

Fe-36%Ni合金の機械的性質に及ぼす合金元素の影響

津田 正臣*・王 昆*²

The Effect of Alloying Elements on the Mechanical Properties of the Fe-36% Ni Alloys

Masaomi TSUDA and Kun WANG

Synopsis : The effect of single addition (C, B<0.041%, others<2.0%) of various minor alloying elements such as C, Si, Mn, Ni, Cr, Co, Nb, Ti, V, Zr, and B in the Fe-36%Ni alloy on the mechanical properties, especially 0.2% proof stress and Young's modulus, was investigated. The results obtained are as follows :

- (1) Cr is the only element which decreases the 0.2% proof stress in the Fe-36%Ni alloys.
- (2) There is a good relation between the magnitude of the effects of alloying elements on the proof stress and the radius of atoms of alloying elements.
- (3) The addition of C, Si, Ni, Co decreases the Young's modulus, while the addition Mn, Cr, Nb, Ti, Zr, B increases it. The effect of such alloying elements except B on the Young's modulus can be classified by the period and group in the periodic table.
- (4) From the view of the number of valence electrons and the texture, the origin of the effect of alloying elements on the Young's modulus has been discussed.

Key words : mechanical property ; 0.2% proof stress ; Young's modulus ; invar alloy ; alloying element ; number of valence electrons ; texture ; lattice distortion.

1. 緒言

36%Ni合金(以下36Ni合金と称す)はきわめて低熱膨張であることを利用して、各種の精密測定計器、あるいは高膨張合金と組み合わせたバイメタル等として用いられるばかりでなく、LNGガスの輸送、貯蔵用タンク、あるいは送電用材料として、低熱膨張と同時に低温靱性や高強度を必要とする機能用材料としても用いられることが多い。Fe-Ni系合金の強度を増加させる方法として、Ti, Alなどを添加し、 γ プライムなどの析出硬化を利用することがある¹⁾。Fe-32%Ni-4%Co三元合金スーパーインバーは室温近くの熱膨張係数が36Ni合金よりさらに小さく、これにTiを添加し、高強度としていること²⁾、また40%Ni合金にNb, Cを添加し、Nbの固溶強化と、NbCの析出硬化などにより高強度を得ていること³⁾等が報告されている。しかしこれらの合金では、Ti, Al, Nb等が比較的多く添加されるため、36Ni合金や、スーパーインバーの低熱膨張という本来の重要な特性が、かなり損なわれている。

一方最近広く用いられているシャドウマスク用材料としては、高強度を必要とせず、むしろアルミキルド鋼なみの低い強度にすることが重要となる。

上記のごとく、Fe-Ni系合金の機械的性質に及ぼす合金元

素の影響については広い範囲の元素にわたっての十分な体系的な研究が少ない。さらには最近の精錬工程における微量元素のコントロール技術の向上を考えたとき、各種元素の微量の範囲での効果を定量的に把握しておくことは36Ni合金の強度を低く設計するため、いかなる元素をコントロールしておくことが経済的にも有利なことを知る上でもきわめて重要なことである。これらのことより、36Ni合金の低熱膨張特性を損なわない比較的少ない合金元素の添加量の範囲で、各種合金元素が機械的性質、特にプレス成形などに重要な特性値である0.2%耐力とヤング率、に及ぼす影響について検討するとともに、一部の合金について焼鈍温度の機械的性質に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験方法

シャドウマスク用以外に用いられる36Ni合金にはC, Si, Mnはもちろんのこと、その用途に応じ、Nb, Ti, V, Coが含まれることが多い。36Ni合金の引張強度をできるだけ低くするという観点から、これらの元素が比較的微量の範囲での検討を行うこととした。供試材の化学組成をTable 1に示した。供試材の製造方法は以下の通りである。まず高周波誘導炉を用い大気溶解により、5 kg鋼塊を鑄造し、同

平成8年1月23日受付 平成8年4月12日受理 (Received on Jan. 23, 1996; Accepted on Apr. 12, 1996)

* 日本冶金工業(株)研究企画部 (Research Planning Dept., Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd., 1-5-8 Kyobashi Chuo-ku Tokyo 104)

* 2 日本冶金工業(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd.)

