

Q 一般に玉石の長径はボーリングコア長の3倍とされていますが、本当？

A 3倍は平均値です。河川により異なりますが、通常、崩壊箇所を除き、短径が10~20cm程度より大きければ3倍以下、小さければ3倍以上になります。河川毎の現地に合わせた長径/短径比を推定する手法もありますので、それにより適切に推定しておくことが妥当と考えられます。

(1) ボーリングコアで確認される玉石のコア長

玉石混じり砂礫で確認されるボーリングコア長は、ほぼ短径を確認すると言われております。それは、河川などでの堆積時に、短径が垂直になるように堆積することが多いためです。下記写真は高梁市内の高梁川の河川敷で、左が上流ですが、河川の流れの抵抗を少なくするように、極くわずかに上流に傾きながら、長径は河川の流下方向に並んでいることが判ります。



写真-1 河川堆積状況（高梁川の例：岡山県）

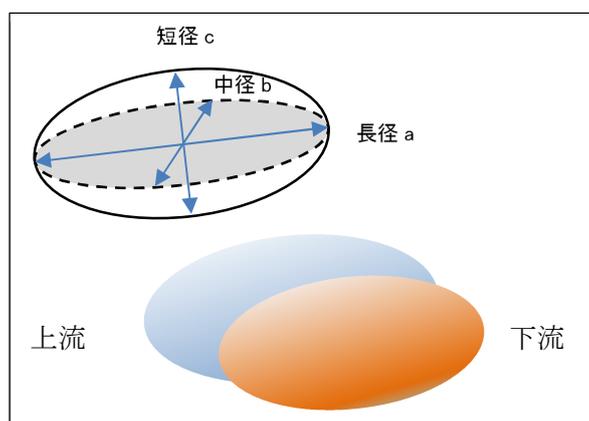


図-1 堆積時の長径短径分布（イメージ）

(2) ボーリングコア長の3倍という経験則

河川堆積物の礫～玉石は、上記のように平たく並ぶ傾向があるので、垂直に確認するボーリングでは、短径 c を確認することになります。そのため、長径 a を推定するには、経験則として3倍されることが多く、下記の図書で3倍の経験則が記載されています。しかし、これは経験則です。

- ・ボーリングデータの見方と活用ノウハウ¹⁾
- ・ボーリング図を読む²⁾

3倍という数値的根拠のひとつは、Krumbein³⁾の球形度 $\{R=(b \cdot c/(a^2))^{0.5}\}$ と、河川礫の平均球形度が80%の頻度で $R=0.3 \sim 0.6$ にあるとした中山⁴⁾の研究成果から導けます。中径 $b=1.5c$ とした場合、 $R=1.22c/a$ なので、 $a/c=2 \sim 4$ となり、平均3.0です。最大値ではなく、平均的に3倍という意味になります。ということは、遭遇確率や不均質分布を考慮した安全側の値ではありません。

(3) 実測値の長径/短径比 (a/c) の分布

木村ほか⁵⁾によると、図-2～7 に示す日本の6河川で確認した長径/短径比 (a/c) から短径依存性があり、崩壊箇所を除き、短径が10～20cm程度より小さくなるほど長径/短径比 (a/c) が大きくなる傾向が強くなり、3倍以上であることも多い結果になっています。逆に、短径が大きくなると、3倍未満になり、3倍則では過大評価になっています。

