体積を測定した。図-2, 3は、その時の河道横断方向における水草の本数の状況を示したものである。

2-2 植生調査の結果^{1), 2)}

調査地点の植種は、12種類であったが、コウホネ、セキシウモ、フサモの占める割合がおおきいので、この3種類を代表植生と考えて、他の植種については、この3種類に類似しているものを適用す

ることとした。

図-4,5は、平成3年度と平成4年度のA地点における水草本数の4月からの日変化図である。また、図-6,7は、同じく、平成3年度と4年度のA地点における水草丈の4月からの日変化を示すものである。これらの図から、水草は、水温・日照量の増加する5月頃から一斉に成長し始め、7～10月にかけてピークに達し、その後枯れ始めている事がわかる。

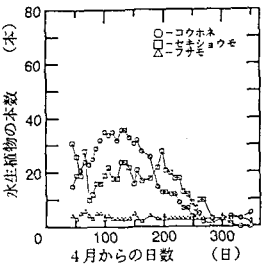


図-4 平成4年度 水草本数の日変化

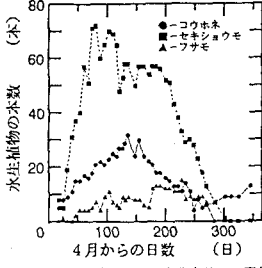


図-5 平成3年度 水草本数の日変化

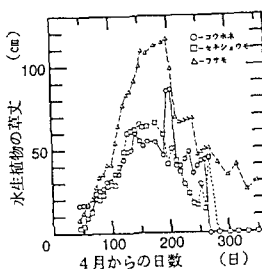


図-6 平成4年度 水草丈の日変化

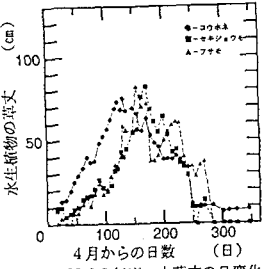


図-7 平成3年度 水草丈の日変化

2-3 葉面積の推定

一株毎の葉面積と草丈の関係図を作成したところ、図-8,9中の直線で示すような相関関係が得られる。表1は、葉面積と草丈の相関式を示している。また、A地点における草丈と4月からの積算水温および、積算日照量との関係を、草丈のピーク時までの成長期とピーク時から3月までの枯衰期に分けて一次近似し、相関関係を求めたところ、図-10～12のような結果を得た。表2は、図中の草丈と積算日照量の関係式を表したものである。ただし、Sは日照量である。

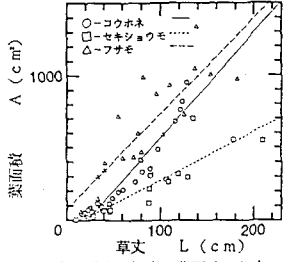


図-8 平成4年度 葉面積-草丈

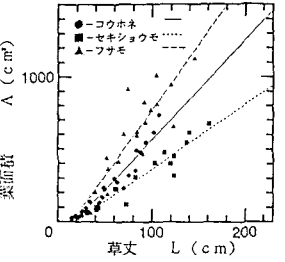


図-9 平成3年度 葉面積-草丈

表-1 葉面積と草丈の関係

a r =	平成4年度	平成3年度
コウホネ	$0.07265 \cdot L - 0.01618$	$0.06867 \cdot L - 0.01216$
セキショウモ	$0.03305 \cdot L - 0.00537$	$0.04427 \cdot L - 0.00769$
フサモ	$0.06577 \cdot L + 0.00750$	$0.09014 \cdot L - 0.01327$

