

ボロン鋳鋼によるトラックシューの強靱化

Improved Ductility of Truck Shoes of Boron Cast Steel

This report deals with the development of a boron cast steel, which makes a suitable material for truck shoes to be used in the construction machine, and the method of heat treatment for the steel.

In the study on the effects of boron, carbon and manganese on the mechanical properties and hardenability of steel a pronounced increase in strength, ductility and hardenability was recognized in the steel containing boron.

岡田千里* Senri Okada

保坂信義* Nobuyoshi Hosaka

石坂隆一** Ryuichi Ishizaka

1 緒 言

建設機械部品のなかでも足まわり部品であるトラックシューは最も多量に使用される部品であるので、これの原価低減の要望は強く、また、これの性能向上は建設機械の質的向上に対して意義が大きい。

これらのトラックシューはエンジン、掘削機械を搭(とう)載したきわめて重量ある建設機械をささえて、岩盤の露出している荒地や雪原を稼(か)動走行しなければならないために強靱(じん)性ならびに耐摩耗性が要求される。

建設機械の量産化が進むに従いトラックシューの形状も軽量化が進み、鋳造品からざん新な形状の圧延品に切り換えられるものが多くなった。しかし、重掘削機械であるパワーショベルなどでは、その形状、重量ともに相対的に大きいものが多いので鋳造品のほうが経済的と思われる。

当初は比較的高価な構造用合金鋳鋼品が用いられた例があ

るが近年は数多くの実績に基づき低マンガン鋼(以下低Mn鋼と略す)のような比較的安価な構造鋼が用いられるようになった。

たとえば、低Mn鋼JIS・SMnおよびSCMn相当材料が用いられている。この鋼は比較的安価なMnを1.3~1.7%含有させて焼入れ性を高め、また、炭素(以下Cと略す)を0.3~0.46%含有させて焼入れかたさを上昇させることができる。しかし、Mn量が比較的多いため焼入れ時に焼われを起こしやすく熱処理において問題がある。

したがって焼入れ方法として、全体焼入れ、焼もどしされたトラックシューもあるが、安全な焼入れ方法として全体焼ならし後、つめ部分を高周波誘導加熱もしくは火炎加熱により部分加熱、焼入れして低温もどしを施すものが多い。

このような煩雑な工程と工数は建設機械の原価にそのまま影響を及ぼすものである。

本報では強靱化と生産合理化を意図して開発した鋳鋼製トラックシューについて述べる。すなわち、上述の改善としてMnをボロン(以下Bと略す)で置き換えることにより従来の材質に劣らない焼入れ性を得るとともに強靱なものにすることを検討しあわせて、その熱処理方法についての合理化を図った。

2 材質面からみた動向

トラックシューは前述のとおり、クローラ形(Crawler type)建設機械の足まわり部品である。これらのトラックシューはほとんど、低Mn鋼鋳鋼で溶製され、図1に示す形状のものが多く用いられている。その大きさは建設機械の本体重量に基づき種々異なるが、およそ長さは400~650mm、幅は250~350mmで重量は20~36kgの範囲にはいるようである。

トラックシューの接地面は建設機械の重量をささえて走行稼(か)動するために十分な耐折損性が必要である。また、ローラ踏み面は走行時ローラと土砂を介して圧着状態となり、いわゆる三体間摩耗現象⁽¹⁾にさらされるので耐摩耗性を具備する必要がある。

これらの材質の機械的性質は、C量、Mn量などの化学組成とその熱処理条件により異なるが、本体強さは引張り強さが60~90kg/mm²、伸び11~17%、かたさ H_B 180~250程度のものが多い。

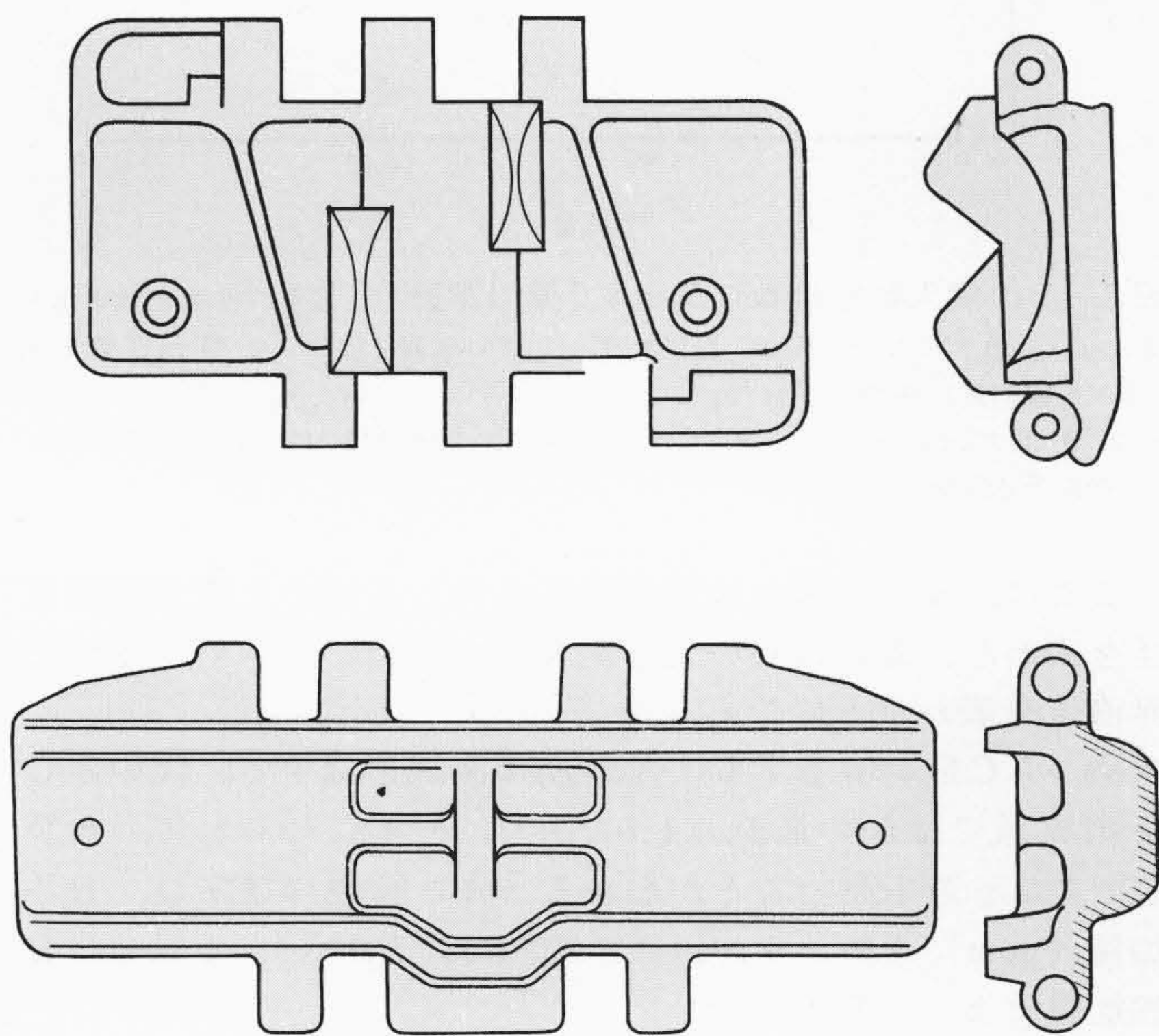


図1 代表的なトラックシューの形状 国内における各メーカーにより製造されているトラクタのトラックシューの形状はつめの部分が単一のものと複列のものがある。

Fig. 1 A Typical Shape of Truck Shoe

*日立製作所機械研究所 **日立建機株式会社

また、焼入れ状態となっているつめ部分の焼入れ硬化層のかたさはほぼ $H_R C37 \sim 42$ となっている。しかし、なかには伸びを12%付近まで低減し、靱性を犠牲にして引張り強さを 95 kg/mm^2 、かたさを $H_B 300$ 付近まで上昇させて本体を強化させたものもある。

このように近年の傾向としては、稼動中の変形防止、耐摩耗性の向上を目的として高硬度強化されてきている。わが国の国土のように比較的軟質な地表層では上記の性状のものが有利であるが、欧米のように岩盤の多い原野や寒冷地での稼動のためには伸び、衝撃強さを主体とした靱性とのかたさとの兼ね合いが検討されなければならない。このような目的に対してBは靱性を向上し、衝撃遷移温度を低減する性質があるため検討の余地が残されている⁽²⁾⁽³⁾。

3 適正化学組成の決定

基本組成として、C量、Mn量、B量は現用材質の焼入れかたさ、強さを上まわすることを目的に0.30~0.45% C、0.80~1.20%Mn、0.0035~0.0055%Bの組成範囲を選定した。

