

## 扇状地の規模に関する研究動向

—どんなに大きくても扇状地？—

齊藤享治（埼玉大学）

### I はじめに

—扇状地の定義はどうなっているのか？

日本の扇状地では、面積576km<sup>2</sup>（段丘化した部分も合わせた面積）の多摩川扇状地が最大で、42.5kmの鬼怒川扇状地が最長であり、平均勾配が2‰よりも緩いと、扇状地形態を一般にとらない（齊藤，1988）。ところが、ボツワナ（南アフリカ共和国の北に位置する国）の北部には、Okavango 扇状地と呼ばれる面積1.8万km<sup>2</sup>（四国の面積1.8万km<sup>2</sup>）、長さ150km、平均勾配0.23‰の扇形地形がある（Stanistreet and McCarthy, 1993）。このような大きな扇形地形も扇状地といえるのであろうか。

扇状地研究は、1960年代にアメリカ合衆国南西部の乾燥地域において急速に進んだ（阪口，1971；Beaumont, 1972；Bull, 1977；Rachocki, 1981）。当時、扇状地の形成プロセスについて、主に地形学的手法で明らかにした論文が多かった。その後、各種気候帯での扇状地が報告され、1980年代以降には、堆積学的手法で扇状地堆積物の堆積プロセスについて言及した数多くの論文がでた。その間、扇状地の定義も拡大し、インド東部のヒマラヤ山脈山麓に発達する面積1.6万km<sup>2</sup>、長さ60km、平均勾配0.34‰（Singh et al., 1993；Stanistreet and McCarthy, 1993）のKosi川扇状地などが巨大扇状地とされ、さらにはOkavango扇状地までも扇状地とされた。

このような扇状地の規模が大きくなる定義の拡大傾向に対し、Blair and McPherson (1994)は、扇状地とは、主として土石流や布状洪水により谷口に形成された急勾配（ $1.5 \sim 25^\circ = 26 \sim 470\text{‰}$ ）の半円錐形地形と定義を厳格化した。その際、地形、水理・堆積プロセス、層相に基づく、扇状地は他の河川地形と区分ができ、その長さはせいぜい10kmまでと指摘した。

このような状況をふまえた Mack and Leeder (1999)は、数十年来の研究にもかかわらず、扇状地の堆積の包括的モデルはとらえどころがないままであり、扇状地形成を担う堆積プロセスやその結果の層相と同様に、扇状地の定義について見解が一致しない状態が続いていると述べている。以上のようなことから、本稿では、どのような扇状地がどのような堆積プロセスで形成されたと解釈されてきたのかを総括しながら、扇状地研究の課題に触れる。

### II 扇形地形の規模と扇状地

—どんなに大きくても、扇状地！？

#### 1. 崖錐

—崖錐は扇状地ではない

扇状地より規模が小さく、急勾配の扇形地形に崖錐 talus・talus cone・debris cone がある。

定義を厳格化した Blair and McPherson (1994)の扇状地はいわゆる（広義の扇状地の）小規模扇状地に相当する。その扇状地上で作用する堆積プロセスについて、彼らは扇状地本体をつくる一次的（初生的）プロセスと、扇状地表面を修飾する二次的（後生的）プロセスとに分けた。一次的プロセスについて、さらに、(1)基盤岩の崩壊によって発生した堆積物重力流（落石、岩石すべり、岩石なだれ）、(2)崩積土斜面の不安定化によって発生した堆積物重力流（崩積土すべり、土石流）、(3)崩積土斜面の不安定化によって発生した流体重力流（布状洪水、下刻流路洪水）に分けた。ここでいう堆積物重力流とは、物質に直接働く重力によって土砂が移動する流れであり、流体重力流とは、水の力によって土砂が移動する流れである。扇状地は、そのなかで主に土石流と布状洪水によってできるのに対して、崖錐は、扇状地形成に先立ち、落石、岩石すべり、岩石なだれによってできると

した。それぞれのプロセスは独自の層相をつくるので、崖錐と扇状地の間には、堆積物の特徴に明確な違いが認められる。この崖錐と扇状地の違いについては、Drew(1873)がインダス川上流域において fan talus は河流運搬ではないと報告したように、古くから言及されている。

## 2. 沖積錐

### —沖積錐の位置づけは難しい

沖積錐 alluvial cone は、扇状地よりも規模の小さい扇形地形として昔から注目されてきた (Chamberlin and Salisbury, 1909; Eckis, 1928など)。崖錐と扇状地の中間規模の地形とされ (Cotton, 1922), 扇状地  $1\sim 10^\circ$ , 沖積錐  $10\sim 25^\circ$ , 崖錐  $25\sim 50^\circ$  といったおおまかな勾配による区分もある (Scheidegger, 1961)。沖積錐は、主に土石流によって形成されるので、扇状地を主に河流によって形成される地形と定義した場合には、沖積錐を区分する意味もあるが、扇状地を土石流や河流によってできる地形と定義する場合には、沖積錐と土石流卓越扇状地の違いが曖昧になり、沖積錐は不要あるいは独自の定義が必要といったように、沖積錐の位置づけは難しいものとなる。

## 3. 土石流卓越扇状地と乾燥扇状地

### —扇状地といえば土石流扇状地であった!?

扇状地は古くから河川の堆積作用でできると指摘され (Drew, 1873; Gilbert, 1882など), 黄河下流の長さ約500km (Gregory, 1918) の扇形地形まで、世界で最も大きい扇状地の1つとされた (Davis, 1898)。これに対し、Blair and McPherson (1994) は、Smith (1754)・Saussure (1779, 1784, 1796a, b)・Surrel (1841, 1870)・Drew (1873)といった先駆的扇状地研究者が最初に指摘し、1800年代末から1900年代初期にかけて、布状洪水、急速な物質移動、土石流の観察などによって確立した扇状地固有の特徴や発達条件からみて、黄河の扇形地形はデルタであって扇状地ではないと反論した。

河川の堆積作用によってできると説明された扇状地であったが、扇状地研究が進められた乾燥地域では、扇状地堆積物が主として泥流によりもたらされること (McGee, 1897), 扇状地堆積物が泥流堆積物と水流堆積物とに分けられ、扇状地形成

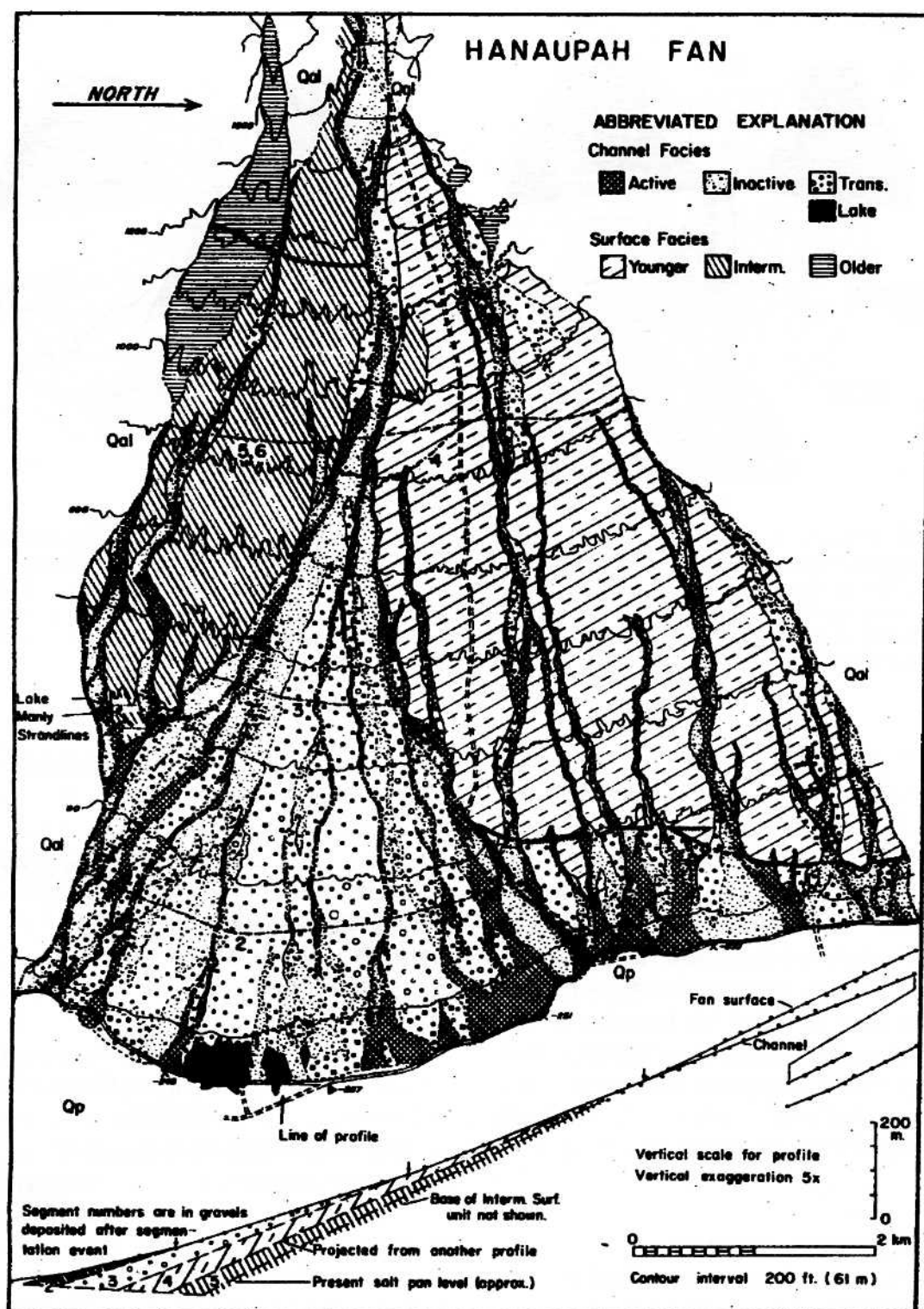
にとって泥流の存在が重要であることが報告された (Blackwelder, 1928)。さらに、扇状地研究が盛んに行われた1960年代には、アメリカ南西部の乾燥地域で、扇状地堆積物の記載が多数なされ (Bull, 1963, 1964; Ruhe, 1964; Bluck, 1964; Melton, 1965など), 実際の泥流の堆積様式も報告された (Beaty, 1963)。そのような泥流を含めて土石流が堆積過程に、河流が侵食過程に対応することが指摘された (Bull, 1972, 1977; Wasson, 1977)。このように主に土石流によってできる扇状地は土石流卓越扇状地 debris-flow dominated fan と呼ばれているが、扇状地といえは1970年代前半までは土石流卓越扇状地が一般的に念頭にあった。Death Valley 西縁にあり、土石流が卓越する Hanaupah 扇状地は (第1図), 多くの研究者に注目され (Denny, 1965; Hooke, 1972; Dorn et al., 1987; Dorn, 1988; Hooke and Dorn, 1992; Blair and McPherson, 1994; Ibbeken et al., 1998), 土石流卓越扇状地の代表例となっている (Stanistreet and McCarthy, 1993)。

