

## 2. 研究会の内容

### (1) 第42回定例研究会

#### ① 重質油の連続水蒸気改質プロセスの開発

東洋エンジニアリング(株) 富田 忠 義

##### 1. 緒論

水素および一酸化炭素を主成分とする合成ガスは、アンモニア、メタノール、オキシ化合物の合成原料ガスおよび都市ガス、石油精製副原料として用いられ、化学産業やエネルギー産業の基本物質となっている。従来、合成ガスはコークス、石炭、天然ガス、原油、石油の留出油および残さ油から製造されてきた。天然ガス、石油系の炭化水素を原料とする場合、酸化剤として水蒸気のみを用い、反応熱を反応器外から供給する水蒸気改質反応と、酸化剤として水蒸気の外に酸素または空気を供給して断熱的に反応させる部分酸化反応がある。同一原料で考えた場合には、水蒸気改質プロセスの方が、安全上、経済上、部分酸化プロセスより優れているが、その原料は、天然ガス、ナフサに限定されるという難点がある。

従来合成ガス製造技術について、エネルギー利用効率について検討し、重質油の水蒸気改質プロセスの開発を推進してきた。その概要を報告する。

##### 2. 合成ガス製造プロセスのエネルギー利用効率<sup>1)</sup>

炭化水素-水蒸気系反応の工業的応用の中で、最も大規模なアンモニア合成ガス製造プロセスについて、わが国で採用されてきたプロセスとそのエネルギー効率について検討する。Table 1に、わが国で採用された主なアンモニア合成ガス製造プロセスの原料と反応器の特徴を示す。

Table 1 GASIFICATION PROCESSES

REACTOR FEED- STOCK	REGENERATIVE <sup>(1)</sup>		AUTOOTHERMIC <sup>(2)</sup>				ALLOOTHERMIC <sup>(3)</sup>
	FIXED		FLUIDIZED	ENTRAINED <sup>(4)</sup>	FIXED	UNPACKED	FIXED
COKE	W.G. <sup>(5)</sup> { 110 111 112	S.W.G. <sup>(6)</sup> { 113 114					
COAL			WINKLER <sup>(112)</sup> { 113 114 115 116	K-T <sup>(7)</sup> <sup>(117)</sup> { 118			
N.G.					G.P. <sup>(8)</sup> <sup>(119)</sup>		C.C.C. <sup>(20)</sup>
NAPHTHA					S.I. <sup>(9)</sup> <sup>(121)</sup>		TOPSOE <sup>(22)</sup> I.C.I. <sup>(23)</sup> { 124 125
HEAVY FUEL OIL						FAUSER <sup>(126)</sup> TEXACO <sup>(127)</sup> SHELL <sup>(128)</sup> { 129	

- (1) Reactors regenerated by using air
- (2) Partial oxidation by using oxygen
- (3) External heating
- (4) Pulverized coal entrained by oxygen
- (5) Water gas furnace

- (6) Semi water gas furnace
- (7) Koppers-Kotzek
- (8) Grand-Proise
- (9) SBA-Topsoe

合成ガス製造の原料としては、石炭、コークス、石油、天然ガスなどの化石燃料が用いられるが、これらの原料は、プロセス自身を特徴づけると共に、エネルギー効率を支配する。

Table 2 にガス化プロセスのモデル操業成績を示す。これは公表されたデータを基礎に、相互に比較出来るように処理したものである。

ガス化プロセスの物質収支のモデルを Figs 1, 2 に示す。ガス化プロセスは内熱式と外熱式に分けられ、いずれの場合も、原料炭化水素、水蒸気、空気を入力し、発生ガス、炭素を出力するが、内熱式では酸素が入力され、外熱式ではエネルギー収支で外熱が入力される点が異なっている。

Figs 1, 2 の物質収支モデルを基礎にして、Figs 3 に示すエネルギー収支モデルにおいて、ガス化プロセスのエネルギー利用効率  $Y_g$  は式(1)で示される。

$$Y_g = \frac{1 - \alpha + \beta - \gamma + \delta - \epsilon}{1 + \delta + \theta} \quad (1)$$

- $\alpha$  : 生成炭素の発熱量
- $\beta$  : 回収熱量
- $\gamma$  : 生成ガスの潜顕熱量
- $\delta$  : 外部加熱量
- $\epsilon$  : 損失熱量
- $\theta$  : 空気分離のエネルギー

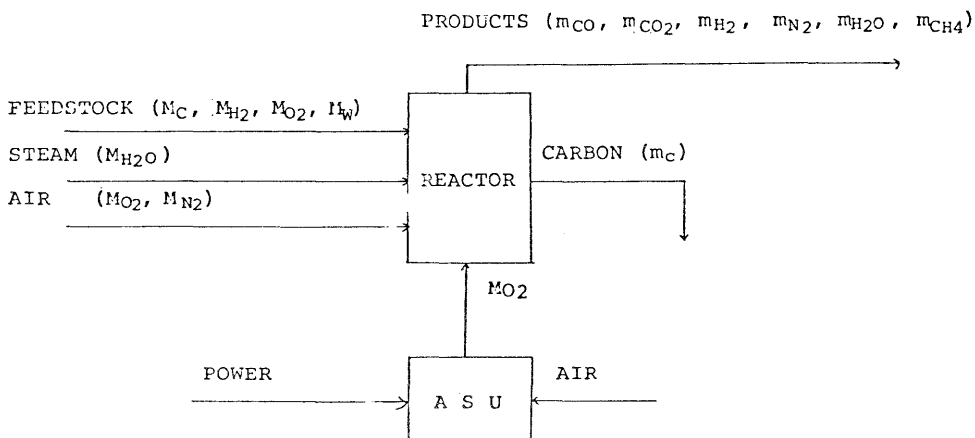


Fig. 1 AUTOTHERMIC REACTOR

$M_i$  : Quantities of feeds                      moles or g-atoms per unit time  
 $m_i$  : Quantities of products                    moles or g-atoms per unit time  
 ASU: Air separation unit

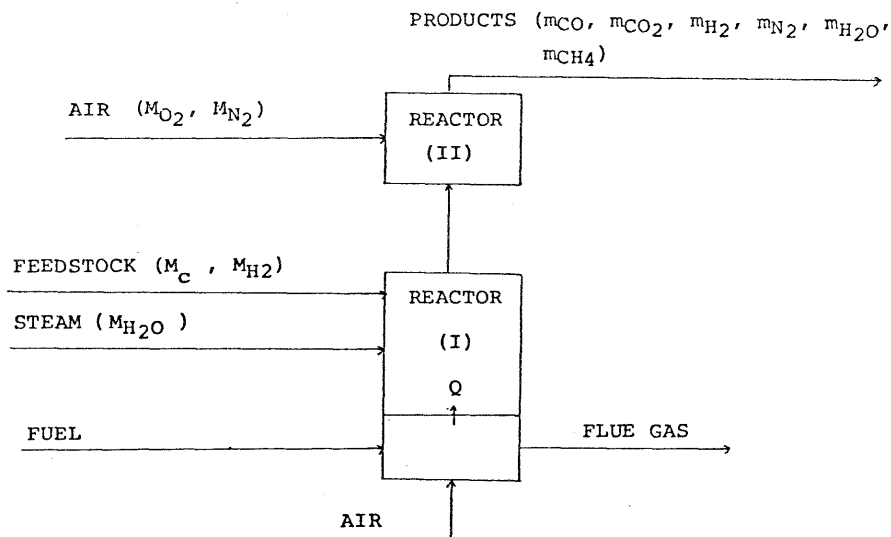


Fig. 2 ALLOTHERMIC REACTOR

Mi: Quantities of feeds                      moles or g-atoms per unit time  
 mi: Quantities of products                  moles or g-atoms per unit time

また、内熱式で空気分離のエネルギーを除外して考えたエネルギー利用効率  $Yg'$  は式(2)で表わされる。

$$Yg' = 1 - \alpha + \beta - \gamma + \delta - \epsilon \quad (2)$$

Table 2 に示したガス化プロセスの操業式績に Fig. 3 のエネルギー収支モデルを適用して、原料の単位発熱量当りの熱量  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \theta$  およびエネルギー利用効率  $Yg, Yg'$

Table 2 Typical Results of Operations of Gasification Process

PROCESS	FEEDSTOCK H.H.V.*	STEAM KG	OXYGEN M <sup>3</sup>	AIR M <sup>3</sup>	PRODUCT GAS M <sup>3</sup>	GAS COMPOSITION V%					TEMP °C
						H2	CO	CO2	CH4	N2	
W.G.	COKE/6601	1.87	-	2.95	1.90	39.1	27.8	11.7	0.2	21.1	700
S.W.G.	COKE/6372	1.30	0.367	0.598	2.15	32.0	30.3	18.5	1.0	18.0	800
WINKLER	COAL/6070	0.298	0.312	0.292	1.83	30.8	30.2	19.6	0.2	19.2	1100
K - T	COAL/6496	0.508	0.515	-	1.66	34.0	51.0	12.5	0.1	1.8	1400
FAUSER	FUEL OIL 10500	1.13	0.83	-	3.02	46.7	39.6	11.7	0.5	1.5	1300
SHELL	FUEL OIL 10500	0.4	0.762	-	3.11	46.1	46.9	4.3	0.2	0.7	1400
SBA- TOPSOE	NAPHTHA 11500	1.20	0.58	1.2	4.92	49.0	16.4	14.5	0.8	19.6	1050
SBA- TOPSOE	N.G. 13047	-	0.492	1.57	5.61	52.1	14.6	9.8	0.3	22.0	1050
I.C.I.	NAPHTHA 11500	3.79	-	1.62	6.10	52.2	15.7	9.9	0.2	21.7	1000
C.C.C.	N.G. 12780	4.19	-	1.99	7.37	58.9	12.6	6.0	0.4	21.6	975

\* Higher heating value

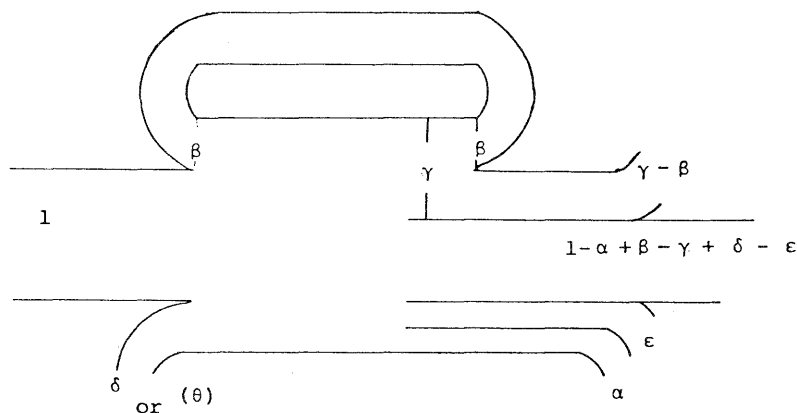


Fig. 3 HEAT BALANCE MODEL

- $\alpha$  : Heating Value of Produced Carbon per Unit Heating Value of a Feedstock
- $\beta$  : Recovered Heating Value per Unit Heating Value of a Feedstock
- $\gamma$  : Gross Heating Value of Production Gas per Heating Value of a Feedstock
- $\delta$  : External Heating Value per Unit Heating Value of a Feedstock
- $\epsilon$  : Heat loss per Unit Heating Value of a Feedstock
- $\theta$  : Energy for air separation per Unit Heating Value of a Feedstock in the case of using oxygen

を算出して Table 3 に示す。Table 3 より、各ガス化プロセスのエネルギー利用効率について次の事が挙げられる。

- ① 石炭のガス化においては、析出炭素の発熱量  $\alpha$  の影響が大きい。つまり析出炭素の量を如何に小さくするかということがエネルギー利用効率向上のキーポイントになる。
- ② 内熱式と外熱式を比較すると外熱式の方が、エネルギー利用効率が高い。内熱式は空気分離のエネルギー  $\theta$  の分だけ、余分のエネルギーを必要とすると考えられる。
- ③ ガス化圧力の差は、 $\gamma_g$  に影響していないので、高圧にする程、省エネルギーに貢献するものと考えられる。

Table 3 Some Heat Efficiencies of Gasification Process

PROCESS	FEEDSTOCK	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\epsilon$	$\theta$	$Y_G$	$Y_G'$
W.G.	COKE	0.200	0.224	0.25		0.1		0.674	
S.W.G.	COKE	0.077	0.113	0.27		0.06	0.069	0.660	0.706
WINKLER	COAL	0.274	0.051	0.190		0.05	0.064	0.504	0.536
K-T	COAL	0.158	0.058	0.215		0.05	0.068	0.595	0.635
FAUSER	FUEL OIL	0.010	0.07	0.254		0.025	0.095	0.713	0.781
SHELL	FUEL OIL	0.023	0.027	0.195		0.06	0.091	0.686	0.749
SBA-TOPSOE	NAPHTHA	0	0.089	0.209		0.06	0.090	0.750	0.820
SBA-TOPSOE	N.G.	0	0.022	0.190		0.06	0.073	0.719	0.772
I.C.I.	NAPHTHA	0	0.283	0.435	0.285	0.043		0.848	
C.C.C.	N.G.	0	0.290	0.433	0.33	0.046		0.857	

以上の検討結果より、重質炭化水素を原料とする新ガス化プロセスは、外熱式の水蒸気改質プロセスであるべきことが方向づけられた。

### 3. 重質油の水蒸気改質用触媒の探索と選定重質油の水蒸気改質用触媒の探索実験

重質油の水蒸気改質用触媒の探索実験を行い、アルカリ土類金属酸化物とアルミナを構成成分とする触媒が有望であると考えられた。<sup>2),3)</sup> 更に、留出油を原料とした場合の炭素ガス化率の温度に対する依存性を検討した。<sup>4)</sup> その結果 Fig.4 に示すように、CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系触媒 T-12 は、800~950℃の温度領域で最も高い炭素ガス化率を示し、900℃では、炭素ガス化率は100%に達する。原油を原料として用いた場合も、950℃で炭素ガス化率は100%に達し、生成ガス中の炭化水素は、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub> のみで、触媒 T-12 は重質油の水蒸気改質用触媒として適していると判断された。( Fig.5 )

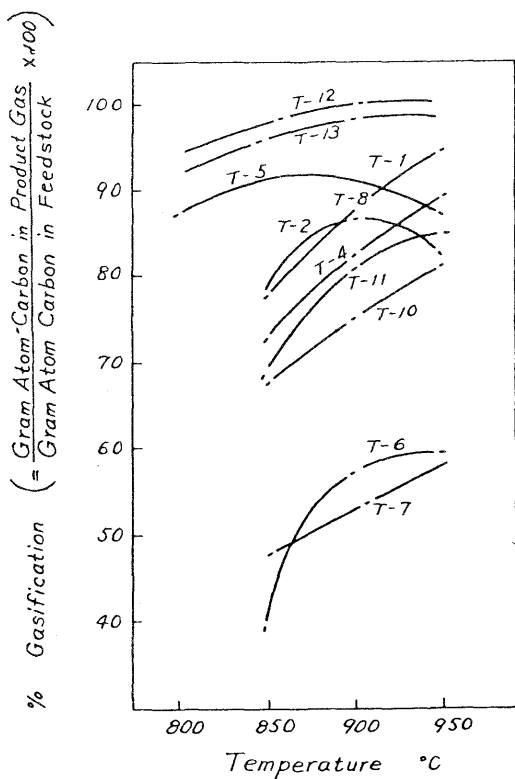


Fig. 4 Gasification of Kuwait Distillate over Various Catalysts with Steam Ratio of 4.

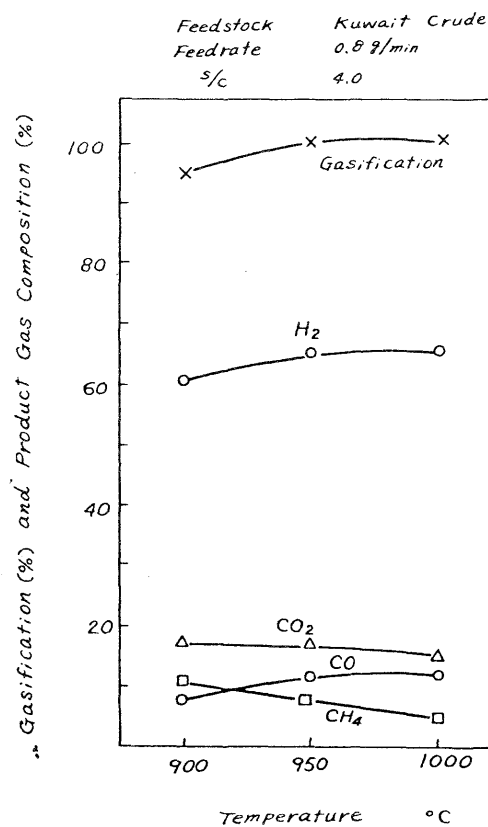
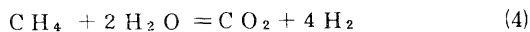
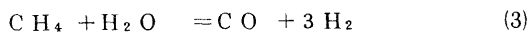


Fig. 5 Gasification and Product Gas Composition v.s Temperature

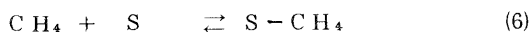
#### 4. 触媒 T-12 のキャラクタリゼーション

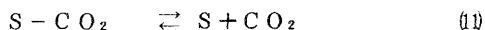
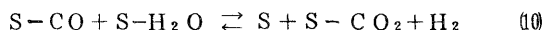
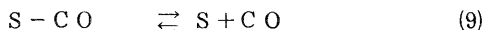
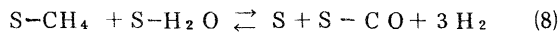
触媒 T-12 の基本等特性を明らかにするために、触媒 T-12 上で、反応温度 750 ~ 950 °C でメタンと水蒸気の反応実験を行った。<sup>5)</sup>



本実験の条件下では、反応(3)、(4)が同時に進行するが、反応(3)の反応速度は遅く、反応(4)が主に進行している。また、反応の動力学的解析より、メタンの反応速度は、メタンについて 1 次反応、水蒸気について、-1 次反応と近似され、活性エネルギーは 10.0 Kcal/mol である。

触媒表面の反応機構(6)~(11)を考え、吸着(6)または、表面の反応(8)を律速と仮定し、触媒表面の水蒸気の吸着能が大きい場合、メタンの反応速度式において





メタンおよび水蒸気の反応次数がそれぞれ、1次および-1次と近似され、反応の動力学的解析の結果と一致した。

触媒T-12の吸着特性を昇温脱離法により測定した。炭酸ガス、水蒸気、一酸化炭素、酸素、メタンを吸着ガスとして、通常の昇温脱離法により、脱離ガスの測定を行った結果を、Tables 4, 5に示す。<sup>6)</sup>

Table 4 TPD experiments of various gases on CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (CaO 54%)

Gases	Adsorption condition	Desorption temperature (°C)	Amounts <sub>2</sub> μmol/m <sup>2</sup> (Coverage %)	Species
H <sub>2</sub> O	800°C + RT 1 hr, 14 Torr	135	5.6 (37)	H <sub>2</sub> O
		260	330	Ca(OH) <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O	990°C + 500°C 6 Torr	930	20.0 (132)	H <sub>2</sub> O
CO <sub>2</sub>	800°C + RT 1 hr, 99 Torr	310	1.4 (16)	CO <sub>2</sub>
		675	31 (-)	CaCO <sub>3</sub>
O <sub>2</sub>	800°C + RT 1 hr, 101 Torr	720	5.0 (66)	O <sup>-</sup> or O <sup>2-</sup>
CO	RT 1 hr, 101 Torr	450	1.2 (8)	CO
		600	1.1 (8)	CO <sub>2</sub>

Table 5 Amount of desorbed species in TPD after CH<sub>4</sub> adsorption, μmol/m<sup>2</sup>, (Coverage %)

Species	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> +CO+CO <sub>2</sub>	
Desorption Temp. (°C)	200~500	250~500	500~900	500~900	above 550°C	200~900
Adsorption Temp. (°C)						
RT	0.03	0.005	0.07	0	0.20	0.105(1.0)
300°C ~ RT	0.03	0.06	0.04	0.04	0.20	0.17(1.6)
500°C ~ RT	0.04	0.02	0.04	0.04	0.07	0.14(1.2)
700°C ~ RT	0.01	0.02	0.05	0.04	0.04	0.12(1.1)

炭酸ガス、水蒸気、酸素について多量に吸着されることが明らかになった。水蒸気は低温部のほかに、920℃という高温部に可逆的な吸着脱離があり、これは、結晶水によるもので反応速度解析における触媒表面反応モデルおよび、触媒表面のH<sub>2</sub>O吸着の仮説を裏付けるものと考えられた。一酸化炭素昇温脱離では、500℃以上の高温部で、炭酸ガスの脱離が認められた。また、メタン、プロパンの昇温脱離において500℃以上では一酸化炭素、炭酸ガス、水素が生成して脱離するが、その酸素源も同様に結晶水で、これが改質反応にあずかっていると考えられる。

## 5. 工業化研究

触媒T-12の性能を基礎に、広い範囲の特に重質油を含む炭化水素を原料とし、マイルドな活性の触媒を用いて、凡そ1000℃で反応させ、反応管材料としては、ニッケル系合金を用いるというFig 6に示す概念を得た。