試料を溶製する際には市販の炭素鋼を溶解原料として用い、塩基性高周波溶解炉において行なった。1 溶解重量を160kgとしてB添加と無添加の2種類、80kgずつ分铸造した。また、Bの添加方法の詳細は先に報告したので本報では省略する⁽⁴⁾。

1,620~1,630°Cで铸造した幅30mmのYブロックと30mm径丸棒より引張試験片、衝撃試験片ならびにジョミニー一端焼入れ性試験片（以下ジョミニー試験片と略す）などを採取加工した。表1は試料の化学組成を示すものである。

3.1 焼入れ性に及ぼすCおよびMn量の影響

試料の焼入れ性に及ぼすC量の影響についてその一例を示したのが図2である。図からC量が増加すると焼入れ性曲線は高硬度側に上昇することがわかる。また、MnはC量が少ない場合に若干焼入れ性は向上するがC量が0.40%以上では0.8%と1.2%Mnの相違は認められなかった。

そこで、各試料の化学組成とその焼入れ曲線より(1)式のようにしてBの焼入れ性倍数（以下、 B_f と表わす）を求めてC量について整理すると図3に示すとおりである。

$$B_f = a/b \cdots \cdots (1)$$

表1 試料の化学組成 試料の化学組成の決定は0.30, 0.33, 0.35, 0.38 0.45% C量として、これに、ボロン添加したものと同添加のものに分類した分析結果のCr量は溶解原材料からの残留量である。

Table. 1 Chemical Composition of the Specimens

試料	化 学 組 成 (%)				
No.	C	Si	Mn	Cr	B*
1	0.29	0.30	0.85	0.21	—
2	0.30	0.31	0.81	0.22	0.0055
3	0.33	0.34	0.84	0.18	—
4	"	0.28	0.82	0.11	0.0045
5	0.32	0.29	1.22	0.16	—
6	0.33	0.24	1.16	0.20	0.0045
7	0.36	0.27	0.84	0.22	"
8	0.35	0.31	1.20	0.16	0.0035
9	0.38	0.23	1.18	0.25	—
10	0.39	0.32	0.97	0.20	0.0035
11	0.44	0.31	0.85	0.22	—
12	"	0.25	0.83	0.26	0.0055
13	0.43	0.42	1.04	0.25	"

