

高山・高地とパルスオキシメーター

増山 茂

はじめに：パルスオキシメーターとは。

酸素は生命にとって不可欠である、低酸素状態になれば酸素を吸えばよい、あるいは吸った方がよいとは誰でも考え付くところであるが、「どの程度吸えば最適であるか」がわかったのは1960年以降のことである。動脈血酸素レベルを正常に保てばことは済むのであるが、その任にあたる酸素電極が臨床研究に使われ始めてのはせいぜいその時代からなのである。現在では大きな病院や研究所であれば普通の自動化された測定機器として頻用されているが、この酸素電極、酸素分子が分解される際に放出される4個の電子による電流を測定するため、血液を直接電極に接触させねばならない。つまり、あの痛い動脈採血が必要である。しかも判るのはそのワンポイントの情報だけである。

そんな痛い思いをしなくとも、色をみれば判るではないか、動脈血は（酸素を含めば）赤いし、静脈血は青黒くなる、と考えるのが、“光で酸素を測る”、オキシメーターの立場である。

一般的に、溶質の濃度は、それにより吸収される光の量により測定できる。溶質が二種類あっても吸光スペクトラムが違えば、違う波長の光をあててやれば相対濃度を測定できる。我々が求めるものは動脈血の酸素レベル、酸素は存在しさえすれば即座にヘモグロビンと結合して運ばれるから、このヘモグロビンが酸素と結合している程度（これを酸素飽和度と呼ぼう）がわかれば良い。酸素ヘモグロビンと脱酸素ヘモグロビンが異なった吸収スペクトラムを示すのを利用してそれぞれの相対濃度を求めよう。たとえば波長660nmの赤色光と波長940nmの赤外光を用いると両者を区別しやすくなるであろう。ただ体に光をあてさえすればいいのだ。

さてこの波長の光を体一指や耳殻に当ててみよう。当然のことながら、光は皮膚や結合組織に吸収される。血管壁や赤血球表面で散乱屈折するかもしれぬ。それにもまして、毛細血管や静脈血に影響を受けるにちがいない。我々が欲しいのは動脈血単独の酸素飽和度であるのだが。

一つのアイデアは、静脈血を動脈血化してしまうことである。例えば耳殻を暖めるとよい。局所的血管拡張剤の使用は局所循環を助けるだろう。組織による吸収の問題の解決には、耳殻を圧迫して虚血状態を作りこれを零点とするがよい、あるいは二波長の光などけちらずに八波長もの光を使えば分析対照すべての中から動脈血だけの酸素飽和度を知ることができるだろう。

1950年代から使われはじめた“イアーオキシメーター”はこのアイデアにのったものであった(Severinghaus et al., 1985)。大型で使いずらく、目の玉がとびでるほど高価であったことが普及を妨げた一因ではあったろうが、動揺する動脈拍動が安定した測定を乱すことや、この“動脈血化”の非原理性が信頼性を損ねる原因となっていた。

5. 高所医学, 運動生理

原理は日本で生まれた。青柳は攪乱要因であった動揺する動脈拍動自体に注目した(本田, 1988)。血管以外の組織や静脈血は心臓の拍動の影響を受けないのであるからこれら不変成分を取り除き、心拍に同期して変動する吸光成分だけを解析の対象にすればよい。これ以後のオキシメータにパルスと冠がつくのはこれ故である。1974年氏はこの原理を日本ME学会で発表し、日本の特許申請も行った。氏の所属する日本光電の製品は日本国内では試作品の段階にとどまっていたが、同時期ミノルタはアメリカに特許申請受理されたのも1976年頃に初期の製品として発売した。(諏訪, 1989)

製品として広く普及したのは残念ながら日本でではなかった。アメリカのBIOX社, NELCOR社が種々の周辺特許をとり現在の機種のプロ型を作った。1985年を過ぎて爆発的な普及が始まった。アメリカでは、医療過誤, 医療訴訟への備えが、低酸素状態に陥る可能性のある医療現場, 手術室や集中治療室へのパルスオキシメータの配置を促進した原因であるともいわれる。しかし、患者を痛めつけることなくリアルタイムでかつ連続的に(理論的に正確な)動脈血の酸素レベルを知る方法をこの時期に初めて我々は手にいれたことを特筆しておこう。

たった5年でパルスオキシメータは医療機関をせっけんした。現在では30社に及ぶメーカーが性能を競っている。

このパルスオキシメータが、病院や診療所などの医療現場を離れて使用され始めているのである。

消防庁が救急体制用に購入を決めている。医療現場そのもののように思われるかもしれないが、救急車には医師看護婦などの医療スタッフはわが国では乗ってはいない。

鉱山, 暗渠を現場に抱える企業にも広がっている。酸素欠乏は、古くはカナリヤなど小鳥, ついでガス検知管, そしてガス分析器と進化してきて, パルスオキシメータにも目がむきはじめた。

