

Inconel X 型合金のばね特性について*

金井良昭**・関不二雄**・上正原和典**・内山道良***

On the Spring Properties of Inconel X Type Alloy.

Yoshiaki KANAI, Fujio SEKI, Kazunori KAMISHOHARA
and Michira UCHIYAMA

Synopsis:

Authors have reported in the preceding study, as part of a study on super alloys for springs, on the spring properties of Refractaloy 26 type alloy. This time, they investigated the spring properties at the room temperature and elevated temperature of Inconel X type alloy. This alloy was treated under various combinations of solution temperature, solution time, aging temperature, aging time and cold reduction before aging.

Characteristics at the room temperature were determined by hardness, tensile, grain size or deflection tests to confirm the spring properties. Spring properties at the elevated temperature were investigated using coil springs subjected to an optimum solution treatment, aging treatment, and cold working. Compression coil springs were manufactured for this investigation and heated from room temperature, with the temperature and deflection registered, then the modulus of rigidity and proportional limit in twisting at high temperature determined. To confirm the stability of deflection under load and heating, coil springs were heated and cooled cyclically. Also the micro-structure and the process of precipitation were observed with the help of electron-microscope.

Results obtained were as follows;

- 1) A combination of 982°C (solution treatment) and 704°C×9~44 hr (aging treatment) develops better mechanical properties at room temperature than any other combination.
- 2) Maximum mechanical properties at room temperature, under a combination of cold working and aging treatment, can be obtained with lower aging temperature and shorter aging time.
- 3) The aging treatment and cold working do not affect the modulus of rigidity.
- 4) The proportional limit in twisting is influenced by the aging temperature, aging time and cold working. It hardly goes down up to about 600°C.
- 5) Permissible stress for this alloy is up to about 40 kg/mm² for one strengthened by cold working and aging treatment, when the upper temperature of reversed cyclic heating is about 400°C.

(Received 21 Oct. 1965)

1. 緒 言

筆者らは超合金のばね的な性能を調査するために先に Refractaloy 26型合金^{1)~4)}について研究したが、今回は引続き Inconel X型合金^{5)~8)}を特に高温用の超合金ばねとして利用するための特性について報告する。高温用のばねとして利用する場合には常温から高温までの特性がばね的に優れていなければならない。本実験もこの点を考慮してまず常温で優れたばね特性を得るための適正な処理を決め、次に常温で優れた特性をもつものについてさらに高温までのばね的な性能を調査した。

本研究の試料は溶体化処理・時効処理・冷間加工(時効処理前の冷間引抜)を組合せ施こした Inconel X 型合金を使用し、実験は引張・硬さ・結晶粒度試験およびコイルばねの圧縮試験を行ない、常温特性については引

張強さ・硬さ・のび・絞り・結晶粒度・振り比例限度・横弾性係数を、高温特性については振り比例限度・横弾性係数および繰返加熱によるセットについて測定した。

2. 試 料

本実験に用いた試料は 100 kg 高周波誘導式真空溶解炉で溶製した合金を 165 mm φ(底部): 205 mm φ(頂部)×415 mm(高さ)の寸法に真空中で造塊後鋼塊表面を旋削し 20 mm φ に熱間鍛造したものを、熱間圧延・冷間引抜などにより最終径 4 mm φ とした。冷間引抜により

* 昭和39年4月, 10月, 昭和40年4月本会講演大会にて発表

昭和40年10月21日受付

** 三菱製鋼株式会社

*** 三菱製鋼株式会社 工博

所定の減面率とする必要がある試片は 5.5~9 mm ϕ の種々の寸法に熱間圧延後溶体化処理と冷間引抜きを行なつて 4 mm ϕ で所定の減面率となるように加工した。試片の化学成分は Table 1 に示す。

Table 1. Chemical composition of specimen (%).

Ni	Cr	Ti	Nb	Al	Fe
Bal	15.61	2.44	0.70	0.47	6.50
C	Si	Mn	P	S	
0.017	0.29	0.48	0.003	0.004	

Table 2. Solution treatment of specimens.

Solution temperature (°C)	Solution time (hr)
871 (1600° F)	0.5
927 (1700° F)	1
982 (1800° F)	2
1038 (1900° F)	3
1093 (2000° F)	4
1149 (2100° F)	5
1204 (2200° F)	6
1260 (2300° F)	

Table 4. Duplex aging treatment of specimens.

Solution treatment	Primary aging treatment	Secondary aging treatment	
		Temperature (°C)	Time (hr)
982°C (1800° F) ×2hr	871°C (1600° F) ×2hr	760 (1400° F)	0.5
	816°C (1500° F) ×2hr	732 (1350° F)	2
		704 (1300° F)	9
	760°C (1400° F) ×9hr	677 (1250° F)	44
		649 (1200° F)	200

Table 5. Cold reduction and aging treatment of specimens.

Solution treatment	Reduction (%)		Aging treatment	
	Specimens of tensile and hardness tests	Coil spring	Temperature (°C)	Time (hr)
982°C (1800° F) ×2hr	0, 17	0, 19	593 (1100° F)	0.5
	24, 38	26, 36	649 (1200° F)	2
	50, 62	47, 62	704 (1300° F)	9
	72, 79	72, 80	760 (1400° F)	44
	89,		816 (1500° F)	200
		871 (1600° F)		

Table 6. Dimensions of coil springs.

Wire dia. (mm)	4.0	Total number of coils	7.5
Coil dia., outer (mm)	30.0	Effective number of coils	5.5
Coil dia., mean (mm)	26.0	Direction of coils	Right hand
Free length (mm)	101.0	Type of ends	Squared & ground

試片は 4 mm ϕ の本合金を Table 2~5 に示すような溶体化処理・冷間引抜き・コイルリング・時効処理を組合せ施したもので、高温実験用のコイルばねの諸元は Table 6 の通りである。

以上のような試片の処理の組合せと試験の種類は Table 7 に示す通りである。

3. 実験方法

Table 7 に示したような試験は次の実験方法によつて行なつた。

3.1 引張試験 (常温)

長さ約 300 mm の 4 mm ϕ 試片をそのまま容量 10 t

Table 3. Aging treatment of specimens.

Solution treatment		Aging treatment	
Temperature (°C)	Time (hr)	Temperature (°C)	Time (hr)
982 (1800° F)	2	649 (1200° F)	0.5
		704 (1300° F)	2
		760 (1400° F)	9
1149 (2100° F)		816 (1500° F)	44
		871 (1600° F)	200
		927 (1700° F)	

Table 7. Treatments of specimens and kinds of tests.

Treatments of specimens	Tests
Solution treatment	Hardness, tensile properties, grain size
Solution treatment→Aging	Hardness, tensile properties, grain size, Modulus of rigidity, proportional limit in twisting
Solution treatment→Duplex aging	Same as above
Solution treatment→Cold drawing→Aging	Same as above
Solution treatment→Coiling→Aging	Modulus of rigidity and proportional limit in twisting at elevated temperature, reversed cyclic heating
Solution treatment→Coiling→Duplex aging	Same as above
Solution treatment→Cold drawing→Coiling→Aging	Same as above

のアムスラー型材料試験機にかけ、常温における引張強さ・伸び・絞り（標点距離は JIS Z2201, 2 号による）の測定を行なった。

3.2 硬さ試験（常温）

引張試験片の一端から引張試験施行前に硬さ測定用の試験片を採取し横断面でヴィッカース硬度計により荷重30 kg の下で常温における硬さを測定した。

3.3 結晶粒度試験（常温）

硬さ測定用試験片について JIS G0551 にしたがってオーステナイト結晶粒度の測定を行なった。

3.4 常温におけるばね撓み試験（常温）

300kg アムスラー型材料試験機でコイルばねに圧縮荷重を加え荷重—撓み曲線を求めた。

3.5 高温におけるばね撓み試験（高温）

容量 150 kg のクリープラプチャー試験機を用い、環状電気炉内でばねに圧縮荷重が加わるように装置したばね座にコイルばねを取り付け、荷重を加えたまま昇温し（約 26°C/min）プルロッドを通じて 1/100 mm 目盛 50 mm ストロークのダイヤルゲージで撓みを読み、またコイルばねの両端のばね座に固定した Pt-PtRd 熱電対により温度を測定し、温度—撓み曲線を求めた。

3.6 繰返し加熱試験（常温—高温）

150kg のクリープラプチャー試験機でコイルばねに圧縮荷重がかかるように設計した保持装置を使用し、コイルばねに荷重を加えたまま直接交流を通电しある温度まで加熱する。ただし測温はテンピルスティックを使用し試料の中央のコイル表面で行なった。予定の温度に昇温した時止電し試料の温度が 50°C になるまで放冷し、再び通电する。以上の操作を 30 回繰返し、この間におけるコイルばねの撓みの変化を 1/100 mm 目盛のダイヤルゲージで読取った。試験は加熱上限温度 4 段階（204,

371, 482, 593°C）荷重12段階（7.3, 12.3, 17.3, 22.3, 27.3, 32.3, 37.3, 42.3, 47.3, 52.3, 57.3, 62.3kg）の組合せによつて行なった。

3.7 組織（常温）

代表的処理を施した試片の組織を電子顕微鏡により観察した。

4. 実験結果

4.1 引張試験・硬さ試験・結晶粒度試験

4.1.1 溶体化処理試片による実験結果

Table 2 のように溶体化の処理温度 8 段階・処理時間 7 段階の組合せにより計 56 種の処理を施したものに

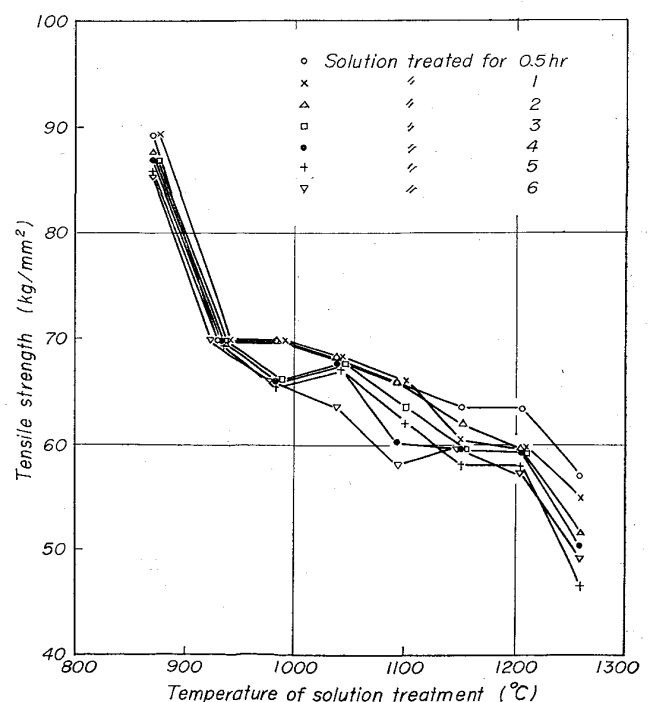


Fig. 1. Effect of solution treatment on tensile strength.

