

宮古島と来間島における湧水と井戸水の標高 及び湧水量と硝酸性窒素濃度の関係

渡久山 章 (那覇市首里石嶺町1—59-6)

はじめに

宮古島の地下水が硝酸性窒素によって汚染されてきていることが新聞で報道された(1988年5月)¹⁾。それによると、宮古島で水道水として最も多く使われている白川田湧水の硝酸性窒素濃度(以下では窒素濃度又はNO₃-N濃度と記す)が1977年には3.3 mg/L、1982年には4.5 mg/L、1987年には6.8 mg/Lと年毎に増加しているということであった。

水道水として使える窒素濃度の基準は10 mg/L²⁾なので、報道時のまま増え続けると、何年後かには使えなくなるのではないかと危惧された。

それで当時の平良市、城辺町、下地町、上野村、宮古島上水道企業団は1988年6月に宮古島地下水水質保全対策協議会(以下では対策協議会と記す)を立ち上げて、この問題の解決に当たることにした。

対策協議会はさっそく1989年4月から調査を開始した。それは地上環境、水質などを詳しく調べ、地下水にNO₃-N濃度が増加した要因として(1)甘しょからサトウキビへという作物品種の変化による化学肥料使用量の増加、(2)馬・豚・鶏など従来きゅう肥や堆肥を供給していた家畜類の減少によって有機肥料が減少し、やはり化学肥料が増加したことが主であるとした³⁾。

それから2年後、(財)沖縄県公衆衛生協会は、22の地下水流域それぞれについて、推定耕地面積、人口、主要家畜(牛、豚、鶏)頭数を調べ、原単位と負荷率(流域に投入された窒素の何割が地下水に浸透していくかという値)を基に推定窒素濃度を求めた。その上で、推定窒素濃度

は肥料、家畜、人間それぞれによって何割が供給されているかという寄与率も求めた。それによると、肥料、家畜、人間によってそれぞれ69.1、19.4、11.6%が供給されていると推定した⁴⁾。すなわち宮古島全22流域合計で、地下水中の窒素は肥料と家畜由来を合わせると90%近くになるということであった。肥料と家畜由来の合計量がいかにか多かがわかる。なお参考文献3)では家畜類(馬・豚・鶏)の減少が指摘されたが、本論文⁴⁾のようにNO₃-Nを供給している起源体の寄与率を求め、牛の頭数を考慮すると家畜由来も多いことがわかる。このことは、家畜(特に牛)糞尿を利用することによって、化学肥料を減少させ、地下水のNO₃-N濃度を減少させるという考えを導くことにつながる⁵⁾。

それから1年後長田は、宮古島全島について原単位と仮定した負荷率などを基に、概略としながらも地下水への負荷量を推定し、さらに寄与率を求めた。その結果、農地への施肥が54%、畜産排水が35%、生活排水が11%を得た。この結果から宮古島の地下水に対して農地への施肥がかなり大きな窒素負荷を与えていると推定した⁶⁾。

それから3年後、中西らは参考文献4)と6)で報告されたのと似た手法を用いて(ただし、負荷率は独自の値を用いた)参考文献3)に挙げられた22各流域の面積、そこの土地利用状況(耕地面積、人口、牛・豚・鶏の数)も利用し、化学肥料、畜産廃棄物、生活排水、及び自然土壌由来の窒素量を求め、流域毎にNO₃-Nを供給している起源体の割合を求めた。その結果、宮古島全島としては、年間で約1,109Mg(1,109×10⁶)

g)の窒素が地下浸透し、このうちの40.4%が化学肥料に、16.4%が畜産廃棄物に、27.0%が家庭排水に、16.3%が土壌窒素に由来すると結論した⁷⁾。この結果からは宮古島全島の地下水に含まれているNO₃-Nの56.8%は化学肥料と畜産廃棄物に由来しているといえる。参考文献4)と6)では中西ら⁷⁾が考えた自然土壌由来の窒素量を考慮してなかったことと用いた負荷率が異なるため、各起源体の寄与率に違いが生じている。

なお、中西らの資料をみると、生活排水由来の窒素量としては、全島で299,231 kgがあげられ、そのうち平良流域(宮古島では人口密度が最も高い流域)で出されている量が145,086 kgで約50%を占めている⁷⁾。従って平良流域を除くと他の流域における窒素供給源の割合は、中西らの値よりも生活排水以外の起源体の割合が増すことになる。