扇状地形成にとって都合がよいといわれる乾燥地域であったが (Tarr, 1903など), それ以外の地域からの扇状地も報告されるようになり、1977年には網状流扇状地が湿潤扇状地 humid fan・wet fan と呼ばれたのに対して、土石流卓越扇状地は乾燥扇状地 arid fan と名付けられた (Schumm, 1977)。その前後から、土石流卓越扇状地以外の扇状地の報告が多くなった。

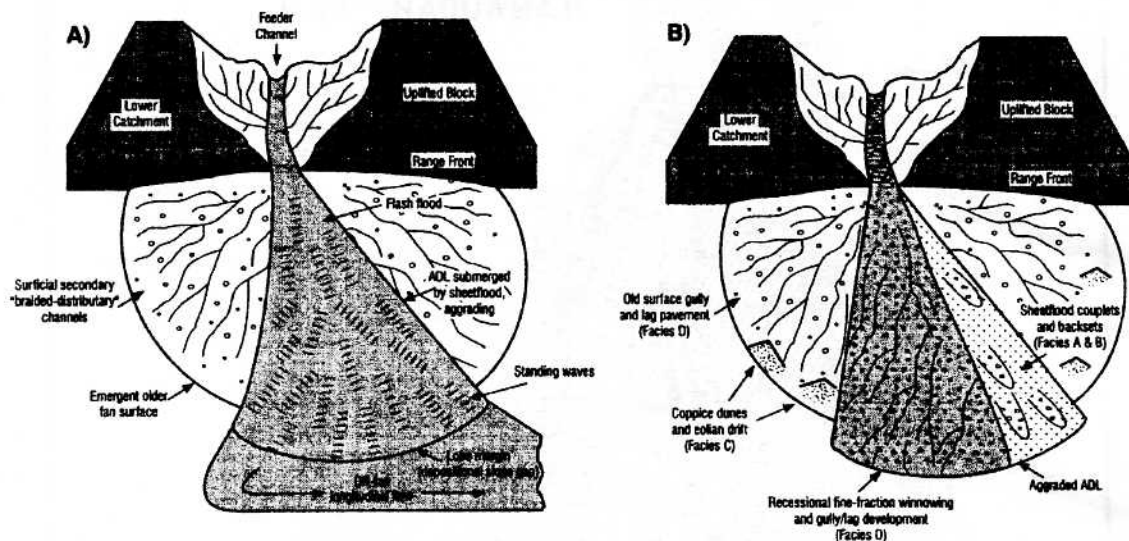
## 4. 布状洪水卓越扇状地

### —布状洪水による扇状地もある!?

扇状地堆積物は、土石流堆積物と河流堆積物に分けられ、河流堆積物はさらに流路堆積物、布状洪水堆積物、浸透堆積物に分けられる (Hooke, 1967; Wasson, 1974; Wells and Harvey, 1987; Balance, 1984)。浸透堆積物とは、扇状地上を流れる河川の水が浸透することによって舌状に礫が長く堆積したものである (Hooke, 1967)。Hogg(1982)が総括した面状に広がる流水、布状洪水については、観察されることがまれなので (McGee, 1897; Bull, 1964), 扇状地形成の堆積プロセスとしてはこれまで無視されてきたり、間違った説明がなされてきたといわれる (Blair and McPherson, 1995)。



第1图 Map and representative topographic profile of Hanaupah fan (Hooke, 1972)



第2図 Schematic depiction of typical depositional phases on a waterlaid alluvial fan, beginning with the generation of a sediment-laden flash flood from heavy precipitation in the catchment (A). Upon reaching the fan, this discharge rapidly expands into a sheetflood across the active depositional lobe (ADL). Lobe switching results in progressive fan aggradation through time (B). Recessional flood or more frequent secondary overland flow across part of the active depositional lobe. Concentration of sediment-deficient water erodes the surface of the sheetflood deposits to produce gravel lags and gully fills. (Blair, 2000)

それに対して、布状洪水が扇状地を形成する重要なプロセスとした Blair and McPherson (1994)は、土石流卓越扇状地と布状洪水卓越扇状地 sheetflood-dominated fan に区分し、前者が1~5km で平均勾配5~15° なのに、後者は3~10km で平均勾配2~8° と、その特徴をまとめた。具体例としては、Wells and Dohrenwend (1985)がカリフォルニア州南東部の扇状地の一部を覆う布状洪水堆積物を報告している。さらに Blair(2000)も、水流扇状地 waterlaid alluvial fan と表現した Death Valley の Hell's Gate 扇状地(面積49.5km<sup>2</sup>, 長さ11.8km, 勾配3~5°)を調査して、布状洪水扇状地の堆積プロセスを模式的に描いている(第2図)。

## 5. 網状流扇状地と湿潤扇状地

### ①アウトウォッシュファンと湿潤扇状地 —網状流扇状地の認識は寒冷地域から！

日本では、扇状地といえば、網状河川によって形成された大規模扇状地を最初に思い浮かべ、小

規模扇状地には土石流も関与すると考えるのが一般的と思われる。しかし、世界的には、網状河川によって扇状地ができるとの指摘もあるにはあったが(Davis, 1938; Blissenbach, 1954; Bull, 1972など)、普通にそのように考えられるようになったのは、湿潤地域の扇状地によってではなく、むしろ特殊な例ともいえる雪氷が融けた水流によってできた扇状地がまとめて報告された1970年代からである。

氷河の前面には、融氷河流(アウトウォッシュ)の出口を扇頂とする緩傾斜の扇形地形が並んだアウトウォッシュプレーンが形成されることがある。初期の扇状地研究者である Haast (1864) は、ニュージーランド南島のカンタベリー平原において、この地形に alluvial fan の fan を世界で最初に用いたといわれる(Cotton, 1922)。アウトウォッシュプレーン上では、融氷河流は一般に網状流をなす。この網状流をかかえる扇形地形が扇状地として再度注目されることになるのは百年後のことで、アラスカでアウトウォッシュファン outwash



fan (Boothroyd, 1972; Gustavson, 1974; Boothroyd and Ashley, 1975)と名付けられてからである。

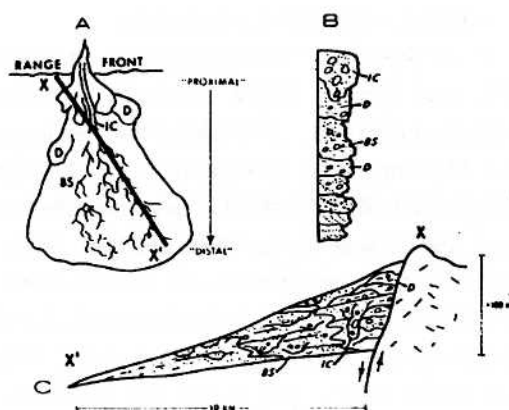
アウトウォッシュファンのような低起伏の縦断砂堆・横断砂堆といった網状流プロセスが支配する扇状地は、恒常河川がつくる湿潤扇状地と名付けられた (Schumm, 1977)。それをうけ、アイスランドのアウトウォッシュプレーン (アイスランドではサンズール sandur (サンダー) と呼ばれる地形) は湿潤扇状地とされた (Boothroyd and Nummedal, 1978)。

## ② 河流卓越扇状地と湿潤扇状地

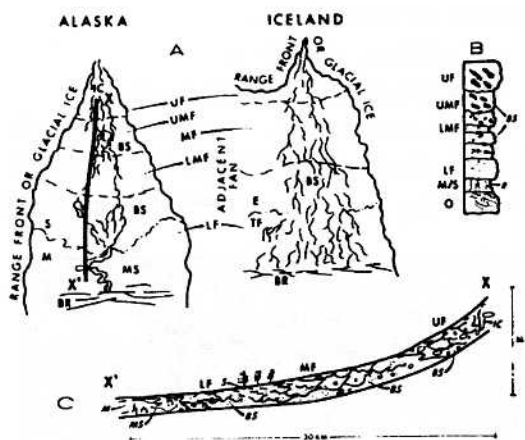
### — 網状流扇状地は湿潤扇状地!? —

その後、McGowen(1979)により、乾燥扇状地や土石流卓越型扇状地 debris-flow dominated fan が乾燥・半乾燥地域に形成され、湿潤扇状地や河流卓越扇状地 stream-dominated fan・fluvial-dominated fan が湿潤地域に形成されると整理されたという (Blair and McPherson, 1994)。同時に、アウトウォッシュファン以外の湿潤地域の湿潤扇状地についても、湿潤温暖扇状地 humid-temperate fan (Pierson, 1980; Kochel and Johnson, 1984; Wells and Harvey, 1987), 湿潤熱帯扇状地 humid-tropical alluvial fan (Kesel and Lowe, 1987; Evans, 1991) として多数報告されるようになった。そして、Bull(1977), Collinson(1978), Reineck and Singh (1980), Galloway and Hobday (1983)を引用した Crews and Ethridge (1993)によれば、湿潤扇状地は、乾燥扇状地にくらべて、(1)大きな恒常的網状流をもち、(2)側方への移動傾向が強く、(3)集合流プロセスよりも河流プロセスが卓越するという特徴をもつことが認識されていったという。

過去の堆積物についても、網状流主体の層相は、河流卓越扇状地の指標とされ (Gloppen and Steel, 1981; Mack and Rasmussen, 1984), 網状流扇状地 braided alluvial fan と呼ばれることもある (Bourquin et al., 1998)。このような湿潤扇状地と乾燥扇状地 (あるいは河流卓越扇状地と土石流卓越扇状地) を両極とした扇状地モデル (第3図・第4図) が描かれるようになり (Cherven, 1984), このモデルを層序にあてはめて、多くの湿潤・乾燥扇状地が復元され、気候条件が議論されるようになった。



第3図 Facies model for arid-region alluvial fan. (A) Map view. D=debris-flow; IC=incised channel; BS=braided stream. (B) Vertical sequence produced by fan progradation. Symbols as in (A). (C) Longitudinal cross-section. (Cherven, 1984)



