

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の 分布と横流（阿蘇黒川の研究，第1報）

理學博士 野 滿 隆 治
理 學 士 輕 部 末 藏
農 學 士 川 口 武 雄

I. 緒 言

著者の一人野滿は、「河川浮泥の水面條件と其の應用」⁽¹⁾なる一文に於て、阿蘇黒川に於ける水溫及び鹽分の垂直分布實測結果を一部發表し河川の水溫及び鹽分は理論上豫想せらるゝ通りに上下殆んど均一なることを示した。其の際、溫度の方は同一横断面上ならば垂直方向のみならず水平方向にも不變であるが、鹽分は水平方向には均一でないことを知つた。此の點は本論文に於て其の理由を檢討しやうと思ふのである。

又浮游砂泥に就いても、其の垂直分布は理論上、任意點に於ける濃度を m 、河底のそれを m_0 とし、河底よりの高さを z にて表はせば

$$m = m_0 e^{-\int \frac{w_0}{\eta} dz} \quad (1)$$

となるべき筈である。こゝに η は河水の亂流交換係數、 w_0 は粒子の靜水中に於ける自然沈降速度である。それで粒徑が小さく従つて w_0 の小なる泥ほど上下均一に近くなり、特に水溫や溶解物質は $w_0 = 0$ に相當するから全く上下均一となつて然るべきであるが、粒徑が大きく従つて w_0 の大なる砂ほど其の濃度は上下に大差があり、河底よりの高さと共に指數函數的に遞減すべきことが豫想せられる。かやうな砂泥垂直分布様式の實證は既に Straub⁽²⁾氏がミズリー河で、速水⁽³⁾頌一郎博士が揚子江で行つて居るが、何分にも只二三點の

- (1) 野滿隆治：河川浮泥の水面條件と其の應用，石本教授記念論文集，昭和17年，尙ほ近々中に學術研究會議，邦文天文學地球物理學輯報に掲載の筈。
- (2) L. G. Straub: Hydraulic and sedimentary characteristics of rivers; Transac. Am. Geophys. Union, 1932, 375.
- (3) S. Hayami: A theory of silt transportation by running water, J. Shanghai Sci. Inst. Sect. I, 1. (1938), 175.

測定にすぎないので、吾々は更に多數の實測を試み充分なる材料を提供し、併せて従來は全く缺けて居た溶解物質の垂直分布資料をも附加したいといふのが本論文の第二目的である。

更に一方、近來の河川學に横流問題がある。流水の彎曲部では helical flow をなして縦流の外に横流が加はつて居ることは、J. Thomson⁽⁴⁾ が實驗室で曲管に水を流し色素の經路を目に見える様にして實證して以來、多くの人が之を信じ來つたのであるが、近年之に反對して實際の河では彎曲部でも螺旋流を認め得ないといふ人が相當に現はれて來た。例へば Leighly⁽⁴⁾ は河の彎曲部で水面の傾斜を生ずることは確かながら螺旋流は認められぬといひ、又 Elliott⁽⁵⁾ もミシシッピー下流では螺旋流が認められぬから河によつては横流のないのがあると稱して居る。それで Eakin⁽⁶⁾ は流速計の羅針を活動寫眞でとる特殊装置を拵へ、ミシシッピー下流の彎曲部二三に就いて各深度の流速と流向とを觀測したが、矢張り螺旋流が存在すると主張する。又 Gibson⁽⁷⁾ は直線河道の處でも横流があると唱へ、浮子や一點を固定した長い布片を水面に浮べ或は蠟製粒子を河底に投入して、其等の側方移動を觀測し、表面でも底面でも多少の横流があることを認めて居る。又木の葉が川の中央部では下降し、岸側では上昇するのを認め昇降流もある證據として居る。然しイーケン氏の如く流速計による方法では、昇降流には全然觸れることが出來ないし、又横流とても夫れが縦流に比較し得るほど強い處ならよいが、エリオットの疑問とする様な横流の微小な處では其の存在を確定するに困難であらう。又ギブソンの方法は極めて大體の判定に役立つだけで、詳細に横断面上の横流や昇降流全體の系統を確認するには不適當である。

依つて吾々は、近世海洋學が海水循環系統を断面上に於ける水溫・鹽分等の分布狀態から判定する方法に準じ、河川の横断面上に於ける水溫・鹽分・浮游砂泥の分布を測定して、夫れから横流昇降流等の全系統を判斷しやうと企てた。之が本論文の第三目的である。

尙昇降流は河川流速の垂直分布に影響し最大流速が表面より多少下にあるのはその爲だとギブソンは解釋する。それで昇降流と河川流速との關係につきても論及したいのが本文

(4) Leighly: Stream Morphology, 1932.

(5) M. Elliott: History of Mississippi River Commission, 1933.

(6) H. M. Eakin; Diversity of current-direction and load-direction and load-distribution on stream-bends, Trans. Am. Geo. Union, 1935, 467.

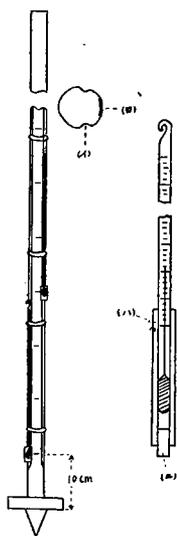
(7) A. H. Gibson: On the depression of filament of max. velocity in a stream flowing through an open channel, Proc. Roy. Soc. London, 82 (1909), 149.

の第四目的である。

是等の目的に適する河川は、先づ濁つて居る川で、而も河底には岩塊などが轉がらずに河床が成るべく整正で、底質も出来るだけ様な砂泥で且つ洲などもなく、従つて水流が比較的規則正しい沖積下流性のものが望ましい。然るに熊本縣阿蘇の黒川は其の名の如く水が黒く見えるほど濁つて居り、而も大火山口の平坦地を流れ底質は殆んど様な火山灰よりなつて居る。而も川幅は20米内外、深さ約1米で實測は極めて容易であり、而も普通の水力工學實驗室のモデルに比すれば遙に大きく且つ自然の川であることから考へ、眞とに理想的な河川模型とも稱し得る。その上、吾々は河畔の内ノ牧町に研究用温泉を掘鑿し出向據點を有して居る關係上、何彼につけ便利であるから、昭和16年夏季を利用し學生の實習を兼ねて黒川觀測を内ノ牧で實施した。

II. 實 測 方 法

1) 水温測定法 河面上の一點に對應する種々の深度に於ける水温を同時に測定する爲、第1圖の様な長さ約2米、直徑4糎の木製棒に10糎毎の目盛を施し、之に水銀寒暖計を30糎間隔に適當數だけ取り付ける。之を舟上より垂直に支持して約15~20分間經過した後、速かに引き上げて讀取るのである。使用した寒暖計は1/5度目盛りのもので、豫め補正を行ひ、且水銀槽の部分には肉厚のゴム管を被せ、下方の孔も亦ゴム栓で閉塞した。この様にした寒暖計は豫め試験をして見ると、空氣中から水中に挿し込んで水と同温度になる迄には約15分を要し、又水中より引出して空氣中に放置すれば、温度差 10° に於て 0.1° 上昇するのにさへ約45秒を要することを確めた。従つて上の様な測定法を行へば、誤差 0.1 以下の精度を以て各深度の水温を同時に知ることが出来るのである。



