

河床砂と浮遊砂の粒度組成について

Comparison of Grain Size Distribution of Bed Materials and Suspended Sediments by a Graphical Method

池 田 一 雄*

Kazuo IKEDA

I はじめに

河床堆積物の粒度組成を流水と係わる堆積環境から説明した最近の研究には、井口・目崎(1974a, b), 井口ほか(1977), Middleton (1976)などがある。井口・目崎 (1974b) は Harding (1949) の方法によって、河床堆積物の粒度組成を分析し、河床堆積物の粒度組成には一般に4つの構成正規分布集団(粗粒な方からA集団, B集団, C集団, D集団)が見い出せるとし、各構成正規分布集団の由来を明らかにした。井口ほか(1977)によれば、A集団は surface creep, B集団は saltation, C集団は suspension, D集団は wash load にそれぞれ由来するものである。しかし、実験や河川での実測資料によってそれらを実証した例は、掃流砂からの検討を試みた目崎(1977)の研究の他にはない。

一方、Middleton (1976) は、正規分布集団が互いに“overlapping”するという可能性を示唆した。彼は、資料の精度上の制約から、ある粒径を境としてそれより細粒物はすべて運び去られるというような process を考える“truncation”の立場に立ち、合衆国におけるいくつかの河川の河床砂と浮遊砂の実測資料を用いて、河床堆積物の堆積環境を水理学的に説明した。Middleton (1976) は実際の河川での浮遊砂の浮遊限界を検討し、Einstein (1950) の浮遊砂量の式により、河床砂から浮遊砂の粒度組成を求めて実測資料と比較して

いるが、式から求めた粒度組成と実際の粒度組成との差の説明が充分とは言えない。

筆者は、すでに井口・目崎 (1974a) がある程度試みたように、資料の得やすい浮遊砂に注目し、河床砂の構成正規分布集団のひとつであるC集団と、実際の浮遊砂の粒度組成を比較することによって、井口ほか(1977)がC集団を suspension に由来するとしたことに対する定性的な検討を試みた。

II 資料及び解析方法

本研究に使用した資料の概要を第1表に示す。第1表を含め本研究のために収集した合衆国における資料のすべては、ふるい分けの間隔が1φで、Middleton (1976) や、井口・目崎 (1974a) の指摘のように必ずしも“overlapping”の解析には適していない。しかし本研究にとって、より精度の高い資料は極めて得難い状況にあるので、ここでは上記の資料を敢えて使用することにした。比較に用いた河床砂と浮遊砂は、ほぼ同一地点で、しかもほぼ同時(同日)か、できる限り互いに近い日に採取されたものである。

一対の河床砂と浮遊砂の資料のそれぞれの残留重量%を同一の正規確率紙にプロットし、それぞれの各点が描く曲線について Harding の方法によって構成正規分布集団を分離した。とくに浮遊砂については、狭義の suspension 集団、すなわち河床砂(底層の掃流物質)と粒子の交換が行な

*筑波大学研究員 (アジア航測)

第1表 参考資料の概要 (*1 掃流砂, *2 河床砂, *3 砂丘砂, 飛砂)

河川名	参考文献	位置	川幅(m)	流量(m ³ /sec)	河川の状況
Niobrara 川	Colby and Hembree (1955)	Nebraska 州	3~40	9~15	流域は sand hills で河床は砂床, 一部基盤岩が露出。
Middle Loup 川	Hubbell and Matejka (1959)	〃	20~100	7~22	流域は sand hills で河床は砂床, turbulence flume がある。
Elkhorn 川	Beckman and Furness (1962)	〃	80~90	36~468	調査区間は沖積地で河床は砂床, 流路はほぼ直線。
Mississippi 川	Scott and Stephens (1966)	Missouri 州	520~550	4,536~12,600	河床は砂床で最大礫径-4φ, dune が形成されていた。
Rio Grande 川	Nordin (1964)	New Mexico 州	240~590	44~360	河床は砂床で最大礫径-4φ, dune~plane bed が形成。
〃	Nordin and Beverage (1965)	〃	70~130	15~360	上流は礫床・砂床で pool and riffle をなす。下流は砂床。
Rio Grande Conveyance Channel	Culbertson, Scott and Bennett (1972)	〃	30	20~70	Rio Grande 川に沿う人工水路。砂床で dune~flat bed が形成。
Colorado 川	Sheppard (1961)	Arizona 州	—	—	—
信濃川 *1	日崎茂和 (1977)	新潟 県	600	140~1,930	河床は砂床で河道はゆるやかに蛇行, 洪水時に径-4φの礫が含まれる。
〃 *2	井口・磯部・河村 (1977)	〃	〃	〃	〃
遠州灘砂丘 *3	松倉公憲 (1975)	静岡 県	—	—	—

