Fe-35% Ni-0~20% Cr 合金の加工状態に おける抵抗歪率と電気抵抗*

山 本 美喜雄** 中 道 琢 郎**
横 山 紀 夫** 林 全 邦***

Mikio Yamamoto, Takurô Nakamichi, Norio Yokoyama and Norikuni Hayashi :
Strain Gauge Factor and Electrical Resistivity in the Cold-Worked State of Fe-Ni-Cr Alloys
Containing 35 wt% Ni and 0~20 wt% Cr. The strain gauge factor and the electrical resistivity
as a function of composition have been investigated in the cold-worked state of Fe-Ni-Cr alloys con-
taining 35 wt% Ni and 0~20 wt% Cr, in order to clarify the origin of the high strain gauge factor of
Iso-elastic alloy with the composition of 52 wt% Fe, 36 wt% Ni, 8 wt% Cr and 4 wt% (Mn+Mo). The
strain gauge factor starts from the value of 2.37 at the Invar alloy (0% Cr) increases with increasing
chromium content, reaches a maximum of 3.65 at 7.23 wt% Cr, and then decreases to a final value of
2.55 at 18.46 wt% Cr. Corresponding to this composition dependence of the strain gauge factor, the
curves of the electrical resistivity vs. chromium content at room temperature and of its average tem-
perature coefficient between the liquid air and room temperatures show bends at about 7 wt% Cr; they
changes very rapidly below about 7 wt% Cr, beyond which they remain almost constant. This fact
suggests that the largest value of the strain gauge factor at 7.23 wt% Cr has a close connection with
the mode of the temperature variation of the electrical resistivity.

(Received December 28, 1966)

** 東北大学金属材料研究所 (The Research Institute
for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku Univer-
sity, Sendai)

*** 東洋測器株式会社 (TôYô Measuring Instrument Co.,
Ltd., Tokyo)

* 35% Ni および 0~20% Cr を含む Fe-Ni-Cr 合金の
加工状態における抵抗歪率と磁性 (第1報)

I. 序 論

一般に物質に弾性的な歪を与えると電気抵抗が変化する事実は古くから知られていて、最近では微小変位、重量、加速度、トルクなどの測定に、この原理を利用した抵抗歪線と呼ばれる変換素子が盛んに実用されている。歪抵抗線には大別して金属(合金)線と半導体板の2種があるがここでは前者を問題にする。

この歪-抵抗変化の関係を支配する原理についてはいくつかの議論が行なわれ、また変換素子の形状、測定回路などの実際問題についての研究も盛んに行なわれているが、実際の材料の材質に則して研究された例はあまりない。

Higson⁽¹⁾によれば、歪に伴う抵抗の変化は物質の寸法の変化によるものと物質自体の比抵抗の変化によるものと二つの部分からなりたつ。すなわち、金属線の抵抗、長さ、断面積、および比抵抗をそれぞれ R, L, A および ρ とすれば、

$$dR/R = dL/L - dA/A + d\rho/\rho \quad (1)$$

である。この式の右辺の最初の二つの項が金属線の寸法効果、すなわち単純な幾何学的変形によるもので、最後の項が歪による金属線の内部的性質の変化に由来するものである。最初の二つの項からの寄与 $(dR/R)_G$ は、ポアソン比 ν を用いると、

$$[dR/R]_G = (1+2\nu) (dL/L) \quad (2)$$

となつて、歪に比例する。これに対して、(1)式の最後の項についてはそれが必ずしも歪に比例するという保障はない。しかし、Meier⁽²⁾はこの比抵抗 ρ が体積変化率 dV/V とつぎのような関係にあることを提案した：—

$$\rho = \rho_0 (1 + m dV/V) \quad (3)$$

ここに、 ρ_0 は体積変化のない場合の比抵抗、そして m は数係数である。(3)式を仮定すると、この比抵抗変化による抵抗変化率 $(dR/R)_S$ は

$$[dR/R]_S = m(1-2\nu) (dL/L) \quad (4)$$

となる。したがって、全体の抵抗歪率 G は

$$G = (dR/R)/(dL/L) = 1 + m + 2(1-m)\nu \quad (5)$$

で与えられる。

通常用いられている抵抗歪線材では $\nu \approx 0.3$, $G \approx 2.0$ の程度であり、したがって(5)式から $m \approx 1$ 、すなわち(3)式によつて $d\rho/\rho \approx dV/V$ なる単純な関係が成立する。しかし、Armour あるいはカンタル合金 (Fe 75%, Cr 20%, Al 5%), Iso-elastic 合金 (Fe 52%, Ni 36%, Cr 8%, Mn+Mo 4%), Pt などでは G は 2.0 よりもかなり大きく、また Manganin (Cu 83%, Mn 15%, Ni 2%) では G は 2.0 よりもかなり小さい⁽³⁾。したがって、これらの合金が 2.0 と異なる G をもつ理由、またそれと関連して、 $d\rho/\rho$ 変化の機構を解明することは興味がある。

