

高性能熱転写プリンタ用
サーマルヘッド最適化設計に関する研究

寺 尾 博 年

目 次

第1章 緒論	1
1-1. 本研究の背景	1
1-1-1. プリンタの種類と熱転写プリンタの位置づけ	1
1-1-2. 熱転写プリンタ開発とサーマルヘッド開発	5
1-2. サーマルヘッドの設計課題と本研究の目的	6
1-3. 本論文の構成	8
第2章 サーマルヘッド形状の解析と接触条件の設計	11
2-1. 緒言	11
2-2. 真実接触面積と印刷濃度の関係	11
2-2-1. 印刷実験条件と接触面顕微鏡	11
2-2-2. 真実接触面積並びに表面粗さと印刷濃度測定結果	13
2-2-3. 各種用紙での測定結果	16
2-2-4. 真実接触面積とインク転写の関係	16
2-2-5. 真実接触面積と印刷の関係	21
2-3. サーマルヘッドの接触圧力の解析	23
2-3-1. 粘弾性測定方法	23
2-3-2. インクの粘弾性	23
2-3-3. PET, プラテンゴムの粘弾性測定	27
2-3-4. 数値解析	27
2-3-5. 数値解析結果の妥当性評価	29
2-4. 結言	33
第3章 サーマルヘッド構成材料と熱応答特性の設計	35
3-1. 緒言	35
3-2. サーマルヘッドの構造検討 基板材料と保温層材料	35
3-2-1. サーマルヘッドの構造	35
3-2-2. 数値解析条件	36
3-2-3. 印刷実験条件と熱応答測定条件	36
3-2-4. 保温層の検討と熱応答特性	38
3-3. 高精細化 600dpi 多階調印刷への応用検討	43
3-3-1. 多階調印刷	43
3-3-2. ヘッド形状検討	43
3-3-3. 数値解析と結果の考察	47
3-4. 高精細化 1200dpi 印刷への応用検討	49
3-4-1. 数値解析:熱応答特性と耐熱性, ヘッド形状の影響検討	49
3-4-2. 試作ヘッドの特性検証	49

3-5. 熔融型熱転写プリンタにおける高速化検討	53
3-5-1. 熱応答特性	53
3-5-2. 保温層膜厚と駆動応答周波数の関係	53
3-5-3. ヘッド表面温度	57
3-5-4. 試作ヘッドによる高速印刷実験	57
3-6. 昇華型熱転写プリンタにおける高速化検討	57
3-6-1. ヘッド構造の最適化：表面温度と蓄熱	57
3-6-2. システム構造検討：タンデム化とヘッド小型化設計	62
3-6-3. 印刷時間の可能性検討	62
3-7. 結言	62
第4章 サーマルヘッドの温度均一化技術：放熱制御と高画質化設計	68
4-1. 緒言	68
4-2. 積層ヘッド構造と接着層の影響	68
4-2-1. 実験装置並びに積層ヘッド構造と測定点および物性値	68
4-2-2. 解析モデル	70
4-2-3. 異方性材料積層の影響	70
4-2-4. 接着剤の影響	74
4-3. 異方性積層基板の最適化設計	74
4-3-1. 異方性積層基板の最適設計	74
4-3-2. 積層基板の異方性効果の検証	77
4-4. 結言	80
第5章 サーマルヘッド構造の最適化設計	81
5-1. 緒言	81
5-2. 断熱層の検討	81
5-2-1. ヘッド構造	81
5-2-2. P I断熱層の適用 耐久性と省電力効果	81
5-2-3. P I蒸着重合法の採用	84
5-3. 最適層構造の検討と品質工学	84
5-3-1. 基本機能の検討	84
5-3-2. 因子の選定	84
5-3-3. SN比の計算	88
5-3-4. 確認実験とチューニング	88
5-3-5. チューニング後の条件と特性確認結果	90
5-4. 結言	90
第6章 結論	94
謝辞	95

第1章 緒論

1-1. 本研究の背景

1-1-1. プリンタの種類と熱転写プリンタの位置づけ

1970年代のLSI技術の進歩に続き、1980年代の通信技術、情報処理技術の発展とともに、扱われる情報が図形、文字のほか画像へと変化してきた。取り扱われる情報の変化とともに、画像情報を出力する装置が求められるようになった⁽¹⁾⁽²⁾。すなわち、ワイヤードットプリンタや活字プリンタに代表されるインパクト方式からノンインパクト方式に変化してきた。ノンインパクト方式は図1.1に分類される。ノンインパクト方式は、レーザープリンタ、インクジェットプリンタ、熱転写プリンタ等があげられ、熱転写プリンタは更に昇華型と溶融型に分類される⁽³⁾。

1990年代に入り、パーソナルコンピュータの普及、並びにオペレーティングシステム(OS)としてのWindowsの出現、さらにはデジタルビデオカメラ、デジタルカメラに代表されるような入力機器の普及により、個人が簡単にカラーのデジタルデータを扱えるようになってきた。個人がカラーデジタルデータを印刷出力する機会が増えるにしたがい、パーソナルコンピュータ用フルカラープリンタが必要になった。

現在、市販されている主なプリンタはインクジェットプリンタ、レーザープリンタ、熱転写プリンタに分けられる。

インクジェットプリンタは微小チャンバ内の液体インクに圧力を加え、記録パターンに対応したインク滴をノズルから印刷用紙に吹き付け、浸透乾燥させて定着させる記録方法である。従って、ランニングコストの面から考えた場合、ドットオンデマンドが可能な理想的な方式となっている。図1.2にインクジェットプリンタの記録原理の概要を示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、インク定着方法が浸透乾燥であるため、プリンタの性能は記録用紙に依存することになる。特にカラー画像を印刷する際には、表面にインクが浸透しやすくするための多孔質の受像層が施された専用紙が必要になる⁽⁶⁾。一方で普通紙印刷やフィルム媒体への印刷はインクの滲みが生じることからインクジェットプリンタでは高画質印刷かつ高速印刷が達成できていない。また液体インクであるため、耐水性に問題があり、しばらく使用しなかった場合はノズル内でインクが乾燥することで、ノズル詰まりが発生し、インクの不吐出となる可能性がある。このようにインクジェットプリンタでは、信頼性の点で課題を抱えている⁽⁷⁾。

レーザープリンタは、光導電現象を利用して感光体上に静電的な電荷の像を形成し、この静電潜像に着色した帯電微粒子(トナー)を静電力によって付着させ、さらにこの可視像となったトナーを紙などに転写・定着させる記録方法である。従って、印刷速度が速く普通紙にもきれいに印刷できる方式となっている。図1.3にレーザープリンタの記録原理の概要を示す⁽⁸⁾。しかしながら、印刷プロセスが複雑で

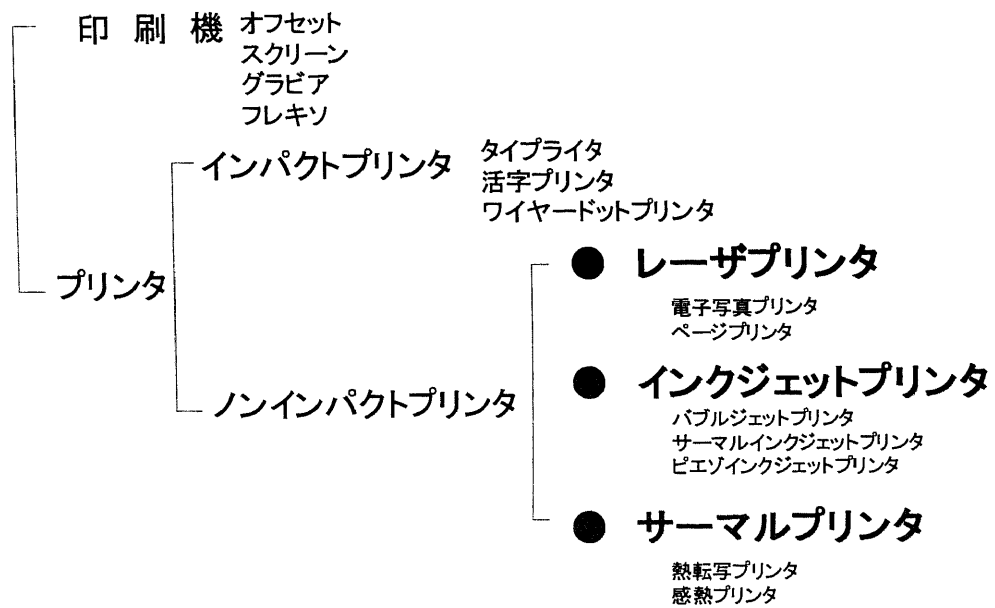


図 1.1 プリンタ方式の分類

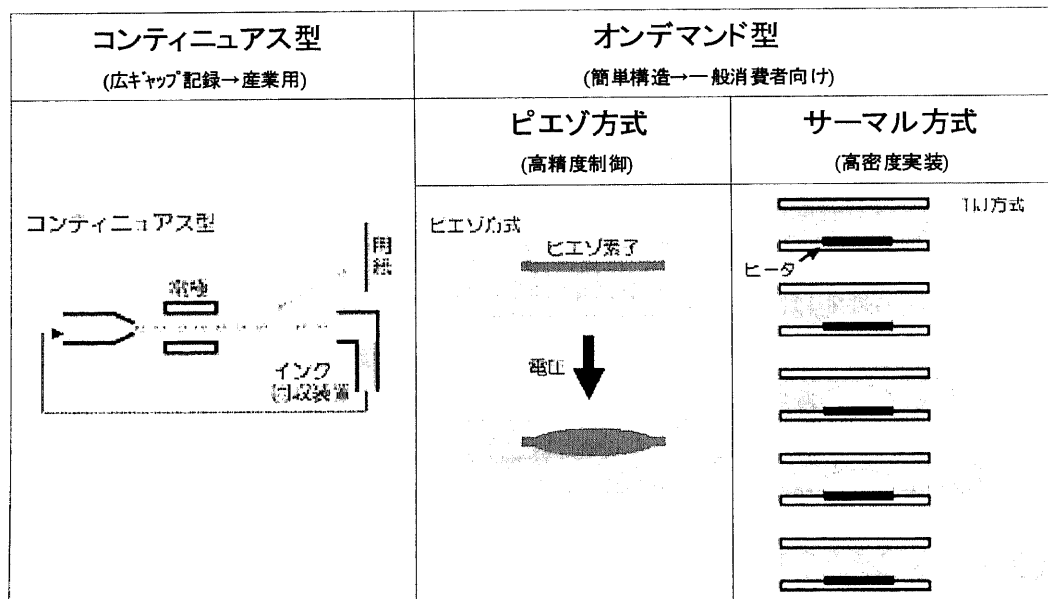


図 1.2 インクジェットプリンタの記録原理

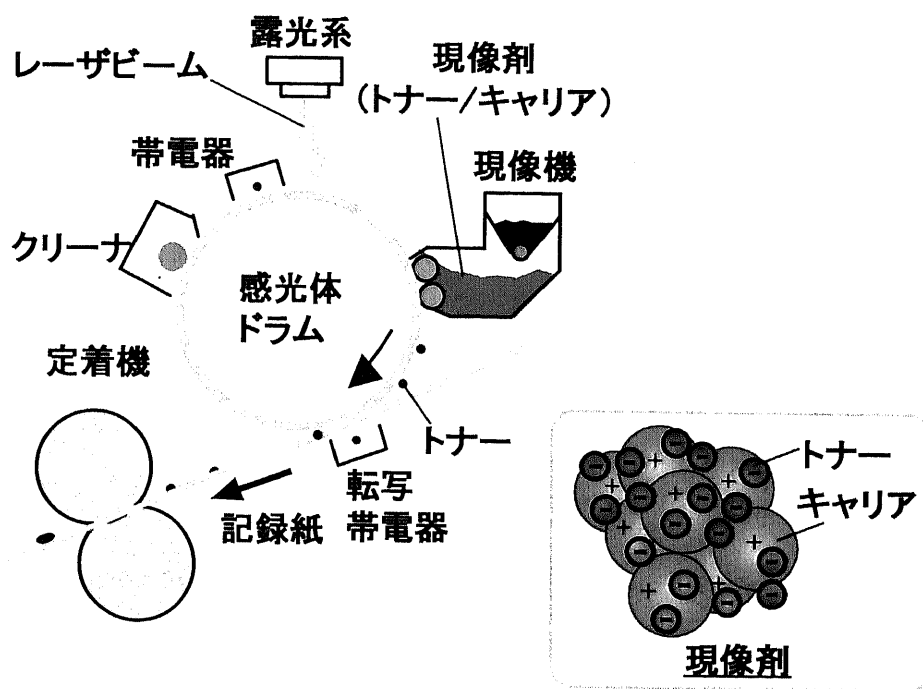


図 1.3 レーザープリンタの記録原理

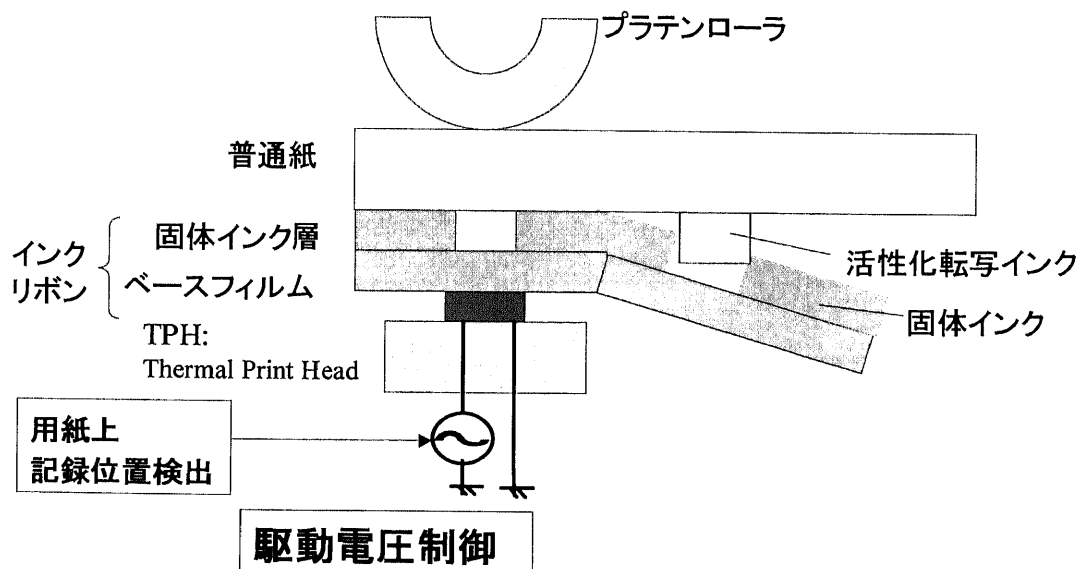


図 1.4 熱転写プリンタの記録原理

あるため装置が大型となり、消費電力も大きい。インク定着用にヒーターを用いているため、電源をいれた後、印刷ができるようになるまでしばらく待たなければいけないといった取り扱い面で課題を抱えている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

一方熱転写プリンタは溶融型熱転写プリンタと昇華型熱転写プリンタに分けられる。溶融型熱転写プリンタは記録パターンに対応した熱をフィルム状の熱可塑性インクに加え、加熱されたインクを記録用紙に転写させ、冷却加圧してインクを定着させる記録方法である。昇華型熱転写プリンタは記録パターンに対応した熱を昇華性染料インクに加え、加熱されたインクを記録用紙の受像層に熱拡散転移させて記録する方法である。いずれの方法も熱源であるサーマルヘッドとプラテンゴムの間に、記録用紙とインクリボンを挟持しサーマルヘッドによって記録ドットを選択的に加熱し、その熱でインクを記録用紙に転写する原理に基づいている。図 1.4 に熱転写プリンタの記録原理の概要を示す⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

溶融型熱転写プリンタはインクを溶融して紙に転写する方法であるため種々の記録用紙に比較的自由に印刷できる。したがってインクジェットプリンタでは困難な普通紙印刷、フィルム印刷も可能である。インクは乾燥インクであるため不吐出のような現象もなく、また装置も小型にできることから、バーコード印刷、電車のチケット印刷、包装フィルムへの印刷など信頼性、簡便さが必要とされる印刷分野で主流のプリンタとなっている⁽¹³⁾。溶融型熱転写プリンタは小型化が可能なこと、信頼性が高いことから、今後の技術開発によってモバイル用プリンタ、業務用ラベルプリンタ等への応用が期待される⁽¹⁴⁾。

また昇華型熱転写プリンタはインクを記録用紙の受像層に熱拡散転移できることから銀塩写真のように 1 ドットの濃度を変えて制御するいわゆる濃度階調が可能である。したがってその仕上がりも銀塩写真並の高画質印刷を行うことができる⁽¹⁵⁾。インクジェットプリンタの場合は、濃度階調ができないことから、解像度を上げる必要があることや、濃度の薄いインクを併用するなどして写真画質を作り出している⁽¹⁶⁾。このため高解像度であるために取り扱うデータが大きいこと、複雑な画像処理が必要なことから、印刷速度が遅くなり、モバイル用に小型化ができないという原理的な課題がある。昨今のデジタルカメラの普及に伴い、その画像出力手段のフォトプリンタとして、昇華型熱転写プリンタが主流となっているのもそのためである。昇華型熱転写プリンタは溶融型熱転写プリンタと同様に小型化が可能なこと、また写真並の高画質印刷が可能なことから、今後の技術開発によって、モバイル用プリンタに限らず、業務用高速写真出力や医療画像出力、顔写真入りの ID カードプリンタ等への応用が期待される⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

1-1-2. 熱転写プリンタ開発とサーマルヘッド開発

熱転写プリンタの技術課題克服の為に、プリンタ機能の印刷部分をつかさどる重要な部品、言い換えるなら「筆」の役割を担うサーマルヘッドの高性能化が必要である。図 1.5 に年代別に代表的なサーマルヘッドのモデルを示す。サーマルヘッドは、70 年代に平板ガラス上に抵抗体をパターンニングしたフラットグレース対応のモデルが主流であったが、その後の西口らや酒徳らによって報告されたパーシャルグレースヘッド、ダブルパーシャルグレースヘッドと呼ばれるモデルへと改善されてきた⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。また吉池らは発熱抵抗体の形状を最適化することで、熱応答特性が改善することを報告している⁽²¹⁾。また柴田らはサーマルヘッドの保護膜と保温層の膜厚の印刷速度への影響について報告している⁽²²⁾⁻⁽²⁵⁾。これらの研究により日本語ワードプロセッサに代表される文字主体の熱転写プリンタとしては十分満足される性能を発揮するようになった。しかしながら、昨今の画像出力が主となるプリンタとしては、熱転写プリンタの技術課題を克服するには、その特性ではまだ不十分であった⁽²⁶⁾。

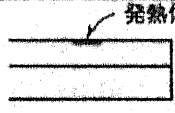

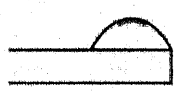
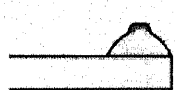
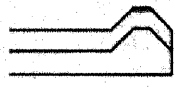
ヘッドの種類 (登場時期)	ヘッド形状	分解能	ドット数	普通紙の 印字品質
全面グレース・ ヘッド (1976 年)		200 dpi 8 ドット/mm	24 ドット	×
部分グレース・ ヘッド (1980 年)		200 dpi 8 ドット/mm	24 ドット	△
リアル・エッジ・ ヘッド (1985 年)		200 dpi 8 ドット/mm	24 ドット	○
ダブルグレース・ ヘッド (1987 年)		360 dpi 14 ドット/mm 400 dpi 16 ドット/mm	48 ドット～ 144 ドット 56 ドット～ 160 ドット	◎
新型サーマル・ ヘッド (1995 年)		600 dpi 24 ドット/mm	240 ドット	◎

図 1.5 代表的なサーマルヘッドモデル

また熱転写プリンタの技術課題に対する研究は多く発表されているが、その対象はサーマルヘッドではなく、研究のほとんどがインクリボンによる対策⁽²⁷⁾に関するものであった。また IBM の Quite-writer に代表されるようなインクリボンに発熱

抵抗体の機能を付加したタイプの熱転写プリンタの研究もその一つである⁽²⁷⁾。これらの研究の成果は普通紙印刷の特性改善や印刷効率の改善につながったものの、印刷速度や高解像度化に対しては不十分であっただけでなく、インクリボンが特殊なものになり、印刷のコストが従来のインパクト方式より高いものになった。

1-2. サーマルヘッドの設計課題と本研究の目的

以上述べたように、画像出力用に用いられる熱転写プリンタの課題を克服するため、これらの技術課題をより明確にし、サーマルヘッドの抜本的な特性改善を進める必要が出てきた。

熱転写プリンタの技術課題は以下の通りである。

- ① インパクトプリンタのような普通紙への印刷
- ② 画像出力に用いるための高精細高画質印刷とインパクトプリンタ以上の高速印刷
- ③ 印刷濃度ムラ改善による高画質印刷の実現
- ④ モバイル印刷用の省電力プリンタの実現

また、画像印刷においては、図 1.6 に示すようにハイライトからシャドーまでの階調を、「正確な位置に」、「より細かく」、「素早く」、「適切な大きさに制御されたドットで」、「手軽に」印刷を行う事が必要になってくる。これらの技術課題を克服するためのサーマルヘッドの設計課題について以下に詳細を述べる。

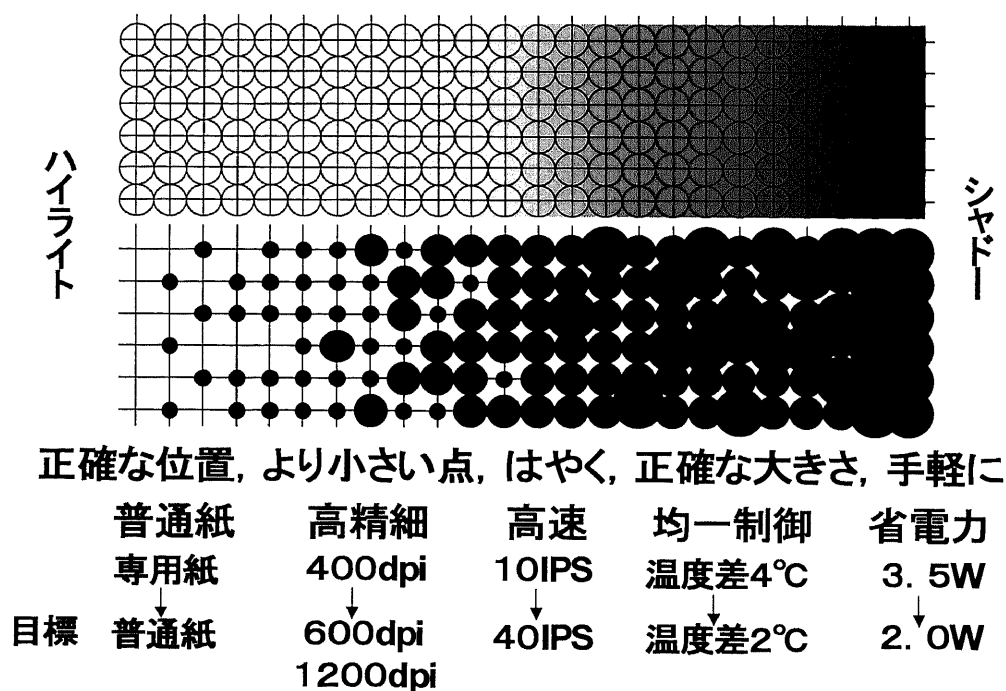


図 1.6 画像表現方法と目標

普通紙印刷の為のサーマルヘッド設計技術課題：「専用紙から普通紙へ」

従来の熱転写プリンタにおいて、活字印刷のような美しい印刷品位を得るためには、平滑性が高い紙が必要であった。それは、熱転写プリンタがインクと紙とを接触させて印刷をおこなうため、凹凸の激しい普通紙では、その接触が十分に出来ないためであると考えられる。これらの関係については、経験的にはよく知られているものの、今まで研究された例がない。また、印刷中にサーマルヘッド表面に加わる応力について、接触の変形まで考慮した研究例はない。凹凸の激しい紙に印刷させるための最適なサーマルヘッド形状、サーマルヘッドの紙に対する押圧条件について明らかにし、普通紙印刷に用いるためにサーマルヘッドをより最適化する必要がある。

高精細高画質印刷の為のサーマルヘッドの設計技術課題

：「400dpi から 600dpi, 1200dpi へ」

これまでのサーマルヘッドでは 400dpi(dot per inch)の解像度までしか実用されていない。その理由は、それまでのサーマルヘッドの構成材料にある。400dpi では、たとえばインパクトプリンタと同等の速度の 10IPS(inch per second)で印刷を行うとすると、4kHz の駆動応答周波数が必要になる。従来のグレース／アルミナ基板の構造では 4kHz が限界であり、これ以上の解像度は不可能であった。400dpi 以上の解像度達成には、サーマルヘッドの抜本的な熱応答特性の改善が必要である。また 400dpi 以上の解像度を得るために必要な発熱温度が上昇し、信頼性の問題も考えられる。またドット径が 400dpi の $84\mu\text{m}$ から小さくなった場合に、暖められたインクの温度が、インクの転写に至るまでのあいだに放熱してしまうことで転写がうまくできないことが考えられる。このように熱転写プリンタでの高精細印刷のためのサーマルヘッド最適化には構成材料の設計による熱応答特性の最適化とともに耐熱性の改善や、微小ドットのインク温度の挙動を明らかにする必要がある。

高速印刷の為のサーマルヘッドの設計技術課題：「10IPS から 40IPS へ」

昨今の我々を取り巻く環境のなかで、オフィスからホームまでプリンタの印刷速度は急速に高速化が進み、今では 100ppm(paper per minute)を越す製品が普通になりつつある。業務用に向け、熱転写プリンタにおけるサーマルヘッドのさらなる高速化の必要性が出てきた。先に述べたように、従来までのサーマルヘッドでは、駆動周波数は 4kHz が限界であり、400dpi ではインパクト方式と同等の 10IPS が可能なものの、800dpi ではその半分の 5IPS が限界となり、高精細画質と速度を両立できないでいた。したがって熱転写プリンタの高速化にはサーマルヘッドの駆動周波数の向上が必要である。また 10IPS 以上の速度を得るためには、必要な発熱温度が上昇してしまうため、サーマルヘッドの信頼性の問題も考えられる。このように熱転写プリンタの高速化のためのサーマルヘッド最適化には、高精細印刷での課題と同様に、構成材料の設計に

よる熱応答特性の最適化とともに耐熱性を改善する必要がある。

印刷濃度ムラ改善による高画質印刷の実現の為のサーマルヘッドの設計技術課題

：「ヘッド基板の均一温度制御 温度差 4℃から 2℃へ」

サーマルヘッドの温度やサーマルヘッド基板内の温度分布は印刷品質に直接影響を及ぼす。特に画像印刷においては、全域にわたってハイライトの同一色の印刷を行う場合、サーマルヘッドの基板内の蓄熱状態がそのまま印刷濃度ムラとなって現れることになる。したがって、サーマルヘッドの通電の制御だけではこの問題を解決することができない。しかしながら、サーマルヘッド基板内の温度分布の制御を行った研究例はない。熱転写プリンタの高速且つ高画質化のためにはサーマルヘッドの放熱性向上とともにヘッド基板内の温度分布を均一化する必要がある。

省電力印刷の為のサーマルヘッド設計技術課題：「3.5W から 2.0W へ」

デジタルカメラが急速に普及し、それに伴ってデジタル画像の出力機が伸びを示している。またその使われ方も多様化を見せ、モバイル性が重要になってきている。溶解型熱転写プリンタはインクジェットプリンタに対し、小型化並びに信頼性の面で優位であるが、インク転写のプロセスには、サーマルヘッドの発熱、インクの熔融、紙へのインクの熱圧着と多くのエネルギーを必要とする。そのエネルギーの約半分をサーマルヘッドが占めている。熱転写プリンタの省電力印刷にはサーマルヘッドの省電力設計が大変重要になる。サーマルヘッドの発熱効率を改善するためには、発熱抵抗体の熱をインク側に効率よく伝えることが必要になる。そのためのサーマルヘッド構造、熱を遮断する断熱層の最適設計が必要である。

また以上の各課題解決のためには、その特性の安定化、いわゆる量産ロバスト設計が必要であり、量産設計手法の確立が不可欠である。

1－3. 本論文の構成

前述の通り、サーマルヘッドの技術課題は大きく分けて4テーマになる。本論文ではこれら4つのテーマごとに章を分け、第2章から第5章に内容を論述した。

第2章 サーマルヘッド形状の解析と接触条件の設計

第3章 サーマルヘッド構成材料と熱応答特性の設計

第4章 サーマルヘッドの温度均一化技術：放熱制御と高画質化設計

第5章 サーマルヘッド構造の最適化設計

第6章に結論を記述する構成とした。

【参考文献】

- (1) 田村秀行監修, コンピュータ画像処理入門, 総研出版, (1985), pp.175-177.
- (2) 三宅洋一, デジタルカラー画像の解析・評価, 東京大学出版会, (2000), pp.1-8.
- (3) 日本写真学会, 日本画像学会合同出版委員会編, ファインイメージングとハードコピー, 株式会社コロナ社, (1999), pp.29-31.
- (4) 乾利治, インクジェット技術における高画質技術, 電子写真学会シンポジウム「マルチメディアとハードコピー」論文集, (1995), pp.33-39
- (5) 小坂橋規文, 田鹿博司, バブルジェット記録方式における画質制御技術, 電子写真学会誌 33-2 別冊, (1994), pp.178-181.
- (6) 技術情報協会編, 「印刷・情報記録における紙の特性と印刷適正および分析・評価」, 株式会社技術情報協会, (1999), pp.245-251.
- (7) 倉林 豊, インクジェット記録における普通紙高画質化技術, 電子写真学会“Japan Hardcopy97”論文集, (1997), pp.141-142
- (8) 電子写真学会編, 続 電子写真技術の基礎と応用, 株式会社コロナ社, (1996)
- (9) 木野内 聡, 高木 修, 電磁誘導加熱による定着器の開発, 日本画像学会“Japan Hardcopy 2004Fall Meeting”論文集, (2004), pp.1-4.
- (10) 谷川耕二, 他, カラー I H 定着方式の開発, 日本画像学会 “Japan Hardcopy 2004Fall Meeting”論文集, (2004), pp.5-8.
- (11) 瀬戸忠雄, 「情報産業とその材料」特集 感熱転写リボン, 繊維学会誌, 47,4, (1991), pp.197-201.
- (12) 杉山早実, 他, カラープリンタにおける熱転写技術, 神鋼電機技報, Vol.37, No2, (1992), pp.63-69.
- (13) 電気学会, 高品位カラー記録デバイス調査専門委員会, ハードコピー技術の高画質化/カラー化についての技術動向, 電気学会技術報告, 第 483 号, (1994).
- (14) 日本工業出版, 最新プリンタにみるラベル発行技術, 月間自動認識, Vol18, No2, (2005), pp.22-24.
- (15) 山下春生, 昇華型フォトプリンタの高画質化技術, 日本画像学会誌, 第 43 巻, 第 2 号, (2004), pp.28-34.
- (16) 角谷繁明, ダークイエローインクを用いた 7 色インクジェットプリンタ, 日本画像学会 “Japan Hardcopy 2001” 論文集, (2001), pp.315-318.
- (17) 花上輝靖, 小川 薫, 此下幸栄, デジタルフィルムイメージャー (フィルムステーション) UP-DF500, 日本画像学会誌, 第 44 巻, 第 5 号, (2005), pp.32-38.
- (18) Ian R.Stephenson,Richard A.Hann, Full Colour Fluorescent Images Printed by Thermal Dye Transfer, IS&T' s NIP21: 2005 International Conference on Digital Printing Technologies, (2005), pp.191-192.
- (19) 西口泰夫, 村野俊次, サーマル転写カラープリンタ用のサーマルヘッドについ

- て，画像電子学会研究会講演予稿，Vol88，(1986)，pp.1-5.
- (20) 酒徳修吉，他，電子写真学会“Japan Hardcopy 1990”論文集，(1990)，pp.245-248.
 - (21) 吉池信幸，他，新熱集中電極を用いたサーマルヘッドの熱特性，画像電子学会全国大会予稿集，Vol17，(1989)，pp.17-20.
 - (22) 柴田 進，金森孝史，黒木賢二，高速印字を可能とする薄膜型サーマルヘッドの検討，電子情報通信学会論文誌 C，Vol68，No1，(1985)，pp.28-34
 - (23) 柴田 進，金森孝史，高速印字，高分解能印字を可能にするサーマルヘッドの設計，電子情報通信学会論文誌 C-2，Vol74，No7，(1991)，pp.607-614
 - (24) Shibata.S,Examination of High-Speed,Low Power Consumption Thermal Head, IEICE Trans Electron, VolE78-C, No11, (1995), pp.1632-1637.
 - (25) 柴田 進，木村 勝，サーマルヘッド用 Ta₂N 薄膜発熱体の劣化挙動，電子情報通信学会論文誌 C-2，Vol79，No6，(1996)，pp.326-329
 - (26) 白川享志，日比野郁夫，小山田佳裕，600dpi のカラー印刷を熔融型熱転写方式で実現，日経エレクトロニクス，7-17，No650，(1995)，pp.89.
 - (27) S.Applegate, et al, Complementation of the resistive ribbon technology in a printer and correcting typewriter, IBM J.Res.Develop., vol.29, (1985), pp.459-469.

