

# 塩素イオンと鉄分からみた 工業用地下水の水質

池田 喜代治

## はじめに

地質調査所では1951年以来 工業地帯あるいは計画工業地帯を対象に工業用地下水の調査研究を行なっている。この調査研究の一環として水試料の化学分析が行なわれているが 今までに一応全国の工業地帯とその背後地の大部分の地域が調査を終わり 化学分析を行なった試料総数も約5000個にも達している。水質分析結果は 各調査地域の地下水の水質そのものを明らかにすることと 地下水の動態解析を行なうことを目的としている。こうした各地域の調査研究の成果は そのたびごとに地質調査所月報に報告されているが 一昨年度地質調査所80周年記念出版物として1951~1961年の過去10年間のこれらのデータを集積したものが出版されたことでもあり そのデータをもとに各地域における地下水の概要について述べてみたいと思う。

## 工業用水と水質

工場で1つの製品がで上がるまでには 多くの人手や機械が働き この間に水の関与しない行程は1つも無いといっても過言ではない。すなわち工場で働く人々には飲料水その他雑用水が必要であり 機械が働けば過熱を防ぐ冷却水が 水蒸気をつくるにはボイラー用水がまた必要である そのほか洗浄用水・空調用水・製品処理用水・原料用水・運搬用水および防災用水など工業と水とは切っても切れない関係にある。これらの工業用水は用途によって水質に対する要望がちがうが 酒造用水や製糸(生糸)用水などのように独特な水質が要望されるもの(第1表参照)は別として 理想的には純水に近いものほど喜ばれることは言をまたない。

このような水質への要望に対し全国的にもっとも工業用水源として利用されている地下水(主として被圧地下水

である)は まず河川水などの地表水より水温・水質の年中変化が少ない利点がある。それに全般にわが国の地下水は諸外国と比較して良質であるといわれている。被圧地下水について取りまとめた結果では pH はほぼ中性であり 水質を端的に示す塩素イオン濃度は 5~10 ppm を示すものももっとも多く分布する。しかし被圧地下水は鉄分・マンガン・シリカなどを多量に溶存するものがあるので 塩分濃度の低いものでも水質処理をしなければ利用できないようなものもある。

## 地下水水質の地域性

今までの水試料の化学分析結果では 地下水水質に地域性が認められる。鉄分の多い地下水が存在する地域 塩分濃度の高い地下水が分布する地域 水温が異常に高い地域等々である。もちろんこれは傾向として述べられるものである。このほかもとは水質がよかったところが 地下水の過剰揚水などが原因で塩水化した例などについて以下述べてみよう。

## 塩素イオン濃度から見た地域性

日本国中で いわゆる天然水でもっとも水質がよい(純水に近いという意味)のは たぶん富士山頂にみられる水であろう 金明水 銀明水と名付けられていて 熔岩を1mぐらいうがった井戸に湧出する水で第2表のような化学成分の含有量を示す 塩素イオンその他はほぼコンマ以下の数値であって 地下水というには余りにも降り立ての天水に近い状態だが 3700m余の高所だけに純度の高いのもむしろ自然であろう まさに日本一の溶存成分の少ない水質といえよう。

このような水質のものは天然水 ことに地下水としては特別のものであって 一般には地下水は塩素イオンの量で3 ppm 以上の値を示す。地質調査所化学分析成果表II(地下水1951~1961)は 被圧地下水の水試料総数約2400個の化学分析成果を収めているが(このうちの約1300個は工場用水である) これらの各地域の塩素イオン濃度の頻度分布を求めた結果では 10ppm 以下のものが全試料の50%以上に達し 濃度の大きい方に徐々に頻度が

第1表 独特な水質を要望する場合の例

	pH	煮沸後 硬度 (CaCO <sub>3</sub> ) ppm	Mアルカリ度 (CaCO <sub>3</sub> ) ppm	Cl <sup>-</sup> ppm	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ppm	Na <sup>+</sup> ppm	K <sup>+</sup> ppm	Ca <sup>2+</sup> ppm	Mg <sup>2+</sup> ppm	硬 度 (CaCO <sub>3</sub> ) ppm	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ppm	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ppm	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ppm
製糸(蚕糸)用適の水質	7.0	8.6	23.0	25				70	10	0.1)			
酒造用水	6.5~7.5	36~110						0.1)	0.3)		5~25	0.1)	

