

14. 高圧ヘリウム-酸素混合ガス環境(11 ATA)でのヒトのサーカディアンリズム^{*1}

関 邦博^{*2} 中山 英明^{*2}

11ATAの高圧ヘリウム環境ヘダイバーを居住させる飽和潜水シミュレーション実験を1976年11月29日から12月15日まで実施した。実験期間中4名の終夜睡眠状態を毎日ポリグラフを用いて記録して分析を行なうと同時に、覚醒時の生理、心理機能検査結果との関連性の検討を試みた。

今回の実験のテストダイバーのからだは、通常、大気圧の自然環境では調和のとれたサーカディアンリズム(日周リズム)が保持されていた。しかし飽和潜水シミュレーション実験では、高い圧力、高分圧のヘリウム、外部から規制された狭い居住空間での生活、しかも低温の水中下作業という厳しい環境下に長期間暴露され、からだの調和が乱れた。その後の高圧環境下で一定期間の滞在によって高圧の新しい環境にからだは適応し、調和の取れたサーカディアンリズムがみられた。これは、からだは環境の変化に適応し、対処する能力を持っているからにほかならない。そのためにアポロ計画(無重量状態、長期間の狭い閉鎖環境)のアストロノート達の多大な成果、またシートピア計画のアクアノート達の活躍がみられたのである。本試験からも11ATAに生体は十分に適応できる能力を持っていることがわかった。

Studies on the Circadian Rhythms of Man under the High Pressure Heliox Environment (11 ATA)

Kunihiro Seki^{*3}, Hideaki Nakayama^{*3}

Experimental study of the simulated saturation dive, to which 4 divers were forced to live under the high pressure 11 ATA environment, was carried out during the term from Nov. 29, 1976 to Dec. 15, 1976.

Circadian rhythms of 4 divers, in sleep through the night, were polygraphically recorded during the term. At the same time, relation between those rhythms and the physiological, psychological data at the hours of awakening was analysed.

The results obtained through the experiment above mentioned are as follows:

Circadian rhythms of 4 divers in the natural environment are kept in harmonized good state of physiological conditions.

Those rhythms are disturbed when these divers were forced in the experimental states, such as simulated saturation dive, high pressure He-O₂ condition, etc. However, after spending some term, their circadian rhythms were recovered from unusual state, and kept again harmonized good state as before.

Thus, we can easily recognize the cases of astronauts in the Apollo-Plan or aquanauts in the Seatopia, and finally, able to say that the living body may have ability to adapt oneself to the unusual conditions like in 11 ATA etc.

^{*1} 本研究は、科学技術庁研究調整局から委託を受けた「大陸棚有人潜水作業システムの研究開発」の一環として実施したものである。

^{*2} 潜水技術部

^{*3} Manned Undersea Technology & Engineering Department

1. ま え が き

19世紀中頃から圧縮空気を用いた潜水方法が開発され、今日に至っている。この潜水方法は長時間にわたって潜水作業を遂行しようとする、減圧時間が極端に長くなり、また減圧症の発生の危険にさらされるという、大きな制約があった。

その後、1960年頃、従来の潜水方法とは異なり、長期間にわたって有用な潜水作業が可能な飽和潜水という新しい潜水技術の開発が進められた。近年、産業界の中でも、特に海底油田の開発に、この飽和潜水技術が実用化され、最近ではなくてはならない潜水技術の一つとなった。

飽和潜水を行うことはとりもなおさず、ダイバーにとっては、高圧環境下の狭い居住空間で、長期間にわたる生活、または低温の水中下といった厳しい環境下の作業をしなければならない。それに伴って、厳しい労働環境から新たな問題として、ダイバー疲労、休養方法、睡眠時間などの提起がされた。

特にその中でもダイバーの潜水作業および作業意欲に支障を与える問題としてダイバー疲労をX. FRUCTUSら³⁾によって見出された。

その後、飽和潜水の疲労の原因についてK. SEKIら¹⁸⁻²²⁾がダイバーの主観的な体験から、睡眠不

足が高圧環境下の疲労に大きなウェイトをしめることを示した。

R. W. HAMILTONら⁶⁾T. SERBANESCOUら²³⁾およびJ. C. ROSTAINら^{12) 13)}は、飽和潜水シミュレーション実験期間中、終夜睡眠のポリグラフ的観察をした。その結果、実験期間中の睡眠状態はREM睡眠（逆説睡眠、Rapid Eye Movement 睡眠）とNREM睡眠（徐波睡眠、Non Rapid Eye Movement 睡眠）に変動がみられ、また被検者によって大きな相違が見い出された。

このような睡眠の量と質の把握がとりもなおさず高圧環境下で生活し、作業に従事するダイバーの最適生活時間、作業時間、睡眠時間を設定する一つの指針となるであろう。

本稿では高圧環境下の覚醒と睡眠のサーカディアンリズム（日周リズム）の周期性を取り上げた。サーカディアンリズムとは生活環境を同じくする人達に共通する現象である。

今回の実験では生体を高圧環境下に暴露するときの変動をポリグラフを用いて終夜睡眠の生体機能を記録し、また翌朝起床時に計測を実施したCFF値（Critical Flicker Frequency）および自

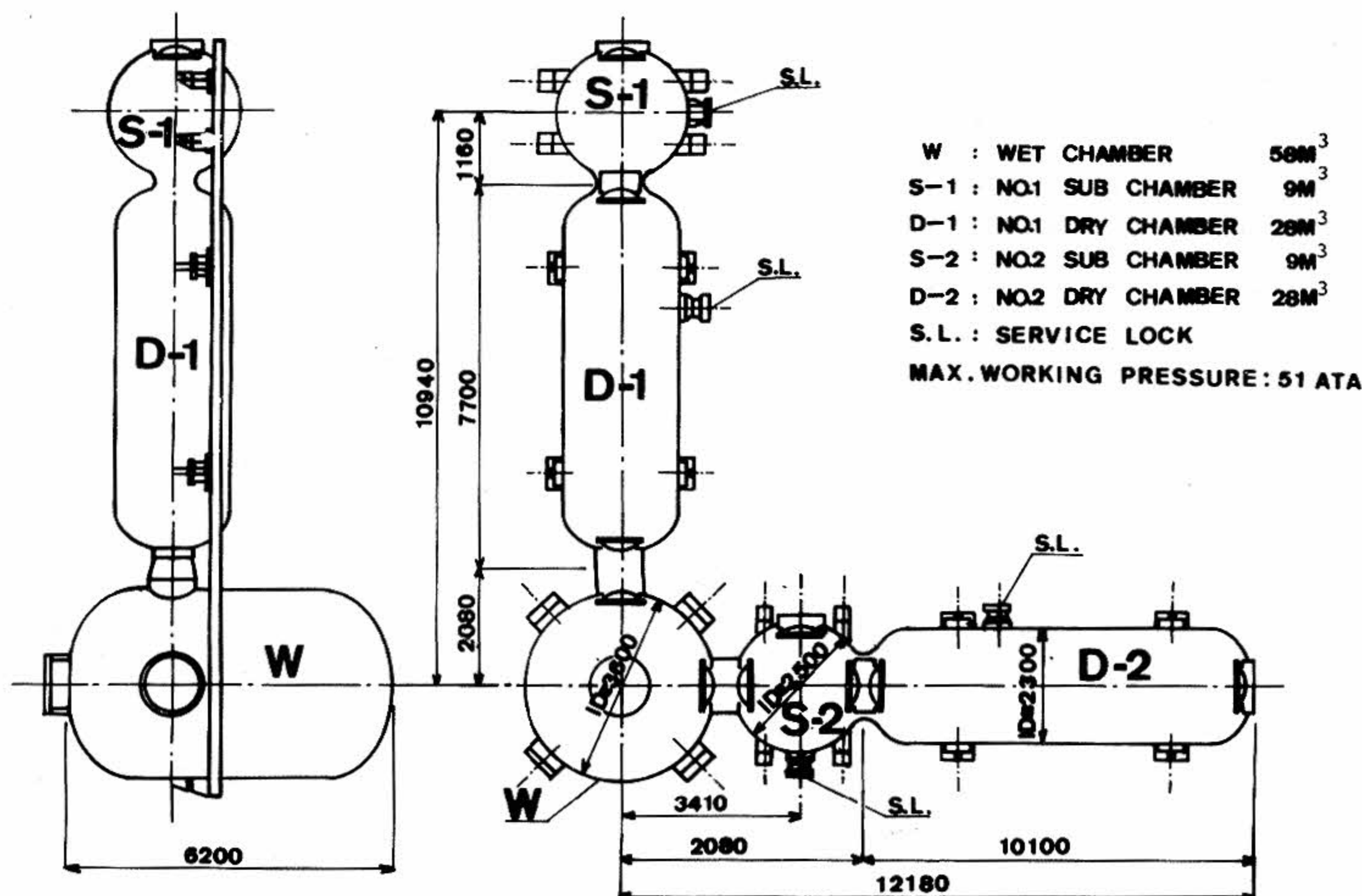


図1 潜水シミュレーター装置（最大加圧、51ATA）

Undersea simulator of JAMSTEC (max. working pressure: 51ATA)

覚症状を調べ、尿中の無機質と有機物質との関連性も合わせて分析検討した。

2. 試験方法

本実験は海洋科学技術センター内に設置された潜水シミュレーターのうち、S-1、D-1及びウェットチャンバーを使用して行った(図1参照)。

- (1) S-1チャンバーは球型で、テストダイバーのトイレ、シャワーなどに使用
- (2) D-1チャンバーは横型円筒で、4名のテストダイバーの居住室、寝室、生理検査室に使用
- (3) ウェットチャンバーWは縦型円筒で、上半分がドライ環境となり、潜水作業用に使用

(4) サービスロックSLはS-1、D-1に設置され、S-1のサービスロックは主として採尿および採便、D-1は1日3回の食事、間食、実験器材の出入れに使用。

上記3チャンバーは単一系統の環境コントロール装置で手動と自動との併用で制御した。

表1は潜水シミュレーター内の環境条件を示す。環境制御のための酸素ガス分析はジルコニア磁気式酸素分析計、CO₂およびN₂の分析はガスクロマトグラフィー、温度はD-1チャンバー内に設置された白金温度センサー、湿度は露点湿度計を使用した。

