

砂浜－砂丘系における漂砂環境の連関を読み解く試み

Identification of Sediment Routing Process in Beach-Dune Systems with consideration of Sedimentary Environments

東 良慶¹・関口秀雄²・山口直文³

Ryoukei AZUMA, Hideo SEKIGUCHI and Naofumi YAMAGUCHI

The sediment routing process in natural beach-dune systems plays an important role for sustaining the topography of sandy beach. Recent practices of coastal protection, however, tend to suppress sediment transfer between a coastal dune and the fronting sandy beach, reducing resilience of the beach subject to severe wave forcing. This study explores linkage between the beach and dune processes. The resistivity explorations and surface-wave prospecting performed on the coastal dune identified the sedimentary architecture of it, in conjunction with examination of existing borehole logs. Notably, there occurs a buried deposit of old sandy dune below the current beach surface. Furthermore, the examination of ten vibrocores retrieved from the seabed suggests that the deposit of well consolidated old dune extends out to the sea.

1. はじめに

わが国の砂浜海岸の成り立ち、特に、日本海に面する砂浜の地形環境に着目すると、後背砂丘が果たしてきた自然の砂貯留機能の重要性に気づく。実際、海岸道路等によって砂浜と砂丘が分断されると、砂浜－砂丘間の堆積物循環機能が損なわれ、ストーム時に生じる砂浜侵食の影響が累積するようになる。

本研究調査エリアである上越地域海岸においては、関川河口（直江津港）における沖防波堤の建設、海岸保全事業による汀線の固定化により、沿岸漂砂系における河川流砂系（主に関川）、海岸砂丘系（潟町砂丘）との連係が分断されている。すなわち、典型的な孤立漂砂系となっている。当海岸域では海岸侵食問題が顕在化しており（平野, 2008）、東ら（2009b）は、最近90年間で平均60m程度汀線が後退し、汀線が固定化された近年では、海底における地形変化が大規模に生じていることを指摘した。

本研究では、海浜地形環境情報にもとづき、海岸砂丘が本来有していた海浜地形の調節機能を読み解き、それらの定量的な評価法の確立を目指している。具体的には、本研究調査エリアである大潟海岸－潟町砂丘系（図-1(a)）では、堆積物の循環機能が分断されており、海底面の侵食（低下）が顕在化している。一方で、古砂丘体が海底に埋没しており、海底面の侵食により現世の漂砂源になっている可能性がある。そこで、周辺地域（海上も含む）のボーリング情報の収集分析、海底バイプロコアサンブ

リング（VCS）による堆積相観察、砂丘斜面における物理探査結果に基づいて、海浜地形環境を読み解き、高解像度海底地形計測（C3D）による海底地形情報を統合し、砂浜－砂丘系の漂砂環境に関する新たな視座を提示する。

2. 上越地域海岸および潟町砂丘の特徴

(1) 上越地域海岸

上越地域海岸は日本海に面し、能登半島と佐渡ヶ島にはさまれた沿岸域（新潟県地質調査業協会, 2002）に展開する延長28kmの砂浜海岸である。当海岸の卓越波向はNW～NNWであり（宇多, 1997, 図-1(b)）、海岸線の法線はその間に入るため、冬季季節風による影響が大きい。最近10年の間に既往最大有義波高が2度更新されて

