

飽和潜水用減圧表の研究

第1報 ラット・ウサギ・イヌの実証実験

設楽 文朗*¹ 他谷 康*¹ 毛利 元彦*¹

Yu-Chong LIN*²

Universal Decompression Table (UDT, Lin et al., 1988 ; Lin et al., 1989) を用いて1) 飽和潜水の減圧時間を安全に短縮するために動物実験で有効性を実証し、併せて2) 減圧症の研究のための動物モデルを作成するための減圧表としての有効性を検討した。実験動物には、ラット82匹 (9 実験), ウサギ52羽 (9 実験), イヌ14匹 (7 実験) を使用し合計25回の実験を実施した。飽和深度は、300m, H_e-O₂, 酸素分圧0.5barからの減圧で実施した。

結果

1. 5 Tauでは体重と半飽和時間の関係式は、 $T_{1/2} = 26.36W^{0.59}$ ($r=0.994$) が導かれた。5 Tauとは、SDT (減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間) の内1 Tauを減圧点間の減圧時間に充て、残り4 Tauを減圧点での停留時間とする階段減圧である。
2. 3 Tau, 1 Tauの実験も行いTDT (総減圧時間) において最も短縮されたSDTは、1 Tauであった。1 Tauとは、SDTの全ての時間を減圧点間の減圧時間に充てるもので半飽和時間の値が大きくなる直線減圧である。
3. 階段減圧方法よりも直線減圧方法が、安全な減圧時間の短縮に有効性を示すことが示唆された。
4. UDTは、ウサギ、イヌのベンズから中枢神経系減圧症の動物モデル作成に十分有効性を示すことが確認された。

キーワード：飽和潜水，減圧表，動物実験，減圧症

* 1 海域開発・利用研究部 第5研究グループ

* 2 ハワイ大学生理学教室

* 3 Coastal Reseach Department

* 4 Depertment of Physiology, University of Hawaii

Study of Universal Decompression Table for Saturation Dives

—Validation Experiments on Rats, Rabbits and Dogs—

Fumiro SHIDARA^{*3} Yasushi TAYA^{*3}
Motohiko MOHRI^{*3} Yu-Chong LIN^{*4}

We conducted a validation study by applying the concept of universal decompression table (UDT, Lin et al., 1988 ; Lin et al., 1989) to animals. The principal objectives were 1) to shorten the decompression time systematically and safely, and 2) to produce animal models for the study of decompression sickness. A total of 25 decompression tables were formulated according to the UDT concept for decompression from 300m H_e-O₂(PO₂=0.5bar) saturation dives and tested on 82 rats (9 UDT300R tables), 52 rabbits (9 UDT300B tables), and 12 dogs (7 UDT300D tables).

RESULTS

1. We derived an interspecies relationship between body weight (W, in kg) tissue half-time (T_{1/2}, in minute) for inert gas elimination as $T_{1/2}=26.36W^{0.59}$ ($r=0.994$) by using 5 Tau as the stage decompression time, of which 1 Tau was used to reduce pressure and 4 Tau for equilibration.
2. To further reduce the decompression time, we tested some UDT tables by using the stage time of 3 Tau or 1 Tau. The shortest of decompression time was achieved by varying the value of T_{1/2} and by using 1 Tau as the short decompression time. In this case there were no pauses between stages, and decompression rate falls progressively with each stage.
3. We found that linear decompression between stages was safer than the original UDT. We were successful in reducing decompression time by using linear decompression between stages.
4. From these studies, we were able to produce decompression sickness consistently. Rabbits and dogs are good models of experimental decompression sickness for the study of bends and central nervous system disorders.

Key words : Saturation Dive, Decompression Table, Animal Experiment, Decompression Sickness

1 はじめに

有人飽和潜水において減圧に要する時間は、大変に長時間であり経済的負担も大きい。例えば、US. Navy, Comex, Royal. Navyの飽和潜水減圧表では300mからは12日間、500mからは20日以上、600mでは何と30日以上という減圧日数を要している。一方、現在までの有人300m飽和潜水実験の例において図1に示すように、スイスチューリッヒ大学において実施した実験で、減圧時間は88時間 (Buhlmann et al., 1970¹⁾) が最短の減圧時間であった。また、最長の減圧時間は、US. Navyと米

国デューク大学で実施した実験で、減圧時間は286時間 (Summit et al., 1971²⁾) であった。この2実験に使用された減圧表で、減圧時間は約200時間の違いがあるにもかかわらず、双方の実験で減圧の最終段階で軽いベンズの発症が共に認められ再圧治療を行っている。減圧時間の長短に係わらず同様の結果が示されたことから、飽和潜水の減圧時間を安全に短縮できる可能性が示唆された。

飽和潜水の最大の利点として、飽和期間 (産業潜水の場合においては水中作業量) が長期になればなる程効率良

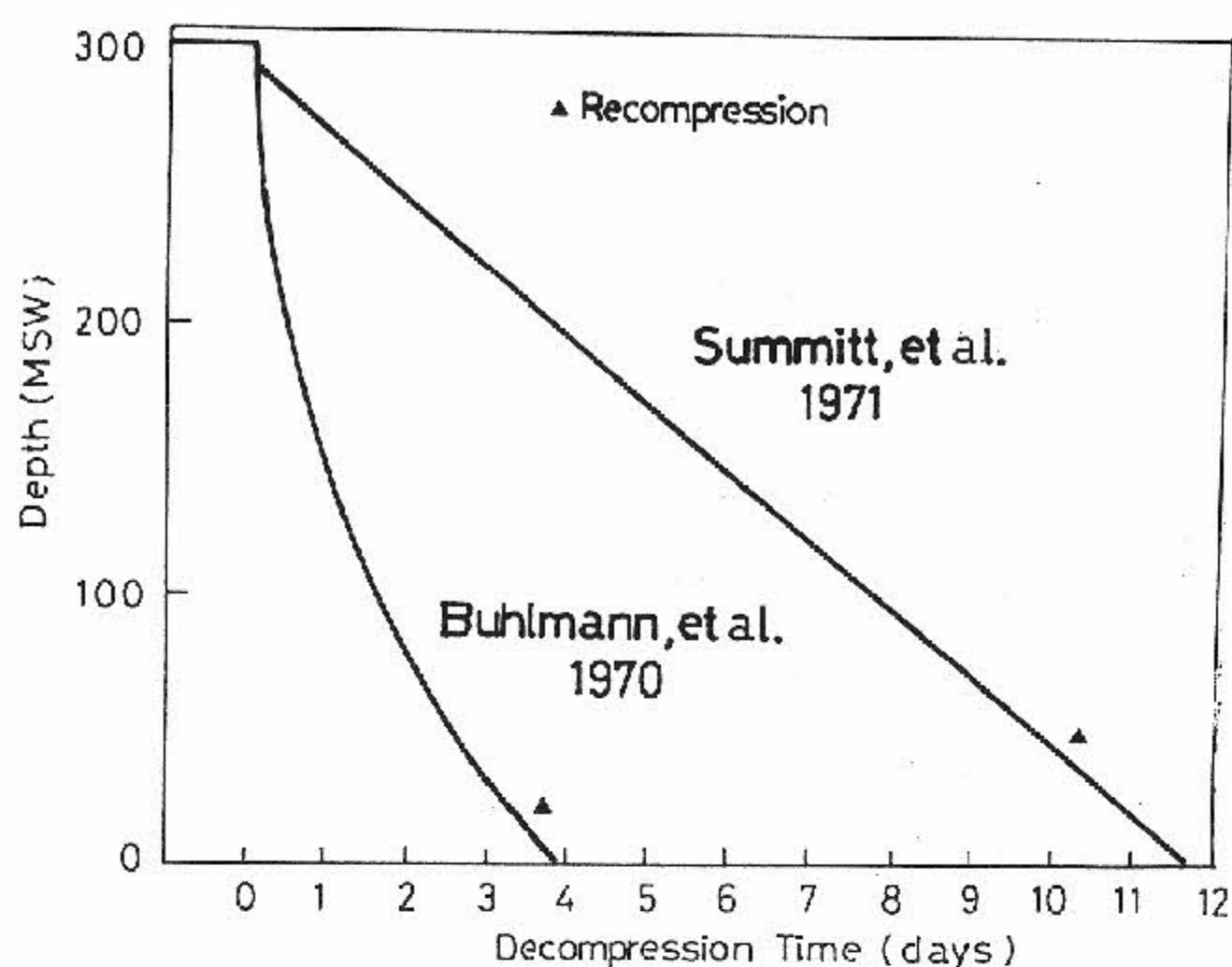


図1 有人飽和潜水実験の長短
Fig. 1

い潜水になり、また、短時間潜水のように減圧を毎日くり返すことなく大気圧に一回で復帰することができる安全な面もある。この飽和潜水の減圧期間を短縮でき安全が確保できたなら飽和潜水はさらに広く利用することができる。

