

シシャパンマ峰滞在中における、動脈血ガス分圧、酸素飽和度、ヘマトクリット、赤血球 2,3-DPGの変動について

中島道郎

大阪府済生会泉尾病院

ヒトは高所に滞在中に、一旦下がった動脈血の酸素分圧(PaO₂)と二酸化炭素分圧(PaCO₂)、それに伴って一旦上がった血液pHは、次第に元の状態に戻ろうとする傾向が見られる。また、血液の赤血球数、ヘモグロビン量、2,3-DPG(Diphosphoglycerate)は増加し血液の酸素運搬能力は高められる。これは呼吸性高所順応としてよく知られた現象である。しかし、それを高所において実際に測定した報告例は世界的に多くない。わがKUMREX'90 はそれらのいくつかを測定して持ち帰っているため、それを高所順応の視点からまとめてみた。すなわち、ベースキャンプ以上に6週間滞在した30隊員中16隊員について調べた結果、最初下がった動脈血酸素分圧(PaO₂)と酸素飽和度(SaO₂)は共に上昇に転じ、低下した二酸化炭素分圧(PaCO₂)はさらに低下、一旦上がったpHは低下の傾向を示した。他方2,3-DPGは明らかに増加した。すべて予想どおりであった。この現象を酸素Hb解離曲線だけから説明付けるのは無理で、ほかにも説明要因がある筈だと思われるが、現段階ではそこまでは追及し切れていない。

1 はじめに

ヒトは高所に登ると、低酸素症に陥るが、その刺激で過換気となり、二酸化炭素が過剰に排出されて低二酸化炭素血症となり、アルカローシスに陥る。アルカローシスになると酸素とヘモグロビン(Hb)の親和性が高まり、同じ酸素分圧で飽和度が高くなる。これは低酸素状態の中を生きてゆくには都合のよい変化であるといえるが、生体にとって血液pHは中性であることが望ましく、過度のアルカローシスはいづれは是正されねばならない。そして何よりも、呼吸筋が疲労して、過換気はそう長く続かない筈である。そのような是正は何によってもたらされるものか、それを考えてみようとしてみた。

2 研究対象と測定器具

全隊員30名の内、測定できたのは27名であったが、滞在の前後とも測定しえたのは16名であった。ベースキャンプの高度は5,020m、気圧は410±2 torr(mmHg)であった。測定は到着翌日の1990年4月15日と、登頂後下山の翌日、滞在6週後の5月

29日に行なった。

動脈血ガス分析にはコーニング・血液ガスアナライザー#168を現地にて使用した。

2,3-DPG (Diphosphoglycerate)は、血清を液体窒素容器に凍結保存後、京都に持帰り、臨床化学検査室にて比色法により測定した。

3 結果

この研究に関連する測定結果を[表1]にまとめた。個々人間の測定値のバラツキは大きい、これを平均して見ると、PaO₂、SaO₂、2,3-DPG、Htは上昇・増加し、PaCO₂、pHはやや減少・低下する傾向が認められる。

この様々な変化のうち、PaO₂とSaO₂について見たのが[図1]である。個人差は甚だしいが、全体の傾向として、高所滞在の前後でPaO₂もSaO₂も共に左下から右上に向かって上昇していることが分かる。その方向は、殆どpH 7.45から7.60の間の酸素Hb解離曲線に沿っており、pHの酸性化傾向がこの移動の主要因であるとは考えにくい。

〔図 2〕は高所滞在前後の PaO₂ と PaCO₂ の関係を見たものである。全体の傾向として、滞在前は左上方、つまり低 PaO₂-PaCO₂ 状態から、滞在後は右下方に移動している。すなわち PaO₂ は上昇し PaCO₂ はさらに低下していることがわかる。理論的には、PaCO₂ の低下した分、PaO₂ が上昇する筈であるが、この図では、PaCO₂ の低下に比し PaO₂ の上昇が大きいように思われる。また個人差も強く、PaCO₂ 低下の割りに PaO₂ 上昇の少ない個体や、反対に、PaCO₂ が上昇して PaO₂ は低下した個体もあり、説明に困難する。

