

ケーブル鉛被結晶粒度の検討

Study of Grain Size of Lead Cable Sheath

大 畠 芳 昭*
Yoshiaki Ohata

内 容 梗 概

ケーブル鉛被の結晶粒度はクリープおよび疲労特性に影響することが知られているが、押出条件などが結晶粒度に及ぼす影響は研究が少なく不明の点が多い。このため本論文では結晶粒度に及ぼす押出条件、特に押出速度、押出温度の影響、断面積と結晶粒度の関係を明らかにした。さらに高電圧ケーブルでは被鉛後に加熱されるのでその影響もあわせて検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 断面積と平均結晶粒直径の対数との間には直線的関係がある。
- (2) 押出速度が 30 m/min 以上になると結晶粒は小さくなる。
- (3) 結晶粒粗大化に対する抵抗は Pb 2% Sn 合金が最も大きく E 合金、純鉛の順に減少する。

1. 緒 言

近來電力需要の増加と電力ケーブルの発達に伴い OF ケーブル、ガス圧ケーブルなどの高圧ケーブルの使用が増加の傾向にある。これらのケーブルでは、ケーブル事故の及ぼす影響が大きいのでその鉛被には高度の機械的性質、特に耐クリープ性、耐疲労性が要求されるようになった。一方これまでの研究結果によれば^{(1)~(3)(6)}、鉛および鉛合金の耐疲労性、耐クリープ性にはその結晶粒度が影響することが知られている。

一般にケーブル鉛被の製造には第 1~3 図に示すような 3 種の被鉛機が使用されている。このため同一寸法の鉛被でも使用機械や押出条件によってその結晶粒度が変わることが予想される。さらに上述の高電圧ケーブルでは、製造過程の中で被鉛後に乾燥、防食工程などで約 100°C 前後の高温にさらされるのでその影響も無視できないであろう。

一方鉛および鉛合金押出機に関する研究はきわめて少ないが⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 主要な研究結果を要約するとつぎのようになる。

L. H. Back 氏⁽⁴⁾は実験室的規模の押出機を使用して結晶粒度に及ぼす押出温度の影響を調べ、結晶粒の断面積の対数と押出温度の間には直線的関係があることを見出している。また最近 J. M. Butler 氏⁽⁵⁾は同様に実験室的押出機によって押出温度、添加元素などの影響を調べ、Cu の添加が著しく結晶粒を微細化すること、加工度よりも押出温度の影響が大きい、合金元素を添加した場合には L. M. Back 氏の見出した関係は認められなかったことなどを報告している。

以上のようにこれまでの結果はすべて実験室的規模の研究であり実際の鉛被を対象とした報告は見当たらない。

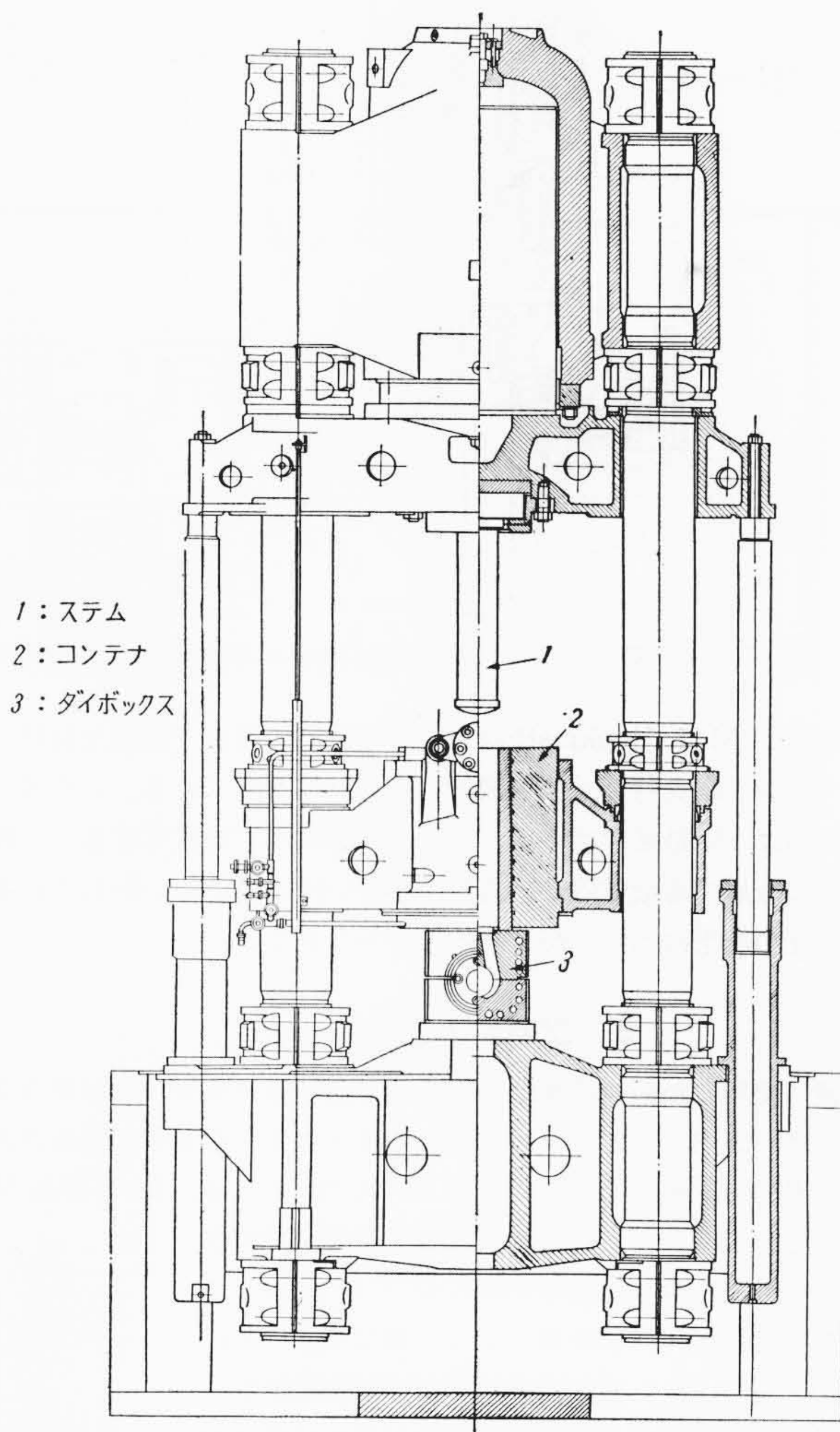
このため著者は上述の 3 種の被鉛機を使用して各種鉛被用鉛合金の結晶粒度に及ぼす押出条件（押出温度、加工度、押出速度）、押出後の熱処理の影響などを調べた。

2. 鉛被の耐クリープ性および耐疲労性に及ぼす結晶粒度の影響

すでに述べたように鉛およびその合金の耐疲労性、耐クリープ性にはその結晶粒度が影響することが多くの研究者によって報告されている^{(1)~(3)}。

たとえば耐クリープ性については J. McKeown 氏⁽⁶⁾は、結晶粒度の異なる鉛についてクリープ試験を行い、クリープによって破断するまでの伸びで示されるじん性は結晶粒の小さいほうが大きいこと

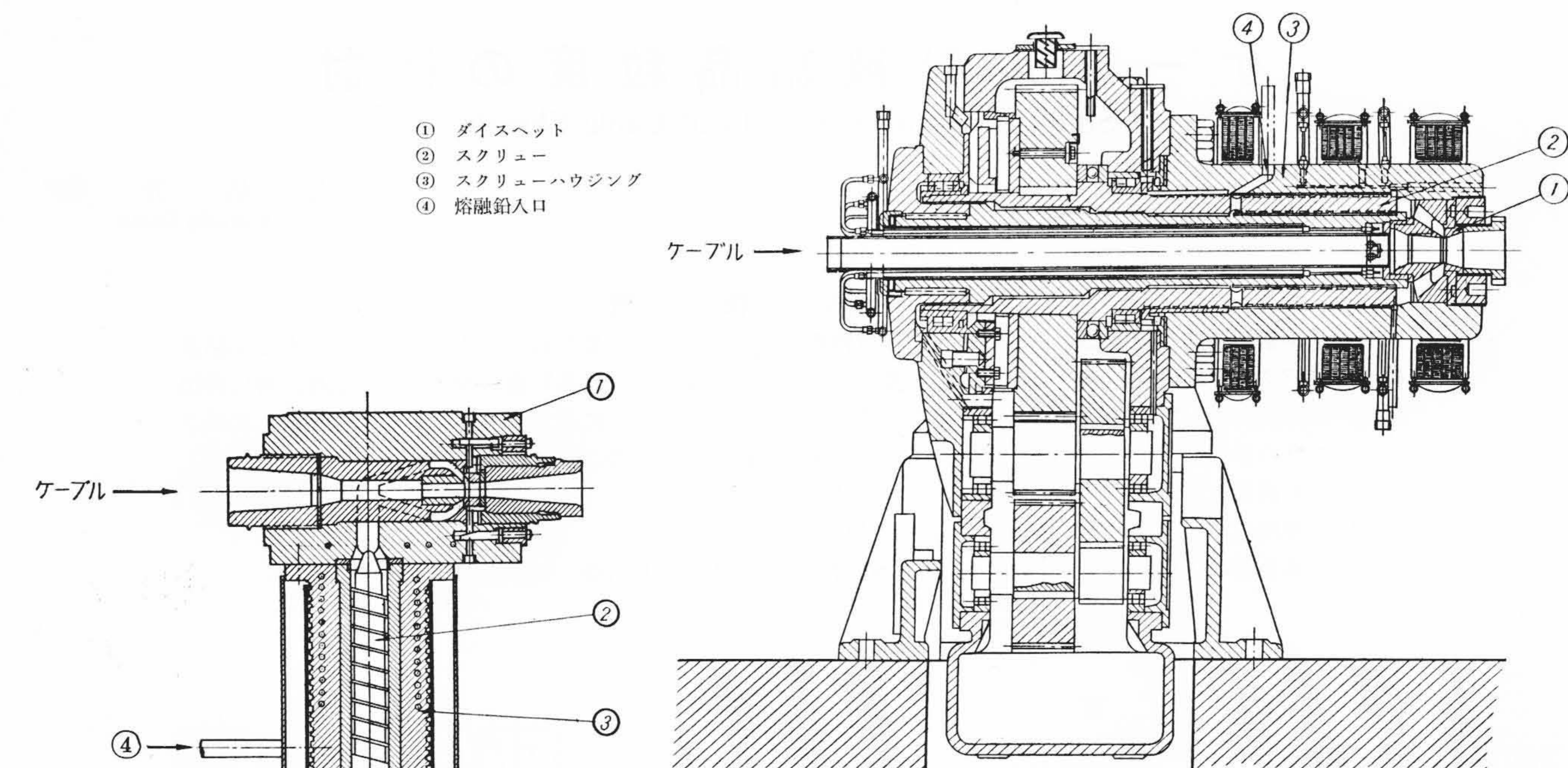
* 日立電線株式会社電線工場



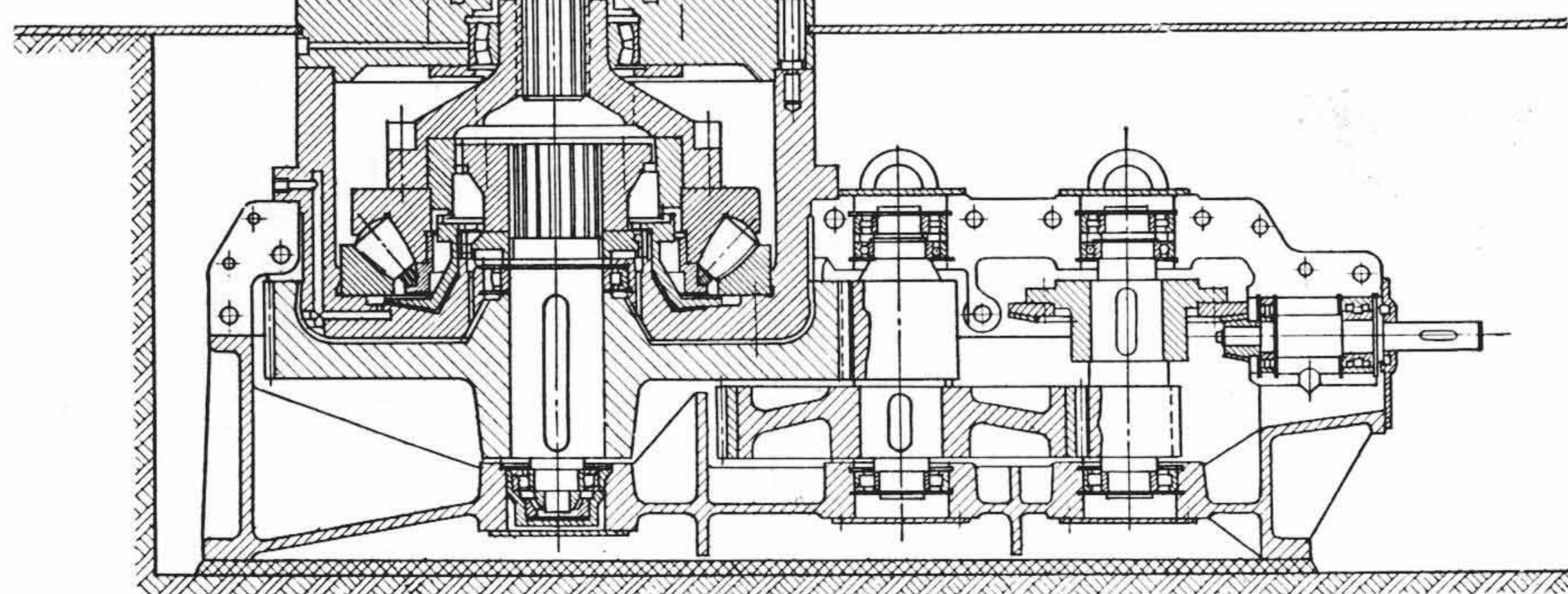
第 1 図 Hydraulic 製 2,400 t 被鉛機

を見出している。また L. M. T. Hopkins 氏⁽³⁾は種々の結晶粒度の鉛合金について応力 300 lb/in² でクリープ試験を行い第 4 図のような結果をえている。この図からわかるように Pb-1% Sn 合金も、Pb-0.05% Cu 合金も結晶粒度によってクリープの伸びが著しく変化することがわかる。