2 目的

Universal Decompression Table (UDT) Y.C. Lin et al. (1988)³⁾ (1989)⁴⁾ を用いて飽和潜水の減圧時間を安全に短縮するために動物実験で有効性を実証し、半飽和時間と体重の関係式を導き、小動物からヒトまで活用できる万能飽和潜水用の減圧表の開発を目的とする。また、減圧障害及び後遺障害の研究のための動物実験において、減圧症モデル作成用の減圧表として利用できるかを検討する。

3 UDTの概念

UDTは、万能最大減圧深度差 (Universal dp_{MAX})、減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間 (Stage Decompression Time : SDT)、そして、総減圧時間 (Total Decompression Time : TDT) から成立している。

飽和深度 (P_1 : ATA) からの最大減圧深度差 (dp_{MAX} : kg/cm^2) はドップラー法による血中気泡検知の動物実験 (ラット、イヌ)⁵⁾ のデータを基に

$$dp_{MAX} = 0.415P_1 + 0.73 \text{ or } P_2 = (P_1 - 1.25)/1.710$$

(P_2 : 次の減圧点, ATA) の式を求めた。

P_1 と P_2 の関係は、 P_1 から P_2 に減圧した時は、その到達深度 P_2 が P_1 になり最終減圧点まで到達する。

減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間 (SDT : min)

は不活性ガス排出量から計算し、半飽和時間 ($T_{1/2}$: min) との関係 $SDT = 7.21T_{1/2}$ を算出した。

半飽和時間と体重との関係式は、呼吸循環代謝と体重の関係を

$T_{1/2} = K (W/Q)$ (Q : 心拍出量, l/min . W : 体重, kg) として $Q = 0.2W^{0.75}$ (Juznic & Klensch. 1964) から $T_{1/2} = K'W^{0.25}$ を導いた。

ヒトの $T_{1/2}$ の 240min 組織を基準にして、体重 70kg から K' を算出し、実験動物の体重に K' を乗ずることによりヒトの $T_{1/2}$ に対応した各種実験動物の $T_{1/2}$ が算出できる。また、SDT に Tau というユニットを設定し $SDT = 5 \text{ Tau}$ とした。

5 Tau の減圧法は、1 Tau を P_1 から P_2 への減圧点間減圧時間、4 Tau を減圧点停留時間とする。3 Tau の減圧法は、1 Tau の減圧点間減圧時間は 5 Tau の減圧法と同一で、2 Tau を減圧点停留時間とする。1 Tau の減圧法は、減圧点停留時間を取らないものである。したがって、

$$R = dp_{MAX}/\text{Tau} \quad (R: \text{減圧点間減圧スピード})$$

また、 $T_{1/2}$ が決定すると R は、5 Tau から 1 Tau まで同一になる。

総減圧時間 (TDT) は、 $TDT = nSDT + dp_{end}/R$ となる。

(n : 減圧点の数, dp_{end} : 最終減圧点からの深度, kg/cm^2)

4 実験方法

4.1 実験動物

ラットはウイスター系今道種雄、合計 82 匹 (体重 $255 \pm 13g$)、1 回の実験に 9 ~ 11 匹づつを使用した。ウサギは日本白色種雄、合計 52 羽 (体重 $2.95 \pm 0.34kg$)、1 回の実験に 3 ~ 6 羽づつを使用した。イヌはアメリカンビーグル種雄、合計 14 頭 (体重 $9.4 \pm 0.7kg$)、1 回の実験に 2 頭づつを使用した。

UDT の作成にあたってラットの体重は 0.4kg、ウサギの体重は 4kg、イヌの体重は 10kg として算出した。

4.2 実証実験

ラットについては、図 2 に示すとうり $Exp-I_R \sim IX_R$ 、ウサギについては、図 3 に示すとうり $Exp-III_B \sim XI_B$ 、イヌについては、図 4 に示すとうり $Exp-I_D \sim IX_D$ の合計 25 回の実験を実施した。

各実験共 150m/hr の加圧スピードで加圧し、2 時間で 300m に到達、ラットは 7 時間、ウサギは 11 時間、イヌ

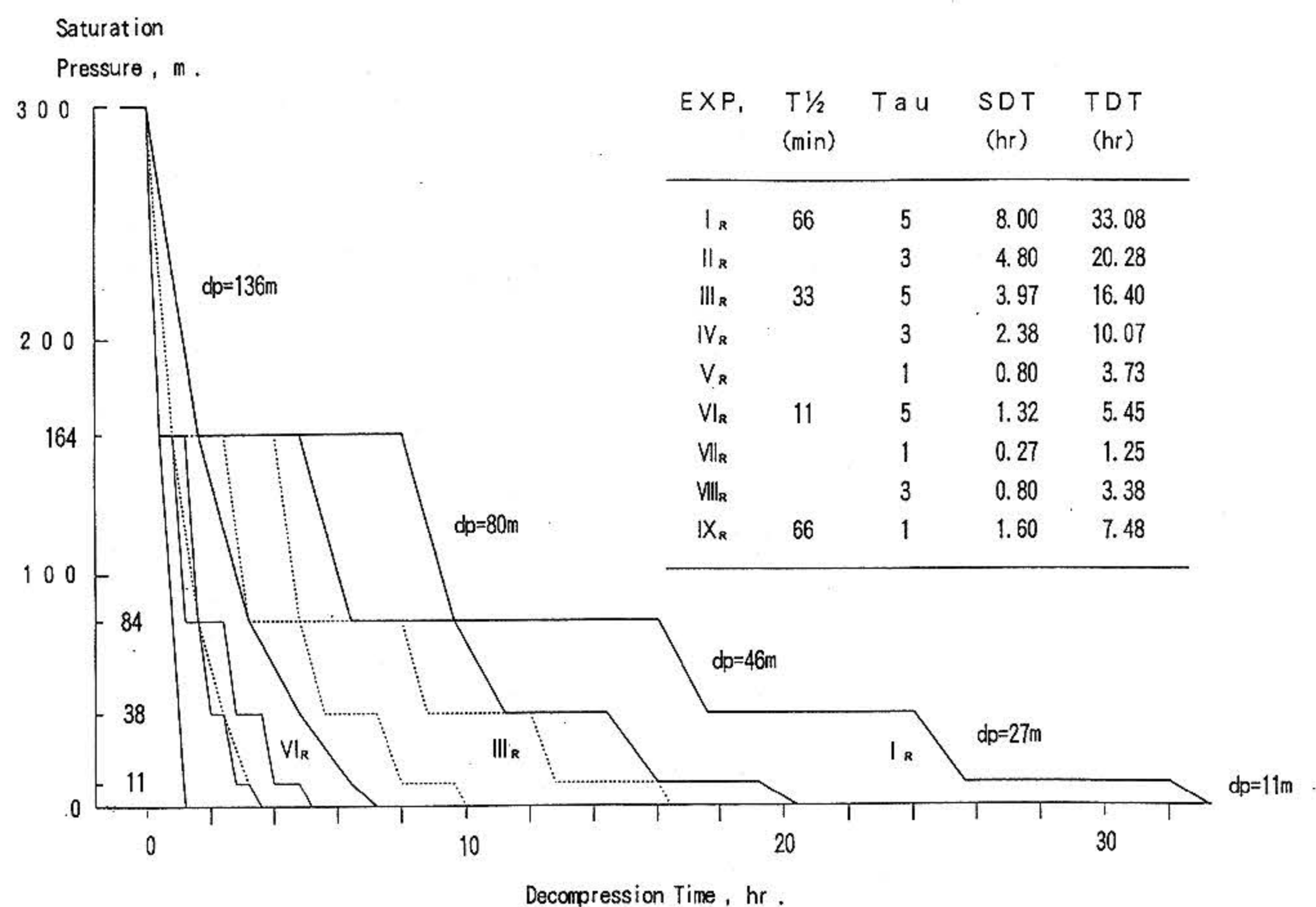


図2 ラットの300m飽和潜水減圧表 (UDT300R)
Fig. 2 Universal Decompression Tables for Rats from 300m Saturation Dive (He-O₂, PO₂=0.5bar).

