

【ミニシンポジウム3】

# 形成気泡数からみた我が国の標準減圧表評価

眞野喜洋<sup>1)</sup>，山見信夫<sup>1)</sup>，外川誠一郎<sup>1)</sup>，中山晴美<sup>1)</sup>，中山 徹<sup>1)</sup>  
角田幸雄<sup>1)</sup>，岡崎史紘<sup>1)</sup>，芝山正治<sup>1)</sup>，川嶌真人<sup>2)</sup>

東京医科歯科大学医学部付属病院 高気圧治療部<sup>1)</sup>  
川嶌整形外科病院<sup>2)</sup>

## 背景

我が国の標準減圧表は昭和36年に労働省によって制定された別表第1（圧気土木用）と別表第2（潜水用）が推奨されている。しかし、今日この標準減圧表には様々な問題点が含まれており、規則通りにこれらの減圧表を利用するには支障を生じることが明らかであろう。

圧気土木用の別表第1においては作業圧力の最大許容が0.4MPaであるが昨年度における作業圧力は既に0.52MPaであったし、本年の作業圧力でも0.48MPaの作業が発注されている。この規則は既に現在の実務作業の要求に対応していないばかりか、現行の標準減圧表を使用することで作業圧力の増大に比例して減圧症が増加するがその発生率は許容限界を逸脱しており、容認しがたい状況にあると思われる。また、減圧における酸素吸入を義務づけていない先進国は日本だけでも言えるほど行政の立ち遅れも指摘されている。

一方、潜水用の別表第2については水深90mまで空気による潜水を指示しており、常識を逸脱しているばかりか、その安全性についても全く評価されておらず、世界でも最も risky な減圧表と言われても致し方ない。

このような厚労省の推奨する標準減圧表は Haldane の定律に基づいていると言われているものの、その根拠となる減圧理論について厚労省は示すことができず、これらの減圧表作成に携われた医師も既に逝去されており、現在では我が国の標準減圧表について検討する資料が存在していないといえる。

そこで今回は当研究室で過去に開発改良した

agarose gel気泡形成実験において検討した我が国の標準減圧表と各国の減圧表とを比較した結果を基に我が国の減圧表の評価を行い、若干の考察と今後の課題について触れてみることにする。

## 減圧表の原則

同一の理論によって構築されている減圧表は特定の数理理論に基づく特定の数式によって算出されている。従って同じ減圧表であるのならば、減圧症の発生率は人が暴露される圧力が高くなればなるほど、かつ、暴露時間が長くなればなるほど高くなる。我々は物理モデルによる agarose gel を用いた気泡計測法をかつて50ヶ所の圧気作業現場に協力して戴き、その作業場の全ての高気圧作業における延べ作業人数、作業圧力、滞在時間、別表第1表に準拠した減圧症発症件数、それぞれの単位当たり平均気泡計測数を調べた。その結果、作業圧力が「高くなるほど、かつ、作業時間が長くなるほど形成気泡数は増加するが、減圧症の発生数も増加していることが判明した（図1，2，3）。作業圧力は0.09 MPa～0.28MPaの範囲内の高気圧作業であったが、延べ作業人数、15,108人の中342人（2.3%）が減圧症に罹患していた。

これらの data から単位当たり計測気泡数と減圧症発症率との関係式を求めると以下ようになった。

$$Y = 0.084 X - 0.276 \quad (r = 0.939)$$

Y: 減圧症発症率(%)

X: 単位当たり計測気泡数

つまり、形成気泡数と減圧症発症率との関係は一定の

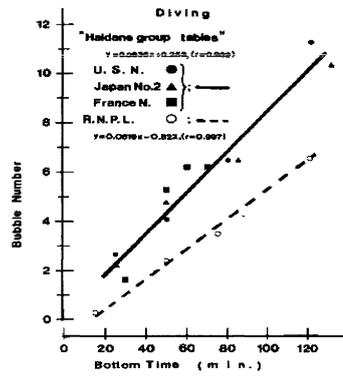


図1 Regression lines of Haldane group and R.N.P.L.  
(lotNo.16320,Tris Buffer,0.5 Agarose,0.27ml,100≐30m)