この研究では、このような見地に立つて、最初に Iso-elastic 合金を対象としてとりあげた。それは、Iso-elastic 合金は Elinvar 合金 (Fe 53%, Ni 35%, Cr 12%), Invar 合金 (Fe 65%, Ni 35%) などと共通して Invar 特性⁽⁴⁾⁽⁵⁾ をもつと考えられ、したがってその抵抗歪率の大きい理由もこの Invar 特性と密接な関連をもつと期待されるからである。そこで、Invar 合金と Elinvar 合金を連ねる組成をもつ 3 元合金について抵抗歪率と電気的および磁気的性質の研究を行なつた。

II. 試 料

試料として選んだ Fe-Ni-Cr 3 元合金は Invar 合金 (65% Fe, 35% Ni) を基として、その Fe を Cr で置換した $\text{Fe}_{0.65-x}\text{Ni}_{0.35}\text{Cr}_x$ の組成のもので、その組成は $x=0, 4, 8, 12, 16, 20\%$ の 6 組成である。これらの合金を化学分析した結果は Table 1 に与えてある。

Table 1 Balanced and chemically analysed compositions of Fe-Ni-Cr alloy specimens.

Specimen mark	Balanced composition (wt%)		Chemically analysed composition (wt%)	
	Cr	Ni	Cr	Ni
0	0	35	—	36.29
4	4	35	3.41	37.23
8	8	35	7.23	37.27
12	12	35	10.59	37.65
16	16	35	14.28	37.23
20	20	35	18.46	37.43

まず、電解鉄 (99.98%), 電解ニッケル (99.97%) および電解クロム (99.99%) を所定の割合に混合して、高周波炉で真空溶解を 2 回行なつた後、20 mm 直径の金型に真空中で鋳造した。この鋳塊棒の表面を旋盤で削りつつた後で、熱間圧延によつて 10, 5 および 3 mm 直径の丸棒を作り、最後に線引きにより 0.2 mm 直径の線材を得た。線材試料には冷間加工がなされているが、特別の場合に 1000°C×3 hr の真空中熱処理を行なつた以外には、加工されたままの状態での測定を行なつた。

加工状態で測定を行なつた理由はつぎのごとくである。第 1 のしかし本質的でない理由は実用の抵抗歪線がすべて加工(線引)状態にあるからである。第 2 のこれもあまり本質的でない理由は抵抗歪率を測定に際して真空中で 900°C で 3 hr 焼鈍された線試料は断線しやすくて、完全なデータを得ることが出来なかつたからである。第 3 の本質的な理由は電気的および磁気的性質は上記の熱処理によつてもあまり大きな影響をうけないことがたしかめられたからである。もつとも比電気抵抗は熱処理によつて減少するが、しかしその組成および温度依存性のごとき本質的な挙動は加工状態と同様である。

(1) G.R.Higson: J.Sci.Instr., **41** (1964), 405.

(2) J.H.Meier: Experimental Mechanics, **1** (1961), 39.

(3) 青柳: ワイヤ・ストレイン・ゲージ (日刊工業社, 1959)

(4) 斎藤: 高弾性材料と恒弾性材料 (日本金属学会編, 1962).

(5) 増本: 金属学会会報, **1** (1962), 45.

III. 測定法および測定装置

抵抗歪率の測定には新しく試作した抵抗歪率測定器を使った。装置の全体図を Fig.1 に示す。線試料 S は試料容器

Fig.1 Apparatus for measurement of the strain gauge factor of a metallic wire.

A: Current terminal (lower end), B: Current terminal (upper end), C: Magnetic core of a differential transformer, D: Coil of the differential transformer, E, F: Pulleys, G: Plate for supporting weights, W: Weights, H: Framework for holding the specimen, S: Specimen wire, M: Micrometer for calibrating the displacement of the magnetic core.

