

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)

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 (1994): 450-489.

著者: BLAIR, T. C. and McPHERSON, J. G.

訳: 齊藤享治 (埼玉大学)

【要 旨】

扇状地は、昨今の一般的な使用とは違って、礫床河川など他の堆積環境のものとは、地形、水理プロセス、堆積プロセス、層相群に基づくとすぐに区別できる固有の自然現象である。上流の涵養流路と山地前面とが交差するところにある扇状地の山麓での条件から、布状洪水、落石、岩石すべり、岩石なだれ、土石流などのカタストロフィックな流体重力流と堆積物重力流が、主要な形成プロセスであり、それらは気候と無関係なことがわかる。これらの流れが山麓で拘束されないことで、扇を典型とする急勾配の半円錐形状ができる。この形態にそなわった凸型の横断面形は、河川システムの溝型横断面とは反対であり、河川地形を特徴づける氾濫原の発達を阻害する。扇状地が相対的に急勾配なので、通過する流体重力流の高い運搬能力、高い運搬力、高流砂階を持続する固有の水理条件が、低角のアンティデューンや、地表と平行な平板型成層のシーケンスを堆積させる布状洪水をもたらす。これらの水流層相は、河川では典型的な低流砂階の厚い層理、斜交層理、レンズ状の流路層相、さらに関連する洪水シーケンスとは対照的である。扇状地上で流れが拘束されないことで、流れが浅くなり、速度・運搬力・運搬能力の即刻の低下を起し、扇状地に典型的な角張った淘汰の悪い組織と短い半径をもたらす急速な堆積を引き起こす。この状態は、堆積物重力流がまれて、水流が流路壁に制限されたままか氾濫原に溢流し、下流の水深が大きい河川とは、かなり異なる。堆積物の二次的な再移動も含め、扇状地を形成する固有のプロセスは、地形内容が失われたところでさえ、岩石の記録などで扇状地シーケンスから簡単に相違が認められる固有の層相群をつくる。その保存にとって決定的な断層そばの山麓の条件により、岩石の記録で正確に識別された扇状地堆積物は、過去の堆積盆地のテクトニクスや層序の発達さらに地球の歴史を内蔵する記録を、復元したり解釈するための貴重な手段となっている。

【はじめに】

イギリス北部での Smith(1754)、フランスのアルプス北部での Saussure(1779, 1784, 1796a, b)、フランスのアルプス南部での Surret(1841, 1870)、インド北東部 [北西部の誤りと思われる: カギ括弧は訳者の補注と言ひ換え、以下同様] のヒマラヤでの Drew(1873)をはじめ、初期の扇状地研究は、河川 [地形と堆積物] や河川デルタから扇状地を具体化し、自然界で分けるための固有の特徴や発達条件を確立してきた。その特徴は次の通り

である。(1)集水域を流れてきた流路が山地からでる山麓に扇状地が出現することとそこに限定されること。(2)山地前面に対して横切る方向の扇状地の向き。(3)地形的に規則のない初期状態から流域界が確定するまでの扇状地をもつ集水域の進化的特性。(4)堆積事変時のまれてカタストロフィック [天変地異的] な流量の特性。(5)閃光洪水 [鉄砲水] を発生させる漏斗型流出にとって集水域の急勾配と流路パターンの重要性。(6)マスウェスティング [重力による地表構成物質の移動] と水流事変の組合せによる、集水域から扇状

地域までの土砂運搬。(7)集水域をでて拘束がなくなったときに流れが広がった結果、扇状地堆積物の堆積開始。(8)扇状地堆積物の淘汰が悪い粗粒角礫の組織。(9)河川に比べて扇状地のかなり急な堆積勾配。(10)扇状地の半径〔長さ〕の限度ある長さ(通常10km以下)。(11)合流扇状地 *coalesced fan*〔複合扇状地:複数の隣接扇状地が接合したもの〕と非合流扇状地上の流向の相違の認識。(12)地表とほぼ平行で平板型だが水平ではない扇状地の層理。(13)扇状地上の堆積・侵食の両プロセス〔地形形成作用〕の認識。(14)同様の特徴をもった扇状地が砂漠にも砂漠以外にも存在するという認識。初期の研究者が確立してきたその他の扇状地の属性は次の通りである。(1)扇頂、下刻流路、平衡交差点〔扇頂溝と扇中央・扇端堆積域の境界にあるインターセクション・ポイント〕、合成扇状地 *compound fan*〔同一河川がつくった複数の地形面からなる扇状地〕の概念。(2)地形的・堆積学的基準に基づいた、扇状地堆積物と急勾配の崖錐堆積物や氷成・河成・湖成層相との違い。(3)扇状地と関連環境との相互関係の知見。(4)放射縦断面での一般的な直線状、凹型、線分化された〔折線〕形状の認識。(5)凸型横断面の記載。(6)扇状地の半径や集水域規模の増大とともに扇状地全体の勾配が減少するという認識。(7)扇状地勾配と土砂運搬との間の正の相関の確認。

これらの基本原則は、以下を指摘した科学者により、1800年代末～1900年代初期に広がった。(1)扇状地上での布状洪水、急速な物質移動、土石流の最初の認識と観察(Heim, 1882; McGee, 1897; Bonney, 1902; Rickmers, 1913; Pack, 1923; Blackwelder, 1928; Woodford and Harriss, 1928)。(2)山麓の合流扇状地と分流網状平野との違い(Haast, 1864)。(3)砂漠での激しい雷雨、閃光洪水、カタストロフィックな堆積、これらの関係の観察(McGee, 1897; Pack, 1923; Blackwelder, 1928)。(4)ファンデルタ *fan delta* のプロセスと特徴の科学的記載(Gilbert, 1890)。(5)現成と過去の条件での扇状地のプロセスとその結果である層相との連関(Trowbridge, 1911; Lawson, 1913; Tiejie, 1923; Blackwelder, 1928)。(6)扇状地表面を修飾する氾濫流など二次のプロセス関係の言及(McGee, 1897; Pack, 1923; Blackwelder, 1928)。(7)山麓帯に

ある扇状地は、谷の発達を支配する盆地縁の断層に一般的に乗り上げたり、切られたりするという認識(Gilbert, 1890; Trowbridge, 1911; Eckis, 1928; Longwell, 1930)。(8)扇状地および隣接する湖・河川環境との間のテクトニクスのサイクロセム〔堆積輪廻層〕の合理性(Davis, 1898)。

この初期の科学的研究とその後の事例研究により扇状地の知見は確立したのに、昨今の地質学者は、網状流(そして蛇行流ですら)のプロセスが扇状地でも河川でも支配していることで、両者に現実的な違いがない、あるいは、その区別は土石流堆積物が存在するところのみでできるとの見解を一般的にもっている(Boothroyd and Nummedal, 1978; Collinson, 1978, 1984; Miall, 1978a, b, 1981, 1984, 1985, 1990, 1992; Ori, 1982; Ethridge, 1985; Fraser and Suttner, 1986; Nemeč and Steel, 1987, 1988; Dunne, 1988; Harvey, 1989; Nemeč, 1990, 1993; Postma, 1990; Reading and Orton, 1991)。そのうえ、扇状地は、岩石の記録では検出するのが難しい大雑把な地形用語でのみ定義されてきたと、多くが主張する。さらに、反証が多いのに(Table 1)、扇状地でみられる層相の多様性は主に気候に支配されると広く受け入れられている。不幸にも、このような不正確な扇状地の概念は、事例研究によるものというよりも、ここ25年間の教科書、総説、短報で提示されたものであり、この環境に広い混乱をもたらした。

地球上のさまざまな条件の現成扇状地の広い範囲の研究に基づき、昨今の考えとは異なっているが初期の科学者とは一致した、礫床河川など他の堆積環境と扇状地との間に根本的で自然界での相違があると、我々は結論づける。この相違には、地形、水理・堆積プロセスが反映し、その結果の扇状地の層相や層相群で、すぐに区分できる。層序学的記録などでの層相群の独自性も、地形的内容が失われていても、扇状地について明白で単純な区別を容易にする。このように、本論文の目的は、これらの特性を調査して扇状地の自然界での区別と地質学的関係を確立し直すことにある。目的達成の第一歩は、現在一般に広く知られている扇状地の枠組を支配する重要な概念が大きな問題であることを明らかにすることにある。

Table 1 砂漠・非砂漠地域で識別された最近の土石流事変（「砂漠」は年平均降水量500mm未満）

文献	地域	砂漠	非砂漠	文献	地域	砂漠	非砂漠
Saussure 1784	France		X	Everett 1979	West Virginia		X
Perkins 1870	Vermont		X	Wasson 1979	NSW Australia	X	
Hitchcock 1885	New Hampshire		X	Suwa and Okuda 1980; Okuda et al. 1980	Japan		X
Conway 1893	NW India	X		Pierson 1980, 1981	New Zealand		X
Davis 1901	Switzerland		X	Pomeroy 1980	Pennsylvania		X
Bonney 1902	France		X	Blong 1981; Pickup et al. 1981	Papua New Guinea		X
Cleland 1902	Massachusetts		X	Eisbacher and Clague 1981	British Columbia		X
Rickmers 1913	Turkestan		X	Fink et al. 1981; Fairchild 1987	Washington		X
Pack 1923; Blackwelder 1928	Utah		X	Jian and Defu 1981; Jian et al. 1983	China	X	
Chawner 1935	California		X	Rapp and Nyberg 1981; Elfstrom 1987	Sweden		X
Troxell and Peterson 1937	California		X	Smart 1981	East Java		X
Money-maker 1939	Tennessee		X	Evans 1982; Martin et al. 1984	British Columbia		X
Sharp 1942	Yukon Territory		X	Jackson et al. 1982; Van Dine 1985	Alberta		X
Fryxell and Horberg 1943	Wyoming		X	Larsen 1982	Spitsbergen		X
Wentworth 1943; White 1949	Hawaii		X	Mills 1982; Neary et al. 1986	North Carolina		X
Wooley 1946; Croft 1962	Utah	X		Moser and Hohensinn 1982	Austria		X
Eisenlohr 1952	Pennsylvania		X	Renwick et al. 1982	California	X	
Gifford 1953; Grove 1953	England		X	Innes 1983, 1985	Scotland		X
Sharp and Nobles 1953	California	X		Harvey 1984	Spain	X	
Common 1954; Baird and Lewis 1957	Scotland		X	Kochel and Johnson 1984	Virginia		X
Haldermann 1956	Tanganyika		X	Kojan and Hutchinson 1984	Peru		X
Mason and Foster 1956	Japan		X	Plafker and Ericksen 1984	Peru		X
Hack and Goodlet 1960	Virginia		X	Clague et al. 1985; Bovis 1986	British Columbia		X
Rapp 1960; Hoppe and Eckman 1964	Sweden, Norway		X	Gallino and Pierson 1985; Benda 1990	Oregon		X
Anderson and Hussey 1962	Alaska		X	Link et al. 1985	Nevada	X	
Mullineaux and Crandell 1962	Washington		X	Harvey 1986; Wells and Harvey 1987	England		X
Beaty 1963, 1970, 1974, 1990	California	X		Jian and Jingrui 1986	China	X	
Bull 1963, 1964; Hooke, 1967	California	X		Kostaschuk et al. 1986	Alberta		X
Denny 1965; Lustig 1965	California	X		Pomeroy and Thomas 1986	Alabama		X
Hawley and Wilson 1965	Nevada	X		Addison 1987	Wales		X
Winder 1965	Alberta		X	Church and Miles 1987	British Columbia		X
Curry 1966; Costa and Jarrett 1981	Colorado		X	Ellen and Fleming 1987	California	X	
Lemke 1966; Anderson et al. 1969	Alaska		X	Grypta and Barthowlemew 1987	Virginia		X
Engelen 1967	Italy	X		Harvey and Renwick 1987	England		X
Waldron 1967	Costa Rica		X	Jackson et al. 1987	Alberta		X
Prior et al. 1968, 1970, 1971	Ireland		X	Kochel 1987, 1990; Clark 1987	Virginia		X
Broscoe and Thomson 1969	Yukon Territory		X	Neary and Swift 1987	North Carolina		X
Crozier 1969; Pain 1971	New Zealand		X	Osterkamp and Hupp 1987	California		X
Hutchinson 1970; Beven et al. 1978	England		X	Schlemon et al. 1987	California	X	
Johnson 1970; Campbell 1974, 1975	California	X		Webb et al. 1987, 1988	Arizona	X	
Johnson and Rahn 1970	Pennsylvania		X	Brazier et al. 1988	Scotland		X
Tufesco 1970; Balteanu 1976, 1986	Romania		X	Eyles et al. 1988	Alberta		X
Ryder 1971; Eisbacher 1980	British Columbia		X	Eyles and Kocsis 1988	British Columbia		X
So 1971	Hong Kong		X	Harris and Gustafson 1988	Yukon Territory		X
Woodruff 1971	Virginia		X	Jenkins et al. 1988; Luckman 1992	Scotland		X
Beaumont 1972	Iran	X		Ohmori and Hirano 1988	Japan		X
Prior and Stephens 1972	Ireland		X	Sorriso-Valvo 1988	Italy	X	
Temple and Rapp 1972	Tanzania		X	Hubert and Filipov 1989	California	X	
Jones 1973	Brazil		X	Jacobson et al. 1989	Virginia		X
Williams 1973	South Australia	X		Jibson 1989; Larsen and Simon 1993	Puerto Rico		X
Williams and Guy 1973	Virginia		X	Kashiwaya et al. 1989; Ono 1990	Japan		X
Azimi and Desvarreux 1974	France		X	King et al. 1989	Papua New Guinea		X
Hutchinson et al. 1974	Ireland		X	Naef et al. 1989, 1990	Switzerland		X
Morton and Campbell 1974, 1979	California	X		Anderson and Anderson 1990	California	X	
Glancy and Harmsen 1975	Nevada	X		Corominos and Alonso 1990	Spain	X	
Blong and Dunckerley 1976	NSW Australia	X		Derbyshire and Owen 1990	Pakistan	X	
Bogucki 1976	North Carolina		X	Haerberli et al. 1990	Switzerland		X
Rapp and Stromquist 1976	Sweden, Norway		X	Kellerhals and Church 1990	British Columbia		X
Shroder 1976	Malawi		X	Matthewson et al. 1990	Utah	X	
Selby 1976	New Zealand		X	Rickenmann 1990	Switzerland		X
Statham 1976	Wales		X	Roesli and Schindler 1990	Switzerland		X
Tanaka 1976; Iso et al. 1980	Japan		X	Whitehouse and McSaveny 1990	New Zealand		X
Bogucki 1977; Renwick 1977	New York		X	Zimmerman 1990	Switzerland		X
Cooley et al. 1977	Arizona		X	Costa 1991	Italy		X
Wasson 1977	Tasmania		X	Gottesfeld et al. 1991	British Columbia		X
Wasson 1978a	Pakistan	X		Wohl and Pearthree 1991	Arizona	X	

【扇状地の知見を蝕む問題】

初期の研究者による扇状地の自然界での区分についての科学的判断からかけ離れる概念の変化が、1950年～1980年に主として起こった。この変化は、合衆国南西部の扇状地の地形研究の増加、および堆積物の層相分析の新たな発展と適用と結びついた1970年代の扇状地の実験室でのモデル研究により進んだ。しかし、現成扇状地の事例研究から概念化され、深く根ざしていた扇状地システムの本来の見解とは違って、1970年代までにてた扇状地の堆積と層相の新たな見解は、地形と実験室の研究結果を層相モデルに観念的に変化させることによって、あるいは河川研究のデータを無批判に適用することによって、主に出現した。その後の拡大使用とこれらの観念的なモデルと概念の拡大とが、扇状地堆積物を表現すると思われる過去のシーケンス〔同時期の地層・層相の類重関係〕についての何百もの解釈の発表を促したが、そのことは実在する現在のものとは何の関係もない。さらに、その観念的なモデルと概念は、事例研究の結果とはほとんど共通性がなく大部分が矛盾しているが、現在広く知られている扇状地の層相枠組の発展的な表現とされてきた。この間違った層相枠組の基礎をつくった6つの顕著な概念は、次の通りである。(1)扇状地の層相変化は主に気候に支配される。(2)扇状地は網状分流路によってつくられ、したがって網状流環境の一部である。(3)細粒河川や河川デルタの層相は、扇状地上にも出現する。(4)実験室での砂箱の実験結果は、野外での検証なしに扇状地に適用できる。(5)解釈された過去のシーケンスに由来する層相モデルは、過去の他のシーケンスに正当に適用できる。(6)布状洪水は、砂のみを含んだ、扇状地あるいは扇端部のみに発生する網状流プロセスである。

<網状分流路の問題>

現成の扇状地表面上で網状分流路のパターンを示す浅い流路が一般的に観察されることから、扇状地堆積物は網状分流路による堆積と広く信じられている (Davis, 1938; Blissenbach, 1954; Hooke, 1967; Bull, 1972, 1977; Hayes and Kana, 1976; Miall, 1978a, 1984, 1992; Rachocki, 1981; Nilsen, 1982, 19

85; Richards, 1982; Tunbridge, 1983; Hayward, 1985; Nemeč and Steel, 1988)。この観察によるさらなる仮説は、網状分流路で形成された扇状地の堆積プロセス、層相、層序が、Doeglas (1962)に記載されたフランス南東部の Durance 川と Ardeche 川のように、網状流路のものと一致するというものである。網状分流路の概念のもつ1番目の問題は、扇状地表面で見られるプロセスが、扇状地の堆積に責任をおうものであるという信念である (Blair, 1985a, 1987b)。さらに、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河川によるものと同じという仮定が、内容のない地形の比較のみに基づいたもので、証拠のある堆積事変の層序学的研究や水理学的な考察によるものではない。この「地表は、層相を解く鍵」という方法は、扇状地の浅い分流路が、洪水の引く段階かその後のカタストロフィックではない流水による小さなリル〔浅い侵食流路〕状の侵食を通じて、流路によるものではない堆積性のシーケンスが単に表面の改造と改装によって形づくられたものとした、扇状地形成時の堆積事変の事例研究と、長い間対立してきた (McGee, 1897; Pack, 1923; Blackwelder, 1928; Chawner, 1935; Beaty, 1963; Denny, 1967; Broscoe and Thomson, 1969; Blair, 1985a, 1987b; Clague et al., 1985)。しかし、その非実証的な基礎にもかかわらず、網状分流路のプロセスと層相モデルは、今日広く使用される扇状地の層相の枠組の重要な要素として確立している。

<扇状地とされた網状河川と網状デルタの再分類>

2番目の問題ある概念には、扇状地とされた網状河川と網状デルタの分類の見直しが求められる。網状河川や網状デルタの研究の多くは、扇状地システムと混同しなかったが (たとえば、Krigstrom, 1962; Fahnestock, 1963; Reimnitz, 1966; Williams and Rust, 1969; Collinson, 1970; McDonald and Banerjee, 1971; Church and Ryder, 1972; Rust, 1972; Fahnestock and Bradley, 1973; Bluck, 1974; Smith, 1974; Ward et al., 1976; Hein and Walker, 1977; Southard et al., 1984)、同じ地形を調査した他の研究では、明らかに独断的な根拠に基づき、それを扇状地と呼ぶことを推奨した。たとえば、Reimnitz (1966)が調査したアラスカの Copper 川とその網状デルタは、アウトウォッシュファン

outwash fan やファンデルタとして再分類された (Boothroyd, 1972; Boothroyd and Ashley, 1975; Gustavson, 1974; Galloway, 1976)。Krigstrom (1962), Bluck (1974), Ward et al. (1976), Hine and Boothroyd (1978) のアイスランドの網状流デルタとアウトウォッシュプレーン [氷河末端に融氷水によってできた平野] は、「湿潤 humid」扇状地とされた (Nummedal and Boothroyd, 1976; Boothroyd and Nummedal, 1978)。Burke (1967) の Yallahs 川デルタは, Yallahs ファンデルタ (Wescott and Ethridge, 1980; Wescott, 1990) となった。Fraser and Cobb (1982) の山間のアウトウォッシュプレーンは氷成扇状地 glacial fan (Fraser, 1989; Fraser and DeCelles, 1993) となった。これらの変更について唯一の弁明は, Boothroyd and Nummedal (1978, p. 643) の「網状流と扇状地は時空的に分けられるものではないが, 網状流の堆積物は半乾燥扇状地の堆積の主要要素であり・・・, 氷成アウトウォッシュファンは湿潤扇状地の堆積物のモデルを導く網状流堆積の完全な好例として提供できる」というものである。

網状流と網状デルタを扇状地とする再分類は独断のようであり, 科学的な根拠に直ちに疑問がでたが (Rust, 1979; Rust and Koster, 1984), この名称変更は, 扇状地に関するその後の大部分の教科書, 総説, 短報に事実として広く取り入れられ, 確立してきた。

<扇状地とされた細粒河川とデルタの再分類>

一般的に細粒の河川やデルタシステムにも, 網状流システムを扇状地として再分類するのと並行して, 一連の事変が起こった。中国東部の黄河デルタやカリフォルニア州中部の Merced 川デルタが, 扇状地として Davis (1901) に名称変更されたのにつづき, カリフォルニア州の Kern 川や隣接の湖成デルタ (Grabau, 1913; Cherven, 1984), ミズーリ州のミシシッピ川の堤防決壊 (Ray, 1964), イランの Mehran 川デルタ (Baltzer and Purser, 1990), テキサス州の Gum Hollow デルタ (McGowen, 1971), インド北部の Markanda と隣接するデルタ (Mukerji, 1976; Parkash et al., 1983), マニトバ州の Assiniboine 川デルタ (Rannie et al., 1989; Rannie, 1990), ボツワナの Okavango 湿地 (McCarthy et al., 1988, 1991, 1992; Stanistreet et al.,

1993; Stanistreet and McCarthy, 1993) など, 他の類似の地形がそのように分類されてきた。さらに困ったことに, インド北東部の Kosi 川をはじめ, いくつかの河川分流も扇状地として再分類された。Kosi 川は, ほぼ平坦な勾配, 支配的な溢流堆積, 流路・分流路の地形など, 典型的な沖積平野の環境の特徴を示し (Gole and Chitale, 1966; Inglis, 1967; Rust, 1979), 西側への流路移動パターンは地殻変動の傾動によるのに (Arogyaswamy, 1971; Williams, 1982), この川は扇状地として他の人によっても広く推奨されてきた (Holmes, 1965; McGowen and Groat, 1971; Schumm, 1977; McGowen, 1979; Schumm et al., 1987; Wells and Dorr, 1987a, b; Gohain and Parkash, 1990; Singh et al., 1993)。この推奨により, Kosi 川が主な扇状地層相モデルとしてだけではなく, 大規模「湿潤 wet」扇状地の原型の例としても, 論文上で確立したことで成功している。Kosi 川と同様に他の河川分流も, 扇状地として独断的に分類されてきた (Geddes, 1960; Hurelbrink and Fehrenbacher, 1970; Ori, 1982; Wells and Dorr, 1987a, b; Bhardwaj and Singh, 1992; Mohindra et al., 1992)。

<扇状地にとって問題ある気候の分類体系>

もう1つ広く保持されている扇状地の概念は, 「湿潤 wet」・「乾燥 dry」気候の分類体系である。この概念は, 長期間・広範囲にわたる反対の証拠があるのに (たとえば, Table 1), 発展しつづけ, 論文に広く用いられている。初期の研究 (Davis, 1905, 1930, 1938; Barrell, 1908; Blackwelder, 1928; Blissenbach, 1954) に根ざした扇状地に対する気候の分類体系の現代版は, 「乾燥」や「泥流 mudflow」の用語が間欠河川によって形成された扇状地に, 「湿潤」や「河流 fluvial」が恒常河川によって形成された扇状地に用いられ (Schumm, 1977), 1970年代後半に確立した。しかし, 「湿潤」と「乾燥」の表現は, 恒常河川が流下する扇状地では土石流主体ではなく, 間欠河川が流下する扇状地では水流堆積物が支配的ではないといった不正確な仮定に基づいている。この気候の分類体系は, 「乾燥」扇状地 dry fan や土石流卓越扇状地 debris-flow-dominated fan が, 乾燥・半乾燥地域に形成され, 「湿潤」扇状地 wet fan や河流卓越扇状地 fluvial-dominated fan が湿潤地域に形成される

として、後に整理された (McGowen, 1979)。この連結が、砂漠でも砂漠以外でも同様に扇状地上の土石流と水流の存在を説明するのに今でも有効であると大量の論文に混乱をもたらした (Table 1)。インドの Kosi 川やアラスカ南東部の網状流は、網状分流扇状地の概念と、いまでは論文で広く推進されている連結である河流卓越の「湿潤扇状地」の概念を結びつけ、その整理された体系で「湿潤」扇状地の例とされた。

近年、気候の分類体系は、気候と扇状地の形やプロセスとを結びつけてさらに修正されてきた (Nemec and Steel, 1987, 1988; Dunne, 1988; Nemec, 1990, 1993; Postma, 1990; Reading and Orton, 1991; Nilsen, 1993; Stanistreet and McCarthy, 1993)。そこでは、「典型的な」半円錐形状をもった扇状地が、砂漠の条件下で土石流によってもつばらできると結論づける (「乾燥」型)。この結論の必然的結果として、水流によって形成された扇状地 (「湿潤」型) は典型的な扇状地形状、特に比較的急な勾配を欠き、湿潤気候条件下でできるとなる。この体系は、以下にもかかわらず、論文で勢いを得てきた。(1) 主に水流によってつくられる特徴的な半円錐形状の扇状地は、砂漠でも砂漠以外でも、報告されている (Harvey, 1984; Blair, 1985a, 1987b, Wells and Harvey, 1987; Nemec and Postma, 1993)。(2) 「典型的」な形状をもち土石流でできた扇状地は、砂漠でも砂漠以外でも広く知られている (Table 1)。

<実験モデルの問題>

扇状地の堆積学的概念を発展させるための基礎として実験室のモデルの結果を、野外での検証なしに使用したことで、2つの概念的問題が発生した。第1の問題は、自然の扇状地システムに「ランダム・ウォーク」コンピュータ・シミュレーション [酔歩モデル] から得られた結論を適用したことによる (たとえば、Price, 1974, 1976; Rachocki, 1981; Chang, 1982; Nemec and Steel, 1988)。この結論の基礎は、扇状地が網状分流路システムによってつくられているという誤った仮定である。第2の問題は、砂箱「扇状地」の小規模実験室のモデルを自然の扇状地に適用しようとしたことによる。この適用は、扇状地堆積物のプロセスや生産が小規模でもモデル化できるとお

そらく非現実的な前提を妥当なものとして仮定する。この限定にもかかわらず、「舌状浸透堆積 sieve lobe」プロセス、「Trollheim 扇状地」層相モデル、扇状地層序と集水域の発達との関係のモデルなど、広く使用されている3つの概念が、そのような実験により出現した。

[第1の] 扇状地上の舌状浸透堆積 [シーブロープ] の概念は、細礫と砂で形成された半径1m以下の扇状地形の実験室での研究によって生まれた (Hooke, 1967)。この砂箱の研究は、自然のシステムを反映しているという仮定をもとにして、実験室の「舌状浸透堆積物」と同様の地形をもつ自然の扇状地上にある形態は、同じプロセスによって堆積したという提起をした。しかし、自然の扇状地で認知された「舌状浸透堆積物」の検証で、岩片に富む土石流ロープと堤の表面を篩い分けた水の産物であり、そのプロセスは、実験室の実験で舌状浸透堆積物として認識されたものと同じ形態をつくることができることが明らかになった (Blair and McPherson, 1992, 1993)。不幸なことに、その「舌状浸透堆積物」のいまだに実証的ではない基礎は、重要な扇状地形成プロセスの1つとして論文に広く記載されたままで、否定されていない。

第2の、野外の検証なしに実験室の砂箱実験を扇状地に適用した概念は、土石流堆積物は扇頂部に、土石流と流路堆積物の地層が扇中央部に、河成堆積物が扇端部に卓越するという層相モデルである (Hooke, 1967, 1987; 1993; Spearing, 1974; Fraser, 1989)。砂と泥を用いた実験に基づいたこのモデルは、カリフォルニア州の Deep Springs Valley の Trollheim 扇状地が、現時点までででている唯一の実例であるが、自然の扇状地について最も一般的な層相のモデルとされている。しかし、Trollheim 扇状地の最近の詳細な研究では、この層相の体系が土石流と洗い出し土石流堆積物からすべて構成されていることが分かっている (Blair and McPherson, 1992, 1993)。この証明されていない層相モデルの基盤にもかかわらず、過去のシーケンスの解釈に最も広く受け入れられ、取り入れられた体系となっている。

第3の砂箱実験に基づく概念は、扇状地をもつ集水域の発達段階と扇状地の層序パターンとを結

びつけた観念的なモデルである (Fraser and DeCelles, 1993)。このモデルは、最初のうちは上方粗粒化、後に上方細粒化シーケンスからなる扇状地に対する層序モデルをつくるために、実験室の研究結果 (たとえば, Schumm, 1977; Hooke and Rohrer, 1979; Schumm et al., 1987) と、集水域の理論を結びつけている。2つの大きな問題がこの方法に持ち上がっている。1つは、扇状地の砂箱モデル化がまだ適切か疑問のあることに関係する。もう1つは、伸長、拡張、最大の広がり、分離の段階など、集水域の発達理論を扇状地に直接適用することと関係する。扇状地への適用については、規模、地殻変動の安定性、起伏比、シュリープのマグニチュードの値 [水系網の枝路等級]、河川次数、各次数の河川断片の長さにおいて、大きな違いがあることを考慮すると、扇状地と集水域とが同じ特徴と歴史をもつという疑問のある仮定をしている。この概念化の最後の問題は、提起された層序モデルが現成の扇状地のデータによるものではなく、扇状地の堆積と再解釈された (DeCelles et al., 1987, 1991a, b) ワイオミング州とモンタナ州の下部第三系の河成シーケンスの研究によるものである (Kraus, 1984) ということである。

<岩石に記録されたシーケンスによる

層相モデルの適用>

多くの扇状地の層相モデルは、過去のシーケンスの解釈 (すなわち、「過去は過去を解く鍵である」)、それは昔を不確かなものと認める実践によって支えられている (Allen, 1965)。大部分のこれらのモデルは、その解釈の根拠からしてまったく観念的なままである。このタイプで最大の使用例は、「扇頂部」に砂岩と礫岩、「扇中部」に斜交層理の礫まじり砂岩、「扇端部」に平板型層理の砂岩をもつ、テキサス州の先カンブリア時代の Van Horn 砂岩に由来する層相モデルである (McGowen and Groat, 1971)。この層相パターンをもつ現成扇状地はいまだに明らかになっていないが、Van Horn モデルは広く事実として受け入れられ、教科書、総説、短報に「湿潤」扇状地システムの重要な例とされた。この動向による問題の大きさは、Van Horn モデルに基づき扇状地と解釈された多数の過去の堆積物が証明している。

<布状洪水問題>

布状洪水は、1つの主要な扇状地の堆積プロセスを構成している。しかし、事例研究でできた概念にかわって実証されていない概念の論文が普及した結果、布状洪水の本質は広く誤解されている。たとえば、その後の論文では、扇状地の布状洪水が、網状流に似た網状分流路での流れに関連したプロセスとする。この結論や、扇状地上の網状分流路の層相と網状河川の層相とが同じという推論は、証明されないままであり、事例研究の結果 (たとえば, McGee, 1897; Koster, 1978; Rust and Gostlin, 1981; Hogg, 1982; Wells and Dohrenwend, 1985; Blair, 1985a, 1987b, Wells and Harvey, 1987) と直接対立している。事例研究と直接対立している教科書や総説で広く提示された扇状地の布状洪水の他の観点は、次の通りである。(1)布状洪水の層相は、主に砂からなる。(2)布状洪水は砂漠の扇状地に主として限定されるプロセスである。(3)一連の布状洪水の個々の地層は、固有の堆積事変を代表している。(4)「上方細粒化」の布状洪水は、次第に弱くなる洪水流に起源がある。(5)布状洪水は、ある説明では扇中央に、またある説明では扇端に限られる。

【形態に基づいた扇状地の自然的差異】

この昨今の層相の枠組には反対し、事例研究の結果に一致させて、地形、水理・堆積プロセスとその結果の層相や層相群に基づく、扇状地は、礫床河川などの環境と容易に区分でき、自然界に固有で基本的な堆積環境を表わしていると、我々は結論づける。現成の条件で河川との違いがすぐに認められる扇状地の最も顕著な特徴は、その形態である (Surrel, 1841, 1870; Drew, 1873)。すべての扇状地形は多くの堆積・侵食事変の総和なので、複合地形とされる (Blair and McPherson, 1994)。他の環境と容易に区分できる扇状地の複合地形として最も重要な特質は、半円錐形状、限度ある放射方向の長さ、凸型横断面、かなり急な放射縦断勾配である。

