

## ●特集・非飽和混合ガス潜水の現状と将来

# 混合ガス潜函作業における減圧法とその安全管理

高嶋力弥

Defence and Civil Institute of Environmental  
Medicine, Canada

### まえがき

圧気潜函工法は河川の橋脚の基礎や軟弱地盤での構造物の基礎建造など、湧水の多い個所で地中工事を安全、確実に施工できる方法として、以前より採用されてきた。しかしながら潜函内の作業者は、高気圧環境暴露による高気圧障害のリスクのため種々の制約をうける。こうした欠点を克服するため、近年作業室内の掘削機や排土装置を外部より遠隔操作し、これらの作業を無人で行う無人潜函工法が開発され実用化されるようになった。

この方法では装置やシステムが順調に作動する限り、従来の有人潜函作業の枠をこえた大深度潜函工事が可能である。しかしながら機器設備の点検、整備、修理や、潜函が沈下し所定の地盤まで到達した際に実施する地耐力試験、さらにその後の機器設備の撤去のため、潜函内での有人作業の必要性は依然として残されている。

ところで函内圧力が3 kg/cm<sup>2</sup>ゲージ圧程度までならば、従来通り空気呼吸下でこれらの作業を実施できる。だが函内圧力がさらに上昇すると窒素酔いの危険性が高まり、とくに4 kg/cm<sup>2</sup>をこえるようになると空気呼吸での作業は殆ど不可能であり、ヘリウムを含む混合ガスを用いなければならなくなる。

こうした状況を受け、大深度潜函の無人化施工に関連し、ヘリウム混合ガスを利用する工法の安全性の検討と実用化をはかるため、1991年9月「大深度潜函混合ガス利用研究会（座長 梨本一郎）」が発足した<sup>1)</sup>。以来安全衛生上の観点から、3カ年

にわたりハードウェア、ソフトウェアならびにバックアップシステム全体につき種々検討を行い、また高压タンクを用いた5, 6, 7 kg/cm<sup>2</sup>のヘリウム混合ガス（ヘリウム・窒素・酸素3種混合ガス；トライミクス）高気圧暴露実証テストを実施した<sup>2)~3)</sup>。その結果、実用化の目処が立つようになったので、1994年末より開始される名港西大橋西工事下部工のP2橋脚基礎ケーソン（潜函）工事に採用されることになった。

以下この潜函工事に於けるトライミクス（ヘリウム混合ガス）使用時の減圧法とその安全管理ならびに関連事項につき述べる。

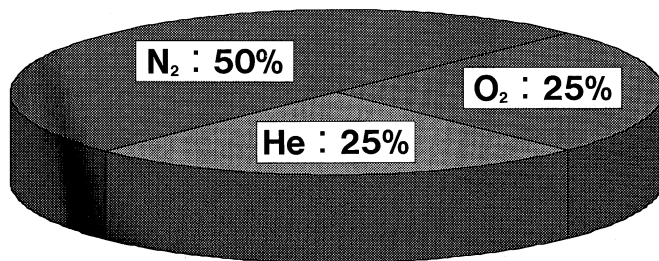
### 1. P2ケーソン施工経過

P2ケーソンは工場で作製、現場に回航され据え付けられた後、1995年1月中旬作業室内に空気が送られ高気圧下での有人掘削作業が開始された。4月作業圧力が2.2kg/cm<sup>2</sup>に達した後、遠隔操作式掘削排土システム（ROVO, Robotized Operating Vertical Shield System of OHMOTO Pneumatic Caisson）を使用し、無人方式に切り替えた。しかしながら掘削機や排土装置の点検、整備、修理等のため、エンジニアや作業員が定期的に函内に入り、従来通り高気圧下で空気呼吸を行った。

掘削が進みケーソンが沈下し、6月中旬函内圧力3.0kg/cm<sup>2</sup>を越えた時点で、バックアップシステムを用い彼らがトライミクス呼吸しながら函内で作業をするようにした。こうした状態は所定の地盤までケーソンが沈み、地耐力試験後函内の機器設備を撤去した12月初旬まで続いた。掘削深度が水面より45mなので予想最大圧力は4.5kg/cm<sup>2</sup>であったが、実際には4.2kg/cm<sup>2</sup>ですんだ。施工経過を表1に示す。

表1 施工経過

年 月	作業圧力 (bar)	掘削作業	呼吸ガス	備考
1994/12	0.0			ケーソン 設置完了
1995/ 2	1.2	有人掘削	空気	
1995/ 4	2.2	無人掘削 システム 「ROVO」	↓	
1995/ 6	3.0	↓	Trimix	
1995/12	4.2	↓	↓	工事完了



