

300m相当深度までの高圧ヘリウム環境における呼吸放熱による深部体温の低下

楢木暢雄*¹ 富安和徳*¹

深度数百メートルの深海潜水において、吸気加温装置等が故障した場合、ダイバーは水温と同等の低温ヘリウム酸素混合ガスを呼吸することになる。本研究は上記の条件を想定し、低温のヘリウム酸素ガス呼吸が深部体温に及ぼす影響をみた。

方法：300 m相当深度の模擬飽和潜水実験において相当深度：0 m（空気）、150 m、300 m（ヘリウム酸素）の環境下で、20分間の低温ガス呼吸時の深部体温を測定した。深部体温として、直腸温と体温調節系では非常に重要な視床下部温の好指標とされている鼓膜温を測定した。

結果と考察：低温ガス呼吸時また回復時の鼓膜温の反応性は、直腸温に比べより高く、この傾向は相当深度の増大とともに強くなることが認められた。深海ダイバーにとって低温ガス呼吸は、脳下部温を低下させ、その安全性に大きな影響を及ぼすことが考えられる。深海ダイバーの呼吸用ガスにおいて、その温度は組成に関する問題と同様に重要である。

Fall in Deep Body Temperature by Cold Gas Inhalation in Hyperbaric Helium-Oxygen Environments (150m and 300m Equivalent Depth)

Nobuo Naraki*², Kazunori Tomiyasu*²

The present experiment was designed to elucidate the effects of cold gas inhalation on the deep cephalic temperature, indicated on the basis of tympanic membrane temperature, in a hyperbaric helium-oxygen environment corresponding to a seawater depth of 300m.

METHODS: Four subjects inhaled cold gas for a period of 20min following a 5min rest, and they rested for an additional 20min as a recovery period at 0m (air, 150m (He-O₂) and 300m (He-O₂). Deep body temperature, tympanic membrane temperature and rectal temperature were measured. **RESULTS and DISCUSSION:** The responses of tympanic membrane temperature to cold gas inhalation and to recovery warm ambient gas respiration were more rapid and clear in comparison with that of rectal temperature. These tendencies of deep body temperature were remarkable at deep equivalent depth.

*¹ 潜水技術部

*² Manned Undersea Science and Technology Department

Concerning the capacity and precision of deep sea dive respiratory apparatus, not only the composition of respiratory gas but also the regulation of inspired gas temperature are extremely important in relationship to securing the divers' safety.

1. はじめに

高圧のヘリウム酸素混合ガスを呼吸ガスや生活環境ガスとして用いる深海潜水においてダイバーが遭遇する最も危険なものとして、低温環境と呼吸に関するものがある(1, 2, 3)。それは、表1に示すような高圧ヘリウム酸素混合ガスの熱力学的特性、とくにヘリウムガスの高熱伝導性によるものである(4, 5)。これまでの高圧ヘリウム環境下の体温に関する研究の多くは、皮膚温等の末梢体温や深部体温でも直腸温を対象とするものであった(6, 7, 8, 9, 10)。直腸温は、最も測定し易い深部体温であるが、直腸の血管網等の条件により、他の深部体温に比べ変化し難く、特に生体上深部からの直接的放熱である呼吸放熱に対しては、その変化はかなり遅いと思われる(11, 12, 13, 14)。さらにKuehn(15)によれば、寒冷環境における直腸温変動は耐寒性の好指標ではないという。しかし、深部体温のなかでも視床下部温は、体温調節系において非常に重要であるが、その測定はヒトにおいては困難であるため、本実験では視床下部温のよい指標といわれている鼓膜温を測定し、高圧ヘリウム環境下における冷気呼吸が生体深部温に及ぼす影響をみた。

2. 実験方法

設定条件は、300 m相当深度までの高圧ヘリウム環境で、加圧は高圧環境装置(高圧チェンバー)内に残留している大気圧空気に100 mbarの酸素を添加した後、純ヘリウムを添加することにより行った。なお全実験期間中、酸素分圧は300 mbar、窒素分圧は790 mbar、相対湿度は50~60%を維持し、また環境温は被験者(ダイバー)の適温とした(図1)。被験者は、当センターの4名のテストダイバーで、その身体的特徴を表2に示す。

また実験前後の検査においては、被験者の鼓膜に肥厚等の異常は認められなかった。

吸気の冷却は図2に示すように、高圧ヘリウム環境下における呼吸ガスの高密度化を考慮しポンプにより氷水中の熱交換用細管へ送気することにより行った。呼気中や吸気以上の送気は逃し弁により高圧チェンバー内に放出した。また呼気量は、一分毎に湿式ガスメーターにより測定し、呼気温、吸気温は宝工業社製のサーミスタ(MB型ビートサーミスタ)、鼓膜温(図3)、直腸温、環境温、は同社製の(SSB型ビートサーミスタ)により1分間隔で測定した。なお、呼吸放熱量の計算には、吸気の湿度は冷却装置の性質上1℃において水蒸気により飽和状態(水蒸気分圧: 5 mm Hg)とし、呼気温は呼期で最も安定している呼気終末部の温度、さらに呼気は呼気温において水蒸気により飽和されているものとした。

測定順序は、環境ガスを呼吸し5分間の倚坐位安静後、20分間の冷気呼吸、さらに環境ガスを呼吸し20分間の倚坐位安静の回復とした。また測定の全期間中、胸部の表面電極からの心電図より心拍数を測定した(図4)。

3. 結果

本実験装置により冷却用熱交換器の出口では約1℃まで吸気を冷却できたが、被験者の口までの間に暖められたため、吸気温は300 m相当深度環境下では約6℃、150 m相当深度では約7℃また大気圧空気下(0 m相当深度)では約15℃であった。高圧環境における低温ガス呼吸に対する感想は、急激に胸廊が内部より冷却され、一時的に呼吸が困難になりとくに300 m相当深度環境下ではまるで“アイスクリームを吸い込んでいるようだ”との訴えもあった。

大気圧空気下(0 m)と150 m、300 m相当深

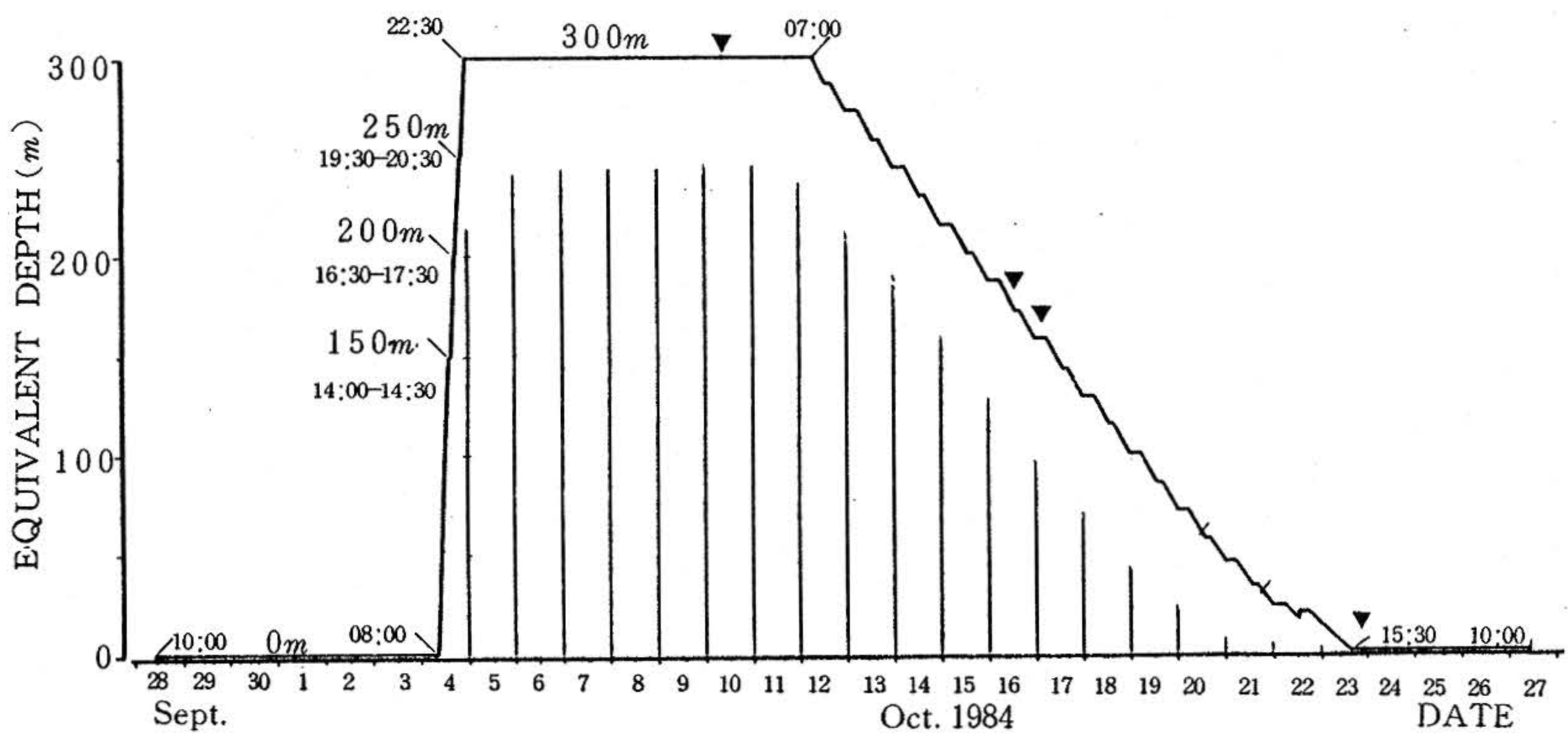


図1 模擬飽和潜水実験における設定環境条件の概要：（Sea Dragon-VI）

▼：低温混合ガス呼吸実施を示す。

・環境温は、大気圧空気下で28℃、高圧ヘリウム環境下では各々：

100 m相当深度では約30℃、200 mでは約30.5℃、300 mでは約31.5℃とした。

（10月22日の再加圧は、一名に減圧障害が発生したことによる）

Experimental protocol of ambient pressure (Sea Dragon-VI)