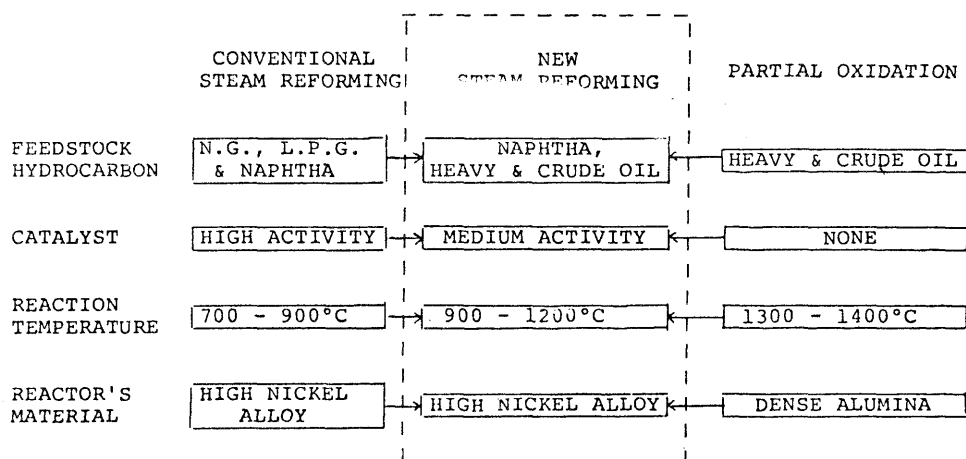


Fig. 6 Position of New Process

この新プロセスの概念を実体化するために、軽質、重質の留出油、原油、C重油、残圧残油などの広い範囲の炭化水素を原料として試験を行い、原料炭化水素の種類、反応温度H<sub>2</sub>O/Cなどの影響について知見を得た。更に、高圧ベンチスケール・テスト、触媒耐久テストを行って、重質油の水蒸気改質プロセスのS E E Dが確立した。

有効加熱長10Mのパイロットスケールテスト、反応管材料テスト、第二次触媒耐久テストを実施して、新プロセスの工業的基礎を確立し、Total Hydrocarbon Reforming (THR) Processと名付けた。



反応器の性能向上をはかるために、外熱式の1次リフォーマーと断熱式の2次リフォーマーからなるシステムのパイロットテストを実施し、成功裏に完了した。Table 6 にその試験結果の一部を示す。

Table 6 TYPICAL EXAMPLES OF THE PILOT OPERATIONS

FEEDSTOCK	ATMOS RESIDUE <sup>*2</sup>	VACCUM RESIDUE <sup>*2</sup>
SPECIFIC GRAVITY	0.944 (15/4°C)	1.03 (25/25°C)
C/H	7.10	7.92
S W%	2.46	4.23
N W%	0.40	0.40
V W PPM	65.0	150.0
Ni W PPM	23.0	50.0
H.H.V. KCAL/KG	10,400	9,860
CATALYSTS <sup>*1</sup>	(T-12) + (T-48)	(T-12) + (T-48)
OIL FEED RATE KG/HR	80.3	81.4
STEAM FEED RATE KG/HR	410	440
AIR FEED RATE <sup>*3</sup> NM <sup>3</sup> /HR	168	165
PRESSURE KG/CM <sup>2</sup> G	15	15
PRODUCT GAS TEMP. °C	940	960
PRODUCT GAS COMPOSITION		
H <sub>2</sub> V%	43.1	42.6
CO V%	11.3	10.5
CO <sub>2</sub> V%	15.2	15.7
CH <sub>4</sub> V%	1.9	1.2
N <sub>2</sub> V%	28.2	29.5
H <sub>2</sub> S V%	0.3	0.5

\*1 T-12: CaO 51.5 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 47.7 wt%, Others 0.8 wt%  
T-48: CaO 40.0 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45.0 wt%, NiO 15 wt%

\*2 Blend Crude Oil: Iranian Heavy 71%, Arabian Heavy 11%,  
Khafuji 18%

\*3 Contains some amount of air for preventing excess temperature drop caused by much lower gas rate than commercial one.

## 6. 結 語

重質油の連続水蒸気改質プロセスの着想、触媒の開発、プロセス概念の確立、プロセスSEEDの確立、工業化試験について、その概要を述べた。THRプロセス開発の最終段階として、通産省、重質油対策技術研究組合のプロジェクトとして、原料油処理量15 T/Dの大型パイロットプラン

トを建設中で、1984年夏よりスタートの予定である。

#### 引用文献

- 1) Tomita T KAGAKU KOGAKU 43, (7) 387 (1979)
- 2) Tomita T. et al J.Japan petrol. Inst 22 (5) 303 (1979)
- 3) Tomita T. et al J.Japan petrol Inst 22 (5) 311 (1979)
- 4) Tomita T. et al Chem - Ing - Tech 49 (6) 469 (1977)
- 5) Tomita T. et al J.Japan petrol Inst 23 (2) 69 (1980)
- 6) Yamazoe et al J.Japan petrol Inst 23 (6) 397 (1980)

(2) 第43回定例研究会

② 鋼材切断ガスとしての水素ガスの評価

株式会社鈴木商館 鈴木 讓

1. はじめに

水素炎の利用の歴史は古く、1837年にフランスのRichmontが、空気水素吹管を発明してから今日に至る。日本においても、戦前は鋼材切断用酸素水素炎の研究が活発に行われていた。しかし、現在産業界において、切断用に水素が用いられている例はごく一部の水中切断などを除いて少ない。

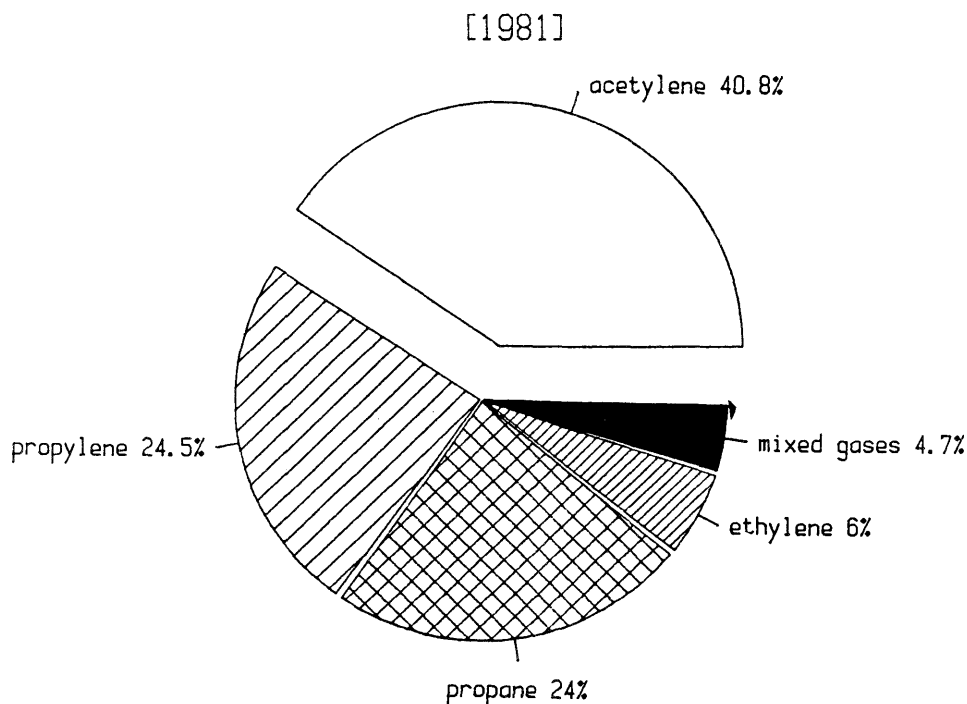


図-1 Consumption rate of cutting gases

図-1は1981年における我が国の切断用燃料ガスの使用割合をカロリー換算で表わしたものである。これらのガスをすべて水素で置きかえると、実に年間3億8千万 $m^3$ の水素が使われる勘定になる。

そこで、今一度切断用燃料ガスとしての水素の性能をテストし、鋼材切断用ガスとしての水素の性能の再発掘を行うのが、今回のわれわれの目的である。

テストは従来水素炎の欠点とされていた無色炎を炭化水素を少量混入させることにより有色炎化し、また着臭をした当社の商品名「 $\eta$ ガス」というガスを用いて行った。



図-2  $\eta$  ガスによる鋳板の切断

2. 鋼材の切断試験結果

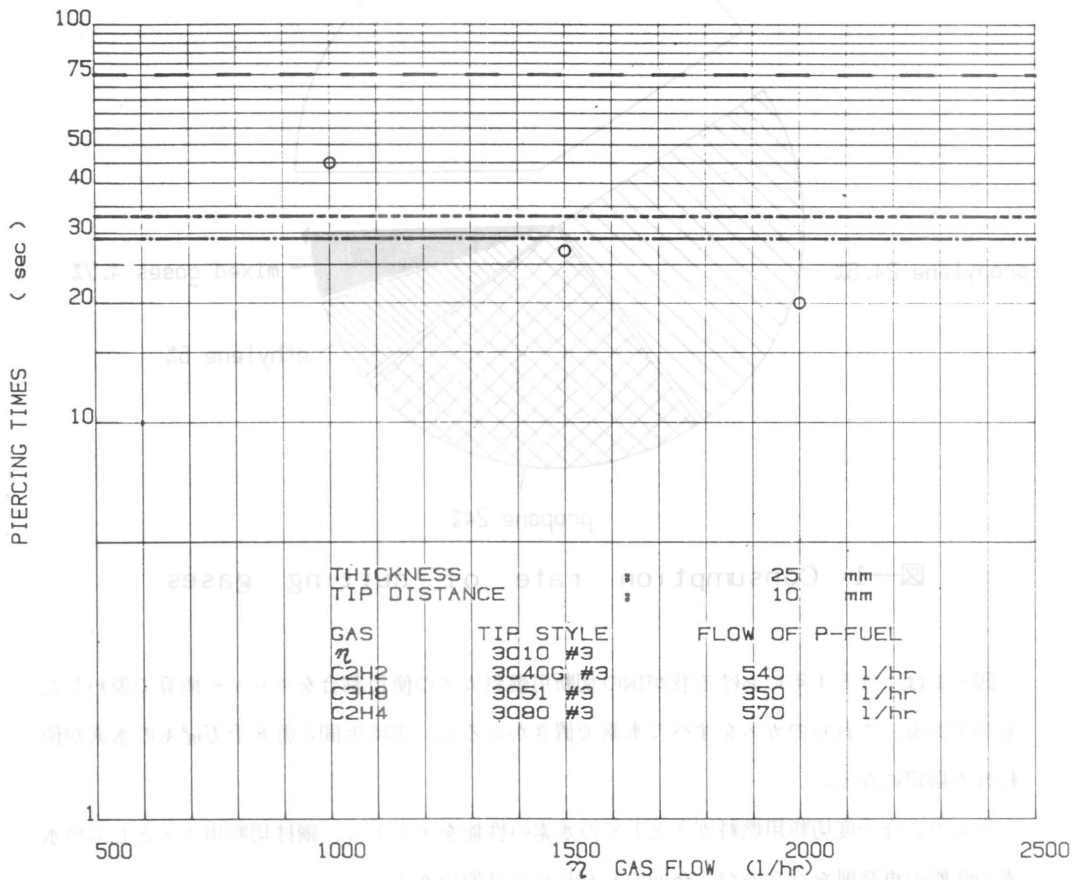


図-3 Influence of  $\eta$  gas flow upon the piercing

図-3は2.5mm鋼板において、プロパン、エチレン、アセチレンの標準流量で行ったピアッシングタイムと、ガス流量を変化させていったときの値の比較を行ったものである。破線はプロパン、二点鎖線はエチレン、一点鎖線はアセチレンのピアッシングタイムであり、これらと横軸の関係はない。図からも分かるように、 $\eta$ ガス流量を変化させていった場合、1500 L/hrのガス流量で他のどのガスよりも早いピアッシングタイムが得られた。

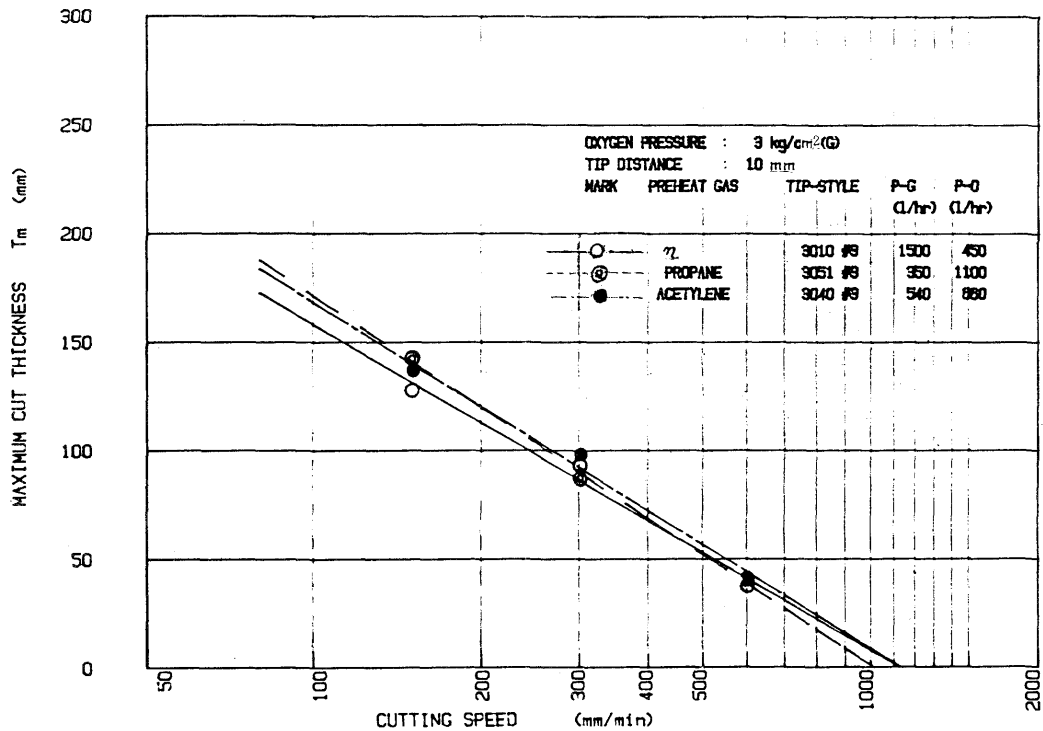


図-4 Results of cutting with various preheating gases at standard oxygen pressure

図-4はくさび型鋼を用いて#3火口で、プロパン、アセチレン、 $\eta$ ガスの切断スピードと最大切断板厚 ( $T_m$ ) の関係のプロットである。

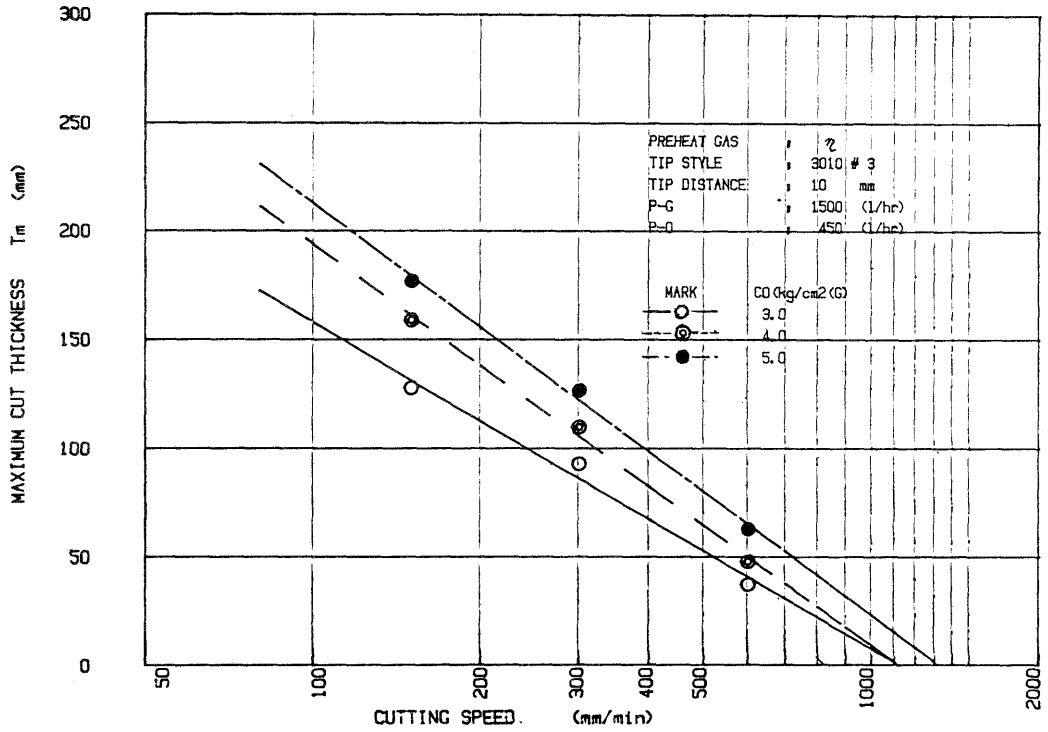


図-5 Effect of oxygen pressure on the maximum cut thickness

図-5は ガスについて切断酸素圧力と  $T_m$  の関係を見るためのプロットである。

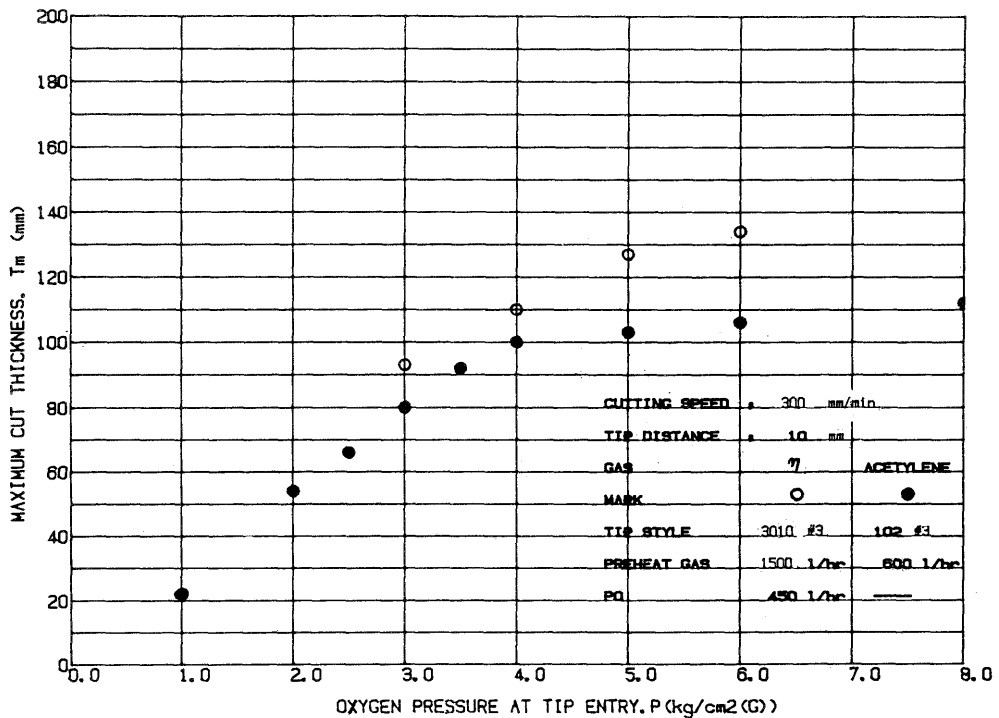


図-6 Effect of oxygen pressure on the maximum cut thickness

図-6は切断速度300 mm/minで切断酸素圧力を変緩させたときの、ガスとアセチレンの  $T_m$  の変化をプロットしたものである。

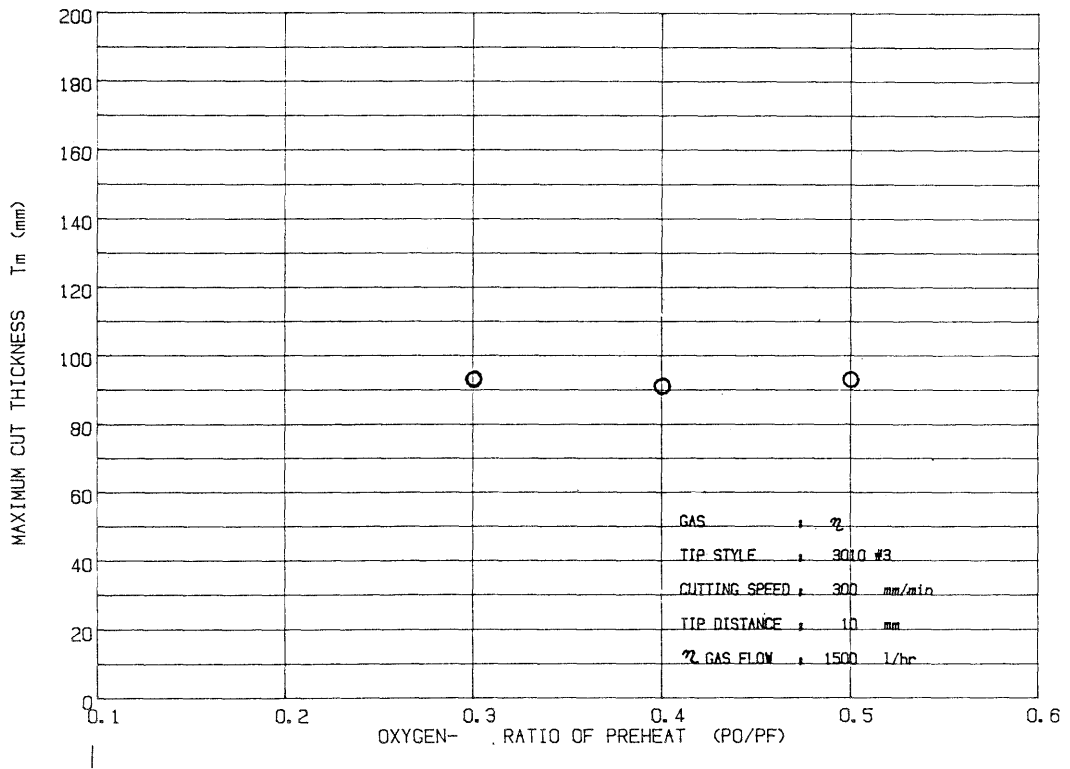


図-7 Influence of preheat oxygen - ratio ( $Q$ ) upon the maximum cut thickness

図-7は $\eta$ ガスの燃焼用酸素ガス混合比による影響を見るためのプロットであり、ほとんど酸素混合比の影響のないことが分かる。

以上の結果、ガスの切断性能はアセチレン、プロパンと比較しても劣ることはなく、むしろ、水素炎の特徴的長所が数多く見出された。水素炎の特徴については次章で述べる。

### 3. 酸素切断の特徴

主に以下のような特徴が見出された。

- 1) 輻射熱が非常に少ない。
- 2) 層流火炎が作り易く、幅広い燃料ガスレンジにおいて安定火炎が出来る。
- 3) 切込、ピアシングなど強い予熱を要す場合にも、非常に優れた性能を発揮する。
- 4) 火口に燃焼生成物、特にカーボンの付着がなく、また切断母材からのスパッタなども飛びにくい。

