RFIDシステムを用いた揚鉱・沈降実験における鉱石モデルの管内移動の計測方法の開発

折田 清隆[1*]・谷 和夫[2]・鈴木 亮彦[3]・田中 肇一[3]・菅 章悟[3]

[1]東京海洋大学　海洋科学部　海洋環境学科（〒108-8477 東京都港区港南4-5-7）
[2]東京海洋大学　学術研究院　海洋資源エネルギー学部門（〒108-8477 東京都港区港南4-5-7）
[3]（株）不動テトラ　地盤事業本部（〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2）
*E-mail: s151031@edu.kaiyodai.ac.jp

海底から高密度で粗粒の鉱石を効率よく揚鉱するために，圧送性能と材料不分離性を両立するキャリア物質を循環させて鉱石を輸送する方法が提案され，その模型実験装置が開発された．揚鉱性能を評価するために行う揚鉱・沈降実験では管路内の鉱石モデルの移動状況を計測する必要があり，不透明なキャリア物質中の鉱石モデルにRFタグを装着してその位置を検知するRFIDシステムによる計測方法を提案した．

RFIDシステムでの計測が揚鉱・沈降実験で実現可能かを知るために実験中に想定される様々な環境下で交信範囲を計測した．その結果，RFIDシステムの適用条件と鉱石モデルや模型実験装置への適切な装着方法が決定された．

Key Words *: RFID, deep-sea mining, instlumentation, carrier material, lifting*

1.　はじめに

高密度で粗粒の鉱石を海底から海上まで効率よく揚鉱するために，キャリア物質（粘性流体と粒状体の混合物）を閉鎖管路内で循環させて鉱石を輸送する方式が提案され[1)]，その揚鉱方式の模型実験装置（図-1(a)）が開発された．粘性流体の高い粘性と，粒状体のせん断抵抗がライザー管内（図-1(a)点線内）での鉱石の沈降を抑制することで[2)]，効率的な揚鉱に寄与すると想定される．

模型実験装置を用いた揚鉱実験では，複数の鉱石モデル（球形：鉱石の形状を単純化，金属製：鉱石の密度を再現）のライザー管内での鉛直上向き方向の移動を計測し，本方式の揚鉱性能を評価する．しかし，実験で用いるキャリア物質は不透明のため，映像での鉱石モデルの移動の計測が不可能である．そのため，電磁波による非金属物質の透過機能を有し，非接触で複数の鉱石モデルの識別が可能な RFID システムを計測に用いる[2)]．図-1(b)のように，鉱石モデルに装着した RF タグをライザー管外に設置したアンテナで検知し，移動を計測する[3)]．

文献調査等を基に，計測に適当な周波数帯・RF タグ・アンテナを選択した[4)]．しかし，キャリア物質中等の実験で想定される環境下での RFID システムの交信の可否は不明である．そのため，実験環境下での交信範囲を計測し，RFID システムの適用条件を調べた．

2.　有効性の検討[4)]

(1)　検討に用いた RFID システム

周波数帯は他の周波数帯（LF，UHF）よりも水・RF タグ同士の干渉・他の電子機器からのノイズへの耐性が高い HF 帯を用いた[5), 6)]．RF タグは，戸田工業(株)製の MBT-0503（以下，小 RF タグ）と MBT-1003N（以下，大 RF タグ）を用いた．いずれもパッシブタイプの金属対応タグであり，図-2 に示すように径 10~30 mm の鉱石モデルに装着可能な大きさである．アンテナはループ状を選択し，図-3 の(株)タカヤ製の TR3-HA101A（以下，小アンテナ）と TR3-HA201A（以下，大アンテナ）を用いた[4)]．コイルの内側をライザー管が通るように設置することで，アンテナ同士の干渉を避け，磁場が一様に強いコイルの内側断面を計測に用いることが可能となる．