第2表 富士山頂の水質

採取地点	水温	pH	Mアルカリ度 (CaCO <sub>3</sub> ) ppm	Cl <sup>-</sup> ppm	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ppm	Na <sup>+</sup> ppm	K <sup>+</sup> ppm	Ca <sup>2+</sup> ppm	Mg <sup>2+</sup> ppm	硬 度 (CaCO <sub>3</sub> ) ppm	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ppm	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ppm	全鉄 ppm	SiO <sub>2</sub> ppm
金明水	2	6.2	2.5	0.1	2.0	0.4	0.1	0.81	0.48	3.7	0.04	0.00	0.02	3.6
久須志ヶ岳の水	2	6.3	2.5	1.1	0.4	1.1	0.3	0.32	0.29	2.0	0.06	0.18	0.02	2.9

昭和38年7月23日採水

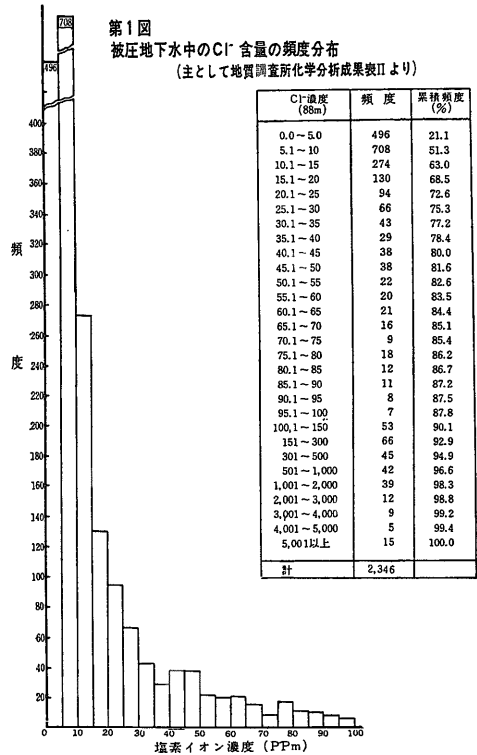
低く長く尾を引き明らかに左右非対称の形を示す 正規分布の形ではない(第1図参照)。

つぎに本邦の各地域毎について塩素イオン濃度の頻度分布図を求めたが これによって各地域の被圧地下水の塩素イオン含有量の分布の形が明らかにされる (第2図参照)。 これらと比較すると西日本より東日本の方の諸地域が濃度の低い方に頻度が集まる傾向がある なかでも塩素イオン含量の少ない地下水が多く分布する地域を列記すると 岩手県北上川流域 八戸—上北—下北 茨城県の中央—南西 栃木県鬼怒川右岸地域 埼玉県—東京都城北(浦和水脈) 八王子・日野地区 千葉県東京湾沿いと野田・柏・松戸地区 神奈川県県央 富山平野 金沢市 岳南地域 名古屋南部を除く濃尾平野 四国の西条付近および九州の筑後川流域から八代にかけての熊本平野の全域などがあげられる 他方分布の形が右側にずれているタイプの地域 すなわち塩素イオン濃度の高いものが比較的多く存在する地域は 山形県庄内平野 宮城県仙塩地区 関東中央部 (古利根川流域の草加—越谷—蓮田—駒西を結ぶ一連の地域) 東京都の江東 城南 川崎市・横浜市 京都市および大阪府を含め瀬戸内海に面した諸地域などである 塩分濃度に以上のような地域差があるのは 初生的には地下水を受け入れる容水地盤の厚さ あるいはひろがりなどや それが海成層か陸成層<sup>〔3〕</sup>なのかといった地質的環境の相違に基づくものであるが 近年いくつかの既成工業地帯の臨海部におこっている地下水の二次的な塩水化によるものも大きな比重を占めている。