鋼塊を1200°C、60分加熱後、約15mm×50mm×Lの板状に鍛造した後、四段熱間圧延機により1200°C~900°Cで3mm×50mm×Lに熱間圧延を施した。次いで3mm×50mm×300mmに切断し、エレマ炉にて大気中で1300°C、10分加熱後水冷の熱処理を行い、四段冷間圧延機により0.6mm厚および0.25mm厚に冷間圧延後、ソルトバス炉にて、900°C、1分加熱の熱処理を行った。これらより、圧延方向平行にJIS13B号の引張試験片および7mm×100mmのヤング率測定用試験片を採取した。また基本組成の無添加の36Ni合金およびNb添加材の一部のものについては焼鈍温度を800°C~1200°Cまで変化させ、その機械的性質の変化を調べた。

ヤング率の測定には、ばね限界値測定試験機(AKASI製MODEL: APT型)を用い、一端固定湾曲法により測定した。なお試験はすべて常温で行った。

Table 1. The chemical composition of the Fe-36% Ni alloys investigated (mass%).

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Co	Nb	Ti	V	Zr	B
Base	0.001	0.01	0.02	36.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000
range of alloying elements	0.012 ~0.041	0.18 ~0.32	0.25 ~0.60	34.05 ~36.97	0.30 ~1.43	0.32 ~1.38	0.25 ~0.98	0.27 ~1.01	0.32 ~0.92	0.20 ~0.59	0.0042 ~0.0102

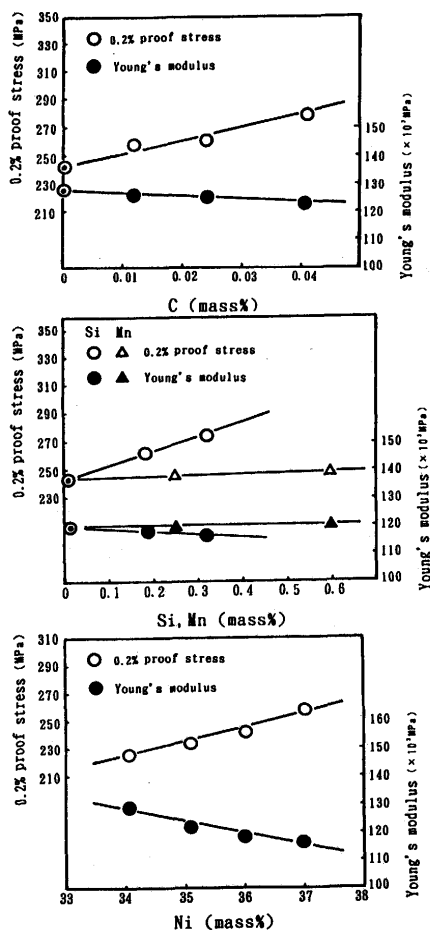


Fig. 1-a. The effect of C, Si, Mn, Ni on the proof stress and Young's modulus of the Fe-36% Ni alloys.

3. 実験結果

3.1 0.2%耐力に及ぼす合金元素の影響

0.2%耐力に及ぼす各種合金元素の影響をFig. 1-a, bに示した。

C, B, Si, Nb, Ti, Zrは微量添加でも、0.2%耐力を増加させている。

同じくNi, Coも増量または添加することにより0.2%耐力を増加させる。これに対しMn, Vは微量添加の範囲では0.2%耐力をさくわずかしき上昇させていない。

一方Crは添加することにより、0.2%耐力が減少している。

これらの元素による0.2%耐力に及ぼす影響を定量的に評価するため、重回帰分析を行い、原子パーセント当たりの効果をTable 2に示した。

なお0.2%耐力に対しては、結晶粒度の効果も大きいと考えられるが、これら各種元素を添加した本実験の合金の結晶粒度は粒度番号8.5から10.0であったことから、ここでは

Table 2. The changes in 0.2% proof stress and Young's modulus per atomic % of alloying elements added in the Fe-36% Ni alloys.

