

討論：地形、水理・堆積プロセス、層相群に基づいた扇状地 そして河川地形との自然区分（紹介）

Discussion: Alluvial Fans and their Natural Distinction from Rivers based on Morphology, Hydraulic Processes, Sedimentary Processes, and Facies Assemblages

Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes 65A(1995): 706-708.

著者：KIM, Seung Bum

訳：齊藤享治（埼玉大学）

Blair and McPherson(1994)は、地形、水理・堆積プロセス、層相群に基づく、礫床河川など他の堆積環境から扇状地が直ちに区分されると、最近主張している。文献調査、理論的考察、野外調査から、扇状地は、主として堆積物重力流（主に土石流）や流体重力流（主に布状洪水）によるカタストロフィックな土砂供給により、谷口に形成された急勾配（ $1.5 \sim 25^\circ$ ）の半円錐形堆積体であると、彼らは結論づけた。その結論は、現在広く知られている用法と知見に反した次の2つの論拠によっている。(1)「扇状地」の用語は、(融氷)河川環境の堆積体を排除して、山麓の扇形堆積体に対し限定的に用いられるべきである。(2)河川卓越（あるいは網状システム支配）扇状地のモデルは、河川〔地形〕・河川デルタと扇状地とを混同した間違っただけの概念である。その論拠の本質は、網状流と扇状地を連続体とみなすよく良く知られた層相モデルに挑戦していると思われる。しかし、その挑戦は成功しないと思う。いくつか批評をここに記す。

【扇状地の定義】

Blair and McPherson(1994)は、扇状地堆積物を、「上流流域の涵養流路と山地前面が交差したところに堆積した粗粒で角張った土砂からなる半円錐形の堆積物」(p. 482)と定義した。この定義は、先駆的研究者が築いた扇状地研究初期の概念を忠実に反映しているが、後の研究者が形成した、アウトウォッシュファン outwash fan (Boothroyd and Ashley, 1975) や河成扇状地 fluvial fan (Schumm, 1977) に至る概念の拡大を完全に否定している。しかし、「扇状地」の用語を山麓の扇状地に限定

するのか、沖積平野の扇状地まで含めるのかは、語義論の問題のように思われる。換言すれば、その2つの語法は、一方が正しく他方が間違いというよりもむしろ、両者とも妥当である。実際に、沖積平野の扇形地形を扇状地のカテゴリーに含めることは、以下のように、意味がある。(1)「扇状地」の用語は、沖積堆積物からなる扇形の地形単位を文字通り単に暗示しているのにすぎない。(2)沖積平野の扇状地は、山麓の扇状地と同様に、拘束されていた流路が拘束されない低地域にでたところにて形成される。(3)全体的な楔形の形状、凸型横断面、凹型放射縦断面、下流側に向けた弧状の等高線、放射状に分布する扇状地表面の高まり、堆積盆での扇端の位置、堆積盆の主軸に直行する堆積方向といったように、沖積平野の扇状地は山麓扇状地の特徴を共有する（たとえば、Kosi 扇状地；Wells and Dorr, 1987）。(4)他方、上述の特徴ばかりではなく、しばしば振り子のように扇状地内の流路システムの急速な一掃で、沖積平野の扇状地は他の河川システムとは対照的である (Viseras and Fernandez, 1994)。(5)最後に最も重要な理由は、山麓扇状地でも沖積平野扇状地でも作用する流路プロセスが区別できるものではなく、2つの環境の間で層相が連続することにある（後述）。これらの理由が、沖積堆積物の扇形地形すべてが1つの地形カテゴリー「扇状地」にグループ化できる基礎を与えている。「扇状地」の用語の正確な意味は、包括性を限定せずに文脈で伝えることができる。これらの点で、現在広く知られている用法に対して元々の定義に固執することは、推奨されるものではないと思われる。

この意見に対し、Blair and McPherson は、沖積

平野扇状地を含めた河川システムと山麓扇状地との間には地形上自然の区分が存在すると主張するだろう(彼らの Figs. 3, 4)。前者は急勾配(1.5~25°)が特徴なのに対し、後者ははるかに緩勾配(0.5°未満)と彼らは主張する。しかし、その議論を支えた彼らのデータは、自然界のすべての出来事を充分にとらえていないものと思う。Bull (1963)は、土石流卓越扇状地が平均勾配わずか0.11~1.63°と報告した。扇状地の縦断面は、鋭い変換点がない河川システムに近いところでは一般的にタンジェントで漸移的な移行を示すことも指摘すべきである。このことは、扇状地と河川の環境に自然界の角度でのギャップがないかもしれないことを意味している。さらに、扇状地は小さい(半径10km未満)という彼らの意見も、カリフォルニア州 Fresno County 西部で大きい(19~30km)扇状地が存在するので疑わしい(Bull, 1963)。

