

# 海洋レーダを用いた 津波到達・波高予測技術

小柳智之\* 平尾達哉\*  
石川博章\*\* 有岡俊彦\*

Tsunami Wave Height Prediction Method by Ocean Surface Rader

Tomoyuki Koyanagi, Hiroaki Ishikawa, Toshihiko Arioka, Tatsuya Hirao

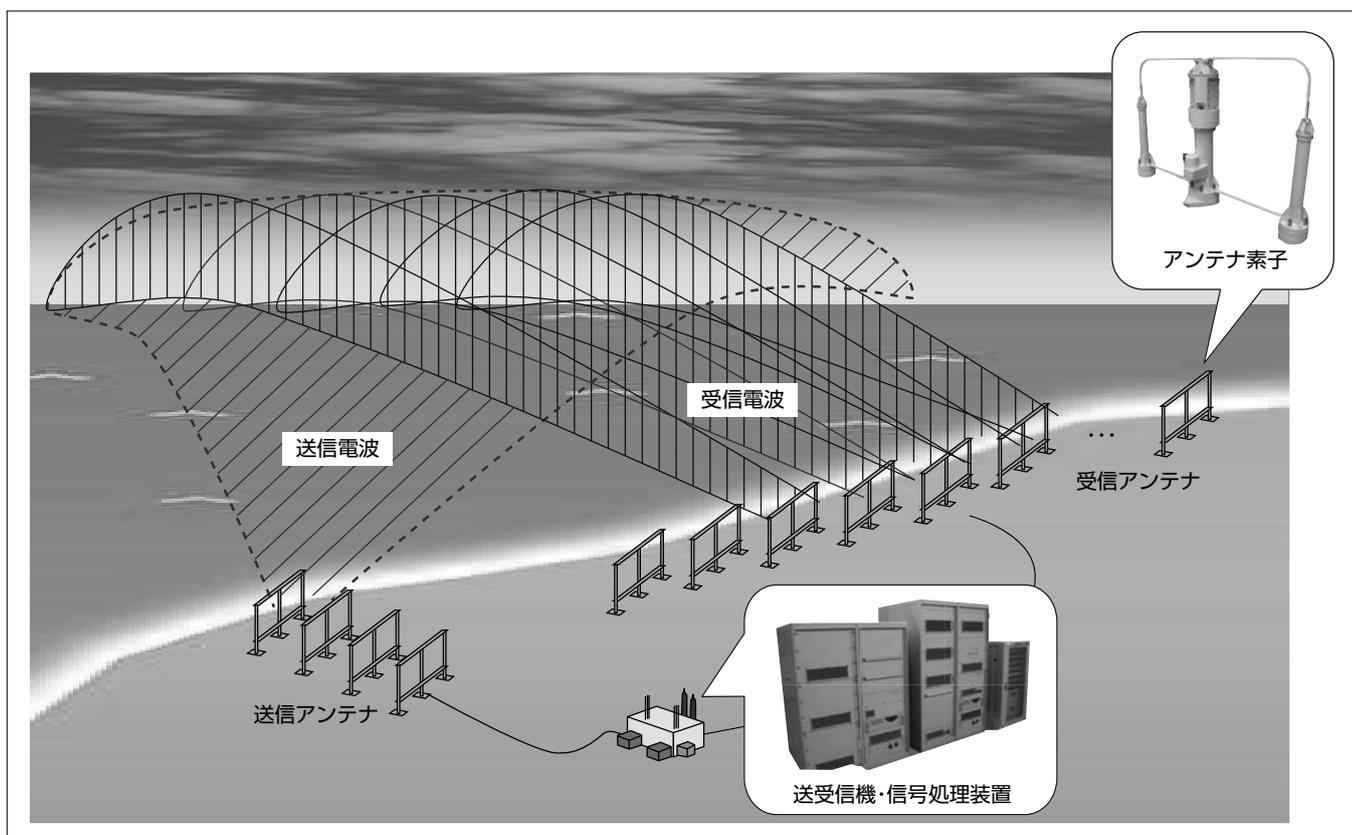
## 要旨

近年、日本の沿岸部では、大地震の発生によって津波が襲来することが懸念されている。津波が沿岸に到達する前に、可能な限り早く精度良く到来を予測することは、効率の良い避難行動や対応を行うために重要である。そのため、津波の沖合での正確な波高値や流速値をリアルタイムで知ることが課題となっている。従来、津波の波高値の計測手段として、沖合に設置されたGPS(Global Positioning System)ブイ等を用いる方法がある。しかし、GPSブイは設置位置(点)での計測しかできないため、広範囲にわたり多数設置する必要がある。