H の下端に固定された電流・電圧端子 A と差動トランス D の鉄芯 C に直結したもう一つの電流電圧端子 B との間にはりわたされる。C はさらに小滑車 E と F を通るナイロン糸で荷重台 G に連結されて、G に加えられる加重 W の力を線試料に伝える仕組みになっている。試料の伸びは C の変位として差動トランス増巾器を通して測定される。差動トランス増巾器の出力電流と試料の伸びの比例常数は差動トランスと連動するマイクロメータ M を使ってきめられ、 2.51 (mA/mm) である。一方、試料の抵抗はダブル・ブリッジの測定辺に前述の A, B 端子をつないで測定された。線試料は直径 0.2 mm 、長さ 100 mm 程度で、抵抗値は 5Ω 前後の値であるが、最高 1 kg 程度の荷重で、約 1.5×10^{-3} の伸び歪、 $3 \sim 5 \times 10^{-3}$ 程度の相対的抵抗変化が得られた。測定の誤差は $\Delta(\delta l/l) = 0.5 \times 10^{-4}$ 、 $\Delta(\delta R/R) = 0.5 \times 10^{-4}$ の程度とみつめられる。抵抗測定のために試料には 1 A 程度の電流を流したので、ジュール熱による抵抗線の温度上昇による誤差をとり除くため、試料容器ごと絶縁油を満た

した容器 V の中に入れられた。

別に、これらの試料について電気抵抗の測定を液体空気温度から常温の間で行なつた。測定法は通常の電位差計法であり、試料をベークライト板の一端に近接してならべた二つの銅製端子とそれから 20 mm の間隔をおいて固定された磁製絶縁管との間にはりわたした。試料に流す電流はこの銅製端子から与えられ、電圧はこの銅製端子から数 mm 離してハンダ付された銅線によつてとり出された。試料の温度は試料のはりわたされた領域のベークライト板にまきつけられた銅薄板に接触する銅-コンスタンタン熱電対によつて測られた。これらのセットはすべて硝子管の中に入れられ、導線と熱電対はそれぞれ細い硝子管を通して試料容器外にとり出された。試料容器の硝子管は液体空気用のデュアびんの中に入れられ、そして液体空気の蒸発に伴う自然な温度上昇を利用して抵抗の温度変化を測定した。なお、熱起電力のための誤差をとり除くため、各測定温度で試料に流す電流の極性を変えて得られる二つの測定値を平均して、その温度における抵抗値とした。

IV. 測定結果

1. 抵抗歪率

抵抗歪率 G は、すべての試料について、はじめに試料を真直ぐにするために 4 kg/mm^2 の死荷重をかけて置き、そして最高荷重 33 kg/mm^2 までの歪とそれに伴う抵抗の変化を測ることによつて決定された。繰返して 2 度測定して得られた抵抗の相対的变化 $\Delta R/R$ と歪 $\Delta l/l$ の関係をすべての試料について Fig.2 に示す。この図から判るように、抵抗の相対的变化と歪の間には必ずしも測定の全領域で完全な直線関係が成立してはおらず、曲線の最初の立ち上りは $3.41\% \text{ Cr}$ 組成においては歪の大きな領域にくらべてその勾配が大きく、 $7.23\% \text{ Cr}$ 以上の組成にあつては若干小さいように見える。これは装置の張力伝達機構の上の遊びなどの偶然的なことから起つているか、あるいは張力による非可逆的な磁化過程から生じているものと考えられる。しかし、どの試料についても 0.6×10^{-3} 以上の歪にあつては抵抗の相対的变化と歪の間には直線関係が成立している。測定の再現性をみるために、同一の組成の何本かの試料で、測定の繰返しを試みたが、測定誤差を考慮しても、Fig.2 より判るように、低歪領域での曲線の勾配は同一ではないが、しかし高歪領域では曲線の平行性が成り立つ。この事実に基づいて、われわれは各試料の抵抗歪率 G を高歪領域での直線部分の勾配から決定した。

このようにして決めた G の Cr 量による変化を Fig.3 に示した。この図から明らかなように、G の値は Invar 合金に対する 2.37 から Cr の増加とともに上昇して、 7.23%

Cr において 3.65 のかなり顕著な山を作った後、再び減少して 18.46% Cr では 2.55 になる。このことから, Iso-

elastic 合金 (I 参照) の大きな抵抗歪率の値 (3.6) にも Cr 量がかかなり重要な役割を演じていると考えられる。

Fig.2 Relative variation of resistance, $\Delta R/R$, as a function of the strain, $\Delta l/l$, in as-coldworked state of Fe-Ni-Cr alloys containing 35% Ni and 0~20% Cr. Open and solid circles indicate measured data of twice repeated measurements.

Fig.3 Composition dependence of the strain gauge factor, G in as-coldworked state of Fe-Ni-Cr alloys containing of 35 wt% Ni and 0~20 wt% Cr.