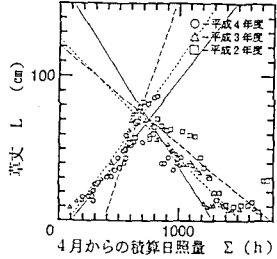


図-10 コウホネ 草丈-日照量

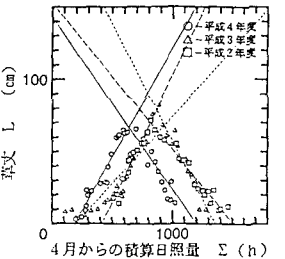


図-11 セキショウモ 草丈-日照量

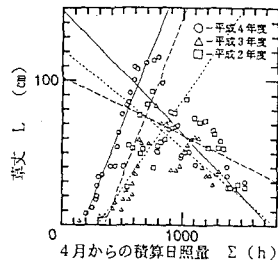


図-12 フサモ 草丈-日照量

表-2 草丈と日照量の関係

l =	年度	成長時	枯衰時
コウホネ	4	$-11.300 + 0.108 \Sigma S$	$165.175 - 0.127 \Sigma S$
	3	$-9.544 + 0.120 \Sigma S$	$125.341 - 0.081 \Sigma S$
セキショウモ	4	$-28.314 + 0.149 \Sigma S$	$142.861 - 0.118 \Sigma S$
	3	$-18.496 + 0.093 \Sigma S$	$218.486 - 0.161 \Sigma S$
フサモ	4	$-35.340 + 0.212 \Sigma S$	$148.335 - 0.085 \Sigma S$
	3	$-35.447 + 0.123 \Sigma S$	$121.424 - 0.068 \Sigma S$

3. 流速の測定結果と理論流速分布

3-1 計測法と結果

平成3年度は、10月3日に植苗橋上流の測線110mに沿い2mおきに、水深方向に20cmごとに、平成4年度は、7月30日に測線103mに沿い4mおきに、水深方向に15cmごとに、 u 、 v 、 w の各成分を計測した。使用計器は、アレック電子社製 ACM-300・3次元電時流速計であり、120秒間の平均流速を測定した。また、計測時のそれぞれの水面勾配は、平成3年度は、 $I = 0.0003566$ 、平成4年度は、 $I = 0.00051$ であった。また、水生植物の密生度は、河道横断植生調査時、平成3年度測線100mにおいて、 8.4 m^{-1} 、平成4年度、測線100mにおいて、 7.4 m^{-1} である。

3-2 理論流速分布

植生を伴う流れの表現として最も単純な以下の式を用いる事にする。すなわち、流れ自身の抵抗をブーシネスク近似であたえ、植生の抵抗を接近流速の2乗に比例するものとする。

$$I - \frac{1}{g} C_r b \phi(\tilde{z}) \tilde{u}^2 + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial \tilde{z}} \left(\epsilon \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{z}} \right) = 0$$

$$\epsilon = \frac{\kappa}{m} u_* h \quad (1)$$

ただし、水底から上向きに $\tilde{z}$ 軸をとり、 $\tilde{u}$ =任意点の流速、 I =水面勾配、 C_r =水草の抵抗係数、 b =単意 水底面上にある水草の葉面積の合計（無次元）、 $\phi(\tilde{z})$ =水深方向の葉の存在確率密度（長さの逆数の次元） g =重力加速度、 κ =カルマン定数=0.4である。

上式の第二項は、水草による抵抗を、第三項は、底面から働くせん断力それぞれ表し、これらが流下方向成分と釣り合っていることを示している。

ここで、水草のない場合を考え、 $\epsilon = (\kappa/m) \cdot u_* h$ において、対数流速分布に一致するように m を選ぶと、 $m=6$ となるが、この値をもとに放物線分布を導いて粗度係数を求めると、実際よりも大きくなり

すぎる事が知られている。そこで水草が枯れた状態での実測値に一致するように $m=10$ を選び、以後、水流自身のせん断力は、この係数に従うものとする。

式(1)の $\tilde{u}$ を u_* で、 $\tilde{z}$ を h でそれぞれ無次元化すると、

$$I - C_r b h \phi(z) \cdot u_*^2 + \frac{\kappa}{10} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

を得る。平成2年度の調査では植生密度 b が大きく、 $\phi(z)$ が指数関数時に変化をみせたが、平成3,4年度の結果は、 b が小さく、 $\phi(z)$ の分布も一様に近いので、

$$\lambda = C_r b h \phi(0) = C_r \alpha \quad (3)$$

ただし α =単位水底面上における水草の葉面積の合計（無次元）=植生密度×水深において、これを直接摂動パラメータにとり、展開をはかる。すなわち、 $u = u_0 + \lambda u_1 + \lambda^2 u_2 + \dots$ (4)

を式(2)に代入し、 λ の次数ごとに整理すると、オーダーごとにそれぞれ次の結果を得る。

$$0\text{次では、} \quad I + \frac{\kappa}{10} \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

$$1\text{次では、} \quad -u_0^2 + \frac{\kappa}{10} \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

$$2\text{次では、} \quad -2u_0 u_1 + \frac{\kappa}{10} \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

$$\text{式(5)より、} \quad u_0 = -\frac{I}{2} \frac{10}{\kappa} z^2 + A z + B$$

$$\text{ただし } A, B \text{ は積分定数} \quad (8)$$

を得るので、式(6)に代入し再び積分すると、

$$u_1 = \frac{10}{\kappa} \left\{ \frac{1}{120} \left(\frac{10}{\kappa} \right)^2 z^6 - \frac{1}{20} \left(\frac{10}{\kappa} \right) A z^5 + \frac{1}{12} \left(A^2 - \frac{10}{\kappa} B \right) z^4 + \frac{1}{3} A B z^3 + \frac{1}{2} B^2 z^2 \right\} + C z + D \quad (9)$$

