

# 真空熔解した Cr-Mo 鋼 (SCM 2) の諸性質について

## Studies on the Various Properties of Vacuum-Melted Cr-Mo Steel (SCM 2)

小 柴 定 雄\* 清 永 欣 吾\*\*  
Sadao Koshiba Kingo Kiyonaga

### 内 容 梗 概

真空熔解および普通熔解した Cr-Mo 鋼 (SCM 2) の諸性質について研究した結果、真空熔解が脱ガス非金属介在物の除去およびそれに付随する各種の性質に良好な結果を与えることが判明した。

すなわち真空熔解は鋼の靱性を改善し、特に衝撃値における改善が著しい。しかも、これらの改善率は高抗張力水準において顕著であることが明らかとなった。このほか、鋼の焼戻脆性、衝撃遷移特性について若干の検討を加えた。

### 1. 緒 言

一般に金属は酸素、窒素、水素そのほかのガスあるいはそれらとの化合物を含有し、性能を低下している。したがって真空熔解によつて金属および合金の性能が著しく向上することは真空管材料、電磁気材料<sup>(1)</sup>、耐熱材料<sup>(2)</sup>、ステンレス鋼<sup>(3)</sup>、軸受材料<sup>(4)</sup>などの実例からみても明らかであり、日立金属工業株式会社安来工場においてもこれらの効果について各鋼種について具体的に調査研究を進めている。本研究はその一環をなすものである。

真空熔解の第一の効果は含有ガスを低め、不純物を除去することであり、これによつて鋼の靱性を高め、疲労限度、衝撃特性などが改善される。従来高性能を有するにもかかわらず、加工困難のため不可能とされていたものが、真空熔解によつて可能となり、その将来性に大きな期待を寄せられている新合金がある。たとえば Fe—Al バルブ合金などであるが、これらの特殊合金に関するかぎり、真空熔解技術の将来はきわめて有望である<sup>(5)(6)</sup>。しかしそのほかの鋼については真空熔解の経済性が問題であり、真空熔解の利点が高い費用を相殺するほど十分であるとはいえない。特に構造用低合金鋼の場合はそうであるが、航空機用構造部品では約 200kg/mm<sup>2</sup> の強さを持ち、しかも良好な靱性、衝撃性質に熱処理しうるような鋼が要請されているので<sup>(6)</sup>、かかる方面への活路は開かれているものと思う。

本研究は Cr-Mo 鋼を真空熔解した場合の諸性質について吟味したものであるが、これら構造用鋼中のガス、あるいは不純物が除去された場合に、いかに性質が改善されるかを知ることは有意義であり、一方上記のごとき高抗張力材料を真空熔解した場合の効果を予見する上にも参考になるものと考えらる。

\* 日立金属工業株式会社安来工場 工博

\*\* 日立金属工業株式会社安来工場

### 2. 試料の調整

5 t 塩基性アーク炉で吹製した SCM-2 (ch# 60785) を日立製作所中央研究所の 30kg 傾倒式真空熔解炉で真空再熔解後、真空鑄造を行い、さらに比較材として同じ素材 (ch# 60785) を用いて 50kg 高周波炉で空气中再熔解し、成分を調整した。

第 1 表は真空熔解の熔製条件を示す。

第 2 表は素材、真空熔解試料および比較試料の化学成分を示す。真空熔解によつて Mn 歩留が悪くなるのは Fe と比較して Mn の蒸気圧が大きいためである。本鋼に含まれる合金元素の蒸気圧の大きさを比較すれば Mn > Cr > Cu > Si > (Fe) > Ni > Mo の順であり<sup>(7)</sup>、したがって Mn, Cr, Cu, Si は真空熔解によつて含有濃度を減じ、一方 Ni, Mo は増すことになる。第 2 表の結果はこの推定とよく一致している。

上記試料を 20×20mm 中、および 30mmφ に鍛伸後、850°C で焼鈍し、各種試験用試料を作製した。なお真空熔解試料の 30kg インゴットは超音波探傷の結果、トッ

第 1 表 真空熔解の熔製条件

時間(min)	電力(kW)	真空度 (mmHg)	温度°C	備 考	
0	22	1.6×10 <sup>-3</sup>		電 源 入	
10	30	6.0×10 <sup>-3</sup>			
20	40	1.5×10 <sup>-2</sup>	1,215		
30	40	3.0×10 <sup>-2</sup>	1,505		
40	40	3.2×10 <sup>-2</sup>	1,485		
45	25	3.0×10 <sup>-2</sup>			
50	25	3.0×10 <sup>-2</sup>	1,460		
60	30	2.0×10 <sup>-2</sup>			
70	30	6.0×10 <sup>-3</sup>	1,690		全 熔 け 落 ち
80	30	1.0×10 <sup>-2</sup>			
92	30	6.0×10 <sup>-3</sup>	1,565	注湯, 電源停止	