一方、海洋レーダは陸上から面的に広範囲の海の状況を高い時間・空間分解能で計測できるため、日常の沿岸環境

監視での有用性が検証されてきた。特に沿岸部から遠い海面を観測することによって、津波が到達するまでの時間を確保できることもメリットの1つである。ただし、海洋レーダが計測するのは海表面の流速(表層流速)であり、津波の波高を直接求めることができないといった課題がある。また、表層流速から津波に起因する流速成分を抽出する技術についても、いまだ十分な開発がなされていない。

このような背景の下、三菱電機では従来の海洋レーダを改良した津波監視用海洋レーダの開発を行った。このシステムによって、海洋レーダで計測される表層流速から津波の波高をリアルタイムで推定できる。



## 津波監視用海洋レーダのシステム構成

津波監視用海洋レーダは海面に電波を送信する送信アンテナ、海面で反射した電波を受信する受信アンテナ、電波の送受信を行う送受信機、流速成分の算出や解析等を行う信号処理装置で構成している。このレーダはHF(High Frequency)帯の電波を使用することで、沿岸(レーダ設置位置)から数十km先までの海面を監視できる。

1. ま え が き

近年、日本の沿岸部では、大地震の発生によって津波が襲来することが懸念されている。津波が沿岸に到達する前に、可能な限り早く精度良く到来を予測することは、効率の良い避難行動や対応を行うために重要である。そのため、津波の正確な波高値や流速値をリアルタイムで知ることが課題となっている。海洋レーダは陸上から広い範囲の海の状況を高い時間・空間分解能で計測できるため、日常の沿岸環境監視における有用性が検証されてきた。特に沿岸部から遠い海面を観測することで、津波が到達するまでの時間を確保できる。

海洋レーダは、HF帯(短波帯(3~30MHz))の電波を海面に照射し、散乱された信号を受信することで沿岸から数十km先までの表層流速を計測する装置である。図1に示すように、陸上に設置したアンテナから海面に電波を照射すると、電波の波長λの半分の長さの間隔を持つ波によって反射された電波(反射波)は、位相がそろうことで強め合う。この現象をブラッグ散乱共鳴という。反射波は受信信号としてアンテナに帰ってくる。帰ってきた受信信号を周波数解析し、得られたドップラースペクトルにおける一次散乱ピークの位置からドップラースhift量を算出して表層流速を求める。なお、1台の海洋レーダでは、海洋レーダに近づく方向又は遠ざかる方向だけ、すなわち、一次元の視線方向の表層流速だけが計測できる<sup>(1)</sup>。

本稿では、1台の海洋レーダで計測した表層流速から津波の波高をリアルタイムで推定する技術について述べる。

2. 津波の波高推定技術

2.1 概 要

1台の海洋レーダによって計測できるのは表層流速の視線方向成分だけであり、直接波高を推定することはできない。今回、1台の海洋レーダから得られる一次元の流速情報に浅水長波理論を適用することで波高を推定する技術を開発した。津波伝播(でんぱ)解析で用いられる波高分布と流速分布に関する基礎方程式である浅水長波理論を、1台のレーダから得られる視線流速情報だけで解析できるモデルにし、この方程式を解くことで波高をリアルタイムで推定する。

