

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

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

Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes 65A(1995): 583-586.

著者：BLAIR, T. C. and McPHERSON, J. G.

訳：齊藤享治（埼玉大学）

McCarthy and Cadle が提起した問題点は、我々の論文を誤解したのものによると思われる。McCarthy and Cadle は、沖積扇状地の我々の定義を「含蓄的」と呼ぶことから始めている。逆に、我々は、扇状地の定義や議論をより含蓄的ではないようにしてきたので、当惑している。河川や河川デルタ環境の特徴に対して扇状地が対照的である経緯や原因を詳細に指摘しながら、位置、形態、プロセス、層相、層相群など、その環境のすべての主要な点を、我々の論文で探った。この評価に基づいた「沖積扇状地」"alluvial fan" の明確な定義は、要旨でも結論でもだした。さらに、McCarthy and Cadle は、最初の段落で、我々が「沖積扇状地とデルタを統合した定義の確立」を試みたと主張した。この要約は正しくない。我々の主な結論は、沖積扇状地が河川や河川デルタと簡単に区別でき、非漸移的に区分できることと、扇状地が河川や河川デルタと明白に分離される分類体系に基づいたその区分を使用することにある。McCarthy and Cadle の論述とは反対に、この区分についての我々の議論は、扇状地のすべての主要な面にわたっている。これら区分できる堆積環境を一緒にした分類を主張したのは、皮肉にも、McCarthy と彼の同僚（たとえば、Stanistreet and McCarthy, 1993）である。次に、McCarthy and Cadle は、扇状地と河川の我々の区分の「根拠を簡単に確かめる」ことを主張した。しかし、この確かめは、我々の40ページの論文のなかの1つの短い段落に当てるための図、我々の Fig. 5（後述）の議論に限られている。「粒径と勾配の特性に純粋に基づいて」、扇状地と河川とを我々が分離したと関連の主張があるので、扇状地と河川を区分する「根

拠を確かめる」には不正確と我々は思う。

【勾配と最頻組成の図】

McCarthy and Cadle は、勾配と最頻組成の我々の Fig. 5 において領域が「河川」と「沖積扇状地」とに区分されることが、片対数グラフ（x 軸が対数で y 軸が通常目盛）の人為にもっぱら起因し、両対数では存在しないと結論づけた。この点を証明するために、McCarthy and Cadle は、（彼らの Fig. 1 で）m/100,000m 単位にした y 軸を対数目盛に変換した図に置き換えて主張することを提案した。さらに、粒径と勾配との関係を示すと述べ、Costa (1983) が展開し、我々が水流の運搬力の議論で用いた経験的で剪断応力に基づいた式(式8)の関係を、彼らはその図に線分("AB")として加えた。この線分がしっかりとそのデータを二分している様子から明らかなように、McCarthy and Cadle は、扇状地と河川が離れた領域にあるとの我々の主張をおそらく否定しながら、粒径と勾配との直線的な関係をその図が証明していると、結論づけた。さらに、McCarthy and Cadle は挿入図に我々の原データを入れなかったが、そのデータがその線上に落ちるだろうとの含みをもって、粒径と勾配の経験的な線が、我々の論文で使用した片対数グラフ上では曲線のようなことを示す挿入図の結果を、彼らは確認した。

我々の原データに対し対数目盛の y 軸を使用しているので、McCarthy and Cadle による我々の元々の Fig. 5 の表現は不正確である (Fig. 1)。第1の問題は、勾配と最頻組成（後者は、Folk et al., 1970 と Folk, 1974 による）の替わりに、我々の Fig. 5 がまるで勾配と最大粒径を描いているかのよう