また耐疲労性については、S. Beckinsale 氏や H. Waterhouse 氏⁽²⁾などは鉛の耐疲労性は他元素の添加により改良される効果は大きい、が結晶粒度には無関係であると述べている。



第2図 Pirelli 形連続被鉛機



第3図 Hansson 形連続被鉛機

しかし L. M. T. Hopkins氏はクリープ試験の場合と同様な試料について疲労試験を行い、第5図のような結果をえている。この図からわかるように結晶粒度によってその疲労限は相当変化する。一般にほかの金属でも疲労限は結晶粒の小さいほど高いといわれているから上記の結果は当然予想されるところである。

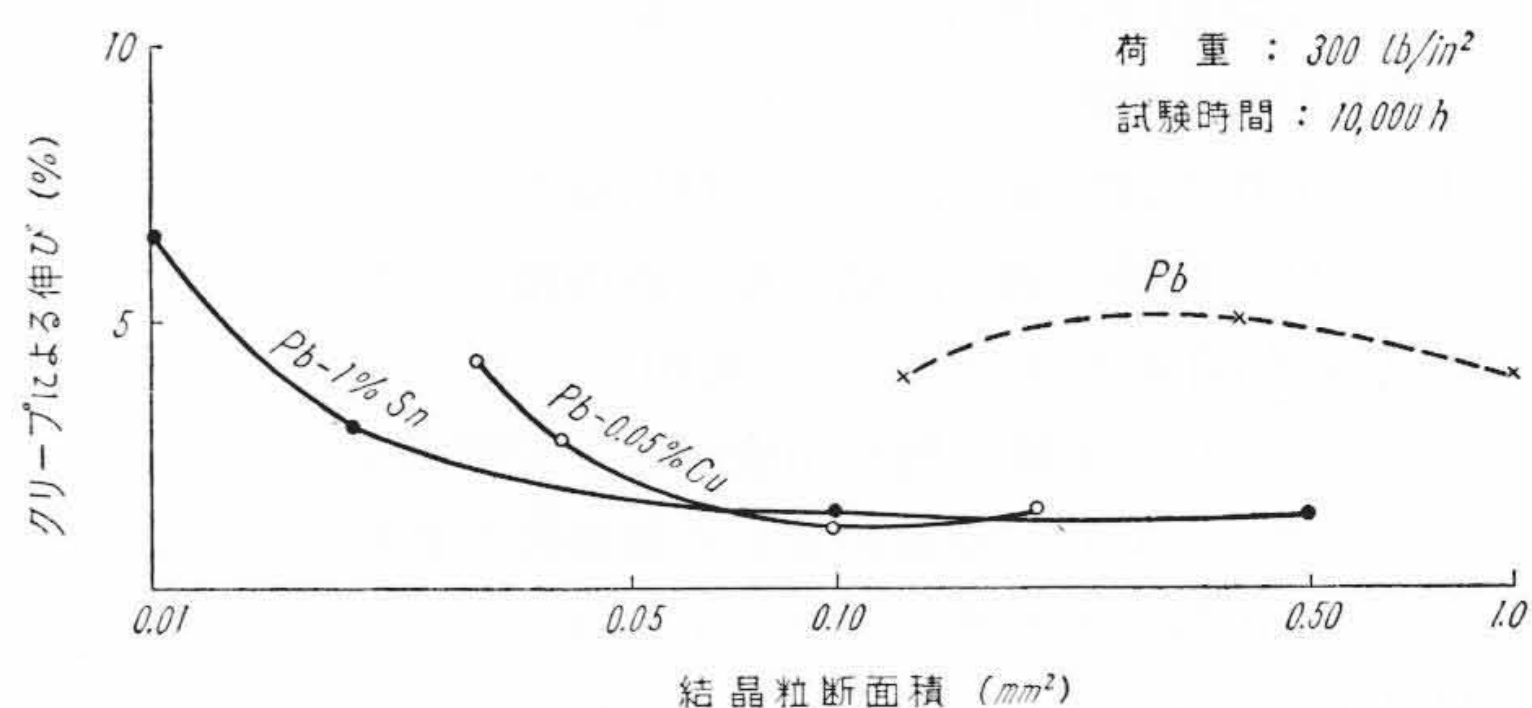
3. 試料および実験方法

実験に使用した鉛の純度は 99.99% の電解鉛であり、供試鉛合金としては、国内、アメリカおよびイギリスなどの諸規格に採用されている Pb-2% Sn 合金、Pb-0.4% Sn-0.2% Sb 合金、Pb-0.85% Sb 合金を取り上げた。またこれら合金の熔製にはできるだけ高純度の合金元素を使用した。

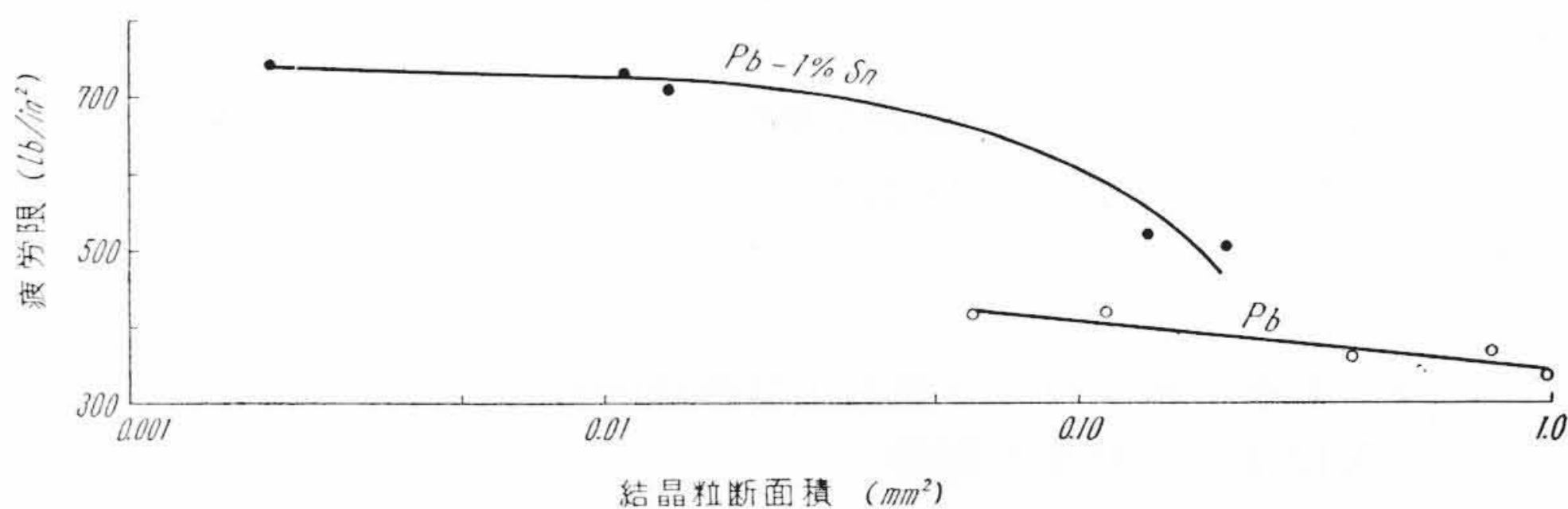
試料の押出条件は被鉛機によって異なるが Hydraulic 製 2,400 t 被鉛機の場合は鉄製熔解炉で $400 \pm 10^\circ\text{C}$ に保持された熔融鉛をコンテナに注入凝固させて10分間保持したのち、ダイボックス温度を $200 \pm 5^\circ\text{C}$ に保持して押出した。

一方 Pirelli 形連続被鉛機の場合は、鉄製熔解炉で $400 \pm 10^\circ\text{C}$ に保持された熔融鉛を導管をへてスクリューに供給し、心口金の箇所を $265 \pm 5^\circ\text{C}$ に保持して押出した。また Hansson 形連続被鉛機の場合は、鉄製熔解炉で $370 \pm 10^\circ\text{C}$ に保持された熔融鉛を同様に導管をへてスクリュー部に供給し、ダイボックス温度を $300 \pm 5^\circ\text{C}$ に保持して行った。