第1圖 水温測定用棒と寒暖計

觀測點は豫定横斷線に兩岸より1米毎に印しをつけた綱を張つて之を指示し、別に船首のもやひ環を通した太綱を河面に張つて、之に沿ひ舟を動かし各觀測點に舟を止める。

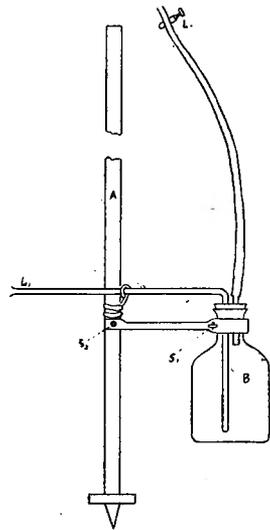
かくすれば全断面の水温觀測も短時間内に終了し、日變化の影響を避けることが出来る。

2) 採水法 濁りや鹽分を定量する爲には各深度より水を採つた。河の如く亂流で

渦の多い場合には、海洋觀測に使ふ様な口の廣い採水器は不適當である。なぜなら河流は數秒乃至數十秒の息をするから、瞬間的に只一度採水したので河の状態を判斷するのは不都合である。少くとも其の間の平均が得られる様に、瓶の入口を細くして満水する迄に1~2分はかかる様にせねばならぬ。それで吾々は第2圖の様な採水装置を用ひた。

Aは支柱で、全長1.5米の金屬棒に10糎毎の目盛をしたもので、底部には圓盤があり河底に密接直立せしむることが出来る。Bは容量約500ccの硝子瓶で、 S_1 なる螺子を用ひ毎回取り更へ得る。 L_1 は内徑約3糎、長さ40糎の硝子管で、河水の取入れ口とする。又コック L_2 は、採水瓶から空氣の逃れ道とした肉厚ゴム管の上端に附けたもので、之により空氣の出入を調節する目的である。

採水の作業は次の様にする。測定深度に應じ螺子 S_2 で採水瓶を支柱A上の一定點に固定し、 L_2 栓を閉ぢ L_1 を上流に向けて、Aを河中に垂直に立てる。そこで空氣口 L_2 を少し開けると、水は L_1 より徐々にB中に流入する。水が瓶に充滿するに至れば栓 L_2 を閉ぢ、Aを引上げて螺子 S_1 を緩めて採水瓶を取換へ、次の採水をする。



第2圖 採水装置

採水に當つては、水温測定と同様に舟を用ひ、又一々の渦動の影響を避けるために、一瓶の採水に60~90秒を要する程度に採水瓶の空氣口 L_2 を加減した。

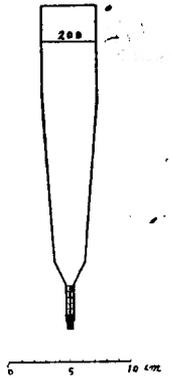
3) 溶解物質の定量 かくして取つた水の溶解分と浮游分とを定量するのであるが、其の内の溶解物に就いては、吾々の目物が河水成分の組成にあるのではなく單に其の分布状態を知り度いだけであるから、吾々は溶解質の代表として鹽素定量のみを行つた。

即ち各採水資料の上澄水25ccを取り、0.0095Nの硝酸銀溶液にて常法に従ひ定量した。使用した硝酸銀液の力價確定には本學分析化學教室證明の0.0990N標準クロールナトリウム定規液を用ひた。

4) 浮游砂泥の定量 本格的の定量を行ふ準備として、吾々は先づ、黒川の浮游物質が如何なる種類のものより成るか、又其の垂直分布の概況如何を知る目的を以て、沈澱速度法による豫備實驗を行つた。

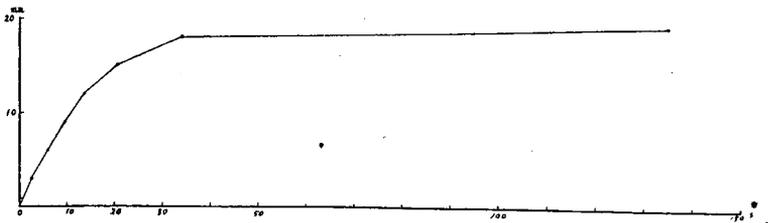
豫備實驗 第3圖の様な沈澱器を作り、之に豫め別に採取した黒川濁水を充分に振盪

して入れ沈澱状況を観察するに、黒き粗粒子がずんずん降下して器底の目盛細管部に沈澱堆積し、約95%は30秒間に、残りも2分間にて終り、残液には赤き粘土状の濁りを留める。この赤色の濁りは中々沈下せず數十分乃至2時間たゝねば澄まないから、濾紙にて濾し捕集する。沈澱器の水層を厚さ20cmにして數回實驗した結果、細管部に19mm堆積する砂量があつたが、其間の堆積進行状況は次表の通りで、圖示すれば第4圖の如くであつた。之より各沈降速度従つて各粒径に應ずる砂量を著者の別論文の混合砂分離算法によつて計算し表中に併記して置いた。即ち黒川の浮游砂は径0.08~0.22mmのもの82%を占め、それより大なるものも小なるものも極めて僅かである。尙ほ全體の weighted mean は 0.168mm 平均直径に相當



第3圖 豫備試驗用沈澱器

沈積量 (mm)	時間 (sec)	各種砂量		沈降速度 (cm/sec)	粒径 (mm)	
		厚さ (mm)	歩合 (%)		範圍	平均
3	2.5	1.0	5.2	>8.40	>.073	>0.73
6	6.0	0	0	3.50~8.40	0.35~0.73	0.54
9	9.5	1.1	5.8	2.21~3.50	0.22~0.35	0.29
12	13.5	4.4	23.0	1.55~2.21	0.16~0.22	0.19
15	20.5	4.1	21.5	1.02~1.55	0.11~0.16	0.14
18	34.0	7.2	37.7	0.62~1.02	0.08~0.11	0.10
19	135.0	1.3	6.8	0.16~0.62	0.04~0.08	0.06



第4圖 黒川浮砂沈降試験

る。赤色の濁りは沈澱法による粒径決定を行はなかつた。

次に、是等の沈澱物を顕微鏡下で観察し且つマイクロメーター尺に比較し粒径を測定すると、黒色沈澱物は主として径 0.1~0.5mm までの粒子より成り、特に 0.15mm 程度のも

(8) 野滿隆治：水中沈降による混合砂の定量分析に就いて、本誌次號にて發表の筈。

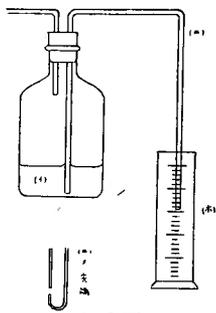
の大部分を占め、學問上「砂」と稱せられる部類に入る。其の質は純然たる火山灰で而も殆んど變質して居ない。形も角張りたるもの多く、間々幾分圓味を帯びたるものや、透明にして劈開に圍まれた結晶粒子を混じて居る。故にこの黑色沈澱物は爾後火山砂と呼ぶことにする。肉眼で見ても明かに砂質である。河底の轉流砂とも亦全く同質同大である。