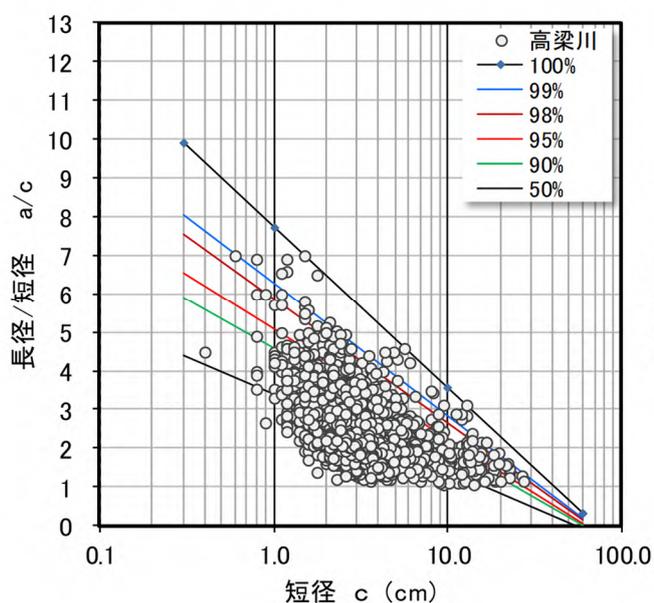


図-2 高梁川 a/c-c 相関図

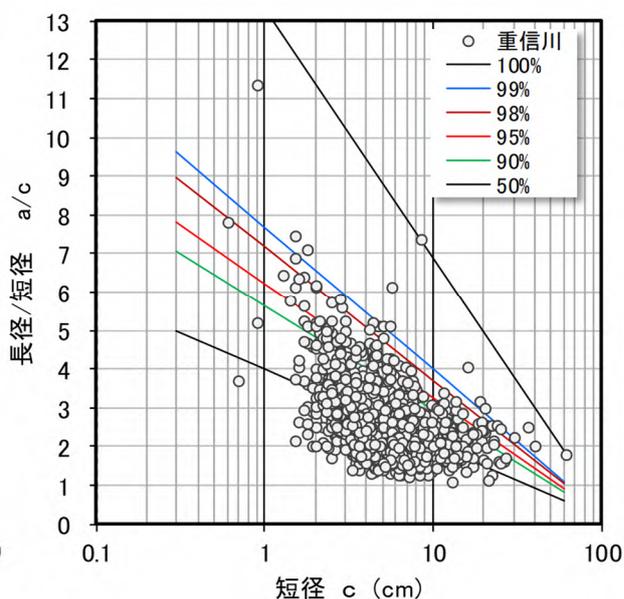


図-3 重信川 a/c-c 相関図

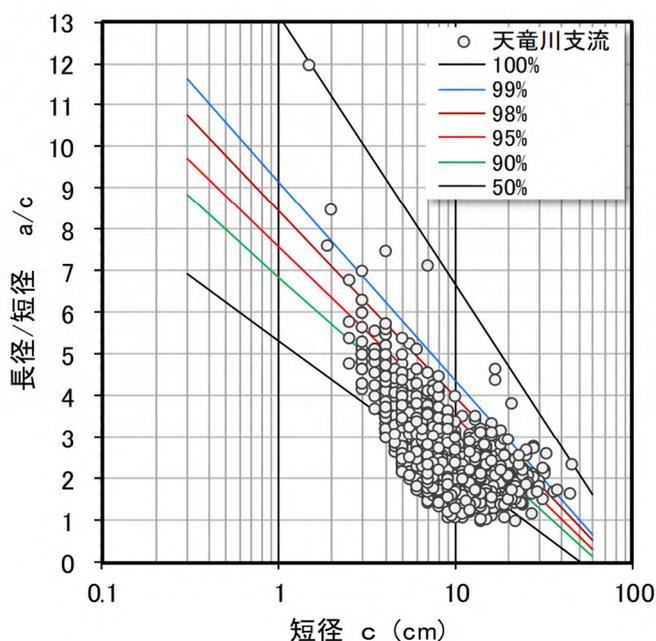


図-4 天竜川支流 a/c-c 相関図

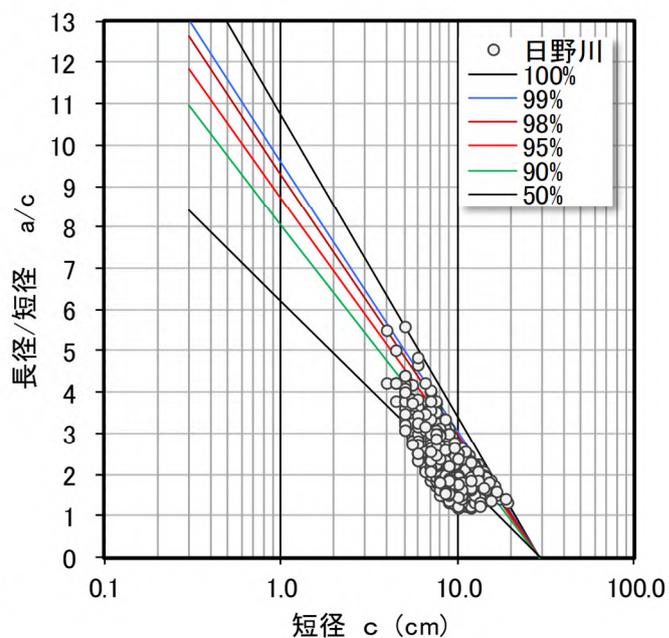


図-5 日野川 a/c-c 相関図

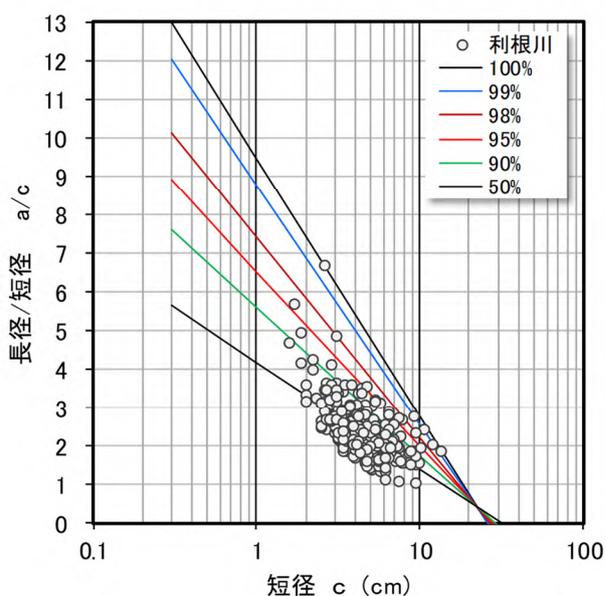


図-6 利根川中流 a/c-c 相関図

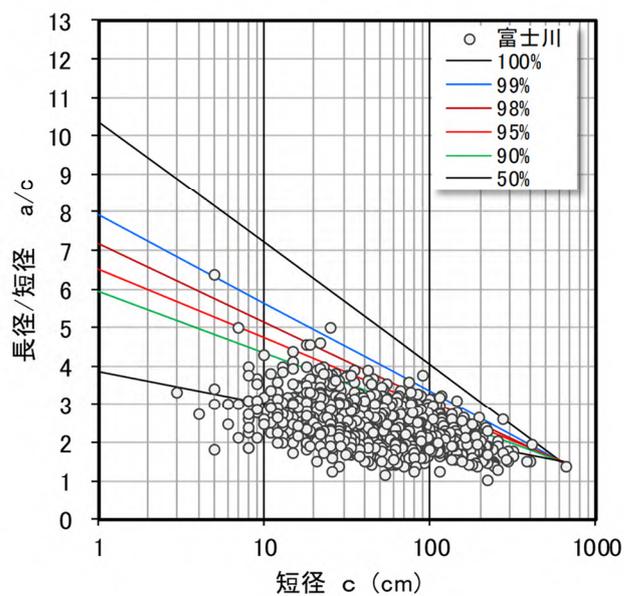


図-7 富士川崩落箇所 a/c-c 相関図

ここで、図-6 は大河川の河川勾配の緩い中流域で玉石が少ない分布域であり、短径 10cm 以上のデータはありません。逆に図-7 は、富士川崩落箇所、局所的に短径 300cm 以上のクジラ級巨大転石群が点在する大崩落箇所からの下流の分布域であり、1 オーダースケールが大きくなっています。ただ、いずれも礫径が小さくなると長径/短径比(a/c)のバラツキが大きくなり、長径/短径比(a/c)が3以上も多くなっています。