この際異なった断面積の試料をうるため種々の外径および肉厚の鉛管を押出したが、外径と肉厚との関係はできるだけ実際の鉛被に



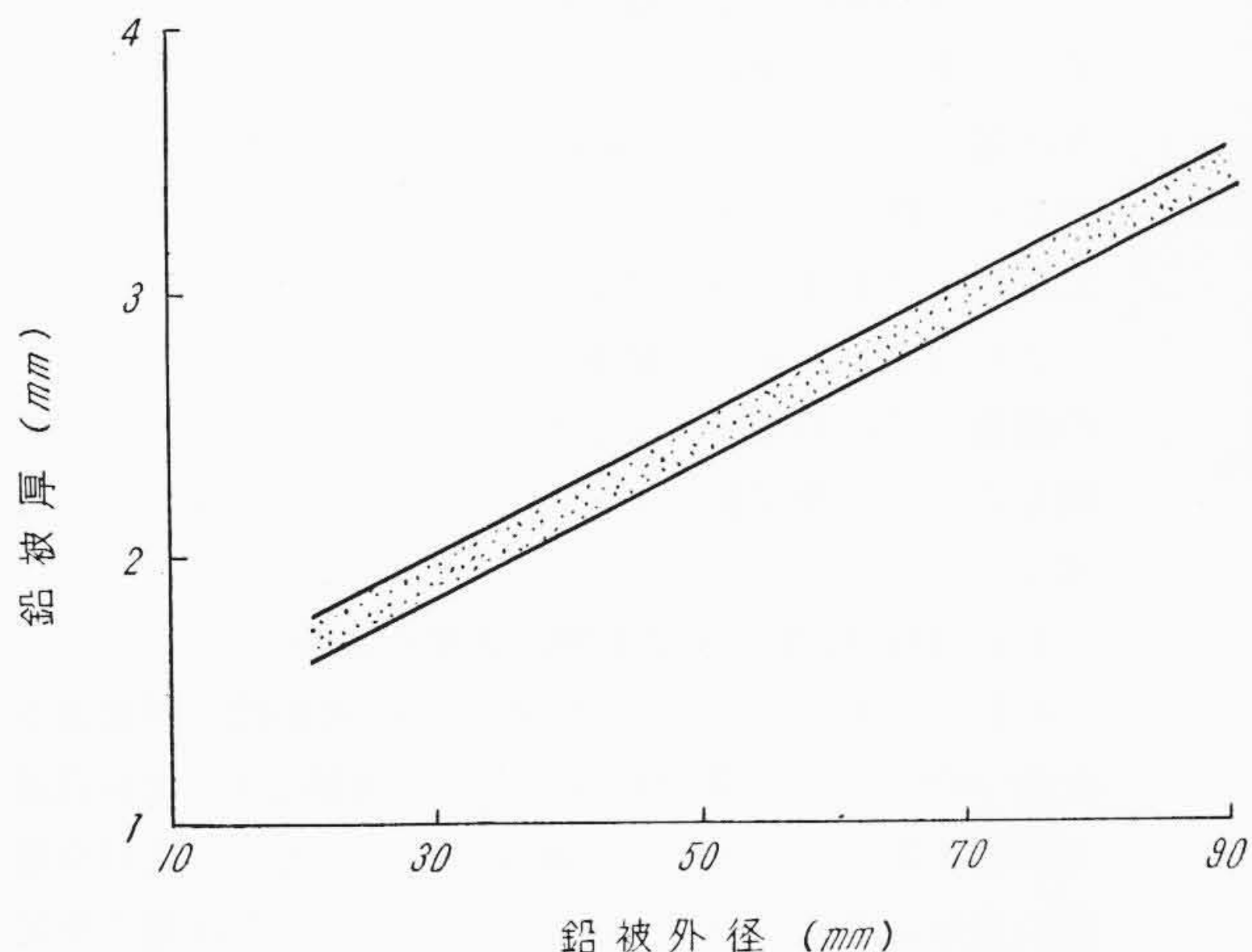
第4図 クリープ抵抗に及ぼす結晶粒度の影響



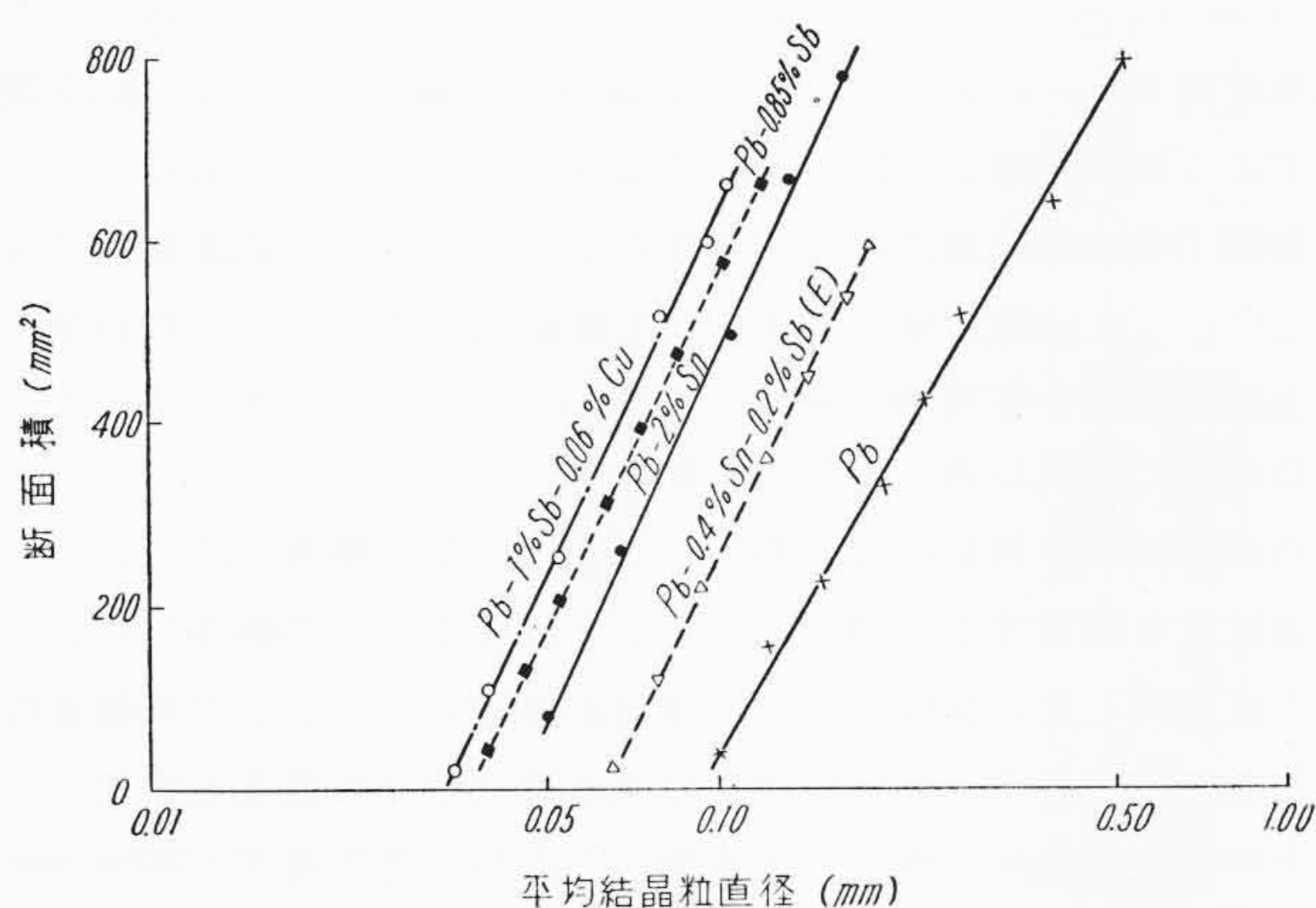
第5図 疲労限に及ぼす結晶粒度の影響

近いものとするため第6図のようになる。

また結晶粒度の測定は試料の断面を著者などの見出した新しい研摩法⁽⁷⁾を用いて顕微鏡組織を検出し、ある一定の長さの直線(l)によって切られる粒の数(N)を求め l/N の値を結晶粒の平均直径とした。なお測定は断面の円周上8箇所について行い、その平均値を求



第6図 試料の鉛被外径と肉厚の関係



第7図 鉛および鉛合金の結晶粒度 (Hydraulik 被鉛機による)

めた。

4. 結晶粒度に及ぼす押出条件の影響

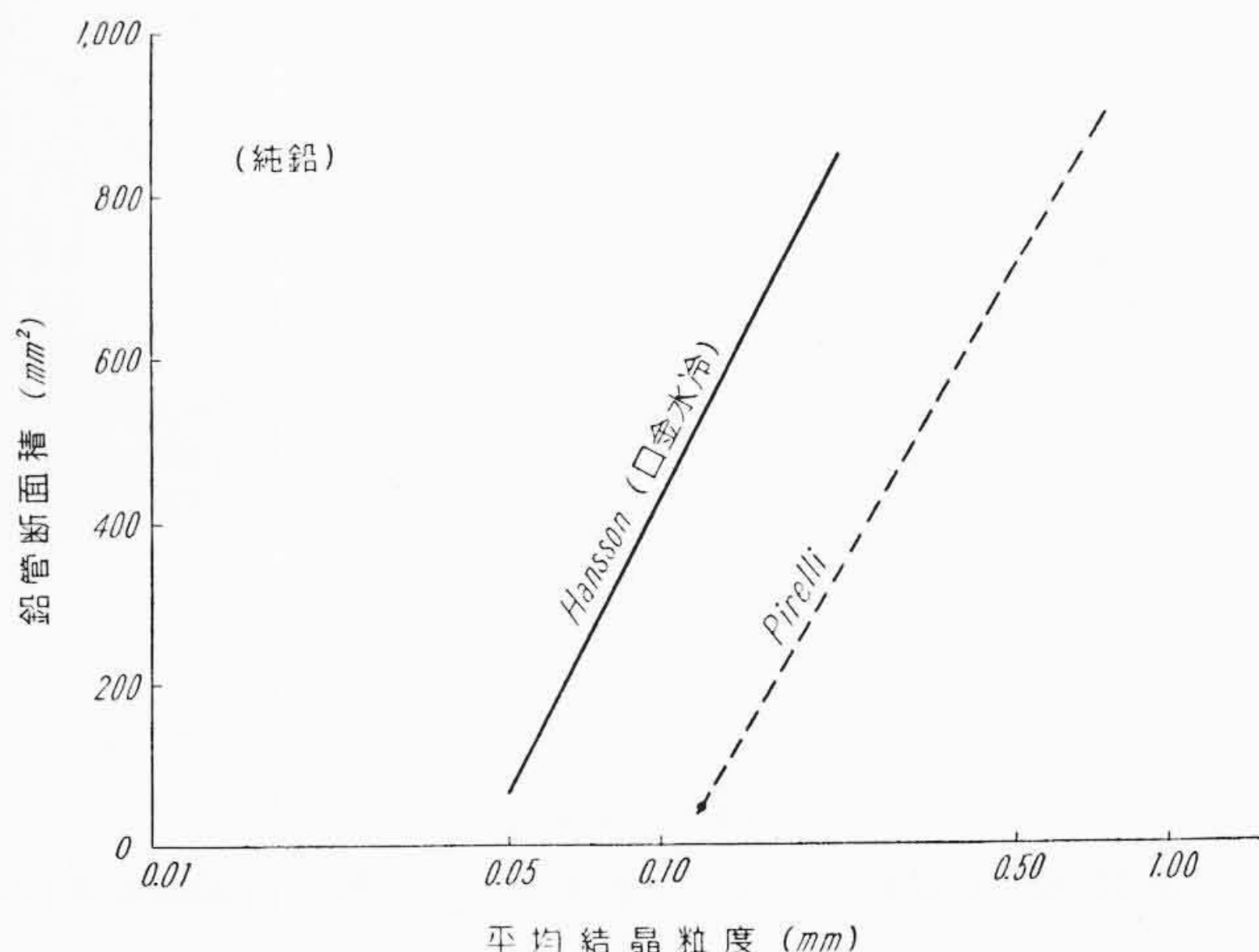
4.1 結晶粒度と断面積との関係

まず Hydraulik 製 2,400 t 被鉛機について試料の断面積と結晶粒の平均直径との関係を図示すると第7図のようになる。この図からわかるように断面積と結晶粒の平均直径の対数との間にはほぼ直線関係がある。

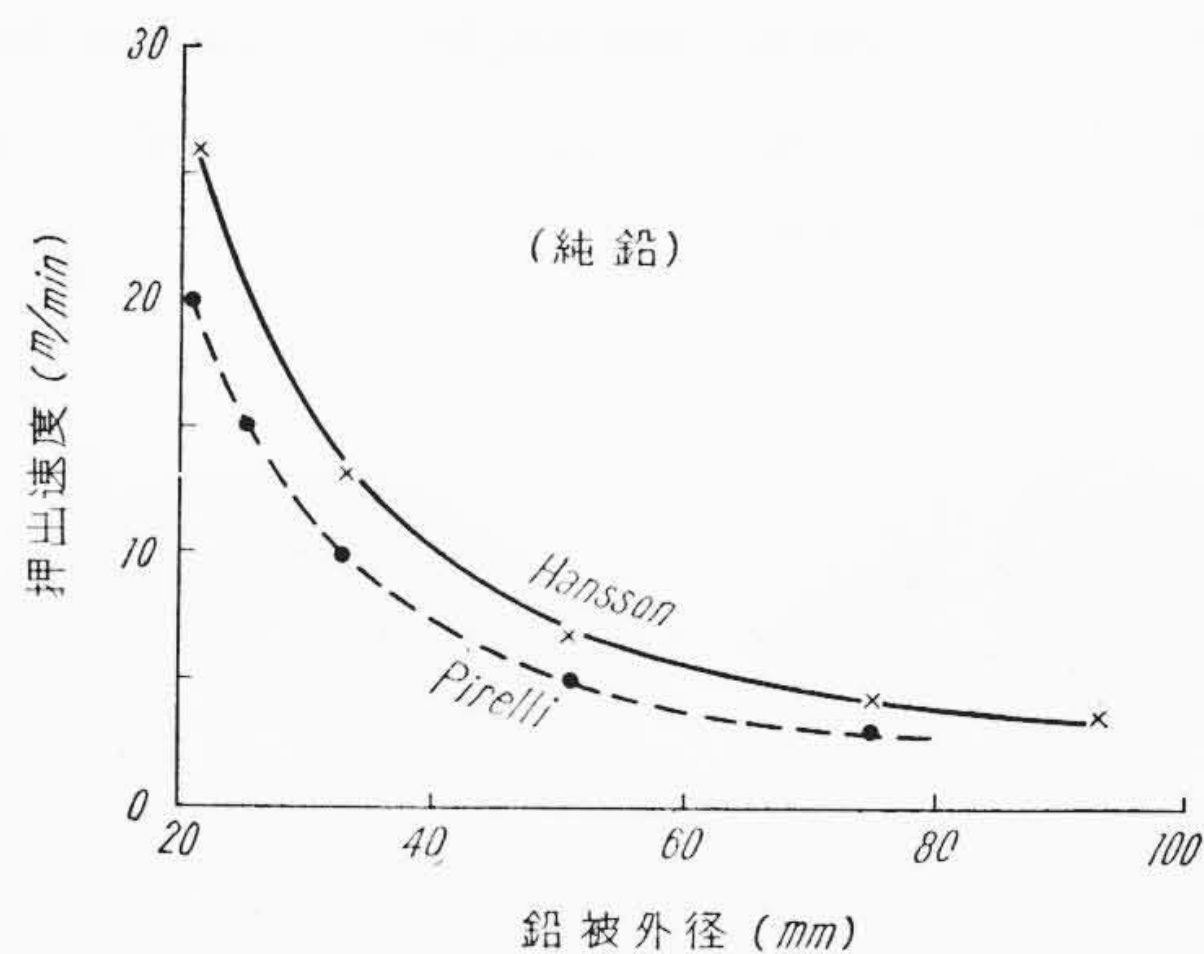
また、同一断面積について各種鉛合金の結晶粒度を比較すると、Pb-1% Sb-0.06% Cu 合金が最も小さく、Pb-0.85% Sb, Pb-2% Sn, Pb-0.4% Sn-0.2% Sb 合金, Pb の順に大きくなっている。なおこれらの試料は特にことわらない限り押出直後ただちに水冷したものであり、また押出速度は約 6 m/min であることを付記する。上記の結果とこれら鉛合金の耐疲労性とを合わせ考えてみると、結晶粒度の順序はちょうどこれら鉛合金の耐疲労性の傾向とまったく等しく耐疲労性の良い鉛合金ほどその結晶粒も小さいことがわかる。