最大作業圧力4.5barにおける留意事項：  
 酸素中毒対策：PO<sub>2</sub> ≤ 1.6atm (Maximum Pressure)  
 UPTD < 450/日 & 2,500/週  
 窒素酔い対策：PN<sub>2</sub> < 4.0atm (Maximum Pressure)

図1 3種混合ガスの組成と留意事項

2. トライミクス (ヘリウム・窒素・酸素) の組成と留意事項

深海潜水や大深度潜函では窒素酔いの防止と呼吸抵抗の軽減のため、呼吸ガスとしてヘリウム混合ガスが用いられる。呼吸用ヘリウム混合ガスとしては、ヘリウムと窒素から成るヘリウム酸素 (He-O<sub>2</sub>, ヘリオクス) が以前から使われてきた。しかしながらヘリオクスは、熱絶縁性や音声歪みなどの面で空気に劣ることが知られている。

この欠点を補うため、近年ヘリオクスに窒素を加えたヘリウム、窒素、酸素から成る3種混合ガス (He-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>, トライミクス) が、水深30~100

m程度の中深度域潜水に好んで用いられている。今後の大深度潜函工事はこれらに相当する圧力範囲で実施されると考えられるので、われわれもヘリウム混合ガスとしてトライミクスを用いることにした。

トライミクスの組成は酸素中毒や窒素酔いの防止を考慮し、最大作業圧力下で酸素分圧が1.6気圧以下、窒素分圧が4.0気圧以下となり、またなるべく減圧が短くなるようにした結果、50% N<sub>2</sub>/25% He/25% O<sub>2</sub>と決定した。なお慢性酸素中毒を考慮し、減圧時の酸素呼吸を含め肺酸素毒性単位 (UPTD) が450/日、2000/週以内となるようにした (図1)。

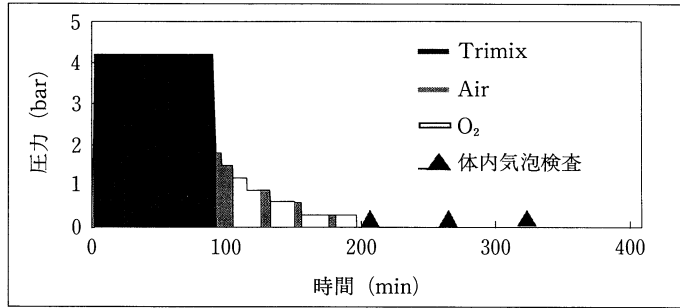


図2 3種混合ガス使用時の減圧スケジュール

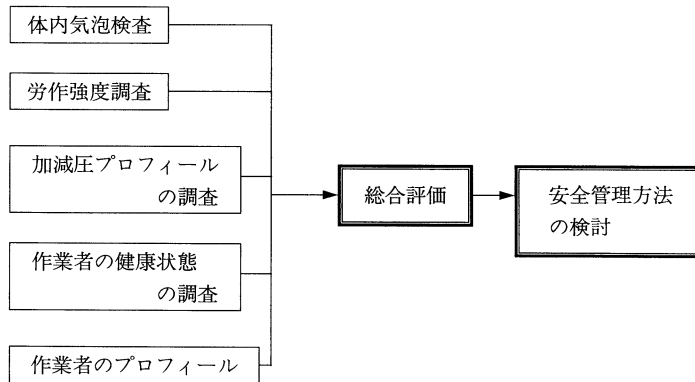


図3 安全管理システムの評価フロー

### 3. 加圧, 減圧法

加圧, 減圧は地上の混合ガス管理室の係員の監視, 操作によりマンロック内で行った。加圧速度は毎分  $1 \text{ kg/cm}^2$  とし,  $3 \text{ kg/cm}^2$  に到達したときマンロック内に設置されているホース式の全面型マスクを装着し, トライミクスガス呼吸を行いながらさらに作業圧力まで加圧した。作業圧力に達したら作業室との間のハッチを開き, 作業室に入り ROVO の点検, 整備など所定の仕事をを行った。

作業を終えた後はマンロックに戻り, 境のハッチを閉め混合ガス管理者に連絡し減圧を始めて貰う。減圧の方法は段階的であり, 第1減圧点に到達したらマスクを外し, マンロック内の空気を呼吸する。その後の減圧段階で,  $1.2 \text{ kg/cm}^2$  以下では管理者の指示により, マンロック備付のダンプ式酸素呼吸器で間欠的に純酸素を呼吸するようにした。

