

発掘現場でみられた高速度流・高濃度流堆積物

増 田 富 士 雄

2 0 2 1 8 月

公益財団法人 京都府埋蔵文化財調査研究センター

発掘現場でみられた 高速度流・高濃度流堆積物

増田 富士雄

1. はじめに

発掘現場でみられる堆積物には、土石流や河川流などの一方向流によって堆積したものがある。一方向流堆積物の中で、特に高速度流や高濃度流の堆積物について、近年、堆積学や地層学の分野で新しい成果が報告されている。それは水路実験や自然観察や観測の進歩によってもたらされた。例えば、流砂の水路実験で、刻々と変化する砂床の形を記録し、それをコンピュータ上で重ねたり移動させたりすることで、堆積物内部にできる堆積構造を再現する技術などである。これにより今まで判らなかった高速流がつくりだす堆積構造が復元され、それが地層からも発見されるようになった（増田ほか 2019）。さらにそうした地層から未知の堆積構造がみいだされ、逆にそれがどのような水理条件で形成された構造か、実験で復元することが問われだしている。

ここでは発掘現場で観察された高速度流と高濃度流の堆積物を具体例で示す。これらの堆積物の識別は、堆積環境や堆積状況の理解を深めることに繋がる。

2. 一方向流の分類

“現場で堆積物を観察する”という立場から、一方向流を分類してみる。

土砂移動の様式は、粒子ひとつひとつが個別に移動する「個別（各個）移動」と、多数の粒子が一体となって移動する「集合（集団）移動」に区分できる。前者は流れの強さ（流速や場の状況など）が、後者は流れの中に含まれる粒子の数、すなわち粒子濃度（流れの密度）が区分の基準となる。

個別移動には、粒子が跳動・転動・滑動の様式で底面を移動する「掃流」と、流れに浮いて移動する「浮遊（浮流）」がある。掃流は、流れの中で内部波が上流に伝わるような弱い流れの「低流砂階」と、それが上流に伝わらない高速度の「高流砂階」の状態に区分される。その境界は流体的にはフルード数 = 1 で示される。

低流砂階では、流れが強まるにつれリップル（砂漣）からデューン（砂堆）へと砂床のうねり地形、ベッドフォームが大きくなる。高流砂階ではさらに、平滑床（プレーンベッド）、アンティデューン（反砂堆）、シュートアンドプール、サイクリックステップと変化

する（第1図B）。その形成領域は堆積物の粒径のほか、流速や水流深や底面状態などで決まる。ここではそれらをまとめた「流れの強さ」を流速で代表しておく。

集合移動はその駆動力から「重力流」とも呼ばれ、流れに含まれる粒子濃度の低いものから高いものに、「混濁流（乱泥流）」、「土砂流」、「土石流」に区分される。それぞれの境界は堆積物濃度で約15%と約40%である。また、土石流は含まれる粒子の大きさで、泥流、砂質土石流、（石礫型）土石流に分けられることもある。