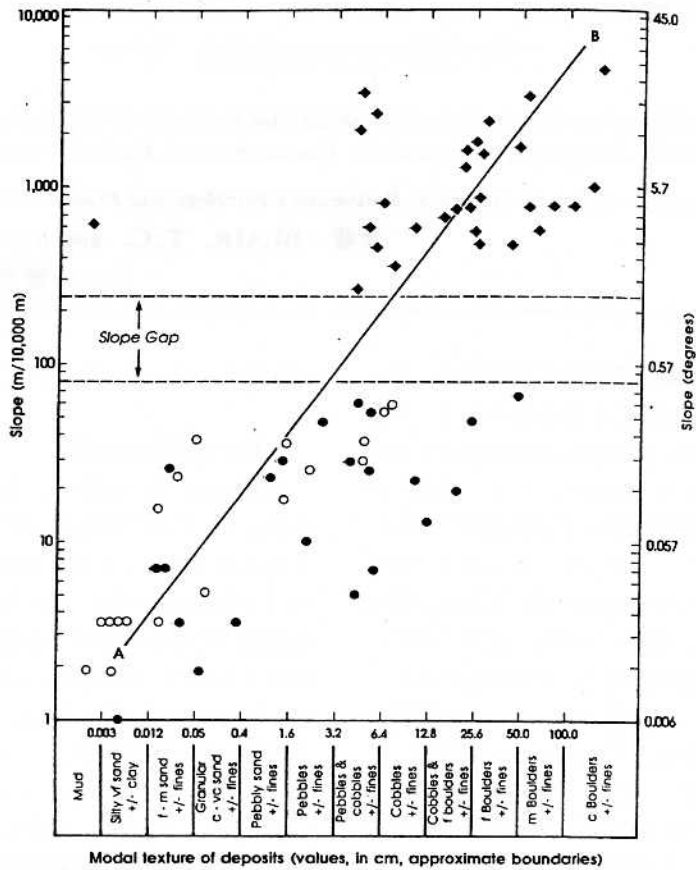


Fig. 1 Blair and McPherson (1994)のTable 2と3に掲げた、代表的な沖積扇状地 (菱形), 河川 (黒丸), 沖積扇状地として問題ある分類がなされた河川 (白丸)における, 最頻組成と平均堆積勾配の半定量的な両対数グラフ。線分"AB"は, McCarthy and Cadleによる。「勾配のギャップ」"slope gap"とは, 河川 (図の下部)と沖積扇状地 (図の上部)との間の堆積勾配の自然界のギャップを指す。

な, McCarthy and Cadleの混乱した議論である。最大粒径と最頻組成の違いは重要である。2, 3の特定の岩屑に基づくのではなく, 最も一般的な大きい粒径の範囲で堆積物を特徴づけるには, より適切な変数であると我々は信じているので, 最頻組成を用いた。McCarthy and Cadleの主張とは異なり, データの勾配 (すなわち y 軸の範囲) を意味ある変数にするためではなく, 最頻組成の階級が x 軸の点よりも広いので, 我々は「半定量的」な図を描いた。重要なことではないが, 言うべきことに, McCarthy and Cadleの図に正しくない表現がある。y 軸の単位は, m/100,000mではなく m/10,000mであり, 彼らの x 軸には我々

の「+/-細粒物」の修飾語が抜けている。

McCarthy and Cadleによる我々のデータの「再録」での第2の問題は, 我々が両対数の図 (本論の Fig. 1) で入れた, 我々の元々の点の33% (70のうち23) を入れなかったことである。本論の Fig. 1で分かることであるが, 我々のデータに基づくと示唆されるように, すべての元々のデータを実際に表すと, McCarthy and Cadleの Fig. 1の「単純な線的關係」はそれほど確実なものではない。データが広く散在するという事は, 最頻組成以上に, 結果的に勾配に影響を与える要因があることを暗示する。「河川」と「McCarthy and Cadleによって扇状地と呼ばれた河川」のデータの点の

