(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年10月29日(29.10.2020)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2020/218258 A1

(51) 国際特許分類:
G01C 13/00 (2006.01) *G08B 21/10* (2006.01)
G01W 1/00 (2006.01) *G01F 23/284* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2020/017092

(22) 国際出願日： 2020年4月20日(20.04.2020)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2019-082791 2019年4月24日(24.04.2019) JP
特願 2019-115927 2019年6月21日(21.06.2019) JP

(71) 出願人: 光陽無線株式会社 (**KOYO MUSEN CORPORATION**) [JP/JP]; 〒8120875 福岡県福岡市博多区新和町２丁目３－３２ Fukuoka (JP).

(72) 発明者: 宗聡 (**SO Satoshi**); 〒8120875 福岡県福岡市博多区新和町２丁目３－３２ 光陽無線株式会社内 Fukuoka (JP).

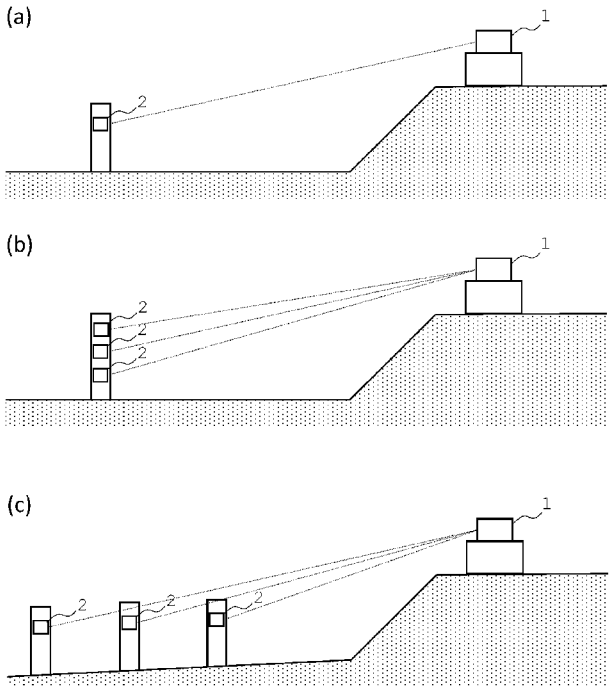
(74) 代理人: 石田和人 (**ISHIDA Kazuto**); 〒8080135 福岡県北九州市若松区ひびきの２番１号 北九州学術研究都市産学連携センター－Ｔ－３０２ Fukuoka (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,

(54) **Title:** INUNDATION DETECTION DEVICE, INUNDATION DETECTION SYSTEM, AND INUNDATION DETECTION METHOD

(54) 発明の名称： 浸水検出装置、浸水検出システム、及び浸水検出方法



(57) **Abstract:** Provided is an inundation detection technology that is resistant to damage over the long term, has low maintenance costs, and is unlikely to make false determinations about abnormal water levels. The inundation detection device 1: detects a reception signal strength I(t), being the strength of a reception response signal received from an RF sensor installed at an inundation detection location; detects dispersion D (I; [t − Δt_1, t] within a prescribed time Δt_1 at I(t); detects a normal reception rate R([t − Δt_2, t]; and outputs an inundation detection signal if the dispersion D (I; [t − Δt_1, t] is at least a prescribed threshold value D_{th1} and the normal reception rate R([t − Δt_2, t] is no more than a prescribed threshold value R_{th1}. In this way, inundation of the RF sensor can be accurately detected as a result of appropriate threshold value determinations for increases in dispersion D (I; [t − Δt_1, t]) and decreases in normal reception rate R([t − Δt_2, t]).

WO 2020/218258 A1

［続葉有］

TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

規則4.17に規定する申立て：
一　発明者である旨の申立て（規則 4.17(iv)）

添付公開書類：
一　国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：長期間故障し難く保守コストが低く異常水位発生の誤判定の生じ難い浸水検出技術の提供。浸水検出装置１は、浸水検出箇所に設置のＲＦセンサから受信される受信応答信号の強度である受信信号強度Ｉ（ｔ）を検出し、Ｉ（ｔ）の一定時間Δt_1内の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）を検出するとともに、正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）を検出し、散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）が所定の閾値D_{th1}以上で、且つ正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）が所定の閾値R_{th1}以下となった場合に、浸水検出信号を出力する。このように、散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）の増加と正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）の減少を適切に閾値判定することによって、ＲＦセンサが浸水したことを精度よく検出することが可能となる。

明　細　書

発明の名称 ：

浸水検出装置、浸水検出システム、及び浸水検出方法

技術分野

[0001] 本発明は、河川・湖沼の増水や氾濫、高潮、道路の冠水等のような、浸水が生じたことを検出するための浸水検出技術に関する。

背景技術

[0002] 斯かる技術としては、特許文献１～３のものが公知である。

[0003] 特許文献１には、河川・湖沼等の橋梁上の通行車用に異常水位を警報する異常水位警報装置であって、マイクロ波の質問信号の送信及び応答信号の受信が可能な質問器と、検知したい水面位置に設置され質問器の質問信号を受信した時にマイクロ波応答信号を返信する応答器と、質問器の応答信号受信の有無に基づいて水位を判定する判定部とを備えた異常水位警報装置が記載されている（特許文献１・請求項１）。この異常水位警報装置は、マイクロ波が水で吸収される性質を利用し、マイクロ波を用いてデータを送受信する水位検知装置である（全〔００１１〕）。質問器と応答器は、内蔵の電池で作動し、検知したい水面付近に設置される。応答器は通常時は冠水せず、増水により冠水する位置に設置される（全文献の図８，図９参照）。応答器が水没していない状態では、質問器が送信した質問信号を応答器が受信し、応答器は記憶データに応じた応答信号を返信する。従って、質問器で応答信号を受信することができ、判定部は異常水位でないと判定する。増水により水面が上昇し応答器が水没すると、質問器が送信したマイクロ波による質問信号は水に吸収されて応答器では受信できなくなり、質問器に応答信号が返送されることがない。これにより判定部は異常水位でないと判定する（全〔００２２〕－〔００２５〕）。

[0004] 特許文献２に記載の洪水発生警報システムは、家屋の基礎、門、石垣、ブロック塀（特許文献２明細書段落〔００２２〕，図１）や河川からの土地高

さレベルに対応した各所（全〔００３７〕，図４）に洪水発生警報装置を設置し、各洪水発生警報装置において水位を検知して警報ブザーや警報ランプにより警報を発令するとともに（全〔００３４〕）、装置内の送信手段により、警報管理センタに洪水警報を送信するものである（全〔００３８〕）。ここで、洪水発生警報装置は、水を検知するフロートスイッチを備えた主回路部と、警報を発する警報手段（警報ブザーや警報ランプ）を備えた副回路部とを具備し、主回路部には、フロートスイッチに電気的に直列に作動リレーが配設され、フロートスイッチに電気的に並列に第１セットリレーが配設されており、また副回路部には、警報手段に電気的に直列に第２セットリレーが配設されている。フロートスイッチが水を検知してオン状態になると、作動リレーが付勢されて第１・第２セットリレーが付勢され、第１セットリレーの付勢により、作動リレーが付勢状態に保持され、第２セットリレーが付勢されることにより、警報手段が作動される（全〔００２８〕－〔００３４〕）。これにより、電力の消費を極力抑えながら洪水の発生を長期にわたって検知するように工夫がされている（全〔００１９〕）。

[0005] 特許文献３には、河川の水位を検出するための河川水位警報ユニットとして、橋梁などに取り付けられ、その下部に、橋梁の下の水面と向かい合わせに設置され、河川水面までの高さを計測する水位計測センサを備えたものが記載されている（全文献明細書段落〔００２０〕，図２参照）。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開２０００－２９８０５５号公報

特許文献2：特開２０１３－１０９５５８号公報

特許文献3：特開２０１０－１７０１９０号公報

非特許文献

[0007] 非特許文献1：菊間信良著，「アレーアンテナによる適応信号処理」，初版，株式会社科学技術出版，１９９８年，ｐｐ．１７３－２４６．

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 異常水位の発生は、年に何度も頻発する事象ではなく、１年から数年に１度のように希にしか生じない事象である。特許文献１に記載の水位検知装置では、水面付近に設置される質問器は内蔵の電池で作動するため、長期間設置する場合には一定期間ごとに電池切れが生じる。また、質問器は、常に外部環境に晒されるため、故障する可能性も高い。そのような場合、応答器が水没していないにも関わらず応答器が応答信号を返信せず、異常水位として誤判定される場合が生じ易いという問題がある。

[0009] 特許文献２に記載の洪水発生警報システムでは、水位検出にはフロート式水位検知スイッチを使用しているが、フロート式水位検知スイッチは、長期間に亘りメンテナンスを行わなければ、ゴミ詰まりや蟻、蜘蛛、泥蜂などの生物の巣掛けによる詰まり等による動作不良を生じやすいため、動作保証に関する信頼性とメンテナンスコストの点で問題がある。

[0010] 特許文献３の河川水位警報ユニットは、橋梁に取り付けられ、橋梁から河川の水面までの高さを水位計測センサで計測するものであるため、基本的に河川に取り付けるものである。しかし、近年の水害では、暗渠や用水路から道路に水が溢れて避難が困難となるケースも珍しくなく、特許文献３の河川水位警報ユニットでは、水害時の周辺住民へ洪水の危険性について警報を発報するシステムに適用するには不十分である。

[0011] そこで、本発明の目的は、長期間設置する場合にも故障しにくく、メンテナンスコストの低く、また、異常水位の発生の誤判定の生じにくい浸水検出技術を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明に係る浸水検出装置の第１の構成は、浸水検出を行う箇所に設置された、間歇的に電波信号を無線発信するＲＦセンサから送信される、前記電波信号を受信して受信信号を出力する受信アンテナと、

各時刻ｔにおいて、前記受信アンテナより出力される前記受信信号の強度

である受信信号強度Ｉ（ｔ）を検出する受信信号強度検出手段と、

各時刻ｔにおいて、前記受信信号強度検出手段が検出する前記受信信号強度Ｉ（ｔ）の一定時間Δt_1内の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）を検出する受信信号強度散布度検出手段と、

各時刻ｔにおいて、一定の時間Δt_2内に前記受信信号が正常に受信された割合である正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）を検出する正常受信率検出手段と、

前記受信信号強度散布度検出手段が出力する前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）が所定の閾値D_{th1}以上で、且つ前記正常受信率検出手段が出力する前記正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）が所定の閾値R_{th1}以下となった場合に、浸水検出信号を出力する浸水検出判定手段と、を備えたことを特徴とする。

[0013] この構成によれば、浸水検出判定手段が出力する浸水検出信号により、ＲＦセンサが浸水したことを精度よく検出することが可能となる。即ち、ＲＦセンサの下方が浸水した場合には、ＲＦセンサから送信される電波信号は、受信アンテナに直接到達する成分（直接波の成分）と、水面で反射されて受信アンテナに直接到達する成分（反射波の成分）とが干渉し、水面の高さに応じて受信アンテナで受信される電波信号の強度は振動する。この反射成分は、水のない地面で反射される場合に比べて水面で反射される場合の方が極めて大きくなるので、浸水した場合には電波信号の強度の干渉振動は非常に大きくなる。通常、水面は波打っているため、この電波信号の強度の干渉振動は、受信側に於いては受信信号強度Ｉ（ｔ）の散布の増加として観測される。そして、ＲＦセンサと水面との距離が近くなるほど、直接波と反射波の光路差は小さくなり、大きな干渉振動が現れ、それに伴い受信信号強度Ｉ（ｔ）の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）も大きくなる。従って、受信信号強度Ｉ（ｔ）の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）の変化を観測することによって浸水の有無を検知できる。また、直接波と反射波の干渉が大きくなると、マルチパス・フェージングによる受信エラーが生じやすくなるため、直

接波と反射波の干渉の増加に伴って正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）も低下する。そして、ＲＦセンサと水面との距離が１波長以下となると、正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）が急激に低下し、ＲＦセンサが水没すると水中における電波減衰及び水面に於ける電波の反射・屈折により正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）が極めて小さくなる。従って、このような散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）の増加と正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）の減少を適切に閾値判定することによって、ＲＦセンサが浸水したことを精度よく検出することが可能となる。

[0014] また、散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）と正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）の両方を用いることにより、ＲＦセンサが故障した場合やＲＦセンサの電池切れの場合と、ＲＦセンサが実際に浸水した場合とを明確に区別することができるため、ＲＦセンサの故障や電池切れによる誤判定の発生を防止できる。

[0015] ここで、「散布度」（dispersion）とは、データの散らばりの程度を示す統計量をいう。「散布度」としては、具体的には、分散（variance），標準偏差（standard deviation），不偏分散（unbiased variance），平均偏差（average deviation），データの範囲（range of data）などを用いることが出来る。「受信信号が正常に受信された」とは、所定の信号パターンで送信される電波信号の所定の信号パターンが、受信信号から正常に復元されることをいう。例えば、ＲＦセンサから、該ＲＦセンサの識別符号を含む信号パターンＡがエラー訂正符号と共に一定時間毎に定期的に送信されている場合、浸水検出装置においてＲＦセンサから受信した受信信号から信号パターンＡを正常に復号できた場合には「受信信号が正常に受信された」こととなり、受信エラーが生じた場合には「受信信号が正常に受信された」こととはならない。

[0016] また、ＲＦセンサは、定期的に電波信号を自発的に無線発信する自発発信型のものでもよいし、浸水検出装置から送信される質問信号に対して電波信号を無線発信する受動発信型のものでもよい。受動発信型のものを使用する

場合には、浸水検出装置から定期的に質問信号を送信するように構成する。

[0017] また、地面が冠水していない平時の場合の受信信号強度Ｉ（ｔ）の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）の平均値Ｄ$_{av0}$を機械学習し、前記平均値Ｄ$_{av0}$に所定の係数ｒ$_\sigma$（ｒ$_\sigma$＞１）を乗じた値を前記所定の閾値Ｄ$_{th1}$に設定する散布閾値設定手段を備えた構成とすることもできる。また、地面が冠水していない平時の場合の正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）の平均値Ｒ$_{av0}$を機械学習し、前記平均値Ｒ$_{av0}$に所定の係数ｒ$_R$（０＜ｒ$_R$＜１）を乗じた値を前記所定の閾値Ｒ$_{th1}$に設定する正常受信率閾値設定手段を備えた構成とすることもできる。

[0018] 一般に、地面が冠水していない平時の場合の受信信号強度Ｉ（ｔ）の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）や正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）は、ＲＦセンサや受信アンテナの設置された周囲環境によって異なる。従って、このような、散布閾値設定手段や正常受信率閾値設定手段を設けることにより、ＲＦセンサや受信アンテナの設置された周囲環境に適應して、浸水検出のための適切な閾値Ｄ$_{th1}$，Ｒ$_{th1}$を設定することが可能となる。尚、散布閾値設定手段又は正常受信率閾値設定手段により平均値Ｄ$_{av0}$，Ｒ$_{av0}$を機械学習させる場合には、例えば、地面が冠水していない平時において、管理者が初期化スイッチで学習指示を入力して一定の期間に亘って学習させる等の手法を採ることが出来る。

[0019] 本発明に係る浸水検出装置の第２の構成は、前記第１の構成に於いて、前記受信信号強度散布度検出手段が出力する前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）が所定の閾値Ｄ$_{th2}$以上となった場合に、浸水注意信号を出力する浸水注意報判定手段を備えたことを特徴とする。

[0020] この構成によれば、浸水注意報判定手段が出力する浸水注意信号により、ＲＦセンサが浸水はしていないが、ＲＦセンサの下方が浸水していることを検出することが可能となる。これにより、ＲＦセンサの浸水が近づいていることを事前に検知することが可能となる。

[0021] ここで、閾値Ｄ$_{th2}$は、必ずしも閾値Ｄ$_{th1}$と同じ値である必要はなく、異

なる値とすることができる。また、閾値D_{th1}と同様に、散布閾値設定手段により、周囲環境に適応して機械学習により決定することもできる。

[0022] 本発明に係る浸水検出装置の第３の構成は、前記第１の構成に於いて、各時刻ｔにおいて、前記受信信号強度Ｉ（ｔ）の時間変化値ＤＩ（ｔ）＝Ｉ（ｔ）－Ｉ（ｔ－δｔ）又はＩ（ｔ）／Ｉ（ｔ－δｔ）の絶対値である受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜を検出する受信信号強度変動検出手段と、

一定の時間Δt_3内に前記受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜が所定の閾値DI_{th}を超えた回数N_{DI}が、所定の閾値N_{DIth}を超えた場合に、浸水注意信号を出力する浸水注意報判定手段を備えたことを特徴とする。

[0023] この構成によれば、浸水注意報判定手段が出力する浸水注意信号により、「ＲＦセンサが浸水はしていないが、ＲＦセンサの下方が浸水していること」を検出することが可能となる。これにより、ＲＦセンサの浸水が近づいていることを事前に検知することが可能となる。

[0024] ここで、地面が冠水していない平時の場合の受信信号強度Ｉ（ｔ）の時間変化値ＤＩ（ｔ）の平均値DI_{av0}を機械学習し、前記平均値DI_{av0}に所定の係数r_{DI}（$r_{DI}>1$）を乗じた値を前記所定の閾値DI_{th}に設定する受信信号強度変動閾値設定手段を備えた構成とすることもできる。これにより、ＲＦセンサや受信アンテナの設置された周囲環境に適應して、浸水検出のための適切な閾値DI_{th}を設定することが可能となる。

[0025] 本発明に係る浸水検出装置の第４の構成は、浸水発生の検出を行う箇所に設置された、間歇的に電波信号を無線発信するＲＦセンサから送信される、前記電波信号を受信する受信アンテナであって、アレイ状に配列された複数のアンテナ素子、前記各アンテナ素子に対して設けられ該アンテナ素子の受信信号の移相を行う移相器、及び前記各移相器が出力する移相器出力信号を加えた加算信号を出力する加算器を具備するアレイアンテナと、

前記アレイアンテナにより受信される前記電波信号から、受信信号を生成する受信手段と、

前記受信器により出力される前記受信信号の強度である受信信号強度Ｉを

検出する受信信号強度検出手段と、

前記アレイアンテナの各移相器の移相量を制御して前記アレイアンテナの最大受信感度方向θｓを制御するとともに、各最大受信感度方向θｓにおける前記受信強度検出手段が出力する受信強度信号Ｉ（θｓ）を取得し、これらの受信強度信号Ｉ（θｓ）から、前記受信信号の角度電力スペクトルを算出する方位スペクトル検出手段と、

前記角度電力スペクトルにおいて、前記受信信号のうち前記ＲＦセンサから前記アレイアンテナに直接到達する直接波を示すメインローブと、前記ＲＦセンサから浸水面での反射の経て前記アレイアンテナに達する反射波を示す第２ローブとを検出し、前記角度電力スペクトルにおける前記第２ローブが検出された場合には、浸水検出信号を出力する浸水検出判定手段と、を備えたことを特徴とする。

[0026] この構成によれば、方位スペクトル検出手段により検出される角度電力スペクトルにおいて反射波を示す第２ローブの発生を検出することにより、浸水の発生を正確に検出することが可能となる。尚、この反射波を示す第２ローブは、地面が水で濡れること地面の反射率が大きく上昇することにより生じることから、通常の降雨によって地面が濡れた場合にも第２ローブが発生する。また、第２ローブの強度は、地面の反射率が大きくなるに従って大きくなるので、メインローブと第２ローブの相対強度から、どの程度地面が濡れたかを検出することも可能となる。尚、電波信号の地面での反射波、地面が乾いている場合にも生じるが、電波周波数領域での水の比誘電率は乾燥した地面の比誘電率と比べて極めて大きいため、地面が乾燥している場合と濡れている場合では反射波の強度は大きく異り、第２ローブの強度を閾値判定すれば、地面が浸水したか否かを容易に判別することが可能である。

[0027] 本発明に係る浸水検出装置の第５の構成は、前記第４の構成に於いて、前記浸水検出判定手段により、前記メインローブ及び前記第２ローブがともに検出された場合、前記メインローブのアンテナ入射角ϕ_0、前記第２ローブのアンテナ入射角ϕ_1、及び予め測定値が設定された前記アレイアンテナから前

記ＲＦセンサまでの距離Ｉ$_0$に基づき、浸水水位を推定する水位推定手段、を備えたことを特徴とする。

[0028] この構成によれば、ＲＦセンサの周囲の地面が浸水して浸水水位が上昇すると、反射面（水面）が上昇するため、反射波がアレイアンテナに入射するアンテナ入射角φ$_1$が変化し、この変化が角度電力スペクトルにおける第２ローブの位置として検出される。従って、この第２ローブのアンテナ入射角φ$_1$と、メインローブのアンテナ入射角φ$_0$及びアレイアンテナからＲＦセンサまでの距離Ｉ$_0$から、簡単な幾何学計算により浸水水位を推定することができる（式（３０）参照）。これにより、どの程度浸水したのかを浸水検出装置において検出することが可能となる。

[0029] 本発明に係る浸水検出装置の第６の構成は、浸水検出を行う箇所に鉛直方向に並べて配列された、間歇的に電波信号を無線発信する複数の送信アンテナからタイミングをずらせて送信される、前記各電波信号を受信して受信信号を出力する受信アンテナと、

前記受信アンテナにより出力される前記受信信号の強度である受信信号強度Ｉを検出する受信信号強度検出手段と、

前記受信信号強度検出手段が出力する前記各受信信号強度から、前記各送信アンテナの高さに対する受信信号強度の変動である干渉波形を検出し、該干渉波形の振幅が所定の閾値を超えた場合に浸水検出信号を出力する浸水検出判定手段と、を備えたことを特徴とする。

[0030] この構成によれば、複数の送信アンテナを浸水検出箇所に鉛直方向に並べて配列することで、浸水検出箇所の地面が浸水した場合、水面から各送信アンテナまでの距離が異なる状態となる。従って、受信アンテナで受信される各送信アンテナからの電波信号の直接波（送信アンテナから受信アンテナに直接達する電波信号）と反射波（送信アンテナから水面で反射して受信アンテナに直接達する電波信号）の位相差は、送信アンテナごとに異なるため、各送信アンテナの強度は、送信アンテナの高さによって変動する。浸水検出手段は、この変動を干渉波形として検出し、干渉波形の振幅を閾値判定する

ことにより浸水の発生を検出することが可能となる。

[0031] 本発明に係る浸水検出装置の第７の構成は、前記第６の構成に於いて、前記干渉波形の振幅が前記所定の閾値を超えた場合において、前記干渉波形の振幅が前記所定の閾値を超えた時刻ｔ０における前記干渉波形の位置に対して、それ以降の時刻ｔにおける前記干渉波形の前記送信アンテナの高さ方向のシフト量を検出する干渉波形シフト量検出手段と、

前記干渉波形シフト量検出手段が検出するシフト量に基づき、前記時刻ｔにおける浸水水位を推定する水位推定手段と、を備えたことを特徴とする。

[0032] この構成によれば、浸水した水面の上昇により、水面から各送信アンテナまでの距離が短縮するため、水面の上昇や下降が、干渉波形のシフトとして検出される。従って、このシフト量を検出することで、浸水水位を推定することができる。これにより、どの程度浸水したのかを浸水検出装置において検出することが可能となる。

[0033] 本発明に係る浸水検出システムの第１の構成は、浸水検出を行う箇所に設置された、間歇的に電波信号を無線発信し又は質問信号に対して電波信号を無線発信するＲＦセンサと、

前記ＲＦセンサから離隔して、前記ＲＦセンサよりも高所に設置された請求項１乃至３の何れか一に記載の浸水検出装置と、を備えたことを特徴とする。

[0034] 本発明に係る浸水検出システムの第２の構成は、前記第１の構成に於いて、前記受信アンテナは、水平方向の電界成分の受信信号強度が最大となる向きに設置されていることを特徴とする。

[0035] この構成に依れば、浸水検出装置の受信アンテナは、ＲＦセンサから送信される電波信号の偏光成分のうち、電界が水平な偏光成分（水平境界平面に対するＳ偏光成分）を主として受信することになる。振幅反射率に関するフレネル係数の式により、水面での電磁波の反射は、Ｐ偏光成分は小さくＳ偏光成分が大きくなる。また、水の比誘電率は１ＧＨｚ付近の周波数領域では約８０であり、空気に対する屈折率は約９となるため水面反射が著しく大き

い。その後、誘電緩和が発生する周波数領域のＲＦセンサが徐々に水没を始めると、水深が増加するに従い電波を受信できなくなる。従って、受信アンテナを水平方向の電界成分の受信信号強度が最大となる向きに設置することで、ＲＦセンサの下方が冠水したことや、ＲＦセンサが水没したことを精度よく検出することが可能となる。

[0036] 本発明に係る浸水検出システムの第３の構成は、浸水検出を行う箇所に設置された、間歇的に電波信号を無線発信するＲＦセンサと、前記ＲＦセンサから離隔して、前記ＲＦセンサよりも高所に設置された前記第４又は５の構成の浸水検出装置と、を備えたことを特徴とする。

[0037] 本発明に係る浸水検出システムの第４の構成は、前記第３の構成に於いて、前記アレイアンテナの前記各アンテナ素子は、水平方向の電界成分の受信信号強度が最大となる向きに設置されていることを特徴とする。

[0038] 本発明に係る浸水検出システムの第５の構成は、浸水検出を行う箇所に鉛直方向に並べて配列された、間歇的に電波信号を無線発信する複数の送信アンテナを備えたＲＦセンサと、前記ＲＦセンサから離隔して、前記ＲＦセンサよりも高所に設置された前記第６又は７の構成のの浸水検出装置と、を備えたことを特徴とする。

[0039] 本発明に係る浸水検出システムの第６の構成は、前記第５の構成に於いて、前記受信アンテナは、水平方向の電界成分の受信信号強度が最大となる向きに設置されていることを特徴とする。

[0040] 本発明に係る浸水検出方法の第１の構成は、浸水検出箇所が浸水したか否かを検出する浸水検出方法であって、

前記浸水検出箇所に設置されたＲＦセンサから送信される電波信号を、前記ＲＦセンサよりも高所に設置された受信アンテナにより受信し、

前記電波信号から電気信号である受信信号を生成し、

各時刻に於いて、前記受信信号の強度である受信信号強度Ｉ（ｔ）、該受信信号強度Ｉ（ｔ）の一定時間Δt_1内の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）、及び一定の時間Δt_2内に前記受信信号が正常に受信された割合である正

常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）を検出し、

前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）が所定の閾値Ｄ$_{th1}$以上で、且つ前記正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）が所定の閾値Ｒ$_{th}$以下となった場合に、浸水が検出されたと判定することを特徴とする。

[0041] これにより、ＲＦセンサが浸水したことを精度よく検出することが可能となる。

[0042] 本発明に係る浸水検出方法の第２の構成は、前記第１の構成に於いて、前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）が所定の閾値Ｄ$_{th2}$以上となった場合に、浸水注意レベルに達したと判定することを特徴とする。

[0043] これにより、ＲＦセンサが浸水はしていないが、ＲＦセンサの下方が浸水していることを検出することが可能となり、ＲＦセンサの浸水が近づいていることを事前に検知することが可能となる。

[0044] 本発明に係る浸水検出方法の第３の構成は、前記第１の構成に於いて、各時刻ｔにおいて、前記受信信号強度Ｉ（ｔ）の時間変化値ＤＩ（ｔ）＝Ｉ（ｔ）－Ｉ（ｔ－δｔ）又はＩ（ｔ）／Ｉ（ｔ－δｔ）の絶対値である受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜を検出するとともに、

一定の時間Δｔ$_3$内に前記受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜が所定の閾値ＤＩ$_{th}$を超えた回数Ｎ$_{DI}$が、所定の閾値Ｎ$_{DIth}$を超えた場合に、浸水注意レベルに達したと判定することを特徴とする。

[0045] これにより、ＲＦセンサが浸水はしていないが、ＲＦセンサの下方が浸水していることを検出することが可能となり、ＲＦセンサの浸水が近づいていることを事前に検知することが可能となる。

[0046] 本発明に係る浸水検出方法の第４の構成は、浸水検出箇所が浸水したか否かを検出する浸水検出方法であって、

前記浸水検出箇所に設置されたＲＦセンサから送信される電波信号を、前記ＲＦセンサよりも高所に設置されたアレイアンテナにより受信し、

前記アレイアンテナの最大受信感度方向θ$_s$を走査しながら前記アレイアンテナにより受信される前記電波信号の受信信号を検出することにより、前記

受信信号の角度電力スペクトルを算出するステップと、

前記角度電力スペクトルにおいて、前記受信信号のうち前記ＲＦセンサから前記アレイアンテナに直接到達する直接波を示すメインローブと、前記ＲＦセンサから浸水面での反射の経て前記アレイアンテナに達する反射波を示す第２ローブとを検出し、前記角度電力スペクトルにおける前記第２ローブが検出された場合には、浸水検出信号を出力するステップと、を備えたことを特徴とする。

[0047] 本発明に係る浸水検出方法の第５の構成は、前記第４の構成に於いて、前記メインローブ及び前記第２ローブがともに検出された場合、前記メインローブのアンテナ入射角ϕ_0、前記第２ローブのアンテナ入射角ϕ_1、及び予め測定値が設定された前記アレイアンテナから前記ＲＦセンサまでの距離l_0に基づき、浸水水位を推定するステップ、を備えたことを特徴とする。

[0048] 本発明に係る浸水検出方法の第６の構成は、浸水検出箇所が浸水したか否かを検出する浸水検出方法であって、

浸水検出を行う箇所に鉛直方向に並べて配列された、間歇的に電波信号を無線発信する複数の送信アンテナからタイミングをずらせて送信される、前記各電波信号を受信して受信信号を生成するステップと、

前記各受信信号強度から、前記各送信アンテナの高さに対する受信信号強度の変動である干渉波形を検出し、該干渉波形の振幅が所定の閾値を超えた場合に浸水検出信号を出力するステップと、を備えたことを特徴とする。

[0049] 本発明に係る浸水検出方法の第７の構成は、前記第６の構成に於いて、前記干渉波形の振幅が前記所定の閾値を超えた場合において、前記干渉波形の振幅が前記所定の閾値を超えた時刻ｔ０における前記干渉波形の位置に対して、それ以降の時刻ｔにおける前記干渉波形の前記送信アンテナの高さ方向のシフト量を検出するステップと、

前記シフト量に基づき、前記時刻ｔにおける浸水水位を推定するステップと、を備えたことを特徴とする。

発明の効果

[0050] 以上のように、本発明によれば、水位検知用のセンサとして、電磁波発信器であるＲＦセンサを使用するため、フロートスイッチのように機械的に故障するということがなく、多少の汚れが付着しても正常に動作するため、メンテナンスコストも低く抑えることが出来る。また、ＲＦセンサが浸水したか否かの判定に、ＲＦセンサから送信される電波信号の受信信号強度Ｉ（ｔ）の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ１，ｔ］）及び電波信号の正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ２，ｔ］）の２つを判定データとして使用することで、長期間設置する場合に、ＲＦセンサの電池切れや故障により電波信号が途絶した場合でも、ＲＦセンサが浸水した場合とは明確に区別できるため、誤ってＲＦセンサが浸水したと判定されることがなく、誤判定が生じにくい。逆に、ＲＦセンサが浸水した場合以外にＲＦセンサの電波信号が途絶した場合には、ＲＦセンサに、電池切れ等の何らかの異常が発生したと判定できるので、浸水検出装置の側からＲＦセンサの異常の発生を自動的に検出すること可能である。

[0051] また、受信信号強度Ｉ（ｔ）の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）や受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜を用いることによって、ＲＦセンサが浸水していない状態であっても、ＲＦセンサの設置された場所の周囲の地面が冠水したことを検出することも可能である。従って、地面の冠水を検出すると浸水検出装置において浸水注意信号を出力することで、道路冠水や洪水などの発生時に早めに注意喚起を行うことが可能となる。

[0052] また、受信アンテナにアレイアンテナを用い、方位スペクトル検出手段によりＲＦセンサからの受信信号の角度電力スペクトルを検出し、角度電力スペクトルにおいて反射波を示す第２ローブの発生を検出することにより、浸水の発生を正確に検出することが可能となる。また、この手法により、ＲＦセンサの周囲の地面がどの程度濡れたかを検出することも可能となる。角度電力スペクトルにおける第２ローブの位置から、ＲＦセンサの周囲の浸水水位を推定することも可能となる。

[0053] また、複数の送信アンテナを浸水検出箇所に鉛直方向に並べて配列し各送

信アンテナからの受信信号から、各送信アンテナの高さに対する受信信号強度の変動である干渉波形を検出し、該干渉波形の振幅が所定の閾値を超えた場合に浸水検出信号を出力することで、浸水の発生を検出することが可能となる。さらに、干渉波形の振幅が所定の閾値を超えた時点ｔ０から各時刻ｔにおける干渉波形のシフト量を検出することで、浸水水位を推定することも可能となる。

図面の簡単な説明

[0054] [図1]本発明の実施例１に係る浸水検出システムの全体配置図の一例を示す図である。

[図2]浸水検出装置１の構成を示すブロック図である。

[図3]ＲＦセンサ２からセンサ通信アンテナ１１への電波信号の伝達経路を示す図である。

[図4]受信点Ｂに入射する電磁波を表す図である。

[図5]受信点Ｂにおいて受信される電磁波の電場成分の相対エネルギー密度の時間平均$U_{Ep}^{(ave)}$，$U_{Es}^{(ave)}$と水面の高さy_{A0}との関係を計算した結果である。

[図6]受信点Ｂにおいて受信される電磁波の電場成分の相対エネルギー密度の時間平均$U_{Ep}^{(ave)}$，$U_{Es}^{(ave)}$と水面の高さy_{A0}との関係を計算した結果である。

[図7]波がある水面における反射平面内の電磁波の伝搬経路を表す図である。

[図8]（ａ）反射点Ｃの高さh_Cの確率分布函数f_{hC}（h_C）、及び（ｂ）水面に波がある場合の受信点Ｂにおける相対受信強度I_B/I_0の確率分布函数f_{I_B}（I_B/I_0）（Ｓ波）の計算結果を表す図である。

[図9]水位の変化に伴う平均相対受信強度ave（I_B/I_0）（Ｓ波）の変化の計算結果を表す図である。

[図10]水位の変化に伴う相対受信強度の標準偏差σ（I_B/I_0）（Ｓ波）の変化の計算結果を表す図である。

[図11]点Ｐに対して複数の方向から電磁波が入射する様子を示す図である。

[図12]波立った水面での反射による多重干渉の一例を示す図である。

[図13]水位レベルの変化に伴う有効反射経路数の変化の様子を示す図である

。

[図14]水位レベルと有効反射経路数の関係を示す図である。

[図15]水位レベルと相対受信強度の平均値ave（I_B/I_0）の関係を示す図である。

[図16]水位レベルと相対受信強度の標準偏差σ（I_B/I_0）の関係を示す図である。

[図17]実験室において実際にアクティブ型ビーコンを用いて、送信点Ａと水面との距離の変化による受信強度の変化を測定した結果である。

[図18]図１７の測定の測定条件を示す図である。

[図19]周波数f=2.4GHzにおける入射角θ_cに対する水の強度反射率R_p，R_sの変化を表す図である。

[図20]外部環境試験Ｉにおける、外部環境測定試験で使用した試験システムの外観写真である。

[図21]外部環境に於けるＲＦセンサ２の周囲の水位レベルとＲＳＳとの測定結果を示す図である。

[図22]各時刻におけるＲＦセンサ２の周囲の浸水状況を示す写真である。

[図23]外部環境に於けるＲＦセンサ２の周囲の水位レベルとＲＳＳの分散σ^2（ＲＳＳ）との測定結果を示す図である。

[図24]外部環境に於けるＲＦセンサ２の周囲の水位レベルと正常受信回数との測定結果を示す図である。

[図25]外部環境に於けるＲＦセンサ２の周囲の水位レベルとＶＲＳＳとの測定結果を示す図である。

[図26]外部環境試験ＩＩにおける、浸水検出装置１及び各ＲＦセンサ２を設置した場所の周辺環境とそれらの位置関係を示す図である。

[図27]外部環境試験ＩＩにおける、各ＲＦセンサ２の設置状態を示す図である。（ａ）対岸から各ＲＦセンサ２を視た図、（ｂ）斜め上方から各ＲＦセンサ２を視た図。

[図28]外部環境試験ＩＩにおける、浸水検出装置１の設置状態を示す図であ

る。（ａ）浸水検出装置１及びその設置位置周辺の外観図、（ｂ）浸水検出装置１の内部。

[図29]水位レベル及びＲＦセンサ２ａに対するＲＳＳの時間変化の実測値を示す図である。

[図30]水位レベル及びＲＦセンサ２ａに対する正常受信回数の時間変化の実測値を示す図である。

[図31]水位レベル及びＲＦセンサ２ａに対するＲＳＳの分散値の時間変化の実測値を示す図である。

[図32]測定された水位レベルとＲＳＳの関係を示す図である。

[図33]水面反射干渉モデルを示す図である。

[図34]水位レベル及びＲＦセンサ２ａ，２ｂ，２ｃに対するＲＳＳの時間変化の実測値を示す図である。

[図35]２つのＲＦセンサ２ａ，２ｂに対するＲＳＳの比の時間変化を示す図である。

[図36]浸水検出装置１の浸水・冠水の有無の検出動作を表すフローチャートである。

[図37]本発明の実施例２に係る浸水検出システムの全体配置を示す図である。

[図38]図３７の浸水検出装置１’及び管理サーバ４２の機能構成を表すブロック図である。

[図39]本発明の実施例３に係る浸水検出システムの全体配置図の一例を示す図である。

[図40]図３９の浸水検出装置１の構成を示すブロック図である。

[図41]アレイアンテナ１１ａの原理を説明する図である。

[図42]アレイアンテナ１１ａにより得られる電波のＡＰＳの一例を示す図である。（ａ）水面反射波がない場合、（ｂ）水面反射波がある場合。

[図43]本発明の実施例４に係る浸水検出システムの全体配置図の一例を示す図である。

[図44]図４３の浸水検出装置１の構成を示すブロック図である。

[図45]アレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサS_iとセンサ通信アンテナ１１との位置関係を示す図である。

[図46]各水位d_wに対する各高さに設置されたＲＦセンサからの受信信号の強度との関係の一例を示す図である。

[図47]アレイＲＦセンサ２ａの他の構成例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0055] 以下、本発明を実施するための形態について、図面を参照しながら説明する。

[0056] 最初に、本明細書で使用される主要な用語について、以下の通りに定義する。

「ＲＦセンサ」（RF（Radio-Frequency）sensor）とは、定期的に電波周波数帯域の応答信号を発信する無線モジュールをいう。「センサＩＤ」（Sensor ID）とは、ＲＦセンサの識別符号をいう。「電波応答信号」（radio response signal）とは、ＲＦセンサが発信する電波信号であって、そのＲＦセンサのセンサＩＤを含む信号をいう。「受信応答信号」（received response signal）とは、電波応答信号を復調処理や復号処理を行うことにより生成される電気信号をいう。「受信信号強度」（Received Signal Strength：以下「ＲＳＳ」という。）とは、受信応答信号の強度をいう。「受信信号強度変動度」（variability of RSS：以下「ＶＲＳＳ」という。）とは、ＲＳＳの時間変化値の絶対値をいう。ここで、ＲＳＳの時間変化値の定義については、（ｎ－１）回目に受信された受信応答信号のＲＳＳをＩ（ｎ－１）、ｎ回目に受信された受信応答信号のＲＳＳをＩ（ｎ）とすると、ｎ回目の時間変化値ＤＩ（ｎ）は、ＤＩ（ｎ）＝Ｉ（ｎ）－Ｉ（ｎ－１）として定義してもよいし、ＤＩ（ｎ）＝Ｉ（ｎ）／Ｉ（ｎ－１）として定義してもよい。後者の定義は、ＲＳＳの値を対数（デシベル）で取り扱う場合に使用される。「正常受信率」（normal reception rate）とは、一定の時間内に受信応答信号が正常に受信された割合をいう。「浸水検出信号」（flood detection signal

）とは、ＲＦセンサの浸水の検出の有無を表す信号をいう。「浸水注意信号」（flood caution signal）とは、ＲＦセンサが浸水はしていないがその下方が浸水したことの検出の有無を表す信号をいう。

実施例 １

[0057] （１）浸水検出システムの全体配置

図１は、本発明の実施例１に係る浸水検出システムの全体配置の一例を示す図である。本実施例１の浸水検出システムは、浸水検出装置１と一乃至複数のＲＦセンサ２とを備えている。

[0058] ＲＦセンサ２は、定期的に、所定の信号パターンの電波応答信号を無線発信する無線モジュールである。本実施例では、ＲＦセンサ２は、定期的に（１秒間隔で）電波応答信号を自発的に無線発信する自発発信型のものを例として示す。電波応答信号には、ＲＦセンサ２を特定するための識別符号（以下「センサＩＤ」という。）が含まれている。

[0059] 尚、ＲＦセンサ２としては、ＲＦＩＤシステム（Radio Frequency IDentification System）で用いられるＲＦタグ（RF tag）のように、浸水検出装置１から定期的に送信される質問信号（interrogation signal）に対して電波応答信号を無線発信する受動発信型のものを用いることもできる。

[0060] 浸水検出装置１は、ＲＦセンサ２から送信される電波応答信号を受信すると共に、電波応答信号の受信状態から、ＲＦセンサ２の周囲の浸水の有無を判定する装置である。この浸水検出装置１の詳細については後述する。図１に示すように、浸水検出装置１は、増水時にも浸水しないように、ＲＦセンサ２よるも高所に設置される。

[0061] ＲＦセンサ２は、図１（ａ）のように、１つの浸水検出装置１に対して１つ設けてもよいし、図１（ｂ），（ｃ）のように、１つの浸水検出装置１に対して複数設け、各ＲＦセンサ２の設置高さを変えたり、設置場所を変えたりして配置することができる。１つの浸水検出装置１に対して複数のＲＦセンサ２を設けた場合には、浸水検出装置１において受信される各ＲＦセンサ２からの電波応答信号は、各電波応答信号に含まれるセンサＩＤを参照する

ことによって、どのＲＦセンサ２からの電波応答信号であるかが識別される。

[0062] （２）浸水検出装置１の構成

図２は、浸水検出装置１の構成を示すブロック図である。本実施例の浸水検出装置１は、センサ通信アンテナ１１、送受信Ｉ／Ｆモジュール１２、マイコン１３、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４、上位通信アンテナ１５、及び初期化スイッチ１６を備えている。

[0063] センサ通信アンテナ１１は、ＲＦセンサ２との間での電波の送受信を行うアンテナである。小型化のため、プリント基板などに形成された平面アンテナを用いることが好ましい。送受信インタフェース・モジュール１２（以下「送受信Ｉ／Ｆモジュール１２」）は、センサ通信アンテナ１１を介してＲＦセンサ２との間の通信処理を行うモジュールである。本実施例では、送受信インタフェース・モジュール１２の一例として、長い通信距離を確保するため、スペクトル拡散通信を用いた通信インタフェース・モジュールを使用する。この送受信Ｉ／Ｆモジュール１２は、センサ通信アンテナ１１によりＲＦセンサ２より受信される電波応答信号から、復調処理や復号処理を行い、受信応答信号を生成する。受信応答信号には、上述したセンサＩＤが含まれている。コンピュータ１３は、浸水検出装置１の動作制御を行う。コンピュータ１３としては、マイコンや、ＰＬＤ(programmable logic device)，ＦＰＧＡ（field-programmable gate array）等のリコンフィギャラブル・コンピュータ（reconfigurable computer）などを用いることができる。上位通信インタフェース・モジュール１４（以下「上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４」）は、ＲＦセンサの浸水の検出を示す浸水検出信号や、ＲＦセンサが浸水はしていないがその下方が浸水していることを検出する浸水注意信号を、上位のサーバやインターネット等の上位ネットワークに送信するための通信を行うモジュールである。本実施例では、Bluetooth（登録商標）（IEEE 802.15規格）やWi-Fi（登録商標）（IEEE 802.11規格）等の、汎用性の高い通信インタフェース・モジュールが使用される。尚、本実施例では、浸水検出装置

