

鉄鋼におけるヌープ硬さ異方性と 応力との関係 (第1報)

中 野 行 夫・大 谷 南 海 男

Relationship between Applied Stress and Anisotropy of Knoop Hardness in Various Steels. (1st Report)

Yukio NAKANO・Namio OHTANI

An investigation was carried out to clarify the effect of applied stress within the elastic limit on the anisotropy of Knoop hardness of various stainless steels, that is, SUS 301, 304, and 305, as cold rolled or annealed after cold rolling.

The anisotropy of Knoop hardness is observed in all of the specimens, regardless of the extent of heat treatment and cold reduction.

The Knoop hardness corresponding to the resistance of deformation in the direction of applied stress decreases remarkably with increasing applied stress.

As to the relationship between applied stress (σ) and the anisotropy of Knoop hardness (ΔH_K), the following equations are approximately obtained:

$$\sigma = 1.1 \Delta H_K - 25.0 \quad (\sigma > 0) \quad \text{for cold rolled materials,}$$

$$\sigma = 1.2 \Delta H_K - 5.0 \quad (\sigma > 0) \quad \text{for annealed materials.}$$

1. ま え が き

金属材料のヌープ硬さは、ビッカース硬さと同一理論に基づいて測定されるが、板面の異方性における微妙な変化を検出するのに有利であることが、氏原¹⁾ら、星野²⁾らによって研究されている。また、Truszkowski³⁾らによれば、冷間加工したAlの塑性異方性をヌープ硬さによって定量的に測定することができる。

一方、弾性限内の応力で金属の硬さが低下する現象は古くから知られており、Yoshino⁴⁾はこの現象を利用して、炭素鋼の焼もどし材と冷間加工材の表面の残留応力を測定した結果、硬さの変化によって残留応力のある程度予測することができたが、実用に供するまでには至っていない。また、弾性応力下でのヌープ硬さ異方性から残留応力を測定しようとした星野²⁾らの研究もある。それによれば3種のステンレス鋼について、冷間圧下率30~67%の範囲ではヌープ硬さ異方性と応力の関係は、鋼種、圧下率に関係なく1本の直線で示されることを明らかにしている。

2)
本研究では、星野らの結果を考慮して、さらに加工度、熱処理の異なる各種のオーステナイト系ステンレス鋼を試料として、弾性応力下でのヌープ硬さ異方性の変化を測定して残留応力を求める可能性について検討した。

2. 試料と実験方法

2・1 試 料

試料はSUS 301, 304および 305の3種で、その化学組成は表-1に示すとおりである。この3種のステンレス鋼の特徴としては、ひずみ誘起マルテンサイト相に対するオーステナイト相の安定度がそれぞれ相違することである。すなわちSUS 301はオーステナイト相が最も不安定であるが、SUS 305は安定であり、SUS 304はその中間程度である。従って 試料はすべてオーステナイト相とひずみ誘起マルテンサイト相の混合組織からなっており、SUS 301では誘起マルテンサイト相の割合が比較的大きいが、SUS 305ではオーステナイト相の割合が大きいものと思われる。

これら3種のステンレス鋼の熱間圧延材(板厚 3.7~4.0mm)を冷間圧延状態または焼なまし

表-1 試料の化学組成 (Wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	N
SUS 301	0.089	0.48	0.98	0.023	0.005	6.99	16.77	0.04	0.04	0.008
SUS 304	0.067	0.55	0.92	0.026	0.011	8.80	18.31	0.04	—	0.025
SUS 305	0.040	0.39	3.87	0.031	0.010	9.91	16.98	0.04	0.08	0.016

表-2 試料の加工、熱処理条件

試 料		加 工 , 熱 処 理 条 件	
SUS 301	冷 間 加 工 材	熱間加工 → 溶体化処理 → 冷間圧延 → 焼なまし → 冷間圧延 t = 3.7mm 1100℃ × 30min t = 1.25mm 1050℃ × 10min t = 1.0mm	
	焼 な ま し 材	" → " " → " → " t = 3.7mm t = 1.0mm 1050℃ × 3min	
SUS 304	冷 間 加 工 材	" → " → " → " → " t = 3.8mm t = 1.25mm 1050℃ × 10min t = 1.0mm	
	焼 な ま し 材	" → " → " → " t = 3.8mm t = 1.0mm 1050℃ × 3min	
SUS 305	冷 間 加 工 材	" → " → " → " → " t = 4.0mm t = 1.25mm 1050℃ × 10min t = 1.0mm	
	焼 な ま し 材	" → " → " → " t = 4.0mm t = 1.0mm 1050℃ × 3min	