では、なぜ径が小さくなるとバラつくのでしょうか。

(4) 転がる石と転がらない石

礫も転がれば小さく丸くなります。図-7の富士川で、この巨礫が、下流にむかってどのように小さくなるのか、下流8kmにわたって礫径を確認したのが図-8です。方法は、地点ごとに目についた大きい順に100個の長径と短径を計測する手法としました。図-8はこの大崩落地から下流への距離と、中間径の関係であり、その相関式を使用すると信濃川367kmの距離で、30cmの玉石が軟岩は7.4cm、硬岩は11cmの玉石に摩耗するだけとなりました。つまり、転がるだけでは礫はあまり小さくなりません。

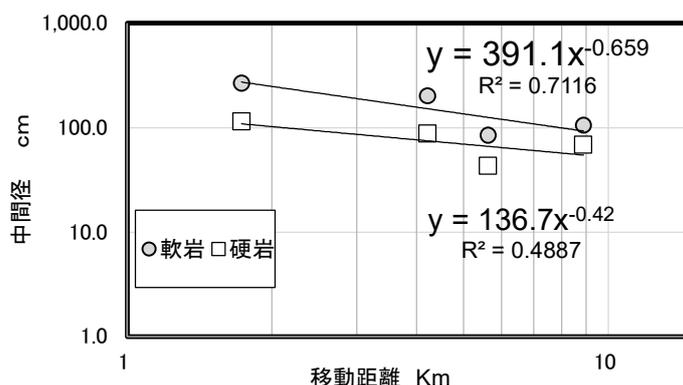


図-8 富士川崩落地からの距離と転石群中間径

ここで、河川勾配と中間径の相関をとると図-9のようになり、礫径は掃流力（河床勾配と正の関係）に支配されていることが判ります。つまり礫径はそこで起こりうる洪水流の掃流力で決まり、礫は流れついた場所より下流には掃流力小さければ移動しないことになります。