図2は飽和潜水シミュレーションのプロファイルを示す。2日間の常圧下の事前観察、7日間の

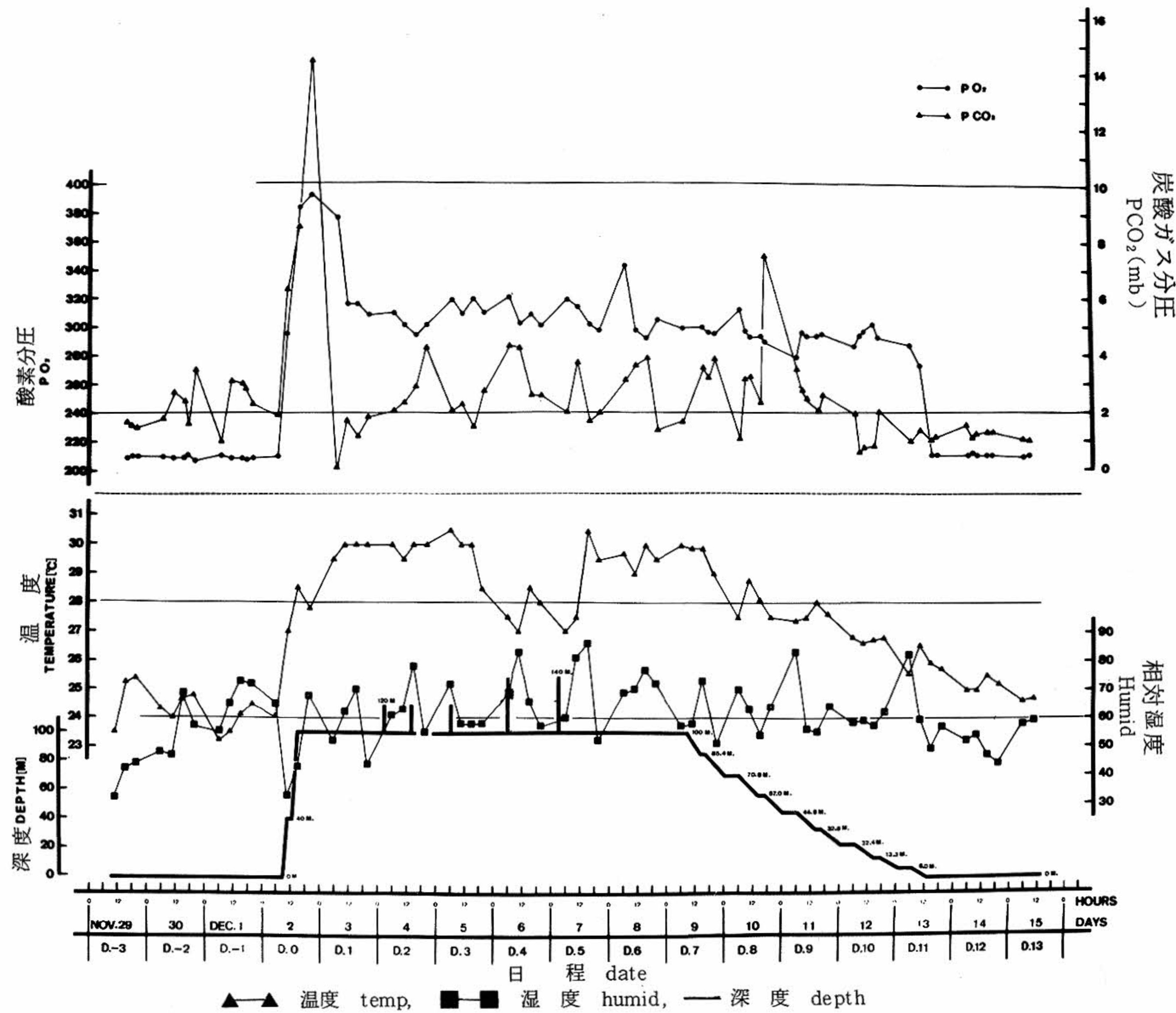


図2 実験期間と加減圧パターン(シードラゴン-I, 11ATA, 1976年12月)
Diving profile and environmental parameters (SEADRAGON-I, 11ATA, Dec. 1976)

SEADRAGON-I		
項 目 item	数 値 value	
圧 力 PRESSURE	11	ATA (100 m)
PO ₂	0.30	ATA
PN ₂	0.78	ATA
PCO ₂	0.003	ATA
温 度 TEMPERATURE	29±1.5	°C
相 対 湿 度 RELATIVE HUMIDITY	45-85	%

表1 環境パラメーター (シードラゴン-I, 1976年12月)

Physical parameters of the hyperbaric environment (SEADRAGON-I, Dec. 1976)

テストダイバー Subject	年齢 Age (yrs)	身長 Height (cm)	体重 Weight (kg)	体表面積 Surface Area (m ²)
A	33	182.0	86.0	2.08
B	34	163.0	60.0	1.64
C	33	168.4	61.0	1.69
D	28	174.5	65.8	1.80

表2 テスト・ダイバーの身体的特徴 (シードラゴン-I, 11 ATA, 1976年12月)
Physical characteristics of test-divers (SEADRAGON-I, 11ATA, Dec. 1976)

11 ATA (100 m) の高圧ヘリウム-酸素混合ガス環境下の滞在後, 5 日間の減圧期間を過し, 減圧終了後, 常圧 (チェンバー内) 下で事後観察を2日間行った。

飽和期間では 120 m で 3 回, 140 m で 2 回のエクスカッション潜水を実施した。この加減圧速度は毎分 18 m であり, 120 m では 1 時間, 140 m では 30 分の滞底時間を取った。1 ATA から 11 ATA の加圧速度は毎時 10 m, 減圧速度は米国海軍の減圧表を若干修正して使用した。

表 2 は 4 名の被検者の身体的特徴, 表 3 はこの期間中のテストダイバーの生理学的, 心理学的測定の日課を示す。

1 日の照明条件は 06:00 ~ 22:00 の 16L (16 時間点燈), 22:00 ~ 06:00 の 8D (8 時間消燈) のリズムを維持した。チェンバー内の照度は外部からの光源を取るため, 平均 80 lx であった。

実験期間中の定時計測は, 毎日 06:00 起床後, 第 1 回を実施し, 第 2 回 10:30, 第 3 回 15:

時刻 Hours	日 課 表 Activity
0600	起床 第 1 回定時生理計測 B.M.R.; Rise out of bed; First biorhythmic measurement; Oxygen consumption; Draw venous blood sample (10ml); Bag feces; Subjective symptoms test of fatigue.
0705	朝食 Breakfast
0745	水中作業 Underwater activity.
1030	第 2 回定時生理計測 生理テスト Second biorhythmic measurement; Physical exercise.
1130	昼食 Lunch
1230	水中作業 Underwater activity.
1530	第 3 回定時生理計測 生理テスト Third biorhythmic measurement; Physical exercise.
1600	Tapping test; Manual Dexterity test; Choice reaction time test; Spirometry; Physical exercise.
1800	夕食 Supper; Subjective symptoms test of fatigue.
1900	入浴 Bath
1930	第 4 回定時生理計測 Fourth biorhythmic measurement; Physical exercise.
2030	自由時間 Free time.
2100	睡眠のポリグラフの計測準備 Preparing for electrophysiological recording for sleep.
2200	就寝 終夜計測 Retire to bed; Overnight electrophysiological recording for sleep.

定時生理計測 心拍数
Biorhythmic measurement: Heart rate;
呼吸数 直腸温度
Respiratory rate; Rectal temperature;
体重計測 血圧
Measurement of body weight; Blood pressure;
採尿 フリッカー
Empty urinary bladder; C.F.F. (Flicker);
心拍 呼吸数
** ECG, EOG, EKG, Heart rate, Respiratory
直腸温度
& Rectal temperature.

表3 実験期間中の日課表 (シードラゴン-I, 1976年12月)

Daily activity schedule inside the chamber (SEADRAGON-I, Dec. 1976)

30, 及び第 4 回 19:30 とし, 4 時間 30 分間隔で 1 日 4 回実施した。

心拍数, 呼吸数および直腸温は毎回 10 分間仰臥位で 4 名同時に記録し, 最後の 1 分間をその時点の測定値とした。

終夜睡眠記録は 22:00 消燈, 就寝から翌朝 06:00 起床まで脳波, 動眼球図, 心拍数, 呼吸数, 直腸温などの電極を所定の位置に設置し, 入力箱, 端子箱を介してチェンバー外へ導出し, 万能タイプ脳波計に連続記録した。

脳波の磁気記録は行わず, 電極装着部位と誘導は J. C. ROSTAIN ら¹⁴⁾の方法によった。電極は銀皿電極を使用し, 電極部位は右半球の前頭極-中心回, 中心回-側頭中, 側頭中-後頭葉に装着し, 双極誘導とした。

動眼球図は脳波用銀皿電極を使用し, 右眼球の

睡眠相の中には睡眠周期があり，通常NREM睡眠からREM睡眠までを原則として一周期とした。ヒトでは一周期90～120 min を取ることが知られている。

— 147 —

4名のテストダイバーを同時に計測し、夜間の寝返り、異物感等で途中電極を脱落し、測定が困難となったことがあった。しかしこの場合も再度電極装着のため起こすことはしなかった。夜間の発汗で電極が頭皮から浮上し、抵抗値が高くなり、異常記録または欠測を生じた。これらの計測値は解析から除外した。

自覚的な睡眠状態を評価するため、前夜の睡眠内感について翌朝起床時に表4に示す“自覚症状しらべ”で調査し、同時に、フリッカー値、尿中の無機物質および有機物質を測定し、終夜睡眠のポリグラフの観察を行い、睡眠深度、入眠時刻、睡眠中の覚醒回数などとの相関分析を行った。

3. 試験結果

3.1. 心拍数

図3は4名の被検者別の終夜睡眠の心拍数、表5はその平均値を被検者別、期間別に区分しその有意水準を示す。

加圧直後2日間4名の被検者とも徐脈傾向を示し、その後時間とともに、適応がみられた。減圧期3名の被検者、“A” “B” 及び “C” は事前観察期の値と比較して有意 ($p < 0.05$) な徐脈傾向を示した。また被検者 “D” は有意差は得られないが、徐脈傾向がみられた。事後観察期では、被検者 “B” と “D” は事前観察期の近似値を示し、反面、被検者 “A” ($p < 0.05$) と “C” には高圧暴露によるとみられる残存効果がみられた。

3.2. 呼吸数

図4は終夜睡眠の呼吸数の変化を示す。

4名の被検者のうち、“A”、“B” 及び “C” の3名は加圧と共に呼吸緩徐傾向を示し、加圧後時間の経過とともに事前観察期の対照値に復帰する傾向が認められた。また高圧環境下の寒冷の影響を知る目的で、環境温度を2℃降下させた2日間にも呼吸緩徐傾向がみられた。減圧開始後、徐々に呼吸数も増加しはじめ、大気圧復帰後、呼吸数は対照値を示した。

表6は被検者別、各期間ごとの有意水準の検討結果である。被検者 “D” には実験期間中を通じて変化はみられなかった。11ATA保圧後期の呼吸数は事後観察期に比較して有意 ($p < 0.01$) な呼吸緩徐(被検者 “A”、“B” 及び “C”)を示した。しかし事前観察期と比較して有意な差は認められなかった。これは心拍数と同様に一時的