注) t は板厚

状態で板厚 1.0mm として試料にした。その詳細の熱処理および焼なまし条件を表-2に示した。すなわち冷間圧下率はほぼ66~74%程度であり、冷間加工の目的は材料の弾性限を高めるためである。なお試料の機械的性質を表-3に示した。

表-3 試料の機械的性質

試 料		縦弾性係数(kg/mm ²)	ビッカース硬さH _{v(10)}
SUS 301	冷間加工材	2.15×10^4	401
	焼なまし材	1.84×10^4	186
SUS 304	冷間加工材	2.24×10^4	311
	焼なまし材	1.75×10^4	157
SUS 305	冷間加工材	2.00×10^4	264
	焼なまし材	2.12×10^4	130

2・2 ヌープ硬さ試験

ヌープ硬さはビッカース硬さ試験機にヌープ圧子を取付け、押込み荷重1000gで測定した。

ヌープ硬さでは、短軸方向の金属側の変形抵抗によって押込み深さが異なるので、圧痕の長軸寸法に差を生ずるものと考えられている。従って圧痕の長軸の長さから求められる短軸方向の硬さをヌープ硬さとする。

本実験では図-1にみるようにヌープ硬さの測定を直交する2方向について行い、試料の圧延方向とヌープ圧子の長軸方向を一致させた場合のヌープ硬さをH_{KC}とし、圧延方向と長軸方向を直交させた場合のヌープ硬さをH_{KL}とした。^{*}

* 後述するように、試料の長手方向と原板の圧延方向は一致している。

すなわち図-1(a)は冷間圧延材の場合の圧痕を示し、ヌープ圧子の長軸方向が圧延方向と一致したとき、すなわち圧延方向に直角な方向の金属の変形抵抗を示すヌープ硬さをH_{KC}としているまたヌープ圧子の長軸方向が圧延方向と直交するとき、すなわち圧延方向の金属の変形抵抗を示すヌープ硬さをH_{KL}とした。

図-1(b)は試料に応力を加えた場合の圧痕を示すもので、ヌープ硬さの記号は図にみるとおりである。

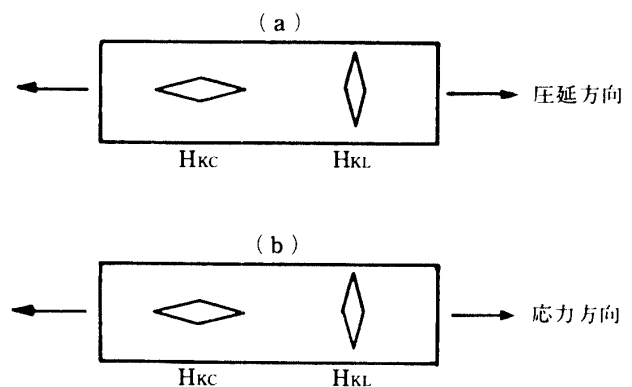


図-1 ヌープ硬さの表示法

2・3 応力の付加方法

試料に弾性限内の引張応力を加えて、そのときの応力を測定するための治具を図-2に示す。図の右側中央のナットを締めることによって試料に負荷を与え、試料裏面に貼付したストレインゲージによって応力値を測定する。すなわち各試料について予め測定した縦弾性係数から各応力値に対応するひずみ量を求めておき、そのひずみを与えることによって逆に応力値を求めた。こうして一定の応力状態で試料をビッカース硬さ試験機に取付け、そのときのヌープ硬さを測定した。なお試験片の長手方向は試料原板の圧延方向と一致させてあり、図-3に試験片の寸法を示した。