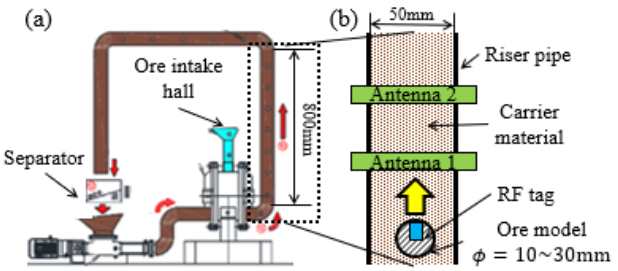

図-1　(a)模型揚鉱実験装置の概略図，(b)ライザー管の拡大図

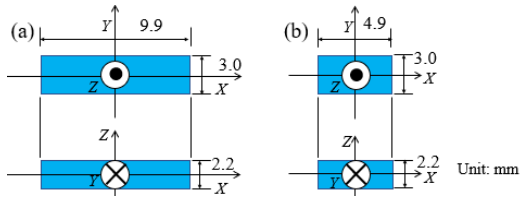

図-2　RF タグの寸法・座標軸：(a)大 RF タグ，(b)小 RF タグ

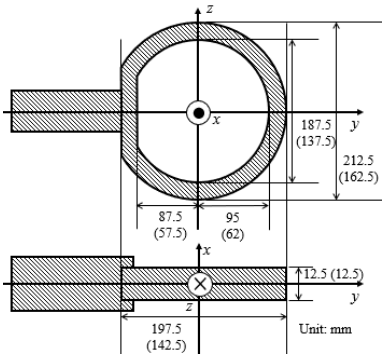

図-3　アンテナの寸法・座標軸（カッコ内は小アンテナ）

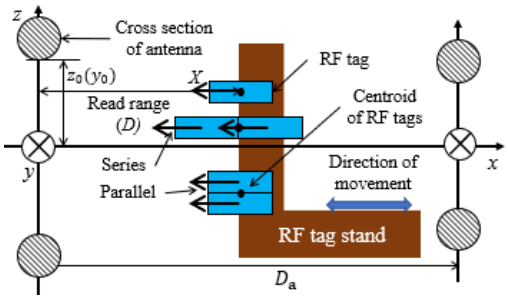

図-4　交信範囲，RF タグの配置，アンテナ間の距離の定義

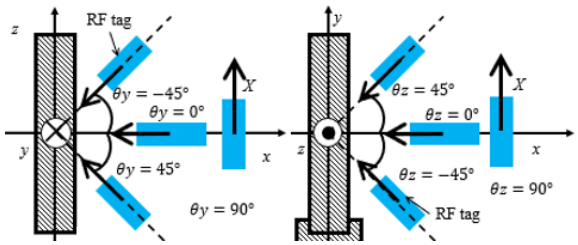

図-5　RF タグの角度の定義

(2)　検討項目

まず，大・小アンテナ，RF タグの交信範囲を調べた．その後，近接する複数 RF タグ，近接するアンテナ，RF タグの配向，近接する金属（RF タグは金属球に装着），水やキャリア物質からの影響を検討した．

(3)　検討方法

a)　交信範囲（形状と大きさ）

図-2，**図-3** のように RF タグとアンテナのコイル面の法線ベクトルをそれぞれ X，x 軸とし，座標軸を設定した．**図-4** のようにアンテナを卓上に固定し，支持台に固定した RF タグを x 方向に移動させアンテナから RF タグの重心までの交信範囲 D を調べた．RF タグの配向の検討を除き，RF タグの X，Y，Z 軸とアンテナの x，y，z 軸は一致する．計測はアンテナ内部で y 軸上が 19.6 mm 間隔，z 軸上が 20 mm 間隔で行った．また，アンテナの原点からコイルの内側までの $y(z)$軸上の距離を$y_0(z_0)$とする．大アンテナと大 RF タグが$\theta y = \theta z = 0°$の時に，空気中で計測した時を基本ケースとし，各条件下での交信範囲と比較する．

b)　近接する複数 RF タグの影響

図-4 のように，RF タグの配列（並列，直列）と間隔（0，10 mm）によって 4 通りで交信範囲を計測を行った．

c)　近接するアンテナの影響

図-4 のように，アンテナの間隔$D_a = 150$，300 mm の 2 通りで計測を行った．

d)　RF タグの配向の影響

図-5 のように，RF タグの X 軸と，アンテナの x 軸が xy 平面上でなす角度を$\theta_z = -45°, 0°, 45°, 90°$，$xz$ 平面上でなす角度を$\theta_y = -45°, 0°, 45°, 90°$とした．

e)　近接する金属の影響

図-6 のように RF タグに金属を装着し，計測を行った．方式 I では RF タグをアルミ箔で梱包した．方式 II と III は金属球の表面に粘土を用いて RF タグを装着した．方式 II ではアンテナと RF タグの間に金属球が挿入されないが，方式 III では挿入される．方式 IV～IX ではステンレス球($D = 25.4$ mm)に開けた$\phi = 5,10$ mm で深さ($d = 12,15,25.4$ mm)の穴の内部に RF タグをビニールテープを用いて装着した．

