

[論文]

札内川の河床礫におけるオリエンテーションと インブリケーションとの比較

山本憲志郎

- 〈目次〉
1. はじめに
 2. 調査地域の概要と調査方法
 3. 調査結果と考察
 4. まとめと今後の課題

1. はじめに

現在まで、掃流によって運搬された礫のファブリックの特徴を、古流向や堆積物の運搬能力の推定に利用しようと試みてきた。すでに報告されている掃流によって運搬、堆積された河床礫の平均 a 軸方位は流向に対して直交配列し、その平均方向への集中度は低いことが判明している (山本, 1998)。また大型水路による実験でも、掃流堆積物の平均 a 軸方位は流向に対して直交配列し、その平均方向への集中度は低いことが判明している。ただし、水路実験では細長い礫からだけで構成される場合、a 軸方位が流行に対して平行配列することが示されている (山本, 2009)。このように掃流によって運搬、堆積された河床礫の平均 a 軸方位の平均方向への集中度は低く、礫形も影響する可能性を否定できないために、これら堆積物の a 軸平均方位を計測することなく、目視による観測のみによって古流向を判断することはかなり困難であると思われる。

また掃流によって運搬された礫のファブリックは上記の a 軸オリエンテーションとともにインプリケーション (礫の a-b 面の最大傾斜方向の方位) も検討されてきた。特に古流行の推定には a 軸オリエンテーションよりインプリケーションが使用されることが多い (例えば八木下, 2001)。古流行の推定にインプリケーションを使う際には、その特徴が明確にされているとともに、a 軸オリエンテーションより顕著な特徴 (= 明瞭な堆積構造) を示すという事実に基づかねばならないと思われる。しかし、掃流によって運搬、堆積した礫の a 軸オリエンテーションとインプリケーションの数値による十分な比較はなされてこなかった。そこで本研究ではどちらの指標がより強く平均方向へ配列を示すのか、主に 2 次元ファブリック解析法を用いて検討を試みた。

2. 調査地域の概要と調査方法

札内川は日高山脈に源流部をもち、日高山脈を掘削しながら東流する。十勝平野に入り、中札内付近で流路を北向きに変え、帯広付近で十勝川に合流する。札内川が日高山脈を侵食した物質は十勝平野に発達する河成段丘の一部を構成している。調査地点は札内川中流（中札内の愛国橋付近）の右岸の砂礫堆である。この砂礫堆は2010年8月12日の強雨による河床礫の運搬・堆積によって形成された。砂礫堆上の礫の種々の計測は2010年8月17日から23日にかけて行ったが、諸所にこの増水時に運搬された流木が見られた（写真1）。砂礫堆上に2m×2mの計測区画を設け、区画内から大きいと思われる130個の礫のa軸オリエンテーション（a軸の最大傾斜方向の方位と傾斜）、インプリケーション（a-b面の最大傾斜方向の方位と傾斜）および3軸長を計測した。砂礫堆は砂と礫からなる典型的な2粒径混合であり砂礫堆表層に3～4粒子の礫があり、その下位に厚さ40cm以上の砂層（主に粗砂）が発達する。砂礫堆表層の礫は一見して明瞭なインプリケーションを示す（写真2）。礫のオリエンテーション、インプリケーションの計測には勾配計を取り付けたデバイダーによってa軸、a-b面の最大傾斜方向の傾斜を計測し（写真3）、その方位はデバイダーの両脚にコンパス（磁石方位計）を接触させて計測した。3軸長の計測はノギスを用いて行った。

3. 調査結果と考察

3-1. a軸オリエンテーションとインプリケーションの配列型

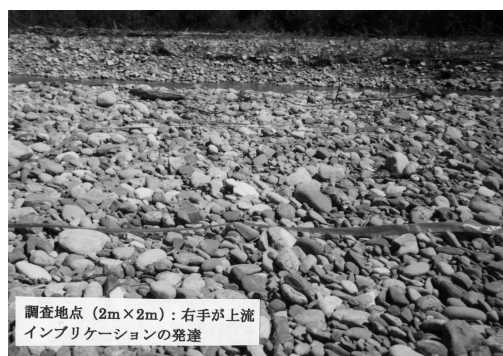
計測された130個の礫のa軸オリエンテーション（方位と傾斜）およびa-b面方向（a-b面の方位と傾斜＝インプリケーション）の結果を第1図、第2図に示す。両図とも極座標系の等面積ネットに投影されている。計測された礫