2.2 基礎方程式

津波は長波の一種であるので、表層流速と海底面上の流

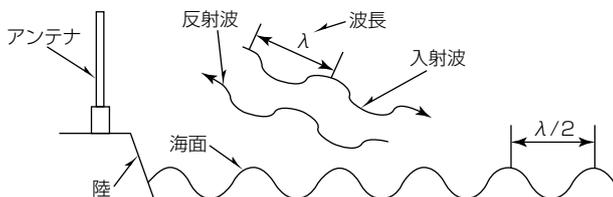


図1. 海洋レーダによる表層流速の算出

速はほぼ一定とみなすことができる。そのため、次のような非線形長波理論(浅水長波理論)に基づく平面二次元モデルが使用される<sup>(2)</sup>。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} \left( M \sqrt{M^2 + N^2} \right) = 0 \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} \left( N \sqrt{M^2 + N^2} \right) = 0 \quad \dots (3)$$

ここで、ηは水位(静水面からの水面の変化量、すなわち波高)、M、Nはx及びy方向の線流量、nは海底摩擦係数(マニングの粗度係数)、Dは全水深(水位η及び静水深hを用いれば、D=η+h)、tは時間、gは重力加速度である。また、x及びy方向の流速(水粒子速度)はU=M/D、V=N/Dである。図2に波高の定義を示す。

2.3 波高分布推定式

海洋レーダが1台で、視線方向の流速成分だけしか算出できないことを考慮し、一次元の表層流速分布から津波の水位ηの分布(波高分布)を推定することを考える。なお、次の説明では、M<sub>r</sub>は視線方向(r方向)の線流量、U<sub>r</sub>は海洋レーダによって計測される視線方向の流速とする。

海洋レーダの照射領域を図3のような円筒座標系とすると、式(2)の運動方程式は、Dが十分大きいとして第2、第3、第5項を消去して線形化し、さらに、D≐hとすると、

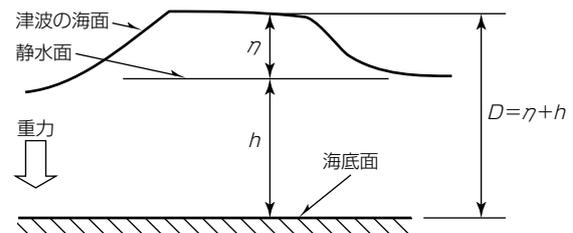


図2. 波高の定義

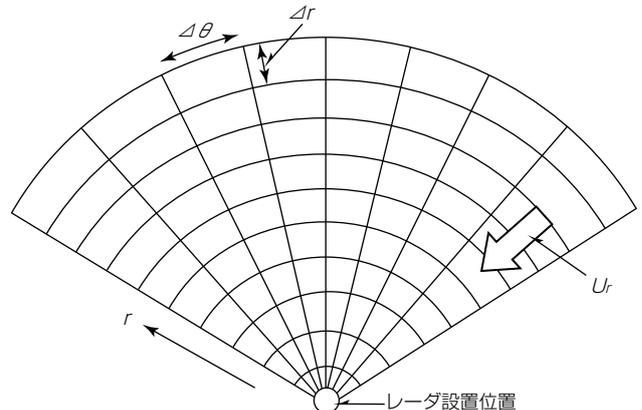


図3. 海洋レーダの照射領域

$$\frac{\partial M_r}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial r} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。波高分布推定には式(4)を変形した次式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial r} &= -\frac{1}{gh} \left( \frac{\partial M_r}{\partial t} \right) \\ &= -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial U_r}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

式(5)は、海洋レーダを中心とした前進差分によって1回の計算で解くことができる。なお、波高分布推定には境界条件が必要であるが、海洋レーダ照射領域の扇の頂点の水位  $\eta_{Rader}$  は1台の水位計で計測できるため、 $\eta_{Rader}$  を境界条件とし、海洋レーダから視線方向( $r$ 方向)に式(5)を積分することで水位  $\eta$  の分布、すなわち波高分布を算出できる。

### 3. 開発技術の評価例

現時点では海洋レーダで津波発生源近くを観測した例はほとんど存在しない。よって、波高推定に使用する元データとなる津波の流速や水位  $\eta$  の分布は事前に津波伝播のシミュレーションを実施し、そのデータを用いた。