#### 4. なぜ良く切れるのか

私自身、酸水素切断を手かけるまでは水素のような低カロリーガスで鋼板が切れることに半信半疑であった。しかし現実に行って見ると非常に見事に切れた。

そこで、われわれは何とか切れる原因をつかもうと燃焼反応の解析を行ってみたり、シュリーレン写真を撮影してみたり種々のことを行ってみた。しかし、予混酸水素炎が水素の速い燃焼速度のために、極めて集中した炎になることによる効果が一番影響しているらしいというあいまいな結論しか出なかった。

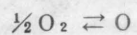
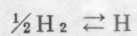
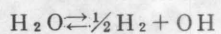
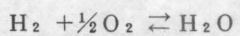
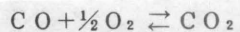
性 質	単 位	ガ ス 名				
		アセチレン C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	エチレン C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	プロパン C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	メ タ ン CH <sub>4</sub>	水 素 H <sub>2</sub>
ガ ス 密 度	0°C 1 atm Kg/m <sup>3</sup>	1.171	1.260	2.030	0.716	0.08987
比 重	Air=1	0.906	0.957	1.562	0.554	0.06952
沸 点	atm °C	-83.6	-103.7	-42.1	-161.4	-252.7
蒸 気 圧	atm at 0°C	26.7	40	47		
"	atm at 20°C	43.4	60	8.0		
臨 界 圧 力	atm	61.6	50.5	42.0	45.8	12.8
臨 界 温 度	atm 0°C	36	90	96.8	-82.5	-239.9
蒸 発 潜 熱	Kcal /kg	197.8	115.4	101.8	136.0	
断熱火焰温度	°C	3100	2900	2810	2780	2800
燃 焼 速 度	cm/sec Air中	157	68.3	39	34	180
真 発 熱 量	Kcal /kg	11,841	11,910	11,726	11,985	23,677
"	Kcal /m <sup>3</sup>	13,866	15,064	23,686	8,560	2,577
総 発 熱 量	Kcal /m <sup>3</sup>	14,059	15,163	24,117	9,517	3,046
最低着火温度	°C Air中	305	490	403	632	530
理 論 燃 料 量	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	2.5	3.0	5.0	2.0	0.5
爆 発 限 界	上限 Vol%Air中	80.0	32.0	9.5	14	94.2
	下限	2.5	3.1	2.4	5.3	4.1

図 - 8 各種燃料ガスの物性一覧表

図-8を見ても分るように、水素は単位容積当たりの発熱量が非常に小さい。総発熱量でとらえると、プロパンは水素の1.85倍もの熱量を同じ切断を行うのに使うことになる。また水素の場合断熱炎温度というのものも他のガスと比較して決して高いものではない。

実際の燃焼反応というものは必ずしも化学量論的に反応式通り進行するものではない。そこでわれわれは次の5つの素反応に燃焼を分けて、炎温度と化学平衡を解析した。





その結果、一次燃焼後の残留酸素量を持って燃焼進行の尺度とすれば、水素の燃焼進行度は85%となり、アセチレンの70%、プロパンの80%よりもやや燃焼が進んでいるのが分かった。

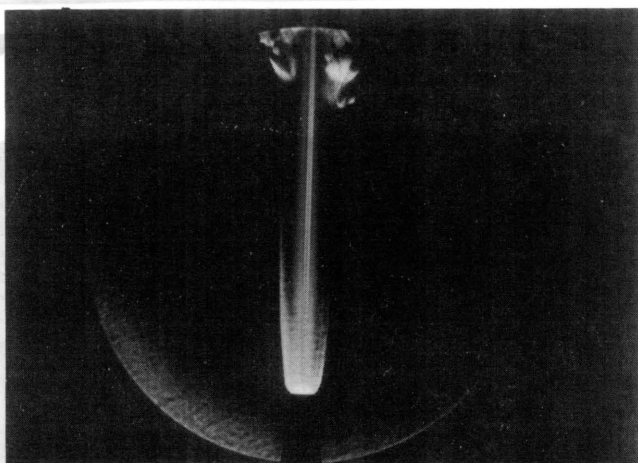


図-9 酸素ガス炎のシュリーレン写真

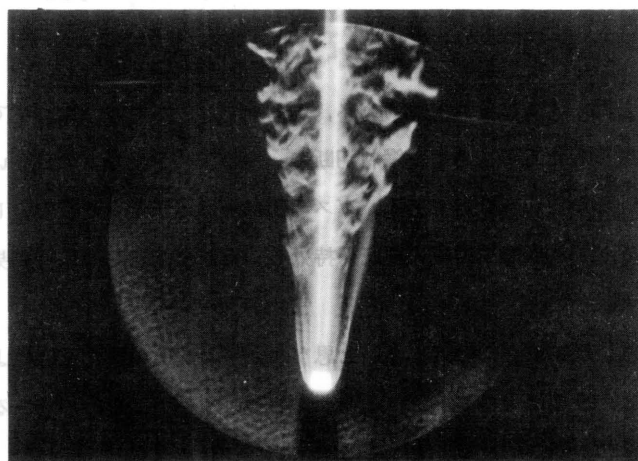


図-10 酸素アセチレン炎のシュリーレン写真

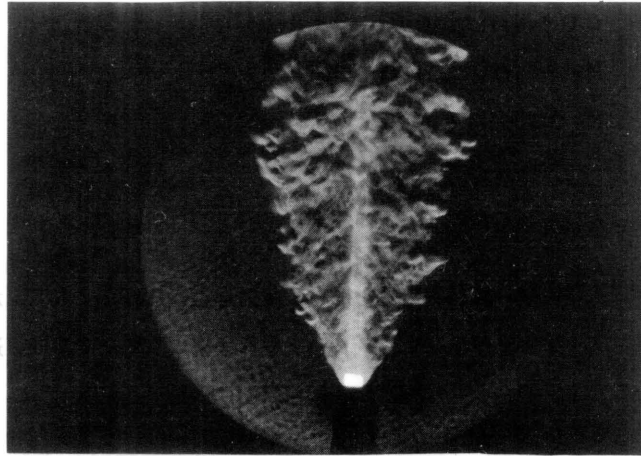


図-11 酸素プロパン炎のシュリーレン写真

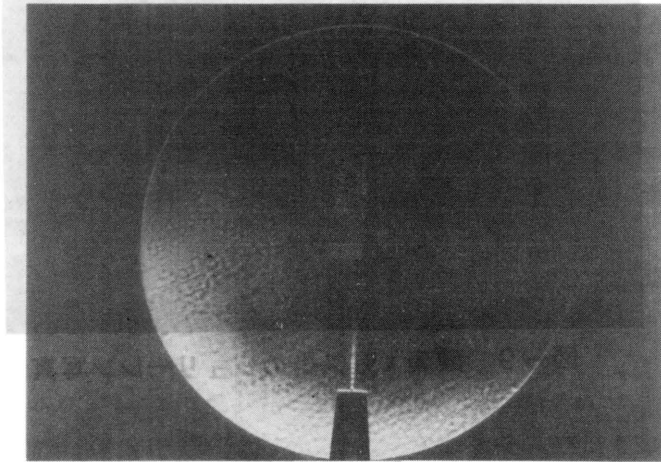


図-12 切断酸素噴流のシュリーレン写真

図-9, 図-10, 図-11はそれぞれアセチレン, アセチレン, プロパンについて切断酸素を  $3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  で噴出しながら撮影したものである。鋼材切断の一つの決め手となるのは、いかに切断酸素噴流が長く伸びているかという問題である。ガス切断における予熱炎の役割として、切断開始点の加熱などもあるが、切断酸素噴流の総圧保持効果、切断酸素純度の保持効果は重要なものである。

ガス切断というのは、既にご存知の方も多いと思うが、酸素がその酸化反応により鋼を切るのであって、予熱炎というのはそのお手伝いということで、主役ではないのである。これで水素のように少ない熱量でも鋼が切れることはご理解いただけると思う。

予熱炎による総圧保持効果とは、一つには切断酸素噴流境界が予熱炎により加熱され、境界

抵抗が少なくなり、切断酸素噴流が遠くまで届くと説明される。この点は図-9と図-12を見比べればお分かりいただけると思う。

図-9は図-12の状態に予熱炎が着火されているだけなのであるが、切断酸素噴流の長さが全く違うのである。しかし予熱炎の種類の違いがどう総圧保持効果に影響するかという点は残念ながら確固たる有意差は認められなかった。

シュリーレン写真では実証されなかったが、切断酸素噴流の総圧保持効果に及ぼす予熱炎種類の違いとして、次のようなことが考えられる。

予熱炎が一次燃焼で未燃ガスを残さないほど二次燃焼の際、切断酸素を消費せずに済むのではないか。つまり二次燃焼を切断酸素を消費して行えば、切断酸素の総圧保持には悪影響となる。

予熱炎が乱流火炎となれば、当然切断酸素噴流をディスタープするのではないか。ここでおことわりしておくが、前のシュリーレン写真は決してこのことを暗示するものではない。たまたまアセチレンやプロパンが乱流火炎となっているが、これらのガスでも層流火炎は作り得る。ただし、水素の場合には前に述べたように広い流量レンジにおいて容易に層流火炎を作り得る。という差がある。

#### 4. まとめ

水素は鋼材切断ガスとして、ピアシングのように急加熱が必要な作業に対しても、低カロリーでありながら必要な部分を集中加熱するために高性能を発揮した。まことにロスが少ない優れたガスである。

最後に、コスト的に見ても燃焼に消費する酸素量が他ガスに比して少ないため、酸素量を含めて考えれば十分にペイする水準にあるだろうことを付け加えておく。

#### 参 考 文 献

- 1) 水津寛一：溶接技術(1982)11。
- 2) 溶接ニュース(1981)9。2。
- 3) 化学便覧(1976)
- 4) 水津寛一・安田武夫：溶接学会誌, 29(1960)2。
- 5) 中西実・丸尾大：炎加工・熱切断
- 6) Roger A. Strehlow: FUNDAMENTALS OF COMBUSTION.

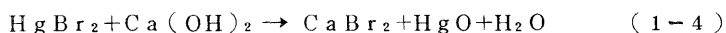
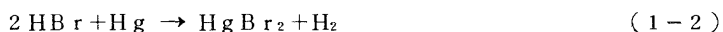
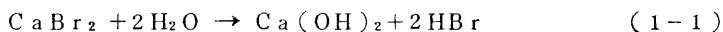
### ③ 熱化学法における酸素発生反応

横浜国立大学環境科学研究センター 田川博章

#### § 1. まえがき

水の多段熱分解法は、1000℃あるいはそれ以下の温度の熱エネルギーを利用して、水を水素と酸素とに化学的に分解する方法をいう。水の生成ギブスエネルギーは1000℃においてもかなり小さいので、この温度で直接熱分解することは熱力学的に難しい。そこで循環物質を使って水の熱分解を幾段かの反応に分けて行うという発想が生れる。この原理は1964年にFunk, Reinstromによって示されたが、<sup>1)</sup> それ以来多くの反応サイクルが提案され、実験が行われてきている。

反応サイクルとして当初発表されたサイクルは、バナジウムと塩素を用いるものであったが、実際に研究開発の行われたサイクルはEURATOMのイスプラ研究所のMark 1である。このサイクルではカルシウム、水銀、臭素を循環物質として用いて、次のような反応を組合せた。<sup>2)</sup>

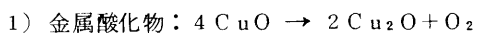


このサイクルを機能別に分類すると、(1-1)は加水分解、(1-2)は水素発生、(1-3)は酸素発生、(1-4)は循環物質の再生のように分類できる。<sup>3)</sup> 熱エネルギーのみを用いて水を分解するためには少なくとも3つの反応を組合せることが必要である。使用する熱エネルギーの温度は高いほど好ましいが、この熱エネルギーの最も高温の部分を酸素の発生に用いるのが一般的である。

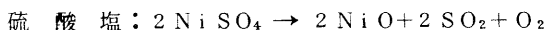
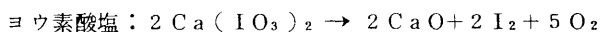
#### § 2. 酸素発生反応

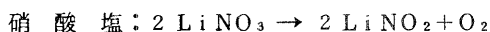
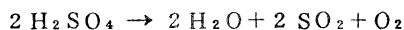
酸素発生の仕方は、大別すると酸化物・酸素酸塩の熱分解と、酸化物とハロゲンの交換反応になる。化合物別に分類し、代表的反応を例示すると次のようになる。

##### 1. 酸素含有化合物の分解

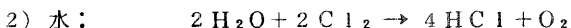
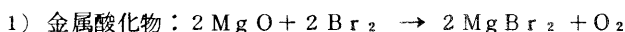


##### 2) 酸素酸塩の分解



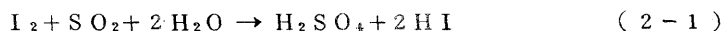


## 2. 酸化物とハロゲンの交換反応

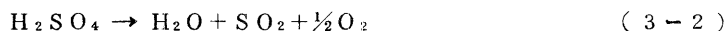
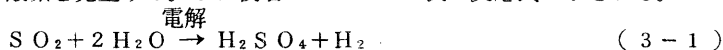


これらの反応の中で、サイクルの熱力学的有利さ、熱効率、材料の耐腐食性などを勘案すると、酸素発生反応としては硫酸または金属硫酸塩の熱分解が対象になる。

硫酸の熱分解を組み込んだ反応サイクルとしては、現在研究開発の行われている General Atomic 社のサイクル<sup>4)</sup>と Westinghouse 社のサイクル<sup>5)</sup>がある。前者は次のような反応群になる：

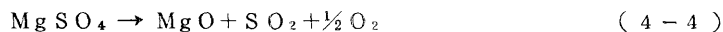
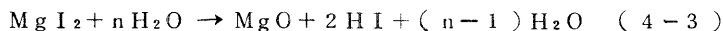
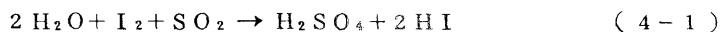


硫黄酸化物はこのサイクルの中では  $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2$  のように酸化・還元のプロセスを繰返えして酸素を発生する。また後者のサイクルは次の反応式で示される。



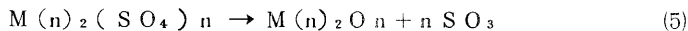
このサイクルでは第1段の反応を電解で行うため、反応数はGA法よりも少ない。ここで硫酸の熱分解はGA法、WH法とも共通であって、触媒を用いて800℃ないしはそれ以上の温度で熱分解することになる。

金属硫酸塩の熱分解を組み込んだサイクルには幾つかの報告があるが、特にGA法の第1段反応で生成する硫酸とヨウ化水素酸の分離が難かしいため、この分離にマグネシウム<sup>6)</sup>あるいはニッケル<sup>7)</sup>を用いて硫酸塩の形に変えると操作性が向上する。マグネシウムを循環物質として使用するサイクルは次のようになる。<sup>6)</sup>



ニッケルを用いるサイクルでは硫酸ニッケルの熱分解が酸素発生反応になる。

金属硫酸塩の熱分解は一般に次のように表わすことができる。



ここでnは金属Mの酸化状態を示す。分解の程度を表わす尺度として分解のギブスエネルギー

$\Delta G^{\circ}d$  (T)を用いると、金属の種類による違いが明らかになる。図1に各種金属硫酸塩の分解ギブスエネルギー $-\Delta G^{\circ}d$ の温度依存性を示す。温度の上昇とともに $\Delta G^{\circ}d$ が小さくなるが、これは硫酸塩上の $SO_3$ の圧力が次第に高くなることを意味する。すなわち、 $\Delta G^{\circ}d$ と分解圧 $P_{SO_3}$ との間には(6)式の関係がある。

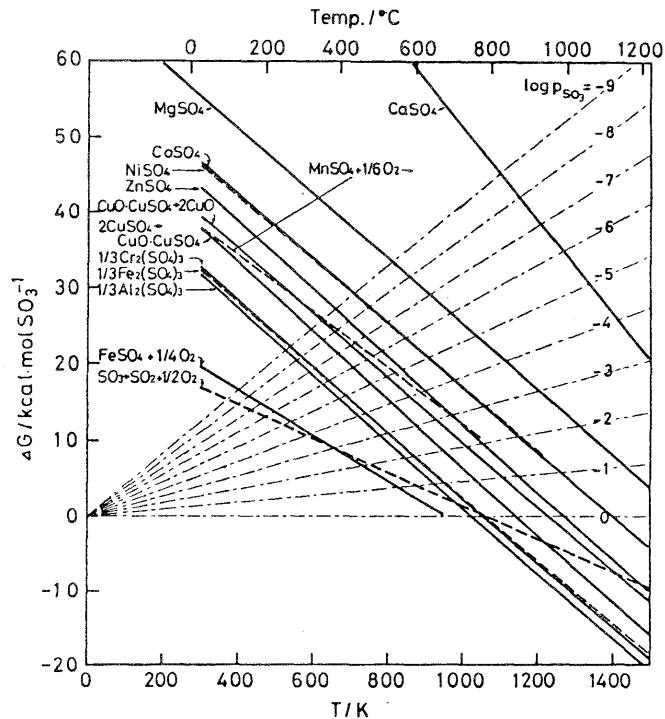


図1 金属硫酸塩の分解ギブスエネルギー変化の温度依存性：  
鎖線は $SO_3$ の分解圧（atm）を示す

### § 3. 硫酸塩の熱分解

$$\Delta G^{\circ}d = -4.58 T \log P_{SO_3} \quad (6)$$

温度の上昇とともに $\Delta G^{\circ}d$ が小さくなるので、分解圧は次第に大きくなるのがわかる。従って図1からは硫酸塩の分解のしやすさの順序もわかる。その順序は、アルミニウム>鉄>クロム>銅>亜鉛>ニッケル、コバルト>マグネシウムになる。

発生した三酸化硫黄は更に解離して二酸化硫黄と酸素になる。



この反応は可逆反応であるが、正逆いずれの方向に進行するにも触媒を必要とする。ただ硫酸塩の分解によって発生する場合には、自触媒作用のために平衡組成の近くまで解離することが認められている。

(7)式の解離がどの程度になるかを図2に示す。解離の程度は温度と全圧とに依存する。硫酸

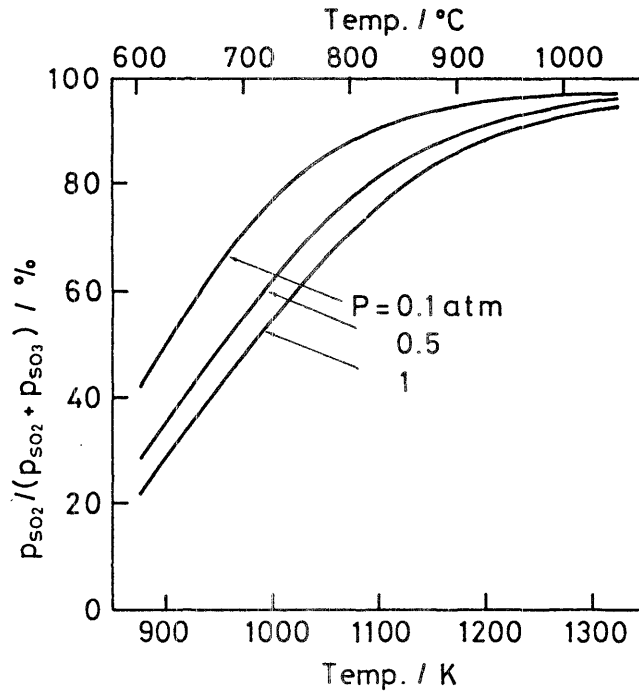


図2  $\text{SO}_3 \rightleftharpoons \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ 系の平衡条件

塩の熱分解をキャリアガス無しで行うと、 $P = 1$  気圧になり、 $800^\circ\text{C}$ では約70%が二酸化硫黄になることがわかる。

#### § 4. 硫酸の分解触媒

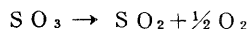
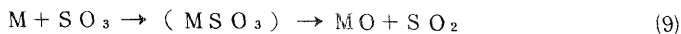
硫酸を加熱すると $317^\circ\text{C}$ にて沸騰し、その蒸気は水蒸気と三酸化硫黄に解離する。



更に加熱すると三酸化硫黄は(7)式のように触媒の存在下にて分解して酸素を発生する。従って硫酸と硫酸塩の熱分解は、酸素発生反応として見るときは同一の反応である。

三酸化硫黄の分解触媒としては白金が知られているが、それに代る触媒の探索は組織的には行われていない。触媒として白金に代る安価なものが存在するとすれば、触媒が備える要件としては、① 酸化・還元触媒としての機能があって、② 硫黄酸化物との親和性があること、にならう。すなわち、触媒の作用機構は、触媒をMとすると次のようなモデルが考えられる。