element	C	Si	Mn	Cr	Co	Nb
0.2% proof stress (MPa)	183	51.5	9.73	-13.3	13.7	111
young's modulus (10 ¹⁰ MPa)	-25.4	-3.00	1.57	3.17	-2.68	86.5
element	Ti	V	Zr	B	Ni	-
0.2% proof stress (MPa)	34.0	12.8	111	130	11.2	-
young's modulus (10 ¹⁰ MPa)	28.3	23.8	109	166	-4.70	-

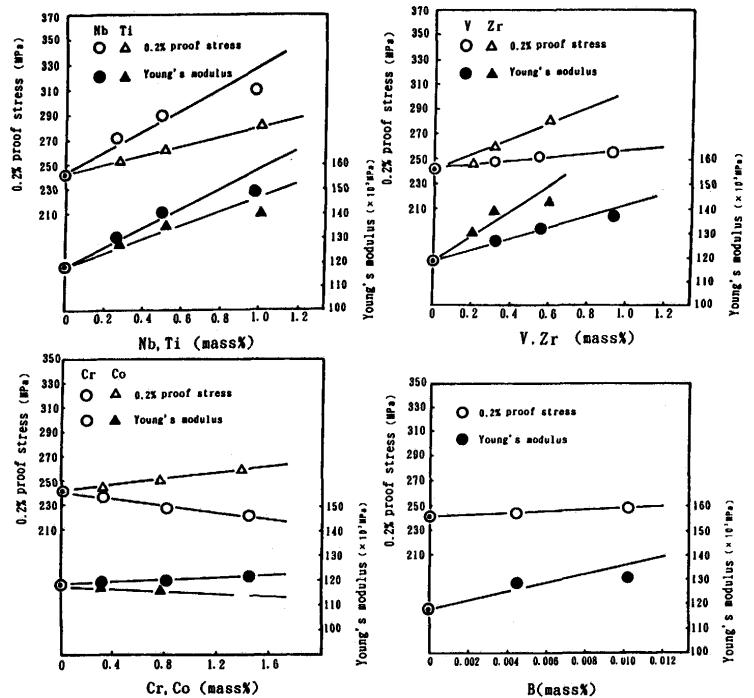


Fig. 1-b. The effect of Nb, Ti, V, Zr, Cr, Co, B on the proof stress and Young's modulus of the Fe-36% Ni alloys.

考慮しなかった。特にNb, Ti, Zrを添加した合金では細粒化の傾向があり, Nb, Ti添加の原子パーセント当たりの効果が大きい原因には, 細粒化効果も含まれているものと考えてよい。

3・2 ヤング率に及ぼす合金元素の影響

ヤング率に及ぼす各種合金元素の影響をFig. 1-a, bに示した。

36Ni合金をベースにしたとき, C, SiおよびCoの添加によりヤング率は減少してくる。これに対しB, Nb, Ti, V, Cr, Zrの添加によりヤング率は増加してくる。特にB, Zr, Nbの効果が大きいことがわかる。またNiをパラメーターにした結果より, Niの増加につれ, ヤング率が減少してくる。

これらの元素によるヤング率に及ぼす効果を定量的に把握するため重回帰分析を行い, それらの結果をTable 2に示した。なおFig. 1-bよりわかるようにNb, Ti, V, Zrの元素では, 添加量が多くなるとヤング率の増加は, 添加量と直線関係にならず, 飽和してくる傾向にある。このような元素の場合には添加量の少ない, 直線近似できる部分のみを用い重回帰分析を行った。

3・3 0.2%耐力およびヤング率に及ぼす焼鈍温度の影響

基本組成の無添加の36Ni合金および0.25%Nbを添加した36Ni合金の冷間圧延材を用い, ソルトバス中で, 焼鈍温度を800°Cから1150°Cまで変化させた材料の機械的性質を調べた。無添加の36Ni合金の引張り試験結果についてFig. 2に示した。0.2%耐力, 引張強さ, 硬さは焼鈍温度の上昇とともに低下しており, 焼鈍温度が800°Cから1150°Cになると結晶粒は粒度番号9.2から3.5まで粗大化し, それにともない0.2%耐力では約70MPa, 引張強さは約80MPa低下している。

