

高圧He-O₂環境下におけるサルの睡眠相 からみたN₂ガス添加の影響について

中野 正美^{*1} 他谷 康^{*1} 楢木 暢雄^{*1}
水嶋 康男^{*1} 設楽 文朗^{*1} 竹内 久美^{*1}
毛利 元彦^{*1}

ヘリウム酸素を呼吸ガスとした潜水では、深度が深くなるにつれて高圧神経症候群が発現することが知られている。またその症候群の症状軽減に窒素ガスを添加する方法が試みられている。しかしながら、窒素ガスの添加量及び添加方法についてはまだ十分な検討がなされていない。

本実験ではサルを51 ATA, He-O₂ と N₂を40%, 20%, 10%及び5%添加したHe-N₂-O₂の5種類の環境にそれぞれ暴露し、窒素ガス添加の有効性及びに添加量、添加方法について睡眠相を指標として検討を行った。その結果、睡眠・覚醒の日内リズム、実験前後の体重変化及び行動面からの観察からみて51 ATAの環境下では高圧神経症候群を抑制するためにはN₂の10%添加がより有効であることが示唆された。

キーワード：飽和潜水，高圧神経症候群，ヘリオックス，トライミックス，睡眠，サル，窒素

Effect of Hyperbaric He-O₂ Environment with N₂ on the Sleep Profile in Rhesus Monkeys.

Masami NAKANO^{*2} Yasushi TAYA^{*2}
Nobuo NARAKI^{*2} Yasuo MIZUSHIMA^{*2}
Fumiro SHIDARA^{*2} Hisayoshi TAKEUCHI^{*2}
Motohiko MOHRI^{*2}

Deep diving in a hyperbaric helium-oxygen environment induces physiologic symptoms known as the high pressure nervous syndrome (HPNS) in both humans and animals

Since then, various authors have tried to discover the causes of the HPNS and

*1 潜水技術部

*2 Diving Science and Technology Department

to reduce its intensity. Using gases that have "narcotic" properties, such as nitrogen, has been attempted to reduce the signs of HPNS. The objective of this study is to find the best combinations between compression methods and the composition of the mixture. This study was designed to clarify the influence of various trimix gas mixtures (5, 10, 20 and 40% of N_2 in $He-O_2$) on the sleep profile, heart rate, respiratory rate and behavior. Ten adult male rhesus monkeys with chronic implanted electrodes were used. Circadian rhythm of sleep and awake kept in the experiment of 51ATA $He-N_2-O_2$ (10% of N_2) only. Furthermore, in this experiment, the body weight was not changed. These results show that the addition of 10% nitrogen in $He-O_2$ reduces certain clinical symptoms of HPNS.

Key word : saturation diving, HPNS, Heliox, Trimix, sleep, monkey, nitrogen

1 はじめに

潜水呼吸ガスとして圧縮空気を使用した場合、30m深度から窒素ガスによる麻酔作用、すなわち“窒素酔い”の発現が見られ、その使用限界は深度45mまでと考えられている。このような潜水深度の制約に対して、1950年代の飽和潜水の理論的実証並びに1960年代の初頭から窒素の変わりにヘリウム・酸素の混合ガス潜水が開発され、潜水深度も数百メートルと飛躍的に拡大された。しかしながら、このようなヘリウム・酸素の呼吸ガスでも、高圧神経症候群 (High Pressure Nervous Syndrome: HPNS) と呼ばれる悪心・めまい、振戦、嘔吐、脳波活動の低下、睡眠障害、簡単な算術計算や手腕作業能力の低下等の症状が発現することが報告されている^{1) - 8)}。このようなHPNSの抑制並びに予防方法については、1970年以降ヒトを初めマウス⁹⁾、ラット^{10) 11)}、ネコ¹²⁾、ヒヒ等^{13) 14) 15)}で研究が進められ、1981年に Bennett et al¹⁶⁾はHPNSの発現を抑制する手段として10%の N_2 を $He-O_2$ に加えた三種混合ガスを用いて、686m深度相当圧力環境下に3名のダイバーを暴露、居住できる可能性を示唆した。しかし、この実験では0mから650mまで4.5日、650mから686mまでの加圧に12時間を要し、また、ダイバーの1名には N_2 ガスの麻酔作用による“窒素酔い”が認められ、最適な窒素ガスの添加量並びに加圧方法について検討課題が示唆された。一方、当センターが実施してきた飽和潜水実験 (シードラゴン計画) では1978年から1984年までに計4回、1985年か

ら1990年まで実施された実海域実験 (ニューシートピア計画) では計6回、延べ48名のダイバーが、 $He-O_2$ を呼吸ガスとした、深度300mまでの潜水を経験しており、顕著なHPNSの症状並びに兆候は認められなかった。このことは、これまで当センターが実施してきた飽和潜水実験時の加圧速度が25m/hと、欧米での180m/h~300m/hの加圧速度に比べてかなり遅いためと考えられ、HPNSの発現に加圧速度が深く関与している事が示唆された。しかし、これまで当センターが実施してきた300mの飽和潜水時のダイバーの自覚症状の報告 (他谷等, 1986)¹⁷⁾や、設楽等 (1986)¹⁸⁾の疲労調査, Yamasaki et al (1986)¹⁹⁾の姿勢振戦並びに企図振戦の報告から、軽度ではあるが、悪心や身体的疲労、筋肉や関節の痛み、振戦の振幅の増大も認められており、効率的な飽和潜水作業の開発においては、これまでの加圧手法の検討並びに窒素ガスの有効な利用方法について更に検討する必要性が示唆された。

以上のことから、本実験ではサルを500m深度相当圧力 (51ATA) の $He-O_2$ 及び N_2 を40%, 20%, 10%, 5%添加した $He-N_2-O_2$ の三種混合ガス環境に暴露し、加圧速度を含む加圧手法、最適な N_2 ガスの添加濃度、添加手法について検討した。なお、本実験では総合的な高圧環境への適応現象を把握する目的から生体のサーカディアンリズムに着目し、睡眠・覚醒のリズムを計測し指標とした。

2 実験方法

5種類の実験の加減圧パターンを図1に示した。各々の実験はまず大気圧の空気環境下で2日間の事前観察を行った後、加圧速度120m/hで500m深度相当圧力(51 ATA)まで加圧し(4時間10分)、500m深度相当圧力(51 ATA)の高压環境下に3日間保圧した。その後、減圧に3日間、さらに事後観察に1日間の延べ10日間の実験を実施した。加圧方法及びN₂ガスの添加方法は、He-O₂では0mから500m深度相当圧までHeで加圧し、N₂40%の実験では0mから300m深度相当圧までHeで、300m深度相当圧から500m深度相当圧までをN₂で加圧した。N₂20%実験では0mから400m深度相当圧までHeで、400m深度相当圧から500m深度相当圧までをN₂で加圧、N₂10%実験では0mから450m深度相当圧までHeで、450m深度相当圧から500m深度相当圧までをN₂で加圧、N₂5%の実験では0mから475m深度相当圧までHeで、475m深度相当圧から500m深度相当圧までをN₂で加圧する方法とした。なお各実験のダイブプロファイル及び環境パラメータは図2～図6に示した。

実験期間中は給餌及び給水のためにケージ移動を毎日10時から12時の間に実施し、給餌量は1頭あたり固形飼料100gとリンゴ1個またはバナナ1本で約430kcalであった。また照明条件は飼育室と同様に12L:12Dとし、朝の07:00～19:00は点灯、19:00～翌朝07:00までは消灯とした。環境条件は保圧中、減圧中ともに図2～6の記載のように制御し、500m深度相当圧での環境温度は33℃±1℃に制御し、酸素分圧(PO₂)は実験中0.21bar±0.02barにコントロールした。

使用したサルは、推定年齢7才～9才、体重は6kg～9kgの健康な雄のアカゲザル(Mcaca mulatta)で当センターの飼育室にて5年間飼育した6頭を用いた。これらのサルには実験開始1ヶ月前に、脳波、眼球運動図、心電図、筋電図、呼吸数、振戦等の生体情報を記録するための各種電極を、ケタラール10(三共株式会社製)の麻酔下においてRostain et al (1980)²⁰⁾の方法に従って所定の部位に固定した。

各種生体情報の計測並びに解析は図7に示すようにチェンバー内のゲージに収容されたサルの頭

部からスリップリング(米国エアークラフト社製)及びコネクターボックスを介してチェンバー外に設置した20ch脳波計(三栄測器社製)並びに21chの磁気記録計(SONY社製)等に導出し実験期間を通して連続記録した。得られた睡眠ポリグラフの解析はBert et al (1978)²¹⁾の方法に準じて、睡眠段階を3段階(AWAKE:覚醒, SWS:徐波睡眠, PS:逆説睡眠)とし、視察評価によって解析を行った。なお視察評価の単位は1分とした。