となる。 C, D は積分定数。この式の最高次数が6次にまで達しているので、式(7)まで求める必要はなさそうである。よって、式(8)、(9)を式(4)に代入し、それを最も明瞭な境界条件

$$z=1 \text{ において } \frac{\partial u}{\partial z}=0$$

$$z=0 \text{ において } u=0$$

に代入し、 λ の0次、1次ごとに条件式を導き、積分定数を求め、次元を戻すと、

$$\begin{aligned} \frac{u}{u_*} = & \frac{C_f \alpha}{120} \left(\frac{10}{\kappa} \right)^3 \left(\frac{z}{h} \right)^6 - \frac{C_f \alpha}{20} \left(\frac{10}{\kappa} \right)^3 \left(\frac{z}{h} \right)^5 \\ & + \frac{C_f \alpha}{12} \left(\frac{10}{\kappa} \right)^3 \left(\frac{z}{h} \right)^4 - \frac{5}{\kappa} \left(\frac{z}{h} \right)^2 \\ & + \left\{ \frac{10}{\kappa} - \frac{2C_f \alpha}{15} \left(\frac{10}{\kappa} \right)^3 \right\} \frac{z}{h} \end{aligned} \quad (10)$$

が得られる。

図-13～16は、実測流速分布に、最も適合する $C_f \alpha$ を求めて、式(10)をあてはめた結果を示すものである。これによって得られた係数 $C_f \alpha$ を α で除せば、 C_f を求めることができる。ここで α は、植生密度の横断平均値（平成3年度は、 8.4 m^{-1} ・平成4年度は、 7.4 m^{-1} ）に、水深をかけたものとする。式の適合性はほぼ良好と考えられるが、流速の小さいものの中に必ずしも適合しない例もある。しかし、ここでは式(10)を用いて進める。

3-3 粗度係数と流量の推定式
式(10)を、水深にわたって積分すると次式になる。

$$\begin{aligned} \int_0^h \tilde{u} d\tilde{z} = & \left\{ \left(\frac{1}{7 \times 120} - \frac{1}{6 \times 20} + \frac{1}{5 \times 12} - \frac{1}{15} \right) \right. \\ & \times C_f \alpha \left(\frac{10}{\kappa} \right)^3 + \frac{10}{3\kappa} \left. \right\} u_* h \quad (11) \\ = & \left\{ -0.0571 C_f \alpha \left(\frac{10}{\kappa} \right)^3 + \frac{10}{3\kappa} \right\} \sqrt{g I} h^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (11)'$$

ただし、 g = 重力加速度、 I = 水面勾配である。

上式に平成3年度と平成4年度の C_f の平均値 $\overline{C_f} = 0.001023$ と $\kappa = 0.4$ を代入して整理すると、

$$\int_0^h \tilde{u} d\tilde{z} = (-0.9127\alpha + 8.33) \sqrt{g I} h^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$= (-2.857\alpha + 26.086) \sqrt{I} h^{\frac{3}{2}} \quad (12)'$$

今、断面が矩形で近似できるものとする
と平均水深 h 、流路幅を B として、流量は、

$$Q = (-2.857\alpha + 26.086) \sqrt{I} B h^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

のように求められる。なお、式(14)からマニングの粗度係数を求めると、

$$n = \frac{h^{1/6}}{-2.857\alpha + 26.086} \quad (14)$$

となる。

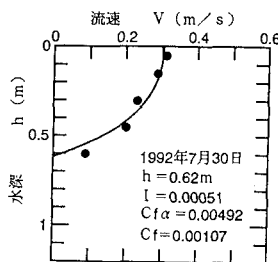


図-13 理論流速分布と実測値
(測線103m、測点14m)

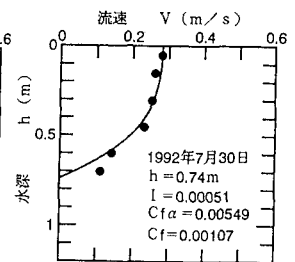


図-14 理論流速分布と実測値
(測線103m、測点18m)