1 例だけ全体からかけ離れた傾向を示した個体がある。最初彼は PaO₂ は全体の中で最低値でありながら PaCO₂ は飛び抜けて高い状態にあり、そこから最後は、PaCO₂ は更に上昇しながら、PaO₂ は誰よりも高い差をつけて上昇するという、矛盾した成績を示している。彼は、遠征に参加する前約半年、海拔 2,880m のポリビアに滞在している。それが理由なのか、単なる個人差なのか、興味深い。

〔図 3〕は 2,3-DPG と PaO₂ の関係である。図で黒星は滞在前、白星は後であるが、PaO₂ も 2,3-DPG 量も、共に滞在の前後で明らかに増加して、全体として、左下から右上に移動し、はっきり黒白 2 群に分かれている。しかしここでも、2,3-DPG は増加しているのに、PaO₂ は低下している個体も見られ、説明を困難にしている。

4 考按

邦語になったものが 1 冊もないのは残念ながら、高所医学に関する成書は世に少なくない (1,2,3)。そしてそれらを通して、高山病とその対策に関しては、最近かなり明らかにされて来た。しかし、高所順応については、まだ分からないことが多すぎる。例えば川嶋 (4) は、高地と呼吸機能という解説文の中で、呼吸性高所順応を分かり易く説明しているが、彼が不明とした問題点は、6 年後のいまでも不明のままである。

そもそも高所順応とは、生体が低圧・低酸素環境に暴露された場合でも生存してゆけるように生理的諸機能が変化することである。すなわち、低酸素症に陥ると頸動脈球にある化学受容体を介して呼吸中枢が興奮し、換気が増大する (過換気)。

すると、CO₂ が肺から排出され過ぎて血液はアルカリに傾き (呼吸性アルカローシス)、血液の Hb は酸素との親和性が強くなる。つまり同じ酸素分圧でも Hb の酸素飽和度は高くなり、血液の酸素運搬能は増加する。これは『酸素 Hb 解離曲線の左方移動』と呼ばれる現象である。他方、同じく頸動脈球化学受容体は、循環中枢を刺激して心拍数と心拍出量を増加させる。さらにまた、低酸素状態は骨髄を刺激してエリスロポイエチンを、ひいては赤血球を増加させる (多血症)。これらの変化は、低圧暴露後数時間ないし数日して出現し、それぞれ相まって血液の酸素運搬能力を高め、急性の低酸素状態を取りあえず生き延びることになる。

しかし、過換気は呼吸筋を疲労させ、アルカローシスは人体のホメオスターシス (恒状状態) を乱し、多血症は血液の粘性を高め、かつ末梢血管抵抗を増大させるので心臓が疲労する。こういう状態は長く続く筈はなく、いづれ破綻する。これを高所衰退と呼ぶ。いづれ衰退するにしても、出来るだけ遅らせようとする努力、これが高所順応である。高所衰退は高所順応の失敗と理解している人は多いが、それは誤解である。どんなに順応しても海面位での状態に戻ることは不可能で、いつかは衰退を免れ得ない。もっとも、どの高度から上が高所なのか、についての定説はなく、またそれを決めることは不可能である。

とまれ、衰退を遅らせる努力の表われとしての順応は、換気量や心拍出量の正常化、という形で認識することが出来る。しかし低酸素刺激によって一旦高められた換気応答は、これは生命維持にとっては根本的な問題だからであろうか、低酸素状態が続く限り、そう簡単には元のレベルには帰らない。だから少しの体動ですぐに換気が促進されるので、PaCO₂ や pH の正常化はかなり遅れる。われわれの観察でも、6 週間でごく僅かのは正が得られたのみであった。高所呼吸性アルカローシスはやがて代謝性に是正される、という説もあるが、少なくとも 6 週間くらいの期間ではそれは認識出来なかった。