われる bed material load の集団と wash load の集団との2つの成分より構成されているもの(芦田ほか, 1970など)として, 構成正規分布集団を分離し, より粗粒な集団を狭義の suspension 集団と考へて, 河床砂から分離されるC集団と比較した。

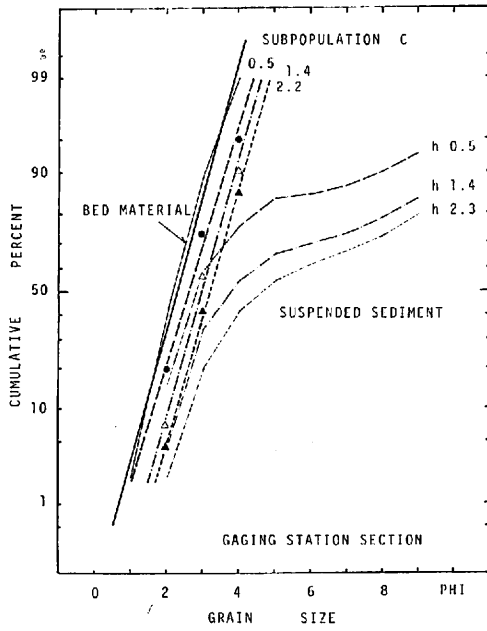
浮遊砂の構成正規分布集団を分離する際に, ふるい分けが4φ程度までしか行なわれていないと, 2つの集団に分離するための混合比を決定する屈曲の変換点の認定が困難であるため, 4φ以下細までふるい分けのなされている同一地点の他の資料を参考にして, 屈曲の変換点の位置を定めて混合比を決定した。なお wash load 集団の粒度組成が十分に把握できないため, 合衆国の資料については分離した正規分布集団を合成して分析結果を確認するという手続きを行っていない。

III 解析結果

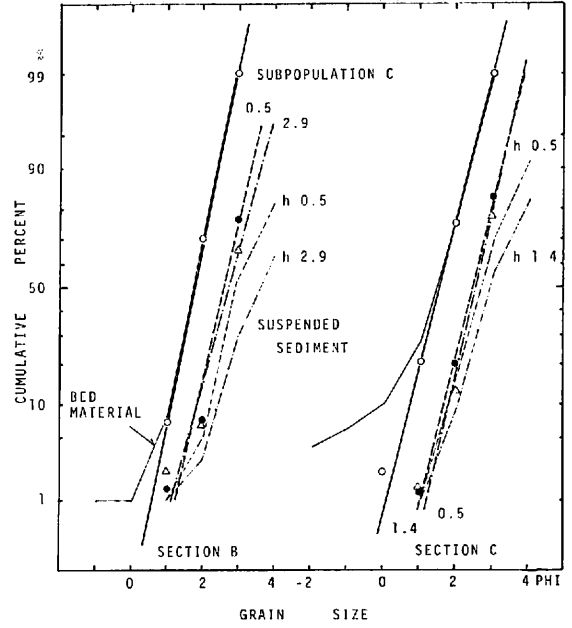
1) point-integrated samples の例

第1図は Niobrara 川 (A), Middle Loup 川 (B), Rio Grande Conveyance Channel (C), Mississippi 川 (D) の4つの合衆国の河川における, point-integrated 法によって得られた浮遊砂の粒径分布の代表的な解析例である。

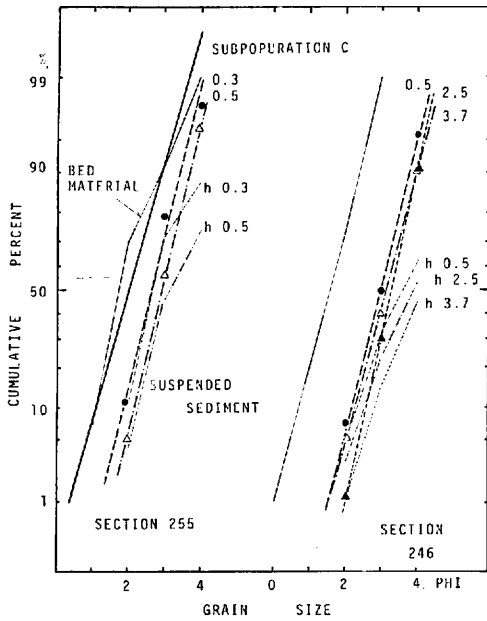
縦軸に残留重量%をとり, 横軸に粒径をφスケールで目盛ってある。細い実線の折れ線は実際の河床砂の粒径分布を示し, 細い長破線, 一点鎖線, 短破線の折れ線は, それぞれ水底から高さ別に採取された浮遊砂の粒径分布を示す。図中の数値は水底からの高さをフィートで示したものである。太い実線の直線は河床砂から集団分離をして求めたC集団で, 太い長破線, 一点鎖線, 短破線の直線はそれぞれ実測された浮遊砂の粒径分布曲線か