2. 電気抵抗とその温度変化

液体空気温度と常温の間で測定された比抵抗 ρ の温度 T による変化は Fig. 4 に示すごとくである。3.41% Cr お

Fig.4 Specific electrical resistivity, ρ , as a function of the temperature, T , in as-coldworked state of Fe-Ni-Cr alloys containing 35% Ni and 0~20% Cr.

よび 7.23% Cr の合金においては、温度による変化が比較的に急でかつ抵抗値が低く、そして 10.59~18.46% の組成範囲においては抵抗値およびその温度による変化にはほとんど変化がない。このことを端的に示すために、Fig. 5 に常温の ρ と液体空気温度と常温の間の平均の ρ の温度係数 α の Cr 量に対する依存性を描いてある。なお、0% Cr 対

する値は白川⁽⁶⁾のデータから計算されたものである。

普通の強磁性体は、ニッケルが典型的に示すように、磁

Fig. 5 Composition dependence of the electrical resistivity, ρ , at room temperature and its average temperature coefficient, α , between liquid air and room temperatures in as-coldworked state of Fe-Ni-Cr alloys containing 35% Ni and 0~20% Cr.

気変態点 T_c で急激な抵抗の減少を現わす。これは白川⁽⁶⁾の測定した一連の Fe-Ni 合金でも大体成立しており、Invar 合金においても、その変化に若干の緩慢さが認められるが、依然としてキュリー点近傍での抵抗の減少はかなり著しい。そこで、液体空気温度と常温の間にキュリー温度をもつ 18.46% Cr 合金の磁化と電気抵抗の温度変化を詳しく調べた。その結果によれば、Fig. 6 から明らかなよ

Fig. 6 The electrical resistivity, ρ , and specific saturation magnetization, σ , as functions of temperature, T , in as-coldworked state of the Fe-Ni-Cr alloys containing 37.43% Ni and 18.46% Cr.

うに、 T_c が 196°K であるにもかかわらず、この温度においてはニッケル型の抵抗減少は全くみられず、むしろわずかにではあるが抵抗の温度係数が常温領域よりも緩やかであり、さらに低温になると抵抗の温度変化ははつきりしたことはいえないが、再び急になるような傾向がみられる。

(6) Y. Shirakawa : Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., **27** (1939), 485.

なお、その他の組成の合金における抵抗の温度変化はみなわずかではあるが低温にいたるほど抵抗の温度係数が大きくなる傾向を示す。

3. 格子常数

1000°C, 2 hr の焼鈍を施した合金線についてデバイゼン写真を撮ったが、常温での回折線は面心立方格子の結晶構造で完全に説明され、その格子常数は Invar 合金 (0% Cr) に対する 3.85 Å から 18.46% Cr 合金に対する 3.57 Å まで単調に減少し、7.23% Cr において特別な異常を示さない。

V. 考 察

本実験で得られた最も重要な結果は、35% Ni および 0~20% Cr を含む Fe-Ni-Cr 3 元合金の抵抗率が約 7% Cr で最大値をとることである。この組成は 4% 程度の Mn+Mo の添加を度外視すれば、Iso-elastic 合金の組成とほとんど同一であり、したがって Iso-elastic 合金の大きな抵抗歪率もこの Cr の含量によつて規定されているものと考えられる。

一方、この問題と関連して、この 3 元合金の比抵抗とその温度係数の組成による変化を比較すると、抵抗歪率の組成による変化、とくにその最大値の約 7% Cr での出現は必ずしもこの物質の電気的性質によつてのみ規定されるものとは考えられない。何故ならば、約 7% Cr 以下の組成範囲では、Cr 量の増加とともに抵抗歪率は増加し、同時に比抵抗は増加するが、その温度係数は減少する。しかし約 7% Cr 以上の組成範囲では、Cr 量の増加によつて、抵抗歪率はかなり急速な減少を示すのに対し、比抵抗もまたその温度係数もほとんど一定値のままにとどまる。したがって、約 7% Cr で抵抗歪率の最大値が出現する原因を追求するためには比抵抗以外の他の性質に関する研究も必要であると考えられる。この点で、とくに注目される Invar 型合金⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾としてのこの 3 元合金の磁気的性質については第 II 報において報告される。

ところで、この合金の電気的性質の注目すべきもう一つの結果は 18.46% Cr 合金の抵抗の温度変化、とくにそのキュリー点付近の挙動である。磁気変態点では、通常の強磁性金属の抵抗変化は、白川⁽⁶⁾の Ni および Ni-Fe 合金についての測定結果にみられるように、強磁性の規則化の発達に伴う急激な抵抗減少を示す。ところが、この 18.46% Cr 合金のそれはむしろキュリー点以下で、わずかではあるが抵抗の温度係数が小さくなる傾向を示している。しかしながら、最近の研究によると、反強磁性の金属⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾,

(7) E. I. Kondorsky and V. L. Sedov : J. Appl. Phys., **31** (1960), 331 S.

