

石狩川の抵抗特性と河床波形状の変化 Study on the Changes of Flow Resistance and Sand Waves in Ishikari River

北海道大学工学部 正会員 ○黒 木 幹 男
北海道大学工学部 正会員 岸 力

1. はじめに

河道の合理的な設計、洪水防禦計画のためには、洪水時の流れの抵抗すなわち粗度係数がどの程度の値になるかを予測することが基本的かつ重要な課題である。近年、土砂水理学研究の進展にともなう、少なくとも実験室的な規模の定常流れにおいては、河床に形成される河床波と流れの抵抗の関係が、かなりの程度まで明らかにされてきているが、実河川の洪水時の挙動を対象としたものは極めて少例である。著者らは水路実験の資料を整理して河床形態と流体抵抗の関係を解明¹⁾するとともに、石狩川の中・下流部の流量観測資料を解析して、実河川においても出水時には水路実験資料に認められたのと同様な砂堆河床 (Dune I) の発達に特有な抵抗特性の変化が認められることを示した。²⁾

その後、昭和50年8月の石狩川の洪水に際しては、洪水最盛期の流量観測資料の得られた下流部の月形橋・石狩大橋の2観測所の資料を整理して次のような注目すべき事実を明らかにした。³⁾月形橋では、水位の増大にともなう河床波はDune I からさらに発達した砂堆河床 (Dune II) に特有な抵抗特性の変化を示し、粗度係数は水位の増大とともに増加し、最高水位時に最大値を示したと推定された。これに対して、石狩大橋では河床波はDune I から遷移河床 (Transition I) に移行したと推定される抵抗の変化を示し、粗度係数の最大値は最高水位より低い水位で生じ、最高水位時には粗度係数は減少した。

これらの研究をつうじて、実河川でも洪水期間中には粗度係数が変化することが明らかにされ、河床波の発達・崩壊の事象の河川工学上の重要性が再確認された。しかし、これら河床波の存在やその変形は流量観測資料の解析だけでもとづいて推定されたものであり実際に確認することが大きな課題になっていた。

本研究では、昭和56年8月洪水の際に石狩川最下流部で実施された河床形状の実測資料^{4,5)}を用いて、水位の変化にともなう河床波形状の変化と流体抵抗の関係を調べた。また、中・下流部の流量観測地点では河床形状の測定は実施されていないが、これまでにいく多回数の流量観測が実施されており、この資料を用いて抵抗特性の変化を調べた。

2. 洪水時における河床波の発達・変形

石狩川では昭和56年8月、計画を大幅に上まわる規模の大洪水を経験した。この洪水に際し、北海道開発局では土木試験所を中心に種々の観測を実施した。ここで引用するエコーサウンダーによる河床、河床波の測定もその1つである。測定自体は多数の測線で繰返し実施されており、詳細は別に報告されているので再記しないが、ここでは河口から2 km ~ 4 km の間で実施された測定の中の代表的なものをとりあげて解析した。

図-1にはこれらの測定が実施された時刻と流量の関係を示す。流量ハイドログラフで実線で記した部分は篠路水位観測所 (KP=15) の水位記録にもとづいたものであるが、破線の部分は水位記録欠測のため、上流の石狩大橋水位・流量観測所の流量に主要支川の合流を考慮して著者らが推定した概略値である。図中に黒丸で示すよう

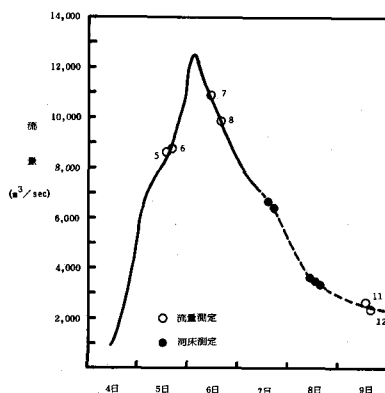


図-1 流量ハイドログラフ (KP = 11)