<半円錐形状および限度ある放射方向の長さ>

扇状地に特徴的な半円錐形の複合形態は、涵養流路と山地前面が交差する供給点を通じて、上流

流域から扇状地まで土砂を含んだ流れが移動した結果である (Fig. 1)。上流流域の最高次の河川が涵養流路とされるのは、上流流域のより低次の流路から谷口の堆積場所へと生産された土砂の移動の究極的な導管となっているからである (ここで使用する河流次数の用語は、Strahler (1957) が修正した Horton (1945) による)。涵養流路が山地前面と交差する点は、位置が扇の頂点にあることから扇頂と呼ばれる (Drew, 1873)。土砂の流れは、扇頂で上流流域を離れて広がるか、平衡交差点と呼ばれる下扇で広がる場所までは下刻をうけた流路 [扇頂溝] のなかを移動する (Fig. 1)。扇頂や平衡交差点を越えた場所で瞬間的に拘束がなくなることに反応した流れの広がり、パイを分けた形の扇状地の一部 (活動的な堆積ロープと呼ばれる) を象徴的に覆って堆積し始める (Fig. 1; Blair and McPherson, 1994)。このロープの弧の長さは、その勾配、放射方向の長さ、代表的な流れの体積・速度・粘性・運動量と結びついた微地形と相関関係がある。時間経過とともに扇状地を横切る活動的な堆積ロープの位置が自動的に移動することによって、半円錐形が維持される (Denny, 1967)。半円錐形の上で流れが広がり扇状地の位置で堆積が進む最適条件は、長さ10km をめったに超えない (たとえば、Anstey, 1965, 1966)。

[第1の] 半円錐形状の複合的な扇状地形態の幾何学的特徴は、河川のとはまったく対照的である。扇状地の半径は、相対的に同様の勾配であらゆる方向に向き、一般に180°の弧をつくり、扇頂と山地前面から外に向かって広がる (Figs. 1, 2)。一方、河川システムの直線状あるいは屈曲した流路の形態は、氾濫原に溢流するとき、あるいは河川デルタの場合には分流路間湾に溢流するときのみ発生する横方向の流れをもった、主たる勾配軸と相対的に同じ方向となる (Fig. 2)。また、[第2の] 扇状地の特徴的な放射方向の短さは、何百から何千 km もの河川の長さと同対照的である (Fig. 2)。さらに、最も急勾配の10kmの扇状地の標高差が通常300~2000m なのに対し、沖積盆地の河川や河川デルタの最大の長軸方向の標高差は典型的にはせいぜい70m である (Fig. 2)。

<横断面の特徴>

第3の扇状地と河川との対照的な地形に由来する大きな違いは、横断面の特徴である。扇状地の横断面が、凸型を示すのに対し、流路のは反対に溝型や凹型となっている (Fig. 2)。河川の横断面はさらに、ほぼ平坦で側方に位置する氾濫原の一般的存在によって、河川デルタの場合には側方に位置する分流路間湾によって、扇状地の横断面と区分される。さらに、扇状地の横断面の起伏は通常300~2000m であるのに対し、河川的全横断面の起伏は15m よりも小さい (Fig. 2)。これらの幾何学的相違の重要な観点は、扇状地上の堆積に関係する流れがつねに拘束されないのに対し、河川システムでは、流路溝に拘束されたままか、より静かな溢流氾濫原や分流路間湾に側方で流出するかである。一方、扇状地の凸型断面は、氾濫原の存在を阻害する (Fig. 2)。

<放射線断面方向の勾配の特徴>

第4の扇状地と河川との地形区分をもたらす大きな違いは、堆積勾配である。扇状地は、最も典型的には2~12° [35~210‰] の値で、1.5~25° [26~470‰] の平均勾配をもつ (Figs. 3, 4; Table 2)。一方、堆積盆地での堆積的な礫床河川や砂床河川の山麓付近でも平均的な堆積勾配は、めったに0.4° [7‰] を超えないかなり低い値となっている (Figs. 3, 4; Table 3; McPherson et al., 1987)。これより少し急な勾配は、基準面低下に順応して河床を下げているデグラデーション [地形学の勾配を減少する作用とは異なった意味の堆積学用語] の河川で指摘され、より急な勾配は、ワシントン州の White 川 (Fahnestock, 1963)、カリフォルニア州の Rubicon 川 (Scott and Gravlee, 1968)、アルバータ州の Peyto と Hilda の氷成アウトウォッシュ流 (McDonald and Banerjee, 1971; Southard et al., 1984)、コロラド州の Big Thompson 川などの河川 (Costa, 1983; Jarrett, 1984) のように、岩盤や最近後退した山岳氷河のモレーンの出現が河床を支配している山間の礫床河川で見られる。これらの河川は、扇状地をもつ集水域の河川と同様の堆積レジーム [河況] というより、侵食レジームによって究極的に特徴づけられているので、我々の調査から除外される。扇状地をもつ集水域の流路のように、これら急勾配の上流流域の河川に

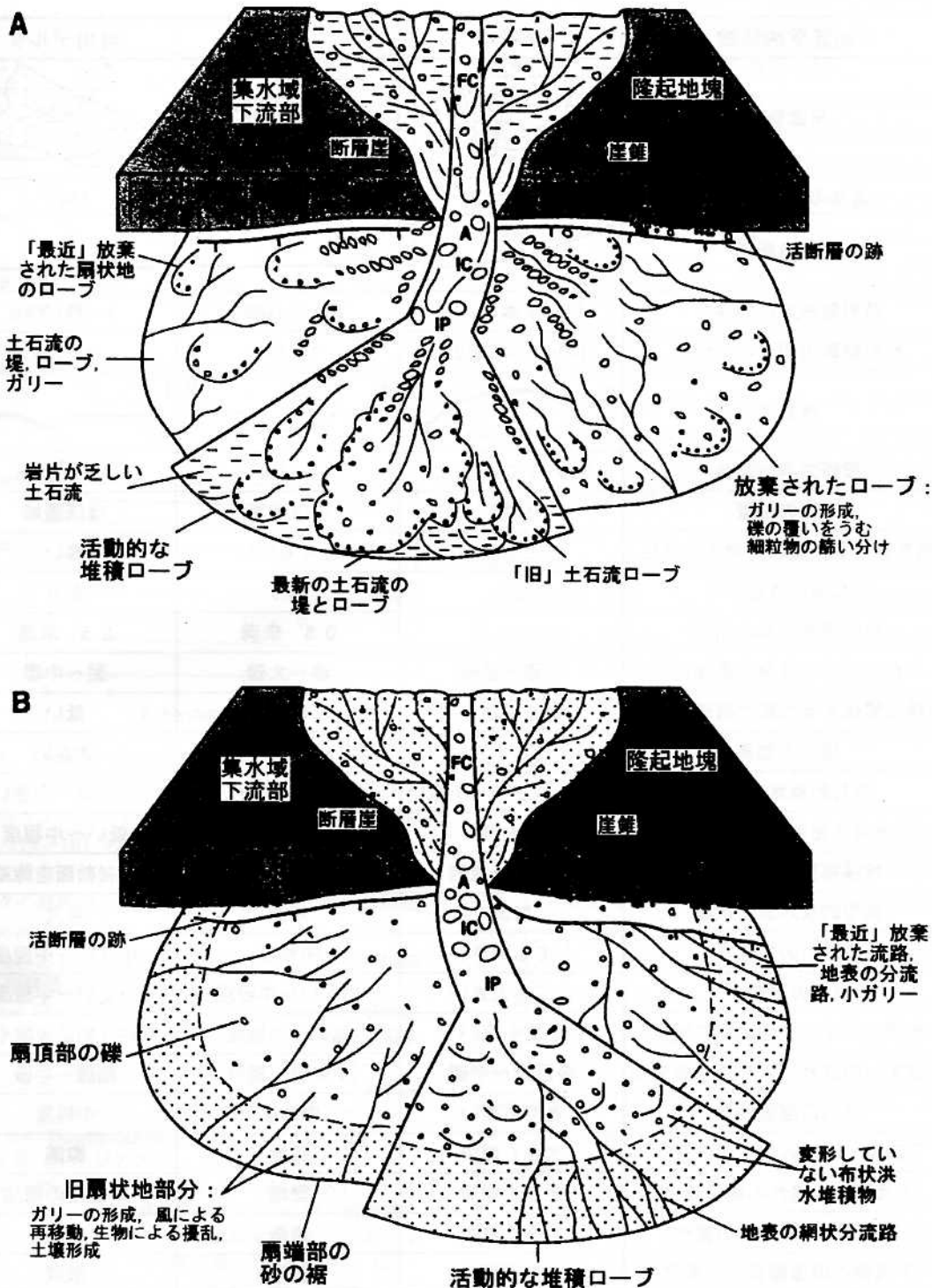


Fig. 1 緩勾配集水域および扇状地の一次的・二次的堆積の特徴を示した模式図

A) 土石流プロセス, B) 布状洪水プロセスが支配している。

A: 扇頂, FC: 集水域涵養流路, IC: 扇状地上の下刻流路 [扇頂溝],

IP: 扇状地上の平衡交差点 [インターセクション・ポイント]

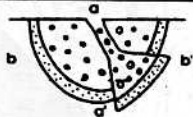


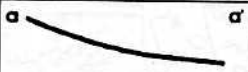
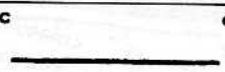
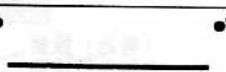



地質学的特徴	扇状地	河川	河川デルタ
平面形態			
流れの広がる角度	180°	無視できる	180°
放射縦断面			
放射縦断面方向の長さ	10km未満~15km	10~1,000km	1~数100km
放射縦断面方向10kmの起伏	300~2,000m以上	1~70m	1~70m
横断面			
横断方向の起伏	300~2,000m以上	1~15m	0.1~2.0m
地形の位置	山麓	ほぼ陸域	ほぼ陸域
拘束されない流れに対する特性	とても高い	とても低い	高い
氾濫原の存在は?	なし	あり	あり
放射縦断面方向の勾配	1.5~2.5°	0.5° 未満	0.5° 未満
典型的な堆積物の最頻径	中礫~巨礫	砂~大礫	泥~中礫
粒径に関する勾配の獲得の速さ	とても高い	低い	低い
植生の効果	とても小さい	大きい	大きい
相対的集水域規模	とても小さい~小さい	中程度~大きい	中程度~大きい
閃光洪水発生に対する特性	とても高い	低い~中程度	低い~中程度
堆積物重力流の活動	とても一般的	まれ	まれ(前面を除く)
典型的な水流の状態	射流	常流	常流
剪断力の大きさ	とても大きい	中程度	小さい~中程度
流れの運搬力	とても大きい	小さい~中程度	小さい~中程度
堆積に対する斜面崩壊の効果	とても高い	低い~中程度	低い(前面を除く)
水深1mの流れに入り込む碎屑物	中巨礫~中礫	中中礫~粗砂	細礫~中砂
流れの運搬能力	とても高い	中程度	中程度
下流側への流れの水深の変化	大きく減少	微増	微減
下流側への流れの幅の変化	大きく増加	微増	中程度の増加
下流側への運搬力の変化	大きく減少	微増	微減
下流側への運搬能力の変化	大きく減少	微増	微減
下流側への水量の変化	大きく減少	大きく増加	維持
アグラデーション事象の頻度	とてもまれ	一般的~まれ	一般的~まれ

Fig. 2 堆積盆地にある扇状地, 河川, 河川デルタの典型的な地形学的, 水理学的, 堆積学的特性の比較

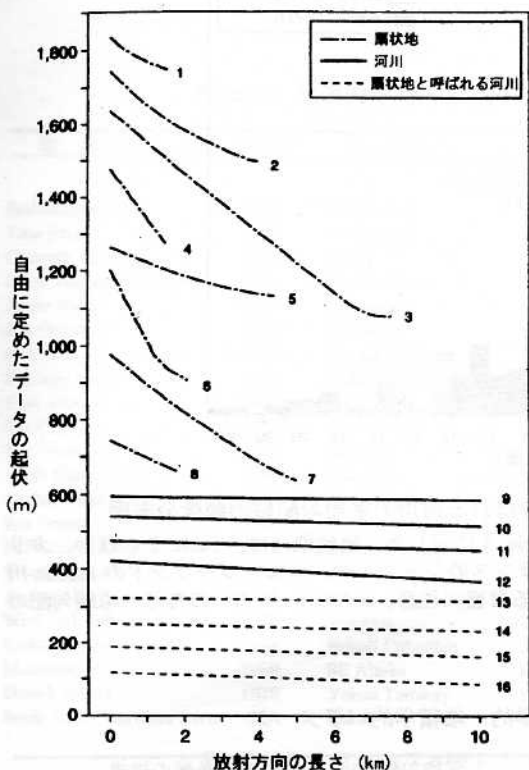


Fig. 3 代表的な扇状地 (1-8), 礫床河川の流路 (9-12), 扇状地と以前にみなされていたが、我々が河川や河川デルタと分類し直した地形 (13-16) の縦断面

垂直方向は10倍に拡大。分類し直した河川・河川デルタの縦断面と河床縦断面の類似性、扇状地断面との非類似性に注目

番号のある地形は、以下の通りである。(1) Black Birch 扇状地 (ニュージーランド), (2) Torrent de Rabioux 扇状地 (フランス), (3) Hanaupah 扇状地 (カリフォルニア州), (4) Torrent du Borgeat 扇状地 (フランス), (5) Alamo Canyon 扇状地 (ニューメキシコ州), (6) Trollheim 扇状地 (カリフォルニア州), (7) Milner Creek 扇状地 (カリフォルニア州), (8) Tjeurajakka 扇状地 (スウェーデン), (9) Amite 川 (ルイジアナ州), (10) Feather 川 (カリフォルニア州), (11) Durance 川 (フランス), (12) Donjek 川 (ユーコン地方), (13) Kosi 川「扇状地」(インド), (14) Kern 川「扇状地」(カリフォルニア州), (15) Reno 川「扇状地」(イタリア), (16) Skeidara 川「扇状地」(アイスランド)。Table 2 と Table 3 の備考を参照

堆積している土砂は、区分できる層相や内容をもっているが、堆積条件よりも侵食条件が優っているために、岩石の記録に残る機会は低い。

扇状地をもつ集水域、それ以外の岩盤に制約された上流河川、最近氷河から解放された谷を除いて、編集したデータは、堆積盆地には扇状地と河川を代表する2つの固有の勾配の最頻値を示す (Tables 2, 3; Figs. 3, 4)。さらに、そのデータは、堆積的な沖積盆地では0.5~1.5 [9~26‰] の堆積勾配が一般的ではないことを示している。その自然界での堆積勾配のギャップとしてここで言及されているこの中断は、典型的な扇状地の堆積勾配と河川の堆積勾配とを分離し (Fig. 4), 両者の環境間の連続性を妨げている。扇状地として不正確に分類されてきたと我々が感じる様々な河川や河川デルタの縦断面や平均勾配のデータも (Table 3B), 知られている扇状地と河川の平均勾配を、比較のために Fig. 3 や Fig. 4 にプロットした。図のように、これらの例のすべてが河川や河川デルタと一致し、扇状地とは似ていない勾配をもっている。我々がこれらの地形を河川 [地形] として分類し直すことは、それらの凹型横断面や、水平的な側方への氾濫原、より長い縦断方向の長さ、流路堤の存在による水流の一般的な拘束からも、支持される (Fig. 2)。

扇状地と河川の勾配の大きな違いのもう一つの観点は、傾度の高い堆積物の組成との固有の関係である (Tables 2, 3)。傾度の高い粒径と平均勾配の図は、2つの環境が自然に区分されることも示す、扇状地と河川にそれぞれがまさに対応する2つの固有の領域が存在する (Fig. 5)。これらの領域のそれぞれの勾配は、比例関係となっていて、粒径が大きくなるにつれて増大する (たとえば, Drew, 1873; Tolman, 1909; Blissenbach, 1952)。しかし、変化の割合と不規則性は、これら2つの環境の特徴的な地形と堆積プロセスの根本的な違いを反映して、河川よりも扇状地では、かなり大きくなっている (Fig. 5)。さらに、扇状地と不正確に呼ばれていると我々が考えている河川と河川デルタのデータは (Table 3B), このグラフ (Fig. 5) の扇状地領域ではなくむしろ河川領域に明確におちる。そのことは、さらに我々の分類の見直しを裏付けている。

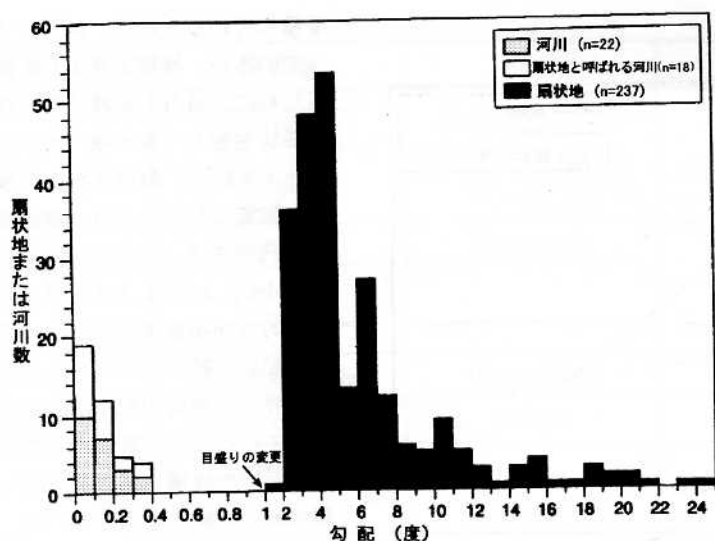


Fig. 4 代表的な現成扇状地, 河川, 扇状地と呼ばれる河川の平均勾配毎の頻度分布図

図示した河川と「扇状地と呼ばれる河川」のデータは Table 3 に示した。扇状地には, Table 2 のほか, カリフォルニア州の Death Valley, ネバダ州の Walker Lake, フランスのシャモニー, ニュージーランドの Rakaia 川と Waimakariri 川の地域のデータを加えた。1.0° で変化する目盛りに注意。0.5以下~1.5° の自然の堆積勾配のギャップにより, 河川と扇状地の勾配が区分される。

Table 2 代表的な扇状地の地形学的・堆積学的パラメータ

地形	分類	地域	文献	平均勾配	10kmの標高差	最頻の組成
Cucamonga alluvial fan	AF	Eureka Valley Calif.		1.6°	279	S bld cob peb gravel
Alamo Canyon alluvial fan	AF	S. New Mexico		2.1°	366	S bld peb cob gravel
Furnace Creek alluvial fan	AF	Death Valley, Calif.		2.6°	454	C/S peb cob gravel
Deadman Canyon fan-delta	AfΔ	Walker Lake, Nevada		2.8°	489	C/S cob m-f bld gravel
Cottonwood Canyon fan	AF	Owens Valley, Calif.	Beaty 1963	2.8°	489	C cob m-f bld gravel
Lone Tree Creek alluvial fan	AF	Owens Valley, Calif.	Beaty 1963	3.0°	524	C cob m-f bld gravel
Penrod Canyon fan-delta	AfΔ	Walker Lake, Nevada		3.2°	559	S/C cob f-m bld gravel
Smith Mountains fan	AF	Death Valley, Calif.		3.4°	594	S bld peb cob gravel
Roaring River fan Lobe 3	AF	Colorado	Blair 1985a; 1987b	3.4°	594	S bld peb cob gravel
Gower Gulch fan-delta	AfΔ	Death Valley, Calif.		3.5°	612	Pebbly cobbly mud
Trail Canyon fan-delta	AfΔ	Death Valley, Calif.		3.8°	664	C peb cob f bld gravel
Copper Canyon fan-delta	AfΔ	Walker Lake, Nevada		4.1°	717	S/C f bld cobble gravel
Hanaupah fan-delta	AfΔ	Death Valley, Calif.		4.3°	752	C peb cob f bld gravel
Milner Creek alluvial fan	AF	Owens Valley, Calif.	Beaty 1963	4.4°	769	C cob m-f bld gravel
Copper Canyon fan-delta	AfΔ	Death Valley, Calif.		4.6°	805	S/C peb cob gravel
N. Copper Canyon fan-delta	AfΔ	Walker Lake, Nevada		4.6°	805	S/C cob f-m bld gravel
Roaring River fan Lobe 2	AF	Colorado	Blair 1985a; 1987b	4.6°	805	S f-m boulder gravel
Natural Bridge fan-delta	AfΔ	Death Valley, Calif.		5.1°	892	C/S cob f bld gravel
Roaring River fan Lobe 1	AF	Colorado	Blair 1985a; 1987b	5.7°	998	S m-c boulder gravel
Rose Creek fan-delta	AfΔ	Walker Lake, Nevada		6.2°	1086	C/S cob f bld gravel
Torrent du Borgeat fan	AF	Chamonix, France		7.4°	1299	C cob f bld gravel
S. Badwater fan-delta	AfΔ	Death Valley, Calif.		7.6°	1334	C/S cob f bld gravel
Torrent de la Creuse fan	AF	Chamonix, France		8.0°	1405	C cob m-f bld gravel
Trollheim alluvial fan	AF	Deep Springs V., Calif.	Blair and McPherson 1992	8.4°	1477	C cob f boulder gravel
Rifle Range alluvial fan	AF	Walker Lake, Nevada		11.4°	2016	C/S cob pebble gravel
N. Badwater fan-delta	AfΔ	Death Valley, Calif.		12.3°	2180	C cob m-f bld gravel
Leath Gill alluvial fan	AF	N. England	Wells and Harvey 1987	14.6°	2604	C/S peb cob gravel
Ravin de Voullourdes fan	AF	Chamonix, France		18.0°	3249	C/S cob m-f bld gravel
Thrush Gill alluvial fan	AF	N. England	Wells and Harvey 1987	18.4°	3327	C/S peb cob gravel
Charlanon alluvial fan	AF	Chamonix, France		24.6°	3759	C cob m-c bld gravel

略語: AF = 扇状地; AfΔ = ファンデルタ; S = 砂質; C = 泥質; peb = 中礫; cob = 大礫; bld = 巨礫; f = 細粒; m = 中粒; c = 粗粒。引用文献のない記入事項は, 筆者の研究による。

Table 3 代表的な河川と河川デルタの地形学的・堆積学的パラメータ

地形	分類	地域	文献	平均勾配	10kmの標高差	最頻の組成
A) 礫床河川と砂床河川						
Brahmaputra River	SBR	Bangladesh	Coleman 1969	0.004°	0.7	Silty vf sand
Tana River	SBR	N. Norway	Coleman 1970	0.01°	1.7	C-m sand
Colorado River	SBR	Texas	McGowen and Garner 1970	0.02°	3.5	Pebbly vc-c sand
South Saskatchewan River	SBR	Saskatchewan	Cant and Walker 1978	0.02°	3.5	M-f sand
Amite River	GBR	Louisiana	McGowen and Garner 1970	0.03°	5.2	S cob peb gravel
Rio Grande	SBR	W. Texas	Harms and Fahnestock 1965	0.04°	7.0	Vf-f sand
Red River	SBR	Texas/Oklahoma	Schwartz 1978	0.04°	7.0	Vf-f sand
Babbage River	GBR	Yukon Territory	Forbes 1983	0.04°	7.0	S cob peb gravel
Knik River	GBR	SE Alaska	Fahnestock and Bradley 1973	0.06°	10.5	S pebble gravel
Rio Chama	GBR	New Mexico	Barnes 1967	0.07°	12.2	S bld peb cob gravel
Salt River	GBR	Arizona	Barnes 1967	0.11°	19.1	Boulder cobble gravel
South Platte River	SBR	Colorado	Smith 1970	0.12°	20.9	Pebbly vc-c sand
Feather River	GBR	C. California	Blair et al. 1991	0.12°	20.9	S bld peb-cob gravel
Rio Grande	SBR	C. New Mexico	Nordin and Beverage 1965	0.14°	24.4	F-m sand
Bella Coola River	GBR	British Columbia	Church 1983	0.14°	24.4	S peb cob gravel
River Durance	GBR	SE France	Doeglas 1962	0.15°	26.2	Cobble pebble gravel
Auranga River	SBR	India	Gupta and Dutt 1989	0.17°	29.7	Pebbly c sand
West Fork Bitterroot River	GBR	Montana	Barnes 1967	0.26°	45.4	Boulder cobble gravel
Kicking Horse River	GBR	British Columbia	Smith 1974	0.28°	48.9	Pebble gravel
Matanuska River	GBR	SE Alaska	Fahnestock and Bradley 1973	0.29°	50.6	S peb cob gravel
Donjek Rivera	GBR	Yukon Territory	Rust 1972	0.34°	59.3	Cob peb gravel
South Fork Clearwater River	GBR	Idaho	Barnes 1967	0.36°	62.8	Boulder gravel
B) 扇状地やファンデルタに分類された疑惑のある河川や河川デルタ						
Yellow River alluvial fan	MDRA	Eastern China	Davis 1901; Grabau 1913	0.01°	1.7	Silt
Markanda terminal fan	MDRA	N India	Mukerji 1976; Parkash et al. 1983	0.01°	1.7	Muddy vf sand
Charleston, Missouri "fan"	SBR	Missouri	Ray 1964	0.02°	3.5	Very fine sand and mud
Mehran River "fan delta"	SBRΔ	SE Iran	Baltzer and Purser 1990	0.02°	3.5	Silty fine sand
Kosi River "alluvial fan"	SBR	E. India	Wells and Dorr 1987a	0.02°	3.5	Silty f-m sand
Okavango "alluvial fan"	MDRA	N. Botswana	McCarthy et al. 1991	0.02°	3.5	Vf sandy mud
Gandak "megafan"	MDR	NC India	Mohindra et al. 1991	0.02°	3.5	Silt and clay
Portage la Prairie "fan"	SBRΔ	Manitoba	Rannie et al. 1989	0.03°	5.2	Coarse sand
Gul Hollow "fan delta"	SBRΔ	Texas	McGowen 1971	0.09°	15.7	Fine sand
Kern River "fan"	SBRΔ	California	Cherven 1984	0.10°	17.4	Pebbly c sand
Copper River "fan-delta"	GBRΔ	SE Alaska	Galloway 1976	0.13°	22.7	Muddy m-f sand
Leba River "alluvial fan"	ERR	Poland	Rachocki 1990	0.13°	22.7	Pebbly f-m sand
Reno River "fan"	GBR	N Italy	Ori 1982	0.14°	24.4	Sandy peb gravel
Gija River "humid fan"	GBR	SE Iceland	Boothroyd and Nummedal 1978	0.17°	29.7	S cob peb gravel
Skeldara River "humid fan"	GBR	SE Iceland	Boothroyd and Nummedal 1978	0.21°	36.7	S cob peb gravel
Merced River "fan"	SBRΔ	California	Davis 1901; Cherven 1984	0.22°	38.4	Cob peb c sand
Yana River "alluvial fan"	GBRΔ	SE Alaska	Boothroyd and Ashley 1975	0.30°	52.4	S peb cob gravel
Scott River "alluvial fan"	GBRΔ	SE Alaska	Boothroyd 1972	0.34°	59.3	S peb cob gravel

略語: GBR = 礫床河川; GBRΔ = 礫床河川デルタ; SBR = 砂床河川; SBRΔ = 砂床河川デルタ; MBR = 泥卓越河川; MBRΔ = 泥卓越河川デルタ; ERR = 拡大した河川流域; S = 砂質; C = 泥質; peb = 中礫; cob = 大礫; bld = 巨礫; vf = 極細粒; f = 細粒; m = 中粒; c = 粗粒; vc = 極粗粒

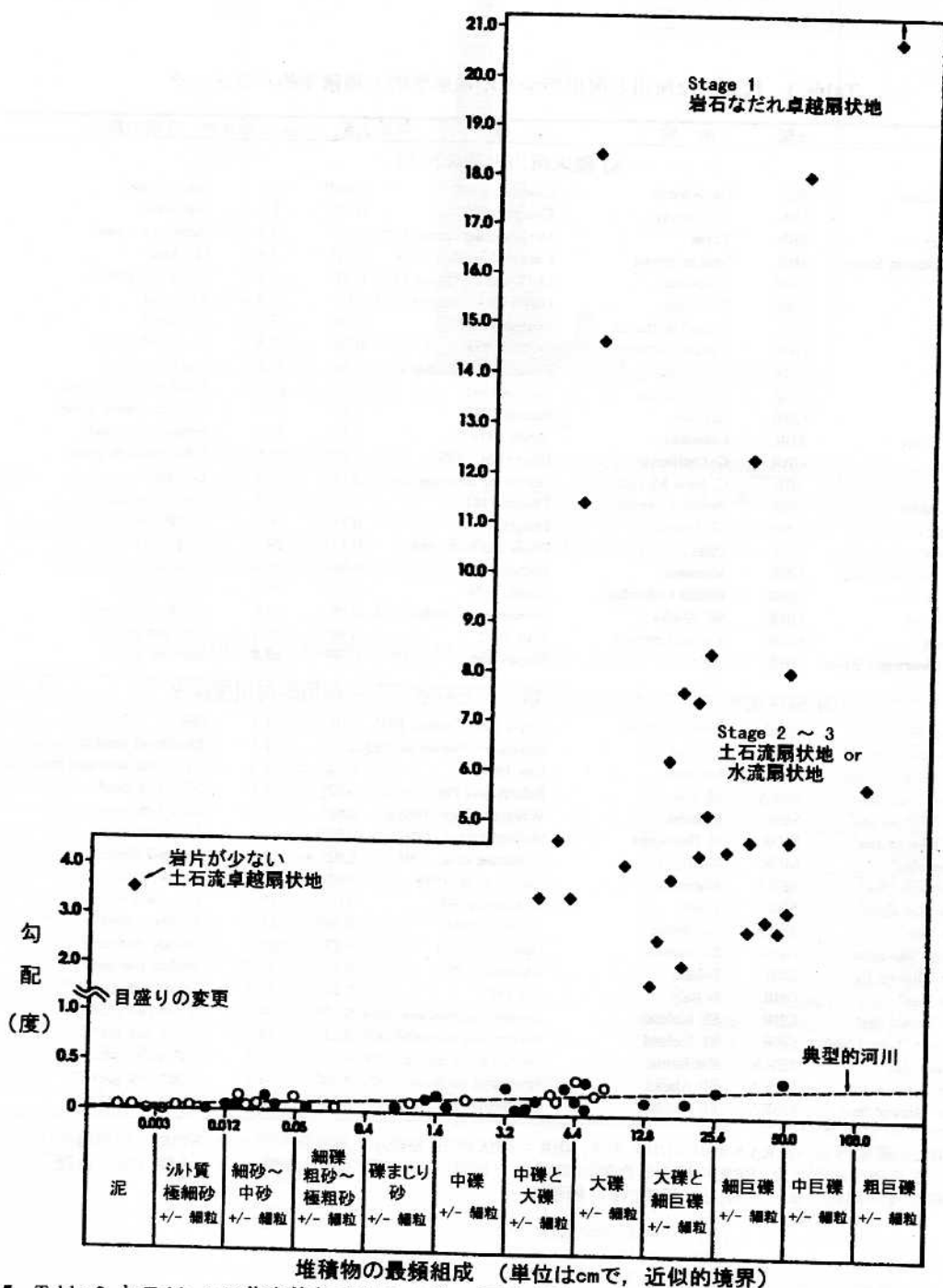


Fig. 5 Table 2 と Table 3 の代表的な扇状地 (◆), 河川 (●), 扇状地と分類された疑惑の河川 (○) の最頻組成 [粒径] と平均堆積勾配の半定量的な図
 扇状地と河川は明瞭に区分され, 我々が河川として分類し直した, これまでの研究者による「扇状地」は, 明瞭に「河川」の領域にあることに注意

【水理的特徴に基づく扇状地の自然界での区分】

扇状地固有の地形条件と複合地形は、他の陸域堆積環境とは大きく異なった流水の水理条件をつくる。その固有の条件をつくる3つの点は以下の通りである。(1)上流流域を流れてきた涵養河川が山地からでるところの谷口の扇状地の位置。(2)集水域の流量を待ちかまえているかなり急な扇状地表面の勾配 (Figs. 3, 4)。(3)扇状地の場所で流水が拘束されないこととその結果広がることで生じる下扇に向けての流水の急速な浅化。

<扇状地の位置の水理的效果>

涵養流路の出口での位置と関係がある扇状地の水理環境の構成要素に、集水域から到達する流れの状態がある。そのような流れの状態は集水域によって直接左右され、それゆえ扇状地の水理環境に対する外的効果となる〔第1の観点〕。扇状地の位置で固有の水理条件をつくる集水域の主要な特質は、以下の通りである。(1)土砂によって一般的に覆われた急斜面の出現。(2)扇状地の位置まで土砂を運搬する急速な雪解けや激しい降雨事変の発生。(3)集水域から扇状地までの水と土砂の流出事変での典型的なカタストロフィックな特性。これらは集水域の起伏や地形によって、また集水域の水系網を特徴づける低い河川次数、さらに各河川次数では短い河川長によって発生する (Surrell, 1870; Horton, 1945; Strahler, 1957, 1964)。扇状地をもつ集水域は、本来そなわった起伏の結果として氾濫が下流側へ集中し加速される効果があるため、急速な雪解けや大きな降水事変から閃光洪水をつくるのに、特に向いている。さらに、より高次の短い河川に短距離で漏斗状に広がる、扇状地をもつ集水域におけるたくさんの一次流路の存在は、涵養流路に氾濫流の急速な移動をもたらす、また閃光洪水の発生を促す (Patton and Baker, 1976; French, 1987; Patton, 1988)。扇状地をもつ集水域に典型的な椀状の形は、閃光洪水の可能なピークの高さを最大限にし、集水域のすべての部分から涵養流路に氾濫流の同時到着をもたらすことでカタストロフィックな流水における付加的要因となっている (Strahler, 1957; Patton, 1988)。通過する大気塊が山地を強制的に上昇させられることで、凝結と降水が生じるので、高い集水域