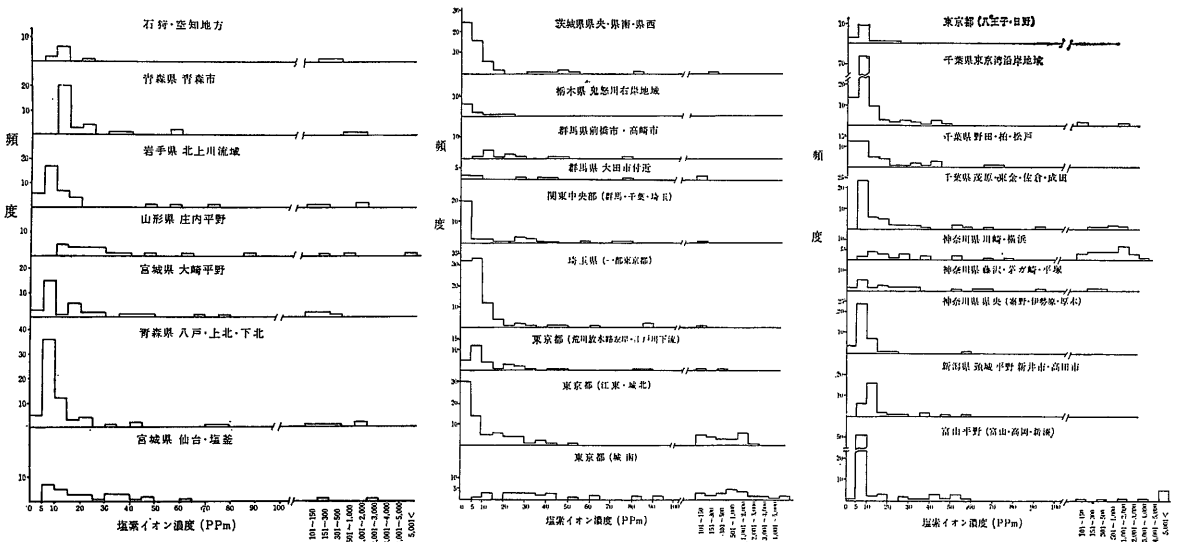
A 塩水化地帯

地下水の塩水化については 地下水の過剰揚水による地下水位の異状低下が最大の原因だと考えられているが 既調査地域で地下水が塩水化している例は 北から八戸市 東京都 富士市 高岡市 和歌山市 大阪市

第1図 被圧地下水中のCl<sup>-</sup>含量の頻度分布 (主として地質調査所化学分析成果表IIより)



尼崎市 新居浜市 松山市および三原市などそれぞれの地域の臨海部の一部で起こっていて 従来使用していた地下水が全く使用できなくなったという実害を受けている。普通一たん塩水化した地域の地下水は 塩分濃度が増大の一途をたどる場合が多いが 特殊なケースとして富士市の臨海部の場合のように 富士山の雪解けが始まる3・4月以降になると塩分濃度の減少が始まり 10月以降の積雪期に再び増大するという大きな周期性が認められる例もある(第3図参照)。



