

# 新減圧表の計算手法と現状

(圧気土木について)

# 構成

1. ビュールマンZH-L16モデルの採用について
  2. 減圧計算式
  3. 圧気土木:減圧表計算に用いる諸条件
  4. 圧気土木:減圧表の評価検証(安全率の設定)
- ☆ 潜水減圧表の考察

# 1. ビュールマンZH-L16モデルの採用について

## 採用理由

- ① モデルが組織中の気体分圧についての数値解を求めるものであり、基本的にはホールデン理論の微分方程式を利用しており、トレースバックが容易である。
- ② ヘリウムおよび窒素の2気体を扱える。
- ③ 組織の半飽和時間がより細かく、かつ長いものを含んでいる。Deep Stopや減圧時間の設定において、より安全側の時間が計算される。
- ④ 広く一般に利用され、かつ多くの臨床例から検証されているモデルである。
- ⑤ 特殊なプログラムを使う必要が無く、比較的計算が容易で扱い易い。

# 高圧則別表1とZH-L16モデルの考え方の対比

	高圧則別表1	新減圧表
計算理論	ホールデン理論	同左
半飽和時間組織の数と種類	組織数6、最長120分	組織数 <b>16</b> 、最長 <b>635</b> 分
減圧制御の方法	減圧比 $\approx 2.0 \sim 1.75$	<b>ビュールマンのa,b値</b>
酸素減圧	考えていない	<b>0.12MPa以下で実施</b>
最終減圧停止	0.03MPa(水深3m)	<b>0.06MPa(水深6m)</b>
業務終了後ガス圧減少時間	減圧終了後に30～60分必要	酸素減圧により体内ガス圧が大幅低下 → <b>不要</b>

注1) 減圧比 = 体内窒素分圧 / 環境圧力

注2) a,b値とは、次の減圧停止圧力に移行してよい不活性分圧を決めるパラメーター。作業気圧の一次関数で、半飽和時間組織ごとに、不活性ガスの種類ごとに決められる。

## 2. 減圧計算式

### 2気体の場合

初期分圧 (Process A1)



体内分圧計算 (減圧過程) 式A  
(Process A2)

a, b値



次の停止圧計算 式E  
(Process A3)



体内分圧計算 (停止時間) 式C  
(Process A4)

### 1気体の場合

初期分圧 (Process B1)



体内分圧計算 (減圧過程) 式A  
(Process B2)

M値



停止時間計算 式B  
(Process B3)



体内分圧計算 (停止時間) 式C  
(Process B4)

## 初期分圧 ProcessA1,B1

☆ 大気圧から水蒸気圧(0.567msw)を除いた値を初期圧力とする。

$$\begin{aligned} P_0 &= 0.79 \times (10 - 0.567) \\ &= 7.45 \text{ msw} \end{aligned}$$

☆ 16組織、全てが同等

## 体内分圧計算(減圧過程) ProcessA2,B2

$$P = P_{i0} + R(t - 1/k) - \{P_{i0} - P_0 - (R/k)\} \times \exp(-kt)$$

**P<sub>i0</sub>**: 目標環境圧力(msw)

P<sub>0</sub>: 体内分圧(msw)

R: 加減圧速度 × ガス濃度

t: 区間時間(min)

k: 半飽和定数 LN(2) / 組織の半飽和時間

- ☆ 16組織、全てにおいて計算する。
- ☆ 2気体の場合、窒素、ヘリウム各々の計算を行う。

## 次の停止圧計算 ProcessA3

☆ 2気体は体内分圧の加重平均でA, B値を算出

$$A = ((a_{N_2} \times P_{N_2}) + (a_{He} \times P_{He})) / (P_{N_2} + P_{He})$$

$$B = ((b_{N_2} \times P_{N_2}) + (b_{He} \times P_{He})) / (P_{N_2} + P_{He})$$

☆ 上記で求めたA, B値から停止圧を算出

$$\text{Depth} = (P_0 - A\text{値}) \times B\text{値}$$

Depth: 次の停止圧 (msw)

Po: 体内分圧 (msw)

☆ 次の停止圧 (3msw毎) になる体内分圧の時間を求める。

## 次の停止時間計算 ProcessB3

☆ 1気体は, 目標圧のM値を下回る区間時間を算出

$$t = \text{LN} \{ 1 - (P_t - P_0) / (P_a - P_0) \} \times (-k)$$

P<sub>t</sub>: 目標圧のM値 (msw)

P<sub>0</sub>: 体内分圧 (msw)