3. 高速度流堆積物

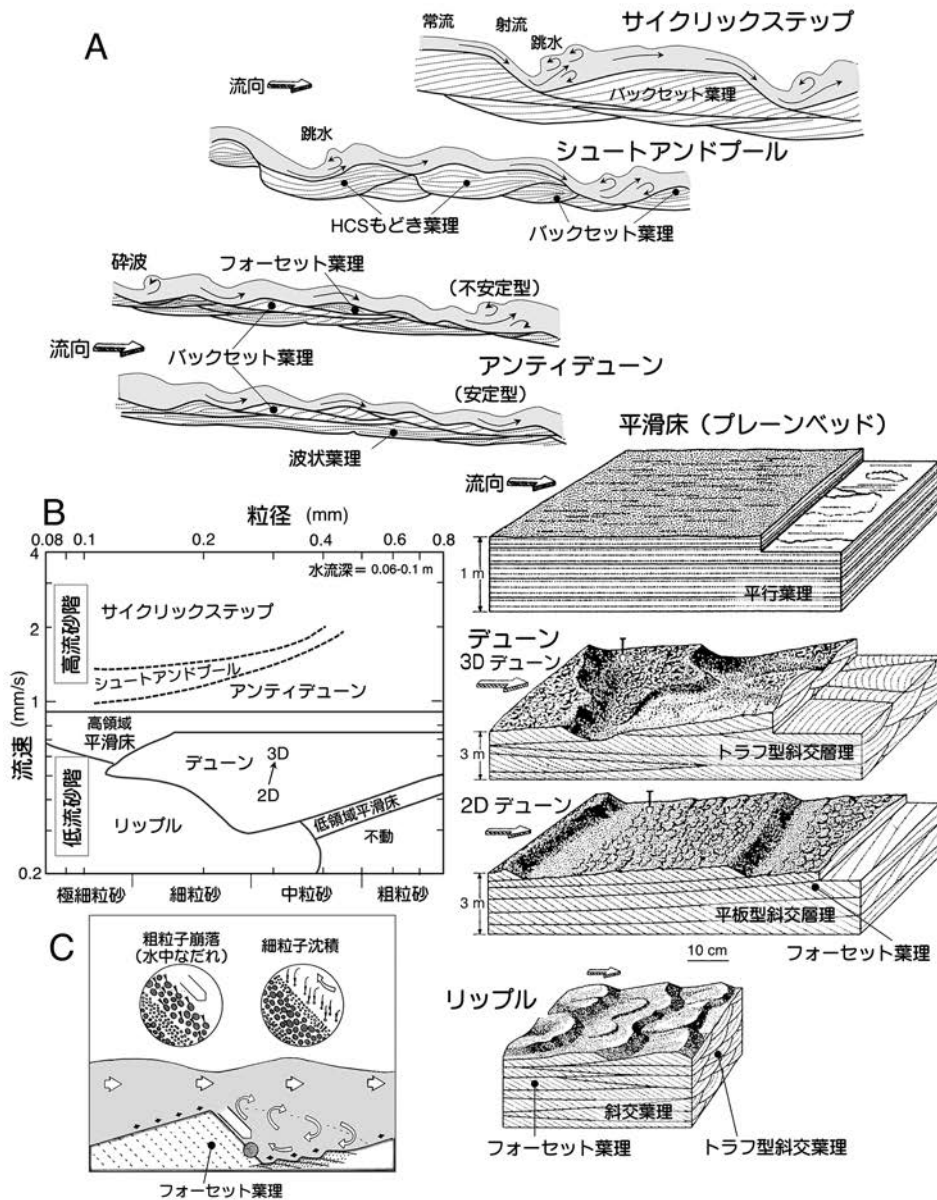
（1）堆積構造の特徴

個別移動の堆積物は、ベッドフォームが移動した痕跡である内部堆積構造の葉理や層理の形態で識別できる。例えば斜交葉理は、移動するリップルの前面の斜面（フォーセット面）で、水中なだれが間歇的に発生する脈動した流れの中での粒子分別によってつくられる（第1図C）。葉理や層理は粒度や物質の違いによって識別できるのである。

低流砂階の「リップル」では、流れに平行な断面ではフォーセット面の痕跡がフォーセット葉理に、流れに直交する断面ではトラフ型斜交葉理になる（第1図Aのリップル）。リップルよりやや強い流れからは、形の大きな「デューン」ができる。その領域では流れが強くなると、デューンは峰が直線型（2D）から、うねる型（3D）へと変化する。この変化は流速の増加だけでなく、反応時間が長くなることでも発生する。その結果、デューンでは平板型やトラフ型の斜交層理ができる（第1図Aのデューン）。

高速度流下で形成される高流砂階の「平滑床」は、平行葉理を形成する（第1図Aの平滑床）。流れがより強くなると、所々で水面が碎ける碎波が起こり、さらに強くなるとその碎波が上流に向かって進行し崩れるという「跳水」現象が発生する。跳水の痕跡が堆積物に記録されたものが上流傾斜のバックセット葉理である。低流砂階では斜交葉理の傾斜方向が下流側になるが、高流砂階ではそれが上流側になるのが最大の特徴である。また、高流砂階では流れが激しく変化し、安定することが少ないので、葉理セットがレンズ状や皿状になって側方に長く連続しない。バックセット葉理の形成過程は、Vellinga et al. (2018) が制作したアニメーションをみると理解しやすい。

「アンティデューン」のうち比較的安定した流れの下では、波状の平行葉理が多くできるのに対し、不安定な流れでは下流傾斜のフォーセット葉理もできる（第1図Aのアンティデューン）。「シュートアンドプール」では跳水が一定間隔で発生するので、下に凸の基底侵食面が跳び跳びにできる。全体に波状葉理が卓越し、葉理セットはレンズ状で、下部が凹みを埋積する下に凸の葉理、上部が上に凸の盛り上がった葉理からなる（第1図



