

Table 14-3. Surface Supplied Helium Oxygen Decompression Table (cont't)

Decompression Stops (fsw)

Depth (fsw)	Bottom Time (min.)	Time to First Stop (min:sec)	BOTTOM MIX										100% O <sub>2</sub>		Chamber O <sub>2</sub> Periods						
			190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80		70	60	50	40	30	20
<b>140</b> Max O <sub>2</sub> =24.8% Min O <sub>2</sub> =14.0%	10	3:00																6	8	1	
	20	3:00																10	12	19	
	30	3:00																10	18	30	
	40	3:00																10	22	40	
	60	3:00																7	29	52	
	80	3:00																7	33	60	
<b>150</b> Max O <sub>2</sub> =23.4% Min O <sub>2</sub> =14.0%	100	3:00															7	35	64	4	
	120	3:00															7	35	66	4	
	10	3:20																10	7	8	1
	20	3:00																7	14	22	2
	30	3:00																7	19	34	2
	40	3:00																7	24	44	3
<b>160</b> Max O <sub>2</sub> =22.2% Min O <sub>2</sub> =14.0%	60	3:00																7	31	56	3
	80	3:00																7	35	64	4
	100	3:00																7	36	66	4
	120	3:00																9	36	66	5
	10	3:20																7	8	10	1
	20	3:20																7	15	24	2
<b>170</b> Max O <sub>2</sub> =21.1% Min O <sub>2</sub> =14.0%	30	3:20																7	21	37	2
	40	3:20																7	26	47	3
	60	3:20																7	30	56	3
	80	3:00																7	35	66	4
	100	3:00																7	35	66	5
	120	3:00																7	36	66	5
<b>170</b> Max O <sub>2</sub> =21.1% Min O <sub>2</sub> =14.0%	10	3:20																7	8	12	1
	20	3:20																7	16	28	2
	30	3:20																7	23	42	3
	40	3:20																7	28	52	3
	60	3:20																7	33	62	4
	80	3:20																9	35	66	4
100	3:00																5	36	66	5	
120	3:00																9	36	66	5	

Exceptional Exposure times are surrounded by the black box.

Table 14-3. Surface Supplied Helium Oxygen Decompression Table (cont't)

Decompression Stops (fsw)

Depth (fsw)	Bottom Time (min.)	Time to First Stop (min:sec)	BOTTOM MIX													100% O <sub>2</sub>		Chamber O <sub>2</sub> Periods																		
			150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290		300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420					
<b>180</b> Max O <sub>2</sub> =20.1% Min O <sub>2</sub> =14.0%	10	3:40																																		
	20	3:40																																		
	30	3:40																																		
	40	3:20																																		
	60	3:20																																		
	80	3:20																																		
<b>190</b>	10	4:00																																		
	20	3:40																																		
	30	3:40																																		
	40	3:40																																		
	60	3:40																																		
	80	3:20																																		
<b>200</b> Max O <sub>2</sub> =18.4% Min O <sub>2</sub> =14.0%	10	4:00																																		
	20	4:00																																		
	30	3:40																																		
	40	3:40																																		
	60	3:40																																		
	80	3:40																																		
<b>210</b> Max O <sub>2</sub> =17.7% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	4:20																																		
	20	4:00																																		
	30	4:00																																		
	40	4:00																																		
	60	3:40																																		
	80	3:40																																		

Exceptional Exposure times are surrounded by the black box.

Table 14-3. Surface Supplied Helium Oxygen Decompression Table (cont'd)

Decompression Stops (fsw)

Depth (fsw)	Bottom Time (min.)	Time to First Stop (min:sec)	50% O <sub>2</sub>												100% O <sub>2</sub>			Chamber O <sub>2</sub> Periods			
			190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50		40	30	20
			BOTTOM MIX																		
<b>220</b> Max O <sub>2</sub> =17.0% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	4:40																13	20	1	
	20	4:20												7	0	2	10	10	20	1	
	30	4:20												7	0	3	7	10	23	4	
	40	4:00												7	2	6	9	10	30	54	
	60	4:00												7	0	6	9	11	34	82	
<b>230</b> Max O <sub>2</sub> =16.3% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	4:00																36	66	5	
	20	4:00												7	8	12	17	21	36	66	
	30	4:00												7	12	15	20	23	36	66	
	40	4:00												7	14	19	23	23	36	66	
	100	4:00												7	18	23	23	23	36	66	
<b>240</b> Max O <sub>2</sub> =15.7% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	4:40																36	66	8	
	20	4:40																36	66	8	
	30	4:20																36	66	8	
	40	4:20																36	66	8	
	60	4:20																36	66	8	
<b>250</b> Max O <sub>2</sub> =15.2% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	5:00																46	86	8	
	20	4:40																46	86	8	
	30	4:40																46	86	8	
	40	4:40																46	86	8	
	60	4:20																46	86	8	

Exceptional Exposure times are surrounded by the black box.

Table 14-3. Surface Supplied Helium Oxygen Decompression Table (cont't)

Decompression Stops (fsw)

Depth (fsw)	Bottom Time (min.)	Time to First Stop (min-sec)	Bottom Time																		Chamber O <sub>2</sub> Periods
			BOTTOM MIX																		
			190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	
<b>260</b> Max O <sub>2</sub> =16.3% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	5:00									7	0	0	0	4	4	10	10	18	27	2
	20	5:00								7	0	3	4	6	7	10	10	27	50	3	
	30	4:40						7	0	2	5	6	9	10	10	10	33	62	4		
	40	4:40						7	0	3	8	9	10	15	15	35	64	5			
	60	4:40						7	3	7	10	14	16	21	21	36	66	6			
	80	4:40						7	6	10	13	17	23	23	23	36	66	7			
	100	4:20						7	2	9	13	16	20	23	23	36	66	8			
	120	4:20						7	4	11	14	19	20	23	23	36	66	8			
<b>270</b>	10	5:20								7	0	0	3	3	4	10	10	17	28	2	
	20	5:00								7	0	3	6	6	8	10	10	29	52	3	
	30	5:00								7	0	3	6	9	13	13	34	62	4		
	40	5:00								7	0	2	5	8	12	16	35	66	5		
	60	4:40								7	0	6	8	10	14	19	23	36	66	6	
	80	4:40								7	3	8	11	14	17	23	23	36	66	7	
	100	4:40								7	5	11	13	16	20	23	23	36	66	8	
	120	4:40								7	8	12	16	19	20	23	23	36	66	8	
<b>280</b> Max O <sub>2</sub> =13.7% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	5:40									7	0	0	3	3	4	10	10	18	31	2
	20	5:20									7	0	4	6	7	10	10	30	54	3	
	30	5:00									7	0	1	5	9	12	12	35	64	4	
	40	5:00									7	0	4	6	8	12	17	35	66	5	
	60	5:00									7	4	6	8	12	15	18	23	36	66	6
	80	4:40									7	0	7	9	11	17	23	23	36	66	7
	100	4:40									7	2	9	11	15	17	20	23	36	66	8
	120	4:40									7	4	11	13	16	19	20	23	36	66	8
<b>290</b> Max O <sub>2</sub> =13.3% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	5:40									7	0	0	4	3	4	10	10	19	33	2
	20	5:20									7	0	1	2	6	9	10	30	56	3	
	30	5:20									7	0	2	5	9	14	14	34	63	5	
	40	5:20									7	0	5	7	8	11	17	35	66	5	
	60	5:00									7	0	6	7	9	12	15	20	36	66	7
	80	5:00									7	2	8	10	12	16	19	23	36	66	8
	100	5:00									7	5	10	12	15	19	20	23	36	66	8
	120	5:00									7	8	11	15	17	19	20	23	36	66	8

Exceptional Exposure times are surrounded by the black box.

Table 14-3. Surface Supplied Helium Oxygen Decompression Table (cont't)

Decompression Stops (fsw)

Depth (fsw)	Bottom Time (min.)	Time to First Stop (min:sec)	Decompression Stops (fsw)																		Chamber O <sub>2</sub> Periods	
			190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20		
<b>300</b> Max O <sub>2</sub> =12.9% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	6:00																				
	20	5:40																				
	30	5:40																				
	40	5:40																				
	60	5:20																				
<b>310</b> Max O <sub>2</sub> =12.5% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	6:00																				
	20	5:40																				
	30	5:40																				
	40	5:20																				
	60	5:20																				
<b>320</b> Max O <sub>2</sub> =12.2% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	6:20																				
	20	6:00																				
	30	5:40																				
	40	5:40																				
	60	5:20																				
<b>330</b> Max O <sub>2</sub> =11.8% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	6:20																				
	20	6:00																				
	30	6:00																				
	40	5:40																				
	60	5:40																				

Exceptional Exposure times are surrounded by the black box.