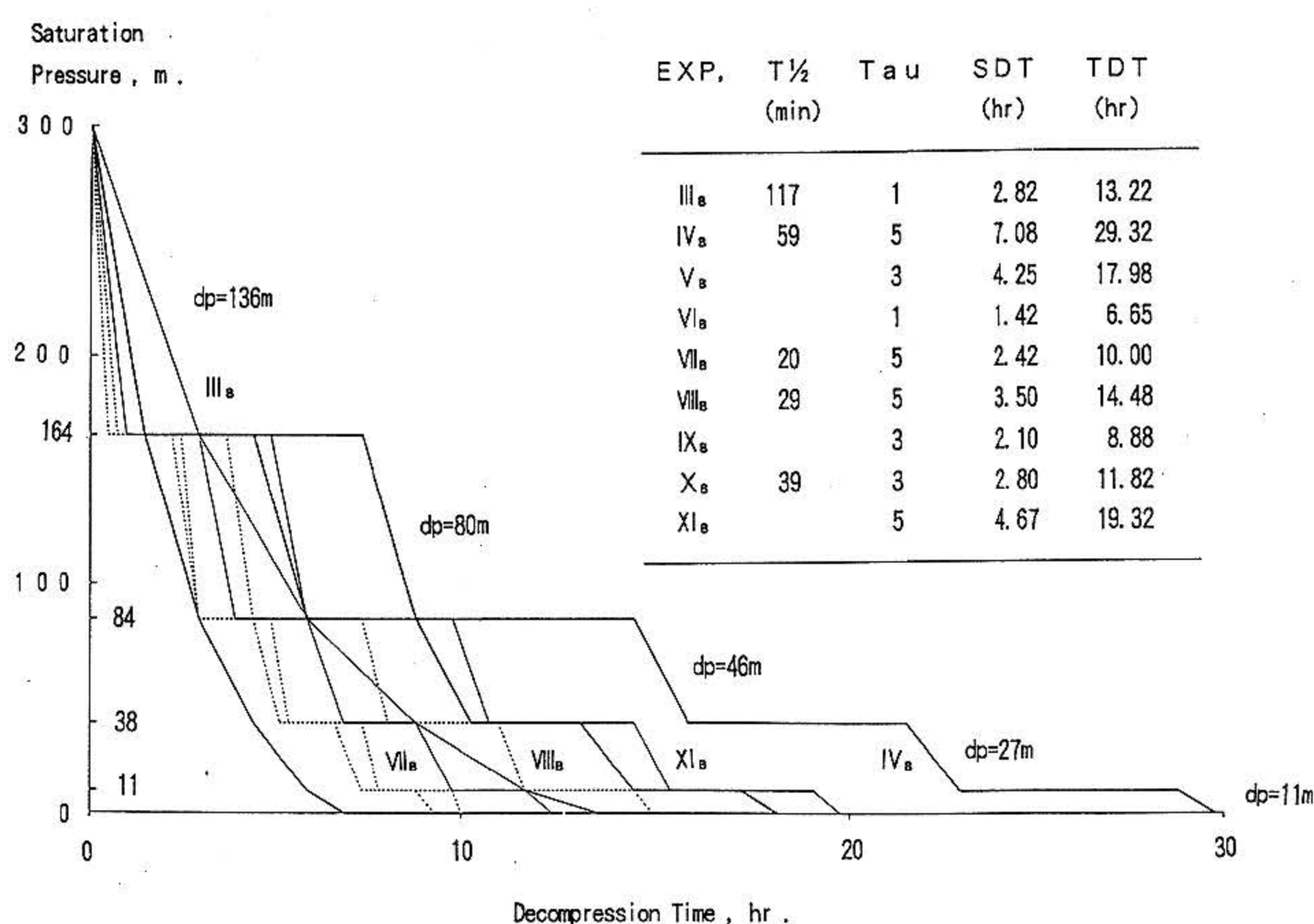


図3 ウサギの300m飽和潜水減圧表 (UDT300B)
Fig. 3 Universal Decompression Tables for Rabbits from 300m Saturation Dive (He-O₂, PO₂=0.5bar).

は12時間の飽和潜水停留後減圧を開始した。減圧点深度は、164m, 84m, 38m及び11mである。酸素分圧は0.5bar, 環境温度は300m深度相当圧で32±1℃と各減圧点毎に示適温度に設定した。また、湿度は55±5%とした。
ラットは、Exp-I_R (T_{1/2} 66min [ヒトの240min], 5

Tau) の総減圧時間が最も長い減圧表 (SDT=6.27hr, TDT=33.08hr) を基準にしてT_{1/2}=66min, 33min及び11minの5 Tauから1 Tauの減圧表について行った。
ウサギは、Exp-I_B (T_{1/2}=117min [ヒトの240min], 5 Tau) 総減圧時間が最も長い減圧表 (SDT=14.08hr,

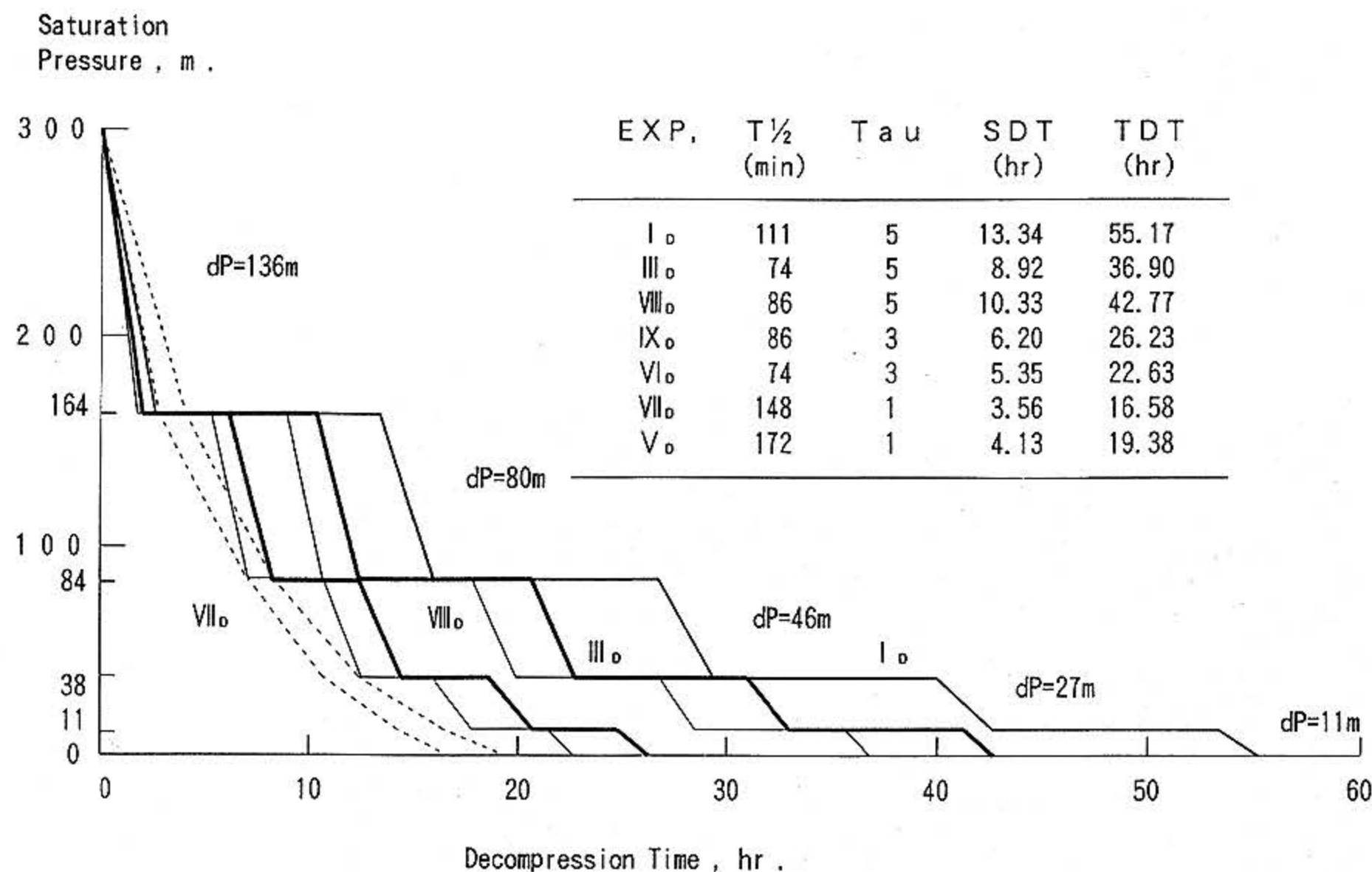


図4 イヌの300m飽和潜水減圧表 (UDT300D)

Fig. 4 Universal Decompression Tables for Dogs from 300m Saturation Dive (He-O₂, PO₂=0.5bar).