次に赤色沈澱物は、肉眼では只一樣に赤褐色を呈するのみで個々の粒子を分別することは出来ないが、檢鏡すると粒徑 0.0025~0.050mm の圓味を帯びた粒子から成り、中にも徑 0.005~0.02mm のものが最多數を占めて居る。特に徑 0.0025mm 程度のもは數個集合して一團をなし透明である。又徑 0.005mm 以上のものは各獨立に存在し一般には透明であるが、劈開に圍まれた結晶質のものや黒色で圓味を帯びたものなども混じつて居る。兎も角此の程度の直徑の粒子は學問上「泥」と稱せらるゝ部類であつて、而も其の成因は火山灰の腐蝕變化したものに相違ないから、吾々はこの赤色沈澱物を火山泥と呼ぶことにする。

之を要するに、黒川の濁りをなす浮游物質は粒徑の全く違つた二種類より成り、徑 0.15 mm 程度の黒色火山砂と 0.00~0.02mm 程度の赤色火山泥に分けられることが分つた。

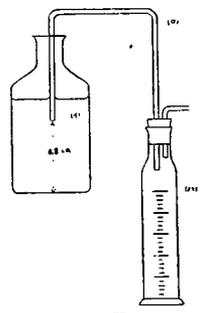
以上の沈澱器による浮游砂泥の定量は簡單迅速であるから、種々の深度より採水測定して、河中の浮游物垂直分布も豫備的には調査したが、大勢を知るにはそれで充分ではあるけれども、詳細の議論をするには誤差が多い。依つて本格的の調査は別に次の様な方法を以て實行した。

本格測定：(i). 第5圖の裝置により、先きに採水した採水瓶(イ)中の上澄水を大部分サイフォン(ロ)で目盛圓筒(ハ)に移す。この際移行した上澄水の體積を V_1 とする。鹽素定量はこの水で行つた。



第6圖
赤色火山泥の大部分を分離す

(ii). 次に瓶(イ)中の殘液を強く振盪した後 120 秒間靜置し、第6圖の裝置によつて赤色泥水の大部分をサイフォン(ニ)で目盛圓筒(ホ)に移す。其の際移行した泥水の體積を V_2 とする。サイフォン(ニ)の尖端は圖の如く盲管となり、尖端から上方 5mm のところに側孔がある。(ニ)の尖端は採水瓶(イ)の底に密着して使用するが、側孔は瓶中の黒色火山



第5圖
上澄水の大部分を去る

砂沈澱層よりは多少高い位置を保つ様になつて居る。従つて粒径の大なる黑色火山砂粒子は少量の泥水と共に(イ)中に残留し、赤色火山泥水のみが(ホ)に分離移行するのである。

振盪後泥水分離まで時間を120秒としたのは、實驗の結果如何ほど強く振盪しても凡そ100秒後は水中に渦を認め得ず、且つ黑色火山砂は沈澱したるからである。

(iii). 泥水分離後の瓶(イ)の殘液は、豫め水に濕したる定量濾紙にて濾過し、濾過水の體積を測つて之を V_3 とする。更に此の濾紙にて(イ)の洗滌水を吸引濾過し、沈澱物は濾紙と共に乾燥・熾灼灰化して秤量する。その重量を M' としやう。

(iv). 上の(ii)で分離した泥水とサイフォン(=)の洗滌水とは之を一括して定量濾紙を以て濾過し、沈澱物は(iii)同様に處理し、秤量して得た重量を m' とする。

(v). 以上の結果から、採取資料水中の浮游砂泥濃度を次の如くして算出する。

採取資料の全體積 V は
$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

採取資料中に含まれた黑色火山砂の量を M とすれば

$$M = M' - m'V_3/V_2$$

∴ 原水中の火山砂濃度 $= M/V$

又採取資料中に含まれた赤色火山泥の全量は之を m とすれば、

$$m = m' + m'V_3/V_2$$

∴ 原水中の火山泥濃度 $= m/V$

5) 流速の測定 浮游砂泥の濃度と河川流速の關係や昇降流と河川流速との關係等をも研究する爲に、流速の測定をも森式流速計を用ひて實施した。但し今の目的には河川横断面に於ける各垂直線上の平均流速を知ればよいから、吾々は黒川の觀測横斷線に就いて水平間隔1米乃至2米毎に測定を行ひ、水深40糎以上の處では其の8/10と2/10の二點の流速を測つて其の平均を以て垂直線平均流速とし、又水深40糎以下の浅い處では、水深の6/10の點の流速を測つて夫れをそのまま平均流速と見做した。

III. 測定の結果

1. 水温の分布 水温の測定は、將來年變化の研究などを行ふ爲の便宜を考慮し、寶泉橋と名づくる坊中街道より内ノ牧町への入口に當る橋の下で舟を使つて行つた。京大研究用温泉のすぐ前⁽⁹⁾ではあるし、又將來頻繁に實測するときは舟を使はず橋上より簡単に測れ

(9) 野滿隆治：阿蘇内牧に於ける京大研究用温泉の掘鑿と其の地點選定法，本誌本號，1頁。

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

るからである。橋脚はコンクリート製舟型のものが只二つ岸壁すれすれに設けられて居て、其の間は極めて規則正しい水路をなして居ることも、河水温分布の性質を窺ふには好適である。脚間隔は約10米である。

昭和16年7月20日15時より16時50分の間に2米間隔で測定した結果は第1表の通りであった。

第1表 黒川水温分布 (気温=24.0°)

観測点		右岸橋脚よりの距離 (m)				
		1	3	5	7	9
水面より (cm)	0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
	10	23.0	22.8	23.0	23.0	23.0
	40	23.0	23.0	23.0	23.2	23.0
	70	—	—	23.0	23.0	23.1
全深度 (cm)		49	52	76	82	78

又表面だけは更に綿密に1米間隔で測つて見たが第2表の如くである。

第2表 黒川水面温度分布 (気温24.0°)

右岸橋脚より距離 (m)	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10.2 (左橋脚より) 0.1
表面水温	23.2	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.1	23.2

以上の結果を見るに、河川の水温は上下均一で(1)式を満足するばかりでなく、横にも同温度で河の横断面全體が均一水温を呈することが分る。之は渦亂流で上下一様にされる上に、気温によつて表面水温が又一様にされやうとする作用が働くからである。此の日は夏の午後であつたから水温の方が気温 24.0 よりは 1° ほど低かつたが、兎も角表面條件が気温によつて一定されることが了解出来る。

只橋脚の近傍 10 纏程度では兩岸とも 0.2 ほど高くなつて居るが、之は夏日の日照を受けてコンクリート橋脚が温まり附近の水に熱を附與する爲と思はれる。同様に洲のある川や河底湧泉のある川では、その附近若干だけは温度が均一でないこともあるであらう。然しさう云ふ異常のない川なら、横断面上全部均一温度となるべきことが吾々の實測から結論されるのである。

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

2. 溶解物質の分布 溶解物質や浮游砂泥分布は後に河川の横流問題に利用したい希望があるので、観測横断線を一つは河の彎曲部に、一つは直線部に選定した。彎曲部としては前記寶泉橋の上流約40米の地點を、直線部としては内ノ牧町立温泉⁽¹⁰⁾(No. 25)裏を選んだ。

寶泉橋上流40米の地點に於ける横断面上の鹽素量測定結果は第3表Aの如く、町立温泉裏のそれは第3表Bの通りであつた。

第3表 黒川のCl含有量

A. 寶泉橋上流40米地點横断面(昭和16年7月28日採水)

採水點の位置		Cl量 (mg/litre)	全深度 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)		
2	10	7.8	25
	20	7.6	
	25	7.7	
3	10	7.6	30
	20	7.4	
	30	7.4	
4	10	7.8	30
	20	7.3	
	30	7.3	
6	10	7.3	25
	20	7.1	
	25	7.1	
8	10	7.1	30
	20	7.1	
	30	7.1	
10	10	7.4	30
	20	7.6	
	30	7.4	
12	10	7.6	40
	20	7.4	
	30	7.4	
	40	7.4	
14	10	8.0	35
	20	8.1	
	30	8.0	
	35	8.2	

