湧水の溶存窒素ガス含有量 (魚類のガス病誘発原因としての窒素ガス過飽和溶存について)

松江吉行・江草周三*・佐伯有常
(東京大学農学部 *現在は広島大学水畜産学部)

On Nitrogen-Gas Contents Dissolved in Flowing Water
of Artesian Wells and Springs
(Relating to High Supersaturation Inducing the So-Called
"Gas-Disease" upon Fishes)
Yoshiyuki MATSUE, Shuzo EGUSA and Aritsune SAEKI

Many springs and flowing wells are distributed in northern vicinity of Odawara City, Kanagawa Prefecture. Throughout the four seasons, clear ground water is continually flowing out of every well and spring, supplying for domestic and industrial purpose.

Although the waters of this district are considered to be of good quality in their chemical properties, curious to say, fishes can hardly be kept alive in these waters. Fishes, when put into these waters just flowed out, soon fall in an unhealthy condition and can not survive long.

Gas contents were examined. Sufficient quantity of oxygen for the life of fish was proved to be dissolved in these waters, but nitrogen gas contents indicated abnormally high supersaturations.

After some experiments, we reached to the conclusion that the death of fishes in these waters must have been brought about by so-called "gas-disease" caused by the abnormally high supersaturation of the nitrogen dissolved in the ground water. Experiments also teach us that the supersaturation values of the nitrogen above 130 % in the water are fatal to fishes.

The gas-disease of fish is considered pathologically to be similar to the caisson-disease and the diver-disease of man and give us many interesting and important problems for scientific investigation both from theoretical and applied point of view. EGUSA, one of the authors, is now studying the subjects and the results of which will be reported in near future.

In this report we will confine ourselves in the quantitative determination of the nitrogen gas in the flowing water of the district. The summary is as follows:

1.) The flowing water of all of the fifteen artesian wells and two springs we visited and investigated showed the supersaturation of nitrogen gas. The values obtained ranged from 118 to 159 %, but were mostly above 140 % (Fig. 1. and Table 1.).

2.) It was observed that each well and spring has its specific supersaturation values of nitrogen stationary for a long period. The oxygen contents showed greater fluctuations compared with those of nitrogen (Table 3, 4 and 5.).

3.) Two artesian wells, the waters of which were also known to induce the gas-disease upon fishes, were found in other districts and their waters were investigated. Both wells showed very high supersturations of nitrogen (146 and 161 %), but very low values of dissolved oxygen (below 10 %) (Table 2.).

緒 言

神奈川県小田原市北方地域一帯には、広範囲に亘つて被圧地下水が存在し、自然に地下水が湧出している泉が各所にあり、また自噴性掘抜井戸も多数掘られている。良質の地下水が周年豊富に湧出を続けているので、家庭用水や工場用水として使われている。

昭和 15 年頃、ここの豊富な湧水に目をつけ、これを利用してアユ・マス等の養魚を行う計画がたてられたことがある。それは比較的小さいコンクリートの池を造つて、湧水を多量に流通させ、稠密な養魚を行うことによつて生産をあげようというねらいのものであつた。このような計画に基いて、何箇所かで実施にうつされたが、意外にも、何れの場所でも魚の斃死が起り、所期の成果があがらず、結局発展をみるに至らなかった。

著者の一人、松江はその当時依頼を受けて、魚の斃死原因の調査に当たつたが、湧水の無機成分には何の異常もなく極めて良質の水であること（既に精密な分析結果が出されていたので著者自身では改めて行わなかつた）魚はいわゆる“ガス病”または“気泡病”と呼ばれる特有の病的徴候を呈して斃死すること、湧水の溶存ガスの測定を行つたところ、窒素ガスが異常に高い過飽和で溶存していることなどがわかつた。これらの結果から判断して、魚の斃死は湧水中の窒素ガス過飽和溶存に原因する魚のガス病によるものであらうという推定を下した。そして、この推定の正しいことは、その後江草¹⁾によつて実験的に証明された。

