

水質調査による岩石崩壊の予知の可能性

北野 康・加藤喜久雄・金森 悟
金森 暢子・吉岡 龍馬

ROCKSLIDES RESULTING FROM THE GEOCHEMICAL WEATHERING OF PARENT MATERIALS

By Yasushi KITANO, Kikuo KATO, Satoru KANAMORI, Nobuko KANAMORI and Ryuma YOSHIOKA

Synopsis

The factors controlling the concentrations of chemical elements contained in natural waters were studied. The authors estimated the amount of the elements which were dissolved from rocks through the interaction between the rocks and the natural waters.

And they show the possibility to foretell zones of weakness and resultant rockslides caused by geochemical weathering, from the chemical composition of natural waters.

緒 言

岩石の風化および崩壊の原因と機構を明らかにすることは砂防工学の立場からは勿論、地球化学の立場からも重要な課題である。

岩石の風化・崩壊の研究にとって最も適当な場所と思われる六甲山系の住吉川および芦屋川流域において、水質を通してその天然水の接した岩石の風化機構を知ることができ、既に報告した^{1)~3)}。すなわち、表流水が岩石中に浸透しているところへ、地下から炭酸ガスがやってきて岩石から主としてカルシウムを水中に溶かし出して岩石を風化する。この風化の度合は溶かし出すカルシウムの量に比例し、岩石の崩壊の大きさと正相関がある。このとき、炭酸ガスは重炭酸イオンに変わってその水中に溶存する。従って住吉川、芦屋川流域における岩石の崩壊をきたし、災害をもたらす原因である岩石の深層風化の度合はその岩石を通ってきた天然水中のカルシウムイオンあるいは重炭酸イオン含量から推定できることを示した。実際には簡単、迅速、しかも正確に定量できる(カルシウムイオン)+(マグネシウムイオン)の量を用いるのが便利である。

さて、その後我々は六甲山系の住吉川、芦屋川流域以外の地域、すなわち表六甲の宇治川流域、高橋川、天上川、妙法寺川流域および裏六甲の有馬川、奥山川、奥山谷、水無川、河原谷流域について研究し、それぞれの場合については報告した。

六甲山系の住吉川、芦屋川流域以外の上記のいくつかの地域においては地下水がかなり複雑で必ずしも、住吉川、芦屋川流域にみられたように天然水中の $(Ca^{2+})+(Mg^{2+})$ 、 Ca^{2+} および HCO_3^- の含量が岩石の風化・崩壊をそのまま指示するとは思えない場合がある。

さらにまた、母岩が六甲山城より複雑な石灰岩とケイ酸塩岩石とからなる伊吹山系の姉川、草野川、愛知川流域⁴⁾、および岐阜県の揖斐川流域⁵⁾でも調査を行なった。これらの結果、地下水や母岩が単純ではない地域の岩石の風化・崩壊の予知をも水質を通して行なえる目安がづくに至った。その経過についてここでは報告したい。

1. 岩石の崩壊に関する筆者らの基本的な考え：

この種の筆者らの仕事を理解してもらうために最初に筆者らの考え^方について述べておきたい。

岩石塊が崩壊する現象は

- 1) 岩石の破碎
- 2) 破碎した土砂の崩壊

の二つにわけて考える。

(1-1) 岩石の破碎

岩石の崩壊現象のうち、最も基本的なことは岩石が破碎されることである。岩石が破碎して崩壊は始まるものである。岩石を元素と元素とが結びついた化合物と考えると、岩石が破碎し崩壊することは、岩石中のある元素とある元素との間の結合が切れることだと考えられる。従来の表現による物理的（あるいは機械的）風化にしる、また化学的風化にしる何れの場合も元素間の結合の切れることが、岩石の風化・崩壊の最も基本的な原因と考えることができる。元素間の結合の切れ易さは(1-1-1) 岩石自体の物理化学的性質、および(1-1-2) 岩石のおかれている環境によってきまる。

(1-1-1) の岩石自体の物理化学的性質は主として岩石の種類（鉱物組成、化学組成）に依存し、また断層とか節理の有無、地形等、すなわち生成時およびその後の環境因子等によっても大きく左右される。

(1-1-2) の岩石のおかれている環境としては、天然水的作用、植物の根等の作用、温度的作用（水的作用をも含む）、圧力等を考慮しなければならない。この圧力に関する影響は考えようによっては(1-1-1) の岩石の物性そのものに断層とか節理とか地形という形で効いているともいえるが、ただ単に現在うけている圧力だけを考えると、ここで問題にする程度の深さの岩石ではそう考慮する必要はないと考えてよからう。環境因子として最も重要な因子、すなわち、岩石中の元素間の結合を切る最も強力なものは天然水であるといえる。天然水はガスを含めたいろいろの元素を含み、含有成分の種類および含量によって岩石に対する作用力は違ってくる。こう考えると岩石の風化には天然水の水質が影響し、岩石が激しく風化されているところでは、岩石から多量の元素が天然水によって溶出され、岩石中の元素間の結合が切れて岩石は破碎されるであろうと推測される。そうして、岩石の風化の度合はそのまま天然水の水質に反映するものと期待される。天然水の水質が全て等しい場合は天然水に溶け出る元素の種類および量は岩石の物性、すなわち、岩石の化学組成、鉱物組成、水と接する表面積、圧力を受けている状態（極端の増は断層、節理として現われ、または複雑な地形としても現われている。特に、前者は水と接する表面積に深い関連をもっていることはいうまでもない）等に依存し、一方、岩石の物理化学的性質が等しいときは、天然水の水質によって溶け出る元素量は変わってくるのである。何れにしても岩石の風化の度合は天然水の水質に鋭敏に反映するであろうということができ、破碎機構は水質を通してうかがい知ることができるといえよう。

(1-2) 破碎した土砂の崩壊

土砂の崩壊、さらに流出を支配する因子としては、

(1-2-1) 岩石の性質、状態

(1-2-2) 水流または水量等の水文学的要素

この二つにわけて考えられよう。

上述の(1-2-1)、(1-2-2)の因子のある大きな部分は重複している。

岩石の崩壊については、岩石の破碎が最も基本的な現象であるから、岩石の破碎機構をまず明らかにし、ついで岩石が崩壊し、流出する条件および要因をこの上加えて考慮することが必要となってくる。筆者らは岩石は主として天然水により化学的に破碎されるので、そこを通して出る天然水の水質から岩石破碎の機構を知り、これに崩壊をおこす集中豪雨および地形的環境等の因子を重ねて考慮することによって岩石崩壊の機構が明らかにされるものと考えている。

災害科学の立増にたつて考えると、岩石崩壊の機構を明らかにする研究は、岩石の崩壊の予知に結びつく

ことによってその意味が増すものである。

筆者らは天然水の水質を通して岩石の風化・破碎の機構を明らかにし、水質を通して岩石の風化・破碎の程度を知ることを目的としているのである。

2. 水質調査による岩石の風化・崩壊予知の困難な点：

そもそも、天然水の水質を通して岩石の風化・崩壊について論述しようとする原理は次のとおりである。

(天然小中に含まれる元素の量) = (降水に由来する元素の量) + (降水物に由出する元素の量) + (温鉱泉水, 特殊な地下水に由来する元素の量) + (人間生活, 農耕作, 工増等の人間活動に由来する元素の量) + (岩石・土壌に由来する元素の量)

上式に示すごとく、天然水中に含まれる元素の量は上述の右辺に示した諸因子に由来するものである。ある地域の天然水のある元素について、右辺の最初の4項に由来する元素の量がその地域全般の天然水にわたって一定であり、かつそれら4項に由来する元素の総量が左辺に示すその天然水中に含まれる元素量に比較して小さいときは、天然水中の元素含量は明らかに岩石、土壌に由来する元素含量、いかえれば岩石、土壌からの元素の溶出量を反映するということができる。

右辺の始めの4項からの元素の寄与は一般的に塩素含量(ある場合は硫酸根含量をも考慮する)から推論が可能である。

住吉川、芦屋川流域では全域に亘り、これら4項からの寄与による元素の量は一様であり、かつその量は小さかった。そして $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 Ca^{2+} および HCO_3^- の含量が岩石の深層風化の程度、崩壊の規模を指示することを知ることができた。

一つの地域については降水および降水物から天然水(河川水、湧水等)へ供給される元素の量は等しいと考えてさしつかえない。もし、人間活動等のない地域を採水点に選べばこの因子からの寄与も無視することができる。ただ、温鉱泉水の寄与する場合は場所により大きく変動することが普通にあり、既に水質調査が終った六甲系山のうち、表六甲の宇治川、高橋川、天上川、妙法寺川流域ではそれらの地域の天然水中に特殊な地下水(温鉱泉水に匹敵する)の任意な混入がみられ、岩石溶出による元素量を天然水の水質そのものから推定することが困難であった。

これが水質による岩石崩壊の予知法を最も難しくする点である。

3. 調査結果およびその考察：

天然水中の主成分(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、溶存ケイ酸等)の含量を測定し、これら元素間の相関関係および分布状態を調べた結果、次のことがわかった。

a) Cl^- 含量から降水、降水物、温鉱泉水および人間活動からの天然水への元素の寄与が推定できる。

b) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 HCO_3^- 含量は他の元素含量に比較して、場所により非常に大きく違い、これらの含量は岩石の風化・崩壊を最もよく指示しそうである。

c) 天然水中の溶存ケイ酸はケイ酸塩岩石からの溶出に由来し、一方一般には $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ はケイ酸塩岩石および石灰岩の両方の岩石からの溶出に由来するものである。天然水中のこれらの両者含量の関係から母岩がケイ酸塩岩石か石灰質岩石かの推定ができる。すなわち、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ が多く、溶存ケイ酸含量が小さいときは $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ は石灰質岩石から、また $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ も溶存ケイ酸含量もともに大きいときは $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ はケイ酸塩岩石からの溶出によることがわかるのである。

以下調査結果を示すが、六甲山系の母岩はケイ酸塩岩石、伊吹山系および揖斐川流域の母岩はケイ酸塩岩石と石灰岩である。

(A) 六甲山系、住吉川および芦屋川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ との含量間の関係は Fig. 1 に、 HCO_3^- と Cl^- との含量関係は Fig. 2 に、および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量の関係は Fig. 3 に示す。

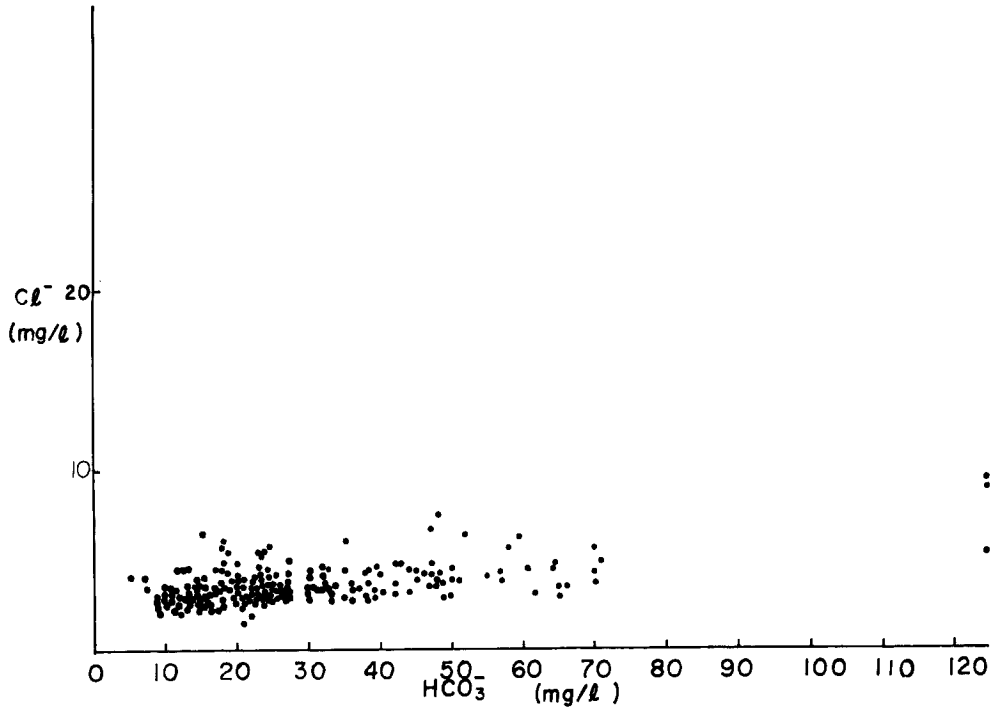


Fig. 1 Relationship between cocentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Sumiyoshi-and Ashiya-gawa areas, Rokko.

- (B) 六甲山系, 高橋川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ との含量間の関係は Fig. 4 に, HCO_3^- と Cl^- との含量関係は Fig. 5 に, および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量の関係は Fig. 6 に示す。
- (C) 六甲山系, 天上川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ第7, 第8および Fig. 9 に示す。
- (D) 六甲山系, 宇治川再度師通流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 10, Fig. 11 および Fig. 12 に示す。
- (E) 六甲山系, 宇治川野谷流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 13, Fig. 14 および Fig. 15 に示す。
- (F) 六甲山系, 妙法寺川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 16, Fig. 17 および Fig. 18 に示す。
- (G) 六甲山系, 有馬川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 19, Fig. 20 および Fig. 21 に示す。
- (H) 六甲山系, 六甲川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 22, Fig. 23 および Fig. 24 に示す。

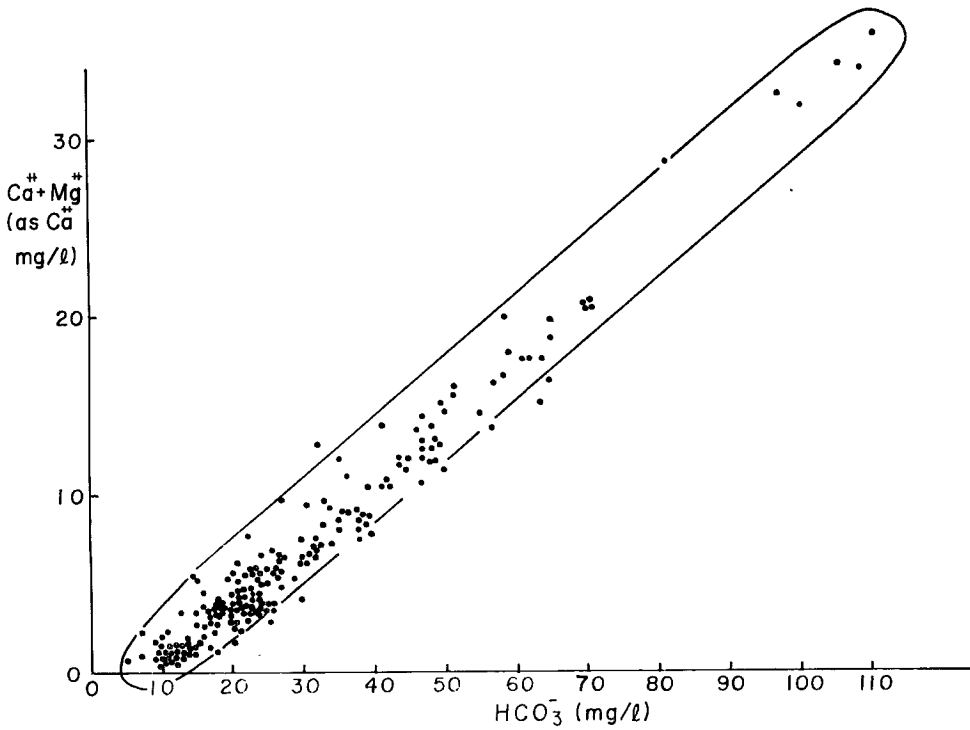


Fig. 2 Relationship between concentrations of HCO_3^- and Cl^- in Sumiyoshi-and Ashiya-gawa areas, Rokko.