ヤング率はFig. 3に示すように無添加の36Ni合金では焼

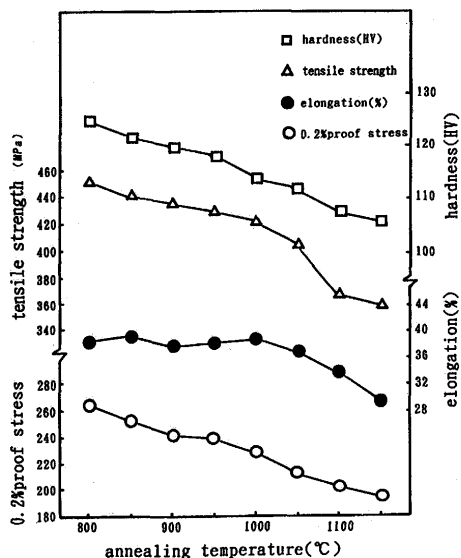


Fig. 2. The effect of annealing temperature on the mechanical properties of the Fe-36%Ni alloy.

鈍温度の上昇とともに低下しているが0.25%Nbを添加した36Ni合金では焼鈍温度を高めてもその変化は少ない。無添加の36Ni合金では焼鈍温度の上昇とともに結晶粒が大幅に粗大化するので, 結晶粒径 d とし $d^{-1/2}$ と0.2%耐力の関係をFig. 4にプロットした。

0.2%耐力と $d^{-1/2}$ の関係はよい直線関係を示し, ホールペッチの式⁴⁾が成り立つことを示している。 $d^{-1/2}$ の係数として, 約13MPa/mm^{-1/2}が得られたがステンレス鋼などオーステナイト系合金では約7~9MPa/mm^{-1/2}程度が報告^{5,6)}されており, それにくらべるとやや大きい。

ヤング率はFig. 3に示したように, 焼鈍温度の上昇とともに低下し, 一方, 組織的には焼鈍温度の上昇とともに結晶粒は粗大化している。

ヤング率は本来, 金属原子同士の原子間力の大きさに依存する値であって, 結晶粒の大きさが異なることにより, 原子間力の大きさが異なるとは考えがたく, ヤング率が結晶粒度に依存して変化しているのは, 別の要因によるものであろう。このことについては後に考察する。

4. 考察

4・1 0.2%耐力に及ぼす合金元素の影響

各種合金元素をベースの36Ni合金に添加することにより0.2%耐力は変化する。それら各種合金元素の0.2%耐力に

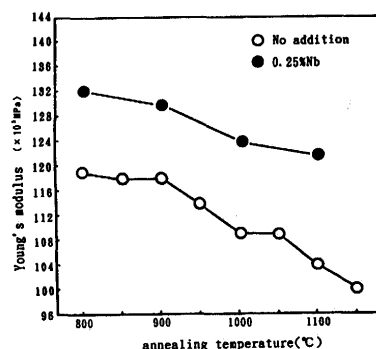


Fig. 3. The effect of annealing temperature on the Young's modulus of the Fe-36%Ni alloys with 0%Nb and 0.25%Nb.

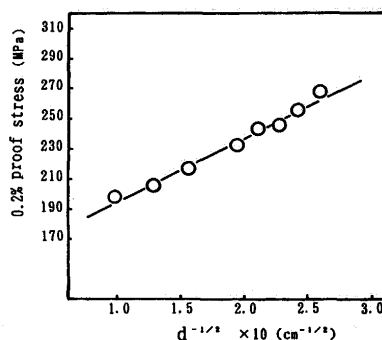


Fig. 4. The effect of grain size on the 0.2% proof stress of Fe-36%Ni alloy.