第2図 本邦の各地域における被圧地下水中のCl<sup>-</sup>濃度のヒストグラム (その1)北海道・東北地方

(その2) 関東地方 ①

(その3) 関東地方 ②

第3表 内陸部における塩素イオン濃度の高い被圧地下水の水質の例

番号	試料採取地点	水深の種類	ストレーナーの位置( )は井戸深度(m)	水温(°C)	PH	RpH	酸度(CaCO <sub>3</sub> )(ppm)	アルカリ度		塩素(Cl <sup>-</sup> )(ppm)	亜硝酸(NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )(ppm)	硫酸(SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> )(ppm)	アンモニウムNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ppm)	ナトリウムNa <sup>+</sup> (ppm)	カリウムK <sup>+</sup> (ppm)	鉄		カルシウムCa <sup>2+</sup> (ppm)	マグネシウムMg <sup>2+</sup> (ppm)	全硬度(CaCO <sub>3</sub> )(ppm)	ケイ酸SiO <sub>2</sub> (ppm)	燐P(ppm)
								M-(CaCO <sub>3</sub> )(ppm)	P-(CaCO <sub>3</sub> )(ppm)							total Fe(ppm)	Fe <sup>2+</sup> (ppm)					
	宮城県南郷町における開泉水道	C	(170)	16.3	7.2	7.4	57	258	0.0	463	0.00	1	0.8	194.3	14.7	6.15	5.85	151.6	13.5	434	62.8	0.12
	埼玉県越谷市における	C	(260)	19.6	7.0		92	0.0	121		1.7	1.3			0.45		24.8	12.2	112	37	0.49	
	京都市 某工場	C	25-143	17.3	7.0	7.3		97	0.0	238	0.20	1	1.0	110.4	2.7	1.46	1.46	44.3	17.2	181	26	0.12
	甲府市 朝日町 某井戸	C	400	37.0	8.4		11	297	0.0	237	0.00	9	0.3	272.0	20.0	0.16	0.09	10.5	1.8	34	54.4	

(註) 水深の種類 C: 被圧地下水

地下水の塩水化に伴う水質の変化については 今までの例ではいずれも混入した塩分の組成は 海水に含まれる塩分の組成とやや違っていて 海水と比較してカルシウム・マグネシウムなどのアルカリ土類の含まれる割合が高いのに反し ナトリウム・カリウムなどのアルカリ金属の含まれる割合が小さい特徴をもっている。これは混入してきたものが海水ではないということの意味するのではなく むしろ海水が浸入する過程で地層との接触によってイオン交換などの現象があったと解せられる。

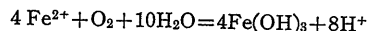
B 化石塩水地域

地質時代から存在する化石水が地下水として存在している地域が各地にある 地質時代の堆積環境が汽水域あるいは海水域であった場合 この化石水中の塩素イオン濃度は数千ppm~1万数千ppmに達するものもある。こうした化石塩水は天然ガスを溶存することも多く したがって天然ガスの産ガス地あるいはガス徴候地の地下水は 一般に水質が悪い 水質は普通の地下水と異なって 重碳酸イオン・全炭酸・アンモニウムイオン・化学的酸素消費量・第一鉄イオンなどの溶存が多く 硝酸・硫酸両イオンが少ない特徴をもっているので工業用水として不適当なものが多い。分布地域は天然ガスを含むものでは 北から 北海道の石狩平野・池田・長万部・本州に入って青森市 津軽平野 象潟 酒田 煙山 山形 新潟 射水 河北潟 南関東 諏訪湖周辺 清水市

焼津 琵琶湖周辺 大阪市 簸川平野 熊本平野 大分平野 宮崎市および敷根などである。このほか 関東中央部(草加-騎西を結ぶ一連の地域でちょうど関東構造盆地のほぼ中央部にあたるところ) や京都盆地 甲府盆地 宮城県大崎平野などにおいても化石塩水のなごりと思われる塩素イオン濃度の高いものが存在する(第3表参照)。

