

## 技術資料

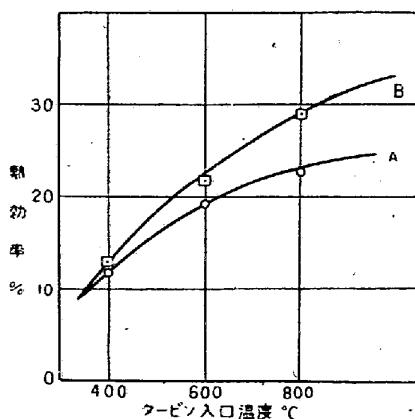
### 最近の耐熱材料について

芥川 武\*

#### I. 緒言

分解蒸溜法を行う精油装置、ディーゼル機関、ガソリン機関等の高速内燃機関、冶金工業或は珪酸鹽工業に於て使用される窯爐、鋼及び銅合金の鍛錬、押出用型材などが耐熱材料を必要とする主なものであるが、最近即ち第二次世界大戦中及び戦後に耐熱材料の著しい進歩を促し、又將來も相互に發達の約束されてゐるものにガスタービンがある。

ガスタービンは燃料と空気を混合して燃焼させる燃焼室、高温燃焼ガスのエネルギーを動力に變へるタービン翼及び翼車、燃焼用空気を壓縮して供給するための壓縮機及び廢ガスの顯熱を利用して空気或は燃料ガスを豫熱する再生器から成つてゐるが、この内特に最高級の耐熱材料を必要とするものはタービン翼及び翼車である。翼、翼車は單に高温度のガスに曝されるだけでなく、高速回轉のために加はる遠心引張應力を主とし、その他振動、振り、曲げ等の加はつた複雑な應力を受ける。若し高温度に於ける耐熱性は充分あり、しかも強度の大なる材料が得られなければ如何に設計に工夫をしてもガスタービンの性能を向上させることが出来ない。ガスタービンの効率を支配する最大の因子はタービンに入る燃焼ガスの温度で、その關係を適當な假定を用ひ計算に依て求めたものが第1圖である。これは壓縮機の効率を入



第 1 圖

口、出口及び燃焼器の損失を含めて 83 % とし、又タービン効率を 87 %、燃焼効率を 90 %、機械効率を 95 % と假定したものである。圖の A は再生器のない場合であり、又 B は効率 75 %、壓力損失 0.5kg/cm<sup>2</sup> の再生器を設備して熱交換を行つた場合である。

現在熱効率の優秀な船用或は發電用ディーゼル機関の正味熱効率は 35~38 %、ボイラーを含めた蒸氣タービンでは 25~33 % であるから、ガスタービンの入口温度を 800° に設計すれば効率的には蒸氣タービンに匹敵し、ディーゼル機関に稍劣るけれども耐熱材料の進歩に依てタービン入口温度を更に上げることが出来る様になれば、ディーゼル機関より更に優れた効率を發揮出来る可能性もある。

その上燃焼として高爐ガス、發生爐ガス、C 重油、微粉炭の如く安價なものを使用することが出来、又同一馬力に對して重量が遙に小さいために、たとひ高價な耐熱材料を使用するとしても全體としての建造費が極めて安價であること等の利點をもつてゐる。従てこれまでは航空機用として發達して來たのであるが、今後は寧ろ船用機関、發電所原動機、精油工場動力、製鐵高爐送風機など廣い範圍に利用せられるであらうし、機關車、自動車などにもその應用が試みられてゐる狀況である。これらのガスタービンに對しては上述の如く特に高温強度を必要とする關係から世界各國特に米國で耐熱材料の研究が盛んとなり、最近數年間に於けるこの方面の進歩には目覺しいものがあるので以下これを紹介する。但し戦時中我國で行はれた耐熱鋼の研究については取りまとめた文献<sup>2), 3)</sup>があるので省略することとする。

#### II. 耐熱材料の性質

耐熱材料として必要な性質の内主なものを設計者の立場から見ると、

- (1) 使用温度に於て酸化、腐蝕に耐へること。
- (2) 使用温度(最高)に於て加はる應力に耐へること。

\* 東京大學第一工學部

(3) 必要にして十分な寿命を有すること。

(4) 使用中の變形が許容し得る限度を越へないこと。

の四条件であるが、これらの要求を満足するために材料供給者として検査又は試験すべき項目には次の如きものがある。

(1) 室温に於ける機械的性質即ち引張試験値、硬度、衝撃値など。

(2) 高温荷重試験値、この内特に重要なのはクリープ試験値、引張破断試験値 (Stress-rupture test data) 及び熱間の疲労試験値である。

(3) 表面の安定性、即ち耐酸化性或は高温ガスに對する耐蝕性。

(4) 組織の安定性、即ち炭化物の固溶、折出、球状化、焼戻脆性など熱處理に關する事項。

(5) 使用温度に於ける安定性、即ち使用温度に於て組織の變化に伴う靱性の變化の有無。

(6) 使用後はじめの室温と於ける特性、例へば靱性、硬度などを保持するか否か。

(7) 熱間加工、機械加工或は熔接性の良否、加工に適する熱處理方法など。

この内ガスタービン材料として現在最も問題とされてゐるのはクリープ試験及び高温破断試験である。クリー

プ試験については種々の鋼につき種々の温度で種々の試験値が報せられてゐるが、クリープ限の定義については著者に依てそれぞれ異つたものを採用してゐるから注意せねばならない。試験温度に試料を厳密に保持しつゝ一定應力を加え、クリープの第二段階即ち定常クリープ速度の状態に於て時間對伸び曲線の傾斜からその應力に對するクリープ速度を求める。同じ温度でいくつかの異なる荷重の下にクリープ速度を測定しクリープ速度と應力の關係を兩對數グラフを描き、兩者が直線的關係にあるものとして一定のクリープ速度に對應する應力を以てクリープ限とする。従來ドイツ及び我國で比較的廣く採用されてゐたクリープ限は荷重を加へてから 3~6 時間の間の平均クリープ速度が 1 時間に  $50 \times 10^{-4} \%$  又は  $33.3 \times 10^{-4} \%$  となる應力を以てその鋼のクリープ限とする定義である。第 1 表は寺町忠夫氏が各種クリープ限の定義とこれ等相互の比較を行つた結果を示す。使用された試料は FWV. II 鋼 (C=0.45, Si=0.25, Mn=0.60, Ni=15, Cr=16, W=3%) で 1000°C より油焼入した後、900°C にて 2 時間焼戻を施したものである。

然し 3~6 時間と云う短時間にては炭素鋼の場合は兎も角耐熱材料の如き高合金鋼ではクリープの定常状態にならない。一定のクリープ速度となるには  $10^3$  時間以上を要するのである。船上或は陸上用機關の如く要求せら

第 1 表 各種クリープ限の測定結果の比較 (FWV. II 鋼について)

|                       | 測定時間 (h)                        | クリープ限の定義                               | 500° にて            |                     | 600° にて            |                     | 700° にて            |                     |
|-----------------------|---------------------------------|--|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                       |                                 |  | kg/mm <sup>2</sup> | KWI No.1 を 100 とし て | kg/mm <sup>2</sup> | KWI No.1 を 100 とし て | kg/mm <sup>2</sup> | KWI No.1 を 100 とし て |
| 佐々川                   | 0~1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> | クリープを生じない最大應力                          | 12.6±0.3           | 60                  | 6.2±0.9            | 37                  | 0.6±1.1            | 8                   |
| 須永                    | 3~6                             | 100×10 <sup>-4</sup> % per hr          | 21.6±1.1           | 103                 | 17.4±0.9           | 105                 | 9.0±0.6            | 118                 |
| KWI No.1              | 3~6                             | 50×10 <sup>-4</sup> % per hr           | 21.0±1.1           | 100                 | 16.6±0.9           | 100                 | 7.6±0.6            | 100                 |
| KWI No.2              | 5~10                            | 30×10 <sup>-4</sup> % per hr           | 20.8±1.1           | 99                  | 16.2±1.1           | 97                  | 7.2±0.6            | 95                  |
| KWI No.3              | 25~35                           | 15×10 <sup>-4</sup> % per hr           | 20.7±0.6           | 99                  | 16.3±1.3           | 98                  | 7.4±0.7            | 97                  |
| 寺町                    | 3~6                             | 33.3×10 <sup>-4</sup> % per hr         | 20.0±1.1           | 95                  | 15.7±0.9           | 95                  | 6.6±0.6            | 87                  |
| Bureau Veritas (佛)    | 25~35                           | 5×10 <sup>-4</sup> % per hr            | 18.8±0.6           | 90                  | 14.3±1.3           | 88                  | 6.2±0.7            | 82                  |
| DVMA 117/118 (獨)      | 25~35                           | 10×10 <sup>-4</sup> % per hr           | 20.2±0.6           | 96                  | 15.5±1.3           | 94                  | 7.1±0.7            | 93                  |
| Zürich Lab. (スイス)     | 24~48                           | 10×10 <sup>-4</sup> % per hr           | 20.6±0.9           | 98                  | 15.6±0.9           | 94                  | 7.3±0.5            | 96                  |
| Hatfield (英)          | 24~72                           | 1×10 <sup>-4</sup> % per hr            | 11.0±0.6           | 52                  | 8.9±1.2            | 54                  | 3.0±0.8            | 40                  |
| Siebl u. Ulrich       | 50                              | 永久伸0.2%の點で 1×10 <sup>-4</sup> % per hr | 20~21              | 100                 | 15~16              | 97                  | 7                  | 92                  |
| Juretzek u. Sauerwald |                                 | 兩對數座標で σ 及 C (クリープ速度) の二直線の交點に相當する應力   | 20                 | 95                  | 15                 | 90                  | 7                  | 92                  |

