



あゝ信州よ山の国 誇りは高しアルペンの  
峯に輝く雪を以て 希望は高いや更に  
さらば歌はむ諸共に 若き血潮のゆくまゝに  
あした夕べの友は山 山は我等の姿なる  
山は我等の姿なる

思誠寮々歌

# 登山中のエネルギー消費量と 心拍数反応からみた高地順化過程

——信州大学学士山岳会ヒマラヤトレッキング隊の場合——

信州大学大学院医学研究科加齢適応医科学系独立専攻

スポーツ医科学分野 非常勤研究員

NPO 法人熟年体育大学リサーチセンター

健康推進コーディネーター

宮川 健

はじめに

高地医学および高地生理学の研究では、平地に存在する人工気象室に入り気圧や酸素濃度を低下させることによって高地の環境を再現して研究を行なうことが一般的です。それは、実際の高地環境が非常に苛酷でそのような環境でデータを取ることが非常に困難であるからです。しかしながら、高地での身体変化や事故などの原因を解明するためには、そのような過酷な環境で計測されたデータこそ非常に価値があり、現場に役立つデータではないかと考えています。『事件は会議室で起きているのではなく、現場で起きているのだ』とはずいぶん有名なセリフですが、これからご紹介するヒマラヤトレッキングの現場で計測いただいたデータは非常に貴重であり、信州大学の学士山岳会でなければ決して計測できなかったものと考えています。

高地という世界

今回、ヒマラヤトレッキング隊が訪れた最高峰は5,400mのトロンパスでした。日本の最高峰である富士山が3,800mであるので、まさに日本では決して味わえない世界を体験されたこととなります。

近年では、登山ブームも相まって中高齢者の海外トレッキングツアーが盛んに行なわれています。しかし、その一方で高地特有の事故が多く発生していることも忘れてはなりません。高地では、「酸素が薄くなる」ことは良く知られていますが、このことがどのような影響を及ぼすかということはあまり知られておりません。人間は運動を行う際に酸素を必要とします。そのため、酸素が薄くなると運動することが辛くなります。具体的には、標高5,000mでは体力は60%に、エベレストの頂上の8,800mでは30%以下になってしまいます。

運動生理学では標高3,200m以上に対して高地と定義をします。それは、3,200mを境に人間が酸素を十分に運べなくなり、一般的に高山病と呼ばれる病気を発症する危険性が高まるからです。そのため、安全に3,200m以上の高地に足を踏み入れるために「高所に慣れること＝高所順化」が必要になります。

### 高所順化とこれまでの順化の評価方法

高所順化とは、ある期間の高所滞在によって、身体が酸素不足状態に慣れ、それを補償した変化を起こしてくる事です。具体的には、右図に示しますように、①急激に高所へ行くと、安静時の心拍数が増加し、運動量の増加に伴う心拍数の増加（心拍数/運動量）の傾きが上昇をします。

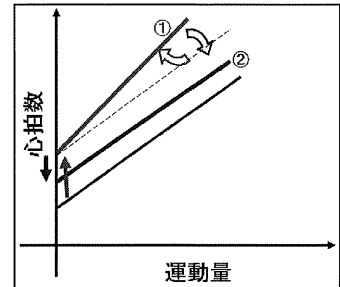


図1. 高地順化の様子

②順化が起こると安静時の心拍数が低下をし、心拍数/運動量の傾きが減少をします。

高地での登山を行なう際には、このような順化を確認できてから更なる高地を目指します。順化の確認方法は、これまで i) パルスオキシメータ、ii) AMSスコア(体調管理チェックシート)、iii) 安静時の心拍数測定が一般的であり、全て安静時の指標でした。これは、登山中の運動量を正確に計測することが出来なかったために、運動中の心拍数応答を明らかに出来なかったからです。

そこで、信州大学スポーツ医科学分野で開発された高度計内蔵携帯型カロリー計（熟大メイト）を用い、登山中の運動量を正確に計測し、運動中の心拍数応答から高地順化の様子を明らかにしようと試みました。この熟大メイトは3軸の加速度計と高度計を内蔵し、前後左右上下の加速度と上昇速度と下降速度から運動時のエネルギー量（基礎代謝を含まない）を正確に測定できる小型の計測器です。



図2. 熟大メイト

### 研究の目的と仮説

第三チーム・アンナプルナ山群一周トレッキング隊の皆様にご協力いただいて、トレッキング中の運動量と心拍数を同時に計測いただき、運動中の心拍数応答から高地順化の過程を明らかにすることを研究の目的といたしました。なお、実際のトレッキングの現場において、正確に運動量を測定することが困難であることと、4,000m以上の高地は日本国内には存在しないことから非常に貴重なデータを計測

できました。

この研究の仮説は、右図に示すように、高地順化の過程で認められる心拍数/運動量の傾きが低下していく過程が高所順化の新しい指標となりうる、というものです。

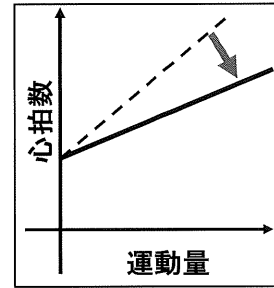


図3. 仮説の概念図

### 研究解析の期間と高度変化

研究解析の対象とした期間は2009年9月24日～10月12日の19日間で、9月24日（ベシサハール、760m）～9月28日（ピサン上村、3,300m）を「低所登山期間」。9月29日～10月1日（マナン、3,540m）を「高所順化期間」。10月2日～10月4日（ムクチナート、3,760m※途中最高到達地点トロンパス5,416mを通過）を「高所登山期間」。10月5日～10月12日（ポカラ、900m）を「下山期間」としました。

また、それぞれの期間の代表日として、低所登山期間；9月27日、高所順化期間；10月1日、高所登山期間；10月4日、下山期間；10月6日としました。そして、この4日間の運動量と心拍数の関係から高所順化の過程を明らかにしようと試みました。図4に日程、高度変化および代表日を示します。

