

河川水の水質からみた岩石風化量

北 野 康

結 言

水質というと飲料水に適するののか、不適かを指示するものと考えられがちである。しかし私は天然水の性質・性格を示す最も簡潔で有効な国際的表現だと思っている。

日本と世界の河川水の平均化学組成を第1表に示した。

第1表 日本と世界の河川水の平均化学組成の比較

	日 本	世 界
蒸 発 残 渣	748mg/l	100mg/l
Na ⁺	9.41%	5.79%
K ⁺	1.68	2.12
Mg ²⁺	2.70	3.41
Ca ²⁺	12.5	20.4
Cl ⁻	8.21	5.68
SO ₄ ²⁻	14.77	12.14
HCO ₃ ⁻	21.6	35.2
SiO ₂ (溶存状)	26.84	11.67

一見ただけで、次のことが読みとれる。第一に世界河川の総塩類量が日本のそれよりも大きいことに気がつく。それは多分、世界の陸地の平均降水量が1年間に650mmであるのに日本では1800mmと大きいこと、日本の河川水の蒸発量は、熱帯地方や乾燥地域に比べて小さいことなどによるのであろう。日本の河川水のNa⁺やCl⁻の占める割合が高いのは、海からの影響が強いからである。日本の河川水で、Ca²⁺やHCO₃⁻の含有濃度は低く、溶存ケイ酸含有量が大きいのは、石灰岩地域が日本では少なく、山地地質が火山岩で占められて

ているからである。

天然水には、量を問題にしなければたいの元素が含まれている。化学元素といえばメンデレーエフ(MENDELEEV)の周期率表が頭に浮かぶが、元素はそれぞれ化学的挙動が違う。長い間の地球化学者の水の研究の積み重ねによって、ある水にある元素が、ある量だけ含まれるための、その水が経てきたであろう可能な履歴を書きあげることができるようになった。それぞれの元素の含有量から、それぞれ独立に水の可能な履歴を書け、定量する元素の数が増えれば増えるほど、その可能な履歴群の数も増えてくる。しかし一つの天然水自体の履歴は提出された履歴群の最大公約数的なものでなければならない。化学者ならば、現在の開発された器機と試薬を用いると、天然水中に含まれる10や15種類くらいの化学元素の定量は、難しくもわずらわしくもない。化学的挙動の典型的に異なる10ないし15種類の元素を分析・定量すれば、その水の経てきた履歴を、かなりの程度まで正しく推定することができるであろう。もう少し話を進めてみよう。第2表を参照されたい。すべての河川水の源は降水である。しかし、河川水では、降水の蒸発と、降水以外の幾つかの起源から元素が加わり、または取り去られてその化学組成は降水のそれとは違って来るし、また元素濃度は高くなって来る。降水が地表に達すると、一部はそのまま河川水に、一部は地下水となる。地球表面では蒸発が起こって、塩類濃度は大きくなる。海水の飛沫が空气中に放出され、大気中を輸送される間に蒸発が起こって結晶が析出し、これが晴れた日でも地表に落下する。これを降下物と呼ぶ。

降水は降下物を溶かして、河川に供給する。また温鉱泉水の添加、人間生活や工業及び農耕活動による物質の供給、そして岩石や土壌からの元素の溶出による添加と、ある元素については吸着その他で除去されるなどして、河川水の化学組成は決まるのである。すなわち、(河川水中の元素量) = (降水による元素量) + (降下物による元素量) + (温鉱泉水による元素量) + (人間生活、工業、農耕活動による元素量) + (岩石、土壌による元素量) となる。

第2表 わが国の河川水中の元素含有量を規定する因子 (mg/l)

イオン	降水	降下物	蒸発による濃縮	温鉱泉水	工業製品の消費	左の合計	河川水	差・土壌による部分
Na ⁺	1.1	2.0	0.66	0.16	1.1	5.0	6.7	+1.7
K ⁺	0.26	0.47	0.16	0.0009	0.42	1.3	1.19	-0.1
Mg ²⁺	0.36	0.65	0.22	0.0012	0	1.2	1.9	+0.7
Ca ²⁺	0.97	1.75	0.58	0.0046	0.45	3.8	8.8	+5.0
Cl ⁻	1.1	2.0	0.66	0.26	1.7	5.7	5.8	+0.1
SO ₄ ²⁻ -S	1.5	2.7	0.90	0.2	0.90	6.2	3.5	-2.7
溶存SiO ₂ -Si	0	0	0	0.0016	0	0	8.9	+8.9
HCO ₃ ⁻							31	+31