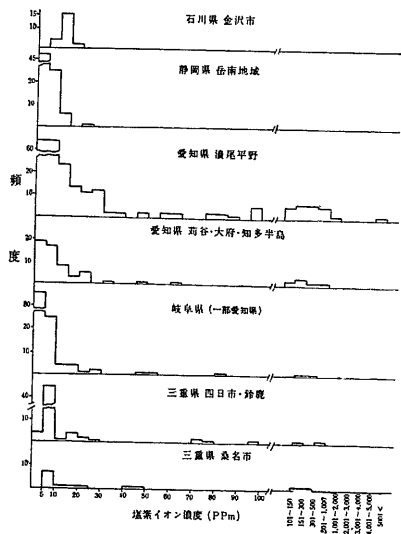
鉄分・マンガン分の多い地域

地下水に存在する鉄分の状態については、イオン状鉄(Fe<sup>2+</sup>・Fe<sup>3+</sup>) コロイド状鉄(Fe(OH)<sub>3</sub>のコロイドなど) および有機鉄(たとえばフミン酸鉄) などがある 被圧地下水などでは遊離炭酸を含み 溶存酸素をほとんど含まないものが多く このような条件下では主として第一鉄イオンの形で存在する。この第一鉄イオンは空気に触れると酸化され溶解度の小さい水酸化第二鉄となって沈でんする。このため揚水直後は無色透明であったものが次第に赤褐色ににごる現象を生ずる この沈でん物は鉄管内部に付着し閉塞したり 水に触れたものを着色したりいろいろの障害を起こすので 最も厄介な要素の一つである

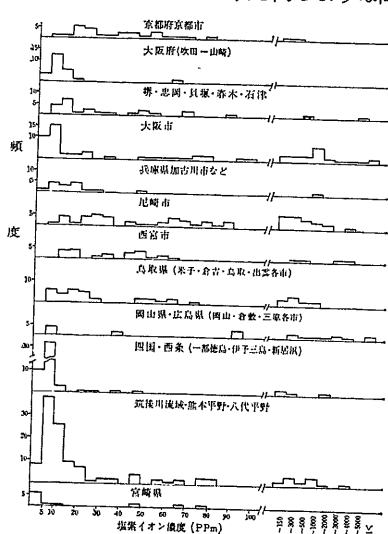


.....第一鉄の空気酸化

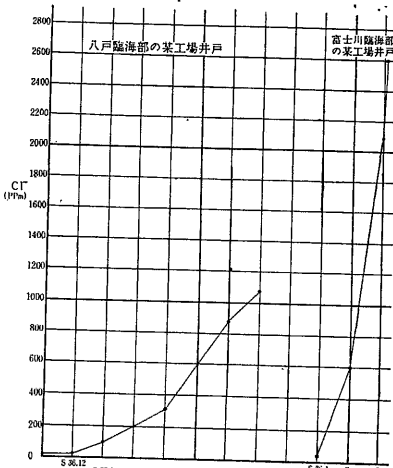
マンガンも鉄と同じような状態で水中に存在し 普通の被圧地下水では Mn<sup>2+</sup> の状態で存在する。これは鉄と同じような障害を起こすが 水中における状態は



(その4) 中部・近畿地方



(その5) 近畿・中国・四国・九州地方



(第3図) 臨海部における被圧地下水の塩素イオン増加の例

Fe<sup>2+</sup> よりも安定なために水質改善上鉄よりも厄介な要素である。

鉄・マンガンは工業用水としてはたとえ微量でも好ましくなく とくに染色・晒などのように原料に直接触れる場合や 原料用水として使用される場合は鉄の許容量を0.1ppm 以下としている。冷却用水として要求される水質としては0.5ppm 以下飲料水の場合は0.3ppm 以下である。

地下水中に存在することができる鉄の量(溶解している形で)を大きく支配する因子はpHとEhであるが 一般地下水で観察される範囲内のpH・Ehでは 理論的に第一鉄イオンとして100ppm 以上の鉄を含み得る。実測値でも100ppm 以上のものが2・3例検出されている。地下水はこのように鉄を含みやすい条件をもっているの で いままでのデータにもとづいて比較的鉄を多く含む地下水の分布する地域について検討してみた。

このような鉄を含む地下水の分布を 地域ごとに調べた結果を第4表に示す。この表は、鉄分の多い地下水を全鉄として1ppm 以上含むものとして それが地域ごとにどの位の割合いで存在するかについて計算を行なったものである。鉄を1ppm 以上含む地下水の存在比率が高いところから列記すると 伊賀上野盆地 名古屋市南部 名古屋市 新井・高田地区 岡山・倉敷地区 西宮市 和歌山市 大分鶴崎地区 尼崎市 八戸市 大阪府 奈良盆地 庄内平野 東京都城南地区などで50%以上の存在比率を示している。以下については表を参照されたい。