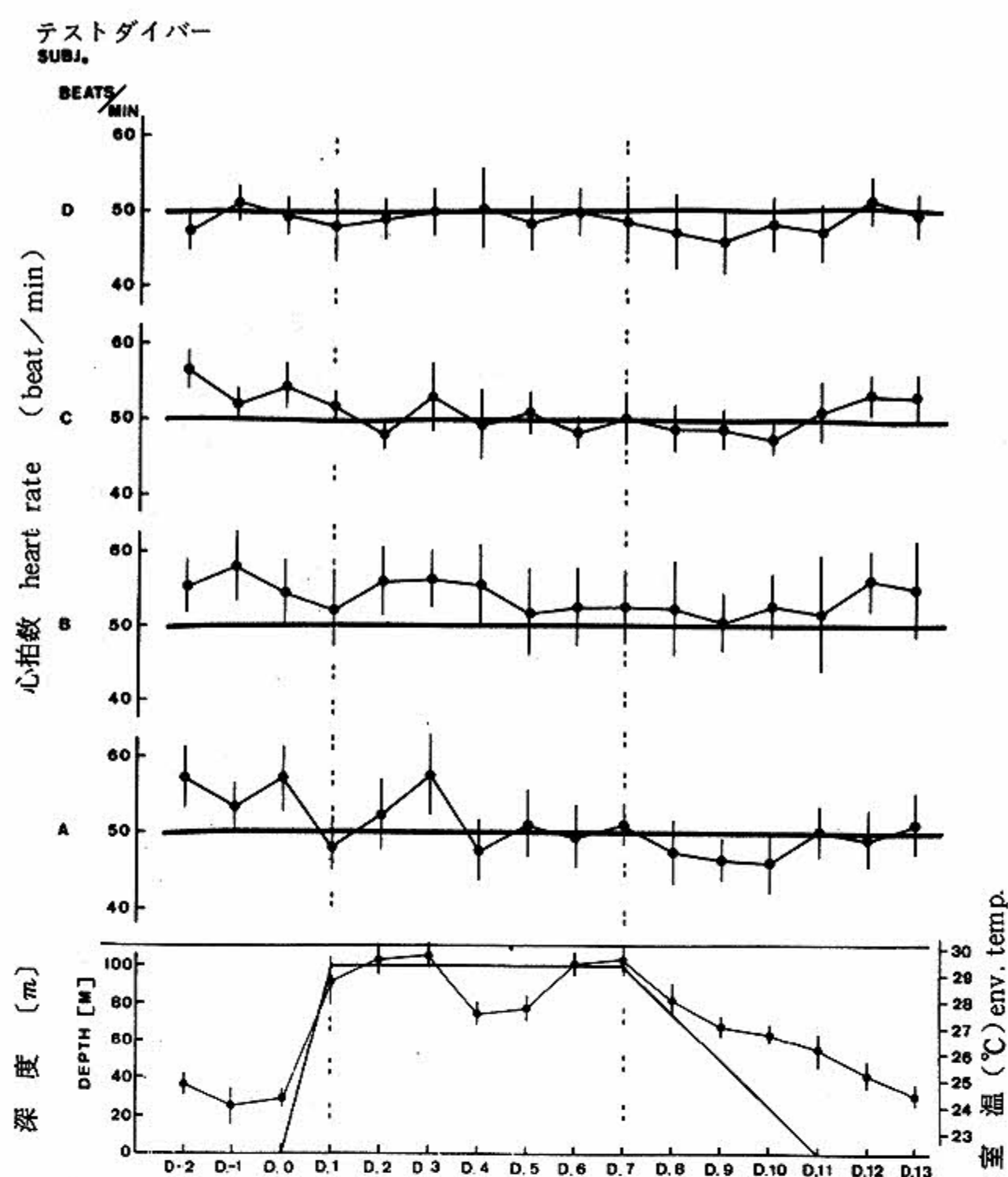


図3 実験期間中の終夜睡眠記録における呼吸数
(シードラゴン-I, 11ATA, 1976年12月)

Mean and S.D. of heart rate in sleep during experiment (SEADRAGON-1, 11ATA, Dec. 1976)

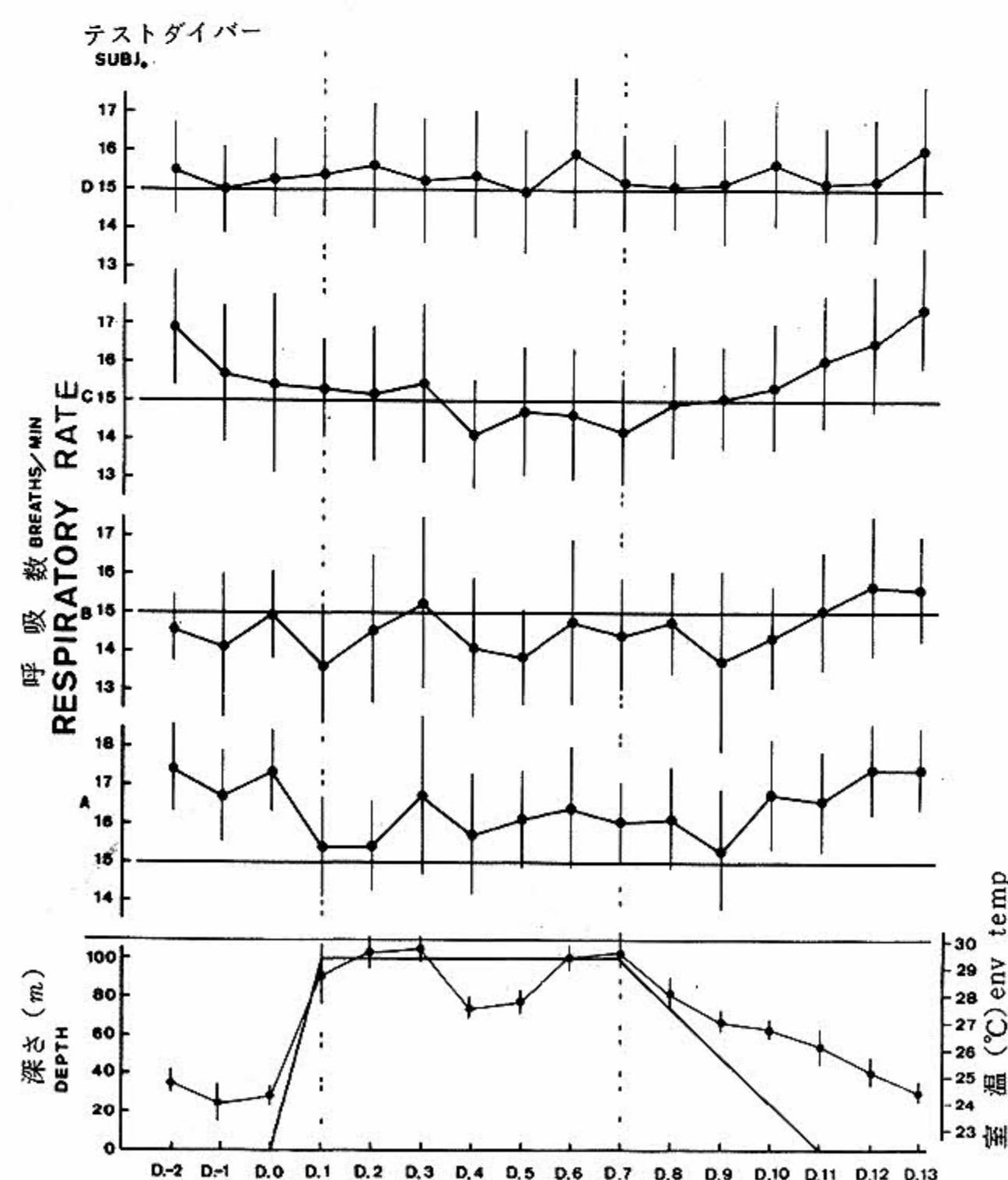


図4 実験期間中の終夜睡眠記録における心拍数
(シードラゴン-I, 11ATA, 1976年11月)

Mean and S.D. of respiratory rate in sleep during experiment (SEADRAGON-1, 11ATA, Dec. 1976)

SUBJECT A テストダイバー A

	PRE-DIVE 3 days per. 55.98±2.20	SAT. (F) 3 days per. 52.76±4.61	SAT. (L) 4 days per. 50.27±1.95	DECOMP. 4 days per. 47.66±1.89	POST-DIVE 2 days per. 50.13±1.27
PRE-DIVE 3 days per. 55.98±2.20			▲	▲ ▲	▲
SAT. (F) 3 days per. 52.76±4.61					
SAT. (L) 4 days per. 50.27±1.95	▲				
DECOMP. 4 days per. 47.66±1.89	▲ ▲				
POST-DIVE 2 days per. 50.13±1.27	▲				

SUBJECT B テストダイバー B

	PRE-DIVE 3 days per. 56.09±1.70	SAT. (F) 3 days per. 55.05±2.32	SAT. (L) 4 days per. 53.42±1.60	DECOMP. 4 days per. 52.12±0.94	POST-DIVE 2 days per. 55.73±0.69
PRE-DIVE 3 days per. 56.09±1.70				▲ ▲	
SAT. (F) 3 days per. 55.05±2.32				▲	
SAT. (L) 4 days per. 53.42±1.60					
DECOMP. 4 days per. 52.12±0.94	▲ ▲	▲			▲
POST-DIVE 2 days per. 55.73±0.69				▲	

SUBJECT C テストダイバー C

	PRE-DIVE 3 days per. 54.58±2.21	SAT. (F) 3 days per. 50.56±2.50	SAT. (L) 4 days per. 49.84±1.11	DECOMP. 4 days per. 49.33±1.49	POST-DIVE 2 days per. 50.86±1.46
PRE-DIVE 3 days per. 54.58±2.21			▲	▲	
SAT. (F) 3 days per. 50.56±2.50					
SAT. (L) 4 days per. 49.84±1.11	▲				
DECOMP. 4 days per. 49.33±1.49	▲				
POST-DIVE 2 days per. 50.86±1.46					

SUBJECT D テストダイバー D

	PRE-DIVE 3 days per. 49.64±1.71	SAT. (F) 3 days per. 49.23±1.05	SAT. (L) 4 days per. 49.70±0.91	DECOMP. 4 days per. 47.62±0.99	POST-DIVE 2 days per. 50.86±1.46
PRE-DIVE 3 days per. 49.64±1.71					
SAT. (F) 3 days per. 49.23±1.05					
SAT. (L) 4 days per. 49.70±0.91					
DECOMP. 4 days per. 47.62±0.99					▲
POST-DIVE 2 days per. 50.86±1.46				▲	

平均値と標準偏差

Values are Mean±S.D. SAT.: 飽和期 Saturation DECOMP.: 減圧期 Decompression

▲ : P<0.05, ▲ ▲ : P<0.01

表 5 実験期間中の終夜睡眠記録における心拍数(シードラゴン-I, 11A T A, 1976 年 12 月)

Mean ± S.D. of heart rate in sleep during five periods

Significantly different on paired t test (p < 0.05) (SEADRAGON-I, Dec. 1976)

SUBJECT A テストダイバー A

	PRE-DIVE 3 days per. 17.17±0.40	SAT. (F) 3 days per. 15.87±0.77	SAT. (L) 4 days per. 16.09±0.28	DECOMP. 4 days per. 16.21±0.66	POST-DIVE 2 days per. 17.44±0.01
PRE-DIVE 3 days per. 17.17±0.40			▲ ▲		
SAT. (F) 3 days per. 15.87±0.77					
SAT. (L) 4 days per. 16.09±0.28	▲ ▲				▲ ▲
DECOMP. 4 days per. 16.21±0.66					
POST-DIVE 2 days per. 17.44±0.01			▲ ▲		

SUBJECT B テストダイバー B

	PRE-DIVE 3 days per. 14.57±0.43	SAT. (F) 3 days per. 14.50±0.81	SAT. (L) 4 days per. 14.29±0.39	DECOMP. 4 days per. 14.47±0.56	POST-DIVE 2 days per. 15.66±0.06
PRE-DIVE 3 days per. 14.57±0.43					▲
SAT. (F) 3 days per. 14.50±0.81					
SAT. (L) 4 days per. 14.29±0.39					▲ ▲
DECOMP. 4 days per. 14.47±0.56					
POST-DIVE 2 days per. 15.66±0.06	▲		▲ ▲		