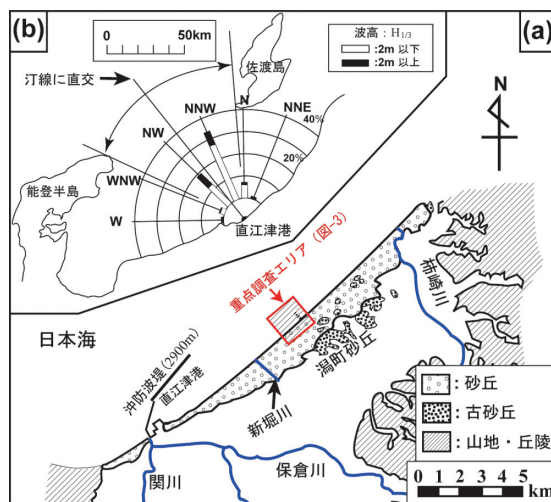


図-1 上越地域海岸の(a)海浜地形環境と(b)波候特性

1 正会員 博(工) 京都大学助教防災研究所
2 フェロー 工博 京都大学名誉教授
3 博(理) 産業技術総合研究所 特別研究員

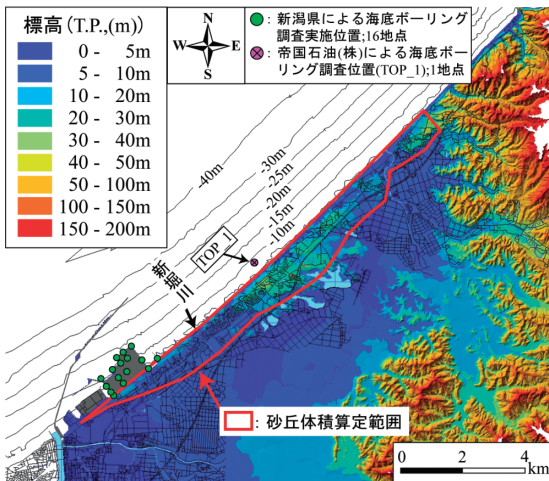


図-2 基盤地図情報(数値標高モデル)10mメッシュ(国土地理院, 2009)にもとづく潟町砂丘周辺の標高コンター図(海底地形コンター線は2005年に実施された広域深浅測量成果(新潟県)にもとづく)

おり、冬季風浪被害が頻発している(平野, 2008)。

調査対象エリアは、上越地域海岸の中でも、関川河口の右岸側に展開する15kmの砂浜海岸である(図-1(a))。当該地の漂砂系への主要な土砂供給源としては、関川からの河川流砂系および潟町砂丘からの海岸砂丘系が考えられるが、直江津港における沖防波堤の建設、海岸保全事業による汀線の固定化により、漂砂系と土砂供給源が分断された状態にある。

(2) 潟町砂丘

高田平野は、西側を西頸城山地(妙高火山群)、南東部を東頸城丘陵に挟まれており、その辺縁域には、延長20km、最大幅1km、最大標高30mの潟町砂丘(新規砂丘および古砂丘より形成)が分布している(図-2)。新堀川より北東側では、新規砂丘(縄文海進以降の形成)の下位に更新統の古砂丘が分布し、重層構造となっている(早津ら, 1982; 成瀬, 1989)。新規砂丘の後背部には湿地・潟湖が形成され、古砂丘の一部が地表に露出している(図-1(a))。ここで、潟町砂丘の体積を推算する。砂丘体積算定範囲(図-2)において、新規砂丘の下端境界面をT.P.(標高)±0mと仮定すると、それより上部の砂丘体積は約2.2億 m^3 と推算され、潟町砂丘がわが国有数の海岸砂丘であり、その堆積物貯留機能が大きいことがわかる。

本研究では上越地域海岸において、海底で実施されたボーリング柱状図を収集し、分析した。その結果、直江津港周辺海域のボーリング柱状図(新潟県が16地点で実施、図-2)によると、海底面直下に砂層(3~4m厚)が分布し、その下位には厚く粘土層が分布することが推察