その後、中西らはさらに研究を進めた。それは負荷率を求めるのに、重回帰分析法を用いるものであった。取り上げた年度は1989年と1992年であった。その結果、宮古島の地下水に含まれているNO₃-Nは肥料、家畜ふん尿、生活排水、自然環境由来の寄与率が1989年度にはそれぞれ56.5、18.6、8.4および17.0%であった。1992年度には、それぞれ44.4、26.2、7.9および21.5%であった⁸⁾。この結果から肥料と家畜ふん尿の合計は1989年度で75%、1992年度で71%であり、これら両者から供給されるNO₃-N量が地下水中NO₃-N濃度の70%以上を占めているといえる。

さらに中西らは、宮古島における水道用3水源の流域(白川田、東添道、福里)について、4起源体の地下水中NO₃-N濃度に対する寄与率を求めた。その結果、3流域を平均して肥料が49.2%、畜産ふん尿が22.8%で両者を合わせると72%であった⁹⁾。

以上のことを踏まえると、ある場所の湧水や

井戸水などに含まれているNO₃-N濃度は、その地下水を供給している場所の土地利用状態と深く関係していることがわかる。そして土地利用状態を考えると、地下水を供給している土地が高所にあるか低地にあるかによって違いがあることが予測される。

すなわち、標高が高い所にある湧水や井戸水は集水域が狭く、NO₃-N濃度も低く、対して湧水や井戸水が標高の低い所にある場合は、畑地や家畜飼育場や居住地域の面積も広く、窒素濃度も高濃度になるのではないかということである。それで、宮古島と来間島(来間ガー1ヵ所だけ)における各湧水や井戸水の標高とNO₃-N濃度の関係を調べることにした。

1. 標高とNO₃-N濃度の関係

1-1. 使用した資料

使用したのは、2014年発行の宮古島地下水水質保全調査報告書(以下調査報告書と記す)に上げられた標高と2012年度の窒素濃度である¹⁰⁾。2012年度の濃度を取り上げたのは、調査報告書にあげられている中では最近年だからである。(同書にはその前年2011年度の濃度も上げられているが、各湧水・井戸水の濃度はほとんど同じであった。カカラシャガーと按司の泉に違いがあるが、それは2011年度の値に異常に高濃度の月があるためで、それらを除くと2012年度の濃度に近くなる。)

なお2014年度発行の調査報告書¹⁰⁾には地盤標高として、来間ガーを含めて39地点が上げられ(窒素濃度としては48地点)ているが、本報ではこれらの中から22地点を上げた(表1)。他の地点を削除した理由は、(1)溶存酸素濃度が低く、明らかに脱窒が起こっていると思われる地点、(2)窒素濃度を測定した月が4ヵ月以下の地点、(3)洞穴泉で水が流れている標高が不明である地点、(4)井戸の深さが地盤標高より深い地

点や井戸の深さが不明な井戸、(5)窒素濃度の標準偏差が1.09以上である地点、(6)地表水が溜まっていると思われる地点、(7)市街地の地点などである。

なお取り上げた22地点を図1に示した。

本報では表1を基に図2を作成した。

1-2. 結果

図2は予想した通り、標高が高いほどNO₃-N濃度は低くなることを示している。標高が50m以上では試料数が少ないが、図2の曲線は市街地を除いた宮古島の湧水・井戸水の標高とNO₃-N濃度の平均的な関係を示していると思われる。

按司の泉は標高が最も高い所にあり、水を供給している地(帯水層)には、人が活動できる面積は狭いと思われる。前井(D井戸)も割合高い所にあつて、南側と西側には畑地も見えるが、それらの影響は小さいと思われる。ツガ井について中西らは、自然土壌以外の影響を受けてないと考えられるとしている⁷⁾。これら3地点の湧水・井戸水については、水を供給している地域において人が活動している場所(畑地、家畜飼育場、居住地など)が狭く、その影響が小さいと考えられる。