TDT=58.28hr) はラットの実験結果から問題なしとして省略し, T_{1/2}=117min, 59min, 39min, 28min及び20minの5 Tauから1 Tauの減圧表について実証実験を実施した。

イヌは, ラット, ウサギの実験結果から, T_{1/2}=172min, 148min, 111min, 86min及び74minの5 Tauから1 Tauの減圧表について実証実験を実施した。

4.3 減圧表の判定

各減圧表の良否は, 減圧中から減圧終了後までの死亡の有無と減圧症の発症を減圧中においては動物シミュレーターの覗き窓からの各実験動物の動作, 呼吸数などにより, 減圧終了後は動物シミュレーター搬出後に歩行動作などで観察し判定した。

4.4 各種実験動物と半飽和時間 (T_{1/2})

ヒト, ラット, ウサギ, イヌの半飽和時間 (T_{1/2}) の対比を示す。

種類	体重	半飽和時間 (T _{1/2})							
ヒト	70kg	280	240	180	140	120	100	80	40
ラット	400g	—	66	—	—	33	—	—	11
ウサギ	4kg	—	117	—	—	59	39	29	20
イヌ	10kg	172	148	111	86	74	—	—	—

5 実験結果

5.1 表1にラットの実証実験の結果を示す。

(1) Exp-I_R, III_R, VI_R

T_{1/2}=66min, 33min (減圧点間減圧スピードが T_{1/2}=66minの2倍) 及び11min (減点間減圧スピードが T_{1/2}=33minの3倍) で減圧点停留時間が減圧点間減圧時間の4倍 (5 Tau), TDT=33.08hr, 16.40hr, 5.45hrは, 減圧症の発症も観られず全22例とも正常であった。

(2) Exp-II_R, IV_R

T_{1/2}=66min及び33minで減圧点停留時間が減圧点間減圧時間の2倍 (3 Tau), (5 Tauの1/2), TDT=20.28hr, 10.07hrは, 減圧症の発症も観られず全20例とも正常であった。

(3) Exp-VIII_R

T_{1/2}=11min, 3 Tau, TDT=3.38hrは, 減圧終了後5分に11例中1例が減圧症の発症により死亡した。

(4) Exp-V_R, IX_R

T_{1/2}=66min, 33minで減圧点停留時間を取らない時 (1 Tau), TDT=7.48, 3.73hrは, 減圧症の発症も観られず全20例とも正常であった。

(5) Exp-VII_R

T_{1/2}=11min, 1 Tau, TDT=1.25hrは, 減圧中15mで3例, 9mで1例, 6~7mで2例, 4mで1例, そして, 減圧終了直後に2例の全9例全て減圧

表1 UDT実証試験の結果 (ラット)

Table 1 Test Parameters, Body Weight Change and Outcome for UDT-300 for Rats.

EXP.	T1/2 (min)	Tau	SDT (h)	TDT (h)	n	Body Wt. (g)			Outcome
						In	Out	Change	
I _R	66	5	8.00	33.08	2	244	257	13	No DCS Symptoms
II _R	66	3	4.80	20.28	10	245±4	262±6	17±5	No DCS Symptoms
III _R	33	5	3.97	16.40	10	263±6	257±5	-6±6	No DCS Symptoms
IV _R	33	3	2.38	10.07	10	257±2	257±3	0±3	No DCS Symptoms
V _R	33	1	0.80	3.73	10	261±3	258±6	-3±5	No DCS Symptoms
VI _R	11	5	1.32	5.45	10	263±6	254±6	-10±4	No DCS Symptoms
VII _R	11	1	0.27	1.25	9	271±17	259±23	-12±7	All dead, 3 at 15m, 1 at 9m, 2 at 6-7m, 1 at 4m, and 2 after surfacing.
VIII _R	11	3	0.80	3.38	11	243±6	239±7	-3±3	1 dead 5 min after surfacing
IX _R	66	1	1.60	7.48	10	241±8	238±8	-3±3	No DCS Symptoms
Average					82	255±13	253±13	-2±9	

* T1/2: 反飽和時間, Tau: 減圧法のユニット

SDT: 減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間, TDT: 総減圧時間

DCS: 減圧症

表2 UDT実証試験の結果 (ウサギ)

Table 2 Test Parameters, Body Weight Change and Outcome for UDT-300 for Rabbits.

EXP.	T1/2 (min)	Tau	SDT (hr)	TDT (hr)	n	Body Wt. (kg)			Outcome
						In	Out	Change	
III _B	117	1	2.82	13.22	9	2.87±0.33	2.84±0.32	-0.03±0.07	No DCS Symptoms
IV _B	59	5	7.08	29.32	3	2.94±0.18	2.61±0.11	-0.34±0.29	No DCS Symptoms
V _B	59	3	4.25	17.98	9	3.09±0.23	2.97±0.27	-0.12±0.10	No DCS Symptoms
VI _B	59	1	1.42	6.65	3	2.47±0.14	2.34±0.15	-0.14±0.03	1 DCS from 20m.
VII _B	20	5	2.42	10.00	3	2.40±0.05	2.33±0.04	-0.08±0.01	1 dead at 25m and 1 DCS after surfacing.
VIII _B	29	5	3.50	14.48	10	2.80±0.25	2.73±0.25	-0.07±0.05	3 dead, 2 at 11m and 1 after 12hrs surfacing. 2 DCS after surfacing.
IX _B	29	3	2.10	8.88	3	3.05±0.03	2.97±0.09	-0.08±0.09	1 dead after surfacing.
X _B	39	3	2.80	11.82	3	2.91±0.03	2.79±0.05	-0.11±0.03	1 dead after surfacing.
XI _B	39	5	4.67	19.32	6	3.17±0.09	3.05±0.11	-0.12±0.10	1 dead at 11m.
Control					3	3.67±0.15	3.69±0.22	0.01±0.12	
Average					52	2.95±0.34			

* T1/2: 半飽和時間, Tau: 減圧法のユニット, SDT: 減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間

TDT: 総減圧時間

DCS: 減圧症

症の発症により死亡した。

(6) 総減圧時間

33.08時間 (T1/2=66min, 5 Tau) から1.25時間 (T1/2=11min, 1 Tau) の範囲で実証実験を行い, T1/2=33min, 1 Tauで総減圧時間3.73時間までは, 減圧症の発症, 死亡例も観られず有効な減圧法であることが実証された。

(7) 体重変化

実験前後で変化の範囲は, 各実験毎の平均で+17±5~-12±7g, 変化率は+7~-4%であった。但

し, 死亡例と減圧症の発症例の観察された減圧表と有効であった減圧表の実験前後の変化率は, -3%と0%であった。

5.2 表2にウサギの実証実験の結果を示す

(1) EXP-III_B

T1/2=117minで減圧点停留時間を取らない時 (1 Tau), TDT=13.22hrは, 減圧症の発症も観られず全9例とも正常であった。

(2) Exp-IV_B

T1/2=59min (減圧点間減圧スピードがT1/2=117minの2倍)で減圧点停留時間が減圧点間減圧時間の4倍(5 Tau), TDT=29.32hrは, 減圧症の発症も観られず全3例とも正常であった。

(3) Exp-V_B

T1/2=59minで減圧点停留時間が減圧点間減圧時間の2倍(3 Tau), (5 Tauの1/2), TDT=17.98hrは, 減圧症の発症も観られず全9例とも正常であった。

(4) Exp-VI_B

T1/2=59min, 1Tau, TDT=6.65hrは, 減圧中約20mから3例中1例に減圧症(両後肢の麻痺)の発症が観察された。

(5) Exp-VII_B

T1/2=20min (減圧点間減圧スピードがT1/2=59minの3倍), 5 Tau, TDT=10.00hrは, 第2減圧点84mから3例中1例に減圧症(両後肢の麻痺)の発症が観察され約25mで死亡した。また, 減圧終了直後の血中気泡検知は2例中1例に気泡が検知されたが1時間後には消失していた。残り1例は血中気泡検知は認められなかった。

(6) Exp-VIII_B

T1/2=29min (減圧点間減圧スピードがT1/2=59minの2倍), 5 Tau, TDT=14.48hrは, 最終減圧点11mで10例中2例, 減圧終了12時間後に1例が減圧症の発症により死亡した。

また, 減圧終了後に残り7例中2例に減圧症(両後肢の麻痺)の発症が観察され, その中の1例は中枢神経系の減圧症の発症も観察された。

(7) Exp-IX_B

T1/2=29min, 3 Tau, TDT=8.88hrは, 3例中

1例が減圧終了後に減圧症の発症により死亡した。

(8) Exp-X_B

T1/2=39min, 3 Tau, TDT=11.82hrは, 3例中1例に最終減圧点11mから1例に減圧症の発症と観られる動作が観察され減圧終了後に死亡した。

(9) Exp-XI_B

T1/2=39min, 5 Tau, TDT=19.32hrは, 6例中1例が最終減圧点11mで減圧症の発症により死亡した。

(10) 総減圧時間

29.32時間(T1/2=59min, 5 Tau)から6.65時間(T1/2=59min, 1 Tau)の範囲で実証実験を行い, T1/2=117min, 1 Tauで総減圧時間13.22時間までは, 減圧症の発症, 死亡例も観られず有効な減圧法であることが実証された。

(11) 体重変化

9実験全てにおいて実験前後で減少が観られ, その減少の範囲は各実験毎の平均で0.34~0.08kg, 減少率は12~3%であった。但し, 死亡例と減圧症の発症例の観察された減圧表と有効であった減圧表の実験前後の変化率は, -14%と-4%であった。

5.3 表3にイヌの実証実験の結果を示す。

(1) Exp-I_D

T1/2=111minで減圧点停留時間を減圧点間減圧時間の4倍(5 Tau), TDT=55.17hrは, 減圧症の発症も観られず全例とも正常であった。

(2) Exp-III_D

T1/2=74min (減圧点間減圧スピードがT1/2=111minの1.5倍)で5 Tau, TDT=36.90hrは, 減圧終了後1例に減圧症(左前肢のベンズ)の発症が観

表3 UDT実証試験の結果(イヌ)

Table 3 Test Parameters, Body Weight Change and Outcome for UDT-300 for Dogs.