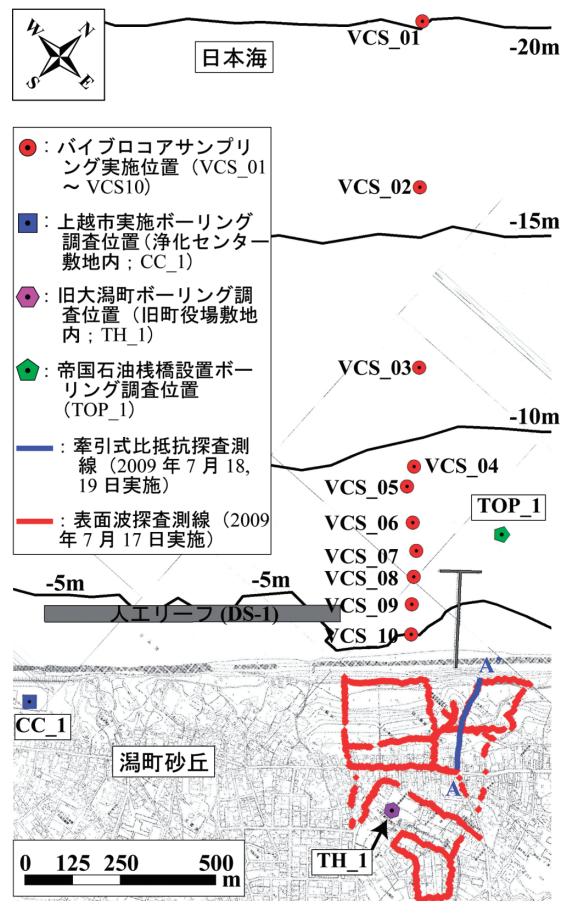


図-3 ボーリング柱状図および地層採取位置と物理探索実施測線の位置説明図(陸域の背景図は都市計画図(上越市, 2008)、海底地形のコンター線は深浅測量成果(2005年, 新潟県)にもとづく)

された。一方、潟町砂丘が最も発達した地点の沖合海域のボーリング柱状図(TOP_1; 帝国石油報告書, 1961年)によると、当時の海底面(T.P.-6.5m)以深の層序は砂礫層が主体である(N値50以上の固結砂層を含む)と推察される。

3. 後浜－砂丘斜面における非破壊物理探査

本研究では、後浜－砂丘斜面における表層堆積環境を同定するために、非破壊物理探査として(1)比抵抗探査、および、(2)表面波探査を実施した。具体的には、まず牽引式比抵抗探査を適用し、地中浅層域の堆積物の平面的な分布を同定する。この結果にもとづき重要調査測線を選定し、表面波探査により浅層域の堆積状況の鉛直断面を詳細に調査する。これらの探査結果を総合的に勘案し、地中浅層域の後浜－砂丘堆積環境を3次元的に同定する。

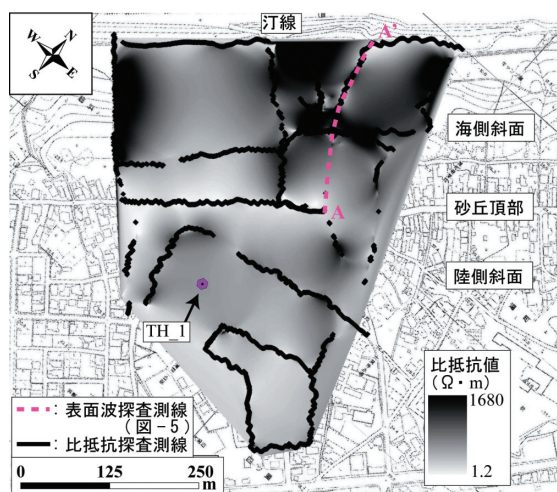


図-4 比抵抗コンター (探索深度; 2.8m) と都市計画図 (上越市, 2008) との重合せ (図上部が海側斜面, 下部が陸側斜面を表す)