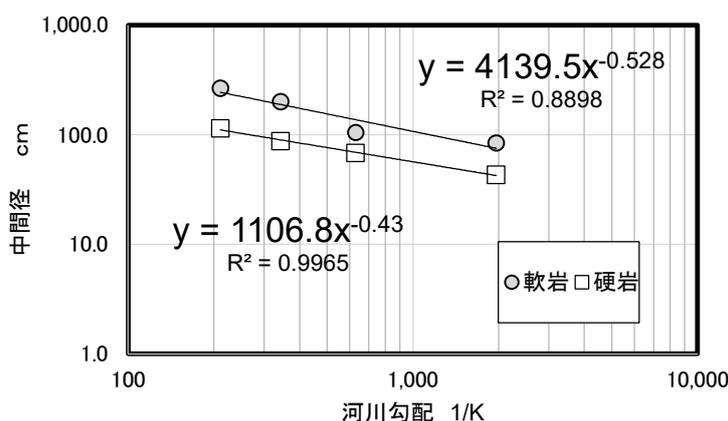


図-9 富士川河川勾配と転石群中間径

掃流力の関係で移動しない石はインブリケーション（覆瓦状構造・imbrication）と呼ばれる配向性のある傾きを持ちます。それは、河原の石は多少扁平なので、流れて落ち着くときは、流れに逆らうことなく平らな面を上流側に向けるためです。水流でめくられないよう、後から来る石も、みんな行儀よくそのように並んでいくので、結局、インブリケーションを形成します。1997年7月4日にNASAの火星探査機が撮影したアレス溪谷の写真

にインブリケーションが認められ、火星の大河川があった証拠とされたのもこの理由によります。また、図-10のように、転がらない石の場合、水流で石の上流側から削剥されて、次第に平坦になりより扁平な石になっていきます。しかし転がる石はより丸くなります。そのため、礫径が小さくなると、さまざまな長径/短径比(a/c)の礫にバラつき、より扁平な石も増えるのです。

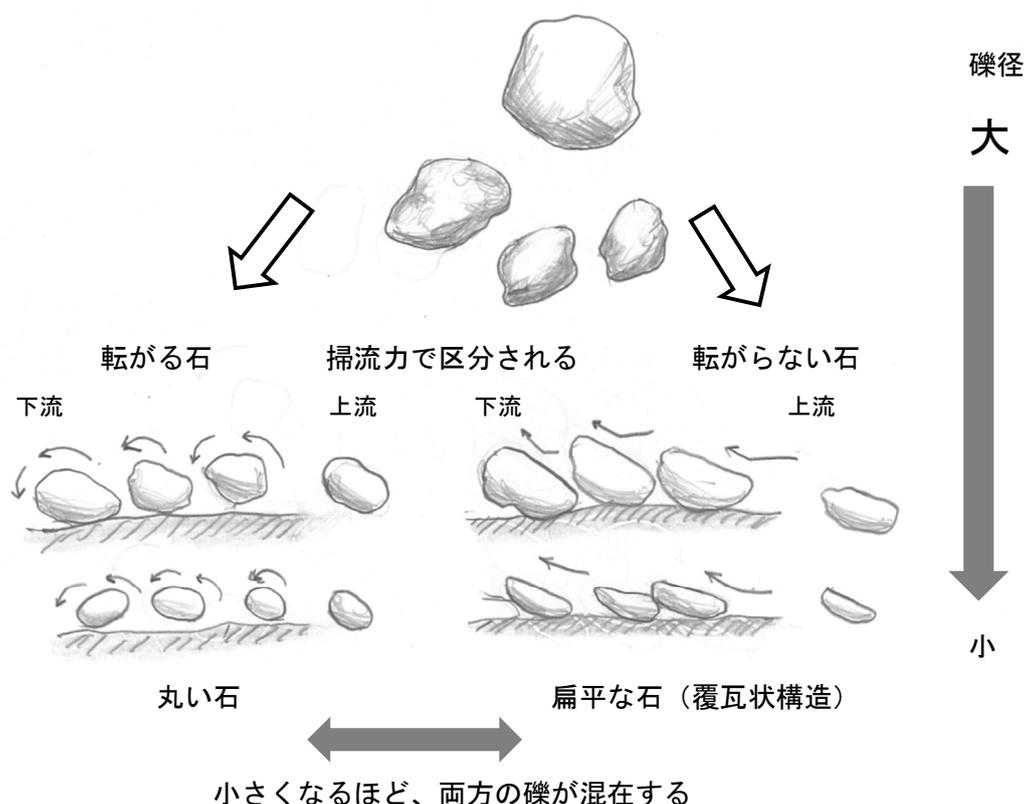


図-10 礫の削剥過程

(5) 河川の全体勾配と長径/短径比の関係

前述のように礫径が掃流力に支配されることを示しましたが、掃流力は河川勾配と関係があることから、河川の全体勾配と長径/短径比の関係を整理したのが表-1です。

短径 c に対する長径/短径比 (a/c) の相関式で、平均 50% の相関式と包括する 100% 確率の相関式の間で、90%~99% 確率の相関式 ($a/c = -A \cdot \ln(c) + B$) を比例配分で求めたのが表-1 に示しました。河川によりそれぞれ特性があり、データの分布が異なります。