EXP.	T1/2 (min)	Tau	SDT (hr)	TDT (hr)	n	Body Wt. (kg)			Outcome
						In	Out	Change	
I _D	111	5	13.34	55.17	2	10.2±0.2	10.3±0.4	0.1±0.1	No DCS Symptoms
III _D	74	5	8.92	36.90	2	10.1±0.1	9.6±0.2	-0.5±0.1	1 DCS after surfacing.
VIII _D	86	5	10.33	42.77	2	9.8±0.0	9.8±0.1	-0.1±0.1	No DCS Symptoms
IX _D	86	3	6.20	26.23	2	9.1±0.0	9.7±0.1	0.6±0.1	No DCS Symptoms
VI _D	74	3	5.35	22.63	2	9.0±0.2	9.2±0.4	0.2±0.1	2 DCS, 1 at 24m and 1 at 12m.
VII _D	148	1	3.56	16.58	2	8.7±0.2	8.8±0.1	0.1±0.1	1 DCS after surfacing.
V _D	172	1	4.13	19.38	2	8.9±0.1	8.6±0.1	0.3±0.1	No DCS Symptoms
Average					14	9.4±0.7			

* T1/2: 半飽和時間, Tau: 減圧法のユニット, SDT: 減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間

TDT: 総減圧時間

DCS: 減圧症

察された。

(3) Exp-VIII_D

T1/2=86min (減圧点間減圧スピードがT1/2=111minの1.3倍) で5 Tau, TDT=42.77hrは、減圧症の発症も観られず全例とも正常であった。

(4) Exp-IX_D

T1/2=86minで減圧点停留時間を減圧点間減圧時間の2倍(3 Tau), TDT=26.23hrは、減圧症の発症も観られず全例とも正常であった。

(5) Exp-VI_D

T1/2=74minで3 Tau, TDT=22.63hrは、減圧中24mから1例に頻呼吸が観察され、減圧終了後には、減圧症(下半身の麻痺)の発症が観察された。残りの1例は減圧中12mから吠える、給水口を噛むなどの異常な動作が観察され減圧症の発症と判定したが減圧終了後には正常に復帰した。

(6) Exp-VII_D

T1/2=148min (減圧点間減圧スピードがT1/2=74minの0.5倍) で減圧点停留時間を取らない(1 Tau), TDT=16.58hrは、減圧終了後1例に減圧症(下半身麻痺)の発症が観察された。

(7) Exp-V_D

T1/2=172min (減圧点間減圧スピードがT1/2=86minの0.5倍) で1 Tau, TDT=19.38hrは、減圧症の発症も観られず全例とも正常であった。

(8) 総減圧時間

55.17時間(T1/2=111min, 5 Tau) から、16.58時間(T1/2=148min, 1 Tau) の範囲で実証実験を行い、T1/2=172min, 1 Tauで総減圧時間19.38時間までは、減圧症の発症、死亡例も観られず有効な減圧法であることが実証された。

(9) 体重変化

実験前後で変化の範囲は、各実験毎の平均で $0.6 \pm 0.1 \sim -0.5 \pm 0.1$ kg, 変化率は、 $+6 \sim -5\%$ であった。但し、死亡例と減圧症の発症例の観察された減圧表と有効であった減圧表の実験前後の変化率は、 -1% と $+2\%$ であった。

6 考 察

ラットを用いての飽和潜水用万能減圧表の実証実験の結果は、1 Tauでは半飽和時間T1/2=33minの総減圧時間(TDT) 3.73時間であり、3 TauではT1/2=33minのTDT=10.07hrであり、5 TauではT1/2=11minのTDT=5.45hrまで短縮された。ウサギの実証実験の結果は、

1 TauではT1/2=117minのTDT=13.22hrであり、3 Tauでは、T1/2=59minのTDT=17.98hrであり、5 Tauの結果では、T1/2=59minのTDT=29.32hrまで短縮された。イヌの実証実験の結果は、1 TauではT1/2=172minのTDT=19.38hrであり、3 Tauでは、T1/2=86minのTDT=26.23hrであり、5 hrでは、T1/2=86minのTDT=42.77hrまで短縮された。これらのラット、ウサギ、イヌの実験結果を比較すると、総減圧時間において最も短縮された減圧方法は減圧点停留時間を取らない1 Tauであった。言い換えると階段減圧方法よりも直線減圧方法が、安全な減圧時間の短縮に有効であることが示唆された。

一般的に階段減圧と直線減圧の優位性は、短時間潜水においては組織不活性ガス圧と環境不活性ガス圧の差(driving force)が大きくなるが、反面、組織不活性ガス圧と環境圧の比(Supersaturation ratio)が一定値(Safe ratio)をこえると気泡発生がおこり減圧症となるが、この値をこえないようにdriving forceを最大にすることで階段減圧は合理的である。しかし、高圧下の時間が長くなればsafe ratioが小さくなり、思い切った減圧効果を望むことは危険で、とくに飽和潜水の減圧は直線減圧が使用されることが多い。直線減圧はdriving forceを常に一定に保てるメリットがあり全体として減圧速度は緩やかであり、減圧症の危険も少ない⁶⁾。以上のことから飽和潜水の安全な短縮のためには、階段減圧法よりも直線減圧法が有利と言え、実験動物による結果からも実証された。しかしながら、飽和潜水の減圧時間は長期間を要するため、ダイバーは昼夜連続で減圧過程に暴露されることになる。生体の呼吸循環代謝は、起床時に活発化し睡眠時に低下するため夜間の脱飽和速度は遅くなる。したがって、同一組織の昼間用いられている半飽和時間は、夜間では長い半飽和時間をとらなければならないことになる。減圧中規則的な圧力変化を与えることは、生体内の変化と同一歩調をとらないため避けなければならない⁷⁾。当センターの飽和潜水の減圧も夜間に減圧停留を実施している⁸⁾。飽和潜水用減圧表は、階段減圧法と直線減圧法の優位な面を組み合わせることによって、より安全な効率良い減圧表が作成できることが十分考えられる。

各実験動物の1 Tau, 3 Tau, 5 Tauの減圧法で比較すると、ラットの1 TauはT1/2=33min (ウサギに換算すると59min [実験結果は117min]), イヌに換算すると74min [実験結果は172min]), 3 TauはT1/2=33min (ウサギに換算すると59min [実験結果も59min]), イヌに

換算すると74min [実験結果は86min]), また, 5 Tau は $T_{1/2}=11\text{min}$ (ウサギに換算すると20min [実験結果は59min], イヌの実験結果は86min) の結果を示した。ラット, ウサギ, イヌの実証実験の結果を総合すると, 1 Tau, 3 Tau, 5 Tauのいずれの減圧法においても, 動物種 (体重差) で実験結果は, 体重増加に伴い半飽和時間 ($T_{1/2}$) が体重から換算する以上に増加することが確認された。

UDTの減圧表の要素は, 減圧点の深度 (最大減圧深度差), 減圧点間減圧スピード (減圧点間減圧時間) 及び, 減圧点停留時間であり, この要素にTauというユニットを設定している。そして, 半飽和時間を何分組織で減圧するかを計算し減圧表を作成する。この半飽和時間は, 生体の呼吸循環代謝と相関関係が有意であり, また, 代謝と体重の相関関係から体重だけで計算される。そして, 半飽和時間が計算されると減圧点間減圧スピードが決定する。つまり同一の半飽和時間では5 Tauから1 Tauまで減圧点間減圧スピードが同一になる (表 4~表 6)。ラット, ウサギ, イヌの結果から第 1 減圧点で減圧症の発症が観られなかったことから, 減圧点の深度は, 問題なく実証されたと考えられる。減圧点間減圧スピードは, 前述したとうり半飽和時間に依存し, つまり体重に依存している。ラットにおいての減圧時間の短縮は総減圧時間に依存したが, ウサギ, イヌの結果は, ウ

サギの $T_{1/2}=117\sim 20\text{min}$ [ラットに換算すると66~11 min] の実験で $T_{1/2}=39\text{min}$ [ラットに換算すると27 min], イヌの $T_{1/2}=172\sim 74\text{min}$ [ラットに換算すると77~33min] の実験で $T_{1/2}=86\text{min}$ [ラットに換算すると39min]以上のハイスピードの減圧点間減圧スピードは, 総減圧時間の長短に係わらず減圧症あるいは減圧症による死亡例が観察された。体重から換算する半飽和時間がラットより大型動物であるウサギ, イヌにおいて実験結果が増加したことは, 体重と半飽和時間の関係式に問題があると考えられる。

減圧点停留時間は, 減圧点間減圧により到着減圧点の深度で過飽和になっている不活性ガスを排出するための時間である。ウサギの結果からEXP- V_B ($T_{1/2}=59\text{min}$, 3Tau, TDT=17.98hr) とEXP- XI_B ($T_{1/2}=39$

表 4 減圧点間減圧スピード (ラット)
Table 4 Decompression Speed between Decompression Steps (Experiment for Rats).