第2章 サーマルヘッド形状の解析と接触条件の設計

2-1. 緒言

図 2.1 は、熱転写プリンタのサーマルヘッド部分の概略図である。サーマルヘッドによりインクリボンに印刷用紙に加圧しつつ、発熱体によって加熱することによりインクリボン上のインクを溶融して所定の位置にインクを固着する。高精細な印刷のためには発熱体の微細化が要求される。現在のところ発熱体のサイズは、 $20\mu\text{m}$ が実現されている^{(1)~(5)}。

熱転写プリンタの印刷時に、サーマルヘッドに圧力を加えるのは次の2つの理由からである。一つは、サーマルヘッドの発熱体で発生した熱をインクリボンに伝えてインクを溶融するためである。もう一つは、インクリボンと印刷用紙が十分接触できるように、普通紙の場合は紙繊維をつぶし、真実接触面積が十分にとれるようにするためである。普通紙を用いて高画質印刷を実現するためには、紙と固体インクの間の接触を深く理解しなければならない。しかし、紙が相手の接触問題はあまり研究されていないのが現状である⁽⁶⁾。そこで本章では数種類の印刷用紙に対して、接触面顕微鏡を用いることで見かけの接触面積と真実接触面積の関係を求めた。一方で、印刷された各種印刷用紙の濃度を調べ、真実接触面積との相関を調べた。また、中心線平均粗さと印刷濃度の相関を調べた。求めた結果より、真実接触面積と中心線平均粗さなどの粗さデータのどちらが印刷濃度の相関が強いかを明らかにした。

また普通紙印刷用のサーマルヘッドを設計するうえで、サーマルヘッド形状とインクリボンの接触圧力を明らかにすることは、高精度な印刷品質を保証する上で必要不可欠である。インクリボンやプラテンゴム⁽⁷⁾には粘弾性特性が存在するために、単なる弾性解析では接触圧力分布が正確に評価できない。そこで本章後半では、接触圧力の解析に必要な各部材の粘弾性特性の測定を行い、サーマルヘッドとインクリボンの接触における粘弾性解析を行うことによって、サーマルヘッドの形状と接触状況を明らかにした。さらに、サーマルヘッド形状において発熱体の位置を変えたサンプルで印刷実験をおこなうことにより解析結果の妥当性を考察した。

2-2. 真実接触面積と印刷濃度の関係

2-2-1. 印刷実験条件と接触面顕微鏡

本研究で用いた印刷用紙は普通コピー紙で、カレンダ処理の際の圧力を変えたものである。カレンダ処理とは数本の金属ローラーを縦積みして設定の圧力を掛けた幾つかのニップに、乾燥し終わった紙を通すことにより、表面の平滑化と厚さの調整を行う処理である。カレンダ処理の圧力が高ければ紙の凹凸が潰されて結果として表面粗さが小さくなる。各々の紙の中心線平均粗さを表 2.1 に示す。表面粗さの測定には赤外線レーザ表面形状測定顕微鏡 VF7500（キーエンス社製）を用い、同一用紙にて場

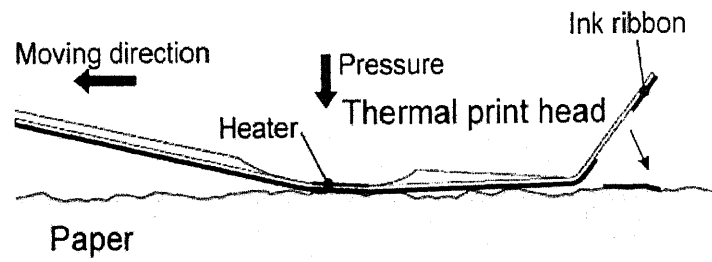


図 2.1 サーマルヘッド部印刷概略図

表 2.1 紙の平均粗さ

Calender Pressure(N/cm)	Ra(μ m)
0	2.78
588	2.16
1764	1.83
2940	2.12

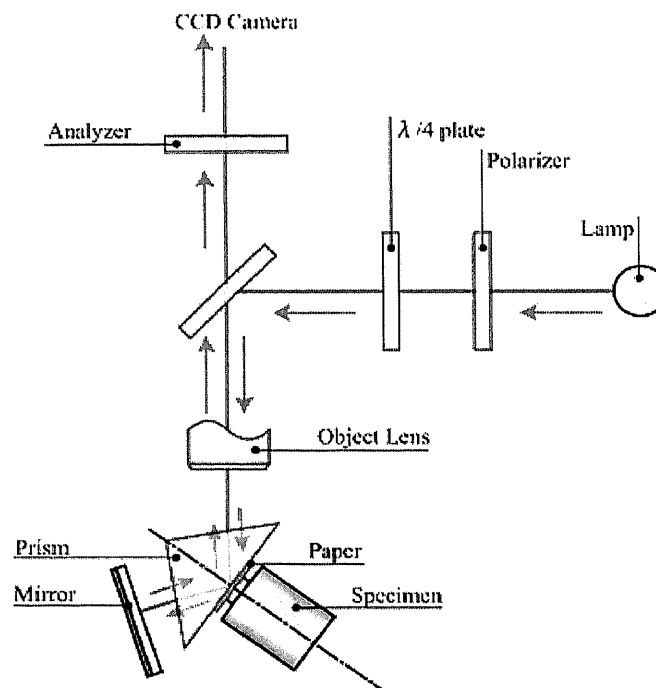


図 2.2 接触面顕微鏡

所を変えて 10 回測定した平均値を用いた。

本研究の印刷実験には市販の熱転写プリンタ (MD5500 アルプス電気製) を用いた。使用した印刷速度とヘッドの押しつけ圧力、並びに投入電力は 254mm/s と 6.0MPa, 0.26W/dot とした。物体の反射率を R とした場合、その反射濃度 D は $D = -\log_{10} R$ で表される。印刷濃度測定はこれらの関係から反射濃度計を用いて反射濃度 D で表現される。対数を用いるのは、明るさに対して肉眼の知覚が、対数的な特性を有するところからきている。今回の実験では、これら印刷濃度測定では一般的に使われる反射濃度計 RD918 (マクベス社製) を用いて測定をおこなった。印刷に用いたパターンは面積率 30% の網点パターンである。これは印刷において点の集団にて表現される階調のハイライトにあたる濃度に相当する。紙の表面凹凸の印刷濃度への影響はベタよりも点の集団であるハイライトのほうが影響しやすいことからこのパターンを選択した。

接触面顕微鏡の概要を図 2.2 に示す。紙の背面を直径 5mm のアルミ製パンチで加圧することにより、紙とプリズムを接触させる。接触部は暗く観察されるので、2 値化処理を行って真実接触面積を求めた。2 値化処理の際はしきい値が重要となる⁽⁸⁾。本研究では、得られた画像の輝度のレベル 60 をしきい値に用いた。測定している見かけの接触面積は、直径 5mm の円形であるが、斜めから観察するために楕円となる。観察後は、画像処理により円形に戻している。

2-2-2. 真実接触面積並びに表面粗さと印刷濃度測定結果

図 2.3 は、カレンダ処理圧力 588(N/cm) の用紙について真実接触面積を測定した結果の一例である。見かけの接触圧力が大きくなるにつれて、ほぼ比例的に真実接触面積が大きくなることが分かる。図中の面積率とは、見かけの接触面積に対しての真実接触面積の割合である。また、見かけの接触面全体で均一に接触しているのではなく、真実接触面の分布に偏りがあることが認められる。これらは、紙の厚みが均一ではないことによると考えられる。

次に、見かけの接触圧力を 6MPa として、カレンダ処理圧力と真実接触面積の関係を調べた。見かけの接触圧力を 6MPa としたのは、サーマルヘッドに作用する圧力の値と同じにするためである。その結果を図 2.4 に示す。カレンダ処理圧力が大きくなると真実接触面積が比例的に大きくなることが分かる。

各種カレンダ処理した印刷用紙に黒色のインクを用いて印刷を行い、印刷濃度を測定した。先程と同様に図 2.4 に結果を示す。印刷濃度も先の真実接触面積同様、カレンダ処理圧力が大きい用紙ほど印刷濃度が比例的に大きくなることが分かる。これらの結果から真実接触面積と印刷濃度の関係について整理し図 2.5 に示した。図 2.5 より真実接触面積と印刷濃度の間には強い相関関係が存在し、比例関係にあることが確認できる。

一方、表 2.1 に示した各種カレンダ処理した印刷用紙の表面粗さと、それぞれの印刷

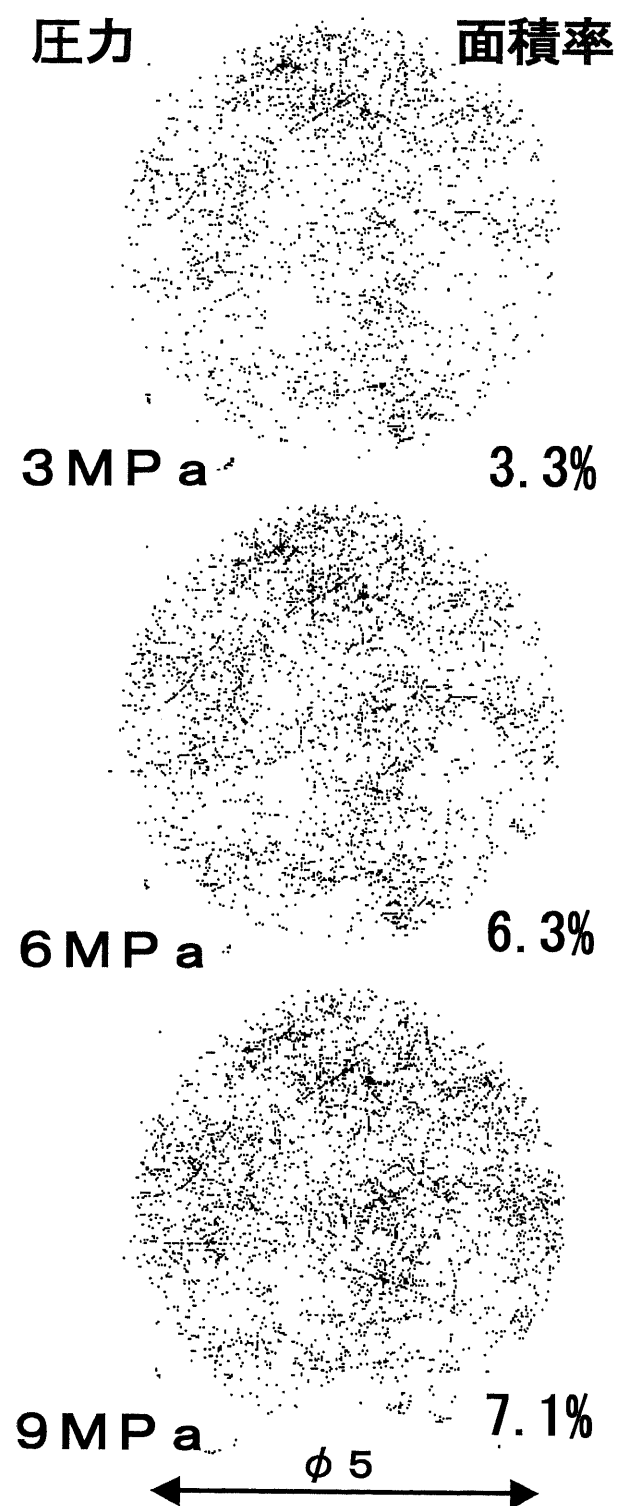


图 2.3 接触面顯微鏡像

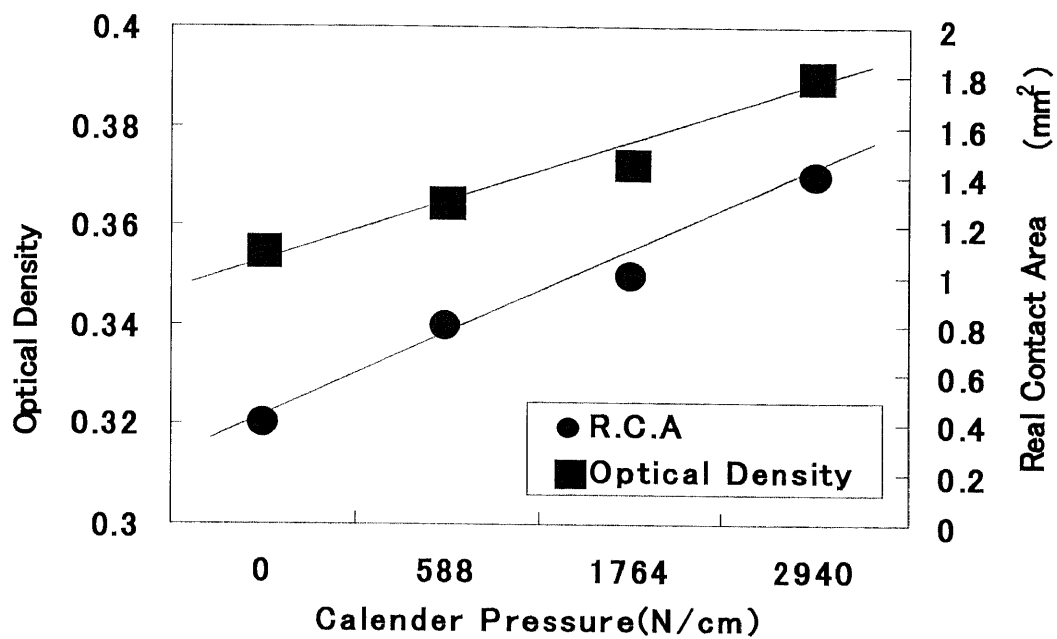


図 2.4 カレンダ圧と真実接触面積，印刷濃度の関係

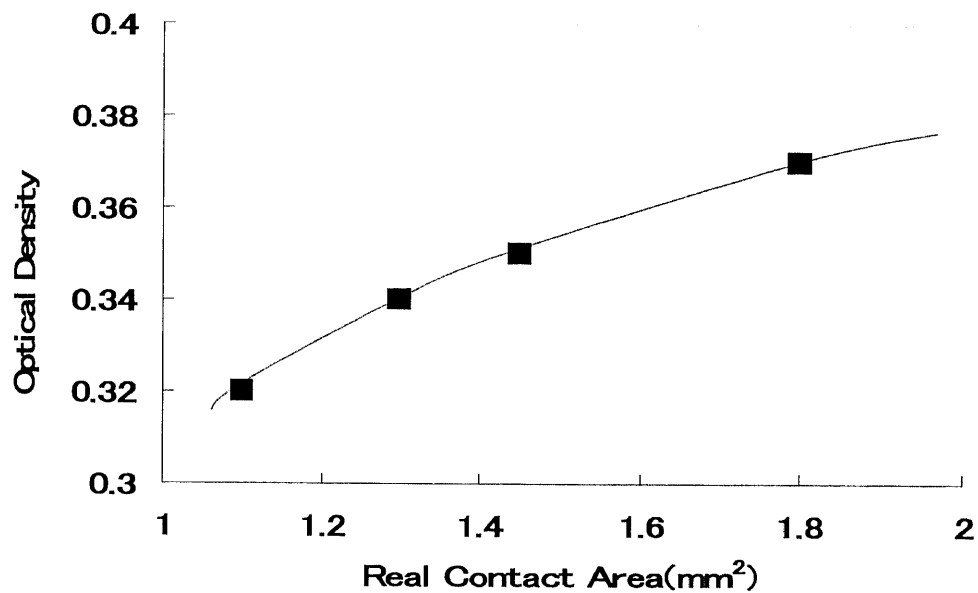


図 2.5 真実接触面積と印刷濃度の関係

濃度の関係を図 2.6 に示す。真実接触面積と印刷濃度の間には比例関係の存在が確認できたが、それに比較し紙の表面粗さと印刷濃度の関係についてはそれほど強い相関関係がみられなかった。

2-2-3. 各種用紙での測定結果

印刷用紙の印刷濃度については、表面粗さより真実接触面積の測定結果のほうが強い相関関係がみられた。この関係について、各種用紙について同様に確認を行った。用紙は表面の粗い PPC 用紙から平滑な専用紙まで媒体 A から H までの 8 種にておこなった。A はボンド紙、B は非塗工紙で表面粗さが粗い紙、C～F は非塗工紙のカレンダ圧が異なる紙、G、H はコート紙である。なお、C は図 2.3 で使った紙と同仕様の紙である。接触面顕微鏡画像を図 2.7 に示す。また、各種用紙にて印刷を行い濃度を測定した結果と真実接触面積の関係を図 2.8 に、表面粗さとの関係を図 2.9 に示す。

図 2.8 より、各種用紙においても真実接触面積と印刷濃度に相関関係がみられ、真実接触面積が 5mm^2 以上では印刷濃度は飽和してしまうことがわかる。一方表面粗さと印刷濃度の関係を図 2.9 に示すが、こちらも全体的に印刷濃度と相関がある結果となった。先程の結果との違いを確認する目的で、図 2.8、図 2.9 のグラフの 8 種の用紙の中から表面状態が似ている非塗工紙の 4 種（媒体 C,D,E,F）のみ抜き出し同様に比較をおこなった。真実接触面積の関係を図 2.10 に、表面粗さとの関係を図 2.11 に示す。なお、近似線は図 2.8、図 2.9 にて求めた近似線を適用している。図 2.10 をみると、先の結果と同様に真実接触面積と印刷濃度に強い相関が確認された。一方、表面粗さとの関係については、先の結果と同様に相関が見られなかった。

2-2-4. 真実接触面積とインク転写の関係

非塗工紙であれば、真実接触面積と印刷濃度の間に相関関係が存在することが確認された。そこで、この関係をより良く理解するために、真実接触面積を測定した同一場所に既知のパターンの印刷を施し、インクの転写分布と真実接触面積の関係を調べた。結果を図 2.12 に示す。図 2.12(a)は、 5mm 四方の真実接触面積の分布を測定したものである。図 2.12(b)は、インクで斜線を印刷したものである。両者を重ねて表すと図 2.12(c)になる。真実接触点のみにインクが転写されるわけではなく、それ以外のところにもインクが転写されている様子がよく分かる。真実接触面積の測定では、紙は硬いガラスと接触するのに対して、印刷では厚さが $2\mu\text{m}$ のインクと $3\mu\text{m}$ のベースフィルム(PET)のインクリボンを通して接触するために、紙の凸部だけではなく、凹部にもインクが入り込み接触するためと思われる。

真実接触面積以外の部分においてもインクが転写しているが、これについては、インクの変形、ベースフィルムの変形が考えられる。この考えを確認するため転写後のインクリボンの表面を観察した。結果を図 2.13 に示す。図 2.13(a)の写真は紙上に転写

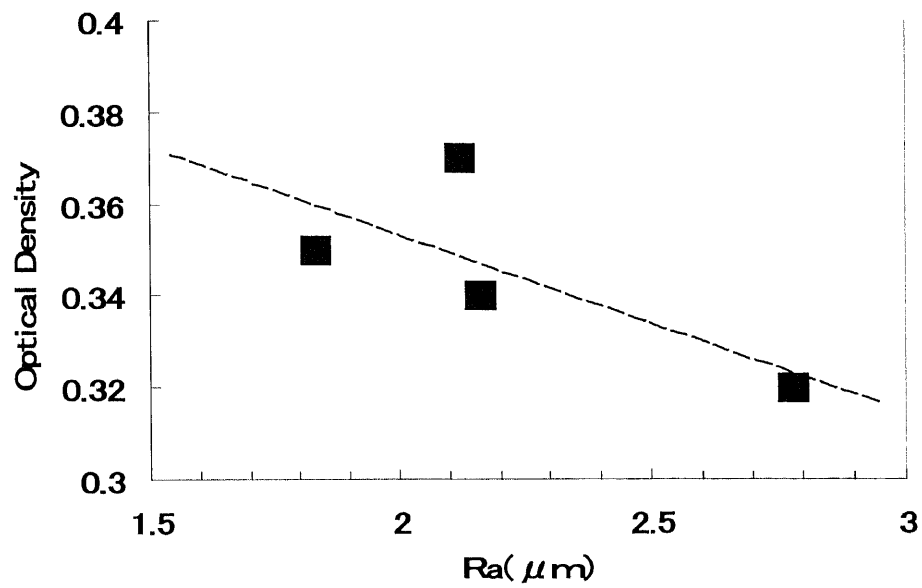


図 2.6 表面粗さと印刷濃度の関係

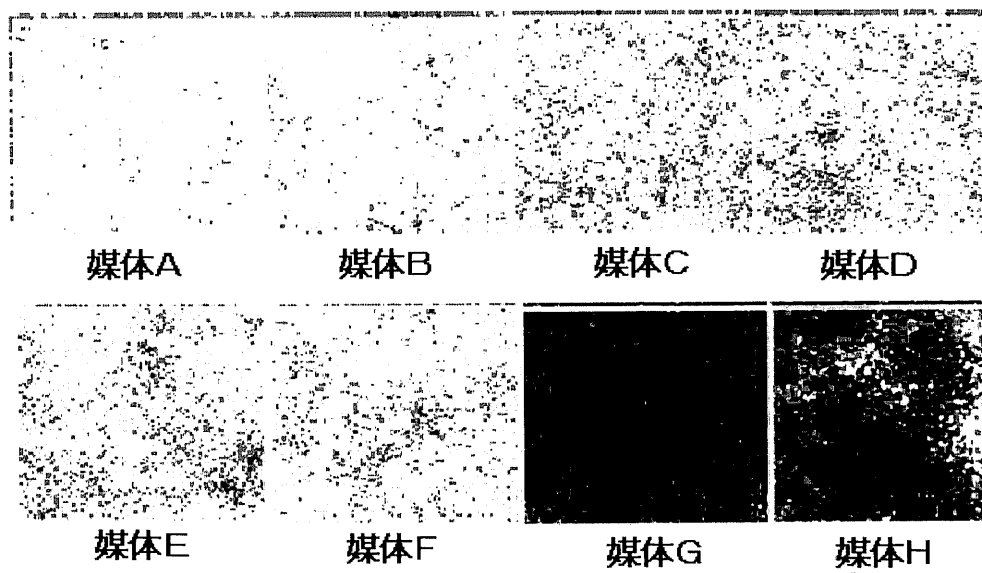


図 2.7 各試験用紙の真実接触面像

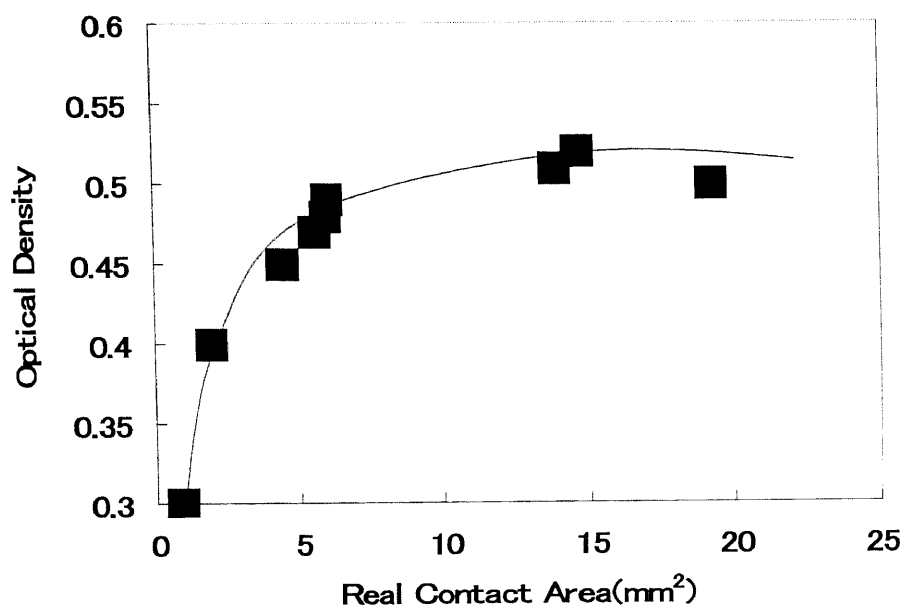


図 2.8 各試験用紙の真実接触面積と印刷濃度の関係

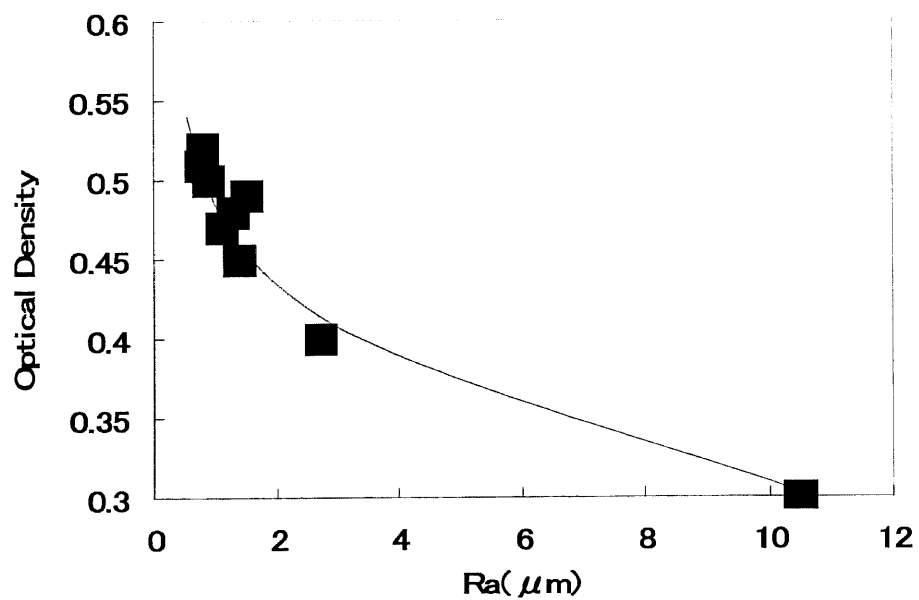


図 2.9 各試験用紙の表面粗さと印刷濃度の関係

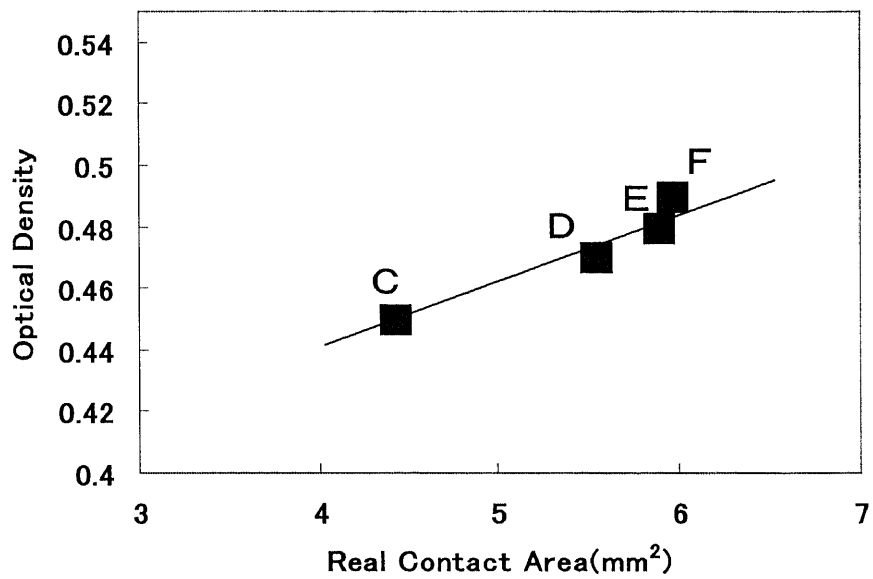


図 2.10 非塗工紙の真実接触面積と印刷濃度の関係

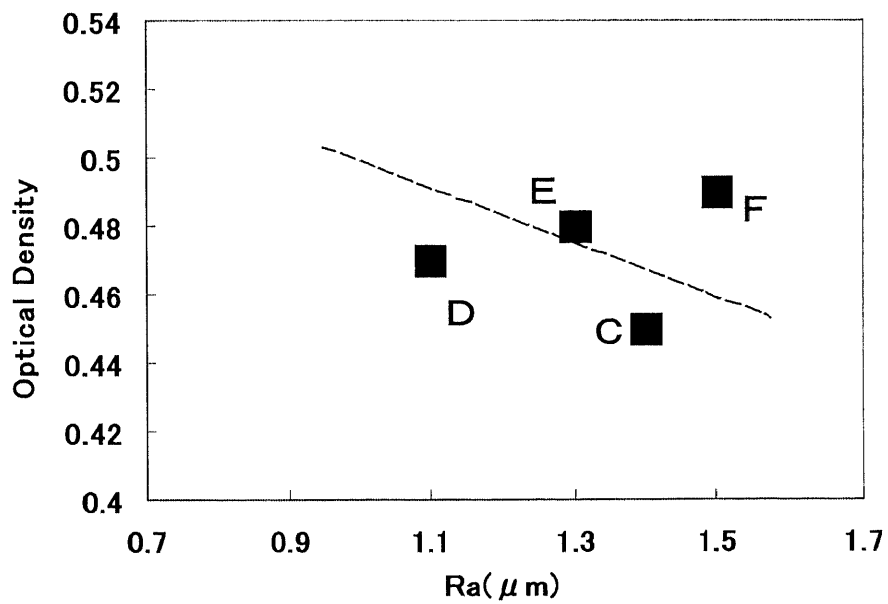


図 2.11 非塗工紙の表面粗さと印刷濃度の関係

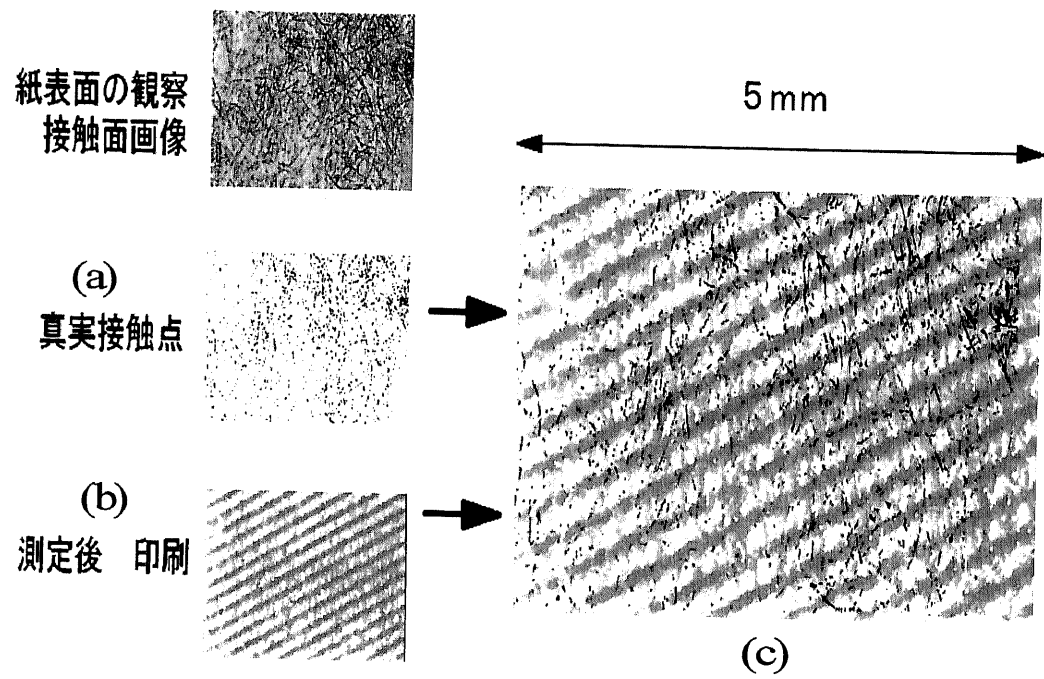


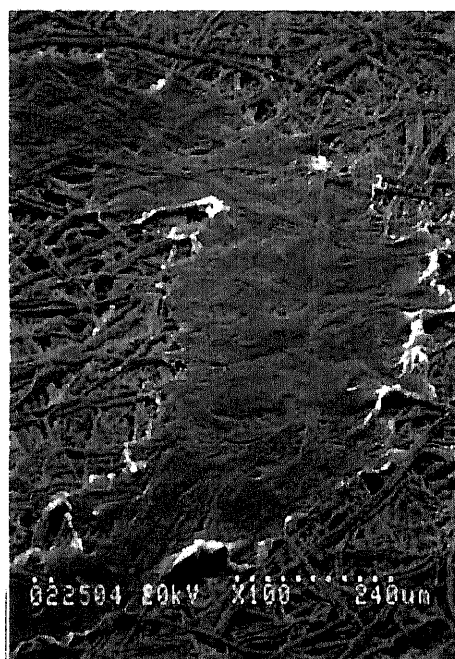
図 2.12 印刷画像と真実接触面像の比較

されたインクの状態を示し、図 2.13(b)の写真はその印刷で使ったインクリボン表面を示している。図 2.13(b)の写真を見るとインクが転写しているところは、ベースフィルムのところに紙の繊維の凹凸が転写されていることが分かる。これは、発熱体の熱によりベースフィルムの機械的強度が低下したためと考えられる。インクが転写していないところのインク表面には、紙表面の繊維との接触跡が転写されている。これらのことより、熱転写プリンタの印刷の際、インクリボンと紙との接触は、ベースフィルムやインクの変形によっても発生していることが分かった。

2-2-5. 真実接触面積と印刷の関係

熱転写プリンタの印刷において、特に非塗工紙を用いた印刷濃度は、真実接触面積と強い相関があったが、実際の印刷では真実接触点以外にもインクが転写されていたことが分かった。これはインクと紙の接触が、インクとベースフィルムの変形によって、接触面顕微鏡で観察される接触点以外でも接触が起こっているためである。しかしながら、熱転写プリンタの場合、真実接触面積と印刷濃度の間に強い相関があり、紙の表面粗さとはそれほどまでの強い相関がなかった。この点について考察を行うため、紙の断面観察によって紙の内部構造を確認した。結果を図 2.14 に示す。図 2.14(a)の写真は紙の表面を示し、図 2.14(b)の写真は紙の断面構造を示している。

図 2.14(a)の写真より、紙の表面では、複雑に絡み合った繊維とその繊維間に穴状の空隙があることが分かる。一方図 2.14(b)の写真より断面でみた場合、明らかに紙繊維周辺に空隙が存在している部分が観察される。表面粗さを測定する場合、これら空隙を含んだ測定になり、実際より大きい値で測定されることが考えられる、逆に、表面粗さ測定では低い値であっても、実際の印刷の際、繊維下部に空隙がある場合では、その部分で圧力が逃げることにより、十分な接触圧力がかからない状態になることが考えられる。一方接触面顕微鏡の場合は、これら空隙も含んだ状態で実際に印刷の時と同じように圧力をかけて測定を行うため、紙の構造による影響も同時に測定される。従って、熱転写プリンタの場合、真実接触面積と印刷濃度の間に強い相関があり紙の表面粗さとはそれほどまでの強い相関がなかったと考えられる。

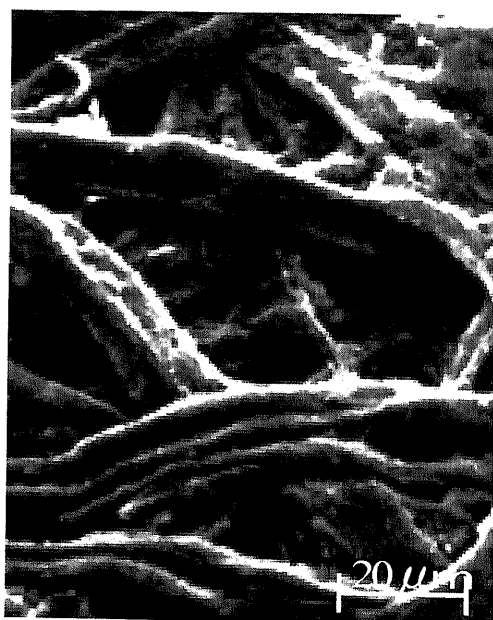


(a)

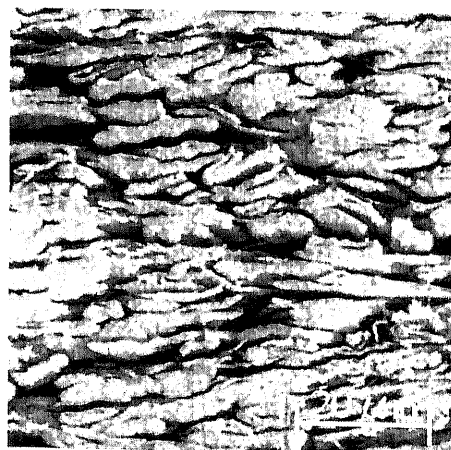


(b)

図 2.13 印刷されたインクとそのインクリボンの SEM 像



(a)



(b)

図 2.14 紙の表面ならびに断面 SEM 像

2-3. サーマルヘッドの接触圧力の解析

2-3-1. 粘弾性測定方法

サーマルヘッドとインクの接触状態の解析を行うにあたって必要となる粘弾性特性は、三要素 Maxwell モデルで表されるバネのヤング率(E_e, E_i)及び緩和時間(T_{ri})である。三要素 Maxwell モデルとは図 2.15 に示されるように二つのバネとダッシュポットからなり、一定のひずみを与えた時に内部応力が減少(緩和)する現象をモデル化したものである⁹⁾。次にそのモデルについて簡単に説明する。

図 2.15 において、三要素 Maxwell モデルに時刻 0 で瞬間的に一定ひずみを加えると、ダッシュポットは動く時間が無く、バネ E_e , E_i だけがフックの法則にしたがって伸び、その分だけが一瞬のうちに変形する。模型の両端の長さは変わらないので、次にダッシュポットが動き出す。このダッシュポットではニュートンの粘性の法則が成り立つものとする。ダッシュポットのピストンが動けば、バネ E_i はその分だけ元の長さに戻るため、バネ E_i に作用する力は小さくなる。ダッシュポットはバネの力に比例した速度で動くため、その速度は次第に遅くなる。また、バネの動く速度も遅くなる。バネ E_i に作用する力が初期の力の $1/e$ 倍に減少するまでの時間が緩和時間 T_{ri} となる。

このように、粘弾性特性は時間に依存しているため、測定を行う速度によってもその振る舞いが異なる。そこで次に示す動的粘弾性測定により、インク、PET、プラテンゴムの各粘弾性特性を算出した。

2-3-2. インクの粘弾性測定

インクの動的粘弾性測定にはレオメータ(Haake 社 Rheostress RS50 とレオメトリックサイエンティフィック社製のもの)を使用した。はじめに、インクが熔融する 83°C の温度で粘弾性特性を測定した。この測定器で得られる値は、周波数(角周波数)ごとのせん断に関する損失弾性率(G')と貯蔵弾性率(G'')である。インクを直径 35mm、厚さ 0.5mm の円板に成型して試験片とした。インク円板にねじりを加えることで測定を行った。ねじりの周波数範囲は 0.1Hz~100Hz とした。

その測定結果を図 2.16 に示す。このグラフの縦軸は損失弾性率、貯蔵弾性率、また横軸は周波数である。損失弾性率、貯蔵弾性率共に周波数の上昇に伴って右肩上がりに上昇している様子がわかる。これらの結果を用いて、以下に示す式よりせん断弾性率 $G(t)$ の時間変化を求めた。

$$G(t) \approx G'(\omega) - 0.4G''(0.4\omega) + 0.014G''(10\omega) \dots\dots\dots(1)$$
$$t = 1/\omega$$