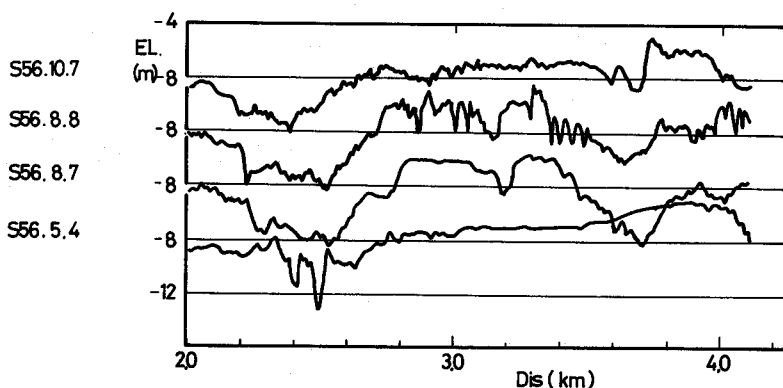


図-2 河床波の形状の変化(測線2-1)

に測定は7日に2回、8日に3回実施されているが、同一日における測定の結果にはあまり大きな差が認められないので、各日の最初に行なわれた測定の結果を解析することにした。

この区間の河床波形状の測定は、洪水前後5月と10月にも実施されており、上記の洪水期間中の測定結果と併せて図-2に示す。図は基準高さを4 m づつ、ずらして描いてある。エコーサウンダーの記録紙からの読み取り間隔は10 m である。

測定は2 km 右岸から4 km 左岸に遡航して実施された。この区間では、図-3の平面図にも示すように上流にある強い弯曲を通して、下流の逆向きのゆるい弯曲に遷移する部分にあたっている。したがって、2 km 付近は右岸に、4 km 付近では左岸にそれぞれ深堀れ部が存在し、図-2の縦継河床形にはその影響があらわれている。以下の解析では、交互深堀れの影響が比較的少ないと思われる、2.7 km ~ 3.4 km の700 m を対象にすることとした。

洪水前の56年5月の測定では、河床波は規模の非常に小さなものが認められるにすぎない。洪水後2ヶ月を経過した10月4日の測定では、洪水前よりはやや明瞭な河床波の存在が認められるが、全体としては平坦な状態である。

これに対して、洪水期間中の河床波の形状は規模の大きなものに一変しており、しかもわずか1日のあいだに波長に非常なちがいが生じている。すなわち、8月7日の測定では、波長 $L=70\sim$

250 m、波高 $\Delta\approx 1.0\sim 2.5$ m 程度の規模の大きな、比較的なだらかな河床波が形成されている。これに対して、8月8日の測定では波高はほとんど変化がなく $\Delta\approx 1.0\sim 2.5$ m 程度であるが、波長は $L=20\sim 30$ m と短くなっており、起伏の大きな河床波に変化している。

河床波の形状変化をスペクトルで比較すると図-4のようになる。考察の対象とする波長にくらべて測定長は十分に長いとは云えないから、スペクトルもあまり精度は期待できないが河床波形状の変化を大略表わす程度のことはできると思われる。河床波形の分散の変化もあわせて表現するため、スペクトルは規準化せずに示してある。表-1に分散の値を示す。洪水期間中の8月7日・8日のスペクトルを比較すると、8日の河床波では高波数域のパワーが相対的に大きくなっていることが特徴的である。さらに高波数域でスペクトル・ピークを示す波数を比較すると、7日には $K\approx 2\times 10^{-2}$ 、 3×10^{-2} 付近にあるピークが、8日の河床