(1) 牽引式比抵抗探査の適用

比抵抗探査法は電気探査法の一つで, 堆積物中に電流を流すことによりできる電位差を測定し, その比抵抗値に基づいて地下構造を調査する方法である (物理探査学会, 1998)。この探査法は媒質 (堆積物) の含水率の違いをよく反映するため, 砂質と泥質の堆積環境を概略的に判別するのに適している。本研究では, 広域かつ平面的に堆積アーキテクチャを同定するために, キャパシタ電極カップル型牽引式比抵抗探査手法の米国 Geometrics 社製の OhmMapper (Timofeev ら, 1994) を適用し, 調査を実施した (2009年7月18, 19日に実施)。

比抵抗探査を実施した測線を図-3に示す (探索深度は 2.2, 2.8, 3.4m の3深度に設定した。探索深度の設定方法等の詳細については東ら (2009a) を参照されたい)。また, 探索深度 2.8m の比抵抗コンター図を都市計画図 (上越市, 2008) と重合せ, 図-4に示す。図中の暗色部は高比抵抗値の領域, すなわち砂礫質を, 明色部は低比

抵抗値の領域, すなわち泥質を表す。同図の比抵抗値分布を吟味することにより推論した観測結果を以下に列挙する。

- (I) 比較的急傾斜な海側斜面においては, 比抵抗値が大きく, 相対的に粗粒の堆積物の分布を示す。
- (II) 一方, 陸側斜面においては, 比抵抗値が小さく, 細粒堆積物の分布を示している。
- (III) 上記の結果は, 海側斜面では, 比較的粗粒の砂が堆積し, 陸側斜面では比較的細粒の砂がルースに堆積する砂丘の構造を反映していることがわかる。このような砂丘の堆積環境は海岸侵食過程だけでなく, 地震時の斜面災害 (液状化) とも密接に係ることにも注意したい (釜井ら, 2008)。

(2) 高精度表面波探査の適用

表面波探査は, 人工的に発生させた表面波を受振計 (地震計) により記録し, 波の位相速度を逆解析することにより, S波速度構造を求める手法である (物理探査ハンドブック, 1998)。堆積物の物性はS波速度構造と強い相関性を有するため, 媒質の弾性係数の違いに基づいて, 堆積物の硬度 (硬質土あるいは軟質土) を概略的に判別することができる。この探査法は, 地中浅層域における鉛直断面の堆積状況を調べることに適している。前述の比抵抗探査結果にもとづき, 砂丘に概ね直交し, 海側斜面を横断する測線 A-A' を表面波探査測線に選定した (図-3および図-4)。本研究で用いた高精度表面波探査では, 受振計を24個用い, その間隔は1mとした (これに対応する探索深度は最大12m程度 (東ら (2009a))。また, 起振にはかけやによる地表面打撃を利用し, 起振間隔は2mとした。

測線 A-A' (図-4) に沿う S波速度構造を図-5に示す。図中の暗色部はS波速度が大きいことを示し, 剛性率の大きい硬質土の堆積をうかがわせる。明色部はS波速度が小さいことを示し, 剛性率の小さい軟質土の堆積が推定できる領域である。また, 近接の既存ボーリング柱状図 (図-3中の CC_1, 孔口標高 T.P.+7.74m) を併示した。