採水點の位置		Cl量 (mg/litre)	全水深 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)		
18	10	8.2	55
	20	8.2	
	30	8.0	
	40	8.0	
	50	8.0	
19	10	8.8	50
	20	8.8	
	30	8.5	
	40	8.5	
	50	8.4	
20	10	9.2	65
	20	9.0	
	30	8.9	
	40	8.9	
	50	9.0	
	60	8.9	
21	10	8.6	60
	20	8.9	
	30	9.3	
	40	9.2	
	50	9.2	
	60	9.4	
22	10	8.4	60
	20	8.4	
	30	8.2	

(10) 前出(9)参照。

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

16	10	8.0	40
	20	7.7	
	30	8.0	
	40	8.0	

	40	8.0	
	50	8.0	
	60	8.2	

B. 町立温泉裏横断面(昭和16年7月30日採水)

採水點の位置		Cl 量 (mg/litre)	全水深 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)		
1	10	8.0	30
	20	7.8	
	30	7.7	
2	10	8.1	40
	20	8.1	
	30	7.8	
3	10	8.1	40
	20	8.2	
	30	7.8	
4	10	7.7	50
	20	7.7	
	30	8.0	
5	10	7.8	50
	20	7.8	
	30	7.8	
6	10	7.4	50
	20	7.7	
	30	7.6	
7	10	7.8	70
	20	7.6	
	30	7.6	
8	10	7.7	50
	20	7.8	
	30	7.8	
9	10	7.8	40
	20	7.8	
	30	8.1	
10	10	8.9	40
	20	8.8	
	30	8.6	
11	10	9.2	40
	20	9.0	
	30	9.0	
12	10	9.0	35
	20	9.2	
	30	9.0	
13	10	8.9	35
	20	9.2	
	30	9.2	
14	10	8.6	30
	20	8.6	
	30	8.9	
15	10	9.0	30
	20	8.9	
	30	9.2	
16	10	9.3	30
	20	9.2	
	30	9.3	

採水點の位置		Cl 量 (mg/litre)	全水深 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)		
8	10	7.7	50
	20	7.8	
	30	7.8	
	40	7.7	
9	10	7.8	40
	20	7.8	
	30	8.1	
	40	7.8	
10	10	8.9	40
	20	8.8	
	30	8.6	
	40	8.6	
11	10	9.2	40
	20	9.0	
	30	9.0	
	40	8.9	
12	10	9.0	35
	20	9.2	
	30	9.0	
	35	8.9	
13	10	8.9	35
	20	9.2	
	30	9.2	
	35	8.8	
14	10	8.6	30
	20	8.6	
	30	8.9	
15	10	9.0	30
	20	8.9	
	30	9.2	
16	10	9.3	30
	20	9.2	
	30	9.3	

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

是等の結果を見れば垂直分布圖を畫くまでもなく、鹽素量は同一垂直線上では殆んど均一で (1)式が満足され、上下の差は多くとも全濃度の1/40か1/50を出でない。而もその僅少な差すら、之は測定の誤差でもなければ (1)式の不備でもなく、河川に横流が實在する證據となるのであるが、夫れは後節に譲る。

只茲に一言注意して置きたいことは、河川の溶解物質が上下には殆んど均一なのに拘らず、横には随分差があつて(第11圖参照)、7 mg/lit. から 9 mg/lit. にも變り其の差が全濃度の1/4にも及ぶことである。水温は横にも均一なのに、同じく(1)式の $w_0=0$ に當る溶解物がさうでないのは何故であらうか。之は水温の場合だと前に述べたる如く、亂流交換作用で上下均一になる上に、表面温度は気温の爲めに一樣にされるのであるが、鹽分の場合には表面を均一ならしむる作用はないからである。否却つて沿岸から汚水の流入などが方々にあつて岸近くと中流部とに差を生ぜしむる原因が働き、横の亂流交換によつて多少は均一化に努めるけれども、川の幅は深さに比して著しく大であるから、上下を均一にする時間位では横にも水深に比較し得る程度の距離しか亂流による均一作用は及び得ないのである。

3. 浮游砂泥の分布 前記二断面上に於ける浮游砂泥を砂と泥とに分離測定した結果は、第4表の様な濃度を示した。火山砂に比し火山泥は桁違ひに少ないから、前者は水1リットル中の cg 數を、後者は mg 數を以て表はすことにした。

第4表 黒川の浮游砂泥量

A. 寶泉橋上流40米の地點横断面(昭和16年7月28日採水、數日來降雨なし)

採水點の位置		水1リットル中の浮游物量		全水深 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)	火山砂 (cg)	火山泥 (mg)	
2	10	4.59	13.0	25
	20	6.30	13.8	
	30	3.29	12.0	
3	10	21.84	13.5	30
	20	7.78	12.9	
	30	3.12	10.0	
4	10	27.15	13.2	30
	20	19.84	13.7	
	30	10.26	11.8	
6	10	24.29	12.5	25
	20	11.82	12.4	
	25	6.99	12.2	

採水點の位置		水1リットル中の浮游物量		全水深 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)	火山砂 (cg)	火山泥 (mg)	
18	10	61.55	14.0	55
	20	61.78	12.7	
	30	47.90	13.7	
	40	33.66	15.8	
	50	22.48	11.9	
19	55	11.18	12.1	50
	10	89.10	14.5	
	20	23.52	12.0	
	30	22.71	16.0	
	40	16.75	14.4	
	50	7.87	13.0	
	10	74.70	17.5	

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

8	10	21.16	12.4	30
	20	14.80	12.2	
	30	7.04	15.3	
10	10	39.16	13.0	30
	20	24.10	15.1	
	30	4.98	13.7	
12	10	67.95	16.5	40
	20	62.46	12.7	
	30	44.61	14.4	
	40	12.39	10.5	
14	10	160.58	15.9	35
	20	25.37	12.2	
	30	15.69	16.5	
	35	9.02	12.9	
16	10	83.11	12.4	40
	20	37.62	13.0	
	30	33.21	11.0	
	40	23.62	12.1	

20	20	40.35	14.5	65
	30	36.45	15.3	
	40	22.20	14.8	
	50	14.32	12.8	
	60	8.46	13.7	
21	65	2.81	14.3	60
	10	49.86	17.8	
	20	29.46	18.5	
	30	19.97	14.3	
	40	11.23	16.2	
22	50	10.73	15.9	60
	60	3.55	14.1	
	10	11.28	15.7	
	20	5.85	14.7	
	30	6.29	17.4	
	40	4.15	15.5	
	50	4.29	12.6	
	60	3.29	15.3	

B. 町立温泉裏横断面(昭和16年7月30日採水、前日及當日午前小雨あり)

採水點の位置		水1リットル中の浮游物量		全水深 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)	火山砂 (cg)	火山泥 (mg)	
1	10	—	14.3	30
	20	6.54	—	
	30	3.73	13.6	
2	10	36.69	13.0	40
	20	11.52	16.5	
	30	8.20	14.8	
4	40	2.97	14.4	40
	10	59.60	13.6	
	20	20.95	16.0	
3	30	22.48	15.7	40
	40	7.02	13.1	
	10	45.18	19.1	
20	34.34	16.9		
30	20.30	13.1		
40	26.68	12.6		
4	50	7.91	14.5	50
	10	39.39	14.9	
	20	34.50	16.1	