1. 高山, 高地でも使われ始めた。

しかし、呼吸機能が健全なヒトが低酸素状態にさらされるのは、我々が専ら扱っているような病気や事故の場合と異なり、吸入気酸素分圧 PIO_2 の低下によることが多い。吸入気酸素分画 FIO_2 が変化する事態は船倉や地下壕など閉鎖された空間などの特殊環境だけであり、生理的にわれわれが経験する PIO_2 の低下は大気圧の低下を伴っている、つまり高所滞在中だけであると考えてよい。

そう。高所にいること自体、船倉や地下壕に閉じ込められると同じくらい病的である。だって高く登るだけで、低酸素血症(などと変な言葉であるが、平地の病院でこう言われたらよっぽど重症だと思っただけ)になってしまう。おまけに低圧低酸素環境での滞在自体がまた悪さをする。低酸素状態を考える際には頸動脈にある低酸素に対する受容器の働きが決定的である。(HONDA, 1985) 低酸素の負荷は、急性の反応期では、この受容器を刺激し換気を増加させるなど積極的な生体応答を引き起こすが、その中枢自体に対する効果は中長期的には抑制的であり、例えば低酸素刺激によりいったん増大した換気は時間経過とともに抑制され低下する。順化機構が長期的な適応を用意するだろうとはいったって、まあ高所なんて体に善いわけがない。好きで行っているのだから心配は無用という方も

多いが、少しぐらい自分の酸素化の程度に注意をはらってもよからう。

生体の酸素化を知る様々な手段を我々は持っている。しかし、こと高所高山というフィールドにあっては、病院や研究室のぜいたくさは我々には与えられない。

パルスオキシメータはその原理からみて、生体の酸素化の程度を推定しうる、フィールドで使用可能な現在唯一の測定機器である。特に高度そのものが生体の低酸素化を意味するヒマラヤなどの高山ではこの機器の有効性は更に高く期待される。まず軽くかつ小さい。次に、キャリブレーションが不要である。おまけに測定に苦痛が伴わない、最後に、安い。(はずである) 実際、この機器が普及してからの高所での生体の順化過程の研究にはめざましいものがある。

2. 使用されてきた現場

パルスオキシメータの特殊領域での使用報告が専門の研究会誌にある。我々も中国の崑崙山脈やチベットヒマラヤなどで実際にこれらの機器を使用してきた経験をここに報告したが(増山, 1989)、以後さらに高所でパルスオキシメータを用いた報告が増えている。

本格的な高所登山を目指す登山隊が携帯し始めている、日本での例をあげると、1986年の東京農業大学隊、東北大学隊、1987年大阪歯科大隊、1988年日本山岳会隊、1989年京都大学隊、1990年学習院大学隊などがその先駆けとなったが、現在では一定以上の規模の登山隊でのパルスオキシメータの携行は常識的になっており、1991年度のエベレスト北側は、ここに挑戦した登山隊による世界各国のパルスオキシメータの展示会と化したという。

更に冒険的な登山を目指す個人もパルスオキシメータを積極的に順化行動に取入れ始めている。1991年5月、たった二人で世界最高峰のエベレストに登頂した日本人クライマーはパルスオキシメータを利用した順化行動の詳細な記録を残している。(貫田, 1991) 登頂直後遭難したそのうちの一人は、二ヶ月にわたる順化過程でもまた直前の測定でもあきらかに異常な数値を示している。

登山者、登山隊ばかりではない。ネパールやチベットをトレッキングで訪れる人々はここ十数年急激に増加している。トレッカーは健常な若者とは限らない。壮年老年者も多く、なかには準呼吸不全として扱われるべき者も含まれる。86歳のご老人がヒマラヤを越える旅をする時代である。一部の心あるトレッキング会社では、アフリカ・南アメリカ・ネパール・チベットでの高所トレッキングツアーにおいてツアーリーダーがパルスオキシメータを使用し各トレッカーの状態を把握することを奨励している。(奥村, 1990) ネパール、ヒマラヤ、エベレストの麓のホテル(3900m)でもパルスオキシメータを購入し始めている。

当然のことながら京都大学、信州大学、千葉大学などで行われた高所医学調査でもパルスオキシメータは重要な武器となった。

3. 使用トレース事例

いかに利用されてきたか、我々のいくつかの実例を示そう。

5. 高所医学, 運動生理

図1は高所滞在に伴うパルスオキシメータによる酸素飽和度の変化を示す。ALTITUDE 1とは5100m到着直後、ALTITUDE 2は5100m滞在1カ月後の値である。高度暴露により、酸素飽和度が低下する様子、滞在により改善することがよくわかる。各点が個人を表すが、そのバラツキが大きいことは驚くほどである (MASUYAMA, 1990)。