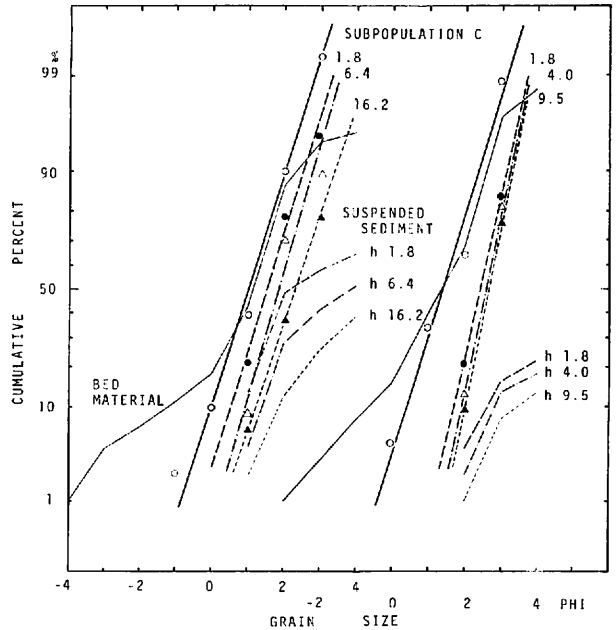
(1A) NIOBRARA RIVER



(1B) MIDDLE LOUP RIVER



(1C) RIO GRANDE CONVEYANCE CHANNEL



(1D) MISSISSIPPI RIVER

第1図 河床砂と浮遊砂の粒径頻度曲線の分析

point-integrated samples の例。図中の数値は水底からの高さ (ft) を示す。資料は次の文献による。A: Colby & Hembree (1955), B: Hubbell & Matejka (1959), C: Culbertson, Scott & Bennett (1972), D: Scott & Stephens (1966)

ら抽出した狭義の浮遊砂集団を示している。以下の記述では井口・目崎(1974a)に従って実際の浮遊砂から得られる狭義の浮遊砂集団をCs集団とし、河床砂から集団分離をして得られるC集団をCb集団として区別する。

分析した合衆国の4つの河川については、Cb集団とCs集団は正規確率紙上ではほぼ平行に近い直線であらわされ、両者の標準偏差はおよそ等しい関係にあるが、Rio Grande Conveyance Channel(第1図C)やMississippi川(第1図D)の右の例のように、Cs集団の標準偏差がCb集団のそれよりも小さいものもある。逆にMiddle Loup川(第1図B)の左の例のように、Cs集団の標準偏差がCb集団のそれよりもやや大きくなる例もある。

Cs集団の平均粒径は一般にCb集団の平均粒径よりも小さく、その差は1φ以内か1φ前後である。このような一般的な傾向からはずれて、Cb集団とCs集団の粒径分布がほとんど一致するものや、Cb集団とCs集団の平均粒径の差が1φ以内であるにも拘らず、標準偏差が大きく異なる例もある。しかしこれらは例外と言ってよく、前述したようにCb集団とCs集団の関係は、およそ第1図に示すような傾向をもっている。

河床からの高さ別のCs集団をみると、わずかな例を除いて、水底に近いほど平均粒径は粗粒となるが、標準偏差の変化は第1図をみてもわかるようにきわめて小さく、変化の傾向は明瞭ではない。

2) depth-integrated sampels の例

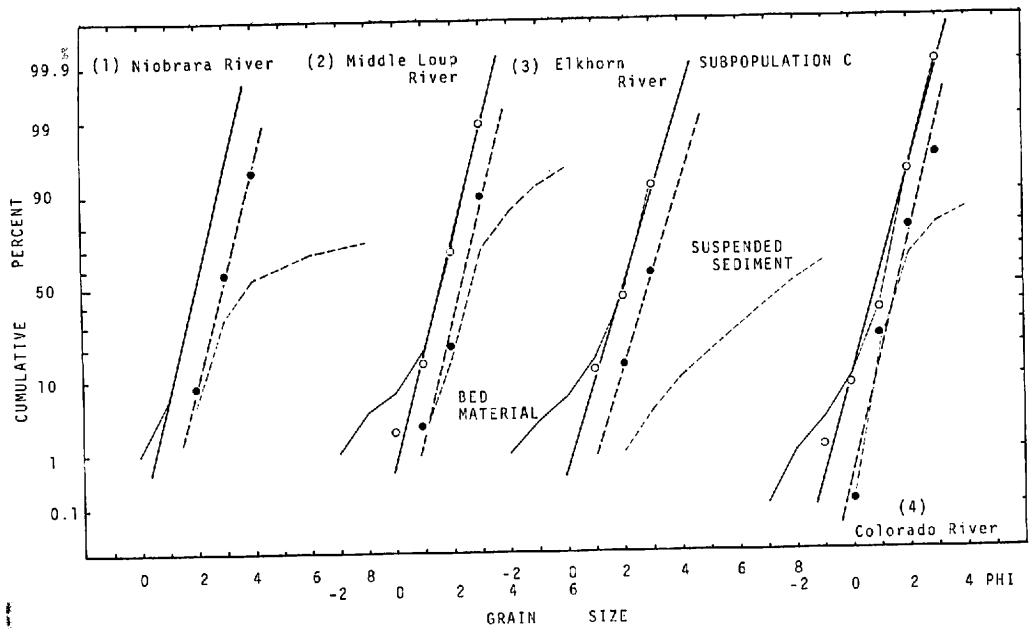
第2図にdepth-integrated法により採取された浮遊砂の粒径分布の解析例を示す。解析に用いた資料は合衆国のNiobrara川、Middle Loup川、Elkhorn川、Colorado川、Mississippi川、Rio Grande川の6河川で得られたものである。point-integrated法の場合と同様に、Hardingの方法によって河床砂からCb集団を、浮遊砂からCs集団を、それぞれ分離し、Cb集団とCs集団を比較すると、標準偏差はややCs集団の方が小さくなるか、およそ等しいという関係が得られた。平

