

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K05890

研究課題名(和文) 津波被災地における地下水利用技術に関する研究

研究課題名(英文) A study on groundwater pumping methods for recovery from salinization caused by the tsunami of the Great East Japan Earthquake

研究代表者

石田 聡 (Ishida, Satoshi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・研究領域長

研究者番号：30414444

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：津波によって塩水化した地下水が帯水層深部に存在する仙台平野南部において、揚水による塩水の混合を防ぐため井戸内に止水性のパッカーを設け、パッカー上部から地下水を揚水する装置、パッカー上部・下部から同時に地下水を揚水する装置を開発し、19箇所の井戸で揚水試験を実施した。その結果、海岸に近くなるほど揚水した地下水のECは高くなるが、を用いると全ての地点で200mS/m未満の地下水が得られ、井戸の深度を浅くすると淡水が得られやすくなることが明らかになった。を用いた試験では、2深度から同時に揚水した地下水のECが一定の値を保ち、本手法でアップコーニングを抑制できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、津波被災地において塩水化した地下水の回復状況を調査する手法とその結果が示され、新たな学術的知見が得られた。また、塩水化した地下水が残っている地域で、淡水を再利用するための方法が示された。このことは、農業用地下水の安定的な確保や営農計画の策定に向けた有益な情報となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Pumping tests were carried out every three months in 19 monitoring wells in Watari district, from 2018 to 2020 to clarify degree of recovery from groundwater salinization caused by tsunami. Since saltwater was distributed in deep part of aquifer, a packer was installed at boundary between saltwater and freshwater in the pumping tests. Groundwater was pumped from a shallower depth than the packer (test A), and from both shallower and deeper depth than the packer at the same time (test B).

(A) The closer to the coast, the higher the EC of the pumped groundwater. Near the coast, the shallower the packer's depth, the lower the EC of groundwater. When the packer's depth was 5m, the EC of groundwater was less than 200mS/m at all points. These results show that groundwater with low EC can be used by reducing the depth of the well.

(B) The EC of groundwater pumped from two depths at the same time maintained a constant value. These results show that upconing can be suppressed by this method.

研究分野：地下水学

キーワード：二重揚水 アップコーニング 地下水 塩水化 津波 東日本大震災 パッカー 揚水試験

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災で津波によって被災した仙台平野南部の沿岸域では、津波でもたらされた海水が地下に浸透したと考えられ、地下水の塩水化事例が報告されている(東北農政局,2015)。一般に沿岸域の地下水は動水勾配が小さく流速が極めて遅い。そのため、塩水化した地下水が海に流れ去るまでに長い期間を要する場合がある(森ら,2014)。沿岸域の地下水は安価で、水温の変化が小さく、水質も良好であることから、古くから農業用水として利用されてきているが、塩水化によって地下水が使用できなくなった地域では、水道水などを代替水源として使用せざるを得ないのが現状である(細谷ら,2012)。

一方で本地域では、不圧帯水層表層部に淡水層が形成されつつあることが、近年の調査によって明らかになり(東北農政局,2015)、その涵養源は震災後の雨水と考えられる。淡水域の厚さは場所によって異なり、震災前の状況にはほど遠いものの、本地域では水田の復旧が進んでおり、今後の地下水涵養状況によってはこの淡水層が新たな農業用水源となる可能性がある。

不圧帯水層の深部に塩水が分布している地域において、浅層の淡水域のみにストレーナを有する井戸を設け、取水を行うと、揚水に伴って井戸周辺の圧力が低下するため、塩水域から淡水域に向かって塩水が浸入(アップコーニング,図1)し、揚水条件によっては最終的に淡水の揚水が不可能となる場合がある(Presley & Todd, 2005 など)。アップコーニングは井戸深度を浅くするほど軽減できるが、同時に揚水量も小さくなるので、地下水の利用という観点からは、許容範囲の水質を保てる揚水量と井戸深度の情報が重要となる。この情報を得るためには、それぞれの調査地点において複数の深度で揚水試験を行う必要があるが、そのためには多くの調査井戸を設置する必要があり、広域的な調査を行うことは難しい。

