

31bar 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

檜木 暢雄, 富安 和徳
横須賀市夏島町2-15, 海洋科学技術センター

Fall in Deep Body Temperature by Cold Gas Inhalation at Hyperbaric Helium-oxygen Environments (16 and 31 bar).

Nobuo NARAKI and Kazunori TOMIYASU
JAMSTEC, 2-15 Natsushima-cho, 237 Yokosuka-shi, Japan

Four male volunteers served as subjects for studies under hyperbaric helium-oxygen environments at 16 bar and 31 bar (simulated saturation dive). Tympanic membrane temperature, rectal temperature, ventilatory gas temperature, expiratory volume, respiratory frequency and cardiac frequency were measured during Cold Gas Inhalation (CGI: 20min) and recovery period (20min) in a warm hyperbaric chamber.

Dyspnea and fall in deep body temperatures were evident during CGI (inspired gas temperature: 6°C at 31bar, 7°C at 16 bar). The change of tympanic membrane temperature during CGI and recovery period was more definite than rectal temperature. This phenomenon was induced by remarkable direct heat exchange between environment and body core, owing to high heat conductivity and high heat capacity of respiratory gas. Concerning safety and physiological functions of the deep sea diver and human exposed to hyperbaric helium-oxygen environment, not only rectal temperature monitoring is very important but also tympanic membrane temperature monitoring.

Key words: Saturation Dive, Hyperbaric Environment, Helium, Respiratory Heat Loss, Tympanic Membrane Temperature

はじめに

高圧ヘリウム・酸素混合ガスを呼吸ガスや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問題に低温環境と呼吸に関するものがある。その原因は、高圧ヘリウム・酸素混合ガスの熱力学的性質とくにヘリウムガスの高熱伝導性にあるとされている。高圧ヘリウム環境下の体温に関する研究の多くは、皮膚温等の生体の末梢温や深部体温でも直腸温を対象とするものであった。直腸温は、最も測定し易い深部温であるが、測定部が体幹の下部に位置し、また血管網等の条件により、他の深部体温に比べ変化し難く、特に生体の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。そのため本実験では、体温調節系において非常に重要である視床

下部温のよい指標といわれる鼓膜温と簡便な深部温である直腸温を測定し、高圧ヘリウム環境における冷氣呼吸が生体深部温に及ぼす影響をみた。

実験方法

設定条件は、31bar (300m 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100mbarの酸素を添加した後、純ヘリウムの添加により行った。なお全実験期間中、環境ガスの酸素分圧は300mbar、窒素分圧は790mbar、相対湿度は50~60%を維持し、また環境温は被験者の適温とした(図1)。被験者は、当センターの4名のテストダイバーで、実験前後の検査において鼓膜に肥厚等の異常は認められなかった。