も閃光洪水の発生を促す (Hayden, 1988)。涵養流路が山地前面に到達したところの扇状地の場所は、集水域の本来そなわっている起伏ゆえに、カタストロフィックな閃光洪水だけではなく、落石〔崩落〕、岩石すべり、岩石なだれ、土石流のようなカタストロフィックなマスウェスティングを受けるのに適した場所といえる。

上流流域の涵養流路と山地前面が交差するところにある扇状地の水理条件の結果、運搬土砂の淘汰が悪く、粗い礫質組成となる。給源に固結度の低い円礫礫岩があるといった特殊な例を除き、扇状地の場所に運搬される土砂は、ひび割れた岩盤、扇状地までの短い運搬距離、急速でカタストロフィックな特性の活発な土砂運搬のメカニズム、これらがもとで角張って淘汰が悪い。泥岩のみからなる集水域に由来する土砂など、まれな条件が細粒扇状地 *fine-grained fan* をもたらすことはあっても (たとえば, Legget et al., 1966), 上流流域の出口にある扇状地の位置は、集水域の急斜面を構成するひび割れた岩盤に由来するので、堆積物が粗粒なのはほぼ必然的である。

その結果としての角張り淘汰が悪い粗粒組成と同様に、集水域の水理条件によって促進された扇状地上のカタストロフィックな堆積事変の卓越は、沖積盆地の河川システムの集水域の水理特性によって引き起こされるプロセスや生産物とは対照的である。河川〔地形〕の集水域は、典型的には、より良い集積、より高次の河川次数、各河川次数ではより長く、かなりの低起伏比となっている (Fig. 2)。そのような条件は、閃光洪水の発生をより少なくし、かわりに、相対的に長期間で低い流量ピークの洪水が発生する。氾濫原においてあるいは地下水として水が貯蔵されることも、河川にカタストロフィックではない基底流量〔降水が地下水として貯留される水量〕をもたらす。扇状地でのようなカタストロフィックなプロセスは、河川システムでは低次の支流で作動するが、河川〔地形〕内での土砂運搬能力は、低い堆積勾配によって妨げられるか阻害されてしまう。

<扇状地の放射方向の勾配の水理的效果>

堆積盆地において河川〔地形〕や河川デルタの平均縦断勾配と比較して扇状地の放射方向の急勾配は (Figs. 2 ~ 4)、通過する水流の水理条件に大

きな影響を与える。異なった勾配によって強く影響を受ける3つの重要な流水の水理パラメータは、速度、流れの領域、剪断応力である。河川〔地形〕と同様に、扇状地上では、これらの流水パラメータは、複雑で相互に関係する多くの変数の関数となっている (Simons and Richardson, 1966; Richards, 1982; Middleton and Southard, 1984; French, 1987)。網状流河川と水流卓越扇状地 water-flow-dominated fan の活動的な道筋に典型的な礫土砂にとって、これらの変数のなかで最も重要なものは、(1) 勾配、(2) 水深、(3) 主に河床物質による流水への抵抗である (Simons and Richardson, 1962, 1966)。

〔速度と流れの領域への影響〕 流速と水理レジュームに対する扇状地表面の急勾配の影響、およびより低い勾配をもつ礫床河川との対照は、流水の抵抗についてのマンニングの公式 (Eq 1) とフルード数の定義 (Eq 2) で、質的に表現できる。

$$V = R_n^{2/3} S^{1/2} / n \quad (1)$$

$$Fr = V/g^{1/2} / D^{1/2} \quad (2)$$

このとき、 V は平均流速 (m/s)、 R_n は径深〔断面上で、流水の断面積を水に接している長さで割った値で、水深に相当〕(m)、 S は勾配 (m/m)、 n はマンニングの粗度係数、 Fr はフルード数、 g は重力加速度 (9.8 m/s²)、 D は平均水深 (m) である。マンニングの粗度係数 n は、河床物質、植生、流路堤のような流水に抵抗する物理的要素で説明される経験に基づいた因子である (たとえば、Chow, 1959; Barnes, 1967)。扇状地上の流れが流路的ではなく、網状流の幅/水深比 (10以上) が大きいので、単純化のために Eq 1 の径深を平均水深 D で置き換える。その結果は次の通りである。

$$V = D^{2/3} S^{1/2} / n \quad (3)$$

Eq 3 は、与えられた河床粗度と水深では、速度は勾配の平方根に比例することを示す。したがって、河床粗度と水深が一定であれば、マンニングの公式は、平均勾配 2° [35‰] の扇状地表面を通過する流水の速度は、急勾配 (0.4° [7‰]) 河川の流水の2倍の大きさとなる。この違いは、4° の勾配の扇状地では3倍となり、6° の勾配の扇状地では4倍となる。これらの重大な違いは、Eq 3

がこれらの勾配をもつ扇状地上あるいは河川で発生する流水の範囲すべてにわたって妥当であることを想定させる。もっとも、その想定は、そのような勾配の抵抗係数のデータが限られているので、扇状地勾配で十分検証されたものではないが。とはいえ、Eq 3 で予測される流水パラメータと、カリフォルニア州の Death Valley の Mosaic Canyon 扇状地 (Beaumont and Oberlander, 1971) やコロラド州の Roaring 川扇状地 (Blair, 1985a, 1987b) を通過する流水で得られたデータとが一致するので、急勾配でもこの公式の使用がほぼ妥当なことが示唆される。

流水のフルード数は速度に正比例するので (Eq 2)、扇状地と河川の勾配の大きな違いは流れの領域〔流況〕にも大きく影響を及ぼす。河川の流れでは、最も一般的には常流 ($Fr < 1$) [流速が波の伝播速度よりも遅い流れ] が観察される。射流 ($Fr > 1$) は、はるかに頻度が少なくなることが指摘されている。一方、扇状地上の流れは、速度が非常に速いのでほぼ必然的に射流になると思われる (Blair, 1985a, 1987b)。この結論は、フルード数 1.3~2.8 が算定され、生成した堆積物において低流砂階〔低い流れの領域〕の堆積組成など、常流の指標はまったくなかった、Roaring 川扇状地と Mosaic Canyon 扇状地の事例研究によって (Beaumont and Oberlander, 1971; Blair, 1985a, 1987b)、支持される。

流れの領域に対する扇状地の急勾配の影響と、礫床河川との対照は、与えられた水深とマンニングの n の値で、常流から射流に流れが変化する勾配 (限界勾配、 Sc) を算定することでより詳細に検討できる (Fig. 6)。速度に対するマンニングの公式 (Eq 3) を解き、フルード数の定義 (Eq 2) に速度のこの解を入れると、フルード数、水深、流水への抵抗、勾配の間の関係が導かれる。

$$Fr = D^{1/6} S^{1/2} / n / g^{1/2} \quad (4)$$

Fr を定数にすると、与えられたマンニング係数と平均水深に対する限界勾配は単純化される。

$$Sc = n^2 g / D^{1/3} \quad (5)$$

この導入式は、流れが一様で定常であり、マンニングの公式が扇状地上と河川でみられる流れのす

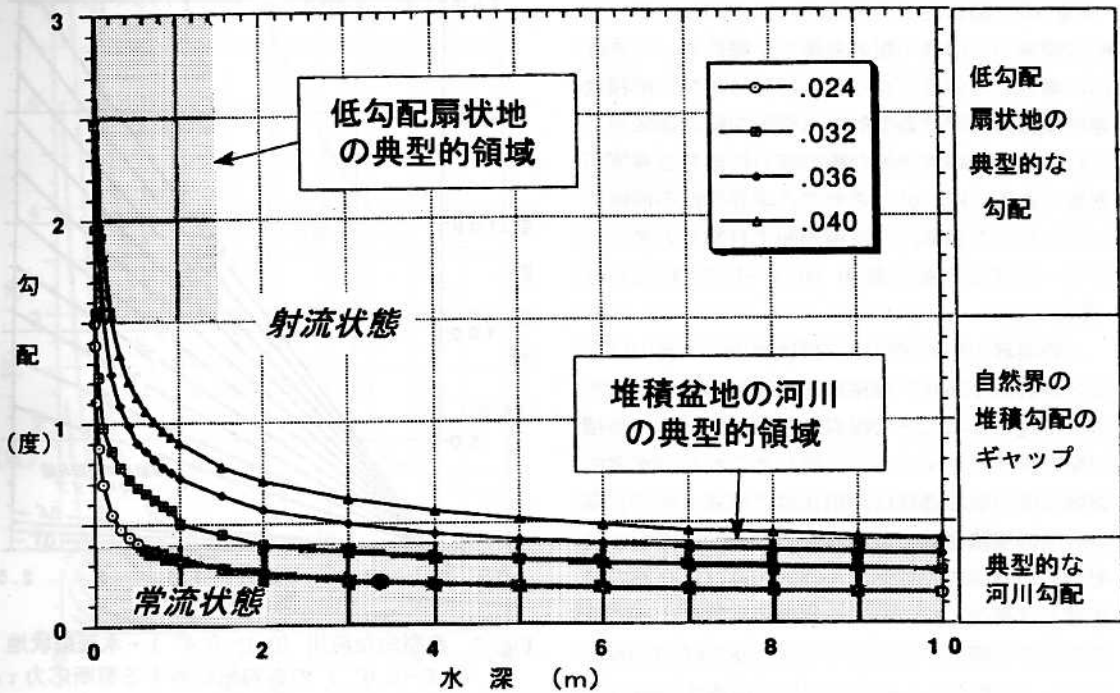


Fig. 6 マニング0.024~0.040の粗度係数に対するEq 5で算定された水深—限界勾配 Sc

乱流で射流の水利状態は、水深—勾配の Sc 曲線の右上側に存在する。常流の水利状態は曲線の左下側にある。扇状地と礫質河川に典型的な水深—勾配の領域は、自然の堆積勾配のギャップで発生する屈曲をもった、 Sc 曲線の反対側の線上に存在することに注目。水利状態は、扇状地の領域ではもっぱら射流であり、河川の領域では常流であることに注目

べてにわたって妥当であり、 n が次元のない変数であることを仮定している。ただし、この仮定は十分に知られていないし、見たことがない。この制限はEq 5が近似式であることを示している。

Eq 5の制限が少ないことを仮定し、Eq 5を用いて、与えられた水深・抵抗状態の限界勾配を算定することにより、扇状地と河川とを根本的に区分するもう1つの重要なパラメータを定義できる (Fig. 6)。Fig. 6は、水流で形成された扇状地上と山麓の礫質網状流河川で見られる、砂質中礫～大礫と中礫～巨礫の河床物質に典型的なマニングの粗度係数に対して、勾配—水深の図上に Sc の値をプロットしたものである。このダイアグラムで使用されたマニングの粗度係数0.024~0.040は、理論的あるいは事例研究の結論に基づいた上記の組成をもつすべての河床で堆積盆地の水流にとって一般的な範囲である (たとえば、Boyer, 1954; Barnes, 1967; Limerinos, 1970; Beaumont and

Oberlander, 1971; Blair, 1987b; French, 1987)。巨礫河床や岩盤に占められた山地河川に典型的なより高い粗度の値 (たとえば、Fahnestock, 1963; Barnes, 1967; Jarrett, 1984) は、この図にはない。もっとも、そのような河川は、堆積盆地の堆積の場所よりも扇状地をもつ集水域や [扇状地をもたない] 河川の集水域の反映と我々が考えている場所で見られるので、その傾向はおそらく同じと思われる。

Fig. 6のマニングの粗度係数ごとの限界勾配を示した曲線は、水深—勾配の状態を2つの領域に区分する。1つは、流れが乱流 [流線が不規則な流れ] の射流で、高流砂階 [高い流れの領域] (曲線の右上側) を示す堆積構造である。もう1つは、流れが乱流の常流で、低流砂階 (曲線の左下側) を示す堆積構造である。限界勾配の全曲線に重要な形態は、 1.5° [26‰] 以上の勾配ではほぼ垂直的な線となっていて、 0.4° [7‰] 以下の勾配ではほぼ水平的な線となっていることである

(Fig. 6)。扇状地上の水流では典型的な水深-勾配の領域が、限界勾配の曲線がy軸にそって垂直的に漸近しているプロットの部分に落ち、堆積盆地の礫質河川では典型的な水深-勾配の領域が、これらの曲線の水平的な線の部分に落ちる事実が重要である (Fig. 6)。さらに、限界勾配の曲線のしっかりした屈曲は、堆積勾配で自然界のギャップと一致する勾配の範囲 (0.5~1.5°) にある (Fig. 6)。

この限界勾配の関係は、扇状地上の水流のほとんどが射流であり、堆積盆地の礫質河川の水が主に常流であることの観察を裏付けている。堆積勾配の自然のギャップと一致したこれらの水理的領域の間の急な遷移は、扇状地と河成 [河川] 環境の間の堆積盆地での連続性がなぜないのかを説明している。この自然の水理的相違は、自然の扇状地とは異なって、植生や他の障害物によって抵抗が大きく増大するところの (たとえば, Barnes, 1967), 氾濫原に入り込む河川の溢流水が溢れることによっても高められる。さらに、扇状地では典型的ではないが河川では一般的な流路の壁の存在が、特に幅-深さ比が10未満のところ、水流の抵抗にかなり寄与する。

【剪断応力への影響】 扇状地と幅広い河川 (幅-深さ比が10以上) の勾配の違いもまた、これらの環境における水流の掃流力すなわち河床の剪断応力に重大な影響を与える。なぜなら、下記のDuBoys (1879) の式で与えられるように、掃流力 τ_0 が水深と勾配と直接関係するためである。

$$\tau_0 = \gamma DS \quad (6)$$

このとき、 γ は流体の比重であり、本論文では $1,000\text{kg/m}^3$ を比較のため仮定する (最小の浮流土砂をもつ水の値)。剪断応力は、流れによって運搬される土砂の直径 (運搬力) と容積 (運搬能力) に影響を与える水流の重要な変数である (たとえば, Shields, 1936; Baker and Ritter, 1975; Costa, 1983)。 τ_0 に対する勾配の効果は、典型的な河川と扇状地環境での与えられた D と S の値に対して、 τ_0 をプロットすることによって描くことができる。このプロット (Fig. 7) は、一般的な扇状地の τ_0 の値が、水深に関係なく、河川のそれよりも十分に高いことを示している。たとえば、水深1.0

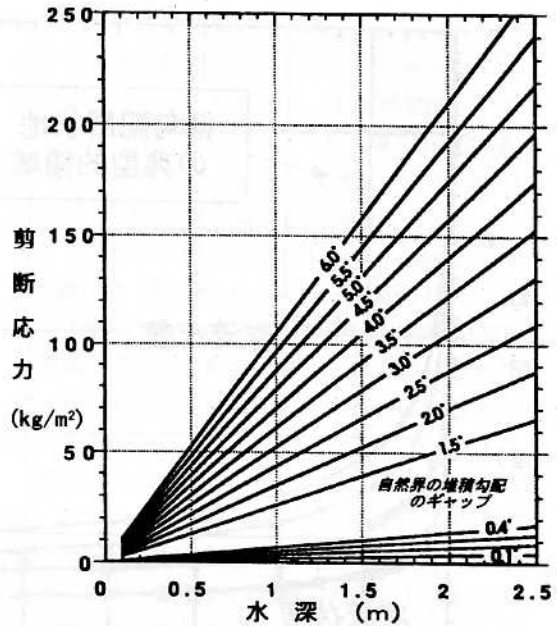


Fig. 7 典型的な河川 (0.1~0.4°)・水流扇状地 (1.5~6.0°) の各勾配に対する剪断応力 τ_0 と水深

m では、沖積盆地の急な (0.3°) 河川のそれよりも、低勾配 (1.5°) の扇状地では、 τ_0 が5倍である。平均勾配が3.0°の扇状地では10倍に、6.0°の扇状地では20倍に増加する (Fig. 7)。

水深と勾配との観点から、礫が運搬されはじめるのに必要な最小限すなわち限界剪断応力 (τ_c) を描くのに、流れの運搬力に対する扇状地と河川で異なった勾配が関連していることが証明されている [1番目の観点]。この関係は、ヒュルストロームの曲線 [碎屑物の移動・堆積の開始条件を流速-粒径で表した曲線] を外挿することによって見積もられている (Novak, 1973)。すなわち、さまざまな粒径 (中軸径によって測定された d) の礫を移動させるのに必要な τ_c を決定する Costa (1983) の経験式 (Eq 7) と剪断応力の定義 (Eq 6) を結合させて、Eq 8 で計算できる。

$$\tau_c = 0.056d^{1.213} \quad (7)$$

$$\gamma DS = 0.056d^{1.213} \quad (8)$$

さまざまな礫径に対するこの式の結果は、 γ に $1,000\text{kg/m}^3$ の定数を仮定すると Fig. 8 のようになる。この図は、Eq 6 から明らかかなように、水流の

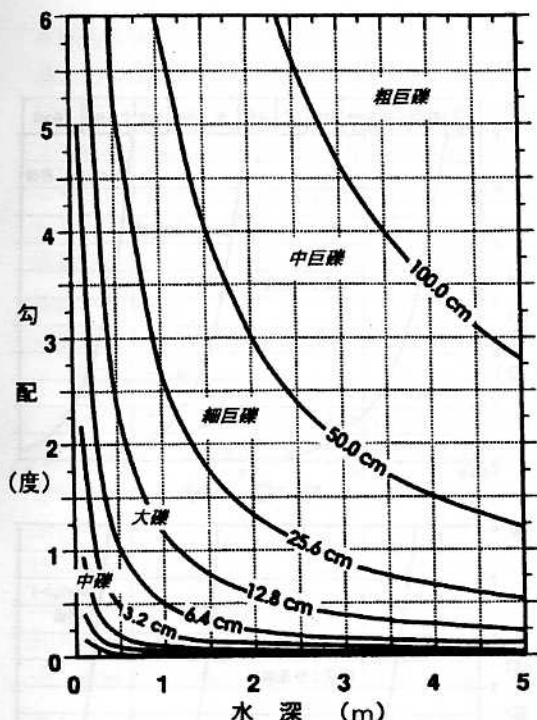


Fig. 8 粒径 (d) と剪断応力 (τ_c) に関する Costa (1983; Eq 7) の経験式に基づいた各種粒径の礫が運搬されるのに必要な水深-勾配

運搬力が水深や勾配とともに増加することを示している。たとえば、 $D = 1.0\text{m}$ では、 0.4° 以下の河川では、運搬できる最大の碎屑物は粗中礫 ($d = 6\text{cm}$) であるのに対し、低勾配 (1.5°) の扇状地では粗大礫 ($d = 15\text{cm}$) を、中程度の勾配 (3.0°) の扇状地では細巨礫 ($d = 30\text{cm}$) を、 6.0° の扇状地では 50cm の巨礫を運搬できる。一方、急勾配 (0.4°) の河川では、粗大礫 ($d = 12.8\text{cm}$) の移動には、 3.0m の水深が必要で、それは中～粗巨礫が扇状地上では運搬できる深さである (Fig. 8)。このように、与えられた水深では、主に勾配の違いによって、沖積盆地の急勾配の河川よりも、扇状地上の流れによってはるかに高い運搬力が維持されている。

運搬に関する複雑性 (たとえば, Sundorg, 1956) のような多くの要因と Eq 7 の経験特性は、その形が同じでありながら、Fig. 8 での曲線の位置を移動させて (Costa, 1983)、礫を運搬するのに必要な実際の剪断応力を複雑にしている。たとえば、礫がしっかり充填されていたり等質であれば、グ

ラフ上でこの曲線は右上に移動して、特定の礫径に対し τ_c を増加させる。反対に、まばらな充填、河床上の砂の存在、浮流土砂の存在 (これは γ を増加させる)、水理的浮力、板状や細長い碎屑物の形状は、Fig. 8 の曲線を本来の位置に移動させて、特定の粒径の礫を移動させるのに必要な τ_c をすべて一般的に減少させる (たとえば, Fahnestock and Haushild, 1962; Bradley et al., 1972; Baker and Ritter, 1975; Costa, 1983)。本来の位置にこれらの曲線を移動させるもう 1 つの要素は、すでに動いている特定の粒径の碎屑物を転動させるのに必要な剪断応力は、動かし始めるのに必要な力よりも小さいという事実である。この効果は、重要である。なぜなら、斜面崩壊や流路堤の下刻による最初の碎屑物の動きは、河川 [流域] で起こるかもしれないが、扇状地をもつ集水域での粗粒土砂にとっては特に一般的なためである。そのことが、両環境を区分するもう 1 つの根本的変数となっている (Fig. 2)。

河川に比較して扇状地の急な勾配によって発生する水流のより大きな τ_c の 2 番目の観点は、粒径を変化させる土砂の運搬様式 (掃流土砂, 浮流土砂, ウォッシュロード) である。掃流土砂 [河床とその付近を移動する粗い土砂] として流れの中で運搬される粒子は、転動, 跳躍, 滑動するのに対し、浮流土砂 [浮遊土砂, 懸濁物質] は、乱流により底にある堆積物に大部分が触れることなく水流の中を移動する (たとえば, Komar, 1988)。流れと河床間の交換なしに移動するほど細かい粒子のウォッシュロードは、他の浮流土砂とは違って、流速と等しい速度ではほぼ無制限の量が運搬されるので、区別される (Komar, 1988)。浮流土砂やウォッシュロードとして移動できる最も大きい堆積粒子は、乱流と関係した浮力の増加によって、 τ_c とともに大きくなる (Walker, 1975a, b; Komar, 1988)。粒径が大きくなった土砂は、大きい浮力が次第に大きな粒に設定された流速を埋め合わせして、乱流がより強くなるので、掃流土砂から浮流土砂へと、あるいは浮流土砂からウォッシュロードへと変化する (Komar, 1988)。さまざまな粒径の碎屑物の取り込みに必要な剪断応力と (Fig. 8)、浮流でさまざまな粒子を維持するのに必要な剪断応力に関する経験式を結びつけることによ

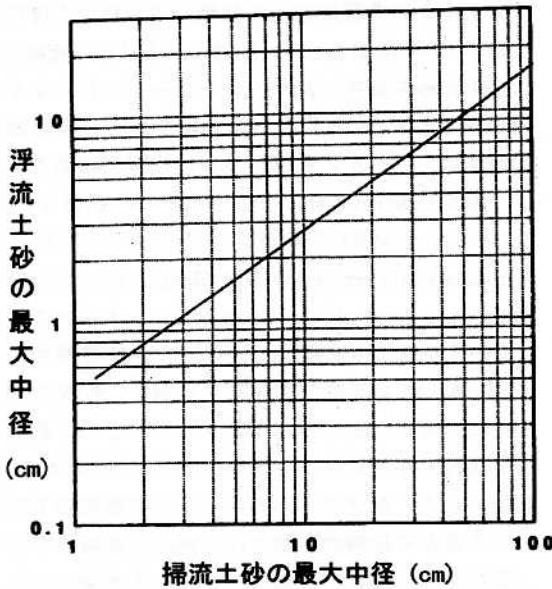


Fig. 9 剪断応力に関する流速と運搬力に基づき算定された、水流を転動できる最大粒径 (d)、同じ水流を浮流できる最大粒径 (d) (Walker, 1975a, 1976b による)

たとえば、40cm の粒径の岩片を運搬できる流れは直径8mm の堆積物も浮流で運搬できる

って、特定の流れて浮流土砂として運搬される最大粒子に対する掃流土砂として運搬される最大粒径との関係に展開できる (Fig. 9; Walker, 1975a, b)。ウォッシュロードと浮流土砂の境界も、掃流土砂と浮流土砂の間の境界を決定する粒径の90%の粒径に、この閾値を任意に関係づけて見積もりできる (Komar, 1988)。

掃流土砂、浮流土砂、ウォッシュロードの領域の境界を決定する堆積物の粒径に対する勾配の効果は、特定の水深について Fig. 7, 8, 9 のデータを結合することで算定できる (Fig. 10)。たとえば、水深1.0m の場合、280mm 以下の粒子 (細巨礫以下) は、平均勾配 3° の扇状地上で運搬され、掃流土砂として7~280mm の部分 (細中礫~細巨礫)、浮流土砂として0.7~7mm の部分 (中砂~細中礫)、ウォッシュロードとして0.7mm 以下の部分を移動させる (Fig. 10A)。一方、水深1.0m の急勾配 (0.3°) 河川では、掃流土砂として1.5~45mm の碎屑物 (細礫~極粗中礫)、浮流土砂として0.17~1.5mm (細砂~極粗砂)、ウォッシュロードとして0.17mm 未満 (極細砂以下) のもの

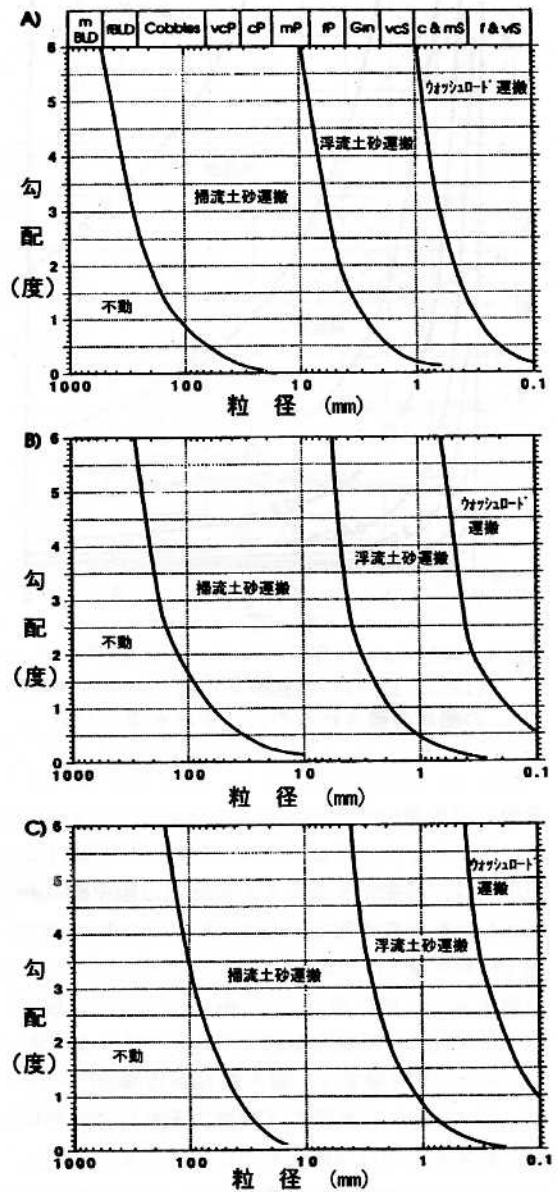


Fig. 10 Figs. 7, 8, 9 を結合した、水深 A) 1.0m, B) 0.5m, C) 0.25m の堆積物の運搬様式に対する勾配の影響

粒径階級は次の通りである。mBLD : 中巨礫, fBLD : 細巨礫, vcP : 極粗中礫, cP : 粗中礫, mP : 中中礫, fP : 細中礫, Grm : 細礫, vcS : 極粗砂, cS : 粗砂, mS : 中砂, fS : 細砂, vS : 極細砂

を移動させることができる (Fig. 10A)。これらの違いの程度は、すべての水深で同じであり (Fig. 10A-C), そのことはそれぞれの運搬様式にとって勾配の関数として増加する運搬力が重要になることを示している。この関係は、細砂、極細砂、シルト、粘土粒子は河川では一般的であるが、水流扇状地にまれな理由を物語っている (たとえば、Blair, 1987b)。

<扇状地上の流れが拘束されないことによる水理的効果>

地形に起因する扇状地の水理条件の第2の観点は、流路壁の拘束がないことで扇頂や平衡交差点で生じる典型的な流れの急速な広がり、その結果として浅くなることである (たとえば、Bull, 1972; Blair, 1985a, 1987b; French, 1987; Beer and Jirka, 1988)。扇頂や平衡交差点を越えたときに流れが浅くなると、剪断応力の低下や速度、運搬能力、運搬力の付随的な低下によって、土砂の堆積を大きく促す (Figs. 2, 7, 8, 10)。剪断応力や速度の減少割合や絶対量は、勾配と浅化の度合との関数となっている。たとえば、水深が1.0m から0.1mへ減少 (90%) した場合、剪断応力が90%減少する。そのような浅化は、6°の勾配の流れで剪断応力を94.6kg/m²低下させ、3°の流れで47.2kg/m²低下させ、1.5°の扇状地勾配の流れで23.6kg/m²低下させる (Fig. 11)。これらの変化に対する反応は、この量によって浅化する流れが被る運搬力の低下で表現できる。1.0m から0.1mへ流れが浅化することによって運搬される最大の碎屑物の粒径は、6°の勾配で中巨礫から中礫へと、3°の勾配で細巨礫から中礫へと、1.5°の勾配で大礫から細中礫へと変化する (Fig. 8)。一方、典型的な河川の勾配では、同じ条件で剪断応力の絶対的減少は、1.6~4.7kg/m²である (Fig. 11)。すなわち、それぞれ、細中礫から細礫、粗中礫から細中礫への運搬力の変化となる (Fig. 8)。これらのそれぞれの減少は、扇状地領域で受ける減少の3~13%となっている。水深1.0, 0.5, 0.25mの運搬力によって描かれているように (Fig. 10A-C), さまざまな粒径の碎屑物の運搬様式での流れの浅化の効果も重要である。

扇状地上で流れが浅化する急速性と規模、その結果の運搬力と運搬能力の低下は、扇状地と河川

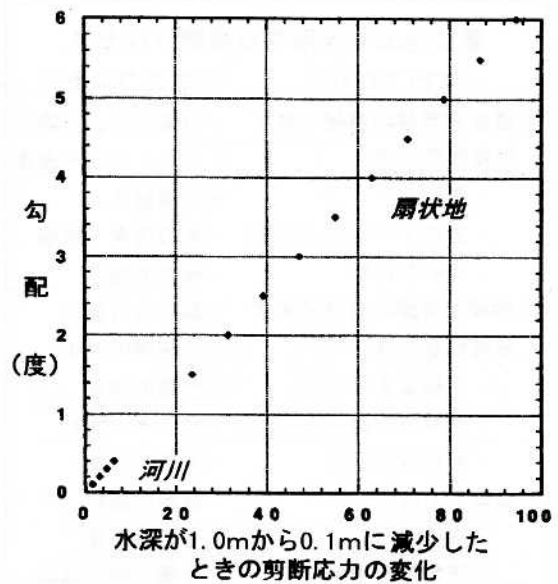


Fig. 11 水深が1.0から0.1mに減少したときの水流の剪断応力 τ_0 と勾配の変化
扇状地と河川の領域が記されている

とに自然界で根本的に区分されるもう1つの様式である。流れが拘束されず広がることに伴う、水深の急速な減少は、半円錐形状の地形によって扇状地上で強く働くが、流路の開放的パイプ型地形の河川では、邪魔されたり妨げられる (Fig. 2)。事実、河川の水深は、多数の支流からの流量が加わり、通常、下流に向け増加する。その結果、流路幅や勾配が一定ならば、剪断応力、速度、運搬力、運搬能力も増加する (たとえば、Leopold and Maddock, 1953)。したがって、勾配の違いだけではなく、地形に関係して流れが浅くなることで、河川と比較して、扇状地上では速度、運搬力、運搬能力の急速な減少がある (Fig. 2)。これらの変化する条件の実際の効果は、拘束されない点に近い扇状地上に急速な堆積を促し、扇状地の特徴的に限定された半径や淘汰の悪い堆積物をうむことになる。一方、堆積盆地の河川は、低勾配なので扇状地で示された運搬力や運搬能力の高い水準を保持できないが、流路壁の維持と、下流に向けての流量増加による水深と剪断応力の増加で、はるかに長い距離、砂と礫を運搬できる。

扇状地上で作用する堆積プロセス	
一次のプロセス	二次のプロセス
A) 基盤岩急崖の崩壊で発生 堆積物重力流	・ 氾濫流による篩分
・ 落石	・ リル・ガリー侵食
・ 岩石すべり	・ 雨滴侵食
・ 岩石なだれ	・ 風の侵食・堆積
B) 崩積土斜面の崩壊で発生 堆積物重力流	・ 植物の根
・ 崩積土すべり	・ 動物の穴掘り
・ 粘質土石流	・ 堆積物の風化
・ 非粘質土石流	・ 土壌の発達
流体重力流	・ 地下水の流れ
・ 布状洪水	・ 表面の硬化
・ 下刻流路洪水	・ 表層の固結
	・ 側方の侵食
	・ 断層・褶曲運動