注 湯 温 度: 1,565°C

最高到達温度: 1,690°C

精練期の真空度: 6.0×10<sup>-3</sup>~1.0×10<sup>-2</sup> mmHg

インゴット重量: 29.3 kg

る つ ぼ: アルミナ

第2表 試料の化学成分

試料	(C)	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	備考
Ch# 60785	0.33	0.23	0.60	0.017	0.007	0.10	0.94	0.21	0.11	素材
VM	0.32	0.20	0.26	0.022	0.006	0.11	0.88	0.22	0.07	真空熔解試料
OM	0.30	0.30	0.32	0.012	0.022	0.03	0.88	0.25	0.04	普通熔解試料

第3表 試料のガス含有量

	分析温度 (°C)	総ガス量 (cc/100g)	[H]%	[O]%	[N]%
VM	1,600	5.02	0.00006	0.0010	0.0037
OM	1,600	20.34	0.00010	0.0086	0.0090

第4表 試料の清浄度

	視野数		清浄度	総平均厚 (μ)
VM	50	A	0.03	3.3
		B	1.68	3.3
OM	50	A	0.05	3.0
		B	2.33	3.1

第5表 変態点の生起状況

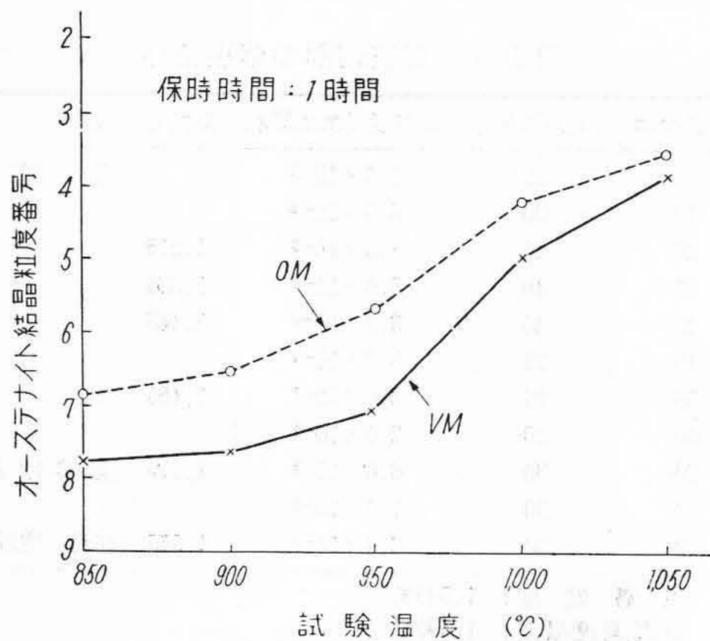
	加熱変態点 (°C) (5°C/min)	冷却変態点 (°C)	
		炉冷 (5°C/min)	空冷
VM	764~819	769~706	599~504
OM	763~823	753~693	590~503

プ部より約110mm深さまで底面反射20~50%であつたので、あらかじめこの部を切断除去後鍛伸した。

### 3. 実験方法および実験結果

#### 3.1 脱ガスと非金属介在物の除去

真空熔解法によつて1,600°Cにおける試料のガス含有



第1図 オーステナイト結晶粒の成長特性 (酸化法)

量を測定した結果を第3表に示す。真空熔解によつて水素は約1/2, 酸素は1/8~1/9, 窒素は約1/3に減少し、総ガス量では約1/4に減少した。この場合、OM試料の酸素含有量がかなり大きいので、酸素の減少率は普通の場合よりも大きくでている。

第4表は試料の旧学振法による清浄度を示す。平均厚は大差ないが、真空熔解によつてB系介在物が約40%減少している。

#### 3.2 変態点の生起状況

本多式熱膨脹計によつて試料の変態点を測定した結果を第5表に示す。普通熔解試料の冷却変態点がわずかに低いようであるが、これはMn, Mo量の相違によるものと思われる。変態点における両試料の膨脹収縮量はほぼ同程度であつた。

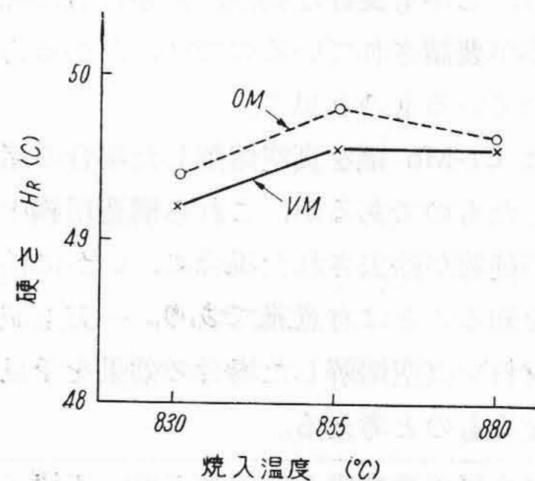
#### 3.3 オーステナイト結晶粒の成長速度

第1図は850~1,100°Cに1時間試料(10×10×5mm<sup>3</sup>)を加熱した場合の結晶粒の成長特性を酸化法によつて測定した結果である。両者の粗大化温度は約950~1,000°Cで、ほぼ同一である。全般的にみて両者の成長特性は大差ないと考えるのが妥当であろう。