SUBJECT C テストダイバー C

	PRE-DIVE 3 days per. 16.03±0.79	SAT. (F) 3 days per. 15.30±0.15	SAT. (L) 4 days per. 14.41±0.30	DECOMP. 4 days per. 15.35±0.49	POST-DIVE 2 days per. 17.00±0.66
PRE-DIVE 3 days per. 16.03±0.79			▲		
SAT. (F) 3 days per. 15.30±0.15					▲
SAT. (L) 4 days per. 14.41±0.30	▲				▲ ▲
DECOMP. 4 days per. 15.35±0.49					▲
POST-DIVE 2 days per. 17.00±0.66		▲	▲ ▲	▲	

SUBJECT D テストダイバー D

	PRE-DIVE 3 days per. 15.26±0.27	SAT. (F) 3 days per. 15.36±0.17	SAT. (L) 4 days per. 15.33±0.43	DECOMP. 4 days per. 15.26±0.27	POST-DIVE 2 days per. 15.63±0.56
PRE-DIVE 3 days per. 15.26±0.27					
SAT. (F) 3 days per. 15.36±0.17					
SAT. (L) 4 days per. 15.33±0.43					
DECOMP. 4 days per. 15.26±0.27					
POST-DIVE 2 days per. 15.63±0.56					

平均値と標準偏差

Values are Mean±S.D. SAT.: 飽和期 Saturation DECOMP.: 減圧期 Decompression

▲ : P<0.05, ▲ ▲ : P<0.01

表 6 実験期間と終夜睡眠記録における呼吸数(シードラゴン-I, 11A T A, 1976 年 12 月)

Mean ± S.D. of respiratory rate in sleep during five periods

Significantly different on paired t test (p < 0.05) (SEADRAGON-I, 11ATA, Dec. 1976)

に環境温度を2℃降下させたためと考えられる。

3.3. 終夜睡眠相

実験期間中の4名の被検者のうち“A”と“C”は欠測が多く、また測定が不規則で解析が困難なため本稿では取り上げなかった。

図5は被検者“B”，図6は“D”の実験期間中の終夜睡眠相を示す。

被検者Bは実験期間を通じて総睡眠時間は、6～7.5時間であり、睡眠段階（Ⅰ＋Ⅱ）と（Ⅲ＋Ⅳ）を比較すればおおむね鏡像を示し、深睡眠時間（Ⅲ＋Ⅳ）の得られない日は浅睡眠時間（Ⅰ＋Ⅱ）が増加していた。これに対してREM睡眠は、14日間の観察日を通して80～120minであった。

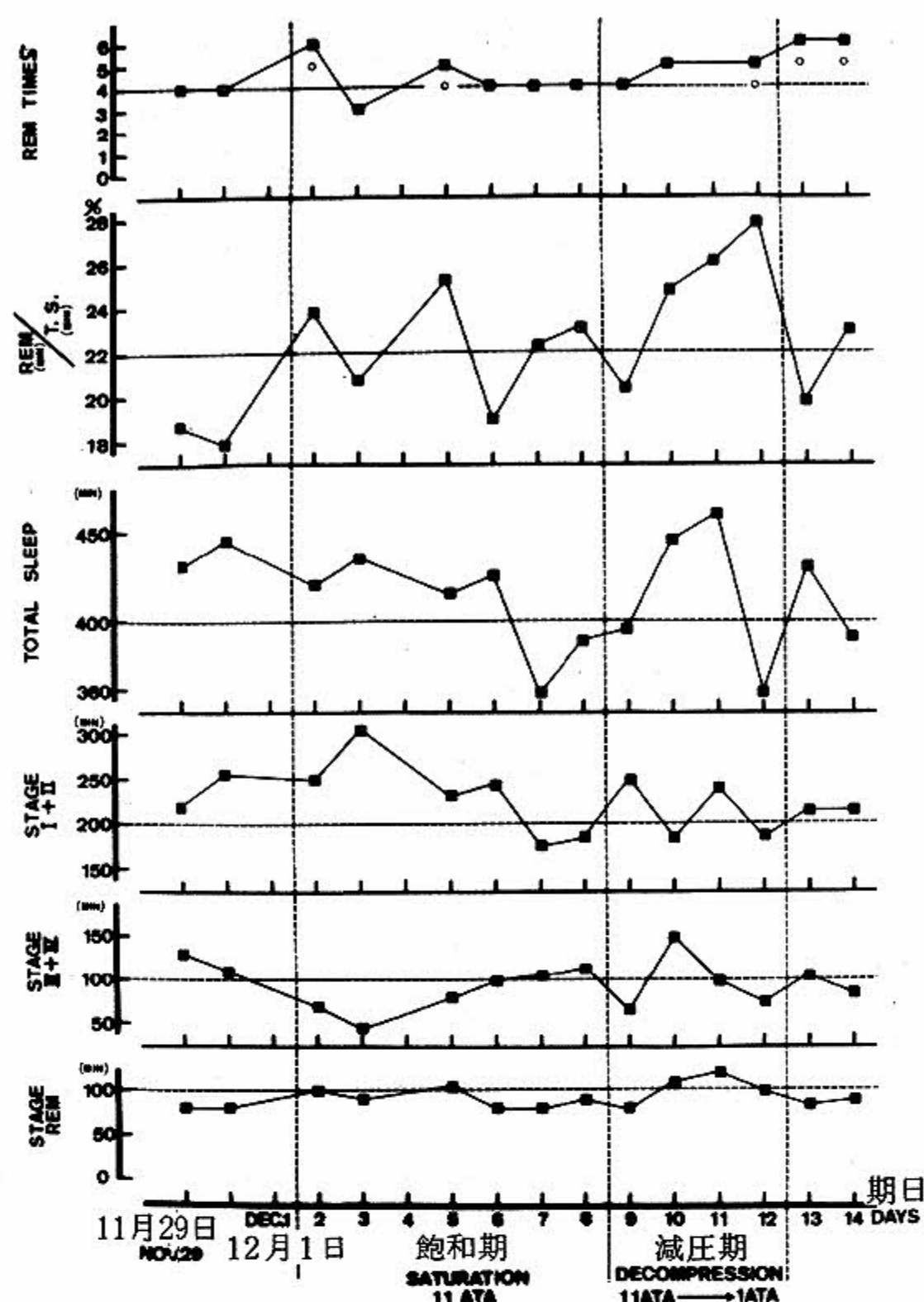
被検者Dは加圧直後の計測値を得ることができなかったが、実験期間を通じて総睡眠時間6.2～7.5時間の睡眠が認められた。図8に示す加圧後、第2日目の夜は終夜睡眠中のREM段階は1回しか認められず、途中5回にもわたる覚醒が記録され、その他は著しい変化は認められなかった。この図には“D”の終夜の睡眠相、呼吸数、心拍数、直腸温を連続記録したものをヒストグラムとして表示した。

図7は“D”の事前観察第2日目の記録である。睡眠相はほぼ正常であるが消灯後約1時間にわたって浅睡眠と覚醒のくり返しがみられ“ねつき”の悪さがみとめられる。図9は被検者“B”の11ATAにおける第2日目の終夜記録である。

消灯後30min覚醒状態が続き、また夜間ごく短時間ながら02:00～03:00の間に2回の覚醒を記録した。同様な傾向が被検者“A”，“C”及び“D”にも認められた。このように、終夜はいずれの被検者も入眠不良を示し、また途中何度も覚醒を記録した。この終夜の特異な環境条件に、22:00の消灯時、環境温度29.2℃、湿度65%、また02:00の環境温度30℃、湿度35%と極端な湿度下降が記録されている。

図10は11ATAにおける第6日目の終夜の睡眠記録である。

この日は寒冷ストレスの影響を調べるため、環境温度を30℃から2℃降下させて28℃とした。睡眠相は消灯後、約1時間にわたって覚醒状態がつづき、その後、正常睡眠相が出現した。図11は減圧開始後、第1日目の睡眠相である。この図は図8に示す事前観察期と同様でしかも、消灯後、直



横軸 期 日

abscissa: Time is days

縦軸 上から順に

ordinate: From top to bottom

睡眠中の逆説睡眠の回数

- Numbers of Times of REM sleep

全睡眠時間に対する逆説睡眠時間の

- Percentage of the REM sleep time on the total time of sleep

- General total time of sleep in minutes

- Total time of stage (I + II) of sleep in minutes

- Total time of stage (III + IV) of sleep in minutes

- Total time of REM sleep in minutes

図5 実験期間中の終夜睡眠記録における変動
(被験者B) (シードラゴン-I, 11ATA, 1976年12月)

Sleep stage of graphic representation of visually analyzed data on subject B (SEADRAGON-I, 11ATA, Dec. 1976)

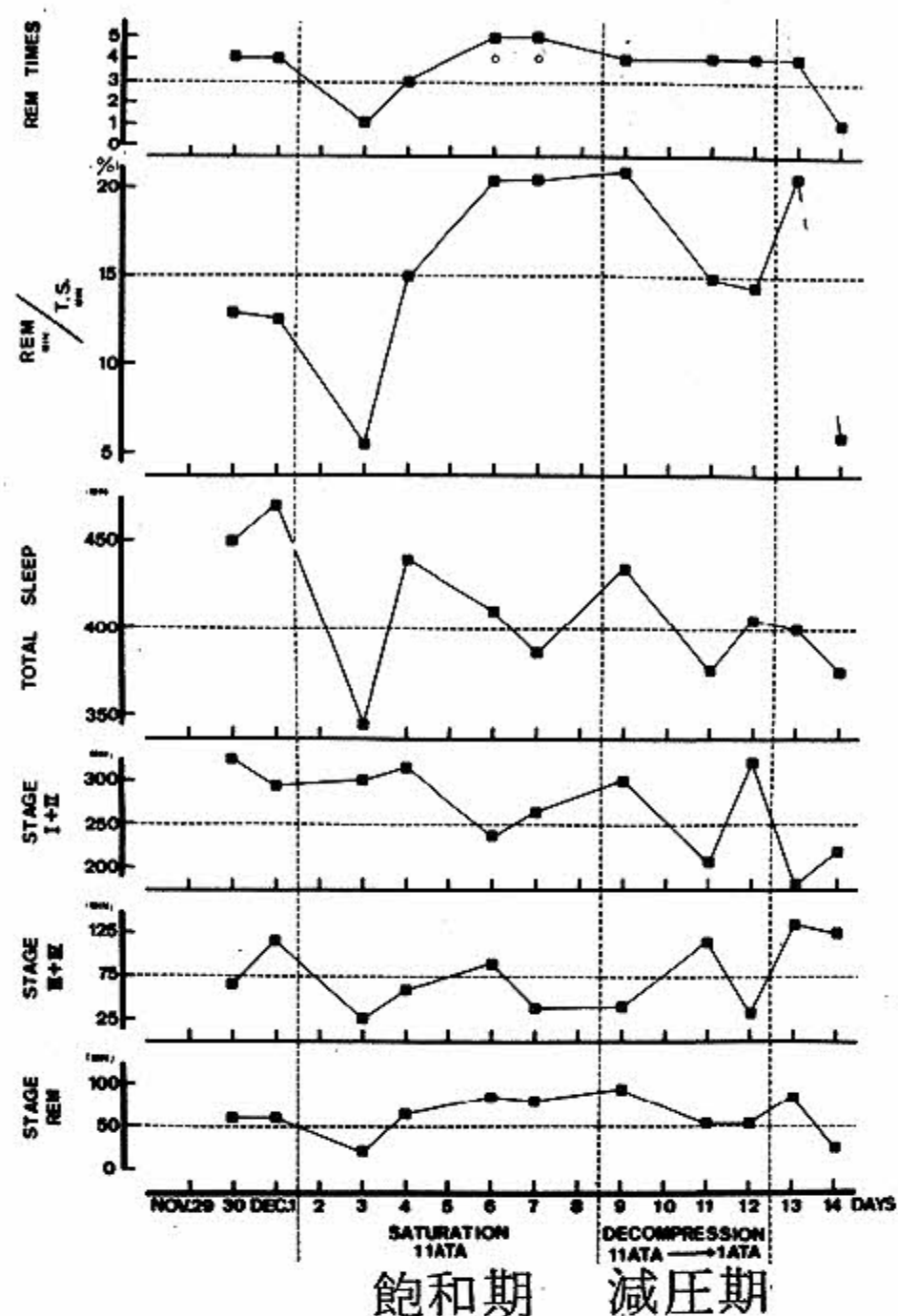


図6 実験期間と終夜睡眠記録における変動
(被験者D)(シードラゴン-I, 11ATA
1976年12月)

