

高圧He-O₂環境下の水分代謝 (第1報)

竹内 久美^{*1} 設楽 文朗^{*1} 桐ヶ谷紀昌^{*2} 中山 英明^{*1}

シートピア60m実験以来、加圧に伴う利尿現象が観察された。また、100 mと150 m以深の実験では、これらの利尿現象のパターンに相違がみられた。その結果、今回はシードラゴン I - VI計画(100 ~ 300 m)のデータをもとに、これらの究明を試み、同時に、水分の摂取量及び排泄量(糞尿)からみた水分バランスの検討を行った。その検討結果、200 m以深の実験で、夜間尿量の増加が認められた。この原因は保圧中、すべてのテストダイバーが、連日1 ~ 2回の夜間排尿を行っていたためであったことが、1978年の実験で明らかとなった。また、事後観察時の尿量は、事前観察時に比べて減少していた。水分バランスでは、保圧時の総不感蒸泄量の減少がみられた。この現象は高圧になるほど顕著であった。これらの原因はさまざまな見知から、cold stress が主要因であることが予測された。

Studies on Water Balance Under a High Pressure Heliox Environment (11-31ATA)., (Report I)

Hisayoshi Takeuchi^{*3}, Fumiro Shidara^{*3},
Norimasa Kirigaya^{*4}, Hideaki Nakayama^{*3}

Since the SEA TROPIA 60 m experiments, the phenomenon of diuresis with compression has been observed. In the experiments at 100 m and 150 m or more in depth, we had found a difference in the diuretic pattern. In this report, we have attempted to study this using the data of the SEA DRAGON I and SEA DRAGON IV projects. At the same time, we investigated water balance measuring water intake and excretion (urine and feces). In the experiments at 200 m or more in depth, the results showed an increase of urine flow at night. We found the reason for this in the 1978 experiment since all divers had diuresis once or twice every night during the saturation diving. Urine flow of the post-dive as compared with pre-dive decreased clearly. In water balance, there was a decrease in the total insensitve water loss during the saturation diving. This phenomenon was clear with the increase of pressure. In the light of data obtained from the experiments, we believe that this was the result of cold stress.

*1 潜水技術部

*2 森永製菓株式会社

*3 Manned Undersea Technology and Engineering Department

*4 Research Institute Morinaga & Co., Ltd.

1. 緒言

He-O₂-N₂ の3種混合ガスを用いた深々度の飽和潜水実験で、加圧中、加圧終了直後、もしくは保圧中に、高頻度の利尿現象が出現することが観察された。

最初、この現象が観察されたのは、当センターで実施した1975年の60 m 潜水シミュレーション実験で、以後、この現象は1976年のシードラゴン-I計画(100 m)から1979年のシードラゴン-IV計画(300 m)に至るまで引続き観察された。また、1977年にハワイで行われたHANAKAI-II(176 m)の潜水シミュレーション実験でも、同様な現象が観察されている。

これら“高圧下の利尿現象”という点で共通しているが、100 m, 200 m, 300 mにおける利尿のパターンに相違がみられることが、1978年のシードラゴン-III計画で明らかとなった。そこで、これらの利尿現象を通して、100 mから300 mの潜水シミュレーション実験における水分代謝の推移についての検討を行った。

また、1976年の100 m 潜水シミュレーション実験で、初の糞便分析を試みた。このとき、以来、長期間、高圧ヘリウム環境下で生活するテストダイバーの多くに高頻度の下痢、もしくは軟便が観察された。

当初、加圧中の連日、ほぼ全員にみられた現象であったが、昨年度及び本年度の実験では全員ではないが、依然、一部のダイバーに高頻度の下痢が出現していた。下痢によって糞便からの水分損失が大きいことは周知の通りで、水分バランスをみるうえでも無視することはできないため、合わせて、この検討も行った。

2. 方法

水分バランスの把握にあたって、摂取量は、直接飲水したものと、摂取した食物中に含有する水分との合計として求めた。

食事時間は、各実験を通して、おおむね、朝食08:00~09:00、昼食12:30~13:30、夕食18:00~19:00であった。排泄量は、尿及び糞便からの水分排泄量の合計として求めた。なお、採尿は、すべての実験で1日4回実施し、排便は適時行なわせた。

採尿の時間帯は図1~11の各図中に明記した。各periodの説明は図1に示した通りで、以後、

図2~7及び図10~11についても同様である。

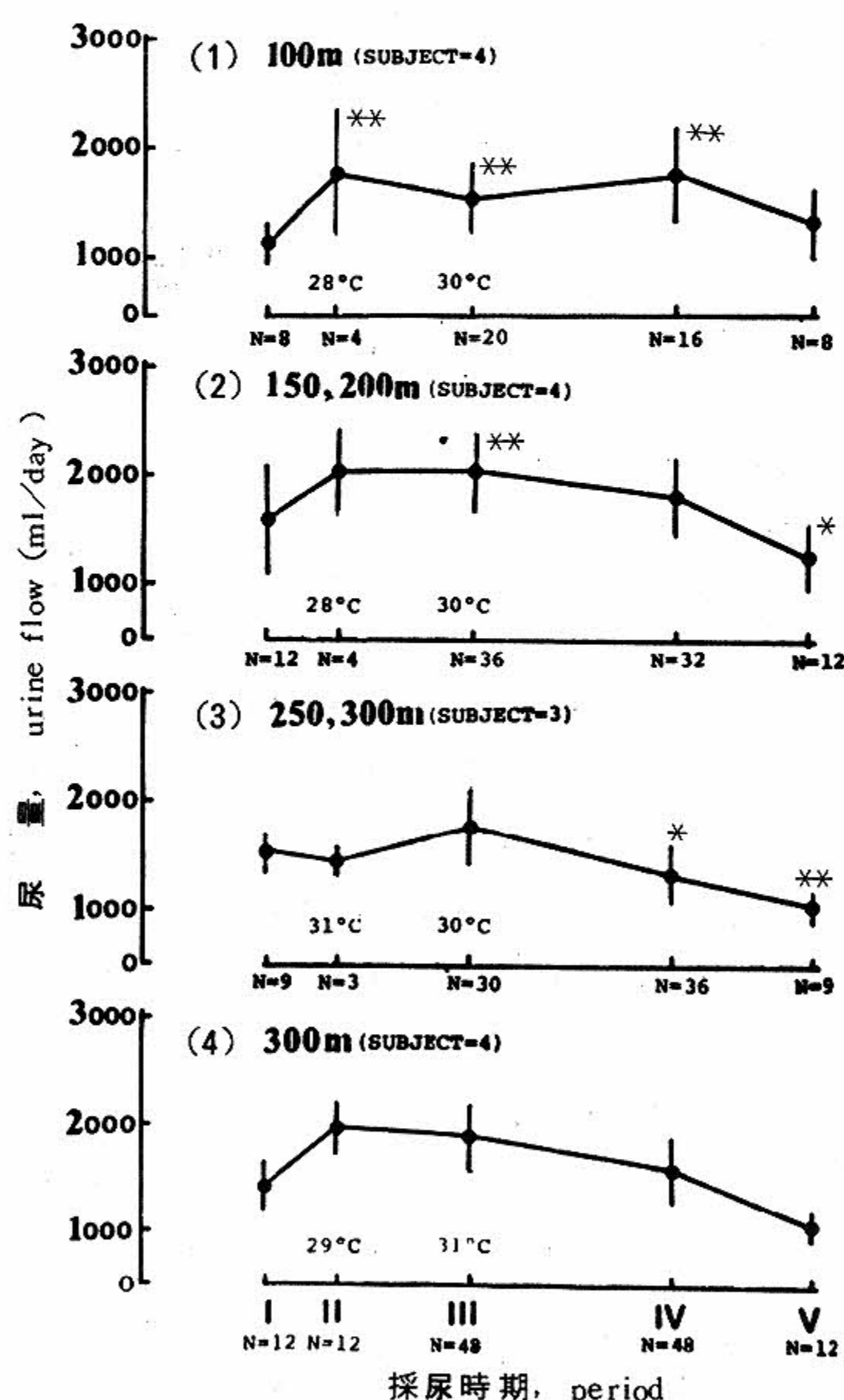
3. 結果と考察

3.1 1日の尿量変化

図1は1976年から1979年にかけて、当センターで実施した100~300 mの潜水シミュレーション実験時にみられた尿量の変化を示す。

各実験時の24時間尿量は、おおむね、period-IIで増加し、period-Vで減少していた。250, 300 mの実験では、他のパターンとは異なり、period-IIでやや減少し、period-IIIで増加していた。