第4図 Facies model for humid-region alluvial fan. (A) Map views of Alaskan and Icelandic outwash fans. UF=upper fan; MF=middle fan; UMF=upper middle fan; LMF=lower middle fan; LF=lower fan; IC=incised channel; BS=braided stream; MS=meandering stream; S=swamp; M=marsh; BR=beach ridges; E=aeolian dune field; TF=wind/tidal flat. (B) Vertical sequence produced by fan progradation. R=roots; O=overbank deposits undifferentiated. (C) Longitudinal cross-section (modified from Boothroyd & Ashley, 1975 and Boothroyd & Nummedal, 1979). (Cherven, 1984)

## 6. 巨大扇状地

### ①巨大扇状地の特徴

#### — 網状流・分流路があれば扇状地!?

インド東部のヒマラヤ山脈山麓には (第5図右下), Kosi 川がつくる面積  $1.6 \text{ km}^2$ , 長さ  $60 \text{ km}$  (Singh et al., 1993), 平均勾配  $0.34\%$  (Stanistreet and McCarthy, 1993) の Kosi 川がつくる扇形地形がある (第6図)。この地形は, mega-cone (Parkash et al., 1980), large flat fan (Wells and Dorr, 1987), 巨大扇状地 megafan (Gohain and Parkash, 1990) と呼ばれてきた。もともと Geddes(1960)により紹介された megafan の概念は, 「inland delta」 (Gole and Chitale, 1966), 「wet alluvial fan」 (Schumm, 1977), 「braided-stream fan」 (Blatt et al., 1980), 「megafan」 (Gohain and Parkash, 1990; Mohindra et al., 1992) と, 異なった研究者が違った名前を与えてきたが (Singh et al., 1993), 巨大扇状地の特徴は, 多くの分流路をもち, 低勾配 ( $0.05 \sim 0.18^\circ = 0.9 \sim 3.1\%$ ) の大規模な ( $10^3 \sim 10^4 \text{ km}^2$ ) 扇形地形とまとめられている (Sinha and Friend, 1994; DeCelles and Cavazza, 1999)。

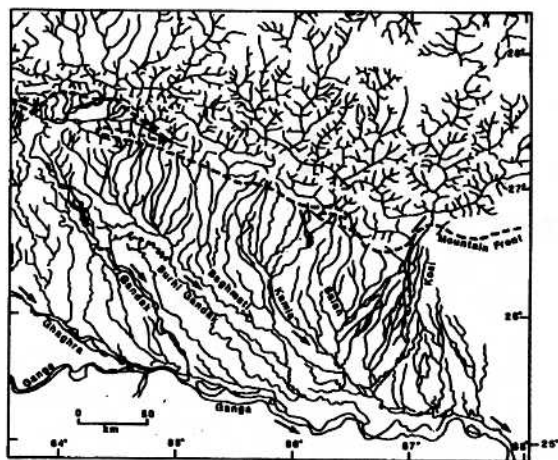
### ②巨大扇状地と湿潤扇状地

#### — 乾燥気候下で湿潤扇状地ができる??

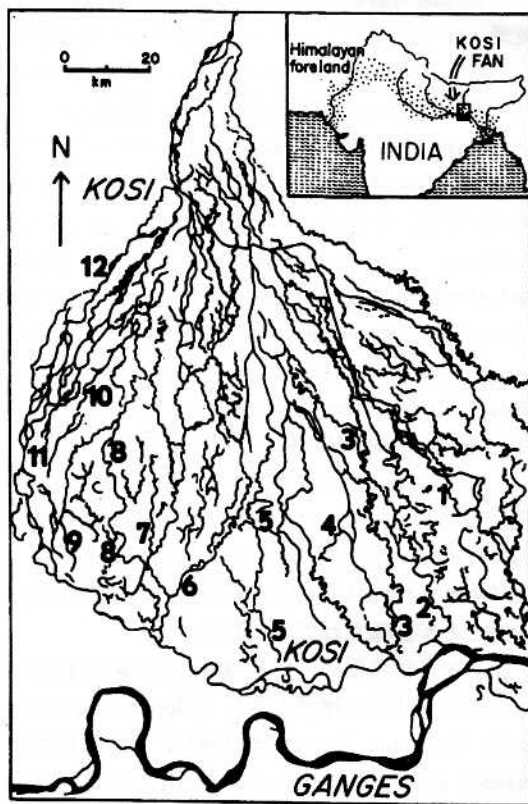
巨大扇状地については, 大集水域を必要とするので河流卓越扇状地とは違うという考え方もあるが (DeCelles and Cavazza, 1999), Stanistreet and

McCarthy (1993)は, 河流卓越扇状地と巨大扇状地をあわせて, 網状流卓越扇状地 braided dominated fan に分類した。

寒冷地域で認識され, 後に湿潤扇状地とされた網状流卓越扇状地に巨大扇状地が含まれてしまうと, 巨大扇状地は湿潤扇状地で湿潤気候下でできたと誤解されかねない。そのような状況に対し, DeCelles and Cavazza (1999) は, 河成巨大扇状地は湿潤気候帯に限らないと注意を喚起し, 乾燥したアルゼンチン北西部の約  $1,400 \text{ km}^2$  の Jachal川巨大扇状地や約  $700 \text{ km}^2$  の Huaco川巨大扇状地 (多摩川扇状地は  $576 \text{ km}^2$ ) (Damanti, 1993), さらに北部ペルーからブラジルにかけての最大の河成巨大扇



第5図 River channel patterns, with the addition of the source area to the north. This is based on small scale maps of the World Topographical Series, HIND 5000. (Sinha and Friend, 1994)



第6図 Map of Kosi drainage system, to resolution limit of about  $30 \text{ m}$ , constructed from March 1977 dry-season false-color satellite imagery. Dates for occupation of channels 1 to 12 are 1731, 1770-1775, 1807-1839, 1840-1873, 1873-1893, 1893-1921, 1921-1926, 1926-1930, 1930-1936, 1936-1942, 1942-1948?, and 1977, respectively (from Singh, 1971) (Wells and Dorr, 1987)

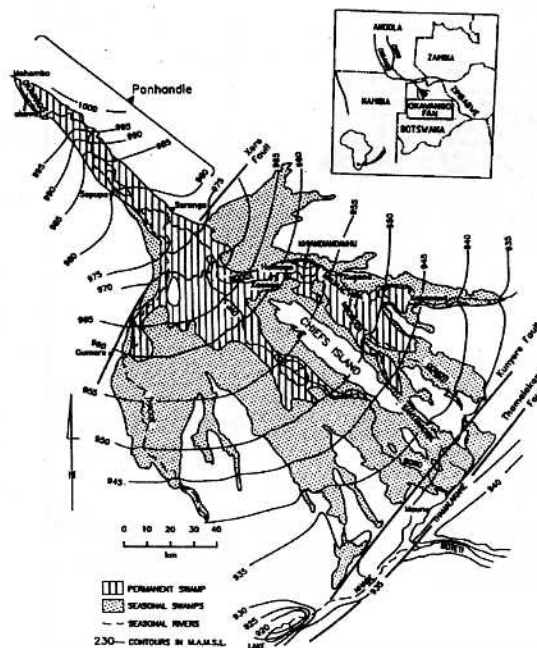
状地とされた面積約 6 万 km<sup>2</sup> (北海道は約 7.8 万 km<sup>2</sup>), 長さ約 400 km の Pastaza-Marañon 巨大扇状地 (Räsänen et al., 1992) を例示した。ただし, 最大に関しては, それを上回るボリビアの面積約 6.5 万 km<sup>2</sup> の Grande 川大扇状地 huge alluvial fans も報告されている (Iriando, 1993)。

## 7. Losimean 扇状地

—蛇行流でも扇状地ができる!?

—湿地帯で堆積しても扇状地!?

ボツワナ北部にある Okavango 扇状地は, 面積 1.8 万 km<sup>2</sup>, 長さ 150 km, 平均勾配 0.23‰ (Stanistreet and McCarthy, 1993) あるいは面積 2.5 万 km<sup>2</sup>, 平均勾配 0.33‰ (McCarthy et al., 1998) とされる扇形地形である (第 7 図)。植被が密であり, 勾配が極めて緩く, 低い屈曲度 sinuosity, 蛇行が特徴で, low sinuosity / meandering の最初の文字をとって, losimean 扇状地と名付けられた (Stanistreet and McCarthy, 1993)。しかし, 約 600 km<sup>2</sup> が恒常的な湿地で (McCarthy et al., 1993), 堆積物が泥など細粒であり, 堆積プロセスが湿地植物の障害によるものといった, これまでの扇状地とは異質の堆積プロセスをとっている。



第 7 図 Topography and vegetative zonation of the Okavango Fan (Stanistreet and McCarthy; 1993)

## III 扇状地の定義の厳格化

—扇状地は扇状地!

### 1. 堆積プロセスの限定

#### ① Trollheim 扇状地の否定

—乾燥地域の網状流扇状地代表は存在しない!?