A: ベッドフォームと堆積構造 B: ベッドフォームの形成領域

C: フォーセット葉理の形成過程

第1図 一方向流ベッドフォーム

Harms et al. (1975)、Lindholm (1987)、Cartigny et al. (2014)、
Ono and Plink-Björklund (2016) より作成

A のシュートアンドプール)。この葉理セットは、暴浪で海底にできるハンモック状斜交層理 (HCS) に似ることから、HCS もどき (増田ほか 1993) と名づけられている。この堆積物に伴ってセット高の小さなリップルが斜め上流に向かってバックセットしながら重なるクライミングリップル葉理が認められることも多い。「サイクリックステップ」の堆積物はバックセット葉理 (層理) が発達し、セット高やセット長が大きい不連続な葉理セットからなる (第 1 図 A のサイクリックステップ)。高速度流で形成される堆積構造はまだ断面での理解だけで (第 1 図 A)、その 3 次元の形態は不明である。

(2) 高流砂階堆積物の具体例

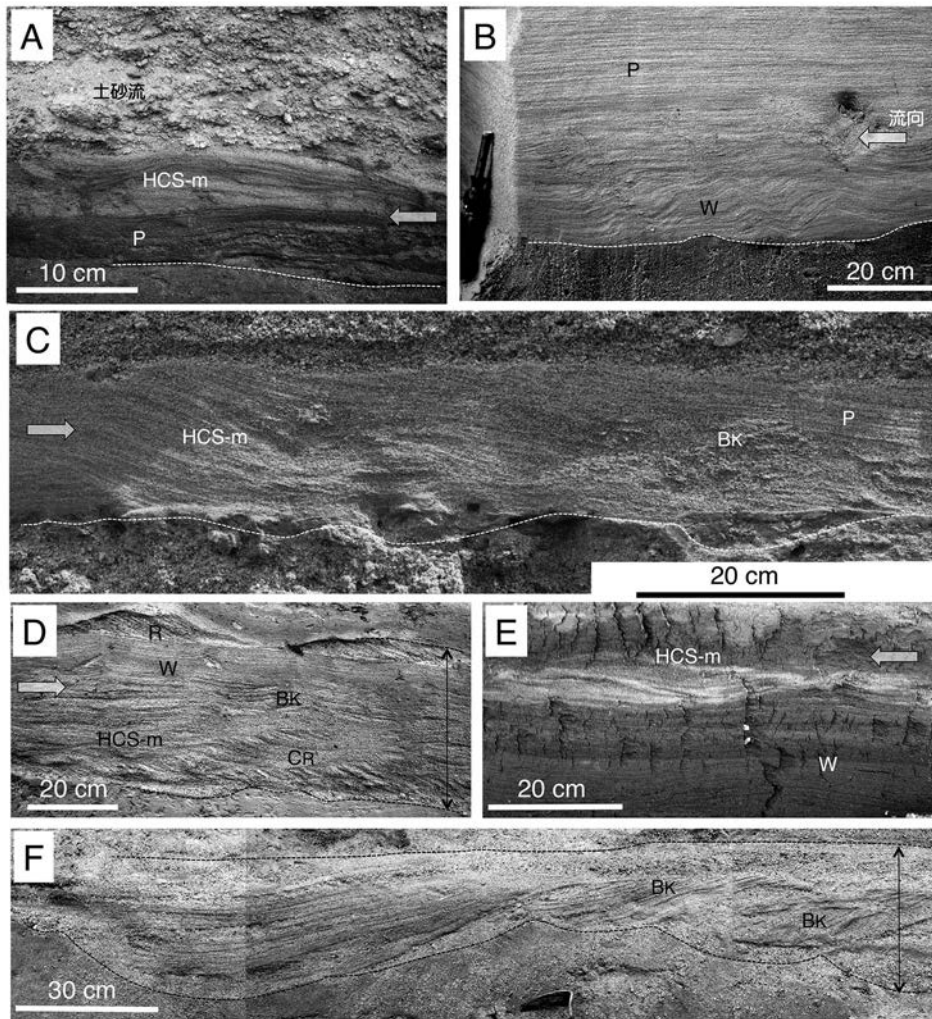
発掘現場で認められた高速度流堆積物の写真 (第 2 図) で、具体的に説明しよう。