この図中には加圧時及び保圧時の環境温の平



*P<0.05, ** P<0.01 compared to period I

● バラツキ mean ± sd.
テストダイバー, subject = 4

図1 各シミュレーション実験における24時間尿量の変化

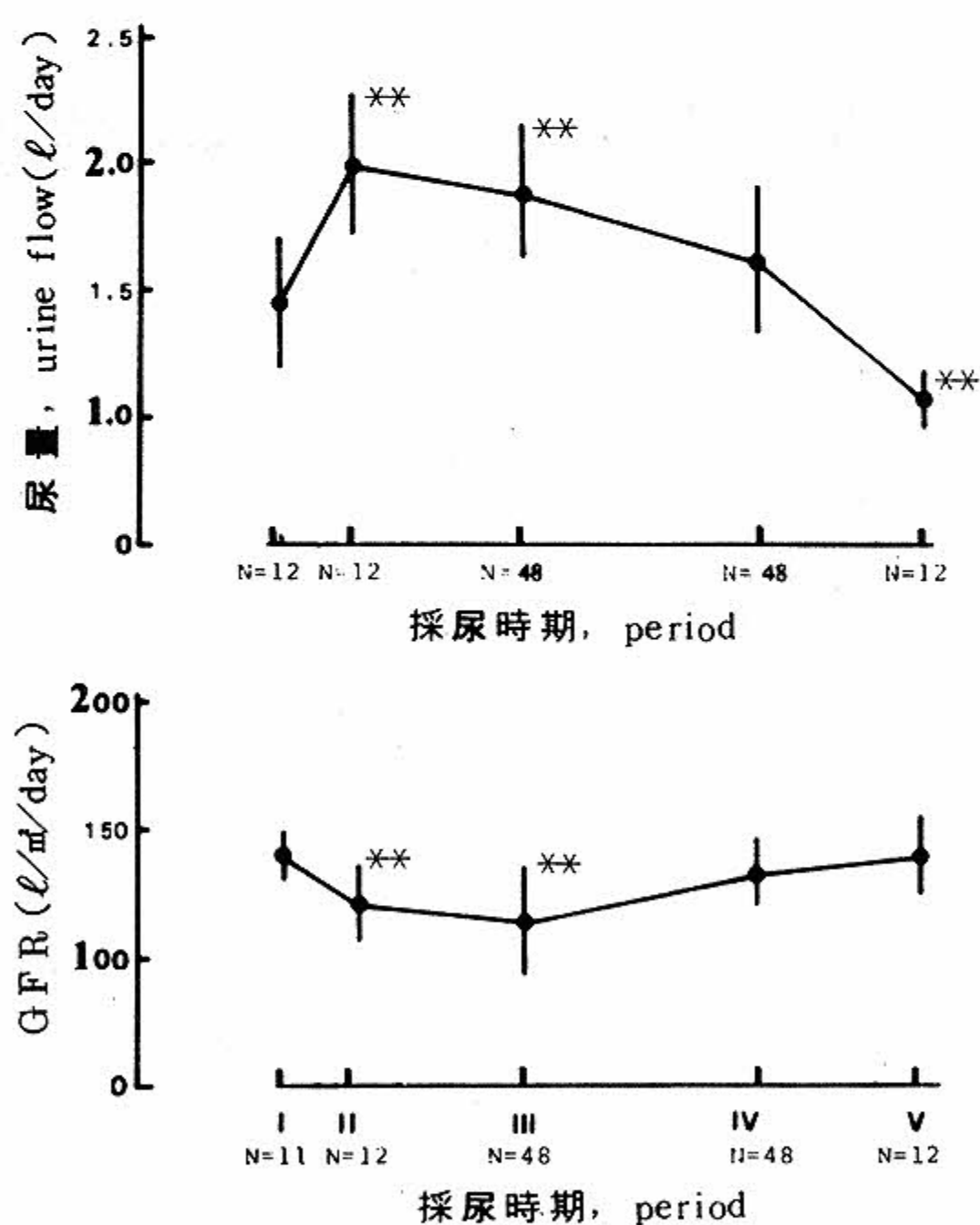
Daily urine flow in saturation diving experiments.

均値を示した。ここで明らかなように、上記の実験では、period - II の温度が通常値よりも約 3℃ 高かった。このとき、すべてのテストダイバーは暑さに対する不快を訴えていた。

period - III の尿量の増減をみると、最も少ない値が示されたのは、100 m 実験時の値で $1538 \pm 325 \text{ ml}$ であった。しかし、最も多かったのは 300 m 実験時の値ではなく、150, 200 m 実験時の $2053 \pm 391 \text{ ml}$ であった。

このように圧力と利尿との関係には、必ずしも相関はみられなかった。この点については、Schaeffer et al. (1970) が行った 180 - 240 m の実験、及び Buhlman et al. (1970) が行った 300 m 実験でも同様な結果が得られたことを Hong が報告³⁾している。

period - I 及び period - V の尿量についてみると、100 m 実験では period - V の方がやや高い値を示し、150 m 以深の実験では、それとは逆に減少している。



* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ compared to period I

● バラツキ mean $\pm$ sd.
テストダイバー, subject=4

図2 300 m 実験時の尿量と GFR (糸球体濾過率) の変化

Urine flow and GFR (Glomerular filtration rate) in the 300 m saturation diving experiment.

3.2 尿量と糸球体濾過率

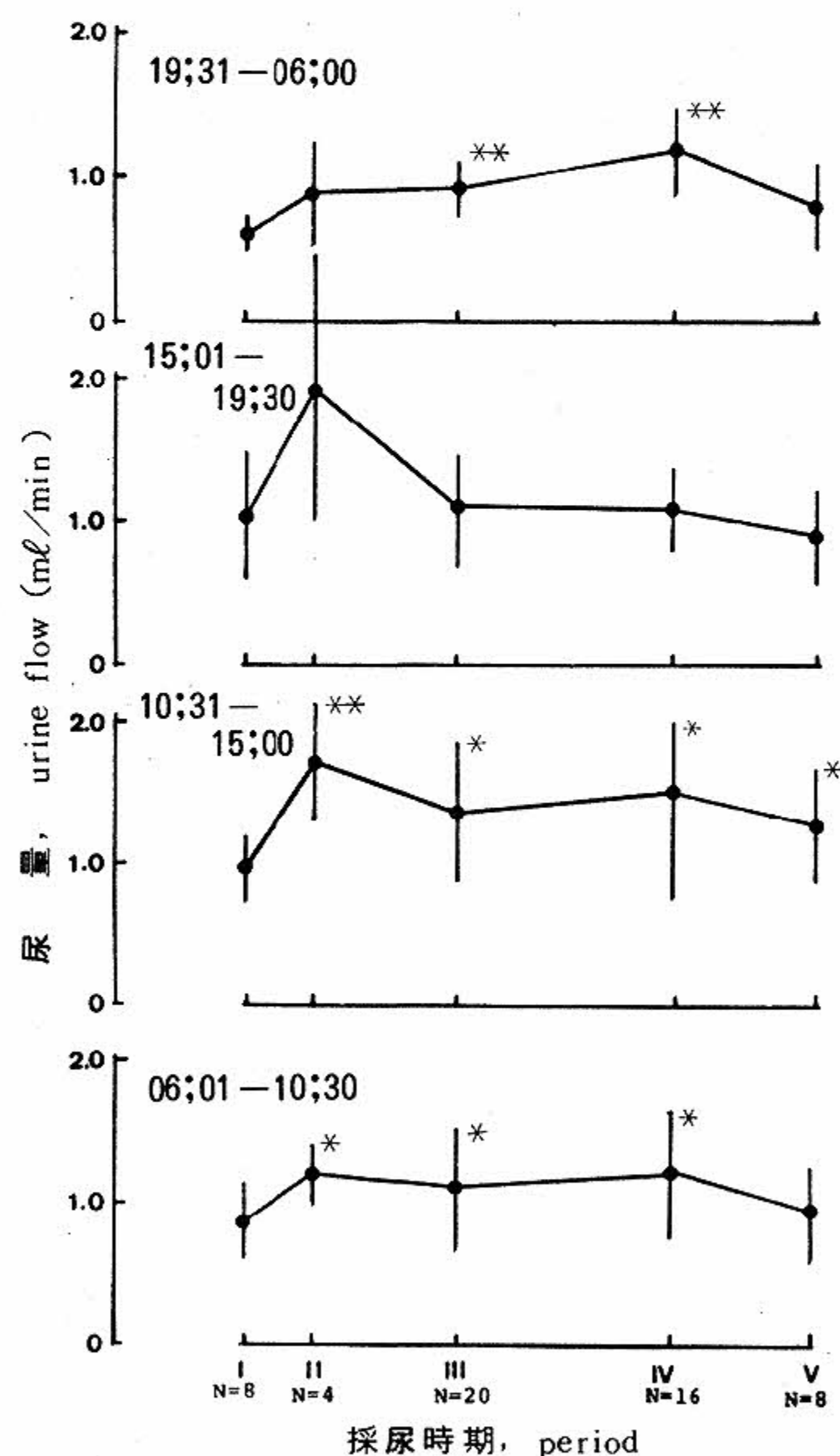
図2によれば、加圧に伴う尿量の増加は、GFR (糸球体濾過率) の増加ではなく尿細管からの水分再吸収が抑制されたために起った現象であることが、1979年の実験で明らかとなった。この点はADH (抗利尿ホルモン, antidiuretic hormon) 等の分析で、より明確な解答が得られるものと思われる。