れる寿命が  $10^4$  時間又はそれ以上の場合には少くも 1000 時間以上のクリーブ試験を行ひ、1 時間當りの伸び速度が  $10^{-4}\%/hr$  又は  $10^{-5}\%/hr$  となる応力を以てクリーブ限とする方法を探らねばならない。

クリーブ試験と並行して米國で行はれてゐるのは荷重破断試験である。これは一組の試験片にそれぞれ適宜な荷重を加へ、一定温度に於て破断に到るまでの時間を測定するもので、破断時間が 2~3 時間乃至數千時間の範圍にある如く荷重を選ぶ。この試験に依れば一定時間に對應する破断時間 (Stress-rupture time) の他に材料の靱性、その温度、應力に於ける組織或は表面の安定性等を知ることが出来る。(クリーブ限も伸びの測定に依り得られる) 材料が試験中に内部的な組織の變化又は表面の酸化などを伴はなければクリーブの場合と同様應力と破断時間との關係は兩對數座標で直線的な關係が得られるので普通實驗室では 2000 時間以内の測定を行ひ、その結果を外挿して 10,000 時間或は 100,000 時間の破断應力を求め、これを設計の基準にしてゐる。但し log-log 座標に依る外挿はあくまでも實用的な性質のものであるから設計の際は 1.5~2 前後の安全係数を乘じてゐる様である。

次に耐酸化性について云へば主としてこれに寄與する元素は、Cr, Al 及び Si で、耐熱鋼では一般に Cr が主體となつてゐる。Cr が鐵の耐酸化性に及ぶ作用は三島、梶山兩氏<sup>9)</sup>に依れば純鐵の場合に生ずるスケールは  $Fe_2O_3$  を主體とする最外層、 $Fe_3O_4$  を主とする第二層に對し Wüstite を主體とする第三層が極めて厚く、しかもこの層は Wüstite の格子缺陷のために  $Fe^{++}$  の擴散が容易に行はれ、内部を保護する効果が乏しい。然るに Cr を加へると Wüstite 層の更に内側にスピネル型結晶構造を有する  $(FeO \cdot (Fe, Cr)_2O_3)$  層を生じ、Wüstite 層は次第に消滅する。更に Cr 量が増せば (10~15% の間で) 最内側に  $Cr_2O_3$  層が生成し  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $FeO \cdot (Fe, Cr)_2O_3$  の各層の厚みは急激に減少する。

結局高クロム鋼では  $Cr_2O_3$  の緻密な薄層が生じることが耐酸化性の主原因であつてこれを充分に發達させるには Cr 18% 以上を必要とする。更に高温度で長時間加熱されて性質の著しく變化しないための條件としてオーステナイトを安定化せしめる目的を主として Ni その他の元素が加へられてゐるのである。

### III. 通常の耐熱鋼の成分と性質

ガスタービン用高強度耐熱鋼の組成及び性質を説明するに先立ち比較對照のため從來使用されてゐたクロム系及びニッケルクロム系耐熱鋼の成分と物理的及び機械的

性質の一覽表を A.I.S.I 規格に従て示すと第 2 表の通りである。耐熱性に就ては表のスケール生成温度の欄で知られる如く 16% クロム鋼 (Type 430) でも  $850^\circ$  以下では殆ど酸化せず、25% クロム鋼 (Type 446) は 1000 $^\circ$  以上の使用に耐へる。然しこれらのフェライト (或はマルテンサイト) 系クロム鋼は熱間強度が極めて小さく  $650^\circ$  で  $10^{-4}\%/hr$  のクリーブ限が  $1\sim 1.5\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $730^\circ$  では  $1\text{kg}/\text{mm}^2$  以下に過ぎない。オーステナイト系耐熱鋼はクリーブ限に關してはフェライト鋼の 2~5 倍の値を有し、殊に Mo を含むもの (Type 316) は單純 Ni-Cr 鋼に比して高いクリーブ限を有することが知られる。我國で (他の國でも大體同様) 航空機用排氣弁として盛んに使用せられ、又初期の排氣タービン及びガスタービン材料として利用せられてゐた舊航空規格 1301 (C 0.35~0.45%, Si 1.5~2.5%, Mn < 0.6%, Ni 13~15%, Cr 14~16%, W 2~3%) も Type 316 に類似するものでこれより稍高い高温強度を示す。又 Type 310 は優秀な耐熱性を有し而も薄板加工が可能なのでガスタービン用ノズルブレード材などとして今日でも重用されてゐる。

### IV. 高強度耐熱材料

現在主として米國で使用せられ、或は試験されてゐる高強度耐熱材料を分類すると大體次の 5 種類<sup>5)</sup> になる。

**第 1 類 Fe-Cr-Ni を主體とするオーステナイト系合金 (鍛造材):** Cr 量は 20% 前後で Ni 量は 8~30% の範圍にある。Cr 量の低いものは  $400^\circ\sim 600^\circ$  で長時間保たれると  $\alpha$  相又は  $\sigma$  相を析出する惧れがある。Cr 20% に對し Ni 20% 以上とすればこの心配はない。高温強度を増大せしめるために Mo 又は W を含みその他 Nb, Ti, Ta, Al 又は Cu を添加し、時効硬化性の増大を畫つたものが多い、この類の代表的な合金としては 19-9DL, Timken 16-25-6<sup>4)</sup> 及び Tinidur (獨) を擧げることが出来る。

**第 2 類 Fe-Ni-Cr-Co を主體とするオーステナイト系合金 (鍛造材):** 第 1 類に對して Co を添加したもので Co 量は 20% 附近が多い。後述の如く  $700^\circ$  以上の高温強度を増すには Co の添加が有效である。この類の代表的なものとしては G18B (英), N-155, S-816 がある。C 量 0.1% 附近のものと 0.4% 附近のものがあるが、熱間強度に對しては後者が優れ、熔接性、塑性加工性は低炭素の方が有利であるから、これは使用目的に應じて定められる。