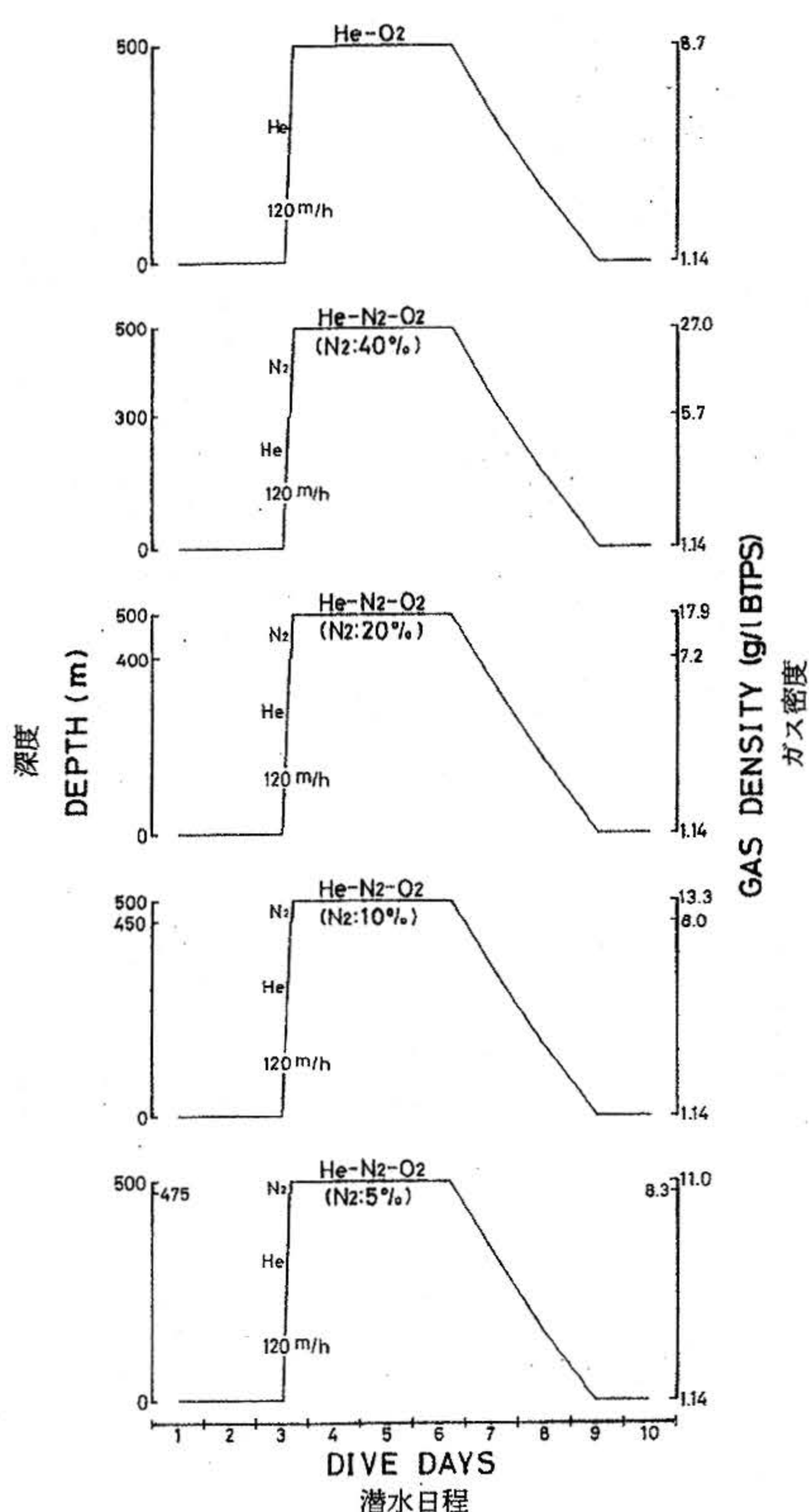


図1 加減圧パターン

Fig. 1 Dive profile

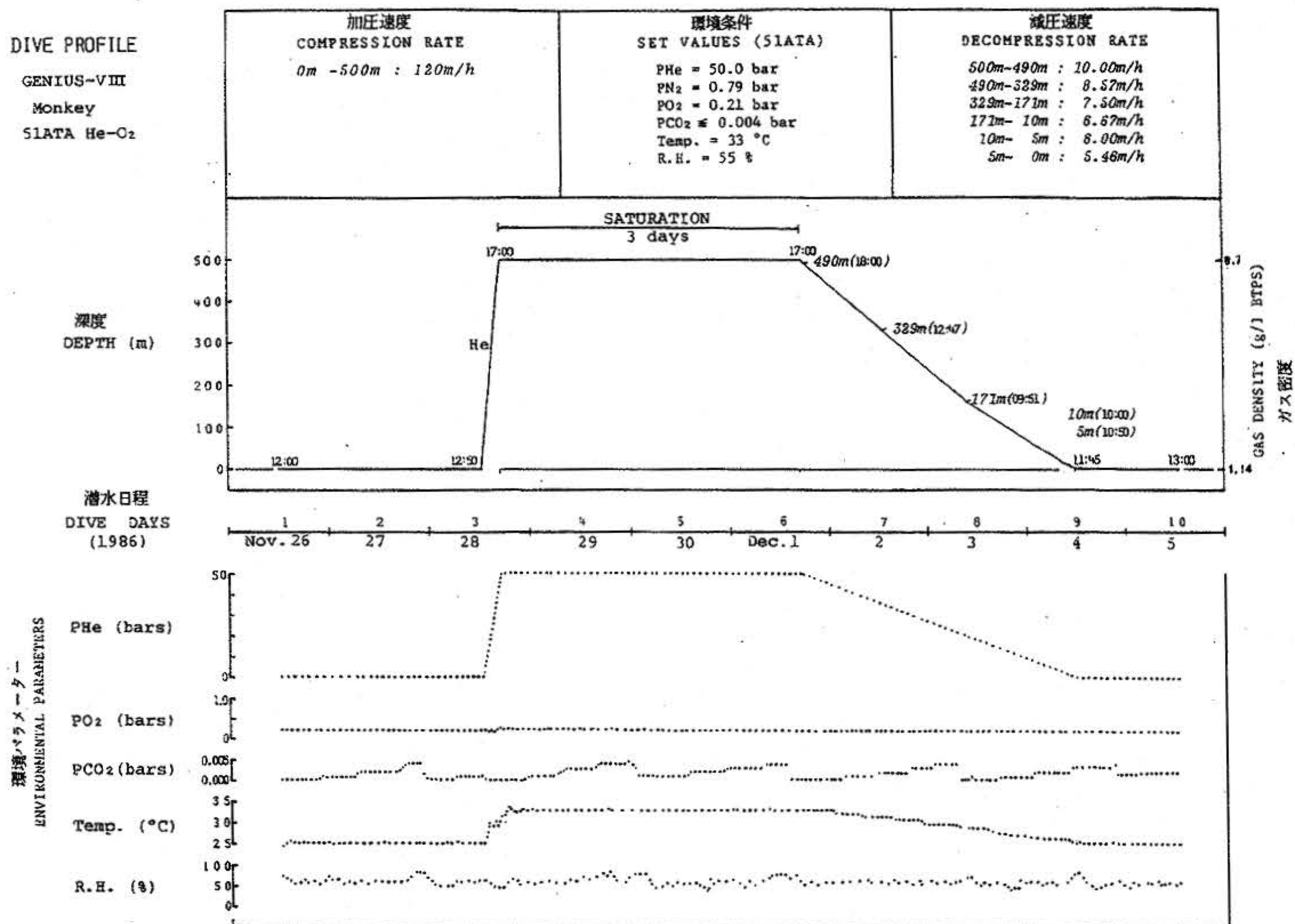


図2 51ATA, He-O₂の加減圧パターンと環境パラメータ

Fig. 2 Dive profile and environmental parameters (51ATA, He-O₂)

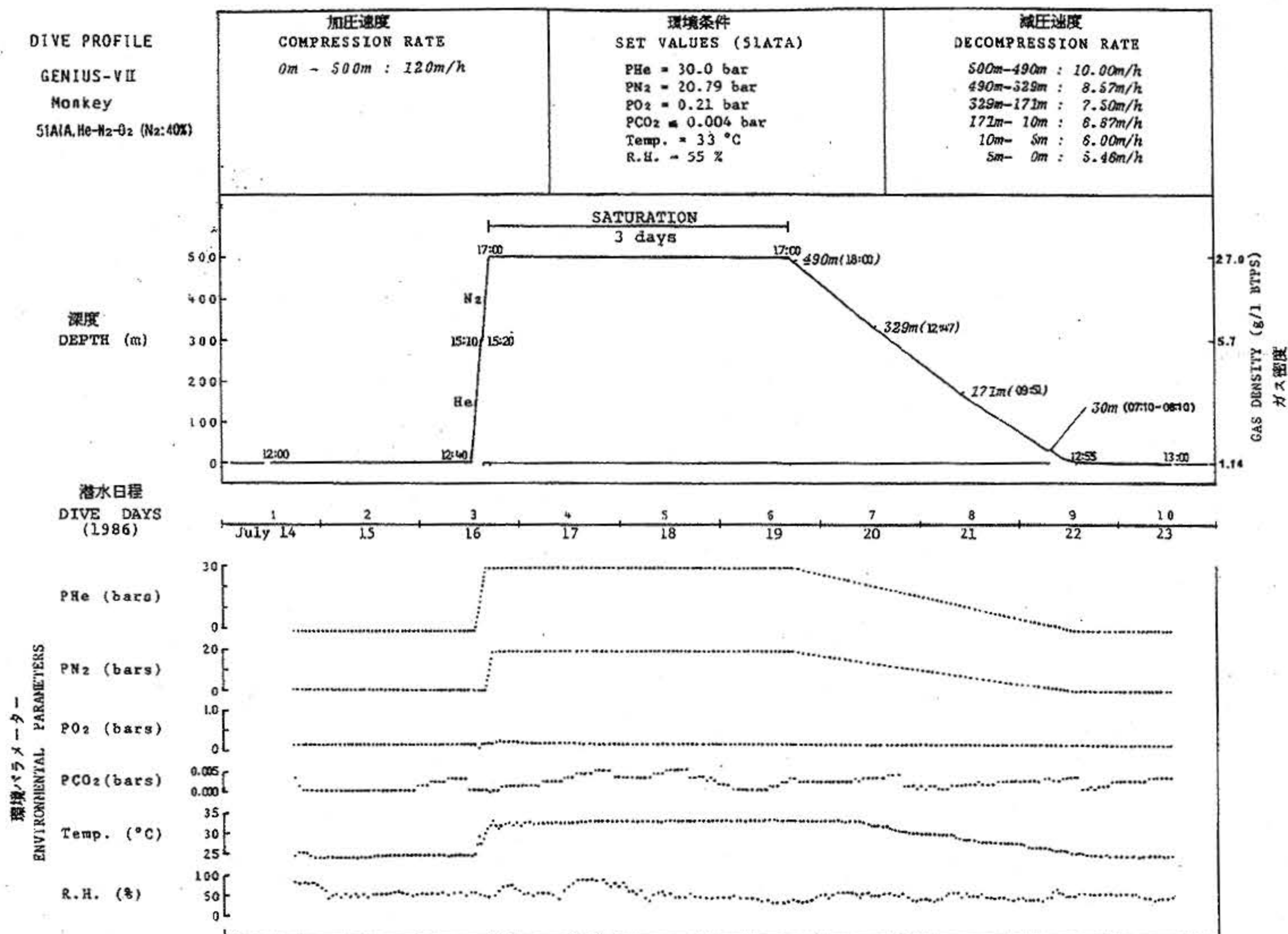


図3 51ATA, He-N₂-O₂ (N₂:40%)の加減圧パターンと環境パラメータ

Fig. 3 Dive profile and environmental parameters (51ATA, He-N₂-O₂, N₂:40%)