表1 宮古島と来間島における湧水と井戸水の標高と硝酸性窒素濃度(2012年度)¹⁾

湧水・井戸水の番号	湧水・井戸水の名称	標高(m) ²⁾	硝酸性窒素濃度(mg/L) ³⁾	形態 ⁴⁾
1	西原農業井戸	2	5.2	管井戸
2	ツガ井	51	2.4	湧水
3	砂川92S44	34	5.4	管井戸
4	白川田水源	18	4.6	湧水
5	C井戸	36	3.6	開放井戸
6	H17B-1	30	3.3	ボーリング孔
7	18B-1	31	4.2	ボーリング孔
8	咲田川	5	6.8	湧水
9	与那覇の井戸	1	6.5	開放井戸
10	前井(D井戸)	65	1.8	開放井戸
11	ムイガー	5	5.8	湧水
12	97-F-31	36	2.1	ボーリング孔
13	加治道水源	20	5.2	管井戸
14	皆福地下ダム	21	5.6	ボーリング孔
15	福嶺小南(B-6)	24	7.1	ボーリング孔
16	保良ガー	35	5.7	湧水
17	アブガー	25	4.8	湧水
18	カカラシャガー	10	0.33	湧水
19	山川湧水(ウブカー)	40	5.4	湧水
20	按司の泉(アズヌガー)	115	0.14	湧水
21	新城湧水(フィキヤー)	50	5.6	湧水
22	来間ガー	5	4.3	湧水

- 1) 標高・硝酸性窒素濃度・形態共に宮古島市地下水水質保全調査報告(宮古島市、2014年)に依った。
- 2) 井戸水の標高は地盤標高の値から井戸深さの値を引いて水が採れる所の標高で示した。
- 3) 硝酸性窒素濃度は2012年5月から翌年3月までの間に10回(10ヵ月)測定された値の平均値である。ただ試料によっては、8ヵ月(カカラシャガー)や9ヵ月(按司の泉)しか測定されていないものもある。なおここには月測定値の標準偏差が1.09以下の試料を挙げた。
- 4) 形態の定義:「管井戸」 縦井戸の一種でケーシングを有するもの。「湧水」 地下水が地上に湧出したもの。「開放井戸」 縦井戸の一種でケーシングを有しないもの。

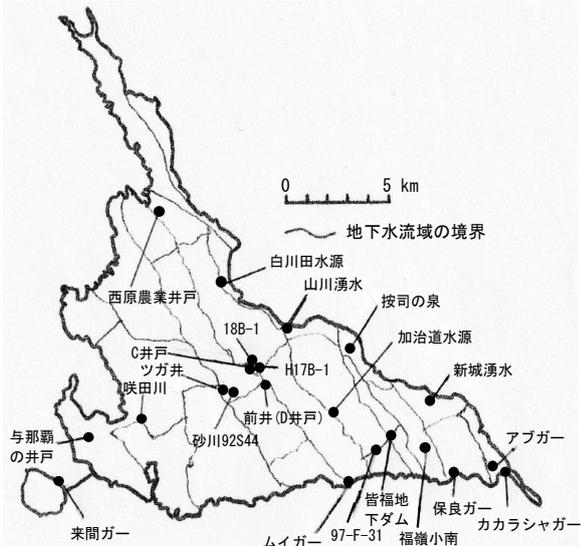


図1 本報に取り上げた湧水と井戸水の位置(原図:平成21年度宮古島地下水水質保全調査報告書)

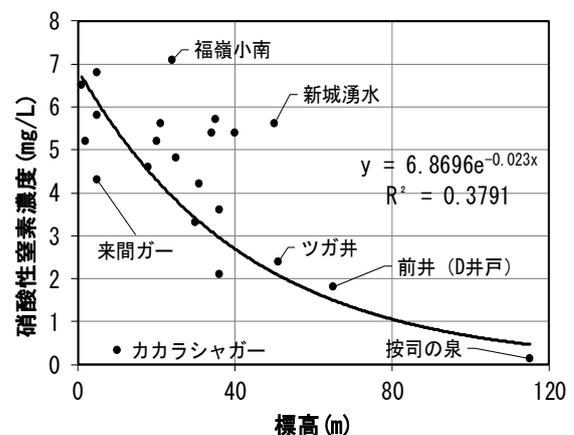


図2 宮古島と来間島における湧水と井戸水の標高と硝酸性窒素濃度の関係

次に標高が50 mより低い所での湧水や井戸水には平均的とした曲線より $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上の方にあるもの(特に新城湧水と福嶺小南)と、逆に低い方にあるもの(カカラシャガーと来間ガー)がある。曲線より上の方にある地下水については、地下水の量に対する $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量が多く、曲線より下の方にある湧水には負荷量が少ないといえる。

