

自動車エンジン・カムフロッワー用耐摩耗材料の設計

加 納 眞

①

自動車エンジン・カムフォロワー用耐摩耗材料の設計

目次	1
1. はじめに	2
2. エンジン・カムフォロワーの構造と動作	3
3. 材料の選定	4
4. 材料の特性	5
5. 材料の加工	6
6. 材料の検査	7
7. 材料の応用	8
8. 材料の将来	9
9. 材料のまとめ	10
10. 材料の参考文献	11
11. 材料の謝辞	12
12. 材料の索引	13
13. 材料の参考文献	14
14. 材料の謝辞	15
15. 材料の索引	16
16. 材料の参考文献	17
17. 材料の謝辞	18
18. 材料の索引	19
19. 材料の参考文献	20
20. 材料の謝辞	21
21. 材料の索引	22
22. 材料の参考文献	23
23. 材料の謝辞	24
24. 材料の索引	25
25. 材料の参考文献	26
26. 材料の謝辞	27
27. 材料の索引	28
28. 材料の参考文献	29
29. 材料の謝辞	30
30. 材料の索引	31
31. 材料の参考文献	32
32. 材料の謝辞	33
33. 材料の索引	34
34. 材料の参考文献	35
35. 材料の謝辞	36
36. 材料の索引	37
37. 材料の参考文献	38
38. 材料の謝辞	39
39. 材料の索引	40
40. 材料の参考文献	41
41. 材料の謝辞	42
42. 材料の索引	43
43. 材料の参考文献	44
44. 材料の謝辞	45
45. 材料の索引	46
46. 材料の参考文献	47
47. 材料の謝辞	48
48. 材料の索引	49
49. 材料の参考文献	50
50. 材料の謝辞	51
51. 材料の索引	52
52. 材料の参考文献	53
53. 材料の謝辞	54
54. 材料の索引	55
55. 材料の参考文献	56
56. 材料の謝辞	57
57. 材料の索引	58
58. 材料の参考文献	59
59. 材料の謝辞	60
60. 材料の索引	61
61. 材料の参考文献	62
62. 材料の謝辞	63
63. 材料の索引	64
64. 材料の参考文献	65
65. 材料の謝辞	66
66. 材料の索引	67
67. 材料の参考文献	68
68. 材料の謝辞	69
69. 材料の索引	70
70. 材料の参考文献	71
71. 材料の謝辞	72
72. 材料の索引	73
73. 材料の参考文献	74
74. 材料の謝辞	75
75. 材料の索引	76
76. 材料の参考文献	77
77. 材料の謝辞	78
78. 材料の索引	79
79. 材料の参考文献	80
80. 材料の謝辞	81
81. 材料の索引	82
82. 材料の参考文献	83
83. 材料の謝辞	84
84. 材料の索引	85
85. 材料の参考文献	86
86. 材料の謝辞	87
87. 材料の索引	88
88. 材料の参考文献	89
89. 材料の謝辞	90
90. 材料の索引	91
91. 材料の参考文献	92
92. 材料の謝辞	93
93. 材料の索引	94
94. 材料の参考文献	95
95. 材料の謝辞	96
96. 材料の索引	97
97. 材料の参考文献	98
98. 材料の謝辞	99
99. 材料の索引	100

加 納 眞

目次

第1章 序論	1
1. 1 まえがき	1
1. 2 カム, フォロワーの形式と材料	1
1. 3 カム, フォロワー摩耗形態の観察例	2
1. 4 従来の研究	4
1. 5 研究の目的と論文の構成	5
参考文献	5
第2章 摩耗の実験	15
2. 1 フォロワーおよびカムの材料	15
2. 2 摩耗試験片	18
2. 3 摩耗試験の条件	18
2. 4 摩耗量の測定方法	19
参考文献	19
第3章 摩擦条件と摩耗	30
3. 1 低速試験における摩耗状況	30
3. 2 高速試験における摩耗状況	31
3. 3 「スカuffing」摩耗の起点と摩擦条件	31
3. 4 考察	33
3. 4. 1 「スカuffing」摩耗によはすエンジン回転速度の影響について	33
3. 4. 2 「スカuffing」摩耗と摩擦条件との関係について	33
3. 5 第3章のまとめ	34
参考文献	35
第4章 摩耗形態の解析	45
4. 1 観察の方法	45
4. 2 各フォロワー材に対する摩耗形態の観察結果	45
4. 2. 1 鉄基焼結材PおよびHシリーズ材の摩耗形態	45
4. 2. 2 超硬合金TCおよび窒化珪素SN材の摩耗形態	47
4. 2. 3 耐摩耗合金鋳鉄Cシリーズ材の摩耗形態	47

4. 2. 4 浸炭窒化鋼 S T の摩耗形態	48
4. 3 摩耗形態観察結果に対する考察	48
4. 4 第 4 章のまとめ	49
参考文献	50
第 5 章 摩耗量とフォロワー材料特性値との関係	62
5. 1 フォロワー材料特性値の測定方法	62
5. 2 「スカフティング」摩耗量の定量解析手法	64
5. 2. 1 低速試験後におけるカムおよびフォロワーの摩耗量	64
5. 2. 2 摩耗量インデックスの定量解析手法	64
5. 3 摩耗量とフォロワー各材料特性値との関係	65
5. 3. 1 カム摩耗量とフォロワー材料特性値	65
5. 3. 2 フォロワー摩耗量とフォロワー材料特性値	65
5. 3. 3 摩耗量と材料特性値との関係の定量解析	66
5. 3. 3. 1 カム摩耗量とフォロワー材料特性値	66
5. 3. 3. 2 フォロワー摩耗量とフォロワー材料特性値	66
5. 3. 3. 3 疲労破壊が支配的なフォロワー材のフォロワー摩耗量	67
5. 3. 3. 4 アブレーション作用が支配的なフォロワー材のフォロワー摩耗量	68
5. 4 摩耗量の定量解析結果についての考察	68
5. 4. 1 カムおよびフォロワー摩耗量の結果について	68
5. 4. 2 カム摩耗量とフォロワー材料特性値との関係について	69
5. 4. 3 フォロワー摩耗量とフォロワー材料特性値との関係について	69
5. 4. 3. 1 疲労破壊が支配的なフォロワー摩耗と材料特性値との関係	70
5. 4. 3. 2 アブレーション作用が支配的なフォロワー摩耗と材料特性値との関係	71
5. 5 第 5 章のまとめ	71
参考文献	72
第 6 章 実際の量産フォロワー材料開発への応用	105
6. 1 解析結果の高クロム鋳鉄への応用	105
6. 1. 1 解析結果のまとめ	105
6. 1. 2 高クロム鋳鉄への応用	106
6. 2 フォロワーの試作	106

6. 3 評価方法	107
6. 3. 1 従来材と改良材の比較	107
6. 3. 2 改良材の成分値バリエーション材の評価	107
6. 4 試験結果	107
6. 4. 1 従来材と改良材の組織	107
6. 4. 2 改良材の摩耗量予測	108
6. 4. 3 実測値と予測値との比較	108
6. 4. 4 改良材の摩耗形態	109
6. 4. 5 改良材の成分値バリエーション材の評価	109
6. 5 第6章のまとめ	110
参考文献	111
第7章 結 論	126
謝 辞	127

第1章 序 論

1. 1 まえがき

最近の自動車エンジン、特に乗用車用エンジンには、より速く、加速良く走れるかといった高出力、高性能化のニーズに伴い、従来のタペットを用いたOHV型の動弁系にかわり軽量コンパクトなロッカーアーム式もしくはスウィングアーム式フォロワーを用いたOHC型さらにはDOHC（ダブルオーバーヘッドカムシャフト）型エンジンが多く採用されてきている。また、エンジンオイルの交換距離延長やバルブクリアランス調整廃止等に代表されるメンテナンスフリー化、音振要求性能の向上に伴うバルブクリアランス増加の抑制、さらには商用車を中心に進められている高寿命化といった要求に伴い、カムとフォロワー間の許容摩耗量は著しく小さくなってきており、それに対応したフォロワー材料の耐摩耗性の向上はますます重要になっている。DOHC型動弁系においては、2本のカムシャフトに相対するフォロワーが必要になりフォロワーの数が2倍となるために、フォロワー材料のコストや加工性も重要な開発因子となってきている。一方、企業としては、収益向上や深刻になり始めている人手不足や今後予想される労働時間の短縮に対応するために、効率的な開発が不可欠となっている。従って、トライアル アンド エラーを繰り返してきた従来型の開発や絨毯爆撃的な材料開発は許されず、摩耗現象においては実用に適したトライボロジー解析ソフトの研究開発およびそれを活用した最適材料の開発が重要となる。今回取り上げたすべり式フォロワー用耐摩耗材料の開発においては、新開発エンジンにおける上記要求に基づくカムおよびフォロワーの許容摩耗量に対応するために、エンジニアの経験により従来材を高合金化や表面処理追加等の改善することの積み重ねで開発されてきたのが実状であった。

1. 2 カム、フォロワーの形式と材料

Fig.1.1に、ロッカーアーム式フォロワーが搭載されたSR20DE型エンジンの動弁系部品群の断面カットを示す(1)(2)(3)。カムシャフトのカムと摺動するすべり式フォロワー（Fig.1.1では 写真に示すY字型のロッカーアーム）は、エンジンの中でも摩擦条件が最も過酷な部位であり、従来より合金鋳鉄、鉄基焼結合金、超硬合金、窒化珪素セラミックスを始めとする種々の耐摩耗材料の適用がなされてきた(4)～(16)。

また、エンジンのバルブを作動させるにあたり、その重量や機構により吸気、排気性能ひいてはエンジン性能そのものに影響するために、エンジンの要求性能に応じてFig.1.2に示すような動弁機構が使い

分けられてきた。OHV式動弁系はカムシャフトとバルブまでの距離が離れているために高回転型の高性能エンジンには適していないので、最近の乗用車用ガソリンエンジンにはほとんど使用されておらず、主にトラック等の大型ディーゼルエンジンなどに採用されている。フォロワーとしては円筒形をしたタベットの用いられており、オフセットしたカムの摺動に伴いタベットが回転するために転がり接触が支配的になる。従って「スカフティング」摩耗よりもピッチング摩耗が顕在化がしやすく、フォロワー材料としては硬化した低合金鋳鉄が汎用されてきた(17)~(21)。一方、OHCエンジンはカムの駆動がフォロワーを介してバルブを作動させるために高回転型のエンジンに適しており、最近の乗用車用のガソリンエンジンのほとんどがこの動弁系を採用している。直動式のフォロワーは、円筒形のリフターの上に載せたシムがオフセットしたカムの摺動に伴い回転するために、「スカフティング」摩耗に対しては楽であり、カムフォロワー材料は浸炭鋼が用いられている。直動式に対して本研究に用いられたロッカーアーム式やスウィングアーム式(一般的にはスウィングアームも含めてロッカーアームと呼ぶ事が多い)フォロワーは、カム回転に応じたバルブのリフト量をてこ比の分だけ多く稼げるメリットがある。しかしながら、フォロワー部の摺動はすべり接触が支配的となるので「スカフティング」摩耗が顕在化しやすくなる。従って、タベットやリフターシムで用いられる低合金鋳鉄や浸炭鋼ではフォロワーの耐摩耗性を成立させられず、種々の耐摩耗材料が開発されてきたわけである。さらには、最近の一部のエンジンにおいてはフォロワーにニードルベアリングを配したローラロッカーアームの採用(22)も見受けられるようになってきている。

Fig.1.2のように分類した各種フォロワーに対して実際のエンジンに用いられてきたカムシャフトおよびフォロワー材料の組み合わせをTable1.1に示す(16)。カムシャフトについても、種々の耐摩耗材料の適用が見られるが(9)(13)(14)、国内および欧州のOHC型エンジン用カムシャフトには、低合金チルド鋳鉄材が最も多く使われている。また、この表よりロッカーアーム式Rとスウィングアーム式Sのカム、フォロワーに対して種々の耐摩耗材料が適用されている様子がわかる。

本論文では、摩擦条件が苛酷であるために、材料開発が困難かつ重要であるすべり式のスウィングアーム、ロッカーアーム形式のフォロワーに関しての摩耗解析および材料設計コンセプトについて言及して行く。まず始めに、実際のフォロワーに観察される摩耗形態にどのようなものがあるかを簡単に説明する。

1.3 カム、フォロワー摩耗形態の観察例

カムとフォロワー間の摩耗には種々の摩耗要因が複雑に絡み合っていると考えられ、摩耗形態を明確に分類するのは困難であることが多い。ここでは、実際のエンジンのそれらの実部品に生じたいくつかの代表的な異なる摩耗を取りあげ、摩耗形態観察や解析に基づき最も主要な摩耗要因を考察する。

Fig.1.3 a),e) は、高クロム鉄基合金の焼結材からなるカムと窒化ケイ素ロッカーアームパッドのフォロワーを組み合わせた場合の、モータリングエンジン試験後に見られたカムの段付き摩耗である。汎用されているチル鋳鉄カムとの組合せにおいては、このような段付き摩耗は全く発生しなかった。焼結カムの摩耗面の走査電子顕微鏡像（以後SEM像と呼ぶ）Fig.1.3 b) とその拡大像Fig.1.3 c) と、その視野に対応するシリコン元素面分析 Fig.1.3 d) により、焼結空孔に相手材の窒化ケイ素摩耗粉がトラップされたことが確認できたため、このカムの摩耗形態は硬いセラミックス摩耗粉によるアブレイシブ摩耗と判断された。

Fig.1.4 a),c) は、ディーゼルエンジン実機の、ファイアリング耐久試験後のチルド鋳鉄製ロッカーアームフォロワーの外観を示す。Fig.1.4 a) は排気ガスを還流した（EGR付加；Exhaust Gas Recirculation）例、Fig.1.4 c) は還流しない例であって、前者は後者に比べ、著しく大きな段付き摩耗を生じている。各々の試験終了後のエンジンから回収した潤滑油中の摩耗粉をフェログラフィー法(23)によりトラップし、それらの形状をSEM像と比較した例をFig.1.4 b),d) に示す。段付き摩耗を生じた場合の摩耗粉が茶褐色を呈し、サブミクロンの非常に微細かつ粒状（Fig.1.4 b)）であるのに対して、EGR無しの場合の摩耗粉は黒色を呈し、薄いプレート状（Fig.1.4 d)）となっている。この結果と、EGR付加によるブローバイガス中のSOx濃度の増加および潤滑油の塩基価の減少が認められたことから、EGR付加の場合の段付き摩耗の主要因は硫酸による腐食摩耗と考えられた(10)。

Fig.1.5 a) は、ころがり接触を狙ったニードルローラー・ロッカーアームのフォロワーを用いて、接触面圧をこのエンジンの標準仕様に比べ1.6倍程度高めた状態で、モータリングエンジン耐久試験を行なった後の、チルド鋳鉄カム表面に見られた剥離ビット状の摩耗である。フォロワー摺動痕のエッジ部にビットが形成されていて、Fig.1.5 b),d) の表面SEM像およびそれぞれの断面組織写真 Fig.1.5 c),e) からわかるように、その部分にはクラックの進展がはっきりと認められる。この損傷は接触面圧、回数の増加で加速されることから、微視的なころがり疲れと分類された。カム表面に生ずるこのような摩耗は、すべり式ロッカーアームフォロワーを用いた高面圧、高速度の長時間耐久においても見受けられている。

以上の例において、アブレイシブ摩耗と腐食摩耗はその加速要因が特殊なものであり、ころがり疲れは接触面圧と材料強度からかなりの精度で予測できることから、材料の開発上の問題は少ない。それに対し、すべり式カム、フォロワーの摩耗不具合として最も多く発生し、摩耗量も大きいために最も重要と考えられている、いわゆる「スカuffing」摩耗を生じたカムと相手のフォロワーの外観の一例を、Fig.1.6 a), b) に示す。カムはチルド鋳鉄、フォロワーは鉄基焼結材で、この「スカuffing」摩耗においては、Fig.1.3 に示したアブレイシブ摩耗と同様な深い条痕が、両面とも局所的に形成されており、摩耗量も大きい。以上本研究では、「スカuffing」摩耗を対象とする。

1. 4 従来の研究

カムとすべり式フォロワー間に生ずる「スカuffing」摩耗は、潤滑用語集等(24)(25)に記載されているスカuffingの定義と同じ現象、すなわち接触面で生ずる融着によるものと解釈されてきた(6)(7)(26)(27)(28)。但しその定義には英語と米語で相違があり、英語では融着現象のみを指すのに対し、米語ではその結果として生ずるアブレーション作用も含めていて、いま論じている摩耗としての「スカuffing」は米語の用語である。この摩耗を抑制するために、フォロワー材料として従来より合金鋳鉄、鉄基高クロム焼結合金、超硬合金を始めとする種々の耐摩耗材料の開発、適用がなされてきた。しかしながらその際の材料開発の手法としては、各自動車会社、部品メーカー技術者の経験やノウハウに頼ることが多かった。すなわち、フォロワー材料開発の定性的な指針として、「強靱な素地に適度の大きさの硬い金属間化合物が多量に分布した複相組織を有し、高温軟化、焼き戻し軟化の少ない熱的に安定なもので、しかも相手カムの表面硬さとの差が常温高温を通じて小さいものが優れた耐摩耗性に優れる」ことを指摘したもの(4)、チルド鋳鉄を主とした各種材料組合せにてエンジンでの耐摩耗性評価を実施したもの(6)、各種鋳鉄材のタベットの炭化物量や黒鉛析出量とタベット摩耗量との相関性を見たもの(18)、チルド鋳鉄カムと鍛造鋼、高クロム鋳鉄および高クロム鉄基焼結合金のフォロワーについてエンジン実機による摩耗試験を実施し、焼結材の優れた耐摩耗性を見いだしたもの(7)などがあるが、いずれもこの「スカuffing」損傷に起因する摩耗量と材料特性値とを定量的に相関付けるには至っていない。

ここで、フォロワー以外の耐摩耗材におけるアブレーション摩耗も含めて、類似の材料の材料特性値と摩耗量を評価した研究をいくつか挙げてみる。ピッカース硬度が500以上の炭素鋼における表面硬さと摩耗量の関係を調べたもの(29)、熱間圧延用ロール材として各種高クロム鋳鉄材の高温での摩耗量を表面硬さや炭化物の析出量との相関を見たもの(30)、各種工具鋼の摩耗量と材料組織の基底硬さと炭化物硬さを加味した「実効硬さ」との関係を示したもの(31)および各種純金属のポリッシング摩耗量と融点、表面エネルギー、押し込み硬ささらにヤング率といった材料特性値との各々の相関を調べたもの(32)、さらには合金鋳鉄の炭化物形状等の組織と摩耗の関係を調べた金らの研究(33)がある。その他にも、炭化物等の硬質相の存在量、粒径、分散状態といった材料組織やマクロ硬さ、材料強度等の材料特性値と摩耗量との関係を調べた研究がいくつか報告されている(34)~(41)。しかしながら、これらはいずれも摩耗量と一つの材料パラメータとの相関関係を見たものであり、開発した耐摩耗材料の摩耗量を定量予測したり、工業的に材料設計するためには不十分であった。

1. 5 研究の目的と論文の構成

本研究は、実際の自動車エンジン動弁系のフォロワー用耐摩耗性材料の「スカuffing」摩耗を解析し、摩耗量と材料特性値との定量的な相関を明らかにして、フォロワー材の材料設計の指針を得ることを目的とする。

本論文は7章から構成されている。

第1章の序論に続いて、第2章では本研究で行なった摩耗実験の詳細を説明する。実験は1種類のカム材に対し、実際の自動車エンジンのフォロワーに使用されている、もしくは使用が検討されている材料を供試材料としてフォロワーに用い、ガソリンエンジンのモータリング試験によってその摩耗を測定する。

第3章～第5章に実験結果を詳述し、考察を加える。まず第3章では、試験後のフォロワーの摩耗痕のプロフィールを調べ、「スカuffing」摩耗の発生状況と摩擦条件との関係を明らかにする。第4章では、フォロワー摩耗部の走査型電子顕微鏡観察などに基づいて「スカuffing」摩耗の機構を調べるとともに、材料による違いを明らかにする。第5章では、各フォロワー材の材料強度に関する諸特性値を測定し、それらと摩耗量との定量的な相関を求める。

第6章は、これらの研究結果に基づく、大量生産の可能なフォロワー材の開発について述べる。第7章は結論で、本研究の成果をまとめる。

第1章の参考文献：

- (1) 服部 貢・二宮 利宏・高橋 秀貴・下村 正雄・川植 寿典・吉敷 一郎：日産技報，26，(1989) 52.
- (2) 加納 眞・谷本 一郎・川村 治・高橋 輝夫：自動車技術会学術講演会前刷集901，1990-5，901025，(1990) 113.
- (3) 加納 眞・谷本 一郎・川村 治・高橋 輝夫：自動車技術会論文集，22，2，(1991) 103.
- (4) 塩飽 義之・近藤 隆夫・飯田 稔・大橋 孝行：潤滑，29，7，(1984) 537.
- (5) Y.Hayashi, A.Morita, Y.Ekino and T.Nakakobara : SAE Paper 852203.
- (6) R.J.Love & F.C.Wykes : SAE Paper 750865.
- (7) 大久保 安久・不破 健雄・関 克彦：自動車技術，39，9，(1985) 1014.
- (8) S.L.Narasimhan and J.M.Larson : SAE Paper 851497.

- (9) P.L.Peppler : SAE Paper 880667.
- (10) 加納 眞・谷本 一郎・中村 清隆・藤木 章 : 潤滑, 32, 12, (1987) 900.
- (11) 谷本 一郎・加納 眞・阿部 真 : 自動車技術, 42, 6, (1988) 711.
- (12) 加納 眞 : トライボロジスト, 34, 2, (1989) 131.
- (13) 加納 眞 : トライボロジスト, 34, 6, (1989) 416.
- (14) 加納 眞 : トライボロジスト, 36, 6, (1991) 440.
- (15) 加納 眞 : 日本機械学会(No910-51)自動車のトライボロジ-講演論文集(91.8.29,東京)13.
- (16) M.Kano and I.Tanimoto : S.I.A 89044.
- (17) 小松 康彦・神原 省三・堂ノ本 忠 : 自動車技術, 32, 9, (1978) 869.
- (18) 山本 幸男・寄高 政史 : 自動車技術会論文集, 33, (1986) 114.
- (19) Liu Jiajun, Lu Zhiqiang and C.Yinqian : Wear, 140, (1990) 135.
- (20) 西本 陸男 : いすゞ技報, 78, (1978) 65.
- (21) 寄高 政史・山本 幸男 : 第5回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, S60.6.10, No112, 67
- (22) 宮村 紀行・長野 修治・浅野 謙一・田中 一郎 : 内燃機関, 26, 6, (1987) 47.
- (23) 柴田 正明 : 潤滑, 20, 7, (1982) 487.
- (24) 潤滑用語集 : 日本潤滑学会編, 養賢堂(1981) 45.
- (25) Glossary of Terms and Definitions in The Field of Friction, Wear and Lubrication, Tribology, (1969) 53.
- (26) 星 満, 藤吉 晃男, 小林 正志 : 内燃機関, 15, 8, (1976) 63.
- (27) 坂口 清・中小原 武 : 潤滑, 27, 5, (1982) 354.
- (28) 黒岩 勝 : 潤滑, 23, 8, (1978) 542.
- (29) 山田 俊宏・佐々木 敏美 : 日本金属学会誌, 39, (1975) 1199.
- (30) 野口 紘・渡辺 靖夫 : 川崎製鉄技報, 19, 3, (1987) 195.
- (31) 前田 貞三・青木 勇 : 塑性と加工, 18, 199, (1977) 627.
- (32) E.Rabinowicz, Z.Li and N.Saka : Proceedings of the Japan International Tribology Conference, (1990) 233.
- (33) 金 詰熙・木村 好次 : 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集(盛岡1992-10) 291.
- (34) P.L.Huricks : Wear, 26, (1973) 285.
- (35) P.J.Mutton and J.D.Watson : Wear, 48, (1978) 385.
- (36) J.Larsen-Badse and K.G.Mathew : Wear, 14, (1969) 199.
- (37) P.Clayton : Wear, 60, (1980) 75.
- (38) W.L.Silence : Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME, 100, (1978) 428.

(3 9) H.Berns and G.Wang : Proceedings of Int.TribologyConf., (1990) Nagoya, 725.

(4 0) A.Kasak and T.A.Neumeyer : Wear, 14, (1969) 445.

(4 1) A.T.Alpas and J.Zhang : Wear, 155, (1992) 83.

Table 1. Combinations of cam and follower materials

Cam material	Camshaft material (Cr-Cr-Mo alloy)	Camshaft material (Al-Si alloy)	Camshaft material (Cast iron)	Camshaft material (Steel)	Camshaft material (Titanium)
Follower material					
Cast iron	Cast iron (Cr-Cr-Mo alloy)	Cast iron (Al-Si alloy)	Cast iron (Cr-Cr-Mo alloy)	Cast iron (Steel)	Cast iron (Titanium)
Aluminum alloy	Aluminum alloy (Cr-Cr-Mo alloy)	Aluminum alloy (Al-Si alloy)	Aluminum alloy (Cr-Cr-Mo alloy)	Aluminum alloy (Steel)	Aluminum alloy (Titanium)
Steel	Steel (Cr-Cr-Mo alloy)	Steel (Al-Si alloy)	Steel (Cr-Cr-Mo alloy)	Steel (Steel)	Steel (Titanium)
High chromium alloy	High chromium alloy (Cr-Cr-Mo alloy)	High chromium alloy (Al-Si alloy)	High chromium alloy (Cr-Cr-Mo alloy)	High chromium alloy (Steel)	High chromium alloy (Titanium)
Marballed cast iron	Marballed cast iron (Cr-Cr-Mo alloy)	Marballed cast iron (Al-Si alloy)	Marballed cast iron (Cr-Cr-Mo alloy)	Marballed cast iron (Steel)	Marballed cast iron (Titanium)
Flender metal	Flender metal (Cr-Cr-Mo alloy)	Flender metal (Al-Si alloy)	Flender metal (Cr-Cr-Mo alloy)	Flender metal (Steel)	Flender metal (Titanium)
Stainless steel	Stainless steel (Cr-Cr-Mo alloy)	Stainless steel (Al-Si alloy)	Stainless steel (Cr-Cr-Mo alloy)	Stainless steel (Steel)	Stainless steel (Titanium)
Carbon steel	Carbon steel (Cr-Cr-Mo alloy)	Carbon steel (Al-Si alloy)	Carbon steel (Cr-Cr-Mo alloy)	Carbon steel (Steel)	Carbon steel (Titanium)

a) Valve train type: Cr-Cr-Mo alloy, Cr-Cr-Mo alloy, Cr-Cr-Mo alloy, Cr-Cr-Mo alloy, Cr-Cr-Mo alloy, Cr-Cr-Mo alloy.

Table1.1. Combinations of cam and follower materials

Cam material Follower material	Carburized hardened steel (Cr,Cr-Mo steel)	Chilled cast iron (Low alloy)	Remelted cast iron (Low alloy)	Hardened cast iron (Low alloy)	Powder metal ferro-based alloy (High Cr alloy)
Carburized hardened steel (Cr,Cr-Mo steel)	Rare	D Common (Gas. or Diesel)	D Common (Gas)	Potential application	Potential application
Journal steel (SUJ2) (Roller type follower)	V (Gasoline)	S or R Common (Gas. or Diesel)	None	S (Gasoline)	V (Gasoline)
Chilled cast iron (Low alloy)	Common (Diesel)	S or V Common (Gas. or Diesel)	None	Known application	None
High chromium cast iron (12 ~30 wt%Cr)	None	S Common (Gas. or Diesel)	S Common (Gasoline)	None	S Common (Gasoline)
Hardened cast iron (Low alloy)	None	None	None	V Common (Gas. or LPG)	None
Powder metal ferro-based alloy (High Cr alloy)	None	R Common (Gas. or LPG)	R Common (Gasoline)	Potential application	Potential application
Silicon nitride ceramic or cemented carbide (Si3N4,WC-Co)	Known application	S or R Common (Diesel or LPG)	None	None	None

*) Valve train type: OHC engine, Direct type=D, Rocker arm type=R, Swing arm type=S, OHV engine, Tappet type=V

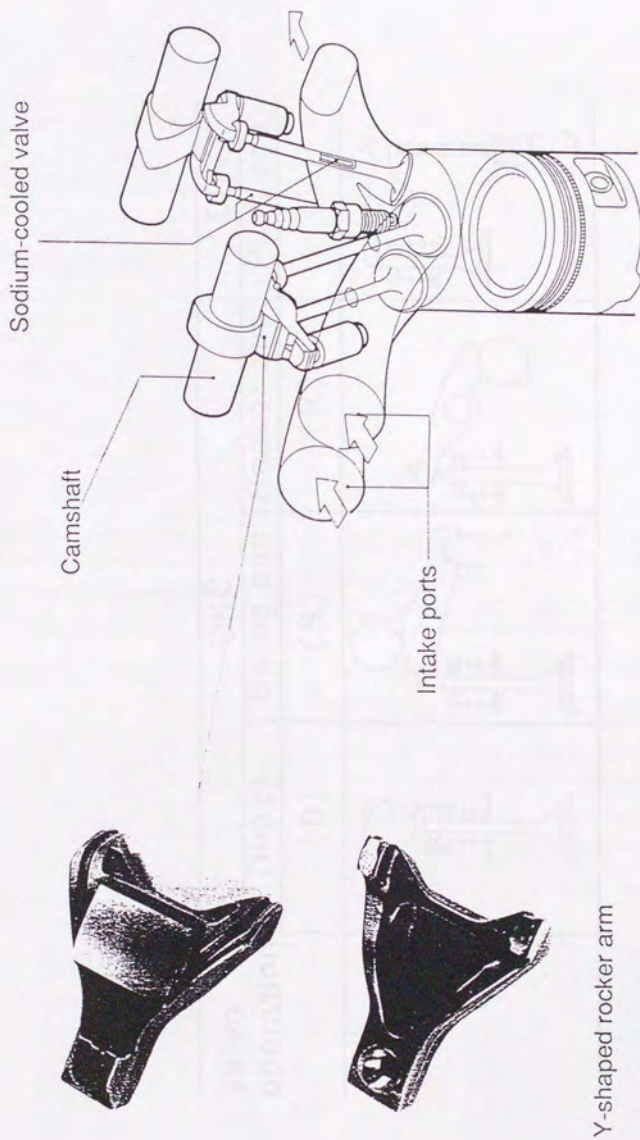


Fig.1.1 Rocker arms fashioned into valve train system of SR20DE engine

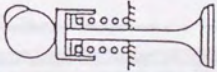
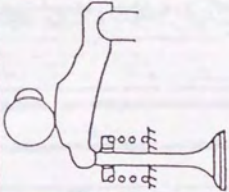
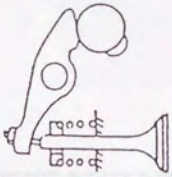
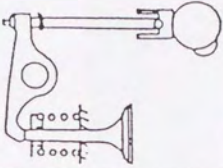
Valve operation	OHC			OHV
	Direct (D)	Swing arm (S)	Rocker arm (R)	
Sketch				

Fig.1.2 Types of cam & follower



d) Debris consisted of Silicon element (X-ray micro analysis)



c) Debris trapped in sinter pore $8 \mu m$



b) Cam sliding surface $0.1mm$



a) Fe-13wt%Cr powder metal cam



f) Pad sliding surface $6 \mu m$



e) Si_3N_4 rocker arm pad

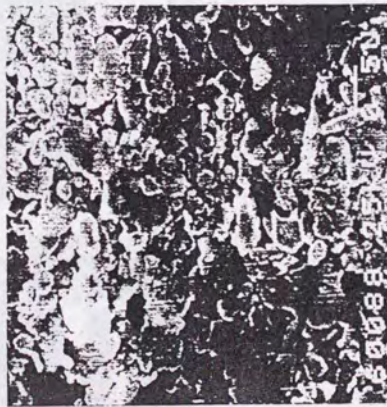
Fig. 1.3 Abrasive wear morphology



a) Severe wear following EGR 40% engine test 600h



c) Mild wear following EGR 0% engine test 800h



b) Fine debris collected from 40%EGR engine test oil



d) Thin plate debris collected from 0%EGR engine test oil

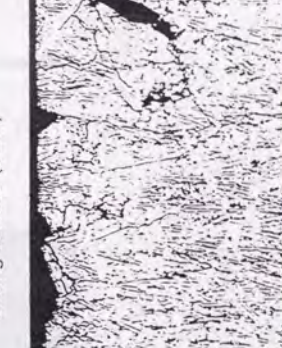
Fig.1.4 Morphology of corrosive wear debris



d) Cam nose top



b) Cracks propagated from sliding surface (SEM)



c) Microstructure of cross-section

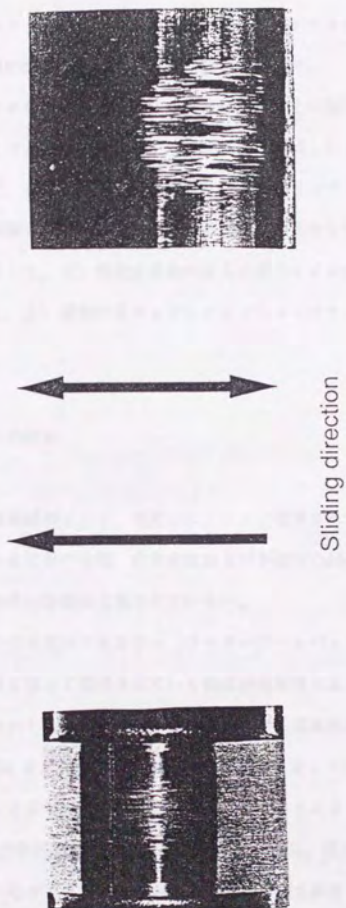


d) Pit formed on sliding surface (SEM)



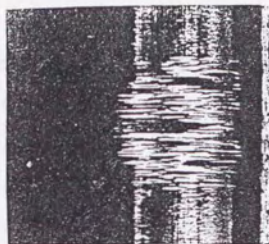
e) Microstructure of cross-section

Fig.1.5 Pitting wear morphology



a) Cam nose

Chilled cast iron



b) P/M follower

Fig.1.6 Surface conditions of cam nose & follower (Low speed test)

第2章 摩耗の実験

この章では、摩耗の実験に用いた材料および試験条件について説明する。

材料に関しては、フォロワーに種々の供試耐摩耗材料を使い、相手のカムシャフト材は一般的な低合金チルド鋳鉄に固定した。フォロワー材としては、異なる4社の材料メーカーが生産している材料および一部開発中の材料から、組織や機械的特性値を異にする16種類を選んだ。

試験方法としては、カムとフォロワーの摩擦条件が非常に苛酷な上に複雑なために、テストピースを用いた摩耗試験では実際にカムとフォロワー間に生ずる摩耗状況を再現しにくいと考え、実際のエンジン動弁系を用いた摩耗評価を選んだ。また、エンジンの駆動はファイアリングでは無くモータリングとした。その理由として、1) 今回の試験条件下では両者において摩耗量に大きな差異が見られないことが数回の耐久試験により確認済みであること、2) 燃焼生成物の混入に伴うオイル劣化やオイル通路の汚れが無いので試験の再現性が良好なこと、3) 実験作業およびエンジンのメンテナンスがしやすいことがあげられる。

2.1 フォロワーおよびカムの材料

試験に用いるフォロワー耐摩耗材料として、実際のエンジンに使用されている、もしくは使用が検討されている材料を選んだ。それら各材料の分類、化学組成および製法をTable 2.1 に示す。上述のような材料なので、微量元素添加元素や製造条件の詳細は公表されていない。

