

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 16 、最長 635 分
減圧制御の方法	減圧比 $\approx 2.0 \sim 1.75$	ビュールマンのa,b値
酸素減圧	考えていない	0.12MPa以下で実施
最終減圧停止	0.03MPa(水深3m)	0.06MPa(水深6m)
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 → 不要

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)

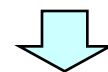


体内分圧計算 (減圧過程) 式A
(Process B2)

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_{i0}: 目標環境圧力(msw)

P₀: 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_t: 目標圧のM値 (msw)

P₀: 体内分圧 (msw)

P_a: 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_{i0}: 目標環境圧力(msw)

P₀: 体内分圧(msw)

t: 区間時間(min)

k: 半飽和定数 LN(2) / 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)	$8m < D \leq 40m$	$8m < D \leq 20m$	$35m < D \leq 70m$
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	N ₂ :O ₂ =79:21	同左	D=70m He:O ₂ =82:18 maxPO ₂ =1.44ATA
酸素組成比率	酸素毒性計算では, O ₂ =100% 減圧計算では, N ₂ :O ₂ =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

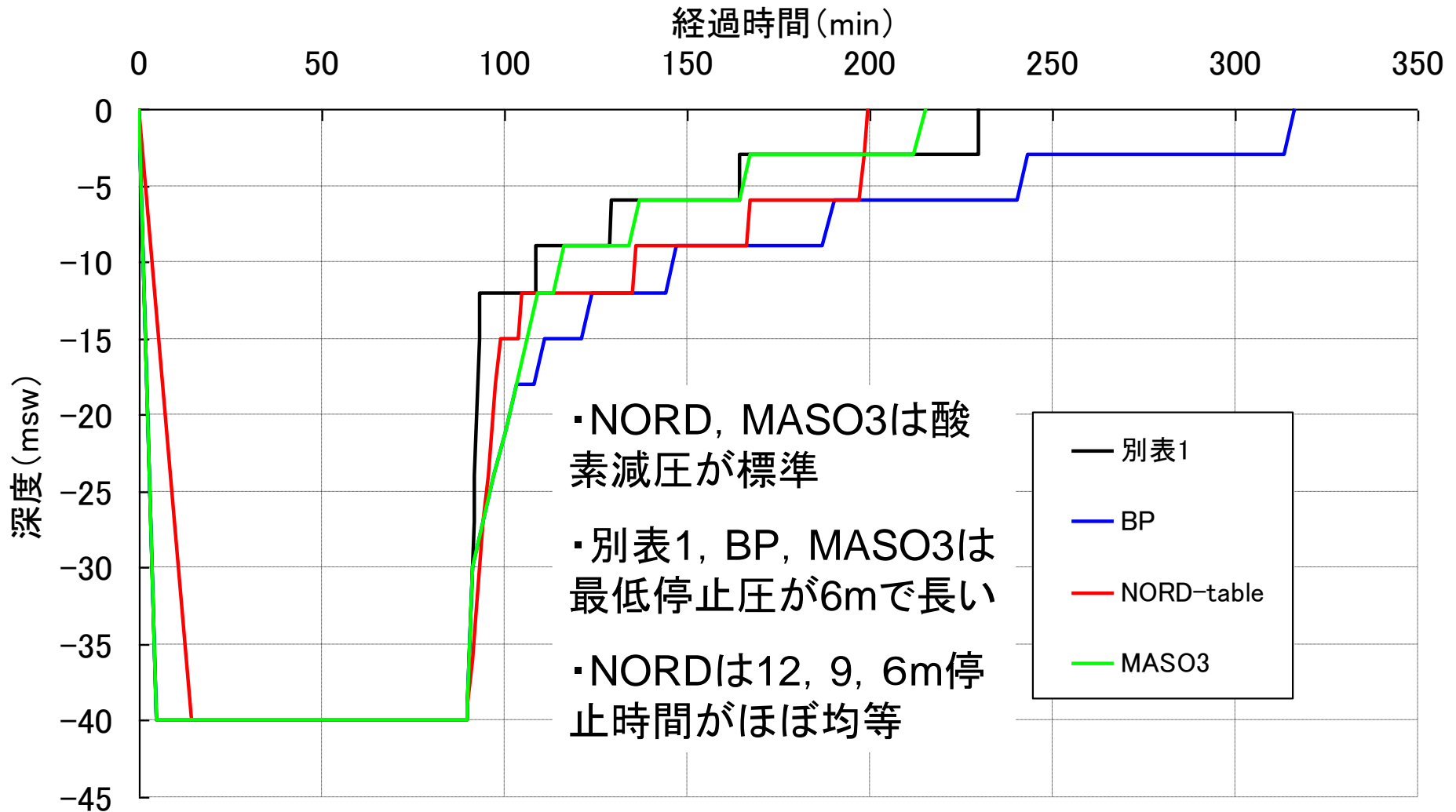
混合ガスにおいては減圧症発症時の探究

○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 α 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