図2は平地居民(我々のことである)と高地居民(ここではネパール人シェルパである)の5150mと6500mでの酸素飽和度の比較である(増山, 1990) いずれの高度でも、明らかにわれわれの酸素飽和度が低いこと、過換気を行ってもその差が小さくはなるが有意の差が存在することがわかる。

上の二例はワンポイントの測定結果のひかくであるが、連続した記録はさらに有用である。

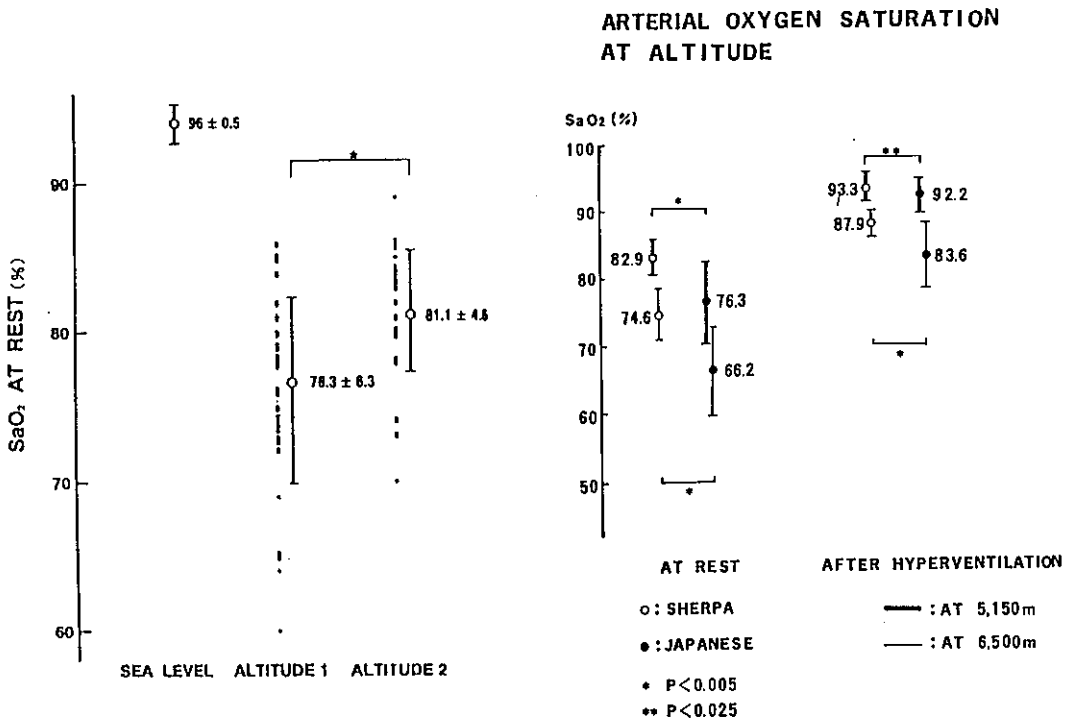


図1

図2

図3は5300mでの睡眠時の連続モニターである。胸部、腹部の呼吸運動は激しく動くかと思えばつきには同時に停止する。チェインストークス呼吸とも言われることもある中枢性無呼吸を伴う周期性呼吸が記録されている。酸素飽和度曲線もきれいに周期的変動を示している。生理的に起きるこの種の周期性呼吸の成因の解析にこの例は大きな示唆を与えた。(MASUYAMA, 1989) この例では周期は約25秒程度であるが、理論的に得られるそれとほぼ合致している。(KHOO, 1983) 図3は周期性呼吸の分析はパルスオキシメータだけでもある程度可能であることを教える。