Sleep stage of graphic representation of visually
analyzed data on subject D (SEADRAGON-I,
11ATA, Dec. 1976)

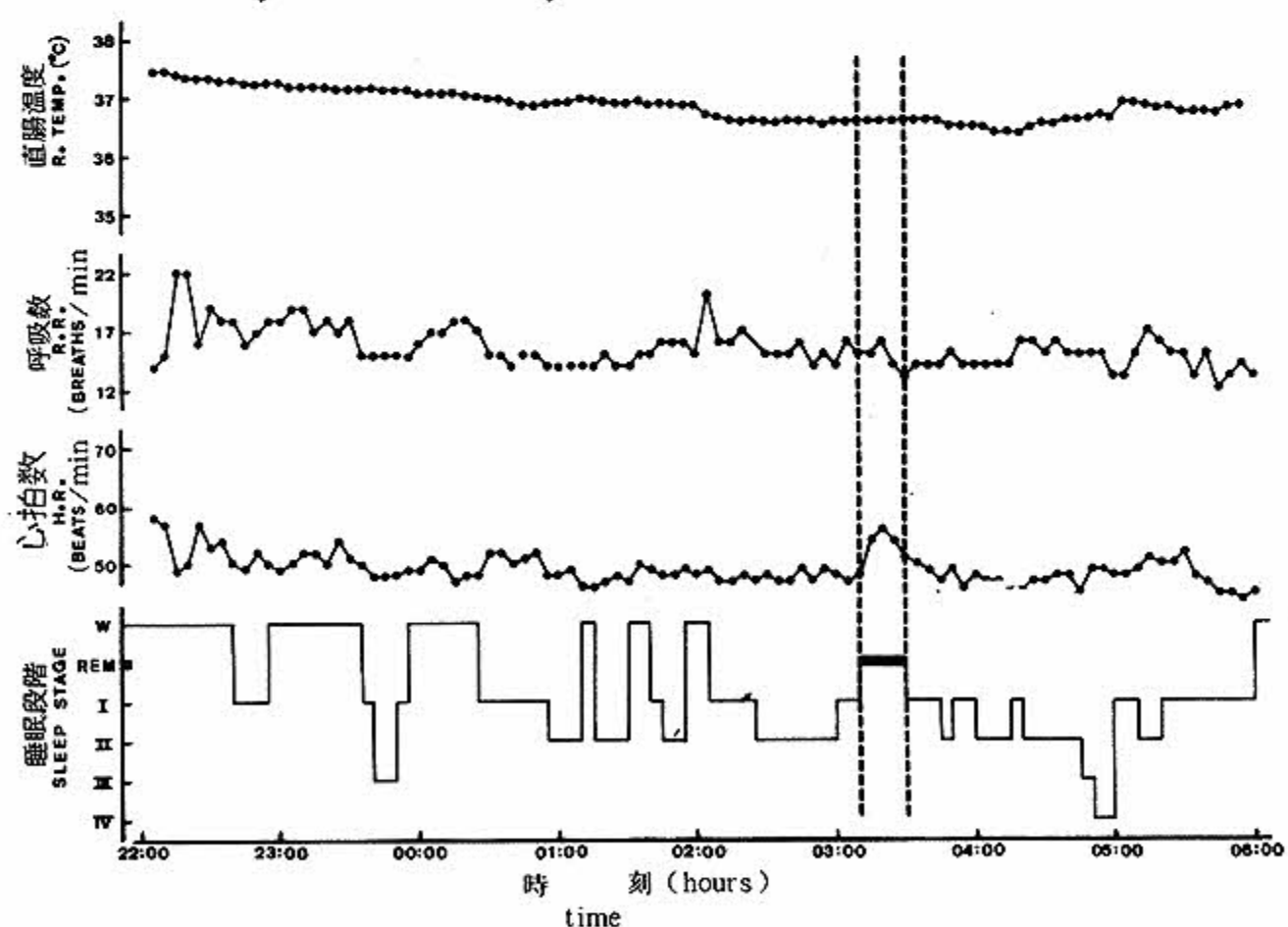
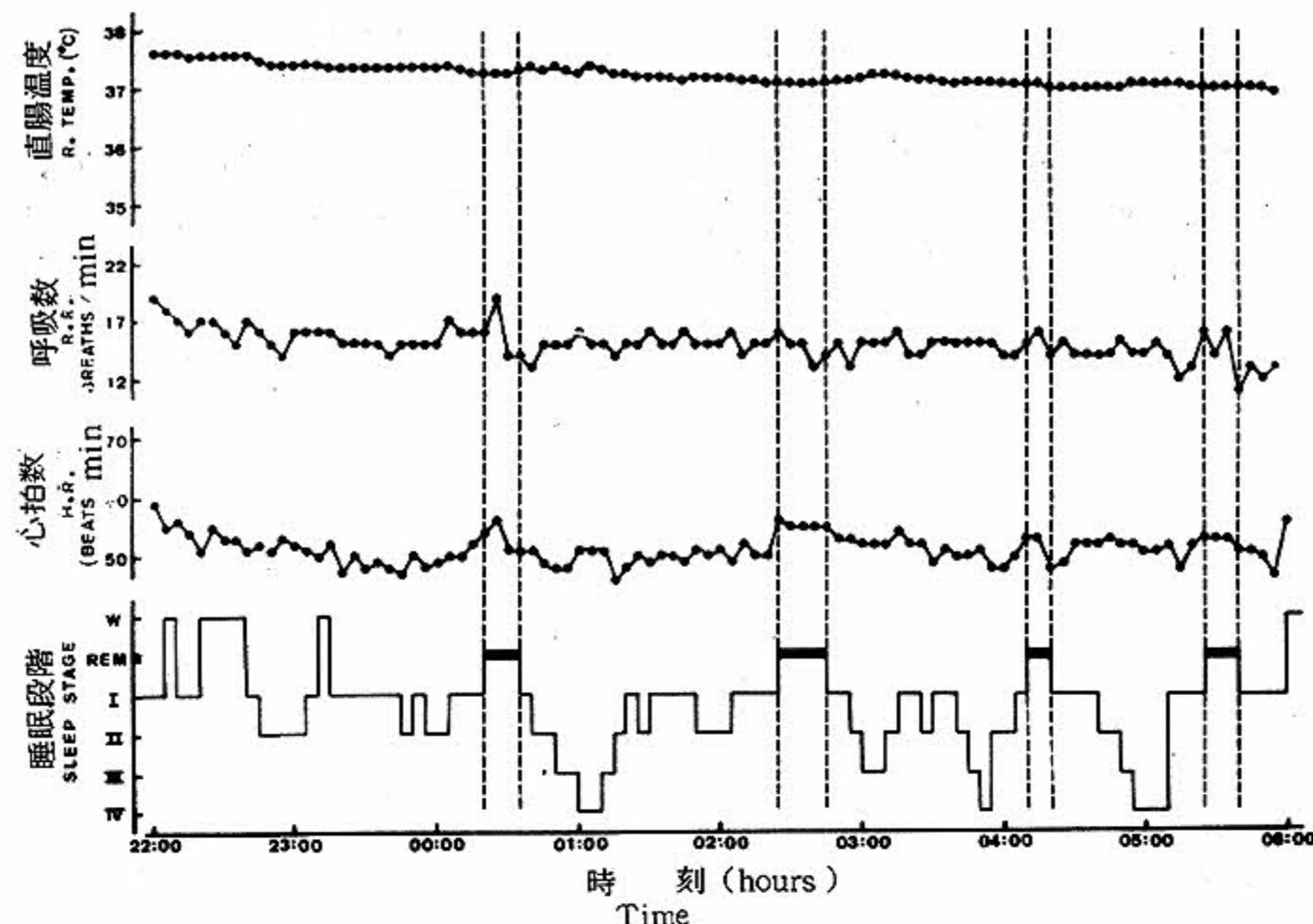


図8 終夜睡眠記録における体温, 呼吸, 心拍数
の変動, 被験者D, 加圧後第2日目 (シードラゴン-I, 11ATA, 1976年12月)

Sleep stage and profile on subject D (SEA-
DRAGON-I, 3 Dec. 1976, 2nd day of saturation)



abscissa : Time in hours
ordinate : From top to bottom
R. Temp. : Rectal Temperature
R. R. : Respiratory Rate
H. R. : Heart Rate
Sleep Stages
W : Waking
REM : Rapid Eye Movement
I : Slow wave stage I
II : Slow wave stage II
III : Slow wave stage III
IV : Slow wave stage IV

図7 終夜睡眠記録における体温, 呼吸, 心拍数
の変動 被験者D, 事前観察期第2日目
(シードラゴン1号, 11ATA, 1976年12月)

Sleep stag and profile on subject D (SEA-
DRAGON-I, 30 Nov. 1976, 2nd day of
confinement)