(I) 六甲山系, 奥山川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 25, Fig. 26 および Fig. 27 に示す。

(J) 六甲山系, 水無川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 28, Fig. 29 および Fig. 30 に示す。

(K) 伊吹山系, 姉川, 草野川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 31, Fig. 32 および Fig. 33 に示す。

(L) 伊吹山系, 愛知川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 34, Fig. 35 および Fig. 36 に示す。

(M) 岐阜県, 揖斐川流域における天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, HCO_3^- と Cl^- および HCO_3^- と溶存ケイ酸含量間の関係をそれぞれ Fig. 37, Fig. 38 および Fig. 39 に示す。

なお, この流域は1965年台風時の岩石崩壊により非常に大きな被害があった。

それぞれの調査結果 (Fig. 1—39) から議論に必要な天然水中の Cl^- , HCO_3^- , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, 溶存ケイ酸含量をまとめて Table 1 に示した。

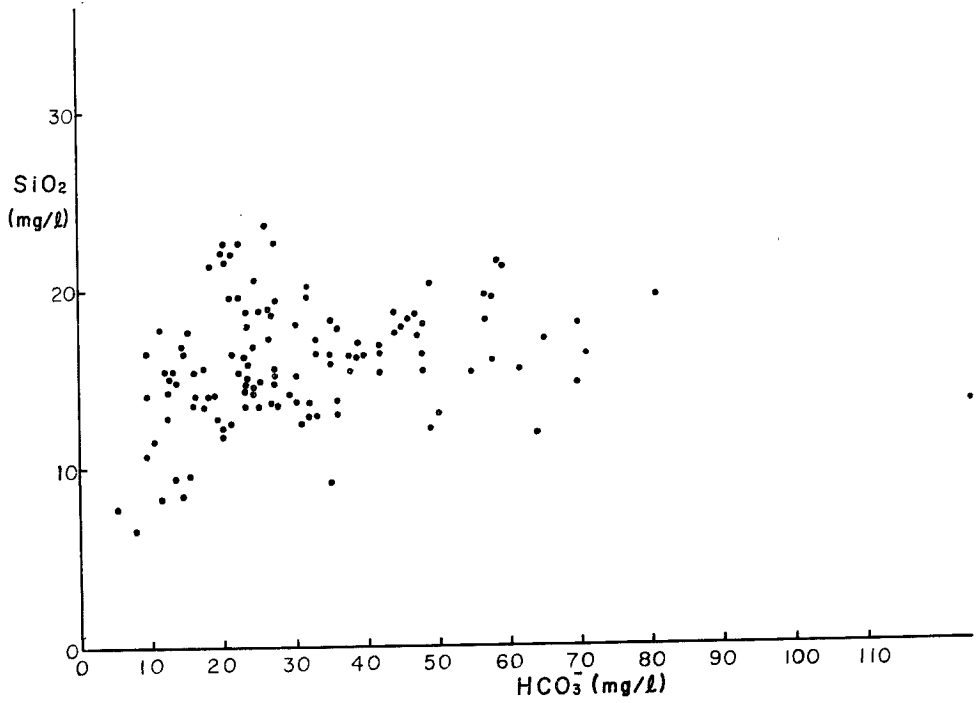


Fig. 3 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Sumiyoshi and Ashiya-gawa areas, Rokko.

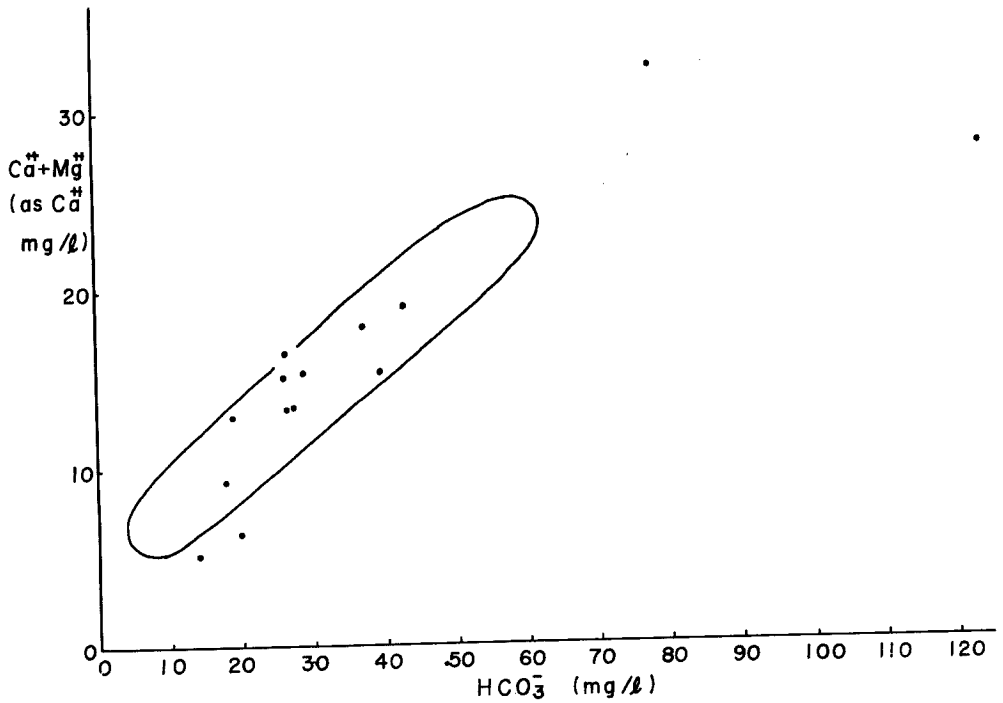


Fig. 4 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Takahashi-gawa, Rokko.

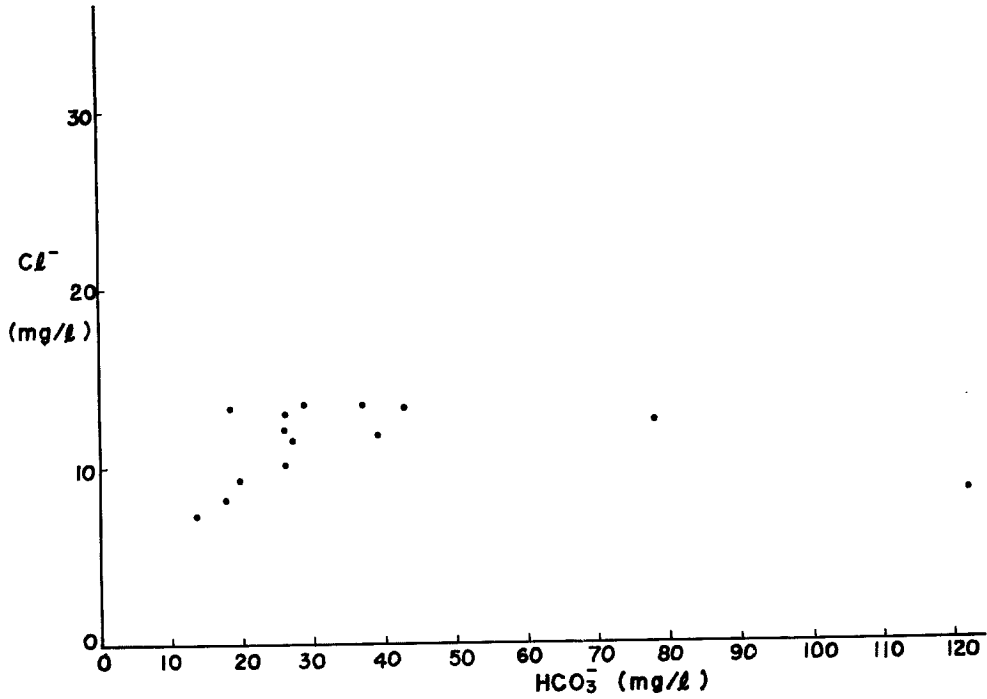


Fig. 5 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Ca²⁺ + Mg²⁺ in Takahashi-gawa area, Rokko.

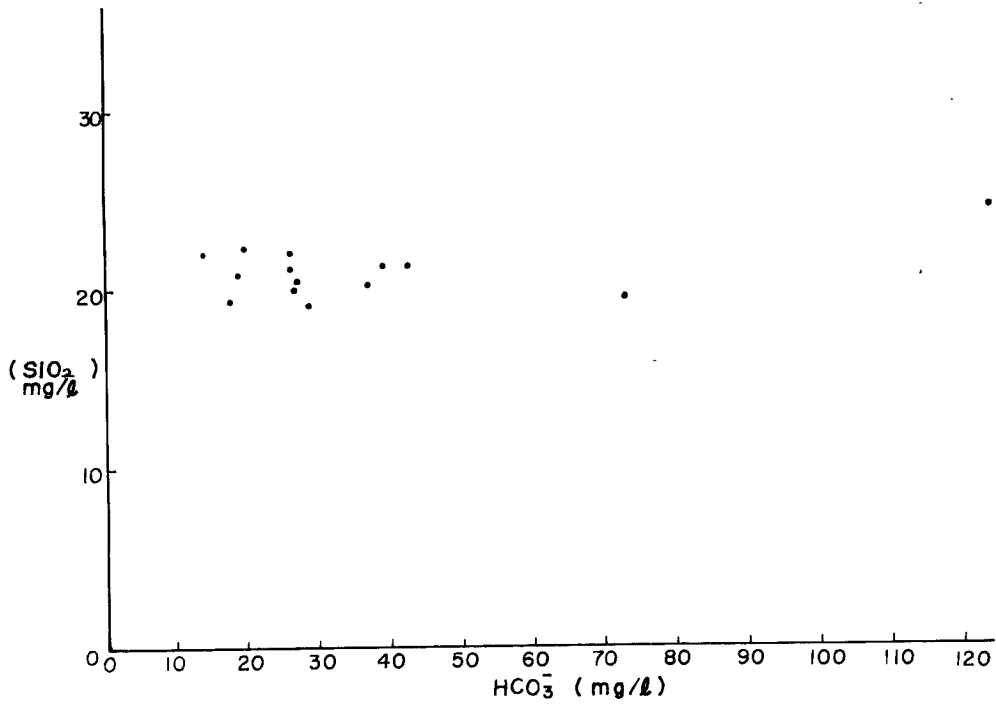


Fig. 6 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and soluble silica in Takahashi-gawa area, Rokko.

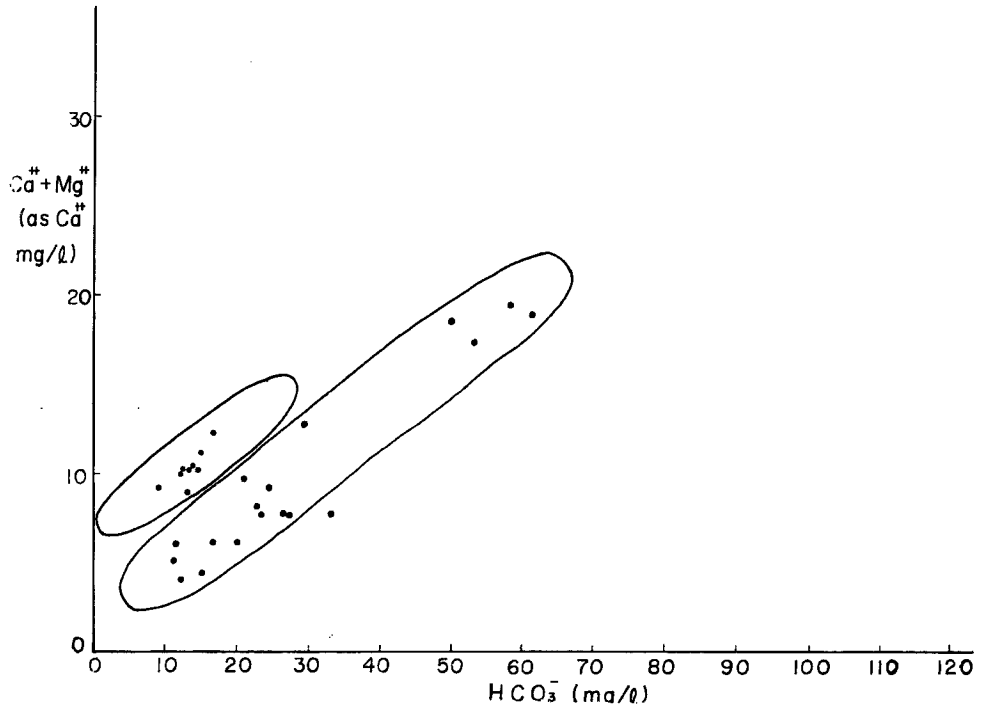


Fig. 7 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Tenjo-gawa area, Rokko.

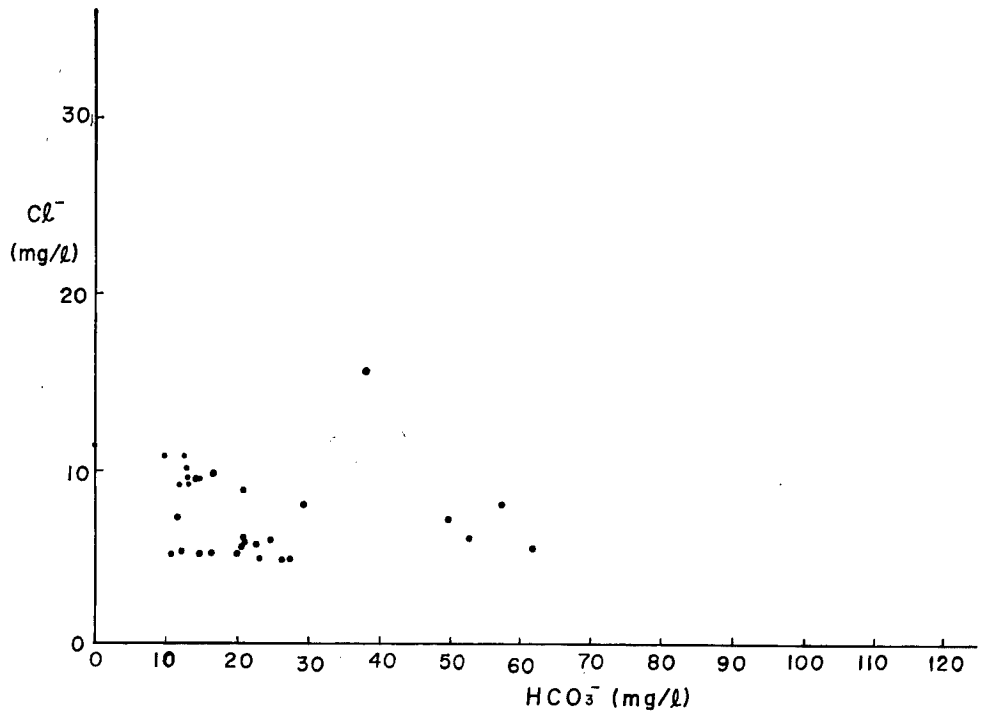


Fig. 8 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Tenjo-gawa area, Rokko.