ここで t は時間(s)、 ω は角周波数(rad/s)である。

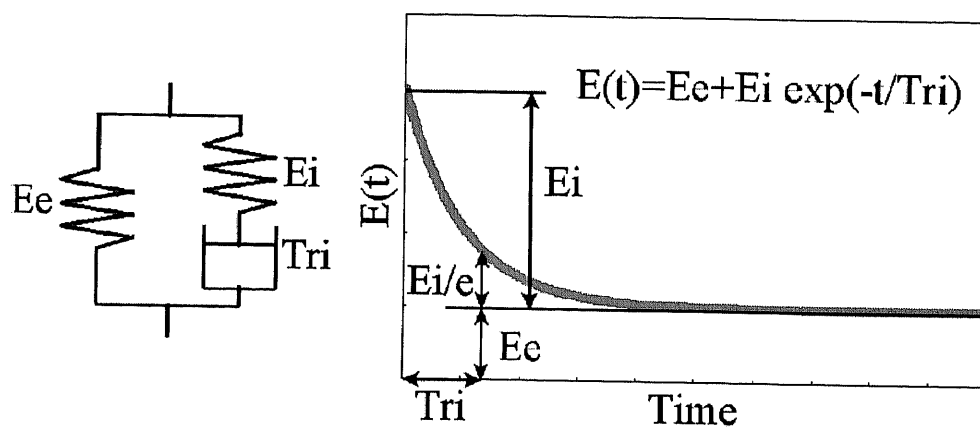


図 2.15 3要素 Maxwell Model

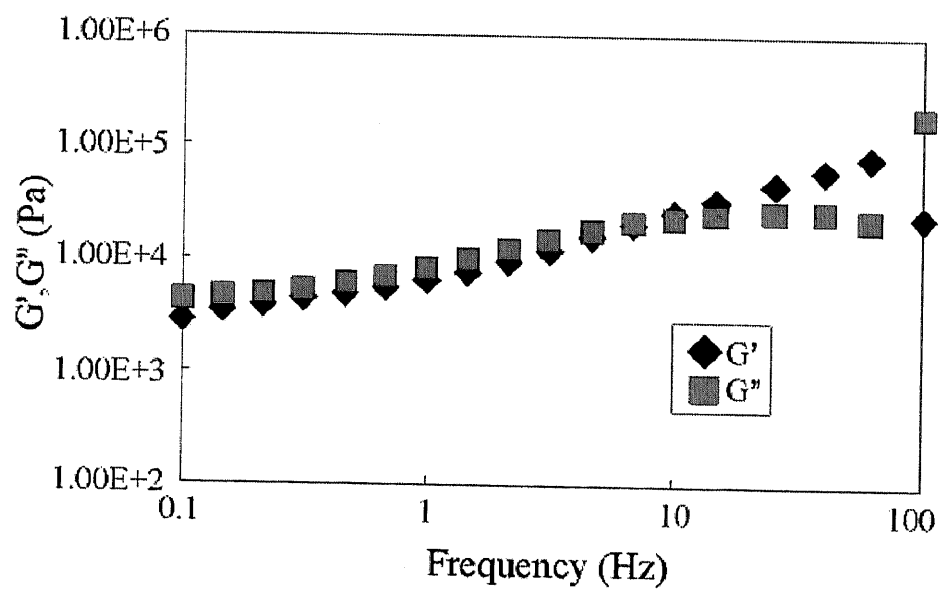


図 2.16 G', G'' の測定結果

実験より得られる時間は、 $t=1/\omega=1/(2\pi \times 100)=1.592 \times 10^{-3}(\text{s})$ から $t=1/(2\pi \times 0.1)=1.592(\text{s})$ までである。式より得られた曲線に、三要素 Maxwell モデルを適用した。式(2)に三要素 Maxwell モデルを表す式(緩和関数)を示す。

$$G(t) \approx G_e + G_i \exp(-t/T_i) \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

G_e , G_i はそれぞれのバネ定数を示し、また T_i は緩和時間である。

式より得られた曲線と三要素 Maxwell モデルの算出方法を図 2.17 に示す。グラフに漸近線を引き、それを境にそれぞれ G_e , G_i に分ける。次に G_i が G_i/e となるまでの間を T_i とする。実際の印刷動作中では、印刷用紙表面上のある一点をサーマルヘッドが通過する時間は非常にわずかであると考えられる。そのため、図中の丸で囲んだ初期部分の領域に三要素 Maxwell モデルの理論値がよく一致するような G_e , G_i , T_i を求めた。

以上の測定により得られた粘弾性測定値は、せん断に関するものである。しかし、数値解析ではその粘弾性特性を Maxwell モデルの縦弾性率 $E(t)$ によって定義するため、これらを縦弾性率に変換する必要がある。そこで式(3)を使って値を変換し、三要素 Maxwell モデルの縦弾性率 E_e , E_i を求めた。

$$E_e = 2(1+\nu)G_e \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$E_i = 2(1+\nu)G_i \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで E_e , E_i はバネ定数(縦弾性率), G_e , G_i はバネ定数(せん断弾性率), ν はポアソン比を示す。ポアソン比は 0.5 とした。ヤング率 E は E_e と E_i を合計したものである。これをインクの粘弾性物性値とした。この結果を表 2.2 に示す。

しかし、このようにして求めた粘弾性特性は溶融状態で測定したものであるため、予備的に行った解析ではヤング率が小さすぎて計算を遂行することができなかった。そこで、25, 60℃における固体状態のインクについても粘弾性測定を行った。この測定器では前述のレオメータと同じように、各測定温度での損失弾性率(G'')と貯蔵弾性率(G')の周波数依存性(マスターカーブ)が得られる。そこで、得られたマスターカーブから同じようにして E_e , E_i , T_i を求めた。

以上の測定により得られた粘弾性特性を表 2.2 に示す。なるべく溶融状態に近い値で、なおかつ計算可能な値として、83℃の溶融インクの各バネ定数を 100 倍にした値を用いることにした。緩和時間は温度依存性があまり見られなかったので、83℃のときの値をそのまま用いた。

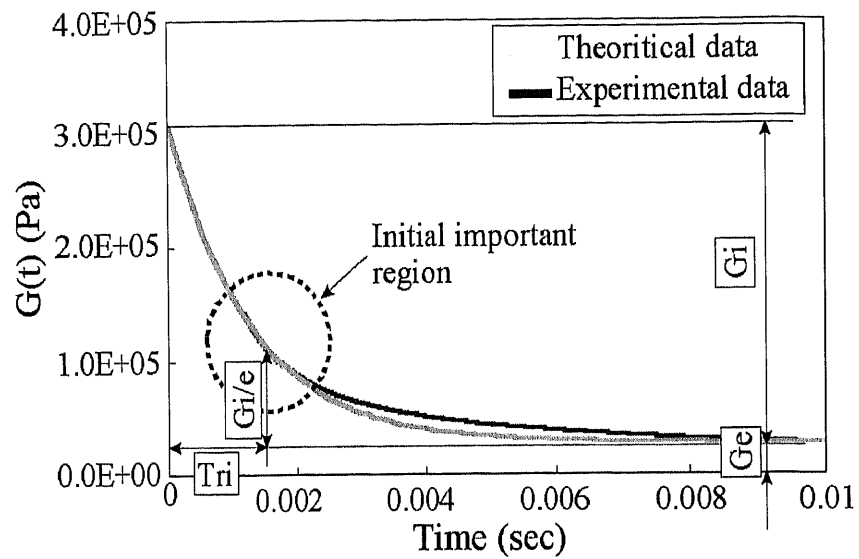


図 2.17 3 要素 Maxwell Model の理論データ

表 2.2 インクの物性値

	Ee (MPa)	Ei (MPa)	E (MPa)	Tri (sec)
liquid 83°C	0.792	0.076	0.868	0.00128
liquid 83°C × 100	79.2	7.6	86.8	0.00128
solid 60°C	93	99	192	0.00125
solid 25°C	380.8	370.8	751.6	0.00129

表 2.3 プラテンの物性値

	Ee (MPa)	Ei (MPa)	E (MPa)	Tri (sec)
Platen rubber	67.1	41.8	108.9	0.000158
PET	495	146	641	0.027

2-3-3. PET, プラテンゴムの粘弾性測定

PET, プラテンゴムの粘弾性測定は粘弾性測定器(レオメトリック社製 RSA-II)を使用した。この測定器では薄い平板上の試験片を引張ることにより粘弾性特性を測定するために、得られる値は縦弾性に関する損失弾性率(E'')と貯蔵弾性率(E')である。各測定温度で測定することにより周波数依存性(マスターカーブ)を求めた。PET の粘弾性測定では、印刷時におよそ 200(°C)のサーマルヘッドと直接接触することから、測定基準温度を 150(°C)とした。一方プラテンゴムは測定基準温度を室温の 22(°C)とした。それぞれの測定結果より、(1), (2)式において、 G' を E' , G'' を E'' , G_e を E_e , G_i を E_i , $G(t)$ を $E(t)$ と置き換えることにより、インクの粘弾性測定の場合と同じように E_e , E_i , T_{ri} を求めた。このようにして得られた各物性値を表 2.3 に示す。

2-3-4. 数値解析

印刷動作時におけるサーマルヘッドの接触圧力解析を、汎用有限要素解析ソフト MARC(Ver.7.3)を使用して二次元問題として調べた。印刷用紙については、そのモデル化が困難であるため、今回は印刷用紙については解析に取り入れなかった。解析の詳細について以下に示す。

実際の印刷動作を模してサーマルヘッドを PET, インク, プラテンゴムに 2kgf の荷重で押し付け、その後摺動させた。この時サーマルヘッドは剛体とし、表面粗さ計で実際に測定した形状から図 2.18 に示すようにモデル化して用いた。図において凸になっている部分が発熱体部分である。また、図 2.18 に示すサーマルヘッドは反時計方向に 3° 傾けた状態で PET と接触させた(図 2.19)。摺動させる時の速度は、標準の 254mm/s, さらにその 1/5 倍, 1/2 倍および 2 倍の 50 mm/s, 127mm/s および 508mm/s とした。PET, インク, プラテンゴムは図 2.19 に示されるような縦 2.105mm, 横 3mm のメッシュを作成し、上から 3 μ m の層を PET, 2 μ m の層をインク, その下 2.1mm をプラテンゴムとした。また、サーマルヘッドが接触する部分は x, y 両方向ともに細かく分割した。

図 2.20 に、サーマルヘッド摺動速度が 254mm/s の場合の粘弾性解析結果を示す。比較のために弾性解析による計算結果も示した。左側の縦軸の Displacement y はメッシュ節点の y 方向の変位であるが、両解析結果ともほぼサーマルヘッドの形状をあらわしている。粘弾性解析に対して弾性解析の場合サーマルヘッドの低下量が少ないことが分かる。

粘弾性解析の接触圧力を見ると、サーマルヘッドの発熱体部の右側にも接触している部分が存在することがわかる。発熱体部では突起の右側に圧力のピークが存在する。弾性解析ではこの圧力のピークは突起の左側に存在する。これらは、粘弾性体上を円柱が純ころがりする場合の圧力分布と同様である⁶⁾。したがって、発熱体の最適位置を決定するためには弾性解析ではピークの位置を正確に予測することができず、粘弾性解析を行わなければならないことが分かる。発熱体により加熱されたインクがエッ

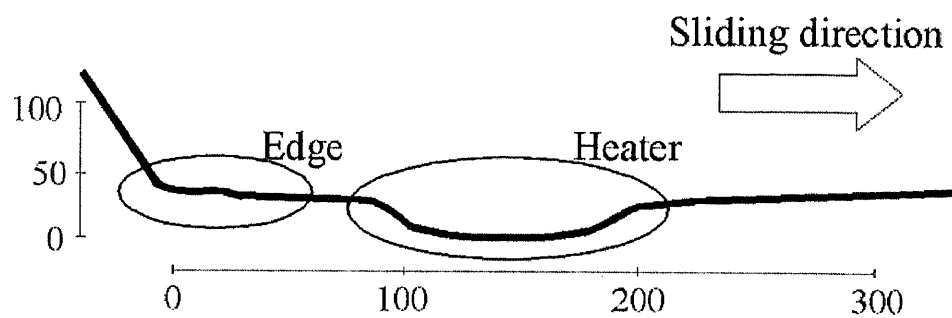


図 2.18 サーマルヘッドの表面形状

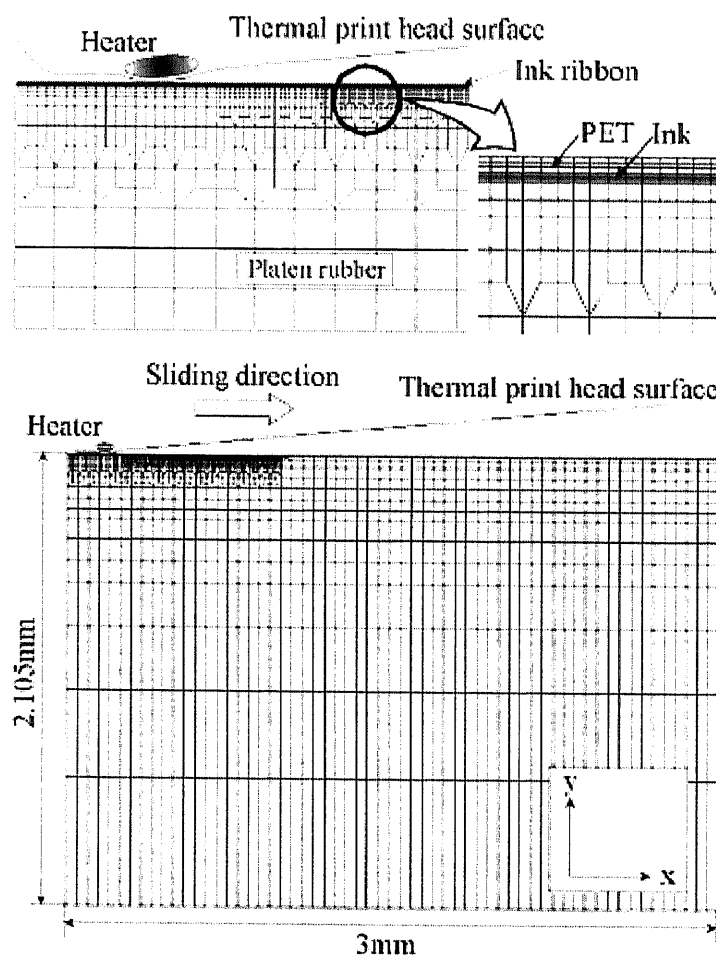


図 2.19 接触解析モデル

ジ部で再加圧(定着)されるが、そのところの圧力は弾性解析よりも圧力の作用範囲が少なくなっていることが分かる。

図 2.21 に、摺動速度を変化させたときの結果を示す。節点 y 方向の変位は、速度による変化はほとんど見られなかったため、254mm/s の結果のみを示す。図中の丸で示されるサーマルヘッドの発熱体部とエッジにおいて接触圧力の速度依存性が確認できる。発熱体部分においては、摺動速度が大きくなるほど接触圧力が高くなり、また、その摺動方向の前側において特に接触圧力が大きくなっている。これらのことは粘弾性特性の影響によるものと考えられる。また、エッジ部においても速度による影響は見られるが、発熱体部とは異なり速度が大きくなるほど接触圧力は小さくなっている。これは、摺動速度が速いために、発熱体部で受けた変形が十分に回復しないためである。発熱体部とエッジ部の間は接触圧力が 0MPa となっており、サーマルヘッドが十分に接触できていないことがわかる。

次に、インク、PET およびプラテンゴムの各部材が接触圧力に及ぼす影響を調べるため、それぞれ部材のみを剛体の上に載せるという条件で解析を行った。サーマルヘッド摺動速度は 254mm/s で一定とし、その他条件は上述の解析と同じとした。解析結果を図 2.22 に示す。このグラフ中において、インクと PET の節点 y 方向の変位は最大 $1\mu\text{m}$ 程度と非常に小さかったため、その結果は省略した。インクおよび PET のみを用いた場合、接触圧力が非常に高くなっている。これは、インクと PET の厚さがそれぞれ $2\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ と薄いために、押し込み量が減少し、接触幅が非常に小さくなったためである。

一方、プラテンゴムのみを考慮すると全ての部材を用いて解析した接触圧力分布に非常に近いものとなった。このことは、インクと PET よりも接触圧力に及ぼす影響が強いことを表している。また、プラテンゴムのみの解析結果をよく見ると、エッジ部で大きく立ち上がった接触圧力が、インクと PET を用いることでより鋭くなっていることが分かる。これは、サーマルヘッドと直接接触する PET のヤング率と緩和時間がインクとプラテンゴムに比べて非常に大きく、サーマルヘッド通過時に圧力を十分に緩和出来ていないためである。したがって、圧力分布の形を決めているのはプラテンゴムで、プラテンゴムが大きく変形することによってインクと PET の過度に高い接触圧力を緩和しているということになる。

2-3-5. 数値解析結果の妥当性評価

今回の解析結果の妥当性を評価するために、以下のような実験を行った。

先に述べたように、サーマルヘッドの接触圧力分布とインクの転写性、すなわち印刷濃度は非常に密接な関係にあると考えられる。接触圧力が高い位置に発熱体が存在すると、インクリボン上のインクを効率的に溶融することができ、印刷用紙へのインクの転写性能が向上する。反対に、低い接触圧力のところに発熱体が位置すれば、イ

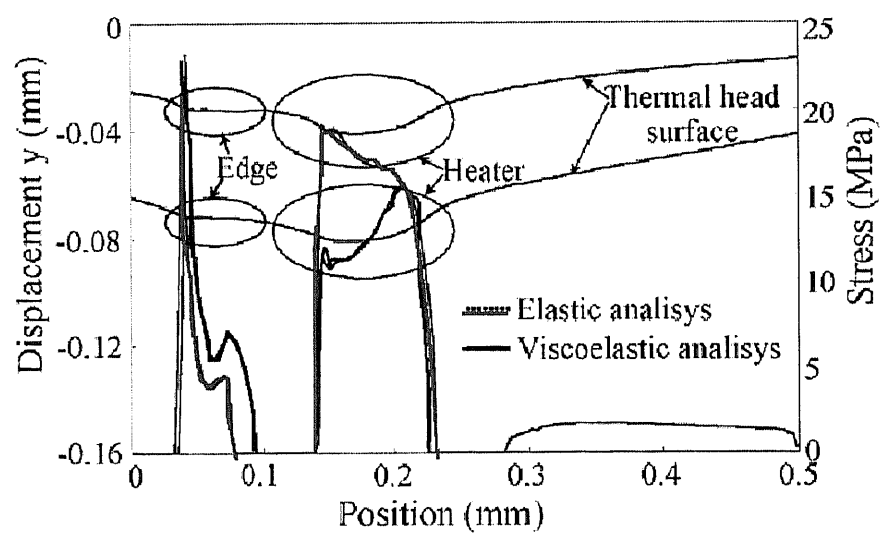


図 2.20 粘弾性解析と弾性解析の違い

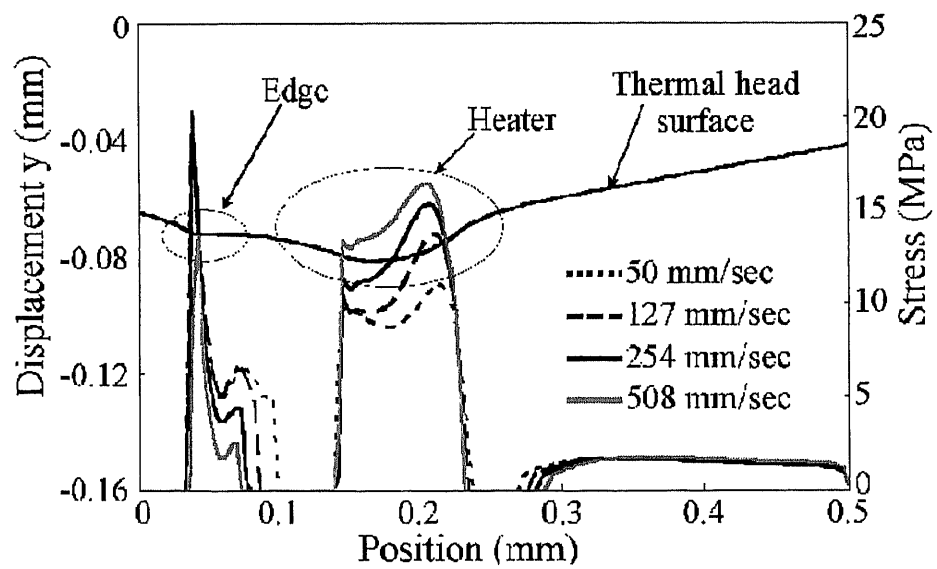


図 2.21 印刷速度の違いによる接触圧力変化

ンクが十分に溶融できずに、インクの転写性能が低下する。

この考えに従えば、接触圧力分布に依存して、発熱体には最適位置が存在することになる。そこで、図 2.23 に示されるような、サーマルヘッド上の発熱体の位置を変えた数種類のサーマルヘッドを用意して印刷実験を行った。そして印刷後の印刷濃度を比較することで、発熱体と接触圧力分布の位置関係を考察した。

試作したサーマルヘッドの概略は図 2.23 に示すとおりであり、そのエッジから発熱体右端までの距離を $2\mu\text{m}$ ごとに変化させた。これらのサーマルヘッドを使用して印刷を行い、それぞれの印刷濃度を反射濃度計（マクベス社，RD918）にて測定した。

図 2.24 に印刷濃度の測定結果を示す。図中の横軸はサーマルヘッドの位置を、左側の縦軸は印刷濃度を示す。印刷濃度の縦軸は入射光強度 1 に対して反射光強度が $1/e$ 倍となることを 1 としている。発熱体右端とエッジの距離が離れるほど、印刷濃度が高くなることがわかる。一方、図 2.24 の右側の縦軸は接触圧力を表わし、サーマルヘッドの移動速度が 254mm/s の場合の接触圧力分布(図 2.20 のもの)を示した。

粘弾性解析により求めた接触圧力分布は印刷濃度測定で得られた印刷濃度の変化におおむね一致していることが分かる。一方、弾性解析によると、発熱体右端からエッジに向かうにしたがい接触圧力が大きくなるので、印刷濃度の変化とは逆の傾向である。

ここで、冷却の効果を考察する。発熱体右端とエッジの距離が長くなると、加熱されたインクが冷却される時間が長くなり、インクの転写に有利に働く。しかし、発熱体を移動させた量は最大で $12\mu\text{m}$ であり、発熱体右端とエッジの距離は約 $130\mu\text{m}$ であるので、その距離は最大でも $142\mu\text{m}$ でしかない。しかも、インクの冷却の大部分はエッジのところでなされる。これより、冷却の影響は少ないと判断できる。

したがって、発熱体を配置する位置と接触圧力分布とは相関が認められ、接触圧力が高い位置に発熱体の右端を一致させた方がインクの転写性が良くなることが分かる。

解析においては、インクのパネ定数の決定にあいまいさが残ったが、インクの緩和時間は温度によらず約 1.3ms であった。このことは、接触圧力の大きさにはある程度のあいまいさを残すが、接触圧力のピークの位置はほぼ正確であることを意味する。したがって、接触圧力の分布形は現実の姿を反映していると考えられる。重要なのは圧力のピークの位置がどこかということであり、それが転写性能を左右する。

以上のことより、粘弾性解析は実際の印刷時の接触圧力分布を再現しているものと考えられる。

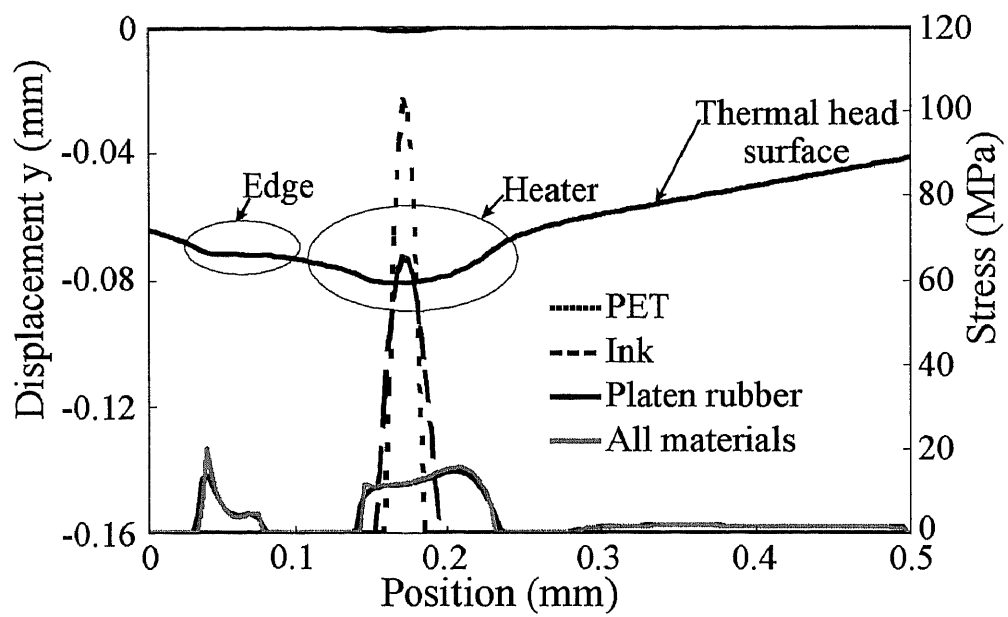


図 2.22 材料の違いによる接触圧力変化

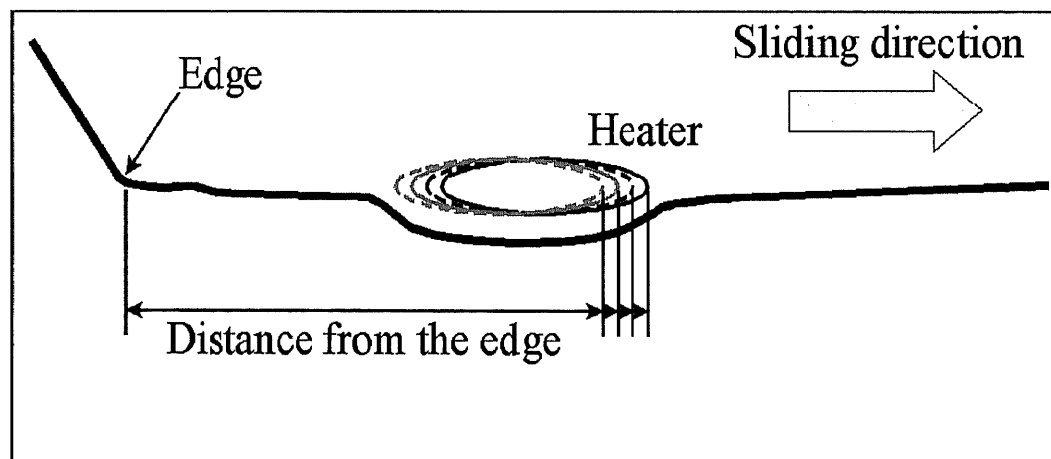


図 2.23 試作ヘッドの概略図

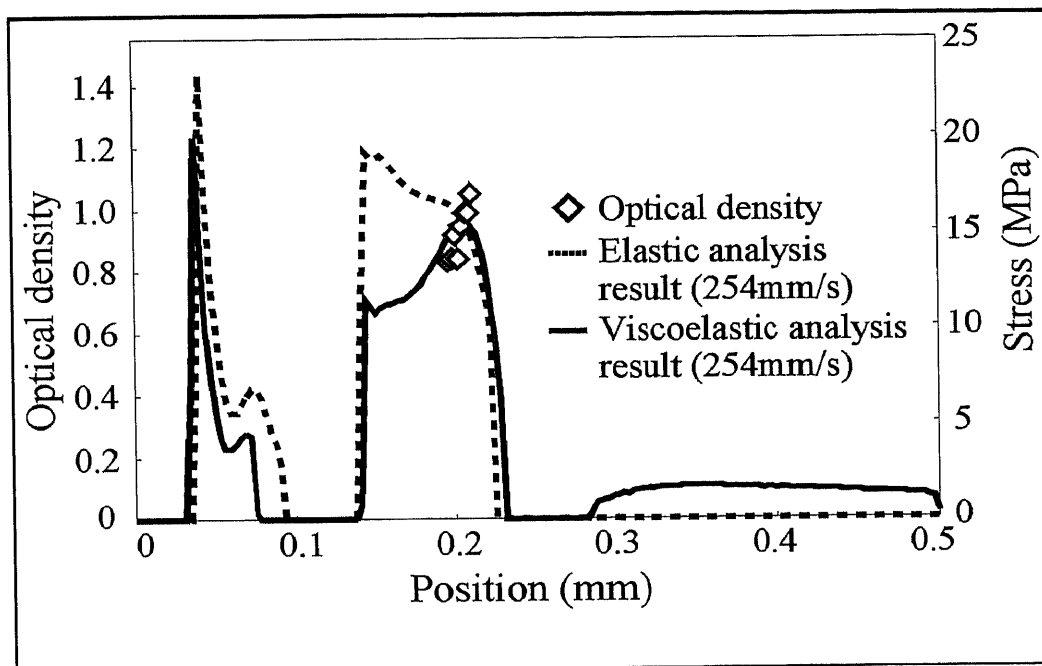


図 2.24 接触圧力分布と試作ヘッドの印刷濃度の関係

2-4. 結言

熱転写方式のプリンタでは、印刷濃度は印刷用紙の質を評価する因子となっている。これまでは、印刷用紙の質の評価のために、印刷用紙の表面粗さが検討されたことはあるが、印刷濃度と表面粗さの間には良い相関が得られなかった。本論文では、新しい試みとして印刷濃度と印刷用紙の真実接触面積の相関について調べた。具体的には、数種類の印刷用紙に対して、真実接触面積および表面粗さと印刷濃度との相関を調べた。また接触圧力の解析に必要な各部材の粘弾性特性の測定を行い、得られた測定値を用いて粘弾性解析を行うことによって、サーマルヘッドの接触圧力分布を明らかにした。主な結論を以下に示す。

- (1) 接触面顕微鏡により各種印刷用紙の真実接触面積を測定した。真実接触面積と印刷濃度の間には相関が見られた。したがって、接触面顕微鏡で紙の評価ができると考えられる。
- (2) 非塗工紙において表面粗さと印刷濃度の間にはよい相関は見られなかったが、真実接触面積と印刷濃度には相関関係が見られた。
- (3) 粘弾性解析により求めたサーマルヘッドの接触圧力は、弾性解析で求めたものより小さく、また異なる位置で最大値を示すことを明らかにした。
- (4) 粘弾性解析で求めた接触圧力分布の妥当性を印刷濃度の観点より評価した結果、本研究で解析した接触圧力分布は妥当であることを示した。

【参考文献】

- (1) 永田達也・佐藤和恭・渡邊道弘, 薄膜感熱記録ヘッドのパルス印加寿命特性, 機論, 62-601, C(1996-9), pp.56-61.
- (2) 永田達也・佐藤和恭・渡邊道弘, 感熱記録ヘッドの性能予測, 機論, 61-581, B(1995-1), pp.289-294.
- (3) 永田達也・渡邊道弘, ポリイミド蓄熱層を用いた 16dot/mm 感熱記録ヘッド開発, 機論, 61-585, B(1995-5), pp.286-291.
- (4) 村田 章・望月貞成・森本泰正・江頭典孝, 半導体レーザを熱源とするフルカラーサーマルプリンタの染料転写特性, 機論, 61-582, B(1995-2), pp.328-333.
- (5) 日比野,小野,内田: “高精細溶融熱転写プロセス の検討” 電子情報通信学会論文誌、Vol.J81-CⅡ, No.6, (1998), pp.566-573.
- (6) 江前敏晴, 紙のトライボロジー概説, トライボロジスト, 第 46 巻, 第 10 号, (2001), pp.741-746
- (7) 中川紀壽・関口泰久・坂本淳一郎, 衝撃荷重を受ける印刷機インクロール皮膜用軟質ゴムの圧縮特性評価, 機論, 64-621, A(1998-5), pp.233-238.
- (8) 新田勇・諸橋明・大谷親, PET 薄膜を用いた真実接触面積の分布の測定, トライボロジスト, 第 44 巻, 第 2 号, (1999), pp.128-134
- (9) 日本レオロジー学会編, 講座・レオロジー, (1996), pp.41, 高分子刊行会.

第3章 サーマルヘッド構成材料と熱応答特性の設計

3-1. 緒言

熱転写プリンタにおいて解像度と印刷速度を上げるためにはサーマルヘッドの駆動周波数を高くし、サーマルヘッドの発熱体を ON/OFF させる必要がある。しかし、従来の構造ではサーマルヘッド基板が蓄熱するために、印刷されたドットの径が大きくなり、連続した印刷ドットの間が潰れてしまう結果となる^{(1)・(8)}。この問題を解決するために、単に基板の放熱性を改善することも考えられるが、逆に急激な昇温のためには膨大な熱エネルギーを発生させなければならなくなる^{(9)・(10)}。小さなエネルギーで急速な昇温と急速な冷却を実現するためには、熱拡散率の低い保温層を熱拡散率の高い材料上に形成した基板が必要となる。そこで、本章では解像度と印刷速度の向上のためのヘッド熱応答特性の設計を構成材料の熱拡散率の観点から行った。

高精細化については、特に 600dpi 化ならびに多階調を実現するためのサーマルヘッド形状の影響を検討した。また発熱体からヘッドエッジまでの範囲インク内温度に対する温度制御の影響を数値解析によって検討した。実際にサーマルヘッドを試作し、印刷実験によって解析結果の妥当性を検証した。また 1200dpi への高解像度化の可能性についても同様に数値解析を中心に検討を行った。

本章前半で述べるヘッドの構造において、高速化のためのサーマルヘッドの設計とその限界点について数値解析を中心に検討を行った。また、実際にサーマルヘッドを試作し、印刷実験を行い溶融型熱転写プリンタならびに昇華型熱転写プリンタでの高速印刷の可能性を確認した。

3-2. サーマルヘッドの構造検討 基板材料と保温層材料

3-2-1. サーマルヘッドの構造

サーマルヘッドの断面構造を図 3.1 に示す。一般的なサーマルヘッドの構造は、ヒートシンク並びに支持体としての絶縁基板上（アルミナセラミック）に、保温層としての熱絶縁層（グレーズ）が形成され、更にこの表面上に発熱体、保護膜が形成されている。また普通紙上にインクを強固に押しつけるために、直線状の凸状突出部をつくり、この頂上に発熱体を形成する。こうすることでサーマルヘッドに加えた荷重を発熱体部に集中させることができる。熱転写方式でのインク転写において、インクをインクリボンのベースフィルムから剥離させる場合、発熱体からヘッドのエッジまでの距離、いわゆるエッジ距離によって転写特性が大きく変化することが知られている。熱転写方式で高速かつ高密度で印刷するには、高速な熱応答性がサーマルヘッドに要求されるため、従来のアルミナセラミックよりも熱拡散率が高い基板をベースに使い、グレーズよりも熱拡散率の低い保温層を薄く形成すればよいことになる。

3-2-2. 数値解析条件

本研究では、ヘッド発熱体からインクが転写されるヘッドエッジ部までのインクの温度分布解析の熱解析を汎用有限要素解析ソフト ANSYS(Ver6.1)を使用して 2 次元問題として行った。本研究に用いた解析のモデルを図 3.2 に、また使用した物性値を表 3.1 に示す。解析に用いた境界条件は、サーマルヘッド、並びに、媒体表面の境界面に熱伝達率をあたえ、空气中へ熱伝達するモデルとした。またヘッドとインクリボンの接触部には $0.2\mu\text{m}$ の空気層を入れた計算とし、実験との調整をおこなった。解析はヘッドと媒体が相対移動するモデルであり、この解析には ANSYS の Mass Transport 機能を用いた。このときの熱伝導方程式は式(1)の通りである。

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = Q \quad \dots (1)$$

ρ	Density
c	Specific heat
T	Temperature
t	Time
V_x, V_y	Velocity of a moving fluid
k	Thermal conductivity
Q	Generation of heat

技術課題の検討では、ある発熱部が時間方向で 1 ドット分のブランクを間にして 2 ドット分通電発熱した状態を解析し、そのときのインクの温度と相対移動距離で評価した。インク温度のピーク温度とバレー温度と転写に必要なインクの温度の関係からインクの転写性を評価し、そのときのヘッド表面温度から転写に必要なヘッド温度を評価した。また各解像度におけるインク温度のピーク温度の位置から、解像度とヘッドの最適エッジ距離の関係を評価した。

3-2-3. 印刷実験条件と熱応答測定条件

本研究に使用したヘッドの断面構造を図 3.1 に示す。解像度 600dpi の試作ヘッドは 240 ドットの発熱体を $42\mu\text{m}$ ピッチで紙面に垂直方向に一列にならべ、一度に 0.4 インチの幅で印刷できるようにした。また解像度 1200dpi の試作ヘッドは 240 ドットの発熱体を $21\mu\text{m}$ ピッチで一列にならべ、一度に 0.2 インチの幅で印刷できるようにした。ヘッドの外形寸法は $18\text{mm} \times 8.5\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ である。

本研究ではサーマルヘッドのベース基板として、単結晶 Si ウェハを選択した。それは、熱拡散率がアルミナセラミックに対し 6 倍高く、かつ表面が平滑で 600dpi, 1200dpi の配線パターンを安定して形成することができるためである。保温層は従来のグレーズに対し、種々の成膜条件で作製した低密度柱状構造の Si 合金酸化膜を用い、その性能を調べた。

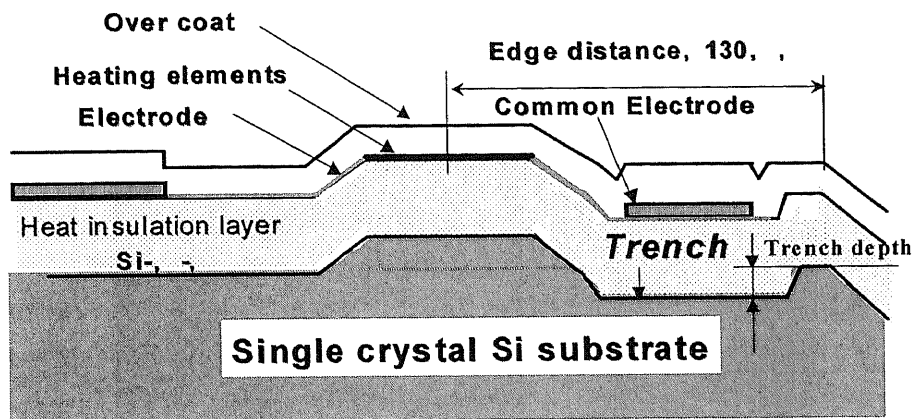


図 3.1 サーマルヘッドの断面構造

表 3.1 材料の熱拡散率

Material	Thermal Diffusivity(mm ² /s)
Alumina ceramics	12.1
Single crystal Si	72.6
Glaze	0.45
SiO2 sputtered film	0.89
Heat insulation layer	0.39