注：*は添加量を表わす。

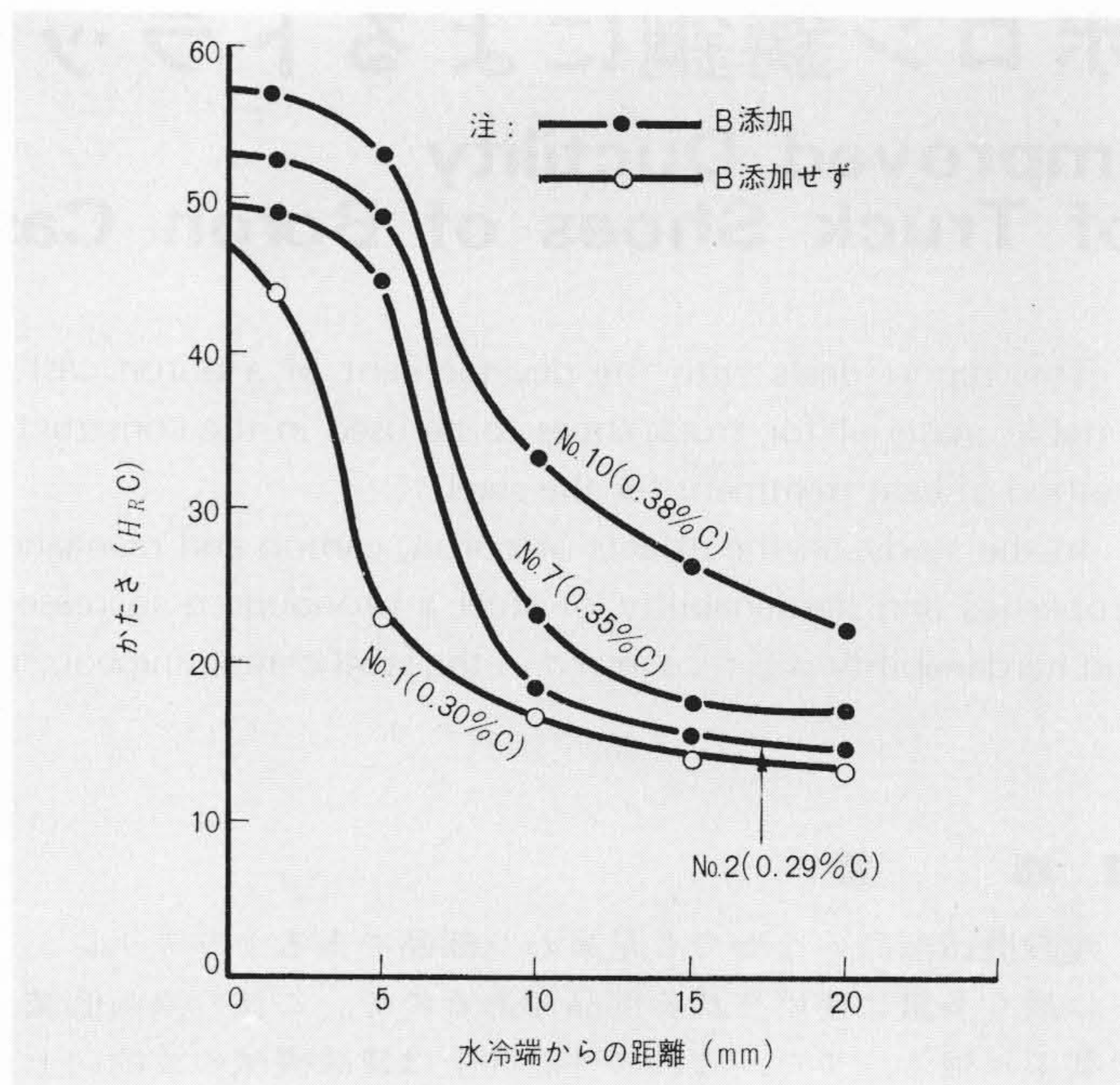


図2 ボロン鋼試料の焼入れ性に及ぼすC量の影響 図2は焼入れ性に及ぼすC量の影響を示すものでC量が増加すると焼入れ性曲線は高硬度側に移動する。

Fig. 2 Effect of Carbon Contents on Hardenability of Boron Bearing Cast Steels

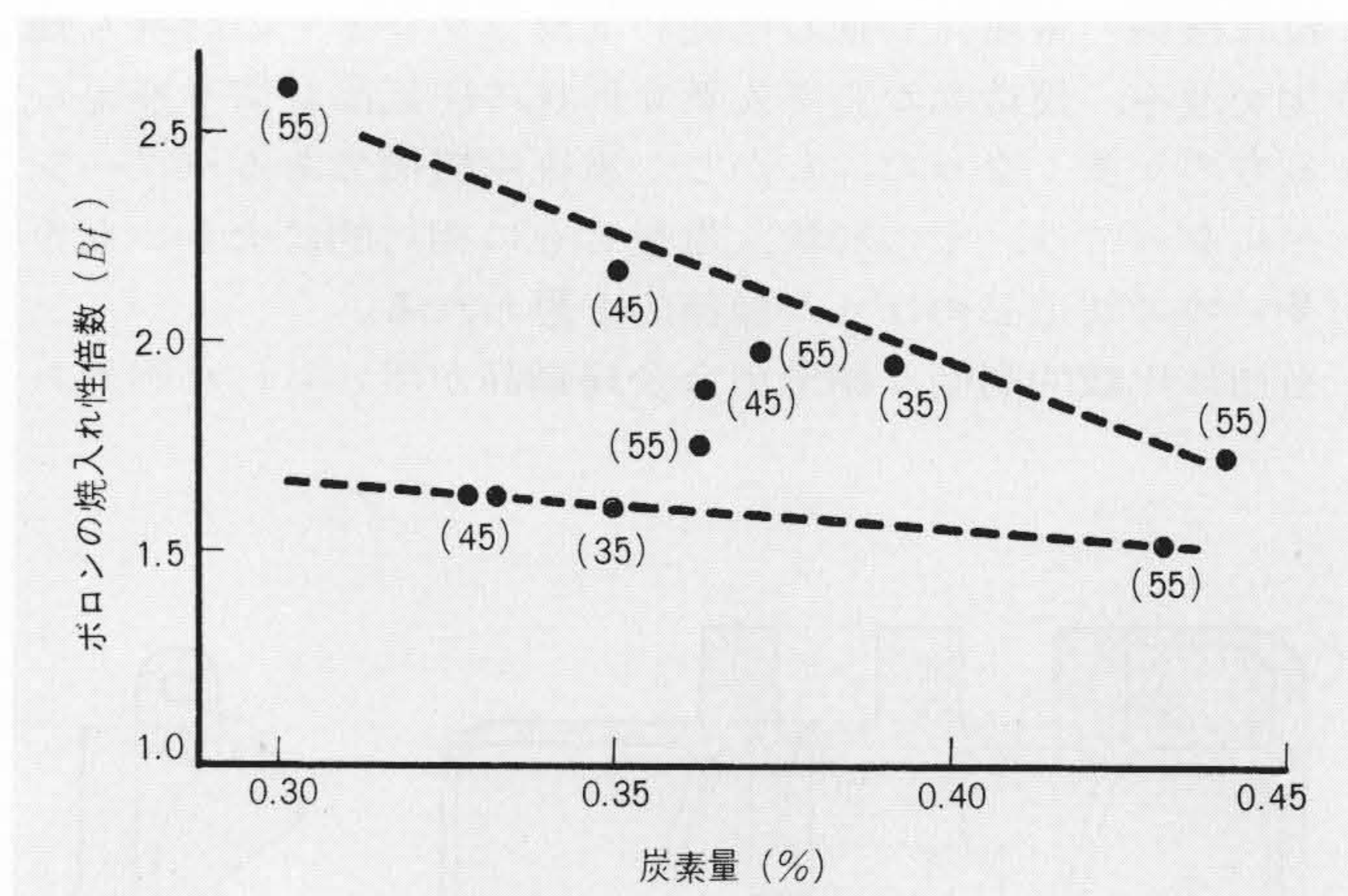


図3 Bの焼入れ性倍数に及ぼすC量の影響 図中の各数字は添加B量(ppm)を示すもので、 B_f はC量増加するに従い低減するが、0.44% C量で約1.6と比較的高い値が示された。

Fig. 3 Effect of Carbon Contents on the Hardenability Multiplying Factor of Boron

ここに、 a は焼入れ性曲線をもとにして求めた理想臨界直径を表わし、 b は試料の化学組成をもとにして求めた理想臨界直径を表わすものである。

図からC量が増加するに従い B_f は漸次下降する。図中のC量組成域では B_f の最低は1.6であり、一般に知られている数値⁽⁵⁾よりも若干高いことがわかる。また図中の数字は、B添加量(ppm)を表わすが、この範囲では B_f に対する効果はB添加量によって変わらない。

次に、870°Cより水焼入れした試料の200~600°Cの焼もどし処理後のかたさに及ぼすMn量の影響については、図4に示すとおりである。

同図からMnは低C量側で焼もどしかたさを若干高めるが高C量側では、その効果は的確ではない。また、C量が増加すると焼入れかたさが高くなるために焼もどしかたさも上昇することが認められた。

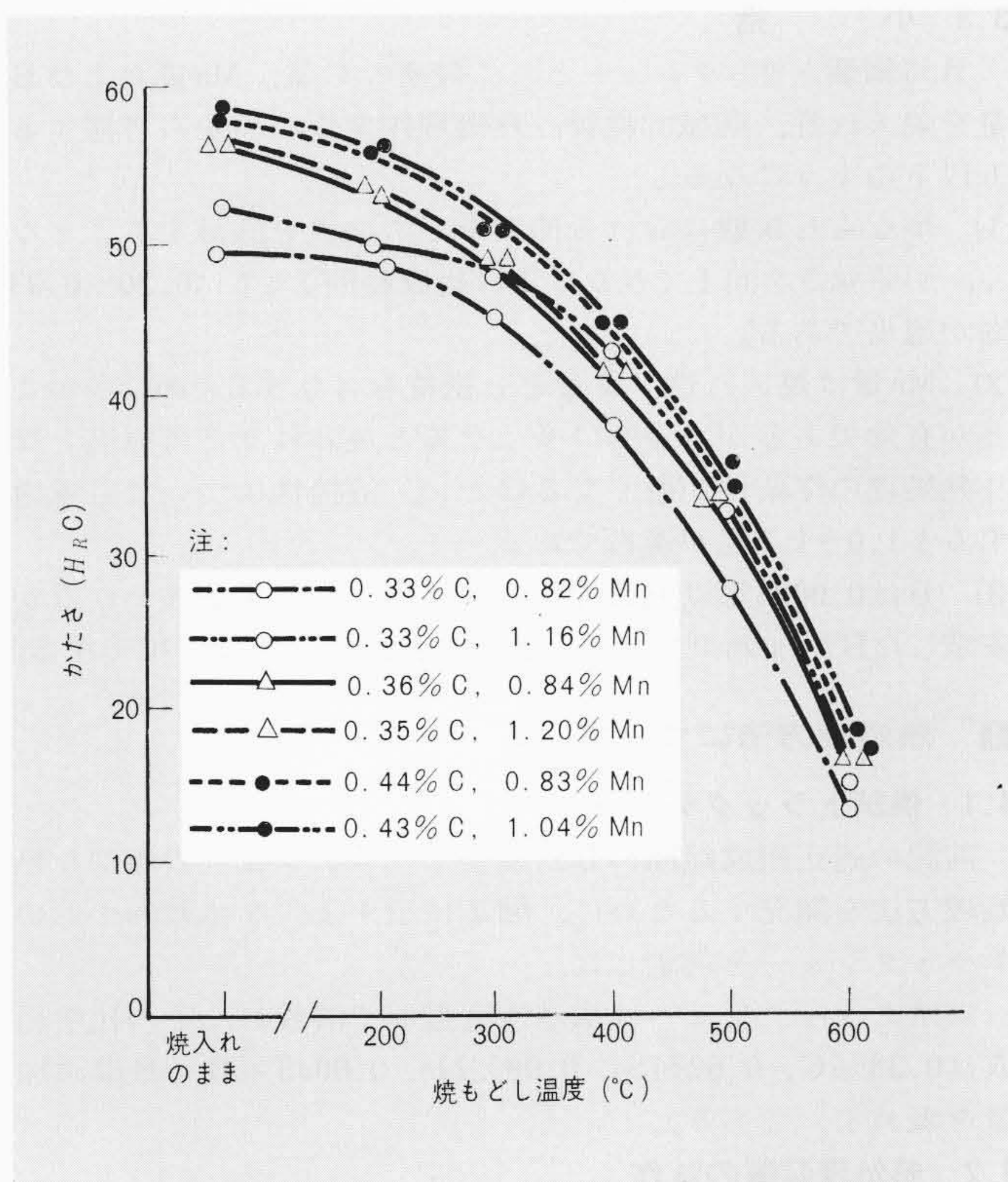