Table 14-3. Surface Supplied Helium Oxygen Decompression Table (cont'd)

Decompression Stops (fsw)

Depth (fsw)	Bottom Time (min.)	Time to First Stop (min:sec)	BOTTOM MIX																	50% O <sub>2</sub>			100% O <sub>2</sub>			Chamber O <sub>2</sub> Periods
			190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20						
<b>340</b> Max O <sub>2</sub> =11.5% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	6:40							7	0	0	0	3	3	3	4	7	10	10	23	41	3				
	20	6:20				7	0	0	2	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	33	60	5				
	30	6:00				7	0	0	3	5	6	7	8	9	10	10	10	18	18	35	66	6				
	40	6:00				7	0	0	4	6	7	8	9	10	10	10	10	22	22	36	66	7				
	60	5:40				7	0	3	5	6	9	10	13	16	18	21	23	23	23	36	66	8				
<b>350</b> Max O <sub>2</sub> =11.2% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	5:40				7	2	8	8	12	13	16	17	17	19	20	23	23	23	36	66	8				
	20	5:40				7	4	9	11	13	15	16	17	19	19	20	23	23	23	36	66	8				
	30	6:20				7	0	0	2	2	2	2	2	3	3	5	7	10	10	21	43	3				
	40	6:00				7	0	1	4	4	4	5	7	8	11	13	18	18	18	33	66	6				
	60	6:00				7	0	5	5	8	8	11	12	16	19	23	23	23	23	33	66	8				
<b>360</b> Max O <sub>2</sub> =10.9% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	7:00				7	1	7	9	12	14	15	16	17	19	20	23	23	23	33	66	8				
	20	6:40				7	0	0	2	2	2	2	2	3	3	3	7	7	10	25	44	3				
	30	6:20				7	0	0	3	3	3	4	5	6	7	8	11	13	19	36	66	6				
	40	6:20				7	0	2	4	5	7	7	9	10	14	19	23	23	23	36	66	7				
	60	6:20				7	2	5	6	7	9	11	14	16	19	23	23	23	23	36	66	8				
<b>370</b> Max O <sub>2</sub> =10.6% Min O <sub>2</sub> =10.0%	10	6:00				7	2	7	8	11	13	16	17	19	20	23	23	23	36	66	8					
	20	6:00				7	4	8	10	12	14	15	16	17	19	20	23	23	23	36	66	8				
	30	6:40				7	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	7	7	10	25	46	3				
	40	6:20				7	0	2	3	4	4	4	5	5	8	11	16	19	19	36	66	7				
	60	6:20				7	0	4	5	7	8	9	11	13	17	20	23	23	23	36	66	8				

Exceptional Exposure times are surrounded by the black box.

Table 14-3. Surface Supplied Helium Oxygen Decompression Table (cont')

Depth (fsw)	Bottom Time (min.)	Time to First Stop (min:sec)	Decompression Stops (fsw)																	Chamber O <sub>2</sub> Periods		
			150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	100% O <sub>2</sub>					
<b>380</b>	10	7:20																				
	20	7:00																				
	30	6:40																				
	40	6:20																				
50	6:20																					
60	6:20																					
80	6:20																					
100	6:20																					
120	6:20																					
			BOTTOM MIX																			
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
			7	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Max O<sub>2</sub>=10.4%  
Min O<sub>2</sub>=10.0%

Exceptional Exposure times are surrounded by the black box.

#### 4. NOAA の減圧停止不要空気潜水表

NOAA の減圧表は、NOAA 減圧停止不要空気潜水表とナイトロックス減圧表がダイビングマニュアルに公開されている。ナイトロックス欠乏などの緊急事態に際して要減圧停止空気減圧を行うことを容認しており、米国海軍標準空気減圧表が併記されている。それで、本節では NOAA 減圧停止不要空気潜水表のみを紹介する。この表は米国海軍の Table3 と Table4 を 1セットに組み合わせた様式になっている。考え方は米国海軍と同じである。



## NOAA NO-DECOMPRESSION AIR DIVE TABLE

CHART 1 — DIVE TIMES WITH END-OF-DIVE GROUP LETTER

WARNING: EVEN STRICT COMPLIANCE WITH THESE CHARTS WILL NOT GUARANTEE AVOIDANCE OF DECOMPRESSION SICKNESS. CONSERVATIVE USAGE IS STRONGLY RECOMMENDED.

RNT RESIDUAL NITROGEN TIME  
 + ABT ACTUAL BOTTOM TIME  
 ESDT EQUIVALENT SINGLE DIVE TIME  
 (USE ESDT TO DETERMINE END-OF-DIVE LETTER GROUP)

DEPTH		00 MAXIMUM NO-STOP TIME		DIVE TIME REQUIRING DECOMPRESSION MINUTES REQUIRED AT 10 fsw STOP (3msw)																00	
msw	fsw																	00	00		
12	40	5	15	25	30	40	50	70	80	100	110	130	150	170	200	00	00				
15	50		10	15	25	30	40	50	60	70	80	90	100	120	160	00	00				
18	60		10	15	20	25	30	40	50	55	60	70	80	100	140	00	00				
22	70		5	10	15	20	30	35	40	45	50	60	70	80	100	00	00				
25	80		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	00	00				
28	90		5	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	00	00				
31	100		5	7	10	15	20	22	25	30	35	40	45	50	60	00	00				
34	110			5	10	13	15	20	25	30	35	40	45	50	60	00	00				
37	120			5	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	60	00	00				
40	130			5	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	00	00				

GROUP LETTER	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
7	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
17	3:20	4:49	5:48	6:34	7:05	7:35	7:59	8:21	8:50	8:58	9:12	9:28	9:43	9:48
25	1:39	2:38	3:24	3:57	4:25	4:49	5:12	5:40	5:49	6:02	6:18	6:32	6:46	6:54
37	1:09	1:57	2:28	2:58	3:20	3:43	4:02	4:19	4:35	4:49	5:03	5:08	5:22	5:28
49	0:54	1:29	1:59	2:23	2:44	3:04	3:21	3:36	3:52	4:04	4:09	4:23	4:37	4:45
61	0:45	1:15	1:41	2:02	2:20	2:38	2:53	3:08	3:22	3:37	3:53	4:05	4:16	4:26
73	0:40	1:08	1:29	1:47	2:03	2:19	2:34	2:47	2:59	3:11	3:24	3:37	3:49	4:01
87	0:36	0:59	1:19	1:35	1:49	2:05	2:18	2:31	2:43	2:55	3:07	3:19	3:31	3:43
101	0:33	0:54	1:11	1:25	1:35	1:53	2:05	2:18	2:31	2:43	2:55	3:07	3:19	3:31
116	0:31	0:49	1:04	1:18	1:30	1:49	2:05	2:18	2:31	2:43	2:55	3:07	3:19	3:31
138	0:28	0:45	0:59	1:11	1:25	1:49	2:05	2:18	2:31	2:43	2:55	3:07	3:19	3:31
161	0:26	0:42	0:54	1:04	1:18	1:49	2:05	2:18	2:31	2:43	2:55	3:07	3:19	3:31
187	0:25	0:39	0:54	1:04	1:18	1:49	2:05	2:18	2:31	2:43	2:55	3:07	3:19	3:31
213	0:24	0:37	0:51	1:04	1:18	1:49	2:05	2:18	2:31	2:43	2:55	3:07	3:19	3:31

CHART 3 — REPETITIVE DIVE TIME

00 TOP NUMBERS (RED) ARE RESIDUAL NITROGEN TIMES, RNT  
 00 BOTTOM NUMBERS (BLACK) ARE ADJUSTED MAXIMUM DIVE TIME FOR A REPETITIVE DIVE WITH NO DECOMPRESSION  
 BLACK AREA: REQUIRES DECOMPRESSION

CHART 2 — SURFACE INTERVAL TIME



## 5. 減圧表の考え方：酸素減圧の導入

### 5-1 酸素減圧の原理

高圧下滞在時に高圧空気を呼吸し、減圧時に酸素を吸入すると、Haldane 式における窒素分圧計算を  $P_a=0(\text{atm})$  で計算するので、減圧時に高圧空気を呼吸するよりも窒素分圧低下が速やかに行われることが推測できる。これを定性的に説明すると以下ようになる。

空気の代わりに純酸素を吸入すると、肺の中はほとんど窒素がない状態となり、体内溶解窒素の分圧との間に圧力差が生じて、体内から体外への窒素排泄が促進される。ヘリウム混合ガス呼吸作業後の減圧においても同様の効果が期待できる。これを「窒素の洗い出し」や「酸素窓効果」と言っている。減圧時に行う酸素吸入を「酸素減圧」と言っている。この方法は、宇宙船外活動でも採用されている。