**第 3 類 高ニッケル合金 (鍛造材又は鑄造材):** 電熱線として知られてゐる Ni-Cr 合金に Nb, Ti, Al などを添加

第 2 表

| AISI Type No.                        | 302   | 316                       | 309                       | 310                       | 410  | 416                  | 430                      | 446                    | 501                                |
|--------------------------------------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------------|
| C %                                  | 0.08~0.20   | < 0.10                    | < 0.20                    | < 0.25                    | < 0.15                                     | < 0.15               | < 0.12                   | < 0.35                 | > 0.10                             |
| Mn %                                 | < 2.00  | < 2.00                    | < 2.00                    | < 2.00                    | < 1.00                                     | < 1.25               | < 1.00                   | < 1.00                 | < 1.00                             |
| Si %                                 | < 1.00  | < 1.00                    | < 1.00                    | < 1.50                    | < 1.00                                     | < 1.00               | < 1.00                   | < 1.00                 | < 1.00                             |
| Ni %                                 | 8.00<br>~10.00  | 10.00<br>~14.00           | 12.00<br>~15.00           | 19.00<br>~22.00           | —  | —                    | —                        | —                      | —                                  |
| Cr %                                 | 17.00<br>~19.00                                       | 16.00<br>~18.00           | 22.00<br>~24.00           | 24.00<br>~26.00           | 11.50<br>~13.50                            | 12.00<br>~14.00      | 14.00<br>~18.00          | 23.00<br>~27.00        | 4.00~6.00                          |
| Mo %                                 | —   | 1.75~2.75                 | —                         | —                         | —  | —                    | —                        | —                      | —                                  |
| N %                                  | —   | —                         | —                         | —                         | —  | —                    | —                        | < 0.25                 | —                                  |
| 比重                                   | 7.9   | 7.9                       | 7.9                       | 7.9                       | 7.6  | 7.6                  | 7.6                      | 7.4                    | 7.6                                |
| 比抵抗 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (20°C) | 72  | 74                        | 78                        | 80                        | 57   | 58                   | 60                       | 67                     | 40                                 |
| 融 點 (°C)                             | 1400<br>~1450   | 1370<br>~1400             | 1230<br>~1450             | 1400<br>~1450             | 1480<br>~1530                              | 1480<br>~1530        | 1425<br>~1530            | 1425<br>~1530          | 1480<br>~1540                      |
| 比 熱 Cal/°C.gr                        | 0.12  | 0.12                      | 0.12                      | 0.12                      | 0.11                                       | 0.11                 | 0.11                     | 0.12                   | 0.11                               |
| 熱 導 度 (C.G.S) 100°                   | 0.0390  | 0.0373                    | 0.033                     | 0.033                     | 0.0595                                     | 0.0595               | 0.0625                   | 0.0500                 | 0.0875                             |
| 500°                                 | 0.0512  | 0.0512                    | 0.045                     | 0.045                     | 0.0686                                     | 0.0686               | 0.0627                   | 0.0583                 | 0.0807                             |
| 熱膨脹係数(0~100°)                        | $9.6 \times 10^{-6}$                                  | $8.9 \times 10^{-6}$      | $8.3 \times 10^{-6}$      | $8.0 \times 10^{-6}$      | $5.5 \times 10^{-6}$                       | $5.5 \times 10^{-6}$ | $5.0 \times 10^{-6}$     | $5.9 \times 10^{-6}$   | $6.2 \times 10^{-6}$               |
| 引張強さ kg/mm <sup>2</sup>              | 53~67   | 56~67                     | 56~70                     | 63~74                     | 46~60                                      | —                    | 49~63                    | 53~67                  | 81~123**                           |
| 降伏點 kg/mm <sup>2</sup>               | 21~32   | 21~32                     | 25~35                     | 28~42                     | 25~32                                      | —                    | 25~39                    | 32~42                  | 63~95                              |
| 縦弾性率 kg/mm <sup>2</sup>              | 19500   | 19500                     | 20000                     | 20000                     | 20500                                      | —                    | 20500                    | 20500                  | 20500                              |
| 伸 (2時につき) %                          | 60~50   | 60~40                     | 50~40                     | 45~30                     | 35~20                                      | —                    | 35~20                    | 30~20                  | 20~15                              |
| 絞 %                                  | 75~60   | 70~55                     | 65~50                     | 65~45                     | 75~60                                      | —                    | 60~40                    | 50~40                  | 60~50                              |
| アイソット ft-lb                          | 110~80  | 100~80                    | 110~70                    | 60~50                     | 100~60                                     | —                    | —                        | —                      | —                                  |
| 疲 勞 限 kg/mm <sup>2</sup>             | 21~39   | 21~39                     | 24.5~60                   | —                         | 21~35                                      | —                    | 25~35                    | 21~39                  | —                                  |
| ブリネル硬度                               | 135~185   | 135~185                   | 150~185                   | 150~185                   | 135~165                                    | —                    | 145~185                  | 140~185                | 240~370                            |
| ロツクウェル硬度                             | B75~90  | B75~90                    | B80~90                    | B80~90                    | B75~85                                     | —                    | B75~90                   | B80~90                 | —                                  |
| オルゼン絞り値 (in)                         | 0.5~0.4   | 0.4~0.5                   | 0.3~0.4                   | —                         | 0.4~0.3                                    | —                    | —                        | —                      | —                                  |
| * クリープ限 kg/mm <sup>2</sup>           | (538°) 12.0<br>(649°) 4.9<br>(732°) 2.1<br>(816°) 0.6 | 17.5<br>7.7<br>3.7<br>1.4 | 12.0<br>6.3<br>2.1<br>0.7 | 12.0<br>6.3<br>2.4<br>0.7 | 8.5<br>1.4<br>1.0<br>—                     | —                    | 6.0<br>1.55<br>0.85<br>— | 4.2<br>1.1<br>0.4<br>— | 6.3<br>1.4<br>1.0<br>—             |
| スケール生成温度 °C                          | 880°  | 900°                      | 1050<br>~1100             | 1100<br>~1120°            | 650~100                                    | 650~100              | 840~880                  | 1100                   | 600~630                            |
| 焼 銑 { 温 度                            | 1040<br>~1100   | 1044<br>~1120             | 1050<br>~1150             | 1050<br>~1150             | 810~890°から600°<br>まで爐冷, 又は810<br>~650°から空冷 | —                    | 810~870                  | 780~870                | 870~840°<br>爐冷又は<br>710~740°<br>空冷 |
| { 冷却法                                | 急冷  | 急冷                        | 急冷                        | 急冷                        | —  | —                    | 空冷                       | 急冷                     | —                                  |

して時効硬化性を與へたものに Inconel X 及び Nimonic 80 があり主として鍛錬材として使用されてゐる。

又耐鹽酸材料として知られてゐる Ni-Mo 系の Hastelloy 合金にも高强度耐熱合金に應用されるものがある。

第4類 ステライト系合金(主として鑄造材)

Co-Cr-Mo (又は W) 系合金で通常のステライトに比しC量は低く鑄造材としても 0.4%が普通であるが1%内外に上げたものもある。Ni量とCo量は種々あるが總括して云へば Cr 23%, Ni+Co 60~70%, Mo+W 6~8% で Co は 40%以上含まれてゐる。C量の低いものは熱間及冷間加工して薄板又は線にすることも可能である。然し現在は一般に C 0.4~0.5%を基準とし、蠟型法 (lost-wax process) その他の精密鑄造法に依り極めて寸法公差の少い、且表面平滑度良く機械加工を要しない程度の翼をこの種合金で製造してゐる。特に 750°以上の高温材としては鍛造材(第1~第2類)では得られない高强度をもつてゐる。従つてこの類の合金は現在

實用に供せられてゐる最高級の耐熱材料である。その代表的なものは X40 であろう。

第5類 Cr 基鑄造合金

Cr 60%, Fe 15~25%, Mo 15~25%, の Cr-Mo-Fe 合金は新しく登場した高級耐熱材料であつて 800° 以上でステライト系より更に高い荷重破斷値を示した結果が報告されてゐる。然しそのデータは可成バラつきがあり、その原因として熔解、鑄造の技術が困難なことが擧げられてゐる。又常温に於て非常に脆いことがあり、これは原料の純度及び結晶程度に關係すると云はれてゐる。従て今後純粋な材料を用い、熔解及び鑄造を真空で行う技術が発達すればこの合金も相當に有望と考へられる。