また、99% 確率と 100% 確率の相関式から、短径 $c=5, 10, 15, 20\text{cm}$ のときの長径/短径比 a/c を求め、表-1 に示しています。

表-1 各河川における全体勾配と長径/短径比

河川区分		高梁川	重信川	天竜川支流	利根川	日野川	富士川崩壊	
99%確率	係数	A	1.487	1.610	2.064	2.691	2.848	1.001
		B	6.268	7.696	9.130	8.778	9.588	7.935
	長径/短径比 a/c (c=cm)	c=5	3.87	5.11	5.81	4.45	5.00	6.32
		c=10	2.84	3.99	4.38	2.58	3.03	5.63
		c=15	2.24	3.34	3.54	1.49	1.87	5.22
c=20	1.81	2.87	2.95	0.71	1.06	4.94		
100%確率	係数	A	1.814	2.792	2.819	2.919	3.191	1.381
		B	7.736	13.323	13.145	9.483	10.739	10.383
	長径/短径比 a/c (c=cm)	c=5	4.82	8.83	8.61	4.79	5.60	8.16
		c=10	3.56	6.89	6.65	2.76	3.39	7.20
		c=15	2.82	5.76	5.51	1.58	2.10	6.64
c=20	2.30	4.96	4.70	0.74	1.18	6.25		
調査範囲 下流起点より l (km)		23	31	15	51	45	6	
調査範囲 下流% l/L (km)		0.21	0.86	0.75	0.50	0.58	0.67	
河川延長 L (km)		111	36	20	101	77	9	
最大水源標高差 H (m)		1188	1233	1780	1831	1271	1065	
河川全体勾配 H/L		10.7	34.3	89.0	18.1	16.5	118.3	
河川勾配係数 $K=(l/L) \times (H/L)$		2.2	29.5	66.8	9.2	9.6	78.9	

ここで係数A Bは $a/c = -A \cdot \ln(c) + B$ の式による。なお、aは長径(cm) cは短径(cm)である。

はC=20のデータがなく、逆転1以下となる

表-1 の調査範囲は、玉石径を確認した下流起点から上流確認位置まで距離を l (km) とし、山頂までの河川延長 L (km) とし、その比 l/L を示しています。また最大水源標高差とは、起点標高から水源最大山頂標高との差 H (m) です。河川全体勾配は H/L とし、河川全体の勾配を意味し、その勾配に確認位置の下流～上の要素を加えるため、河川勾配係数 K は、(l/L) と (H/L) の積としていた係数 K を設定しています。

この係数を用い、99%確率と 100%確率の長径/短径比(a/c)に対し、河川全体勾配 H/L の対比を図-12~13 に示し、河川勾配係数 K の対比を、図-14~15 に示しています。