また、アップコーニングを抑止するため、淡水域と塩水域から同時に揚水する二重揚水と呼ばれる手法がある(図2)。この手法は、塩水域と淡水域との間で圧力差を発生させないで、異なる水質を持った2層の地下水を混合させず、別々に揚水できることが現地試験によって示されている(Zack and Candelario, 1984, 石田ら, 2014 など)。塩水を破棄するための手段が必要となるものの、この手法を津波被災地に用いることができれば、淡水の持続的利用と、塩水化した地下水の排除を同時に行うことが可能となると考えられる。しかしこれらに着目した既往の研究例はなく、二重揚水による淡水の利用可能量、塩水排除による地下水の塩水化からの回復の程度などといった、手法の適用性については明らかにされていない。

2. 研究の目的

1. に述べた背景下、本研究では仙台平野南部における、不圧地下水表層部の淡水層の利用可能性を明らかにすること、調査地特有の地下水条件に適応した二重揚水手法を開発し、その適用性を評価することを目的とする。

本研究は、1本の井戸で二重揚水を実現する。具体的には、深さが塩水域まで達している1本の井戸内の、淡水と塩水の境界部(塩淡境界)を膨縮性を持つパッカーで止水し、パッカーより上側の淡水域と下側の塩水域からそれぞれ地下水を揚水する(図3)。この方法の利点は、1つの調査地点に対して井戸を2本用意する必要がないこと、降雨の多寡や揚水等によって塩淡境界深度が変化した場合でも、パッカー深度を変えることによって最適な深度で揚水を行えることである。さらに、本研究の対象地として想定している宮城県亶理町においては、東北農政局によって観測用の井戸が分布的に配置されており、本手法を用いればこれらの井戸を用いて現地試験を行うことができる。このような方法で、津波被災地において二重揚水の試験を実施した研究例はこれまでにない。

不圧地下水表層部の淡水層の利用可能性調査については、これまで農家が地下水を利用していた方法は浅井戸による揚水であるため、図3のパッカー上部のみから揚水する装置を作成し、揚水試験に用いた。この装置を用いることにより、観測用の井戸より浅い深度(パッカー深度)の井戸から揚水した状態を模すことができるので、パッカー深度を変化させて揚水し水質を測定するこ

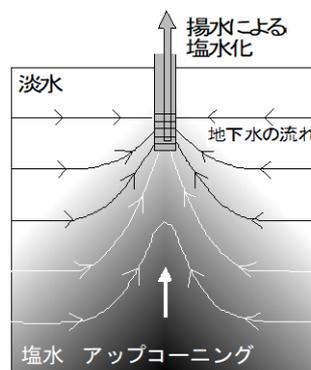


図1 アップコーニング模式図
(淡水域の井戸からの揚水によって塩水が上昇)

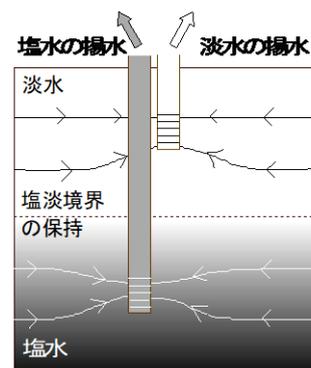


図2 二重揚水模式図
(淡水域と塩水域から同時に揚水しアップコーニング抑止)

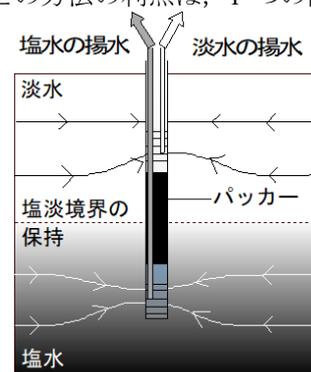


図3 単孔式二重揚水模式図
(1本の井戸をパッカーで止水しその上下から別々に揚水)