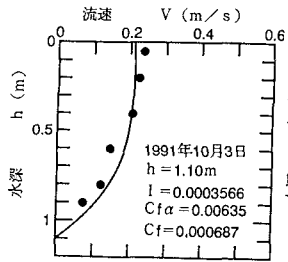


図-15 理論流速分布と実測値
(測線110m、測点40m)

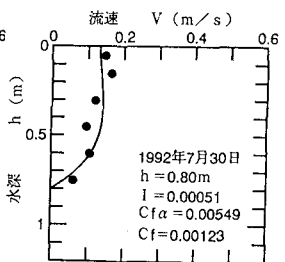


図-16 理論流速分布と実測値
(測線103m、測点18m)

4. H-Q関係のモデル化

式(13)によれば流量を推定するためには水位 H （または水深 h ）の他に I 、 B 、 α の情報が必要である。

後三者を、何らかの入手しやすいデータによって予測することができれば、簡易な流量推定が可能となろう。

4-1 水位と水面勾配、流路幅

図-17は、平成3年度、平成4年度のA地点での水位と水面勾配との関係である。

また、図-18は、平成3年度、平成4年度

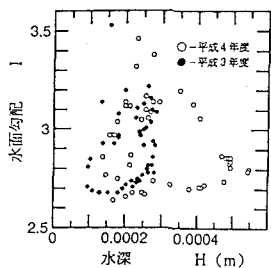


図-17 水面勾配-水位の関係

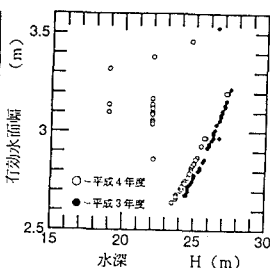


図-18 流路幅-水位の関係

のA地点における水位と流路幅（有効水面幅）との関係を示すものである。

これらは、年度によって差が激しく、水位Hによる関数によって水面勾配Iや水面幅Bを表すのは今のところ困難である。したがって本モデルでは、I、Bに関して実測値を用いる事にした。

4-2 葉密度 α のモデル化

平成4年度の、表2でえられた、コウホネの草丈-日照量、セキショウモの草丈-日照量、フサモの草丈-日照量の相関関係を、表1のそれぞれの葉面積-草丈の相関式にあてはめると、表3のようになる。

表-3 水草の葉面積のモデル化

コウホネ	成長時	$a_k = 0.05745 \cdot (0.00108 \Sigma S - 0.113) - 0.01495$
	枯衰時	$a_k = 0.05745 \cdot (-0.00127 \Sigma S + 1.652) - 0.01495$
セキショウモ	成長時	$a_s = 0.03305 \cdot (0.00149 \Sigma S - 0.283) - 0.00537$
	枯衰時	$a_s = 0.03305 \cdot (-0.00118 \Sigma S + 1.429) - 0.00537$
フサモ	成長時	$a_f = 0.06577 \cdot (0.00212 \Sigma S - 0.363) + 0.0750$
	枯衰時	$a_f = 0.06577 \cdot (0.00085 \Sigma S + 1.483) + 0.00750$

ただし、 a_k はコウホネ一本あたりの葉面積、 a_s はセキショウモ一本あたりの葉面積、 a_f はフサモ一本あたりの葉面積である。

単位面積あたりの各水草の本数は、A地点で実測した一辺50cmの正方形の各水草の本数を4倍する事によってえられる。しかし、図-2の河道横断植生調査で示したように、測線100mの植生は河道の中央付近で密である。A地点は河道の中央付近にあるので、A地点の単位面積本数を

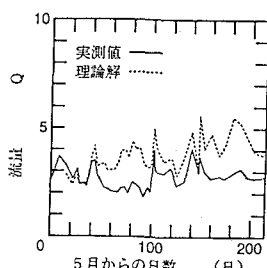


図-19 平成4年度
日照量からの流量推定

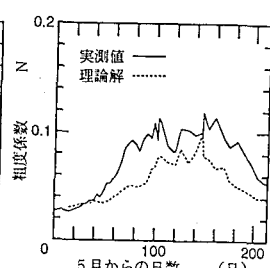


図-20 平成4年度
日照量からの粗度推定

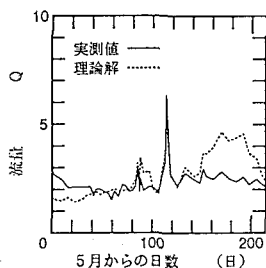


図-21 平成3年度
日照量からの流量推定

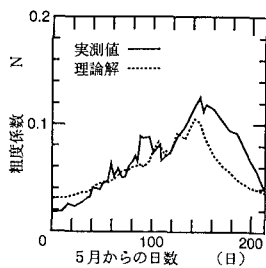


図-22 平成3年度
日照量からの粗度推定

もって代表させると河床全体の平均単位面積本数よりも多くなる。そこで、A地点の実測値から得られた単位面積あたりの本数（時系列）に、図-2の幅0.5mの河道横断採取から求めた各水草の平均本数とA地点付近の実測本数との比をかけることによって、河床全体の単位面積あたりの本数時系列を求めることにする。すなわち、単位面積あたりのコウホネの本数 n_k は次の式で求められる。