f)　水やキャリア物質の影響

図-7 のように流体（水，CMC 水溶液）及び粒状体（珪砂 qs，鉄粉 fe）で充填したペットボトル($\phi = 60$ mm)の中心軸上にビニール紐で RF タグを固定した．キャリア物質の構成の模式図を**図-8**，検討に用いたキャリア物質の構成を**表-1**，キャリア物質中を構成する物質の密度を**表-2** にそれぞれ示す．水(w)，増粘剤(t)，粒状体(s)，粘性流体(l)の質量をそれぞれ$m_w, m_t, m_s, m_l(= m_w + m_t)$，全重量 m$(= m_w + m_t + m_s)$に対する質量パーセント濃度を$C_w, C_t, C_s, C_l$とする．また，粒状体と粘性流体の体積を$V_s, V_l$とし，全体積$V(= V_s + V_l)$に対する体積パーセント濃度を$C_{V,s}, C_{V,l}$とする．加えて，検討に用いた全てのキャリア物質の流体部分の増粘剤水比$(T/W = C_t/C_w\ (\times 100\ \%))$は1.52 %である．

まず，流体の種類による交信範囲の変化を調べるために，水，CMC 水溶液，鉄粉，珪砂中での交信範囲を比較した．鉄粉・珪砂共に$C_s = 30$ %である．次に，キャリア物質中の珪砂の体積パーセント濃度ごとの交信範囲の計測を$C_{V,s} = 0$ %(CMC 水溶液), 14 %, 50 %, 100 %で行った．なお，計測に用いたキャリア物質の濃度は冨田(2017)[2]が行った沈降実験を基に決定した．

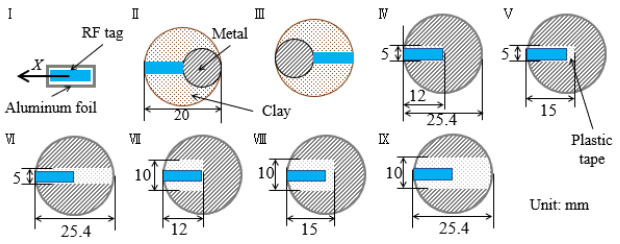

図-6　金属への RF タグの装着方式（図の左方向がアンテナ）

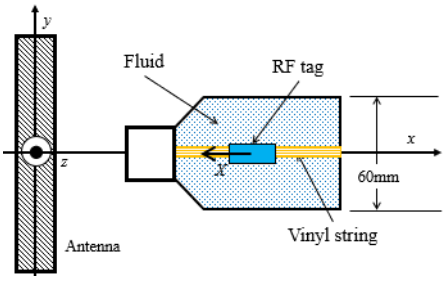

図-7　キャリア物質中での交信範囲の計測方法

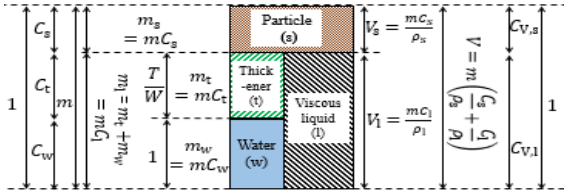

図-8　キャリア物質の構成の模式図

表-1　各キャリア物質の構成（%）

キャリア物質	T/W	C_s	C_t	C_w	$C_{V,s}$	$C_{V,l}$
CMC 水溶液	1.52	0.0	1.5	98.5	0.0	1.0
鉄粉	1.52	30.0	1.1	69.0	5.1	94.9
珪砂	1.52	30.0	1.1	69.0	14.2	85.8
	1.52	72.2	0.4	27.4	50.0	50.0
	-	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0

表-2　キャリア物質中を構成する物質の密度

物質	密度ρ[g/cm^3]	物質	密度ρ[g/cm^3]
水	ρ_w =1.0	珪砂	ρ_{qs} =2.6
CMC(s)	$\rho_{CMC(s)}$ =1.6	鉄粉	ρ_{fe} =7.9
CMC(aq)	$\rho_{CMC(aq)}$ =1.0	–	