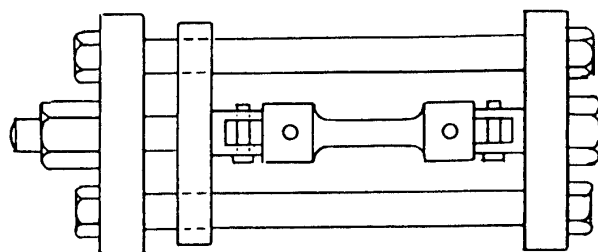


図-2 応力付加用治具

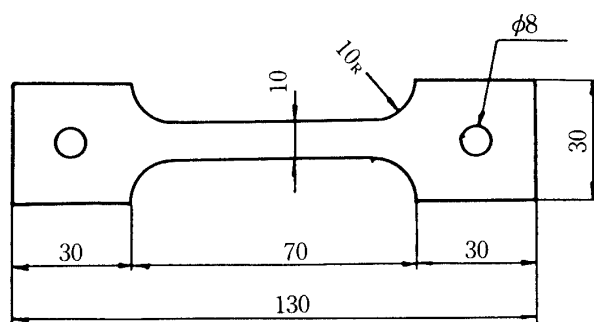


図-3 試験片の寸法 (mm)

3. 実験結果とその考察

3・1 試料のヌープ硬さ異方性

SUS 301, 304および 305の冷間加工材と焼なまし材に対して引張り応力を加えた場合のヌープ硬さ H_{KC} と H_{KL} の測定結果を図-4～9に示した。

図中の応力零におけるヌープ硬さ異方性、すなわち $H_{KC} - H_{KL}$ は金属材料のもつ異方性のうちで、応力に依存しない部分と思われる。一般的な傾向としては、この値は鋼種と加工、熱処理条件によって相違しており、SUS 301加工材では小さく、SUS 304加工材では大きい。これは定性的には星野ら²⁾の研究結果と一致しており、星野らのいうように、オーステナイト相/マルテンサイト相の混合組織において、マルテンサイト相が多くなると、冷間圧延に伴う集合組織が発達しにくくなるためと考えれば、SUS 301加工材の異方性の小さいことが理解される。

焼なまし材の異方性は3鋼種とも加工材よりも小さいが、これは焼なまし処理による均質化に基づくものと思われる。

このように金属材料のヌープ硬さ異方性は応力のみならず鋼種とその組織によっても変化する。従来、ヌープ硬さ異方性は圧子の押込みによって、材料がほぼ圧痕の短軸方向へ流動するので、その方向の変形抵抗によって押込み深さが異なり、圧痕の長軸寸法に差を生ずるものと考えられてきた。⁵⁾ 圧延面内でのヌープ硬さが、圧下率の増大とともに大きくなる1例を、黄銅板について^{*}図-10に示した。このようにヌープ硬さ異方性は金属材料のもつ組織の異方性と関係しているが、詳細の関係については今後の検討にまきたい。

