

飽和潜水用減圧表の研究 —第2報, 階段減圧法と直線減圧法—

設楽 文朗*¹ 他谷 康*²
毛利 元彦*² Yu-Chong LIN*³

Universal Decompression Table : UDT (Y. C. Lin et al., 1988¹⁾ 1989²⁾) を用いて300m, He-O₂, PO₂=0.5barの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UDTの有効性を検討した。減圧法は階段減圧法に比較し直線減圧法が有効であることが示唆された。⁵⁾⁶⁾

本報告では, 第1報の実験動物にラット, ウサギ, イヌに加えてマウスを追加し, 半飽和時間と体重の関係式 $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$, 5Tau について階段減圧法と直線減圧法を比較し減圧法の安全性を検討した。

結果は, 正常体重から肥満にいたる各実験動物について階段減圧法に比較し直線減圧法が安全な減圧法であることが実証できた。また, この実証できたUDTで, ヒト体重70kgの300m, He-O₂, PO₂=0.5barの飽和潜水の減圧時間は約7.1日間であることが試算された。この日数は, 海洋科学技術センターの300m飽和潜水に使用している減圧期間12日間を, より安全に短縮できる可能性が示唆された。

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 —Second Report : A Comparison of the Stage and Linear Decompressions—

Fumiro SHIDARA*⁴ Yasushi TAYA*⁵
Motohiko MOHRI*⁵ Yu-Chong LIN*⁶

The concept of the universal decompression table (UDT) formulates its tables by using a maximal decompression step that produces no bubbles and shows 5 time constants (Tau) or 7.21 half-times ($T_{1/2}, T_{1/2} = \ln 2(\text{Tau})$) for each stage. One of the 5Tau in each stage was

-
- * 1 総務部安全管理室(海域開発・利用研究部)
 - * 2 海域開発・利用研究部
 - * 3 ハワイ大学生理学教室
 - * 4 Administration Department (Coastal Research Department)
 - * 5 Coastal Research Department
 - * 6 Department of Physiology, University of Hawaii

used to produce pressure changes and the remaining 4Tau for the equilibration at the new pressure. A UDT table is, therefore, characterized by a long stage time of only a few large decompression stages. For example, decompression from a 300-m saturation dive requires only 5 stages. The major advantage of UDT is that tables calculated for one species are convertible for use in other species. The calculation of UDT tables relies heavily on the value of $T_{1/2}$. We generate values of $T_{1/2}$ based on body mass, in the form of $T_{1/2} = aW^x$. Where W is body weight in kg, $T_{1/2}$ is half-desaturation time in min and a and x are constants obtained experimentally. We proved UDT tables calculated by using $T_{1/2} = 26.36W^{0.59}$ to be safe for rats rabbits and dogs. It was revised and became $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$ by including mice, in addition to rats, rabbits, and dogs. In this report, we compared the stages as in the original UDT tables and linear decompressions of UDT tables calculated by using $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$. By using 5Tau for each stage, the linear decompression proved to be safe for mice, rats, rabbits, and dogs. The linear decompression procedure is more simple to carry out. By extrapolation of these results, we calculated the decompression for humans from 300-m saturation to be 7.1 days as opposed to the current accepted decompression of 12 days. The short human decompression table from 300-m saturation dive remains to be validated.

Key Words : Saturation Dive, Decompression table, Animal experiment decompression sickness

1 はじめに

Universal Decompression Table (UDT) (Y. C. Lin et al., 1988¹⁾ 1989²⁾) 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。UDT は、体重 (W) を指標にして半飽和時間 ($T_{1/2}$) を計算し、減圧ユニット (Tau : Time Constant, 5Tau = 7.21 $T_{1/2}$) を設定することによって小動物からヒトまで簡便に作成することができる。我々は、実験動物を用い体重と半飽和時間の関係式を確立、減圧ユニットの設定等の基礎データを得ることを目的として実証実験を実施した。

第1報のラット、ウサギ、イヌの実証実験の結果は、5 Tauの減圧〔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。〕よりも、最も安全に短縮された減圧法は 1 Tau (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直線減圧である。) であった。これらの結果が示すことは、減圧点間減圧スピードを遅くし (SDTの内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法が良いことが示された³⁾⁴⁾。言い換えると階段減圧法より直線減圧法が安全な総減圧時

間の短縮になることが示唆された⁵⁾⁶⁾。

上記の結果から、体重と半飽和時間の関係式 $T_{1/2} = 26.36W^{0.59}$ (5 Tau階段減圧法) に再度検討を加えた。修正された関係式 $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$ (5 Tau階段減圧法) を用い実験動物にマウスを加えラット、ウサギ、イヌを用いて階段減圧法と直線減圧法について実証実験を行い安全な減圧法の比較検討をした。また、減圧点間減圧スピードの結果から導かれた体重と半飽和時間の関係式 $T_{1/2} = 40.954W^{0.499}$ について実証実験を実施し、階段減圧法の肥満動物への適用を検討した。

2 UDT作成のための理論式

2.1 Universal dP_{MAX} (万能最大深度差)

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

P_1 : 飽和深度, P_2 : 次の減圧点

2.2 Step Decompression Time

(減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間)

$$SDT = 7.21 T_{1/2} = 5 \text{ Tau}$$

$$T_{1/2} = 26.36W^{0.59}, T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$$

$$R = dP_{MAX} / \text{Tau}$$

$T_{1/2}$: 半飽和時間, W : 体重, R : 減圧点間減圧スピード

2.3 Total Decompression Time (総減圧時間)

$$TDT = nSDT + dP_{end}/R$$

$nSDT$: 減圧点の数, dP_{end} : 最終減圧点からの深度差

3 実験方法

3.1 $T_{1/2}=26.36 W^{0.59}$ の階段減圧法による実証実験

図1に示すとおりラット, ウサギ, イヌについて6実験を実施した。ラットは2実験計18匹(体重約600~700g), 1回の実験に9匹を使用した。ウサギは3実験計9羽(体重約4~4.5kg), 1回の実験に3羽を使用した。イヌは1実験2匹(体重約13.5kg)を使用した。

3.2 $T_{1/2}=25.990 W^{0.577}$ の階段減圧法による実証実験

$T_{1/2}=26.36 W^{0.59}$ の実証実験の結果から修正した換算式 $T_{1/2}=25.990 W^{0.577}$ で実施した。図2に示すとおりマウス, ラット, ウサギ, イヌについて5実験を実施した。マウスは1実験22匹(体重約40g)を使用した。ラットは1実験9匹(体重約600g), ウサギは2実験計6羽(体重約3.5kg), 1回の実験に2羽を使用した。イヌは1実験2匹(体重約12kg)を使用した。