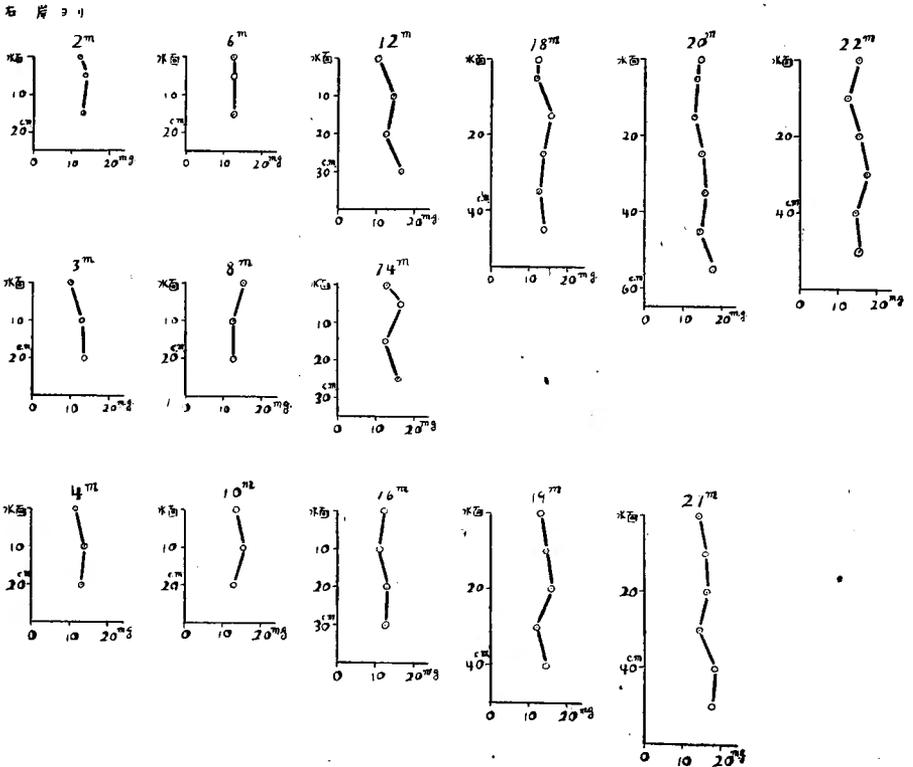
採水點の位置		水1リットル中の浮游物量		全水深 (cm)
右岸より (m)	底面より (cm)	火山砂 (cg)	火山泥 (mg)	
8	10	70.10	14.9	50
	20	34.86	11.6	
	30	42.63	13.6	
	40	64.09	16.5	
	50	6.69	14.1	
9	10	31.58	16.1	40
	20	12.09	13.0	
	30	11.75	10.5	
4	40	4.64	13.1	40
	10	54.99	15.4	
	20	20.67	14.1	
10	30	16.05	13.4	40
	40	5.63	13.1	
	10	34.00	14.5	
20	41.62	14.8		
30	26.86	15.7		
40	5.23	12.6		
11	10	49.93	16.2	40

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

5	30	34.44	12.5	50	12	20	25.12	15.6	35		
	40	19.79	14.2			30	13.73	15.4			
	50	8.12	12.9			35	3.36	12.4			
6	10	66.20	15.2	50	13	10	21.00	14.7	35		
	20	38.88	13.9			20	18.57	15.1			
	30	43.64	15.7			30	11.45	12.8			
	40	41.46	12.3			35	3.52	12.0			
	50	6.16	14.0								
7	10	163.32	17.8	70	14	10	46.68	15.1	30		
	20	121.62	19.0			20	30.38	15.2			
	30	64.20	16.9			30	2.62	14.1			
	40	57.01	15.7			15	10	15.37		15.1	30
	50	70.80	13.9				20	18.59		13.8	
	60	43.37	14.2				30	6.81		11.9	
					16	10	11.53	16.0	30		
						20	14.42	12.7			
						30	4.26	13.5			

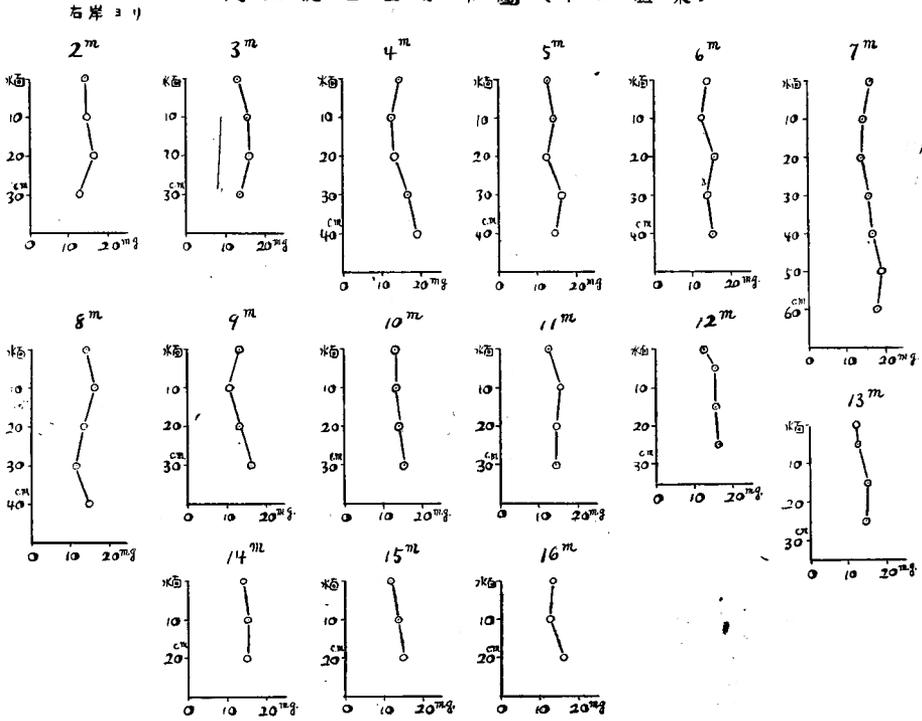
第7圖 細泥の垂直分布特性(第一断面)

火山泥垂直分布圖(宝泉橋)



第8圖 細泥の垂直分布特性(第二断面)

火山泥垂直分布圖(甲立温泉)



以上のデータにより、先づ砂泥の垂直分布を検討しやう。

赤色火山泥は表を見たゞけでも略々上下均一に近いことは分るが、圖にすれば第7—8圖のようになる。上下に於て多少の差はあるが、上層が多いとも下層が多いとも云へず、平均的には寧ろ上下均一といふ方が真相に近い。之は此の細泥が極めて微粒で其の沈降速度が甚小なる爲であつて、(1)式の満足されることを示すものである。溶解鹽素ほどに規則正しくないのは、Clに對しては完全に $w_0=0$ であるけれども、細泥に於ては w_0 が小さいながら完全には零でないから當然のことである。尙第7—8圖の多少の不規則には矢張り横流の影響が加味されて居ることも確かである。又水平的にも泥の差は微少であつて、其點は水溫分布に類しCl分布と異なる。底質が從つて m_0 が略ほ一定に制約される爲と思はれる。