▼:Cold gas inhalation test

-Ambient temperature within chamber was maintained at thermal comfort zone of subjects as follows: 28°C at 0m, 30°C at 100m, 31.0°C at 200m and 31.5°C at 300m.

表1 呼吸、環境用高圧ヘリウム・酸素混合ガスの熱力学的特性（35℃、乾燥ガス状態）。

Thermodynamic characteristics of the environmental and respiratory gas.

P (m)	P.P.			F			Z	ρ (g/l)	Cp (J/g·°C)	Cp· ρ (J/l·°C)
	O ₂	N ₂	He	O ₂	N ₂	He				
0	0.21	0.79	0.	0.21	0.79	0.	1.	1.14	1.01	1.15
50	0.30	0.79	4.91	0.0500	0.1317	0.8183	1.003	2.03	4.46	9.05
100	0.30	0.79	9.91	0.0273	0.0718	0.9009	1.005	2.81	4.81	13.52
150	0.30	0.79	14.91	0.0188	0.0494	0.9319	1.007	3.59	4.94	17.74
200	0.30	0.79	19.91	0.0143	0.0376	0.9481	1.009	4.37	5.01	21.89
250	0.30	0.79	24.91	0.0115	0.0304	0.9581	1.011	5.14	5.05	25.96
300	0.30	0.79	29.91	0.0097	0.0255	0.9648	1.014	5.91	5.08	30.02

P：相当深度（環境圧：m）

P.P：ガス分圧（bar）

F：濃度比

Z：加圧係数， ρ ：密度（g/l） Cp：定圧比熱（J/g·°C） Cp· ρ ：熱容量（J/l·°C）

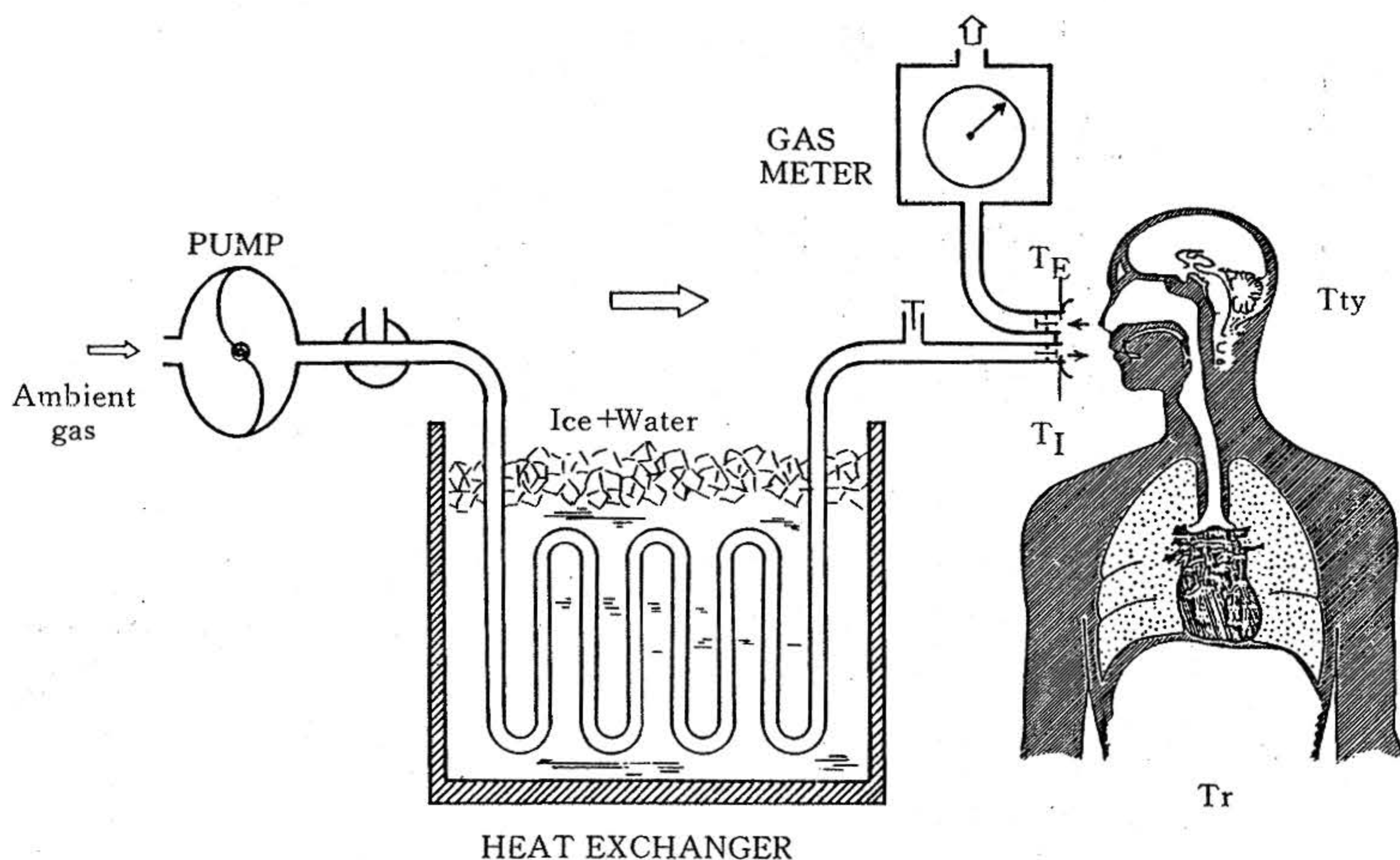


図2 低温混合ガス呼吸実験装置の概要

- 送気ポンプの容量：300 m相当深度の高圧環境において60～100 L/min
 - 温度測定には、宝工業社製のサーミスタを用いた：
 - 吸気温・呼気温は MB型ビートサーミスタ，
 - 鼓膜温，直腸温，環境温はSSB型ビートサーミスタによる
- (熱交換部出口における送気温は約1℃)

Diagrammatic representation of cold gas inhalation apparatus.

-Thermal sensors T_I : inspired gas, T_E : expired gas,
 T_{ty} : tympanic membrane, Tr : rectum