P1~P8は、ガソリンエンジン用のフォロワー（ロッカーアームパッド）材として広く採用されてきたり、耐摩耗性向上や原価低減を狙って開発されている鉄基焼結材料である。これらの材料は、硬さがHV400以上のパーライトないしはマルテンサイトを主体とする基体組織中に、HV1000以上の硬いM₇C₃炭化物（M: Cr, Feを主体に含有）が分散した組織を有している。P1は、本試験の標準材であるP3に対してモリブデンと炭素含有量を約2倍増加させることにより、炭化物析出量の増加を狙った材料である。Fig.2.1-1 a)の光学顕微鏡組織写真に見られるように、白く見える炭化物の析出量が多いがそれらはネットワーク状につながって存在している。基体は、硬さがHV486とそれほど高くはないことから、完全なマルテンサイトでなくて焼き戻しマルテンサイトもしくはベイナイト組織と考えられる。P2は、標準材P3に対して炭素量を1%増加させることで、炭化物析出量の増加を狙った材料である。Fig.2.1-1 b)の組織写真に示されるように、炭化物の析出量は狙い通りP3よりも多くなっている。また、炭化物はP1と異なり分散して存在しているが、P3材に見られる炭化物よりも粒径は大きくなっている。基体の硬さはHV545とP1材よりも若干高くなっている。P3材は、量産エンジンのフォロワー材料と

して採用されてきた実績があり、本試験の標準フォロワー材料として使用したものである。Fig.2.1-1 c)に示すように、細かい粒状炭化物が均一に分散した組織をもっている。また、焼結後焼入れ焼戻し処理をしているために、基地の組織はマルテンサイトとなり硬さはHV729と高い。P4は、P3材の原価低減を狙いクロムとモリブデン量を低減させ、その代わりに炭化物形成元素であるニオブを若干加えた材料であり、これもフォロワー材料として量産実績がある。Fig.2.1-1 d)に示したように、P3よりも炭化物はかなり粗大化している。P5は、P4材に対してニオブ量を高めることで炭化物の微細化を狙った材料である。Fig.2.1-1 e)の組織写真から、P4材に対して炭化物が多少微細化されていることがわかる。P6は、P1～P5材とは異なるメーカーの耐摩耗焼結材であり、これもフォロワー材料として量産の実績がある。組織では、Fig.2.1-1 f)に示すように、炭化物の大きさがP3とP5材のそれらの中間に位置している。また、基地はパーライト組織であり、その硬さもHV409と低い。P7は、P1～P5材と同一のメーカーの材料でクロム量を大幅に低減させて、その代わりに炭化物形成元素としてタングステンとバナジウムを加えたものである。Fig.2.1-2 g)の組織写真に見られるように、炭化物析出量は少なく、炭化物は粗大となっている。基地の硬さはHV412と軟らかく、パーライト組織で構成されている。P8は、これまでの2社とは異なるメーカーの耐摩耗材料であり、P7材よりもさらに合金元素量を低減させている。Fig.2.1-2 h)の組織写真を見ると、炭化物の析出状態はP7材に類似しているが、基地は焼入れ処理によりマルテンサイト化され、HV765という高い硬さを示す。また、P7とP8材においては、クロム量が少なく他の炭化物形成元素が添加されているので、M₇C₃以外の炭化物も形成されていると思われる。なお、以上のPシリーズ材料組織写真のエッチング溶液には、ナイトル（エチルアルコール90ml + 硝酸10ml）(1)を使った。

H1とH2は高速度鋼系合金粉末をベースとした焼結材料で、炭化物の析出量を増加させるのではなく炭化物の微細分散により耐摩耗性の向上を狙った開発材である。H1は、AISI規格のM7合金組成(2)の炭素量を0.5wt%に低減させた母合金粉末にFe-14%B粉末を混合したもので、真空焼結にて作製したものである(3)。Fig.2.1-2 i)の組織写真に示されるように、硬質析出物はPシリーズ材に比べるかに小さくなっている。これらの析出物は、数種類の炭化物と硼化物から構成されている。また、焼結後のガス冷却により基地はマルテンサイト組織が得られており、硬さもHV823とPシリーズ材よりもさらに高くなっている。H2は高速度鋼系成分の合金粉末を真空焼結したものである。Fig.2.1-2 j)の組織を見ると、H2材ではH1材に比べて硬質相の析出量は多いが、所々に連なった大きな炭化物が見られる。基地は、H1材と同様にマルテンサイトとなっており、HV826の硬さが得られている。なおH1材の材料組織のエッチング溶液には村上試薬（蒸留水100ml + 水酸化カリウム10g）(1)、H2材にはナイトル溶液を使った。

TCとSNは硬質の非鉄金属材料および非金属材料で、比較のために用いたものである。TCはいわゆる超合金であり(4)(5)、ベンツのロッカーアームパッドとしての採用されたものを狙った組成で焼結されたものである。光学顕微鏡では金属のような組織写真が得られないので、走査電子顕微鏡により硬質相とバインダー相との凹凸像を見ることにした。Fig.2.1-2 k)に示すように、角ばった硬質のタングステンカーバイドがコバルトバインダー相にて結合された組織となっている。SNは常圧焼結した窒化珪素セラミックス材であり、日本のタクシーに汎用されているLPGエンジン用のロッカーアームパッドとしての採用実績がある(6)。組織は、fig.2.1-2 l)のSEM像によってもTC材の組織のように硬質相とバインダー相との区別が付けられなかった。

C1、C2およびC4は鋳鉄である。C1とC2は高クロム合金鋳鉄材で、従来からガソリンエンジン用のロッカーアーム式フォロワー材料として使用されてきたものである(1-5))。C1はクロム量を27wt%と多くし、鋳造後放冷で作製したものであり、Fig.2.1-3 m)の光学顕微鏡写真のような組織となっている。M7C3型を主体とする炭化物は、先のPおよびHシリーズの焼結材とは大きく異なって粗大な棒状析出物であり、その量は今回用いた金属材料の中で最も多くなっている。基地は、HV400と低い硬さであり、パーライトと残留オーステナイト相から構成されている。C2はクロム量を18wt%として鋳造されており、Fig.2.1-3 n)のような組織を示す。炭化物はC1材よりも細いがやはり棒状に伸びた形状を示す。基地は、硬さHV450とC1材よりも若干硬く、残留オーステナイト相は見られずパーライト相だけから構成されている。これらの高クロム鋳鉄材料のエッチング溶液にはマープル試薬(塩酸50ml + 硫酸銅飽和水溶液25ml)(1)を使った。C4は、クロム量が1wt%と低い低合金のチルド鋳鉄材料であり、非常に廉価であるためにカムシャフトをはじめとする耐摩耗材料として汎用されてきた。Fig. 2.1-3 o)に示すように、棒状のセメンタイト炭化物が軟らかい(Hv353)パーライト相に多量に析出した組織となっている。エッチング液にはナイトルを用いた。

最後のSTは、低合金鋼のSCM415材を浸炭後、塩浴軟窒化(サフト)処理したものである。この浸炭材料は、主にFig.1.2に示される直動型のカムフォロワーのリフターやシムに汎用されている(1-16))のものであり、ここではロッカーアームフォロワーへの適用のために、塩浴軟窒化処理を追加することで耐摩耗性向上を図った。Fig.2.1-3 p)に示すようにパーライト組織の表面に窒化物からなる10 μ m程度の硬質の化合物層が形成された組織とした(7)(8)。なお、エッチング液にはナイトルを使った。

試験に用いたカムシャフト材は、上述のC4材と多少の成分が異なるものの、材料特性値や金属組織はほとんど同等とみなせる。

2. 2 摩耗試験片

フォロワーは、これらの材料を用いてFig.2.2の写真にみられる形状のロッカーアームパッドを作製し、フォロワー部に配置してADC12の組成を有するアルミ合金をダイキャスト成形することにより、アルミ合金でパッドを鋳込み締結したロッカーアーム粗材を作製した。さらに、カムと摺動するフォロワー表面は、カム摺動方向に直角に研磨し、表面粗さで $Ra 0.21 \sim 0.59 \mu m$ に仕上げた。但し、超硬合金TCと窒化珪素SNはパッドの状態では研磨により、表面粗さ $Ra 0.2 \sim 0.3 \mu m$ に仕上げし、鋳込んだ後の摺動面は無加工とした。全てのフォロワー材の表面クラウニング量は、カム摺動方向に直角に $5 \sim 10 \mu m$ の範囲であった。

相手のカムシャフトは、試験に用いたエンジンの量産品であり、材料は0.7wt%のクロムを含有した低合金チルド鋳鉄で、表面はカム摺動方向と平行にグラインダーでカム研磨し、 $Ra 0.11 \sim 0.54 \mu m$ に仕上げている。

2. 3 摩耗試験の条件

上述のフォロワーおよびカムシャフトを実際の市販エンジンの動弁系に組み込み、耐摩耗性の評価を行った。その条件をTable.2.2に示す。使用したエンジンは日産CA18直列4気筒OHC型ガソリンエンジンで、フォロワー（ロッカーアーム）とカムシャフトはFig.2.3に示されるように配置してある。フォロワーは、エンジン1台で吸気側と排気側で1気筒2個、4気筒で合計8個しか組み込めないで、各試験に際しては標準材としてP3を1気筒に2個組み入れ、残りの3気筒の各気筒に種々の試作材2個をそれぞれ組み込んだ。この標準材P3のカムおよびフォロワー摩耗量を測定することによって、各試験間のばらつきを把握した。また相手のカムシャフトは、各々の試験ごとに同じ仕様の量産品の新品を組み込んだ。

試験はエンジンのモータリングで行ない、低速・高速の2条件とした。主体は低速試験で、従来より「スカuffing」摩耗が発生しやすく摩耗に厳しいことが知られている、アイドル回転数600rpmに設定した(1-(26))(9)。高速試験は、低速試験の「スカuffing」摩耗が高速でいかに軽減されるかを確認するため、Table2.1に示したフォロワー材の中から12種類を選んで補助的に実施したものである。

通常の運転条件では摩耗量がきわめて小さいので、加速試験を行なうこととし、バルブスプリングを強化してリフト荷重を増大させた。特に、高速試験では回転数の上昇に伴う慣性重量の低減に起因する接触圧力の低下(10)を補うために、リフト荷重を60%と大幅に増大させた。

潤滑油には、ガソリンエンジン用 S F 級 7.5W-30 の市販品を用いた。各試験開始時に、新油と新品のオイルフィルターに交換し、エンジンを軽く回して潤滑系のフラッシングを行なった後、再び各々新品に替えて試験を実施した。

油温を、実際のエンジン稼働時として妥当な範囲の中で選び、低速試験では低油温の 50℃とし摺動面における摩耗防止剤の化学反応を抑制することにより、高速試験では逆に油温を 110℃と高めることで低粘度による流体潤滑効果の低下によって、それぞれ「スカuffing」摩耗発生の促進を狙った。油温は、エンジン内の冷却水通路に外部より水ないしはスチームを流し、その流量を調節することで制御し、オイルパンの油温を低温試験では 50 \pm 2℃に、高温試験では 110 \pm 10℃に保った。

試験は、Fig.2.4 の外観写真に見られるような試験ベンチ 3 箇所、同一仕様の 3 台のエンジンを用いて実施した。カムシャフトは、外部の AC 電気モータにより V ベルトを介してエンジンクランクシャフトを回転させて駆動した。

2. 4 摩耗量の測定方法

カムおよびフォロワーの摩耗量としては、計測上の簡便性に加えて、バルブのリフト量やタイミングに直接影響を及ぼす量として、初期加工面が残存している未摺動部と摩耗した摺動部との段差を、表面粗さ計もしくは三次元形状測定器を用いて測定した。Fig.2.5 に示すように、カムについてはノーズトップ部をカム軸方向に、フォロワーについてはカムとの摺動方向に沿ってトレースし、それらの未摺動部との段付き量の最大値を各々の摩耗深さとして求めた。前述したように、1 気筒の吸気と排気側に 1 箇所ずつ供試材料のフォロワーを用いているので、それらの摩耗深さの平均値をもって摩耗量を表すことにした。

第 2 章の参考文献：

- (1) Gunter Petzow, (訳者) 松村源太郎：金属エッチング技術，アグネ，(1977) 66.
- (2) Handbook of Comparative World Steel Standards：海外技術資料研究所
- (3) 藤木章・馬来義弘・加納 真・谷本一郎：粉体および粉末冶金，35，3，(1988) 118.
- (4) JIS ハンドブック 非鉄：日本規格協会，(1982) 617.
- (5) 鈴木 ひさし編：超硬合金と焼結硬質材料，基礎と応用，丸善，(1986).
- (6) Y.Ogawa,M.Machida,N.Miyamura,K.Tashiro and M.Suguro：SAE Paper, 860397.

(7) 滝島 延雄 : 鉄と鋼, 第70年, 6, (1984) 492.

(8) 工藤 績 : 鋳鍛造と熱処理, (90.10) 29.

(9) 山下 宏・井沢 信一郎・真田 誠: 自動車技術, 44, 8, (1990) 58.

(10) D.Dowson, P.Harrison and C.M.Taylor : Fluid Film Lubrication, Paper XI(ii), (1987) 305.

Table 2.1 Follower materials

No.	Category	Main chemical composition, % by weight	
P1	High chromium content ferro-based powder metal	Fe - 15Cr - 9Mo - 4C	Casting
P2		Fe - 16Cr - 4Mo - 3C	
P3		Fe - 16Cr - 4Mo - 2C	
P4		Fe - 12Cr - 1Mo - 0.3Nb - 2C	
P5		Fe - 12Cr - 1Mo - 1Nb - 2C	
P6		Fe - 11Cr - 1Mo - 2Ni - 2C	
P7		Fe - 5Cr - 2W - 1Mo - 1V - 2C	
P8		Fe - 5Cr - 2W - 0.4Mo - 0.2V - 2C	
H1	Powder metal based on high speed steel	Fe - 4Cr - 8Mo - 2W - 2V - 1B - 0.5C	Casting
H2		Fe - 4Cr - 10Mo - 4V - 2C	
TG	Coated carbide	WC - 9Co	Hot forging
SN	Silicon nitride ceramic	Si ₃ N ₄ - MgO - CeO ₂ - ZrO ₂ - SiO ₂	
C1	High chromium cast iron	Fe - 27Cr - 3C	Casting
C2		Fe - 18Cr - 1Ni - 3C	
C4	Low alloy chilled cast iron	Fe - 1Cr - 0.3Ni - 0.2Mo - 0.02B - 3C	Hot forging
ST	Low alloy steel	Fe - 1Cr - 0.2Mo - 0.4C	
Cam	Low alloy chilled cast iron	Fe - 0.7Cr - 2Si - 0.04Mn - 0.2P - 3C	Casting

Table 2.1 Follower materials

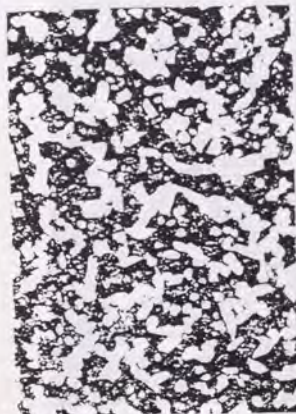
No.	Category	Main chemical composition, %by weight	Process
P1	High chromium content ferro-based powder metal	Fe - 16Cr - 9Mo - 4C	Sintering
P2		Fe - 16Cr - 4Mo - 3C	
P3		Fe - 16Cr - 4Mo - 2C	
P4		Fe - 12Cr - 1Mo - 0.3Nb - 2C	
P5		Fe - 12Cr - 1Mo - 1Nb - 2C	
P6		Fe - 11Cr - 1Mo - 2Ni - 2C	
P7		Fe - 5Cr - 2W - 1Mo - 1V - 2C	
P8		Fe - 5Cr - 2W - 0.4Mo - 0.2V - 2C	
H1	Powder metal based on high speed steel	Fe - 4Cr - 8Mo - 2W - 2V - 1B - 0.5C	
H2		Fe - 4Cr - 10Mo - 4V - 2C	
TC	Cemented carbide	WC - 9Co	
SN	Silicon nitride ceramic	Si ₃ N ₄ - MgO - CeO ₂ - ZrO ₂ - SrO	
C1	High chromium cast iron	Fe - 27Cr - 3C	Casting
C2		Fe - 18Cr - 1Ni - 3C	
C4	Low alloy chilled cast iron	Fe - 1Cr - 0.3Ni - 0.2Mo - 0.02B - 3C	
ST	Low alloy steel	Fe - 1Cr - 0.2Mo - 0.4C	Hot forging
Cam	Low alloy chilled cast iron	Fe - 0.7Cr - 2Si - 0.8Mn - 0.2P - 3C	Casting

Table 2.2 Wear test conditions

Engine	SOHC 4-cyl. 1.8 liter	
Operation	Motoring	
Camshaft	Low alloy chilled cast iron	
Test mode	Low speed	High speed
Eng. speed	600 rpm	4000rpm
Duration	200h	170h
Valve spring	18% higher load	60% higher load
Oil type	7.5W-30 (SF grade)	← —
Oil temperature	323K (50°C)	383K (110°C)



a) P1 : White precipitates; $(Fe,Cr)_7C_3$
Matrix : Bainite ~ Martensite



b) P2 : White precipitates; $(Fe,Cr)_7C_3$
Matrix : Martensite



c) P3 : White precipitates; $(Fe,Cr)_7C_3$
Matrix : Martensite



d) P4 : White precipitates; $(Fe,Cr)_7C_3$
Matrix : Martensite

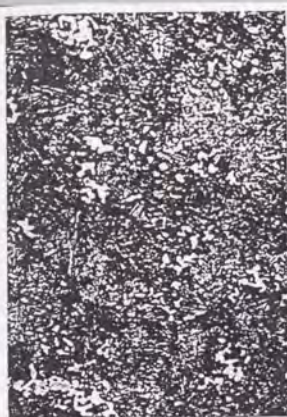


e) P5 : White precipitates; $(Fe,Cr)_7C_3$
Matrix : Bainite



f) P6 : White precipitates; $(Fe,Cr)_7C_3$
Matrix : Pearlite

Fig. 2.1-1 Microstructures of follower materials



j) H1 : White precipitates;
(W,Mo)₂FeB₂/(Fe,Cr)₂Calc.
Matrix : Martensite



h) P8 : White precipitates; (Fe,Cr)₂Ca
Matrix : Martensite



g) P7 : White precipitates;(Fe,Cr)₂Ca
Matrix : Pearlite



i) H2 : White precipitates;
(Fe,Cr,V)₂Ca₂/(Fe,Mo)₂Calc.
Matrix : Martensite

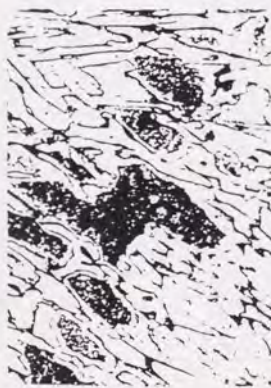


k) TC : Gray part ; Tungsten carbides $\frac{5 \mu m}{x1600}$
Binder part ; Cobalt (SEM)



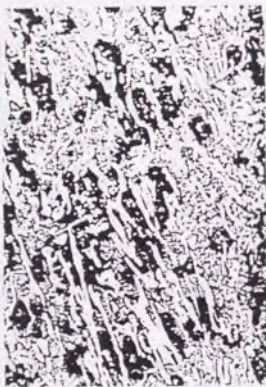
l) SN : Silicon nitride (SEM) $\frac{5 \mu m}{x1600}$

Fig. 2.1-2 Microstructures of follower materials



m) C1 White precipitates; $(Fe,Cr)C_3$
Matrix ; Pearlite+retained austenite
(Gray massive part)

25 μm



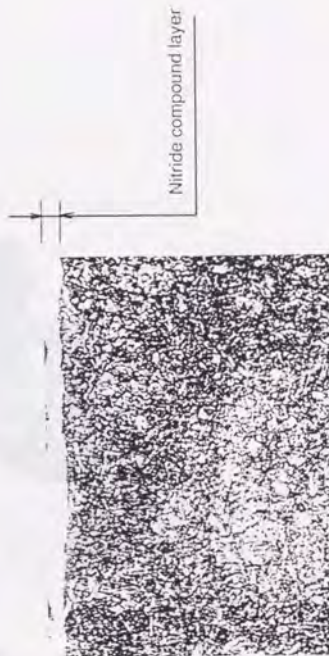
n) C2 : White precipitates; $(Fe,Cr)C_3$
Matrix ; Pearlite

25 μm



o) C4 : White precipitates; Fe_3C
Matrix ; Pearlite

20 μm



p) ST : Matrix ; Pearlite

Nitride compound layer

Fig.2.1-3 Microstructures of follower materials

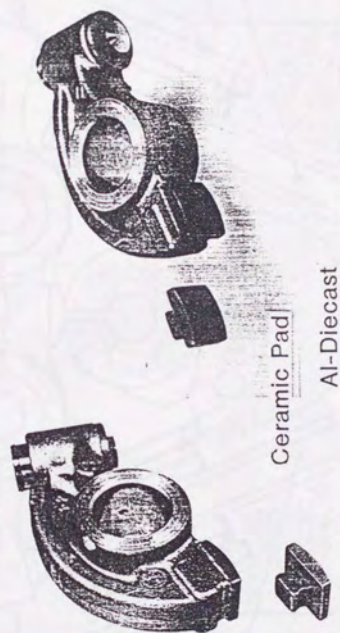


Fig.2.2 Rocker arm pad fashioned into follower

Cam follower(rocker arm)

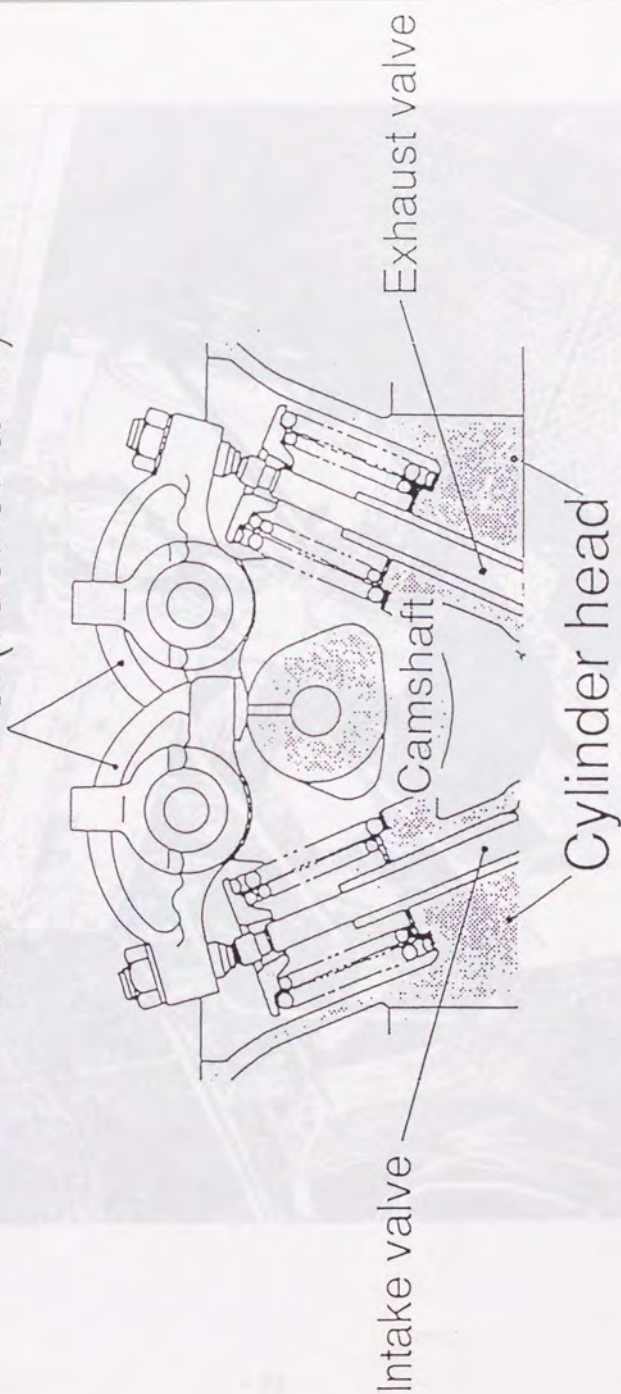


Fig.2.3 Arrangement of cam & follower

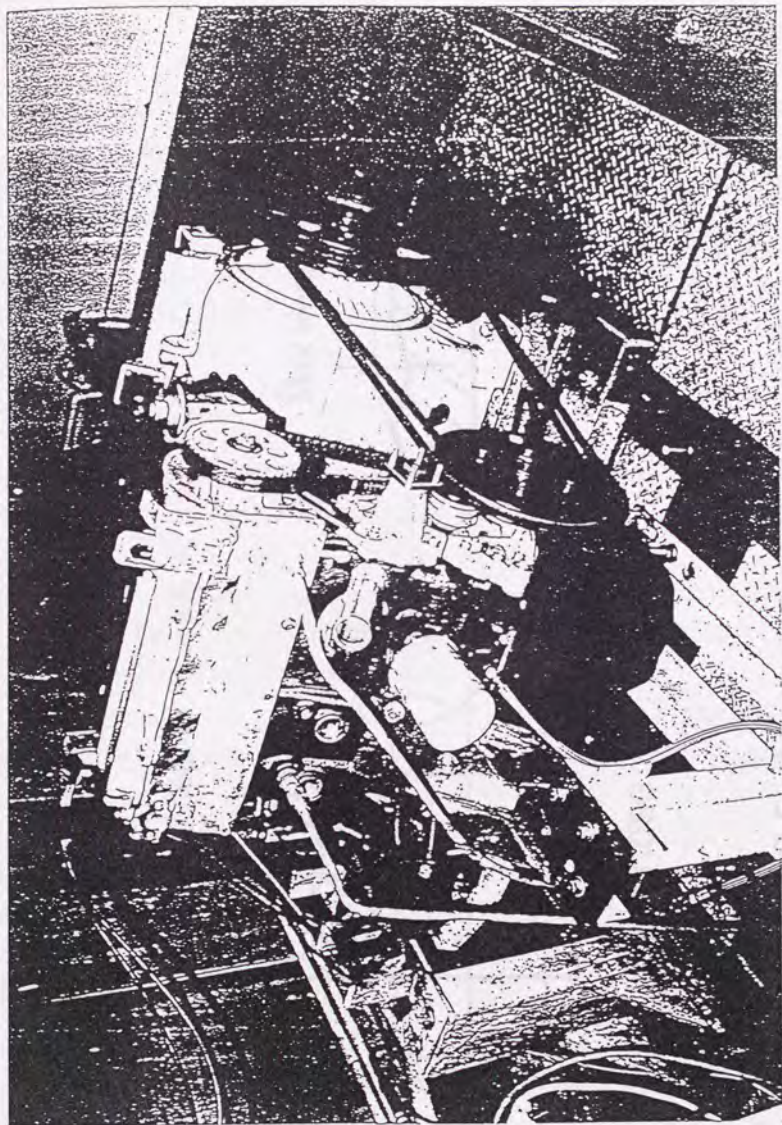


Fig.2.4 Engine test rig

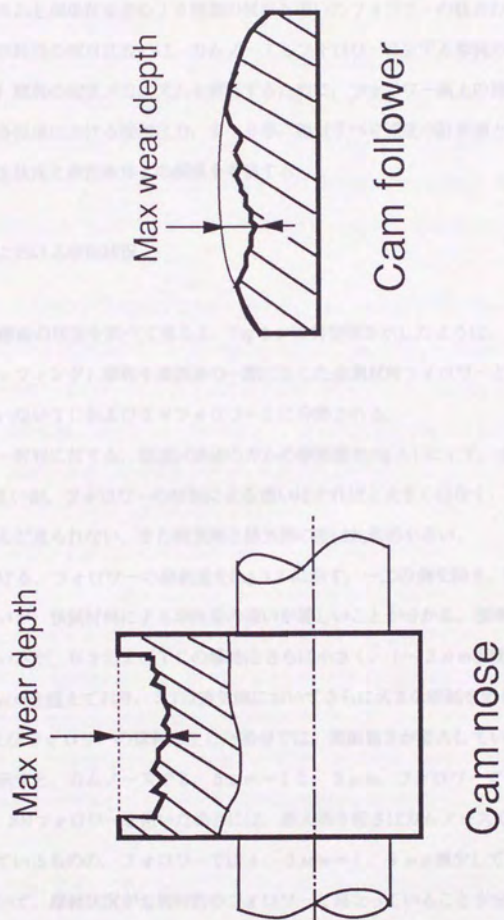


Fig.2.5 Measurement of wear

第3章 摩擦条件と摩擦

本章では、実際のエンジンを用い、低速および高速の耐久試験を実施して、量産車に用いられている低合金チルド鋳鉄のカムと標準材を含む16種類の材料を用いたフォロワーの組合わせにおける摩擦量を測定する。材料の耐摩擦性の相対比較には、カムノーズとフォロワーに生ずる摩擦の最大深さを用いるが、「スカuffing」摩擦の発生メカニズムを解析するために、フォロワー面上の摺動方向に沿った摩擦深さの分布を調べ、各位置における接触圧力、すべり率、相対すべり速度の計算値と比較して、「スカuffing」摩擦の発生状況と摩擦条件との関係を考察する。

3. 1 低速試験における摩擦状況

低速試験後の摩擦面の状況を調べて見ると、Fig.1.6 に典型例を示したように、1. 3に述べた現象的な意味での「スカuffing」摩擦を摩擦面の一部に生じた金属材料フォロワーと、「スカuffing」摩擦を全く生じていないTCおよびSNフォロワーとに分類される。

各供試フォロワー材料に対する、低速試験後のカムの摩擦量をFig.3.1に示す。全体として摩擦量が $10\mu\text{m}$ 以上と大きい、フォロワーの材料による違いはそれほど大きくはなく、次のフォロワーの摩擦量との相関もほとんど見られない。また吸気側と排気側の差は比較的小さい。

同じ試験後における、フォロワーの摩擦量をFig.3.2に示す。一二の例を除き、吸気側と排気側の差はそれほど大きくないが、供試材料による摩擦量の違いが著しいことが分かる。標準材のP3はまずまずの耐摩擦性を示しているが、H2およびTCの摩擦はさらに小さく、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度であるのに比べ、C4の摩擦量は $100\mu\text{m}$ を超えており、STは排気側においてさらに大きな摩擦を示した。

P3材のカムおよびフォロワーの摩擦を生じた部分では、表面粗さが増大していて、最大高さ粗さの初期値からの変化で示すと、カムノーズで $2.5\mu\text{m}\rightarrow 12.3\mu\text{m}$ 、フォロワーで $4.3\mu\text{m}\rightarrow 7.5\mu\text{m}$ となっている。SNフォロワーを用いた場合には、最大高さ粗さはカムノーズで $2.1\mu\text{m}\rightarrow 4.2\mu\text{m}$ とやや増大しているものの、フォロワーでは $4.3\mu\text{m}\rightarrow 1.9\mu\text{m}$ 減少しており、いわゆる鏡面に近い状態になっていて、摩擦状況が金属材料のフォロワーと異なっていることが分かる。また、各フォロワー材の耐久前後の最大表面粗さの変化 Fig.3.3 に示すように、フォロワーの鏡面化は、フォロワーの摩擦量が小さいTC材やH2材にも見られる。

3. 2 高速試験における摩耗状況

低速試験と異なり、高速試験を行なったフォロワーには、どの材料の場合も上述したような粗さの増加が見られず、寸法変化として測定可能な摩耗を生じなかった。

一方、高速試験後におけるカムには、Fig.3.4 に示す摩耗量が測定された。SNフォロワーに対するカムの摩耗量のみが、約 $50\mu\text{m}$ と飛び抜けて大きいのが、他のフォロワー材に対するカムの摩耗量は全て $10\mu\text{m}$ 以下で、低速試験の場合の $1/10$ に過ぎず、フォロワー材料による差もずっと小さい。なお、標準材 P 3 のフォロワーを用いた場合について、6 回の試験を行なって再現性を調べたところ、カムの摩耗量は $2\sim 6\mu\text{m}$ の範囲にあり、データ間の相対誤差は大きいものの、摩耗量のレベルとしてはそろっているものと判断した。

SN については、カムの摩耗量は極端に大きいものの、Fig.3.5 に示すようにその摩擦面はなめらかであり、「スカuffing」摩耗は生じていないものと判断される。カムノーズのプロファイルに見られる傾きは、フォロワーのロッカーアームの傾きに起因する片当たりによるものである。

以上の結果から、高速試験においては、バルブスプリングの荷重を 60% も増加させたにもかかわらず、「スカuffing」摩耗は発生しないことが分かった。

3. 3 「スカuffing」摩耗の起点と摩擦条件

低速試験で金属材料のフォロワーに発生した「スカuffing」摩耗のメカニズムを解析するために、試験に用いたエンジンの動弁系の諸元を用いてカムとフォロワーの摩擦条件を計算した(1)。但し以下の計算は準静的なもので、慣性力の影響は考慮していない。

ここで、摩擦条件として注目したのは、平均ヘルツ圧 P 、フォロワーのすべり率 SF およびカムとフォロワーの相対すべり速度 V^* であり、それぞれ次のように定義される。

$$P = \left[(1/R_c + 1/R_f) \cdot W/b \right]^{1/2} \dots\dots\dots [1]$$

$$SF = (V_c - V_f) / V_f \dots\dots\dots [2]$$

$$V^* = V_c + V_f \dots\dots\dots [3]$$

但し、式中の記号は次のとおりである。

R_c : カムの曲率半径, mm

R f : フォロワーの曲率半径, mm

W : 負荷荷重, N

b : 接触幅, mm

V c : カム上の接触線のすべり速度, mm/rad

V f : フォロワー上の接触線のすべり速度, mm/rad

平均ヘルツ圧Pとすべり率SFは接触部における発熱量を、相対すべり速度 V^* は油膜のくさび効果を支配する要因である (2-(9)) (2)。

吸気側のカム、フォロワーについて、低速試験の条件を用いて計算した結果を、カム軸の回転角の関数としてFig.3.6に示す。カムプロフィールに沿って、図の左から右に向かって -60° のイベント部からリフトを開始し、 -41° 付近で大きくリフトし、これに伴いPも著しく増加する。 -41° は、フォロワー面上の接触線の折り返し部に対応するので、SFの絶対値は無限大となる。 V^* は -41° を超えると著しく小さくなって行く。Pはトップリフト 0° を挟み、下りの 40° 付近まで600MPa前後の高面圧を維持している。この面圧は、すべり接触が支配的な摺動部品としては、他の自動車部品には見当たらないほどの高い値である。 V^* はトップリフトを過ぎた 20° 付近と 40° 付近で0の値を交差して行く。ここで 40° は、フォロワー面上の接触線の折り返し部（前述と反対側）に対応し、SFの絶対値は垂直に立ち上がっている。今回実験に用いたエンジンの動弁系においては、吸気側と排気側でカムのプロフィールが全く逆になっているので、排気側ではカム軸の回転に伴いFig.3.6の横軸を右から左にたどることになる。

このような摩擦条件にある、フォロワー面上の摺動方向に沿った摩耗深さの変化を、標準材P3の例についてFig.3.7および3.8に示す。カムシャフトの回転に伴うフォロワー面上の接触位置の移動をそれぞれ右上に描いてあるが、Fig.3.7に示した吸気側の場合には、この図でいうと中央付近でリフトを開始し、左端で折り返した後最大リフトに達した後、再び右端で折り返して中央付近でリフトを終了する。Fig.3.8に示した排気側では移動方向が吸気側と逆になる。