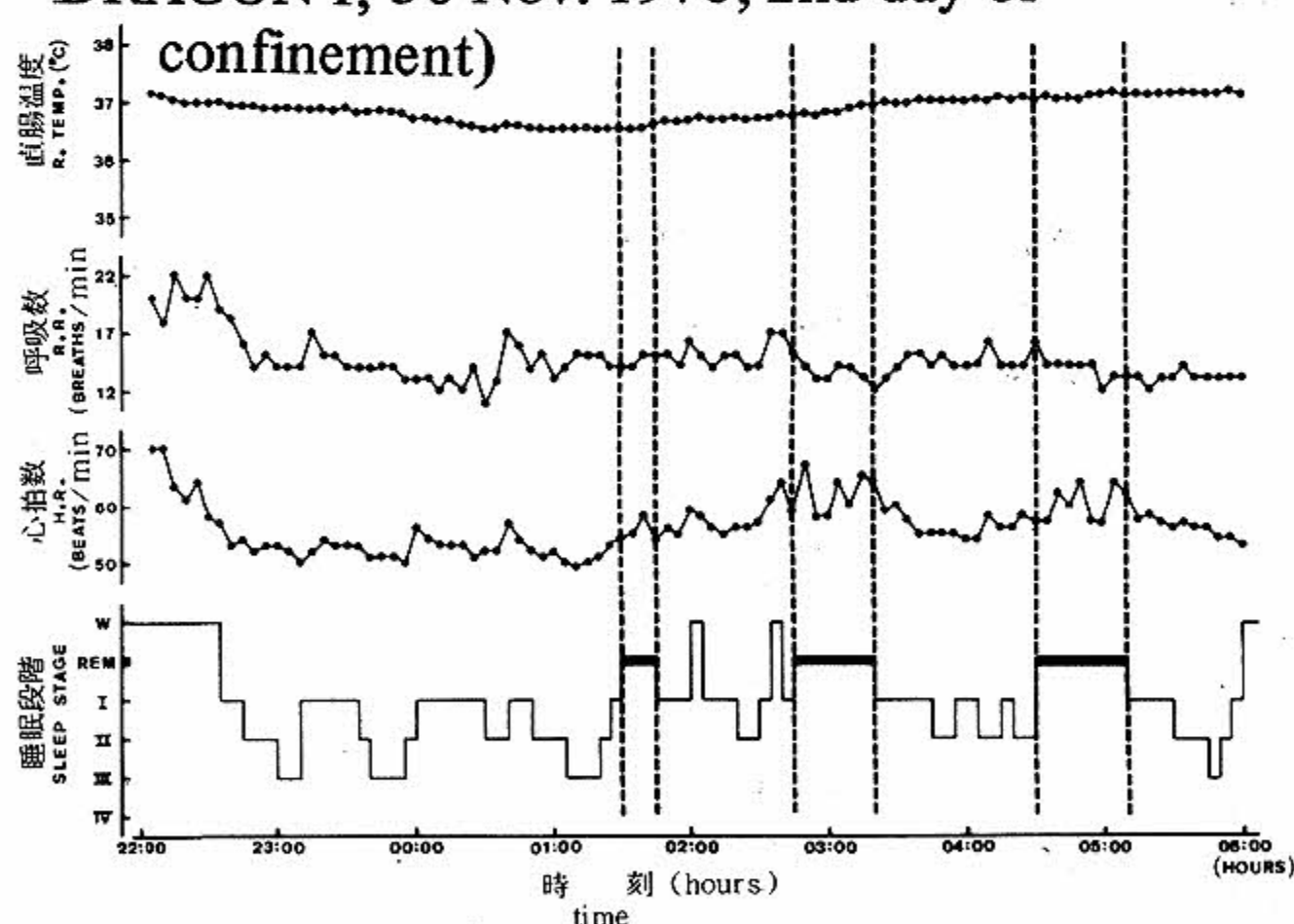


図9 終夜睡眠記録における体温, 呼吸, 心拍数
の変動, 被験者B, 加圧後第2日目 (シードラゴン-I, 11ATA, 1976年12月)

Sleep stage and profile on subject B (SEA-
DRAGON-I, 3 Dec. 1976, 2nd day of saturation)

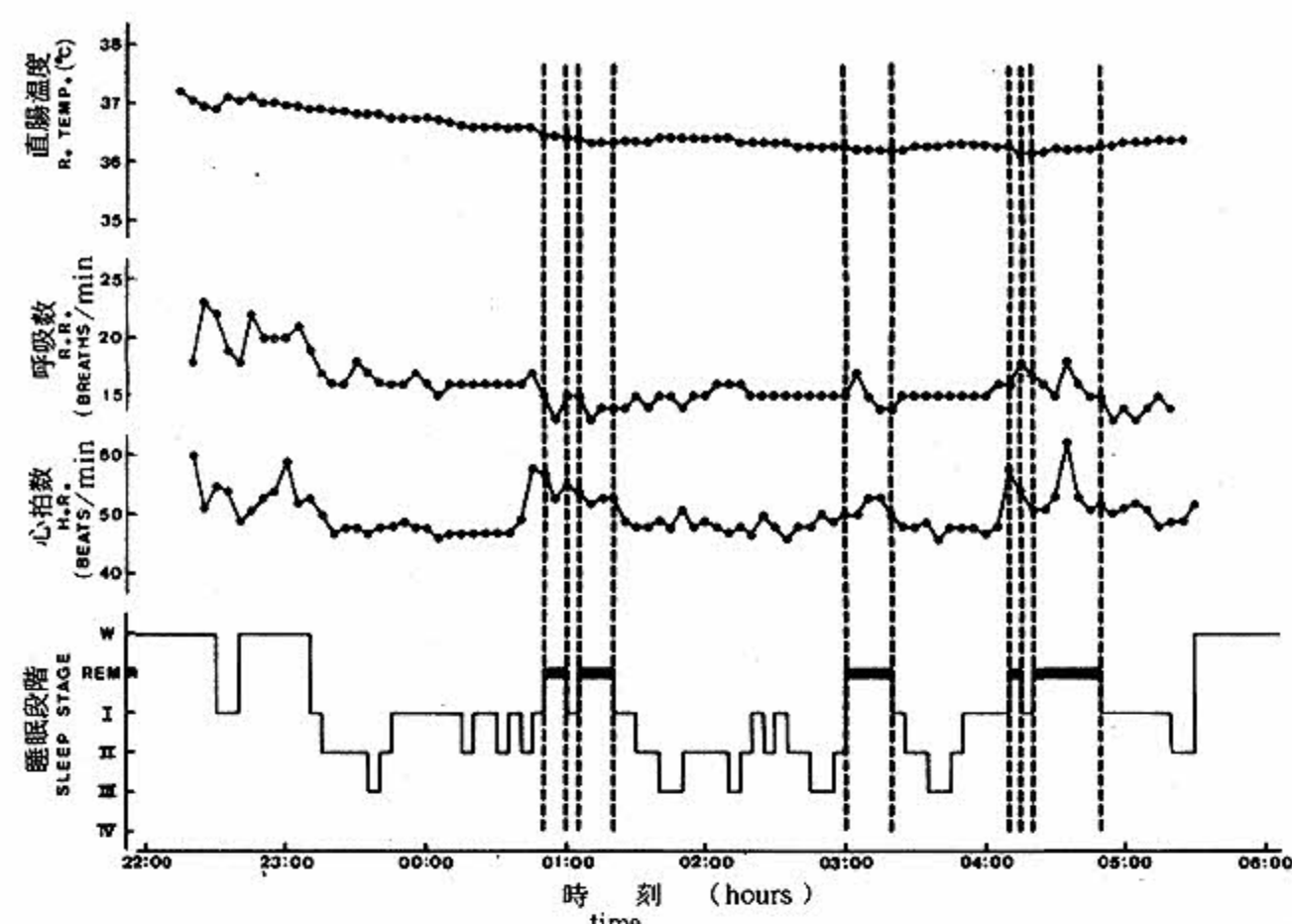


図10 終夜睡眠記録における体温，呼吸，心拍数の変動，被験者D，加圧後第6日目（シードラゴン-1，11ATA，1976年12月）

Sleep stage and profile on subject D (SEA-DRAGON-I, 7 Dec. 1976, 6th day of saturation)

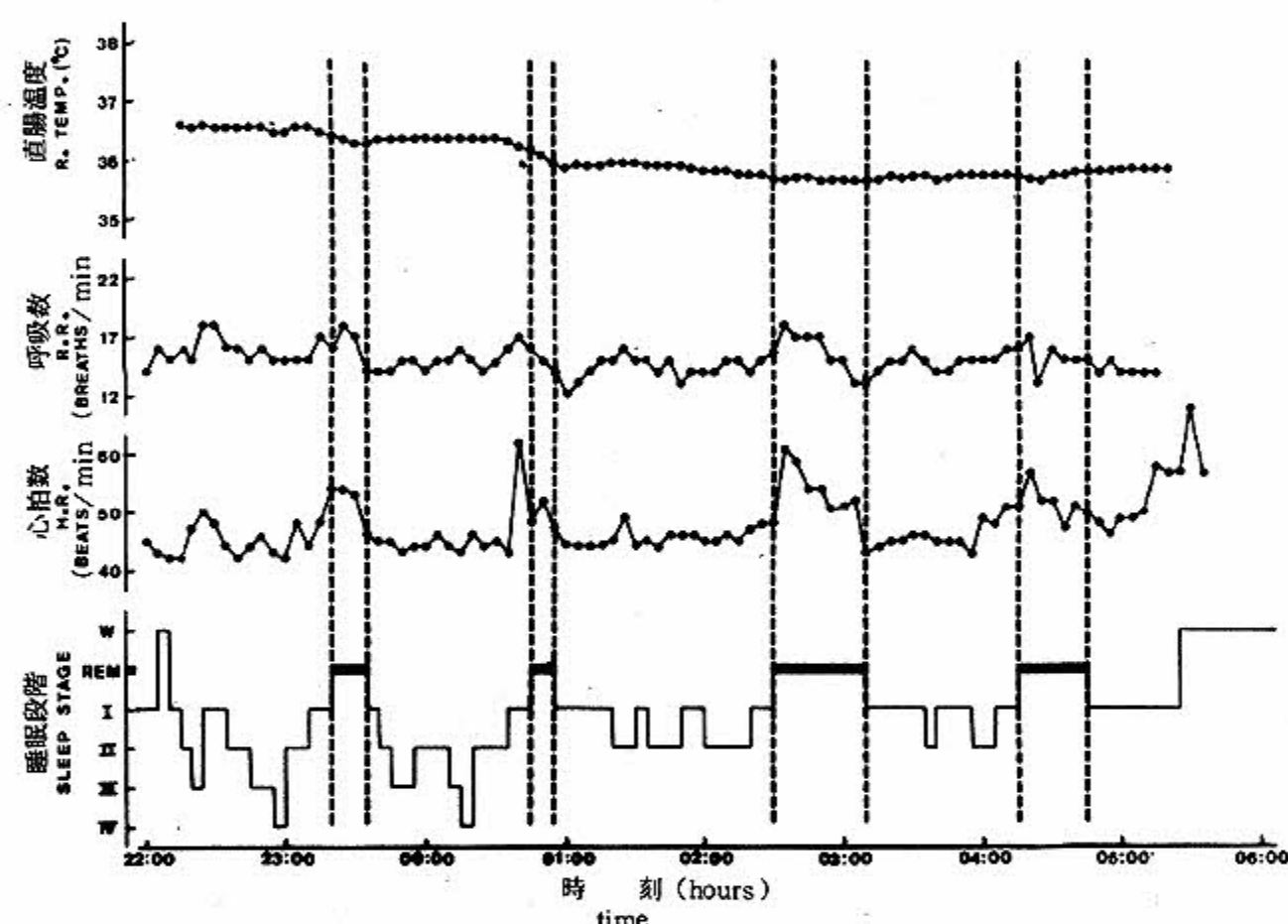


図11 終夜睡眠記録における体温，呼吸，心拍数の変動，被験者D，減圧開始第1日目（シードラゴン-1，11ATA，1976年12月）

Sleep stage and profile on subject D (SEA-DRAGON-I, 8 Dec. 1976, 1st day of decompression)

ちに入眠状態を示した。図12は事後観察期第1日目の睡眠相の記録である。この図は図8及び図11と同様な睡眠相を示したが，起床前約2時間から覚醒状態を示した。この傾向は図13の被検者Bの場合にもみられた。

3.4. 相関分析

11ATA下，7日間の4名の被検者の終夜睡眠の生体機能をポリグラフを用いて記録した測定値と，翌朝起床時のフリッカ値，尿中の無機質および有機物質，自覚症状しらべとの相関関係をピアソンの式を用いて相関分析を行なった。

