

●原 著

飽和潜水減圧表の研究

—実験動物を用いた実証実験—

設楽文朗*, 他谷 康*, 毛利元彦*, Yu-Chong LIN**

Universal decompression table (Lin et al., 1988; Lin et al., 1989) 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。実験の飽和潜水深度は300mを用い, 環境ガスは, He-O₂ (酸素分圧0.5bar) の組成とし, その300mからの減圧で実施した。

その結果以下の知見を得た。

1. 5Tau (Tau: Time Constant, $Tau = T_{1/2} / \ln 2$, $5Tau = 7.21 T_{1/2}$) では W (体重) と $T_{1/2}$ (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。
5Tau とは, SDT (Stage Decompression Time: 減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間) の内 1Tau を減圧点間の減圧時間に充て, 残り 4Tau を減圧点での停留時間とする階段減圧である。
2. 3Tau, 1Tau の実験も行い TDT (Total Decompression Time: 総減圧時間) において最も短縮された SDT は 1Tau であった。1Tau 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であることが示唆された。

キーワード: 飽和潜水, 減圧表, 動物実験, 減圧症

Study of Universal Decompression Table for Saturation Dives

—Validation Experiments on Animals—

Fumiro Shidara* Yasushi Taya* Motohiko Mohri* and Yu-Chong LIN**

*Marine Development Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

**Department of Physiology, University of Hawaii

We conducted validation study by applying the concept of universal decompression table (UDT, Lin et al., 1988; Lin et al., 1989) to animals. The principal objective was to shorten the decompression time systematically and safety. A total of 25 decompression tables was formulated according to the UDT concept for decompression from 300 He-O₂ (PO₂=0.5bar) saturation dives and

tested in 82 rats (9 UDT300R tables), 52 rabbits (9 UDT300B tables), and 14 dogs (7 UDT300D tables).

And eventually we could find the following results.

1. We derived an interspecies relationship between body weight (W, in kg) and 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 5Tau (Tau: Time Constant, $Tau = T_{1/2} / \ln 2$, $5Tau = 7.21 T_{1/2}$) as the stage decompression time, of which 1Tau was used to reduce pressure and 4Tau for equilibration.

2. To further reducing the decompression time, we tested some UDT tables by using the stage time of 3Tau or 1Tau. The shortest of decompression time was achieved by the varying the value of $T_{1/2}$ and by using 1Tau as the short decompression time.

In the case, there was no pause between stages and decompression rate falls progressively with each stage.

*海洋科学技術センター海域開発研究部

**ハワイ大学生理学教室

3. We found that linear decompression between stage was safer than the original UDT. We were successful in reducing decompression time by using linear decompression between stages.

Keywords : _____

Saturation dive
Decompression table
Animal experiment
Decompression sickness

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 の飽和潜水実験の減圧表では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が最短の減圧で総減圧時間は88時間であった。(Bühlmann et al., 1970¹⁾) また、最長の減圧は、US. Navy と米国デューク大学で実施した実験で総減圧時間は286時間であった。(Summit et al., 1971²⁾) この2実験に使用された減圧表で、減圧時間に約200時間の違いがあったにもかかわらず、双方の実験で減圧の最終段階でI型減圧症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減圧症発症という同様の結果が示されたことから、飽和潜水深度からの減圧時間を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い潜水になり、また、短時間潜水のように減圧を毎日繰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るなら飽和潜水はさらに広く利用することが可能となる。

そこで、Y.C. Lin et al (1988)³⁾(1989)⁴⁾が開発した Universal Decompression Table (UDT) を用いて飽和潜水の減圧時間を安全に短縮するための実証実験を各種の実験動物を用いて実施し、

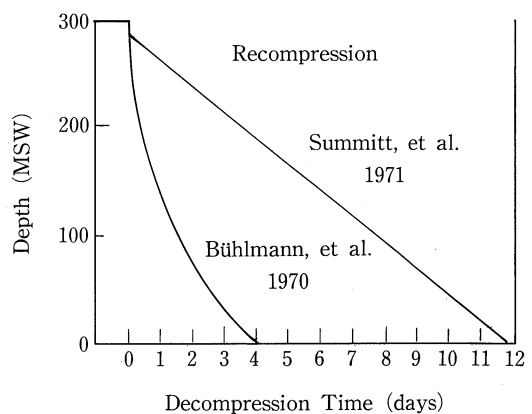


図1 300m 有人飽和潜水実験における減圧期間の長短

この UDT 減圧表の有効性を検証し、さらに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確立を本論文の目的として実験を行った。