3.　計測結果および考察

(1)　交信範囲（形状と大きさ）

図-9 に小アンテナの交信範囲を示す．交信範囲は yz 平面（アンテナのコイル面）及び xy 平面に関して対称である．**図-10** のアンテナからの磁力線の分布から [7]，磁力線の分布が yz 平面及び，xy 平面に対して対称なため，交信範囲も yz 平面及び，xy 平面に対して対称になる．そのため，これ以降の検討では$x > 0$，$z > 0$のみを図示する．yz 平面に対して交信範囲が対称であるため，揚鉱・沈降実験において RF タグがアンテナを通過する際に交信開始時間と交信終了時間の平均値をとることでアンテナのコイル面を通過した時間を算出できる．

図-11 (a) に大・小アンテナの交信範囲の比較を示す．両者の x 方向の交信範囲 D の最大値D_{max}はほぼ等しいが，小アンテナでは y 方向の交信幅が小さい．沈降実験では管壁の影響を避けるために，より径の大きい管を使う．そのため，より径が大きい大アンテナを用いる．

図-11 (b) に大・小 RF タグの交信範囲の比較を示す.小 RF タグではアンテナ中央部において交信不可能である．**図-2** より，小 RF タグと大 RF タグの yz 平面上の断面積は等しいため，RF タグのコイルの断面積Aは等しい．しかし，小 RF タグは大 RF タグに比べて X 方向で約半分の長さであるため，コイルの巻き数Nが少ないと推測される．そのため，式(1)より [8]，誘導起電力V_rの絶対値が小さくなり，交信範囲が小さくなると思われる．故に，沈降実験等には交信範囲が広い大 RF タグを用いる．

$$V_r = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -N\frac{\Delta BA\cos\theta}{\Delta t} \qquad (1)$$

以上の検討より，これ以降の計測では大アンテナと大 RF タグのみを用い，代表値である $xy(xz)$平面上での交信範囲のみを図示する．加えて，グラフの y 軸を $y/y_0\ (z/z_0)$，x 軸を$D/D_{max,base}$で表すことで，他のアンテナと RF タグで行われた交信範囲の計測との比較を可能とする．

また，交信範囲は放物線式(2)でモデル化が可能である．**図-12** より，xy 平面上での基本ケースの交信範囲は式(2)において$(a, b, c) = (-0.40, -0.06, 1.0)$で表される．この放物線の頂点の y 座標は$-b/2a = -0.13$である．その値は$y/y_0$の約 5%であるため，交信範囲の放物線の軸はアンテナの x 軸とほぼ一致する．交信範囲のモデルが $-1 \le y/y_0(z/z_0) \le 1$において常に正であるとき，アンテナ内部全域で交信が可能であり，揚鉱・沈降実験での運用が可能とする．

$$\frac{D}{D_{max,\ base}} = a\left(\frac{y}{y_0}\text{or}\frac{z}{z_0}\right)^2 + b\left(\frac{y}{y_0}\text{or}\frac{z}{z_0}\right) + c \qquad (2)$$

