イトマキヒトデの腕数に関する研究：
５腕以外のイトマキヒトデが生まれる要因とは？

大　野　雄　登＊1・三　田　雅　敏＊2

生命科学分野

（2015 年 5 月 22 日受理）

OHNO, Y., and MITA, M.: What is a factor to determine the arm number of starfish *Asterina pectinifera*? Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 67: 25-31. (2015) ISSN 1880-4330

Abstract

In the starfish (*Asterina pectinifera*[1]), the number of arms is not always five. They sometimes have four or six - seven arms. This study focused on the arm number of starfish *A*. *pectinifera* and analyzed whether the arm number is determined by a genetic factor, or an environmental factor, such as water temperature. As a result, the arm number was not genetically determined. It was suggested that the water temperature may play an role for arm number deteremination.

Keywords: Starfish, arm number, heredity, environmental factor

Department of Life Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨：　イトマキヒトデ（*Asterina pectinifera*）は，同じ種にもかかわらず腕の数が５本（５腕）ばかりではなく４腕や６～７腕，まれに９腕の個体がいることが知られている。本研究は，イトマキヒトデの腕数の変異に注目し，成体の腕数は遺伝的要因により決定されるのか, あるいは, 幼生の飼育環境（水温）によるものか等, 解析をおこなった。その結果，イトマキヒトデ成体の腕数は遺伝的に決定されるのではなく，飼育中の水温が影響している可能性が強く示唆された。

＊１　茨城県土浦市立都和中学校（300-0015　土浦市中貫1222-2）
＊２　東京学芸大学 広域自然科学講座 生命科学分野（184-8501　小金井市貫井北町4-1-1）

１．はじめに

磯や砂浜でよく見かける五角形の生き物と言えば，ヒトデであろう。ヒトデは，人手（５本の指）と漢字を当てはめるように通常，腕（足とは言わない）が５本ある。ヒトデは分類学的には，棘皮動物門に属し，その仲間には，ヒトデの他に，ウニ，ナマコ，ウミユリ，クモヒトデが含まれる。クモヒトデを除いて，あまり五角形のイメージはないが，いずれも成体の形態が五角形を基本とした放射相称の動物である。

イトマキヒトデ（*Asterina pectinifera*）は日本沿岸の浅海に最も普通に見られるヒトデで（佐波ら 2002），北海道から九州にかけて，干潮線から水深300ｍの砂地あるいは岩礁上に生息し（Hayashi 1935; 林 1973），間接発生をするヒトデとして知られている。そのため，発生過程において，受精後，原腸胚まで発生した後，ビピンナリア幼生，ブラキオラリア幼生という段階を経て，稚ヒトデへと変態する。興味深いことに，イトマキヒトデの幼生は左右相称であるのに対して，変態して稚ヒトデになると５放射相称となる（石原 1996）。

一方，自然界のイトマキヒトデには腕の数が５本（５腕）ばかりではなく，４腕や６～７腕，まれに９腕の個体もいることが知られている（佐波ら，2002）。本来５腕であるべきはずのイトマキヒトデの腕数が４本あるいは６本である場合，それを発見した人々の目に不思議と映るのも当然であろう。イトマキヒトデの腕形成に関して，以前，我々の研究室に朝日小学生新聞の記者が訪れ，取材を受けた経験がある（朝日小学生新聞 2010）。また，最近の話題では，兵庫県豊岡市瀬戸の城崎マリンワールドで７本腕のイトマキヒトデが展示され，「ラッキーセブンで縁起のいいヒトデ」ということで注目を集めていた（松山 2010）。ちなみに７本腕と縁起に関して，科学的な根拠はない。

イトマキヒトデには，同じ種類にもかかわらず腕数の異なる変異体が存在する。このような腕数の違いは，なぜ生じるのであろうか？本研究は，この疑問に応えるため，イトマキヒトデの腕数について，⑴ 遺伝的に決まるのかどうか，あるいは，⑵ 環境要因によるものであるかどうか，それぞれについて解析を行った。