一方2種のスクリー形連続被鉛機(Pirelli 形およびHansson 形)で押出した試料の断面積と結晶粒の平均直径の対数との関係を第8図に示す。この図から連続被鉛機で押出した試料も立形被鉛機の場合と同様にほぼ直線関係がある。ただ連続被鉛機で押出した試料はこの機械の性質上断面積が異なる場合、それによって押出速度も異なっていることを付記する。その関係は第9図に示す。

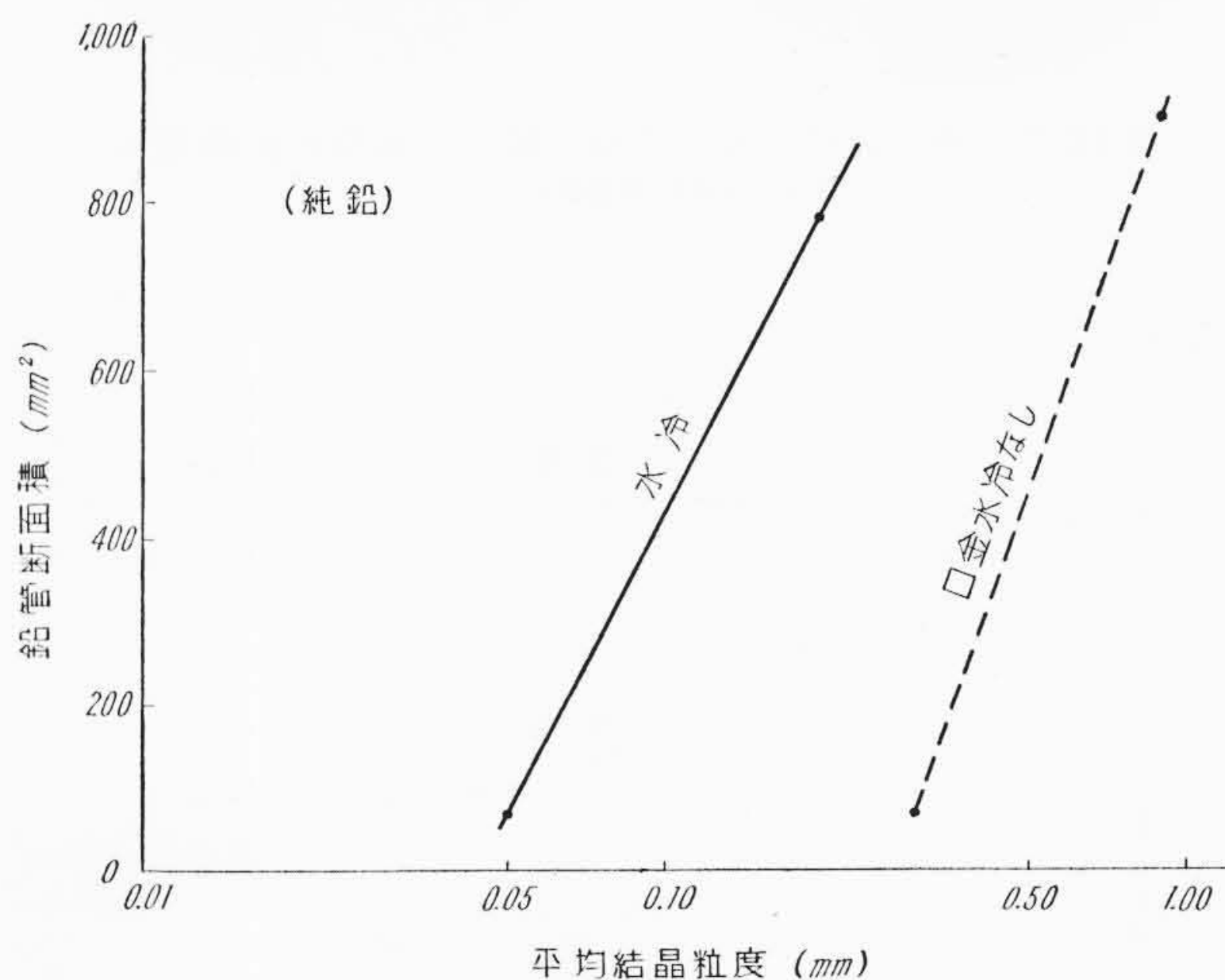
第7図と第8図とを比較して考察するとつぎのことが明らかとなった。すなわち同じ組成で同一断面積の試料では、Hansson 形被鉛機で押出した試料がその結晶粒が最も小さく、立形被鉛機, Pirelli 形



第8図 純鉛の結晶粒度と断面積の関係 (連続被鉛機による)



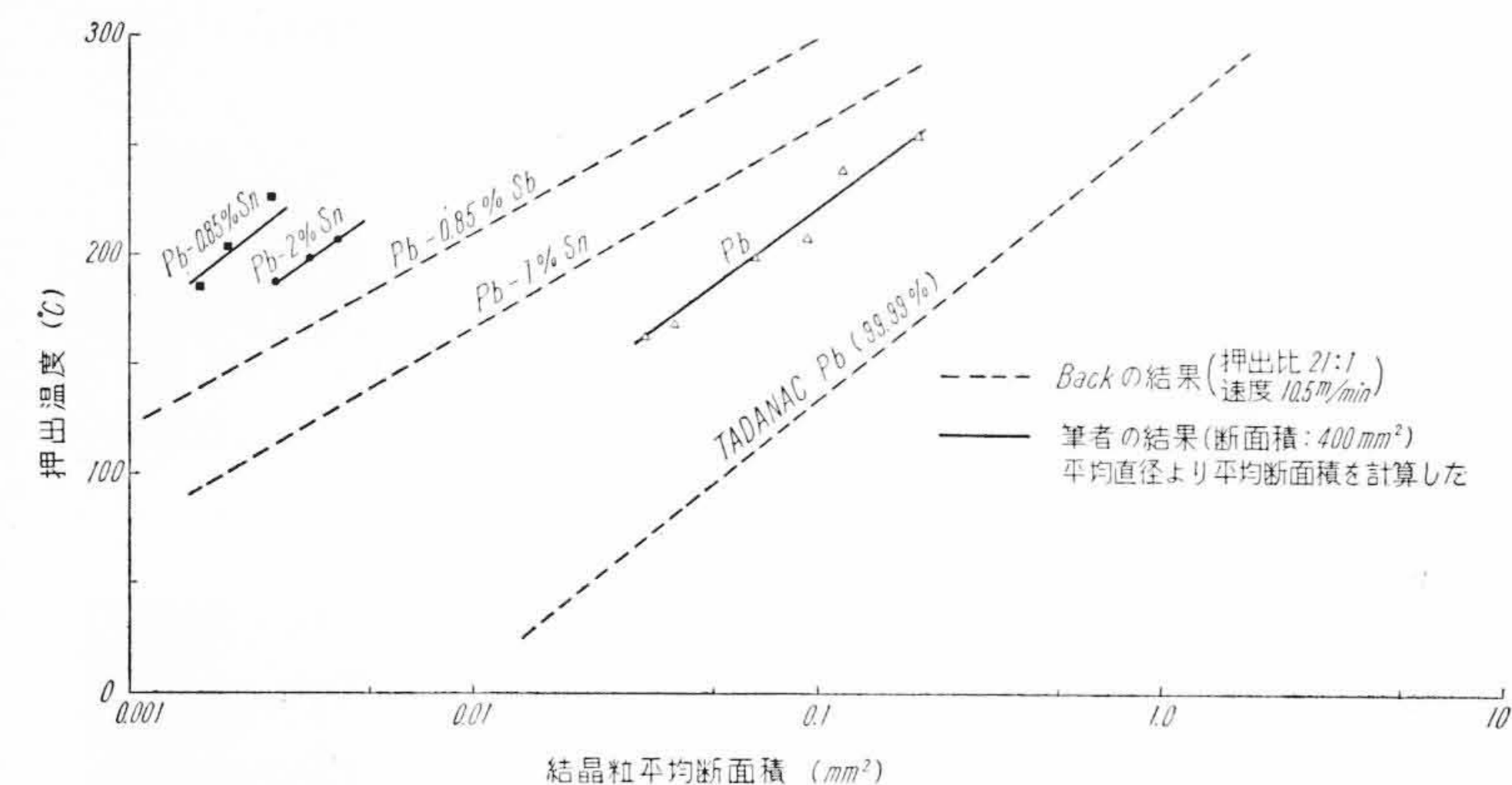
第9図 連続被鉛機の鉛被外径と押出速度の関係



第10図 Hansson形連続被鉛機の口金水冷による結晶粒度の変化

被鉛機に順に結晶粒が大きくなっている。この原因はHansson形被鉛機ではダイボックスの温度は300°Cで鉛の熔融温度(327°C)に近い高温であるが、押出直後口金箇所では強烈な冷却作用を受けるためであろう。口金冷却を行った場合と冷却しない場合との押上過程の結晶粒度の変化を第10図に示す。この図から口金冷却が結晶粒の微細化に効果的なことがわかる。

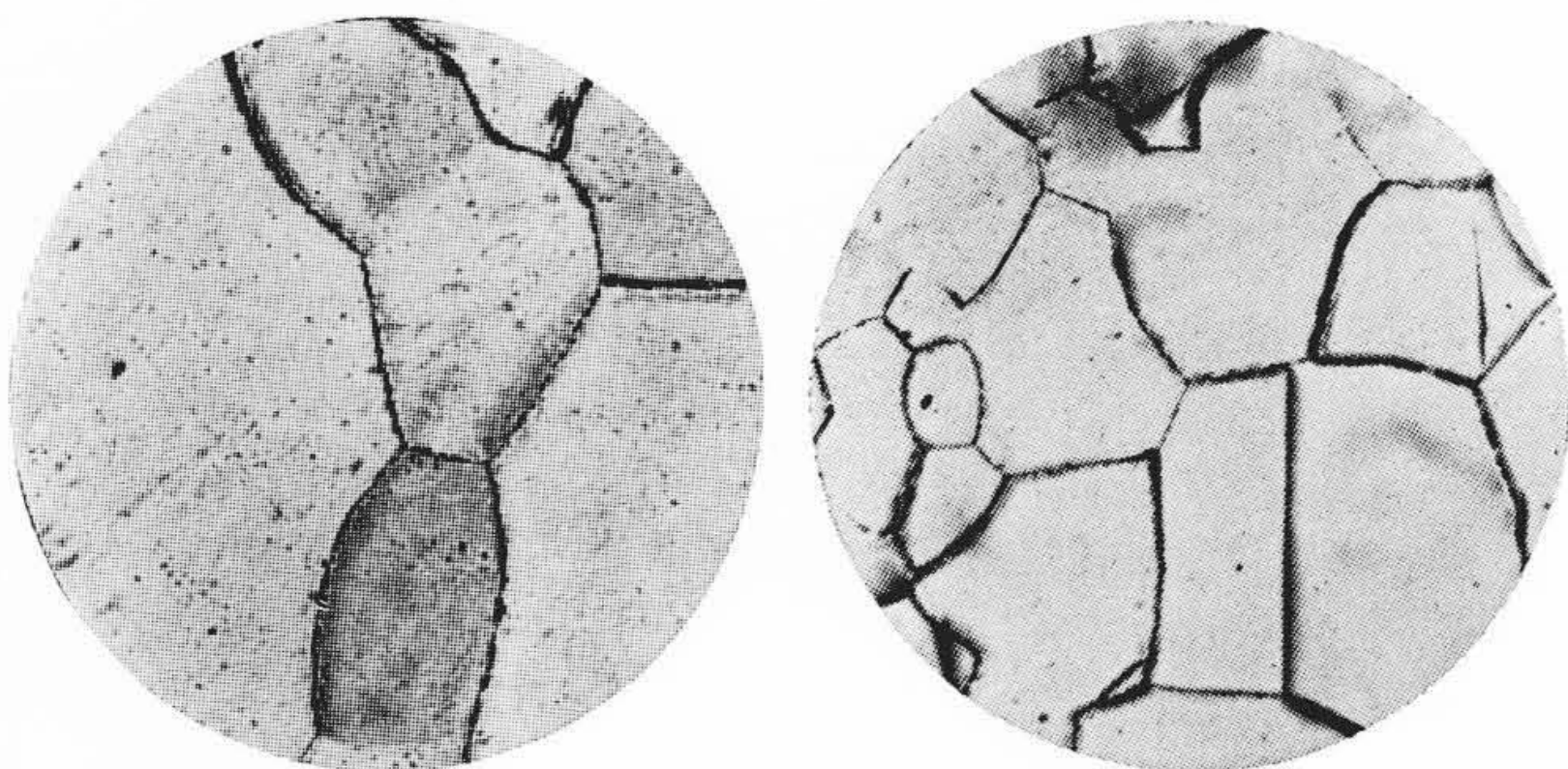
一方 Pirelli 形被鉛機では、その構造からわかるように熔融状態から徐々に冷却しながら押出し口金部分の温度がほぼ250°Cで立形被鉛機の口金温度(200°C)より高いため、その結晶粒が大きいものと思う。