左辺の河川水中の元素濃度は化学分析することによって知ることができる。右辺の第1, 2項は実測などにより推定できる。実は降下物は降水にかきされて河川水となるが、この過程で蒸発濃縮される。その蒸発量は降水量と河川水流出量とから推定され、約2~3割の蒸発濃縮を考えることにする。第3項目の温鉱泉水などからの河川水への元素供給量も推定でき、第4項目の人間活動による元素供給量も簡単ではないが推定される。

これらについては、北野康, "水の科学" (日本放送出版協会, PP.205, 1969), 三宅泰雄, 北野康, "新水質化学分析法" (地人書館, PP. 265, 1971), および Y, KITANO, "Geochemistry of Water" (Dowden, Hutchinson & Ross, PP.455, 1975)などを参照されたい。ともかく、右辺のそれら第1~4項までの和を左辺の値から差引いて、第2表の最後の行に示した。これは岩石・土壌に由来する元素量ということになる。その内容は岩石・土壌からの元素溶出と逆にイオン交換をも含めた吸着などによる除去との収支量である。カルシウムイオンは非常に大きなプラスを示すが、これは岩石から多量のカルシウムが溶け出ること、マイナスになるカリウムイオンは岩石から溶け出ても粘土に大変吸着されやすいこと、硫酸イオンは還元されて硫化鉄として沈殿して、水中から除かれることで説明される。このように第5項は岩石の風化を最も端的に示すものとして、注目されるべきものといえよう。

1. 水質で山くずれの予知をする

花崗岩できて六甲の山はもろく、災害は忘れる暇もないほどくりかえし起っている。六甲の山に入って気のつくことは、小さな沢一つちがうと、岩石の崩れ方が全く違うことである。上流とか下流の区別なく、全く任意の場所で岩石崩壊が起っている。六甲山系の代表的ともいえる、住吉川と芦屋川流域を例にとって話を進めたい。

住吉川流域で大きな被害がおこるのは、深い層で岩石の風化がおきて細かく割れ、ここに水が入りこんですべるので大量の土砂、岩石がおし流されるからである。芦屋川流域では表面が風化されていて、流出する岩石量は多くなく被害は小さい。

そこで、六甲山系の地下の岩石の風化状態を知ることができれば、山くずれの予知ができるわけである。それを知るには、岩石をボーリングして調べればよい。しかし、岩石の崩れぐあいが場所による規則性のまったくないことを思うと、全山が、それこそ蜂の巣になるまでボーリングしなければならないわけで、とうていそれはできない。

北野らは次のような考えのもとに、水質から深層岩石の風化状態を定量的に知ること成功した。

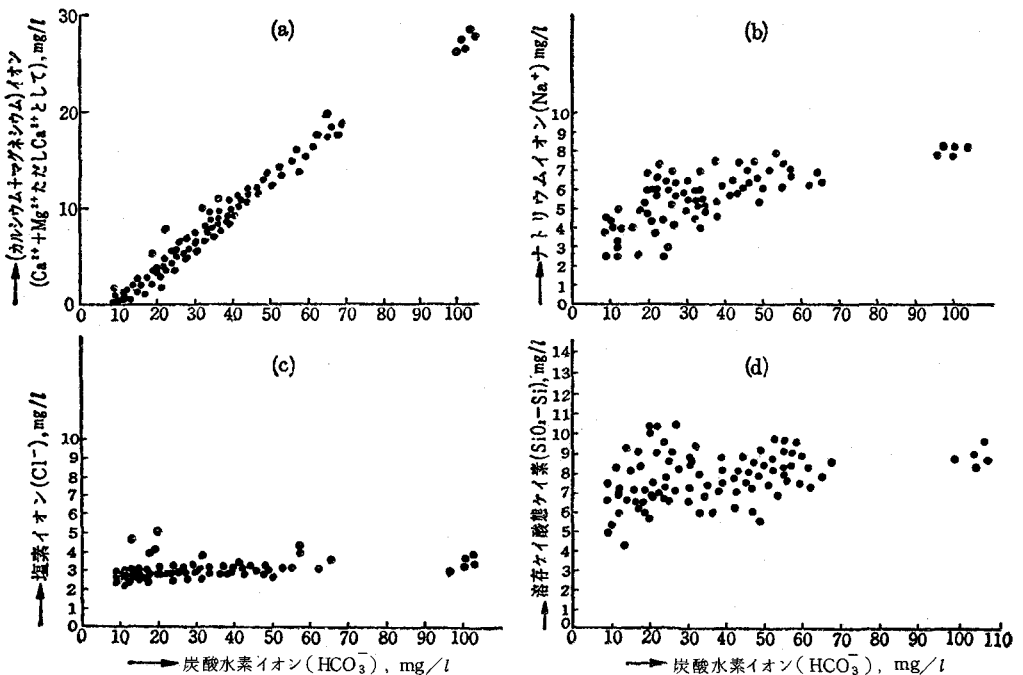
岩石の崩壊、流出の基本は、岩石が細かく割れることである。そもそも岩石は、元素と元素が結びついてできている物質である。これが細かく割れるのは、元素と元素の結びつきのどこかが切れるこ