過換気による PaO₂ の上昇は、PaCO₂ の低下という代償によって得られる。ところが今回の観察では、PaO₂ の上昇値が PaCO₂ の低下値を上まわ

っている例が多く見受けられた。この場合のPaO₂を高める要因は何であろうか。酸素が肺から組織に運ばれるのは、血液中のHbと結合した形で行なわれるのがほとんどである。酸素とHbの結合の度合(親和性)は、血液のpHと赤血球2,3-DPGによって左右される。その辺の消息を示す関係図が「酸素Hb解離曲線」(図4)である。この図で、pHが高い(アルカローシス)とHbの酸素親和性は高くなり、曲線は左方へ移動する。pHが低下する(アシドーシス)と親和性は下がり曲線は右方へ移動する。反対に、2,3-DPGが増加すると曲線は右方に、減少すると左方に移動する。曲線の左方移動、すなわちHbの酸素親和性の上昇は、同じPaO₂ならSaO₂は高い、つまりHbの酸素運搬能力の増加を意味し、反対に右方移動は、同じSaO₂ならPaO₂は高い、裏返せば、Hbから酸素は離れやすくなっていることを意味する。今回の観察で、高所滞在6週ではまだ強いアルカローシス状態にあるが、全体として僅かに酸性側には正されており、2,3-DPGは明らかに増加していることが示された。そうだとすると、曲線は右方に移動している筈である。PaO₂の増加の理由の一部はこれで説明されうるかもしれない。しかし、今回の観察でPaO₂もSaO₂も共に増加している事実は、これは解離曲線の移動だけでは説明出来ない。呼吸性高所順応の道筋には、これよりも

っとほかに、何かPaO₂もSaO₂も共に増加させるような要因がある筈である。それが何であるか、いまのところ勉強不足にして、ちょっと見当がつかないでいる。

5 結語

チベットのシシャバンマ峰において、ベースキャンプ(5,020m)以上、頂上(8,012m)を踏んで下山する迄の約6週間の高所順応の様子を、血液中の酸素、二酸化炭素、pH、赤血球2,3-DPGの変化を通して観察し、若干の考察を加えた。ここで観察しえた事柄はすべてこれ迄に論じられてきたことで、何ら新事実と呼べる発見はなかったが、データを分析する過程において、呼吸性高所順応を説明するには、これだけでは不十分で、まだほかに説明要因がある筈だという疑問を強く感じた。

文献

- 1) Houston, C.S. (Revised Ed. 1978), *Going Higher, The Story of Man and Altitude*, Little, Brown and Co., Boston, Toronto.
- 2) Ward, M.P., Milledge, J.S., West, J.B., (1989). *High Altitude Medicine and Physiology*, Chapman and Hall Medical, London.
- 3) Heath, D., Williams, D.R. (1989). *High-Altitude Medicine and Physiology*, Butterworths, London
- 4) 川嶋 彰、小林俊夫、草間昌三(1987): 高地と呼吸機能, 呼吸 6:51-56.

表1 シシャパンマ峰(8,012m)ベースキャンプ(5,020m)以上に6週間滞在した際、その前後における動脈血ガス分析値、ならびにヘマトクリットと赤血球2,3-DPGの変化の比較
(京都大学シシャパンマ医学学術登山隊,KUMREX'90)