写真1 計測地点付近 (2010年8月18日)



2010年8月12日の増水による流木が見られる

写真2 計測区画の様子 (2m×2m)



インプリケーションが発達している

写真3 勾配計付きデバイダーによる傾斜角の計測



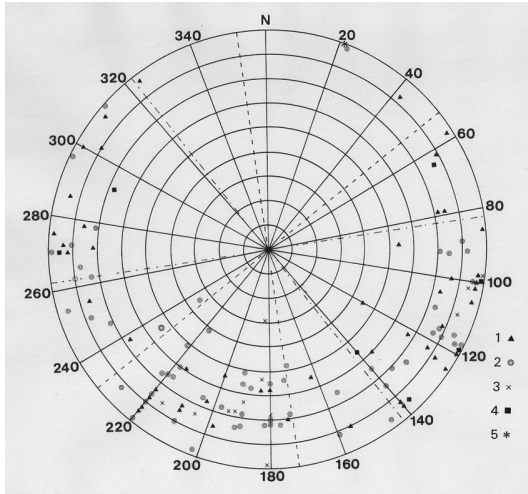
は Zingg (1935) の指標に従って, Blade (凡例 1), Disc (凡例 2), Rod (凡例 3) および Sphere (凡例 4) に分類した. また計測区画における札内川の流向 (N22° E, 1° N) も示した. 計測された礫の平均 a 軸長は 9.7cm (サンプル標準偏差は 2.7cm), 形態別出現率は Blade : 37.7%, Disc : 47.7%, Rod : 9.2%, Sphere : 5.4% であった. b 軸長/a 軸長が大きく, c 軸長/b 軸長が小さい扁平な礫 (Disc, Blade) の構成比が高くなっている. ここで a 軸方位と礫形の関係を第 1 表に, また a-b 面方位と礫形の関係を第 2 表に示す.

本研究では a 軸方位および a-b 面方位を以下の配列型に分類した. 最大傾斜方向の方位を 360° 投影した際に, 流向を基準 (0° あるいは 360°) とすると, 330° ~ 30° および 150° ~ 210° にある場合を平行配列型, 60° ~ 120° および 240° ~ 300° にある場合を直交配列型, これ以外の方位にある場合をランダム配列型と呼称する.

流向に対する a 軸方位配列型は直交配列型 (46.2%) が多く, 平行配列型 (40.0%) が次ぎ, ランダム配列型 (13.8%) は少ない. また 12 個の細長い Rod 型の礫の中で 9 個は平行配列型を示している. 従来の研究によれば, 流向と掃流によって運搬された礫の長軸方位の関係は①礫の長軸方位は直交型であり, 平均方向への集中度は低い (出現頻度の最も高い配列型は直交型であるが他の配列型の出現頻度もかなり高い), ②礫形は長軸方位に多少, 影響する. 特に Rod 型の礫は平行配列しやすい, ことが報告されている. この①, ②の特徴は掃流によって運搬される礫は b 軸回転する礫が多いこと, Rod 型の礫は停止時に直交配列した後, 停止した場所で水流によって平行型に再配列するものが多いことによる (山本, 2009). 本研究の a 軸方位と礫形の関係はこれまでの研究報告と整合しているといえよう.