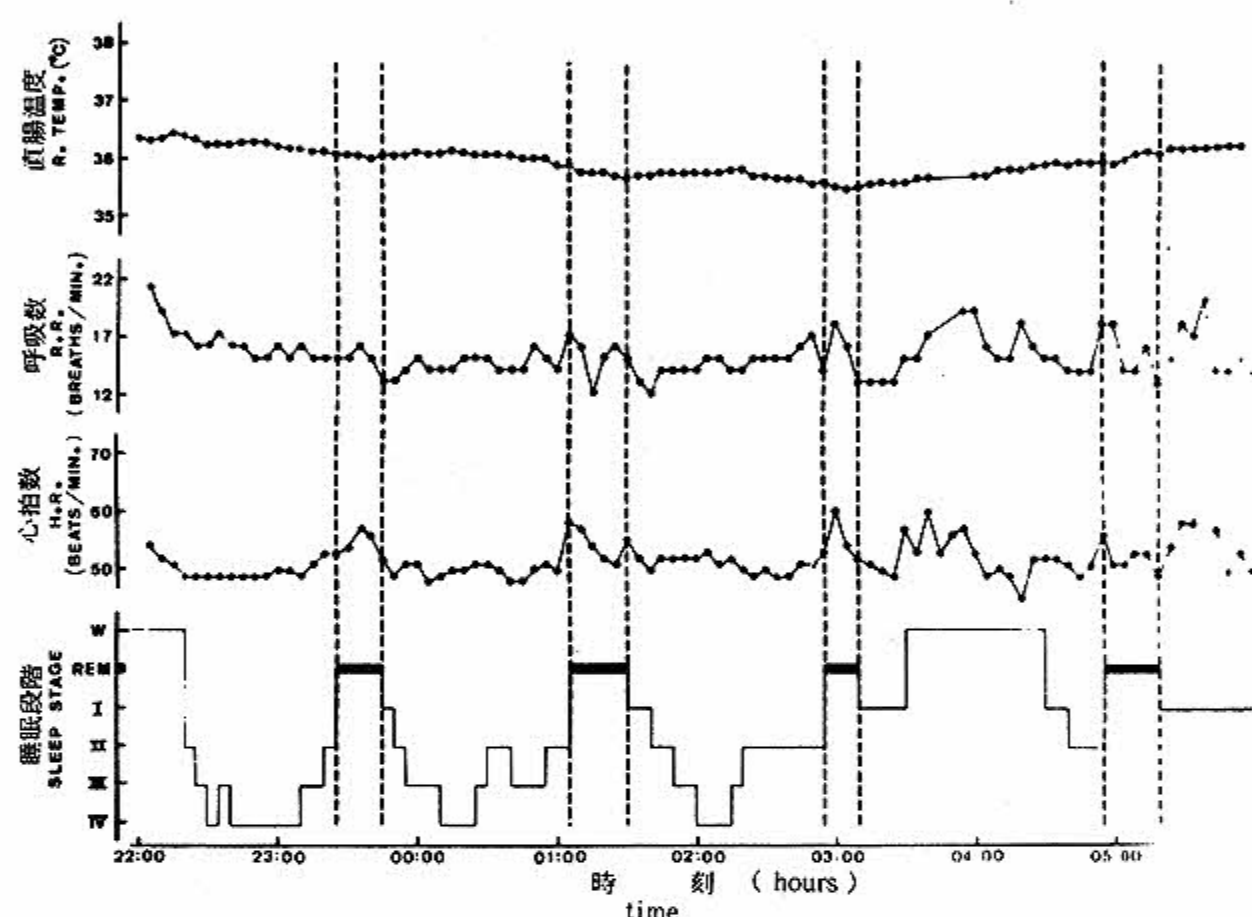


図12 終夜睡眠記録における体温，呼吸，心拍数の変動，被験者D，事後観察第1日目（シードラゴン-1，11ATA，1976年12月）

Sleep stage and profile on subject D (SEA-DRAGON-I, 13 Dec. 1976, 1st day of post dive)

その結果は次のようであった。

n = 16 (11ATA)			
(1) 終夜睡眠の心拍数	と 終夜睡眠の呼吸数	r = 0.498	p < 0.05
(2) 起床時のCFF値	と 起床時の呼吸数	r = 0.527	p < 0.05
(3) 起床時の気分	と 起床時の呼吸数	r = -0.520	p < 0.05
(4) 消燈から入眠までの時間	と 起床時のフリッカー値	r = -0.716	p < 0.01
(5) 消燈から入眠までの時間	と 総睡眠時間段階 (Ⅲ + Ⅳ)	r = 0.495	p < 0.1
(6) 消燈から入眠までの時間	と ねつき (自覚症状)	r = -0.663	p < 0.01
(7) 総睡眠時間段階 (Ⅲ + Ⅳ)	と ねつき (自覚症状)	r = 0.663	p < 0.01
(8) 総睡眠時間段階 (Ⅲ + Ⅳ)	と 起床時のフリッカー値	r = 0.609	p < 0.02
(9) 総REM睡眠時間	と 起床時の尿中クレアチニン	r = -0.531	p < 0.05
(10) 総REM睡眠時間	と 起床時の尿中 Na	r = -0.486	p < 0.1
(11) 総REM睡眠時間	と 起床時の尿中 Cl	r = -0.516	p < 0.1
(12) 総REM睡眠時間	と 終夜睡眠の覚醒回数	r = -0.502	p < 0.1

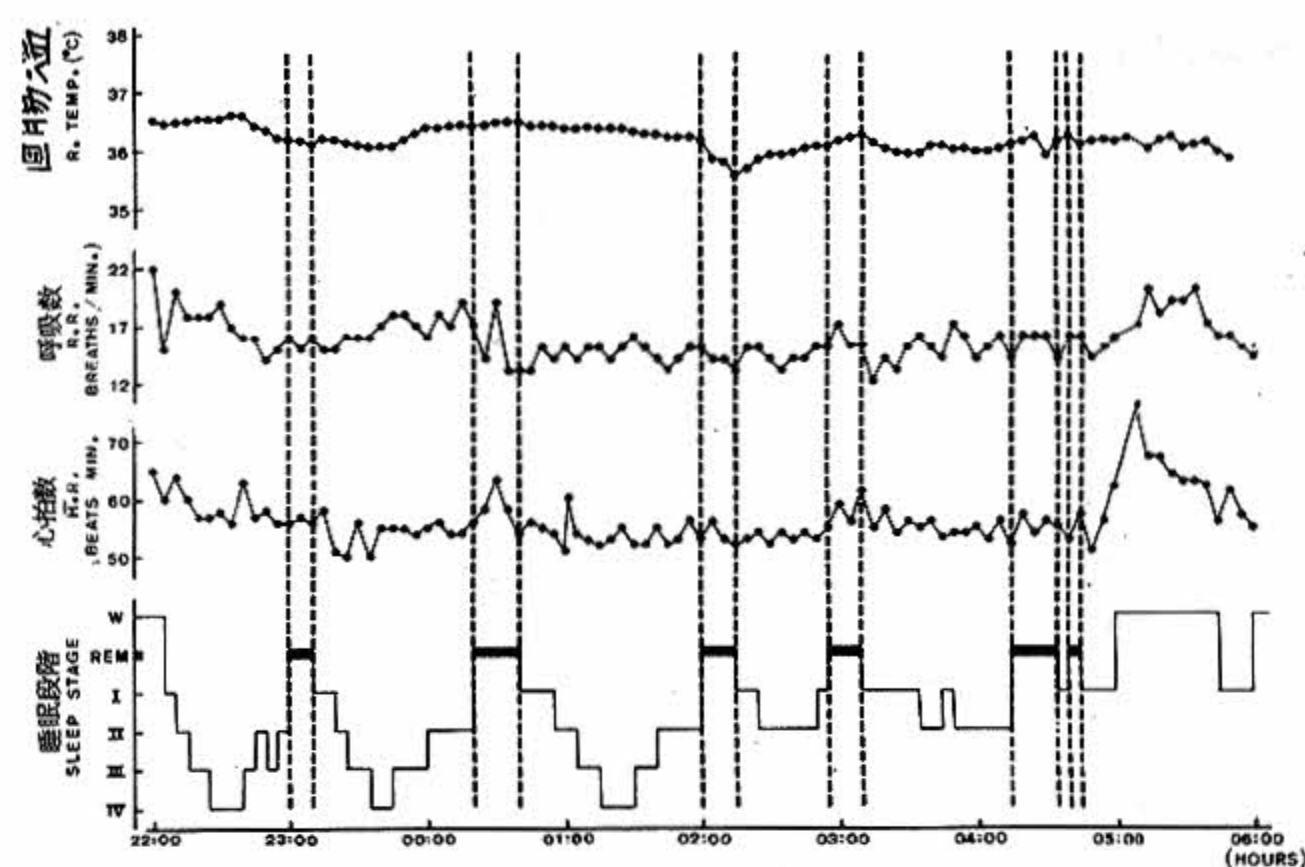


図13 終夜睡眠記録における体温，呼吸，心拍数の変動，被験者B，事後観察第1日目（シードラゴン-1，11A T A，1976年12月）

Sleep stage and profile on subject B (SEA-DRAGON-I, 13 Dec. 1976, 1st day of post dive)

以上のことからつぎのことが言える。消燈から入眠に要する時間が長くなれば，翌朝起床時のフリッカー値は低くなり，同時に自覚的には“ねつき”が悪くなることも示している。このことは自覚症状しらべの妥当性がこの相関関係から立証されよう。同様に総睡眠時間段階（Ⅲ＋Ⅳ）が短縮すれば，フリッカー値も低くなることを示す。総REM睡眠時間と起床時の尿中クレアチニン， Na^+ ， Cl^- などと高い逆相関を示す。

Na^+ ， Cl^- は生体内のイオンの大部分を占め，体液浸透圧をつかさどる主要イオンでサーカディアンリズムを示すことが知られているため，今後の分析検討に大きな期待を持てる分野である。

4. 考 察

4.1. 観察の妥当性

本実験の観察は，従来の潜水シミュレーション実験に新たに付け加えられたものである。

実験成績は，4名の被検者という限定された被検者のうち，2名の被検者しか正常な記録が得られなかった。分析方法も自動解析によらず，全て視察評定（visual analysis）によったため分析上の問題点は残っている。しかし実験期間が長時間で，しかも同一被検者の記録を行ったこと，また終夜睡眠時のポリグラフ的記録分析，起床時のフリッカー値，自覚症状しらべなどに高い相関関係を見出したことなどから本実験の分析結果は価値あるものと考えられる。

4.2. 結果の意義づけ

実験期間中の終夜睡眠相の心拍数及び呼吸数は，4名の被検者中3名までが加圧直後2日間にわたって徐脈傾向，呼吸緩徐傾向を示し，同時に睡眠時間と睡眠段階に変動がみられた。このように高圧暴露によって生体にサーカディアンリズムの変動がみられたことは新知見である。常圧下で生体は一定周期に同調（Synchronization）していたのが，高圧環境に暴露されることによって脱同調（desynchronization）が生じた。しかし高圧環境に長時間滞在することによって，新しい一定周期をもった同調が生じた。これは生体が新しい環境に適応する能力を合せ持っていることを立証したものと考えられる。

高圧環境から減圧期間を経て常圧への復帰にさいして，高圧環境下では一定周期に同調していたものが，常圧の事後観察期間2日間の期間では事前観察期の定値への復帰が認められなかった。これは生体が脱同調を起こし，常圧への同調に達する期間が2日間では十分に適応できなかったものと推察される。このことは図7～13の終夜睡眠相の中でみられる。