第 2 図 A の中下部の細～中粒砂層は、水田の床土上に堆積した平滑床とアンティデューンの葉理を示す高速度流堆積物である。波状平行葉理と、侵食面をもった下に凸から上に凸の形で厚さが変化する HCS もどき葉理が特徴である。黒色の葉理からなる層は、洪水や津波などのイベント堆積物の先端部にみられることがある。この砂層は上位の土砂流堆積物の含礫粗粒砂層と連続し、先行して流れでた増水による堆積物である。これは神戸市深江北町遺跡の弥生時代後期の堆積物で、増田 (2014) の報告がある。

第 2 図 B は、耕作土の上位に重なる破堤堆積物の細～中粒砂層である。下部は高流砂階のシュートアンドプールのクライミング波状葉理砂層で、流速と供給量が大きかったことを示す。それに連続して重なる平滑床の平行葉理砂層への変化から、流水深が増し流れの強さと砂供給が継続していたことがわかる。これらは堤防が決壊して流れ出た高速度の氾濫流が内水側につくった舌状のロープの堆積物である (増田 2018)。京田辺市魚田遺跡の 1896 年の洪水による堆積物で、詳細は増田ほか (2009) にある。

第 2 図 C は、扇状地における洪水堆積物の細～中粒砂層である。内部に侵食面をもつ波状葉理や平行葉理から、この砂層は高流砂階のアンティデューン～シュートアンドプールの堆積物といえる。また、点在する上流側が深く非対称の侵食基底面は跳水の痕跡である。基部の不連続な薄い泥層と上位の砂層下部に含まれる泥礫は、逆級化を示す洪水氾濫層 (増田・伊勢屋 1985) の泥層が高速度流下での砂の堆積時に壊され、そこで取り込まれたものである。最上位の中～粗粒砂層までが一連の氾濫堆積物である。京都市北白川道分遺跡の縄文時代前期～中期の堆積物で、増田 (2019) に紹介がある。

第 2 図 D は、河道内の高水敷の堆積物で、泥層に挟まれた 1 枚の細～中粒砂層である。下位の泥層から砂層へは漸移する一連の氾濫層を示す。下部は低流砂階のクライミングリップル葉理、中部から上部は高流砂階のアンティデューン～平滑床の波状や平行葉理を示す。最上部には孤立した低流砂階のリップル葉理が見られる。この構造変化から、下部か



A：アンティデューンの砂層（弥生時代後期）神戸市深江北町遺跡、B：シュートアンドプール～平滑床の砂層（明治時代初期）京田辺市魚田遺跡、C：アンティデューン～シュートアンドプールの砂層（縄文時代前期～中期）京都市北白川追分遺跡、D：アンティデューン～平滑床の砂層（近世以降）宇治市宇治川太閤堤跡、E：アンティデューンの砂層（縄文時代晩期）北白川追分遺跡、F：シュートアンドプール～サイクリックステップの砂層（近世以降）相楽郡精華町乾谷遺跡

HCS-m：HCSもどき葉理，P：平行葉理，W：波状葉理，BK：バックセット葉理，
CR：クライミング葉理，R：リップル葉理。

第2図 高速度流堆積物

ら上部へ流れが次第に強まり、最上部では流れが減衰して砂の供給量が低下したことがわかる。これは宇治市宇治川太閤堤跡でみられた近世以降の堆積物である。

第2図Eは、扇状地の流路からやや離れた場所での細粒砂層である。これは典型的な

アンティデューンで（増田ほか 1993；Araya and Masuda 2001）、レンズ状のHCSもどき葉理がバックステップ構造を示す。上下の泥層は氾濫原の砂質泥層で、どちらも緩くうねる波状の平行葉理で、砂層を含めて上下一連の洪水氾濫に伴う高速度流堆積物である。これは京都市北白川追分遺跡の縄文時代晩期の堆積物である。