混在は、我々の元々の Fig. 5のように、我々の再録でも明白である。

我々の Fig. 5に対する McCarthy and Cadle の表現の第3の問題は、彼らとその図に加えた（彼らの Fig. 1の AB）、粒径 d と勾配 S の関係 ($\gamma DS = 0.056 d^{1.213}$) に関してである。剪断力の考察に基づいた最大礫径の流体重力流の運搬力に対する Costa(1983)の経験式 ($\tau = 0.056 d^{1.213}$) と、DuBoyの剪断の式 ($\tau = \gamma DS$) とを組み合わせ、この関係を我々は得た。その関係は、この式を導いた条件の範囲内でのみ有効であり (Blair and McPherson, 1994 参照)、したがって、礫の大きさでの流体重力流の運搬力の議論についてのみ使用した。砂や泥の粒径にまでこの傾向を McCarthy and Cadle は外挿し、我々の最頻組成とこの最大粒径との関係を混同し、まるで堆積物重力流の堆積物に対応するかのようにこの関係を表現することは、妥当ではない。さらに、選択されたデータの点の中央を直に通る1つの線としてその関係を描くことは（彼らの Fig. 1）、誤解をまねく。この関係 ($\gamma DS = 0.056 d^{1.213}$) は、勾配 S と同様に、流体の比重 γ と水深 D に依存する。たとえば、 $\gamma = 1000 \text{kg/m}^3$ （最小懸濁物質をもつ水の比重）を仮定すれば、McCarthy and Cadle が線分 AB として最頻組成と勾配の図上に描いたのは、水深 0.48m の水流における最大粒径と勾配との経験的な関係である。この図による McCarthy and Cadle の論議は、データのすべてが流体重力流で運搬された最大粒径であり、そしてすべての流体重力流が水深 0.48m 以上でも以下でも決してないならば、妥当である。その図上で勾配と最大粒径の特定の位置は、水深 $< 0.48\text{m}$ の水流では必然的に左に移動し、水深 $> 0.48\text{m}$ の水流では必然的に右に移動する。たとえば、我々の「河川」と「扇状地と呼ばれた河川」のデータの範囲は、水深約 0.1 ~ 10.0m である（本論の Fig. 1の下半分）。このことは、もし McCarthy and Cadle が彼らの挿入図に我々のデータの点を入れた場合、彼らの暗示にもかかわらず、彼らの片対数のグラフ上でその曲線が流体重力流卓越システムからの我々のデータと一致しない理由にもなっている。

我々の Fig. 5についての McCarthy and Cadle の議論に関する第4の問題点は、「扇状地」と「河

川」の領域にデータが分離するのは、「軸を選択する我々の人為」にあるとの主張である。我々は同意しない。2組のデータセットの間にある大きなギャップが、McCarthy and Cadle の図でさえ存在する（彼らの Fig. 1の破線の間）。彼らの図でのその関係は、構成データによってではなく、隣接する各データセットが勾配のギャップに範囲を広げることによって、そして我々の元々のデータセットにおいてではなく、他の点を入れることによって、分かりにくくなった（後述）。「不適切な」図化による結論を得るために、両対数に対して我々が意図的に片対数を選んだという McCarthy and Cadle の暗示には同意しない。第1に、片対数は、両対数におとらず数学的に有効である。第2に、あいまいにするのではなく、その関係を最もよく反映させるために、y 軸を普通目盛りに我々は選んだ。変換した勾配の適切性をあいまいにし、ゆがめているのは、実際には、McCarthy and Cadle の対数目盛の y 軸（と m/10,000m の増分の使用）である。たとえば、その図の下 50% に $0.006^\circ \sim 0.57^\circ$ （1~100m/10,000m）の範囲の勾配を描き、上 50% に $0.57^\circ \sim 45.0^\circ$ （100~10,000m/10,000m）の勾配を描いている。0.006° から 0.57° までの勾配での流体重力流か堆積物重力流かへの変化の関係は、勾配 0.57° から 45.0° までの変化の関係とは、ほとんど同等ではない。勾配の全範囲の 1% を図の下半分に描き、残り 99% を図の上半分にもつような構造を、我々は理解できない。