したがつて、湧水を充分曝気することによつて、過飽和の溶存窒素ガスを放出さえすれば、養魚用水として用いて何の支障も起らない。養魚を計画した人達も曝気が有効であることには気がついていたので、湧水中には何か有毒ガスが含まれているのではないかという疑いを持つた人もあつた由である。しかし、実際問題としては、上述のような様式の養魚計画であると、流水量が多いことが必要条件となるので、多量の水について簡単な曝気処理で、しかも短時間で過飽和の窒素を充分に放出させることは容易ではない。この曝気法と過飽和溶存窒素ガス逸出速度との関係は複雑であり、ここでは触れないことにする。

水中の窒素ガス過飽和溶存によつて起る魚のガス病は、病理学的には人間の潜水病や航空病と全く等しいものであつて、これに関しては学術上からも応用上からも、いろいろ重要な研究問題があるが、江草は現在もひき続いてこの研究を行つており、詳細な結果の報告は近くなされる予定である。

ここでは魚のガス病発症に関連して、昭和 17 年以来われわれが度々同地に出かけて、各所の湧水について溶存窒素ガスの測定を行つた結果だけをとりまとめて報告する。

溶存窒素ガス測定法

溶存窒素ガスの測定は WINKLER の原法に菅原²⁾が改良を加えた方法によつて湧水現場で行つた。本法の原理は試水に大理石粒と塩酸とを加え、発生する炭酸ガスの気泡中に水中の溶存ガスを吸収させる。これをアルカリ液を通して炭酸ガスを溶かし、先ず窒素と酸素との和の容積を読み、次いでピロガロール液に酸素を吸収させ、残つた気体の容積を測定して窒素とするものである。この中には勿論アルゴン等も含まれる理である。

本測定法によつて溶存窒素ガスを決定する場合、特に対象が湧水などである時には次の二つの懸念が抱かれる。その一つは窒素とアルゴンとが果して空気中におけると等しい割合で含まれているかどうかということであり、他の一つはこれら 2 種の他に何か別の気体が混じて含まれているようなことがないかということである。ところが、その後名古屋大学の菅原教授が同地に赴いて、湧水中のアルゴン含有量を測定された結果によると、窒素ガスに対するアルゴンの比率は、空気中のそれと変わらない由であるから第一の懸念は解消した（同教授の談による）。

しかし、第二の懸念については簡単には確められない。ここでは一応窒素、アルゴンのみであると仮定して WINKLER³⁾の表によつてその飽和度の算出を行つた。

調 査 結 果

(1) 湧水の溶存窒素ガス含有量の場所による相違

調査はなるべく泉や掘抜井戸等が分布している全域に跨るように、いくつかの代表的な湧水を選んだが、合計 17 地点 (Fig. 1) で行つた溶存窒素ガス含有量の測定結果が Table 1 である。溶存酸素の値も同時に得られるから、この結果もともに掲げた。

Fig. 1. Map of northern vicinity of Odawara City, Kanagawa Prefecture, showing the positions of artesian wells and springs investigated.

ないということである。もつとも、地点 1 の湧水は、118% というわれわれが調査した中では最も溶存窒素の過飽和度の低い値であるから、湧水直後の水でも飼育水として用いて差し支えないものである。

溶存窒素が過飽和であるために、魚を飼うとガス病を起すという湧水は、小田原附近の地域に限られたものではなく、各地に少なからずあるもののようである。われわれはこれまでに、茨城県下及び埼玉県下で同様の 2 例を発見することができた。一は土浦市内の、他は加須町の何れも自噴性掘抜井戸の湧水である。これらの湧水について溶存窒素を測定した結果が Table 2 で、前者は 160%, 後者は 146% という高い飽和度である。しかし、両者とも溶存酸素は 10% 以下の低い飽和度で、この点是小田原附近の湧水とは性質を異にしている。このように、溶存酸素の値が小さいことは、むしろ地下水の一般的性状であつて、小田