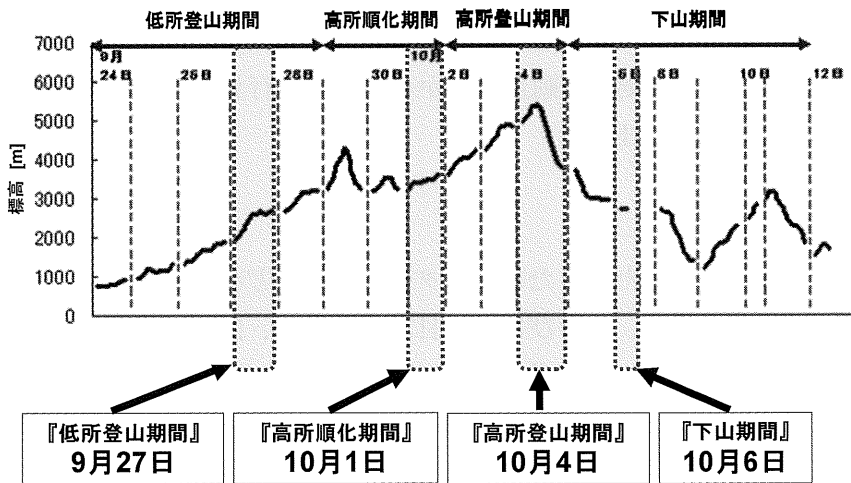


図4. 日程、高度変化および代表日

### 研究の結果

代表日4日の「安静時心拍数」と「心拍数/運動量」を図5に示します。

まず、急激な高度上昇を行なった10月1日と10月4日を比較してみましょう。高

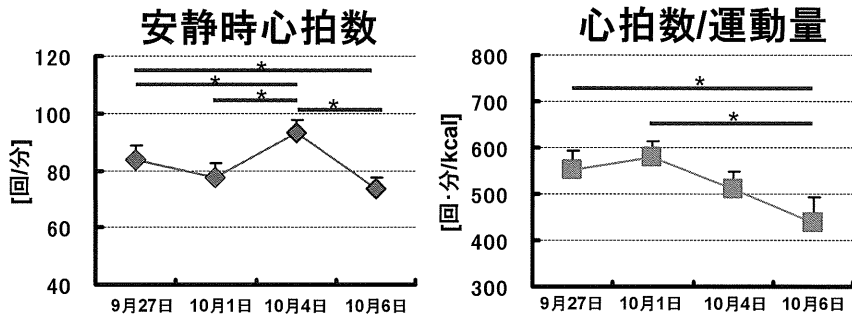


図5. 各代表日の安静時心拍数と心拍数/運動量

※ \*は統計上有意味な差があることを表します。

度の上昇した4日は1日と比較して、安静時の心拍数は約15拍増加を認めましたが、心拍数/運動量は減少する傾向を認めました。これは、10月4日にも高地順化が続いていたことを示します。さらに、10月6日の結果も加えると、安静時心拍数は高度の変化によって、4日に増加し、6日に減少したことが認められますが、一方、心拍数/運動量は低下し続けました。つまり、安静時心拍数の測定では明らかにすることが出来ない高地順化の過程を心拍数/運動量の計測によって明らかにすることが出来たということです。

これまでは、安静時心拍数を計測し「高地順化の指標」としていましたが、安静時心拍数の測定は急激な高度変化の影響を受けやすいため、順化の過程を評価するためには、運動中の心拍数/運動量の値から順化の進行具合を評価の方が正確であることが明らかになりました。

### 最後に

今回のデータを計測いただくために、タバコの箱ほどの熟大メイトと胸バンドの締め付けが苦しい心拍計、および毎日の日誌を携帯し、計測をしながらトレッキングを行なっていただきました。先述しましたとおり5,000mの世界では体力は60%以下になる非常に過酷な世界であり、少しでも身軽に行動をしたいというのが心情かと思えます。そんな環境下でも、信州大学の今後の山岳研究のためにと計測を続けていただいた皆様に、心より感謝いたします。

### 当該研究に係った方々

信州大学 医学研究科 スポーツ医科学分野  
能勢 博、宮川 健、森川真悠子

熟年体育大学リサーチセンター

能勢 博、源野広和、宮川 健、森川真悠子

信州大学学士山岳会及び第三チーム参加メンバー

宮崎敏孝、松尾武久、故寺田雅治、宇都宮昭義、小原 武、葛西正美、奥嶋啓志、川崎 誠、柴田武明、板谷真人、駒井 浩、河原 洋、杉本敏宏、大安徹雄、池内寛行、石山 駿、坂本貴男、大島いよ子、滝川正子、大沼淳一、大沼章子、  
信州大学 山岳科学総合研究所 高地医学・スポーツ科学分野

能勢 博

キッセイコムテック株式会社

山崎敏明



トレッキング終了後、最大運動量の計測のため熟大メイトを設定する隊員



低速歩行の計測を行っている隊員

# アンナプルナ山群における渓流水・温泉水および ペリヒマール山域における降雪の化学特性

信州大学山岳科学総合研究所

鈴木 啓助

## 1. はじめに

信州大学学士山岳会60周年記念事業の一環として、第一チームのペリヒマール登山隊では雪試料を、第三チームのアンナプルナ山群トレッキング隊では渓流水および温泉水の採取を実施した。それら極めて貴重な試料について化学分析を行う役割を担うことができたので、その結果を以下に報告する。

## 2. 試料採取方法・分析方法

### 2-1. 渓流水・温泉水

渓流水および温泉水の採取は次に示す方法で行った。超純水にて洗浄した250mlのポリエチレン瓶をトレッキング隊が現地に持ち込み、現地においてはポリエチレン瓶を試料水で共洗った後に、試料水をポリエチレン瓶に満充填した。渓流水を11地点から採取し、温泉水を2地点から採取した。

可能な限り冷暗状態で日本に持ち帰り、信州大学理学部の実験室にて化学分析を行った。分析まで冷蔵庫で保管し、分析の際には、ろ過後に電気伝導度計（TOA: CM-60S）で電気伝導度を測定し、自動滴定装置（TOA・DKK: AUT-501）でpHを測定するとともに、硫酸滴定法により $\text{HCO}_3^-$ 濃度を測定した。さらに、イオンクロマトグラフ（DIONEX: DX-500）により主要溶存イオン濃度（ $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ）を測定した。また、同位体比質量分析計（国立極地研究所、ThermoFisher: DELTA-plus）により $\delta\text{D}$ および $\delta^{18}\text{O}$ を測定した。

### 2-2. 降雪・表面積雪

降雪および表面積雪の採取は、第一チームのペリヒマール登山隊が次の方法で行った。超純水にて洗浄した1,000mlと50mlのポリエチレン瓶および超純水を満たした500mlのポリエチレンビンを現地に持ち込んだ。現地では、降雪および表面積