3.3 $T_{1/2}=40.954 W^{0.499}$ の階段減圧法による実証実験

上記2実験及び第1報⁴⁾のデータより減圧点間減圧スピードの成功例を取り出し算出した換算表により実施した。ラットは1実験26匹(体重約500g), ウサギは1実験5羽(体重約4kg)を使用した。

3.4 $T_{1/2}=25.990 W^{0.577}$ の直線減圧法による実証実験

図3に示すとおりマウス, ラット, ウサギ, イヌを使用し5Tau, 3Tauについて各実験動物1実験ずつ(ウサギは5Tauの実験を2回実施した。)計9実験を実施した。1回の実験にマウスは21~22匹(体重約40g), ラットは9匹(体重約700g), ウサギは3羽(体重約2.5~3.5kg), イヌは2匹(体重約12~13.5kg)を使用した。

3.5 ラット, ウサギの体重換算の考慮

階段減圧法の実証実験において, UDT作成にあたっての体重は, ラット, ウサギの加齢による肥満について

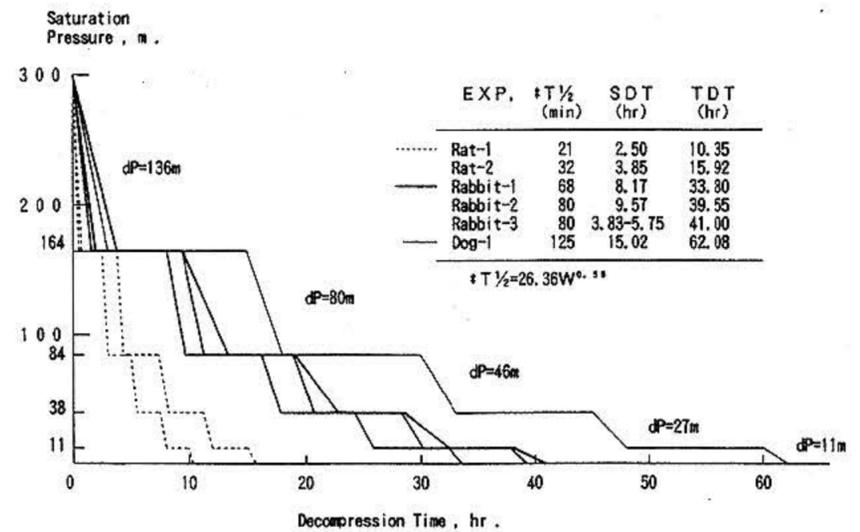


図1 $T_{1/2}=26.36 W^{0.59}$ の300m飽和潜水階段減圧法
Fig. 1 Universal Decompression Table from 300m Saturation Dive (H_e-O_2 , $PO_2=0.5bar$, 5τ)

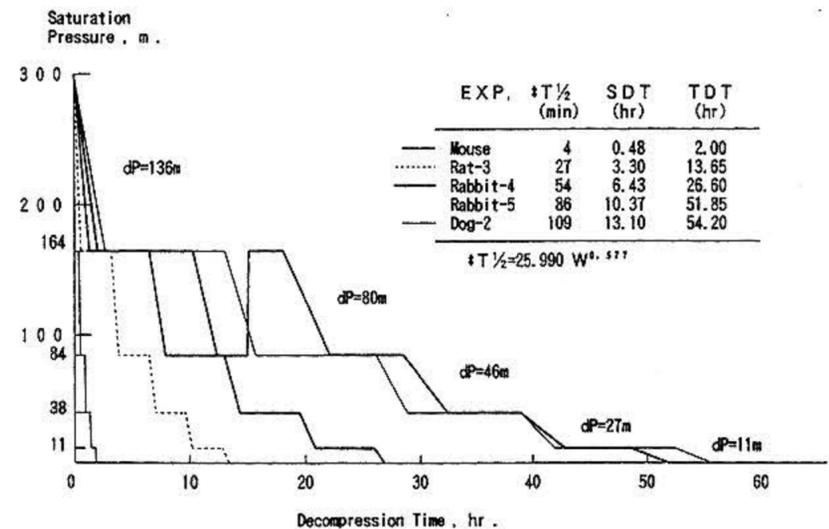


図2 $T_{1/2}=25.990 W^{0.577}$ の300m飽和潜水階段減圧法
Fig. 2 Universal Decompression Table from 300m Saturation Dive (H_e-O_2 , $PO_2=0.5bar$, 5τ)

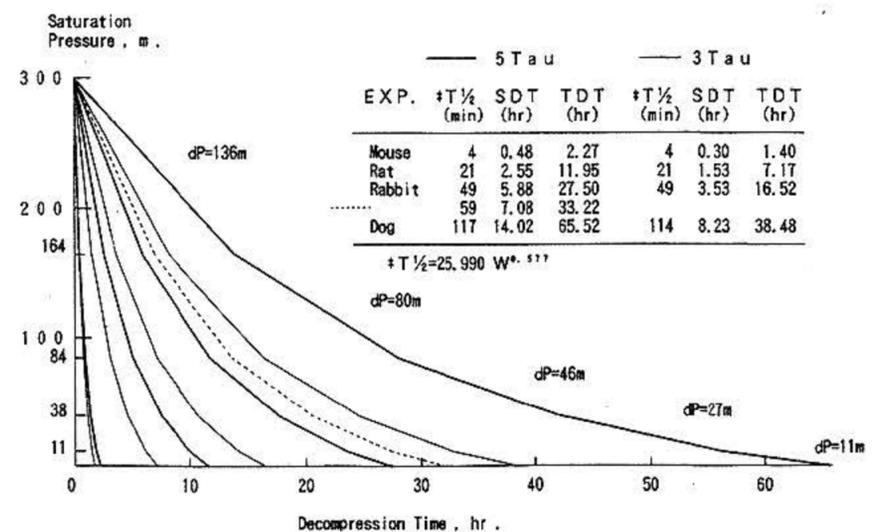


図3 $T_{1/2}=25.990 W^{0.577}$ の300m飽和潜水直線減圧法
Fig. 3 Universal Decompression Table from 300m Saturation Dive (H_e-O_2 , $PO_2=0.5bar$, Linear)