注) 宇宙船外活動時の酸素減圧：宇宙ステーション内は大気圧 1 気圧 (0.1MPa) に保たれているが、船外活動は絶対気圧が 0 atm に近い宇宙空間で行われる。手袋の操作性から宇宙服内は 0.29 気圧 (約 0.029MPa) に保たれているので、船外活動をする場合は、体内に飽和溶存している窒素 (分圧 0.8atm) を体外除去しないと減圧症に罹患してしまう。その方法として酸素減圧 (宇宙医学専門用語で「脱窒素」) を採用している。脱窒素の方法には短時間方式 (約 2~4 時間) と長時間方式 (約 13 時間) がある。前者は宇宙服内で酸素を吸入する方法で宇宙服着用時間が 10 時間に及ぶ。後者は宇宙ステーション内のエアロック内で純酸素吸入等の複雑な手順とロック内宿泊を経て船外活動に臨む。

高圧酸素の長時間吸入は肺酸素中毒の危険を伴うこともあるので、減圧時の酸素吸入は圧力 0.12MPa 以下で行い、かつ吸入 25 分と 5 分間のマンロック内高圧空気吸入 (エアブレイク) を交互に行って大気圧に帰還する方法を採用している。不活性ガスが体内溶解蓄積する高気圧作業後の全ての減圧において酸素減圧を採用することが理想的である。

英国の法律は減圧停止圧のある高気圧作業の減圧 (すなわちゲージ圧 0.95bar  $\div$  0.1MPa を超える高気圧作業の減圧) において採用している。それ以下のゲージ圧でも採用も可能。

### 5-2 酸素減圧の効果の定量的評価(グラフ表示：高圧下滞在を高圧空気呼吸で行った場合)

図 5-1 は減圧症に罹患した作業員の減圧記録 (窒素分圧のみ試算) に酸素減圧実施を想定して窒素分圧を計算した図を併記した図である。窒素分圧降下が如実に示されている。

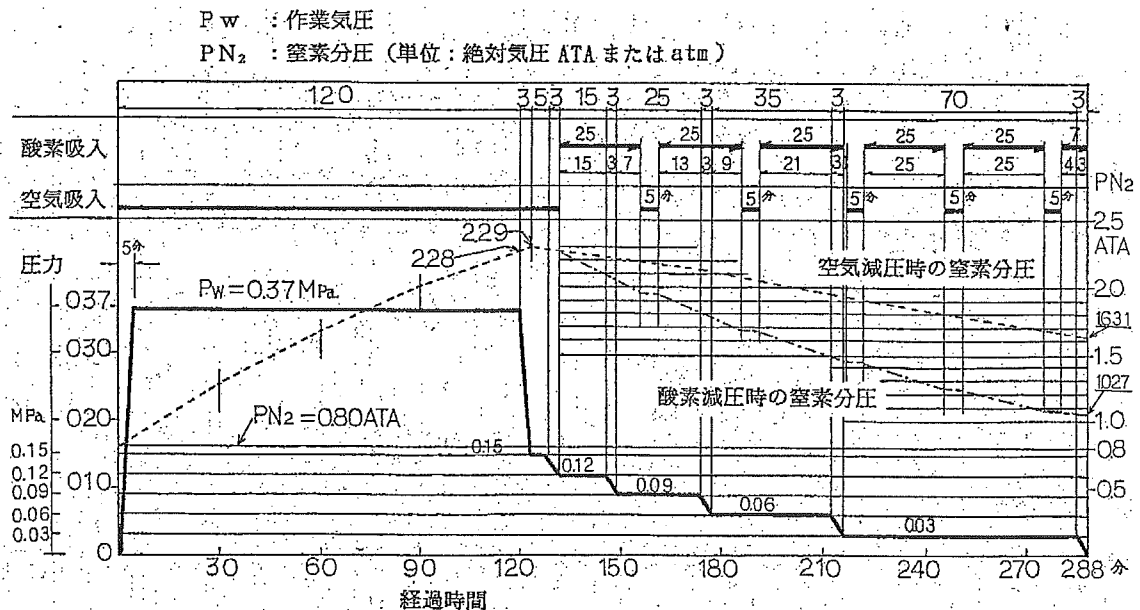


図 5-1 酸素減圧の効果 (出典：窒素分圧の話・石井通夫・建設と圧気・日本圧気技術協会 2002.1.15)

### 5-3 空気呼吸で減圧した場合の窒素分圧値計算例

#### 5-3-1 要約

減圧症罹患者の加減圧プロフィールを基に半飽和時間  $T=120$  分の場合の窒素分圧値計算を試みた。窒素分圧を用いた体内ガス圧係数は 2.038 (高圧則別表では 2.1) となった。

#### 5-3-2 発症経過と加減圧プロフィール

平成 13 年 4 月 4 日に作業圧力 0.363MPa (3.7kgf/cm<sup>2</sup>) で高圧下の時間 120 分を終えて、減圧停止圧 (高圧則を遵守した) 間の圧力降下を毎分 0.1kgf/cm<sup>2</sup> で行う減圧を 168 分実施した。業務終了後ガス圧減少時間 60 分を現場内で過ごさせた。罹患者が減圧症発症を翌日 14 時 30 分に訴えたので、専門医師と連絡をとり医師の指示で救急再圧員は 15 時 28 分に再圧を治療表第 2 A 欄で開始した。0.5MPa までの加圧途中 0.363MPa で、症状は消滅し、所定の減圧を経て 4 月 6 日午前 2 時 46 分に出陣した。その後は異常を訴えていない。

以下に、作業時の減圧プロフィールにしたがった窒素分圧変動試算結果を示す。

なお、単位は kgf/cm<sup>2</sup> で表記している。

#### 5-3-3 高圧下滞在で増大した窒素分圧値 : 圧力 3.7kgf/cm<sup>2</sup>, 滞在 120 分

$$Pa=(1+3.7) \times 0.8=3.76 \text{ atm}$$

- ①  $t=30$  分 :  $P_{tis}=0.80 + (3.76-0.80) \{1 - e^{-(0.693 \times 30/120)}\} = 1.27 \text{ atm}$
- ②  $t=60$  分 :  $P_{tis}=0.80 + (3.76-0.80) \{1 - e^{-(0.693 \times 60/120)}\} = 1.67$
- ③  $t=90$  分 :  $P_{tis}=0.80 + (3.76-0.80) \{1 - e^{-(0.693 \times 90/120)}\} = 2.00$
- ④  $t=120$  分 :  $P_{tis}=0.80 + (3.76-0.80) \{1 - e^{-(0.693 \times 120/120)}\} = 2.28$

#### 5-3-4 減圧時の窒素分圧低下状況

- ① 第 1 減圧停止圧 1.5kgf/cm<sup>2</sup> までの減圧 3 分終了時の窒素分圧 (分圧上昇に留意のこと)

平均圧力  $(3.7+1.5)/2=2.6 \text{ kgf/cm}^2$  を 3 分呼吸したと想定し呼吸ガスの  $Pa=3.6 \times 0.8=2.88 \text{ atm}$

$$P_{tis}=2.28 + (2.88-2.28) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 2.29 \text{ atm}$$

- ② 第 1 減圧停止圧 1.5kgf/cm<sup>2</sup> を 5 分間保持後の窒素分圧 :  $Pa=2.5 \times 0.8=2.0 \text{ atm}$

$$P_{tis}=2.29 + (2.00-2.29) \{1 - e^{-(0.693 \times 5/120)}\} = 2.282 \text{ atm}$$

- ③ 第 2 減圧停止圧 1.2kgf/cm<sup>2</sup> までの減圧 3 分終了時の窒素分圧

平均圧 1.35kgf/cm<sup>2</sup> とすれば、呼吸ガスの窒素分圧  $Pa=(1+1.35) \times 0.80=1.88 \text{ atm}$

$$P_{tis}=2.282 + (1.88-2.282) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 2.275 \text{ atm}$$

- ④ 第 2 減圧停止圧 1.2kgf/cm<sup>2</sup> を 15 分間保持後の窒素分圧 :  $Pa=2.2 \times 0.8=1.76 \text{ atm}$

$$P_{tis}=2.275 + (1.76-2.275) \{1 - e^{-(0.693 \times 15/120)}\} = 2.232 \text{ atm}$$

- ⑤ 第 3 減圧停止圧 0.9kgf/cm<sup>2</sup> までの減圧 3 分終了時の窒素分圧 : 平均圧 1.05kgf/cm<sup>2</sup>

$$P_{tis}=2.232 + (1.64-2.232) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 2.222 \text{ atm}$$

- ⑥ 第 3 減圧停止圧 0.9kgf/cm<sup>2</sup> を 25 分間保持後の窒素分圧 :  $1.9 \times 0.8=1.52 \text{ atm}$

$$P_{tis}=2.222 + (1.52-2.222) \{1 - e^{-(0.693 \times 25/120)}\} = 2.128 \text{ atm}$$