１を上位ネットワークに接続する手段として、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４による無線接続手段を使用する例を示すが、ケーブルにより有線接続する構成とすることも可能である。上位通信アンテナ１５は、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４が上位ネットワークに接続する際の無線通信に用いられるアンテナである。この上位通信アンテナ１５も、小型化のため、プリント基板などに形成された平面アンテナを用いることが好ましい。初期化スイッチ１６は、ＲＦセンサの浸水やＲＦセンサの下方が浸水を判定するための各種閾値を機械学習により設定するための初期化指示を入力するスイッチである。

[0064] また、上述のコンピュータ１３は、図２に示した様に、受信信号強度検出部２１、受信強度散布度検出部２２、分散閾値設定部２３、正常受信率検出部２４、正常受信率閾値設定部２５、受信信号強度変動検出部２６、強度変動閾値設定部２６ａ、浸水判定部２７、浸水注意報判定部２８、及び判定信号送信部２９を備えている。これらの各構成部分は、コンピュータ１３にプログラムを読み込ませて実行することによって、コンピュータ１３内部に機能的に構成される機能モジュールである。

[0065] 受信信号強度検出部２１は、各時刻ｔにおいて、送受信Ｉ／Ｆモジュール１２により出力される受信応答信号の強度である受信信号強度（ＲＳＳ）Ｉ（ｔ）を検出する処理を行うモジュールである。尚、水面波によるノイズの影響を低減するため、受信信号強度検出部２１は、時刻ｔから前の一定の時間内のＲＳＳの平均値（移動平均値）をＩ（ｔ）として出力するように構成してもよい。受信強度散布度検出部２２は、各時刻ｔにおいて、受信信号強度検出部２１が検出するＲＳＳ Ｉ（ｔ）の一定時間Δt_1内の分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）を検出する処理を行うモジュールである。分散閾値設定部２３は、地面が冠水していない平時の場合のＲＳＳ Ｉ（ｔ）の分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）の平均値σ^2_{av0}を機械学習し、平均値σ^2_{av0}に所定の係数r_σ（r_σ＞１）を乗じた値を閾値σ^2_{th1}に設定する処理を行うモジュールである。

[0066] 正常受信率検出部２４は、各時刻ｔにおいて、一定の時間Δt_2内に受信応

答信号が正常に受信された割合である正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）を検出する処理を行うモジュールである。正常受信率閾値設定部２５は、地面が冠水していない平時の場合の正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）の平均値Ｒ$_{av0}$を機械学習し、平均値Ｒ$_{av0}$に所定の係数ｒ$_R$（０＜ｒ$_R$＜１）を乗じた値を閾値Ｒ$_{th1}$に設定する処理を行うモジュールである。

[0067] 受信信号強度変動検出部２６は、各時刻ｔにおいて、ＲＳＳＩ（ｔ）の時間変化値ＤＩ（ｔ）＝Ｉ（ｔ）－Ｉ（ｔ－δｔ）又はＩ（ｔ）／Ｉ（ｔ－δｔ）の絶対値である受信信号強度変動度（ＶＲＳＳ）｜ＤＩ（ｔ）｜を検出する処理を行うモジュールである。ここで、δｔは、前回の電波応答信号の受信時刻から今回（時刻ｔ）の電波応答信号の受信時刻までの時間を表す。強度変動閾値設定部２６ａは、地面が冠水していない平時の場合のＶＲＳＳ｜ＤＩ（ｔ）｜の平均値｜ＤＩ｜$_{av0}$を機械学習し、平均値｜ＤＩ｜$_{av0}$に所定の係数ｒ$_{DI}$（ｒ$_{DI}$＞１）を乗じた値を閾値ＤＩ$_{th}$に設定する処理を行うモジュールである。

[0068] 浸水判定部２７は、受信強度散布度検出部２２が出力する分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）が閾値σ$^2_{th1}$以上で、且つ正常受信率検出部２４が出力する正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）が所定の閾値Ｒ$_{th1}$以下となった場合に、浸水検出信号を出力する処理を行うモジュールである。

[0069] 浸水注意報判定部２８は、ＲＦセンサが浸水はしていないがその下方が浸水したことの検出の有無を表す浸水注意信号を生成し出力する処理を行うモジュールである。浸水注意報判定部２８は、受信強度散布度検出部２２が出力する分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）が閾値σ$^2_{th2}$以上となった場合や、一定の時間Δｔ$_3$内にＶＲＳＳ｜ＤＩ（ｔ）｜が閾値ＤＩ$_{th}$を超えた回数Ｎ$_{DI}$が、所定の閾値Ｎ$_{DIth}$を超えた場合に、浸水注意信号を出力する。

[0070] 判定信号送信部２９は、浸水判定部２７が出力する浸水検出信号や、浸水注意報判定部２８が出力する浸水注意信号を、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４を通して上位ネットワークに送信する処理を行うモジュールである。

[0071] 尚、本実施例では、ＲＳＳＩ（ｔ）の「散布度」として、分散値σ^2（Ｉ

（ｔ））を用いた例を示すが、本発明に於いては、「散布度」として、これ以外に、標準偏差，不偏分散，平均偏差，データの範囲などを用いることもできる。

[0072] （３）浸水検出の原理

次に、本実施例の浸水検出システムに於いて、ＲＦセンサの浸水や、ＲＦセンサが浸水はしていないがその下方が浸水したことの検出を行う原理について説明する。

[0073] まず、浸水検出装置１において受信される電波応答信号のＲＳＳＩ（ｔ）とＲＦセンサ２の周辺の水位レベルとの関係について説明する。ＲＦセンサ２から浸水検出装置１のセンサ通信アンテナ１１へ電波応答信号が送信される場合において、ＲＦセンサ２の下方に水面が存在する場合を考える。ここでは、原理的な説明なので、理解を容易にするため、水面は波が全くない静水面であると仮定する。この場合、電波応答信号の伝搬経路は、図３に示したようになる。図３において、ＲＦセンサ２を送信点Ａ、センサ通信アンテナ１１を受信点Ｂとし、点Ａ，Ｂは静水面上にあるとして、図３に示した様に、点Ａ，Ｂを含む鉛直面内に、水平向きにx軸、鉛直向きにy軸をとったｘ－ｙ座標系を設定する。送信点Ａの座標を$(0, y_A)$、受信点Ｂの座標を(x_B, y_B)とし、水面を$y=y_0$とする。送信点Ａから発射される電磁波（電波応答信号）は、放射状に広がる球面波であると仮定したとき、受信点Ｂに到達する電磁波の経路は、(1) 送信点Ａから受信点Ｂへ直接至る経路p_{AB}、(2) 送信点Ａから水面上の反射点Ｃで反射され、受信点Ｂへ至る経路p_{ACB}、(3) 送信点Ａから水面上の屈折点Ｄで屈折して水中へ進入し、水底面上の反射点Ｅで反射され、水面上の屈折点Ｃで屈折し、受信点Ｂへ至る経路p_{ADECB}、…などが考えられる。今想定している電磁波の周波数は、ＲＦＩＤやBluetooth（登録商標）などの通常の電波無線通信で使用される周波数帯（900MHz～十数GHz）である。この周波数帯においては、水の比誘電率は８０程度であり、水の屈折率は８～９程度と非常に大きい。そのため、水面での電磁波の反射率が大きく、水中での電磁波の誘電損失による減衰も非常に大きいと考えられるので、ここでは

、経路p_{AB}，p_{ACB}のみを考えることとする。水面から送信点Ａまでの距離をy_{A0}、水面から受信点Ｂまでの距離をy_{B0}、$h_{BA}=y_B-y_A$とする。このとき、経路p_{AB}の経路長l_{AB}、経路p_{ACB}の経路長l_{ACB}、経路p_{ACB}の反射点Ｃのx座標x_C、反射点Ｃの入射・反射角θ_C、及び受信点Ｂにおいて経路p_{AB}，p_{ACB}が成す角θ_Bは、其々、次のように表される。

[0074] [数1]

$$l_{AB}=\sqrt{x_B^2+h_{BA}^2} \tag{1a}$$

$$\begin{aligned} l_{ACB} &= \sqrt{x_C^2+y_{A0}^2}+\sqrt{(x_B-x_C)^2+y_{B0}^2} \\ &= \frac{1}{h_{BA}}\left\{y_{A0}\sqrt{x_B^2+h_{BA}^2}+\sqrt{x_B^2(h_{BA}-y_{A0})^2+h_{BA}^2y_{B0}^2}\right\} \end{aligned} \tag{1b}$$

$$x_C=\frac{y_{A0}}{y_{A0}+y_{B0}}x_B, \tag{1c}$$

$$\theta_C=\mathrm{atctan}\left(\frac{x_C}{y_{A0}}\right)=\mathrm{atctan}\left(\frac{x_B}{y_{A0}+y_{B0}}\right) \tag{1d}$$

$$\theta_B=\mathrm{atctan}\frac{x_B}{h_{BA}}-\theta_C \tag{1e}$$

[0075] また、経路p_{AB}，p_{ACB}を通って受信点Ｂに入射される電磁波の電場成分を、其々、E_1，E_2とし、磁場成分を、其々、H_1，H_2とし、電場E_1，E_2のｐ偏光成分をE_{1p}，E_{2p}、磁場H_1，H_2のｐ偏光成分をH_{1p}，H_{2p}、電場E_1，E_2のｓ偏光成分をE_{1s}，E_{2s}、磁場H_1，H_2のｓ偏光成分をH_{1s}，H_{2s}とし、E_{1p}，E_{2p}，E_{1s}，E_{2s}，H_{1p}，H_{2p}，H_{1s}，H_{2s}を、其々、次のように表す（図４参照）。

[0076] [数2]

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E}_{1p}(t)&=\boldsymbol{i}_1E_{10p}\cos\omega t, & \boldsymbol{H}_{1p}(t)&=\boldsymbol{i}_zH_{10p}\cos\omega t \\ \boldsymbol{E}_{2p}(t)&=\boldsymbol{i}_2E_{20p}\cos(\omega t+\phi_{12}), & \boldsymbol{H}_{2p}(t)&=\boldsymbol{i}_zH_{20p}\cos(\omega t+\phi_{12}) \\ \boldsymbol{E}_{1s}(t)&=\boldsymbol{i}_zE_{10s}\cos\omega t, & \boldsymbol{H}_{1s}(t)&=\boldsymbol{i}_1H_{10s}\cos\omega t \\ \boldsymbol{E}_{2s}(t)&=\boldsymbol{i}_zE_{20s}\cos(\omega t+\phi_{12}), & \boldsymbol{H}_{2s}(t)&=\boldsymbol{i}_2H_{20s}\cos(\omega t+\phi_{12}) \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、i_1，i_2は、其々、電場E_1，E_2の向きを表す単位ベクトル、i_zはx-y平面に垂直な向きの単位ベクトル、ωは電磁波の角周波数、ϕ_{12}は、受信点Ｂにおける電磁波(E_1，H_1)に対する電磁波(E_2，H_2)の位相シフト量である。

[0077] このとき、受信点Ｂにおけるｐ偏光電磁波及びｓ偏光電磁波のエネルギー密度の時間平均値$\langle U_p\rangle$，$\langle U_s\rangle$は、其々、次のように表される。ここで、$\langle U_{1p}\rangle$，$\langle U_{1s}\rangle$は送信点Ａから経路p_{AB}を通って受信点Ｂに到達する電磁波（直接波）のｐ偏光成分，ｓ偏光成分のエネルギー密度の時間平均値、$\langle U_{2p}\rangle$，$\langle U_{2s}\rangle$は送信

点Ａから経路p_{ACB}を通って受信点Ｂに到達する電磁波（反射波）のｐ偏光成分，ｓ偏光成分のエネルギー密度の時間平均値である。

[0078] [数3]

$$\langle U_p \rangle = \frac{1}{2}\left[\langle U_{1p}\rangle + \langle U_{2p}\rangle + \sqrt{\langle U_{1p}\rangle\langle U_{2p}\rangle}(1+\cos\theta_B)\cos\phi_{12}\right] \tag{3a}$$

$$\langle U_{1p}\rangle = \epsilon_0 E_{10p}^2 = \mu_0 H_{10p}^2, \quad \langle U_{2p}\rangle = \epsilon_0 E_{20p}^2 = \mu_0 H_{20p}^2 \tag{3b}$$

$$\langle U_s \rangle = \frac{1}{2}\left[\langle U_{1s}\rangle + \langle U_{2s}\rangle + \sqrt{\langle U_{1s}\rangle\langle U_{2s}\rangle}(1+\cos\theta_B)\cos\phi_{12}\right] \tag{3c}$$

$$\langle U_{1s}\rangle = \epsilon_0 E_{10s}^2 = \mu_0 H_{10s}^2, \quad \langle U_{2s}\rangle = \epsilon_0 E_{20s}^2 = \mu_0 H_{20s}^2 \tag{3d}$$

[0079] また、電磁波の波長をλとすると、位相シフト量ϕ_{12}は次のように表される。

[0080] [数4]

$$\phi_{12} = \phi_2 - \phi_1 \tag{4a}$$

$$\phi_1 = 2\pi\frac{l_{AB}}{\lambda}, \quad \phi_2 = 2\pi\frac{l_{ACB}}{\lambda} + \pi \tag{4b}$$

[0081] 今、送信点Ａから発射される電磁波は球面波であると仮定しているので、送信点Ａからの光路長をｌとすると、電磁波のエネルギー密度は$1/l^2$に比例して減衰する。従って、送信点Ａから発射されるｐ偏光電磁波，ｓ偏光電磁波のエネルギー密度の時間平均値を$\langle U_{p0}\rangle$，$\langle U_{s0}\rangle$とすると、$\langle U_{1p}\rangle$，$\langle U_{1s}\rangle$，$\langle U_{2p}\rangle$，$\langle U_{2s}\rangle$は、其々次のように表される。

[0082] [数5]

$$\langle U_{1p}\rangle = \frac{\langle U_{p0}\rangle}{l_{AB}^2}, \quad \langle U_{1s}\rangle = \frac{\langle U_{s0}\rangle}{l_{AB}^2} \tag{5a}$$

$$\langle U_{2p}\rangle = R_p\frac{\langle U_{p0}\rangle}{l_{ACB}^2}, \quad \langle U_{2s}\rangle = R_s\frac{\langle U_{s0}\rangle}{l_{ACB}^2} \tag{5b}$$

ここで、R_p，R_sは、其々、ｐ偏光，ｓ偏光の水面における強度反射率であり、水の屈折率をｎ（周波数2.4GHzではn=8.94（水温10℃））とすると次のように表される。

[0083]

[数6]

$$R_p = \frac{\left| n^2 \cos\theta_C - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_C} \right|^2}{\left| n^2 \cos\theta_C + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_C} \right|^2} \quad (6a)$$

$$R_s = \frac{\left| \cos\theta_C - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_C} \right|^2}{\left| \cos\theta_C + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_C} \right|^2} \quad (6b)$$

[0084] 以上の各式により、受信点Ｂにおいて受信される電磁波の電場成分の相対エネルギー密度（受信点Ｂの電場エネルギー密度を送信点Ａの電場エネルギー密度で除した値）の時間平均$\langle U_p \rangle$, $\langle U_s \rangle$と水面の高さy_{A0}との関係を計算すると、図５，図６のようになる。ここで、h_{BA}=1mとし、図５ではx_B=1m、図６ではx_B=10mとしている。図５，図６より、水面が送信点Ａに近づくにつれて、直接波と反射波との干渉が大きくなるため、受信点Ｂにおいて受信される電磁波の電場成分の相対エネルギー密度のy_{A0}の変化による振動が大きくなる。実際の水面は疑似ランダムに振動しているため、水面が送信点Ａに近づくにつれて、受信点Ｂにおける電磁波の受信強度の分散が大きくなる現象として観測される。

[0085] 以上の考察は水面が静水面と仮定した場合についてのものであるが、実際の水面は波立っている。そこで、次に、波のある水面について考察する。実際の水面は３次元な広がりがあるが、ここでは定性的な簡単な評価のみをおこなうこととして、送信点と受信点を含む鉛直平面（以下「反射平面」（reflection plane）という。）内のみについて考えることとする。

[0086] 図７は、波がある水面における反射平面内の電磁波の伝搬経路を表す図である。図７において、送信点Ａから受信点Ｂに向かって電磁波が伝達する場合を考える。平均水面（平均水位の水平面）を含む水平面上にｘ軸を設定し、鉛直上方に向けてｚ軸を設定し、送信点Ａからｘ軸に下ろした足に原点Ｏを設定する。電磁波は、送信点Ａから受信点Ｂへ直接到達する経路ＡＢのほかに、送信点Ａから水波面上の反射点Ｃで反射されて受信点Ｂへ到達する経路ＡＣＢをとるとする。反射点Ｃにおける水波面の接線が水平面と成す角を

φとし、該接線が経路ＡＣ及び経路ＣＢと成す角をφとし、反射点Ｃにおける水波面の法線が経路ＡＣ及び経路ＣＢと成す角をθとする。θは反射点Ｃにおける電磁波の入射・反射角である。反射点Ｃからｘ軸に下ろした垂線の足をＣ’、受信点Ｂからｘ軸に下ろした垂線の足をＢ’とする。各部の長さを、ＯＡ＝h_A，Ｂ’Ｂ＝h_B，Ｃ’Ｃ＝h_C，ＯＢ’＝l，ＯＣ’＝l_0，Ｃ’Ｂ’＝l_1，ＡＢ＝l_{AB}，ＡＣ＝l_{AC}，ＣＢ＝l_{CB}とおく。また、反射点Ｃに対する送信点Ａ及び受信点Ｂの高さを、其々、$h_0=h_A-h_C$，$h_1=h_B-h_C$とおく。このとき、入射・反射角θは次のように表される。

[0087] [数7]

$$\theta=\arccos\left[\sqrt{\frac{K_1+\sqrt{K_1^2-4K_2K_0}}{2K_2}}\right] \tag{7a}$$

$$K_2=l^2+(h_1+h_0)^2>0 \tag{7b}$$

$$K_1=(h_1+h_0)^2+2l^2\sin^2\phi-2l\alpha \tag{7c}$$

$$K_0=(\alpha-l\sin^2\phi)^2 \tag{7d}$$

$$\alpha=(h_1-h_0)\sin\phi\cos\phi \tag{7e}$$

[0088] また、経路ＡＢ及び経路ＡＣＢの経路長l_{AB}，l_{ACB}は、其々次のように表される。

[0089] [数8]

$$l_{AB}=\sqrt{l^2+(h_1-h_0)^2} \tag{8a}$$

$$l_{ACB}=\sqrt{l_0^2+h_0^2}+\sqrt{l_1^2+h_1^2} \tag{8b}$$

$$l_0=h_0\tan(\theta+\phi) \tag{8c}$$

$$l_1=h_1\tan(\theta-\phi)=l-l_0 \tag{8d}$$

[0090] 送信点Ａから経路ＡＢを通り受信点Ｂに到達する電磁波（直接波）ｗ（ＡＢ）に対する、送信点Ａから経路ＡＣＢを通り受信点Ｂに到達する電磁波（反射波）ｗ（ＡＣＢ）の位相差をΔΦとする。反射点Ｃで位相がπ[rad]ずれることを考慮すれば、位相差ΔΦは次のように表される。ここで、λは電磁波の波長、ωは電磁波の各周波数、ｃは光速である。

[0091]

[数9]

$$\Delta\Phi = \frac{l_{ACB} - l_{AB}}{\lambda} + \pi \tag{9a}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} \tag{9b}$$

[0092] 従って、受信点Ｂで受信される電磁波の受信強度Ｉ$_B$は、次のように表される。ここで、Ｉ$_{AB}$は受信点Ｂにおける直接波ｗ（ＡＢ）の強度、Ｉ$_{ACB}$は受信点Ｂにおける反射波ｗ（ＡＣＢ）の強度、Ｒ（θ）は式（６ａ）又は式（６ｂ）で表される強度反射率、Ｉ$_0$は送信点Ａから送信される電磁波の強度、ｃｏｓξは経路ベクトル（ＡＢ）及び経路ベクトル（ＣＢ）の間の方向余弦を表す。

[0093] [数10]

$$I_B = \frac{1}{2}\left[I_{AB} + I_{ACB} + \sqrt{I_{AB} I_{ACB}}(1 + \cos\xi)\cos\Delta\Phi\right] \tag{10a}$$

$$I_{AB} = \frac{I_0}{l_{AB}^2} \tag{10b}$$

$$I_{ACB} = R(\theta)\frac{I_0}{l_{ACB}^2} \tag{10c}$$

$$\cos\xi = \frac{\overrightarrow{AB}}{|\overrightarrow{AB}|}\cdot\frac{\overrightarrow{CB}}{|\overrightarrow{CB}|} = \frac{l_1 l + h_1(h_1 - h_0)}{l_{AB} l_{BC}} \tag{10d}$$

[0094] 実際の水波面の動きは極めて複雑であるが、ここでは簡単に、水波面を正弦波で近似することとし、水波の振幅をｈ$_w$、波長をλ_w、角振動数をω_wとして、反射点の高さｈ$_C$を次のように表す。ここで、ｔは時刻、ｘ$_C$は反射点Ｃのｘ座標であり$x_C = l_0$である。

[0095] [数11]

$$h_C = h_w \sin\left(2\pi\frac{x_C}{\lambda_w} - \omega_w t\right) \tag{11}$$

[0096] ここで、通常の水波面では$\lambda_w = k_w \cdot 2\pi h_w$（ｋｗ＝１～１．５）程度である。反射点Ｃにおける接線傾斜角ϕの正接は式（１１）をｘ$_C$で偏微分することによって得られるので、結局、接線傾斜角ϕは次のように表される。

[0097]

[数12]

$$\phi = \arctan\left[2\pi\frac{h_w}{\lambda_w}\cos\left(2\pi\frac{x_C}{\lambda_w}-\omega_w t\right)\right] \tag{12}$$

[0098] 今、時刻ｔは任意変数であるので、ξ＝２πｘ$_C$／λ$_w$－ω$_w$ｔも任意変数である。そこで、（ｈ$_C$，φ）を任意変数ξの函数とみなし、次のように表す。

[0099] [数13]

$$h_C(\xi) = h_w \sin\xi \tag{13a}$$

$$\phi(\xi) = \arctan\left[2\pi\frac{h_w}{\lambda_w}\cos\xi\right] \tag{13b}$$

[0100] そして、

（ｉ）まず、ξを区間［０，２π）の一様乱数で発生させて（ｈ$_C$，φ）を決定する。

（ｉｉ）次に、発生させた（ｈ$_C$，φ）から、式（７ａ）により入射・反射角θを決定する。

（ｉｉｉ）次に、（φ，θ）から、式（８ｂ）により反射経路長ｌ$_{ACB}$を決定する。

（ｉｖ）次に、ｌ$_{ACB}$から、式（９ａ）により位相差ΔΦを決定する。

（ｖ）最後に、（ｌ$_{ACB}$，ΔΦ）から、式（１０ａ）により電磁波の受信強度ｌ$_B$を決定する。

という一連の処理を繰り返し実行し、電磁波の受信強度ｌ$_B$の分布をモンテカルロ法により計算する。尚、この計算に於いては、異なる２つ以上の経路の反射波が同時に干渉する場合については、発生確率が小さいであろうと仮定して考慮していない。

[0101] 図８は、（ａ）反射点Ｃの高さｈ$_C$の確率分布函数ｆ$_{hC}$（ｈ$_C$）、及び（ｂ）水面に波がある場合の受信点Ｂにおける相対受信強度ｌ$_B$／ｌ$_0$の確率分布函数ｆ$_{lB}$（ｌ$_B$／ｌ$_0$）の計算結果を表す図である。図８（ｂ）の計算では、Ｓ波を使用した。図８（ｂ）の計算に於いて、各定数は、水の比屈折率ｎ$_r$＝８．９４４、送受信点間水平距離ｌ＝１０ｍ、送信点高さｈ$_A$＝０．５ｍ、受信点高さｈ$_B$＝１．０ｍ、水波振幅ｈ$_w$＝０．１ｍ、水波波長λ$_w$＝１．５×２

πh_w＝０．９４２ｍ、電磁波周波数ｆ＝２．０ＧＨｚとした。また、モンテカルロ計算回数は１０，０００，０００回とした。上述の通り水波面を正弦波で近似したので、h_Cの確率分布函数$f_{hC}(h_C)$は、図８（ａ）に示すような逆正弦分布関数となる。そして、受信強度I_Bの確率分布函数$f_{IB}(I_B)$は、この確率分布函数$f_{hC}(h_C)$が反映されたものとなる。

[0102] 図９は、水位の変化に伴う相対受信強度I_B/I_0の平均値ave(I_B/I_0)の変化の計算結果を表す図である。図１０は、水位の変化に伴う相対受信強度I_B/I_0の標準偏差$\sigma(I_B/I_0)$の変化の計算結果を表す図である。図９，図１０の計算では、Ｓ波を使用した。図９，図１０に於いて、各定数は、水の比屈折率n_r＝８．９４４、送受信点間水平距離Ｉ＝１０ｍ、送信点高さh_A＝２．０ｍ、受信点高さh_B＝５．０ｍ、水波波長λ_w＝１．５×$2\pi h_w$、電磁波周波数ｆ＝２．０ＧＨｚとした。また、水位１点あたりのモンテカルロ計算回数は２００，０００回とした。横軸の「水位レベル」は、平均水面の高さ（ｚ座標）であり、図９，図１０に於いては、水位が２．０ｍに達したときに平均水面は送信点Ａの高さh_Aまで達する。図９より、水面波の振幅h_wが大きくなるにつれて、反射波の経路長I_{ACB}の分散が大きくなるために反射波の位相差ΔΦの分散が大きくなり、相対受信強度I_B/I_0において現れる反射波の干渉の影響が小さくなる傾向が見られる。また、干渉による相対受信強度I_B/I_0の平均値ave(I_B/I_0)の変動振幅の大きさ及び相対受信強度I_B/I_0の標準偏差$\sigma(I_B/I_0)$は、水位が送信点に接近するに従って大きくなる傾向が見られる。

[0103] 以上は、受信点に於いて１つの直接波が１つの反射波と干渉する場合についての検討であったが、次に、送信点から発射された電磁波が受信点に直接到達すると共に、複数の反射点で反射された反射波が受信点に於いて多重干渉する場合についても検討する。実際の水面は３次元的な拡がりを有するので、一般的な議論については３次元空間に於いて行う必要がある。然し、ここでは簡単に定性的な机上検討を行うことを目的とし、送信点と受信点を含む鉛直平面Ｓ内に於ける電磁波の反射と干渉についての検討をする。

[0104] 図１１に示したように、空間内の或る点Ｐに対して（Ｎ＋１）方向から同一周波数の電磁波が入射して干渉する場合を考える。点Ｐに入射する電磁波をray_0，ray_1，…，ray_Nとする。電磁波ray_0，ray_1，…，ray_Nは全て同一平面Ｓ内にあるとし、平面Ｓを「光軸平面」（optic axial plane）と呼ぶ。電場が光軸平面Ｓ内にあり磁場が光軸平面Ｓに垂直である電磁波ray_i（ｉ＝０，…，Ｎ）の成分（Ｐ偏光成分）の電場を$E_i^{(p)}$、磁場を$H_i^{(p)}$と記す。電場が光軸平面Ｓに垂直であり磁場が光軸平面Ｓ内にある電磁波ray_i（ｉ＝０，…，Ｎ）の成分（Ｓ偏光成分）の電場を$E_i^{(s)}$、磁場を$H_i^{(s)}$と記す。また、電磁波ray_i（ｉ＝０，…，Ｎ）の光軸が水平線と成す角をθ_iと記す。

[0105] まず、Ｐ偏光成分について考える。電磁波ray_0，ray_1，…，ray_NのＰ偏光成分の電場及び磁場を、其々次のように表す。

[0106] [数14]

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{E}_0^{(p)} = \boldsymbol{i}_0 E_0^{(p)} \cos(\omega t + \phi_0), && \boldsymbol{H}_0^{(p)} = \boldsymbol{i}_z H_0^{(p)} \cos(\omega t + \phi_0)\\
&\boldsymbol{E}_1^{(p)} = \boldsymbol{i}_1 E_1^{(p)} \cos(\omega t + \phi_1), && \boldsymbol{H}_1^{(p)} = \boldsymbol{i}_z H_1^{(p)} \cos(\omega t + \phi_1)\\
&\qquad\vdots && \qquad\vdots\\
&\boldsymbol{E}_i^{(p)} = \boldsymbol{i}_i E_i^{(p)} \cos(\omega t + \phi_i), && \boldsymbol{H}_i^{(p)} = \boldsymbol{i}_z H_i^{(p)} \cos(\omega t + \phi_i)\\
&\qquad\vdots && \qquad\vdots\\
&\boldsymbol{E}_N^{(p)} = \boldsymbol{i}_N E_N^{(p)} \cos(\omega t + \phi_N), && \boldsymbol{H}_N^{(p)} = \boldsymbol{i}_z H_N^{(p)} \cos(\omega t + \phi_N)
\end{aligned} \tag{14}$$

[0107] ここで、ベクトルi_0，…，i_Nは、其々、光軸平面Ｓ内で且つ電磁波ray_0，ray_1，…，ray_Nの光軸に垂直な方向の単位ベクトル、i_zは光軸平面Ｓに垂直な方向の単位ベクトル、ϕ_0，…，ϕ_Nは、其々、電磁波ray_0，ray_1，…，ray_Nの点Ｐにおける位相である。このとき、点Ｐにおける干渉波の電場及び磁場は次のようになる。

[0108] [数15]

$$\boldsymbol{E}^{(p)} = (E_x^{(p)}, E_y^{(p)}, 0), \quad \boldsymbol{H}^{(p)} = (0, 0, H_z^{(p)}) \tag{15a}$$

$$E_x^{(p)} = \sum_{k=0}^{N} E_k^{(p)} \sin\theta_k \left[-\cos\phi_k \cos\omega t + \sin\phi_k \sin\omega t\right] \tag{15b}$$

$$E_y^{(p)} = \sum_{k=0}^{N} E_k^{(p)} \cos\theta_k \left[\cos\phi_k \cos\omega t - \sin\phi_k \sin\omega t\right] \tag{15c}$$

$$H_z^{(p)} = \sum_{k=0}^{N} H_k^{(p)} \left[\cos\phi_k \cos\omega t - \sin\phi_k \sin\omega t\right] \tag{15d}$$

[0109] これから、点Ｐにおける電場エネルギー$U_E^{(p)}$及び磁場エネルギー$U_H^{(p)}$の時間平均値$\langle U_E^{(p)}\rangle$，$\langle U_H^{(p)}\rangle$を計算すると、其々、次のようになる。

[0110] [数16]

$$\left\langle U_E^{(p)}\right\rangle = \frac{1}{2}\epsilon_0\left[\left\langle E_x^{(p)2}\right\rangle + \left\langle E_y^{(p)2}\right\rangle\right] = \frac{1}{4}\epsilon_0\sum_{k=0}^{N}E_k^{(p)2} + \frac{1}{2}\epsilon_0\sum_{k\neq l}^{N}E_k^{(p)}E_l^{(p)}\cos(\theta_k-\theta_l)\cos(\phi_k-\phi_l) \tag{16a}$$

$$\begin{aligned}\left\langle U_H^{(p)}\right\rangle &= \frac{1}{2}\mu_0\left\langle H_x^{(p)2}\right\rangle = \frac{1}{4}\mu_0\sum_{k=0}^{N}H_k^{(p)2} + \frac{1}{2}\mu_0\sum_{k\neq l}^{N}H_k^{(p)}H_l^{(p)}\cos(\phi_k-\phi_l)\\ &= \frac{1}{4}\epsilon_0\sum_{k=0}^{N}E_k^{(p)2} + \frac{1}{2}\epsilon_0\sum_{k\neq i}^{N}E_k^{(p)}E_l^{(p)}\cos(\phi_k-\phi_l)\end{aligned} \tag{16b}$$

[0111] 故に、点ＰにおけるＰ偏光成分の電磁場エネルギー$U^{(p)}$の時間平均$\langle U^{(p)}\rangle$は次のようになる。

[0112] [数17]

$$\begin{aligned}\left\langle U^{(p)}\right\rangle &= \left\langle U_E^{(p)}\right\rangle + \left\langle U_H^{(p)}\right\rangle = \frac{1}{2}\epsilon_0\sum_{k=0}^{N}E_k^{(p)2} + \frac{1}{2}\epsilon_0\sum_{k\neq l}^{N}E_k^{(p)}E_l^{(p)}(1+\cos(\theta_k-\theta_l))\cos(\phi_k-\phi_l)\\ &= \frac{1}{2}\left[\sum_{k=0}^{N}\left\langle U_k^{(p)}\right\rangle + \sum_{k\neq l}^{N}\sqrt{\left\langle U_k^{(p)}\right\rangle\left\langle U_l^{(p)}\right\rangle}(1+\cos(\theta_k-\theta_l))\cos(\phi_k-\phi_l)\right]\end{aligned} \tag{17}$$

[0113] ここで、$\langle U_i^{(p)}\rangle$（ｉ＝０，…，Ｎ）は、電磁波ray_iのＰ偏光成分の時間平均エネルギー（即ち、電磁波ray_iのＰ偏光成分の点Ｐでの強度$I_i^{(p)}$）である。Ｓ偏光成分についても、同様に計算することが出来て、点ＰにおけるＳ偏光成分の電磁場エネルギー$U^{(s)}$の時間平均$\langle U^{(s)}\rangle$は次のようになる。ここで、$\langle U_i^{(s)}\rangle$（ｉ＝０，…，Ｎ）は、電磁波ray_iのＳ偏光成分の時間平均エネルギー（即ち、電磁波ray_iのＰ偏光成分の点Ｐでの強度$I_i^{(s)}$）である。

[0114] [数18]

$$\left\langle U^{(s)}\right\rangle = \frac{1}{2}\left[\sum_{k=0}^{N}\left\langle U_k^{(s)}\right\rangle + \sum_{k\neq l}^{N}\sqrt{\left\langle U_k^{(s)}\right\rangle\left\langle U_l^{(s)}\right\rangle}(1+\cos(\theta_k-\theta_l))\cos(\phi_k-\phi_l)\right] \tag{18}$$

[0115] 次に、波立った水面上の送信点Ａから、水平距離lだけ離れた同水面上の受信点Ｂに対して電磁波が送信される場合について考える。送信点Ａと受信点Ｂを含む鉛直平面Ｓを「光軸平面」又は「反射平面」と呼び、この反射平面Ｓ内での反射・干渉について考える。反射平面Ｓ内の水平方向にｘ軸、鉛直方向にｙ軸を設定し、反射平面Ｓに垂直な方向にｚ軸を設定する。水面はｚ方向に対して並進対称であると仮定する。反射平面Ｓ内についてのみ考察す

る場合、水面は、反射平面Ｓ内で振動する水面曲線$f_w(x,t)$として表される。波立った水面に於いて電磁波が反射する場合、反射の法則により、反射点Ｃにおいて、水面の法線に対する電磁波の入射角と反射角とは等しくなる。即ち、反射点Ｃにおける入射経路と反射経路との中線が、反射点Ｃに於ける水面曲線$f_w(x_C,t)$の接線に対して垂直となる。以下、これを「反射条件」（reflection condition）と呼ぶ。送信点Ａから発射されて反射条件を満たして水面で反射され受信点Ｂへ至る経路を「反射経路」（reflection path）と呼ぶ。

[0116] 反射平面Ｓ内で振動する水面曲線$f_w(x,t)$は、xに対して振動する関数なので、一般に反射経路は複数個存在する。そして、これら複数の反射経路を経由した各反射波と、送信点Ａから受信点Ｂへ直接到達する直接波とが、受信点Ｂにおいて多重干渉し、干渉波を形成する。図１２に、波立った水面での反射による多重干渉の一例を示す。図１２において、水面曲線$f_w(x, t)$は正弦波曲線$f_w(x, t)=\sin(2\pi x/\lambda_w+\omega_w t)$（t=0）としている。この場合、送信点Ａから水面上で反射され、反射条件を満たして受信点Ｂへ至る反射経路は１９個存在する。其々の反射経路中の反射点を、図１２の通りC_1，C_2，…，C_{19}とする。これら１９の反射経路のうち、経路AC_{12}，AC_{14}，AC_{16}，AC_{18}は、水面曲線$f_w(x, t)$と交叉しているため、これらの反射経路を採ることは出来ない。「反射経路は水面曲線と交叉しない」という条件を「非交叉条件」（non-crossing condition）と呼ぶ。詰まり、送信点Ａから受信点Ｂへ至る反射経路のうち非交差条件を満たすものが「有効反射経路」（significant reflection path）となる。水面曲線$f_w(x, t)$の形状が同じ場合であっても、水位レベルによって有効反射経路の数は変化する。これは、送受信点と水面とが接近するに従って、反射経路の水面法線に対する入射角が大きくなるため、（１）反射条件を満たす反射経路の数が減少し、（２）反射経路が水面と交叉しやすくなるため非交叉条件を満たす反射経路の数も減少するためである。特に、送受信点と水面とが水面波の波高の数倍程度以下まで接近すると、有効反射経路数n_Cは急激に減少する。図１３に、水位レベルの変化に伴

う有効反射経路数の変化の様子を示す。図１３において、水面曲線は正弦波曲線$f_w(x, t)= h_w \cdot \sin(\omega_w t + 2\pi x/\lambda_w+y_{w0})$とし、時間tは固定（t=0）としている。各パラメータは、送信点Ａの高さh_A=5.0m、受信点Ｂの高さh_B=8.0m、水波振幅h_w=0.05m、水波波長λ_w=1.5×2πh_w=0.942mとし、水位レベルy_{w0}を0.2～4.0mの範囲で変化させている。図１４に、水位レベル（h_A-y_{w0}）と有効反射経路数ｎ$_C$との関係を示す。

[0117] 送信点Ａから受信点Ｂへ直接到達する直接波ray_0の強度$I_0^{(p)}$（＝$\langle U_0^{(p)}\rangle$），$I_0^{(s)}$（＝$\langle U_0^{(s)}\rangle$）と、各有効反射経路に対して受信点Ｂにおける反射波ray_i（ｉ＝１，…，ｎ$_C$）の強度$I_i^{(p)}$（＝$\langle U_i^{(p)}\rangle$），$I_i^{(s)}$（＝$\langle U_i^{(s)}\rangle$）を式（５ａ），（５ｂ）により計算し、式（１７），（１８）によって受信点Ｂにおける干渉波の強度$I_B^{(p)}$（＝$\langle U^{(p)}\rangle$），$I_B^{(s)}$（＝$\langle U^{(s)}\rangle$）を計算する。また、水波曲線は時刻tに従って変動するので、時刻tを１周期T=2π／ω_wだけ等間隔ステップΔｔで変化させて、各時刻t=Δｔ・ｉで干渉波の強度$I^{(p)}$，$I^{(s)}$を計算してその平均及び分散をとることで、各水位レベル（h_A-y_{w0}）及び各水波振幅h_wに対する干渉波の平均強度及び分散を計算することができる。図１５に水位レベルと相対受信強度の平均値ave（Ｉ$_B$／Ｉ$_0$）の関係を示す。図１６に水位レベルと相対受信強度の標準偏差σ（Ｉ$_B$／Ｉ$_0$）の関係を示す。図１５，図１６に於いて、各定数は、水の比屈折率ｎ$_r$＝８．９４４、送受信点間水平距離Ｉ＝１０ｍ、送信点高さｈ$_A$＝２．０ｍ、受信点高さｈ$_B$＝５．０ｍ、水波波長λ$_w$＝１．５×２πｈ$_w$、電磁波周波数ｆ＝２．４ＧＨｚとした。横軸の「水位レベル」は、平均水面から送信点Ａまでの距離（h_A-y_{w0}）である。図１５より、Ｐ偏光・Ｓ偏光ともに、水位レベル（h_A-y_{w0}）の変化に伴い相対受信強度の平均値ave（Ｉ$_B$／Ｉ$_0$）が振動することが分かる。これは、直接波と単一の反射波とが干渉する場合と同様である。また、水位レベル（h_A-y_{w0}）が０～１．５ｍ付近で、相対受信強度の平均値ave（Ｉ$_B$／Ｉ$_0$）が振動しながら増加する傾向が見られるが、これは、この領域では水位レベル（h_A-y_{w0}）が増加するに従って有効反射経路数ｎ$_C$が急激に増加することが反映されたものと考えられる。これは、今回の計算を反射平面Ｓ内に限っており、水面が反射平面Ｓに垂直な方

向（ｚ方向）に対して並進対称であると仮定したことによるものであり、実際の３次元的な水面では、この領域での有効反射経路数n_Cの増加はより緩やかになると考えられる。

[0118] （４）試験結果

（４．１）室内試験

次に、実際にビーコン（beacon）（ＲＦセンサ）と受信器を用いて、水面による電波の受信状況の変化に関して実験を行った結果について説明する。図１７は、実験室において実際にアクティブ型ビーコン（active beacon）を用いて、送信点Ａと水面との距離の変化による受信強度の変化を測定した結果である。図１７において横軸は時間、縦軸は受信強度（dB）を表す。また、図１８は、図１７の測定の測定条件を示す図である。測定は、水槽内にポールを設置して、125cm間隔で高さを変えてアクティブ型ビーコンを設置し、水槽に水を注水しながら水槽外部の受信機で各ビーコンから送信される信号の受信強度を観測することによって実施した。図１７の（ａ），（ｂ），（ｃ）の測定結果は、其々、図１８の（ａ），（ｂ），（ｃ）のビーコンからの信号の受信強度を表している。

[0119] 図１７より、水槽内に水が注水され始めると、受信強度の分散が大きくなり始め、水面が各ビーコンに接近するにつれて受信強度の分散が大きくなる。これは、水面がビーコンに接近するにつれて、ビーコンから受信アンテナへ伝搬する直接波と反射波との干渉の影響が大きくなり（図５，図６）、水面の揺れによる受信強度の変化が大きくなるためであると解される。水面がビーコンにさらに接近すると、～１０ｃｍ以下まで接近した辺りから、受信強度の平均値が徐々に低下し始めるとともに、受信信号の有効サンプリング数（受信に成功した信号の数）が低下し始める。これは、水面がビーコンに非常に近くまで近接すると、反射波の水面への入射角がブリュースタ角に近づくため、ｐ偏光波の反射があまり生じなくなり、その分だけ全体の受信強度が低下するためであると解される。図１９は、周波数f=2.4GHzにおける入射角θ_Cに対する水の強度反射率R_p，R_sの変化を表す図である。図１９より、周

波数f=2.4GHzにおいては、空気-水間の反射のブリュースタ角は約８４度であり、入射角θ_cが６０度を超えた付近からｐ偏光波の反射率は急激に低下していることが分かる。

[0120] そして、ビーコンが水没すると、受信強度は急激に低下する。これは、水中のビーコンから発射された電波が水面で反射及び屈折されるためであると解される。尚、周波数f=2.4GHzにおいては屈折率が大きいため、水中から水面に入射される電磁波の屈折角は、ほぼ９０度となり、屈折波の殆どは水面に沿って伝搬するため、水面から離れた位置にある受信アンテナへ到達する電波強度は大きく弱まると考えられる。さらに、水没後にビーコンの水深が大きくなると、水中のビーコンから発射された電波は水中で大きく減衰するため、受信強度はさらに急激に低下して、通信途絶に至る。

