

濃尾平野の水成堆積砂の物理的性質について

岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 正会員 吉村優治

1. はじめに

風化、侵食、堆積作用は、終わりのない「岩石変化の循環」の一部ではあるが、現時点では地盤の工学的性質を支配しているのは第四紀の地史であり、その中でも特に新しい沖積層に工学的問題の多くが集中している。しかし、この沖積層という語はそれが生成された地質時代とは関係なく、河川営力よる堆積物というのが本来の使われ方である¹⁾。

さて、東海地方に水成堆積平野として広がる濃尾平野は木曾三川(木曾川、長良川、揖斐川)の作用により沖積低地が発達しており、わが国の典型的な沖積平野である。特に洪積台地が広い関東平野などとは異なり、濃尾平野のうち沖積平野部が86%を占め、扇状地地帯、自然堤防地帯、三角州地帯、すなわち沖積平野の3地形帯が、図-1のようにわが国の沖積平野のなかで最も典型的な状態で配列している²⁾。

沖積平野を形成している自然砂は、岩石からの変化の過程(風化→運搬→堆積)でできた碎屑性堆積物であり、原岩の鉱物および岩片の集合である。したがって、現地盤に深および河川敷きに堆積している河川堆積砂の物理的な性質は、母岩の性質およびその河川の源流からの運搬距離あるいは河床勾配などと何らかの関係があることが予想される。しかしながら、これまでに水成堆積砂の物理的な性質を工学的な見地から究明するためになされた研究はほとんど見あたらない。そこで本研究は、濃尾平野の水成堆積砂の基本的な性質(粒径、粒度分布、粒子形状など)の特徴を明らかにするためにに行った基礎的な研究である。

2. 試料のサンプリング

ある場所の河川堆積物は、河川によってその位置まで運搬堆積された結果を示しており、この結果は現在進行中のもので最終結果とはいえないが、河道

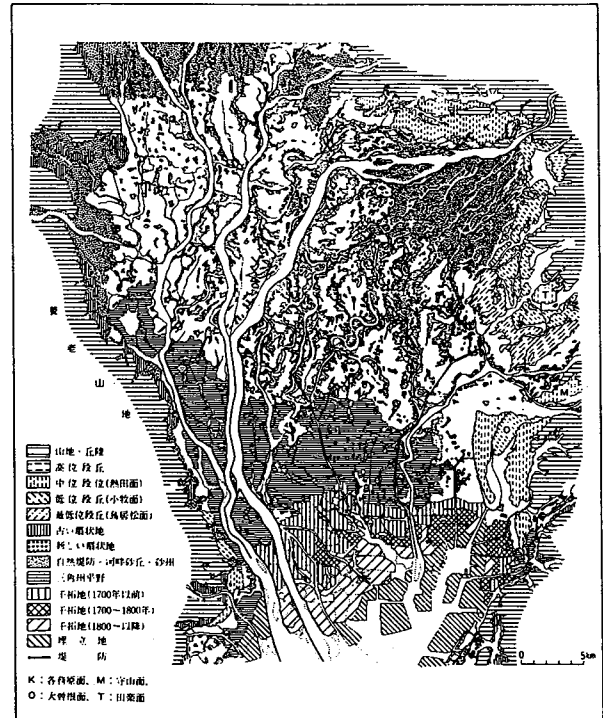


図-1 濃尾平野地形分類図²⁾

が変わったり、新しいダムなどが建設されない限り、その河川におけるある場所の堆積物は一応平衡状態にあると考えられる。

木曾三川については、大がかりな木曾三川水系の治水工事が行われたのは薩摩藩による宝暦治水であり、本格的にはオランダ人工師デレーケによる明治改修工事(木曾三川分流工事)である。したがって現木曾三川河道が定まってから約100年が経過し、堆積物は一応平衡状態にあると考えてよからう。特に長良川は、この規模の川としては日本に珍しいダムのない川であり、ダムの建設されている木曾川や揖斐川に比較すれば完全に平衡状態にあると考えられる。ただし、現時点の長良川は河口堰の建設が進み、同時に河口から15kmにあるマウンドを残して川底の浚渫が進められており、平衡状態にないのが現状である。

Physical Properties of Aqueous Sedimentary Sands in Nobi Plain: Yuji Yoshimura (Gifu National College of Technology: Department of Civil Engineering)