表1. アンナプルナ山群における渓流水・温泉水およびペリヒマール山群における降雪・表面積雪試料の化学分析結果

Date	Sampling point	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	EC mS/m	pH	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Mg <sup>2+</sup> mg/l	Ca <sup>2+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	
<b>Stream water</b>														
A	2009/9/24	Marsyandi/Khudi	-94.8	-13.5	24.7	7.72	3.69	1.52	4.45	20.3	5.13	1.36	29.2	78.9
B	2009/9/26	Marsyandi/Chanji	-101.7	-14.4	27.1	7.70	2.87	0.86	6.02	29.4	3.52	1.80	38.9	73.7
C	2009/9/27	Marsyandi/Chame	-107.2	-15.1	32.5	7.77	2.50	0.87	10.50	35.0	2.33	0.59	55.6	85.8
D	2009/9/30	Sabji Khola/Annapurna-II BC	-116.6	-16.5	18.3	7.72	0.25	1.01	3.71	16.8	0.18	0.62	21.9	61.2
E	2009/9/30	Marsyandi/Pisang	-112.2	-15.8	55.8	6.99	8.85	5.74	15.10	70.5	9.66	1.32	79.2	126.0
F	2009/10/1	Marsyandi/Manang	-114.4	-16.0	34.7	7.74	1.70	0.71	11.10	34.6	0.51	0.72	65.0	85.1
G	2009/10/1	Manang Khola/Manang	-110.0	-15.3	49.0	7.77	8.61	0.99	19.40	50.9	0.84	1.07	144.0	99.3
H	2009/10/3	Kona Khola/Thorongphedi	-114.6	-16.0	52.1	7.72	1.63	1.19	24.70	73.5	0.36	0.71	171.0	89.7
I	2009/10/5	Kaligandaki/Kagbeni	-126.7	-17.3	52.3	7.71	10.30	1.65	14.10	39.3	13.50	0.82	94.6	102.0
J	2009/10/8	Kaligandaki/Tukuche	-126.8	-17.5	57.3	7.69	6.52	1.42	15.60	47.8	8.64	2.04	94.0	108.0
K	2009/10/9	Kaligandaki/Tatobani	-102.8	-14.5	34.3	7.69	2.79	1.07	7.48	24.3	3.83	1.51	37.0	94.6
<b>Hot Spring water</b>														
L	2009/9/27	Dharapani/Chame	-64.6	-9.6	149.0	7.39	134.00	40.80	35.30	81.5	248.00	13.90	93.4	277.0
M	2009/10/9	Tatopani	-102.0	-14.3	296.0	7.36	433.00	61.10	5.20	137.0	763.00	3.78	65.8	207.0
<b>Snowfall</b>														
a	2009/10/5	BC (4800 m)	-150.5	-20.8	0.157	5.59	0.009	0.007	0.002	0.031	0.021	0.024	0.063	-
b	2009/10/7	BC (4800 m)	-187.3	-25.5	0.140	5.40	0.002	0.002	0.001	0.015	0.005	0.018	0.062	-
c	2009/10/8	BC (4800 m)	-214.2	-28.6	0.145	5.52	0.005	0.007	0.002	0.017	0.010	0.016	0.060	-
d	2009/10/9	BC (4800 m)	-190.5	-26.7	0.177	5.43	0.001	0.001	0.003	0.050	0.006	0.048	0.158	-
e	2009/10/13	C2 (6200 m)	-182.4	-23.8	0.182	5.65	0.010	0.008	0.005	0.087	0.018	0.038	0.073	-
<b>Surface snow</b>														
f	2009/10/1	C1 (5560 m)	-35.8	-7.7	0.170	5.47	0.002	0.002	0.003	0.048	0.008	0.049	0.092	-
g	2009/10/14	Summit (7126 m)	-108.6	-14.5	2.510	6.36	0.035	0.029	0.328	1.940	0.052	4.670	0.366	-

雪を1,000mlのポリエチレン瓶で掬い取り、密封したまま雪を融解させ、融解水を50mlのポリエチレン瓶に満充填した。

可能な限り冷暗状態で50mlポリエチレン瓶を日本に持ち帰り、信州大学理学部のクリーンルームにて化学分析を行った。登山隊の制約にならないよう持ち帰り試料の量を少なくしたことと、極めて清浄な雪試料であろうことが考えられたため、降雪試料の電気伝導度およびpHは、密封型の流通セルを用いて測定した。電気伝導度は流通セル (TOA・DKK: CT-84101B) と電気伝導度計 (TOA: CM-30V) で、pHは流通セル (TOA・DKK: GST-5420C) とpH計 (TOA: HM-30V) で測定した。さらに、イオンクロマトグラフ (DIONEX: ICS-2000) により主要溶存イオン濃度 (Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) を測定した。また、同位体比質量分析計 (国立極地研究所、ThermoFisher: DELTA-plus) により  $\delta D$  および  $\delta^{18}O$  を測定した。



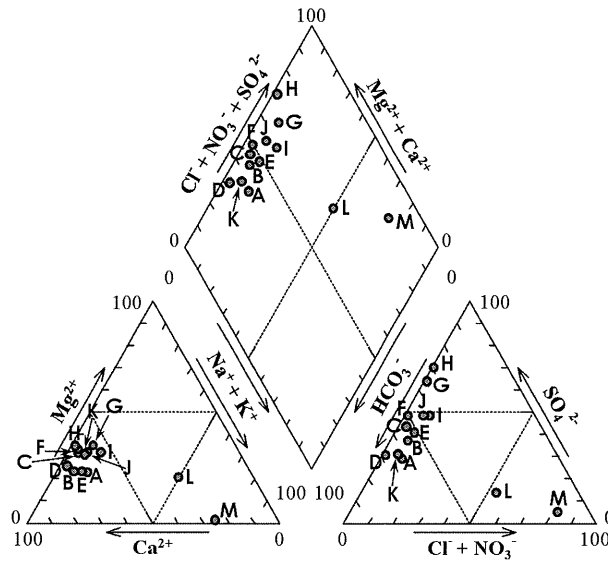


図1. アンナプルナ山群における渓流水・温泉水のトリリニア・ダイアグラム

### 3. 結果

#### 3-1. 渓流水・温泉水

アンナプルナ山群における渓流水・温泉水の化学分析結果を表1の上部に示す。渓流水の主要な陽イオンは $\text{Ca}^{2+}$ であり、陰イオンについては主要なイオンが地点により $\text{SO}_4^{2-}$ の場合と $\text{HCO}_3^-$ の場合がある。温泉水については、 $\text{Na}^+$ が主要な陽イオンであり、 $\text{Cl}^-$ も主要な陰イオンとなっている。特に、Tatopani温泉については、典型的な食塩泉となっている。

以上のことは、図1に示すようなトリリニア・ダイアグラムによって明瞭に示すことができる。図中の地点を表す記号は表1のとおりであるが、温泉である「L」と「M」は他の地点とは明らかに異なる位置にプロットされている。渓流水については、前述のように $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ のタイプと $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ のタイプがあるが、その差はあまり明瞭ではない。そこで、分析されたイオン濃度を変数として渓流水採取地点について主成分分析を行った。各採取地点の第1主成分と第2主成分の主成分得点を図2に示す。第1主成分の寄与率は51.8%、第2主成分の寄与率は26.6%であり、このふたつで全体の変動の78.4%を説明することができる。第1主成分の主成分負荷量は $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ の順で大きいので、第1主成分の得点がプラスとなっている各地点「E」、「I」、「J」、「G」、「H」は $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ のタイプであるといえ

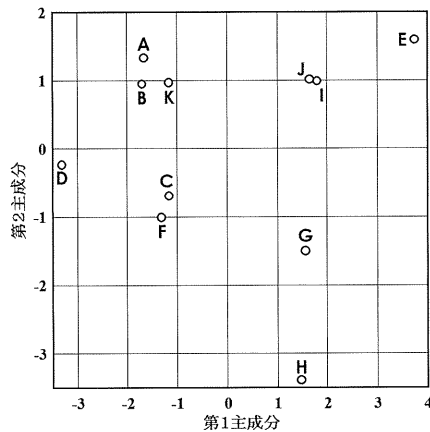


図2. アンナプルナ山群における溪流水の主成分分析結果

る。それ以外の地点は、強いて言えば  $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$  のタイプということになる。第2主成分の主成分負荷量は  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  の順に大きく、 $\text{SO}_4^{2-}$  の主成分負荷量が最大のマイナスの値となっている。