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min)		
			$T_{1/2}=66$	33	11
1	300	136	1.42	2.83	8.51
2	164	80	0.83	1.66	4.97
3	84	46	0.48	0.97	2.91
4	38	27	0.28	0.57	1.70
5	11	11	0.17	0.33	0.97

表 5 減圧点間減圧スピード (ウサギ)
Table 5 Decompression Speed between Decompression Steps (Experiment for Rabbits).

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min)				
			$T_{1/2}=117$	59	39	29	20
1	300	136	0.80	1.60	2.43	3.24	4.69
2	164	80	0.47	0.94	1.43	1.90	2.76
3	84	46	0.27	0.54	0.82	1.10	1.59
4	38	27	0.16	0.32	0.48	0.64	0.93
5	11	11	0.09	0.19	0.30	0.38	0.55

表 6 減圧点間減圧スピード (イヌ)
Table 6 Decompression Speed between Decompression Steps (Experiment for Dogs).

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min)				
			$T_{1/2}=172$	148	111	86	74
1	300	136	0.55	0.64	0.85	1.10	1.27
2	164	80	0.32	0.37	0.50	0.65	0.75
3	84	46	0.19	0.21	0.29	0.37	0.43
4	38	27	0.11	0.13	0.17	0.22	0.25
5	11	11	0.06	0.07	0.10	0.13	0.14

min, 5Tau, TDT=19.32hr) の実験でEXP-XI_B は総減圧時間が1.34時間長いにもかかわらず1例が最終減圧点で死亡した。EXP-III_B (T1/2=117min, 1 Tau, SDT=2.82hr) とEXP-X_B (T1/2=39min, 3 Tau, SDT=2.80hr) の実験では、ほとんど同じSDT (減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間) にもかかわらずEXP-X_B の最終減圧点で1例に減圧症が観察され減圧終了後に死亡した。EXP-III_B より総減圧時間で1.26時間長いEXP-VIII_B (T1/2=29min, 5 Tau) で中枢神経系の減圧症の発症も観察された。イヌの結果もウサギと同様, EXP-IX_D (T1/2=86min, 3 Tau, TDT=26.23 hr, SDT=6.20 hr) とEXP-III_D (T1/2=74min, 5 Tau, TDT=36.90hr, SDT=8.92hr) の実験でEXP-III_D は総減圧時間が10.67時間長く, 減圧点停留時間及び減圧点間減圧時間も2.72時間長いにもかかわらず1例に減圧症が観察された。

これらの例の結果から, 減圧点間減圧スピードと減圧点停留時間の関係が減圧時間の安全な短縮にとって重要な問題であり, その結果として総減圧時間の短縮になることが示唆された。また, 半飽和時間が長く減圧点間減圧スピードの遅い方の減圧表で実証実験が成功した。そして, ラット, ウサギ, イヌの最も短縮された減圧法が1 Tauであったことから減圧点間減圧スピードを遅くし (減圧点間減圧時間を長く取る) 減圧点停留時間を補助的な減圧時間にする減圧方法が良いことが示唆された。言い換えると階段減圧法よりも直線減圧法に良い結果を示したと言える。

ウサギの実験は, 実験前後で体重の減少が9実験全てに観察された。EXP-VIII_B と同一時間チェンバー内に大気圧で飼育したコントロール実験で僅かであるが増加したことから, 体重の減少は減圧によるストレスと考えられる。その体重の減少は, 総減圧時間が9実験中最も長時間であったEXP-IV_B において全例正常であったにもかかわらず最大を示し減圧ストレスも最大であったと考えられる。この体重の減少の結果からも前述した3例 (EXP-XI_B, X_B, VIII_B) の結果, つまり減圧の良否は, 総減圧時間に依存するよりも減圧点間減圧スピード (減圧点間減圧時間) と減圧点停留時間の関係が重要であるということをサポートするものである。

半飽和時間と体重の関係を減圧法 5 Tau, 3 Tau, 1 Tauについて図5～図7に示す。

5 Tauでは, $T1/2=26.36W^{0.59}$ ($r=0.994$)⁹⁾, 3 Tauでは, $T1/2=42.21W^{0.29}$ ($r=0.993$), 1 Tauでは, $T1/2=53.95W^{0.52}$ ($r=0.998$) の半飽和時間と体重の関係式が導

かれた。この関係式でヒトの体重70kgとして計算してみると, 5 TauがT1/2=323min, 3 TauがT1/2=145

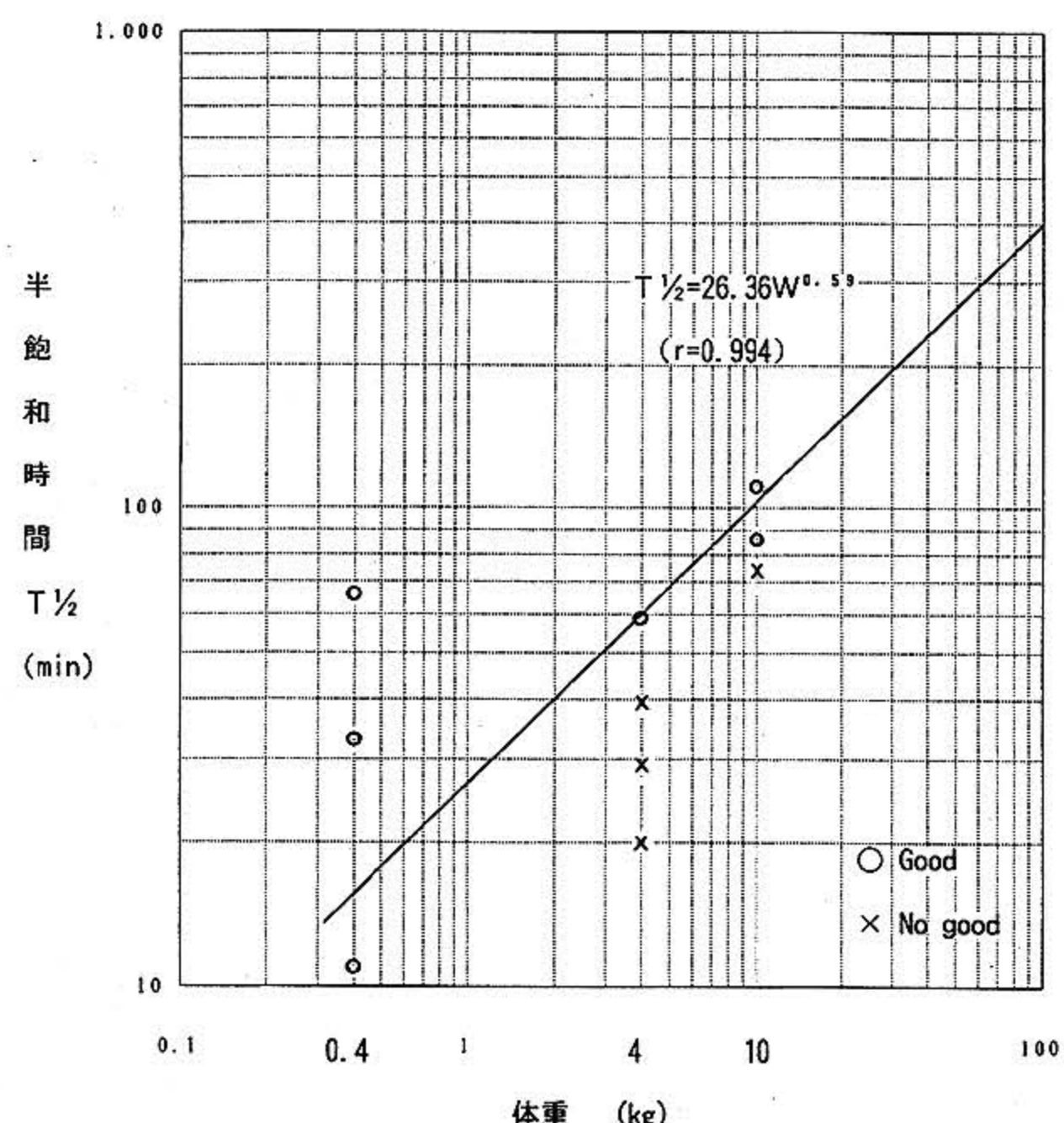


図5 半飽和時間 (T1/2)と体重の関係, 5 Tau

Fig. 5 Regression Equation was calculated for the Correlation between Body Weight and T1/2 (5 Tau).