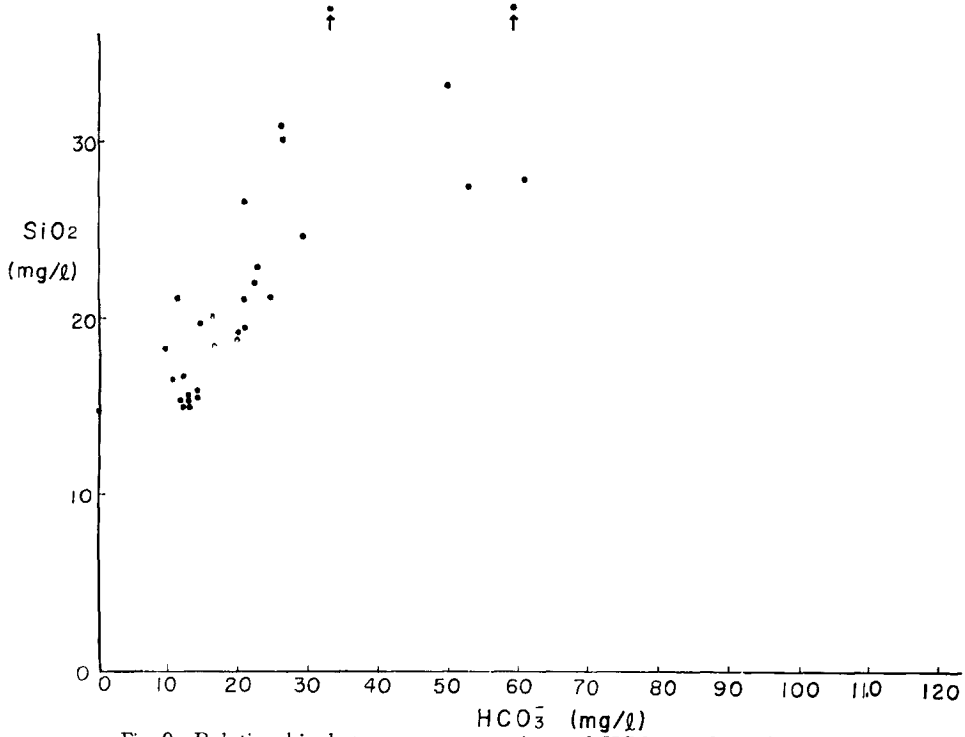


Fig. 9 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Tenjo-gawa area, Rokko.

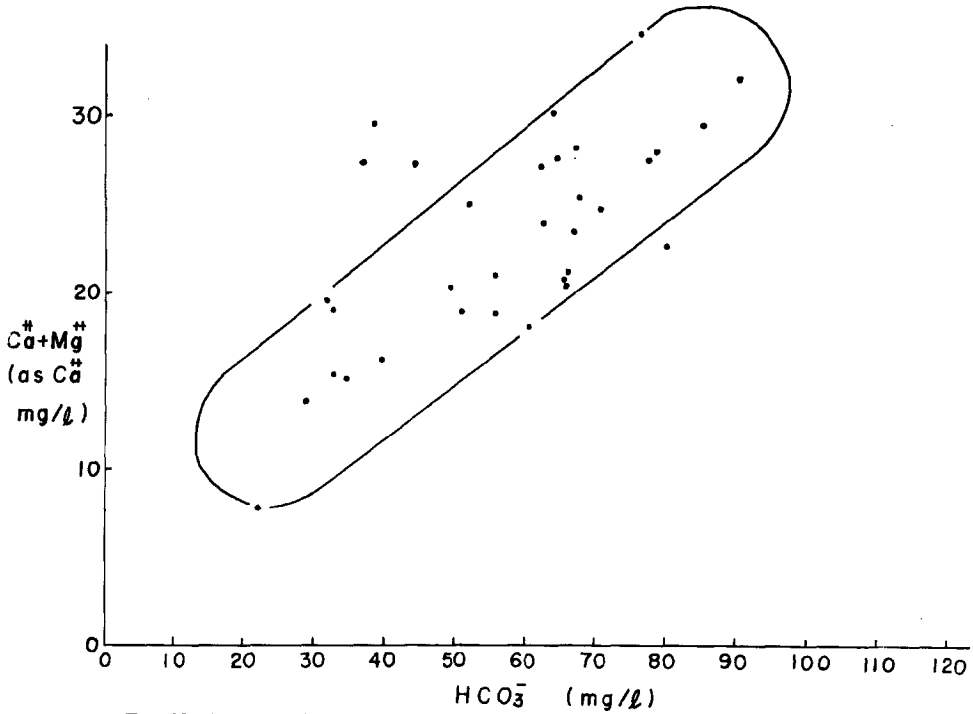


Fig. 10 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Uji-gawa (Futatabi-dōri) area, Rokko.

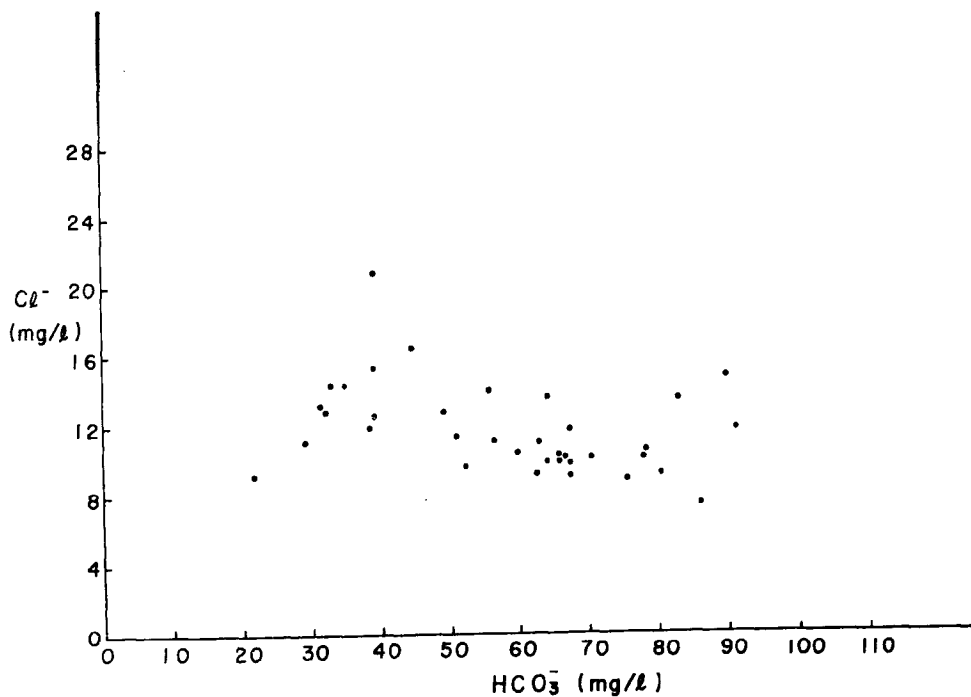


Fig. 11 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Cl⁻ in Uji-gawa (Futatabi-dōri) area, Rokko.

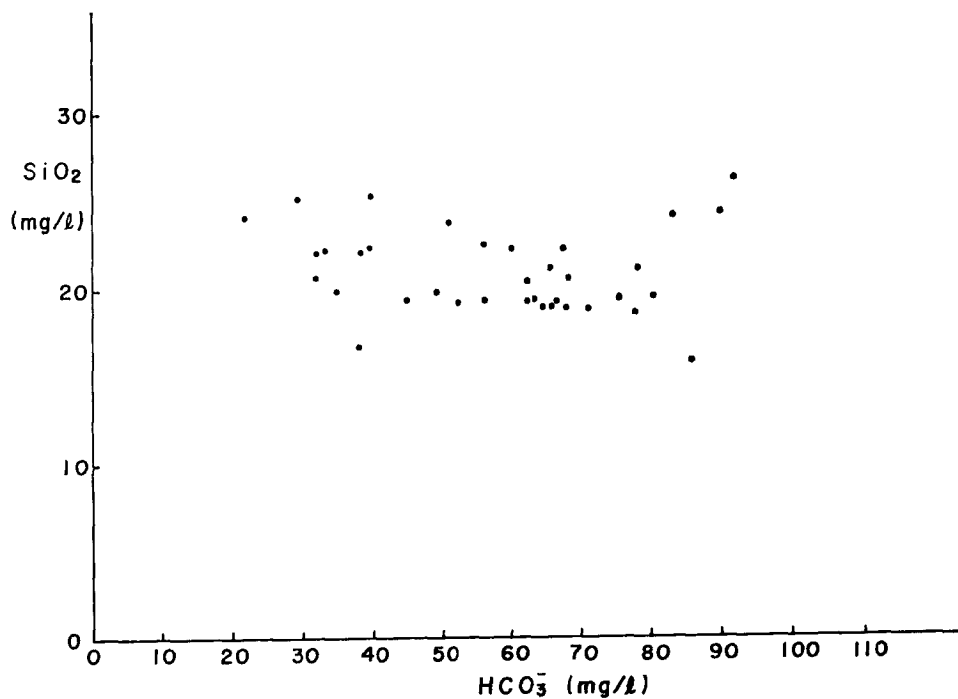


Fig. 12 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and soluble silica in Uji-gawa (Futatabi-dōri) area, Rokko.

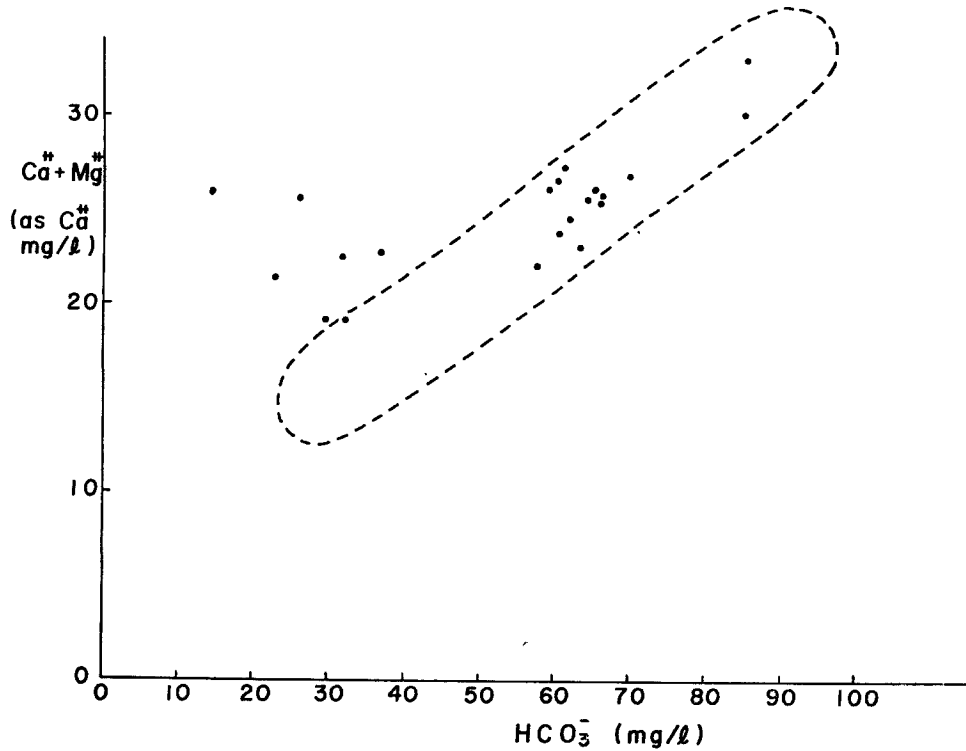


Fig. 13 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Ca²⁺ + Mg²⁺ in Uji-gawa (Nodani) area, Rokko.

(3-1) Table 1 (詳細についてはFig. 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35 および 38 を参照)から次のことがわかる：

天然水中の Cl⁻ 含量から天然水への人間活動による汚染，温鉱泉水の混入が殆んど無視できる地域，すなわち，Cl⁻ の供給源としては降水および降下物を考えればよいと思われる地域は

- 六甲山系， 住吉川， 芦屋川流域
 - 六甲川流域
 - 奥山川流域
 - 水無川流域
- 伊吹山系， 姉川， 草野川流域
 - 愛知川流域
- 岐阜県， 揖斐川流域

である。

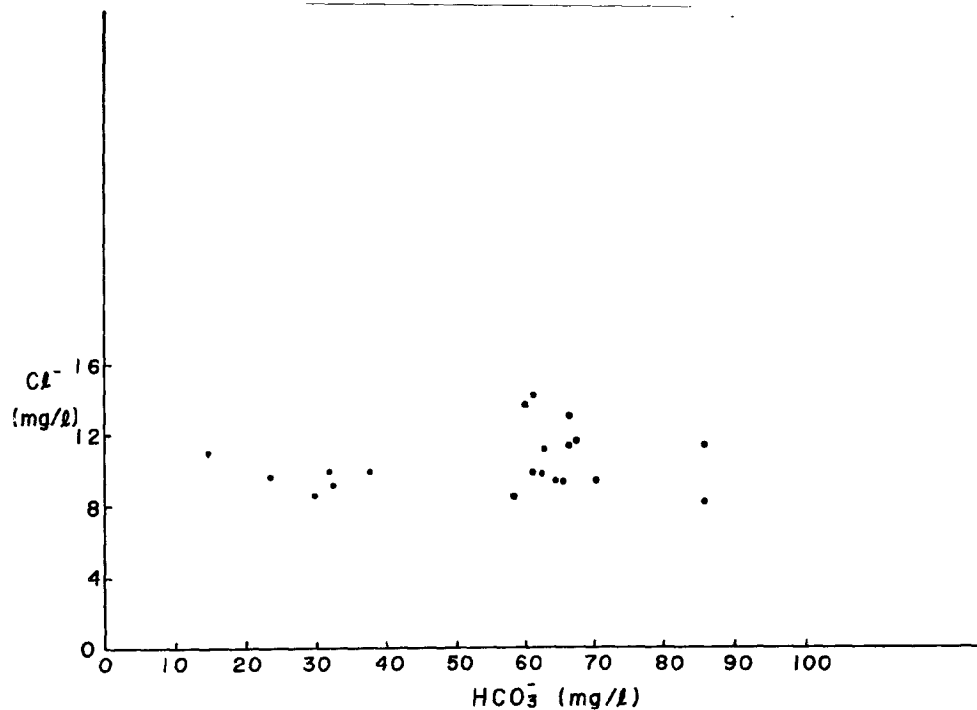


Fig. 14 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Cl⁻ in Uji-gawa (Nodani) area, Rokko.

