

光熱変換手法を用いた  
高解像度紙面発色型ディスプレイの研究

東京大学大学院 工学系研究科

先端学際工学専攻

37097191 山田 啓己

指導教員 廣瀬通孝教授

## 図・表目次 8

### 第1章 序論 10

- 1.1 本研究の背景 10
- 1.2 本研究の目的 11
- 1.3 本研究の社会的ニーズと予想される波及効果 11
- 1.4 本研究の寄与 11
- 1.5 本論文の構成 14

### 第2章 発光と発色による情報提示技術と統合アプローチ 17

- 2.1 緒言 17
- 2.2 2種のディスプレイ 18
  - 2.2.1 発光型ディスプレイ 18
  - 2.2.2 発色型ディスプレイ 18
    - 2.2.2.1 本研究における「発色型ディスプレイ」 19
- 2.3 発光型ディスプレイ技術の変遷 20
  - 2.3.1 技術発明の歴史 20
  - 2.3.2 根幹技術分類 22
  - 2.3.3 発光型ディスプレイの立ち位置 25
  - 2.3.4 発光型ディスプレイの特長と問題点 25
- 2.4 紙メディアの変遷 26
  - 2.4.1 技術発展の歴史 27
    - 2.4.1.1 紙の発明からその素材の変遷まで 27
    - 2.4.1.2 製紙法と印刷法の技術発達と伝播 29
  - 2.4.2 規格と物性 35
    - 2.4.2.1 計量・規格と流通 35
    - 2.4.2.2 紙による構成・造形・デザイン 35
    - 2.4.2.3 構造・機械的特性と固有の性質 39
    - 2.4.2.4 他素材との比較 41
  - 2.4.3 紙メディアの立ち位置 41
  - 2.4.4 紙の特長と問題点 44
- 2.5 両者の対比 45
- 2.6 統合のアプローチ 45
  - 2.6.1 ペーパーライクディスプレイ - 並立のための新たなソリューション -  
45
    - 2.6.1.1 ペーパーライクディスプレイの概要と狙い 45

2.6.1.2	電子ペーパーの技術と歴史	47
2.6.1.3	フレキシブルディスプレイ関連技術	49
2.6.1.4	その他のペーパーライクディスプレイ技術	50
2.6.2	ペーパーライクディスプレイの現状	50
2.6.2.1	電子ペーパーの普及状況	50
2.6.2.2	予想される原因	51
2.6.2.3	本質的問題点	51
2.6.3	プロジェクションマッピング - 物的特性を考慮した投影技術 -	51
2.6.3.1	概要と利点	51
2.6.3.2	問題点	52
2.6.4	統合アプローチで解決できない問題	52
2.7	両者の進化におけるの起点と終点	53
2.8	紙面発色型ディスプレイの構成要素とその特性	54
2.8.1	紙の特性	54
2.8.1.1	特性概覧	54
2.8.1.2	本研究に継承する特性	56
2.8.2	色素の特性	56
2.8.2.1	特性概覧	56
2.8.2.2	本研究に継承する特性	56
2.9	結言	57

## 第3章 従来の発色型ディスプレイの問題点 58

3.1	緒言	58
3.2	機能性色素	58
3.2.1	機能性色素の概要	58
3.2.2	機能性色素を用いる理由	59
3.2.3	バリエーションと熱感応型機能性色素の有用性	59
3.3	熱感応型機能性色素の選択	62
3.3.1	サーモクロミックインクの構造と特性	63
3.3.2	サーモクロミックインク導入の利点	65
3.3.3	感熱紙の特性	67
3.4	熱感応型機能性色素を用いた研究事例と試作事例	67
3.4.1	従来研究・既存技術と事例	67
3.4.2	従来型の基本的な熱制御手法	68
3.4.3	試作事例	69
3.4.3.1	試作事例1 パネル型アイコンシステム	69
3.4.3.2	試作事例2 色が変わる糸型ディスプレイ	70
3.5	熱設計技術の改良の必要性	71
3.5.1	既存事例と試作から見る問題点	71
3.5.1.1	解像度の問題	71
3.5.1.2	応答性の問題	72