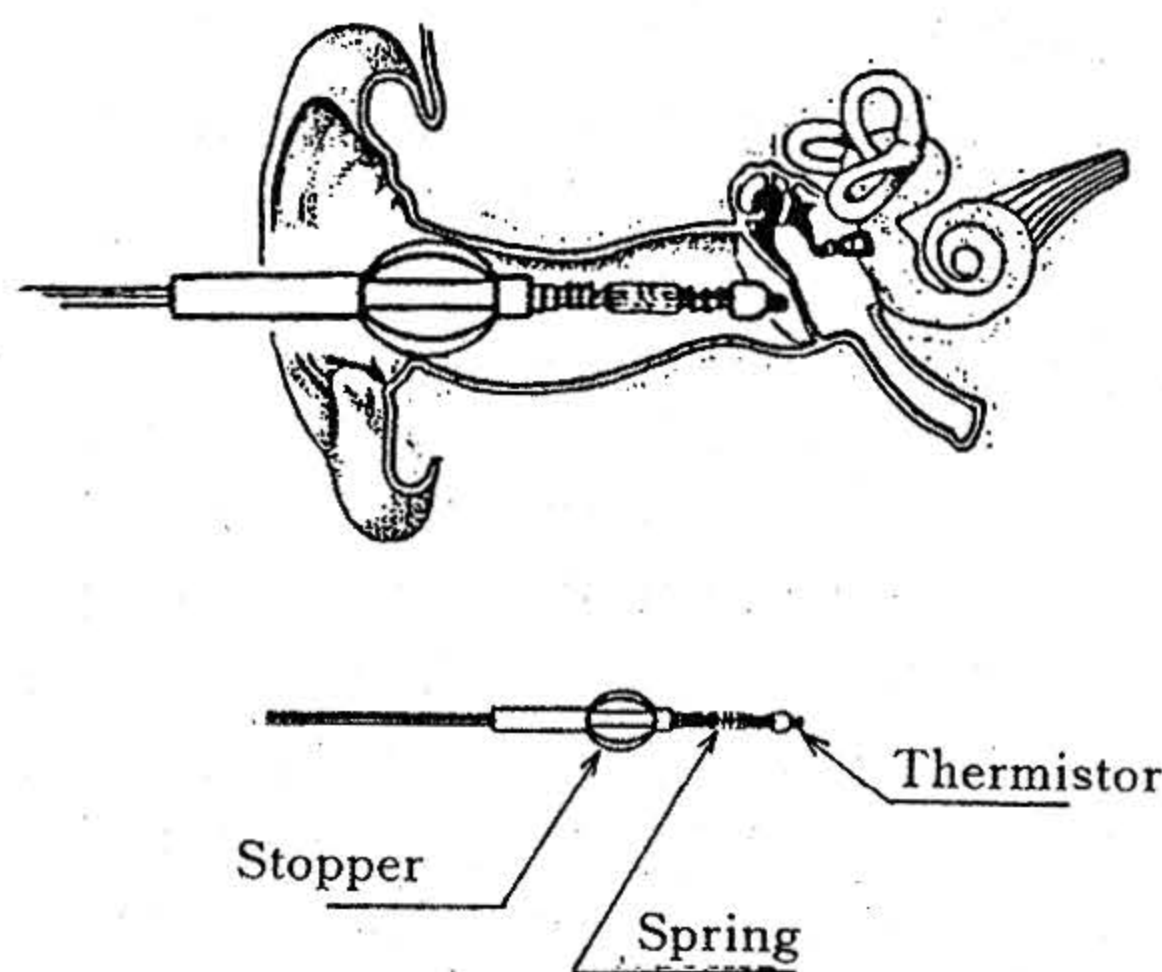


図3 鼓膜温測定用センサー（宝工業社製：耳内用センサー）

Thermal electrode of tympanic membrane (thermistor)

- 右端のサーミスターをスプリングにより鼓膜に接触させ、
 ストッパにより外耳道に固定する。

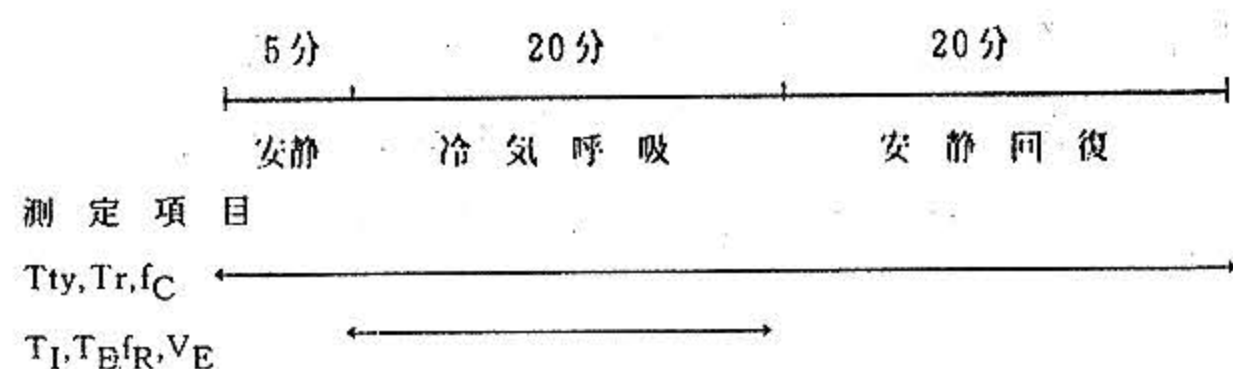


図4 低温混合ガス呼吸時の生理機能測定

・測定は上記の時間に1分間隔で行った。

Tty: 鼓膜温 Tr: 直腸温 fC: 心拍数

TI: 吸気温 TE: 呼気温 fR: 呼吸数 VE: 分時呼気量

・安静時の呼吸ガスは、高圧チェンバー内の環境ガスとする

Procedure of low temperature gas inhalation test.

-sitting rest for 5 minutes, cold gas inhalation for 20 minutes and recovery setting rest for 20 minutes.

-Physiological factor measurements:

Tty: tympanic membrane temperature,

Tr: rectal temperature fC: cardiac frequency

TI and TE: inspired and expired gas temperature

fR: respiratory frequency VE: expiratory minute volume

度環境下において、呼気温は吸気温変動に対し直線的に変化した。各環境圧下に求めた呼気温・吸気温の回帰直線間における共分散分析の結果、回帰直線間に有意差は認めることができなかった。

(図5)。なお図中の高温部の測定点は、チェンバー内の環境ガス呼吸時の呼気温と吸気温によるものである。

高圧ヘリウム環境下と大気圧空気下における冷氣呼吸時の生体深部温(鼓膜温、直腸温)、心拍数、呼吸数、分時呼気量の例を図6に示す。また、冷氣呼吸開始時からの両深部体温の低下度を3名の平均値とその標準偏差として図7に示す。

全環境圧条件下において、環境ガス呼吸時に比較し、冷氣呼吸時の心拍数、呼吸数、分時呼気量に大きい変化は認められなかった。冷氣呼吸に伴う深部体温のうち鼓膜温の低下は、直腸温に比べより著しく、環境ガス呼吸による回復期の深部体温の上昇も、鼓膜温がより早いことが認められ、この傾向は相当深度(環境圧)の増大に伴いより顕著であった。さらに、冷氣呼吸時の両深部体温の関係を図8に示す。両深部体温の変化には、高い相関がみられ、大気圧空気下では、その回帰直線の傾きが約1であるのに対し、高圧ヘリウム環境下では傾きの増大が示すように、鼓膜温の変化が直腸温の変化に対しより大きいことが認められ