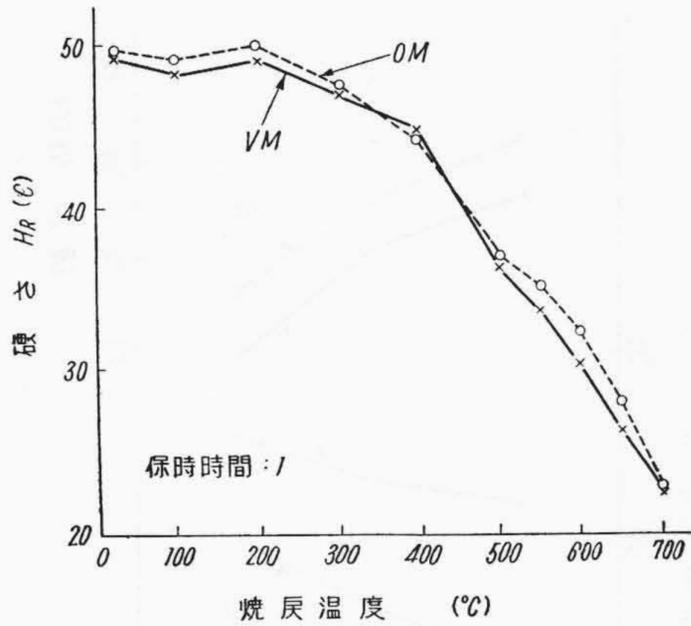
#### 3.4 焼入焼戻温度と硬さ

17×17×10mm<sup>3</sup>の試料を830~880°Cの焼入温度に30分、加熱後、油焼入した表面より約1mmの部分の硬さを測定した。第2図の結果は3個の試料の平均値を示しているが、そのばらつきからみて両者間にはほとんど差はないと思われる。

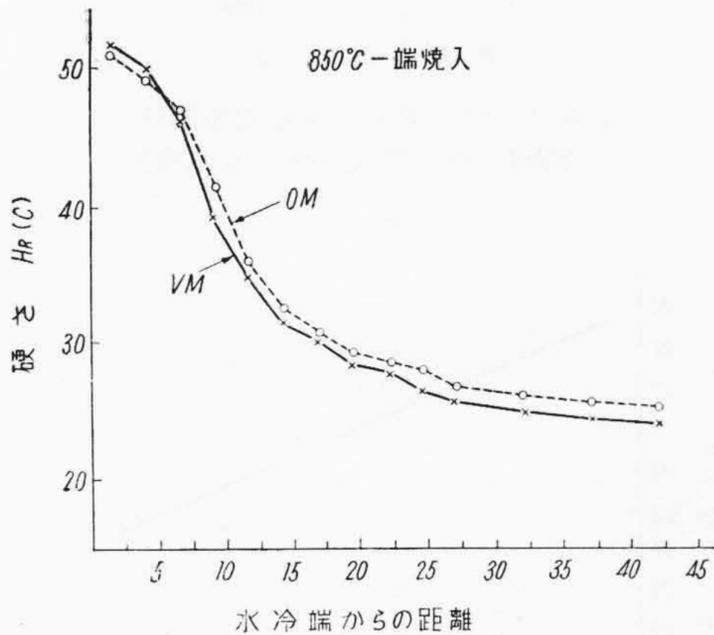
次に855°Cで油焼入した試料を常温~700°Cの各温度で1時間焼もどした場合の焼戻温度と硬さの関係进行调查した。その結果を第3図に示す。焼戻温度200°C以上で