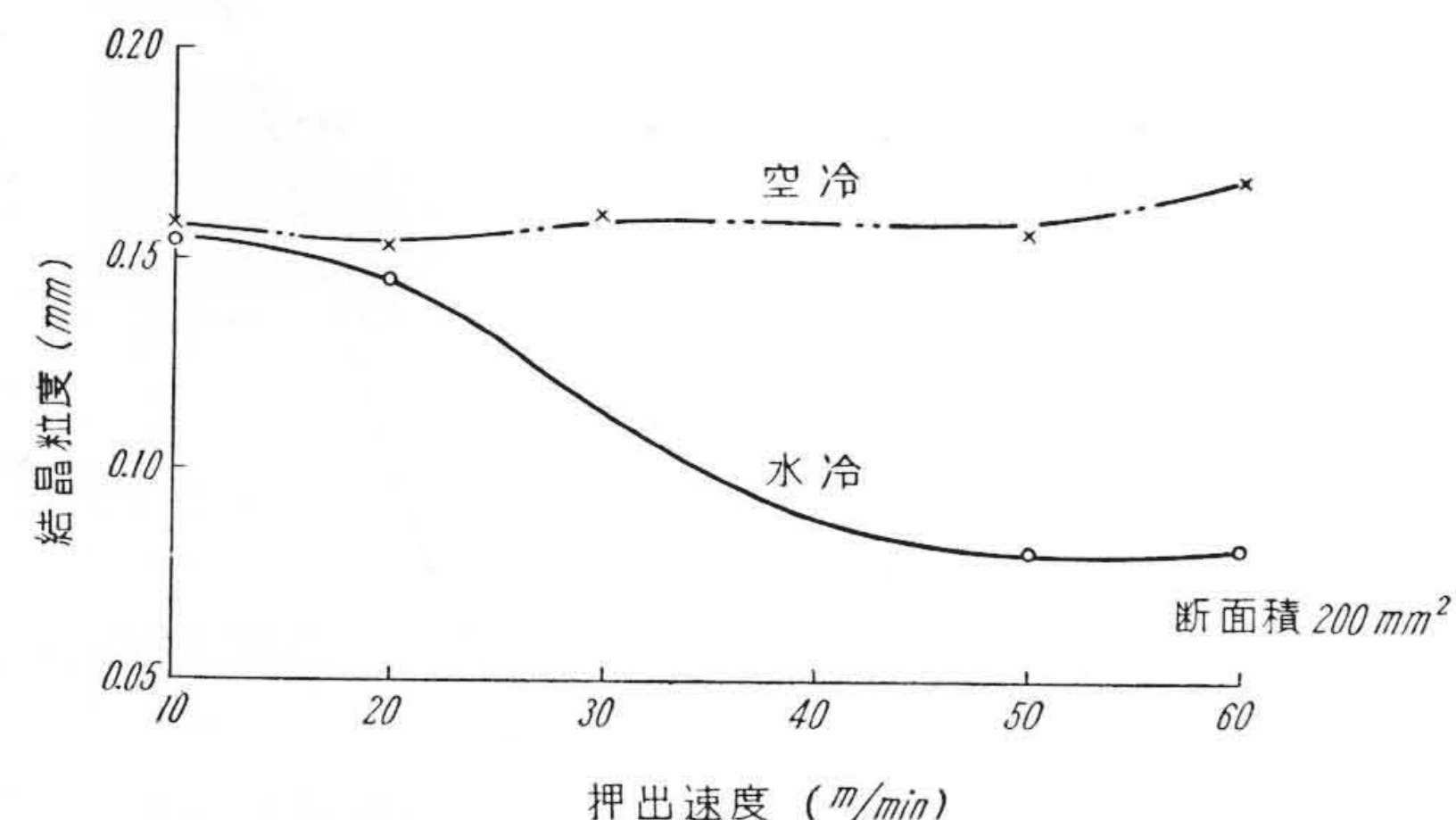
第 11 図 結晶粒度に及ぼす押出温度の影響 (Hydraulik 被鉛機による)

第 1 表 結晶粒度に及ぼす押出速度の影響

断面積 (mm ²)	各押出速度での平均結晶粒直径 (mm)						
	1m/min	5m/min	10m/min	20m/min	30m/min	50m/min	60m/min
200	0.14	0.13	0.16	0.14	0.08	0.06	0.06
710	0.52	0.49	0.54	—	—	—	—



第 12 図 押出速度を変化させた場合の顕微鏡組織変化 (Hydraulik 被鉛機による)



第 13 図 試料を水冷した場合と空冷した場合の結晶粒度の変化 (Hydraulik 被鉛機による)

4.2 結晶粒度に及ぼす押出温度の影響

Hydraulik社製2,400 t 被鉛機を使用して押出温度160～250℃の範囲について実験した。実験結果を第11図に示す。この結果からわかるように純鉛の場合には L. H. Back 氏の見出した結果と同様に押出温度と結晶粒度の対数との間にはほぼ直線的関係があることがわかる。

ただ Pb-2% Sn 合金、Pb-1% Sb 合金の場合はこれら合金の押出性が悪いので純鉛の場合ほど押出温度を広い範囲に変化させることができなかったため明確な関係は見出せなかった。

J. M. Butler 氏は同様に種々の押出温度で結晶粒度の変化を測定し、純鉛の場合、空冷試料では(棒状試料)押出温度と結晶粒の断面積との間にはほぼ直線の関係があるが、押出直後水冷した試料および合金元素を添加した試料では明確な関係は見出せなかったと述べている。

これは上述の筆者の結果と異なるが、J. M. Butler 氏の実験は試料の形状および加工度が筆者の場合と著しく異なること、測定値が少ないことなどに起因するものと思う。

4.3 結晶粒度に及ぼす押出速度の影響

4.2 項の場合と同様に Hydraulik 被鉛機で押出速度を2～60m/minの範囲に変化させて実験した。なお高速で押出す場合は、押出しを継続するにしたがって口金温度の上昇が著しいので、押出開始後できるだけ速く所定速度にしてただちに試料を取り水冷した。結晶粒度の測定結果を第1表に示す。この結果から断面積 200 mm² の場合は押出速度が30 m/min 以上になると結晶粒度が小さくなることがわかる。さらに押出速度 60 m/min では、試料の顕微鏡組織を調べると第12図に示すように微細結晶と粗大結晶の混在が著しいことがわかる。一方断面積 710 mm² の場合は押出速度によってほとんど結晶粒度は変化しない。これは断面積が大きいため被鉛機の水圧ポンプの容量の関係上押出速度を広い範囲に変化できなかったためと肉厚が厚いので試料の冷却に時間を要したためであろう。

このため試料を押出直後水冷した場合としない場合とについてその結晶粒度を測定すると第13図のようになる。この結果からわかるように水冷しない試料では押出速度が30 m/min 以上でも結晶粒度はあまり変化せず、さらに微細結晶と粗大結晶の混在も少ない。

以上の実験結果から押出直後水冷した試料で押出速度が30m/min 以上の場合結晶粒が微細化する原因を考察するとつぎのことが考えられる。

一般に加工材の再結晶粒度は、結晶核の生成と結晶粒の成長速度および加熱時間によって決定されることが知られている。さらに鉛は再結晶温度が常温以下であるから押出温度で再結晶してしまう。したがって押出速度が速いと加工後押出温度に保持される時間が短く結晶粒の成長が阻止されるものと思う。

また局部的に粗大結晶が発生するのは、加工ひずみ、不純物などの局部的な不均等および結晶粒成長速度の各方向による不均等に起因するものと考えられる。

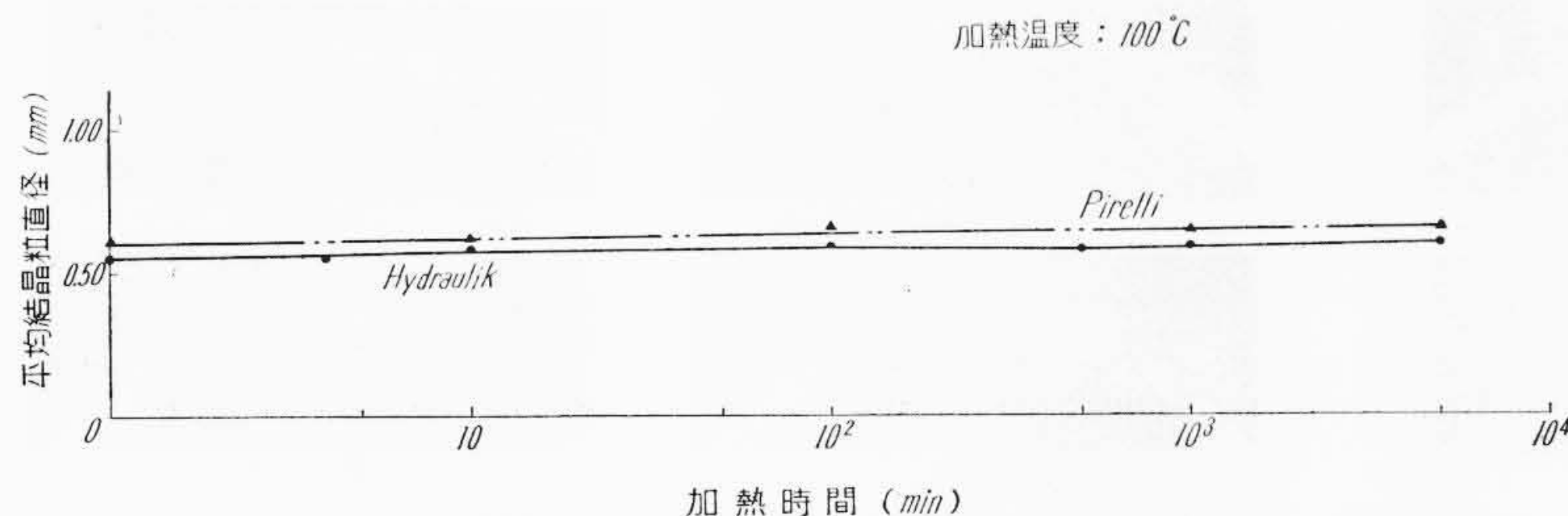
また J. M. Butler 氏は押出速度 9～27m/min の範囲で実験し、押出速度は結晶粒度にあまり影響しないと述べているが、これは実験範囲が筆者の場合に比較して狭いためと思う。