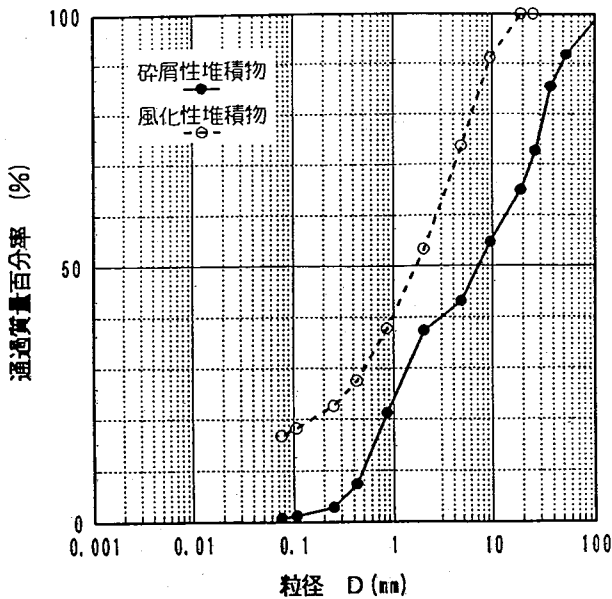


図-2 代表的な粒径加積曲線

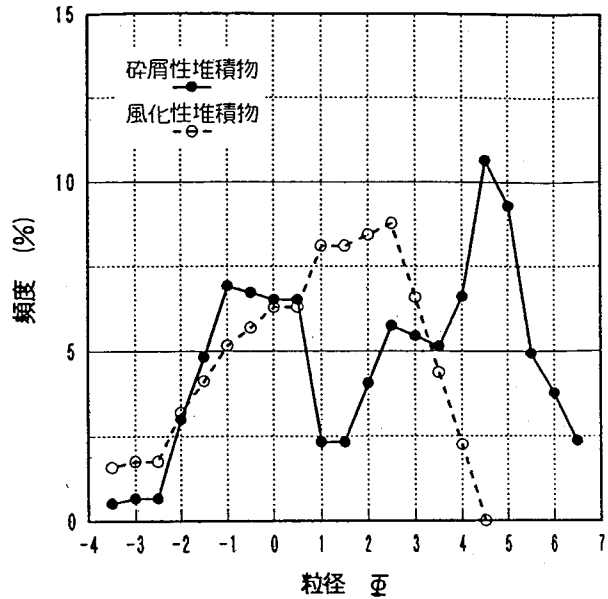


図-3 代表的な頻度分布曲線

また、洪水の度に網上に流路を変えていた約100年前までの河川堆積物と現河道に定まってからの河川堆積物とが同じ性質があるとはいえないが、いずれも濃尾平野の沖積層を構成している河川堆積物であるため、本研究では現河道の河川敷から採取した試料、地表面下にある旧河道の堆積物(以下、陸砂利³⁾という)を含めて分析を行った。

上述したことを考慮し、河川堆積物のサンプリング期間は1987年8月～1992年2月、陸砂利のサンプリングについては1989年9月以降、採取可能な工事現場等で継続中であり、本研究では全部で約170種のサンプリング試料の分析を行っている。

ただし、この種の研究ではサンプリングにあたり採取地点(ランダム性)、採取位置(局所的)、採取量の決定が大きな問題である。たとえば、河川堤防の安定性評価の研究においても、杉井・宇野ら⁴⁾は堤防地点の無作為抽出が難しいとして、特定の条件下でのデータしか得ることができないと述べている。したがって、本研究でのサンプリングは、完全なランダムサンプリングとはいえないが、後述するように河川堆積物の物理的性質を分析しているため、現木曾三川の河川敷の砂の採取可能任意の地点より適量を、また、陸砂利については採取可能な工事現場の任意の深さよりなるべく不攪乱の状態にて採取している。