[0121] 従って、受信点（センサ通信アンテナ１１）において、送信点（ＲＦセンサ２）からの信号の受信強度の分散の増加を観測することにより、浸水が始まったことを検出することが可能であることが分かる。また、受信強度の平均値の低下を観測することによって、送信点（ＲＦセンサ２）が近接又は水没したことを検出することが可能であることが分かる。

[0122] （４．２）外部環境試験Ｉ

次に、実際の外部環境に於いて行った試験測定結果について説明する。河川増水や洪水のような発生頻度の極めて低い事象での試験は事実上困難であるため、今回の外部環境測定試験は、海岸に於ける潮の干満を利用して試験を実施した。外部環境測定試験の実施場所は、干満差のある干潟で行った。図２０は、外部環境測定試験で使用した試験システムの外観写真である。図２０（ａ）はＲＦセンサ２の設置状態を示す写真であり、図２０（ｂ）は電波受信測定系の設置状態を示す写真である。干潟に沓石ブロック（deck block）を設置して、沓石ブロックに支柱を立てて、この支柱の高さの異なる３カ所に、其々、ＲＦセンサ２を固定した。沓石ブロックの上面から各ＲＦセンサ２までの高さは、其々、３９．７ｃｍ，７９．７ｃｍ，１１８．２ｃｍとした（図２０（ａ）の左下小図参照）。各ＲＦセンサ２は、自発発信型のも

のを使用し、１秒毎に電波応答信号を発信するように設定した。また、電波応答信号の使用周波数帯域は２．４ＧＨｚを用い、スペクトル拡散通信による通信を行うように設定した。また、電波応答信号の受信と同時に、そのときの水深も測定するため、沓石ブロックの上面に水深センサを設置した。尚、干潟地面から沓石ブロック上面までの高さは約２０ｃｍとしたため、沓石ブロックの周囲の水位が２０ｃｍを超えた場合に水深センサにより水深が検出される。また、電波受信測定系は、図２０（ｂ）に示した様に、海岸の堤防上に設置した。沓石ブロックから電波受信測定系の受信アンテナまでの水平距離は６．６ｍ、沓石ブロックが設置された干潟地面から受信アンテナまでの垂直距離は４．２ｍとした。受信アンテナは、Ｓ偏光を最も高感度で受信できるように、電界が水平方向に振動する電波の受信感度が最大となる向きとなるように設置した。また、電波受信測定時における実際の水面の様子も同時に記録するため、受信アンテナの脇にビデオカメラを設置してＲＦセンサ２の周囲の撮影を行った。

[0123] 図２１は、外部環境に於けるＲＦセンサ２周囲の水位レベルとＲＳＳとの測定結果を示す図である。尚、図２１の結果は、図２０（ａ）の３つのＲＦセンサ２のうちの最も下のもので測定されたデータである。図２１において、横軸は測定時刻（８時～１１時）、左縦軸はＲＳＳ［ｄＢ］、右縦軸は水位レベル［ｍ］（沓石ブロックの上面を０とした水深）を表す。実際に各時刻に測定されるＲＳＳは、水面波の影響によるノイズが大きいため、各時刻ｔにおいて、その時刻ｔから時間区間［t-Δt，t］（Δｔ＝２min）の時間平均をとることにより、ノイズの低減化処理を行った。尚、水位レベルのほうは、水深センサにより各時刻ｔに計測された値を示している。ビデオカメラで記録した映像から、時刻９：００から沓石ブロックの周囲が浸水しはじめ、時刻９：４７に最下部のＲＦセンサ２に水面が到達した。図２２に、各時刻におけるＲＦセンサ２の周囲の浸水状況を示す。図２２（ａ）は時刻９：００におけるＲＦセンサ２の周囲の浸水状況、図２２（ｂ）は時刻９：００におけるＲＦセンサ２の周囲の浸水状況である。ＲＦセンサ２の周囲の地面

が冠水すると、水面反射により、受信アンテナで受信される電波応答信号の干渉が大きくなり、水面がＲＦセンサ２に近づくに従って干渉の影響は増大する。そして、水面がＲＦセンサ２に近づくとともに、ＲＳＳの水位レベルに対する振動が増加し、水面がＲＦセンサ２の高さにまで達すると、ＲＳＳは急激に低下する。この結果は、図５，図６，図９に示した様な計算結果と定性的によく一致していることが分かる。

[0124] 図２３は、外部環境に於けるＲＦセンサ２の周囲の水位レベルとＲＳＳの分散σ^2（ＲＳＳ）との測定結果を示す図である。図２３の測定データは、図２１と同じ電波応答信号によるものである。図２３において、横軸は測定時刻（８時～１１時）、左縦軸はＲＳＳの分散σ^2（ＲＳＳ）［ｄＢ］、右縦軸は水位レベル［ｍ］（沓石ブロックの上面を０とした水深）を表す。ＲＳＳの分散σ^2（ＲＳＳ）は、ＲＦセンサ２の周囲の冠水が始まると急激に大きくなる。これは、通常のノイズに水面波振動によるＲＳＳの揺らぎが加わるためと考えられる。また、ＲＦセンサ２と水面との間の距離が一定程度まで近づくと急激に大きくなり、その後ＲＦセンサ２と水面との間の距離が近づくにつれて振動しながら増加する。これは、水面波によって水面が上下動をすることが影響して、このような現象が観測されると考えられる。この結果は、図１０に示した様な計算結果と定性的によく一致していることが分かる。

[0125] 図２４は、外部環境に於けるＲＦセンサ２の周囲の水位レベルと正常受信回数との測定結果を示す図である。図２４の測定データは、図２１と同じ電波応答信号によるものである。図２４において、横軸は測定時刻（８時～１１時）、左縦軸は正常受信回数［回］、右縦軸は水位レベル［ｍ］（沓石ブロックの上面を０とした水深）を表す。ここで、「正常受信回数」とは、一定の時間内に受信応答信号が正常に受信された回数をいう。正常受信回数を、その時間内にＲＦセンサ２から電波応答信号が送信された回数で割れば、「正常受信率」が求められる。図２４においては、１．５分あたりに受信応答信号が正常に受信された回数を示している。正常受信回数は、ＲＦセンサ２の周囲の地面が冠水してもあまり変化は見られない。これは、送受信Ｉ／

ＲＦモジュール１２における通信プロトコル上のエラー訂正機能により、ある程度のマルチパス・フェージングによる干渉ノイズによる受信信号の部分的なエラーは、エラー訂正がされるためであると考えられる。ＲＦセンサ２と水面との間の距離が２０ｃｍよりも近づくと、電波応答信号のマルチパス・フェージングの影響が極めて大きくなるため正常受信回数は低下しはじめ、水面がＲＦセンサ２の高さに達すると正常受信回数は急激に減少する。従って、正常受信回数（又は正常受信率）の急激な減少を検出することにより、ＲＦセンサ２の浸水を検出することができることが分かる。

[0126] 図２５は、外部環境に於けるＲＦセンサ２の周囲の水位レベルとＶＲＳＳとの測定結果を示す図である。図２５の測定データは、図２１と同じ電波応答信号によるものである。図２５において、横軸は測定時刻（８時～１１時）、左縦軸はＶＲＳＳ［ｄＢ］、右縦軸は水位レベル［ｍ］（沓石ブロックの上面を０とした水深）を表す。尚、図２５においては、受信信号強度Ｉ（ｔ）の時間変化値ＤＩ（ｔ）をＤＩ（ｔ）＝Ｉ（ｔ）／Ｉ（ｔ－δｔ）と定義している。ＶＲＳＳはＤＩ（ｔ）の絶対値｜ＤＩ（ｔ）｜である。図２５より、ＶＲＳＳは、ＲＦセンサ２の周囲の地面の冠水が始まると急激に大きくなり、その後ＲＦセンサ２と水面との間の距離が近づくにつれて増加し、水面がＲＦセンサ２の高さまで達するとさらに増大する。これは、図２１に示したＲＳＳの変化に対応したものである。尚、図２５から分かるように、ＲＦセンサ２の周囲の地面が冠水して以降のＶＲＳＳの値は非常にばらつきが大きい。従って、ＶＲＳＳの値からＲＦセンサ２の周囲の地面の冠水の有無を判定するには、単純にＶＲＳＳの値｜ＤＩ（ｔ）｜が閾値DI_{th}を超えたか否かで判定するよりも、一定の時間Δt_3内にＶＲＳＳの値｜ＤＩ（ｔ）｜が閾値DI_{th}を超えた回数N_{DI}が、所定の閾値N_{DIth}を超えたか否かで判定することが好ましいと考えられる。

[0127] （４．３）外部環境試験ＩＩ

次に、水位変化が大きい福岡県の筑後川の河口付近に於いて水位検出試験を行った試験測定結果について説明する。この試験では、浸水検出装置１と

各ＲＦセンサ２との間の通信方式として、Bluetooth 5.0（登録商標）規格を使用した。無線周波数帯域は2.4 GHzである。ＲＦセンサからの電波応答信号の間隔は１０秒とした。図２６－図２８に、浸水検出装置１及び各ＲＦセンサ２ａ，２ｂ，２ｃを設置した場所の周辺環境とそれらの位置関係を示す。図２７に示すように、河川の岸付近に立てられた木杭に、３つのＲＦセンサ２ａ，２ｂ，２ｃを、約５０ｃｍ間隔で高さを変えて固定設置した。この各ＲＦセンサ２の設置場所の隣には、国土交通省の水位計が設置されており、各時刻の水位に関してはこの水位計の観測データを利用した。図２８に示すように、浸水検出装置１は、ＲＦセンサ２を設置した川岸の対岸にある建物の屋上に設置した。浸水検出装置１と各ＲＦセンサ２との位置関係は、図２６に示すように、河川を挟み、水平距離で８０．２ｍ、垂直距離で１５．０ｍ、直線距離で８１．６ｍ（測量値）とし、浸水検出装置１から各ＲＦセンサ２が直接見通せるようにした。

[0128] 図２９に、水位レベルとＲＦセンサ２ａに対するＲＳＳの時間変化の実測値を示す。図３０に、水位レベルとＲＦセンサ２ａに対する正常受信回数（normal reception count；以下「ＮＲＣ」という。）の時間変化の実測値を示す。図３１に、水位レベルとＲＦセンサ２ａに対するＲＳＳ分散の時間変化の実測値を示す。図２９－図３１において、横軸は時刻（時：分）を表す。図２９の縦軸は水位（左軸）及びＲＳＳ（右軸）、図３０の縦軸は水位（左軸）及びＮＲＣ（右軸）、図３１の縦軸は水位（左軸）及びＲＳＳ分散値（右軸）を表す。水位の基準面（０ｍ面）は、ＲＦセンサ２ａ直下の河床から０．１３ｍの高さとされ、浸水が生じていない状態（ＲＦセンサ２ａ直下の河床に水がない状態）において水位は－０．１３ｍである。また、最上部のＲＦセンサ２ａの設置された高さは、水位基準面から２．１ｍの高さである。図２９のＲＳＳの値は、１０秒毎に測定される標本値を前２分間の期間で平均した移動平均値である。また、図３１のＲＳＳ分散は、各時刻における該時刻から前３分の間にサンプリングされたＲＳＳ値の分散を表す。

[0129] 図２９－図３１において、水位の観測値を見ると８：００頃から河床の冠

水が発生し、１０：００－１２：１０の間にはＲＦセンサ２ａが没水し、１５：００頃に河床の冠水が終息していることが分かる。河床の冠水が始まってＲＦセンサ２ａが没水するまでの間（８：００頃－１０：００）、及びＲＦセンサ２ａの没水が終わってから河床の冠水が終息するまでの間（１２：１０－１５：００頃）は、ＲＦセンサ２ａの周囲には水面が存在し、時間と共に水面とＲＦセンサ２ａとの間の空間の距離が変化する。この区間を「非水没冠水期間」（non-submerge flooding period）と呼ぶ。ＲＳＳの観測結果（図２９）を見ると、非水没冠水期間にはＲＦセンサ２ａと水面との間の距離の変化に伴って、ＲＳＳの振動変化が明確に観測されている。この振動については、図５，図６で説明した通りである。また、ＲＦセンサ２ａが冠水すると、ＲＳＳは急激な減少が始まり、水深が増すと軈て通信が途絶することが分かる。これは、水中での2.4 GHz近傍の電磁波の誘電損失が極めて大きいためである。

[0130] 次に、ＮＲＣの観測結果（図３０）を見ると、非水没冠水期間においてはＮＲＣの目立った変化はなく、河床が冠水していない期間（以下「非冠水期間」（non-flooding period）という。）との判別はできない。これは、浸水検出装置１における受信器のエラー訂正機能により、水面反射により生じるマルチパスフェージングノイズの影響が相殺されるためであると考えられる。従って、ＮＲＣを観測しただけでは、冠水の発生は検出するのは難しいことが分かる。一方、ＲＦセンサ２ａが没水すると、ＲＳＳが急激に減少することに伴いＮＲＣも０となり通信が途絶する。従って、ＮＲＣを観測することにより、ＲＦセンサ２ａが没水したか否かを鋭敏に検出することができることが分かる。

[0131] 次に、ＲＳＳ分散の観測結果（図３１）を見ると、非水没冠水期間においては、ＲＦセンサ２ａの周囲の河床が冠水して水深が浅いときには、ＲＳＳ分散は水深の変化に対して大振幅で変化する。そして、水深が大きくなるに従って、ＲＳＳ分散は振動しながらその振幅が減少していく。水深が１ｍを超えるあたりでは、ＲＳＳ分散は非冠水期間とほぼ同じレベルとなる。一方

、ＲＦセンサ２ａが没水する直前の付近及び没水が終了する直後の付近では、ＲＳＳ分散は急激に増大する。従って、ＲＳＳ分散が急激に増加したことを観測することによって、ＲＦセンサ２ａの周囲の地面が冠水したこと又はＲＦセンサ２ａが没水する直前であることを検出することができると考えられる。

[0132] 図３２は、図２９に示した各時刻の水位レベルの実測値及びＲＦセンサ２ａに対するＲＳＳの実測値を、横軸を水位レベル、縦軸をＲＳＳとしてプロットした図である。尚、図２９においては、水位レベルの０ｍ面は河床面から０．１３ｍのオフセットがあるので、図３２では、河床面が０ｍとなるように水位レベルをシフト変換している。図３２より、ＲＦセンサ２ａに対するＲＳＳの観測値は、水位レベルの変化に対してΔＬｖ＝３２．７±２．５ｃｍの略一定周期で振動していることが分かる。従って、垂直方向に複数のＲＦセンサ２を並べて設置して、各時刻で各ＲＦセンサ２に対するＲＳＳを観測することによって、各時刻でＲＳＳの水位レベルに対する振動をリアルタイムに捉えることが出来ることが分かる。

[0133] ここで、水位レベルの変化に対するＲＳＳの振動周期とＲＦセンサ２ａ及び浸水検出装置１の受信アンテナの位置の関係について説明する。実際のＲＦセンサ２ａから浸水検出装置１の受信アンテナへの電波伝搬を簡単化し、図３３に示した様な水面反射干渉モデルを考える。この場合、点Ａに設置されたＲＦセンサ２ａから放射された電波は、光路ＡＢ及び光路ＡＣＢを通って、点Ｂに設置された浸水検出装置１の受信アンテナに到達し、点Ｂにおいて干渉する。点Ｃは水面上の反射点である。光路ＡＣＢを含む垂直面を反射平面とし点Ａを原点（０，０）とする。反射平面内の水平方向にｘ軸、垂直方向にｙ軸を設定する。点Ｂの座標を（x_0，y_0）とする。水面から点Ａ（原点）までの距離をｄとする。光路ＡＢ，ＡＣ，ＣＢの長さを、其々l_0、l_{11}，l_{12}とする。今、$(y_0/x_0)^4 \ll 1$、$((y_0+2d)/x_0)^4 \ll 1$とすると、光路ＡＢの光路長l_0及び光路ＡＣＢの光路長$l_{11}+l_{12}$並びに両者の光路差Δｌは次のようになる。

[0134] [数19]

$$l_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \simeq x_0 \left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{y_0}{x_0}\right)^2\right] \tag{19a}$$

$$l_{11} + l_{12} = \sqrt{x_0^2 + (y_0 + 2d)^2} \simeq x_0 \left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{y_0 + 2d}{x_0}\right)^2\right] \tag{19b}$$

$$\Delta l = (l_{11} + l_{12}) - l_0 \simeq \frac{2d(y_0 + d)}{x_0} \tag{19c}$$

[0135] このとき、点Ｂにおいて受信アンテナで受信される受信信号ｓのフェーザ（phasor）は次式（２０ａ）のようになる。ここで、ｋ，λ，ｆは放射電波の波数，波長，周波数であり、ｃは光速、s_0は直接波の受信強度、ηは点Ｃでの光路差ΔＩ，水面での反射率Ｒ（θ），直接波と反射波の受信アンテナへの入射角ϕ_0，ϕ_1及び受信アンテナの指向性関数ｇ（φ）により決まる１より小さい反射波減衰係数である。

[0136] [数20]

$$s \simeq s_0(1 - \eta\cos k\Delta l) = s_0\left[1 - \eta\cos\left(\frac{4\pi f}{c}\left(\frac{y_0}{x_0}d + \frac{d^2}{x_0}\right)\right)\right]$$

$$\simeq s_0\left[1 - \eta\cos\left(2\pi\frac{2f}{c}\frac{y_0}{x_0}d\right)\right] \quad (d \ll x_0) \tag{20a}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \tag{20b}$$

$$\eta = \frac{g(\phi_1)}{g(\phi_0)}R(\theta)\left(1 - \frac{\Delta l}{l_0}\right) \tag{20c}$$

[0137] 故に、水位レベルの変化に対するＲＳＳの振動周期Λは次式のように表される。

[0138] [数21]

$$\Lambda = \frac{c}{2f}\frac{x_0}{y_0} \tag{21}$$

[0139] 周波数ｆが２．４ＧＨｚの場合ｃ／２ｆ＝６．２５×１０$^{-2}$［ｍ］である。x_0＝８０［ｍ］、y_0＝１５［ｍ］とすると、式（２１）よりΛ＝０．３３［ｍ］となり、図３２の実測値とほぼ一致する。

[0140] 図３４は、水位レベル及びＲＦセンサ２ａ，２ｂ，２ｃに対するＲＳＳの時間変化の実測値を示す図である。尚、図３４に示した測定データは、図２

９－図３１に示したデータの測定日とは異なる日に測定したものである。図３４において、各ＲＦセンサ２ａ，２ｂ，２ｃの非水没冠水期間では、水位の上昇又は下降に伴い、最上部のＲＦセンサ２ａのＲＳＳは、最下部のＲＦセンサ２ｃのＲＳＳと略同位相で振動している。また、中央部のＲＦセンサ２ｂのＲＳＳは、水位の上昇又は下降に伴い、ＲＦセンサ２ａ，２ｃのＲＳＳとは、ほぼ逆位相で振動している。各ＲＦセンサ２ａ，２ｂ，２ｃの間隔は約５０ｃｍであるので、ＲＦセンサ２ａ，２ｂの間隔d_{ab}は約５０ｃｍ、ＲＦセンサ２ａ，２ｃの間隔d_{ac}は約１００ｃｍである。水位変化に対するＲＳＳの振動の周期ΔＬｖは、図３２より、ΔＬｖ≒３３ｃｍであるので、d_{ab}／ΔＬｖ≒１．５、d_{ac}／ΔＬｖ≒２．０であり、d_{ab}／ΔＬｖはほぼ半整数、d_{ac}／ΔＬｖはほぼ整数となっている。従って、ＲＦセンサ２ａ，２ｂの水位変化に対するＲＳＳ振動の位相は逆位相、ＲＦセンサ２ａ，２ｃの水位変化に対するＲＳＳ振動の位相は同位相となることが予測され、図３４の測定結果はその予想を裏付けている。このように、ΔＬｖの半整数倍となる間隔で設置した２つのＲＦセンサ２ａ，２ｂ（又は２ｂ，２ｃ）に対するＲＳＳを同時に測定してその比（ｄＢ値の差分）を取ることで、水位変化に対するＲＳＳ振動をリアルタイムに高感度で検出することが可能となる。図３５に、２つのＲＦセンサ２ａ，２ｂに対するＲＳＳの比ＲＳＳ（２ａ）／ＲＳＳ（２ｂ）の時間変化を示す。ＲＦセンサ２ａ，２ｂの水位変化に対するＲＳＳ振動の位相は逆位相であるため、非冠水期間と比べて、非水没冠水期間には比ＲＳＳ（２ａ）／ＲＳＳ（２ｂ）の顕著な振動が検出されることが分かる。

[0141] （５）浸水検出装置１の動作

最後に、本実施例の浸水検出システムの動作について説明する。本実施例の浸水検出システムにおける浸水検出装置１では、ＲＦセンサ２からの電波応答信号の受信信号強度Ｉ（ｔ）の一定時間Δt_1内の分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）と一定時間Δt_2内の正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）の閾値判定により、ＲＦセンサ２の浸水を検出する。また、分散値σ^2（Ｉ；［

ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）の閾値判定、又は受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜の閾値判定を用いて、ＲＦセンサ２の周辺の地面の冠水を検出する。そのため、これらの閾値判定の際の閾値を適切な値に設定する必要がある。然し乍ら、受信信号強度Ｉ（ｔ）やその分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）、正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）等は、ＲＦセンサ２と浸水検出装置１が設置される周辺環境に依存して変化すると考えられる。従って、本実施例の浸水検出装置１では、地面が冠水していない平時において受信信号強度Ｉ（ｔ）、分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）、正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）等をサンプリングして、機械学習によって其々の閾値を周囲環境に適応して設定する。

[0142] 各閾値を設定する場合、使用者は、地面が冠水していない平時において、初期化スイッチ１６により初期化指示を浸水検出装置１に対して入力する。初期化指示が入力されると、分散閾値設定部２３は、一定の時間、ＲＦセンサ２から定期的に送信される電波応答信号の受信応答信号をサンプリングして、地面が冠水していない平時の場合のＲＳＳＩ（ｔ）の分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）の平均値σ^2_{av0}を機械学習し、平均値σ^2_{av0}に所定の係数r_σ（r_σ＞１）を乗じた値を閾値σ^2_{th1}に設定する。ここで、係数r_σは実験によって予め適宜設定される定数である。また、正常受信率閾値設定部２５は、地面が冠水していない平時の場合の正常受信率Ｒ（［ｔ－Δｔ$_2$，ｔ］）の平均値R_{av0}を機械学習し、平均値R_{av0}に所定の係数r_R（０＜r_R＜１）を乗じた値を閾値R_{th1}に設定する。ここで、係数r_Rは実験によって予め適宜設定される定数である。また、強度変動閾値設定部２６ａは、地面が冠水していない平時の場合のＶＲＳＳ｜ＤＩ（ｔ）｜の平均値$|DI|_{av0}$を機械学習し、平均値$|DI|_{av0}$に所定の係数r_{DI}（r_{DI}＞１）を乗じた値を閾値DI_{th}に設定する。ここで、係数r_{DI}は実験によって予め適宜設定される定数である。

[0143] 以上の初期設定が完了した後、浸水検出装置１は、ＲＦセンサ２の周囲の地面の冠水の有無、及びＲＦセンサ２の浸水・冠水の有無の検出動作を継続

的に実行する。図３６は、浸水検出装置１の浸水・冠水の有無の検出動作を表すフローチャートである。

[0144] まず、時刻t_nにおいてセンサ通信アンテナ１１でＲＦセンサ２からの電波応答信号が受信されると、送受信Ｉ／Ｆモジュール１２は電波応答信号を復調・復号して受信応答信号を出力する（Ｓ１）。

[0145] 次に、受信信号強度検出部２１は、時刻t_nにおけるＲＳＳＩ（t_n）を検出し出力する。また、受信信号強度変動検出部２６は、時刻t_nにおけるＶＲＳＳ｜ＤＩ（t_n）｜を演算し出力する（Ｓ２）。

[0146] 次に、受信強度散布度検出部２２は、時刻t_nにおいて、ＲＳＳＩ（ｔ）の一定時間Δt_1内の分散値σ^2（Ｉ；［$t_n-\Delta t_1$，t_n］）を演算し出力する（Ｓ３）。ここで、分散計算のためのサンプリング時間Δt_1は予め設定された定数値である。

[0147] 次に、正常受信率検出部２４は、時刻t_nにおいて、時刻t_nから前の一定の時間Δt_2内に受信応答信号が正常に受信された割合である正常受信率Ｒ（［$t_n-\Delta t_2$，t_n］）を演算し出力する（Ｓ４）。ここで、正常受信率の計算のためのサンプリング時間Δt_2は予め設定された定数値である。

[0148] 次に、浸水判定部２７は、受信強度散布度検出部２２が出力する分散値σ^2（Ｉ；［$t_n-\Delta t_1$，t_n］）が閾値σ^2_{th1}以上で、且つ正常受信率検出部２４が出力する正常受信率Ｒ（［$t_n-\Delta t_2$，t_n］）が所定の閾値R_{th1}以下となったか否かを判定する（Ｓ５）。ここで、判定条件「σ^2（Ｉ；［$t_n-\Delta t_1$，t_n］）$\geqq\sigma^2_{th1}$ ∩ Ｒ（［$t_n-\Delta t_2$，t_n］）$\leqq R_{th1}$」が満たされた場合、浸水判定部２７は、浸水検出信号を出力し、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４は、浸水検出信号を、上位通信アンテナ１５を介して上位ネットワークへ送信する（Ｓ６）。

[0149] 一方、ステップＳ５において、判定条件「σ^2（Ｉ；［$t_n-\Delta t_1$，t_n］）$>\sigma^2_{th1}$ ∩ Ｒ（［$t_n-\Delta t_2$，t_n］）$<R_{th1}$」が満たされていない場合には、浸水注意報判定部２８は、次のいずれかの冠水判定条件が満たされているか否かを判定する（Ｓ７）。

（判定条件１）受信強度散布度検出部２２が出力する分散値σ^2（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）が閾値σ^2_{th2}に対してσ^2（Ｉ；［ｔ－Δｔ$_1$，ｔ］）≧σ^2_{th2}となった。

（判定条件２）一定のサンプリング時間Δｔ$_3$内にＶＲＳＳ｜ＤＩ（ｔ）｜が閾値ＤＩ$_{th}$を超えた回数Ｎ$_{DI}$が、所定の閾値Ｎ$_{DIth}$を超えた。

上記（判定条件１）又は（判定条件２）が満たされた場合には、浸水注意報判定部２８は、浸水注意信号を出力し、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４は、浸水注意信号を、上位通信アンテナ１５を介して上位ネットワークへ送信する（Ｓ８）。

[0150] 以下は、上記ステップＳ１～Ｓ８までの動作が反復して実行される。上位ネットワークにおいて、例えば、上位ネットワーク上の管理サーバ（図示せず）が浸水検出装置１から送信された浸水検出信号を受信すると、その浸水検出装置１の周辺に設置されたＲＦセンサ２において浸水が発生したことを知ることが出来る。また、管理サーバが浸水検出装置１から送信された浸水注意信号を受信すると、その浸水検出装置１の周辺に設置されたＲＦセンサ２の周辺に於いて地面が冠水したことを知ることが出来る。このようにして、本実施例の浸水検出システムは、ＲＦセンサ２の周囲の浸水又は冠水状況を適確に検出することが出来る。

実施例 2

[0151] 図３７は、本発明の実施例２に係る浸水検出システムの全体配置を示す図である。本実施例２に係る浸水検出システムは、浸水検出装置１’，ＲＦセンサ２，及び管理サーバ４２を備えており、浸水検出装置１’と管理サーバ４２とは、通信回線４１を介して接続されている。尚、浸水検出装置１’は、通信回線４１と有線又は無線のいずれかで接続されているものとする。また、管理サーバ４２は、通信回線４１を介して、自治体その他の防災関係機関に設置された関係機関サーバ４３と接続されているものとする。

[0152] 図３７において、ＲＦセンサ２は実施例１と同様のものであり、浸水検出装置１’は、実施例１と同様にしてＲＦセンサ２との間で無線通信を行う。

また、ＲＦセンサ２の数については、実施例１の図１と同様に、種々の構成をとり得るものとする。

[0153] 本実施例に係る浸水検出システムでは、実施例１の浸水検出装置１（図２参照）におけるコンピュータ１３及び初期化スイッチ１６の機能を分離して、管理サーバ４２側に設けた点が、実施例１と相違している。図３８は、図３７の浸水検出装置１’及び管理サーバ４２の機能構成を表すブロック図である。図３８において、図２と同様の構成部分には同符号を附している。管理サーバ４２における通信Ｉ／Ｆモジュール５１は、管理サーバ４２が通信回線４１との間で通信するための処理を行うモジュールである。図３８の浸水検出装置１’は、ＲＦセンサ２から電波応答信号を受信すると、送受信Ｉ／Ｆモジュール１２が受信された電波応答信号から、復調処理や復号処理を行い、受信応答信号を生成する。そして、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４は、生成された受信応答信号を、通信回線４１を介して管理サーバ４２へ送信する。尚、通信回線４１のトラフィックの増大を抑制するため、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４は、一定時間毎（例えば、１０秒毎）に受信応答信号を蓄積し、蓄積された受信応答信号を圧縮して管理サーバ４２へ送信するようにしてもよい。

[0154] 管理サーバ４２は、浸水検出装置１’から受信応答信号を受信すると、その受信応答信号に基づき実施例１と同様の判定処理を行う。そして、浸水注意報判定部２８により浸水注意信号が出力された場合や浸水判定部２７により浸水検出信号が出力された場合には、判定信号送信部２９は、その浸水注意信号又は浸水検出信号を、通信回線４１を介して関係機関サーバ４３へ送信する。

[0155] このように、実施例１の浸水検出装置１（図２参照）におけるコンピュータ１３及び初期化スイッチ１６の機能を分離して、クラウド上の管理サーバ４２にそれらの機能を担わせるようにすれば、複数の浸水検出装置１’に対する冠水及び浸水に関する判定処理を管理サーバ４２で一括して行うことができる。これにより、多数の浸水検出装置１’から送られてくる時系列的の

受信応答信号が管理サーバ４２に蓄積されるため、この蓄積された各時系列的の受信応答信号に基づき機械学習を行うことによって、冠水及び浸水に関する判定精度を向上させることも可能となる。

実施例 3

[0156] 図３９は、本発明の実施例３に係る浸水検出システムの全体配置図の一例を示す図である。基本的な配置は、実施例１と同様であるが、本実施例では、浸水検出装置１がセンサ通信アンテナとしてアレイアンテナ１１ａを備えている点が、実施例１とは相違している。図４０は、図３９の浸水検出装置１の構成を示すブロック図である。図４０において、実施例１の図２と同様の構成部分については同符号を付している。実施例１と比較すると、本実施例の浸水検出装置１は、センサ通信アンテナとして、複数のアンテナ素子がアレイ状に配列されたアレイアンテナ１１ａを備えている。アレイアンテナ１１ａの各アンテナ素子は、垂直向きに一定の間隔で縦列配置されている。また、アレイアンテナ１１ａの各アンテナ素子に一対一に対応して移相器１１ｂを備え、各移相器１１ｂで受信される出力を加算する加算器１１ｃを備えている点が相違している。また、コンピュータ１３の機能モジュールとして、ウエイト設定部３０，方位スペクトル検出部３１，水位推定部３２，水位信号送信部３３を備えている。ウエイト設定部３０は、各移相器１１ｂのウエイト（移相量及びゲイン）を設定する処理を行うモジュールである。方位スペクトル検出部３１は、アレイアンテナの受信出力に基づき受信方向に対する受信強度のスペクトル（以下「角度電力スペクトル」（angular power spectrum：ＡＰＳ）という。）を計算する処理を行うモジュールである。水位推定部３２は、方位スペクトル検出部３１から出力されるＡＰＳに基づき、降雨の有無及び冠水水位を推定する処理を行うモジュールである。水位信号送信部３３は、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４により水位推定部３２が出力する降雨の有無及び冠水水位を上位のサーバやインターネット等の上位ネットワークに送信するための通信を行うモジュールである。

[0157] 以上のように構成された本実施例に係る浸水検出システムについて、以下

その動作を説明する。尚、ここでは、実施例１と同様の部分についての説明は省略し、新たに追加したアレイアンテナによるＡＰＳの検出とそれに基づく降雨の有無及び冠水水位を推定する処理に関して説明する。アレイアンテナ１１ａは、図４１に示した様に、Ｎ個（Ｎは２以上の整数）のアンテナ素子$Ａ_1$，$Ａ_2$，…，$Ａ_N$が鉛直直線$Ｌ_a$上に配列している。尚、図４１では、図示の便宜上、９０度回転させて表示している。鉛直直線$Ｌ_a$上の適当な位置に原点Ｏを設定して、各アンテナ素子$Ａ_i$（ｉ＝１，２，…，Ｎ）の原点に対する距離を$ｄ_i$とする。このアレイアンテナ１１ａに対して、水平方向に対する頂角（入射角）がθの方向から平面波の電波（到来波）ｓ（ｔ）が入射する場合を考える。このとき、アンテナ素子$Ａ_i$には受信信号$ｘ_i$（ｔ）が誘導される。原点Ｏにおける到来波ｓ（ｔ）の位相を０とすれば、アンテナ素子$Ａ_i$に入射する到来波ｓ（ｔ）の位相進行量$φ_i$は$φ_i＝ｋｄ_i\sin(θ_i)＝２πｄ_i\sin(θ_i)／λ$である。ここで、ｋ，λは、到来波の波数，波長である。従って、受信信号$ｘ_i$（ｔ）は、アンテナ素子$Ａ_i$の指向性をｇ（θ）とすれば、

[0158] [数22]

$$x_i(t) = g(\theta)e^{-j2\pi d_i \sin\theta/\lambda}s(t) \tag{22}$$

である。アンテナ素子$Ａ_i$の受信信号$ｘ_i$（ｔ）は、移相器１１ｂにおいて移相され増幅される。アンテナ素子$Ａ_i$に対する移相器１１ｂの移相量をδ$_i$、ゲインを$Ｗ_i$とし、この移相器１１ｂの複素ウエイト$ｗ_i$を

[0159] [数23]

$$w_i = W_i e^{j\delta_i} \tag{23}$$

とする。このとき、アンテナ素子$Ａ_i$に対する移相器１１ｂの出力は$ｗ_i ｘ_i$（ｔ）となるので、加算器１１ｃの出力ｙ（ｔ）は、

[0160] [数24]

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N} w_i x_i(t) = s(t)g(\theta)D(\theta) \tag{24a}$$

$$D(\theta) = \sum_{i=1}^{N} W_i g(\theta)\exp\left[j\left(-\frac{2\pi}{\lambda}d_i\sin\theta + \delta_i\right)\right] \tag{24b}$$

となる。Ｄ（θ）はアレイファクタ（array factor）と呼ばれている。

[0161] このようなアレイアンテナ１１ａにおいて、任意の入射角θ_sの方向のアレイファクタの大きさを最大とする場合、ウエイト設定部３０は各アンテナ素子に対する移相器１１ｂの移相量δ_iをつぎのように設定する。

[0162] [数25]

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} d_i \sin\theta_s \quad (i = 1, 2, \cdots, N) \tag{25}$$

このとき、頂角θ_sをステアリング角（steering angle）という。

[0163] 方位スペクトル検出部３１は、ウエイト設定部３０によりステアリング角θ_sを走査範囲［θ_{min}，θ_{max}］内（$-90° < \theta_{min} < \theta_{max} < 90°$）で変化させ、各ステアリング角$\theta_s$において受信強度検出部２１により受信強度｜ｙ（ｔ）｜^{2}を検出することによりＡＰＳを測定することができる。実際には、受信信号ｘ$_i$（ｔ）にはノイズ（アンテナ素子内の内部ノイズや、アンテナ素子外の外部ノイズ）が加算されているので、方位スペクトル検出部３１がＡＰＳを測定する際には多数の受信強度の標本値から統計的な処理を行うことによってＡＰＳを算出する。この手法は、現在ではビームフォーマ法（beamformer method）やCapon法（Capon method）、線型予測法、ＭＵＳＩＣ（MUltiple SIgnal Classification）法などの各種手法が周知であり、これらの手法を用いてＡＰＳの測定を行うことができる（例えば、非特許文献１参照）。例えば、Capon法によりＡＰＳを測定する場合、方位スペクトル検出部３１は、次のような統計計算によってＡＰＳ　P_{CP}（θ）の算出を行う。

[0164] [数26]

$$P_{CP}(\theta) = \frac{1}{\boldsymbol{a}^H(\theta)\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{26a}$$

$$\boldsymbol{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \cdots, x_N(t)]^T = s(t)\boldsymbol{a}(\theta) \tag{26b}$$

$$\boldsymbol{a}(\theta) = \left[g_1(\theta)\exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_1\sin\theta\right), g_2(\theta)\exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_2\sin\theta\right), \cdots, g_N(\theta)\exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_N\sin\theta\right)\right]^T \tag{26c}$$

$$\boldsymbol{R}_{xx} = E[\boldsymbol{x}(t)\boldsymbol{x}^H(t)] \tag{26d}$$

ここで、Ｅ［…］は期待値（アンサンブル平均）、（　）^{T}は転置、（　）^{H}はエルミート共役を表す。ベクトルｘ（ｔ）は入力ベクトル（input vector）、ベクトルａ（θ）はアレイ応答ベクトル（array response vector）、行

列R_{xx}は入力相関行列（input correlation matrix）と呼ばれている。また、ビームフォーマ法によりＡＰＳを測定する場合、方位スペクトル検出部３１は、次のような統計計算によってＡＰＳ　$P_{BF}(\theta)$の算出を行う。

[0165] [数27]

$$P_{BF}(\theta) = \frac{\boldsymbol{a}^H(\theta)\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{xx}}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta)}{\boldsymbol{a}^H(\theta)\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{27}$$

また、線型予測法によりＡＰＳを測定する場合、方位スペクトル検出部３１は、次のような統計計算によってＡＰＳ　$P_{LP}(\theta)$の算出を行う。

[0166] [数28]

$$P_{LP}(\theta) = \frac{1}{|\boldsymbol{w}_{LP}^H\boldsymbol{a}(\theta)|^2} \tag{28a}$$

$$\boldsymbol{w}_{LP} = \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{xx}}^{-1}\boldsymbol{t} \tag{28b}$$

$$\boldsymbol{t} = [1, 0, \cdots, 0]^T \tag{28c}$$

ベクトルw_{LP}は、最適ウエイトベクトルと呼ばれる。

また、ＭＵＳＩＣ法によりＡＰＳを測定する場合、方位スペクトル検出部３１は、次のような統計計算によってＡＰＳ　$P_{MU}(\theta)$の算出を行う。

[0167] [数29]

$$P_{MU}(\theta) = \frac{\boldsymbol{a}^H(\theta)\boldsymbol{a}(\theta)}{\boldsymbol{a}^H(\theta)\boldsymbol{E}_N\boldsymbol{E}_N^H\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{29a}$$

$$\boldsymbol{E}_N = [\boldsymbol{e}_{L+1}, \cdots, \boldsymbol{e}_N] \tag{29b}$$

$$\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{e}_i = \boldsymbol{0} \quad (i = L+1, \cdots, N) \tag{29c}$$

$$\boldsymbol{A} = [\boldsymbol{a}(\theta_1), \boldsymbol{a}(\theta_2), \cdots, \boldsymbol{a}(\theta_L)] \tag{29d}$$

ここで、θ_iは各到来波の入射角、Ｌは到来波の個数、ベクトルe_iは入力相関行列A_{xx}の固有ベクトル、Ｎは入力相関行列A_{xx}の固有値・固有ベクトルの数（アンテナ素子の素子数）である。行列Ａは方向行列と呼ばれている。尚、方位スペクトル検出部３１によるＡＰＳの計算方法については、これ以外にも各種公知の方法を用いることができる。

[0168]　水位推定部３２は、このようにして得られるＡＰＳに基づき、降雨による地面の冠水及びその水位の検出及び推定を行う。例えば、図３３のように、

送信点ＡのＲＦセンサ２から光路ＡＢを通り受信点Ｂのアレイアンテナ１１ａに到来する直接波と、送信点ＡのＲＦセンサ２から光路ＡＣＢを通り受信点Ｂのアレイアンテナ１１ａに到来する反射波とについて考える。光路ＡＢが水平軸（ｘ軸）と成す角をθ_0、光路ＣＢが水平軸（ｘ軸）と成す角をθ_1とする。一例として、θ_0＝１０°，θ_1＝２０°，アレイアンテナ１１ａのアンテナ素子数が２１の場合について考える。図４２に、この条件に於いてアレイアンテナ１１ａにより得られる電波のＡＰＳの例を示す。地面が冠水しておらず、光路ＡＣＢを通り受信点Ｂに到来する反射波が無視できる場合、図４２（ａ）のようなＡＰＳが得られる。この場合、アンテナ入射角θがθ_0＝１０°の位置にメインローブＬｏｂｅ$_0$が１つ生じ、その周囲に極めて低レベル（－１０ｄＢ以下）のサイドローブが多数生じる。一方、地面が冠水して光路ＡＣＢを通り受信点Ｂに到来する反射波が生じた場合には、図４２（ｂ）のようなＡＰＳが得られる。この場合、アンテナ入射角θがθ_0＝１０°の位置のメインローブＬｏｂｅ$_0$に加えて、アンテナ入射角θがθ_1＝２０°の位置に、反射波による第２ローブＬｏｂｅ$_1$が現れる。第２ローブＬｏｂｅ$_1$の強度は他のサイドローブよりも遙かに大きいため、他のサイドローブとは容易に区別できる。水位推定部３２は、この第２ローブＬｏｂｅ$_1$が発生したことを検出することにより、地面が冠水したことを検出することができる。また、メインローブＬｏｂｅ$_0$のピークの位置（$\theta=\theta_0$）及び第２ローブＬｏｂｅ$_1$のピークの位置（$\theta=\theta_1$）を検出することにより、次のようにして水位ｄを検出することができる。

[0169] [数30]

$$d=\frac{1}{2}l_0\cos\theta_0(\tan\theta_1-\tan\theta_0) \tag{30}$$

[0170] ここで、Ｉ$_0$は、図３３に示した通り、送信点Ａから受信点Ｂまでの距離であり、これは予め測定して水位推定部３２に予め設定されているものを用いる。

[0171] 水位推定部３２により降雨による地面の冠水が検出された場合、水位信号

送信部３３は、水位推定部３２により検出された水位ｄを、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４により上位のサーバやインターネット等の上位ネットワークに送信する。また、浸水注意報判定部２８は、水位推定部３２により検出された水位ｄが予め設定された所定の条件を満たした場合（この場合、水位ｄは水面からＲＦセンサ２までの距離で定義しているので（図３３参照）、例えば、水位ｄが予め設定された所定の閾値d_{min}以下となった場合など）にも、浸水注意信号を出力する。

[0172] 以上のように、本実施例の浸水検出システムでは、浸水検出装置１がセンサ通信アンテナとしてアレイアンテナ１１ａ、移相器１１ｂ、加算器１１ｃ、ウエイト設定部３０、方位スペクトル検出部３１、及び水位推定部３２を備え、アレイアンテナ１１ａを用いてステアリング角の走査による受信される電波のＡＰＳを検出する。そして、検出されたＡＰＳの第２ローブＬｏｂｅ$_1$の有無から地面の冠水の発生又は降雨による地面の濡れの状態を検出することができる。また、メインローブＬｏｂｅ$_0$と第２ローブＬｏｂｅ$_1$の入射角θ_0，θ_1を検出し、この２つの入射角θ_0，θ_1により、冠水した地面の冠水水位を検出することができる。