均粒径は本研究で解析したいずれの河川の例でも約1φ程度Cs集団の方が小さい。Elkhorn川(第2図Aの3)では河床砂(細い実線の折れ線)と浮遊砂(細い破線の折れ線)の実測された粒径分布が、平均粒径、標準偏差とも大きく異なるにも拘わらず、分離されたCb集団とCs集団の関係は他の5河川の例とほとんど同様となっている。

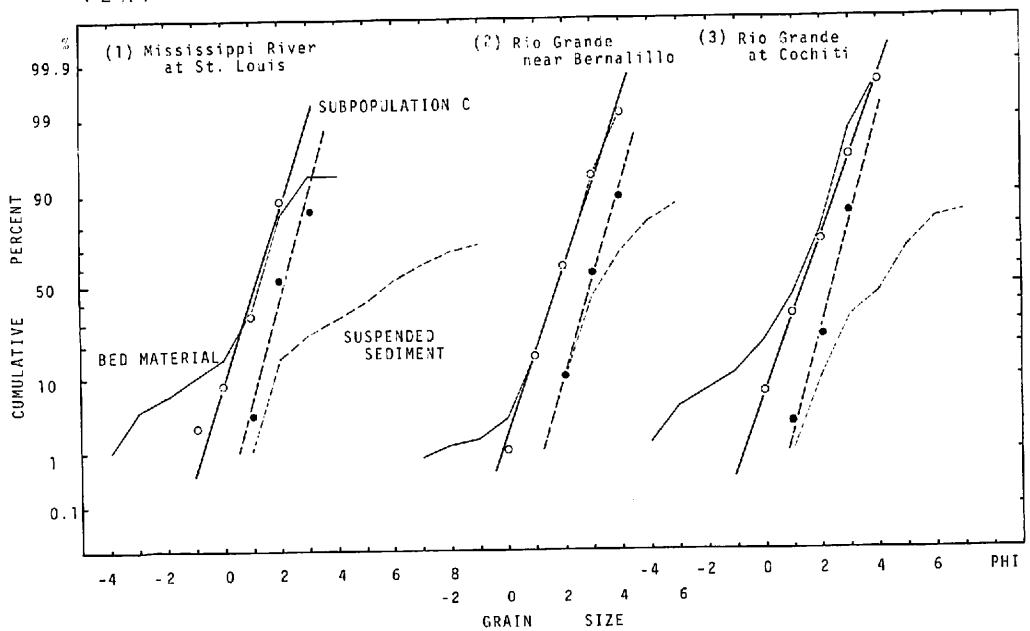
3) 掃流砂から見たC集団

目崎(1977)は信濃川下流部の与板橋(長岡市街地下流約12km)において、昭和49年7月より約4ヵ月間、土研式掃流砂採取器2型により掃流砂を採取し分析して、掃流砂の粒度組成を水理条件から検討した。一方井口ほか(1977)は信濃川与板橋において河床砂を採取し、その粒径分布をHardingの方法によって分析し、平均粒径が0.5~1.5φで標準偏差の小さな集団があることを報告し、その集団がsuspensionに由来するC集団であるとしている。目崎(1977)は掃流砂採取器によって掃流砂として採取された物質の中にも、井口ほか(1977)によって分析された河床砂のC集団に分布の特徴がきわめて類似した集団があり、その集団は、河床面付近を掃流砂(contact load, saltation load)と一体となって移動している浮遊砂に由来するものとしている。