その理由として負荷量が多い場合は、(1)水を供給している地域における人の活動場の面積が平均より広いか、(2)面積は平均より広くなくても負荷量が多いか、(3)面積も広いし、負荷量も多いことが考えられる。これらのうち、これまでの研究結果^{3~9)}から、水を供給している地域の中で、人が活動している場の面積の広さがまず考えられる。

曲線より下の方にあるカカラシャガーの場合は、東平安名岬の付け根にあって、現場を見ると地形の制約によって畑地など人が活動できる場所はほとんどなく、そのため標高は低くても $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は低いと思われる。

来間ガーの場合は、水量に対する負荷量が平均よりも少ない理由としては、上記負荷量が多い場合の逆になる。これら3つの理由の中で、まずは水を供給している地域の中で人が活動している場の面積が狭いことが考えられる。

このように、標高と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係を調べることによって、それらの平均的な状態にある湧水や井戸水がわかり、さらに平均的な状態からのズレの理由を考えることによって、1つ1つの湧水や井戸水の状況を考えることができる。なお図2の曲線の R^2 値(決定係数)は0.379であるが、この図からカカラシャガーを除いて作図した曲線の式は $y=8.987e^{-0.028x}$ (R^2 は0.725)になって、標高と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の相関度は高くなることも記しておきたい。

2. 湧水量と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係

前項標高と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係では標高は低いのに $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低い湧水(カカラシャガーと来間ガー)があった。それで湧水量と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係を調べることにした。

2-1. 湧水量の測定用具と方法

2-1-1. 湧水量の多い所(山川湧水と新城湧水)

用具：50 Lのポリバケツ・10 Lのポリバケツ
測定方法と日湧水量の決定：山川湧水は50 Lのポリバケツを用いて45 L溜まるまでの時間を測った。それを何度かくり返した。その時間は7秒間であった。これを基に日湧水量(555 m^3)を決定した。新城湧水は3カ所の湧水口で測定した。用いたのは10 Lのポリバケツで、3カ所それぞれで、7 Lまで溜まる時間を測った。測定は4~5回くり返し、それぞれの平均時間を基にそれぞれの日湧水量を求め、最後に3カ所を合計して全体の日湧水量(144 m^3)を決定した。

2-1-2. 湧水量の少ない所(ツガ井、カカラシャガー、按司の泉)

用具：台ばかりとタオル

測定方法：前もって重量を測定しておいたタオルを湧水口に置き、ある時間間隔(秒単位)後タオルを引き上げて重さを測った。この時、当然であるが、湧水がタオルを越流しない時間間隔でタオルを引き上げた。そして、水を含ませた後のタオルの重量から含ませる前のタオルの重量を引いて湧水量を求めた。

湧水量決定：場所によって、1~5回の測定を行い、複数回測定の場合は、それらの平均値で決めた。

湧水量測定は2015年2月26日に行った。

なお湧水量については、すでに報告された値もあるので、それらも利用することにした。今回の測定値と既報の値を表2に上げ、表2を基に図3を作成した。湧水量は測定日により、測定方法によっても異なる値が出ることが考えら

れる。例えば、新城湧水では今回と J.F. ミンク¹¹⁾による値と田代が上げた値(1998年5月測定)¹²⁾には2倍もの違いがあった。図3にはこれら両値も上げてある。

2-2. 結果

表2と図3から湧水量が150 m³/日(新城湧水)を超えると、NO₃-N濃度は高くなり、5 mg/L前後に達することがわかる。湧水量が150 m³/日を越す地域では、これまでの研究^{3~9)}から、湧水量がそれ以下の地域に比べて、その湧水に水を供給している全地域の中で人が活動している面積(畑地、家畜飼育場、居住地など)の割合が高くなっていることがまず考えられる。

図3には大まかに全湧水の平均的な値を表すライン(曲線)も示した。このラインを基に1つ1つの湧水のNO₃-N濃度からそれらの湧水に水を供給している地域の状態を推定した。