3.5.1.3 安定性の問題 72

3.5.1.4 その他の問題 72

3.5.2 従来技術により解決されていない本質的問題点 73

3.6 結言 73

## 第4章 本研究の提案手法 74

4.1 緒言 74

4.2 従来技術の問題点の改善指針 74

4.3 エネルギー変換による熱制御の導入 75

4.4 空間分離制御の導入 76

4.5 光熱変換手法の提案 76

4.5.1 概要と利点 76

4.5.2 解像度の向上への寄与 78

4.5.3 応答性の向上への寄与 78

4.5.4 安定性の向上への寄与 78

4.6 結言 78

## 第5章 光熱変換による熱制御 79

5.1 緒言 79

5.2 光熱変換原理 79

5.2.1 光熱変換の基本的機構 79

5.2.1.1 照射光 80

5.2.1.2 光熱変換媒体素材 80

5.2.1.3 紙 80

5.2.1.4 熱感応型機能性色素 80

5.2.1.5 空間分離 80

5.2.2 冷却方式 80

5.2.2.1 空冷を用いる理由と熱伝導素材・熱感応型色素の冷却特性 80

5.2.2.2 フィードバック制御について 81

5.3 照射光制御 81

5.3.1 光照射方式 81

5.3.2 光照射デバイスの特徴と選定 82

5.3.3 レーザー制御 83

5.3.4 赤外LEDによる制御 84

5.4	コンポーネント構成図	85
5.5	性能の向上程度	85
5.6	結言	86

## 第6章 表示応答解析 87

6.1	緒言	87
6.2	発色と消色における温度制御	87
6.2.1	熱挙動概要	87
6.2.2	熱感応型機能性色素のタイプによる挙動	87
6.2.3	温度上昇プロセスの概要	88
6.2.4	温度下降プロセスの概要	88
6.2.5	理論式と境界条件	90
6.2.5.1	一次元非定常熱伝導	90
6.2.5.2	光熱変換及び雰囲気との熱伝達と境界条件	91
6.2.5.3	紙の断熱材近似効果と対流伝熱の影響の考察	93
6.2.5.4	表示の定常状態への移行条件	94
6.3	評価の指針	95
6.3.1	光照射方式の違いによる応答特性と表示内容	95
6.3.2	測定手法	95
6.3.3	解像度評価の指針	96
6.3.4	応答性評価の指針	96
6.3.5	安定性評価の指針	99
6.4	構成部材の物性値と条件	99
6.4.1	紙	99
6.4.2	光熱変換媒体	100
6.4.3	熱感応型機能性色素	100
6.4.4	光照射デバイス	101
6.4.4.1	赤外レーザーとガルバノメータ	101
6.4.4.2	赤外LED	101
6.4.4.3	可視光レーザー彫刻デバイス	103
6.4.5	雰囲気	103
6.5	シミュレーションと実測値	103
6.5.1	ドット表示応答	103
6.5.1.1	赤外LEDとサーモクロミックインク	103
6.5.1.2	赤外レーザーとサーモクロミックインク	104
6.5.1.3	赤外レーザーと感熱紙	105
6.5.1.4	可視光レーザーと感熱紙	105
6.5.2	高速スキャン方式による表示応答	106
6.6	設計指針	108
6.6.1	注視時間との比較からみる色素種類・光源制御手法・応答性・安定性評価からのコンテンツ適性	108

6.7 紙の特性によるパラメータチューニング	109
6.7.1 温度挙動への影響力の考察	110
6.8 性能向上のためのポイント	112
6.9 結言	112
<b>第7章 システムのモデル化</b>	<b>114</b>
7.1 緒言	114
7.2 システムのモデル化	114
7.2.1 モデル化の意義	114
7.2.2 システムモデルの概要	114
7.2.3 UMLによるシステム記述	116
7.2.4 数式によるモデルの統合表現	118
7.3 結言	120
<b>第8章 応用と考察</b>	<b>121</b>
8.1 緒言	121
8.2 表現能力とテーマ	121
8.3 応用例1：サーモクロミックインクと和紙による肖像画像描画システム	122
8.3.1 概要	122
8.3.2 システム構成	123
8.3.3 評価と考察	124
8.4 応用例2：カーボン紙と感熱紙による手書きメッセージ表示システム	126
8.4.1 概要	126
8.4.2 システム構成	127
8.4.3 システムモデルと交換変数	128
8.4.4 評価と考察	128
8.5 応用例の総括	130
8.6 結言	130
<b>第9章 結論</b>	<b>131</b>
9.1 緒言	131
9.2 本研究におけるディスプレイ総括	131
9.2.1 構成	131
9.2.2 挙動	132
9.2.3 発色型ディスプレイとしての性能向上程度	133
9.3 諸項目の評価	135
9.3.1 社会的意義からの評価	135
9.3.2 メディアとしての評価	135
9.3.3 理論式と実験からのディスプレイ性能評価	135
9.3.4 システムモデルからの評価	136
9.3.5 応用例からの評価	136

9.4 応用と展望	136
9.4.1 非フラットなスクリーンへの光照射	136
9.4.1.1 遮蔽を生まない塑性変形条件	136
9.4.1.2 照射面の形状への対応	137
9.4.1.3 照射エネルギーの減衰程度	138
9.4.2 システムの改良指針	140
9.4.2.1 色彩表現能力の多様化	141
9.4.2.2 立体形状への応用	142
9.4.2.3 性能のさらなる向上	142
9.4.2.4 素材の多様化	142
9.4.3 課題	142
9.5 結言	143
<b>参考文献</b>	<b>144</b>
<b>研究業績</b>	<b>153</b>
国際会議（査読有）	153
論文（査読有）	153
論文（査読無）	153
口頭発表（査読無）	154
受賞歴	154
展示歴	154
<b>付録 A アレイ光源方式での赤外LEDの同時制御型システムの習作</b>	<b>155</b>
<b>付録 B 赤外LEDの個別制御回路</b>	<b>158</b>
<b>謝辞</b>	<b>159</b>