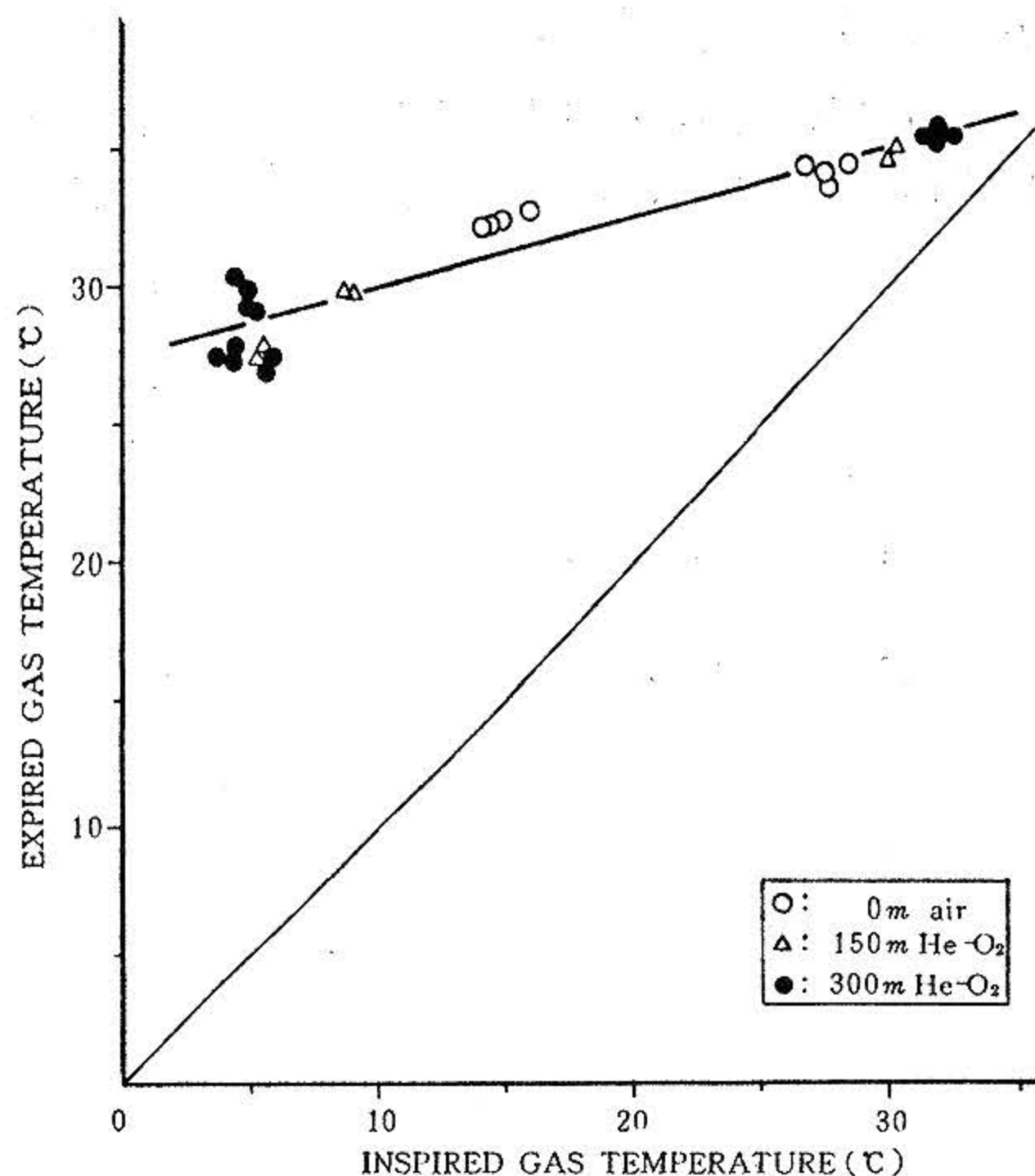


図5 0 m相当深度(空気環境下)と150 m, 300 m相当深度の(ヘリウム酸素環境下)の吸気温と呼気温の関係(4被験者)。

呼気温(TE: °C)の吸気温(TI: °C)に対する回帰直線:

0 m: ○ TE = 30.5 + 0.134 · TI n = 8 r = 0.955

150 m: △ TE = 26.9 + 0.260 · TI n = 6 r = 0.982

300 m: ● TE = 27.1 + 0.262 · TI n = 13 r = 0.950

3回帰直線間に有意差は認められないため、3環境条件下の回帰直線をまとめて次の回帰直線を得た:

$$T_E = 27.4 + 0.256 \cdot T_I \quad n = 27 \quad r = 0.954$$

Expired gas temperature as function of inspired gas temperature under atmospheric air (0 m) and hyperbaric helium-oxygen environments (150 m and 300 m equivalent depth) on 4 subjects.

-Equations of regression line between expired (TE) and inspired (TI) gas temperature under three environments were as follows:

0 m: ○ TE = 30.5 + 0.134 · TI n = 8 r = 0.955

150 m: △ TE = 26.9 + 0.260 · TI n = 6 r = 0.982

300 m: ● TE = 27.1 + 0.262 · TI n = 13 r = 0.950

There was no significant difference between these three regression lines with analysis of covariance and we present only one regression line in the figure:

$$T_E = 27.4 + 0.256 \cdot T_I \quad n = 27 \quad r = 0.954$$

た。さらに、各環境圧下で求められた鼓膜温低下度・直腸温低下度間の回帰直線に対する共分散分析の結果、150mと300m相当深度の回帰直線間

に有意差は認められなかったが、0mと150m、300m相当深度環境下の回帰直線間に有意差（傾き： $P \leq 0.05$, 切片： $P \leq 0.02$ ）が認められた。

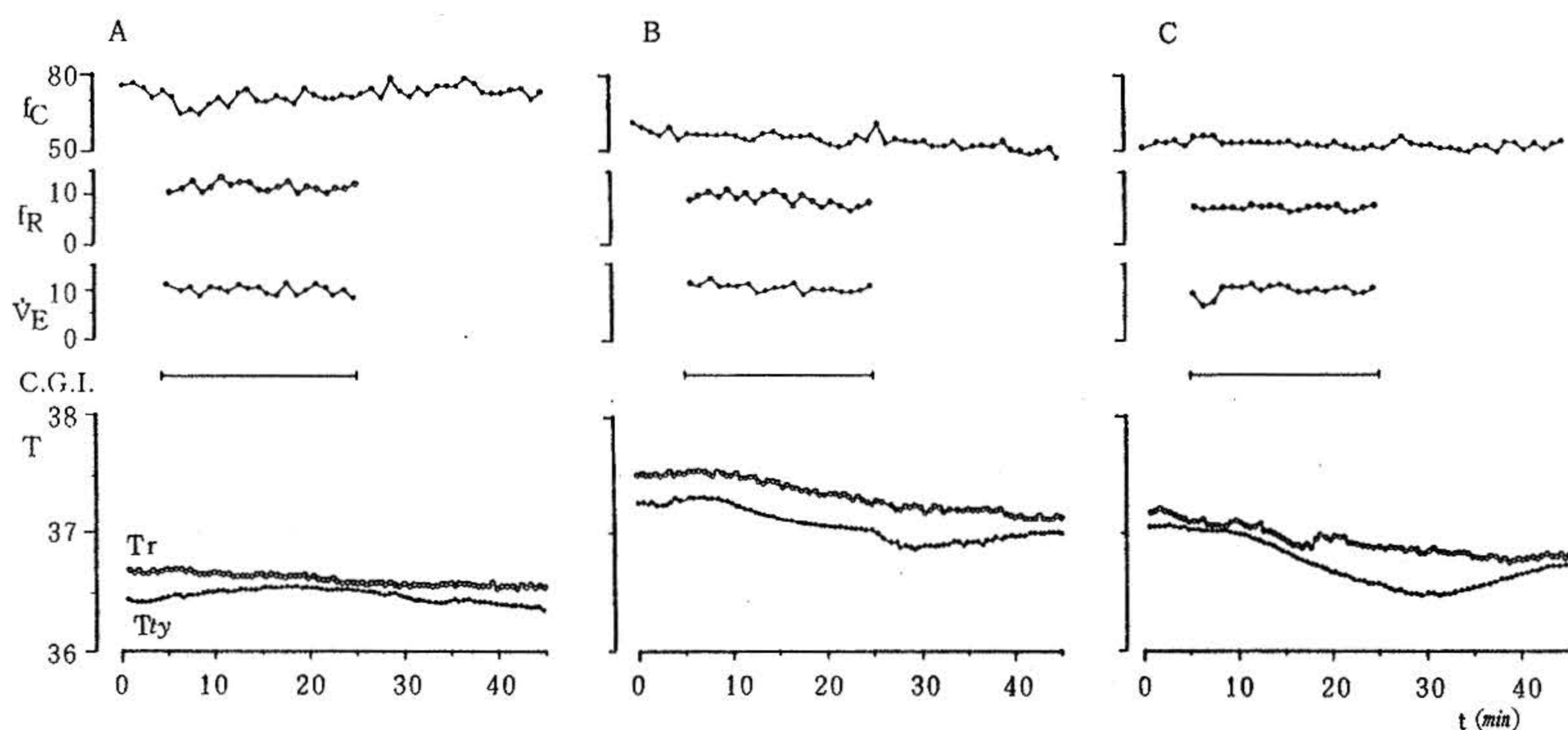


図6 0m相当深度（空気環境下）と150m、300m相当深度（高圧ヘリウム環境）における安静、冷氣呼吸、安静回復時の心拍数、1分呼気量、呼吸数、直腸温、鼓膜温（被験者：T. S.）。

- 環境圧（相当深度）：A：0m, B：150m, C：300m
- 測定項目：
 - f_C ：心拍数（beats/min） $\dot{V}_E$ ：分時呼気量（L ATPS₁/min）
 - f_R ：呼吸数（breaths/min）
 - Tr：直腸温
 - （C.G.I.：冷氣呼吸） Tty：鼓膜温（℃）
 - t：時間（min）

Changes in cardiac frequency (f_C), respiratory frequency (f_R), expiratory minute volume ($\dot{V}_E$), tympanic membrane temperature (Tty), and rectal temperature (Tr) during successive 5 minutes of rest, 20 minutes of cold gas inhalation (CGI) and 20 minutes of recovery period (subj.: T. S.).