NAME ID# ³	PaO ₂		PaCO ₂		pH		SaO ₂		Ht		2,3-DPG		DPG/Htx100	
	Bef. ¹	Aft. ²	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.
MA 18	46.6	42.4	19.0	22.9	7.49	7.52	86.3	83.5	42.0	50.5	2.56	4.04	6.10	8.00
KM 06	44.4	47.7	22.5	21.8	7.53	7.40	85.6	83.6	50.0	62.5	2.95	3.77	5.90	6.03
SN 16	43.4	46.9	22.5	19.8	7.58	7.53	86.5	87.8	51.5	67.0	3.35	4.46	6.50	6.66
TS 12	40.4	42.1	23.6	18.4	7.58	7.58	83.8	85.8	52.0	62.0	3.19	4.29	6.13	6.92
KF 17	40.4	40.7	27.0	24.9	7.53	7.58	81.5	84.0	50.5	62.0	3.47	4.41	6.87	7.11
HU 03	40.0	39.2	20.3	26.4	7.53	7.51	81.4	79.0	51.0	66.0	2.57	3.99	5.04	6.04
KS 26	40.0	37.9	22.3	22.4	7.51	7.57	80.4	80.3	51.5		2.72	4.16	5.28	
KE 20	38.9	42.8	24.5	25.3	7.51	7.51	79.1	83.3	52.0	70.0	3.33	5.08	6.40	7.25
SS 07	38.2	44.3	23.9	24.9	7.61	7.45	82.2	82.5	52.5	63.5	3.46	4.24	6.59	6.68
YJ 10	38.1	42.1	24.2	26.1	7.48	7.45	76.6	79.9	53.0	68.0	3.53	5.20	6.66	7.65
TM 02	37.1	42.0	24.5	23.7	7.50	7.53	76.0	83.1	53.0	62.0	3.40	4.30	6.42	6.94
AD 08	36.8	42.8	24.9	20.7	7.52	7.55	76.7	85.1	46.5	60.0	2.72	4.30	5.84	7.13
RN 05	35.3	41.3	23.7	20.0	7.60	7.54	78.5	83.4	49.5	67.0	3.46	4.66	6.99	6.96
MS 23	33.8	45.1	27.2	18.9	7.54	7.54	72.4	86.8	48.5	65.0	3.31		6.82	
SY 01	32.0	40.5	25.4	20.8	7.51	7.49	68.0	80.2	52.0	60.5	2.82	4.39	5.42	7.26
MT 30	31.0	46.2	29.2	30.9	7.56	7.50	67.9	85.5	42.0	63.5	2.78	4.03	6.62	6.35
ET 25	40.9		25.6		7.58		84.0							
YY 27	37.0		27.0		7.53		77.0							
SK 29	36.8		21.9		7.55		78.2		45.5		2.45		5.38	
NK 11	34.3		26.0		7.49		71.0		50.5		3.32		6.57	
AF 04		41.4		20.4		7.53		83.1						
KH 09		41.3		28.4		7.46		79.1	56.5		3.74		6.62	
MN 13		41.5		25.2		7.52		82.2	42.0	56.5	3.21	4.76	7.64	8.42
AS 14		43.7		23.0		7.52		84.6		57.5		4.49		7.81
AS 19		42.6		29.5		7.51		82.7		49.0		3.23		6.59
TT 24		44.3		24.1		7.50		84.3		70.0		4.26		6.09
KT 15		45.3		24.2		7.52		85.8		70.0		5.29		7.56
MEAN	37.8	42.8	24.6	23.6	7.53	7.51	77.7	83.4	49.6	62.6	3.11	4.36	6.29	7.02
SD	4.5	2.4	2.8	3.3	0.04	0.04	7.1	2.4	3.9	5.7	0.37	0.46	0.64	0.65

*1 Bef. = Before Altitude Sojourn(Just on Arrival at BC) April 15,1990, 409±2 torr,

*2 Aft. = After 6 Weeks Sojourn Above 5,000m. May 29,1990, 411±2 torr,

*3 ID# = The Identification Number of the Expedition Members

*4 SpO₂ = Arterial Oxygen Saturation Measured by Pulsoxymeter

図1 シシャパンマ峰(8,012m)ベースキャンプ(5,020m)以上に6週間滞在した際、その前後における SaO₂とPaO₂の変化の比較 (京都大学シシャパンマ医学学術登山隊,KUMREX'90)