体重に対する脂肪量（体脂肪率：%FAT）を考慮した実験も実施した。成熟期から老化に進行するに伴って%FATを約20%から約40%として算出した。

3.6 実験動物種

マウスはICR種雄，ラットはウイスター系今道種雄，ウサギはジャパニーズホワイト種雄，イヌはアメリカンビーグル種雄を使用した。

3.7 実験動物種による半飽和時間（ $T_{1/2}$ ）の対比

体重と半飽和時間の換算式によるヒト，マウス，ラット，ウサギ，イヌの半飽和時間の対比を下表に示す。

換算式		$T_{1/2}=26.36W^{0.59}$	$T_{1/2}=25.990W^{0.577}$	$T_{1/2}=40.954W^{0.499}$
種類	体重	半飽和時間（ $T_{1/2}$ ）min		
ヒト	70kg	3 2 3	3 0 2	3 4 1
マウス	40g	4	4	8
ラット	700g	2 1	2 1	3 4
ウサギ	4kg	6 0	5 9	8 2
イヌ	12kg	1 1 4	1 0 9	1 4 1

3.8 実証実験

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，その後マウスは4時間，ラットは7時間，ウサギは11時間，イヌは12時間の飽和潜水停留後減圧を開始した。階段減圧の減圧点停留深度，直線減圧の減圧スピード変更点は，164m，84m，38m及び11mである。酸素分圧は0.5bar，環境温度は300m相当深度で $32\pm 1^\circ\text{C}$ と各減圧点毎に示適温度に設定した。湿度は $55\pm 5\%$ とした。

3.9 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，減圧終了後は動物シミュレーターから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。

4 実験結果

4.1 $T_{1/2}=26.36W^{0.59}$ の階段減圧法による実証実験

表1-1に実験結果を示す。

ラットは体重約700gで $T_{1/2}=21\text{min}$ では，9例中5例に減圧症の発症が観られた。%FATから体重1.4kgに換

算した $T_{1/2}=32\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

ウサギは体重約4.5kgで $T_{1/2}=68\text{min}$ ，%FATから体重6.5kgに換算した $T_{1/2}=80\text{min}$ の2実験共，3例中2例に減圧症の発症が観られた。 $T_{1/2}=80\text{min}$ で減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間（SDT）を2：3 Tau（5 Tauの通常は1：4 Tau）で減圧した場合は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

イヌは体重約14kgで $T_{1/2}=125\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

実験前後の体重の変化は，全ての実験で減少し変化率は2.8～8.9%であった。

4.2 $T_{1/2}=25.990W^{0.577}$ の階段減圧法による実証実験

表1-2に実験結果を示す。

マウスは体重約40gで $T_{1/2}=4\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

ラットは体重約600gで%FATから体重1.1kgに換算した $T_{1/2}=27\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

ウサギは体重約3.5kgで $T_{1/2}=54\text{min}$ ，%FATから体重8.0kgに換算した $T_{1/2}=86\text{min}$ の2実験共，3例中全例と3例中2例に減圧症の発症が観られた。

イヌは体重約12kgで $T_{1/2}=109\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

実験前後の体重の変化は，全ての実験で減少し変化率は1.6～4.8%であった。

4.3 $T_{1/2}=40.954W^{0.499}$ の階段減圧法による実証実験

表1-3に実験結果を示す。ラットは体重約500gで $T_{1/2}=29\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。ウサギは体重約4kgで $T_{1/2}=82\text{min}$ は，5例中3例に減圧症の発症が観られた。実験前後での体重の変化は，両実験とも減少し変化率は，4.5～6.6%であった。

4.4 $T_{1/2}=25.990W^{0.577}$ の直線減圧法による実証実験

表2-1に5 Tauの実験結果を示す。

マウスは体重約40gで $T_{1/2}=4\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

ラットは体重約700gで $T_{1/2}=21\text{min}$ は，減圧症の発症も観られず全例正常であった。

表1 UDT実証実験の結果 (5 T a u)

Table 1-1~3 Test Parameters, Body Weingt Change and Outcome for UDT-300 for Stage Decompression Method.

表1-1 ($T_{1/2}=26.36W^{0.59}$)									
実験動物種	n	$T_{1/2}$ (min)	SDT (hr)	TDT (hr)	Body weight		Change (%)	結果	UDT作成 体重(kg)
					In	Out			
ラット-1	9	21	2.50	10.35	687±32g	668±32g	-2.8	5/9DCS	0.7
ラット-2	9	32	3.85	15.92	616±20g	589±20g	-4.4	Good	1.4
ウサギ-1	3	68	8.17	33.80	4.42±0.14kg	4.23±0.22kg	-4.3	2/3DCS	5.0
ウサギ-2	3	80	9.57	39.55	4.22±0.13kg	3.97±0.11kg	-5.9	2/3DCS	6.5
ウサギ-3	3	80	3.83-5.75	41.00	3.95±0.05kg	3.74±0.05kg	-5.3	Good	6.5
イヌ-1	2	125	15.02	62.08	13.5±0.5kg	12.3±0.9kg	-8.9	Good	14.0

表1-2 ($T_{1/2}=25.990W^{0.577}$)									
実験動物種	n	$T_{1/2}$ (min)	SDT (hr)	TDT (hr)	Body weight		Change (%)	結果	UDT作成 体重(kg)
					In	Out			
マウス	22	4	0.48	2.00	37.5±1.0g	36.9±0.9g	-1.6	Good	0.04
ラット-3	9	27	3.30	13.65	579±26g	564±24g	-2.6	Good	1.1
ウサギ-4	3	54	6.43	26.60	3.35±0.08kg	3.19±0.08kg	-4.8	3/3DCS	3.5
ウサギ-5	3	86	10.37	51.85	3.59±0.17kg	3.53±0.15kg	-1.7	2/3DCS	8.0
イヌ-2	2	109	13.10	54.20	11.5±0.3kg	11.3±0.1kg	-1.7	Good	12.0

表1-3 ($T_{1/2}=40.954W^{0.499}$)									
実験動物種	n	$T_{1/2}$ (min)	SDT (hr)	TDT (hr)	Body weight		Change (%)	結果	UDT作成 体重(kg)
					In	Out			
ラット-4	26	29	3.48	14.13	511.8±26.6g	478.0±26.5g	-6.6	Good	0.5
ウサギ-6	5	82	9.85	40.76	4.24±0.38kg	4.05±0.32kg	-4.5	3/5DCS	4.0

* $T_{1/2}$: 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

表2 UDT実証実験の結果 (直線減圧)

Table 2-1~2 Test Parameters, Body Weight Change and Outcome for UDT-300 for Linear Decompression Method.