-Equivalent depth:
A:0m(air), B:150m He-O₂, C:300m He-O₂

(f_C in beats/min, f_R in breaths/min, $\dot{V}_E$ in L ATPS₁/min, T in °C)

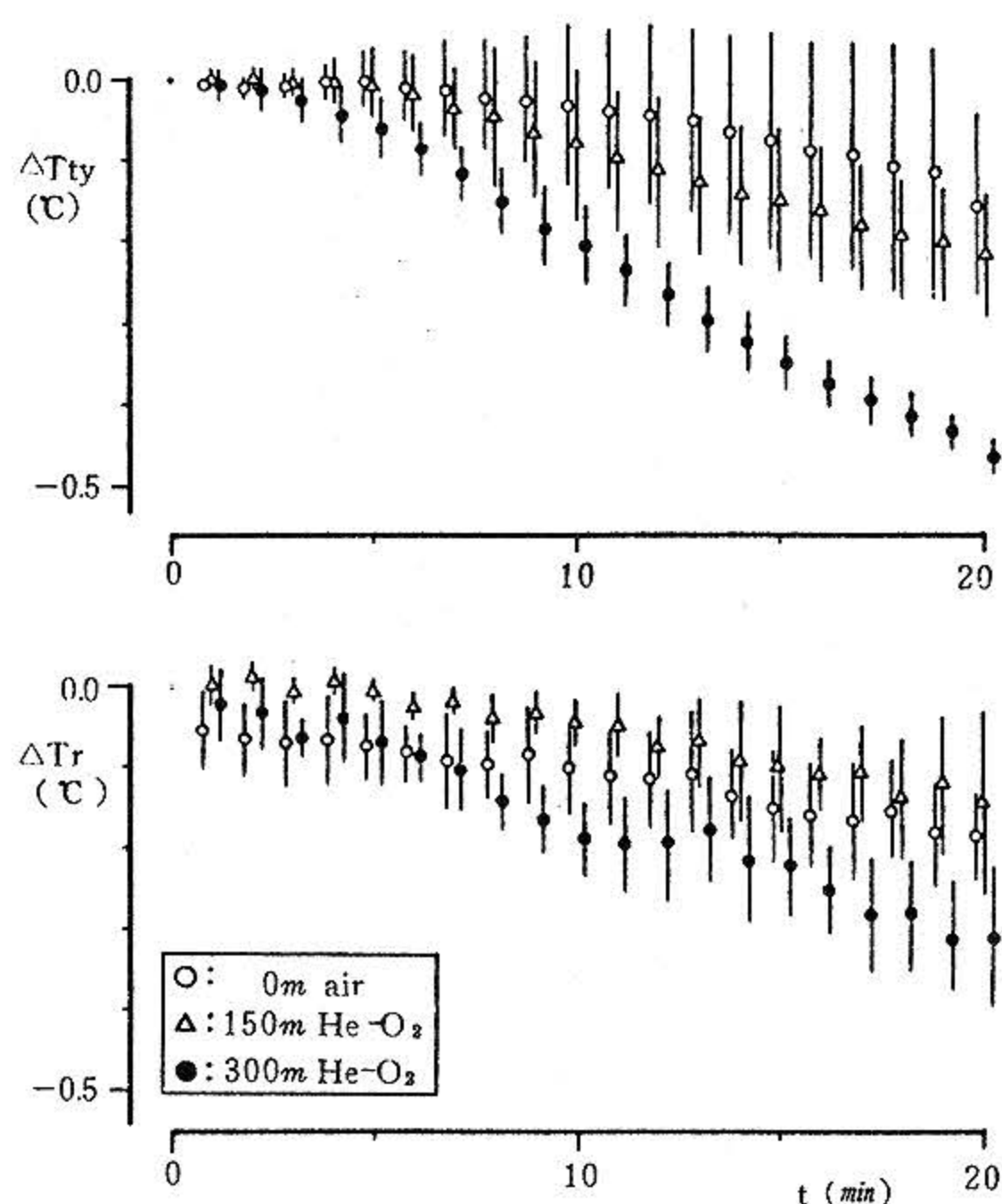


図7 0 m, 150 m, 300 m相当深度環境下での、冷気呼吸にともなう深部体温（鼓膜温，直腸温）の低下（3被験者の平均±標準偏差）。

- ・両深部体温の低下は、冷気呼吸開始時を基準としたものである。
- ・環境圧条件：○：0 m, △：150 m, ●：300 m
- ・三被験者とは、Y.T., T.H., T.S.である

Changes in tympanic membrane temperature, from warm resting base line, during cold gas inhalation at Om air and 150 m and 300 m equivalent depth environments.

-Mean values±s.d. in rating 3 subjects are given.

-Environmental conditions:

○:0m air, △:150m He-O₂, ●:300m He-O₂

4. 考 察

高圧ヘリウム環境下で得られた、吸気温と呼気温の関係（図5）は、ほぼ同等の相当深度（環境圧）において報告されている（16, 17, 18, 19），またNaraki（3）らのネコによる結果と大変よく一致している。また、高圧ヘリウム環境下の低温ガス呼吸における、呼吸困難に関しては、Rawlin & Tauber（20）、Hoke（21）らも報告している。その原因としては、Mcfadden（22）が大気圧空気下で行った、低温空気呼吸（-17℃）実験の結果に示された肺下葉温の10℃もの低下と同様、低温、高熱容量のガスが呼吸器のより深部まで侵入し、気道収

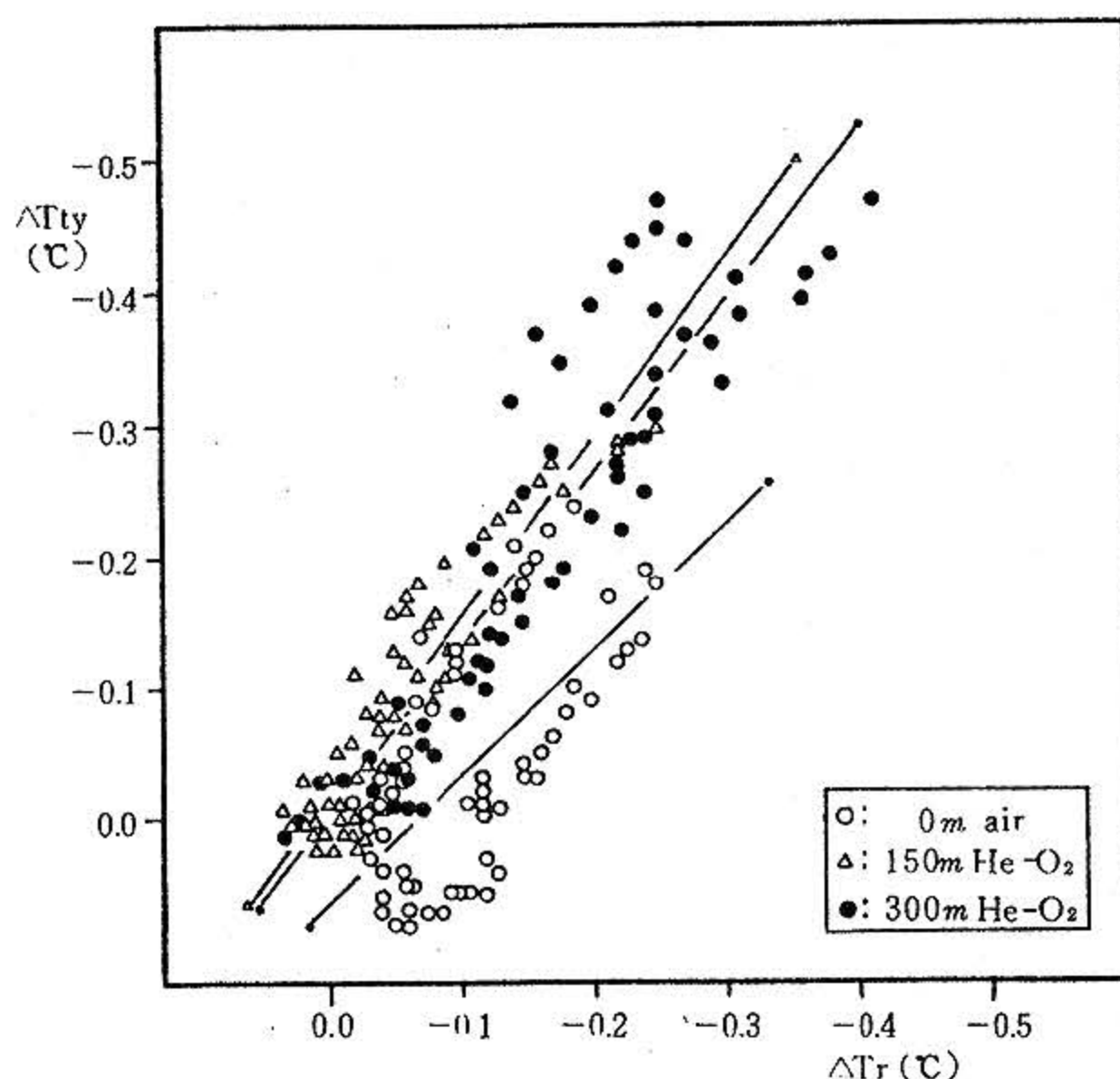


図8 0 m相当深度空気環境下と150 m, 300 m相当深度の高圧ヘリウム環境における、冷気呼吸中の鼓膜温と直腸温の関係（4被験者）。

- ・鼓膜温低下度（ΔTty）の直腸温低下度（ΔTr）に対する回帰直線：

$$0\text{ m } \bigcirc \quad \Delta Tty = 0.062 + 0.961 \cdot \Delta Tr \quad n = 60 \quad r = 0.661$$

$$150\text{ m } \triangle \quad \Delta Tty = -0.014 + 1.366 \cdot \Delta Tr \quad n = 60 \quad r = 0.918$$

$$300\text{ m } \bullet \quad \Delta Tty = -0.002 + 1.312 \cdot \Delta Tr \quad n = 60 \quad r = 0.904$$

- ・両深部温の低下度は、冷気呼吸開始時の値を基準とした。

- ・3回帰直線の分析の結果、0 mと150 m, 300 mの間にのみ有意差が認められた（傾き $P \leq 0.05$, 切片 $P \leq 0.02$ ）。

Comparison between change of tympanic membrane temperature and change of rectal temperature measured in 4 subjects during cold gas inhalation at Om air and 150 m, 300 m, equivalent depth helium-oxygen environments.