実施例 ４

[0173] 図４３は、本発明の実施例４に係る浸水検出システムの全体配置図の一例を示す図である。基本的な配置は、実施例１と同様であるが、本実施例では、ＲＦセンサ２としてアレイＲＦセンサ２ａを備えている点が、実施例１とは相違している。アレイＲＦセンサ２ａは、複数のＲＦセンサ２を鉛直方向にアレイ状に配列したものである。尚、図４３では、アレイＲＦセンサ２ａは、一つの基板２ｂ上に複数のＲＦセンサ２を直線状に配設して一体のアッセンブリ（Assembly）としたものを示しているが、アレイＲＦセンサ２ａとしては基板２ｂは省略してもよく、ＲＦセンサ２を取り付けるポールなどの地上構造物の表面に複数のＲＦセンサ２を鉛直直線上に配列して固定配置したものを用いてもよい。アレイＲＦセンサ２ａを構成するＲＦセンサ２の個数は２個以上であれば任意の数とすることができるが、水位レベルの変化に

対するＲＳＳの振動の形状プロファイルが検出可能な十分な数とすることが好ましい。また、アレイＲＦセンサ２ａのＲＦセンサ２の配列長についても任意の長さとすることができるが、水位レベルの変化に対するＲＳＳの振動の形状プロファイルを精度よく検出する観点から、式（２１）で定義される水位レベルの変化に対するＲＳＳの振動周期Λの１／２よりも長い長さとすることが好ましい。また、ＲＳＳの振動周期Λよりも長い長さとすればより好ましい。

[0174] 図４４は、図４３の浸水検出装置１の構成を示すブロック図である。図４０において、実施例１の図２と同様の構成部分については同符号を付している。実施例１と比較すると、本実施例の浸水検出装置１は、新たに、干渉波形検出部３５、干渉波形シフト量検出部３６、水位推定部３２、水位信号送信部３３を備えた点で相違している。干渉波形検出部３５は、アレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサ２から送信される電波の受信信号から、直接波と反射波の干渉による強度変動波形を検出する処理を行うモジュールである。干渉波形シフト量検出部３６は、干渉波形検出部３５で検出される強度変動波形のシフト量を検出する処理を行うモジュールである。水位推定部３２は、干渉波形シフト量検出部３６が検出する強度変動波形のシフト量から、冠水水位の推定値を計算する処理を行うモジュールである。水位信号送信部３３は、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４により、水位推定部３２により算出された冠水水位を、上位のサーバやインターネット等の上位ネットワークに送信するための通信を行うモジュールである。

[0175] 以上のように構成された本実施例に係る浸水検出システムについて、以下その動作を説明する。尚、ここでは、実施例１と同様の部分についての説明は省略し、新たに追加したアレイＲＦセンサ２ａを用いた冠水検出及び冠水水位の推定に関するする処理について説明する。以下では、説明の便宜上、アレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサ２を、下側からS_1，S_2，…，S_Nと付号し、ＲＦセンサS_i（ｉ＝１，…，Ｎ）の地面からの高さをh_iとする。ＲＦセンサS_i（ｉ＝１，…，Ｎ）の高さh_iのデータは予め測定して、浸水検

出装置１の干渉波形検出部３５に記憶されているものとする。

[0176] まず、浸水検出装置１は、アレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサS_i（ｉ＝１，…，Ｎ）から送信される電波を受信する。ここで、アレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサS_iは同時に電波を送信するのではなく、一定の時間バンドΔＴ内にそれぞれがタイミングをずらして電波送信を行う。各ＲＦセンサS_iからの送信波が干渉しないようにするためである。時間バンドの長さΔＴは、該時間バンドΔＴの期間内に大きな水位変化が生じない程度の長さであれば任意に設定することができる。時間バンドΔＴ内にセンサ周囲の冠水状態が変化しないという観点から、時間バンドΔＴは各ＲＦセンサS_iの送信波が干渉しない程度であれば、できるだけ短い方が好ましい。具体的には、ΔＴは数秒～数十秒とすることができる。浸水検出装置１は、時間バンドΔＴ内に、アレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサS_iからの電波を受信すると、受信強度検出部２１はその受信信号の強度P_iを検出する。干渉波形検出部３５は、各ＲＦセンサS_iの高さh_iと受信信号強度P_iから、直接波と反射波との干渉波形が出現したか否かを検出する。以下にこの検出手法について説明する。

[0177] 図４５は、アレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサS_iとセンサ通信アンテナ１１との位置関係を示す図である。図４５において、各ＲＦセンサは点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）に配置され、センサ通信アンテナ１１は、各ＲＦセンサから水平距離でx_0離れた、点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）よりも高所の点Ｂに配置されている。点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）及び点Ｂを含む鉛直平面を反射平面と呼ぶ。点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）に沿って上向きにｙ軸を設定し、ｙ軸が地面と交叉する点を原点Ｏとし、原点Ｏを通る反射平面内の水平軸をｘ軸とする。点Ｂの座標を（x_0，y_0）、点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）の座標を（０，h_i）とする。h_iはＲＦセンサS_iの高さである。また、各高さh_i（ｉ＝１，…，Ｎ）の平均をh_0とする。ＲＦセンサS_iの高さの偏差Δh_iを$\Delta h_i = h_i - h_0$と定義する。各点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）から点Ｂまでの距離をl_{0i}とし、各距離l_{0i}（ｉ＝１，…，Ｎ）の平均をl_0とする。アレイＲＦセンサ２ａ

の周囲の地面が冠水しており水深（冠水水位）がｄ$_w$である場合、ＲＦセンサＳ$_i$から送信されてセンサ通信アンテナ１１で受信される電波の受信信号強度ｓ$_i$は、式（２０ａ）より次のようになる。

[0178] [数31]

$$s_i \simeq s_{0i}\left(\frac{1}{l_0}\right)\left[1-\eta_i\cos\left(2\pi\frac{d_i}{\Lambda_i}\right)\right] \tag{31a}$$

$$d_i = h_i - d_w, \quad \Lambda_i = \frac{c}{2f}\frac{x_0}{y_0 - h_i} \tag{31b}$$

[0179] ＲＦセンサＳ$_i$の平均高さｈ$_0$から受信アンテナＢまでの高低差をｙ$_0$’＝ｙ$_0$－ｈ$_0$とすると、Δｈ$_i$＜＜ｈ$_0$’の場合には水位レベルの変化に対するＲＳＳの振動周期Λ$_i$は次のように近似できる。

[0180] [数32]

$$\Lambda_i = \Lambda_0\left(1+\frac{\Delta h_i}{y_0'}-\left(\frac{\Delta h_i}{y_0'}\right)^2+\cdots\right)\simeq\Lambda_0 \quad (\Delta h_i \ll y_0') \tag{32a}$$

$$\Lambda_0 = \frac{c}{2f}\frac{x_0}{y_0'} \tag{32b}$$

[0181] 従って、受信信号強度ｓ$_i$及び受信信号電力Ｐ$_i$は次のようになる。

[0182] [数33]

$$s_i \simeq s_{0i}\left[1-\eta_i\cos\left(2\pi\frac{d_i}{\Lambda_0}\right)\right] \tag{33a}$$

$$P_i \sim |s_i|^2 \simeq |s_{0i}|^2\left[1-\eta_i\cos\left(2\pi\frac{d_i}{\Lambda_0}\right)\right]^2 \tag{33b}$$

[0183] 図４６に、各水位ｄ$_w$に対する各高さに設置されたＲＦセンサからの受信信号の強度との関係の一例を示す。図４６において、横軸ｈは各ＲＦセンサの高さ［ｍ］、縦軸は受信信号電力Ｐ［ｄＢ］を表す。アレイＲＦセンサ２ａでは、複数の高さｈ$_i$にＲＦセンサＳ$_i$が設置され、１つの時間バンドΔＴ内に各ＲＦセンサＳ$_i$からの信号が受信される。アレイＲＦセンサ２ａの周囲の地面が冠水した非水没冠水期間では、１つの時間バンドΔＴ内で受信されたこれらの信号の強度を線で結ぶと、図４６に示した様な周期的に振動する曲線となる。尚、地面が冠水しておらずアレイＲＦセンサ２ａの周囲に水面（反射面）がない非冠水期間には、図４６の「水面なし」と付記した直線とな

る。従って、干渉波形検出部３５は、各時間バンドΔＴ内において、各ＲＦセンサ$Ｓ_i$からの信号が図４６に示した様な変動する曲線となる場合には、アレイＲＦセンサ２ａの周囲の地面が冠水したと判定する。また、各ＲＦセンサ$Ｓ_i$からの信号が図４６の「水面なし」と付記した直線の様になる場合には、アレイＲＦセンサ２ａの周囲の地面は冠水していないと判定することができる。降雨により地面が濡れて、地面の反射係数が大きく上昇した場合にも、図４６に示した様な変動曲線が観測される。この場合、変動曲線は図４６の$ｄ_w$＝０［ｍ］と付記した曲線となり、地面の湿り度が大きくなるに従って地面の反射係数が増大するため、曲線の振動振幅が大きくなる。これにより、アレイＲＦセンサ２ａの周囲の地面がどの程度濡れているかについても検出が可能で有り、従って、降雨の有無を検出することもできる。

[0184] また、アレイＲＦセンサ２ａの周囲の地面が完全に冠水し、その冠水水位$ｄ_w$が上昇すると、図４６の矢印$ｖ_1$，$ｖ_2$，$ｖ_3$，$ｖ_4$で示した様に、高さｈに対する受信強度の振動波形が右方向（ｈが大きくなる方向）に連続的にシフトしてゆく。逆に、冠水水位$ｄ_w$が下降すると振動波形が左方向（ｈが小さくなる方向）に連続的にシフトしてゆく。従って、干渉波形シフト量検出部３６は、干渉波形検出部３５がアレイＲＦセンサ２ａ周囲の地面が冠水したと判定した時点から、この振動波形のシフト量を継続して検出することにより、冠水水位$ｄ_w$の変化を検出することができる。この場合、$ｄ_w$＝０［ｍ］の振動波形からの振動波形のシフト量（ｈの増加方向へのシフト量）が、そのまま冠水水位$ｄ_w$を表している。

[0185] このようにして干渉波形検出部３５により振動波形のシフト量が検出されると、水位推定部３２はこのシフト量を冠水水位$ｄ_w$に換算し、水位信号送信部３３は、水位推定部３２により検出された水位ｄを、上位通信Ｉ／Ｆモジュール１４により上位のサーバやインターネット等の上位ネットワークに送信する。また、浸水注意報判定部２８は、水位推定部３２により検出された冠水水位$ｄ_w$が予め設定された所定の閾値を超えた場合にも、浸水注意信号を出力する。

[0186] 以上のように、本実施例の浸水検出システムでは、複数のＲＦセンサ２を鉛直方向にアレイ状に配列したアレイＲＦセンサ２ａを備え、一定の時間バンドΔＴごとに、このアレイＲＦセンサ２ａの各ＲＦセンサ２から送信される電波をセンサ通信アンテナ１１で受信した受信強度から、ＲＦセンサ２の高さｈに対する受信強度の振動波形の有無を検出することにより、アレイＲＦセンサ２ａの周囲の地面が冠水したか又は地面が濡れたか否かを検出することができる。また、ＲＦセンサ２の高さｈに対する受信強度の振動波形が、冠水深度d_w＝０［ｍ］からシフトしたシフト量を継続的に検出することにより、アレイＲＦセンサ２ａの周囲の地面の冠水水位d_wを検出することができる。

[0187] 尚、図４３では、アレイＲＦセンサ２ａとして、複数のＲＦセンサ２を配列した構成例を示したが、アレイＲＦセンサ２ａの構成としては、１つのＲＦセンサ２に対して複数のアンテナ素子２ｅを接続して、アンテナ素子２ｅをアレイ状に配列する構成とすることもできる。図４７に、１つのＲＦセンサ２にアレイ状に配列したアンテナ素子２ｅを接続したアレイＲＦセンサ２ａの例を示す。ＲＦセンサ２は、浸水検出装置１に対して電波信号の送信を行うための回路を含む送受信モジュールと、電波信号の送信に用いるアンテナ素子２ｅを選択して切り替えるアンテナ切替器２ｄを備えている。アンテナ切替器２ｄは、Ｎ個のアンテナ素子２ｅの其々に接続されており、送受信モジュール２ｃに接続するアンテナ素子２ｅの切り替えを行う。各アンテナ素子２ｅは、図４５の送信点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）に相当する。送受信モジュール２ｃは、アンテナ切替器２ｄにより電波信号を発信するアンテナ素子２ｅを順次切り替えながら電波信号の送信を行うことにより、各送信点S_i（ｉ＝１，…，Ｎ）から浸水検出装置１へ電波信号を送信する。このような構成とすれば、送受信モジュール２ｃにより各時間バンドΔＴ内に各アンテナ素子２ｅからタイミングをずらして電波信号を確実に送信することができる。

符号の説明

[0188] １　浸水検出装置

２　ＲＦセンサ

２ａ　アレイＲＦセンサ

２ｂ　基板

２ｃ　送受信モジュール

２ｄ　アンテナ切替器

２ｄ　アンテナ素子

１１　センサ通信アンテナ

１１ａ　アレイアンテナ

１１ｂ　移相器

１１ｃ　加算器

１２　送受信Ｉ／Ｆモジュール

１３　コンピュータ

１４　上位通信Ｉ／Ｆモジュール

１５　上位通信アンテナ

１６　初期化スイッチ

２１　受信強度検出部

２２　受信強度散布度検出部

２３　分散閾値設定部

２４　正常受信率検出部

２５　正常受信率閾値設定部

２６　受信強度変動検出部

２６ａ　強度変動閾値設定部

２７　浸水判定部

２８　浸水注意報判定部

２９　判定信号送信部

３０　ウエイト設定部

３１　方位スペクトル検出部

３２　水位推定部

３３　水位信号送信部

３５　干渉波形検出部

３６　干渉波形シフト量検出部

請求の範囲

[請求項1] 浸水検出を行う箇所に設置された、間歇的に電波信号を無線発信するＲＦセンサから送信される、前記電波信号を受信して受信信号として出力する受信アンテナと、

各時刻ｔにおいて、前記受信アンテナより出力される前記受信信号の強度である受信信号強度Ｉ（ｔ）を検出する受信信号強度検出手段と、

各時刻ｔにおいて、前記受信信号強度検出手段が検出する前記受信信号強度Ｉ（ｔ）の一定時間Δt_1内の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）を検出する受信信号強度散布度検出手段と、

各時刻ｔにおいて、一定の時間Δt_2内に前記受信信号が正常に受信された割合である正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）を検出する正常受信率検出手段と、

前記受信信号強度散布度検出手段が出力する前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）が所定の閾値D_{th1}以上で、且つ前記正常受信率検出手段が出力する前記正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）が所定の閾値R_{th1}以下となった場合に、浸水検出信号を出力する浸水検出判定手段と、を備えたことを特徴とする浸水検出装置。

[請求項2] 前記受信信号強度散布度検出手段が出力する前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）が所定の閾値D_{th2}以上となった場合に、浸水注意信号を出力する浸水注意報判定手段を備えたことを特徴とする請求項１記載の浸水検出装置。

[請求項3] 各時刻ｔにおいて、前記受信信号強度Ｉ（ｔ）の時間変化値ＤＩ（ｔ）＝Ｉ（ｔ）－Ｉ（ｔ－δt）又はＩ（ｔ）／Ｉ（ｔ－δt）の絶対値である受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜を検出する受信信号強度変動検出手段と、

一定の時間Δt_3内に前記受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜が所定の閾値DI_{th}を超えた回数N_{DI}が、所定の閾値N_{DIth}を超えた場

合に、浸水注意信号を出力する浸水注意報判定手段を備えたことを特徴とする請求項１記載の浸水検出装置。

[請求項4] 浸水検出を行う箇所に設置された、間歇的に電波信号を無線発信するＲＦセンサと、

前記ＲＦセンサから離隔して、前記ＲＦセンサよりも高所に設置された請求項１乃至３の何れか一に記載の浸水検出装置と、を備えたことを特徴とする浸水検出システム。

[請求項5] 前記受信アンテナは、水平方向の電界成分の受信信号強度が最大となる向きに設置されていることを特徴とする請求項４記載の浸水検出システム。

[請求項6] 浸水検出箇所が浸水したか否かを検出する浸水検出方法であって、

前記浸水検出箇所に設置されたＲＦセンサから送信される電波信号を、前記ＲＦセンサよりも高所に設置された受信アンテナにより受信し、

前記電波信号から電気信号である受信信号を生成し、

各時刻に於いて、前記受信信号の強度である受信信号強度Ｉ（ｔ）、該受信信号強度Ｉ（ｔ）の一定時間Δt_1内の散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）、及び一定の時間Δt_2内に前記受信信号が正常に受信された割合である正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）を検出し、

前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）が所定の閾値D_{th1}以上で、且つ前記正常受信率Ｒ（［ｔ－Δt_2，ｔ］）が所定の閾値R_{th}以下となった場合に、浸水が検出されたと判定することを特徴とする浸水検出方法。

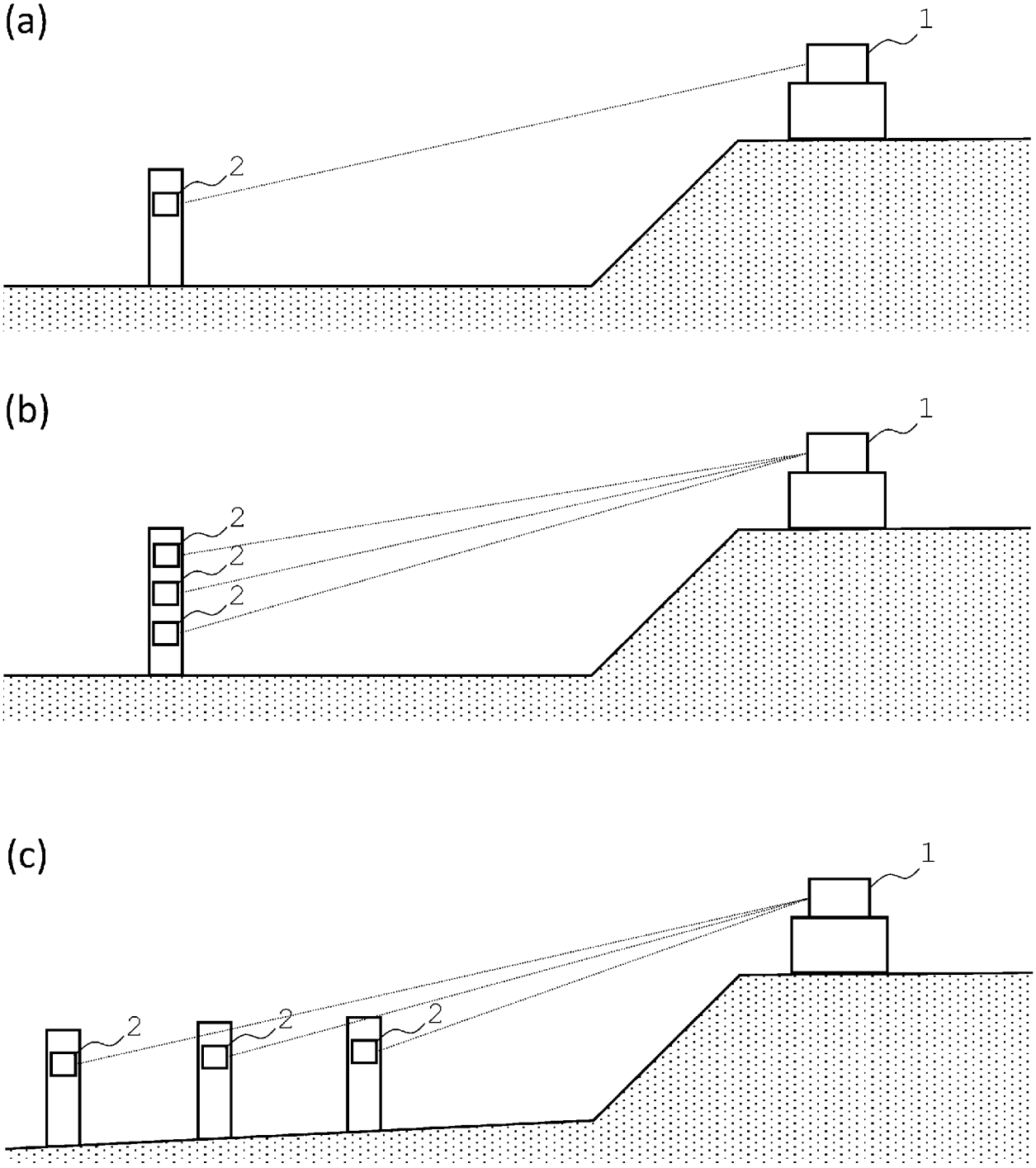
[請求項7] 前記散布度Ｄ（Ｉ；［ｔ－Δt_1，ｔ］）が所定の閾値D_{th2}以上となった場合に、浸水注意レベルに達したと判定することを特徴とする請求項６記載の浸水検出方法。

[請求項8] 各時刻ｔにおいて、前記受信信号強度Ｉ（ｔ）の時間変化値ＤＩ（

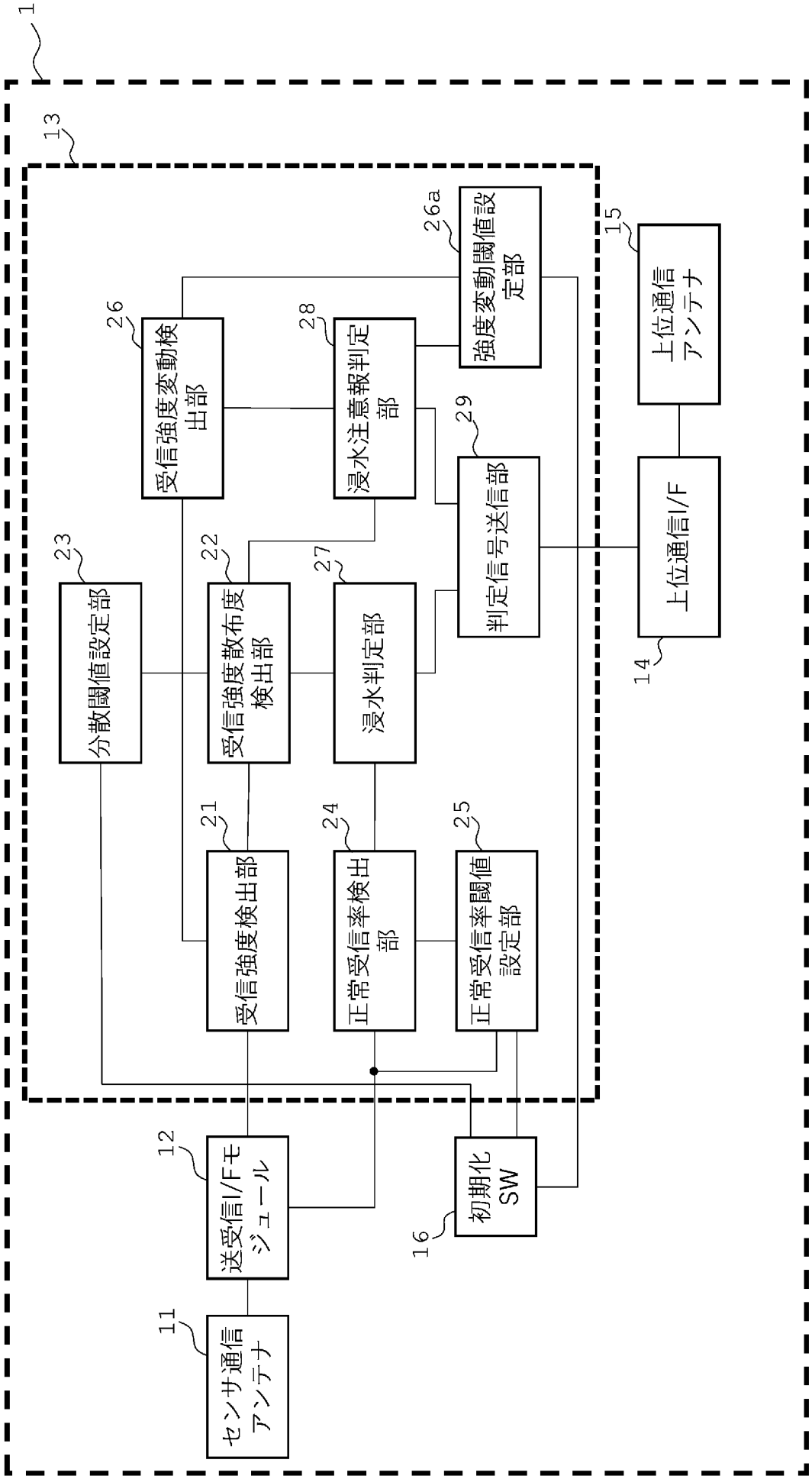
ｔ）＝Ｉ（ｔ）－Ｉ（ｔ－δｔ）又はＩ（ｔ）／Ｉ（ｔ－δｔ）の絶対値である受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜を検出するとともに、

一定の時間Δｔ$_3$内に前記受信信号強度変動度｜ＤＩ（ｔ）｜が所定の閾値ＤＩ$_{th}$を超えた回数Ｎ$_{DI}$が、所定の閾値Ｎ$_{DIth}$を超えた場合に、浸水注意レベルに達したと判定することを特徴とする請求項６記載の浸水検出方法。

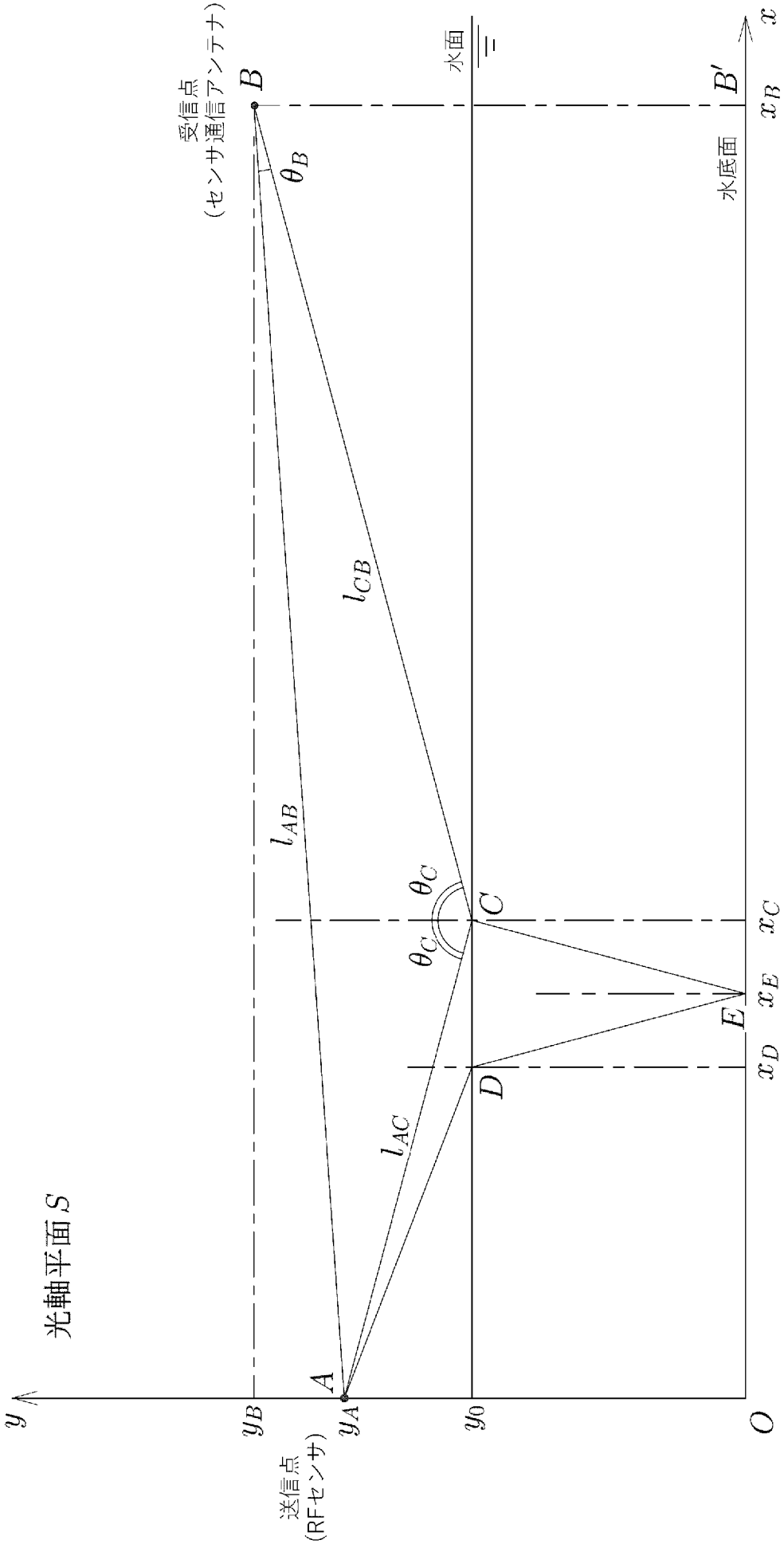
[図1]



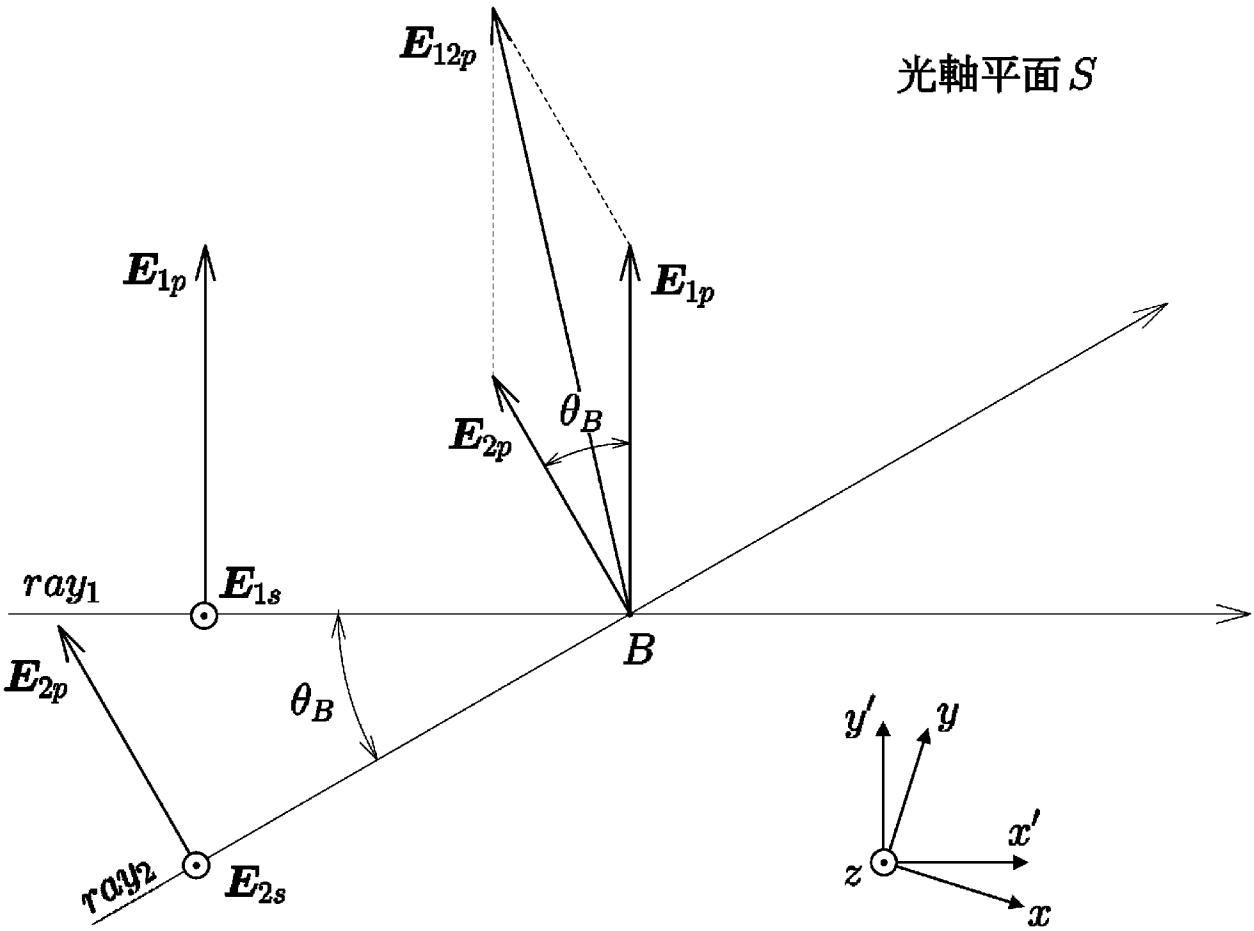
[図2]


1
13
26a
強度変動閾値設定部
15
上位通信アンテナ
26
受信強度変動検出部
28
浸水注意報判定部
29
判定信号送信部
上位通信I/F
14
23
分散閾値設定部
22
受信強度散布度検出部
27
浸水判定部
21
受信強度検出部
24
正常受信率検出部
25
正常受信率閾値設定部
12
送受信I/Fモジュール
16
初期化SW
11
センサ通信アンテナ

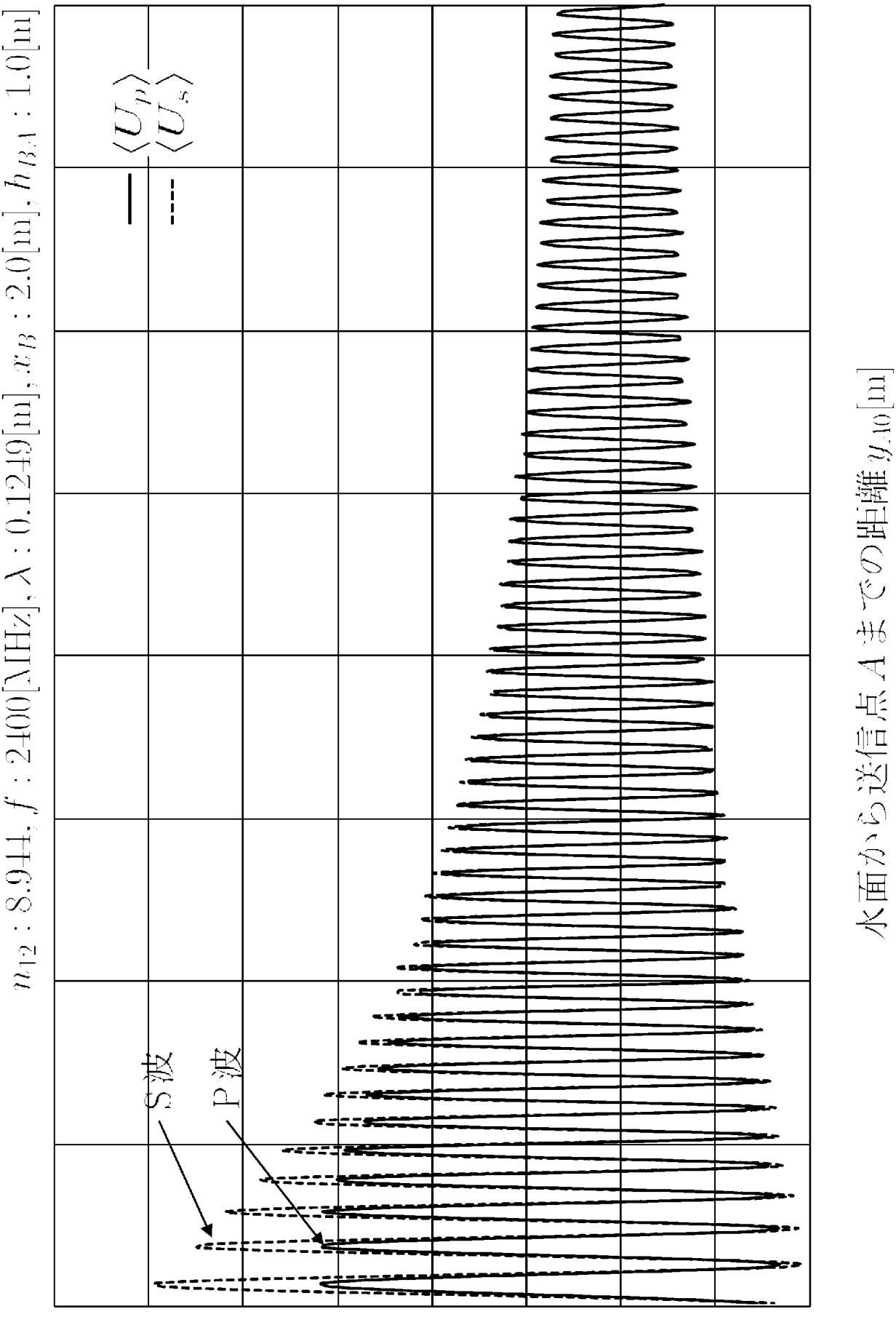
[図3]


受信点
（センサ通信アンテナ）
水面
水底面
光軸平面 S
送信点
（RFセンサ）
B
B'
A
C
D
E
O
x
y
θ_B
θ_C
θ_C
l_{CB}
l_{AB}
l_{AC}
x_B
x_C
x_E
x_D
y_B
y_A
y_0

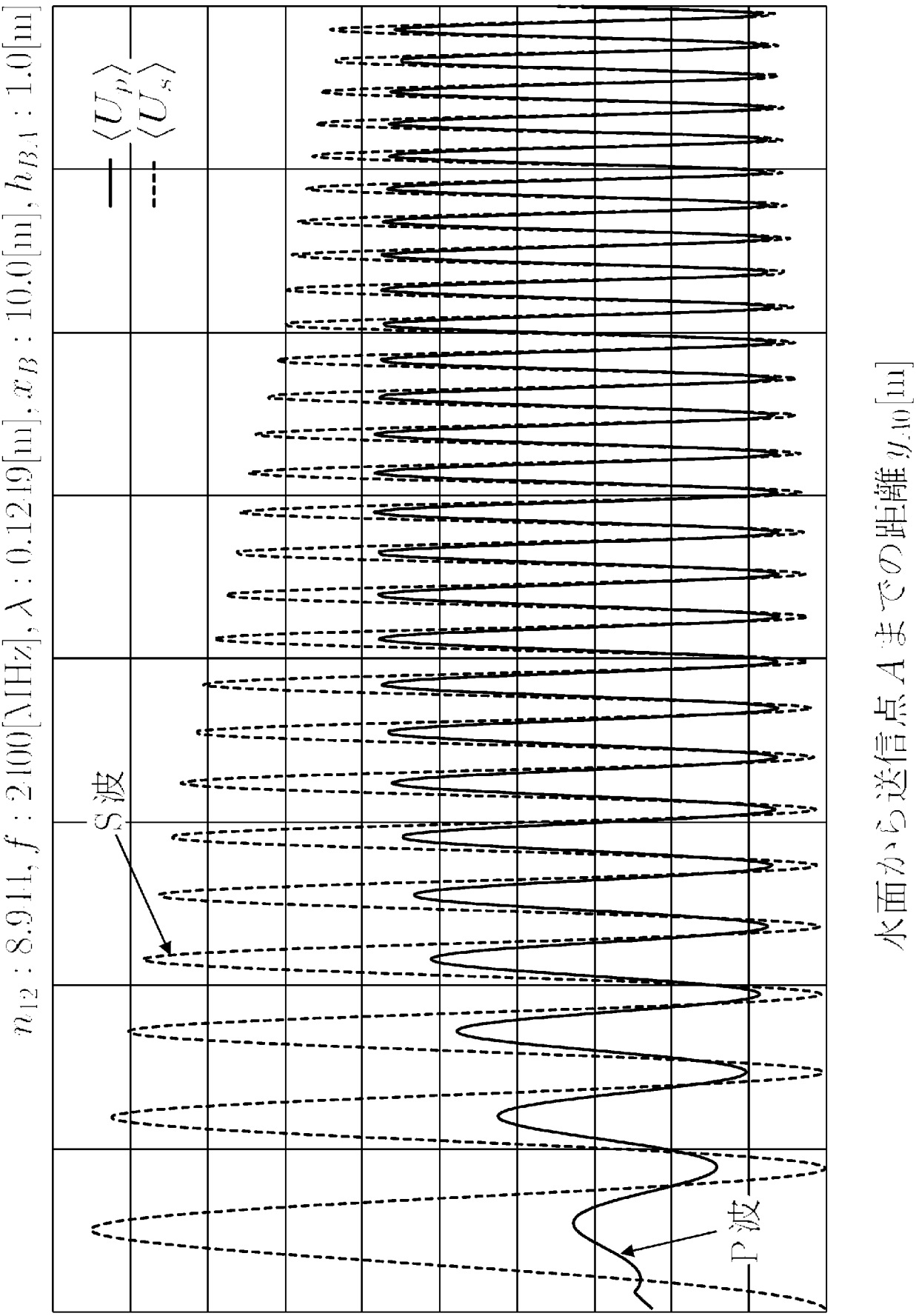
[図4]


E_{12p}
光軸平面 S
E_{1p}
E_{1p}
θ_B
E_{2p}
ray_1
E_{1s}
B
E_{2p}
θ_B
y'
y
x'
z
x
ray_2
E_{2s}

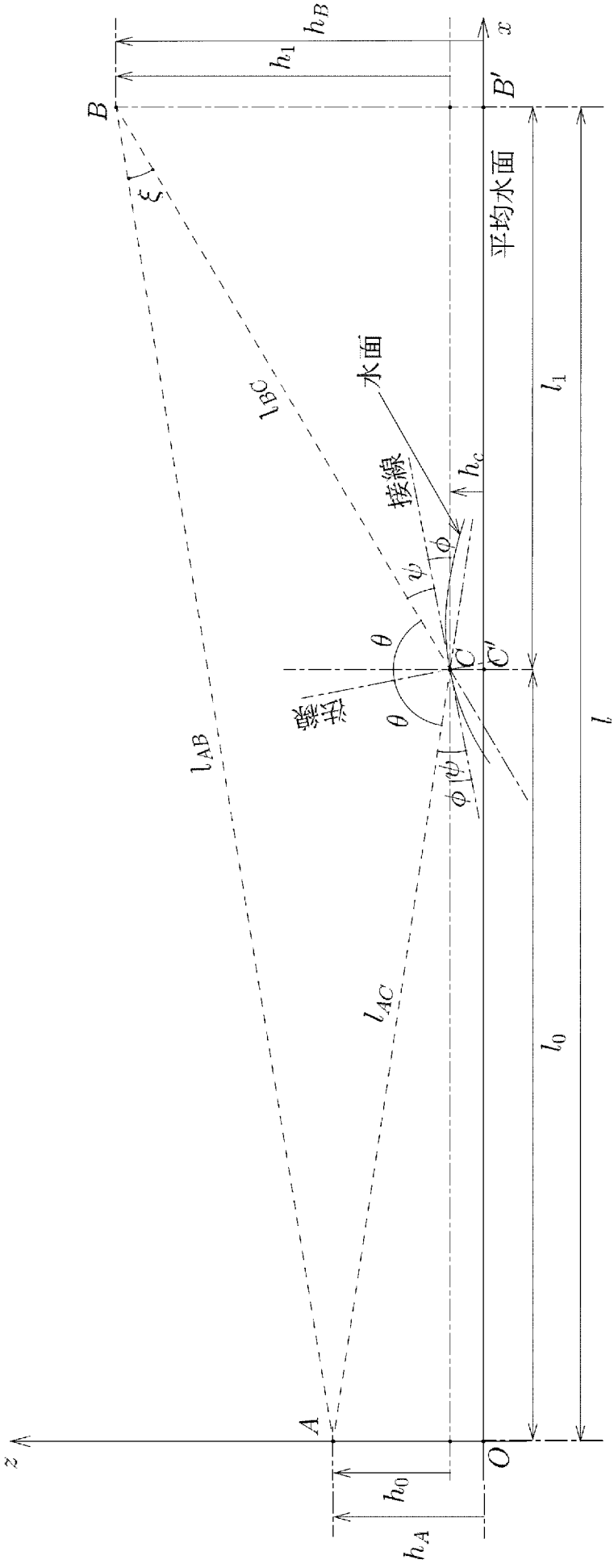
[図5]


n_{12} : 8.944, f : 2400[MHz], λ : 0.1249[m], x_B : 2.0[m], h_{BA} : 1.0[m]
— $\langle U_p \rangle$
--- $\langle U_s \rangle$
S波
P波
干渉波エネルギー密度の平均相対強度 $\langle U_p \rangle$
水面から送信点 A までの距離 y_{A0}[m]