とにより、淡水を得られる最適な井戸深度を明らかにすることができる。

3. 研究の方法

研究対象地として、帯水層内に、津波により塩水化した地下水と、その上部に淡水域が分布している宮城県亶理町・山元町を選定した。対象領域は東側を海岸線に接した東西 7km、南北 5km の範囲である。本調査対象地には、東北農政局によって観測用の井戸が分布的に配置されており(図 4)、その深度は 10~15m である。本研究ではこれらの井戸の口径・材質に合わせた揚水装置を作成し、現地にて揚水試験を実施した。

現地試験に先立って各観測井戸の EC を深度 1m 毎に測定したところ、地下水面上数 m まで EC が比較的低く、それ以深では EC が深度とともに上昇する傾向にあった。なお、本研究では現地の主要作物の一つであるイチゴ栽培に適した塩分濃度 (EC70mS/m 以下) の地下水を淡水と呼ぶ。

(1) 淡水地下水の利用可能性調査

井戸の任意の深度を空気パッカーで止水し、パッカーの上部から同時に揚水するパッカー付き揚水装置 (以下「パッカー付き揚水装置」という) を作成し、揚水試験に用いた(図 5)。本装置を用いることにより、使用する井戸の深度より浅い任意の深度 (=パッカー設置深度) の井戸を模して揚水試験を行うことができる (石田ら, 2019-a)。揚水量は 1~10L/min の範囲で調節できる構造とした。揚水中の水圧と EC 変化を経時的に記録する構造とした。パッカー長は 0.5m または 1m とし、パッカーの上側に水圧・温度・EC 自記センサ (応用地質(株)製 S&DLminiEC メーター) および揚水ホースを配し、揚水には吸込み式ポンプ (ニップatzジャブスコ(株)製 Flojet Pump)、揚水量測定には電磁流量計 (愛知時計電機(株)製 NW10-PTN)、揚水強度の調整にはモータースピードコントローラを用いた。

揚水試験は井戸 19 箇所を対象に年に 4 回 (概ね 3 カ月に 1 回) 程度実施した。各試験では揚水前に井戸内の EC を深度 1m 毎に測定し、EC の鉛直分布を把握した。1~3 回目の試験では原則としてパッカー設置深度を 7m とし、淡水域と塩水域の境界がこれより浅い場合はその境界深度とした。揚水深度は原則として 3m とし、2 とおりのパッカー長 (0.5m と 1.0m) で実施した。4 回目の試験ではパッカー深度を原則として 5m とした (塩淡境界深度による調整は 1~3 回目同様)。揚水量は装置の最大揚水量 (10L/min 程度) としたが、水位降下が大きい場合は安定して揚水できる量に適宜調整するとともに、場合によってはパッカー設置深度・揚水深度を調整した。5 回目の試験ではそれまでの試験結果から各井戸のパッカー深度を、淡水 (または相対的に EC の低い地下水) を揚水できる最適な深度とした。また、比較としてパッカー付き揚水装置を使用しない状態での揚水試験も実施した。揚水時間はそれぞれ 10 分間とし、試験中は揚水開始 1 分後、5 分後、10 分後に地下水水位および揚水した地下水の水質 (EC, pH, DO, ORP)、水温をそれぞれ測定した。

(2) 二重揚水試験

1 本の井戸内の、淡水と塩水の境界部(塩淡境界)を、膨縮性を持つパッカーで止水し、パッカーより上側の淡水域と下側の塩水域からそれぞれ地下水を揚水する装置 (以下「二重揚水装置」という) を作成した(図 6)。この方法の利点は、1 つの調査地点に対して井戸を 2 本用意する必要がないこと、降雨の多寡や揚水等によって塩淡境界深度が変化した場合でも、パッカー深度を変えることによって最適な深度で揚水を行えることである (石田ら, 2019-b,c)。本手法を用いれば、新たな井戸を設置することなく、現地の観測井戸を用いて二重揚水試験を行うことができる。揚水装置に使用した機材類は、パッカー付き揚水装置と同様とした。