3.3 時間帯における尿量変化

3.3.1 100 m 実験

各採尿時間における単位時間あたりの尿量の変化をみると、図3に示すように、100 m 実験では、period - II, -III, -IV のどの時間帯でも増加がみられた。

period - V の値は $1317 \pm 279 \text{ ml}$ で、period



* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ compared to period I

● バラツキ mean $\pm$ sd.
テストダイバー, suverel=4

図3 100 m シミュレーション実験時の各period 及び各時間帯における尿量の変化

Urine flow every several hours of each period in the 100 m saturation diving experiment.

-I の $1138 \pm 170 \text{ ml}$ に比べ、やや高い値を示した。これが図1の period-V の増加の主要因となっていることは明らかである。period-III の夜間尿量（夕食後～翌朝覚醒時）には有意な変化はみられず、period-IV ではその増加がみられた。

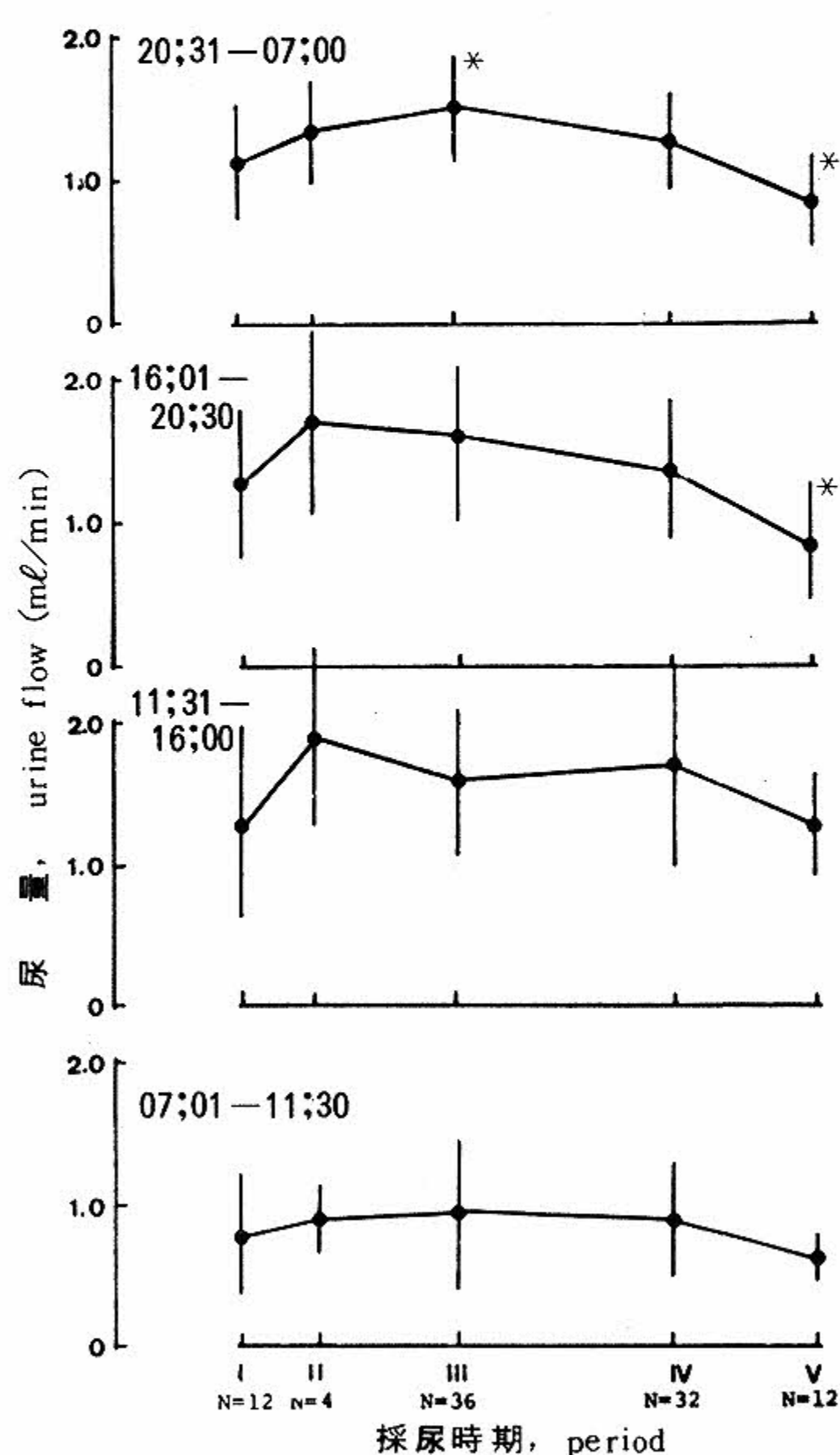
3.3.2 150, 200 m 実験

150, 200mの実験では、前に述べた 100 m 実験と異なった現象として、図4に示した。

period-V の夕方 16:00 以降～翌朝 07:00 にかけての尿量が period-I のそれに比べて明らかな減少を示し、また、このころから period-III の夜間尿量の増加がみられた。

3.3.3 250, 300 m 実験

図5に示す 250, 300m実験の値では、各時間帯



* $P < 0.05$, compared to period I

● バラツキ mean $\pm$ sd.
テストダイバー, subject=4

図4 150, 200 m シミュレーション実験時の各 period 及び各時間帯における尿量の変化

Urine flow every several hours of each period in the 150, 200m saturation diving experiment.

で period-II の減少がみられた。最も顕著だったのは 11:31-16:00 の時間帯で、period-I の $1.53 \pm 0.39 \text{ ml}$ から $1.13 \pm 0.28 \text{ ml}$ に減少した変化であった。図4の 150, 200m 実験のときと同様に、period-III の夜間尿量に増加がみられたが、その変化は僅かであった。period-V は period-I に比べ、すべての時間帯で減少していた。

