

## ハンモック状斜交層理の形態に関する一考察

岡崎浩子

深田地質研究所

### Preliminary analysis of geometry of hummocky cross-stratification

OKAZAKI Hiroko

Fukada Geological Institute

要旨：ハンモック状斜交層理（Hummocky Cross-Stratification; HCS）は、浅海堆積物に広く見られる緩やかなドーム状の層理をもつ堆積構造で、ストームに伴う波浪や複合流によって形成される指標堆積構造と考えられている。しかしながら波浪が関係しない堆積環境からも HCS に似た構造の存在が報告され、その成因も振動流・複合流・一方向流が複雑に関与していることが明らかになってきている。したがって、特定の堆積環境や堆積過程の指標とは見なせないという意見がある。HCS の内部構造は対称性に基づき等方性（isotropic）と異方性（anisotropic）に大きく分類される。また、そのスケールは波浪条件に依存するとも言われる。HCS についてこれまで数多くの報告があるが、その形態に関する明確な認定基準があるとは言えない。本報告は、複合成因構造で多様な形態をもつ HCS の認定の鍵となる要素を探るため、その概要と試行的な考察を示すものである。

キーワード：ハンモック状斜交層理, 形態

Abstract: Hummocky cross-stratification (HCS) is a gently undulating sedimentary structure commonly found in shallow-marine deposits and traditionally interpreted as the result of storm-related oscillatory or combined flows. However, HCS has also been observed in fluvial, deltaic, fan-deltaic, and even pyroclastic deposits, indicating a variety of formative processes. Based on internal symmetry, it can be classified into isotropic and anisotropic types. The scale and geometry of HCS are affected by wave orbital motion, flow strength, and grain size. This report conducts a preliminary analysis to explore the key factors involved in the formation of HCS with various forms and the elements that contribute to its combined origin.

Keywords: Hummocky cross-stratification, geometry

### 1. はじめに

ハンモック状斜交層理（Hummocky cross-stratification: HCS）は浅海成の地層の中によく見られる堆積構造の一つで、文字通り緩やかに上に凸のドーム状（ハンモック）の形がみられるのが特徴である。暴風雨イベントに関連するプロセスによって堆積した構造と言われ、下部外浜から

内側陸棚環境のストーム堆積物（テンペスタイト）の指標構造と位置づけられてきた（Myrow and Southard, 1996 など）。この構造は 1970 年代以降に報告され始め、Harms *et al.* (1975) によって“Hummocky Cross-Stratification”と命名された。Cheel and Leckie (1993) のレビューによってその概念が広く浸透し、以後、数多くの研究が進められてきた。また、増田 (2001) ではそれ

らの問題提起を含んだ総括的レビューが行われている。堆積環境としては上記の環境だけではなく、河川 (Rust and Gibling, 1990 など), 河川デルタ (Dott and Bourgeois, 1982; Tinterri, 2011 など), ファンデルタ (Myrow *et al.*, 2008; Lawb *et al.*, 2008 など), 火砕堆積物 (Branney and Kokelaar, 2002) などの様々な環境の現世堆積物や地層からの報告がある。その成因も複数あり, 波浪による振動流や一方向と振動流が合わさった複合流, 一方向流のみから形成されると考えられている (Arnott and Southard, 1990 ; 増田, 2001 など)。また, 複数の成因に伴う形態の多様性が報告されている (Cheel and Leckie, 1993 など)。本報告はその形態の多様性について概観するとともに, その認定の鍵となる要素を探るため, 試行的な考察をする。