5. 結晶粒度に及ぼす加熱温度の影響

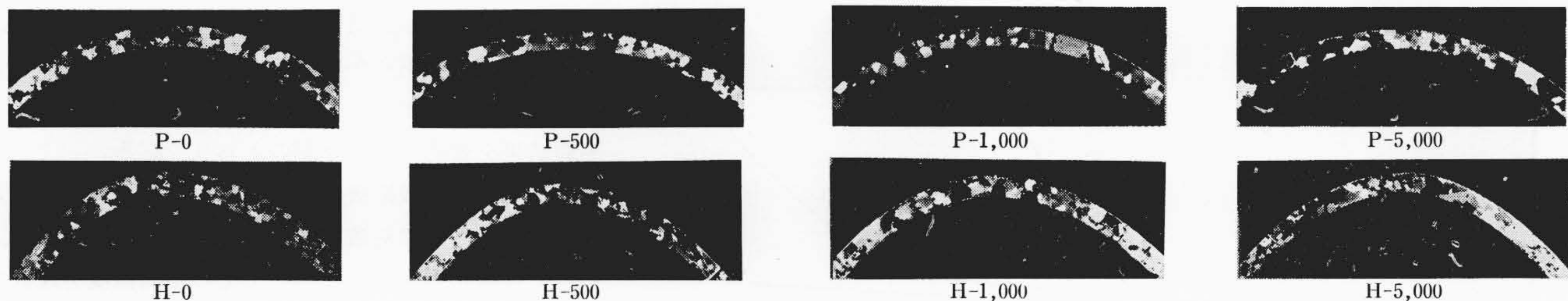
すでに述べたように高電圧ケーブルは鉛被後、乾燥、防食作業などが行われるのでふたたび100～130℃位の高温に長時間さらされる。さらにこれらのケーブルは布設の際鉛工によって相互に接続されるので200℃位の高温に短時間加熱されることもある。一方上述の温度は鉛および鉛合金の再結晶温度よりはるかに高く当然結晶粒の変化が予想される。このため筆者は4項に使用した試料について、100～200℃の温度範囲で種々の時間加熱して結晶粒の変化を測定した。実験には内部にかくはん機を設けた恒温槽を使用して温度変化は±1℃の範囲に制御した。

5.1 加熱温度 100℃ の場合 (純鉛)

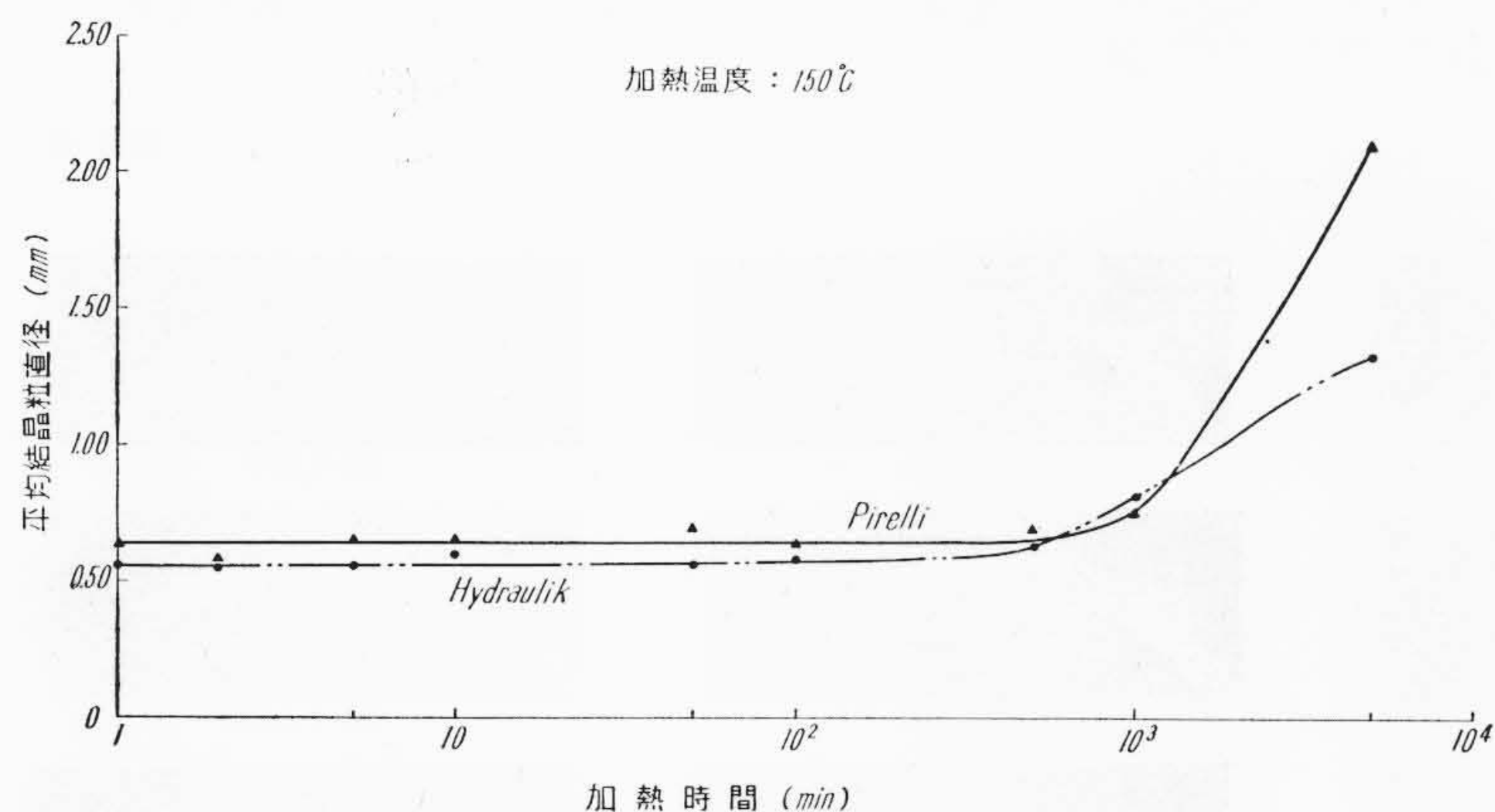
Hydraulik および Pirelli 形被鉛機で押出した断面積 710 mm² の純鉛の試料について 1～5,000 min 加熱して結晶粒の変化を測定した。その結果を第14図に、マクロ組織を第15図に示す。この結



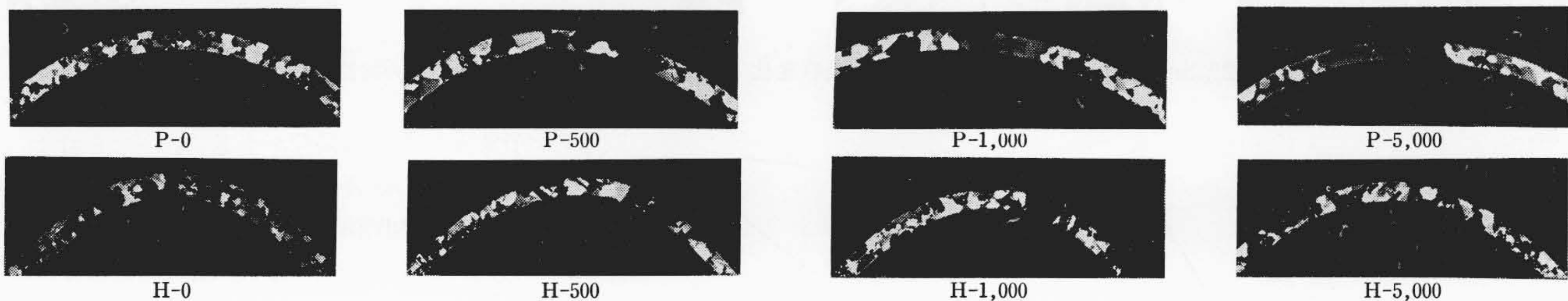
第 14 図 加熱温度100°Cの場合の結晶粒度の変化



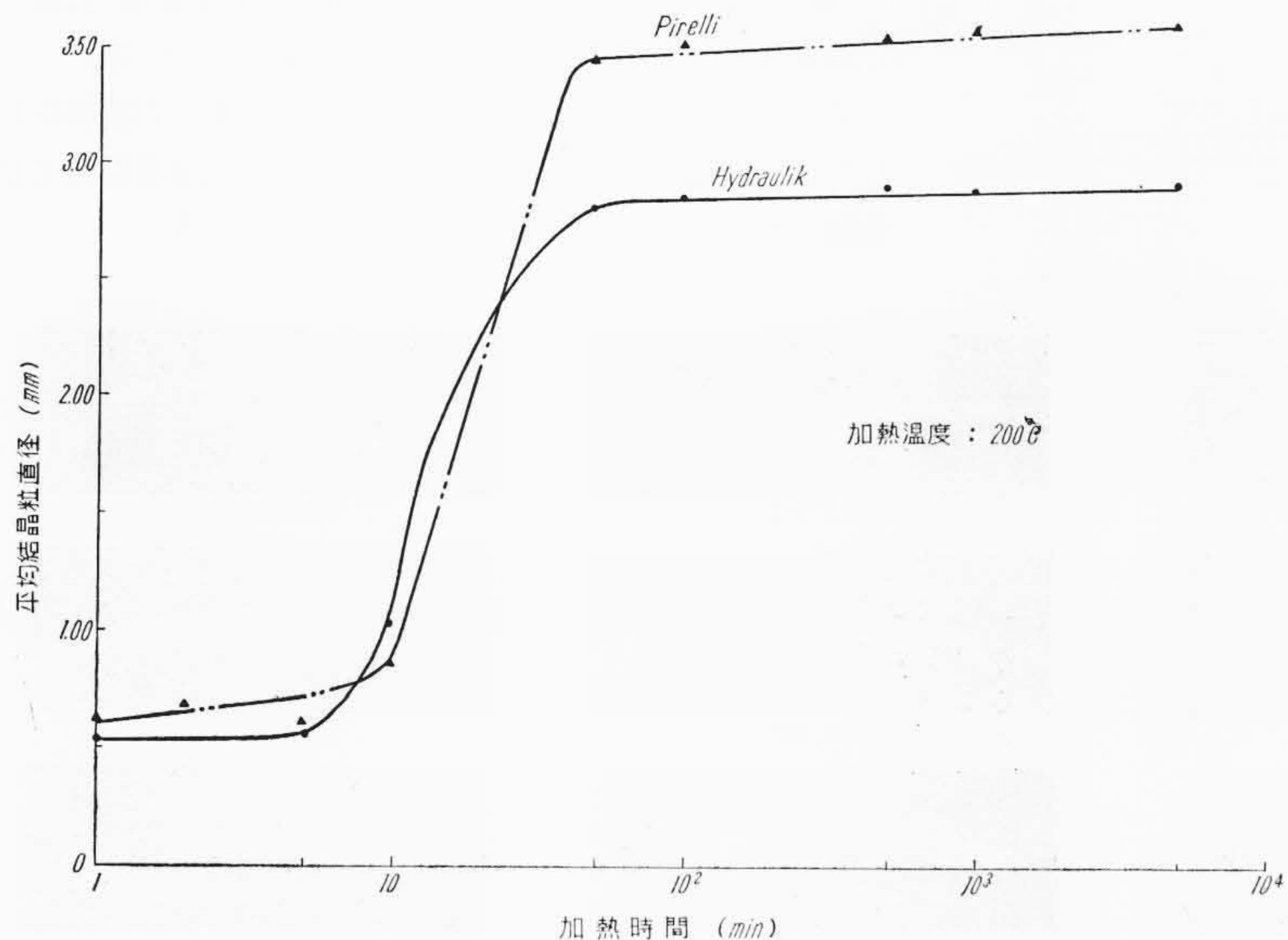
第 15 図 加熱温度100°Cの場合のマクロ組織の変化 (P: Pirelli H: Hydraulic 数字は加熱時間を示す)



第 16 図 加熱温度150°Cの場合の結晶粒度の変化



第 17 図 加熱温度150°Cの場合のマクロ組織の変化 (P: Pirelli H: Hydraulic 数字は加熱時間を示す)



第 18 図 加熱温度 200°C の場合の結晶粒度の変化

果から 100°C の加熱では 5,000 min の加熱後でも結晶粒度はほとんど変化しないことがわかる。

5.2 加熱温度 150°C および 200°C の場合 (純鉛)

加熱温度 150°C の実験結果を第 16, 17 図に示す。この結果からわかるように Pirelli 形被鉛機の試料は 500 min 以上の加熱で結晶粒の成長を起している。一方 Hydraulic 被鉛機の試料も成長を起すが、断面の各結晶粒が一様に成長せず局部的に粗大結晶が発生している。

この原因について種々検討した結果つぎの理由が考えられる。

すなわち Hydraulic 形被鉛機では溶解炉からいを通じて熔融鉛をコンテナに注入するが、この際どうしても酸化物が混入するのを避けられない。したがって Pirelli 形被鉛機の試料に比較して局部的な酸化物の混在があり不均等な結晶粒の成長を起すものと思う。

加熱温度 200°C の実験結果を第 18, 19 図に示す。この結果からいずれの試料も 5 min 以上の加熱で結晶粒の成長を起すこと、また 150°C の場合に比較して双晶の多いことなどがわかる。