揚水試験は宮城県亶理町の観測用井戸 6 か所で行った。パッカー深度はそれぞれの井戸の淡水と塩水の境界部とし、パッカーより上部から淡水を、パッカーより下部から塩水を同時に揚水した。揚水量・揚水時間は原則としてそれぞれ 15L/min・連続 120 分とし、揚水中の地下水水位、揚水した地下水および孔内の電気伝導度 (EC) の経時変化、揚水前と揚水後の井戸内の深度別 EC 分布の変化を測定した。併せて揚水中の地下水を一定時間間隔で採取し、ラドン濃度・pH・ORP を測定した。

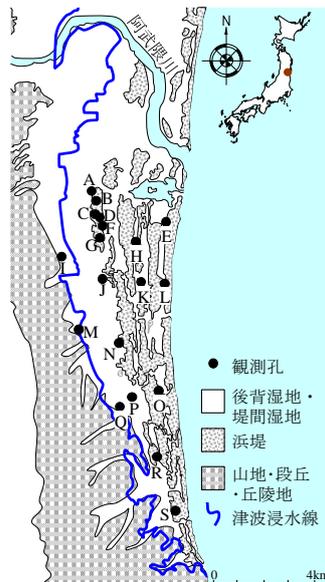


図 4 観測井戸位置図

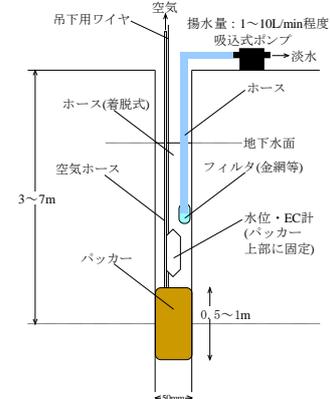


図 5 パッカー付き揚水装置構成図

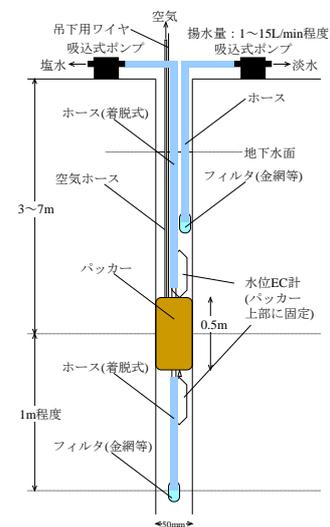


図 6 二重揚水装置構成図

4. 研究成果

(1) 淡水地下水の利用可能性調査

各回の揚水試験とも、揚水開始5分後と10分後の揚水量、地下水位、水質、水温はほぼ同じであることが殆どであったため、以後 EC および揚水量は揚水終了直前（揚水開始10分後）に記録された値を示す。表1に揚水試験結果（5回分）を、図7は①～③回目目の試験における、揚水した地下水の EC の平均値を示す。19 地点のうち C 地点は水位降下が大きく、安定した揚水が困難であったので、以下の考察の対象外とした。またパッカー長の違いによる揚水結果への影響は見いだせなかった。

19 地点のうち後背湿地西縁に位置し、津波が到達せず地下水が塩水化していなかった I, M, Q 地点については事前検層で塩水域が確認されず、揚水した地下水の EC も 70mS/m 未満であった。また J 地点についても、揚水した地下水の EC は 70mS/m 未満であり、パッカーを用いない場合でも同様であった。これらの地点では、深度 10m 以浅の井戸で淡水地下水が利用できると思われる。

上記4地点よりやや海岸寄り、浜堤列西端から後背湿地に位置する A, B, D, F, G, N, P 地点はいずれも観測井戸の深部で 200mS/m を超える EC が観測され、地下水塩水化の影響が残っていた。このうち、淡水域の厚さが 0~5m と比較的薄い地点（A, B, D, N, P）では殆どの場合、揚水した地下水の EC は 70mS/m を超えたが、パッカー深度を浅くすると低下した（N 地点では上昇しているが、このときは揚水前の EC がそれまでより高かった）。これらの地点では現時点では淡水地下水の利用は難しいが、井戸深度を浅くするほど、低い EC の地下水が得られると考えられる。一方、淡水域の厚さが 5m を超えていた地点（F, G）では揚水した地下水の EC は常に 70mS/m を下回った。これらの地点では、今回設定した揚水深度・揚水量であれば、淡水地下水が利用できる可能性が高いと考えられる。