回帰直線で示すことが可能であり、発症率は気泡数に比例していることが指摘できる。このことはダイコンとよばれる減圧 computer も同様の物理モデルであることから減圧管理手段として利用できうることを意味している。

これらのことから、同一理論に基づく数理理論で導かれる減圧表では形成気泡数も同様に暴露圧力が增大するほど、また、暴露時間が增大するほど形成される気泡数も増大するであろうと予測される。どのような減圧表であってもその暴露圧力が高い場合や暴露時間が長い場合には減圧表の信頼性は下がるということであり、ダイバーが好んで愛用しているダイコンの限界も同様である。一定の信頼性をおけるダイコンや減圧表の利用はせいぜい水深は30m (0.29MPa) 以内を限度とすべきであり、滞在時間では潜水で60分、圧気土木で90分が限度ではなかろうか。これらを超える場合にはさらに別の安全係数をかけなければ、そのままの減圧表を使用することにはかなりのriskが加わると考えるべきである。そのことを留意しないで圧暴露することには賛同できない。

### 我が国の減圧表評価

ここで示す内容は数理モデルに基づく agarose gel bubble からみた減圧表評価であるので、ダイコンと同様に人の生理現象を再現しているものではない。したがって、この研究を発表した1970年代から80年代前半にかけてはまだ、減圧 computer は全く普及していなかったため物理的な数理モデルを人の減圧症発現に

絡めて考案することへの抵抗が強く、本学会でも関係する潜水医学研究者から総すかんを食って袋叩きに会い、国際学会においても日本の土俵を海外にまで持ち込まれて批判して戴いた経緯がある。

1981年に Royal Navy Diving Manual が改訂され、また Peter Bennett らが彼らの同席している国際会議で agarose gel bubble の一連の仕事を高く評価してくれてからはその傾向は穏やかになったが癪りが消えたとは言えなかった。物理的に形成される気泡数から減圧表を評価することの是非そのものが現在のように computer でものを言えない時代の世相を示す一例であった。図1はその頃行った、いわゆる Haldane 表と英国海軍生理学研究所 (RNPL) で作成された減圧表との比較である。水深を30m相当圧力に固定し、そこでの圧暴露時間を20~120分まで変化させ、それぞれの減圧表に従って大気圧力まで復帰減圧させた時の形成気泡数の変化を示している。

我が国の標準減圧表を含めて米仏海軍表の形成気泡数は RNPL 表より形成される気泡数は多く、それだけ risky と言える。また、両者に共通して言えることは潜水時間が短い場合には気泡数が少ないが時間経過と共にその数は直線的に増加し在底時間 (bottom time) が80分を超えるようになると特に日本の減圧表も減圧症発症の危険性が高まってくる。本来ならば、同じ理論に基づく減圧表であればそれを利用した結果、形成される気泡数は在底時間に関係なく短時間でも長時間でもその危険率は同じでなければならないはずが、在底時間の違いによって同じ減圧表を使用しても同じ

は原則として想定し得ないこと、酸素減圧による減圧症予防効果の大なることを考えるとこのような法規制は過去の考え方であり、潜水においても酸素減圧を利用すべきと言えよう。また、水深90mまでの空気による潜水を推奨していることは常識外であり、少なくとも水深40m以上では混合ガス潜水にするべきであり、水深30m以上における作業潜水では混合ガス潜水を推奨すべきである。潜水作業は圧気土木と異なり、水産関係などでは特に一人親方的零細企業も多く、コストの問題があって価格的に対応の難しい面もあり、一定の例外処置も必要かも知れない。しかし安全潜水を考え

る場合には水深40m以上における空気による潜水作業は推奨できない。また、水中減圧は基本的に行うべきではなく、特殊な潜水環境条件を除いて無限圧潜水に限定し、有減圧潜水を行う場合にはすべての場合に酸素減圧を義務付けて bounce dive に依る船上減圧、ないし bell bounce dive を行うべきであろう。また、どうしても例外的に水中減圧をしなければならない場合には賛同はしかねるが、オープン・ボトム・ベルないし水中ステージの設置を義務づけて酸素減圧を行うべきであろう。