とである。この結合を切るのに、最も大きな力をもっているのはこの環境下では水であると、北野らは推論した。水自体は、その分子構造のために、物質を溶かすひじょうに大きな能力をもっているからである。水は岩石中の元素間の弱い結合を切るであろう。その時、ある元素は溶かし出されて水の中に含まれることになる。地下にもぐって出てきた水は、山を歩けば集めることができる。地表で採った水の化学組成が、その水が接してきた岩石の状態を何らかの形で反映し、その便りをもってきてはいまいかという、素朴な思いに願いをかけたのである。

岩石が細かく割れる — それは、やられる岩石とやっつける環境、この場合は水との間の闘いである。その双方の絶対的な強さが問題ではない。相対的な強さが問題である。ともかく、その勝負の結果は水質が指示してくれるであろうというのが、北野らの考えのもとであった。

住吉川、芦屋川流域の調査結果をお目にかけよう。

天然水に含まれる塩化物イオン、硫酸イオン、ナトリウムイオン、カリウムイオン、溶存ケイ酸等の含有量は、第1図(b)~(d)に一部を示すように、全流域にわたってほとんど差がなく、一様であった。これらの元素は、降水と降水物に由来するものだけで説明がつく程度の含有量である。そして、このことはまた、特殊な温鉱泉水の混入も、この地域ではまったく見られないことを示している。ただカルシウムイオン（マグネシウムイオンも）と炭酸水素イオンだけが、第1図(a)に示すように、場所によって実に大きく異なっており、しかも二つの含有量は、化学量論的に、炭酸水素カルシウムの組成で変動しているのである。



第1図 住吉川および芦屋川流域の河川水および湧水中の炭酸水素イオン含有量と各種イオン含有量との関係

六甲の岩石、花崗岩を採ってきて、水への溶出実験も慎重に行なった。多くの検討結果は、地下から二酸化炭素（炭酸ガス）が出てきて、これが地表からしみこんできた水に溶けこみ、その水が岩石を溶解するためであることを示唆した。この水は、花崗岩のうちで弱い結合を示すカルシウムを溶かし出し、一方二酸化炭素は、炭酸水素イオンに変わったのである。こうして、岩石の風化の割合に比例して、水中のカルシウムイオンと炭酸水素イオン含有量が増加してくることの間違いないことがわかったのであった。

そこで北野らは、ただ機械的に天然水中のカルシウムあるいは炭酸水素イオン濃度を数段階にわけて地図上でその分布を色わけした。一方これとはまったく無関係に、建設省六甲砂防工事事務所は、同地域の岩石の崩壊した規模を、同じく数段階にわけて地図の上に色わけした。どんな特性の降雨があったときにどの崩壊がおこったかの記録も、全部調べあげられた。

この二つの地図を重ね合わせたら、見事に合ったのである。ただ水質のほうからみて、カルシウムや炭酸水素イオンの含有量が大きいのに、いままで崩壊はしていない所がいくつかあった。これは将来、ある特性の降雨があるときに、ある規模の岩石の崩壊が起こる可能性があるであろうと、考えられる。