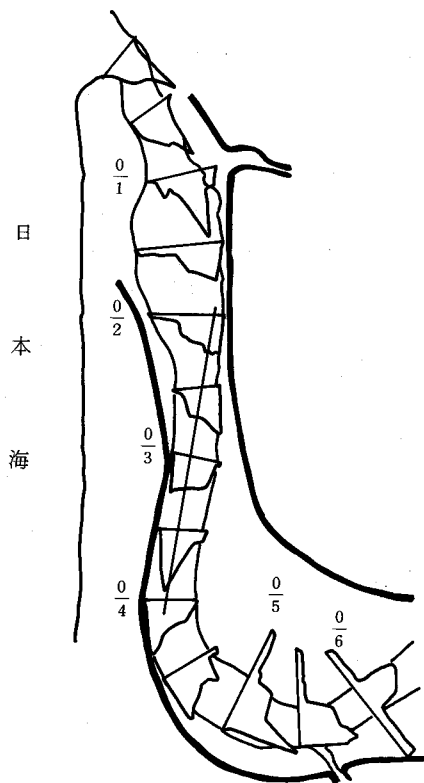


図-3 河道横断形状の縦断変化

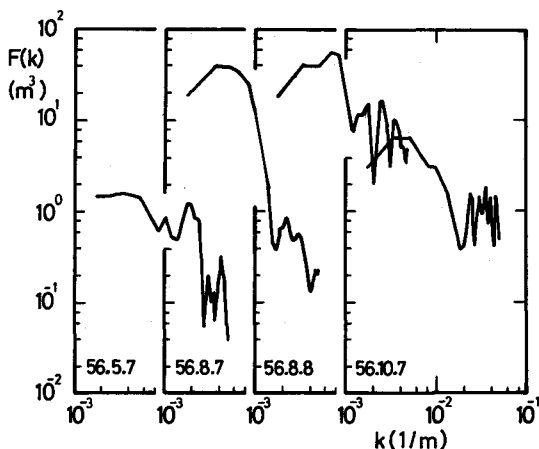


図-4 河床波スペクトルの変化(測線2-1)

表-1 河床波の分散と粗度

年月日 時刻	σ^2_{η}	n
56. 5. 7 0712 - 0737	0.028	0.036
56. 8. 7 1508 - 1516	0.318	0.052
56. 8. 8 1129 - 1150	0.713	0.059
56.10. 4 1007 - 1024	0.084	0.042

波では欠落し、それぞれ、 $K \approx 1.5 \times 10^{-2}$ 、 2.5×10^{-2} 、 3.5×10^{-2} 付近に新たなピークが形成されている。

また低波数域では、 $K \approx 5 \times 10^{-3}$ 程度のところにピークがあり、7・8両日の測定で大きな変化はないようである。この低波数の河床波は洪水後の測定でも認められるが、洪水前の測定には認められない。これらのスペクトルから、洪水時に観測された河床波は水理量の変化に比較的敏感に反応して変形する高波数のものと水理量変化にゆっくりと反応する低波数のものからできているらしいことがわかる。

後述するように、河床測定時刻の詳しい水理量は測定されていないので、河床形態の分類も大雑把な推定しかできないが、高波数側のものは波長が水深の数倍でありほぼ砂堆河床と考えると差支えなからう。これに対し、低波数側のものは波長が水深の十数倍程度あり砂堆河床と考えるには長く、砂州と考えると短いようである。既述のように、河床掃流力が大きな8月7日の測定で特徴的に現われており、洪水最盛期には掃流力もさらに大きくなっていることを考えると遷移河床に分類してよいかも知れない。

3. 河床波と粗度係数

河床波が形成されると、形状抵抗が付加されることで粗度係数の値は増加することが知られている。上述の河床波と粗度の関係を調べるためには同一箇所でも水理量の測定値が得られれば理想的である。河床波測定区間の中では、 $KP=3.55\text{ km}$ で2回、8月8日09:35、13:35、流量観測が行なわれているが、洪水期間中の経時的な変化は主として上流の $KP=11\text{ km}$ 地点での測定値しか得られていない。