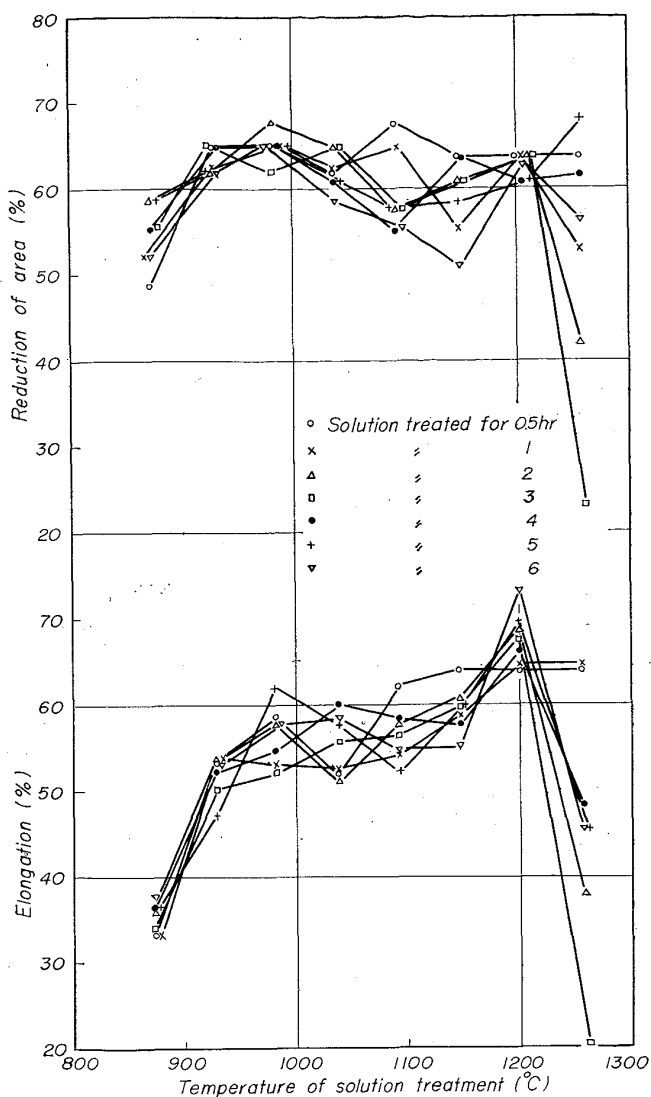


Fig. 2. Effect of solution treatment on elongation and reduction of area.

いて調査を行なった。

硬さの変化⁹⁾は 927°C から溶体化が開始されていることを示し、それ以上の温度の上昇と共に僅かに硬さは低下する傾向をみせている。ただし処理時間の長短によつては差がみられない。

Fig. 1 の引張強さも硬さと同様な傾向を示している。ただし溶体化温度が 1260°C に到達すると急に低くなる。

Fig. 2 の絞り・伸びは硬さと引張強さとは逆の関係にあることが示されており、引張強さの場合と同様に溶体化処理温度が 1260°C に到達した場合は急に低くなる。

Fig. 3 の結晶粒度はこの溶体化処理の温度と時間による変化の結果を示したもので、1093°C までは処理時間との関係は著しくなく僅かに粗粒化する傾向があるが、それ以上の温度では処理時間の延長と共に急に粗粒化が

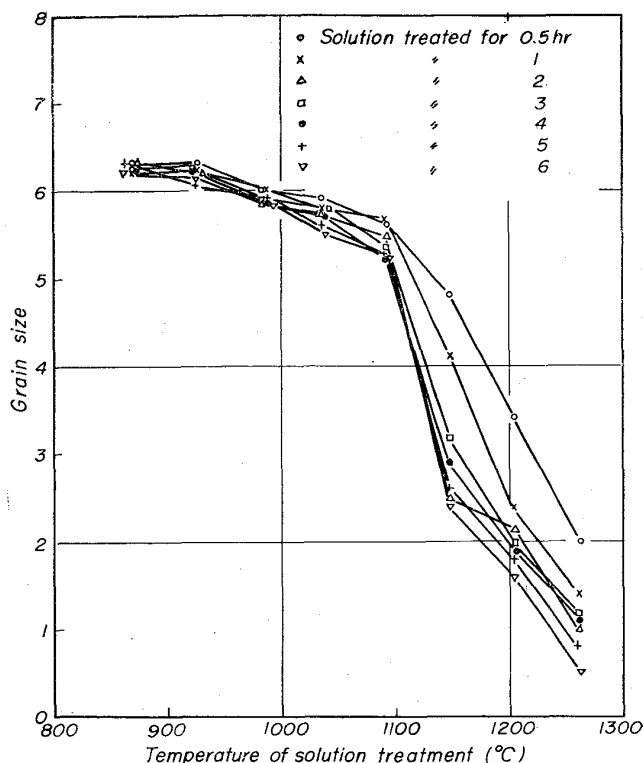


Fig. 3. Effect of solution treatment on grain size.

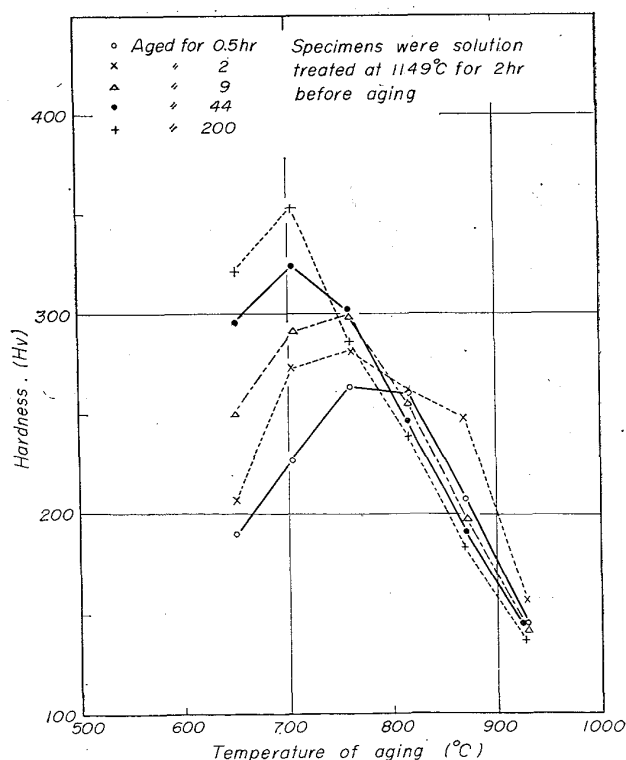


Fig. 4. Effect of aging treatment on hardness.

著しくなる。1260°C を例にとれば 0.5hr で 2.0, 6hr で 0.5 にも粗粒化しこれが引張強さ・伸び・絞りなどの性質を低下させている原因となっている。

4.1.2 1 段時効処理試片による実験結果

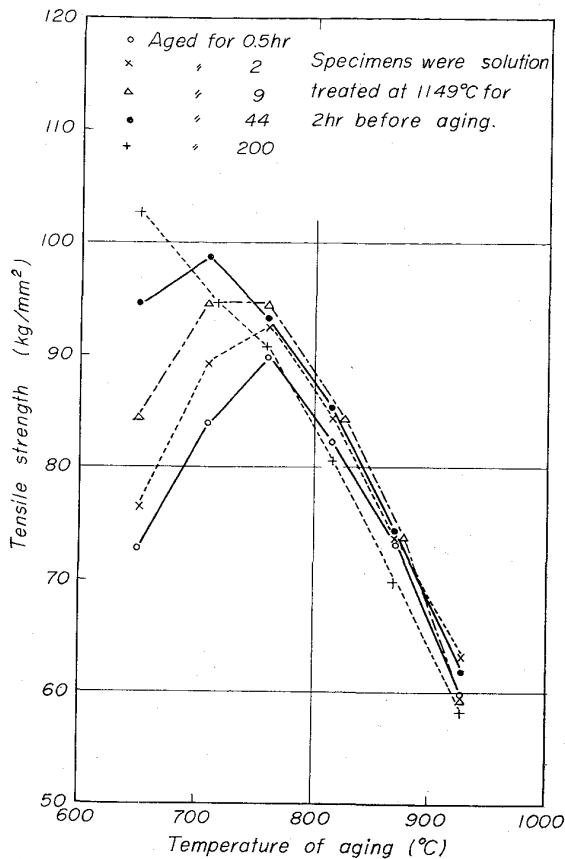


Fig. 5. Effect of aging treatment on tensile strength.