★: 滞在開始前、ベースキャンプ到着翌日(1990/04/15, 409±2torr)
 ☆: 滞在6週後、ベースキャンプ撤退前日(1990/05/29, 411±2torr)
 数字は隊員番号、

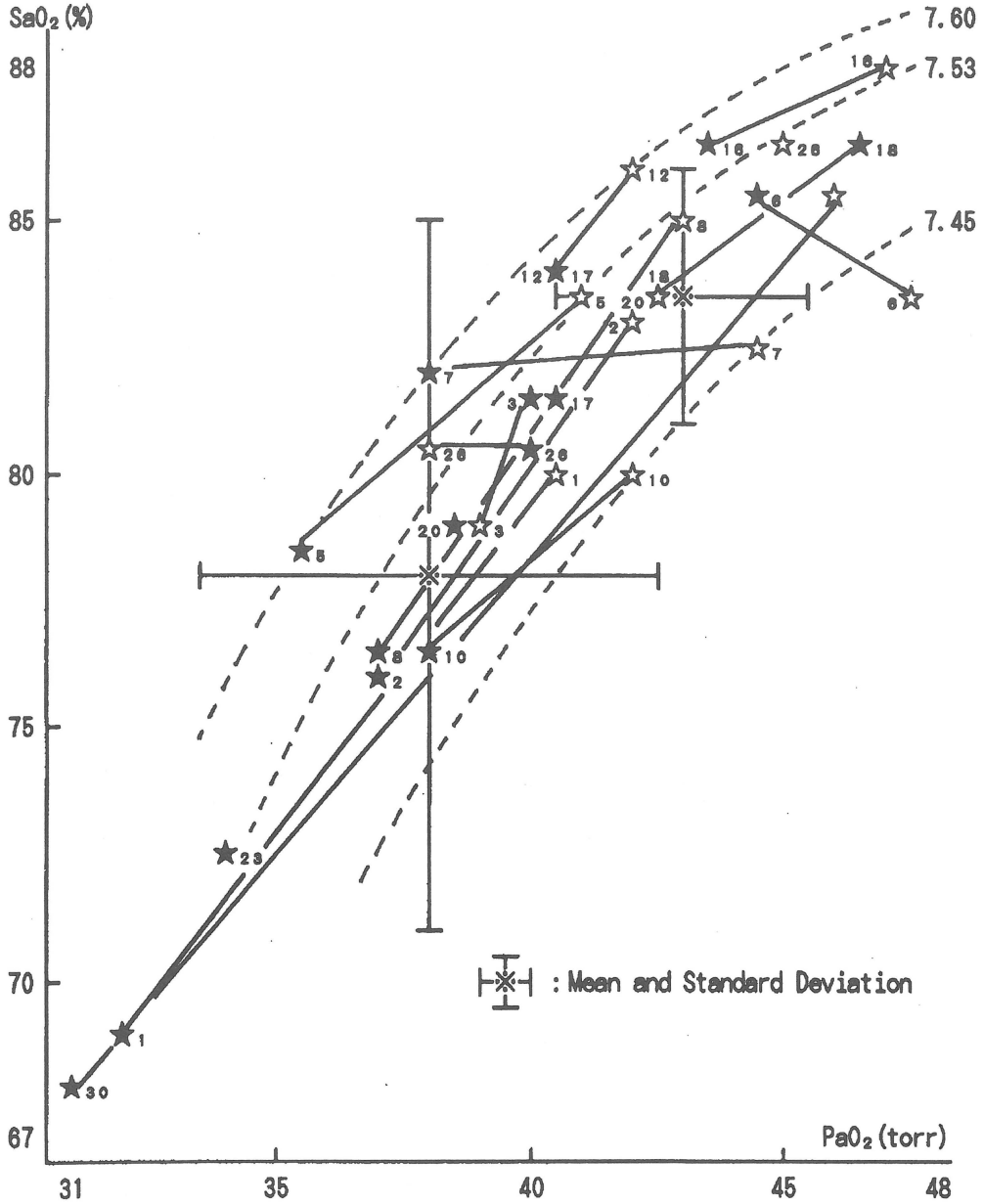


図2 シシャパンマ峰(8,012m)ベースキャンプ(5,020m)以上に6週間滞在中、その前後における PaCO₂ と PaO₂ の変化の比較 (京都大学シシャパンマ医学学術登山隊, KUMREX'90)