両地点の河幅・河床材料にあまり大きな相違は認められないから、定性的な傾向を調べる程度ならば、 $KP=11\text{ km}$ の資料を用いても差支えないと考えられる。

$KP=11\text{ km}$ での流量観測は図-2の中に白丸で示すように、河床波測定時刻をはさんで実施されており、流量的にも河床波測定時の流量をはさんでいる。流量測定資料を再整理し、低水路部分の粗度係数を求めると図-5のようになり、水位の高い状態では粗度係数の値は小さく、水位の低い状態では粗度係数が大きくなっている。すなわち、河床波測定の行なわれた時刻も含めて洪水減水期の相当の部分で、水位が低下するほど粗度係数の値は増加していることが判った。

一方、河床波形状と粗度の関係についてこれまでに多くの研究があるが、ここでは河床波の分散 σ^2_{η} から粗度係数の推定を行なった。

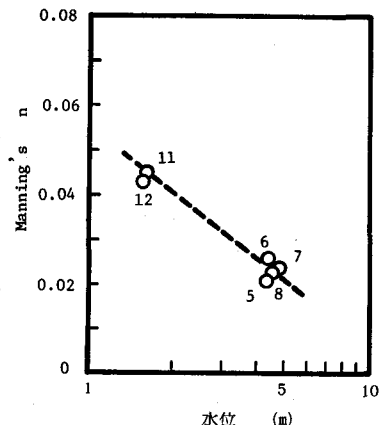


図-5 水位と粗度係数($KP=11$)

芦田・田中⁹⁾は実験水路の資料を整理して、相当粗度 Ks と $\sigma\eta$ との間に強い相関があることを指摘している。この関係を定式化し、Manning-Strickler の式を用いて粗度係数 n との関係の求めると次式のようになる。

$$n = 0.062 \sigma\eta^{0.81} \quad (m \cdot sec \text{ 単位}) \tag{1}$$

表-1 に示すように、洪水期の2つの資料をくらべると減水途上にある8月7日より、減水の相当に進んだ8月8日の河床波の方が分散が大である。表の最右欄に式(1)による粗度係数の推定値を示してあるが図-5 に示された洪水減水期の粗度の増加現象は、河床波の分散の変化からも裏付けられたことになる。

この一連の測定、解析によって河川の粗度係数が洪水期間中に変化すること、しかもその原因が河床波の発達・崩壊にあることが確認された。

4. 流れの抵抗特性の解析

本節では粗度係数と平均の水力量の関係について考察する。著者らは移動床の水路実験で得られた資料を整理して、全剪断力 τ_* と粒子(又は有効)剪断力 τ_*' の間の関係を調べ、河床形態と流れの抵抗との関係を明らかにしている。ここに、 $\tau_* = RI/sd$ 、 $\tau_*' = R'I/sd$ であり R' は Einstein-Barbarossa の式に小修正を加えた次式で定義される。

$$\frac{v}{\sqrt{gR'I}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R'}{2d} \tag{2}$$

v : 平均流速、 R : 径深、 I : エネルギー勾配、 d : 河床材料の平均粒径、 s : 河床材料の水中比重。

式(2)を指数型で表わし変形すると、流れの抵抗係数 φ_0 は次式のようにあらわせる。

$$\varphi_0 = \frac{v}{u_*} = 7.66 \left(\frac{R}{2d}\right)^{1/6} \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*}\right)^{2/3} \tag{3}$$

上式、右辺の $(\tau_*'/\tau_*)^{2/3}$ が河床波による抵抗の増加をあらわしている。著者らは、河床形状ごとに τ_* と τ_*' の関係を定式化している。

$$\left. \begin{aligned} \tau_*' &= 0.21 \tau_*^{1/2} && \text{Dune I} \\ \tau_*' &= 1.49 (R/d)^{-1/4} \tau_* && \text{Dune II} \\ \tau_*' &= \tau_* && \text{Flat} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式(4)を式(3)に代入しManning 型の表現に書き直すと上の3つの河床形態に対応する粗度係数 n は次のように表わせる。

$$\left. \begin{aligned} n &= 0.042 d^{1/6} \tau_*^{1/8} && \text{Dune I} \\ n &= R^{1/6} / 28 && \text{Dune II} \\ n &= 0.015 d^{1/6} && \text{Flat} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

