

# 干潟堆積構造の地球物理学的評価と形成要因 —砂質・泥質・砂泥二層干潟—

渡部要一<sup>1</sup>・佐々真志<sup>2</sup>

本研究では、多様な土質で構成された砂質干潟・泥質干潟・砂泥二層干潟地盤において、一般的な土質特性の調査に加え、地球物理学的手法の一つである表面波探査の適用を試みた。その結果、表面波探査は、地盤の硬軟を表すせん断波速度の分布を定量的に把握することにより、干潟地盤の堆積構造を効率的に評価できる有効な手法であることが確認できた。硬軟分布や間隙分布として定量化された干潟土砂堆積構造の形成要因について考察した結果、波浪や潮汐流を通じて土砂が堆積した後、潮汐に伴う地下水位変動に起因したサクシオン動態に基づく土骨格の繰返し弾塑性変形の帰結として、堆積構造を定量的に説明できることが明らかとなった。

## 1. はじめに

干潟は多種多様な生物を育む重要な沿岸環境要素の一つである。生物の食活動に着目した生態学（生物が主役）、冠水時の土粒子の移動に着目した水工学（水が主役）、海水・間隙水の化学環境学（化学物質が主役）からのアプローチが多い一方で、生物の棲み心地を支配する住環境、すなわち干潟土砂の物理環境を取り扱う地盤環境学からのアプローチ（土が主役）は皆無であった。

筆者らの最新の研究では、底生生物の住環境と食活動が、地盤環境によって本質的に支配されている可能性を示唆する実験事実を得ている（佐々・渡部, 2006）。一般に、生物相に乏しい砂浜とは違い、生物相が豊かな干潟は、地下水位の低下が僅かで土砂の飽和状態が保たれ、夏の太陽の下でも、気化熱によって過剰な温度上昇が抑えられている。このような土砂環境も、生物にとっての住環境に他ならない。このような背景から、地盤環境学からのアプローチと従来の研究アプローチとの協働の必要性を強く感じている。

佐々・渡部（2005）は、干潟土砂環境動態や堆積構造の形成過程に着目した研究に取り組み、干潟土砂表層において、潮汐に伴う地下水位変動に起因したサクシオン（サクシオン  $s$  は、間隙水圧を  $u_w$ 、周囲の空気圧を  $u_a$  とすると  $s = u_a - u_w$  で定義される）の有意な動態を観測した。また、サクシオン動態が表層地盤の間隙構造の形成に重要な役割を担っている可能性について、大型水槽実験と理論モデル化／解析を通じて明らかにした。本研究では、砂質干潟・泥質干潟・砂泥二層干潟といった多様な土質の干潟地盤において、堆積構造の効率的かつ定量的な把握を目指して地球物理学的手法を適用した。同

手法等によって捉えられた干潟土砂の堆積構造について、上述の干潟土砂の環境動態に関する視点からその形成要因を考察した。

## 2. 調査対象干潟と表面波探査の実施

調査対象干潟における測線の位置図を調査状況写真とともに図-1に示す。千葉県水更津市の小櫃川河口に広がる広大な砂質干潟（盤洲干潟）、熊本県宇城市の大野川河口（八代海湾奥）に広がる広大な泥質干潟（不知火干潟）、広島県尾道市で浚渫粘土を活用して造成された小規模な砂泥二層干潟（尾道糸崎港人工干潟）を調査対

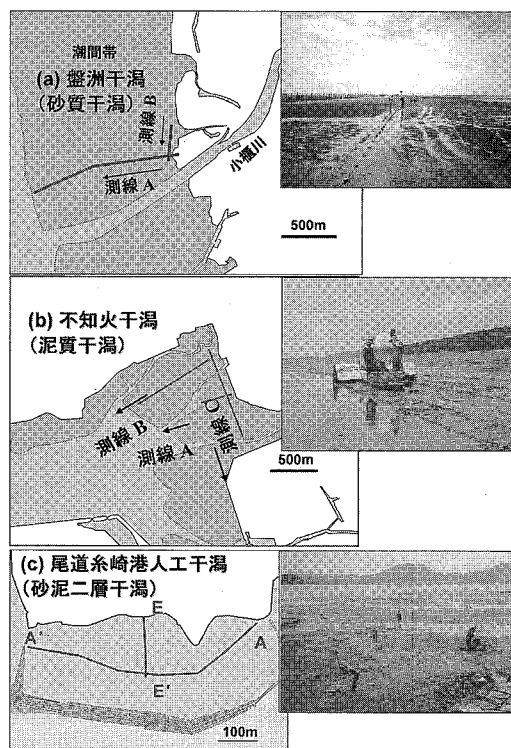


図-1 調査対象干潟と調査測線の位置

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究室長  
2 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究室研究官