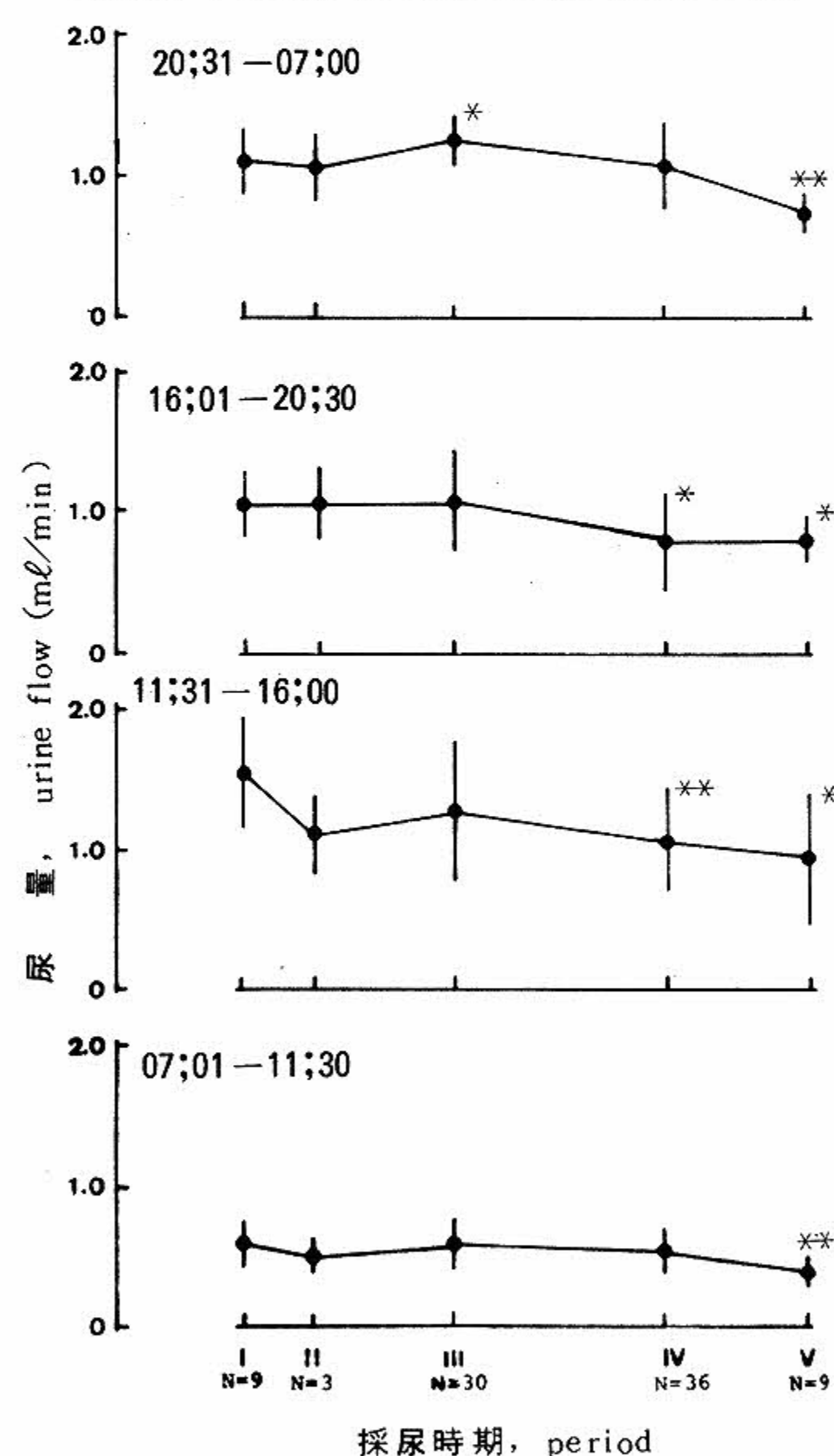
3.3.4 300 m 実験

図6には 300 m 実験の結果を示す。

前述のデータと異なっているのは、period-3 の 15:01 から 19:00 の間の尿量が period-I に比べて減少していることである。

3.3.5 考察

これまでに記載した尿量の変化では、覚醒



* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ compared to period I

● バラツキ mean $\pm$ sd.
テストダイバー, subject=3

図5 250, 300m シミュレーション実験時の各 period 及び各時間帯における尿量の変化

Urine flow every several hours of each period in the 250, 300m saturation diving experiment.

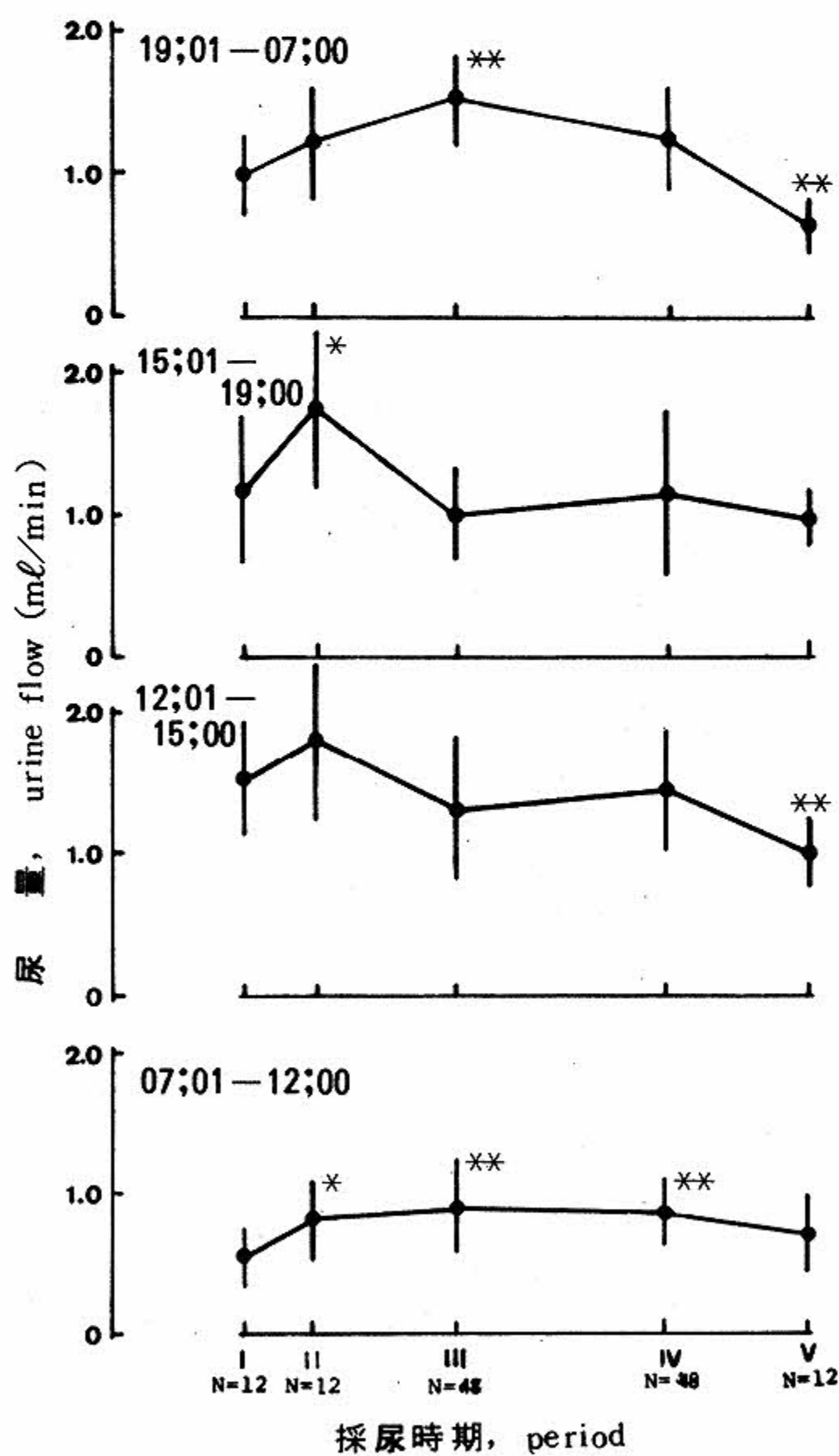
時の値については、この間の作業内容によって大きな影響を受けることが予測される。そのため、発汗を伴う作業時間の多い昼食後から就寝時までの尿量をみる場合には、これらのことを考慮しなければならない。

しかし、夜間の尿量については、各実験で夕食後から就寝までの時間に僅かな相違はあったが、スケジュールの内容からみて、この間の作業が尿量の変化をもたらすほどの要因となっていないものと思われる。