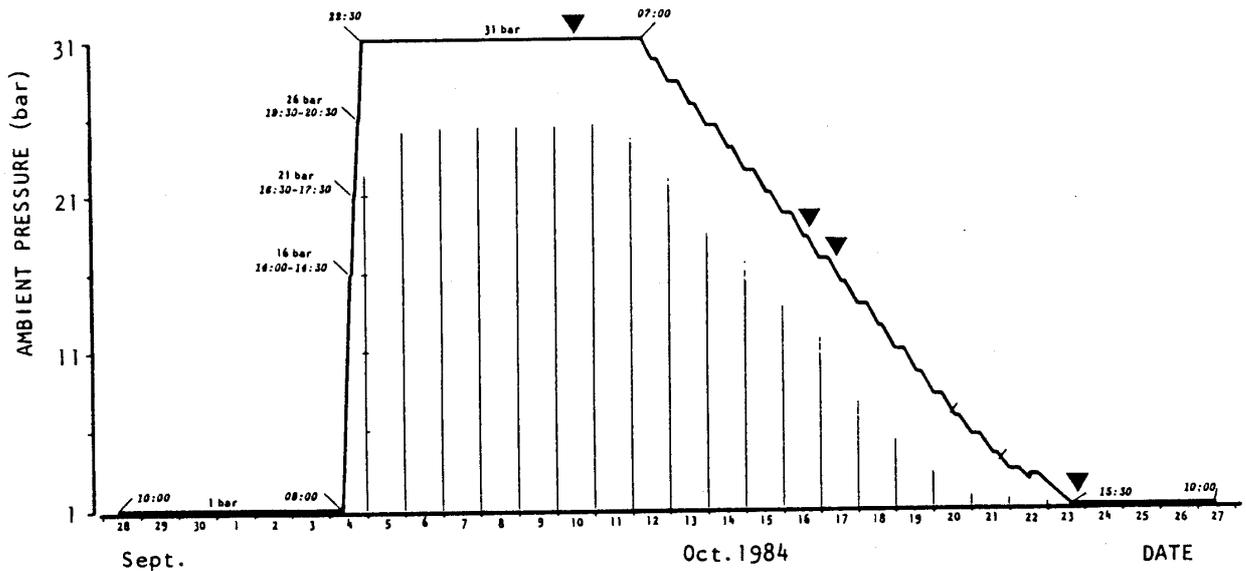


Fig. 1 Experimental protocol of ambient pressure.

▼ : Cold Gas Inhalation test

Ambient temperatures were 30°C at 11 bar, 31°C at 21 bar and 31.5°C at 31bar.

吸気の冷却は高圧ヘリウム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、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。また呼気温は呼期終末の温度とした。測定順序は、環境ガスを呼吸し5分間の倚座位安静後、20分間の冷氣呼吸、さらに環境ガスを呼吸し20分間の倚座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。

結果

冷氣呼吸時の吸気温は装置の性能上31barの高圧ヘリウム環境下では約6°C、16barでは約7°Cまた大気圧空気下では約15°Cであった。高圧環境における低温ガス呼吸に対しては、急激に胸部が内部より冷却され、一時的に呼吸が困難になり、とくに31bar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”との訴えがあった。

大気圧空気下と16bar、31barの高圧ヘリウム環境において、呼気温は吸気温の変動に対し直線的に変化し、環境圧毎に求めた呼気温・吸気温の回帰直線間に有意差は認められなかった(図2)。なお図中の高温部の測定点は、チェンバー内の環境ガスを呼吸した時のもの

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鼓膜温、直腸温、心拍数、呼吸数、一分呼気量の例を図3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4に示す。

全環境圧条件において、環境ガス呼吸時に比較し、冷氣呼吸時の心拍数、呼吸数、一分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、また環境ガス呼吸による回復期の上昇も、鼓膜温が直腸温より早いことが認められ、この傾向は環境圧の増大に伴い、顕著であった。さらに、冷氣呼吸時の両深部体温の低下度の関係を図5に示す。両深部体温の低下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より大きいことが認められた。また各環境圧下の鼓膜温低下度・直腸温低下度間の回帰において16barと31barとの間に有意差は認められなかったが、大気圧空気下と16bar、31barの間には有意差(傾き: $P < 0.05$, 切片: $P < 0.02$)が認められた。

考察

高圧ヘリウム環境下で得られた、吸気温と呼気温の

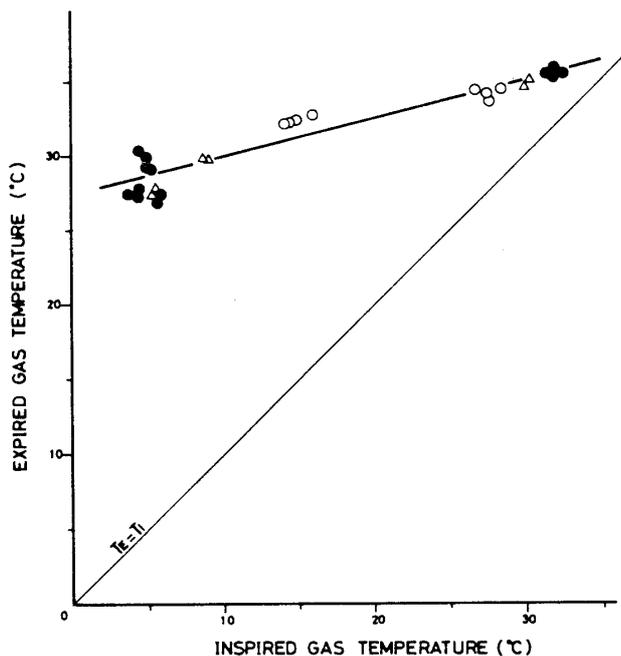


Fig. 2 Expired gas temperature as function of inspired gas temperature under atmospheric air, 16 and 31 bar hyperbaric helium-oxygen environments (4 subjects).