### 3-2. 降雪・表面積雪

ペリヒマール登山隊により採取された降雪および表面積雪の化学分析結果を表2の下部に示す。降雪と表面積雪の区別は次のように行った。ペリヒマール登山隊のベースキャンプ（標高：4,800m）滞在時には断続的な降雪が観測され、2009年10月5日、7日、8日、9日のいずれも早朝に降雪試料を採取した。表1の「a」から「d」の試料がこれに相当する。いずれの試料も  $\delta\text{D}$  および  $\delta^{18}\text{O}$  の値が小さく高所での降雪の特徴を示している。また、イオン濃度は極めて低濃度であり、電気伝導度は1次蒸留水程度に小さい。さらにこれら試料のpHは、純水と大気中の二酸化炭素との平衡状態である5.6とほぼ同じである。2009年10月13日にC2（標高：6,200m）にて採取された試料の化学特性も、ベースキャンプにおける試料と同程度であるため降雪後間もない雪を採取したものと考えられる。これら降雪試料の化学特性からは、雪の結晶が雲粒のほとんど付着していない極めて綺麗な雪結晶であることが考えられる。

一方、2009年10月1日にC1（標高：5,560m）で採取された試料と2009年10月14日にHimlung Himal山頂（標高：7,126m）で採取された試料の  $\delta\text{D}$  および  $\delta^{18}\text{O}$  の値は、標高の低いBCにおける値よりも大きくなっている。本来、標高が高く気温の低い地点の降雪試料であれば、両者の値はBCにおけるそれらの値よりも小さ

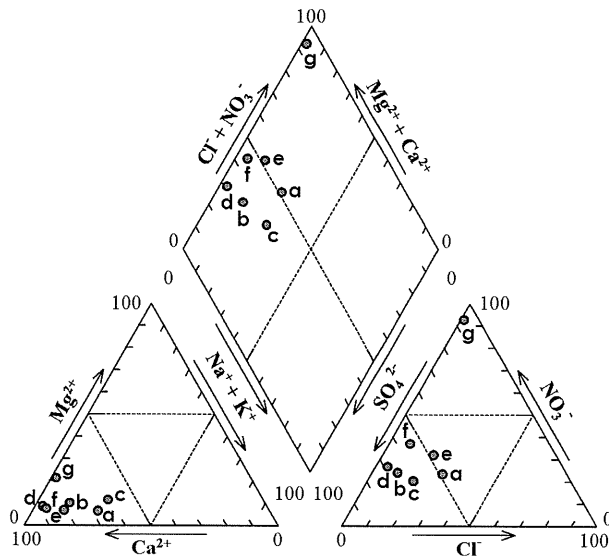


図3. ペリヒマール山群における降雪・表面積雪試料のトリリニア・ダイアグラム

くなるはずである。そのため、C1と Himlung Himal 山頂で採取された試料は、降雪後時間が経過し、昇華蒸発が進行した雪試料であると判断し降雪試料とはしなかった。特に、C1における表面積雪は $\delta D$ および $\delta^{18}O$ の値が極端に大きく、昇華蒸発がかなり進行しているものと考えられる。しかし、イオン濃度はベースキャンプの降雪試料と同程度であることから、降雪時にはさらに低濃度であったことが推察される。また、Himlung Himal 山頂で採取された試料のイオン濃度が、他の雪試料に比べて高濃度となっているのは、昇華蒸発による濃縮効果とも考えられるが、イオンバランスが極めて特異である。

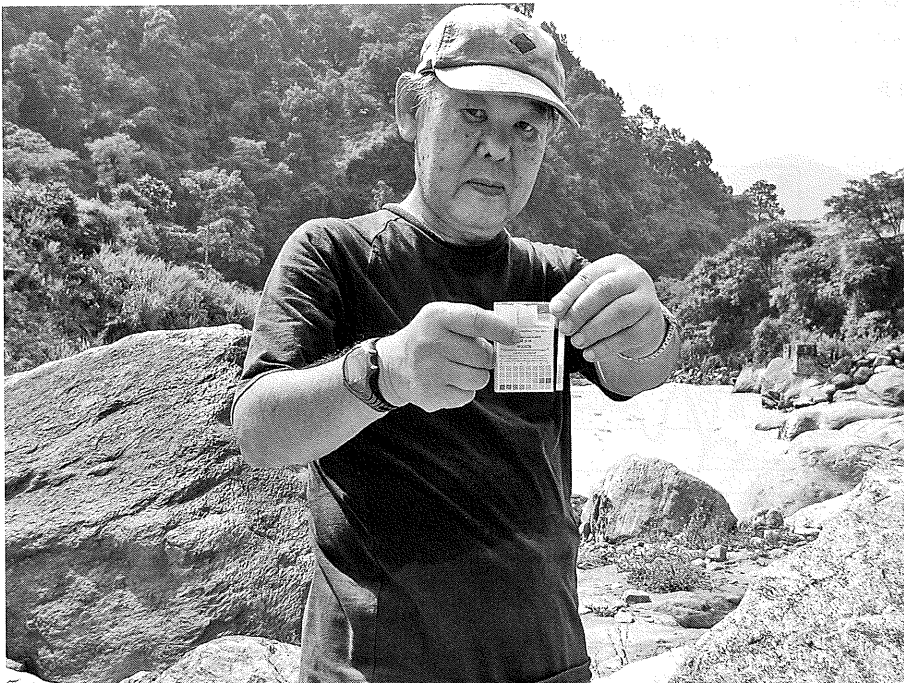
Himlung Himal 山頂で採取された表面積雪試料のイオンバランスの特異性を明らかにするために、雪試料についてのトリリニア・ダイアグラムを図3に示す。図中の試料を示す記号は表1のとおりであるが、Himlung Himal 山頂で採取された表面積雪試料を示す「g」は、他の雪試料とは全く異なる位置にプロットされている。陽イオンの組成では全ての試料が集中してプロットされているが、陰イオン組成では「g」の $NO_3^-$ の高い割合が顕著である。対流圏内での $NO_3^-$ の起源は人間活動による化石燃料の燃焼によって放出されたものであるが、同じように化石燃料の燃焼起源である $SO_4^{2-}$ の濃度がそれほど高くないことから、人間活動起源の $NO_3^-$ であることは考えにくい。もうひとつの $NO_3^-$ の起源としては、成層圏内での生成が考えられる。極渦の発達する南極内陸での降雪試料では $NO_3^-$ 濃度が高くなるが、こ

れは成層圏で生成された $\text{NO}_3^-$ が極渦によって対流圏内に降下したものと考えられている。これと同じことが、標高7,126mのHimlung Himal山頂で起きていることが推察される。

#### 4. おわりに

信州大学学士山岳会60周年記念事業の一環として、雪試料および渓流水・温泉水の採取が行われ、それらの極めて貴重な試料について化学分析を実施する役割を担うことができたことは大変光栄なことである。降雪もたびたび観測されたようであるから、現地で雪の結晶型を観察しながら、さらに詳細な雪試料の採取を自分の手で実施したかったとの思いが今更ながら強くなってきた。また、渓流水についても、採取地点の地質や標高等、さらには流域特性についても詳細な検討が必要であるが、今回は分析結果を提示するに留めざるを得ない。

最後に、Himlung Himal山頂をはじめとする過酷な環境の中での雪試料を採取して頂いたペリヒマール登山隊の皆様と、多数の地点で渓流水と温泉水を採取して頂いたアンナプルナ山群トレッキング隊の皆様に深甚なる謝意を表します。