これらより海岸寄りの浜堤・堤間湿地に位置する地点（E, H, K, L）では淡水域の厚さが薄くなり、排水路に隣接している K 地点以外では揚水した地下水の EC は平均で 70mS/m を超え、パッカー深度を浅くしても低下しなかった。このことは、今回設定した揚水深度・揚水量では淡水の揚水が難しいことを示していると考えられる。

調査区域南部の O, R, S 地点では淡水域の厚さが 5m に満たないが揚水された EC が平均で 70mS/m を下回る地点（O, S）がある一方、井戸内の地下水はほぼ淡水であるが、揚水した地下水の EC が 70mS/m を超える地点（R）が見られ、地下水の回復度は一概には判定しにくい。調査区域南部は海岸から後背丘陵地までの距離が比較的小さく、地下水塩水化からの回復は早いと予想されたが、地点ごとのばらつきが大きかった。

全体的な傾向としては、内陸側の地点ほど揚水した地下水の EC が低くなる傾向にあるが、地点毎のばらつきも大きく、地下水の利用にあたっては、揚水試験による EC の確認が必要であると考えられた。

図8にパッカー付き揚水装置を用いず揚水を行ったときの地下水の EC と、パッカー深度を最適化させたときの地下水の EC の比較を平面図で示す。ここで最適化とは、各地点で淡水または比較的 EC が低い地下水を揚水できる最も深い深度にパッカーを設置することを示す。最適化深度を求める理由は、パッカー深度を浅くするほど揚水する地下水の EC は低くなるが、水位低下も大きくなって単位時間あたりの揚水量が減少するためである。図8（右）

表1 揚水試験結果

孔名	P	I	①		②		③		P	I	④		P	I	⑤		⑤Pなし		
			V	EC	V	EC	V	EC			V	EC			V	EC	V	EC	
A	7	3	10	181	10	159	10	172	5	3	7	70	6	5	14	83	5	15	382
B	10	9	8	102	8	93	8	92	8	4	5	63	8.5	7.5	5	68	8	10	190
C	10	9	1	77	2	185	2	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	7	3	10	164	9	139	2	130	5	3	2	89	7	6	14	109	6	14	126
E	5	3	10	87	10	78	10	67	3	2	1	70	4.5	3.5	15	191	4	15	958
F	7	5	9	48	9	47	9	44	5	5	3	41	7	6	15	39	6	15	45
G	5.5	3	10	31	10	33	10	26	4	3	8	16	5.5	4.5	14	35	5	14	110
H	7	3	1	115	10	151	9	143	5	3	10	137	5	3	10	137	4	15	136
I	7	3	-	-	5	31	5	32	5	3	8	32	7.5	6.5	12	31	7	12	30
J	7	3	10	57	9	54	10	54	5	3	9	40	6	5	15	46	5	15	56
K	4*	3*	10	46	5	38	3	33	4	3	4	36	6	5	14	92	5	10	353
L	7	3	10	81	10	85	10	96	5	3	10	112	5	4	14	136	4	14	152
M	7	3	9	65	9	62	9	58	5	3	9	37	-	-	-	-	-	-	-
N	7	3	10	76	10	104	10	104	5	3	9	164	5.5	4.5	14	125	5	14	135
O	7	3	-	-	10	55	10	83	-	-	-	-	5	4	16	18	4	16	126
P	7	3	10	80	10	99	10	71	5	3	4	52	6	5	15	62	5	15	100
Q	7	3	2	28	4	26	2	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R	7	3	10	168	10	169	10	148	5	3	9	107	5	4	15	92	4	15	88
S	7	3	10	56	10	47	10	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