P<sub>a</sub>: 目標圧 (msw)

t: 区間時間 (min)

k: 半飽和定数 LN(2) / 組織の半飽和時間

## 体内分圧計算(停止時間) ProcessA4, B4

### ☆ 圧力一定時の体内分圧計算

$$P = P_0 + (P_{i0} - P_0) \times \{1 - \exp(-kt)\}$$

P: t時間後の体内分圧

**P<sub>i0</sub>: 目標環境圧力(msw)**

P<sub>0</sub>: 体内分圧(msw)

t: 区間時間(min)

k: 半飽和定数  $\text{LN}(2) / \text{組織の半飽和時間}$

☆ これらの計算式を用いて、大気圧0mswまで繰返す

### 3. 圧気土木：減圧表計算に用いる諸条件

	空気呼吸 酸素減圧	空気呼吸 酸素減圧 2回作業	混合ガス呼吸 酸素減圧
適用範囲(深度D)	8m < D ≤ 40m	8m < D ≤ 20m	35m < D ≤ 70m
減圧表 深度区分	2m	同左	5m
減圧表 時間区分	30min	同左	同左
加圧速度	8m/min以下	同左	同左
減圧速度	ボトムから12mまでは8m/min以下 12mから大気までは1.5m/min以下	同左	ボトムから30mまでは8m/min以下 30mから大気までは1.5m/min以下
呼吸ガス組成比率	N2:O2=79:21	同左	D=70m He:O2=82:18 maxPO2=1.44ATA
酸素組成比率	酸素毒性計算では, O2=100% 減圧計算では, N2:O2=20:80	同左	同左
ガス呼吸プロセス	—	—	・ヘリオックス呼吸は30m以深のみ ・30mから酸素減圧を開始するまでは空気呼吸
減圧プロセス	・12m以浅の第一停止深度から酸素減圧を実施 ・酸素減圧では, 酸素25min, 空気5minの繰返し ・総作業時間430min以下	同左	同左
二回目のプロセス	—	・120minの作業間隔を設ける ・一回目の組織分圧を初期値として減圧計算を行い, 二回目のプロセスを決定	—
最浅減圧停止深度	6m	同左	同左
最大作業時間	圧力に応じて変動	同左	同左

# 酸素暴露量に関する条件 (作業時間、連続作業日数の制約)

1日あたりの酸素暴露量：600 CPTD

1週間あたりの酸素暴露量：2,500 CPTD

$$\text{UPTD} = t \times \left( (P_{0_2} - 0.5) / 0.5 \right)^{0.83}$$

UPTD: 肺酸素毒性量単位

CPTD: 累積的肺酸素毒性量単位

t: 酸素暴露時間 (min)

$P_{0_2}$ : 酸素分圧 (ATA)

## 4. 圧気土木：減圧表の評価検証（安全率の設定）

### 既往減圧表の分析による新減圧表への応用

体内分圧経時変化に着目した安全率の決定方法  
（体内分圧／M値の比率検討）

## ○目的

計算手順を明確にし、そのトレースバックをすること、できることは本減圧理論の選定理由の一つである。その手法として、数値計算における安全性を検証し、M値に対する「安全率」という指標で新減圧表に応用することを主旨とする。