マルシャンディ川の水質を測る葛西隊員

# ネパール・アンナプルナサーキットトレッキング グルートの陸水の水質組成

第三隊員・中部大学生命健康科学研究所

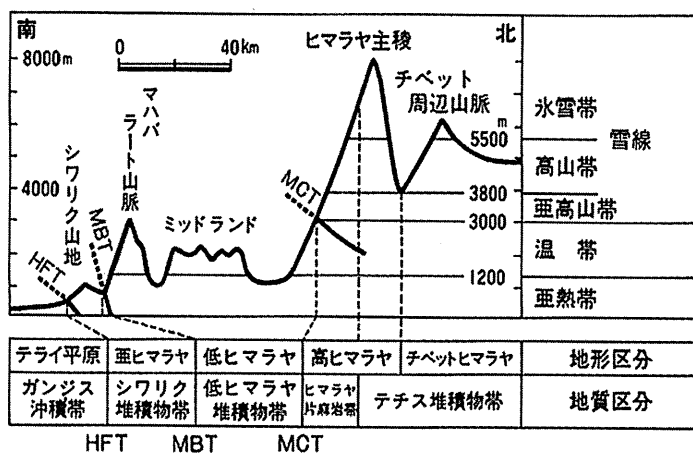
大沼 章子

## 1. はじめに

ネパールの地形は、地質構造帯と調和的な東西方向の地形列からなり、南北断面はどこを切ってもほぼ同じで、北から、高ヒマラヤ帯、低ヒマラヤ帯、亜ヒマラヤ帯、テライ平原に大別される（図1）。アンナプルナサーキットトレッキングルートは、アンナプルナ山群の周りを、低ヒマラヤ帯から高ヒマラヤ帯（最高到達点トロンパス、5,416m）そして再び低ヒマラヤ帯にと、主にマルシャンディ川（図2中A）とカリガンダキ川（同B）沿いに歩くコースである。本調査は、2009年に企画された信州大学学士山岳会60周年記念事業の一環である第三隊アンナプルサーキットトレッキングに、参加させていただいた機会に実施したものである。

## 2. 調査方法

2009年9月24日-10月6日のトレッキング期間中に、宿泊地又は行動中において採取可能であった陸水（飲料水源、河川水、温泉水）について調査した。調査地点



MCT：主中央衝上断層  
MBT：主境界衝上断層  
HFT：ヒマラヤ前縁衝上断層

図1 ヒマラヤの断面図（木崎、1994）



を図2に示したが、1-16は飲料水源、20-23は河川水、34は温泉水である。陸水の採取は、洗剤、酸及び精製水にて洗浄した100mlPE製ポリビンを、現場の陸水で共洗いした後、オーバーフロー後満水にして密栓した。なお、採取後のポリビンは常温暗所で輸送した。

分析は、現場において、携帯用電気伝導率計（オルガノ スイケンサ AB-7）によって電気伝導率（以下EC）、総アルカリ度滴定法によって $\text{HCO}_3^-$ 、万能pH試験紙によってpHを測定した。

帰国後実験室にて、 $0.45\ \mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過後、イオンクロマトグラフ法（Yokogawa IC7000P使用）によって主成分イオン等（ $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{Br}^-$ ）を測定した。

### 3. ネパールの地形・地質と陸水の採取場所の概要

ネパールは、図1に示したように、地形別に地質も区分される。木崎（1994）やウラクラ（2004）によれば、チベットヒマラヤ帯は、高ヒマラヤ帯の上位に位置し、古生代から中生代、すなわち、カンブリア紀（5億7千万年前）から白亜紀（1億4千4百万年前）にわたる頁岩、石灰岩、砂岩などのテチス海起源のテチス堆積物からなる。高ヒマラヤ帯は、先カンブリア時代（22億年以上前）の結晶質岩（ヒマラヤ片麻岩、結晶片岩）からなる変成岩帯である。そのヒマラヤ片麻岩帯の下に主中央衝上断層（MCT：Main Central Thrust）がある。北のMCTと南の主境界衝上断層（MBT：Main Boundary Thrust）の間に分布する低ヒマラヤ帯は先カンブリア時代から初期中新世（2200万年前）の弱変成した堆積岩（粘板岩、千枚岩、片岩、片麻岩、珪岩、石灰岩、苦灰岩）からなる。低ヒマラヤ帯の南縁にはミッドランドが隆起してできたマハバラート山脈があり、その南側にMBTが位置する。また、北にMBT、南に前縁衝上断層（MFT：Main Frontal Thrust）で区分される亜ヒマラヤ帯は中期中新世（1600万年前）から更新世（100万年前より新しい）にかけて堆積したシワリク層の岩石（泥岩、砂岩、礫岩）からなり、このシワリク堆積物が隆起してできたのがシワリク山地である。ネパールヒマラヤの南縁はテライ平原で、インド・ガンジス平原に代表され、北のMFTによって亜ヒマラヤ帯と区分される。高度は100m～200mで更新世から完新世（1万年前より新しい）の堆積層からなり、局地的に河川堆積物によるAsの地下水汚染地帯もある。

以下に、図2の番号順に陸水の採取場所の概要を述べる。

- 1 ベシサハール：高度760m。カトマンズから西へ約90km。トリスリ川との合流点から上流にマルシャンディ川沿いに北上した所。山に囲まれた街で人

- 口は比較的多く、水田もある。本トレッキングの出発地。ホテルの庭がキャンプサイトで掘削井戸の蛇口水。低ヒマラヤ帯で地質は変成堆積岩類。
- 2 ベラウチビサウナ：高度780m。ベシサハールからマルシャンディ川沿いに北上した所で、川と山の間に水田が広がる。イギリスのグループの助成金によって作られた山沿いの道の下の蛇口水。低ヒマラヤ帯で地質は変成堆積岩類。
  - 3 ナディバザール：高度930m。マルシャンディ川とナディ川の合流点直近の上流側の段丘上で、民家もある。山から引いたキャンプサイトの水。低ヒマラヤ帯で地質は変成堆積岩類。
  - 4 ジャガット：高度1,300m。狭いV字谷の中にある比較的大きな村で、川よりかなり高い山腹段丘上にある。山から引いたキャンプサイトの水。低ヒマラヤ帯で地質は変成堆積岩類。
  - 5 ダラパニ：高度1,860m。V字谷の中にある村で、川よりかなり高い山腹段丘上にある。山から引いたキャンプサイトの水。低ヒマラヤ帯で地質は変成堆積岩類。
  - 6 テイマン：高度2,270m。マルシャンディ川からかなり登った山腹斜面の村。民家が道路沿いにある。山から引いた水でホテルの庭の蛇口水。高ヒマラヤ帯で地質はヒマラヤ片麻岩類。
  - 7 チャーメ：高度2,760m。氷河のある山にも迫られた急峻なV字谷にある比較的大きな村。村の中をマルシャンディ川が流れる。ホテルの庭がキャンプサイトで山から引いた水の蛇口水。高ヒマラヤ帯で地質はヒマラヤ片麻岩類。
  - 8 ピサン下村：高度3,200m。狭いU字谷で、マルシャンディ川を挟んで両側の山々の山麓が迫る。ホテルの庭がキャンプサイトで山から引いた水。高ヒマラヤ帯で地質はテチス堆積物のチベット層群。
  - 9 ピサン上村：高度3,300m。マルシャンディ川に迫る山麓の斜面に民家が城砦のように存在する村。山から引いた村の共同の水。高ヒマラヤ帯で地質はテチス堆積物のチベット層群。
  - 10 マナン：高度3,540m。広々としたマルシャンディ川低地河岸段丘上の街で県都。ホテルの庭がキャンプサイトで山から引いた水。高ヒマラヤ帯で地質はテチス堆積物のチベット層群。
  - 11 レダール：高度4,200m。マルシャンディ川から離れて支流のトロン川沿いに北西方向に登った所で、放牧用の夏の家が一軒のみある急峻な山麓のキャ