図4 B添加試料の焼もどしかたさに及ぼすMn量の影響 焼もどしかたさに及ぼすMn量の影響は低炭素量側で焼もどしかたさを高めているが高炭素量側では影響を及ぼさないことが認められる。
Fig. 4 Effect of Carbon Contents on the Hardness of Tempered Boron Caststeels

3.2 機械的性質に及ぼすC量, Mn量およびB量の影響

各試料の焼ならし状態の機械的性質についてCおよびMn量で整理すると図5に示すとおりになる。図中の数字はMn量を表わし、●印はB添加、○印はB無添加を表わしている。本図から、B無添加の引張強さはC量に依存する傾向が大きい、B添加ではほぼ70kg/mm²でC量の影響が少ない。また、Mnの影響については明らかでない。

次に、伸びに対してはCおよびBはともに低減させることが認められたがMnについては明らかではない。

伸びの低下に及ぼすBの影響はC量が多くなるに従い大きく、C量単独の場合より低下の傾向は大きい。しかし、本組成範囲内では伸びは20%以上となっている。

次に図6は焼入れ焼もどし状態（焼入れ温度870°C、焼もどし温度200°C）の機械的性質を前図と同様の整理方法で示したものである。同図から焼入れ焼もどし状態の引張り強さは、C量の増加に従い、著しく高くなるが、その傾向はB添加により倍加する。一般に焼入れ性の面では、C量が多くなるとBの焼入れ性倍数は低減することが知られているが、引張強さは逆に急上昇することは興味あることである。

その割合は、0.3%C系試料ではB添加の場合152kg/mm²、B添加により165kg/mm²となり、約13kg/mm²上昇しているが、0.43%C系試料ではB無添加の場合165kg/mm²、B添加により195kg/mm²となり、約30kg/mm²も上昇する。また、伸びにおいても、特に低減しているとは考えられないために高C量側でも実用部品への適用が考えられる。