第2図 焼入温度と硬さの関係



第3図 試料の焼戻軟化抵抗



第4図 試料の一端焼入性曲線

軟化を開始し、400~500°C 間の軟化速度が最も激しい。  
500°C以上では OM の軟化速度が若干減少する。

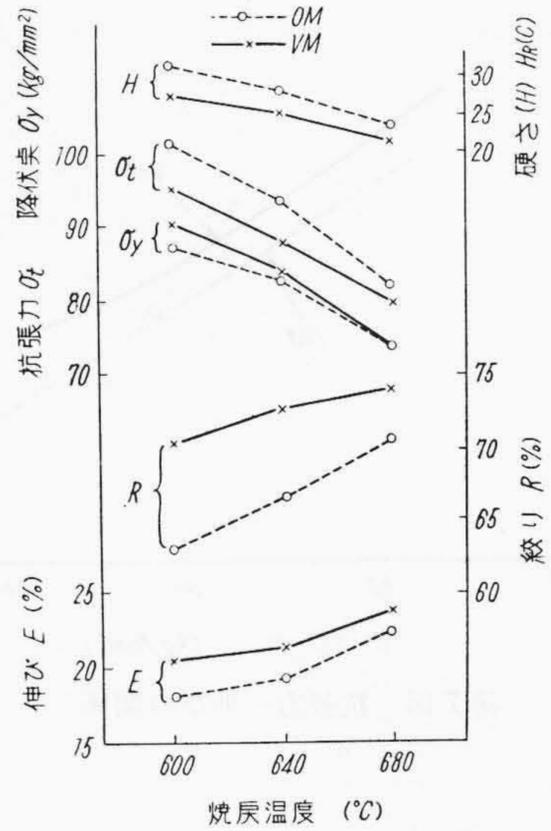
3.5 焼入性

JIS: G 0561 に準拠して試料の一端焼入性試験を行つた結果を第4図に示す。試験温度は850°Cである。両者間には大差はないが、わずかに OM の焼入性が大きいようである。

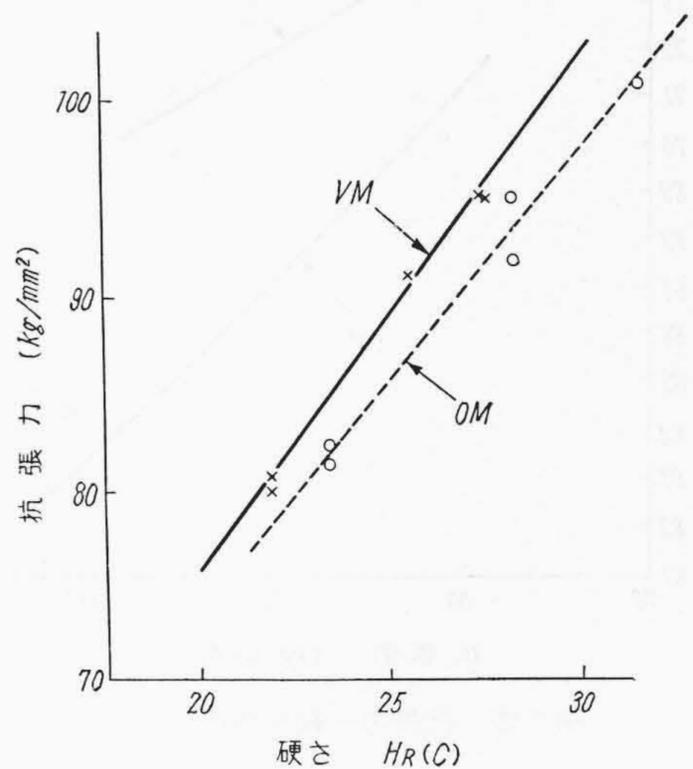
3.6 機械的性質

焼鈍した 20mmφ 素材より抗張試験、衝撃試験片を採取し、試料の強度、靱性などについて吟味した。

焼入温度は 850°C(油冷)に一定とし、焼戻温度を 600, 640 および 680°C (水冷) の三水準にとつた場合の試料の引張性質を第5図に示す。焼入温度における保持時間は30分、焼戻温度では1時間である。同一焼入焼戻温度における硬さは OM 試料が大きいので、抗張力は OM が大となっている。これに対し降伏点は VM の方が大であり、真空熔解試料の降伏比が普通熔解試料に比べてきわめて大であることを示し、VM 試料の靱性が非常に



第5図 焼戻温度と機械的性質 (850°C 油冷焼戻温度より水冷)