## 2. HCS の形態

ハンモック状斜交層理 (以下, HCS とする) は, 緩い起伏の 3 次元形態のベッドフォーム (ハンモック状ベッドフォーム) が累重あるいは移動して形成されると考えられている。一般的に, 波長数十 cm から数 m, 波高数 cm から数十 cm の中規模から大規模の斜交層理で, 緩やかな傾斜を持つ層理 (普通  $10^\circ$  最大  $15^\circ$  以下) は, ハンモック (円丘) 部とスウェール (くぼ地) 部によって表現される 3 次元形態を示す。粒度は通常, 粗粒シルトから細粒砂よりなる (図 1) (Harms *et al.*, 1975 ; Dott and Bourgeois, 1982)。HCS の形成中に起きる侵食・堆積過程でできる層理面・葉理面は第一次面, 第二次面, 第三次面と呼ばれる (Cheel and Leckie, 1993) (図 1B, 3A)。第一次面は HCS で特徴づけられる地層の岩相境界を示し, HCS 層の基底および頂部と見なすことがで

きる。第二次面は侵食面でハンモックとスウェールの形態を示す。このうねった侵食面の上に水中に浮遊して分布する堆積粒子が底面をドレイプ状にまたは平坦化するように沈積を繰り返し第三次面が形成される。第三次面の層理は級化構造を示す場合がある (Hunter and Clifton, 1982)。また, その上部は再びうねった第二次面で侵食される。HCS の形態には成因を反映した区分が行われている (Cheel and Leckie, 1993)。内部層理の対称と非対称の形態で等方性 (isotropic) と異方性 (anisotropic) に区別し, さらに等方性のものは侵食・被覆型 (scour and drape form) と上方付加型 (vertical accretionary form) に細分されている (図 2)。

### 2.1 等方性 HCS (Isotropic HCS)

等方性 HCS は侵食被覆型・上方付加型に分けられるが, 侵食被覆型は HCS で最も多くみられる。第二次面の侵食面を第三次面の葉理がドレイプして覆っていき, 内部の葉理はスウェール部で厚く, ハンモック部で薄くなる (図 2, 3A)。等方性上方付加型は, 内部の葉理がスウェール部よりもハンモック部で厚くなり, 全体に付加成長した形態になる (図 2, 3B,D)。水路実験からは振動流のみや振動流が支配的な複合流でこのようなベッドフォームが形成される (Arnott and Southard, 1990; Dumas *et al.*, 2005)。高周期で大きい軌道速度をもつ振動流により大きな丸い 3 次元リップルが形成されている。これらの流れの領域は平滑床の領域より水理条件が弱い領域で, また, 大きい加積速度 (aggradation rate) における平滑床への遷移段階の堆積構造であるとされている (Dumas and Arnott, 2006)。また, ハンモックの三次元ドーム形状は, 多方向の流れと関連性が高いという報告もある (Ribberink and Al-Salem,

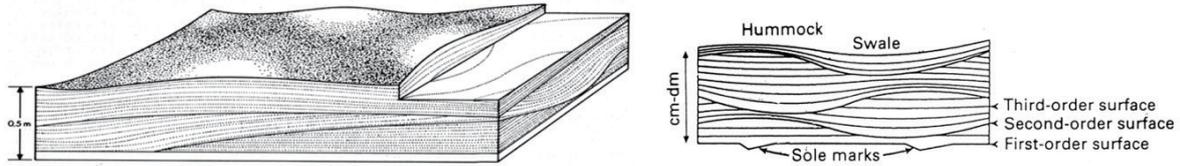


図1 ハンモック状斜交層理の (A) 3次元構造(Harms *et al.*, 1975). (B) 第一次面～第三次面 (Cheel and Leckie, 1993) .