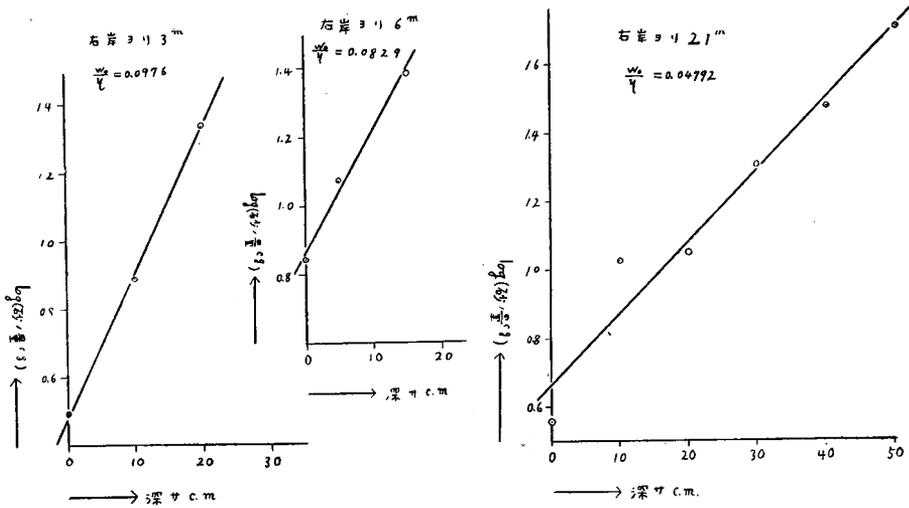
火山砂の垂直分布は明かに表層に少く底層に著しく多い。(1)式に於て亂流交換係數 η は上下違ふかも知れぬが、其の平均を使つて上下一定と假定すれば

$$m = m_0 e^{-\frac{w_0}{\eta} z} \quad (2)$$

となり、浮砂の垂直分布は完全な指數函數となるわけである。所で黒川の火山砂につき深さ z と砂量の對數とを對比すれば、第9圖の如く事實直線配列となるのが多い。その様な

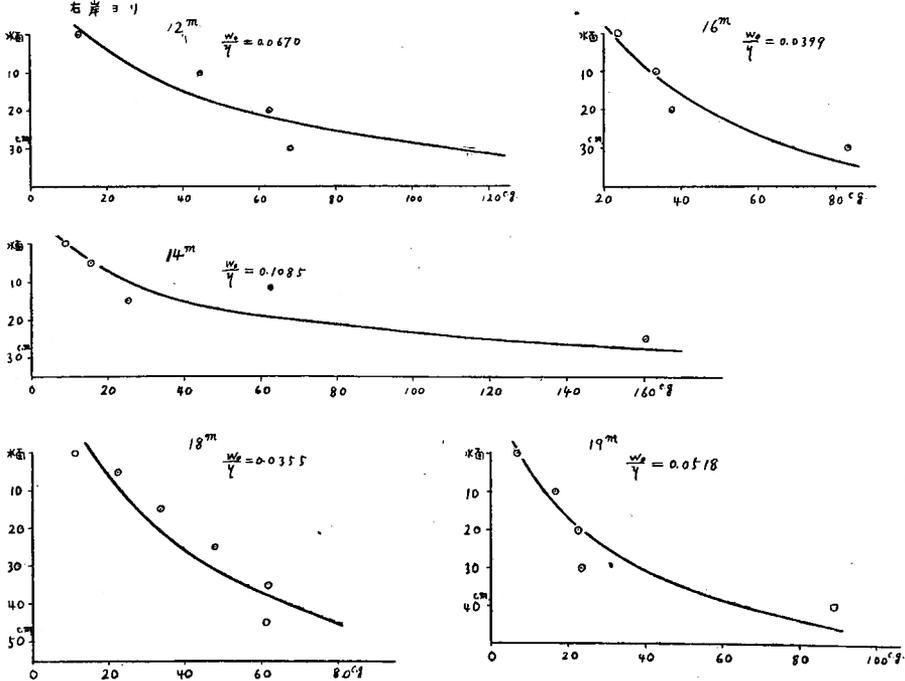
河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

第9圖 黒川の浮砂量の對數と深さとの關係(寶泉橋附近)



第10圖 黒川浮砂の垂直分布二三の例

火山砂垂直分布圖(空泉橋)



直線の傾角から w_0/η を各垂直線毎に求めて、(2)式に従ふ分布曲線を描くことが出来る。かくして求めた w_0/η 及び $w_0=1.5\text{cm/sec}$ として出した η は次表の如くである (c. g. s.)

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

單位)。ηは浅い處に小さく、深い處に大きい傾向はあるが、大體20~40 (c. g. s.) の程度である。只兩岸1~2mの間は岸の摩擦によつて渦流が多くηも飛び離れて大で70~100にもなつて居る。又第10圖は黒川寶泉橋上流點の火山砂垂直分布の實測値(小圓)と、(2)式

右岸 より (m)	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	19	20	21	22
w_0/η	0.0145	0.0976	0.0485	0.0829	0.0554	0.1029	0.0670	0.1085	0.0399	0.0355	0.0518	0.0514	0.0479	0.0214
η	101	15.6	30.9	18.1	27.1	14.2	22.4	13.8	37.6	42.2	28.9	29.2	31.3	68.1

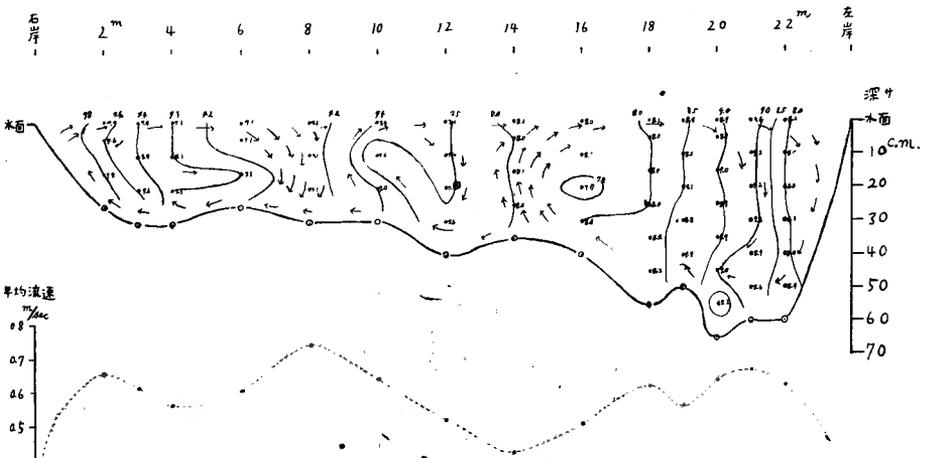
に従ふとしての理論値(曲線)とを對照したものである。大體に於て理論と實際とは一致して居る。多少の相違があるのは後節に論ずる横流の作用によるもので、測定の誤差でもなければ(2)式が成立せぬ爲でもないことは後にわかるのである。

町立温泉裏の浮砂に就いても大體同様であるから略する。但し、此の場合は前日も當日の午前にも降雨があつて亂流状態が餘り甚だしかつたので、寶泉橋の場合よりも幾らか成績が劣る。蓋し採水の時間が60~90秒では不足で、2~3分位かゝる様にせねば充分には平均状態を與へぬ爲だと思はれる。