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) から成り立っている。

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

$$dP_{MAX} = 0.415P_1 + 0.73 \quad \text{or}$$

$$P_2 = (P_1 - 1.25) / 1.710$$

(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

$$SDT = 7.21 T_{1/2} \text{ を算出した。}$$

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 $T_{1/2} = K (W/Q)$

表1 実験に用いた各種実験動物と半飽和時間 (T_{1/2}) の対比

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

(Q: 心拍出量, 1/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 (Time Constant, $Tau=T_{1/2}/\ln 2$) というユニットを設定し, $SDT=5Tau=7.21T_{1/2}$ とした。

5Tau の減圧法は, 1Tau を P₁ から P₂ への減圧点間減圧時間, 4Tau を減圧点停留時間とする。3Tau の減圧法は, 1Tau の減圧点間減圧時間が 5Tau の減圧法と同一で, 2Tau を減圧点停留時間として得られる。1Tau 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,

$R=dP_{MAX}/Tau$ (R: 減圧点間減圧スピード)

また, T_{1/2} が決定すると R は, 5Tau から 1Tau 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/cm²)

実験方法

1. 実験動物

ラットはウイスター系今道種雄 82 匹 (体重 255 ± 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 52 羽 (体重 2.95 ± 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 14 頭 (体重 9.4 ± 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 0.4 kg, ウサギの体重は 4kg, イヌの体重は 10kg とし算出した。

2. 各種実験動物と半飽和時間 (T_{1/2})

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

3. 実証実験

ラットについては, 図 2 に示すとおり Exp-I_R ~ IX_R, ウサギについては, 図 3 に示すとおり Exp-III_B ~ XI_B, イヌについては, 図 4 に示すとおり Exp-I_D ~ IX_D の合計 25 回の実験を実施した。

各実験共 150m/hr の加圧スピードでヘリウムで加圧し, 2 時間で 300m に到達, その後ラットは 7 時間, ウサギは 11 時間, イヌは 12 時間の 300m 飽和潜水停留後減圧を開始した。減圧点深度は, 164 m, 84m, 38m 及び 11m である。酸素分圧は 0.5 bar, 環境温度は 300m 深度相当圧で 32 ± 1 °C 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 240 min], 5Tau) の減圧表 (SDT = 6.27hr, TDT = 33.08hr) を基準にして T_{1/2} = 66min, 33min 及び 11min の 5Tau から 1Tau の減圧表について行った。

ウサギは, Exp-IV_B (T_{1/2} = 59min [ヒトの 120 min], 5Tau) の減圧表 (SDT = 7.08hr, TDT = 29.32hr) を基準にして T_{1/2} = 117min, 59min, 39 min, 29min 及び 20min の 5Tau から 1Tau の減圧表について行った。

イヌは, Exp-I_D (T_{1/2} = 111min [ヒトの 180 min], 5Tau) の減圧表 (SDT = 13.34hr, TDT = 55.17hr) を基準にして T_{1/2} = 172min, 148min, 111min, 86min 及び 74min の 5Tau から 1Tau の減圧表について行った。