* 図中のヌープ硬さ H_K は圧痕の長軸の長さから求めた硬さを短軸方向の硬さとした。

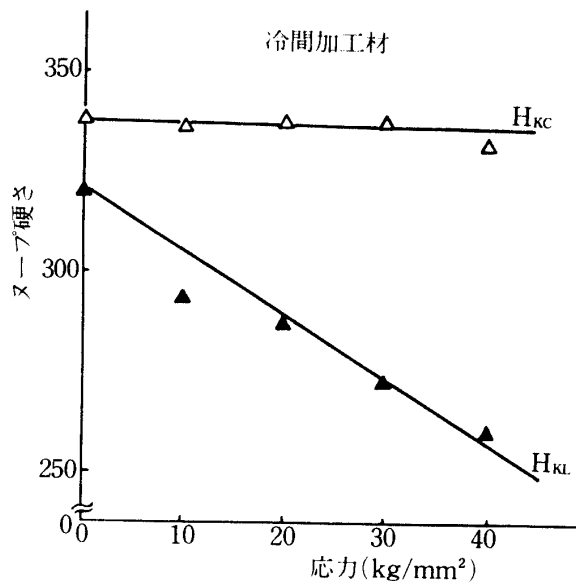


図-4 SUS 301のヌープ硬さにおよぼす応力の効果

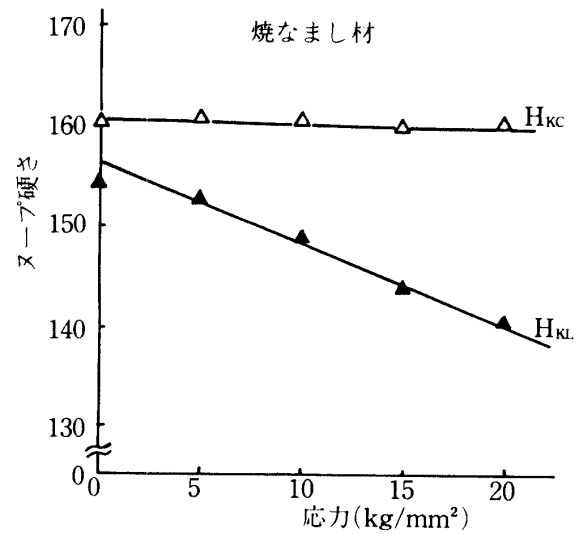


図-5 SUS 301のヌープ硬さにおよぼす応力の効果

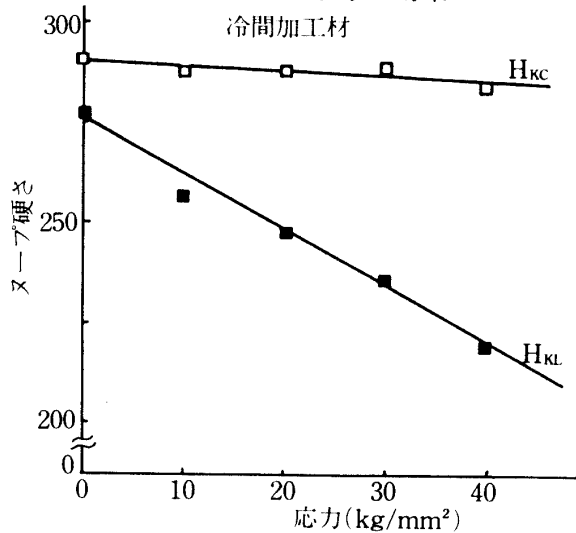


図-6 SUS 304のヌープ硬さにおよぼす応力の効果

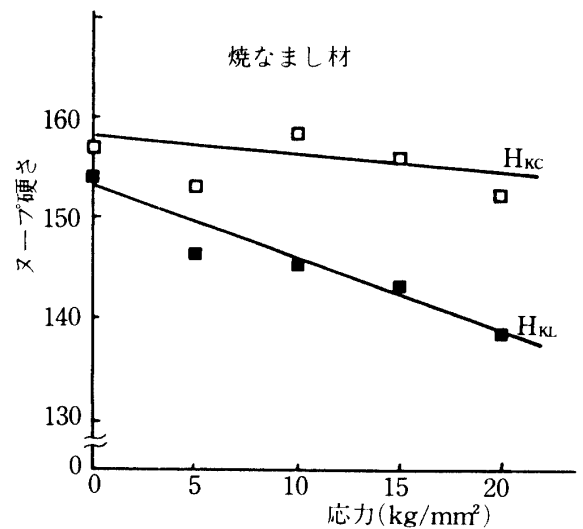


図-7 SUS 304のヌープ硬さにおよぼす応力の効果

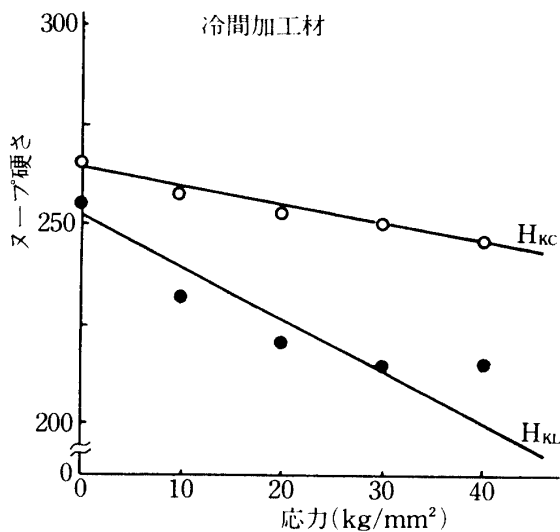


図-8 SUS 305のヌープ硬さにおよぼす応力の効果

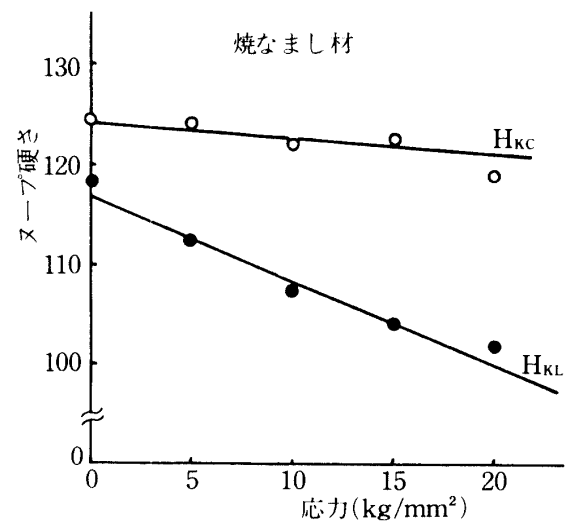


図-9 SUS 305のヌープ硬さにおよぼす応力の効果

3・2 ヌープ硬さ異方性に

およぼす応力の効果

さて、ヌープ硬さ異方性におよぼす応力の効果に関しては、図-4～9に示したとおりである。一般的傾向としては、3鋼種の冷間加工材、焼なまし材ともに、 H_{KC} の値は応力が増加するに従って僅かに減少する程度にすぎないが、 H_{KL} の値は応力の増加とともに著しく減少する。これは、さきに述べた星野らの研究結果とよく一致している。²⁾

このように応力の作用方向とヌープ圧子の長軸方向が一致した場合よりも、応力の作用方向と長軸方向が直角になったときの方が、硬さにおよぼす応力の影響が大きいことは、すでに Oppel⁶⁾によって報告されている。戸沢らも、この現象をとりあげ⁷⁾