以上の実験で焼入れ性、焼もどしかたさおよび機械的性質に及ぼすC、Mn、Bそれぞれの影響を検討してきた。この結

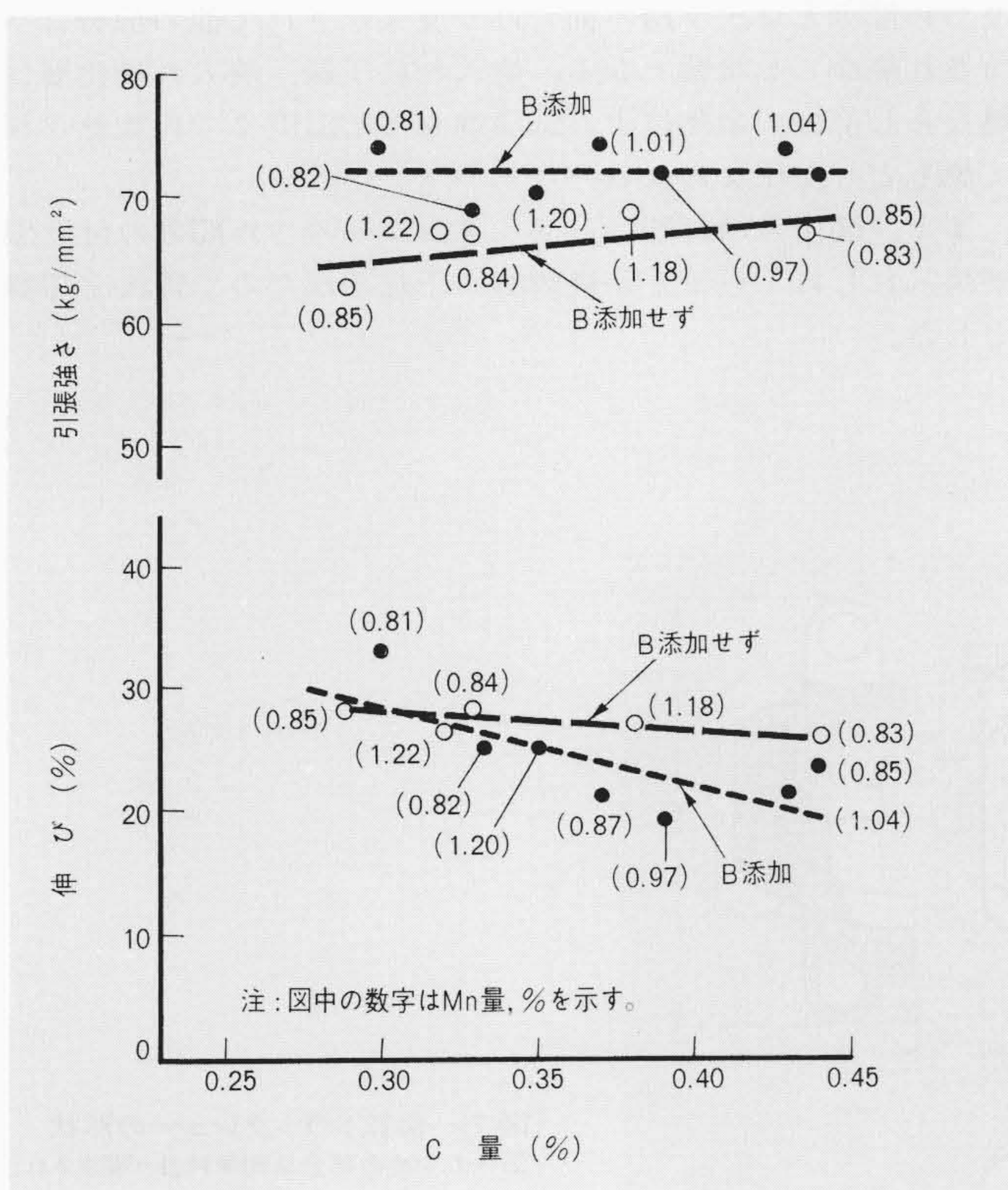


図5 試料の焼ならし状態の機械的性質 B無添加ではC量の増加に従い引張強さが上昇するが、B添加ではC量にかかわらず、ほぼ70kg/mm²を示している。しかし、伸びは逆にB添加のほうがC量の依存の割合が大きい。
Fig. 5 Mechanical Properties of the Normalized Specimens

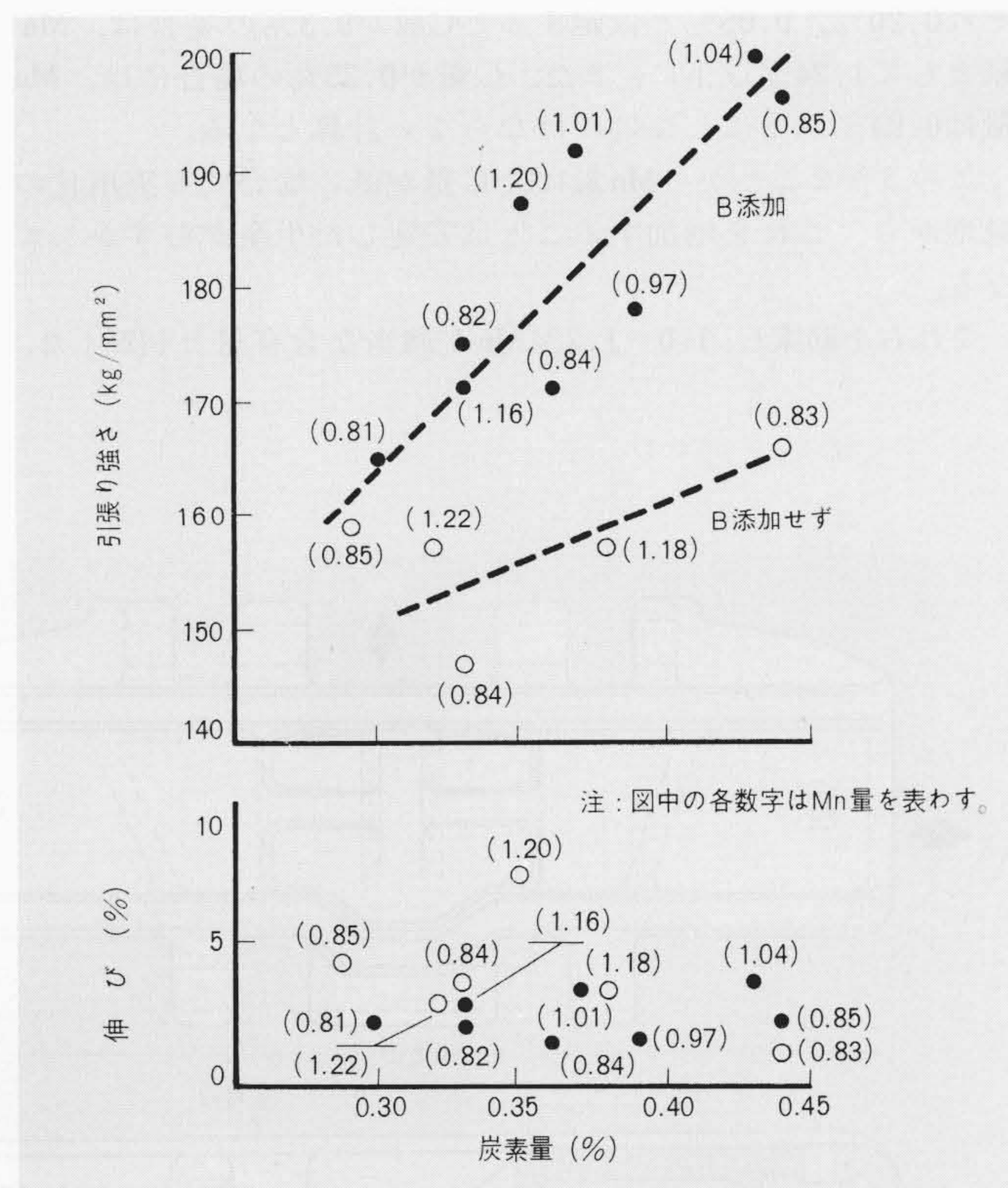


図6 試料の焼入れ焼もどし状態の機械的性質 引張強さはC量の増加に従い上昇するが、その上昇の割合はB添加試料のほうがきわめて大きく、伸びはそれに比較してB無添加とほとんど変化していない。
Fig. 6 Tensile Strength the Specimens Quenched and Tempered

果より、トラックシューとしての最適組成について考察する。

まず、Bは焼ならし材においては引張強さを向上させる反面、伸びを若干低減する。伸びの低減はC量の増加に従い大きくなり0.44%付近ではほぼ20%となる。

Bの添加量としては、その臨界冷却速度が最低となる固溶B量は約3～4 ppmと言われ⁽⁶⁾、そのためには30～50 ppmのB添加が必要とされており、この点0.0045%の添加量が適当と考えられる。また、その添加方法としても従来の研究実績ならびに知見⁽⁷⁾とあわせてFe-Ti-Bによる添加が妥当であると考えられる。