表2-1 ($T_{1/2}=25.990W^{0.577}$, 5Tau)									
実験動物種	n	$T_{1/2}$ (min)	SDT (hr)	TDT (hr)	Body weight		Change (%)	結果	UDT作成 体重(kg)
					In	Out			
マウス	22	4	0.48	2.27	40.3±2.4g	39.9±2.4g	-1.0	Good	0.04
ラット	9	21	2.55	11.95	684±24g	670±25g	-2.0	Good	0.7
ウサギ	3	49	5.88	27.50	2.63±0.22kg	2.78±0.04kg	+5.7	Good	3.0
ウサギ	5	59	7.08	33.22	4.06±0.19kg	3.85±0.21kg	-5.2	Good	4.0
イヌ	2	117	14.02	65.52	13.3±0.1kg	12.7±0.4kg	-4.5	Good	13.5

表2-2 ($T_{1/2}=25.990W^{0.577}$, 3Tau)									
実験動物種	n	$T_{1/2}$ (min)	SDT (hr)	TDT (hr)	Body weight		Change (%)	結果	UDT作成 体重(kg)
					In	Out			
マウス	21	4	0.30	1.40	40.7±1.3g	38.7±1.5g	-4.9	Good	0.04
ラット	9	21	1.53	7.17	667±15g	670±15g	+0.4	2/9DCS	0.7
ウサギ	3	49	3.53	16.52	3.34±0.06kg	3.23±0.08kg	-3.3	2/3DCS	3.0
イヌ	2	114	8.23	38.48	12.3±0.3kg	11.9±0.5kg	-3.3	Good	13.0

* $T_{1/2}$: 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

ウサギは体重約3kgで $T_{1/2}=49\text{min}$ 、体重約4kgで $T_{1/2}=59\text{min}$ の2実験共に減圧症の発症も観られず全例正常であった。

イヌは体重約13.5kgで $T_{1/2}=117\text{min}$ は、減圧症の発症も観られず全例正常であった。

実験前後の体重の変化率は $-4.5\sim+5.7\%$ であった。

表2-2に3 Tauの実験結果を示す。

マウスは体重約40gで $T_{1/2}=4\text{min}$ は、減圧症の発症も観られず全例正常であった。

ラットは体重約700gで $T_{1/2}=21\text{min}$ では、9例中2例に減圧症の発症が観られた。

ウサギは体重約3.5kgで $T_{1/2}=49\text{min}$ では、3例中2例に減圧症の発症が観られた。

イヌは体重約12.5kgで $T_{1/2}=114\text{min}$ は、減圧症の発症も観られず全例正常であった。

実験前後の体重の変化率は $-4.9\sim+0.4\%$ であった。

5 考察

5.1 階段減圧法による体重と半飽和時間について

$T_{1/2}=26.36W^{0.59}$ ($r=0.994$)の実証実験の結果を図4に示す。イヌにおいては成功したが、ラット、ウサギにおいては減圧症例が多数観られた。この換算式の導出時のラット、ウサギの体重は、約0.4kgと3.0kgであった。今回の体重は、約ラット0.7kg、ウサギ4.5kgであった。UDTは、体重の多少による結果の違いは本来ないはずである。減圧症と%FATの関係は、相関が高いと言われている。この体重約ラット0.7kg、ウサギ4.5kgは、ラットが50週令以上、ウサギが30週令以上であり、加齢による肥満と考えられることから、%FATを考慮した体重で実験を実施した。この結果ラットにおいては成功したが、ウサギにおいては未だ減圧症例が観られ不成功に終わり、ウサギは減圧に対するストレスが他の使用した実験動物に比較し大きいことが示唆された。また、体重と半飽和時間の関係は、体重と呼吸循環代謝量の関係と同一と観ることができ、ウサギの減圧には呼吸循環代謝も検討する必要がある。ウサギの成功例は、%FATを考慮しかつSDTを2 Tau-3 Tauの減圧点間減圧スピードを $1/2$ に遅くした減圧であった。

第1報の結果からも、安全な減圧時間の短縮に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ている。³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾つまり、減圧点間減圧スピードを遅くし減圧点停留時間を短くした。

TDT(総減圧時間)は殆ど同一であるが、 dP_{MAX} に対する減圧スピードのストレスが減少したためと考えられる。

再度導いた換算式 $T_{1/2}=25.990W^{0.577}$ ($r=0.970$)の実証実験の結果を図5に示す。マウス、イヌにおいては、問題なく成功した。また、ラットにおいても%FATを考慮した体重で成功した。しかし、ウサギにおいては%FATを40%に考慮しても不成功であった。5 Tauの階段減圧法は、肥満動物には使用できないと考えられ、正常な実験動物用ということができる。

表3-1~表3-3にマウス、ラット、ウサギ、イヌのそれぞれの半飽和時間($T_{1/2}$)に対する減圧点間減圧スピードと実験結果を示す。マウスは $T_{1/2}=4\text{min}$ 、ラットは $T_{1/2}=27\text{min}$, 32min 、ウサギは $T_{1/2}=160\text{min}$ (SDTを2 Tau-3 Tauから換算)、イヌは $T_{1/2}=85\text{min}$, 109min , 125min の減圧点間減圧スピードが成功した。これらの結果は、ウサギがイヌよりも減圧が困難ということができる。

図6に体重と半飽和時間の関係を減圧点間減圧スピードの結果から導かれた換算式は、 $T_{1/2}=40.954W^{0.499}$ ($r=0.865$)で、実証実験の結果ラットは成功したもののウサギにおいては不成功に終わり、この換算式で肥満ウサギの体重例えば4.5kgを計算すると $T_{1/2}=87\text{min}$ になり、これまでの実証実験の結果から減圧は不成功ではないかと思われる。この換算式も正常な実験動物用ということができる。

5.2 階段減圧法と直線減圧法の比較について

$T_{1/2}=25.990W^{0.577}$ の直線減圧法による実証実験の結果を図7に示す。マウス、ラット、ウサギ、イヌの各実験動物においても成功した。ラット、ウサギは共に%FATからの体重の補正も必要がなく、特にウサギにおいては実験前後で体重の増加が観られ減圧ストレスも低かったと考えられる。この実証実験の減圧点間減圧スピードを表4-1に示す。もちろん階段減圧法に比較し減圧スピードは遅いが、総減圧時間(TDT)は5 Tauの階段減圧法と殆ど同一である。