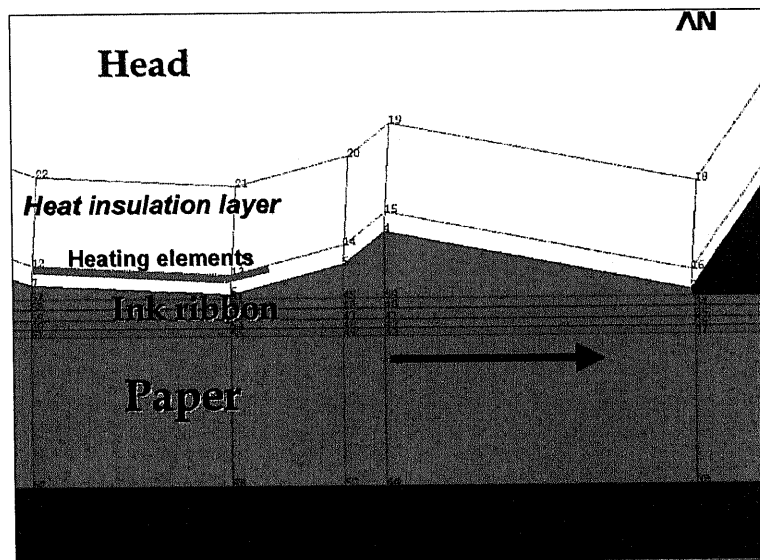


図 3.2 解析モデル

試作したヘッドでは、直線状の凸状突出部の高さを約 1.5 倍に、かつ平坦部と突出部頂面までの斜面の角度も約 1.5 倍にしている。またエッジ距離を約 60~150 μm に変化させ、インク転写に及ぼす影響を調べた。

発熱体からエッジまでの間にコモン電極が存在するが、試作ヘッドでは図 3.1 に示すように溝が形成され、コモン電極が埋め込まれた構造をとっている。またインクを定着させるエッジ部分には、約 20 μm の平坦部が形成されている。

本研究の試作ヘッドを図 3.3 に示す市販の熱転写プリンタ (MD5500 アルプス電気製) に搭載し、専用紙を用いて印刷を行った。使用した印刷速度とヘッドの押しつけ圧力、並びに投入電力は 254mm/sec と 6.0MPa, 0.26W/dot とした。濃度測定の印刷実験に用いたパターンは、1 ドットの周囲が必ず空白となる面積率 25% のパターンを用いた。印刷濃度測定には反射濃度計 RD918 (マクベス社製) を使用した。

階調性評価には、入力データの階調値を変えて面積率 0%~100% までのパターンを印刷し、その印刷濃度を測定して比較を行った。

ヘッドの熱応答特性の評価には図 3.4 に示す赤外線顕微鏡型放射温度計: RM2A (日本バーンズ製) にて対物レンズ 36 倍を用いて測定をおこなった。熱応答波形比較では投入電力を 0.26W/dot とした。

3-2-4. 保温層の検討と熱応答特性

サーマルヘッド基板材料は単結晶 Si であるが、その上に形成する熱拡散率の低い保温層材とその形成方法を検討した。

本研究では保温層材の作製方法として、ターゲット材に Si や Ta 等の金属等を使い、酸素ガス中でスパッタリングする、いわゆる反応性スパッタリング法を採用した。熱拡散率を表 3.1 に示しているが、グレーズ保温層の 0.45(mm^2/s) に対し、Si 合金酸化膜のスパッタ保温層は 0.39(mm^2/s) と約 15% 熱拡散率が低くなっている。

スパッタリングを採用したことで、成膜条件によりさまざまな密度の膜が形成できる。図 3.5 に成膜条件の違いによる構造の変化を膜の断面 SEM 写真で示した。成膜ガス圧が高くなるに従い、低密度の柱状構造になっていく様子がわかる。密度が変化することで熱応答特性も変化する。図 3.6 に成膜ガス圧に対するヘッド発熱温度の変化を示した。ガス圧が高いほど、発熱温度が高くなることからわかる。本研究では熱応答特性と再現性を考慮し、成膜圧力は約 1Pa とした。

また、反応性スパッタリングを採用した理由は、成膜速度を上げる為である。スパッタリング法は厚膜印刷法や塗布法等に比べ、成膜速度が遅いため生産性が悪く、SiO₂ のような絶縁物を使った場合は特に遅くなるからである。図 3.7 に成膜中の酸素流量と成膜速度の関係を示しているが、本研究では酸素濃度を 11% とした。反応性スパッタリングの採用により SiO₂ をターゲット材料とした場合に比べ、成膜速度は約 3 倍となった。

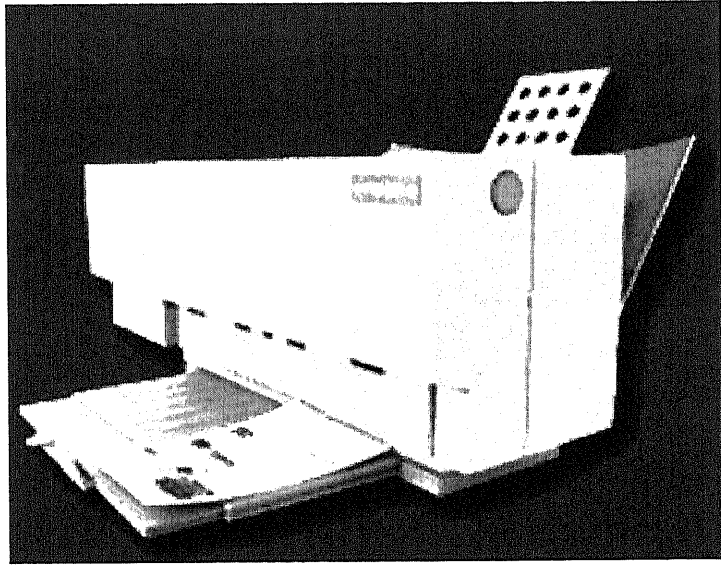


図 3.3 熱転写プリンタ (MD5500 : アルプス電気)



図 3.4 赤外線放射温度計 (RM2A : 日本バーンズ)

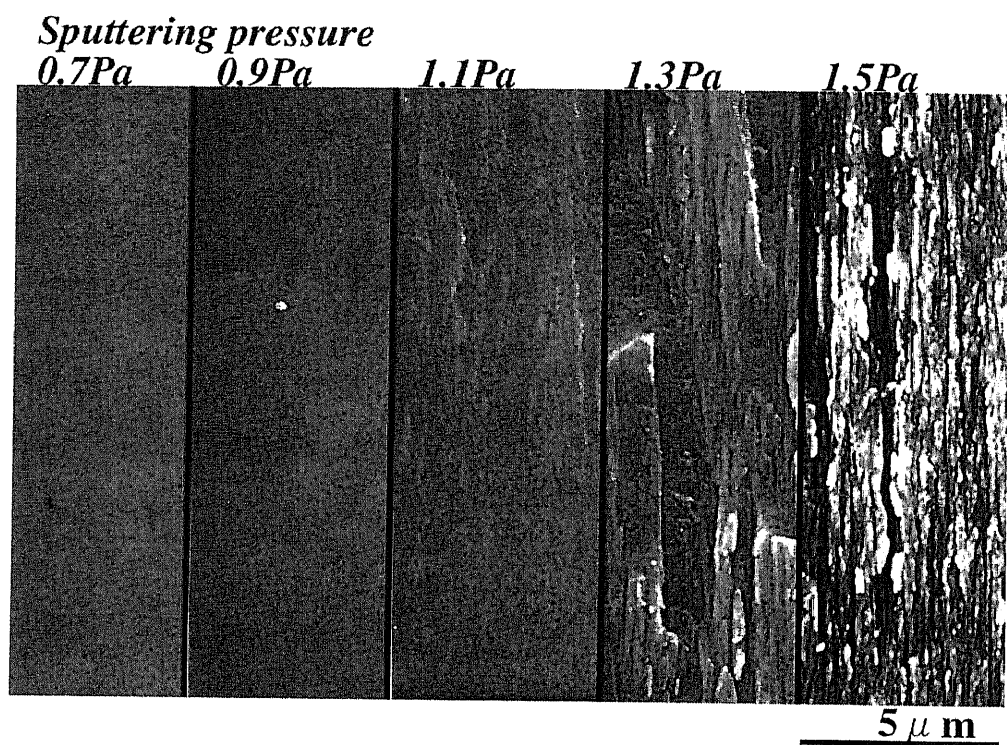


図 3.5 保温層断面 SEM 像

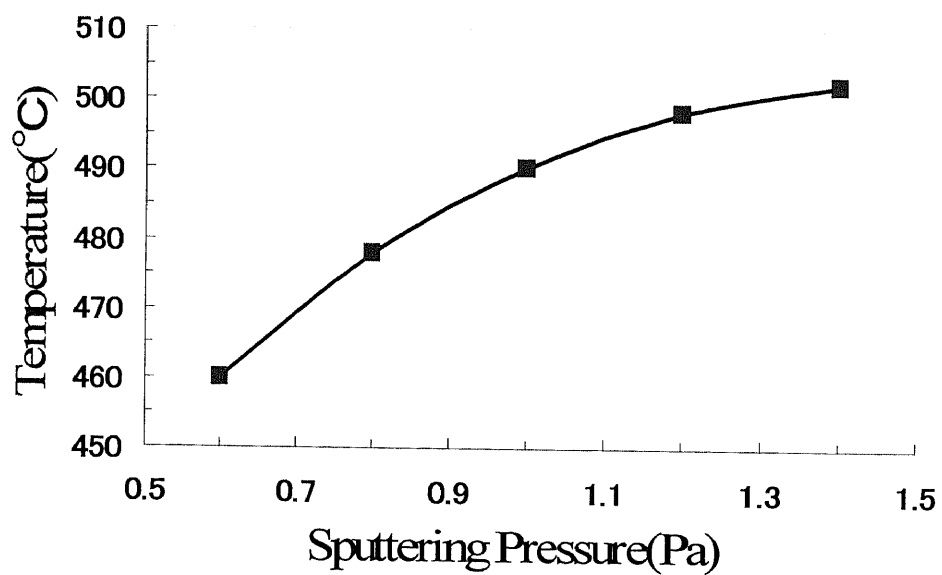


図 3.6 成膜ガス圧とヘッド発熱温度の関係

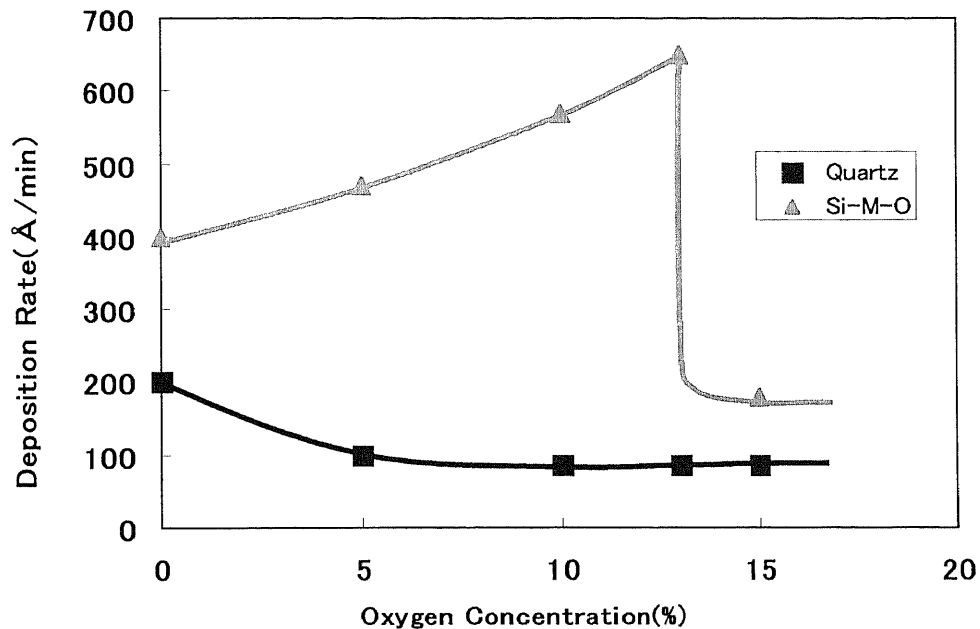


図 3.7 成膜中の酸素流量と成膜速度の関係

Si 基板ならびにスパッタ保温層を採用した本研究のヘッド熱応答特性を測定した。図 3.8 に単独パルスを与えた場合の測定結果を示すが、従来ヘッドに比べ本研究のヘッドは同一温度到達時間で比較した場合、約 20%速い応答性を示した。これは保温層熱拡散率が従来ヘッドより低いためと考えられる。

また図 3.9 に連続パルスを与えた場合の測定結果を示すが、従来ヘッドに比べ、基板での蓄熱による温度上昇もなく、高速高密度駆動に対応していることがわかる。これはヘッド基板の熱拡散率が従来の 6 倍も高いためと考えられる。

本研究では、サーマルヘッドの構成材料の基板材料と保温層材料に着目し、材料変更を行うことで熱応答特性を大きく改善する事ができた。以下にこの構造を基本とするサーマルヘッドを用いた高精細化ならびに高速化設計の内容について述べる。

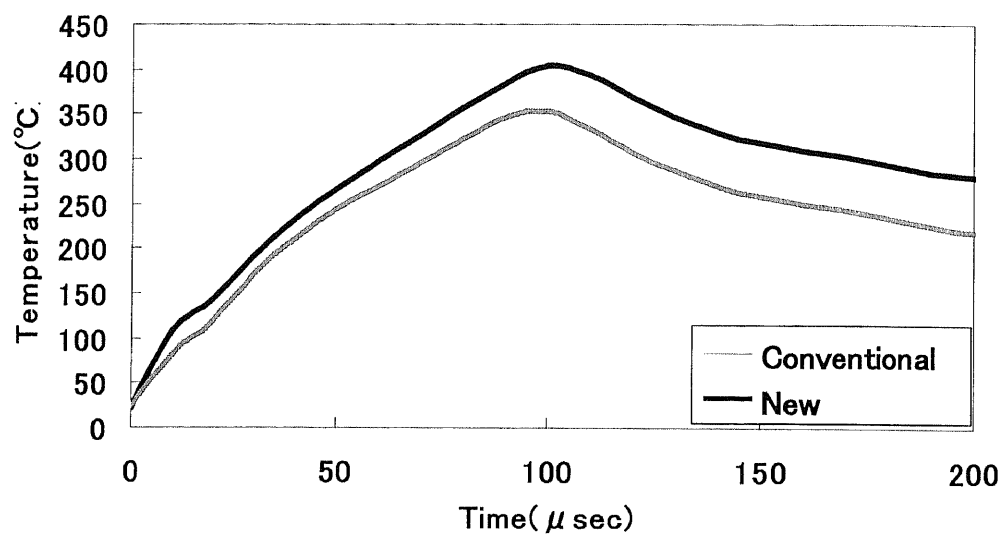


図 3.8 単パルスの熱応答波形

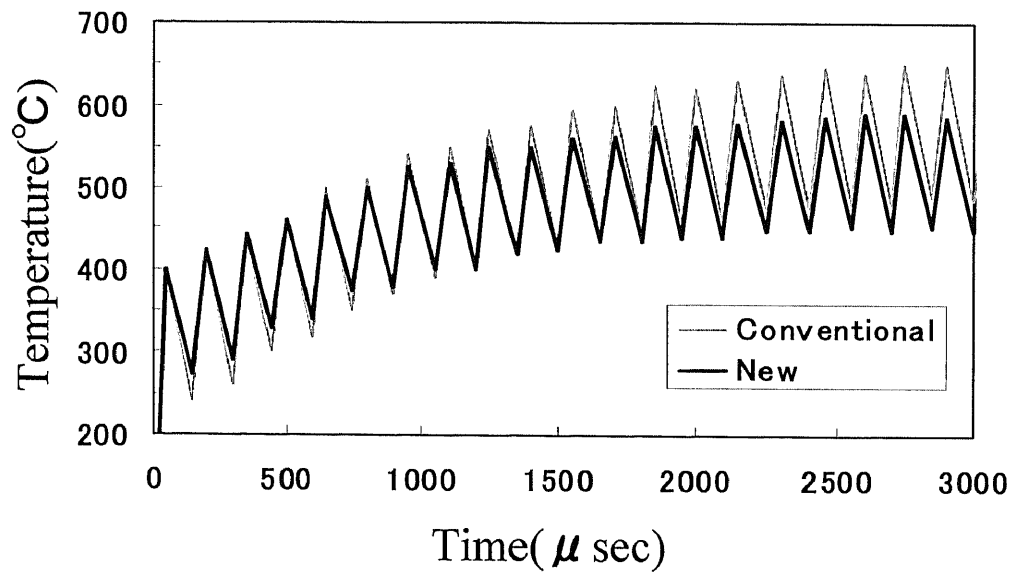


図 3.9 連続パルスの熱応答波形

3-3. 高精細化 600dpi 多階調印刷への応用検討

3-3-1. 多階調印刷

熱転写方式において多階調印刷を実現するためには、1 ドットのドット径を従来よりも小さくし、かつその径を制御する必要がある。またドット径を小さくした場合の転写ドットの安定性が連続階調にとっては不可欠であり、そのためにはインクを十分に定着させなければならない。

図 3.10 にドット径を変化させる場合のヘッド温度とインク温度、そのときのドット径の関係を模式図で示した。熱転写プリンタのインクの転写プロセスは大きく分けて 4 工程からなる。印刷速度 10IPS、駆動周波数 6kHz であるため、この一連の工程が時間にして $500 \mu \text{sec}$ 、距離にして $130 \mu \text{m}$ で行われることになる。ここで、ヘッドエッジ部にてインクがベースフィルムより剥離される時点で、図 3.10 に示すように、ヘッド温度を下げ、転写ドット部のインクの温度を低くすることにより、ドット径を小さくすることができる。しかし、従来ヘッドにてヘッド温度を下げた印刷すると、転写されたインクは図 3.11(a)に示すように尾を引いた形となり不安定な転写状態となる。一方、本研究で試作したサーマルヘッドを用いると、図 3.11(b)に示すようにドット径を小さくできることが確認された。

3-3-2. ヘッド形状検討

インク転写の安定性を検討する目的で、ヘッドの発熱体からヘッドエッジまでの形状を変更して検討を進めた。具体的には表 3.3 に示すように、発熱体からヘッドエッジまでのエッジ距離と発熱体からエッジまでの間に溝を形成した場合のその深さを変えて比較を行った。

エッジ距離を変更した場合の印刷評価結果を図 3.12 に示す。この検討では印刷濃度だけでなく、印刷インクの紙との密着性を評価する目的で消しゴムにて 10 回摺動した後の濃度測定結果も示した。図 3.12 より、ヘッドエッジ距離が短ければ短いほど、印刷濃度が高い傾向を示すことがわかる。一方、インクの紙への定着性をみると、エッジ距離に最適値があることがわかり、この印刷条件では $130 \mu \text{m}$ 付近が最適値であることを示している。またその最適範囲も $130 \mu \text{m}$ に対して $\pm 5 \mu \text{m}$ 程度である。溝深さを変更した場合の印刷評価結果を図 3.13 に示す。この検討では印刷濃度だけでなく、印刷走行状態を示すスリップ率も示している。スリップ率とは下記に示す式(2)の通りであり、値が小さいほど、インクの走行が安定であることを示す。

$$\text{Slip ratio}(\%) = 100 - \frac{\text{Ink spent length} \times 100}{\text{Print length}} \quad \dots (2)$$

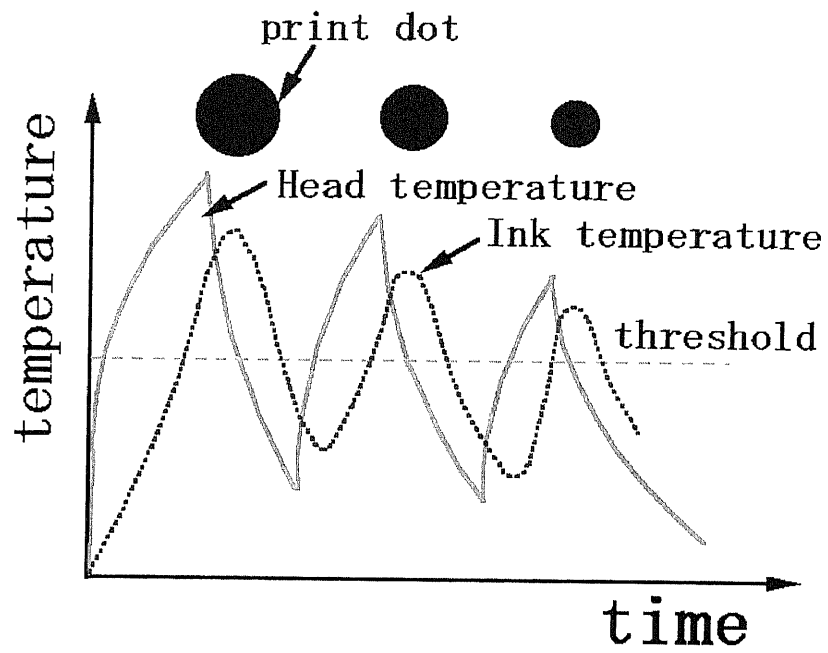


図 3.10 ヘッド並びにインク温度と転写ドット径の関係

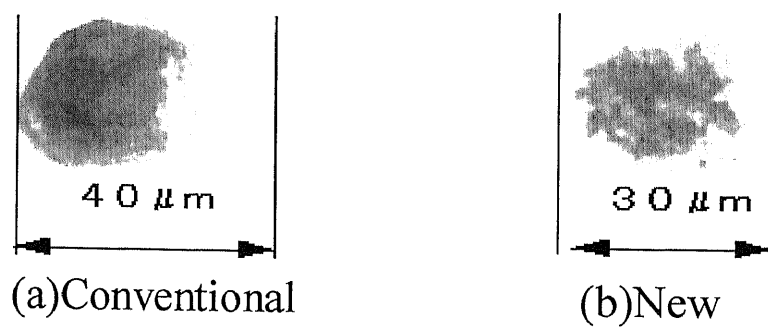


図 3.11 転写ドットの拡大図

表 3.3 試作ヘッドの形状

No	Edge distance (μm)	Trench depth (μm)
1	60	0
2	80	0
3	100	0
4	120	0
5	130	0
6	140	0
7	150	0
8	130	2
9	130	3
10	130	4
11	130	5

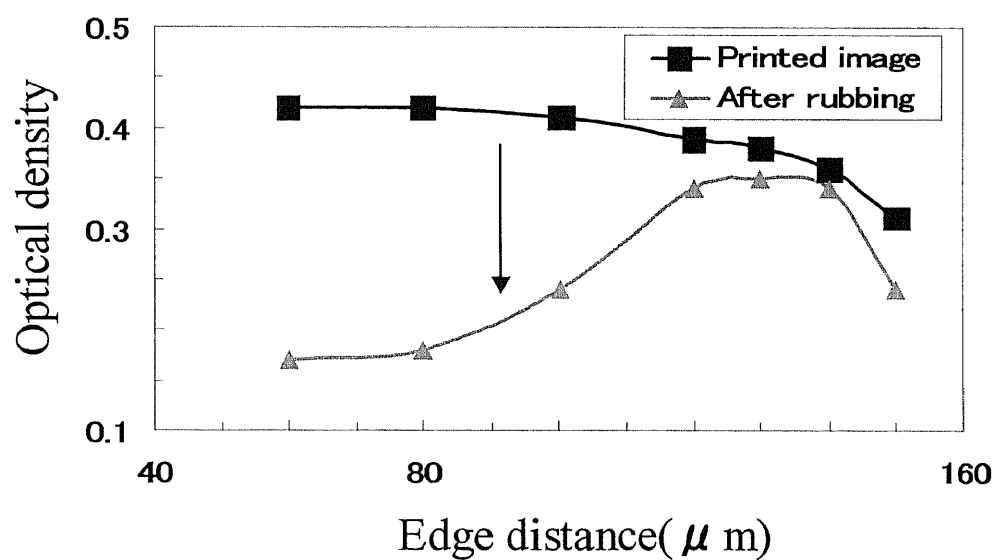


図 3.12 エッジ距離と印刷濃度，耐擦性の関係

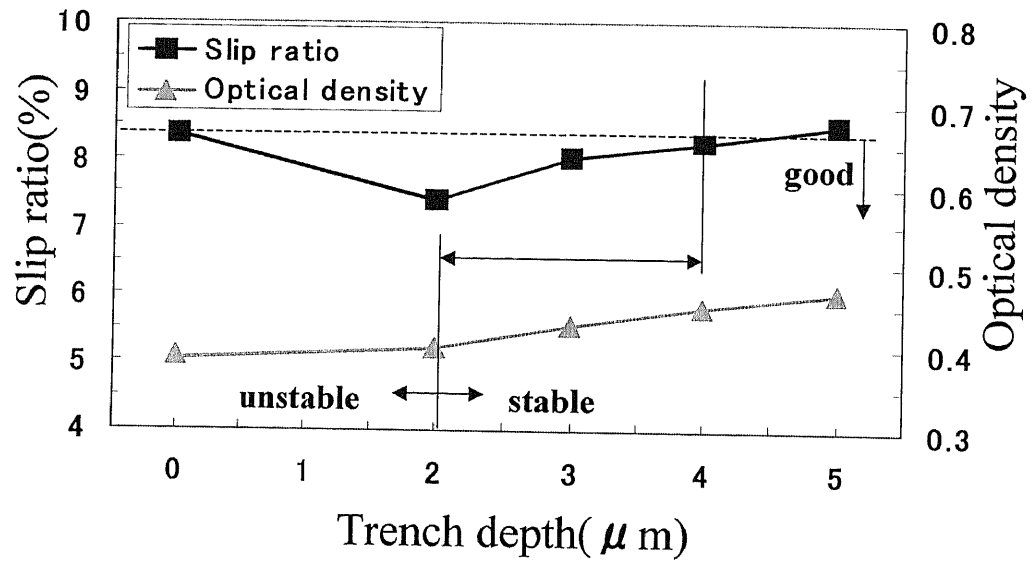


図 3.13 溝深さと印刷濃度，スリップ率の関係

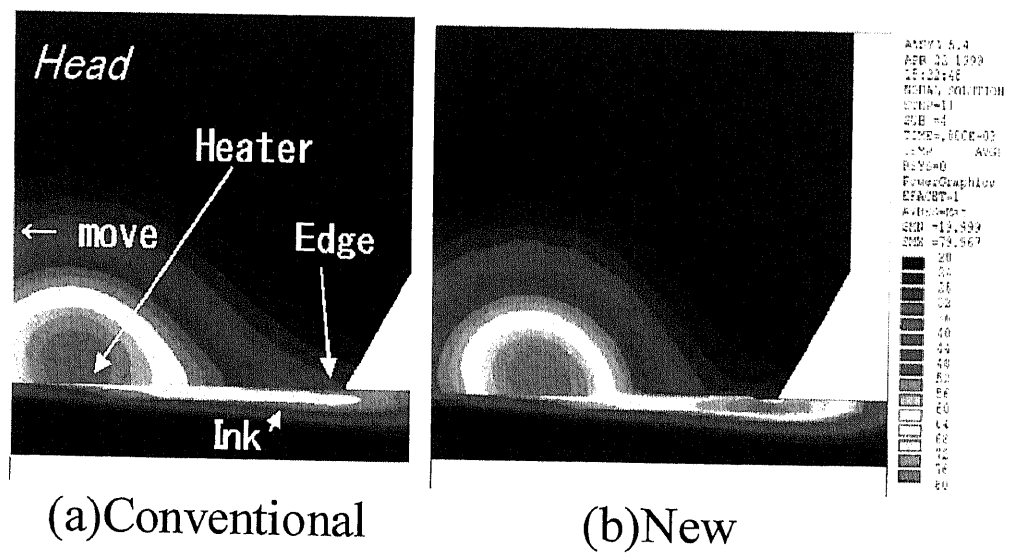


図 3.14 ヘッドの熱分布解析結果

図 3.13 より、転写ドットの安定性から溝深さは $2\mu\text{m}$ 以上が必要であることがわかる。また逆に $4\mu\text{m}$ 以上の場合、スリップ率が増加し、インクリボンの搬送に不具合が生じてくることがわかる。よって、溝の形成には $3\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ の加工精度が必要であることがわかる。

このヘッドを使用した印刷結果を図 3.11(b)に示した。従来ヘッドに比べて、インクが安定に転写されていることがわかる。また同時にシャドー部（ドット径の大きいところ）では、印刷のつぶれも緩和された。

3-3-3. 数値解析と結果の考察

ヘッド形状を変更した場合インク転写状態が改善された。その原因を調べるために、ヘッド発熱体からインクが転写されるヘッドエッジ部までのインクの温度分布解析を行った。図 3.14 に熱解析によるヘッドとインクの温度分布を示した。

図 3.14(a)は従来ヘッドについての結果である。発熱体からエッジ部までの間にインク温度のピークが見られる。これより、インクの熱がヘッド発熱部とエッジ部の間の接触部分でヘッド側に逃げ、そのためエッジ部で温度が下がっていることがわかる。このことが原因で、ハイライト部分（ドット径が小さいところ）においてインクの転写が不安定となっていたと考えられる。

次に、ヘッド発熱体からエッジまでの間で、インクの熱がヘッド側に逃げないようにするため、コモン電極を溝に埋め込む構造にて熱解析を行った。この結果を図 3.14(b)に示す。この場合は、ヘッド発熱部とエッジ部の間で必要以上にインクの熱がヘッド側に逃げることはなくなり、インクがベースフィルムから剥離されるヘッドのエッジ部にてインク温度がピークを示している。よって、多階調印刷を行うためには、発熱体からエッジまでの間でインクの熱がヘッド側に逃げにくい形状設計をすればよいことがわかる。 $130\mu\text{m}$ のエッジ距離が最適値を示した理由もこのインクの温度とヘッドの走行が関係していたこともこの解析からわかった。すなわち、インク内の温度がピークをむかえるのが、発熱体から $130\mu\text{m}$ 離れた位置であるということである。

以上のことから明らかになったように、サーマルヘッドには高い加工精度が要求される。必要なヘッド形状加工については、単結晶 Si 基板の異方性エッチングにより達成している。あらかじめ凸状の突出部を異方性エッチングにて加工し、その後、溝部分を同様に異方性エッチングにて加工することで、加工誤差を $\pm 1\mu\text{m}$ に抑えることができた。

図 3.15 に階調値に対する、印刷濃度の関係を示す。横軸は発熱体に入力する電力の大きさを示している。図 3.15 より、0~20%のハイライト部分では、従来ヘッドの場合は 0~10%まで印刷濃度の上昇が見られなかったが、本ヘッドでは濃度が徐々に上がっている。一方 90%~100%のシャドー部分では、従来は 90%でほぼ濃度が飽和していたが、本ヘッドでは 90%~100%の間でも濃度の上昇が見られた。従って従来へ

ッドの場合実質 10%~90%までの 80%の間の階調表現しかできなかったのに対して、本ヘッドの場合、0~100%までの階調表現ができ、階調特性が向上したことがわかる。

図 3.16 に印刷結果の比較を示す。この図は自然画のハイライト部分を拡大した図である。図 3.16(a)は従来ヘッドで印刷した場合であり、2 値の面積階調による印刷、図 3.16(b)は本ヘッドによる多階調印刷の結果であるが、この画像比較によっても、本ヘッドによって階調特性が向上したことがわかる。

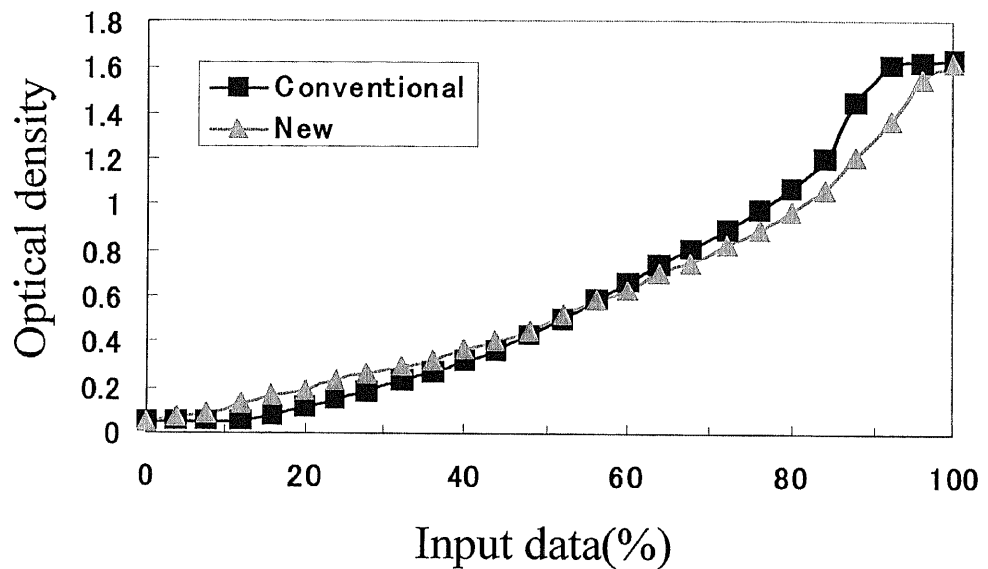


図 3.15 階調再現性比較

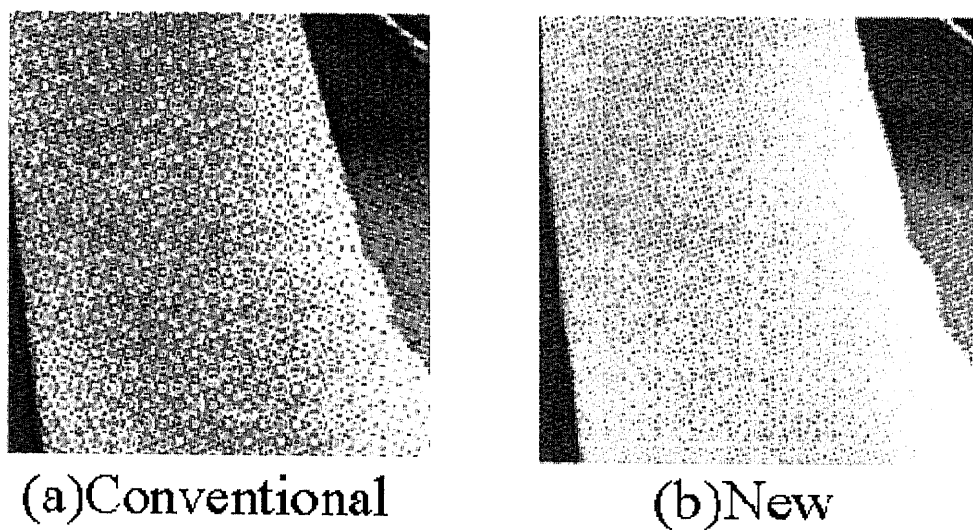


図 3.16 画像印刷結果の比較

3-4. 高精細化 1200dpi 印刷への応用検討

3-4-1. 数値解析：熱応答特性と耐熱性，並びにヘッド形状の影響検討

1200dpi ヘッドにおける技術課題の検討には数値解析を適用した。1200dpi で 10IPS の速度で印刷を行う為の，駆動周波数は 12kHz である。熱解析によって，前述の 600dpi ヘッド構造のまま 12kHz で駆動させた場合を計算した。結果を図 3.17 に示す。図 3.17 より基板が蓄熱し連続した印刷の場合ドットの間が潰れてしまい，発熱温度を一定に制御することが困難になることがわかる。このように溶融熱転写で高速かつ高密度で印刷させるためには，更に高速な熱応答性が必要となる。この課題に対し，熱応答性を上げるため 600dpi 構造の保温層膜厚を薄くし再度計算した。検討の関係を同じく図 3.17 に示す。図 3.17 より従来構造においても，保温層の膜厚を $10\mu\text{m}$ 以下に設計することで，12kHz にて駆動可能であることがわかった。

次に，10IPS の印刷速度を想定し，インク温度が 80°C になるために必要なヘッド表面温度と解像度の関係を解析した。結果を図 3.18 に示す。図 3.18 より，ヘッドの解像度が増すに連れ，必要なヘッド表面温度が高くなることがわかる。1200dpi ヘッドの場合は 800°C 付近の高温が必要となり，保温層にグレーズを用いている従来のヘッド構造では，グレーズ層の耐熱限界から実現不可能であることがわかる。本研究で用いたヘッド構造の場合は基板に単結晶 Si，保温層に Si 合金酸化膜を使用していることから，材料の耐熱性の点で実現の可能性があることがわかった。

前述の通り，溶融熱転写において，インクをインクリボンのベースフィルムから剝離し，媒体に転写させる場合，エッジ距離によって転写特性が大きく変化する。この関係について，解像度が変化した時の最適なエッジ距離の関係を計算より求め，図 3.19 に示した。図 3.19 より，600dpi の場合の最適エッジ距離が $130\mu\text{m}$ ，1200dpi の場合は約 $100\mu\text{m}$ 付近が最適な位置であることがわかる。エッジ部にはコモン電極配線が有り，エッジ距離を短くすると，コモンの配線幅を広く取れないため，コモン電極の配線抵抗値が大きくなり，配線部での電圧降下の影響が大きくなる。この点は今後構造から見直す必要があることがわかった。