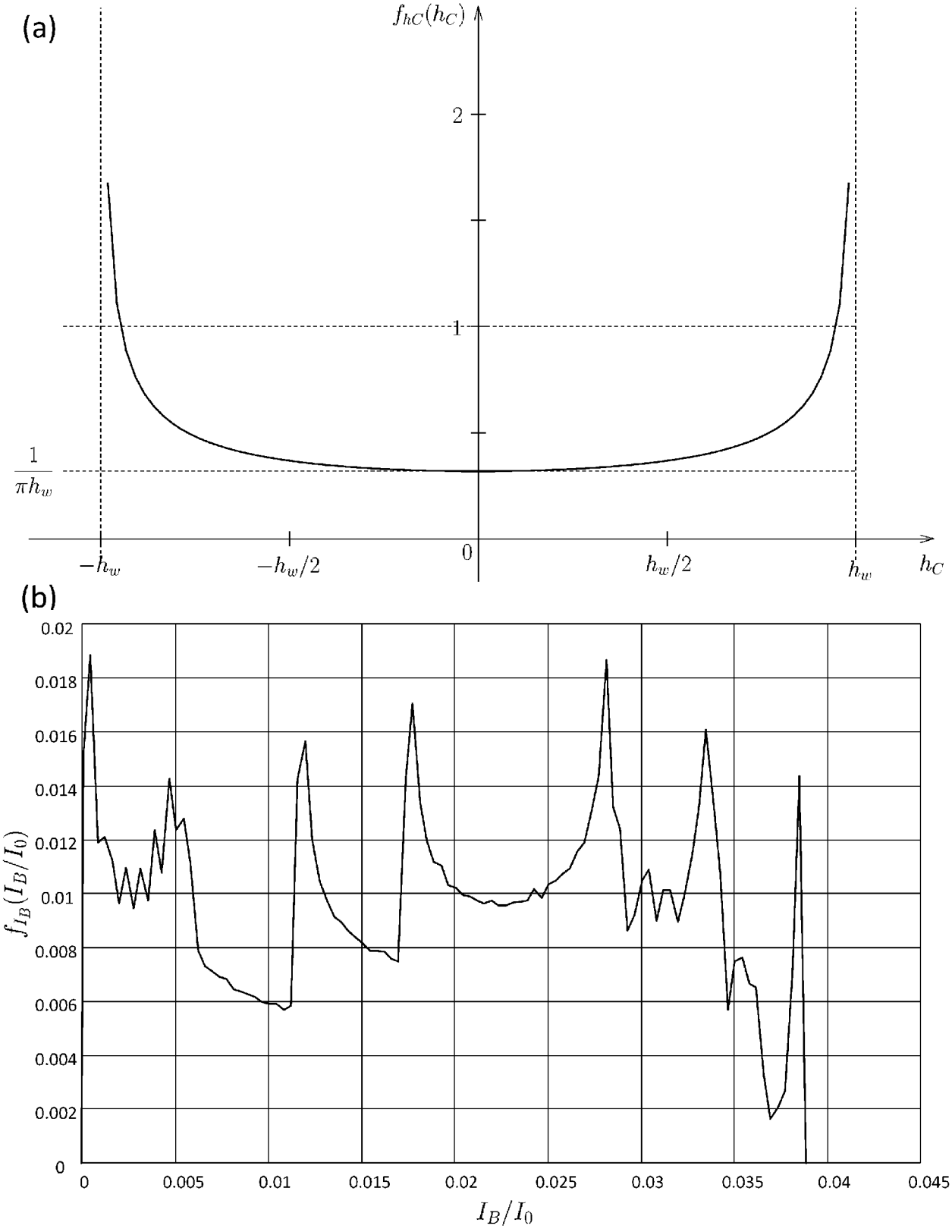
[図6]


n_{12} : 8.911, f : 2100[MHz], λ : 0.1219[m], x_B : 10.0[m], h_{B1} : 1.0[m]
$\langle U_p \rangle$
$\langle U_s \rangle$
S波
P波
水面から送信点Aまでの距離y_{A0}[m]
下向波エネルギー密度の平均相対強度$\langle U_p \rangle$

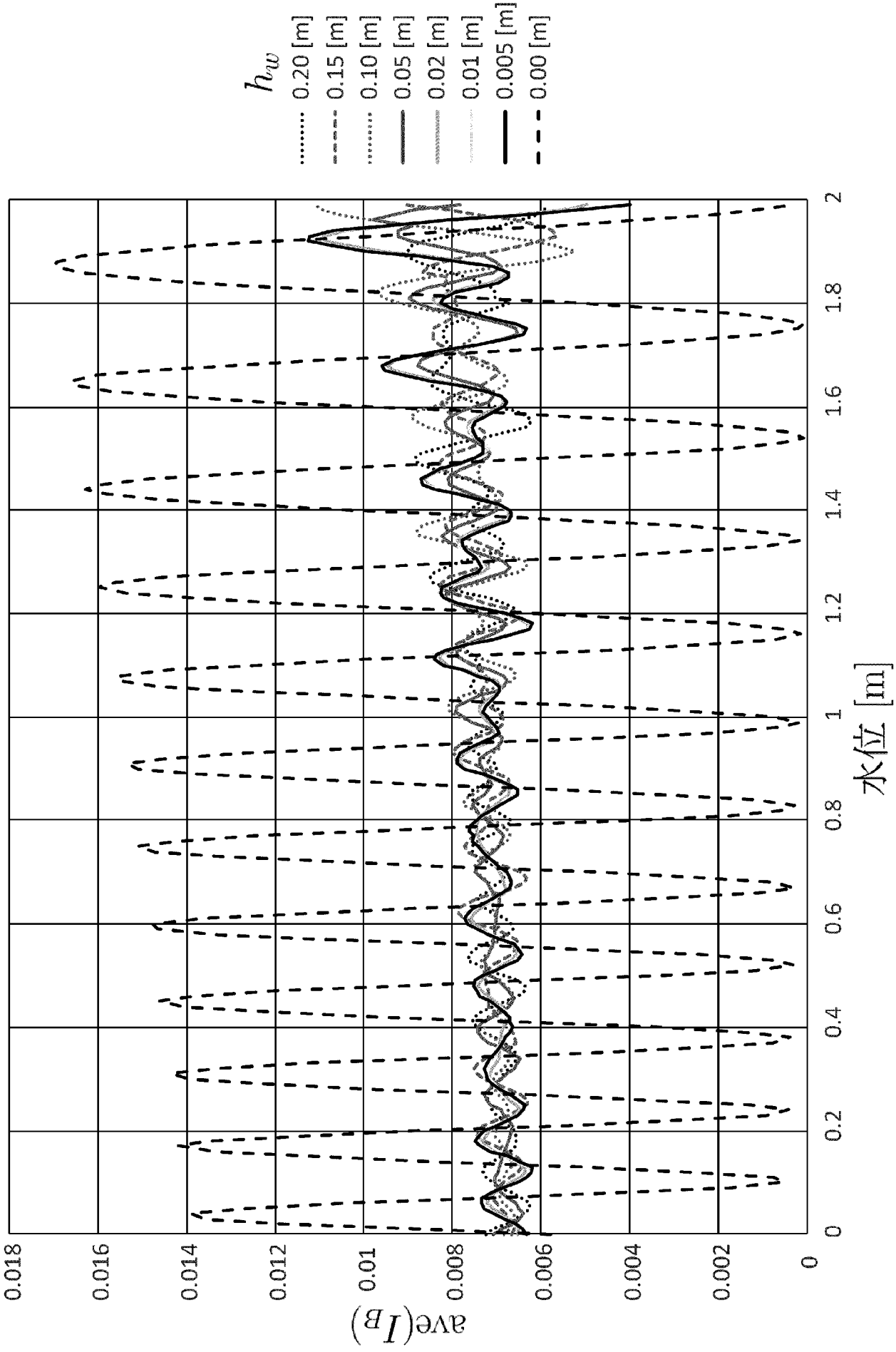
[図7]


h_B
h_1
x
B
B'
ξ
平均水面
l_{BC}
水面
l_1
接線
h_c
ϕ
ψ
θ
C
C'
接線
θ
l_{AB}
ϕ
ψ
l
l_{AC}
l_0
z
A
O
h_0
h_A

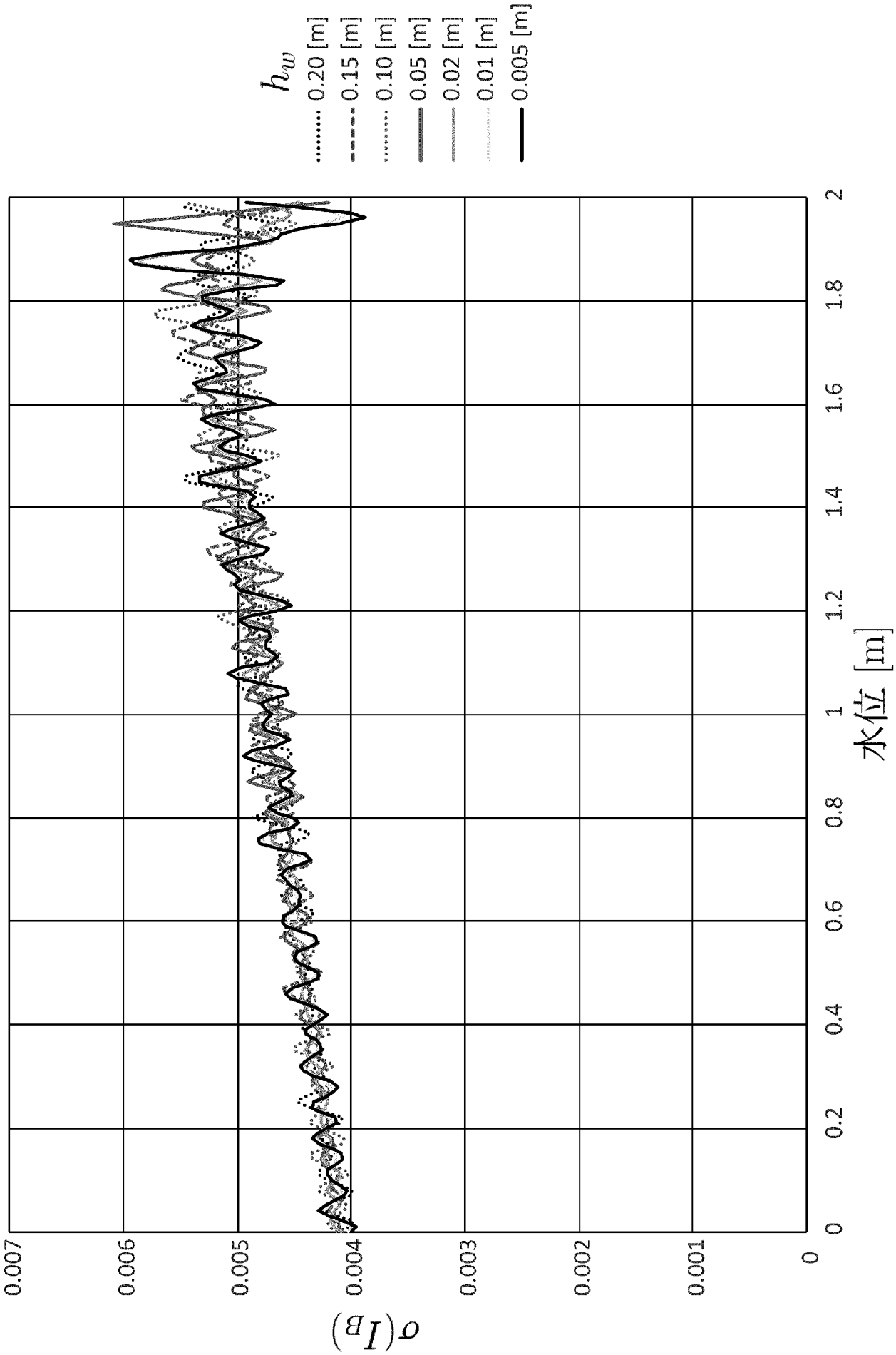
[図8]


(a)
$f_{hC}(h_C)$
2
1
$\frac{1}{\pi h_w}$
$-h_w$
$-h_w/2$
0
$h_w/2$
h_w
h_C
(b)
0.02
0.018
0.016
0.014
0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
$f_{I_B}(I_B/I_0)$
0
0.005
0.01
0.015
0.02
0.025
0.03
0.035
0.04
0.045
I_B/I_0

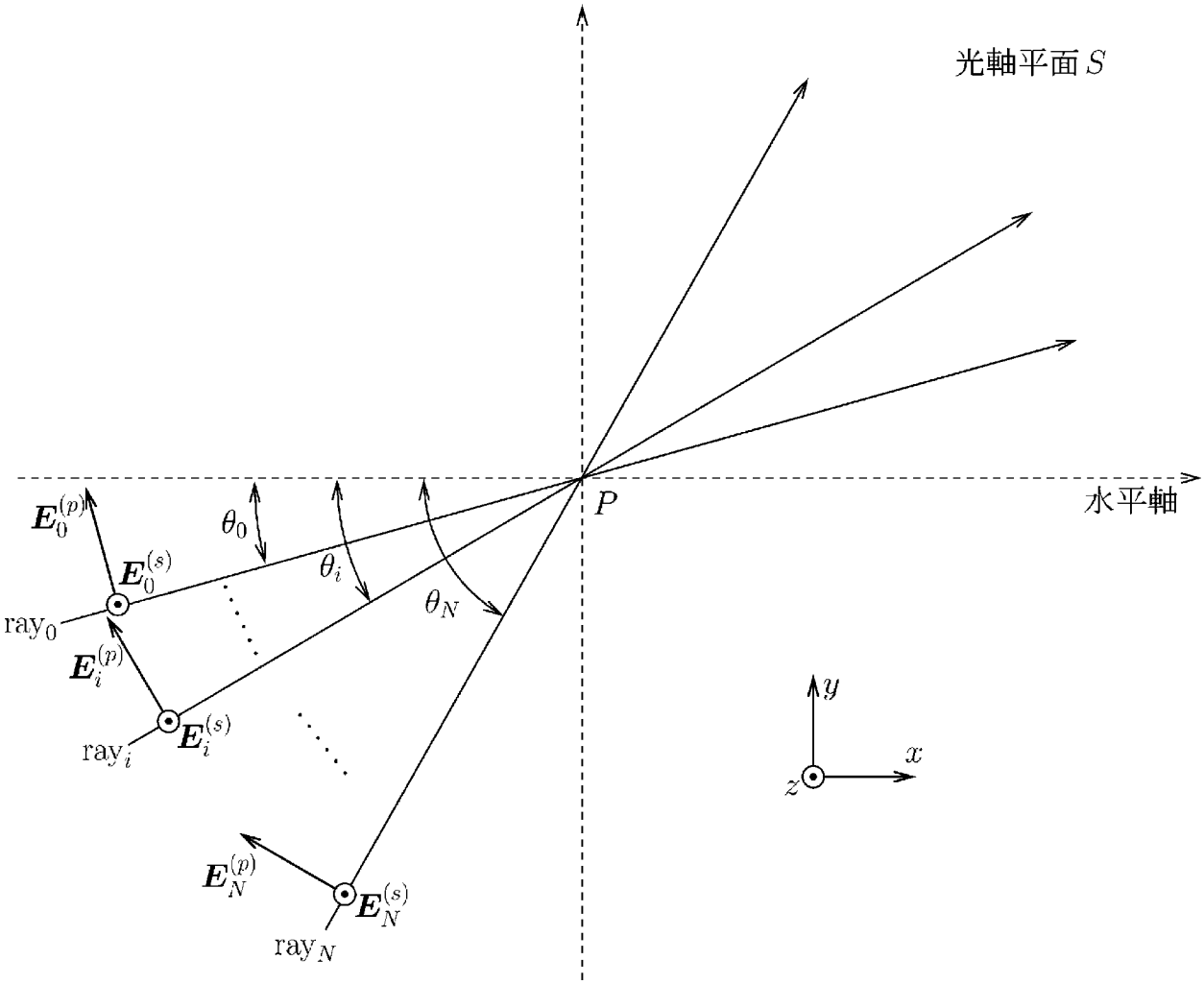
[図9]


h_w
0.20 [m]
0.15 [m]
0.10 [m]
0.05 [m]
0.02 [m]
0.01 [m]
0.005 [m]
0.00 [m]
$\mathrm{ave}(I_B)$
0.018
0.016
0.014
0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
水位 [m]
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
2

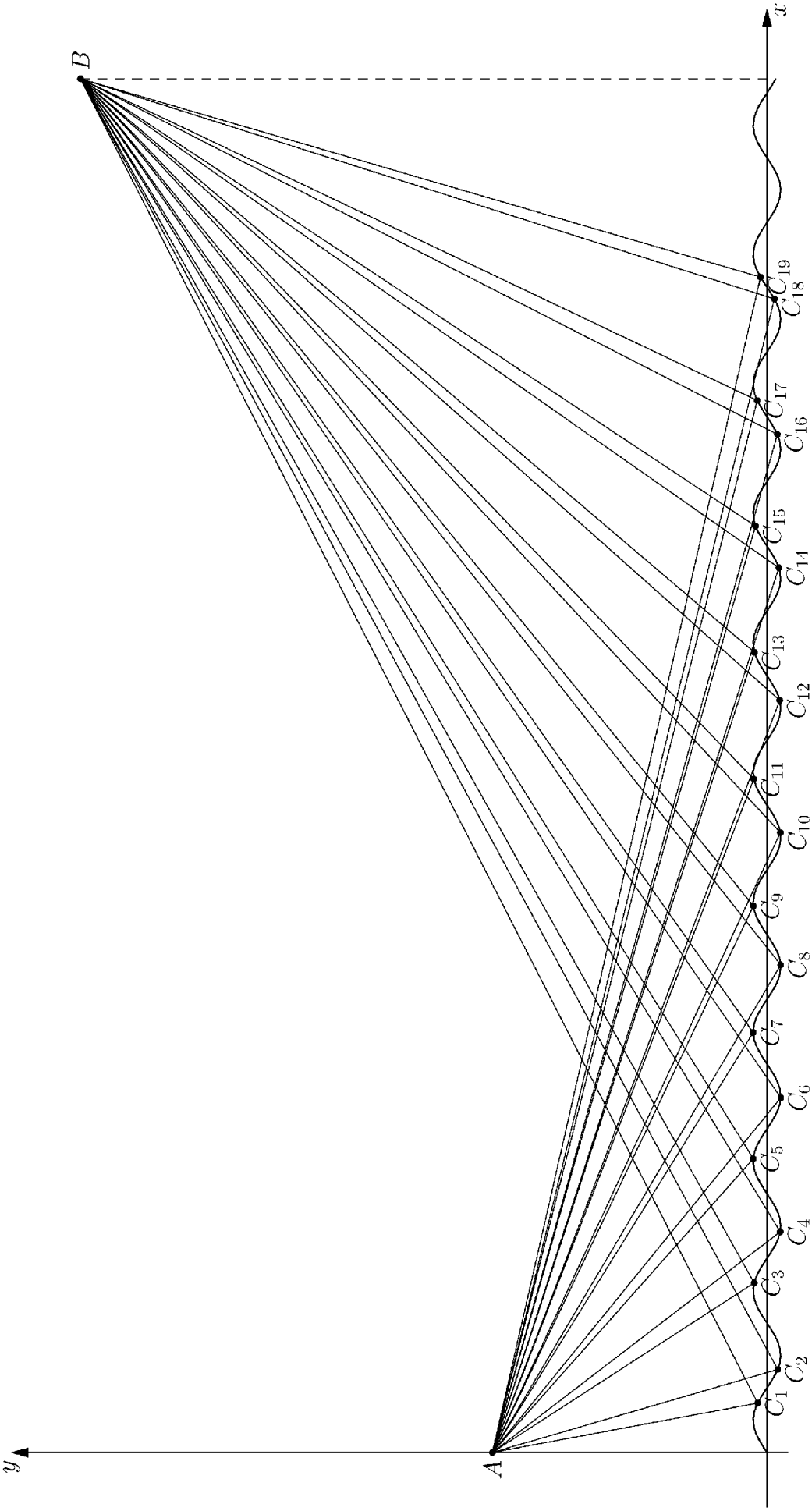
[図10]


h_w
0.20 [m]
0.15 [m]
0.10 [m]
0.05 [m]
0.02 [m]
0.01 [m]
0.005 [m]
$\sigma(I_B)$
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
2
水位 [m]

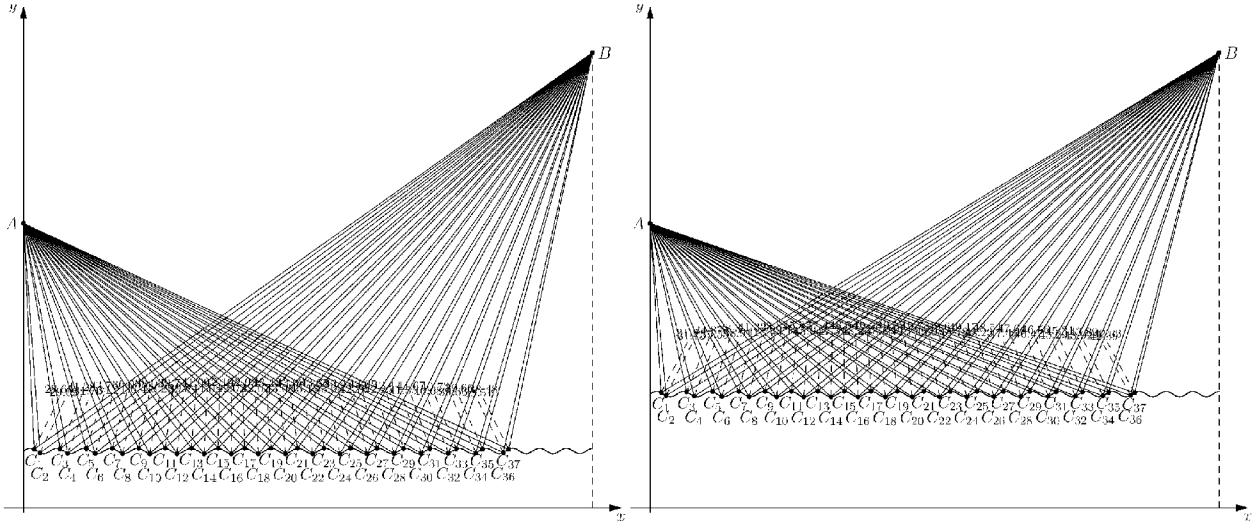
[図11]


光軸平面 S
P
水平軸
θ_0
θ_i
θ_N
$\boldsymbol{E}_0^{(p)}$
$\boldsymbol{E}_0^{(s)}$
ray_0
$\boldsymbol{E}_i^{(p)}$
$\boldsymbol{E}_i^{(s)}$
ray_i
$\boldsymbol{E}_N^{(p)}$
$\boldsymbol{E}_N^{(s)}$
ray_N
y
x
z

[図12]

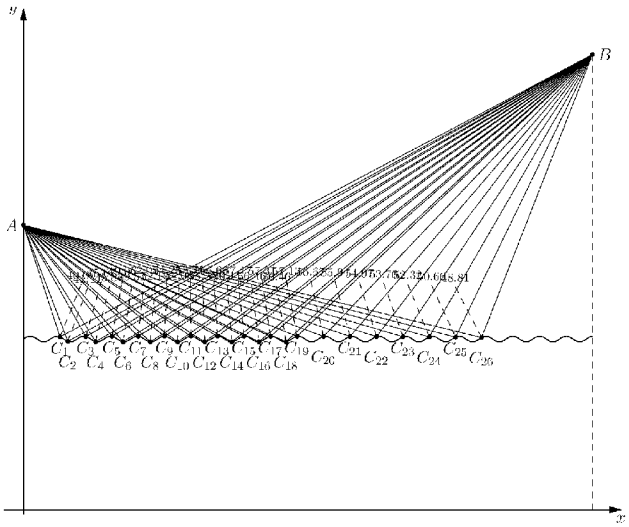

x
B
C19
C18
C17
C16
C15
C14
C13
C12
C11
C10
C9
C8
C7
C6
C5
C4
C3
C2
C1
y
A

[図13]

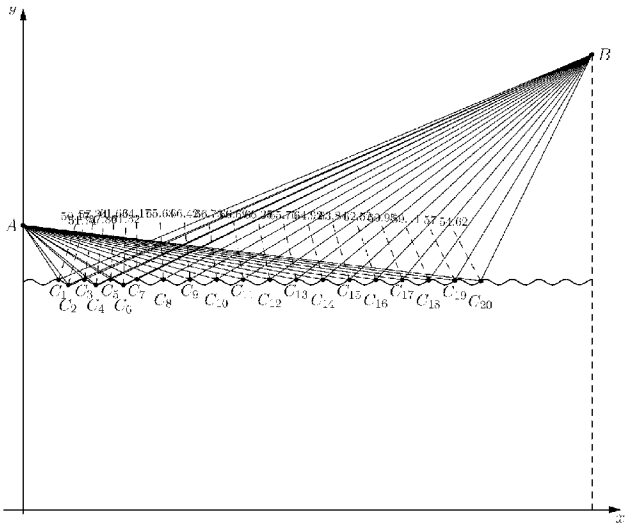


(a) $h_A - y_{w0} = 4.0$ [m]

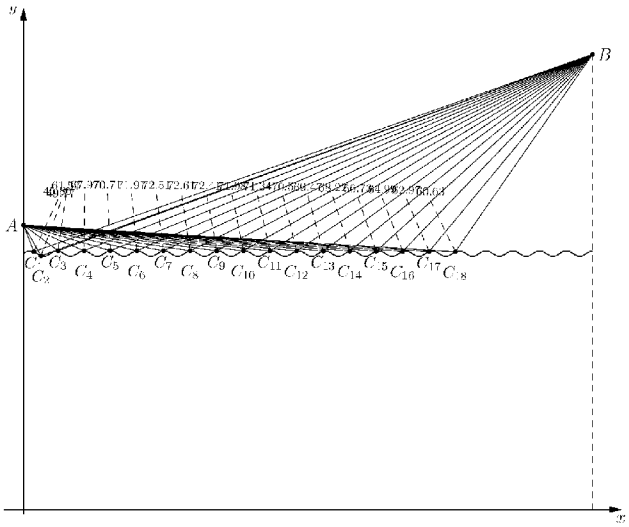
(b) $h_A - y_{w0} = 3.0$ [m]



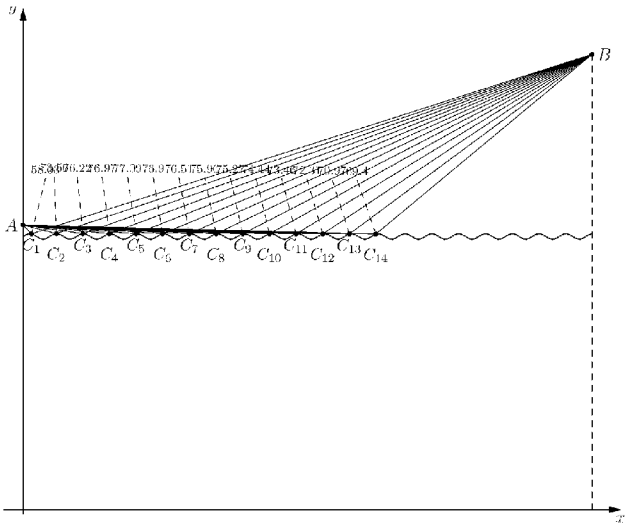
(c) $h_A - y_{w0} = 2.0$ [m]



(d) $h_A - y_{w0} = 1.0$ [m]

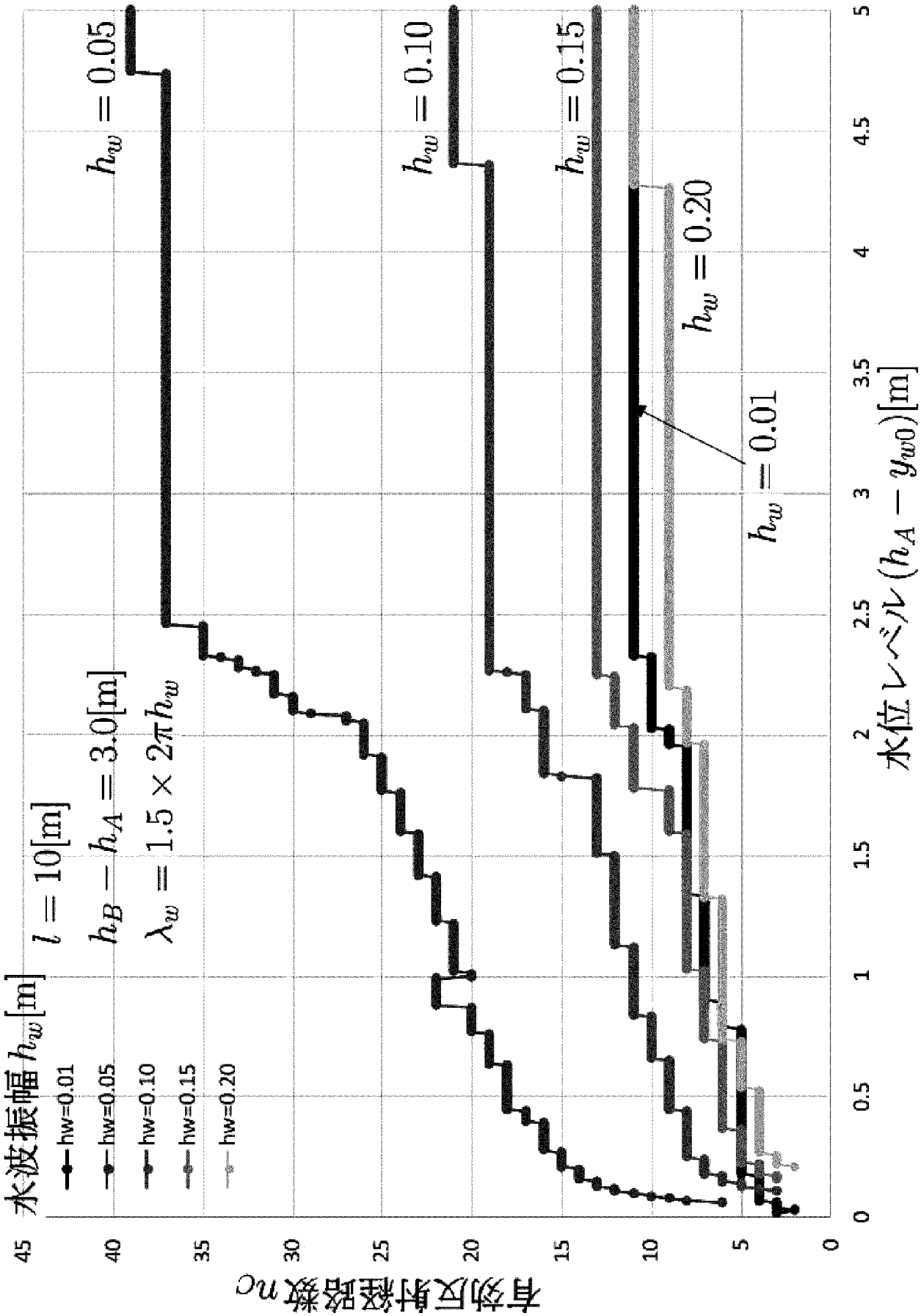


(e) $h_A - y_{w0} = 0.5$ [m]



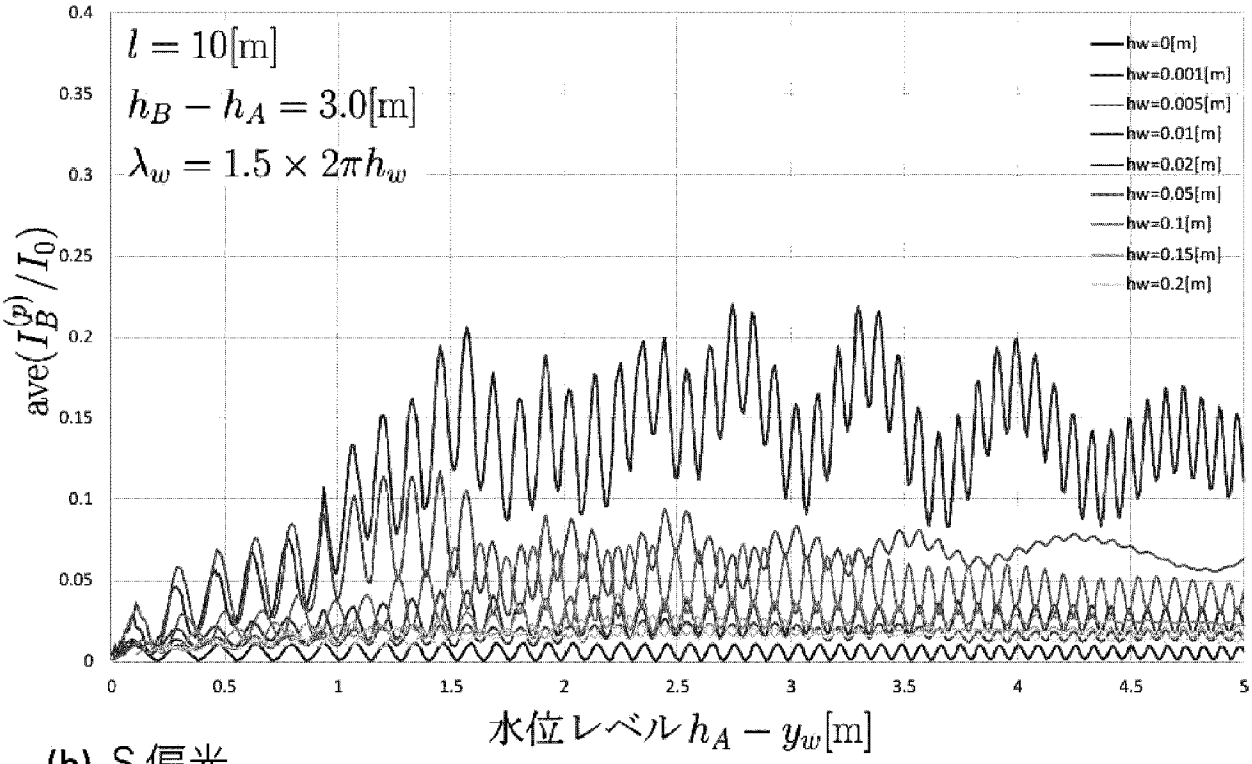
(f) $h_A - y_{w0} = 0.2$ [m]

[図14]

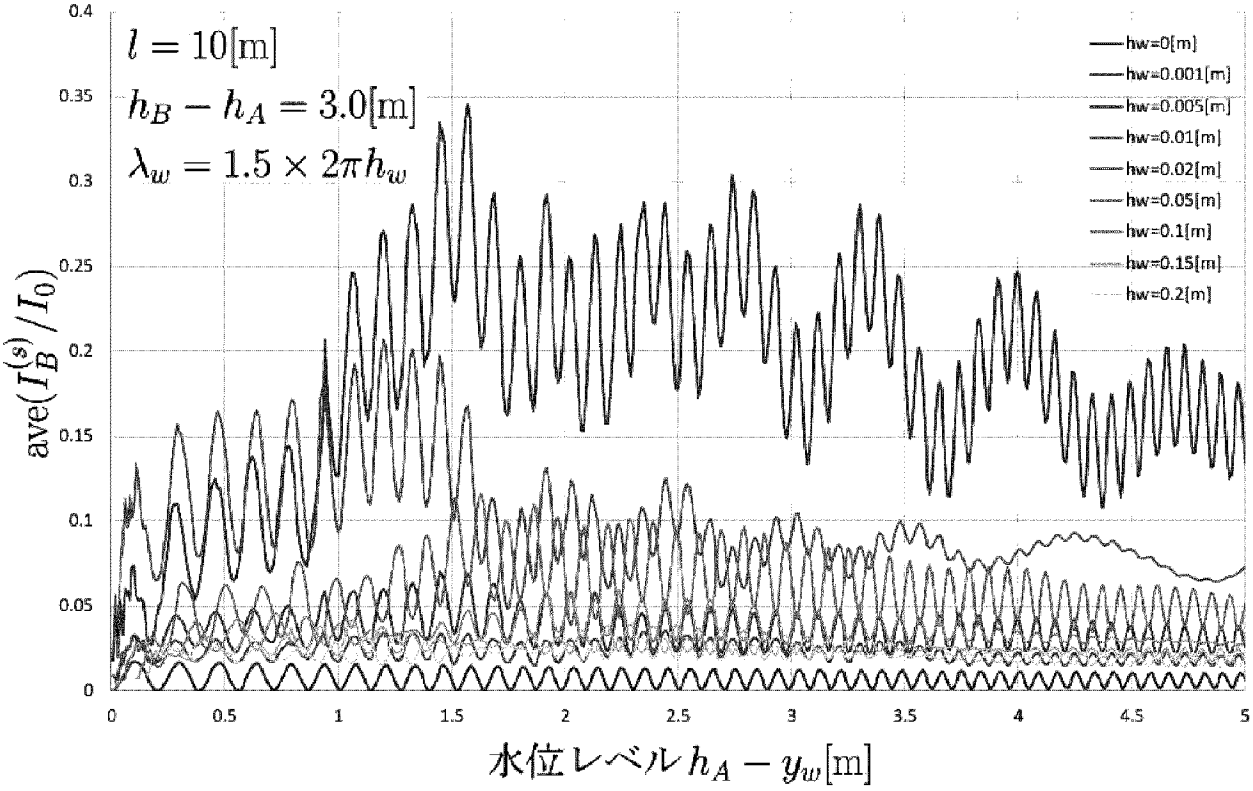

水波振幅 h_w[m]
hw=0.01
hw=0.05
hw=0.10
hw=0.15
hw=0.20
$l = 10$[m]
$h_B - h_A = 3.0$[m]
$\lambda_w = 1.5 \times 2\pi h_w$
$h_w = 0.05$
$h_w = 0.10$
$h_w = 0.15$
$h_w = 0.20$
$h_w = 0.01$
有効反射経路数 n_c
水位レベル $(h_A - y_{w0})$[m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

[図15]

(a) P 偏光

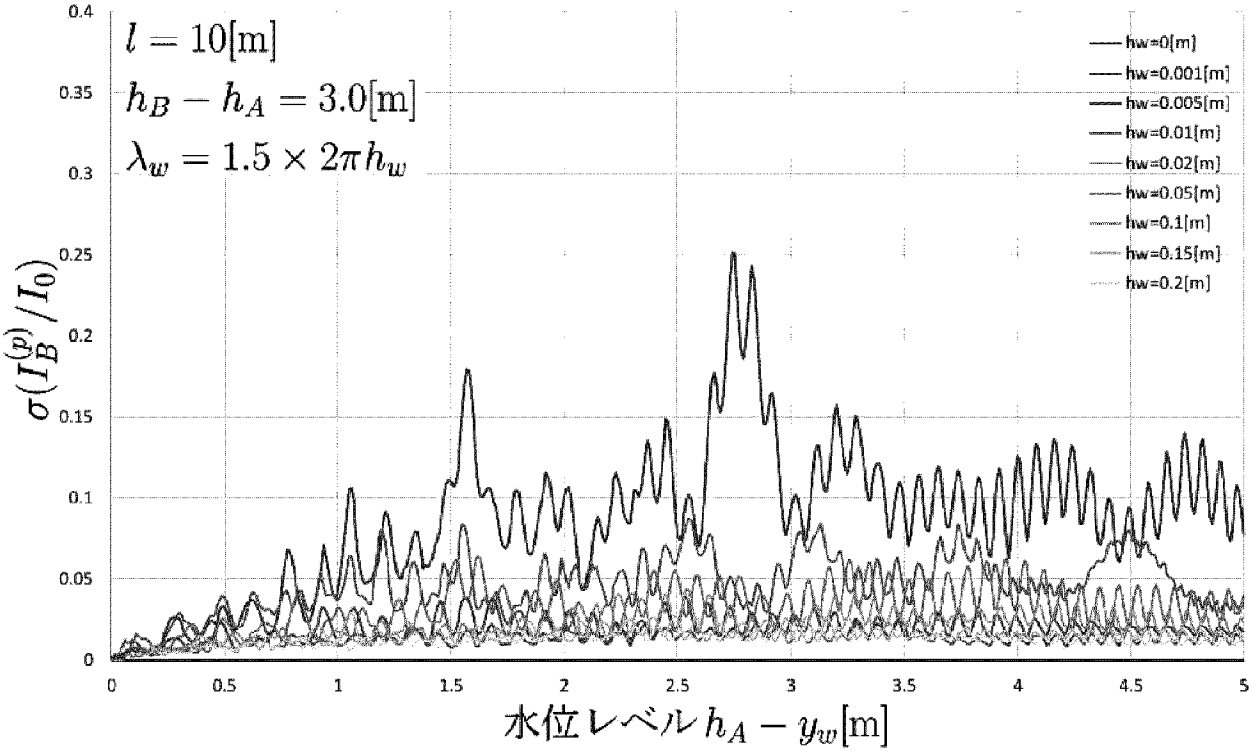


(b) S 偏光

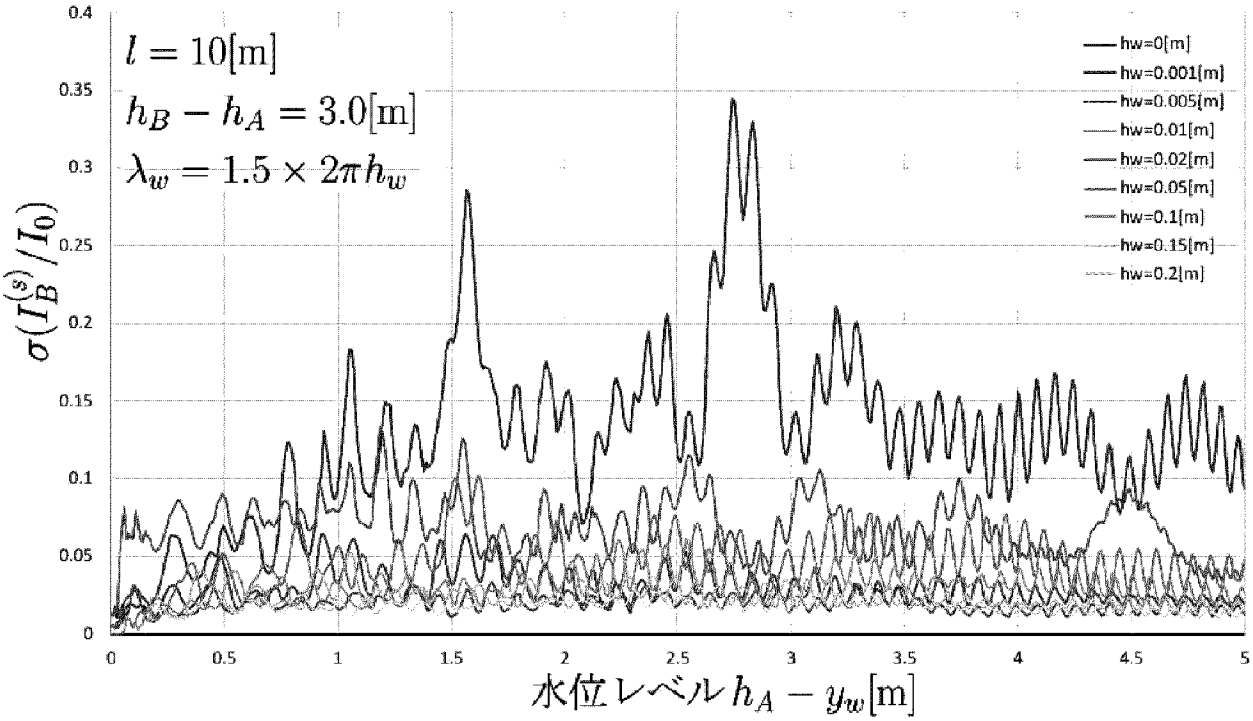


[図16]