3. φ尺度の定義と碎屑性堆積物の特徴

土質工学会基準(JSF)⁵⁾の粒径加積曲線は、任意の粒径 $D(\text{mm})$ より小さい(あるいは大きい)粒子が質量換算でどれほどあるかを知るには便利であるが、その土の粒径別の頻度分布を直感的に判断することはできない。これに対して、Krumbein⁶⁾の提唱するφ尺度($\phi = -\log_2(D/1\text{mm})$)を用いた頻度分布曲線は、頻度分布およびモード径(最頻粒径)を知るときには便利であり、さらに天然の碎屑性堆積物の分布が対数正規分布に近い分布状態にあることが知られており⁷⁾、自然土の粒度を検討する際には有効である。ただし、この尺度ではφが大きくなるほど小さな粒径を表しているため、土質工学に携わる者にとってはたいへん扱いにくい。そこで、ここではφ尺度として $\phi = \log_2(D/1\text{mm})$ 、すなわち $D = 2^\phi$ を定義した。したがって、このφ尺度はKrumbein⁶⁾の提唱するφ尺度を用いた頻度分布図のx軸の土を逆にしたものである。

さて、代表的な碎屑性堆積物と風化性堆積物の粒径加積曲線を示した図-2をみると、この両線からは粒径、細粒分含有量の違いが明らかである。したがって、粒径加積曲線からは、粒度分布の良否、中央粒径(平均粒径 D_{50})、細粒分含有量(75 μm 以下の含有量)などの値は容易に読み取ることができる。一方、図-3はこれと同一の試料のφ尺度を用いた

頻度分布曲線を示したものであり、両線の頻度分布の相違が明らかである。すなわち、風化性堆積物の粒度分布は対数正規分布に近い分布状態にあるのに対して、碎屑性堆積物の粒度分布は2つの対数正規分布が合成された分布状態にある。碎屑性堆積物の分布については前述した天然のものは対数正規分布に近い分布状態にあるという報告⁷⁾と異なる結果を示しているが、堆積物の粒度組成は供給物質、運搬・堆積過程などに支配され、せん断応力、じょう乱、流体速度などの微妙な変化に対して敏感であり、単純な対数正規分布をしない場合も多く、このような堆積物は複数の対数正規対数分布集団が集合し、混合された可能性が高いという報告⁷⁾もある。さらに、Spencer⁸⁾によれば、むしろ大部分の碎屑性堆積物は、このような混合物であるとみなされ、淘汰とは、このようないくつかの集団の一部が除去された程度を意味する。この複数の集団の合成による粒度から、もとの正規分布集団を確率紙上で求める方法は、井口⁹⁾に詳述されている。

濃尾平野の扇状地への入り口付近(谷からの出口)の堆積物の粒度分布の特徴については、筆者ら¹⁰⁾が木曾三川の各水系別に約1 tonの試料について行ったふるい分け試験の結果、各水系とも図-3に示される碎屑性堆積物と同様に2つの山(モード)をもつ分布曲線となり、2つの山の凹の粒径は $\phi=1$ ($D=2\text{mm}$)であることがわかっている。また、今回分析した約170種の試料の多くについても2つのモードをもつ粒度分布であり、特に平野部では2つの山の凹の粒径は $\phi=1$ であった。天然の碎屑性堆積物の分布が対数正規分布に近い分布状態にあること⁷⁾から、平野部での2つ山は、大きい方(大モード)が洪水時に運搬されたものであり、小さい方(小モード)が定常的な流れにより運搬・堆積されたものであると考えられる。(もちろん、1つの山しかない試料もあり、また、河川合流部などではさらに複数の山のあるものもあった。)

さらには、河川敷きからのサンプリングでは労力的にせいぜいバケツ一杯程度が限度であるため、特に大粒径の砂礫を含む地点では無作為のサンプリングは不可能に近い。したがって、大モードの分布にはほとんど意味が無く、これは小モードの頻度にも影響を与える。