ただし、 d は mm 単位、他は $m \cdot sec$ 単位である。平坦河床の式は Strickler の式として知られているものに一致する。

図-6 は、 $KP=11km$ での $\tau_* \sim \tau_*'$ の関係を示す。図中の実線は著者らの理論線である。砂堆から平坦床への遷移の下限 (Transition I) は式(6)で得られるが、遷移の経路は必ずしもこれに沿って生じるわけではなく粗度係数の予測は未解明である。この地点の測定値は水位の低い状態の

表-2 測水所位置と河床材料

観測所名	河口からの距離 (km)	河床砂の平均粒径 d (mm)
K.P. 11	11.0	0.26
石狩大橋	26.6	0.80
月形	58.0	4.0
橋本町	94.5	12.6
伊納	146.0	27.2

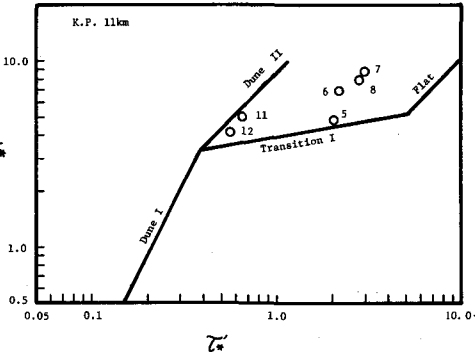


図-6 KP=11kmの $\tau_* \sim \tau_*'$ の関係

観測値(11、12)はDune II にきわめて近い所にプロットされているが、水位の高い状態の観測値(5~7)は遷移領域内にある。前節までに示した河床波形状の観測結果ともあわせて、石狩川の下流部では流量が $Q=3,000\sim4,000\text{ m}^3/\text{sec}$ 程度で砂堆河床が十分に発達し(Dune II)、これよりも流量が拡大すると、河床波は崩壊し遷移河床に移行していると考えてよい。

観測番号11、12では $R \simeq 7.0\text{ m}$ であり、式(5)から粗度係数を求めると $n = 0.05$ と計算されほぼ実測値に近い値になっている。これに対し、遷移河床(5~7)の粗度係数は予測できない。河床波が完全に崩壊して平坦床になれば、式(5)のように河床粒径だけで粗度係数が決まることになり、本地点の $d = 0.26\text{ mm}$ を代入すれば $n = 0.012$ まで粗度係数は低下する。

次に、石狩川の代表的な水位・流量観測所の測流資料を用いて抵抗特性の解析を行なった結果を示す。これらの地点では河床波の測定は実施されていない。各測水所の位置・河床材料は表-2に示すとうりである。

石狩川の基準点である石狩大橋測水所の $\tau_* \sim \tau_*'$ 関係および水深・粗度係数の関係を図-7、8に示す。石狩大橋では $KP=11\text{ km}$ と同様に、遷移河床への移行が認められる。ただし、Dune I の理論線に沿って河床波が発達する部分がほとんど認められず、平坦床への遷移も理論的に予測されるよりは τ_* の小さな段階で生じている。しかも、遷移の過程は昭和50年8月の洪水と昭和56年8月の洪水とは異なった挙動を示しているが、これは遷移河床の大きな特徴である。

同地点の粗度係数は洪水最盛期に減少していることが大きな特徴である。昭和56年8月洪水では、水深10 m程度のときに粗度係数は極大値をとり $n \simeq 0.04$ となったが、最高水位時には $n \simeq 0.02$ 程度にまで低下していたと推定される。