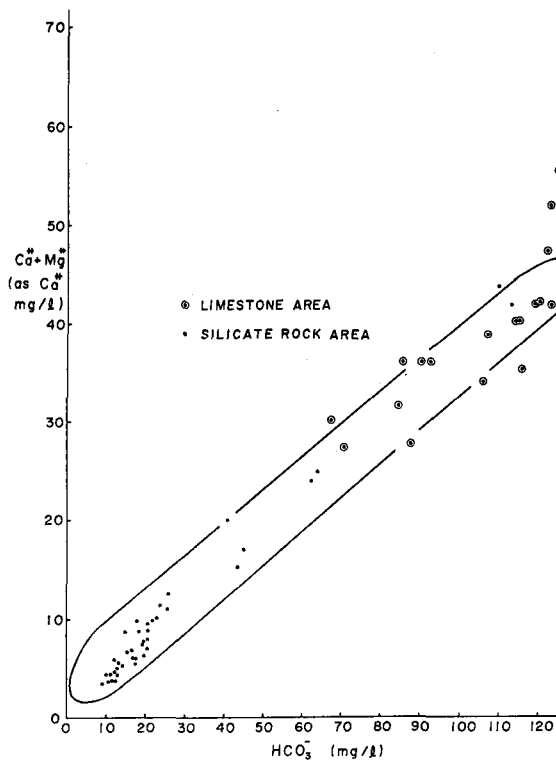
ともかく、六甲で崩壊をおこす原因は、物質の面からみると、地下からの二酸化炭素（炭酸ガス）の噴出であることがわかった。火山、花崗岩地域、そこにはかならずといってもよいほど、二酸化炭素の噴出がある。二酸化炭素はガスである。地下に亀裂さえあれば、そこをとって地表に出てくるのである。上流とか下流などには無関係のはずであり、任意の場所に出てきて当然である。

黒部第四ダム地域をはじめとし、多くの花崗岩地帯で同じような結果がえられた。

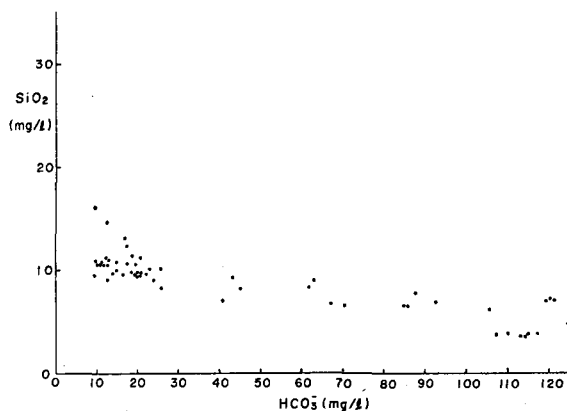
花崗岩地域といえば、宅地造成や土木工事が連想される。そこには六甲に象徴される岩のもろさを考えざるをえない。

ここで、石灰岩が存在する伊吹山系の結果をつけ加えたい。この地域には、石灰岩とケイ酸塩岩石がある。石灰岩は大変抵抗力が小さく水によって溶けやすい。第2図および第3図に一例を示したが、 Ca^{2+} や HCO_3^- が大きいのに溶存ケイ酸濃度が小さい場合は石灰岩が溶解していることがわかり、地下の岩石の状態が鮮明に推定できる。

ともあれ、水中の Ca^{2+} や HCO_3^- の濃度が岩石崩壊の予知に役立つことが分った。



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



第3図 Relationship between concentrations of HCO_3^- and soluble silica in Ane- and Kusano-gawa areas, Ibuki.

これらのことについては、北野康らの水質調査による岩石崩壊の予知の可能性、京大防災研年報第10号A、557-587、1967を参照されたい。

2. 河川流域において1年間に風化変質する鉱物および生成する粘土の量——河川水の化学組成に基づいた推定——

大きな溶解能力をもつ水が岩石に接触すると、岩石中において弱い結合力で結びついている元素は水中に溶かし出される。その元素を含む水を採集することは難しくはない。集めた天然水の化学組成がその水が接した岩石の風化状態を反映していることが多い。現在までの筆者らの研究結果から、天然水中の HCO_3^- 濃度が岩石の風化された状態を示唆してくれることが分った。それは岩石のき裂の状態をも含めた安定の度合を指示するものと思われる。岩石崩壊の度合の真の予想にはその上に地形と水文学的な因子を考慮すべきである。

これらの成果を北野と中村誠佑は更に次のように展開させた。

まず、天然水中の溶存元素の含有量のうち、岩石から真に溶け出た元素の量を推定する。そしてその過程で、どんな鉱物がどれだけの量風化変質し、どんな粘土鉱物がどれだけ生産されたか、また岩石中の石灰石や石英または非晶質シリカがどれだけの量、水中に溶出したかを推定した。