また、 $T_{1/2}=25.990W^{0.577}$ の直線減圧法を3 Tauで減圧を実施した場合は、ラット、ウサギにおいて不成功であった。表4-2にこの実証実験の減圧点間減圧スピードを示す。 $T_{1/2}=25.990W^{0.577}$ の5 Tau階段減圧法と減圧点間減圧スピードを比較するとラットは遅く、ウサギにおいても同様に(SDTを2 Tau:3 Tauで減圧し成功した。)殆ど同一であったが共に不成功であったということは、階段減圧法のSDTの減圧点停留時間が不活性ガスの排

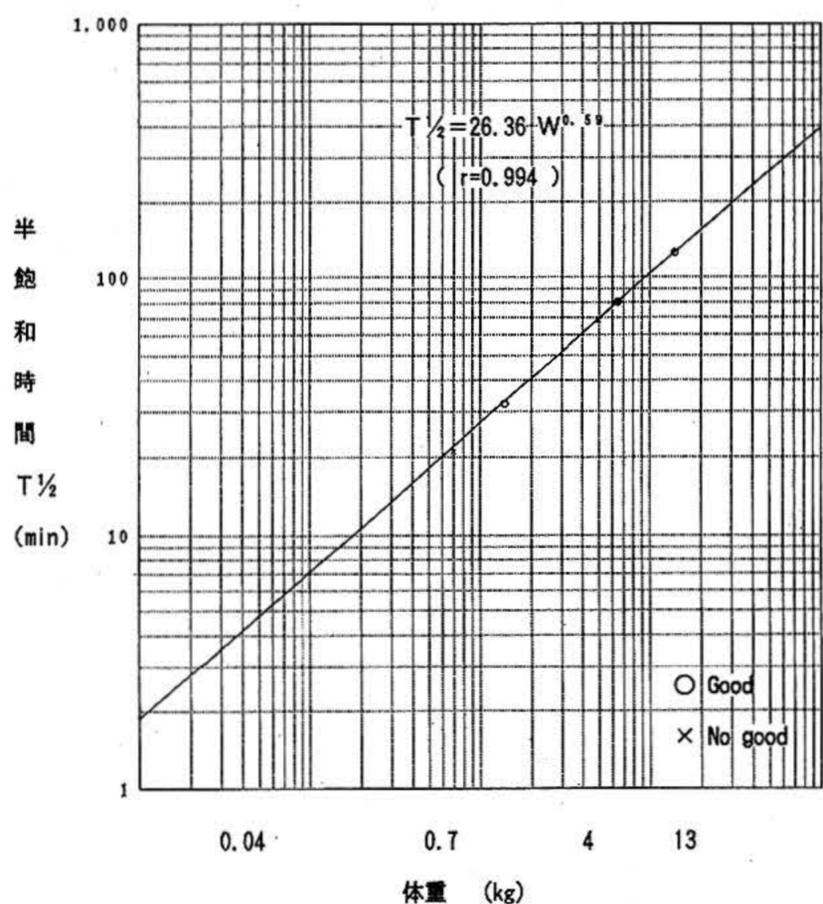


図4 半飽和時間 ($T_{1/2}$) と体重の関係, 5 Tau (Step)
 $T_{1/2} = 26.36W^{0.59}$ 階段減圧法実証実験の結果
 Fig. 4 Result of $T_{1/2} = 26.36W^{0.59}$ Stage Decompression Method.

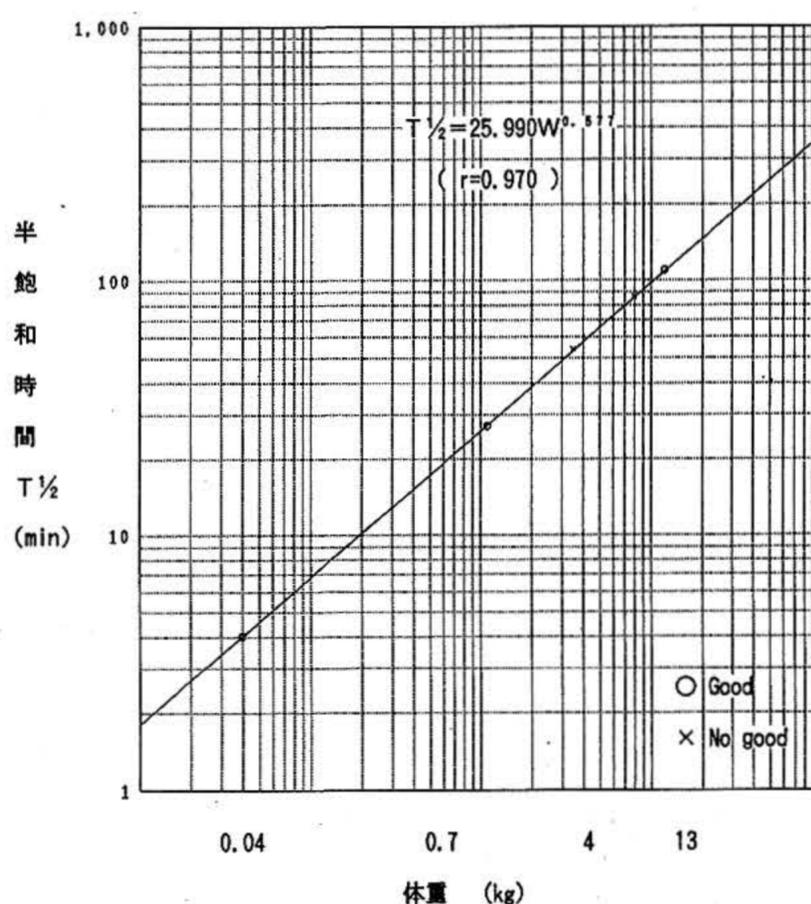


図5 半飽和時間 ($T_{1/2}$) と体重の関係, 5 Tau (Step)
 $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$ 階段減圧法実証実験の結果
 Fig. 5 Result of $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$ Stage Decompression Method.