EC欄の区分： <70mS/m 70~200mS/m >200mS/m

①～⑤:試験番号, P:パッカー設置深度(m), I:取水深度, V:揚水量(L/min), EC:単位 mS/m, *①のみそれぞれ 5,4m

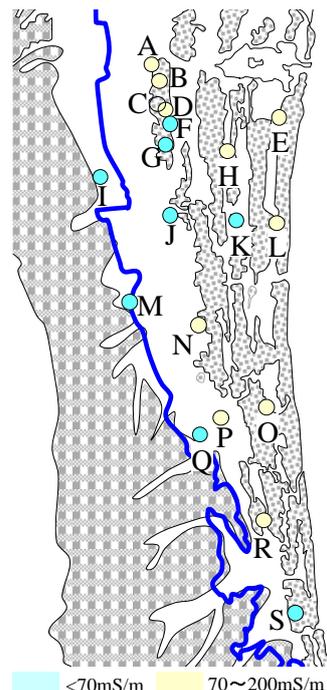


図7 揚水した地下水の EC (①～③平均, 凡例は図4と同じ)

には、それぞれの井戸で求めた最適パッカー深度を併せて示す。

パッカーなし（井戸深度 10～15m）での揚水では、調査地北東部で地下水の EC が 200mS/m を超えており、淡水が得られる領域も一部である。これに対してパッカーありの揚水では、地下水の EC が 200mS/m を超える地点はなく、淡水が得られる領域も広がっている。パッカー付き揚水装置を用いた揚水は、パッカー深度と等しい深さの井戸での揚水と同等の結果が得られると考えられるため、本調査地においては、井戸深度を 5～6m 程度とすれば、津波により地下水が塩水化した地域でも 200mS/m 以下の地下水が得られ、一部では淡水の利用も可能であると考えられる。

(2) 二重揚水試験

二重揚水試験は A, E, K, L, N, O 地点で実施した。

図 9 に、パッカー下部の EC が比較的高かった A, E, L 地点における二重揚水試験結果を示す。図中上部に記載されているデータはパッカー上部から揚水した地下水の EC、下部に記載されているデータはパッカー下部から揚水された地下水の EC を示す。パッカー上部および下部から揚水した地下水の EC は揚水開始 5 分後からそれぞれほぼ安定し、その後両者の EC はほぼ一定値を保っていた。この傾向は二重揚水を行った 6 か所の井戸すべてで同様であった。またその他の水質指標についても同じ傾向が見られた。これらの結果は、本装置によって井戸内の 2 深度の地下水が混合することなく揚水できることを示しており、2 深度から同時に揚水することにより、パッカー上部の地下水の塩水化が抑止されたと言えることができる。一部の観測井戸では、パッカー下部の揚水口の深度を変えて複数回試験を行ったが、揚水した地下水の EC に差は見られなかった。このことから、パッカー下部からは、取水口の位置に関わらず、パッカー下端から一定区間の地下水を平均的に揚水しているものと考えられた。