２．実験材料と方法

２．１　実験材料および試薬

千葉県犬吠崎周辺（６月），神奈川県走水周辺（５月），青森県浅虫周辺（９月），岡山県牛窓周辺（11月），長崎県大村湾周辺（11月）で採集したイトマキヒトデ（*Asterina pectinifera*）を使用した。人工海水（artificial seawater, ASW）は，ホウ酸でpH 8.2に調整したvan't Hoff's ASWを用いた（Kanatnai & Shirai 1970）。またカルシウム欠如海水（CaFSW）は，$CaCl_2$の代わりにNaClを加えた。天然海水は，千葉県館山沖で採取し，濾紙で濾過後，80℃に加熱し，冷ましてから使用した。１-メチルアデニン（1-MeAde）はSigma社（St. Louis, MO, USA）から購入した。

２．２　卵および精子の調整

成体から卵巣を取り出し，CaFSW中で30分から１時間処理し，その後，卵巣断片をASWに戻した。この操作により，未成熟の卵母細胞が卵巣から放出されるので，放卵後の卵巣片を茶こしで取り除き，卵母細胞を得た。実験には，予め0.1 µM 1-MeAdeで100%卵核胞崩壊（germinal vesicle breakdown, GVBD）を起こすことを確認した繁殖期の卵母細胞を用いた（Kanatani et al. 1969）。

精子は，氷上にてASWを入れたシャーレに精巣を取り出し，ハサミでミンチして，精子を調整した。受精には，予め運動性の高い精子を選んで用いた。

２．３　受精と発生

卵母細胞を 1-MeAde（1 µM）を含む海水中で 25 ～ 30 分インキュベートし，GVBD が起こり始めたことを確認し，精子懸濁液を加え，媒精した（石川と沼宮内 1988）。すべての卵で受精膜が形成されたことを確認した後，天然海水で受精卵を洗い，余分な精子を洗い流した。受精卵は，飼育密度が１個 /ml になるように天然海水中に懸濁し，野口の方法（野口 1975）に従って，卵や胚が沈まないようにゆっくり撹拌しながら発生させた。飼育海水は定期的に交換した。

受精後２日目の初期ビピンナリア幼生から，エサとして珪藻（*Chaetoceros gracilis*と*Chaetoceros coartatus*）を定期的に与えた。受精後約40日目，後期ブラキオラリア幼生まで発生させ，幼生内にヒトデ原基が形成されたことを確認した後，幼生を１個体ごとシャーレに移し換えた。稚ヒトデへの変態はサンゴ片や貝殻で誘導させた（野口 1975）。

３．実験結果

３．１　自然界で観察されるイトマキヒトデ腕数変異体の割合

イトマキヒトデは日本各地に棲息するが，その繁殖期は産地ごとに異なることが知られている（Noumura

表１　各採集地域で観察された４腕，５腕および６腕のイトマキヒトデの割合

採　集　地	個　体　数			
	４　腕	５　腕	６　腕	合　計
東京湾（神奈川県走水周辺）	2 (1.3)	144 (96.6)	3 (2.0)	149
太平洋沿岸（千葉県犬吠崎周辺）	1 (0.6)	151 (98.1)	2 (1.3)	154
陸奥湾（青森県浅虫周辺）	1 (0.3)	284 (98.0)	5 (1.7)	290
瀬戸内海沿岸（岡山県牛窓周辺）	0 (0)	136 (100)	0 (0)	136
大村湾（長崎県多以良町周辺）	1 (0.5)	191 (98.5)	2 (1.0)	194
（合　計）	5 (0.5)	906 (98.2)	12 (1.3)	923