3-4-2. 試作ヘッドの特性検証

1200dpi ヘッドの技術課題については数値解析によって明らかにすることができた。600dpi のヘッドと同一構造で 1200dpi ヘッドを試作し特性評価を行った。

解像度と発熱温度の関係を図 3.20 に示した。このときの通電時間は $100\mu\text{sec}$ とした。解像度が増すにつれ，低い電力で発熱する様子がわかる。この結果を単位面積当たりの投入エネルギーで整理すると図 3.21 のようになり，この実験条件においてヘッドの発熱現象がエネルギー則であることがわかる。図 3.22 に各解像度別に印刷実験を行った時のインク転写開始電力とヘッド温度の関係を示した。図 3.22 より解像度が増すにつれ，必要な発熱温度が高くなっていることがわかる。数値解析で得られた結果とほ

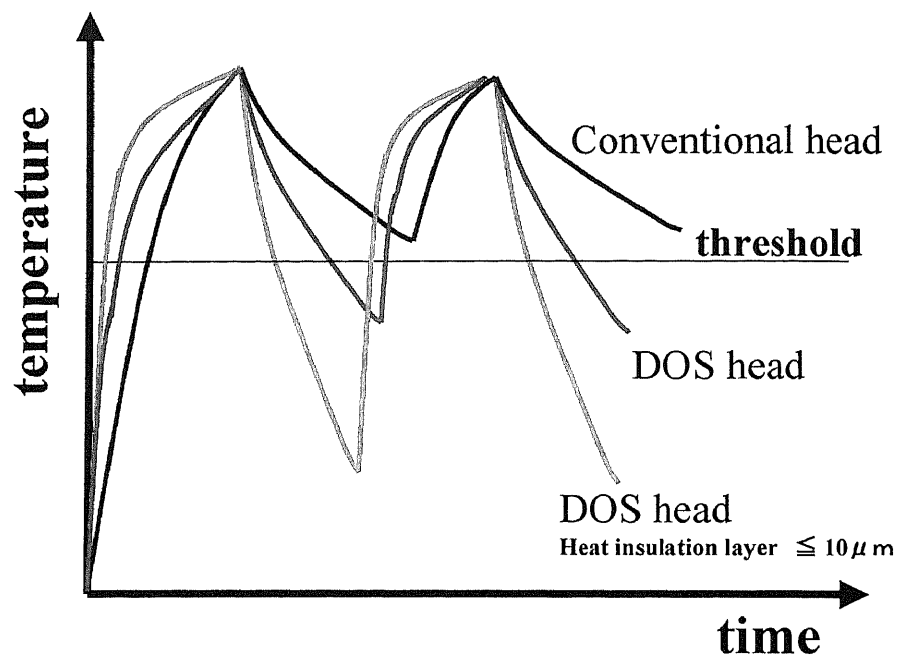


図 3.17 駆動周波数の解析結果

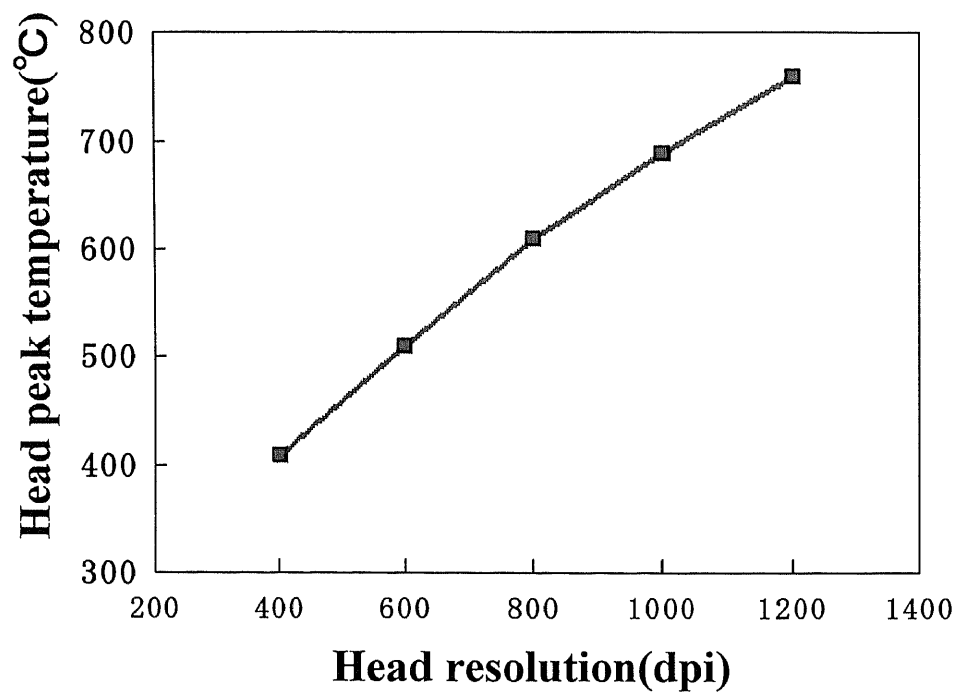


図 3.18 ヘッド解像度と印刷に必要なヘッド温度の関係

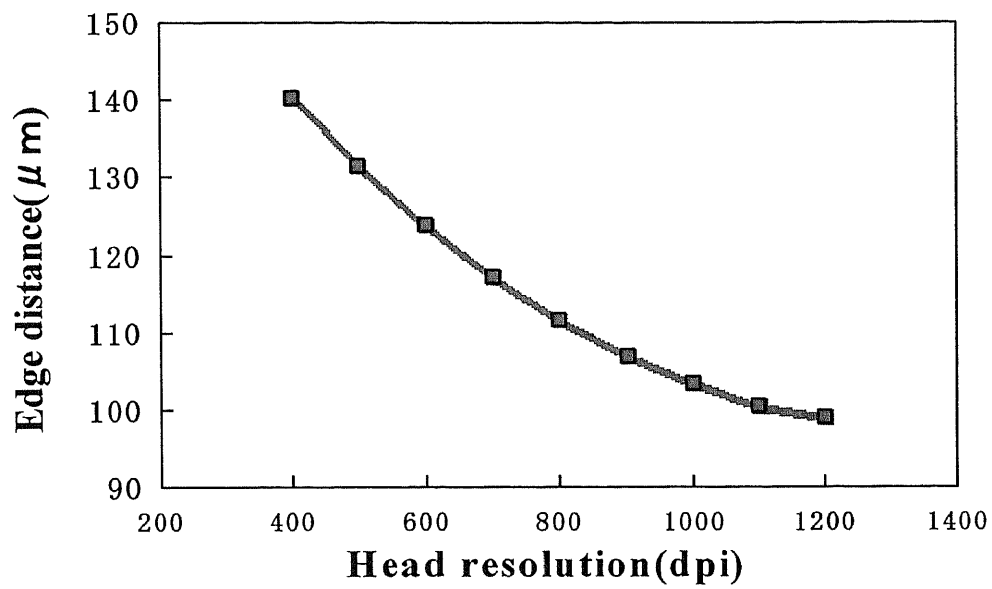


図 3.19 ヘッド解像度とエッジ距離の関係

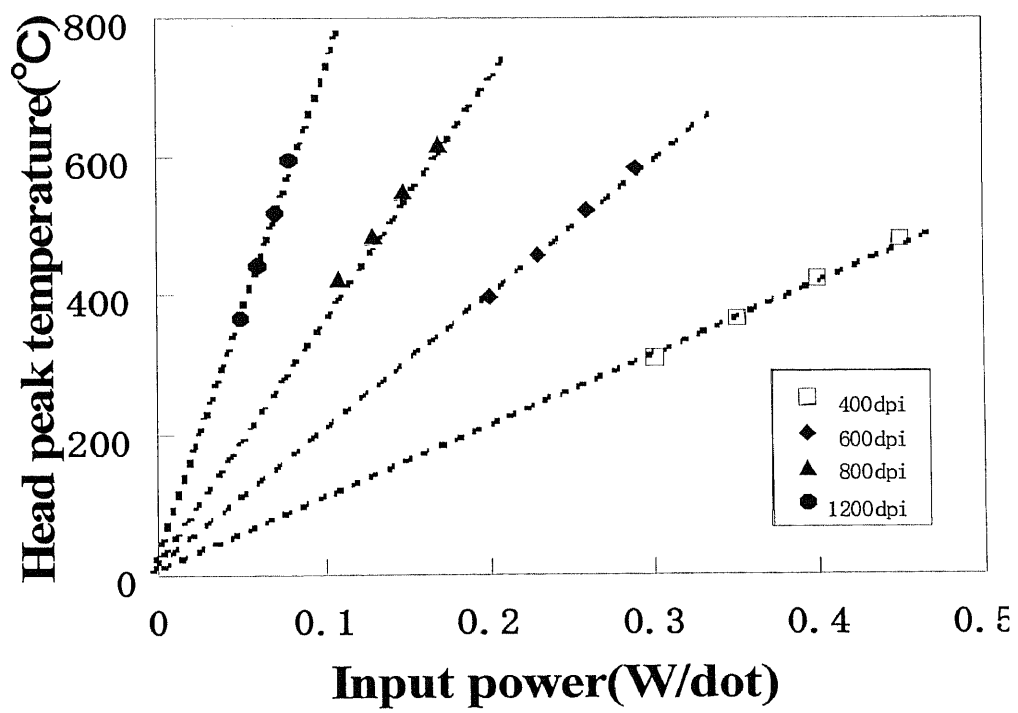


図 3.20 投入 POWER と発熱温度の関係

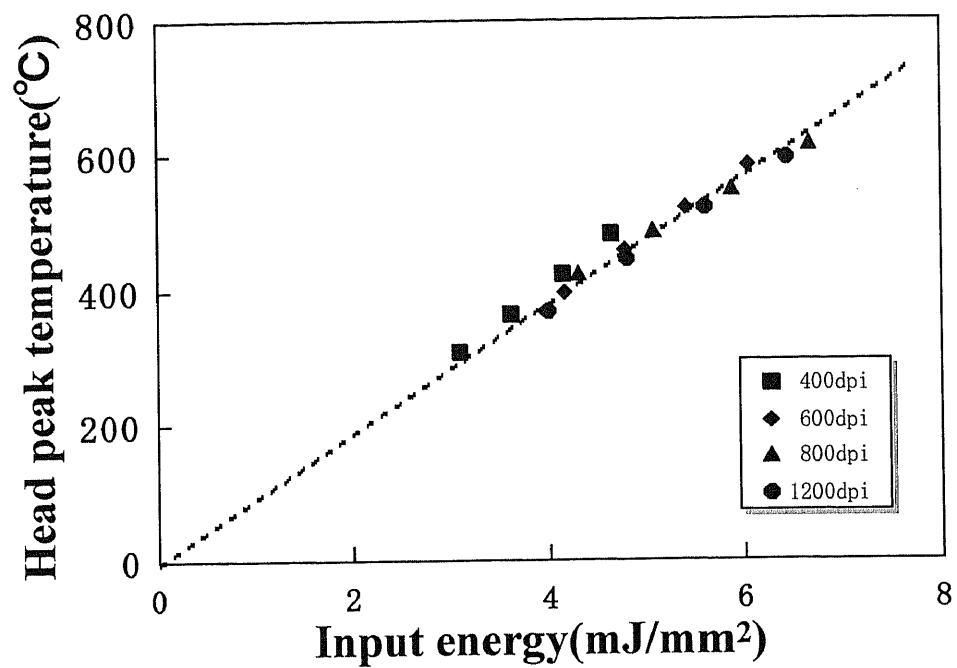


図 3.21 投入エネルギーと発熱温度の関係

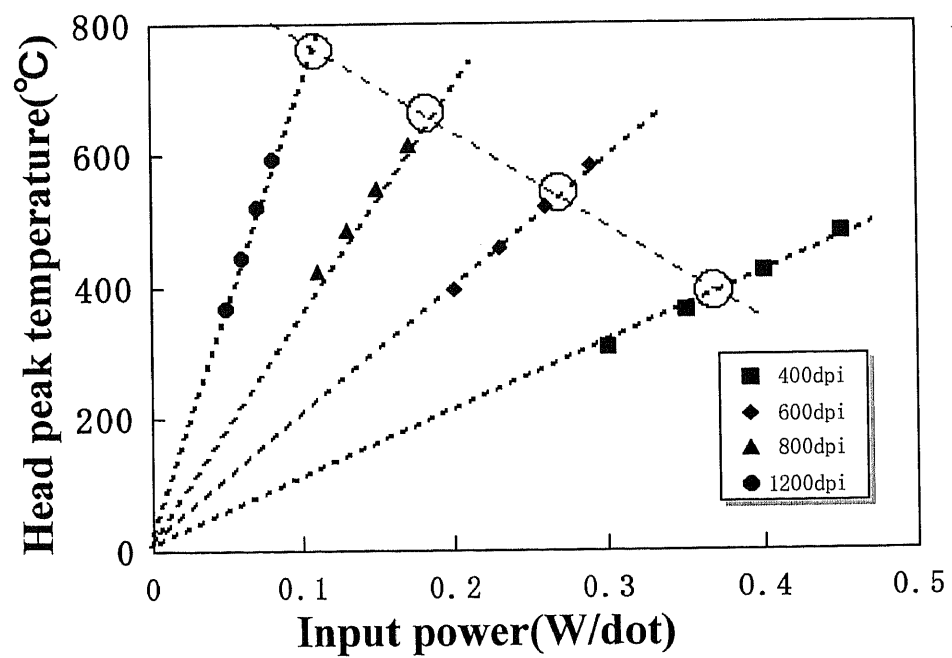


図 3.22 インク転写開始電力とヘッド温度の関係

ば合致する結果となり、1200dpi ヘッドの場合は 800℃付近の温度が必要であることがわかる。

本試作ヘッドにおいて文字や画像を印刷し 600dpi ヘッドと比較した。図 3.23 に文字印刷結果と画像拡大図を示した。図 3.23 より、1200dpi となったことで微細文字の品位が更に向上し、1 ポイント以下の小さな文字でも綺麗に再現していることがわかる。また画像印刷においても、従来の線密度 190lpi(line per inch)に対し 370lpi が可能となり、より高精細な画像が得られることがわかる。

3-5. 熔融型熱転写プリンタにおける高速化検討

図 3.24 に各解像度における、印刷速度と駆動周波数の関係を示す。従来ヘッド構造の場合、駆動周波数の限界は 4kHz であった。よって、300dpi の場合でも印刷速度は 11IPS が限界速度であった。そこで本章では、本研究で用いているヘッド構造を変更し、何処まで印刷速度をあげることが可能か検討をおこなった。技術課題の検討には数値解析を適用した。

3-5-1. 熱応答特性

図 3.25 に本研究で用いているヘッド構造にて、保温層膜厚を変更した場合のヘッドの熱応答特性を示す。図 3.25 より、1st パルスの温度は保温層膜厚との相関関係はみられなかった。パルスを連続通電した時の温度をみると、膜厚が薄い程発熱温度が低くなることがわかる。100 パルス通電後のピーク温度とともに、バレー温度も下がる。これは保温層の膜厚が薄くなったことによって保温層での蓄熱が減ったためと考えられる。

3-5-2. 保温層膜厚と駆動応答周波数の関係

保温層膜厚を変更したヘッドを用い、100 パルス目のピーク温度が 500℃になるように各ヘッドにおいて投入電力を調整した。保温膜厚と必要な電力の関係を図 3.26 に示す。図 3.26 より、10 μm では 23 μm に対し約 1.4 倍、5 μm の場合は約 1.75 倍の電力が必要になることがわかる。この点は保温層を薄くした場合の課題である。

図 3.27 に連続通電時のピーク温度を 500℃になるように設定とした時の保温層膜厚とバレー温度の関係を示す。図 3.27 より、保温層膜厚が薄いほどバレー温度が低いことがわかる。6kHz で駆動した時の保温層膜厚は 23 μm であるが、23 μm のバレー温度と同じバレー温度を示す時間は保温層膜厚が薄いほど早いことになり、その分駆動周波数を早くすることができることになる。この関係から、保温層膜厚と駆動周波数の関係を図 3.28 に示す。図 3.28 より、保温層膜厚を 5 μm まで薄くした場合、駆動周波数は 11kHz まで早くできることがわかる。この関係については、実際にヘッドを試作し、確認実験をおこなった。同じく図 3.28 に実験結果を示した。ほぼ数値解析結果と実験結果が重なっていることがわかる。

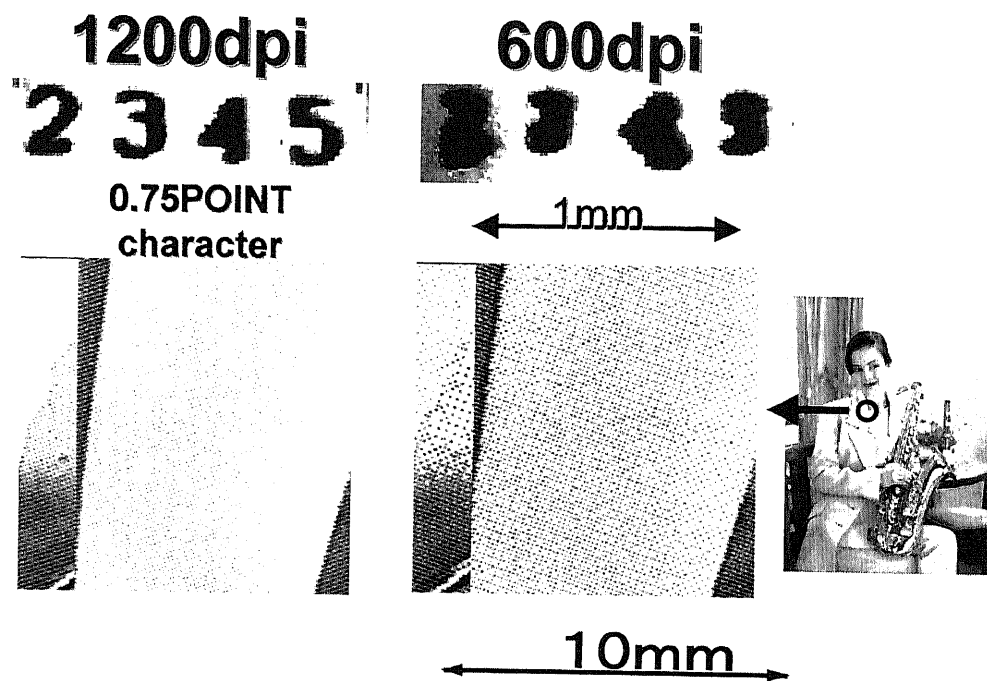


図 3.23 印刷結果比較

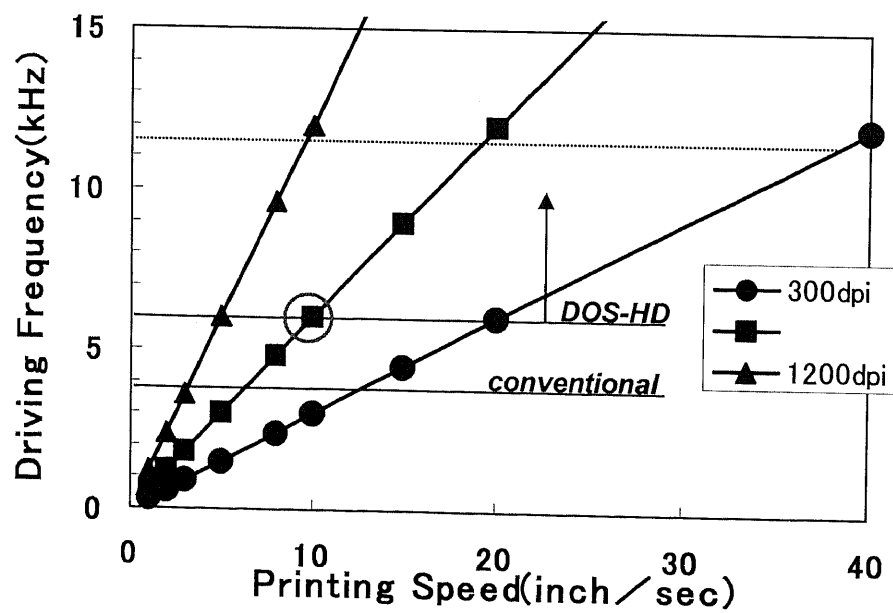


図 3.24 印刷速度と駆動周波数の関係

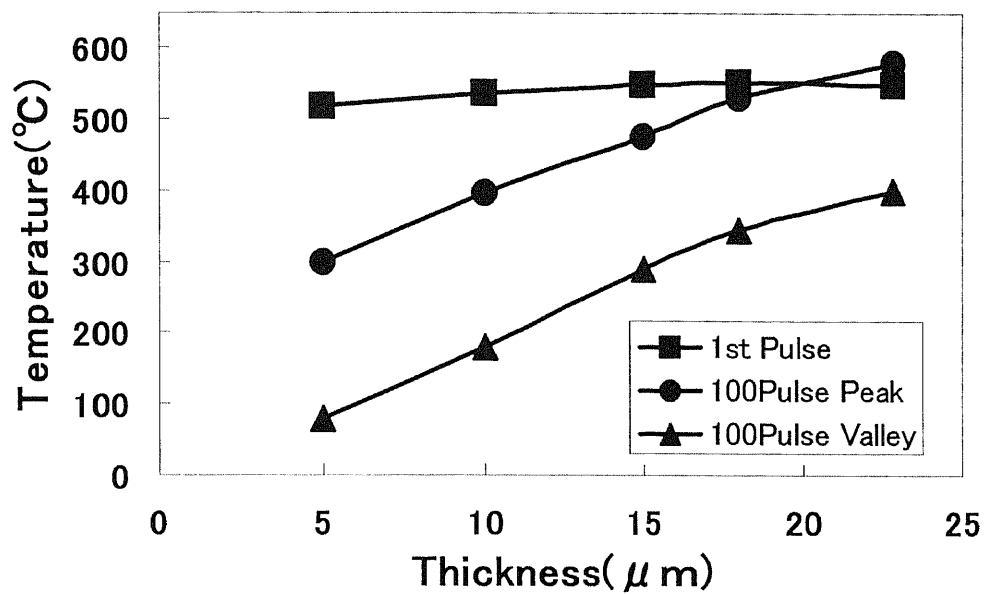


図 3.25 保温層膜厚とヘッド表面温度の関係

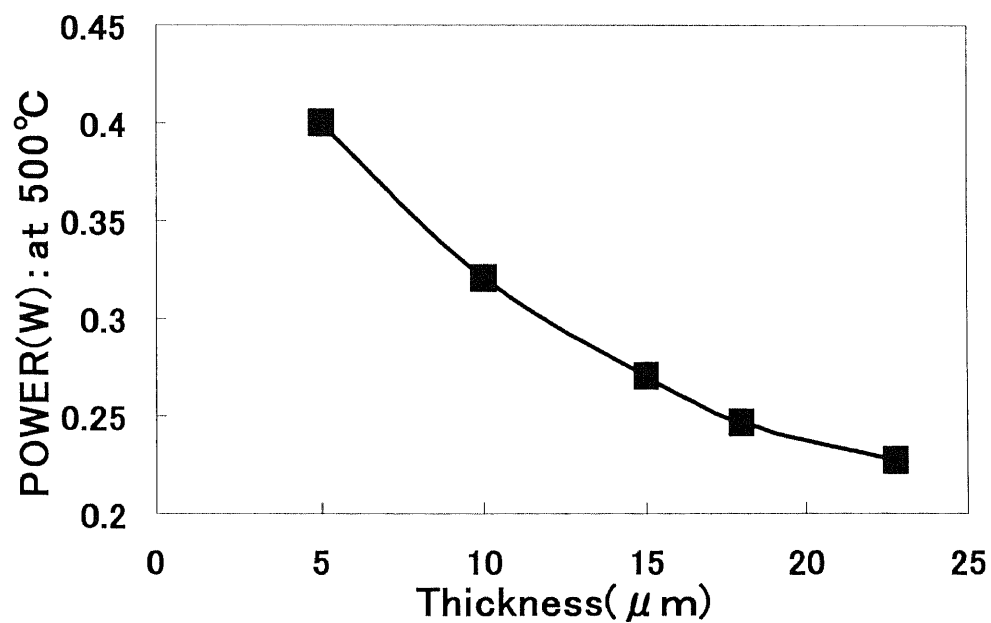


図 3.26 保温層膜厚と必要電力の関係

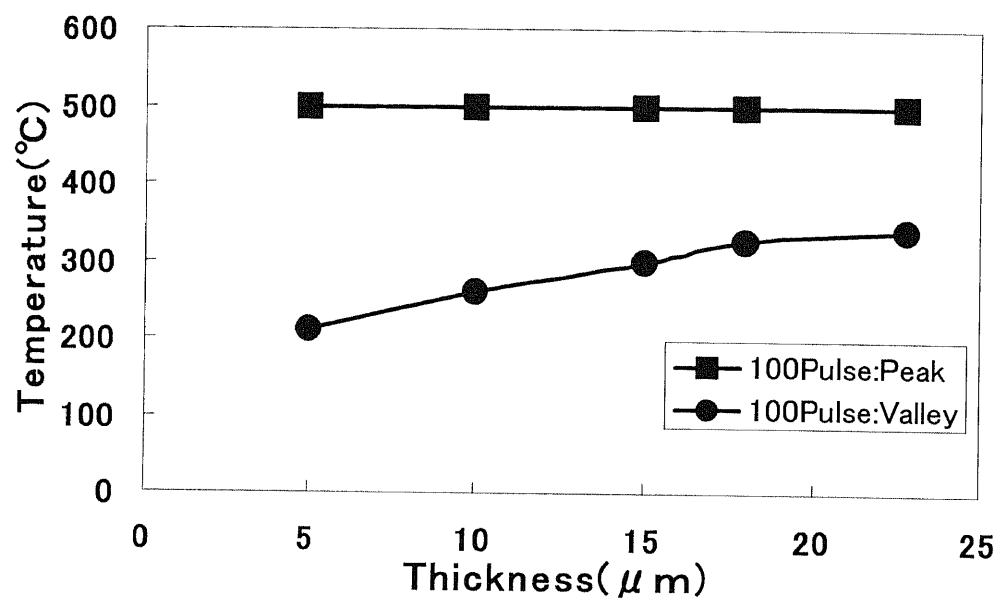


図 3.27 保温層膜厚とバレー温度の関係

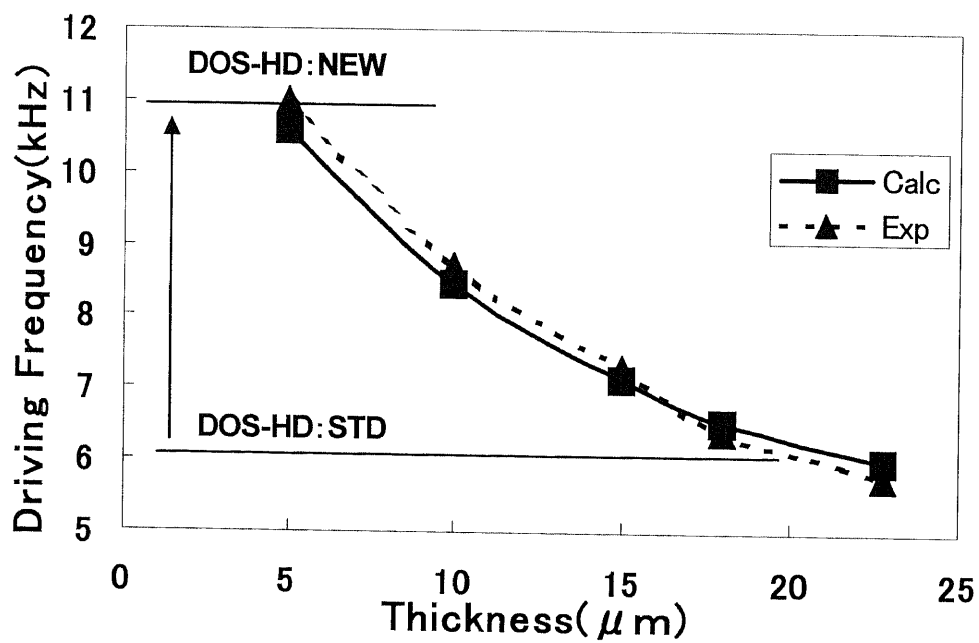


図 3.28 保温層膜厚と駆動周波数の関係

3-5-3. ヘッド表面温度

保温層を薄くした場合、駆動周波数は11kHzまで早くできることがわかった。図3.29に各解像度における印刷速度と駆動周波数、ならびに印刷に必要なヘッド表面温度の関係を示す。これよりおよそ、600dpiで20IPS、300dpiでは40IPSの速度が可能になることがわかる。また、印刷速度がますます必要ヘッド表面温度が高くなることがわかる。保温層にグレーズを用いている従来のヘッド構造では、耐熱温度は500℃程度であり、耐熱性からも従来のヘッド構造の場合は300dpiで20IPSが限界である。本研究で用いたヘッド構造の場合は基板に単結晶Si、保温層にSi合金酸化膜を使用していることから、耐熱温度も700℃以上ある。従って、駆動周波数、耐熱性両方の観点からも高速化の可能性が高いことがわかる。

3-5-4. 試作ヘッドによる高速印刷実験

解析結果をもとに、保温層膜厚5 μ mのヘッドを試作し、高速印刷の実機確認をおこなった。結果を図3.30に示す。この結果は600dpiで10IPSと20IPSを比較しているが20IPSでも少し輪郭でのインク転写に不安定な要素が残っているものの、10IPSと同等の印刷できていることがわかる。

3-6. 昇華型熱転写プリンタにおける高速化検討

昇華型熱転写プリンタは、濃度階調ができることから仕上がりも銀塩写真並の高画質印刷を行うことができる⁽¹¹⁾。しかし欠点として、印刷速度が遅いということが挙げられる。そこで昇華型熱転写プリンタの高速化について引き続き検討をおこなった。高速化には、ヘッドの走行速度を上昇させる方法について、並びに、ヘッドをイエロー、マゼンタ、シアン、オーバーコート各色に対し1本使用し、合計4本のサーマルヘッドを使用するタンデム化システムについて検討を行った。

3-6-1. ヘッド構造の最適化：表面温度と蓄熱

前述の溶融型熱転写プリンタで使用しているヘッドのまま印刷速度を上昇させた場合、ヘッドの表面温度は図3.31のように上昇してしまう。ヘッド表面温度550℃以上では、サーマルヘッドの耐熱限界に近くなるため、寿命の問題が発生する。この問題に対し、サーマルヘッドの発熱体長さを最適化した。発熱体長を長くすると、同じ濃度を出すために必要なヘッド温度は図3.31のように低く出来る。しかしながら、一方では発熱体長さが長いと、印刷パターンの輪郭が不鮮明になってくる。これらの関係を図3.32に示す。図3.32は発熱体長さと輪郭の鮮明度を示す。縦軸の輪郭の鮮明度は、図3.32内で定義しているように印刷部の階調値C1と余白部の階調値C2の比としている。ヘッドの表面温度と輪郭の鮮明度の関係を考慮し、印刷速度2~3IPSの場合、発熱体長さは120 μ m~160 μ m程度が良いことがわかった。この時のヘッド表面

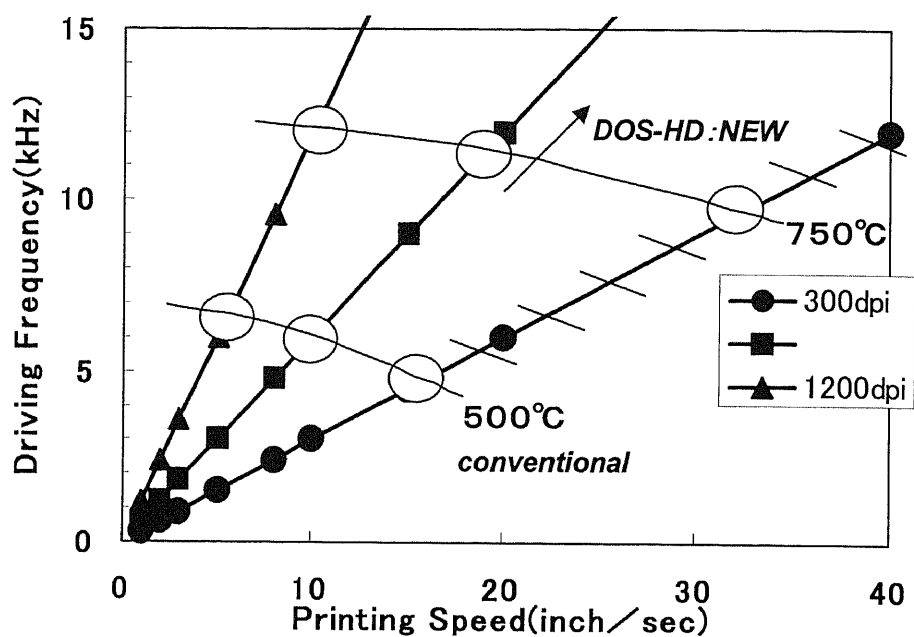


図 3.29 各解像度における印刷速度と駆動周波数，表面温度の関係

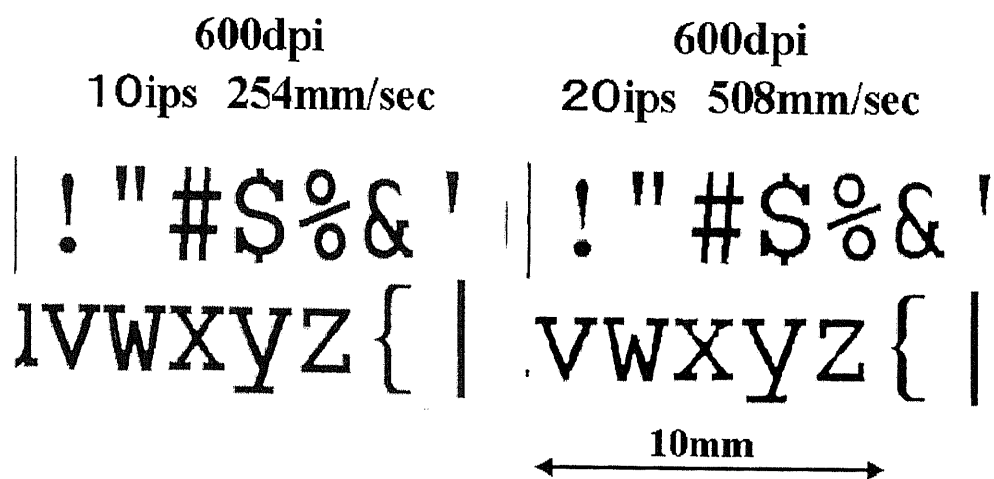


図 3.30 高速印刷結果比較

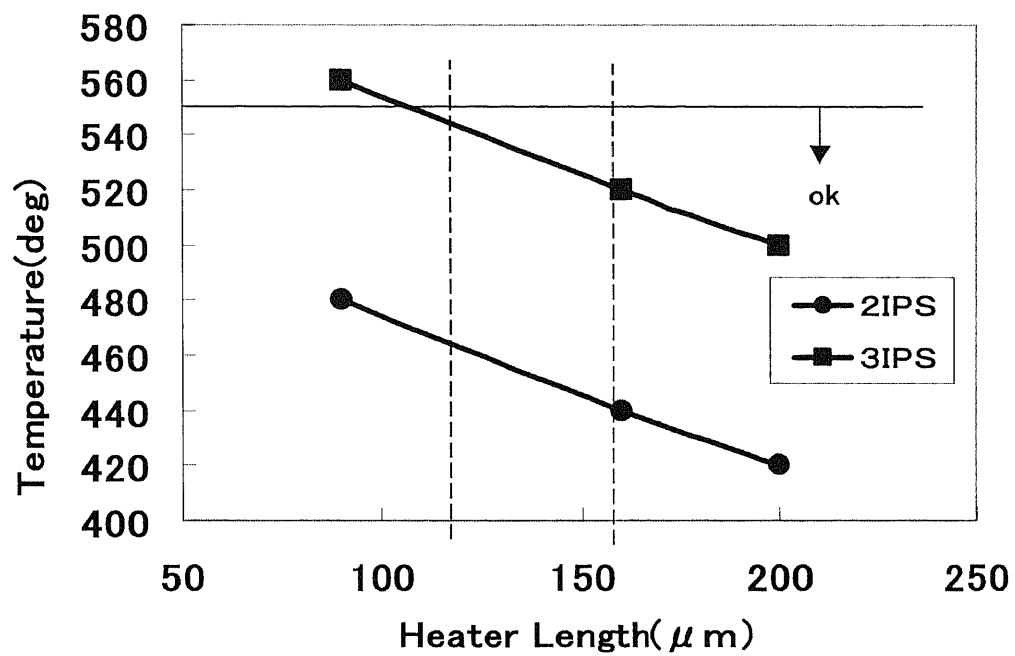


図 3.31 昇華印刷における印刷速度とヘッド表面温度の関係

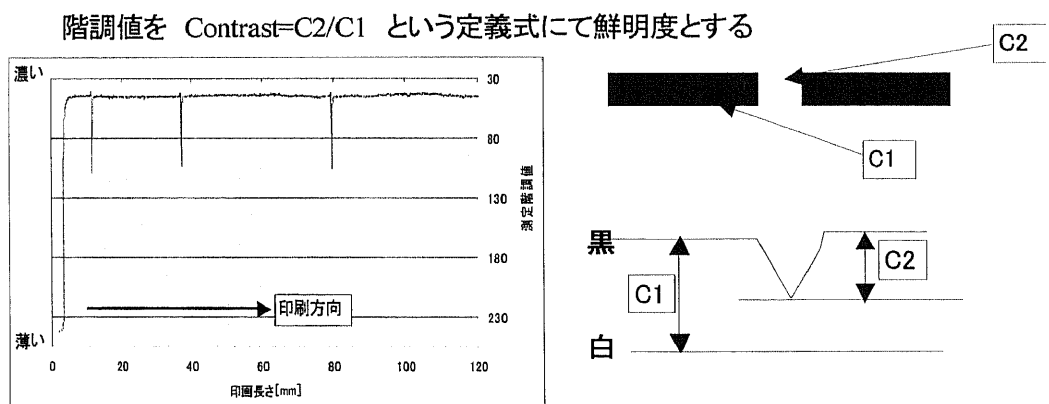
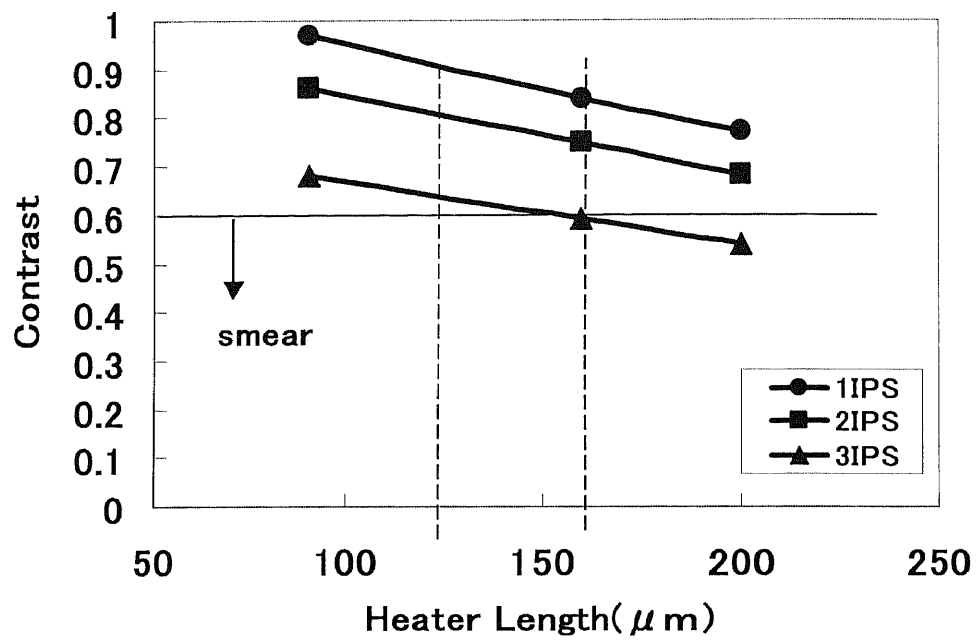