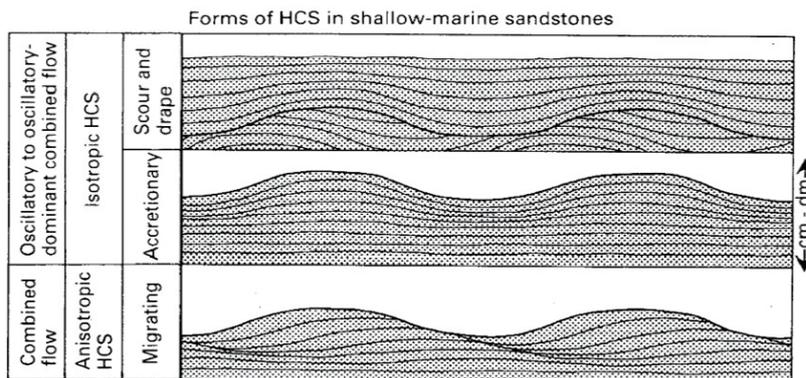


図2 HCSの形態分類 (Cheel and Leckie, 1993) .

1994; Quin, 2011). 現在の海洋底では陸棚上でハンモック状ベッドフォームがしばしば観測されている (Green *et al.*, 1995, Amos *et al.*, 1996 ; 斉藤, 1989). 振動流が卓越した複合流下で形成され, 一方向流成分としてはストーム時に発生する混濁流や地衡流が推定されている (Ramsay *et al.*, 1996; Li and Amos, 1999). より浅い浅海域でも見出されている. Greenwood and Sherman (1986) は, カナダのヒューロン湖の水深 2m 以浅のいわゆる砕破帯で, 沿岸流が形成に関与していると指摘している. Yang *et al.* (2006) は韓国南西部の干潟海岸で冬季の暴浪により形成された HCS を報告している.

ハンモック部が第二次面により切断されたような形態はスウェール状斜交層理 (Swaley cross-stratification ; SCS) と呼ばれる (Leckie and Walker, 1982) (図 3E,F) . 一般にスウェール部がハンモック部の水平または低角の平行葉理を削って独立に存在したり, それらが入れ子状に配

列している. HCS はストーム時の波浪限界深度 (wave base) の近くで, ストーム時に十分な加積速度をもった場所で形成されるが, SCS は静穏時とストーム時の波浪限界深度の間で一方向流の強さがより強く加積速度が小さいために形成すると推定されている (Dumas and Arnott, 2006). ちなみに HCS や SCS は一方向流でできるトラフ型斜交層理と異なり, 3次元形態を反映してどの方向の断面でも同様の形態をとる. SCS によく似たトラフ型斜交層理の流れの直交断面は下に凸の基底面に平行した同心円状の葉理を持つが, SCS の基底面はより広くて浅く, 内部葉理は上位に向かって次第に水平になり, スウェールの端では薄くなって消滅するという違いがある.