第3表は以上第1類乃至第5類の合金の成分(成るべ

第2表備考

\* クリープ限は 10,000h に 1%の伸速度の應力  
\*\* 501 の機械的性質は焼入、焼戻材につき記す、その他はすべて焼鈍材とす。

く代表的な値)を集めたもので戦時中以來如何にこの方面の研究が盛んであつたかを物語つてゐる。イギリス、

ドイツ等の材料については資料が乏しかつたので完全にまとめることが出来ないのを遺憾とする。

第 3 表  
第1類 Fe-Cr-Ni を主成分とするオーステナイト系合金 (鍛錬材)

|                   | C      | Mn   | Si   | Cr    | Ni   | Mo   | W    | Cb   | Ti   | N    | Co | Fe   | その他     |
|-------------------|--------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|----|------|---------|
| 19-9 DL           | 0.3    | 0.6  | 0.7  | 19    | 9    | 1.3  | 1.2  | 0.4  | 0.2  |      |    | Bal. |         |
| 234A5             | (0.38) | 4.7  | 0.30 | 18.52 | 4.55 | 1.35 | 1.34 | 0.57 |      |      |    | Bal. |         |
| GT 45             | (0.08) | 1.25 | 0.5  | 17.3  | 13.8 | 2.9  |      | 0.45 | 0.30 |      |    | Bal. | Cu 3.1) |
| S 495             | 0.5    | 0.7  | 0.9  | 15    | 20   | 4    | 4    | 4    |      |      |    | Bal. |         |
| r Columbium       | 0.4    | 0.7  | 1.8  | 15    | 24   | 4    |      | 4    |      |      |    | Bal. |         |
| ATV-3             | 0.4    | 1.4  | 1.2  | 15    | 27.4 |      | 4    |      |      |      |    | Bal. |         |
| Timken16-25-6     | 0.1    | 1.5  | 0.9  | 16    | 25   | 6    |      |      |      | 0.15 |    | Bal. |         |
| TE                | 0.1    | 0.7  | 0.5  | 20    | 30   | 4    | 4    |      |      | 0.15 |    | Bal. | Ta1.9   |
| Disalloy          | 0.03   | 0.5  | 0.5  | 13    | 25   | 3    |      |      | 2.3  |      |    | Bal. | A10.6   |
| Refractalloy B    | 0.1    | 2    |      | 25    | 30   | 8    |      |      |      |      |    | Bal. |         |
| イ 301 (H)         | 0.4    | 0.5  | 2.0  | 15    | 14   |      | 2.5  |      |      |      |    | Bal. |         |
| イ 306 (H)         | 0.1    | 0.5  | 1.2  | 17    | 9    | 0.5  | 1.2  |      | 0.3  |      |    | Bal. |         |
| Stayblade (英)     | 0.2    | 0.6  | 1.0  | 20    | 8.5  |      |      |      | 1.2  |      |    | Bal. |         |
| H.R. Crown Max(英) | 0.2    | 0.4  | 1.6  | 23    | 12   |      | 3    |      |      |      |    | Bal. |         |
| Rex. 78 (英)       | 0.7    | 0.8  | 0.7  | 14    | 18   | 3.75 |      |      | 0.65 |      |    | Bal. | Cu 3.6  |
| Tinidur (獨)       | 0.1    | 0.3  | 0.5  | 15    | 20   |      |      |      | 1.7  |      |    | Bal. |         |

第2類 Fe-Cr-Ni-Co を主成分とするオーステナイト系合金 (鍛錬材)

|                               |      |     |     |    |    |     |     |     |     |      |    |      |       |
|-------------------------------|------|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|------|----|------|-------|
| L <sub>1</sub> T <sub>2</sub> | 0.3  | 0.6 | 0.6 | 14 | 33 | 3.5 | 2.5 |     |     |      | 10 | Bal. |       |
| N-153                         | 0.4  | 1.8 | 0.5 | 16 | 15 | 3   | 2   | 1   |     | 0.10 | 13 | Bal. |       |
| LowC N-153                    | 0.1  | 1.5 | 0.5 | 15 | 15 | 3   | 2   | 1   |     | 0.10 | 13 | Bal. |       |
| S-497                         | 0.4  | 0.5 | 0.6 | 15 | 20 | 4   | 4   | 4   |     |      | 20 | Bal. |       |
| S-590                         | 0.5  | 0.9 | 0.6 | 20 | 20 | 4   | 4   | 4   |     |      | 20 | Bal. |       |
| N-154                         | 0.3  | 1.6 | 0.7 | 16 | 24 | 3   | 2   | 1   |     | 0.10 | 21 | Bal. |       |
| N-155                         | 0.4  | 1.5 | 0.7 | 20 | 20 | 3   | 2   | 1   |     | 0.10 | 20 | Bal. |       |
| LowC N-155                    | 0.15 | 1.5 | 0.5 | 20 | 20 | 3   | 2   | 1   |     | 0.12 | 20 | Bal. |       |
| N-156                         | 0.3  | 1.5 | 0.6 | 16 | 33 | 3   | 2   | 1   |     | 0.04 | 24 | Bal. |       |
| H-418                         | 0.4  | 1.5 | 0.6 | 16 | 25 | 3   | 2   |     |     |      | 25 | Bal. |       |
| H-355                         | 0.3  | 1.5 | 0.6 | 20 | 25 | 3   |     |     |     |      | 25 | Bal. |       |
| H-439                         | 0.4  | 1.5 | 0.6 | 20 | 30 | 5   |     |     |     |      | 30 | Bal. |       |
| Refractalloy 26               | 0.3  | 0.7 | 0.7 | 18 | 37 | 3   |     |     | 3   |      | 20 | Bal. | A10.6 |
| Refractalloy                  | 0.1  | 2   | 0.2 | 20 | 20 | 8   | 4   |     |     |      | 30 | Bal. |       |
| S-816                         | 0.4  | 0.6 | 0.3 | 20 | 20 | 3   | 4   | 4   |     |      | 45 | Bal. |       |
| 100NT-2                       | 1.0  | 1.5 | 0.5 | 20 | 30 | 3   | 2.2 |     |     |      | 20 | Bal. | Ta2   |
| 110N-2                        | 1.1  | 1.5 | 1   | 21 | 30 | 3   | 2.2 | 1.0 |     | 0.07 | 21 | Bal. |       |
| K42B                          | 0.6  | 0.7 | 0.3 | 18 | 42 |     |     |     | 2.6 |      | 22 | Bal. | A10.6 |
| G18B (英)                      | 0.4  | 0.8 | 1.0 | 13 | 13 | 2.0 | 2.5 | 3.0 |     |      | 10 | Bal. |       |

第3類 高ニッケル合金 (鍛錬材)

|             |      |     |     |    |     |    |  |   |     |  |  |   |       |
|-------------|------|-----|-----|----|-----|----|--|---|-----|--|--|---|-------|
| Inconel X   | 0.05 | 0.5 | 0.4 | 15 | >70 |    |  | 1 | 2.5 |  |  | 7 | A10.7 |
| Nimonic 80  | 0.04 | 0.6 | 0.5 | 21 | 74  |    |  |   | 2.5 |  |  |   | A10.7 |
| Hastelloy B | 0.05 | 0.6 | 0.2 |    | 65  | 29 |  |   |     |  |  | 5 |       |

第4類 ステライト系合金 (主として鑄造材)

|            |      |     |     |    |    |   |     |   |  |      |    |      |                  |
|------------|------|-----|-----|----|----|---|-----|---|--|------|----|------|------------------|
| Vitallium  | 0.25 | 1   | 0.6 | 28 | 2  | 6 |     |   |  |      | 64 |      |                  |
| 422-19     | 0.4  | 0.4 | 0.5 | 25 | 16 | 6 |     |   |  |      | 52 | 0.65 | CrB <sub>2</sub> |
| X-41       | 0.5  | 0.5 | 0.5 | 25 | 8  |   | 7.5 |   |  |      | 55 |      | 1.8              |
| 61         | 0.4  | 0.3 | 0.6 | 24 | 2  |   | 6   |   |  |      | 68 |      |                  |
| 6059       | 0.5  | 0.2 | 0.8 | 26 | 33 | 6 |     |   |  |      | 34 |      |                  |
| X-40       | 0.5  | 0.6 | 0.7 | 25 | 10 |   | 7   |   |  |      | 55 | 0.6  |                  |
| X-50       | 0.8  | 0.6 | 0.5 | 23 | 20 |   | 12  |   |  |      | 40 | Bal. |                  |
| S-816      | 0.4  | 0.6 | 0.3 | 20 | 20 | 3 | 4   | 4 |  |      | 45 | Bal. |                  |
| (100NT-2)  | 1.0  | 1.5 | 0.5 | 20 | 30 | 3 | 2.2 |   |  |      | 20 | Bal. | Ta2)             |
| (110NT-2)  | 1.1  | 1.5 | 1   | 21 | 30 | 3 | 2.2 | 1 |  | 0.07 | 21 | Bal. |                  |
| (111VT2-2) | 1.11 |     |     | 23 |    | 6 |     |   |  |      | 67 |      | Ta2)             |
| (73J)      | 0.73 | 1   |     | 23 | 6  | 6 |     |   |  |      | 60 |      | Ta2)             |
| (36J)      | 0.36 | 1   |     | 23 | 6  | 6 |     |   |  |      | 60 |      | Ta2)             |