第6図 抗張力—硬さの関係

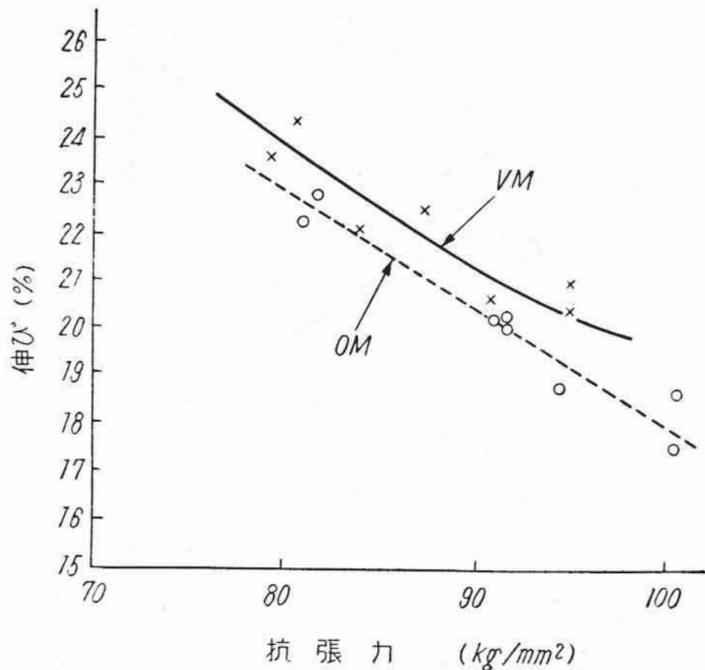
高いことを示している。両者の降伏比を比較すれば、下記のとおりである。

VM (真空熔解試料) 降伏比: 95%

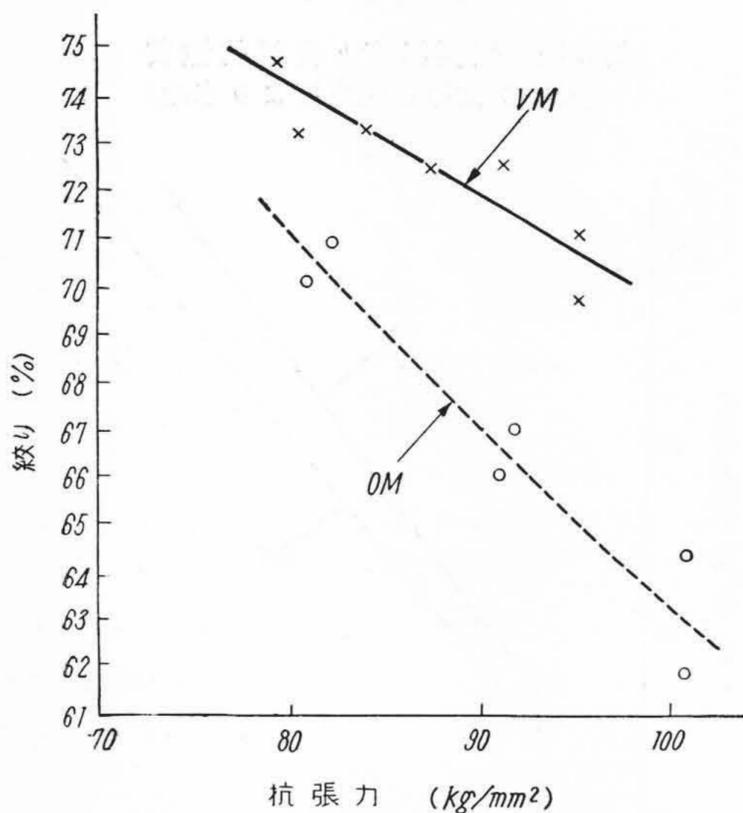
OM (普通熔解試料) 降伏比: 88%

絞りは鋼の靱性を比較する重要な要素の一つである。両試料とも焼戻温度の上昇につれて絞りは大となるが、同一熱処理において真空熔解試料は約 10% 絞りを改善している。同様に伸びも約 10% 良くなつている。

第6図は硬さと抗張力の関係を示したものであるが、同一硬さに対する抗張力はむしろ VM の方が大であり、この点からみれば真空熔解は靱性のみならず強さも改善することがわかる。