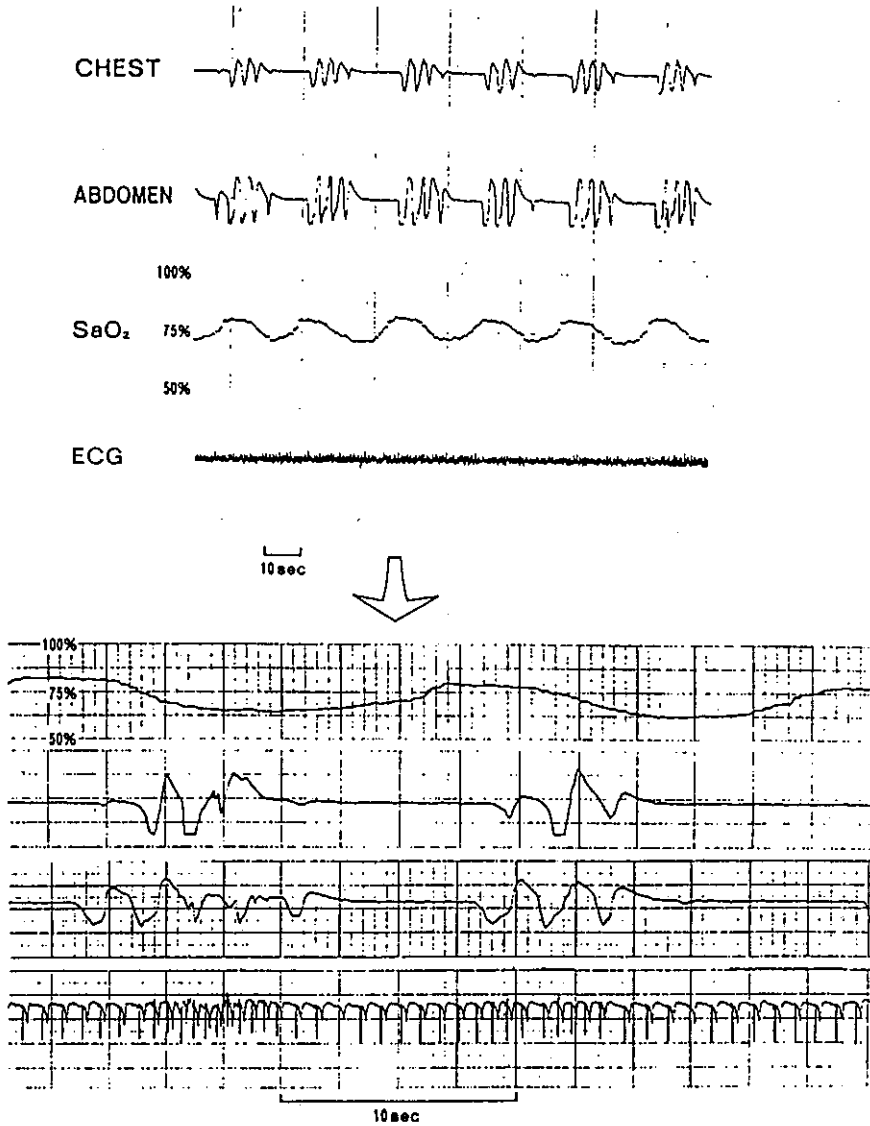


図 3

次に、高度3700mのチベットのラサ市に航空機にて到着後急性高山病に陥ったある日本人トレッカーの例を示す。ウトウトとして傾眠傾向があり、周期性呼吸を呈する。図4は、到着日夕方初診時のHRとSaO₂連続トレースを示す。上段に示すようにSaO₂は50-60%台を低迷しており、HRは80を越えている。後半からHR、SaO₂は規則正しい上下を繰り返す。中段右の拡大トレースではっきりするが、この変化は図3が教えるようにチェーンストーク呼吸のような中枢性無呼吸を伴う周期性呼吸が

5. 高所医学, 運動生理

生じていることを意味する。下段はこの波の周波数分析の結果である。右にあるように周期約17秒の強い規則性をもつ変動があることがわかる。

このトレッカーを、携帯型高圧チャンバー（以下開発者の名前をとってガモウバッグと略す）による治療を行った。このガモウバッグは110mmHgの加圧ができ、この高度だと約2000m下降に相当する。

約一時間ガモウバッグ治療を受けた後の同日深夜のトレースを図5に示す。上段中段に見るように周期性呼吸は持続しているがHRは60台へ低下している。この波の周期は約20秒。27秒のも小さなピ