河川全体勾配 H/L

河川勾配係数 K

$$= (l/L) \times (H/L)$$

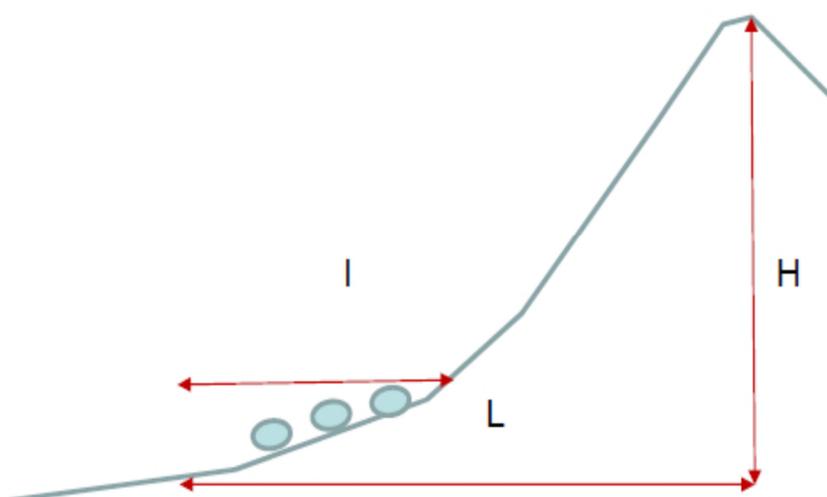
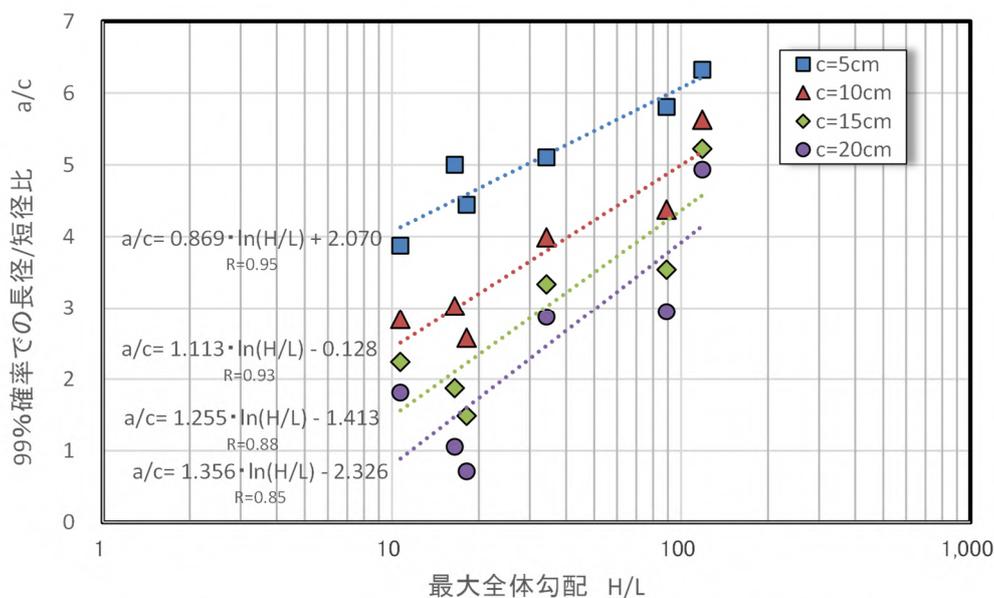


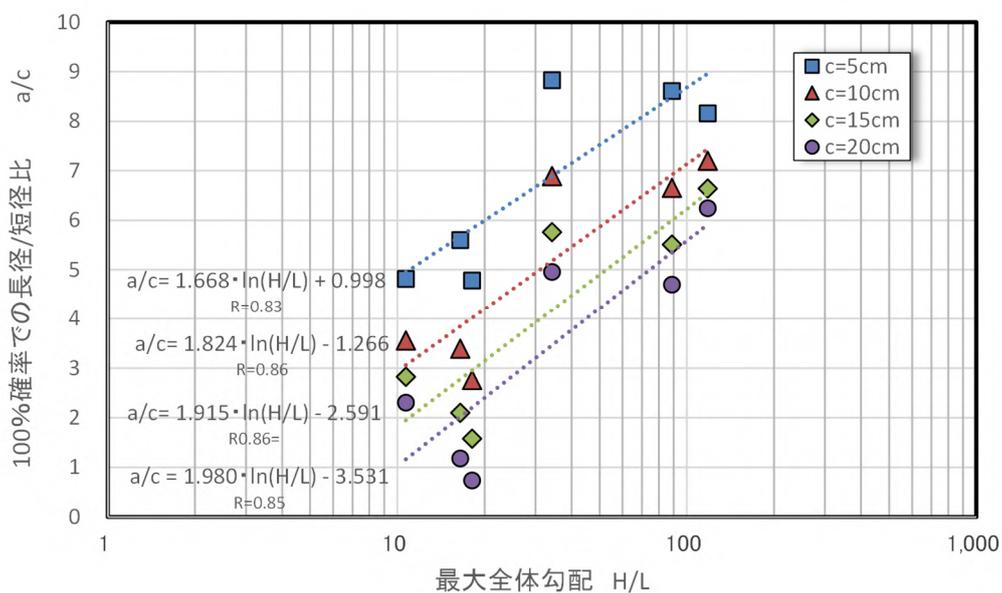
図-11 河川勾配係数のイメージ



河川全体勾配 H/L での a/c 推定式 (99%確率の場合)

- $c=5\text{cm}$ $a/c=0.869 \times \ln (H/L) +2.070$ (1) 式
- $c=10\text{cm}$ $a/c=1.113 \times \ln (H/L) -0.128$ (2) 式
- $c=15\text{cm}$ $a/c=1.255 \times \ln (H/L) -1.413$ (3) 式
- $c=20\text{cm}$ $a/c=1.356 \times \ln (H/L) -2.326$ (4) 式