3.4 夜間の排尿

ほぼ一定条件を保っている夜間から早朝にかけての尿量の変化をみることで、高圧下の尿量変化をみるのに最適と思われる。

これまでのデータのうち、夜間排尿の行われた時間帯のみの尿量変化を図7に抜粋した。



*P<0.05, **P<0.01 compared to period I

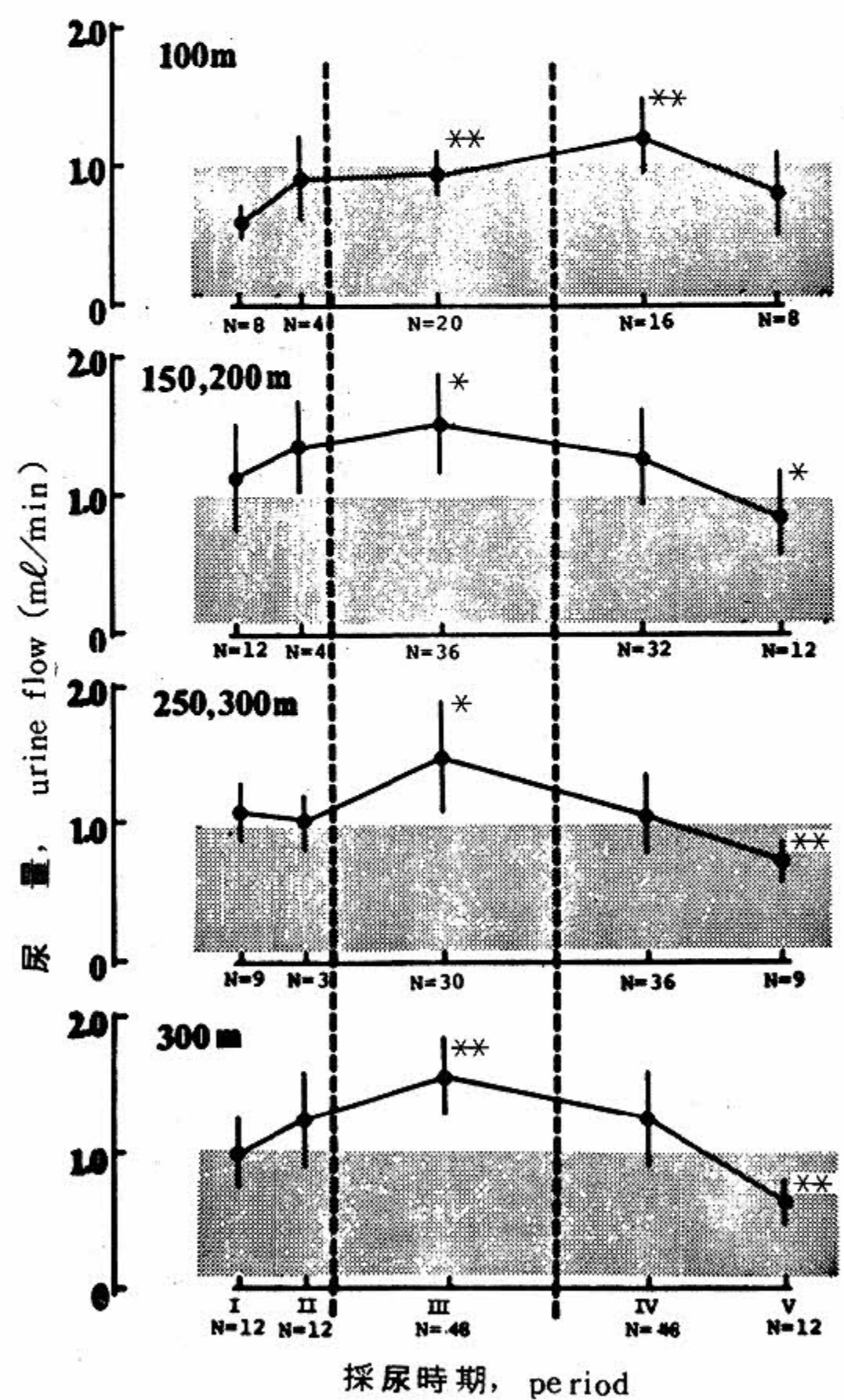
● バラツキ mean±sd.
テストダイバー, subject=4

図6 300mシミュレーション実験時の各period及び各時間帯における尿量の変化

Urine flow every several hours of each period in the 300m saturation diving experiment.

この図から明らかなように、150 m 以深の実験では、夜間尿量が増加と共に増加し、保圧時に、そのピークが現われている。その後、減圧に伴って減少し、period-Vではperiod-Iに比べ、さらに低値を示した。このperiod-Vの減少は、夜間のみではなく、おおむね各時間帯での減少であった。

上記のうち、保圧時の夜間尿量の増加については、1978年の250, 300 mの実験で加圧後半から減圧初期にかけて各テストダイバーが不規則な時間帯であったが、消灯後、夜間1~2回の排尿を行っていたことが確認できた。したがって、このことが夜間尿量の増加をもたらした原因となっていたことが明らかとなった。さらに、このような現象は、減圧がおよそ150 m程度まで進むと、徐々に消失することも判明した。



*P<0.05, **P<0.01 compared to period I

● バラツキ mean±sd.
テストダイバー, subject=4

図7 各シミュレーション実験時の夜間尿量の変化

Urine flow at night in saturation diving experiments.

就寝時及び夜間排尿の状況について実験終了後、各テストダイバーは、次のように訴えていた。

- (1) 保圧時の睡眠は、実験開始時に比べて寝つきは良好であったが、排尿のために目が覚めた
- (2) ベッドとの接触部が常に汗で濡れていた
- (3) 毛布をかけると、ただちに暑くなり、取ると間もなく冷えてきた

以上のことからみて、就寝後の cold stress の影響が大きいのではないと思われる。

常圧で健康成人にみられる強度の利尿現象には、利尿剤の服用などのほか、過剰の水分摂取、cold stress、緊張等がある。そのような要因を除けば、適度の水分摂取を行ったときの就寝後の夜間排尿はほとんど起らない。以上のことから、夜間の排尿現象は、200 m 以深の高圧下にみられる特異な現象と思われる。

一方、150 m 以深の実験にみられた period-V の減少が、なぜ生じたかは、まだ明らかではない。しかし、これと同様な現象が、表 1 に示した 1975 年のシートピア計画 60 m、100 m の各 2 回の実験でもみられていることから、やはり前記の保圧時の夜間尿量の増加と同様に、高圧の潜水シミュレーション実験でみられる特筆すべき現象といえよう。これについて、次のことが考えられる。

- (1) 高圧下の利尿現象で、多くの溶媒（水）が失われ、溶質に対する水の量が減少した。そ

表 1 潜水前と潜水後の尿量の比較

(シートピア 60 m 及び 100 m シミュレーション実験)

Comparison of urine flow in the pre-dive and post-dive (Seatopia 60 & 100 m saturation diving experiments).

潜水実験 diving experiments	観察時期 period	事後観察 period-I (pre-dive)	事後観察 period-V (post-dive)
60 m	1 回目	1665±246	1416±282
	2 回目	1674±237	1364±346
100 m	1 回目	1669±297	1235±161
	2 回目	1305±155	1296±292

のため、浸透圧受容器 (osmoreceptor) が反応し、水の再吸収を増加させる手段として、脳下垂体後葉からの ADH の分泌を促進させ、水の再吸収を増加させた。

- (2) 血管の拡張、または圧の変化に反応する受容器 (stretch-or pressure sensitive elements) が左房に存在すると考えられ、これが浸透圧に関係なしに、血管内液量の異常な減少に反応し、脳下垂体後葉からの ADH の分泌を促進した。