## 2.2 異方性 HCS (Anisotropic HCS)

異方性移動型の HCS は, 低角の斜交葉理のセット (厚さは 5cm 以下) が浅いスウェール部を埋めてある一方向に優勢的に移動してで

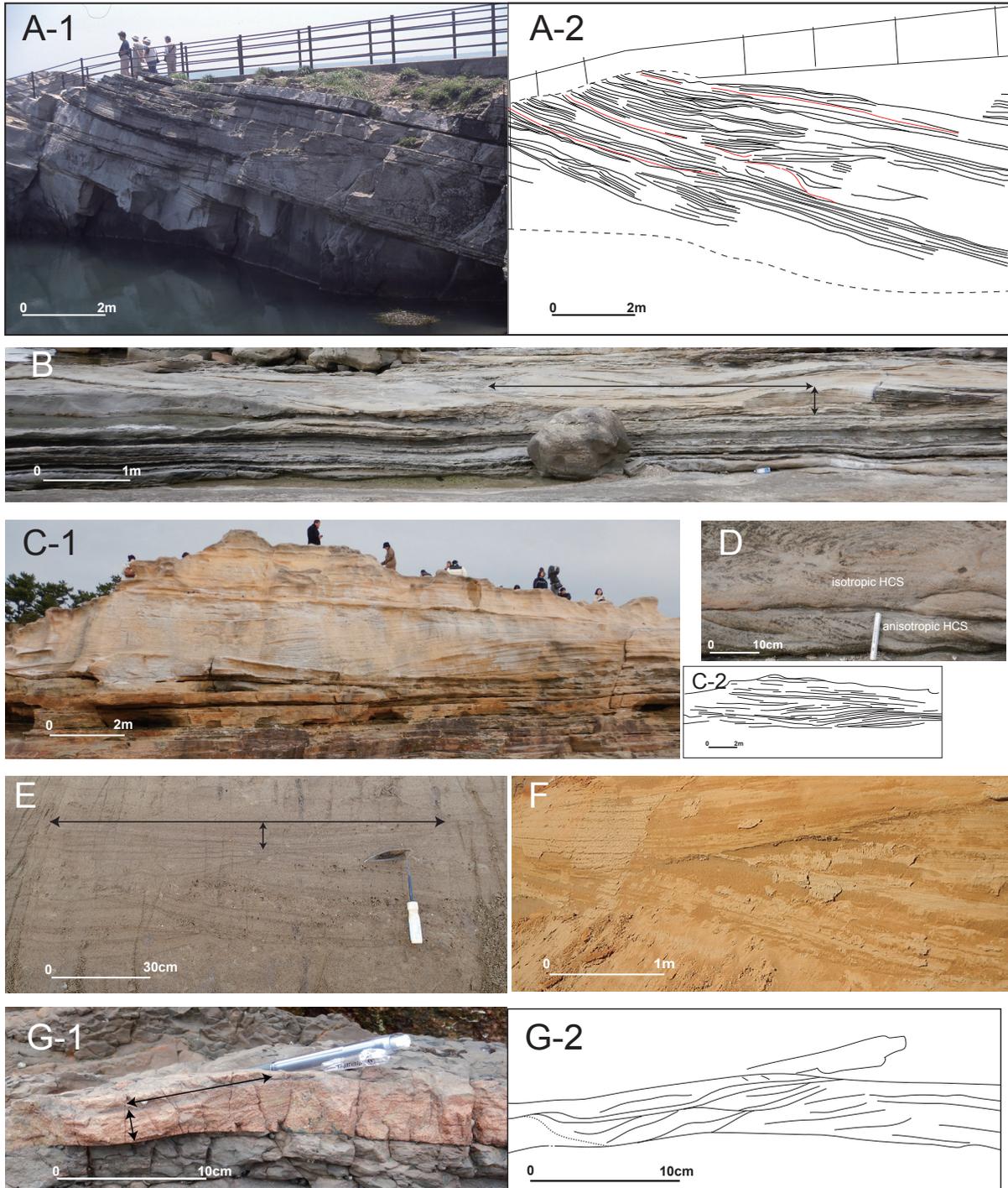


図3 (A-1) 白亜系銚子層群犬吠埼層. 千葉県銚子市. 等方性HCS. いくつかの第一次面が融合し、厚い砂岩層を形成している。(A-2) トレース図. 赤線は第一次面。(B) 等方性HCS. 下部中新統田辺層群白浜層. 和歌山県白浜町. 両矢印は波長と波高(層厚)を示す。(C) 異方性HCS. シグモイダル層理が見られる. 下部中新統田辺層群. 和歌山県白浜町。(D) 異方性HCS. 上部に等方性HCSがのる. 下部中新統田辺層群. 和歌山県白浜町。(E) SCS. 更新統下総層群香取層. 両矢印は波長と波高(層厚)を示す. 千葉県銚子市。(F) SCS. 更新統下総層群香取層. 千葉県銚子市。(G) 白亜系姫浦層群樋の島層. タービダイト砂岩. 熊本県宇土市.