及ぼす効果を定量化した。これら各種添加元素のうち36Ni合金の0.2%耐力を低下させる元素は唯一Crだけであった。これら各種元素の効果について若干の考察を行った。

36Ni合金に各種元素を添加したときの0.2%耐力に対する原子パーセント当たりの効果と添加元素の原子半径の関係をFig. 5に示した。なお各種元素の原子半径の値については種々の値が示されているがFe, Ni, Crについては配位数12でそれぞれの原子半径がCr>Fe>Niの順になっているデータ⁷⁾を採用した。

原子半径約1.26を中心とし、これより原子半径が大きい元素または小さい元素、いずれを添加しても、0.2%耐力が増加し、若干のバラツキはあるものの、原子半径1.26より大きくまたは小さくなる程度が大きくなるにつれ0.2%耐力の増加が大きくなる。36Ni合金にはFeとNiの原子半径差から生じる格子歪みが存在するが、FeやNiの原子半径との差の大きい原子半径を有する添加元素を固溶させるとさらに格子歪み量が大きくなり、0.2%耐力を増加させていると考えられる。

原子半径1.26近辺のNi, Cr等の原子半径とそれら元素の0.2%耐力に対する効果の関係をFig. 6に示した。Ni, Co, Mn, Crの順に原子半径が小さくなり、36Ni合金にNiをさらに増加させたり、あるいはCo, Mn, Crを添加していくと、

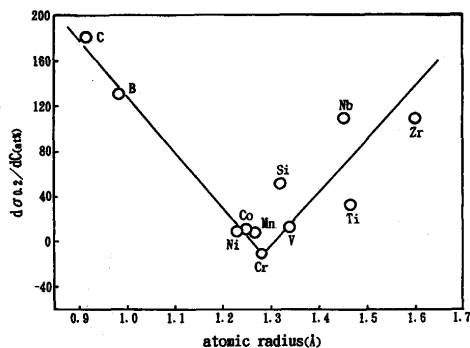


Fig. 5. Relation between the change of 0.2% proof stress per atomic % and the atomic radius of alloying elements added in the Fe-36%Ni alloys.

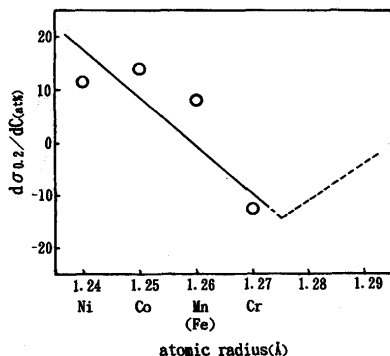


Fig. 6. Relation between the change of 0.2% proof stress per atomic % and the atomic radius of Ni, Co, Mn, Cr added in the Fe-36%Ni alloys.

おおむね0.2%耐力は減少している。FeとNiよりなる36Ni合金にベースとなっているFeよりも原子半径の小さいCoを添加したり、Niを増加させるとさらに格子歪み量が大きくなること、またFeと原子半径の同じMnを添加すると格子歪み量は変わらないこと、等が推察できる。一方、Feよりも若干原子半径が大きいCrを添加すると、おおそFe 3原子、Ni 1原子の比よりなる36Ni合金では添加されたCr原子のまわりには必ずNi原子が存在すると考えられ、その部分においては格子歪み量は減少することが考えられる。しかしFeとNiの原子半径差よりも大きな原子半径差を生じるような元素であっては格子歪み量は減少しない。すなわち36Ni合金の原子半径差にもとづく格子歪み量を小さくするためには、NiはFeよりも原子半径が小さいので、

Feよりも原子半径が大きく

かつ、

$$\text{Feの原子半径} - \text{Niの原子半径} \geq \text{元素Xの原子半径} - \text{Feの原子半径}$$

となる元素の添加が必要となると考えられる。

この観点から見ると本実験の範囲ではCrのみが適合する元素であって、またCrは36Ni合金の0.2%耐力を低下させた唯一の元素であった。またFeとNiの原子半径の値から

$$\text{元素Xの原子半径} \leq 2(\text{Feの原子半径}) - \text{Niの原子半径} = 2 \times 1.26 - 1.24 = 1.28 \text{ \AA}$$

となる。

これを満たす元素としてはCr(原子半径1.27Å)の他にCu(原子半径1.28Å)があるが、CuではCrに比べ、Niと共存する個所では平均的な原子半径はFeのそれに近づくがNiの3倍の原子数があるFeとの原子半径差が大きくなり平均的な原子半径差はCrが添加された場合よりも大きく、耐力の低下効果はCrほど大きくないことが予想される。