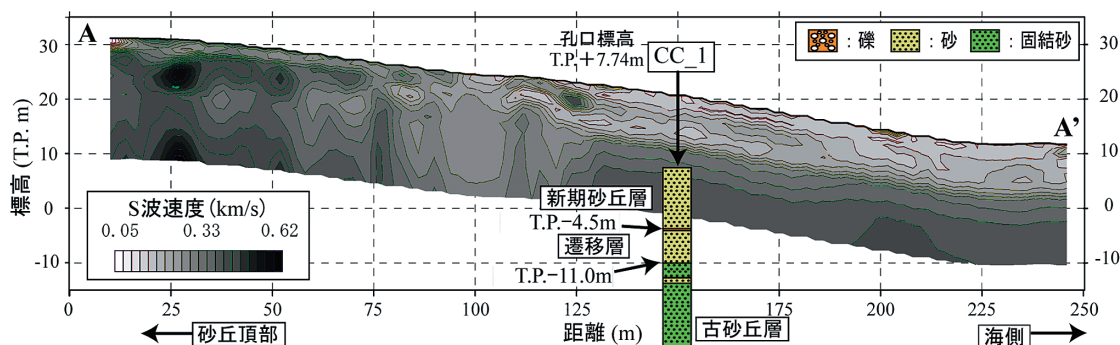


図-5 S波速度構造と近接の既存ボーリング柱状図 (CC_1, 孔口標高 T.P.+7.74m) の重合せ

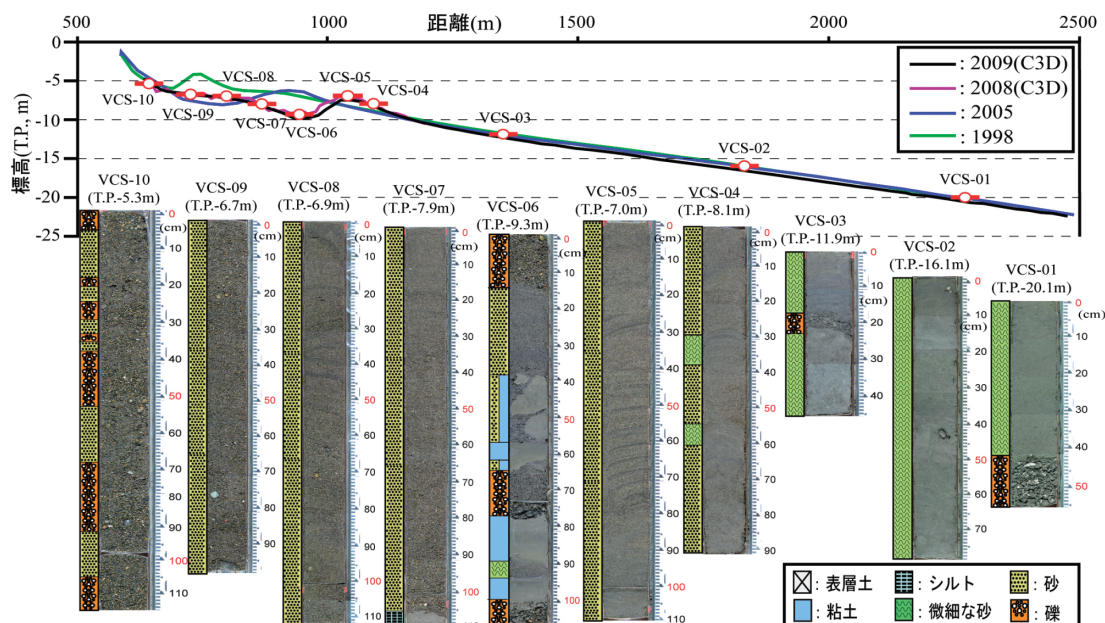


図-6 高解像度海底地形計測（2009年7月20日実施）にもとづく海底地形プロフィールとパイプロコアサンプリングによる海底堆積物のコア写真および柱状図

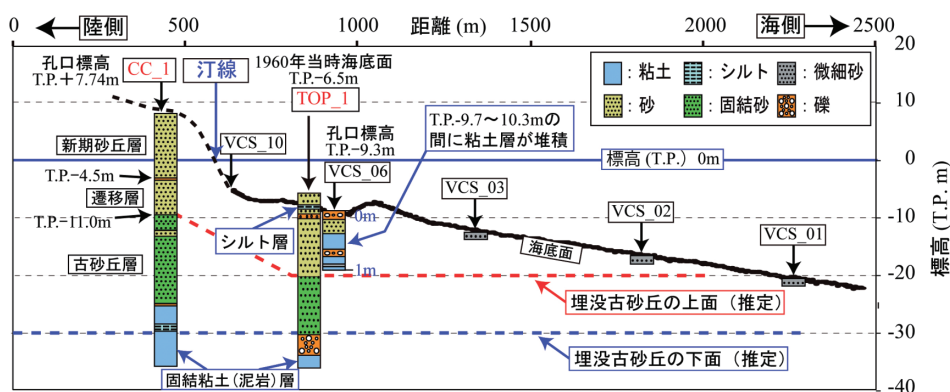


図-7 海底表層堆積物と漂砂系土砂収支との関わり（海底地形（実線）は高解像度海底地形計測（2009年7月実施）にもとづく）

同図より得られた結果を以下に列挙する。

- (Ⅰ) 砂丘斜面の海側では、表層約10mの厚さの範囲でS波速度が小さく、飛砂等により軟らかく堆積した砂層の分布がうかがえる。地表から10m以深では、S波速度が大きく、比較的良く締った砂層が分布している。
- (Ⅱ) 砂丘頂部付近においては、地表付近までS波速度が大きく、硬く締った地層が堆積していることが推察される。
- (Ⅲ) 近接の既存ボーリング柱状図（CC-1、図-5）によると、固結砂層（N値50以上；古砂丘層に対応）の上位に、N値が10～30程度の比較的よく締まっ

た地層（新期砂丘層）が分布している。したがって、上述の考察（Ⅰ）はこの新期砂丘層をとらえたものと考えられる。なお、地点CC-1では施設建設に先立ち、砂丘地の整地が行われている。

4. 海底埋没古砂丘に関する考察

(1) 海底表層堆積物の堆積相観察

パイプロコアサンプリング（VCS）による海底堆積物のコア写真および柱状図を図-6に示す。高解像度海底地形計測（2009年7月20日実施）にもとづく海底地形プロフィールを併示する。採取したコアの総体的な特徴として、採取地点の水深が深くなるほど、卓越する粒径が小