$$n_k = 4 \times \text{A地点でのコウホネの実測本数} \times \frac{\text{河道横断方向のコウホネの平均本数}}{\text{測点23mでのコウホネの実測本数}}$$

セキショウモの単位面積あたりの本数 n_s 、フサモの単位面積あたりの本数 n_f も、同様に求めることができる。

葉の表面の抵抗を考える場合両面をとって、 $\alpha = 2 a \cdot n$ とすべきであるが、コウホネとフサモについては、葉の付き方が、セキショウモほど単純ではなく、重なることが多いようなので、剥離域内の抵抗減少を考えて、片面についてのみ考える事にする。すなわち、

$$\alpha = \alpha_k \cdot n_k + 2\alpha_s \cdot n_s + \alpha_f \cdot n_f$$

この α を式(14)、(15)に代入し、日照量、水温との相関によって得られた草丈の変化、水位H、水面勾配I、川幅Bの日変化を与えることによって流量・マンニング粗度係数をえることができる。

4-3 モデル推定の結果

図-19～22は、植苗橋における実測流速変化・粗度係数の変化と比較した結果を示すものである。様々な仮定や単純化にもかかわらず、モデルの推定結果は比較的良好である。平成3年度の枯衰期や平成4年度の結果は粗度の見積りが小さ目になっており、その分流量が過大になっている。植生本数などの評価に問題があるものと考えられる。

4-4 代表植生によるモデル

ここで、一つの植生を代表植生とし、植生本数が年間を通じて一定しているものと仮定してモデル化することにする。

例として平成4年度のコウホネを代表植生とすると、図-23、24のような結果をえた。この結果はコウホネの植生状態に強く影響されて、かなり偏ったものになっており、植生の代表性がよほど適當するものでない限り、簡略化モデルでの推定は難しいようである。

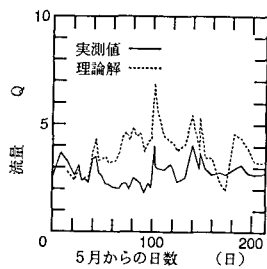


図-23 平成4年度
代表植生コウホネからの流量推定

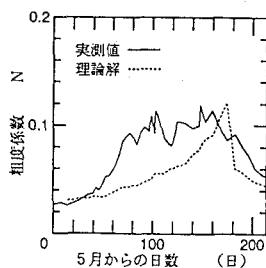


図-24 平成4年度
代表植生コウホネからの粗度推定

5. 結論

(1)水草の草丈は、水温・日照量によって推定でき、その成長・枯縮は、粗度係数の増加・減少をもたらす。

(2)各水草の実測本数の日変化など詳しい植性情報がある場合、式(14)の流量の推

定式はかなりの程度実測値とあっている。

(3)しかし、植生状態を1つの代表植生で表すなど、より簡略な方法を用いると適合性が悪くなる。植生状態の適切なモデル化が重要である。

6. おわりに

水温・日照量と草丈の相関関係を調べ、それを用いて比較的詳しい植生状態の資料をもとに、流量推定を行った結果図-23～26のように実測値とよくあった。しかし、代表植生モデルを用いた場合図-27、28のように少し実測値とずれる。H-Qカーブなど実用に結び付けるには水草の株密度や植種の割合などの植生状態のモデル化が必要である。また、コウホネ、フサモについては、葉の片面についての計算をおこなったが植種別の抵抗状態も詳しく知る必要がある。今後の課題にしたい。

謝辞：本研究を進めるにあたり北海道開発局石狩川開発建設部より貴重な資料をお見せ頂いた。記して謝辞とかわる次第である。

参考文献：

- 1)平成3年度 千歳川放水路環境影響調査報告書(美々川流量調査) 財団法人 河川環境 管理財団 1991
- 2)平成4年度 千歳川放水路環境影響調査報告書(美々川流量調査) 財団法人 河川環境 管理財団 1992
- 3)神保・羽山・長谷川：水草の成長サイクルに伴う流れの変化,土木学会北海道支部論文報告集,第48号,1992年,pp.329-334