Fig. 12 扇状地上で作用する一次的・二次的プロセス

【扇状地の堆積プロセスとその層相】

<一次的・二次的扇状地プロセス>

扇状地固有の位置、複合的形態、水理条件は、一連の特有のプロセスと層相群をうむ。扇状地上に作用する堆積プロセスは、我々が一次的・二次的と呼ぶ2つの基本的型がある (Fig. 12)。一次のプロセスは、集水域から扇状地の場所へと盛んに土砂を運搬するものである。上流流域の涵養流路の出口で扇状地が発達することは、一次扇状地プロセスはカタストロフィックであるがまれであり、堆積物が角張って、淘汰が悪く、粗粒であることを保証している。この型の重要なプロセスは、落石、岩石すべり、岩石なだれ、崩積土すべり、土石流、布状洪水である (Fig. 12)。一次プロセスは、ふつう扇状地の形成あるいはアグラデーション [堆積学では、堆積物が上に重なる堆積現象を意味する] をもたらし、土砂の再移動による集水域の拡大と連動して働く。一次プロセスの事変は、したがって、扇状地の発達や層序に特徴的には短期間ではあるが重要な影響を与えている。

一方、二次プロセスは、一次プロセスによって扇状地に最初に堆積した土砂が再移動あるいは変形するものである (Blair and McPherson, 1994

で議論)。それらには、氾濫流、雨滴による侵食、風による再移動、植物の根、動物の穴掘り、堆積物の風化、土壌の発達、断層、地下水の移動、表面の硬化、隣接する河川・湖沼・大洋・氷河による扇端侵食 [崖端侵食] がある (Fig. 12)。二次のプロセスは、典型的には扇状地の侵食やデグラデーションをもたらす、篩い分けられた碎屑物の薄いラグ堆積物 [下刻流路内の粗粒堆積物]、土壌、生物擾乱層準、続成作用により変化した帯として扇状地層序に一般的に認められる。断層とおそらくは何回かの氾濫流と扇端侵食を除いて (たとえば, Beaumont and Oberlander, 1971), 二次のプロセスは通常あるいはカタストロフィックではない状態に関係している。それらは、扇状地形成に対する影響は一般的には小さいが、二次プロセスは、一次プロセスを特徴づける長期間の再来間隔により、扇状地表面を普段支配している。したがって、扇状地の層序シーケンスは、最も単純な意味で、二次プロセスによる「正常」状態できた地表や薄層によって区分されるカタストロフィックであるがめったに起こらない一次的な事変の記録となる (Blair, 1985a, 1987b; Blair and McPherson, 1992, 1993, 1994)。

すべての一次扇状地プロセスは、集水域斜面の崩壊や不安定な物質の下方への移動によって誘発される。斜面物質は、水の力によって土砂が動く流体重力流として (たとえば、水流)、あるいは物質に直接働く重力によって土砂が動く堆積物重力流として (たとえば、Middleton and Hampton, 1976)、扇状地まで移動する。扇状地をもつ集水域斜面は、2つの独自の物質型、岩盤と崩積土とで構成される。岩盤は、集水域で急斜面 (50~90°) をつくる岩棚 [狭い平坦面] や急崖で代表される (Fig. 13)。一方、崩積土は、風化により基盤岩の急崖からの未固結で、一般的に礫が卓越した、淘汰の悪い堆積物からなり (たとえば、Drew, 1873; Sharpe, 1938; Rapp and Fairbridge, 1968; Rahn, 1986; Kite, 1987; Nelson, 1992)、集水域の急崖の下

Fig. 13 異なった発達段階の扇状地および対照的な岩相がある集水域の多様な岩盤斜面と崩積斜面 (写真, 省略)

や、急崖の前面にそって、あるいは急崖の間の凹地に堆積する (Fig. 13)。粘土、シルト、砂は、岩盤の風化や風の運搬によって崩積土に付加する。崩積土からなる斜面は、一般に安息角 (30~40°) に近いが、15° 以下~56° となっている (Campbell, 1975)。扇状地をもつ集水域は、主として岩盤、主として崩積土、あるいは最も一般的には2つの混合からなる斜面をもっている (Fig. 13)。異なった一次的プロセスは、不安定な斜面物質が岩盤なのか崩積土なのか、そして堆積物重力流あるいは流体重力流どちらが誘発されるかに依存して作動する。このため、扇状地の層相分析の洞察から、一次的扇状地プロセスは、3つの型に分けられる。(1)集水域の基盤岩の急崖の崩壊によって発生した堆積物重力流。(2)集水域の崩積土斜面の不安定化によって発生した堆積物重力流。(3)集水域の崩積土斜面の不安定化によって発生した流体重力流 (Figs. 12, 13)。

<基盤岩の急崖の崩壊による

一次的堆積物重力プロセスと層相>

落石、岩石すべり、岩石なだれは、重力のもとで集水域にある基盤岩の急崖の崩壊により発生した扇状地形成に重要な堆積物重力プロセスの漸移的スペクトルで表現できる (Fig. 14)。これらのプロセスのすべては、破断や風化によって岩盤が内部摩擦や剪断強さ [剪断応力の最大値] が次第に低下したことに由来する。究極的には、基盤岩の急崖は、重力がもはや逆らうことができない不安定さの閾値に到達して、崩壊する。この閾値も、時間経過により、吸着水・氷により、あるいはおそらく最も重要と思われる、地震時の振動により超えてしまう (Hadley, 1964; Morton, 1971; Garwood and Janos, 1979; Harp et al., 1981; Keefer, 1984; Plafker and Ericksen, 1984; Statham and Francis, 1986; Cotecchia, 1987; Beaty and DePolo, 1989; Harp and Keefer, 1989; Slosson et al., 1992)。他の一次的扇状地プロセスとは異なり、基盤岩の急崖の崩壊による堆積物重力流の発生、運搬、堆積の間には、水は必要条件あるいは絶対に必要な条件とはなっていない。急崖の崩壊で扇状地の堆積が促進する山地前面の特殊な場所は次の通りである。(1)山地前面の断層が広がり、準安定 [極相を越しても以前のままの状態] の岩盤地塊が地殻

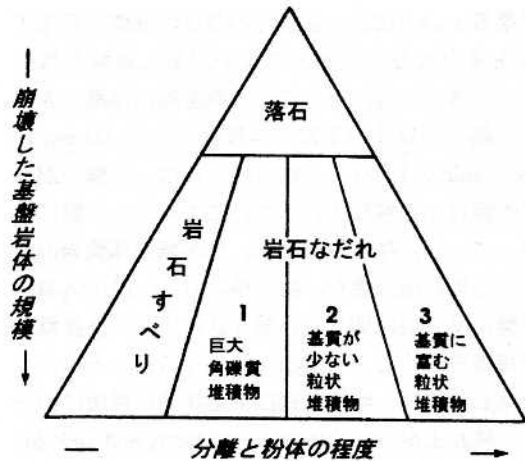


Fig. 14 落石・岩石すべり・岩石なだれなど、集水域における基盤岩の急崖の崩壊で発生した堆積物重力プロセス間の相互関係

プロセス間の漸移的境界は、崩壊した岩体の規模と分離・粉体の程度との関数となっている。岩石なだれ堆積物は最低3区分できる。(1)基質に富むものから乏しいものまでの破碎された碎屑物の組成、(2)基質が少ない粒状の組織、(3)基質に富む粒状の組織。

変動により形成されているところ。(2)隆起している地塊での地殻変動に同調あるいは受け継いだ破断パターンが、山地前面や涵養流路に並行しているところ。(3)山地前面が、部分的に弱い層理面にそってすべる不安定さをもった、高角の傾斜をもった良くセメントされた堆積物の成層からなるところ (DeGraff, 1978; Pearce and O'Loughlin, 1985; Cruden, 1988; Schultz and Southworth, 1989)。(4)良くセメントされた岩石とセメントされていない岩石の間にある、変質した葉理面や不整合のような、地質学的に顕著な不連続を示す他の型が山地前面近くで高角で傾斜するところ (たとえば、Hadley, 1964; Dawson et al., 1986)。(5)起伏が大きくなって斜面が過度に急になったところ (Plafker and Ericksen, 1984)。(6)山地前面に剥離した大規模岩塊が発達するところ (Da Costa Nunes et al., 1984)。

Fig. 15 集水域における基盤岩の急崖の崩壊で発生した扇状地上の堆積物重力流の堆積地形と層相。(写真、省略)

〔落石 rock fall〕 基盤岩の急崖の崩壊で発生する堆積物重力プロセスのなかで最も単純な落石〔岩石落下〕は、重力のもと典型的には礫の大きさの個々の岩片の下方への移動である (Drew, 1973; Gardner, 1983)。これらの岩片は、岩盤の割れ目や節理から解放されることによって、一般に角張っている。落石堆積物は、集水域の基盤岩の急崖や山地前面の麓を一般に覆い (Figs. 13, 15A-B)、岩盤にV字型に切り込み漏斗状に広がった崖錐や崩積錐をつくる (Church et al., 1979)。そのような落石の岩片、特に巨礫は、扇状地の場所に転がるか跳ね上がって (Beatty, 1989; Beatty and DePolo, 1989)、堆積物のなかの特大的岩片を構成する (Fig. 15A)。

〔岩石すべり rock slide〕 落石に対し、岩石すべり〔岩盤地すべり〕は、断層や割れ目にそって基盤岩の急崖から剥離したより大きな岩塊 (Fig. 14) からなり、急速にあるいは徐々に、そして継続的にあるいはその時々、基底のすべり面の上をまとまった集合体が下方へ移動するものである (Varnes, 1978)。岩石すべりの分離によって形成された、もとの岩盤が典型的には曲線状にえぐられた部分は、滑落崖と呼ばれる (Fig. 15B)。岩石すべりは、落石の移動の転動や跳躍とは違い、すべる運搬メカニズムによって落石とは区分される (Sharpe, 1938; Mudge, 1965)。上側の集合体の重量で移動している間、すべり面にそって発生した、浸透した剪断応力のために、岩石すべりの基底は、落石堆積物とは違い、典型的には角礫岩化している。不安定な水平層の場所での岩盤の角礫化により岩石すべりの崖の基部にそって、落石堆積物がほぼ必然的に出現する (Fig. 15B)。岩石すべりの堆積物は、岩盤斜面の基部付近 (Fig. 15B; Grainger and Kalaugher, 1987)、あるいは扇状地の上に孤立した岩塊として堆積する。特に大きな岩石すべりは、Death Valley の Artist's Point の不安定な岩塊のように、リストラクチャー断層〔断層面が下に凸の断層〕に沿ったわずかな回転によって運搬されてきた集合体となっている。

〔岩石なだれ rock avalanche〕 大規模に破断された基盤岩の急崖の崩壊は、部分から全体までの分離・粉碎を伴う急速でカタストロフィックな崩落としておそらく最も一般的に発生して、岩石な

だれと呼ばれる角礫質や粒状の集合体をつくる (Fig. 14; Harrison and Falcon, 1937; Mudge, 1965; Shreve, 1968; Browning, 1973; Hsu, 1975; Hunt, 1975; Porter and Orombelli, 1980; Yarnold and Lombard, 1989; Monastersky, 1992; Topping, 1993; Yarnold, 1993)。岩石なだれは、勾配の減少や集合体の側方への拡散により、山麓帯で典型的に堆積する (Nicoletti and Sorriso-Valvo, 1991)。実際の流出距離も、いずれも垂直的落下量とともに増加する、落下の運動エネルギーと、下方への移動に要した重力からの位置エネルギーと関係する (Melosh, 1987; Fauque and Strecker, 1988; Yarnold and Lombard, 1989; Hart, 1991; Topping, 1993)。岩石なだれは、基盤岩体の規模、含まれる粒子数、粒状流〔岩盤の破碎による岩片の集合流〕に対する転動や跳躍の運搬メカニズムによって、落石と区分できる。岩石なだれは、崩壊以前のよりその場での強い風化により、あるいは、山麓斜面と崩落する岩体が衝突するときやその後の水平的に動くときにもたらされる破碎や離散のより大きな程度により、基盤岩体のより進んだ分離によって岩石すべりと漸移的に異なっている (Fig. 14)。

扇状地上の個々の岩石なだれの堆積物はさまざまであるが、他の堆積物重力流型とは区別できる特徴的な地形学的・堆積学的特性を通常もっている (Longwell, 1951; Koop, 1952; Burchfiel, 1966; Gates, 1987; Yarnold and Lombard, 1989; Ryder et al., 1990; Hart, 1991; Yarnold, 1993)。緩やかなすべりを続けた岩盤斜面の大規模な崩壊は、山麓に厚さ5m ~100m 以上の円錐体を堆積させる (Fig. 15C-E)。完新世の大規模岩石なだれでその他言及された地形は次の通りである。(1) 100m もの高さの細長いあるいは同じ幅の丘で表面に凹凸がある (Fig. 16A-B)。(2) 長さ幅比が低いあるいは高い弧状からU字型までの高さ1~100m の堤としわの形 (Fig. 16C-D; Fauque and Strecker, 1988も参照)。(3) 厚さ10m までの下方へ数 km 広がる連続的なロープ。小規模岩石なだれの堆積物は、U字

Fig. 16 集水域における基盤岩の急崖の崩壊で発生した扇状地上の堆積物重力流の堆積地形と層相 (写真、省略)

型の堤としわの型 (Fig. 16E) あるいは連続的な起伏0.5m~5m以上の舌状型 (Figs. 15C, 16E-F) をもつ (Gates, 1987; Cluer, 1988; Harp and Keefer, 1989)。岩石なだれのどんな大きさの堤やロープでも上方の末端は、山地前面と連続する (Figs. 15C, 16 E-F), あるいはそこから少しだけ (Fig. 16C) ないしかなり (Fig. 16A) 離れている。

岩石なだれ堆積物の3つの漸移型は、基盤岩体の破碎、分離、粉体の程度で区分できる。その違いは、破碎された基質〔マトリックス〕を高い割合から低い割合まで含んだ角礫質あるいは粒状化した礫の組織として、堆積物中に現れる (Fig. 14)。最も広く知られている岩石なだれの組織の1つは、さまざまな割合の破碎された基質に挟まれた、充分破碎されているが、典型的にはもとのままかほんのわずかに広がった、基盤岩の角張った岩片や岩塊からなる (Fig. 16B)。ジグゾーパズルのような角礫岩や細かいひびが入った角礫岩などファブリック〔空間的配列〕に特徴のあるこの組織は、合衆国南西部とフランスで巨大角礫岩と呼ばれる堆積物に典型的である (Longwell, 1951; Koop, 1952; Burchfiel, 1966; Shreve, 1968; B. Johnson, 1984; Yarnold and Lombard, 1989)。巨大角礫岩は、かなりもろいあるいは運動中に破碎の変形をうけているが、分離や内部での混合が相対的に低いため、岩体のまとまりが保存されている、崩落基盤岩体から発達した岩石なだれの堆積的産物となっている (Yarnold and Lombard, 1989; Yarnold, 1993)。たとえば、カリフォルニア州の Panamint Valley の Lake Hills の岩石なだれ堆積物には、巨大角礫岩の層相が、50m以上の高さの完全な角礫の丘 (Fig. 16A-B), あるいは破碎されているがもとのままの基盤岩の厚板が岩石すべりから岩石なだれの間の堆積物重力流で運搬されてくるその下に厚さ70mの破碎された基底として出現している。

崩壊以前のその場でのより広い風化により、あるいは移動中に粘性がなくなり、かなりの程度分離して崩落する基盤岩体からなる岩石なだれは、礫間の基質を多量 (Fig. 15D-E), 中程度 (Figs. 15F, 16D), 少量 (Fig. 16E-F) 含み、粒状化と典型的には角礫質の堆積物で特徴づけられる。ほんの短距離であっても (Fig. 15C-E), 運動中にかなり分離する基盤岩体の岩石なだれの発達は、崩壊前の岩

盤のかなりの程度の風化や破碎を最もよく反映している。崩落の比高や、山麓斜面そばの基盤岩体に対する衝撃への抵抗力も、崩落する基盤岩体の分離の程度に影響する。かなり分離した基盤岩体の岩石なだれは、山地前面に近い丘で堆積する (Fig. 15C-E), あるいは下方に移動する粒状流に変形する。後者は、弧状からU字型の堤—しわの堆積物や厚さ1未満~数百mの連続した舌状堆積物 (Fig. 16C-F) をつくったり、1未満~数十km²を覆う (たとえば、Harrison and Falcon, 1937; Crandell et al., 1984)。岩石なだれは、扇状地を下刻した流路に入っていたり、埋積さえる (Ryder et al., 1990)。岩石なだれの堆積物のすべての型は、以下により、他の堆積物重力流の層相と区別できる。(1)層理あるいは大規模な層理の欠如。(2)ジグゾーパズルのような礫岩あるいは細かいひびが入った角礫岩の層相の存在など、礫の破碎と角張った特徴。(3)塊状構造の〔特定の配列がない〕巨礫、岩塊、岩盤の平板の存在など、淘汰が悪い。(4)礫岩片の一般に単源〔1つの礫種〕あるいは累帯の組成。(5)基質の細粒物がその後の土壌起源というよりも破碎起源。(6)堆積事変当たりの極めて大容量の堆積物。(7)池を含む顕著な凹凸のある地表。(8)集合体の急速で一方向の変異によりできた、碎屑岩脈や覆瓦スラストの出現などかなり変形した基底帯 (Mudge, 1965; Francis et al., 1985; Fauque and Strecker, 1988; Yarnold and Lombard, 1989; Yarnold, 1993)。

＜崩積土斜面の崩壊による

堆積物重力プロセスと層相＞

〔崩積土すべり *colluvial slide*〕 崩積土斜面の崩壊で発生した扇状地上の堆積物重力流には、全種類の土石流のほか、先行する崩積土すべりがある (Fig. 12)。崩積土すべりは、すべり面と呼ばれる分離層の上をゆっくり、間欠的に、あるいは急速に移動する不安定な崩積土の元のままの集合体からなる (Varnes, 1978; Bovis, 1986; Cronin, 1992)。すべり面は、粘土層や地下水面のように、崩積土内の弱いところに発達したり、崩積土と下の岩盤の間の接点を構成する。崩積土すべりの堆積物は、その大きさや形が岩盤の亀裂の特質に特に影響をうける、通常は淘汰がないか極めて悪い粘土まじり礫からなる斜面物質の特性を反映している

(Kite, 1987; Mills, 1987)。崩積土すべりは、地震に反応するなど、乾燥あるいは土砂が不十分な状態でも発生するが (Keefer, 1984), 土砂が十分蓄積したところに降雨や雪解けが加わって発生することが多い (Caine, 1980; Ellen and Fleming, 1987; Reneau et al., 1990)。崩積土斜面は、間隙水圧 [土粒子間の間隙水に働く圧力] の増加と土砂の剪断強さの減少による抵抗の低下によって、土砂が十分蓄積したときに最も一般的に崩落する (Campbell, 1975; Hollingsworth and Kovacs, 1981; Moser and Hohensinn, 1982; Wieczorek, 1987; Costa, 1988, 1991; Mathewson et al., 1990)。両者の要因に対して、崩積土中の粘土の存在は、浸透率 [透水性] の低下と、すき間を流体状態する力を与えることによって、強く働く。岩石なだれは、山地前面から直接、あるいは特に小規模で急傾斜の集水域に由来するならば、扇状地上に堆積する (Bovis, 1985, 1986)。さらに一般的には、飽和した粘土に富む岩石なだれは、移動時に分解したり、土石流に変化する。

【土石流 debris flow】 土石流は、重力で下方へ移動する土砂粒子と少ない割合の水と空気の混合物で特徴づけられる (Blackwelder, 1928; Sharp and Nobles, 1953; Johnson and Rahn, 1970; Fisher, 1971; Varnes, 1978; A. Johnson, 1984)。土石流は、扇状地まで運搬されるかなりの土砂について最も重要な種類の堆積物重力流として、あるいはそのようなものとして、広く調査されてきた (Table 1)。土石流は、2つのメカニズムによって発生する。そのうち、最も一般的な [第1の] 発生メカニズムは、分解した崩積土すべりが、下方へ移動するときに粒子個々の押し合い、変形、損失により空気と水が乗りあって土石流に変化する (Johnson and Rahn, 1970; Campbell, 1974, 1975; Costa, 1988)。この変化は、崩積土に水の存在が不可欠であり、したがって過度の降雨や雪解けの間あるいは直後に最も発生しやすい。第2の発生メカニズムは、速く移動する水が、大量の土砂により覆われた集水域斜面と交わったところで発生する。攪拌、突き上げ、混合を通じて分散した岩片によって水がエネルギーを消耗するところで結果として起こる反応は、土砂、空気、水が急速に乗り合い土石流を発生させる (A. Johnson, 1970, 1984)。ど

ちらかのメカニズムによる土石流の発生は、土砂も氾濫流も集中する収束的な集水域網で結びつけられた一般的に急傾斜で淘汰の悪い崩積土斜面によって、扇状地をもつ集水域において推進させられる (たとえば、Reneau et al., 1984, 1990; Reneau and Dietrich, 1987)。

いったん発生すると、土石流は、剪断強さをもちや超えることができなくなる地点まで重力が減少するまで、移動し続ける。土石流は、数トンの碎屑物を運搬できるにもかかわらず、非侵食的となつて葉理の状態でも移動する (Johnson, 1970; Rodine and Johnson, 1976)。土石流の土砂粒子は、粘着力、分散圧力 [衝突で発生する力]、浮力による流れの高密度と力によって支えられている (Middleton and Hampton, 1976; Costa, 1984, 1988)。巨礫と他の物質との密度の小さな違いによる、浮力と分散力への巨礫の違った反応は、流れの頂面、前面、側面へ巨礫を集中させる (Fisher, 1971)。土石流の終息は、究極的に、扇状地での脱水や勾配の減少により促進するプロセスである、塑性降伏強度 [弾性体としての限度] が剪断応力と等しくなるところまでの薄化 (Johnson, 1970) による。土石流は、流れの前面や側面で粗粒碎屑物の堰き止め効果や (Pierson, 1985)、流路の障害物に引っかかっても (Blair, 1987b)、停止する。

扇状地上の土石流の堆積は、典型的には次のどちらかで起こる。(1)しわが結合した、高さ2mまでで、何十mも下扇で広がった対になった堤 (Fig. 17A-B)。(2)放射状に延びた、幅1~20m、長さ何十m、厚さ2mまでのロープ (Fig. 17C-E) (Sharp and Nobles, 1953; Johnson, 1970; Pierson, 1980, 1981; Costa, 1984; Takahashi, 1991)。大規模土石流は、扇状地全体を覆う堆積的なロープすら生みだす。堤すしわの堆積物は扇頂部でより多いのに対し、ロープ堆積物は扇端部でより一般的である。両者の地形は、1つの堆積事象で放射方向に発達したものである (Fig. 17A)。多様な地層は、斜面や堤防が間欠的に崩壊・抜け落ちることで流れに新たな物質が加わることで誘発される1回の

Fig. 17 土石流による扇状地堆積物の層相 (写真, 省略)

現象、あるいは碎屑物と流路のくびれの相互関係によってできる堰き止めの繰り返しの発生と中断の波動の結果として、1つの土石流事変で形成されることもある (Fig. 17A; Blackwelder, 1928; Fryxell and Horberg, 1943; Sharp and Nobles, 1953; A. Johnson, 1984)。これらすべての場合で、堆積物はふつう淘汰が悪く、基質を含み、堆積物の場所に左右されて (Fig. 17B)、礫岩片 (Fig. 17E) が基質 (Fig. 17C-D)、あるいは両者にささえられている。堤やしわは、移動する土石流が選択的に粗い粒子を淘汰することや堆積物により地形が変化するので、関連のロープよりも、より粗粒でより厚く、不連続の層理をなす傾向にある (Fig. 17B)。礫岩片を欠く土石流堆積物は、岩片が乏しいと記載され (Fig. 17D)、礫をかなりの程度富むものは、岩片に富むとされる (Fig. 17B-C, F)。コロラド州の Roaring 川扇状地での1982年7月15日のもののように、粘土粒子を欠く岩片に富む土石流は、非粘質土石流と呼ばれる (Jarrett and Costa, 1986; Blair, 1985a, 1987b)。すべての種類の土石流のシーケンスの表面は、典型的にはかすかに侵食をうけ、二次的プロセス、特に氾濫流によって篩い分けされている (Broscoe and Thompson, 1969; Blair and McPherson, 1994)。この一次的・二次的プロセスの関係によって発生する扇状地の層序は、二次的プロセスから、土石流事変間に発達する篩い分けられたラグ堆積物とガリー [谷頭部でよく発達する小さな溝状地形] の埋積によって区切られた (典型的にはガリーの埋積あるいは堤を構成する最大の層厚が) 厚さ 1~100cm 以上の土石流堆積物となっている (Fig. 17F)。

<崩積土斜面の崩壊による

一次的流体重力プロセスと層相>

流体重力流の2つの型、布状洪水と下刻流路洪水は、扇状地の一次のプロセスである (Fig. 12)。両方の流れの状態は、集水域の崩積土斜面で雪解けや降雨による流出の一瞬の集中の結果であり、土砂を運搬するカタストロフィックな流水を下方にもたらす。その場合、崩積土に粘土が少なく十分な土砂量がなく、土砂が流れに入り込む速度が遅いと、土石流は発生しない。集水域の斜面の崩積土砂は、スランピング [滑落]、抜け落ち、巻き込みによって水流に入り込み、掃流土砂や浮流

土砂として、扇状地まで移動する。これらの流れの土砂量は、低いものから高度に集中したものである。

[布状洪水 Sheetflood] 扇状地を形成する最も一般的で重要な [1つ目の] 流体重力流のプロセスは、布状洪水である (Hogg, 1982; Blair, 1985a, 1987b; Wells and Harvey, 1987)。布状洪水 [面状洪水] は、扇状地を流下するときに拡散する、まれでカタストロフィックな拘束されない水流である。土砂を含む閃光洪水が扇状地に到達し、さらに流路壁がなく、しかも半円錐形により扇状地表面が多くの方角を向いているために、浅くなったときに、布状洪水は発生する。最も一般的な布状洪水の層相は、葉理のある礫まじり細礫や細礫質粗砂を通常混じえた、部分的に巨礫のある、中礫と大礫の厚さ10~30cmの垂直的に変化する平板型層理のある対からなる (Fig. 18A-E)。平板型層理の部分は、扇状地表面に平行し、典型的には勾配2~8°である (Fig. 18A)。布状洪水の対をなす粗粒礫部分は、碎屑物の長軸が勾配に直行した向きを示し、a-b 軸面 [長軸・中軸を含む面] がふつう扇状地の上流側を向いた、良く発達したファブリックを一般的にもつ。これらの地層は、垂直的には不連続な布状の形態を示し、平面的には幅1~3m、長さ5m以上で、勾配に平行に延びて広がる。布状洪水の対をなす細粒部分は、葉理のある礫まじり砂、あるいはシステムに砂を欠く場合には、礫まじり細礫から典型的には構成される (Fig. 18A-D)。細粒の地層は、10mも側方への連続性を持ち、粗粒の地層よりも、一般的によく広がる。粗粒部分が、適度に淘汰され、主に中礫と細大礫からなるところに、布状洪水の対をなす層序が最もよく発達する。扇状地表面に巨礫、粗大礫、あるいは樹木の幹が部分的にある場合、流れが分離したり三日月型の流れで、対をなす規則性は悪くなるものの、平板型層理は示す (Fig. 18D; Karcz, 1968; Richardson, 1968; Blair, 1987b; Blair and McPherson, 1994)。Fig. 18の、コロラド州、ニューメキシコ州、ニュージーランドの例に加え

Fig. 18 布状洪水による扇状地堆積物の層相 (写真、省略)

て、礫質・砂質の扇状地の布状洪水の対をなす層相は、カリフォルニア州 (Van de Kamp, 1973; Blair and McPherson, 1994)、スペイン (Harvey, 1984)、イギリス (Wells and Harvey, 1987)、クレタ島 (Nemec and Postma, 1993) の現成扇状地で記載されている。

他に3つの布状洪水層相型が、平板型層理の対をなす層相と関係して認められた。第1の型は、扇状地の上流側にふつう傾いた (Fig. 18B, E)、あるいは扇状地勾配に平行に向いた露頭で上扇から下扇の傾斜方向に前進的変化のある前置層をもつ低角の斜交層理を示す砂質大礫～中礫をもつ (Zielinski, 1982)。この層相はなかに通常厚さ10～100cmの部分が認められる平板型層理の布状洪水の対ほど一般的ではない (Fig. 18B, E)。第2のより一般的ではない布状洪水型は、扇状地勾配に垂直に並ぶ屈曲した峰にあるレンズ状の礫からなる (Koster, 1978; Rust and Gostlin, 1981; Wells and Dohrenwend, 1985)。横列葉脈 (McDonald and Day, 1978) と呼ばれるこれらの形態は、低い土砂量に伴う布状洪水の堆積物を表していると思われる。第3の布状洪水堆積物の型は、礫質布状洪水堆積物が扇端部に堆積し、裾に不連続な平行葉理の成層をもつ礫まじり砂や砂からなる (Fig. 18F; Zielinski, 1982; Blair, 1985a, 1987b)。植物や礫のような障害物が流路にある場合には、この砂の裾の層相のなかで成層の規則性は悪くなる。

扇状地の布状洪水の層相は、堆積したときの異なった水理条件 (大きなフルード数、流れが薄化する速い速度、速い堆積速度) ゆえに、他の型の水理堆積物とは違っている。大きな布状洪水での流れの状態は、扇状地表面の相対的に急な勾配の影響で、必然的に射流となっている (Fig. 6)。対をなす層相をもたらす、扇状地上の布状洪水のなかの粗粒礫と細粒礫土砂の運搬と堆積の交替段階は、射流に典型的な水深と速度の本質的な変化と同様に、流れの拡大と減少する勾配に関係した水理条件の変化によりもたらされる。さらに特殊なことに、布状洪水の堆積は、繰り返し発生し、拡大し、上流側へ移動し、激しく砕け、下流側をねらいうち、その後、布状洪水の残りとは混じることによって消える、何列もの定立波 [ほとんど移動しない波] の下であって扇状地表面上に出現する、

水に浸かったアンティデューン [遡上砂堆、反砂堆] の河床形の移動と流失の産物である (McGee, 1987; Zielinski, 1982; Blair, 1985a, 1987b)。たとえば、コロラド州の Roaring 川扇状地の活発な布状洪水の空中写真は、表面の17%を覆い、長さ320mの扇状地ロープ上に勾配に平行な43列の定立波の出現を捉えた (Blair, 1987b)。この布状洪水は、平均水深0.5m、速度3～6m/s、フルード数1.4～2.8と水理的に復元できた。多数の布状洪水の対は、コロラド州の Roaring 川扇状地での1982年7月15日の布状洪水で15ものそのような対をなす堆積が報告されたように、1回の閃光洪水の事変で堆積してしまう (Blair, 1985a, 1987b)。この研究で、扇状地の堆積は、時間とともに、扇状地表面を横切る定立波の列の自己周期的な発達、破壊、再発達を通じて起こり、新たな列は、最も新たに堆積した土砂の薄層の脇にある少し深い水体で発生することが明らかになった (Blair, 1987b)。

平板型層理の布状洪水の対をなす層相とアンティデューンの斜交層理の層相の粗粒礫の部分は、水深と速度が最大である射流の定立波の列内で掃流土砂の波動として選択的に運搬されている (Blair, 1987b)。掃流土砂は、上流側に傾いた斜交層理の出現に示されるように、アンティデューンの上流側への移動時に堆積したり、あるいは布状洪水の対をなす粗粒部分の細長い礫岩片の a-b 軸面が上流側へ一般に傾くことで示されるように、定立波とアンティデューンの下流側への流失時に堆積する (Fig. 18A-E)。下流側へ傾いた斜交層理は、部分的にアンティデューンの風下側が保存された結果、あるいは定立波の流失時に河床形の風下側にわたった下流側の付着によるかもしれない (たとえば、Middleton, 1965; Zielinski, 1982)。布状洪水の対をなす細粒部分をつくる細中礫、細礫、砂は、Fig. 9に示された掃流土砂と浮流土砂の能力関係に対応して、浮流土砂として定立波の列で運搬された堆積物を表している。この大きさの部分は、定立波の流失段階と同時に、また直後に、落ちて堆積する。礫質のもう1対と同様に、扇端部の扇状地の裾の砂質布状洪水堆積物も、射流の状態ではあるが、勾配の減少で能力が減少した流れのなかでできた。

上流側に傾斜したアンティデューンの部分的な

保存 (Fig. 18D-E) は、これらの河床形を堆積させた定立波が、砕けて下流側をねらい打ちするかわりに、ゆっくりした沈下で終わったことを示している (Simons and Richardson, 1966)。上流側へ移動する段階の斜交層理の層相の上にある定立波の周期の流失段階の対をなす層相の選択的保存は、布状洪水に典型的な相対的に浅い水深と結びついた、より典型的には砕ける定立波の列の終了と相関関係にある。布状洪水のシーケンスで厚さ 100cm までの上流側に傾いたアンティデューンの保存には (Fig. 18E)、定立波のエネルギーのゆっくりした消失と、堆積時の相対的に深い流れの状態を必要とする。下扇での布状洪水の広がり必然的に伴う水深の減少は、斜交層理のアンティデューン部分の保存が、水深が最大の扇頂部で最も起こりやすいことを示唆している。

布状洪水事変で一般的に知られているもう一つの形態は、洪水が引くとき、あるいはその後の氾濫流による、侵食での低起伏で軟らかい表層の修飾である。網状分流パターンをもった礫で覆われたリル、ガリー、流路は、一般的には、この覆いが布状洪水のかなりの地層を再移動から守った、この種の侵食の結果である (Blair, 1985a, 1987b)。扇状地上のカタストロフィックな布状洪水の重要性に対する認識の欠如は、これらの事変の堆積物がまれで、すぐに二次的氾濫流プロセスによって隠されてしまうという事実起因している (Blair, 1985a, 1987b; Blair and McPherson, 1994)。