津波のシミュレーションの初期条件としては、海面に初期水位分布  $\eta_0$  を与え、基礎式は式(1)から式(3)を時間の経過に対して解いた。空間差分では、スタッガード格子(格子中央で波高  $\eta$  を定義し、線流量  $M$  及び  $N$  は格子の辺で定義)を用い、時間差分では、蛙(かえる)とび法(Leap-Flog法:  $\eta$  と  $M$  及び  $N$  の計算時刻を計算時間間隔  $\Delta t$  の1/2だけずらす方法)を用いた。また、式(2)、式(3)での非線形項(第2、3項)は安定化のために風上差分を用いた。さらに、今回は陸上への津波の遡上は解かず、海底摩擦係数(マンニングの粗度係数)は海だけの領域での津波に一般に用いられる  $n=0.025$  とした。

図4に解析領域を示す。海洋レーダは( $x=0$ )の陸上に配置されるとし、津波がレーダ配置位置へ直接伝播するケース(CASE1)及び、半島や島で反射して複雑な流れ場を形成しつつ、間接的にレーダ配置位置へ伝播するケース(CASE2)の2つ場合について評価した。解析領域は180km角の領域とし、 $x$ 方向格子数 $\times y$ 方向格子数 $=II \times JJ=180 \times 180$ 、格子1つの幅  $\Delta x = \Delta y = 1,000\text{m}$  の直交格子を用いた。また、 $x=0(I=0)$ を除いた周囲境界は無反射(自由透過境界)とし、静水深  $h$  の分布は図5のように  $x$ が50km以上で1,000m、 $x$ が50km未満では、 $x$ に対して線形に増えるものとした。さらに、初期条件として初期水位  $\eta_0=5\text{m}$  を与え、時間刻み1秒で計算を行った。

図6に津波シミュレーション結果を示す。CASE1では、陸へ向けて直接津波の本流が伝播し、約30分後にレーダ設置位置に到達する。さらに、CASE2では津波の本流は島に衝突して拡散後に島を回りこみ、一部は半島で反射した後、レーダ設置位置に到達する。