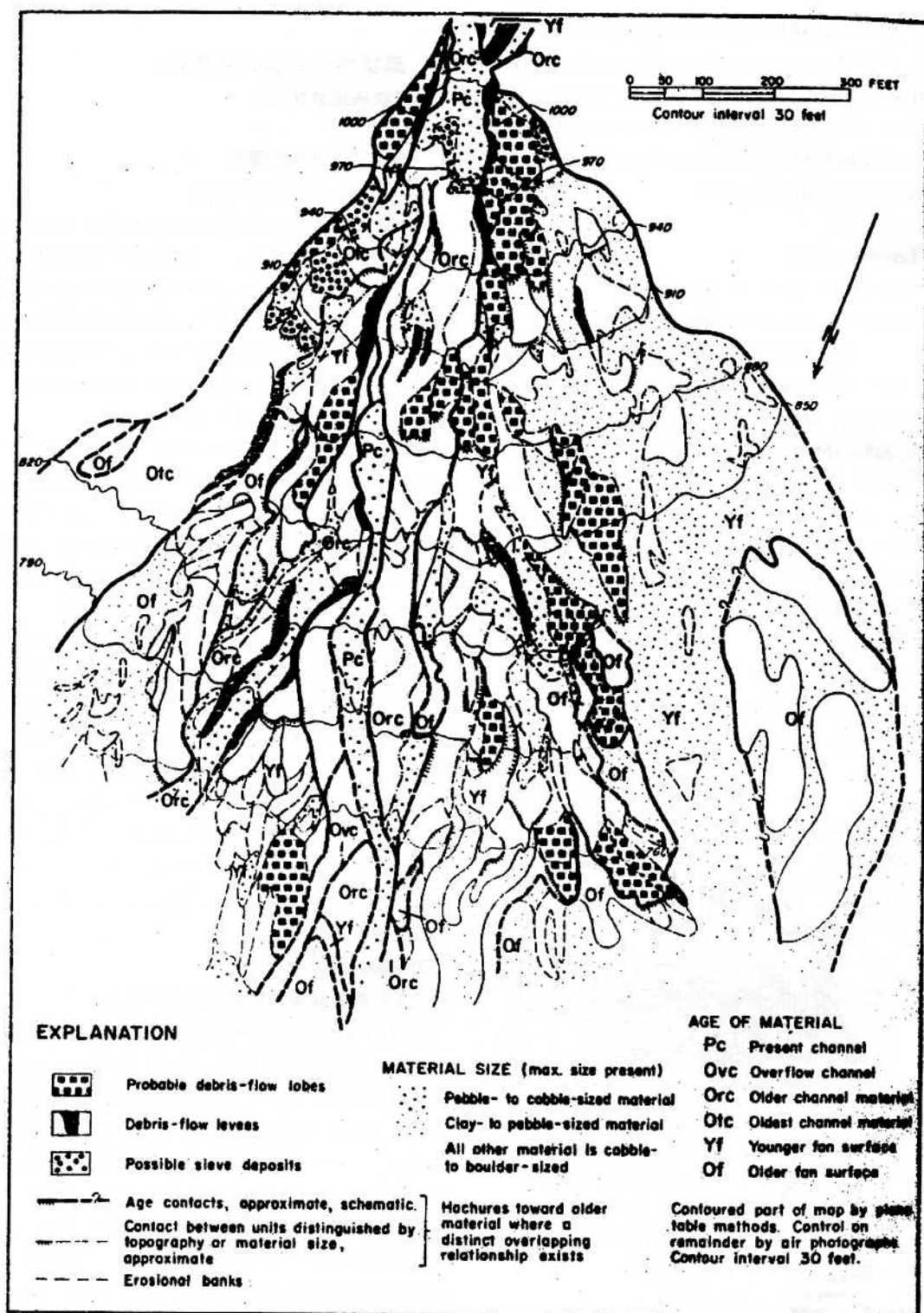
扇状地の定義が拡大し, 大規模扇形地形まで扇状地とされる状況に対し, Blair and McPherson (1994) は, 網状流が単に流下する扇形地形は扇状地ではないとし, 扇状地とは, 主として堆積物重力流 (主に土石流) と流体重力流 (主に布状洪水) により形成されるものとした。

乾燥地域の扇状地であっても, カリフォルニア州 Deep Springs 河谷にある Trollheim 扇状地 (長さ 2 km, 面積 0.95 km<sup>2</sup>, 平均勾配 8.4° ; 第 8 図) は, 土石流のほか, 浸透堆積物, 布状洪水, 流路の層相からなるとされてきた (Hooke, 1967; Miall, 1978, 1981; McGowen, 1979; Harvey, 1989)。しかし, 現地調査の結果, 布状洪水や浸透堆積物は見られず, それは Hooke (1967) の地形学図が改変された結果であり, さらに, 乾燥地域の扇状地の堆積シーケンスを構築するに際し, Miall (1978, 1981) が, 扇頂部の網状流河川層相に対し間違って「Trollheim 垂直断面」と名付けてしまったことによるという (Blair and McPherson, 1992)。こうして乾燥地域において網状流によってできたと解釈された扇状地の代表例は間違ったものであることが指摘された。

#### ② 乾燥扇状地の否定

—土石流扇状地は乾燥扇状地ではない!

Death Valley の Panamint 山脈山麓で隣り合う扇状地を取り上げた Blair は, Anvil Spring Canyon 扇状地は河流プロセス (下刻流路洪水と布状洪水) により (Blair, 1999a), Warm Spring Canyon 扇状地はおもに土石流でできたとした (Blair, 1999b)。両者の違いは, 風化により堆積物の違いをもたらす基盤岩型によるとした (Blair, 1999c)。さらに, 上流流域から土石流のプロセスによって山麓まで岩屑斜面から運搬されるのは, 扇状地が形成される主要な方法の 1 つであるとし (Blackwelder, 1928; Beatty, 1963), 扇状地上の歴史的土石流は, 地球上の, すべての気候下でおおむね等頻度で, ど



第8图 Geomorphic map of the upper (most recent) segment of Trollheim Fan (Hooke, 1967)



の山地域からも指摘されていると述べている (Blair and McPherson, 1994, 1998)。カナダでも氷成岩屑が解氷後に河成環境のもと運搬・堆積されてきた扇状地であるパラグレイシヤルファン (paraglacial fan) (Ryder, 1971a, b; Church and Ryder, 1972)が、土石流卓越扇状地であることが報告されている (Elyes and Kocsis, 1988)。このようなことから、乾燥・湿潤扇状地について、気候以外の要素が重要と Gloppe and Steel (1981) や Maizels (1990)も述べているように、Blair and McPherson (1994)は土石流卓越扇状地を乾燥扇状地と言い換えることに反対した。

## 2. 湿潤扇状地の否定

### ① 網状分流路と扇状地堆積物の関係

#### — 網状流があれば網状流扇状地なのか？

現成の扇状地表面上で網状分流路が見られることで、扇状地堆積物が網状分流路により堆積したと解釈されることについて (Davis, 1938など)、Blair and McPherson (1994)は、表面に網状分流路をもつ扇状地の堆積プロセスとその層相は網状流によるものという仮定が、内容のない地形の比較のみに基づいたもので、証拠のある層序学的研究や水理学的な考察によるものではないとした。その「地表は、層序を解く鍵」という方法は、扇状地堆積物堆積時とその後の網状分流路の形成を明らかにしてきた事例研究に反しているとした。

### ② 湿潤扇状地の否定

#### — 湿潤扇状地は扇状地ではない！

#### — 扇状地は長さ10kmまで！

アウトウォッシュファンが湿潤扇状地とされたのは、少ない例あるいは独断的な根拠に基づいたものとされる (Cherven, 1984; Blair and McPherson, 1994)。巨大扇状地の Kosi 川扇状地についても、輪郭が明瞭ではないと Rust (1979)・Rust and Koster (1984)などから扇状地と呼ぶことに対して反論がでている。losimean 扇状地とされた Okavango 扇状地などに対しても、Blair and McPherson (1994)は、疑問を呈した。

Blair and McPherson (1994)は、扇状地の平均勾配が $1.5 \sim 25^\circ$  ( $26 \sim 470\%$ )なのに対し、礫床河川ではめったに $0.4^\circ$  ( $7\%$ )を超えず、両者には $0.5 \sim 1.5^\circ$  ( $9 \sim 26\%$ )の堆積勾配のギャップがあり、

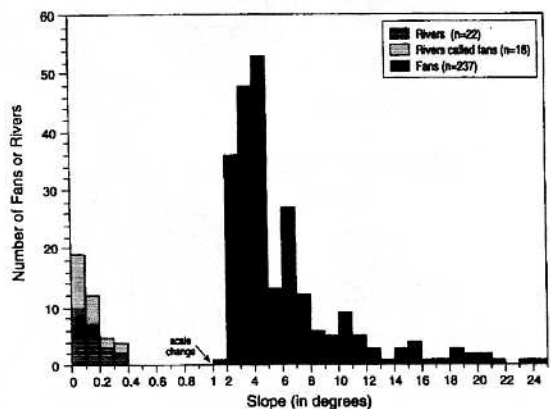
疑問ある扇状地は、扇状地をもたない河川の勾配と同様であることから、扇状地ではないとした (第9図)。このように網状流があれば湿潤扇状地・網状流卓越扇状地とするような、扇状地の定義を拡大することに反対した。扇状地が相対的に限定された規模 (一般的には半径10km以下)と勾配 ( $1 \sim 5^\circ$ )をもつとした Anstey (1965)の研究を引用して、扇状地は、一般に長さが10km以内であることも指摘した。

## 3. 沖積平野扇状地の否定

### — 沖積平野扇状地は扇状地ではない！

Blair and McPherson (1994)は、扇状地堆積物を「上流流域の涵養流路と山地前面が交差したところに堆積した粗粒で角張った土砂からなる半円錐形の堆積物」と定義し、扇状地を山麓扇状地に限定することで、扇状地堆積物と他の礫床河川の堆積物とを区分できるとした。

これに対し、Kim (1995)は、「扇状地」の用語を山麓扇状地に限るのか、沖積平野の「扇状地」まで含めるのかは「語義論」の問題で、正確な意味は文脈で伝えることができるので、山麓扇状地に限定する必要はないと批評した。さらに、扇状地の発達段階について、Blair and McPherson (1994)が、岩石なだれ卓越扇状地などの Stage 1, 土石流卓越扇状地が発達する Stage 2, 土石流・布状卓越扇状地が発達する Stage 3 としたのに対し、それ



第9図 Histogram of representative modern alluvial fans, rivers, and rivers called fans categorized by average slope (Blair and McPherson, 1994)

に続き、河流卓越扇状地が発達する Stage 4, 沖積平野扇状地が発達する Stage 5, 河成システムに相当する Stage 6 があるに違いないとも言及した。

しかし, Blair and McPherson (1995)は, 扇状地は扇状地であって, 沖積平野の「扇状地」(扇形地形)は扇状地ではないし, 扇状地の発達段階についても, 集水域の時間経過による拡大ではなく, 集水域の争奪によって扇状地から河川地形へ移行すると考え, Kim のような発達段階はとらないと反論した。この反論は, 礫層をみれば安易に扇状地堆積物とし, さらに土石流堆積物であれば乾燥気候, 河流堆積物であれば湿潤気候とした研究者に警鐘を与える立場からは当然のことと思われる。この点については, ファンデルタを例に大八木 (2001) も, ファンデルタの重要性が Ethridge などによって明らかにされ以来 (Westcott and Ethridge, 1980), 粗粒堆積物に対して非常に安易にファンデルタあるいは扇状地が古堆積環境として推定されてきたので, McPherson et al. (1987)の論文は, 「ファンデルタばかり」の誤った, しかも安易な解釈に対していくつかの重要な指摘を行ったと述べている。