- ⑦ 第 4 減圧停止圧 0.6kgf/cm<sup>2</sup> までの減圧 3 分終了時の窒素分圧

平均圧 0.75kgf/cm<sup>2</sup> とすれば、呼吸ガスの窒素分圧  $Pa=1.75 \times 0.8=1.40 \text{ atm}$

$$P_{tis}=2.128 + (1.4-2.128) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 2.115 \text{ atm}$$

- ⑧ 第 4 減圧停止圧 0.6kgf/cm<sup>2</sup> を 35 分間保持後の窒素分圧 : 呼吸  $PN_2=1.6 \times 0.8=1.28$

$$P_{tis}=2.115 + (1.28-2.115) \{1 - e^{-(0.693 \times 35/120)}\} = 1.962 \text{ atm}$$

- ⑨ 第 5 減圧停止圧 0.3kgf/cm<sup>2</sup> までの減圧 3 分終了時の窒素分圧

平均圧 0.45kgf/cm<sup>2</sup> とすれば呼吸ガスの窒素分圧  $Pa=1.45 \times 0.8=1.16 \text{ atm}$

$$P_{tis}=1.962 + (1.16-1.962) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 1.948 \text{ atm}$$

- ⑩ 第 5 減圧停止圧 0.3kgf/cm<sup>2</sup> を 70 分間保持した後の窒素分圧 :  $1.3 \times 0.8=1.04 \text{ atm}$

$$P_{tis}=1.948 + (1.04-1.948) \{1 - e^{-(0.693 \times 70/120)}\} = 1.646 \text{ atm}$$

- ⑪ 大気圧に帰還直後の窒素分圧

$$P_{tis}=1.646 + (0.8-1.646) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 1.631 \text{ atm}$$

- ⑫ 減圧プロフィールと窒素分圧変動図 : 図 7-1 参照。

#### 5-3-5 減圧終了時の体内ガス圧係数について

体内ガス圧係数は (窒素分圧/0.80) =  $1.631/0.80=2.038$  と計算される。高圧則は減圧停止圧力間の圧力降下速度を 0.8kgf/cm<sup>2</sup>/分以下でその値に近似して計算しているの、減圧終了後の体内ガス圧係数が 2.1 となっている。一方、当該工事では減圧速度を 0.3kgf/cm<sup>2</sup>/3 分 = 0.1kgf/cm<sup>2</sup>/分としているので、最終的に窒素分圧低下が促進されて 2.1 より小さい値となった。減圧管理として高圧則を逸脱していない。

しかしながら、窒素分圧 1.631ATA で減圧症が発症している。

## 5-4 酸素吸入で減圧 (0.12MPa 以下) した場合の窒素分圧計算例

### 5-4-1 要約

前節で再現した窒素分圧を基にして、その減圧症罹患者が減圧中の圧力 0.12MPa (1.2kgf/cm<sup>2</sup>) 以下で酸素減圧を実施した場合に、窒素分圧値がどのように変動するかを計算した。図 7-1 は計算結果をプロットした図である。

5-4-2 計算式：組織の半飽和時間 T=120 分で計算する。

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\}$$

ここに、 $P_{tis}$  : t 時間滞在した後の組織の不活性ガス分圧

$P_a$  : 動脈内の窒素分圧=呼吸ガスの窒素分圧。

酸素吸入中は  $P_a=0.0ATA$  とする。

$P_0$  : t=0 時の窒素分圧、  $t$  : 滞在時間 (分)

### 5-4-3 酸素減圧中の窒素分圧変動の逐次計算：一部計算省略

①酸素減圧開始直後：減圧停止圧力 0.12MPa 保持中の窒素分圧変動

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 2.275 + (0 - 2.275) \{1 - e^{-(0.693 \times 15/120)}\} = 2.086 \text{ atm}$$

ただし  $P_0=2.275ATA$ ,  $P_a=0$ ,  $t=15$  分 (酸素吸入)

②減圧 0.12~0.09MPa 中も酸素吸入 3 分：平均圧力 0.105MPa で計算

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 2.086 + (0 - 2.086) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 2.050 \text{ atm}$$

③減圧停止圧力 0.09MPa 保持中の酸素吸入 (25-15-3=7 分) における窒素分圧変動

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 2.050 + (0 - 2.050) \{1 - e^{-(0.693 \times 7/120)}\} = 1.969 \text{ atm}$$

④減圧停止圧力 0.09MPa 中の空気吸入 (5 分)

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.969 + (1.52 - 1.969) \{1 - e^{-(0.693 \times 5/120)}\} = 1.956 \text{ atm}$$

ただし  $P_a=(1+0.9) \times 0.80=1.52 \text{ atm}$

⑤減圧停止圧力 0.09MPa 中の酸素吸入 (25-7-5=13 分)

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.956 + (0 - 1.956) \{1 - e^{-(0.693 \times 13/120)}\} = 1.803 \text{ atm}$$

⑥減圧 0.09~0.06MPa 中も酸素吸入 3 分：平均圧力 0.075MPa で計算

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.803 + (0 - 1.803) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 1.772 \text{ atm}$$

⑦減圧停止圧力 0.06MPa 保持中の酸素吸入 (25-13-3=9 分) における窒素分圧変動

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.772 + (0 - 1.772) \{1 - e^{-(0.693 \times 9/120)}\} = 1.682 \text{ atm}$$

⑧減圧停止圧力 0.06MPa 中の空気吸入 (5 分)

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.682 + (1.28 - 1.682) \{1 - e^{-(0.693 \times 5/120)}\} = 1.671 \text{ atm}$$

ただし  $P_a=(1+0.6) \times 0.80=1.28 \text{ atm}$

⑨減圧停止圧力 0.06MPa 中の酸素吸入 (35-9-5=21 分)

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.671 + (0 - 1.671) \{1 - e^{-(0.693 \times 21/120)}\} = 1.480 \text{ atm}$$

⑨~⑭の計算記述は省略

⑮減圧停止圧 0.03MPa 保持中の酸素吸入 25 分における窒素分圧変動

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.236 + (0 - 1.236) \{1 - e^{-(0.693 \times 25/120)}\} = 1.070 \text{ atm}$$

⑯減圧停止圧力 0.03MPa 保持中の空気吸入 (5 分) における窒素分圧変動

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.070 + (1.04 - 1.070) \{1 - e^{-(0.693 \times 5/120)}\} = 1.069 \text{ atm}$$

ただし  $P_a=(1+0.3) \times 0.80=1.04 \text{ atm}$

⑰減圧停止圧 0.03MPa 保持中の酸素吸入 4 分における窒素分圧変動

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.069 + (0 - 1.069) \{1 - e^{-(0.693 \times 4/120)}\} = 1.045 \text{ atm}$$

⑱減圧 0.03~0.00MPa 中も酸素吸入 3 分：平均圧力 0.015MPa で計算

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.045 + (0 - 1.045) \{1 - e^{-(0.693 \times 3/120)}\} = 1.027 \text{ atm}$$

### 5-4-4 減圧終了時の体内ガス圧係数

酸素減圧を行った場合の減圧終了時の体内ガス圧係数  $1.027/0.80=1.284$

注) 高圧則減圧表・別表第 1 による減圧の場合： $1.631/0.80=2.039$

## 6. 減圧表の考え方

### 6-1 ヘリウム混合ガス呼吸の概要

: 米国の潜水生理学専門書に見るヘリウム混合ガス呼吸の現状

#### 6-1-1 まえがき：原著の概要紹介

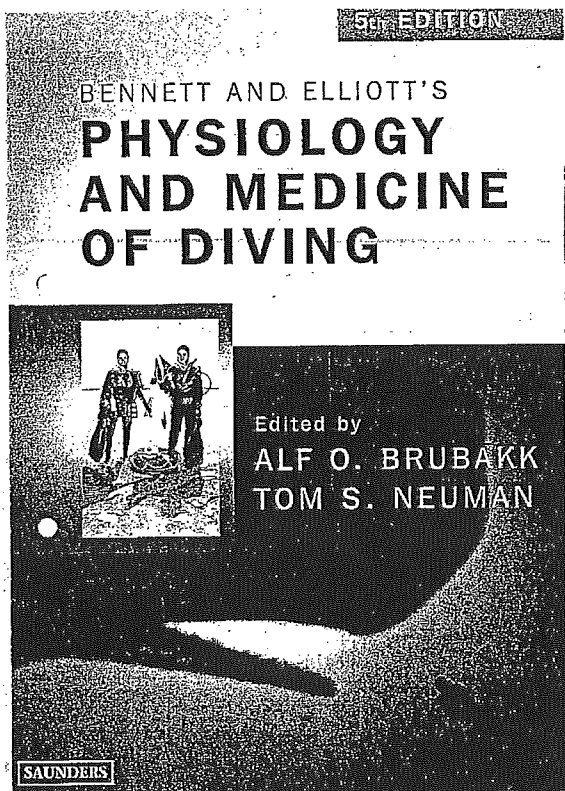
本節は原著 BENNETT & ELLIOTT's

The Physiology and Medicine of diving (潜水生理学と医学)：第5版(2003年刊行)  
10 Decompression：減圧 10.2 減圧理論(原著455~500ページ)の一部翻訳である。