先の溶体化処理の実験結果では、927°C以上の温度では保持時間が0.5hr以上の時は大差ないことを知った。そこで一応機械的性質に悪い影響を与えない範囲内で、また溶体化処理温度の上限と下限を確かめる意味で982°Cおよび1149°Cで各2hrの保持を溶体化処理として選んだ。1段時効処理の組合せとしてはTable 3のごとく溶体化処理2段階、時効処理温度6段階、時効処理時間5段階を組合せた計60種について特性を求めた。

硬さの特性はFig. 4および講演論文¹⁰⁾に示す通りで、いずれも時効処理時間の延長と共に最大の性能は低温度処理側に移行している。また溶体化処理温度982°Cのものが1149°Cのものより優れている。

引張強さの特性は¹¹⁾Fig. 5にも示すように硬さの関係と同様な結果である。

Fig. 6は絞り・伸びを示したもので硬さ・引張強さなどと逆の関係を示している。ただし溶体化処理温度が982°Cのものは1149°Cのものに較べて硬さ・引張強さの値が大きいものにも関わらず絞り・伸びもまた良好な性能を示している。

4.1.2 2段時効処理試片による実験結果

1段時効処理の実験結果では溶体化処理温度982°C

の方が優れている。そこで溶体化処理は1種類としてTable 4に示す組合せで1段目の時効処理は3段階、2段目の時効処理は4段階の温度と5段階の時間を組合せた中から55種について特性を求めた。

Fig. 7~9はそれぞれ硬さ・引張強さ・絞り・伸びについての結果を示した。硬さ・引張強さについては先の1段時効処理と同様に2段目の処理時間が延長されるに従い最大値は低温度側に移行する。絞り・伸びについては一般に硬さ・引張強さと逆の関係を示していることも同様である。ただし2段時効処理による最大値は少くとも1段時効処理によつて得られた最大値に比較して特に優れた性質を示していない。

4.1.4 冷間加工と時効処理を施した試片による実験結果

溶体化処理後冷間引拔を施したのち時効処理したものの組合せとしてTable 5の加工度9段階、時効処理温度6段階、時効処理時間5段階の組合せの中から220種について特性を求めた。

Fig. 10は593~871°C間の時効処理温度6段階の硬さの特性で、これによれば高加工度のものほど処理時間の延長または処理温度の上昇と共に最大値は低下する。

Fig. 11は硬さの特性と相当する処理を施した引張強さの結果で、硬さとほとんど同じ傾向を示している。

Fig. 12はこの状態の絞りと伸びを示した。一般に硬さや引張強さと逆の関係を示し、ことに硬さや引張強さが時効処理温度の上昇と共に高加工度側で逆転を示すものが伸びに特に顕著に示されている。絞りはそれ程明瞭に現われていない。

4.2 常温におけるばねの撓み試験

Table 3~5に示す時効処理を行なつたものについて常温で撓み試験を行ない、荷重と撓みとの関係から横弾性係数Gと捩り比例限度τを求めた。

これらの計算式は(1)、(2)式による。

$$G = 8PD^3n / \delta d^4 \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau = 8KPD / \pi d^3 \dots\dots\dots (2)$$

- ここに P: 荷重 (kg)
- D: コイルの平均径 (mm)
- n: コイルの有効巻数
- δ: 撓み (mm)
- d: コイルの線径 (mm)
- K: $(4m - 1/4m - 4) + 0.615/m$
($m = D/d$)

である。

4.2.1 1段時効処理コイルばねによる撓み試験結果

この場合コイルばねに施した1段時効処理は常温の機械的性質の結果から選択したが、760°C以上の処理温度では機械的性質が低下し、また649°C以下の処理温

度では最大値を得るために、200hr以上の長時間処理を行わなければならないので、649, 704, 760°Cの3段階を適正時効処理温度として選択した。

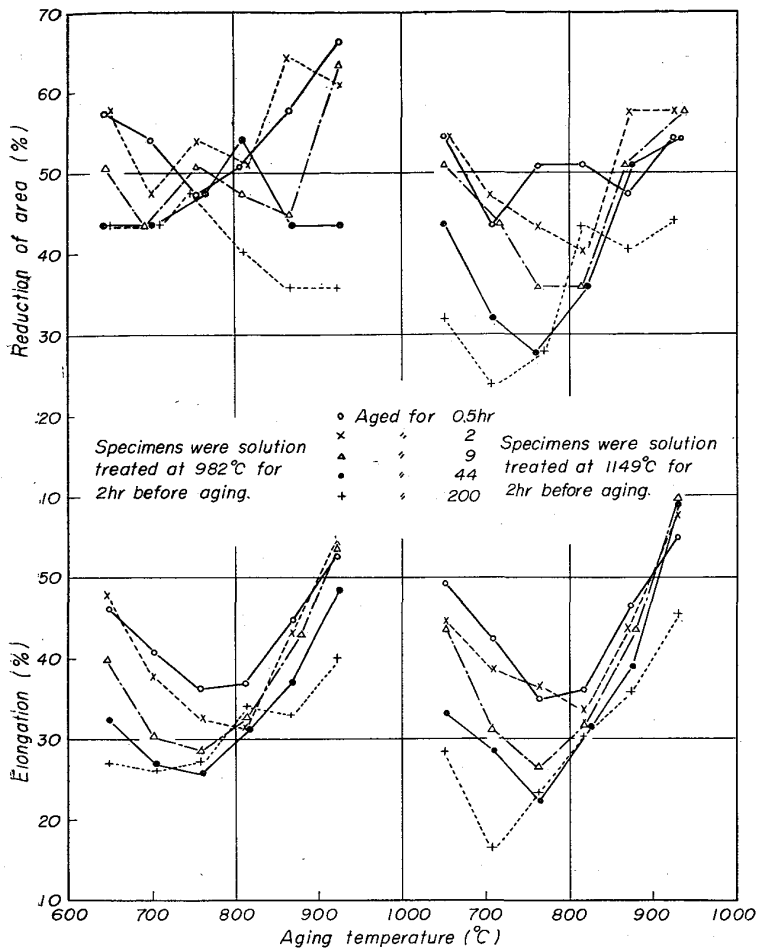


Fig. 6. Effect of aging treatment on reduction of area and elongation.

以上の処理を行なった試片の荷重と撓みとの関係を測定した結果¹²⁾によると、時効処理時間の増加に対して撓り比例限度は0.5~9hrの時効処理で急増し9~200hrで最大値となる。また処理温度が低い程最大値が長時間側に現われることは常温の引張強さおよび硬さの傾向と同じである。また横弾性係数は溶体化処理のみを行なったものではやや低いが時効処理を行なうとほとんど同じである。

4.2.2 冷間加工と時効処理を施したコイルばねによる撓み試験結果

溶体化処理後0~80%の冷間加工を施した線材をコイルリングした後の時効処理は常温機械的性質の結果から選択したが、

- a. ばね特性が優れていること
- b. 時効処理温度が高すぎないこと
- c. 時効処理時間が長すぎないこと

を選択の要因として649°C×44hrの処理を施した。これらの試片の撓み試験結果¹³⁾によると、横弾性係数は冷間加工度の変化に対してほとんど変わらないが、撓り比例限度は冷間加工度の増加と共に急激に増加し72%で最大値となりそれ以上の冷間加工を行なうとかえつて減少する。この傾向は引張強さや硬さと同じようである。

4.3 高温におけるばねの撓み試験

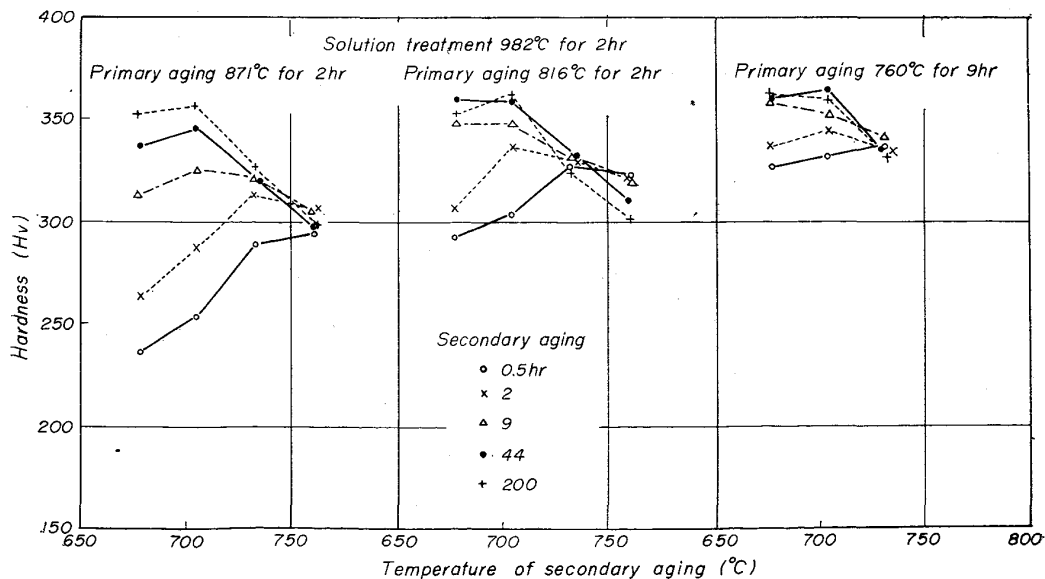


Fig. 7. Effect of secondary aging on hardness.