(9)と(10)の反応が繰返えされて $\text{SO}_3$ が分解する。



最も考え易い触媒は、金属硫酸塩の分解生成物である酸化物である。

硫酸塩の分解のしやすさと分解圧の温度依存性は既に図1から明らかであるが、これを各金属酸化物と硫酸塩の領域がわかるように、三酸化硫黄と温度との関係として図3に示す。この

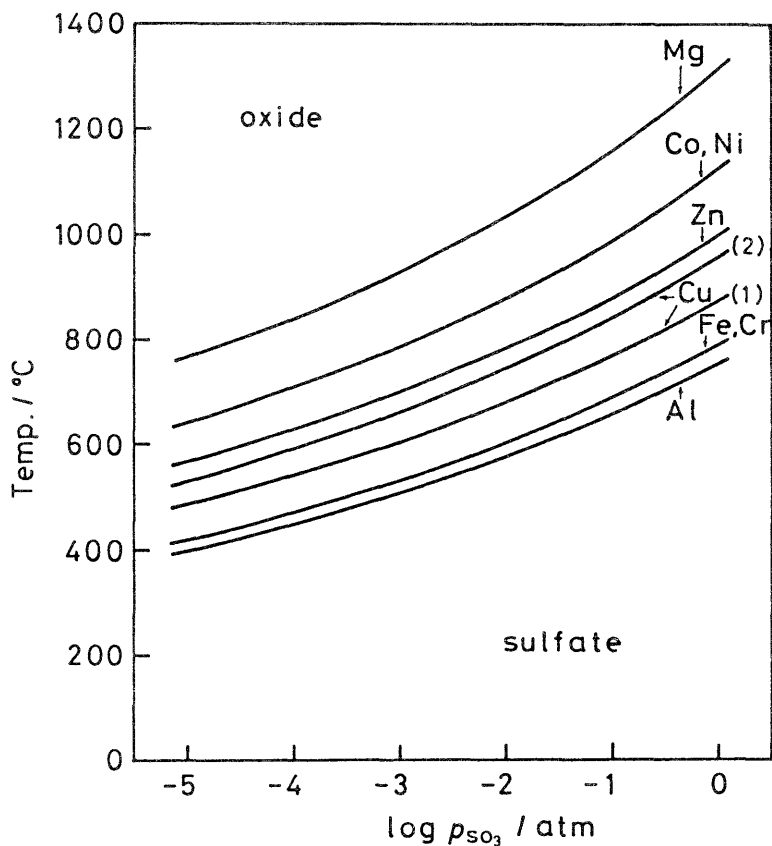


図3 硫酸塩⇄酸化物 + SO<sub>3</sub>系のSO<sub>3</sub>圧と温度との関係

図を用いると、例えば9.8 wt %の濃硫酸を分解する場合には、SO<sub>3</sub>濃度は4.7 mol %、分圧としては0.47 atm ( $\log P(\text{SO}_3) = -0.33$ )になる。この条件では鉄、クロムの酸化物は750°C以上にて存在するので、触媒活性が期待できる。図3の各金属の低温から高温への順序すなわちアルミニウム>鉄、クロム>銅>亜鉛>コバルト、ニッケル>マグネシウムは、そのまま触媒活性の下る順序にもなるものと思われる。ただ触媒の作用モデルで示したように、アルミニウムとマグネシウムでは酸化・還元機能がないので、触媒能はそれほど期待できないであろう。

## § 5. 硫酸の接解分解

硫酸の分触媒の検討から、白金、酸化鉄、酸化ニッケルの3種の触媒を選び、活性の比較



を行った。方法は：約  $2\text{ cm}^3$  の触媒層にヘリウムをキャリアーガスとして  $60\text{ wt}\%$  硫酸の蒸気を流し、分解ガスを酸成分をアルカリで除去したのち酸素計に通して、生成酸素を定量し、分解率を求めた。

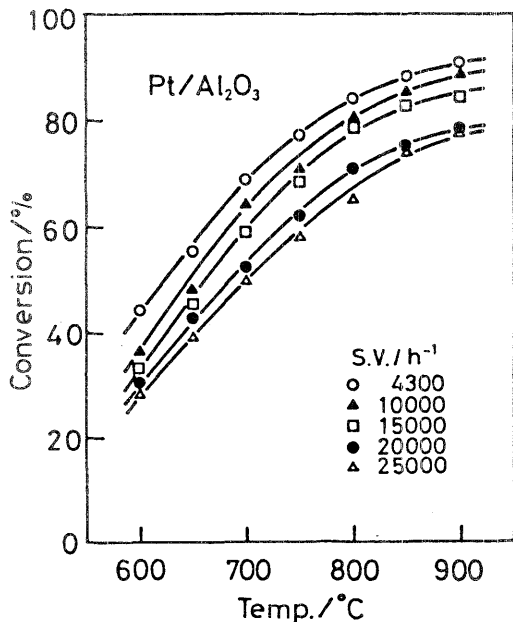


図4 白金触媒による硫酸の熱分解

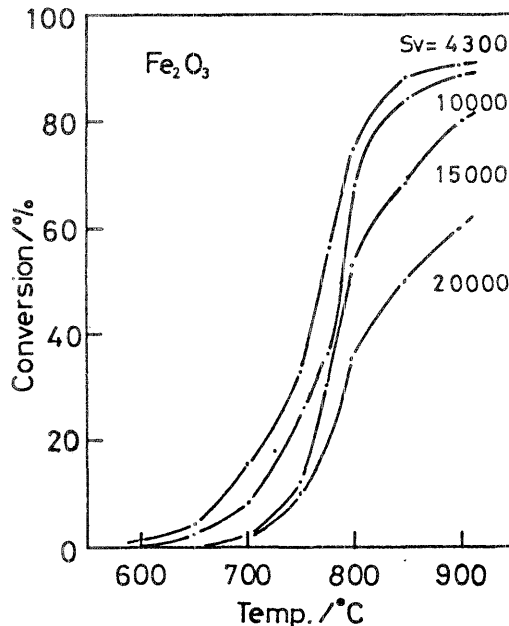


図5 酸化鉄触媒による硫酸の熱分解

白金と酸化鉄を触媒とした硫酸分解を図4と5に示す。白金触媒（アルミナに  $0.5\text{ wt}\%$  の白金を担持）を用いた場合には空間速度（= 1時間当りの供給ガス量/触媒量）が  $4300$  にて平衡組成近くまで硫酸が分解する。酸化鉄触媒の活性は白金の場合と異なり  $700^\circ\text{C}$  を越えると大きくなり、 $850^\circ\text{C}$  以上に白金と同じ触媒活性を示すようになる。空間速度に対する依存性は白金の場合よりも大きい。なお  $700^\circ\text{C}$  以下では時間の経過とともに酸化鉄が硫酸鉄(Ⅲ)に変ることが観察された。酸化ニッケルを触媒として用いると活性は更に低下する。空間速度  $4300$  の場合の温度と分解率の関係を図6に示す。比較のために白金と酸化鉄の値も示した。酸化鉄では  $700^\circ\text{C}$  以上で活性が見られたが、酸化ニッケルではこの温度が更に  $100^\circ\text{C}$  程度高くなる。また白金と同程度の活性を示す温度は  $950^\circ\text{C}$  であった。空間速度が大きくなったときの分解率の低下も酸化鉄の場合よりも大きい。

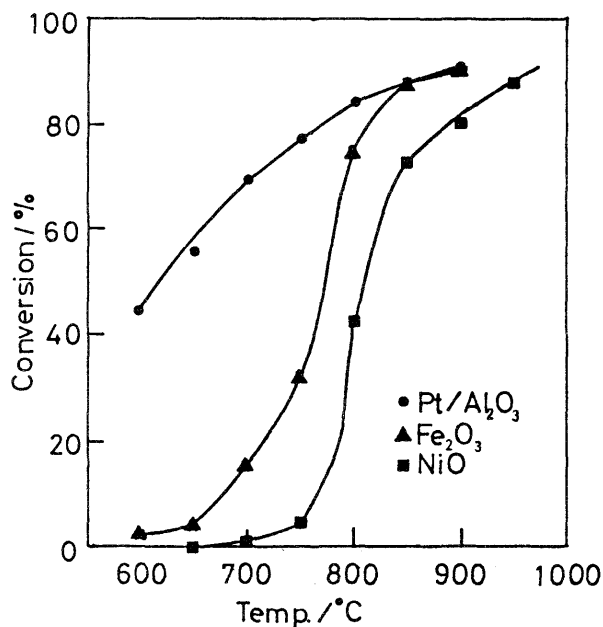


図6 白金，酸化鉄，酸化ニッケルの各触媒上での硫酸の熱分解：空間速度， $4300\text{h}^{-1}$

§ 6. 硫酸の接触分解と硫酸塩の分解挙動との関係

金属硫酸塩の熱分解挙動と硫酸分解の触媒活性との間には密接な関係があるように思われる。硫酸の熱分解では、金属の酸化状態の高い硫酸塩ほど同一温度において三酸化硫黄の分解圧が高く、分解速度も大きいという結果が得られている。<sup>8)</sup>硫酸の接触分解に金属酸化物を触媒として用いる場合には、酸化鉄・酸化ニッケルの例に見られたように、Ⅲ価の鉄がⅡ価のニッケルよりも触媒活性が高いという結果が得られ、硫酸塩の分解の結果とよい対応をしていることがわかる。

従ってこれらの結果から、もし一般的に敷衍できるならば、酸化物触媒の金属としては酸化状態の高いもの、鉄(Ⅲ)、クロム、あるいはⅣ価金属が好ましく、また作業条件としては分解温度は高く、供給する硫酸濃度は低く、従って $\text{SO}_3$ の空間速度は小さい方が好ましいという結論が得られる。

引用文献

- 1) J.E.Funk, R.M.Reinstrom, I& EC Process, TID-20441(Vo1.2)(Suppl. A)(1964), Design and Develop., 5, 336(1966)

- 2) EURATOM, Joint Nuclear Research Centre, EUR 4776e(1972),
- 3) 田川, JAERI-M 6421(1976), 熱測定, 6, 117(1979)
- 4) G.E. Besenbruch, et al., Proc. 3rd World Hydrogen Energy Conf., TOKYO, 243(1980)。
- 5) P.W.T. Lu, R.L. Ammon, proc. 3rd World Hydrogen Energy Conf., TOKYO, 439(1980)。
- 6) S. Mizuta, T. Kumagai, Bull. Chem. Soc. Jpn., 55, 1939(1982)。
- 7) 清水, 佐藤, 池添, 中島, 電気化学, 49, 699(1981)。
- 8) 田川, 電気化学, 51, 223(1983)。

### (3) 第44回定例研究会

#### (4) 石油探査と情報処理技術

東京大学教授 石井吉徳

石油ならびに天然ガスがエネルギー供給に占める位置は今さらいうまでもなく重要である。しかしその重要さの意味は、石油危機の前と後では大きく変わっている。代替エネルギーの開発、省エネルギーの重要性は毎日のように話題にのぼるが、実際には石油の寿命、現在の埋蔵量がどのくらいか、今後エネルギー供給の中で石油がどのような位置を占めるかについてはあまり説明されていない。

#### 世界のエネルギー資源

35ページの表は米国政府機関による地球の推定エネルギー資源供給可能量である。ここで特に注目すべき点は軽水炉技術でウラン資源を用いた場合、その量があまりにも少ないことである。ウランは少なくなったといわれる石油に比べてもなお少ない。軽水炉技術で考えるかぎり、原子力発電はエネルギーの長期的解決策にはならないのである。

それでは、海水からウラン資源を得ればよいではないかという考えもある。しかし海中のウラン含有率は0.001 ppmと見られており、この値は地殻中の平均値である4 ppmをはるかに下まわっている。資源についての正しい認識が必要である。資源とは自然の状態で十分濃縮されていて、十分な量があり、経済的に採集可能な位置にあるといった3つの基本的条件を満たす必要があると思われるが、代替エネルギーの多くはこの条件を満たしていない。

35ページの表は石油の埋蔵に関する前回(1979年)の世界石油会議に提出された石油の埋蔵に関する数字である。4年ごとに開催されるこの会議の最大テーマは石油、天然ガスの埋蔵量である。これによると、人類は今までにほぼ発見量(163ギガトン、1ギガトンは $10^9$ トン)の30%(すなわち48ギガトン)を消費している。この資料が示すように今後これまでの発見量にはほぼ匹敵する石油が見つけれられると考えるのが一般的なので、私たちは今までにほぼ15%ほど、地球の石油を使ったことになる。石油、天然ガスの開発はこれからも大切であり、有効な探査開発技術の活用は今後いっそう重要になるだろう。

ここでふたたび35ページの表にもどると $1.6 \times 10^{20}$  Btu (1 Btuは1.05506キロジュール)のエネルギー中、固体エネルギー、つまり石炭の量が目立って多い。しかしこれを含めても、年間2%でエネルギー消費量が増加すると、エネルギー資源の寿命は130年ほどしかなく、増加率が5%になると70年くらいで終わってしまうのである。これには現在の技術水準での原子力利用も含めている。

これまでのことから、私たちにとって重要なことは、できるだけエネルギー消費を抑えながら、

次にくる本当に新しい、“本格的”エネルギーが現われるまで、この大切な地下エネルギー資源を有効に開発、利用していくことである。現代文明を支えている、もっとも使いやすいエネルギー源である石油と天然ガスは、従来とは異なった意味で非常に重要である。

この論文ではこのような意味から、新しい局面を迎えた石油・天然ガスの探査技術のうち、特に地下を詳しく調べる技術について述べてみよう。

地下深部にある石油、天然ガスの探査、開発には、地下をできるだけ詳しく調べる技術が不可欠である。近年石油の価格の上昇に伴い、1バレル当たりの探鉱投資を大幅に増やせるようになったので、従来は考えられなかった難しい地域の探鉱も思い切って行なえるようになった。複雑な地質的条件下の油、ガス田を調査する技術も進歩してきた。しかし巨大な中近東規模の油田がいくつも見つかるとは思えない。これは仕方のないことであり、今後はより高度な技術で可能な限り多くの油田やガス田を見つけるしかない。

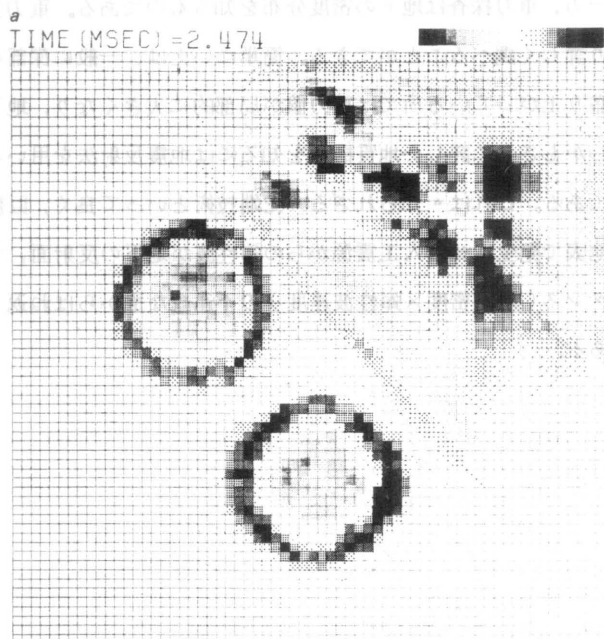
## 石油、天然ガスの探査技術

石油や天然ガスの探査は、基本的に地下構造を正確に知ることから始まる。ボーリングが必要なことは誰でも知っているが、どのように計画してどこを掘るかという、探査技術上の意味については、知られていない。ボーリングは地図上の“点”にすぎないから、他の平面的な情報がないければ地下の全体像はわからない。そのため地下構造を詳しく知る方法がいろいろ工夫されている。

石油、天然ガスは地下深部の地層中の孔隙に含まれ、それから地表に逃げていかないようにトラップすなわちとじこめられている。その典型的なものがおわんをふせたような背斜構造である。

石油は長い時間をかけてここに移動してくる。また石油がここから逃げないようにち密な岩も必要である。石油の探査の第一歩は、炭化水素を生成するような堆積盆地内で、まず背斜構造を探すことである。

世界の巨大油田はほとんどこのタイプであり、これらは地殻の変動による地層のしゅう曲などの結果できた。しかし、石油のトラップは背斜構造でなくとも原理的に同一の



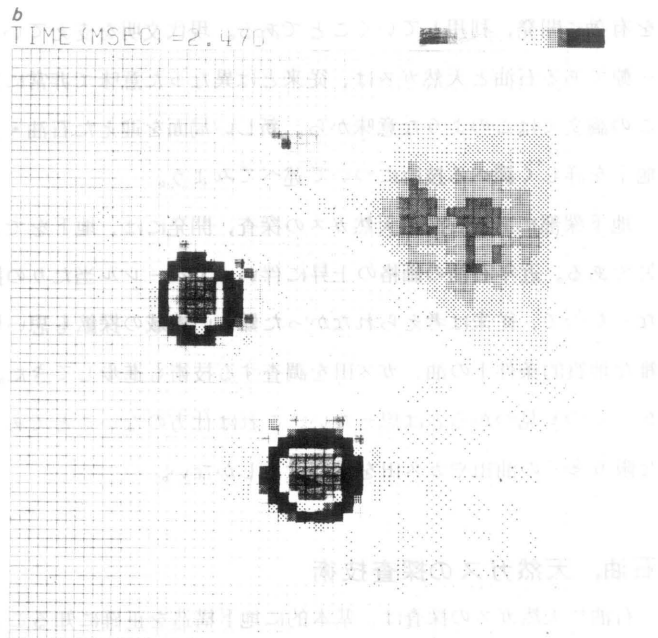
機能を果たす構造であればかまわないが、一般に複雑なトラップほど探すのが困難である。

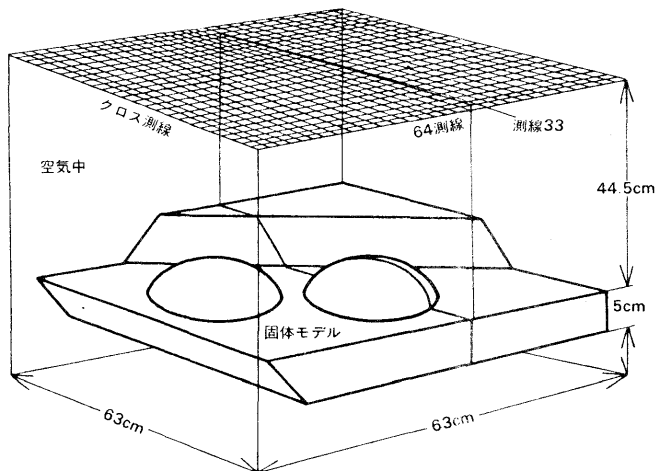
地下の地質構造を知るにはいくつかの方法があるが、近年技術の進歩が著しいものに物理探査技術がある。石油の探査には基本的に3種の方法を用いる。すなわち地表の重力や磁力ポテンシャル場の局部的異常から地下を知る重力・磁力探査と人工地震波を用いる地震反射法である。

磁力探査とは堆積盆地の基盤を構成している火成岩体の深さを調べ、基盤構造の概要を知るものである。通常、堆積岩の磁化率は火成岩よりはるかに低いので磁力異常は基盤に左右され、地球磁場の局地的変化、異常を調べていけば基盤の深度、分布がわかる。

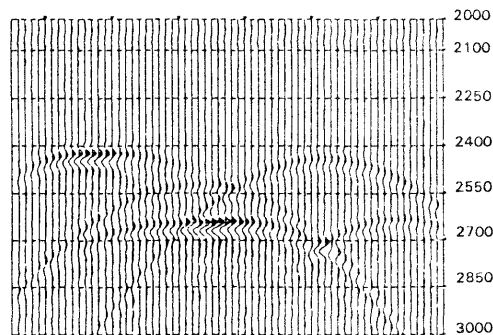
一方、重力探査は地下の密度分布を知るものである。重力異常図から堆積盆地の基盤形状をかなり詳しく調べることができる。簡単にいえば、一般に深部の岩石ほど密度が大きいため、地層の盛り上がっている所では重力値が局部的に大きくなり、地下構造を推定できる。

しかしさらに詳しい地質構造を知るには地震反射法を用いる。もっとも重要なものがこの反射法である。これは“知られざる”先端技術といって良く、巨額の資金が必要である。一口でいえば地表で発生させた人工震源からの弾性波が地下の反射面、すなわち地層境界面など音響インピーダンス(岩石密度×弾性波速度)の不連続な面からはね返ってくる反射現象を、観測するものである。





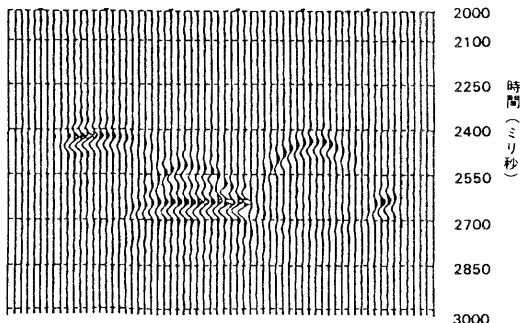
測線33  
1 原因



**3次元模型を使った実験** スケールモデルを用いた実験で地震反射法のシミュレーションを行なった例である。これは空気中においた固体反射面モデルで、実スケールの約5000分の1である。電気スパーク発源とマイク

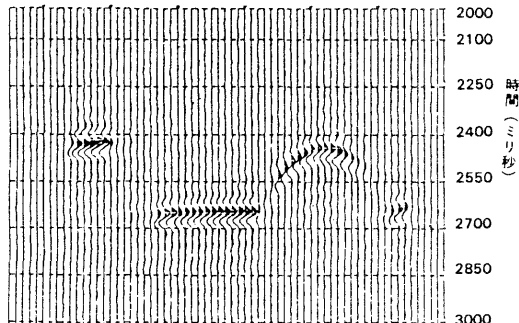
ロホンはモデル上部の測線上64×64の点にそれぞれおかれる。(1)は記録断面の一例で左図の測線33に沿っている。これは実際のモデルと大きく異なっている。したがってこれでは複雑な構造をほとんど解明できない。しかし、