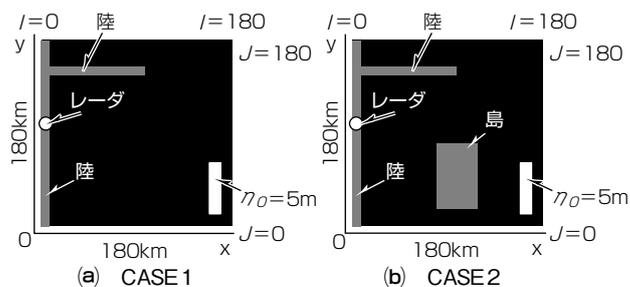


図4. 津波シミュレーションの解析領域

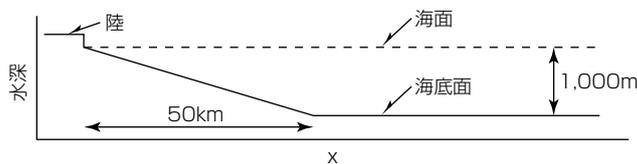


図5. 静水深の分布

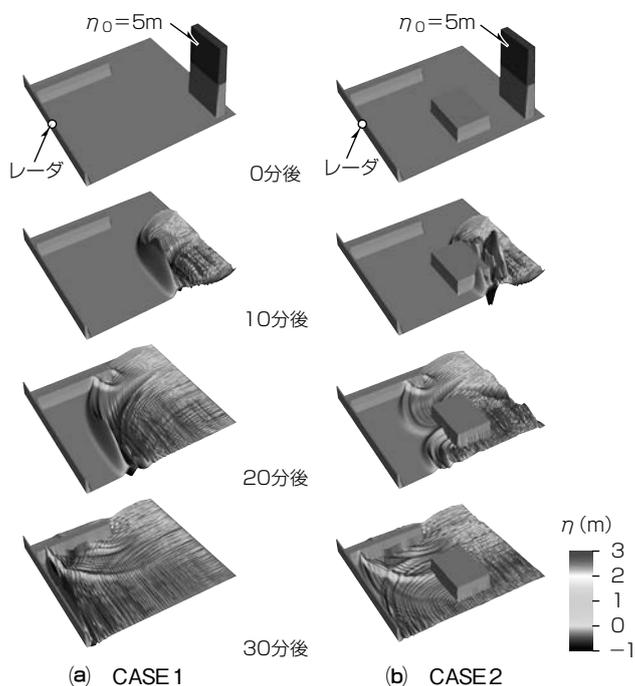


図6. 津波シミュレーション結果

次に、波高分布の推定を行った。波高分布は実施した津波シミュレーション結果から、海洋レーダで計測される60秒間隔の2時刻 $r$ 方向の流速を抽出し、式(5)を用いて推定した。この時間間隔は海洋レーダシステムでのデータ処理的に実現可能なレベルである。ここでは、流速の計測誤差がないものと仮定した。図7に示すように海洋レーダを設置し、海洋レーダの照射領域で $r$ の最大値は50kmとし、 $r$ 方向の格子分割は1,000m刻みとした。

このようにして、一次元の $r$ 方向流速分布だけから波高を推定した結果を図8に示す。津波が海洋レーダの照射領域に入る20分後以降のデータを示し、比較のために津波シミュレーション(図6)から直接得られた $\eta$ も示した。60秒間隔の流速データを使用したため、津波シミュレーションの結果から水位  $\eta$  の分布が鈍る傾向にはあるが、一次元流速だけの使用にもかかわらず、津波の到来方向や流れの方

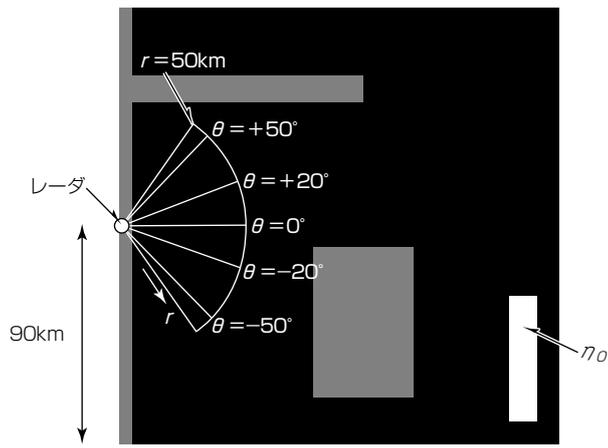
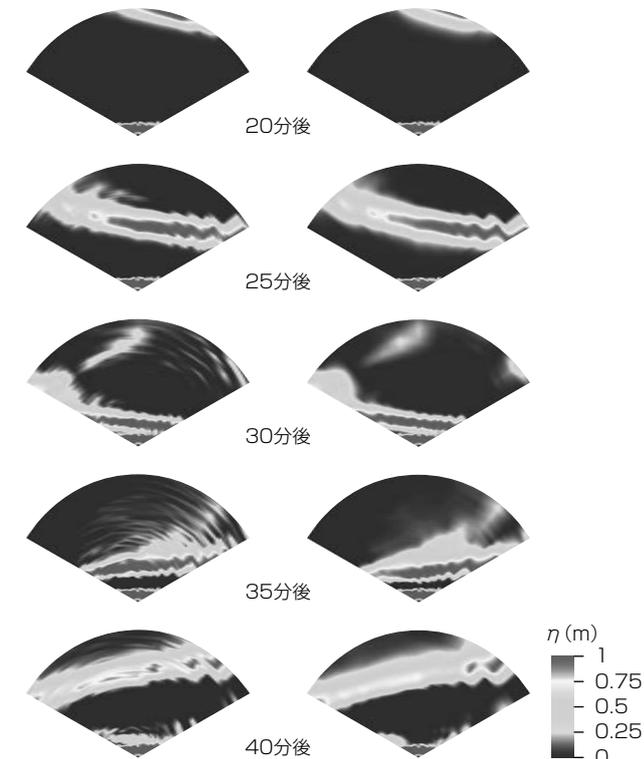