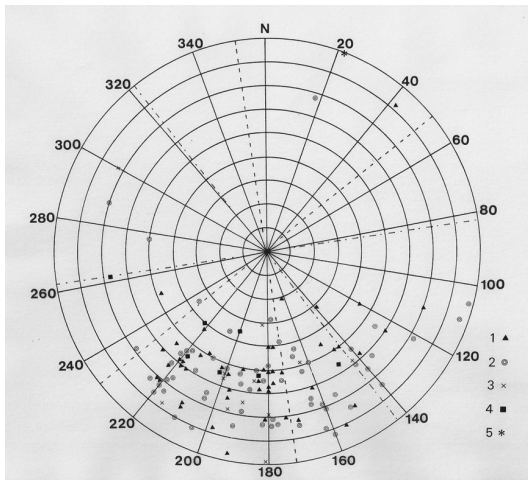
また, 計測された礫の流向に対する a-b 面方位は平行配列型 (65.4%) が卓越し, ランダム配列型 (19.2%), 直交配列型 (15.4%) は少ない. a-b 面方位と礫形の関係からは, 平行配列型が多く, 直交配列型の出現頻度はかなり低いこと (直交配列型の出現頻度はランダム型より低くなっている), さらに明瞭な礫形の影響が認められないこと (Blade 型, Rod 型, Sphere 型の 70% 以

第1図 形態別のa軸の方向
(極座標系投影, 計測礫数130個)



凡例 1 : Blade 型 (n=49), 2 : Disc 型 (n=62), 3 : Rod 型 (n=12), 4 : Sphere 型 (n=12), 5 : 流向 (N22°E, 1°N)

第2図 形態別のa-b面方位の方向
(極座標系投影, 計測礫数130個)



凡例 1 : Blade 型 (n=49), 2 : Disc 型 (n=62), 3 : Rod 型 (n=12), 4 : Sphere 型 (n=12), 5 : 流向 (N22°E, 1°N)

第1表 a軸方位の配列型と形態別の出現率 (N=130)

配列型	個数 出現率	各形態別出現率 (%)		
		形態	個数	出現率
直交	59 ----- 46.2%	Blade	27	20.8%
		Disc	23	17.7%
	Rod	3	2.3%	
	Sphere	6	4.6%	
ランダム	19 ----- 13.8%	Blade	9	6.9%
		Disc	9	6.9%
	Rod	0	0%	
	Sphere	1	0.8%	
平行	52 ----- 40.0%	Blade	13	10.0%
		Disc	30	23.1%
	Rod	9	6.9%	
	Sphere	0	0%	

第2表 a-b面方位の配列型と形態別の出現率 (N=130)

配列型	個数 出現率	各形態別出現率 (%)		
		形態	個数	出現率
直交	20 ----- 15.4%	Blade	5	3.8%
		Disc	12	9.2%
	Rod	2	1.5%	
	Sphere	1	0.8%	
ランダム	25 ----- 19.2%	Blade	8	6.2%
		Disc	15	11.5%
	Rod	1	0.8%	
	Sphere	1	0.8%	
平行	85 ----- 65.4%	Blade	36	27.7%
		Disc	35	26.9%
	Rod	9	6.9%	
	Sphere	5	3.8%	

上が平行配列型であり、Disc型も56%が平行配列型である)を示している。これらのことは掃流で運搬された礫は形に関わらず、a-b面の最大傾斜方向を上流側に傾ける (= up-slope imbrications) ことを示している。

a軸方位の最頻配列型は直交型であり、46.2%を占める。またa-b面方位の最頻配列型は平行型であり、その出現頻度は65.4%である。a軸方位とa-b面方位の最頻配列型はそれぞれ異なるが、出現頻度はa-b面方位の平行配列型の方が高くなっている。この結果はa-b面方位のほうがa軸方位より古流向の推定に好適である (= 一見して判別しやすい) 可能性を示していると考えられる。

なお、流向に対する [a軸方位配列型・a-b面方位配列型] の組み合わせは9タイプに分類される。各タイプの出現頻度を第3表-1, 2, 3に示す。その出現頻度は [直交配列型・平行配列型] が37.7%と最も高く、 [平行配列型・平行配列型] が26.2%で次いでいた。 [直交配列型・平行配列型] の礫

第3表① a軸およびa-b面方位の配列型と形態別の出現率① (N=130)

配列型		個数	各形態別出現率 (%)		
a軸	a-b面		出現率	形態	個数
直交	直交	3	Blade	1	0.8%
			Disc	1	0.8%
		2.3%	Rod	0	0%
			Sphere	1	0.8%
直交	ランダム	7	Blade	0	0%
			Disc	6	4.6%
		5.4%	Rod	1	0.8%
			Sphere	0	0%
直交	平行	49	Blade	26	20.0%
			Disc	16	12.3%
		37.7%	Rod	2	1.5%
			Sphere	5	3.8%