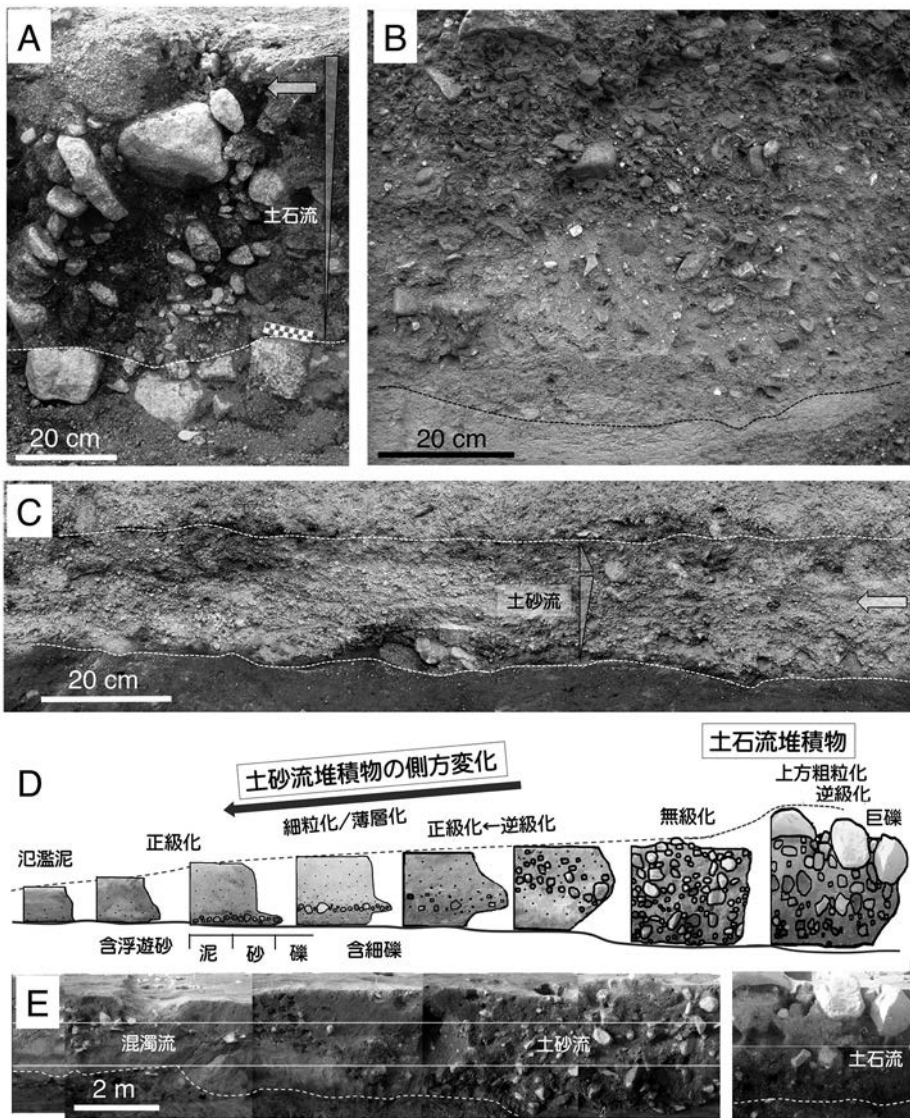
第2図Fは、氾濫原砂質泥層の上面を谷状に侵食して埋積した中～粗粒砂層である。古流向は左奥から右手前で、レンズ状のバックセット葉理のセットが上流側にバックステップ構造をとって重なる。これは高流砂階のシュートアンドプール～サイクリックステップの高速度流からの堆積物である。上位の細礫混じり粗粒砂層にはデューン移動の痕跡である右（下流側）に傾斜したフォーセット葉理がみられる。小さな谷間から流れてた洪水流本体に先行した流水深の小さい高速度流から堆積した砂層である。これは相楽郡精華町乾谷遺跡における近世以降の堆積物である。

4. 重力流堆積物

（1）堆積物の特徴

重力流堆積物については、陸上堆積物よりも海や湖での水中堆積物についての研究が進んでいる（例えば、増田 2004; Pickering and Hiscott 2016）。その中でもタービダイトと呼ばれる混濁流（乱泥流）堆積物はよく知られている。重力流は、流れの密度が低い方から、混濁流、高密度流、超高密度流、そして土石流へと分類される。また、河川の洪水流が海や湖に流入して発生するハイパーピクナル流がつくる堆積物は、下部の多重逆級化構造や、中部の粗粒層基底の侵食面や、上部の級化構造など、特異な構造を示す（齋藤ほか 2005）。一方、陸上での重力流堆積物については火山地帯での研究が先行している。そこでは超濃集流などと呼ばれる流れが、河川流と土石流（泥流）との中間的な流れとして区別されている。それはここでいう土砂流にあたる。