我々の Fig. 5に対する McCarthy and Cadle の再録に関するもう1つの問題は、堆積盆地で堆積が進行する河川と扇状地との間の堆積勾配の自然界のギャップの結論に反証するために点を追加したことである。McCarthy and Cadle は、Yana 川デルタから9点、Scott 川デルタ (Boothroyd and Ashley, 1975) から19点、ネバダの無名の扇状地 (Bluck, 1964) から4点、不明の扇状地 (Blissenbach, 1954) から5点、我々の図に追加した。Yana 川デルタのデータの適切性は明らかではない。なぜなら、この地形の値は、堆積盆地における我々の河川の勾配の領域内に落ちる ($< 0.4^\circ \sim 0.5^\circ$)。勾配のギャップを閉じようと McCarthy and Cadle がとくに重要視した Scott 川デルタの点も、勾配 $0.5 \sim 1.5^\circ$ の範囲に落ちる4つの最も扇頂寄り

除いて、「河川」の領域に完全に位置する。なお、この情報源 (Boothroyd and Ashley, 1975) を調査すると、Scott「扇状地」の「扇頂部」とされた全データは、デルタ自身からではなく、Scott氷河の末端と山地前面のデルタの要との間に位置する、狭くて、基盤岩に覆われた涵養谷にある堆積物に実際は由来するものであった (Boothroyd and Ashley, 1975の Fig. 2参照)。まるでデルタ上流部あるいは扇状地かのように、涵養谷からのBoothroyd and Ashleyのデータ呈示は、その議論を支持するデータを McCarthy and Cadle が信じているので、思い違いであると我々は思う。勾配のギャップは、基盤岩に制限された流路あるいは最近後退した氷河によって取り残されたモレーンの上ではない、堆積盆地で発生することを論文で、明白に述べた。これらの (そして他の特殊な) 条件での河川勾配は、堆積物-水の相互関係よりも他の支配要因を反映している。Bluck (1964) からの4点の追加の信頼性にも疑問をもっている。Bluckにより調査された無名の扇状地の地形図 (彼の Fig. 2) は、この扇状地が $\sim 1.7^\circ$ のほぼ一定の勾配をもっている。その明白な傾向は、限定された堆積物に対して地図スケールの大きな等高線間隔におそらくよるものであろうが、地形図は下扇でわずかに増加する勾配をもつ扇状地を実際には表現している。この地形図からの我々の結論は、扇状地勾配が 2.3° から 1.1° まで (420m/10,000m から200m/10,000m まで) 減少することを示した、McCarthy and Cadleの結論と対峙する。それらのより高い値は、扇状地のデータとした Bluckの涵養谷のデータの間違った使用によるものであるが、より低い勾配の値は、地形図とは一致しない。さらに、この扇状地 (と Blissenbach の1つ) が、「扇端部のデータを収集すれば」、勾配のギャップにまた落ちるだろうとの McCarthy and Cadleの主張は、両研究とも扇状地全体の半径で表すことを表明しているので、誤解を招く。我々の堆積勾配のギャップの理論に反証するための McCarthy and Cadleにより主張された最後のデータセットは、Blissenbach (1954)、おそらくその Fig. 5からのものと鑑定する。この研究で Blissenbachによって述べられた沖積扇状地についての多くの結論と同様に、彼のデータを生み出した実際の扇

状地は特定されていない。したがって、Blissenbachの結論は、そのデータを確認も評価もできないので、科学的議論には役立たない。

さらに、McCarthy and Cadleによる勾配のギャップに関する議論は、いくつかの不正確な仮定を含んでいる。彼らの議論の前提として、「勾配がそうであるように、下扇に向けて粒径が減少することはよく知られている」と McCarthy and Cadleは主張した。この「よく知られた」原理が、十分なデータベースによって証明されていない沖積扇状地についての広く保持されている多くの概念の1つであることに、我々は挑戦した。多くの扇状地、とくに土石流堆積物が主体の扇状地では、一定の勾配をもち、最大粒径の下扇への細粒化がないことを見いだしている。扇端で減少する勾配をもつ沖積扇状地は確かに存在するが (我々の Type II扇状地の議論を参照)、この減少が $\sim 0.5^\circ$ から 1.5° までの勾配のギャップの範囲に届くような例がないことを、我々の原論文で指摘した。