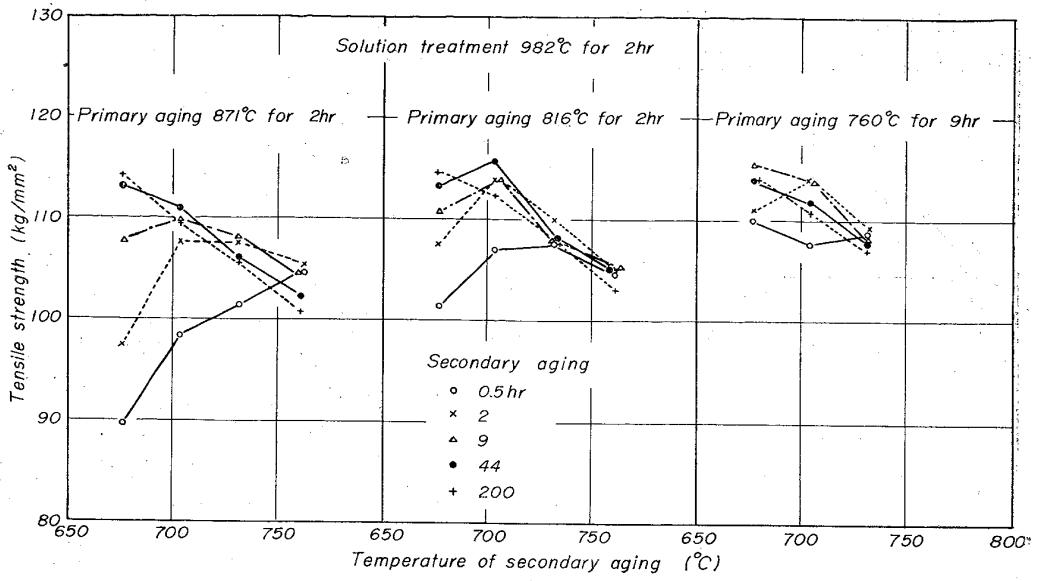


Fig. 8. Effect of secondary aging on tensile strength.

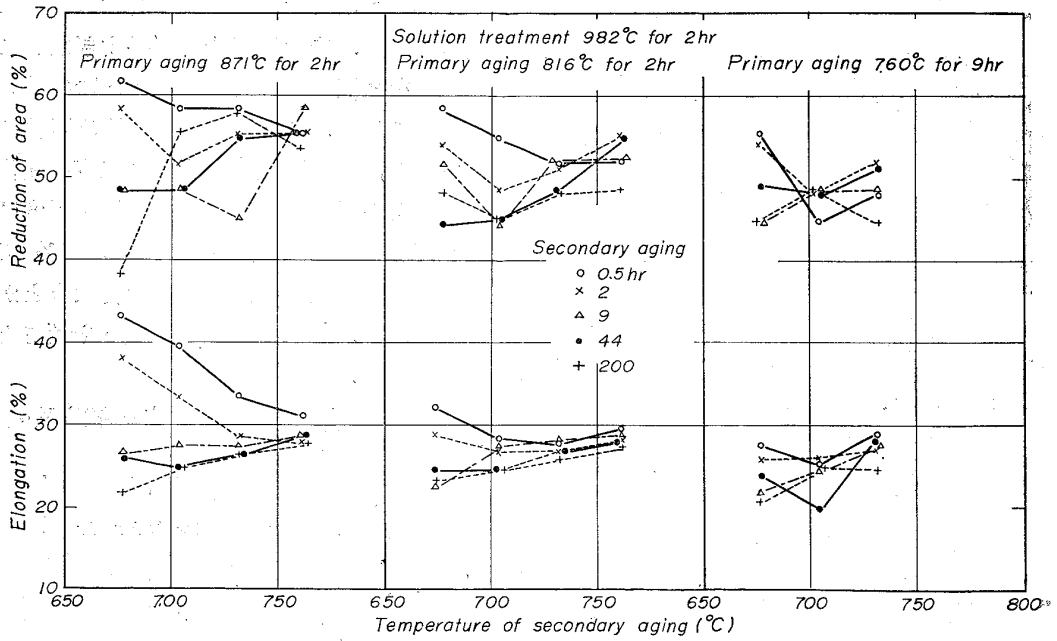


Fig. 9. Effect of secondary aging on reduction of area and elongation.

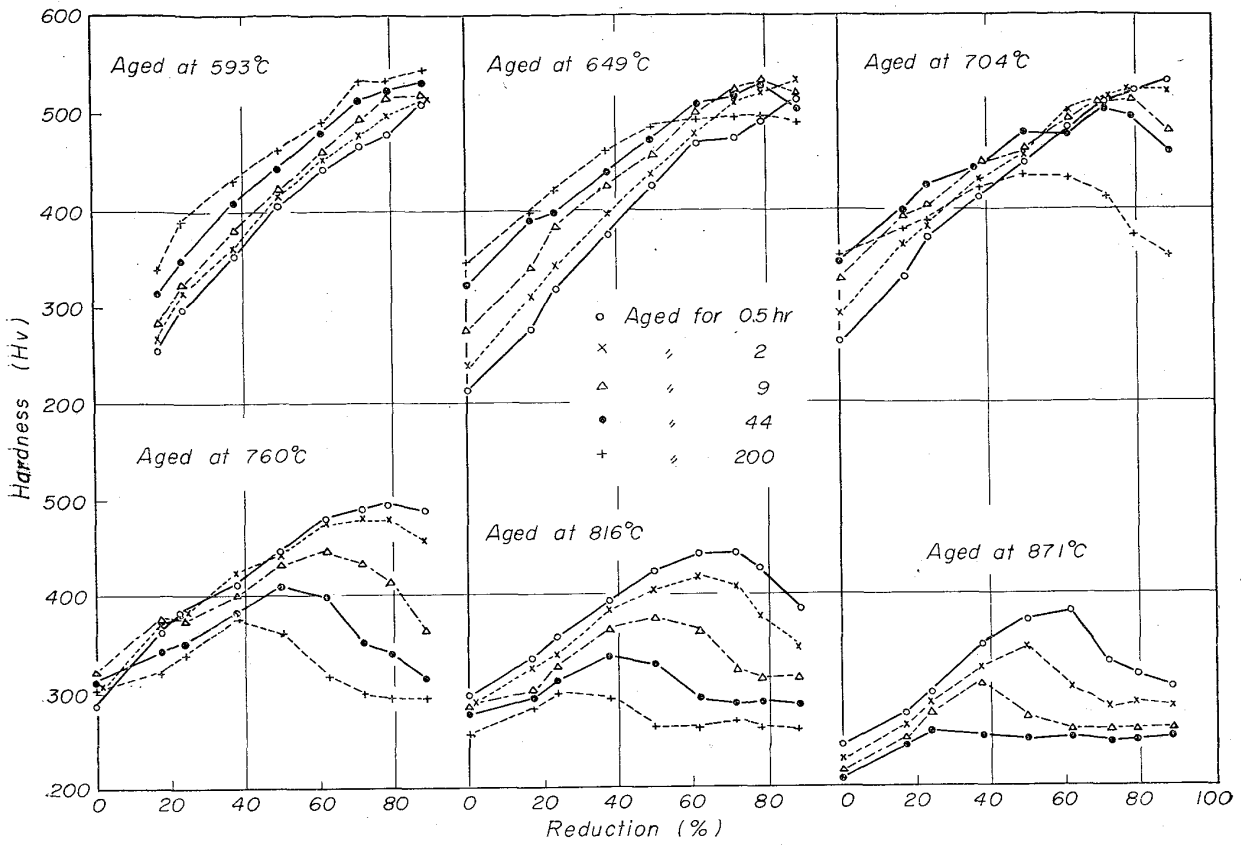


Fig. 10. Effect of cold drawing on hardness.

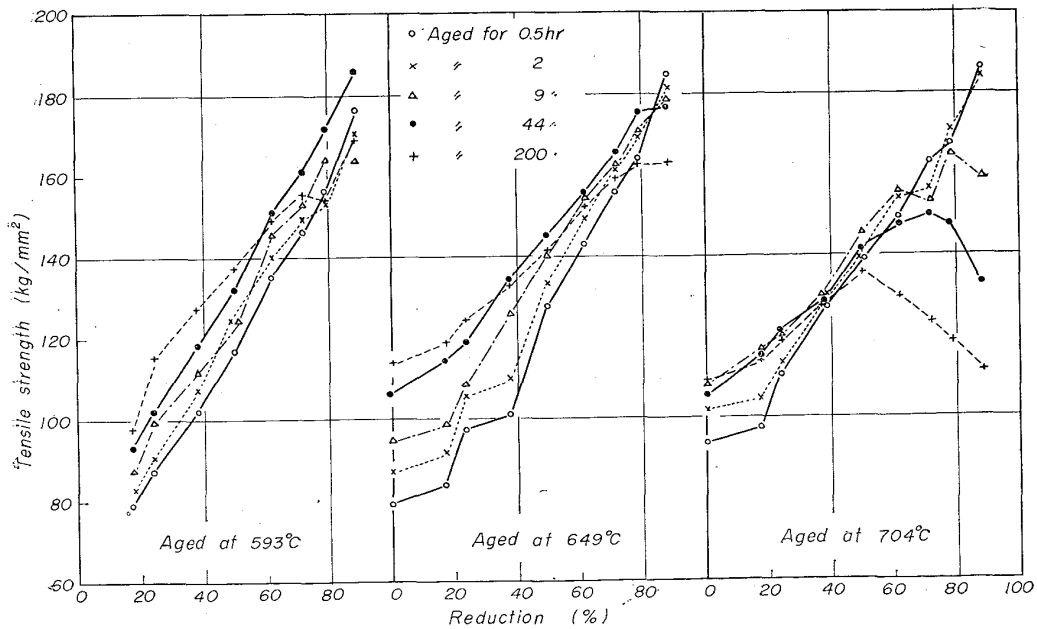


Fig. 11 a. Effect of cold drawing on tensile strength.