加圧後の11A T Aの高圧ヘリウム-酸素混合ガス環境下の終夜睡眠中のREM睡眠記録時の頻脈傾向，頻呼吸傾向がみられたこと，また常圧下でも同様で，増加割合は10～15%（NREM睡眠段階と比較して）を示し，加圧後の高圧環境下では20～25%を示した。さらにREM睡眠期は交感神経緊張の亢進で，心拍数は頻脈傾向を伴うと考えられるが高圧ヘリウム-酸素混合ガス環境下では常圧下と比較して一層の亢進をきたすものと考えられる。この傾向は減圧期と事後観察期（2日間）にも認められる。そのため，常圧復帰後も，しばらく残存効果を示すと考えられる。

これらの結果からも，前述の高圧暴露による周期性の変動を立証できる。

加圧直後，2日間にわたって睡眠相に変動がみられたのは，加圧自体による影響か，あるいは環境制御による影響か，客観的な把握が困難であった。しかし4名の被検者らの主観的体験から温度および湿度の変動によって終夜睡眠途中の覚醒をしばしば経験したことがわかり，加圧と環境制御の相乗効果によると考えられる。

心拍数の徐脈傾向はJ. CORRIOLら¹⁾およびC. M. HESSERら²⁾の研究では酸素分圧上昇，ガ

ス密度、浸水反射、水温などが徐脈傾向を発現させる要素であると述べている。J. SALZANOら¹⁵⁾は皮膚温度の降下で末梢系の血管収縮が徐脈傾向を示す原因ではないかと述べている。この説は今回、加圧直後から終夜睡眠記録で認められた顕著な徐脈傾向は、日中の覚醒期に計測を行った平均皮膚温度に有意な降下を示したことで裏付けることができる。

しかし徐脈現象は今だに不明な部分が多く、高圧環境下の徐脈傾向の解析は十分慎重に行う必要がある。

終夜睡眠の呼吸数と心拍数に高い相関がみられたことは、呼吸循環系統が高圧ヘリウム-酸素混合ガス環境下でも、相互に密接な関与を保持していることを示すものと解釈される。

総睡眠時間段階(Ⅲ+Ⅳ)と起床時のフリッカー値に高い相関が得られたことは、フリッカー値の低下が中枢系の疲労を示すことから、睡眠段階(Ⅲ+Ⅳ)が減少することは中枢系の疲労を高める大きな要素^{19, 20)}と思われる。

総REM睡眠時間と起床時の尿中クレアチニン、 Na^+ 、 Cl^- などとの高い相関は、新知見であり、相互の関連性は今後の研究課題としたい。

相関分析では呼吸数、心拍数などの統計処理を各睡眠段階に関係なく、終夜睡眠相の中で睡眠開始から起床までを1分評定で算出したものを単純平均した数値を用いた。今後は各睡眠段階に区分した数値を算出し、他の生理機能の計測値、また環境制御の物理的パラメーターとの関連性について検討を加えたい。

以上、高圧環境下の終夜睡眠相で、REM睡眠とNREM睡眠に変動がみられたことは、M. JO-VETらがとなえる脳内のモノアミン(Monoamine)性ニューロン(Neuron)の関与の中で、特にNREM睡眠時間の減少に関与する脳内のセロトニン(Serotonin)、REM睡眠の発現に必要なカテコラミン(Catecholamine)が11ATAという高圧環境内で、圧力と高分圧ヘリウムの影響で変動を生じたのではないかと推察される。

しかし睡眠-覚醒の周期性は脳内のドーパミン(Dopamine)系、ノルアドレナリン(Noradrenaline)系およびコリン(Choline)作動系などが相互に作用し合っているため、今後の研究にまたねばならないであろう。

一般的に生体の周期性の変動を解くには、種々

の問題があり、F. HALBERGら^{4, 5)}、およびA. REINBERGらは周期性を左右する因子として、明暗の比率、ストレス、低酸素、低温などの条件を与えると周期性は停止し、または脱同調を生じ、明暗、温度、酸素などの条件を実験前のレベルまでもどせば、周期性も再開し、または同調すると述べている。

本実験では、常圧から高圧環境への適応と高圧環境から減圧期間を経て常圧へという、二つの高圧適応と常圧適応が、睡眠と覚醒のサーカディアンリズムの分析から示された。

しかし今後、サーカディアンリズムの指標には神経系、内分泌系および循環系の計測値の波形分析(周期、位相、振幅)を行い、多角的な成績を積み重ねると同時に、実験動物を用いて高圧暴露の実験実施による電気生理学および生化学的な裏付けを行なう必要がある。

5. 結 論

4名のテストダイバーを1ATAの空気環境から11ATAの高圧ヘリウム-酸素混合ガス環境に加減圧を含めて17日間滞在させ、その間、サーカディアンリズムの指標を終夜睡眠状態のポリグラフで記録し、その睡眠相、心拍数、呼吸数などの検討を行い、生体は11ATAの高圧暴露に適応していることがわかった。

その結果、次のような結論を得た。

- (1) 心拍数は加圧直後から徐脈傾向を示し、4名中2名の被検者は事後観察期まで徐脈傾向を示した。
- (2) 呼吸数は加圧直後から呼吸緩徐傾向を認め、減圧終了と同時に事前観察期の対照値に復帰した。
- (3) 終夜睡眠相の変動が加圧直後、2日間、全被検者に共通して出現した。
- (4) 実験期間を通じて総REM睡眠時間の変動はみられなかった。
ただし加圧後、2日間を除く。
- (5) REM睡眠期には心拍数が頻脈傾向を示し、呼吸数は頻呼吸傾向がみられるが、常圧と比較して高圧ヘリウム-酸素混合ガス環境下ではいずれも10%の増加がみられた。
- (6) 終夜睡眠のポリグラフ的観察と自覚症状調査の間に有意な相関関係が見出された。
- (7) 総REM睡眠時間と起床時の尿中クレアチ

ニン, Na^+ , Cl^- との間に有意な相関関係が
みられた。

R E F E R E N C E S

- CORRIOL, J., J.J. ROHNER, and J. FONDARAI. (1966)
Origin et signification de la bradycardie chez le
plongeur en apnée. Ext. Pathol. Biol. 14 : 1185-1191.
- DEMENT, W. and KLEITMAN, N. (1957). Cyclic variations in EEG
during sleep and their relation to eye movements.
Body Motility and dreaming. EEG. Clin. Neurophysiology,
No. 9, 673-690.
- FRUCTUS, X. and CONTI, V. (1971). La plongée profonde opération-
nelle, JANUS II. Gazette Médicale de France 78, 4089-4094.
- HALBERG, F., TONG, Y. L. and JOHNSON, E. A. (1967).
Circadian system phase-An aspect of temporal morphology;
Procedures and illustrative examples. In : The cellular
Aspect of Biorhythm, H. V. Mayersbach (ed), pp 20-48,
Springer, Berlin.
- HALBERG, F. (1969) Chronobiology. Ann. Rev. Physiol. 31, 672-725.
- HAMILTON, R. W., Jr., J. B. MCINNIS, A. D. NOBLE and H. R. SCHREINER. (1966).
Saturation diving to 650 feet. Technical Memorandum B-411,
Ocean Systems, Inc., Tonawanda, New-York.
- HESSER, C. M., L. FAGRAEUS, and D. LINNARSSON. (1968)
Cardio-Respiratory Responses to Exercise in Hyperbaric
Environment. Repts. Lab. Aviation Naval Med. Karol. Inst.,
Stockholm.
- HORI, T., MIYATA, A. and NIIMI, Y. (1970). Skin potential activities
and their regional differences during normal sleep in humans.
Japanese Journal of Physiology, 20 : 657-671.
- JOVET, M. and PUJOL, J. F. (1972). Role des monoamines dans la
regulation de la vigilance. "Etude Neurophysiologique
et biochimique". pp. 115-138.
Reunion Neurologique Internationale des Mediateurs chi-
miques, Ed. Masson and Cie, Paris.
- RECHTSCHAFFEN, A. and KALES, A., (Eds) (1968).
A manual of standardized terminology, Techniques and scor-
ing system for sleep stage of human subjects.
Washington D.C. : U.S. Government Printing Office.
- REINBERG, A. (1974)
Fatigue et rythmes biologiques. In "Stress, Fatigue,
Depression". Ed. P. BUGARD., DOIN. Paris. I, pp. 41-54.

- ROSTAIN, J.C. and LYAGOUBI, S. (1971). Etude électroencéphalographique de la veille et du sommeil sous hyperbarie prolongée en atmosphère hélium-oxygène. Opération JANUS II. Ref. E.E.G. Neurophysiol., 1. 2, 239-241.
- ROSTAIN, J.C., REGESTA, G. and NAQUET, R. (1973). Study of the organization of sleep of divers at 300 meters depth in oxy-helium atmosphere. Electroencephalography and clinical Neurophysiology 34-788.
- ROSTAIN, J.C. and NAQUET, R. (1974). Le syndrome nerveux des hautes pressions : Caractéristiques et évolution en fonction de divers modes de compression. Rev. E.E.G. Neurophysiol. 4 : 107-124.
- SALZANO, J., D.C. RAUSCH, and H.A. SALTZMAN. (1970). Cardiorespiratory response to exercise at a simulated sea water depth of 1,000 feet. J. Appl. Physiol. 28 : 34-41.
- SEKI, K. (1972). La fatigue en situation de plongée profonde à l'héliox "aspects subjectifs". Diplôme d'études supérieures de Sciences Naturelles. Université de Provence. pp. 1-66.
- SEKI, K. (1976). Etude d'ergonomie hyperbare, "Fatigue subjective et dégradations sensorielles en plongée fictive à saturation (31, 40, 51 et 62 ATA ; binaire ou ternaire)". Thèse Science, Université d'Aix-Marseille-I, 317p.
- SEKI, K. and HUGON, M. (1974). Etude de la fréquence critique de papillotement "FLICKER" en situation de Plongée hyperbare à l'héliox. Ergonomie hyperbare. Rapport n° 3. Université de Provence. pp. 1-24.
- SEKI, K. and HUGON, M. (1975). Fréquence critique de papillotement (CFF) chez l'homme en hyperbarie à l'hélium-oxygène (31 ATA). Soc. Franç. Méd. Sub. Hyp. Réunion scientifique du 25 octobre 1974. Lyon Méditerranée médical. XI, N° 9, pp. 1107-1120.
- SEKI, K. and HUGON, M. (1976). Critical flicker frequency (CFF) and subjective fatigue during an oxy-helium saturation dive at 62 ATA. Undersea Biomedical Research. Vol. 3, No. 3, pp. 235-247.
- SEKI, K. and HUGON, M. (1977) a. Acuité temporelle somesthésique chez l'homme en hyperbarie à l'héliox (40,5 ATA). Soc. Franç. Méd. Sub. Hyp. Réunion scientifique du 21 mai 1975. Lyon Méditerranée médical. XIII, N° 1, 59-68.
- SEKI, K. and HUGON, M. (1977) b. Fatigue subjective et dégradation de performance en environnement hyperbare à saturation (Homme-Héliox-40,0 ATA). Ergonomics. Vol. 20, N° 2. 103-119.

SERBANESCOU, T., FRUCTUS, P. and NAQUET, R. (1968).
Etude électroencéphalographique du sommeil sous hyper-
bare prolongée (opération Ludion II). Rev. Neurol.,
119, 305-306.