第5類 Cr-Mo-Fe 合金 (鑄造材)

|        |      |  |  |    |  |    |  |  |  |  |    |  |  |
|--------|------|--|--|----|--|----|--|--|--|--|----|--|--|
| CM 469 | 0.03 |  |  | 60 |  | 25 |  |  |  |  | 14 |  |  |
|--------|------|--|--|----|--|----|--|--|--|--|----|--|--|

さて以上の各合金の高温度に於ける性質、殊に熱間強度であるがこれは種々の因子に依て影響を受ける。第一に Ni, Cr, Co, W, Mo, Nb などの特殊合金元素が同一であつても、C, Mn, N など普通に含まれる元素の影響も亦無視し得ぬ程の大きさをもつてゐる。第二に高温強度を上げるためにとられてゐる方法は単に成分だけの調節ではなく加工と熱処理がこれに深い関係をもつてゐる。これらの高合金耐熱鋼は再結晶温度が高いために 650~750° で加工した場合加工硬化を起し、而もその効果は 650° 内外に再加熱するも依然残つてゐる、これを利用したものが熱間加工硬化処理又は黒打ち (hot-cold working) と稱される方法で、通常の高温加工 (1200°~1100° で行う) の後温度を下げ 650~750° で仕上鍛錬又は壓延を施すか、或は一定の高温加工 (粗仕上) を行つた後一旦冷却して寸法検査した上再び 650~700° に加熱して豫め定めた量の仕上型鍛錬 (約 20%) を行うのである。後者の方が加工度が一定し従て成品の性質が希望通りになり、且つ寸法公差 +0.5mm~-0.0mm 以内の極めて精密な寸法に仕上げることが可能であるから機械加工の手間を大いに省くと云う利點もある。尙この hot-cold working したものは加工の際生じた内部應力を除くために 650° で約 6 時間の歪取焼鈍を行うのが普通である。hot-cold working の効果は C 量も合金元素量も低い方が顯著であり、しかも龜裂の最も生ずる惧れが少い利點がある。従て 19-9 DL の如き合金がこの處理に最も適して居り、第 4 表で知られる通り 650° の破斷強度は Inconel X を除く他の高合金材料に比してむしろ優れた値を示してゐる。即ち 100h 及 1000h の破斷強度は hot cold work したものの 42.2 及 35.1kg/mm<sup>2</sup> に對し、しないものは 30kg/mm<sup>2</sup> 及 24.5kg/mm<sup>2</sup> である。尙次に述べる Solution treatment の後に hot-cold working を行う方法もあるが破斷までの伸びの値は小さくなる。何れにせよ hot-cold working の効果が大きいのは 650°~700° 以下であるから 700° 以上で使

用する材料にはこの方式が有利とは云へない。これに對して高温度で有効な強度増大法は溶體化處理及び時効處理 (solution treatment and aging) の組合せに依る熱處理である。これには種々の合金元素が關係し、折出時効の機構については尙明らかでない點も少くないが、現象的に云へば Solution の温度が影響を有し、S-590, N-155 等ではこれを高くする程 300° 内外の破斷強度を上げる効果がある<sup>6)</sup>。然し融點に接近するので温度調節が困難となること、變形が大きくなること、或は割れを發生する危険があるので實際的には最適温度より稍低い温度を選んでゐる。時効處理は特に行はないで使用中に折出時効を進行させる場合もあるが、最も多いのは使用又は試験される温度に豫め數時間乃至數十時間時効處理する方法である。鑄造合金の場合は鑄造のまま使用するか又は鑄造が solution treatment を兼ね、時効處理は鑄造材よりも稍高温で 750° に 50 時間内外の處理を施すのが普通である。Inconel X にも種々の熱處理法があるが 600°C 以上の高温強度に對してはやはり 1150° × 2~4hr の solution treatment を行ひ、次に時効處理を 800~830° × 24hr 及び 700° × 約 20hr で二段に施すのが最も有效であるとされてゐる。この合金は 800° 附近に長時間保つと過時効状態となるので破斷應力は時間と共に著しく低下する。耐熱材料の熱間強度に影響を及ぼす第四の因子に結晶粒度がある。特に精密鑄造材に於て結晶粒度は破斷強度にもクリープ限にも影響を有し、結晶粒の粗大な方が高温で強度が大である。但し疲労及び酸化その他の腐蝕に對しては粗粒材は好ましくない。粒度は鑄型の豫熱温度に依て變化するが、一例を挙げると 20,000 psi (約 14kg/mm<sup>2</sup>) の應力で 1500°F (816°C) に於ける破斷時間が鑄型を豫熱した場合には 400 時間、豫熱しない場合には 100 時間と云う結果が Vitallium について報告せられてゐる。その他鑄造試験片の大きさも關係するが普通は直径 1/4" の試験片で、之が 1/2" に増した程度では殆ど變化はない。

第 4 表 破 斷 應 力 及 伸 び

| 材 料     | 温 度  |     | 10h                |     | 100h               |     | 1000h              |     | 處 理  |
|---------|------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|--|
|         | °F   | °C  | kg/mm <sup>2</sup> | %   | kg/mm <sup>2</sup> | %   | kg/mm <sup>2</sup> | %   |  |
| 19-9 DL | 1200 | 649 | 49.2               | 7.0 | 42.2               | 4.3 | 35.1               | 2.5 | { 2055°~1300°F (1125~705°C) 鍛錬, 2100°F<br>1h 空冷; 1200°F 壓延; 1200°F 歪取空冷<br>2250°F (1230°C) 1/2h 油冷; 1500°F 50h                               |
|         | 1350 | 732 | 42.2               | 4.0 | 24.6               | 4.0 | 14.4               | 4.0 |  |
|         | 1500 | 816 | 12.3               | 5.0 | 9.3                | 4.0 | 7.0                | 3.0 |  |
| S-495   | 1200 | 649 | 38.0               | 25  | 24.6               | 18  | 18.3               | 6   | 2200°F (1205°C) 鍛錬後空冷; 1400°F 仕上鍛錬<br>2250°F (1230°C) 2h 水冷; 1400°F 50h<br>2250~2400°F 2h 水冷; 1400~1500°F 16~50h<br>2250°F 2h 水冷; 1600°F 50h |
|         | 1350 | 732 | 23.2*              | 28  | 19.7*              | 20  | 16.9*              | —   |  |
|         | 1500 | 816 | 16.9               | 30  | 12.9               | 27  | 10.0               | 21  |  |
|         | 1600 | 871 | 13.5               | 29  | 9.4                | 22  | 6.5                | 9   |  |