- Equations of regression line between expired gas temperature: (T_e) and inspired gas temperature: (T_i) under three environments as follows:

1 bar: \circ $T_e = 30.5 + 0.134 \cdot T_i$ $n = 8$ $r = 0.955$

16 bar: \triangle $T_e = 26.9 + 0.260 \cdot T_i$ $n = 6$ $r = 0.982$

31 bar: \bullet $T_e = 27.1 + 0.262 \cdot T_i$ $n = 13$ $r = 0.950$

- There was no significant difference between these 3 regression lines with analysis of covariance and we obtained united regression line:

$$T_e = 27.4 + 0.256 \cdot T_i \quad n = 27 \quad r = 0.954$$

関係 (図2) は、ほぼ同等の環境圧でヒトにおいて報告されている Varene ら (1976), Piantadosi (1982), また Naraki ら (1984) 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時の呼吸困難に関しては、Rawlins & Tauber (1971), Hoke ら (1976) も報告しており、その原因としては、Mcfadden (1983) が大気圧空気下で行った低温空気呼吸 (-17°C) 実験の結果に示された肺下葉温の 10°C もの低下と同様に、低温、高熱容量ガスが呼吸器系のより深部まで侵入し、気道の収縮等を引き起したものである。

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: Hammel et al., 1963, Baker et al., 1972, Adair 1977, Lynch et al. 1980)。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 Benzinger 以来用いられており、そのため鼓膜温への高圧ヘリウム環境下の冷氣呼吸の影響を、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併せて検討した。

Hayward ら (1977) 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より大きく、また白木ら (1983) によれば、ヒトにおいて加温もしくは冷却した血液を下腿動脈より灌流させた場合、直腸温の変化は、鼓膜温に比べて顕著であるとしている。しかし、McCaffrey ら (1975) により、ヒトの頸頭部を加温・冷却した場合、鼓膜温の変動性は食道温より高いことが示されている。本実験の結果では冷氣呼吸による気道からの放熱によるものであり、先述の McCaffrey (1975) らの実験結果が頸頭部からの加熱・放熱によるものであるという点では大変類似している。鼓膜温の高変動性の原因としては、McCaffrey らの指摘のように頭の深部へ向う動脈血が、頸頭部の皮膚や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、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3, 4)。この傾向がより高圧のヘリウム環境において顕著となる理由は、より大きな熱容量の低温ガスを呼吸することにより、気道表面がより強く冷却されるためと思われる。

低温の高圧ヘリウム・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呼吸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上からも、深部体温の指標が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 ら (1980) の豚による実験では、51bar までの高圧ヘリウム環境において直腸温と脳温には直線関係があることが報告されている。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鼓膜温等を推定するため、図5に大気圧空気と16bar, 31bar の高圧環境における冷氣呼吸時の