第3表② a軸およびa-b面方位の配列型と形態別の出現率② (N=130)

配列型		個数	各形態別出現率 (%)		
a軸	a-b面		出現率	形態	個数
ランダム	直交	3	Blade	1	0.8%
			Disc	2	1.5%
		2.3%	Rod	0	0%
			Sphere	0	0%
ランダム	ランダム	14	Blade	6	4.6%
			Disc	7	5.4%
		10.8%	Rod	0	0%
			Sphere	1	0.8%
ランダム	平行	2	Blade	2	1.5%
			Disc	0	0%
		1.5%	Rod	0	0%
			Sphere	0	0%

第3表③ a軸およびa-b面方位の配列型と形態別の出現率③ (N=130)

配列型		個数	各形態別出現率 (%)		
a軸	a-b面		出現率	形態	個数
平行	直交	14	Blade	3	2.3%
			Disc	9	6.9%
		10.8%	Rod	2	1.5%
			Sphere	0	0%
平行	ランダム	4	Blade	2	1.5%
			Disc	2	1.5%
		3.1%	Rod	0	0%
			Sphere	0	0%
平行	平行	34	Blade	8	6.2%
			Disc	19	14.6%
		26.2%	Rod	7	5.4%
			Sphere	0	%

は、Blade 型の礫の53.0%、Disc 型の礫の25.8%、Rod 型の礫の16.6%、Sphere 型の礫の71.4%で認められ、Blade 型、Sphere 型の礫で多くなっている。これは a 軸方位が直交型である27個の Blade 型の礫のうち、26個の礫の a-b 面方位が平行型になっていることや Sphere 型の礫の a 軸方位は直交型が卓越する（全7個中の6個）が影響していると考えられる。同様に [平行配列型・平行配列型] の礫は、Blade 型の礫の16.3%、Disc 型の礫の30.6%、Rod 型の礫の58.3%で認められ、Sphere 型の礫では認められない。[平行配列型・平行配列型] は Rod 型の礫で多くなっているといえる。これは Rod 型の礫の a 軸方位は平行配列型が卓越する（全12個中の9個）ことが影響していると思われる。こうした礫の形の影響も認められるが、[a 軸方位配列型・a-b 面方位配列型] の組み合わせの中で [直交配列型・平行配列型] が多いことは、掃流によって運搬された礫のファブリックの特徴の一つであると考えられる。

3-2. a 軸オリエンテーションとインプリケーションの平均方向への集中度

先述したように [a 軸方位配列型・a-b 面方位配列型] の最頻出型は [直交配列型・平行配列型] であった。この結果は計測した河床礫の流向に対する平均方向が a 軸方位は直交、a-b 面方位は平行となることを強く示唆している。ここでそれぞれの平均方向への集中度の強さを比較するために、指標を計算によって算出した。指標には Vector Magnitude (% ; Krumbein, 1939, 以下, V.Mg. と略す) を用いた。V.Mg. (%) は以下の手順で算出される。