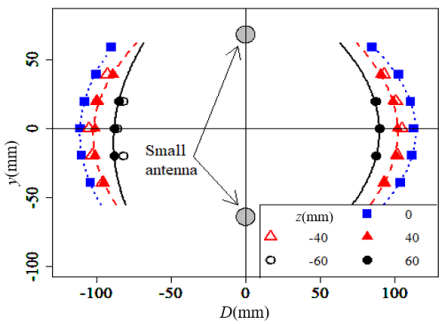

図-9　小アンテナの交信範囲（形状及び対称性の検討）

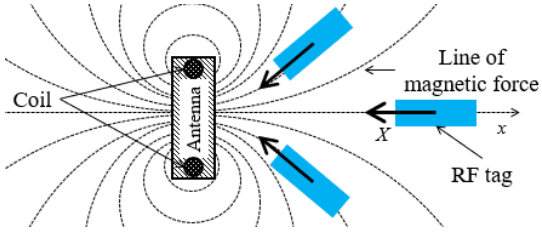

図-10　アンテナからの磁力線と RF タグの位置関係

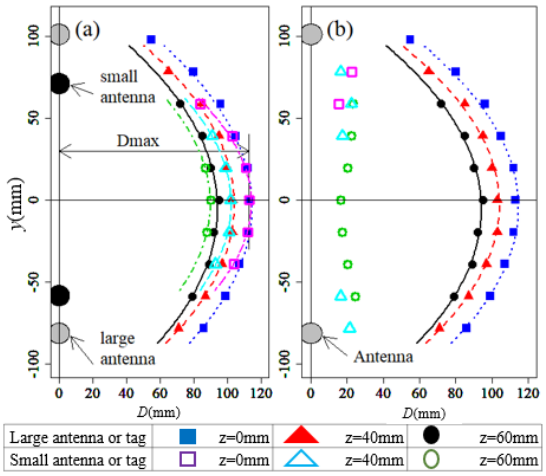

図-11　交信範囲の比較 (a)大・小アンテナ，(b)大・小 RF タグ

(2)　近接する複数 RF タグの影響

図-12 に複数の RF タグが近接する時の交信範囲を示す．直列・並列の双方で，RF タグ同士が接する時は交信が不可能となる．一方，直列・並列の双方で RF タグ間の間隔が 10 mm の時は交信が可能になり，基本ケースに対する$D_{\max}$の大きさ$(D_{\max}/D_{\max,\mathrm{base}})$は 84 %になる．

交信範囲が小さくなる原因は他の RF タグからの干渉である．複数の RF タグから発せられる電磁波が重複し，電磁波のエネルギーが減衰することで交信が不可能になる [12]．また，RF タグからの電磁波の混合により RF タグの識別が不可能となる [13]．故に，複数の RF タグを同じ鉱石モデルに装着することは不可能である．一方，RF タグ間の距離が 10 mm 以上ある場合には，他の RF タグからの干渉の影響が小さくなるため交信が可能となる．

(3)　近接するアンテナの影響

図-12 に複数のアンテナが近接する場合の交信範囲を示す．$D_{\mathrm{a}} = 150$ mmの場合には交信が不可能になる．一方で，$D_{\mathrm{a}} = 300$ mmの場合には交信が可能となり，$D_{\max}/D_{\max,\mathrm{base}} = 84$ %になる．

$D_{\mathrm{a}} = 150$ mmの際は他のアンテナからの強い電磁波が RF タグが発する弱い電磁波を打ち消すことで正常な交信は不可能となる [14]．アンテナ間隔が広くなると他のアンテナからの電磁波は減衰し，$D_{\mathrm{a}} = 300$ mm程度の距離を取ると正常な交信が可能となる．故に，実験ではアンテナ同士の間隔を 300 mm 以上空けて設置する．

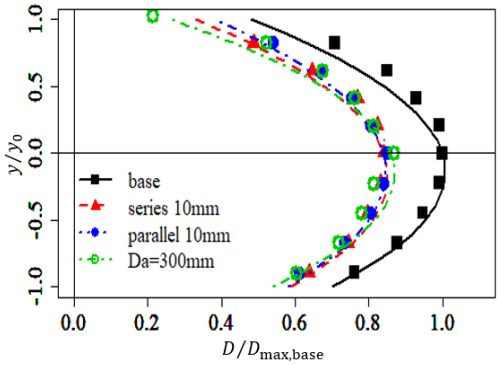

図-12　複数の RF タグ・アンテナが近接する場合の交信範囲・近似曲線

(4)　RF タグの配向の影響

図-13，図-14 は RF タグの配向による交信範囲の変化を示す．RF タグの配向は交信範囲の形状を変化させる．$\theta y = \theta z = 0°$の際は$D_{\max}$はアンテナの x 軸上に存在する．$\theta y, \theta z \neq 0°$の際は$D_{\max}$の位置は RF タグの配向に応じて変化し，アンテナの x 軸と一致しない．また，RF タグの傾きの絶対値が等しい場合には交信範囲が，θy では xy 平面に，θz では xz 平面に対しそれぞれ対象となる．しかし，配向が90°の場合は交信が不可能である．

図-10 より，磁力線はアンテナの x 軸を中心に拡散する．式(1)より，磁力線と RF タグの X 軸が平行の時に磁束Φ_Bが最大となるため，$\theta y = \theta z = 0°$の時は x 軸上で誘導起電力及び交信範囲が最大となり，モデルの頂点は x 軸付近に存在する．一方で$\theta y, \theta z \neq 0°$の時は図-10 の RF タグのように，アンテナの磁力線と RF タグの X 軸が平行になる位置は RF タグの配向に応じて変化する．そのため，交信範囲の放物線の軸が x 軸と一致しない．