- Equations of regression line between change of tympanic membrane temperature (ΔTty) and change of rectal temperature (ΔTr) under three environments were as follows:

$$0\text{ m} \quad \Delta Tty = 0.062 + 0.961 \Delta Tr \quad n = 60 \quad r = 0.661$$

$$150\text{ m} \quad \Delta Tty = -0.014 + 1.366 \Delta Tr \quad n = 60 \quad r = 0.918$$

$$300\text{ m} \quad \Delta Tty = -0.002 + 1.312 \Delta Tr \quad n = 60 \quad r = 0.904$$

- There was significant difference between only 0 m air and two hyperbaric helium-oxygen environments (150 m and 300 m equivalent depth) according to the analysis of covariance.

縮等を引き起したものと思われる。

体温調節系に脳温変化が与える影響の重要性は、多くの動物実験より報告されており、その脳温の

なかでも特に視床下部温と体温調節反応との強い関連が認められている（猿の実験に関して：23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30）。またヒトでは直接的に脳温を測定することが非常に困難なため、より簡便な方法として鼓膜温が視床下部温のよい指標として1960年代のBenginger (31)以来用いられている（13, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38）。また本実験では、高圧ヘリウム環境下の冷氣呼吸の影響を鼓膜温だけでなく、簡便な深部体温として広く用いられている直腸温の変化とも併せて検討した。Hayward (34)らの冷水浴中の鼓膜温、直腸温の変化において、直腸温の低下速度は鼓膜温の低下速度以上であり、また白木ら(39)によれば、ヒトにおける下腿静脈血温の変動に伴う直腸温の変化は、鼓膜温に比べより顕著であるとしている。さらにMc Caffrey (11, 40)らによれば、ヒトにおいて外部より生体の一部を加温、冷却した場合の食道温と直腸温の変動性は、脚部加温では直腸温がより高く、頭部加温では食道温がより高いという結果が示されている。本実験では先述のMc Caffreyらの頭部加温実験とは頸頭部からの放熱という点では、大変類似している冷氣呼吸による気道からの放熱であり、心臓から脳へ向かう動脈血が気道から心臓へ向かう低温静脈血により冷却されることが考えられる。そのため冷氣呼吸による深部体温の低下は、鼓膜温において直腸温より顕著でその反応も早く、また環境ガス呼吸による回復性も高いものと思われる（図6, 7）。

以上の傾向がより高圧ヘリウム環境下において顕著となる理由としては、表1に示したように、高圧ヘリウムガスの熱力学的特性のうち、低温の高熱容量ガス呼吸により、気道表面が強く冷却されるためと思われる（3, 8）。

大気圧空気における呼吸放熱は、全代謝産熱量の10%に過ぎず、その呼吸放熱の9割は気道表面からの水分蒸散（呼吸蒸散放熱）によるもので、残りの1割すなわち全代謝産熱量の1%のみが、吸気を暖めるために失われる熱量（呼吸対流放熱）である（41, 42, 43）。高圧ヘリウム環境下の呼吸放熱に関し、呼吸蒸散放熱は水蒸気分子の運動速度の低下や、環境ガスの含有水蒸気量の低下も報告されており、減少することはあっても増加することは考えられない（44, 45, 46, 47）。

一方、呼吸対流放熱は、呼吸気の熱容量、呼吸気温差と直線関係にあり、呼吸気の熱容量は表1に示したように相当深度（環境圧）の上昇に伴い著しく増大しており、またTimbal (48), Webb (49)は、300m相当深度の高圧ヘリウム環境においても、呼気温・吸気温の関係に換気量の影響がないことを示しており高圧ヘリウム環境下では低温ガス呼吸がより大きな深部体温の低下を引き起したものであると思われる。

低温高圧ヘリウム酸素混合ガス呼吸による深部体温の低下は、ダイバーが水中作業において遭遇する可能性がある吸気加温装置の故障と同じ条件である。そのため、ダイバーの安全性のうえからも、Webb (49), Smith & Hames (50)が指摘している深部体温の指標としている直腸温だけでは不十分であり、体温調節系で最も重要な脳温、とくに視床下部温のよい指標である鼓膜温を測定する必要がある。さらにUnger (51)らは、豚による実験では、500m相当深度までの高圧ヘリウム環境において直腸温と脳温は直線関係にあると報告している。そのため脳温や鼓膜温が測定できない場合でも直腸温より推定できるように、図8に0mと150m, 300m相当深度の環境において低温ヘリウム酸素混合ガスを呼吸したときの直腸温と鼓膜温の低下度の関係をみた。その結果、鼓膜温と直腸温は直線関係にあり高圧環境下では鼓膜温の低下率は直腸温に比べ、1.3倍大きいことがわかる（回帰直線の傾き）。すなわち、高圧環境下での低温ヘリウム酸素混合ガス呼吸により、脳温は直腸温よりも1.3倍の早く低下することになる。このことは、“水深数百メートルにおいて作業中のダイバーの吸気加温装置が故障した場合、

表2 被験者の生体的特徴

Physical characteristics of subjects.
— name, age (diving career), height and weight

被 験 者	年 令〔潜水歴〕 (才)	身 長 (cm)	体 重 (kg)
Y. T.	3 2〔4〕	173	65
M. N.	2 8〔4〕	164	55
T. H.	2 3〔6〕	167	60
T. S.	3 3〔2〕	167	62

深部体温のなかでも脳温の低下が非常に大きい問題であろう”という Piantadosi (52) と Webb(53) の提唱を裏付けるものである。

このような脳温の大幅な変動がある場合は、ダイバーの体温調節機能や作業能力に大きな影響を与えるだけでなく、さらにダイバーの安全性にも大きく影響するものである。

高圧環境における低温ヘリウム酸素混合呼吸に伴う体温低下度を、以下の条件のもとで試算した。その条件として：呼気温・吸気温の関係（回帰直線は大気圧空気下：0 m と 150 m, 300 m 相当深深度の高圧環境下の三環境条件を総合したもの：図 5），体重：60 kg, 生体の平均比熱：3.47 J/g・°C, 呼吸当量（呼吸量／酸素摂取量）：0.63 LBTPS/mmol, 一分呼吸量：10 LBTPS/min さらに吸気温を 0, 15, 30°C, 吸気湿度を 0, 60, 100% として、1°C の平均体温低下に用する時間を求めた（図 9）。図より 1°C の平均体温低下に用する時間は、深度の増加に伴い著しく減少し、その傾向は吸気温が低いほど、また吸気湿度の影響は吸気温が高いほど著しいことになる。実際の海中条件を考慮すると、水深 100 m の水温が約 15°C であるため、吸気温が水温と等しくなり吸気湿度が 0% の場合、約 70 分で平均体温が 1°C 低下する。また水深 300 m の水温が約 10°C の場合、約 30 分で平均体温が 1°C 低下することになる。以上の試算は、呼吸放熱による平均体温の低下であるため、気道付近の胸廊や脳下部の温度低下はさらに大きいと思われる。また海中作業等で呼吸量が増加した場合、平均体温低下に要する時間は、呼吸量に反比例して短縮することになる。

さらに、図 9 に、諸文献より深度（相当環境圧）と最低吸気温との関係をとると、深度数十～数百メートルの範囲においては、U. S. NAVY (54) のダイバーの生命の安全を考慮したものは、平均体温低下率 30 分/°C, Piantadosi (19), Le Chui-ton (55) のものは 50 分/°C, さらに Lambertsen (56) らによる水中作業をより確実に行うための最低吸気温では、100 分/°C というほぼ一定した値を得た。