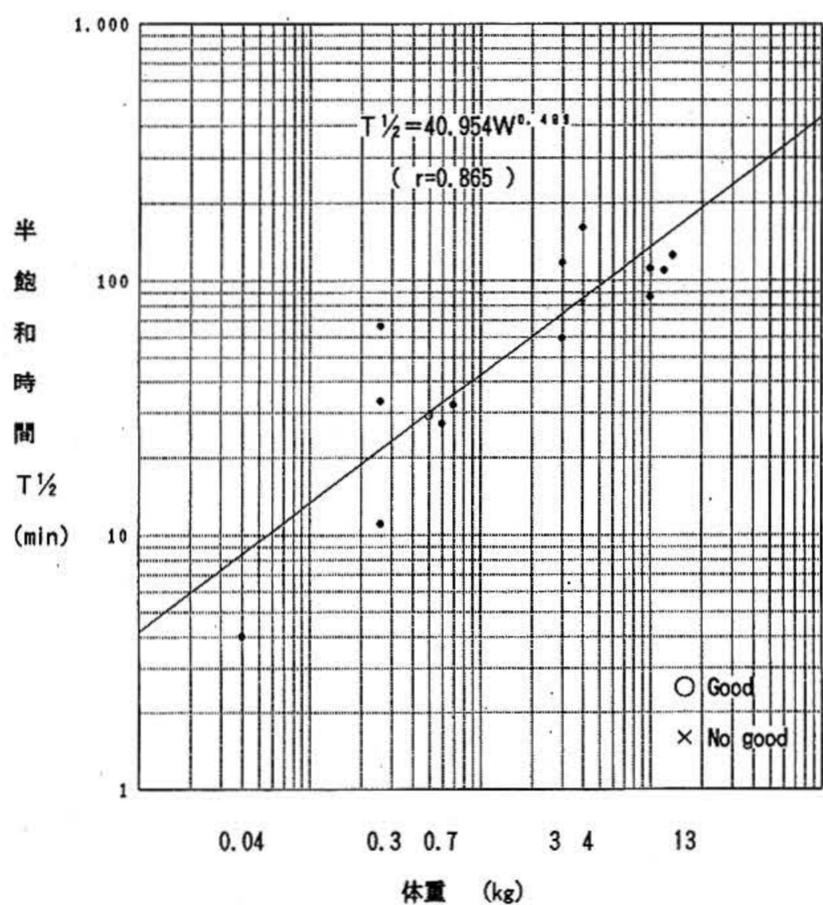


図6 半飽和時間 ($T_{1/2}$) と体重の関係 (減圧点間減圧スピード)
 ○×は, $T_{1/2} = 40.954W^{0.499}$ 階段減圧法実証実験の結果
 Fig. 6 Regression Equation was calculated for the Correlation between Body Weight and $T_{1/2}$ (Decompression Speed between Decompression Steps). And Result of $T_{1/2} = 40.954W^{0.499}$ Stage Decompression Method.

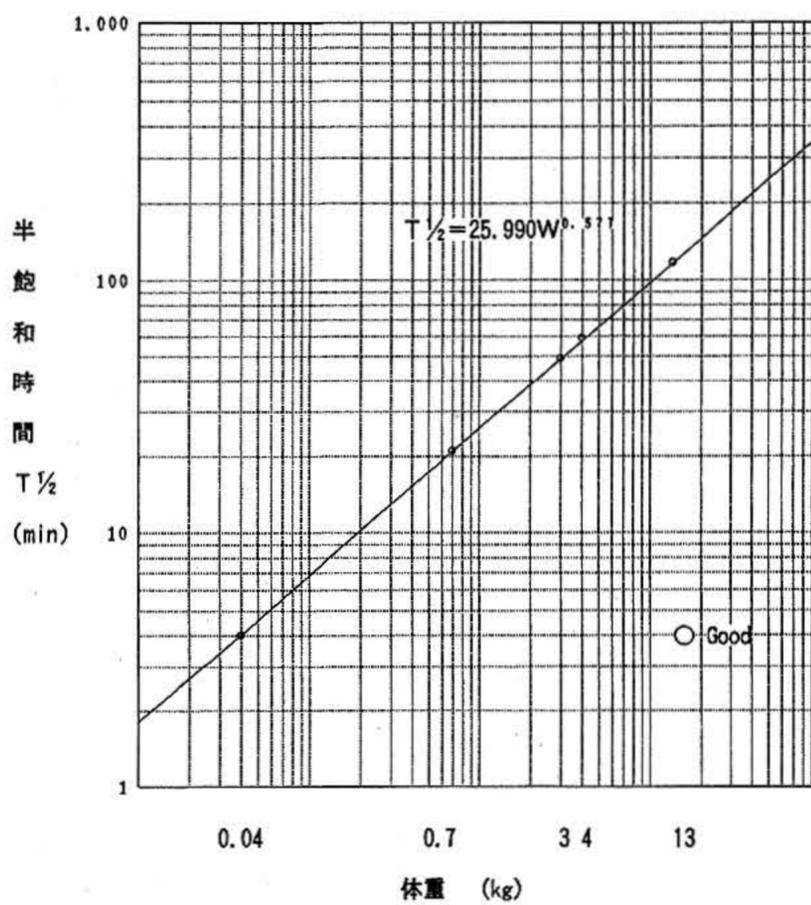


図7 半飽和時間 ($T_{1/2}$) と体重の関係, 5 Tau (Linear)
 $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$ 直線減圧法実証実験の結果
 Fig. 7 Result of $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$ Linear Decompression Method.

表3-1~3 減圧点間減圧スピード (階段減圧法, ラット, マウス, ウサギ, イヌ)

Table 3-1~3 Decompression Speed between Decompression Steps (Experiment for Stage Decompression Method, Rats, mice, Rabbits and Dogs).

表3-1 減圧点間減圧スピード (ラット)

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min) (マウス)				
			$T_{1/2}=32$	29	27	21	4
1	300	136	2.93	3.32	3.40	4.53	22.67
2	164	80	1.72	1.95	2.00	2.67	13.33
3	84	46	1.00	1.12	1.15	1.53	7.67
4	38	27	0.59	0.66	0.68	0.90	4.50
5	11	11	0.34	0.39	0.41	0.52	2.75
実験結果			Good	Good	Good	Good	Good

表3-2 減圧点間減圧スピード (ウサギ)

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min)					
			$T_{1/2}=86$	82	80	68	54	*80
1	300	136	1.09	1.15	1.19	1.39	1.76	0.59
2	164	80	0.64	0.68	0.69	0.82	1.03	0.35
3	84	46	0.37	0.39	0.41	0.47	0.60	0.20
4	38	27	0.22	0.23	0.24	0.28	0.35	0.12
5	11	11	0.13	0.14	0.14	0.16	0.21	0.07
実験結果			DCS	DCS	DCS	DCS	DCS	Good

* 減圧点間減圧時間を2 Tauとした。

表3-3 減圧点間減圧スピード (イヌ)

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min)			
			$T_{1/2}=125$	109	86	74
1	300	136	0.75	0.87	1.10	1.27
2	164	80	0.44	0.51	0.65	0.75
3	84	46	0.26	0.29	0.37	0.43
4	38	27	0.15	0.17	0.22	0.25
5	11	11	0.09	0.10	0.13	0.14
実験結果			Good	Good	Good	DCS

出に有効に作用したということができる。また、総減圧時間も短時間過ぎたと考えられる。

階段減圧法と直線減圧法の違いは、 $T_{1/2}$ が同一の場合SDTは同一時間になる。しかし、5 Tauの場合は、SDT (減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間)の内、階段減圧法は1 Tauが減圧点間減圧時間4 Tauが減圧点停留時間になり減圧点間の減圧スピードが5 Tauで直線減圧法

表4-1~2 減圧点間減圧スピード (5 Tau, 3 Tau直線減圧法)

Table 4-1~2 Decompression Speed between Decompression Steps (Experiment for Linear Decompression Method, 5 Tau and 3 Tau).