きた形態を示す (Migrating form) (図 3C,D). 実験では等方性 HCS の安定領域に一方向流が加わると、河床形態は速やかに下流側に非対称性を発達させ、一方向流れの方向へ移動する。これは振動流の周期が長いほど一方向成分の影響は速く出て、また流れの下流側の傾斜角は一方向流れの速度の増加とともに大きくなるが、安息角よりは小さいとされる (Arnott and Southard, 1990; Dumas *et al.*, 2005 ; 横川ほか, 2011 ; Perillo *et al.*, 2014). 最近の Wu *et al.* (2024) による振動流と一方向流が直交する複合流実験では複合流リップルの下方にハンモック状ベッドフォームと考えられる隆起が発生することが明らかにされた。

ちなみに HCS と同様に複合流でできる複合流リップルは、一方向流が卓越してくると峰が丸くなるのが実験で明らかになっている。内部構造は、シグモイダル (sigmoidal) 葉理や、上下からのフォーセット葉理が重なって接合しているように見える接合構造 (joined structure) などがみられる (Yokokawa, 1995)。

地層の中でもこのような異方性 HCS が報告されている (Midtgaard, 1996; Lamb *et al.*, 2008; Mulder *et al.*, 2009; Tinterri, 2011; Jelby *et al.*, 2020). 形態は内部葉理が一方向に優勢的に傾く。シグモイダルな斜交層理が見られることもある。葉理の傾斜角度は  $10^\circ$  程度からやや急なものまでであるが安息角よりは緩やかである。葉理セットは下流方向に厚くなったり薄くなったりし、また、低角に第二次面で侵食されたり、薄い泥層を挟む場合がある。

### 3. HCS の垂直変化

HCS を含む砂岩層には堆積相シーケンスと呼ばれる一連の堆積相変化が認められる (Dott

and Bourgeois, 1982). これは、基底面は侵食面で底痕 (ソールマーク) があり、基底面上には粗粒な粒子 (ラグ) が存在し、その上位にハンモック部さらに上位に平行葉理部、リップル葉理部、そして最上部に生痕化石が多く見られる泥層が重なる。このような変化はストームの終息期から後期における流れの特徴をよく記録している (Cheel and Leckie, 1993). すなわち、基底面にみられる底痕や侵食痕やラグ堆積物などは、強力な冲向きの流れが存在したことを示唆している (Myrow, 1992; Browne, 1994). HCS は暴浪に伴う複合流が強くなって形成され、その上のリップルは、暴浪衰退時の振動流によるものである。局所的に堆積した均質な泥岩層は、暴風衰退期の最終段階の波による再懸濁やハイパーピクナル流からの凝集泥の急速な沈降に起因するものである。

HCS の層相変化には粒径によるものがよく知られている。HCS は一般的にシルトから細粒砂によくみられるが、ファンデルタや三角州の陸近傍においては砂礫層によるものも認められている (Tinterri, 2011 ; Jelby *et al.*, 2020). そこでは通常、強い異方性を示す。また、しばしば HCS 砂岩層の側方で波長数 10cm から数 m の粗粒なリップルがみられる。これは Leckie (1988) によって粗粒リップル (coarse-grained ripples ; CGR) と名づけられ HCS と同様に一連のストームによって形成されたと考えられている (Cheel and Leckie, 1991). 水路実験においても同じ水理条件下で極細粒砂では HCS, 粗粒砂でデューンが作られている (Cumming *et al.*, 2009) .

図 4 で示しているのは、茨城県の中部更新統下総層群の外浜堆積物である。HCS や CGR がみられ、そこでは、比較的急激な垂直・側方

への層相変化をみることができる。鉛直方向の粒度変化は侵食面をかいして下部の極細粒砂から最上部の細礫を含む粗粒砂へと変化する。堆積構造は、最下部の複合流リップルから平行層理、等方性 HCS から徐々に粒径が粗くなり異方性 HCS へと変化する、最上部はやや変形をしているが粗粒リップルになり、泥層に覆われる (岡崎, 2003)。

Li and Amos (1999) の大陸棚における観測によるとストームが発達するにつれて、リップルは一般的に平滑床のベッドフォームに変化する。ストームのピークに続いて、懸濁物からの堆積物の落下と長波振動による海底の盛り上がりによって、3次元のマウンド状の大型リップルが形成される。Leckie (1988) は