この点、今後、さらに詳しく浸透圧及び ADH 等の解析を行って解明していきたい。

3.5 水負荷試験

加圧中の過剰な水分摂取が常圧下に比べ、尿量の増加をもたらすか、否かを究明するために、1978 年の実験では、同一被検者に対して計 3 回

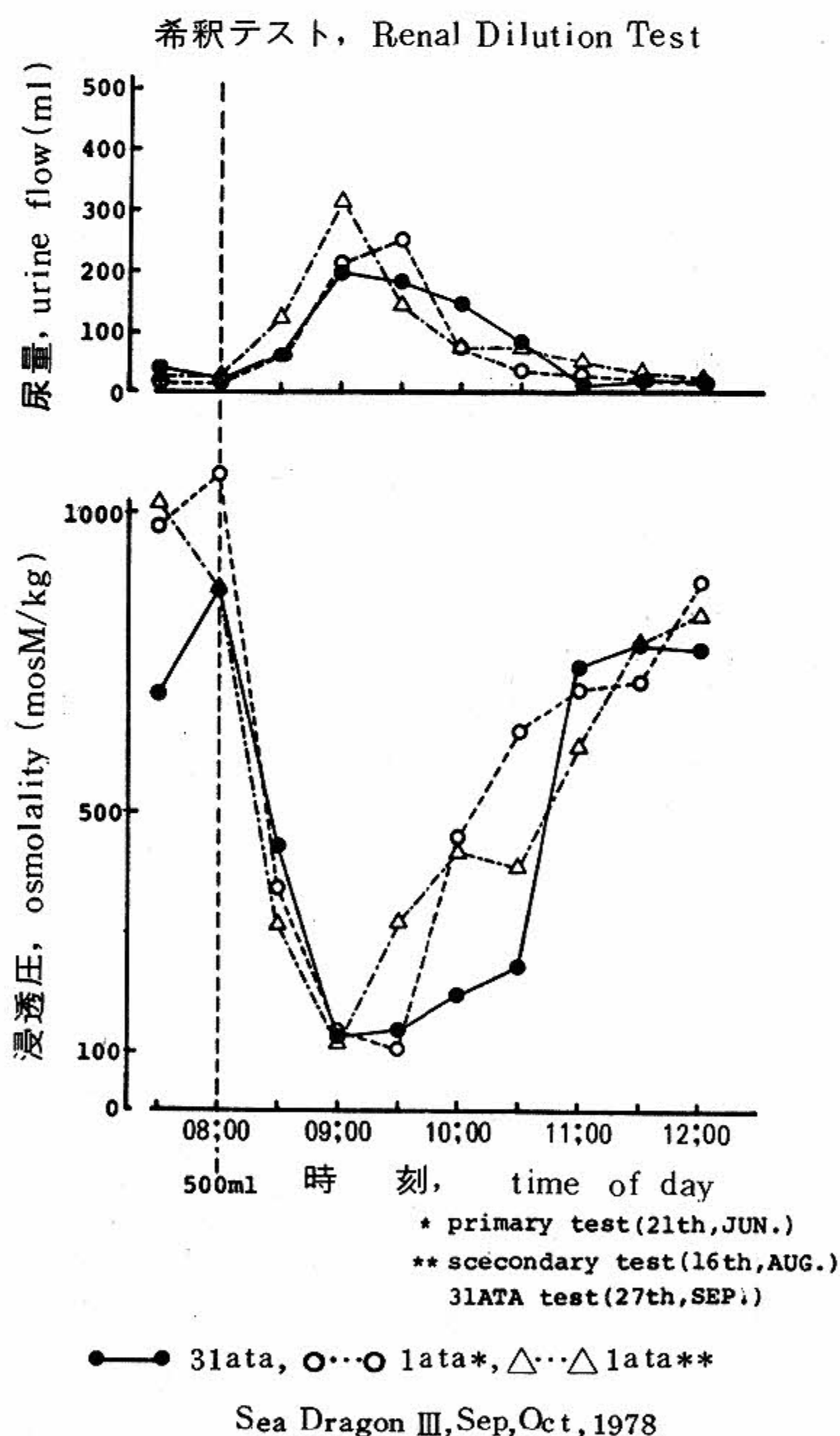
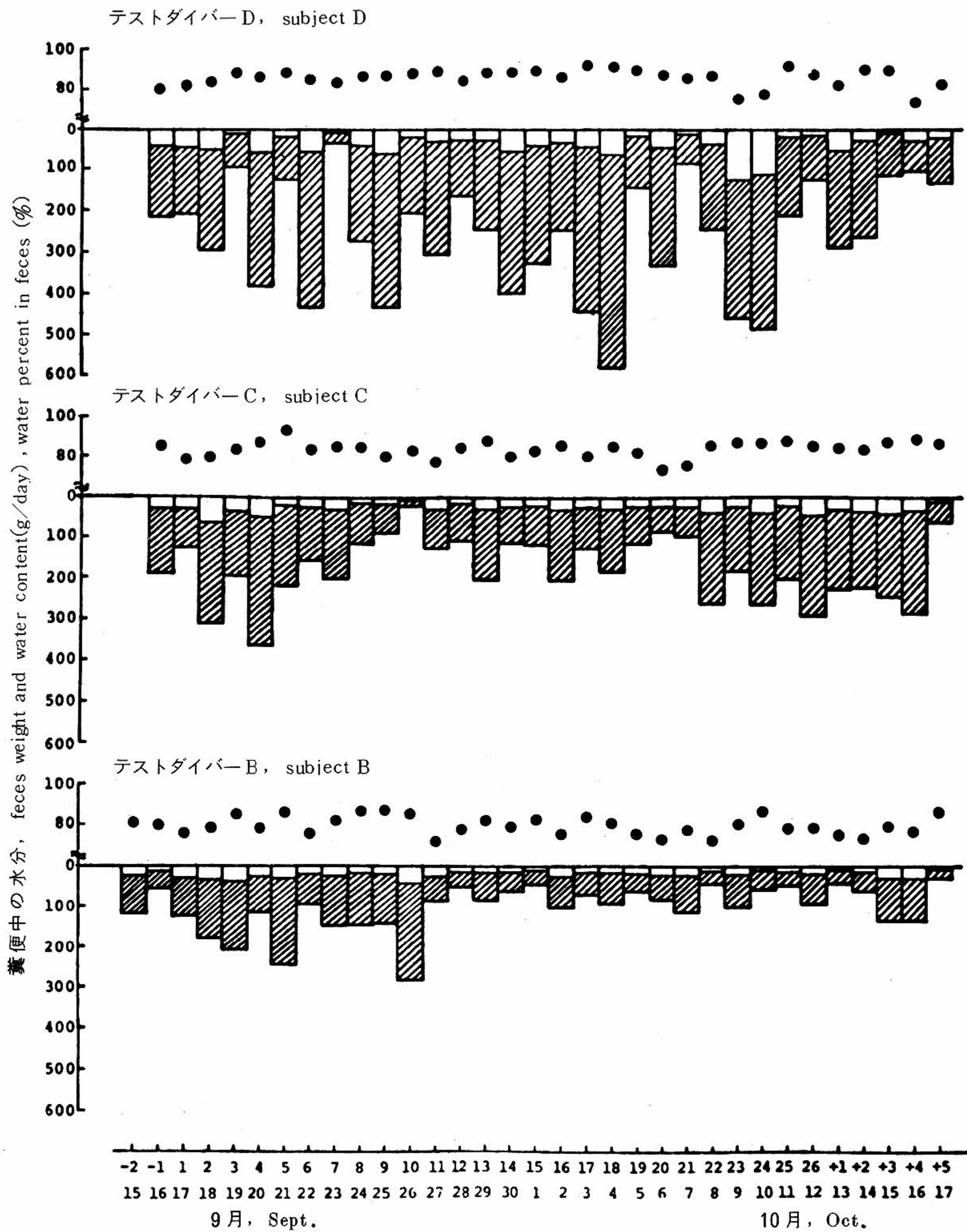


図 8 常圧及び 300 m における 500 ml 水負荷試験の結果 (テストダイバー B)

The 500 ml water tolerance test in the 300 m saturation diving experiment and in the 1 ata control. (Subject B)



減 圧, decompression
日 程, a day's program

- 水分含有率 water percent (%)
- 除去した水分 except water (g)
- 糞便中の水分 water in feces (g)

Sea Dragon IV, Sept., Oct., 1978

図9 糞便中の水分含量

The feces condition in the 250, 300m saturation diving experiment.