象とした。盤洲干潟の調査は大潮（潮位差約 1.6 m）に合わせ 2004 年 8 月 16～18 日の干出時に、不知火干潟の調査は大潮（潮位差約 4.0 m）に合わせ 2005 年 8 月 18～20 日の干出時に、尾道糸崎港人工干潟は大潮（潮位差約 3.0 m）に合わせ 2005 年 8 月 3～5 日の干出時にそれぞれ実施した。盤洲干潟の水理・水質や生態環境の特性については、内山ら（2000）および Kuwae ら（2003）など、不知火干潟周辺の底質や生態については北園ら（2001）などに詳しい。尾道糸崎港人工干潟は、砂質地盤上に浚渫粘土で造成された軟らかい地盤が載った二層構造になっており、表面には覆砂が施されている。造成およびその後の追跡調査については松本（2005）などに詳しい。

本研究では、地球物理学的手法の一つである表面波探査を実施した。図-2 に概念図を示すように、24 個のジオフォン（高精度地震計）を 1 m 間隔に取り付けたランドストリーマーを測線に沿って牽引し、砂質地盤では 2 m、泥質地盤では 5 m 移動する毎に、作業の都合上、砂質地盤では後方、泥質地盤では前方の地盤表面をカケヤ（巨大な木槌）で鉛直に叩いて表面波（レーリー波）を発生させ、ジオフォンで波形を記録した（Hayashi・Suzuki, 2004）。

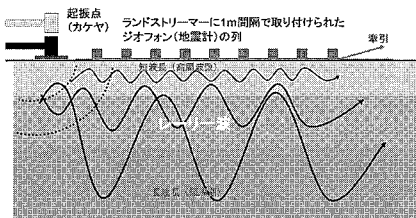


図-2 表面波探査の概念図

干潟地盤上を歩ける砂質地盤や人工干潟では、人力により十分効率よく作業ができた。しかし、泥質地盤では、干潟地盤上を歩くことすらできず、移動のために特別な装備と動力が必要であり、干潟走行機（エンジンで大型のパドルを駆動するボート）を利用した（図-1(b)）。

### 3. 干潟地盤の堆積構造

盤洲干潟の密で硬い砂地盤・緩く軟らかい砂地盤、不知火干潟の軟らかい粘土地盤、尾道糸崎港人工干潟の砂泥二層地盤において得られた典型的な波形記録例を図-3 に示す。表面波が 23 m の距離を通過するのに要する時間は、硬い砂地盤で 0.3～0.5 秒、軟らかい砂地盤で 0.3～0.8 秒、非常に軟らかい粘土で 0.7～1.8 秒であり、地盤が軟らかいほど長いことがわかる。また、砂泥二層地盤の記録は、軟らかい砂地盤と軟らかい粘土地盤の波形が合成されたような記録となっている。