【扇状地の堆積プロセス】

扇状地は主に土石流や布状洪水により形成され、現成扇状地の表面にある網状分流路は、扇状地表面を単に修飾したにすぎず、とくに低流砂階の斜交層理の層相を保持する可能性は低いと、Blair and McPherson(1994)は主張している。この主張にしたがって、Blair and McPherson(1994)は、これまで河流卓越扇状地と呼ばれていた扇状地を河川や河川デルタに再分類した。しかし、この再分類には一部疑問がある。たとえば、アペニン山脈山麓の断層沿いに発達する Reno 川扇状地は、礫床河川システムとして再分類されているが、Blair and McPherson(1994)の定義、すなわち、粗粒堆積物、谷口の位置、扇形地形(Ori, 1982)にしたがっても、扇状地と呼ぶためのすべての条件を満たしている。したがって、土石流と布状洪水が扇状地形成プロセスの主体であると一般的に強調することは認めるが、網状流システムを無視することには同意できない。実際、たくさんの論文により、流路が現成扇状地を切った断面において、土石流堆積物と互層をなしたり、土石流堆積物のなかに入り込んだ(数mまでの)厚い河流堆積物が報告されている(たとえば、Blissenbach, 1954; Bull, 1963; Wasson, 1977; Kochel and Johnson, 1984など)。これらの河流堆積物は、平板型成層、板

状あるいはトラフ型の斜交成層、礫のインブリケーションのような掃流を示す構造によってすべて特徴づけられる礫、礫まじり砂、砂を含む。さらに、Blair and McPhersonの主張とはまったく反対に、主に河流流路システムにより形成された、現成の網状システム支配扇状地の例がたくさんある(たとえば、Harvey, 1984; Al-Sarawi, 1988; Kochel, 1990; Ritter et al., 1993; Nemec and Postma, 1993など)。網状システム支配扇状地は土石流堆積物からなるものもあるが、ほとんどないものもある。Al-Sarawi(1988)は、すべて河流で形成された(厚さ6m未満の)第四紀扇状地シーケンスを報告した。その堆積物は、扇頂部では層理のない碎屑支持の礫、扇央部では斜交層理の礫まじり砂と砂、扇端部ではプラヤの泥と互層の斜交葉理や平板型葉理の礫まじり砂によって代表される。Nemec and Postma(1993)も、流路ラグ[基底地形]や流路州によってできた広範囲の岩片に支えられた、さまざまな級化・成層の礫層からなる(厚さ40m以上の)更新世の高エネルギー河流卓越扇状地を論述している。これらの例に基づくと、河流を扇状地形成プロセスから排除すべきではないと十分に結論づけられる。ついでながら、Blair and McPherson(1994)は、もう1つ重要な扇状地形成プロセスであり、流動学的・流体力学的に河流と土石流の中間形態で、一般には2部分に別れる浮流として運搬される水中の高度集中乱泥流と同種の超集中洪水流(Costa, 1988; Todd, 1989; Smith and Lowe, 1991)を見逃している。超集中洪水流堆積物は、現成の扇状地堆積物に広く認められている(たとえば、Kochel, 1990; Brierly et al., 1993など)。

布状洪水は、重要な扇状地プロセスと認知されているが、Blair and McPherson(1994)により明らかに強調されたと思う。その強調は、次の疑問に注意を払うとさらに成功するであろう。Blair and McPherson(1994)は、布状洪水を、「扇状地を流下するときに拡散する、まれでカストロフィックな拘束されない水流」(p. 470)と定義する一方、網状流プロセスを常流で低運搬力の河流が卓越しているとみなしている。この区分には2つの欠点があると思う。(1)大規模洪水流を網状流プロセスとみなさなかったことと、(2)扇状地プロセス