C量としては焼ならし状態、焼入れ状態の機械的性質に対するBとの交互作用を考えて選定することである。焼ならし時の機械的性質については低C量ほどB効果が大きい、焼入れ焼もどし材の強さに対してはC量が高いほどB効果が大きいことが判明した。ここでは、伸びなど靱性を重要視することにしたので相対的に低C量側が望ましいと考え、0.30～0.33%が適当と判断した。

Mnは焼入れ性、焼もどし抵抗性の改善には必要欠くことのできない元素である。ところが機械的性質については実験範囲内では、CおよびBの効果の陰にかくれて明確に示されなかった。

一方で、C量およびMn量が高いとき、焼われ感受性が高くなり、溶接がむずかしくなるといわれている。いま溶接性について述べると(2)式で示す炭素当量でその難易を判断することが多い⁽⁸⁾。

$$C.E.(%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{40} + \frac{V}{14} (\%) \cdots (2)$$

ここに、 $C.E.(%)$ ：溶接性の難易度を表す炭素当量溶接が容易である組成はこの $C.E.$ 値が0.44%以下であるといわれている。仮に溶解材料から混入するCrおよびNi量をそれぞれ0.20%、0.05%と仮定するとC量が0.3%の場合は、Mn量として1.24%以下に、また、C量が0.35%の場合には、Mn量は0.94%以下にしなければならない計算となる。

このようなことからMn量は、C量が低い場合でも実用化の見地から、これを増加することは安定した生産がむずかしくなる。

これらを勘案し、1.0～1.2%Mnが適当な含有量と判断した。

3.3 小 括

B鋼製トラックシューとして最適なC量、Mn量およびB量を焼入れ性、機械的性質、熱処理作業性の面から考慮すると以下ようになる。

- (1) 焼ならし状態における伸びなどの靱性を低減することなく、引張強さを向上できるC量の組成範囲としては0.30～0.33%が適当である。
- (2) Mn量は焼入れ性、焼もどし抵抗を付与するために多いことが有効であるが、量的に多くなると焼われなどの原因となり熱処理の作業性が悪くなるほかに、溶接性についても考慮すると1.0～1.2%が適当である。
- (3) Bは0.0035%以上添加すると焼入れ性効果が表われるが安定したB添加効果を得る量として0.0045%添加を推奨する。

4 熱処理方法について

4.1 供試トラックシュー

前記の適正組成範囲のB鋼製トラックシューの適切な熱処理方法を開発するために、図7に示すような比較的小形のトラックシューを選定した。

供試トラックシューは塩基性電弧炉で溶製し、その化学組成は0.33%C、0.62%Si、0.98%Mn、0.0045%B（Bは添加量を表す）である。

4.2 熱処理装置の試作

トラックシューの焼入れを簡略化するために考案設計した焼入れ装置の概略は図8に示すとおりである。

本装置はトラックシューを焼ならしと同時に、そのつめ部分のみを部分焼入れするように考案されている。すなわち、加熱炉から取り出したトラックシューを図8に示すようにテーブル上に置き、つめ部分とローラ踏み面のみを管状冷却器により一定時間冷却することにして焼入れを施す。これによりつめ部分とローラ踏み面だけが焼入れされて他の部分は空冷され焼ならし状態となる。焼入れ終了後、焼入れ硬化層は焼ならし部分の余熱により低温焼もどし温度まで再加熱されて焼もどしが行なわれる。

また、図中の冷却器はトラックシューのつめ部分の付け根が焼入れしにくいことが経験的に予想されたので管状冷却器とした。

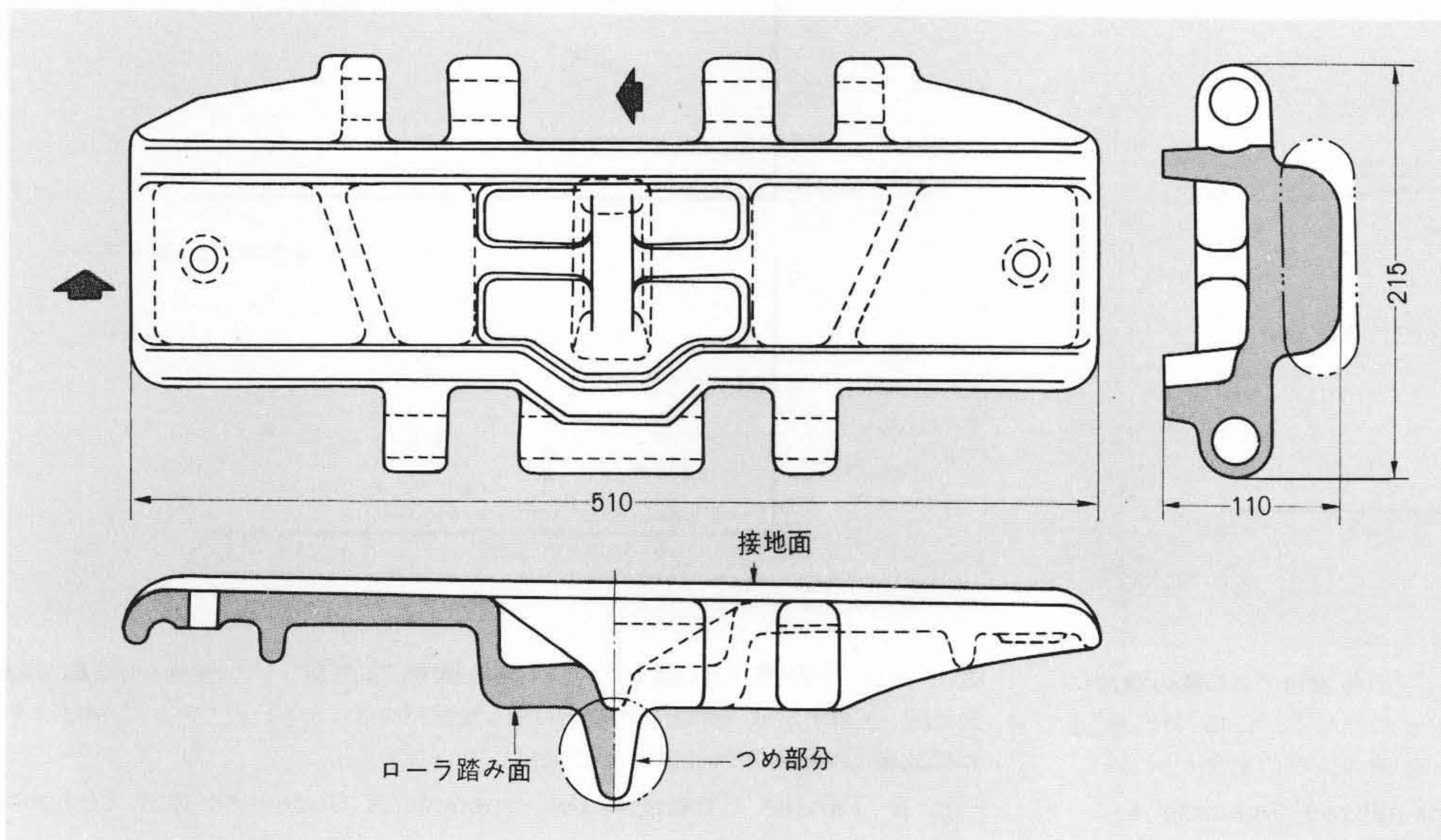
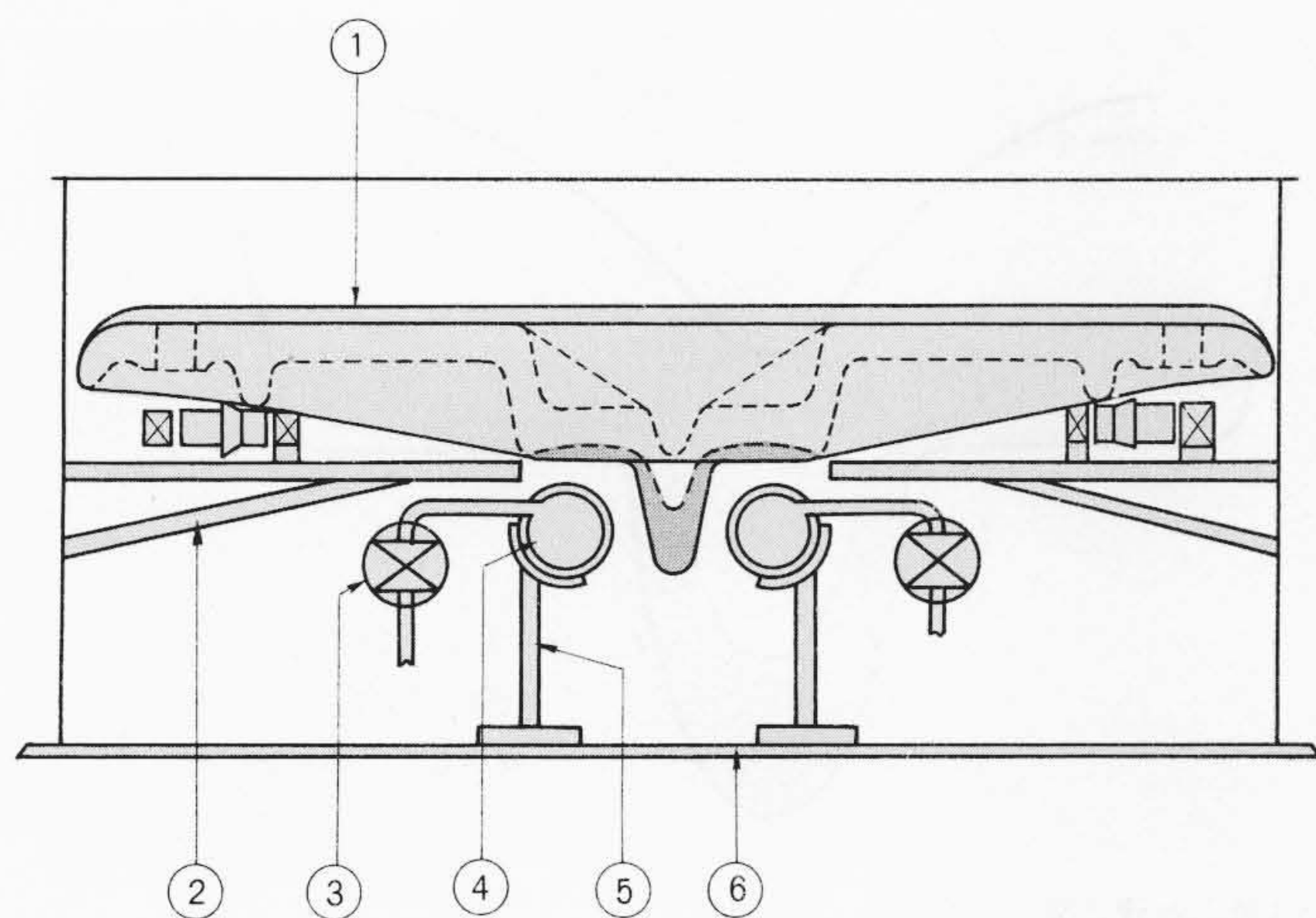