土石流堆積物では、淘汰が悪く、大きな礫が上部に集まり、全体で上方粗粒化を示し、高角度で上流傾斜した礫やそれに沿った剪断面が認められる（増田 2005、2010、2016、2020）。土砂流堆積物はやや細粒の砂礫層からなり、一部にフォーセット葉理や平行葉理がみられ、基部が逆級化構造を示し、層全体では上方粗粒化から上方細粒化に変化する（増田 2004、2016）。土石流や土砂流堆積物では急停止して堆積したことを示す水抜け構造も認められる。混濁流堆積物は正級化構造が特徴で、含礫砂層や砂層からなる。土石流は流域が花崗岩地域の場合、“まさ土”を主体とした砂質土石流堆積物となり、下部に多重逆級化構造が認められる（増田ほか 2005、増田 2019）。



A：土石流堆積物（縄文時代草創期） 神戸市雲井遺跡、B：土石流～土砂流堆積物（18世紀後半） 京都市聖護院川原町遺跡、C：土砂流堆積物（弥生時代後期） 神戸市深江北町遺跡、D・E：土石流から土砂流への側方分化を示す堆積物（縄文時代前期） 神戸市祇園遺跡

第3図 高濃度流堆積物

（2）重力流堆積物の具体例

発掘現場で認められた重力流堆積物の写真（第3図）で、具体的に説明しよう。

第3図Aは、花崗岩の亜角礫～亜円礫層からなる土石流堆積物の断面である。それは、上方粗粒化や上部の巨礫、上部ほど上流傾斜角が急になる礫の覆瓦状構造、泥質な基質、

堆積物全体の淘汰が悪いことなどが特徴である。これは神戸市雲井遺跡の縄文時代草創期の堆積物で、詳細は増田（2010）を参照されたい。

第3図Bは、中・古生界の堆積岩起源の角礫を含む扇状地性の土石流堆積物である。上方粗粒化がやや不明瞭であり、上部と下部の岩相対立が明瞭なことから、やや土砂流に近い土石流堆積物と考えられる。古流向は写真の手前から奥で、上流傾斜の礫の覆瓦状構造が認められる。これは京都市聖護院川原町遺跡の18世紀後半の堆積物で、この遺跡については富井・笹川（2010）の報告がある。

第3図Cは、河川氾濫泥層の上に堆積した砂礫層からなる土砂流堆積物である。淘汰の悪い砂礫層で、上方粗粒化から上方細粒化へと変化し、右（上流）傾斜の剪断面と礫配列が認められる。基底に残留した礫の覆瓦状構造も、右からの古流向を示す。これは神戸市深江北町遺跡の弥生時代後期の堆積物で、増田（2014）の報告がある。

第3図D・Eは、土石流から土砂流へさらに混濁流へと、流れの側方での分化を示す一連の堆積物で、連続した露頭で観察したものである。礫層～砂礫層～砂層への粒度変化とともに、級化構造も逆級化～逆級化・正級化～正級化の変化を示す。これは神戸市祇園遺跡の縄文時代前期の堆積物で、詳細については増田（2016）を参照されたい。

5. おわりに

発掘現場の堆積物から、これまであまり識別されてこなかった高速度流や高濃度流によって形成された堆積物について、具体例で示した。こうした堆積物が認識されるようになると、その堆積物だけでなくそれに伴う堆積物を含む堆積環境や堆積状況を知ることができ、さらにそれをもたらした洪水災害や土砂災害などについての知見を深めることができる。なぜなら、高速度流や高濃度流の堆積物は静穏時には形成されないものだからである。こうした堆積物の理解はまだ始まったばかりであり、今後、現場でその堆積物の多様性が認識できれば、堆積物研究に貢献できると思われる。

（ますだ・ふじを = 当調査研究センター理事、京都大学名誉教授）

参考文献

- 増田富士雄 2004 「堆積システムと堆積物」『堆積ショートコーステキスト』 日本堆積学会 571 p.
増田富士雄 2005 「陸上土石流・水中土石流堆積物から堆積過程を読み取る」『京都大学防災研究所報告』 一般共同研究 16G-09 14 p.
増田富士雄 2010 「地層と土石流堆積物」『雲井遺跡第28次発掘調査報告書』 神戸市教育委員会 pp. 181-187