|  |      |     |       |           |       |           |       |     |  |
|--|------|-----|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----|--|
| Timken<br>16-25-6                        | 1200 | 649 | 54.8  | .12       | 40.0  | 8.5       | 29.5  | 4.3 | } 2065°~1650°F (1130~900°) 鍛錬; 2100°F<br>1h空冷; 1200°F 展延; 1200°F 歪取空冷<br>1550° 豫熱; 2150°F 水冷   |
|  | 1350 | 732 | 29.5  | 8.5       | 19.7  | 4         | 13.4  | 1.8 |  |
|  | 1500 | 816 | 13.7  | 6.0       | 9.3   | 3.5       | 6.3   | 2.0 |  |
| S-497                                    | 1200 | 649 | 43.0  | 17        | 31.7  | 9         | 23.2  | 4   | 2200°F 鍛錬; 1400°F 仕上又は 2000°F 1h<br>水冷; 1300°F 16h<br>2200~2250°F 12h 水冷; 1500°F 4~50h<br>同 上<br>2250°F (1230°C) 2h 水冷; 1600°F 50h   |
|  | 1350 | 732 | 26.4  | 23        | 20.4  | 26        | 16.2  | —   |  |
|  | 1500 | 816 | 15.8  | 28        | 12.7  | 19        | 10.1  | 12  |  |
|  | 1600 | 871 | 10.0  | 23        | 8.1   | 15        | 6.3   | —   |  |
| S-590                                    | 1200 | 649 | 48.5* | 33        | 36.6  | 35        | 28.1  | 37  | 2325°F(1275°C)1h 水冷; 1400°F 16h 空冷<br>2300°F(1260°C)1h 水冷; 1400°F 10h 空冷<br>2250~2325°F 1~2h 水冷; 1500°F 16~50h<br>空冷<br>2300°F 1h 水冷; 1600°F 16h 空冷<br>2270°F (1245°C) 1h 水冷; 1700°F 16h |
|  | 1350 | 732 | 29.5  | 28        | 22.1  | 24        | 16.5  | 19  |  |
|  | 1500 | 816 | 18.0  | 16<br>~20 | 14.0  | 16<br>~20 | 10.9  | 8   |  |
|  | 1600 | 871 | 13.4  | 40<br>~48 | 9.8   | 28        | 4.6   | 13  |  |
|  | 1700 | 925 | 9.1   | 60        | 6.5   | 32        | 4.6   | 13  |  |
| LowC<br>N-155                            | 1200 | 649 | 52.7  | 15        | 41.5  | 15        | 32.4  | 13  | 熱間加工<br>熱間加工<br>2320°F(1270°C)1h 水冷; 1500°F 4h 空冷<br>2280°F(1250°C)1/2h 空冷   |
|  | 1350 | 732 | 33.0  | —         | 25.3  | 15        | 19.0  | 11  |  |
|  | 1500 | 816 | 17.6  | 24        | 14.0  | 28        | 11.1  | —   |  |
|  | 1700 | 871 | 8.8   | 50        | 5.3   | 19        | 3.3   | 7   |  |
| N-155                                    | 1200 | 649 | 55.5  | —         | 42.2  | —         | 32.0  | —   | 2075°~1600°F 鍛錬; 2100°F 1h 空冷;<br>1700°F 仕上加工<br>2320°F 水冷; 1500°F 50h 「1200°F 歪取」<br>2320°F 1h 水冷; 1500°F 4h 空冷<br>熱間加工; 2300°F 1h 水冷; 1500°F 4h 空冷                                     |
|  | 1350 | 732 | 35.8  | 18        | 25.3  | 10        | 18.3  | 8   |  |
|  | 1500 | 816 | 22.5  | 12        | 17.2  | 10        | 12.9  | 4   |  |
|  | 1600 | 871 | 15.0* | 17        | 10.9* | 7         | 8.0*  | 3   |  |
| LowC<br>N-153<br>Refract-<br>alloy<br>26 | 1200 | 649 | 42.9  | —         | 37.6  | —         | 33.3  | —   | 熱間加工<br>熱間加工<br>不 明<br>不 明<br>2100°F(1150°C)1h 油冷; 1500°F 20h 空冷   |
|  | 1350 | 732 | 26.5  | —         | 20.4  | —         | 15.5  | —   |  |
|  | 1200 | 649 | —     | —         | 52.0  | —         | —     | —   |  |
|  | 1350 | 732 | —     | —         | 33.8  | —         | —     | —   |  |
|  | 1500 | 816 | 33.0  | 20        | 20.4  | 18        | 12.7  | 16  |  |
| K-42B                                    | 1200 | 649 | 66.7* | 1         | 43.6  | 1         | 27.8  | 0.5 | 1950°F(1070°C)水冷; 1350°F 20h<br>同 上<br>2100°F(1150°C)水又は油冷; 1500°F 20~50h  |
|  | 1350 | 732 | 34.8  | 1         | 25.7  | 1         | 18.6  | 1   |  |
|  | 1500 | 816 | 23.8  | 2.5       | 15.8  | 2.5       | 10.5  | 2.5 |  |
| S-816<br>(forged)                        | 1200 | 649 | 58.4  | 14        | 45.0  | 8         | 34.6  | 4   | 2250~2350°F 1h 水冷; 1400°F 6~16h 空冷<br>2300°F (1260°C) 水冷; 1400°F 16h<br>2300°F 1h 水冷; 1500°F 16~50h<br>2300°F 1h 水冷; 1600°F 50h<br>2300°F 1h 水冷; 1700°F 16h<br>2300°F 1h 水冷; 1800°F 16h  |
|  | 1350 | 732 | 38.6  | 18        | 28.1  | 8         | 20.7  | 6   |  |
|  | 1500 | 816 | 24.7  | 10        | 19.0  | 10        | 14.8  | 10  |  |
|  | 1600 | 871 | 15.3  | 16        | 10.4  | 15        | 7.0   | 12  |  |
|  | 1700 | 925 | 10.5  | 15        | 6.9   | 6         | 4.5   | —   |  |
|  | 1800 | 972 | 6.2   | 18        | 3.7   | 10        | 2.2   | 4   |  |
| Hastell-<br>oy B                         | 1200 | 649 | 70.5* | 2.1       | 40.8  | 2.2       | 24.4  | 8.5 | 200°F(1095°)1h 水冷; 1200°F 4h 爐冷<br>1950°F(1065°)2h 空冷<br>1900°F(1035°)24h 空冷<br>不 明  |
|  | 1350 | 732 | 38.8* | —         | 23.9* | 22.5      | 17.6* | —   |  |
|  | 1500 | 816 | 18.0  | 28        | 12.0  | 59        | 8.0*  | —   |  |
|  | 1600 | 871 | 11.7  | —         | 8.2   | —         | 5.8   | —   |  |
| Nimonic<br>80                            | 1200 | 649 | 54.9* | 3         | 42.2* | 2.5       | 31.6* | 1.8 | 1950°F(1065°) 水冷; 1290°F(700°)16h<br>1950°F 4h 水冷; 1400°F(760°)50h<br>1950°F 4h 水冷; 1500°F 50h   |
|  | 1350 | 732 | 39.7  | 1         | 25.3  | 1         | 16.4  | 1   |  |
|  | 1500 | 816 | 16.2  | 13        | 11.5  | 9.5       | 8.3   | 0.5 |  |
| InconelX                                 | 1200 | 649 | 45.0  | 1         | 41.5  | 1         | 38.6  | 1.5 | 2100°F(1150°)24h 空冷; 1300°F 6~20h 空冷<br>同 上<br>2100°F 4~24 h 空冷; 1300°F 6~20h 空冷   |
|  | 1350 | 732 | 40.8  | 40<br>~60 | 33.7  | 15<br>~20 | 28.1  | 2   |  |
|  | 1500 | 816 | 31.6  | 25<br>±5  | 20.4  | 11        | 13.0  | 2.6 |  |
| (以上 Forged alloy)                        |      |     |       |           |       |           |       |     |  |
| Vitalli-<br>um                           | 1200 | 649 | 47.8  | —         | 38.0  | —         | 30.2  | —   | 鑄造のまま<br>1500°F 50h 時效<br>1250~1500°F 50h 時效<br>1500°F 50h 時效<br>鑄造のまま<br>鑄造のまま  |
|  | 1350 | 732 | 33.8  | —         | 25.6  | —         | 19.7  | —   |  |
|  | 1500 | 816 | 21.8  | 15        | 15.5  | 10        | 11.3  | 5   |  |
|  | 1600 | 871 | 16.7  | 34        | 12.9  | 18        | 10.2  | 11  |  |
|  | 1700 | 925 | 11.5  | 38        | 9.2   | 10        | 7.4   | 5   |  |
|  | 1800 | 972 | 8.6   | 4.2       | 6.2   | 13        | 4.5   | 3   |  |