本研究により、高圧環境下における低温ヘリウム酸素混合ガス呼吸は、気道からの非常に大きな放熱、すなわち生体深部からの直接的放熱を伴う

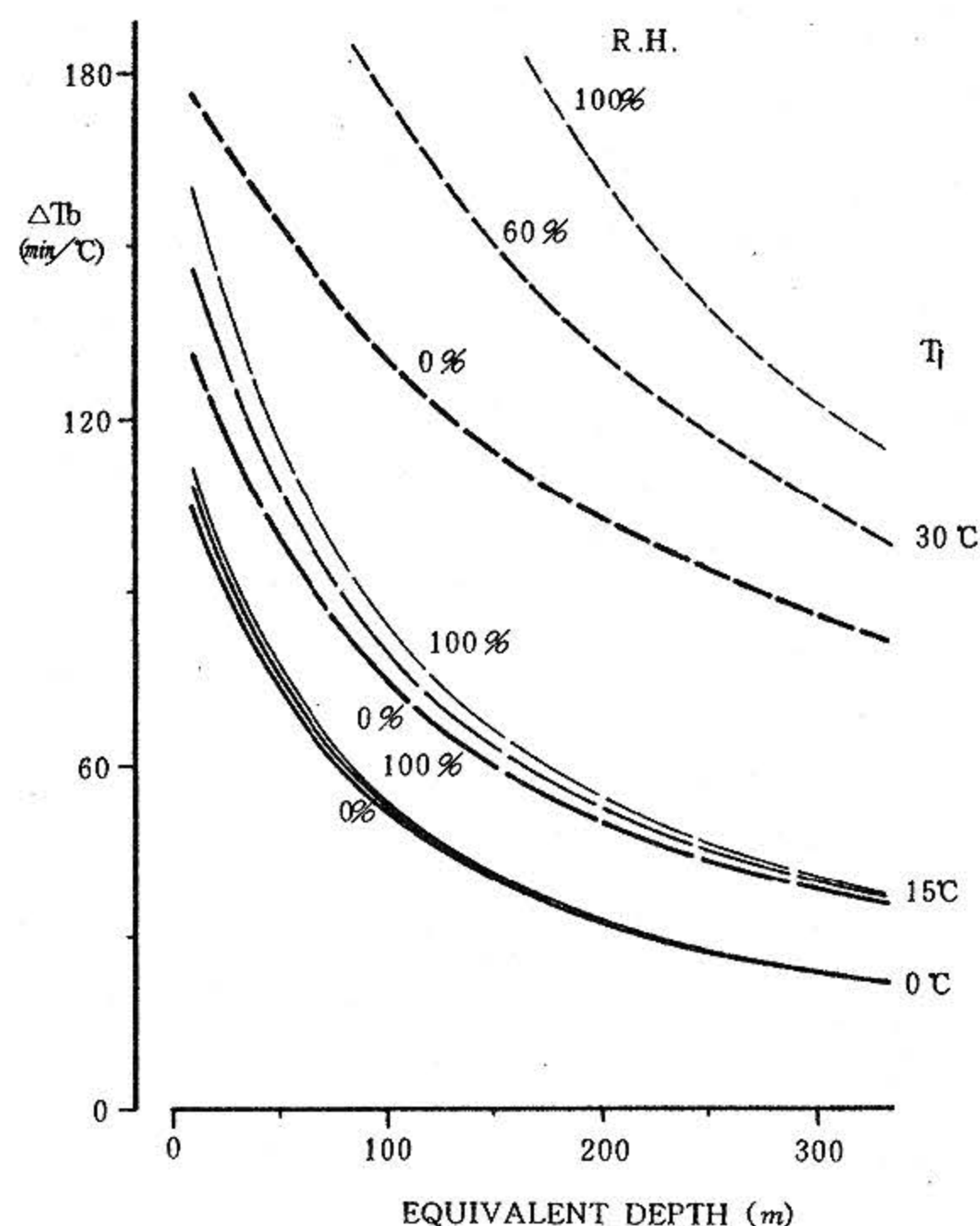


図 9 高圧ヘリウム・酸素混合ガス呼吸における吸気温と平均体温の低下率の関係（試算）。

- ・平均体温低下率： $\Delta \bar{T}_b$: (min/°C)
(呼吸放熱のみによる平均体温 1°C の低下に要する時間)
- ・ T_i : 吸気温 R.H. 吸気湿度
- ・計算条件：
 - ・生体の平均比熱：3.47 J/g・°C 体重：60 kg 換気量：10 L_{BTPS}/min
 - ・換気率（呼吸量／酸素摂取量）：0.63 L_{BTPS}/mmol
 - ・呼気温・吸気温関係は、図 5 に示した環境総合の回帰直線
 - ・吸気は 1°C において、また呼気は呼気温において水蒸気により飽和状態にあるとする
 - ・吸気温：0, 15, 30°C ・吸気湿度：0, 60, 100%

Estimation of fall rate in mean body temperature only by respiratory heat loss due to the cold gas inhalation at hyperbaric helium-oxygen environments.

Estimative conditions;
 -mean body specific heat: 3.47 J/g°C
 -body weight: 60 kg
 -ventilatory minute volume: 10 L_{BTPS}/min,
 -ventilatory equivalent: 0.63 L_{BTPS}/mmol.
 -relationship between inspired and expired gas temperature was presented in figure 3.
 -expired gas is saturated with water vapor at expired gas temperature.

3 levels of inspired gas temperature: 0°C, 15°C and 30°C
 3 levels of inspired gas humidity: 0%, 60% and 100%

ため、気道表面温の著しい低下による呼吸困難と深部体温の著しい低下を招くことが明らかとなった。なかでも体温調節系において非常に重要な視床下部温の著しい低下が考えられるため、低温高圧ヘリウム酸素混合ガス呼吸は、体温調節中枢の機能障害や生命の危険にもつながり、深海潜水の呼吸装置において、温熱条件に関する問題は呼吸ガスの成分等と同様に重要視する必要があると思われる。

文 献

- 1) DAVIS, F. M., A. D. BADDELEY and T. R. HANCOCK (1975) Diver performance the effect of cold. *Undersea Biomed. Res.*, 2: 195-213.
- 2) NARAKI, N. (1983) Equilibre thermique et respiration chez le chat sous pression d'hélium élevée. Thesis, Marseille at France, pp. 192.
- 3) NARAKI, N., H. BURNET G. IMBERT and M. HUGON (1984) Respiratory heat loss under hyperbaric helium-oxygen atmosphere. *Jpn. Annal. Physiol. Anthropol.*, 3: 227-236.
- 4) Webb, P. (1975) Cold exposure. In: *The physiology and medicine of diving and compressed air work*. Second Edition ed. by P. B. BENNETT & D. H. ELLIOTT, pp. 285-306.
- 5) NISHI, Y. and A. P. GAGGE (1977) Effective temperature scale useful for hypo- and hyperbaric helium-oxygen environments. *Aviat. Space Environ. Med.*, 48: 97-107.
- 6) TIMBAL, J., H. VIEILLEFOND, H. GUENARD and P. VARENE (1974) Metabolism and heat losses of resting man in a hyperbaric helium atmosphere. *J. Appl. Physiol.*, 36: 444-448.
- 7) RAYMOND, L. W., W. H. BELL, K. R. BONDI and C. R. LINDBERG (1968) Body temperature and metabolism in hyperbaric helium atmospheres. *J. Appl. Physiol.*, 24: 678-684.
- 8) RAYMOND, L. W., E. THALMANN, G. LINDGREN H. C. LANGWORTHY, W. H. SPAUR, J. CROTHERS, W. BRAITHWATTE and T. BERGHAGE (1975) Thermal homeostasis of resting man in helium-oxygen at 1-50 atmospheres absolute. *Undersea Biomed. Res.*, 2: 51-67.
- 9) VARENE, P., H. VIEILLEFOND, J. TIMBAL, H. GUENARD, C. BOUTELIER and C. LEMAIRE (1978) Energy balance of divers at work in helium-oxygen atmospheres. In *Under-water Physiology. Proceedings of 6th Symposium in Underwater Physiology*. ed. by C. W. SHILLING & M. W. BEKETT, pp. 91-97.
- 10) HAYES, P. A., E. H. WISSLER and A. PASCHE (1983) Mean skin temperature in hyperbaric oxyhelium-its measurement and limitation. *Undersea Biomed. Res.*, 10: 29-37.
- 11) McCAFFREY, T. V., R. D. MCCOOK and R. D. WUNSTER (1975) Effect of head skin temperature on tympanic and oral temperature in man. *J. Appl. Physiol.*, 39: 114-118.
- 12) BUGUET, A. G. C., S. D. LIVINGSTONE, L. D. REED and R. E. LIMMER (1976) Cold-induced shivering in men with thermoneutral skin temperature. *J. Appl. Physiol.*, 41: 142-145.
- 13) CABANAC, M. and M. CAPUTA (1979) Natural selective cooling of the human brain: evidence of its occurrence and magnitude. *J. Physiol. (London)* 286: 255-284.
- 14) BROWN, G. A. and G. M. WILLIAMS (1982) The effect of head cooling on deep body temperature and thermal comfort in man. *Aviat. Space Environ. Med.*, 53: 583-586.
- 15) KUEHN, L. A. and J. ZUMRICK (1978) Thermal measurements on divers in hyperbaric helium-oxygen environments. *Undersea Biomed. Res.*, 3: 213-231.