に対する布状洪水の根拠のない限定である。これらのおそらく欠陥は、「布状洪水」が大規模洪水流と同様のプロセスで、網状流帯に広がるかもしれないという疑問を提起する。布状洪水によるいくつかの河床形が拘束された流れの河床形と同様であることは、注目すべきである (Wells and Dohrenwend, 1985)。Blair and McPherson (1994) は、布状洪水の層相を、後置層あるいは前置層をときどき示す礫・砂の対と考えている。この考えでは、礫が乏しい砂の堆積物を布状洪水層相とみなしていない。しかし、側方に広がった (24km²までの) 塊状から射流のリップルをもつ砂層まで (たとえば, Boering and North, 1993a, b), 本当に布状洪水と呼ぶことができないのであろうか。Blair and McPherson (1994) は、表面に現れた定立波の列の下に発達するアンティデューンの礫の河床形の移動と流失を、布状洪水の堆積によると特に考えた。しかし、これらのアンティデューンの移動が卓越し、脈動する洪水流が扇状地上で作用する支配的な布状洪水であると結論づけることは、軽率な一般化なのであろうか。この疑問は、氷帽下での火山噴出 (Pierson and Scott, 1985) やダム崩壊 (Blair, 1987) のようなまれでカタストロフィックな事象によって発生した、ほんの数例の大規模閃光洪水でそのような流れが観測された事実からでている。詳細な水理学そしてその結果の堆積物の特徴がまだ解決していない、異なったメカニズムを洪水流プロセスに含めることを、心に銘記すべきである (Carling and Beven, 1989)。

理論的考察により、Blair and McPherson (1994) は、カタストロフィックな流量、射流と高運搬力の流れの卓越、急激な下扇への流れの薄化の点で、扇状地の水理条件は河川のと対照的であると考えた。この考えにはまったく同感であるが、少々欠点がある。たとえば、下扇への水理条件の変化が欠如している。言い換えれば、扇状地上の洪水流 (彼らのいう「布状洪水」) が急勾配のため常に射流で高運搬力という彼らの主張は、彼ら自身が認めているように、拘束がなくなることと勾配が減少することで急激に下扇に向けて浅くなり、そのため扇端部では運搬力の低い常流に変化しているという点を、残念ながら見過ごしている。この流れの変化は、扇端部に向けて斜交層理のある布

状洪水堆積物部分が増加することで証明されている (たとえば, Brierly et al., 1993)。このことは、布状洪水と河流との間が連続した1つの層相であることを意味している。流れの運搬力の急速な消失も、カタストロフィックな流量が支配しているにもかかわらず、下扇へ向けて堆積物の粒径が減少し扇端部での砂の堆積をもたらしている (たとえば, Ori, 1982; Al-Sarawi, 1988)。

これらの点で、「河流卓越扇状地」の用語は廃棄すべきであるという Blair and McPherson (1994) の主張は、布状洪水と網状流のプロセスの偏見によるものなので、間違っていると思う。「河流卓越扇状地 streamflow-dominated fan」の概念を棄却する替わりに、「布状洪水卓越扇状地 sheetflood-dominated alluvial fan」の用語を新たに使用することが、限定的で最も適切と思われる。したがって、「網状流と扇状地は空間的に離れていない」 (Boothroyd and Nummedal, 1978, p. 643) との報告はここで確証され、扇頂部から扇端部までの層相の連続および扇状地から網状流までの層相の連続の概念も支持される。

【扇状地の発達】

Blair and McPherson (1994) は、集水域の発達および扇状地地形と主要な堆積プロセスとを関係させた扇状地の発達の統合を考えた (彼らの Figs. 20, 21)。彼らの考えは、2つのおそらく欠点を除いて、かなり合理的と思われる。第1に、河流卓越扇状地 (彼らのいう「布状洪水卓越扇状地」) では、土石流卓越扇状地にくらべ、一般に半径が大きく、勾配が緩いという事実を、彼らが認めているが、このモデルには含まれていない。河流卓越扇状地には、斜面からのマスマーブメントによって供給される土砂を一時的に蓄えることができる高次の集水域が必要なので、発達段階において河流卓越扇状地が土石流卓越扇状地に一般的に続くという統合が、より論理的と思われる。この発達傾向は、いくつかの現成扇状地で報告されている (たとえば, McArthur, 1987; Nemec and Postma, 1993)。第2に、扇状地の発達が Stage 3 で止まってしまい、その後扇状地は盆地床の細粒物に覆われる、あるいは河川のような隣接する環境によって侵食されるのを待つだけという彼らのモ