地下水中に多量の鉄を含む地域については 鉄を多量に含有する花崗岩類が分布する地域との関連を述べた文献があるが 名古屋以西の花崗岩質の岩石の分布地帯に鉄分の多いのは そのような関係を裏付けるものと思われる。こういう鉄分の多い地下水を使用せねばならない所では 最近積極的に水質改善をして使用する向き

第4表 被圧地下水中の鉄  
各地域の全鉄1ppm以上を含む試料の存在比率表

(主として地質調査所化学分析成果表IIより)

地 域 名	(%)	地 域 名	(%)	地 域 名	(%)
北海道石狩・空知地方	50 (14)	千葉県小糸川流域	0 (10)	三重県管内(主として四日市三重村)	33 (62)
青森県青森市	9 (3)	佐倉市・成田市付近	7 (3)	桑名市その周辺	27 (15)
〃 北上・下北(一部八戸市)	9 (3)	神奈川県川崎・横浜両市	54 (44)	〃 四日市市	52 (28)
〃 八戸市馬淵川右岸	67 (15)	〃 藤沢・茅ヶ崎・平塚	4 (25)	〃 松阪市・昭和町・小俣町	17 (14)
岩手県北上川流域	18 (11)	〃 秦野市・伊勢原町	0 (17)	〃 伊賀上野市	100 (5)
〃 〃	12 (3)	〃 県央	0 (2)	京都府京都市	18 (28)
山形県庄内平野	58 (24)	新潟県新井・高田市	84 (24)	大阪府(大阪市を除く)	63 (68)
宮城県大崎平野	36 (28)	〃 長岡市・見付市	15 (3)	〃 大阪市	45 (47)
〃 仙台・塩釜両市	4 (2)	富山県富山市・高岡市	8 (8)	和歌山県和歌山市	75 (8)
福島県阿武隈川流域	17 (6)	〃 新津とその付近	42 (13)	兵庫県尼崎市	73 (62)
茨城県中南部	0 (8)	石川県金沢市	0 (2)	〃 西宮市	77 (68)
〃 黒西南部	16 (3)	静岡県沼津市	8 (4)	鳥取県米子市	0 (3)
栃木県	10 (10)	〃 安部川・巴川流域	5 (2)	〃 倉吉市	50 (4)
群馬県前橋市・高崎市	17 (12)	〃 吾南地域	0 (7)	〃 鳥取市	32 (25)
〃 太田市とその周辺	30 (18)	〃 大井川扇状地	9 (2)	〃 出雲市宍道町付近	23 (13)
関東平野中央部(群馬・千葉・埼玉)	6 (2)	〃 浜松市とその周辺	4 (2)	岡山県岡山市・倉敷市	79 (14)
埼玉県(一部東京都)	2 (2)	愛知県岡崎市など	33 (9)	広島県三原市など	25 (4)
東京都荒川水碓左岸・江戸川下流	0 (4)	〃 名古屋市	86 (26)	徳島県徳島市付近	0 (2)
〃 江東・城北	15 (8)	〃 滝尾平野部	22 (8)	愛媛県西条市生土川町	15 (2)
〃 城南	57 (4)	〃 名古屋市南部	97 (1)	佐賀県筑後川流域	0 (2)
〃 八王子・日野・青梅	7 (1)	〃 羽倉・大府・知多半島	62 (6)	大分県大分市・鶴崎市	75 (8)
千葉県東井・市原	2 (4)	〃 豊橋市とその付近	5 (2)	熊本県熊本平野	7 (2)
〃 葛南	0 (3)	〃 岡崎市とその付近	45 (1)	〃 八代市	9 (5)
〃 木更津市	0 (1)	岐阜県・愛知県	12 (4)	宮崎県延岡一宮崎一都城	9 (1)
〃 野田・柏市	0 (4)	岐阜県大垣市白根帯と周辺	0 (2)		
〃 茂原・東金	0 (1)	〃 大垣市と周辺	5 (8)		