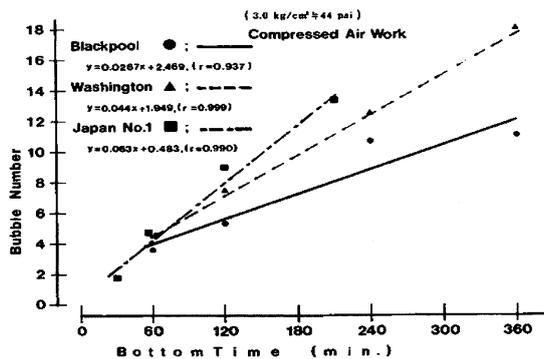


図2 Regression lines of different decompression schedules

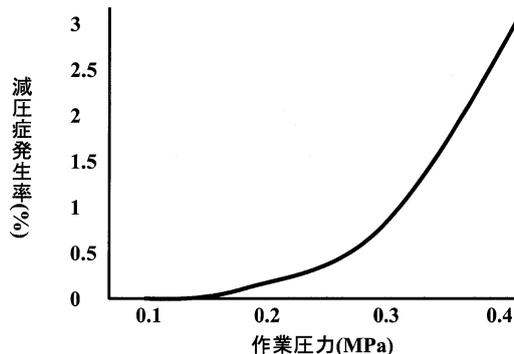


図3 作業圧力別減圧症発生率の比較

レベルの安全性は保証されていないと言える。同様に圧気土木作業に用いられている別表第1表についても図2から言えることは我が国の減圧表は米国のWashington表や英国のBlackpool表と比べ、時間経過に伴う形成気泡数の増加は著しく増えてしまう。圧暴露時間が120分を超えると日本の別表第1は欧米の減圧表に比べriskyなことは一目瞭然であろう。図1および2に共通して言えることは気泡計測法から判断すると我が国の標準減圧表は欧米の減圧表の安全性と較べるとかなり低いと言わざるを得ない。

作業圧力の違いによる減圧症発生率の変化は図3に示されるように作業圧力が大なるほど発生率は等比級数的に増えてゆく。これは当研究室で延べ人数55,643人に対して287人の減圧症発生をみたdataを基に作成された。作業圧力が0.2MPa以下では減圧症発生は余り多くないが0.3MPaを超えると途端に増加する。0.3MPa(水深30m相当)以上の場合には、民間レベルでは既に行っているが、厚労省の標準減圧表においても、この現象は減圧表そのものの持つ宿命であるとも言えるので今後の減圧表作成にあたっては単なる数理モデルのみに頼らない別の安全係数をさらに付加することを考える必要があろう。

**現行の標準減圧表の問題点と今後の課題**

我が国の圧気土木用の標準減圧表、別表第1は1日に2回のsplit shift作業を基本としている。この考え方は作業途中で休憩時間を挿入するという労基法の原則に照らして決められたようであるが、減圧症発生

のriskを高めるという点で間違っている。高気圧業務という特殊な環境作業に対してあまりにも無知蒙昧な行政的対応と言わざるを得ない。現在このような体系を維持しているのは先進諸国では日本だけである。繰り返し圧力暴露を避けるためには欧米では1日1回作業が原則であり、その工夫をすべきであろう。0.4MPa以上の減圧表がないからという理由で別表第2を推奨している点もナンセンス以外の何物でもない。そもそも空気表を堅持する姿勢は取りやめるべきであり、0.3MPa以上での空気による減圧管理には賛同できない。減圧症発生が急増する0.3MPa以上の作業においてはHeliumガスを利用する混合ガス吸入を検討すべきであろう。また、減圧を必要とするあらゆる圧気作業においては酸素減圧を標準利用とすることで減圧症発生を皆無に近づける環境を整備するべきである。このような行政的な配慮が欠落しているために発注者はコストの安い空気利用に拘る結果となり、そのしわ寄せが圧気作業者にのみ掛かってしまう結果となっている。

EC諸国では1996年以降の空気による減圧方法を廃棄して減圧停止を必要とする全て圧気作業で酸素減圧が標準方式となっている。これによって誤作動を除いて減圧症に対する心配は殆ど無くなったと言われている。

潜水用の別表第2について高気圧障害防止規則では水中における酸素減圧を禁止している。使用する呼吸ガスボンベの採り違いによる事故が過去にあって、それによる急性酸素中毒による死亡事故が背景にあったものと思われる。しかし、現在そのような人為的ミス