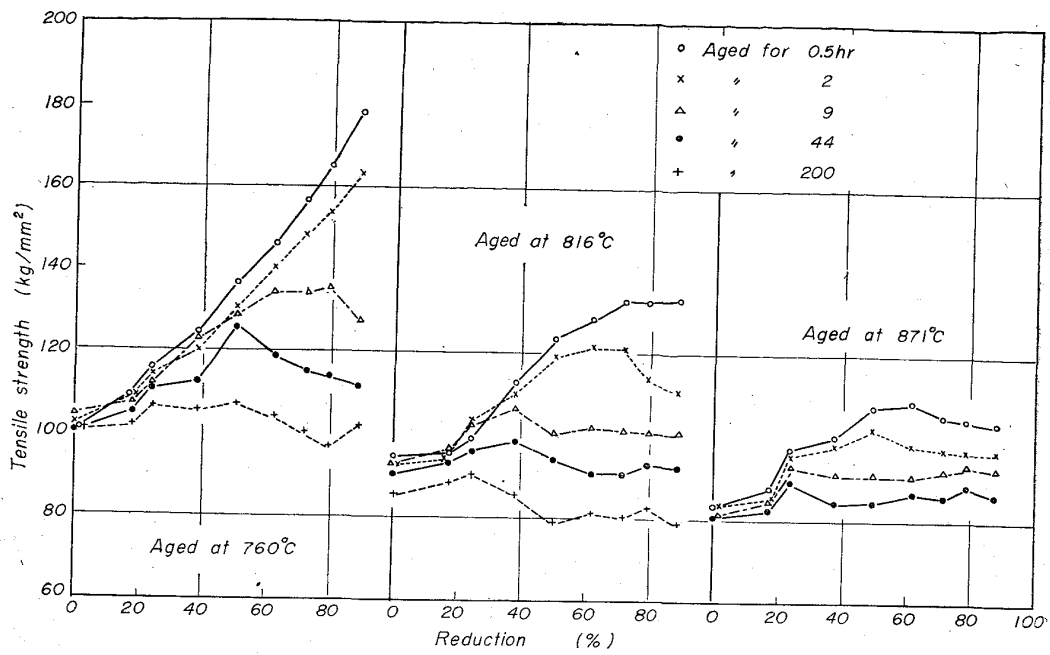


Fig. 11 b. Effect of cold drawing on tensile strength.

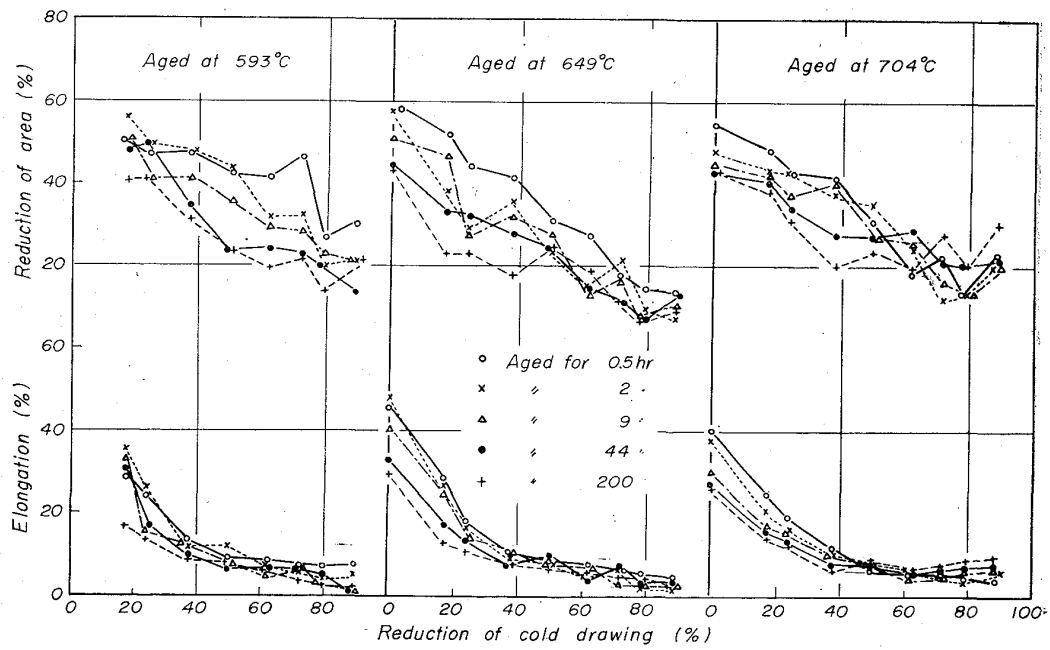


Fig. 12 a. Effect of cold drawing on reduction of area and elongation.

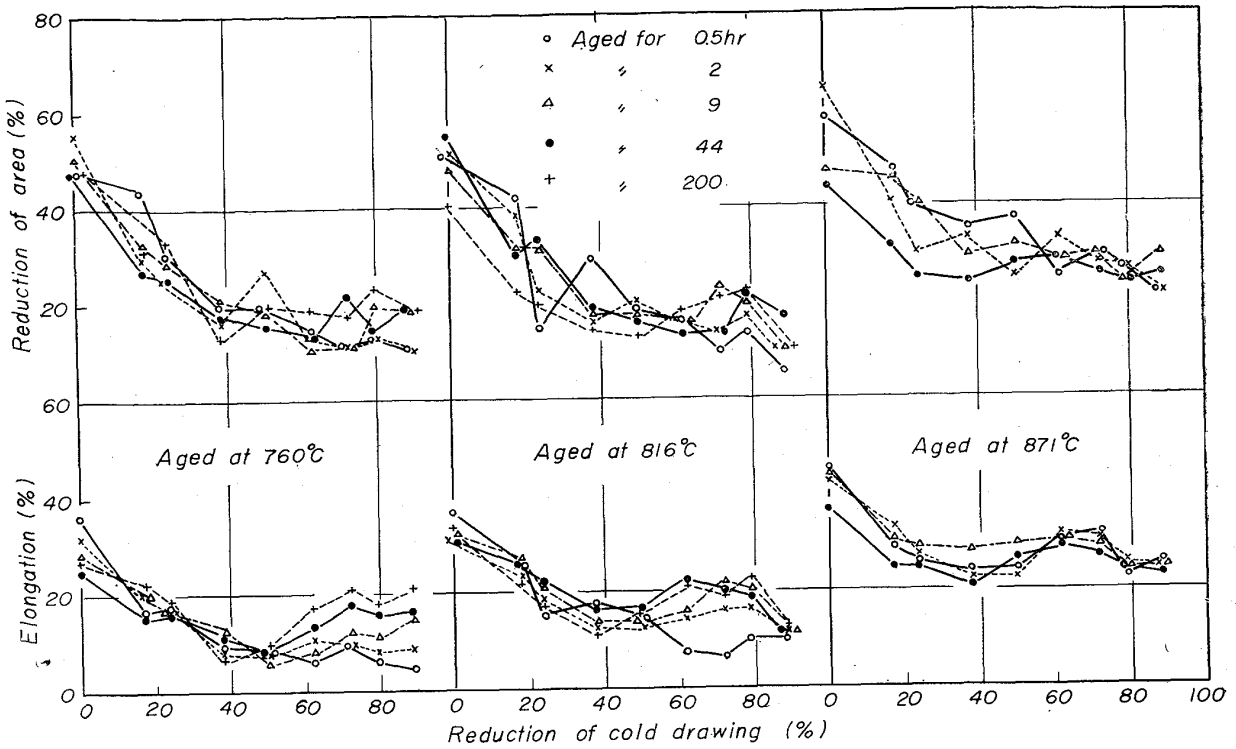


Fig. 12 b. Effect of cold drawing on reduction of area and elongation.

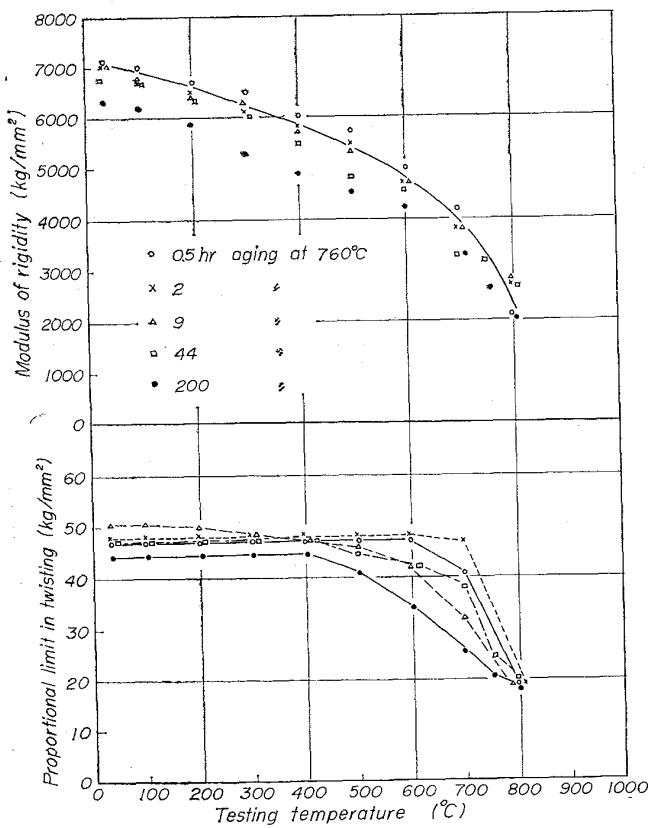


Fig. 13. Effect of testing temperature on modulus of rigidity and proportional limit in twisting.