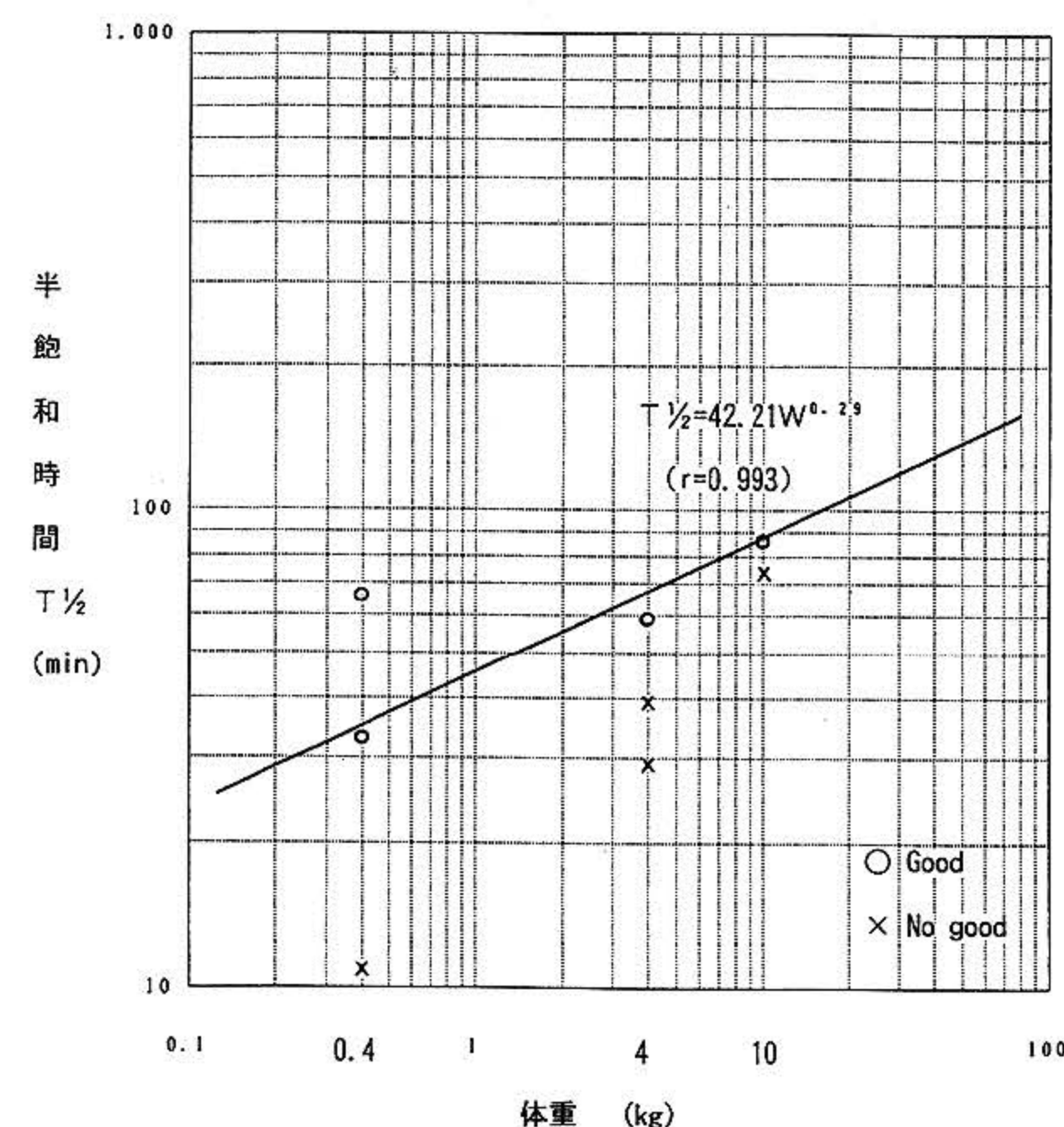


図6 半飽和時間 (T1/2)と体重の関係, 3 Tau

Fig. 6 Regression Equation was calculated for the Correlation between Body Weight and T1/2 (3 Tau).

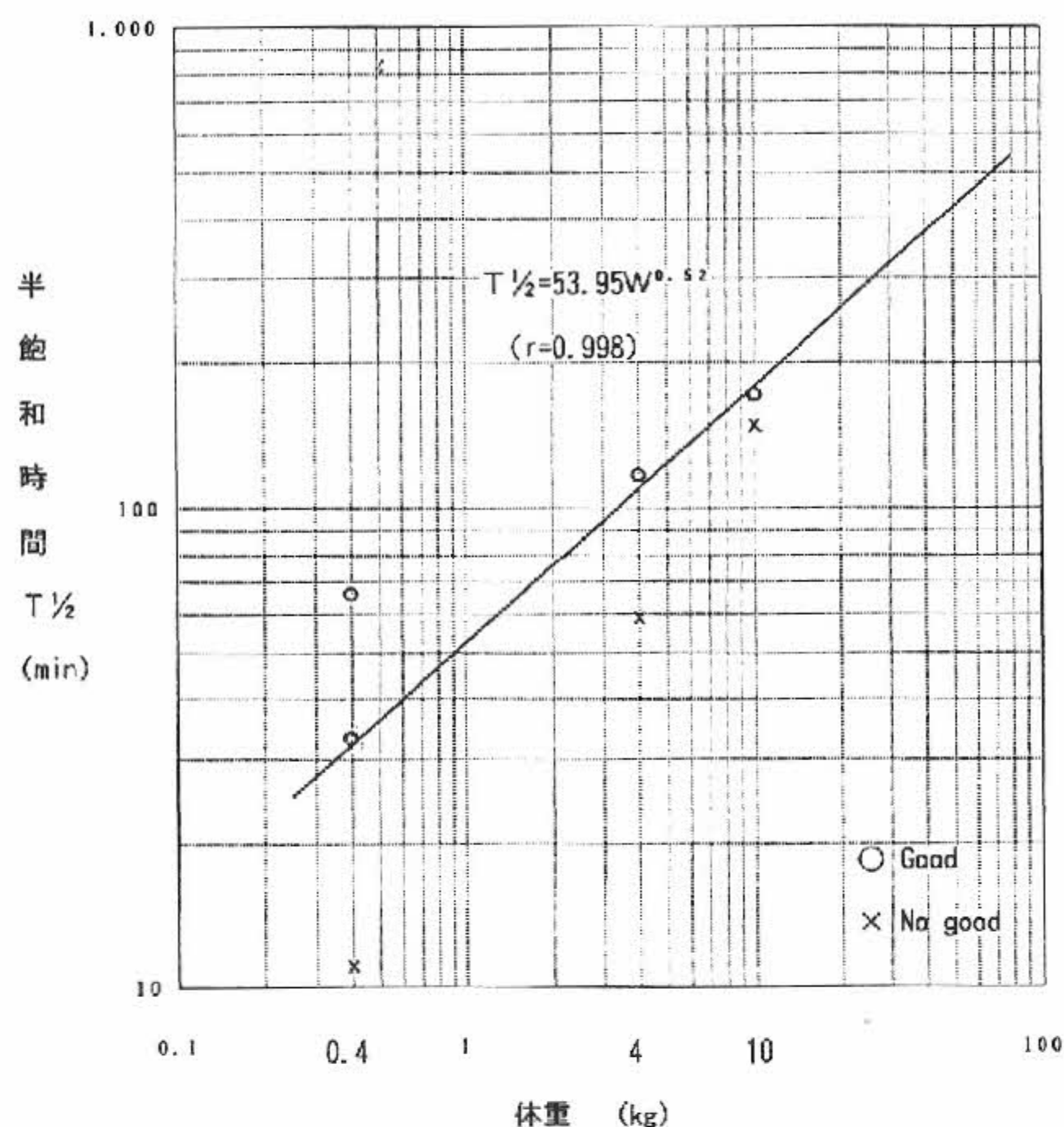


図7 半飽和時間 (T1/2)と体重の関係, 1Tau
Fig. 7 Regression Equation was calculated for the Correlation between Body Weight and T1/2 (1 Tau).