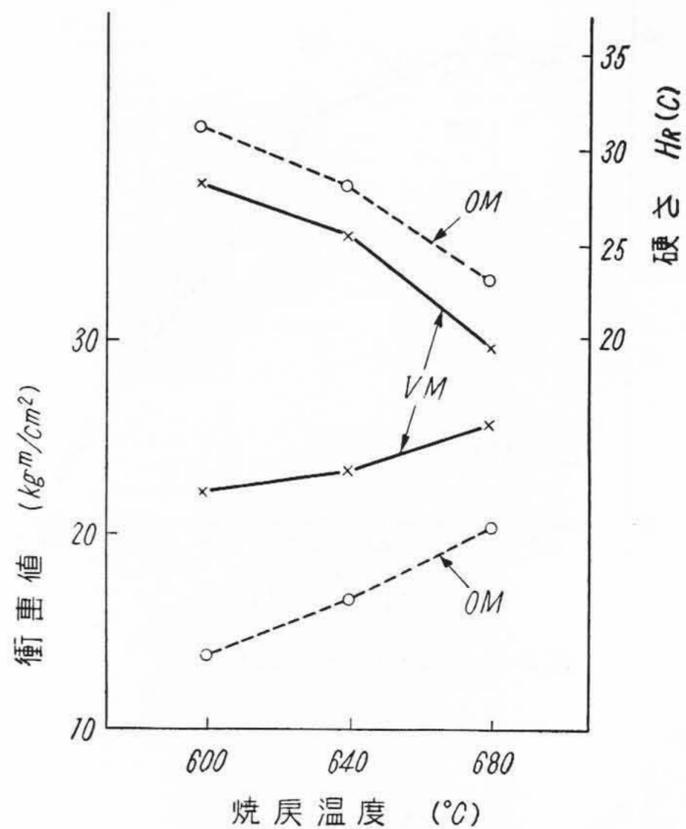
第7図 抗張力—伸びの関係



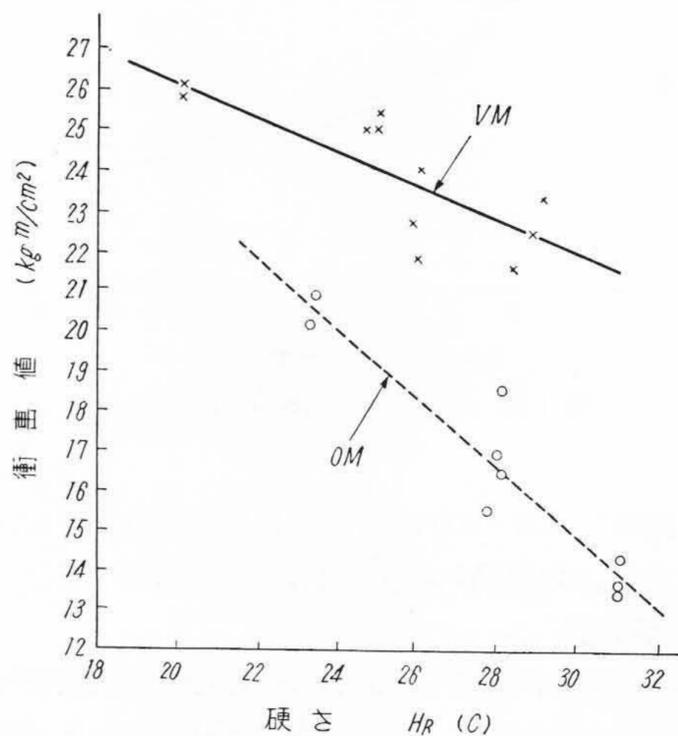
第8図 抗張力—絞りの関係

強靱鋼はその性質として強度と靱性が同時に要求されるが、その適応性をみる一つの手段として、抗張力—伸び、抗張力—絞りの関係について吟味する方法がある。これらの関係を示したものが第7,8図である。この二つの方法によつて VM 試料が優秀な性質を示していることは明らかであるが、特に同一抗張力に対する絞りの関係は真空熔解によつて大いに改善される。高抗張力水準において、この特性の差が大となることは注目すべき事実である。

同様な熱処理を施した場合の試料のシャルピー衝撃値を比較したのが第9図である。同一熱処理においてはVMの方が約40% 衝撃値が高い。第10図は同一硬さにおける衝撃値を比較したものであるが、これによつて真空熔



第9図 焼戻温度と衝撃値の関係 (850°C 油冷焼戻温度より水冷)