★: 滞在開始前、ベースキャンプ到着翌日 (1990/04/15, 409±2torr)
 ☆: 滞在6週後、ベースキャンプ撤退前日 (1990/05/29, 411±2torr)
 数字は隊員番号、

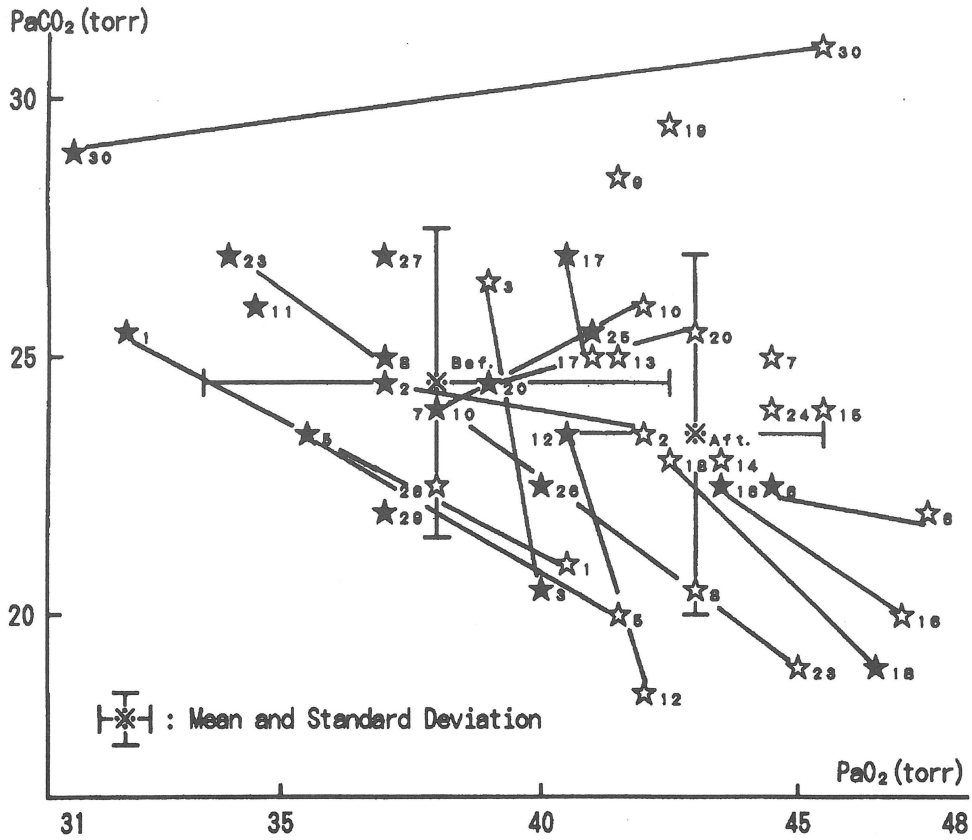


図3 シシャパンマ峰 (8,012m) ベースキャンプ (5,020m) 以上に6週間
 滞在した際、その前後におけるPaO₂と赤血球2,3-DPGの変化の比較
 (京都大学シシャパンマ医学学術登山隊、KUMREX'90)