## 2 2次元処理



ここでマイグレーションと呼ばれる、処理を行なうと実際の構造がはっきりと浮かび上がってくる。(2)は2次元マイグレーションの結果でこれだけでもかなり不要な波を整理できているが、まだ不十分である。ここで3次元マ

## 3 3次元処理



イグレーション (F-K法) を使い、3次元にわたるデータボリュームを処理し、3次元的にマイグレーションを行なった(3)。これは前ページ左図の実際のモデルと良く対応のつくことがわかる。

## 地震反射法

いわゆる反射係数は、本質的には音響インピーダンスの変化率のことで、この大小に従って波が反射する。反射法とはこの反射波を観測し地下を調べる技術であるが、反射波を確実にとらえるのは実際には非常に難しい問題であった。反射法が現在のように進歩した最大の要因は、反射を確実に捕捉できるようになったからである。このためにはまず信号と雑音に関する理論の導入をはじめとし、情報工学の知識を駆使したのである。しかし半面、地下弾性波動の伝播は厳密に考えると非常に難しい問題なので、これに情報理論をそのまま持ち込むのは不可能に近い。このため波動伝播モデルは思い切って単純化された。

複雑な弾性波動論に深入りするのを避け、各種の補正を用いて現象の単純化をはかった。たとえば、球面波の進行に伴う振幅の減少を振幅補正として一括してコンピューターで扱い、44ページの図に示す時間のずれは単純な補正として処理した。これは一種の平面波近似である。波の垂直入射の問題は、地表から反射面までの距離が震源と受振点までの震央距離に比べて十分大きいと考慮無視する。

このように非常に現象を単純化し、次に述べるような徹底した信号の改善を行なった。

この信号と雑音の比 (Signal to noise ratio), S/N比の改善が、石油探査を舞台にして大きく成長した反射法の最大の課題であり、多くの努力をこの問題に集中して、現在の反射法技術を完成させたのである。

地下から返ってくる信号、すなわち反射波はある種の規則性をもっている。したがって反射波の位相を合わせて重ね合わせれば、振幅は大きくなる。一方、この規則からはずれる地動、特にランダムな地動は重ねてもあまり大きくなる。

S/N比の改善の原理はこうしたものであり、N回重ねればS/N比はN倍増加する。このほか種々の周波数特性をもつバンドパスフィルターなども用いるのだが、これらは重ね合わせの方法に比較すると補助的といって良いほどである。具体的な加算、重ね合わせの方法は2つある。1つは震源、受振器を同時に多数用い雑音を平均化して小さくするものである。たとえば震源側を20個同時斉発し、受振器を1チャンネル50個という具合である。もう1つの変革は、CDP重合 (Common Depth Point Stacking) である。前の方法では独立な地動を数多く加算するには、受振、発震源の広がり必然的に大きくなってしまいが、大きくなりすぎると地下の反射点も広がり、探査の精度が落ちる。そこで加算する反射経路を44ページの図のように、地下の各反射点に関し震央距離 (震源と受振点の距離) を対称に大きくとれば、問題は解消する。しかし波の経路が長いと反射時間が大きくなる。こうした時間のずれはデータ処理時に補正すれば良い。実はこの時間のずれ $\Delta T$ は、地下の波の伝播速度の関数でもあるので、これから地下の伝播速度をかなりの精度で推定できる。

以上のようなCDP重合は一種の“Focus-Sing”, または“Imaging”の処理でその後の反射法のもっとも重要な柱となった。CDP重合はその重合度で表現する。たとえば同一反射点を6回重合するものは6重合、あるいは600%のCDPなどと呼ばれる。これらのS/N比改善の原理は、単位測線長当たりの観測の重複度、あるいは密度を上げることにあり、今までにはほぼ

石油	9634
天然ガス	8663
石炭	120854
オイルシェール	20130
タールサンド	—
ウラン(軽水炉の場合)	1960
<hr/>	
合計	161241Btu

**エネルギー供給量** この表は米国政府機関がまとめた、エネルギー資源供給可能量の推定である。単位はBtuで、1Btuは1.05506キロジュール。



3600倍, S/Nで 3600 = 60 倍ほど増えており, ますます急速に増加する傾向にある。

今, 通常の海洋での調査を例にとると, チャンネル数96, 各チャンネルごとのセンサーが50個, 同時斉発するエアガンも20個といった程度であり, CDP48重合(4800%)なども珍しくない。また1回の測定で収録するデータ量については, 測定時間5秒, 2ミリ秒のサンプリング, 1つのサンプル当たり2バイトとすると, 計96 × 2500 × 2 = 4.8 × 10<sup>5</sup>バイトで, データ量としてもかなり多い。40ページの図に示したように, これを50メートル間隔で行なっていくとすれば総データ量は膨大なものになる。

反射信号を正確にとらえることに成功した反射法にとって, 次に挑戦すべき問題は地下の探査の詳しさ, すなわち分解能を向上することであった。通常反射波は数十メートルの波長をもつ。波を媒介として対象物を調べる方法にとって波長と分解能は本質的な問題である。波長が長いと解像力が低下する。しかし短い波長の波は遠くまでとどかない。深部探査が目的の反射法では, ある程度長い波長の低周波数帯域を使わざるをえない。すると, どうしても分解能が落ちてしまう。

地震反射法では, これを次のようなコンピューターを用いたデジタル処理で解決した。

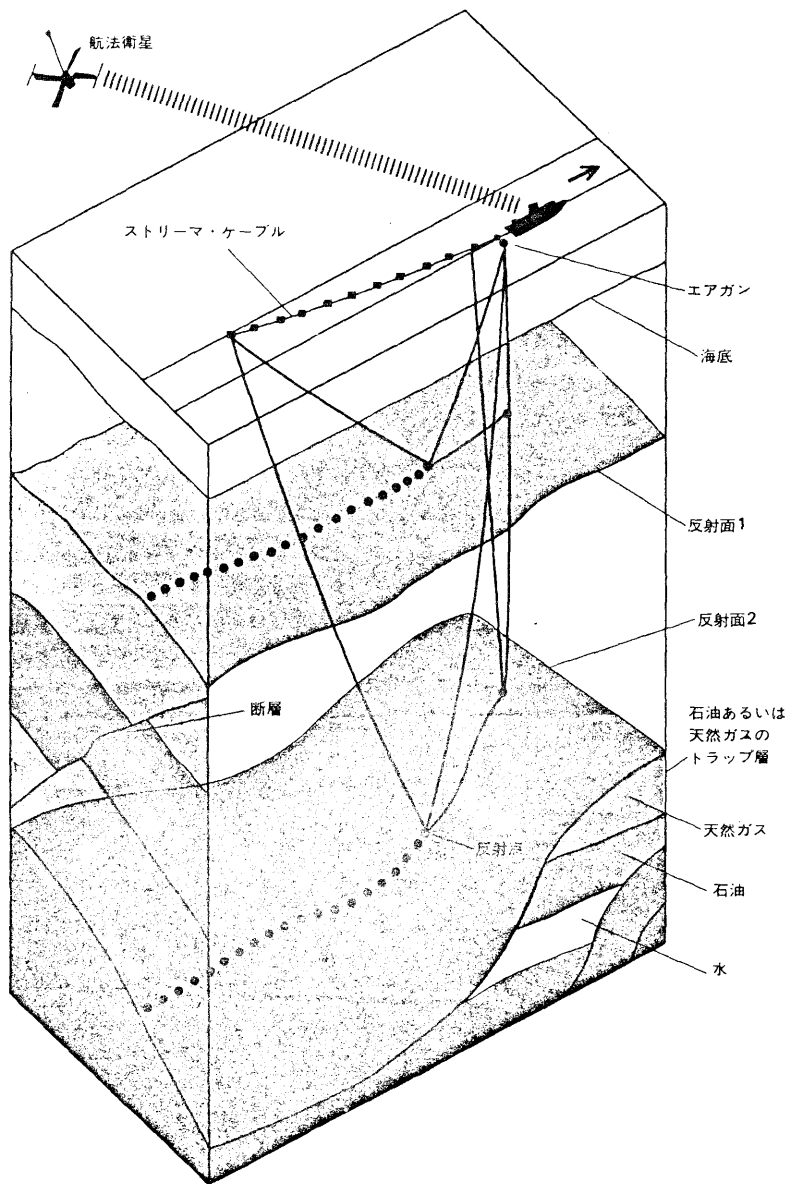
### 探査の分解能と精度の向上

長い波長の“波のむれ”, ウェーブレットを短いパルスにするデータ処理をデコンボリューション(Deconvolution)と呼ぶ。1950年代の後半, 米国のマサチューセッツ工科大学のグループは, ウィナー(N.Wiener)の最適フィルターの理論(Optimum Filter)を応用した一種の逆特性フィルターを考えた。これは後でデコンボリューションと広く呼ばれるようになった。しかしデコンボリューション理論のもっとも優れた点は, 地下の反射の物理的プロセスを数理的にモデル化したことにある。

まず, 地下の多層構造や堆積盆地は, 地層の積み重なりであるので, これを多数の反射面の集積と見る。これに対して地表から単一パルスを送ると, それぞれの反射面からパルスが帰る。結局受信される現象は反射係数の大小に比例したパルスの時間的な並び, すなわちパルス時系列と

	生産量	既発見の埋蔵量	今後の発見期待量	合計
米国	16	7	11(5-28)	34
米国以外の西半球	8	12	25(6-50)	45
ソ連, 中国, その他	8	14	50(14-129)	72
中近東	12	68	19(7-70)	99
上記以外の東半球	4	14	36(6-68)	54
合計(単位: ギガトン)	48	115	141(40-345)	304

**石油資源** 1979年に開かれた第10回石油会議に提出された, 世界の石油資源に関する数字である。私たちはすでに全石油資源のほぼ15%を消費した。残りの85%はこれからであり, 天然ガスはもっと息が長い。



**反射法の原理** 大陸棚の石油の探査は、現在の世界の石油開発の本命である。反射法は、地震波を送り出す震源、これを受信する受振器群、海ではハイドロフォン群、そして信号を記録するレコーダーが必要である。海洋では圧縮空気の爆発を用い、サイズの異なるエアガンを多数(10~20個)同時斉発する。ハイドロフォンはストリーマと呼ばれる長さ3キロメートルもの長いケーブル内に収まっていて、耐強カスチールケーブルとともに油づけされ、ケーブル全体は水と同じ比重になっている。1つのチャンネルは、50個前後のハイドロフォンからなり全体で48~96のチャンネル数が普通である。ストリーマはその特性上、海面下で同一の水深に保っておく必要があり、水深コントローラーでほぼ10メートル程度の深さを保ちながら、休みなく震源からの波を受ける。信号はチャンネルごとに独立に増幅されデジタルテープに記録される。ケーブルと船との相対位置関係はストリーマにつけられたいくつかのセンサーによって知る。船の位置は人工衛星を用いて決め、1日中休みなく、測線に沿って作業を続ける。

なる。これが地質構造の数理モデルである。この時系列について、各パルスの大きさ、符号は共に不規則に変化しているとみなすことにする。

この時系列は一種のパルス列であり、反射係数列である。しかし、こうした反射係数列では地下を実際の振動波形、すなわちウェーブレットが伝わったことになっていない。したがって実際の反射波形が地下のさまざまな反射面から反射されて返ってきたものにかえることができれば、数理的に反射記録をシミュレートできる。反射係数列を数理的な反射記録モデルにするには、反射係数列にあるウェーブレットを用いコンボリューションという数学的演算をすれば良い。実際には各地層間のきわめて複雑なくりかえしの反射、重複反射を含めるなど、さらに多くの工夫が必要だが、ここでは理解しやすいように、もっとも単純な説明にとどめよう。

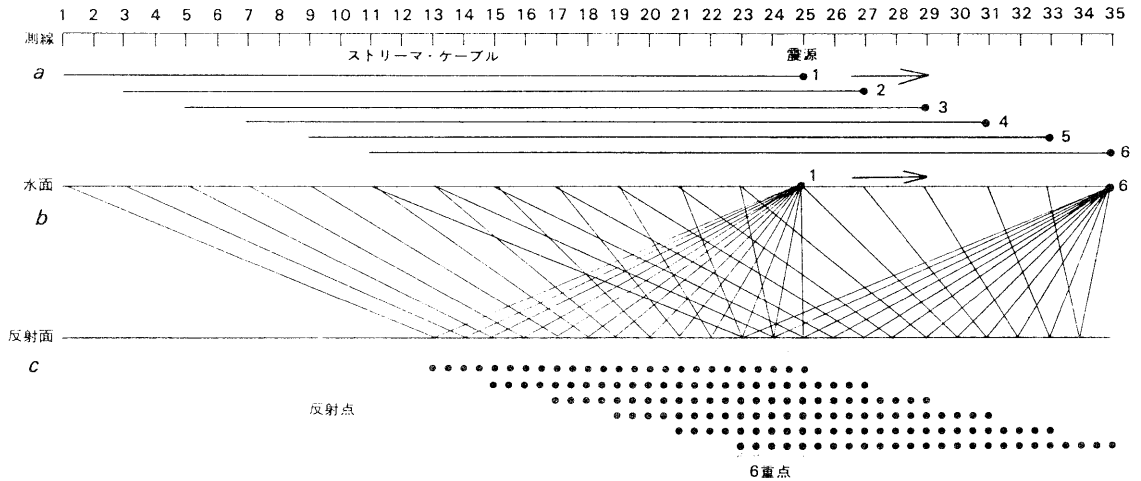
このような反射モデルでは、いわば平面波が反射面へ垂直に入射すると仮定している。ここで前に述べた平面波への近似が役にたつ。すなわち振幅補正、時間のずれを補正したCDP重合結果はこの反射モデルにぴったりと合うのである。なおCDP重合法では、この前提に合わない地層間で重複して反射する波などは自動的にかなり除去される。

さて本論にもどると、仮りに各反射面が反射係数の大小に比例するインパルスで表現できれば、地下の地層分解能はもっとも高くなる。しかし実際のウェーブレットは長い波長をもっているため、このままでは分解能が低い。したがって、高い分解能を得るには、このウェーブレットをふたたびパルス状に戻す作業が必要になる。ここで前の反射係数列が不規則であることが役にたつのである。なぜならウェーブレットでコンボリューションされた前述の反射記録は、自分自身に対する相関をとると（これを自己相関という）、その過程の中で、反射波がランダムに分布している性質が平均されて、ウェーブレットの波形そのものの自己相関が得られるからである。すなわち、未知のウェーブレットの1つの性質を求めることができる。

しかし自己相関関数はウェーブレットのエネルギースペクトルしか与えないので波形はわからない。したがって、もう1つの仮定が必要である。これはウェーブレットを最小位相型の波形であると考えた仮定で、簡単にいえば反射波をエネルギーのビルドアップ（確立）のもっとも早いタイプの波形とみなすのである。

このようにすればウェーブレット波形そのものがわかるので、これに波形変換処理をほどこせば良い。このために便利な数学的手法にウィナーの最適フィルター理論と呼ばれるものがある。これは入力波形として上記のウェーブレット、そして出力としてインパルスを選び、最小二乗法の意味に必要なフィルターを求める。その後はこのフィルターを地震反射記録に用いれば良い。

この処理はウェーブレットを元のインパルスにもどすものであるから、前に述べたコンボリューションに対してデコンボリューションという名前がついている。すなわち反射係数列にウェーブレットでコンボリューションを行なって得た反射記録を元に戻すという意味である。このウェーブレットは震源の波形、地中のフィルター特性、観測システム特性などをすべて含んでいる。



**反射法のオペレーションとCDP重合** 海洋、陸上いずれの場合にも原則としては測線に沿って作業をする。この図の(a)は測線の進め方で直線は受振点の配列、すなわち展開を示している。チャンネル数は24、48、96というように次第に増加する傾向がある。反射の法則から、1回の爆発では、

展開の半分の長さの地下反射面をカバーする(b)。したがって地下を100%カバーするには展開は全長の半分ずつ移動すれば良い。たとえば600%、すなわち6重合では展開の1/12ずつ移動し、同じ反射点のトレースを選び出し補正し重合する((c)で赤く示した部分)。

これを取り除く逆特性フィルターがデコンボリューションである。

デコンボリューション処理は現在あらゆる記録に標準処理として用いられている。

デジタル処理の初期、1960年頃、には当時のコンピューターでは能力が不足しており、まず専用のコンピューターが開発された。特に、重要なものは時間のかかるコンボリューション演算を高速で行なうためのブースターであった。これに対して、汎用コンピューターメーカーはコンボルバーと称する装置を通常の中央演算装置に付けて、この専用システムに対抗した。

このようにしてCDP重合を技術の骨格とし、デコンボリューションに代表される各種のフィルタリング技術、データ処理技術に支えられ、地震反射法は近代的技術として発展した。この時期はちょうど大陸棚に石油資源を求めようになった時期に一致しているが、むしろこの変化が新しい技術の発展を促したといえる。特に海面-海底の間の一種の共振の現象である水中残響を除去する方法として、デコンボリューション処理は著しい成果をあげた。

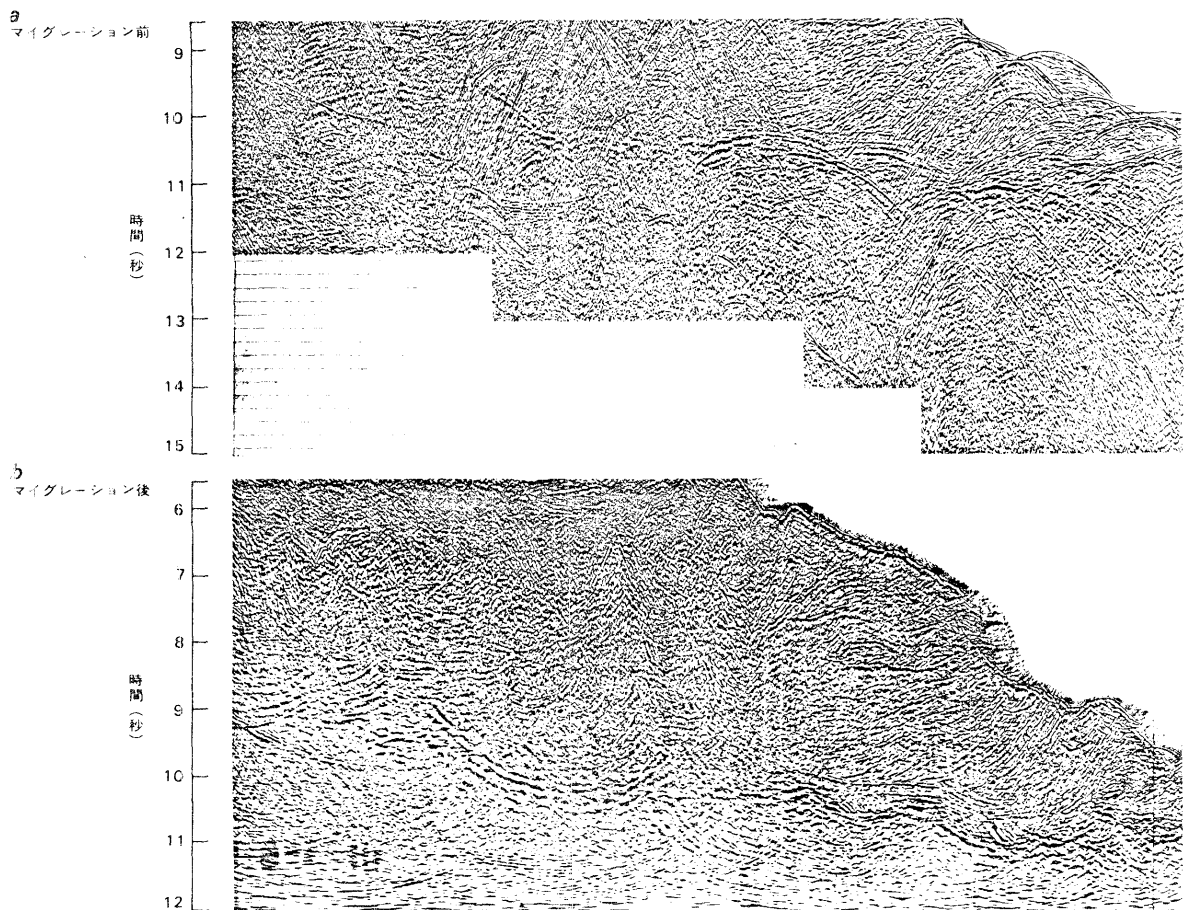
現在海洋で働く1隻の専用地震探査船は、1日当たり50キロメートルの調査をするとして、2400フィートの磁気テープ約20巻分のデータを収録する。1年間で1万キロメートル分の作業をすれば4000巻もの磁気テープが必要になるのである。これらのデータをすべてコンピューターで処理するわけで、現在の石油の探査技術は情報工学的な性格を非常に強くもっている。

## 地下の構造と物性探査

地震反射法の技術は、地球物理学とは別な発展の歴史をもって現在に至っている。その理論体系は単純明解でわかりやすい。つまりきわめて複雑な地下の弾性波動伝播を思い切って単純化し、