4・2 ヤング率に及ぼす合金元素および集合組織の影響

本実験において36Ni合金のヤング率に対し、各種の合金元素が影響し、36Ni合金をベースとしたとき、C, Si, Co, Niの添加により減少し、Mn, Cr, Nb, Ti, V, Zr, B添加により増加した。また無添加の36Ni合金の焼鈍温度を上昇させ、結晶粒を粗大化させることによってもヤング率が変化している現象が認められた。これらのことよりヤング率に対する微量合金元素と集合組織の影響について考察を行った。

4・2・1 合金元素の影響

合金のヤング率に及ぼす各種合金元素の影響に関する報告は少なく、もちろん36Ni合金のそれに関する研究はほとんどない。Koster⁸⁻¹⁰⁾はCu, Ag, Auに対し、B亜族元素を添加し、それらの固溶体のヤング率が添加元素濃度に対し、直線的に減少することを示している。すなわち原子パーセ

ント当たりのヤング率の変化量 dE/dC は添加元素と母金属との原子価差 ΔZ と関係があり、次式が成り立つことを示している。

$$dE/dC = \alpha(\Delta Z)^2 + \beta \quad \alpha, \beta: \text{定数}$$

同じく鈴木ら¹¹⁾は種々のB垂族元素を添加したNi固溶体のヤング率と合金元素濃度の関係を測定し、ヤング率の変化量 dE/dC と ΔZ との関係を調べている。

すなわち、Ni合金でも上記関係式が成立し、定数 β は添加元素の周期によらずほぼ一定であること、および係数 α の符号は周期によらず常に負であり、周期番号が大きくなるほど絶対値が増加することを認めている。

36Ni合金における本実験結果では、ヤング率を減少させた元素は、C, Si, Co, Niであり、またヤング率を増加させた元素はMn, Cr, Nb, Ti, V, ZrおよびBである。これらを周期律表上でみると、Ni, CoはFeと同族で、またC, SiはIVA族であり、ヤング率を減少させた元素はいずれも周期律表上Feよりも右側に位置する元素である。同じくBを除き、ヤング率を増加させた元素は全てIV~VIIのB族元素であり、周期律表上Feよりも左側に位置する元素である。

本実験結果はベースが36Ni合金であり鈴木らのNiと異なっているものの、ベース元素に対し周期律上右側に位置する元素群がそれらベース金属に対しヤング率を低下させているという点で、鈴木らの結果と一致している。

またBはFeよりも周期律上右側に位置するにもかかわらず他元素と異なりヤング率を増加させている。これは後述するように集合組織の影響によるものと考えられ、Bの添加によりヤング率の低い面である(100)面の板面への配向が少な

くなったためと考えられる。

ヤング率に及ぼす合金元素の効果を電子構造の点から検討を加えてみる。本実験の検討元素の電子構造と外殻電子数ならびに36Ni合金の平均外殻電子数をTable 3に示した。

36Ni合金と各種添加元素の外殻電子数の差 $n_{36Ni}-n_i$ とTable 2に示した各種添加元素の原子パーセント当たりのヤング率の変化量 dE/dC との関係をFig. 7に示した。すなわち周期律表上で周期番号4のNi, Co, Mn, Cr, V, Tiのグループおよび周期番号5のNb, Zrのグループに分けられ、 $n_{36Ni}-n_i$ が大きくなるにつれヤング率の変化量が大きくなり、また周期番号が大きくなるにつれ dE/dC が大きくなっている。また遷移金属元素でないSiとCについてはFig. 7にプロットしなかったが、いずれも $n_{36Ni}-n_i$ は4.7であり、Siは周期番号3, Cは周期番号2である。 $n_{36Ni}-n_i$ が4.7におけるヤング率の変化量 dE/dC の大きさを比べると、周期番号2, 3, 4, 5と大きくなるにつれ、 dE/dC は大きくなっている。すなわち、36Ni合金のヤング率の変化量は、36Ni合金の平均外殻電子数と添加元素の外殻電子数の差ならびに周期番号等により、比較的良好に整理されることがわかる。

4.2.2 集合組織の影響

Fig. 3に示したように無添加の36Ni合金では焼鈍温度の上昇とともにヤング率が低下している。

焼鈍温度の上昇とともに結晶粒が粗大化するが、ヤング率は金属原子同士の原子間力が支配的因子であるので、本来結晶粒度によってヤング率が大きく変化することはないと考えられる。