すなわち、それは次の2つの操作に分けられるのである。

(A) 岩石から天然水に溶け出た元素量の推定

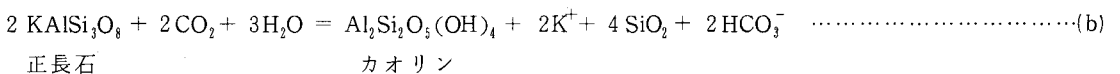
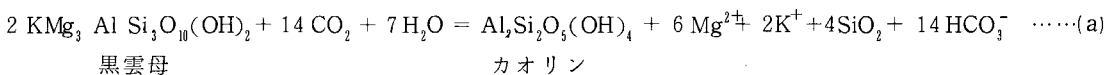
この操作を進めるためには、天然水中の Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , 溶存シリカの濃度の測定値を必要とする。具体的な操作を記すことにする。

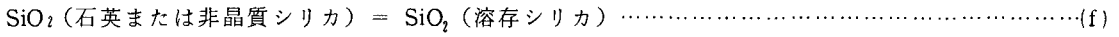
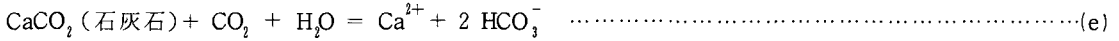
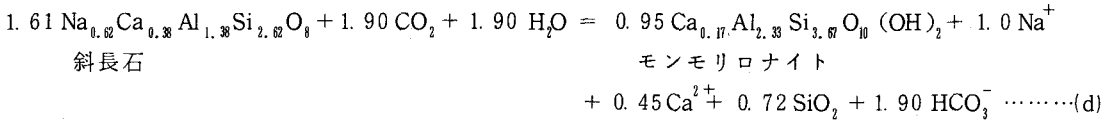
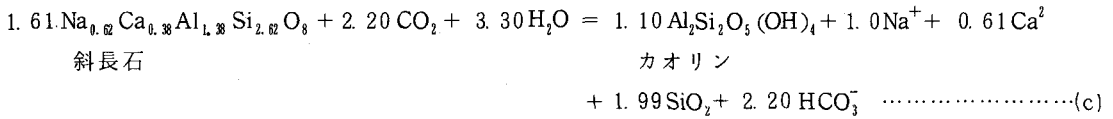
(a) 岩石自体は一般的には Cl^- , SO_4^{2-} を含んでいないので、水中に溶存する Cl^- , SO_4^{2-} は岩石からの溶出以外の起源に由来するものである。

そこで天然水中の Cl^- , SO_4^{2-} の量が零になるような操作をほどこさなければならない。天然水中の Cl^- の全量を、その Cl^- の量に相当する海水組成の元素量とともに天然水の分析値から差引いて Cl^- を零にする。簡便法としては Cl^- を零にするように、その量に当量の Na^+ とともに差引いてもよい。(b) SO_4^{2-} を零にするように、その量に当量の Ca^{2+} とともに差引く。(c) イオン交換現象を考慮して、天然水に含まれる Na^+ の量の25%に当量の Ca^{2+} と、 Na^+ の10%に当量の K^+ とを(b)迄にえられた値に加え、その代わりに35%の Na^+ の量を差引く。(d) こうして得られた陽イオンの当量値の合計量を HCO_3^- の量とする。このようにしてえられるイオンを岩石に由来するものとする。しかしこの操作にはまだ疑問点が残されている。将来特に(b), (c)の項は検討せざるをえないことになるであろう。

(B) 天然水中の Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} などの主要化学元素はどんな造岩鉱物からどのようにして溶かし出され、その過程でどんな粘土鉱物が生産されるのか？そしてその量はそれぞれの流域で1年間にどれだけの量になるのか？

(A)でえられた Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 溶存シリカが岩石から水に溶かし出されるための予想される、最も可能な化学式を示すと次の通りである。特殊の場合はその他の式をも同時に考えなければならぬであろう。





厳密には(f)式は $\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$ と書くべきで、(a)~(f)式においても SiO_2 の代わりに H_4SiO_4 と書くべきである。しかし簡便のためにこう書いても計算には差支えない。

扱て、これらの式中の $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$ のそれぞれの量は(A)の操作で分っている。(a)~(d)までの連立方程式を解こうとすると、式の数が1つ不足する。そこで生産される粘土鉱物のカオリンとモンモリロナイトの量比を1:10, また1:5 というように与えてやれば、これらの連立方程式は簡単に解ける。そこで風化変質した黒雲母、正長石、斜長石の量、生産したカオリン、モンモリロナイトの量が算出される。本報文では後者の場合(1:5の量比)についての計算結果を表に示すが、カオリンとモンモリロナイトの量比を変えても、それ以外の算出量はそう大きくは違ってはこない。(a)~(d)式までで使われた Ca^{2+} の量、および溶出するものとして算出される溶存シリカの計算値のそれぞれを(A)でえられる Ca^{2+} の量および天然水の分析値にもとづいてえられる溶存シリカの量と比較すると、過不足が生ずる。(A)の量の方が大きいときには、その差は Ca^{2+} については(e)式、溶存シリカについては(f)式に従って水中に溶出し、供給されたものと考えられるので、溶出されてしまう岩石中の石灰石やシリカの量が推定できることになる。溶存シリカについて、(A)の値の方が小さいときには、一旦岩石から溶け出した溶存シリカが再沈殿して、水中から失われたと考えざるをえない。