デルは、奇妙に思われる。私の考えでは、その後、集水域の拡大が終了しないならば、河流卓越扇状地に相当する Stage 4, 沖積平野扇状地に相当する Stage 5, 河成システムに相当する Stage 6 があるに違いない。繰り返す扇頂侵食、二次的扇状地の形成、埋積を通じて、後背地の削剥や山麓の堆積により、山地前面と盆地の氾濫原との間の起伏は減少し、そこでは、山地前面が後退し、扇状地が事実上河成システムに変わるだろう。

文 献

- Al-Sarawi, A.M. 1988. Morphology and facies of alluvial fans in Kadhmah Bay, Kuwait. *Journal of Sedimentary Petrology* 58: 902-907.
- Blair, T.C. 1987. 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. and McPherson, J.G. 1994. Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes* 64: 450-489.
- Blissenbach, E. 1954. Geology of alluvial fans in semiarid regions. *Geological Society of America Bulletin* 65: 175-189.
- Boering, M. and North, C. 1993a. Dryland alluvial fan deposits: controls on sheetflood development (abstract): *5th International Conference on Fluvial Sedimentology, Queensland*, p.14.
- Boering, M. and North, C. 1993b. Sedimentology of dryland sheetflood deposits: a quantitative approach (abstract): *5th International Conference on Fluvial Sedimentology, Queensland*, p.15.
- Boothroyd, J.C. and Ashley, G.M. 1975. Processes, bar morphology, and sedimentary structures on braided outwash fans, northeastern Gulf of Alaska. In *Glaciofluvial and glaciolacustrine sedimentation*, ed. A.V. Jopling and B.C. McDonald, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 23: 193-222.
- 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.
- Brierley, G.J., Liu, K., and Crook, K.A.W. 1993. Sedimentology of coarse-grained alluvial fans in the Markham Valley, Papua New Guinea. *Sedimentary Geology* 86: 297-324.
- Bull, W.B. 1963. Alluvial fan deposits in western Fresno County, California. *Journal of Geology* 71: 243-251.
- Carling, P. and Beven, K. 1989. The hydrology, sedimentology and geomorphological implications of floods: an overview. In *Floods: hydrological, sedimentological and geomorphological implications*, ed. K. Beven and P. Carling, 1-9. New York: Wiley.
- 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.
- 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.
- 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.
- McArthur, J.L. 1987. The characteristics, classification and origin of late Pleistocene fan deposits in the Cass Basin, Canterbury, New Zealand. *Sedimentology* 34: 459-471.
- 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.
- 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.
- Pierson, T.C. and Scott, K.M. 1985. Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated stream flow. *Water Resources Research* 21: 1511-1524.
- Ritter, J.B., Miller, J.R., Enzel, Y., Howes, S.C., Nadon, H.G., Grubb, M.D., Hoover, K.A., Olsen, T., Reneau, S.L., Sack, D., Summa, C.L., Taylor, I., Toussintheiphonexay, K.C.N., Yodis, E.G., Schneider, N.P., Ritter, D.F., and Wells, S.G. 1993. Quaternary evolution of Cedar Creek Alluvial Fan, Montana. *Geomorphology* 8: 287-304.
- Schumm, S.A. 1977. *The fluvial system*. New York: Wiley, 338p.
- Smith, G.A. and Lowe, D.R. 1991. Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum. In *Sedimentation in volcanic settings*, ed. R.V. Fisher and G.A. Smith, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 45: 59-70.
- Todd, S.P. 1989. Stream-driven, high-density gravelly traction carpets: possible deposits in the Trabeg Conglomerate Formation, SW Ireland and some theoretical considerations of their origin. *Sedimentology* 36: 513-530.
- Viseras, C., and Fernández, J. 1994. Channel migration patterns and related sequences in some alluvial fan systems. *Sedimentary Geology* 88: 201-217.
- Wasson, R.J. 1977. Catchment processes and the evolution of alluvial fans in the Lower Derwent Valley, Tasmania. *Zeitschrift für Geomorphologie* 21: 147-168.
- Wells, N.A. and Dorr, J.A. 1987. A reconnaissance of sedimentation on the Kosi Alluvial Fan of India. In *Recent developments in fluvial sedimentology*, ed. F.G. Ethridge, R.M. Flores, and M.D. Harvey, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication* 39: 51-61.
- Wells, 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.