ヤング率は先にも述べたように結晶方位によって変化することが知られている。

松尾¹²⁾は鉄単結晶の主要な結晶面が表面に平行な板状試料についてヤング率の面内異方性について検討している。{111}が板面に平行な場合はヤング率の面内異方性は認められないが、他の方位では異方性があり、{110}では最も著しいこと、平均的なヤング率の大きさとしては、板面に{100}が平行な場合に最も小さく、{110}が平行な場合に最も大きく、次いで{111}、{211}の順となることを示している。無添加の36Ni合金およびNb, Bを添加した36Ni合金の(111)極点図をFig. 8に示した。無添加の36Ni合金では焼鈍温度900°C, 1150°Cの場合、いずれも{100} <001>の立方体集合組織を示しているが、1150°Cの場合の方が立方体方位の鮮鋭化が進んでいる。無添加の36Ni合金の焼鈍温度による結晶方位の変化をより明確にするため面強度を測定した。それらの結果を{200}と{220}の焼鈍温度による変化としてFig. 9に示した。焼鈍温度の上昇とともに板面にはヤング率が低い{200}が多くなり、ヤング率が高い{220}が少なくなっていることがわかる。Fig. 3に示すよう焼鈍温度の上昇とともにヤング率が低下してくるのは、このことが主な原因と考えてよい。

一方、Nb添加36Ni合金ではFig. 8よりわかるように、そ

Table 3. The number of valence electrons of alloying elements and the Fe-36%Ni alloy.

element	C	Si	Mn	Cr	Co	Nb	Ti	V	Zr	B	Ni	Fe	36Ni*
number of valence electrons	4	4	7	6	9	5	4	5	4	3	10	8	8.7

* $\sum n_i w_i / a_i / \sum w_i / a_i$ n_i : number of valence electrons of i atom
 w_i : mass% of i atom
 a_i : atomic weight of i atom

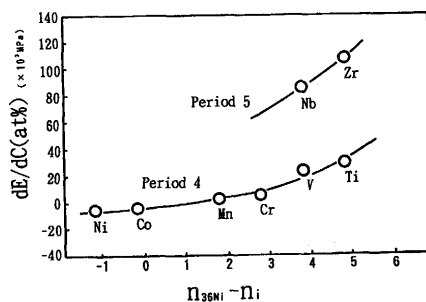


Fig. 7. Relation between the change in Young's modulus per atomic % of alloying elements added in the Fe-36%Ni alloys and the difference in the number of valence electrons per atom in the Fe-36%Ni alloy and that in alloying elements.

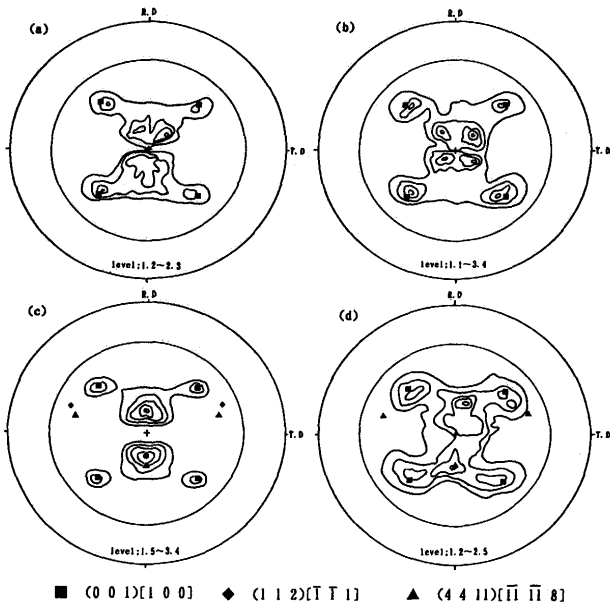


Fig. 8. (111) pole figures at 20~30 μ m from the surface of the various Fe-36%Ni alloy specimens.