- 増田富士雄 2014 「神戸市東灘区深江北町遺跡第 12 次調査地での自然堆積層」『深江北町遺跡第 12・14 次調査埋蔵文化財発掘調査報告書』 神戸市教育委員会 pp. 171-181
- 増田富士雄 2016 「神戸市兵庫区祇園遺跡で観察された土石流と土砂流堆積物」『祇園遺跡第 17・18 次発掘調査報告書』 神戸市教育委員会 pp. 94-101
- 増田富士雄 2018 「京都府南部、城陽市下水主遺跡の発掘調査で見いだされた弥生時代の氾濫流路とその埋積物」『京都府遺跡調査報告書』第 173 冊 (公財) 京都府埋蔵文化財調査研究センター pp. 247-255
- 増田富士雄 (編著) 2019 「ダイナミック地層学: 大阪平野・神戸 六甲山麓・京都盆地の沖積層の解析」 近未来社
- 増田富士雄 2020 「神戸市灘区郡家遺跡で観察された土石流堆積物」『郡家遺跡第 95 次発掘調査報告書』 神戸市教育委員会 p. 40-45
- 増田富士雄・服部 昇・石田志朗 2019 「河川堆積物にみられる高流砂階の堆積構造: 鮮新・更新統古琵琶湖層群堅田層」『堆積学研究』第 77 巻 2 号 日本堆積学会 pp. 81-95
- 増田富士雄・伊勢屋ふじこ 1985 「“逆グレーディング構造”: 自然堤防帯における氾濫原洪水堆積物の示相堆積構造」『堆積学研究会報』22/23 号 1985, pp. 108-116
- 増田富士雄・伊藤有加・坂本隆彦・佐藤智之 2009 「京都府京田辺市魚田遺跡付近の地形と洪水破堤堆積物」『京都府遺跡調査報告集』第 133 冊 (財) 京都府埋蔵文化財調査研究センター pp. 99-104
- 増田富士雄・田村 亨・富井 眞 2005 「砂質土石流堆積物の粒度特性 - 京都大学理学部校内の弥生時代の砂層 (黄色砂)」『京都大学構内遺跡調査研究年報』 京都大学埋蔵文化財研究センター pp. 263-276
- 増田富士雄・横川美和・坂本隆彦 1993 「HCS MIMICS: 下総層群の潮汐堆積物と大阪層群の洪水氾濫堆積物」『堆積学研究会報』39 号 pp. 27-34
- 齋藤 有・田村 亨・増田富士雄 2005 「タービダイト・パラダイムの革新的要素としてのハイパーピクナル流とその堆積物の特徴」『地学雑誌』第 114 巻 5 号 pp. 687-704
- 富井 眞・笹川尚紀 2010 「京都大学病院構内 AG16 区の発掘調査」『京都大学構内遺跡調査研究年報』 京都大学埋蔵文化財研究センター pp. 5-54
- Araya, T. and Masuda, F., 2001, Sedimentary structures of antidunes: An overview. *Journal Sedimentary Society Japan*, 53, pp. 1-15.
- Cartigny, M.J.B., Ventra, D., Postma, G. and Van Den Berg, J.H., 2014, Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions: New insights from flume experiments. *Sedimentology*, 61, pp. 712-748.
- Harms, J.C., Southard, J.B., Spearing, D.R. and Walker, R.G., 1975, Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences. *Short Course SEPM*, 2, 161p.

- Lindholm, R.C., 1987, A Practical Approach to Sedimentology. Allen & Unwin, 276p.
- Ono, K. and Plink-Björklund, P., 2018, Froude upercritical flow bedforms in deepwater slope channels? Field examples in conglomerates, sandstones and fine-grained deposits. *Sedimentology*, 65, pp. 639-669.
- Pickering, K.T. and Hiscott, R.N. 2016, Deep Marine Systems: Processes, Deposits, Environments, Tectonics and Sedimentation. American Geophysical Union, Wiley, 657p.
- Vellinga, A.J., Cartigny, M., J.B., Eggenhuisen, J.T. and Hansen, E.W., 2018, Morphodynamics and depositional signature of low- aggradation cyclic steps: New insights from a depth-resolved numerical model. *Sedimentology*, 65, pp. 540-560. (<https://www.youtube.com/watch?v=t7kfmFiT5pg>)