の500ml水負荷試験を実施した。

図8はその結果を示す。

第1回目及び第2回目の実験は、コントロールとして、300 m潜水シミュレーション実験の前に実施した。高圧下の試験は300 m加圧後3日目に行った。いずれの試験も水道水を用い、早朝空腹時に行った。飲水後、30分ごとの尿量には有意な変化はみられなかった。

このことは互に異なる圧力下でも、同程度の水分摂取であれば、利尿現象にほとんど差がないことを意味している。これについて、これまでのすべての実験で、高圧下での水分摂取量が特に常圧下よりも上回っていたという事実もない。したがって高圧下の利尿現象は水分摂取量とは関係なく起っていることが、ここでも示唆される。

3.6 高頻度の下痢

高圧下でみられた注目すべき現象は加圧から減圧中にかけてみられた高頻度の下痢である。

図9には1979年の250, 300 m実験時に実施した糞便分析の結果を示す。図中の水分85%以上を示す値は肉眼的所見から下痢状態であった。

このうち、糞便の状態が最も悪かったのはテストダイバーDで、保圧から減圧終了までの連日2～4回の排便を行っていた。この原因は当初、直腸温のサーミスタによる直腸への機械的

刺激や環境ガスによる腹部の冷えなど、いくつかの要素が考えられる。そのため、同実験では腹部の冷え防止のため、5日間隔で就寝時に腹帯の使用を試みたが、ほとんど、その効果は認められなかった。最近、それらが加圧の原因ではなく、むしろ、閉鎖環境によるストレスが原因であることが判明してきた。

3.7 潜水実験における不感蒸泄の推移

尿量の変化や水分摂取量をもとに、同一被検者の各飽和潜水実験における不感蒸泄の推移を図10に示す。ここで明らかなことは、period-I, -Vの不感蒸泄がperiod-II, -III, -IVに比べて減少していること、さらに圧力が増すにつれて不感蒸泄が減少していることである。

1979年の300m実験で計9回の不感蒸泄の測定を行った。その結果を表2に示す。これから明らかなように、高圧下の不感蒸泄は常圧時の約48%に減少していた。

不感蒸泄には呼吸気道からと全皮膚面からのものと2種類がある。常圧下では前者は後者の約30%程度で、これらは代償的に行われるといわれている。また、不感蒸泄の増減は、かなりの個人差があることも知られており、この増減に大きな影響を及ぼす要因には、呼吸気道では吸入ガスの乾湿、皮膚では温度の変化であるといわれている。図10に示す、高圧下でみられた

表2 不感蒸泄量

Insensitive water loss

(単位 unit : g/min)

観察の時期 period		テストダイバー, Subject				平均値 mean ± sd.
		A	B	C	D	
潜水前 pre-dive	1	0.88	0.69	1.01	0.87	0.84 ± 0.040
	2	0.93	0.90	0.79	0.68	
飽和潜水 saturation diving (31 ATA)	3	0.447	0.327	0.534	0.587	0.44 ± 0.090
	4	0.448	0.272	0.534	0.476	
	5	0.350	0.398	0.434	0.329	
	6	0.457	0.335	0.556	0.470	
	7	0.569	0.444	0.424	0.350	
潜水後 post-dive	8	1.024	0.943	0.845	0.762	0.90 ± 0.047
	9	1.039	0.972	0.968	0.666	

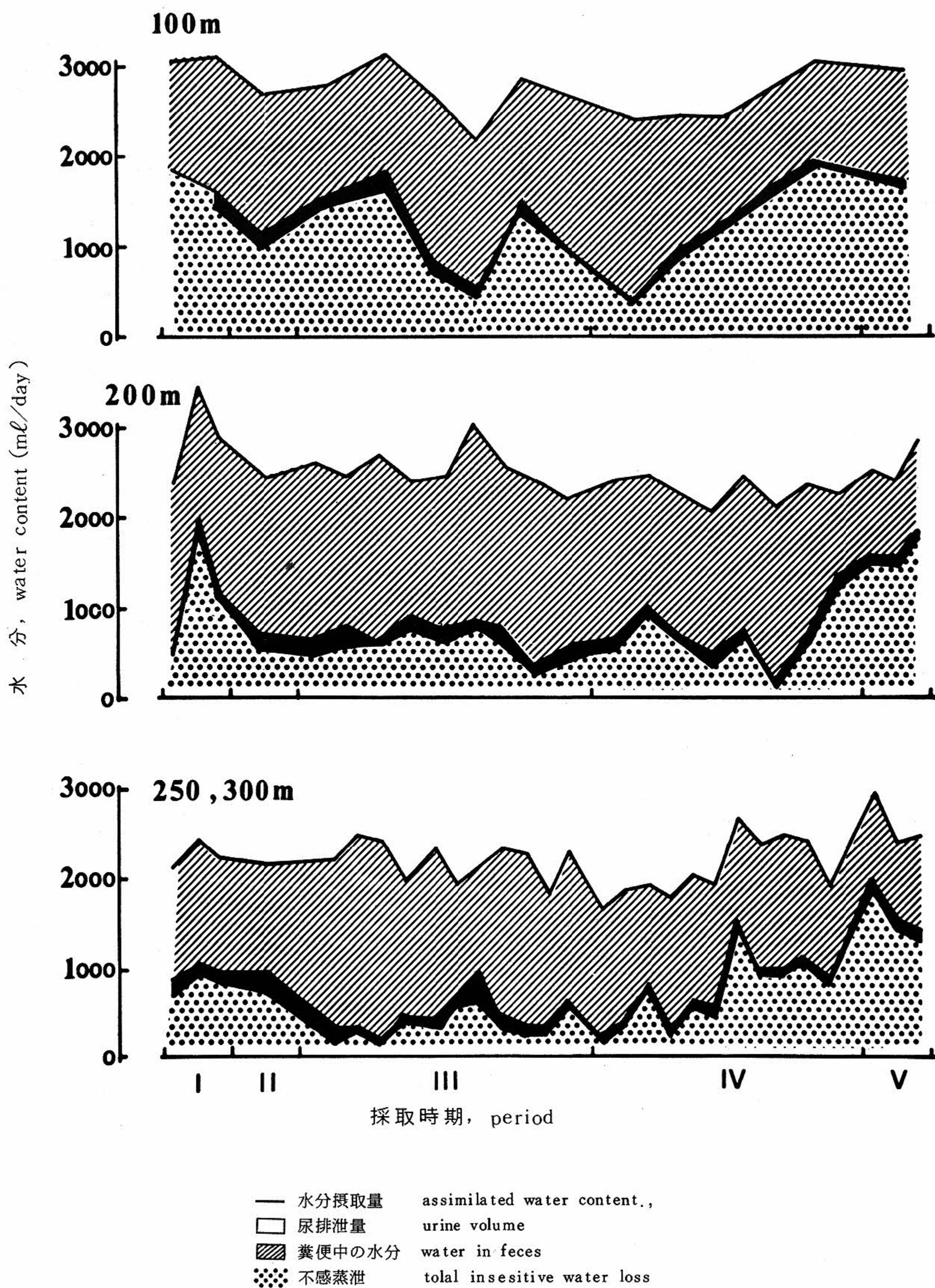


図10 水分バランスからみた不感蒸泄の推移 (テストダイバー B)

The total insensitive water loss of the same subject in the saturation diving experiment from 100 m to 300 m. (Subject B)

感蒸泄は、代償的に変化したのではなく、総不感蒸泄量が減少していたということで、常圧下とは異なっている。この減少が、呼吸気道、皮膚のいずれからの減少によるものかはまだ明らかではない。

3.8 尿量と体温

図11に示す 300 m 実験時の早朝 (07:00) の皮膚温の変化をみると、加圧から保圧時にかけての減少がみられ、この変化は、おおむね尿量の変化とは逆の動きを示す。このようなことからみても、皮膚不感蒸泄の減少が大きかったことが予測される。夜間排尿の問題も、高圧 He 環境下では、わずかな温度変化が利尿現象に大きな影響を及ぼしていることなどからみても、就寝時の cold stress があるのではないと思われる。

3.9 今後の問題点

各実験を通してみた尿量の多少は、実験を実施した時期的 factor も無視することはできない。これらの問題に関して、現在 hormonal の

問題を主に、解析を行っている。したがって、早急に解決しなければならない当面の問題としては、

- (1) 高圧下の夜間排尿がなくなるような手段を講じ、長期間チェンバー内で生活するダイバー達の睡眠不足による疲労を除く
- (2) 情動ストレスを少なくすることなどである。そのためには常時一定している昼夜間の環境温を変化させてみることや、高圧 He 環境下で着用する特殊な衣類の考察、さらには閉鎖環境内での娯楽などが、今聞の課題であろう。

4. ま と め

シードラゴン I ~ IV 計画にみられた加圧に伴う、24時間尿量の増加は、おおむね夜間尿量の変化と類似していた。

24時間尿量の増加は GFR (糸球体濾過率) の増加ではなく、尿細管からの水分再吸収が抑制されたために起った変化と思われる。また、圧力が異なることによって利尿パターンに相違がめられたが、圧力の増加と利尿現象との関係には相関はみられなかった。