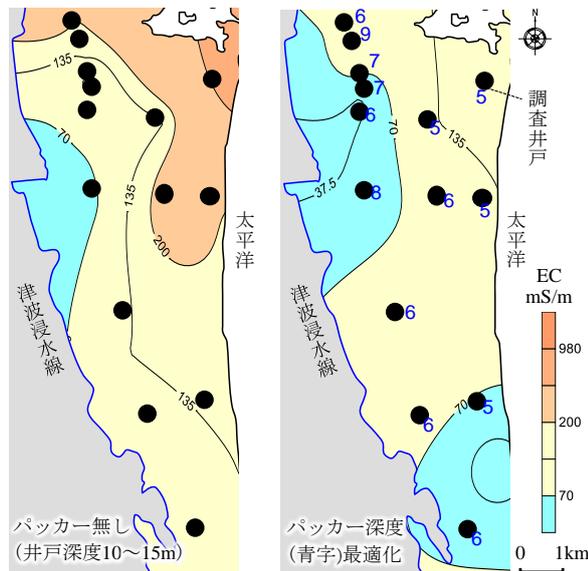


図 8 パッカーなし揚水(左)と、パッカー深度を最適化した揚水(右)による地下水の EC 比較

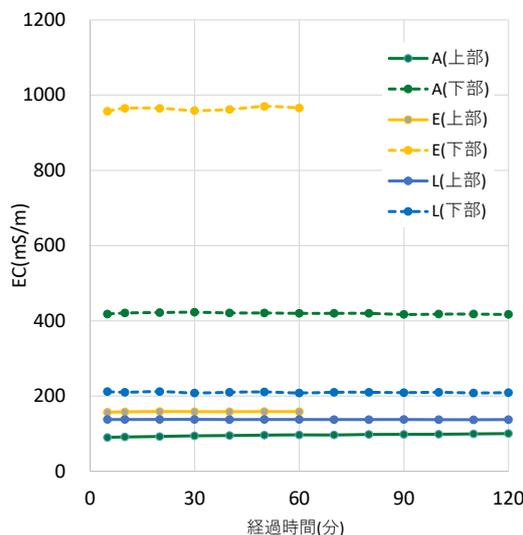


図 9 二重揚水により揚水した地下水の EC (地点番号は図 9 と同じ)

<引用文献>

- ① 細谷裕士、森 一司、中里裕臣、東日本大震災後の緊急農業用地下水調査、農業農村工学会誌、80(7)、2012、547-550
- ② 石田 聡、白旗克志、土原健雄、吉本周平、帯水層内の水質混合を抑止する単孔式二重揚水装置の作製と取水試験、農研機構研究報告 農村工学研究部門、(1)、2017、11-17
- ③ 石田 聡、白旗克志、土原健雄、地下水の淡水利用判定方法、判定装置、および地下水の淡水利用揚水装置、特許第 6472148 号、2019-a
- ④ 石田 聡、白旗克志、土原健雄、吉本周平、地下水揚水システムおよびそのシステムを用いた揚水方法、特許第 6488101 号、2019-b
- ⑤ 石田 聡、白旗克志、土原健雄、吉本周平、地下水揚水システムおよびそのシステムを用いた揚水方法、特許第 6529201 号、2019-c
- ⑥ 森 一司、紺野道昭、平山利晶、宮城県亶理郡における地下水塩水化の現状と予測、日本応用地質学会東北支部第 23 回研究発表会、2015
- ⑦ Presley K. Todd、Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2005-5098、2005、1-40
- ⑧ 東北農政局、海岸地域における地下水調査「東北地区」(H23～H26) 調査報告書、2015、19-20
- ⑨ Zack, A. and Candelario R. M., A Hydraulic Technique For Designing Scavenger-Production Well Couples To Withdraw Freshwater From Aquifers Containing Saline Water, Final Technical Report To U.S. Department Of The Interior Washington, D.C. 20240、1984、1-50

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 石田 聡	4. 巻 843
2. 論文標題 沿岸域における淡水地下水利用深度の調査手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農村振興	6. 最初と最後の頁 24,25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石田 聡
2. 発表標題 沿岸域における淡水地下水利用深度の調査手法
3. 学会等名 令和元年度実用新技術講習会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田 聡, 白旗克志, 土原健雄, 紺野道昭, 中里裕臣
2. 発表標題 パッカー付き揚水装置を用いた、津波によって塩水化した地下水の回復状況調査
3. 学会等名 平成30年度日本応用地質学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田 聡, 白旗克志, 土原健雄, 紺野道昭, 中里裕臣
2. 発表標題 仙台平野南部における地下水の塩水化からの回復状況調査
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Ishida , Katsushi Shirahata , Takeo Tsuchihara , Konno Michiaki
2. 発表標題 Field Survey on recovery situation from groundwater salinization that was brought by the tsunami of the Great East Japan Earthquake using a pumping device with packing
3. 学会等名 46th IAH Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

沿岸域における淡水地下水利用深度の調査手法 http://www.naro.affrc.go.jp/org/nkk/jituyo/all/pdf/02-01-08.pdf
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------