HCS から CGR への漸移部ではしばしば両者の混合的な堆積構造が見られ、例えばドーム状の層理 (ハンモック) の上に粗粒なトラフ型斜交層理が形成される場合があるとしている。これは波浪の振動流に重なった強い一方向流 (storm surge や戻り流れ) によって生じたもので、CGR 形成への移行過程を示す。したがって図 4 では複合流下で下位では上方に向かって振動流が強くなりリップルから平行層理、等方性 HCS が形成された。また、それ以後一方向流がより強くなると同時に粗粒になり異方性 HCS が、さらにより粗粒物質が増えることにより CGR が形成されたと考えられる。暴風による堆積イベントのエネルギーが上方へ向かって増大したことを示唆する。



図 4 テンペスタイト. 更新統下総層群清川層. 本文参照.

表 1 HCS・SCS の波長と波高（層厚）

地層名	波長(cm)	波高(cm)	波高/波長比	分類型	堆積環境*	備考
白亜系姫浦層群	19.5	2.1	0.107	異方性HSC	タービダイト	本報告図3G：波長は両矢印の2倍
中新統田辺層群	363.7	32.8	0.090	等方性HSC	内側陸棚	本報告図3B
更新統下総層群	120.2	8.5	0.070	SCS	外浜	本報告図3E
現世堆積物	30-60		0.0833-0.125		碎波帯	**Greenwood & Sherman(1986)

\*堆積環境は、白亜系姫浦層群（樋の島層）；小松ほか（2024）（HCSの認定は著者による3次元的検証が必要）、中新統田辺層群（白浜層）；船山・近藤(1999)、更新統下総層群（香取層）；Okazaki *et al.*(2022)による。 \*\*現世堆積物を比較のために加えた。

このようにテンペスタイトの中で堆積構造は、一方向流や振動流や粒径の変化を明瞭に示している。

#### 4. 考察—ハンモック状斜交層理の形態—

HCS が示す丸みを帯びた緩やかな傾斜層理はこれらを作ったベッドフォームの大きさ・形態に関係していると考えられる。本報告では試行的に、波高/波長比を取り上げてみる。表1はそれぞれ大きさや内部層理型や堆積環境の違うHCSやSCSの波長と波高（厚さ）である（図3の両矢印で示した）。HCSの第二次面のハンモックやスウェールを示す侵食面はベッドフォームの形態を直接は反映しないという指摘（増田，2001）もあり、ここではなるべく最上位の形態を計測している。Wu *et al.* (2024) が、既報のいくつかの水路実験やフィールドデータから求めた波高/波長比は0.04-0.15であった。本報告で得られた結果もWu *et al.* (2024) の範囲内であった。このことは実験や現世堆積物、地層などでの異なる形成条件や大きさに関わらずこのような形態がHCSと認定されていることを示している。

現世堆積物の観測ではHCSを形成する大きく3次元的なリップルは、底面付近の振動流の軌道長径が大きくなるにつれてサイズが大きくなるため、HCSの大きさ（波長）は波の大きさに関係していると考えられる（Li and Amos, 1999; Yang *et al.*, 2006 など）。また、比較的小型のHCSは現

世や地層の湖沼堆積物や、地層のタービダイト層中から見つかる（図3G）（Prave and Duke, 1990; Mulder *et al.*, 2009 など）。地層のタービダイト層中のHCSは混濁流で形成されていると考えられる。また一方向流だけで形成されるものとして、河川堆積物（Rust and Gibling, 1990 ; Brennand, 1994 ; 増田, 2001）があり、これらは3次元のアンティデューンであると考えられている。従ってHCSやSCSの形態を規定するものは、単なる波浪や流れの種類だけではなくその他の要因も強く働いている可能性がある。また、粒径は形態の大きな規制要因となっている。