図-9には橋本町での $\tau_* \sim \tau_*'$ の関係を示す。橋本町でも理論値よりは小さな τ_* で遷移する傾向が認められる。この2測水所で砂堆が未発達のまま遷移河床に移行する理由はいくつかある。今後の研究課題である。

次に、水位の上昇にともなって粗度の増加する例を示す。これは、月形橋・伊納の資料に認められる。図-10・11に月形橋の例を、図-12に伊納の例を示す。

月形橋では、観測値はDune I からDune II の理論線に沿ってプロットされ、水位の増加にともなって砂堆が形成され最高水位時にも十分に発達した状態になっていると推定される。この地点の粗度係数は水深の増加とともに、大

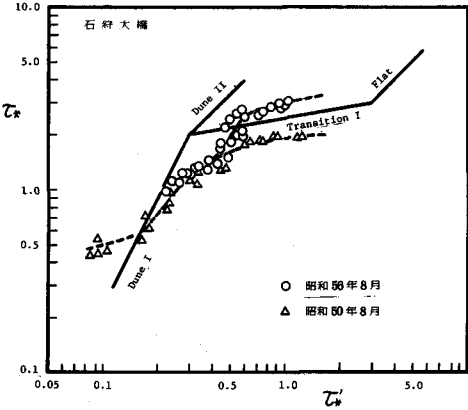


図-7 石狩大橋における $\tau_*-\tau_*'$ の関係

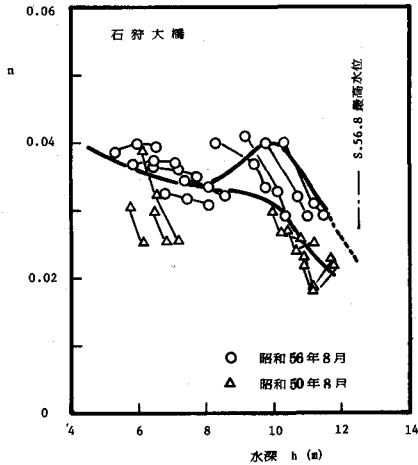


図-8 石狩大橋における水深・粗度係数の関係

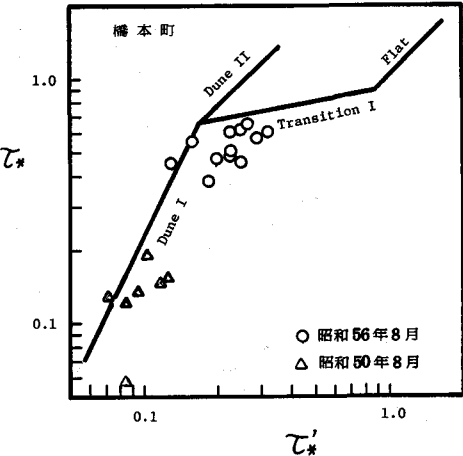


図-9 橋本町における $\tau_*-\tau_*'$ の関係

きくなり、しかも最大水位時には $n \approx 0.07$ にも達したと推定される。これは通常の低水路の設計に用いられる値の2倍にもなっている。図-11の細線で結ばれた観測値は、同一時刻の横断方向の測線ごとの値をあらわしている。全体としてはDune I からDune II の理論線に沿って変化しているが、増水期と減水期では理論線の下上にループを描いて変化している。

これは、河床波の変形と水理量の間の時間遅れを考えれば合理的な説明が可能であり、今後の検討を要する興味ある事象の1つである。

図-12に示す伊納の例でも、Dune I に沿って変化している。伊納のような河床材料の比較的大きな地点でも、出水時には砂堆河床に特有な抵抗特性の変化が見られることは、これまでの解析例が、石狩川の下流部の粒径の小さな部分に限定された特殊な現象ではなく、移動床流れに共通の現象であることを示すものである。