ある地点を中心とする波形記録を抽出し、周波数と位

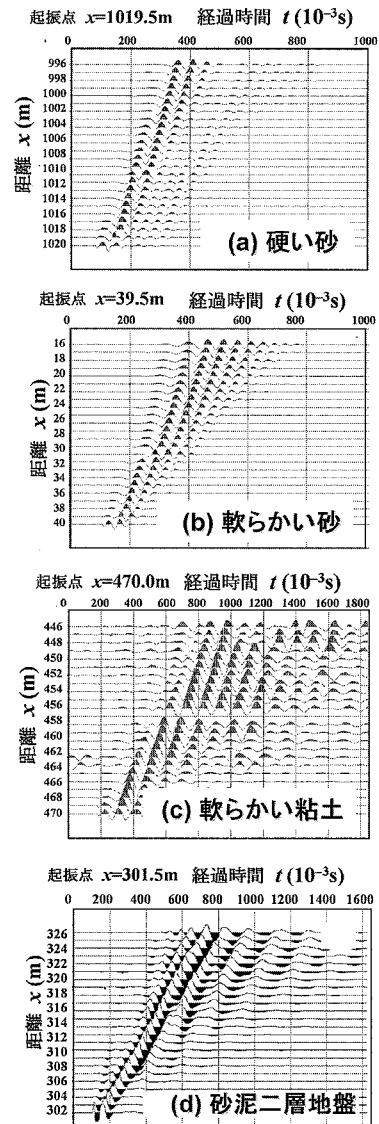


図-3 典型的な波形記録例

相速度の関係を算出して全ての結果を重ね合わせると、位相速度と周波数の関係（分散曲線）が得られる（図-4）。濃い色で浮かび上がった部分が、位相速度と周波数の関係を表す分散曲線である。低周波数は深部、高周波数は浅部を表し、経験的には波長の 3 分の 1 が深さに相当するが、これを初期モデルとして分散曲線を再現するせん断波速度構造を逆解析によって推定した。表面波の伝播速度は、地盤が緩く軟らかいほど遅く、砂地盤の硬軟、土質、層構造に対応してそれぞれ特徴的な分散曲線となる。(a)硬い砂地盤と(b)軟らかい砂地盤では、深部のせん断波速度構造はともに似ているが、浅部で前者が約 100 m/s、後者が約 60 m/s と異なっている。(c)軟らかい粘土地盤では、表層付近で 50 m/s 程度しか

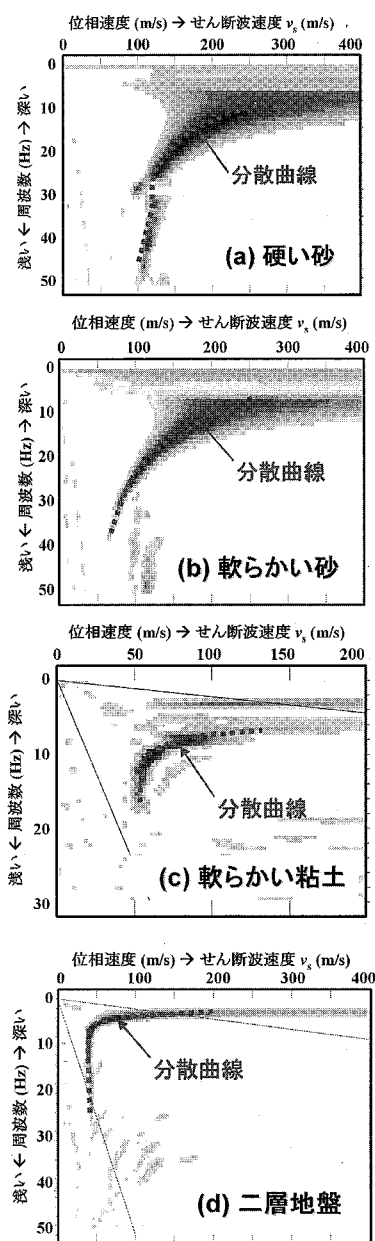


図-4 典型的な分散曲線の例

い。(d)砂泥二層地盤では、表層付近で40 m/s程度と粘土の軟らかさがある一方で、深部は100 m/s以上の砂地盤であることが捉えられている。

分散曲線を最も良く再現する速度分布を上述のような逆解析により推定し、測線に沿って並べると図-5に示すせん断波速度構造が得られる。せん断剛性はせん断波速度の二乗に比例するので、せん断波速度構造は本質的に地盤の硬軟を表している。(a)盤洲干潟では、表層の50~100 m/sの層は、岸側では深度0~1 mの範囲であるが、沖に向かって徐々に浅くなる。800 mより沖側の

表層では、バーで100 m/s以上、トラフで100 m/s以下、すなわち、バー(速い・硬い)とトラフ(遅い・軟らかい)のリズミカルに現れる強いコントラストが捉えられた。表層から2 m以深は水平方向に比較的一様である。(b)不知火干潟は、極めて軟らかく水平方向に一様である。表層2 m程度は50 m/s以下、それ以深は約5 mまでが100 m/s以下で比較的水平方向に一様であり、砂干潟に比べて深度方向への増加率が小さい。(c)尾道糸崎港人工干潟では、100 m/sを境界として、原地盤(砂質土)上に、非常に軟らかい浚渫粘土が埋め立てられたことが明瞭に把握できる。また、 $x=200$  m前後では表層のせん断波速度が内部より速く、覆砂の存在も捉えられている。