4. 溶解物質及び浮游物質の横断面分布と横流 河川の横流は彎曲部に著しかるべきことが想像されるので、黒川の寶泉橋上流地點の横断面はわざと彎曲部に選んだわけである。

第11圖 横断面上のCl分布と横流

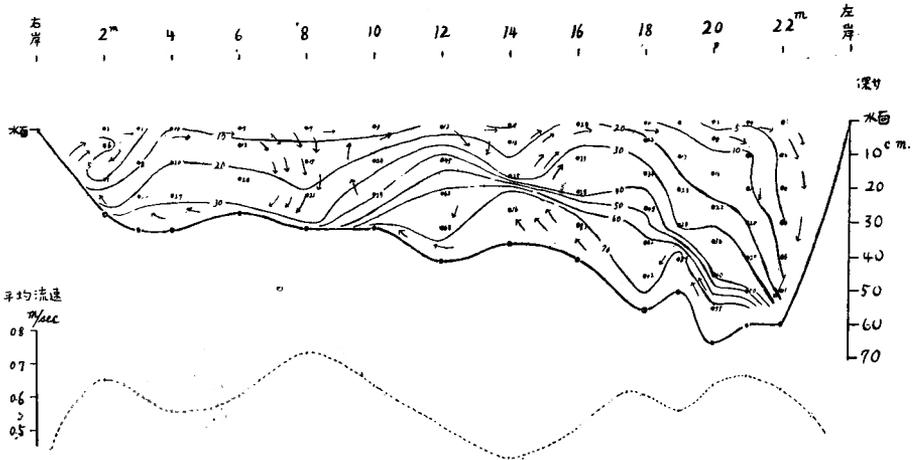
宝泉橋Cl分布圖 横流



河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

第12圖 横断面上の火山砂分布と横流

宝泉橋火山砂分布圖 横流



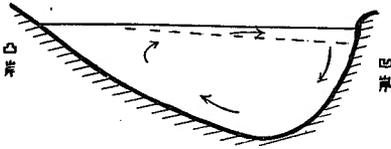
そこで此の断面上の C_1 及び浮游火山砂分布圖を前掲の諸表によつて描いて見るに、第11圖及び第12圖を得る。

河川横流が全くないならば、溶解物質は上下均一なるべきであるから、横断面上の等鹽素線は總て垂直に並行する筈であり、又浮游砂は底層に最多で上層に向ひ指數函数的に遞減すべきであるから、横断面上の等砂量線は大體河底に平行な水平線に近い筈である。第11—12圖の大勢は事實それに近いのではあるが、多少の異状が明かに認められる。鹽素に就いては、海洋學上に鹽分分布から海水の循環を判定する如く、等鹽素線の舌狀に延びて居る處は河水がその方向に運動するものと考へると、第11圖中の矢符の様な横流や昇降流が存在すると推定してよい。又浮游砂に就いても同様であるが、特に等砂量線が下に彎入して居る處は下降流があり上方に彎曲して居る處は上昇流があると考へてよいから、矢張り第12圖の矢印の様な横流昇降流が推定せられる。

抑も理想的な規則正しい川なら、彎曲部の横断形状は凹岸に深く凸岸に浅い三角状をなし、横流は第13圖の如く表面では凸岸より凹岸に向つてそこで下降し、底層では凹岸より凸岸に向つてそこで上昇する一つの循環系統が豫想せられる。吾々の黒川断面でも全體としては確にその様な系統が第11—12圖によつて認められる。此の断面では黒川は上流より下流へ右廻りに彎曲して居て、右岸が凸岸に當り左岸が凹岸の處である。

然し黒川の河床は圓滑な三角状ではなくて圖に見る様な相當の不規則がある爲か、横流

河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流



第 13 圖

循環は上記の一般系統の上に、更に三つの循環系統が加味されて居るのである。即ち (i) 右岸より 8m までの間と、(ii) 9m から 13m の間と、(iii) 14m から左岸までの三區に、夫れ夫れ一つ宛の循環系統がある。

而して岸に近い兩側の二つが特に著しく中央部のは弱勢である。尙ほ茲に注意して置きたいことは、著しい下降流のある處が右岸より 8 米の附近と左岸近くの二箇所で、著しい上昇流は右岸近くと 14m の附近二箇所にあることである。之は河川流速の分布と密接な關係あることは次節に譲る。

5. 河川流速と浮砂量及び昇降流との關係：採水を行つた同じ断面で、各垂直線上の平均流速を測定した結果は第 5 表の通り 40~70cm/sec である。平均流速としては、既述の如く時間節約の爲、普通行はれる様に浅い處では全水深の 6/10 の點に於ける流速を測り、深い處では全水深の 2/10 と 8/10 の二點に於ける流速を測つて平均した。

第 5 表 横斷線上の平均流速分布

A. 寶泉橋上流40m地點

B. 町立温泉裏

(昭和16年7月28日13時~14時30分)

(昭和16年7月30日13~14時)

前數日降雨なし。

前日及當日午前中小雨あり。

観測點の位置		各點の流速 (m/sec)	平均流速 (m/sec)	全水深 (cm)
右岸より (m)	水面より (cm)			
2	20	0.655	0.655	30
3	30	0.577	0.610	40
	10	0.642		
4	20	0.558	0.558	35
6	20	0.597	0.597	35
8	20	0.732	0.732	30
10	20	0.631	0.631	35
12	30	0.362	0.510	40
	10	0.659		
14	30	0.256	0.409	40
	10	0.562		
16	40	0.392	0.492	50
	10	0.592		
18	40	0.515	0.609	50
	10	0.703		

観測點の位置		各點の流速 (m/sec)	平均流速 (m/sec)	全水深 (cm)
右岸より (m)	水面より (cm)			
1	20	0.428	0.428	35
2	40	0.646	0.680	50
	10	0.714		
3	40	0.745	0.750	50
	10	0.755		
4	35	0.648	0.658	45
	10	0.668		
5	40	0.830	0.861	50
	10	0.891		
6	35	0.722	0.734	45
	10	0.745		
7	40	0.516	0.570	50
	10	0.624		
8	30	0.694	0.702	40
	10	0.709		
9	20	0.682	0.682	35
10	35	0.659	0.652	45
	10	0.645		
11	30	0.507	0.648	40
	10	0.789		

、河川の横断面に於ける鹽分並に浮游砂泥の分布と横流

19	45	0.518	0.545	55
	10	0.571		
20	45	0.597	0.625	55
	10	0.652		
21	50	0.551	0.653	65
	15	0.755		
22	50	0.579	0.610	65
	15	0.640		