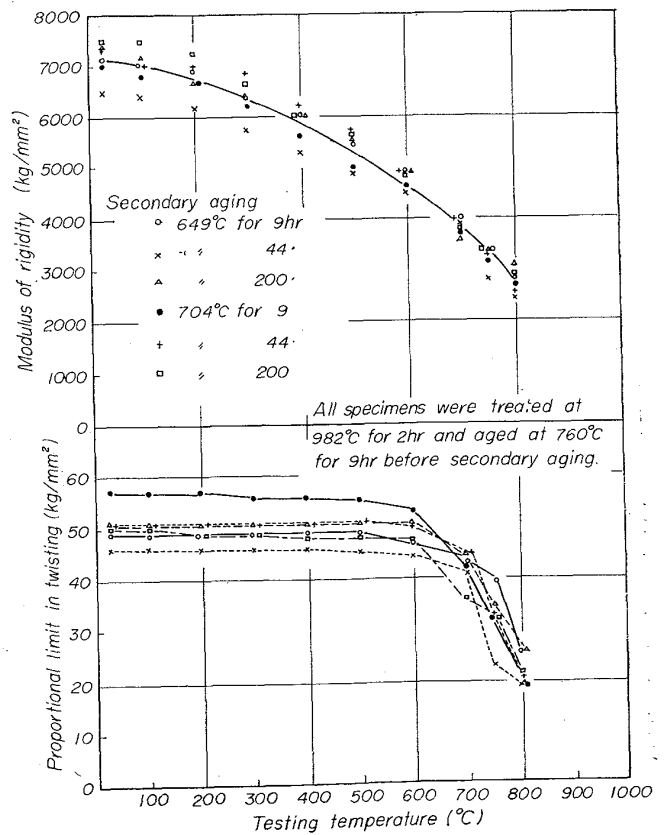


Fig. 14. Effect of duplex aging treatment and testing temperature on modulus of rigidity and proportional limit in twisting.

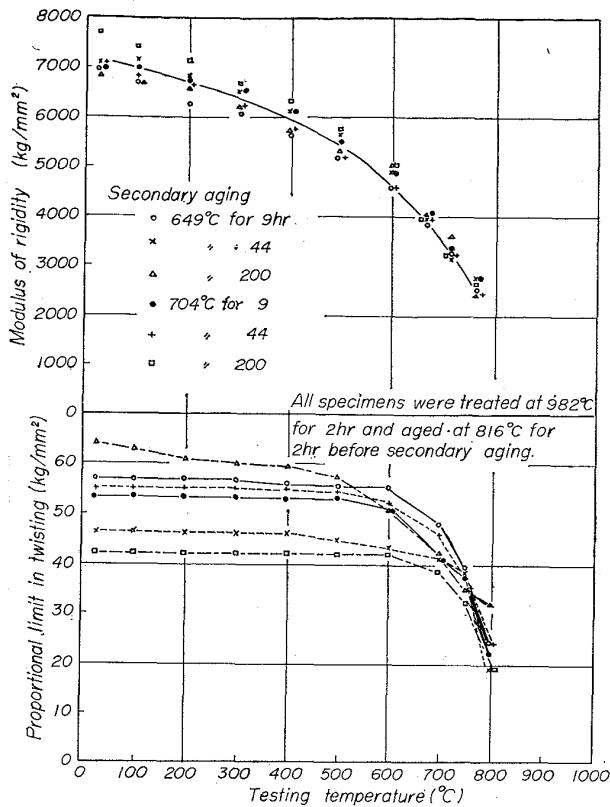


Fig. 15. Effect of duplex aging treatment and testing temperature on modulus of rigidity and proportional limit in twisting.

4.3.1 1段時効処理コイルばねによる高温撓み試験結果

Table 3 に示す時効処理を施したコイルばねに圧縮荷重を加えたまま昇温し撓み量を測定して、温度と横弾性係数および振り比例限度との関係を求めた。

649, 704°C で時効処理したコイルばねの結果¹⁴⁾および 760°C で時効処理した結果 (Fig. 13) によると、横弾性係数は常温で 7000~7500 kg/mm² から昇温とともに次第に減少し 800°C で 2000~3000 kg/mm² になる。また時効処理温度が 649~760°C の変化や処理時間が 0.5~200 hr の間ではほとんど同じ横弾性係数が得られる。

振り比例限度は常温から約 600°C までは減少しないが、600°C をこえると減少しはじめ 700~800°C で急激に降下する。時効処理時間を変えると振り比例限度は影響をうけるが、649°C の処理のもの最大値は 200hr, 704°C では 9hr, 760°C では 2~9hr と処理温度の上昇とともに短時間側に移行する。それぞれの処理中振り比例限度の最大値を示すものを比較すると 704°C × 9hr, 649°C × 200hr, 760°C × 2~9hr の順位となる。一般に常温で優れた振り比例限度をもつコイルばねは約 600°C まで優れた特性を維持している。

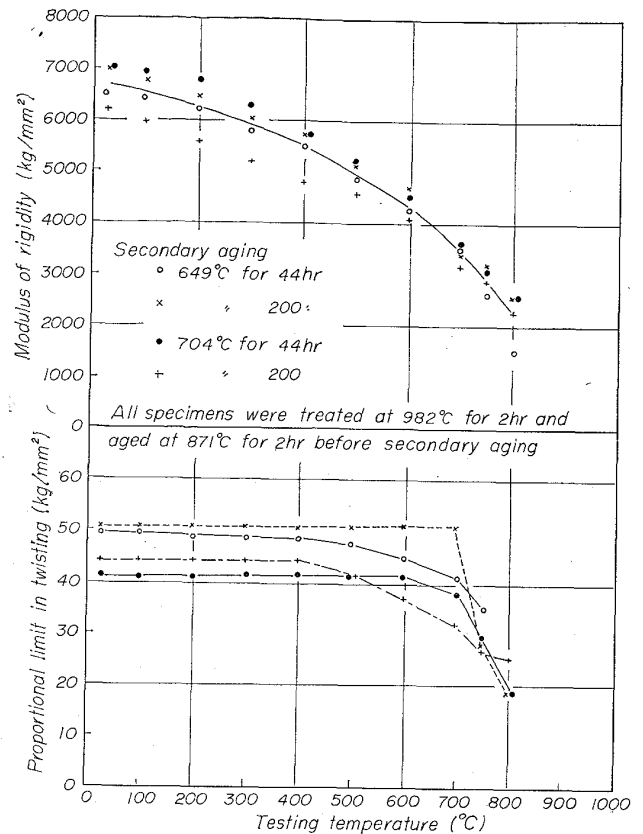


Fig. 16. Effect of duplex aging treatment and testing temperature on modulus of rigidity and proportional limit in twisting.

4.3.2 2段時効処理コイルばねによる高温撓み試験結果

2段時効処理は Table 4 の通りの温度と時間を選択したが、2段目処理では常温特性の研究結果 732°C 以上では特性が低下し、また 677°C 以下では短時間処理側でまだ高い値を示す可能性も認められたので 704, 649°C の2種類を選択した。

これらの試片の高温におけるばね特性を調査すると Fig. 14~16 に示す通りであるが、横弾性係数は1段目処理が 871°C のものがやや低いのを除いて1段時効処理の試片と同じ傾向である。また振り比例限度が昇温とともに減少する傾向は1段時効処理の試片と同じであつて、1段目処理 816°C × 2hr 2段目処理 649°C × 200hr のものが最も優れているが、816°C × 2hr → 649°C × 9hr の試片は約 600°C まで安定して高い特性をもっている。

4.3.3 冷間加工と時効処理を施したコイルばねによる高温撓み試験結果

溶体化処理後冷間引拔を行なつて 649°C × 44hr の時効処理をしたコイルばねを昇温した結果は Fig. 17~18 の通りであつて、これによると横弾性係数が温度とともに減少する傾向は冷間加工を施さないで直ちに時効処

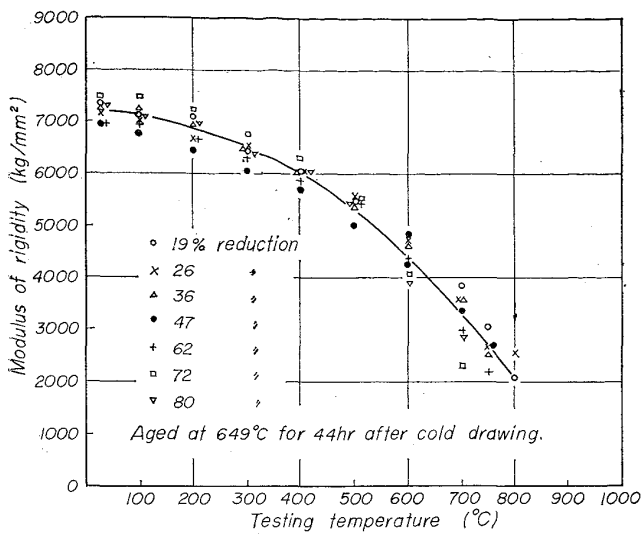


Fig. 17. Effect of cold reduction and testing temperature on modulus of rigidity.