図-13 より，$\theta z = 45°$，$-45°$での交信範囲のモデルは$(a, b, c) = (-0.28, 0.23, 0.84), (-0.33, -0.24, 0.86)$，図-14 より，$\theta y = 45°$，$-45°$での交信範囲のモデルは$(a, b, c) = (-0.28, 0.23, 0.84), (-0.33, -0.24, 0.86)$ となる．いずれのモデルでも$-1 \leq y/y_0(z/z_0) \leq 1$で常に正である．しかし，$y/y_0(z/z_0) = \pm 1$ 付近で$D/D_{\max,\mathrm{base}} \approx 0$である．故に，$\pm 45°$よりも RF タグの傾きが大きくなると実験での運用が不可能となる．

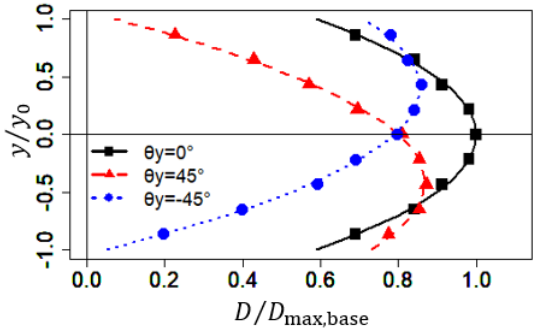

図-13　xy 平面上で RF タグが傾いた際の交信範囲・近似曲線

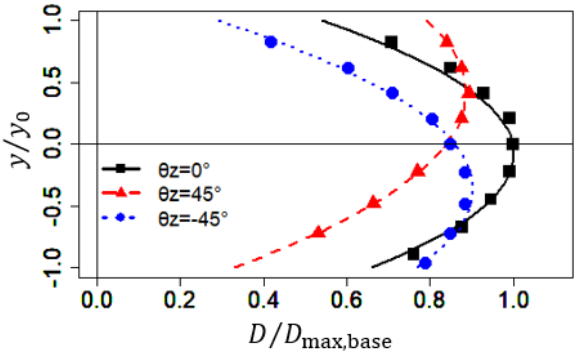

図-14　xz 平面上で RF タグが傾いた際の交信範囲・近似曲線

(5)　近接する金属の影響

図-15 に金属が近接する際の交信範囲を示す．RF タグをアルミホイルで包んだ方式Ⅰ・ステンレス球に埋め込む方式Ⅳ～Ⅸでは交信が不可能となった．一方，金属球の表面に RF タグを装着した方式Ⅱ，Ⅲでは交信が可能であり，それぞれ$D_{\mathrm{max}}/D_{\mathrm{max,base}}$ =86 %，90 %になる．

近接する金属によって交信範囲が減少する原因は金属の高い電気伝導率である．電気伝導率が高い物質に外部から電磁波を加えると導体内で渦電流が発生し，それが磁束の導体内への侵入を阻害する [12]．式(1)より，RF タグの誘導起電力の大きさV_{r}と磁場の大きさBは比例しているため電磁波の阻害は交信範囲を減少させる．図-15 より，ⅡとⅢ以外の方式では RF タグを取り囲む金属によって電磁波が阻害されると推測される．一方，方式ⅡとⅢにおいて RF タグは金属に囲まれていないためアンテナからの電磁波が RF タグに届き，交信が可能となる．

鉱石モデルは金属製であるため，それに RF タグを埋め込むと方式Ⅳ～Ⅸのように交信が不可能となり，計測も不可能となる．それを防ぐために，図-16 のように鉱石モデルの上半球を非金属物質とし，そこに RF タグを埋め込む方式を提案した．この方式では RF タグは金属に囲まれていないため，交信は可能と推測される．また，上半球が下半球よりも低密度であるために，鉱石モデルの回転が抑制され，アンテナの x 軸と RF タグの X 軸の間の角度が常に平行に近い状態で保たれる． それにより，実験中に鉱石モデルを読み落とす可能性が減る．

(6)　水やキャリア物質の影響

図-17 に流体の種類ごとの交信範囲を示す．水中の$D_{\mathrm{max}}/D_{\mathrm{max,base}}$は 63 %，CMC 水溶液中では 67 %であった．C_{s} = 30 %の珪砂中では交信範囲は水に比べて大きくなり，$D_{\mathrm{max}}/D_{\mathrm{max,base}}$ = 74 %となる．なお，鉄粉を用いた場合の交信は不可能であった．