Fig.3.7に示した吸気側のフォロワーにおける摩耗深さの変化をFig.3.6と比較しながらみると、カムの回転角 -41° のすべり率が ∞ となる点、すなわちフォロワー上における接触部の最初の折り返し点から「スカuffing」摩耗が始まっていると判断される。これに対しFig.3.8に示した排気側のフォロワーでは、すべり率の ∞ となる折り返し点がリフトの終了時になり、回転角 -14° のすべり速度が0となる点あたりから「スカuffing」が始まっていると判断される。なお、数種の金属材料フォロワーの相手カムにおけるこの点に対応する位置付近には、Fig.3.9に示すようなピッチングがスカuffing痕中に

観察された。

3.4 考察

3.4.1 「スカuffing」 摩耗におよぼすエンジン回転速度の影響について

低速600rpmと高速4000rpmの耐久試験の結果から、高速においては「スカuffing」摩耗が全く発生しないことが示された。この結果は、エンジン低回転速度において、潤滑状態が境界潤滑から混合潤滑の範囲にあるためと考えられる。エンジン回転数の上昇に伴い、〔3〕式のオイル巻き込み速度の増大および慣性重量の増加による接触圧の低下(2-(10))によって、カム、フォロワー間の潤滑状態が混合潤滑から流体潤滑条件に近づく結果、「スカuffing」摩耗が4000rpmでは発生しなくなったものと考えられる。カム、フォロワー間の摩擦係数は、低速時では0.1~0.2、高速時には0.1以下と低下し(3)~(7)、これは上述した潤滑状態の変化に対応するが、高い摩擦係数が「スカuffing」摩耗の原因であるのか、あるいは両者が潤滑状態の変化によるパラレルな結果であるのかは、この段階では分からない。

3.4.2 「スカuffing」 摩耗と摩擦条件との関係について

従来の研究においては、オイル巻き込み速度 V^* が0となる点と、PV値が大きくなってSFが大きい点が「スカuffing」摩耗の起点として解析されている(2-(9))(2)(8)(9)。しかしながら、どの報告も、実際の摩耗起点がどちらかであることを明確にしているわけではなく、両方が「スカuffing」摩耗の発生に大きな影響をおよぼしていることを指摘するに止まっている。

フォロワーの摩耗深さが最大になる位置と、上述した二つの点の関係を検討してみると以下のようになる。

吸気側： 最初の折り返し点 $SF=-\infty$ ：(カム角、-41度) ~ 最大リフト部：(0度)の間

排気側： オイル巻き込み速度 $V^*=0$ ：(-14度) ~ 最大リフト部：(0度)の間

また、フォロワー上のスカuffingの起点と見られる位置との関係は以下の通りである。

吸気側： $SF=-\infty$

排気側： $V^*=0$

$SF=-\infty$ の位置では、フォロワー上の接触線の移動速度 V_f が0で純すべりの状態となるために、摩擦発熱による温度上昇が大きく、粘度の低下による局所的な油膜切れが生じやすいと考えられる。また、 $V^*=0$ の位置では、カムとフォロワー上で接触線が等速で逆方向に移動するするために、理論上流体潤滑状態となる。

滑効果が全くないことになる。Fig.3.9 に示したように、排気側のカムノーズ部に形成されたピッチング損傷がほぼこの $V^*=0$ の部分に位置することも、この理由によるものと考えられる。

これらの結果から、この「スカuffing」損傷が、カムリフト時の最初の潤滑状態が苛酷となる点を起点として発生していることになる。

さらに、エンジンの吸気側と排気側において、カム、フォロワー間の潤滑状態の違いに加え、摩耗粉の噛み込みやすさの違いにより、アブレイシブ摩耗によるカム、フォロワーの摩耗量に大きな違いが見られたという報告もある(10)。今回の低速試験後のカムおよびフォロワーの摩耗量は、どのフォロワー材料においても吸気側と排気側では同等であった。この違い一つの要因としては、摩耗量に差を生じた上述の実験に用いたエンジンのフォロワーがFig.1.2のスウィングフォロワー式であり、フォロワーの上にカムが配置されており、フォロワー上に溜まった摩耗粉によるアブレイシブ作用が生じうるのに対して、今回の試験に用いたエンジンのフォロワーはロッカーアーム式でフォロワーの下にカムがあるために、それが機構上生じないことが考えられる。また、上記の実験におけるエンジン回転数は1500rpm～3600rpmであるのに対して、本実験でもっと低速の600rpmであるために、潤滑条件ははるかに厳しく、「スカuffing」摩耗の量がアブレイシブ作用により大きくなって、そのような差異が認められなかったのかもしれない。

3.5 第3章のまとめ

第3章においては、実際のエンジンを用いたカム、フォロワーの摩耗試験によって「スカuffing」摩耗がどのような条件下で発生するのかを、量的な面から調べた。結果をまとめると以下のようになる。

(1) 低速耐久試験においては、金属材フォロワーに「スカuffing」摩耗が発生したが、超硬合金と窒化珪素材フォロワーには発生しなかった。

(2) 高速耐久試験においては、どのフォロワー材についても、カムおよびフォロワーともに「スカuffing」摩耗は生じなかった。

(3) 低速試験におけるフォロワーの摩耗量は、供試材料によって大幅に異なったが、それと組み合わせたカム摩耗量のフォロワー材料による差は、それに比べると小さかった。

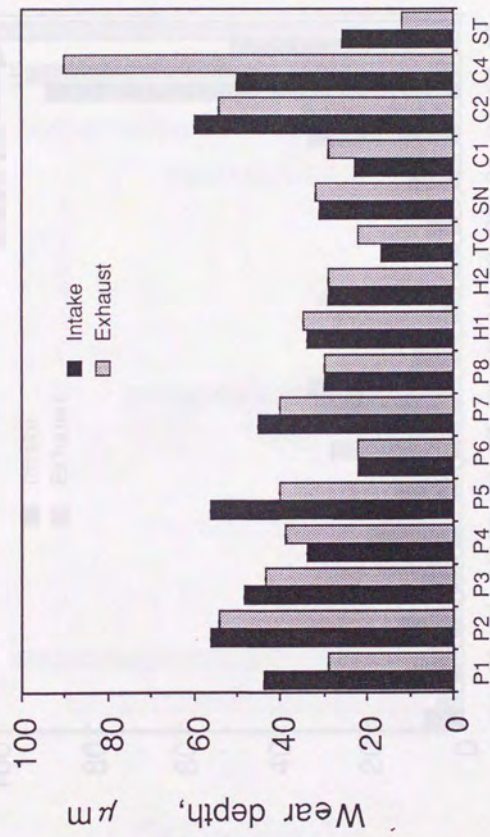
(4) 吸気側と排気側とにおいて、カムおよびフォロワーの摩耗量やスカuffingの程度には大きな差は見られなかった。

(5) スカuffingは、吸気側がフォロワーのすべり率 SF の絶対値が無限大となる接線の折返し部を、排気側がオイルの巻き込み速度 $V^*=0$ の部位を起点として発生しており、最大摩耗深さはそれらの部位

と最大リフト部との間に位置していた。いずれの場合も「スカuffing」摩耗は潤滑条件の苛酷な点を起点としている。

第3章の参考文献：

- (1) M.J.Neale (ed.) "Tribology Handbook, Butterworths ,(1973) A23
- (2) A.Dyson : Tribology International June (1980) 121.
- (3) S.Bair, J.A.Griffioen and W.O.Winer : Journal of Tribology, Transactions of the ASME, 85-Trib-4 , 1.
- (4) 保田 芳輝・有田 正司：潤滑学会トライボロジー会議予稿集，東京1991.5 ,117.
- (5) 中原 綱光・山地 正高・京極 啓史：潤滑学会トライボロジー会議予稿集，盛岡，1992-10，703.
- (6) 加藤亨・保田 芳輝；自動車技術会学術講演会前刷り集924，1992-10，85.
- (7) A.D.Ball, D.Dowson and C.M.Taylor : Tribological Design of Mechanical Elements, (1989) 111.
- (8) M.Miorali and A.Chiarottino : SAE Paper 811226.
- (9) T.Colgan and J.C.Bell: SAE Paper 892145.
- (10) E.T.King and G.K.Chul : SAE Paper 892149.



Follower materials

Fig.3.1 Intake & exhaust cam wear after low speed test

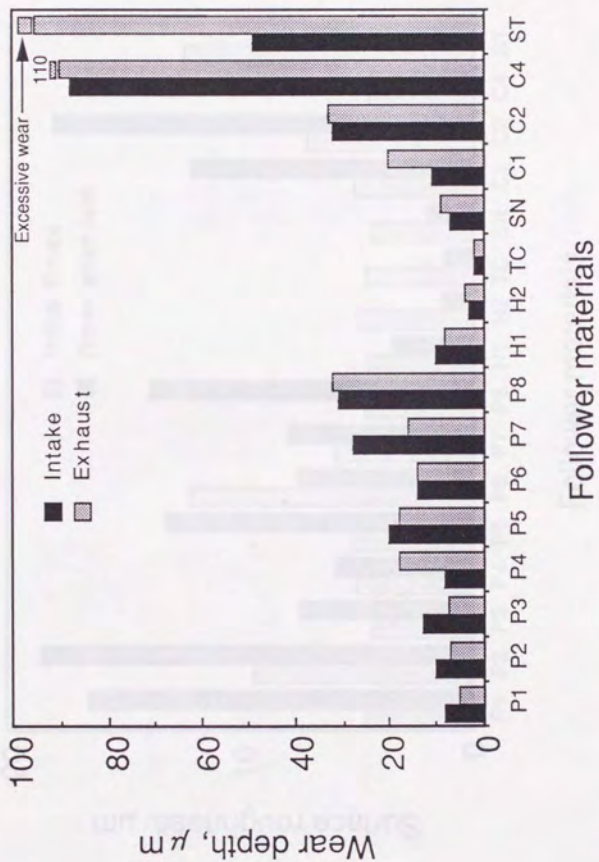
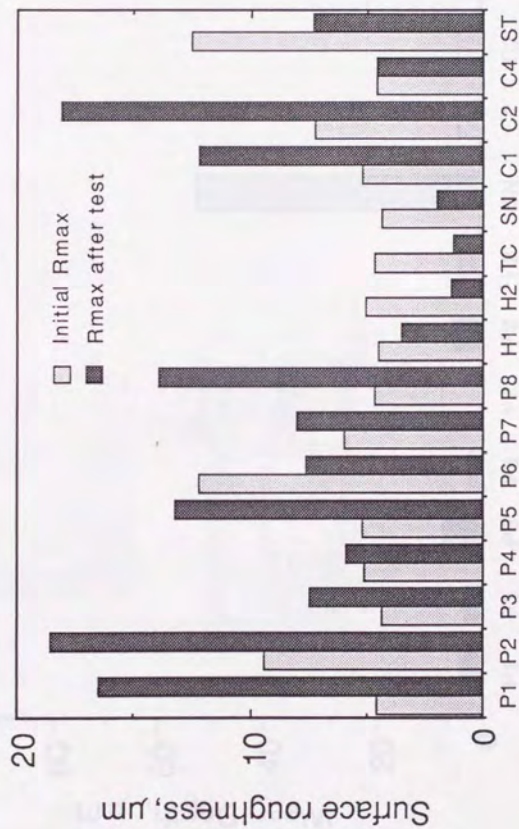


Fig.3.2 Intake & exhaust follower wear after low speed test



Follower materials

Fig3.3 Change of surface roughness

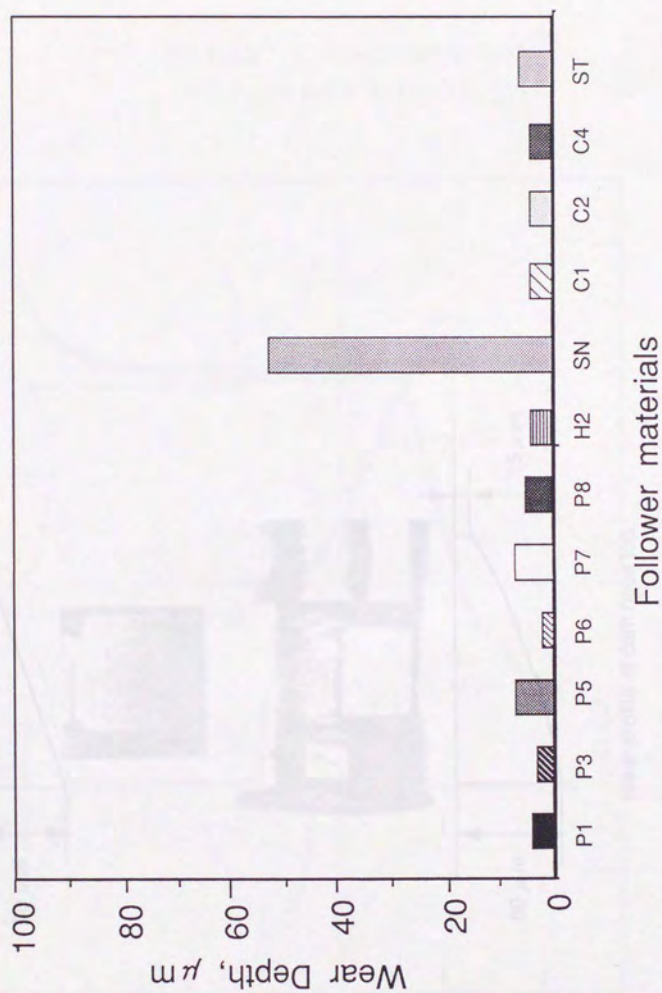


Fig. 3.4 Cam wear after high speed test

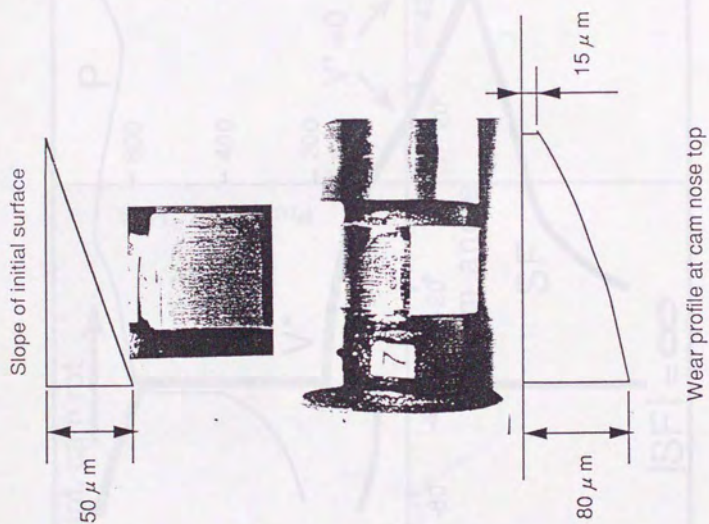


Fig.3.5 Cam nose wear under edge load

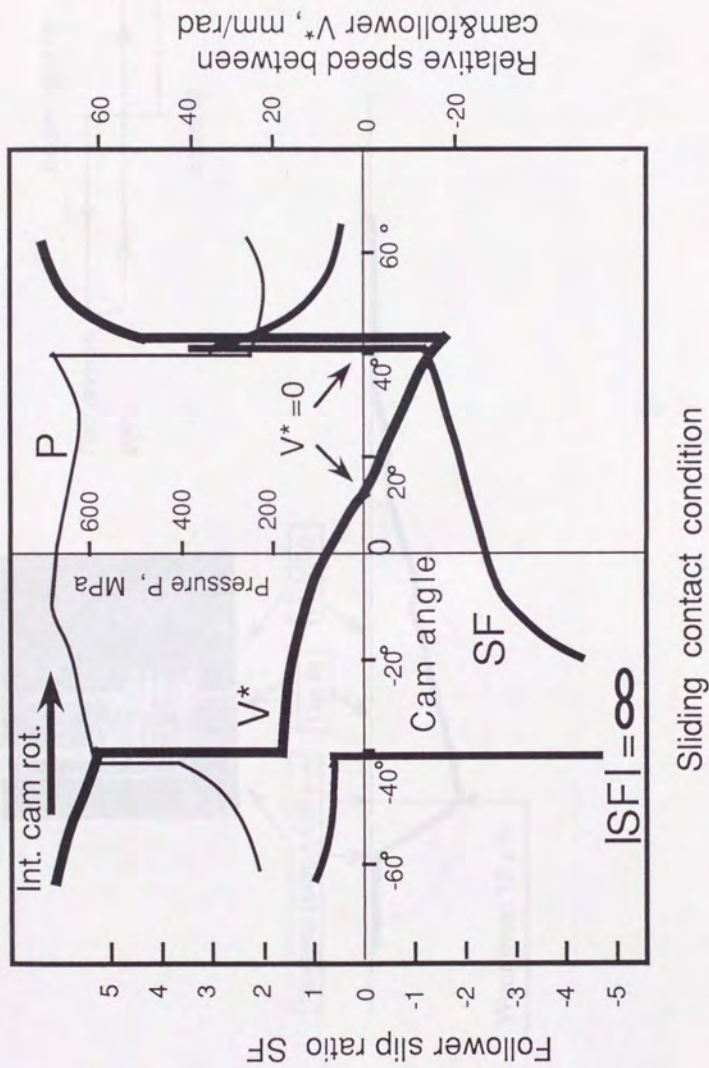


Fig.3.6 Sliding contact conditions

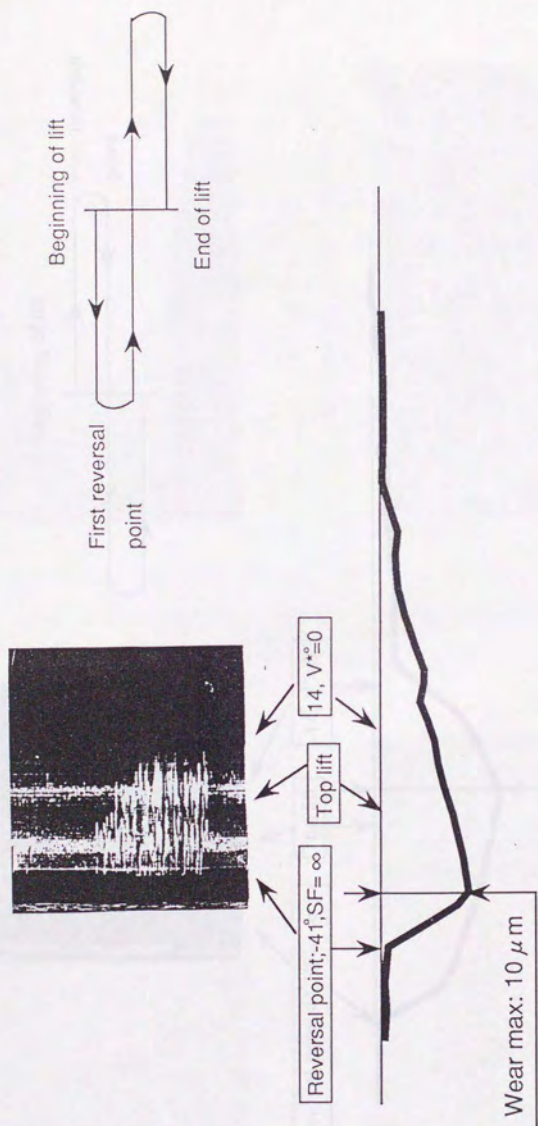


Fig.3.7 Wear profile on P3 follower (Int.)

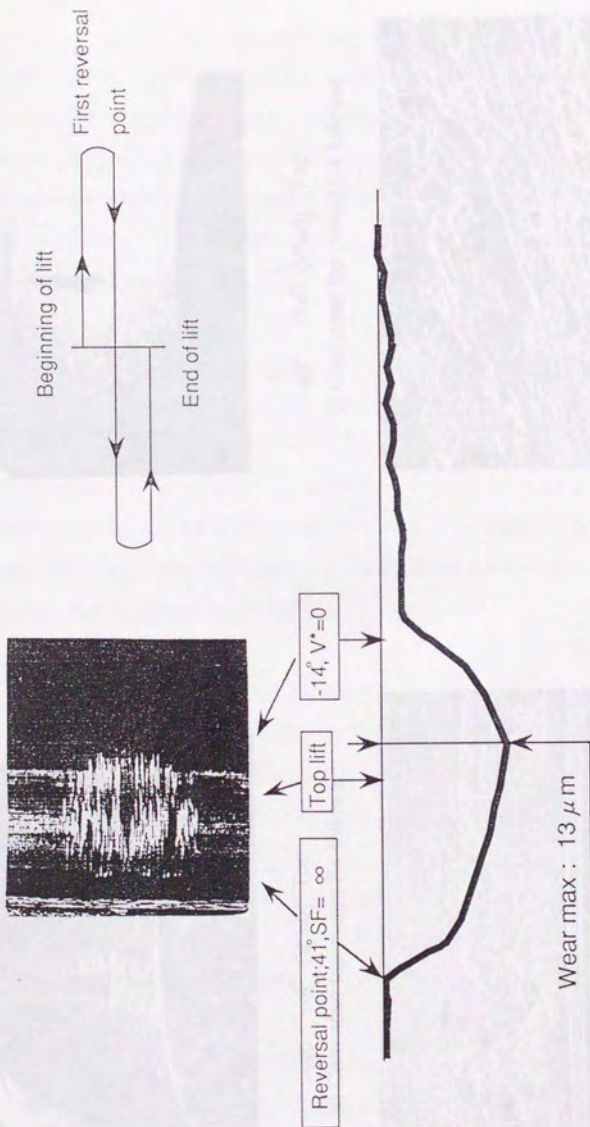
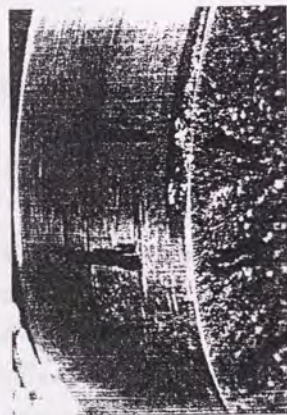
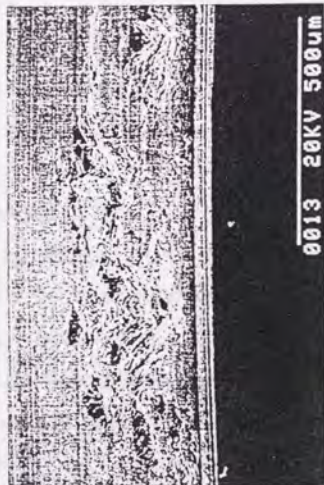


Fig.3.8 Wear profile on P3 follower (Exh.)



-40° -14° ($V^*=0$) Top
a) Cam nose top mated P4 follower



b) Pits on cam nose top of fig. (a)



-40° -14° ($V^*=0$) Top
c) Cam nose top mated C4 follower



d) Pits near $V^*=0$ point of fig. (c)

Fig.3.9 Pits formed near $V^*=0$ point

第4章 摩耗形態の解析

この章においては、低速試験において生じた各種材料のフォロワーと相手カムに生じた「スカuffィング」摩耗の形態およびそれに基づく摩耗の状況を観察する。実際のエンジンのカム、フォロワーにおける「スカuffィング」摩耗の形態を解析した報告は限られている(1-(7)(8))(1)~(4)ので、本研究においては種々のフォロワー材料について、材料表面の摩耗痕やクラックの形成および摩擦面直下における塑性流動層やクラックの伝播を、Suhらの報告(5)~(7)にならって、走査電子顕微鏡により摩擦表面および表面と断面を同時に見る手法によって観察する。さらに、それらの摩耗形態の違いと材料特性の関係を考察する。

4.1 観察の方法

低速試験後のカムシャフトおよびフォロワーから、それぞれカムノーズおよびフォロワーにおける当たり幅のはば中央部を、摺動方向と平行な断面が得られるように切り出した。次に断面を光学顕微鏡観察試料と同じ方法で研磨仕上げし、材料組織を浮き出させるためにそれぞれの材料に適した腐食液にてエッチングした後、走査電子顕微鏡を用いて観察した。

4.2 各フォロワー材に対する摩耗形態の観察結果

16種類の材料を用いたフォロワーから、代表的な摩耗形態を順に示して行く。カムについては、摩耗形態の違いが見られた数例についてのみ示すことにする。

4.2.1 鉄基焼結材PおよびHシリーズ材の摩耗形態

P1フォロワーの摩耗形態をFig.4.1に示す。P1は標準材P3対してモリブデンとカーボン元素含有量を増やし、硬質炭化物の析出量を増加させたもので、炭化物の析出量の増加に伴い、炭化物は独立に存在するのではなくネットワーク状につながっている。低倍率の写真Fig.4.1 a)からわかるように、摺動表面には「スカuffィング」摩耗による条痕が、折り返し部から右方向に、摺動方向に沿って形成されている。また、その高倍率の写真Fig.4.1 b)の写真からは、表面に露出した炭化物を縦断したクラックが認められるが、断面深さ方向に進展した大きなクラックは見られなかった。

次に、標準材であるP3をフォロワーに用いた場合について、「スカuffィング」摩耗部におけるフォ

ローの摩耗形態を Fig.4.2 a)~d) に、相手カムの摩耗形態を Fig.4.2 e),f) にそれぞれ示す。フォロワーについて見ると、Fig.4.2 a)~c) では摩擦表面の条痕の中に脱着寸前の摩耗粉の形成が見られる Fig.4.2 b) から、摩耗粉が粒状の炭化物の周囲の基地に沿って伝播することにより形成されている様子が分かる。また、Fig.4.2 d) のように、断面にも深さ約 50 μm 付近に摺動方向に伸びたクラックが観察される。相手のカムには、Fig.4.2 e) のような条痕と、f) に見られるように、摩擦面に摺動方向に直角に伸びたクラックおよび摩耗粉が脱着したビットが観察される。

続いて、P 6 フォロワーの摩耗形態を Fig.4.3 に示す。Fig.4.3 c) の写真では上下方向の摺動部の上端の折り返し部の表面であり、フォロワー横方向の加工目に直角に条痕が入っている様子がみられる。これを拡大した写真 Fig.4.3 d) から、条痕を横切るクラックや連なった小さなビットが認められる。折り返し部よりも多少中央寄りの摩耗深さの大きい位置では、摺動表面 (Fig.4.3 e)) や表面直下のかなり浅い部分 (a), b) で、クラック伝播による摩耗粉の形成とそれらの脱着によって生じたビットが観察される。

次に、P 8 フォロワーについて見ることにする。P 8 材は、Fig.4.4 f) の材料の断面部エッチング組織の SEM 像からわかるように、結晶粒界や灰色に見える粒界析出した炭化物の界面に、焼結空孔が多量に残存している。Fig.4.4 a), b) に見られるように、摩擦表面にはこれらの焼結空孔から進展したクラックとそれらによる摩耗粉およびビットが形成されている。また c) のように、断面には表面から入ったクラックが、これらの空孔を連結するように、粒界に沿って約 100 μm と深くまで伸びていることがわかる。さらには、写真 Fig. 4.4 d), e) のように、他の P シリーズに比べて摩耗粉が深くから大規模に剥離して行く様子が見受けられる。他の P シリーズ材については、ほぼ標準材 P 3 もしくは P 6 に類似した摩耗形態を示していた。

H 材は、P 材に比べて材料強度が高い高速度鋼の合金成分を有する鉄基焼結材である。まず、H 1 フォロワーの摩耗形態を Fig.4.5 に示す。Fig.4.5 a) のように、摩擦表面には P 材と似たクラックと脱着前の摩耗粉および脱着後の小さなビットの形成が見られる。しかしながら H 材では、写真 Fig.4.5 c) のように、いったん離脱した摩耗粉が押し潰されたような部分も見られ、P 材よりも摩耗粉の脱着がしにくい様子が見えてくる。さらに b), d) では、断面の焼結空孔や表面から材料内部に伸びたクラックが認められるが、いずれもクラックの幅が狭く、開口していないように見える。また、相手のカムは、Fig.4.5 e) に示すように、表面の条痕が浅く滑らかであり、P 3 フォロワー材の相手カム (Fig.4.2) よりも損傷が軽く見える。摩擦面直下にはアンドライト状の炭化物が塑性流動して矢印のように変形している。また、Fig.4.5 f) のように、炭化物の周りにクラックの形成も見られた。

次に、H 2 材フォロワーの摩耗形態を Fig.4.6 に示す。写真 Fig.4.6 a) は摺動部上端の折り返し部であり、左右方向の加工痕に直交した上下方向の条痕が形成されているが、図の下手にも加工痕の残存が認め

られることから、条痕が浅く摩耗量も小さいことがわかる。Fig.4.6 b),c)より、摩擦表面に摩耗粉の形成が見られるが、やはり押し潰されており脱落しにくそうに見える。また、断面部の写真Fig.4.6 d)より、クラックは表面に沿って進展しており、非常に浅い状態に留まっている。

4. 2. 2 超硬合金TCおよび窒化珪素SNの摩耗形態

タングステンカーバイド超硬合金TC材のフォロワーの結果を、Fig.4.7に示す。Fig.4.7 a)の写真は $V^* = 0$ 付近の摺動面であり、「スカuffing」摩耗による条痕は全く見られないが、小さなビット群が一列に並んで形成されているのが分かる。これを拡大したFig.4.7 b),c)の写真から、先述の焼結合金に見られたような明確なクラックの伝播や摩耗粉の形成はなく、粒径数ミクロンの硬いタングステンカーバイド周辺における焼結バインダー部の欠落が見られる。

損傷状況は、セラミックス材ではさらに軽微となる。今回の試験で用いた窒化珪素材SNフォロワー摺動表面の摩耗形態をFig.4.8 a)にフォロワー示すが、クラック等は全く見られず、ごく浅い摺動痕と小さく浅い凹みが見られるだけである。また相手のカムノーズについても、Fig.4.8 b)に示すように、摺動表面は滑らかである上に表面からのクラックもごく浅く、摺動方向に伸びている程度である。

4. 2. 3 耐摩耗合金鋳鉄Cシリーズ材の摩耗形態

まず、27wt%のクロムを含有する高クロム鋳鉄材C1フォロワーの摩耗形態をFig.4.9に示す。Fig.4.9 a), b)は左右方向の摺動部の右端の折り返し部であるが、加工痕を掘り起こしたような深い溝が見られる。また深い溝の中に、トラップされた摩耗粉と思われるものも観察されたFig.4.9 c)。摺動方向に伸びた条痕を横切るクラックは見つからなかった。また、写真Fig.4.9 d),e)に示すように、断面には表面を起点とすると思われる摺動方向に沿ったクラックが観察されるが、焼結材PおよびHシリーズに見られたような、粒界や炭化物の周辺に沿って深く伸びたものではなく、棒状の炭化物を横切って表面に平行に進展している。

次に、相手カム材に近い成分と組織を有する低合金チル鋳鉄材のC4フォロワーの摩耗形態を、Fig.4.10に示す。これもやはりC1材と同様に、表面に掘り起こし状の条痕(Fig.4.10 a)~c))と摺動方向に沿った浅いクラックおよび欠落が見られる(Fig.4.10 d),e))。また、離脱しかかった部分が隆起している状況も観察された(Fig.4.10 f))。

なお、18wt%のクロムを含有するC2フォロワーについては、C1材と類似した摩耗形態が観察された。

4. 2. 4 浸炭窒化鋼STの摩耗形態

ST材のフォロワーでは、摩耗量が約500 μm と他の材料に比べてはるかに大きく、硬質の化合物層による耐「スカuffing」性の向上は認められなかった。このST材フォロワーの摩耗形態をFig.4.11に示す。摺動表面には深い条痕が見られ(Fig.4.11 a)b)), 断面の表層近傍には、c)のように、著しい発熱と塑性変形により生ずると言われる白層(7)~(10)が観察された。

4. 3 摩耗形態観察結果に対する考察

摩耗形態と摩耗量との関係は次章で詳細に述べることにし、ここでは材料による摩耗形態の違いから、今回の摩耗試験で見られた「スカuffing」摩耗について、そのメカニズムの差異を見極めて行くこととする。上述の観察結果から、摩耗形態は以下の4つに分類される。

(ア) 表面から深さ方向および表面上において摺動方向に直交した方向へ、材料組織の炭化物の周囲の基地中をクラックが伝播することにより生じた摩耗粉およびそれらの脱落によって生じたピットが形成されているもの。→P1を除くPおよびHシリーズ焼結材フォロワーに見られる。

(イ) 明確なクラックの伝播や摩耗粉の形成はなく、焼結バインダー部の欠落や小さく浅い凹みといった軽微な摩耗損傷が形成されているもの。→超硬TCおよびセラミックスSN材フォロワーに見られる。

(ウ) 硬い相手表面の突起や摩耗粉のアブレーション作用により生じたと考えられる条痕と表面から深さ方向に、摺動方向に沿って棒状炭化物を横切ったクラックが形成されているもの。→耐摩耗性铸铁Cシリーズ材C1, C2, C4と鉄基焼結材P1フォロワーおよびチル铸铁材カムに見られる。

(エ) 大きく摩耗し、深い条痕と表層付近に白層が形成されているもの。→浸炭窒化鋼ST材フォロワーに見られる。

これらの中で(イ)と(エ)の摩耗形態は(ア)と(ウ)と明らかに異なっている。

まず(イ)では、フォロワー材がカム材に比べてはるかに硬いために、Fig.4.7, 4.8に示したように、きわめてなめらかな面が形成されている。これは初期のなじみ過程で加工目の凸部のみが摩耗し、粗さの減少によって部分的な流体潤滑効果が助長されたために大きなクラックの形成は起こらず、焼結バインダー部の欠落や相手カムの硬質炭化物による微小なアブレーション摩耗しか生じなかったものと考えられる。

また(エ)は、フォロワー材内部にクラックの進展に影響をおよぼすほどの大きさの硬質炭化物が存在しないので、表層の硬質化合物層が摩耗した後は、相手カム面に存在する炭化物によるアブレーション摩耗が急速に進んだものと考えられる。それによる全体的な粗さの増加と摩耗粉の介在により部分的な流体効果が阻害されて、潤滑状態は純粋な境界潤滑に近くなり、接触点における表面温度の上昇と急冷によって白

層を生じたものと推定される。

これらに対して、(ア)および(ウ)では表面から内部へのクラックの伝播が特徴であり、それによって摩耗粉が母材から難脱させられたものと考えられる。しかしながら、(ア)と(ウ)のクラック伝播の仕方が大きく異なり、その原因は材料組織の違いに求められる。(ウ)が見られる焼結材P1および鋳鉄Cシリーズ材は、硬質炭化物が棒状またはネットワーク状に析出したものであって、表面から入ったクラックは炭化物を避けて通ることができず、それらを横断して伝播している。これは、相手のカム面との摩擦によってフォロワー表面の軟らかい基底がまず摩耗し、その結果相対的に浮き出た硬質炭化物に摩擦力が集中して、炭化物が剪断破壊を生じたものと考えられる。このような、棒状の炭化物や連係した硬質相が破断する摩耗形態は、高クロム鋳鉄材料のアブレーシブ摩耗に関する研究(11)(12)(13)に見受けられるし、硬質ファイバー相の基底からの浮き出た形態は、Metal-matrix composites 摩擦試験に関する研究(14)で報告されている。これに対して(ア)のP1を除くPシリーズおよびHシリーズ材は、細かい硬質炭化物が基底中に分散した焼結材組織である。そのため表面から入ったクラックは炭化物を容易に避けることができ、焼結空隙や粒界に沿って硬質炭化物の周囲の基底内を伝播している。事実この条件においてヘルツ圧に基づく剪断応力が最大となる約50 μm の深さ以内にある焼結空隙では、それらのクラックとの連結が顕著に見られた。(ア)、(ウ)のいずれの形態においても、摺動表面にはこれらのクラックの伝播および連結により形成された、脱着寸前の摩耗粉が数多く観察された。従って、これらの材料に見られる「スカuffing」摩耗は、本来のスカuffingの定義とは異なって、接触の繰返しに伴う摩擦入力により進展するクラックの伝播、すなわち疲労破壊に支配されているものと考えられる。見かけ上「スカuffing」の特徴である深い条痕は、破壊した硬質炭化物あるいは相手面の炭化物によるアブレーシブ作用によるものと解釈される。

4. 4 第4章のまとめ

低速耐久試験後の、フォロワーおよびカムの摩耗形態を、摺動表面および断面の走査電子顕微鏡観察によって調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 細かい硬質炭化物が基底中に分散した組織を有する鉄基焼結材フォロワーでは、表面で生成したクラックが焼結空隙や粒界に沿って硬質炭化物の周囲の基底内を伝播することにより、摩耗粉やそれが脱着して生ずるピットが形成される。
- (2) 棒状もしくはネットワーク状に析出した炭化物を有する耐摩耗性鋳鉄Cシリーズ材、鉄基焼結材P1フォロワーおよびチル鋳鉄材カムでは、摺動方向に沿って炭化物を横断して進展したクラックによっ

て摩耗粉が生じ、破壊した炭化物または相手面の炭化物のアブレーション作用によって生じたと考えられる深い条痕が形成される。

(3) カム材に比べてはるかに硬い超硬TCおよびセラミックスSN材フォロワーでは、明確なクラックは見られず、損傷は浅い溝や焼結バインダー部の欠落、凹みといったレベルの軽微なものであり、試験後の表面粗さは小さく、「スカuffing」摩耗は生じていない。これらの相手カムの摩擦面もなめらかであり、クラックも極く浅いところに見られるだけであった。

これらの結果から、カム、フォロワー間に見られる「スカuffing」摩耗が、従来考えられていた材料相互の融着に起因する(1)-(6)(7)(25)(26)(27))のものでなく、摩擦入力による機械的破壊であることが明らかになった。

第4章の参考文献

- (1) M.Kano and I.Tanimoto : Wear, 145, (1991) 153.
- (2) M.Kano and I.Tanimoto : Wear, 151, (1991) 229.
- (3) I.Tanimoto, M.Kano and M.Sasaki : SAE Paper 902087.
- (4) M.Kano and Y.Kimura : Wear, 162, (1993) 897.
- (5) S.Jahanmir, N.P.Suh and E.P.Abrahamson : Wear, 28, (1974) 235.
- (6) N.P.Suh : Wear, 25, (1973) 111.
- (7) N.P.Suh, S.Jahanmir, E.P.Abrahamson and A.P.L.Turner : Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME, OCTOBER, (1974) 631.
- (8) T.S.Eyre and A.Baxter : Metals & Materials, (1972) 435.
- (9) 山田 俊宏 : 日本金属学会誌, 40, 7, (1976) 757.
- (10) R.Bulpett, T.S.Eyle and B.Ralph : Wear, 162 - 164, (1993) 1059.
- (11) 陳 立輝・呂 博盛 : 鋳物, 63, 10, (1991) 830.
- (12) L.H.Chen, L.C.Chang and T.S.Lui : Proceedings of the Japan International Tribology Conference, Nagoya, (1990) 227.
- (13) S.Turenne, F.Lavalée and J.Masounave : Journal of materials science, 24, (1989) 3021.
- (14) N.Saka and N.K.Szeto : Wear, 157, (1992) 339.