## ○過去実績(減圧表)調査対象

別表1, BP, NORD-table, MASO3

## ○調査項目

各減圧表による体内分圧履歴  
減圧症発症率  
総減圧時間

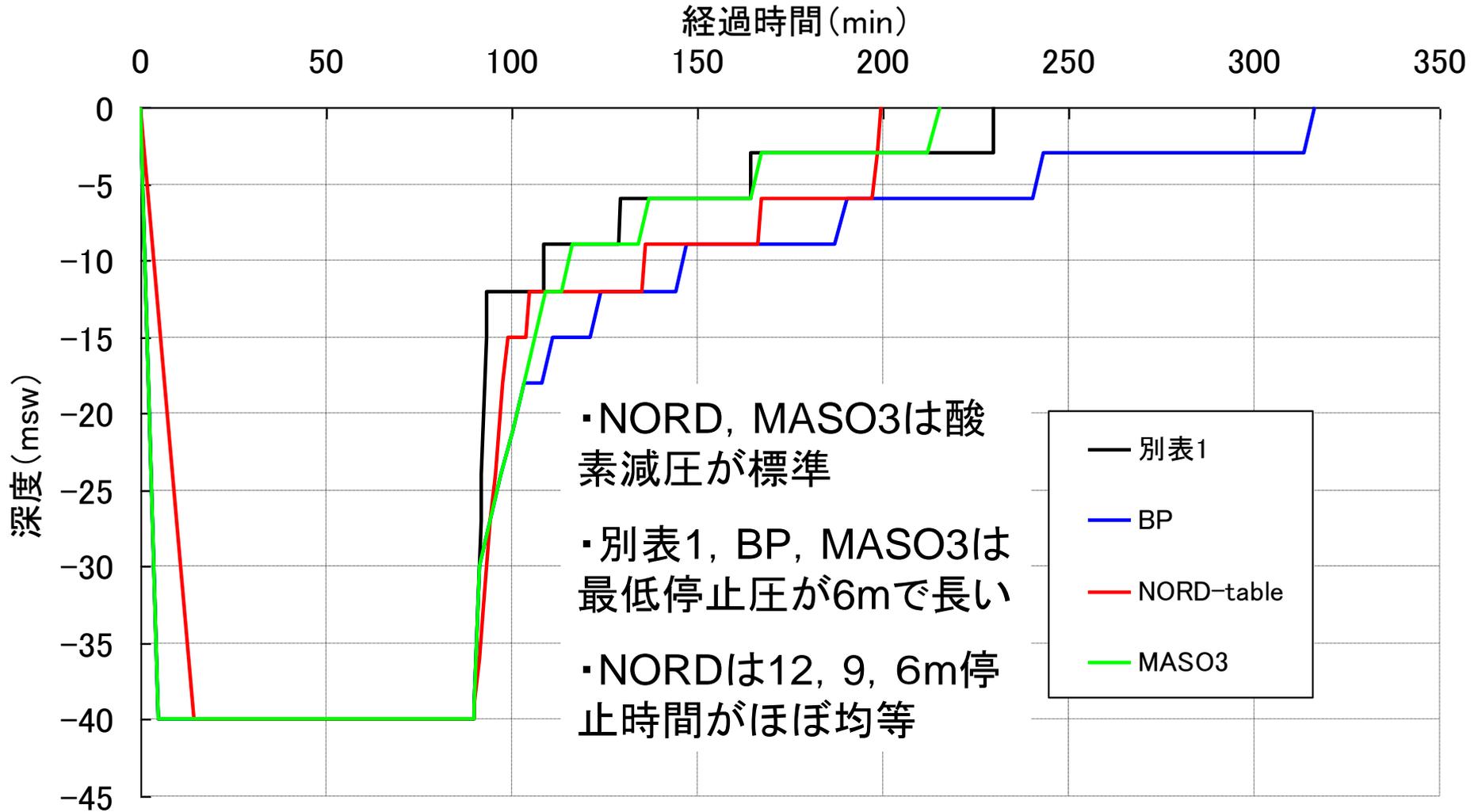
混合ガスにおいては減圧症発症時の探究

## ○分析指標

各深度における体内分圧( $P_i$ ) / M値(ビュールマン換算) < 1.0 安全

# 現在使用している減圧表のタイムスケジュール傾向

各減圧表(40msw~90min) タイムスケジュール



## 減圧表計算条件(分析結果から計算への展開)

- ・減圧表の安全率 $\alpha$ を決定する際、体内分圧がM値に対して0.90 ( $\alpha=1.10$ )範囲内に収まるような数値とする。また、分圧値が突出する場合においても、最大で0.95 ( $\alpha=1.05$ )以下に抑える
- ・各停止深度毎に安全率を定め(停止圧21mswから抑制)、体内分圧がM値に対して12mswから6mswの間に、比率0.15程度の低下を目指し、停止圧12mswで長時間保圧(12, 9mswの安全率を大きく)する。  
(ホールデンテール対策)
- ・上記条件の範囲で、総減圧時間が最短になるよう配慮する。

# 圧気土木 減圧表算定の現状

1. NORD-tableの減圧症発症率が分かると算定する上で参考になるため、調査中
2. 前述、安全率を考慮した「空気呼吸・酸素減圧表」「混合ガス呼吸(82:18)・酸素減圧表」の計算まで実施
3. 減圧表の最大作業時間は、総作業時間、酸素暴露量(CPTD)の支配要因によって決定

○資料1: 空気呼吸・酸素減圧表(8~40msw)

○資料2: 混合ガス呼吸(82:18)・酸素減圧表(35~70msw)

# スプリットシフト方式(2回作業)の考え方

- ① 本式は20msw以下の深度でのみ採用する
- ② 高気圧作業間隔を120min以上確保する
- ③ 2回の合計作業時間が第34条規準を超えないこと
- ④ 2回の合計累積酸素暴露量(CPTD)が600を超えないこと
- ⑤ 2回目の減圧時間は、2回目の高圧時間を2倍した作業時間として減圧時間を選択すること

→ 2回目 実作業60分 ならば 120分の減圧表を選択

⑤の理由として、

条件の最も厳しい20msw—300min作業で、大気圧帰還120min後の体内窒素分圧は、支配要因となる組織で、20msw—150min作業と同等

よって、減圧時間の選定において、作業時間を2倍とることにより入函時の余剰分圧をほぼ相殺する