# 図・表目次

図 1.1	本研究により実現される解像度の程度	12
図 1.2	本研究により実現される立ち上がり表示挙動	13
図 1.3	本研究により実現される表示安定制御の概要	13
表 2.1	ディスプレイの機構分類	21
図 2.1	CRTディスプレイの基本機構[68]	22
図 2.2	FEDディスプレイの基本機構[68]	23
図 2.3	LCDディスプレイの基本機構（透過型TFT液晶例）[68]	24
図 2.4	PDPディスプレイの基本機構[68]	24
図 2.5	ELディスプレイの基本機構[68]	25
図 2.6	日本における紙の生産量と国民1人あたりの消費量の推移	27
表 2.2	機能紙分類	34
表 2.3	素材としての紙に対する印象[73]	36
表 2.4	紙のサイズ規格[73]	37
表 2.5	紙の加工・造形分類[73]	38
図 2.7	紙の種類・用途と生産量[69]	42
表 2.6	フレキシブル特性と特徴	46
図 2.8	マイクロカプセル電気泳動型電子ペーパーの基本構造[68]	48
表 3.1	機能性色素の機能と応用分野	59
図 3.1	単色サーモクロミックインクの閾値温度近辺での表示特性例	63
図 3.2	単色サーモクロミックインクと液晶インクの温度による表示特性例	63
図 3.3	ロイコ色素の可逆反応	64
図 3.4	2種のロイコ色素の化学構造	64
図 3.5	酸と塩基による可逆反応	64
図 3.6	フルオラン色素	65
図 3.7	重ね塗りのパターン	65
表 3.2	色とドナー性置換基の対応関係	66
図 3.8	感熱紙の表示構造[66]	67
図 3.9	パネル型アイコンシステム	69
図 3.10	パネル型アイコンシステム制御機構	69
図 3.11	色変化する糸によるインスタレーション	70
図 3.12	糸の色制御システム	71
図 3.13	ペルチェ素子によるマトリクス型温度制御システム	73
図 4.1	従来型の熱制御との比較	75
図 4.2	エネルギー変換と空間的分離からなる光熱変換機構	77
図 5.1	光熱変換の基本的機構	79
図 5.2	レーザー制御用2軸ガルバノメータ	83
図 5.3	2値化画像のラスタースキャンの例	83
図 5.4	レーザー彫刻機	84
図 5.5	赤外LEDマトリクスアレイ	85
図 5.6	コンポーネント構成図	85
図 6.1	表示と消去における熱力学的挙動の概要	88
図 6.2	熱変化と表示挙動（連続切り替え表示型）	89
図 6.3	熱変化と表示挙動（永続表示型）	89
図 6.4	DISTRIBUTIONS OF INTERVALS OF VOLUNTARY AND INVOLUNTARY MOVEMENTS IN EXPERIMENT 1 (D) (OHTANI, 1971)[130]	98
表 6.1	物性値（紙）	100

表 6.2	物性値 (光熱変換媒体)	100
表 6.3	仕様 (赤外レーザー)	101
表 6.4	仕様 (ガルバノメーター)	101
図 6.5	LEDのアレイ状配列	102
表 6.5	仕様 (赤外LED)	102
表 6.6	仕様 (青色レーザー)	103
図 6.6	ドット表示応答 (赤外LEDと単色サーモクロミックインク)	104
図 6.7	ドット表示応答 (赤外レーザーと単色サーモクロミックインク)	104
図 6.8	ドット表示応答 (赤外レーザーと感熱紙)	105
図 6.9	ドット表示応答 (可視光レーザーと感熱紙)	106
図 6.10	高速スキャン方式 (ラスタースキャン)	107
図 6.11	デバイスと注視時間の対応	108
図 6.12	光源出力の変化に対する温度挙動の比較	111
図 6.13	紙の物性値の変化に対する温度挙動の比較	111
図 7.1	システムモデルを介したコミュニケーション	115
図 7.2	システムのクラス図	116
図 7.3	シーケンス図と状態遷移	117
図 8.1	応用例 1 作品概観	122
図 8.2	応用例 1 システム構成	123
図 8.3	応用例 1 嵩高紙による温度変化比較	125
図 8.4	応用例 2 作品概観	126
図 8.5	応用例 2 システム構成	127
図 9.1	システム構成	131
図 9.2	挙動	132
図 9.3	解像度の向上程度	134
図 9.4	遮蔽形状への光照射	137
図 9.5	楕円照射スポットのビームパワー減衰	140
図 9.6	紙とは異なる素材の応用例	141
図 9.7	混色による表現色域の拡充	141
図 10.1	紙と液晶インクによる展示空間向けキャプションシステム	155
図 10.2	単色サーモクロミックインクと液晶インクによるインタラクティブキャプションシステム	156
図 10.3	色変化を起こす絵の試作事例	157
図 10.4	赤外LED個別制御基板	158