さくなる。沿岸砂州 (基準線から1000~1100m) 周辺に境に粒径の変化が顕著に表れており、沿岸砂州より沖側のコア (VCS_01~03) では微細な砂が卓越している。特筆すべきは、沿岸砂州のトラフ領域に位置するVCS_06の堆積層である。標高T.P.-9.7m~-10.3mの間に粘土塊とシルト層試料が採取された。

(2) 海底表層堆積物の特徴と漂砂系土砂収支の関わり

上記VCSによるコア柱状図と周辺で実施されたボーリング調査成果を統合し、海底地形変化と堆積環境の関係図を図-7に示す。沖合海域のボーリング柱状図TOP_1 (帝国石油報告書, 1961年) を参照すると、調査が実施された1960年より50年経過する間に海底面が約3m低下したことが分かる。柱状図TOP_1の上位層には、エスチャリー性のシルト層 (T.P.-9~-10m) が確認できる (図-7)。一方、弓状沿岸砂州 (東ら, 2009b) のトラフ部におけるコアVCS_06 (図-6) では、粘土塊 (T.P.-9.7~-9.9m) およびシルト層 (T.P.-10.1~-10.3m) が確認できる。これらのシルト層 (粘土塊) の深度が対応しており、当海岸域において海岸侵食が進行し、海底面が侵食され (約3m低下)、周辺エリアのシルト層から粘土塊が生じ、弓状沿岸砂州のトラフ部に堆積した可能性がある。

海底 (TOP_1) および陸上 (CC_1) における既存ボーリング柱状図を対比し、海底地形断面を考慮すると、新規砂丘層の下位に存在する古砂丘の上位面 (約T.P.-20m) および下位面 (約T.P.-30m) が現世の海底面に埋没していることが推定される。