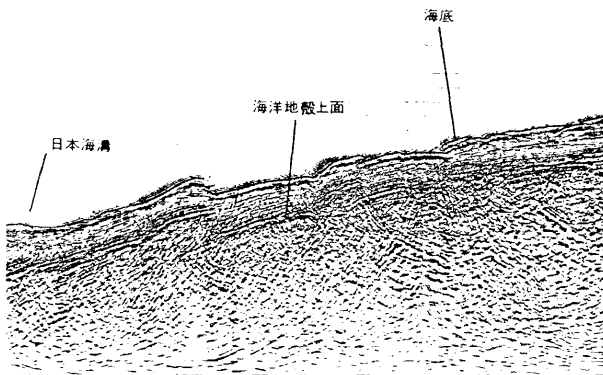
情報処理の手法を応用して独特なデータ処理体系をつくり上げたのである。逆説的でない方をすると、複雑な地震波動論を避けたことが、現在の“技術的”な成功の大きな原因といえるかもしれない。

地下構造を知るための技術がひとまず完成すると、次には地下の地層そのものの物理的性質、すなわち、地下の物性を知る技術の開発が進められるようになった。もともと反射波を観測すれば、基本的に次のような3種の情報が得られる、すなわち反射波の走時、つまり到達時間と振幅、そして波形である。地下構造は走時を利用して解明するのだが、振幅や波形からは地下の物性を知る手がかりを得ることができる。たとえば、反射係数の大小は音響インピーダンス、に關係しており、波形スペクトルの変化は地層内での波の減衰の特性にも關係している。

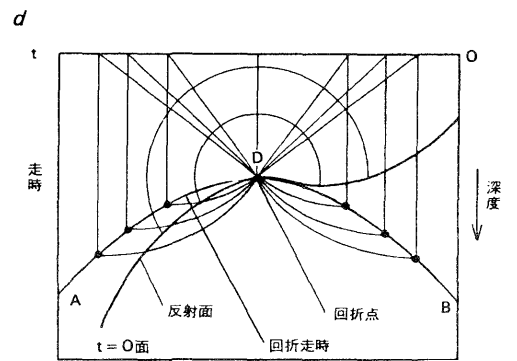
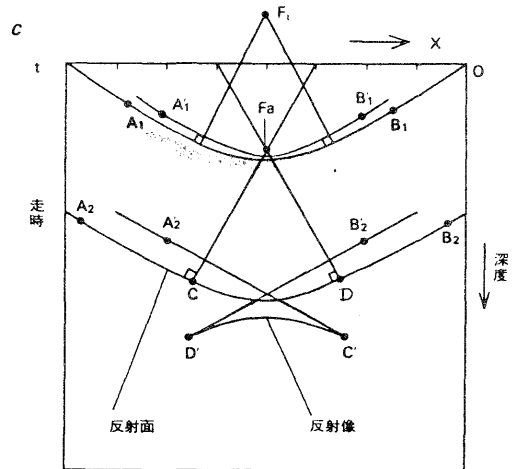


**マイグレーション** 走時（波が帰ってくるまでの時間）を縦軸にとる記録断面表示法では、傾斜のある反射面は次ページ(c)のように異なった位置に現われるので、複雑な構造では直の地質構造を示さない。入射波面の曲率半径と反射面の曲率半径の大小にしたがい浅い $A_1B_1$ は記録断面上 $A_1B_1$ のようになるが、深い $A_2CDB_2$ は $A_2C'DB_2$ のように反射の並びが交差して

しまう。ところが、たとえば回折点Dからの回折波は記録断面では(d)に示すように、上に凸の回折走時パターン(ADB)の並びとなるが、記録断面のすべての波はこのパターンの集合と見なせる。マイグレーションとは回折パターンをもとの点Dに集める処理で、反射面の各点から始めて波が出るものとする。マイグレーションは複雑な地質構造を調べるのには有効な方法で



あるが、高度な理論と大型の高速コンピューターが必要である。こうしたマイグレーションの応用例として深海における反射記録断面をみてみよう。前ページの図は日本海溝の反射記録断面の調査例である。図は通常の処理断面(a)とマイグレーション処理後のものである(b)。水深は海底の1番くぼんだ所では海底面からの反射時間が10秒であるから、約7500メートル(10秒



×1500メートル/秒×1/2)の深さである。この記録は、日米協力の海底地殻の調査、国際深海掘削計画 (IPOD) の結果の一部である。通常の石油探査技術をそのまま用いており、この結果から海洋地殻プレートの沈みこみまで判別できる。(a)には回折パターンが多くみられるが、(b)のマイグレーション処理後これらは消えており、地下構造をより正しく表現している。

前述のデコンボリューション処理が理想的に進めば、地表の反射記録の各トレースから地下の反射係数の時系列を得ることができる。反射係数が求まりさえすれば、地下の音響インピーダンスは順を追って計算できる。

しかしここで1つ問題がある。数十ヘルツを中心とした周波数帯域で観測される反射記録は、周波数がゼロ、すなわち直流的な成分を含んでいない。ボーリングデータでは音響インピーダンスは、地下の深度と共に平均的にはしだいに増加する。したがって、こうした直流成分は別に反射波振幅以外のデータから求めなければならない。このためには反射波の到達時間、すなわち、反射走時をもとにした前に述べた速度解析の結果を用いる。

地下の岩石のおおまかな密度分布は、経験式などが与える。

音響インピーダンスなどの物性データは反射法に新しい可能性を開いた。たとえば十分に厚く、大きな広がりをもつ天然ガス層があれば、音響インピーダンスが低下するので比較的簡単にわかる。その他一般的に、地下の音響インピーダンス分布は岩質の微妙な変化を示す。

## マイグレーション

通常、反射法は地表の直線に沿って震源、受震点を配置して測定を行なう。この直線を測線という。海洋探査船は地図上の前もって決められたこの測線に沿って進む。したがって得られる反射記録断面は、測線に沿ったある種の地質の断面ということになる。しかし、これは必ずしも垂直な地質断面とは限らない。3次元的な地下構造の場合、反射波は測線に垂直な方向を含め、あらゆる方向から帰ってくる。構造の傾斜がゆるく、単純ならばたがいに交差する粗い間隔の測線ネットで調査するのも良いが、傾斜が急で、断層も多い複雑な構造では50メートル間隔、あるいはそれよりも細かい間隔での面的調査が必要である。

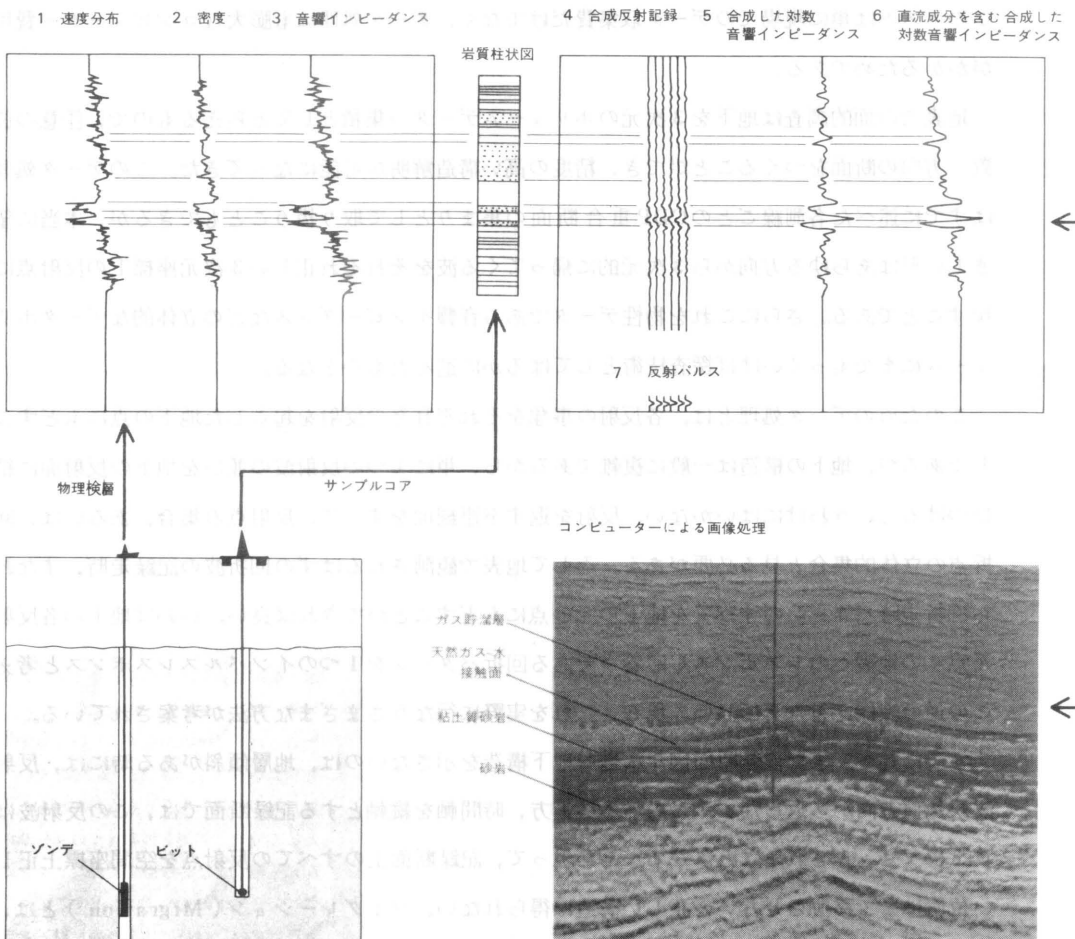
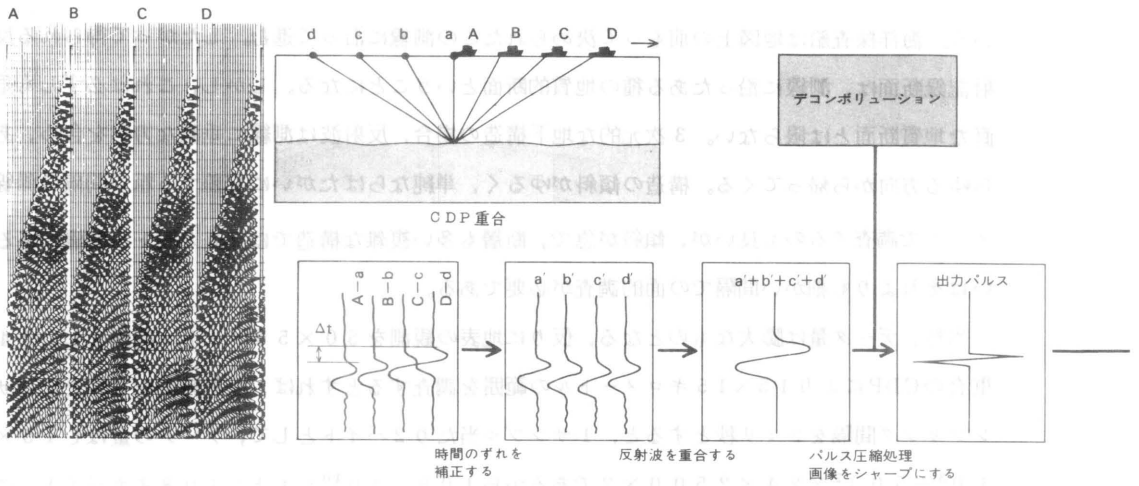
当然、データ量は膨大なものとなる、仮りに地表の観測を50×50メートル間隔とし、24重合のCDPにより15×15キロメートルの範囲を調査するとすれば、反射時間を5秒とし、サンプリング間隔を2ミリ秒とすると、1サンプル当たり2バイトとして、データの量は $(15 \times 10^3 \div 50)^2 \times 24 \times 2500 \times 2$ であるから $1.08 \times 10^{10}$ バイト(1.08ギガバイト)にもなる。こうした調査に必要な費用は本格的な石油井1本分のコストに匹敵するほどである。このコストは単に現場でのデータ収集費だけでなく、データ処理にも膨大なコンピューター費用がかかるためである。

地表での面的調査は地下を3次元のボリュームデータの集積としてとらえるもので、任意の位置、方向の断面をつくることができ、精度の高い構造解明が可能になってきた。このデータ処理はすでに述べた各測線ごとのCDP重合断面の集まりとして取り扱うこともできるが、本当に望ましい形はあらゆる方向から3次元的に帰ってくる波をそれぞれ正しい3次元座標上の反射点に戻すことである。さらにこれを物性データである音響インピーダンスなどの立体的なデータボリュームにまでもっていけば探査技術としてはるかに進んだものとなる。

このためのデータ処理とは、各反射の事象をそれぞれその反射を起こした地下の点にもどすことであるが、地下の構造は一般に複雑であるから、単に1つの反射波の並びを地下の反射面に結びつけるというわけにはいかない。反射を返す不連続面をすべて、反射点の集合、あるいは、回折点の立体的集合と見る必要がある。そして地表で観測されるはずの回折波の記録走時、すなわち回折走時パターンのすべてを地下の元の点にもどすことができれば良い。いわば地下の各反射“点”の地表へのレスポンス(応答)である回折パターンを1つのインパルスレスポンスと考え、この逆の操作を行えば良い。現在、これを実際に行なうさまざまな方法が考案されている。

すでに述べてきた記録断面図が本当の地下構造を示さないのは、地層傾斜がある時には、反射波が鉛直方向から返らないからである。一方、時間軸を縦軸とする記録断面では、この反射波は真下にプロットされることになる。したがって、記録断面上のすべての反射点を空間座標上正しい位置にまで移動させないと正しい構造は得られない。マイグレーション(Migration)とは、

この移動のことで、2, 3 - Dマイグレーションとはそれぞれ2次元, 3次元についての反射点移動処理のことである。





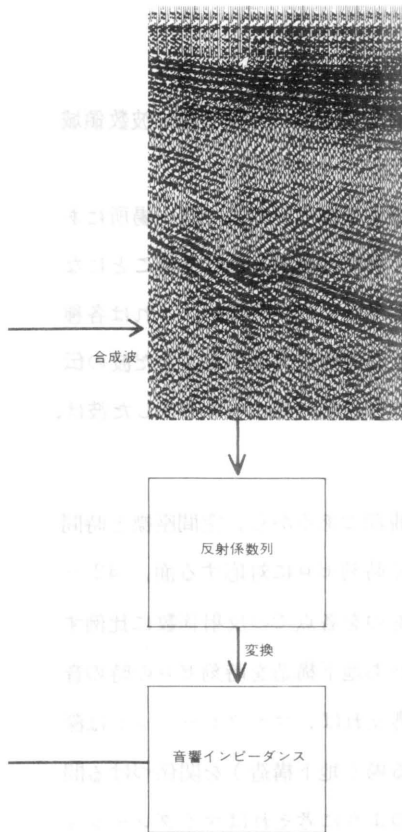
### 3-Dマイグレーションの原理

前に述べたようにマイグレーションの処理は、基本的に記録上のすべての現象を、回折走時パターンの集合と見て、それぞれのパターンに沿って波の振幅を足し合わせ、もとの回折点(回折パターンの頂点)の値としていくのである。この回折パターンは、もちろん記録断面上には見えないが、条件によっては原理的に同じものが見えることがある。たとえば 41 ページ a 図では地下反射面の不規則な変化がいくつかの回折パターンをつくっている。

これは反射面の小規模な凹凸により、反射エネルギーの集中・拡散が起こるためで、一見すると回折点が不規則に分布しているように見える、したがって、これらのパターンに沿って波の振幅を加算し、その頂点の値として表示すれば正しい反射面の様子が現われてくる(41 ページ b 図)。ところで仮想的な回折走時曲線を計算するには、地下の詳しい速度分布がわかっていなければならない。41 ページの例は2次元パターンであるが、これを3次元的な円錐状の回折走時面で考えれば3次元マイグレーションが可能になるはずである。

この考えは実際に2次元マイグレーション用の方法として実用化されており、ディフラクションマイグレーションと呼ばれている。この方法は原理的にはわかりやすいが、理論的にはあまり巧妙なものとはいえない。このためその後いくつかの手法が考案されてきた。いずれも最終的には、同一の効果を得るもので、本質的には同じである。しかし近似の仕方、処理の前提など技術的には相当異なっており、一長一短をもっている。

いずれの場合も重要なのは地下の速度分布の情報とその取り扱いで、これらが誤差のおもな原因であ



**反射波測定**の原理 地震探査船が海底油田の探査をする際のデータ処理の流れを簡単に示した図である。海底のある点からの反射波は、船を移動させて何回も測定する(CDP重合法)。しかし各反射波は、震源-受振器間の距離の違いによる時間差を含んでいる。左上に示したのがこのような時間差を含んだ生のデータである。このデータは時間差を補正して、足し合わせれば不規則なノイズを減らすことができる。このようにして得た反射記録はさらに分解能を高くするための処理を加えて、シャープなパルスとする。右上はこの結果でありはっきりした地下の構造を示すようになる。図中段の1, 2, 3はいずれもポーリングを掘って得た物性データで3は1と2の積から音響インピーダンスを計算した結果である。4はこのデータから計算した合成反射記録である。5は地震反射法で調べた反射波の振幅から求めた音響インピーダンス分布で、6はこれに速度解析結果(直流成分)を加えたものである。中央はポーリングから得た岩石サンプルによる深さに対する岩質の分布図である。1-6までが良く対応しているのがわかる。図の下段には音響インピーダンス断面に現われた天然ガスの貯溜層を示した。反射記録から、地下の岩質分布がわかる良い例である。

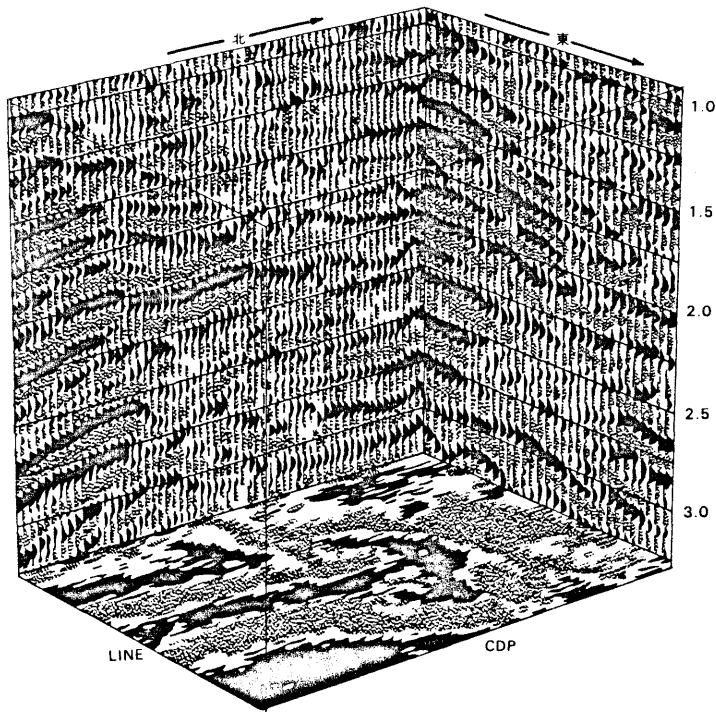
る。本論文ではもっとも巧みな方法の1つと思われる，フーリエ変換を用いて周波数-波数領域で処理を行なうF-Kマイグレーションについて簡単に述べよう。

一般には地下からの反射波は往復で異った経路を通るが，震源と受振点が地表で同一場所にあると，波の往復経路は同一になる。したがって，往復の経路の片側だけを考えれば良いことになる。つまり地下の反射面上の各点から，波がスタートすると考えてさしつかえない。これは各種の補正を行なってつくったCDP重合記録の各トレースについて近似的に成立する。ただ波の伝播速度は真の値の半分としておく必要がある。さて，反射面上の各点を一斉にスタートした波は，地表に向かい最終的に地表で観測される。

この結果，3次元マイグレーションでは地表は測線ではなく面観測であるから，空間座標と時間の3次元データボリュームが得られる。もちろん地下の反射面（時刻ゼロに対応する面，42ページ右図）も3次元の空間座標で表わされている。反射面そのものを各点での反射係数に比例する値にしておくこと，この面は時間ゼロの場を示している。すなわち地下構造を時刻ゼロの時の音圧などといった波動の場に対応させるわけである。このように考えれば，マイグレーションは深度ゼロに対応する面（すなわち地表）の場と時刻ゼロに対応する場（地下構造）を関係づける問題になる。この2つをスカラー波動方程式で結ぶのである。このように考えればマイグレーションとは単に波動の初期値，境界条件の問題となる。

この問題を解くにはまず地表の空間座標と時間を変数とする観測データをフーリエ変換し，空間座標に対する波数，時間に対する周波数をパラメータとするフーリエスペクトルデータを求める。次に波動方程式を用いて波数-周波数の変換を行ない，空間座標だけに関するスペクトルデータに変え，これに時間ゼロの条件を与えれば地下構造のフーリエ変換像が得られる。最後にこれをもとの空間領域にもどせば良い。この結果が求める地下構造である。この方法は処理を周波数-波数の領域で行なうので，F-Kマイグレーションという。

このようなマイグレーションの問題は一般的に見れば，地表の観測値から地下構造を求めるもので，一種の“Inverse Problem”つまり“逆の問題”であり，前に述べた1次元のフィルター処理であったデコンボリューションとの類推では空間的デコンボリューションの処理ということ



3次元データボリューム 地表面で2次的に細かく格子状に測定し、3次元データボリューム(マイグレーション後)をつくれれば地質構造を詳しく解析できる。つまりこの図のような断面が得られる。

ができる。このマイグレーションの考えは、地下構造モデルから地表で観測されるはずの合成記録をつくる問題にも利用できる。また合成記録作成の過程は、1種の“Forward Problem”つまり“前向きの問題”である。一般に物理探査では、地表観測値から地下の構造を求める、逆の問題を解くものであるが、これは一義的に決まらない場合が多い。マイグレーションでいろいろな前提をおくのはこの本質的自由度を減らすためである。したがってその種の技術がど