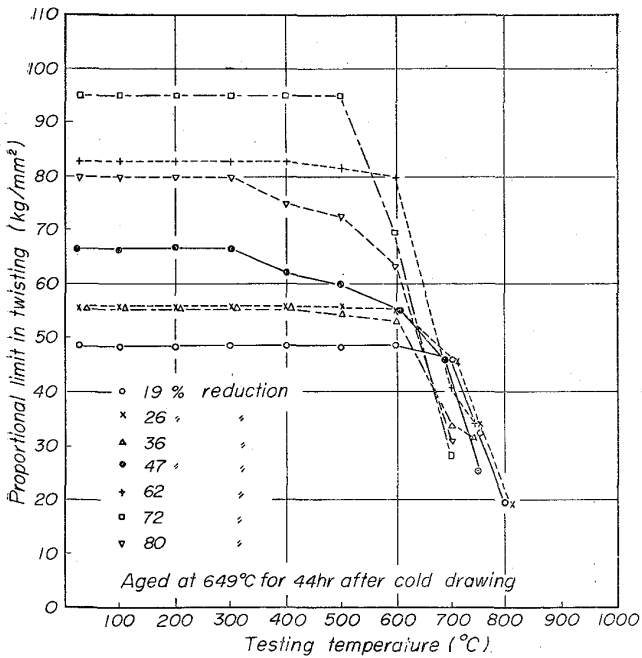


Fig. 18. Effect of cold drawing and testing temperature on proportional limit in twisting.

理をした試片と同じようである。

振り比例限度は約 500°C まで常温と同じ強さを維持しているが 500~800°C の温度範囲では急激に減少する、特に冷間加工度の低いものよりも高いもの程低温側から減少を開始する。72% の冷間加工を行なった試片は最も高い振り比例限度を示しているが、500°C 以上で急激に減少し 700°C では冷間加工度の低いものより低下している。

4.4 ばね繰返し加熱実験

ばねの用途によつて何回となく熱的履歴（以下熱サイ

クルと呼ぶ）が繰返される場合があり、ばねにおいて良く知られているセットの現象に類似した効果がある。そしてこれは最終熱処理の時効処理および熱サイクルの過程における析出によつて大きく左右される。筆者らは時効処理後のばね性能の使用中の熱サイクルに対する安定度の基準を決定する一助としてこれらのうち最も代表的な熱処理・冷間加工を施こした圧縮コイルばねを用い、一定荷重（応力）のもとでばねに直接交流を通すことにより急激に加熱する方法で熱サイクルを加えた時の撓みの変化について実験した。この熱サイクルの加熱速度は 400°C 位まで約 30°C/sec である。

4.4.1 繰返加熱試験における加熱繰返し数と撓みの変化

約 130 のコイルばねについて行なつた繰返し加熱実験のうち代表的な例として、62% の冷間加工後 649°C × 44hr の時効処理を行なつたばねに加熱上限温度 593°C 荷重 12.3, 22.3, 32.3, 42.3, 52.3kg のときの繰返し数—撓み曲線を Fig. 19 に、また 62.3kg 荷重のもとで加熱上限温度が 204, 371, 482, 593°C のときの繰返し数—撓み曲線を Fig. 20 に示す。

4.4.2 繰返し加熱試験における荷重とセット量

加熱上限温度が 204, 482, 593°C と 50°C の間で 30

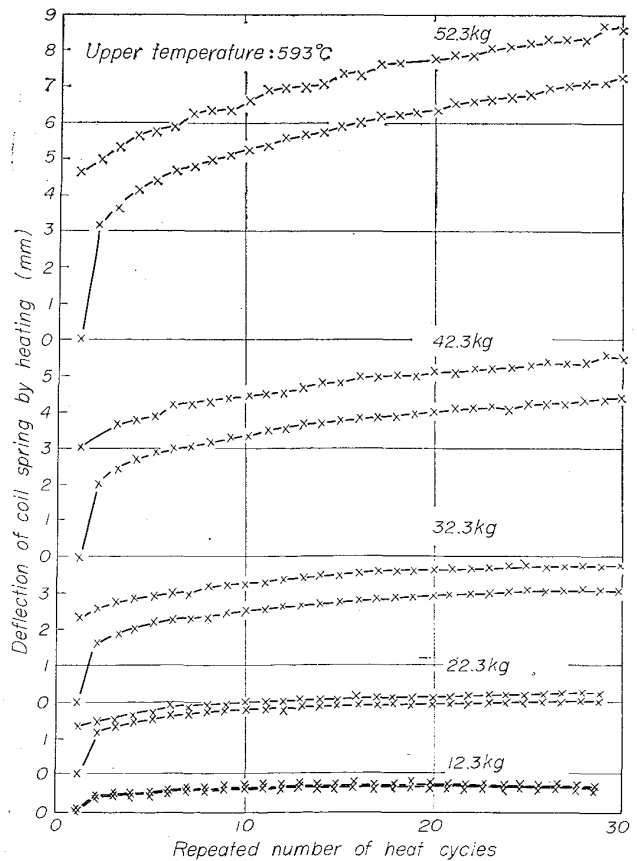


Fig. 19. Deflection curves (1).

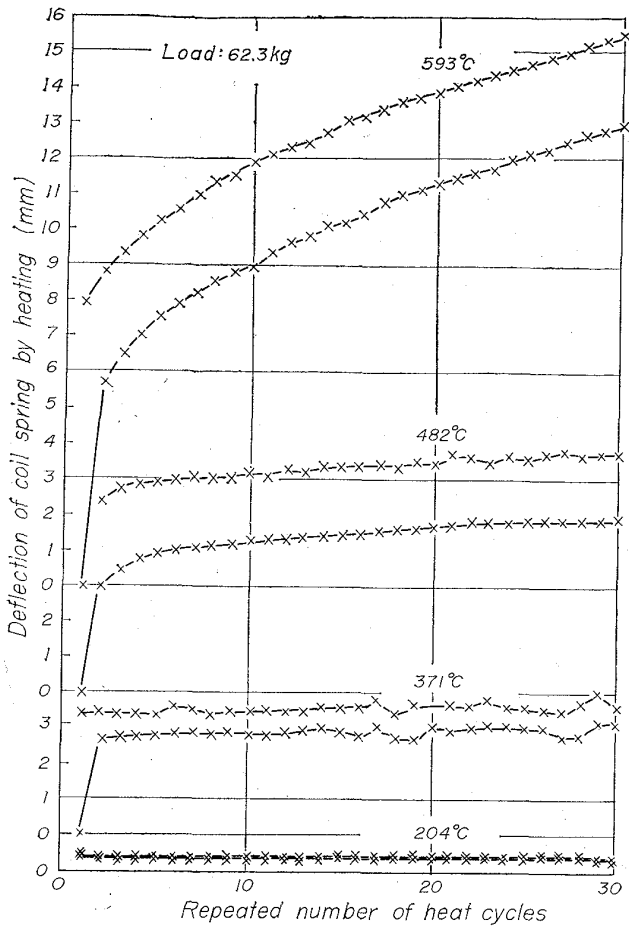


Fig. 20. Deflection curves (2).

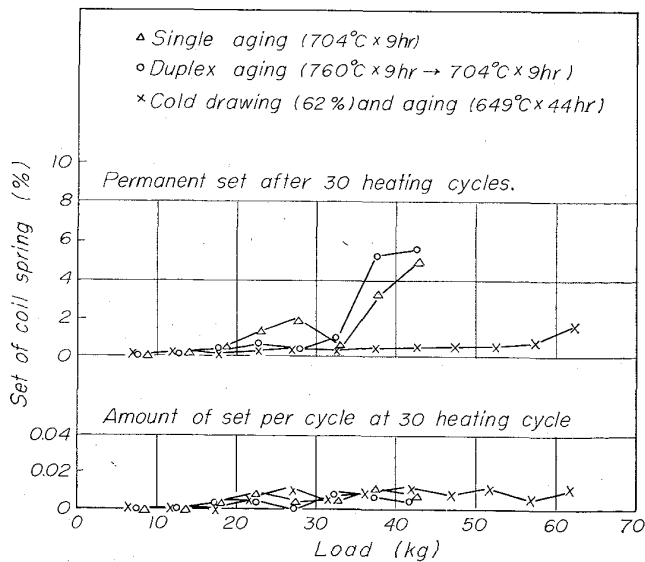


Fig. 21. Effect of load on the set of coil spring (Upper temperature 371°C).

回の繰返し加熱冷却を行なった後の荷重と永久変形量との関係、および 30 回繰返し後の 1 サイクル当りの永久変形量は第Ⅶ報¹⁵⁾で報告した通りである。また上限温度 371°C の時の永久変形量は Fig. 21 に示す通りである。

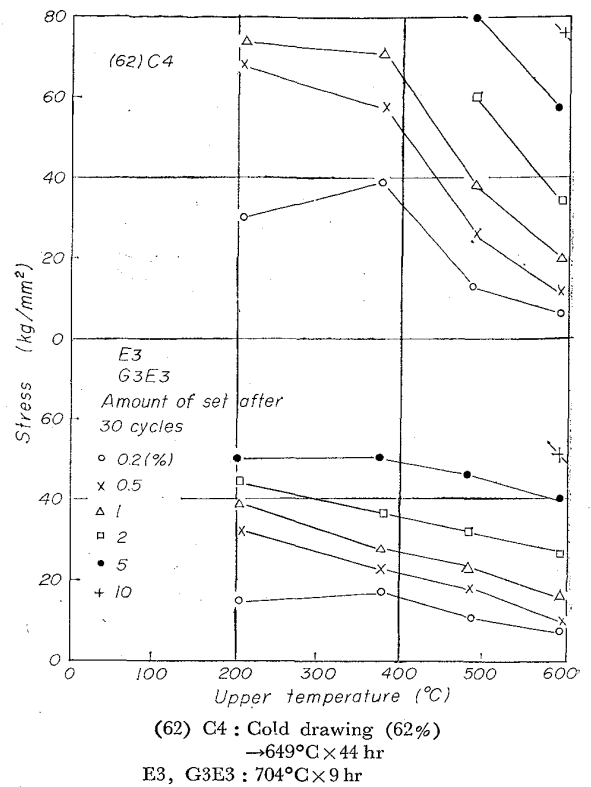


Fig. 22. Stress-temperature curve for various amounts of set (after 30 heating cycles).