例えば新城湧水である。この湧水は標高とNO₃-N濃度の項でも述べたが、標高の高い割にはNO₃-N濃度が高く、この湧水に水を供給している地域の中で人が活動している場の面積の割合が宮古島における平均的な値よりも高いと思われる。なお図3からは日湧水量が150 m³(新城湧水)から1,500 m³(保良ガー)まで10倍違っても、NO₃-N濃度はほとんど同じ5.5 mg/L程である。このことはこれら湧水地に水を供給している地域における人の活動量が単位面積当たりほぼ同程度であることを示している。

次に保良ガーの2倍の湧水量を持っている咲田川のことである。咲田川のNO₃-N濃度は6.8 mg/Lで保良ガーに比べて高濃度である。その理由としては(1)咲田川に水を供給している地域の全面積の中で人が活動している場の面積割合が保良ガーなどより高いか、(2)人が活動している場の面積割合は高くなくても全体としての負荷量が多いか、(3)人が活動している面積割合も高く、そこにおけるNO₃-N負荷量も多いなどが

考えられる。これらの中で、これまでの研究結果^{3~9)}からはまず人が活動している面積割合の高さが考えられる。

咲田川の高濃度とは異なって日湧水量が15,000 m³を有する白川田¹³⁾のNO₃-N濃度は4.6 mg/Lで咲田川に比べると2 mg/Lも低くなっている。この理由としては、まず中西ら⁹⁾が指摘した白川田流域における森林率の高さが考えられる。森林率が高いと人の活動場の割合が低くなるし、さらに森林自体が窒素を吸収するのでNO₃-N濃度は低くなると思える。

表2 宮古島における湧水の湧水量と硝酸性窒素濃度

湧水番号 ¹⁾	湧水名	湧水量 (m ³ /日)				硝酸性窒素濃度 (mg/L) ¹⁾
		今回 ²⁾	古川 ³⁾	ミンク ⁴⁾	田代 ⁵⁾	
2	ツガ井	6.9				2.4
4	白川田湧水		15,000			4.6
8	咲田川				3,000	6.8
16	保良ガー			1,500	1,200	5.7
18	カカラシャガー	0.72				0.33
19	山川湧水	555				5.4
20	按司の泉	3.1				0.14
21	新城湧水	144		150	300	5.6

- 1) 湧水番号と硝酸性窒素濃度は表1と同じ。
- 2) 今回の測定は2015年2月26日になされた。
- 3) 古川博恭(1981)、8-11 宮古島、『九州・沖縄の地下水』、九州大学出版会、298頁。
- 4) ジョン・F・ミンク(1967)、「日本列島宮古島の水資源について」宮古島水道誌、宮古島水道組合、199頁。
- 5) 田代豊(2002)、2. 地下水の量に関することから、1998年5月実測値、『サンゴの島の地下水保全』、中西康博編著、宮古島地下水水質保全対策協議会・宮古広域圏事務組合・宮古島水道企業団、160頁。

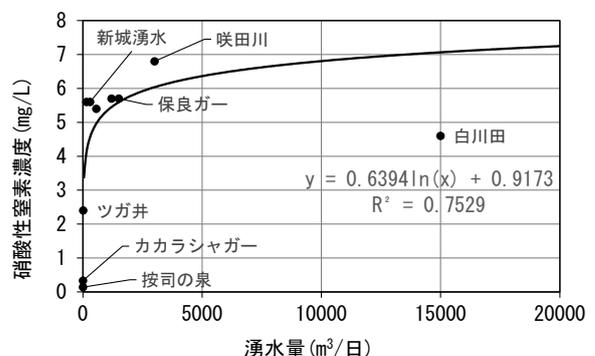


図3 宮古島における湧水の湧水量と硝酸性窒素濃度の関係

湧水量の少ないカカラシャガーについては前記したように東平安名岬の付け根にあって集水域の狭さが考えられる。按司の泉も前記したように標高が最も高い所において、やはり集水域の狭さが考えられる。ツガ井は湧水量が 7 m³/日以下なので、集水域は狭いと思われる。これら3湧水については、地形の制約があって、人が活動できる場所が限られ、NO₃-N 濃度は低くなっていると言える。