Fig.4.1 Wear morphology of P1 follower

P3 follower



a) Delaminated particle



Sliding
direction



Sliding
surface

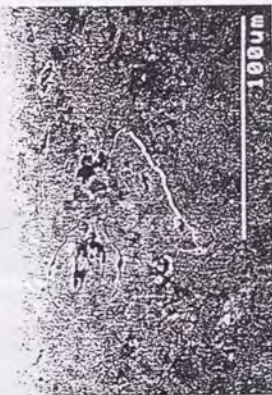


b) Cracks propagated on surface

Cross-
section



c) Delaminated particles and pits



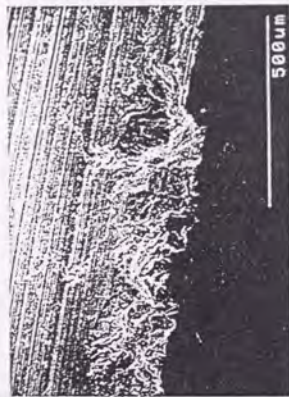
d) Cracks formed under surface

Mated cam nose



e) Plowing grooves

Sliding
direction



f) Pits formed on surface

Fig.4.2 Wear morphology of P3 follower & mated cam



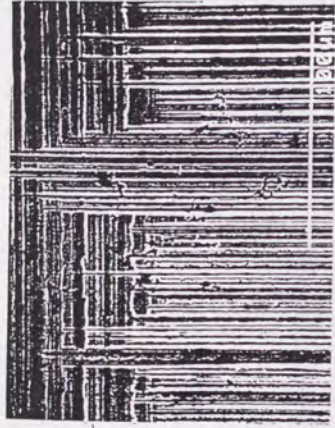
a) Cracks propagated from sinter pore near sliding surface

Sliding direction

53

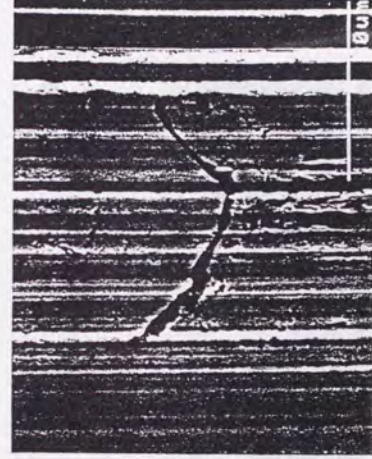


b) Magnified photograph of (a)



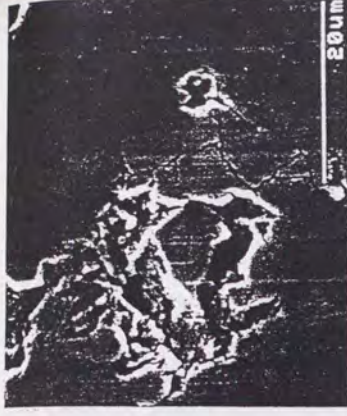
c) Initial cracks across plowing grooves

Sliding direction



d) Magnified photograph of (c)

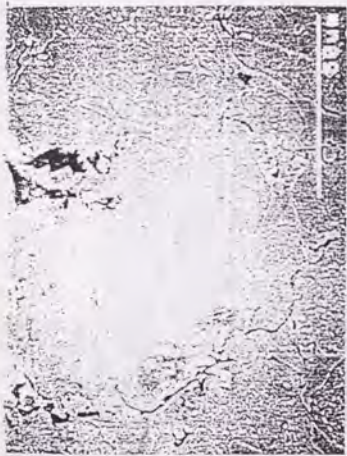
Fig.4.3 Wear morphology of P6 follower



e) Delaminated particles on sliding surface



a) Plowing grooves and delaminated particles on sliding surface



c) Cracks propagated around grain boundary and carbides



e) Cracks propagated around delaminated particles



b) Delaminated particles on sliding surface



d) Pits formed on sliding surface



f) Sinter pores around grain boundary

Fig.4.4 Wear morphology of P8 follower

H1 follower



a) Plowing grooves and delaminated particles



c) Plowing grooves and delaminated particles

Sliding direction
Sliding surface



b) Cracks propagated from sinter pore



d) Cracks propagated from sliding surface

Mated cam nose



e) Deformed layer near surface

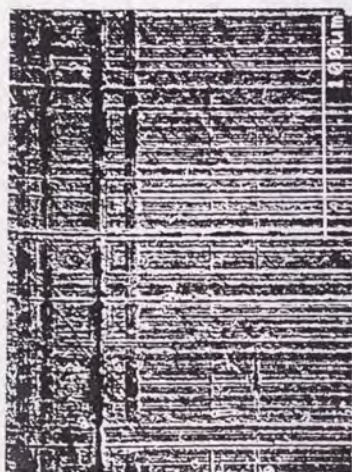
Surface
Sliding direction
Cross-section



f) Cracks propagated around carbides

Surface
Sliding direction
Cross-section

Fig.4.5 Wear morphology of H1 follower & mated cam



a) Plowing grooves formed across surface finishing grooves

c) Delaminated particles



Sliding surface
Cross-section



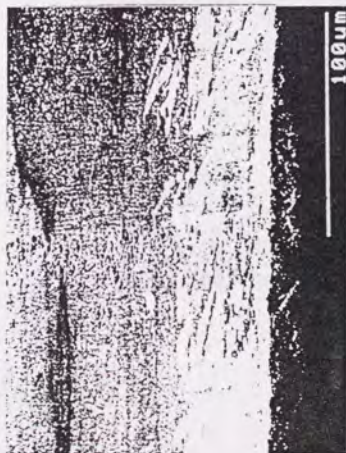
b) Delaminated particles and micro pits on sliding surface



d) Shallow cracks propagated from sliding surface

Fig.4.6 Wear morphology of H2 follower

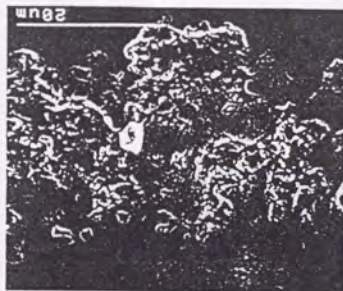
Sliding direction



a) Many small pits near $V^*=0$ line
on sliding surface



b) Magnified photograph of (a)



c) Flaked Co binder
around tungsten carbides

Fig.4.7 Wear morphology of TC follower

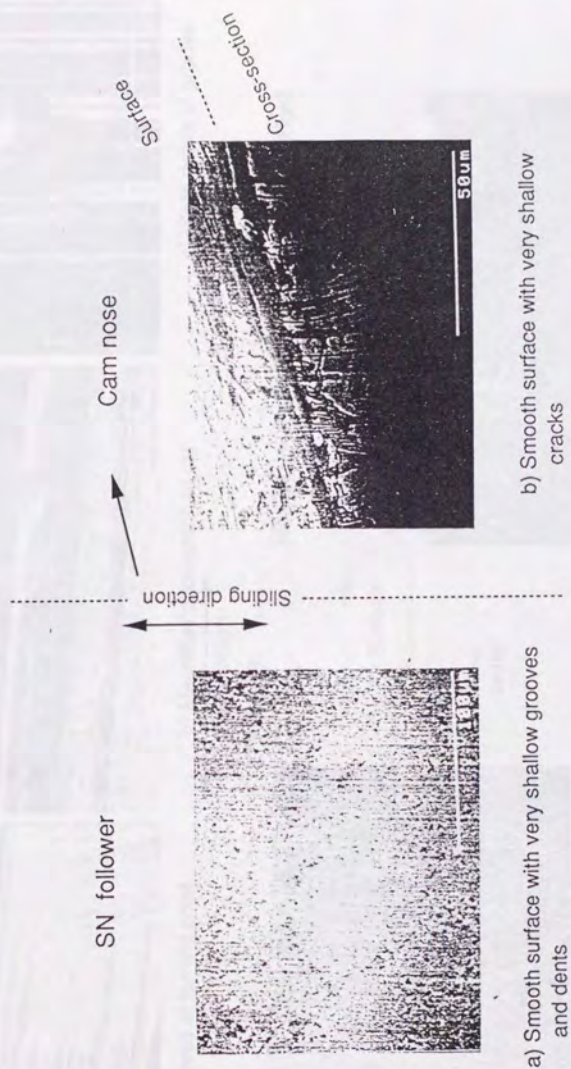


Fig.4.8 Wear morphology of SN follower & mated cam

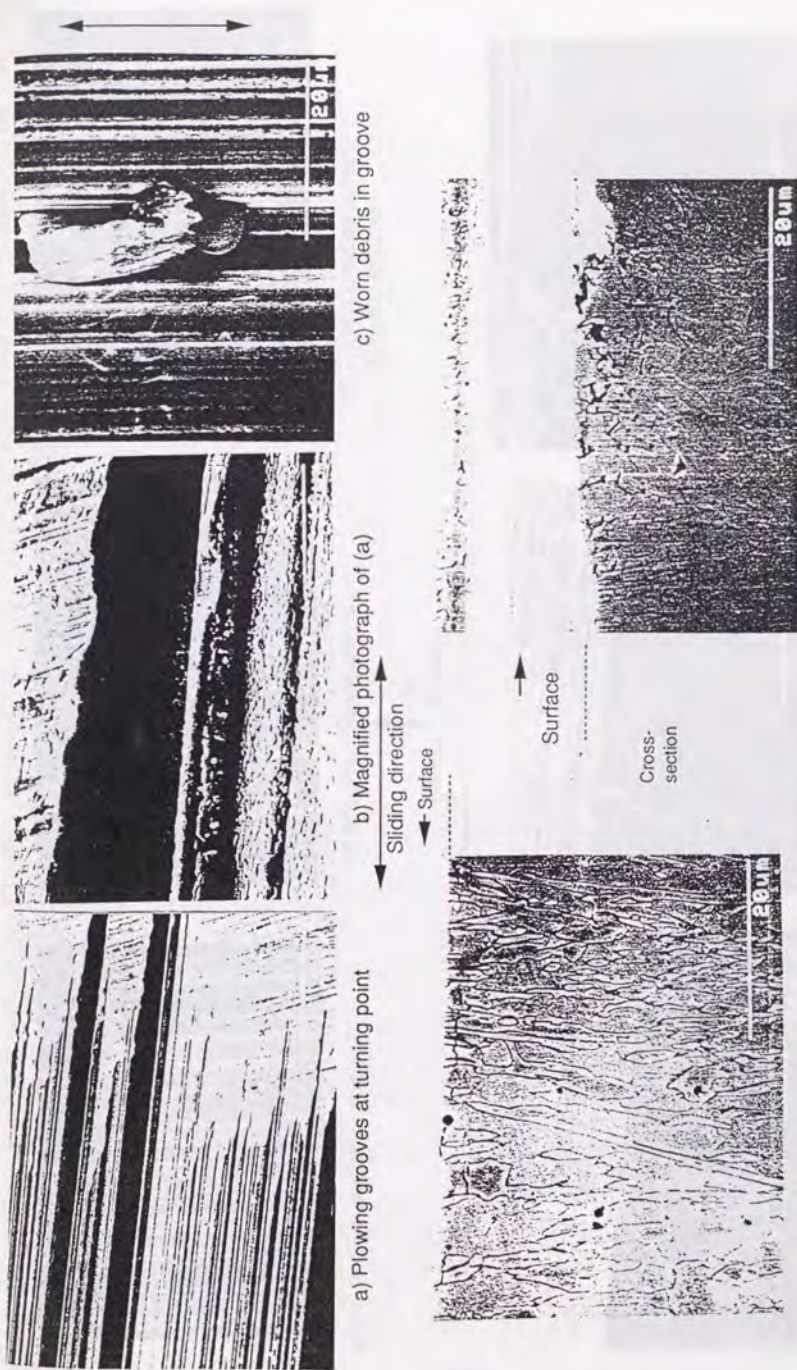
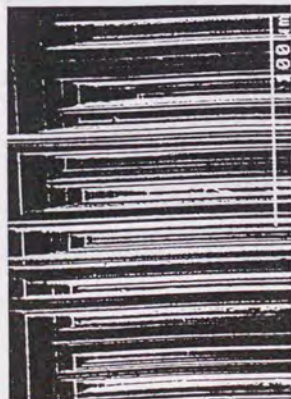


Fig.4.9 Wear morphology of C1 follower



a) Plowing grooves at turning point

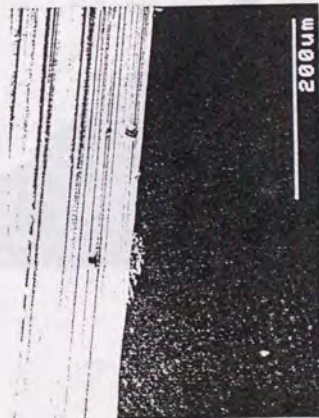


b) Magnified photograph of (a)



c) Plowing grooves across dendritic carbides

Sliding direction



d) Shallow cracks and pits near surface,
Cracks propagated across dendritic carbides



e) Magnified photograph of (d)



f) Cracks propagated across dendritic carbides and digged up chip

Fig.4.10 Wear morphology of C4 follower

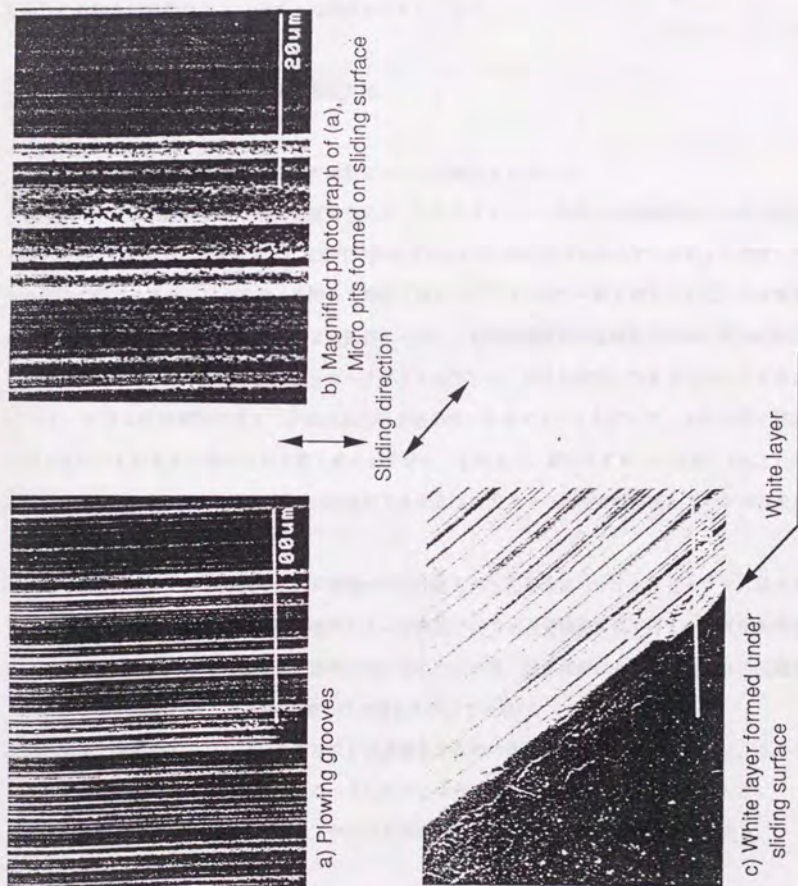


Fig.4.11 Wear morphology of ST follower

第5章 摩耗量とフォロワー材料特性値との関係

この章では、低速耐久試験後におけるカムおよびフォロワーの摩耗量と、種々のフォロワー材料特性値との相関関係を定量的に解析し、前章の摩耗形態との関係を調べることによって、従来からカムとフォロワーとの材料相性に依存した融着性で決定されると言われてきた「スカuffing」摩耗のメカニズムを追究し、それに応じてこの種の耐摩耗材料を開発するのに重要な材料パラメータを明らかにすることで、工業的に有益な材料設計のコンセプトの提案につなげて行く。

5.1 フォロワー材の材料特性値の測定方法

フォロワーの材料特性値として以下の項目についての測定を実施した。

＊表面のマクロ硬さ：ロックウェル硬度計Cスケールにてフォロワー表面の未摺動部を5～6点測定し、その平均値を求めた。（超硬合金TCと窒化珪素SNフォロワーについてはAスケール値より換算した）。

＊炭化物の硬さ：ファインカッターを用いて摺動方向に平行にフォロワー材を切り出して、その断面部を第2章と同様の方法で、光学顕微鏡により観察しながら、塑性流動層等の組織変化の無い部分の炭化物に圧痕が落ちるようにして、マイクロビッカース硬さを測定した。炭化物粒径の大きさに合わせて荷重を0.15～0.30Nの範囲で変え、圧痕が炭化物の断面内に形成できるようにして、10ヶ所の測定値の平均（ばらつきが大きい場合は最大値と最小値を除く）を求めた。鋼材STについては、Fig.2.1-3,p)の組織からわかるように、硬度計の圧痕が内部にできるような大きさの炭化物が存在していないので、測定を行っていない。

＊基地の硬さ：上と同様な方法で、材料組織中の炭化物を外した基地部のマイクロビッカース硬さを求めた。荷重は通常3Nとし、基地部の面積が小さい材料については適宜軽荷重に下げて、圧痕が基地部の中に収まるようにした。超硬合金TCと窒化珪素SNについては、硬質相がほとんどで硬度計の圧痕が落とせるような広い基地(バインダー相)が無いので測定を行っていない。

＊抗折強度：超硬合金TC、窒化珪素SNと浸炭鋼ST以外の各フォロワー材料については、JIS規格H5501に則った試験片（35×10×6）をフォロワー材と同様の製法にて別に作製した。

抗折力は各材料について3本測定し、それらの平均値を求めた。計算式は以下の通りである。

$$\text{抗折力} = 3pl / 2bt^2 \quad \text{MPa}$$

ここで、p；破断したときの荷重 N

b；試料の幅 mm

t ; 試料の厚さ mm

l ; 抗折治具支点間距離 mm

*炭化物の析出面積率：各フォロワー材料の断面を光学顕微鏡で観察し、フォロワー摺動面から50 μ m ~ 100 μ mにおける代表的な組織を写真撮影して、画像解析に供した。装置としてはルーゼックス画像解析装置(LUZEXII)を使用した。超硬合金TCについてはSEM像写真を用いた。また、鋼STでは大きな炭化物が存在しないため、窒化珪素SNは炭化物をもっていないために、測定を行っていない。

*炭化物の形状/粒径，形状係数：画像解析に供した断面における各フォロワー材の析出炭化物の形状を表わす量として，粒径として最大長DDと次式で求められる形状係数SFを測定した。

$$\text{形状係数SF} = \frac{(\text{周囲長})^2}{4\pi \times (\text{面積})} \quad [1]$$

式[1]で定義される形状係数は，Fig.5.1に示されるように，炭化物粒子形状の凹凸度合を表すことになる(1)~(3)。すなわち真円の時が1であり，凹凸が増える程その値が大きくなる。

これらの個々の計測値を平均するにあたり，以下のことを考慮した。硬質炭化物の大きさによる耐摩耗性への寄与を明らかにするため，各フォロワー材の析出炭化物を以下の3つの大きさに分類し，それらの個数と面積率の分布を調べた。

S : 1 - 20 μ m²

M : 20 - 80 μ m²

L : 80 μ m² 以上

ここで，1 μ m²以下の粒子は計測の都合上無視している。これらの計測例としてフォロワー材P1の結果をFig.5.2に示す。粒径の小さい炭化物は個数は最も多いがそれらが占有する面積は最も小さく，粒径の大きい炭化物は逆の傾向を示している。こうして得られる，各金属材フォロワーにおける各大きさに対応する析出炭化物の個数の分布をFig.5.3に，それらの占有面積率の分布をFig.5.4に示す。ここで面積率は，炭化物の総面積を100とした時の，3つの大きさ属する炭化物が占める割合を示したものである。これらの図から，析出粒子の個数では，小さいSレンジの炭化物が多いが，各レンジの面積率は材料によって異なる。

そこで，次式のように炭化物の粒径DDと形状係数SFは，各S，M，Lの大きさに分類された炭化物についての平均値に面積率を重み付けした値を求めた。

$$DD = (DD_s \times A_s + DD_m \times A_m + DD_l \times A_l) / 100 \quad [2]$$

$$SF = (SF_s \times A_s + SF_m \times A_m + SF_l \times A_l) / 100 \quad [3]$$

ここで，DD_{s,m,l}；S，M，L各大きさの炭化物1ヶ当りの平均粒径， μ m

SFs,m,l; S, M, L 各大きさの炭化物 1 ケ当りの平均形状係数

As,m,l; S, M, L 各大きさの炭化物面積率, %

5. 2 「スカuffing」摩耗量の定量解析手法

5. 2. 1 低速試験におけるカムおよびフォロワーの摩耗量

第2章で説明したように、各低速試験において標準材としてP3フォロワーを吸排気に1個ずつ2個組み込み、それらのカムおよびフォロワーの平均摩耗深さを基準とした相対値として、各フォロワー材を用いた場合におけるカムとフォロワーそれぞれの摩耗量インデックスを定義する。なお、7回の試験におけるP3材での摩耗量は、カムノーズで42~50 μm 、フォロワーで6~14 μm と比較的再現性が良く、Fig.1.6 a), b) に示したような「スカuffing」摩耗が毎回発生した。

Table 5.1 に、測定された各フォロワー材に対する材料特性値と摩耗量インデックスを、まとめて示す。

5. 2. 2 摩耗量インデックスの定量解析手法

各フォロワー材として超硬合金TC、窒化珪素SNおよび浸炭窒化鋼STを除く、13種の金属材料を用いた場合におけるカムおよびフォロワーの摩耗量インデックスと材料特性値との関係を調べるために、SAS(Statistical Analysis System)プログラム(4)を用いた多変量解析を行った。従属変数の選び方としては、変数の出し入れを逐次的に行なうStepwise Procedureに従い、有意水準f値(Significance level)は一般的に用いられる5%以下になる範囲で実施した。次に、選ばれた変数を用いた重回帰分析により偏回帰係数を求めた。モデルの式を次式に表わす。

$$Y_i = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \cdots + a_nX_n + \epsilon \quad \text{-----} [4]$$

ここで、 Y_i : 従属変数 \rightarrow 摩耗量インデックス

X_i : 説明変数(独立変数) \rightarrow 材料特性値

$a_1 \sim a_n$: 偏回帰係数

ϵ : 誤差

一般的に重回帰係数は説明変数の追加に伴い増加し、説明変数の個数が(標本数-1)になると必ず1になり、データ数が説明変数の個数に比べてあまり多くない場合は、変数選択の結果得られた偏回帰係数の有意性は割り引いて解釈する必要がある(5)。こういった点を踏まえながら、このあとの統計的解析を進めることにする。

5. 3 摩耗量とフォロワー各材料特性値との関係

5. 3. 1 カム摩耗量とフォロワー材料特性値

各フォロワー材を用いた場合のカムとフォロワーの摩耗量インデックスを、Fig.5.5 に示す。以下この摩耗量インデックスのことを略して摩耗量と呼ぶことにする。カム摩耗量と相手フォロワー材の各材料特性値との関係を、Fig.5.6～Fig.5.12 に各々プロットした。各図ともに鉄基焼結材Pシリーズを黒塗り、高速度鋼材Hシリーズを濃い網目模様、超硬合金と窒化珪素材を斑点模様および鋳鉄材Cシリーズを白抜きマークで示した。

Fig.5.6 に示したフォロワー材のマクロ硬さとカム摩耗量との間には、マクロ硬さの上昇に対してカム摩耗量が減少する傾向が若干見られるが、フォロワー材のその他の材料特性値とカム摩耗量との相関は明らかでない。

5. 3. 2 フォロワー摩耗量とフォロワー材料特性値

続いてフォロワー摩耗量と各材料特性値との関係を見ることにする。まず、マクロ硬さとフォロワー摩耗量との関係をFig.5.13 に示す。フォロワー材のマクロ硬さの上昇に伴いフォロワー摩耗量は減少する傾向が見られ、カム摩耗量との関係 (Fig.5.6) よりも相関性ははるかに強い。特に、P 8 材を除く鉄基焼結材P材および高速度鋼H材においては、かなり強い相関性を示している。

次に、硬質炭化物の硬さとフォロワー摩耗量との関係をFig.5.14 に示す。炭化物硬さの上昇に伴いフォロワー摩耗量が減少して行く傾向が若干あるように見える。

Fig.5.15 は基地の硬さとの関係を示したものである。これについても基地の硬さの上昇に伴うフォロワー摩耗の減少の傾向があるように見える。但しここでも、P 8 材だけは大きくはずれている。

Fig.5.16 はフォロワー材の抗折強度との関係を見たものである。強度の増加に伴う摩耗量の減少が、特にP 1 材を除くPおよびHシリーズ材の間において顕著に見受けられる。

Fig.5.17 ～Fig.5.19 は硬質炭化物についての画像解析特性値との関係を見たものである。まずFig.5.17 は炭化物の析出面積率との関係を示したものである。明瞭ではないが、各シリーズごとに析出量の増加に伴い摩耗量は減少して行く傾向があるように思える。

Fig.5.18 は炭化物粒径とフォロワー摩耗量との関係を示したものである。鋳鉄Cシリーズ材を除くとかなり強い相関が見られ、粒径が小さくなるほどフォロワー摩耗量が減少して行く。

最後に炭化物の形状係数との関係をFig.5.19 に示す。超硬合金TC材や鋳鉄Cシリーズ材を除くと、形状係数が小さい、すなわち凹凸の少ない方向に向かってフォロワー摩耗量が減少して行く傾向が見られる。

5. 3. 3 摩耗量と材料特性値との関係の定量解析

5. 3. 3. 1 カム摩耗量とフォロワー材料特性値

13種のフォロワー材に対するカム摩耗量と7種の材料特性値を用いた多変量解析結果をFig.5.20に示す。この図で、説明変数VARIABLEとして登場するHHは炭化物硬さ、MACHはマクロ硬さ、DDは粒径およびSPHは形状係数を示す。

まず、最適な1つ説明変数を選ぶStep1では炭化物硬さが選ばれた。しかし、そのモデル式に対する寄与率を示すR-SQUARE（重相関係数の2乗）は0.19と低い上に有意水準f値（PROB>F）が0.05以上であり、有意性に乏しい。さらに、2つの最適説明変数を選ぶStep2でマクロ硬さが取り込まれ、若干R-SQUAREの値が高くなるものの、f値が0.05を越えており有意性は低いままである。以降、説明変数を7個まで説明変数を増やして行っても、f値0.05以下となる計算結果は得られなかった。従って、これらの13種のフォロワー材に対するカム摩耗量と今回調べたフォロワーの材料特性値との定量的な関係は明らかでない。

5. 3. 3. 2 フォロワー摩耗量とフォロワー材料特性値

前項と同様に、13種のフォロワー材に対して、フォロワー摩耗量と7種の材料特性値を用いて多変量解析を行なった。その結果をFig.5.21に示す。この図で新たに登場する説明変数としては、AREAが炭化物の析出面積率およびBHが基地の硬さを示す。

まず、Step1では形状係数が選ばれ、そのR-SQUARE値は0.46とある程度の値が得られた。さらに説明変数を増やして行くと、Step3にて形状係数に炭化物の面積率と硬さが加わることで、f値が0.052と若干判定基準よりも高いものの、R-SQUARE値は0.77とかなり高い値まで到達する。これらの偏回帰係数を重回帰分析のモデル式〔4〕にあてはめた関係式を以下に示す。

$$\text{フォロワー摩耗量} = 4.3 - 0.20 \times \text{HHV}/100 - 0.95 \times \text{AREA}/10 + 0.58 \times \text{SF} \quad [5]$$

ここで、HHVは炭化物硬さ、Hv、AREAは炭化物面積率、%、SFは炭化物形状係数、無次元単位をそれぞれ示す。

この結果を、Fig.5.22に示す。縦軸が実測されたフォロワー摩耗量で、横軸が〔5〕式で表される回帰式からの計算値を示す。ある程度の相関性が見られるものの、予測式〔5〕で十分に実際の摩耗量を表わすことはできていない。前章の摩耗形態観察の結果を考慮してみると、今回解析した13種のフォロワー材の中には、「スカuffing」摩耗に対応する疲労破壊が支配的と考えられる摩耗と、アブレーション作用が支配的と考えられる摩耗を生じたものの2種類が含まれている。そこで次に、これらの2種類の摩耗形態のそれぞれについて解析してみることにする。

5. 3. 3. 3 疲労破壊が支配的なフォロワー材のフォロワー摩耗量

まず、従来「スカuffing」摩耗と呼ばれていた損傷、すなわちフォロワー材料の表面からのクラック進展による疲労破壊に支配されると考えられる摩耗形態を示したフォロワー材料群（P1を除く鉄基焼結合金材Pシリーズと高速度鋼焼結材H1とH2）について解析して行く。但し、P8材については以下の理由で定量解析から除外した。P8材は、Fig.4.4 f)の材料組織からわかるように、結晶粒界に他の焼結材では見られない大きな焼結空孔が存在しており、それらが切り欠きとして作用してクラックの伝播が容易となり、フォロワーの過大な摩耗を生じたものと考えられたので、定量解析には適さないものと判断した。同一の「スカuffing」摩耗を生じたと考えられるフォロワー材のP2～P7とH1、H2の8材種について、フォロワー摩耗量と7種の材料特性値との関係を調べた。結果を、Fig.5.23, 5.24に示す。Step4で登場する説明変数STRは抗折強度を示す。まず、Step1でマクロ硬さが選ばれ、この時点で既にR-SQUARE値は0.86と高い値が得られる。Step2で粒径DDが加わりR-SQUARE値は0.96と非常に高い値が得られる。また有意水準f値も0.0003と非常に低い。これらの2つの偏回帰係数を重回帰分析のモデル式〔4〕にあてはめた関係式を以下に示す。

$$\text{フォロワー摩耗量} = 10.7 - 0.17 \times \text{MACH} + 0.51 \times \text{DD}/10 \quad \text{〔6〕}$$

ここで、MACHはマクロ硬さ、HRCを、DDは炭化物の粒径、 μm をそれぞれ示す。

実測したフォロワーの摩耗量と〔6〕式による予測値との関係をFig.5.26に示す。この図から、これらのフォロワー材においては、回帰式〔6〕を用いてマクロ硬さと炭化物の粒径の2つの説明変数により、実際のフォロワー摩耗量を予測できることが分かる。

さらに解析を進めると、Step3～5においてf値は0.06～0.08と多少悪化するがR-SQUARE値は徐々に増加し、Step6において6つの説明変数を選ぶとf値が0.05以下に低下しR-SQUARE値も0.99以上という非常に高い値が得られる。

こうして得られた偏回帰係数を重回帰分析のモデル式〔4〕にあてはめると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \text{フォロワー摩耗量} = & 9.4 - 0.11 \times \text{MACH} - 0.24 \times \text{HHV}/1000 - 0.10 \times \text{STR}/100 \\ & - 0.31 \times \text{AREA}/10 + 0.55 \times \text{DD}/10 + 0.51 \times \text{SF}/10 \quad \text{〔7〕} \end{aligned}$$

ここで、HHVは炭化物硬さ、HV、STRは抗折強度、MPa、AREAは炭化物面積率、%、DDは炭化物粒径、 μm 、SFは炭化物形状係数、無次元単位をそれぞれ示す。

実測したフォロワーの摩耗量と〔7〕式による予測値との関係をFig.5.27に示す。予測値と実測値は良く一致しているものの、データ数が説明変数の個数に比べて多くないために、得られた偏回帰係数の有意性は割り引いて解釈する必要がある。従って、〔6〕から説明変数として追加された炭化物硬さ、抗折強度、炭化物面積率および炭化物形状係数については、有意性は低いものの補足的な意味があるものと考

える。

5. 3. 3. 4 アブレーション作用が支配的なフォロワー材のフォロワー摩耗量

次に、アブレーション作用が支配的と考えられる摩耗形態を示した、鉄基焼結材 P 1 および 3 種の铸铁材 C 1, C 2, C 4 材について、同様に定量解析を試みた。