こまで役に立つかは前提が実際の現象にどれだけマッチするかにかかっている。

地震反射法の研究では、よく超音波を用いた縮尺モデルを使う。これは実験室内で地下構造モデルを使うもので、データ処理の正しさを証明するのにも都合が良い。

35ページ左上は空中におかれたマイグレーションの研究のためにつくった3次元のプラスチックモデルである。電気スパークで音波の反射を調べるもので、デジタルデータ記録をとるため、モデル上の水平面で格子状に反射波のサンプリングをする。このモデルは1つの断層と、ドーム状の構造2個から構成されている。このモデルを使って得た1つの記録の断面を35ページの図に示してある。35ページの(1)はマイグレーションを行なわない記録であり35ページの(2)は2次元データだけを使った2-Dマイグレーションの結果で、35ページの(3)は3次元ボリュームデータをすべて用いた3-Dマイグレーションの結果である。この結果はモデルの様子をはっきりと再現している。

## 石油、天然ガスの3次元探査

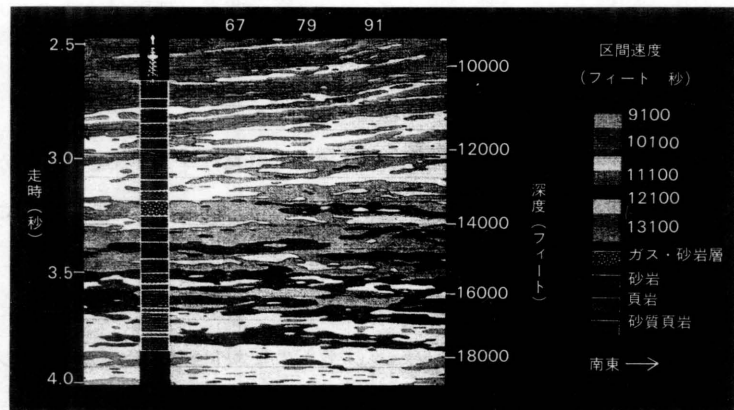
1920年代に初めて物理探査技術が石油の探査に使われて以来、技術はめざましく進歩した。石油の探査とは、究極的には石油や天然ガスがたまっている地下の多孔質の十分に厚い、広範囲に分布している貯溜層の存在を知ることである。もちろん貯溜層が存在するには石油を逃がさぬトラップが必要だが、これを詳しく調べる技術が今まで述べてきた地震反射法であり、さらにボーリングで実際に掘った井戸の中の物理検層技術である。

反射法データは地下構造、地層の物性情報を与えるが、ボーリングデータからは地層、油層の一層詳しい知識が得られる。しかし坑井は地図上の点にすぎない。したがってこの両者を総合して用いれば坑井での詳しい知識を面的に広げることができる。すなわちこれらのデータはたがいに補い合う性質をもっている。

反射記録から地下の物性を推定できるようになった現在、この両者の連結は今まで以上に重要になってきた。

すでに述べた音響インピーダンスと坑井データの対比と油、ガスを含む背斜構造の例(44ページ中図、下図)は反射記録の非常によく使用例である。これは構造が比較的単純である場合で特に3次元探査を必要としない例である。

しかし構造が複雑になった場合、音響インピーダンス断面をマイグレーション処理をしないまま細かい議論をしてもあまり意味がない。したがって3次元調査を行ないマイグレーション処理を済ませ、3次元物性データボリュームをつくらなければならない。最終的に前ページの図のような資料をつくれれば目的に応じて任意の断面が得られるため、地下



**反射データに現われたガス層** 岩質の変化にともなう層位封塞型のカストラップを示している。明瞭な構造トラップがない場合、岩石の物性変化を示すこのような断面図はほとんど唯一の探査上の手がかりである。これは反射法からしか得ることができない。図中の物性変化は、岩質の分布と良く対応しているのがわかる。この例では音響インピーダンスから速度を求めている。©Geophysics, 1979。

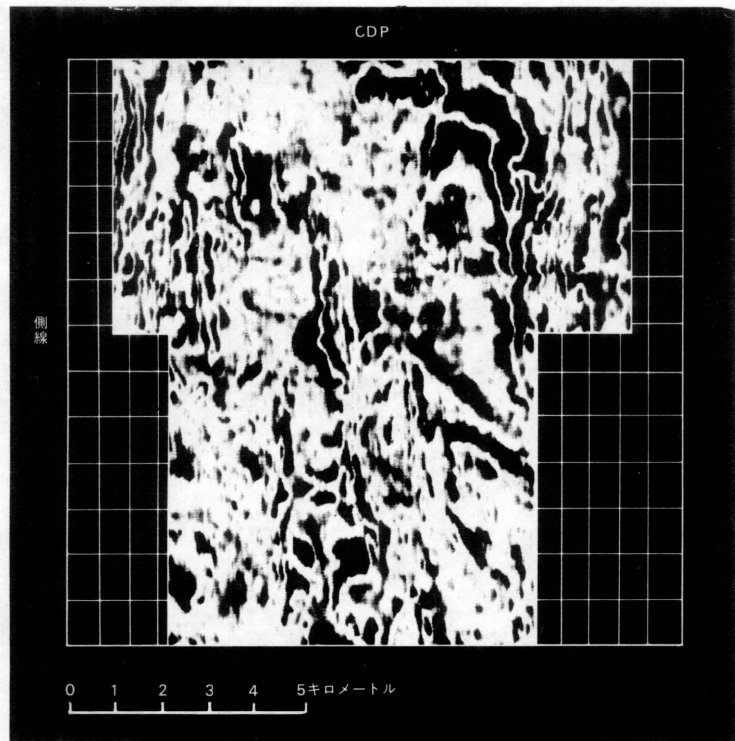
の解析は非常に正確になる。

48頁に示す図の例は物性情報として音響インピーダンスではなく、速度情報を示している。これはまず、音響インピーダンスを求め、次にこれに経験式から得られる岩石密度を与え、速度分布を計算している。一般に砂岩層は頁（けつ）岩層に比べて速度が大きい、この断面はこの互層の状態を良く表わしている。これに対して水平断面の例（右に示した図）を示す、この種のデータはボーリング場所の選定、油田の開発に決定的意味をもつ。

現在石油開発の技術は、3つの先端的技术テクノロジー、すなわち地震反射法、坑井内検層、そしてボーリングの技術で代表されるといわれる。新しい3-D反射法の技術はこれらを総合的に、有効に生かす基本的資料を与えている。一方新しいこの反射法技術の展開はコンピューター能力の大幅な向上をうながすきっかけにもなりつつある。

地震反射法は情報処理技術と地球科学の接点で成長してきたが、現在その第2期の新たな成長期に入っているといえる。今まで石油、天然ガスの探査、開発技術は日本では広い関心を集めることが少なく、ほとんど知られていない。多くの人は単にボーリングして“当てる”と思っている。しかし実際にはもっとも進歩した先端技術の代表的な例である。

現在日本は世界の石油生産量の1割以上を消費する大消費国である。しかし石油探査開発資金はわずか1%しか負担していない。この問題は石油の技術開発でも同じであり、投下資金はまっ



**水平断面の実例** 3次元マイグレーションを行なった後のデータボリュームから切り出された水平断面である。各サンプリングごと（たとえば4ミリ秒）にこの断面を切ることができる。水平の構造図は微妙に変化していくのが普通で、この方法を用いれば、このような地下構造を細かく知ることができる。この図は地下1,408秒の断面でタイ沿岸の海洋の例である。©Geophysics, 1982。

といて良い。日本国内ではこうした技術の実情、様子を知る機会が非常に少なかったことも、日本が探査・開発に不熱心だった1つの原因かもしれない。この分野には、多くの人が考えているよりはるかに高度な技術が使われており、非常におもしろいものも少なくないことを知ってもらいたい。（完）

たくゼロといって良い。日本国内ではこうした技術の実情，様子を知る機会が非常に少なかったことも，日本が探査・開発に不熱心だった1つの原因かもしれない。この分野には，多くの人が考えているよりもはるかに高度な技術が使われており，非常におもしろいものも少なくないことを知ってもらいたい。

(完)

## ⑤ アモルファスシリコンと太陽電池開発

電子技術総合研究所 田 中 一 宜

### 1. はじめに

最近、電卓や腕時計に組みこまれたアモルファスシリコンの太陽電池が人々の目をひくようになった。これらの太陽電池は民生用なので、効率も3～5%と低いが、少なくとも結晶シリコン太陽電池よりは安価に作成することができる。アモルファスシリコンが登場してからまだ10年も経っていないが、民生用とは言え、太陽電池の大量生産技術を完成させたのは世界の中で日本たゞ一国である。この数年間の、日本におけるアモルファスシリコン基礎技術への官民投資は集中的であり、それが功を奏したと言えよう。以下に、アモルファスシリコンをいう材料の特徴と、太陽電池技術へ結びついていった経緯とを述べ、その将来性に言及したい。

### 2. アモルファスシリコンとは何か？

「アモルファス (amorphous)」とは、「形のはっきりしないもの」とか「分類不可能は」という意味で、「非晶質」「無定形」と訳されることもある。つまり、アモルファスシリコンは、結晶のようにSi原子がお行儀よくきちんと並んでいないで、バラバラに近い並び方をしている固体と言えよう。ただし、完全なバラバラではなく、隣接原子同志はある秩序(化学結合の手の数、手の長さ、結合手のなす角度)を持って結ばれている(短距離秩序の存在)。また、最近注目されているアモルファスシリコンの中には、Siの他に10～20原子%のH(水素)も含まれているので、正確には、水素化アモルファスシリコン(a-Si:Hと記す)と呼ばれる。

水素を含まないa-Siは、通常、蒸着法やスパッター法で作成されるが、これは使いものにならない材料である。結合の切れた状態C結合手:ダングリングボンド)が $10^{20} \sim 10^{21}/\text{cm}^3$ も含まれていて、これらが欠陥となって電子的には低品質な薄膜である。そのため、1975年までのアモルファス半導体は今1つ、応用分野に活気が無かった。1975年の末に、SpearとLeComberがグロー放電法(SiH<sub>4</sub>分子をグロー放電プラズマで分解)で作成した水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)は、Hの働きによって未結合手が殺され、欠陥密度が $10^{15}/\text{cm}^3$ にまで下がったため、電子的にすぐれた性質を示すことがわかった。その性質が「構造敏感性(Structure-sensitive)」あるいは「Pn制御性」である。

これは、僅かな不純物(磷原子やボロン原子)を添加することによって、電気伝導の型をn型(電子)やp型(正孔)に自由に制御する技術、あるいは制御され得る性質を意味している

が、結晶 Si が今日の IC や LSI の基本素子であるダイオード・トランジスタの材料としてもはやされているのも「構造敏感」な性質をもっているからに他ならない。「構造敏感性」これは、応用の立場から考えた時、半導体の最も重要な性質なのである。その意味で、アモルファス半導体において初めて「pn 制御」を実現させた a-Si:H の登場は、技術の世界に “break through” をもたらし、特に太陽電池の世界に大きな変革を巻き起こした。

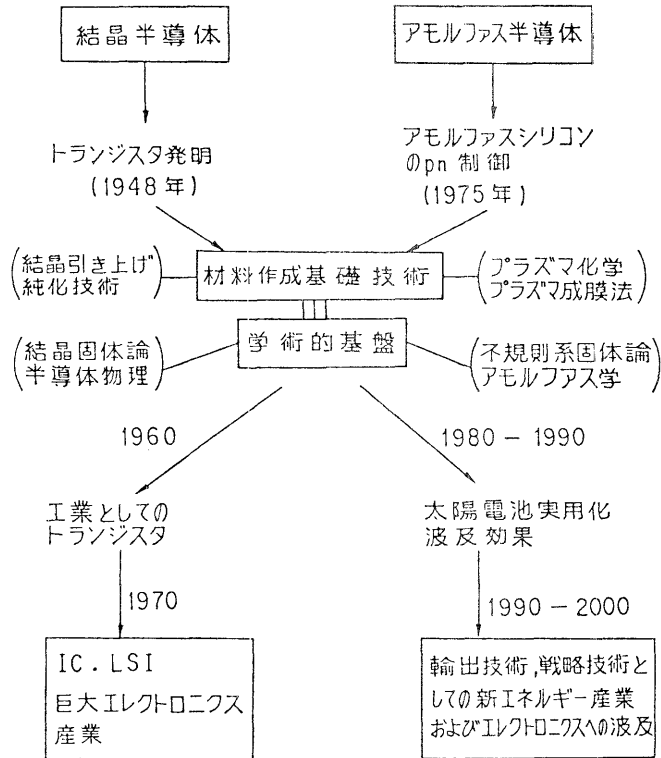
### 3. a-Si:H 太陽電池開発の特徴

1975 年当時は、石油ショック直後の新エネルギー開発ブームにあり、日本ではサンシャイン計画、アメリカでは DOE の国家プロジェクトがスタートしていた。新エネルギー技術の中で、光電変換プロジェクトの最大の問題は、(1)太陽光発電は、火力、原子力に比べて発電単価が高すぎる。(2)大面積化が難しい、等で、特に(1)は簡単に克服できそうになかった。結晶 Si 技術は成熟した技術なので、大巾な低コスト化は容易ではないし、また小面積に高密度に素子をつめこむ IC や LSI とは技術思想が異なっており、あまり得意の応用分野とは思えない。a-Si:H による pn 制御の成功は、突破型の技術が必要としていた太陽電池開発とうまく整合した訳である。

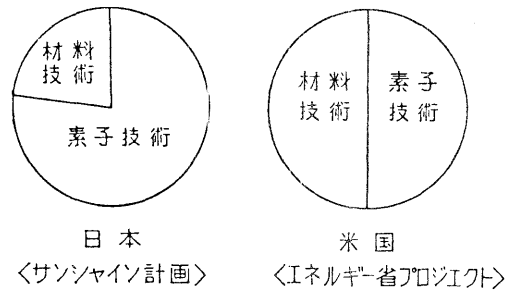
事実、Spearらが a-Si:H を発表した翌年の 1976 年に、a-Si:H を使った最初の太陽電池が RCA から発表され (Carlson & Wronski)、以来、(1)作成プロセスが低温で容易 (シランガス [SiH<sub>4</sub>] をグロー放電分解して 200~300°C に熱した基板上に a-Si:H を成膜)。(2)大面積化が容易、(3)薄膜 (1 μm) で太陽光を充分吸収。等により、低コスト大面積セル用材料として一躍注目を浴びることになった。

a-Si:H 太陽電池開発が結晶型太陽電池開発と異なる最大の特徴は、材料技術およびこの分野の学術的な未成熟にある。見方を変えると、先行投資と集中開発を効率的に行えば、基本技術や特許をおさえて輸出技術にまで育成できる可能性があり、極めて高い戦略性を包含した分野なのである。第 1 図に、トランジスタ発明以後、結晶半導体が材料技術と学術的進展とのカップリングにより巨大エレクトロニクス産業に育っていった過程、およびそれとのアナロジーで描いた a-Si:H の発展予想を示す。工業化から一大産業へと進展していく前段のプロセスとして、材料作成技術とその分野の学術的急進展とが基幹にあること、そこでの成果は基本特許につながること、等を指摘しておきたい。





第 1 図 結晶半導体とアモルファス半導体



第 2 図 アモルファス太陽電池の配算内容

#### 4. 内外の開発体制

サンシャイン計画推進本部は、a-Si:H太陽電池開発における上記のような要素を考慮して、1980年、官主導の開発体制としては最初の試みである完全な産官学体制を組織した。しかも光電変換プロジェクトの加速推進策として、総花主義を排し、基礎研究開発については

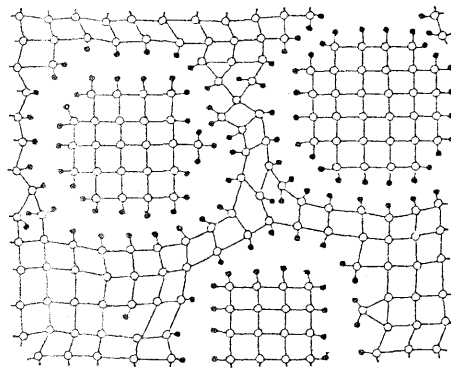
a - Si : H太陽電池に重点を置いた。ちなみに1981年会計年度のこの分野に対する国家予算は、日本(サンシャイン)の13億円に対し米国(エネルギー省, DOE)の12億円で、日米の差はほとんどないのが現状である。但し、第2図に示す材料研究と素子研究への予算配分比率からも明らかなように、米国に比べ日本の開発は、良くも悪くも素子技術への力点が高い。これは、そのまま、この2,3年の研究開発成果に現れている。1982年会計年度(1983年3月まで)を終了した時点において、大面積(1~10cm<sup>2</sup>)セルで変換効率6%を達成するという当初のマイルストーンをすでに大幅に破り、100cm<sup>2</sup>で7.3%以上が達成されている(三洋, 富士電)。量産技術は勿論のこと。この面積では世界の最高レベルにある。一方、材料基礎に力を入れる米国の追い上げは、第1図に示した如くこの分野の特殊性から考えて注目すべきものがあり、日米に大きな差があるとは考えるべきではない。事実、RCAやARC Oでは、1cm<sup>2</sup>ながら確実に10%を越える変換効率を達成している。

サンシャイン計画におけるa - Si : H太陽電池プロジェクトの産(8企業)、官(電総研3グループ、学(7大学8グループ)の大雑把な役割分担は、それぞれ、素子技術(高効率化等)、材料技術、物性基礎、ということになるが、お互いに境界で重なり合いながらプロジェクトは進行している。前述のように学術的基礎をにらんだ材料作成の基礎技術が基本特許につながるとの認識に立つと、電総研はまさにその領域をカバーしようとしており、米国の動向も併わせ考え、背負うべき責任は重い。しかしながら、大学を入れた本格的な産官学体制は、初めてのケースながら、年3~4回の研究発表会を通じて情報交換や成果移転が有機的に行なわれつつある。

## 5. 材料研究の最近の成果

サンシャインにおける基礎材料サイドの仕事としては、(1)材料高品質化と作成技術の基礎研究、(2)アモルファス特有の新しい物性評価法の開発、(3)デバイス物理の完成、等がある。この中で、材料研究から新しい材料が2つ生まれ、太陽電池の効率向上に大きな役割を果たしている。

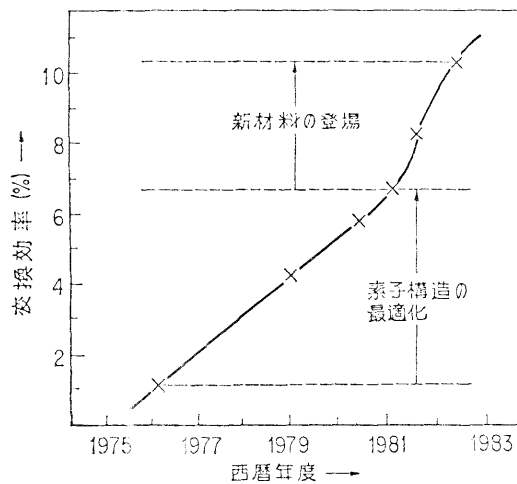
1つは、電総研の筆者らのグループで開発した。微結晶相(100Å<sup>o</sup>前後の粒径)を含むアモルファスSi : H(C - Si : Hと記す)で、微結晶の存在で伝導率が高く(見かけのドーピング効率が上がる)なる上に水素の存在でバンドギャップを大きくすることもできるという利点を持つ。C - Si : Hは富士電機のグループによってアモルファス太陽電池のn型層として導入され、1981~1982年の1cm<sup>2</sup>セルでの世界チャンピオンデータにつながった(7.8%)。第3図に、C - Si : Hの構造模型を示す。



第3図 微結晶-アモルファス ( $\mu c-Si:H$ )  
の構造モデル (白丸Si, 黒丸H)

もう1つの新材料は、阪大の浜川・太和田らによるBをドーピングした $a-SiC:H$ で、光学バンドギャップを大きくしたp型層として太陽電池に組み込まれ高効率化に大きく貢献している。RCAの10%セルも $Q-SiC:H$ を使っている。

これら、新材料の登場は、変換効率向上に決定的な寄与をしている。第4図に、新材料開発



第4図 アモルファス太陽電池の変換効率  
推移

の果たした役割を示す変換効率向上のカーブが示されている。 $a-Si:H$ 太陽電池に関する限り、アモルファス材料自身の基礎研究が如何に重要であることを如実に物語っている。

## 6. おわりに

アモルファスシリコンの研究開発は、太陽電池への応用を中心としてこの数年、急進展した。日米の開発競争はさらに激化していく模様であるが、アモルファス材料という立場から眺めると、太陽電池以外に新たに应用分野が拡がりつつある。電子写真用の光電面、液晶駆動用の薄膜トランジスタ、ファクシミリ用ラインセンサー、カラーセンサー、等で、その波及効果は大きく着実である。また、グロー放電法というプラズマCVD技術は、アモルファスばかりでなく、ダイヤモンド、SiC等の超硬物質（結晶）作成にも適用されようとしている。当分、楽しみな分野である。

### （ 参 考 文 献 ）

- 菊池誠監修・田中一宜編著「アモルファス半導体の基礎」（オーム社、東京、1982年刊）
- 「日経エレクトロニクス」1982年12月20日号（アモルファスシリコン特集）
- 田中一宜：電子技術総合研究所 報 47巻7号（1983）557。

#### (4) 第45回定例研究会

#### ⑥ 固体電解質を用いるエネルギー変換(要旨)

名古屋大学名誉教授 高橋武彦

##### 1. はじめに

一般に、電解質がエネルギー変換用の材料となるのは、化学電池、燃料電池あるいは電気分解槽のような電気化学装置においてであるが、特殊な例としては、熱発電用材料としても考えられている。電気化学装置は、等温下で、化学エネルギーと電気エネルギーとの直接相互変換をおこなう装置であるから、元来は、常温作動型が望ましいのであるが、常温では、液体、固体の電解質、いずれを用いても、概して電解分極が大きく、高効率のエネルギー変換装置としては、高温作動型が望ましい。