増田（2001）では、HCSを営力または大きさに関係なく単に堆積構造の名称として広く使用すべきである、とされている。この報告の発端は、その場合、多様性のあるHCSとそれに似た他の堆積構造（複合流リップルやトラフ型斜交層理、アンティデューン構造など）を区別する記載上の基準要素はあるのだろうか、というものである。本報告は予察であり、今後はより多くの事例収集を行い、複合成因で多様な形態をもつHCSの認定要素とその形成要因を探っていきたい。

#### 文献

Amos, C.L., Li, M.Z. and Choung, K.S. (1996): Storm-generated, hummocky stratification on the outer-Scotian Shelf. *Geo- Marine. Letters.*, **16**, 85–94.

- Arnott, R.W. and Southard, J.B. (1990): Exploratory flow-duct experiments on combined flow bed configurations and some implications for interpreting storm-event stratification. *Journal Sedimentary Petrology*, **60**, 211-219.
- Branney M.J. and Kokelaar P. (2002): Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society Memoir*, **27**.
- Brennand T.A.(1994):Macroforms, large bedforms and rhythmic sedimentary sequences in subglacial esker, south-central Ontario: implication for esker genesis and meltwater regime. *Sedimentary Geology*, **91**, 9-55.
- Cheel, R.J. and Leckie, D.A. (1993): Hummocky cross-stratification. *Sedimentary Review.*, **1**, 103-122.
- Cummings, D.I., Dumas S. and Dalrymple R.W. (2009): Fine-grained versus coarse grained wave ripples generated experimentally under large-scale oscillatory flow. *Journal of Sedimentary Research*, **79**, 83-93.
- Dott, R.H. and Bourgeois, J. (1982): Hummocky stratification: significance of its variable bedding sequences. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **93**, 663-680.
- Dumas, S., Arnott, R.C.W. and Southard, J.B. (2005): Experiments on oscillatory flow and combined flow bed forms: implications for interpreting parts of the shallow-marine sedimentary record. *Journal of Sedimentary Research*, **75**, 501-513.
- Dumas, S. and Arnott R.C.W. (2006): Origin of hummocky and swaley cross-stratification. The controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. *Geology*, **34**, 1073-1076.
- 船山展孝・近藤康生 (1999) : 紀伊半島南西部, 中部中新統田辺層群白浜層の堆積相と底生動物群集 : 浅海化に伴う堆積環境の細分化と群集の多様化. 日本地質学会第 106 年学術大会講演要旨. P-52.
- Green, M.O., Vincent, C. E., McCave, I. N., Dickson, R.R., Rees, J.M. and Pearson, N.D. (1995): Storm sediment transport: observations from the British North Sea Shelf. *Continental Shelf Res.*, **15**, 889-912.
- Greenwood, B. and Sherman, D.J. (1986): Hummocky cross-stratification in the surf zone: flow parameters and bedding genesis. *Sedimentology*, **33**, 33-45
- 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. *Soc. Econ. Paleont. Miner. Short Course*, **2**, 161p.
- Hunter, R. E. and Clifton, H. E. (1982): Cyclic deposits and hummocky cross-stratification of probably storm origin in Upper Cretaceous rocks of the Cape Sebastian area, southwestern Oregon. *Journal of Sedimentary Petrology*, **52**, 127-143.
- Jelby, M.E., Grundvåg, SA., Helland-Hansen, W., Olaussen, S. and Stemmerik, L. (2020): Tempestite facies variability and storm-depositional processes across a wide ramp: Towards a polygenetic model for hummocky cross- stratification. *Sedimentology*, **67**, 742–781.
- 小松俊文・田中源吾・松田博貴 (2024) : 天草