説明変数選択の Stepwise Procedure の結果を Fig. 5.28 に示す。Step 1 では炭化物硬さ HH が選ばれ R-SQUARE は 0.85 となり、有意水準 f 値は 0.08 と若干悪い値を示す。多少有意性が低いものの、これらのフォロワー材の摩耗量と炭化物硬さとは、かなりの相関性があるといえる。Step 2 ではさらに基地の硬さ BH が追加されることにより、 f 値 0.05 以下で R-SQUARE 0.99 以上の値が得られる。測定データ数が 4 ケであるので、説明変数は 2 ケが限界となる。この結果からデータ数は少ないものの、測定されたフォロワー摩耗量とフォロワー材料特性値とは次式で表わされる。

$$\text{フォロワー摩耗量} = 16.24 - 0.451 \times \text{HHV} / 100 - 0.203 \times \text{BH} / 10 \cdots [8]$$

ここで、HHV は炭化物硬さ, Hv, BH は基地の硬さ, Hv をそれぞれ示す。

Step 2 で選ばれた HH, BH の 2 変数を用いて重回帰分析を行なった結果を Fig. 5.29 に示す。さきほどと同様に、フォロワー摩耗量は炭化物硬さに強く相関し、基地の硬さには有意性は低いものの多少の相関性を有するものとする。

5. 4 摩耗量の定量解析結果についての考察

5. 4. 1 カムおよびフォロワー摩耗量の結果について

Fig. 5.5 の摩耗量インデックスを示したグラフから、カム摩耗量はフォロワー摩耗量に比べてフォロワー材料の違いの影響が小さいことが分かる。摩耗量の絶対値を比較して見ると、Fig. 5.30 に示すように、カム摩耗量の方がフォロワー摩耗量よりも大きめである。これらの結果は、本試験に用いたカム材が、耐摩耗性の低いフォロワー材 C 4 に近い成分を有する、低合金のチル铸铁であったことに起因すると考えられる。すなわち、

(1) カム材と同等と思われる C 4 材をフォロワーに用いた場合には、フォロワーの方がカムよりも摩耗量が多い。これは一回のカム回転に対して、接触線がカム側では一方向に一回転するが、フォロワー上では Fig. 3.7, 3.8 に示したように一往復すなわち二回摺動するため、深さで表わした摩耗量が大きくなることのほか、駆動カムに引きずられる被動側のフォロワー接触面では噛み合い時に引張りがかかるためにクラック伝播しやすいこと (6) ことによると考えられる。

(2) C 4 材よりも耐摩耗性の高いフォロワー材を用いた場合には、焼結空孔を多量に有し耐摩耗性が劣る P 8 材と硬質層が消失して異常摩耗した S T 材を除いて、すべてカム摩耗量がフォロワー摩耗量よりも大きい。このことは、上述した条件の差にもかかわらず、材料の耐摩耗性の向上により摩耗量が逆転したものと考えられる。

(3) $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 以上のカム摩耗量には、相手フォロワー材の疲労破壊もしくは炭化物の割れにより生じた摩耗粉もしくはフォロワーの表面荒れに起因するアブレイシブ摩耗が加わっていると考えられる。その裏付けデータとして、Fig.5.31に低速試験後の、フォロワーとカムの「スカuffing」摩耗を生じた部分の表面粗さを示す。フォロワーの摩耗量が小さい H1, H2, TC, SN 材 (Fig.4.5~4.8 に対応) では、フォロワー自身の表面粗さが小さいだけではなく相手カムの表面粗さも小さい。すなわち、フォロワー材の摩耗粉の生成を抑えればカムの摩耗も抑制できることを示している。さらに、S T 材の場合には、フォロワーが過大に摩耗しても、 $10 \mu\text{m}$ の窒素化合物層が消失した後はアブレイシブ作用をする硬質相が無いために、カム摩耗量は小さい値を示している。

一方、フォロワー材の摩耗は、材料による違いが大きい。フォロワー材 P 1 ~ P 8 は、高合金から低合金へと並べたものであるが、ほぼこの順に摩耗が増加しており、これらのフォロワー材の耐摩耗性の違いがどういった材料特性値と相関しているのかを見極めることは、この種の耐摩耗材料の設計や開発に非常に有益と考えられる。

5. 4. 2 カム摩耗量とフォロワー材料特性値との関係について

5. 3. 3. 1 節で説明したように、カム摩耗量との明確な相関を持つ材料特性値は見い出せなかった。あえて言えば、Fig.5.6 に示したフォロワー材のマクロ硬さとの間に相関が見受けられる程度である。この結果からすると、従来言われていたようにフォロワー材の硬さはカム材の硬さに近い方が耐摩耗性に優れる(1-(4))のではなくて、硬い方が耐摩耗性に優れているように見える。

5. 4. 3 フォロワー摩耗量とフォロワー材料特性値との関係について

5. 3. 3. 2 節で定量解析した結果、式〔5〕で示される析出炭化物に係わる 3 つの説明変数、硬さ、面積率および形状係数からなる関係式が得られた。R-SQUARE の値は 0. 774 で相関は認められるが関係式としては十分とは言えないレベルであった。これは、先に述べたように疲労破壊とアブレイシブ作用という異なる 2 種類のメカニズムに起因する摩耗が、この定量解析に用いた 13 種のフォロワー材に混在しているためと判断される。そこで、前節では 2 つの異なる形態のフォロワー摩耗量について別々に定量解析を行った。

5. 4. 3. 1 疲労破壊が支配的なフォロワー摩耗と材料特性値との関係

疲労破壊が支配的なフォロワー材の摩耗量についての定量解析においては、式〔6〕に示すR-SQUARE 0.96の非常に強い相関を持った関係式が得られた。式〔6〕の材料特性値の内、マクロ硬さがフォロワー摩耗量と最も強い相関を示し、次に炭化物粒径の相関が強い。この関係は、鉄鋼材料の疲労強度がマクロ硬さと介在物の大きさに強い相関関係を示した結果(7)(8)に良く類似している。すなわち、フォロワーの摩耗量の少なさをフォロワーの耐摩耗性とする、この耐摩耗性と鉄鋼材料の疲労強度は両者ともに、マクロ硬さが上昇するにつれて、炭化物もしくは介在物が小さくなるにつれて向上している。この関係は、低速試験によって生じる「スカuffing」摩耗が、純粋な疲労試験における疲労破壊に共通した損傷メカニズムを有していると考ええる。

さらに、6個の説明変数で構成されている式〔7〕においては、データ数が説明変数の個数に比べて多くないために有意水準は低いものの、追加された4個の説明変数もフォロワー摩耗量に相関性を有するものと考ええる。そのうちの1つである炭化物の形状係数では、その増大(凹凸度の増大)につれて、界面の切り欠きを鋭くさせることになり、疲労クラックの発生を容易にすると考えられる。これは、炭化物の形状係数が大きくなるにつれて、摩耗量も大きくなって行く結果と一致する(Fig.5.19)。また、抗折強度も材料の疲労強度に相関すると考えられ、その増加にともないフォロワー摩耗量は低下する傾向が見られる(Fig.5.16)。この図中、焼結空孔が粒界に多く存在するP8材は、マクロ硬さが高いにもかかわらず抗折強度が著しく低く、従って疲労強度も大幅に低下すると考えられる。この原因としてはFig.4.4に見られるように、焼結空孔がある粒界に析出した不整合な炭化物が強度を低下させ、S U Hが概説しているように(9)(10)耐摩耗性の悪化を招いたものと考えられる。

次に、炭化物の面積率と炭化物硬さは耐アブレイシブ摩耗にそれぞれ強い相関性を有する(4)(11)(12))と考えられる。炭化物の析出面積率との関係において、Fig.5.17に示すように、マトリックスが著しく硬く炭化物が非常に細かいハイス系のH1、H2材と鉄基焼結P材とを2つのグループに分けて見れば、析出面積率の増大に伴い耐摩耗性は向上しており、その一部には炭化物の分散強化に起因した強度向上分も含まれていることも考えられる。しかしながら、炭化物硬さはフォロワー摩耗量と強い相関性は見られない(Fig.5.14)。

以上のように、選ばれた6つ説明変数の内、炭化物の面積率と硬さを除く全ての変数が、疲労強度もしくは静的強度に強く係わる材料特性値ということになり、摩耗形態から判断した疲労破壊が支配的な摩耗メカニズムが定量解析からも裏付けられたことになる。今回の結果は、金属材料の疲労強度そのものとすべり摩耗量との強い相関性からすべり摩耗が疲労破壊に支配されることを示した報告(11)(12)を支持するものである。

5. 4. 3. 2 アブレーション作用が支配的なフォロワー摩耗と材料特性値との関係

アブレーション作用が支配的な摩耗形態を示したフォロワー材 P1, C1, C2 および C4 のフォロワー摩耗量とそれらの材料特性値との関係は、式〔8〕に示されるように炭化物硬さと基地硬さの2つの説明変数で表わされた。これらのフォロワー材の摩耗形態においては、P1 材は Fig.4.1, C1 材は Fig.4.9, C4 材は Fig.4.10 に示されるように、いずれもネットワーク状もしくは棒状の粗大炭化物にクラックが入り、それらが摩擦表面に浮き出している状態が観察された。今回の定量解析で選ばれた2つの変数は、炭化物硬さが高くなれば炭化物にクラックは入り難くなるし、基地硬さが高くなれば炭化物が浮き出され難くなることを意味すると考えられ、それによって式〔8〕の関係が得られたものと解釈される。

5. 5 第5章のまとめ

低速試験後における、種々の金属フォロワー材を用いた場合の、カムおよびフォロワーの摩耗量とフォロワー材料特性値との相関関係を定量的に解析し、前章の摩耗形態との関係を調べた結果、以下のことが明らかになった。

(1) カムの摩耗量は、フォロワー材によってあまり大きく変化せず、今回求めたフォロワー材料特性値との強い相関性も認められなかった。

(2) 析出面積の重み付けを施した炭化物の平均粒径および形状係数は、フォロワー摩耗量と強い相関性を示し、両者ともに大きいほど摩耗量は増加して行く傾向を示した。

(3) 表面の観察結果から疲労摩耗に主に支配されると考えられたフォロワー材料群 (P1 を除く鉄基焼結合金材 P シリーズと高速度鋼焼結材 H1 と H2) においては、2つの材料特性値すなわちマクロ硬さと炭化物の粒径に強い相関関係が得られ、さらには有意水準が低いものの、抗折強度と炭化物の面積、形状係数および硬さを加えた6つの材料特性値とフォロワー摩耗量との間に非常に強い相関関係が得られた。この結果から、従来からカムとフォロワーとの融着性で決定されると言われてきた「スカuffing」摩耗が、疲労破壊に支配されること、そしてそれらに密接した材料特性値でフォロワー摩耗量を定量予測できることが明らかとなった。

(4) アブレーション摩耗に主に支配されると考えられたフォロワー材料群 (鉄基焼結合金材 P1 と 鋳鉄材 C1, C2 および C4) においては、炭化物硬さと基地硬さの材料特性値とフォロワー摩耗量との間に強い相関関係が見いだされた。

第5章の参考文献：

- (1) LUZEX II 操作説明書 QJ8069.0 (株) ニレコ.
- (2) 尾上 守夫編：画像処理ハンドブック，画像処理ハンドブック編集委員会編，昭見堂，324.
- (3) 吹抜 敬彦：FAX,OAのための画像の信号処理，日刊工業新聞社，31.
- (4) 新村：SASRegression Applications, 朝倉書店，東京，(1986).
- (5) 柳井ら：多変量解析ハンドブック，現代数学社，京都，(1989) 22.
- (6) 曾田 範宗，山本 隆司：潤滑，20, 4, (1975) 268.
- (7) 村上 敬宣：鉄と鋼，第75年，8，(1989) 1267.
- (8) 村上 敬宣，遠藤 正浩：材料，35, 395，(1986) 911.
- (9) N.P.Suh : Wear, 44, (1977) 1.
- (10) N.Saka, J.J.Pamies-Teixeira and N.P.Suh : Wear, 44, (1977) 77.
- (11) N.Soda, Y.Kimura and A.Tanaka : Wear, 43, (1977) 165.
- (12) Y.Kimura : Preprints, 1980ASM, Materials Science Seminar, (1980) 1.

Table 5.1 Material properties of follower

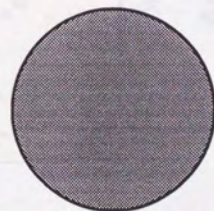
Test material	Macro-hardness (HRC)	Carbide hardness (HV)	Matrix hardness (HV)	Bending strength (MPa)	Total Area of carbides (%)	Average size of carbides* (μm)	Average shape factor of carbides*	Wear	
								Cam	Follower index
P1	65	1280	486	540	35	21	5.14	0.83	0.59
P2	62	1378	545	1590	28	11	3.02	1.25	0.77
P3	60	1205	729	1660	19	8	1.75	1.00	1.00
P4	59	1343	608	1590	25	28	4.03	0.88	2.17
P5	59	1345	538	1560	24	20	2.77	1.09	1.73
P6	57	1016	409	1060	19	14	2.47	0.53	2.33
P7	51	1119	412	1450	18	31	5.51	1.02	3.67
P8	60	1219	765	640	18	40	7.83	0.71	4.85
H1	60	2300	823	1962	8	5	1.87	0.72	0.62
H2	66	1300	826	2030	14	9	3.44	0.58	0.26
TC	69	1155	—	—	67	5	6.10	0.41	0.15
SN	73	(1340)	—	—	—	—	—	0.66	0.62
C1	59	1500	400	890	49	40	8.10	0.55	1.35
C2	51	1062	244	1080	37	36	8.32	1.16	2.32
C4	55	601	353	600	36	28	9.56	1.43	6.36
ST	33	—	330	—	—	—	—	0.40	43.5
CAM	49	—	—	—	—	—	—	—	—

* Area-weighted average values , (Silicon nitride)