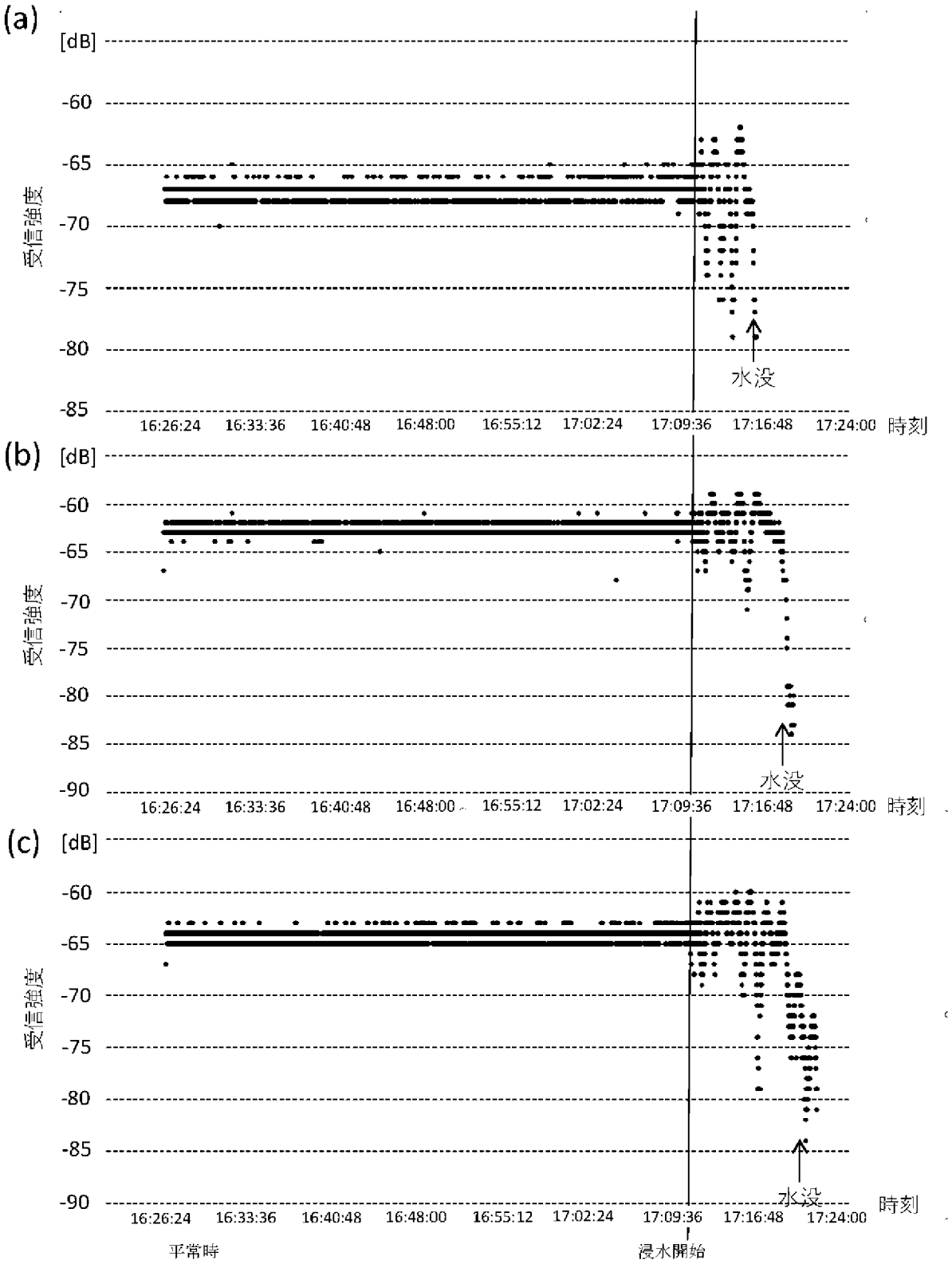
(a) P 偏光



(b) S 偏光

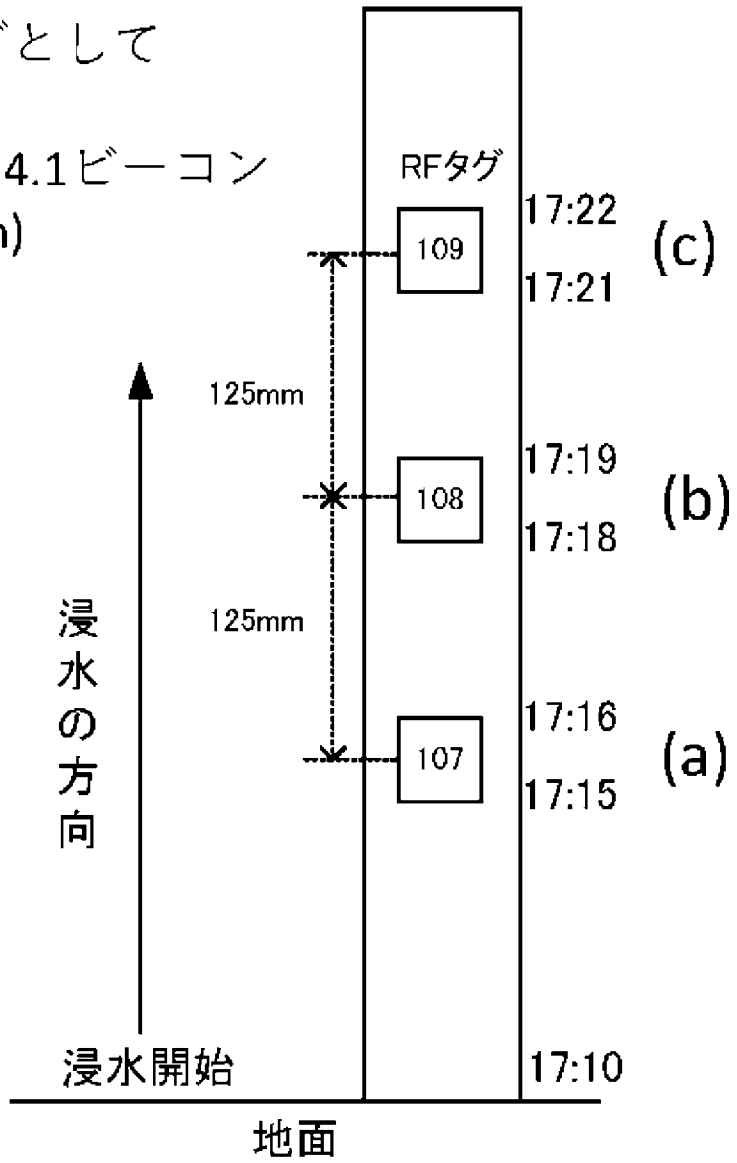


[図17]

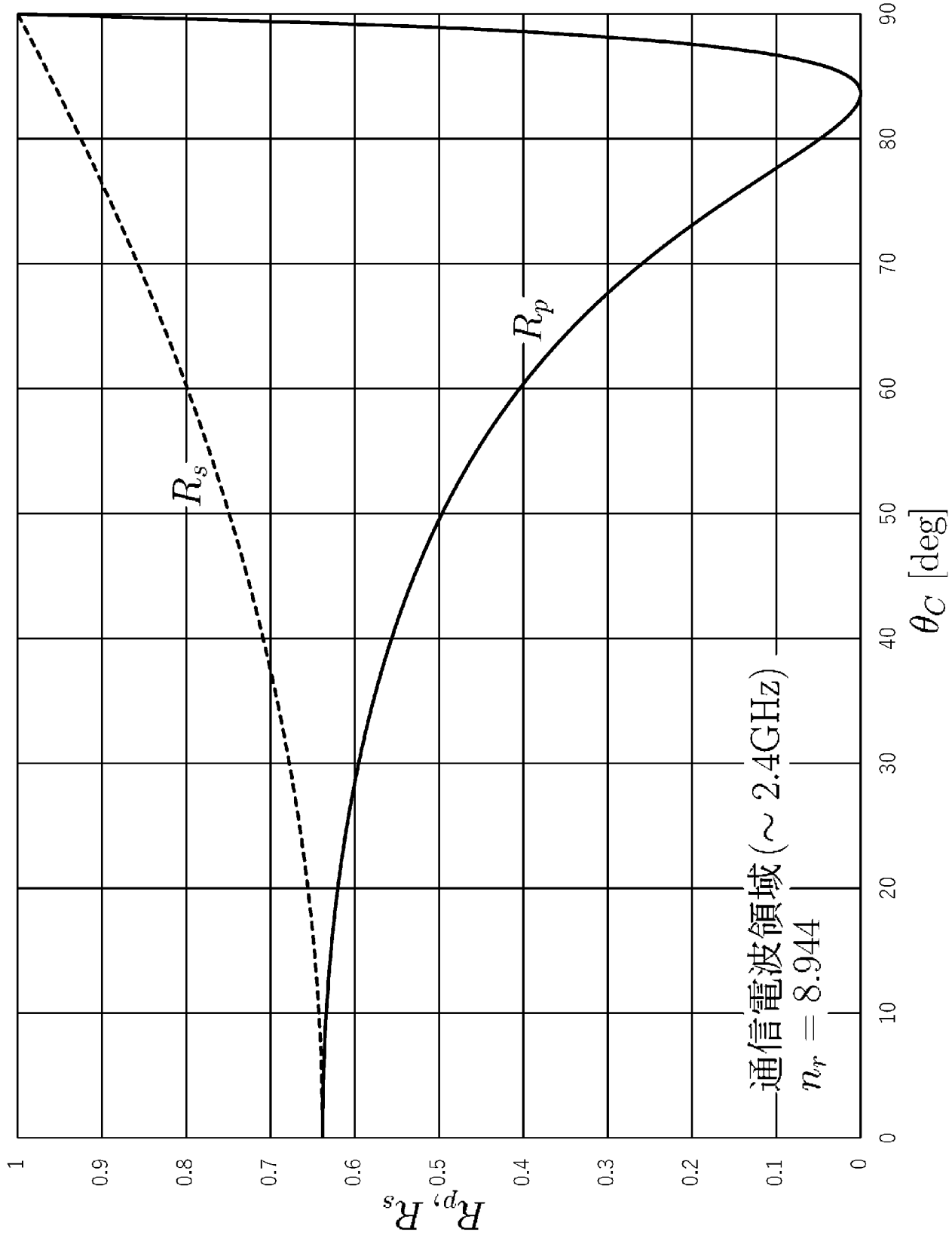

(a)
[dB]
-60
-65
-70
-75
-80
-85
受信強度
水没
16:26:24
16:33:36
16:40:48
16:48:00
16:55:12
17:02:24
17:09:36
17:16:48
17:24:00
時刻
(b)
[dB]
-60
-65
-70
-75
-80
-85
-90
受信強度
水没
16:26:24
16:33:36
16:40:48
16:48:00
16:55:12
17:02:24
17:09:36
17:16:48
17:24:00
時刻
(c)
[dB]
-60
-65
-70
-75
-80
-85
-90
受信強度
水没
16:26:24
16:33:36
16:40:48
16:48:00
16:55:12
17:02:24
17:09:36
17:16:48
17:24:00
時刻
平常時
浸水開始

[図18]

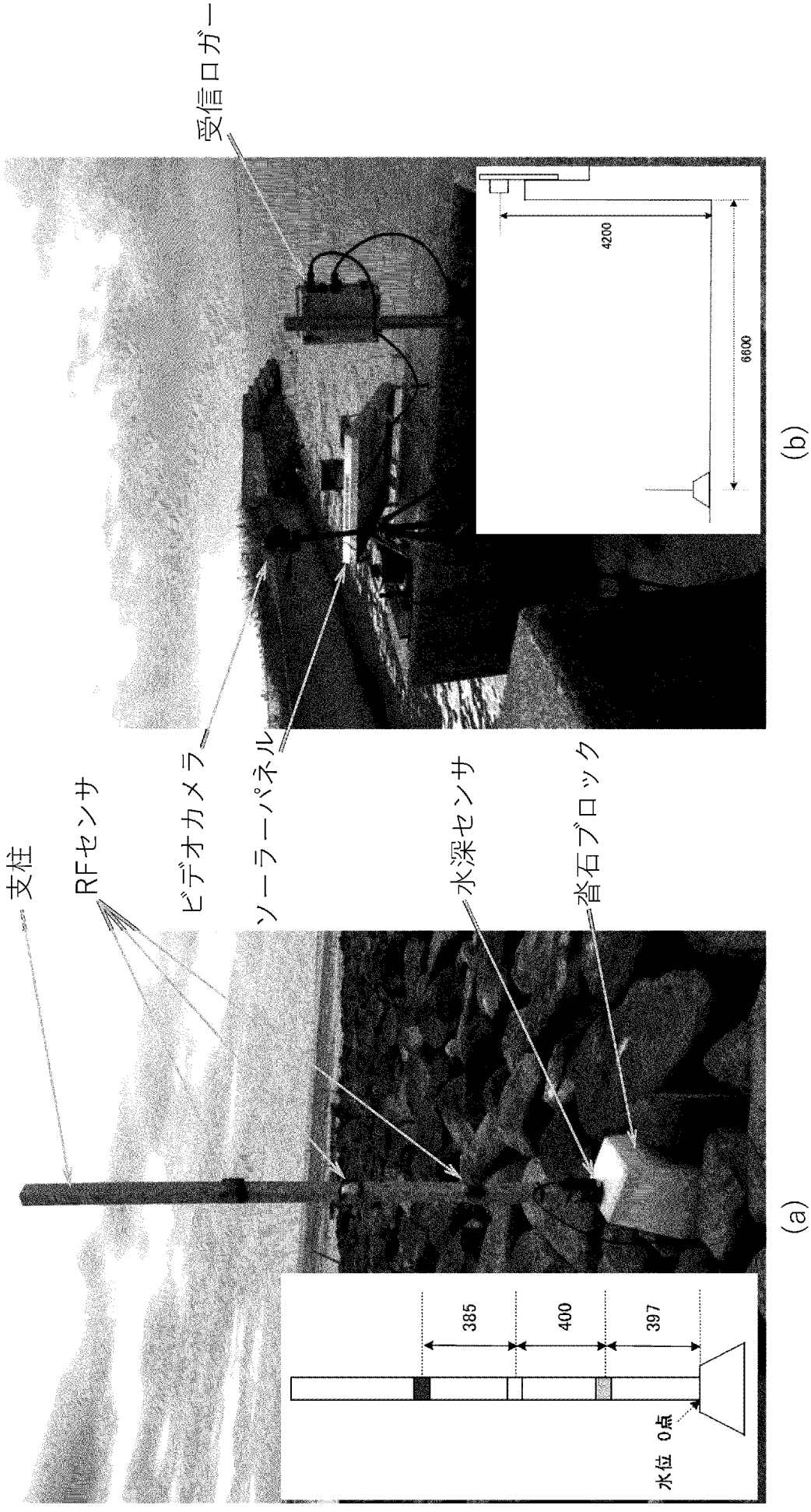
アクティブ型RFタグとして
使用したデバイス
Bluetooth(登録商標) 4.1ビーコン
f = 2.4 GHz (λ=125mm)



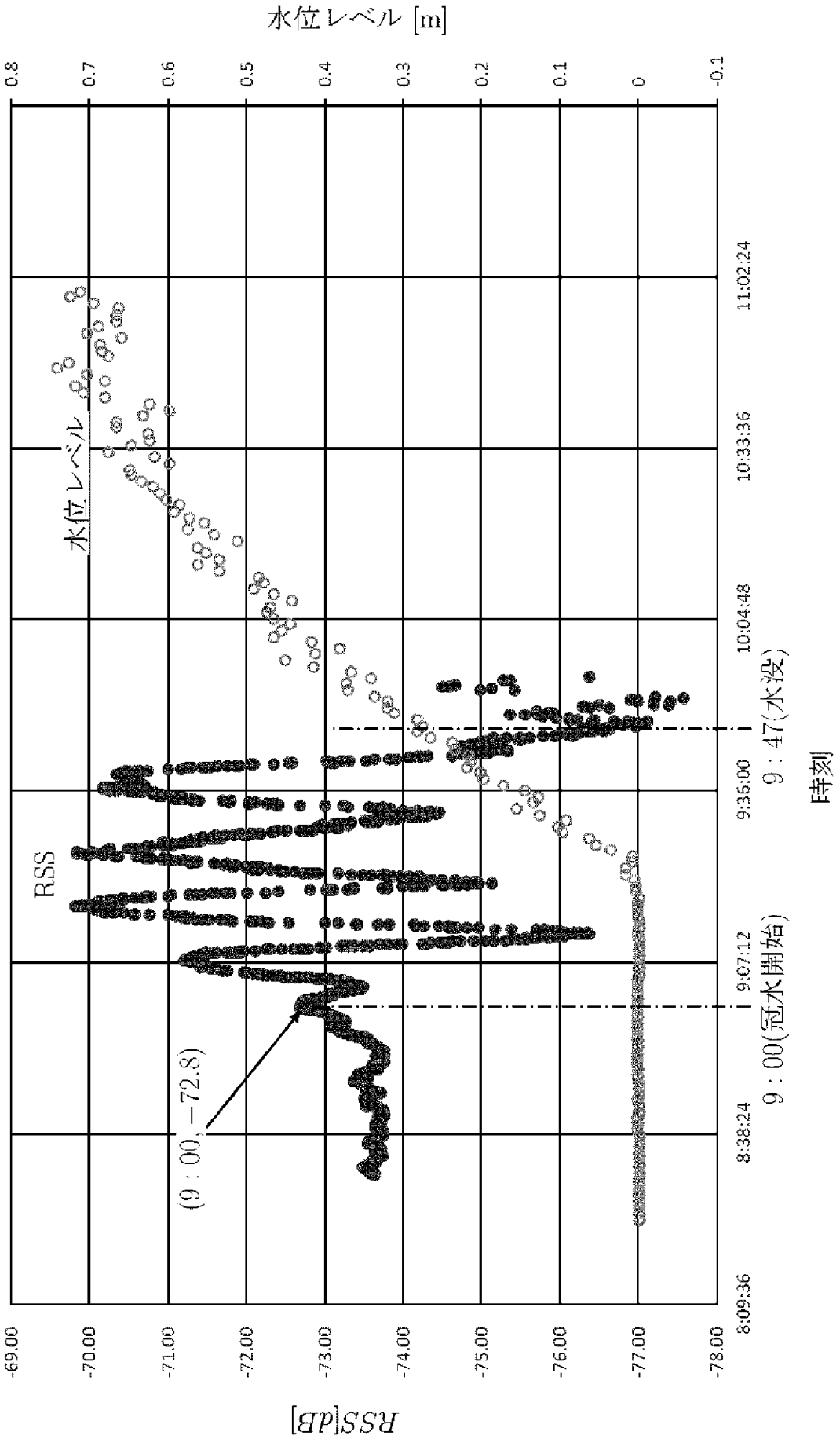
[図19]


R_p
R_s
通信電波領域（～2.4GHz）
$n_r = 8.944$
R_p, R_s
θ_C [deg]
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

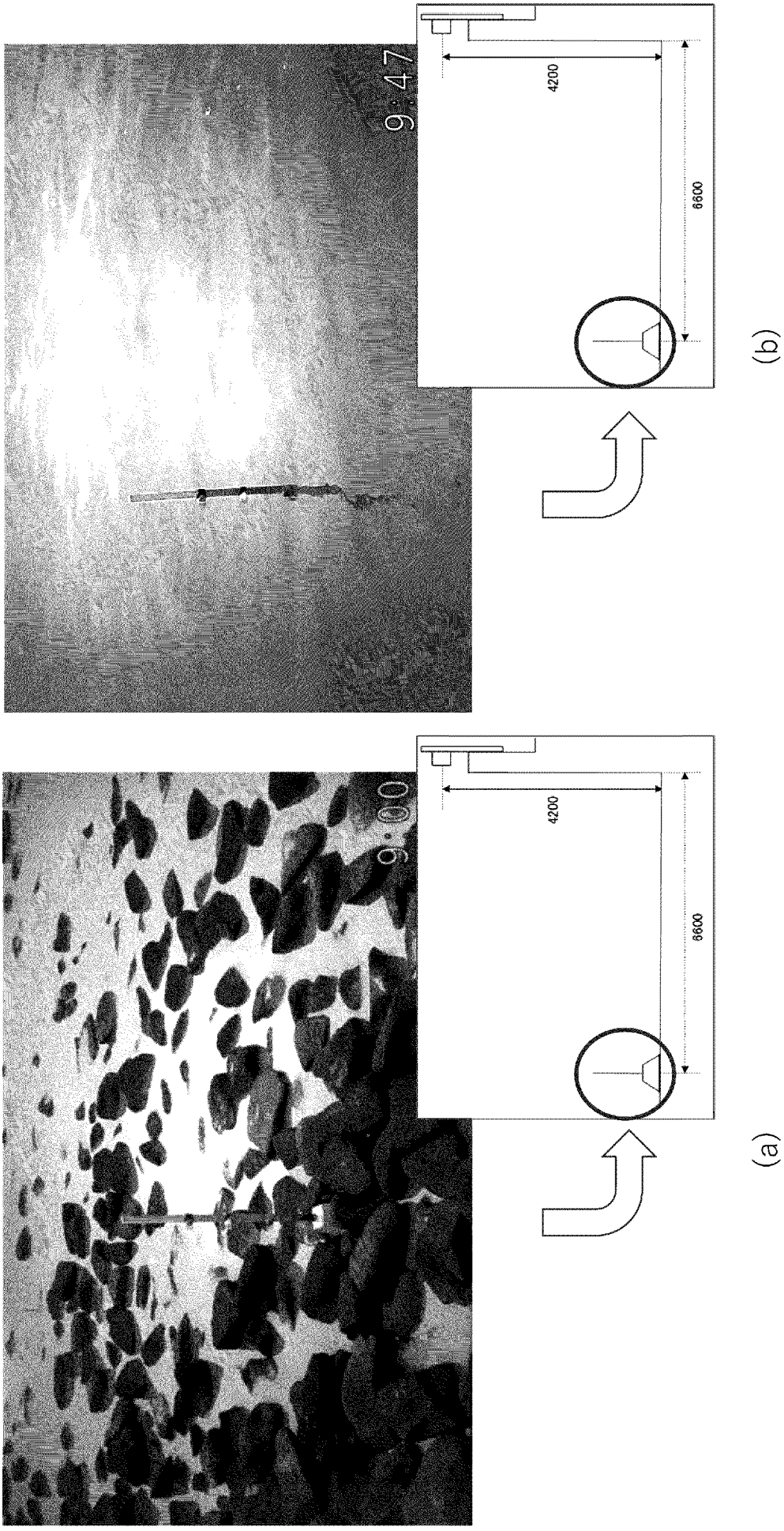
[図20]


受信ロガー
支柱
RFセンサ
ビデオカメラ
ソーラーパネル
水深センサ
沓石ブロック
385
400
397
水位 0点
(a)
4200
6600
(b)

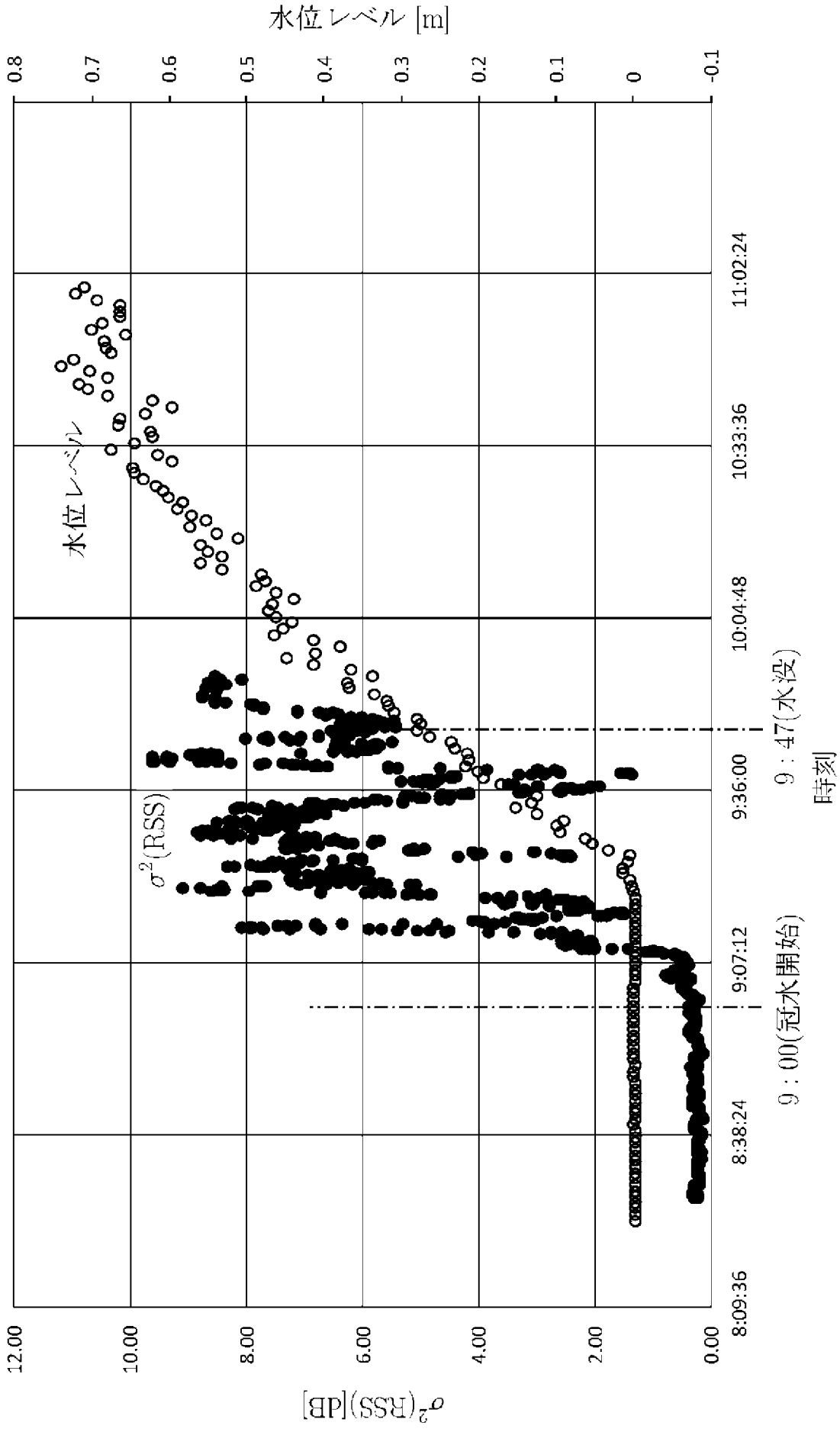
[図21]


水位レベル [m]
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
水位レベル
RSS
(9：00, −72.8)
8:09:36
8:38:24
9:07:12
9:36:00
10:04:48
10:33:36
11:02:24
9：00(冠水開始)
9：47(水没)
時刻
-69.00
-70.00
-71.00
-72.00
-73.00
-74.00
-75.00
-76.00
-77.00
-78.00
RSS[dB]

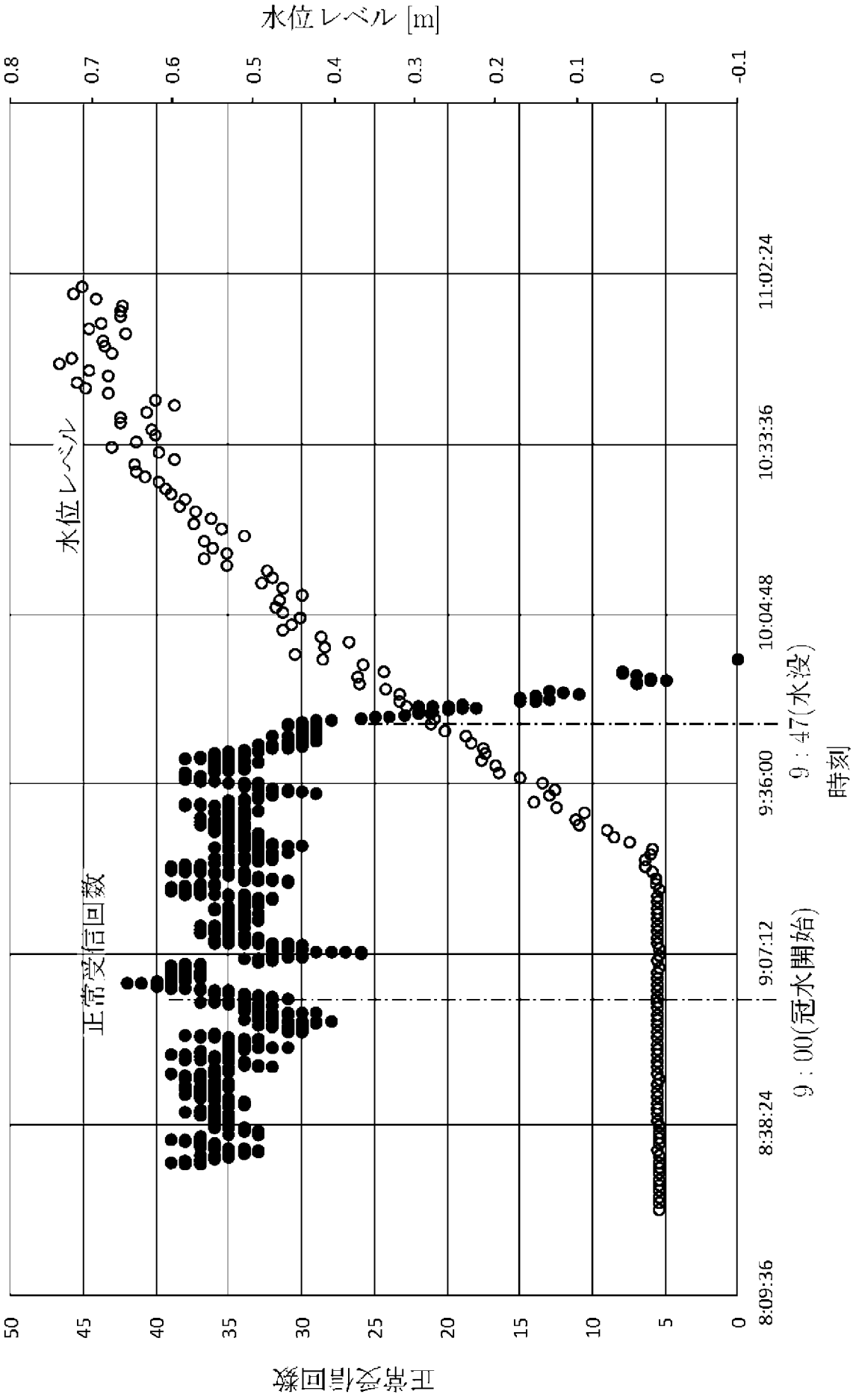
[図22]



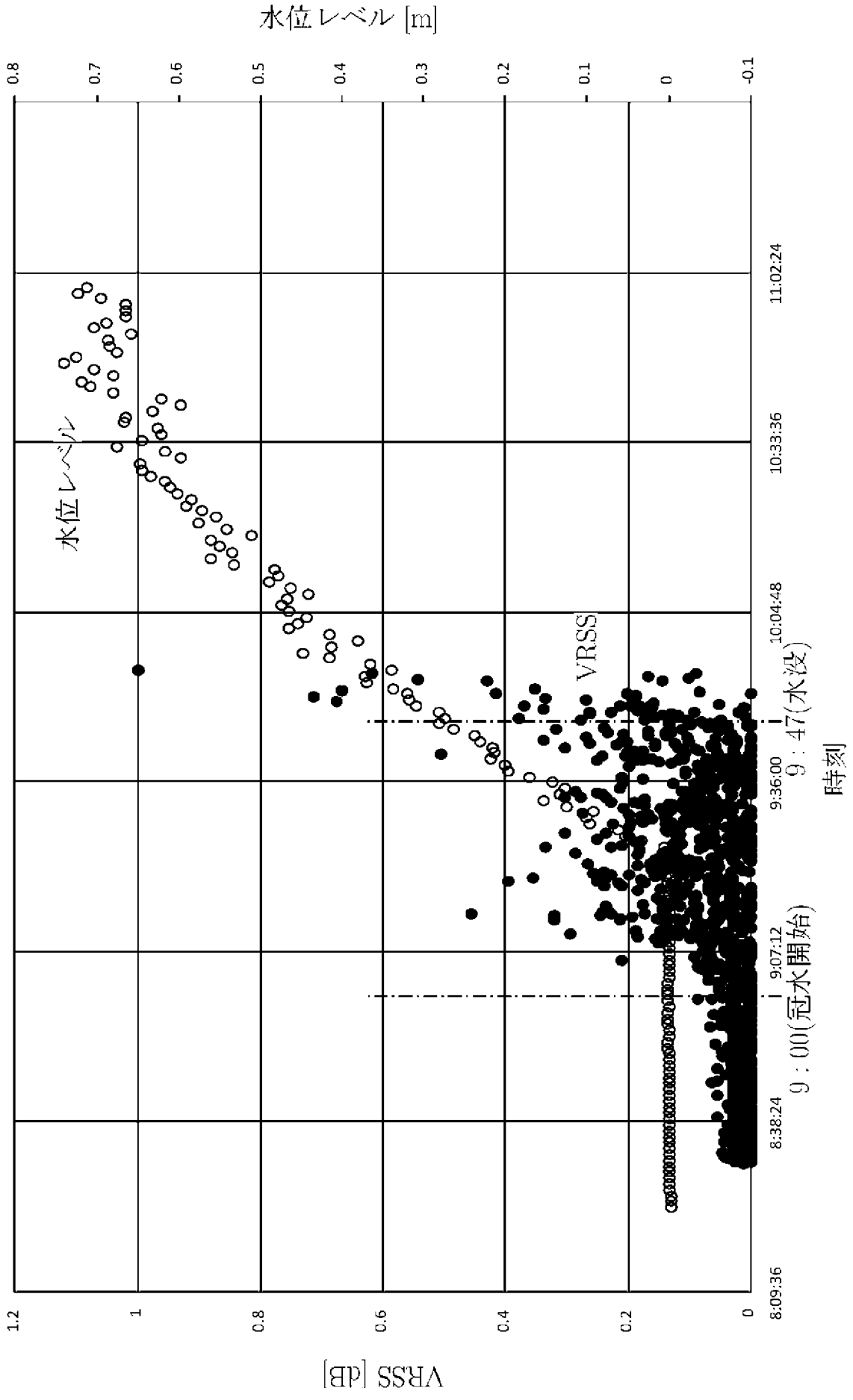
[図23]


水位レベル [m]
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
水位レベル
σ^2(RSS)
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
σ^2(RSS)[dB]
8:09:36
8:38:24
9:07:12
9:36:00
10:04:48
10:33:36
11:02:24
時刻
9：00(冠水開始)
9：47(水没)

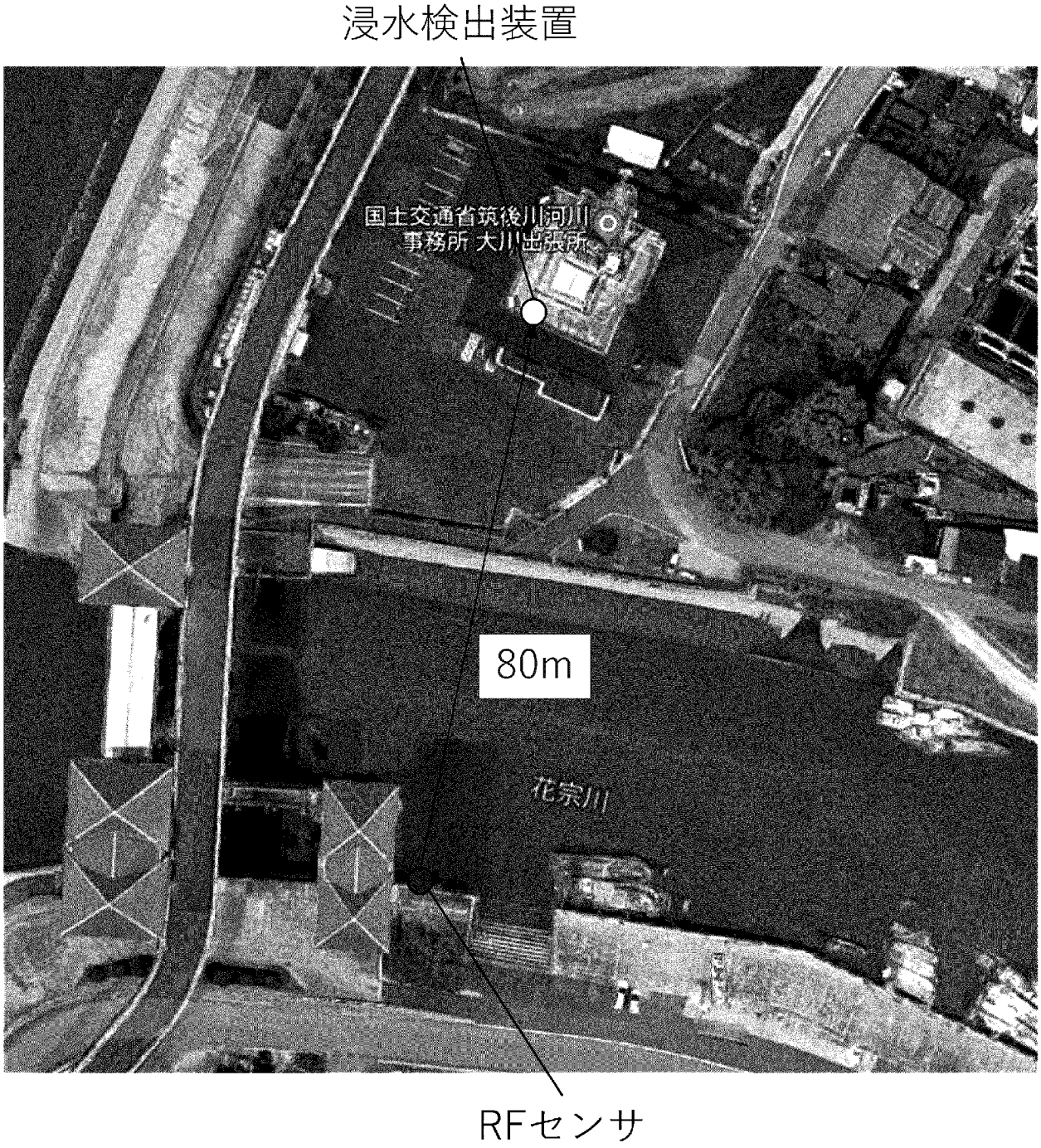
[図24]


水位レベル [m]
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
水位レベル
正常受信回数
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
8:09:36
8:38:24
9:07:12
9:36:00
10:04:48
10:33:36
11:02:24
9：00(冠水開始)
9：47(水没)
時刻

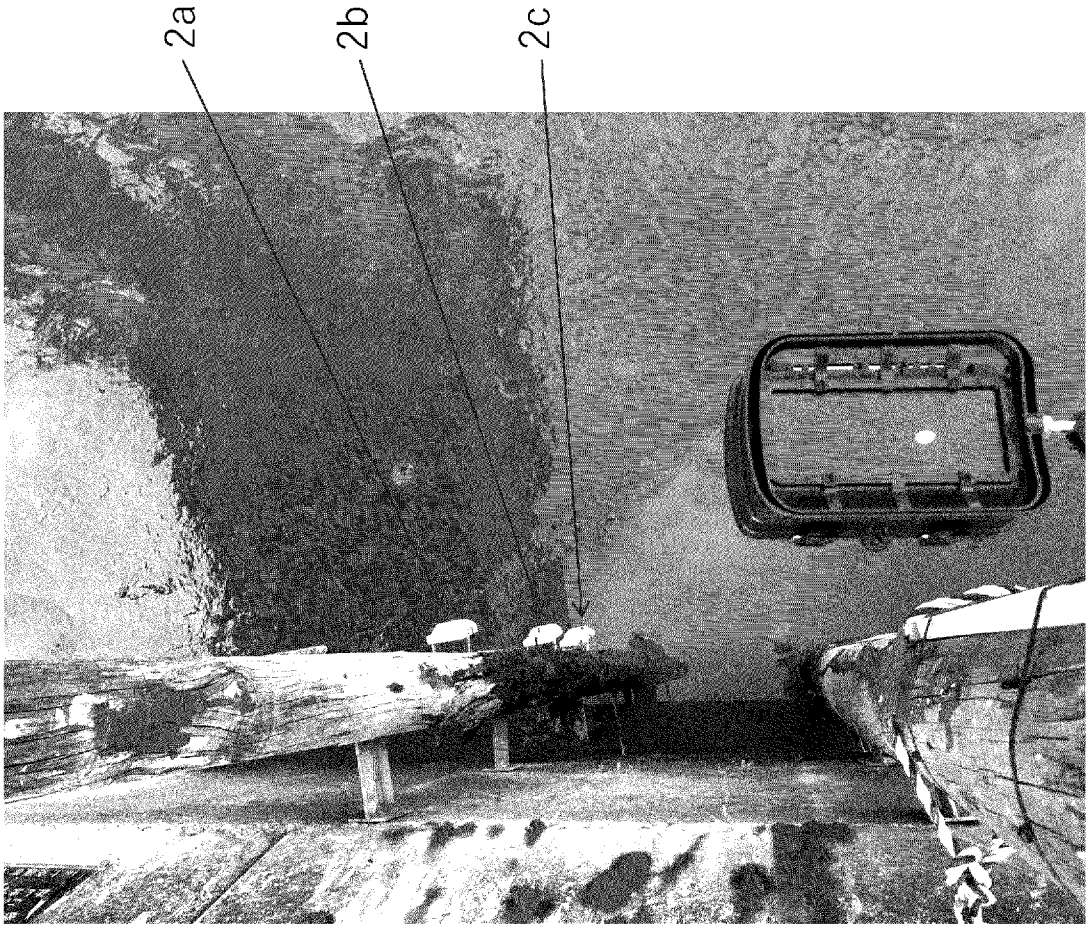
[図25]


水位レベル [m]
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
水位レベル
VRSS
8:09:36
8:38:24
9:07:12
9:36:00
10:04:48
10:33:36
11:02:24
9：00(冠水開始)
9：47(水没)
時刻
VRSS [dB]
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