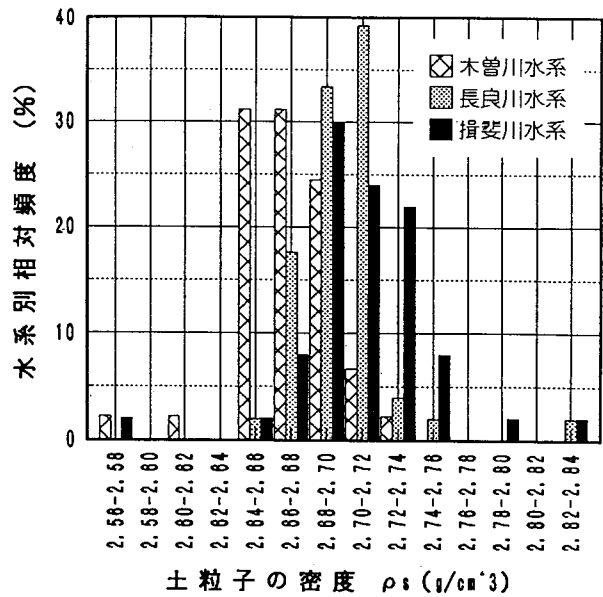


図-4 土粒子の密度の頻度分布

表-1 土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$ の基礎統計量

	水 系		
	木 曾 川	長 良 川	揖 斐 川
平均 値	2.669	2.699	2.709
最大 値	2.736	2.832	2.821
最小 値	2.564	2.656	2.569
分 散	0.00066	0.00069	0.00131
標準偏差	0.02564	0.02618	0.03619
変動係数	0.00961	0.00970	0.01336
歪 度	-1.090	2.585	-0.371
尖 度	5.001	11.056	4.349

以上のことから、図-3にもみられるように定常的な流れにより運搬・堆積された土は2mm程度以下であり、大粒径の砂礫についてはサンプリング上の問題も大きいので、本研究では小モード、すなわち2mm(土質分類の砂)以下の堆積物(以下、砂という)について分析を行った。

4. 堆積砂の物理的性質

(1) 土粒子の密度 ρ_s 。

比重は、砂の構成鉱物によるところが大きいと考えられるが、ここでは土粒子の密度試験方法(JSF T 111-1990)¹¹⁾にしたがって求めた。

木曾三川の各水系別の ρ_s の相対頻度分布図を図-4に、その基礎統計量を表-1に示す。水系によって若干平均値が異なるものの、各水系とも ρ_s の分布は正規分布よりもかなり尖った分布の形をして

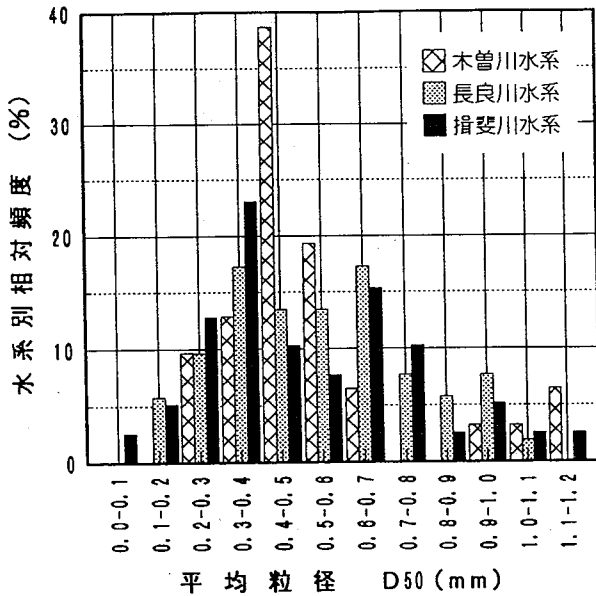


図-5 平均粒径の頻度分布

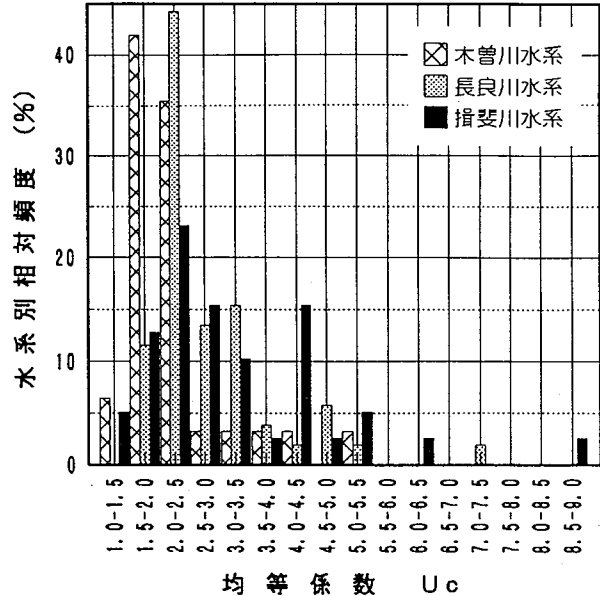


図-6 均等係数の頻度分布

表-2 平均粒径 D_{50} (mm)の基礎統計量

	水 系		
	木曾川	長良川	揖斐川
平均値	0.527	0.540	0.502
最大値	1.170	1.080	1.120
最小値	0.200	0.175	0.095
分散	0.05509	0.05314	0.06394
標準偏差	0.23470	0.23052	0.25287
変動係数	0.44506	0.42720	0.50323
歪 度	1.494	0.384	0.579
尖 度	1.652	-0.647	-0.276