ヘリウム混合ガスを利用した新しい減圧実務の現状を探る目的で翻訳した表題「海外の潜水生理学専門書に見るヘリウム混合ガス呼吸の現状」は、原著表題「減圧実務」からヘリウム混合ガス呼吸関連の記述を抽出したことから、原著編著者に無断で付けている。原著の10.2章全体は翻訳していない。

なお、原著は初版を1969年に刊行以降、1975,1982,1993と2003年に改訂されてきた。編著者のひとりでもあるP. Bennett博士は第5版を眞野に献呈した。なお、原著476ページ紹介の1939年の米国海軍潜水艦 SQUALUS 引き揚げ作業において試行段階にあったにも関わらず米国海軍・ヘリウム減圧表は使われた。それに至る一連の経過が、光文社文庫「海底からの生還・史上最大の潜水艦救出作戦」(ピーター・マース著、江畑謙介 訳、2005年2月)で紹介されている。

改訂第5版原著表紙と刊行に際して編著者・P. Bennett博士から眞野への献詞を下記に紹介し、次ページに原著目次を紹介する。



To Hiro,  
A wonderful friend and colleague  
and the founder of DAN Japan on my  
retirement as Founder and President of DAN  
and DAN America. Your support, generosity  
and kindness over these many years is  
very much appreciated.  
with warmest personal regards  
P. Bennett  
June 26 2003

# Contents

Contributors .....	vii		
Preface .....	xi		
Introduction .....	1		
<i>Christian J Lambertsen</i>			
<b>1 An Outline History of Diving Physiology and Medicine</b> .....	4		
<i>David H Elliott and James Vorosmarti</i>			
<b>2 Diving Methods</b>			
2.1 Compressed Air Work .....	17		
<i>Eric P Kindwall</i>			
2.2 Commercial Diving .....	29		
<i>Michael L Gernhardt and Christian J Lambertsen</i>			
2.3 Recreational Diving .....	45		
<i>Drew Richardson</i>			
2.4 Scientific Diving .....	56		
<i>Michael A Lang</i>			
2.5 Empirical Diving Techniques .....	64		
<i>Robert M Wong</i>			
<b>3 Ventilation, Gas Exchange and Exercise Under Pressure</b> .....	77		
<i>Enrico M Camporesi and Gerardo Bosco</i>			
<b>4 Thermal Considerations in Diving</b> .....	115		
<i>Igor B Mekjavic, Michael J Tipton and Ola Eiken</i>			
<b>5 Breath-Hold Diving</b> .....	153		
<i>Massimo Ferrigno and Claes E Lundgren</i>			
<b>6 Drowning and Nearly Drowning</b> .....	181		
<i>Steven D Brown and Daniela Gaitanaru</i>			
<b>7 Comparative Diving Physiology</b> .....	211		
<i>Paul J Ponganis, Gerald L Kooyman and Sam H Ridgway</i>			
<b>8 Otorhinolaryngological Aspects of Diving</b> .....	227		
<i>Otto Molvaer</i>			
<b>14 Pathology of Diving Accidents</b> .....	729		
<i>James L Caruso</i>			
<b>15 Diving Equipment</b> .....	744		
<i>Glen H Egstrom</i>			
<b>9 Pressure Effects</b>			
9.1 Biological Effects of Pressure .....	265		
<i>Stephen Daniels and Yoram Grossman</i>			
9.2 Inert Gas Narcosis .....	300		
<i>Peter B Bennett and Jean Claude Rostain</i>			
9.3 High Pressure Nervous Syndrome .....	323		
<i>Peter B Bennett and Jean Claude Rostain</i>			
9.4 Oxygen Under Pressure .....	358		
<i>James M Clark and Stephen R Thom</i>			
<b>10 Decompression</b>			
10.1 Decompression Theory .....	419		
<i>Peter Tikuisis and Wayne A Gerth</i>			
10.2 Decompression Practice .....	455		
<i>Robert W Hamilton and E D Thalmann</i>			
10.3 Bubble Detection .....	501		
<i>R Y Nishi, Alf O Brubakk and Olav S Eftedal</i>			
10.4 Pathophysiology of Decompression Sickness .....	530		
<i>T James R Francis and Simon J Mitchell</i>			
10.5 Arterial Gas Embolism and Pulmonary Barotrauma .....	557		
<i>Tom S Neuman</i>			
10.6 Manifestations of Decompression Disorders .....	578		
<i>T James R Francis and Simon J Mitchell</i>			
10.7 Treatment of Decompression Disorders .....	600		
<i>Richard E Moon and Des F Gorman</i>			
<b>11 Long Term Effects of Diving</b>			
11.1 Long Term Effects of Diving on the Lung .....	651		
<i>Einar Thorsen</i>			
11.2 Dysbaric Osteonecrosis .....	659		
<i>John Paul Jones, Jr and Tom S Neuman</i>			
11.3 Long Term Effects on the Central Nervous System .....	718		
<i>Andrew J Dutka</i>			
<b>12 Fitness to Dive</b> .....	700		
<i>Alfred A Bove</i>			
<b>13 Investigation of Diving Accidents</b> .....	718		
<i>James Vorosmarti</i>			
<b>Appendix: Some Useful Data and Formulas Related to Diving</b> .....	760		
<b>Index</b> .....	765		

## 6-1-2 米国の潜水生理学専門書に見るヘリウム混合ガス呼吸の現状

この文書は下記文献の一部翻訳である。翻訳許可申請未済。  
The Physiology and Medicine of diving : BENNETT 第5版 (2003年刊行)  
10 Decompression : 減圧  
10.2 Decompression Practice : 減圧の実務、からヘリウム混合ガス関連を抽出  
(原著 476~479 ページ) 執筆者 : Robert W Hamilton and Edward D Thalmann

訳注) 単位: 原著では圧力単位を水深で表示している。msw (meter of seawater)、  
fsw (feet of seawater)、 $3.3\text{fsw} \doteq 10.06\text{msw} \doteq 0.1\text{MPa}$

ヘリウム酸素潜水 476~477 ページ (原著のページ、以降同様)

ヘリウムはその低い溶解度と減圧に一層有利であるという理論的仮定の故に当初は潜水ガスとして提案された (Sayers ら 1925)。Behnke & Yarbrough(1938)は、ヘリウムは麻酔効果を引き起こさず、これが約 50msw(165fsw)より深い潜水に対するヘリウム使用の主な動機になると結論した。

最初のヘリウム潜水の試みは米国と英国の海軍(Momsen 1942)により 1920 年に行われたが、やっかいな DCS 発症の結果に終わった。実験は Edgar End(1937,1938)が 120msw(400fsw)ヘリウム酸素潜水の実用性を明らかに示した 1930 年に再開された、そして米国海軍は 1939 年の米国海軍潜水艦 Squalus 引き揚げ途中でも試行段階であったが使われた米国海軍・ヘリウム分圧表(Momsen 1942)を開発した (Behnke & Willmon 1939)。より大深度へ降下する潜水範囲拡張のためと減圧が浅い潜水では余りにも長過ぎ深い潜水では短すぎると感じられた理由で表の調整をするために、さらなるテストが行われた。これらの研究は完全に成功しなかった (Alexander ら 1970, Molumphy 1950, Summitt & Crowley 1970)、そして最初の減圧表はバウンスダイビング用に残され、深度 107msw(350fsw)以浅の適用まで降格された。

訳注) バウンスダイビング : bounce diving

飽和潜水で用いるのと同様のダイビングベル内を大気圧状態にしたまま作業深度まで急速に降下させ、ベル内をその深度の水圧相当まで飽和潜水より急速に加圧 (途中の圧力で呼吸ガス成分を変更) し、等圧になったらハッチを開いて水中作業を開始する。呼吸ガス (ヘリオックス) はベルと連結した呼吸ホースから供給される。作業が終わると、ベル内に入りハッチを閉めて減圧を開始するが、ベルの水面引き揚げも行われ、水面到達後にダイバーは船上減圧室で減圧を続行する。この方式では減圧時にデカンテングのように短時間でも作業員の大気圧環境下暴露におくことをしない。石油関係では深度 100msw を超えると飽和潜水に移行している (原著 477 ページ参照)。