最後に、勾配と最頻組成の図上で、扇状地や河川を1つの点で表現することについて、McCarthy and Cadleは我々を批判している。扇状地の勾配や最頻組成が基本的に一定の場合のみ扇状地を1つの点として我々は表現した。彼らの主張とは反対に、我々の図では、扇端部で粒径と勾配が減少することが明らかになっている (Blair, 1987)、1つの扇状地 (Roaring 川扇状地) の分割を含んでいる。それでも、この扇状地の末端での勾配は、決して 1.5° の閾値を下回らない。我々は、河川を1つの点として描いているが、これらの多くの点は、河川の最も上流側 [平野の谷口そば] でのものである。この方法は、反対するのではなく、これらのデータに対し、我々の結論に反論するのに彼らに最大の機会を与えた。

【Stanistreet and McCarthy (1993)の扇状地分類】

McCarthy and Cadleの討論の多くは、Okavangoデルタをその一員的一端として含める扇状地の分類体系 (Stanistreet and McCarthy, 1993)、すなわち我々の論文が間違いと結論づけた仮説に基づいた分類体系を維持しようとしているように思われる。McCarthy and Cadleは、扇状地と河川を分ける我々の根拠に反論するために、Okavangoをそ

の例として提示した。まるで我々がそのような呼び方をしたかのように、Okavangoを「河川デルタ」と呼ぶことについて、我々を非難することから、その討論を始めている。実際には、McCarthyや彼の同僚など (McCarthy et al., 1986, 1988a, 1989; Cairncross et al., 1988; Ellery et al., 1989; Ellery et al., 1990; McCarthy and Metcalfe, 1990), これまで多くの筆者がこの地形に適用した最も一般的な用語を、我々は単に使用した。最近、ほとんど正当な理由もなく、Okavangoを、最初、「デルタファン」"delta-fan"と (McCarthy et al., 1988b), その後、「沖積扇状地」と (McCarthy et al., 1991, 1992; Stanistreet and McCarthy, 1993; Stanistreet et al., 1993), 再分類したのはMcCarthyらである。しかし、これらの変換した後の論文でさえ、McCarthyと彼の同僚は、扇状地ではなく、デルタとしてこの地形について言及し続けた。

Okavangoが河川デルタから扇状地に変化することについてのMcCarthyや彼の同僚によって与えられた主要な説明は、彼らの討論で提供されたのと同じものである。物理的にも時間的にも最も限定された意味で使用される「前進」"prograde"を用いて、静水に前進していないので、Okavangoは実際にはデルタではないと彼らは結論づけている。もし首尾一貫して適用されるならば、この限定的定義は、すべての一時的な湖岸デルタをデルタ環境から排除するばかりではなく、永続的な湖岸デルタや、Mississippi川デルタのように海進の海岸線に支配された海岸デルタをも排除してしまう。彼らの議論は、デルタやデルタ亜環境、すなわちデルタ前面に加え、前進デルタ、上位デルタ面、下位デルタ面などで発生し、特徴づけられている (たとえば、Coleman, 1976), たくさんの他のプロセスや地形を考慮することなく、単独の特定の堆積プロセスがデルタの前面で発生しているかどうか、「デルタ」の定義を狭めるものである。McCarthyと彼の同僚 (たとえば、Stanistreet and McCarthy, 1993) は、彼らがデルタ環境から除名したその地形を含めるために、「沖積扇状地」の定義を拡大してきた。「沖積扇状地」の定義のこの拡大は、多数の陸成環境を基本的に通常ほとんどもたないところで適切なものとされてきた。