表-3 均等係数 U_c の基礎統計量

	水 系		
	木曾川	長良川	揖斐川
平均値	2.224	2.775	3.356
最大値	5.077	7.037	12.051
最小値	1.365	1.727	1.043
分散	0.65504	1.00531	4.15226
標準偏差	0.80934	1.00265	2.03771
変動係数	0.36390	0.36134	0.60724
歪 度	1.998	2.022	2.373
尖 度	3.750	4.771	6.949

いるといえる。これは水系上流の地質の違い、すなわち堆積砂の構成鉱物の違いによるものであると考えられる。

(2) 粒径

土質の分野では、質量換算で粒径分布の中央値を平均粒径 D_{50} と呼び、たとえば、液状化強度の補正¹²⁾などに利用されており、ここでも D_{50} を集合体である砂の大きさを代表する量とする。

木曾三川の各水系別の D_{50} の相対頻度分布図を図-5に、その基礎統計量を表-2に示すが、各水系とも D_{50} の分布はほぼ正規分布の形をしているといえる。

(3) 粒度分布

土質の分野では、粒度分布の良否を判断する定量的な定義として均等係数 U_c および曲率係数 U_c' がある。この U_c は粒径加積曲線の傾度を示すもので

あり、 U_c' はこの曲線のなだらかさを示すものである¹³⁾。したがって、ここでは粒径加積曲線の傾度を示す U_c で粒度分布の良否を評価する。この U_c が小さいほど粒の大きさが均等であることを示しており、よく淘汰された砂であるといえる。

木曾三川の各水系別の U_c の相対頻度分布図を図-6に、その基礎統計量を表-3に示す。各水系とも U_c は正規分布に比べて右に裾が長く左に歪み、若干尖った分布の形をしている。

さらに、木曾三川各水系の代表的な粒径加積曲線、頻度分布曲線を示した図-7、図-8から、運搬距離に伴う淘汰の様子が明確にわかる。すなわち、図-7に見られるように、下流の堆積砂ほど粒径加積曲線は左にあり、また曲線は立っているため、砂は下流に行くほど粒径が小さくなり良く分級されている。同様に、図-8に見られるように、下流の堆積