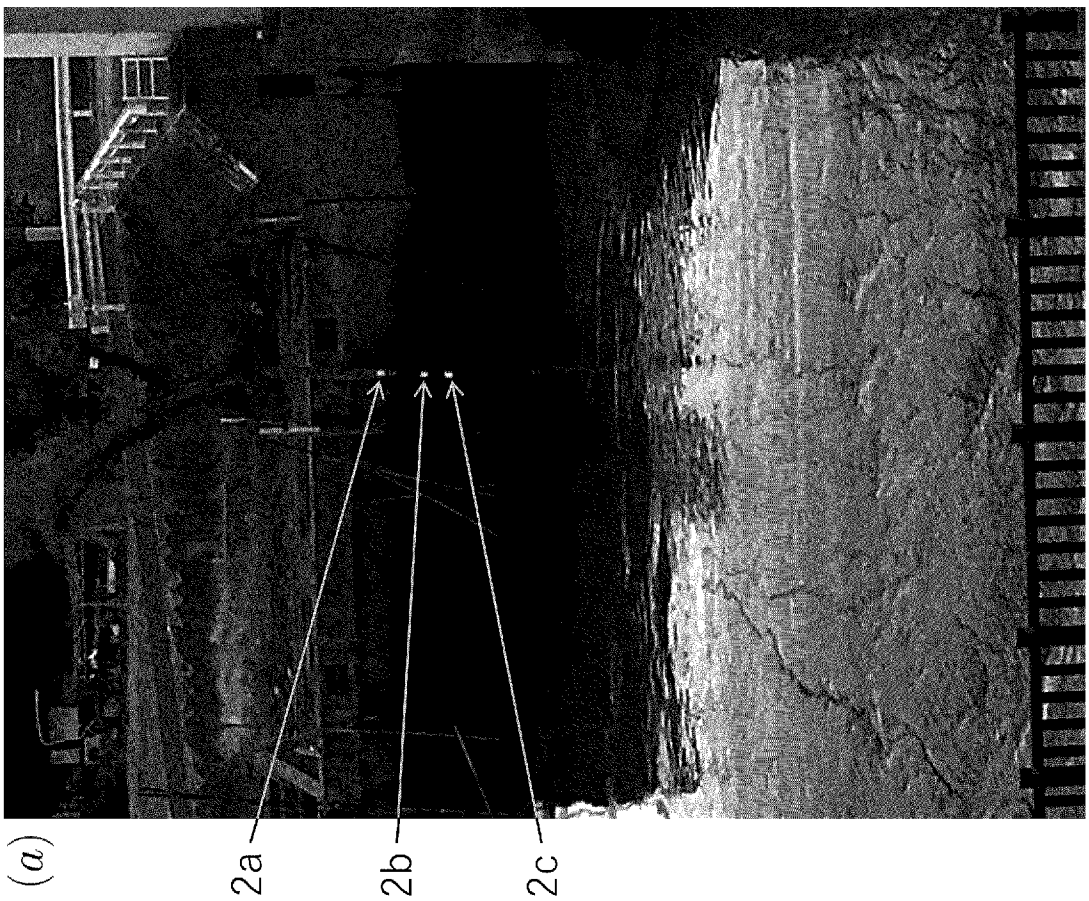
[図26]



[図27]

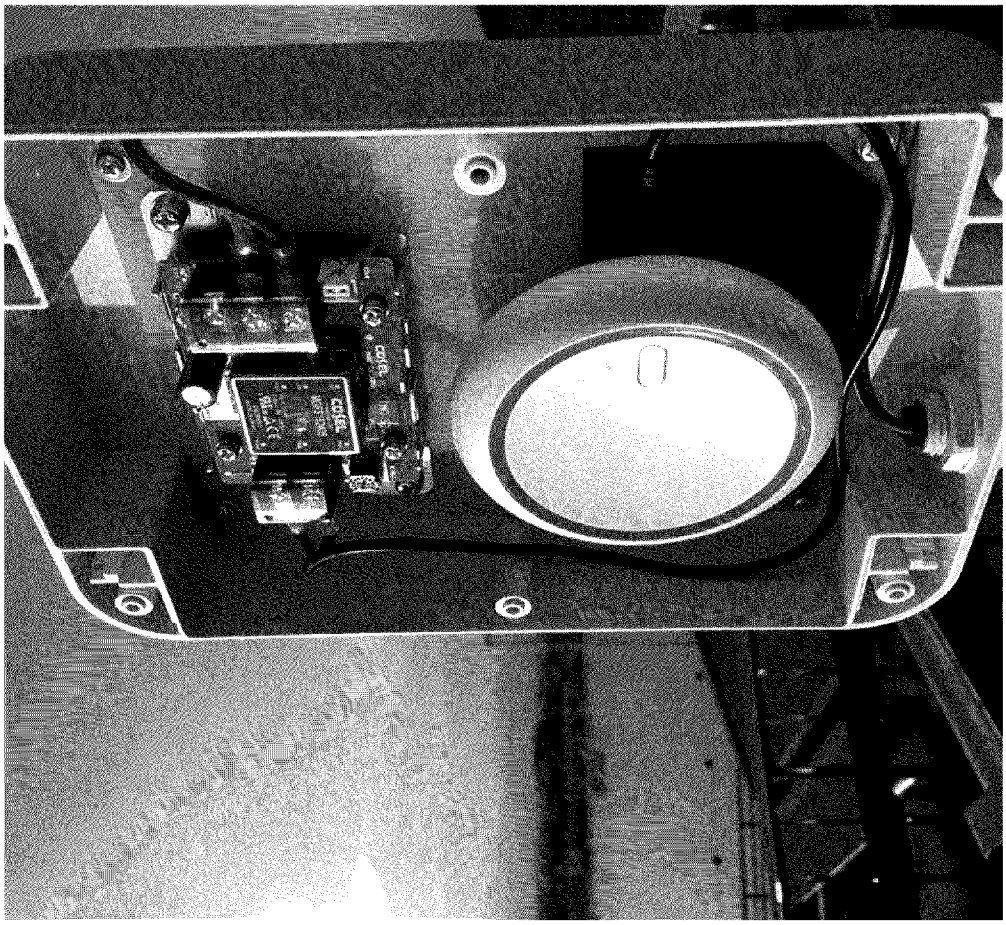


(b)



(a)

[図28]

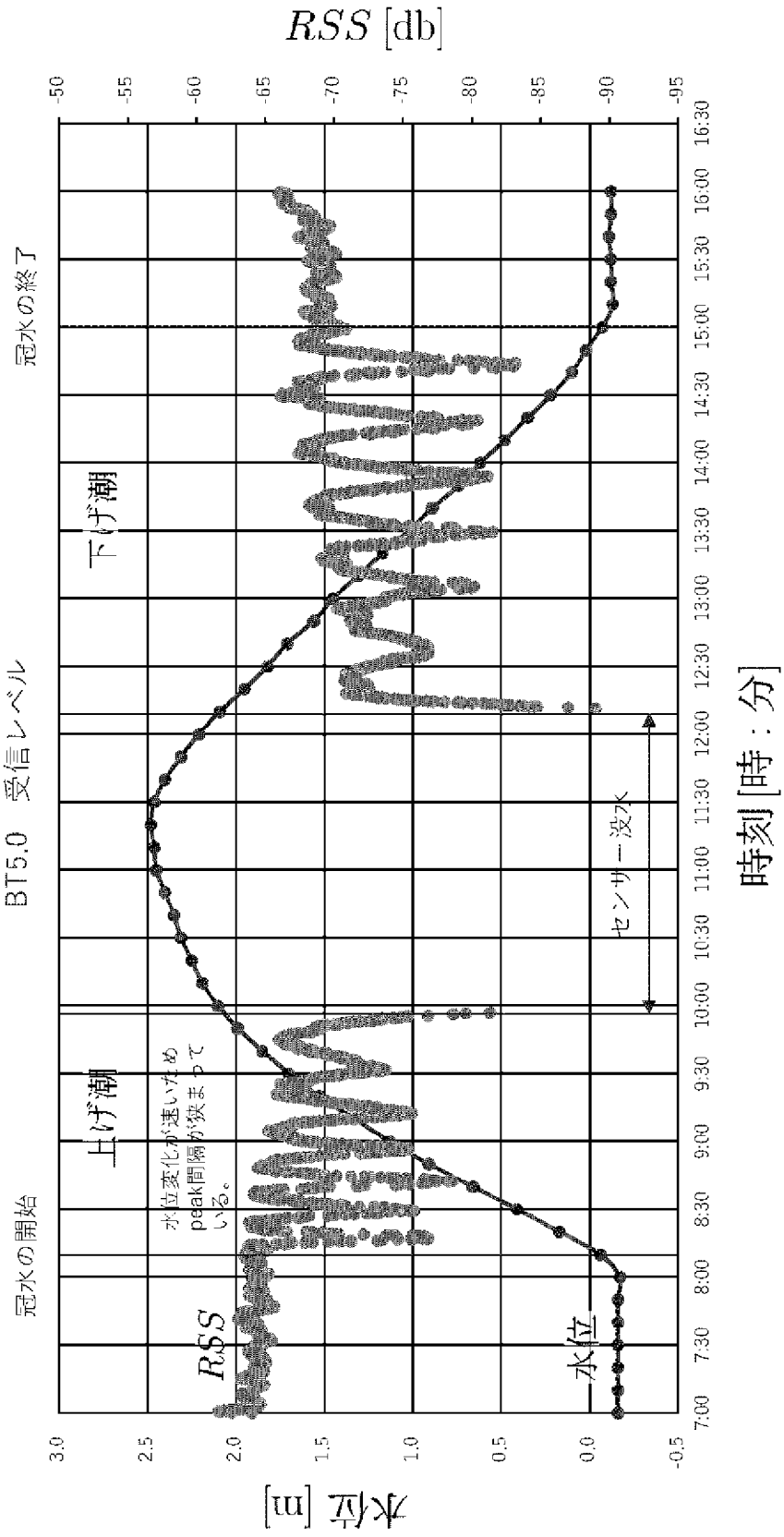


(b)

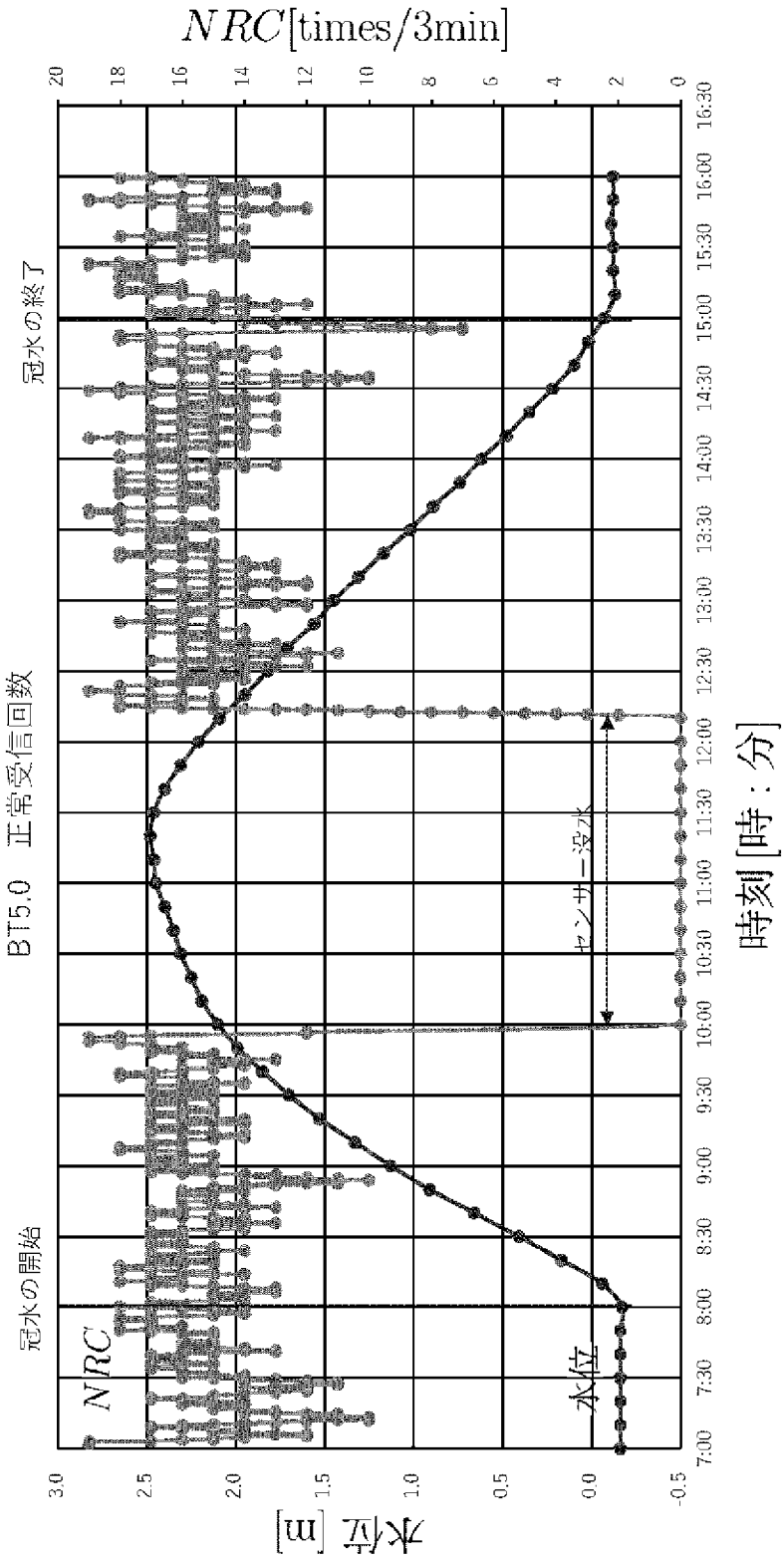


(a)

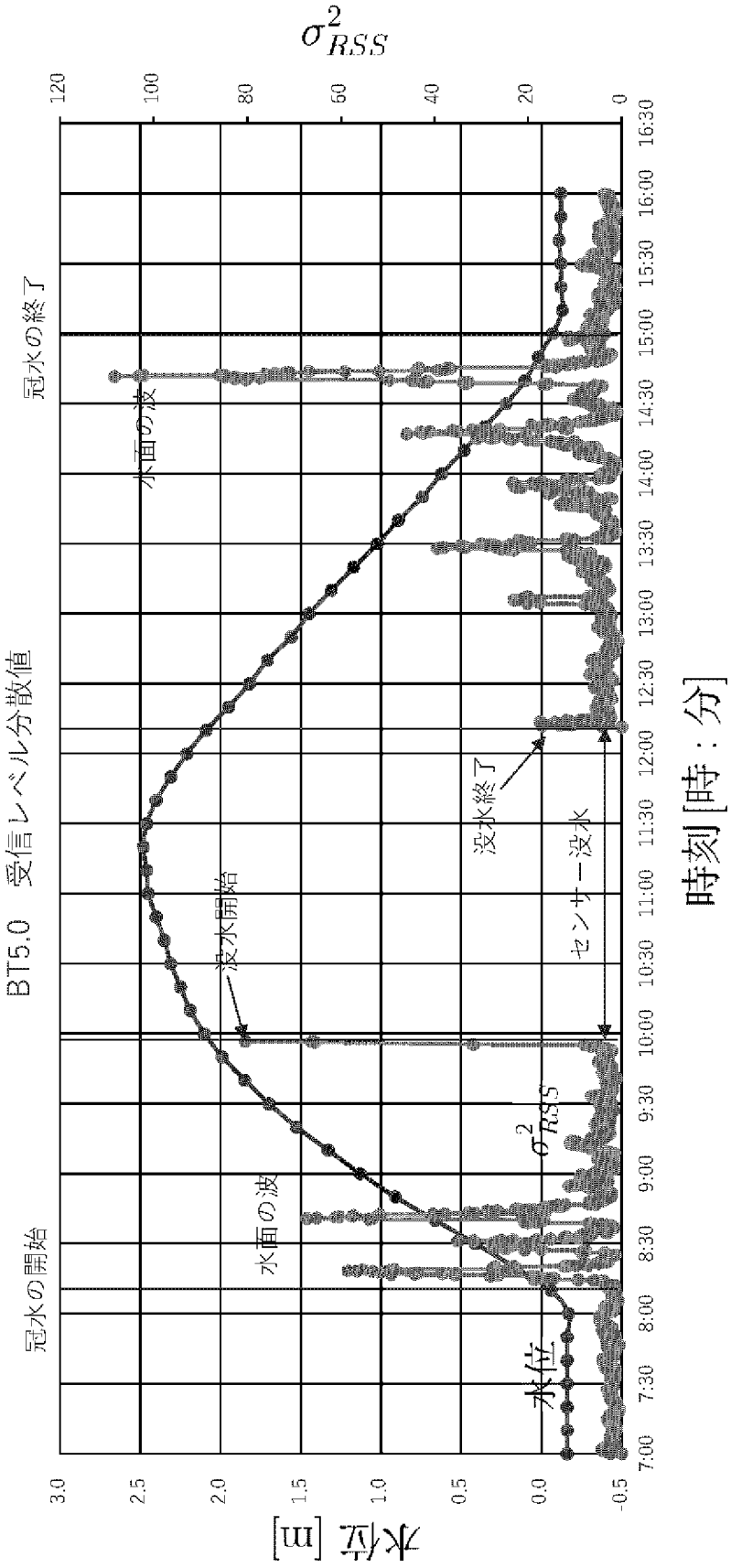
[図29]


RSS [db]
-50
-55
-60
-65
-70
-75
-80
-85
-90
-95
BT5.0 受信レベル
冠水の開始
冠水の終了
上げ潮
下げ潮
水位変化が速いため
peak間隔が狭まって
いる。
RSS
水位
センサー設水
水位 [m]
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
7:00
7:30
8:00
8:30
9:00
9:30
10:00
10:30
11:00
11:30
12:00
12:30
13:00
13:30
14:00
14:30
15:00
15:30
16:00
16:30
時刻 [時：分]

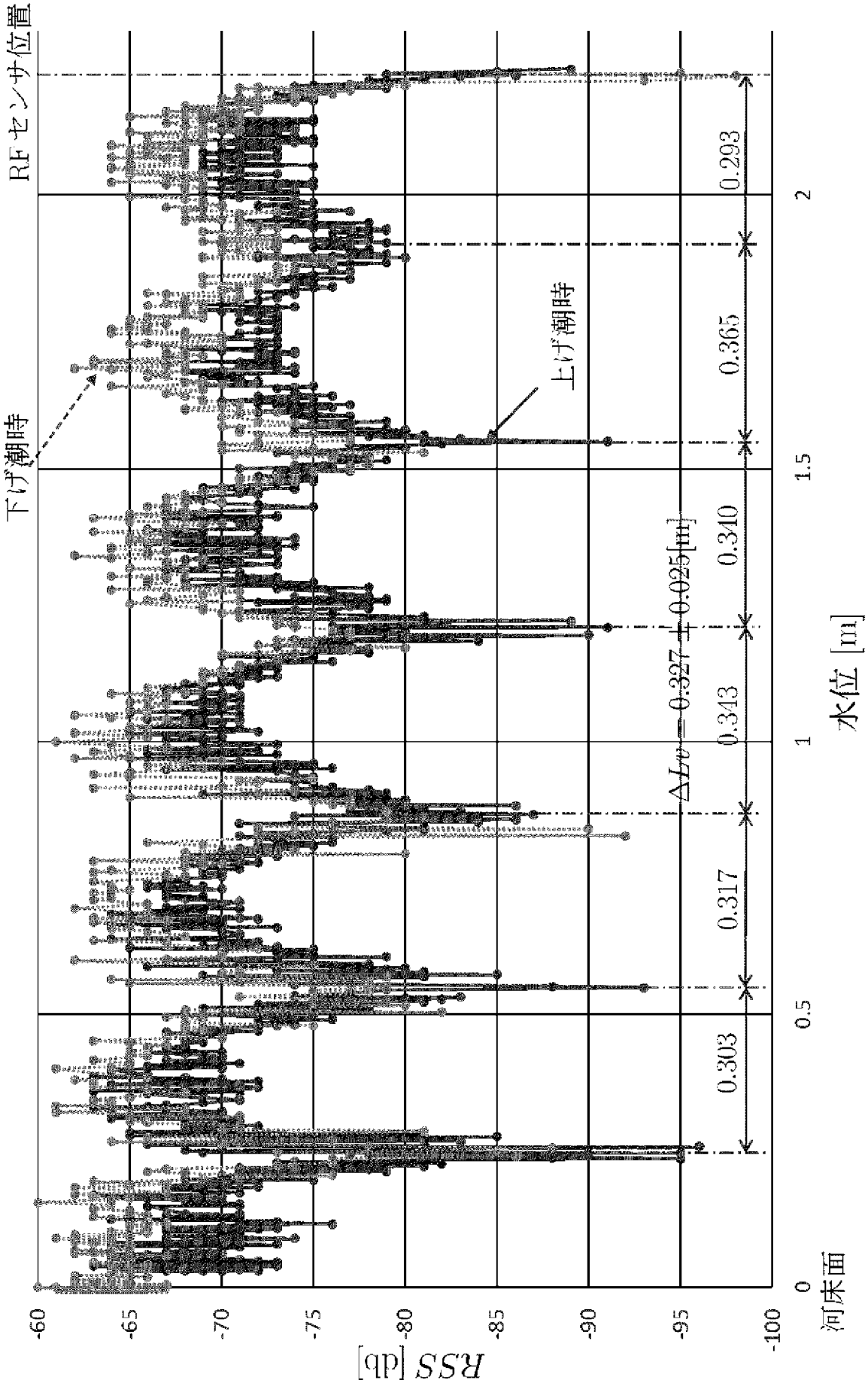
[図30]


NRC[times/3min]
BT5.0 正常受信回数
冠水の開始
冠水の終了
NRC
水位
センサー没水
水位 [m]
時刻 [時：分]

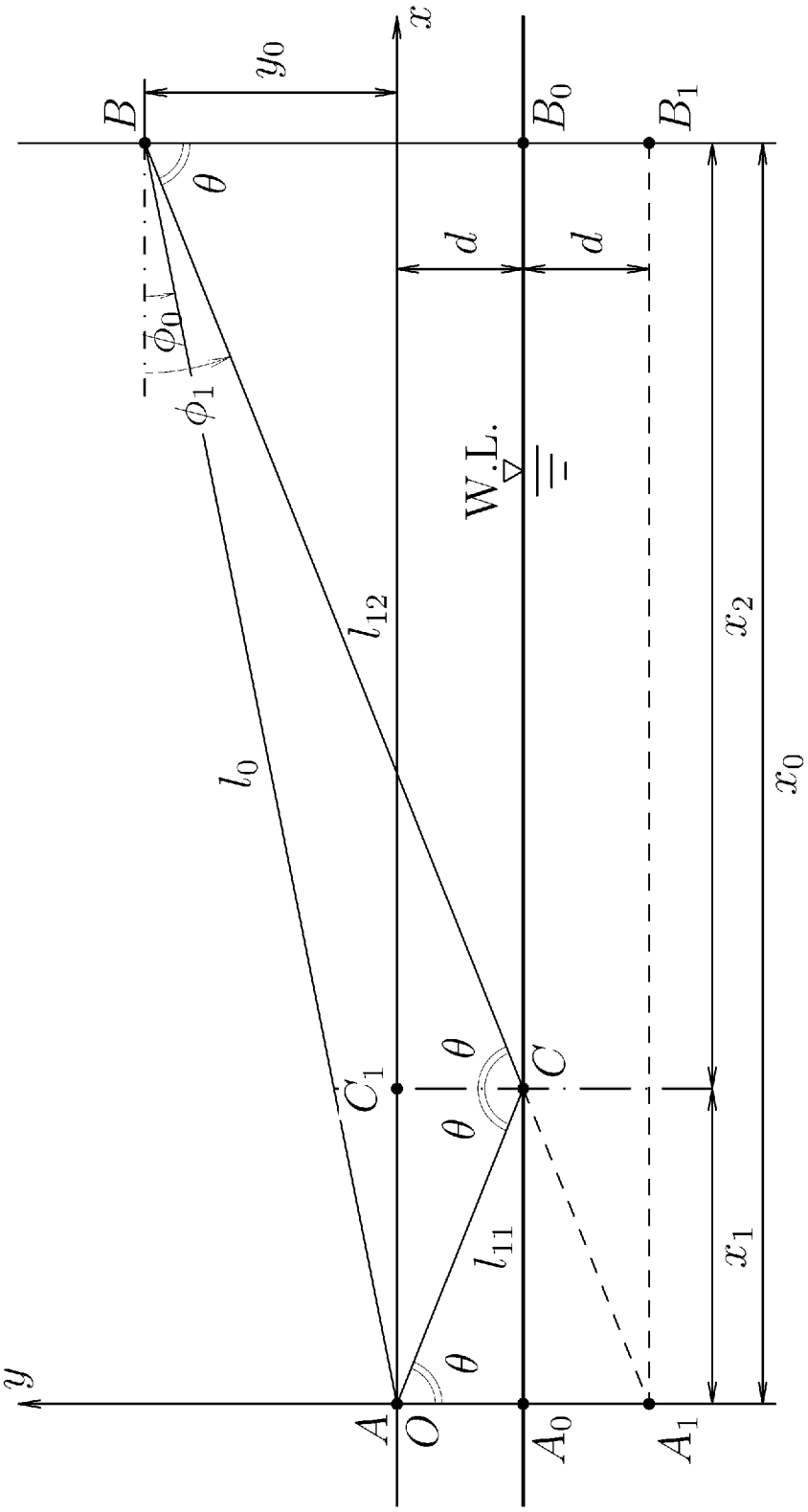
[図31]


σ^2_{RSS}
BT5.0 受信レベル分散値
冠水の開始
冠水の終了
水面の波
波水開始
水面の波
没水終了
センサー没水
σ^2_{RSS}
水位
水位 [m]
時刻 [時：分]

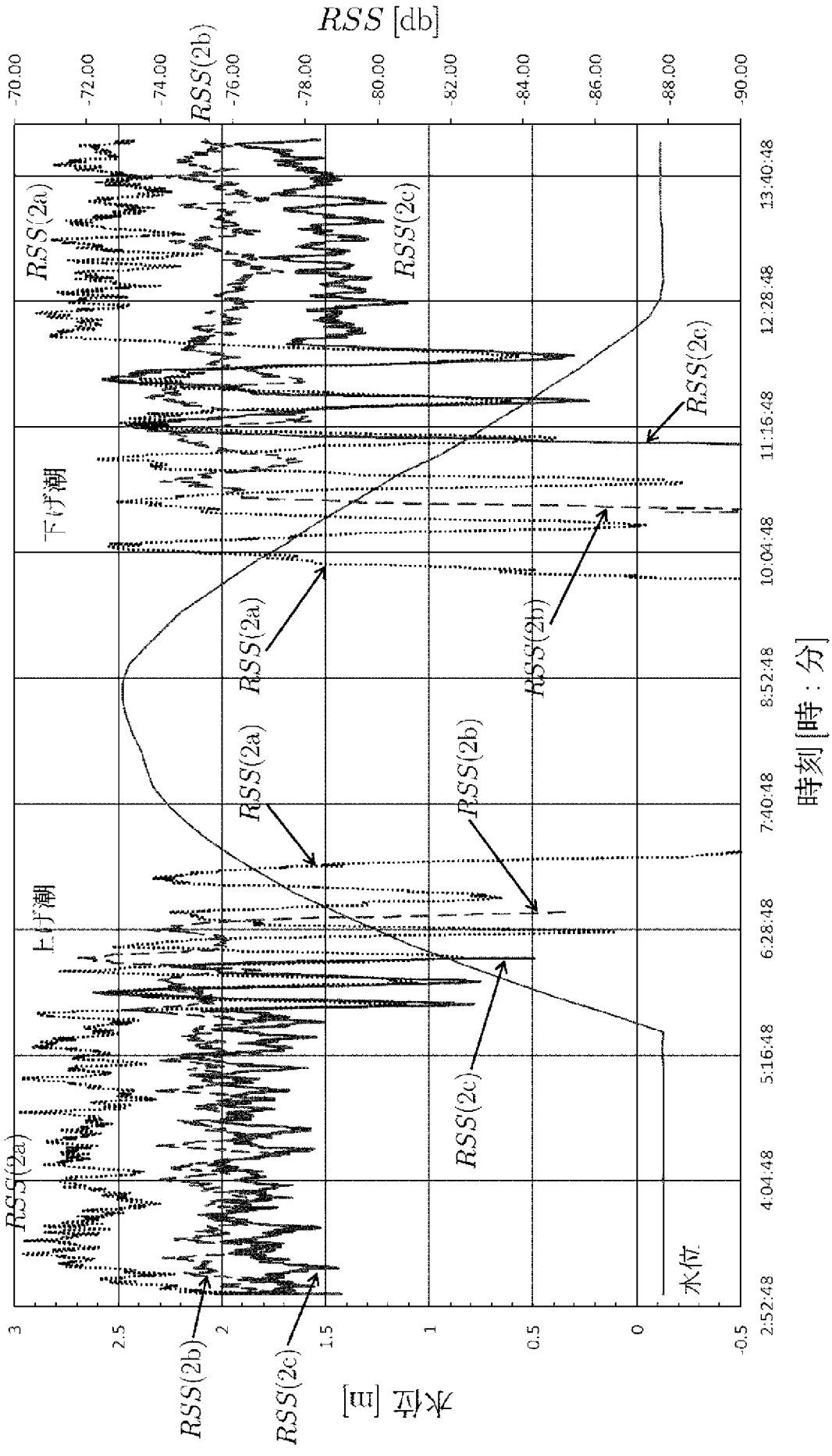
[図32]


RFセンサ位置
下げ潮時
上げ潮時
0.293
0.365
0.340
0.343
0.317
0.303
$\Delta L_W = 0.327 \pm 0.025$[m]
RSS [db]
水位 [m]
河床面
-60
-65
-70
-75
-80
-85
-90
-95
-100
0
0.5
1
1.5
2

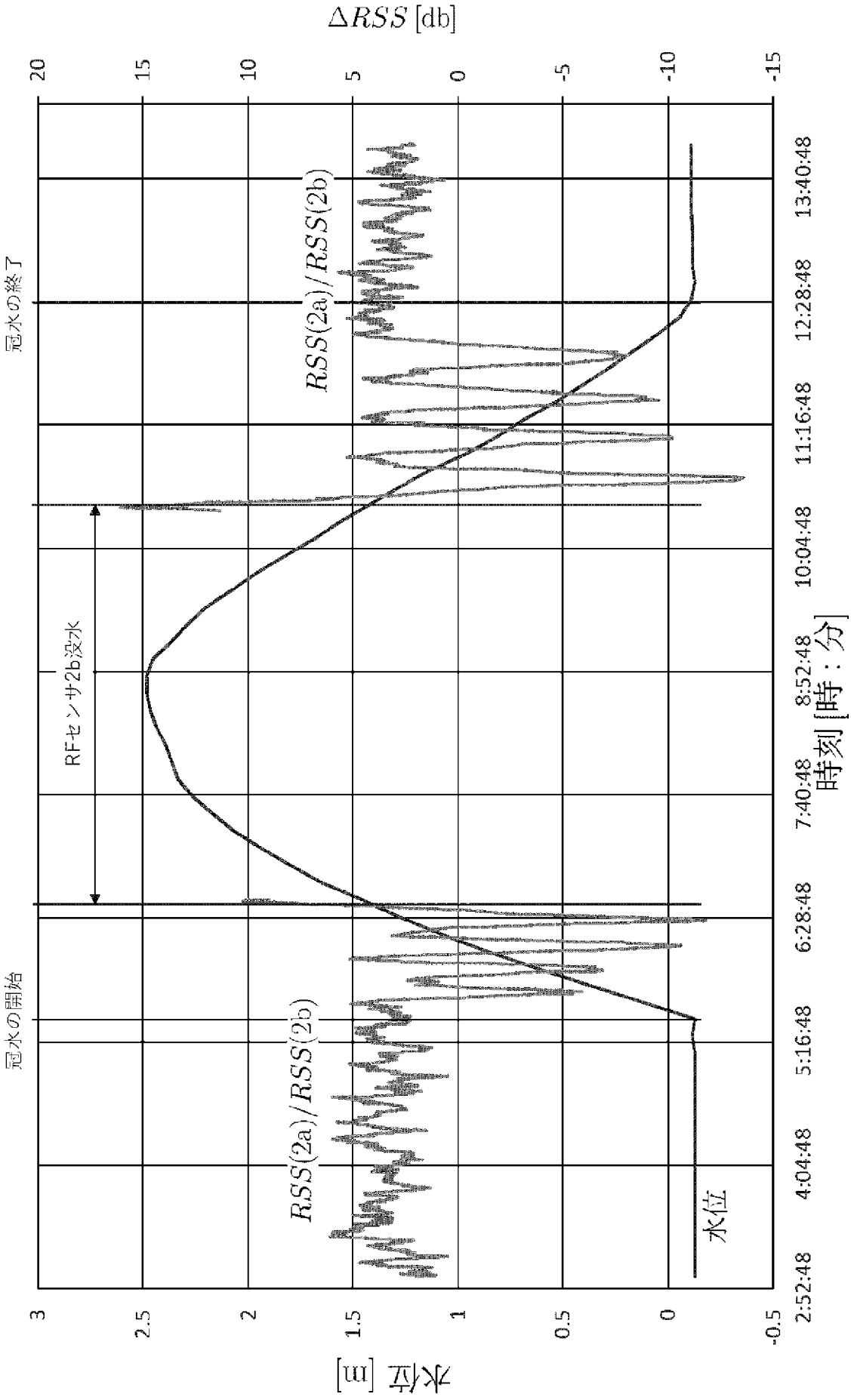
[図33]



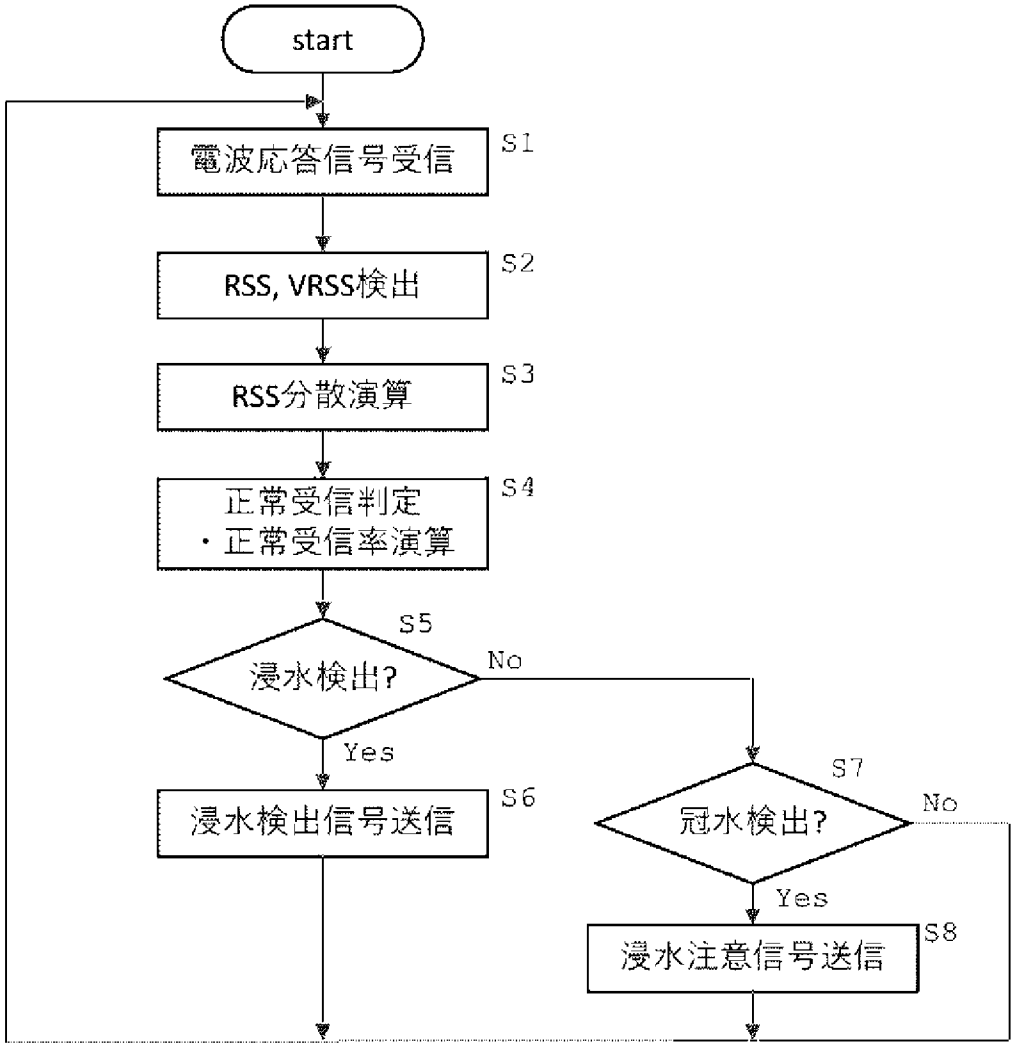
[図34]


RSS [db]
-70.00
-72.00
-74.00
-76.00
-78.00
-80.00
-82.00
-84.00
-86.00
-88.00
-90.00
RSS(2b)
RSS(2a)
RSS(2c)
上げ潮
下げ潮
水位
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
水位 [m]
2:52:48
4:04:48
5:16:48
6:28:48
7:40:48
8:52:48
10:04:48
11:16:48
12:28:48
13:40:48
時刻 [時：分]

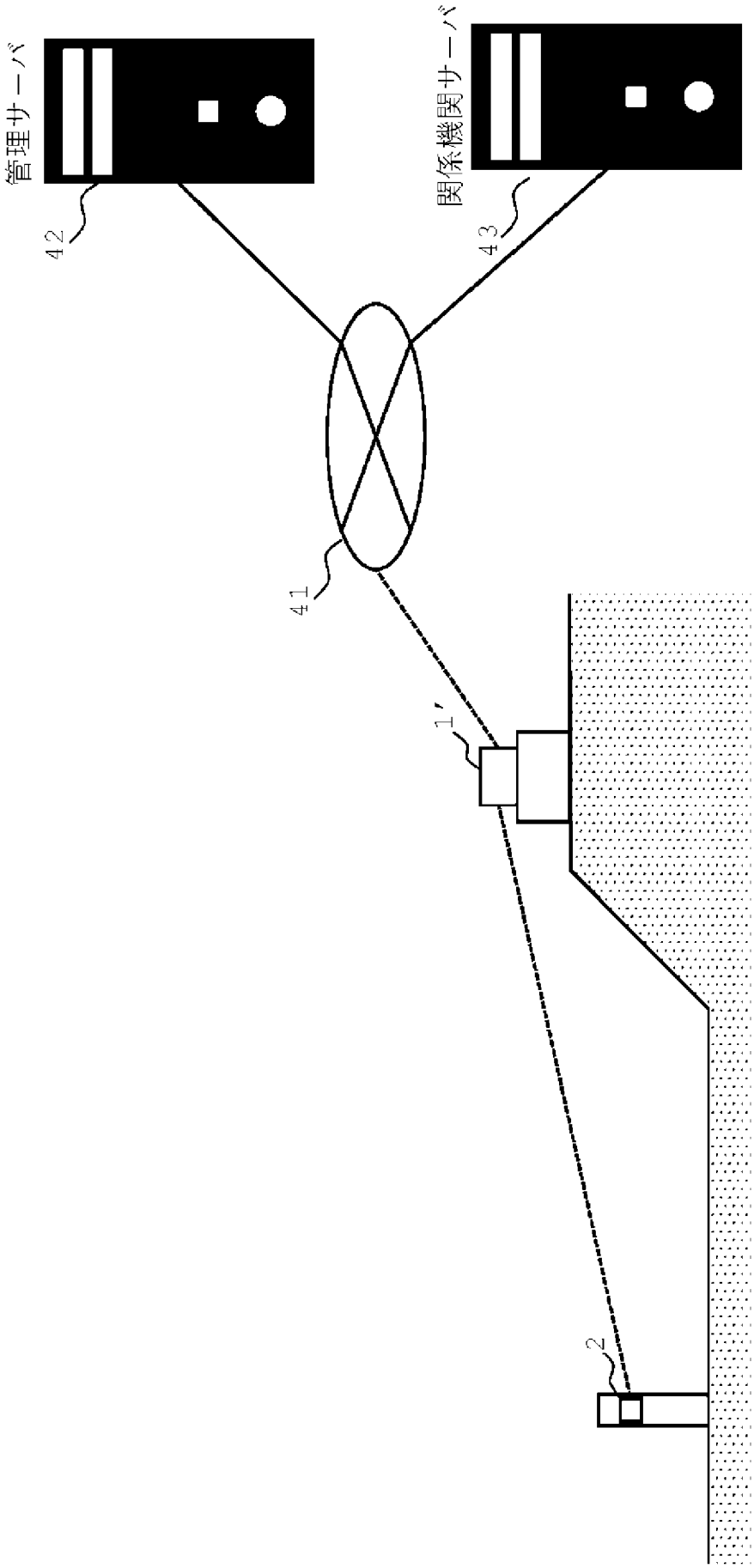
[図35]


ΔRSS [db]
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
冠水の終了
冠水の開始
RFセンサ2b没水
RSS(2a)/RSS(2b)
RSS(2a)/RSS(2b)
水位
水位 [m]
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
2:52:48
4:04:48
5:16:48
6:28:48
7:40:48
8:52:48
10:04:48
11:16:48
12:28:48
13:40:48
時刻 [時：分]

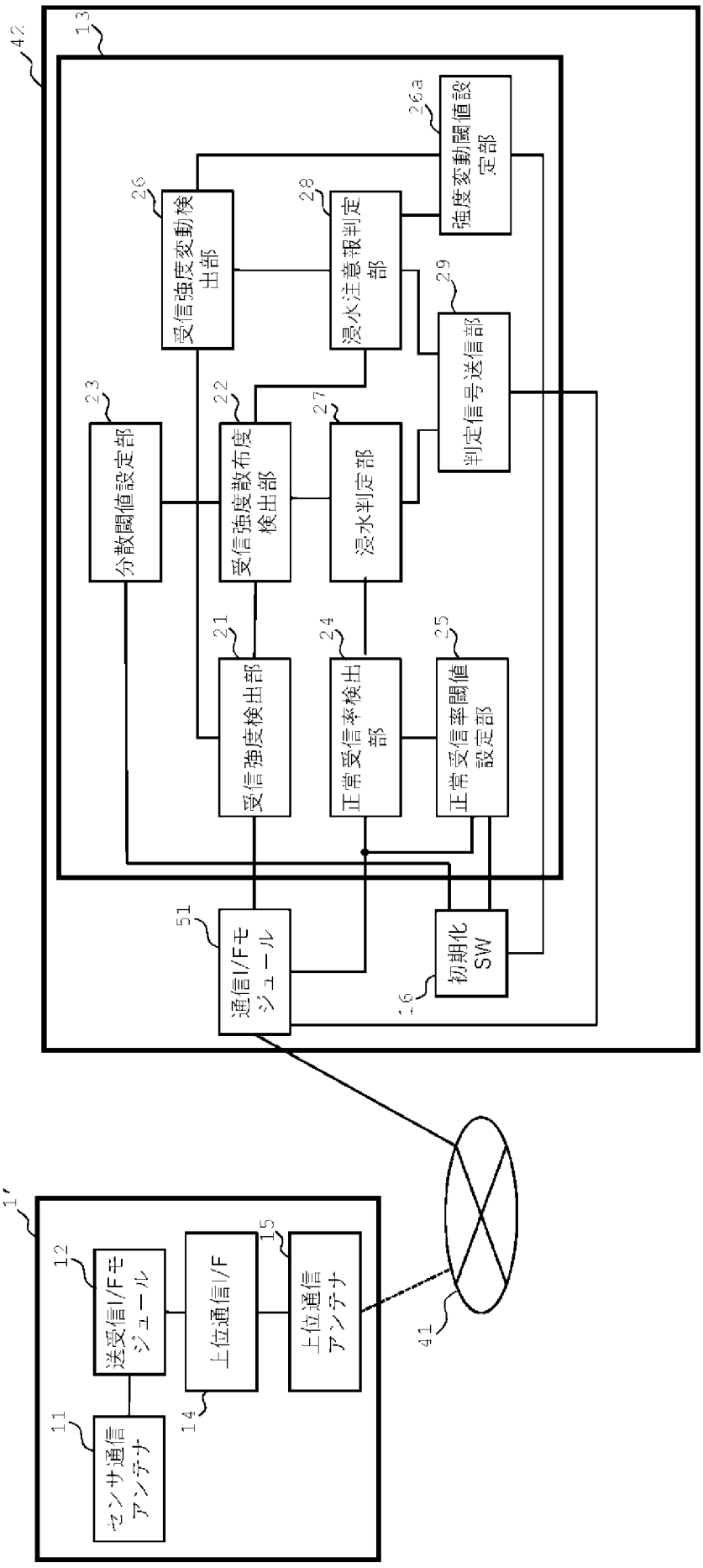
[図36]


start
電波応答信号受信
S1
RSS, VRSS検出
S2
RSS分散演算
S3
正常受信判定
・正常受信率演算
S4
S5
浸水検出?
No
Yes
浸水検出信号送信
S6
S7
冠水検出?
No
Yes
浸水注意信号送信
S8