Okavangoを「沖積扇状地」として再分類する

ことを支えるいくつかの新しい論議が、McCarthy and Cadleの討議で提供された。第1に、地溝の縁にあるOkavangoの位置と、この地形が扇状地であることを支持する証拠として180°の弧状の平面形を使用している。我々はこの議論に同意できない。なぜならば、扇状地もデルタもこれらの特徴をもっている。McCarthy and Cadleはさらに、Okavangoが扇状地のように、円錐形で、平面的に凸の形態を示し、このことは、等高線を重ねたOkavangoの衛星画像によっても (彼らのFig. 2) 支持されると主張した。しかし、我々はこの結論に同意しない。扇状地地形を出現させた彼らの図の等高線パターンは、提示がなかった水平スケールを考慮しなければ、人をあざむく。Okavangoの要とMaun町近くの末端との~41mの落差は、実際には158kmの距離にわたって発生している (たとえば、McCarthy et al., 1991のFig. 1参照)。その平均 (と相対的に一定な) 勾配は0.015°である。この勾配は、Mississippi川デルタとNiger川デルタの勾配の中間的な値であり、我々が低勾配の扇状地として定義しているものより2ケタ小さい。実際、Okavangoの勾配は、緩いために、水がどちらの方向に流れるのかかろうじて分かるものであり、そのことが湿地によって占められている理由である。

Okavangoは特殊で重要な地形学的・堆積学的形態であり、McCarthyと彼の同僚がそれを報告するために賞賛すべき仕事をしてきたことは否定しない。しかしながら、Okavangoが沖積扇状地とするMcCarthy and Cadleの分類と、河川デルタよりも土石流卓越扇状地の方がより共通性があるという彼らの主張は、論理的理由で否定される。デルタも扇状地ももつ特徴の、平面形や放射状の分散パターンを除き、Okavangoは、沖積扇状地に典型的な、地形学的、水理学的、堆積学的、あるいは層序学的形態をもたない。

文 献

- 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: 451-490.
- Blissenbach, E. 1954. Geology of alluvial fans in semiarid regions. *Geological Society of America Bulletin* 65: 175-189.
- Bluck, B.J. 1964. Sedimentation of an alluvial fan in southern Nevada. *Journal of Sedimentary Petrology* 34: 395-400.
- Boothroyd, J.C. 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: 192-222.
- Cairncross, B., Stanistreet, I.G., McCarthy, T.S., Ellery, W.N., Ellery, K., and Grobicki, T. 1988. Paleochannels (stone rolls) in coal seams: modern analogues from fluvial deposits of the Okavango Delta, Botswana, southern Africa. *Sedimentary Geology* 57: 107-118.
- Coleman, J.M. 1976. *Deltas: processes of deposition and models for exploration*. Champaign, Illinois: Continuing Education Publishing Company, Inc., 102p.
- 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.
- Ellery, W.N., Ellery, K., McCarthy, T.S., Cairncross, B., and Oelofse, R. 1989. A peat fire in the Okavango delta, Botswana, and its importance as an ecosystem process. *African Journal of Ecology* 27: 7-21.
- Ellery, W.N., Ellery, K., Rogers, K.H., McCarthy, T.S., and Walker, B.H. 1990. Vegetation of channels of the northeastern Okavango delta, Botswana. *African Journal of Ecology* 28: 276-290.
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, Texas: Hemphill's Publishing Co., 182p.
- Folk, R.L., Andrews, P.B., and Lewis, D.W. 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 13: 937-968.
- McCarthy, T.S. and Metcalfe, J. 1990. Chemical sedimentation in the semi-arid environment of the Okavango delta, Botswana. *Chemical Geology* 89: 157-178.
- 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., Ellery, W.N., Rogers, K.H., Cairncross, B., and Ellery, K. 1986. The roles of sedimentation and plant growth in changing flow patterns in the Okavango delta, Botswana. *South Africa Journal of Science* 82: 588-591.
- McCarthy, T.S., McIver, J.R., Cairncross, B., Ellery, W.N., and Ellery, K. 1989. The inorganic chemistry of peat from the Maunachira Channel-swamp system, Okavango delta, Botswana. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53: 1077-1089.
- McCarthy, T.S., Rogers, K.H., Stanistreet, I.G., Ellery, N., Cairncross, B., Ellery, K., and Grobicki, T.S.A. 1988a. Features of channel margins in the Okavango delta. *Palaeoecology Africa* 19: 3-14.
- 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. 1988b. Incremental aggradation on the Okavango delta-fan, Botswana. *Geomorphology* 1: 267-278.
- Stanistreet, I.G. and McCarthy, T.S. 1993. The Okavango Fan and the classification of subaerial fan systems. *Sedimentary Geology* 85: 115-133.
- 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.