て、応力が作用する方向がヌープ圧子の軸方向に対して異なる場合、圧子押込み時の金属内の偏差応力が方向によって異なり、圧子によって変形させるために必要な応力も当然異なってくるために、金属に見掛け上の変形抵抗が方向性をもつことになるものと説明している。

しかし、Oppelや戸沢らの報告では、応力の作用方向に対し直角方向の硬さを示す H_{KC} が、応力によってどのように変化するかについては検討されていないようである。本研究の結果によれば、SUS 304, 305の2鋼種では、冷間加工材、焼なまし材ともに応力の増加につれて、 H_{KC} が僅かに減少するのに対して、SUS 301ではほとんど変化しない。このような相違の生ずる原因について解析することは困難であるが、応力の効果は、応力の付加方向の硬さを示す H_{KL} の変化に明りように現われる。

そこで H_{KL} について検討すると、BüCKLE⁸⁾によれば、式(1)で示される ΔH_{KL} は弾性応力に比例するといわれる。

$$\Delta H_{KL} = \frac{\text{無負荷状態の } H_{KL} - \text{負荷状態の } H_{KL}}{\text{無負荷状態の } H_{KL}} \quad (1)$$

いま、試料の3鋼種を加工材と焼なまし材とに分けて、応力との関係を示すと図-11, 12を得る。これによれば ΔH_{KL} が応力に依存する傾向は認められるが、加工材、焼なまし材ともに鋼種による相違が大きく、測定値は原点を通る点線に対して、ある幅をもつように思われる。