CARBIDE SHAPE FACTOR

$$= \frac{\text{PERIMETER}^2}{4 \pi \times \text{AREA}}$$

C.S.F = 1

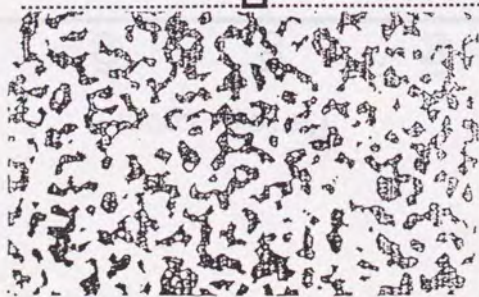


C.S.F = 10



Fig.5.1 Definition of shape factor

P1 microstructure



Total
Count: 136
Area: 35%

1-300 μm^2



S: Count: 61
Area: 3%

1-20 μm^2



M: Count: 48
Area: 10%

20-80 μm^2



L: Count: 27
Area: 22%

80- μm^2

Fig.5.2 Classification of carbide particles

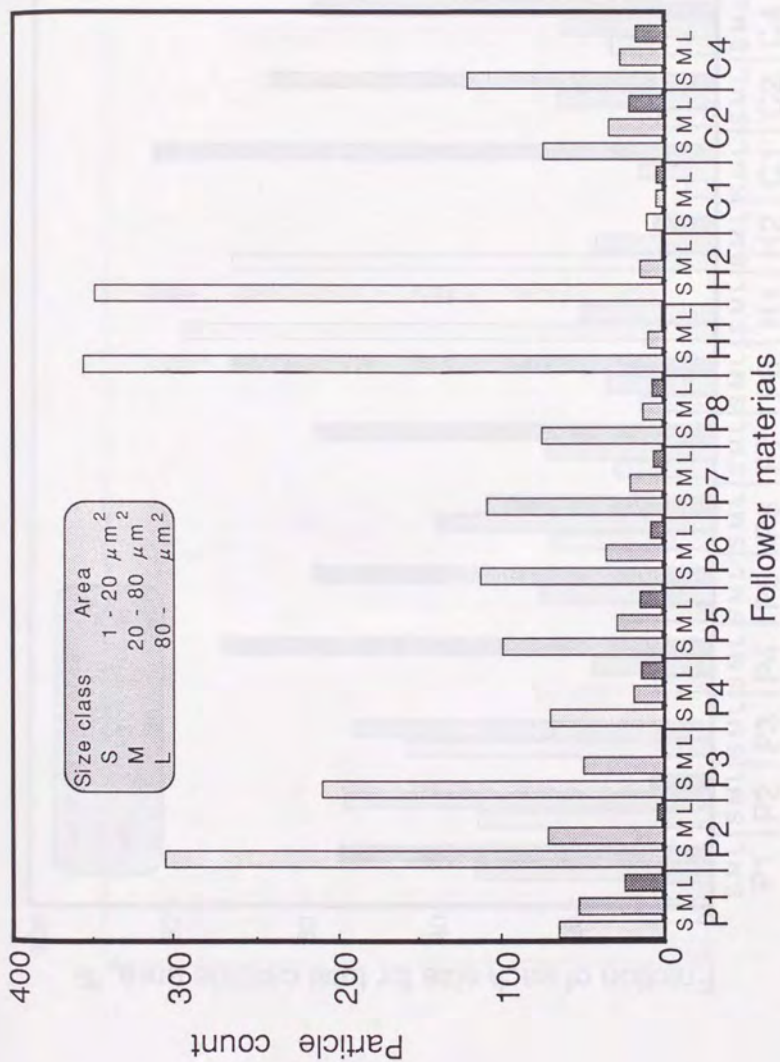


Fig.5.3 Carbide particle count for each size class

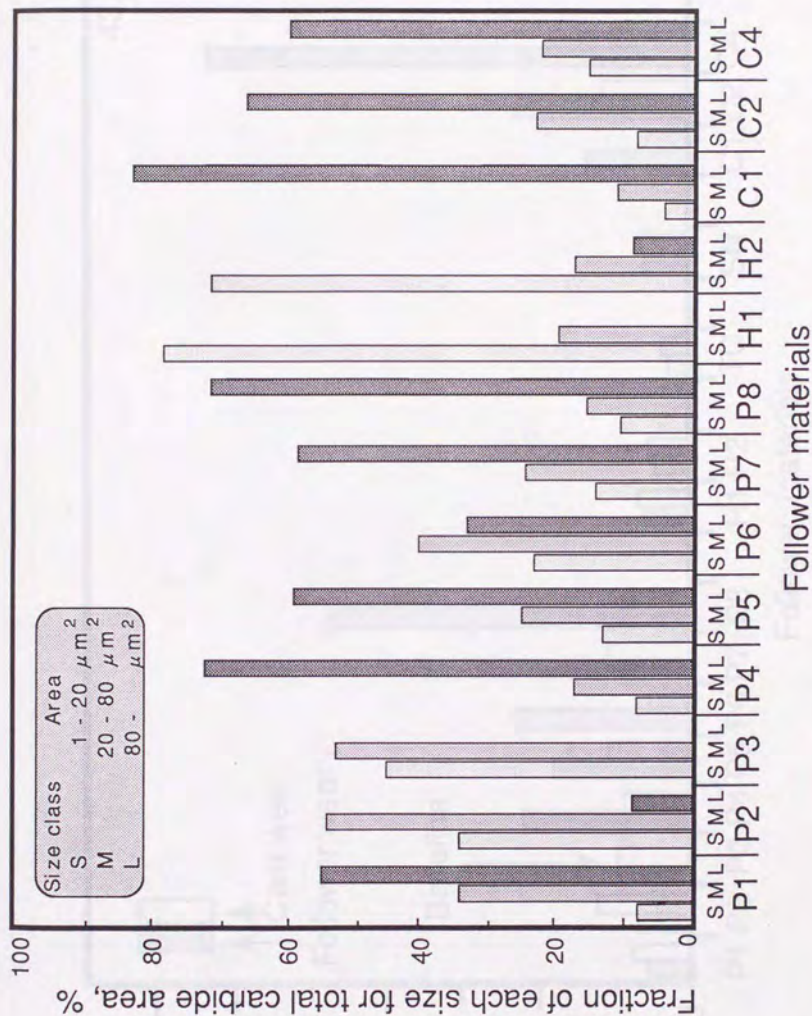


Fig.5.4 Carbide area ratio for each size class

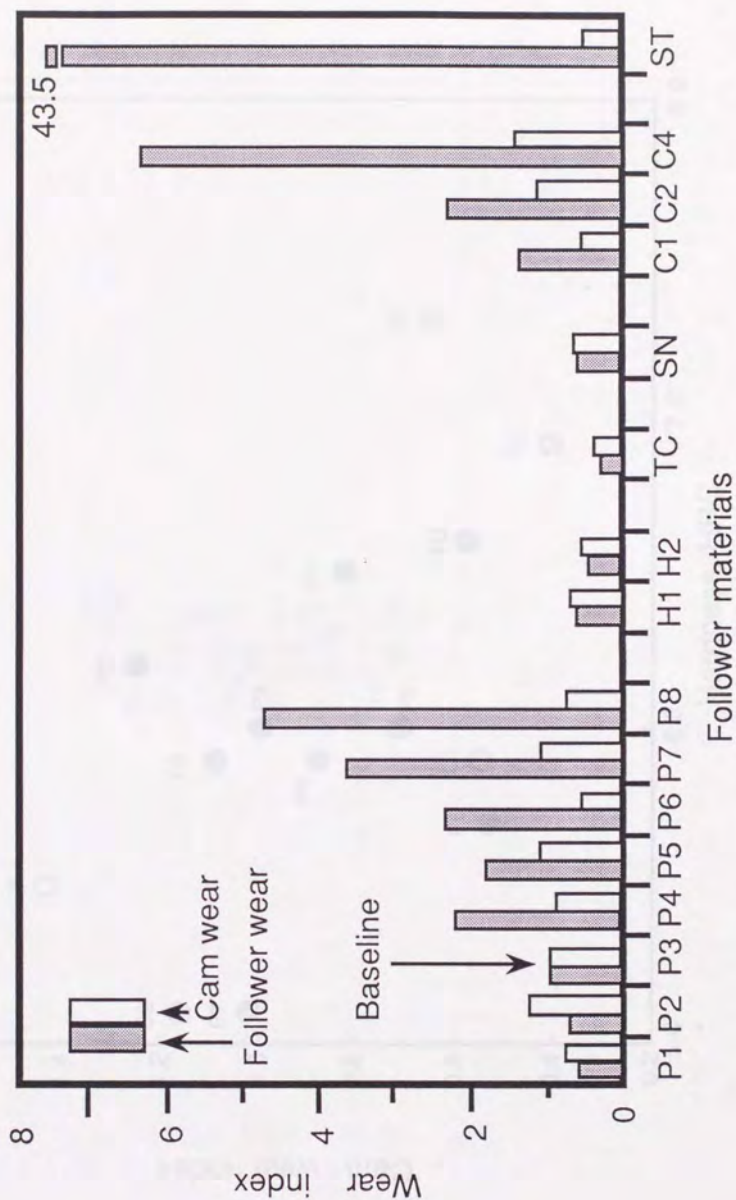


Fig. 5.5 Wear evaluation for follower materials

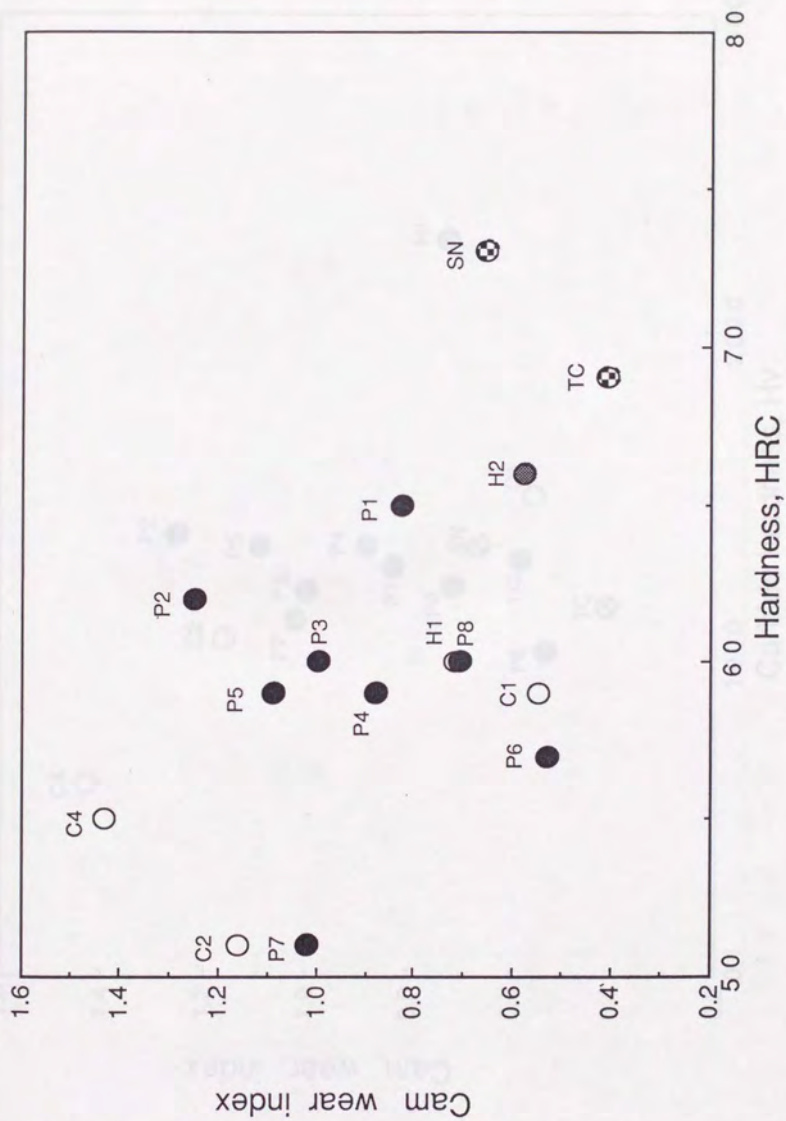


Fig.5.6 Hardness of follower vs. cam wear

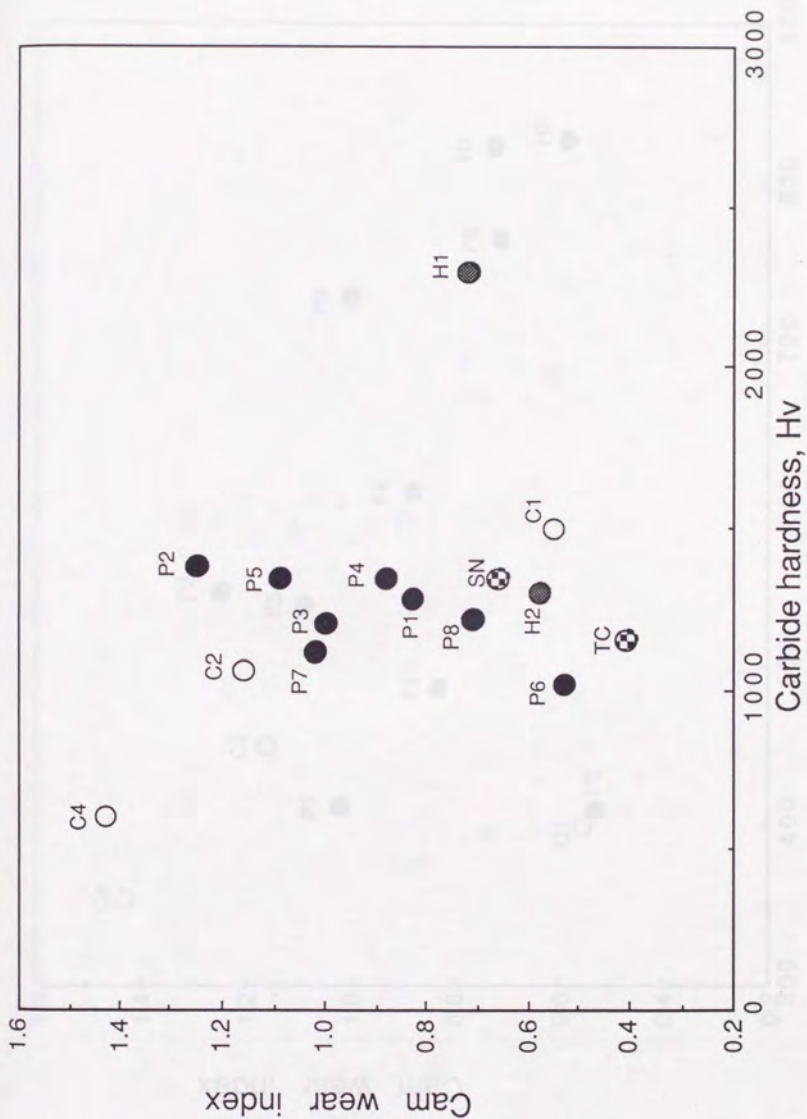


Fig.5.7 Carbide hardness of follower vs. cam wear

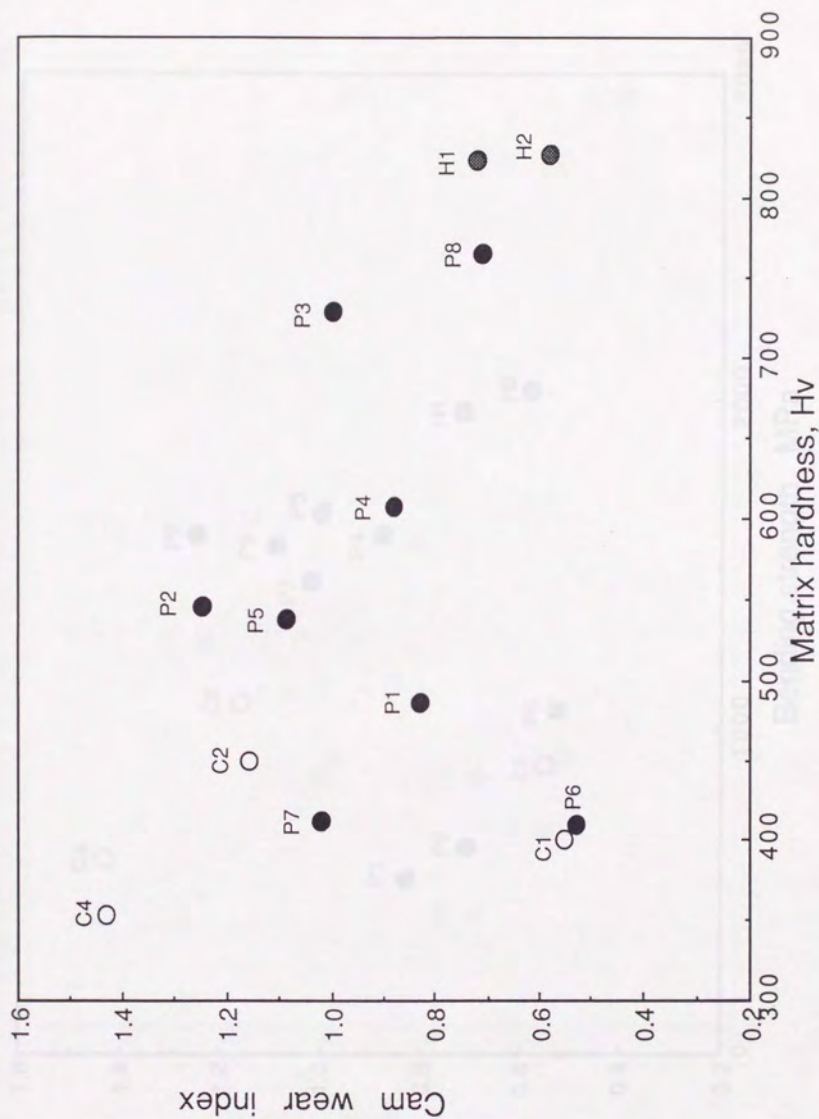


Fig.5.8 Matrix hardness of follower vs. cam wear

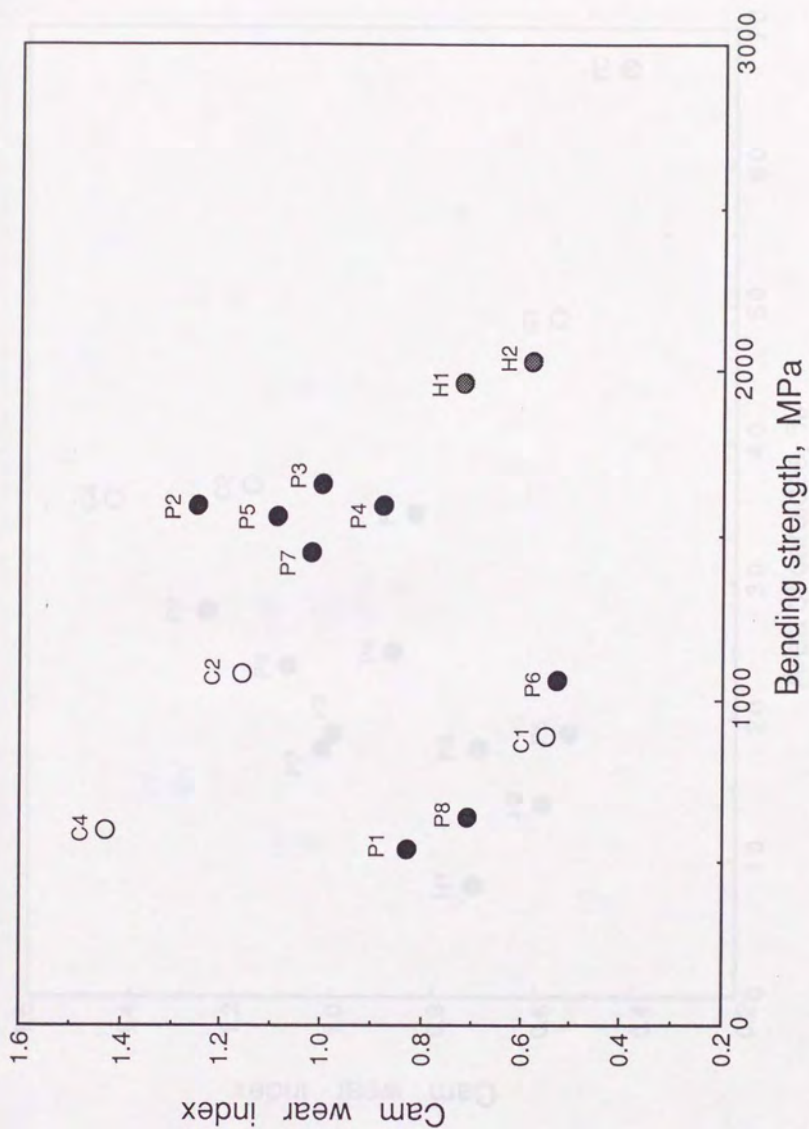


Fig.5.9 Bending strength of follower vs. cam wear

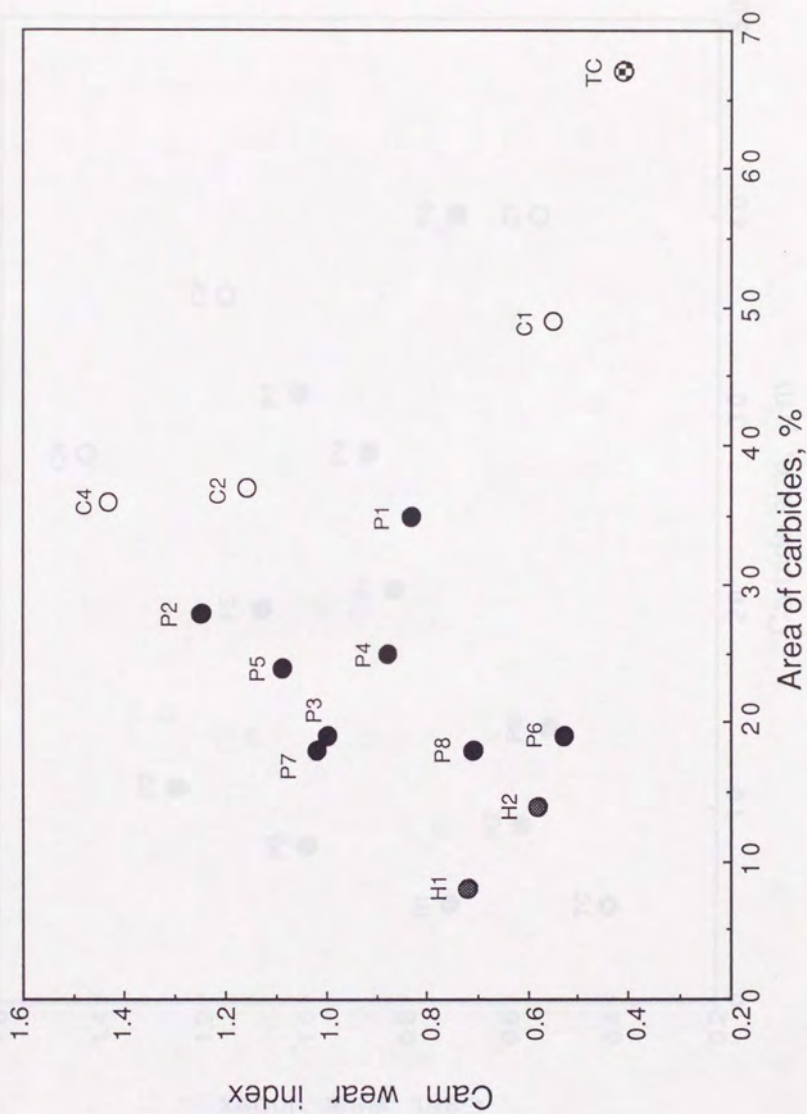


Fig.5.10 Area of carbides of follower vs. cam wear

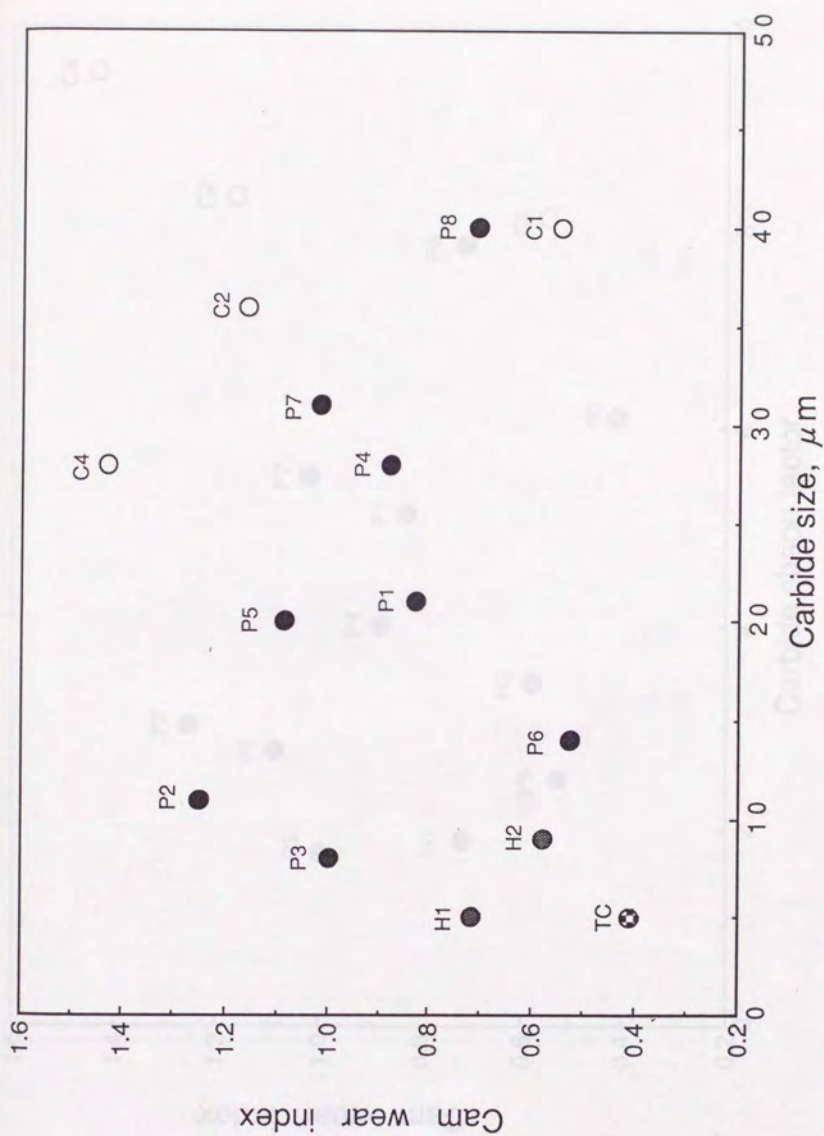


Fig.5.11 Carbide size of follower vs. cam wear

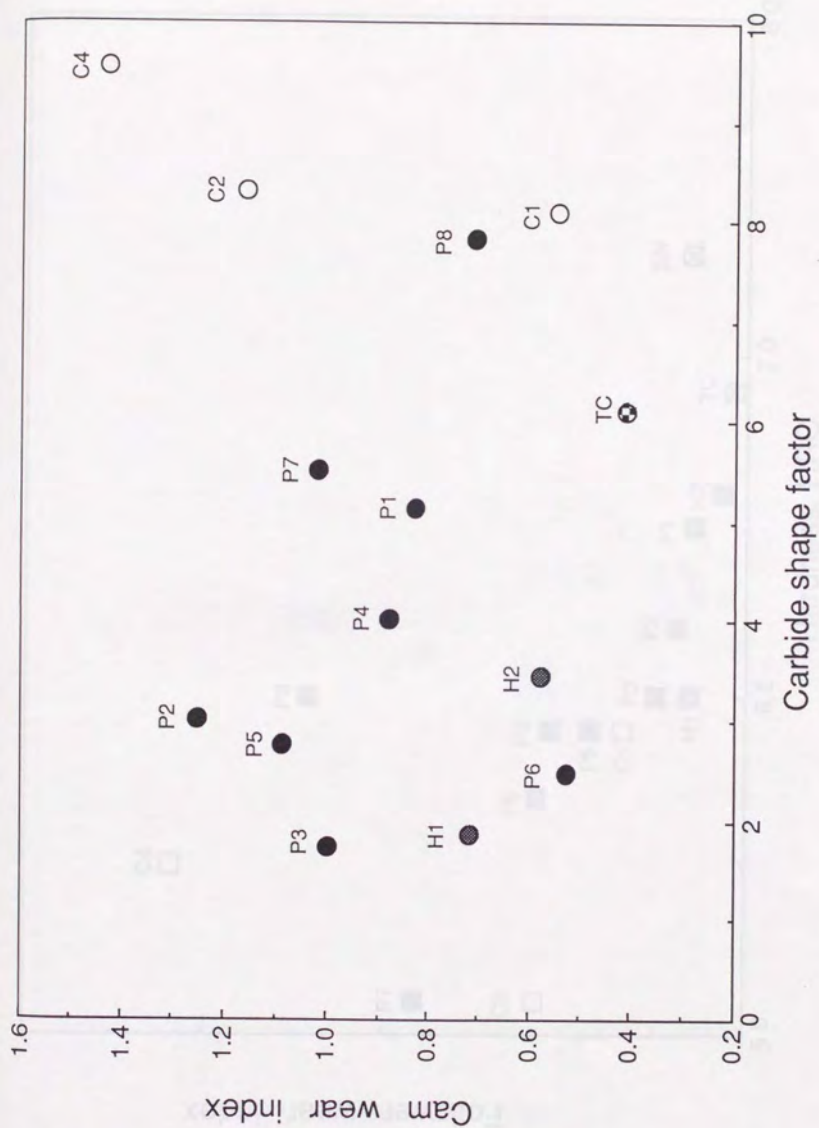


Fig.5.12 Carbide shape factor of follower vs. cam wear

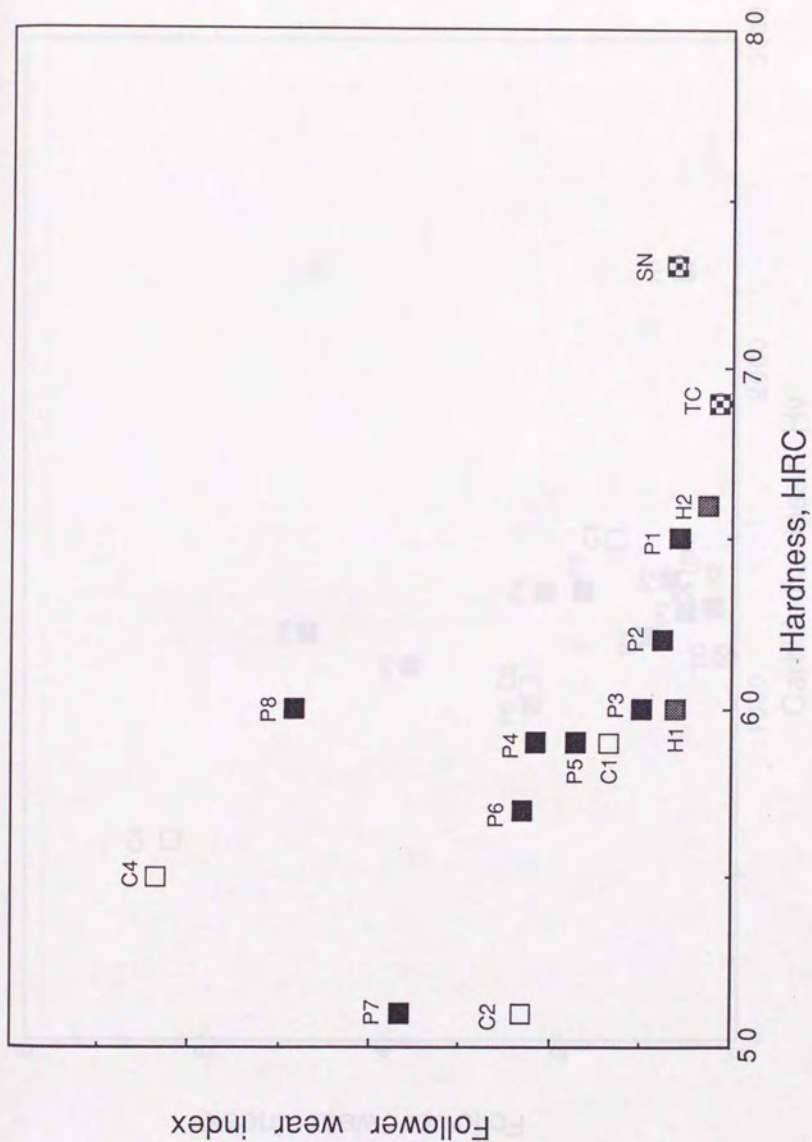


Fig.5.13 Hardness of follower vs. follower wear

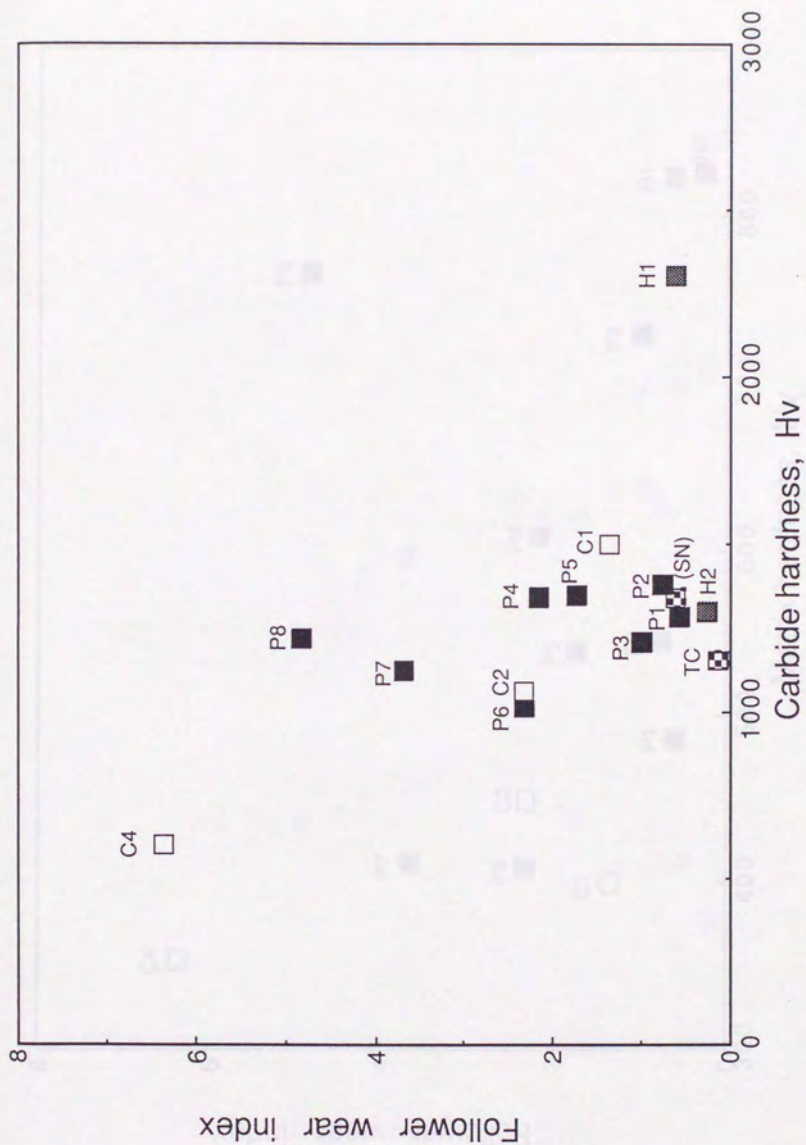


Fig.5.14 Carbide hardness of follower vs. follower wear

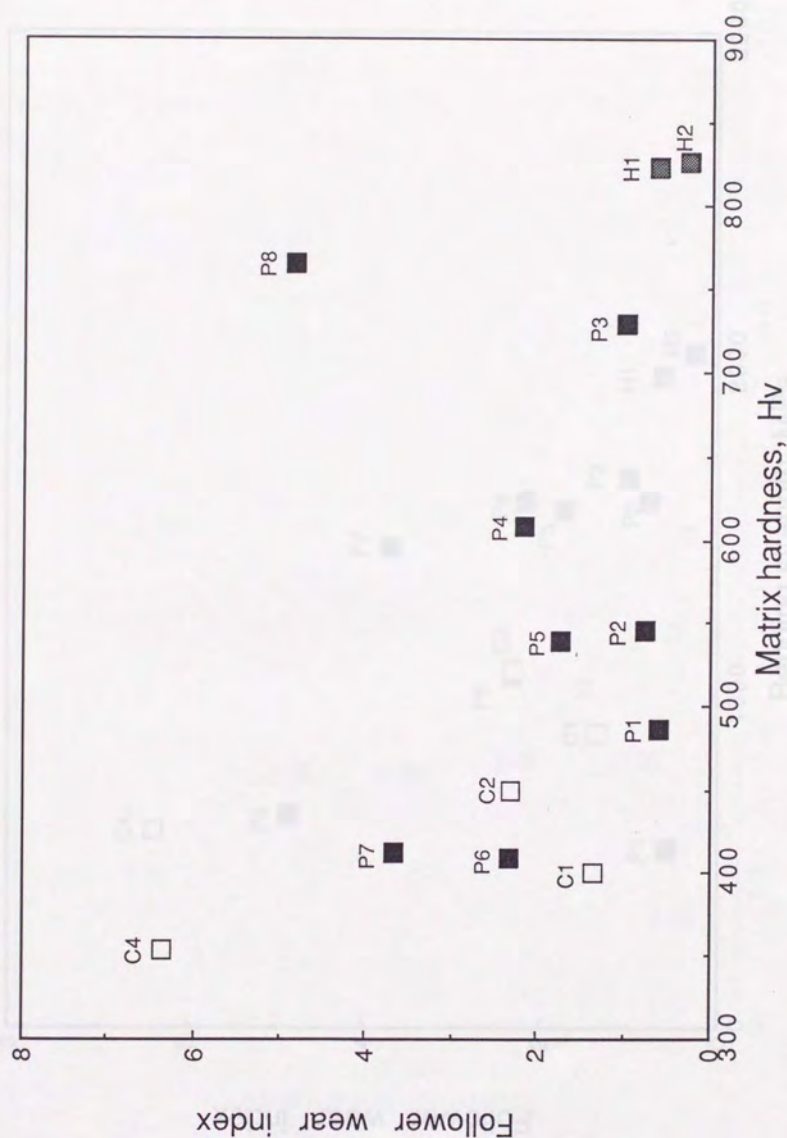


Fig.5.15 Matrix hardness of follower vs. follower wear

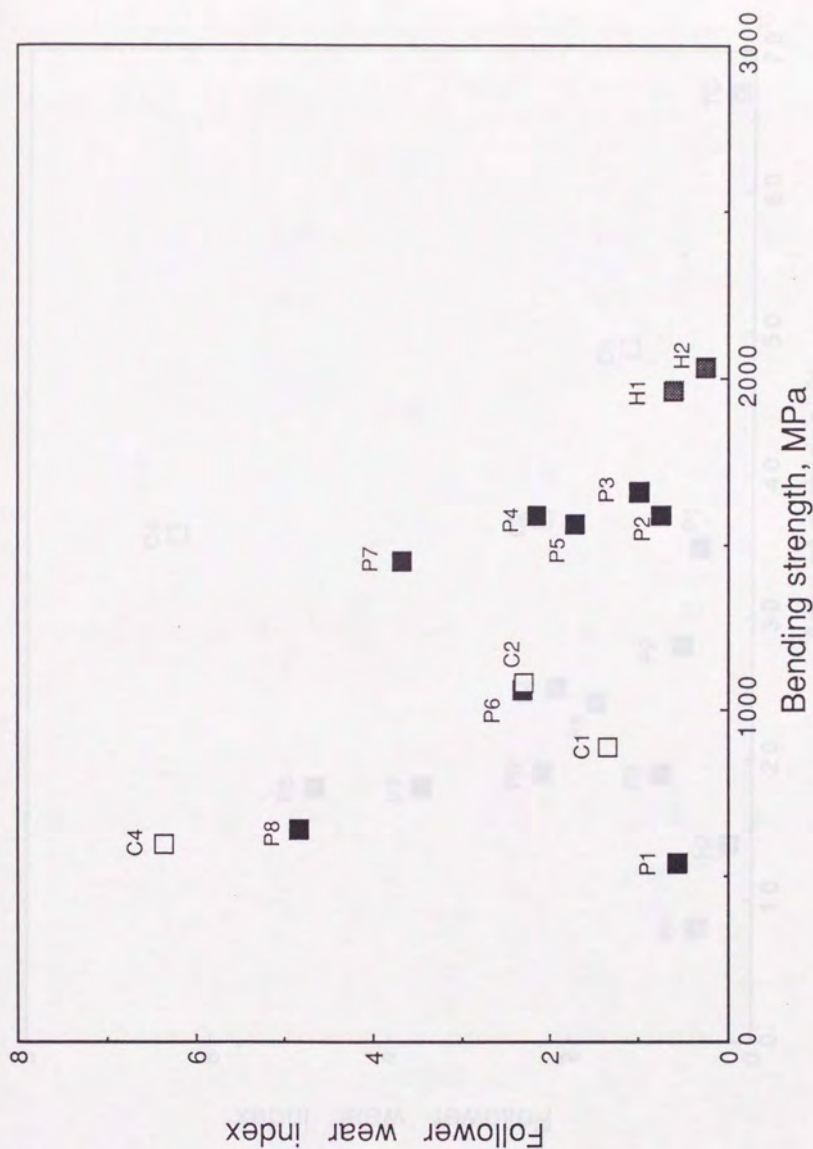


Fig.5.16 Bending strength of follower vs. follower wear

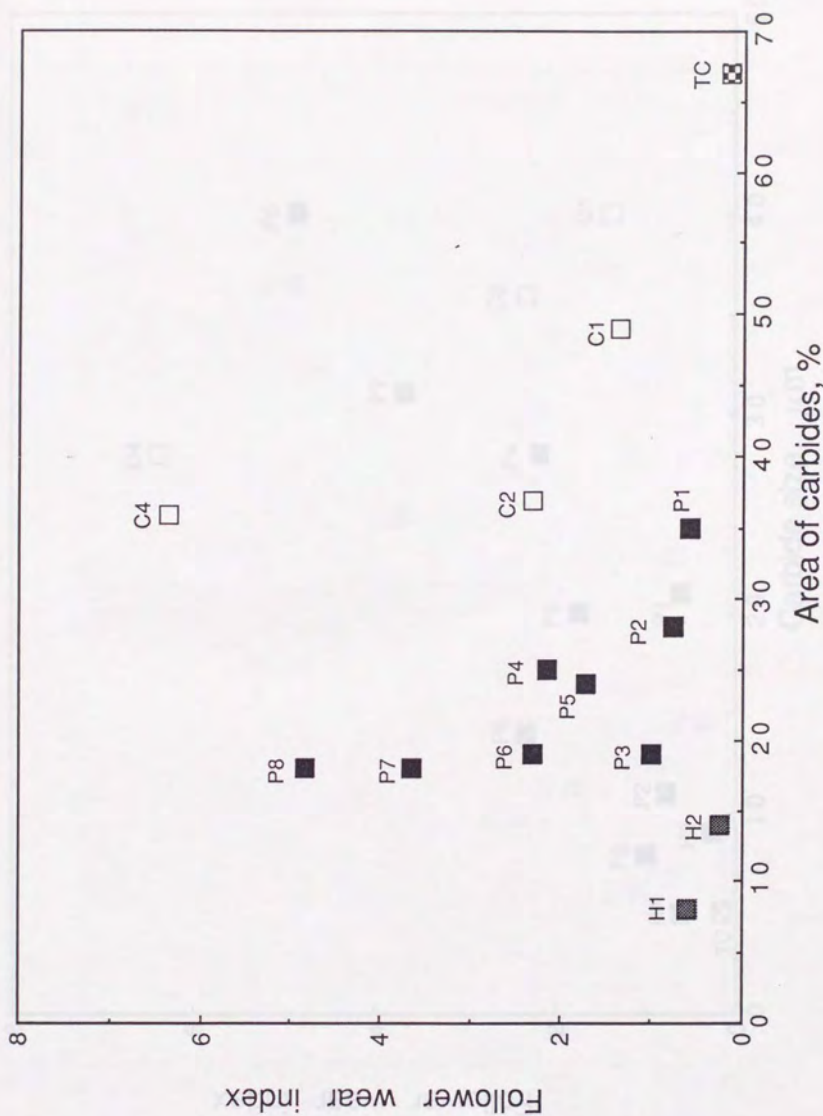


Fig.5.17 Area of carbides of follower vs. follower wear

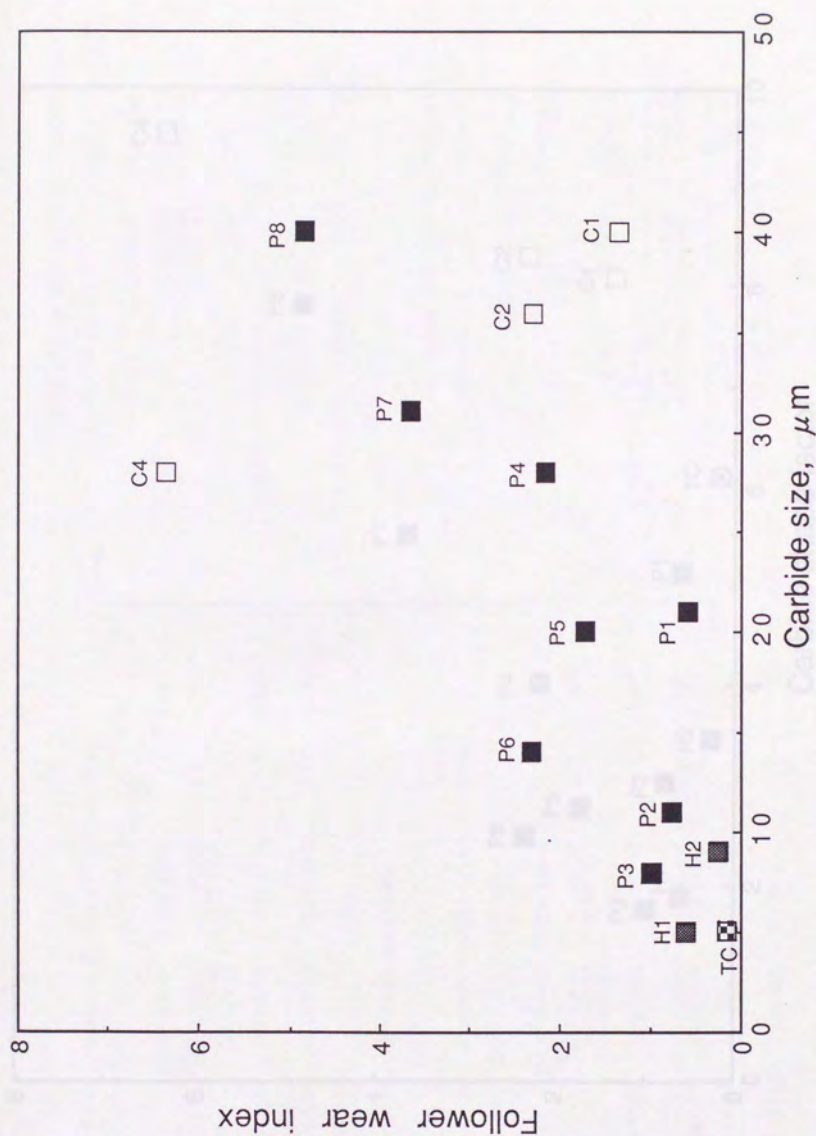


Fig.5.18 Carbide size of follower vs. follower wear

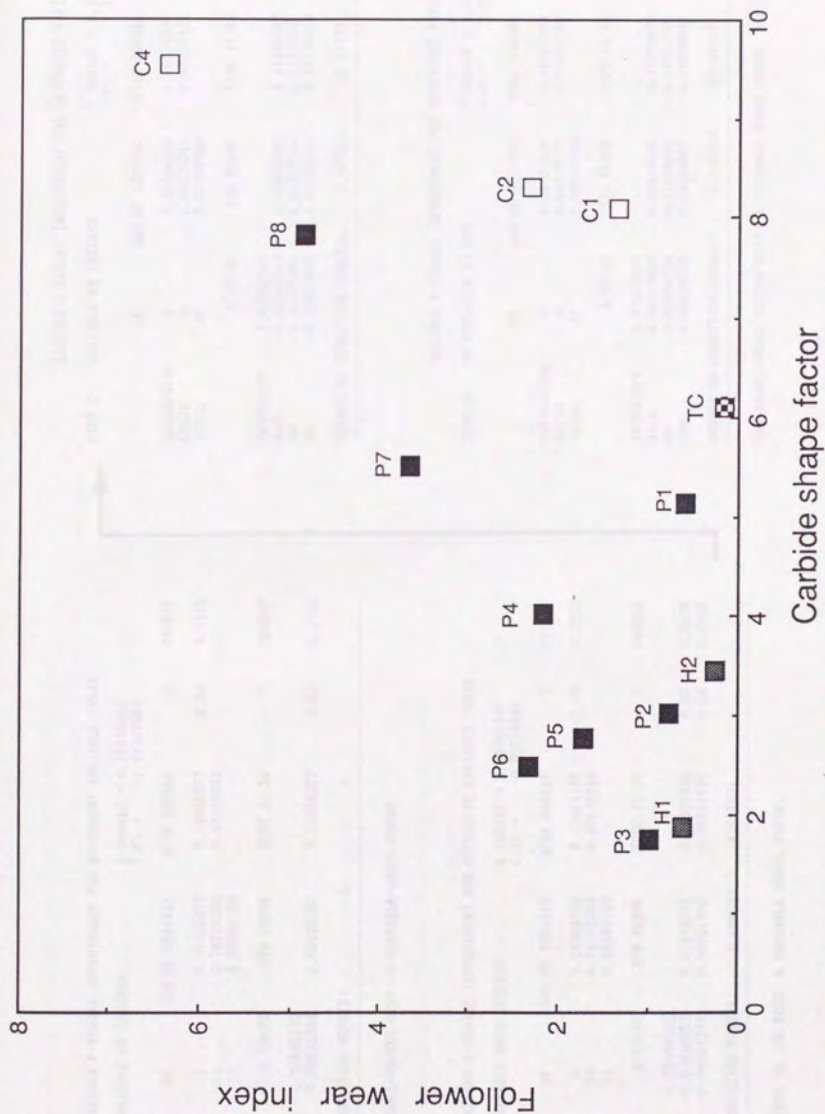


Fig.5.19 Carbide shape factor of follower vs. follower wear

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE CVEAR

STEP 1		VARIABLE H1 ENTERED		R SQUARE = 0.18570032 C(P) = -1.61347083	
REGRESSION	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
ERROR	1	0.17956377	0.17956377	2.51	0.1415
TOTAL	11	0.78734302	0.07157672		
	12	0.9690769			
INTERCEPT		B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	PROB>F
H1	1	1.31606170			
DD	-0.00032306	0.00020307	0.17956377	2.51	0.1415
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 1. 1					

---THE ABOVE MODEL IS THE BEST 1-VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE CVEAR

STEP 2		VARIABLE H1 ENTERED		R SQUARE = 0.25781547 C(P) = -0.28755088	
REGRESSION	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
ERROR	2	0.24028376	0.12014188	1.74	0.2252
TOTAL	10	0.71762303	0.07176239		
	12	0.9690769			
INTERCEPT		B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	PROB>F
H1	2	2.28400205	0.01845372	0.06071899	0.97
DD	-0.01818922	0.00021990	0.08741924	1.22	0.2956
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 1.159333. 4.637331					

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 2 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE CVEAR

STEP 3		VARIABLE DD ENTERED		R SQUARE = 0.31507070 C(P) = 1.21307143	
REGRESSION	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
ERROR	3	0.30464428	0.10154809	1.38	0.3104
TOTAL	9	0.66226341	0.07358482		
	12	0.9690769			
INTERCEPT		B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	PROB>F
H1	2	2.02682549	0.02056422	0.11453267	1.55
DD	-0.02563547	0.00022804	0.11733032	1.59	0.2384
DD	-0.00028922	0.00750314	0.05536052	0.75	0.4083
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 1.407011. 12.11277					

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE CVEAR

STEP 3		H1 REPLACED BY SP1		R SQUARE = 0.32275971 C(P) = 1.09796796	
REGRESSION	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
ERROR	3	0.31091339	0.10363780	1.46	0.2889
TOTAL	9	0.64090431	0.07222159		
	12	0.9690769			
INTERCEPT		B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	PROB>F
H1	2	2.77043017	0.01983066	0.17873830	2.47
DD	-0.03110002	0.01255841	0.14016709	2.07	0.1845
SP1	0.00073705	0.00055021	0.12959942	1.79	0.2132
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 4.016079. 27.18468					

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 3 VARIABLE MODEL FOUND.

Fig.5.20 Result of stepwise procedure for cam wear

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

R SQUARE = 0.45736871
C(P) = 8.14038935

STEP 1	VARIABLE SPH ENTERED	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
1	REGRESSION	1	18.19217121	18.19217121	9.27	0.0111
	ERROR	11	21.58355187	1.96214108		
	TOTAL	12	39.77572308			

B VALUE STD ERROR TYPE II SS F PROB>F

INTERCEPT	-0.06837608	0.00148787	18.19217121	9.27	0.0111
SPH	0.00453046				

ROUNDS ON CONDITION NUMBER: 1

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 1 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 2		VARIABLE AREA ENTERED		R SQUARE = 0.63401014 C(P) = 4.53260734	
DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F	
REGRESSION	2	25.25430808	12.62718404	8.70	0.0065
ERROR	10	14.52135500	1.45213550		
TOTAL	12	39.77572308			
		B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	F
INTERCEPT		1.00877460	0.04118353	7.00210687	4.86
AREA		-0.00842170	0.00171056	24.54721154	16.80
SPH		0.00703293			
ROUNDS ON CONDITION NUMBER:		1.78595	7.143801		
					0.0520
					0.0021

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 2 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 3		VARIABLE INH ENTERED		R SQUARE = 0.76556877 C(P) = 2.40510671	
	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	3	30.45105130	10.15035043	9.80	0.0034
ERROR	9	9.32467177	1.03607404		
TOTAL	12	39.77572308			
B VALUE		STD ERROR	TYPE II SS	F	PROB>F
INTERCEPT	4.30035658				
INH	-0.00200186	0.00089385	5.16668322	5.02	0.0519
AREA	-0.09490057	0.03483453	7.68969104	7.42	0.0234
SPH	0.00576704	0.00155150	14.31506438	13.82	0.0048
ROUNDS ON CONDITION NUMBER:		2.059264	15.53055		

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 3 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 4		VARIABLE BU ENTERED		R SQUARE = 0.82620203 C(P) = 2.48985087	
	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	4	32.86278321	8.21569580	9.51	0.0039
ERROR	8	6.91203987	0.86411748		
TOTAL	12	39.77572308			
		B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	F
INTERCEPT		6.78674180			
INH		-0.00173009	0.00083126	3.78482788	0.0697
OH		-0.00381801	0.00228538	2.41173191	0.1333
AREA		-0.19274743	0.03678287	10.09034441	0.0091
SPH		0.00589253	0.00141890	14.96233894	0.0032

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 4 VARIABLE MODEL FOUND.