(8) A. Kussman and K. Jessen : J. Phys. Soc. Japan, **17** (1962), Suppl. B-1, 136.

(9) M. J. Marcinkowski and H. A. Lipsitt : J. Appl. Phys., **32** (1961), 1238.

(10) G. K. White and S. B. Wood : Can. J. Phys., **35** (1957), 346.

もしくはラセン型 スピン 配列構造の金属⁽¹¹⁾にあつては、抵抗は磁気変態点で一つの谷を作り、それ以下で一度小さな極大値を示してから、さらに温度の降下とともに急激に減少してゆく。この事実も奇妙であつて、いろいろ議論されている。しかし、ここではそれには立ち入らないで、Invar 型合金の特異な磁性の起源が潜在反強磁性⁽⁷⁾の存在によるとする主張を考えてみる。もしこの潜在反強磁性説が正しいとすれば、この Invar 型 3 元合金にあつても、抵抗の磁気変態点以下の温度変化を支配するものは強磁性的規則化と反強磁性的要素の二つの要因であり、そして、後者は強磁性的規則化の発達に伴なつて起る全体としての抵抗減少を妨げ、その結果として抵抗の温度係数を常磁性領域におけるよりも小さくする可能性をもつ。したがつて、われわれは 18.46% Cr 合金のキュリー点以下における抵抗の温度変化はこのような潜在反強磁性の役割を考慮してはじめて理解できると考える。

実際、Invar 型合金の抵抗の温度変化のこのような挙動の典型は藤森⁽¹²⁾によつて Coelinvar 合金 (36.5% Fe, 52.5% Co, 11% Cr) において示された。すなわち、その抵抗の温度変化を三つの領域に分つことが出来、そして第 1 の常磁性領域は格子振動の効果による比較的小さな抵抗の温度係数で特徴づけられる。また、キュリー温度 415°K より 300°K に至る第 2 の領域では、強磁性的規則化が発達しているにもかかわらず、抵抗の温度係数は常磁性領域よりも小さく、上述の潜在反強磁性効果が強く現われているものと理解される。さらに、300°K 以下の第 3 の領域では強磁性的規則化の効果が優勢になることに対応して、抵抗の減少は急激となり、その温度係数は常磁性領域よりも大き

い。この抵抗の温度変化の三段階をそれぞれ常磁性領域、反強磁性的領域および強磁性的領域と名づけよう。

われわれが研究した Fe-Ni-Cr 3 元合金 全体の抵抗の温度変化をこのような考え方に立つてみると、0~7% Cr の組成範囲内では、Cr 量の増加とともに、反強磁性的領域が広がるとともに、強磁性的領域の温度係数が急速に小さくなつており、そして約 7% Cr 以上の組成範囲にあつてはこのような変化はないために、各温度領域とも抵抗の温度係数は組成によらず、それぞれほぼ一定な値をとつているものと考えられる。

VI. 総 括

35% Ni および 0~20% Cr を含む Fe-Ni-Cr 合金の加工状態における抵抗歪率と電気抵抗の組成による変化を研究してつぎの結果を得た。

(1) 抵抗歪率は 7.23% Cr の組成で最大値 3.65 を示し、そして抵抗歪率は Cr 量に著しく依存する。

(2) 常温の比抵抗は Cr 量の増加とともに最初は増加し、またその温度係数は減少するが、約 7% Cr 以上になると、両者ともほとんど組成によつて変化しない。

(3) 18.46% Cr の組成の合金の電気抵抗の温度変化は通常の強磁性体の場合と異なり、キュリー温度以下の抵抗の温度係数が常磁性領域のそれよりも緩かである。この事実は Invar 型合金としてのこの合金の特性と密接な関連があるものと推定される。

以上の三事実から、われわれが研究した Fe-Ni-Cr 合金の抵抗歪率は電気抵抗、とくにその温度変化の様子、と密接な関連をもち、さらにこの合金系の Invar 特性に関連づけられるものと推定される。より詳細な検討は次報の磁性研究の結果とあいまつて行なう。

(11) R. V. Colvin, S. Legood and F. H. Spedding: Phys. Rev., **20** (1960), 741.

(12) H. Fujimori and H. Saito: J. Phys. Soc. Japan, **21** (1966), 1219.