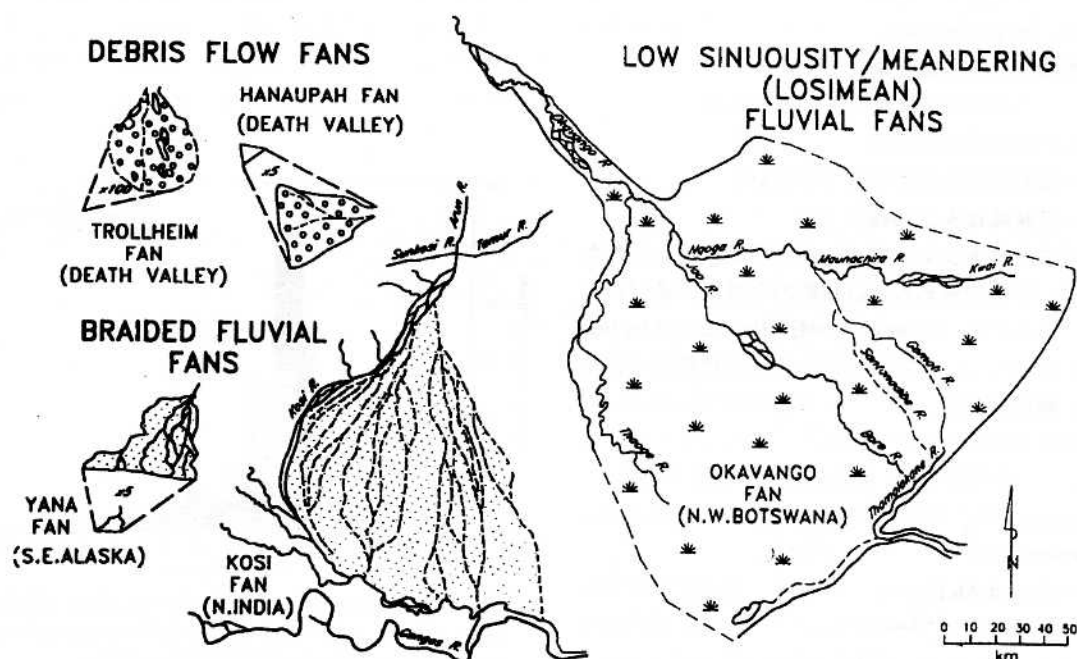
#### 4. 沖積扇状地の定義と規模

##### ①沖積扇状地の定義

##### —網状流扇状地も定義したい!?

それでは, 沖積平野の「扇状地」は扇状地ではないとしてよいのであろうか。Blair and McPherson (1994)の厳格な定義にしたがえば, 大きな沖積平野の場合, 山麓のわずかな部分だけが扇状地, あと河口付近に河川デルタがあるだけで, その他の大部分が, 「河川」(地形)に分類されてしまう。ほとんど区分されない地形分類よりも, ある程度面的に区分される地形分類の方が望ましいはずである。もちろん意味のない地形分類は好ましくないので, Blair and McPherson (1994)が指摘したように, 地形と堆積物との関係を明らかにすることなどが求められる。

そのようななかで, Stanistreet and McCarthy (1993)は, Blair and McPherson (1994)の限定的な定義の扇状地を沖積扇状地 alluvial fan とし, その他の扇形地形を扇状地 fan とした。その上で, 大気下扇状地 subaerial fan を, 土石流扇状地 (沖積扇状地), 網状流扇状地, losimean 扇状地に分類した (第10図・第11図)。



第10図 A comparison of the sizes of recent subaerial fan systems (Stanistreet and McCarthy; 1993)

## DEBRIS FLOW DOMINATED FAN

### INNER FAN :

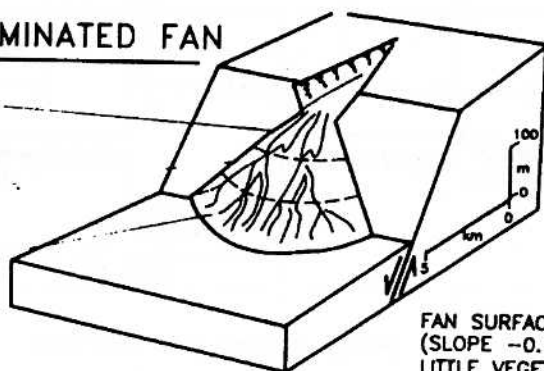
Channelised proximal debris flows

### MID FAN :

Distal debris flows and sheet flows

### OUTER FAN :

Sheet flows and shallow braided stream



FAN SURFACE STEEP  
(SLOPE  $\sim 0.1-0.01$ )  
LITTLE VEGETATION

## BRAIDED FLUVIAL FAN

### INNER FAN :

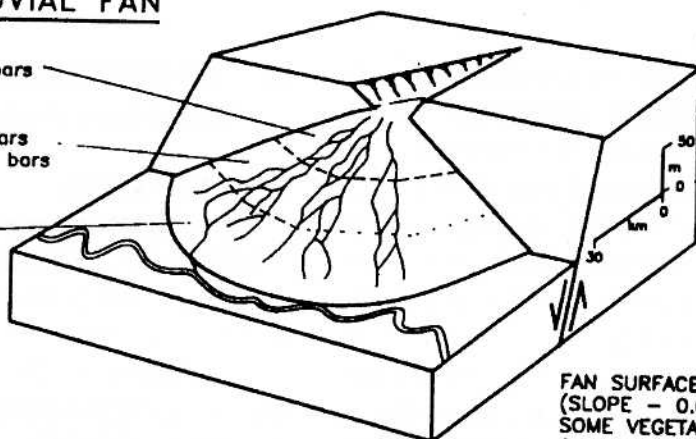
Longitudinal gravel bars

### MID FAN :

Longitudinal gravel bars and transverse sand bars

### OUTER FAN :

Transverse bars and dunes



FAN SURFACE NOT STEEP  
(SLOPE  $\sim 0.001-0.0003$ )  
SOME VEGETATION ALONG CHANNELS

## LOW SINUOSITY/MEANDERING FLUVIAL FAN

### INNER FAN :

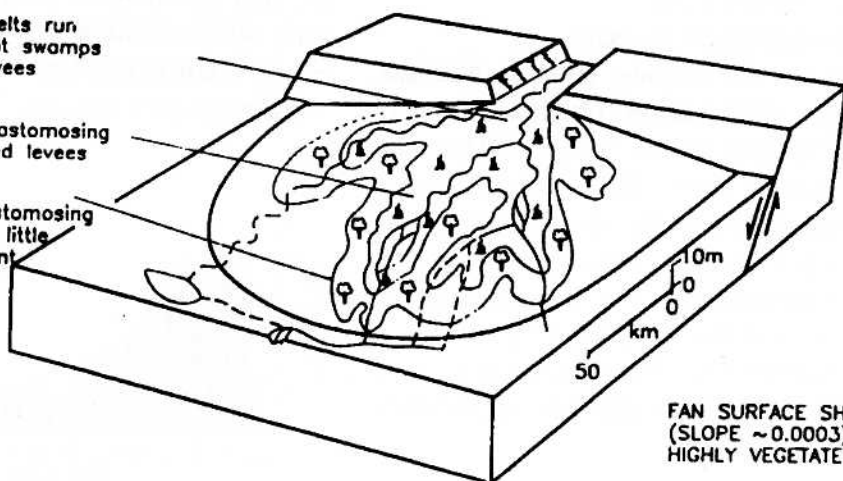
Active meander belts run through permanent swamps with vegetated levees

### MID FAN :

Low Sinuosity/Anastomosing river with vegetated levees

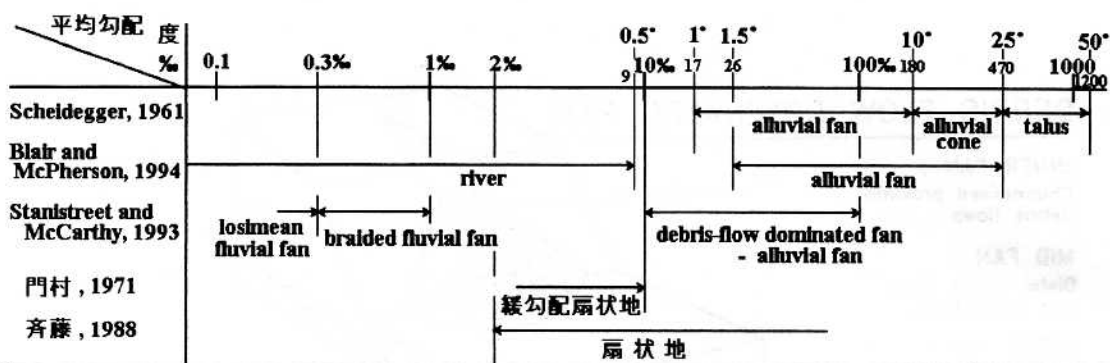
### OUTER FAN :

Low sinuosity/Anastomosing rivers incised with little channel confinement



FAN SURFACE SHALLOW  
(SLOPE  $\sim 0.0003$ )  
HIGHLY VEGETATED

第11图 Classification of subaerial fans (Stanistreet and McCarthy; 1993)



第12図 扇状地の定義と平均勾配

巨大扇状地 megafan に対して alluvial を付けない名称も、土石流扇状地（沖積扇状地）との混同を避けるために、Parkash や彼の共同研究者が（たとえば、Gohain and Parkash, 1990; Singh et al., 1993）好んで用いたといわれる（Sinha and Friend, 1994）。このように堆積学的に堆積物で区分できる扇状地について alluvial fan と呼び、扇形地形は fan とする呼び方が定着しつつある。しかし、扇形地形に単に fan を用いたのでは、本質的な問題が解決したわけではなく、Kim(1995)の指摘したまさしく「語義論」の問題で、その問題を避けただけに過ぎないのではなかろうか。

## ②扇状地の規模と勾配

### —網状流扇状地は0.3~1%!?—

Stanistreet and McCarthy (1993)は、Blair and McPherson (1994)の扇状地の定義に矛盾しないように、平均勾配について、土石流卓越扇状地=沖積扇状地が10~100%、網状流卓越扇状地 braided dominated fan が0.3~1%、loshmean 扇状地が0.3%以下、長さについて、沖積扇状地が10km まで、網状流卓越扇状地が120km まで、loshmean 扇状地が少なくとも150km にのぼるとした（第12図）。このような平均勾配・長さで定義した場合、日本の扇状地は、どのように位置づけられるのであろうか。