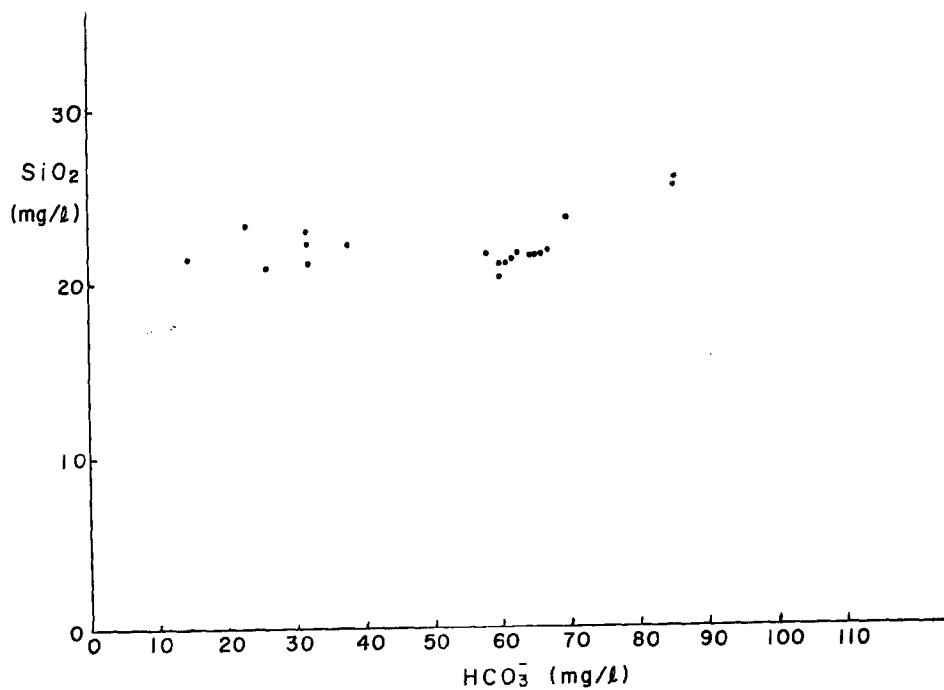


Fig. 15 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and soluble silica in Uji-gawa (Nodani) area, Rokko.

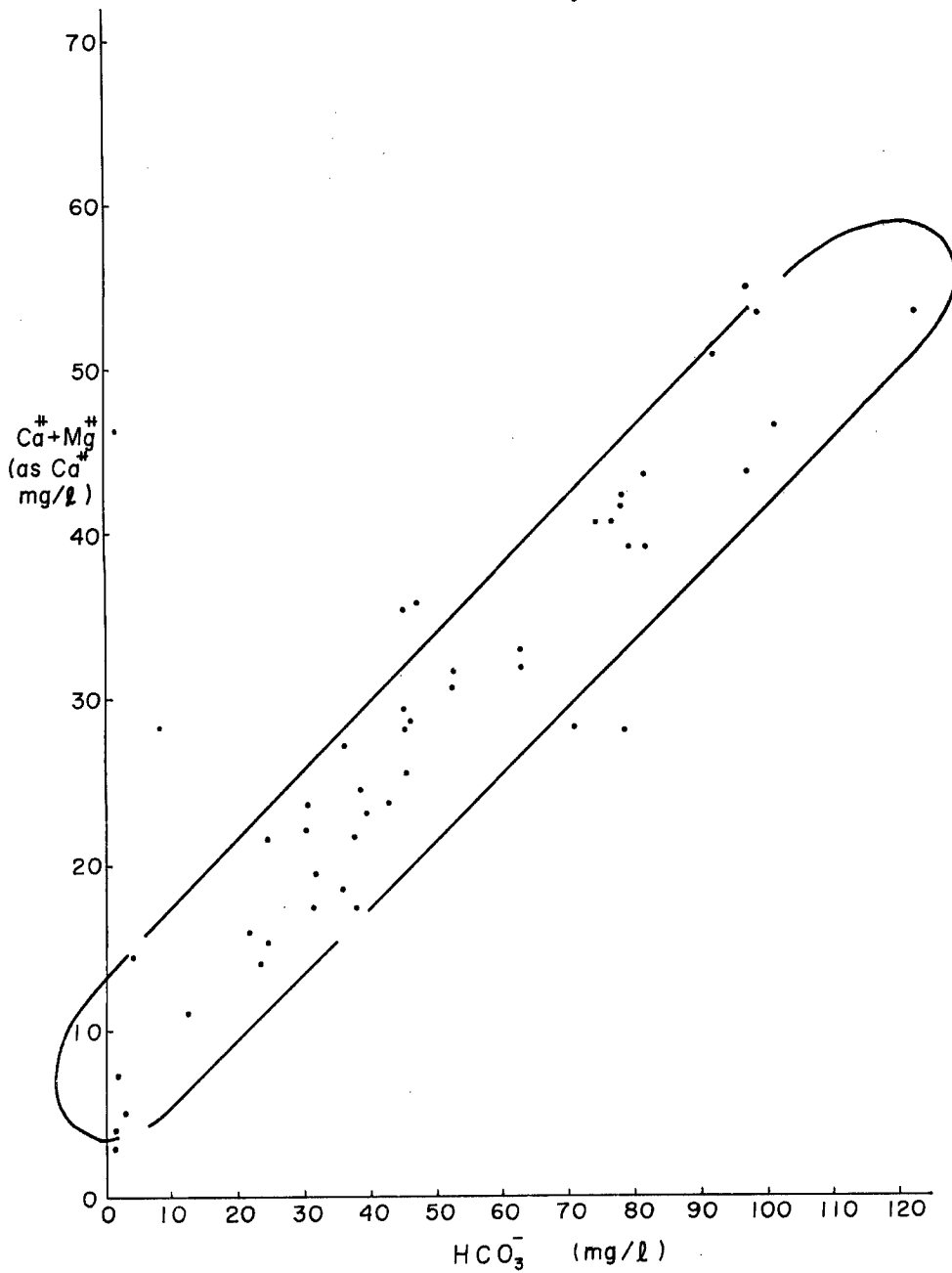


Fig. 16 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in miyohōji-gawa area, Rokko.

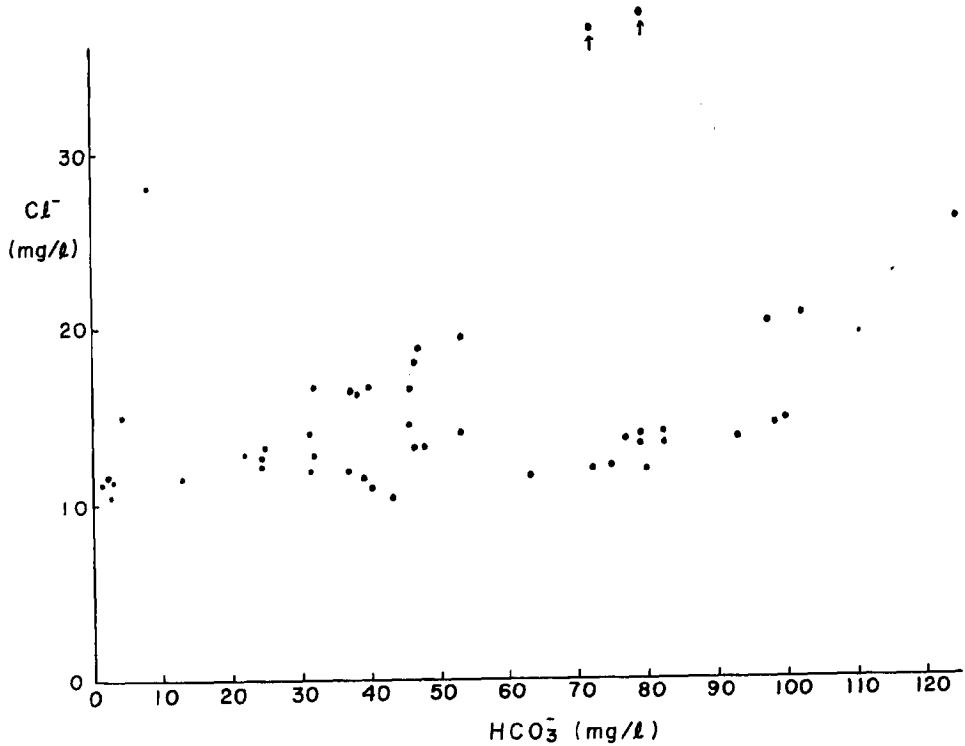


Fig. 17 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Cl⁻ in Miyohōji-gawa area, Rokko.

降水、降下物からの天然水中への元素の寄与は同一地域においてはほぼ一様であると考えられ、降水、降下物からの Ca²⁺+Mg²⁺ が天然水中へ供給される量はこれらの地域では無視できる程度と考えてよかろう。

従ってこの地域における天然水の Ca²⁺+Mg²⁺ の大部分は岩石、土壌から溶出されて天然水に加わったものと考えられることができる。これらの地域における岩石の崩壊がその地域の天然水中の Ca²⁺+Mg²⁺ 含量によって予知されることは既に六甲山系の住吉川、芦屋川流域に関する報告¹²⁻³³⁾ で詳述した通りである。すなわち、Fig. 1, 22, 25, 28, 31, 34 および Fig. 37 からわかるように Ca²⁺+Mg²⁺ と HCO₃⁻ とは正相関があり、Ca²⁺+Mg²⁺ 含量からでもまた HCO₃⁻ 含量からでも岩石の風化の程度、そしてひいては崩壊の予知はできるのである。

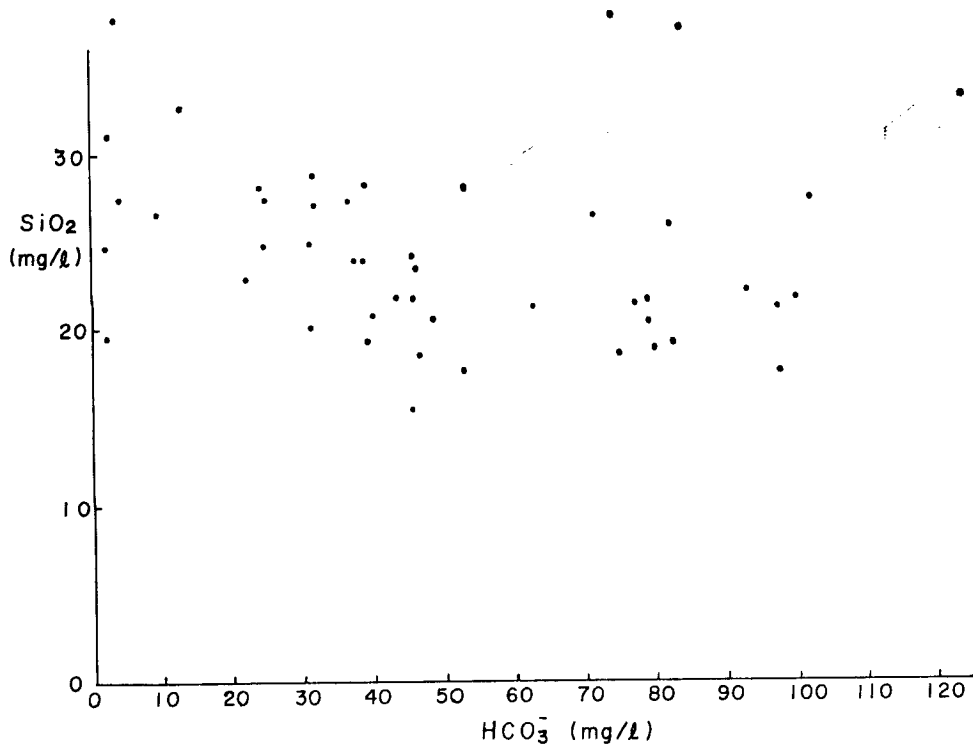


Fig. 18 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Miyohōji-gawa area, Rokko.

ここで注意したいことは上述の地域の母岩が **Table 1** に示したごとく、ケイ酸塩岩石のみからなる地域とケイ酸塩岩石と石灰岩の両方からなる地域とがあることである。

天然水中の $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ がケイ酸塩岩石からの溶解によるか、それとも石灰岩からの溶解によるかを判定することは非常に大切なことである。

この判定は天然水中の HCO_3^- 含量 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ と正相関がある) と溶存ケイ酸含量との関係をもとにして知ることができる。母岩がケイ酸塩岩石であるときは **Fig. 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27** および **Fig. 30** からわかるごとく HCO_3^- 含量 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量も) と溶存ケイ酸含量との関係を見ると、少くとも HCO_3^- あるいは $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量が増加するとき溶存ケイ酸含量が小さくなることはない。しかるに母岩がケイ酸塩岩石と石灰岩からなるときは **Fig. 33, 36** および **Fig. 39** からわかるごとく、天然水中の HCO_3^- あるいは $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量が大きくなると、溶存ケイ酸含量は減する傾向が明らかにみられる。天然水中の $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ がケイ酸塩岩石からの溶解に起因するならば、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ が多量溶かし出されるときはケイ酸も多量溶かし出されるはずであり、天然水中の $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量が大きいかかわらず溶存ケイ酸含量が小さいときは、その多量の $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ の大部分は石灰岩からの溶解によるものと推察されるのである。

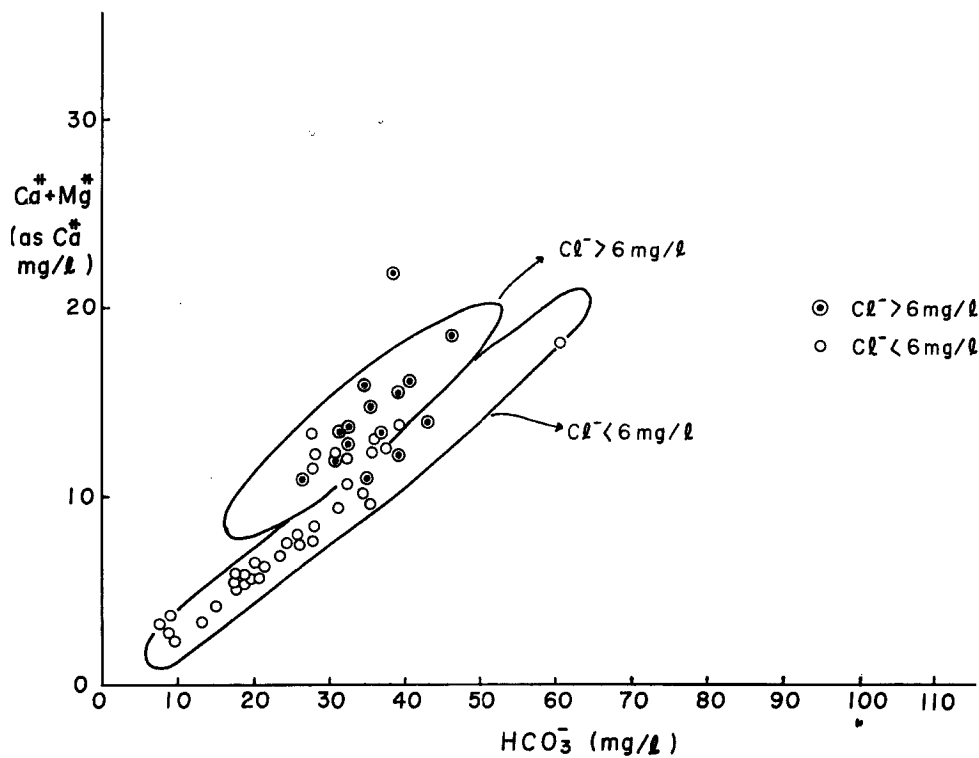


Fig. 19 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Arima-gawa area, Rokko.