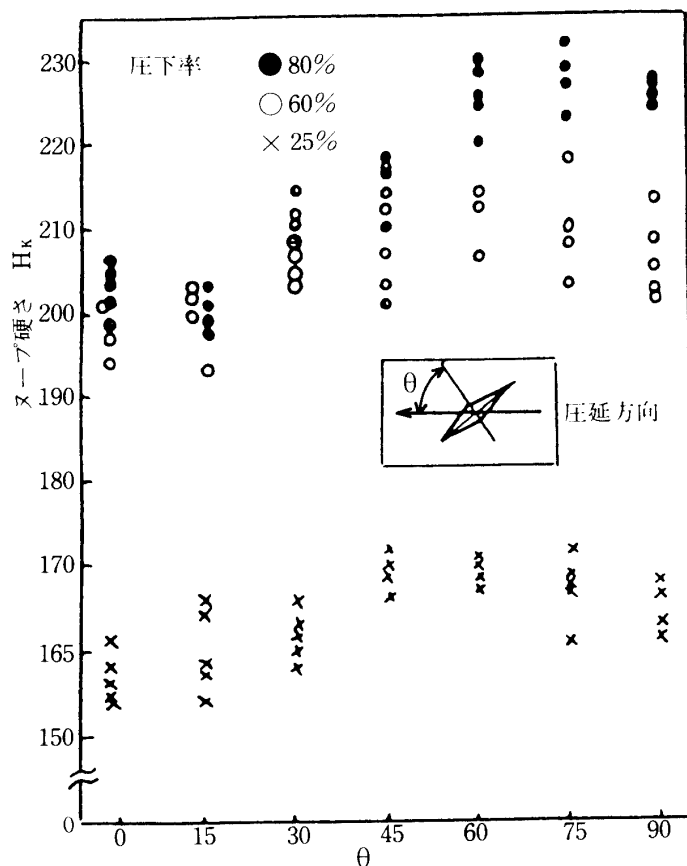


図-10 黄銅板圧延面内でのヌープ硬さ異方性⁶⁾

ここで星野らの研究²⁾に示されるように、 H_{KL} が応力にほとんど依存せず、 H_{KL} が応力の増大とともに単調に減少することに注目して、改めて H_{KC} と H_{KL} の差すなわち $\Delta H_K = H_{KC} - H_{KL}$ を縦軸にとって、応力との関係をプロットすると図-13, 14を得る。