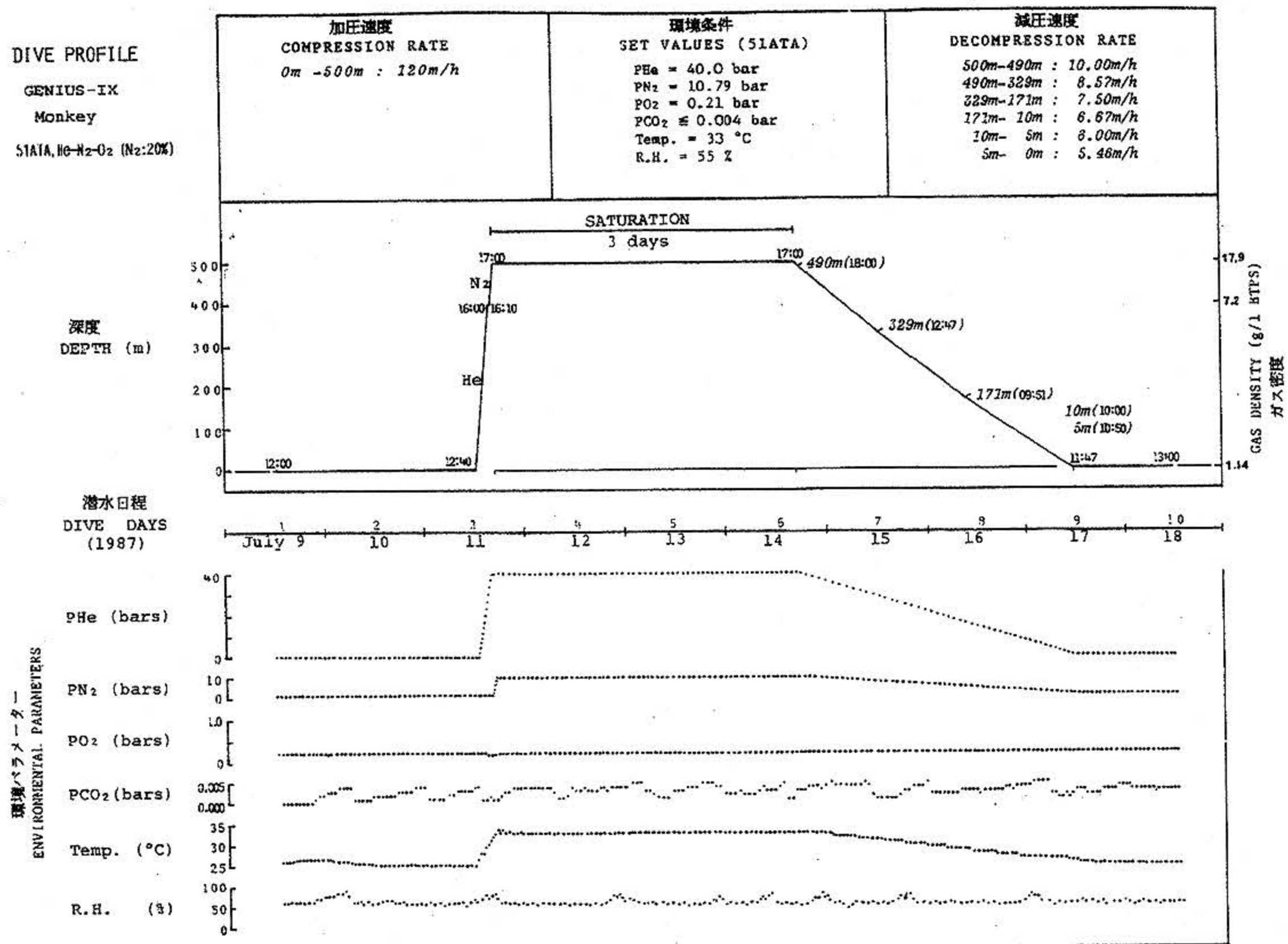


図4 51 ATA, He-N₂-O₂ (N₂:20%) の加減圧パターンと環境パラメータ
Fig. 4 Dive profile and environmental parameters (51ATA, He-N₂-O₂, N₂:20%)

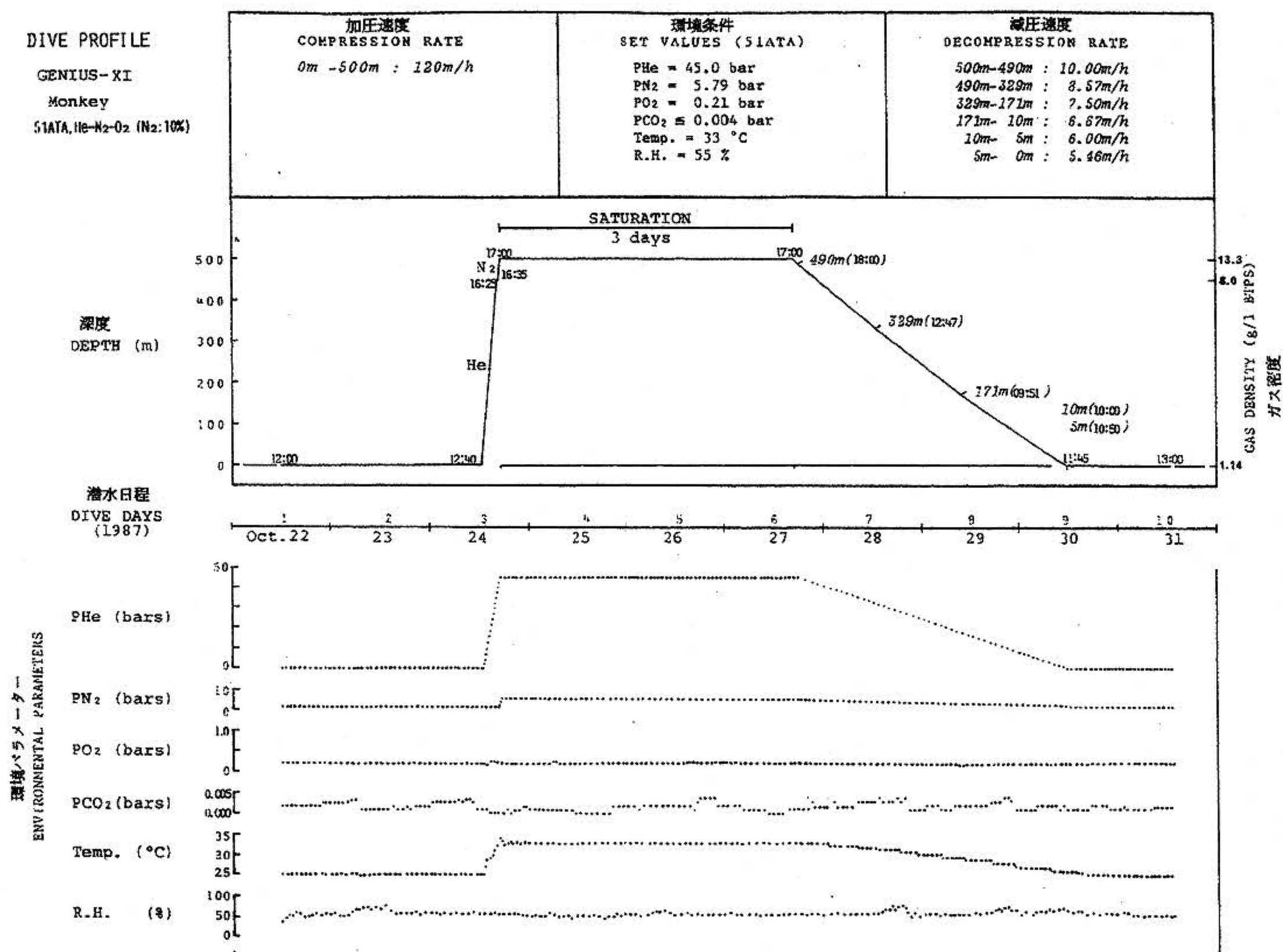


図5 51 ATA, He-N₂-O₂ (N₂:10%) の加減圧パターンと環境パラメータ
Fig. 5 Dive profile and environmental parameters (51 ATA, He-N₂-O₂, N₂:10%)