4. 減圧表の良否の判定

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, また, 減圧終

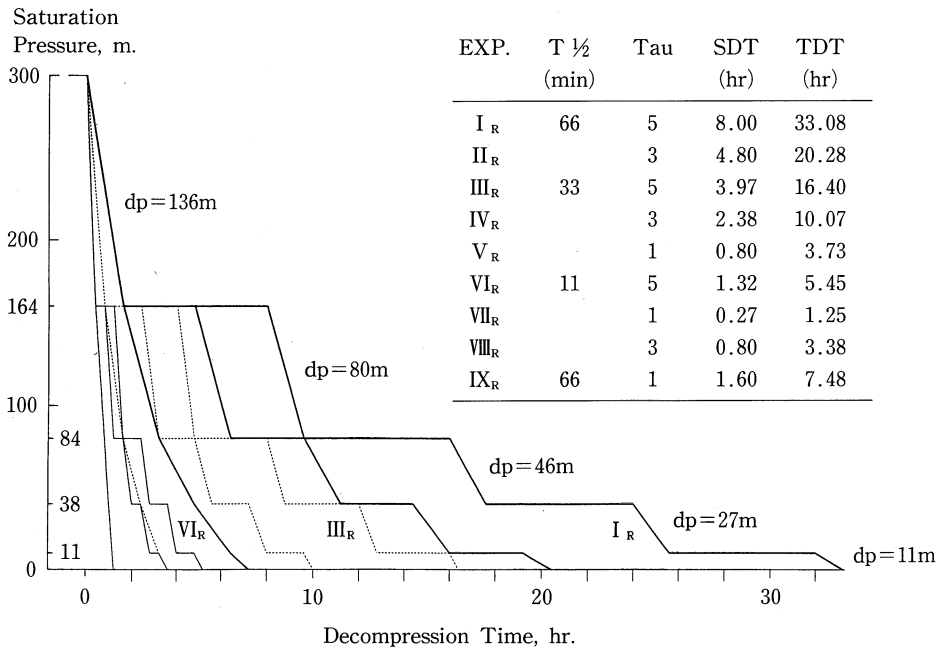


図2 ラットの300m飽和潜水減圧表 (UDT300R)

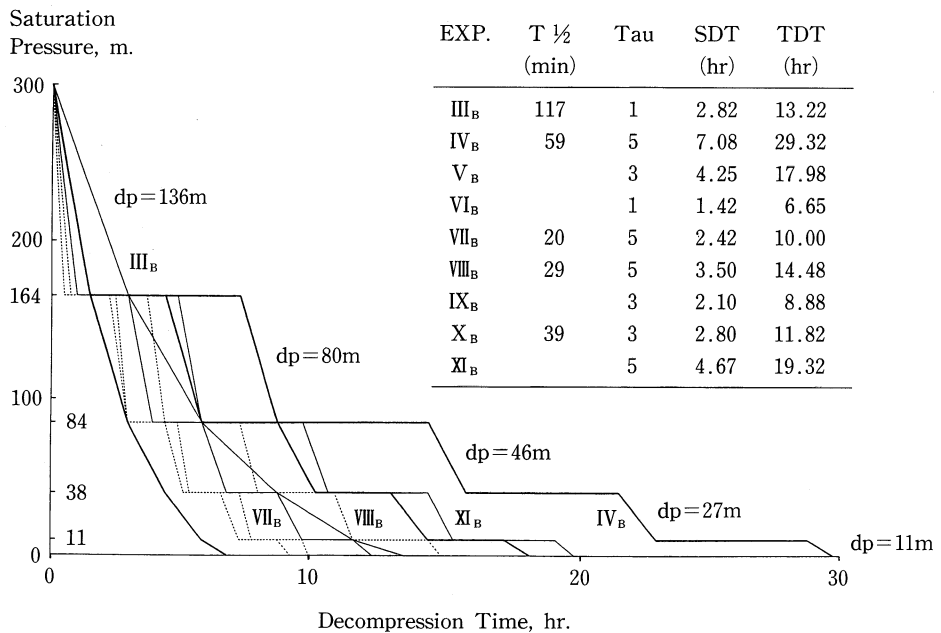


図3 ウサギの300m飽和潜水減圧表 (UDT300B)