表4-1 減圧点間減圧スピード (直線減圧, 5 Tau)

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min)				
			$T_{1/2}=4$ (マウス)	21 (ラット)	49 (ウサギ)	59 (ウサギ)	117 (イヌ)
1	300	136	4.69	0.89	0.38	0.32	0.16
2	164	80	2.76	0.52	0.23	0.19	0.09
3	84	46	1.59	0.30	0.13	0.11	0.06
4	38	27	0.93	0.18	0.08	0.06	0.03
5	11	11	0.55	0.10	0.04	0.04	0.02
実験結果			Good	Good	Good	Good	Good

表4-2 減圧点間減圧スピード (直線減圧, 3 Tau)

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (dp/dt) (m/min)			
			$T_{1/2}=4$ (マウス)	21 (ラット)	49 (ウサギ)	114 (イヌ)
1	300	136	7.75	1.49	0.64	0.28
2	164	80	4.53	0.87	0.38	0.16
3	84	46	2.65	0.51	0.22	0.09
4	38	27	1.55	0.30	0.13	0.06
5	11	11	0.91	0.17	0.07	0.03
実験結果			Good	DCS	DCS	Good

を使用した場合に比較し4倍も速くなることになる。言い換えると、直線減圧法はSDTを減圧点間減圧時間に全て充て、従って減圧点間の減圧スピードが階段減圧法に比較し4倍も遅くなることになる。また、直線減圧法は最終減圧点から減圧終了までの減圧点間減圧時間 (減圧点間減圧スピード)も長く (遅く)なる。従って、総減圧時間は最終減圧点までは同一になり、最終減圧点か

ら減圧終了までの長くなった時間が増加するだけである。

実証実験による階段減圧法と直線減圧法の違いは、マウス、イヌにおいて全て成功し違いは観られなかった。しかし、ラット、ウサギにおいては階段減圧法に比較して直線減圧法が安全な飽和潜水の減圧時間の短縮によって明らかに優位であった。

半飽和時間 ($T_{1/2}$) に 7.21 の係数を乗じて 5 Tau の SDT を計算するが、この SDT は飽和時間と観ることができる。¹⁾²⁾ この飽和時間は、加圧時間をある程度短縮しても殆ど障害となることはない。しかし、減圧の過程ではその短縮、減圧法等で減圧症を伴う。階段減圧法は前述したように減圧点間減圧スピードが直線減圧法に比較し速くなり、飽和深度から減圧点、そして、次の減圧点到着時の体内ガス圧 (過飽和状態) が常時高い状態にある。この過飽和状態が限界を超えると血中に気泡が発生し、減圧症の原因を形成する。一方、直線減圧法は減圧過程での過飽和状態が、階段減圧法に比較し常時低い状態にある。これらの減圧点での過飽和状態の高低が、階段減圧法に比較し直線減圧法の結果が優位であった最大の理由であるといえることができる。

5.3 サルの500m飽和潜水によるUDTの応用

サルを用いた500mH₂O-O₂飽和潜水の減圧表は、減圧点が490m, 329m, 171m, 10m, 5mでそれらの減圧点間の減圧スピードは、500mから490mは10m/hrであり、次の減圧点から8.57m/hr, 7.50m/hr, 6.67m/hr, 6.00m/hr, 5.46m/hrの直線減圧法で、総減圧時間は、66時間45分を実施している⁶⁾。この500m飽和潜水減圧表は、未発表であるが減圧症の発症も観察されている。この500m飽和潜水からの減圧にUDTを応用した。

UDTによる500mからの減圧点は、281m, 153m, 78m, 34m, 8mであり、それぞれの減圧点間減圧時間を1 Tauとし減圧点停留時間を4 Tauとする5 Tauの階段減圧法で実施した。UDTの作成には $T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$ を用い体重約8kgと11kgのサルで実施し、総減圧時間は、それぞれ49時間48分, 64時間15分であった。両実験共、減圧症の発症も観察されず減圧が成功し、300m以深の飽和潜水減圧表としても安全に使用できることが確認された。

5.4 UDT (飽和潜水用万能減圧表) のヒトでの試算

現在までのデータからヒト (70kg) に試算した300m飽和潜水からの減圧表を表5と図8に示す。5 Tau直線減圧 ($T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$) の場合は、 $T_{1/2} = 302\text{min}$,

SDT=36.29hr, TDT=7.1day, が試算できた。また、5 Tau 階段減圧 ($T_{1/2} = 40.954W^{0.499}$) の場合は、 $T_{1/2} = 341\text{min}$, SDT=40.98hr, TDT=7.1day, が試算できた。このように総減圧時間が殆ど同一を示し、総減圧時間に

表5 UDT-Human

(飽和潜水用万能減圧表のヒト [70kg] での試算)

Table 5 Trial of UDT-Human (Body Weight 70kg).