短時間で、深いヘリウム酸素”バウンス”潜水に関する海軍による他の文書はほとんどない。米国海軍のヘリウム酸素体験は半閉鎖回路型呼吸装置 (MBA) の Mk6 型 (Workman & Reynolds 1965) や特殊装置付き減圧要領が開発された閉鎖回路型 Mk16 UBA (Thalmann 1985a) を用いて行う浅い潜水に関する、よりうまい解説書を提供している。最近、カナダ軍はかれらの特殊任務用に一層適したヘリウム酸素減圧表 (Nishi 1990) を開発した。

訳注) 半閉鎖回路型 (semi-closed circuit) ・閉鎖回路型 (closed circuit)

スクーバ潜水はスクーバ(SCUBA:Self-contained under water breathing apparatus・自吸気式潜水呼吸器)を背中に背負って行う。アクアラング (水中肺) は商品名。スクーバを用いた潜水時間は潜水深度とボンベ内の呼吸ガス収納容量に左右される。呼吸で吐き出したガスには酸素が残っており、炭酸ガス量も少ないのでそれを再利用するのが半閉鎖型呼吸器である。呼気を水中に吐き出さず炭酸ガスをガス吸収剤で吸収し、さらに少なくなった酸素を添加する方式の呼吸装置が閉鎖回路型である。呼吸ガス使い捨てすなわち呼気を全て海中に吐き出し、新鮮なガスをボンベから供給する方式の呼吸装置を開放型回路 (open circuit) 呼吸器という。

商用潜水産業では 1960 年代に自分たち固有の使用のために米国海軍ヘリウム分圧表を修正し、1970 年代を通じて効力のある表に発展させた。結果として得られた減圧表は通常、専有で、公刊されず、大部分が履歴不詳、性能不詳となっている。深度 120~180msw (400fsw~600fsw) で 30-60 分滞在におけるヘリウム減圧手順の開発は重要な挑戦課題であることを示した。(Hamilton 1976)

商用の深いヘリウム・バウンス・ダイビングは 1980 年代には普通でなくなり、1990 年代に飽和潜水の受け入れや遠隔操作装置 (ROV) が発展した。1970 年代に年間 1000 件のヘリウム・バウンス潜水をこなした大潜水会社も現在は 50 件に過ぎない (Imbert ら 1992a)。

ヘリウムが窒素より溶解し難く、急速に交換するので、ヘリウム潜水は窒素潜水より早い減圧を期待さ

れる。これは飽和減圧で明らかに真実であるが、短時間潜水や深い潜水における相異はよくても小さく、他の要因により統計的意味付けを明らかにすることも難しい (Duffner & Snider 1958、Hempleman 1967、Thalmann 1985a、Thalmann ら 1989)。Momsen(1942)は、滞底圧を離脱するときヘリウムの初期急速排泄順応するために深く、予期しない減圧停止の必要性を報告した。

訳注) 下線部の原文: Momsen(1942) reported the need for deep, and unanticipated, decompression stops to accommodate the 'initial out-rush' of helium upon leaving the

Cabarrou ら (1978) は類似の必要性を報告した。そして、深い停止への必要性は現時点の減圧作業員の主要な課題である (Lang & Lehner 2000)。

通常、ヘリウム潜水後の減圧はヘリウムや減圧時間を節約するために空気または酸素への変更を伴い、その結果、ヘリウムと窒素に依存した減圧の直接比較データがほとんどない。しかしながら、そのような情報は減圧中のガス交換のない類似の潜水に対する Mk15 や Mk16UBA 研究から得られる (Thalmann 1984、1985a、1986、Thalmann ら 1980、Vann 1982)。ヘリウムでの全体の DCS 発症は 3.7% (1723 潜水のうち 64 件)、窒素では 5.2% (1976 潜水のうち 103 件) であった。しかし、重大な症状は全ヘリウム症状のうち 40.1% (発症数 64 件のうち 26 件)、窒素症状のうち 15.5% (発症数 103 件のうち 16 件;  $p < 0.001$ ) を占めた。

最初の米国海軍ヘリウム減圧表は使うには複雑過ぎた。1991 年にその表は単純化された。主に 3 種の滞在酸素構成比率 10、12 および 16% に指定し、第 1 停止 [30msw(100fsw)あるいはそれより浅い] 15msw(50fsw)到達までにおけるヘリウム混合ガス中の酸素 40%への交換を導入した。そしてそこで 100%酸素への交換がなされた。12msw(40fsw)停止の終わりにダイバーは水面に急速浮上を行い、船上減圧室に入り、12msw(40fsw)に加圧されて室内で減圧を完了する。減圧計画それ自身は変更されなかった、しかし滞在時間は上述のカナダプログラムの結果に基づいて再び配分された (Nishi 1990)。米国海軍方式を用いると、酸素中毒の発症は 15 および 18msw(50 と 60fsw)であったと報告されている (Moluphy 1950)。カリフォルニアの商業ダイバーが 1960 年代にヘリオックスを使い始めたとき、水中での酸素吸入を避けるためにかれらは即座に米国海軍表を修正した。

1998 年に米国海軍は同じ動きをした。100%酸素吸入は全ての水中停止に対してヘリウム中の酸素 40%と置き換えられたが、それ以外に変更されなかった。減圧室内での減圧停止時の 100%酸素吸入は変更されていない。これら後者の変更は完全に減圧エキスパートの判断に基づいている (「承認研究会」にしたがった補間変更: 「減圧手順の承認」以下を参照)。しかし現場での予備使用 (米国軍艦 Moinitor の引き揚げにおける 350 回の潜水) は、DCS 1 件のみ、酸素痙攣無しの良好という判定を示した。

訳注) 下線部: 原著 492 ページ記述の「see Validation of Decompression Procedures」のこと。492 ページでは次のように記述されている。

「新たに開発された減圧計算手法やそれによる減圧表の評価機関の必要性が提起されて、「UHMS の Validation Workshop : 米国高気圧環境医学会承認研究委員会」に委託された。・中略・UHMS の Validation Workshop の統一見解が、もし新減圧表が経験内容の基になっている既存の表に十分に類似あるいは証明された計算手法に類似していれば、そのとき新減圧表は特別な研究施設の試行も経ずに特別な条件付きで実用承認のための現場テストに進むことができる。」

レクリエーション (テクニカル) ダイビング団体によるヘリウム使用の開発もあった (テクニカル・トライミックス・ダイビング: 「混合ガス・スクーバ」以下を参照)。

訳注) 下線部: 原著 478 ページ記述の (Technical Trimix Diving: Scuba With Mixed Gases) のこと。

このヘリウム使用の大部分は酸素、ヘリウムと窒素のトライミックス構成であった。不運にもこれらの開発は主として伝聞で、十分に証拠書類で立証されていない。短時間滞底潜水に対して、トライミックスにおけるさらなるヘリウム使用は、より長い減圧を必要とするが、滞底中のこの交換はさらに減圧を長くする (Lang & Lehner 2000)。

訳注) 下線部の訳は正しいか? 原文を以下に示す。

For dives with short bottom times the use of more helium in the trimix requires a longer decompression, but this switches as bottom times get longer( Lang &

圧力約 40msw(130fsw)を超えるケーソンやトンネル作業におけるトライミックス使用は、今日実施を容認されている [ (トンネルとケーソン作業参照: 圧気暴露後の減圧)、(Faesecke ら 2001、小林ら 1995) ]

この項 完

訳注) 下線部: 原著 460 ページに記述した事項を参照の意味。

## 深海潜水システム適用の深い混合ガス・バウンス・ダイビング：477 ページ

1960年代後半に沖合い石油産業は深度 100~200msw(325~650fsw)の範囲で約 40 分作業を行い、続いて水面に減圧を行うダイバーを必要とした (Hamilton 1976)。典型的な深海バウンス潜水において、2名のダイバーが閉鎖されたダイビングベル (別称：作業員搬送容器・a personnel transfer capsule・PTC すなわち潜水減圧室・submersible decompression chamber・SDC、水中エレベーター) 内を大気圧にして作業箇所へ降下した。それからベル内の圧力は環境水圧に等しくされ、下扉 (別称：ハッチ) が開かれ、1名のダイバーが作業のためにベルを出る。呼吸ガス補給ホース経由でマスクあるいはヘルメットにより呼吸する。もう1名のダイバー・ベルマンは介添え人 (テンダー) として仕える。ベルやホース内の混合ガスは通常、滞底時に酸素分圧  $PO_2 1.0 \sim 1.2 \text{atm}$  を与えるに十分な酸素をもったヘリオックス・酸素—ヘリウム混合である。