〔下刻流路 *incised channel*〕 扇状地上で見られる 2 つ目の流体重力流の堆積物は、下刻流路の埋積物からなる。扇状地上につづく集水域の涵養流路の延長と表現される下刻流路は、高さ 10m ほどの壁面をもつ (Figs. 1, 19A)。扇状地勾配の急傾斜は、布状洪水内のように、下刻流路内でかなりの水流を乱流・射流にする (Fig. 6)。下刻流路は、上扇側で土砂を含んだ閃光洪水を、布状洪水へと広がる前に扇端側へと移動させ、封じ込める。下刻流路内に閃光洪水を封じ込めることは、下刻流路のない扇状地上にくらべ、扇頂からより遠くまで、流体重力流の速度、水深、運搬力、運搬能力を持続させる。したがって、下刻流路の存在は、活動的な堆積ロープの扇頂から下扇への移動をもたらす。涵養流路と下刻流路の間に発生する勾配

の減少は、運搬力の減少により粗粒 (巨礫) 部分を通過する閃光洪水から選択的に堆積させることになる。反対に、下刻流路を通過する閃光洪水は、兩岸や基底を侵食して、粗粒 (巨礫) のラグ堆積物を残す (Fig. 19A-B)。この層相は、上扇のなかで断層と接した隆起する細長い部分で、特に一般的である。下刻流路は、涵養流路と下刻流路の間に勾配の減少があれば、堆積物重力流が堆積する場所ともなる (Clague et al., 1985)。もっともその堆積物は、その後の洪水で再移動するが。したがって、下刻流路の堆積による主な層相は、他の一次的プロセス型の地層間あるいは関係ない厚い巨礫堆積物の地層であり、また布状洪水や土石流の堆積物のようなより古い非流路の層相のシーケンス内に入り込んでいる。

＜扇状地の層相と集水域の発達との関係＞

扇状地上で働く一次的堆積プロセスと扇状地集水域の発達段階との間には、強い因果関係がある。基盤岩の急崖の崩壊によって起こる堆積物重力流は、同時に起こる集水域の発生段階の排出なので、扇状地の初期の発達段階において扇状地形成にとって特に重要である (Fig. 13A, 15C, 16F, 20; Sorriso-Valvo, 1988)。集水域の発達は、典型的には破断、断層、岩相の不連続のような基盤岩中の部分的な弱線にそって風化した物質の落石で始まったり、岩石すべりや岩石なだれを発生させるこれら同じ岩盤の弱線に沿ったよりカタストロフィックな崩壊が始まる (Fig. 13A, 15B-C; Grainger and Kalaugher, 1987)。これらのプロセスは、扇状地形成の開始に一般に先立ち山地前面の崖錐を発生させ、さらに後でより典型的な複合する扇状地型をその上につくる初期の扇状地の土台をつくる (Fig. 20)。Stage 1 あるいは初期の扇状地段階と呼ばれる (Blair and McPherson, 1994)、扇状地発達の発生段階時の集水域は、急傾斜で岩盤が卓越した斜面と、主に 1 次流路からなる未発達か発達の悪い水系網によって特徴づけられる (Figs. 13A, 15B-C, 16F, 21A)。関連する扇状地は、基盤岩の急崖の崩壊により発生する堆積物重力流の層相が支配

Fig. 19 下刻流路に堆積した扇状地堆積物の層相 (写真、省略)

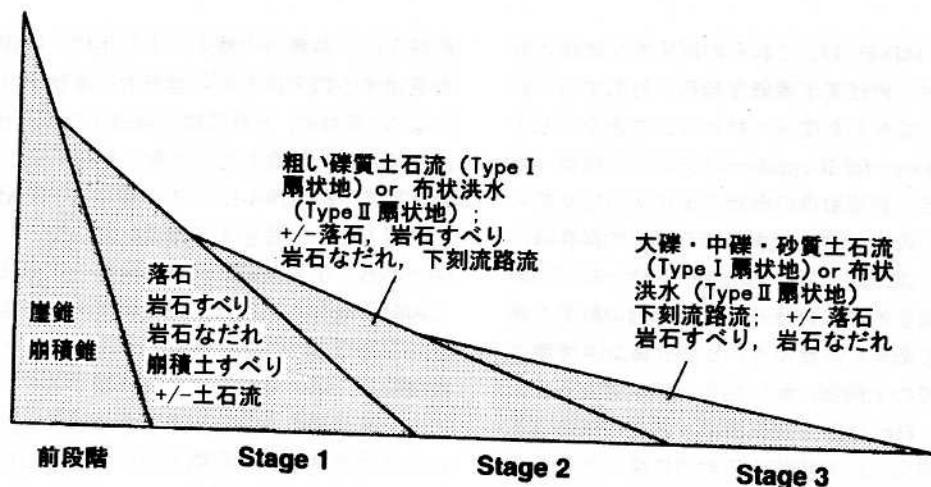


Fig. 20 扇状地の発達段階と主要な堆積プロセス・層相群の模式断面 (縦を2倍に強調)
堆積勾配は左に向かって増加し、扇状地の半径は右に向かって長くなる。発達段階は、扇状地と集水域が理想的に規模が大きくなるという一般的な地形学的・堆積学的な発達過程によった。

的であり、急勾配 (12~25°) と、短い半径が特徴である (Figs. 20, 21A)。この発達段階の扇状地の例は、スイスの Herbruggen 扇状地 (Fig. 15C)、フランスのシャモニー河谷の多くの扇状地 (Fig. 13A)、カリフォルニア州の Deep Springs Valley の岩石なだれ卓越扇状地である (Fig. 16F)。

崩積土すべり、土石流、土砂運搬流体重力流は、斜面を覆う崩積土の形成に適する落石・岩石すべり・岩石なだれのプロセスを通じて、いったん集水域が碗状形に十分発達すると、扇状地を盛んにつくり、集水域を大きくする重要な一次的プロセスとなる (Figs. 13B-C, 20)。この関係が存在するのは、崩積土すべり・土石流・流体重力プロセスには、最初、堆積物を覆う降雨や雪解け水の収束とともに岩盤の風化を通じてできる崩積土の被膜が必要なためである。これらの集水域の条件がそろると、主に崩積土の粘土含有量に依存して、土石流か流体重力流が扇状地に土砂を運び始め、主要な一次的プロセスとなる (Figs. 13B-C, 20)。短い (1km 未満) 下刻流路も、この段階で扇状地上に発達する。基盤岩の急崖の崩壊によって発生する堆積物重力プロセスは、集水域において基盤岩の急崖を維持するので、崩積土斜面の崩壊によって起こる堆積プロセスに加え、この段階で岩屑の運搬を続ける (Fig. 13B-C)。扇状地と集水域の発達のこの段階は、Stage 2 とされる (Fig. 20 ;

Blair and McPherson, 1994)。

Stage 2 の崩積土斜面での崩壊の発生は、土石流や流体重力流のプロセスによって将来の土砂運搬を促す。なぜなら、排出した崩積土すべりやスランプ [堆積構造が残る地すべり] によって残った典型的にはスプーン状の崖は、土砂や水が地形的収束により集中しつづける凹地をさらにつくるからである。これらの凹地の形成や拡大は、さらなる斜面の不安定化と、新たな1次流路の確立により短い2次や3次涵養流路を含んだ集水域網の究極的な拡大をまねく (Figs. 13B-C, 21B; Patton, 1988; Sorriso-Valvo, 1988)。落石、岩石すべり、岩石なだれ、崩積土すべりにくらべ、土石流でも布状洪水でも典型的には高頻度と高い流出能力が、5~15° の複合した勾配を減少させるとともに、Stage 2 では1~約5km に扇状地半径を広げる (Figs. 20, 21B)。これらの要因は、最頻値の粒径に対する勾配の図上において、Stage 2 の扇状地を Stage 1 の扇状地とは異なった場所へ移動させる (Fig. 5)。Stage 2 の典型的な扇状地をもつ例は、コロラド州の Roaring 川扇状地、カリフォルニア州の Death Valley の Grotto Canyon 扇状地と Badwater と Morman Point の間の扇状地 (Fig. 21B)、ニューメキシコ州の Lead Canyon 扇状地 (Fig. 13C)、ニューージーランド南島の Glenthorpe Station 近くの Boundary Stream 扇状地である。

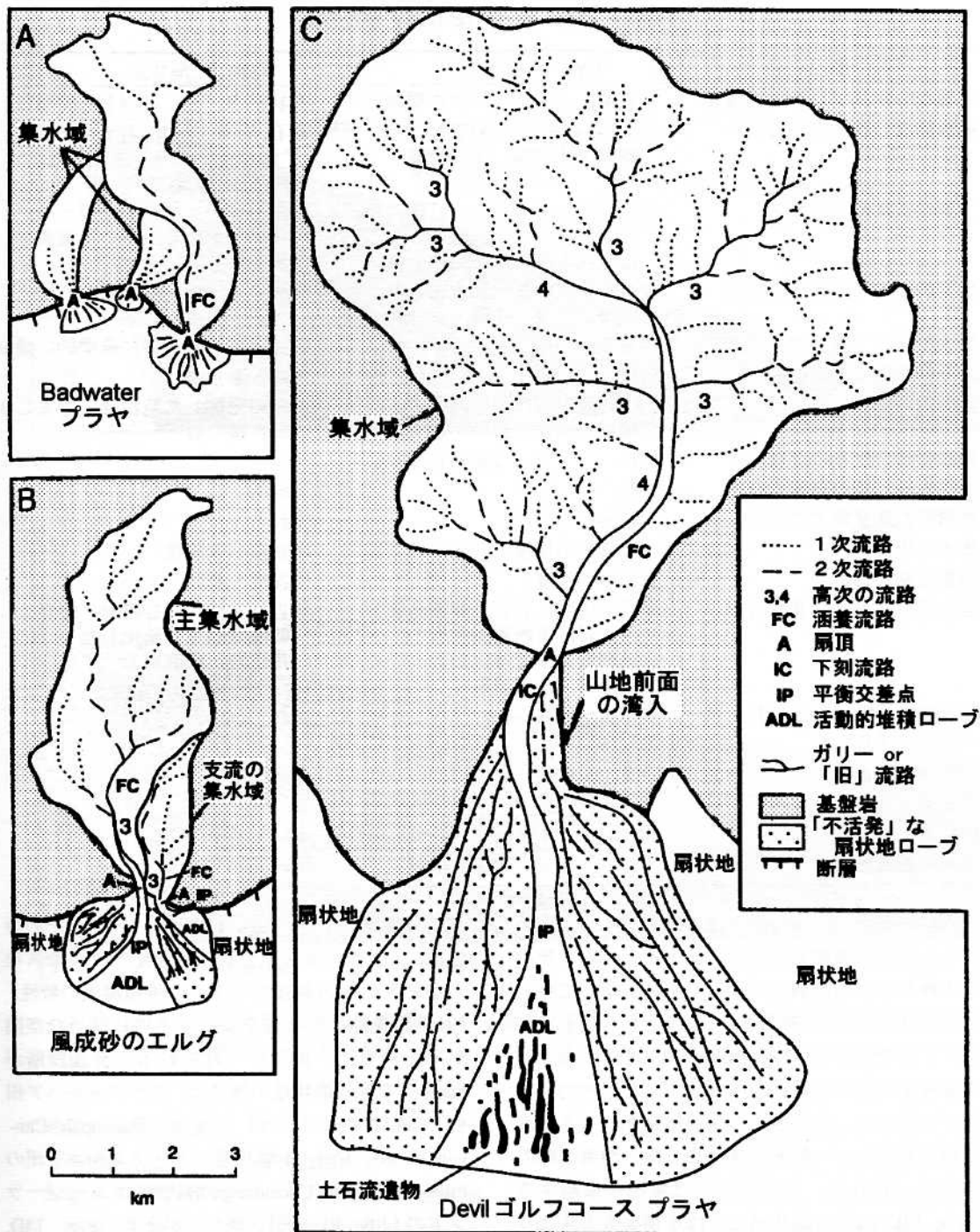


Fig. 21 種々の発達段階のカリフォルニア州 Death Valley の扇状地と集水域の平面図

A) Badwater 近くの Stage 1 の 2 扇状地 (左) と Stage 2 の 1 扇状地 (右)。B) Stovepipe Wells 近くの Stage 2 の Grotto Canyon 扇状地。C) Stage 3 の Trail Canyon 扇状地。集水域規模、扇状地規模、涵養流路の次数、扇状地の下刻流路の存在と長さについて、発達段階間の違いに注目

Table 4 Type I・Type II扇状地の特徴

特徴	Type I 扇状地	Type II 扇状地
主要な一次的プロセスと層相 副次的な一次的プロセス	土石流, とくにロープの層相 落石, 岩石すべり, 岩石なだれ 崩積土すべり, 下刻流路	布状洪水, とくに対をなす層相 落石, 岩石すべり, 岩石なだれ 崩積土すべり, 下刻流路, 非粘質土石流
主要な二次的プロセス	砂漠のベープメント, 巨礫の覆 い, ガリー, 浅い流路をつくる 氾濫流と風による篩い分け	砂漠のベープメント, ガリー, 浅い分流路をつくる氾濫流と 風による篩い分け
典型的な粒子の淘汰と粒径	極めて淘汰の悪い粘土まじり 巨礫, 大礫, 中礫	淘汰の悪い砂・巨礫まじり 大礫~中礫
最大粒径の下扇方向の傾向	相対的に一定	巨礫から中礫・砂に典型的に減少
典型的な粒子の形態	角礫	角礫~亜角礫
典型的な層理の型	二次的篩い分け面を除いて, 層理の発達が悪いかわずか	層理の発達した粗粒礫と砂まじり 細粒礫の対
細礫や砂の挟みの存在	まれ	一般的
扇端の砂の裾の層相の存在	まれ	一般的
堆積時の基質粘土の存在	一般的	まれ
集水域規模	小規模~中規模	小規模~大規模
涵養流路の長さ	短い~中程度	中程度~長い
集水域の典型的な基盤岩相	泥質変成岩, 頁岩, 非顕晶質 火山岩, 苦鉄質深成岩; 湿潤気候下で風化した 花崗岩, 片麻岩も	珪岩, 石英に富む礫岩・砂岩; 乾燥気候下で風化した 花崗岩, 片麻岩も
集水域の崩積土斜面の粘土量	中程度~豊富	まれ
一般的な平均勾配	5~15°	2~8°
下扇への斜面型	一定, 直線状	下流側へ減少, 凹型
浸透率	低い	高い
間隙率	低い	高い
透水層の連続性	低い	高い

扇状地発達上の Stage 3 は, 扇状地半径の伸長とともに集水域網を継続的に拡大する。扇状地半径の伸長は, 山地前面からはるかに前進して盛んに堆積を促し, 下刻流路を1km 以上の値まで伸ばすことで生じる (Figs. 13D, 20, 21C)。集水域の崩積土斜面の崩壊によって発生した一次的扇状地プロセスは, たくさんの1次流路をつくる集水域網の拡大と, 一般的に4次や5次の涵養流路の確立と一致して, この段階では堆積が卓越する (Fig. 13D, 21C)。扇状地上では堆積物重力流よりも土石流や布状洪水の堆積物によって圧倒的に占められるようになって, 基盤岩の急崖の崩壊により発生する堆積物重力プロセスが, 集水域内のそのような崖の継続的な出現により, Stage 3 でも働くかもしれない。この扇状地形成の前進的段階では, 半径は3~10km 以上, 勾配は2~8° に減少

した扇状地になる (Figs. 13D, 20, 21 C)。その特性は, (1)布状洪水や土石流が支配的プロセスなのかどうか, (2)隣接する下方の堆積環境の特性, (3)堆積盆地に扇状地を長くするのに適当な空間があるかで, 一部条件づけられる。発達段階が Stage 3 の現成扇状地の例には, カリフォルニア州の Death Valley の Trail Canyon, Hanaupah Canyon, Titus Canyon 扇状地, カリフォルニア州の Eureka Valley の Cucamonga 扇状地, ニュージールランドの Little River 扇状地などがある (Figs. 13D, 21C)。いったん到達すると Stage 3 の状態は, 盆地床の環境が扇状地全体に移動するのに十分な速度で新たに沈降することによって妨げられるまで (Blair, 1985b, 1987a, c; Blair and Bilodeau, 1988), あるいは扇状地が河川や谷氷河のような隣接する環境により広く侵食されるまで, 持続する。

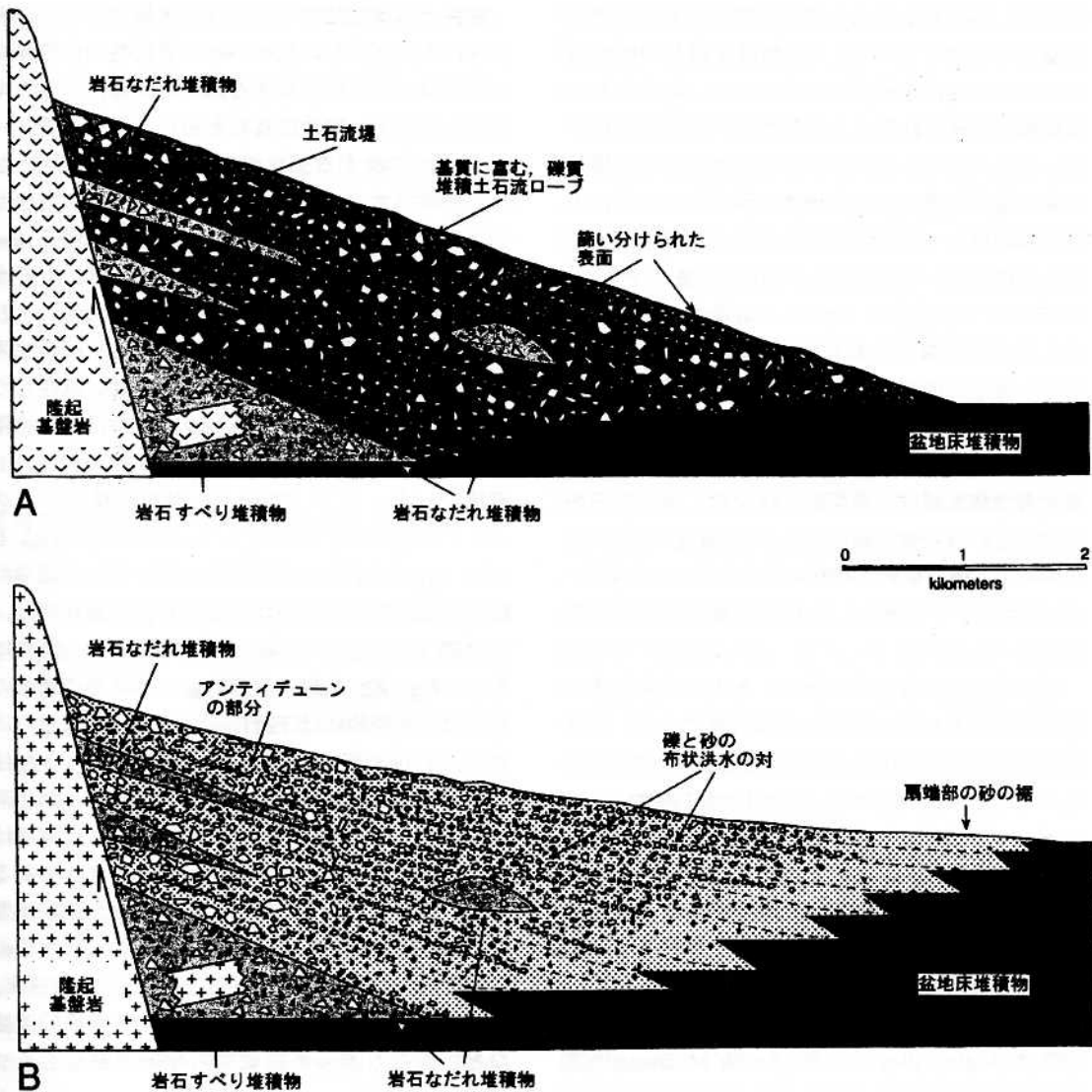


Fig. 22 Stage 2・Stage 3の扇状地における著者の研究に基づいた堆積層相の模式縦断面
 A) 土石流卓越 (Type I) 扇状地, B) 布状洪水卓越 (Type II) 扇状地。縦軸を2倍に拡大

<発達する扇状地上の

布状洪水と土石流の層相の広がり>

Stage 1の発達段階を除いて、最も新しい扇状地は、粘質土石流シーケンスか布状洪水シーケンスが卓越している (Figs. 1, 20, 22; Table 4)。この関係は、いったん扇状地をもつ集水域がそのような斜面物質を十分に生産し蓄えると、岩盤斜面よりも崩積土斜面の崩壊による一次的扇状地プロセスを高頻度で促す結果である。粘質土石流も布状洪水の堆積物も同じ扇状地上に出現するもの

の、集水域の岩相や風化の状態によって、これらプロセスのうち他をほぼ排斥して1つがふつう促される (Blair and McPherson, 1994)。扇状地上で布状洪水堆積よりも土石流堆積が進む重要な要因は、(1)水が飽和した崩積土斜面が崩壊するとき、集水域の土砂のなかに、土石流を発達させるのに十分な粘土の含量と、(2)扇状地の場所まで土石流を迅速に移動させる、直線状そして短距離の涵養流路の配置である (Table 4 ; たとえば, Wasson, 1978b; Evans, 1982; Blair and McPherson, 1994)。

反対に、扇状地上で土石流堆積物よりも布状洪水堆積物が卓越するのは、(1)崩積土斜面の崩壊時に土石流の発達を妨げることになる、粘土を欠く堆積物が生産されるように集水域の岩盤が風化しているところや、(2)集水域や涵養流路の規模、貯蔵容量、粗度が、扇状地まで到達する以前に土石流の堆積を一般的に促すところである。粘土を欠く崩積土は、一般に次のような集水域でできる。(1)珪岩や石英質砂岩・礫岩。(2)乾燥気候下で風化した花崗岩質・片麻岩質の岩盤。(3)どんな岩相でも急速に隆起し侵食を受けた、化学的風化は最低であるが激しい機械的風化による、固結した岩 (Table 4)。反対に、かなりの崩積性粘土の生産をもつ集水域は、典型的には少なくとも以下から構成される岩盤からなる。(1)泥質変成岩、(2)非顕晶質 [構成鉱物が細粒の] 火山岩、(3)頁岩、(4)湿潤気候下で風化した長石に富む粗粒の晶質火成岩 (Table 4)。

扇状地をもつ集水域の概形、あるいは集水域の基盤岩相の違いは、隣接した扇状地でさえ、対照的なプロセスが支配してしまう。これらの関係は、スペイン南東部 (Harvey, 1984, 1988, 1990)、カリフォルニア州 Death Valley, ニューメキシコ州南部中央の3グループの扇状地によって示されている。スペインの研究事例の1地域における片麻岩起源の砂漠の扇状地は、流体重力プロセスが支配的であるのに対し、泥質変成岩や泥岩由来の隣接した扇状地は、主に土石流堆積物からなる。同様の話は Death Valley にあり、Smith Mountain の花崗岩質深成岩体や粘土を欠く礫岩・砂岩に由来する扇状地では布状洪水が卓越しているのに対し、隣接する Black Mountains の泥質変成岩由来の扇状地では土石流堆積物を豊富に含んでいる。3つ目の例は、ニューメキシコ州の布状洪水卓越の Marble Canyon 扇状地と Alamo Canyon 扇状地である。土石流と岩石なだれ卓越の Lead Canyon 扇状地のような隣接したところとは対照的に (Fig. 13C), これらの扇状地では布状洪水のプロセスが支配している。Marble Canyon 扇状地での布状洪水の卓越は、岩相の違いによるものではないが、堆積物重力流の堆積が誘発され、扇状地までの流出が妨げられる、大きな集水域と高い運搬能力の涵養流路の産物である。

粘質土石流堆積物や布状洪水堆積物から主に構成されるかどうかに基づいた、扇状地の自然界での区分は、扇状地に対する基本的な層相分類の枠組をもたらす。岩片に富むあるいは岩片が乏しい土石流が卓越する扇状地は、Type I 扇状地とされ、布状洪水が卓越する扇状地は Type II 扇状地とされる (Figs. 1, 17, 18, 22; Table 4; Blair and McPherson, 1994)。基盤岩の急崖の崩壊による堆積物重力流は、Type I や Type II の扇状地の土石流や布状洪水シーケンスに、おそらく扇状地体の核 (Stage I) や扇頂部で最も豊富に、点在しているだろう (Figs. 15F, 20, 22)。下刻流路の堆積物は、発達段階が Stage 2 や Stage 3 の扇状地の土石流シーケンス (Type I) か布状洪水シーケンス (Type II) に入り込んでいるだろう (Figs. 1, 19)。Type II 扇状地は典型的には2~8°で扇端が緩勾配な凹型断面なのに対し、Type I 扇状地は、5~15°の一定の(直線状の)勾配をもつ傾向にある (Fig. 22; Table 4)。Type II 扇状地の最大の岩片は、典型的には下流に向けて小さくなるのに対し、Type I 扇状地では最大の岩片の大きさは一定となる傾向がある。扇端の砂の裾と、扇頂部~扇央の細礫~砂の層理は、Type II 扇状地ではふつうであるが、Type I 扇状地ではまれである (Fig. 22; Table 4)。これらの異なった扇状地型は、地下水の流れと、過去の場所での炭化水素の貯蔵や封入システムの潜在性と関連して、浸透率、間隙率 [孔隙率]、透水層の水平的・垂直的連結など、かなり違った記載岩石学的特質をもつ (Table 4)。

Type I 扇状地の土石流の二次的な再移動の程度は、ふつう小さい。それは、風、氾濫流、リルやガリー侵食により主としてつくられる、薄い篩い分けされた礫のラグ堆積物によって分けられた、積み重なった土石流に主に特徴づけられる層序シーケンスとなっている (Figs. 17F, 22A)。いくつかの土石流卓越型扇状地の集水域の状態は、特に扇頂部から扇頂においてと下刻流路内で先に堆積した土石流の表層をより広域に篩い分けすることができる、土砂を欠いた氾濫流を挿話的につくりだす。これは、扇状地をもつ集水域が特に大きい土砂を欠く場合、あるいは粘土生産が遅い場合である。その正味の結果は、水理学的に

相容れない特大の岩片と層理のある細礫と中礫を含んだ、粗い無淘汰の礫のラグ堆積物に挟まれた、一次的土石流によって特徴づけられた層序となっている。粘質土石流卓越扇状地の変形は、Type I B とされる。一方、最小の二次的再移動をうけた例 (Fig. 17F) は、Type I A とされる。同様に、一次的布状洪水の表層が二次的に再移動したものは、Type II A の最小のものから Type II B の中程度のものまでである。網状分流パターンをもつ浅いリルやガリーの掘削は、表層堆積物の高い侵食性により Type II 扇状地の上で特にふつうの二次的プロセスとなっている。

【対照的な礫質河川の堆積過程と層相】

河川 [地形] の層相・層相群は、粗粒礫が主体であっても、河川 [地形] と扇状地の2つの環境での堆積に影響を与える条件の大きな違いの結果として、扇状地の層相・層相群から容易に区分される。たとえば、粗粒河床河川の最も一般的な層相は、活動的な流路の道筋にある縦列流路州として堆積した、厚い層理から未熟で水平的な成層までの、碎屑 (礫) 支持の砂質〜巨礫質の中礫〜大礫からなる (Fig. 23A-D; Doeglas, 1962; Williams and Rust, 1969; Boothroyd, 1972; Church and Ryder, 1972; Rust, 1972; Fahnestock and Bradley, 1973; Bluck, 1974, 1979, 1982; Eynon and Walker, 1974; Smith, 1974; Arche, 1983; Forbes, 1983; Southard et al., 1984; Desloges and Church, 1987; Blair et al., 1991; Reinfelds and Nanson, 1993)。これらの堆積物にある礫岩片は、一般的に円磨され、細長い岩片は a-b 軸面を勾配と垂直方向に向け、上流側に傾いたインブリケーション [覆瓦構造] を示す。これらの礫群に一般的に関係する堆積物は、低角の層理の礫や砂である (Fig. 23A, C)。現成の礫床河川や礫質砂床河川の活動的な流路の河道で見られる他の層相型は、平板型斜交層理 (Fig. 23E)、トラフ型斜交層理 (Fig. 23F)、イブシロン斜交層理 [滑走斜面上で形成される層理]、水平的な層理のある堆積物、そして関連するリップル [砂漣: 流れによる波状微地形] の成層や水平的に層理のある砂・シルト・泥のひだを含んでいる (McKee et al., 1967; Coleman, 1969; McGowen and Garner, 1970;

Smith, 1970, 1972; Cant and Walker, 1978; Gustavson, 1978; Arche, 1983; Campbell and Hendry, 1987; Dawson and Bryant, 1987)。河川システムの流路の埋積層相は、古い流路や氾濫堆積物に対して水平的に先細りになる、厚さ10m以上のシーケンスで現れる。この層相群は、氾濫流で堆積した氾濫原の細粒層相によって、典型的に区切られたり、内部で成層したりする (Fig. 23D; Reinfelds and Nanson, 1993)。

礫床河川や礫質砂床河川の一般的な層相は、固有の水理条件ゆえに扇状地上では欠落する (Figs. 3~6)。たとえば、一般的な低流砂礫の構造は、急な扇状地勾配は射流の状態を導くので、扇状地上には発達しない (Fig. 6)。さらに、扇状地表面上の流れの薄化は、斜交層理群など高い起伏をもった構造の発達に必要な不断の深い流れよりも、浅い流れか急速に浅くなる流れを示す。さらに、扇状地の円錐形状は、扇頂からすべての方向に傾斜が連続するので、氾濫原の発達が阻害される。また、弧状の岩石なだれ堆積物の後のようなめつたにないような状態を除いて、急傾斜が維持されているので、池も扇状地上にできない。さらに、単一の下刻流路と小さなガリーを除いて、布状洪水を促す状態が卓越するため、レンズ状の流路埋積堆積物は流体重力流卓越扇状地ですら、その上に存在しない。一方、堆積物重力流のような扇状地に典型的なプロセスは、扇状地と河川の環境間に地形的かつ水理的な大きな違いがあるので、沖積盆地の河川では一般的ではない。たとえば、扇状地上の布状洪水の急速な広がり、射流の特徴、そしてそれらの刻印のある対をなす層相は、河川システムでは発達しない。なぜなら、流れの深さと幅の維持、持続流と運搬状態による砂と礫の一般的により良い淘汰、そして河川の典型的な常流の状態のためである。したがって、礫卓越河川であっても、扇状地と河川 [地形] は、實際上、共通の層相をもたない。これら2つの環境でできた特有の層相群は、岩石の記録においてすぐに単純な区別を容易にする。

Fig. 23 急勾配河川堆積物である砂礫の層相垂直断面 (写真, 省略)

【過去の扇状地と礫質河川の層相群の例】

扇状地と礫質河川とによって堆積した過去の層序シーケンスを区分することはすぐに可能であるにもかかわらず、過去の出版物ではこの区分は一般に達成されないと述べている。この混乱は、過去25年間の教科書、総説、短報における、扇状地に対する不正確な堆積学的概念や層相モデルによって直接的にもたらされたものである。岩石の記録における扇状地と河川の層相区分を妨げてきたもう1つの要因は、現成の扇状地の堆積学研究がまだ初期の状態にあることである。たとえば、集水域で出現する基盤岩の急崖の崩壊によって発生する堆積物重力プロセスの層相は、岩石の記録では認識が限られていた。特に過去の盆地周縁の位置で欠落していることによるよりも、現成の位置においてこれらの特徴の最近の堆積学的認識が少ないことによる。岩石なだれ堆積物は、合衆国南西部で明らかになった様々な第三紀盆地埋積層から最近論述されるようになってきた。それは、Death Valley 地域 (Hodges et al., 1987, 1989, 1990; Saylor and Hodges, 1991; Topping, 1993)、カリフォルニア州の Salton Trough-Gulf (Kerr, 1984; Kerr and Kidwell, 1991)、Mojave 砂漠 (Fedo and Miller, 1992)、ネバダ州 (Schmitt and Brown, 1991)、アリゾナ州 (Krieger, 1977; Yarnold and Lombard, 1989; Yarnold, 1993) の例である。首尾一貫した岩石すべり岩塊は、Death Valley 地域の上部漸新統-中新統の扇状地堆積物 (Saylor and Hodges, 1991)、ネバダ州中部の中新世の Horse Camp 層 (Schmitt and Brown, 1991)、カリフォルニア州南東部の中新世の半地溝 (Fedo and Miller, 1992) で記載されてきた。落石起源は、カナダ Fundy 盆地東部の下部ジュラ系の堆積物で最近提案されてきた (Tanner and Hubert, 1991)。それに対して、土石流扇状地の層相は、岩石の記録では拡大する盆地の埋積層からより一般的に論述されるようになってきた。その例は、鮮新世-更新世の死海地溝埋積層 (Manspeizer, 1985)、カリフォルニア州南部の新第三紀の盆地埋積層 (Crowell, 1982; Kerr, 1984; Link, 1984; Hendrix and Ingersol, 1987; Kerr and Kidwell, 1991; Fedo and Miller, 1992)、東アフリカ地溝帯システムの第三紀盆地埋積層