括弧内の数字はパーセントを示す。

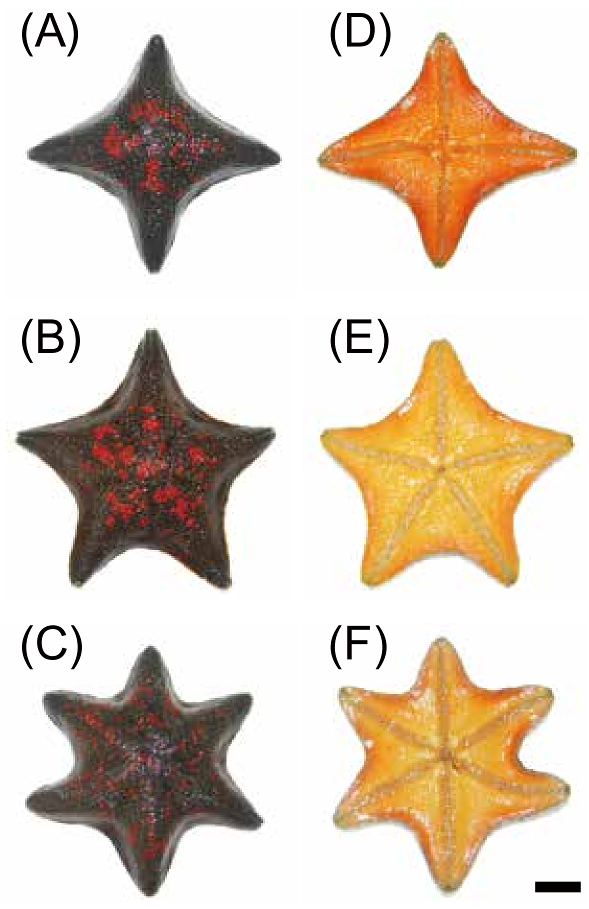

図１．自然界で観察されるイトマキヒトデの腕数変異個体
(A)　４本腕個体（背側），(B)　５本腕個体（背側），
(C)　６本腕個体（背側），(D)　４本腕個体（口側），
(E)　５本腕個体（口側），(F)　６本腕個体（口側）。
バーの長さは１cm。

& Kanatani 1962; Ikegami et al. 1991）。そこで，自然界のイトマキヒトデの腕数変異体の割合を知るために東京湾（神奈川県横須賀市走水周辺），太平洋沿岸（千葉県銚子市犬吠埼周辺），陸奥湾（青森県青森市浅虫周辺），瀬戸内海沿岸（岡山県牛窓周辺），大村湾（長崎県多以良町周辺）で繁殖個体を採集する際に４腕，５腕，６腕の個体数を計測した（表１）。４腕個体（図１AとD），５腕個体（図１BとE），６腕個体（図１CとF）は，背側から見て，それぞれ４腕，５腕，６腕であるばかりでなく，口側から見ても，放射神経が口から腕の先端に沿って伸びていて，決して腕が途中で枝分かれはしていないことを確認した。それぞれの腕数の個体の割合は採集地によって多少異なるが，４腕は０～1.3%，６腕は０～2.0%で，大半（96.6～100%）は５腕であった。全部で923個体のうち，４腕が５個体で0.5%，５腕が906個体で98.2%，６腕が12個体で1.3%であった（表１）。

３．２　イトマキヒトデ腕数に対する遺伝的影響

イトマキヒトデの腕数が遺伝的影響を受けるかどうかを明らかにするため，腕数変異体を受精し，発生させ，変態後の稚ヒトデの腕数に影響があるかどうかを調べた。本実験では，いずれも東京湾で採集されたイトマキヒトデを用いた。最初に４腕のメスから得られた卵と６腕オスの精子を受精し，発生させた。受精後約40日でブラキオラリア幼生まで成長するので，幼生の体内にヒトデ原基が形成されたことを確認した後（図２），さらに１個体ごとに固着珪藻の着いたサンゴ片の入ったシャーレに移し，変態を開始させた。変態後，稚ヒトデの腕数を観察した。その結果，総個体数192個体中，４腕の稚ヒトデ（図３A）を７個体（3.6%）確認することができた（表２）。一方，５腕の稚ヒトデ（図３B）は185個体（96.4%）であった。６腕の稚ヒトデは観察できなかった。