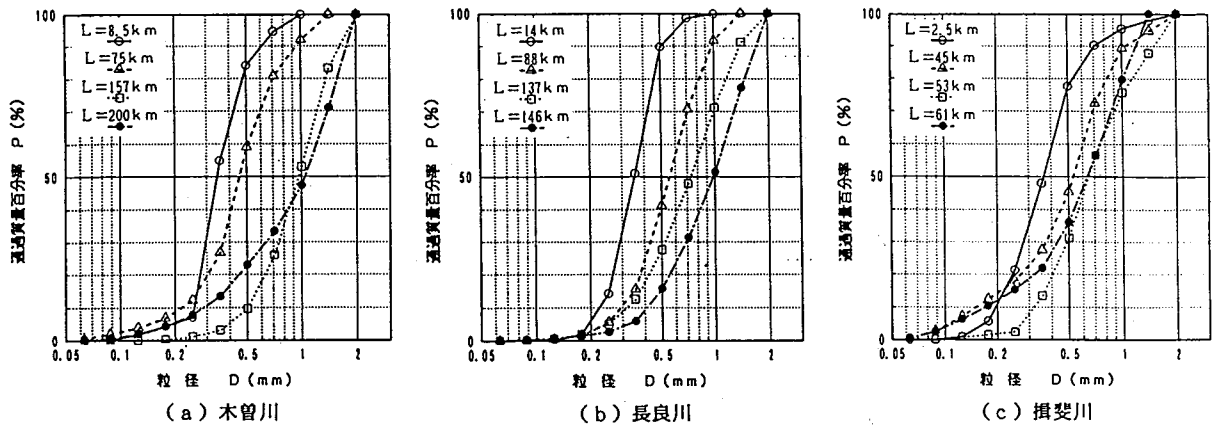


図-7 代表的な試料の粒径加積曲線

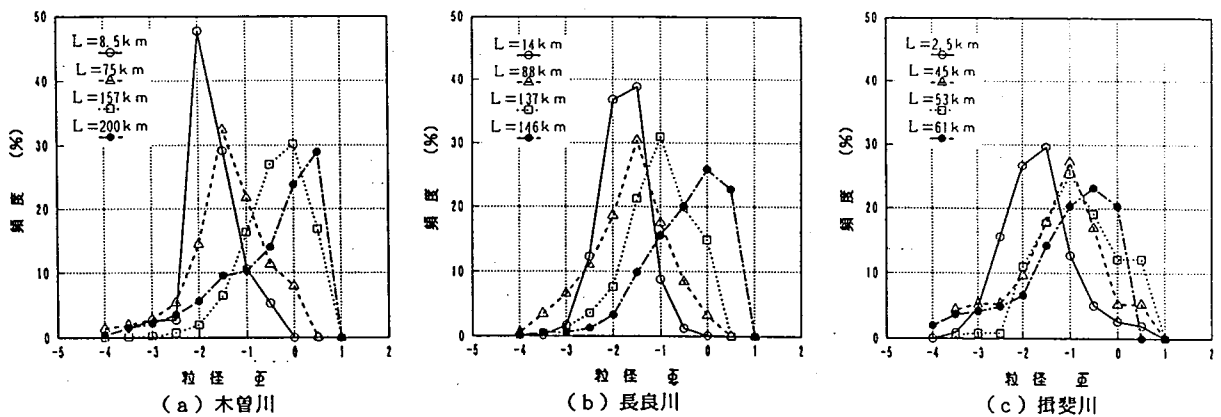


図-8 代表的な試料の頻度分布曲線

砂ほど頻度分布曲線の山は左にあり、またその山は高くなるので、砂は下流に行くほど粒径が小さくなり同一粒径の粒子が多くなる。結果的にはこの両図は、砂の粒子の大きさと分級の度合いという淘汰を違う観点から表しているものである。

(4) 粒子形状

JSFには粒状体の形状を定量化する指標は定義されていない。したがって、ここでは筆者ら¹⁴⁾の提案した凹凸係数 FU を用いて粒子形状を評価する。この FU は、粒子内の直交する三軸を考え、その長軸と中間軸を含むように粒子を投影した断面の外周長を l 、その断面積を a としたときに、

$$FU = 4\pi a / l^2$$

で定義され、粒が完全球(投影断面が円)の場合には1.0で、凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる係数である。

木曾三川の各水系別の FU の相対頻度分布図を図-9に、その基礎統計量を表-4に示す。水系によ

って若干平均値は異なるものの、各水系ともほぼ正規分布の形をしているといえる。

また、図-10は河口からの距離 L に対する FU の変化を各水系毎に示しているが、 L と FU の関係には水系による有意な差はみられず、河口からの距離が長くなるほど、つまり運搬距離が短いほど FU は小さくなり粒子の凹凸の大きいことがわかる。

5. おわりに

本研究では、サンプリングなど多くの問題点を含んでいるものの、木曾三川水系の土粒子の密度、粒径、粒度分布、粒子形状といった物理的性質の頻度分布や基礎統計量が明らかになった。また、集合体である砂の粒径や粒度分布といった淘汰の度合いを見るには土質の分野で使われている粒径加積曲線のほかに頻度分布曲線を利用すると便利であり、しかも頻度分布曲線からは碎屑性堆積物の運搬・堆積の過程を推測することも可能であることがわかった。