来間ガーの湧水量は測定してないが、標高は低いのに NO₃-N 濃度が低いことから集水域は広くないと思われる。ただし、湧水量は今後測定しなければならない。

3. まとめ

宮古島の地下水に NO₃-N 濃度が高くなっていることについて、この30年間で多くの研究が報告されている。それらを見ると湧水や地下水が得られる場所の標高と NO₃-N 濃度の間には何らかの関係があるのではないかと思えた。それですでにそのことを調べることにした。

その結果(1)宮古島の標高と NO₃-N 濃度間に平均的なライン(曲線)を引くことができた。それは予測した通り、標高が高いほど NO₃-N 濃度は低いということであった。(2)ところが標高が 50 m より低くなると、平均的な曲線よりも NO₃-N 濃度が高い湧水や井戸水がある半面、逆に NO₃-N 濃度が低い湧水も見られた。本報ではそれら平均的な曲線からズレている1つ1つの湧水や井戸水についてこれまでの研究結果を参考に考えられる理由を上げた。

次に標高は低くても NO₃-N 濃度が低い湧水があるので、湧水量を測定して NO₃-N 濃度との関係を調べた。その結果(1)標高は低くても湧水量が少ないと、NO₃-N 濃度は低いことが見えた。この場合は地形の制約があって、帯水層の面積が小さく人が活動できる場が狭いためと思われ

る。(2)日湧水量が 150 m³ を越す湧水については湧水量と NO₃-N 濃度間に平均的な値として引いたラインよりも NO₃-N 濃度が高い湧水、低い湧水それぞれについてこれまでの研究結果を参考に考えられる理由を上げた。

謝辞

湧水量測定に際しては現場を案内され、測定を手伝ってくれた 2015 年当時宮古島市環境衛生課に勤務しておられた奥平富男さん、仲間寿敬さんにお礼申し上げます。なお本報における図は沖縄県衛生環境研究所の岩崎綾さんに作ってもらいました。岩崎さんは本文に図表を貼り付けてくれました。記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 沖縄タイムス、1988年5月14日号、夕刊、「宮古、地下水の水質悪化」、沖縄タイムス社。
- 2) 高橋裕・綿抜邦彦・久保田昌治ら、1997、「付表 8 水道水質基準」『水の百科事典』、丸善、P. 790。
- 3) 宮古島地下水水質保全対策協議会、1990、『宮古島地下水水質保全調査報告』、224PP。
- 4) (財) 沖縄県公衆衛生協会、1992、『宮古島地下水水質保全調査報告書』、宮古広域圏事務組合・宮古島地下水水質保全対策協議会、103PP。
- 5) 中西康博、2012、「サンゴの島々における水環境」『琉球列島の環境問題』沖縄大学地域研究所「復帰」40年、琉球列島の環境問題と持続可能性>共同研究班、41-49。
- 6) 長田実也、1993、「宮古島の地下水水質現況と水質保全の取組み」『農業土木学会誌』、農業土木学会、第61巻、第4号、331-335。
- 7) 中西康博・山本洋司、朴光来・加藤茂・熊沢喜久雄、1995、「 $\delta^{15}\text{N}$ 値利用による地下水硝酸起

- 源推定法の考案と検証」『日本土壌肥科学雑誌』、日本土壌肥料学会、第66巻、第5号、544-551.
- 8) 中西康博・高平兼司・下地邦輝、2001、「地下水窒素汚染における起源別窒素負荷率の重回帰分析法による推定」『日本土壌肥科学雑誌』、日本土壌肥料学会、第72巻、第3号、365-371.
- 9) 中西康博・池間昌克、2001、「沖縄県宮古島の水道水源窒素の由来と森林による窒素除去能の推定」『日本土壌肥科学雑誌』、日本土壌肥料学会、第72巻、第3号、372-378.
- 10) 宮古島市、2014、『平成24年度 宮古島地下水水質保全調査報告書』、156PP. (付資料編32PP.)
- 11) ジョン・F・ミンク、1967、「日本列島宮古島の水資源について」『宮古島水道誌』、宮古島上水道組合、P.199.
- 12) 田代豊、2002、「地下水の量に関することがら」『中西康博編著、サンゴの島の地下水保全』、宮古島地下水水質保全対策協議会・宮古広域圏事務組合・宮古島上水道企業団、P.160.
- 13) 古川博恭、1981、「8-11 宮古島」『九州・沖縄の地下水』(財)九州大学出版会、P.295.