個々の礫の a 軸方位、a-b 面方位を360°の全円に投影し、北を0°として北の方位とそれぞれの方位がなす角度 (=θ) を時計回りに計測した時、

$$r = [(\sum n \sin \theta)^2 + (\sum n \cos \theta)^2]^{0.5}$$

$$\text{Vector Magnitude}(\%) = 100 \cdot r / \sum n$$

で与えられる。最大値は100% (=全サンプルの方位が揃っている場合) であり、その数値が高いほど平均方向への集中度が高い (=サンプルの方位のば

らつきが小さい) ことを示す。

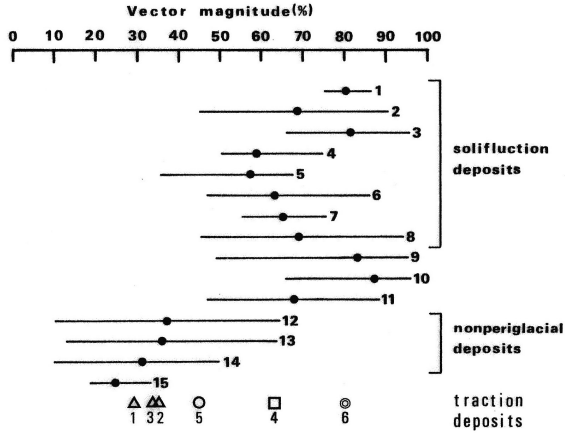
本研究の130個の河床礫の a 軸オリエンテーションの V.Mg. (%) は 44.6%, a-b 面方位の V.Mg. (%) は 79.8% であった。明らかに a-b 面方位の V.Mg. (%) が高い値を示す。この結果は, a-b 面方位は a 軸方位より古流向の推定に好適である (= 一見して判別しやすい) 可能性を示していると考えられる。

計測された礫の a 軸方位および a-b 面方位の V.Mg. (%) は掃流によって運搬された礫の平均方向への強さの程度を示している。ここで掃流以外の営力によって運搬された礫の V.Mg. (%) およびすでに報告されている他地域等における掃流堆積物の V.Mg. (%) との比較を試みた。この比較は掃流堆積物の V.Mg. (%) の特徴を検討するとともに本研究の V.Mg. (%) の妥当性を検討するためである。著者の先行研究 (山本, 1990 の第13図) を基に, 本研究のデータを加筆したのが第3図である。第3図では本研究と同じ掃流によって運搬された礫の V.Mg. (%) データを増やすために, 山本 (2009) の表1に記載した筑波大学大型水路を利用した掃流実験データ (第3図の△1~3) と揖斐川の河床礫のデータ (森山・中西, 1991 の IBI-1, 第3図の□4) のデータの S1 値 (△1 〈Site A, n=500〉の S1 値: 0.557, △2 〈Site B, n=100〉の S1 値: 0.595, △3 〈Site C, n=50〉の S1 値: 0.588, □4 〈IBI-1, n=100〉の S1 値: 0.774) を V.Mg. (%) に換算した数値を掲載した。S1 値は a 軸方向 (方位と傾斜) についての3次元ファブリック解析法による平均方向への集中度を示す指標である (Scheidtger, 1965; Mark, 1974)。

S1 値から V.Mg. (%) への換算は, 山本 (1995) の第1図に記載した全データ (計測地点数 n=94, 各地点で少なくとも数十個以上の礫の方向を計測) の直線回帰式 (第4図の破線, $V.Mg. = 154.2 \cdot S1 - 57.1$) によった。両パラメータ間には強い正の相関 ($r=0.912$) が認められる。

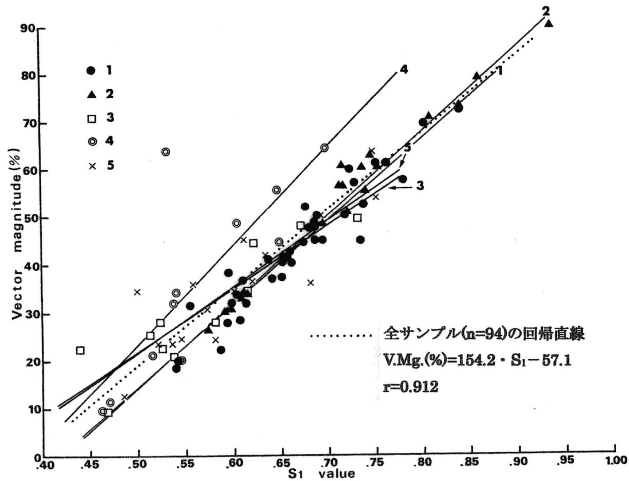
比較の結果, 河床礫の a-b 面の最大傾斜方向の方位 (第3図の◎6, V.Mg.: 79.8%) はすでに報告されているソリフラクションによって運搬された礫の a 軸方位の V.Mg. (%) と同等の高い値を示した。一方, 河床礫の a 軸

第3図 Vector Magnitude (%) による掃流堆積物 (traction deposits) の a 軸方位, a-b 面方位と他の運搬力による堆積物の a 軸方位との比較



1~15の直線 (レンジ) と黒丸 (平均) のデータ源については, 山本 (1990) の第13図を参照のこと. 凡例△1~3: 掃流実験データ, □4: 森山・中西 (1991) のIBI-1 データ, ○5: a 軸方位 (本データ, n=130), ◎6: a-b 面方位 (本データ, n=130)

第4図 S1 値と Vector Magnitude (%) の関係



破線が全データ (n=94) の回帰直線. 直線1~6のデータ源は山本 (1995) の第1図を参照のこと.