現在では河川流砂系と海岸砂丘系の連係が分断されている当該海岸においては、陸部からの土砂供給は期待できず、漂砂源は侵食による海底面からの土砂生産が主たるものと考えられる。東ら (2009b) は当調査エリアにおいて、波浪による地形変化の限界水深 (当該海岸では8m, 宇多, 1997) 以深での侵食 (海底面低下) を指摘している。この侵食 (海底面低下) の影響がT.P.-20m付近まで及んでいることが推察され、埋没古砂丘が現世の漂砂源になっている可能性がある。一方で、古砂丘体が固結し難侵食性である場合、海底の侵食深を規制 (rock control) している可能性がある。

5. 結論

沖防波堤の建設 (港湾整備) および海岸保全事業にとりなう汀線固定化により、河川流砂系および海岸砂丘系との連係が分断され、典型的な孤立漂砂系になっている上越地域海岸を調査対象エリアとした。現在では分断されている大潟海岸-潟町砂丘系における堆積物循環に着目し、海上ボーリング情報の収集、海底パイプロコアサンプリング (VCS) および砂丘斜面での物理探査結果を統合し、海岸砂丘が本来有していた海浜地形の調節機能

について考察を加えた。本研究により得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 既存海上ボーリング柱状図、高解像度海底地形計測、海底パイプロコアサンプリングおよび物理探査の結果を統合し、潟町砂丘が最も発達している大潟海岸の沖合海底に砂丘体が埋没していることを指摘した。
- 2) 海底部 (T.P.-9.7~-10.3m) からの粘土塊およびシルト層試料の採取 (VCS_06) は、同海底において過去50年間に約3mの海底侵食が進行した結果、パイプロコア技術の適用とあいまって初めて可能になったものである。
- 3) 大潟海岸域では海底地形変化 (侵食) が周辺海域よりも顕著であり、埋没古砂丘が現世の漂砂源 (あるいはrock control) になっている可能性がある。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、新潟県上越地域振興局、上越市大潟区総合事務所の関係各位より、既存ボーリング柱状図等に関するご教示を賜りました。また、京都大学防災研究所 釜井俊孝教授より、物理探査装置に関する便宜をはかっていただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 東 良慶・関口秀雄・釜井俊孝 (2009a): 埋没水害地形の同定: 非破壊物理探査法の適用, 土木学会論文集B, Vol.65, No.2, pp. 141-150.
- 東 良慶・関口秀雄・蔡曙伍・渡邊康司 (2009b): 漂砂系土砂収支把握に向けた浅海域高解像度海底地形計測の試み, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 1431-1435.
- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食、山海堂, pp. 141-149.
- 釜井俊孝・村尾英彦 (2008): 2007年新潟県中越沖地震による柏崎市及び周辺地域の斜面災害, 第47回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 287-290.
- 国土地理院 (2009): 基盤地図情報 (数値標高モデル) 10mメッシュ (標高), <http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>, 参照2010-05-12.
- 上越市 (2008): 都市計画図1:2500, VIII-FD 46-1, 46-3.
- 帝国石油株式会社臨時施設部 (1961): 大潟町沖人工島建設工事報告書, 87p.
- 成瀬敏郎 (1989): 日本の海岸砂丘, 地理学評論, 第62巻, A-2号, pp. 129-144.
- (社)新潟県地質調査業協会 (2002): 新潟県地盤図, 図面; 3/3, 説明書; pp. 27-29.
- 早津賢二・新井房夫・白井 亨 (1982): 新潟県高田平野の中位段丘と古砂丘-形成時代についての火山灰編年学的考察-, 地学雑誌, 第91巻, 第1号, pp. 1-16.
- 平野幸生 (2008): 直江津・大潟海岸における海岸保全事業の変換~Sand has will~, 第27回大潟海岸に学ぶ, 講演資料, 108p.
- 物理探査学会 (1998): 物理探査ハンドブック (手法編1章-4章), Vol.2, pp.115-151.
- Timofeev, V. M., Rogozinski, A. W., Hunter, J. A. and Douma, M. (1994): A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics, Proc. of the SAGEEP, EEGS, pp. 701-715.