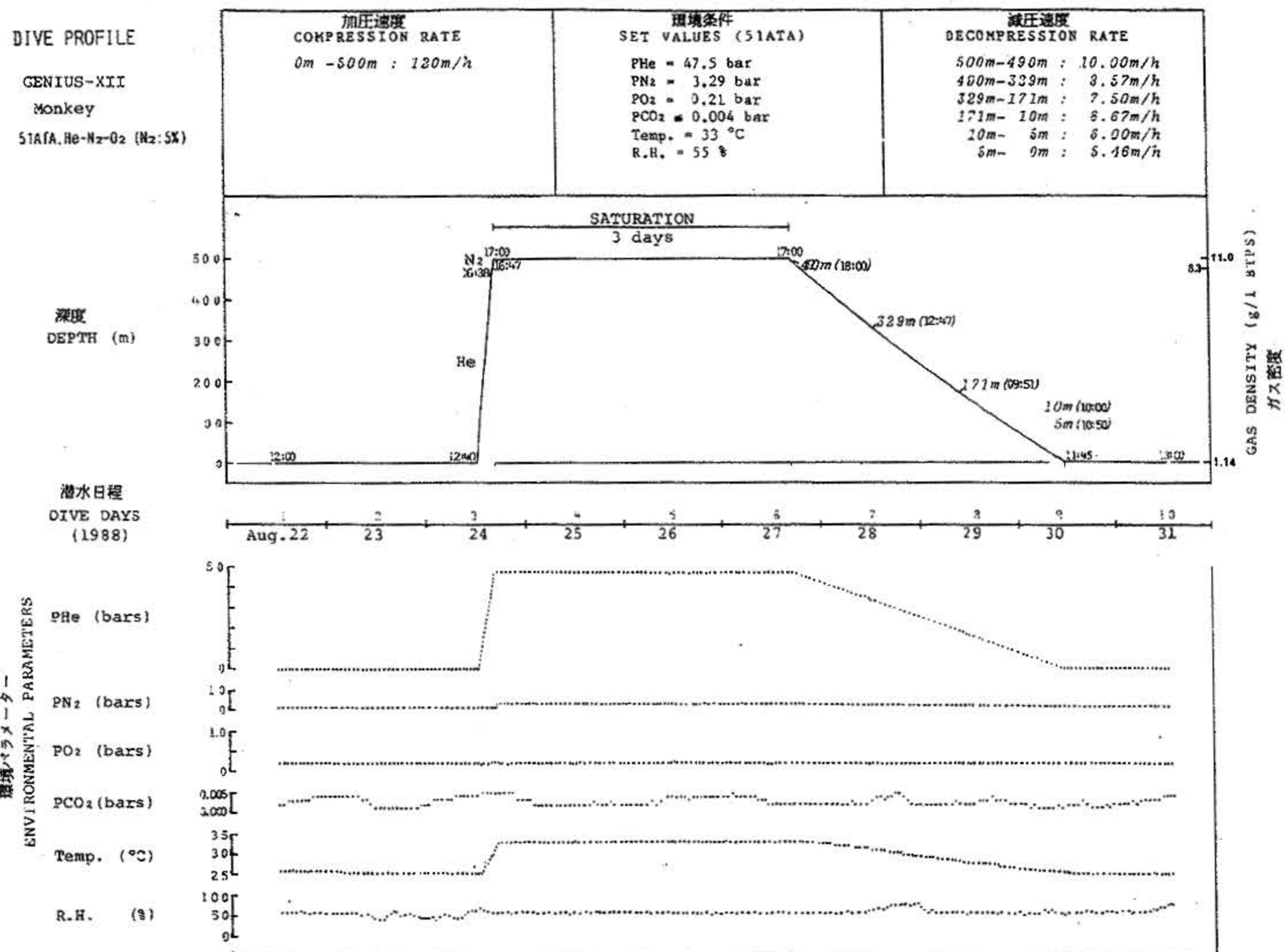


図6 51ATA, He-N₂-O₂ (N₂:5%) の加減圧パターンと環境パラメータ

Fig. 6 Dive profile and environmental parameters (51ATA, He-N₂-O₂, N₂:10%)

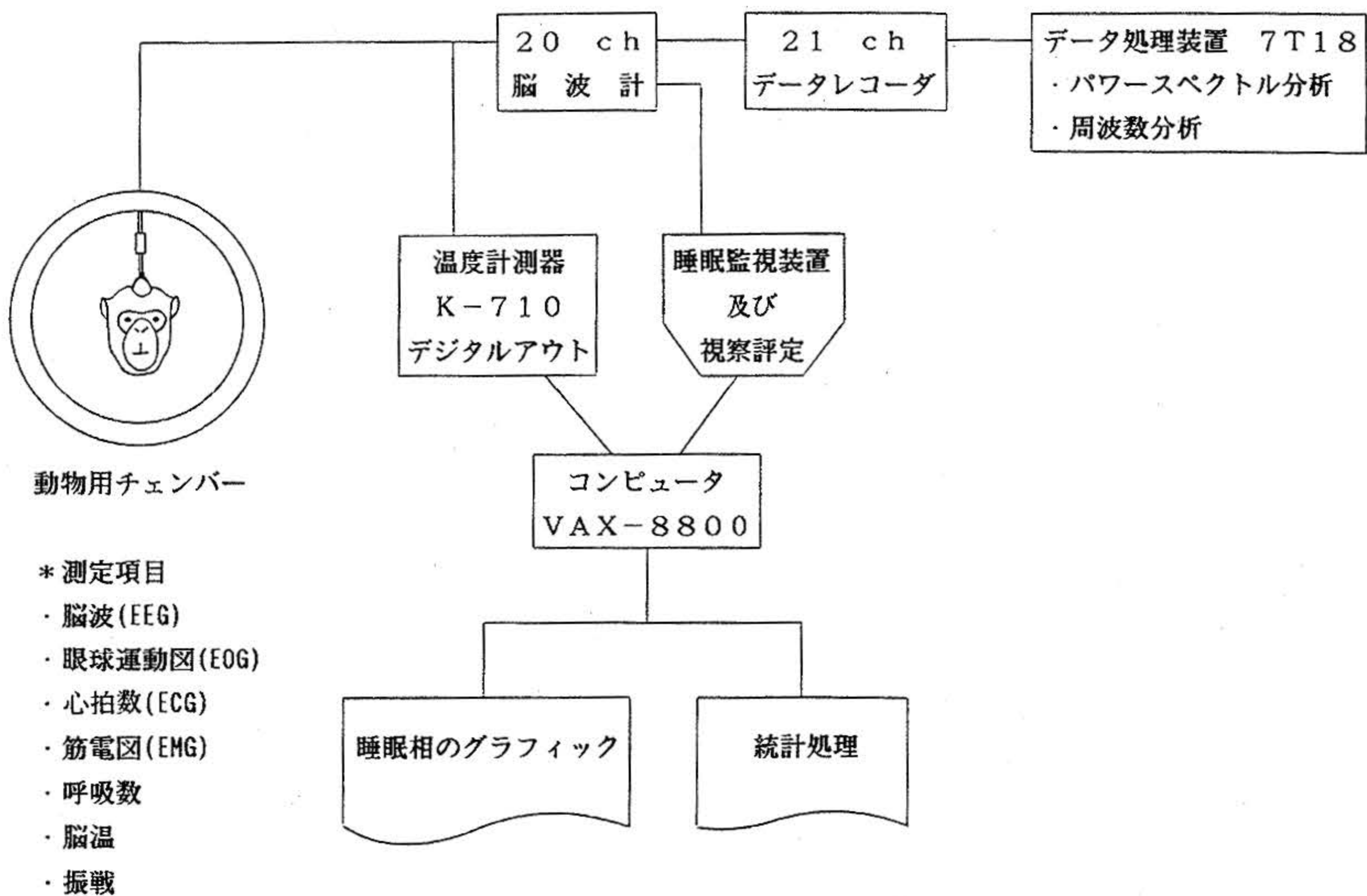


図7 サルの生体情報の計測, 記録及び処理方法

Fig. 7 Diagram of recording and processing system of physiological data.

3 結果及び考察

実験ごとの2頭のサルの睡眠相の出現割合を図8～図12に示した。図の横軸は時間を示し、07:00～19:00 明期（点灯）、19:00～07:00 暗期（消灯）である。縦軸は睡眠相（AWAKE, SWS, PS）の出現割合を示し、各々の睡眠相の出現時間は4時間を100%として算出した。図からも明らかに、各実験とも事前観察期間には19:00～07:00の暗期にSWSの増加、07:00～19:00明期にはAWAKEを示し正常な睡眠・覚醒のパターンが認められた。この事は、Crowley et al (1972)²²⁾ のアカゲザルでの報告に見られるように、サルはヒトと同じく昼行性で単相性の睡眠をとり、昼間は活動し夜は眠ると言う報告と一致している。従って、本実験でのチェンバー内の大気圧空気環境では、通常の睡眠・覚醒のパターンが維持されており、チェンバー内が特殊な環境でないことが示唆された。しかし、図8に見られるようにHe-O₂を呼吸混合ガスとした実験では、2頭のサル共に51 ATA への暴露後からは明期にもSWSの

出現割合が増加し、減圧期から事後観察期にかけてその割合はさらに増加し、減圧後期には PS の出現が認められた。また、この傾向は N_2 を 40% 並びに 20% 添加した $He-N_2-O_2$ の実験でも顕著であり (図 9, 図 10 参照), 圧力並びに呼吸ガス密度等の影響や加圧によるストレスといった要因が関与したものと推察された。しかし、図 11 及び 12 に示した N_2 10% 並びに N_2 5% の添加実験群では、保圧期の後期から減圧後にかけて明期に若干の SWS が認められたが、前の 3 実験に比較して僅かであり、概ね正常な睡眠・覚醒のリズムが維持された。以上の事から、 N_2 10% 並びに N_2 5% の添加実験群は N_2 の添加しなかった $He-O_2$ ならびに N_2 40% 並びに 20% 添加した実験条件に比べて生体へのストレスは少なかったものと推察された。また、1 日 (24 時間) における SWS と PS の量的変化を事前観察期と比較すると、表 1 に示すように $He-O_2$ と N_2 5% の実験群は、51 ATA での保圧期間中では減少 (↓印) を示した。しかし、 N_2 の 40% 並びに 20% 添加群では個体差は認めら