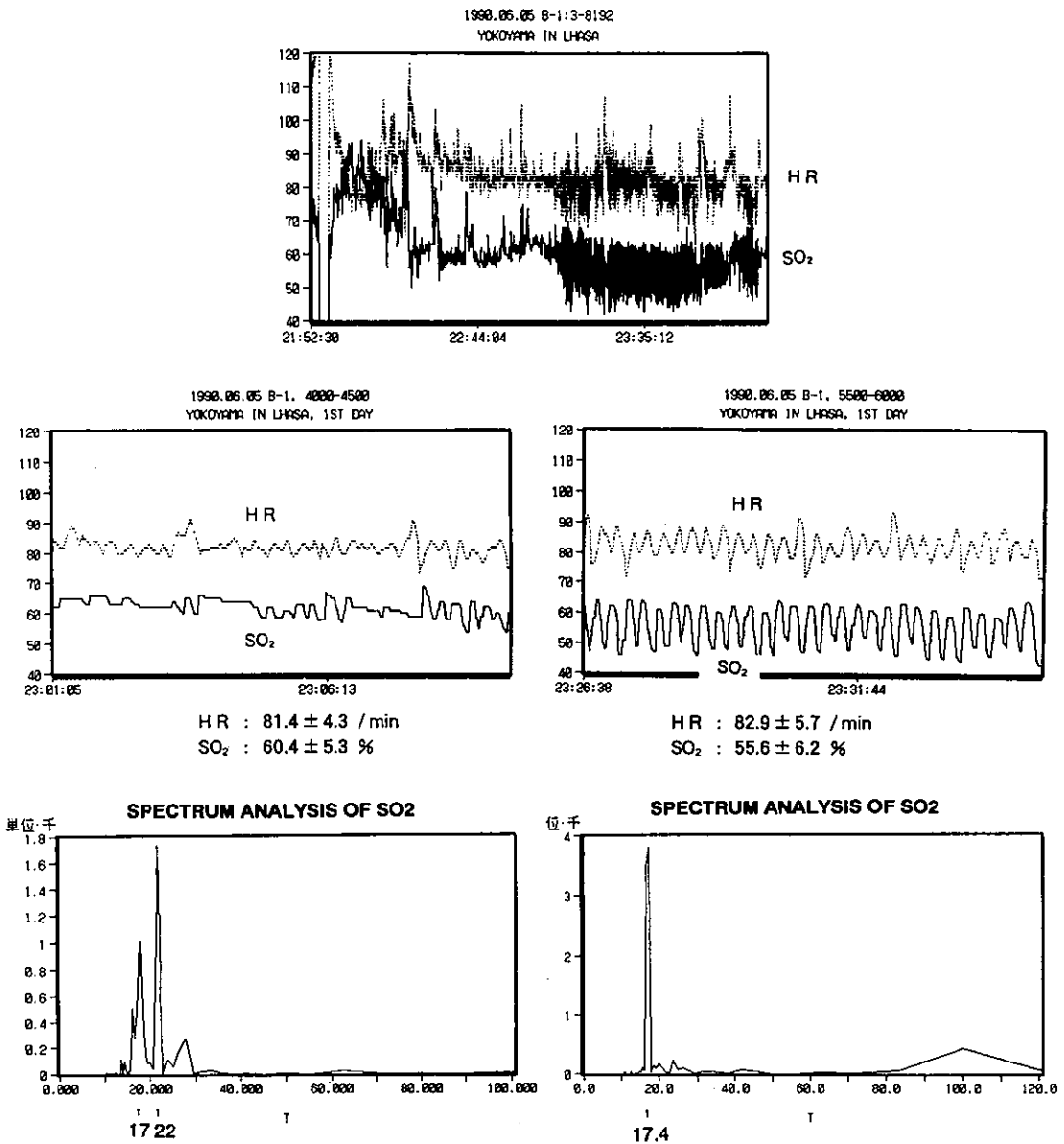


図 4

ークを見る。高所での中枢性無呼吸を伴う周期性呼吸の周期は数学的モデル解析からも又実際の観察からもこの程度の高度では20から25秒程度であると考えられているが (WEST, 1986), 周期が17秒から20秒に延びたこの例では, 心不全状態改善による循環時間遅延の正常化, 換気血流比, 低酸素血症の改善に伴うループゲインの変化などがその理由として考えられ, ガモウバッグがこの面に効果があったことが示唆される。図5の上段の右図は翌明け方のトレースであるが, 右下図にみるように約