これからわかるように、湧水の溶存窒素含有量は、地点によつてかなり相違があるが、何れも 120% を超える過飽和値で、しかも大部分は 140% 以上であり、特に著しいものは 160% に達する高値である。

江草りがコイ、フナ、ウナギ等を用いて行つた実験によると、水中の溶存窒素が 130% の過飽和値を超えると、魚は短時日中に斃れるようなガス病を起すことが知られている。よつて、同地域の湧水は、そのほとんど総てが、湧出直後の水では魚が飼えないといつてよい。

溶存酸素は一、二の地点で過飽和がみられるだけで他は総てが未飽和であり、最低値は 25% というかなり低い飽和度である。このように溶存酸素の地点による差違は、溶存窒素の場合に比較すると遙かに著しい。しかし、全体としてみた溶存酸素量は、湧水としてはむしろ極めて豊富であるという点で特徴的であり注目に値しよう。

水温は 15~17°C で、僅かではあるけれども湧水の所在位置による違いがある。

さて、小田原北方地域一帯の湧水の溶存窒素含有量は上述のとおりであるが、このような過飽和は何が原因となつて起るのであるのか。これは難問のようである。もちろん、いろいろの推定は下されるけれども、その正しい解答は将来の精密な地下水学的調査に俟たなければならない。

掘抜井戸で、その深さがわかっているものは参考として表中に掲げたがこれをみても井戸の深さと溶存ガス量との間には別に何の関係も認められないようである。

地点 1, 3 及び 12 は前からある養魚場内の湧水である。これら三か所の養魚場では何れも小規模の池中養魚を行つており、池水の補充に湧水を用いている程度であるからガス病の被害は起ら

Table 1. The nitrogen-gas contents dissolved in the flowing water of springs and wells in the northern vicinity of Odawara City, Kanagawa Prefecture.

Position	Date	Kind of spring and well	W. T. (°C)	Dissolved nitrogen		Dissolved oxygen		Depth of well
				(cc/L)	(%)	(cc/L)	(%)	
1.	Aug. 1942	Artesian well	15.1	15.86	117.7	7.95	111.2	18 m.
2.	Oct. '51	Spring in pond (Limnocrene)	15.0	16.68	123.5	7.16	100.8	
3.	Oct. '51	Cliff spring (Rheocrene)	16.2	18.07	136.9	6.88	99.3	
4.	March 9, '43	Artesian well	14.8	19.05	140.5	4.90	68.6	
5.	March 9, '43	do.	15.8	18.95	142.5	5.08	72.7	
6.	Dec. 6, '42	"	15.7	18.08	135.7	5.15	73.6	
7.	" 6, '42	"	16.1	16.90	127.7	5.66	81.4	27 m.
8.	" 6, '42	"	16.2	16.77	127.0	4.83	69.7	
9.	" 6, '42	"	16.9	19.67	151.0	5.46	79.9	
10.	" 6, '42	"	16.2	19.50	147.7	5.47	78.9	
11.	Aug. 3, '42	"	16.0	19.23	145.1	5.09	73.1	32 m.
12.	Feb. 9, '43	"	16.8	20.67	158.5	5.46	79.7	
13.	" 9, '43	"	15.7	18.75	140.8	1.76	25.1	47 m.
14.	March 9, '43	"	16.1	17.26	130.5	3.10	44.6	
15.	Dec. 6, '42	"	16.35	19.89	151.1	3.60	52.1	22 m.
16.	" 6, '42	"	16.35	19.76	150.1	2.14	31.0	31 m.
17.	" 6, '42	"	16.35	19.22	146.0	1.86	26.9	38 m.

Table 2. Two cases of high supersaturation of nitrogen dissolved in the ground-water discovered in other districts.