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

機械工学技術、情報工学技術の発達により、様々なディスプレイの研究開発が進んでいる。特にモバイル機器をはじめとするデバイスの小型化や三次元表現、プロジェクション技術、高解像度化などの多方面・多分野にわたる技術革新は著しい。それらは我々の日常生活に既に身近なものとして定着し親しまれ、今後もさらなる技術革新が求められている。

これらの革新的技術によるディスプレイが、我々の生活に入り込むことにより、我々は様々な形態のディスプレイから多様なサービスを楽しむようになった。なおも発展していくディスプレイ技術は、現段階で「それがいかなる場所で、どういった形で、いかなる目的で使うか」といった、ユーザーの多様な欲求に十分に答えることができつつあるように思える。

しかし、我々の生活に入り込んでいる多くのディスプレイ機器は、ユーザーの要求に対し決して万能なものではない。ユーザーの用途によっては、道具としての選択肢から外さざるを得ないことも多い。その理由はコンテンツ、使用状況、ユーザーの技能など様々な要因に左右されるものである。こうした問題は、ユーザーに「電子機器ではないディスプレイ」を使用するという、伝統的かつ簡便なもう一つの選択肢を与える。その主流にあるのは、歴史、技術的蓄積が最も豊富かつ生活において最も身近な紙である。現実には、紙による電子制御によらない古典的手法・素材による情報提示は、現代の技術革新の波の中でも生き残り、それらもまた我々の生活に不可欠なものとなっている。すなわち、現代は高度化しつつある電子制御型ディスプレイと、古来からある紙メディアの共存状態にあるとすることができるだろう。すなわち、現在多方面に技術進歩した電子制御型ディスプレイは一見して既に万能なものであるように見えるが、ユーザーの欲求する目的や表示したいコンテンツを、ユーザーの思う通りに十二分かつ繊細に表現できる段階には未だ至っておらず、その空隙を紙メディアが補っている状態が現状であると言える。すなわち、現在の情報提示技術は電子制御型ディスプレイと紙メディアの並立状況にあると捉えることができる。この並立状況に至るまでの両者の歴史的技術変遷の詳細については第2章に譲ることとしたい。情報提示の方式の観点からは、電子制御型ディスプレイを主とする発光型、紙メディアを主とする発色型の情報提示の並立構造が構築されていると見ることができるだろう。

しかし、発光型の情報提示手法が多様化・高機能化する一方で、発色型の情報提示手法は、技術的に既存の紙メディアの領域を脱することは未だ出来ずにいる。その理由は紙表面の発色媒体の電子制御が極めて難しく、またディスプレイとして実用に耐えうる性能、具体的には優れた解像度、応答性、安定性などが実現されていないことである。そのため、紙メディアはディスプレイとしての技術的ステージを上げることなく、その表現能力は大きく変革されることなく、従来と変わらぬ姿で存在し続けている。

## 1.2 本研究の目的

本研究の目的は、従来手法では困難であり、そのため実現できなかった、紙面における発色型情報提示の表現性能向上を実現し、その設計手法を明らかにすることである。表現性能の向上とは、具体的には時間軸を与え、その上で幅広い表現を可能とする従来の紙メディアの解像度の高さを保つことであり、それに伴い時間軸を持つディスプレイの機能としての表示の応答性や安定性も改良対象要件に含まれる。性能向上がなされた新しい紙面発色型ディスプレイは、従来持たなかった表現上の時間軸を得、さらに解像度などの表現力を損なうことなく、新しい表現を可能とするディスプレイとなる。そのために、紙面発色型電子制御ディスプレイの性能向上をなす上で問題点を解決するシステム開発の新しいアプローチを提案し、従来方式による制御では実現できなかった、紙と色素からなる従来の部材構成を崩すことなく、かつ豊富な情報を表現できるディスプレイの設計指針を目指す。具体的には、従来型の発色型ディスプレイの抱えていた低解像度、低応答性、低安定性などの問題点を、エネルギー変換と空間分離制御から成る光熱変換機構の導入により解決し、紙面発色型ディスプレイの従来特性をそのまま生かしつつ、電子制御による高解像度表現を行うことのできるディスプレイ機構の実現を目的とする。

## 1.3 本研究の社会的ニーズと予想される波及効果

前述のように、ディスプレイの新規開発の需要は、現在においても高まり続ける一方であり、様々な用途や形態のものが生み出されている。一方で、紙を中心とする電子制御によらない情報提示手法も失われておらず、双方が目的や用途、嗜好に応じて使い分けられる形で共存している。それぞれの特長や欠点を正しく把握した上で、双方の特長を引き出し、正しく使用することができれば、現状のニーズに応えながらも、電子制御ディスプレイと紙メディア双方の更なる発展と、新しい体験が望めるであろう。

本研究は紙メディアによる情報提示に時間軸を与え、さらに高い空間解像度を与えることで、同メディアのステージを上げることを目指している。これは現在なおも需要の高い紙メディアを、その特長を消すことなく大きく生かす試みであり、ディスプレイ産業に貢献することを目指すものである。