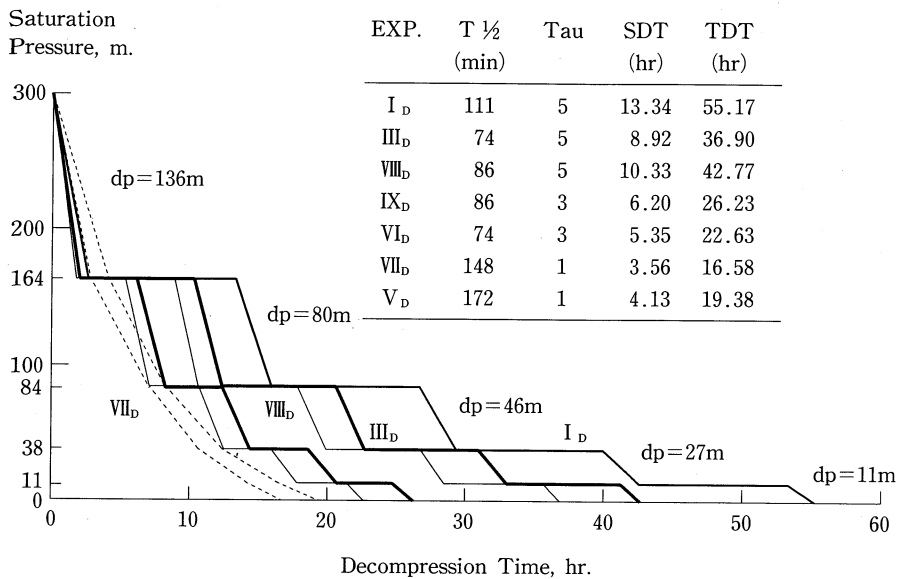


図4 イヌの300m 飽和潜水減圧表 (UDT300D)

了後は動物シミュレーター搬出後の歩行動作などの肉眼的観察による減圧症の発症の有無により判定した。

実験結果

1. 表2にラットの実証実験の結果を示す

1) 総減圧時間

33.08時間 (T½=66min, 5Tau) から1.25時間 (T½=11min, 1Tau) の範囲で実証実験を行い、T½=33min, 1Tau で総減圧時間3.73時間までは、減圧症の発症、死亡例も観られずラットを用いた飽和潜水減圧表として有効な減圧法であることが実証された。

2) 体重変化

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

2. 表3にウサギの実証実験の結果を示す

1) 総減圧時間

29.32時間 (T½=59min, 5Tau) から6.65時間 (T½=59min, 1Tau) の範囲で実証実験を行い、T½=117min, 1Tau で総減圧時間13.22時間までは、減圧症の発症、死亡例も観られずウサギを用

いた飽和潜水減圧表として有効な減圧法であることが実証された。

2) 体重変化

9実験全てにおいて実験前後で体重の減少が観られ、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。

3. 表4にイヌの実証実験の結果を示す

1) 総減圧時間

55.17時間 (T½=111min, 5Tau) から16.58時間 (T½=148min, 1Tau) の範囲で実証実験を行い、T½=172min, 1Tau で総減圧時間19.38時間までは、減圧症の発症、死亡例も観られずイヌを用いた飽和潜水減圧表とした有効な減圧法であることが実証された。

2) 体重変化

実験前後での体重変化の範囲は、各実験毎の平均で+0.6±0.1~-0.5±0.1kg, 変化率は、+6~-5%であった。

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、1Tau では半飽和時間 T½=33 min の総減圧時間 (TDT) 3.73時間であり、3Tau

表2 UDT 実証試験の結果 (ラット)

EXP.	T ½ (min)	Tau (h)	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	

* T ½: 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

表3 UDT 実証試験の結果 (ウサギ)

EXP.	T ½ (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			

* T ½: 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

表4 UDT 実証試験の結果 (イヌ)

EXP.	T ½ (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			

* T ½: 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

では T ½=33min の TDT=10.07hr であり、5Tau では T ½=11min の TDT=5.45hr まで短縮された。ウサギの実証実験の結果は、1Tau では T ½=117min の TDT=13.22hr であり、3Tau では、T ½=59min の TDT=17.98hr であり、5Tau の結果では、T ½=59min の TDT=29.32hr まで短縮された。イヌの実証実験の結果は、1Tau では T ½=172min の TDT=19.38hr であり、3Tau では、T ½=86min の TDT=26.23hr であり、5Tau では、T ½=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 1Tau 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、総減圧時間が短く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り減圧症の発症が考えられるが、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、減圧症発症の危険も少ない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効であるという事実を、動物実験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ねばならない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 1Tau, 3Tau, 5Tau の減圧法で比較すると、ラットの 1Tau は T ½=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]), 3Tau は T ½=33min (ウサギに換算すると 59min [実験結