図7 供試トラックシューの形状
図中のつめの部分は耐摩耗性が要求され、焼入れ硬化される。接地面は、これに加えて耐衝撃強さが要求される。

Fig. 7 The Shape of Tested Truck Shoe



① トラックシュー	③ 冷却水減圧弁	⑤ 冷却器支持台
② カバー	④ 管状冷却器	⑥ 水そう

図8 焼入れ装置の概略 本焼入れ装置はトラックシューの接地面に焼ならし状態の熱処理を施し、つめ部分を焼入れ自己焼もどしを与えるためのものである。

Fig. 8 Apparatus for Quenching of Truck Shoe

4.3 トラックシューの熱処理条件

トラックシューの焼入れ部分の冷却状態は水量および水圧により種々異なるが図9はつめ部分の温度変化の一例を示すものである。これから前述したような低温焼もどしの状態がわかる。なお、図中の水圧は冷却器内の水圧を示すものである。

本組成範囲のB鋼が焼入れされるためには、オーステナイト温度よりパーライト温度領域をほぼ15秒以内で通過する冷却速度が必要である。

本装置で水圧を変えたとき、つめ部分の冷却速度、パーライト温度領域の通過時間を水圧と対比させて示すと図10に示すようになる。

これから表面下5mmでは、ほぼ10秒前後と、試験した圧力では安定して焼入れされることが推定できる。

また、トラックシューのつめ部分の断面の焼入れ硬化層に

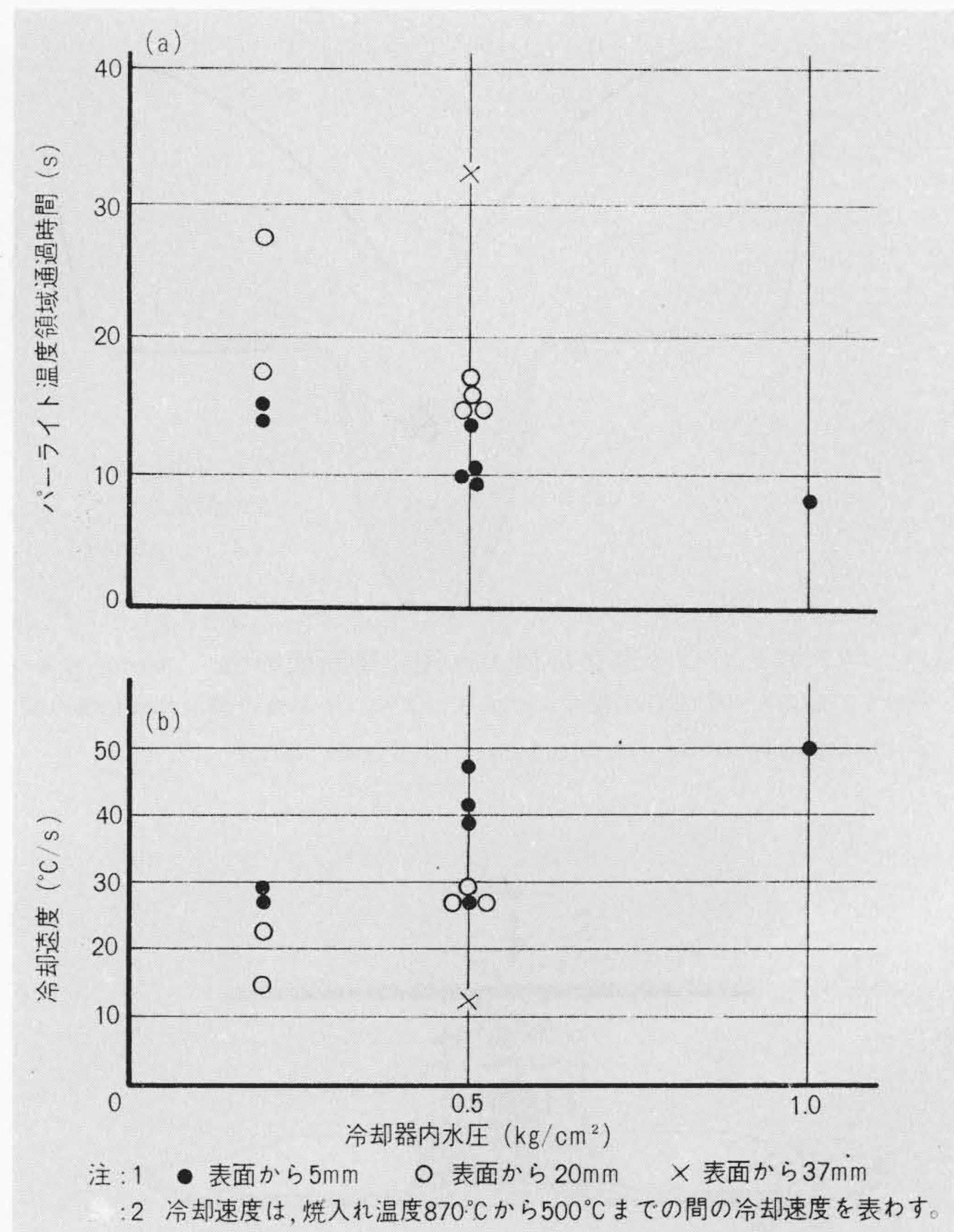


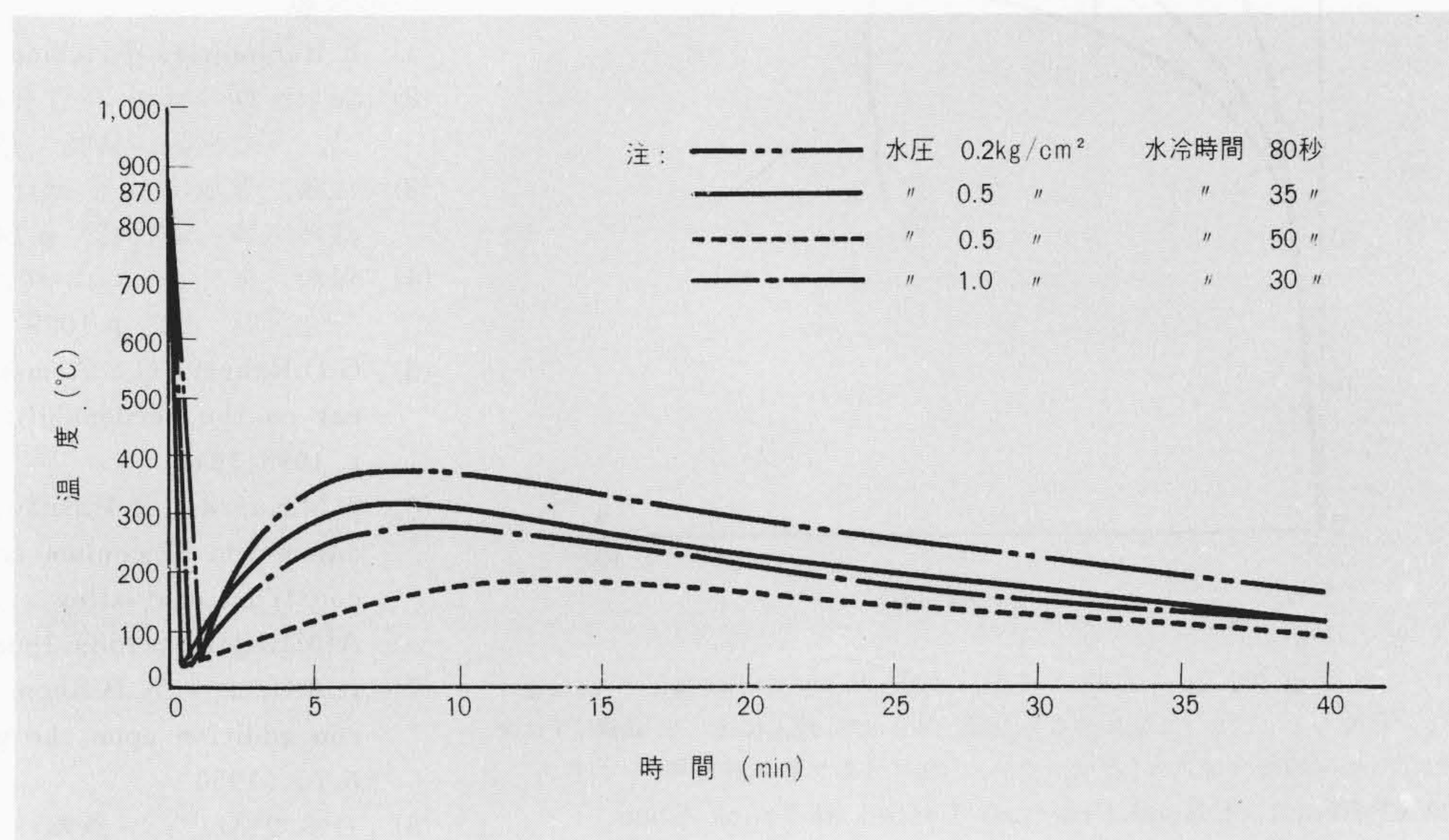
図10 つめ部分の冷却速度に及ぼす水圧の影響 本図からつめ部分が焼き入れされるために必要なパーライト温度領域の通過時間10秒前後の冷却速度が水圧の調整で得られることがわかる。

Fig. 10 Effect of Water Pressure on the Cooling Rate at the Pin of Truck Shoe

及ぼす焼入れ冷却条件の影響は、図11に示すとおりである。この図から焼入れ冷却条件によりトラックシューのつめ部分とローラ踏み面を所要の深さまで焼き入れすることができることを認めた。これにより従来行なわれている2～3工程を要する熱処理を一挙に簡略化できることになった。

図9 実体トラックシューの焼入れ条件ともどり温度との関係 つめ部分は噴水冷却中急速に冷却されるが、噴水冷却を中止すると接地部分からの余熱伝達により再び温度上昇する。(つめ先端から5mmの位置の冷却状態)。

Fig. 9 The Relationship between Quenching Conditions and Tempering Temperature



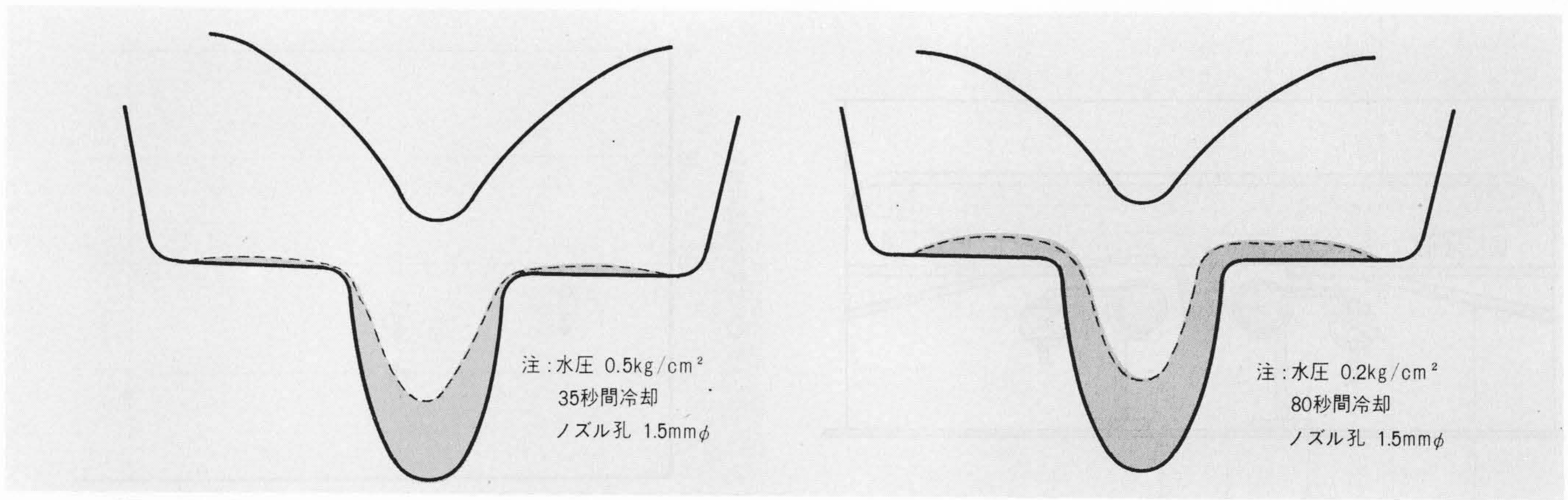


図11 焼入れしたつめ部分の焼入れ硬化層断面の例 図中ハッチング部分は焼入れ硬化層を表わす($H_R C 37 \sim 50$)冷却水量および水圧によりつめ部分の焼入れ硬化層は変えられる。