減圧スケジュールはトライミクス組成と作業圧力ならびに作業時間(高気圧作業安全衛生規則で

は高圧下の時間)に基づき W. Sterk (ライデン大学) が作成した。図2にその1例を示す。

### 4. 安全管理

1991年より1993年にかけての高圧タンクを用いた  $5, 6, 7 \text{ kg/cm}^2$  のヘリウム混合ガス(ヘリウム・窒素・酸素3種混合ガス; トライミクス) 高気圧暴露実証テスト, またその後1994年に実施した高圧タンクによる  $4.5 \text{ kg/cm}^2$  トライミクス暴露テストなどを通じ, 使用する減圧表の妥当性は実証されてきたとはいうものの, 空気潜水や従来の高気圧作業に比べ経験が少ない。

妥当性をより確実にするためには実作業でのデータを数多く集積することが不可欠である。そのため筆者らが現場に常駐し, 安全管理を兼ね作業者の加減圧プロフィールの調査, 減圧終了後の超音波ドプラによる体内気泡検査, 労作強度調査, 健康状態の調査などを継続的に行うとともに, その結果を解析し安全管理面にフィードバックした(図3)。

表2 作業気圧と気泡の出現(安静時)

作業気圧 P (bar)	被験者数 (人)	気泡出現数
3.0<P<=3.3	76	5 (6.6%)
3.3<P<=3.6	49	20 (40.8%)
3.6<P<=3.9	148	80 (54.1%)
3.9<P<=4.2	187	116 (62.0%)
合計	460	221 (48.0%)

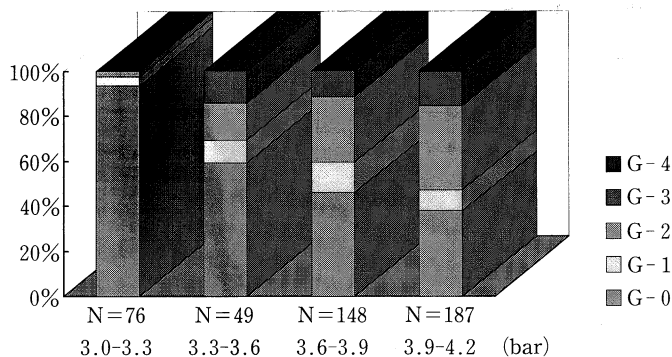


図4 作業気圧と気泡の出現(安静時)

## 5. 結果

### (1) 作業圧力と気泡の出現

表2, 図4に示すように作業気圧が上昇するにつれ, 気泡出現の頻度が大となりまたグレードも高くなる傾向を示している。さらに重労作の際にもこうした傾向が見られた。

### (2) 減圧症の発生

トライミクス呼吸で高気圧作業を行った人は延べ1,061名で, うち減圧症罹患者は11名(減圧症発生率:  $11/1,061=0.9\%$ )であった。殆どは膝関節のだるみ(niggle)程度の軽症例であり, 再圧治療を要しなかった。

## 6. 要約

(1) 作業圧力 $3.0\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 4.5\text{kg}/\text{cm}^2$ においてヘリウム混合ガス(トライミクス)が使用された。

(2) 函内作業時間(高圧下の時間)は, 28~130分で, その平均は約90分であった。

(3) トライミクス総暴露者数は延べ1,061名であった。

(4) 減圧症患者は11名(発生率は0.9%)で, いずれもきわめて軽症のため再圧治療を受けなかった。

(5) 酸素中毒および窒素酔いの症状は認められなかった。

## 7. 結論

(1) われわれが提案した組成のヘリウム・窒素・酸素3種混合ガス(トライミクス)の使用およびその際の減圧方法は, 十分な信頼性のあることが認められた。

(2) 減圧法の評価に対し, 超音波ドプラー体内気泡検査のきわめて有効なことが確認された。

(3) 今回われわれが提案し実施した安全管理システムが減圧症予防に有効であることが認められた。

稿を終えるにあたりデータの収集やその解析,

取りまとめに多大の協力を頂いた、梨本研究所梨本一郎博士、DITEC望月徹氏ならびにライデン大学 Walter Sterk 教授に深甚の謝意を表する次第である。

【参 考 文 献】

- 1) 大深度潜函混合ガス利用に関する研究報告書，東京，大深度潜函混合ガス利用研究会，1995，150頁
- 2) 梨本一郎，小林 浩，高野耕輔，大元邦夫：大深

度ニューマチックケーソンにおける無人化施工とバックアップシステム，基礎工，22巻3号，50-55頁，1994

- 3) K. Kobayashi, W. Sterk, Y. Gotoh, F. Eda and I. Nashimoto : Use of trimix breathing in deep caisson work. In : Proceedings of 20th European Undersea Baromedical Society meeting Istanbul, 1994, 336-341