#### 4. 堆積構造の形成過程

盤洲干潟の岸沖方向の地形と地下水位の断面図(表面波探査の測線Aより約100 m南側の断面)を図-6に示す。浅い水溜まりになっているトラフ領域以外では、地下水位は地表面直下近傍に位置している。岸側では地表面と地下水位はほぼ一致しており、地表面にサクシオンはほとんど発達していないが、バーでは地表面から0.2~0.3 m程度の深さに地下水位があり、地表面で2~3 kPaのサクシオンが発達している。サクシオンに起因する有効応力の変動は、土骨格の繰返し弾塑性変形を引き起こす。佐々・渡部(2005)に示したように、干出時にサクシオンが増加するのに伴って土骨格は圧縮し、冠水時にサクシオンが消失するのに伴って土骨格は膨張するが、変形剛性は圧縮よりも膨張時の方が著しく大きく、かつ、繰返し載荷によるヒステリシスがあるので、日々の潮汐変動により、岸側やトラフに比べてバーでは地盤がより密になっているとして定性的に説明される。このことは、せん断波速度構造(図-5)に見事に反映されている。表面波探査の測線Aより約800 m南側で調査した表層300 mmの平均データによると、粒度(図-7)には、バーとトラフで有意な差が見られず同じ土質であると判断されるにも拘わらず、岸沖方向の間隙構造分布(図-8)は、相対密度がバーで高く(間隙比が低い)、トラフで低い(間隙比が高い)ことと対応している。

トラフでは常に冠水している一方で、バーでは上述のように、干出時の地下水位が地表面から0.2~0.3 mの深さに位置し、その結果、地表面で2~3 kPaのサクシオンが発達している。佐々・渡部(2005)は、現地観測で捉えたサクシオン動態と提案したモデルにより、初期間隙比が1.1程度に堆積した模型地盤が、干出時のサクシオン増加に伴う土骨格の圧縮、冠水時のサクシオン消失に伴う土骨格の膨張、圧縮よりも膨張の変形剛性が著しく大きいことに起因した圧縮の蓄積等により、間隙比が