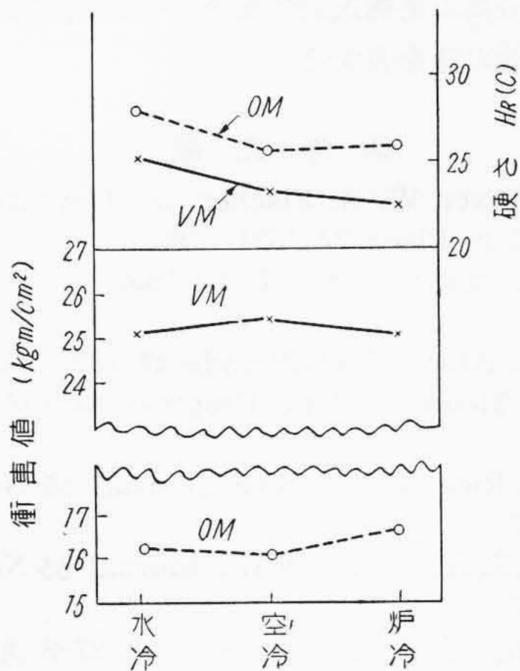
第10図 衝撃値—硬さの関係

解試料の耐衝撃性がきわめて良いことがわかる。また絞りの場合と同じく、高い硬さの場合にこの傾向が著しい。

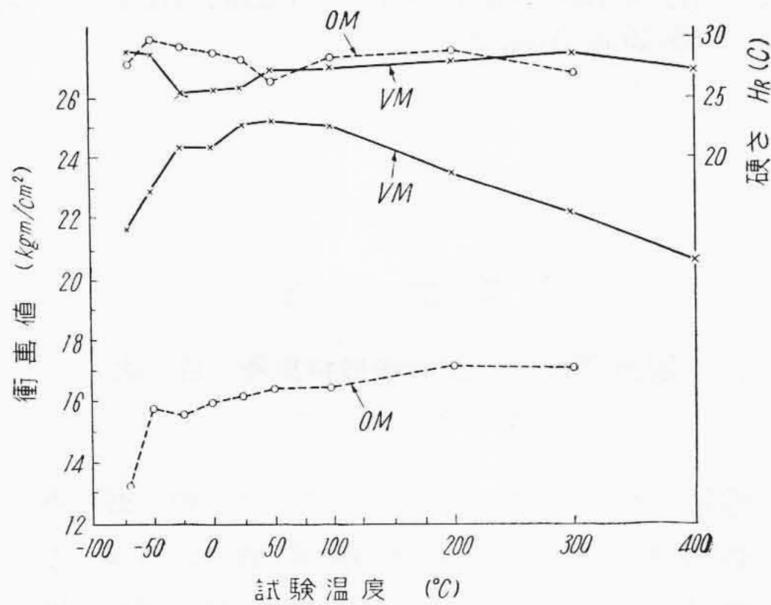
### 3.7 焼戻脆性

850°C 油焼入したシャルピー試験片を 640°C×1 時間焼戻後、水冷、空冷および炉冷したのち室温で衝撃試験を行つた。その結果を第11図に示す。硬さは冷却速度が遅くなるにつれてやや低下するが、衝撃値は冷却速度によつてほとんど変化を示さない。ただし、OM および VM の衝撃値の間には相当のひらきがあり、真空熔解材は約 85% 衝撃値を改善している。

次に 850°C 油焼入、640°C 水冷焼戻した試料を 300~



第11図 焼戻後の冷却速度と室温の衝撃値 (850°C 油冷, 焼戻温度 640°C)



第12図 焼入, 焼戻後の衝撃遷移特性 (850°C 油冷, 640°C 水冷)

-70°C の試験温度で衝撃試験を行い, 両試料の衝撃遷移特性を調査した。第12図はその結果であるが, 両者の遷移温度は大差ないようである。最高衝撃エネルギーの80%値を示す試験温度によつて比較すれば, 両者とも-70~-100°C 間に遷移温度があるように思われる。真空熔解試料を100°C以上の温度で試験すれば, 漸次衝撃値は低下して, 普通熔解試料のそれに近づく。

4. 考 察

以上の実験結果は真空熔解によつて機械的性質特に靱性を大幅に改善すること, 焼入硬さ, 焼入性, 結晶粒の成長特性に対してはほとんど効果を及ぼさないことを示している。これらの効果の原因は, 含有ガスないしは介在物の減少によつて説明されなければならないが, ガスまたは介在物の焼入性に及ぼす影響はわずかであるから, (8)焼入硬さおよび焼入性に与える真空熔解の効果は小さいものと推定される。

本研究に用いた熔解素材は Al キルド鋼であるが, これに含まれていた AlN などの結晶粒成長の抑制剤は真空熔解によつてある程度減少すると考えられるので, 結晶粒の成長速度は増加するものと考えられる。しかし比較材 OM は Si キルド鋼で Al 添加を行つておらず, 結晶粒の成長を妨げる力が弱いので VM 試料との差が少ないのであろう。

鋼の焼戻脆性の本性についてはまだ完全にはわかつていないが, 従来の説によれば A<sub>1</sub> 点以下におけるある種の元素の固溶度の差に関係するものとされている。また第一脆性はオーステナイト粒界における不純物の偏析によつて起り, 第二脆性はフェライト粒界に不純物が析出するためであるともいわれている(9)。いずれにせよ真空熔解によつて鋼中のガスまたは不純物が減少すれば, 鋼の焼戻脆性が緩和されるであろうことは十分予想できることである。しかるに本研究では 640°C 焼戻後の冷却速度によつて, ほとんど常温の衝撃値に影響が現われなかつたが, この理由としては, 次の二つの説明が考えられる。

一つはこの鋼種における恒温脆化図では 640°C における脆化開始時間が1時間以上であるという説明である。一般に 640°C 付近の焼戻がもつとも脆化に時間のかかる温度範囲である(9)。もう一つは, これらの試料間に脆化の差は実際には存在するけれども, 常温の衝撃試験のみでは検出できない。すなわち遷移温度の差はあるけれども, 両者の遷移温度はいずれも, 常温以下であるという見方である(10)。この両方はいずれも妥当であるがその詳細についてはさらに研究を進める必要がある。

第12図の真空熔解試料で, 200°C 以上の試験温度における衝撃値が漸次低下しているが, この理由にははつきりしない。温度が高くなるにつれて雰囲気中のガスを吸収し, 性能が普通熔解材に近づくのかもしれない。