5. 結 論

洪水時に得られた河床波と流量の観測資料の解析から、洪水期間中に粗度係数は河床形態の変化に応じて変化することを示した。しかも、砂堆が十分に発達する河川では水深の増加にともない粗度係数も増大し、従来の河道設計法では洪水疎通能力を過大に評価するおそれがある。河床波の発達と崩壊の機構を解明することが河川の洪水防禦計画を考える上にも基本的で重要な課題であることを重ねて強調して結論とする。

謝辞 本論で用いた資料は全て北海道開発局の努力によって測定されたものである。貴重な資料の使用を許可して下さったことを記して厚く謝意を表します。また、本研究は文部省科学研究費、自然災害特別研究（課題番号5602501、代表 岸 力）の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1) 岸・黒木(1973): 移動床流における河床形状と流体抵抗(I)、北大工学部研究報告、第67号
- 2) 岸・黒木(1973): 沖積地河川における水深-流量関係の予測、土木学会北海道支部論文集、第29号
- 3) 岸・黒木・他(1976): 洪水時における河床波の発達と粒度係数の変化、文部省科学研究費特別研究（自然災害）「昭和50年8月風水害に関する調査研究」総合報告書（代表 矢野勝正）
- 4) 高木・牧野・竹本・森田(1982): 石狩川下流部における洪水流と河床変動の観測、第26回水講演論文集
- 5) 久米・牧野(1982): 石狩川下流部現地調査について、文部省科学研究費自然災害特別研究(1)「昭和56年8月北海道豪雨災害に関する調査研究」成果報告書（代表 岸 力）
- 6) 芦田・田中(1969): 砂運に関する実験的研究(3)、京都大学防災研究所年報 第10号

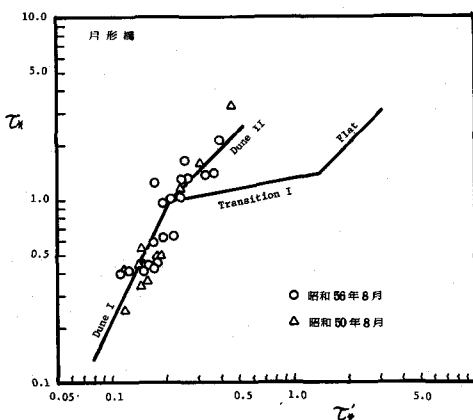


図-10 月形橋における τ_* - τ_*' の関係

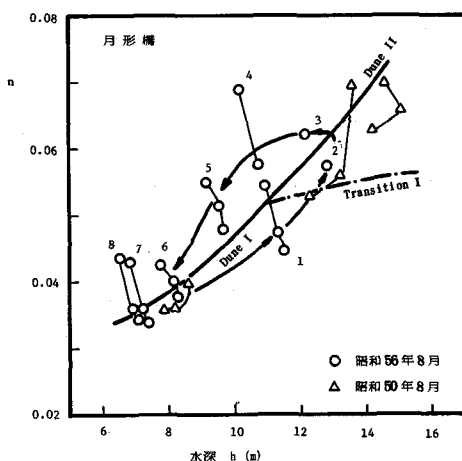


図-11 月形橋の水深・粗度係数の関係

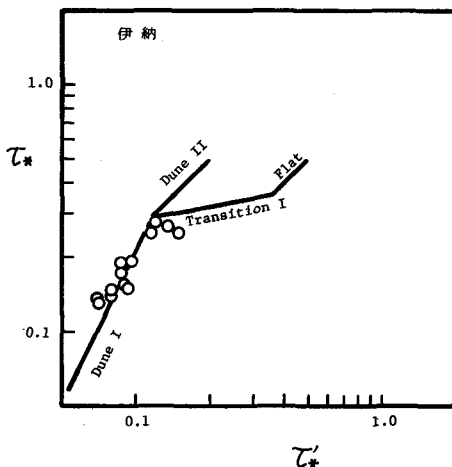


図-12 伊納における τ_* - τ_*' の関係