Fig.5.21 Result of stepwise procedure for follower wear

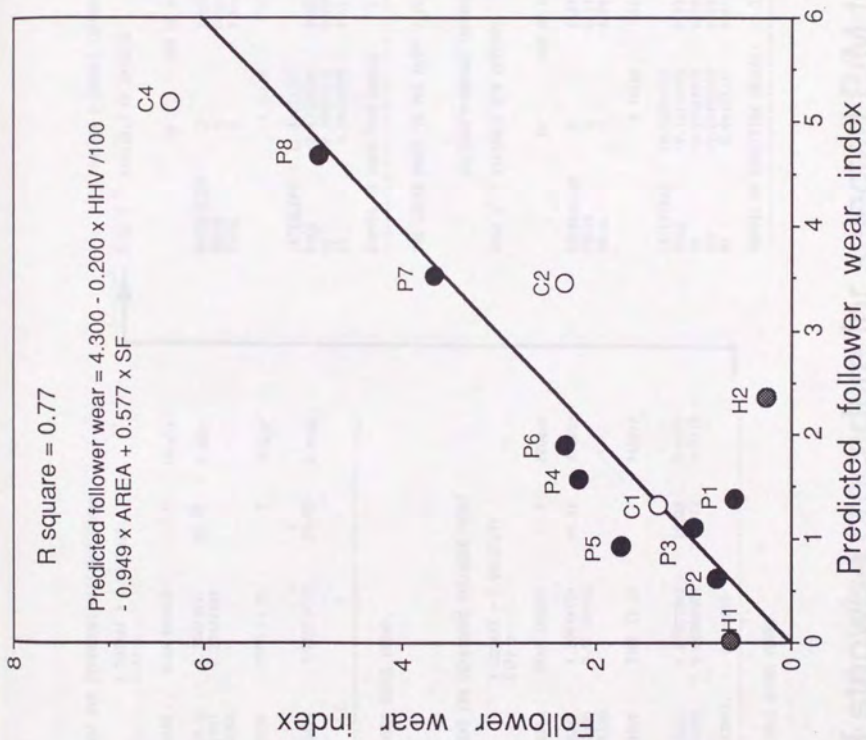


Fig.5.22 Follower wear vs. predicted follower wear

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 1 VARIABLE MACH ENTERED R SQUARE = 0.86370101 C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	1	7.73671417	38.05	0.0008
ERROR	6	1.21997333		
TOTAL	7	8.95668750		
B VALUE				
INTERCEPT	10.16400000			
MACH	-0.24633333	0.03993415	7.73671417	0.0008
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 1.				
TYPE II SS				
INTERCEPT	10.16400000			
MACH	-0.24633333	0.03993415	7.73671417	0.0008

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 1 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 2 VARIABLE DO ENTERED R SQUARE = 0.90025271 C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	2	8.60068341	4.30034170	0.0003
ERROR	5	0.35600409	0.07120042	
TOTAL	7	8.95668750		
B VALUE				
INTERCEPT	10.7675574			
MACH	-0.16767513	0.03268525	1.87377992	0.0037
DO	-0.05052353	-0.01450398	-0.86306924	-0.0176
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 1.913001, 7.652245				
TYPE II SS				
INTERCEPT	10.7675574			
MACH	-0.16767513	0.03268525	1.87377992	0.0037
DO	-0.05052353	-0.01450398	-0.86306924	-0.0176

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 2 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 3 VARIABLE IHH ENTERED R SQUARE = 0.98250703 C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	3	8.60008847	2.03333616	0.0006
ERROR	4	0.15667003	0.03916976	
TOTAL	7	8.95668750		
B VALUE				
INTERCEPT	11.81214703			
MACH	-0.17250600	0.02433307	1.06612604	0.0021
IHH	-0.00048135	0.00011338	0.00252507	0.0811
DO	0.04020300	0.01169928	0.46344733	0.0263
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 2.258731, 16.34694				
TYPE II SS				
INTERCEPT	11.81214703			
MACH	-0.17250600	0.02433307	1.06612604	0.0021
IHH	-0.00048135	0.00011338	0.00252507	0.0811
DO	0.04020300	0.01169928	0.46344733	0.0263

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 3 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 4 VARIABLE STR ENTERED R SQUARE = 0.98664703 C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	4	8.83708014	2.20927229	0.0038
ERROR	3	0.11958336	0.03956612	
TOTAL	7	8.95668750		
B VALUE				
INTERCEPT	10.93932947			
MACH	-0.15166086	0.03263231	0.86110363	0.0182
IHH	-0.00028809	0.00029410	0.03825283	0.3995
STR	-0.00441392	0.00441392	0.03708067	0.4060
DO	0.04432331	0.01254099	0.49797188	0.0365
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 3.405664, 45.63871				
TYPE II SS				
INTERCEPT	10.93932947			
MACH	-0.15166086	0.03263231	0.86110363	0.0182
IHH	-0.00028809	0.00029410	0.03825283	0.3995
STR	-0.00441392	0.00441392	0.03708067	0.4060
DO	0.04432331	0.01254099	0.49797188	0.0365

Fig.5.23 Result of stepwise procedure for selected P/M follower wear(1)

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 4: H11 REPLACED BY AREA

R SQUARE = 0.99519243
C(P) = .

	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	4	8.91362756	2.22840689	155.25	0.0008
ERROR	3	0.04305094	0.01435331		
TOTAL	7	8.95668750			
	B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	F	PROB>F
INTERCEPT	8.54579612	0.02296114	0.23116848	16.11	0.0278
H11	-0.00214710	0.00259217	0.31116902	21.68	0.0187
STR	-0.01200941	0.01130100	0.11479125	8.00	0.0663
AREA	-0.03195016	0.00864168	0.85108952	59.30	0.0046
DD	0.00654415				
BOUNDS ON CONDITION NUMBER:			54.3028		
			4.683224.		

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 4 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

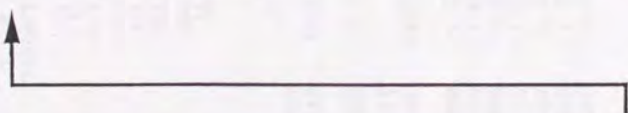
STEP 5: VARIABLE H11 ENTERED

R SQUARE = 0.99943100
C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	5	1.79031824	702.59	0.0014
ERROR	2	0.00254816		
TOTAL	7	8.95668750		
B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	F	PROB>F
INTERCEPT	9.50212016	0.26005822	105.59	0.0003
HACH1	-0.10800526	0.01051078	14.90	0.0010
HACH2	-0.00028700	0.00007435	0.03796362	0.0206
STR	-0.00912847	0.00133170	46.99	0.0015
AREA	-0.03191895	0.00476162	44.94	0.0014
DD	0.006030150	0.11450205	230.85	0.0043

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 5 VARIABLE MODEL FOUND.

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR



STEP 6: VARIABLE SPH ENTERED

R SQUARE = 0.99999992
C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
REGRESSION	6	8.95668676	1.40278113	999999.99
ERROR	1	0.00000074	0.00000074	0.0001
TOTAL	7	8.95668750		
B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	F	PROB>F
INTERCEPT	9.40478123	0.00018020	0.26113895	351052.45
H11	-0.10877047	0.00000142	0.02053962	27611.68
H12	-0.00023527	0.00002511	0.11814668	15826.10
STR	-0.01009791	0.00008315	0.10006837	134523.20
AREA	-0.03049727	0.00008315	0.10006837	134523.20
DD	0.05465827	0.00009701	0.23615146	317461.44
SPH	0.00050709	0.00000613	0.00500557	6850.04
BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 8.191452.				

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 6 VARIABLE MODEL FOUND.

Fig.5.24 Result of stepwise procedure for selected P/M follower wear(2)

VARIABLE	DF	PARAMETER ESTIMATE	STANDARD ERROR	T FOR HO: PARAMETER=0	PROB > T
INTERCEP	1	9.40478123	0.008991330	1045.983	0.0006
HACH	1	-0.10677047	0.000180204	-592.497	0.0011
HH	1	-0.000235266	0.0000141584	-166.168	0.0038
STR	1	-0.01000791	0.000025112	-398.530	0.0016
AREA	1	-0.03049727	0.000083150	-366.774	0.0017
DD	1	0.05465827	0.000097009	563.437	0.0011
SPH	1	0.000507090	0.00000612687	82.765	0.0077

OBS	ACTUAL	PREDICT VALUE	RESIDUAL
1	1.0000	1.0003	-3.0E-04
OBS	ACTUAL	PREDICT VALUE	RESIDUAL
2	2.3300	2.3300	-1.5E-05
3	0.2600	0.2599	1.2E-04
4	3.6700	3.6699	6.0E-05
5	2.1700	2.1705	-4.6E-04
6	1.7300	1.7294	6.5E-04
7	0.7700	0.7700	-1.7E-05
8	0.6200	0.6200	-3.0E-05

SUM OF RESIDUALS 6.12982E-14
 SUM OF SQUARED RESIDUALS 7.43874E-07

Fig.5.25 Result of regression procedure for selected P/M follower wear

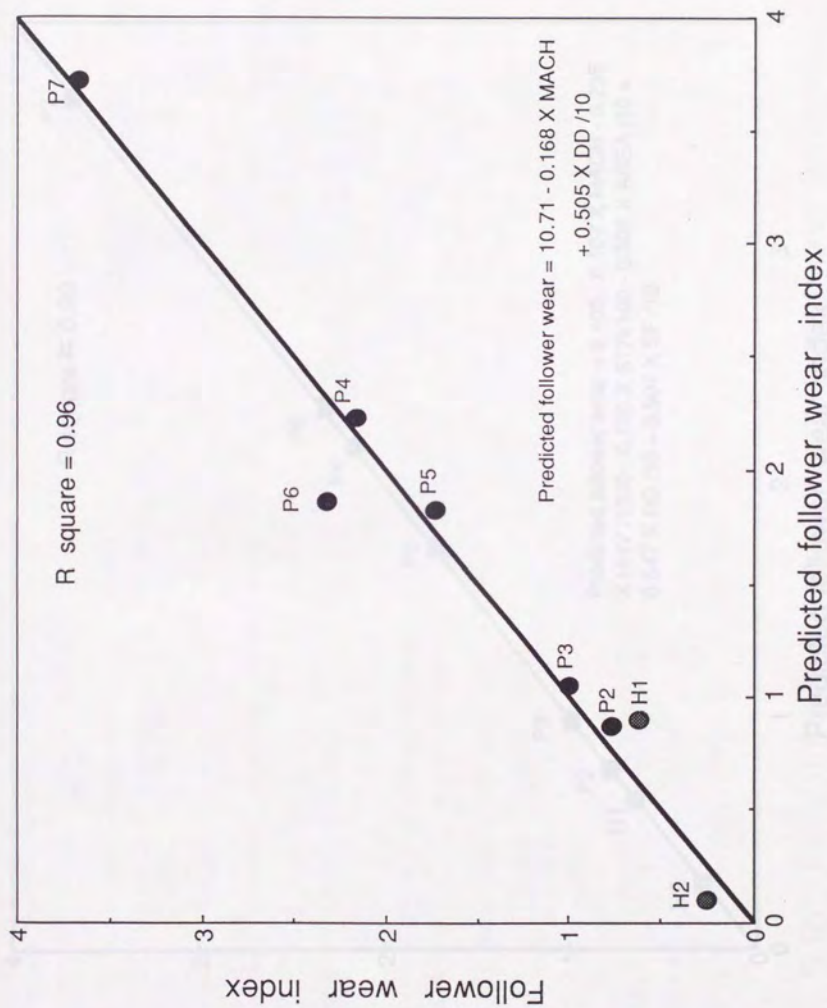


Fig.5.26 P/M follower wear vs. predicted follower wear (Step 2)

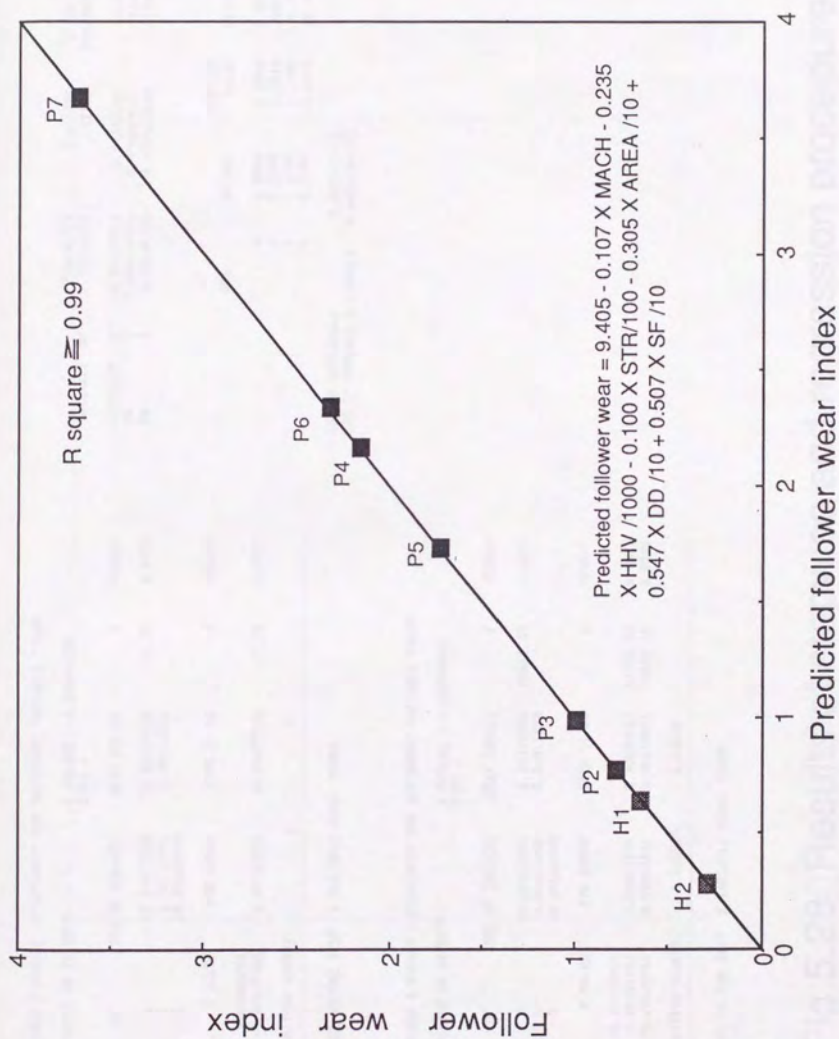


Fig.5.27 Selected P/M follower wear vs. predicted follower wear

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 1 VARIABLE BN ENTERED R SQUARE = 0.8504180
C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F	VARIABLE	DF	PARAMETER ESTIMATE	STANDARD ERROR	T FOR H0: PARAMETER=0	PROB > T
1	16.84427559	16.84427559	11.37	0.0778	INTERCEPT	1	16.24432954	0.04655306	348.942	0.0018
2	2.96222441	1.48111221			BN	1	-0.004514526	0.000019307	-232.745	0.0027
3	19.80650000					1	-0.02030745	0.000128215	-158.385	0.0040

B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	F	PROB>F	OBS	ACTUAL	PREDICT VALUE	RESIDUAL
INTERCEPT	0.50808894				1	0.5900	0.5903	-0.006317
BN	-0.00017060	0.00182076	11.37	0.0778	2	2.3200	2.3116	-0.008485
BOUNDS ON CONDITION NUMBER:	1.	1			3	1.3500	1.3496	0.0004
					4	6.3600	6.3626	-0.00257

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 1 VARIABLE MODEL FOUND.

SUM OF RESIDUALS 7.02216E-15
SUM OF SQUARED RESIDUALS 0.0001180773

MAXIMUM R-SQUARE IMPROVEMENT FOR DEPENDENT VARIABLE FWEAR

STEP 2 VARIABLE BN ENTERED R SQUARE = 0.00099404
C(P) = .

DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	PROB>F
2	19.80638192	9.90319096	83870.37	0.0024
1	0.00011808	0.00011808		
3	19.80650000			

B VALUE	STD ERROR	TYPE II SS	F	PROB>F
INTERCEPT	16.24432954			
BN	-0.00451453	0.00001940	6.39629625	54170.34
BN	-0.02030745	0.00012821	2.96210634	25086.15

BOUNDS ON CONDITION NUMBER: 1.409595, 5.63838

THE ABOVE MODEL IS THE BEST 2 VARIABLE MODEL FOUND.

Fig.5.28 Results of stepwise and regression procedure for selected follower wear occurred by abrasion

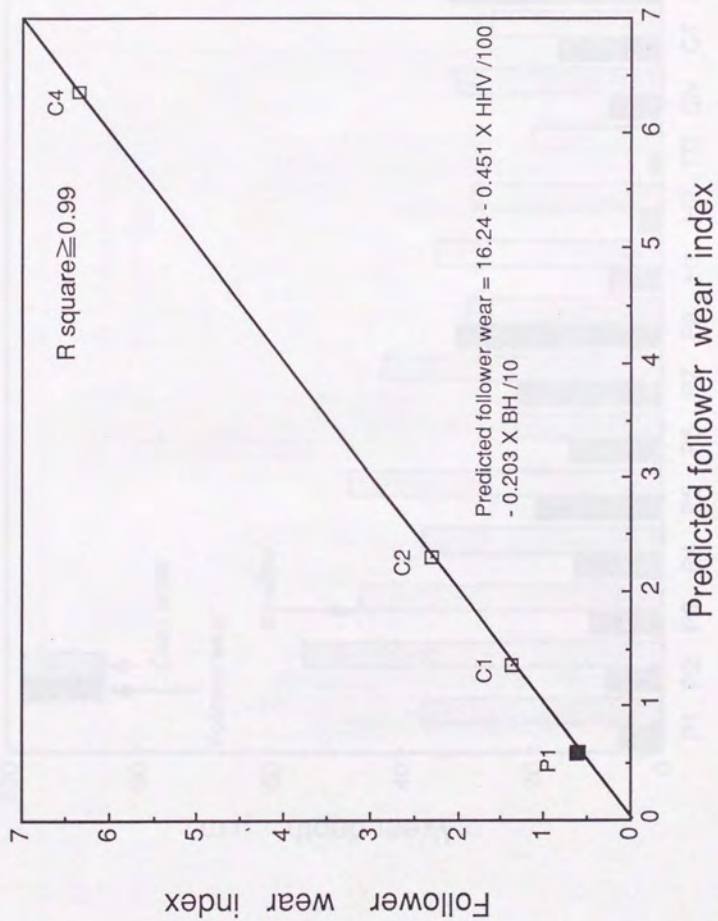


Fig.5.29 Selected follower wear occurred by abrasion vs. predicted follower wear

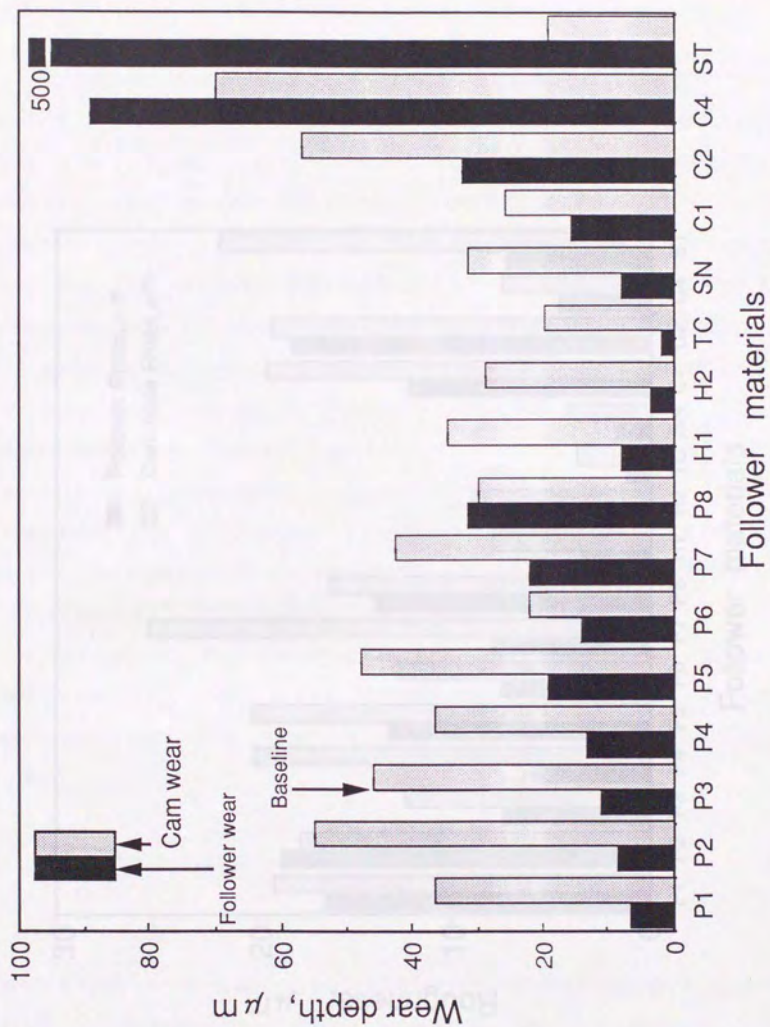


Fig.5.30 Wear depth for follower materials

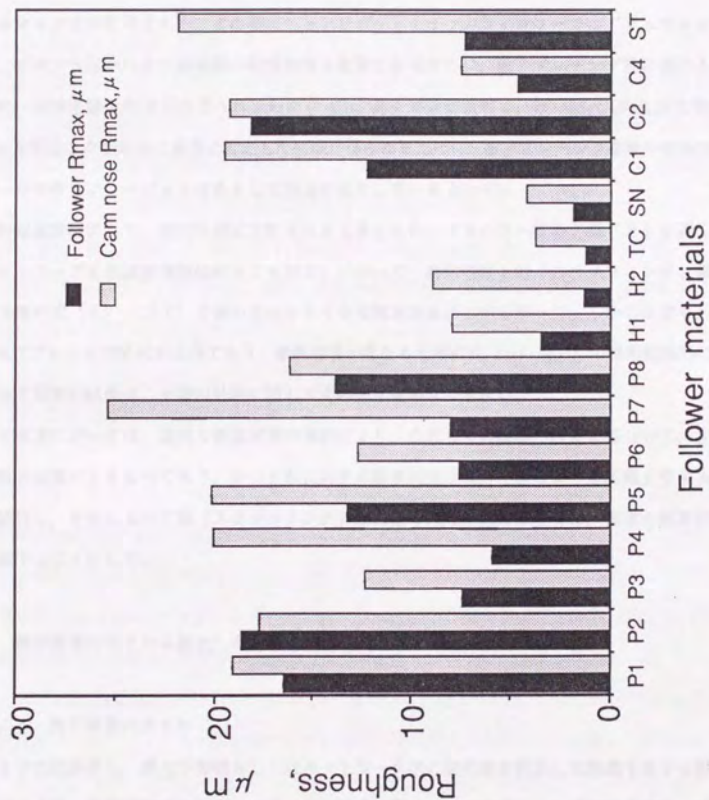


Fig.5.31 Surface roughness after low speed test

第6章 実際の量産フォロワー材料開発への応用

この章では第5章までの結果を基にした、実際のフォロワー材料開発(1-(2)(3))への応用について述べることにする。このフォロワーが搭載されたエンジンは、Fig.1.1に示したSR18DE, SR20DE型エンジンであり、高性能化、コンパクト化や低コスト化の設計要求に伴い、従来一つのバルブに対して一つのフォロワーを用いていたものを図のような一つのY字形状をしたフォロワーで二つのバルブを同時に駆動させる方式が採用された。この種のエンドピボットタイプのフォロワーでは、カムフォロワー部に加えて、ピボット部やバルブ軸端側の耐摩耗性も重要となるために、耐アブレーション性に優れる高クロム鋳鉄材の一体精密鑄造の適用が見られていた(1)-(5)。高クロム鋳鉄材は、硬い M_7C_3 共晶炭化物(M:Fe,Cr)がクロムを固溶した基地中に多量に析出した組織が得られるために、耐アブレーション摩耗や耐熱性に優れ、圧延ロールや耐アブレーション材料として用途が拡大している(1)~(3)。

前章の定量解析により、疲労摩耗に支配されると考えられたフォロワー材料8種(P1を除く鉄基焼結合金材Pシリーズと高速度鋼焼結材H1とH2)について、材料特性と耐「スカuffing」摩耗性との間に第5章の式(6)、(7)で表わされるような相関があることが分かった。しかしながら、高クロム鋳鉄ではアブレーション摩耗が主体であり、摩耗形態が異なるために式(6)(7)の適用範囲外にあった。したがって前章の結果は、上述の材料に対してそのまま適用はできない。

そこで本章においては、適切な添加元素の選択により、これまでの観察の結果に基づいて、主たる摩耗形態が疲労破壊によるものであり、かつそれに対する耐摩耗性が大きくなるような組織を有する高クロム鋳鉄を試作し、それによって耐「スカuffing」摩耗性の向上を図るとともに、前章の解析結果の有効性を確認することにした。

6.1 解析結果の高クロム鋳鉄への応用

6.1.1 解析結果のまとめ

前章までの結果から、粗大な棒状もしくはネットワーク状の炭化物が析出した組織を有する耐摩耗性鋳鉄Cシリーズ材、鉄基焼結材P1フォロワーが、低速試験においてアブレーション摩耗を生じ、フォロワー摩耗量が標準材P3よりもかなり大きいことが分かった。これに対して、細かい硬質炭化物が基地中に分散析出した組織を有するフォロワー材料群(P1を除く鉄基焼結合金材Pシリーズと高速度鋼焼結材H1とH2)は、疲労摩耗に支配されることと、材料特性値によってはCシリーズ材よりもフォロワー摩耗量をかなり小さくできることを示した。ここで、この材料群において、耐摩耗性に寄与する材料因子は次のように表わせる。

耐摩耗性にプラスの寄与をする因子：主としてマクロ硬さ，補助的には炭化物硬さ，抗折強度，炭化物の面積率。

耐摩耗性にマイナスの寄与をする因子：主として炭化物の粒径，補助的には炭化物の形状係数。

これらの結果から，フォロワー材の耐摩耗性を理想的に向上させるには，細かく粒状の硬質炭化物を多量に，硬い基地中に分散析出させた組織とし，マクロ硬さの高くすることが望ましい。

6. 1. 2 高クロム鋳鉄への応用

従来の高クロム鋳鉄材C1，C2の耐摩耗性を改良するにあたり，実際に変えることができる因子としては，マクロ硬さと炭化物の粒径および形状係数があげられる(4)～(7)。そこで，これらの因子をFig.6.1に示すように，材料成分および熱処理を選ぶことにより，改良材C3の仕様を決定した。すなわち，クロム量を18 wt%とし，精密鑄造後に焼入れ低温焼戻し処理を加えることにより，マルテンサイト基地とすることで，マクロ硬さをC1，C2材よりも大幅に高めることとした。炭化物粒径と形状係数については，C1，C2材よりも小さくするために，細かい塊状の炭化物を分散析出させた組織となるように，タングステンおよびモリブデン合金元素を加えた(8)。

6. 2 フォロワーの試作

従来からフォロワーに用いられてきた高クロム鋳鉄材として，クロム量13 wt%を狙った材料(1-(10))，18 wt%のC2材，27 wt%のC1材(1-(5))および改良材C3からなるプロトタイプエンジン用のフォロワーを，一体精密鑄造にてそれぞれ試作した。各材料の化学組成分析値をTable 6.1に示す。C1およびC3材のクロム量については，多少狙いから外れた値となった。C3材フォロワーには，鑄造時の溶湯処理として，脱酸と炭化物の粒状化の効果を狙った溶湯処理剤：Ca-60Si合金を溶湯に添加した。また，熱処理としては，1223Kx30分加熱後，373Kの焼入れ油中に焼入れ，さらに433Kx2h 炉中低温焼戻しを加えた。これらの材料からなるフォロワー粗材のカムフォロー摺動面をグラインダー研磨し，表面粗さで Ra 0.4～0.6 μm に，その他の部位についても所定の加工を加え，最終形状に仕上げた。また13 wt% Crには，実用化されているフォロワーに合わせて，塩浴軟窒化(タフトライド)処理を実施し，その後バレル研磨して仕上げた。C2材についても，この塩浴軟窒化処理がされているフォロワーの実用例があるので，処理無し品とは別にこの処理を加えたフォロワーを試作した。

改良材については，量産フォロワーの各元素含有量の管理幅を検討するために，耐摩耗性に直結する硬質炭化物の析出状態に与える影響の大きな元素である炭素，クロム，タングステンおよびシリコンの添加

量をTable 6.2に示すように意図的に大きく変えたフォロワーを試作した。これらのフォロワーは、前述のプロトタイプのエンジンではなく、量産試作段階のSRエンジン用フォロワー (Fig.1.1) として精密鋳造にて試作しており、標準材の組成もTable 6.1の値と多少異なっていた。各フォロワーの熱処理条件およびその後の研磨条件は標準材と同じとした。

6. 3 評価方法

6. 3. 1 従来材と改良材の比較

各高クロム鋳鉄材料の組織を、第2章と同様の方法で光学顕微鏡により観察した。

改良材C3については、炭化物の成分構成を調べるために、EPMAによる反射電子像観察および主要元素のX線回折像による分布調査を行なった。

各フォロワー材料の耐摩耗性評価を、開発初期のプロトエンジンを用いた低速試験後の摩耗量比較にて行なった。エンジン型式以外はTable 2.2に示される低速試験と同一条件である。また、摩耗量の測定方法もFig.2.5と同じである。

6. 3. 2 改良材の成分値バリエーションの評価

各材料の組織を先と同様の方法で光学顕微鏡にて観察した。

耐摩耗性の評価は、量産試作SR20DEエンジンを用い、試験時間を200hから400hに長くした以外は今までの低速試験と同一とし、試験後のスカuffing発生状況と摩耗量を比較検討した。

6. 4 試験結果

6. 4. 1 従来材と改良材の組織

各高クロム鋳鉄材フォロワーの表面直下断面部の光学顕微鏡組織をFig.6.2に示す。13wt%Cr材の表層に見られる白色層および網目状の組織は、軟窒化処理により形成されたFe、Crの窒化物(2-7)(8))を主体とする硬質な化合物である。内部の塊状白色部は硬い析出炭化物(Cr,Fe)₃C₃と判断され(4)(9)(10)黒色部の基底はパーライト組織となっている。C1およびC2は、第2章での観察結果と同様な粗大な棒状炭化物が、多量に析出した組織となっている。一方、改良材C3では、細かく塊状の硬質複炭化物がマルテンサイト基地中に均一に分散した組織となっている。

C3材は、他の高クロム鋳鉄材の組織と明らかに異なり、細かな塊状炭化物が均一に分散した組織を有

している。これらの炭化物の組成についてE PMAにて分析を行なった。Fig.6.3にC3材の反射電子組成像を示す。この像では分析エリアの中で相対的に質量の重い物質が白く、軽い物質が黒いコントラストが得られることから、重い元素からなる塊状の白色、灰色および軽い元素からなる黒色の3種類の炭化物の存在が認められる。この像に対応するタングステン、クロムおよび炭素各元素の特性X線像および赤外線線で示される線分析の結果をそれぞれFig.6.4, 6.5および6.6に示す。Fig.6.3の白色部はFig.6.4のタングステン元素分布からタングステンリッチの、黒色部はFig.6.5のクロム元素分布からクロムリッチの、灰色部はそれらの元素を中間的に含んだ組成を有する炭化物であることがわかる。さらに、これら3種の炭化物組成の波長分散型E PMAによる定量分析(WDX分析)結果を以下に示す。数字は重量%を示す。

塊状白色部: $\text{Fe}-11\text{Cr}-25\text{W}-5\text{Mo}-2\text{C}$ (原子濃度%: $\text{Fe}-13\text{Cr}-8\text{W}-3\text{Mo}-11\text{C}$)

塊状黒色部: $\text{Fe}-42\text{Cr}-4\text{W}-0.8\text{Mo}-7.8\text{C}$ (同上: $\text{Fe}-35\text{Cr}-0.9\text{W}-0.4\text{Mo}-28\text{C}$)

塊状灰色部: $\text{Fe}-31\text{Cr}-12\text{W}-3\text{Mo}-5\text{C}$ (同上: $\text{Fe}-30\text{Cr}-3.3\text{W}-1.5\text{Mo}-21\text{C}$)

マトリックス部: $\text{Fe}-7.7\text{Cr}-2\text{Si}-0.9\text{Mn}-1.9\text{C}$

これらの結果から、改良材に加えたタングステン、モリブデン元素が、炭化物の析出形態に大きく作用することにより、改良材の狙いの通りの細かく塊状の炭化物が均一に分散した組織が得られたものと考えられる。

6.4.2 改良材の摩耗量予測

C3材の材料特性値を従来材の材料特性値表に加えた一覧表をTable6.3に示す。C3材の炭化物の粒径および形状係数は、鉄基焼結材P7並みの値を示していることから、改良材C3のフォロワー摩耗量を、前章で得られた疲労破壊が支配的なフォロワー材に対応した第5章の定量式〔7〕を援用して計算する。これらの測定値を代入して求めたフォロワー摩耗インデックス予測値(標準材P3フォロワー摩耗量に対する相対比)と、第3章で測定されたC1, C2フォロワー摩耗インデックス実測値を比較する。

C3材フォロワー摩耗インデックス予測値 = 1.11

C1材フォロワー摩耗インデックス実測値 = 1.35

C2材フォロワー摩耗インデックス実測値 = 2.32

前述したように、式〔7〕による予測結果がこれらの材料にそのままではまる保証はないが、少なくともC3の予測結果は、従来材C1, C2を下回っており、耐摩耗性の改善が期待される。

6.4.3 実測値と予測値との比較

次に、改良材C3を含む各種高クロム鋳鉄材フォロワーの低速試験結果をFig.6.7に示す。まず最初に、

軟窒化処理したフォロワー材を除いたC1, C2, C3材のフォロワー摩耗量だけを比較すると、以下のようになる。

C3材フォロワー摩耗量 = $16\mu\text{m}$ → この量を1.11とすると

C1材フォロワー摩耗量 = $20\mu\text{m}$ → 1.39

C2材フォロワー摩耗量 = $20\mu\text{m}$ → 1.39

というインデックス値と対応することになり、C3材とC1材だけを見れば前項の予測結果と非常に良い一致を示した。C2材については、第3章の結果とは異なり摩耗量が小さく、C1材並みとなったものの、いずれにしてもC3材が最も優れた耐摩耗性を示していることは明らかである。さらにはFig.6.7のカム摩耗量を見ると、C1, C2材では非常に大きくなっているのに対して、C3材では小さく抑えられている。したがって、フォロワー摩耗量とカム摩耗量の和として見れば、C3材が従来材C1, C2に比べ大幅に耐摩耗性の改善が達成できたことになる。

また、13wt% Cr 軟窒化処理材では、フォロワー摩耗量はそれほど大きくないがカム摩耗量が著しく大きい。C2材に軟窒化処理を加えたフォロワーについても、フォロワー摩耗量は小さいがカム摩耗量が大きく増加するため、トータルの摩耗量としての低減効果は認められなかった。

この結果から、疲労破壊が支配的なフォロワー材に対応するフォロワー摩耗定量式から求められた予測値と、低速試験から得られた実測値とが、かなり良く一致するとともに、適切な添加元素と熱処理の選択に基づき高クロム鋳鉄の組織を改良することによって、耐「スカuffing」摩耗性を向上できることが明らかになった。

6. 4. 4 改良材の摩耗形態

低速試験終了後のC3材フォロワーの摩耗形態を、第4章と同様の方法に従い走差電子顕微鏡を用いて観察した。その結果をFig.6.8に示した。滑らかな中央摺動部にビットの形成と、両サイドにはすべり方向に平行な条痕が見られる。ビット部を拡大したFig.6.8 b) では、ビット周辺へ伝播したクラックと写真中央部の下方に見られる白色の細かい共晶炭化物の周囲に進展したクラックが観察される。一方、条痕部を拡大したFig.6.8 c) においても条痕の下に白色の共晶炭化物と小さなビットの形成が見受けられる。この摩耗形態は、第4章で調べた疲労破壊が支配的な焼結材Pシリーズのフォロワー摺動表面と同じ特徴を示し、クラック伝播による摩耗粉の形成および脱落后のビット形成 (Fig.4.2~4.6) に類似していた。アブレーシブ作用が支配的なC1材等に見られた、深い条痕形成 (Fig.4.9) は認められていない。

6. 4. 5 改良材の成分値バリエーションの評価

優れた耐摩耗性を示した改良材C3材、それを標準として合金成分をTable6.2に示すように変えたバリエーション材の断面組織をFig.6.9に示す。細かい塊状の炭化物が均一に分散した組織を示す標準材(a)に対して、タングステン量を減らした(b)では棒状炭化物の析出が現れ、クロムと炭素量を増やしシリコン量を減らした(c)では粗大炭化物と棒状炭化物が見られ、(c)とは逆にクロムと炭素量を減らしシリコンを増やした(d)では析出量が大きく減少するとともに棒状炭化物が増加した組織となった。

これら4種の材料からなるフォロワーを、量産試作のSR20DEエンジンに組み込み低速試験を行なった。試験後のカムノーズとフォロワー摺動表面の外観写真をFig.6.10に示す。標準材(a)以外のフォロワーでは、いずれも相手のカムノーズ部に「スカuffing」摩耗が生じた。さらに、Fig.6.11にカムおよびフォロワーの摩耗量を示した。棒状炭化物や粗大炭化物を有する(b)および(c)では、標準材に比べて相手カムの摩耗が増大しており、析出量が少なく棒状炭化物である(d)ではカム摩耗のみならずフォロワー摩耗も増大している。これらに対して、標準材のカムおよびフォロワーの摩耗量は著しく低くなっている。

以上の結果から、上記合金元素の含有量の増減は、炭化物の析出状態を変えとともに、耐摩耗性に大きな影響を与えることが明らかとなった。

6. 5 第6章のまとめ

新型エンジンのフォロワー用耐摩耗材料として、第5章までの解析結果に基づき、従来実用化されていた高クロム鋳鉄材料を改良した。

(1) 粗大な棒状炭化物が比較的軟らかい基地中に多量に存在する、従来の高クロム鋳鉄材C1およびC2の組織に対して、改良材C3ではタングステンとモリブデン元素の添加および熱処理により、硬いマルテンサイト基体中に細かく塊状の炭化物が分散析出した組織が得られた。

(2) この改良材C3の材料特性値を、疲労摩耗に支配されるフォロワー材料群におけるフォロワー摩耗量と材料特性値との定量式に代入して計算された予測摩耗量は、従来の高クロム鋳鉄材C1やC2のフォロワー摩耗量実測値よりも低い値となった。

(3) C1、C2材とC3材からなるフォロワーを用いて、低速試験により耐摩耗性を評価した結果、C3フォロワー材の実際の摩耗量は、予測通りC1、C2材よりも低くなった。さらには、摩耗量の値自体についても予測値とかなり良い一致を示した。

(4) 低速試験後の改良材C3フォロワーの摩耗形態は、疲労破壊が支配的な焼結材Pシリーズのフォロワー摺動表面に見られた、クラック伝播による摩耗粉の形成および脱落后のピット形成に類似していた。

(5) C3標準材に対して、炭化物の析出状態を変える合金元素の含有量の増減は、耐磨耗性に大きな影響を与えることが明らかとなった。

以上の結果から、第5章までに得られたフォロワー摩耗量と材料特性値に関する定量解析結果は、この種の耐磨耗材料の開発において実用上充分活用できることが検証された(11)。

第6章の参考文献

- (1) 冬 慶平, 鈴木 俊夫, 梅田 高照: 鋳物, 62, 11, (1990) 925.
- (2) G.Laird II, R.L.Nielsen and N.H.Macmillan: MET.Trans.A, 22A, AUGUST, (1991) 1709.
- (3) 桑野 正司, 大城 桂作, 沢本 章, 松田 公扶: 鋳物, 60, 7, (1988) 454.
- (4) 冬 慶平, 鈴木 俊夫, 梅田 高照: 鋳物, 62, 2, (1990) 130.
- (5) 冬 慶平, 鈴木 俊夫, 梅田 高照: 鋳物, 62, 5, (1990) 344.
- (6) 冬 慶平, 加藤 治, 鈴木 俊夫, 梅田 高照: 鋳物, 62, 10, (1990) 821.
- (7) 桑野 正司, 大城 桂作, 沢本 章: 鋳物, 63, 7, (1991) 613.
- (8) 川村 治, 高橋 照夫, 谷本 一郎, 加納 眞: 日本鋳物協会1991秋期大会講演予稿集, 35.
- (9) 成田 貴一: 金属学会会報, 7, 12, (1968) 742.
- (10) 佐藤 知雄: 金属学会会報, 7, 7, (1968) 363.
- (11) M.Kano, I. Tanimoto, O.Kawamura and T. Takahashi: JSAE Review, 12, 1, (1991) 58.