図7. レーダ設置位置と照射領域

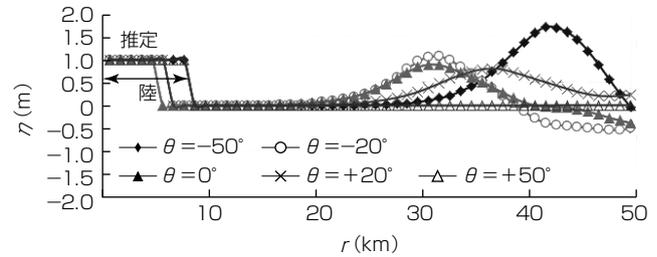
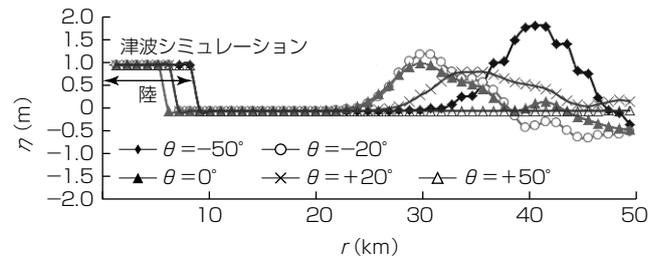


(a) 津波シミュレーション (b) 推定

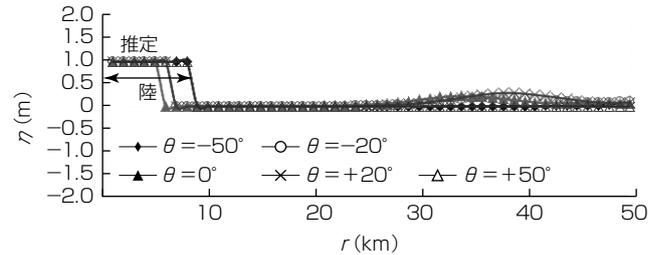
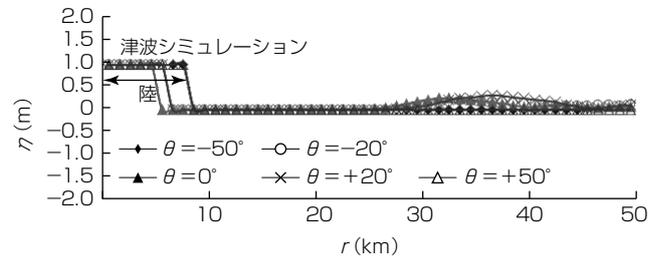
図8. CASE1の津波シミュレーションと推定との波高比較

向など非常に良く推定できることが分かる。これは、沖で発生した津波は陸側へ向かうため、全体的に見ても陸方向への流速成分が陸と平行な成分より支配的であること、さらに、海洋レーダ照射の領域を円筒座標系としたことによる。

次に、図9に $\theta$ 方向の角度が $-50^\circ$ 、 $-20^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $+20^\circ$ 、 $+50^\circ$ の5方向の線上(図7)での $\eta$ の距離変化を示す。ここで $r$ が5 km以下は陸の領域(高さ1 mとした)である。分布には鈍りが見られるが、水位 $\eta$ の値を良く推定できることが分かる。これらから、海洋レーダシステムで十分波高を推定可能であることが分かった。なお、陸に到達する津波の波高は沖合で推定された津波の水位 $\eta$ や視線方向流速 $U_r$ を初期条件とした津波シミュレーションを、レーダ照射領域を含んだ領域で実施することによって推定可能である。



(a) CASE1 (25分後)



(b) CASE2 (25分後)

図9. 津波シミュレーションと推定との波高の距離変化比較

#### 4. む す び

海洋レーダ1台を用いて計測される流速情報(視線方向流速)と浅水長波理論から津波の波高を推定する技術について述べた。その他、当社では、表層流速の中で大きな割合を占める定常流の動きを予測して除去した津波成分を抽出する技術も開発している。これらの技術によって、早期の津波検知と避難行動に必要な時間の確保を支援できる。

#### 参 考 文 献

- (1) 石川博章, ほか: 海洋レーダーを用いた津波到達・波高予測技術, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, 164-1, 152~155 (2016)
- (2) 後藤智明: 津波の線形, 非線形および波数分散現象, 水工学に関する夏期研修会講義集, 35-B, B.9.1~B.9.20 (1999)