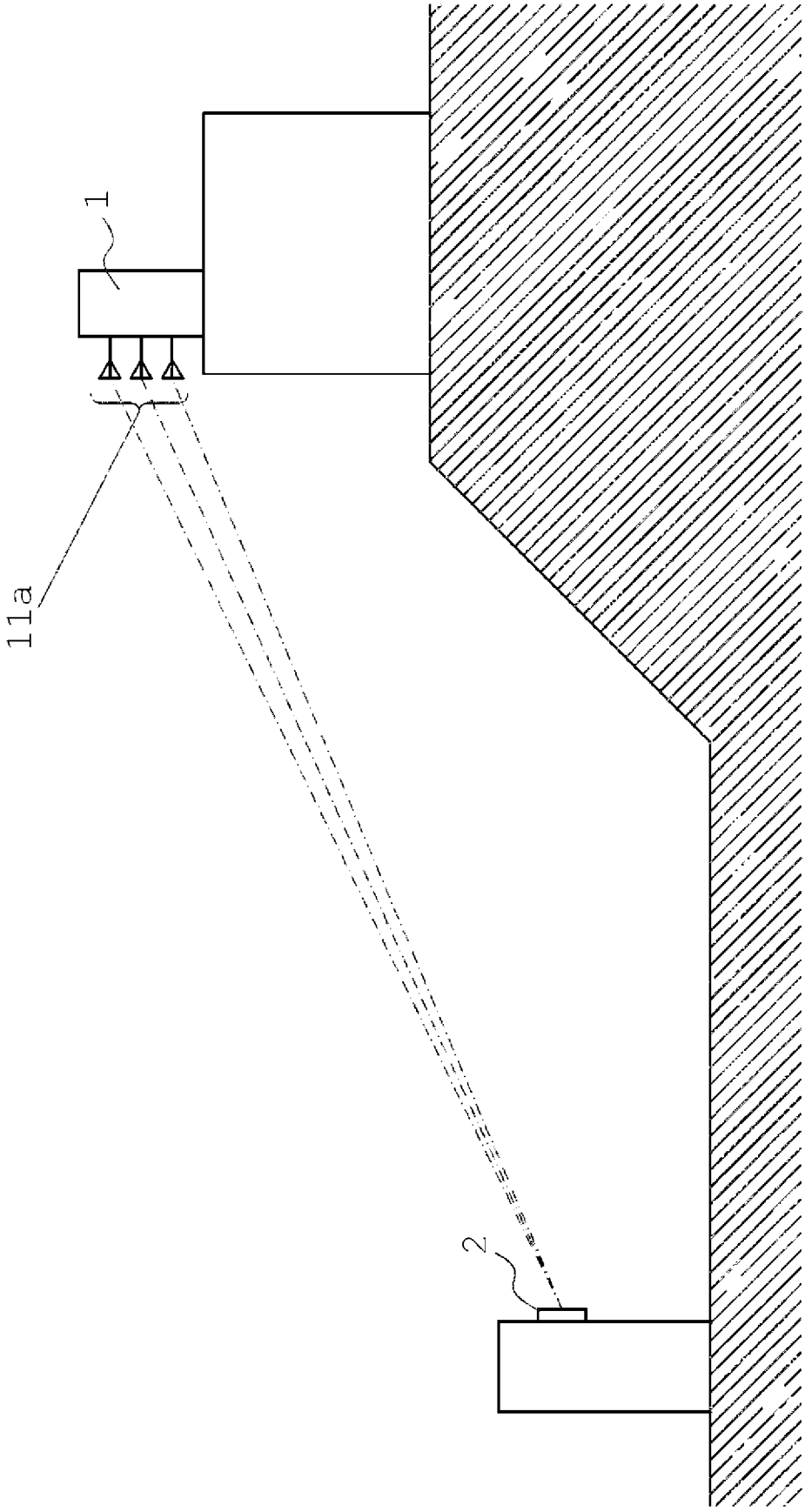
[図37]



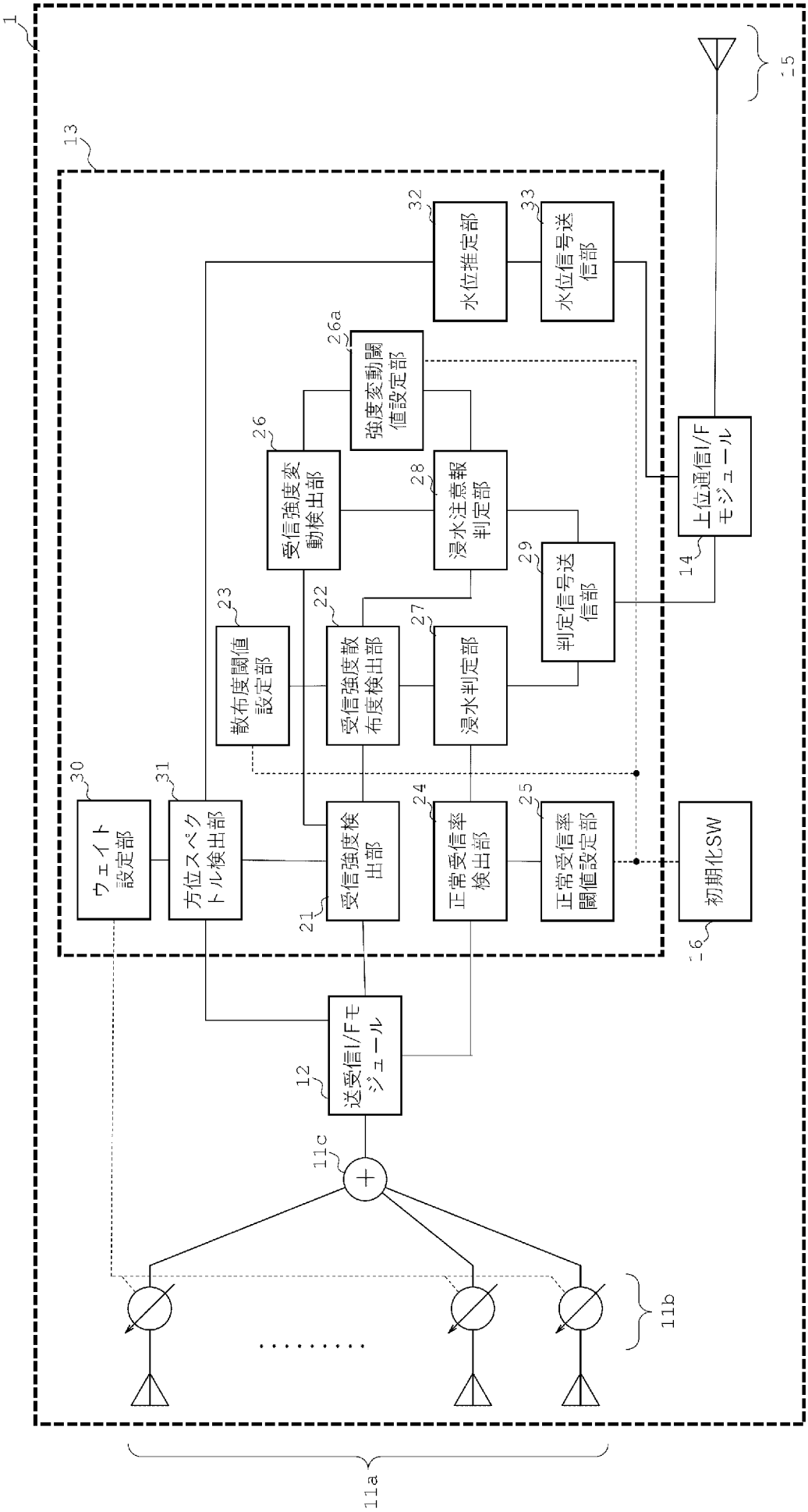
[図38]


1'
11
センサ通信アンテナ
12
送受信I/Fモジュール
14
上位通信I/F
15
上位通信アンテナ
41
42
13
51
通信I/Fモジュール
16
初期化SW
21
受信強度検出部
22
受信強度散布度検出部
23
分散閾値設定部
24
正常受信率検出部
25
正常受信率閾値設定部
26
受信強度変動検出部
26a
強度変動閾値設定部
27
浸水判定部
28
浸水注意報判定部
29
判定信号送信部

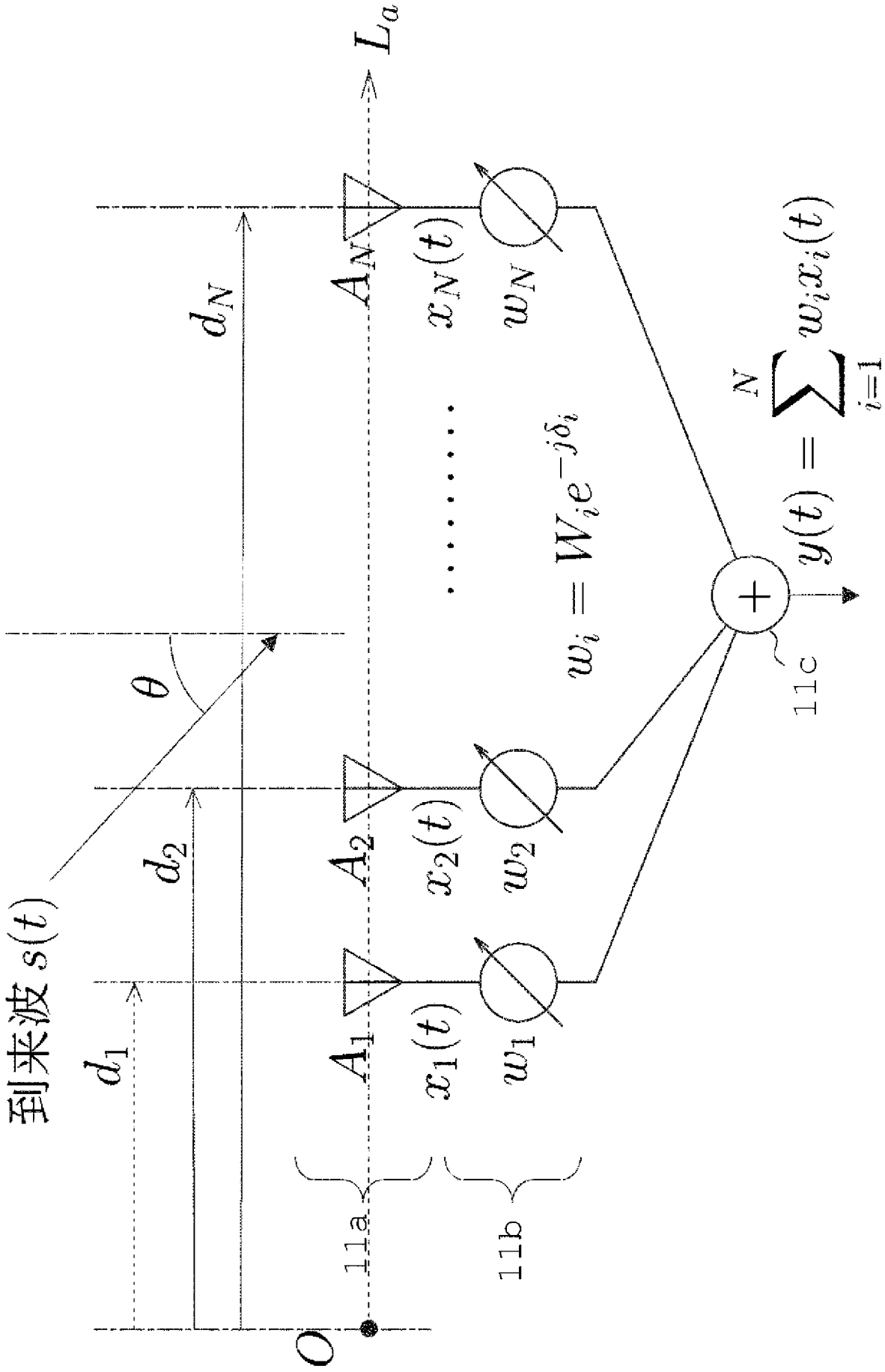
[図39]



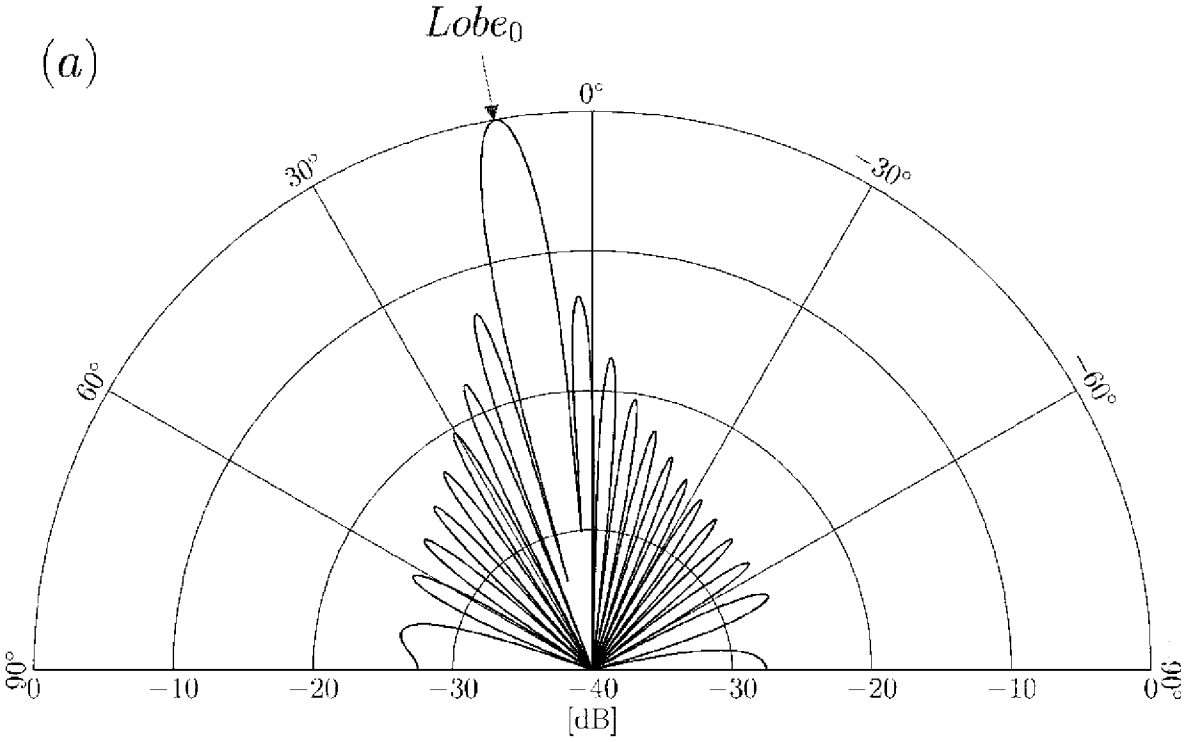
[図40]

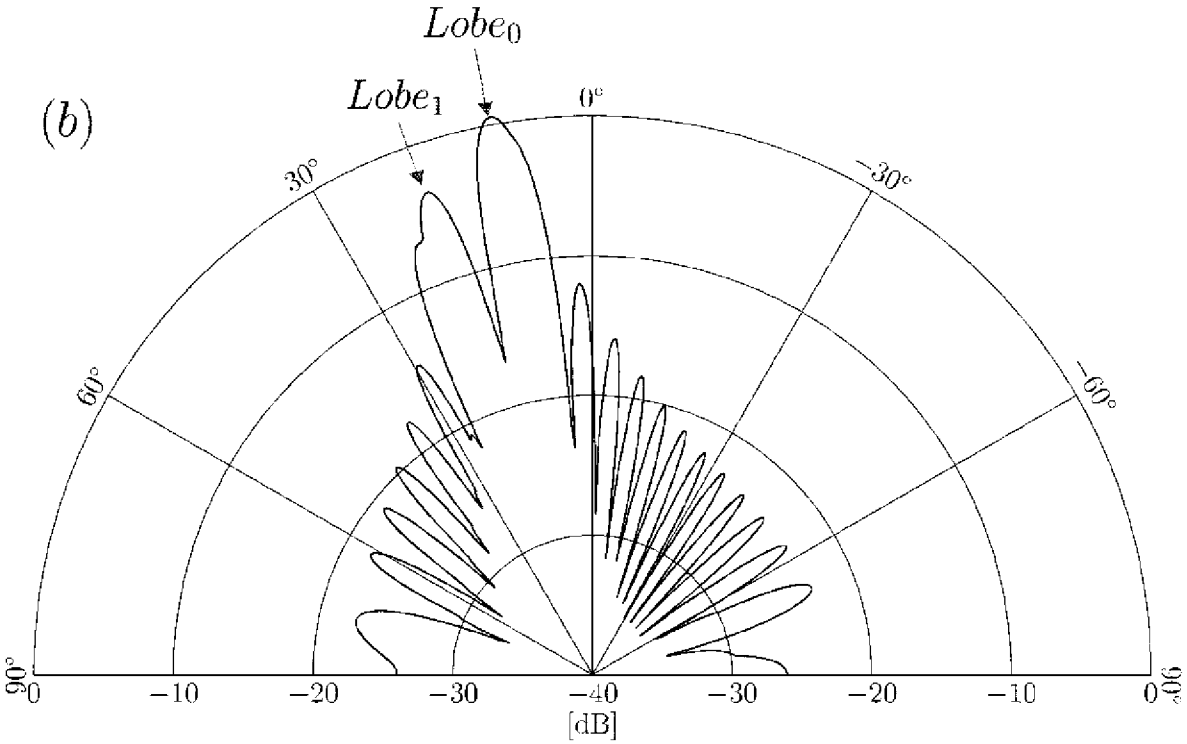

1
13
15
32
水位推定部
33
水位信号送信部
26a
強度変動閾値設定部
26
受信強度変動検出部
28
浸水注意報判定部
上位通信I/Fモジュール
14
29
判定信号送信部
23
散布度閾値設定部
22
受信強度散布度検出部
27
浸水判定部
30
ウェイト設定部
31
方位スペクトル検出部
受信強度検出部
21
24
正常受信率検出部
25
正常受信率閾値設定部
初期化SW
16
12
送受信I/Fモジュール
11c
11b
11a

[図41]

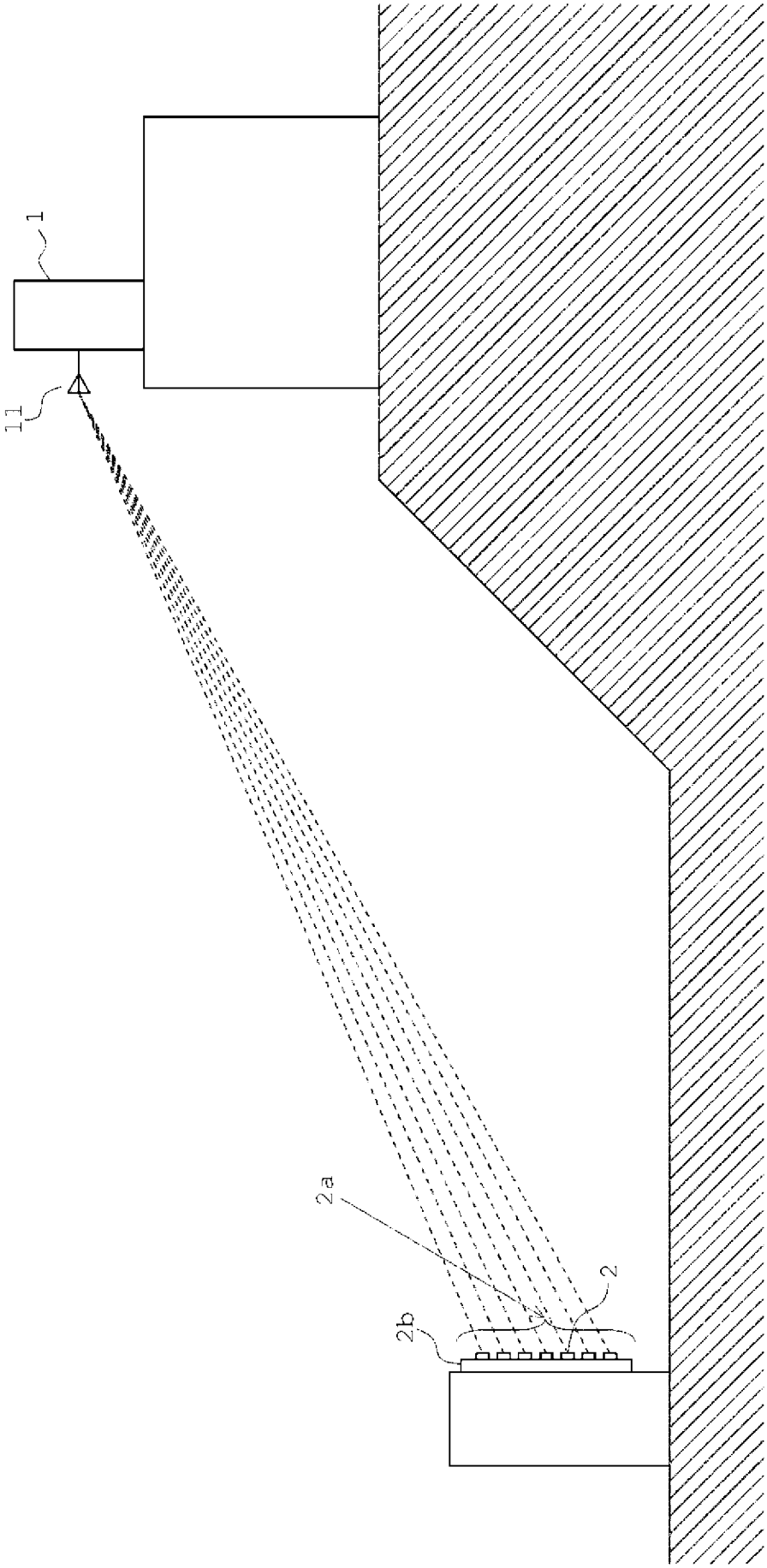

L_a
A_N
$x_N(t)$
w_N
d_N
A_2
$x_2(t)$
w_2
d_2
A_1
$x_1(t)$
w_1
d_1
θ
到来波 $s(t)$
O
$w_i = W_i e^{-j\delta_i}$
$y(t) = \sum_{i=1}^{N} w_i x_i(t)$
11a
11b
11c

[図42]

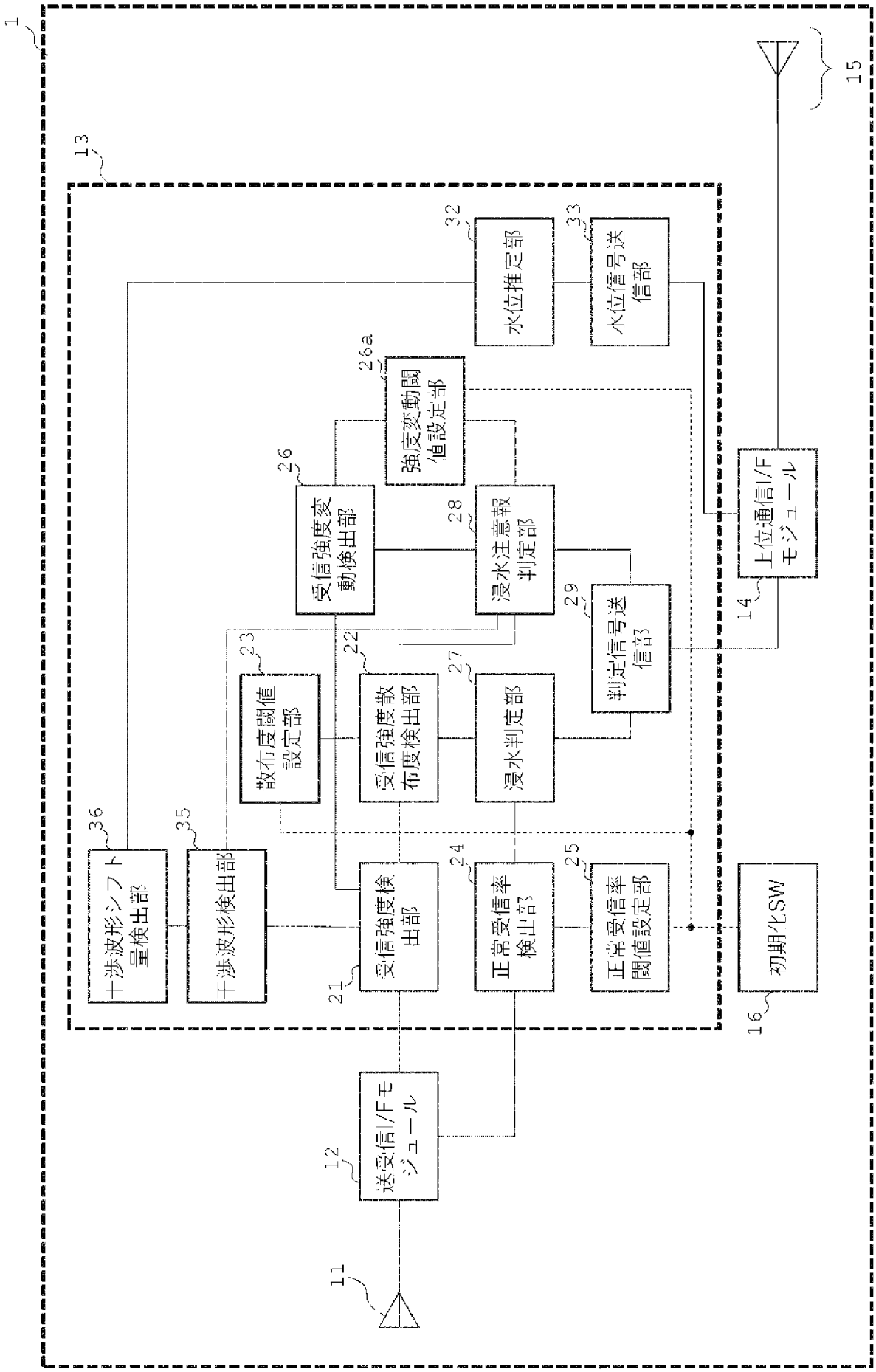

(a)
Lobe0
0°
30°
−30°
60°
−60°
90°
0
−10
−20
−30
−40
−30
−20
−10
0
90°
[dB]


(b)
Lobe0
Lobe1
0°
30°
−30°
60°
−60°
90°
0
−10
−20
−30
−40
−30
−20
−10
0
90°
[dB]

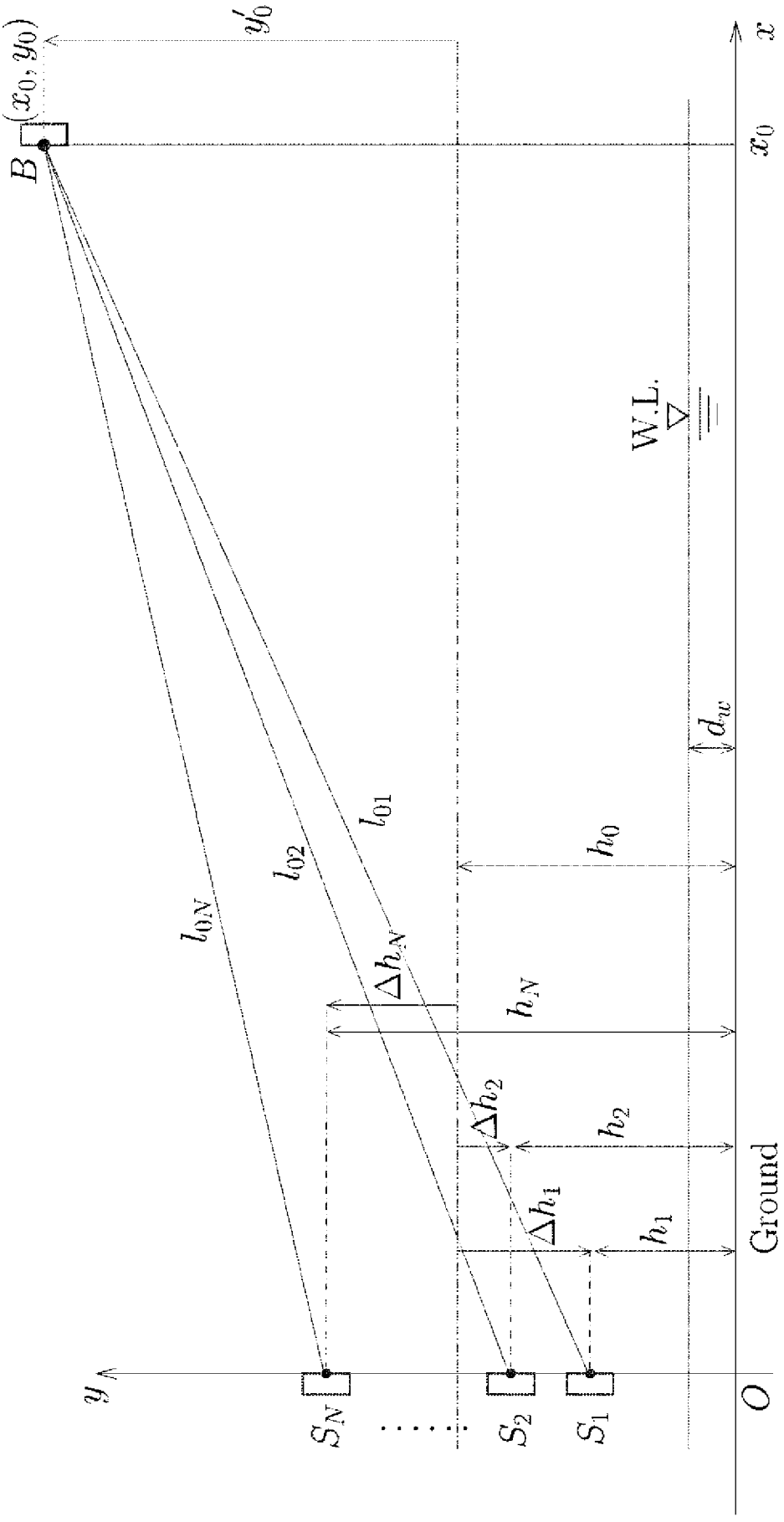
[図43]



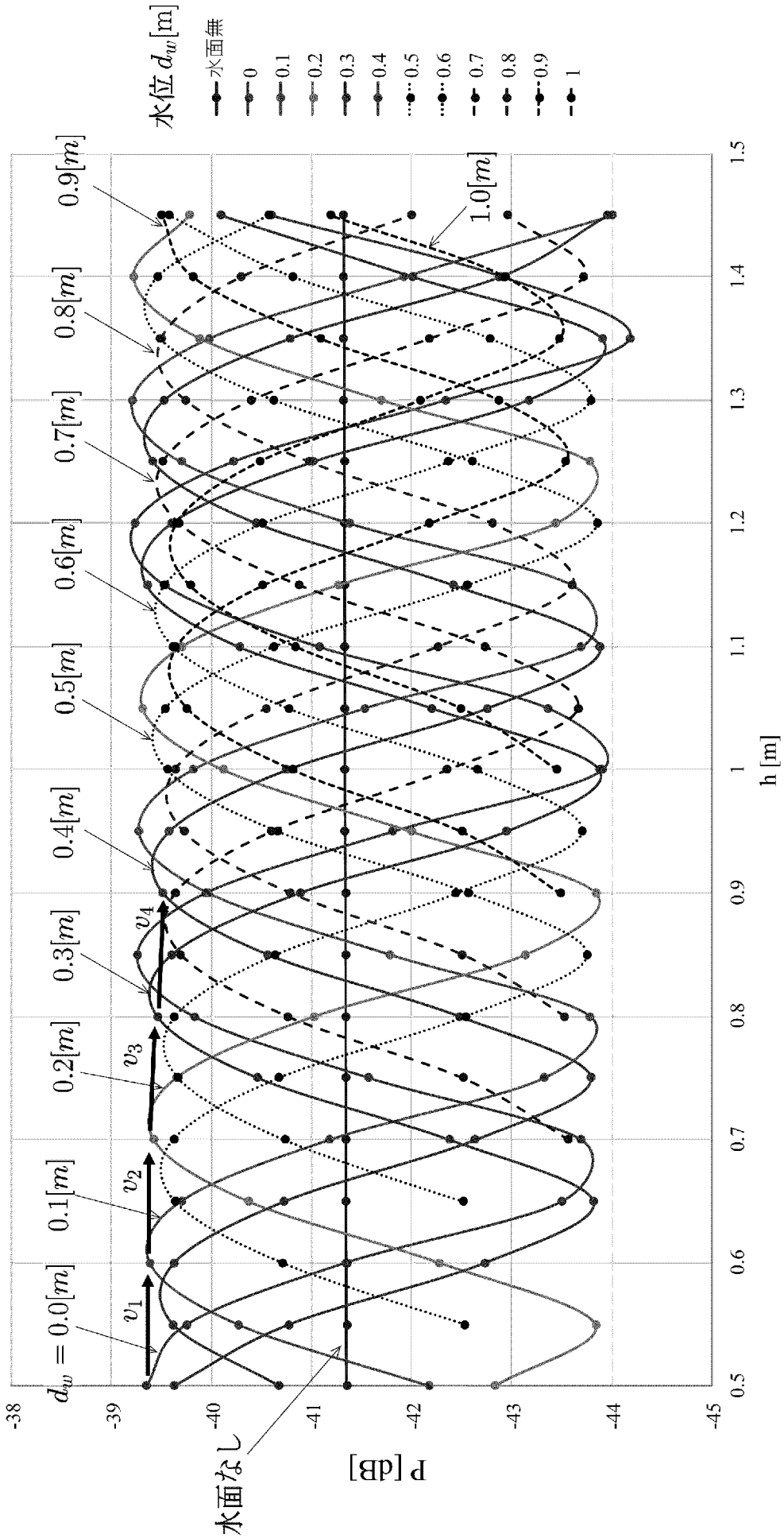
[図44]


1
13
15
32
水位推定部
33
水位信号送信部
26a
強度変動閾値設定部
26
受信強度変動検出部
28
浸水注意報判定部
29
判定信号送信部
14
上位通信I/Fモジュール
23
散布度閾値設定部
22
受信強度散布度検出部
27
浸水判定部
36
干渉波形シフト量検出部
35
干渉波形検出部
21
受信強度検出部
24
正常受信率検出部
25
正常受信率閾値設定部
16
初期化SW
12
送受信I/Fモジュール
11

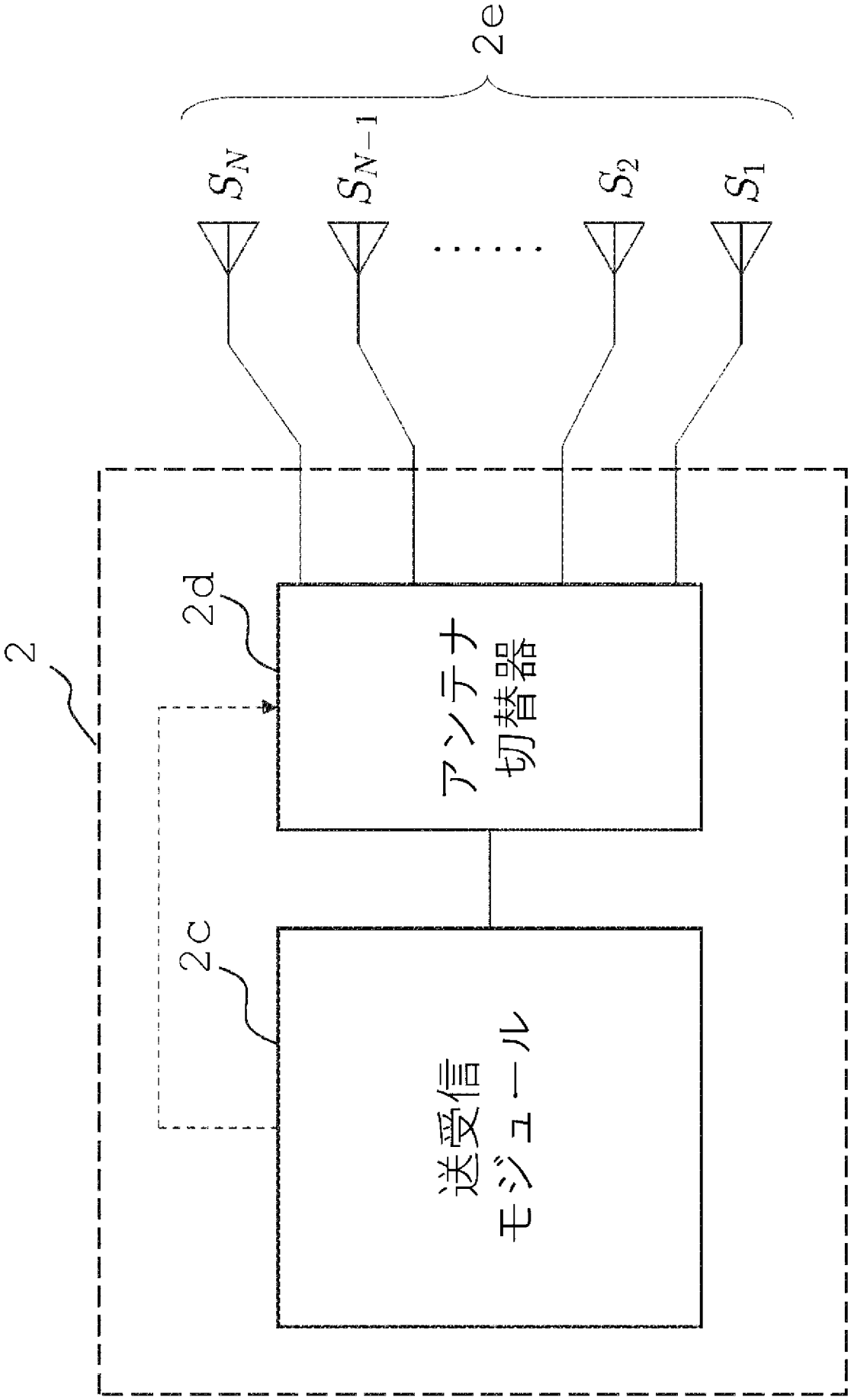
[図45]


(x_0, y_0)
y'_0
B
x
x_0
W.L.
d_w
l_{01}
l_{02}
l_{0N}
h_0
Δh_N
h_N
Δh_2
h_2
Δh_1
h_1
Ground
y
S_N
S_2
S_1
O

[図46]


水位 d_w [m]
水面無
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
$d_w = 0.0[m]$
0.1[m]
0.2[m]
0.3[m]
0.4[m]
0.5[m]
0.6[m]
0.7[m]
0.8[m]
0.9[m]
1.0[m]
v_1
v_2
v_3
v_4
水面なし
P [dB]
h [m]
-38
-39
-40
-41
-42
-43
-44
-45
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5

[図47]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2020/017092

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl. G01C13/00(2006.01)i, G01W1/00(2006.01)i, G08B21/10(2006.01)i, G01F23/284(2006.01)i
FI: G01F23/284, G01C13/00D, G08B21/10, G01W1/00J
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl. G01F23/284, G01C13/00, G01W1/00, G08B21/10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2020
Registered utility model specifications of Japan	1996-2020
Published registered utility model applications of Japan	1994-2020

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2016-65824 A (OKI ELECTRIC IND CO., LTD.) 28.04.2016 (2016-04-28)	1-8
A	JP 2015-129709 A (SUMITOMO ELECTRIC SYSTEM SOLUTIONS CO., LTD.) 16.07.2015 (2015-07-16)	1-8
A	JP 2010-156672 A (SUMITOMO OSAKA CEMENT CO., LTD.) 15.07.2010 (2010-07-15)	1-8
A	JP 2017-227485 A (FUJI ELECTRIC CO., LTD.) 28.12.2017 (2017-12-28)	1-8
A	US 6586760 B1 (THE UNITED STATES OF AMERICA AS REPRESENTED BY THE SECRETARY OF THE INTERIOR) 01.07.2003 (2003-07-01)	1-8

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.
☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
03.06.2020	16.06.2020

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Telephone No.

JP 2016-65824 A	28.04.2016	(Family: none)
JP 2015-129709 A	16.07.2015	(Family: none)
JP 2010-156672 A	15.07.2010	WO 2010/146762 A1 CN 102460218 A KR 10-2012-0028886 A TW 201100764 A
JP 2017-227485 A	28.12.2017	(Family: none)
US 6586760 B1	01.07.2003	(Family: none)

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2020/017092

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G01C 13/00(2006.01)i; G01W 1/00(2006.01)i; G08B 21/10(2006.01)i; G01F 23/284(2006.01)i
FI: G01F23/284; G01C13/00 D; G08B21/10; G01W1/00 J

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

G01F23/284; G01C13/00; G01W1/00; G08B21/10

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２０年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２０年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２０年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	JP 2016-65824 A (沖電気工業株式会社) 28.04.2016 (2016-04-28)	1-8
A	JP 2015-129709 A (住友電工システムソリューション株式会社) 16.07.2015 (2015-07-16)	1-8
A	JP 2010-156672 A (住友大阪セメント株式会社) 15.07.2010 (2010-07-15)	1-8
A	JP 2017-227485 A (富士電機株式会社) 28.12.2017 (2017-12-28)	1-8
A	US 6586760 B1 (THE UNITED STATES OF AMERICA AS REPRESENTED BY THE SECRETARY OF THE INTERIOR) 01.07.2003 (2003-07-01)	1-8

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
"E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
"L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
"P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
"T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
"X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
"Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
"&" 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
03.06.2020	16.06.2020

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
公文代　康祐 2F 4741
電話番号 03-3581-1101 内線 3216

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2020/017092

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2016-65824 A	28.04.2016	（ファミリーなし）	
JP 2015-129709 A	16.07.2015	（ファミリーなし）	
JP 2010-156672 A	15.07.2010	WO 2010/146762 A1	
		CN 102460218 A	
		KR 10-2012-0028886 A	
		TW 201100764 A	
JP 2017-227485 A	28.12.2017	（ファミリーなし）	
US 6586760 B1	01.07.2003	（ファミリーなし）	