表5 減圧点間減圧スピード

減圧点 (ラット)	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			
(ウサギ)			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	
(イヌ)			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	

果も59min], イヌに換算すると74min [実験結果は86min]), また, 5TauはT $\frac{1}{2}$ =11min (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, 1Tau, 3Tau, 5Tauのいずれの減圧法においても, 体重増加に伴い半飽和時間 (T $\frac{1}{2}$) 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の関係が有意であり, また, 代謝と体重との関係から体重だけで計算することが可能である。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5Tauから1Tauまで減圧点間減圧スピードが同一になる。(表5)

減圧点間減圧スピードは, 前述したとおり半飽和時間に依存し, つまり体重に依存している。ラットにおける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 $\frac{1}{2}$ =117~20min [ラットに換算すると66~11min]の実験でT $\frac{1}{2}$ =39min [ラットに換算すると27min], イヌのT $\frac{1}{2}$ =172~74min [ラットに換算すると77~33min]の実験でT $\frac{1}{2}$ =86min [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。体重から換算された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大していたことは, この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, 減圧点間減圧による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 $\frac{1}{2}$ =59min, 3Tau, TDT=17.98hr)とEXP-XI_B (T $\frac{1}{2}$ =39min, 5Tau, TDT=19.32hr)

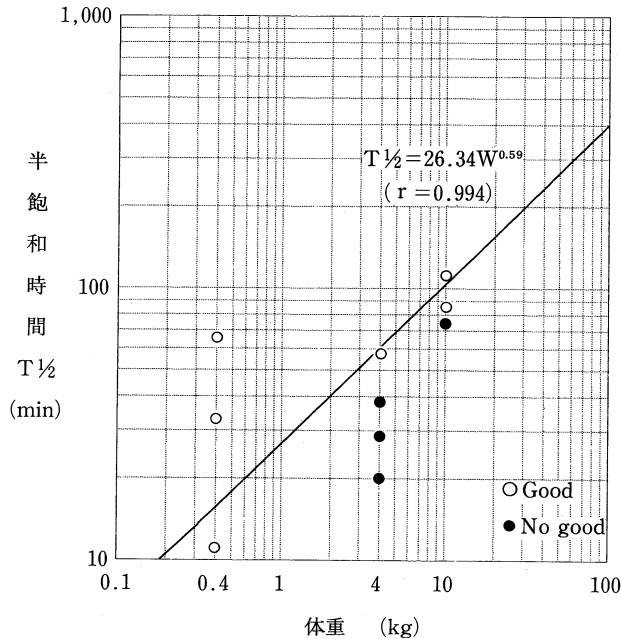


図5 半飽和時間 (T_{1/2}) と体重の関係, 5Tau

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 (T_{1/2}=117min, 1Tau, SDT=2.82hr) とEXP-X_B (T_{1/2}=39min, 3Tau, 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 (T_{1/2}=29min, 5Tau)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 (T_{1/2}=86min, 3Tau, TDT=26.23hr, SDT=6.20hr) とEXP-III_D (T_{1/2}=74min, 5Tau, 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。これらの減圧症発症例の結果から、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を用いた実証実験では減

圧症の発症が認められなかった。そして、ラット、ウサギ、イヌの最も短縮された減圧法が1Tau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実験すべてに観察された。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において全例減圧症も死亡例も観られず正常であったにもかかわらず体重の減少は最大を示し、減圧ストレスも多大であったと考えられる。

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

5Tauでは、 $T_{1/2} = 26.36W^{0.59}$ ($r = 0.994$)⁹⁾

3Tauでは、 $T_{1/2} = 42.21W^{0.29}$ ($r = 0.993$)

1Tauでは、 $T_{1/2} = 53.95W^{0.52}$ ($r = 0.998$)