## 1.4 本研究の寄与

本研究は紙面発色型ディスプレイの情報表現性能の向上に寄与する。紙と熱感応型機能性色素、及び従来型の熱制御手法に取って代わる光熱変換原理の導入により、既存の電子制御ディスプレイでは不可能だった、紙素材の物的特性・機能特性を生かしたディスプレイが実現でき、同時に従来では不可能であった、高い解像度、優れた応答性や安定性を実現することができる。

本研究におけるディスプレイの新規設計によって生じる情報表現の豊かさとは、紙本来の情報提示のあり方のまま電子制御性すなわち時間軸が付与され、解像度、応答性、安定性などの要素が向上することにある。すなわち、電子制御式

のディスプレイでありながら、あくまでも紙面発色ディスプレイであるという表示形態・部材構成を失わないということである。

システムの機構の概要は次のようなものになる。まず、紙、光熱変換媒体、光源により、紙表面の熱感応型機能性色素の温度制御を行うことが表示制御の主軸となる。機能性色素や光源には幾つかの特性があり、それによって応答性、安定性の向上のために独自の最適な制御手法が存在する。また、紙独自の重要な特性として、後述するように、スクリーンとなる紙そのもののパラメータチューニング性により、ディスプレイの挙動設計を行うことができるという点がある。この特性により、解像度、応答性、安定性といった表現における重要なパラメータのチューニングによって、求める表現の実現が可能となる。

ディスプレイの性能向上への寄与点は、具体的には次のようなものになる。図1.1、図1.2及び図1.3に、本研究によって実現されるディスプレイの性能の向上の程度の概要を述べる。図1.1は、解像度の向上程度を示している。評価指針として、JIS規格による数値・文字の表示機構の基準解像度[39]および、詳細な画像の例として文字画像、顔画像が個別識別できる解像度を提示した。これらの画像の個別識別の科学的根拠となる既存研究事例は第8章に詳述する。

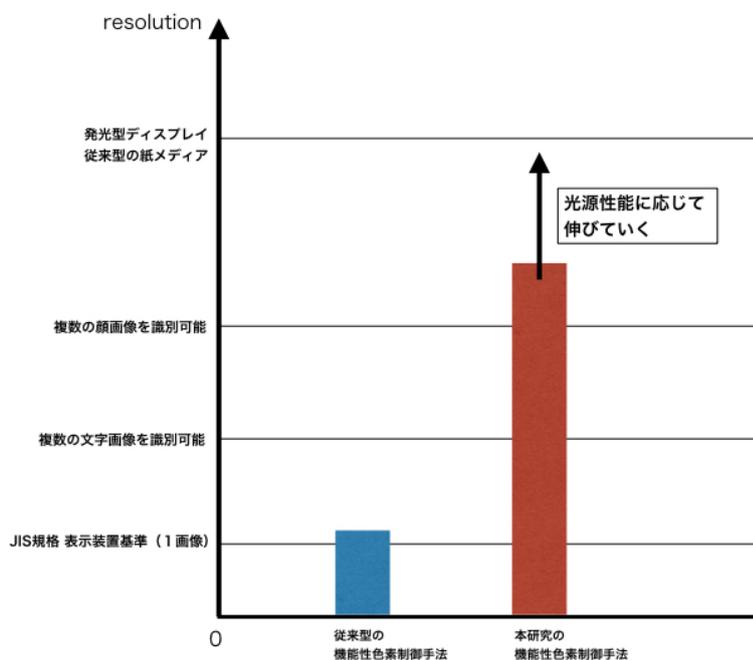


図 1.1 本研究により実現される解像度の程度

想定条件として、一般的なA4サイズの紙への画像描画を検討する。まず、解像度については、発熱デバイスによる熱感応型機能性色素の熱制御を行う方式の従来研究では、1画像のみの描画で、規格に定められた数値・文字の表示機構の標準解像度を超えることがやっとであり、文字などの詳細な画像をそれとわかる程度の解像度で描画することは不可能であった。本研究における光熱変換を用いた熱制御においては、解像度は紙への照射光と同等のものとなるため、詳細な画像を個別識別が可能な程度に、かつ複数並列表示することが可能となる。さらに解像度が光制御デバイスの性能に依存するため、発色ディスプレイや従来型の印刷式の紙メディアへの到達も視野に入れることが可能となった。