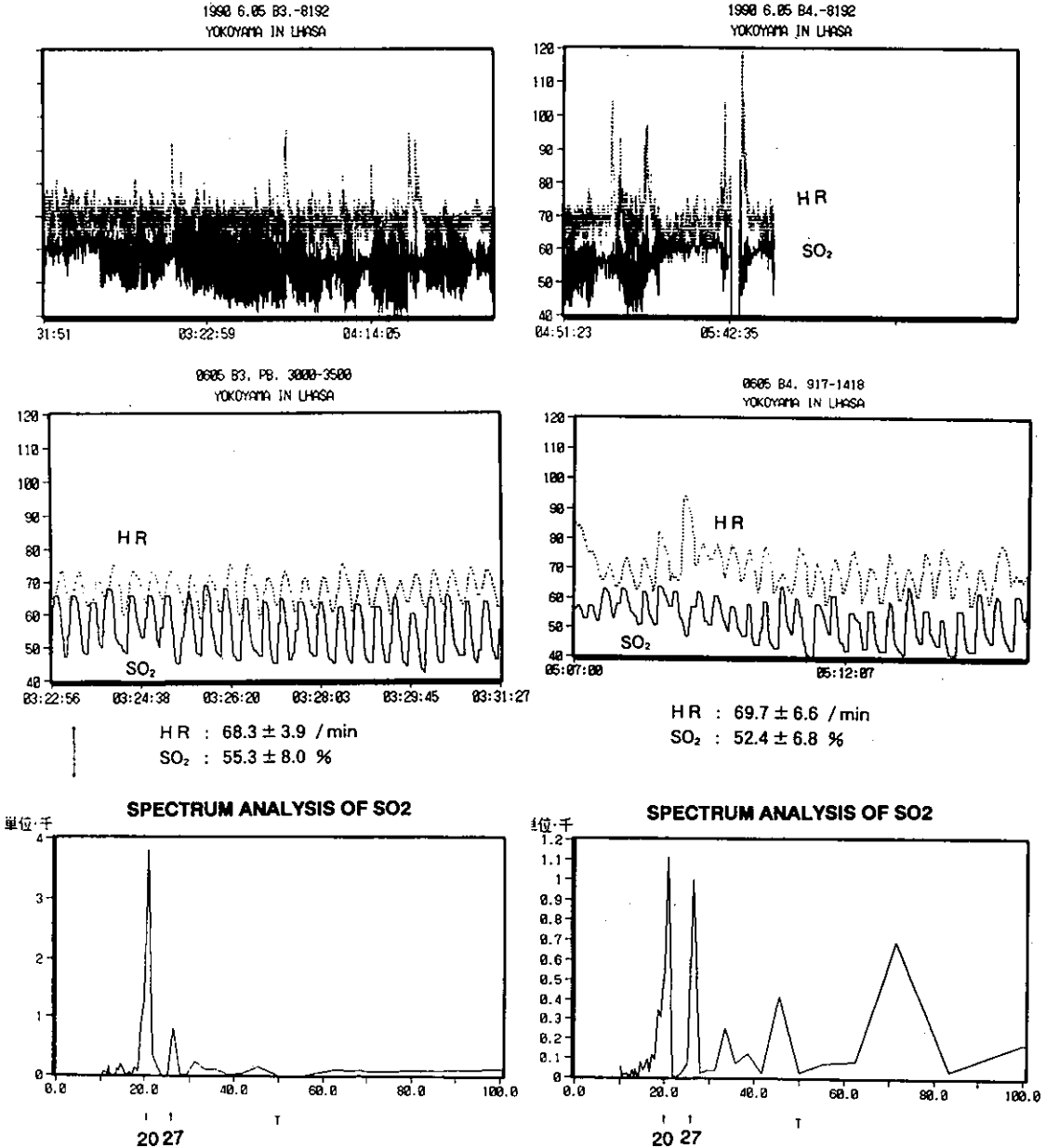


図5

5. 高所医学, 運動生理

27秒のピークが顕著になっている。

しかし、その効果は持続的ではなかった。同日昼間にガモウバッグ二回目の治療を行った日の夕方のトレースを図6に示す、 SaO_2 は50%を割る状態であり、この強い低酸素状態による呼吸抑制のため周期性呼吸は失われ（下段の周波数分析は図4や図5ほど顕著なピークを示していない）、不規則な低換気呼吸状態に陥っている。傾眠傾向が顕著になり、収縮期心雑音も増強、顔面浮腫も強くなった