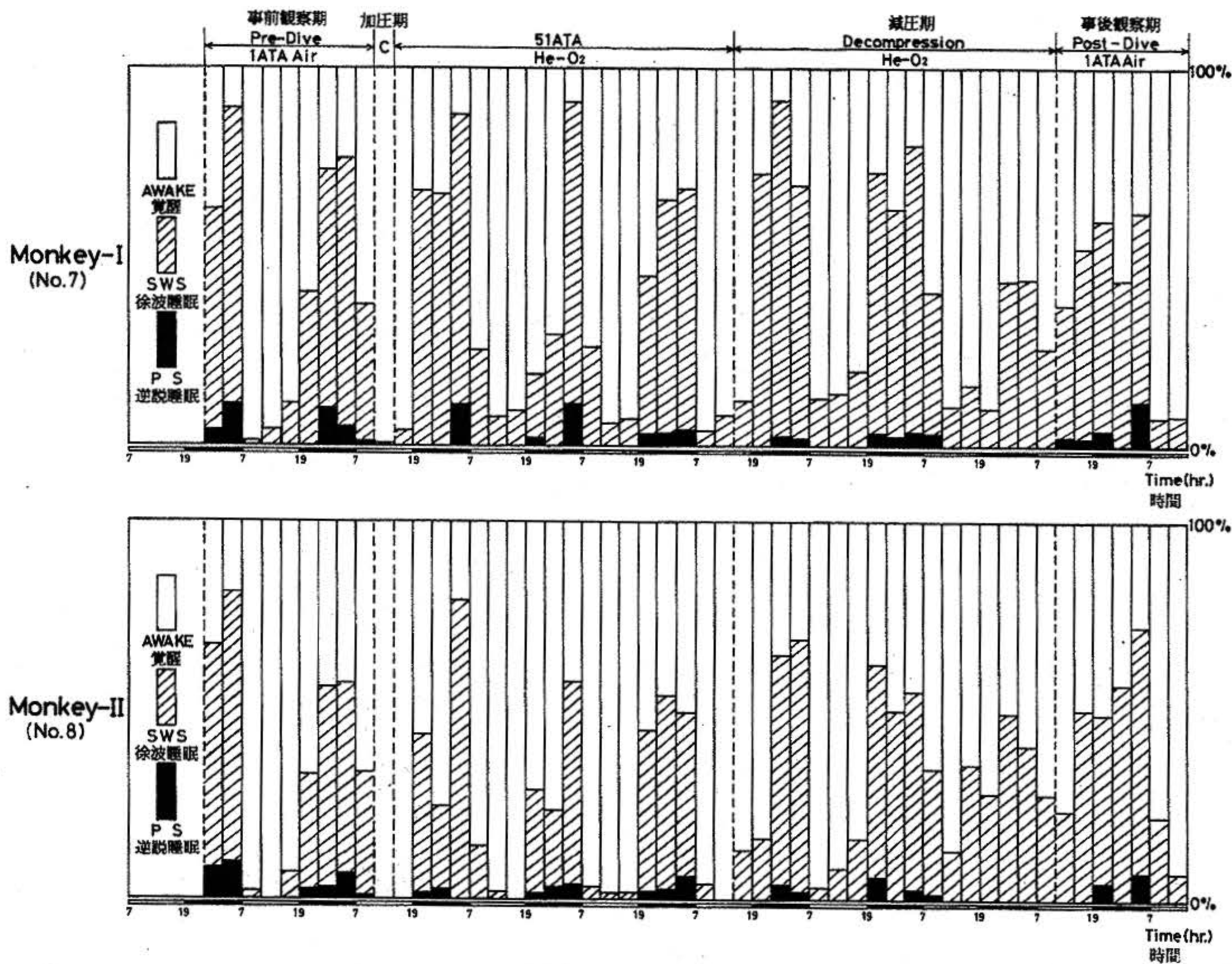


図8 Monkey-I & II の実験期間中4時間ごとの睡眠相の出現割合 (He-O₂)
Fig. 8 Ratio of each sleep stage in Monkey I & II (51ATA, He-O₂)

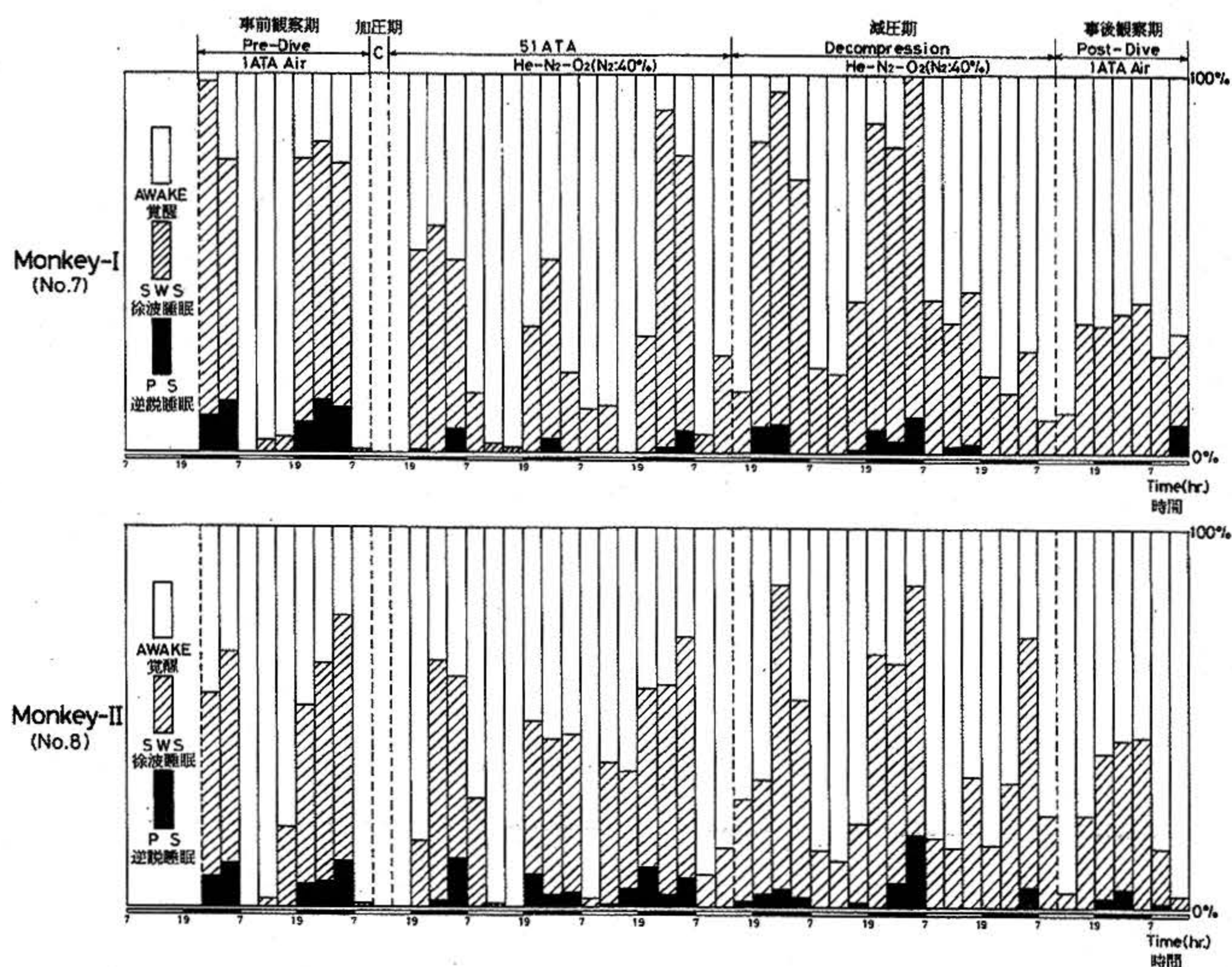


図9 Monkey-I&IIの実験期間中4時間ごとの睡眠相の出現割合 (N₂:40%)
 Fig. 9 Ratio of each sleep stage in Monkey I & II (51ATA, 40% N₂ in He-O₂)

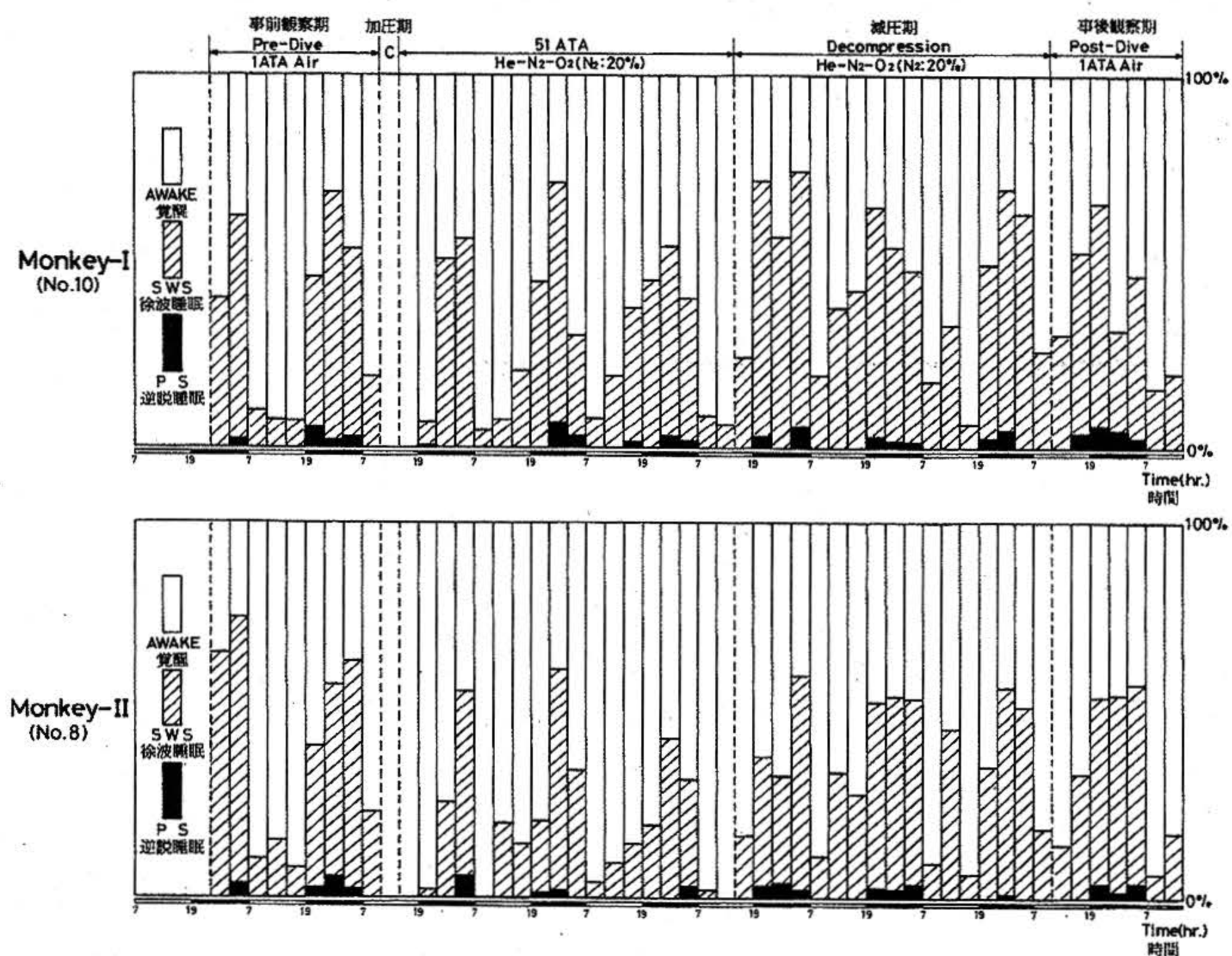


図10 Monkey-I&IIの実験期間中4時間ごとの睡眠相の出現割合 (N₂:20%)
 Fig. 10 Ratio of each sleep stage in Monkey I & II (51ATA, 20% N₂ in He-O₂)