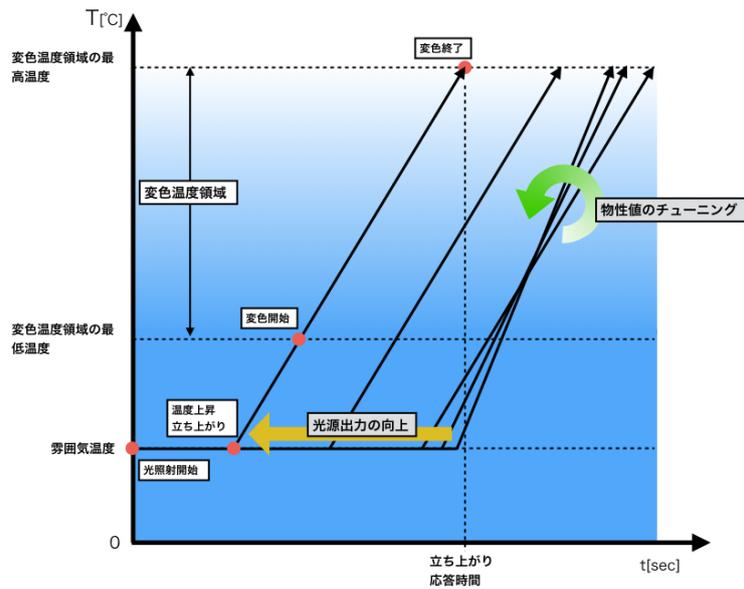


図 1.2 本研究により実現される立ち上がり表示挙動

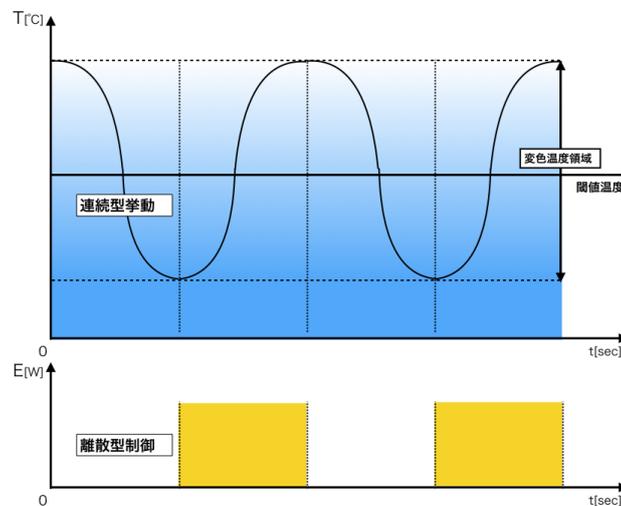


図 1.3 本研究により実現される表示安定制御の概要

紙面の色素の発色状態の初期変化の挙動、すなわち立ち上がり表示の挙動、一言で言うところの表示応答性については、従来型の制御手法と本研究の制御手法の比較は難しい。従来型の制御手法は機能性色素を直接加熱する手段を取っているため、デバイスの選択肢や物性、挙動がほぼ無限に存在するからである。従って、ここでは本研究における制御手法の特徴を述べるに留める。まず、エネルギー源となる光源の出力を単純に増大させることで、表示立ち上がりの開始時間は短縮される。次に、本研究独自の特色として、スクリーン面となる紙素材の物性値のチューニング性により、機能性色素への熱伝導の速度を設計者が自由に操作することが可能である。これは立ち上がり表示の温度変化においては勾配の変化となって現れる（図1.2）。これら2種のパラメータの適切な設定により、表示応答性を高め、あるいは適度に調整することが可能であることが特色である。

表示安定性については、光熱変換機構の導入により、従来型の機能性色素制御に比べより安定した制御システムを構築することが可能である。なぜならば光照射は放熱より緻密な制御が可能であり、制御知見やデバイスの種類も豊富であるからである。後述するように、本研究のシステムでは、一定周期で光照射のオン・オフを極めて単純な離散型制御により切り替えていくことで、可逆反応を起こす機能性色素について、色素の連続的な発色・消色挙動を制御することが可能である（図1.3）。

## 1.5 本論文の構成

第1章では、本研究の背景および目的、社会的ニーズと予期される波及効果、本研究の寄与、構成を述べる。

第2章では、情報提示手法として並列状況にある発光型ディスプレイと発色型ディスプレイに着目する。メディアの長い歴史において、その利便性や物質的特性から紙メディアが最も重要な位置にあり続けた。後に電子制御技術の発展により、様々な制御機構や形状のディスプレイが開発され、紙にはない特長により我々の生活に不可欠なものとなった。現在、これらのメディアは、それぞれが持つ長所と短所を補い合う形で並列状況にある。両者の歴史および根幹となる技術の変遷と現時点での立ち位置について確認し、両者の抱える現在の課題について考察を行う。また、両者の主要な統合アプローチについての確認を行う。統合アプローチとしては、紙の物的特性の再現を目指したペーパーライクディスプレイ、および投影対象の物的特性をフィードバックするプロジェクションマッピングが代表的な手法である。ペーパーライクディスプレイは、電子制御型ディスプレイと紙媒体の架け橋としての優秀性をある程度実現したが、紙の物的特性の完全再現には至らず、あくまでも紙の一部の物的特性の模擬の範疇を超えることはなかった。プロジェクションマッピングはその質感豊かな表現から幅広く利用される表現手法となったが、紙の質感の擬似的再現を狙うのみであり、これもまた紙の本来の物的特性を完全に再現するものではなかった。すなわち、既存技術においては、紙の本来の物的特性、機能特性の一部の再現に留まることとなった。こうした事例を踏まえ、発光型ディスプレイ、