低合金鋼を真空熔解すると繊維方向とそれに垂直な方向の機械的性質の差が少なくなり, また鋼の疲労限界が増加するといわれている(6)。これらの事実と, 本研究で示されたようにひずみ速度の大きな切欠靱性が著しく改善されるということは, 衝撃, 疲労, 強度などに高性能を要求する航空機用構造材料に対して真空熔解がきわめて重要な意味をもつことは明らかである。

5. 結 言

真空熔解および普通熔解せる Cr-Mo 鋼 (SCM 2) の諸性質について比較研究を行つた結果, 次の諸点を明らかにした。

- (1) 真空熔解によつて鋼中のガス含有量は約 1/4 に減少し, B 系非金属介在物は約 40% 減少した。
- (2) オーステナイト結晶粒の成長特性, 焼入温度と焼入硬さの関係, 一端焼入試験の結果は両試料間に有

意差を認めなかつた。

(3) 焼戻軟化抵抗は500°C以上でやや普通熔解試料の方が大きい。

(4) 同一焼入温度, 同一焼戻温度においては普通熔解試料の抗張力が大きい, 同一硬さ水準ではむしろ真空熔解試料の方が強度は大きい。

(5) 真空熔解は降伏比を改善する。

(6) 絞りおよび伸びは真空熔解により約10%, 衝撃値は約35%改善された。

(7) 真空熔解によるこれら靱性の改善率は, 特に高抗張力水準において顕著であつた。

(8) 640°C×1時間の焼戻による両者の焼戻脆性について検討を加えたが, 冷却速度の差による衝撃値の差および水冷後の両者の遷移温度の差は認められなかつた。

終りにのぞみ, 試料の真空熔解に御便宜をいただいた日立製作所中央研究所各位および比較試料の熔解を担当

された日立金属工業株式会社安来工場冶金研究所九重主任に深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- (1) F. Wever W. A. Fischer. u. H. Engelbrecht, Stahl u. Eisen 74 1521 (1954)
- (2) 小柴, 九重: 日本金属学会 1957 年秋季講演大会 発表
- (3) O. Winkler: Metallkunde 47 133 (1956)
- (4) J. H. Moore: Metal Progress 64 103 (1953-Oct.)
- (5) F. M. Richmond: SAE Journal 65 No. 10. 28 (1957)
- (6) H. C. Rezeau. Jr: SAE. Journal 65 No. 10. 67 (1957)
- (7) 日本化学会: 化学便覧 377 (昭 27-8 丸善)
- (8) 大和久: 焼入性 171 (昭 31-5 日刊工業)
- (9) G. K. Bhat: Iron Age 179 No. 4 73/77 (1957-Jan. 24)
- (10) H. Schwartzbart J. P. Sheehan: Iron Age 178 85 (1956-Aug. 9)

#### 日立評論

Vol. 40 No. 9 目次 (9月25日発行)

- ◎日立屋外用空気遮断器
- ◎大容量空気遮断器の新等価試験
- ◎日本国有鉄道東北線用中央制御無人直流変電所
- ◎ポーターコード型遠方監視制御装置
- ◎巻鉄心形変圧器
- ◎日立空気圧式小形計器
- ◎U 23 ディーゼルシヨベル
- ◎ドラムブレーキの研究
- ◎TIE-2型簡易型工業テレビジョン装置について
- ◎高品位アルミニウムを利用した防蝕
- ◎鋳鉄のガス含有量について(第1報)
- ◎熱間工具鋼 W-Cr(5-2)系鋼に及ぼすNiの影響
- ◎腐蝕電流の新測定装置
- ◎電極金属内部の電子構造と水素電極反応機構との関連性について

発行所 日立評論社  
東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地  
振替口座 東京 71824 番  
取次店 株式会社オーム社書店  
東京都千代田区神田錦町3の1  
振替口座 東京 20018 番

#### 日立評論

別冊 No. 25 工作機械特集号 目次  
(9月30日発行予定)

- ◎最近のフライス盤の進歩
- ◎フライス盤の防振装置について
- ◎工作機械の数値制御
- ◎工作機械用サーボ弁の解析と特性
- ◎シャフト用トランスファマシンについて
- ◎トランスファマシンの高度オートメーション化
- ◎トランスファマシンの加工精度検測装置
- ◎日立強力型1,500mmホブ盤について
- ◎平面研削盤における問題点
- ◎日立新型重切削旋盤用倣い装置
- ◎工作機械用送りネジの精度
- ◎工作機械用電気品に要求される特性
- ◎格子制御放電管による電動機速度制御装置

発行所 日立評論社  
東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地  
振替口座 東京 71824 番  
取次店 株式会社オーム社書店  
東京都千代田区神田錦町3の1  
振替口座 東京 20018 番