(A)の操作が天然水の分析値である1ℓあたりの濃度に基づいているので、(B)による計算結果も天然水1ℓ当たりの値として算出される。そこで河川の1年間の流量を(B)の算出値に乗ずれば、1年間当たりの値になる。正しい流量の測定値は得にくい。同じ河川でも報告者によって大変大きな差のあることが多い。流量の測定値が得られにくいときには、流域面積に年間降水量を乗じ、その30%は蒸発によって失われるものと考え、70%をもって年間流量とした。(B)の化学式については、例えば関東ロームとか地すべり地帯については検討の余地が残されている。しかし岩石崩壊でも地すべりでも、地下から CO_2 ガスが激しく出ている所で起ることが多いことを思い出してほしい。

(C) 計算結果

以上の操作に従い、本邦218主要河川の各流域で1年間に何トンの雲母や長石が変質し、何トンのカオリンやモンモリロナイトが生産され、何トンの石灰石や石英などが水に溶け出されるかを計算した。また岩石から溶け出る陽イオン ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) の当量は HCO_3^- の当量になるので、 HCO_3^- でそれを代表させ、その量と溶存シリカの量との和をも算出した。これらの値は岩石の崩壊と関係があることは明らかである。これらの計算値が自然災害の起る場の物質の安定度を指示するであろうことは間違いなからう。

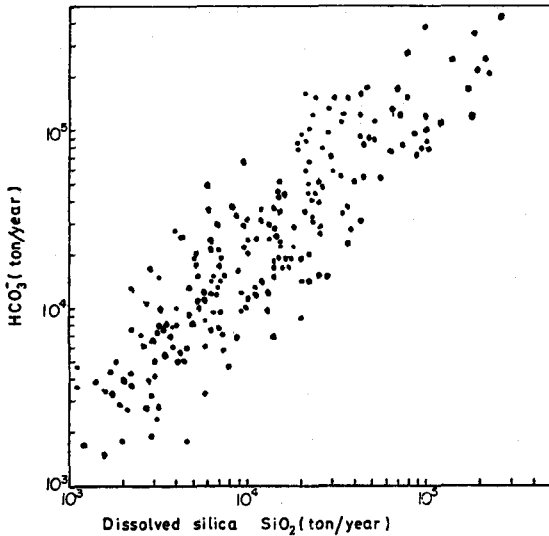
岩石崩壊などの自然災害は一つの河川流域全体で平均的に起るものでは勿論ない。ある大変限られた場所で起るものである。従って自然災害という立場にたつと、水量の大きな下流の水質分析結果を用いて算出するような、一つの河川流域全体の平均的な値ではなく、大変狭い水域の水質を調べて、上述の計算値を出す必要がある。日本の代表的な大河川についての平均的な値を出したが、その値は日本列島全体の自然災害の概観とか地形の変化などをみるとときには意味はある。しかし、それ

がただちに実際におこる自然災害そのものと具体的に結びつくものではない。自然災害の立場ではきめ細かい採水をして上記の計算をするべきであり、筆者らは六甲山系、天竜川上流域、その他数個所で詳細な調査研究を行なった。