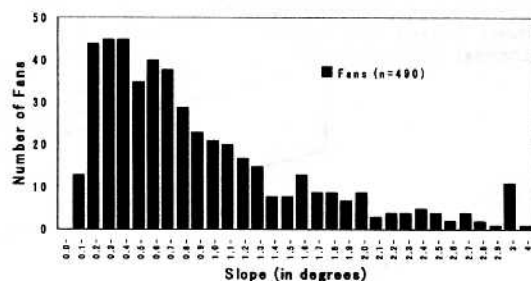
## IV 日本の扇状地の分類と課題

### —日本の扇状地はどうなるの!?—

#### 1. 日本の「扇状地」

##### —日本には網状流扇状地はない??—

面積2km<sup>2</sup>以上、平均勾配2%以上の扇形地形を扇状地とした齊藤（1988）によれば、日本には490 河川をつくる扇状地がある。そのなかに、長さ10 km 以上の扇状地が、最長の鬼怒川扇状地（42.5 km）をはじめ黒部川扇状地（11.8km）など65ある。さらに、平均勾配1.5° 未満の扇状地は393（0.5° 未満では147）にのぼる。これらの扇状地は、Blair and McPherson (1994)の厳格な定義によれば、原則的には扇状地ではなくなる。また、0.5 ~1.5° の扇状地は246もあり、堆積勾配のギャップも認められない（第13図）。



第13図 日本の490扇状地の平均勾配の頻度分布



Stanistreet and McCarthy (1993)の定義によれば、10.6‰の黒部川扇状地は土石流卓越扇状地の範囲に入る。それ以下の10‰未満の扇状地は172にのぼり、しかも、日本では、平均勾配2‰未満の地形は、一般に半円錐形をなさず、河口付近ではデルタを形成している。したがって、平均勾配0.3～1‰の網状流卓越扇状地は日本には存在せず、172の扇状地は網状流卓越扇状地と土石流扇状地の狭間にある。日本の特殊性なのか、それとも湿潤地域の特殊性なのか、湿潤地域と乾燥地域との勾配や面積の比較もあるものの (Kesel, 1985a, b; Oguchi and Ohmori, 1994; Milana and Ruzyski, 1999), データがまだまだ乾燥地域に偏っているので (Lecee, 1990), 0.5～1.5° といった堆積勾配のギャップがあるのかなのかななどについて、世界の異なった部分から多数のデータを収集することが求められている (Milana and Ruzyski, 1999)。

このように、日本には、Blair and McPherson (1994)の扇状地と河川、Stanistreet and McCarthy (1993)の網状流卓越扇状地と土石流卓越扇状地の違いを検討する際の (第12図)、境界に位置する扇状地が多数存在し、扇状地の定義を検討する上で日本は重要な位置を占める。

## 2. 掃流砂礫堆積型扇状地と研究課題

### 一扇端の形成プロセスが重要！

世界的には、乾燥地域で扇状地研究が進んだので、扇状地といえど土石流卓越扇状地が念頭にあった。一方、1900年前後から「扇状地」が用いられた湿潤地域の日本では (齊藤, 1985), 河川的作用による扇状地形成の報告がほとんどである。その大河川による河流卓越扇状地の堆積過程について、村田 (1933) は、大河川の谷口付近において扇頂の河床勾配の方が山地側よりも一般に急であることから、河床勾配の減少のみで堆積が発生することは説明できないとし、河流の分流あるいは扇状地の浸透性による河水の減少が堆積に関与している可能性を示唆した。

黒部川扇状地では、旧流路や扇状地表面に網状流の微地形が残されていることが確認されてきた (吉川, 1952; 深井, 1966; 樫根・山本, 1971; 大内, 1979)。それらをふまえ、門村 (1971) は、勾配10‰以下の緩勾配扇状地について、その微地

形のパターンが、砂礫流送河川の低水時に現れる微地形のパターンに類似することから、流路を放射状に移動しながら、掃流砂礫を満遍なく堆積させた地形であり、浸透堆積の重要性を指摘した。この勾配10‰以下の緩勾配扇状地は、Stanistreet and McCarthy (1993)の網状流卓越扇状地と土石流卓越扇状地の間にあり、扇状地の形成プロセスを考える上で、重要な位置を占める (第12図)。

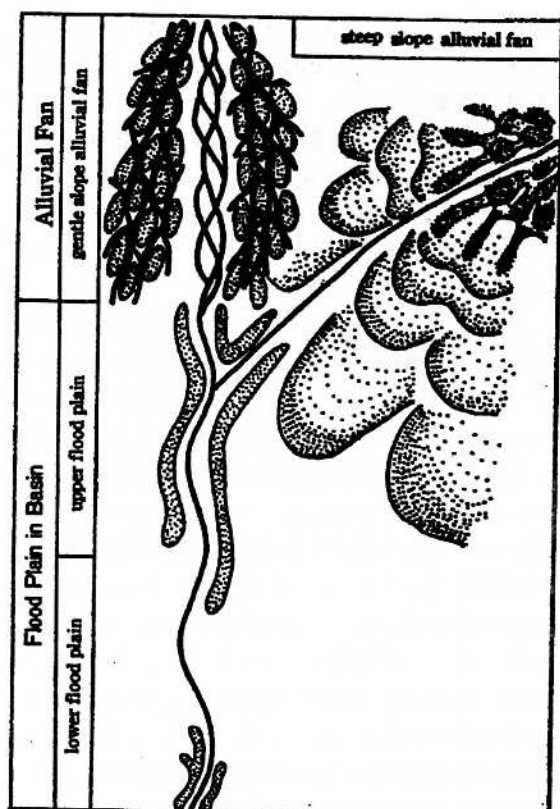
Blair and McPherson (1994)は、扇状地堆積物本体の堆積が扇状地表面の網状流と関係あるかどうか、疑念をもっているため、その点を明らかにする必要がある。また、平均勾配0.5～1.5° より緩い扇形地形は、扇状地独自の堆積物をもたないので、河川地形としている。この点については、日本では、扇端で礫の大きさが不連続に変化することが明らかにされたり (谷津, 1954; Yatsu, 1955), 透礫の堆積過程などで扇端部における勾配の急変が生じることが説明されたりして (小玉・井口, 1986; Kodama, 1992), 扇状地として区分できるような研究が進められている。ただし、扇状地を構成する堆積物と河床を構成する堆積物が、同じものであるかの検討も必要である。

## 3. 土石流涵養型扇状地と研究課題

### 一急勾配・緩勾配扇状地の区分が肝要！

日本では、土石流がつくる小規模扇形地形を沖積錐とし、河川がつくる比較的大きな扇形地形を扇状地として、扇状地と沖積錐を区別することもある。しかし、従来、扇状地と呼ばれてきた、甲府盆地の御勅使川扇状地 (面積33.9km<sup>2</sup>, 長さ10.9km) の一部や御手洗川扇状地 (面積4.2km<sup>2</sup>, 長さ3.9km) のような比較的大きな扇状地までが、微地形や堆積物の分析で、土石流涵養型であることが明らかになった (高木・中山, 1983; 中山・高木, 1987)。この土石流涵養型扇状地の重要性が日本でも認知され、第14図のように、扇状地が緩勾配扇状地 (掃流砂礫堆積型扇状地) と急勾配扇状地 (土石流涵養型扇状地) とに区分されるようになってきた (高木・中山, 1983; 中山, 1987)。

河流卓越扇状地と土石流卓越扇状地の扇状地規模や勾配の違いも検討されるようになってきた (Kostaschuk et al., 1986; Harvey, 1992; Marchi et al., 1993; Marchi and Tecca, 1995)。そのような検



第14図 Typical landform order in a basin  
(高木・中山, 1983)

討などを通じて, Stanistreet and McCarthy (1993) の網状流卓越扇状地と土石流卓越扇状地の間にある平均勾配のギャップ1~10‰の扇状地をどのように定義していけばよいのか, 日本の扇状地から提言できる可能性がある。

#### 4. 扇状地の定義にかかわる諸問題

##### —扇形地形もいろいろ

扇状地の規模以外にも, 扇状地堆積物の堆積環境にかかわって, 深海扇状地やファンデルタの定義の問題, 扇状地に侵食プロセスがかかわるかどうか, ペディメントや岩石扇状地との関係の問題も残されている。また, 谷口を必要としない扇形地形を扇状地とするかどうかでは, サンダー, アウトウォッシュファン, ターミナルファン (河水の蒸発や浸透で堆積が始まってできた扇状地), 火山山麓扇状地などの定義との関係も明瞭にしておかなければならない。

## V おわりに

### —日本の扇状地から情報発信を!

扇状地の定義は, 拡大しつづけ, 扇形地形であれば扇状地, また層相に網状流堆積物があれば扇状地とする傾向をたどってきた。しかも, 土石流卓越扇状地は乾燥気候, 河流卓越扇状地は湿潤気候といった, 単純な当てはめも横行するようになった。このような動向に, Blair and McPherson (1994) は, 警鐘をならし, 扇状地は主に土石流と布状洪水によってできる長さ10km 程度までの地形であると, 定義を厳格化した。それは, 堆積学の立場からいえば, 扇状地堆積物と認定できるものを扇状地堆積物とすることであり, 当然のことであつた。

しかし, 地形学の立場からいえば, 沖積平野において, 山麓の一部だけが扇状地, 河口付近の一部だけがデルタ, その他ほとんどの部分は河川 (地形) と分類しても, 有効な地形区分とは必ずしもいえない。また, 日本で勾配10‰以下の緩勾配扇状地といわれてきた地形の多くが扇状地でなくなる。日本ではそのような扇状地の扇端部での堆積物の違いあるいは堆積プロセスの違いが明らかになっているので, 網状流卓越扇状地は存在するものと思われる。また, 日本で土石流卓越扇状地と網状流卓越扇状地の区分を明瞭にできる可能性もある。扇状地を構成する堆積物と河床堆積物との関係, あるいは扇状地堆積物の堆積環境, 扇状地の形成位置, 侵食プロセスも関与するのかどうかについても, 扇状地の定義を明確にしながら, 明らかにする必要がある。そのような扇状地研究の発展が, 日本のような湿潤地域で期待されている。

謝辞: 本研究には, 平成12~13年度日本学術振興会科学研究費基盤研究 C「河床形態・礫径分析による扇状地の開析過程のモデル化」(研究代表者: 斉藤享治)の補助金を使用しました。1995年以降の文献の多くについては, 埼玉大学附属図書館の電子ジャーナルを利用して, 収集しました。国会図書館などでの文献の複写には, 埼玉大学教育学部学生の石見子さん, 小宮春美さん, 坂田智恵子さん, 武内真知子さんが協力してくれました。ここに記して, 感謝の意を表します。