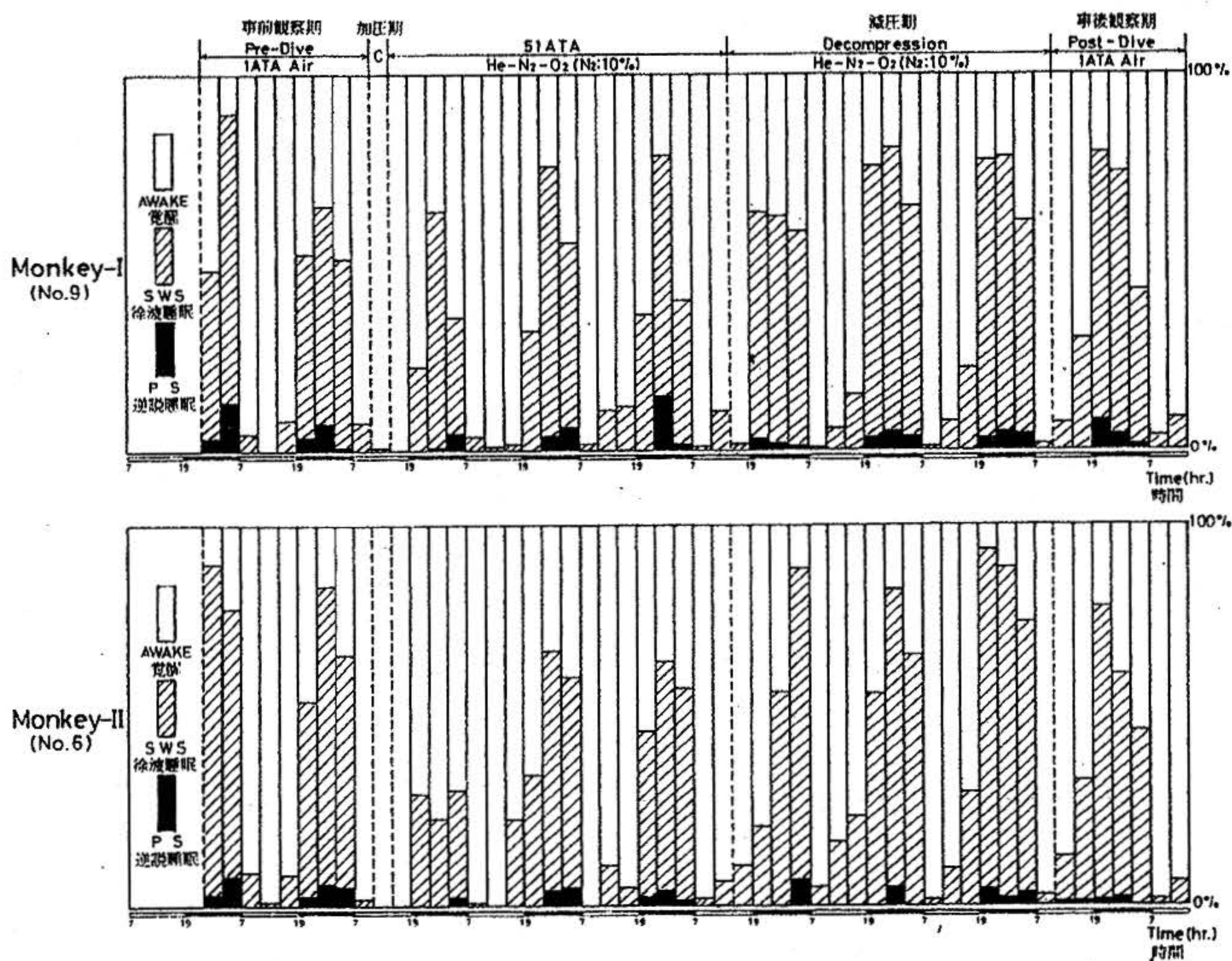


図11 Monkey- I & II の実験期間中 4 時間ごとの睡眠相の出現割合 (N₂:10%)
 Fig. 11 Ratio of each sleep stage in Monkey I & II (51ATA, 10% N₂ in He-O₂)

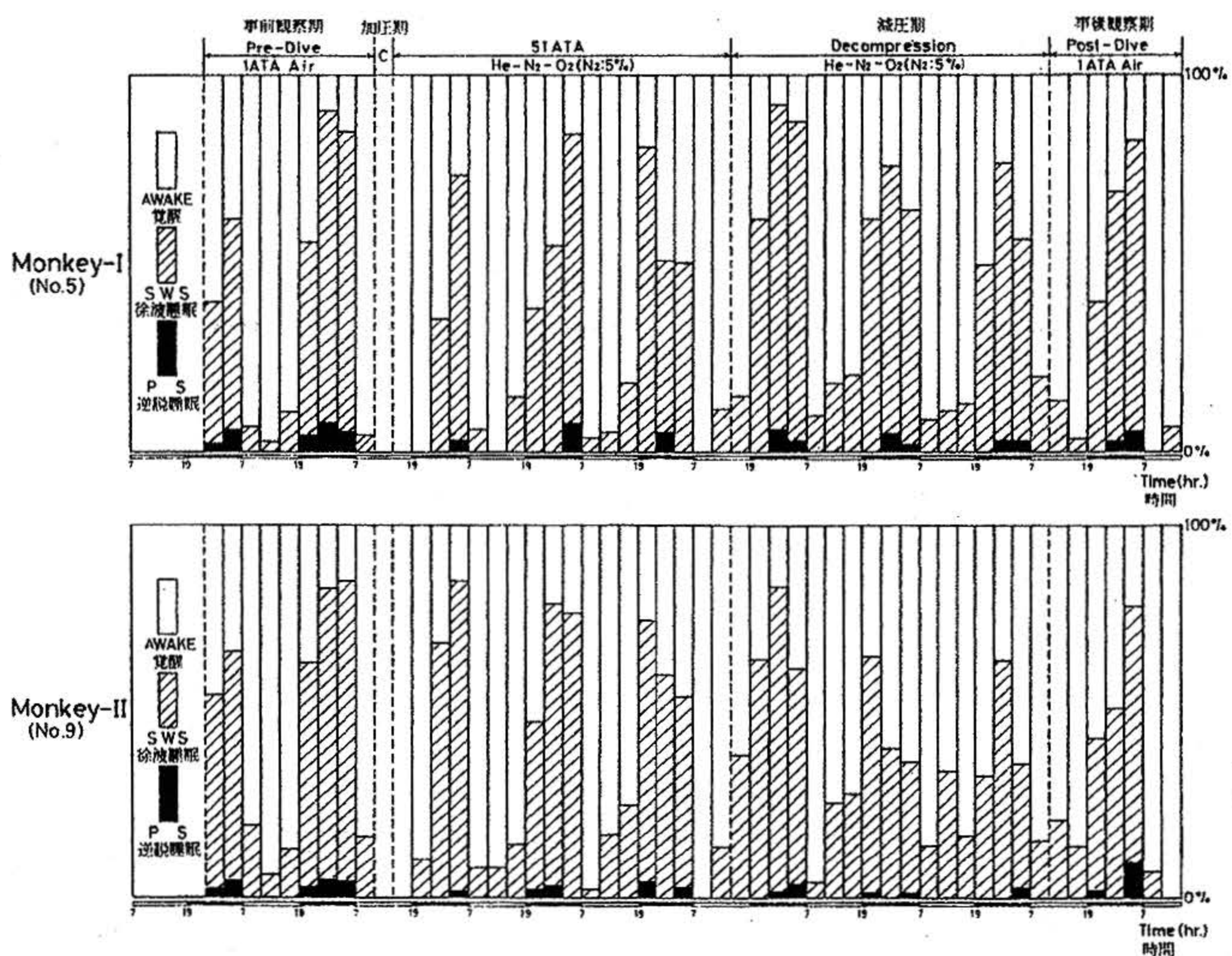


図12 Monkey- I & II の実験期間中 4 時間ごとの睡眠相の出現割合 (N₂:5%)
 Fig. 12 Ratio of each sleep stage in Monkey I & II (51ATA, 5%N₂ in He-O₂)

表1 各実験における事前観察期に対するSWS, PSの量的変化

Table 1 Change of each sleep during the 51ATA, Decompression and Post dive period.