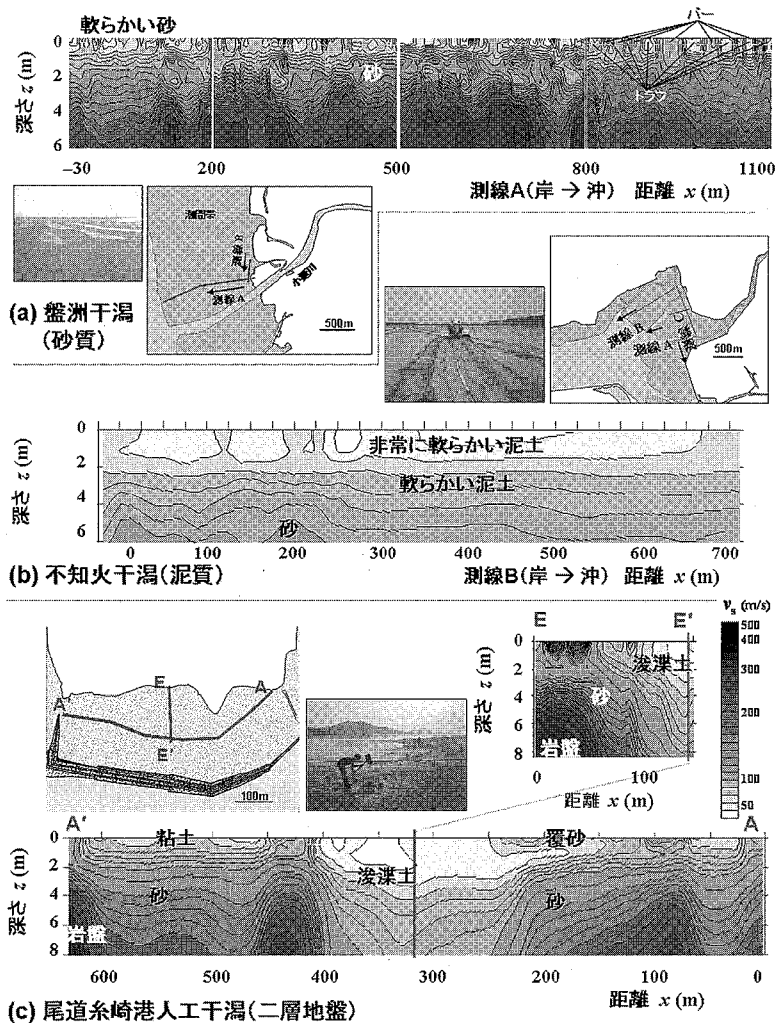


図-5 地球物理的手法（表面波探査）で得られたせん断波速度構造

0.2 程度減少することを定量的に説明した。一方、常に冠水したトラフでは、サクシオンが発達しないために土骨格の圧縮はほとんどないと考えられる。上述の調査結果は、バーとトラフで粒度や最大・最小間隙比 ( $e_{\max}$ ,  $e_{\min}$ ) が変化しておらず、堆積時に分級が無かったことを示唆するものであるにも拘わらず、バーにおける自然間隙比  $e_n$  がトラフにおけるそれよりも 0.2 程度小さくなっている。なお、トラフにおける自然間隙比  $e_n$  (約 1.1) は、堆積時の状態に近いと考えられ、佐々・渡部 (2005) の説明は、このことと良く整合していることがわかる。

不知火干潟では、約 1/700 の緩やかな勾配で、かつ、泥土は透水係数が小さいので、地表面と干出時地下水位はほぼ一致する。このため、干出による有効応力の増加は微小で、かつ、その影響はごく表層に限られ、結果として局所的な硬軟は現れずに、軟弱で一般的な堆積構造になっていると理解できる。間隙比と粒度の分布（表層

50 mm の平均データ）を図-9 に示す。岸側では粘土分が多く高間隙比であり、沖に向かって次第に砂分の含有率が増加し、低塑性になって間隙比は減少する。間隙比は、岸近くで 5 以上あるが、沖側では 2.5~3.0 である。これは、岸近くでも沖側でも、ともに含水比が液性限界の 2~3 倍あることに相当する。土質力学的な応力履歴だけを考えたとき、このような高含水比状態にある正規圧密粘土では、潟の表面で生活するヤマトオサガニやムツゴロウを支えるせん断強さの発現はあり得ない。ところが、実際の地盤はこれらの生物を支えるのに十分なせん断強さを有していることから、有効応力では説明できないほどに大きなせん断強さを発現する何らかの仕組みがあるはずである。表層近傍では、夏には場所によって 40℃ 程度まで温度上昇するので、化学的な作用により粘土粒子同士の固結が促進されていることも考えられる。

尾道系崎港人工干潟における地表面形状と干潮時地下

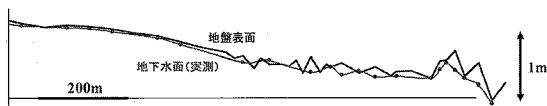


図-6 盤洲干潟の地盤高と地下水位の関係

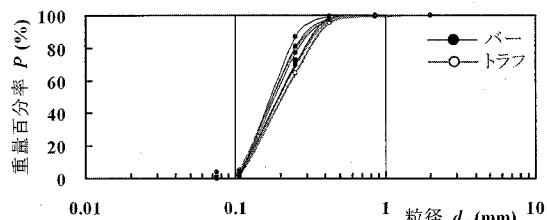


図-7 盤洲干潟の多段バー・トラフにおける粒度

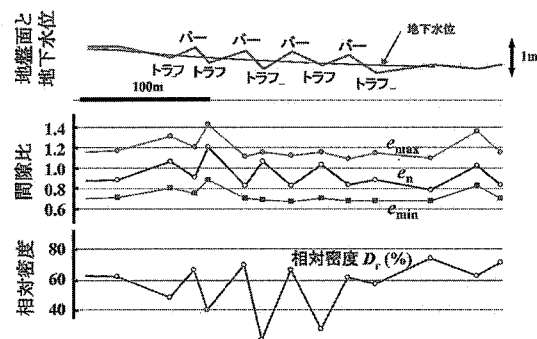


図-8 盤洲干潟の多段バー・トラフにおける間隙構造

水位(図-10)もほぼ一致しているが、覆砂が厚い  $x=100\sim 250$  m では、地下水位が他より低く、サクシオンにより覆砂部分が密になった結果、せん断波速度(図-5)も速くなったと説明できる。