図 3.32 発熱体長さと鮮明度

温度は 450～550℃程度である。

また従来構造のまま印刷速度を上昇させた場合、ヘッドの保温層に熱がたまり、ヘッドへの投入エネルギーを off にした後もインクが余白部に転写するいわゆる「尾引き現象」が発生してしまう。ヘッドの保温層の厚みや基板の熱物性を変更することで、この問題を解決した。一例として、保温層としてのグレーズの厚さを変更した場合の蓄熱の変化についてシミュレーションした結果を図 3.33 に示す。この結果、グレーズ厚は 100 μm 前後が良いことがわかった。

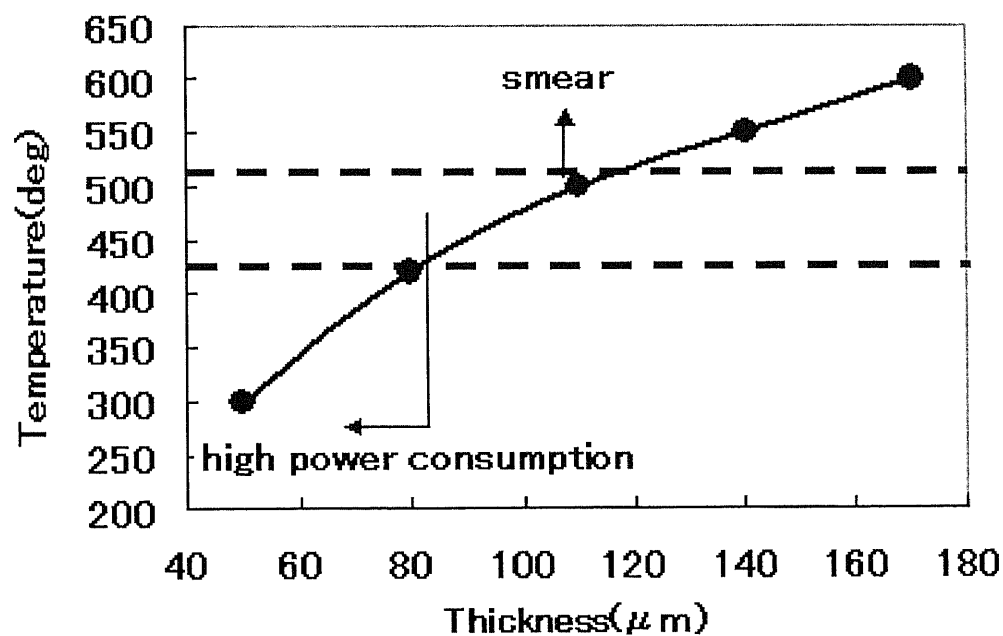


図 3.33 グレーズ厚と表面温度の関係

3-6-2. システム構造検討：タンデム化とヘッド小型化設計

カラープリンタの高速化にはタンデム方式が有効である。タンデム方式とは、図 3.34 の様に 1 カラーに 1 ヘッドを使用することによって各色を平行に印刷する方式で、図 3.35 に示す 1 ヘッド方式の 1 色毎にカラーチェンジ及びメディアスイングバックを必要とするプリンタより高速に印刷が出来る。しかし、このタンデム方式は構造的にサイズが大きくなる事が避けられず、特に、今後フォト市場で伸びが期待されるデジタルラボや SOHO 及び KIOSK 端末の様なシステムへの組み込み用途には小型化が必須である⁽¹⁾。タンデム機の小型化にはヘッドユニットの小型化が重要である。ヘッドユニットの小型化にはヘッドチップサイズの小型化の検討と放熱設計をおこなった。

ヘッドユニットの小型化設計ではヒートシンクをより小さく設計する必要があった。この対策として、水冷方式のヘッドユニットを検討した。水冷ユニットの構成を図 3.36 に示し、検討結果を図 3.37 に示す。図 3.37 より水冷によって従来の FAN による冷却方式より、25%の温度低下が得られ放熱性能が向上したことがわかる。一方ヘッドチップの小型化については、DrIC の実装方法にワイヤーボンディングを採用した。図 3.38 に側面図を示す。IC の封止材の塗布量を制御し、0.4mm 程度の封止高さにした。従って封止材位置をギリギリまで発熱体に近づけることができ、結果的にヘッドユニットの幅で 13mm 程度に小型化にすることができた。これらによって、幅 310mm×高さ 320mm×奥行き 300mm という、従来の 1 ヘッドタイプの業務用途機と変らないサイズでのタンデムの高速化を実現した。

3-6-3. 印刷時間の可能性検討

以上の検討によって図 3.39 に示すように、昇華型印刷において、A6 サイズのフルカラー画像の印刷時間を改善することができた。1 ヘッドで従来 90 秒程度印刷時間が必要であったが、今回の結果、1 ヘッドで 20~30 秒が可能であり、このヘッドを 4 ヘッドタンデム化することにより最速で 2 秒/枚が達成できる可能性が見いだされた。

3-7. 結言

本研究では、熱転写方式にて高速、高精細印刷を可能とするために、熱拡散率の観点からサーマルヘッド材料の検討を行った。さらに、サーマルヘッドの形状の最適化を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 高熱拡散率の単結晶 Si 基板の上に、低熱拡散率の保温層をスパッタで形成した結果、600dpi のサーマルヘッドを高速に高密度で駆動でき、熱転写方式にて速度 10IPS、解像度 600dpi の印刷が可能であることがわかった。
- (2) 発熱体からヘッド端部までの間のヘッド形状が階調特性に影響することがわかった。ヘッド形状を最適化することで、1 ドットの径を 16 段階に変化させることができ、レ

ジンインクを用いた熱転写方式での多階調印刷が可能であることを確認した。

(3)1200dpi の高解像度印刷が基板に単結晶 Si, 保温層に Si 合金酸化膜を適用した本研究のヘッド構造で可能なことを FEM 解析より確認した。

(4)1200dpi の場合, 保温層の膜厚を調整することで, 10IPS で印刷可能であることを見いだした。またその時のヘッド表面温度が, 従来ヘッドより高温が必要となることから, ヘッドの耐熱性の向上が必要であることがわかった。レジインクの転写の場合, エッジ距離が重要であり 600dpi より更に短く設計する必要があることがわかった。その結果この位置に配置されるコモンの設計に課題であることが明らかになった。また, 実験的に実際にヘッドを試作し, 印刷検討を行い高精細印刷の可能性を確認した。

(5)600dpi・20IPS, 300dpi・40IPS の高速印刷についても先の高解像度化と同様に基板に単結晶 Si, 保温層に Si 合金酸化膜を適用した本研究のヘッド構造で可能なことを FEM 解析より確認した。またその時のヘッド表面温度も同様に, 従来ヘッドより高温が必要となることから, ヘッドの耐熱性の向上が必要であることがわかり, 耐熱性に優れる本研究のヘッド構造にて達成できる可能性を見いだした。また, 実験的に実際にヘッドを試作し, 印刷検討を行い高速印刷の可能性を確認した。

(6)昇華型熱転写プリンタの高速化としてヘッド走行速度を上昇させる方法を検討した。ヘッドの構造の最適化によって, 従来の 0.5~1.0IPS に対し 2~3IPS まで改善させることが出来た。またヘッドをタンデム化したシステムについて検討を行った。ヘッドの走行速度とタンデム化によって, A6 サイズで最高速 2 秒/枚の印刷速度が可能であることをシステム構想検討で技術的な可能性を見いだした。

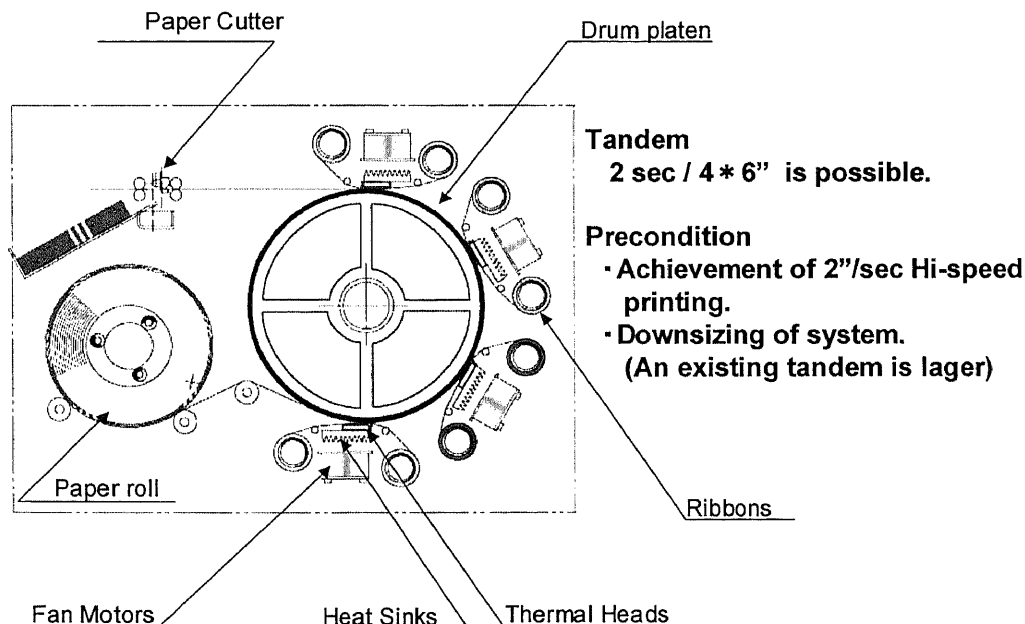


図 3.34 タンデム方式

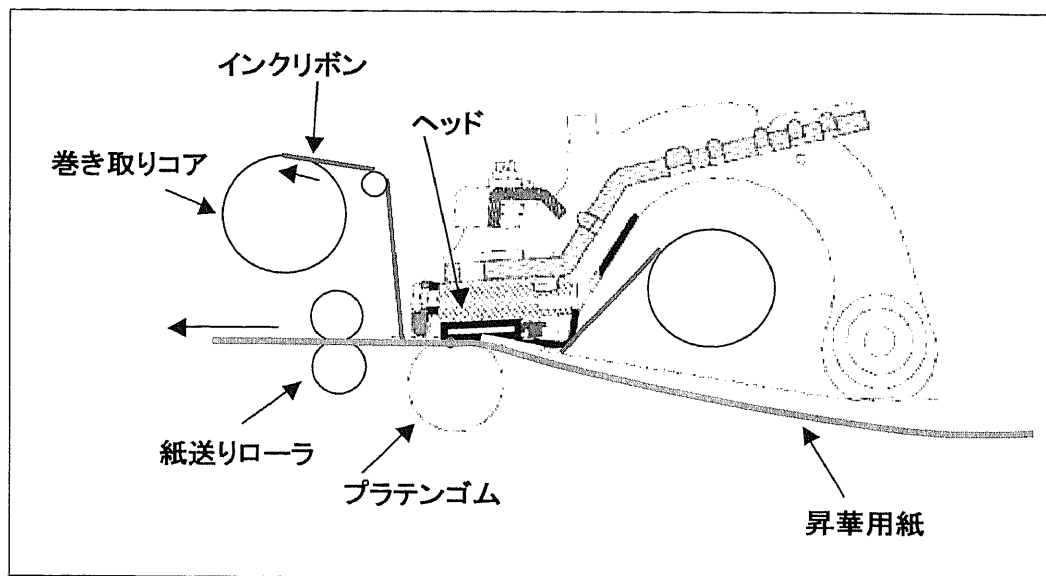


図 3.35 シングルヘッド方式

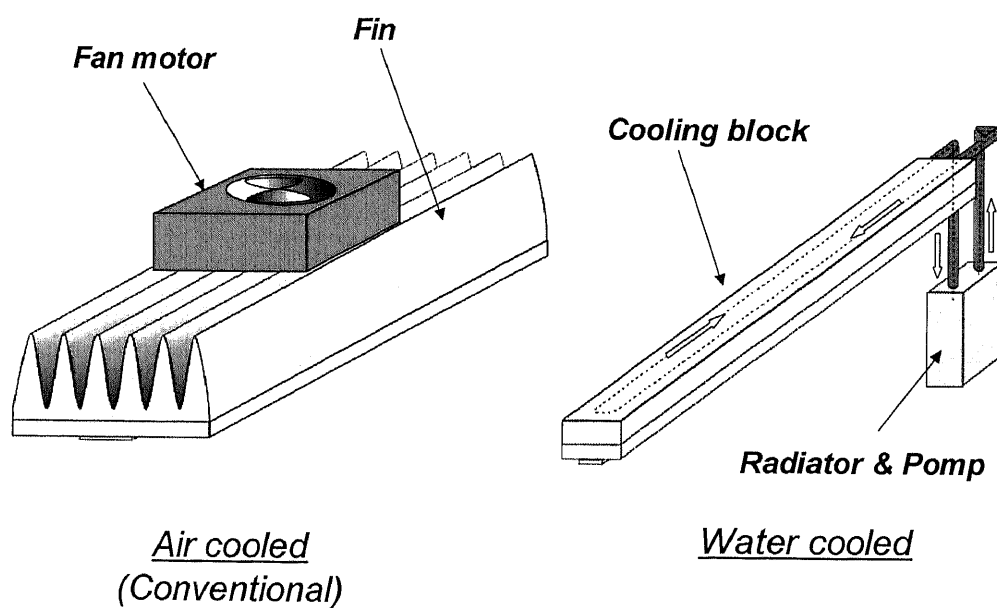


図 3.36 小型ヘッドユニット構造

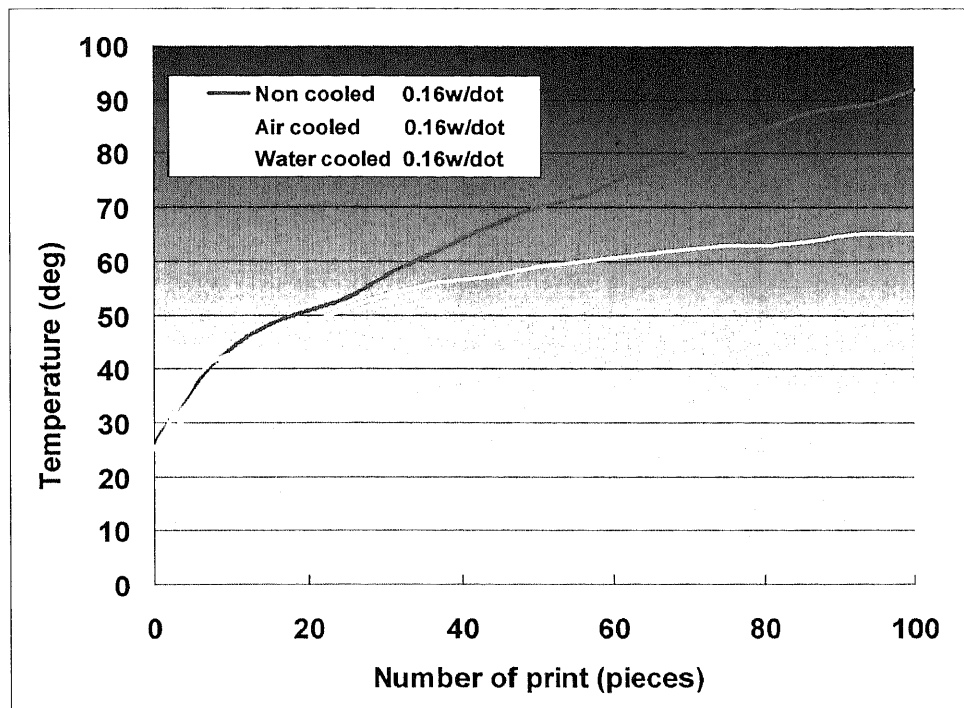


図 3.37 水冷検討結果

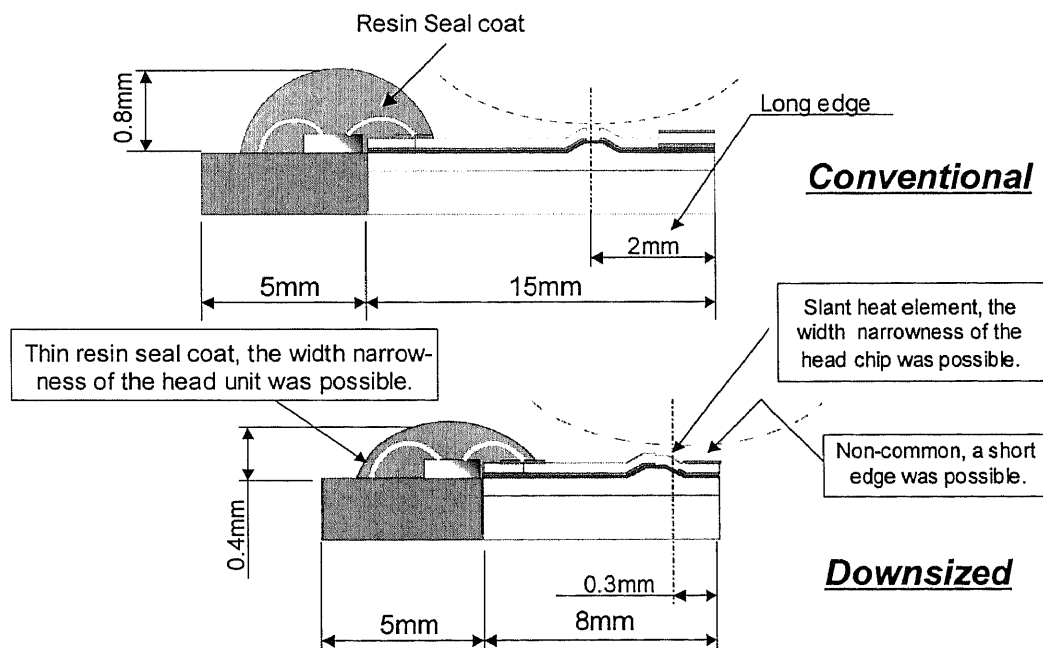


図 3.38 サーマルヘッド側面図

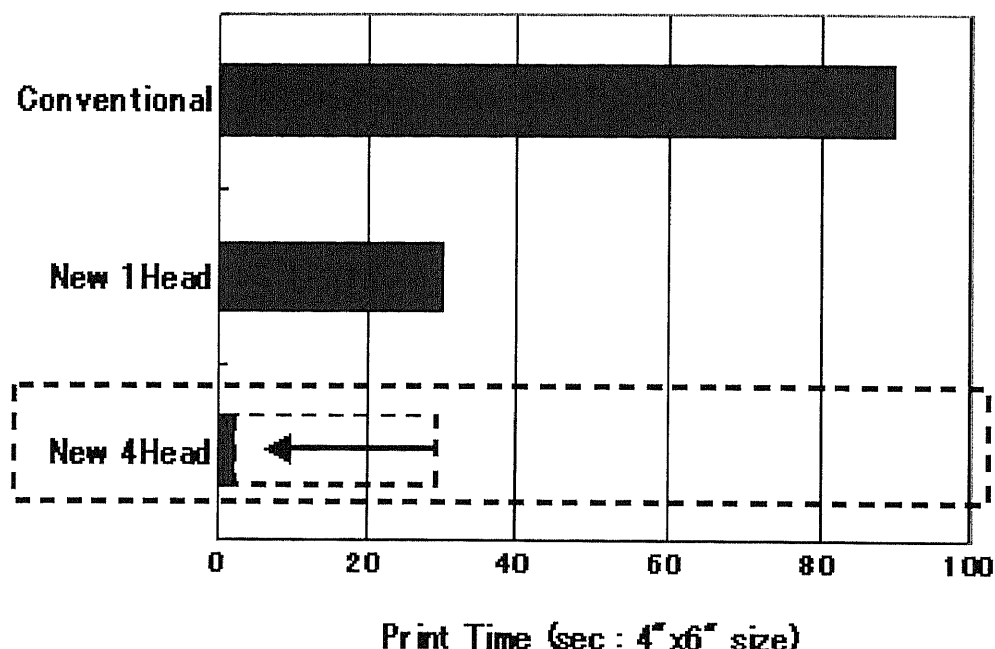


図 3.39 印刷時間の比較結果

【参考文献】

- (1) Nagata, T., Sato, K, Watanabe, M., Pulse Durability Characteristics of Thin-Film Thermal Head , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 62, No.601 (1996), pp. 56-61.
- (2) Nagata, T., Sato, K, Watanabe, M., Printing Characteristics Estimation of Thermal Head , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No.581 (1995), pp. 286-294.
- (3) Nagata, T., Watanabe, M., 16dots/mm thermal printing head developing heat efficiency with polyimide heat insulating layer. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No.585 (1995), pp. 286-291.
- (4) Murata, A., Mochizuki, S., Morimoto, Y., Egashira, N., Printing Characteristics of Full-Color Thermal Dye-Transfer Printers Using Semiconductor Laser Heat. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No.582 (1995), pp. 328-333.
- (5) Hibino, I., Ono, S., Uchida, T., Study of Highdefinition Thermal Transfer Process. *Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, VOL. J81-C-2 NO. 6; PAGE. 566-573; (1998/06)

- (6) I. Hibino, "High Resolution Thermal Transfer Technology" ,Proc.PICS, p100.
(1998)
- (7) I. Hibino, J. Technical Report of IEICE. EID95-95,7(1996)
- (8) I.Hibino,S.Ono,T.Uchida,IEICE.Vol.J81-C II,No.6,pp.566-573(1998)
- (9) N. Egashira, S. Mochizuki and Y. Morimoto, " Heat Transfer and Printing
Characteristics in Dye Transfer Printing",IS&T's NIP8:1992 International
Conference,p352,(1992)
- (10) R. A Hann and B. Pack, " Control of D2T2 Print Quality by Back Coat Friction
Properties",IS&T's NIP9:1993 International Conference,p322,(1993)
- (11) J.Smith, R.Muzzolini, and D. Kacker," Challenges In Digital
photofinishing",IS&T's NIP19:2003 International Conference on Digital
Printing Technologies,p366,(2003)

第4章 サーマルヘッドの温度均一化技術：放熱制御と高画質化設計

4-1. 緒言

サーマルヘッドの温度やサーマルヘッド基板内の温度分布は印刷品質に大きな影響を及ぼすことになり、熱転写プリンタの高速且つ高画質化のためにはサーマルヘッドの放熱性向上及びヘッド基板内の温度分布を均一化する必要がある^{(1)・(4)}。この課題に対し本研究では、サーマルヘッドの放熱性を向上させ、かつ、ヘッドデバイス温度の偏りを改善するためサーマルヘッドと放熱板の間に熱的特性に異方性を有する副層⁽⁵⁾を配置し、温度均一化に及ぼす異方性副層の効果を実験と有限要素法解析によって明らかにした。熱的異方性材料として炭素繊維配合材料を使用するが、このような異方性材料を用いる場合、繊維の方向、分率といった自由度の高い設計変数が存在するため、目的を満たす設計条件を見つけることが困難である。この問題を解決するために本研究ではニューラルネットワークを使用して副層の熱伝導率の最適な異方性を探索する。ニューラルネットワークは人間の神経細胞を模擬した数理モデルであり、パターン分類・認識、予測問題において多くの研究事例が報告されている。本研究では熱的異方性を有するヘッドを試作し、実機の印刷状態を再現する熱的負荷を与える実験を行い、与えられた設計条件と得られたヘッド温度の関係をニューラルネットワークに学習させることにより、最適な設計条件を見出し、その妥当性を考察した。

4-2. 積層ヘッド構造と接着層の影響

4-2-1. 実験装置並びに積層ヘッド構造と測定点および物性値

実験装置の構成を図4.1に示す。パソコンからヘッド制御の命令が出力されると、制御装置によって発熱体に電圧が印加される。このときのヘッド基板温度を放射温度計によって測定し、その出力を記録装置によって記録するシステムとなっている。

積層ヘッドの構造と測定点について図4.2に示す。ヘッド発熱抵抗体への単位面積当たりの印加エネルギーを、約 $10\text{mJ}/\text{m}^2$ とし、そのときのヘッド基板温度を測定した。通電は4.2秒間通電ONし、4秒間通電OFFする動作を1サイクルとした。図4.2に示すA~Dの4点の温度を測定し、各測定点間の温度差でヘッド温度の均一性を評価した。点A,B,Cは発熱領域の偏熱状態を調査するために選択されたものであり、この3点の温度差が大きいと印刷濃度に好ましくない変化が生じる。異方性副層を用いる主たる目的は、この温度差を低減することである。点Dは発熱領域からの熱移動を評価するための測定点であり、点ABCと点Dの温度差が大きくなるということは、発生した熱が発熱体近傍に蓄積していることを意味する。

実験で使用した異方性副層の熱伝導率は表4.1のとおりである。C0,C1,C2では副層全体の熱伝導率の増加による影響を、CX,CY,CZでは副層の熱伝導率の異方性の影響について調査した。

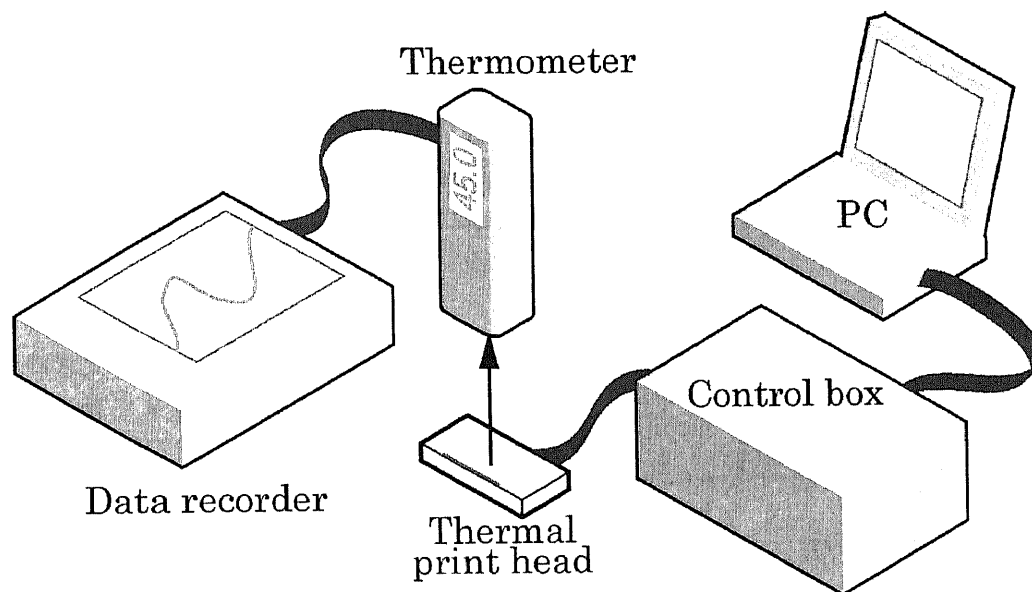


図 4.1 実験装置

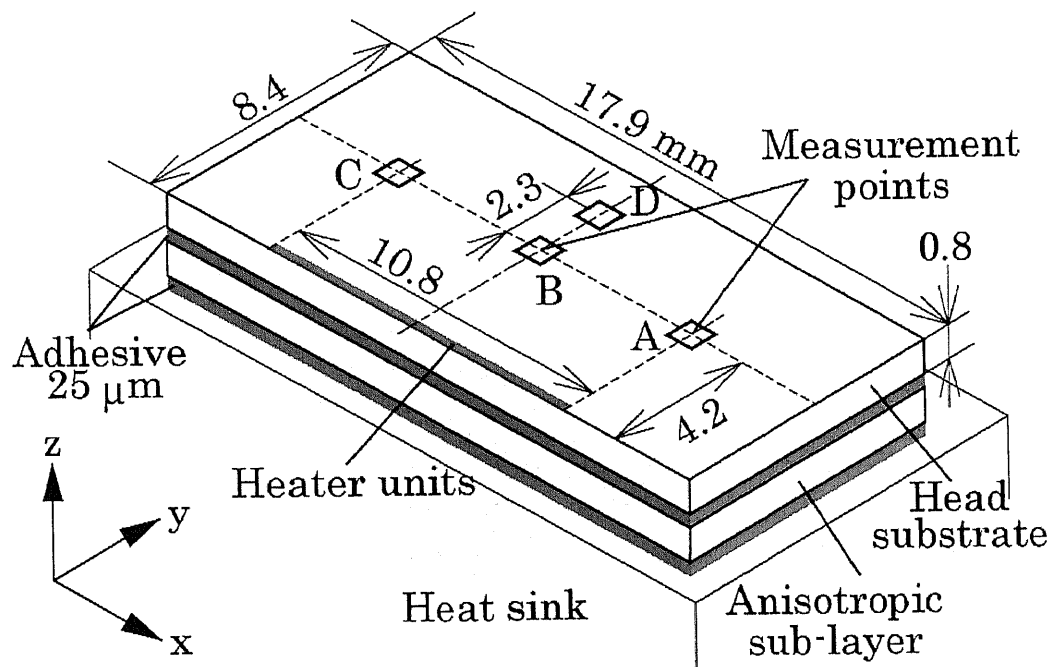


図 4.2 ヘッド構造と測定点

4-2-2. 解析モデル

解析に使用した有限要素モデルを図 4.3 に示す。解析には汎用有限要素法解析コード MSC.MARC を使用し、8 節点六面体要素を用いてモデル化した。解析モデルはヒートシンク、Si 基板、異方性副層（炭素繊維複合材料）、接着剤（シリコーン）、発熱体、保温層から構成されている。各材料の物性値を表 4.2 に示す。

実機と同様に、発熱体で発生するジュール熱によるサーマルヘッドの温度変化を解析する。外気温度を 25°C とし、モデル表面に外気との熱伝達条件を与えた。また、実験ではヘッドを治具に固定して温度を測定したため、固定治具への熱伝達条件も仮定した。これらの熱伝達係数は測定が困難なため、実験によって得られた非定常温度変化を用いたパラメータ調整で決定した。また、発熱体へ印加する電圧も実験と同様の温度が得られるように調整された。

4-2-3. 異方性材料積層の影響

各サーマルヘッドについて 5 サイクルの通電を与えてヘッド基板各点の温度を測定した。図 4.4 に最高温度を示したときの、B 点と A, C, D 点との温度差 ΔT_{BA} , ΔT_{BC} , ΔT_{BD} と A-C 間の温度差 ΔT_{AC} の測定結果を示す。図には異方性副層を積層していないヘッド基板 1 層のみの結果 (STD) も示してある。最も温度差が少ない、すなわちヘッド基板温度が均一に近いヘッドは C1 であることがわかる。これは副層全方向の熱伝導率が 200 W/m°C でヘッド基板の熱伝導率 150 W/m°C よりも大きく、ヘッド全体の熱伝導率が向上したためと考えられる。強い異方性をもつヘッド CX, CY, CZ について C1 と比較すると、CX では x 方向の温度差が減少しているが、CY, CZ では温度差に異方性副層を使用した効果が現れていないことがわかる。

得られた実験結果を検討するために、これらのヘッドについて有限要素法を用いた熱伝導解析を行った。図 4.5(a)~(g) は各ヘッドの印刷開始から 1.4 秒後と 4.2 秒後（1 行印刷終了）における温度分布を示す。図の濃い部分は低温部 (20~25°C)、薄い部分は高温部 (75~80°C) を表す。解析結果から熱的異方性の小さい基板 C0, C1, C2 の偏熱状態に大きな差異は見られない。また、図 4.5(e) (f) に示すように CX, CY においては熱伝導率の大きい方向へ熱が伝わっていく様子が確認された。ヘッド基板全体の温度が低いのは CZ であったが、異方性副層の x, y 方向の熱伝導率が低いためにヘッド基板面内の温度差は大きくなっている。また、すべての積層ヘッドに共通して、接着剤の熱伝導率が低いために、ヘッド基板と異方性副層の間に大きな温度差が生じていることもわかった。

表 4.1 基板の熱伝導率

Sub-Layer	Thermal conductivity (W/mK)		
	X	Y	Z
C0	100	100	100
C1	200	200	200
C2	250	250	180
CX	450	8	8
CY	8	450	8
CZ	8	8	450

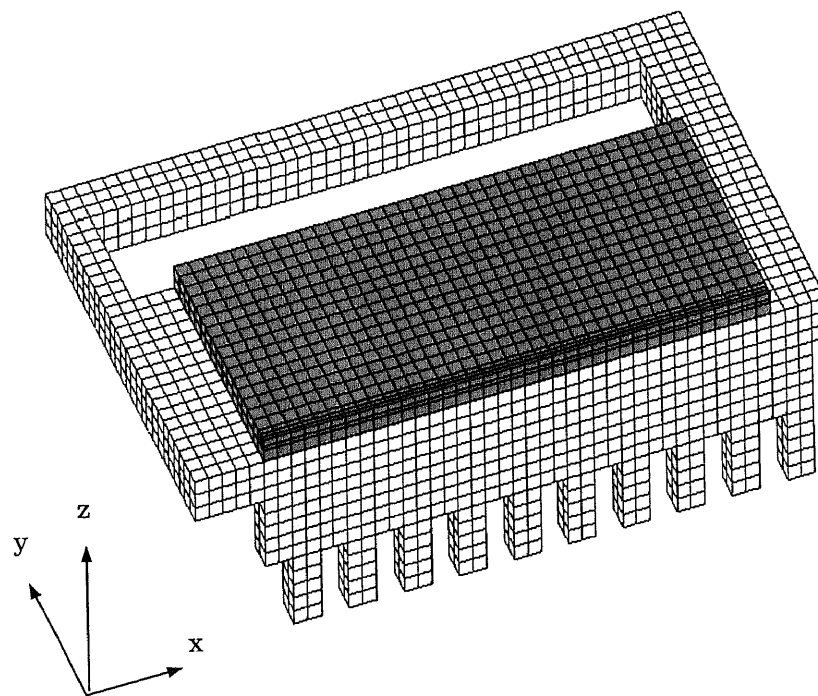


図 4.3 解析モデル

表 4.2 熱物性値

Materials	Thermal conductivity λ (W / m°C)	Specific heat c (J/kg°C)	Density λ (kg / m ³)
Heat sink	96.2	963	2740
Si substrate	150	805	2330
sub-layer	see Table.1	200	1700
Heat insulation layer	1.2	1800	1000
Heater	45	700	6500
Adhesive	0.81	750	2500