第3図Aは、目崎(1977)によって信濃川与板橋において、掃流砂採取器によって掃流砂として採取された物質の粒径分布の数例と、井口ほか(1977)により分析された同地点における河床砂の粒径分布を、同一の正規確率紙にプロットしたものである。太い実線の折れ線は河床砂を示し、細い実線、破線等の折れ線は掃流砂として採取されたものの粒径分布を示している。土研式の掃流砂採取器ではシルト以細の粒子は河床から引き上げる際に消失する(目崎, 1977)ため、シルト以細の細粒部の粒径分布曲線は、河床面で把えた時の粒径分布曲線からは多少変化していると考えられる。第3図Aをみると河床物質より粗粒なものが洪水時には掃流砂として観測されており、bed load 15, 19ではA集団がかなり明瞭である。又D集団は河床物質も含めすべての試料に含まれているこ



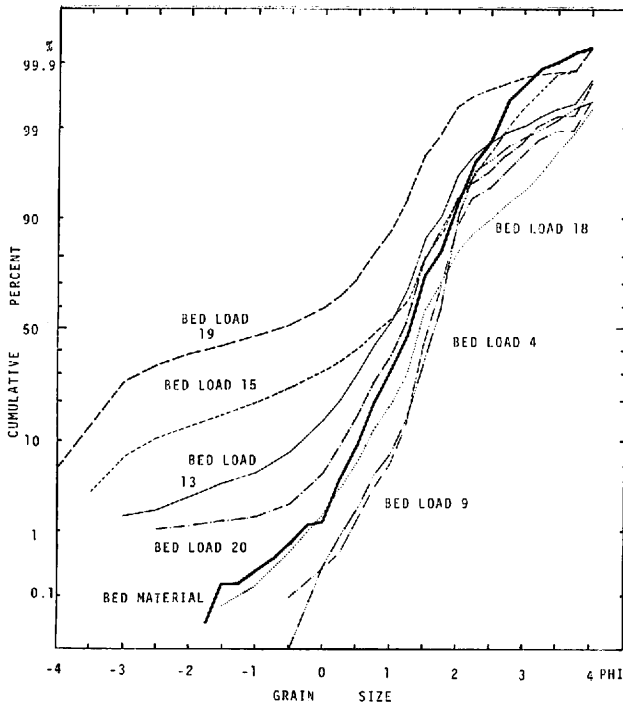
(2 A)



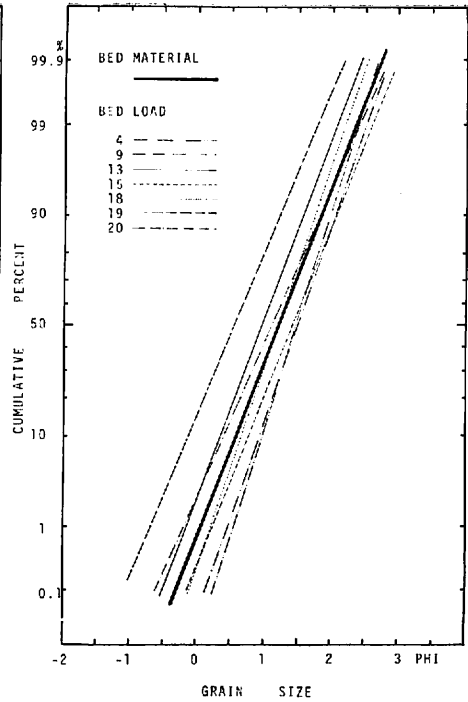
(2 B)

第 2 図 河床砂と浮遊砂の粒径頻度曲線の分析

depth-integrated samples の例。A(1) Colby & Hembree (1955), A(2) Hubbell & Matejka (1959), A(3) Beckman & Furness (1962), A(4) Sheppard (1961), B(1) Scott & Stephens (1966), B(2) Nordin & Beverage (1965), B(3) Nordin (1964)



(3 A)



(3 B)

第3図A 河床砂と掃流砂の粒径頻度分布

信濃川与板橋の例。河床砂資料は井口ほか(1977)、掃流砂資料は日崎(1977)による。

第3図B 河床砂と掃流砂の粒径頻度曲線の分析により分離されたC集団

信濃川与板橋の例。資料は第3図Aと同様。

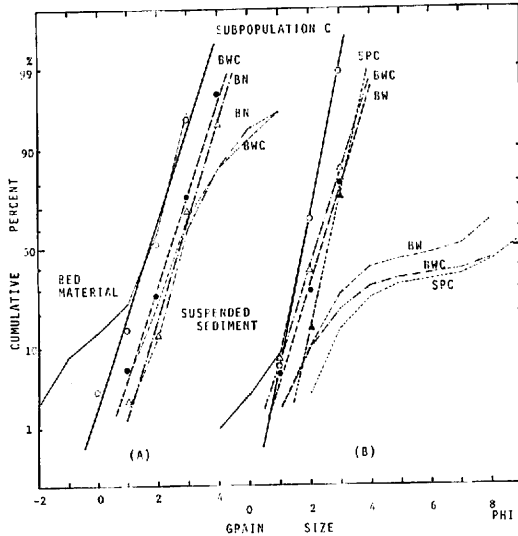
とがわかる。なお bed load 9は単位幅流量が最小であり、bed load 13はそれが最大の例である。bed load 13と15は9月2日に、bed load 19, 20は9月3日とそれぞれ同日に同一横断面の異なる位置で観測された例である。