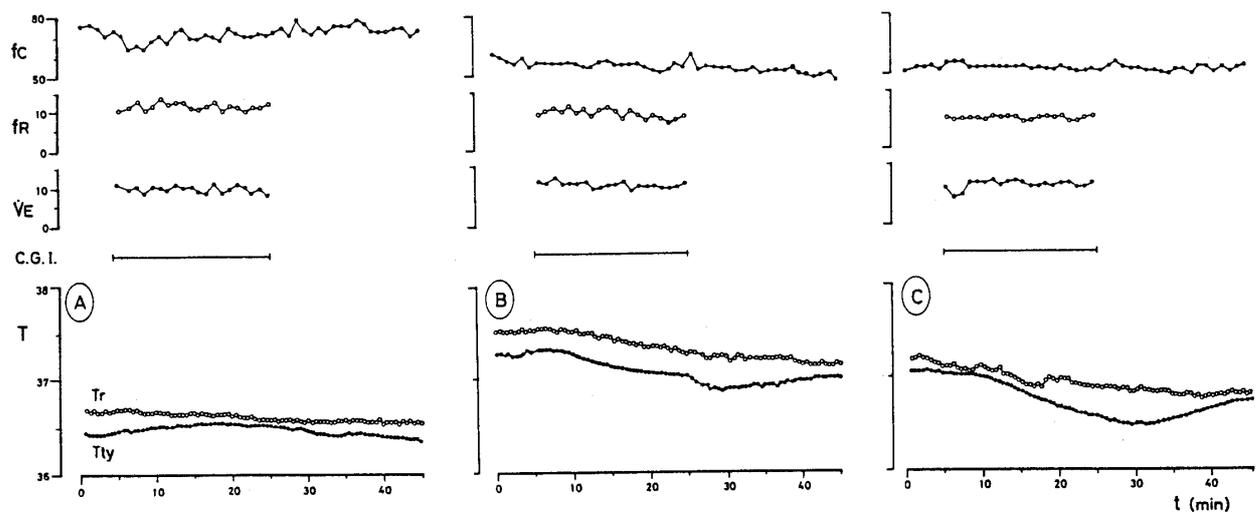


Fig. 3 Changes in cardiac frequency (fC), respiratory frequency (fR), expiratory volume (\dot{V}_E), tympanic membrane temperature (Tty) and rectal temperature (Tr) during successive 20 minutes of cold gas inhalation (CGI) and 20 minutes of recovery period (subject: T.S.).

• Environmental pressure:

A: 1bar air, B: 16 bar He-O₂, C: 31 bar He-O₂

[fC in beats/min, fR in breaths/min, \dot{V}_E in L ATPS/min and T in °C]

直腸温と鼓膜温の関係を示した。図中の回帰直線の傾きより、高圧環境下の低温ヘリウム・酸素混合ガス呼吸による脳温の低下は、直腸温よりも1.3倍も早いと思われる。これは“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、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 ら (1981) の提唱を裏付けるものである。このような呼吸放熱の増大による脳温の大幅な低下がある場合は、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。

大気圧空気下の呼吸放熱は、全代謝産熱量の10%にすぎず、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 (Caldwell et al. 1969)。高圧ヘリウム環境における呼吸放熱に関して、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中の包含水蒸気量低下の報告もあるため、減少することはあっても増加することは考えられない (Paganelli & Kurata 1977, Garrard et al., 1981)。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、呼吸気の熱容量が環境圧の上昇に伴い著

しく増大するため Timbal ら (1974), Naraki ら (1984) によれば、数十 bar 以上の高圧ヘリウム適温環境での対流呼吸放熱は全代謝産熱量の20~30%にも達する。さらに本実験の16bar と31bar の高圧環境における冷気呼吸時の呼吸放熱量は、全代謝産熱量と同等もしくは、それ以上であると思われる。

本研究により、高圧環境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る。そのため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。

引用文献

- Adair, E.R. (1977) Skin, preoptic, and core temperatures influence behavioral thermoregulation. *J. Appl. Physiol.*, 42: 559-564.
Baker, M.A., R.A. Stocking and J.P. Meeham (1972)

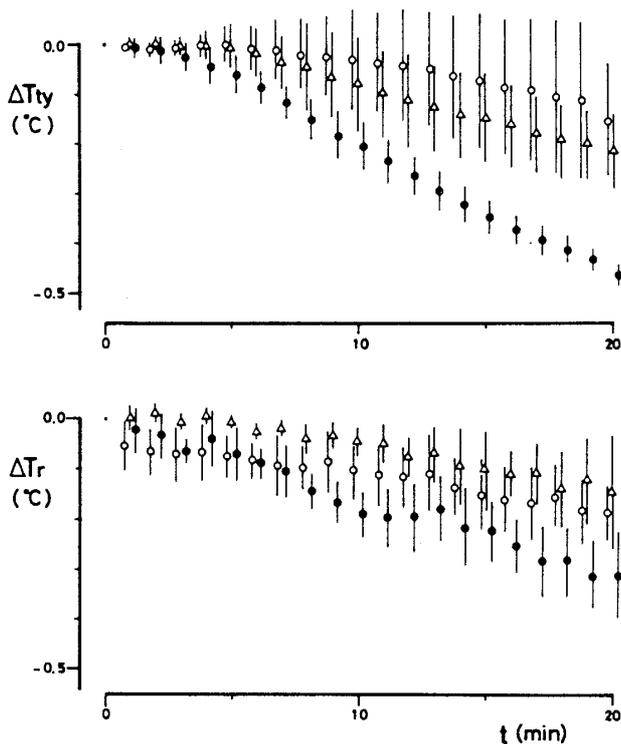


Fig. 4 Changes in tympanic membrane temperature and rectal temperature from warm resting base line during cold gas inhalation at atmospheric air, and 16, 31 bar hyperbaric helium-oxygen environments.