( ) 内の数字は各地域別の被圧地下水試料の総数

が多い。鉄分の多い地域が西日本に多いことも一つの理由と思われるが 概して近畿地方にそういう装置や施設をもつ工場が多い。

おわりに

いままで工業用水源調査で得られた被圧地下水試料の水質分析結果のなかから 塩素イオンと鉄に関しておもに話を進めてきた。これは点素イオンは概略的に溶存塩類量を端的に表現する場合によく使われ また鉄分は目に見える障害を起こすことで水中に存在する化学成分のなかで 関心をもちたい要素だからである。このほか10数項目の成分の一つ一つについてももちろん工業用水としての水質に無関係ではありえないが これらの項目については いずれ次の機会に述べたいと思う

(筆者は 技術部化学課)

第5表 工業用水道の水源の水質

番号	試料採取地点	水源	水温 (°C)	PH	RPH	溶存酸素 (DO) (cc/L)	硬度 (CaCO <sub>3</sub> ) (ppm)	アルカリ度 M - (CaCO <sub>3</sub> ) (ppm)	P - (ppm)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	アンモニア NH <sub>3</sub> (ppm)	ナトリウム Na <sup>+</sup> (ppm)	カリウム K <sup>+</sup> (ppm)	鉄		カルシウム Ca <sup>2+</sup> (ppm)	マグネシウム Mg <sup>2+</sup> (ppm)	全硬度 (CaCO <sub>3</sub> ) (ppm)	ケイ酸 SiO <sub>2</sub> (ppm)	酸 P (ppm)	酸素消費量 (COD) (ppm)
																	total Fe (ppm)	Fe <sup>2+</sup> (ppm)						
	川崎市工業用水道水源 No.13井	C	16.0	6.8	7.1	t <sub>r</sub>	32.5	197.5	0.0	36.1	0.22		0.	0.1	52.9	5.0	9.76	9.45	23.3	11.8	107.0	40.8	0.32	
	〃 No.15井	C	16.3	6.8	7.2	0.05	35.0	220.5	0.0	28.8	0.04		4	0.4	60.0	5.1	11.59	11.30	23.0	10.8	102.5	26.0	0.38	
	相模原市工業用水道水源井	C	15.0	7.0	7.1		2.3	42.0	0.0	5.2	0.00		3.2	0.10			0.00		11.2	4.9	48.2	33.	0.00	
	四日市市工業用水道水伏流水	U		6.7	7.0		5.0	28.8	0.0	5.9	0.03			0.1	4.9	1.8	0.04	0.00	9.3	2.0	31.6	12.0	0.01	
	〃 深井戸水源	C	16.7	6.8	7.1	1.10	10.0	82.9	0.0	6.8	0.01			0.3	5.4	0.4	9.28	2.39	5.9	5.0	35.3	137.2	0.06	
	〃 大里ポンプ揚揚井戸	C	17.0	7.0	7.2	1.67	5.8	88.4	0.0	9.8	0.00			0.5	24.0	2.5	4.58	2.20	3.7	3.2	22.3	67.2	1.07	
	松阪市工業用水取水地点(梅田川)	R	17.4	7.2	7.3		1.7	25.1	0.0	4.4	t <sub>r</sub>	0.84	11.3	0.14	3.9	1.1	0.25	0.00	10.7	1.1	31.3	7.9	0.00	
	和歌山市工業用水道 1号井	C	17.6	6.8	7.4	0.63	38.8	130.6	0.0	36.9	0.00		5	t <sub>r</sub>	49.6	1.0	0.20	0.12	10.1	14.1	83.2	38.3	0.44	
	〃 2号井	C	18.3	6.8	7.3	0.21	83.5	175.4	0.0	148.0	0.00		t <sub>r</sub>	t <sub>r</sub>	126.0	2.1	0.92	0.81	17.3	13.9	100.4	31.3	0.18	
	大分県工業用水源地(大野川)	R	9.9	7.4	7.5		1.5	51.0	0.0	3.7	0.02	1.14	14.1	0.00	7.0	3.5	0.17	0.00	11.8	3.6	44.1	54.2	0.00	0.67

(注) 水源の種類 R: 河川水 F: 自由地下水 C: 被圧地下水 U: 伏流水