掃流砂採取器によって掃流砂として採取されたものの中に、河床面を掃流砂(contact load, saltation load)と一体となって移動する浮遊砂が含まれていると考え、この浮遊砂は河床面にきわめて近い部分の浮遊砂であると考えてよいであろう。そこで、第3図Aの粒径分布曲線について、Hardingの方法によって構成正規分布集団に分離した。特に河床砂から分離されるC集団と掃流砂として採取されたものから分離されるC集団に注目し、分離されたC集団のみを図示したものが第3図Bである。第3図Aと同様に、太い実線が河

床砂から分離されたC集団で、細い実線、破線等が、掃流砂から分離されたC集団を示している。第3図Aに示したように、掃流砂や河床砂の粒径分布曲線がかなり異なるにも拘わらず、bed load 19の平均粒径が河床砂の平均粒径より約0.75φ程大きいのを除いて、掃流砂として採取された物質から分離されたC集団と、河床砂から分離されたC集団の平均粒径と標準偏差は、良く一致していると言える。

4) 分離された集団の信頼度

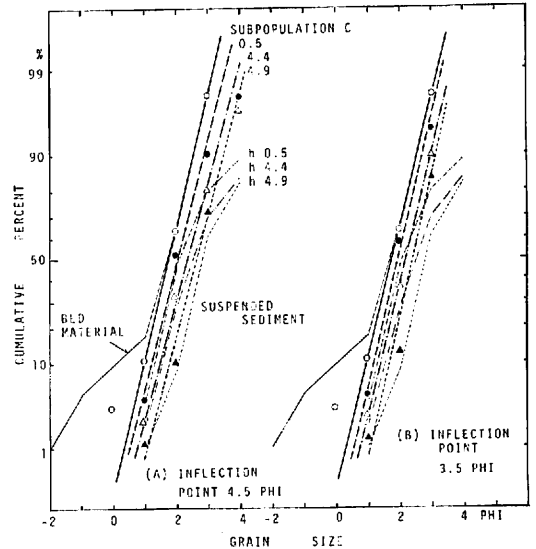
次にこれらの解析の信頼度をみるために、第4図と第5図を作成した。前記した合衆国のNiobrara川の資料には、同一の試料を異なった方法で粒度分析をした結果が記載されている。第4図はこの資料に基づいて作成されている。同図作成の資料は depth-integrated 法により採取された浮遊砂



第4図 異なる粒度分析法による粒径頻度曲線の分析の差異
Niobrara 川 (Colby and Hembree, 1955) の例。図中の記号は粒度分析法を示す。B : Bottomwithdrawal tube, N : in native water, W : in distilled water, S : Sieve, C : chemically dispersed, P : pipette

の資料による。同図(A)の細い破線と一点鎖線の折れ線は、同一の浮遊砂試料をそれぞれ BN, BWC (記号については第4図の説明を参照) という別の粒度分析方法で分析した結果をプロットしたものであるが、折れ線は大体においてよく一致している。第4図(B)は同様に3つの異なった粒度分析法によって同一の浮遊砂試料を分析した結果であり、この場合の粒径分布曲線は大幅に異なっている。これらの折れ線(曲線)から前記した方法で、 C_s 集団をそれぞれ分離すると(A)では標準偏差はおおよそ等しく、平均粒径はわずかに異なり、(B)の例では平均粒径の差は約 0.5ϕ 程で、折れ線からの見掛けよりも値が近似してくる。しかし標準偏差は分析法によってかなり異なっている。

Harding の方法による正規分布集団の分離では、正規確率紙上での粒径分布曲線の屈曲の変換点をまず見い出さなければならない。ところが入手した浮遊砂の資料には微細粒径までふるい分け



第5図 粒径頻度曲線の屈曲の変換点の差による分析の差異
Niobrara 川 (Colby and Hembree, 1955) の例。(A)と(B)の河床砂と浮遊砂(point-integrated法による)の粒径頻度曲線はまったく同一である。

が実施されていないものがあるため、この屈曲の変換点を見い出すのが困難なものがある。第5図はその例でNiobrara川の浮遊砂(point-integrated法による)資料について分析したものである。同図(A)は浮遊砂の粒径分布曲線の屈曲の変換点を 4.5ϕ として分析したもので、細い実線の折れ線は河床砂、細い長破線、一点鎖線、短破線の折れ線は水底から高さ別に測定された浮遊砂を示し、太い実線は河床砂から分離した C_B 集団を、太い長破線、一点鎖線、短破線の直線は浮遊砂から分離された C_s 集団をそれぞれ示しており、図中の数値は水底からの高さ(浮遊砂の採取された高さ)をフィートで表示している。同図(B)は同図(A)とまったく同一の粒径分布曲線から、屈曲の変換点を 3.5ϕ として C_s 集団を分離したものであり、屈曲の変換点の取り方の違いにより(A)と(B)に示すように、分離された C_s 集団の粒径分布に差異が生じる。同図(A)では C_s 集団の標準偏差が C_B 集団のそれと等しいかやや大きく、同図(B)では C_s 集