発色型ディスプレイの進化の起点と目指すものについて確認し、研究領域の違いについて説明する。紙面発色型ディスプレイの研究においては、その表現性能の高さと独自性、技術的知見を生かすため、従来の紙メディアの部材構成要素、すなわち紙と色素による構成を崩さず、印刷などの技術や知見をそのまま活かすことのできる形での電子制御性の付与が重要となる。その上では、どの特性をシステムに継承するかが非常に重要な問題となるため、この点について議論を行う。

第3章では、従来型の電子制御を導入した発色型ディスプレイの事例と問題点について述べる。その根幹となるのは熱感応型機能性色素及びその制御デバイスである。熱感応型機能性色素はその印刷や塗布の容易さ、カラーバリエーションの豊富さなどから紙面発色型ディスプレイに非常に適した外部刺激反応型機能性色素である。高機能な発色型ディスプレイを設計する上では、この色素の表示を制御するための熱制御設計が鍵となる。まず、従来型の熱制御を用いた既存研究事例及び筆者による試作事例を通じて、問題点を確認する。端的に言えば、それは熱の高解像度制御の困難さ、表示安定性の欠如である。従って性能向上においては熱設計技術の改良を必要とする。

第4章では、第3章において確認した問題点を解決するためのアプローチとして、「エネルギー変換」及び「空間分離制御」の導入を提案する。第3章で挙げた問題点を解決するために、まず熱ではない高解像度かつ緻密な制御が可能なエネルギーを用い、それを熱に変換することで、前述の解像度に関する問題点を解決する。さらに空間分離制御によって、熱の発生源から機能性色素を切り離すことで、空冷による安定性の向上を図る。この本研究における根幹となる仕組みを光熱変換と呼称する。この新しい熱制御手法は、熱よりも高解像度の制御が可能な光の照射を起点とし、それを高効率で熱に変換する機構を挟み、最終的に熱感応型機能性色素に伝わる熱の分布解像度が高精細なものへと向上されるという仕組みである。

第5章では、光熱変換原理の詳細について述べる。基本的機構は、光照射デバイス、光熱変換を効率的に行う媒体素材、紙、熱感応型機能性色素、及び以上の空間分離配置により成り立つ。安定性の検証のため、空冷装置およびフィードバック制御の有効性について議論を行う。次に熱制御のための光照射の方式とデバイスの特性について分類する。以上の構成から、本研究における新しい発色型ディスプレイの性能の向上程度を確認する。

第6章では、ディスプレイの表示挙動について、いくつかの評価軸を設定し、熱力学的挙動からなる表示応答についての検証を行う。機能性色素の消色および発色のプロセスについて、素材物性や光照射特性より導き出される理論式より予想される性能を導き出す。熱感応型機能性色素には、連続切り替え型のもの、永続表示型のものの2種が存在する。連続切り替え型の消色及び永続表示型の発色においては、照射光を受けた熱伝導媒体は光熱変換を行い、紙内部の熱伝導により熱感応型色素の温度上昇が起これば変色閾値温度を超えて消色する。連続切り替え型の発色においては、温度勾配による非定常熱伝導と同時に、紙の熱伝導媒体側、熱感応型色素塗布側ともに雰囲気との熱伝達により冷却される。さらに実際にいくつかの光照射デ

バイスと紙、機能性色素、描画パターンの組み合わせで実測値を検証する。その上で、ドット応答に対する注視時間の観点から、光照射方式と表示コンテンツの適用適性について設計指針に関する考察を行う。また、従来型の紙メディアから継承する紙の特性の一つとして選択したパラメータチューニングによる表示挙動操作について述べる。

第7章では、第6章において求めた理論式を元に、実際のシステムの運用において有効利用するためのモデル化を行う。本研究のシステムは非常に多数の変数のチューニングを行い、目的に応じた最適化を行う必要があるが、モデルはこの効率的な最適化について重要な役割を果たす。全ての挙動を定式化し、実際の運用において物性値の代入により設計が行える基本的システムモデルの構築を目指す。このモデルにより、ディスプレイの使用・設計にあたってユーザーが何の情報を設定し、何の情報を調整すれば良いのかを明確にすることで、システムの全体像と運用方法を明らかにする。

第8章では、本研究の提案手法の応用例を述べる。すなわち、本研究により実現される高解像度の紙面発色型ディスプレイの有用性を評価するための応用例である。応用例1では、画像の表示媒体として紙とサーモクロミックインクを用い、光源の高速スキャン方式制御により、人物の白黒の顔画像を認識できる描画システムを実現する。応用例2では、画像の表示媒体として感熱紙を用い、光源の高速スキャン方式制御により、遠隔コミュニケーションにおいて異なる素材のスクリーンをつなぐ試みを行い、手書き文字の持つ書き癖やスピードといった特徴を認識できるシステムの構築を行う。