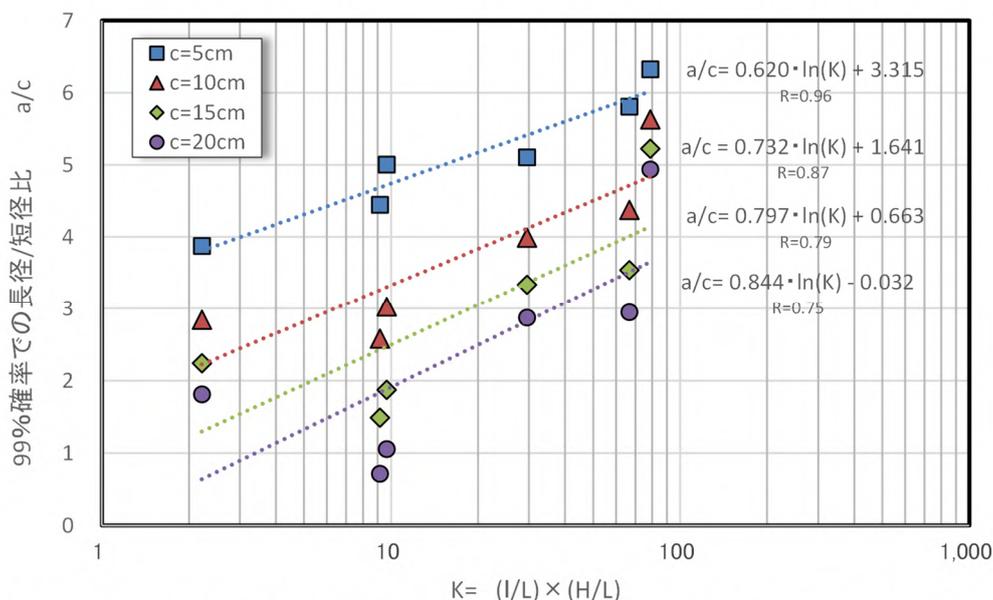
図-12 99%確率での H/L と a/c の相関



河川全体勾配 H/L での a/c 推定式 (100%確率の場合)

- $c=5\text{cm}$ $a/c=1.668 \times \ln (H/L) +0.998$ (5) 式
- $c=10\text{cm}$ $a/c=1.824 \times \ln (H/L) -1.266$ (6) 式
- $c=15\text{cm}$ $a/c=1.915 \times \ln (H/L) -2.591$ (7) 式
- $c=20\text{cm}$ $a/c=1.980 \times \ln (H/L) -3.531$ (8) 式

図-13 100%確率での H/L と a/c の相関



河川勾配係数 $K : \{(l/L) \times (H/L)\}$ での a/c 推定式 (99%確率の場合)

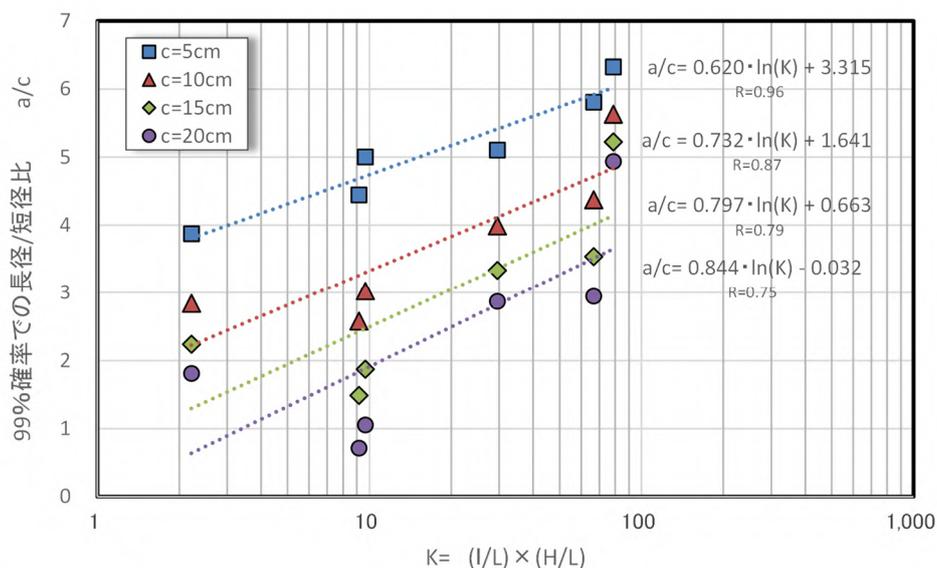
$c=5\text{cm}$ $a/c=0.620 \times \ln (H/L) +3.315$ (9) 式