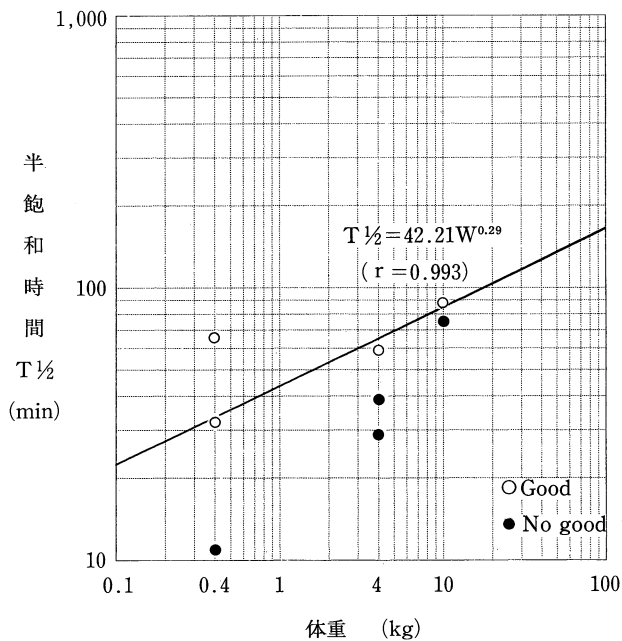


図6 半飽和時間 ($T_{1/2}$) と体重の関係, 3 Tau

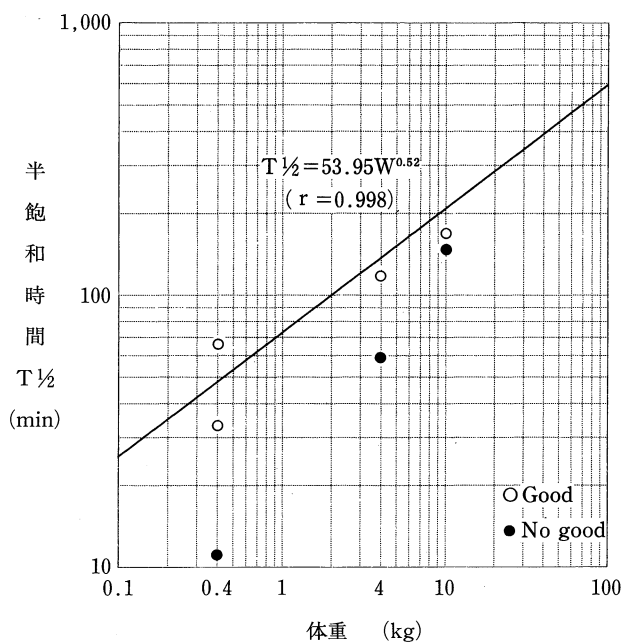


図7 半飽和時間 ($T_{1/2}$) と体重の関係, 1 Tau

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、5Tauが $T_{1/2}=323\text{min}$ 、3Tauが $T_{1/2}=145\text{min}$ 、1Tauが $T_{1/2}=491\text{min}$ となる。300mヘリウム酸素飽和潜水の総減圧時間は、5Tauで約6.8日間、3Tauで約1.9日間、1Tauで約2.5日間と試算される。現在までの総減圧時間で最短時間は、約3.7日間 (Bühlmann et al., 1970¹⁾) で $T_{1/2}=177\text{min}$ (5Tau) に相当し、最長時間は、約11.9日間 (Summit et al., 1971²⁾) で $T_{1/2}=574\text{min}$ (5Tau) に相当する。そして、5Tau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。3Tauについての $T_{1/2}=145\text{min}$ は、イヌの実証実験の結果と $T_{1/2}$ (1Tau) 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すぎ現実的でないと考えられる。

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。

(1)総減圧時間は、1Tauの減圧法において最も短縮された。このことは、段階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。

(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。

5Tauでは、 $T_{1/2}=26.36W^{0.59}$ ($r=0.994$),

3Tauでは、 $T_{1/2}=42.21W^{0.29}$ ($r=0.993$),

1Tauでは、 $T_{1/2}=53.95W^{0.52}$ ($r=0.998$)

(3)5Tau, 3Tau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を示唆できる結果が得られた。

【参考文献】

- 1) Bühlmann, 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 excursion 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. Lamberson ed. *Underwater 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. Niueds. *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," p203-208, In: *潜水学*. 関 邦博訳, マリン企画, 東京, 323pp, 1982
- 8) 榎木暢雄・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 (UDT300) *Proceedings of the 11th Meeting UJNR Diving Physiology and Technology Panel*, 48-60, 1991