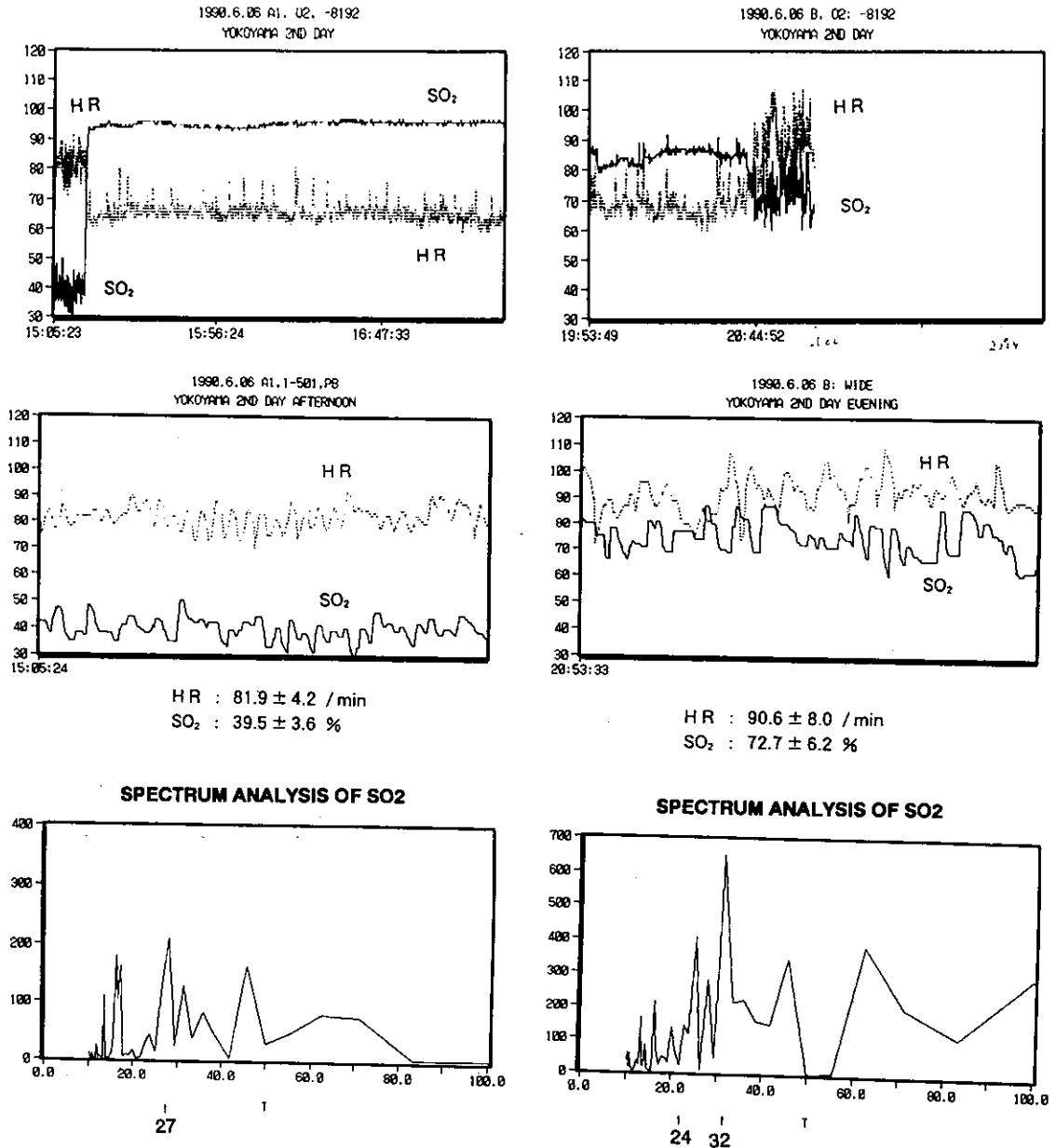


図6

んで、酸素投与、利尿剤や呼吸刺激剤の投与が行われた。同日夜のトレースが図6の右図であるが酸素化の改善は一目瞭然である。

このように、高所ではパルスオキシメータはきわめて有力な診断手段となっている。

4. 以下の点は注意したい。

この簡便で有用な機器もいざ高所寒冷地での測定に使用しようとする、クリアせねばならぬ課題もあり、データの解釈に留意せねばならぬ点もある。簡便さの裏腹にあるこれらの問題点をいくつかを指摘しよう。

- ① 交流電源が得られない場合のバックアップが十分ではない。この点はフィールドでの使用にとってクリティカルである。おしなべてパルスオキシメータ付属の蓄電池の性能は寒冷により急激に低下する。我々はヒマラヤで内蔵電池を三個並列にした特別の充電ボックスを用意したが、氷点下になると充電能力は十分とはいえず、充電電池単独では長時間の連続測定は難しかった。外部の乾電池・バッテリーによる駆動は可能であったが内蔵ROM初期化のためか運転開始時に交流電源を必要とする機種もあった。
- ② 機種ごとの測定値のばらつきが大きい。低酸素血症が強いとき常に悩まされる問題である。標高5,000mでは PaO_2 は75mmHg程度であり SaO_2 は人により70%を割り込む。このレベルでの酸素解離曲線の急峻さが機種間の特性の差異を強調することになるであろう。(GEORGE) また同一機種においても必ずしも成績が安定しているとはいえないようであった。高度・時間・対象を問わず、パルスオキシメータを用いて比較を行う際には同一機種、できれば同一の機械が望ましい。
- ③ 指尖での測定の場合、寒冷による末梢循環不全・低温によるHbの酸素親和性の変化が測定値を修飾する可能性がある。(LAWSON) 事前の加湿保温が十分でない時には、測定値は動揺し安静時の値すら信用しがたくなる。またこのレベルでは小さな換気の変動が大きな測定値の動きをもたらすが、機種によりリスポンス時間に差がある。(GEORGE) 周期性呼吸のような短い周期の現象を捕らえる際には機種の特性に注意すべきである。
- ④ 急性の高所暴露は過換気による呼吸性アルカローシスをもたらす。可能な限りpHまたは PCO_2 変化による補正を心がけるべきである。また長期にわたる高所滞在はpH, 2-3DPGの変化を通じて酸素解離曲線をソフトさせる。(BANCHERO) 高所での時間をおいての比較や、高地居住民の調査の際には、そのデータの持つ意味を十分吟味すべきである。図1に見るように5150mに到達直後より一ヶ月後の SaO_2 のほうが高い値を示している。安静時の換気量も後者で増加しているが換気増大だけでこの SaO_2 増加が説明できるか否か問題となろう。(MASUYAMA, 1990)
- ⑤ 現在の機種は本体に記憶できるデータの容量が十分ではない。また生データを加工して記録している場合もあって、上記図4, 図5, 図6のような分析をおこなうためには別のパソコンなりに記憶させる必要がある。より細かい生データ用の小型の記憶装置が望まれる。