150 m 以深の実験で保圧時の夜間尿量の増加がみられたが、それは減圧と共に消失した。

このほか、潜水後尿量が潜水前に比べて明らかな減少を示した。これは加圧時の利尿現象による水分損失を補う手段として、生体の homeostatic な反応と思える。

総不感蒸泄量は圧の増加に伴ない減少した。皮膚温の変化もこれと同様の変動を示しており、これらを反映して利尿現象が起っているものと思われる。このことから環境ガスによる cold-stress の影響が伺える。

以上のことから加圧時の利尿現象の概要をおおむね、次のように系統づけて要約できるのではなかろうか。

保圧時の尿量変化で、昼夜間の変化がほぼ逆の動きをしていることから、

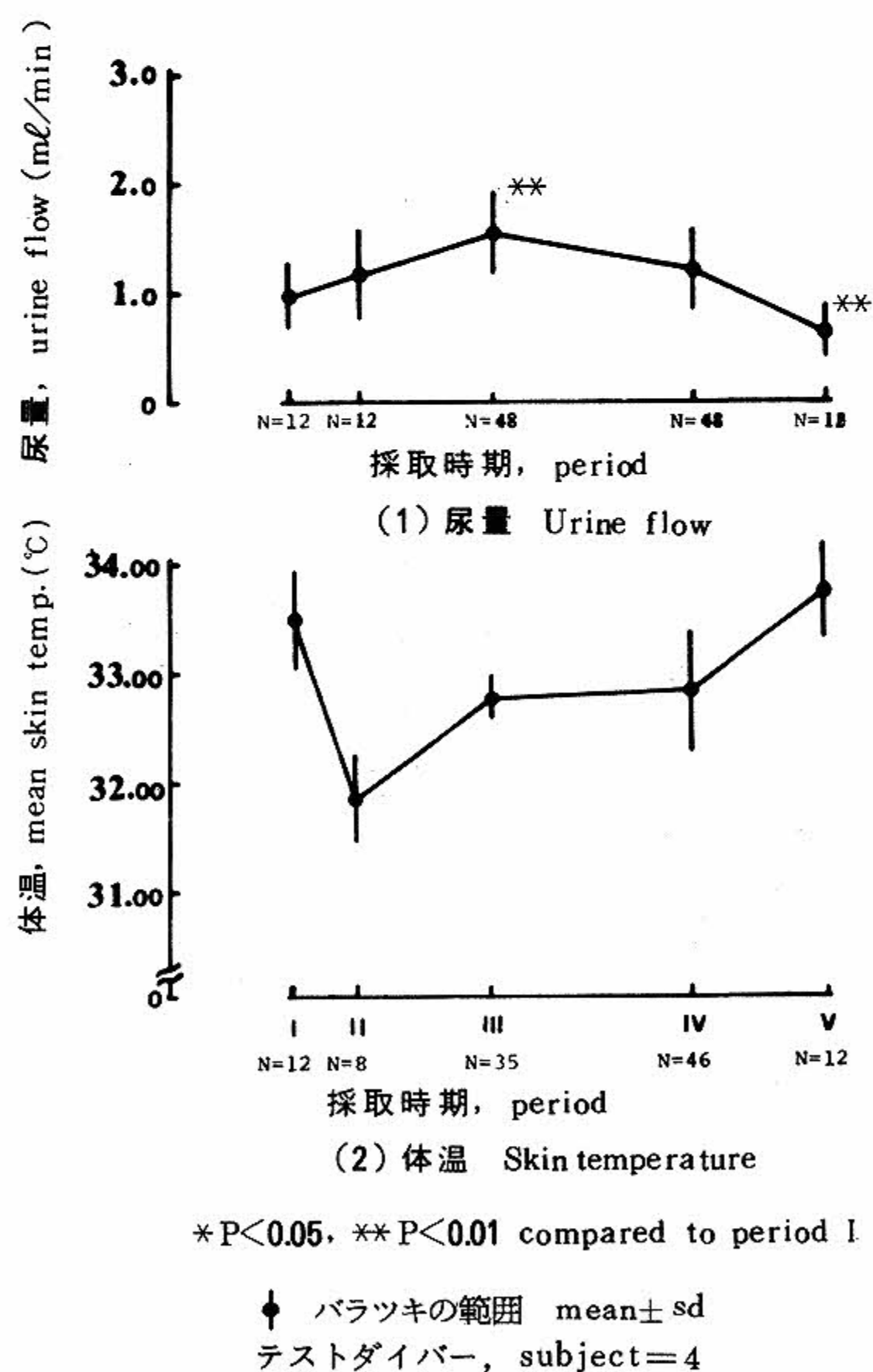
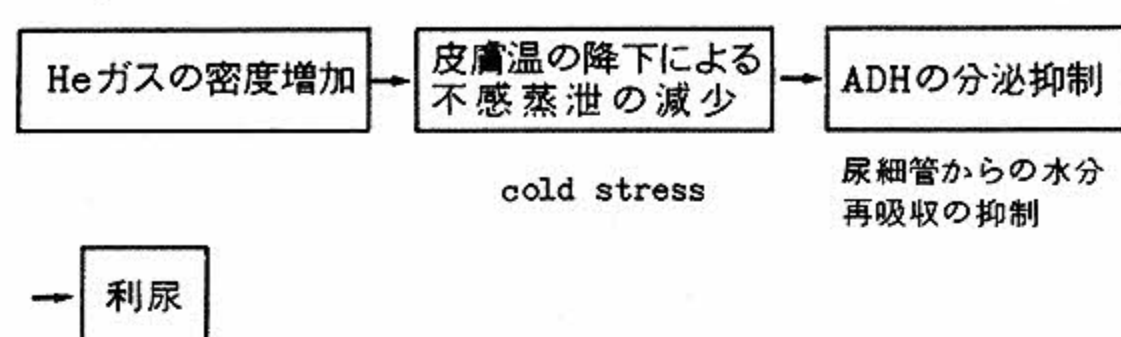


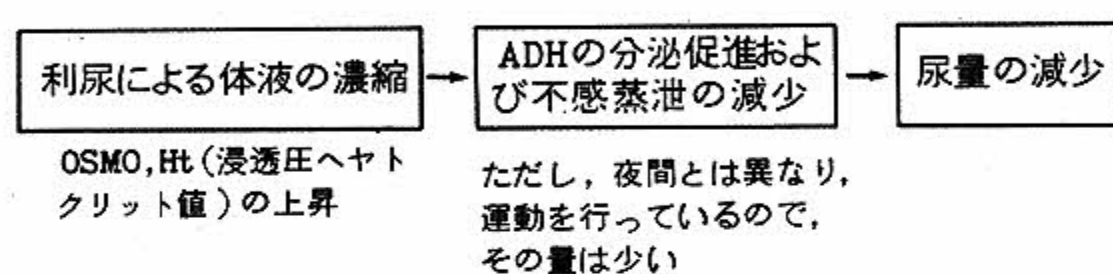
図11 300 m シミュレーション実験における尿量と体温

Urine flow and skin temperature in 300 m saturation diving experiment.

(1) 加圧直後および保圧時の夜間



(2) 保圧中の10:00-20:00頃までの時間帯
(上記1)に対する現象に対する拮抗作用)



文 献

- 1) 加藤暎一, 山内真, 体液バランスの基礎と臨床, 1965, p.21-22., 文光堂

- 2) 竹内久美, 設楽文朗ほか, 1978, "高圧環境下の消化機能", JAMSTECTR (2), 136
- 3) Hong S.K., 1975, "Body fluid balance during saturation diving" ., International Symposium on man in the sea, IV., p.127-138
- 4) Hong S.K., Claybaugh J.R., et al., 1977, "HANA KAI II, a 17 day dry saturation dive at 18.6 ATA., III. Body fluid balance", Undersea biomed. Res. 2, p.247-263
- 5) 吉村寿一, 緒方維弘, 生理学大系 IV - I, 1970, p.652-668., 医学書院
- 6) 海中作業基地による海中実験報告書, 1975, p.p.128., JAMSTEC.
- 7) 海中作業基地による海中実験研究, 成果報告書 1/2, 1976, p.151-153., JAMSTEC.
- 8) 大陸棚有人潜水作業システムの研究開発, 成果報告書, 1977, p.75-87., JAMSTEC.