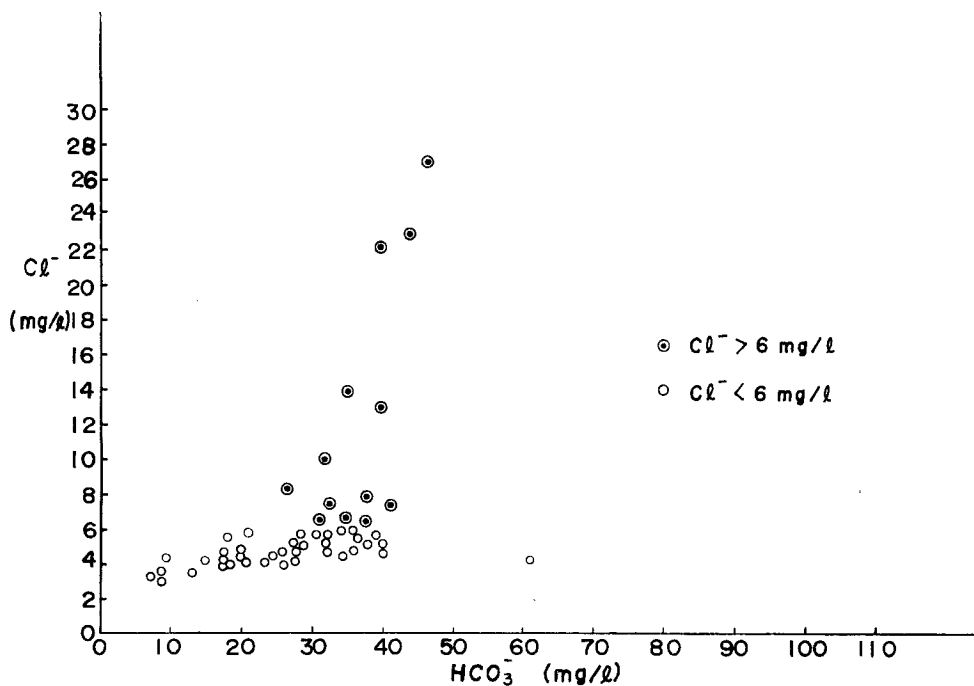


Fig. 20 Relationship between concentrations of HCO_3^- and Cl^- in Arima-gawa area, Rokko.

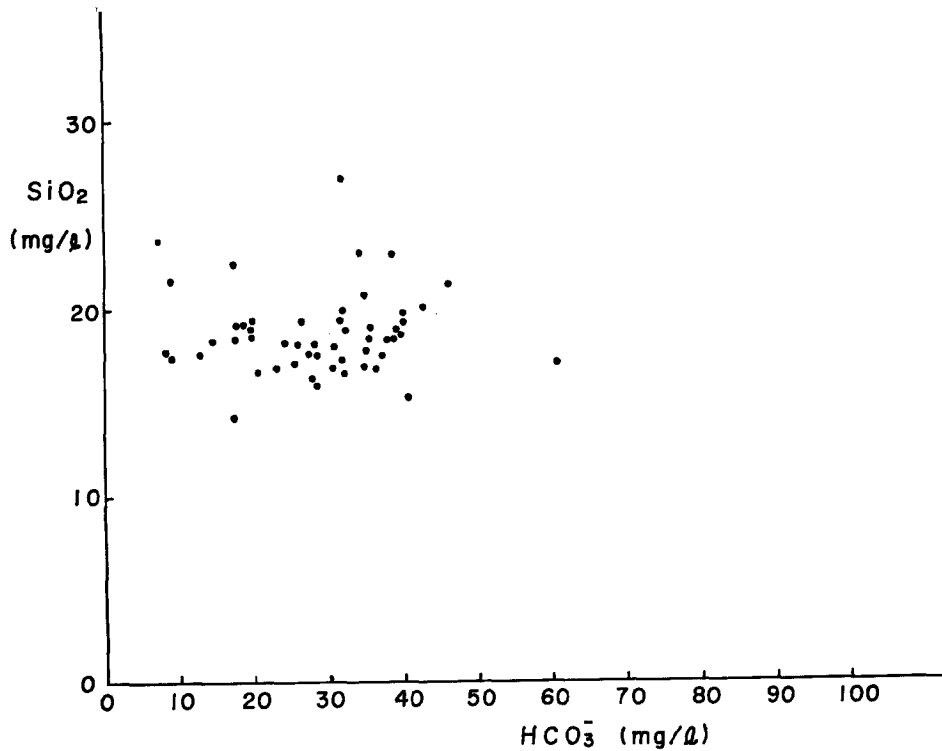


Fig. 21 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Arima-gawa area, Rokko.

(3-2) Table 1 (詳細については Fig. 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 32, 35 および Fig. 38 参照) から次のことがわかる：

もともと、人間活動からの汚染は調査地域全体について無視できるような場所を選んでいる。そこで Cl^- 含量が大きい天然水については温鉱泉水あるいは特殊な通下水の混入を考慮しなければならない。

そのような地域は

- 六甲山系、高橋川流域
- 天上川流域
- 宇治川再度師通および野谷流域
- 有馬川流域のある地域
- 妙法寺川流域

である。

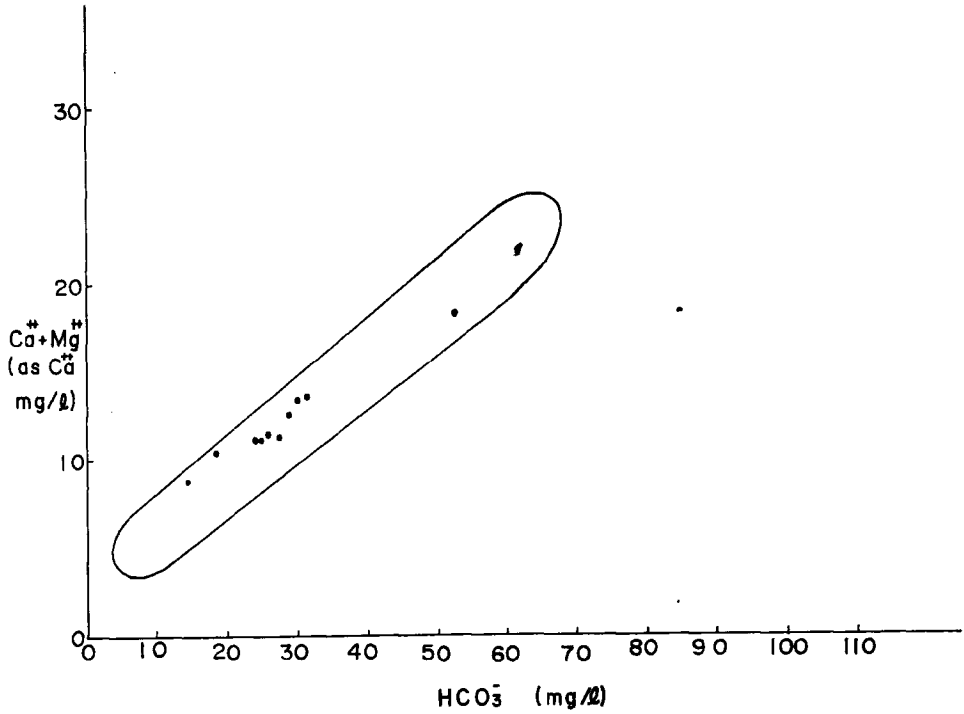


Fig. 22 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Ca²⁺ + Mg²⁺ in Rokko-gawa area, Rokko.

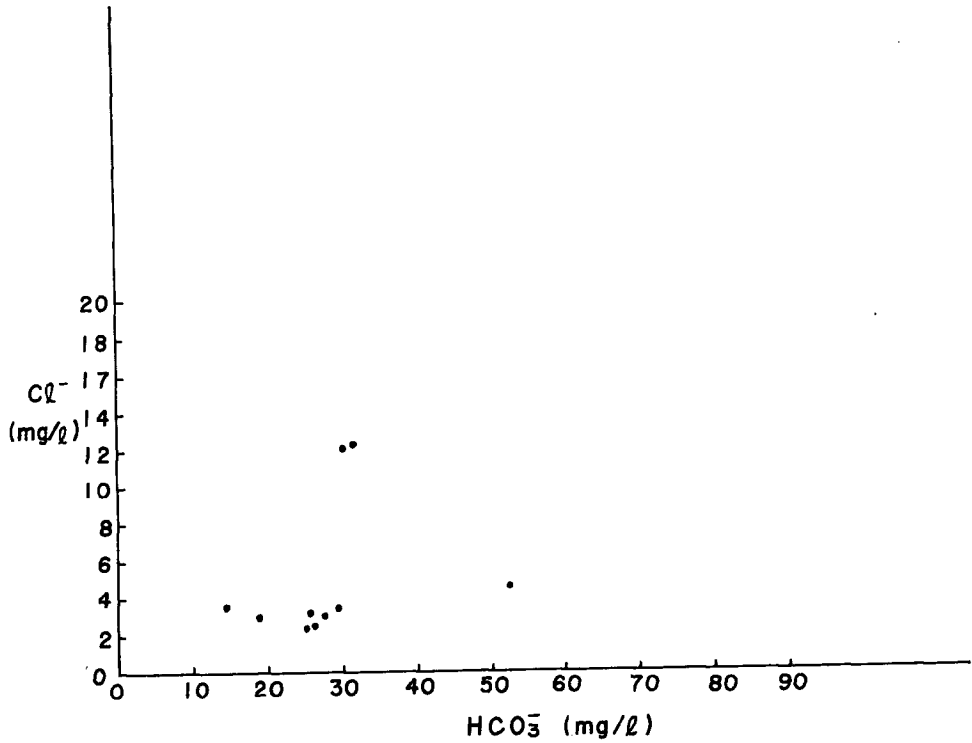


Fig. 23 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Cl⁻ in Rokko-gawa area, Rokko,

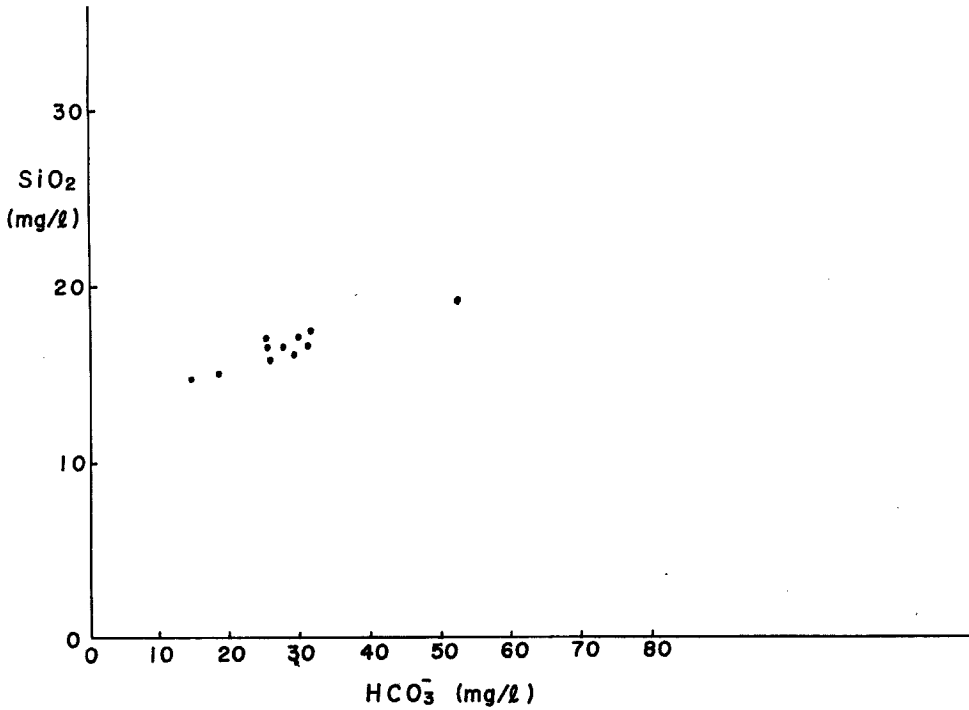


Fig. 24 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Rokko-gawa area, Rokko.

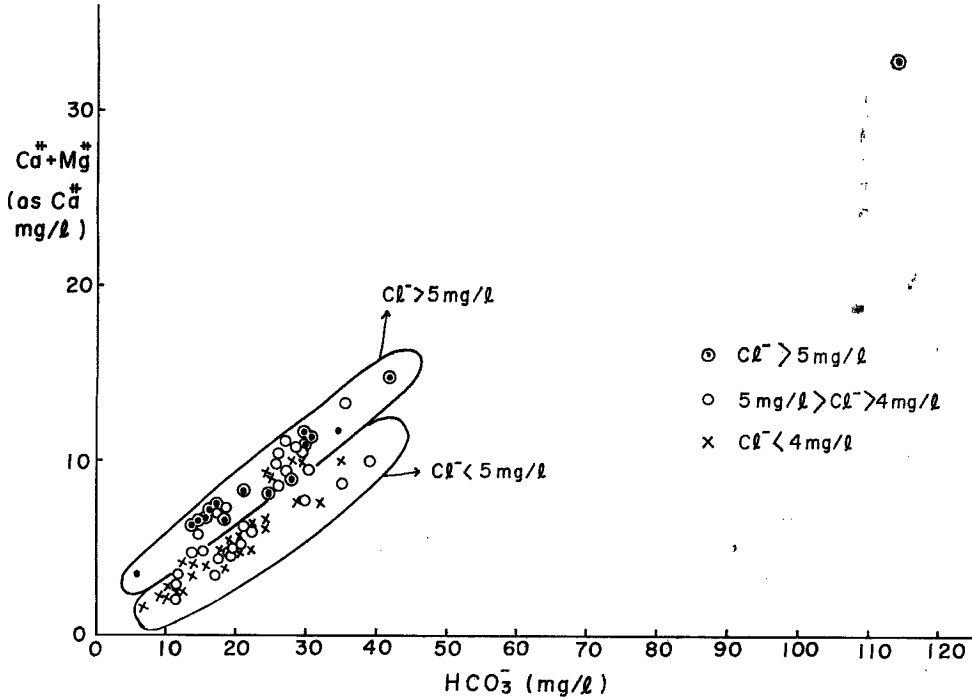


Fig. 25 Relationship between concentrations of HCO_3^- $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Okuyama-gawa area, Rokko.