次に６腕メスの卵と６腕オスの精子を受精させ，発生させたところ，変態した稚ヒトデの総個体数200個体中，５腕の稚ヒトデの割合は100%であった（表２）。また，５腕のメスの卵と６腕のオスの精子を受精させた場合でも，変態後のすべての稚ヒトデの割合はすべてが５腕であった（表２）。６腕の稚ヒトデはいずれの場合も観察できなかった。

さらに５腕のメスと５腕のオスについて，２回，そ

れぞれ異なる個体を使って，受精させ，発生させたところ，最初の組合せでは，４腕の稚ヒトデが7.1%誕生した。しかし，２回目の組み合わせでは，すべてが５腕の稚ヒトデに変態した（表２）。

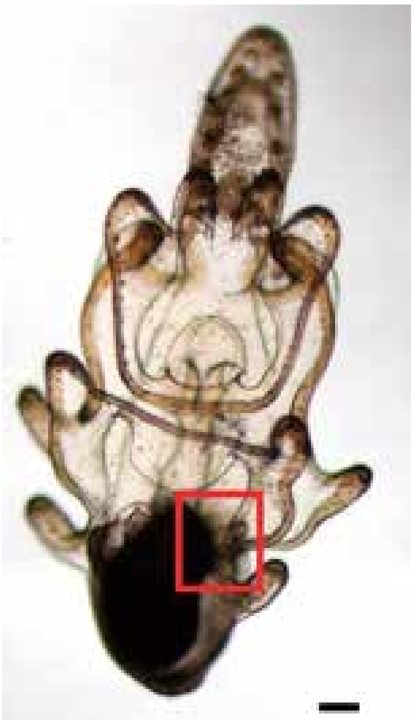

図２．ブラキオラリア幼生とヒトデ原基
四角で囲んだ部分がヒトデ原基。バーの長さは0.1 mm。

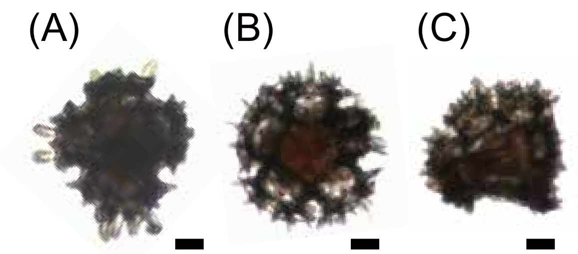

図３．変態したばかりの稚イトマキヒトデの腕数の変異
(A)　４腕（口側），(B)　５腕（口側），
(C)　不明（口側）。バーの長さは0.1 mm。

３．３　イトマキヒトデ腕数に対する飼育温度の影響

５腕のメスとオスのイトマキヒトデから卵と精子を調整し，受精させた後，20℃，25℃および30℃の水温で発生させた。20℃で発生させた場合，東京湾，太平洋沿岸および陸奥湾など，採集場所にかかわらず，ブラキオラリア幼生まで正常に発生した。陸奥湾の個体において，変態後，腕数の不明な稚ヒトデ（図３C）が１個体だけ，観察されたが，他は，すべて５腕の稚ヒトデに変態した（表３）。受精後，25℃で飼育した場合，東京湾の個体から9.0%の割合で４腕の稚ヒトデが観察された。また，陸奥湾の個体では，胞胚以降の発生が進まなかった。30℃では，東京湾の個体でも，受精後，卵割が起こらなかった。従って，環境要因の一つと考えられる水温はイトマキヒトデの正常発生および変態後の稚ヒトデの腕形成に何らかの影響を与えていることが示唆された。