★：滞在開始前、ベースキャンプ到着翌日 (1990/04/15, 409±2torr)
 ☆：滞在6週間後、ベースキャンプ撤退前日 (1990/05/29, 411±2torr)
 数字は隊員番号

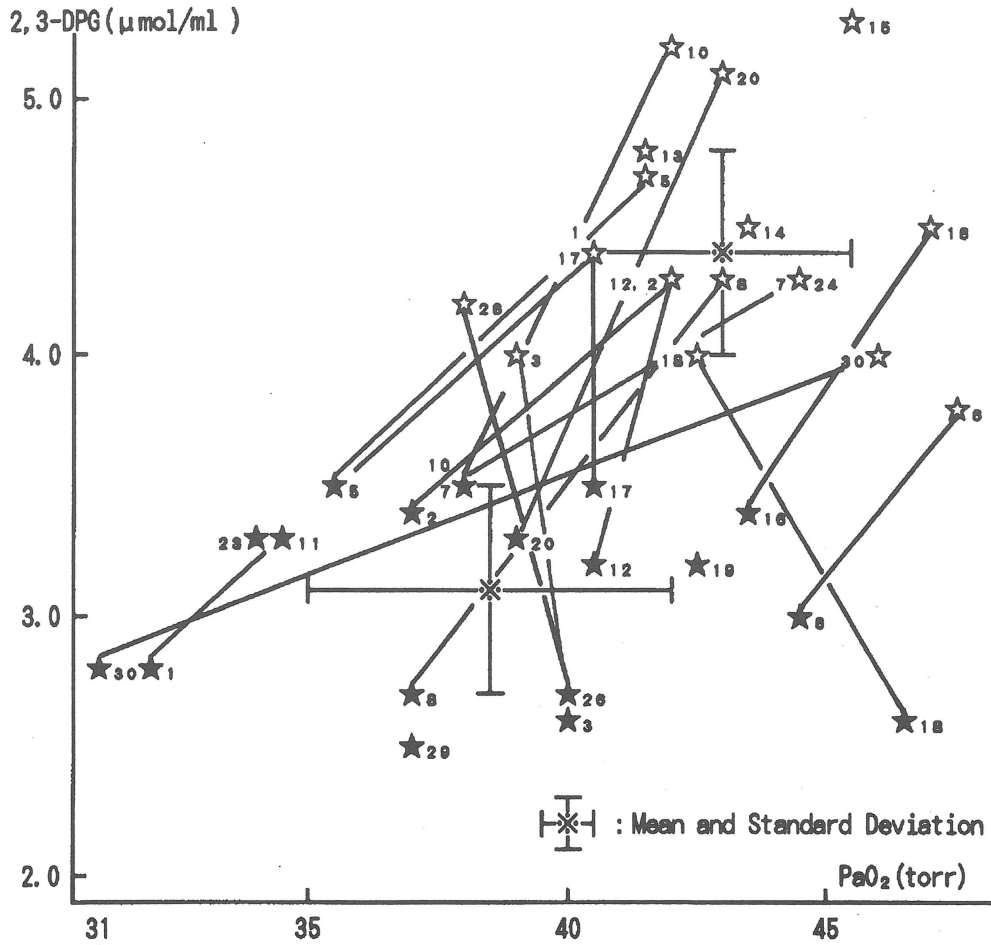


図4 酸素ヘモグロビン (Hb) 解離曲線

右の大きい図は、pH7.4、体温37°Cの場合の、いわば標準的酸素Hb解離曲線。右上の2組の図は、この曲線が、体温(上)あるいは、pH(下)の変化に応じて左右に移動する様子を示している。また、下左は、2,3-DPGが減少すれば曲線は左へ、増加すれば右へ移動することを示す。下右図は、肺毛細血管におけるpHと解離曲線の関係を示すが、本論とは直接関係ない。

(Forster, Briscoe, Dubois, Fisher: The Lung(1986), p. 224より引用)