方位の V.Mg. (%) はかなり低い値を示す ($\triangle 1$: 28.8%, $\triangle 2$: 34.6%, $\triangle 3$: 33.6%, $\circ 5$: 44.6%, $\square 4$: 62.3%). 5 地点の掃流によって運搬された河床礫の a 軸方位の V.Mg. のレンジは 28.8%~62.3%, その平均値は 40.8% であった. これらの結果から, 掃流によって運搬された礫の a-b 面方位は a 軸方位に比較して, 平均方向への集中度が高く, その集中度は従来報告されているソリフラクション堆積物中の礫の a 軸方位の平均方向への集中度とおおよそ同程度であるといえよう. なお, ソリフラクション堆積物中の礫の a 軸方位は斜面の最大傾斜方向に対して強い平行配列型となり (yamamoto, 1989; 山本, 1990; 1991; 1992), 掃流堆積物中の礫の a 軸方位の配列型 (= 流方向に対して直交配列) とは異なる. したがって, 仮に掃流堆積物とソリフラクション堆積物が挟在する地点においても, 両堆積物の区別は容易であろう. なお, a 軸方位が斜面の最大傾斜方向に対して直交配列する堆積物に転・落石がある (山本, 1996). 有珠・オガリ山における転・落石 (n=735個) の形態別の計測礫数および S1 値は, Blade (n=51個, S1=0.435), Disc (n=225 個, S1=0.405), Rod (n=171 個, S1=0.445), Sphere (n=228, S1=0.415) である (山本, 1996の第 1 表 b). S1 値のレンジは 0.405~0.445 であり, 先述の直線回帰式によって V.Mg. (%) に換算すると, V.Mg. (%) のレンジは 5.4%~11.6% となる. この値は掃流堆積物の掃流堆積物の a 軸方位の V.Mg. (%) と比較してもかなり低いといえ, 少なくとも本研究の掃流堆積物の a-b 面方位の V.Mg. (%) より明らかに低い. こうした a 軸方位の平均方向への集中度の相違とともに, 両堆積物中の礫の円磨度の違いも考慮すると, 両堆積物の区別は容易であると思われる.

4. まとめと今後の課題

2010年 8 月 12 日の洪水によって札内川中流域の右岸に形成されたインブリケーションの発達がよい砂礫堆上に 2 m × 2 m の区画を設け, 区画内から大きいと思われる礫 130 個の a 軸方向 (a 軸の最大傾斜方向の方位と傾斜), a-b

面の最大傾斜方向（a-b面の最大傾斜方向の方位と傾斜）および3軸長を計測した。

流向に対するa軸方位の最頻配列型は直交型であり、46.2%を占める。またa-b面方位の最頻配列型は平行型であり、その出現頻度は65.4%である。また、流向に対する[a軸方位配列型・a-b面方位配列型]の組み合わせの出現頻度は[直交配列型・平行配列型]が37.7%と最も高くなった。これらの結果は掃流によって運搬された礫のファブリックの特徴を示していると考えられる。なお礫の形態が配列に与える影響として、Rod型の礫のa軸方位が流向に対して平行配列する現象が認められたが、他の形態の礫では顕著な影響は認められなかった。

平均法方向への集中度を示すV.Mg.(%)を算出したところ、130個の河床礫のa軸オリエンテーションのV.Mg.(%)は44.6%、a-b面方位のV.Mg.(%)は79.8%であった。この値を掃流以外の営力によって運搬された礫のV.Mg.(%)およびすでに報告されている他地域等における掃流堆積物のV.Mg.(%)と比較したところ、掃流によって運搬された礫のa-b面方位はa軸方位に比較して、平均方向への集中度が高く、その集中度は従来報告されているソリフラクション堆積物中の礫のa軸方位の平均方向への集中度とおおよそ同程度であった。