４．考察

本研究の結果から，イトマキヒトデの腕数は遺伝とは無関係であることが強く示唆された。４腕のメスと６腕のオスから得られた卵と精子を受精させ，発生させ，稚ヒトデに変態させたところ，４腕が3.6%見られたが，大半は５腕（96.4%）で，６腕の稚ヒトデは１個体もいなかった。この時，卵を得たメスが４腕であったことから，４腕の稚ヒトデが生じた理由として，メスの腕数が遺伝している可能性がある。しかし，６腕のメスと６腕のオスから得た卵と精子を受精させた場合，６腕の稚ヒトデは１個体も生じず，すべて５腕の稚ヒトデになった。５腕のメスの卵と６腕のオスの精子を受精させた場合も稚ヒトデの腕数はすべて５腕であった。５腕同士のメスとオスから得た卵と精子を受精させた場合，１回目の実験で高い割合（7.1%）で４腕の稚ヒトデが得られた。しかし，２回目の実験で

表２　各腕数のイトマキヒトデから得られた卵と精子を受精・発生させ，
変態後に観察された各腕数の稚ヒトデの個体数

受精に用いた成体の腕数		各腕数の稚ヒトデの個体数			
メ　ス	オ　ス	４　腕	５　腕	６　腕	合　計
４腕	６腕	7 (3.6)	185 (96.4)	0 (0)	192
５腕－１	５腕－１	15 (7.1)	196 (92.9)	0 (0)	211
５腕－２	５腕－２	0 (0)	127 (100)	0 (0)	127
５腕	６腕	0 (0)	200 (100)	0 (0)	200
６腕	６腕	0 (0)	200 (100)	0 (0)	200

括弧内の数字はパーセントを示す。

表３　５腕のイトマキヒトデから得られた卵と精子を受精し，20℃，25℃および30℃で発生させ，変態後に観察された各腕数の稚ヒトデの個体数

水温（℃）	（採集場所）	各腕数の稚ヒトデの個体数				
		４　腕	５　腕	６　腕	不　明	合　計
20	実験１（東京湾）	0（0）	159（100）	0（0）	0（0）	159
	実験２（太平洋沿岸）	0（0）	144（100）	0（0）	0（0）	144
	実験３（陸奥湾）	0（0）	110（99.1）	0（0）	1（0.9）	111
25	実験１（東京湾）	9（9.0）	91（91.0）	0（0）	0（0）	100
	実験２（太平洋沿岸）	0（0）	120（98.0）	0（0）	2（1.6）	122
	実験３（陸奥湾）＊1	−	−	−	−	
30	実験１（東京湾）＊2	−	−	−	−	

括弧内の数字はパーセントを示す。
＊1 胞胚期以後，発生せず。
＊2 受精後，卵割せず。

別の個体から得た卵と精子を使って受精した時には，すべてが５腕の稚ヒトデになった。おそらく，１回目の実験は，発生の環境条件，例えば，飼育密度やエサとして与えた珪藻の死骸による飼育海水の環境悪化などが原因して，４腕の稚ヒトデの出現率を高めた可能性がある（Basch, 1996）。