# 文 献

- 大内俊二 1979. 扇状地面と河床の間の微地形および粒径分布の差異について. *地理学評論* 52: 190-198.
- 大八木晃司 2001. 『岩相解析および堆積構造』古今書院, 222p.
- 門村 浩 1971. 扇状地の微地形とその形成—東海地域域の緩勾配扇状地を中心に—. 矢澤大二・戸谷 洋・貝塚爽平編『扇状地』55-96. 古今書院.
- 榎根 勇・山本莊毅 1971. 『扇状地の水循環』古今書院, 151p.
- 小玉芳敬・井口正男 1986. 渡良瀬川下流部の河床勾配急変点付近における河床砂礫の堆積状況. 筑波大学水理実験センター報告 10: 67-79.
- 斉藤享治 1985. 扇状地事始. *北海道地理* 59: 44-45.
- 斉藤享治 1988. 『日本の扇状地』古今書院, 280p.
- 阪口 豊 1971. 扇状地の自然地理学的諸問題—海外の扇状地を中心として—. 矢澤大二・戸谷 洋・貝塚爽平編『扇状地』121-157. 古今書院.
- 高木勇夫・中山正民 1983. 甲府盆地西部地域の地形. 日大文理学部自然科学研究所研究紀要 18: 31-41.
- 中山正民 1987. 荒川中流低地における微地形と洪水との関係について. 菊地万雄先生古稀記念事業会編『災害の地理学』167-182.
- 中山正民・高木勇夫 1987. 微地形分析よりみた甲府盆地における扇状地の形成過程. *東北地理* 39: 98-112.
- 深井三郎 1966. 黒部川扇状地の微地形とその形成. 富山大学学術調査団『黒部川』121-138. 古今書院.
- 村田貞蔵 1933. 扇状地とその上流河谷との勾配関係に就て. *地理学評論* 9: 857-869.
- 谷津寿寿 1954. 平衡河川の縦断面形について(1)・(2)・(完). *資源研報* 33: 15-24, 34: 14-21, 35: 1-6.
- 吉川虎雄 1952. 黒部川扇状地の地形とその海岸侵蝕. *東京大学地理学研究* 2: 92-109.
- Anstey, R.L. 1965. Physical characteristics of alluvial fans. *United States Army Natick Laboratories, Technical Report* ES20: 109p.
- Ballance, P.F. 1984. Sheet-flow-dominated gravel fans of the non-marine middle Cenozoic Simmler Formation, central California. *Sedimentary Geology* 38: 337-359.
- Beaty, C.B. 1963. Origin of alluvial fans, White Mountains, California and Nevada. *Annals of the Association of American Geographers* 53: 516-535.
- Beaumont, P. 1972. Alluvial fans along the foothills of the Elburz Mountains, Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 12: 251-273.
- Blackwelder, E. 1928. Mudflow as a geologic agent in semiarid mountains. *Geological Society of America Bulletin* 39: 465-484.
- Blair, T.C. 1999a. Sedimentary processes and facies of the waterlaid Anvil Spring Canyon alluvial fan, Death Valley, California. *Sedimentology* 46: 913-940.
- Blair, T.C. 1999b. Sedimentology of the debris-flow-dominated Warm Spring Canyon alluvial fan, Death Valley, California. *Sedimentology* 46: 941-965.
- Blair, T.C. 1999c. Cause of dominance by sheetflood vs. debris-flow processes on two adjoining alluvial fans, Death Valley, California. *Sedimentology* 46: 1015-1028.
- Blair, T.C. 2000. Sedimentology and progressive tectonic unconformities of the sheetflood-dominated Hell's Gate alluvial fan, Death Valley, California. *Sedimentary Geology* 132: 233-262.
- Blair, T.C. and McPherson, J.G. 1992. The Trollheim alluvial fan and facies model revisited. *Geological Society of America Bulletin* 104: 762-769.
- Blair, T.C. and McPherson, J.G. 1994. Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes* 64A: 450-489.
- 斉藤享治 2001. 地形, 水理・堆積プロセス, 層相群に基づいた扇状地そして河川地形との自然区分(抄訳). *地理学研究報告* (埼玉大学教育学部) 21: 19-72.
- Blair, T.C. and McPherson, J.G. 1995. Reply: Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes* 65A: 708-711.
- 斉藤享治 2001. 回答: 地形, 水理・堆積プロセス, 層相群に基づいた扇状地そして河川地形との自然区分(紹介). *地理学研究報告* (埼玉大学教育学部) 21: 77-82.
- Blair, T.C. and McPherson, J.G. 1998. Recent debris-flow processes and resultant form and facies of the Dolomite alluvial fan, Owens Valley, California. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes* 68: 800-818.
- Blatt, H., Middleton, G.V., and Murray, R. 1980. *Origin of sedimentary rocks*, 2nd ed. Englewood Cliff, N.J.: Prentice-Hall, 782p.
- Blissenbach, E. 1954. Geology of alluvial fans in semiarid regions. *Geological Society of America Bulletin* 65: 175-189.
- Bluck, B.J. 1964. Sedimentation of an alluvial fan in southern Nevada. *Journal of Sedimentary Petrology* 34: 395-400.
- Boothroyd, J.C. 1972. Coarse-grained sedimentation on a braided outwash fan, northeast Gulf of Alaska. *University of South Carolina Coastal Research Division Technical Report* 6-CRD: 127p.
- Boothroyd, J.C. and Ashley, G.A. 1975. Processes, bar morphology, and sedimentary structures on braided outwash fans, northeast Gulf of Alaska. In *Glacio-fluvial and glaciolacustrine sedimentation*, ed. A.V. Jopling and B.C. McDonald, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 23: 192-222.
- Boothroyd, J.C. and Nummedal, D. 1978. Proglacial braided outwash: a model for humid alluvial-fan deposits. In *Fluvial sedimentology*, ed. A.D. Miall, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir* 5: 641-668.
- Bourquin, S., Rigollet, C., and Bourges, P. 1998. High-resolution sequence stratigraphy of an alluvial fan-fan delta environment: stratigraphic and geodynamic implications: an example from the Keuper Chaunoy Sandstones. *Sedimentary Geology* 121: 207-237.
- Bull, W.B. 1963. Alluvial fan deposits in western Fresno County, California. *Journal of Geology* 71: 243-251.
- Bull, W.B. 1964. Geomorphology of segmented alluvial fans in western Fresno County, California. *United States Geological Survey Professional Paper* 352E: 89-129.
- Bull, W.B. 1972. Recognition of alluvial-fan deposits in the stratigraphic record. In *Recognition of ancient sedimentary environments*, ed. J.K. Rigby and W.K. Hamblin, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 16: 63-83.
- Bull, W.B. 1977. The alluvial-fan environment. *Progress in*

- Physical Geography* 1: 222-270.
- Chamberlin, T.C. and Salisbury, R.D. 1909. *Geology: processes and their results*. 2nd ed. London: John Murray, 684p.
- Cherven, V.B. 1984. Early Pleistocene glacial outwash deposits in the eastern San Joaquin Valley, California: a model for humid-region alluvial fans. *Sedimentology* 31: 823-836.
- Church, M. and Ryder, J.M. 1972. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin* 83: 3059-3071.
- Collinson, J.D. 1978. Alluvial sediments. In *Sedimentary environments and facies*, 1st Edition, H.G. Reading, 15-60. Oxford: Blackwell.
- Cotton, C.A. 1922. *Geomorphology of New Zealand, Part I, Systematic*. Wellington: Dominion Museum, 462p.
- Crews, S.G. and Ethridge, F.G. 1993. Laramide tectonics and humid alluvial fan sedimentation, NE Uinta Uplift, Utah and Wyoming. *Journal of Sedimentary Petrology* 63: 420-436.
- Damanti, J.F. 1993. Geomorphic and structural controls on facies patterns and sediment composition in a modern foreland basin. In *Alluvial sedimentation*, ed. M. Marzo and C. Puigdefàbregas, *International Association of Sedimentologists, Special Publication* 17: 221-233.
- Davis, W.M. 1898. *Physical geography*. Boston: Ginn and Company, 432p.
- Davis, W.M. 1938. Sheetfloods and streamfloods. *Geological Society of America Bulletin* 49: 1337-1416.
- DeCelles, P.G. and Cavazza, W. 1999. A comparison of fluvial megafans in the Cordilleran (Upper Cretaceous) and modern Himalayan foreland basin systems. *Geological Society of America Bulletin* 111: 1315-1334.
- Denny, C.S. 1965. Alluvial fans in the Death Valley region, California and Nevada. *United States Geological Survey Professional Paper* 466: 62p.
- Dorn, R.I. 1988. A rock varnish interpretation of alluvial-fan development in Death Valley, California. *National Geographic Research* 4: 56-73.
- Dorn, R.I., DeNiro, M.J., and Ajie, H.O. 1987. Isotopic evidence for climatic influence on alluvial-fan development in Death Valley, California. *Geology* 15: 108-110.
- Drew, F. 1873. Alluvial and lacustrine deposits and glacial records of the upper-Indus Basin. *Quarterly Journal of the Geological Society of London* 29: 441-471.
- Eckis, R. 1928. Alluvial fans of the Cucamonga district, southern California. *Journal of Geology* 36: 224-247.
- Evans, J.E. 1991. Facies relationships, alluvial architecture, and paleohydrology of a Paleogene, humid-tropical alluvial-fan system: Chumstick Formation, Washington State, U.S.A. *Journal of Sedimentary Petrology* 61: 732-755.
- Eyles, N. and Kocsis, S. 1988. Sedimentology and clast fabric of subaerial debris flow facies in a glacially-influenced alluvial fan. *Sedimentary Geology* 59: 15-28.
- Galloway, W.E. and Hobday, D.K. 1983. *Terrigenous clastic depositional systems*. New York: Springer-Verlag, 490p.
- Geddes, A. 1960. The alluvial morphology of the Indo-Gangetic plains: its mapping and geographic significance. *Transactions and Papers, Institute of British Geographers* 28: 253-276.
- Gilbert, G.K. 1882. Contributions to the history of Lake Bonneville. *United States Geological Survey Second Annual Report*: 167-200.
- Gloppen, T.G. and Steel, R.J. 1981. The deposits, internal structure and geometry in six alluvial fan-fan delta bodies (Devonian-Norway): a study in the significance of bedding sequence in conglomerates. In *Recent and ancient nonmarine depositional environments: models for exploration*, ed. F.G. Ethridge and R.M. Flores, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 31: 49-69.
- Gohain, K. and Parkash, B. 1990. Morphology of the Kosi megafan. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 151-178. Chichester: John Wiley & Sons.
- Gole, C.V. and Chitale, S.V. 1966. Inland delta building activity of the Kosi River. *American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Hydraulics Division* 92-HY2: 111-126.
- Gregory, H.E. ed. 1918. *Military geology and topography*. New Haven: Yale University, 281p.
- Gustavson, T.C. 1974. Sedimentation on gravel outwash fans, Malaspina Glacier Foreland, Alaska. *Journal of Sedimentary Petrology* 44: 374-389.
- Haast, J. 1864. *Formation of the Canterbury Plains*. Christchurch: Press office, Session 22, 63p.
- Harvey, A.M. 1989. The occurrence and the role of arid zone alluvial fans. In *Arid zone geomorphology*, ed. D.S.G. Thomas, 136-158. New York: Wiley.
- Harvey, A.M. 1992. The influence of sedimentary style on the morphology and development of alluvial fans. *Israel Journal of Earth Sciences* 41: 123-137.
- Hogg, S.E. 1982. Sheetflood, sheetwash, sheetflow, or...? *Earth-Science Reviews* 18: 59-76.
- Hooke, R.L. 1967. Processes on arid-region alluvial fans. *Journal of Geology* 75: 438-460.
- Hooke, R.L. 1972. Geomorphic evidence for Late-Wisconsin and Holocene tectonic deformation, Death Valley, California. *Geological Society of America Bulletin* 83: 2073-2098.
- Hooke, R.L. and Dorn, R.I. 1992. Segmentation of alluvial fans in Death Valley, California: new insights from surface exposure dating and laboratory modeling. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 557-574.
- Ibbeken, H., Warnke, D., and Diepenbroek, M. 1998. Granulometric study of the Hanaupah Fan, Death Valley, California. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 481-492.
- Iriondo, M. 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America). *Geomorphology* 7: 289-303.
- Kesel, R.H. 1985a. Tropical fluvial geomorphology. In *Themes in geomorphology*, ed. A. Pitty, 102-121. London: Croom Helm.
- Kesel, R.H. 1985b. Alluvial fan systems in a wet-tropical environment, Costa Rica. *National Geographic Research* 1: 450-469.
- Kesel, R.H. and Lowe, D.R. 1987. Geomorphology and sedimentology of the Toro Amarillo alluvial fan in a humid tropical environment, Costa Rica. *Geografiska Annaler* 69A: 85-99.
- Kim, S.B. 1995. Discussion: Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary*