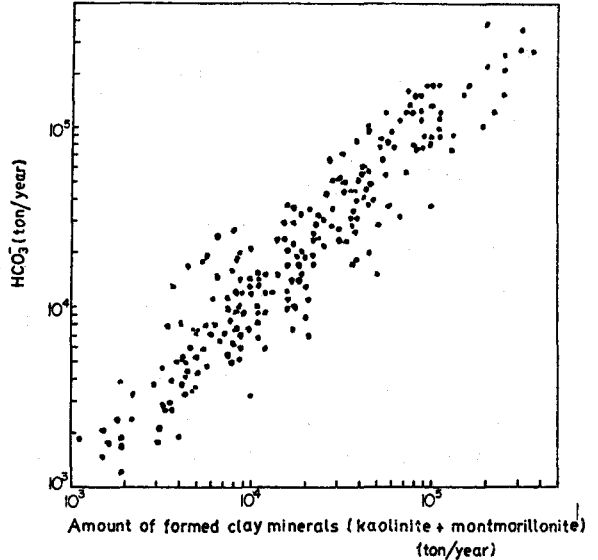
扱て、(B)の(a)~(f)までの式を加えると、次のようになる。

〔風化変質した造岩鉱物の量：雲母+長石〕 + 〔溶出した造岩鉱物の量：石灰石+石英または非晶質シリカ〕 + $\{CO_2\}$ + $\{H_2O\}$ = 〔生成した粘土鉱物の量：カオリン+モンモリロナイト〕 + 〔鉱物から溶出した陽イオンの量： Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} 〕 + $\{HCO_3^-\}$ + 〔岩石から溶出した溶存シリカの量〕。

本邦 218 主要河川の各流域について計算した結果は、北野康，中村誠佑，日本の主要河川流域において 1 年間に風化変質する鉱物および生成する粘土の量——河川水の化学組成に基づいた推定——，自然災害資料解析 2，11-29 (1975)，および北野康，中村誠佑，土砂の生産と流出の実態 (P.12, 石原藤次郎，土砂の流送・運搬に伴う自然環境変化に関する研究 No.A-50-9, 自然災害科学総合研究班，1975) に報告されているので，参照されたい。

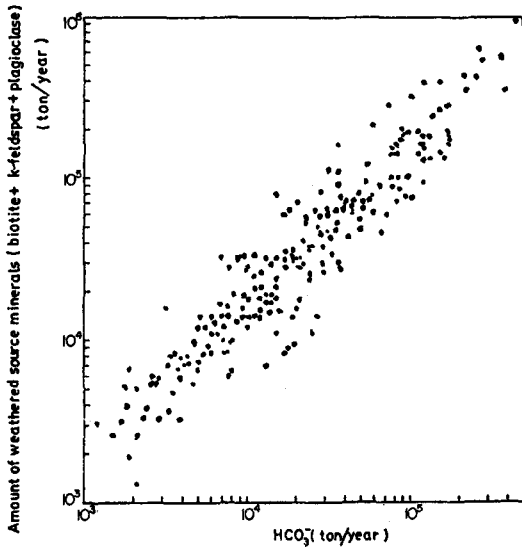


第 4 図 河川流域で 1 年間に流出する HCO_3^- の量と溶存 SiO_2 量との関係

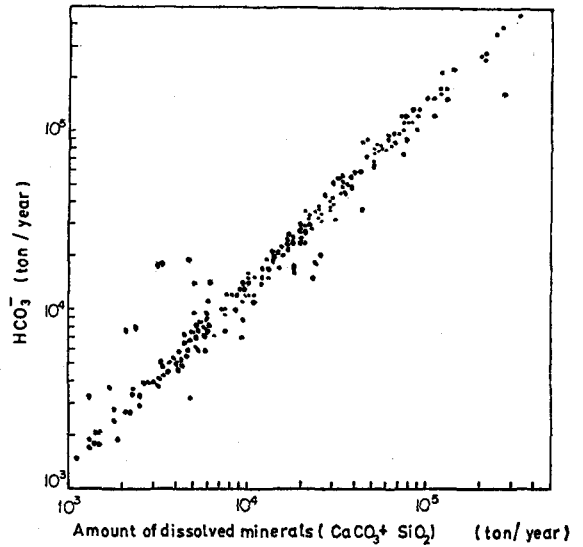


第 5 図 河川流域で 1 年間に流出する HCO_3^- 量と生産される粘土量との関係

第 4 図は本邦 218 主要河川のそれぞれの流域全体で 1 年間に流出する HCO_3^- の量と溶存シリカの量との関係を，第 5 図はそれぞれの河川流域全体で 1 年間に流出する HCO_3^- の量と生産されるカオリンとモンモリロナイト粘土鉱物の総和量との関係を，第 6 図はそれぞれの河川流域全体で 1 年間に流出する HCO_3^- の量と風化変質する雲母と長石の総和量との関係を，第 7 図はそれぞれの河川流域全体で 1 年間に流出する HCO_3^- の量と溶出する石灰石と石英または非晶質シリカの総和量との関係を，そして第 8 図はそれぞれの河川流域全体で 1 年間に生産される粘土鉱物の総量と風化変質する造岩鉱物の総量との関係を示している。それぞれの図で分かるように，それぞれの量の間には正の直線関係が存在する。従って簡便法としては，既に筆者らが調査結果だけに基づいて主張してきた，天然水中の HCO_3^- が岩石の風化状態，ひいては崩壊などの規模を指示するパラメーターになりうる事が分かる。