イトマキヒトデの腕数が遺伝に寄らないとすれば，受精卵の時には，まだ腕数は決まっていないことになる。イトマキヒトデのように間接発生型のヒトデでは，受精後，卵割期，胞胚期，原腸胚期を経て，ビピンナリア幼生，ブラキオラリア幼生へと発生する（石原 1996）。ビピンナリア幼生やブラキオラリア幼生は，星形とは無関係に左右対称である。従って，腕数はブラキオラリア幼生から稚ヒトデへの変態時に決まると考えられる。初期ブラキオラリア幼生のころになると胃の左側前方付近に水腔葉が形成されることが知られている（石原 1996; Morris et al. 2009）。水腔葉は，成体の特徴である５放射相称または歩帯の成長と関係した重要な部分である（David & Mooi 1996）。水腔葉は，左側体腔と前体腔の一部から形成され（Morris et al. 2009），将来の成体の管足を形成する水管系の一部になる。ブラキオラリア幼生になると水腔葉の部分にやがて成体となるヒトデ原基が形成される（本川 2001）。変態に伴い，左右相称であったブラキオラリア幼生は，次第に成体に吸収され，５放射相称の稚ヒトデとなる。ヒトデ原基は，変態後，後部の右側面がヒトデの背面になり，左側は腹面になる（石原 1996）。ウニやヒトデでは，飼育する海水温が正常発生に影響を与えることが知られている（Byrne et al. 2005, 2009; Johnson & Babcock 1994; Fujisawa 1989; 相良 1954）。今回の研究から，飼育中の水温が腕数変異個体を生じる環境要因である可能性が示唆された。20℃で飼育した場合，ヒトデの産地に寄らず，ほとんどすべて５腕の稚ヒトデに変態した。25℃の場合，東京湾のイトマキヒトデでは，9.0%の割合で４腕稚ヒトデを生じた。また，太平洋沿岸を産地とするイトマキヒトデでは，25℃の飼育で腕数変異個体は生じなかったが，腕数の不明な稚ヒトデが得られた。発生過程は，遺伝子の発現やタンパク質の合成などが繊細なタイムスケジュールで制御されていることが指摘されている（Byrne et al. 2005, 2009）。飼育海水温度の違いは，水腔葉形成とヒトデ原基の形成に微妙な狂いを生じさせ，そのことが腕数の変異に繋がった可能性がある。具体的なメカニズムについての詳細は，今のところ不明であるが，４腕や６腕さらに７腕など腕変異体の出現と関係している可能性は高い。一方，陸奥湾のイトマキヒトデは25℃で正常の発生がみられなかったこと，また，東京湾のヒトデでも30℃では，正常発生しなかったことから，イトマキヒトデは，日本全国に棲息しているものの，各地域の棲息環境に比較的適応している可能性が考えられる。地球温暖化による環境の変化は，イトマキヒトデの腕数変異個体の出現頻度として現れるのかもしれない。

ヒトデの腕（足？）はなぜ，５本なのか，という質問は多い。ヒトデの仲間のウニやナマコも棘皮動物の特徴である５放射相称であるが，一目で五角形と分かるのは，ヒトデとクモヒトデであろう。クモヒトデ（Ophiuroidea）をよくヒトデ（Asteroidea）と見間違うことがあるが，クモヒトデの幼生は，ヒトデのビピンナリア幼生やブラキオラリア幼生ではなく，ウニのプルテウス幼生に似たオフィオプルテウス幼生である。棘皮動物の成体が５放射相称である理由は，はっきり

しないが，ヒトデの化石は約５億年前のカンブリア紀から見つかっている（Wagonner 1994）。その形態的特徴である五角形のヒトデが現在まで進化を続けているとすれば，生き物として，勝ち組と言えない訳でもない。そもそもヒトデやウニは，成体の場合，海の底や岩にくっついて暮らしていて，それほど遠くまで移動する必要がない。むしろこのことが五角形の利点になっているのかもしれない。「五角形だと前後左右どちらにも進みやすい」。また，「敵から身を守るにも，各方向に気を配りやすくなる」。例えば，北海道函館市の五稜郭やアメリカの国防総省の本部庁舎（ペンタゴン）など，守りを考えた建物には五角形のものが少なくない。外部からなんらかの力を受けたとき，力をうまく吸収する形が五角形である。体の継ぎ目が一直線にならないことも，千切れにくく頑丈な構造と考えられる。いずれにせよ，今から５億年以上も前の地球に５放射相称動物が誕生したのは紛れもない事実である。一方，その誕生に至るまでの過程は，未だに神秘のベールに包まれている。

５．謝辞

実験を進めるにあたり，イトマキヒトデの採集にご協力頂いたお茶の水女子大学湾岸生物教育研究センターの清本正人博士，山口　守氏，東北大学大学院生命科学研究科付属浅虫海洋生物学研究センターの経塚啓一郎博士，鷲尾正彦氏，岡山大学理学部附属牛窓臨海実験所の坂本竜哉博士，牛堂和一郎氏および長崎大学東シナ海海洋環境資源研究センターの征矢野　清博士に感謝申し上げます。

注

1　シノニム（synonym）として*Patiria pectinifera*を用いることもある

引用文献

Basch L V.（1996）. Effects of larval densities on development and survival of asteroid larvae. Mar. Biol., 126: 693-701.