Table 6.1 Chemical compositions of high chromium cast irons

Composition Material	Chemical composition (wt%)						
	T.C	Cr	W	Mo	Ni	Si	Mn
13% Cr	3.0	13.0	—	—	0.5	1.5	0.7
C2 (18%Cr)	3.4	18.0	—	—	0.7	1.5	0.8
C3 (18%Cr+W,Mo)	3.3	17.1	5.0	0.9	0.5	1.5	0.7
C1 (27%Cr)	2.9	28.5	—	—	—	0.5	0.7

Table 6.2 Chemical composition variations for new alloy

Composition Material	Chemical composition (wt%)						
	T.C	Cr	W	Mo	Ni	Si	Mn
(a) Standard	3.5	17.6	4.9	1.2	0.6	1.7	0.7
(b) Lower W content	3.4	17.6	3.4	1.2	0.5	1.7	0.7
(c) Upper Cr&C content Lower Si content	3.7	20.1	4.9	1.2	0.6	1.3	0.6
(d) Lower Cr&C content Upper Si content	3.2	16.9	4.9	1.1	0.5	1.8	0.7

Table 6.3 Material properties compared with C3

Test material	Macro-hardness (HRC)	Carbide hardness (HV)	Matrix hardness (HV)	Bending strength (MPa)	Total Area of carbides (%)	Average size of carbides* (μm)	Average shape factor of carbides*	Wear index	
								Cam	Follower
P1	65	1280	486	540	35	21	5.14	0.83	0.59
P2	62	1378	545	1590	28	11	3.02	1.25	0.77
P3	60	1205	729	1660	19	8	1.75	1.00	1.00
P4	59	1343	608	1590	25	28	4.03	0.88	2.17
P5	59	1345	538	1560	24	20	2.77	1.09	1.73
P6	57	1016	409	1060	19	14	2.47	0.53	2.33
P7	51	1119	412	1450	18	31	5.51	1.02	3.67
P8	60	1219	765	640	18	40	7.83	0.71	4.85
H1	60	2300	823	1962	8	5	1.87	0.72	0.62
H2	66	1300	826	2030	14	9	3.44	0.58	0.26
TC	69	1155	—	—	67	5	6.10	0.41	0.15
SN	73	(1340)	—	—	—	—	—	0.66	0.62
C1	59	1500	400	890	49	40	8.10	0.55	1.35
C2	51	1062	244	1080	37	36	8.32	1.16	2.32
C3	67	1466	723	940	35	22	4.90	0.36	0.88
C4	55	601	353	600	36	28	9.56	1.43	6.36
ST	33	—	330	—	—	—	—	0.40	43.5
CAM	49	—	—	—	—	—	—	—	—

* Area-weighted average values , (Silicon nitride)

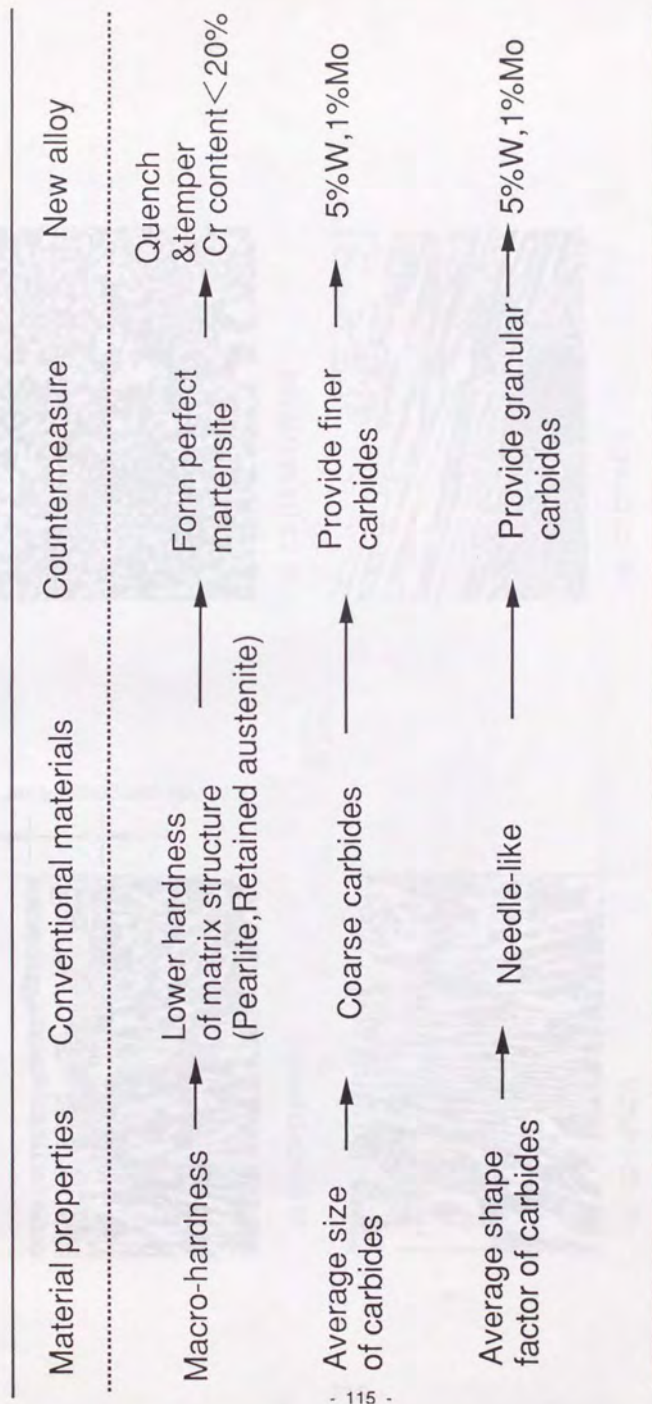


Fig.6.1 Design concept for wear-resistant follower materials

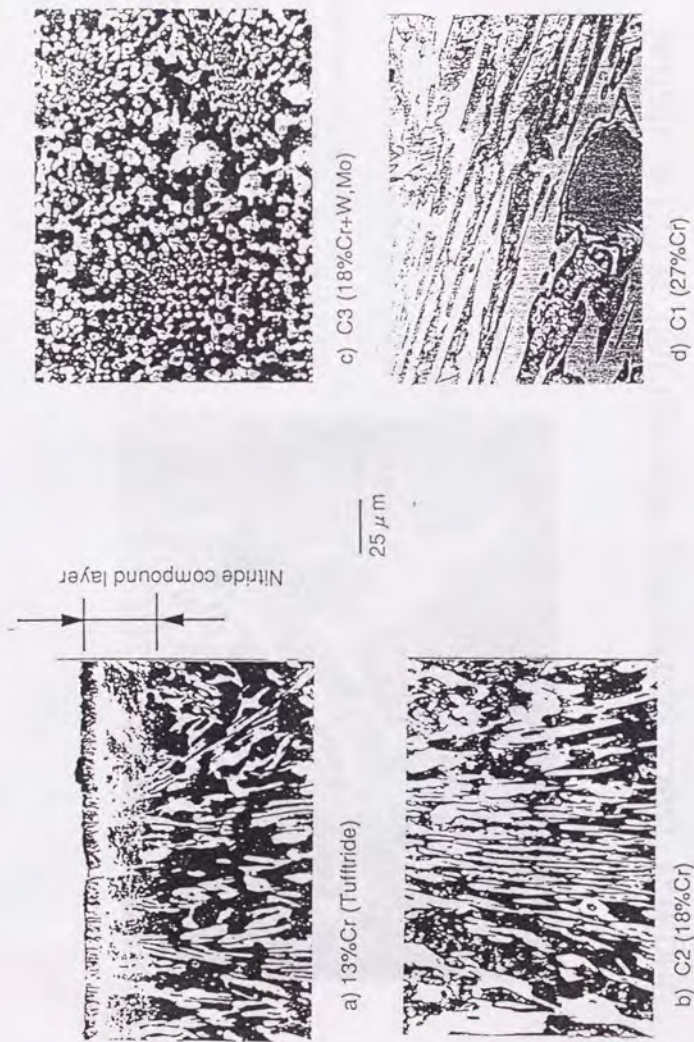
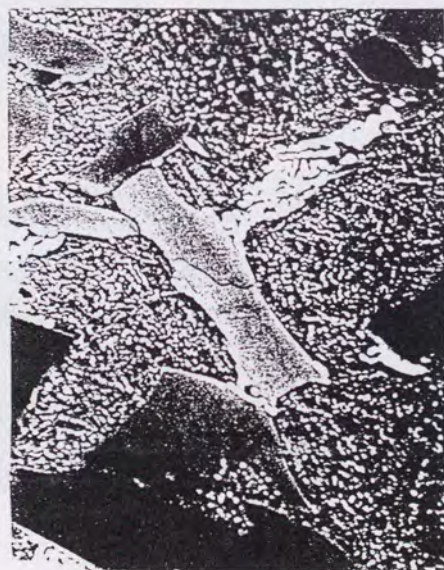


Fig.6.2 Microstructure of high chromium cast iron follower



White precipitates: Tungsten rich M_6C carbides
 Fe-13Cr-8W-3Mo-11C (atomic%)

Black precipitates: Chromium rich M_7C_3 carbides
 Fe-35Cr-0.9W-0.4Mo-28C (atomic%)

Gray precipitates: Transitted carbides
 Fe-30Cr-3.3W-1.5Mo-21C (atomic%)

Matrix : Fe-7.7Cr-2.0Si-0.9Mn-1.9C (wt%)

$5\ \mu m$

Fig.6.3 Back scattering micrograph of C3 material

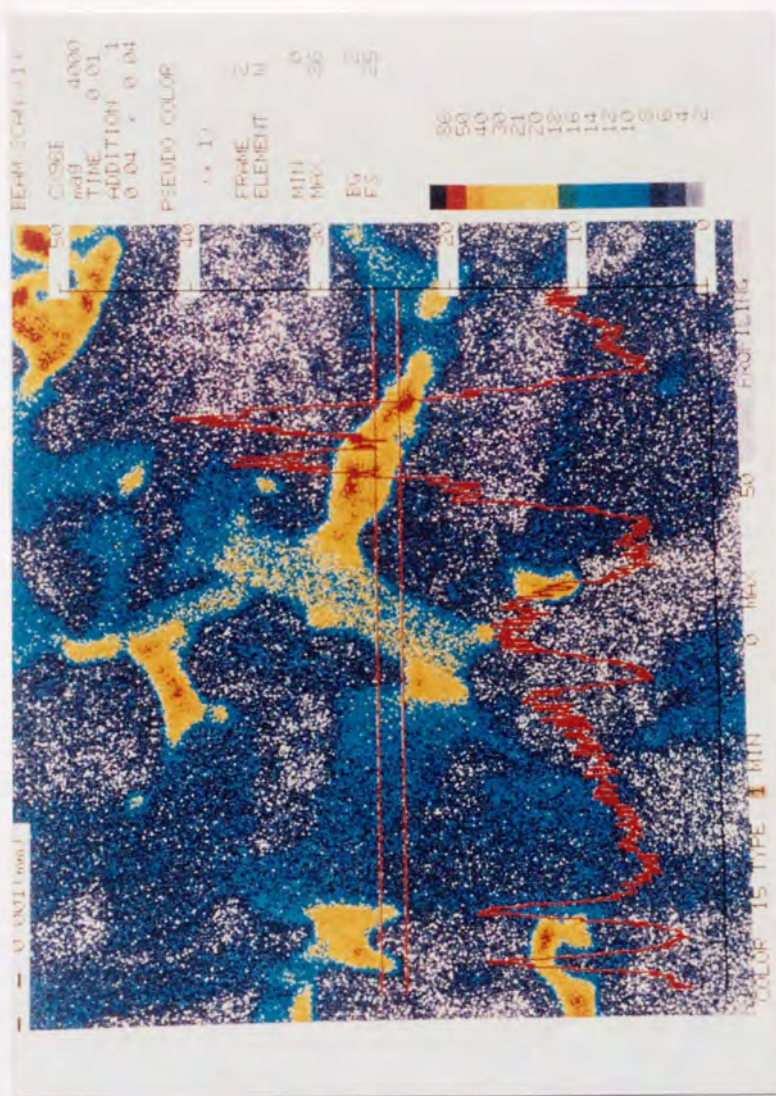


Fig.6.4 Tungsten X-ray image of C3 material

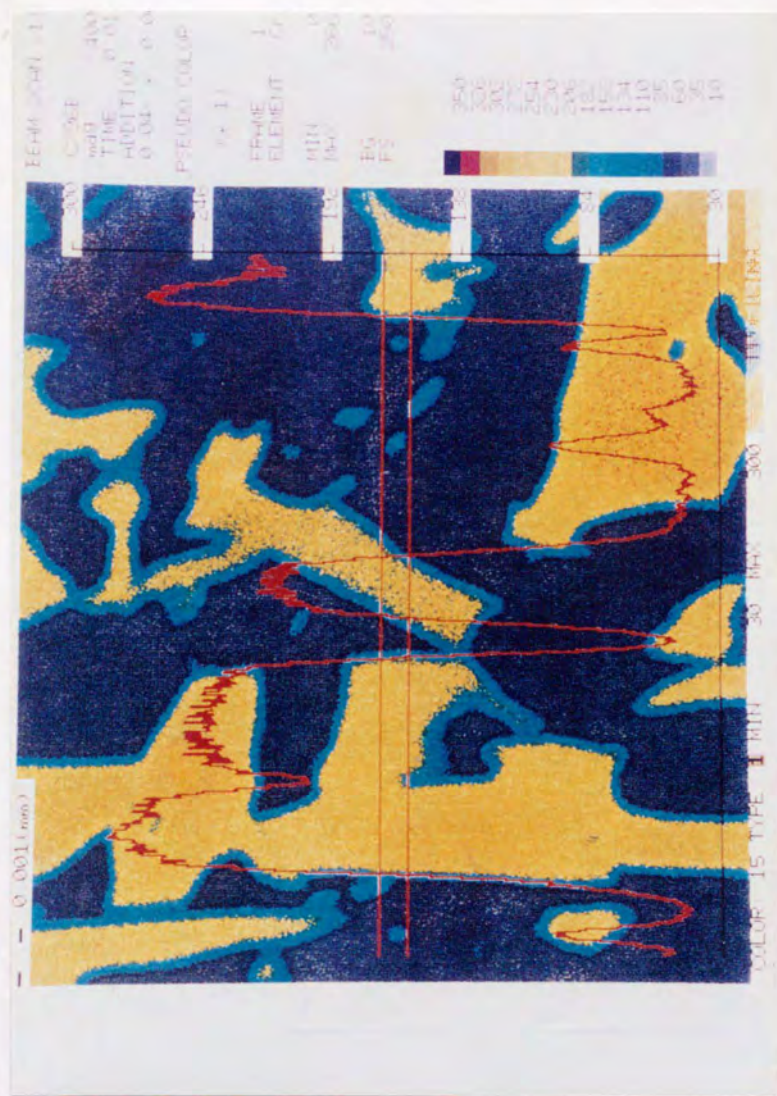


Fig.6.5 Chromium X-ray image of C3 material

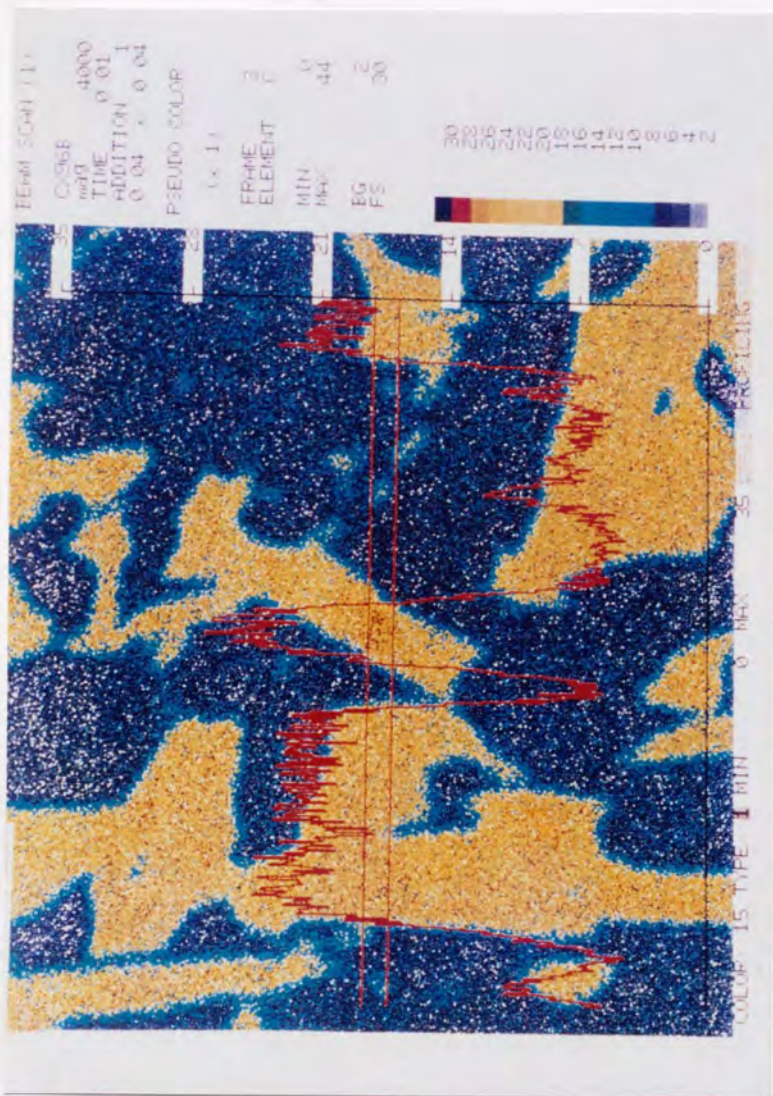


Fig.6.6 Carbon X-ray image of C3 material

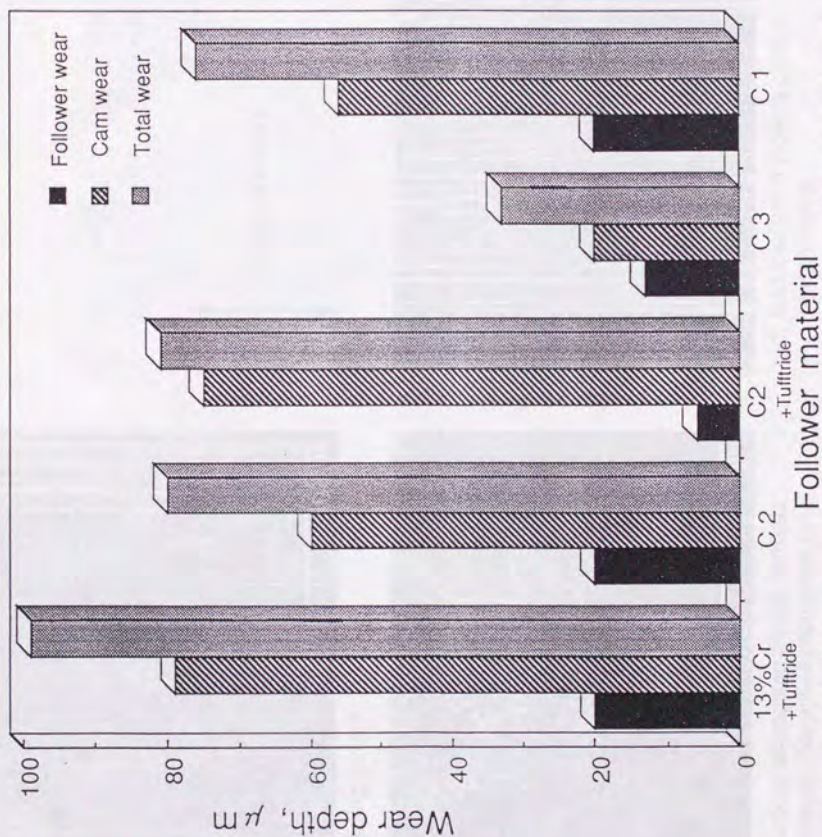
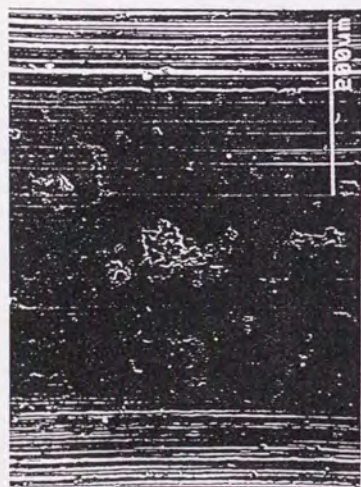
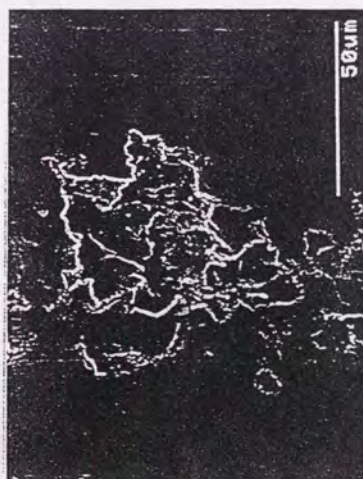


Fig.6.7 Wear resistance evaluation of high chromium cast iron followers



a) Sliding surface

Sliding direction
↔



b) Cracks propagated around carbides and pits (Magnified photograph of (a))



c) Carbides under plowing pattern (Another area)

Fig.6.8 Wear morphology of C3 follower

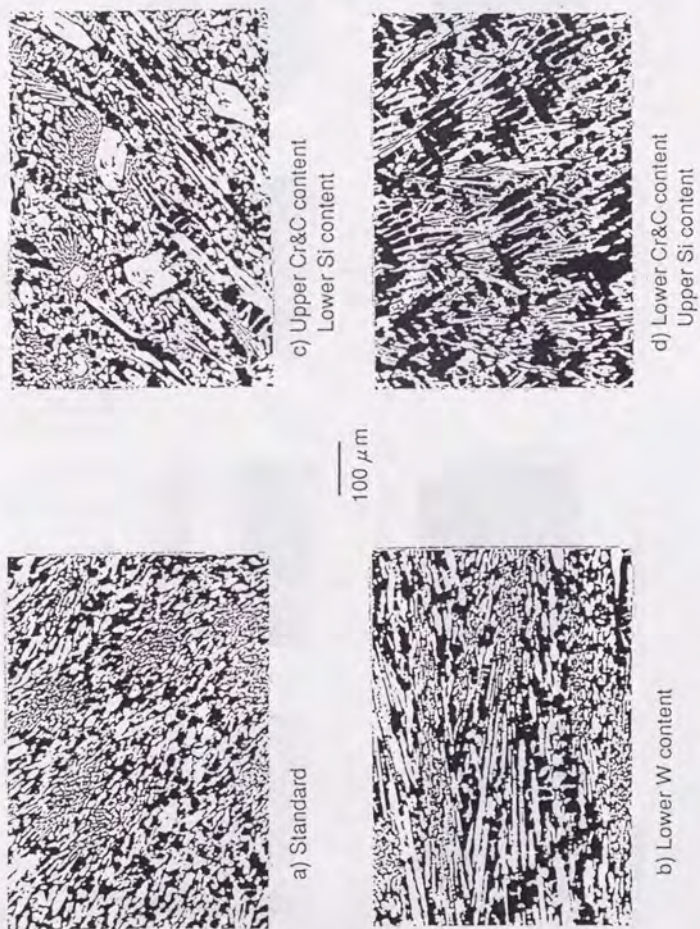


Fig.6.9 Microstructures of follower materials with various additive contents

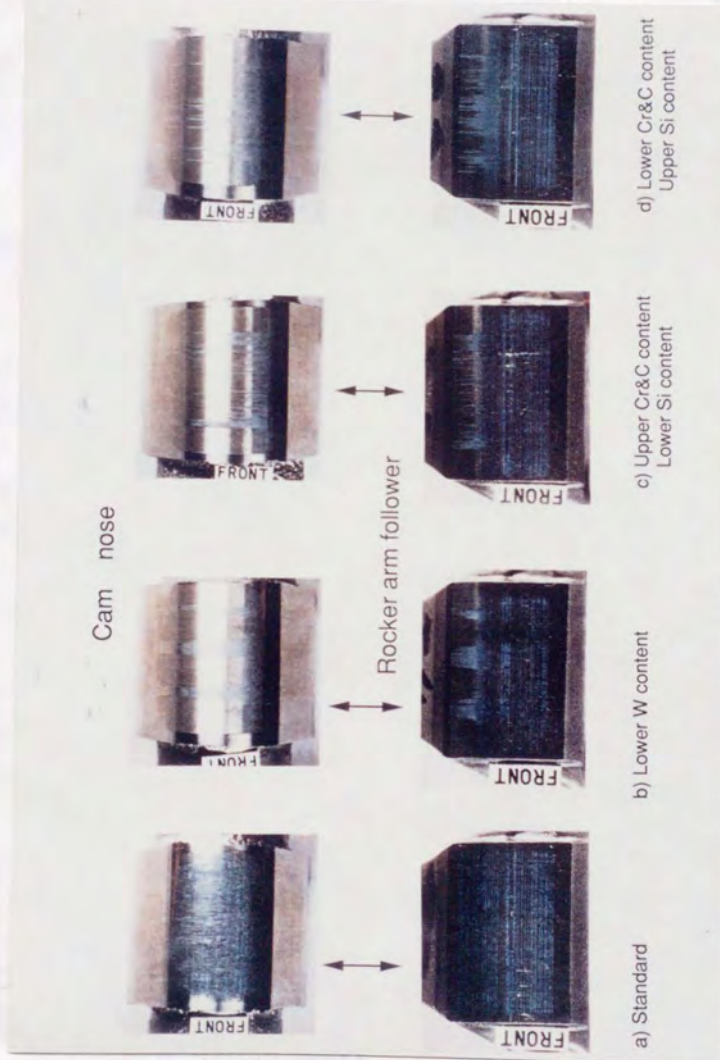


Fig.6.10 Surface conditions following engine idling test

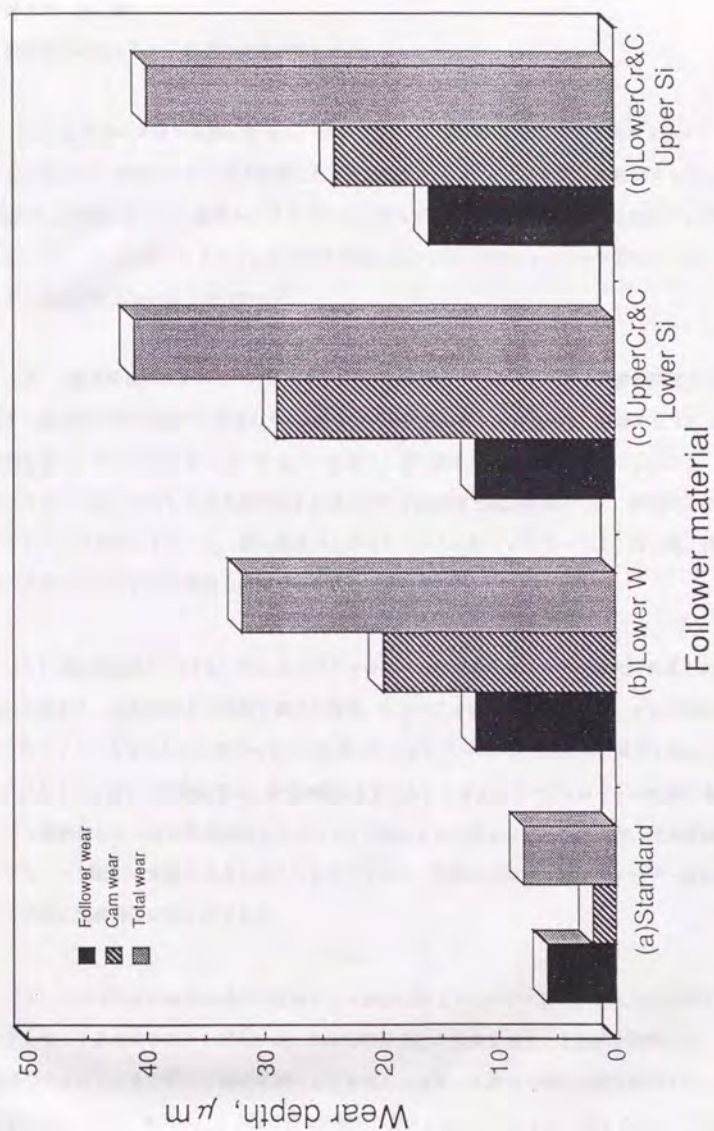


Fig.6.11 Wear resistance evaluation of materials with various additive contents

第7章 結 論

本研究の結果として、以下の結論が得られた。

(1) 実際のエンジンを用いたカム、フォロワーの摩耗試験を通じて、「スカuffing」摩耗がどのような条件下で発生するのかを調査した。その結果、「スカuffing」摩耗はエンジン回転数600 rpmの低速試験において、金属材フォロワーには発生するが、超硬合金と窒化珪素材フォロワーには発生しないこと、さらには4000 rpmの高速試験においては、どのフォロワー材についても、「スカuffing」摩耗は生じないことが分かった。

(2) 低速試験後のフォロワーの摩耗形態を摺動表面および断面の走査電子顕微鏡観察にて調べた結果、細かい硬質炭化物が基地中に分散した組織を有する鉄基焼結材フォロワーは、特徴的な「スカuffing」摩耗を生じ、それが表面からのクラックの生成および伝播を主とする疲労摩耗によること、棒状もしくはネットワーク状に析出した粗大炭化物を多量に有する鋳鉄材と鉄基焼結材では、表面突起や摩耗粉によるアブレイシブ摩耗によること、硬い超硬およびセラミックス材フォロワーでは、浅い溝、焼結バインダー部の欠落や凹みといった軽微な損傷であることが分かった。

(3) 低速試験後における、カムおよびフォロワーの摩耗量とフォロワー材料特性値との相関関係を定量的に解析し、摩耗形態との関係を調べた結果、以下のことが明らかになった。カムの摩耗量は、フォロワー材によってあまり大きく変化せず、今回求めたフォロワー材料特性値との相関性も認められなかった。これに対しフォロワーの摩耗量は、疲労摩耗に支配されると考えられたフォロワー材料群においては、フォロワー摩耗量と2つの材料特性値すなわちマクロ硬さと炭化物の粒径との間に強い相関関係が得られた。アブレイシブ摩耗に支配されると考えられたフォロワー材料群においては、フォロワー摩耗量と炭化物硬さとの間に相関関係が見いだされた。

(4) 本研究の解析結果に基づいた高クロム鋳鉄の耐「スカuffing」摩耗性の改善を試み、硬いマルテンサイト基地中に細かい塊状の炭化物が分散析出した組織を有する改良材を試作した。それを用いて実際のフォロワーを作製して低速試験により評価した結果、予測通り優れた耐摩耗性を示した。この研究で得られた定量的解析結果は、この種の耐摩耗材料の開発において実用上充分活用できることが検証された。

謝 辞

本研究を遂行し、まとめるにあたり、長年にわたり終始懇切なご指導とご鞭撻を賜りました東京大学教授 木村 好次 先生に深く感謝申し上げます。また、本研究に対してご教示賜りました東京大学教授 梅田 高照 先生、塩谷 義 先生、東京大学 助教授 加藤 孝久 先生、武田 展雄 先生に深く感謝申し上げます。

なお、本研究の多くの部分は、著者の勤務する日産自動車(株)総合研究所材料研究所ならびに材料技術部において行われたものであり、入社以来、長年ご指導いただくとともに便宜を図っていただいた日産自動車(株) 馬来 義弘氏、有田 正司氏、内野 実氏に深く感謝申し上げます。また、研究の遂行にあたり数々のご助言を賜わるとともに、ご協力いただきました日産自動車(株) 谷本 一郎氏、ユニシアジェックス(株) 佐々木 正登氏、日本ビストンリング(株) 川村 治氏ならびに高橋 輝夫氏に深く感謝致します。さらに、多くの実験を担当していただきました、日産自動車(株) 庄司 勇助氏、樋口 正春氏、山内 宏氏、森田 謙三氏、荒木 新一氏、石山 敬幸氏に厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたって、日産自動車(株)総合研究所材料研究所ならびに材料技術部、ユニシアジェックス(株)、日本ビストンリング(株)、その他の材料メーカーの多くの方々にも多大なご協力を賜りました。ここに厚く感謝の意を表します。