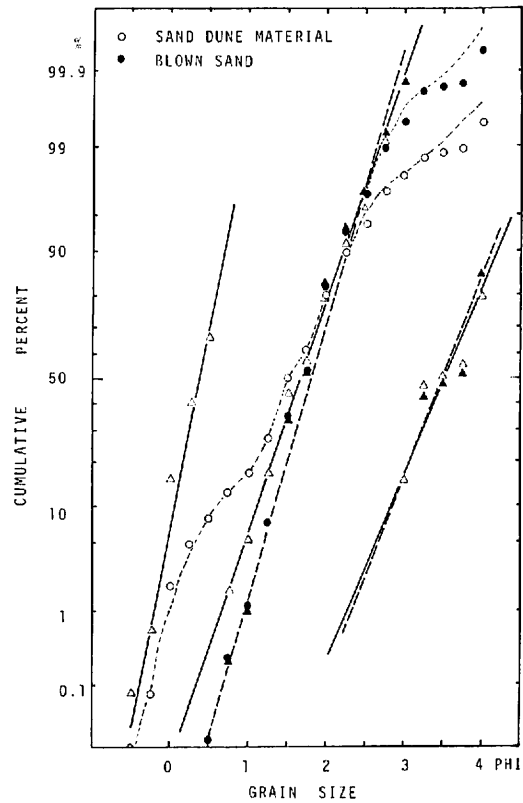
団の標準偏差は C_B 集団のそれよりもわずかに小さくなる。当然のことながら、屈曲の変換点の位置を粗粒にとる程、 C_S 集団は C_B 集団の粒径分布に近づいて来る。

いずれにしてもここで使用している資料では、第4図と第5図に示すような誤差があるものとして結果を検討する必要がある。

IV 考 察

前述したように、粒度分析法や粒径分布曲線の屈曲の変換点の位置によって、分析結果に考慮すべき差異があらわれるが、第1図と第2図に示したように、河床砂から分離した C_B 集団と、浮遊砂の wash load の成分を除いたと考えられる狭義の suspension 集団 (C_S 集団) の粒径分布の標準偏差はほぼ等しい。また、 C_S 集団は C_B 集団よりも細粒で (平均粒径で 1ϕ 前後)、しかも C_S 集団は水底から離れるに従って細粒化するという傾向がある。

第6図は遠州灘砂丘の砂丘砂と飛砂の粒径分布の例 (資料は松倉, 1977による) を示したものである。飛砂 (黒丸印) は、この例では2つの集団 (太い破線) に分離される。砂丘砂 (白丸印) は3つの集団に分離でき、同図の太い実線のようなになる。細い破線は分離した集団を合成して求めた粒径分布曲線である。砂丘砂の最も粗粒な集団 (平均粒径が約 0.5ϕ の集団) は rolling に由来するものと考えられ、約 2ϕ に平均粒径のある集団が saltation に由来していると考えられる。飛砂から分離されたより粗粒な集団 (太い破線で平均粒径が約 2ϕ の集団) と、砂丘砂から分離された saltation に由来すると考えられる集団を比較すると、砂丘砂から分離された集団の方が平均粒径で約 0.2ϕ 、標準偏差でもわずかに大きく、松倉 (1975) はこれを sorting によるためであると述べている。この飛砂の例では、砂丘砂から分離される saltation 集団の方が、飛砂から分離された集団よりも平均粒径、標準偏差ともやや大きくなっており、第2図に示した浮遊砂の depth-integrated samples のいくつかの C_B 集団と C_S 集団の関係



第6図 砂丘砂と飛砂の粒径頻度曲線の分析
遠州灘砂丘の例で資料は松倉(1975)による。

や、point-integrated samples の例 (第1図) の Mississippi 川における C_B 集団と C_S 集団の関係に似ている。

浮遊砂から分離される C_S 集団と河床砂から分離される C_B 集団の粒径分布は、飛砂の例のような傾向を必ずしも示していないが、Niobrara 川の例では第5図(B)に示したように屈曲の変換点を 3.5ϕ とすると C_S 集団の標準偏差は C_B 集団のそれよりもわずかに小さくなる。また平均粒径の値もより C_B 集団に近づき、飛砂の例に示した傾向、すなわち C_B 集団よりも C_S 集団の方が平均粒径、標準偏差ともやや小さくなるという傾向を持つことになる。水路実験ではこのような傾向があることが報告されており (芦田・道上, 1970)、これについては更に資料を増して検討してみた