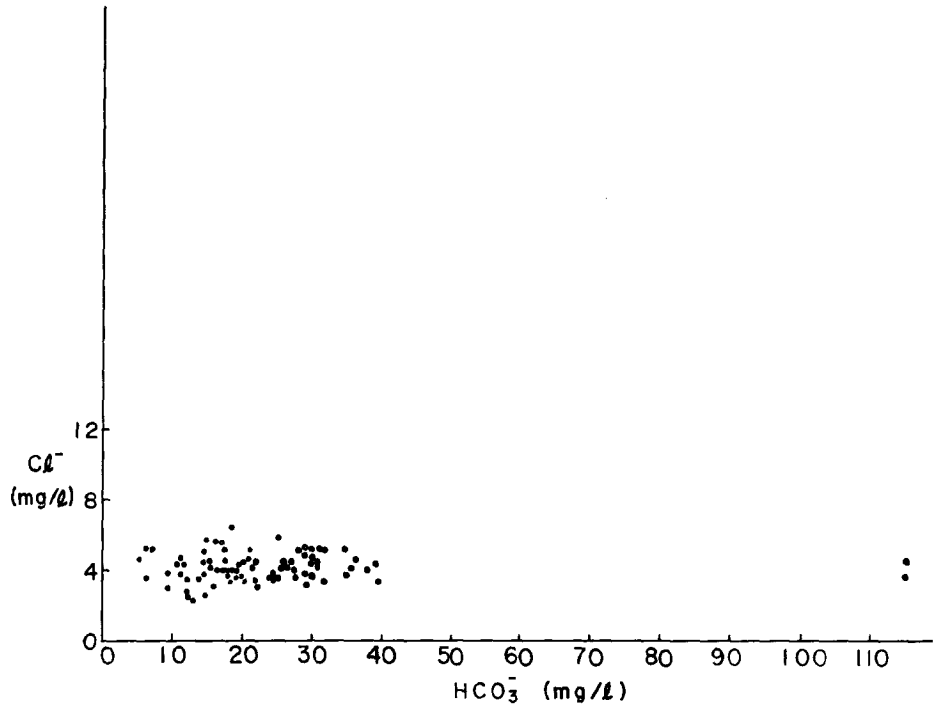


Fig. 26 Relationship between concentrations of HCO_3^- and Cl^- in Okuyama-gawa area, Rokko.

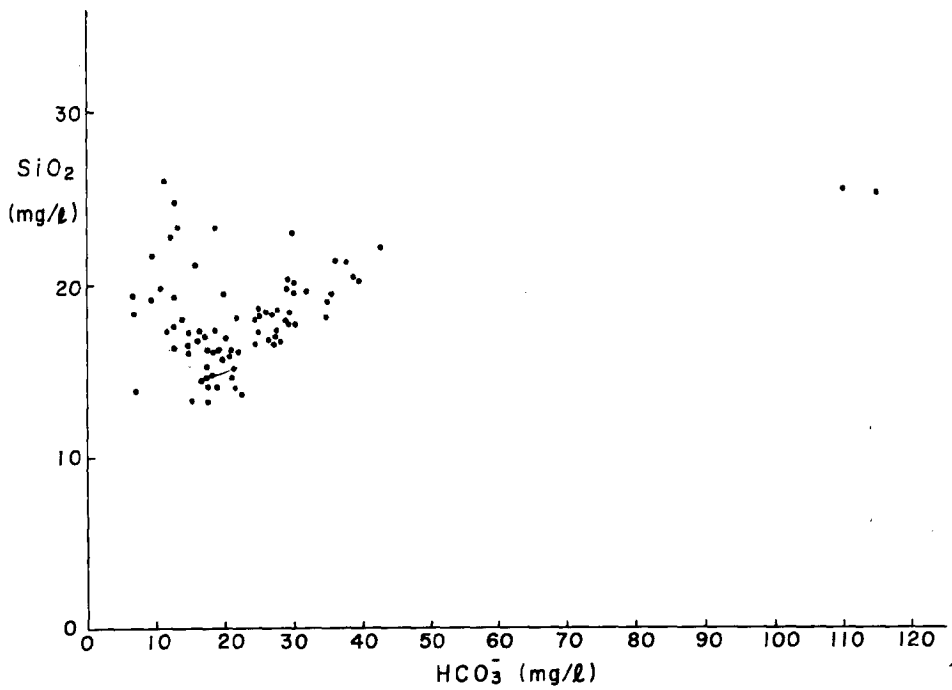


Fig. 27 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Okuyama-gawa area, Rokko.

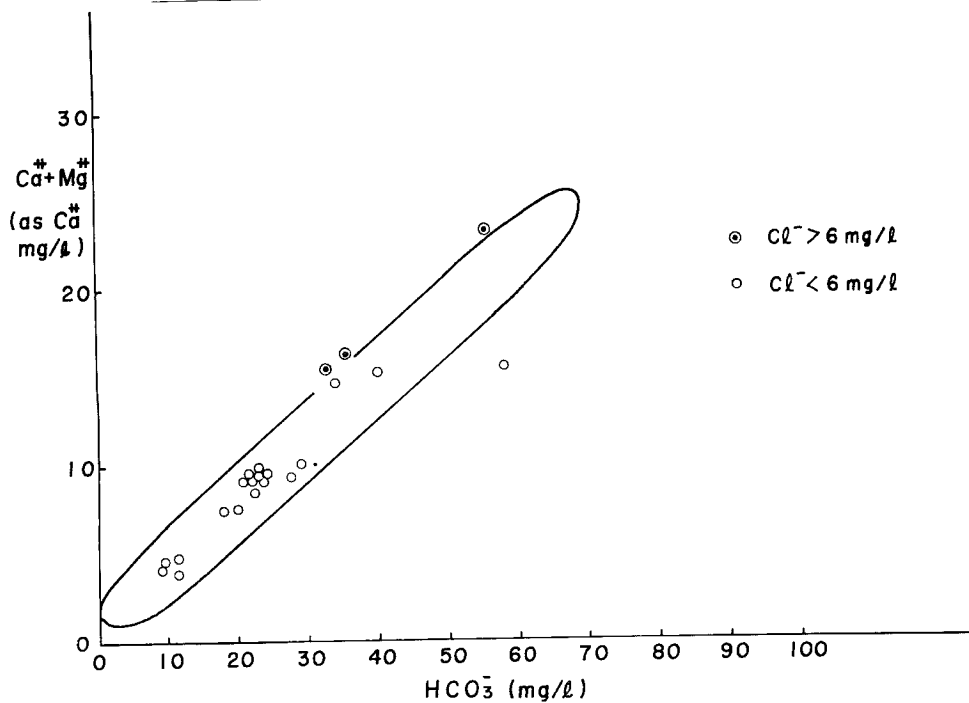


Fig. 28 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Mizunashi-gawa area, Rokko.

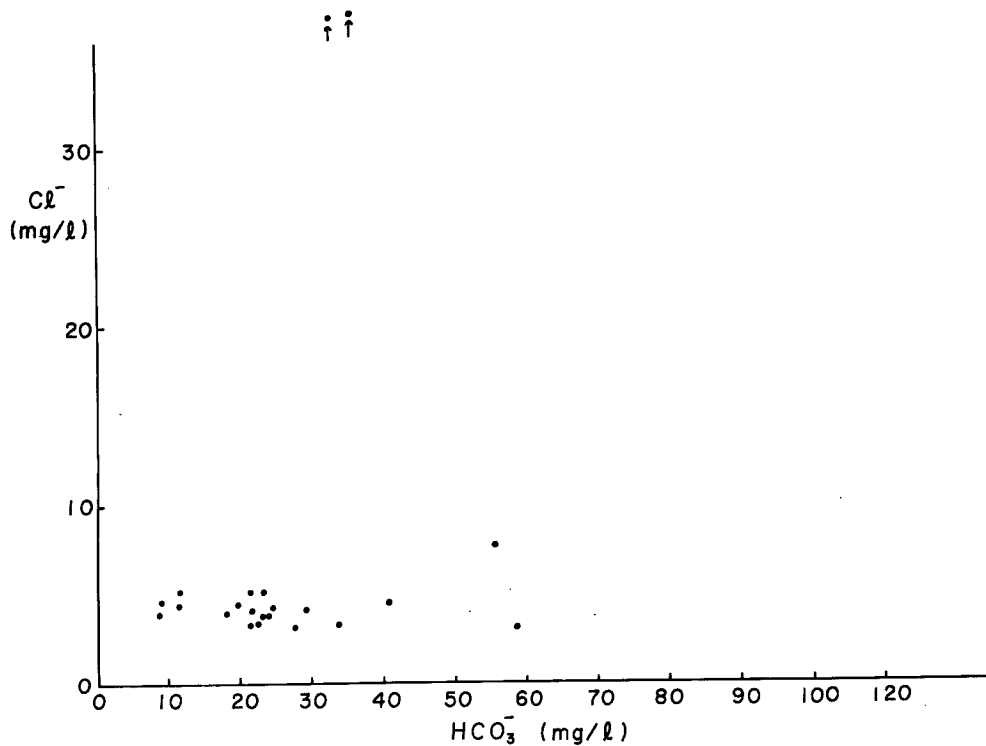


Fig. 29 Relationship between concentrations of HCO_3^- and Cl^- in Mizunashi-gawa area, Rokko,

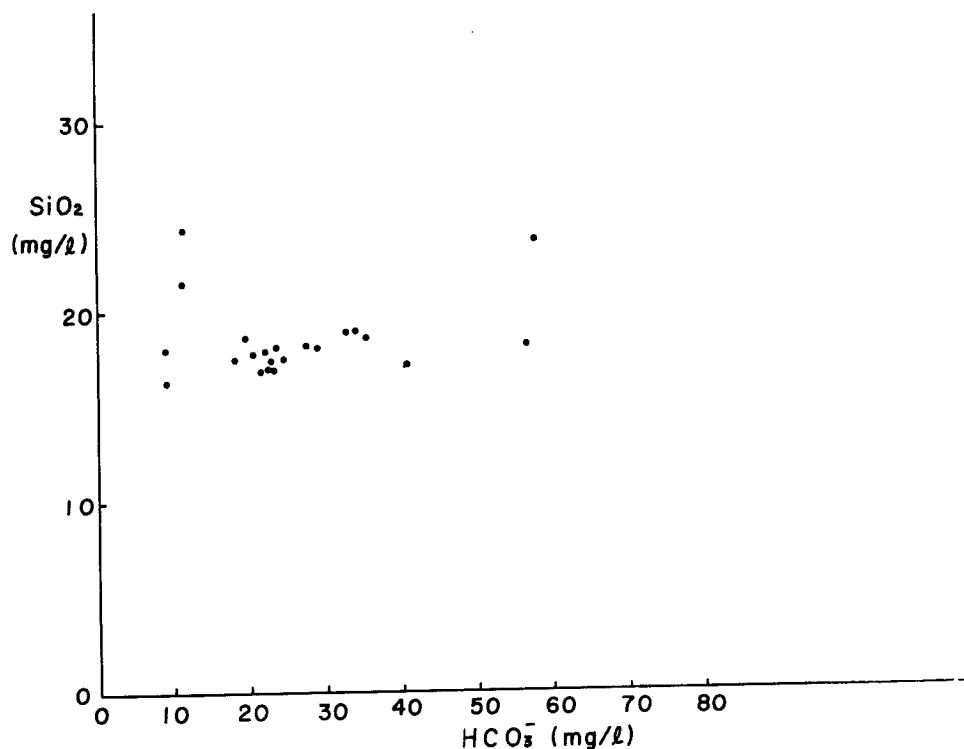


Fig. 30 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Mizunashi-gawa area, Rokko.

このような地域の天然水の性質は複雑で(2-1)に示したように単純には取扱うことができない。温鉱泉水または特殊な地下水からの天然水中への元素の混入、とくに $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ および HCO_3^- 等の混入量を知り、この値を天然水中の $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 含量から差引いて、岩石からの溶解に由来する $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ の量を知らなくてはならない。そうして始めて天然水中の $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ あるいは HCO_3^- 含量と岩石崩壊の予知とを結びつけて考えることができるのである。天然水中の Cl^- 含量が大きい所では今述べた温泉水または特殊な地下水の混入があると考えなくてはならない。

このことを念頭においてこれらの地域の天然水中の HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 含量との関係を示す Fig. 4, 7, 10, 13, 16 および Fig. 19 をみると、何れの場合も HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 含量間には正相関がみられるが、(2-1)の地域にみられる関係とは違っていることがわかる。 Cl^- 含量が多いものほど特殊な地下水の天然水中への混入量が多いと考えなければならないことを指示するものであろう。一例を有馬川流域にとって考えると、 Cl^- 含量 6mg/l 以上と以下の地点を分けて考えると Fig. 19 にみられるごとく、 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ と HCO_3^- との関係はそれぞれではかなりきれいな正相関がみられる。

さて、今まで調査した全ての場合について $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ と HCO_3^- との含量間の関係を1つにまとめて Fig. 40 に示した。

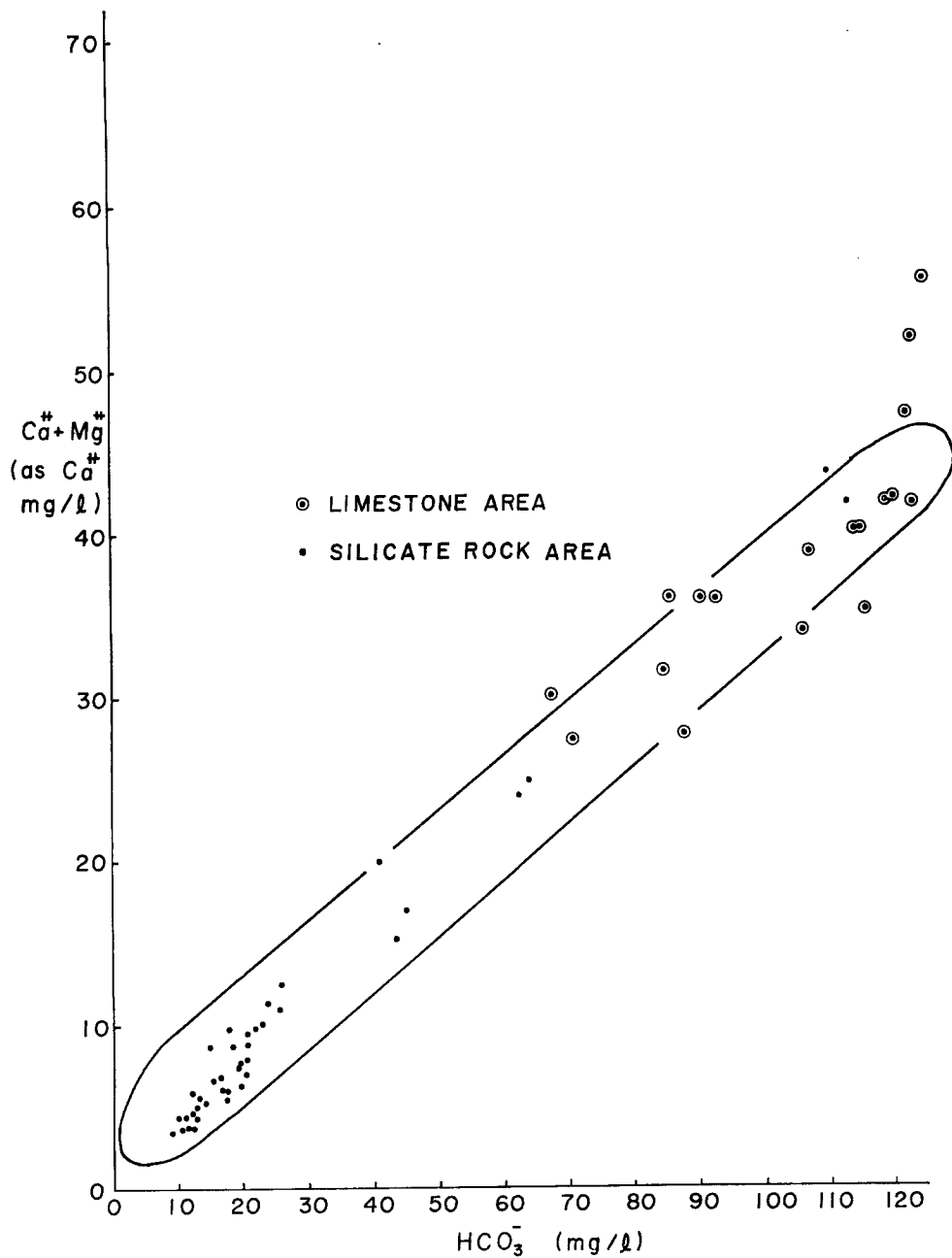


Fig. 31 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Ane-and Kusano-gawa areas, Ibuki.