(Burggraf and Vondra, 1982)、カナダ東部の下部ジュラ系の Fundy 盆地 (Tanner and Hubert, 1991)、カナダの Gaspé 半島のデボン系-石炭系 (Rust, 1981)、ノルウェーのデボン紀の Hornelen 盆地 (Steel et al., 1977; Gloopen and Steel, 1981) である。

基盤岩の急崖の崩壊によって発生した堆積物重力プロセスの堆積物のような、言及されてきた布状洪水堆積物が卓越する扇状地シーケンスは、岩石の記録の報告がめったになかった。おそらく、それらが欠如していたのではなく、認識の欠如によるものである。布状洪水の成層の厚い (100+ m) シーケンスは、マサチューセッツ州の三疊紀の Mount Toby 礫岩 (Hand et al., 1969)、メキシコ南東部のジュラ紀の Todos Santos 層 (Blair, 1985b, 1987c)、アリゾナ州南部の漸新世-中新世の Pantano 層 (Balcer, 1984)、カリフォルニア州南部の漸新世-中新世の Simmler 層 (Ballance, 1984)、カリフォルニア州南部の中新世の Salton Trough 盆地 (Van de Kamp, 1973; Kerr and Kidwell, 1991)、カリフォルニア州南部の Ridge 盆地の中新世-鮮新世の堆積物 (Blair and McPherson, 未発表) で論述されてきた。扇状地の布状洪水の層相で他に可能性のある例は、Houmark-Nielsen (1983) と Sneh (1979) が記載した更新世の堆積物と Laming (1966) が考察したイギリスの二疊紀-石炭紀の系列である。湖成堆積物に埋没させられた扇状地の個々の Stage 2 や Stage 3 の上にある下刻流路と布状洪水の層相の挿入関係も、メキシコの Chiapas のジュラ紀の Todos Santos 層で論述されてきた (Blair, 1987c)。

現成の礫床河川や礫質砂床河川に典型的な層相からなるシーケンスの岩石の記録の例は、たくさんある。過去の礫床系列は、アイダホ州 (Kraus and Middleton, 1987)、ネブラスカ州 (Goodwin and Diffendal, 1987)、イタリア (Billi et al., 1987)、ユーコン地域 (Morison and Hein, 1987) の上部第三系、ワイオミング州西部 (Kraus, 1984)、スペイン (Nijman and Puigdefabregas, 1978) の下部第三系堆積物、メキシコ南東部の上部ジュラ系の堆積物 (Blair, 1987c)、スペインの二疊紀-三疊紀の堆積物 (Ramos and Sopena, 1983)、北大西洋の大陸縁辺に沿ったデボン紀-石炭紀の堆積物 (Cant and Walker, 1978; Rust, 1981) などである。

		隣接水域の型			
		デルタ の大気下部分	海	永続的湖	一時的湖
非 漸 移		扇状地	臨海 ファンデルタ	永続的湖成 ファンデルタ	一時的湖成 ファンデルタ
	漸 移	掃流土砂卓越河川	臨海 網状デルタ	永続的湖成 網状デルタ	一時的湖成 網状デルタ
		浮流土砂卓越河川	臨海 氾濫原デルタ	永続的湖成 氾濫原デルタ	一時的湖成 氾濫原デルタ

Fig. 24 海成、永続的湖成、一時的湖成環境に区分した、ファンデルタと河川デルタの分類

不幸なことに、典型的な河川の堆積学的特徴をもった過去のシーケンスを扇状地として解釈した出版が地質学の文献のなかにたくさんある。

【ファンデルタと河川デルタの分類】

扇状地や河川固有の地形、水理プロセス、堆積プロセス、層相群は、McPherson et al. (1986, 1987, 1988a) が最初に提案したように、これらの環境のデルタの分類について、明瞭で決定的な基礎を提供する。扇状地のデルタ（ファンデルタ fan delta）は、この分類体系では（Fig. 24）、級化がないことで、河川デルタと区別される。一方、河川デルタは、掃流土砂卓越の粗粒型（網状デルタ braid delta）から、浮流土砂卓越の蛇行～直線状の典型的には細粒デルタ型へと、漸移する。これらのデルタ型のそれぞれを区分する論理的な鍵は、その大気下の要素が扇状地、網状流、浮流土砂卓越河川かどうかで決定する（McPherson et al., 1986, 1987, 1988a, b）。

McPherson et al. の分類体系は、隣接する水体に形成される地形が扇状地、網状流河川、氾濫原主体の河川であるかどうか、次に隣接する水体が海洋、永続的湖、一時的な（プラヤ〔乾燥内陸盆地床〕）湖であるかどうかに焦点をあてることによって、ファンデルタと河川デルタのさらなる区分に対して枠組を与えて拡大することができる（Fig. 24）。原案のように（McPherson et al., 1986, 1987, 1988a）、この拡張された体系では扇状地と河川の自然界での区分が、これらの環境の間の非漸移的移行の境界によって描かれる。急勾配で相対的に粗粒の掃流土砂卓越網状流河川と低勾配で細粒の浮流土砂卓越河川の間の自然界での遷移

も、維持される。同様に、永続的湖と一時的湖の間の時間経過で発生する自然界での漸移的移行があり、湖成と海洋水体の独自性が示される。

3つの水体型をもつ3つの扇状地・河川型をクロスさせた9つの並びが、これらの環境の分類に9つのカテゴリーを与える（Fig. 24）。この体系では、典型的な使用と一致させて、湖岸線ではなく海岸線を暗示する coastal の用語を用いて、海洋に隣接する扇状地にはより正確に臨海ファンデルタ coastal fan delta と名づける。湖に隣接する扇状地も、一般的な使用に一致させ、この体系では湖成ファンデルタ lacustrine fan delta と名づける。湖は永続的なものから一時的なものまで変化するので、これらの変化を説明するために、永続的湖成ファンデルタと一時的湖成ファンデルタの用語を与えて、湖成ファンデルタと修正する（Fig. 24）。湖成ファンデルタの用語は、提案された永続的湖成ファンデルタの用語と同義語的に典型的に使用されてきた。一方、単に「扇状地」は、一時的湖成ファンデルタとして提案されたシステムにおいて分類された地形として一般的に使用されてきた。しかし、形容詞の用語「永続的湖成」と「一時的湖成」は、扇状地堆積時の、特定の湖の状態とそのあり得る影響をより正確に描く。

網状デルタ braid delta も、隣接する水体の特徴によって、臨海網状デルタ、永続的湖成網状デルタ、一時的湖成網状デルタに細分できる（Fig. 24）。すべての場合、これらの特徴は、河川デルタシステムの粗粒の領域に一致する（McPherson et al., 1986, 1987, 1988a）。同様に、細粒（あるいは普通）の氾濫原卓越河川デルタシステムは、臨海氾濫原デルタ、永続的湖成氾濫原デルタ、一時的湖成氾濫原デルタに細分される（Fig. 24）。伝統的に、デ

ルタの用語は、これらの自然のシステムのより注意深い描写が必要とされる (McPherson et al., 1986, 1987, 1988a), 扇状地やファンデルタのカテゴリに強制的に過去には入れられてきた他の全てのデルタの型も、この体系で臨海氾濫原デルタと呼ばれるものにのみ適用されてきた (たとえば, Coleman and Wright, 1975)。さらに、永続的湖の網状デルタや氾濫原デルタは、過去において、「湖成デルタ」あるいは間違っ「ファンデルタ」と一般的に使用されてきた。一方、一時的な湖の対応物は、必然的そして首尾一貫して「内陸デルタ inland deltas」「乾燥デルタ dry deltas」「扇状地 alluvial fans」「ターミナル扇状地 terminal fans」とされてきた。これらの最後2つの地形用語の使用について、扇状地と河川の根本的に異なった存在に関する不正確な暗示を与えるので、止めることを我々は推奨する。さらに、形容詞「一時的湖成」も、最初の2つの用語に替わり、より記述的で明確なもの和我々は思う。

扇状地と関係してきたいくつかの堆積条件や型は、この体系では取り入れられない。たとえば、「Gilbert delta」の用語 (Gilbert, 1890による) は、分類にあげた臨海デルタや永続的湖成デルタのどの型にも存在することができる特殊なデルタ前面の層相群 (底置-前置-頂置層) を意味するので、用いられていない。インドの Kosi 川や Gandak 川、イタリアの Reno 川のような河川支流の環境も、扇状地、ファンデルタ、河川デルタ、いずれの堆積物も表していないので、この体系では説明されない。そのかわり、河川環境堆積物であるそれらは、そのように分類されるべきである。「扇状地」と何人かに認められたもう1つの地形は、ポーランドの Leba 川の膨らんだ部分 (たとえば, Rachocki, 1990) やアルゼンチンの Huaco 川と Jachal 川 (Damanti, 1993) のように、地形的に支配されるより広い谷に河川が流入するところ一般的に発達した広がった河川部分である。広がった河川部分は、デルタあるいは扇状地に一般的な特徴をもっていないので、上述の分類に含まれない。替わりに、局地的に膨らんだ部分をもつ河川として単純に分類されるべきである。

【層序記録で扇状地と河川堆積物を区分する地質学的重要性】

層序記録で河川堆積物から扇状地堆積物を正確に区分することは、地球の歴史上で古地理や過去のテクトニクスを復元するための貴重な手段を提供する。扇状地堆積物に固有の地質学的意味は、扇状地の発達にとって最適と考えられる以下の現成の条件の理解から引き出される。(1)隆起する山地塊と谷の併置、(2)上流流域を流れ、山地前面の谷に横から入り込む涵養河川の存在、(3)機械的・化学的風化による集水域での土砂生産、(4)集水域から扇状地域まで土砂を運搬するのに必要な閃光降水を発生させる激しいがめったに起こらない降水 (Surrell, 1841, 1870; Blair and McPherson, 1994)。扇状地がある現成の地形条件は、以下の通りである。(1)典型的には急角度 (25°以上) の正断層や横ずれ断層に区切られた隆起構造地塊の縁の谷 (たとえば, Hunt and Mabey, 1966)。(2)ヒマラヤシステムのような圧縮地帯内 (Drew, 1873)。(3)アリゾナ州の Colorado 川に沿ったような、下刻を受けた河谷に支流が横から入り込んだところ (Webb et al., 1988)。(4)氷河から解放され、モレーンに縁取られた谷に、河川が入り込んだところ (たとえば, Blair, 1987b)。(5)差別侵食によって造られた起伏のある岩盤の山脚に沿ったところ (たとえば, Sorriso-Valvo, 1988; Harvey, 1990)。

高角正断層や横ずれ断層に関係して発達する扇状地は、はるかに最も多い。それは、北アメリカの Basin and Range の西部、中東の死海地溝、東アフリカ地溝帯のような、陸域の引張地域にできた扇状地の発達条件が最適だからである。引張によってできる盆地の条件は、扇状地の発達を特に導く。というのは、それぞれの断層が何千万年と続き、個々の扇状地が20万~70万年となっていて、山塊の起伏は、かなりの期間 (5千万年間)、地殻変動で発達し維持されてきたからである (Blair and Bilodeau, 1988)。起伏の維持は、集水域が発達するための十分な時間を与えると同時に、斜面侵食に対する重力を効果的にする風化をかなり推進させるので、扇状地の発達に重要である。時間とともに発達する典型的な水系網に沿った起伏の存在も、扇状地まで淘汰が悪く一般的に粗粒の土

砂を運搬することができる、カタストロフィックな閃光洪水を促すことにおいても重要である(たとえば, Surril, 1870)。活発な地殻変動に関係した地震の振動も、集水域の崩積土斜面と岩盤斜面を不安定にして扇状地形成をもたらす(たとえば, Keefer, 1984)。さらに、断層に関係した地殻変動による破碎は、物理的分離をとおしてだけではなく、割れ目の網では水和や酸化が起こりやすい岩石表面を増加することに関係した化学的風化の刺激もとおして、基盤の風化を促進する(Blair and McPherson, 1994)。

これに対して、扇状地が発達する場所の他の4つの現成の条件のうちの3つ(下刻河川、岩盤の山脚、解氷の谷の側方)は、遅い土砂生産速度と扇状地までのカタストロフィックな土砂運搬事象の低い可能性に結びつく、その場所での起伏を維持するメカニズムが欠如しているために、長期間の扇状地の発達を導くものではない。長期間の扇状地の発達も、尾根一谷のスラスト地帯の地形をつくるより合成された集水域が促されるために、スラスト帯のなかや前縁盆地に沿ってのように、圧縮体制の変動様式の縁の条件に妨げられてしまう。そのような条件は、扇状地のかわりに河川の発達を促す。さらに、地殻変動の変位の水平成分が大きいため、活動的な盆地の縁や山地内部の河谷の不安定さによって、前縁盆地にそったテクトニクスの条件では、扇状地の発達が妨げられている。

岩石の記録での扇状地研究において重要な配慮は、扇状地ができる様々な現成の条件が保存されている可能性である。高角正断層や横ずれ断層に区切られる隆起地塊に隣接する場所を除いて、扇状地が発達する現成の条件のすべてが、層序記録に保持される可能性は低い。山地内部のスラスト地帯の河谷やスラストの縁の盆地の場合には、盆地の縁の水平的不安定さ、河川システムの支配、時間とともにスラスト前面の堆積物が再移動することで、保存する可能が低くなる。下刻河川、解氷の谷、差別侵食により形成された岩盤の山脚の側方にできる扇状地は、地殻変動で沈降する場所よりも、一般的に侵食が発生するために保存されている可能性が限られている。したがって、岩石の記録に保存される可能性が最大となる扇状地な

どの大気下の現成の条件は、次の通りである。(1) Basin and Range 地域や東アフリカ地溝帯のような、広がる大陸地塊に形成された縦ずれが卓越する引っ張りによる盆地。(2) グアテマラの Izabal 地溝やイスラエル・ヨルダン国境に沿う死海盆地のような、広い横ずれ断層にそって形成された斜め伸長帯の盆地。(3) チリ北部の Salar de Atacama 盆地のような、背弧-前弧の引張地域(Flint et al., 1991, 1993)。少々理想的ではないがまだおそらく保存される可能性のある扇状地の条件は、バイカル湖盆地のような別種の圧縮領域に形成された地域的な地溝である。

したがって、岩石の記録で正確に認知された扇状地のシーケンスは、特定の古地理と過去のテクトニクスの状態を描写する。それは、以下の通りである。(1) 岩盤地塊と活動的な沈降河谷(たとえば、山麓条件)の地形的併置。(2) 地殻変動の引っ張りや斜め伸長帯に関係した広域的な沈降地帯の存在。(3) 岩盤地塊と堆積盆地の境界にある縦ずれや横ずれ断層の存在。(4) 盆地縁辺の断層への近接(普通5km 未満~10km)。(5) 正断層や横ずれ断層の盆地の沈降の継続。(6) 何百万年間の断層帯の平面的位置の継続(Fig. 25)。さらに、盆地縁辺からみて扇状地の横切方向により、普通直線的な引張盆地の平面的輪郭が復元できる(たとえば, Blair, 1987c)。さらに、限定的な運搬のカタストロフィックである(すなわち急速な)特徴と結びついた、山地前面からの扇状地堆積物の運搬は、典型的には最大10km 未満であることが、詳細な過去の地質条件を復元する有用な、高精度の情報をひそませる堆積物を生みだしている(Fig. 25)。

岩石に記録された扇状地と河川の堆積物を正確に区分する科学的関係は、河成堆積物から推定される古地形学、古地理学、過去のテクトニクスの情報を比較することで描くことができる。粗粒や細粒の河川システムは、山麓条件や活断層に近い山麓で出現するものの、そこに発達が限られるというわけではない。一般に、山麓帯から何百も何千 km ですら離れて存在する(Fig. 25)。したがって、粗粒なものでさえ、河川堆積物は、地殻変動でできた起伏に近接しているという明白な指標ではなく、活断層の正確な位置についても乏しい指

岩石に記録された扇状地と河川シーケンスの地質学的関係			
地質学的特徴	扇状地あるいは ファンデルタ堆積物	粗粒河川あるいは 河川デルタ堆積物	細粒河川あるいは 河川デルタ堆積物
過去の山麓に依存する指標	ある	ない	ない
縦・横ずれ断層の盆地縁に依存する指標	ある	ない	ない
地殻変動帯に依存する指標	ある	ない	ない
盆地の伸びに依存する指標	ある	ない	ない
長期間活動の断層に依存する指標	ある	ない	ない
関連する断層との推定距離	0~15km	0~数1000km	0~数1000km
出所データの相対的質	とても高い	低い~高い	低い

Fig. 25 河川・網状デルタ・氾濫原デルタと扇状地・ファンデルタとを層序区分する場合の地質学的関係

標となっている。さらに、岩石に記録された河成シーケンスも、ほぼどんな型の大気下の盆地でも堆積するので、特定の堆積盆地の条件を示唆するものではない (Fig. 25)。さらに、堆積粒子が河川で移動できるおそらく長い運搬距離と、そのシステムにおける潜在的に長い滞在時間は、風化、磨滅、淘汰を通じて変わりやすい粒子の型の選択的消失があるので、堆積物から得られる由来や古地質の情報の質をかなり低くする。この状態は、扇状地堆積物から得られる由来の情報が高質なのとは対照的である (Fig. 25)。

上述の議論にもかかわらず、多くの昨今の著者は (Nemec and Steel, 1987, 1988; Dunne, 1988; Nemec, 1990, 1993; Postma, 1990; Reading and Orton, 1991; Nilsen, 1993), 過去の堆積盆地の古地理と過去のテクトニクスの復元に対して、扇状地堆積物の重要性に挑んできた。その結論は、扇状地の環境をすべて河成領域に事実上含めるように拡大してきたという、現在一般的であるがかなり不正確な扇状地の概念的枠組を受け入れるという究極的な問題を発生させ、示した。扇状地と河川 [地形] の明瞭な区分は、これらの環境の本質的な独自性を反映しているだけでなく、地球の歴史の層序記録とその内在する記録を解読するために我々の科学的可能性を大きく高める貴重な手段をも提供している。

【結 論】

扇状地は、礫床河川など他の陸域堆積環境と、地形、水理・堆積プロセス、層相群に基づき、明瞭に区分できる自然現象である。扇状地堆積物は、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である。扇状地は、急であり ($2\sim 25^\circ$)、長さは限られている (一般には10km 未満)。カタストロフィックな流体重力流 (布状洪水と下刻流路洪水) あるいは集水域の基盤岩の急崖や崩積土斜面の崩壊によって発生する堆積物重力流 (落石、岩石すべり、岩石なだれ、崩積土すべり、土石流) によって主に扇状地はつくられる。これらの一次的堆積物の表面は、風食や氾濫流のような二次的プロセスによって典型的には変形する。扇状地固有の層相群と、高角の断層付近という条件以外に岩石に記録された限られた機会は、地球の過去の古地理と過去のテクトニクスの事変を復元する貴重な地質学的実在をつくっている。

文 献

- Addison, K. 1987. Debris flow during intense rainfall in Snowdonia, North Wales: a preliminary study. *Earth Surface Processes and Landforms* 12: 561-566.
- Allen, J.R.L. 1965. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology* 5: 89-191.
- Anderson, D.M., Reynolds, R.C., and Brown, J. 1969. Bentonite debris flows in northern Alaska. *Science* 164: 173-174.
- Anderson, G.S. and Hussey, K.M. 1962. Alluvial fan development at Franklin Bluffs, Alaska. *Iowa Academy of Sciences Proceedings* 69: 310-322.
- Anderson, S.P. and Anderson, R.S. 1990. Debris-flow benches: dune-contact deposits record paleo-sand dune positions in north Panamint Valley, Inyo County, California. *Geology* 18: 524-527.
- Anstey, R.L. 1965. Physical characteristics of alluvial fans. *United States Army Natick Laboratories, Technical Report ES20*: 109p.
- Anstey, R.L. 1966. A comparison of alluvial fans in west Pakistan and the United States. *Pakistan Geographical Review* 21: 14-20.
- Arche, A. 1983. Coarse-grained meander lobe deposits in the Jarama River, Madrid, Spain. In *Modern and ancient fluvial systems*, ed. J.D. Collinson and J. Levin, *International Association of Sedimentologists Special Publication* 6: 313-322.
- Arogyaswamy, R.M.P. 1971. Some geological factors influencing the behavior of the Kosi. *Geological Survey of India Records* 96: 42-51.
- Azimi, C. and Desvarreux, P. 1974. A study of one special type of mudflow in the French Alps. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 7: 329-338.
- Baird, P.D. and Lewis, W.V. 1957. The Cairngorm flood, 1956. *Scottish Geographical Magazine* 73: 91-100.
- Baker, V.R. and Ritter, D.F. 1975. Competence of rivers to transport coarse bedload material. *Geological Society of America Bulletin* 86: 975-978.
- Balcer, R. A. 1984. Stratigraphy and depositional history of the Pantano Formation (Oligocene-Early Miocene), Pima County, Arizona. [unpublished M.S. thesis]: Tucson, University of Arizona, 107p.
- Ballice, P.F. 1984. Sheet-flow-dominated gravel fans of the non-marine middle Cenozoic Simmler Formation, central California. *Sedimentary Geology* 38: 337-359.
- Balceanu, D. 1976. Two case studies of mudflows in the Buzau Subcarpathians. *Geografiska Annaler* 58A: 165-171.
- Balceanu, D. 1986. The importance of mass movement in the Romanian Subcarpathia. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 58: 173-190.
- Baltzer, F. and Purser, B.H. 1990. Modern alluvial fan and deltaic sedimentation in a foreland tectonic setting: the Lower Mesopotamian Plain and Arabian Gulf. *Sedimentary Geology* 67: 175-197.
- Barnes, H.H. 1967. Roughness characteristics of natural channels. *United States Geological Survey Water-Supply Paper* 1849: 213p.
- Barrell, J. 1908. Relations between climate and terrestrial deposits. *Journal of Geology* 16: 159-190, 255-295, 363-384.
- Beatty, C.B. 1963. Origin of alluvial fans, White Mountains, California and Nevada. *Annals of the Association of American Geographers* 53: 516-535.
- Beatty, C.B. 1970. Age and estimated rate of accumulation of an alluvial fan, White Mountains, California, U.S.A. *American Journal of Science* 268: 50-77.
- Beatty, C.B. 1974. Debris flows, alluvial fans and a revitalized catastrophism. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 21: 39-51.
- Beatty, C.B. 1989. Great boulders I have known. *Geology* 17: 349-352.
- Beatty, C.B. 1990. Anatomy of a White Mountains debris-flow: the making of an alluvial fan. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 69-89. New York: Wiley.
- Beatty, C.B. and DePolo, C.M. 1989. Energetic earthquakes and boulders on alluvial fans: is there a connection? *Seismological Society of America Bulletin* 79: 219-224.
- Beaumont, P. 1972. Alluvial fans along the foothills of the Elburz Mountains, Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 12: 251-273.
- Beaumont, P. and Oberlander, T.M. 1971. Observations on stream discharge and competence at Mosaic Canyon, Death Valley, California. *Geological Society of America Bulletin* 82: 1695-1698.
- Beer, J.A. and Jirka, G.H. 1988. Computations of high-velocity flows on alluvial fans. *American Society of Civil Engineers, National Conference on Hydraulic Engineering, Proceedings*, 167-172.
- Benda, L. 1990. The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon Coast Range, U.S.A. *Earth Surface Processes and Landforms* 15: 457-466.
- Beven, K., Lawson, A., and McDonald, A. 1978. A landslide/debris flow in Bilsdale, North York Moors, September 1976. *Earth Surface Processes* 3: 407-419.
- Bhardwaj, B.D. and Singh, A. 1992. Sedimentology of a recent alluvial fan of Ganga River, Rishikesh, India. *Geological Society of India Journal* 39: 457-465.
- Billi, P., Magi, M., and Sagri, M. 1987. Coarse-grained low-sinuosity river deposits: examples from Plio-Pleistocene; Valdarno Basin, Italy. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethridge, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 39: 197-204.
- Blackwelder, E. 1928. Mudflow as a geologic agent in semiarid mountains. *Geological Society of America Bulletin* 39: 465-484.
- Blair, T.C. 1985a. Depositional chronology, sedimentary processes, and the resulting vertical stratification sequences in the Roaring River alluvial fan, Rocky Mountain National Park, Colorado. In *Field guidebook to modern and ancient fluvial systems in the United States*, ed. R.M. Flores and M.D. Harvey, *Fort Collins, Colorado, Proceedings of the 3rd International Fluvial Conference*: 96-101.
- Blair, T.C. 1985b. Nonmarine sedimentological response to tectonism in rift basins: a comparison of the Jurassic Todos Santos Formation, Chiapas, Mexico, with Quaternary deposits in Death Valley, California (abstract). *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Annual Mid-Year Meeting Abstracts* 2: 11-12.
- Blair, T.C. 1987a. Hydrologic and tectonic controls on alluvial fan/fan-delta flood basin sedimentation, southwestern United States, and their implications to the development of cyclic marginal fan and flood-basin megasequences.

- International Symposium on Fan Deltas, Geological Institute, Bergen, Norway*: 121-122.
- Blair, T.C. 1987b. Sedimentary processes, vertical stratification sequences, and geomorphology of the Roaring River alluvial fan, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Journal of Sedimentary Petrology* 57: 1-18.
- Blair, T.C. 1987c. Tectonic and hydrologic controls on cyclic alluvial fan, fluvial, and lacustrine rift-basin sedimentation, Jurassic-lowermost Cretaceous Todos Santos Formation, Chiapas, Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology* 57: 845-862.
- Blair, T.C. and Baker, F., and Turner, J. 1991. Cenozoic fluvial-facies architecture and aquifer heterogeneity, Oroville, California, Superfund Site and vicinity. In *Three dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*, ed. N. Tyler and A.D. Miall, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Concepts in Sedimentology and Paleontology* 3: 147-159.
- Blair, T.C. and Bilodeau, W.L. 1988. The development of tectonic cyclothem in rift, pull-apart, and foreland basins: sedimentary response to episodic tectonism. *Geology* 16: 517-520.
- 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. 1993. The Trollheim alluvial fan and facies model revisited, Reply to R.L. Hooke. *Geological Society of America Bulletin* 105: 564-567.
- Blair, T.C. and McPherson, J.G. 1994. Alluvial fan processes and forms. In *Geomorphology of desert environment*, ed. A.D. Abrahams and A.J. Parsons, 354-402. London: Chapman & Hall.
- Blissenbach, E. 1952. Relation of surface angle distribution to particle size distribution on alluvial fans. *Journal of Sedimentary Petrology* 22: 25-28.
- Blissenbach, E. 1954. Geology of alluvial fans in semiarid regions. *Geological Society of America Bulletin* 65: 175-189.
- Blong, R.J. 1981. Stability analysis of Chim Shale mudslides, Papua New Guinea. In *Erosion and sediment transport in Pacific rim steeplands*, ed. T.R.H. Davies and A.J. Pearce, *International Association of Hydrological Sciences Publication* 132: 42-66.
- Blong, R.J. and Dunkerley, D.L. 1976. Landslides in the Razorback area, New South Wales, Australia. *Geografiska Annaler* 55A: 139-147.
- Bluck, B.J. 1974. Structure and directional properties of some valley sandur deposits in southern Iceland. *Sedimentology* 21: 533-544.
- Bluck, B.J. 1979. Structure of coarse grained braided stream alluvium. *Royal Society of Edinburgh Transactions* 70: 181-221.
- Bluck, B.J. 1982. Texture of gravel bars in braided streams. In *Gravel-bed rivers*, ed. R.D. Hey, J.C. Bathurst, and C.R. Thorne, 339-355. London: Wiley.
- Bogucki, D.J. 1976. Debris slides in the Mt. LeConte area, Great Smoky Mountains National Park, U.S.A. *Geografiska Annaler* 58A: 179-191.
- Bogucki, D.J. 1977. Debris slide hazards in the Adirondack province of New York State. *Environmental Geology* 1: 317-328.
- Bonney, C.T.G. 1902. Moraines and mudstreams in the Alps. *Geological Magazine* 9: 8-16.
- 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.
- Bovis, M.J. 1985. Earthflows in the Interior Plateau, southwest British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal* 22: 313-334.
- Bovis, M.J. 1986. The morphology and mechanics of large-scale slope movement, with particular reference to southwest British Columbia. In *Hillslope processes*, ed. A.D. Abrahams, 319-341. Boston: Allen & Unwin.
- Boyer, M.C. 1954. Estimating the Manning roughness coefficient from an average bed roughness in open channels. *American Geophysical Union Transactions* 35: 957-961.
- Bradley, W.C., Fahnestock, R.K., and Rowekamp, E.T. 1972. Coarse sediment transport by flood flows on the Knik River, Alaska. *Geological Society of America Bulletin* 83: 1261-1284.
- Brazier, V., Whittington, G., and Ballantyne, C.K. 1988. Holocene debris cone evolution in Glen Etive, western Grampian Highlands, Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms* 13: 525-531.
- Browning, J.M. 1973. Catastrophic rock slide, Mount Huascarán, north-central Peru, May 31, 1970. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 57: 1335-1341.
- Broscoe, A.J. and Thomson, S. 1969. Observations on an alpine mudflow, Steele Creek, Yukon. *Canadian Journal of Earth Sciences* 6: 219-229.
- 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 Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 16: 63-83.
- Bull, W.B. 1977. The alluvial-fan environment. *Progress in Physical Geography* 1: 222-270.
- Burchfiel, B.C. 1966. Tin Mountain landslide, southeastern California, and the origin of megabreccia. *Geological Society of America Bulletin* 77: 95-100.
- Burggraf, D.R. and Vondra, C.F. 1982. Rift valley facies and paleoenvironments: an example from the East African rift system of Kenya and southern Ethiopia. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 42: 43-73.
- Burke, K. 1967. The Yallahs basin: a sedimentary basin southwest of Kingston, Jamaica. *Marine Geology* 5: 45-60.
- Caine, N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler* 62A: 23-27.