			51 A T A			減圧期			事後観察期
			第1日目	第2日目	第3日目	第1日目	第2日目	第3日目	第1日目
He-O ₂	Monkey-I (No.7)	S W S	→	↓	↓	↑	↑	↓	→
		P S	↓	↓	↓	↓	↓	↓	→
	II (No.8)	S W S	↓	↓	↓	↓	↑	→	↑
		P S	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :40%)	Monkey-I (No.7)	S W S	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓
		P S	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	II (No.8)	S W S	↓	↓	→	↑	↑	↓	↓
		P S	↓	→	→	↓	↑	↓	↓
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :20%)	Monkey-I (No.10)	S W S	↓	→	↓	↑	↑	↑	↑
		P S	↓	→	↓	↓	↓	↓	→
	II (No.8)	S W S	↓	↓	↓	↑	↑	↓	→
		P S	↓	↓	↓	→	→	↓	→
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :10%)	Monkey-I (No.9)	S W S	↓	→	↓	→	↑	↑	↑
		P S	↓	→	↑	↓	→	↑	→
	II (No.6)	S W S	↓	↓	↓	→	↑	↑	↑
		P S	↓	→	→	↓	↓	↑	↓
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :5%)	Monkey-I (No.5)	S W S	↓	↓	↓	↑	→	↑	↓
		P S	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	II (No.9)	S W S	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
		P S	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

SWS: 徐波睡眠

P S: 逆説睡眠

↑ 増加 increase

→ 変化なし no difference

↓ 減少 decrease

れたものの、事前観察期と比べて変化はなく、N₂の10%群では保圧3日目から増加（↑印）する傾向が1例に認められた。なお、減圧期間においては各実験群ともにPSの減少ならびにSWSの増加が認められ高圧環境下での睡眠不足を補う現象と考えられた。

しかしながら、本実験で最も良いと思われたN₂10%の実験群について、実験期間中8日間の睡眠相の出現割合を1日分の睡眠量を100%として事前観察期と比較してみると、図13からも明らかのように、Crowley et al (1972)²²⁾の報告にある1日の睡眠相の出現割合では、通常の大気圧空気環境では、AWAKEが51%、SWSが43%、PSが6%となっているが、本実験では平均するとそれぞれAWAKEが64%、SWSが33%、PSが3%と何れも低い出現割合を示し睡眠不足が明らかであった。この事について中野等(1984)²³⁾は、当センターで実施した31 ATA, He-O₂での有人飽和潜水実験でのダイバーの終夜睡眠の測定から、高

圧環境下でのPS並びにSWSの減少に対して、ダイバーは作業時間外にはベッドで仮眠し、また減圧期間での睡眠相に占めるSWSの割合が増加するとの報告を行っている。この原因として、有人実験では夜間の排尿が睡眠不足の大きな要因と考えられており、加圧時のストレス並びにHe-O₂のガス環境に対する環境温度制御等が問題となっている。本実験では夜間の排尿等に対する行動については観察していないが、加圧時のストレス並びに高密度ガス環境における環境温度等も睡眠不足の要因であると推察された。

各実験における事前観察期に対するSWS時の平均心拍数の変化については表2に示すように、He-O₂では1例に低下が認められ、N₂40%のHe-N₂-O₂実験群では2例とも増加傾向が認められた。しかし、N₂20%並びにN₂10%の実験群では4例ともに心拍数に変化は見られなかった。Beaber et al (1979)²⁴⁾やLundgren et al (1976)²⁵⁾のラット及びマウスでの実験では、圧力の増加によって

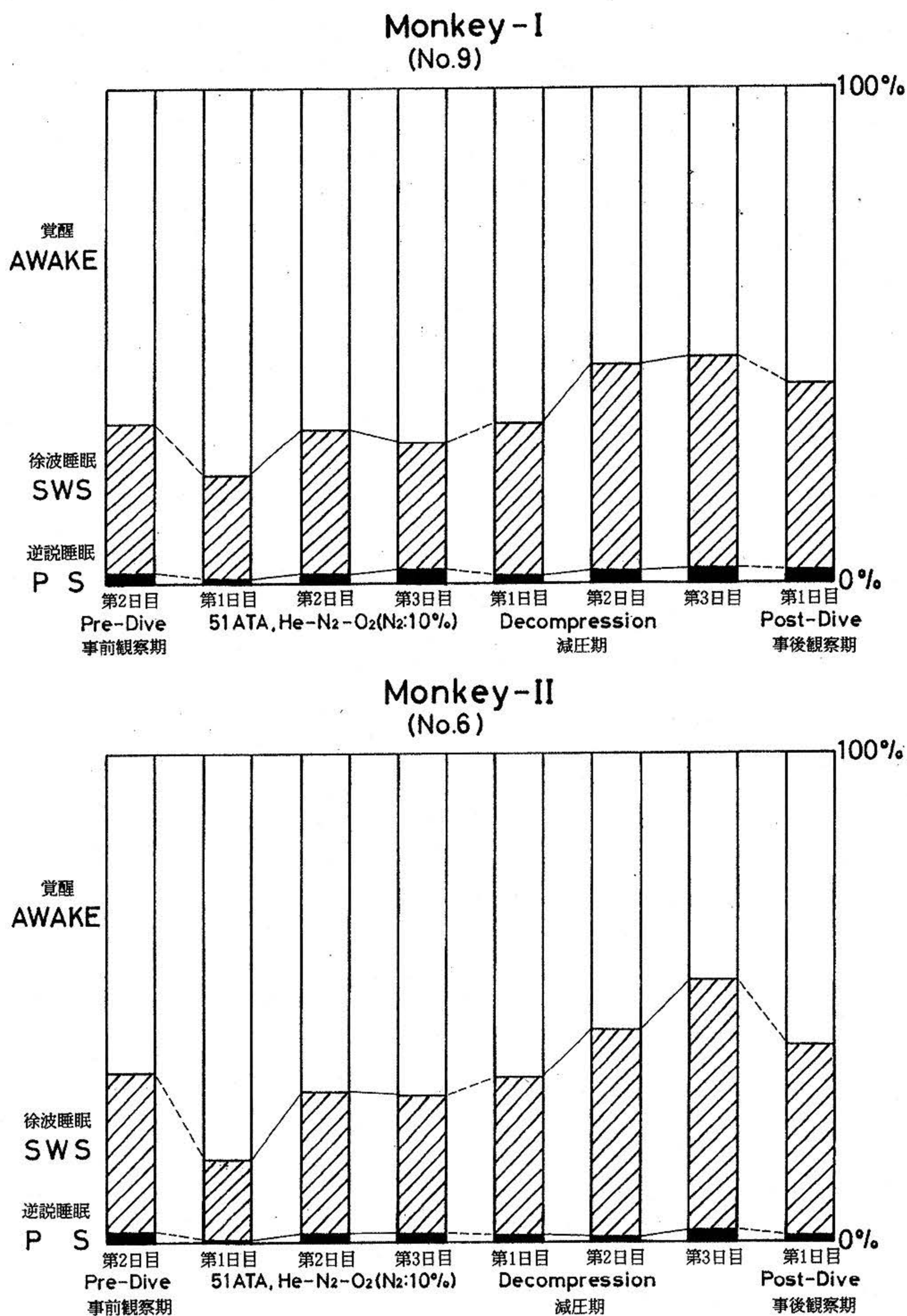


図13 Monkey-I & II の実験期間中 8 日間の睡眠相の出現割合 (N₂:10%)

Fig. 13 Ratio of sleep profile during the experiment in Monkey I & II (51ATA, 10%N₂ in He-O₂)

心拍数は低下，すなわち徐脈が引き起こされると報告しており，ヒトにおいての息こらえ潜水では顕著な徐脈が見られることが Moore et al (1972)²⁶⁾ によって報告されている。しかし，Brauer et al (1979)²⁷⁾ のアカゲザルの実験では，加圧過

程において発作が発現する時点では心拍数に変化はなく，それ以降もほとんど心拍数に影響はなかったと報告しており，Ohta et al (1981)²⁸⁾ の当センターでの31 ATA，He-O₂での有人飽和潜水実験 (SEADRAGON-IV) の報告では，何れも有意な

表2 各実験における事前観察期に対するSWS（徐波睡眠）時の平均心拍数の変化

Table 2 Change of mean Heart rate during SWS stage in each experiment.

		51ATA	減圧期	事後観察期
He-O ₂	Monkey-I (No.7)	↓	—	—
	II (No.8)	→	↑	↑
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :40%)	Monkey-I (No.7)	↑	↑	↑
	II (No.8)	↑	→	↑
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :20%)	Monkey-I (No.10)	→	↑	↑
	II (No.8)	→	→	↑
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :10%)	Monkey-I (No.9)	→	→	→
	II (No.6)	→	↑	↑
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :5%)	Monkey-I (No.5)	→	→	↑
	II (No.9)	↑	↑	↑

↑ 増加 increase

→ 変化なし no difference

↓ 減少 decrease

変化はないが、加圧時の100m-200mでは若干の低下が認められ、300mではむしろ増加傾向にあったと報告している。高圧環境下での心拍数の変化については、圧力だけでなくその他の様々な環境条件の違いが何らかの影響を及ぼしていることは明らかであり、本実験でのN₂40%のHe-N₂-O₂実験群で2例に心拍数の増加傾向が認められていることについては、肺換気諸量におけるMVVとガス密度との間には高い正の相関関係のある事が知られており²⁹⁾、本実験での高密度ガス環境条件では呼吸・循環系に影響があったものと推察された。また、減圧期並びに事後観察期においてはどの実験条件においても心拍数の増加が認められ、減圧期のストレスが大きく関与したと思われる。従って、今後更に減圧手法の問題も含め検討する必要がある。

次に、各々の実験条件での加圧前と減圧後の体重変化から各種混合ガスの影響を検討して見ると、表3に示すようにHe-O₂とN₂40%と20%のHe-N₂-O₂の実験群では何れも体重の減少が認められ、N₂10%と5%の実験群では4頭中2頭に増加も認められた。前者の体重の減少については、加圧

表3 各実験における実験前後のサルの体重変化

Table 3 Change of body weight of Monkeys at the Pre-Dive and Post-Dive.