- 地域の上部白亜系・古第三系と現世干潟堆積物. 日本堆積学会 2024 年熊本大会野外巡検案内書. 16p.
- Lamb, M., Myrow, P., Lukens, C., Houck, K. and Strauss, J. (2008): Deposits from wave-influenced turbidity currents: Pennsylvanian Minturn Formation, Colorado, USA. *Journal of Sedimentary Research*, **78**, 480–498.
- Leckie, D.A. (1988): Wave formed, coarse-grained ripples and their relationship to hummocky cross-stratification. *Journal of Sedimentary Petrology*, **58**, 607-622.
- Leckie, D.A. and Walker, R.G. (1982): Storm- and tidal-dominated shorelines, in Cretaceous Moosebar-Lower Gates interval - outcrop equivalents of Deep Basin gas trap in Western Canada. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, **66**, 138-157.
- Li, M.Z. and Amos, C. L. (1999): Sheet flow and large wave ripples under combined waves and currents: field observations, model predictions and effects on boundary layer dynamics. *Continental Shelf Res.*, **19**, 637-663.
- 増田富士雄 (2001) : 堆積学入門シリーズ (1) 波浪堆積構造 . 日本堆積学研究会
- Midtgaard, H.H. (1996) Inner-shelf to lower-shoreface hummocky sandstone bodies with evidence for geostrophic influenced combined flow, Lower Cretaceous, West Greenland. *Journal of Sedimentary Research*, **66**, 343–353.
- Myrow, P.M.(1992): Bypass-zone tempestite facies model and proximity trend for an ancient muddy shoreline and shelf. *Journal of Sedimentary Petrology*, **62**, 99-115.
- Myrow, P.M. and Southard, J.B. (1996): Tempestite deposition. *Journal of Sedimentary Research*, **66**, 875-887.
- 岡崎浩子 (2003): 茨城県行方台地の更新統下総層群にみられる外浜堆積物. 堆積学研究, **56**, 3-4
- Okazaki H., M. Nara, H. Nakazato, A. Furusawa, K. Ito, T. Tamura (2022): Coastal progradation associated with sea-level oscillations in the later phase of the Last Interglacial period, central Japan. *Quaternary Science Reviews*, **285**, 107507.
- Quin, J.G. (2011): Is most hummocky cross-stratification formed by large-scale ripples? *Sedimentology*, **58**, 1414–1433
- Ramsay, P.J. (1994): Marine geology of the Sodwana Bay shelf, southeast Africa. *Marine Geology*, **120**, 225-247.
- Ribberink, J.S. and Al-Salem, A. (1994): Sediment transport in oscillation boundary layers in cases of rippled beds and sheet flow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **99**, 12707–12727.
- Rust, B.R. and Gibling, D.A. (1990): Three-dimensional antidunes as HCS mimics in a fluvial sandstone: the Pennsylvanian South Bar Formation near Sydney, Nova Scotia. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60**, 540-548.
- 斎藤文紀 (1989): 陸棚堆積物の区分と暴風型陸棚における堆積相 . 地学雑誌 , **98**, 350-365.
- Wu, X., Carling, P. A., and Parsons, D.(2024): Hummocky sedimentary structures within rippled beds due to combined orbital waves and transverse currents. *Sedimentology*, **71**,

573–589

- Tinterri, R. (2011): Combined flow sedimentary structures and the genetic link between sigmoidal and hummocky cross-stratification. *GeoActa*, **10**, 1–43.
- Tinterri, R. and Muzzi Magalhaes P., 2011. Synsedimentary structural control on foredeep turbidites: An example from Marnoso-arenacea Formation, Northern Apennines, Italy. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 629-657.
- Yang, B., Dalrymple, R.W. and Chun, S.(2006): The significance of hummocky cross-stratification (HCS) wavelengths: evidence from an open-coast tidal flat, south Korea. *Journal of Sedimentary Research*, **76**, 2-8.
- Yokokawa M. (1995): Combined flow ripples: genetic experiments and application for geologic records. *Kyushu University, Faculty of Science, Memoirs, Series D, Earth and Planetary Sciences*, **29**, 1-38.