一度作業が終わるすなわち利用できる時間が過ぎると、ベル外にいるダイバーは再びベルに入り、適切な深度でハッチが閉じられ、ベルは水面へ引き揚げられる。圧力は使用中の減圧表で要求される減圧停止圧に調和するように制御される。ガスは一度か二度酸素を増大させた媒介混合ガスに交換され、いつかは空気に交換される。ダイバーはできるかぎり早くより快適で、環境制御できる船上減圧室へ移動させられ、そこで通常は酸素吸入をしながら減圧を完了させる。DCS 発症は正式に報告されなかったが、よりストレス過剰の潜水ではおそらく 10~20%の範囲である (Hamilton 1976)。

相当な開発努力にも拘わらず、この運用的取り組みは結局は元に戻った。DCS 発症率は高く、治療はいつも成功したけれど問題となり継続できるものではなく、治療ガス貯蔵、操作員の訓練や医療支援のような相当な資金を要求した。最終的に、依頼人すなわち石油会社は 100msw(300fsw)を超える潜水に飽和技術使用を受け入れた。

## カウンター・デифュージョン：減圧との関係 477 ページ

### Counterdiffusion：対向拡散あるいは逆拡散

対向拡散は非常に異なった拡散特性という生理学的影響を説明するために使われる用語である。それは2つの方法で減圧に関係している。第1は、2つのガス病変という症状——DCS や対向拡散症状——は同じで、病因も皮膚の気泡あるいは他のガス塞栓症とあきらかに同じである。第2は、対向拡散の状況は減圧を複雑に、あるいは減圧を支援し、対向拡散症状は圧力変化にしたがってあるいは変化なしでも生じる。Lambertsen により定義されたような不活性ガス対向拡散の2つの種類、上皮と深層組織の状態がある。

訳注) 拡散：徐々に溶解する状況を「拡散」と表現する。液相が非常に薄いと、それに接している気体が急速に飽和レベルまで溶解する。飽和レベル到達時間を拡散灌流時間や飽和時間という。半飽和時間で表わすことが多い。  
灌流：器官の血管内に液体を流すこと。

### 上皮対向拡散：Superficial Counterdiffusion

上皮対向拡散は、重いあるいは緩慢に拡散するガスが呼吸され (例えば、窒素あるいはネオン)、外部環境がより軽く、一層速く拡散するガス (例えばヘリウム) であるときに体表面を貫通して発症する。皮膚の中にある軽いガスの内部に向かう流束網は皮下の過飽和や血管外の気泡形成を引起し、そしてそれらは圧力変化なしで生じることができる。

高くなった圧力下にある人体暴露にあっては、激烈なかゆみが耐え難いほどに、高まってくる、貧血症状や容赦ない前庭機能障害を伴う (Harvey & Lambertsen 1978, Lambertsen ら 1977)。

正反対の影響が、背景の不活性ガスとしてヘリウムから窒素への呼吸ガス変更があるとき、起こる。もし、ダイバーが深部でヘリオックスを呼吸し、減圧中に空気へ変更すると、窒素が入るより速くヘリウムはかれの組織を離れ、そして結果として生じる不飽和が、減圧を促進させるようにあらわれ、対向拡散問題を引起さず、さらに深いヘリオックスバウンスダイビング用に十分にうまく構築されたやり方となる。

### 深層組織対向拡散：Deep tissue counterdiffusion・478 ページ

深層組織対向拡散は、異なる不活性ガスが連続して呼吸されるとき生じる。灌流と拡散は、緩慢な拡散ガスが排泄されるより速く、急速に組織へ還流するガスを運ぶ。圧力にしたがって大きさが増大する一時的な過飽和が生じる (D'Aoust & Lambertse 1982)。海面レベルのヘリウムで囲まれた環境において窒素を含む酸化物を呼吸している間の動物実験に際して、毛細血管に損傷を与えた皮下組織で詳細に調べられた気泡は、耐え難い損傷を与えたことを明らかにし、致命的な静脈ガス塞栓症という結果になった対向拡散を続けた (Idicula ら 1976)。

訳注) 窒素を含む酸化物：原文は「nitrous oxide」。直訳のままとした。ナイトロックス (窒素・酸素混合ガス) かどうかは不明である。



3名のダイバーが30msw(100fsw)で窒素からヘリウム混合ガスへ変更したとき、1時間のうちに全員が激しいかゆみを発現させ、5～7時間のうちにDCSを示唆する関節の痛みを発現させた。20msw(66fsw)での同様の実験はより少ないかゆみしかも痛みのない症状を引き起こした(Harvey 1977, Hamilton ら 1982)。

ガスによる組織の浸透性は拡散度－溶解度の結果に支配され、それでヘリウムは水素(より軽く、しかし溶解し易い)に対して対向拡散できる。

訳注) ①より軽い、しかし溶解し易い：両ガスの特性は分子量：He=4.00、H<sub>2</sub>=2.02、  
筋肉/血液への溶解度：He=1.31(m/gas/ml 媒体)、H<sub>2</sub>=0.98(m/gas/ml 媒体)  
②対向拡散できる：原文は「so helium can counterdiffuse against hydrogen, a lighter but more soluble gas.」圧力Pでヘリウム・酸素混合ガス呼吸から水素・酸素混合ガス呼吸に変更するとヘリウムが排泄されて水素が取り込まれる。その過程で一時的な過飽和が生じる。体内皮膚組織の分圧和>環境圧Pのことを言っていると推測する。

COMEX 社 訳注：フランスの潜水会社 ・Hydra Vでの深い飽和潜水で、水素・ヘリウム・酸素混合ガス「hydreliox」46atm 暴露から減圧したダイバーは25atm でヘリウム・酸素混合ガスへ変更したときにDCSに類似した対向拡散から症状に発展し、そしてDCS治療技術で対応した(Cardette ら 1987, Rostain ら 1987)。Lambertsen (1989)は対向拡散を避けるいくつかのヒントを挙げている。ダイバーはヘリウムから窒素へ不活性ガスを交換できるが、窒素からヘリウムへ交換する場合は付随して加圧が用いられる。

訳注) 上記の下線部(下線は原文にない)：建災防報告書のトライミックス呼吸は加圧時に空気呼吸からトライミックス呼吸に変更している。このことは窒素(空気)からヘリウムを含んだ呼吸ガスへの移行であり、上記の記述と矛盾がない。減圧時にはヘリウムを多く含んだトライミックスから窒素を多く含んだ空気呼吸へ移行している。これも矛盾はない。したがって、建災防報告書方式は対向拡散を避ける方式であると言える。

人は窒素で囲まれあるいは飽和したところでヘリウム混合ガスをマスクで呼吸すべきでない。再圧と酸素呼吸は対向拡散症治療にDCS治療とまったく同様に効果的で、減圧は効果を拡大する。それでさえ、伝わってくる体験は、大深度潜水からの減圧中の有利な変更の後ですら、減圧に際して有害な影響があることをそれとなく言っている。これらの秘話のあるものは、特にガス交換の結果として僅かに(しかもおそろしく不適切に)浮上率が加速された場合、基本的に不適切な減圧表の影響であるらしい。しかしながら他の場合、前庭減圧症すなわち一ことによると対向拡散症－は容易に説明されず、交換に関連付けられる。これは継続した不確実さとして残る。

訳注) 上記の下線部(下線は原文にない)：原文は、「One should not breathe helium mixes by mask while surrounded by or saturated with nitrogen.」この表現が気になる。ここで記述された一連の文から、なぜ「マスク」の用語が出てくるのかわからない。突然出てきた。前述COMEX社実験のように大深度潜水でのことなのか脈絡がない。建災防報告書方式では何も問題ないのだが。

## ガス連続 Gas Sequencing : 478 ページ

Albert Bühlmann 教授と Hannes Keller 氏は、非常に深い潜水からの減圧を実施するために不活性ガス差動拡散率という賛成できる状況を、気密室と実海域で用いた。この手法は300msw(1000fsw)への最初の潜水で使われた(Bühlmann 1969, 1975, Keller & Bühlmann 1965)。しかしながら、標準的な運用実施にも拘わらず、Thalmann(1985a,b)は、ヘリオックス潜水後の減圧中に空気あるいはヘリオックスが呼吸されたときDCS発症に相異を見出さなかった。さらに、Momsen(1942)は、50msw(165fsw)より深いヘリオックスから空気への移行しているダイバーについて記述にはない逆の影響を報告し、次に続いた33msw(110fsw)より深い急速移行を用いた実験は前庭すなわち内耳DCSを暗示する(Hamilton 1976)目まいと吐き気すなわち我々がまさに見ている対抗拡散症に気づいた。もう一つの可能性がある機序は急速な窒素酔いへの暴露である。興味深いことに、テクニカル・ダイバー(次節参照)に用いられる現代の減圧加速手法はBühlmannやKellerにより報告された手法に極めて似ている。