- Mean values \pm s.d. in rating 3 subjects are given, ambient temperature was adjusted for comfort.
- Environmental conditions:
○: 1bar air, △: 16 bar He-O₂, ●: 31 bar He-O₂

Thermal relationship between tympanic membrane and hypothalamus in conscious cat and monkey. *J. Appl. Physiol.*, 32: 739-742.

Benzinger, T.H. (1969) Heat regulation: Homeostasis of central temperature in man. *Physiol. Reviews*, 49: 671-759.

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.

Garrard, M.P., P.A. Hayes, R.F. Carlyle and M.J. Stock (1981) Metabolic and thermal status of divers during simulated dives to 55bars. In: *Underwater Physiology 7. Proceedings of the 7th symposium on Underwater Physiology*, ed. by A. J. Bachrach and M.M. Matzen, pp.517-538.

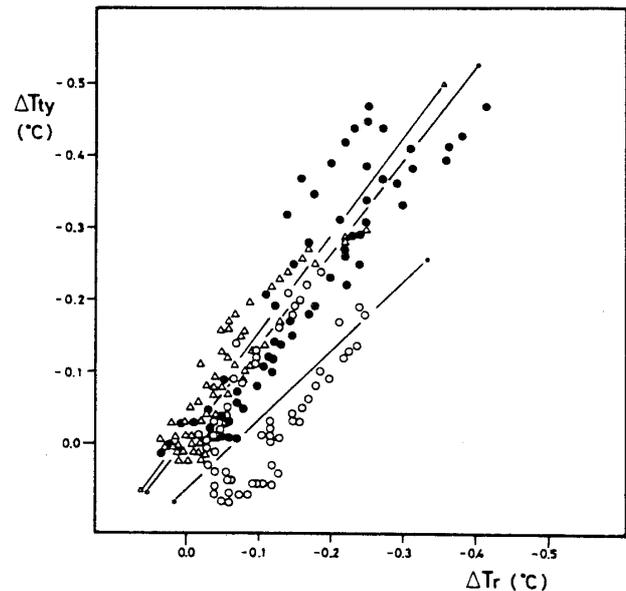


Fig. 5 Comparison between change of tympanic membrane temperature and change of rectal temperature measured in 3 subjects during cold gas inhalation at atmospheric air, 16 bar and 31 bar helium-oxygen environments.

- Equations of regression line between change of tympanic membrane temperature: (ΔT_{ty}) and change of rectal temperature: (ΔT_r) under three environments as follows:

1 bar: ○ $\Delta T_{ty} = 0.062 + 0.961 \cdot \Delta T_r$ n=60 r=0.661
 16 bar: △ $\Delta T_{ty} = -0.014 + 1.366 \cdot \Delta T_r$ n=60 r=0.918
 31 bar: ● $\Delta T_{ty} = -0.002 + 1.312 \cdot \Delta T_r$ n=60 r=0.904

- There was significant difference between only atmospheric air and two hyperbaric helium-oxygen environments (16 & 31 bar) after analysis of covariance.

Hammel, H.T., D.C. Jackson, J.A. Stolwijk, J.D. Hardy and S.B. Stromme (1963) Temperature regulation by hypothalamic proportional control with an adjustable set point. *J. Appl. Physiol.*, 18: 1146-1154.

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.

Hoke, B., D.L. Jackson, J.M. Alexander and E.T. Fiyinn (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.
- 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.
- Mccaffrey, T.V., R.D. Mccook and R.I. Wunster (1975) Effect of head skin temperature on tympanic and oral temperature in man. *J. Appl. Physiol.*, 39: 114-118.
- Mcfadden, E.R. (1983) Respiratory heat and water exchange: physiological and clinical implications. *J. Appl. Physiol.*, 54: 331-336.
- 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.
- Paganelli, C.V. and F.K. Kurata (1977) Diffusion of water vapor in binary and ternary gas mixtures at increased pressure. *Resp. Physiol.*, 30: 15-26.
- 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.
- 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.
- Rawlins, J.S.P. and J.F. Tauber (1971) Thermal balance at depth. In: *Underwater Physiology Proceedings of the 4th symposium on Underwater Physiology.* ed. by Lambertsen, New York: Academic Press, pp.435-442.
- 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.
- Timbal, J., H. Vieillefond, H. Guenar and P. Varene (1974) Metabolism and heat losses of resting man in a hyperbaric helium atmosphere. *J. Appl. Physiol.* 36: 444-448.
- 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.
- 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. Lambertz, Bethesda, FASEB, pp.755-763.

(1985年2月20日受付)