- ンプ地。山からの伏流水の湧出口で採取。高ヒマラヤ帯で地質はテチス堆積物のチベット層群。
- 12 ハイキャンプ：高度4,925m。トロンパスへの入り口のキャンプ地。植生はほとんどない。山からの伏流水の湧出口で採取。高ヒマラヤ帯で地質はテチス堆積物のチベット層群。
  - 13 ラニパウア：高度3,700m。トロンパスから西に下った広い山の斜面にある村。山から引いた共同の水。高ヒマラヤ帯で地質はテチス堆積物のチベット層群。
  - 14 ジョムソン：高度2,720m。カリガンダキ川の広大な堰止湖跡の河原に沿った大きな街。荒涼とした山が迫っている。山から引いた共同の水の蛇口水。高ヒマラヤ帯で地質はテチス堆積物のチベット層群。
  - 15 バイサリ：高度2,530m。カリガンダキ川の急峻なV字谷の道路沿いに民家が点在。山から引いたレストランの水。低ヒマラヤ帯で地質は変成堆積岩類。
  - 16 ポカラ：高度820m。ネパール第二の都市で人口は約10万人、盆地地形をなす。トレッキングの終点。ホテルの部屋の蛇口水。低ヒマラヤ帯で地質は変成堆積岩類。
  - 20 クディ(マルシャンディ川)：高度790m。灰濁色で水量の多い急流の河川水、真茶色のクディ河との合流点の上流側で採取。
  - 21 タール(マルシャンディ川)：高度1,700m。灰濁色で川幅が広く、水量の豊富な河川水。
  - 22 アンナプルナII峰(7,937m)ベースキャンプ(マルシャンディ川の支流でチャイチャンワ川源流)：高度3,500m。マルシャンディ川源流の一つで、やや灰濁色を呈し、氷河の融水を集めて流れる明るい溪谷の河川水。
  - 23 エクレバッティ(カリガンダキ川)：高度2,740m。やや灰濁色を呈し、広大な堰止湖跡の広い河原の中を水深浅く流れる河川水。河原にはアンモナイトの化石がある。
  - 34 チャーム温泉：高度2,760m。チャーム橋の下流約100m、マルシャンディ川の左岸で、岩盤の裂け目からの湧出水。湧出口は少なくとも2か所存在。無色澄明、無臭で、水温は実測できず、推測で60℃以上。高ヒマラヤ帯で地質はヒマラヤ片麻岩類。



表1 アンナプルナサーキットトレッキングルートでの陸水の調査結果

* kind	date	point	height (m)	(color/turbidity)	pH	EC (mS/m)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Br <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	hardness as CaCO <sub>3</sub> (mg/L)
DWS	2009/9/23	1 Besisahar	760	no/no	6	49.0	157	23.2	11.8	7.5	47.7	0.10	30.5	0.00	21.0	0.00	9.60	150
DWS	2009/9/24	2 Berautbisauna	780	no/no	-	4.86	26.8	1.6	0.8	1.8	4.0	0.09	0.9	0.00	1.0	0.00	0.13	17.4
DWS	2009/9/24	3 Nadi Bazar	930	no/no	7	31.3	184	0.6	3.6	17.5	33.1	0.08	0.3	0.00	7.9	0.00	0.00	155
DWS	2009/9/25	4 Jagat	1300	no/no	6	8.11	37.8	2.4	2.9	1.6	8.9	0.05	0.4	0.00	6.1	0.00	0.00	28.8
DWS	2009/9/26	5 Dharapani	1860	no/no	6	17.8	96.4	0.6	1.3	1.6	31.7	0.10	0.4	0.00	11.4	0.00	0.24	85.7
DWS	2009/9/27	6 Timang	2270	no/no	6	6.80	34.2	0.6	0.6	0.6	12.0	0.19	0.5	0.00	4.8	0.00	0.31	32.4
DWS	2009/9/27	7 Chame	2760	no/no	6	9.80	53.7	0.0	0.4	0.5	18.3	0.08	0.5	0.00	5.6	0.00	0.06	47.8
DWS	2009/9/28	8 Lower Pisan	3200	no/no	6	23.5	153	1.2	0.2	6.3	39.7	0.04	0.4	0.00	5.0	0.00	0.27	125
DWS	2009/9/29	9 Upper Pisan	3300	no/no	7	26.3	161	1.2	0.2	6.3	39.3	0.04	0.6	0.00	4.9	0.00	0.24	124
DWS	2009/10/1	10 Manang	3540	no/no	6	36.1	129	3.3	0.2	13.6	50.4	0.05	0.4	0.00	98.8	0.00	0.16	182
DWS	2009/10/2	11 Lodher	4200	no/no	6	36.2	142	0.9	0.4	17.3	49.8	0.10	0.4	0.00	94.9	0.00	0.08	196
DWS	2009/10/3	12 High Camp	4925	no/no	6	36.6	118	0.0	0.1	16.0	51.7	0.03	0.3	0.00	111	0.00	0.14	195
DWS	2009/10/4	13 Ranipauva	3700	no/no	6	38.3	134	1.9	0.3	10.3	50.2	0.03	0.4	0.00	76.1	0.00	0.28	168
DWS	2009/10/5	14 Jomson	2720	no/no	7	73.0	283	3.1	0.4	40.6	80.0	0.05	0.9	0.00	171	0.00	0.00	367
DWS	2009/10/6	15 Baisari	2530	no/no	7	36.3	153	4.3	1.9	6.2	54.7	0.15	0.9	0.00	44.1	0.00	0.00	162
DWS	2009/10/6	16 hotel in Pokhara	820	no/no	7.5	49.6	253	4.3	2.5	4.0	84.1	0.04	6.3	0.00	7.4	0.00	5.04	226
RW	2009/9/24	20 Khudi(Marsyangdi khola)	790	grey/much	6.5	23.0	100	4.0	1.4	6.1	31.0	0.14	5.3	0.00	38.8	0.00	0.10	103
RW	2009/9/26	21 Tal(Marsyangdi khola)	1700	grey/much	6	23.8	106	3.1	1.1	8.3	35.6	0.19	3.5	0.00	57.0	0.00	0.18	123
RW	2009/9/30	22 Annapurna II EC (Chachanawa khola)	3500	grey/a little	6	18.6	83.0	0.0	0.7	7.1	30.1	0.00	0.3	0.00	41.8	0.00	0.17	104
RW	2009/10/5	23 Ekle Bhatti (Kali Gandaki khola)	2740	grey/a little	6	55.5	137	14.8	2.4	19.6	57.7	0.21	17.9	0.00	159	0.00	0.13	225
HS	2009/9/27	34 Chame hot spring	2760	no/no	7	>199	262	405	57.0	6.4	153	2.50	780	0.00	82.3	0.50	0.14	408