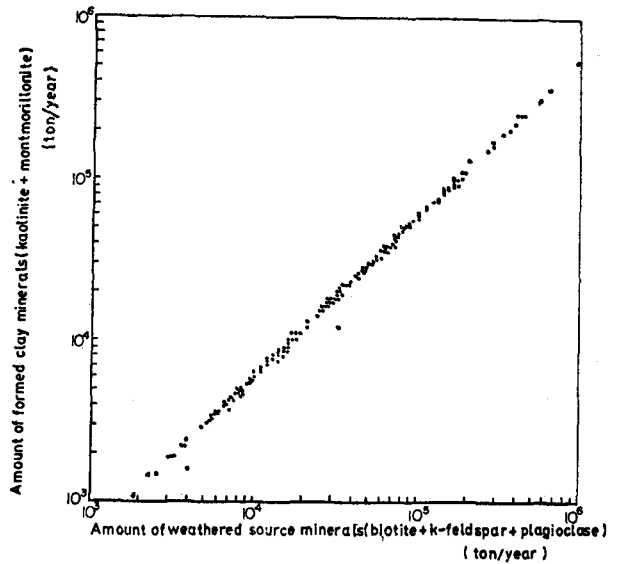


第6図 河川流域で1年間に流出する HCO_3^- の量と風化変質する鉱物の量との関係



第7図 河川流域で1年間に流出する HCO_3^- の量と溶出する石灰石と石英または非晶質シリカの合計量との関係

なお、第3表には日本を8地域にわけ、1年間にそれぞれの地域全体および各地域の1km²当たりで流出する HCO_3^- の量、生産する粘土鉱物の量、風化変質する造岩鉱物の量、溶出する石灰石と石英または非晶質シリカの総量、および造岩鉱物から溶け出る元素の総量を代表する値として HCO_3^- の総量とを示した。各地域のそれぞれの値の総和は、本邦全土における値となる。



第8図 河川流域で1年間に風化変質する鉱物の量と生産する粘土鉱物の量との関係

第3表 河川水の化学組成を基にして算出した本邦各域で1年間に風化変質および溶解する鉱物量、生産される粘土鉱物量および岩石から溶出する元素量

地域	河川水中の HCO_3^-			生産される粘土量 (カオリン+モンモリロナイト)		風化変質する鉱物量 (雲母+長石)		溶解する鉱物量 (石灰石+石英, 非晶質シリカ)		岩石から溶出する元素量 (HCO_3^- + 溶存シリカ)			面積 km ²	流量 10 ⁶ ・m ³ /year
	mg/l	ton/year・km ²	10 ³ ton/year	ton/year・km ²	10 ² ton/year	ton/year・km ²	10 ² ton/year	ton/year・km ²	10 ² ton/year	mg/l	ton/year・km ²	10 ² ton/year		
北海道	22.3	20	14,200	30	26,000	60	43,500	20	15,800	46	40	29,300	78,500	63,900
東北	12.6	10	8,600	30	19,300	50	32,700	10	9,100	34	30	23,200	66,900	67,900
関東	30.0	30	10,200	40	13,200	70	22,700	30	10,100	53	60	18,100	32,200	34,100
中部	20.1	20	11,300	30	14,700	50	25,000	30	13,500	34	40	19,000	47,200	56,100
近畿	16.9	20	5,400	30	8,200	50	13,600	20	6,800	29	30	9,300	27,200	32,100
中国	17.1	20	6,400	30	10,300	50	16,900	30	8,400	31	40	11,700	31,700	37,500
四国	22.6	30	5,100	30	5,300	50	8,900	30	6,500	32	40	7,300	18,800	22,500
九州	29.9	40	18,300	90	35,700	140	59,500	50	19,800	62	90	38,000	42,000	61,100

以上、河川水の水質が岩石風化、岩石崩壊そして粘土生産について指示し、主張できそうなことをまとめてみた。これらの議論や取扱いの中には、いくつかの偏見にみちた考えが入りこんでいる。それを発表することにはそれなりの勇気を必要としたほどである。しかし、耳をかたむけて下さる方々からの批判を期待することがその気おくれに優先した。改めて御批判をお願いしたい。