- Campbell, J.E. and Hendry, H.E. 1987. Anatomy of a gravelly meander lobe in the Saskatchewan River near Nipawin, Canada. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethrige, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication 39*: 179-190.
- Campbell, R.H. 1974. Debris flows originating from soil slips during rainstorms in southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology 7*: 339-349.
- Campbell, R.H. 1975. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California. *United States Geological Survey Professional Paper 851*: 51p.
- Cant, D.J. and Walker, R.G. 1978. Fluvial process and facies sequences in the sandy braided South Saskatchewan River, Canada. *Sedimentology 25*: 625-648.
- Chang, H.H. 1982. Fluid hydraulics of deltas and alluvial fans. *American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Hydraulics Division 108*: 1282-1295.
- Chawner, W.D. 1935. Alluvial fan flooding: the Montrose, California, flood of 1934. *Geographical Review 25*: 255-263.
- 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.
- Chow, V.T. 1959. *Open channel hydraulics*. New York: McGraw Hill, 680p.
- Church, M. 1983. Pattern of instability in a wandering gravel bed channel. In *Modern and ancient fluvial systems*, ed. J.D. Collinson and J. Lewin, *International Association of Sedimentologists Special Publication 6*: 169-180.
- Church, M. and Miles, M.J. 1987. Meteorological antecedents to debris flows in southwestern British Columbia: some case studies. In *Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wiczeorek, *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology 7*: 63-80.
- 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.
- Church, M., Stock, R.F., and Ryder, J.M. 1979. Contemporary sedimentary environments on Baffin Island, N.W.T., Canada: debris slope accumulations. *Arctic and Alpine Research 11*: 371-402.
- Clague, J.J., Evans, S.G., and Blown, I.G. 1985. A debris flow triggered by the breaching of a moraine-dammed lake, Klattasine Creek, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences 22*: 1492-1502.
- Clark, G.M., 1987. Debris slide and debris flow historical events in the Appalachians south of the glacial border. In *Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wiczeorek, *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology 7*: 125-138.
- Cleland, H.F. 1902. The landslides of Mt. Greylock and Briggsville, Massachusetts. *Journal of Geology 10*: 513-517.
- Cler, J.K. 1988. Leveed boulder flows on volcanic slopes of the Sonoran Desert, Arizona. *Journal of Arid Environments 15*: 43-52.
- Coleman, J.M. 1969. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. *Sedimentary Geology 3*: 129-239.
- Coleman, J.M. and Wright, L.D. 1975. Modern river deltas: variability and processes of sand bodies. In *Deltas: models for exploration*, M.L. Broussard, *Houston Geological Society 99*: 99-149.
- Collinson, J.D. 1970. Bedforms of the Tana River, Norway. *Geografiska Annaler 52A*: 31-56.
- Collinson, J.D. 1978. Alluvial sediments. In *Sedimentary environments and facies*, 1st Edition, H.G. Reading, 15-60. Oxford: Blackwell.
- Collinson, J.D. 1984. Alluvial sediments. In *Sedimentary environments and facies*, 2nd Edition, H.G. Reading, 20-63. Oxford: Blackwell.
- Common, R. 1954. A report on the Lochaber, Appin, and Benderloch floods, May, 1953. *Scottish Geographical Magazine 70*: 6-20.
- Conway, W.M. 1893. Exploration in the Mustagh Mountains. *Geographical Journal 2*: 289-299.
- Cooley, M.E., Aldridge, B.N., and Euler, R.C. 1977. Effect of the catastrophic flood of December, 1966, North Rim area, eastern Grand Canyon, Arizona. *United States Geological Survey Professional Paper 980*: 43p.
- Corominas, J. and Alonso, E.E. 1990. Geomorphological effects of extreme floods (November 1982) in the southern Pyrenees. *International Association of Hydrological Sciences Publication 194*: 295-302.
- Costa, J.E. 1983. Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range. *Geological Society of America Bulletin 94*: 986-1004.
- Costa, J.E. 1984. Physical geomorphology of debris flows. In *Developments and applications of geomorphology*, ed. J.E. Costa and P.J. Fleisher, 268-317. Berlin: Springer-Verlag.
- Costa, J.E. 1988. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flow. In *Flood geomorphology*, ed. V.R. Baker, R.C. Kochel, and P. C. Patton, 113-122. New York: Wiley.
- Costa, J.E. 1991. Nature, mechanics, and mitigation of the Val Pola landslide, Valtellina, Italy, 1987-1988. *Zeitschrift für Geomorphologie 35*: 15-38.
- Costa, J.E. and Jarrett, R.D. 1981. Debris flows in small mountain stream channels of Colorado and their hydrologic implications. *Association of Engineering Geologists Bulletin 18*: 309-322.
- Cotecchia, V. 1987. Earthquake-prone environments. In *Slope stability*, ed. M.G. Anderson and K.S. Richards, 287-330. Chichester: Wiley.
- Crandell, D.R., Miller, C.D., Glicken, H.X., Christiansen, R.L., and Newhall, C.G. 1984. Catastrophic debris avalanche from ancestral Mount Shasta volcano, California. *Geology 12*: 143-146.
- Croft, A.R. 1962. Some sedimentation phenomena along the Wasatch Mountain front. *Journal of Geophysical Research 67*: 1511-1524.
- Cronin, V.S. 1992. Compound landslides: nature and hazard potential of secondary landslides within host landslides. In *Landslides/landslide mitigation*, ed. J.E. Slossen, A.G. Keene, and J.A. Johnson, *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology 9*: 1-9.
- Crowell, J.C. 1982. The Violin Breccia, Ridge Basin, southern California. In *Geology of the Ridge Basin, southern California*, ed. J.C. Crowell and M.H. Link, *So-*

- ciety of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Pacific Section: 89-98.
- Crozier, M.J. 1969. Earthflow occurrence during high-intensity rainfall in eastern Otago (New Zealand). *Engineering Geology* 3: 325-334.
- Cruden, D.M. 1988. Thresholds for catastrophic instabilities in sedimentary rock slopes, some examples from the Canadian Rockies. *Zeitschrift für Geomorphologie* 67: 67-76.
- Curry, R.R. 1966. Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range, central Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 77: 771-776.
- Da Costa Nunes, A.J., Costa Couto e Fonseca, A.M.M., and Hunt, R.E. 1984. Landslides of Brazil. In *Slope instability*, ed. D. Brunson and D.B. Prior, 419-446. New York: Wiley.
- 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. The Triassic formations of Connecticut. *United States Geological Survey Annual Report* 18, part 2: 1-192.
- Davis, W.M. 1901. *Physical geography*. Boston: Ginn and Company, 432p.
- Davis, W.M. 1905. The geographical cycle in an arid climate. *Journal of Geology* 13: 381-407.
- Davis, W.M. 1930. Rock floors in arid and humid climates. *Journal of Geology* 38: 1-27.
- Davis, W.M. 1938. Sheetfloods and streamfloods. *Geological Society of America Bulletin* 49: 1337-1416.
- Dawson, A.G., Matthews, J.A., and Shakesby, R.A. 1986. A catastrophic landslide (sturzstrom) in Verkilsdalen, Rondane National Park, southern Norway. *Geografiska Annaler* 68A: 77-87.
- Dawson, M.R. and Bryant, I.D. 1987. Three-dimensional facies geometry in Pleistocene outwash sediments, Worcestershire, U.K. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethridge, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 39: 191-196.
- DeCelles, P.G. and Gray, M.B., Ridgway, K.D., Cole, R.B., Pivnik, D.A., Pequera, N., and Srivastava, P. 1991a. Controls on synorogenic alluvial-fan architecture, Beartooth Conglomerate (Paleocene), Wyoming and Montana. *Sedimentology* 38: 567-590.
- DeCelles, P.G. and Gray, M.B., Ridgway, K.D., Cole, R.B., Srivastava, P., Pequera, N., and Pivnik, D.A. 1991b. Kinematic history of a foreland uplift from Paleocene synorogenic conglomerate, Beartooth Range, Wyoming and Montana. *Geological Society of America Bulletin* 103: 1458-1475.
- DeCelles, P.G., Tolson, R.B., Graham, S.A., Smith, G.A., Ingersoll, R.V., White, J., Schmidt, C.J., Rice, R., Moxon, I., Lemke, L., Handschy, J.W., Follo, M.F., Edwards, D.P., Cavazza, W., Caldwell, M., and Bargar, E. 1987. Laramide thrust-generated alluvial-fan sedimentation, Sphinx Conglomerate, southwestern Montana. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 71: 135-155.
- DeGraff, J.V., 1978. Regional landslide evaluation: two Utah examples. *Environmental Geology* 2: 203-214.
- Denny, C.S. 1965. Alluvial fans in the Death Valley region, California and Nevada. *United States Geological Survey Professional Paper* 466: 62p.
- Denny, C.S. 1967. Fans and pediments. *American Journal of Science* 265: 81-105.
- Derbyshire, E. and Owen, L.A. 1990. Quaternary alluvial fans in the Karakoram Mountains. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 27-53. New York: Wiley.
- Desloges, J.R. and Church, M. 1987. Channel and floodplain facies in a wandering gravel-bed river. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethridge, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 39: 99-110.
- Doeglas, D.J. 1962. The structure of sedimentary deposits of braided rivers. *Sedimentology* 1: 167-193.
- 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.
- DuBoys, M.P. 1879. Etudes du régime et l'action exercée par les eaux sur un lit a fond de graviers indefiniment affouillable. *Annals de Ponts et Chaussées, Series* 5, 18: 141-195.
- Dunne, L.A. 1988. Discussion of fan-deltas and braid-deltas: varieties of coarse-grained deltas. *Geological Society of America Bulletin* 100: 1308-1309.
- Eckis, R. 1928. Alluvial fans of the Cucamonga district, southern California. *Journal of Geology* 36: 224-247.
- Eisbacher, G.H. 1980. Debris torrents across the Alaska Highway near Muncho Lake, northern British Columbia. *Geological Survey of Canada, Current Research* 80-1C: 29-36.
- Eisbacher, G.H. and Clague, J.J. 1981. Urban landslides in the vicinity of Vancouver, British Columbia, with special reference to the December 1979 rainstorm. *Canadian Geotechnical Journal* 18: 205-216.
- Eisenlohr, W.S. 1952. Floods of July 18, 1942, in north-central Pennsylvania. *United States Geological Survey Water-Supply Paper* 1134-B: 59-158.
- Ellen, S.D. and Fleming, R.W. 1987. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. In *Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wieczorek, *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology* 7: 31-40.
- Elfstrom, A. 1987. Large boulder deposits and catastrophic floods. *Geografiska Annaler* 69A: 101-121.
- Englen, G.B. 1967. Landslides in the metamorphic northern border of the Dolomites (north Italy). *Engineering Geology* 2: 135-147.
- Ethridge, F.G. 1985. Modern alluvial fans and fan deltas. In *Recognition of fluvial depositional systems and their resource potential*. *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Short Course* 19: 101-126.
- Evans, S.G. 1982. Landslides and surficial deposits in urban areas of British Columbia: a review. *Canadian Geotechnical Journal* 19: 269-288.
- Everett, A.G. 1979. Secondary permeability as a possible factor in the origin of debris avalanches associated with heavy rainfall. *Journal of Hydrology* 43: 347-354.
- Eyles, N., Eyles, C.H., and McCabe, A.M. 1988. Late Pleistocene subaerial debris-flow facies of the Bow Valley near Banff, Canadian Rocky Mountains. *Sedimentology* 35: 465-480.

- 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.
- Eynon, G. and Walker, R.G. 1974. Facies relationships in Pleistocene outwash gravels, southern Ontario: a model for bar growth in braid bars. *Sedimentology* 21: 43-70.
- Fahnestock, R.K. 1963. Morphology and hydrology of a glacial stream-White River, Mount Rainier, Washington. *United States Geological Survey Professional Paper* 422-A: 70p.
- Fahnestock, R.K. and Bradley, W.C. 1973. Knik and Matanuska rivers, Alaska: a contrast in braiding. In *Fluvial geomorphology*, ed. M. Morisawa, State University of New York at Binghamton, *Publications in Geomorphology*: 220-250.
- Fahnestock, R.K. and Haushild, W.L. 1962. Flume studies of the transport of pebbles and cobbles on a sand bed. *Geological Society of America Bulletin* 73: 1431-1436.
- Fairchild, L.H. 1987. The importance of lahar initiation process. In *Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wieczorek, *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology* 7: 51-62.
- Fauque, L. and Strecker, M.R. 1988. Large rock avalanche deposits (Struzströme, sturzstroms) at Sierra Aconquija, northern Sierras Pampeanas, Argentina. *Ecologiae Geologicae Helveticae* 81: 579-592.
- Fedo, C.M. and Miller, J.M.G. 1992. Evolution of a Miocene half-graben basin, Colorado River extensional corridor, southeastern California. *Geological Society of America Bulletin* 104: 481-493.
- Fink, J.H., Malin, M.C., D'Alli, R.E., and Greely, R. 1981. Rheological properties of mudflows associated with the Spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington. *Geophysical Research Letters* 8: 43-46.
- Fisher, R.V. 1971. Features of coarse-grained, high-concentration fluids and their deposits. *Journal of Sedimentary Petrology* 41: 916-927.
- Flint, S., Turner, P., and Jolley, E.J. 1991. Depositional architecture of Quaternary fan-delta deposits of the Andean fore-arc: relative sea-level changes as a response to aseismic ridge subduction. In *Sedimentation, tectonics, and eustasy, sea-level changes at active margins*, ed. D.I.M. MacDonald, *International Association of Sedimentologists, Special Publication* 12: 91-103.
- Flint, S., Turner, P., Jolley, E.J., and Hartley, A.J. 1993. Extensional tectonics in convergent margin basins: an example from Salar de Atacama, Chilean Andes. *Geological Society of America Bulletin* 105: 603-617.
- Forbes, D.L. 1983. Morphology and sedimentology of a sinuous gravel-bed channel system: lower Babbage River, Yukon coastal plain, Canada. In *Modern and ancient fluvial systems*, ed. J.D. Collinson and J. Lewin, *International Association of Sedimentologists, Special Publication* 6: 195-206.
- Francis, P.W., Gardeweg, M., Ramirez, C.F., and Rothery, D.A. 1985. Catastrophic debris avalanche deposit of Socompa volcano, northern Chile. *Geology* 13: 600-603.
- Fraser, G.S. 1989. *Clastic depositional sequences, processes of evolution and principles of interpretation*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 459p.
- Fraser, G.S. and Cobb, J.C. 1982. Late Wisconsinian proglacial sedimentation along the West Chicago moraine in northeastern Illinois. *Journal of Sedimentary Petrology* 52: 473-491.
- Fraser, G.S. and DeCelles, P.G. 1993. Geomorphic controls on sediment accumulation at margins of foreland basins. *Basin Research* 4: 233-252.
- Fraser, G.S. and Suttner, L. 1986. *Alluvial fans and fan deltas*. Boston: International Human Resources Development Corporation, 199p.
- French, R.H. 1987. *Hydraulic processes on alluvial fans*. Amsterdam: Elsevier, 244p.
- Fryxell, F.M. and Horberg, L. 1943. Alpine mudflows in Grand Teton National Park, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin* 54: 457-472.
- Gallino, G.L. and Pierson, T.C. 1985. Polallie Creek debris flow and subsequent dam-break flood of 1980, East Fork Hood River Basin, Oregon. *United States Geological Survey Water-Supply Paper* 2273: 22p.
- Galloway, W.E. 1976. Sediments and stratigraphic framework of the Copper River fan delta, Alaska. *Journal of Sedimentary Petrology* 46: 726-737.
- Gardner, J.S. 1983. Accretion rates on some debris slopes in the Mt. Rae area, Canadian Rocky Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms* 8: 347-355.
- Garwood, N.C. and Janos, D.P. 1979. Earthquake-caused landslides: a major disturbance to tropical forests. *Science* 205: 997-999.
- Gates, W.B. 1987. The fabric of rockslide avalanche deposits. *Association of Engineering Geologists Bulletin* 24: 389-402.
- 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.
- Gifford, J. 1953. Landslides on Exmoor caused by the storm of 15 August 1952. *Geography* 38: 9-17.
- Gilbert, G.K. 1890. Lake Bonneville. *United States Geological Survey Monograph* 1: 438p.
- Glancy, P.A. and Harmsen, L. 1975. A hydrologic assessment of the September 14, 1974 flood in Eldorado Canyon, Nevada. *United States Geological Survey Professional Paper* 930: 28p.
- 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. New York: Wiley.
- 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.
- Goodwin, R.G. and Diffendal, R.F. 1987. Paleohydrology of some Ogallala (Neogene) streams in the southern Panhandle of Nebraska. 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: 149-158.
- Gottesfeld, A.S., Mathewes, R.W., and Gottesfeld, L.M.J. 1991. Holocene debris flows and environmental history, Hazelton area, British Columbia. *Canadian Journal of*

- Earth Sciences* 28: 1583-1593.
- Grabau, A.W. 1913. *Principles of Stratigraphy*. New York: Seiler, 1185p.
- Grainger, P. and Kalaugher, P.G. 1987. Intermittent surging movements of a coastal landslide. *Earth Surface Processes and Landforms* 12: 597-603.
- Grove, A.T. 1953. Account of a mudflow on Bredon Hill, Worcestershire, April, 1951. *Geologists' Association Proceedings* 64: 11-13.
- Grypta, J.J. and Bartholomew, M.J. 1987. Factors influencing the distribution of debris avalanches associated with the 1969 Hurricane Camille in Nelson County, Virginia. In *Landslide processes of the eastern United States and Puerto Rico*, ed. A.P. Schultz and R.W. Jibson, *Geological Society of America, Special Paper* 236: 15-28.
- Gupta, A. and Dutt, A. 1989. The Auranga: description of a tropical monsoon river. *Zeitschrift für Geomorphologie* 33: 73-92.
- Gustavson, T.C. 1974. Sedimentation on gravel outwash fans, Malaspina Glacier Foreland, Alaska. *Journal of Sedimentary Petrology* 44: 374-389.
- Gustavson, T. C. 1978. Bed forms and stratification types of modern gravel meander lobes, Nueces River, Texas. *Sedimentology* 25: 401-426.
- Haast, J. 1864. *Formation of the Canterbury Plains*. Christchurch: Press office, Session 22, 63p.
- Hack, J.T. and Goodlet, J.C. 1960. Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians. *United States Geological Survey Professional Paper* 347: 66p.
- Hadley, J.B. 1964. Landslides and related phenomena accompanying Hebgen Lake earthquake of August 17, 1959. *United States Geological Survey Professional Paper* 435: 107-138.
- Haerberli, W., Rickenmann, D., and Zimmermann, M. 1990. Investigation of 1987 debris flows in the Swiss Alps: general concept and geophysical soundings. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 194: 303-310.
- Haldermann, E.G. 1956. Recent landslide phenomena in the Rungwe volcanic area, Tanganyika. *Tanganyika Notes and Records* 45: 3-14.
- Hand, B.M., Wessel, J.M., and Hayes, M.O. 1969. Antidunes in the Mount Toby Conglomerate (Triassic), Massachusetts. *Journal of Sedimentary Petrology* 39: 1310-1316.
- Harms, J.C. and Fahnestock, R.K. 1965. Stratification, bed forms, and flow phenomena (with an example from the Rio Grande). In *Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation*, ed. G.V. Middleton, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 12: 84-115.
- Harp, E.L., Wilson, R.C., and Wiczorek, G.F. 1981. Landslides from the February 4, 1976, Guatemala earthquake. *United States Geological Survey Professional Paper* 1204A: 35p.
- Harp, E.L. and Keefer, D.K. 1989. Earthquake-induced landslides, Mammoth Lakes area, California. In *Landslides in central California*, ed. W.M. Brown, *28th International Geological Congress Field Trip Guidebook* T381: 49-53.
- Harris, S.A. and Gustafson, C.A. 1988. Retrogressive slumps, debris flows, and river valley development in icy, unconsolidated sediments on hills and mountains. *Zeitschrift für Geomorphologie* 32: 441-455.
- Harrison, J.V. and Falcon, N.L. 1937. The Saidmarrah landslide, south-west Iran. *Geographical Journal* 89: 42-47.
- Hart, M.W. 1991. Landslides in the Peninsular Ranges, southern California. In *Geological excursions in southern California and Mexico*, ed. M.J. Walawender and B.B. Hanan, *Geological Society of America Annual Meeting Guidebook*: 349-371.
- Harvey, A.M. 1984. Debris flows and fluvial deposits in Spanish Quaternary alluvial fans: implications for fan morphology. In *Sedimentology of gravels and conglomerates*, ed. E.H. Koster and R.J. Steel, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 10: 123-132.
- Harvey, A.M. 1986. Geomorphic effects of a 100 year storm in the Howgill Fells, northeast England. *Zeitschrift für Geomorphologie* 30: 71-91.
- Harvey, A.M. 1988. Controls of alluvial fan development: the alluvial fans of the Sierra de Carrascoy, Murcia, Spain. *Catena, Supplementary Band* 13: 123-137.
- 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. 1990. Factors influencing Quaternary alluvial fan development in Southeast Spain. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 247-269. New York: Wiley.
- Harvey, A.M. and Renwick, W.H. 1987. Holocene alluvial fan and terrace formation in the Bowland Fells, northwest England. *Earth Surface Processes and Landforms* 12: 249-257.
- Hawley, J.W. and Wilson, W.E., III 1965. Quaternary geology of the Winnemucca area, Nevada. *University of Nevada Desert Research Institute Technical Report* 5: 66p.
- Hayden, B.P. 1988. Flood climated. In *Flood geomorphology*, ed. V.R. Baker, R.C. Kochel, and P.C. Patton, 13-26. New York: Wiley.
- Hayes, M.O. and Kana, T.W. 1976. Terrigenous clastic depositional environment. *Columbia: University of South Carolina Coastal Research Division Technical Report* 11-CRD: 171p.
- Hayward, A.B. 1985. Coastal alluvial fans (fan deltas) of the Gulf of Aqaba (Gulf of Eliat), Red Sea. *Sedimentary Geology* 43: 241-260.
- Heim, A. 1882. Der Bergsturz von Elm. *Deutsche Geologische Gesellschaft, Zeitschrift* 34: 74-115.
- Hein, F.J. and Walker, R.G. 1977. Bar evolution and development of stratification in the gravelly braided Kicking Horse River, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* 14: 562-570.
- Hendrix, E.D. and Ingersoll, R.V. 1987. Tectonics and alluvial sedimentation of the upper Oligocene/lower Miocene Vasquez Formation, Soledad basin, southern California. *Geological Society of America Bulletin* 98: 647-663.
- Hine, A.C. and Boothroyd, J.C. 1978. Morphology, processes, and recent sedimentary history of a glacial-outwash plain shoreline, southern Iceland. *Journal of Sedimentary Petrology* 48: 901-920.
- Hitchcock, C.H. 1885. The recent landslide in the White Mountains. *Science* 6: 84-87.
- Hodges, K.V., McKenna, L.W., and Harding, M.B. 1990. Structural unroofing of the central Panamint Mountains, Death Valley region, southeastern California. In *Basin and Range extensional tectonics near the latitude of Las Vegas, Nevada*, ed. B.P. Wernicke, *Geological Society of*

- America, *Memoir* 176: 377-390.
- Hodges, K.V., McKenna, L.W., Stock, J., Knapp, J., Page, L., Sternlof, K., Silverberg, D., Wust, G., and Walker, J.D. 1989. Evolution of extensional basins and Basin and Range topography west of Death Valley, California. *Tectonics* 8: 453-467.
- Hodges, K.V., Walker, J.D., and Wernicke, B.P. 1987. Footwall structural evolution of the Tucki Mountain detachment system, Death Valley region, southeastern California. In *Continental extensional tectonics*, ed. M.P. Coward, J.F. Dewey, and P.L. Hancock, *Geological Society of London Special Publication* 28: 393-408.
- Hogg, S.E. 1982. Sheetflood, sheetwash, sheetflow, or...? *Earth-Science Reviews* 18: 59-76.
- Hollingsworth, R. and Kovacs, G.S. 1981. Soil slumps and debris flows: prediction and protection. *Association of Engineering Geologists Bulletin* 18: 17-28.
- Holmes, A. 1965. *Principles of physical geology*, 2nd ed. New York: Ronald, 1288p.
- Hooke, R.L. 1967. Processes on arid-region alluvial fans. *Journal of Geology* 75: 438-460.
- Hooke, R.L. 1987. Mass movements in semi-arid environments and the morphology of alluvial fans. In *Slope stability*, ed. M.G. Anderson and K.S. Richards, 505-529. Chichester: Wiley.
- Hooke, R.L. 1993. The Trollheim alluvial fan and facies model revisited: discussion. *Geological Society of American Bulletin* 105: 562-563.
- Hooke, R.L. and Rohrer, W.L. 1979. Geometry of alluvial fans: effect of discharge and sediment size. *Earth Surface Processes* 4: 147-166.
- Hoppe, G. and Ekman, S.R. 1964. A note on the alluvial fans of Ladtjovagge, Swedish Lapland. *Geografiska Annaler* 46A: 338-342.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin* 56: 275-370.
- Houmark-Nielsen, M. 1983. Depositional features of Late Weichselian outwash fan, central east Jylland, Denmark. *Sedimentary Geology* 36: 51-63.
- Hsu, K.J. 1975. Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfall. *Geological Society of America Bulletin* 86: 129-140.
- Hubert, J.F. and Filipov, A.J. 1989. Debris-flow deposits in alluvial fans on the west flank of the White Mountains, Owens Valley, California, U.S.A. *Sedimentary Geology* 61: 177-205.
- Hunt, C.B. 1975. *Death Valley: Geology, Ecology, and Archeology*. Berkeley: University of California Press, 234p.
- Hunt, C.B. and Mabey, D.R. 1966. General geology of Death Valley, California: stratigraphy and structure. *United States Geological Survey Professional Paper* 494-A: 165p.
- Hurelbrink, R.L. and Fehrenbacher, J.B. 1970. Soils and stratigraphy of a portion of the Gola River fan of Uttar Pradesh, India. *Soil Science Society of America Proceedings* 34: 911-916.
- Hutchinson, J.N. 1970. A coastal mudflow on the London clay cliffs at Beltinge, north Kent. *Geotechnique* 20: 412-438.
- Hutchinson, J.N., Prior, D.B., and Stephens, N. 1974. Potentially dangerous surges in an Antrim mudslide. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 7: 363-376.
- Inglis, C.C. 1967. Inland delta building activity of the Kosi River: a discussion. *American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Hydraulics Division* 93-HY1: 93-100.
- Innes, J.L. 1983. Debris flows. *Progress in Physical Geography* 7: 469-501.
- Innes, J.L. 1985. Magnitude-frequency relations of debris flows in northwest Europe. *Geografiska Annaler* 67A: 23-32.
- Iso, N., Yamakawa, K., Yonezawa, H., and Matsubara, T. 1980. Accumulation rates of alluvial cones, constructed by debris-flow deposits, in the drainage basins of the Takahara River, Gifu prefecture, central Japan. *Geographical Review of Japan* 53: 699-720.
- Jackson, L.E., Kostaschuk, R.A., and MacDonald, G.M. 1987. Identification of debris flow hazards on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wieczorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 115-124.
- Jackson, L.E., MacDonald, G.M., and Wilson, M.C. 1982. Paraglacial origin for terraced river sediments in Bow Valley, Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences* 19: 2219-2231.
- Jacobson, R.B., Cron, E.D., and McGeehin, J.P. 1989. Slope movements triggered by heavy rainfall, November 3-5, 1985, in Virginia and West Virginia. In *Landslide processes of the eastern United States and Puerto Rico*, ed. A.P. Schultz and R.W. Jibson, *Geological Society of America Special Paper* 236: 1-13.
- Jarrett, R.D. 1984. Hydraulics of high-gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering* 110: 1519-1539.
- Jarrett, R.D. and Costa, J.E. 1986. Hydrology, geomorphology, and dam-break modeling of the July 15, 1982 Lawn Lake and Cascade Lake dam failures, Larimer County, Colorado. *United States Geological Survey Professional Paper* 1369: 78p.
- Jenkins, A., Ashworth, R.J., Ferguson, R.I., Grieve, I.C., Rowling, P., and Stott, T.A. 1988. Slope failures in the Ochil Hills, Scotland, November 1984. *Earth Surface Processes and Landforms* 13: 69-76.
- Jibson, R.W. 1989. Debris flows in southern Puerto Rico. In *Landslide processes of the eastern United States and Puerto Rico*, ed. A.P. Schultz and R.W. Jibson, *Geological Society of America Special Paper* 236: 29-55.
- Johnson, A.M. 1970. Formation of debris flow deposits. In *Physical processes in geology*, 433-448. San Francisco: Freeman, Cooper.
- Johnson, A.M. 1984. Debris flow. In *Slope instability*, ed. D. Brunsten and D.B. Prior, 257-361. New York: Wiley.
- Johnson, A.M. and Rahn, P.H. 1970. Mobilization of debris flows. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 9: 168-186.
- Johnson, B. 1984. Blackhawk landslide, California, U.S.A. In *Slope instability*, ed. D. Brunsten and D.B. Prior, 481-504. New York: Wiley.
- Jones, F.O. 1973. Landslides of Rio de Janeiro and Serra das Araras escarpment, Brazil. *United States Geological Survey Professional Paper* 697: 42p.
- Karcz, I. 1968. Fluvialite obstacle marks from the wadis of the Negev (southern Israel). *Journal of Sedimentary Petrology* 38: 1000-1012.
- Kashiwaya, K., Okimura, T., and Kawatani, T. 1989. Tree ring information and rainfall characteristic for landslide

- in the Kobe District, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms* 14: 63-71.
- Keefer, D.K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95: 406-421.
- Kellerhals, R. and Church, M. 1990. Hazard management on fans, with examples from British Columbia. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 335-354. New York: Wiley.
- Kerr, D.R. 1984. Early Neogene continental sedimentation in the Vallecito and Fish Creek Mountains, western Salton Trough, California. *Sedimentary Geology* 38: 217-246.
- Kerr, D.R. and Kidwell, S.M. 1991. Late Cenozoic sedimentation and tectonics, western Salton Trough, California. In *Geological excursions in southern California and Mexico*, ed. M.J. Walawender and B.B. Hanan, *Geological Society of America Annual Meeting Guidebook*: 397-416.
- King, J., Loveday, I., and Schuster, R.L. 1989. The 1985 Bairaman landslide dam and resulting debris flow, Papua New Guinea. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 22: 257-270.
- Kite, J.S. 1987. Colluvial diamictites in the Valley and Ridge Province, West Virginia and Virginia. In *Landslides of eastern North America*, ed. A.P. Schultz and C.S. Southworth, *Geological Survey Circular Report* 1008: 21-23.
- Kochel, R.C. 1987. Holocene debris flows in central Virginia. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wieczorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 139-156.
- Kochel, R.C. 1990. Humid fans of the Appalachian Mountains. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 109-129. New York: Wiley.
- 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.
- Kojan, E. and Hutchinson, J.M. 1984. Mayunmarca rockslides and debris flow, Peru. In *Slope instability*, ed. D. Brunnsden and D.B. Prior, 315-361. New York: Wiley.
- Komar, P.D. 1988. Sediment transport by floods. In *Flood Geomorphology*, ed. V.R. Baker, R.C. Kochel, and P.C. Patton, 97-112. New York: Wiley.
- Koop, O.J. 1952. A megabreccia formed by sliding in southern France. *American Journal of Science* 250: 822-828.
- 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.
- Koster, E.H. 1978. Transverse ribs: their characteristics, origin, and hydraulic significance. In *Fluvial sedimentology*, ed. A.D. Miall, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 5: 161-186.
- Kraus, M.J. 1984. Sedimentology and tectonic setting of Early Tertiary quartzite conglomerates, northwest Wyoming. In *Sedimentology of gravels and conglomerates*, ed. E.H. Koster and R.J. Steel, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 10: 203-216.
- Kraus, M.J. and Middleton, L.T. 1987. Contrasting architecture of two alluvial suites in different structural settings. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethridge, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 39: 253-262.
- Krieger, M.H. 1977. Large landslides composed of megabreccia interbedded in Miocene basin deposits, southeastern Arizona. *United States Geological Survey Professional Paper* 1008: 25p.
- Krigstrom, A. 1962. Geomorphological studies of sandur plains and their braided rivers in Iceland. *Geografiska Annaler* 44: 328-346.
- Laming, D.J.C. 1966. Imbrication, paleocurrents, and other sedimentary features in the lower New Red Sandstone, Devonshire, England. *Journal of Sedimentary Petrology* 36: 940-959.
- Larsen, M.C. and Simon, A. 1993. A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler* 75A: 13-23.
- Larsson, S. 1982. Geomorphological effects on the slopes of Longyear Valley, Spitsbergen, after a heavy rainstorm in July, 1972. *Geografiska Annaler* 64A: 105-125.
- Lawson, A.C. 1913. The petrographic designation of alluvial fan formations. *University of California Publication in Geological Sciences* 7: 325-334.
- Legget, R.F., Brown, R.J.E., and Johnson, G.H. 1966. Alluvial fan formation near Aklavik, Northwest Territories, Canada. *Geological Society of America Bulletin* 77: 15-29.
- Lemke, R.W. 1966. Effects of the earthquake of March 27, 1964, at Seward, Alaska. *United States Geological Survey Professional Paper* 542-E: 43p.
- Leopold, L.B. and Maddock, T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *United States Geological Survey Professional Paper* 252: 57p.
- Li, J. and Luo, D. 1981. The formation and characteristics of mudflow and flood in the mountain area of the Dachao River and its prevention. *Zeitschrift für Geomorphologie* 25: 470-484.
- Li, J. and Wang, J. 1986. The mudflows in Xiaojiang Basin. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 58: 155-164.
- Li, J., Yuan, J., Bi, C., and Luo, D. 1983. The main features of the mudflow in Jiang-Jia Ravine. *Zeitschrift für Geomorphologie* 27: 325-341.
- Limerinos, J.T. 1970. Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. *United States Geological Survey Water-Supply Paper* 1898-B: 47p.
- Link, M.H. 1984. Fluvial facies of the Miocene Ridge Route Formation, Ridge Basin, California. *Sedimentary Geology* 38: 263-285.
- Link, M.H., Roberts, M.T., and Newton, M.S. 1985. Walker Lake Basin, Nevada: an example of late Tertiary(?) to recent sedimentation in a basin adjacent to an active strike-slip fault. In *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*, ed. K.T. Biddle and N. Christie-Blick, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 37: 105-125.
- Longwell, C.R. 1930. Faulted fans west of the Sheep Range, southern Nevada. *American Journal of Science* 20: 1-13.
- Longwell, C.R. 1951. Megabreccia developed downslope