これらのことから、流向に対して平行配列するa-b面方位の方が流向に対して直交配列するa軸方位より平均法方向への集中度が高く(=ばらつきが小さい)、古流向の推定に好適である(=一見して判別しやすい)ことが明らかとなった。

上記の研究報告とは別にa-b面の傾斜を検討した結果、a軸方位配列型との関係が認められた。a-b面方位が平行配列型の礫のa-b面傾斜角は、[直交配列型・平行配列型]の方が[平行配列型・平行配列型]より約10°大きい。これは砂の洗掘によって礫の上流側に形成された凹みへの落ち込みやすさの違いや、a軸方位の配列型による落ち込み時の傾斜の違いが影響している可能性が考えられる。今後、こうしたインプリケーションの形成に関する

議論が必要であると思われる。

(本稿の骨子は2011年東北地理学会春季学術大会(山本, 2011)および2012年北海道地理学会(山本, 2012)で発表し, その一部を2014年北海道地理学会(山本, 2014)および2016年東北地理学会春季学術大会(山本, 2016)で発表した)

参考文献

- 森山昭雄・中西 勉(1991): 沖積河川における河床礫の粒形特性とオリエンテーション. 地形, 12, 335-355.
- 八木下浩司(2001): 『岩相解析および堆積構造』, 古今書院, pp. 222.
- 山本憲志郎(1990): 日高山脈北部における周氷河性斜面堆積物の数量的性質. 地理学評論, 63A-5, 285-314.
- 山本憲志郎(1991): 周氷河性斜面堆積物における礫径および礫の形態とファブリックストレングスとの関係. 地形, 12, 135-146.
- 山本憲志郎(1992): 周氷河性斜面堆積物におけるマクロ・ファブリック. 地理学評論, 65A-2, 114-123.
- 山本憲志郎(1995): 様々なファブリック解析パラメータの関係に関する予察的研究. 『自然環境論の窓から』, 門村 浩教授退職記念出版事業会, 159-163.
- 山本憲志郎(1996): 有珠・オガリ山における転・落石および乾燥岩屑流堆積物のファブリック. 地理学評論, 69A-3, 165-183.
- 山本憲志郎(1998): 斜面傾斜および礫のファブリックと斜面プロセスの関係. 地形, 19, 243-259.
- 山本憲志郎(2009): 掃流堆積物の一般的堆積構造—特に礫の大きさと形が与える影響について—. 『自然・社会・ひと〜地理学を学ぶ〜』, 古今書院(金沢大学文学部地理学教室編), 2-19.
- 山本憲志郎(2011): 流向とインプリケーション, 2011年東北地理学会春季学術大会発表要旨.
- 山本憲志郎(2012): 河床礫のオリエンテーションおよびインプリケーションの特徴について, 2012年北海道地理学会発表要旨.
- 山本憲志郎(2014): 河床礫のインプリケーションの形成と軸長, 堆積面との関係に関する予察的研究, 2014年北海道地理学会発表要旨.
- 山本憲志郎(2016): 河床礫のc軸長, a-b面の大きさなどとインプリケーショ

ンとの関係, 2016年東北地理学会春季学術大会発表要旨.

Krumbein, W. C. (1939): Preferred orientation of pebbles in sedimentary deposits. Jour. Geol., 47, 673-706.

Mark, D. H. (1974): On the interpretation of till fabrics. Geology, 2, 101-104.

Scheidegger, A. E. (1965): On the statistics of the orientation of bedding planes, grain axes, and similar sedimentological data. U.S. Geological Survey Professional Paper, 525-C, 164-167.

Yamamoto, K. (1989): Clast-Fabric Strength in Periglacial Slope Deposits as a Function of Clast Size and Shape. Environ. Sci., Hokkaido University, 12 (2), 187-197.

Zingg, Th. (1935): Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 15, 39-140.