5.3 Pb-2% Sn および E 合金 (Pb-0.4% Sn-0.2% Sb) の成長過程

Hydraulic 被鉛機で押出された Pb-2% Sn 合金の実験結果を第 20, 21 図に示す。

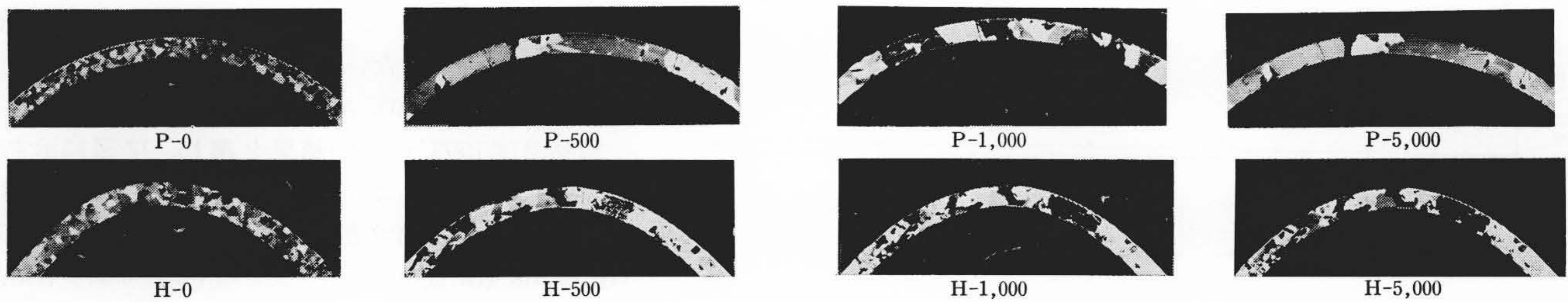
この結果から 100°C および 150°C の加熱では 1,000 min 以上でわずかに局部的な結晶粒の成長を起すにすぎないことがわかる。一方 200°C の場合は 500 min 以上の加熱で成長を起しているが純鉛に比較すればその傾向は少ない。

以上のように Pb-2% Sn 合金は加熱しても結晶粒の粗大化を起しにくいことがわかる。

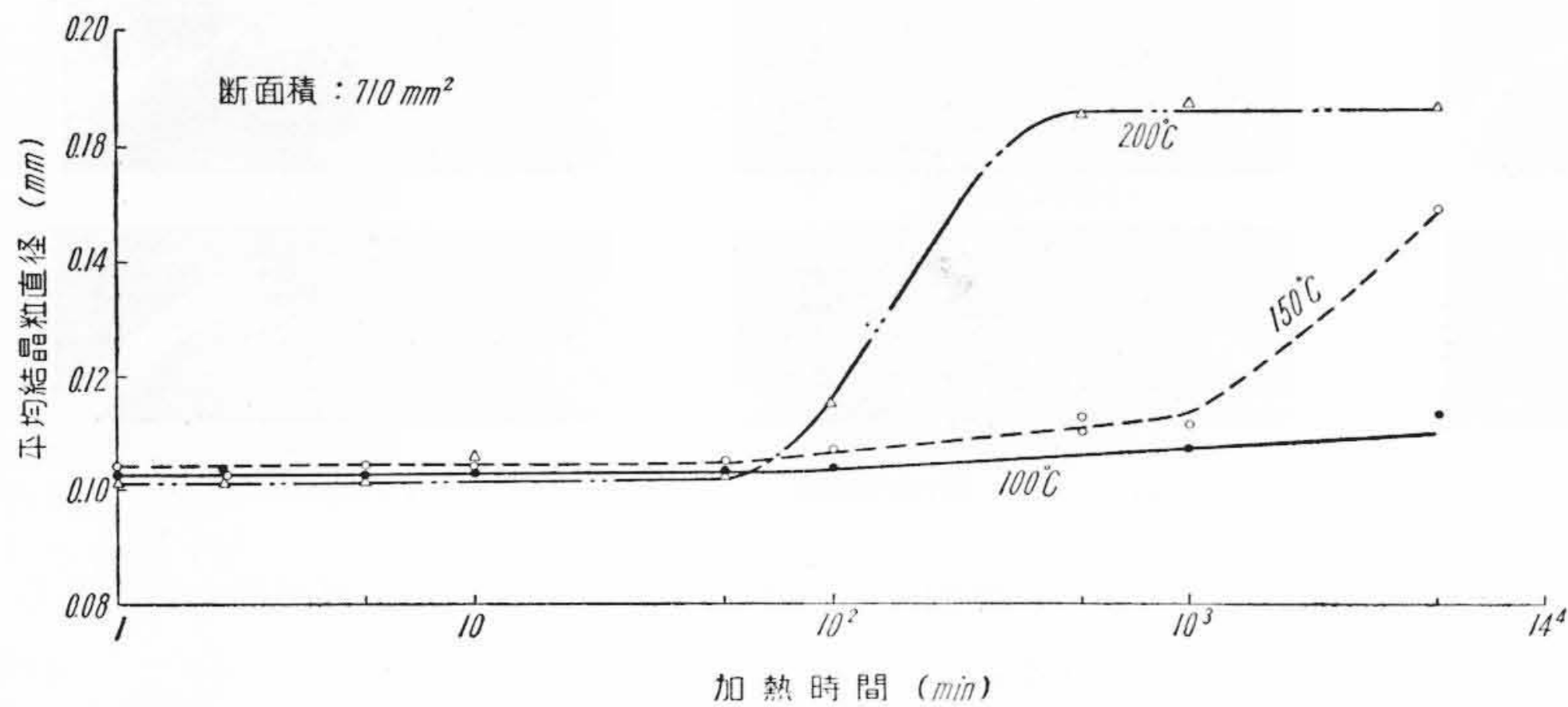
つぎに E 合金の実験結果を第 22, 23 図に示す。この結果からわかるように 100°C の加熱ではほとんど成長を起さないが 150°C および 200°C の場合には 50 min 以上の加熱で成長を起している。また E 合金と Pb-2% Sn 合金を比較すれば E 合金のほうが成長を起しやすいこともわかる。

6. 結 言

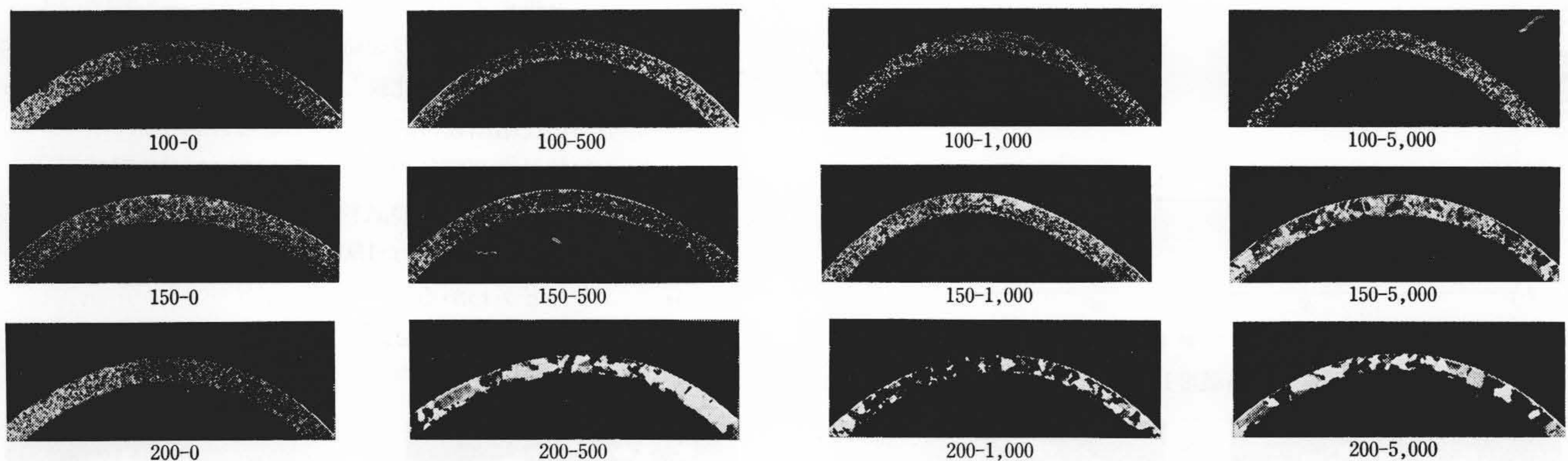
3 種の被鉛機で押出された鉛および鉛合金の試料につ



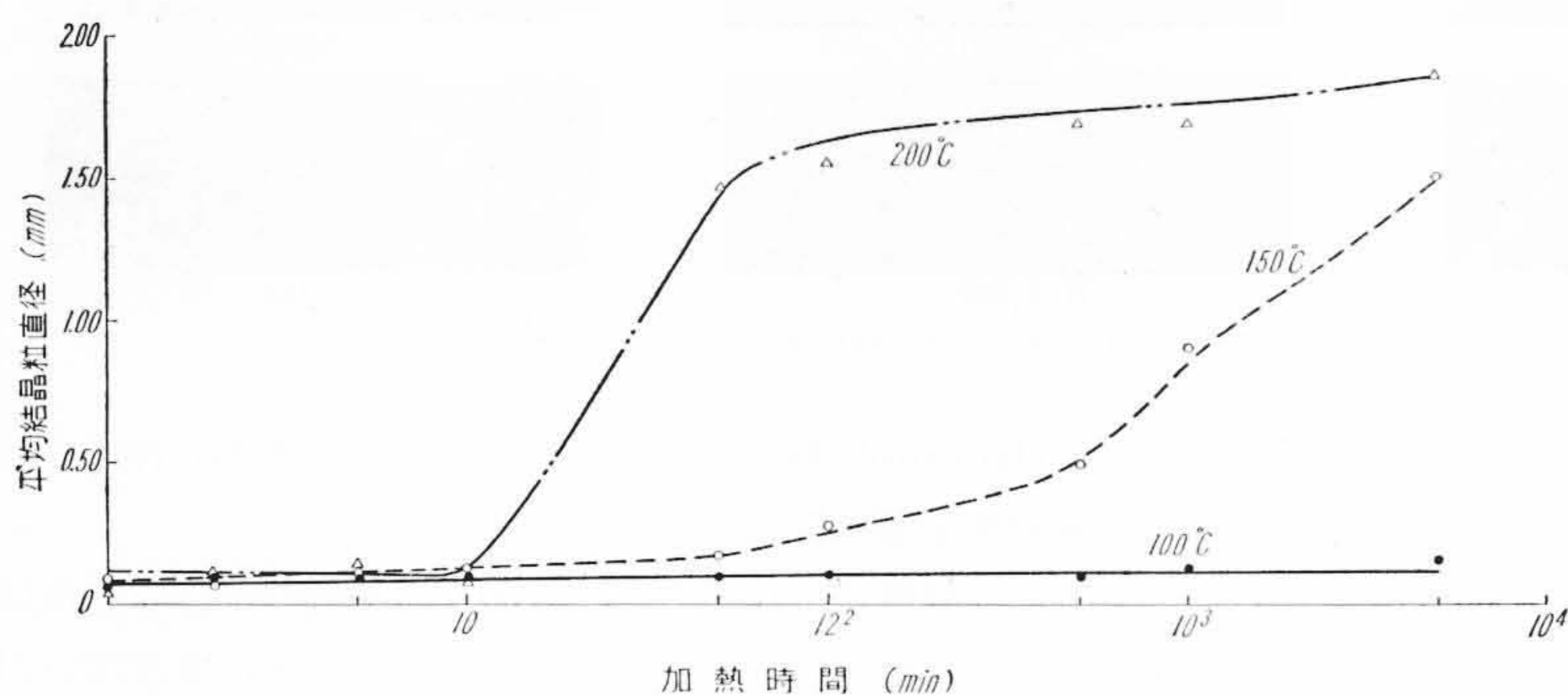
第 19 図 加熱温度200°Cの場合のマクロ組織の変化 (P: Pirelli H: Hydraulic 数字は加熱時間を示す)