流体中で RF タグの交信範囲が空気中より小さくなる原因は，金属と同様に高い電気伝導率である．水の電気伝導率(1.0×10^{-2})[5]は空気(6.2×10^{-15})[15]より10^{13}倍，鉄の電気伝導率(0.7×10^{8})[9]は10^{23}倍大きい．そのため，水中での交信範囲は大幅に減少し [5]，鉄粉入りキャリア物質中では RF タグで誘導起電力が発生せずに交信範囲がほぼ 0 になる．一方，珪砂(1.5×10^{-14})[16]のように電気伝導率が低い物質は電磁波が減衰せずに RF タグに届き，交信範囲の減少が少ない．そのため，電気伝導率の低い粒状体を実験に用いる．

図-18 にキャリア物質中の珪砂の体積パーセント濃度ごとの交信範囲を示す．図-19 が示すようにキャリア物質中の珪砂の体積パーセント濃度と交信範囲は比例している．$D_{\mathrm{max}}/D_{\mathrm{max,base}}$は$C_{\mathrm{V,s}}$ = 14 %の時に 74 %，50 %時に 80 %，100 %の時に 95 %となる．冨田(2017)[2]よりキャリア物質中の珪砂濃度と沈降抑制効果は比例する．そのため，揚鉱実験等では粒状体の濃度が大きいキャリア物質を用いる．それらのキャリア物質は電磁波を減衰しにくいため計測にも適当である．