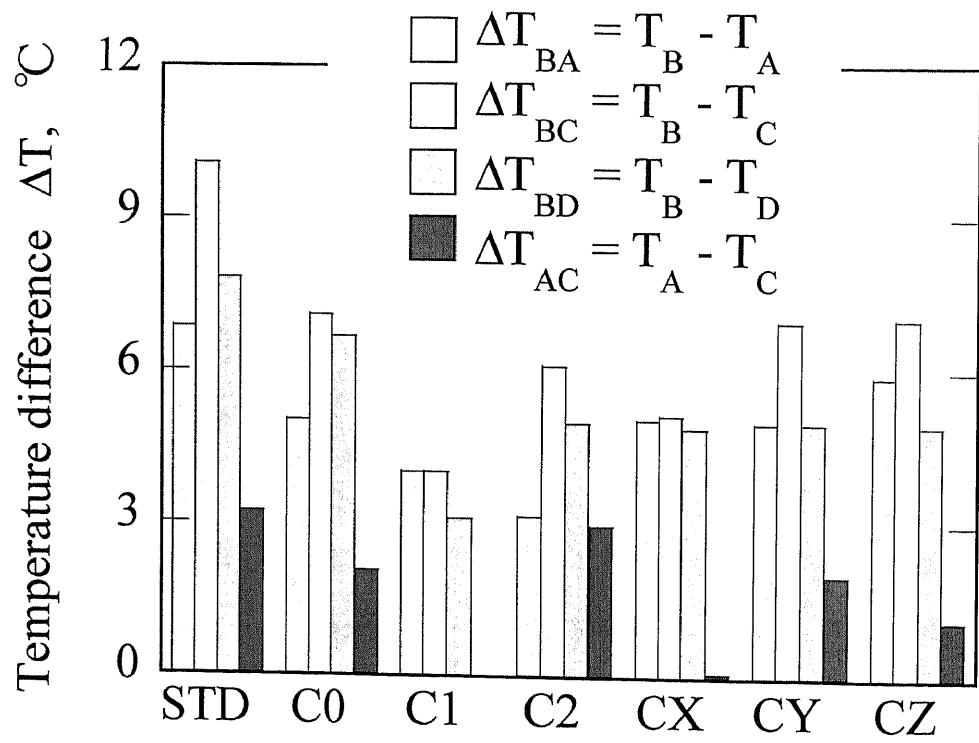


図 4.4 各基板の温度差

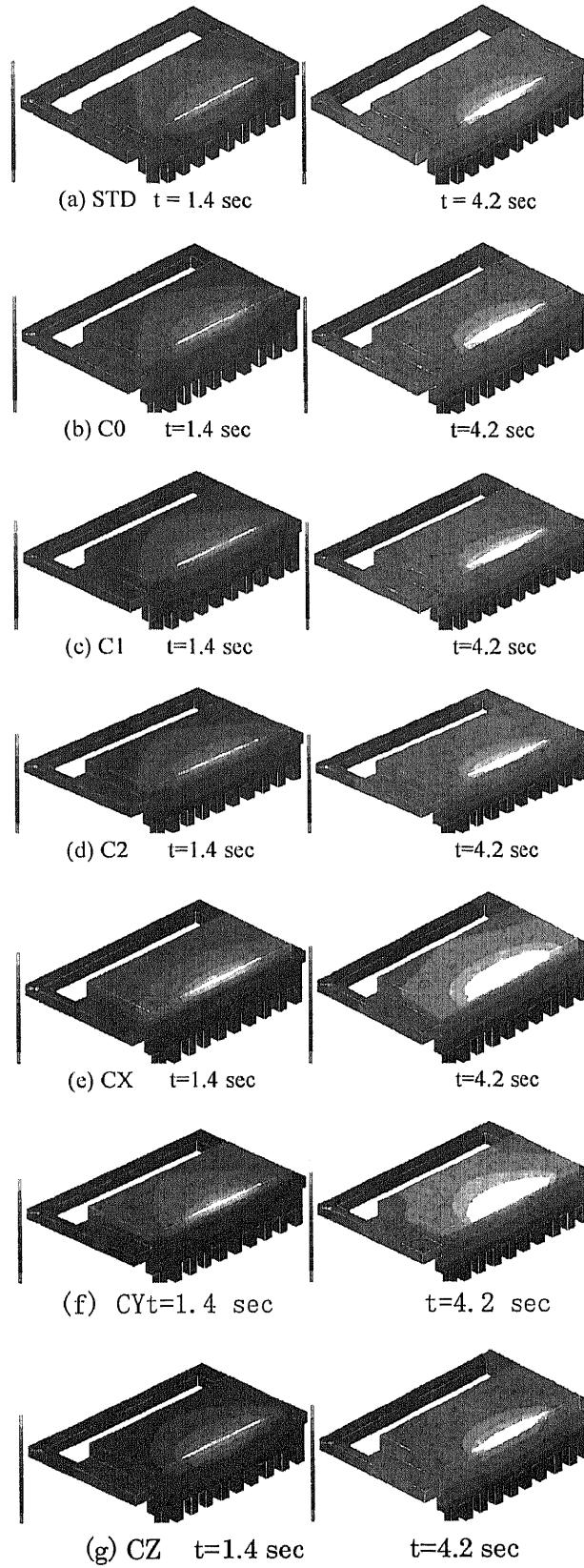


図 4.5 各基板の熱分布の計算結果

4-2-4. 接着剤の影響

接着剤の影響を調べるために、ヘッド CZ について通電開始 4.2 秒後におけるヘッド基板と異方性副層のそれぞれについて、接着剤との界面における温度分布を求め、図 4.6 に結果を示した。図 4.6 (a) がヘッド基板、(b) が異方性副層の温度分布である。これらの図をみるとヘッド基板と異方性副層の温度が大きく異なっていることから、接着剤によって熱伝導が妨げられている様子がわかる。

4-3. 異方性積層基板の最適化設計

4-3-1. 異方性積層基板の最適設計

これまでの実験、解析結果からサーマルヘッドの温度分布均一化のために異方性熱伝導率を有する副層を用いることの有効性が示された。さらに温度分布を改善するために最適な熱的異方性の探索を試みる。

ニューラルネットワーク(NN)は教師データにおける入力と出力の関係を学習することで、与えられたデータに対する予測結果を出力する人工知能ツールであり、本研究では図 4.7 に示す階層型ニューラルネットワークを用いる。入力層ユニットが 3 個、出力層ユニットが 3 個、中間層が 3 層、中間層ユニットが 7-7-7 個のニューラルネットワークを用い、異方性積層構造のプリンタヘッドの熱伝導率と、実験によって得られたヘッド基板上の各点間の温度差(図 4.4)を教師データとして誤差逆伝播法を用いた学習を行った。

はじめに、熱伝導率の異方性の影響を調査するために、表 4.1 に示す x, y, z 方向の熱伝導率 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ を入力教師データとし、それらのヘッドを用いて測定されたヘッドの温度差 $\Delta T_{BA}, \Delta T_{BC}, \Delta T_{BD}$ を出力教師データとして学習を行った。

学習完了後のニューラルネットワークを用いて推定した温度差に及ぼす熱伝導率の影響を図 4.8~10 に示す。この結果から λ_x を増加させることが温度の均一化に有効であることがわかるが、 λ_y は温度差の増加をもたらす可能性があることがわかった。

構築されたニューラルネットワークと最適化アルゴリズムを用いた異方性の決定も可能であるが、ここでは、入出力教師データを交換し、基板温度差を入力、熱伝導率を出力教師データとしてニューラルネットワークの逆学習を行うことにより、目標とするプリンタヘッドの温度分布を満足する熱伝導率を逆決定する。

逆学習終了後、ヘッド基板内の温度均一化を目的として、すべての温度差が 1°C となるように $\Delta T_{BA} = \Delta T_{BC} = \Delta T_{BD} = 1^\circ\text{C}$ を入力データとして与え、それを満たす x, y, z 方向の熱伝導率 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ を予測した。その結果 $\lambda_x = 399 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $\lambda_y = 176 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $\lambda_z = 254 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ が得られた。

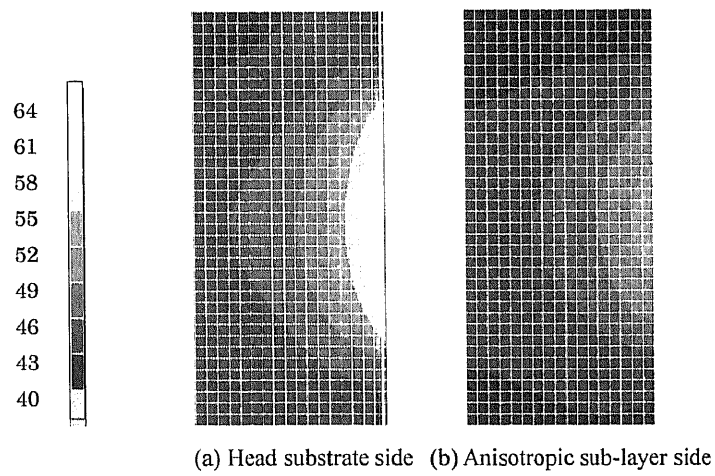


図 4.6 接着剤の熱分布計算結果

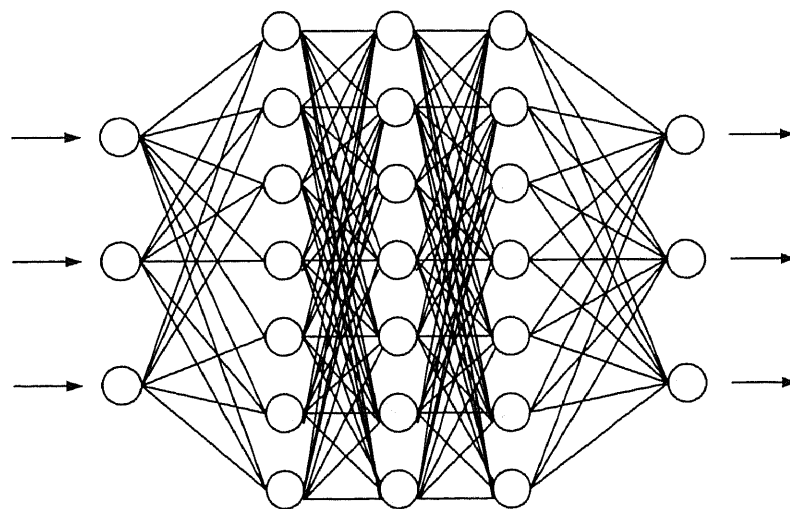


図 4.7 ニューラルネットワークの構造

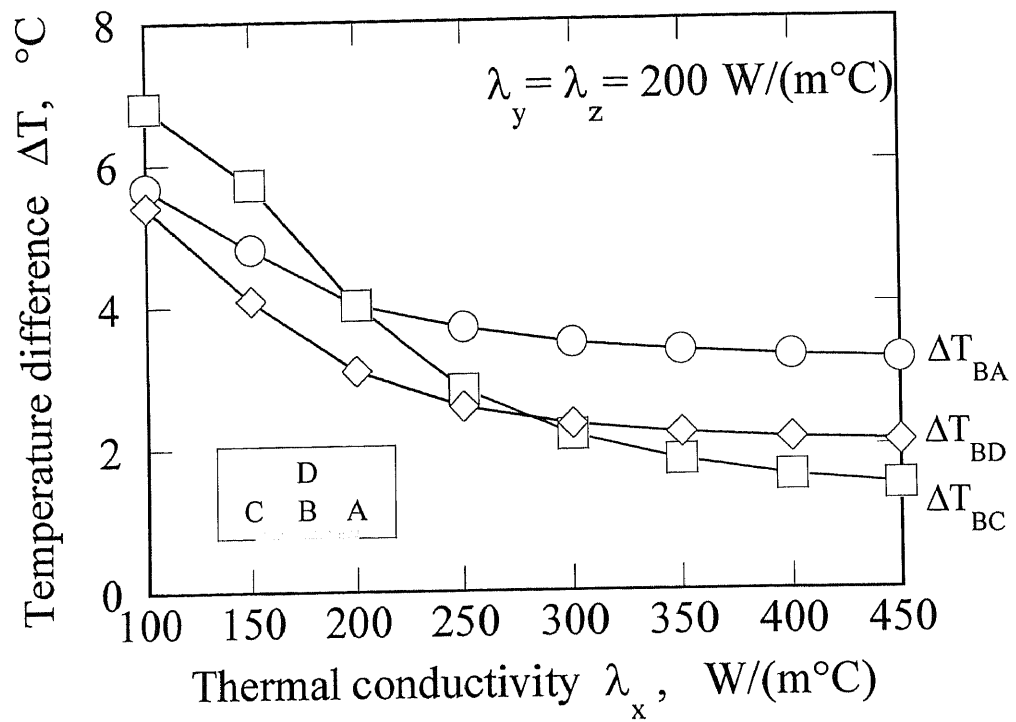


図 4.8 NNによる x 方向の熱伝導率の温度差に及ぼす効果

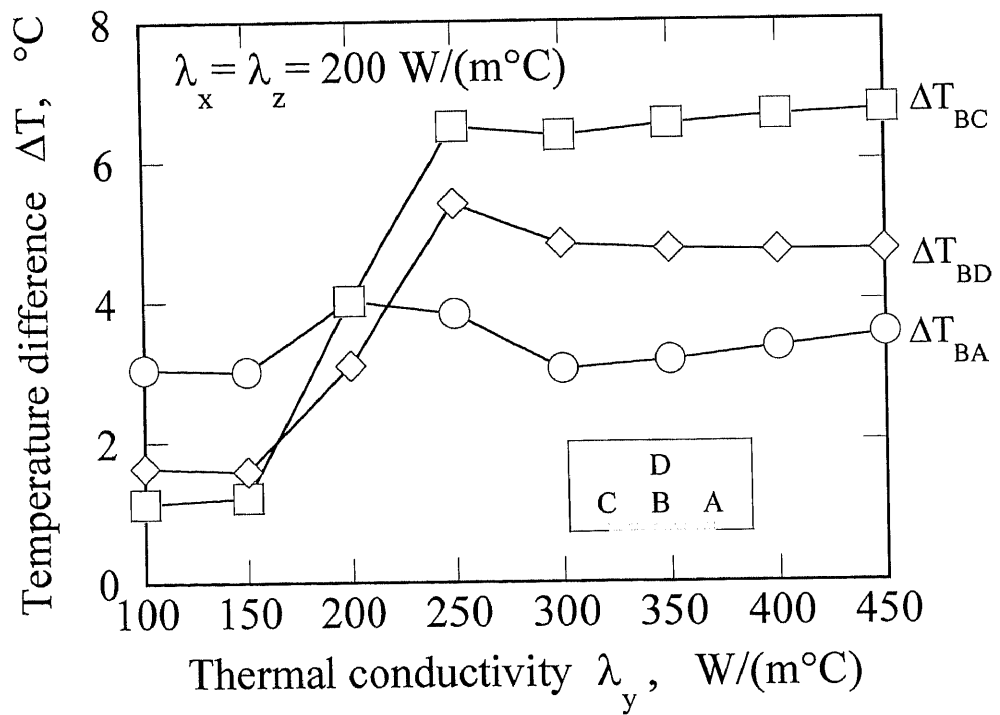


図 4.9 NNによる y 方向の熱伝導率の温度差に及ぼす効果

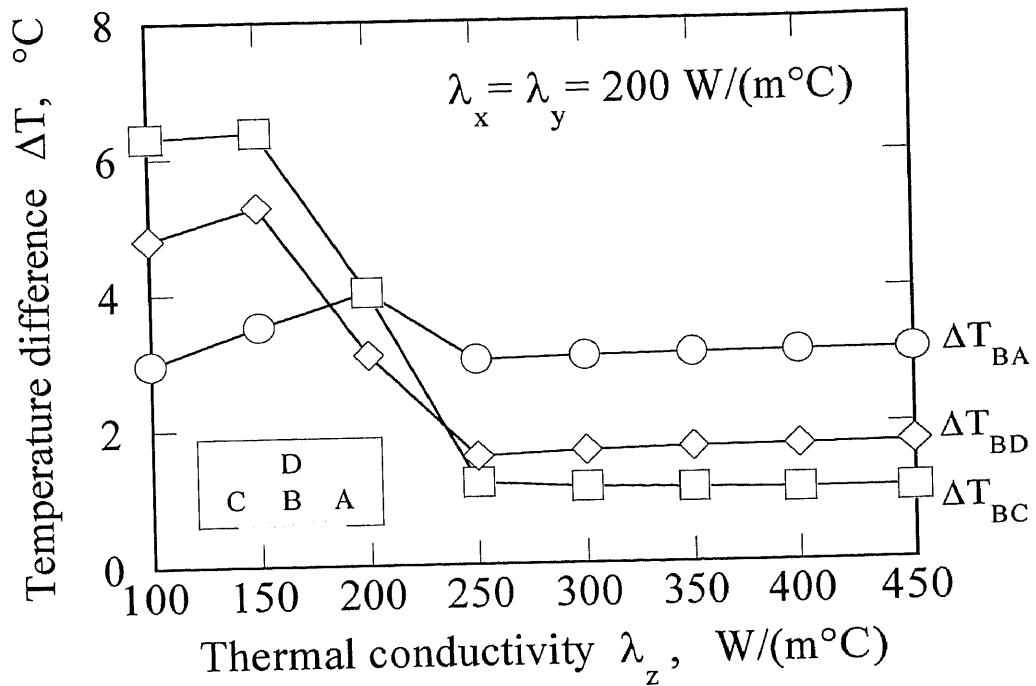


図 4.10 NNによる z 方向の熱伝導率の温度差に及ぼす効果

4-3-2. 積層基板の異方性効果の検証

積層ヘッドに熱的異方性をもたせることによるヘッド基板の温度均一化に及ぼす効果をより詳しく調査し、前節で得られた推定結果の妥当性を検証するために、異方性基板の各方向の熱伝導率 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ を 100~600 W/m°C で変化させて解析を行い、通電開始 4.2 秒後における各点の温度差を求めた結果を図 4.11~14 に示す。

図 4.11 は $\lambda_{iso} = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ の場合であり、等方性基板を積層した場合に相当する。この場合、実検結果 (C0, C1) と同様に、全体の熱伝導率の増加とともに温度差が減少していることがわかる。図 4.12~14 はそれぞれ x, y, z 方向の熱伝導率 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ のみを変化させ、その他の方向の熱伝導率は 100 W/m°C とした場合の結果である。図 4.12 から λ_x の増加とともに x 方向の温度差 $\Delta T_{BC}, \Delta T_{BA}, \Delta T_{AC}$ は減少するが、y 方向の温度差 ΔT_{BD} は大きな変化を示さないことがわかる。 λ_y のみを変化させた場合、y 方向の温度差 ΔT_{BD} は減少するが、 $\Delta T_{BC}, \Delta T_{BA}$ に増加傾向が見られ、 λ_y の増加が偏熱の要因となることが懸念される。

図 4.14 を見ると λ_z のみを変化させた場合には、どの温度差の変化も小さいことがわかる。これは異方性基板の厚さが薄いことに加え、接着剤の熱伝導率が小さいため、副層が z 方向に大きな熱伝導率を持っていてもその効果が現れないためと考えられる。また、前節で得られた最適熱伝導率を与えた場合の解析結果 $\Delta T_{BA}, \Delta T_{BC}, \Delta T_{BD}$ はそれぞれ 2.5, 2.0, 2.0 °C となり、ヘッド基板の温度分布制御が実現可能であるということがわかる。

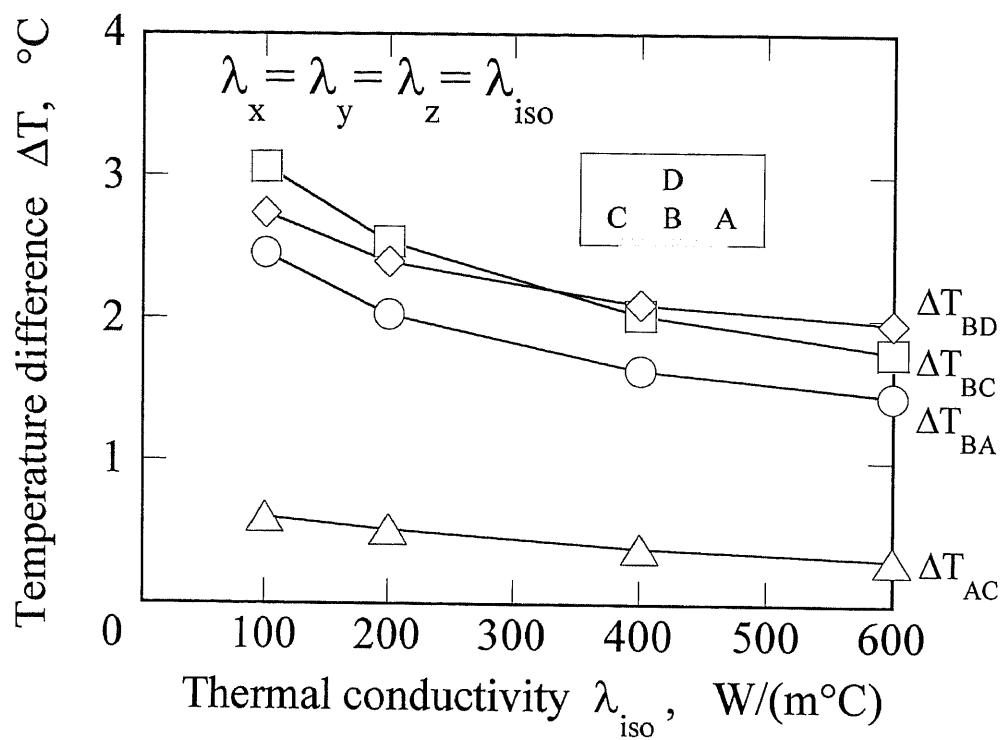


図 4.11 FEM による等方性熱伝導率の温度差に及ぼす効果

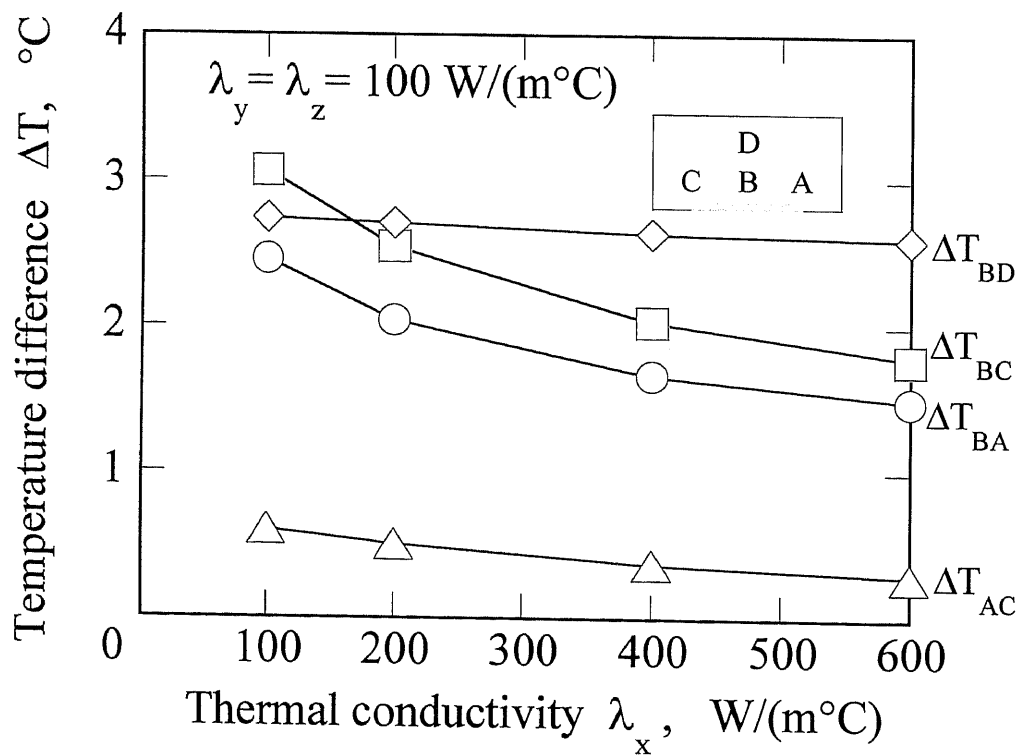


図 4.12 FEM による x 方向の熱伝導率の温度差に及ぼす効果

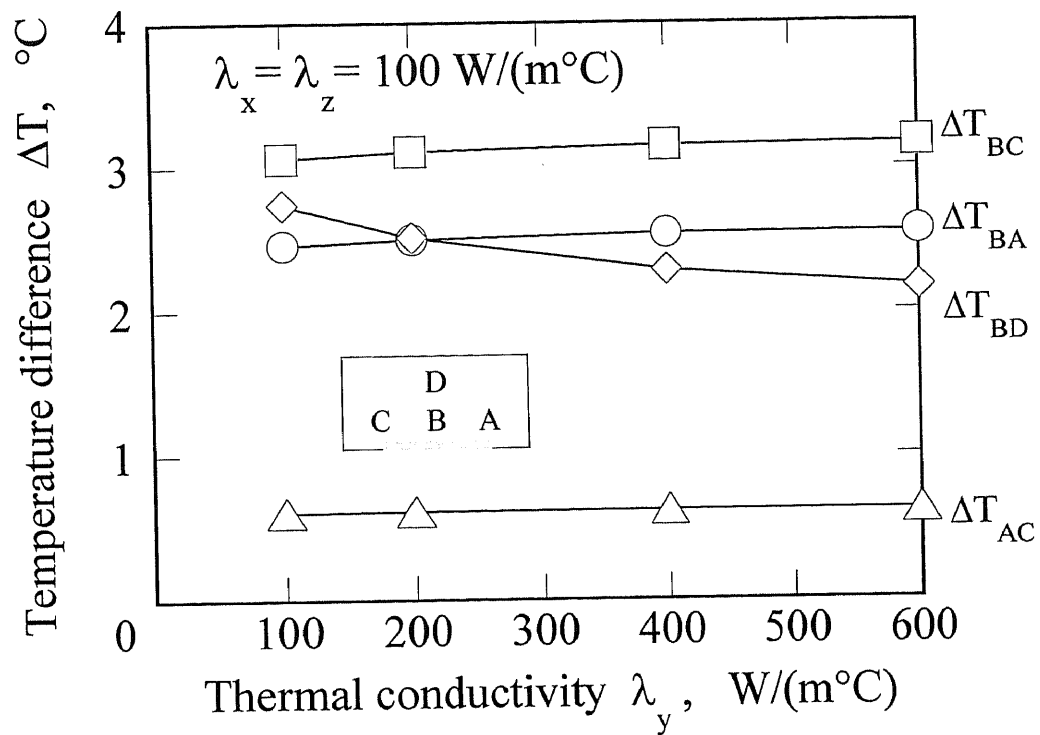


図 4.13 FEM による y 方向の熱伝導率の温度差に及ぼす効果

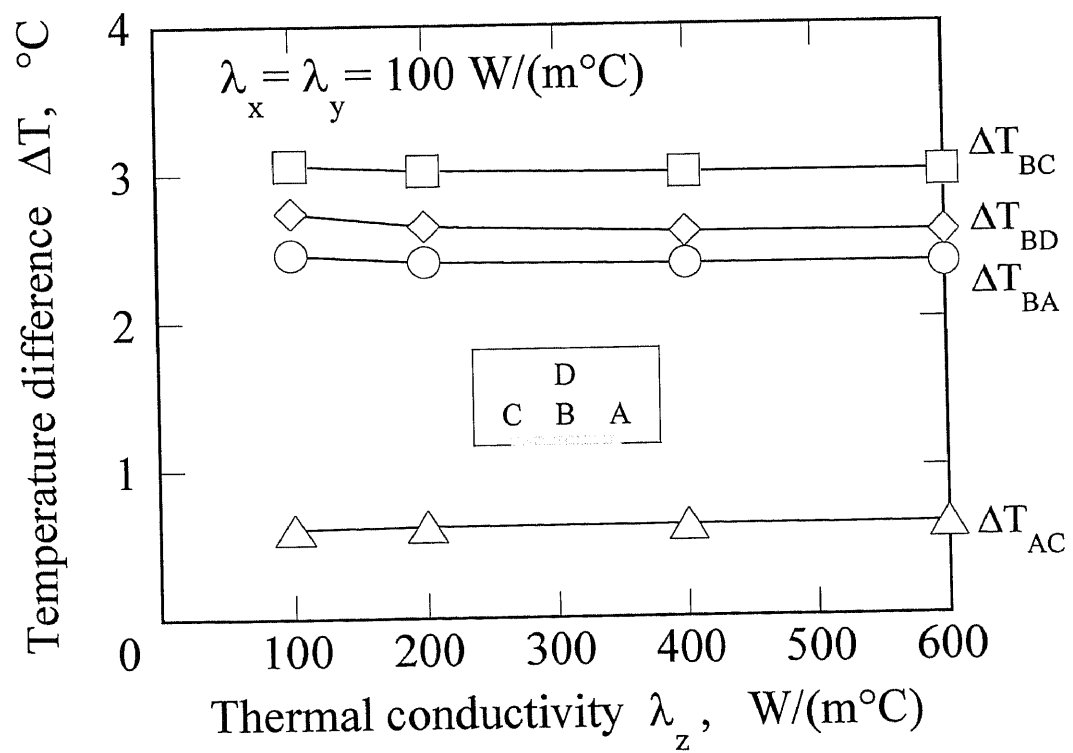


図 4.14 FEM による z 方向の熱伝導率の温度差に及ぼす効果

4-4. 結言

本研究では、サーマルヘッドと放熱板の間に熱的に異方性の異方性副層を配置し、温度均一化の効果を実験と有限要素法による熱解析によって明らかにし、ニューラルネットワークを用いて異方性副層の最適化設計をおこなった。主な結論を以下に示す。

- (1)本実験では、全方向の熱伝導率が大い、等方性副層が最も温度分布が均一であり、どの方向にもある程度の大きな熱伝導率を持った異方性副層を使用することが推奨される。
- (2)異方性副層によって熱伝導率の大きい方向に熱が伝わり、サーマルヘッドの温度分布制御が可能である事を確認した。
- (3)異方性副層とヘッド基板間の接着剤により、熱伝導が妨げられ、副層の効果が十分得られないことを確認した。異方性副層の効果を出すには熱伝導率の高い接着剤が必要である。
- (4)異方性副層の最適化設計をおこなった結果、印画品質に大きな影響を及ぼす x 方向の温度分布を均一化するためには、x 方向の熱伝導率を増加させ、y 方向の熱伝導率を減少させるのが効果的であるという結論を得た。

【参考文献】

- (1) Nagata, T., Sato, K, Watanabe, M., Pulse Durability Characteristics of Thin-Film Thermal Head , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 62, No.601 (1996), pp. 56-61.
- (2) Nagata, T., Sato, K, Watanabe, M., Printing Characteristics Estimation of Thermal Head , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No.581 (1995), pp. 286-294.
- (3) Nagata, T., Watanabe, M., 16dots/mm thermal printing head developing heat efficiency with polyimide heat insulating layer. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No.585 (1995), pp. 286-291.
- (4) Murata, A., Mochizuki, S., Morimoto, Y., Egashira, N., Printing Characteristics of Full-Color Thermal Dye-Transfer Printers Using Semiconductor Laser Heat. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No.582 (1995), pp. 328-333.
- (5) Tsushima, E., et al., Heat conduction plate for semiconductor package (in Japanese), *Patent Gazette*, (1997). Tokukai-Hei09-129793.

第5章 サーマルヘッド構造の最適化設計

5-1. 緒言

サーマルヘッドは半導体と同様にスパッタリングとエッチングを繰り返す薄膜プロセスで作製するため、その試作には費用だけでなく、数ヶ月と非常に時間が掛かってしまう。そこで、前章まで述べたように、設計には有限要素法によるシミュレーションを適用しているが、現象把握と原理設計にとどまり、最適化設計にまで至っていなかった。

前章を含めた課題解決に対し、量産後の誤差条件下にて安定で優れた特性を維持するための、いわゆる量産ロバスト設計を短期間に効率良く行う量産設計手法の確立が不可欠である。本研究ではシミュレーションと品質工学を適用し、量産における最適化設計を進め、省電力化を含めたサーマルヘッド多層構造の設計手法の確立をおこなった⁽¹⁾⁽²⁾。

5-2. 断熱層の検討

5-2-1. ヘッド構造

図 5.1 に本研究に用いたヘッドの断面構造を示す。省電力サーマルヘッドは、絶縁基板上に蓄熱層なるグレーズ層を形成し、その上に断熱層のポリイミド（以下 PI）層が形成されている⁽³⁾⁽⁴⁾。その上に PI 層の弾性変形による影響を緩和する目的で補強層を形成している。補強層には本論文の第3章に記述した Si 合金酸化膜のスパッタ保温層を適用した。補強層の上に発熱体を形成し、その両端に一对の電極を接続している。発熱抵抗体を保護する目的で、最上層には保護膜が形成されている。

5-2-2. PI 断熱層の適用 耐久性と省電力効果

図 5.2 に断熱層熱伝導率と発熱温度の関係についてのシミュレーション結果を示す。現行条件の 3.5W に対し、省電力化の目標である 2W での断熱層の熱伝導率は約 0.25W/mK を示すことが分かる。一般的に 1.0W/mK を下回る材料は有機材料となる。本研究では、サーマルヘッドの発熱体の熱に耐える有機材料保温層として、蒸着重合法で形成された PI を適用した。PI は Si 合金酸化膜のスパッタ保温層に比べ、熱拡散率で約 1/4 であり、高い断熱性を有している。図 5.3 に単発温度の測定結果を示すが、約 3 割の省電力となっている。

PI 層の剛性は従来のグレーズ層に対し約 1/3 となるため、そのままでは強度が問題となる。本研究ではこの対策として PI 層と発熱抵抗体の間に補強層を導入した。図 5.4 に各構造における耐久性と省電力の関係を示すが、お互いトレードオフの関係になっていることがわかる。