		体重変化
He-O ₂	Monkey-I (No.7)	-13.3%
	II (No.8)	-5.6%
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :40%)	Monkey-I (No.7)	-7.2%
	II (No.8)	-3.1%
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :20%)	Monkey-I (No.10)	-1.3%
	II (No.8)	-5.9%
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :10%)	Monkey-I (No.9)	+4.7%
	II (No.6)	±0.0%
He-N ₂ -O ₂ (N ₂ :5%)	Monkey-I (No.5)	+0.5%
	II (No.9)	-3.3%

中及び保圧中の行動観察でも摂取行動がほとんどみられないことから、摂取量の低下が原因と考えられた。この摂取量の低下を引き起こす原因を更に行動観察から詳しく考察してみると、He-O₂で

の実験では加圧中、400m深度相当圧力前後から高圧神経症候群と考えられる振戦、嘔吐が見られ、保圧後数時間にわたって振戦が引き続き見られた事に起因したものと推察された。また、N₂40%と20%の実験群では高圧神経症候群の発現は認められなかったが、ゲージ内でうずくまる姿勢が多く見られ、動作も緩慢になっていることからN₂の麻酔作用による影響が強く現れたものと考えられる。一方、N₂10%と5%の実験群では、前者が400mから、後者は450mからそれぞれN₂を添加する方法を取ったが、何れもそれまで認められていた振戦が抑制され、生体へのストレスが軽減されたものと推察された。

以上の結果より、高圧神経症候群の発現に対して窒素ガスが有効であることが明らかとなった。しかし、Rostain et al (1984)¹⁵⁾は、ヒヒ (Papio papio) を用いた実験において、200m/hの加圧速度で加圧した場合、He-O₂では362±63m深度相当圧力から振戦の発現が認められ、加圧初期に窒素分圧を4.5barとしたHe-N₂-O₂の混合ガス条件においても456±32m深度相当圧力で振戦が発現したと報告しており、窒素ガス分圧だけでなく添加時期も高圧神経症候群の発現にとって重要な要因であることが示唆されている。この事に関しては、未発表ではあるが、我々のアカゲザルでの実験において、N₂で0～50mまで加圧した後、Heで500mまで加圧していくと350m深度相当圧力から振戦が発現するが、Heで0～150mまで加圧した後、150m～200mまでをN₂で加圧、再びHeで500mまで加圧していくと振戦の発現は認められず、同じ窒素分圧 (PN₂=5.0bar) でも添加時期によってその効果が異なることが予測されている。従って、本実験では加圧の後期、高圧神経症候群の発現深度付近から窒素ガスの添加を行う方法としたが、本実験でも明らかなように、N₂10%の添加実験群では窒素ガス分圧が5.0barとヒトの上限 (PN₂=4.5bar) に近い分圧であるのに対して、N₂40%と20%の添加群では窒素分圧が各々20bar、10barと高く、窒素ガスの麻酔作用が強く現れる結果となった。従って、この事が睡眠・覚醒の日内リズムに影響を及ぼし、また行動を抑制することによる食欲の低下を引き起こしたものと推察された。また何ずれの実験条件でも

睡眠量の低下が認められ、今後更に加圧速度、窒素ガスの添加時期、窒素ガスの最適な分圧ならびに環境温度、ガス密度等の様々な環境条件を考慮し更に検討する必要性が示唆された。

4 結 論

アカゲザルを51 ATA、He-O₂並びにN₂を40%、20%、10%、及び5%添加した5種類のHe-N₂-O₂の高圧環境下に暴露し、高圧神経症候群の発現に対する窒素ガス添加の有効性並びに添加量について、睡眠相並びに行動観察等を指標に検討した。その結果、N₂10%の添加並びに添加方法が他の実験群に比べて最も有効であることが示唆された。

参考文献

- 1) Bennett, P. B. : Inert gas narcosis., Bennett, P. B. and Elliott, D. H. eds., The physiology and medicine of diving., Balliere:Tindall, London, pp. 237-261, (1982)
- 2) Bennett, P. B. : The high pressure nervous syndrome in man., Bennett, P. B. and Elliott, D. H. eds., The physiology and medicine of diving., Balliere:Tindall, London, pp. 262-296, (1982)
- 3) Bennett, P. B. : Performance impairment in deep diving due to nitrogen, helium, neon and oxygen., Lambertsen, C. J. eds., Underwater physiology III., Baltimore: Williams and Wilkins., pp. 327-340, (1967)
- 4) Brauer, R. W., Dimov, S., Fructus, X., Gosset, A. and Naquet, R. : Syndrome neurologique et electrographique des hautes pressions., Rev Neurol., Vol. 121, pp. 264-265, (1969)
- 5) Biersner, R. J. and Cameron, B. J. : Memory impairment during deep helium dive., Aerosp Med., Vol. 41, pp. 658-660, (1970)
- 6) Rostain, J. C., Regesta, G. and Naquet, R. : Study of the organization of sleep of divers at 300 meters depth in oxygen-helium atmosphere., Electroencephalography and clinical neurophysiology., Vol. 34, pp. 788-797, (1973)
- 7) Vaernes, R., Bennett, P. B., Hammerberg,

- D. Ellertsen, B., Peterson, R. E. and Tojum, S. : Central nervous system reactions during heliox and trimix dives to 31ATA., Undersea Biomed. Res., Vol. 9, pp. 1-14, (1982)
- 8) Lewis, V. J. and Baddeley, A. D. : Cognitive performance, sleep quality and mood during deep oxyhrlium diving., Ergonomics., Vol. 24 No. 10, pp. 773-793, (1981)
- 9) Brauer, R. W., Goldman, S. M., Beaver, R. W. and Sheehan, M. E. : N_2 , H_2 and N_2O antagonism of high pressure neurological syndrome in mice., Undersea Biomed. Res., Vol. 1, pp. 59-71, (1974)
- 10) Albano, G. P., Criscuili, M., Scaglione, G. C., Mazzone, M., Lamonaco, G. and Burmano, G. : La sindrome da estreme sressioni ambientali. Relievi EEG ed ECG su ratti liberi con elettrodi da dimora., Ann. Med. Nav., No. 77, pp. 11-28, (1972)
- 11) Cromer, J. A., Bennett, P. B., Hunter, W. L. and Zinn, D. : Effect of helium/nitrogen/oxygen mixtures on HPNS convulsion threshold in euthermic rats., Undersea Biomed. Res., Vol. 6 No. 4, pp. 367-377, (1979)
- 12) 関 邦博, 中山英明, 設楽文朗, 水嶋康男, 他谷 康, 中野正美 : 高圧ヘリオックス環境下 (51ATA, 16日間) のネコの睡眠相の変化。JAMSTECTR, No. 6, pp. 137-144, (1981)
- 13) Overman, W. H., Brauer, R. W. and Burke, E. R. : Failure to find residual memory deficits in monkeys after repeated HPNS., Undersea Biomed. Res., Vol. 16 No. 2, pp. 115-127, (1989)
- 14) Rostain, J. C. and Naquet, R. : Resultats preliminaires d'une etude comparative de l'effet des melanges oxygene-helium et oxygene-hydrogene et des hautes pressions sur le babouin Papio-Papio., Proceedings of the third international onference on hyperbaric and underwater physiology., Vol. X, pp. 44-49, (1972)
- 15) Rostain, J. C., Dumas, J. C., Gardette, B., Impert, J. P. and Lemaire, C. : Effects of addition of nitrogen during rapid comperssion of baboons., J. Ap. Physiol., Vol. 57, pp. 332-340, (1984)
- 16) Bennett, P. B., Coggin, R. and Mcleod, M. : Effect of compression rate on use of trimix to ameliorate HPNS in man to 686m(2250ft)., Undersea Biomed. Res., Vol. 9 No. 4, pp. 335-351, (1982)
- 17) 他谷 康, 設楽文朗, 中野正美, 関 邦博, 中山英明 : 300m(31 ATA)へのHe- O_2 での加圧時におけるダイバーの自覚症状。Annals Physiol. Anthropol., Vol. 4 No. 2, pp. 169-174, (1985)
- 18) 設楽文朗, 他谷 康, 桑原信之, 関 邦博, 中山英明 : 高圧閉鎖環境下居住時のダイバーの疲労と情緒的变化。Annals Physiol. Anthropol., Vol. 4 No. 2, pp. 153-161, (1985)
- 19) Yamasaki, M., Sasaki, T., Sakamoto, K., Shidara, F., Taya, Y. and M. Nakano: Power-spectral analysis of intentional and postural tremor during a simulated heliox dive to 31 ATA., Annals Physiol. Anthropol., Vol. 4 No. 2, pp. 129-136, (1985)
- 20) Rostain, J. C., La syndrome nerveux des hautes pressions chez l'homme et le singe Papio-papio. (these de doctorrat)., Marseille, France., Universite d'Aix-Marseille I., (1980)
- 21) Bert, J., Vuillon-Cacciuttolo, G., Balzamo, E., Demicco, P., Gambarelli, D., Tamalet, J. and Gastaut, H. : Experimental kuru in the Rhesus Monkey: A study of EEG modifications in the waking state and during sleep., Electroencephalography and clinical neurophysiology., Vol. 45, pp. 611-620, (1978)
- 22) Crowley, T. J., Kripke, D. F., Halderg, F., Pegram, G. V. and Schildkraut, J. J. : Circadian rhythms of Macaca mulatta: Sleep, EEG, body and eye movement and temperature., Primates., Vol. 13 No. 2, pp. 149-168, (1972)
- 23) 中野正美, 他谷 康, 関 邦博 : 31ATA, He- O_2 環境下におけるダイバーの終夜睡眠相の変化。JAMSTECTR, No. 13, pp. 149-157, (1984)
- 24) Beaver, R. W., Brauer, R. W. and Fuquay, J. :

Changes in heart rate associated with high-pressure convulsions in rodents. , J. Appl. Physiol. , Vol. 47, pp. 834-845, (1979)

- 25) Lundgren, C. E. G. and Örnham, H. Ch. , : Heart rate and respiratory frequency in hydrostatically compressed, liquid breathing mice. , Undersea Biomed. Res. , Vol. 3, pp. 303-320, (1976)
- 26) Moore, T. O. , Lin, Y. L. , Lally, D.A. and Hong, S. K. : Effects of temperature, immersion, and ambient pressure on human apneic bradycardia. , J. Appl. Physiol. , Vol. 33 No. 1, pp. 36-41, (1972)
- 27) Brauer, R. W. , Beaver, R. W. , Lahser, S. , McCall, R. D. and Venters, R. : Comparative physiology of the high-pressure neurological syndrome-compression rate effects. , J. Appl. Physiol. , Vol. 46, pp. 128-135, (1979)
- 28) Otha, Y. , Arita, H. , Nakayama, H. , Tamaya, S. , Lundgren, C. E. G. , Lin, Y. L. , Smith, R. M. , Morin, R. , Farhi, L. E. and Matsuda, M. : Cardiopulmonary functions and maximal aerobic power during a 14-day saturation dive at 31ATA (SEADRAGON IV). , Bachrach, A. J. and Matzen, M. M. eds. , Underwater physiology VII. , Undersae Medical Society, Inc. , pp. 209-221, (1981)
- 29) Lanphier, E. H. and Camporesi, E. M. : Respiration and Exercise. , Bennett, P. B. and Elliott, D. H. eds. , The physiology and medicine of diving. , Balliere: Tindall, London, pp. 99-156, (1982)

(原稿受理 : 1990 年 6 月 18 日)