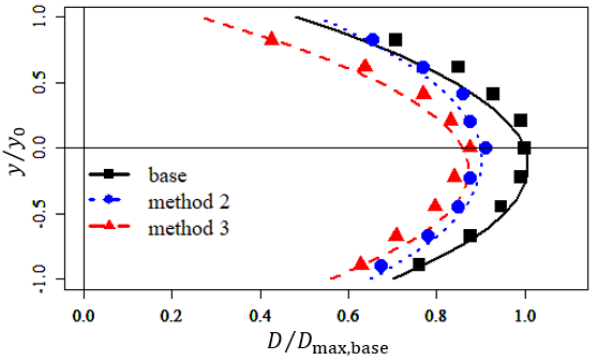

図-15　金属が近接する場合の交信範囲・近似曲線

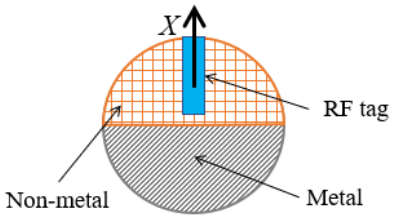

図-16 鉱石モデルへの RF タグの装着方式

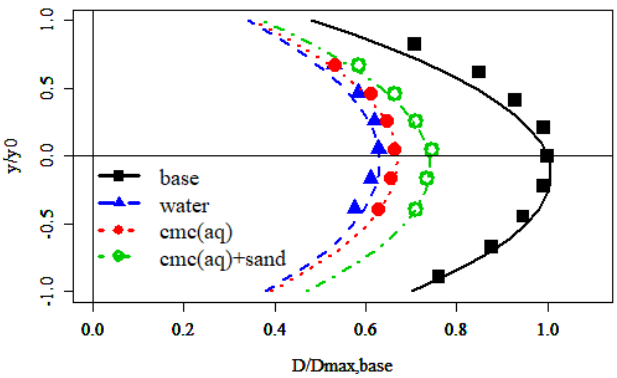

図-17　流体の種類ごとの交信範囲・近似曲線

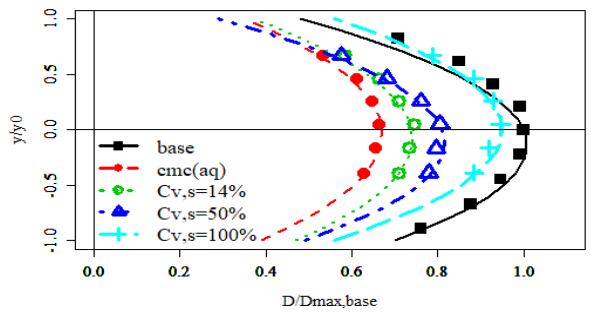

図-18　珪砂の体積パーセント濃度ごとの交信範囲・近似曲線

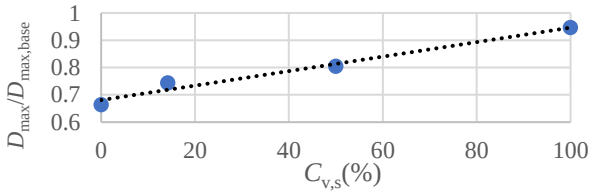

図-19　珪砂の体積パーセント濃度による交信範囲の変化

5.　まとめ

揚鉱・沈降実験で想定される環境下での RFID システムの交信範囲を計測し，その適用条件が判明した．アンテナはより径が大きいライザー管への装着が可能な TR3-HA201A を，RF タグは十分な誘導起電力が得られる MBT-1003N を用いる．アンテナや RF タグが互いに近接している場合，電磁波が干渉することで交信が不可能となる．そのため，アンテナは 300 mm，RF タグは 10 mm 以上の離隔が必要である．RF タグの近傍が金属に囲まれる場合にはアンテナからの電磁波が遮断され交信が不可能となる．そのため，金属の鉱石モデルに RF タグを装着する際には非金属物質による開放部を設ける事が必要である．また，水溶液は空気より高い電気伝導率を持っているため，電磁波及び交信範囲が減少する．しかし，珪砂などの非金属の粒状体を含むキャリア物質では，電気伝導率が低下し，交信範囲が拡大する．粒状体の濃度が高いキャリア物質は交信範囲及び沈降抑制効果が大きいため，今後の揚鉱・沈降実験に適している．

参考文献

1) Tani, K, Suzuki, A., Tanaka, K., Suga, S. and Tomita, A. : Development of experimental apparatus for model tests of lifting marine mineral resources by carrier materials, *10th Asian Rock Mechanic Symposium*, 2018.
2) 冨田晃弘: 揚鉱実験装置における鉱石モデルの移動速度を計測するための RFID システムの開発, 東京海洋大学修士論文, 2017.
3) 鈴木亮彦, 谷和夫, 田中肇一: キャリア物質循環方式による揚鉱の模型実験装置の開発，第 53 回地盤工学会研究発表会, pp.2-3, 2018.
4) 折田清隆, 谷和夫, 鈴木亮彦, 田中肇一, 菅章悟: 揚鉱・沈降実験における, 鉱石モデルの管内移動の計測に適切な RFID システムの選考, 第 15 回地盤工学会関東支部発表会, 2018.
5) Jiang, S and Georgakopoulos, S.: Electromagnetic wave propagation into fresh water. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol.3, pp.261-266, 2011.
6) 日本自動認識システム協会: よくわかる RFID　電子タグのすべて, Vol.2, 134p,オーム社, 2017.
7) 長岡洋介:電磁気学I〔物理学入門コース 3〕,岩波書店, pp.169, 1982.
8) 原康夫: 基礎からの電磁気学, 学術図書出版社, pp.76-95, 2001.
9) 国立天文台: 理科年表, 丸善出版, pp.388-429, 2017.
10) ダイセルファインケム：カルボキシメチルセルロースナトリウム　製品安全データシート, 2011.
11) 菊本統, 西村聡, 早野公敏.: 図説　分かる土質力学, 学芸出版社, pp.20, 2015.
12) Ebrahimi-Asi, S, Ghasr, M T A, Zawodnlok, N J.: A solution to low read rate problem in RFID scattering networks, *IEEE journal of radio frequwncy identification*, Vol.1, pp. 176-184
13) Papapostolou, A, Chaouchi, H.: RFID-assisted indoor localization and the impact of interference on its performance, *Journal of Network and Computer Application*, pp. 902-913, 2011.
14) Joshi, G R, Kim, S W.: Survey, nomenclature and comparison of reader anti-collision protocols in RFID, *IETE Technical Reviewe*, pp. 234-243, 2008.
15) 北川信一郎, 河崎善一郎, 三浦和彦, 道本光一郎.:大気電気学, 東海大学出版会, pp.65-67, 1996.
16) 黒沢達美: 物理学 One point-23 電流と電磁誘導, 共立出版, pp.1-66, 1983.

DEVELOPMENT OF INSTRUMENTATION WITH RFID SYSTEM FOR ORE MODEL MOVEMENTS IN LIFTING EXPERIMENTS

Kiyotaka ORITA, Kazuo TANI,
Akihiko SUZUKI, Keiichi TANAKA and Shogo SUGA

New experimental apparatus to lift up ore models by carrier material was proposed. However, the movement of ore models in apparatus can't be observed by visual method since carrier material is invisible. Therefore, RFID system will be used because it can work under invisible condition.

The read range of RFID system under various conditions, which is expected in experiments, was measured to evaluate the feasibility of RFID system for experiments as instrumentation. As a result, the applied condition of RFID system on lifting up experiment and appropriate method to install of RFID system on ore model and experimental apparatus were found out.