- from large faults. *American Journal of Science* 249: 343-355.
- Luckman, B.H. 1992. Debris flows and snow avalanche landforms in the Lairig Ghru, Cairngorm Mountains, Scotland. *Geografiska Annaler* 74A: 109-121.
- Lustig, L.K. 1965. Clastic sedimentation in Deep Springs Valley, California. *United States Geological Survey Professional Paper* 352F: 131-192.
- Manspeizer, W. 1985. The Dead Sea rift: impact of climate and tectonism on Pleistocene and Holocene sedimentation. In *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*, ed. K.T. Biddle and N. Christie-Blick, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 37: 143-158.
- Martin, D.C., Piteau, D.R., Pearce, R.A., and Hawley, P.M. 1984. Remedial measures for debris flows at the Agassiz Mountain Institution, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal* 21: 505-517.
- Mason, A.C. and Foster, H.L. 1956. Extruded mudflow hills of Nirasaki, Japan. *Journal of Geology* 64: 74-83.
- Mathewson, C.C., Keaton, J.R., and Santi, P.M. 1990. Role of bedrock ground water in the initiation of debris flows and sustained post-flow stream discharge. *Association of Engineering Geologists Bulletin* 27: 73-83.
- McCarthy, T.S., Ellery, W.N., and Stanistreet, I.G. 1992. Avulsion mechanisms on the Okavango fan, Botswana: the control of a fluvial system by vegetation. *Sedimentology* 39: 779-795.
- McCarthy, T.S., Stanistreet, I.G., and Cairncross, B. 1991. The sedimentary dynamics of active fluvial channels on the Okavango fan, Botswana. *Sedimentology* 38: 471-487.
- McCarthy, T.S., Stanistreet, I.G., Cairncross, B., Ellery, W.N., Ellery, K., Oelofse, R., and Grobicki, T.S.A. 1988. Incremental aggradation on the Okavango delta-fan, Botswana. *Geomorphology* 1: 267-278.
- McDonald, B.C. and Banerjee, I. 1971. Sediments and bedforms on a braided outwash plain. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 1282-1301.
- McDonald, B.C. and Day, T.J. 1978. An experimental flume study on the formation of transverse ribs. *Geological Survey of Canada Paper* 78-1A: 441-451.
- McGee, W.J. 1897. Sheetflood erosion. *Geological Society of America Bulletin* 8: 87-112.
- McGowen, J.H. 1971. Gum Hollow fan delta, Nueces Bay, Texas. *Texas Bureau of Economic Geology Report of Investigations* 69: 91p.
- 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 Colloquim*: 43-79.
- McGowen, J.H. and Garner, L.E. 1970. Physiographic features and stratification types of coarse-grained point bars: modern and ancient examples. *Sedimentology* 17: 77-111.
- McGowen, J.H. and Groat, C.G. 1971. Van Horn Sandstone, west Texas: an alluvial fan model for mineral exploration. *Bureau of Economic Geology Report of Investigations* 72: 57p.
- McKee, E.D., Crosby, E.J., and Berryhill, H.L. 1967. Flood deposits, Bijou Creek, Colorado, June 1965. *Journal of Sedimentary Petrology* 37: 829-851.
- McPherson, J.G., Shanmugam, G., and Moiola, R.J. 1986. Fan-deltas and braid deltas: conceptual problems (abstract). *American Association of Petroleum Geologists, Memoirs* 70: 619.
- 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.
- McPherson, J.G., Shanmugam, G., and Moiola, R.J. 1988a. Fan deltas and braid deltas: conceptual problems. In *Fan deltas: sedimentology and tectonic settings*, ed. W. Nemecek and R.J. Steel, 14-22. Glasgow: Blackie and Son.
- McPherson, J.G., Shanmugam, G., and Moiola, R.J. 1988b. Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas: reply to discussion by L.A. Dunne. *Geological Society of America Bulletin* 100: 1309-1310.
- Melosh, H.J. 1987. The mechanics of large avalanches. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wiczeorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 41-50.
- Miall, A.D. 1978a. Fluvial sedimentology: a historical review. In *Fluvial sedimentology*, ed. A.D. Miall, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 5: 1-48.
- Miall, A.D. 1978b. 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.
- Miall, A.D. 1984. *Principles of sedimentary basin analysis*. New York: Springer-Verlag, 490p.
- Miall, A.D. 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. In *Recognition of fluvial depositional systems and their resource potential: Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Short Course Notes* 19: 33-81.
- Miall, A.D. 1990. Principles of sedimentary basin analysis, 2nd edition. New York: Springer-Verlag, 668p.
- Miall, A.D. 1992. Alluvial deposits. In *Facies models: response to sea-level change*, ed. R.G. Walker and N.P. James, 119-142. Toronto: Geological Association of Canada.
- Middleton, G.V. 1965. Antidune cross-bedding in a large flume. *Journal of Sedimentary Petrology* 35: 922-927.
- Middleton, G.V. and Hampton, M.A. 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In *Marine sediment transport and environmental management*, ed. D.J. Stanley and D.J.P. Swift, 197-218. New York: Wiley.
- Middleton, G.V. and Southard, J.B. 1984. Mechanics of sediment movement. *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Eastern Section, Short Course* 3: variously paginated.
- Mills, H.H. 1982. Long-term episodic deposition on mountain foot slopes in the Blue Ridge province of North Carolina: evidence from relative age-dating. *Southeastern Geology* 23: 123-128.
- Mills, H.H. 1987. Variation in sedimentary properties of colluvium as a function of topographic setting, Valley and Ridge province, Virginia. *Zeitschrift für Geomorphologie* 31: 277-292.
- 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.
- Monastersky, R. 1992. When mountains fall. *Science News* 142: 136-138.
- Money-maker, B.C. 1939. Erosional effects of the Webb Mountain (Tennessee) cloudburst of August 5, 1938. *Tennessee Academy of Sciences Journal* 14: 190-196.
- Morison, S.R. and Hein, F.J. 1987. Sedimentology of the White Channel gravels, Klondike area, Yukon Territory: fluvial deposits of a confined valley. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethridge, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publication* 39: 205-216.
- Morton, D.M. 1971. Seismically triggered landslides in the area above San Fernando Valley. *United States Geological Survey Professional Paper* 733: 99-103.
- Morton, D.M. and Campbell, R.H. 1974. Spring mudflows at Wrightwood, southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 7: 377-384.
- Morton, D.M., Kennedy, M.P., Campbell, R.H., Barrows, A.G., Kahle, J.E., and Yerkes, R.F. 1979. Landsliding and mudflows at Wrightwood, San Bernardino County, California. *California Division of Mines and Geology, Special Report* 136: 21p.
- Moser, M. and Hohensinn, F. 1982. Geotechnical aspects of soil slips in alpine regions. *Engineering Geology* 19: 185-211.
- Mudge, M.R. 1965. Rockfall-avalanche and rockslide-avalanche deposits at Sawtooth Ridge, Montana. *Geological Society of America Bulletin* 76: 1003-1014.
- Mukerji, A.B. 1976. Terminal fans of inland streams in Sutlej-Yamuna plain, India. *Zeitschrift für Geomorphologie* 20: 190-204.
- Mullineau, D.R. and Crandell, D.R. 1962. Recent lahars from Mount St. Helens, Washington. *Geological Society of America Bulletin* 73: 855-870.
- Naef, F., Haerberli, W., and Jaggi, M. 1989. Morphological changes in the Swiss Alps resulting from the 1987 summer storms. In *Hydrology of disasters*, ed. O. Starosloszky and O.M. Melder, 36-42. London: James & James.
- Naef, F., Horat, P., Milnes, A.G., and Hoehn, E. 1990. Anomalous hydrological behaviour of an Alpine stream (Varuna, Poschiavo, southern Switzerland) and its interpretation in terms of the geology of the catchment. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 194: 347-354.
- Neary, D.G. and Swift, L.W. 1987. Rainfall thresholds for triggering a debris avalanching event in the southern Appalachian Mountains. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wieczorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 81-92.
- Neary, D.G., Swift, L.W., Manning, D.M., and Burns, R.G. 1986. Debris avalanching in the southern Appalachians: an influence on forest soil formation. *Soil Science Society of America Proceedings* 50: 465-471.
- Nelson, A.R. 1992. Lithofacies analysis of colluvial sediments: an aid in interpreting the recent history of Quaternary normal faults in the Basin and Range Province, western United States. *Journal of Sedimentary Petrology* 62: 607-622.
- Nemec, W. 1990. Deltas: remarks on terminology and classification. In *Coarse-grained deltas*, ed. A. Colella and D.B. Prior, *International Association of Sedimentologists, Special Publication* 10: 3-10.
- Nemec, W. 1993. The concept and definition of a fan delta: review and discussion: Pohang, Korea, 3rd International Workshop on Fan Deltas, Abstracts with Program: 17-25.
- Nemec, W. and Postma, G. 1993. Quaternary alluvial fans in southwestern Crete: sedimentation processes and geomorphic evolution. In *Alluvial sedimentation*, ed. M. Marzo and C. Puigdefàbregas, *International Association of Sedimentologists, Special Publication* 17: 235-276.
- Nemec, W. and Steel, R.J. 1987. What is a fan-delta and how do we recognize it? *Fan deltas: Sedimentology and Tectonic Settings, International Symposium Proceedings*: 11-17.
- Nemec, W. and Steel, R.J. 1988. What is a fan delta and how do we recognize it? In *Fan deltas: sedimentology and tectonic settings*, ed. W. Nemec and R.J. Steel, 3-13. London: Blackie.
- Nicoletti, P.G. and Sorriso-Valvo, M. 1991. Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches. *Geological Society of America Bulletin* 103: 1365-1373.
- Numan, W. and Puigdefàbregas, C. 1978. Coarse-grained point bar structure in a molasse-type fluvial system, Eocene Castisent Sandstone Formation, South Pyrenean Basin. In *Fluvial sedimentology*, ed. A.D. Miall, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 5: 487-510.
- Nilsen, T.H. 1982. Alluvial fan deposits. In *Sandstone depositional environments*, ed. P.A. Scholle and D. Spearing, *American Association of Petroleum Geologists, Memoirs* 31: 49-86.
- Nilsen, T.H. 1985. Introduction and editor's comments. In *Modern and ancient alluvial fan deposits*, ed. T.H. Nilsen, New York: Van Nostrand Reinhold, 372p.
- Nilsen, T.H. 1993. What is an alluvial fan? *International Working Group on Fan Deltas, Newsletter* 1: 3-4.
- Nordin, C.F. and Beverage, J.P. 1965. Sediment transport in the Rio Grande, New Mexico. *United States Geological Survey Professional Paper* 462-F: 35p.
- Novak, I.D. 1973. Predicting coarse sediment transport: the Hjulström curve revisited. In *Fluvial geomorphology*, ed. M. Morisawa, *State University of New York at Binghamton, Publications in Geomorphology*: 13-25.
- Nummedal, D. and Boothroyd, J.C. 1976. Morphology and hydrodynamic characteristics of terrestrial fan environments. *Columbia: University of South Carolina Coastal Research Division Technical Report* 10-CRD: 61p.
- Ohmori, H. and Hirano, M. 1988. Magnitude, frequency and geomorphological significance of rocky mudflows, land-creep and the collapse of steep slopes. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 67: 55-65.
- Okuda, S., Suwa, H., Okunishi, K., Yokoyama, K., and Nakano, M. 1980. Observations on the motion of debris flow and its geomorphic effect. In *Geomorphic experiments on hillslopes*, ed. O. Slaymaker, T. Dunne, and A. Rapp, *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 35: 142-163.
- Ono, Y. 1990. Alluvial fans in Japan and South Korea. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 91-107. New York: Wiley.
- Ori, G.G. 1982. Braided to meandering channel patterns in humid-region alluvial fan deposits, River Reno, Po Plain (northern Italy). *Sedimentary Geology* 31: 231-248.
- Osterkamp, W.R. and Hupp, C.R. 1987. Dating and inter-

- pretation of debris flows by geologic and botanical methods at Whitney Creek Gorge, Mount Shasta, California. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wieczorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 157-164.
- Pack, F.J. 1923. Torrential potential of desert waters. *Pan-American Geologist* 40: 349-356.
- Pain, C.F. 1971. Rapid mass movement under forest and grass in the Hunua Ranges, New Zealand. *Australian Geographical Studies* 9: 77-84.
- Parkash, B., Awasthi, A.K., and Gohain, K. 1983. Lithofacies of the Markanda terminal fan, Kurukshetra district, Haryana, India. In *Modern and ancient fluvial systems*, ed. J.D. Collinson and J. Lewin, *International Association of Sedimentologists, Special Publications* 6: 337-344.
- Patton, P.C. 1988. Drainage basin morphometry and floods. In *Flood geomorphology*, ed. V.R. Baker, R.C. Kochel, and P.C. Patton, 51-64. New York: Wiley.
- Patton, P.C. and Baker, V.R. 1976. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydro-geomorphic controls. *Water Resources Research* 12: 941-952.
- Pearce, A.J. and O'Loughlin, C.L. 1985. Landsliding during a M 7.7 earthquake: influence of geology and topography. *Geology* 13: 855-858.
- Perkins, G.H. 1870. Notice of a recent land-slide on Mount Passaconaway, New Hampshire. *American Journal of Science* 49: 158-161.
- Pickup, G., Higgins, R.J., and Warner, R.F. 1981. Erosion and sediment yield in Fly River drainage basin, Papua New Guinea. In *Erosion and sediment transport in the Pacific rim steeplands*, ed. T.R.H. Davies and A.J. Pearce, *International Association of Hydrological Sciences Publication* 132: 438-456.
- Pierson, T.C. 1980. Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand. *Earth Surface Processes* 5: 227-247.
- Pierson, T.C. 1981. Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt. Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. *Sedimentology* 28: 49-60.
- Pierson, T.C. 1985. How debris flows stop (abstract). *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 17: 623.
- Plafker, G. and Ericksen, G.E. 1984. Nevados Huascaran avalanches, Peru. In *Slope instability*, ed. D. Brunsten and D.B. Prior, 277-314. New York: Wiley.
- Pomeroy, J.S. 1980. Storm-induced debris avalanching and related phenomena in the Johnstown area, Pennsylvania, with references to other studies in the Appalachians. *United States Geological Survey Professional Paper* 1191: 24p.
- Pomeroy, J.S. and Thomas, R.E. 1986. Geologic relationships of slope movement in northern Alabama. *United States Geological Survey Bulletin* 1649: 13p.
- Porter, S.C. and Orombelli, G. 1980. Catastrophic rockfall of September 12, 1717 on the Italian flank of the Mont Blanc massif. *Zeitschrift für Geomorphologie* 24: 200-218.
- Postma, G. 1990. Depositional architecture and facies of river and fan deltas: a synthesis. In *Coarse-grained deltas*, ed. A. Colella and D.B. Prior, *International Association of Sedimentologists, Special Publication* 10: 13-28.
- Price, W.E. 1974. Simulation of alluvial fan deposition by a random walk model. *Water Resources Research* 10: 263-274.
- Price, W.E. 1976. A random-walk simulation model of alluvial-fan deposition. In *Random processes in geology*, ed. D.F. Merriam, 55-62. New York: Springer-Verlag.
- Prior, D.B. and Stephens, N. 1972. Some movement patterns of temperate mudflows: examples from north-eastern Ireland. *Geological Society of America Bulletin* 83: 2533-2543.
- Prior, D.B., Stephens, N., and Archer, D.R. 1968. Composite mudflows on the Antrim Coast of north-east Ireland. *Geografiska Annaler* 50A: 65-78.
- Prior, D.B., Stephens, N., and Douglas, G.R. 1970. Some examples of debris flows in northern Ireland. *Zeitschrift für Geomorphologie* 14: 275-288.
- Prior, D.B., Stephens, N., and Douglas, G.R. 1971. Some examples of mudflow and rockfall activity in north-east Ireland. *Institute of British Geographers, Special Publication* 3: 129-140.
- Rachocki, A.H. 1981. *Alluvial fans: an attempt at an empirical approach*. New York: Wiley, 161p.
- Rachochi, A.H. 1990. The Leba River alluvial fan and its palaeogeomorphological significance. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 305-317. New York: Wiley.
- Rahn, P.H. 1986. *Engineering Geology*. New York: Elsevier, 578p.
- Ramos, A. and Sopena, A. 1983. Gravel bars in low-sinuosity streams (Permian and Triassic, central Spain). In *Modern and ancient fluvial systems*, ed. J.D. Collinson and J. Lewin, *International Association of Sedimentologists, Special Publication* 6: 301-313.
- Rannie, W.F. 1990. The Portage la Prairie 'floodplain fan'. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 179-193. New York: Wiley.
- Rannie, W.F., Thorleifson, L.H., and Teller, J.T. 1989. Holocene evolution of the Assiniboine River Paleochannels and Portage la Prairie alluvial fan. *Canadian Journal of Earth Sciences* 27: 1834-1841.
- Rapp, A. 1960. Recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geografiska Annaler* 42: 73-200.
- Rapp, A. and Fairbridge, R.W. 1968. Talus fan or cone: scree and cliff debris. In *Encyclopedia of geomorphology*, 1106-1109. New York: Reinhold.
- Rapp, A. and Nyberg, R. 1981. Alpine debris flows in northern Scandinavia. *Geografiska Annaler* 63A: 183-196.
- Rapp, A. and Stromquist, L. 1976. Slope erosion due to extreme rainfall in the Scandinavian Mountains. *Geografiska Annaler* 58A: 193-200.
- Ray, L.L. 1964. The Charleston, Missouri, alluvial fan. *United States Geological Survey Professional Paper* 501B: 130-134.
- Reading, H.G. and Orton, G.J. 1991. Sediment calibre: a control on facies models with special reference to deep-sea depositional systems. In *Controversies in modern geology: evolution of geological theories in sedimentology, earth history, and tectonic*, ed. D.W. Muller, J.A. McKenzie, and H. Weissert, 85-111. London: Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich.
- Reimnitz, E. 1966. *Late Quaternary history and sedimentation of the Copper River delta and vicinity, Alaska*. San

- Diego [unpublished Ph.D. thesis], University of California, 160p.
- Reinfelds, I. and Nanson, G. 1993. Formation of braided river floodplains, Waimakariri River, New Zealand. *Sedimentology* 40: 1113-1127.
- Reneau, S. and Dietrich, W.E. 1987. The importance of hollows in debris flow studies: examples from Marin County, California. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wicczorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 165-180.
- Reneau, S., Dietrich, W.E., Donahue, D.J., Jull, A.J.T., and Rubin, M. 1990. Late Quaternary history of colluvial deposition and erosion in hollows, central California Coastal Ranges. *Geological Society of America Bulletin* 102: 969-982.
- Reneau, S., Dietrich, W.E., Wilson, C.J., and Rogers, J.D. 1984. Colluvial deposits and associated landslides in the northern San Francisco Bay area, California, U.S.A. *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Toronto*, 425-430.
- Renwick, W.H. 1977. Erosion caused by intense rainfall in a small catchment in New York State. *Geology* 5: 361-364.
- Renwich, W., Brumbaugh, R., and Loehner, L. 1982. Landslide morphology and processes on Santa Cruz Island, California. *Geografiska Annaler* 64A: 149-159.
- Richards, K. 1982. *Rivers: form and process in alluvial channels*. London: Methuen, 361p.
- Richardson, P.D. 1968. The generation of scour marks near obstacles. *Journal of Sedimentary Petrology* 38: 965-970.
- Rickenmann, D. 1990. Debris flows 1987 in Switzerland: modelling and fluvial sediment transport. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 194: 371-378.
- Rickmers, W.R. 1913. *The Duab of Turkestan*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rodine, J.D. and Johnson, A.M. 1976. The ability of debris heavily freighted with coarse clastic materials to flow on gentle slopes. *Sedimentology* 23: 213-234.
- Roesli, U. and Schindler, C. 1990. Debris flows 1987 in Switzerland: geological and hydrogeological aspects. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 194: 379-386.
- Rust, B.R. 1972. Structure and process in a braided river. *Sedimentology* 18: 221-245.
- Rust, B.R. 1979. Coarse alluvial deposits. In *Facies models*, ed. R.G. Walker, *Geoscience Canada Reprint Series* 1: 9-21.
- Rust, B.R. 1981. Alluvial deposits and tectonic style: Devonian and Carboniferous successions in eastern Gaspe. In *Sedimentation and tectonics in alluvial basins*, ed. A.D. Miall, *Geological Association of Canada Special Paper* 23: 49-76.
- Rust, B.R. and Gostin, V.A. 1981. Fossil transverse ribs in Holocene alluvial fan deposits, Depot Creek, South Australia. *Journal of Sedimentary Petrology* 51: 441-444.
- 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. 1971. 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., Bovis, M.J., and Church, M. 1990. Rock avalanches at Texas Creek, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* 27: 1316-1329.
- Saussure, H.B.de. 1779. *Voyages dans les Alpes: précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*, part 1. Neuchatel: 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. Neuchatel: 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. Neuchatel: 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. Neuchatel: Lous Fauche-Borel, 594p.
- Saylor, B.Z. and Hodges, K.V. 1991. The Titus Canyon Formation: evidence for early Oligocene extension in the Death Valley area, CA (abstract). *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 23: 82.
- Schlemon, R.J., Wright, R.H., and Montgomery, D.R. 1987. Anatomy of a debris flow, Pacifica, California. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wicczorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 181-200.
- Schmitt, J.G. and Brown, C. 1991. Megabreccia deposits in an extensional basin: Horse Camp Formation, east-central Nevada (abstract). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 75: 1139.
- Schultz, A.P. and Southworth, C.S. 1989. Large bedrock landslides of the Appalachian Valley and Ridge province of eastern North America. In *Landslide processes of the eastern United States and Puerto Rico*, ed. A.P. Schultz and R.W. Jibson, *Geological Society of America, Special Paper* 236: 57-74.
- Schumm, S.A. 1977. *The fluvial system*. New York: Wiley, 338p.
- Schumm, S.A., Mosley, M.P., and Weaver, W.E.. 1987. *Experimental fluvial geomorphology*. New York: Wiley, 413p.
- Schwartz, D.E. 1978. Hydrology and current orientation analysis of a braided-to-meandering transition: the Red River in Oklahoma and Texas, U.S.A. In *Fluvial sedimentology*, ed. A.D. Miall, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 5: 231-255.
- Scott, K.M. and Gravlee, G.C. 1968. Flood surge of the Rubicon River, California: hydrology, hydraulics, and boulder transport. *United States Geological Survey Professional Paper* 422-M: 40p.
- Selby, M.J. 1976. Slope erosion due to extreme rainfall: a case study from New Zealand. *Geografiska Annaler* 58A: 131-138.
- Sharp, R.P. 1942. Mudflow levees. *Journal of Geomorphology* 5: 222-227.
- Sharp, R.P. and Nobles, L.H. 1953. Mudflow of 1941 at Wrightwood, southern California. *Geological Society of America Bulletin* 64: 547-560.
- Sharpe, C.F.S. 1938. *Landslides and related phenomena*. New York: Columbia University Press, 137p.
- Shields, A. 1936. Anwendung der Ähnlichkeits-Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Preussisch Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Mitteilungen*, Berlin, pt. 26.
- Shreve, R.L. 1968. The Blackhawk landslide. *Geological Society of America, Special Paper* 108: 47.

- Shroder, J.F. 1976. Mass movement on Nyika Plateau, Malawi. *Zeitschrift für Geomorphologie* 20: 56-77.
- Simons, D.B. and Richardson, E.V. 1962. The effect of bed roughness on depth-discharge relations in alluvial channels. *United States Geological Survey Water-Supply Paper* 1498-E: 26p.
- Simons, D.B. and Richardson, E.V. 1966. Resistance to flow in alluvial channels. *United States Geological Survey Professional Paper* 422-J: 61p.
- Singh, H., Parkash, B., and Gohain, K. 1993. Facies analysis of the Kosi megafan deposits. *Sedimentary Geology* 85: 87-113.
- Slosson, J.E., Yoakum, D.D., and Shuirman, G. 1992. Thistle landslide: sas mitigation possible? In *Landslides/landslide mitigation*, ed. J.E. Slosson, A.G. Keene, and J.A. Johnson, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 9: 83-93.
- Smart, G.M. 1981. Volcanic debris control, Gunung Kelud, east Java. In *Erosion and sediment transport in the Pacific rim steepplands*, ed. T.R.H. Davies and A.J. Pearce, *International Association of Hydrological Sciences Publication* 132: 604-623.
- Smith, G. 1754. Dreadful storm in Cumberland. *Gentleman's Magazine* 24: 464-467.
- Smith, N.D. 1970. The braided stream depositional environment: comparison of the Platte River with some Silurian clastic rocks, north-central Appalachians. *Geological Society of America Bulletin* 81: 2993-3014.
- Smith, N.D. 1972. Some sedimentological aspects of planar cross-stratification in a sandy braided river. *Journal of Sedimentary Petrology* 42: 624-634.
- Smith, N.D. 1974. Sedimentology and bar formation in the upper Kicking Horse River, a braided outwash stream. *Journal of Geology* 82: 205-223.
- Sneh, A. 1979. Late Pleistocene fan-deltas along the Dead Sea rift. *Journal of Sedimentary Petrology* 49: 541-552.
- So, C.L. 1971. Mass movements associated with the rain-storm of June 1966 in Hong Kong. *Institute of British Geographers Transactions* 53: 55-65.
- Sorriso-Valvo, M. 1988. Landslide-related fans in Calabria. *Catena, Supplement* 13: 109-121.
- Southard, J.B., Smith, N.D., and Kuhnle, R.A. 1984. Chutes and lobes: newly identified elements of braiding in shallow gravelly systems. In *Sedimentology of gravels and conglomerates*, ed. E.H. Koster and R.J. Steel, *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs* 10: 51-59.
- Spearing, D.A. 1974. Alluvial fan deposits. *Geological Society of America Summary Sheets of Sedimentary Deposits*, sheet 1.
- Stanistreet, I.G., Cairncross, B. and McCarthy, T.S. 1993. Low sinuosity and meandering bedload rivers of the Okavango Fan: channel confinement by vegetated levées without fine sediment. *Sedimentary Geology* 85: 135-156.
- Stanistreet, I.G. and McCarthy, T.S. 1993. The Okavango Fan and the classification of subaerial fan systems. *Sedimentary Geology* 85: 115-133.
- Statham, I. 1976. Debris flows on vegetated screes in the Black Mountains, Carmarthenshire. *Earth Surface Processes* 1: 173-180.
- Statham, I. and Francis, S.C. 1986. Influence of scree accumulation and weathering on the development of steep mountain slopes. In *Hillslope processes*, ed. A.D. Abrahams, 245-268. London: Allen & Unwin.
- Steel, R.J., Maehle, S., Nilsen, H., Roe, S.L. and Spinnangr, A. 1977. Coarsening-upward cycles in the alluvium of Hornelen Baisn (Devonian) Norway: sedimentary response to tectonic events. *Geological Society of America Bulletin* 88: 1124-1134.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions* 38: 913-920.
- Strahler, A.N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In *Handbook of applied hydrology*, ed. V.T. Chen, 40-74. New York: McGraw-Hill.
- Sundborg, A. 1956. The river Klarälven: a study of fluvial process. *Geografiska Annaler* 38: 125-316.
- 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.
- Suwa, H. and Okuda, S. 1980. Dissection of valleys by debris flows. In *Geomorphic experiments on hillslopes*, ed. O. Slaymaker, T. Dunne, and A. Rapp, *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 35: 164-182.
- Takahashi, T. 1991. Debris flows. *International Association for Hydraulic Research Monograph Series*, 165p.
- Tanaka, M. 1976. Rate of erosion in the Tanzawa Mountains, central Japan. *Geografiska Annaler*, 58A: 155-163.
- Tanner, L.H. and Hubert, J. 1991. Basalt breccias and conglomerates in the Lower Jurassic McCoy Formation, Fundy Basin, Nova Scotia: differentiation of talus and debris-flow deposits. *Journal of Sedimentary Petrology* 61: 15-27.
- Temple, P.H. and Rapp, A. 1972. Landslides in the Mgeta area, western Uluguru Mountains, Tanzania. *Geografiska Annaler* 54A: 157-193.
- Tieje, A.J. 1923. The red beds of the front range in Colorado: a study in sedimentation. *Journal of Geology* 31: 192-207.
- Tolman, C.F. 1909. Erosion and deposition in the southern Arizona bolson region. *Journal of Geology* 17: 136-163.
- Topping, D.J. 1993. Paleogeographic reconstruction of the Death Valley extended region: evidence from Miocene large rock-avalanche deposits in the Amargosa Chaos Basin, California. *Geological Society of America Bulletin* 105: 1190-1213.
- Trowbridge, A.C. 1911. The terrestrial deposits of Owens Valley, California. *Journal of Geology* 19: 736-740.
- Troxell, H.C. and Peterson, J.Q. 1937. Flood in La Caaada Valley, California. *United States Geological Survey Water Supply Paper* 796-C: 53-98.
- Tufescu, V. 1970. Mudflows in the Flysch Carpathians and Bend Sub-Carpathians of Romania. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 9: 146-156.
- Tunbridge, I.P. 1983. Alluvial fan sedimentation of the Horseshoe Park flood, Colorado, U.S.A., July 15, 1982. *Sedimentary Geology* 36: 15-23.
- Van de Kamp, P.C. 1973. Holocene continental sedimentation in the Salton Basin, California: a reconnaissance. *Geological Society of America Bulletin* 84: 827-848.
- Van Dine, D.F. 1985. Debris flows and debris torrents in the southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal* 22: 44-68.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. In *Landslides, analysis and control*, ed. R.L. Schuster and R.J. Krizek, *Washington D.C.: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report*

- 176: 11-33.
- Waldron, H.H. 1967. Debris flow and erosion control problems caused by ash eruptions of Irazu volcano, Costa Rica. *United States Geological Survey Bulletin* 1241-I: 37p.
- Walker, R.G. 1975a. Conglomerate: sedimentary structures and facies models. In *Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences*. Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, *Short Course* 2: 133-161.
- Walker, R.G. 1975b. Generalized facies models for resedimented conglomerates of turbidite association. *Geological Society of America Bulletin* 86: 737-748.
- Ward, L.G., Stephan, M.F., and Nummedal, D. 1976. Hydraulics and morphology of glacial outwash distributaries, Skeidararsandur, Iceland. *Journal of Sedimentary Petrology* 46: 770-777.
- Wasson, R.J. 1977. Last-glacial alluvial fan sedimentation in the lower Derwent Valley, Tasmania. *Sedimentology* 24: 781-799.
- Wasson, R.J. 1978a. A debris flow at Reshun, Pakistan, Hindu Kush. *Geografiska Annaler* 60A: 151-159.
- Wasson, R.J. 1978b. Alluvial fans, climate, and climatic change (abstract). *Jerusalem: International Association of Sedimentologists, Annual Meeting Abstracts* 2: 721-722.
- Wasson, R.J. 1979. Sedimentation history of the Mundi Mundi alluvial fans, western New South Wales. *Sedimentary Geology* 22: 21-51.
- Webb, R.H., Pringle, P.T., and Rink, G.R. 1987. Debris flows from tributaries of the Colorado River, Grand Canyon National Park, Arizona. *United States Geological Survey Open-File Report* 87-118: 64p.
- Webb, R.H., Pringle, P.T., Reneau, S.L., and Rink, G.R. 1988. Monument Creek debris flow, 1984: implications for formation of rapids on the Colorado River. *Geology* 16: 50-54.
- 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 Palaeontologists and Mineralogists, *Special Publication* 39: 51-61.
- Wells, N.A. and Dorr, J.A. 1987b. 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.
- Wentworth, C.K. 1943. Soil avalanches on Oahu, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 54: 53-64.
- Wescott, W.A. 1990. The Yallahs fan delta: a coastal fan in a humid tropical climate. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 213-225. New York: Wiley.
- 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.
- White, S.E. 1949. Processes of erosion on steep slopes of Oahu, Hawaii. *American Journal of Science* 247: 168-186.
- Whitehouse, I.E. and McSaveney, M.J. 1990. Geomorphic appraisal for development on two steep, active alluvial fans, Mt. Cook, New Zealand. In *Alluvial fans: a field approach*, ed. A.H. Rachocki and M. Church, 369-384. New York: Wiley.
- Wieczorek, G.F. 1987. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*, ed. J.E. Costa and G.F. Wieczorek, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 93-104.
- Williams, G.E. 1973. Late Quaternary piedmont sedimentation, soil formation and paleoclimates in arid South Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie* 17: 102-125.
- Williams, G.P. and Guy, H.P. 1973. Erosional and depositional aspects of Hurricane Camille in Virginia, 1969. *United States Geological Survey Professional Paper* 804: 80p.
- Williams, P.F. and Rust, B.R. 1969. The sedimentology of a braided river. *Journal of Sedimentary Petrology* 39: 649-679.
- Williams, V.S. 1982. Tectonic tilting of mountain-front alluvial fans near the Sapt Kosi gorge, eastern Nepal. In *Himalaya: landforms and processes*, ed. V.K. Verma and P.S. Saklani, 115-132. New Delhi: Today and Tomorrow Printers and Publishers.
- Winder, C.G. 1965. Alluvial cone construction by alpine mudflow in a humid temperate region. *Canadian Journal of Earth Sciences* 2: 270-277.
- Wohl, E.E. and Pearthree, P.P. 1991. Debris flows as geomorphic agents in the Huachuca Mountains of southeastern Arizona. *Geomorphology* 4: 273-292.
- Woodford, A.O. and Harriss, T.F. 1928. Geology of Blackhawk Canyon, San Bernardino Mountains, California. *University of California Publications in Geological Sciences* 17: 265-304.
- Woodruff, J.F. 1971. Debris avalanches as an erosional agent in the Appalachian Mountains. *Journal of Geography* 70: 399-406.
- Woolley, R.R. 1946. Cloudburst floods in Utah 1850-1938. *United States Geological Survey Water Supply Paper* 994: 159p.
- Yarnold, J.C. 1993. Rock-avalanche characteristics in dry climates and the effect of flow into lakes: insights from the mid-Tertiary sedimentary breccias near Artillery Peak, Arizona. *Geological Society of America Bulletin* 105: 345-360.
- Yarnold, J.C. and Lombard, J.P. 1989. Facies model for large block avalanche deposits formed in dry climates. In *Conglomerates in basin analysis*, ed. I.P. Colburn, P.L. Abbott, and J. Minch, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section Symposium Book* 62: 9-32.
- Zielinski, T. 1982. Contemporary high-energy flows, their deposits and reference to the outwash depositional model. *Prace Naukowe Uniwersytetu Slaskiego* Nr 519 Geologia 6: 98-110 (in Polish)
- Zimmermann, M. 1990. Debris flows 1987 in Switzerland: geomorphological and meteorological aspects. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 194: 387-393.