\*: DWS=drinking water source, RW=river water, HS=hot spring water

#### 4. 調査結果

表1に調査結果を示した。pHは、全ての陸水試料において、中性付近（6-7.5）であった。チャーメ温泉のECはEC計の最大計測値を超えていたが、極限モル伝導率による理論値の概算では330mS/mであった。表1の右端に、Ca<sup>2+</sup>とMg<sup>2+</sup>の濃度から求めた硬度（CaCO<sub>3</sub>）を示した。WHOは硬度の飲料水基準は定めていないが、mg/l単位で0~60未満を軟水、60~120未満を中硬水、120~180未満を硬水、180以上を非常な硬水としている。飲料水源において、日本の水道基準300mg/lを超えたのはジョムソンのみであったが、60mg/l以上の硬水が75%を占めており、例えば、名古屋市の水道水源である木曽川の硬度は2007年度の平均値で20（14-28）mg/lであったのに比して、ネパールの飲料水源の硬度は全体的には高いと言えた。飲料水源のECに対して、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は正の相関（危険率0.05%）を示した。なお、NO<sub>3</sub>-N濃度が、低ヒマラヤ帯のトレッキング出発地のベシサハールで9.60mg/l、同終点のポカラで5.04mg/lと、WHOの飲料水基準値（11.3mg/l）未満ではあったが、他の高地の陸水に比較して高濃度であった。これらの街は人口も多く、水田等も多いことより、肥料等人工的な汚染が推測された。

#### 5. 陸水の水質組成

陸水の水質組成をみるために、主成分イオンの分析値を基にヘキサダイアグラム

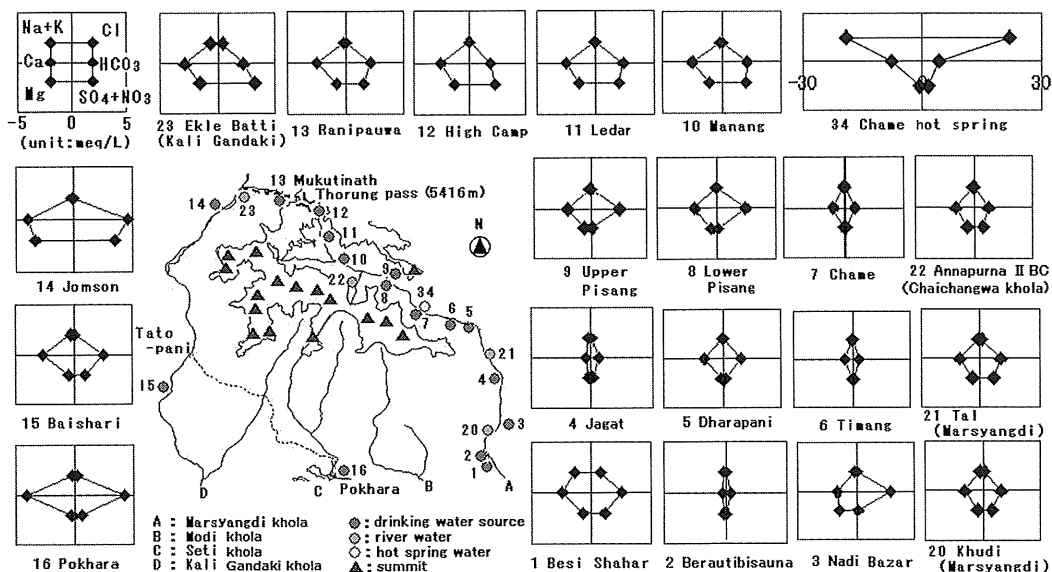


図2 2009年調査のヘキサダイアグラム

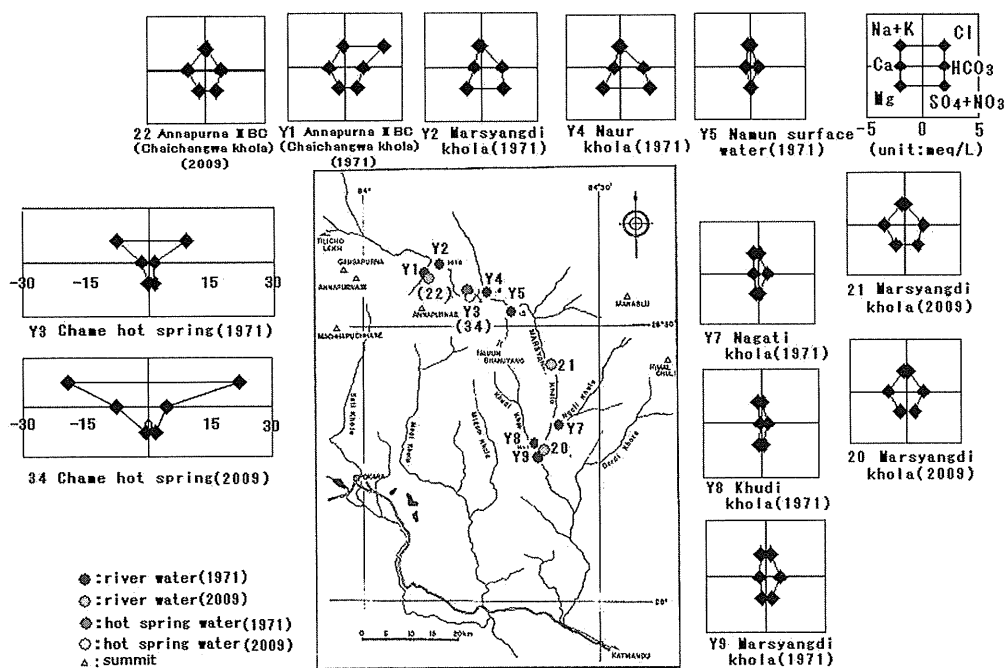


図3 1971年調査 (山田ら、1976) と2009年調査のヘキサダイアグラムによる比較

を作成し、図2に示した。分析値とヘキサダイアグラムの形状の変化をみると、低ヒマラヤ帯のマルシャンディ川流域の陸水が主にCa-HCO<sub>3</sub>型であるのに対して、高ヒマラヤ帯ほどSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の当量濃度が高くなり、Ca-SO<sub>4</sub>・HCO<sub>3</sub>型、あるいはCa-

SO<sub>4</sub>型の水質組成を示した。また、マルシャンディ川流域の陸水に比べると、カリガンダキ川流域の陸水はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が高い傾向にあった。このことは、両河川流域の造岩構成物質の差が反映されているものと推測された。すなわち、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の起源は、海成堆積物起源のテチス堆積物にあると推測され、マルシャンディ川より、カリガンダキ川の方がより多くテチス堆積物よりなるチベット周辺山脈からの源流の流れ込みがあるためと推測された。なお、Mg<sup>2+</sup>については、陰イオンにおけるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と同様な濃度変動がみられたが、低ヒマラヤ帯でもMgを含む苦灰岩等も存在するため、必ずしも高度に伴った変動ではなかった。しかし、全体としては、飲料水源において、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度はCa<sup>2+</sup>濃度と、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度はMg<sup>2+</sup>濃度とより高い相関を示した。このことは、飲料水源の湧出地での造岩鉱物の組成を反映しているものと推測され、特にSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はテチス堆積物起源と考えられることより、高ヒマラヤ帯起源の陸水ほどSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が高いことが明らかとなった。