|                 |      |     |       |           |      |      |      |     |  |
|-----------------|------|-----|-------|-----------|------|------|------|-----|--|
| S-816<br>(Cast) | 1200 | 649 | 50.6  | —         | 40.8 | —    | 32.4 | —   | 鑄造のまま<br>鑄造のまま<br>2300°F(1260°) で 1h 水冷;1350°F<br>~1500°F で 16~50h 時効<br>鑄造のまま<br>鑄造のまま<br>鑄造のまま |
|                 | 1350 | 732 | 38.0  | —         | 28.1 | 16   | 20.4 | —   |  |
|                 | 1500 | 816 | 25.0  | 15        | 20.0 | 3    | 15.5 | 1   |  |
|                 | 1600 | 871 | 17.2  | 19        | 12.7 | 17   | 9.2* | 11  |  |
|                 | 1700 | 925 | 12.7  | 7         | 10.4 | 6    | 8.5* | 2*  |  |
|                 | 1800 | 972 | 9.9   | 16        | 7.4  | 10   | 5.6  | 6   |  |
| 61              | 1200 | 649 | 50.0  | —         | 40.8 | —    | 33.3 | —   | 不明<br>1500°F で 50h 時効<br>1500°F で 50h 時効<br>1600°F で 50h 時効<br>鑄造のまま<br>鑄造のまま                    |
|                 | 1350 | 732 | 32.4  | 6         | 24.8 | 5    | 19.0 | 5   |  |
|                 | 1500 | 816 | 24.5  | 8         | 18.8 | 4.8  | 14.4 | 2.9 |  |
|                 | 1600 | 871 | 17.6  | 10<br>~15 | 12.0 | 5.5  | 8.3  | 2.5 |  |
|                 | 1700 | 925 | 13.8* | 30        | 9.5* | 7    | 6.6* | 5   |  |
|                 | 1800 | 972 | 9.5   | 20        | 6.1  | 12   | 4.0  | 5   |  |
| X-40            | 1200 | 649 | 45.7  | —         | 38.6 | —    | 32.4 | —   | 不明<br>1350°F で 50h 時効<br>1350~1500°F で 50h 時効<br>1600°F で 50h 時効<br>鑄造のまま<br>鑄造のまま               |
|                 | 1350 | 732 | 41.5  | 20        | 31.5 | 31   | 23.9 | 37  |  |
|                 | 1500 | 816 | 23.9  | 30        | 19.7 | 12   | 16.3 | 7   |  |
|                 | 1600 | 871 | 17.6  | 36        | 15.0 | 19   | 13.0 | 7.5 |  |
|                 | 1700 | 925 | 14.8  | 39        | 12.2 | 22   | 10.1 | 16  |  |
|                 | 1800 | 972 | 9.4   | 46        | 8.0  | 24   | 6.9  | 8   |  |
| X-50            | 1500 | 816 | 27.0  | 28        | 20.5 | 14.5 | 15.8 | 5   | 1500°F で 50h 時効<br>1600°F で 50h 時効<br>鑄造のまま<br>鑄造のまま   |
|                 | 1600 | 871 | 17.9  | 24        | 14.1 | 17   | 11.4 | 10  |  |
|                 | 1700 | 925 | 13.9  | 27        | 10.5 | 16   | 9.7  | 2   |  |
|                 | 1800 | 972 | 8.6   | 30        | 6.8  | 15   | 5.5  | 8   |  |
| X-41            | 1600 | 871 | 15.8  | —         | 13.7 | —    | 12.0 | —   | 1600°F で 50h 時効  |
| CM 469          | 1600 | 871 | 47.1  | 17        | 28.6 | 12.5 | 15.0 | —   | 真空鑄造   |

(以上 Cast alloy)

第5表 クリーブ試験値 (最小クリーブ速度に対応する應力)

| [Forged Alloy]  | *最小クリーブ速度 % per hr. |                    |                    |                    | S-816             | S-495 | 5.7   | 8.1              | 11.5             | 16.3             |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------|---|------------------|------------------|------------------|
|                 | 10 <sup>-5</sup>    | 10 <sup>-4</sup>   | 10 <sup>-3</sup>   | 10 <sup>-2</sup>   |                   |       |   |                  |                  |                  |
|                 | kg/mm <sup>2</sup>  | kg/mm <sup>2</sup> | kg/mm <sup>2</sup> | kg/mm <sup>2</sup> |                   |       |   |                  |                  |                  |
| 1200°F = 649°C  |                     |                    |                    |                    |                   |       | 1600°F = 871°C  |                  |                  |                  |
| Hastelloy B     | 1.86                | 5.2                | 14.0               | 39.4               | S-495             |       | 2.5   | 3.7              | 5.5              | 8.3              |
| Timken 16-25-6  | 6.3                 | 9.8                | 15.1               | 23.5               | S-816             |       | 2.8   | 4.1              | 6.0              | 8.6              |
| K 42 B          | 8.4                 | 13.2               | 20.4               | 32.4               | S-497             |       | 3.5   | 4.4              | 5.5              | 6.9              |
| 1350°F = 732°C  |                     |                    |                    |                    | 最小クリーブ速度 % per hr |       |   |                  |                  |                  |
| S-497           | 9.0                 | 10.9               | 13.8               | 17.0               | [Cast Alloy]      |       | 10 <sup>-5</sup>  | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-2</sup> |
| S-816           | 8.6                 | 12.7               | 18.8               | 27.7               | 1500°F = 816°C    |       | kg/mm <sup>2</sup> kg/mm <sup>2</sup> kg/mm <sup>2</sup> kg/mm <sup>2</sup> |                  |                  |                  |
| S-495           | 8.2                 | 11.3               | 15.7               | 21.8               | Vitallium         |       | 3.4   | 5.3              | 8.2              | 12.7             |
| N-155(High C)   | 9.5                 | 12.9               | 17.6               | 24.2               | 422-19            |       | 6.7   | 9.3              | 12.9             | 17.7             |
| S-590           | 10.0                | 13.3               |                    |                    | 61                |       | 7.0   | 9.1              | 11.9             | 15.5             |
| 1500°F = 816°C  |                     |                    |                    |                    | X-50              |       | 7.1   | 9.5              | 12.8             | 17.1             |
| Hastelloy B     | 1.1                 | 2.0                | 3.4                | 5.8                | X-40              |       | 7.2   | 9.6              | 13.0             | 17.4             |
| Timken 16-25-6  | 2.7                 | 4.0                | 5.9                | 8.8                | 111VT2-2          |       | 7.7   | 10.5             | 14.6             | 19.3             |
| K 42 B          | 2.75                | 5.2                | 9.8                | 18.6               | 100NT-2           |       | 9.7   | 12.2             | 15.3             | 19.0             |
| 19-9 DL         | 3.4                 | 5.0                | 7.3                | 10.7               | 110N-2            |       | 10.4  | 12.7             | 15.4             | 18.8             |
| Nimonic 80      | 4.0                 | 6.7                | 11.0               | 18.3               | 1600°F = 871°C    |       |   |                  |                  |                  |
| Refractalloy 26 | 4.0                 | 6.7                | 11.0               | 18.3               | Vitallium         |       | 3.9   | 5.6              | 7.9              | 11.1             |
| N-155(low C)    | 4.9                 | 5.8                | 6.9                | 8.1                | 111VT2-2          |       | 5.1   | 7.2              | 10.6             |                  |
| S-590           | 5.1                 | 6.7                | 8.9                | 11.7               | X-50              |       | 6.0   | 7.4              | 9.3              | 11.5             |
| Inconel X       | 5.3                 | 8.6                | 13.8               | 21.2               | 100NT-2           |       | 6.0   | 8.2              | 11.3             | 15.5             |
| N-155(High C)   | 5.5                 | 7.2                | 9.7                | 12.9               | X-40              |       | 6.1   | 8.2              | 11.0             | 14.8             |
| S-497           | 5.7                 | 7.0                | 8.7                | 10.5               | 422-19            |       | 6.7   | 8.2              | 10.2             | 12.5             |



第4表～第5表に掲げられた代表的な耐熱材料の破断应力及び破断に到るまでの伸び、クリープ应力、疲労強度について主な点を摘記すると次の如くである。尙紙面の都合で省略したがこれらの破断应力、クリープ应力を兩對数座標を用いてプロットして見ると各合金の温度に依る性質の變化や同一温度に於ける各合金の性質の比較が一層はつきりするであらう。

(1) 鍛造材では Inconel X が 1200°F (649°C) 及び 1350°F (732°C) に於て最高の破断应力を示す。然し Inconel X は前記の如く 1500°F (816°C) に於て時間に依る破断应力の低下が顯著であるから高温、長時間の壽命が要求せられるものには不適當である。1200°F で強いのは鍛造材では N-155, N-153, S-816, Nimonic 80, hot cold work した 19-9 DL などであり、S-497, S-495,  $\gamma$ -Columbium, Hastelloy B, K 42B などは長時間試験で破断应力の低い部類に属する。但し K42B はクリープ应力は比較的大である。又 K42B, Nimonic 80, Inconel X, 19-9DL などは破断までの伸びが極めて小さい。一般に伸びは試験時間の長い程小さい値になる。殊に高温試験に於てはその傾向がはつきり現れてゐる。

鑄造合金として 1200°F 下に於ては何れも破断应力は似た様な値である。そして鍛造材の或もの (Inconel X, 19-9 DL など) に對してよりすぐれた値は示さない。たゞ C 量の高い例へば 36J の如きは 1000hr の破断应力が 40kg/mm<sup>2</sup> 近くを示してゐる。