- 16) BOUTELIER, C., J. COLIN et J. TIMBAL (1971) Determination du coefficient d'échange thermiques dans l'eau en écoulement turbulent. *J. Physiol. (Paris)*, 63: 207-209.
- 17) JACQUEMIN, C., P. VARENE et L'HUILLIER (1971) Aspects respiratoires de l'environnement thermique hyperbare. *J. Physiol. (Paris)*, 63: 293-295.
- 18) VARENE, P., J. TIMBAL, H. VIEILLEFOND, H. GUENARD and J. L'HUILLIER (1976) Energy balance of man in simulated dive from 1.5 to 31ATA. In: *Underwater Physiology. Proceedings of 5th Symposium in Underwater Physiology*, ed. by C. J. LAMBERTSEN, Bethesda, FASEB, pp. 755-763.
- 19) PIANTADOSI, C. A. (1982) Respiratory heat loss limits in helium-oxygen saturation diving. U. S. Navy Experimental Diving Unit Report No. 10-80, p. 23.
- 20) RAWLINS, J. S. P. and J. F. TAUBER (1971) Thermal balance at depth. In: *Underwater Physiology Proceedings of the 4th Symposium on Underwater Physiology*. LAMBERTSEN (ed), New York: Academic Press, pp. 435-442.
- 21) HOKE, B., D. L. JACKSON, J. M. ALEXANDER and E. T. FIYNN (1976) Respiratory heat loss and pulmonary function during cold-gas breathing at high pressures. In: *Underwater Physiology: Proceedings of 5th Symposium in Underwater Physiology*, ed. by C. J. LAMBERTSEN, Bethesda, FASEB, pp. 723-740.
- 22) McFADDEN, E. R. (1983) Respiratory heat and water exchange: physiological and clinical implications. *J. Appl. Physiol.*, 54: 331-336.
- 23) HAMMEL, H. T., D. C. JACKSON, J. A. HARDY and S. B. STROMME (1963) Temperature regulation by hypothalamic proportional control with an adjustable set point. *J. Appl. Physiol.*, 18: 1146-1154.
- 24) HAYWARD, J. N. and M. A. BAKER (1968) Role of cerebral arterial blood in the regulation of brain temperature. *Am. J. Physiol.*, 215: 389-403.
- 25) GALE, C. C., M. MATSEWS and J. YOUNG (1970) Behavioral thermoregulatory responses to hypothalamic cooling and warming in baboons. *J. Physiol. & Behavior*, 5: 1-6.
- 26) BAKER, M. A., R. A. STOCKING and J. P. MEEHAM (1972) Thermal relationship between tympanic membrane and hypothalamus in conscious cat and monkey. *J. Appl. Physiol.*, 32: 739-742.
- 27) ADAIR, E. R., J. U. CASBY and J. A. J. STOLWIJK (1970) Behavioral temperature regulation in the squirrel monkey: changes induced by shifts in hypothalamic temperature. *J. Comp. Physiol. Psychol.*, 72: 17-27.
- 28) ADAIR, E. R. (1976) Autonomic thermoregulation in squirrel monkey when behavioral regulation is limited. *J. Appl. Physiol.*, 40: 694-700.
- 29) ADAIR, E. R. (1977) Skin, preoptic, and core temperatures influence behavioral thermoregulation. *J. Appl. Physiol.*, 42: 559-564.
- 30) LYNCH, W. C., E. R. ADAIR and B. W. ADAMS (1980) Vasomotor thresholds in the squirrel monkey: effects of central and peripheral temperature. *J. Appl. Physiol.*, 48: 89-96.
- 31) BENGINGER, T. H. (1969) Heat regulation: Homeostasis of central temperature in man. *Physiol. Reviews.*, 49: 671-759.
- 32) WURSTER, R. D., R. D. MCCOOK and W. C. RAWDALL (1966) Cutaneous vascular and sweating responses to tympanic and skin temperature. *J. Appl. Physiol.*, 21: 617-622.
- 33) NADEL, E. R., S. M. HORVATH, C. A.

- DAWSON and A. TUCKER (1970) Sensitivity to central and peripheral thermal stimulation in man. *J. Appl. Physiol.*, 29: 603–609.
- 34) HAYWARD, J. S., J. D. ECKERSON and M. L. COLLIS (1977) Thermoregulatory heat production in man: prediction equation based on skin and core temperatures. *J. Appl. Physiol.*, 42: 377–384.
- 35) MASUDA, M. and K. UCHINO (1978) A device for measuring tympanic membrane temperature in man. *Jikei Med.*, 25: 95–99.
- 36) MASUDA, M. and K. UCHINO (1978) Human tympanic membrane temperature during sleep. *Jikei Med.*, 25: 101–107.
- 37) McCAFFREY, T. V., R. D. WURSTER, H. K. JACOBS, D. E. EULER and G. S. GEIS (1979) Role of skin temperature in the control of sweating. *J. Appl. Physiol.*, 47: 591–597.
- 38) CAPUTA, M. and M. CABANAC (1980) Muscular work as thermal behavior in humans. *J. Appl. Physiol.*, 48: 1020–1023.
- 39) SHIRAKI, K., N. KONDA and S. SAGAWA (1983) A comparison of temperatures measured in esophagus, tympanic membrane, aorta and right atrium during hyperthermia in man. *Jpn. J. Biometeor.*, 20: 74–80.
- 40) McCAFFREY, T. V., G. S. GEIS, J. M. CHUNG and R. D. WURSTER (1975) Effect of isolated head heating and cooling on sweating in man. *Aviat. Space Environ. Med.*, 46: 1353–1357.
- 41) CALDWELL, P. R. B., D. M. GOMEZ and W. FRITTS, Jr. (1969) Respiratory heat exchange in normal subjects; and in patients with pulmonary disease. *J. Appl. Physiol.*, 26: 82–88.
- 42) HANSON, R. G. (1974) Respiratory heat loss at increased core temperature. *J. Appl. Physiol.*, 37: 103–107.
- 43) BRUBAKK, A. O., S. TONJUM, B. HOLAND R. E. PETERSON, R. W. HAMILTON, E. MORILD, and J. ONARHEIM (1982) Heat loss and tolerance time during cold exposure in heliox atmosphere at 16 ATA. *Undersea Biomed. Res.*, 9: 81–90.
- 44) PAGANELLI, C. V. and F. K. KURATA (1977) Diffusion of water vapor in binary and ternary gas mixtures at increased pressure. *Resp. Physiol.*, 70: 15–26.
- 45) CARLYLE, R. F., M. P. GARRARD and P. A. HAYES (1979) Insensible heat losses in man during simulated dives in helium–oxygen mixture to a depth of 420 meters of sea water (43 bars). *J. Physiol. (London)*, 295: 39 • P.
- 46) BONDI, K. R. (1981) An analysis of heat stress under hyperbaric conditions. In: *Underwater Physiology VII. Proceedings of the 7th Symposium on Underwater Physiology*, ed. by A. J. BACHRACH & M. M. MATZEN, pp. 503–507.
- 47) GARRARD, M. P., P. A. HAYES, R. F. CARLYLE and M. J. STOCK (1981) Metabolic and thermal status of divers during simulated dives to 55 bars. In: *Underwater Physiology 7. Proceedings of the 7th Symposium on Underwater Physiology*, ed. by A. J. BACHRACH & M. M. MATZEN, pp. 517–538.
- 48) TIMBAL, J. P. VARENE. H. VIEILLEFOND et H. GUENARD (1973) Les échanges thermiques par convection en milieu helium–oxygene hyperbare. *Arch. Sci. Physiol.*, 27: A51–58.
- 49) WEBB, P. (1976) Thermal stress in undersea activity. In: *Underwater Physiology Proceedings of 5th Symposium on Underwater Physiology*, ed. by C. J. LAMBERTSEN, Bethesda, FASEB pp. 705

-724.

- 50) SMITH, G. B. and E. F. HAMES (1962) Estimation of tolerance time for cold water immersion. *Aerospace Medicine*, 33: 834-840.
- 51) UNGER, H., F. G. HEMPEL and P. G. KAUFMAN (1980) Correspondence of brain and rectal temperatures of guinea pigs in helium environments. *Undersea Biomed. Res.*, 1: 27-34.
- 52) PIANTADOSI, C. A., E. D. THALMANN and W. H. SPAUR (1981) Metabolic response to respiratory heat loss-induced core cooling. *J. Appl. Physiol.*, 50: 829-834.
- 53) WEBB, P. (1981) Current concepts of metabolism and thermophysiology. In *Underwater Physiology VII. Proceedings of the 7th Symposium on Underwater Physiology*. ed. by A. J. BACHRACH & M. M. MATZEN, pp. 493-502.
- 54) U. S. NAVY DIVING MANUAL (1977). Washington, D. C. Navy Department, 687p.
- 55) LeCHUITON (1981) Les problemes thermiques en plongee profonde. *Med. Aero. Spat. Sub. Hyp.*, 80: 353-359.
- 56) LAMBERTSEN, C. J. (1980) Prediction of physiological limits to deep diving extension of physiological tolerance. In: *Techniques for diving deeper than 1500 feet. The 23rd Undersea Medical Society Workshop*. 15-26.

(原稿受理: 1985年10月17日)