- (a) no addition annealing temperature 900°C
- (b) no addition annealing temperature 1150°C
- (c) 0.25%Nb added annealing temperature 900°C
- (d) 0.0042%B added annealing temperature 900°C

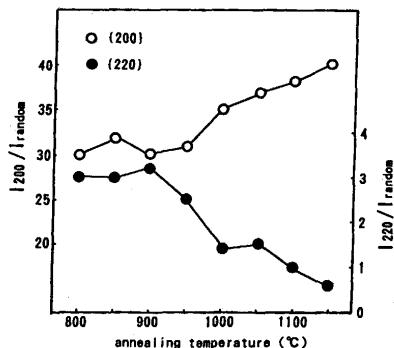


Fig. 9. The effect of annealing temperature on the pole intensity of {200} and {220} in the Fe-36%Ni alloy.

の再結晶集合組織の主成分は{112} <111>であり本図では示さなかったが焼鈍温度を上げて主成分が変化することはなかった。またB添加材ではその集合組織の主成分は{4411} <11118>となっている。これらの{112} <111>, {4411} <11118> および {100} <001> を松尾の示したヤング率の面内異方性の結果¹²⁾に照らしてみると, {112} <111>, {4411} <11118> を有するものの方が {100} <001> を有するものよりヤング率が高いことがわかる。NbやBの添加によりヤング率が上昇するのは, 集合組織の変化がその一因をなし

ているものと考えられる。

5. 結言

36%Ni合金の機械的性質,特に0.2%耐力とヤング率に及ぼす添加量の比較的少ない範囲でのC, Si, Mn, Ni, Cr, Co, Nb, Ti, V, Zr, B等の合金元素および焼鈍温度の効果について検討し,以下の結果を得た。

0.2%耐力について

(1)0.2%耐力に及ぼす合金元素の影響を定量化した。それらの元素のうちC, B, Zr, Nb, Siは0.2%耐力を大きく増加させる。また36Ni合金の0.2%耐力を下げる元素は唯一Crだけであった。

(2)各種元素の添加による0.2%耐力の変化は,添加元素の原子半径とよい相関関係を示した。

ヤング率について

(1)ヤング率に及ぼす合金元素の影響を定量化した。ヤング率はC, Si, Ni, Coの添加により減少し, Mn, Cr, Nb, Ti, V, ZrおよびBの添加により増加する。Bを除きこれらの元素の作用は周期律表上で分けられた。また無添加の36Ni合金では焼鈍温度の上昇とともに減少した。

(2)各種遷移金属元素の添加によるヤング率の変化量は36Ni合金の平均外殻電子数と添加元素の外殻電子数の差,ならびに周期番号と比較的よい相関関係が認められる。

(3)B, Nb, Ti等の添加によるヤング率の増加,特に周期律表上で他元素と同一に区分けできないBの添加によるヤング率の増加は集合組織の変化によるものと考えられ,ヤング率の低い{100} <001>の立方体方位が形成されにくくなり,{100}が少なくなること,また無添加の36Ni合金の焼鈍温度の上昇によるヤング率の低下は,焼鈍温度の上昇につれ{220}, {111}が少なくなり,{100}がより多く配向するようになるためと考えられた。

文 献

- 1) 例えば, Physics and Application of Invar Alloys, ed. by H. Saito, 丸善, (1978).
- 2) 矢萩慎太郎, 草加勝司, 加藤哲男: 電気製鋼, 51 (1980), 80.
- 3) 矢萩慎太郎, 草加勝司: 電気製鋼, 53 (1982), 122.
- 4) N.J.Petch: J.Iron and Steel Institute, 174 (1953), 25.
- 5) 津田正臣: 日本冶金技報, 3 (1994), 49.
- 6) K.J.Irvine and F.B.Pickering: J.Iron and Steel Institute, 207 (1969), 1017.
- 7) 金属, 58 (1988), 折込表 元素周期律表.
- 8) W.Koster: Z.Metallk, 62 (1971), 117.
- 9) W.Koster: Z.Metallk, 62 (1971), 123.
- 10) W.Koster: Z.Metallk, 63 (1972), 633.
- 11) 鈴木朝夫: 昭和57, 58年度研究費補助金研究成果報告書No57420051, 124.
- 12) 松尾宗次: 金属塑性加工の進歩, 五弓勇雄編, コロナ社, (1978), 486.