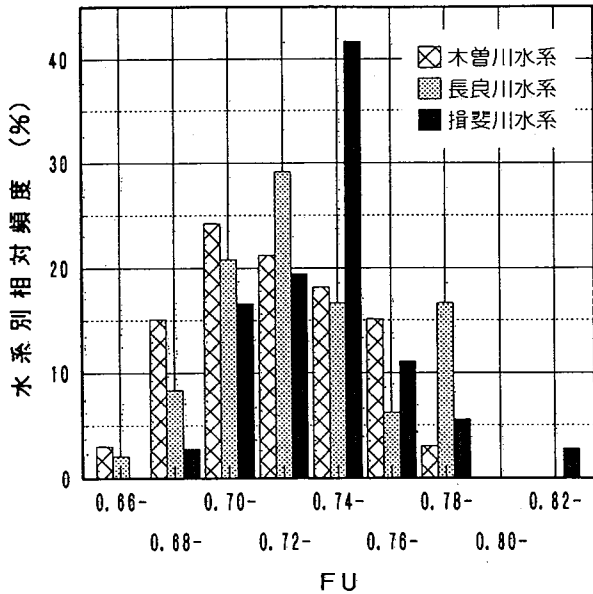


図-9 凹凸係数FUの頻度分布

表-4 凹凸係数FUの基礎統計量

	水 系		
	木 曾 川	長 良 川	揖 斐 川
平均値	0.729	0.737	0.745
最大値	0.789	0.794	0.826
最小値	0.671	0.669	0.699
分散	0.00083	0.00097	0.00072
標準偏差	0.02881	0.03119	0.02682
変動係数	0.03951	0.04229	0.03602
歪 度	0.124	0.148	0.771
尖 度	-0.731	-0.766	0.903

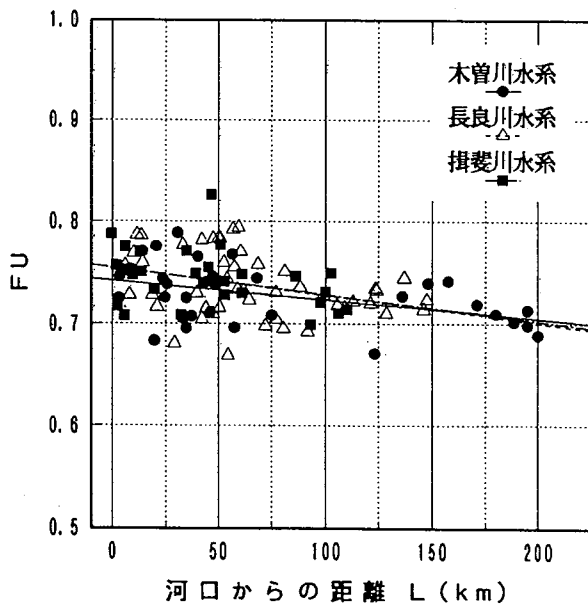


図-10 FUと河口からの距離の関係

参 考 文 献

- 1) 池田俊雄：わかりやすい地盤地質学，鹿島出版会，pp.55～63，1986.10.
- 2) 東海三県地盤沈下調査会編：濃尾平野の地盤沈下と地下水，名古屋大学出版会，pp.7～34，1985.3.
- 3) 岐阜県鉱業会：岐阜県砂利採取事務要領集pp.1～2，1988.10.
- 4) 杉井俊夫・宇野尚雄・林幹朗：発生確率を考慮した堤防安定性評価，平成4年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.417～418，1993.3/9.
- 5) 土質工学会：土質試験の方法と解説，pp.54～67，1990.3.
- 6) Krumbein, W.C. : Size Frequency Distributions of Sediments, J.Sed.Petrol., 4, pp.65～77, 1934.
- 7) 砕屑性堆積物研究会編：堆積物の研究法—礫岩・砂岩・泥岩—，地学団体研究会，pp.151～244，1983.7.
- 8) Spencer, D.W. : The Interpretation of Grain Size Distribution Curves of Clastic Sediments, J.Sed.Petrol., 33, pp.180～190, 1963.
- 9) 井口正男：漂差と流砂の水理学，古今書院，1975.
- 10) 吉村優治・橋村新吾・堀部康弘：木曾三川流域の代表的な岩石について，平成2年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.328～329，1991.3/1.
- 11) 前掲5)，pp.43～48.
- 12) たとえば，日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp.60～87，1980.5.
- 13) 三木五三郎：粒径加積曲線と均等係数および曲率係数，土と基礎，Vol.18, No.11, p.4, 1970.11.
- 14) 吉村優治・小川正二：砂のような粒状体の簡易な定量化法，土木学会論文集，No.463/Ⅲ-22, pp.95～103，1993.3.