## テクニカル・トライミックス潜水：混合ガス用スクーバ：478 ページ

1980年代後半にレクリエーションダイビングの世界において、酸素・ヘリウム・窒素を潜水深度60～100msw(200～325fsw)の範囲で開放方式呼吸装置使用を中心とした新しい潜水方式が使われ始めた。ビュールマン教授がまさに述べているように、ガス交換方式のような数種の技術が知られていた。当時は商用のみならず軍事部門におけるこの種潜水分野でも効果的に採用されておらず、軍用ヘリオックス減圧表は適切でなかった。

## 現代テクニカル潜水の始まり

現代テクニカル潜水の体裁は、フロリダ洞窟地底湖探検ダイバーが具体的深度約 75msw(250fsw)における麻酔状態削減を必要とし、結果として酸素・ヘリウム・窒素のトライミックスになったヘリウムを添加したときに始まった (Hamilton & Turner1988)。減圧中に当該ダイバーらは媒介濃縮空気「deco」ミックスに交換し、浅い減圧停止深度で酸素を呼吸した。この方式は改良を重ねても貫かれた。このような混合ガスが以前に広く使われなかった理由は、この種混合に対応して容易に利用できる減圧表がなかったことによる。他の実用的配慮は、酸素毒性、麻酔、十分なガスの供給能力、保温や長時間に及ぶ減圧がもつ他の曝露関連要因である。

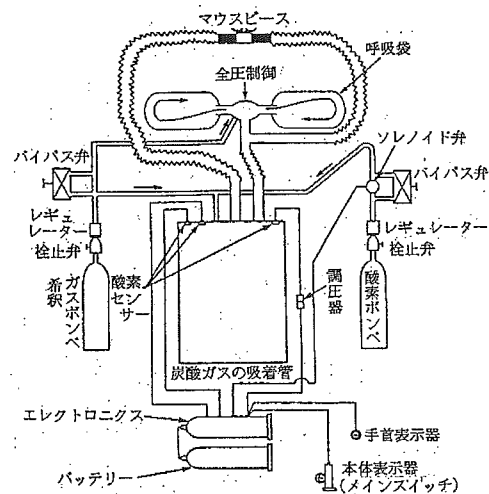
訳注) フロリダ洞窟地底湖探検：2001年12月2日に「フロリダ ダイバーの挑戦」と題したシンポジウムが開催された。潜水時間 16 時間・水深 100m、距離 10km の潜水をトライミックス呼吸で行ったことが報告された。

## テクニカルダイビング用語

テクニカルダイビング (technical diving) という用語は特別混合潜水部門の説明として発展してきた。そしてかなりよく洗練された技術を表わすようになった。厳密に言えば、それが発展してきたという事実は依然としてレクリエーションダイビングである。大部分の常習実行者が定職業務よりむしろ楽しみで行っているという意味でそれはレクリエーションであるが、依然として従来のレクリエーションダイビングとは少しも似ていない高度な訓練と専門的知識を必要とする仕事である。テクニカルダイビングは自給自足の方法すなわち、レクリエーションダイビングの従来の空気ポンペ以上に十分に展開する拘束されない潜水 (すなわち水面へのガスホースや命綱がない) である。テクニカル登山がハイキングに関連があるように、テクニカルダイビングも従来のレクリエーションダイビングと関連がある。一言でいえば、この潜水で最小限に要求されることは、ダイバーが1種類以上の呼吸ガスを使うことである。厳密に言えば、深い空気潜水だけ、ではテクニカルダイビングではなく、減圧停止あるいは無減圧停止がある潜水のみならず酸素添加空気 (ナイトロックス・nitrox) もまたテクニカルダイビングでない。閉鎖回路再呼吸装置 (rebreather) を用いた潜水はテクニカルダイビングとみなされる。英国の専門用語は、特に軍用潜水についての、閉鎖回路再呼吸装置を用いた潜水を半世紀以上もの間、テクニカルダイビングとみなしていた。

訳注)

閉鎖回路再呼吸装置 (rebreather) :  
決められた酸素分圧レベルを保つため、消費された酸素のみを追加し、システム体積を保持するのに必要な量のみ不活性ガスを加える呼吸装置。呼気に含まれる炭酸ガスは吸着剤で呼気から分離させる。潜水に限らず、救護用呼吸器にも利用される。



以前のテクニカル・トライミックス潜水作業：原著 479 ページ

: Previous Technical Trimix Diving Operations

訳注) テクニカル：technical 専門的・学術的

1970 年代にイタリアのサンゴ採集業者らは潜水生理学者の支援を受けて、ここで述べるテクニカル潜水実務に著しく類似した潜水を始めた (Zannini & Magno1987)。かれらの実行は 70~100msw(230~328 fsw)範囲で所定の順序を踏む潜水であった。かれらの呼吸混合ガスは 10%酸素、40%ヘリウム、50%窒素であった。減圧手順は、以下に述べる手順で使われるアルゴリズムに極めて類似したホールデンワークマン・シュライナイアー・アルゴリズムに基づいており、これらのサンゴ採集業者が船上減圧室で水面減圧

を行う以外は潜水プロフィールの様相と時間が同じようにみえた。深度 80msw(262fsw)、30 分潜水の減圧は減圧時間 140 分を要し、酸素使用では約半分になった。860 件のトライミックス潜水で DCS 発症の報告はなかった。英国海軍は、1970 年代後半に 20%酸素、40%ヘリウム、40%窒素を用いて深度/滞在時間・75msw(246fsw)/15 分を対象としたトライミックス計画を開始した (Shieldsら 1978)。その技術は小型船舶から潜水し、鉱山封鎖対策に使用することを意図していた。75msw(246fsw)/15 分潜水後の無減圧停止・室内実験は計算モデルの結果を用いた。このことから試行に優先して行われた一部の減圧表は実務執行レベルで成功裡に検証された (Shields1982 a,b)。試行は 2 件の減圧障害を誘発した。それは英国海軍潜水で使われた新しい酸素分圧規制 限界のために報告されなかった。現在も使われているヘリオックス潜水表を選んで、この計画は廃棄された。

### トライミックス潜水の方法

テクニカル・トライミックス潜水を実用的にするための鍵は、最小規模の麻酔状態と酸素毒性の重大危険性誘発なしに行う潜水の十分かつ信頼できる減圧要領である。体験的に展開され、空気潜水の極限曝露で実験的に正しいことを証明された酸素耐性アルゴリズムに基づいて、最初の減圧表は現場試行で苦心して作成された (Hamilton & Turner1988)。他の作業者は直ぐに減圧表を作り始め、そして直に利用技術や減圧表は一般に利用されるようになった (Dive Planning Software : 466 ページを見よ)。

最適呼吸ガスの選択はトライミックス減圧計画の重要な点である。滞在気圧における混合ガスは重大な麻酔状態を除くために十分なヘリウムを必要とし、ホールデン方式の計算では短時間で深い潜水にはトライミックス中のヘリウムが多くなるほど減圧が長くなる (そしてガス代も高くなる)。トライミックスの麻酔発現相当深度の計算で、減圧を計算するとき無視されている酸素が全て無視できるとは限らないという、いくつかの根拠がある (Bennett1970、Linnarssonら 1990)。

テクニカル・トライミックス潜水技術は科学潜水分野で採用されてきた。この一例が NOAA の潜水計画である。NOAA は米国・難破船監視用に開発された慣例的減圧表を持っており、それらを何年も使ってきた。しかし、米国海軍は最近修正された自分らのヘリオックス減圧表を使っている。

訳注) NOAA : 米国商務省・海洋大気局・U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration の略

訳注) フロリダダイバーの減圧要領 : 減圧プロフィールを次ページに紹介する。

### 6-1-3 フロリダ・ダイバーの減圧プロフィール例

フロリダのスポーツダイバー（通称：フロリダ・ダイバー）は洞窟探検の潜水でトライミックス呼吸を利用している。下図は Wakulla spring を探検した際に使用した減圧表の特徴と減圧プロフィールである。

## Wakulla Spring の減圧表の特長

Algorithm (コンピューター演算方式)の活用

- 1) 15 ~ 16 区画の半飽和時間区画を使用
- 2) Trimix, Nitrox ( Heliox, Hydrox ) の活用
- 3) 酸素減圧を有効に活用
- 4) 浮上開始直後(深い深度)より減圧ステップをとる
- 5) 1 ~ 2 分の short stop を Haldane stop まで追加挿入
- 7) 5) 6) により Haldane tail を短縮する

注) 最終減圧停止時間が長い部分を『Haldane tail : ホールデンの尻尾』と言っている。

### ワクラ洞窟ダイブ減圧表とビュールマン表との比較