## 5. ま と め

本研究では、多様な土質の干潟地盤において、地球物理学的手法の一つである表面波探査を実施して、干潟土砂の堆積構造を評価し、干潟土砂の環境動態に関する視点から、干潟地盤の形成要因を考察した。その結果得られた主要な知見を以下にまとめる。

- (1)地球物理学的手法の一つである表面波探査は、地盤の硬軟の分布を表面波速度の分布として捉えることができ、干潟地盤堆積構造の効率的把握に有効である。
- (2)砂質干潟地盤において、探査や物理試験により定量化された干潟堆積構造(地盤の硬軟、間隙分布)は、潮汐に伴う地下水変動に起因したサクシオン動態による土骨格の繰返し弾塑性変形の帰結として定量的に説明される。
- (3)砂質干潟地盤では、波浪や潮流の影響下でバー・トラフのような不陸が形成された後、干出するバーにおいてのみ繰返し弾塑性変形を受けて圧縮が蓄積し、堆

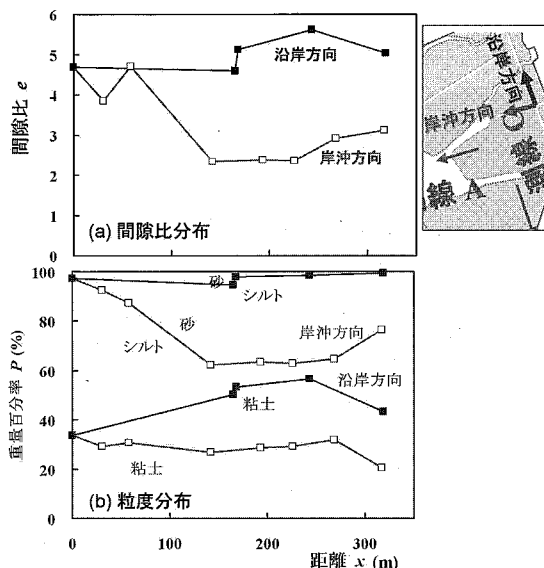


図-9 不知火干潟の間隙構造と粒度の分布

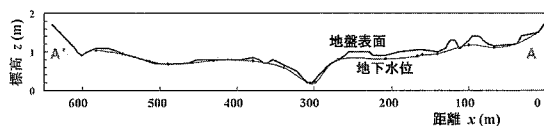


図-10 尾道糸崎港人工干潟の地盤高と地下水位の関係

積時より間隙が減少して密になる。

- (4)泥質干潟では、サクシオンの発達が無く、粒度に依存した間隙構造の変化は見られるものの、地盤の硬軟に関しては極めて均質である。
- (5)砂泥二層地盤からなる小規模な人工干潟では、浚渫土上に覆砂を施すことによって、広大な砂質干潟と同等な地下水位動態が覆砂内にコンパクトに実現されている。

## 参 考 文 献

- 内山雄介・加藤一正・栗山善昭・古川恵太(2000):東京湾盤洲干潟の漂砂特性について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 521-525.
- 北園芳人・鈴木敦巳・林 泰弘・喜津木郁人・滝川 清(2001):有明海と八代海の干潟における底質特性と底生動物の豊かさに関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1131-1135.
- 佐々真志・渡部要一(2005):砂質干潟の土砂環境場におけるサクシオン動態とその果たす役割, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 981-985.
- 佐々真志・渡部要一(2006):干潟底生生物の生活動における臨界現象と適合土砂環境場の解明, 海岸工学論文集, 第53巻.(投稿中)
- 松本英雄(2005):造成干潟整備における地盤工学上の課題について, 土と基礎, Vol. 53, No. 6, pp. 16-18.
- Kuwaie, T., E. Kibe and Y. Nakamura(2003): Effect of emersion and immersion on the porewater nutrient dynamics of an intertidal sandflat in Tokyo Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 57, pp. 929-940.
- Hayashi, K. and H. Suzuki(2004): CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, Exploration Geophysics, Vol. 35, pp. 7-13.