Fig. 11 Sample of Hardened Layer of Truck Shoe

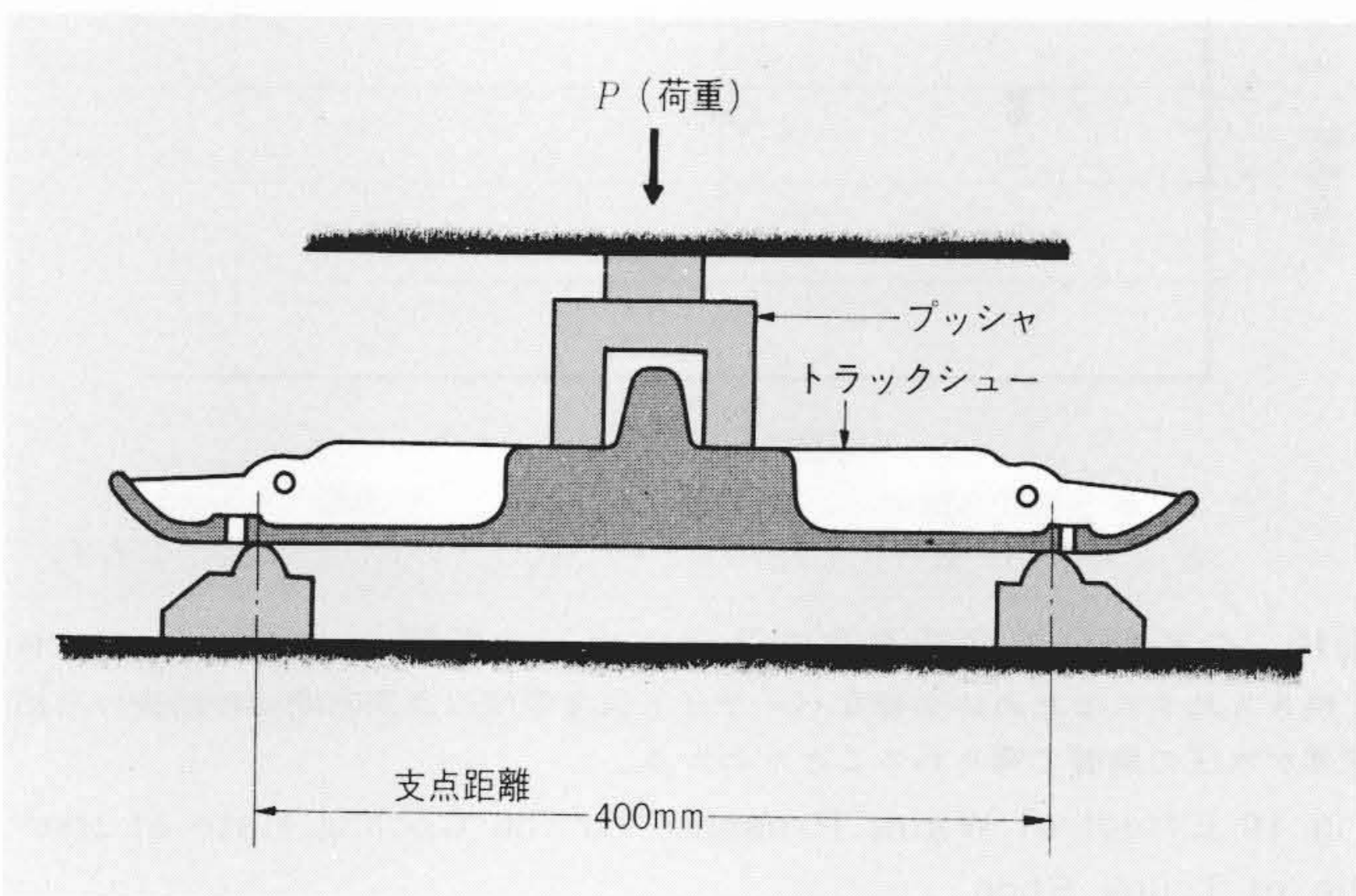


図12 トラックシューの曲げ破断試験方法 実体トラックシューを50tアムスラー試験機により図示のプッシャにより押し曲げ破断する。

Fig. 12 Method of Bend Fracture Test of Truck Shoe

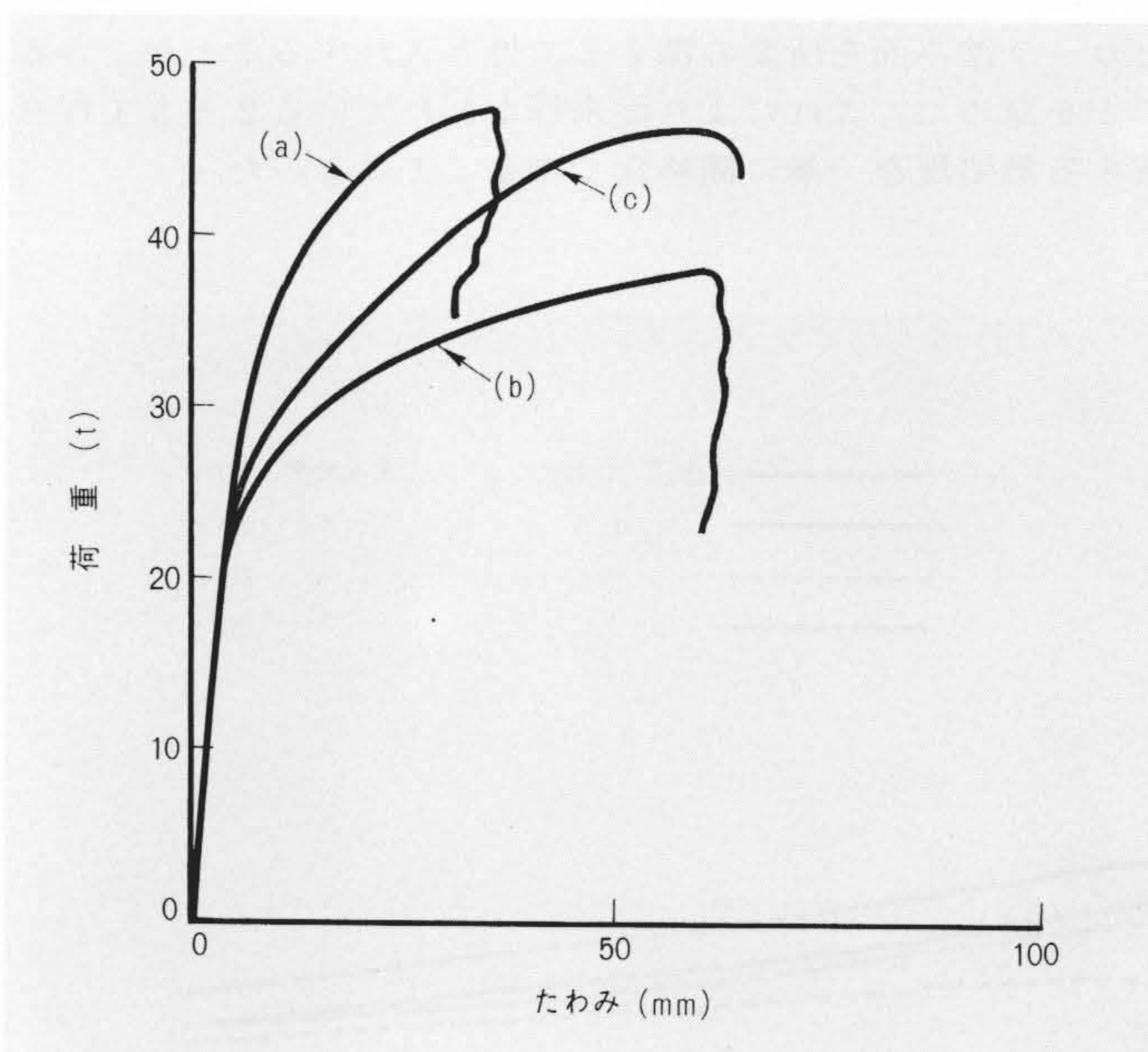


図13 トラックシューの曲げ破断試験結果 低Mn鋼にて(a)は全体焼入れ焼もどし, (b)は全体焼ならし後, 部分加熱, 焼入れ, (c) B 鋼にては全体焼ならし同時部分焼入れ(トラックシュー曲げ破断比較試験結果)を示す。

Fig. 13 Result of Bend Fracture Tested of Truck Shoe.

4.4 実体強さの試験結果

前述の熱処理方法で焼ならしと部分焼入れを同時に施したトラックシューについて50tアムスラー万能試験機により図12に示すような方法で抗折試験を行ない, 在来品と比較した。

破断試験の結果, 図13に示すように在来品の全体焼入れ焼もどし, あるいは全体焼ならし後部分加熱焼入れに比較してその色のないことが判明した。

5 結 言

強靱なトラックシューを経済的に生産することを目的に材質, 熱処理の両面について研究を行なった。

材質上はB鋼の適用を考え, 最適組成として0.30~0.33% C, 1.0~1.2% Mn, 0.0045% Bを選定した。

本材質は焼ならし状態で引張り強さ 70kg/mm^2 , 伸び20%以上の性質を有するとともに焼入れかたさは $H_R C 37 \sim 50$ 程度になる。これは既存の低Mn鋼と比較し, 靱性にすぐれている。熱処理上は焼ならし過程で特に耐摩耗性を要する部分だけを水焼入れする装置および方法を開発し, 適正焼入れ条件を決定した。

この材質および熱処理方法により製造したトラックシューは, その機械的性質, 耐久性ともに従来のものをしのいでいる。

終わりに終始ご協力いただいた日立製作所亀有工場および日立建機株式会社の関係各位に深く謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) E.Rabinowicz "Friction and wear of materials" (1965)
- (2) 保坂, 横井ほか: 「含有硼素鋼の焼入れ性と耐摩耗性に関する二, 三の検討」 鋼物 42 p.73 (1970)
- (3) 佐藤, 保坂ほか: 「ボロン鋼の諸性質に及ぼすボロン添加条件の影響」 鋼物42 p.140 (1970)
- (4) 保坂, 横井: 「ボロン鋼品の製造法に関する二, 三の検討」 日立評論 53 p.1029 (1971)
- (5) G.D.Rahrer, C.S.Armstrong: "The effect of carbon content on the hardenability of boron steels" Trans A.S.M 40 p. 1099 (1948)
- (6) B.M.Kapadia, R.M.Brown: "The influence of nitrogen, titanium and zirconium on the boron hardenability effect in constructional alloy steels". Trans.Metallurgical Soc. AIME 242 p.1689 (1968)
- (7) R.A.Granger, W.B.Seens: "Effect of boron and kind of boron addition upon the properties of steel" Trans.A.S.M. 42 p. 75 (1950)
- (8) 日本規格協会: 「鉄鋼ハンドブック」 (1971)