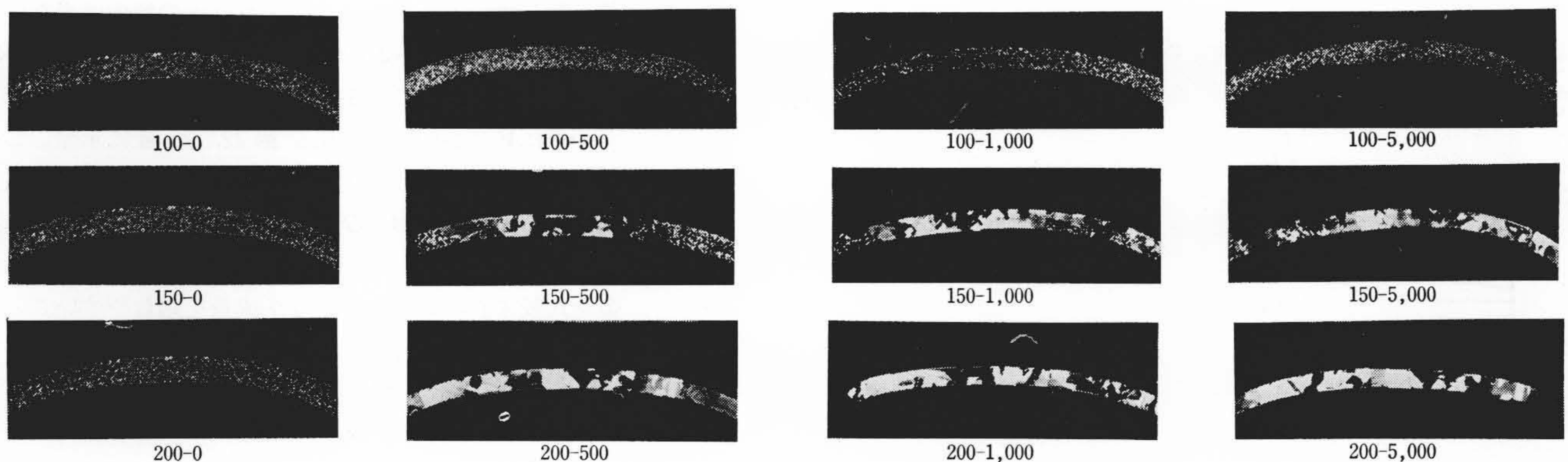
第 20 図 Pb-2%合金の加熱による結晶粒度の変化 (Hydraulik 被鉛機による)



第 21 図 Pb-2%Sn 合金の加熱によるマクロ組織の変化 (左側の数字は加熱温度を示す 右側の数字は加熱時間を示す)



第 22 図 E 合金の加熱による結晶粒度の変化 (Hydraulik 被鉛機による)



第 23 図 E 合金の加熱によるマクロ組織の変化 (左側の数字は加熱温度を示す 右側の数字は加熱時間を示す)

いて、結晶粒度と断面積の関係、結晶粒度に及ぼす押出条件の影響などを明らかにし、さらに押出後の加熱による結晶粒の成長過程も合わせ検討した。

実験結果を要約すると下記のとおりである。

- (1) いずれの被鉛機で押出された試料でも断面積と平均結晶粒直径の対数との間には直線関係がある。
- (2) 各種鉛被用合金についてその結晶粒度を比較すると Pb-1% Sb-0.06% Cu 合金が最も小さく Pb-0.85% Sb 合金, Pb-2% Sn 合金, E 合金の順に大きくなっている。

- (3) Hansson 形連続被鉛機の試料がほかの被鉛機の

ものに比較して最も結晶粒が小さい。

- (4) 押出温度の影響は L. H. Back 氏の結果と同様に結晶粒度と直線関係があることが認められた。

- (5) Hydraulic 被鉛機では押出速度が 30 m/min 以上になると結晶粒は小さくなる。

- (6) 結晶粒粗大化に対する抵抗は Pb-2%Sn 合金が最も大きく、E 合金、純鉛の順に減少している。

終りにのぞみ本研究を行うに当りご指導、ご激励をいただいた内藤副工場長、山野井部長、水上副部長および実験に協力された関係各位にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) R. C. Gifkins: J. Inst. Metals, 81, 417 (1953)
 (2) S. Beckinsale, H. Waterhouse: J. Inst. Metals, 39, 375 (1928)
 (3) L. M. T. Hopkin: J. Inst. Metals, 82, 181 (1954)
 (4) L. H. Back: Symposium on the Hot Working of Non-Ferrous Metals and Alloys (1951, Inst. of Metals)
 (5) J. M. Butler: J. Inst. Metals, 86, 145 (1958)
 (6) J. Mckeown, L. M. T. Hopkin: Metallurgia, 41, 135 (1950)
 (7) 山路, 大島: 日立評論 37, 963 (昭 30)



新 案 の 紹 介



登録新案第522736号

村 田 敏 雄・山 崎 勇

石 炭・鉱 石 な の の 移 送 装 置

構 造

旋回可能に支持された送り込みコンベヤ1の先端に、折りたたみ式ゲート付シュート6を回転できるように取付ける。

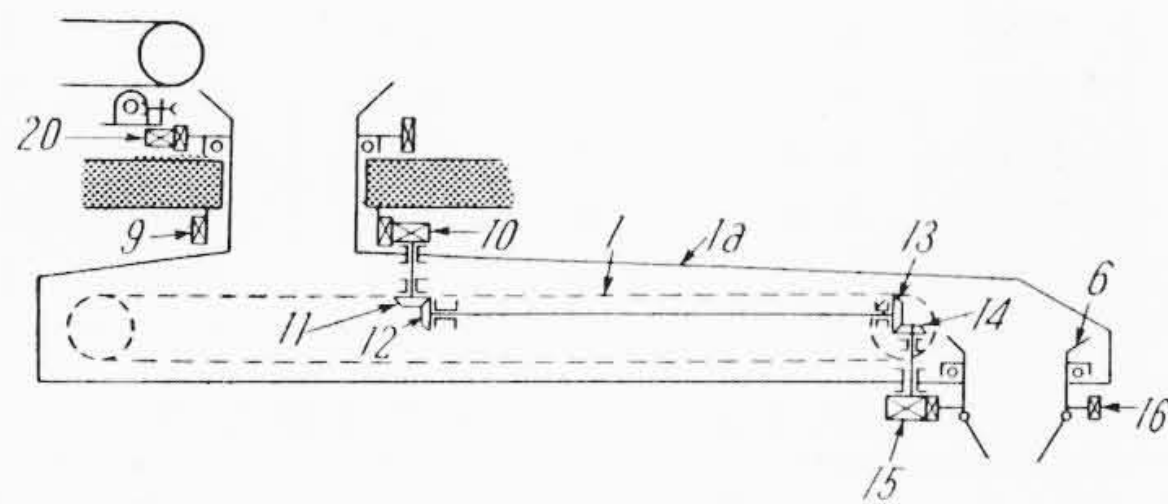
送り込みコンベヤ1を、並列する荷受けコンベヤ21ないし24のおののに対して回転させる場合、折りたたみ式ゲート付シュートを送り込みコンベヤ1の旋回にともなって自動的に回転させ、その流れ方向を荷受けコンベヤの流れ方向と一致させる連動歯車機構9ないし16を設ける。

作 用、効 果

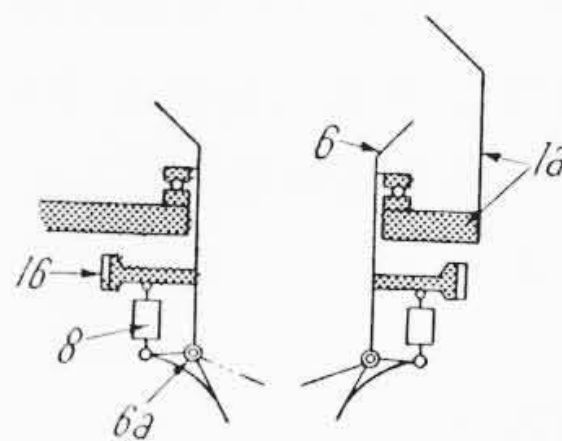
ガーダ1aを歯車機構20またはロープなどにより回転させると、連動歯車機構9ないし16を経てシュート6が回転される。したがって、連動歯車機構の歯車比を適当に定めれば、ガーダ1aを並列する荷受けコンベヤ21ないし24のおののに対して回転させたとき、

シュート6の流れ方向を荷受けコンベヤの流れ方向に自動的に一致させることができる。ガーダ1aの旋回にあたっては、電動液圧押し機8を駆動してゲート6aを鎖線のように揺動させ、旋回に支障のないようにする。電動液圧押し機8にはケーブルにより給電する。したがって、従来の移送装置におけるようなガーダ1aの俯仰装置を設ける必要はない。なお、場合によっては、送り込みコンベヤ1のかわりに適当な傾斜をもたせた旋回シュートを用いてもよい。

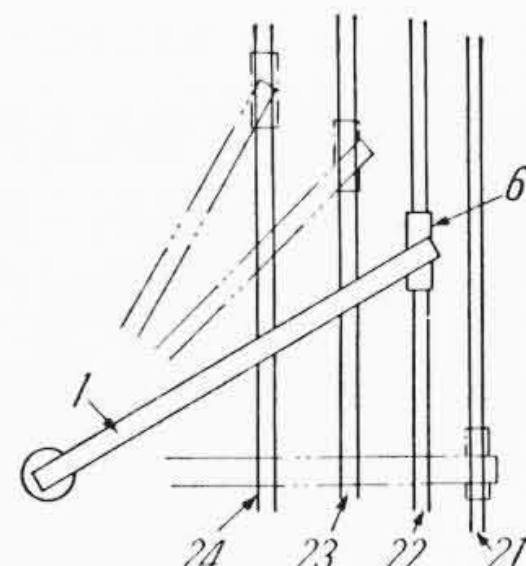
この考案によれば、ガーダの先端に設けたシュートのゲート进行操作することにより支障なく送り込みコンベヤのガーダを回転させることができ、またガーダをおのの荷受けコンベヤに対して回転させると自動的にシュートの流れ方向がその荷受けコンベヤの流れ方向と一致するので、荷役操作が簡便となり作業能率を向上することができる。(富田)



移 送 装 置



折 り た た み 式 ゲ ー ト 付 シ ュ ー ト



説 明 図



新 案 の 紹 介



登録新案第522773号

村 田 敏 雄・山 崎 勇

石 炭・鉱 石 な の の 移 送 装 置

構 造

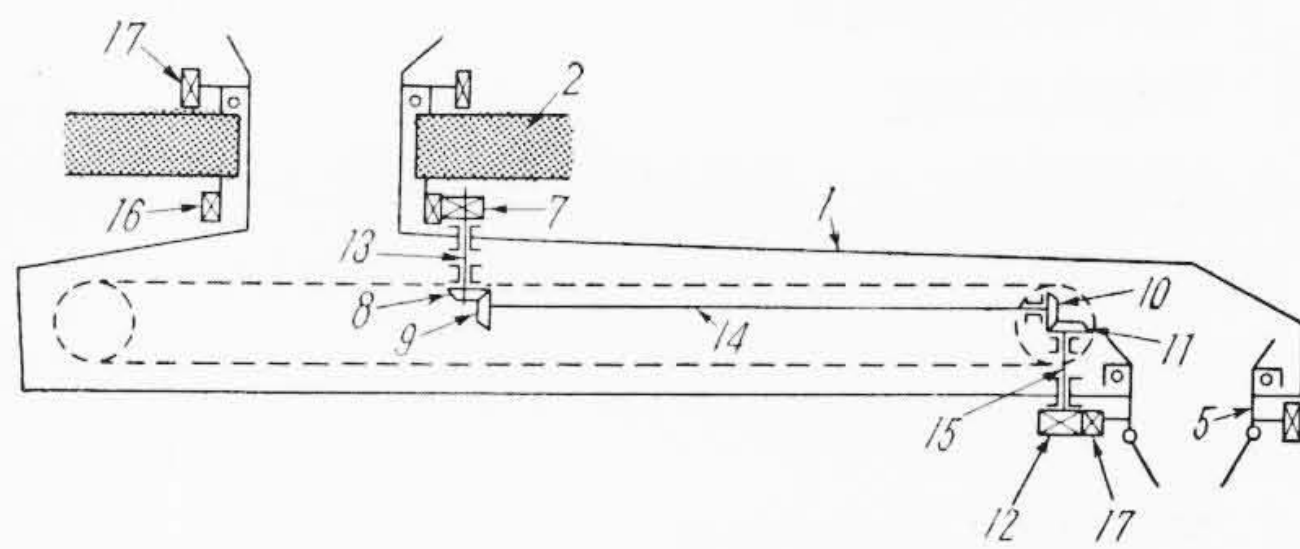
先端にシュート5をそなえたコンベヤガーダ1に、回転軸13, 14, 15を支持させ、それらの軸に回転を順次伝える連動歯車群7ないし12を取付ける。

連動歯車群の最初の歯車7および最後の歯車12を、フレーム2にとりつけた歯車16およびシュート5に取付けた歯車17にそれぞれかみ合わせる。

作 用、効 果

コンベヤガーダ1を歯車機構17またはロープなどにより回転させると、連動歯車群7ないし12を経てシュート5が自動的に回転される。したがって連動歯車群の歯車比を適当に定めれば、コンベヤガーダ1の旋回にともないシュート5を所要の角度自動的に回転させて荷役作業を行うことができる。

この考案によれば、コンベヤガーダ自体の旋回を利用してコンベヤガーダに設けたシュートを任意の角度容易に回転させて荷役作業を便利に行うことができる効果がある。(富田)



説 明 図