Locality	Date	W. T. (°C)	Dissolved nitrogen		Dissolved oxygen	
			cc/L	%	cc/L	%
Artesian well in Tsuchiura City, Ibaraki Prefecture.	Feb. 3, 1943	20.5	19.70	161.3	0.35	5.5
	May 22, 1943	21.1	19.60	162.1	0.60	9.3
Artesian well in Kasu City, Saitama Pref.	March 3, 1944	20.8	17.70	145.7	0.40	6.3

Table 3. Fluctuations observed in nitrogen-gas contents dissolved in the flowing water in a short period (observed at the position 12 on April 9, 1943).

Time	W. T. (°C)	Dissolved nitrogen		Dissolved oxygen	
		cc/L	%	cc/L	%
10 h. 30 m.	16.8	19.63	150.4	5.64	82.3
11 h. 30 m.	16.8	19.61	150.3	5.66	82.6
12 h. 30 m.	16.8	19.57	150.0	5.68	82.9
13 h. 30 m.	16.8	19.78	151.6	5.66	82.6
14 h. 30 m.	16.8	19.81	151.8	5.69	83.1
15 h. 30 m.	16.8	19.82	151.9	5.67	82.7
16 h. 30 m.	16.8	19.80	151.7	5.66	82.6

原附近の湧水の値が高いことが却つて例外とみなされよう。

(2). 溶存窒素量の時間的変動

地点 12 の湧水について、数時間の間に 1 時間ごとに行つた 溶存窒素の測定結果が Table 3 である。短時間内ではほとんど変動がない。測定値の上では 0.2 cc/L 程度の僅かな違いが出ているけれども、測定法の誤差を考慮に入ると、この程度の変動は問題とならない。溶存酸素についても同様に変動はない。

次に地点 12 の湧水について年間の変化を調べた結果が Table 4 である。この場合には測定誤差を考慮に入れても、明らかに多少の変動がみられる。しかし、その値は飽和度で数パーセント程度の小さい範囲に過ぎない。溶存酸素についても同じ程度の変動が起つている。しかし、両者の変動の傾向はお互いに全く無関係で関連は認め難い。

更に長期間の変化をみるために、最初の調査を行つてから 10 年近くを経過した後、地点 1, 12 及び 15 の 3 点の湧水について調べた結果が Table 5 である。重複するが、最初の測定値も比較のために同時に掲げてある。

これからわかるように、地点 1 及び 12 では、溶存窒素の飽和度の値で数パーセント増加、地点 15 では 2 % 余りの減少がみれる。この期間中の測定値が欠けているのは遺憾であるが、前述した 1 年間の変動の模様などを合せて考えると、該地域の湧水の溶存窒素は、長期間に亘つて大体定常的な値を持続し、変動が少いとみてよいであろう。

溶存酸素の変動は溶存窒素のそれよりはかなり大きい。また水温は地点 15 で 0.7°C の上昇がみられるが他の 2 点では変化がない。

Table 4. Fluctuations observed in nitrogen-gas contents dissolved in the flowing water in a year (observed at the position 12).

Date	W. T. (°C)	Dissolved nitrogen		Dissolved oxygen	
		cc/L	%	cc/L	%
July 9, 1942	16.7	19.50	148.1	5.25	76.5
Sept. 17, " 42	16.9	19.82	152.1	5.36	78.5
Oct. 30, " 42	16.8	19.80	151.7	5.50	80.3
Dec. 6, " 42	16.8	20.23	155.0	5.37	78.4
Feb. 9, " 43	16.8	20.29	155.5	5.46	79.7
April 9, " 43	16.8	19.81	151.8	5.69	83.1
June 16, " 43	16.8	19.90	152.5	5.34	78.0

Table 5. Fluctuations observed in nitrogen-gas contents dissolved in the flowing water in a long period.