高温で用いられる電解質としては、熔融塩あるいは固体の電解質があるが、こゝでは、固体電解質が、ある程度の規模をもったエネルギー変換にどのような形で関与するかに限定して話をすゝめる。ただし、残念ながら、現在実用されている装置はないので、将来、この方面で実用される可能性をもつ装置についてのべる。

##### 2. 高温固体電解質電気化学装置および熱発電装置の条件

エネルギー問題に直接関与する電気化学装置は、大容量化が可能で、材料が安価、豊富であり、大電流を流した場合、電池では、閉路電圧ができるだけ高く、電解槽では、印加電圧が可及的に低いことが望ましい。このためには、電解質の導電率が高いことが要求されるが、化学電池では、陰極として、なるべく卑な電位を示すアルカリあるいはアルカリ土類金属、陽極としては、カルコゲンあるいはフッ化物など、電解槽では過電圧の低い電極材料が対称とされる。

熱電変換装置用固体電解質としては、導電率が高く、熱伝導率の低いことが要求されるが、ナトリウムイオン導電体あるいは銀イオン導電体などが検討の対象とされている。

##### 3. 化学電池

###### 3.1 アルカリ金属電池

リチウムイオン導電性固体電解質としては  $\text{Li}_3\text{N}$  あるいは  $\text{LiSiCON}$  ( Li thium |Super ionic Conductor ) と名付けられている  $\text{Li}_{14}\text{Zn}(\text{GeO}_4)_4$  およびその他のリチウムを含む複合酸素酸塩が考えられ、これらは、 $200\sim 600^\circ\text{C}$  で  $10^{-1}\sim 10^1\text{Sm}^{-1}$  程度のリチウムイオン導電率を示すが、これらを電解質とする大規模電力用電池は未開発である。

ナトリウムイオン導電性固体電解質としては  $\text{Na}-\beta$ -アルミナ、 $\text{Na}-\beta''$ -アルミナある

いはNASICON(Na Superionic Conductor)と云われる $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ および $\text{Na}_5\text{MSiO}_{12}$ ( $M=\text{Y, Gd, Er}$ あるいは $\text{Sc}$ )などが注目されている。このうち、最もよく研究され、電池用電解質として有望視されているのは $\beta$ -および $\beta''$ -アルミナである。これらの理想式は、前者の場合、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ 、後者で $\text{Na}_2\text{O} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$ で、導電率は後者のほうが高い。

$\text{Na}-\beta$ -アルミナを電解質とし、 $\text{Na}$ を陰極、 $\text{S}$ を陽極とする電池が最も注目されているが、この形式の電池は1966年にアメリカのフォード・モータ社が開発したもので、電気自動車用動力源電池および電力の負荷平滑化用電池として期待されている。

$\beta$ -アルミナは六方晶系に属する化合物で結晶のC軸に直角方向にのみ $\text{Na}^+$ の通路をもつ2次元導電体であるが、単結晶はそのC軸に直角方向にのみ成長するので、電池用電解質としては、多結晶焼結体が使用される。この電池は300~350℃で運転されるが、この温度における導電率は $\beta''$ -アルミナで20~40  $\text{Sm}^{-1}$ で $\beta$ -アルミナのそれはこの $\frac{1}{2}$ 程度である。この温度では $\text{Na}$ も $\text{S}$ も熔融状態で、電解質は厚さ1~2 mm以下で片側を閉じた管状に成形され、多くの場合、管の内側に $\text{Na}$ 、外側に、炭素で導電性をもたせた $\text{S}$ がみたまされる。初放電反応は、 $2\text{Na} + \text{XS} \rightarrow \text{Na}_2\text{S}_x$ で、 $x$ は2~3まで放電可能であるというが、 $x=3$ を放電末組成とするとこの電池の理論エネルギー密度は780  $\text{Wh/Kg}$ となるが、実際は100~200  $\text{Wh/Kg}$ 程度である。この電池は、電気自動車用としては800サイクル以上、電力負荷平滑用としては2,000サイクル以上が目標とされ、ヨーロッパでは主として電気自動車用、わが国では主として、工業技術院のムーンライト計画の中でとりあげられ電力貯蔵用として検討され、アメリカでは両用として開発が進められている。

NASICONは200℃以上の温度で $\text{Na}$ に対して不安定となるので、現段階では $\text{Na}/\text{S}$ 電池用には用いられない。

### 3.2 フッ化物イオン導電体電池

フッ化物イオン導電体としては、結晶構造が、螢石型、タイソナイト型および $\text{YF}_3$ 型のものが知られているが、電池用電解質として考えられたのは螢石型の導電体で、 $\text{Ca}$ または $\text{Mg}$ を陰極、 $\text{NiF}_2$ 、 $\text{FeF}_3$ あるいは $\text{CuF}_2$ などを陽極とする電池が検討され、 $\text{Ca}$ 陰極、 $\text{CuF}_2$ 陽極電池の開路電圧は450℃で3.37V、理論エネルギー密度は1290  $\text{Wh/Kg}$ であるが、実際にえられているのはこの $\frac{1}{4}$ 程度のエネルギー密度である。

## 4. 燃料電池

プロトン導電性固体電解質を用いる $\text{H}_2/\text{O}_2$ 燃料電池も研究されてはいるが未だ研究の初期段階であり、エネルギー問題に関与する固体電解質燃料電池としては、酸化物イオン導電体を

電解質とする燃料電池が主対象とされている。

酸化物イオン導電性固体電解質としては、酸化トリウム、酸化セリウム、酸化ビスマスあるいはペロブスカイト型酸化物と他の酸化物との固溶体なども検討されているが、固体電解質高温燃料電池用としては、酸化ジルコニウムに、4価のZrより低原子価の他の金属酸化物を固溶させて、 $O^{2-}$ 空格子点を結晶中に生成させた、いわゆる安定化ジルコニアが圧倒的に対象とされている。ZrO<sub>2</sub>は単独では1150℃付近で、単斜—斜方の結晶系の転移があるので、2価あるいは3価の金属酸化物を固溶させて螢石型の立方晶に安定化させ、同時に $O^{2-}$ 空格子点を生成させた固溶体を安定化ジルコニアとよび、添加酸化物を安定化剤と称しているが、導電率の高さとその安定度および価額の点から、燃料電池用としては、専ら、酸化イットリウム(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が使用される。ZrO<sub>2</sub>に対する添加量はモル%で10%程度で、 $O^{2-}$ 導電率は1000℃で10 S m<sup>-1</sup>の桁であり、電子導電性は無視できる。このように導電率が高いとは云えないので、電解質の薄膜化が検討され、プラズマスプレー法、フレームスプレー法、電気化学蒸着法などが研究され、30~40 μmの薄膜電解質がえられている。

現在、試験電池を用いて試験しているのは、アメリカのウエスチングハウス電気会社(WH社)の研究開発センターとわが国の工業技術院電子技術総合研究所(TEL)のみであるが、アメリカのアルゴンヌ国立研究所(ANL)およびモンタナ・エネルギー開発研究所(MERDI)でも検討をおこなっている。

WH社では多孔性のカルシア安定化ジルコニアの管の上へ薄膜電池を形成させ、管の内部へ空気、外部へ水素と一酸化炭素を流して電池を作動させ、還元ふん囲気中で電池を直列および並列に連結する構造とし、TELではこれとは逆に、多孔性アルミナ管の上へ薄膜電池を形成させ、管の内部へ燃料、外部へ空気を流す方式で、管の上で12個の電池を直列に結び、これを8個用いて、燃料として水素、酸化剤として酸素を使用し、1010℃で最大出力260 W(4.25 V, 6.1 A)をえている。ともに、陽極として酸化物半導体を用いているが、導電率の値に問題がある。なおTEL方式は、1981年以前にWH社が試験していた方法と類似で、アルミナ管上で、薄膜電池を直列に結ぶ材料にも問題がある。また、ANLでは、ハネカム構造の一体化燃料電池(Mono lithic Fuel Cell)の構想を検討し、高出力密度電池の構成が可能であるとし、MERDIでは、通常の積層電池型の平板電解質電池を検討している。

## 5. 電気分解装置

安定化ジルコニアを電解質とする燃料電池の逆反応で800℃~1200℃で水蒸気を電気分解して、水素と酸素をえようとする研究が、西ドイツ、アメリカおよびわが国などでおこなわれている。

たとえば、西ドイツのドルニエ・システム会社では1975年以来HOT ELLY (High Operating Temperature Electrolysis) と名付けられている水蒸気電解装置の開発をおこなっている。1985年末までに、1000℃で、1時間に1 m<sup>3</sup>の水素を生成するモジュールを完成させる予定であるという。この場合、現行の水溶液の水電解が最新の装置でも4.6 kWh/m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>の電気エネルギーを要するのに比し、HOT ELLYでは最もよい場合は、実用的な水素生成速度でも2.6 kWh/m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>の電気エネルギーですむといわれている。

また、わが国の原子力研究所では、将来のDT反応による核融合炉システムにおいて生成すると考えられるトリチウム水(HD.T)<sub>2</sub>Oからトリチウムを回収するため、イットリウム安定化ジルコニアを電解質とする高温トリチウム水の電気分解を提案している。

## 6. 熱発電装置

アメリカのロス・アラモス研究所で、ヨウ化銀(AgI)を固体電解質として用い、Ag/AgI/I<sub>2</sub>電池を起電力の低い低温で充電し、起電力の高い高温で放電すれば起電力の差に相応する電気エネルギーがえられることが示され、結局、温度差を与える熱エネルギーを電気エネルギーに変換する電気化学ヒートエンジンをつくることができると提案されたことがある。しかし、現在注目されているのはβ-あるいはβ''-アルミナを用いる方式で、この固体電解質の両側に温度を変化させたNaをおくとNa蒸気の活量の差があらわれ、温度の高い側が陰極、低い側が陽極となって、濃淡電池が形成される。低温側のNaはポンプで高温側へもどされるとこの電池の連続放電が可能になって電気エネルギーがえられる。この方式は、1968年にアメリカのフォード・モータ社が特許をえた方式で一名ナトリウム・ヒートエンジンと云われている。低温部150℃、高温部600°~1000℃で、たとえば、β''-アルミナの厚さ0.1 cm程度で熱エネルギーから電気エネルギーへの変換効率20~40%がえられ、補機類を含めて、エネルギー密度0.6 kwk/Kgがえられるといふ、宇宙開発電源、通信リレーステーション、電気自動車電源あるいは太陽熱利用の家庭用トータルシステム中の電源として利用されうると考えられ、さらに燃料からの熱・電併給システム、発電所のトッピングユニットあるいは、ナトリウム冷却原子炉の発電用として好適であるとされ、現在、フォード・モータ社、ジェネラル・エレクトリック社あるいはジェット推進研究所で開発が進められている。

## 7. おわりに

固体電解質を用いる大容量化学電池、熱電池あるいは電気分解装置には将来、有望なものが多いと思われる。さらに固体電解質は、小型化学電池、各種のガスセンサ、種々の電気化学素子、エレクトロクロミック表示装置あるいは、電気エネルギー貯蔵デバイスなどに広く利用



されうる可能性をもっている機能材料であるということが出来る。したがって、エネルギー変換用材料としてはさらに高いイオン導電率をもつ固体電解質、イオン・電子混合導電性を示す固体の探求、あるいはその導電機構の解明が望まれる。

文 献 ( 1980年以降の成書のみをあげる )

- 1) T. Takahashi, A. Kozawa, Ed. "Applications of Solid Electrolytes" ( JEC, press, Cleveland, 1980 )
- 2) E.C. Subbarao, Ed. " Solid Electrolytes and Their Applications " ( Plenum Press, New York, 1980 )
- 3) S. Chandra, "Superionic Solids" (North - Holland, Amsterdam, 1981 )
- 4) A. H. Heuer, L. W. Hobbs, Ed. " Science and Technology of Zirconid ( The Amer.chem.Soc, Columbus, 1981 )
- 5) J. B. Goodenough, J. Jensen, M. Kleitz, Ed. "Solid State Protonic Conductors for Fuel Cells and Sensors I & II ( Odense Univ. Press, Odense, Denmark, 1983 )
- 6) T. A. Wheat, A. Ahmand, A. K. Kuriakose, Ed. "Progress in Solid Electrolytes" ( Energy, Mines & Rosousces Canada Ottawa, 1983 )

付) "Solid State Ionics" と名付けられた学術雑誌が、1980年からNorth - Holland Publ.Co.から刊行され2年に1回おこなわれる International Conference on Solid State Ionics ( 第5回が、1985年8月にアメリカ、カリフォルニア州でおこなわれることになっている ) の Proceedings も掲載される。

## ⑦ 情報化時代のエネルギー問題

横浜国立大学工学部 太田時男

**序** わが国の経済を概括してみると、例えば1980年度では年間7億トンほどの資源・エネルギーを輸入し、その代金1400億ドルを支払い、また、これを加工して製品化したものを7000万トンほど輸出して代金1500億ドルを稼いでいる。輸入代金の半分以上が石油であり、輸出では600万台にのぼる自動車がトップを占める。世界全経済の1割を占めることになるが、わが国の経済の要諦は、(1)いかに輸入し、(2)いかに加工し、(3)いかに売るかに尽きる。この三つの点のすべてに精確な情報とその適正な処理は欠かせない。とりわけ、(2)の加工過程において80%以上を輸入に頼るエネルギーの役割は大きい。本研究は情報とエネルギーとの二大テーマを産業・経済・労働の広い視点から調べたものである。

**電力問題** 1981年度の販売電力量は4435億kwhで、近年および今後も当分の間は3.1%ほどの緩い伸び率を示すことが予想されるが、一方、最大ピーク値は1983年8月5日の9932万kwで余裕率は9.3%となったが、今後のピーク値は3.8%以上4%ほどまでの間の急激な伸びを示すだろう。これは社会の情報化により大衆の関心が一様化する傾向が強まっていることも大きな要素の一つで、冷房をかけて高校野球を楽しんだりすることがその例である。このため、発電設備や電力貯蔵設備のための投資が増え、一方では年間を通しての電力需要がそれほど大きくならないので償却のため電力料金高騰という問題が出る。

しかし、情報化のための電力需要は今度、4%以上になるという見方もある。それは現在電力弾性値が1.2ほどで、ロボット化で一基20kwのものが50万基設備され、年間7000時間働くとして700億kwh、また、大型汎用コンピューターで一基200kwのものが、50万期設置され、年間1500時間運転されるとして1500億kwhとなる。この二つだけで2200億kwhとなり、例えば、これを1990年度と想定しても全電力需要予測の34%以上となってしまい、電力需要予測の現在の値は小さすぎることになる。

電力価格とも関連するので単純なその需要予測は難しいが、電力問題が情報化社会のエネルギー問題の一つのキイとなるだろう。

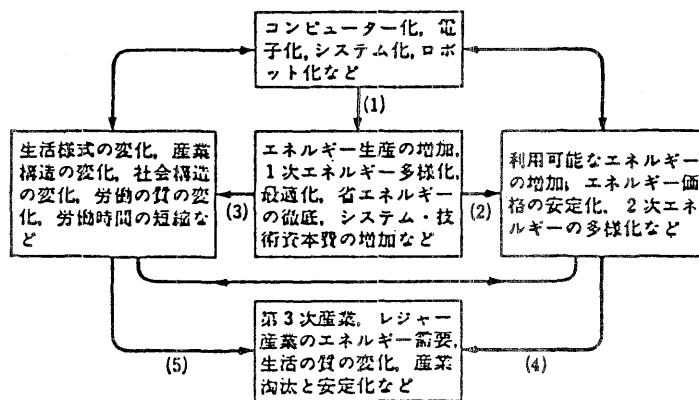
**エネルギー源** 情報化技術の普及に伴ってエネルギー源の探査に大きなインパクトが予想される。第1は油田探査の科学化による適確な予知で、埋蔵量の正確な推量によって採算価格〇ドル以上のものが幾億バレルという数値が示されるようになり、冷厳なエネルギー経済が展開されよう。このためには探査海面15km<sup>2</sup> 当り20ギガバイトという恐るべき大量の情報を処理する

必要がある。しかし、これも時間が解決する技術開発の問題である。

ソフト・エネルギーの利用は自然エネルギーの情報を適確に把握し、これをエネルギー変換システムへフィードバックすることであるが、これには情報化技術の応用が可能ではあるが制限もある。設備投資と運転電力が増加するための経済的制限である。

同様な問題は原子力に対しても成立する。この場合は石炭火力との競合であり、情報化技術は従来原子力に対しては十分取入れられてきたが、石炭火力へはこれから適正に採用されるわけである。この点から、情報化技術は石炭火力に有利に働らくことになる。

**安定化のパターン** 情報化時代においては常にエネルギー需給が安定化するパターンが現われるが、また、このパターンの時間的進行の加速・減速の変化が速くなるという一面を持っている。まず、需給安定化のパターンは図に示された流れとなる。図では、例えば、ルート：(1)→(2)→(4)ではエネルギー需給の安定化と価格の安定化によって、産業への効果と結果が示されているが、ただし、この安定化は長期間の平均にわたる安定化であって、短い時間の揺動は情報化時代の特徴であり避けられず、これに耐えうる産業体質が要望される。ルート：(1)→(3)→(4)の見方ではエネルギー価格の低レベル安定化の要素を把握するむきではロボットなどの自動化技術の産業への導入が加速され、これは社会構造へインパクトを及し、結局は、産業構造の上では第3次産業の比重を増加させ、失業問題、余暇問題、生活態様の変化などの社会的、個人的生活へのインパクトも大きいことを示す。



第1図

	1975年(実績)	2025年(予想)
第1次産業	5.9%	4.1%(30%減)
第2次産業	42.7%	41%(6%減)
第3次産業	51.5%	54.7%(4%増)

第1表

**産業構造** 第1表はシステムダイナミックスという手法によって、1975年の時点において、50年後の産業構造の変革を予測したものであるが、これにはエネルギーの供給不足が大きな要素として入っている。この他に情報化という要素を考慮するとどのようになるかを考えてみると、2000年の時点で1次産業は30%以上の減、2次産業は6%以上の減、3次

産業は4.5%以上の増というおおよその結果になる。エネルギー供給の不足といった単純な効果しか生まない要因に比し、情報化、電子化、自動化などの要因は多彩、多様な結果を生み、経済最適化システムを取ろうとして、その歪みやフィードバック効果が複雑に絡み合うため数値解析は単純ではない。

3次産業がぼっこするという要因の内にはソフト産業や研究産業といった新種のものが生れ育つということが含まれる。「頭でっかち」という3次産業へのソフト型構造になっても「文明」や「生活の利便」などへの結着は、当のソフトに対応するハードの決済によってのみ実効を持つ場合が圧倒的に多い。これが、エネルギー、1次産品が情報や労働などと深く絡み合う構造をとる原因である。

**余暇とエントロピー** 第1図を見てもわかるように産業の情報化によってもたらされる顕著な効果の一つは余暇が増加するということである。余暇の位置づけは多様である。価値観の問題でもある。産業最適化過程の副産物として余暇が出来たとすれば、それは1種のエントロピーであり、生産しない。一方、余暇が何かを生産とする立場では、それは価値の創造であり、ボーナスである。

何れにしろ、可処分時間を余暇とするならば、余暇の利用によってエネルギー需要は相当大きな影響を受けることになる。第2表には19

業 種	支 出(円)	関連エネルギー比率
印刷・出版	49,005/世帯	用紙・パルプ5.1% (全電力需要中)
旅 行	25,363/世帯	自動車16.1% (産業用を含む) 航空機0.6% (全石油需要中) 鉄道6.6% (全電力需要中)
スポーツ用品	10,343/世帯	せんい4.4% 電灯21.3% (全電力需要中)
TV・ラジオ	20,374/世帯	—

第2表

81年度の余暇関係の国民一世帯平均の支出額とわが国の関連したエネルギー需要中の比率をまとめたものである。読書と旅行は支出の双壁であるが、エネルギー需要の多いのは旅行の方である。余暇を旅行によって費すということになれば、勢いエネルギー需要は増加する。読書派か旅行派かは供給される情報によっても左右されるので一意的な予測も難しい。

**エントロピー生成率** 情報化時代の一つの特徴として、1種のエントロピーとも見なされる余暇が増える。同様にハード(資源、製品)やソフト(情報、知識など)の消費率も高くなり、価値あるものの寿命は短くなる。この結果エントロピー生成率は高くなり、廃棄されるハードやソフトのうず高いゴミ棄て場が、あちこちに出来る。世界経済は、このようにして、いかに早く価値あるものを発見し、いかに早く(他におくれぬよう)これを消費してしまうかをめぐって成立するようになる。これはエネルギーの消費率が大きくなることと比例関係にある。

高度の情報化社会では、このようにして、資源、エネルギー、あるいはソフトの何れでも、ま

だまだ、工夫したり、加工したりすることで十分な価値をもちうるものが廃棄されることになる。従って、そういうものを2次資源として利用し、成立する2次的な産業も成立しうるだろう。

**自然システム** 自然界には物理系、有機系、生物系など幾億年かかってとう汰されて出来上がった自然システムとも呼ばれるシステムが存在する。これらのシステムをよく考察すると幾つの特徴をもつ。その特徴は「非還元的である」こと、「環境の中で自己存続の機能をもつ」こと、「環境の中で自己創造の能力をもつ」こと、「システムは階層性をもち、最適に機能させている」ことである。

情報化によるエネルギー消費率、エントロピー生成率の増大などの環境破壊の速度の進む中で生き残り、パワーを持ち続けるためには、こうした自然システムに多くを学ばねばならない。

## 文 献

太田時男：情報化時代のエネルギー問題（NHKブックス，1983）