い。

更に、河床堆積物の運搬や堆積時の状態の推定や考察はいまだ十分な段階ではないが、掃流砂として採取された物質の粒径分布曲線から分離されるC集団を、水底にごく近い部分の suspension に由来する集団であると考え、浮遊砂の粒径分布は、河床面にきわめて近い部分では、河床砂から分離される C_B 集団の粒径分布にきわめて類似していると考えることができる。

V おわりに

以上、河川における浮遊のメカニズムや水理量等の個々の複雑な問題は考慮せずに、狭義の suspension に由来すると考えられる C 集団の粒度組成についての議論を進めて来た。又資料の精度も“overlapping”を解析するには多少の無理があった。しかしながら敢えてそれらの資料を用いて Harding の方法によって、河床砂と浮遊砂から C 集団を分離し比較してみると、両者の間には統一的な傾向があらわれており、C 集団を suspension に由来するとした認定の妥当性がうかがえる。

今後は解析が十分に可能な資料により、浮遊のメカニズムをふまえて、既存の浮遊砂量の式等より C_B 集団と C_S 集団の粒径分布の差異を説明するような定量的な検討が必要であるとともに、wash load の成分についても検討を加えて行く必要がある。

なお本研究は筆者が昭和53年4月より54年3月まで筑波大学地球科学系の研究員として、同大水理実験センターに在籍中に、土砂流出に関する研究の一環として行なったものである。

終りに、本研究を進めるにあたり、終始御指導を賜った筑波大学井口正男先生ならびに有益な御助言をいただいた油田 宏先生、松倉公憲先生、同大水理実験センターの川又良一氏をはじめとする皆様、同大大学院生、前門兎氏に心から感謝いたします。

又研究の機会を与えて下さったアジア航測㈱の皆様、心からお礼申し上げます。

文 献

- 芦田和男・村本嘉雄・今本博健・田中祐一朗・奈良井修二・上野鉄男 (1970) : 大戸川に関する調査研究. 京大防災研究所年報, 13-B, 187-197.
- 芦田和男・道上正規 (1970) : 浮遊砂に関する研究(I). 京大防災研究所年報, 13-B, 233-244.
- 井口正男・日崎茂和 (1974a) : 沖積河川における河床砂れきの粒度組成について(I). 東教大地理学研究所報告, X VII, 25-38.
- 井口正男・日崎茂和 (1974b) : 沖積河川における河床砂れきの粒度組成について(II). 地理評, 47, 545-556.
- 井口正男・磯部豊彦・河村和夫 (1977) : 沖積河川における河床砂れきの粒度組成について(III). 筑波大学水理実験センター報告, 1, 1-15.
- 松倉公憲 (1975) : 遠州灘における砂丘砂と飛砂の粒度組成. 第四紀学会講演要旨集, 4, 19.
- 日崎茂和 (1977) : 信濃川と板橋で観測した掃流砂の粒度組成. 筑大法文学部紀要, 20, 91-131.
- Breckman, & E. W. Furness, L. W. (1962) : Flow characteristics of Elkhorn River near Waterloo, Nebraska. *U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper*, 1498-B, 1-34.
- Colby, B. R. & Hembree, C. H. (1955) : Computations of total sediment discharge, Niobrara River near Cody, Nebraska. *U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper*, 1357, 1-187.
- Culbertson, J. K., Scott, C. H. & Bennett, J. P. (1972) : Summary of alluvial-channel data from Rio Grande Conveyance Channel, New Mexico, 1965-1969. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 562-J, 1-49.
- Einstein, H. A. (1950) : The bed load function for sediment transportation in open channel flows. *U. S. Dept. Agriculture Soil Conservation Service Tech. Bull.*, 1026, 1-79.
- Harding, J. P. (1949) : The use of probability paper for the graphical analyses of polymodal frequency distributions. *Jour. Marine Biol. Assoc., New Series*, 28, 141-153.
- Hubbell, D. W. & Matcjkja, D. Q. (1959) : Investigations of sediment transportation, Middle Loup

- River at Dunning, Nebraska. *U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper*, 1476, 1-123.
- Middleton, G. V. (1976) : Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Jour. Geol.*, **84**, 405-426.
- Nordin, C. F. (1964) : Aspects of flow resistance and sediment transport Rio Grande near Bernalillo, New Mexico. *U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper*, 1498-H, 1-41.
- Nordin, C. F. & Beverage, J. P. (1965) : Sediment transport in the Rio Grande, New Mexico. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 462-F, 1-35.
- Scott, C. H. & Stephens, H. D. (1966) : Special sediment investigations Mississippi River at St. Louis, Missouri, 1961-63. *U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper*, 1819-J, 1-35.
- Sheppard, J. R. (1961) : Total sediment transport in the lower Colorado River. *Proc. A.S.C.E.*, **HY 6**, 139-153.