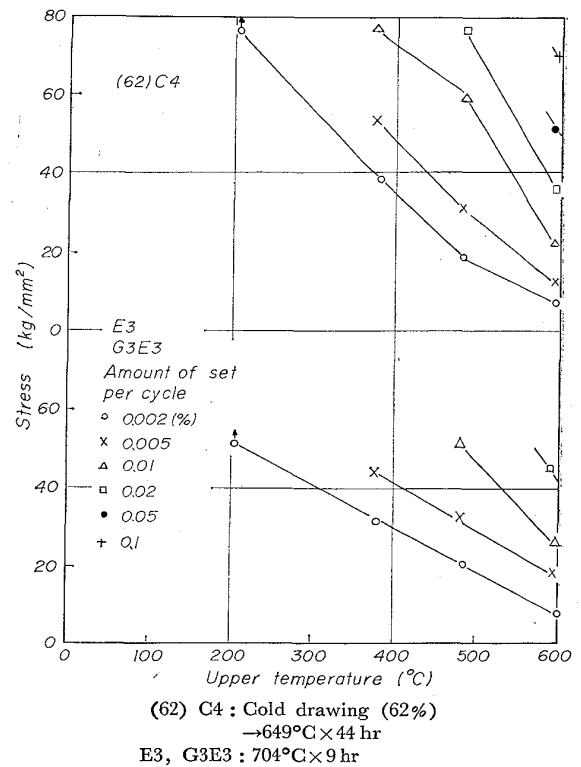


Fig. 23. Stress-temperature curve for various rates of set (at 30 heating cycles).

4.4.3 繰返し加熱における応力と温度との関係
荷重とセット量との関係から振り応力と加熱上限温度との関係を永久変形量 (0.005~10%) をパラメーター

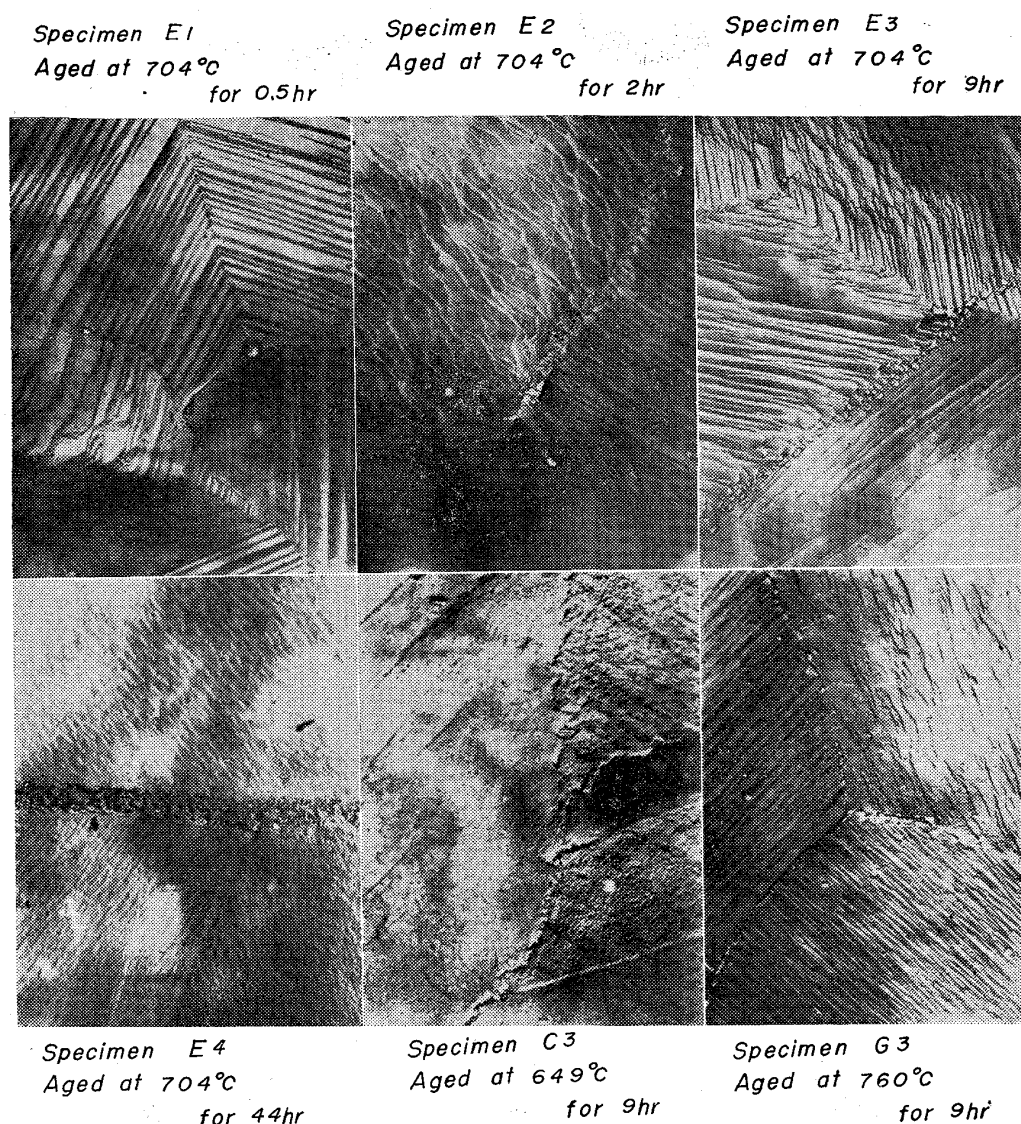


Photo. 1. Electron microstructures of InconelX type alloy etched with chromic acid (2Vol) and hydrochloric acid (1 Vol).

×5000 (4/5)

とすると Fig. 22~23 が得られる。これによると冷間引抜後時効処理を行なったコイルばねは顕著にセット量が少なくなることがみられる。

4.5 組織

以上の実験の試片の析出物の状態を調査するため電子顕微鏡を使用して組織を調査した。それらをPhoto. 1に示すが、これによると溶体化処理をしたもののマトリックスには析出物はみとめられない。時効処理を行なうと粒界析出をおこすが、時効処理温度が高くなるにつれて析出物が大きくなり凝集する。同じ時効処理温度で処理時間を長くすると粒界析出物は増加しやや大きくなる。

5. 結 言

以上 Inconel X型合金に本実験の範囲内の溶体化処

理・冷間加工・時効処理を種々組合せ施したものの常温ならびに高温における特性を調査した結果次のことが判明した。

(1) 常温特性は 982°C の溶体化処理後 704°C × 9~44hr の時効処理を行なったものがすぐれた性能を示し、2段時効処理を施こしても特性の改善は望まれない。

(2) 冷間加工と時効処理を組合せ施こすと、常温強さの最大値は加工せぬものに比べて時効処理は低温側・短時間側に移行する。

(3) 横弾性係数は時効処理の変化または冷間加工の影響をほとんどうけないが、試験温度の上昇とともに次第に低下する。

(4) 振り比例限度は時効処理温度が低い時は長時間

処理で、高い時は短時間処理で最高値となる。また試験温度の上昇とともに常温から約 600°C までほとんど低下しないが、700~800°C では急激に減少する。

(5) 振り比例限度は加工度の増加とともに高くなるが、80%以上の高い冷間加工度を施すとかえつて低下する。また試験温度の上昇と共に振り比例限度が減少を開始する温度は冷間加工度の高いものは低いものより低温側に移行する。

(6) 冷間加工後時効処理を行なったものは時効処理のみのものより永久変形量が少ないが、1サイクル当りの変形量の差はみとめられない。

(7) 62%の冷間加工後 649°C×44hr の時効処理を行なうと、繰返加熱の上限温度が 300°C ならば応力約 60 kg/mm², 400°C ならば約 40 kg/mm² まで耐えうる。

文 献

- 1) 上正原, 金井, 内山: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 617
- 2) 金井, 上正原, 関, 内山: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 619
- 3) 金井, 上正原, 関, 内山: 鉄と鋼, 49 (1963) 10, p. 1577
- 4) 上正原, 関, 金井, 内山: 鉄と鋼, 49 (1963) 10, p. 1578
- 5) ASTM: The elevated-temperature properties of selected super-strength alloys (1954), p. 150
- 6) 勝田, 伊東: 三菱電機技報, 37 (1963) 3, p. 40
- 7) 竹内, 中島, 北風: 三菱電機技報, 37 (1963) 3, p. 15
- 8) International Nickel Company, Inc: Technical Bullentin T-38 (1963)
- 9) 関, 金井, 上正原, 内山: 鉄と鋼, 50 (1964) 4, p. 654
- 10) 関, 金井, 上正原, 内山: 鉄と鋼, 50 (1964) 4, p. 656
- 11) 関, 金井, 上正原, 内山: 鉄と鋼, 50 (1964) 4, p. 655
- 12) 金井, 関, 上正原, 内山: 鉄と鋼, 50 (1964) 12, p. 1999
- 13) 金井, 関, 上正原, 内山: 鉄と鋼, 50 (1964) 12, p. 2000
- 14) 金井, 関, 上正原, 内山: 鉄と鋼, 50 (1964) 12, p. 1999~2000
- 15) 上正原, 関, 金井, 内山: 鉄と鋼, 51 (1965) 5, p. 961