## 6. 1971年調査との比較

1971年にアンナプルナII峰の登頂を目指した信州大学山岳会登山隊は、マルシャンディ川とチャーメ温泉について試料採取し、その調査結果を山田ら（1976）が報告している。図3に、1971年の試料と今回の河川水、温泉水の調査位置を示した。また、同時に、それらの調査によるヘキサダイアグラムを示した。両調査において、チャーメ温泉は、採取場所がほぼ同一であると考えられ、ヘキサダイアグラムの形状もほとんど同じであった。しかし、各成分の当量濃度については、濃度の低いMg<sup>2+</sup>と（SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>）以外は、今回の方が1971年より平均で約3倍高い濃度であった。また、水温について、1971年は31℃と報告されているが、今回は実測できなかったものの、推測60℃以上であった。この違いは、採取現場が河原で、積み重なった大きな岩の隙間や岩盤の割れ目からの涌出口が複数存在したことより、実際に採取した泉源場所の違いによるものかもしれない。しかし、いずれにせよ、1971年の調査では、何らかの別の陸水で希釈された温泉水が湧出しており、それが源泉として採取されたのではないかと推測された。その仮定が正しいとすれば、当量濃度も水温もほぼ1971年の調査結果に一致することとなる。チャーメ温泉の泉質は、日本の温泉法によればNa・Ca-Cl温泉に該当する。金原（1991）は山田らの報告を基にして、チャーメ温泉をMCTの北に分布する比較的温度の低い温泉に分類している。しかし、今回の調査結果からは、チャーメ温泉は、少なくともタトパニ温泉と同じMCTの近傍に分布する泉温71℃に近い温泉の仲間に入り、地下深部に浸透した天水が花崗岩質貫入マグマの熱により加熱され、MCT帯に沿って

湧出する、いわゆる構造規制型温泉であると判断された。また、マルシャンディ川源流の一つであるアンナプルナII峰BCのチャンチャンワ川についても、採取場所がほぼ同一であると推測されたが、 $\text{Cl}^-$ 濃度について違いがあった。この場合は、陽イオンと陰イオンの当量濃度のバランスより、今回の調査結果がより正しいと判断され、氷河の後退はあるものの、水質組成に変動がないことが明らかとなった。

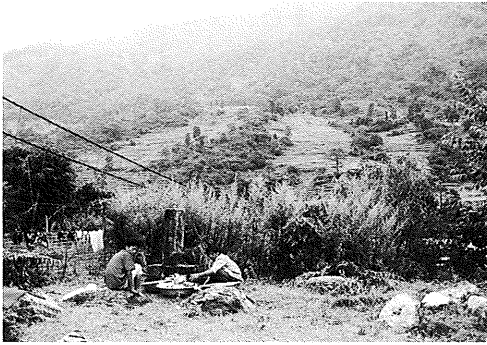
## 7. まとめ

アンナプルナサーキットトレッキングルートを歩きながら、採取した陸水（飲料水源、河川水、温泉水）について、主に、主成分イオンによる水質組成をヒマラヤの地形・地質と共に考察した。

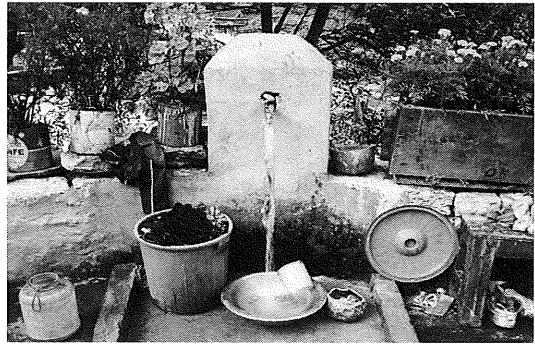
低ヒマラヤ帯の陸水は主に $\text{Ca-HCO}_3$ 型を示したが、高ヒマラヤ帯の陸水はテチス堆積物の影響を受けて $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が高い傾向にあり、 $\text{Ca-SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ 型、あるいは $\text{Ca-SO}_4$ 型であった。マルシャンディ川流域に比してカリガンダキ川流域の陸水の方が、よりテチス堆積物の影響を受けており、両河川流域の造岩構成物質の差が反映されていると推測された。また、マルシャンディ川等の陸水は、1971年の信州大学アンナプルナII峰登山隊によっても調査されており、今回の調査結果との比較・考察によれば、チャーメ温泉やアンナプルナII峰BCのチャンチャンワ川の主成分イオンの水質組成は、38年前とほぼ同じであることが推測された。なお、飲料水源の硬度は全体の75%が $60\text{mg/l}$ 以上の硬水であった。また、低地の人口の多い街では $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の高い飲料水源があり、肥料等の人工的な汚染が推測された。

## 引用文献

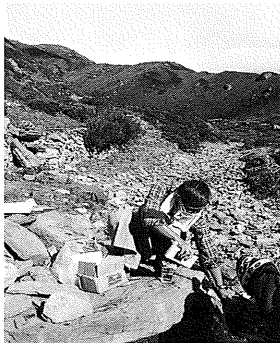
- 木崎甲子郎：ヒマラヤはどこから来たか 貝と岩が語る造山運動、中公新書1190、中央公論社、1994
- 金原啓二：インド・ユーラシアプレート衝突帯（ヒマラヤ地域）の地熱・温泉資源、地質ニュース、446号、18-32、1991年10月
- P. D. ウクラ、小滝篤夫：ネパールヒマラヤ、カリガンダキ河流域の地質案内、京都地学23号、34-39、2004
- 山田哲雄、野口喜三雄、一國雅巳、上野精一、相川嘉正、今橋正征、岡村知彦：ネパール・ヒマラヤ、ランタン谷とマルシャンディ谷の陸水の化学成分、温泉科学、26 (4)、123-135、1976



3 Nadia Bazar



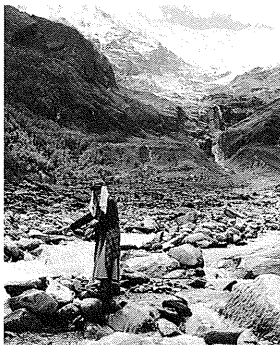
7 Chame



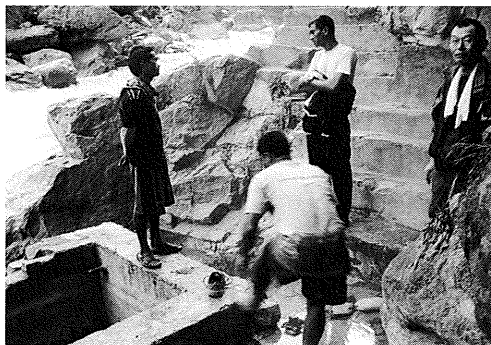
11 Ledher



15 Baisari



22 Annapurna II BC  
(Chaichangwa khola)



34 Chame hot spring

参考：採取場所の風景