5. 高所医学, 運動生理

5. 最後に。

しかし、十全のメンテナンスさえ怠らなければ現在の機種でも高所寒冷下で十分に使用可能である。我々はヒマラヤの高度6500m, 外気温マイナス20度Cの小さなテントの中という劣悪な環境においても、外部バッテリーを用いパルスオキシメータを終夜連続して測定に使用することができた。

10年前には価格1000万円、大きさ小型テレビほどであったこのパルスオキシメータは、今や約50万円、弁当箱大になった。程なく登山服の胸ポケットに納まる程、タバコ大になって登場する予定である。

酸素分子が結合している動脈血のヘモグロビンのパーセンテージは、チベットの山奥に居ようがカラコラムの氷河にいようが、チラッと胸ポケットをみればわかるようになる。もっともその数値の意味を役立てられるか否かは個々人の知恵によるであろうが。

それがどうした、という向きもあるだろう。器械に頼ってなにが面白いかと。もちろん登山や旅行の楽しみはヘモグロビンや酸素やにあるわけではなく、まして器械によるわけではない。だけど、高所順化を巡る古来からの多くの迷説を逃れることができれば(だってこのパーセンテージが高ければよい、低ければよろしくないというしごくシンプルな面がある)、その分だけ自然の不可思議さを楽しむ自由度が増やそうというものではないか。(千葉大学医学部附属病院医師)

参考文献

- 本田良行。 生体における酸素測定法の革命。ゐのはな(千葉大学付属図書館分館報) 20: 1-2, 1988
- 増山 茂。 パルスオキシメータ: 高所寒冷地での有用性 パルスオキシメートリー Vol. 3: 85-87, 1989
- 増山 茂 ほか 高地居住民の低酸素化学感受性は障害されているといえるか? 登山医学 Vol. 10: 81-90, 1990
- 貫田宗男。 たったふたりのチェモランマ。山と溪谷, 1991年9月号 № 674: 68-79, 1991
- 奥村圭輔。 トレッキングをいかに安全に快適にするか? オキシメータを実施訓練。山と溪谷1991年2月号 № 667: 68-69, 1991
- 諏訪邦夫。パルスオキシメータ。中外医学社。東京, 1989
- Banchero N., and Grover R.F. Effect of different levels of simulated altitude on O₂ transport in llama and sheep. Am. J. Physiol. 222: 1239-1245, 1972
- George, C.F., West, P., and Kryger, M.H. The accuracy and response dynamics of transmittance and pulse oximeters in sleep apnea. Am. Rev. Respir. Dis. 135 (4): A50, 1987.
- Honda, Y. Role of carotid chemoreceptors in control of breathing at rest and in exercise: studies on human subjects with bilateral carotid body resection. Jpn. J. Physiol. 35: 535-544. 1985

- Khoo, M.C. Factors inducing periodic breathing in humans : A general model. *J. Appl. Physiol.*, 53 : 644-659, 1982
- Lawson, W.H. Jr., Holland, R.A.B., and Forster, R.E. Effect of temperature on deoxygenation rate of human blood cells. *J Appl. Physiol.* 20 : 912-917. 1965
- Masuyama, S. et al. Periodic Breathing at High Altitude and Ventilatory Responses to O₂ and CO₂. *Jpn. J. Physiol.* 39 (4) : 523-535, 1989
- Masuyama, S., et al. Altitude Acclimatization: Breathing Pattern Hypoxic Ventilatory Response. *Am. Rev. Respir. Dis.* 141 (4) : 305. 1990.
- Severinghaus, J.W. et al : History of blood gas analysis. I-VI. *J Clin Monit* 1 : 180-192. 1985
- West, J.P. et al : Nocturnal periodic breathing at altitudes of 6300 and 8050m. *J. Appl. Physiol.*, 61 : 280-287, 1986