Position	Date	W. T. (°C)	Dissolved nitrogen		Dissolved oxygen	
			cc/L	%	cc/L	%
1.	1942	15.1	15.86	111.7	7.95	111.2
	1951	15.2	16.73	124.3	6.81	96.2
12	1943	16.8	20.69	158.5	5.46	79.7
	1951	16.8	21.04	161.2	6.01	87.7
15	1942	16.35	19.89	151.1	3.60	52.1
	1951	17.1	19.29	148.6	2.61	38.4

結 語

無機成分の点ではたとえ良質の水であつても、窒素ガスが過飽和に溶存していると、魚類棲息上の障害となるという事実は一般にはほとんど知られていない。われわれはこの問題を取扱った文献を探しているが未だ見出すことができないでいる。溶存酸素の異常に高い過飽和によつて魚がガス病を起す事実を指摘した文献が少数見当る程度である。

村上秀二氏はその著書「水の生活科学」の中で次のように記している(220 ページ)。南支仏印国境近くの湧水のある自噴水中に魚を入れると、眼球が飛び出したり、垂直になつて泳いだり、いろいろの異状現象が起る。水の無機成分の分析結果からは、良質の水であるという以外に何の異状も認められない。このような魚の異常が何によつて起るのかは不明である。

村上氏のこの記載から判断すると、魚の異常は明らかにガス病にかかつた魚の斃死前の症状のようである。この湧水中には恐らく相当高い過飽和で窒素ガスが溶存しているのではないかと推定される。

小島、富山²⁾ 両氏は日本各地の養鰯場で、ニジマスの稚魚の斃死率に相当著しい相違がある事実に着目し、養魚用水の無機成分の詳細な分析を実施して比較検討した。その結果、ニジマス稚魚の斃死率の大きさと、用水の珪酸含有量の高いこととの間に相関関係を見出し、稚魚の斃死を高めるのは、アニオンとしての珪酸イオンが多く、カチオンとの平衡がとれていないための生理作用が原因であろうと推定している。

両氏の報告によると、稚魚の斃死率の高い養鰯場はその多くが湧水を用いている点は注目を要するところであり、これらの湧水については一応溶存窒素の測定を行つてみることも必要であろうと考えられる。

小田原地帯の数地点の湧水について、われわれが試みに珪酸塩の含有量を測つた結果では、その値は 40 mg/L (SiO_2 として) 内外という高い値であつたことを参考までに附記する。

本報告の首題とは異なるけれども、湧水以外の場合でも特別な理由によつて、異常な過飽和で窒素ガスが溶存している水が往々発見されることがある。例えば押上げポンプの活栓に隙間があつて、ここから空気がは入つて高圧が加わる場合、あるいは水圧の高い水道管中に何かの原因で空気が混入する場合等がそれである。魚がガス病を起すのは、このような水中でも同様であつて、われわれは度々その実例をみた。水族館等で魚を飼育する場合には充分この点に注意することが肝要である。

また、このような水がある期間鉄管中に停滞していて流出してくる場合には、溶存酸素が鉄管の酸化、あるいはその他の酸化に消費されて、かなりの未飽和値を示すことが多い。このことは、地下水のガス溶存量について一つの興味ある示唆を与えるものと考えられる。この点についても、目下江草が実験中であり結果は追つて発表の予定である。

総 括

- 1) 小田原北方地帯の湧水には窒素ガスが過飽和に溶存しており、これが原因となつて魚にガス病を起す。
- 2) 湧水の溶存窒素含有量は、湧水地点によつて異なり、その飽和度は 120~160 % である。
- 3) 同一の井戸または泉は、それぞれ個有の溶存窒素量を示し、短時間内にはもちろん、相当長期間内でもほとんど変動しない。

文 献

- 1) 江草周三：日水会誌, 15, 83 (1944).
- 2) 菅原健：化学実験学, 第一部, 12, 地球化学, p. 559 (1941).
- 3) R. MAUCHA: *Die Binnengewässer*, Bd. 12, p. 62 (1932).
- 4) W. C. ALLEE et al: *Principles of Animal Ecology*, p. 189 (1949).
- 5) 小島良夫, 富山哲夫：日水会誌, 15, 277 (1949).