- 5 Tau 直線減圧の場合 ($T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$)
 - 半飽和時間 $T_{1/2} = 302\text{min}$
 - 減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間
SDT=36.29 hr
 - 総減圧時間 TDT=170.17hr=7.1day
 - 減圧点間減圧スピード

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (m/min)	減圧スピード (m/hr)
1	300	136	0.062	3.75
2	164	80	0.037	2.20
3	84	46	0.021	1.27
4	38	27	0.012	0.74
5	11	11	0.007	0.44

- 5 Tauの階段減圧の場合 ($T_{1/2} = 40.954W^{0.499}$)
 - 半飽和時間 $T_{1/2} = 341\text{min}$
 - 減圧点間減圧時間及び減圧点停留時間
SDT=40.98 hr
 - 総減圧時間 TDT=169.58hr=7.1day
 - 減圧点間減圧スピード

減圧点	深度 (m)	dp (m)	減圧スピード (m/min)	減圧スピード (m/hr)
1	300	136	0.276	16.59
2	164	80	0.163	9.76
3	84	46	0.093	5.61
4	38	27	0.055	3.29
5	11	11	0.022	1.34

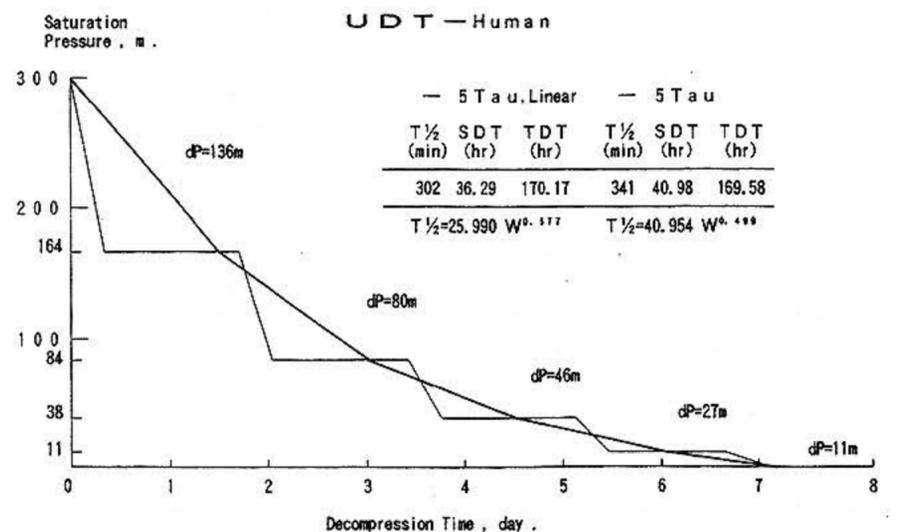


図8 ヒトの300m飽和潜水減圧表 ($T_{1/2} = 25.990W^{0.577}$) の直線減圧と $T_{1/2} = 40.954W^{0.499}$ の階段減圧

Fig. 8 Universal Decompression Table from 300m Saturation Dive (H₂O₂, PO₂=0.5bar)

においては安全な減圧ができると考えられる。しかし、減圧点間減圧スピードは、階段減圧が直線減圧の4.4倍である。この減圧点間減圧スピードは、ウサギにおいては約2倍でも減圧症の発症が観られている。これらの実証実験の結果から、階段減圧法に比較し直線減圧法が飽和潜水の減圧方法としてより安全であろうと考えられる。短時間潜水と飽和潜水の減圧方法の違い⁶⁾、飽和潜水における長期間の減圧に対するヒトの昼夜の代謝量の違い⁹⁾、当センターの飽和潜水の減圧も昼2時間、夜間6時間の減圧停留を実施している¹⁰⁾。飽和潜水用減圧表は、上記のことを考慮し、ダイバーの体格を計測し、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、より安全で減圧期間を効率よく設定できると考える。

本研究は、ハワイ大学生理学教室Dr. Y. C. Linとの共同研究「減圧症動物の生化学動態の変化と汎用減圧表の有効性」「短時間潜水時の最適減圧手法の基礎研究」で実施したものである。

6 まとめ

- ① 階段減圧法より求めた体重と半飽和時間の換算式は、減圧点間減圧スピードの結果 $T_{1/2} = 40.954 W^{0.499}$ 、5 Tauの結果 $T_{1/2} = 25.990 W^{0.577}$ の関係が導かれた。
- ② 階段減圧法による肥満の減圧には、%FATから体重を考慮した減圧表の作成が必要である。しかし、加齢の肥満ウサギには使用できない。ウサギは、マウス、ラット、イヌに比較して減圧に対するストレスが大きい。
- ③ $T_{1/2} = 25.990 W^{0.577}$ の5 Tau直線減圧法は、マウス、ラット、ウサギ、イヌ全てに、また、肥満動物にとっても有効である。
- ④ 500m H_e-O_2 飽和潜水減圧表としても有効であることが実証できた。
- ⑤ $T_{1/2} = 25.990 W^{0.577}$ の5 Tau直線減圧法と $T_{1/2} = 40.954 W^{0.499}$ の5 Tau階段減圧法でヒト(70kg)の300m飽和潜水の減圧表を試算した場合、総減圧時間が共に約7.1日間で同一を示し、海洋科学技術センターの300m飽和潜水に使用している減圧期間12日間⁸⁾より安全に短縮できる可能性が示唆された。
- ⑥ 飽和潜水の減圧には、階段減圧法より直線減圧法が安全な減圧法であることが確認された。

参考文献

- 1) Lin, Y. C. : Formulation of saturation dive

decompression table 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)

- 2) 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)
- 3) F. Shidara, Y. Taya, Y. Mizushima, M. Mohri, Y. C. Lin : Determination of Inter-species $T_{1/2}$ for the Formation of Decompression Tables (UDT300).
Proceedings of the 11th Meeting UJNR Diving Physiology and Technology Panel, 48-60. (1991)
- 4) Y. C. Lin, F. SHIDARA, Y. TAYA, Y. MIZUSHIMA AND M. MOHRI : Interspecies Conversion of Tables for Decompression From 300 MSW (UDT300). Petter B. Bennett and Robert E. Marquis, Editors. Basic and Applied High Pressure Biology. Rochester, NY: University of Rochester Press, 341-352. (1994)
- 5) 設楽文朗・他谷 康・毛利元彦・Yu-Chong LIN : 飽和潜水減圧表の研究第1報 ラット・ウサギ・イヌの実証実験, JAMSTEC R, 31, 61-72. (1995)
- 6) 設楽文朗・他谷 康・毛利元彦・Yu-Chong LIN : 飽和潜水減圧表の研究—実験動物を用いた実証実験—, 日本高気圧環境雑誌, Vol, 28. No, 2, 103-113. (1993)
- 7) 中野正美・他谷 康・榎木暢雄・水嶋康男・設楽文朗・竹内久美・毛利元彦: 高圧 H_e-O_2 環境下におけるサルの睡眠相からみた N_2 ガス添加の影響について, JAMSTEC R, 24, 155-169. (1990)
- 8) 中山英明: 減圧速度から見た減圧症. 日本高気圧環境雑誌, 17 (2), 49-51 (1982)
- 9) 関 邦博訳: “システム潜水の減圧表の概念” 203-208. In: 潜水学, マリン企画, 東京, 323pp. (1982)
- 10) 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)

(原稿受理: 1995年11月27日)