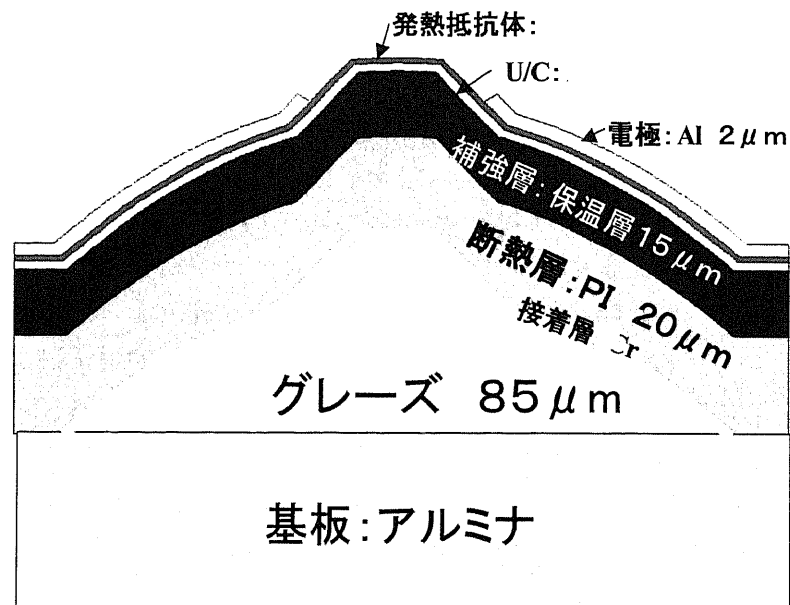


図 5.1 ヘッド断面構造

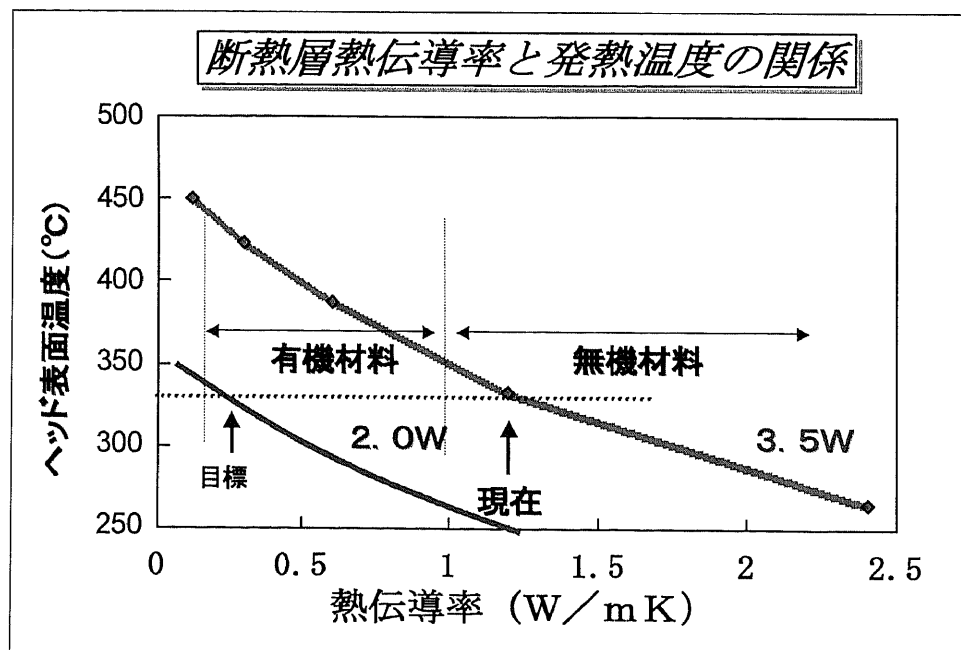


図 5.2 断熱層熱伝導率と発熱温度の関係

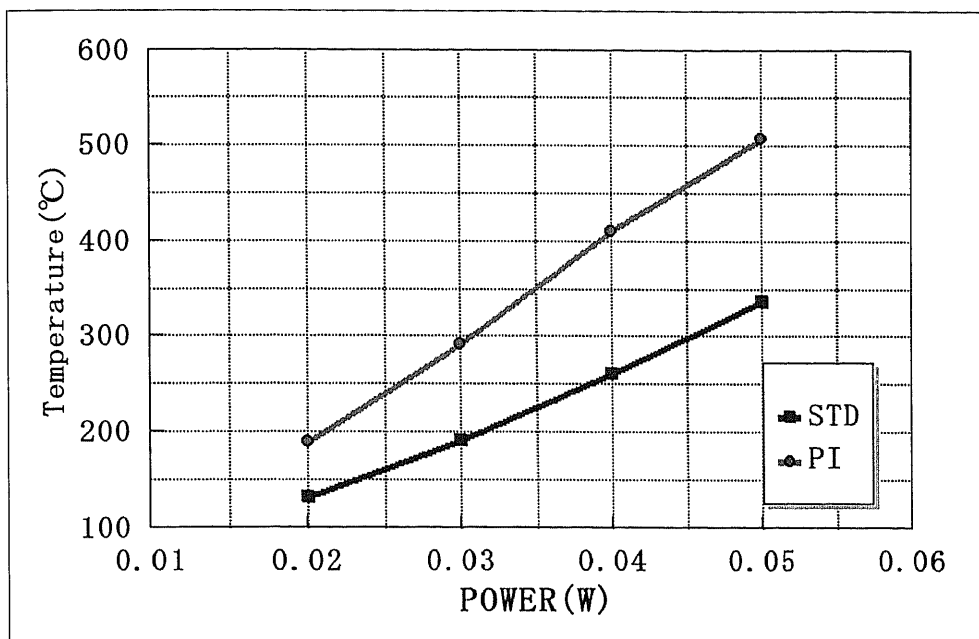


図 5.3 投入 POWER とヘッド温度

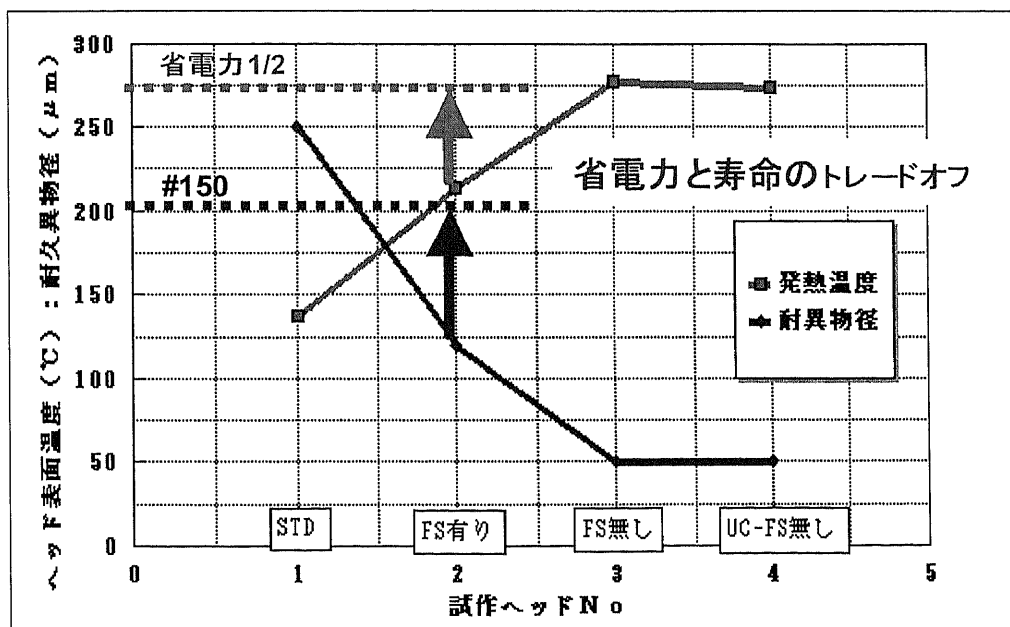


図 5.4 ヘッド構造と耐久性，省電力の関係

5-2-3. PI 蒸着重合法の採用

PI の成膜は従来、溶媒中にモノマーを溶かし、重合反応によりポリアミド酸を作製し、その溶液を基板に塗布乾燥させた後、加熱処理により PI 膜にしていた。この方法では基板に凹凸があると液だまり、液流れが生じ、膜厚にむらが生じやすい。よって本研究では図 5.5 に示すように、PI の成膜に蒸着重合法⁽⁴⁾を採用した。蒸着重合法では、真空中で加熱、蒸発させた原料モノマーを基板上で反応させてポリアミド酸膜を作製し、その後加熱イミド化して PI を形成する。この方法では図 5.6 に示すようにサーマルヘッドのように凸部がある基板形状に影響されず、複雑な形状面に均一な膜を形成することができる。従来の溶液塗布法の場合、液だまりが見られるが、蒸着重合法ではそれが見られない。その他にも、従来法に比べ真空特性(低放出ガス)、電気絶縁性(ピンホールが少ない)、耐熱性、膜厚制御性に優れている。

5-3. 最適層構造の検討と品質工学

5-3-1. 基本機能の検討

図 5.1 に解析並びに実験に用いたヘッドの断面構造を示す。サーマルヘッドは、絶縁基板上に断熱層を形成している。その上に発熱体を形成し、その両端に一对の電極を接続している。発熱抵抗体を保護する目的で、最上層には保護膜を形成している。サーマルヘッドの通電時間と発熱温度の関係を図 5.7 に示す。電力を供給している間は温度が上昇し、停止すると下降する。この温度の上昇・下降時に制御因子のバラツキにより温度のバラツキが発生する。この関係を標準 SN 比で研究することにした。サーマルヘッドは電力を供給した時に温度が早く上昇し、停止した時に早く下降するのが理想であるため、熱応答性の感度 β も求めた。

省電力化を達成させるためには、サーマルヘッドの発熱抵抗体に発生した熱をいかに印刷に寄与させることができるかが重要になる。その為に必要なサーマルヘッドの構造と熱設計には、前章でも用いた有限要素法による熱シミュレーションを適用した。この解析はヘッドとインク紙が接触しながら相対移動している状態の熱伝導を解いている。本論文の実験では、発熱体に一定時間通電し、通電後の経過時間も含めてヘッド保護膜表面での温度を計算した。

5-3-2. 因子の選定

信号因子は時間とし、この時間に対するヘッド表面温度($^{\circ}\text{C}$)を出力とした。時間は 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 (ms) をとり 2 ms まで通電するものとした。SN 比の計算は、信号因子に標準条件 (N_0) のシミュレーション出力値を、出力 y に誤差条件 (N_1, N_2) のシミュレーション出力値を用いた標準 SN 比として行った。

従来法と蒸着重合法との比較

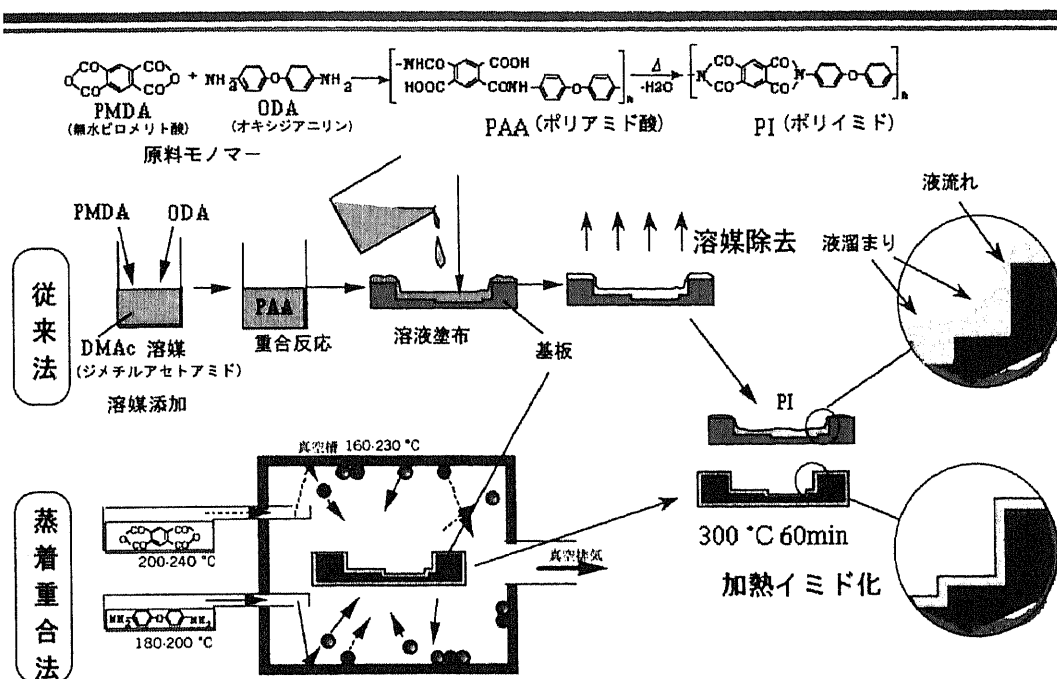


図 5.5 PI 膜の蒸着重合法

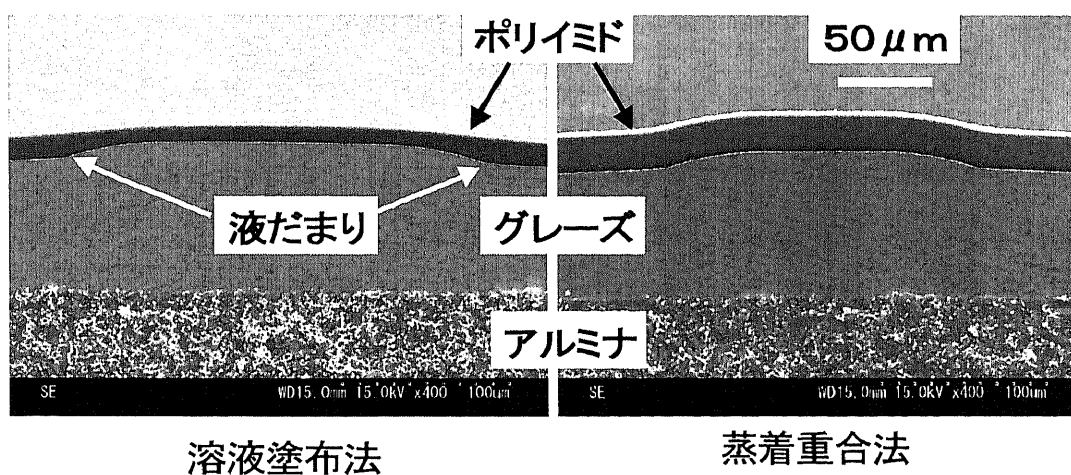


図 5.6 PI 膜の被覆性

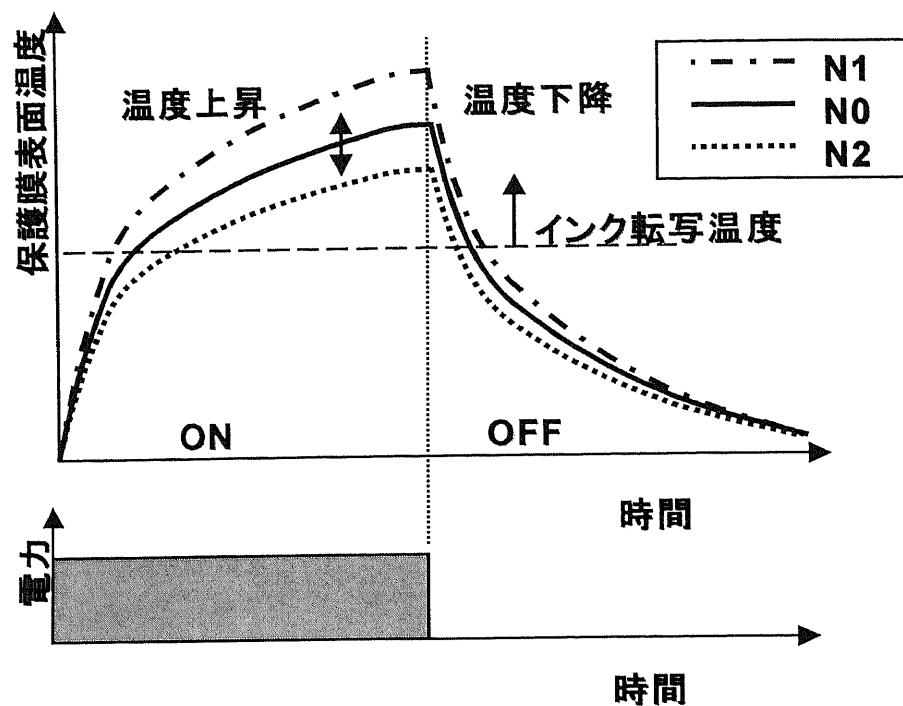


図 5.7 通电時間とヘッド表面温度の関係

表 5.1 制御因子および水準

	パラメータ	
A	基板熱拡散率 (mm^2/S)	基板材料
B	発熱体サイズ	A層形状
C	保護膜厚 (μm)	B層形状
D	保護膜熱拡散率 (mm^2/S)	B層熱拡散率
E	断熱層厚 (μm)	C層形状
F	断熱層熱拡散率 (mm^2/S)	C層熱拡散率
G	電極厚 (μm)	D層形状
H	電極熱拡散率 (mm^2/S)	D層熱拡散率

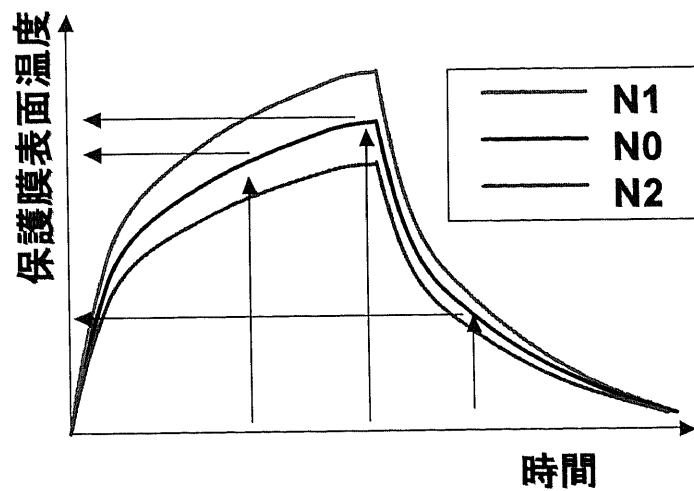
誤差因子2
ヘッド接触部材熱拡散率

表 5.2 調合誤差

制御因子	水準 1	水準 2	水準 3	誤差因子 1		
				N1	N2	N0
A: 基板材料	A	B	—	-2%	2%	0%
B: A層形状	小	中	大	-2%	2%	0%
C: B層形状	小	中	大	-10%	10%	0%
D: B層熱拡散率	小	中	大	2%	-2%	0%
E: C層形状	小	中	大	10%	-10%	0%
F: C層熱拡散率	小	中	大	-2%	2%	0%
G: D層形状	小	中	大	-10%	10%	0%
H: D層熱拡散率	小	中	大	-2%	2%	0%
誤差因子 2 : ヘッド接触部材熱拡散率				大	小	中

表 5.3 通電時間と温度上昇値

L01	Time(ms)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
	N0	404	462	500	261	182	119
	N1	428	490	531	276	192	124
	N2	382	436	472	248	173	115



制御因子はサーマルヘッドの構成要素から 8 種類を選び表 5.1 に示した。誤差因子は各制御因子の標準条件 N_0 ，に対し出力が正側(N_1)，負側(N_2)になるように $\pm 2 \sim 10\%$ の誤差を与え，さらに紙の熱拡散率も加えた。調合して， N_1 ， N_2 の 2 水準とし表 5.2 に示した。

ピーク温度が SN 比に大きく関与すること，また温度の上昇および下降の感度を求めることから，実験番号毎の N_0 におけるピーク温度の差が出ないように発熱体に与える電力を調整し表 5.3 に示した。

5-3-3. SN 比の計算

SN 比の計算は以下の式にておこなった。

$$\begin{aligned} S_T &= 408^2 + 470^2 + \cdots + 95^2 \\ &= 1347298 \quad (f_T = 12) \\ r &= 384^2 + \cdots + 99^2 = 667141 \\ L_1 &= 384 \times 408 + 442 \times 470 + \cdots + 99 \times 104 \\ &= 709775 \\ L_2 &= 384 \times 362 + 442 \times 416 + \cdots + 99 \times 95 \\ &= 628531 \\ S_\beta &= (L_1 + L_2)^2 / (2 \times r) = 1342343 \quad (f_\beta = 1) \\ S_{N*\beta} &= (L_1^2 + L_2^2) / r - S_\beta = 4946 \quad (f_{N*\beta} = 1) \\ S_e &= S_T - S_\beta - S_{N*\beta} = 6.9 \quad (f_e = 10) \\ S_N &= S_e + S_{N*\beta} = 4953 \quad (f_N = 11) \\ V_e &= S_e / f_e = 0.69 \\ V_N &= S_N / f_N = 450 \\ \eta &= 10 \log((S_\beta - V_e) / (2 \times r \times V_N)) = -26.5 \end{aligned}$$

この式にて求められた SN 比の要因効果図を図 5.8 に示す。

図 5.8 より，現行条件は $A_1B_2C_2D_2E_2F_1G_1H_2$ であるが，バラツキの少ない最適条件は $A_1B_3C_1D_1E_2F_1G_2H_3$ であることがわかる。

5-3-4. 確認実験とチューニング

確認実験の結果は表 5.4 に示す通りであり，高い再現性が得られた。よって量産の誤差条件下において安定な特性が得られたことになる。

温度の上昇 (βI) と下降 (βII) では，図 5.9 に示すように，別の機能と考えられるので，別々に感度を求めることにした。感度は SN 比の最適条件の N_0 を代表的な特性として算出した。また，下降では，ピーク温度からの温度の降下分を用いて感度を求めた。そのため，2 次項以下をチューニングする意味はない。表 5.5 および表 5.6 にデータの一例を示す。

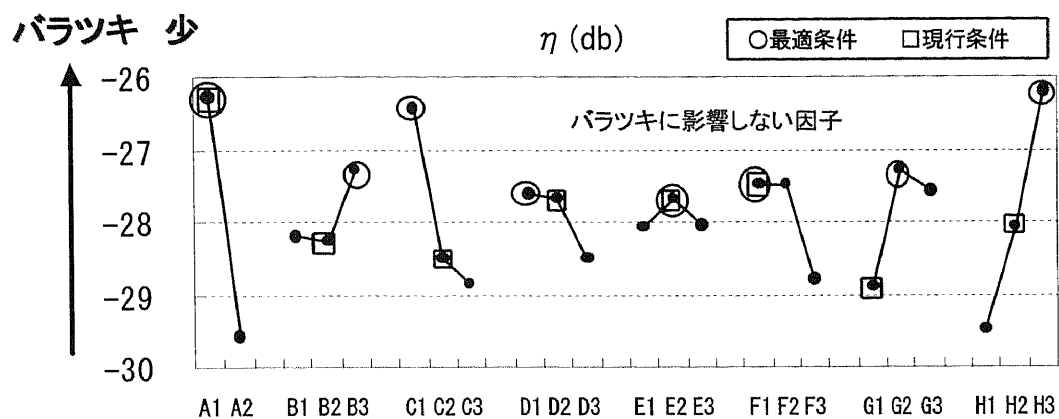


図 5.8 SN 比の要因効果図

表 5.4 確認実験結果

	最適	現行	利得
推定値	-20.8	-30.7	9.9
確認実験	-22.2	-33.1	10.8

表 5.5 温度上昇の例

Time(ms)	1.0	1.5	2.0
最適N0	347	424	480
L01N0	384	442	480

表 5.6 温度下降の例

Time(ms)	0.5	1.0	2.0
最適N0	174	254	337
L01N0	239	318	381

・温度上昇 (β I)

$$r = 347^2 + 424^2 + 480^2 = 530553$$

$$L = 347 \times 384 + 424 \times 442 + 480 \times 480 = 551039$$

$$\beta \text{ I} = 551039 / 530553 = 1.0386$$

・温度下降 (β II)

$$r = 174^2 + 254^2 + 337^2 = 208559$$

$$L = 174 \times 239 + 254 \times 318 + 337 \times 381 = 251090$$

$$\beta \text{ II} = 251090 / 208559 = 1.2039$$

感度の要因効果図を図 5.10 および図 5.11 に示す。温度上昇と温度下降でほぼ同じ傾向を示した。各実験の印加電力での要因効果図を図 5.12 に示す。図 5.12 より感度とほぼ逆の傾向を示した。このことは、感度の向上が省電力になることを意味している。本論文では感度でチューニングすることにした。

5-3-5. チューニング後の条件と特性確認結果

SN 比の要因効果図および感度の要因効果図より、SN 比の影響が少なく、感度の影響が大きい因子 E, F を用いて、感度のチューニングを行った。チューニング後の条件は $A_1B_3C_1D_1E_1F_2G_2H_3$ である。

電力を固定し、チューニング前後の条件にて表面温度の熱応答特性を確認した。チューニング前の結果を図 5.13 に、チューニング後の結果を図 5.14 に示す。チューニング後の条件はチューニング前に比較して、バラツキが小さく、ピーク温度が約 250℃ 高くなっている。つまり約 250℃ 分の印加エネルギーを省く事が出来ることになり、本研究によって省電力化が従来比 1/2 が出来ることが分かった。

5-4. 結言

本研究では、誤差条件下にて安定で且つ省電力性能に優れた特性をもつサーマルヘッドを試作無しで最適化設計を行うために、シミュレーションと品質工学を適用し最適化設計を進めた。主な結論を以下に示す。

- (1) SN 比で約 10db 削減することができ、量産の誤差条件下でのバラツキが小さくなることを確認した。
- (2) 本研究で検討した新たなヘッド構造によって、従来課題であったヘッドの消費電力を従来比 1/2 と半減することができた。
- (3) 試作無しでシミュレーションと品質工学を適用し最適化設計を進めた結果、従来の試作から評価終了まで 3 ヶ月～半年かかっていたものを約 10 日で終了させることができ量産ロバスト設計手法が確立できた。

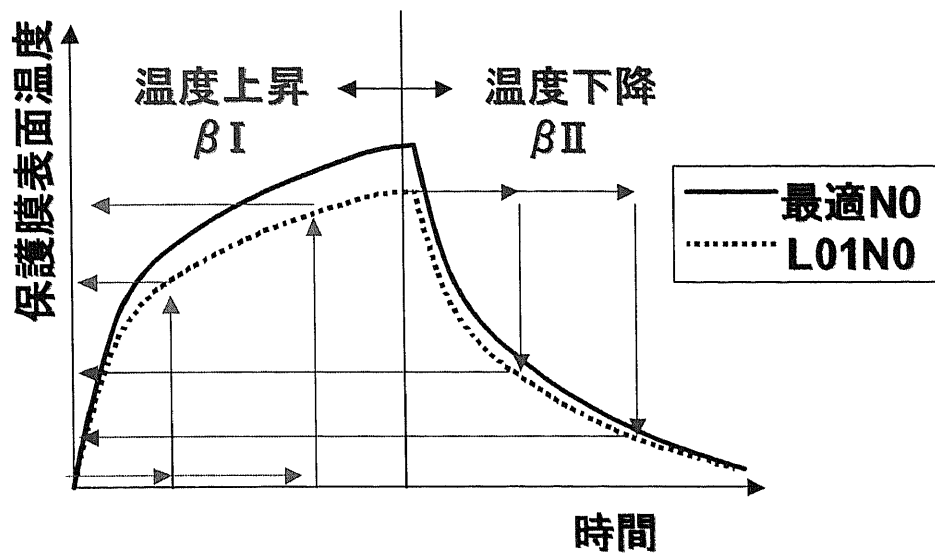


図 5.9 温度上昇と下降の関係

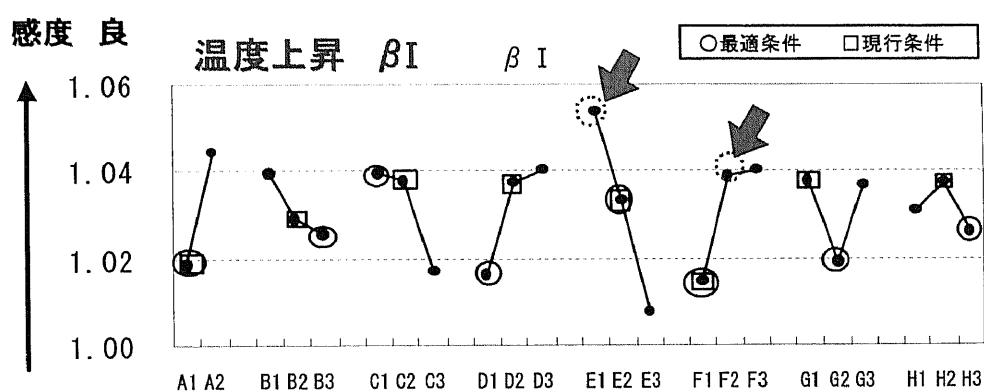


図 5.10 温度上昇時の感度

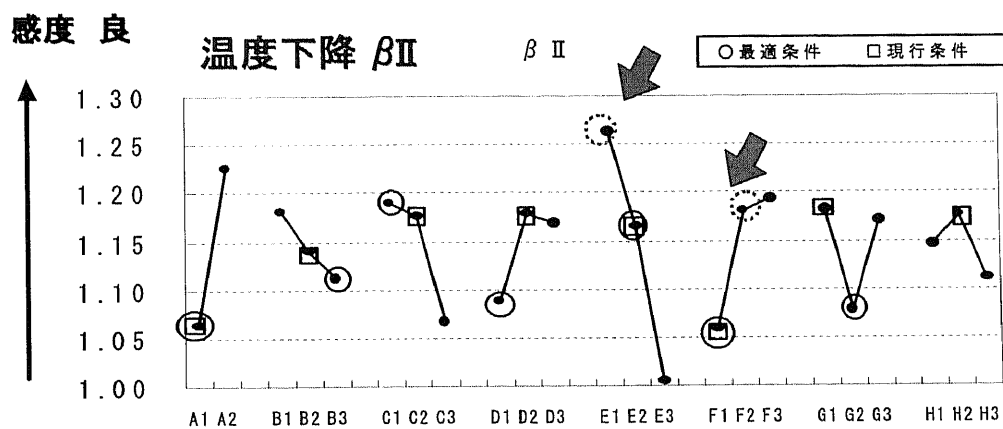


図 5.11 温度下降時の感度

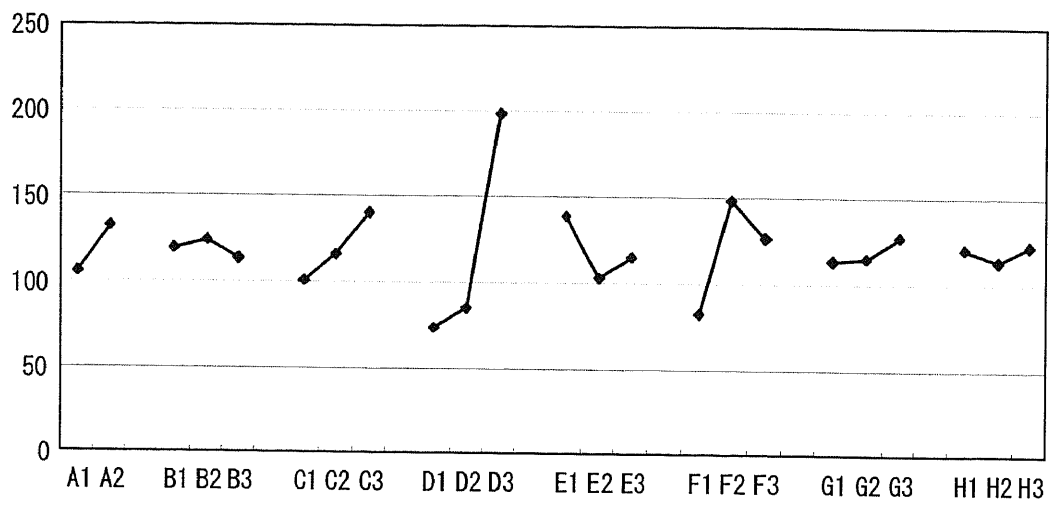


図 5.12 各実験の印加電力での要因効果図

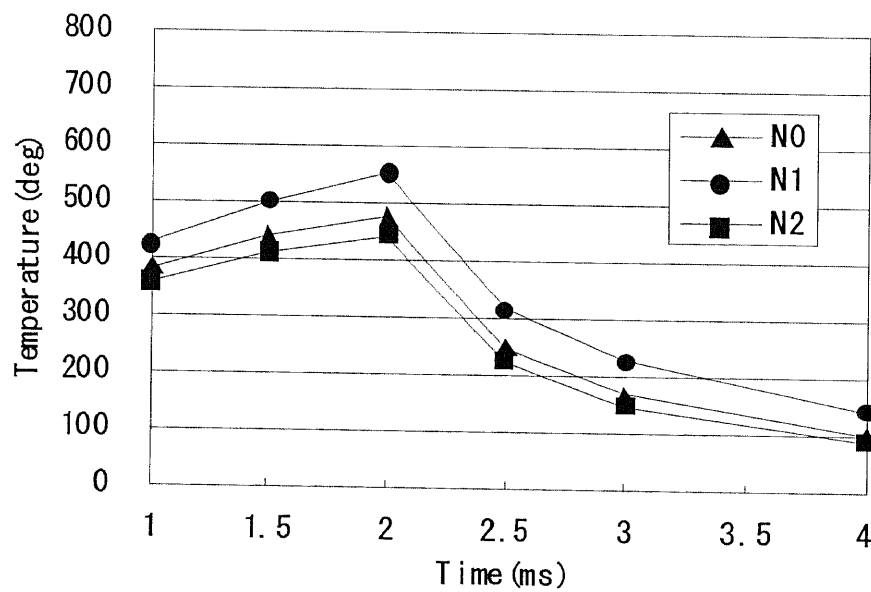


図 5.13 熱応答波形 (チューニング前)

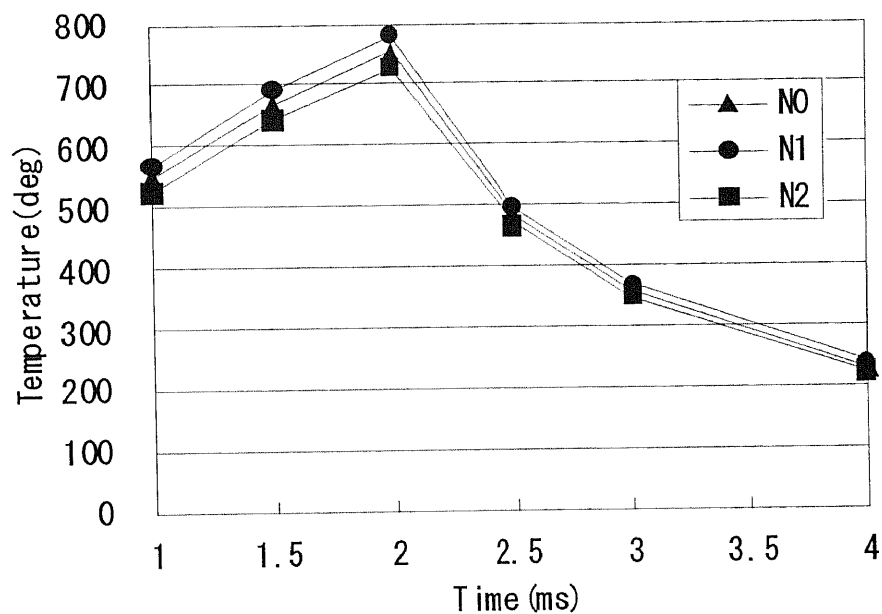


図 5.14 熱応答波形（チューニング後）

【参考文献】

- (1)田口玄一：標準化と品質管理 Vol.54No.5 機能性の評価
- (2)溝口修理他：QES2001 論文集 撮りつきりカメラシャッター機構の安定性のタグチメソッドによる設計
- (3)Shibata.S,Examination of High-Speed,Low Power Consumption Thermal Head, IEICE Trans Electron, VolE78-C, No11, (1995), pp.1632-1637.
- (4)永田達也・渡邊道弘, ポリイミド蓄熱層を用いた 16dot/mm 感熱記録ヘッド開発, 機論, 61-585, B(1995-5.), pp.286-291

第6章 結論

本論文では、まずサーマルヘッドの接触圧力の解析並びに真実接触面積による印刷用紙の印刷濃度評価を行い、サーマルヘッドと媒体との接触状態を明らかにした。普通紙印刷に対応したサーマルヘッドの設計では、ヘッドの形状と加圧条件、並びにヘッド発熱体の設置位置等の設計指針を得た。また熱転写プリンタの高精細印刷、高速印刷に対応したサーマルヘッドの設計では、ヘッドの熱応答特性並びにヘッド形状の影響を明らかにし設計指針を得ることができた。さらに、印刷濃度ムラを解消するためのヘッドの放熱制御と高画質化設計に対応したサーマルヘッドの設計では異方性副層の適用と最適化についての設計指針を、そして熱転写プリンタをモバイルプリンタとするためのサーマルヘッドの省電力化設計では断熱層採用と構造検討についてシミュレーションと品質工学を適用した量産設計の指針を得ることができた。

本論文で得られた主要な結果に基づき本論文を総括すると以下のようになる。

1. 接触解析と粘弾性解析によって、普通紙印刷に優れるヘッド形状、加圧条件を見出した。
2. ヘッドの構造材料を見直し、熱応答特性の改良を行ったことにより、従来構造では達成出来なかった 600dpi、多階調印刷、1200dpi の高精細、高解像度の可能性を確認した。
3. 熱応答特性を改善するためにヘッド構造の最適化を行った。その結果、溶融型熱転写プリンタでは従来難しいとされた 40IPS の速度が、昇華型熱転写プリンタでは 3IPS の速度が、可能であることを確認した。
4. 異方性副層を用いサーマルヘッド基板の放熱制御を最適化することで、ヘッド基板でのムラを改善することが確認された。
5. ヘッドに断熱層を適用し、層構造をシミュレーションと品質工学を用いて最適化することで特性バラツキが小さい省電力ヘッドが可能であることがわかった。
6. 試作無しでシミュレーションと品質工学を適用し最適化設計を進めた結果、従来の試作から評価終了まで3ヶ月～半年かかっていたものを約10日で終了させることができ量産ロバスト設計手法が確立できた。

以上より、従来の熱転写プリンタでは実現が困難であった高性能熱転写プリンタの開発のためのサーマルヘッドの設計指針を得ることができた。また本論文によって得られた結果は、今後のサーマルヘッド開発にとってその開発の方向性を示すことができ、高性能熱転写プリンタ開発の成功に大きく貢献した。

謝辞

本学位論文をまとめるに当たり、終止懇切なるご指導とご助言を賜りました新潟大学工学部教授、新田 勇先生に心より感謝申し上げます。

岩手大学工学部教授、菅野良弘先生、同じく岩手大学工学部助教授、西村文仁先生、廣瀬宏一先生には、本研究の終止にわたり適切なるご指導ご鞭撻を賜り、深く感謝申し上げます。

本研究内容は、筆者がアルプス電気(株)において入社以来担当させていただいております高性能熱転写プリンタのサーマルヘッド開発の最適化設計をテーマとしたものであり、開発テーマの設定並びに大変貴重なる研究の機会をいただきましたアルプス電気(株)営業本部ペリフェラル営業部長築田公咲様ならびにペリフェラル事業部生産システム部加工技術開発グループ主幹技師日比野郁夫様に心より感謝申し上げます。またシステム機器事業部盛岡工場が閉鎖し、現在のペリフェラル事業部小名浜工場に移動した後も、本研究の継続とご支援をいただきましたペリフェラル事業部第3技術部部付部長大森英樹様に感謝申し上げます。またサーマルヘッドの開発においては元アルプス電気(株)主幹技師白川亨志様ならびにアルプス電気(株)主任技師対馬登様、中谷諱文様に大変お世話になりました。また熱伝導解析に対してはアルプス電気(株)石黒克之様、星野 久様、元アルプス電気(株)伊藤尚志様にお世話になりました。サーマルヘッドの設計評価に対しては和字慶知子様、佐々木恒之様にお世話になりました。品質工学の取り組みに対しては、長浜谷祐二様、柱 博志様、二神光夫様にお世話になりました。そのほか、本研究の推進に対して多くの方からご指導ご鞭撻ご協力を賜りました。お世話になりました皆様に深甚の謝意を表します。

(株)アイカマス・ラボ片野圭二様には、日頃より多くの励ましを頂戴しましたことを、厚く御礼申し上げます。

最後に、本学位論文をまとめるに当たり陰ながら支えていただいた妻、そして終止応援してくれた息子達、そして今は亡き両親に心より感謝いたします。