$c=10\text{cm}$ $a/c=0.732 \times \ln (H/L) +1.641$ (10) 式

$c=15\text{cm}$ $a/c=0.797 \times \ln (H/L) +0.663$ (11) 式

$c=20\text{cm}$ $a/c=0.844 \times \ln (H/L) -0.032$ (12) 式

図-14 99%確率での K と a/c の相関



河川勾配係数 $K : \{(l/L) \times (H/L)\}$ での a/c 推定式 (100%確率の場合)

$c=5\text{cm}$ $a/c=1.242 \times \ln (H/L) +3.233$ (13) 式

$c=10\text{cm}$ $a/c=1.270 \times \ln (H/L) +1.431$ (14) 式

$c=15\text{cm}$ $a/c=1.286 \times \ln (H/L) +0.377$ (15) 式

$c=20\text{cm}$ $a/c=1.297 \times \ln (H/L) -0.371$ (16) 式

図-15 100%確率での K と a/c の相関

上記の各式により河川毎の玉石の長径/短径比(a/c)を推定することが可能になります。

(6) 調査地点の現場毎の長径/短径比 (a/c) の推定方法

河川毎に、流域に応じた長径の推定方法の例として、旭川、四万十川、物部川の a/c を試算しました。99%確率が図-16 で、100%確率が図-17 です。範囲は下流から 0.5~0.7 程度の位置とし、(9)~(16)式により 99%と 100%確率の a/c を算出し、河川毎に相関式を出しています。玉石最大径が施工の機種選定と工費を大きく左右するため、99%と 100%の両方を記載例で示しています。明らかに河川により差があることがわかります。そのため河川に応じてこのような相関図を作成し、適正な長径を推定することが重要と考えられます。

ボーリングコアから一律 3 倍ではなく、流域に応じた適正な長径推定と、現場の河川のコア径を実測し、総合的に判断するのが最良の方法と考えます。

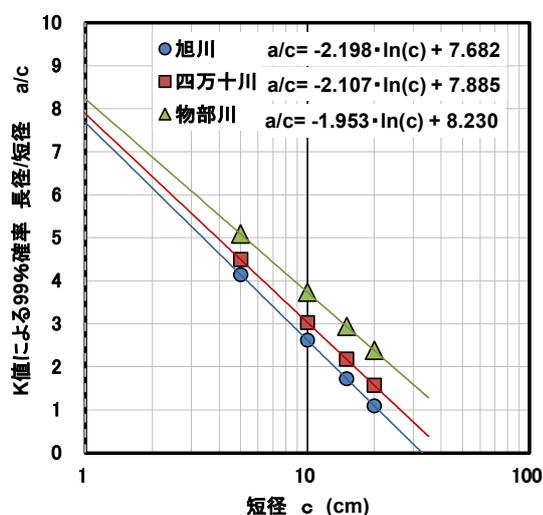


図-16 99%確率での推定

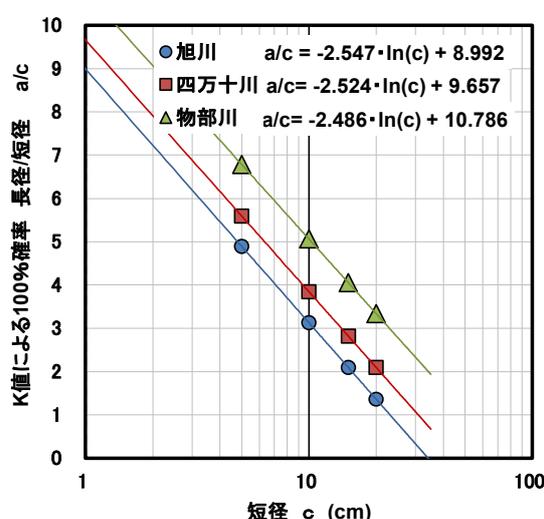


図-17 100%確率での推定

【参考文献】

- 1) 三橋晃司 ほか著：トラブルを防ぐためのボーリングデータの見方と活用ノウハウ、近代図書、1995. 3
- 2) 平井利一 編著：ボーリング図を読む、理工図書、1989. 12
- 3) W. C. Krumbein: Experimental design in the Earth sciences、Eos, Transactions American Geophysical Union、1955
- 4) 中山正民：礫浜における堆積物の諸性質について、地理学評論 38(2)pp103-120、1965
- 5) 木村隆行他：玉石における長径/短径比と河川勾配係数の相関、第 53 回地盤工学研究発表会 pp243-244、2018. 7

(回答者 木村 隆行)