min, 1 TauがT1/2=491minとなる。300mヘリウム酸素飽和潜水の総減圧時間は、5 Tauで約6.8日間、3 Tauで約1.9日間、1 Tauで約2.5日間と試算される。現在までの総減圧時間で最も短時間は、約3.7日間 (Buhlmann et al., 1970¹⁾) でT1/2=177min (5 Tau) に相当し、最も長時間は、約11.9日間 (Summit et al., 1971²⁾) でT1/2=574min (5 Tau) に相当する。そして、5 Tauの結果が現在有人実験で実施された総減圧時間の中間に位置し、信頼性の持てる半飽和時間と体重の関係式ということが言える。3 TauについてのT1/2=145minは、イヌの実証実験の結果とT1/2 (1 Tau) が殆ど同一であり減圧症も観察され、この減圧点間減圧スピードはヒトにとって速過ぎると考えられ、現実的でないと考えられる。

減圧症の発症した減圧表を利用し動物種や体重差の差異によっても減圧症I型 (ベンズ), 減圧症II型 (中枢神経) の発症をコントロールでき、飽和潜水の減圧障害の研究のための動物実験に有効に利用できると思われる。

7 まとめ

UDTを用いてのラット、ウサギ、イヌの実証実験から、以下の知見が得られた。

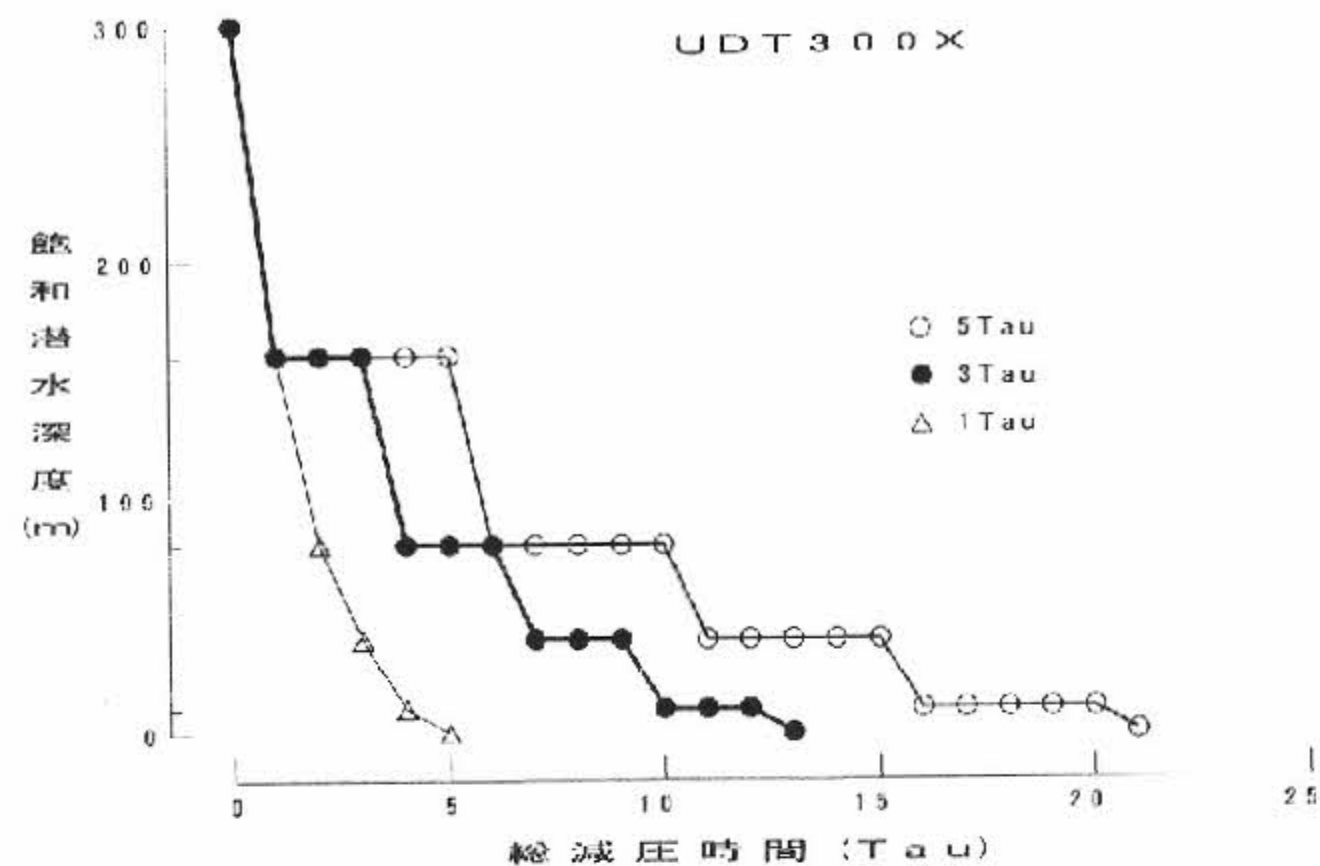


図8 飽和潜水用万能減圧表
Fig. 8 A Generic UDT from 300m (UDT300X).

- ① 総減圧時間は、1 Tauの減圧法において最も短縮された。このことは、階段減圧方法よりも直線減圧方法が安全な減圧時間の短縮に有効性を示すものと考えられる。今後検討していく必要がある。
- ② ラット、ウサギ、イヌを用いて半飽和時間と体重の関係式が導かれた。5 Tauでは、 $T1/2 = 26.36W^{0.59}$ ($r=0.994$), 3 Tauでは、 $T1/2 = 42.21W^{0.29}$ ($r=0.993$), 1 Tauでは、 $T1/2 = 53.95W^{0.52}$ ($r=0.998$) 今後実験例数を増やし検討する必要がある。
- ③ 5 Tau, 3 Tauの減圧法においては、減圧点間減圧スピード (減圧点間減圧時間) と減圧点停留時間の関係が減圧時間の安全な短縮にとって重要な問題であり、その結果として総減圧時間の短縮になることが示唆された。
- ④ 300mヘリウム酸素飽和潜水のヒトでの減圧期間は2.5~6.8日間の結果を得、現在当センターで使用している減圧日数12日間以下に短縮できる可能性ができた。
- ⑤ 図8に飽和潜水用万能減圧表 (UDT) を示す。この減圧表は、体重から半飽和時間を何分組織で減圧するか、また、減圧法 (Tau) を幾つに設定するかで簡単に作成することができ実用的である。
- ⑥ UDTは、ウサギ、イヌのベンズから中枢神経系減圧症の動物モデル作成に十分活用できることを確認した。

8 おわりに

本研究は、平成元年度から平成4年度にハワイ大学生理学教室Dr. Y.C. Linとの共同研究「飽和潜水用減圧表の研究」「減圧症動物の生化学動態の変化と汎用減圧表の有効性について」で実施したものである。本研究に際して動物シミュレーターのオペレーションにご協力いただいた無人探査機操縦班の水嶋氏、工務課の中野氏に感謝します。

参考文献

- 1) Buhlmann, A.A., H. Matthys, G. Overath, P.B. Bennett, D.H. Elliott and S.P. Gray.: Saturation exposure at 31 ATA in an oxygen-helium atmosphere with excursions to 36 ATA, *Aerospace Med.*, 41 : 394-402. (1970).
- 2) Summitt, J.K., J.S. Kelley, J.M. Herron and H.A. Saltzman.: 1000-foot helium saturation exposure, In : C.J. Lambersen ed. *Under-water Physiology IV*, New York : Academic Press, 519-527. (1971).
- 3) Lin, Y.C. : Formulation of saturation dive decompression tables based on critical pressures and exponential gas elimination, In : Y.C. Lin and A.K.C. Niu eds. *Hyperbaric Medicine and Physiology*, San Pedro, CA : Best Publishing. 99-119. (1988).
- 4) Lin, Y.C. and K.K. Shida : Unified Concept of Decompression from Saturation Dives and Interspecies Conversion of Table, *Proceeding of the 10th Meeting UJNR Diving Physiology and Technology Panel*, 111-128. (1989).
- 5) Y.C. Lin : Species Independent Maximum no-Bubble Decompression from Saturation Dive. *Proceedings of the 7th Symposium on Underwater Physiology*, 82-83. (1980).
- 6) 中山英明 : 減圧速度から見た減圧症. *日本高気圧環境医学会雑誌*, 17 (2), 49-51 (1982).
- 7) 関 邦博訳 : “システム潜水の減圧表の概念” p 203-208. In : 潜水学. 関 邦博訳, マリン企画, 東京, 323pp. (1982).
- 8) 橋本暢雄・設楽文朗・竹内久美・他谷 康・水嶋康男・中野正美・毛利元彦 : 高圧環境作業時のダイバーの作業負担, 効率. *海洋科学技術センターニューシートピア計画成果報告書*, 279-285. (1991).
- 9) F. Shidara, Y. Taya, Y. Mizushima, M. Mohri, Y.C. Lin : Determination of Interspecies T_{1/2} for the Formation of Decompression Tables (UDT 300). *Proceedings of the 11th Meeting UJNR Diving Physiology and Technology Panel*, 48-60. (1991).

(原稿受理 : 1993年12月15日)