Byrne M, Cisternas P, Elia L, Relf B.（2005）. *Engrailed* is expressed in larval development and in the radial nervous system of *Patiriella* sea stars. Dev. Genes Evol. 215: 608-617.

Byrne M, Ho M, Selvakumaraswamy P, Nguyen H D, Dworjanyn S A, Davis A R.（2009）. Temperature, but not pH, compromises sea urchin fertilization and early development under near-future climate change scenarios. Proc. R. Soc. B 276: 1883-1888.

David B, Mooi R.（1996）. Embryology supports a new theory of skeletal homologies for the phylum Echinodermata. CR. Acad. Paris. 319: 557-584.

Fujisawa H.（1989）. Differences in temperature dependence of early development of sea urchins with different growing seasons. Biol. Bull. 176: 96-102.

Hayashi R.（1935）. Studies on the morphology of Japanese sea-stars. Internal anatomy of two short-rayed sea-stars, *Patiria pectinifera*（Müller & Troschel）and *Asterina bather* Goto. J, Fac. Sci., Hokkaido Univ. ser., IV, 4 : 197-212.

林 良二.（1973）. 相模湾産海星類. 生物学御研究編. 保育社. 81.

Ikegami S, Mitsuno T, Kataoka M, Yajima S, Komatsu M.（1991）. Immunological survey of planktonic embryos and larvae of the starfish *Asterina pectinifera,* obtained from the sea, using a monoclonal antibody directed against egg polypeptides. Biol. Bull. 181: 95-103.

石原勝敏.（1996）. 動物発生段階図譜. 共立出版株式会社. ISBN4-320-05433-4.

石原勝敏，沼宮内　隆.（1988）. 現代発生生物学シリーズ. ３. 海産無脊椎動物の発生実験. 培風館. ISBN4-563-03963-2.

Johnson L G, Babcock R C.（1994）. Temperature and the larval ecology of the crown-of-thorns starfish, *Acanthaster planci.* Biol. Bull. 187: 304-308.

Kanatani H, Shirai H, Nakanishi K, Kurokawa T.（1969）. Isolation and identification of meiosis-inducing substance in starfish, *Asterias amurensis.* Nature 221: 273-274.

Kanatani H, Shirai H.（1970）. Mechanism of starfish spawning. Ⅲ. Properties and action of meiosis-inducing substance produced in gonad under influence of gonad-stimulating substance. Dev. Growth & Differ. 12: 119-140.

こどもアサヒ.（2010）. イトマキヒトデ今度は腕６本だ. 朝日小学生新聞. ８月６日付. １面.

松山祐介.（2010）. 城崎マリンワールド. 飼育レポート. http:// marineworld: hiyoriyama.co.jp

Morris VB, Selvakumaraswmy P, Whan R, Byrne M.（2009）. Development of the five primary podia from the cpeloms of a sea stan larra : homology with the echinoid echinoderms and other deuterostomes. Proc. R. Sac B 276 : 1277-1284

本川達雄.（2001）. ヒトデ学. 東海大学出版会. ISBN4-486-01552-5.

野口政止（1975）. ウニ後期幼生の飼育装置と，それによって変態を完了したウニについて（発生学）. 動物学雑誌. 84(4). 331：12-25.

Noumura T, Kanatani H.（1962）. Induction of spawning by radial nerve extracts in some starfishes. J. Fac. Sci. Univ. of Tokyo Sect.

Ⅳ, 9: 397-402.

佐波 征機，入村 精一，楚山 勇．(2002)．ヒトデガイドブック．TBSブリタリカ．ISBN4-484-02410-1.

Smith GFM. (1940). Factors limiting distribution and size in the starfish. J. Fish. Res. Bd. Can. 5. 84-103.

相良 純一郎．(1954)．ヒトデ稚仔の適温・適比重試験．日本水産学会誌．20(8)：689-693.

Wagonner B. (1994). “Echinodermata: Fossil Record”. Echinodermata. The Museum of Paleontology of The University of California at Berkeley.