- Petrology and Processes* 65A: 706-708. 齊藤享治訳 2001. 討論: 地形, 水理・堆積プロセス, 層相群に基づいた扇状地そして河川地形との自然区分 (紹介). 地理学研究報告 (埼玉大学教育学部) 21: 73-76.
- Kochel, R.C. and Johnson, R.A. 1984. Geomorphology and sedimentology of humid-temperate alluvial fans, central Virginia. In *Sedimentology of gravels and conglomerates*, ed. E.H. Koster and R.J. Steel, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 10: 109-122.
- Kodama, Y. 1992. Effect of abrasion on downstream gravel-size reduction in the Watarase River, Japan: field work and laboratory experiment. *Environmental Research Center Papers, the University of Tsukuba* 15: 1-88.
- Kostaschuck, R.A., MacDonald, G.M. and Putnam, P.E. 1986. Depositional process and alluvial fan-drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms* 11: 471-484.
- Lecce, S.A. 1990. The alluvial fan problem. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 3-24. Chichester: John Wiley & Sons.
- Mack, G.H. and Leeder, M.R. 1999. Climatic and tectonic controls on alluvial-fan and axial-fluvial sedimentation in the Plio-Pleistocene Palomas half graben, southern Rio Grande rift. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes* 69: 635-652.
- Mack, G.H. and Rasmussen, K.A. 1984. Alluvial-fan sedimentation of the Cutler Formation (Permo-Pennsylvanian) near Gateway, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 95: 109-116.
- Maizels, J. 1990. Long-term palaeochannel evolution during episodic growth of an exhumed Plio-Pleistocene alluvial fan, Oman. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 271-304. Chichester: John Wiley & Sons.
- Marchi, L., Pasuto, A., and Tecca, P.R. 1993. Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps. *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge* 37: 447-458.
- Marchi, L. and Tecca, P.R. 1995. Alluvial fans of the Eastern Italian Alps: morphometry and depositional processes. *Geodinamica Acta* 8: 20-27.
- McCarthy, T.S., Ellery, W.N., and Dangerfield, J.M. 1998. The role of biota in the initiation and growth of islands on the floodplain of the Okavango alluvial fan, Botswana. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 291-316.
- McCarthy, T.S., Ellery, W.N., and Ellery, K. 1993. Vegetation-induced, subsurface precipitation of carbonate as an aggradational process in the permanent swamps of the Okavango (delta) fan, Botswana. *Chemical Geology* 107: 111-131.
- McGee, W.J. 1897. Sheetflood erosion. *Geological Society of America Bulletin* 8: 87-112.
- McGowen, J.H. 1979. Alluvial fan systems. In *Depositional and groundwater flow systems in the exploration for uranium*, ed. W.E. Galloway, C.W. Kreitler, and J.H. McGowen, *Texas Bureau of Economic Geology Research Colloquium*: 43-79.
- McPherson, J.G., Shanmugam, G., and Moiola, R.J. 1987. Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas. *Geological Society of America Bulletin* 99: 331-340.
- Melton, M.A. 1965. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal of Geology* 73: 1-38.
- Miall, A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In *Fluvial sedimentology*, ed. A.D. Miall, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 5: 597-604.
- Miall, A.D. 1981. Analysis of fluvial depositional systems. *American Association of Petroleum Geologists, Educational Course Note Series* 20: 75p.
- Milana, J.P. and Ruzicky, L. 1999. Alluvial-fan slope as a function of sediment transport efficiency. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes* 69: 553-562.
- Mohindra, R., Parkash, B., and Prasad, J. 1992. Historical geomorphology and pedology of the Gandak megafan, middle Gangetic Plains, India. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 643-662.
- Oguchi, T. and Ohmori, H. 1994. Analysis of relationships among alluvial fan area, source basin area, basin slope, and sediment yield. *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge* 38: 405-420.
- Parkash, B., Sharma, R.P., and Roy, A.K. 1980. The Siwalik Group (molasse): sediments shed by collision of continental plates. *Sedimentary Geology* 25: 127-159.
- Pierson, T.C. 1980. Erosion and deposition by debris flows at Mt Thomas, New Zealand. *Earth Surface Processes* 5: 227-247.
- Rachocki, A.H. 1981. *Alluvial fans: an attempt at an empirical approach*. New York: Wiley, 161p. ラホッキ, A.H.著, 北林吉弘・齊藤享治訳 1995. 『扇状地の形成と発達』古今書院, 186p.
- Räsänen, M., Neller, R., Salo, J., and Jungner, H. 1992. Recent and ancient fluvial deposition systems in the Amazonian foreland basin, Peru. *Geological Magazine* 129: 293-306.
- Reineck, H.E. and Singh, I.B. 1980. *Depositional sedimentary environments*, 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 549p.
- Ruhe, R.V. 1964. Landscape morphology and alluvial deposits in southern New Mexico. *Annals of the Association of American Geographers* 54: 147-159.
- Rust, B.R. 1979. Coarse alluvial deposits. In *Facies models*, ed. R.G. Walker, *Geoscience Canada Reprint Series* 1: 9-21.
- Rust, B.R. and Koster, E.H. 1984. Coarse alluvial deposits. In *Facies models*, 2nd Edition, ed. R.G. Walker, *Geoscience Canada Reprint Series* 1: 53-69.
- Ryder, J.M. 1971a. The stratigraphy and morphology of para-glacial alluvial fans in south-central British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 279-298.
- Ryder, J.M. 1971b. Some aspects of the morphometry of paraglacial alluvial fans in south-central British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 1252-1264.
- Saussure, H.B.de. 1779. *Voyages dans les Alpes: précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*, part 1. Neuchâtel: Lous Fauche-Borel, 540p.
- Saussure, H.B.de. 1784. *Voyages dans les Alpes: précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*, part 2. Neuchâtel: Lous Fauche-Borel, 482p.
- Saussure, H.B.de. 1796a. *Voyages dans les Alpes: précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*, part 3. Neuchâtel: Lous Fauche-Borel, 456p.
- Saussure, H.B.de. 1796b. *Voyages dans les Alpes: précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*, part 4. Neuchâtel: Lous Fauche-Borel, 594p.

- Scheidegger, A.E. 1961. Theoretical geomorphology. Berlin: Springer-Verlag. シヤイデッガー, A.E.著, 奥田節夫監訳. 1980. 『理論地形学』古今書院, 463p.
- Schumm, S.A. 1977. *The fluvial system*. New York: Wiley, 338p.
- Singh, H., Parkash, B., and Gohain, K. 1993. Facies analysis of the Kosi megafan deposits. *Sedimentary Geology* 85: 87-113.
- Sinha R. and Friend, P.F. 1994. River systems and their sediment flux, Indo-Gangetic plains, Northern Bihar, India. *Sedimentology* 41: 825-845.
- Smith, G. 1754. Dreadful storm in Cumberland. *Gentleman's Magazine* 24: 464-467.
- Stanistreet, I.G. and McCarthy, T.S. 1993. The Okavango Fan and the classification of subaerial fan systems. *Sedimentary Geology* 85: 115-133.
- Surell, A. 1841. *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*, 1st ed. Paris: Imprimerie Cusset.
- Surrell, A. 1870. *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*, 2nd ed. Paris: Imprimerie Cusset.
- Tarr, R.S. 1903. *New physical geography*. London: The Macmillan Company, 457p.
- Wasson, R.J. 1974. Intersection point deposition on alluvial fans: an Australian example. *Geografiska Annaler* 56A: 83-92.
- Wasson, R.J. 1977. Catchment processes and the evolution of alluvial fans in the lower Derwent Valley, Tasmania. *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge* 21: 147-168.
- Wells, N.A. and Dorr, J.A. 1987a. A reconnaissance of sedimentation on the Kosi alluvial fan of India. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethridge, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 39: 51-61.
- Wells, N.A. and Dorr, J.A. 1987. Shifting of the Kosi River, northern India. *Geology* 15: 204-207.
- Wells, S.G. and Dohrenwend, J.C. 1985. Relict sheetflood bed forms on late Quaternary alluvial-fan surfaces in the southwestern United States. *Geology* 13: 512-516.
- Wells, S.G. and Harvey, A.M. 1987. Sedimentologic and geomorphic variations in storm-generated alluvial fans, Howgill Fells, northwest England. *Geological Society of America Bulletin* 98: 182-198.
- Wescott, W.A. and Ethridge, F.G. 1980. Fan-delta sedimentology and tectonic setting: Yallahs fan delta, southeast Jamaica. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 64: 374-399.
- Yatsu, E. 1955. On the formation of the slope discontinuity at the fan margins. *Miscellaneous Reports, Research Institution for Natural Resources* 36: 57-64.

## Recent Studies on the Size of Alluvial Fans

Kyoji SAITO

Faculty of Education, Saitama University