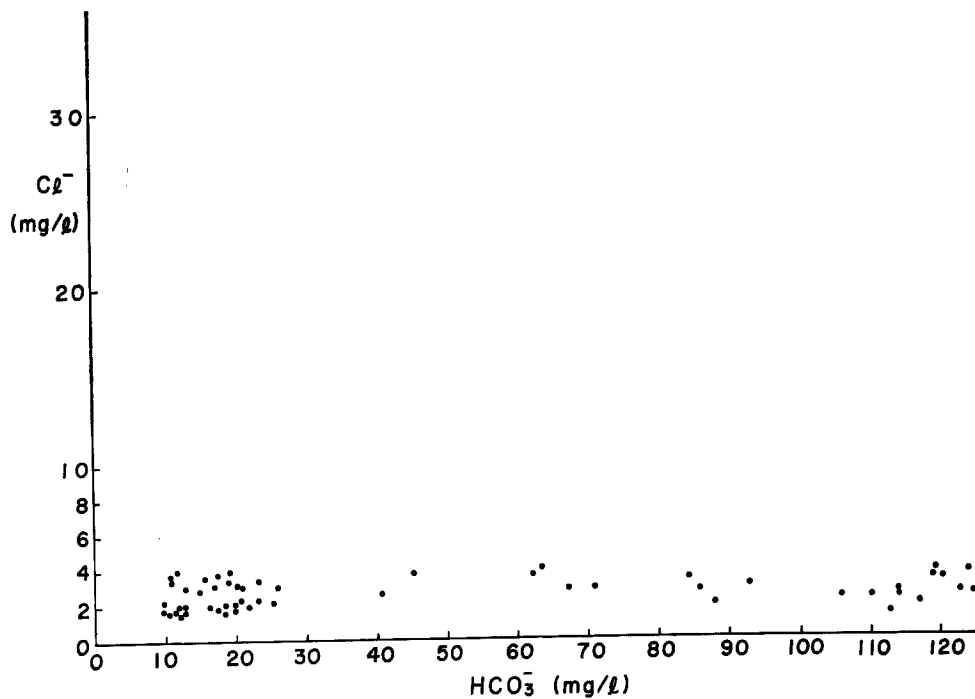


Fig. 32 Relationship between concentrations of HCO_3^- and Cl^- in Ane- and Kusano-gawa areas, Ibuki.

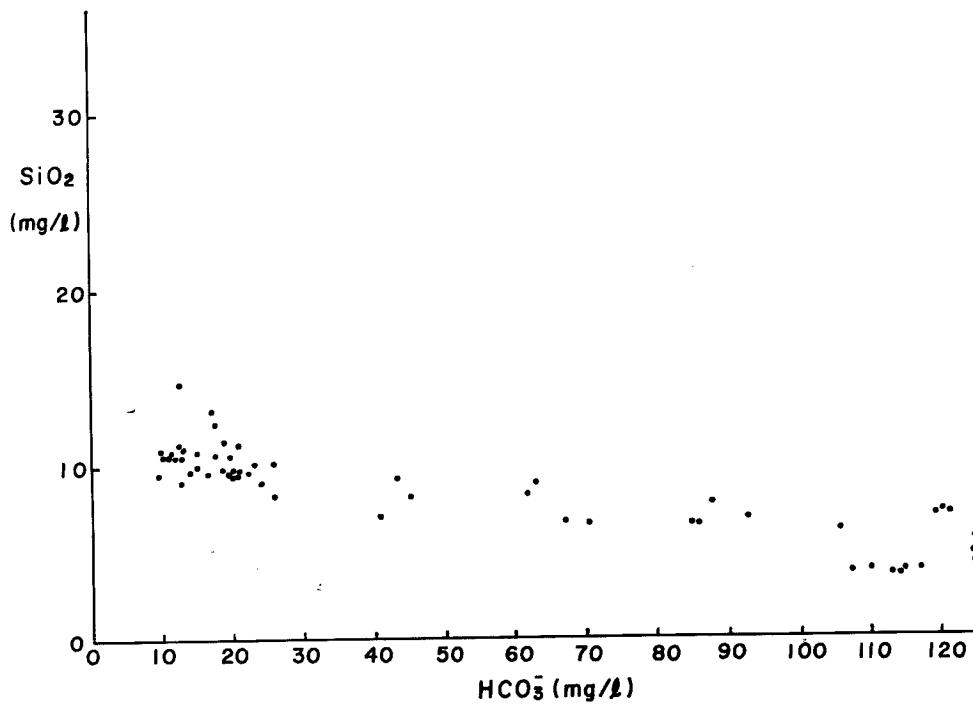


Fig. 33 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Ane- and Kusano-gawa areas, Ibuki.

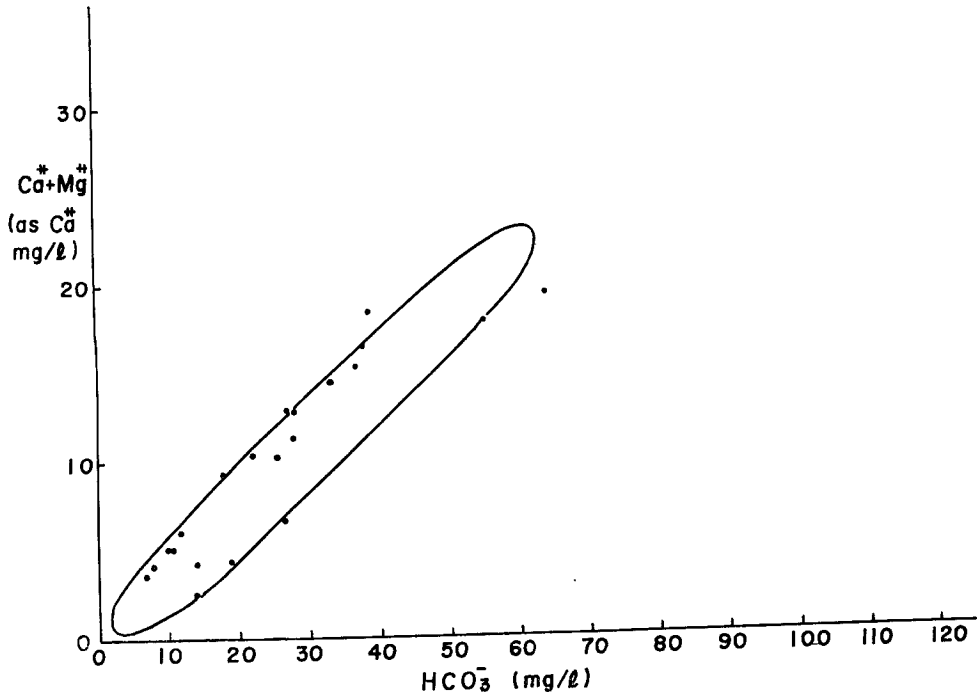


Fig. 34 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in Echi-gawa area, Ibuki.

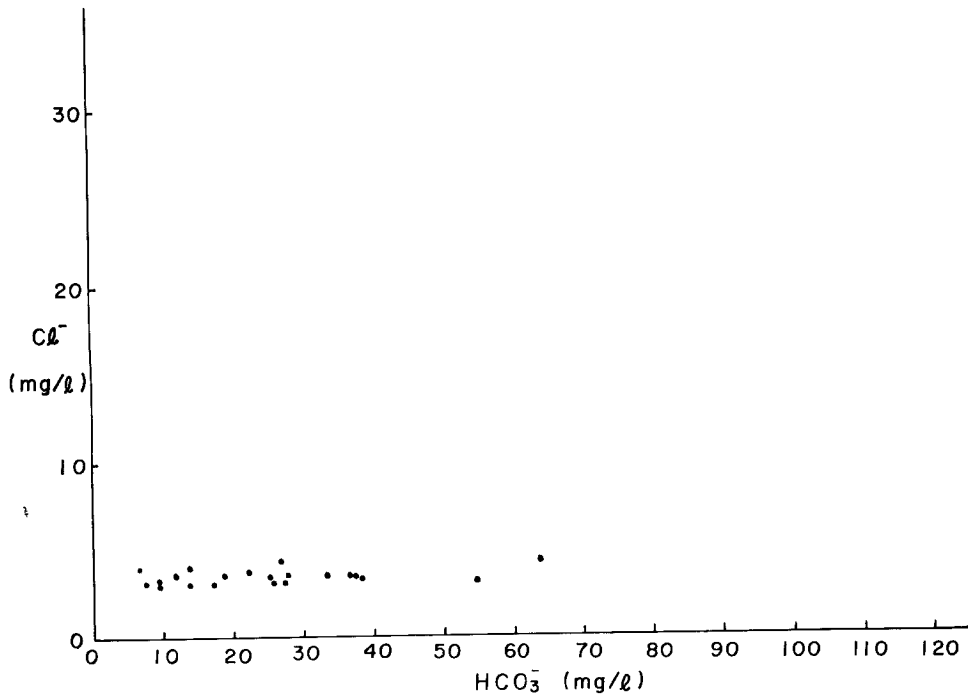


Fig. 35 Relationship between concentrations of HCO_3^- and Cl^- in Echi-gawa area, Ibuki.

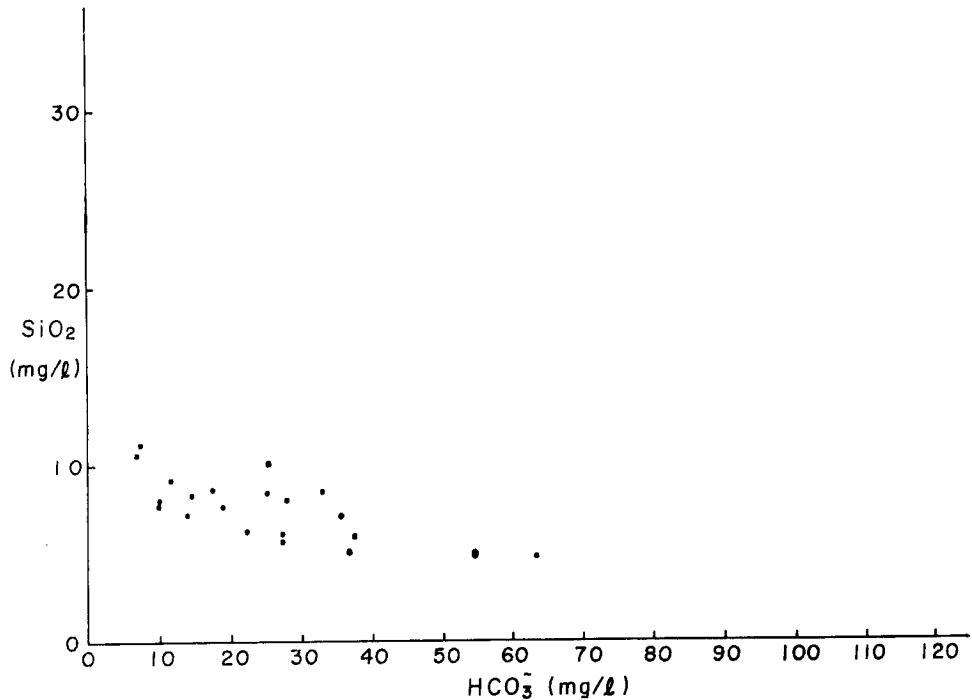


Fig. 36 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Echi-gawa area, Ibuki.

この結果から天然水中に Cl^- の多い地域、その極端な例は妙法寺川流域であるが、 HCO_3^- 含量が零でも $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ が含まれていることがわかり、これだけの量は少くとも岩石からの炭酸による溶出によって天然水中に供給されたものではないことがわかる。なぜならば Ca^{2+} または Mg^{2+} は岩石から炭酸によって溶かし出され、従って Ca^{2+} または Mg^{2+} が溶け出た場合はこれに当量の HCO_3^- が天然水中に供給され、含有されていなければならないからである。

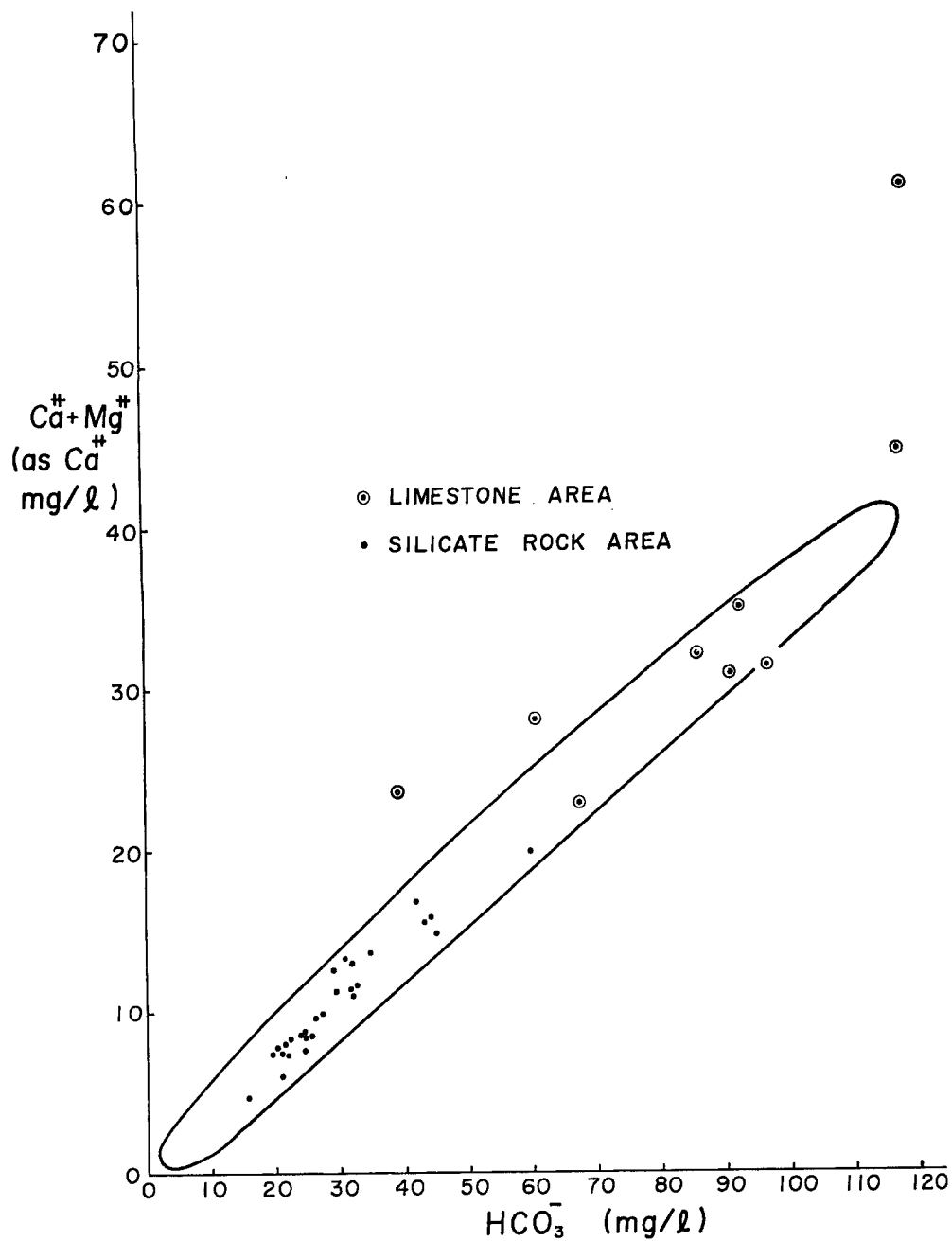


Fig. 37 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}_2^+ + \text{Mg}_2^+$ in Ibi-gawa area, Gifu Prefecture.