(2) 温度が 1350°F (732°C) に上ると Inconel X がやはり優秀であるが 19-9 DL, 16-25-6 の如き hot-cold work 材は弱くなり S-816, N-155, K42B の如き Co を 20% 以上含むものが良い破断应力を示す様になつて来る。(クリープ应力から云えば S-590, N-155 などが良い) 同様に Co 量の高い鑄造材が鍛造材より優れた強さを示し、殊に C の高い程破断強度が大である。(73J は 1000h の破断应力が約 28kg/mm<sup>2</sup>)

(3) 1500°F (816°C) では明かに鑄造材が優れ 1000h の破断強度が概ね 15kg/mm<sup>2</sup> 以上であるのに對して鍛造材でこの値に達するものは S-816 のみである。Vitalium の如く C の低いものは鑄造材でもやはり強さ (破断強度及びクリープ限) が低下する。又クリープ試験に於て K42B 及び Refractalloy 26 は 1350°F では非常に良い値を示し、1500°F でも高荷重短時間の試験では優れた性質をもつてゐるけれども荷重を低くして長時間のクリープ試験を行うと比較的早期にクリープの第三段階に入り、S-495, S-497, N-155 などに比して弱いことは

注意すべき點とされてゐる。

(4) 1600°F (871°C) 以上では鍛造材としては S816, S590 などが比較的強度大であるが X40, X41, X50 などのステライト系鑄造合金に比較すると可成破断強度が落ち、S816 でも鍛造材は鑄造材に比して弱い。同じく鑄造材でも C 量の高く Ta を含んだ 100 NT-2 の如き合金が強度は大で、1000h の破断強度は 1600°F で 14 kg/mm<sup>2</sup>, 1700°F (925°C) で 6kg/mm<sup>2</sup>, 1800°F (980°C) で 7kg/mm<sup>2</sup> を示す。普通に使用されてゐるステライト系鑄造合金で高温強度の最も優れてゐるのは X40 である。この合金は高温に於ける靱性も亦良好である。然しこの種 (X40, 61 合金, X50, 473J など) の Co-Cr 基合金は N-155 の如き Ni-Cr-Co-Fe 合金の C 量を増したもの (100NT-2, 108N-2 など) と比較して 1500°F 内外の破断強度は大であるがクリープ应力は低目である。即ち 1500°F (816°C) 10<sup>-5</sup> %/h に對するクリープ限は前者が 9~10.5kg/mm<sup>2</sup> であるのに對し、後者は 7±0.7 kg/mm<sup>2</sup> である。然し 1600°F (871°C) になると兩者の差はそれ程明かでなく X40 はクリープ限でも相當高い値をもつてゐる。

最後に疲労試験値について一言する。ガスタービンの場合でも翼或は翼車は振動や温度變化に依る繰返し荷重を受けてゐるわけである。それらの繰返し荷重が材料の破壊に相當効いてゐることは事實あり得ると思はれるが高温に於ける疲労試験については未だ充分なデータが得られてゐない。第6表は 1200°F (649°C)~1500°F (816°C) に於ける高温繰返し曲げ疲労試験値で Westinghouse Electric Co. の研究所で行はれたものである。これで見ると大部分の合金では疲労限は 1000h の破断強度に比して稍大きい様である。

## V 焼結材及び非金屬材料<sup>5)</sup>

Fe, Ni, Co 又は Cr を主成分とする従來の金屬質耐熱材料はガスタービン翼として要求される強度から判断してせいぜい 850° 附近が止りではないかと思はれる。そこで更に高温で使用する耐熱材料が研究されてゐるが、これに金屬と金屬化合物を粉末冶金法で結合させたものと純然たる酸化物とがある。前者は ceramets, ceramals, cerametallics 或は metal-ceramics などと呼ばれる。現在緒についたばかりで、ガスタービン材として實用の域には未だ達してゐない。然し考へられてゐる種類は多く例へばアルミナ、ベリリア、ジルコニアなどの酸化物をクロム、コバルト、ニッケル、鐵などの金屬と結合させたもので金屬が 30~70% の範圍にある。

第6表 疲 勞 試 験 値

| 材 料         | 状 態   | 温 度<br>°C         | 疲 勞 限                      |                       |
|-------------|---|-------------------|----------------------------|-----------------------|
|             |   |                   | 10 <sup>8</sup> 回          | 2.5×10 <sup>8</sup> 回 |
| 19-9 D L    | disk. 2100°F 1h, 空冷; 1200°F で 15% 加工<br>更に 1200°F で 4h 時効 | 816               | kg/mm <sup>2</sup><br>12.0 | kg/mm <sup>2</sup>    |
| Timken      | 2000°F 水冷後 1200°F で 4h 時効                                 | 649               | 32.3                       |                       |
| 16-25-6     | 2150°F で 3/4 水冷後 1500°F で時効                               | 816               | 13.4                       | 12.6                  |
| LowCN155    | 1200°F で 50h 時効   | 649               | 46.4                       |                       |
|             | 1500°F で 50h 時効   | 816               | 23.2                       | 22.5                  |
| S-495       | 2000°F, 1h 水冷; 1300°F 16h 時効                              | 649               | 29.5                       | 28.8                  |
| S-497       | 2000°F 1h 水冷; 1300°F 16h 時効                               | 649               | 35.1                       | 34.4                  |
| S-816       | 2350°F 1h 水冷; 1500°F 16h 時効                               | 649               | 48.5                       |                       |
| Inconel X   | 2100°F 4h 空冷; 1550°F 24h 及び<br>1300°F で 20h 時効            | 649<br>732<br>816 | 37.3<br>33.8<br>24.6       |                       |
| K-42 B      | 2100°F 1h 水冷; 1350°F 20h 時効                               | 649               | 38.0                       | 33.8                  |
|             | 2100°F 1h 水冷; 1500°F 20h 時効                               | 732               | 33.8                       |                       |
| Hastelloy B | 2000°F 水冷; 1200°F 4h 時効                                   | 649               | 46.4                       | 45.0                  |
|             | 2050°F 空冷; 1900°F 24h 時効                                  | 816               | 23.9                       |                       |
| Vitallium   | 鑄造のまま   | 649               | 31.0                       |                       |
|             | "   | 816               | 23.3                       |                       |
| 61          | 鑄造のまま   | 649               | 31.0                       |                       |
|             | "   | 816               | 26.8                       | 26.8                  |
| 422-19      | 鑄造のまま   | 649               | 36.7                       |                       |
| X-40        | 鑄造のまま   | 649               | 39.5                       |                       |
| S-816       | 鑄造のまま   | 816               | 23.3                       |                       |

酸化物を多くする程耐熱性は良いが脆く且熱的衝撃にも弱くしかも焼結がむつかしくなる。金属と酸化物の結合は従来の粉末冶金的な考へ方と多少異つた別の観点から研究する必要がある。その他硼化物(例へば硼化クロム)と金属(ニッケル及びクロム), 炭化物(炭化チタンが最も有望でこれに炭化タンタルなどを加へる)と金属(ニッケル又はコバルト), 窒化物と金属などの組合せが考へられてゐる。

## VI 結 言

以上最近の外國特に米國に於て發達したガスタービン用耐熱材料について簡単に紹介したが、この種材料は今日尙研究進歩の段階にあるものであつて、今後としてはローター材及びこれに近い温度の翼材についての製造研究或は型鍛造に於ける型の壽命などを考へてより有利な条件にあると思はれる精密鑄造法の改良などがある。終戦後我國ではこの方面の研究が殆ど中止の状態にあつたので今後ガスタービンの製造が開始されるとしてもその

ために相當の現場的な問題が提起せられると思つてゐる

## 文 献

- 岡崎卓郎氏の計算に依る,
- 日本金屬學會編, "最近金屬學の概観," p. 178~186.
- 日本鐵鋼協會編, "最近日本鐵鋼技術概観," p. 475~478.
- 三島徳七, 梶山正孝, 鐵と鋼 昭和 25 年 6 號
- 文献の數は多いが主として次のものに依つた.  
Iron Age, Nov. 7, 1946 p. 47  
Metals Handbook, 1948 Ed. p. 566~569 及 p. 578~581.  
Iron Age, Mar. 18, Apr. 8; Apr. 15; 1948.
- Iron Age, June 12, 1947.
- Materials and Methods, Oct. 1949.
- Materials and Methods May 1950.
- Symposium on Materials for Gas Turbines, A. S. T. M. (1946).