これを図-11, 12と比較すると、明らかに鋼種による ΔH_K のばらつきが ΔH_{KL} のばらつきより

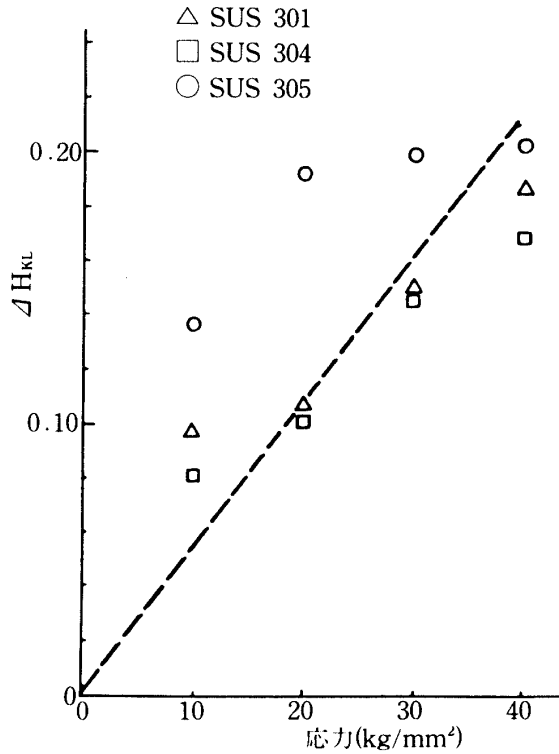


図-11 冷間加工材の ΔH_{KL} と応力との関係

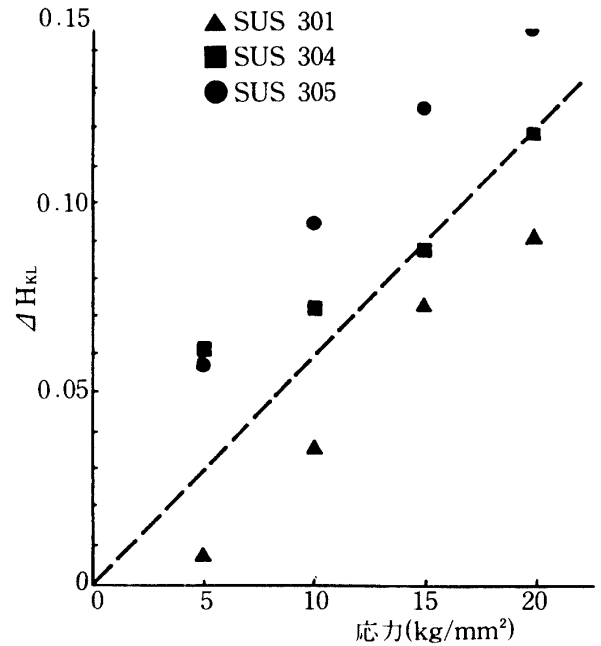


図-12 焼なまし材の ΔH_{KL} と応力との関係

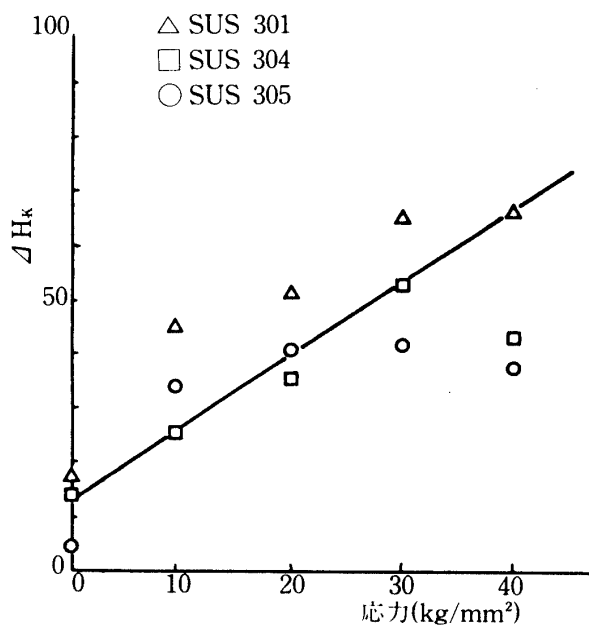


図-13 冷間加工材の応力とヌープ硬さ異方性との関係

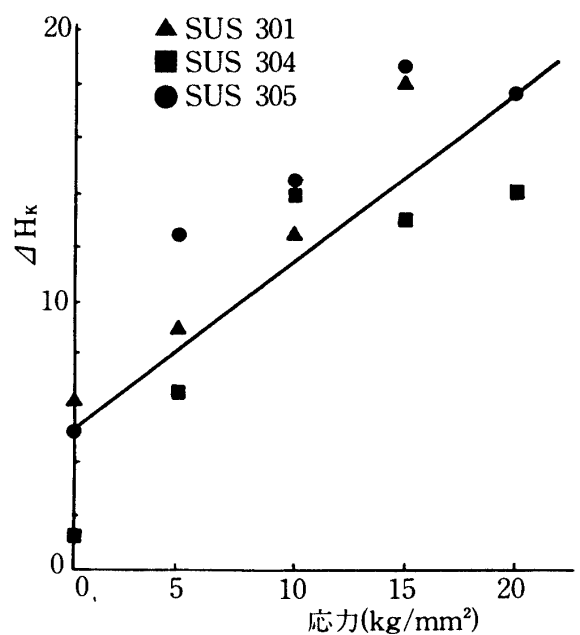


図-14 焼なまし材の応力とヌープ硬さ異方性との関係

も小さくなることが判る。

この結果から鋼種に関係なく、応力 σ とヌープ硬さ異方性 ΔH_k との関係を直線的とみなすと図-15に示したとおりになる。すなわち、冷間加工材と焼なまし材とでは、 σ と ΔH_k との関係は近似的ではあるが、勾配を異にするつぎの2本の直線であらわされる:

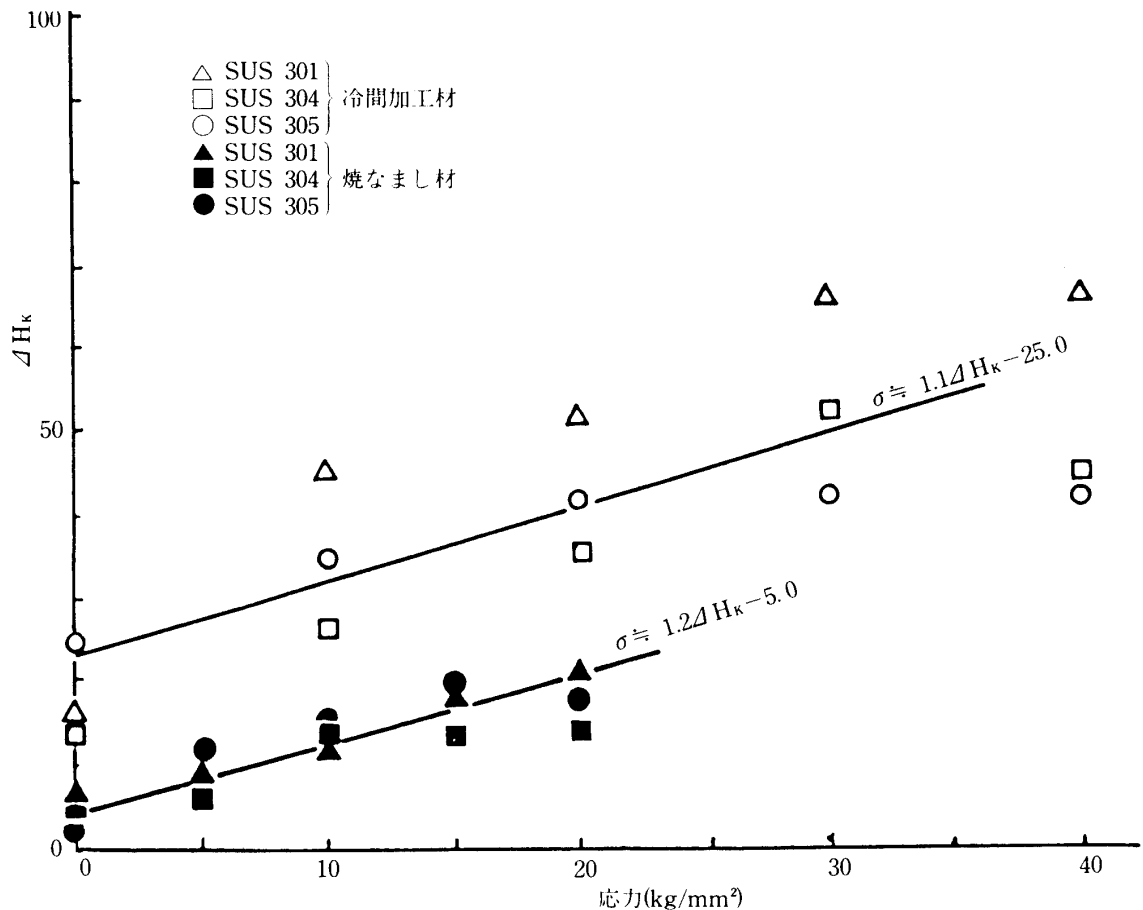


図-15 ヌープ硬さ異方性におよぼす応力の効果

$$\text{冷間加工材, } \sigma \doteq 1.1\Delta H_k - 25.0 \quad (\sigma > 0) \quad (2)$$

$$\text{焼なまし材, } \sigma \doteq 1.2\Delta H_k - 5.0 \quad (\sigma > 0) \quad (3)$$

4. ま と め

本実験では、多方面に使用されている3種の実用ステンレス鋼SUS 301, 304 および 305を用いて、ヌープ硬さの異方性を利用することによって、残留応力を非破壊的に測定する可能性について検討した。その結果、つぎのような事柄が明らかになった。

(1) ヌープ圧子の長軸方向が応力の方向と一致するとき、すなわち応力と直角方向の硬さは、応力の影響をあまり受けない。しかし、ヌープ圧子の長軸方向と応力の方向が直角になった場合、つまり応力方向の硬さは応力の増加につれて直線的に減少する。これは従来の研究結果と一致する。

(2) 本実験で使用した3種の試料においては、鋼種、熱処理条件、圧下率に関係なくヌープ硬さの異方性が現われる。しかし一般的には、各鋼種とも冷間加工材の方が焼なまし材よりも、この異方性が顕著である。

(3) ヌープ硬さ異方性におよぼす応力の影響については、各鋼種とも冷間加工材と焼なまし材では程度が異なっており、応力 σ と H_{KC} と H_{KL} の差 ΔH_K との間には、鋼種に関係なく近似的に次の関係式が得られた。すなわち、

冷間加工材については

$$\sigma \approx 1.1 \Delta H_K - 25.0 \quad (\sigma > 0)$$

焼なまし材については

$$\sigma \approx 1.2 \Delta H_K - 5.0 \quad (\sigma > 0)$$

従って、この関係からヌープ硬さの異方性を測定すれば、極めて近似的ではあるが、単軸の応力値を非破壊的に求めることができる。

終りに、本研究を行うに当って試料と種々の便宜を提供された日新製鋼株式会社周南研究所、ならびに研究結果についてご教示、ご討論頂いた同研究所星野和夫博士、名古屋大学工学部戸沢康寿教授に厚くお礼を申し上げます。また終始熱心に実験に協力された福井工業大学学生古山尚宏、高木康之の両君にも深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 氏原・中川・吉井：第22回塑性加工連合講演会概要集 (1977), 433
- 2) 星野・井川・守田：日新製鋼技報, 第33号 (1975), 33
- 3) W.Truskowski et J. Gryziecki: Memoires Scientifiquev Rev.Metallurg., **LXIX** (1972), 67
- 4) T.Yoshino: Proc.of Internat'l Conf. on Mechanical Behavior of materials, **5** (1972), 315
- 5) P.L.Rittenhouse and M.LRicklesimer: A.I.M.E., **236**(1966), 496
- 6) 戸沢・中村：塑性と加工, **18**, No. 82(1967), 631
- 7) G.Oppel: Exp.Mech., (1964), 135
- 8) H.Bückle: Z.Metallkunde, **45**(1954), 623