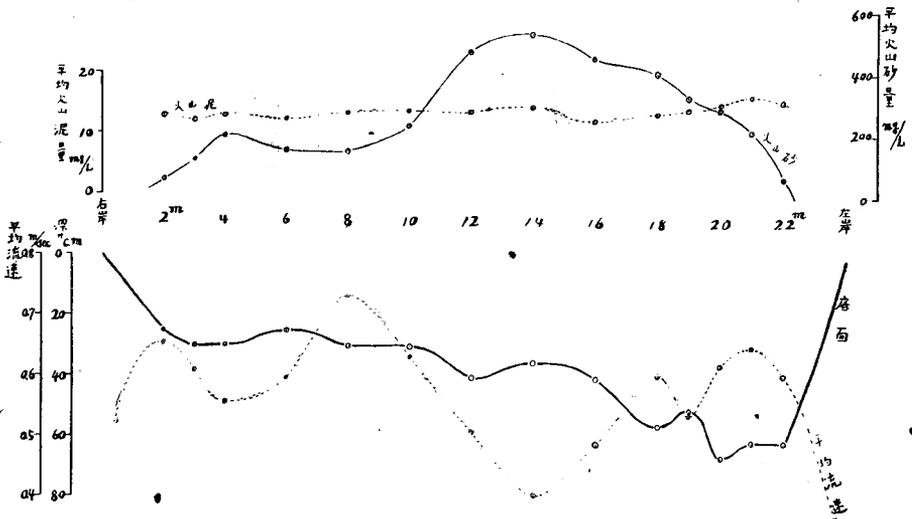
12	20	0.704	0.704	35
13	20	0.653	0.653	35
14	20	0.672	0.672	35
15	20	0.386	0.386	35
16	20	0.470	0.470	30
17	15	0.555	0.555	25
18	10	0.415	0.415	20

此の表による寶泉橋上流横斷線上の流速分布狀況は第11—12圖の下部に示してある。兩岸の摩擦により岸にすりすりは流速が遅くなるのは云ふまでもないとして、下降流のある處は平均流速が大きく上昇流のある處は小さくなつて居るのが目を惹く。之も當然の理で、一體に流速は表層に速く底層に小さい筈であるから、下降流があれば比較的速い水を下まで運び自然と其處の平均流速を大にし、上昇流があれば底層の遅い水を上部まで運び其處の平均流速を小ならしむるのである。實はそう云ふ考へをも加味して第11—12圖の横流循環系統を描いたのであつた。

此の考へが正しいことは、横斷線上の平均流速の分布と平均浮砂量の分布とを對照すれば

第14圖 横斷線上に於ける平均流速と平均浮砂量の關係

平均流速 平均火山砂量 平均火山泥量 (寶泉橋)



ば一層明瞭となる。第14圖は第4表の浮砂量を各垂直線毎に平均して其の分布を流速分布と併べたものである。之によると、流速の大なる處に浮砂量が少なく、流速の小なる處に

浮砂量が多く、普通の常識に反する様に見える。然し良く考へて見るとそうではない。普通に「流速の大なる處が流砂量も多い」といふのは流路の方向に就いて云ふのであつて、同じ一連の水筋に關することである。横断面上の違つた水筋に就いては違つた法則になつても毫も不都合ではない。否寧ろ第13圖の如く平均流速と平均浮砂量とが相反關係にあることが、昇降流の存在を裏づけるものとして吾々には非常に興味深い事實なのである。といふのは、浮砂は元來底層に多く上層に少ない筈であるから；上昇流のある處は當然比較的上まで砂が運ばれ平均浮砂量は多くなる。然るに上昇流は其處の平均流速を小ならしむることは前節にのべた所である。従つて上昇流は平均浮砂量を大にし平均流速を小にする。同様に下降流は平均浮砂量を小にし平均流速を大にする。かくして、河川の横断線上では平均流速と平均浮砂量とが相反關係を示すこととなるのである。

細粒の火山泥は上下均一分布で而も底質亦略々均一であるから、昇降流の存否には無關係で、水平的にも略ほ變化がない。

6. 黒川の流水量と流砂泥量 寶泉橋上流と町立温泉裏の二断面につき、幅1~2米毎に區切り、各區の平均流速に其の面積を乗じて其の區の流水量とし、之等を總計して全断面の流水量を求めた。

又各區間の浮砂及び浮泥含有率平均値を求め、之に其の區の流水量を乗じて總計し、全断面の砂泥流量を算定した。第6表はその結果である。水量は下流の方が却つて少く途中から地下水涵養に一部を費消されて居るが、砂泥は下流が多いから途中に多少洗掘が行はれて居ると見ねばならぬ。

第6表 黒川の流水量及び砂泥流量

断 面	水 流 量 (m ³ /sec)	火山砂流量 (gr/sec)	火山泥流量 (gr/sec)
寶泉橋上流	4.97	1246	69
町立温泉裏	4.67	1337	71

IV. 結 論

以上の要點を摘記すれば

1) 吾々は阿蘇黒川で、二つの横断面上に於ける河水の溫度、鹽素量及び浮游砂泥の分布及び流速を精測し、浮游物の垂直分布理論式

$$m = m_0 e^{-\int \frac{w_0}{\eta} dz}, \quad \eta = \text{交換係數}, \quad w_0 = \text{粒子の沈降速度}$$

を検證すると共に、河川の横流問題に利用した。

2) 水溫は横断面上垂直にも水平にも變りがなく、全部均一である。上下均一なのは上式の $w_0=0$ に相當するからであるが、横にも均一となるのは水面溫度が氣溫によつて一定に制約されるからである。

3) 鹽素量も上下には均一であるが、横には均一でない。即ち溶解物質は $w_0=0$ であるから、それが上下均一といふことは矢張り上式の檢證になる。横に均一でないのは水溫の場合の如く表面を一定に制約する作用が働かず、却つて沿岸より汚水其他の流入があつて變化の原因が働く故である。

4) 黒川の濁りを成すものは平均直徑 0.168mm の黒色砂と 0.005~0.02mm の赤色泥の二種である。赤色泥は沈降速度 w_0 が非常に小さいから矢張り上下には大體均一に分布する。又水平的にも大差なく均一に近い。之は底質がどこも略一様で、従つて m_0 が一定に制約されるからである。又黒色砂は $w_0=1.5\text{cm/sec}$ 程度であるが、其の垂直分布は平均的に理論式を満足する。

5) 浮砂の垂直分布から亂流交換係数を求めたところ、 $\eta=20\sim40$ c. g. s. 程度であつた。只兩岸 1~2m の間は岸の影響で渦多く、 $\eta=70\sim100$ にもなつて居た。

6) 横断面上の鹽素量及び浮砂の分布圖を描いて、横流及び昇降流の存在を確認した。横流の速さを推算したところ 5~20 cm/sec. 程度になつた。

7) 横断線上各點の上下平均流速を測つて、先きの横流昇降流豫察圖と對照し、上昇流のある處は平均流速小に、下降流のある處は平均流速大なることを認めた。之は下降流があれば流速の大なる表層水を下に運んで平均流速を大ならしめ、上昇流は緩速の底層水を上に運んで平均流速を低下するものと解した。

8) 横断線上の流速分布と浮砂量の分布を對比して、横断面上では「上下平均流速の大なる處に浮砂量少く流速小なる處に浮砂量が多い」といふ一見意外の結果を見出した。然し之は實は當然のことで、上昇流のある處は下層の濃厚なる浮砂を上に運んで平均浮砂量を大ならしむると同時に流速を小にし、下降流のある處は浮泥の割合少い而も速さの大なる表面水を下へ運ぶ爲、平均浮砂量を低下し流速を大にする結果であることが分つた。

9) 黒川の二断面に於ける流水量は下流で却つて減少し一部の水は地下水となり、砂泥量は下流に多くなるから、河床の洗掘が行はれて居る事情が明かになつた。

終りに本研究は學術振興會第 4 特別委員會の費用を以て遂行したものである。深く感謝の意を表する。又實測に當つては學生田坂浩、齋藤泰一、汪慶甲の諸君に多大の援助を得た。併せて謝意を述べる。