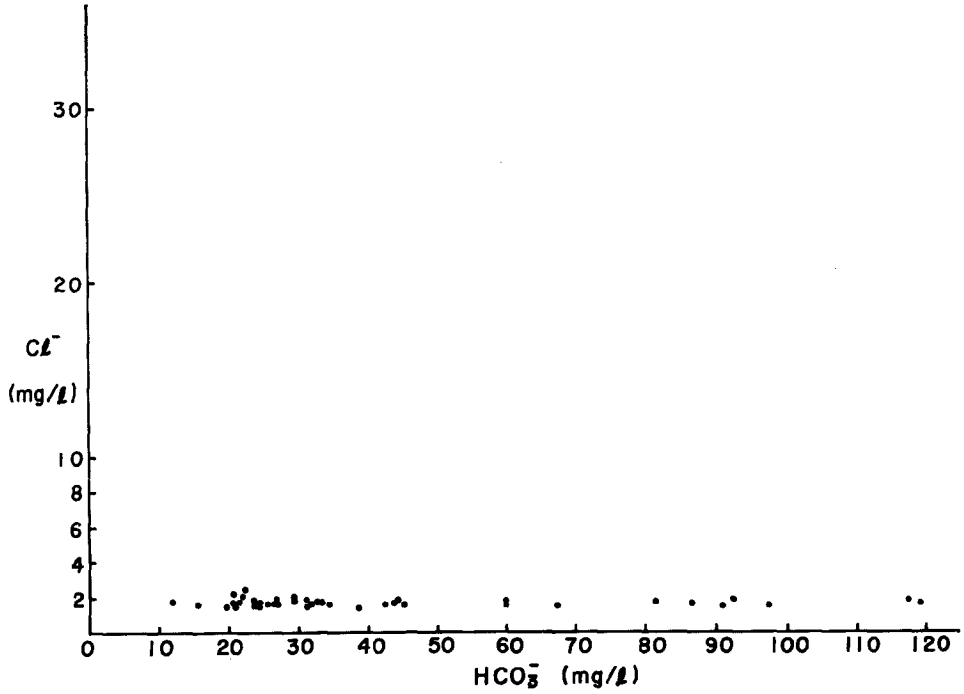


Fig. 38 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and Cl⁻ in Ibi-gawa area, Gifu Prefecture.

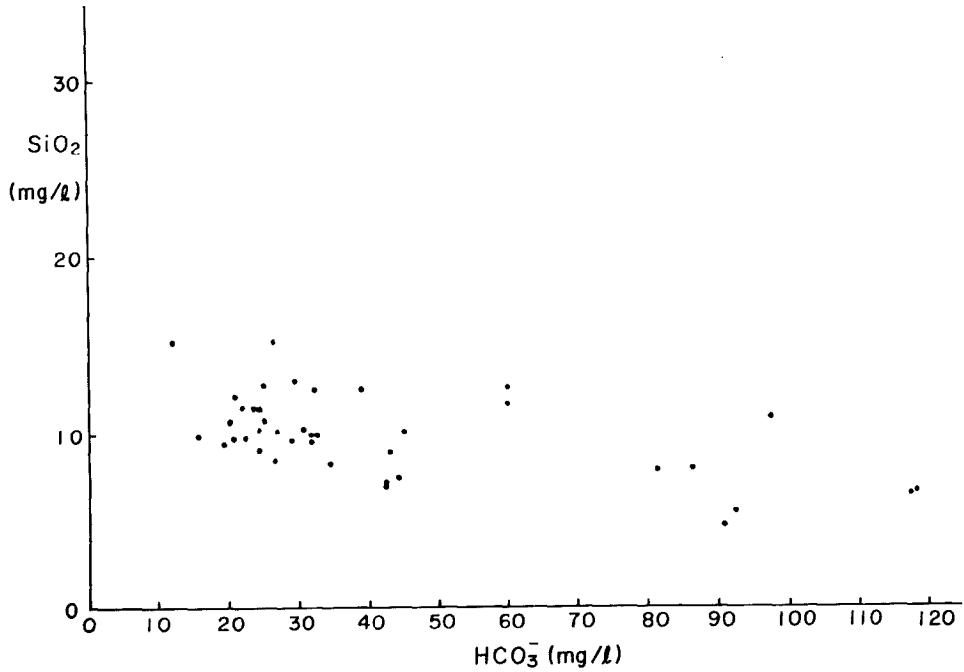


Fig. 39 Relationship between concentrations of HCO₃⁻ and soluble silica in Ibi-gawa area, Gifu Prefecture.

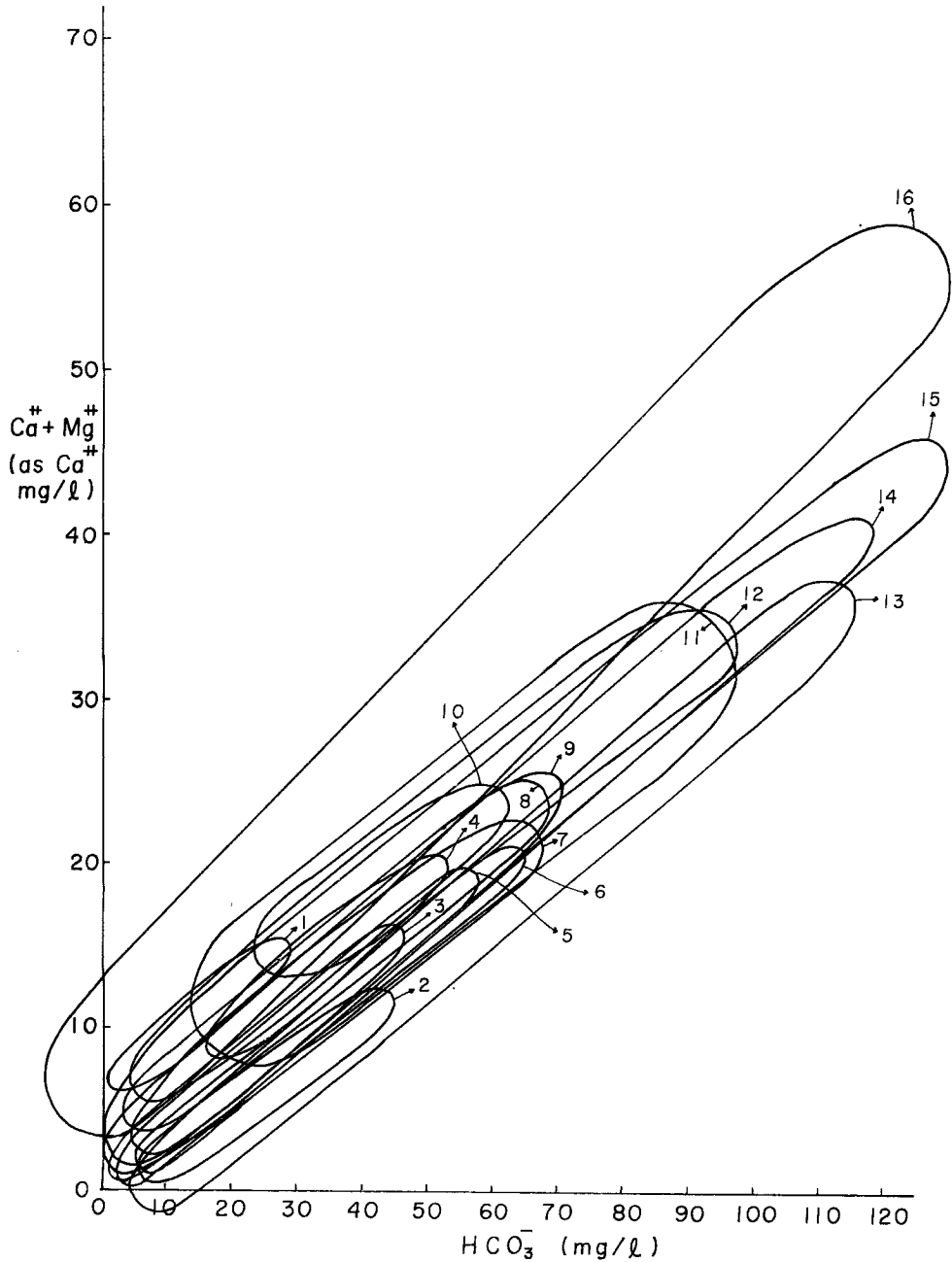


Fig. 40 Relationship between concentrations of HCO_3^- and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in natural waters.

- | | | |
|---------------------------------|------------------|------------------------|
| (1) Tenjo-gawa | (2) Okuyama-gawa | (3) Okuyama-gawa |
| (4) Arima-gawa | (5) Echhi-gawa | (6) Arima-gawa |
| (7) Tenjo-gawa | (8) Rokko-gawa | (9) Mizunashi-gawa |
| (10) Takahashi-gawa | (11) Uzi-gawa | (12) Uji-gawa (Nodani) |
| (13) Ashiya- and Sumiyoshi-gawa | | (14) Ibi-gawa |
| (15) Ane- and Kusano-gawa | | (16) Miyohoji-gawa |

Table 1 The chemical compositions of natural waters (mg/l)

the region of the investigation	kinds of rocks	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (as Ca ²⁺)	soluble silica (SiO ₂)	
Rokko	Sumiyoshi- and Ashiya gawa areas	silicate rocks	2—6	5—110	0.4—36	8—24
	Takahashi-gawa area		8—14	15—120	6—32	19—22
	Tenjo-gawa area		5—11	10—60	5—20	15—33
	Uji-gawa area (Futatabi-dori)		9—16	20—90	10—34	19—26
	Uji-gawa area (Nodani)		8—14	15—85	19—33	20—26
	Myohoji-gawa area		10—20	5—130	5—54	18—32
	Arima-gawa area		3—26	7—60	9—20	16—24
	Rokko-gawa area		2—4	15—55	9—18	15—19
	Okuyama-gawa area		2—6	5—45	2—15	14—24
Mizunashi-gawa area	3—5	10—60	4—23	17—24		
Ibuki	Ane- and Kusano- gawa areas	silicate rocks	2—4	10—130	4—54	4—14
	Echi-gawa area	and limestone	3—4	7—65	4—19	5—11
Gifu Pref.	Ibi-gawa area	silicate rocks and limestone	2	10—120	5—45	5—15

今述べたような場合に岩石からの溶出量を考えるには横の座標軸を HCO₃⁻ 含量が零のときの Ca²⁺+Mg²⁺ 含量の線まで上方に移動すればよいことになる。

一方、Cl⁻ 含量の小さい天然水の HCO₃⁻ と Ca²⁺+Mg²⁺ の含量間の関係をみると原点を通る場合が多い。このことはこのような天然水中の Ca²⁺+Mg²⁺ および HCO₃⁻ のほとんど全てが岩石からの溶解現象にもとづくものと考えられ、Ca²⁺+Mg²⁺ や HCO₃⁻ 含量そのものから岩石崩壊の規模を予想することが簡単にできる場合である。しかし Cl⁻ 含量が小さい天然水でも、例えば六甲山系、住吉川および芦屋川流域の天然水にみられるごとく、Ca²⁺+Mg²⁺ 含量が零でも HCO₃⁻ が含まれる天然水もある。このような場合に岩石に由来する元素量を考えるには縦の座標軸を Ca²⁺+Mg²⁺ 含量が零のときの HCO₃⁻ 含量の線まで右に移動すればよいことになる。

以上のような座標軸を移動させる操作をすることにより、温鉱泉水の混入がみられるかなり複雑な水系においても我々は天然水中の Ca²⁺+Mg²⁺ あるいは HCO₃⁻ の含量から岩石の風化程度さらに崩壊の規模の予知ができるであろうといえよう。

温鉱泉水等の混入には無関係に我々の調査した地域全てについての HCO₃⁻ と Ca²⁺+Mg²⁺ 含量の関係、すなわち傾斜は等しいことが Fig. 40 からわかる。ここで前述したような座標軸を移動させる、すなわち温鉱泉水等からの寄与を除く操作をほどこすと、全ての場合について Ca²⁺+Mg²⁺ (Ca²⁺ の重さで示す) と HCO₃⁻ との重量関係は

$$(Ca^{2+}+Mg^{2+}) : HCO_3^{-} = 1 : 3$$

の一定比でそれぞれの含量は大きく変動していることがわかる。これは丁度 Ca(HCO₃)₂ として Ca²⁺ が溶

けていることを示しており、岩石（ケイ酸塩岩石であれ、また石灰岩であれ）からの炭酸による Ca^{2+} の溶出反応に全く一致するものであることが注目される。逆にいえば、以上のような操作をほどこ欠すことにより、天然水中で $\text{Ca}^{2+}:\text{HCO}_3^- = 1:3$ になることからこうして補正した $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 HCO_3^- の含量は岩石の溶解に由来するものであることを支持するといえるのである。こうしてよほどの特別の場合でない限りは本報で述べてきたような座標軸移動の操作をすることによって既に住吉川、芦屋川の研究結果で述べた通りに、補正した天然水中の $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ あるいは HCO_3^- の含量から岩石崩壊の規模をも含む予知ができる可能性を見出したのである。

この仕事の大部分を占める六甲山系の調査・研究は昭和30年から現在に至るまでの間終始建設省近畿地方建設局六甲砂防工事事務所の援助によった。もちろん、同事務所の援助がなくてはこの研究はできなかった。この間にわたる同事務所からうけた絶大な御協力、御援助にたいし深甚の謝意を表したい。それぞれの水域における調査結果の詳細は同事務所に報告してきた。六甲山域の調査・研究は将来も続けていく心積りであり、その結果えられる結論については建設省近畿地方建設局出版による報告書に報告する心積りである。

また、その他の地域の研究に関しては名古屋大学理学部松沢勲教授を長とする文部省の特定研究費を仰いだ。併わせて謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 北野康：六甲山系，住吉川および芦屋川流域砂防調査報告書（第一回），建設省近畿地方建設局 pp.125—159（1959）
- 2) 北野康：同上誌（第二回），pp.195—200（1962）
- 3) 北野康，金森暢子：同上誌（第三回），pp.1—81（1964）
- 4) 北野康：災害の地域的特異性に関する基礎的総合研究，松沢勲編集，pp.14—16（1966）
- 5) 野北康，金森悟，金森暢子，加藤喜久雄：同上誌，pp.72—78（1966）
- 6) 北野康，加藤喜久雄：昭和40年9月の豪雨および24号台風による風水害の調査とその防災研究，松沢勲編集，pp.122—125（1966）