第9章では、これまでに提案、検証してきた紙面発色型ディスプレイシステムについて、結論と本研究の総括と評価を行い、今後の展望を述べる。

# 第2章 発光と発色による情報提示技術と統合アプローチ

## 2.1 緒言

本章では、情報提示技術について、現在において並列状況にある電子制御による発光型ディスプレイと紙メディアの双方に対し、その特徴や現在に至るまでの技術・文化面における発展および現状を確認・俯瞰し、それぞれの今日における我々の生活における立ち位置について述べる。人の生活する空間へ何らかの情報を提示するという行為は、人とディスプレイの関係性を語る上で欠かせないものである。これはデジタル技術以前のメディアから現在に至るまで存在する問題であり、様々なメディアや方法論が確立され、実践されてきた。ある空間に情報が提示される時、その情報提示のシステム、プロセスに関わる要素として、情報提示のためのメディアやデバイス、コンテンツとその制作者、情報の発信者、情報の受信者が存在し、これら要素の組み合わせにより、人と情報の送受信のフローが構築され体系化されたシステムとなる。

情報提示手法において、歴史的にはその利便性や物質的特性から紙が最も重要なメディアであった。後に電子制御技術の発展により、様々な制御機構・形状のディスプレイが開発され、紙にはない特長をもって我々の生活に欠かせないものとなった。現状ではこれらのメディアはその長所・短所を補い合う形で並列状況に置かれている。こうした状況では、それぞれの持つ特長が合算されれば、理想的なメディアが誕生すると考えることは自然である。すなわち、紙の持つ特長と電子制御機能の利便性を統合することで、用途や機能を拡充し、表示可能なコンテンツを増やすという両者の優れた面を取り入れた新しい形の統合型ディスプレイの実現が目指されることとなった。主流となったのが、電子ペーパーを始めとするペーパーライクディスプレイという、電子制御ディスプレイと紙メディアとをつなぐ新しい解決策および、投影対象の物的特性をフィードバックさせたプロジェクション技術であるプロジェクションマッピングである。特に電子ペーパーは既に商品化され、多くの人に愛好される一方で、未だに電子制御型のディスプレイと紙メディアの単純な統合では解決できない課題を抱えている。こうした統合アプローチは成果として十分なものを得ることはなかった。その理由は両者の発展の起点と終点の違いにあることを論じ、発色型ディスプレイがどうあるべきかについて考察する。

## 2.2 2種のディスプレイ

### 2.2.1 発光型ディスプレイ

電子制御による発光を情報提示の主軸とするディスプレイである。発光を実際どのように利用し、どのように作用するかは2.3節に後述するように様々なものがある。光源の種類、性能ともに発展と多様化が目覚ましく、そのため解像度、応答性、安定性に優れ、また小型化などの使い勝手の良さも備える面もあるなど非常に多様なデバイスとして我々の生活に欠かせないものとなっていることは先述の通りである。

### 2.2.2 発色型ディスプレイ

発色を情報提示の主軸とするディスプレイである。色すなわち色素は従来「時間軸を与えて動作させるもの」ではないため、我々の社会に存在する多くのものは塗布・印刷など何らかの形で色を情報として人間に伝えている。

発色型ディスプレイについて、発色面となる素材の質感・素材感は、運用にあたりユーザーのコンテンツ制作において要求されるひとつのポイントとなることがある。

まず素材要件について述べる。レンダリング方程式において、レンダリング対象ポイント $x$ について、放射輝度（視線方向）を $\Omega$ 、視線方向へのベクトルを $w_0$ 、入射する光の逆ベクトルを $w_i$ 、面の法線を $n$ とする。放射輝度は以下の式により示される。

$$L_0(x, \vec{w}_0) = L_e(x, \vec{w}_0) + \int_{\Omega} f_r(x, \vec{w}_i, \vec{w}_0) L_i(x, \vec{w}_i) (\vec{w}_i, \vec{n}) d\vec{w}_i \quad (3.1)$$

右辺第一項は自発光の場合における光総量に対する加算項、右辺第二項は入射光の総量となる。

すなわち、ポイント $x$ における放射輝度は、自発光と入射光の和となるため、自発光する物体は光色に影響を及ぼす。素材が本来持つ特性の保持をしなければならない場合、「自発光要素」を排除し、「反射光」にしぼらなければならない。すなわち素材が非発光型である必要がある。

また、建築内装材のテクスチャは照明要因の影響を受けるという研究結果がある[20]。これはある空間において、色温度や照度などの「光に関するパラメータ」が心理におよぼす影響があることを示したものである。これにより照明場によって感じられる質感の印象が変化する。よって自発光要素を排除し非発光であることが心理的安定感を生む。素材特性保持・質感がユーザーにとってどれほど重要なものとなるかは用途次第であるが、主に空間的インテリア性を重視するケースにおいては十分に考慮すべき要素であると言える。

発色型のディスプレイの特性としては、「明所で高パフォーマンス、暗所で低パフォーマンスを発揮する」「黒色に近い色ともに表現可能である」「提示情報それ自体が物理的実体を持つ」といった点があげられる。メディアアート作品が暗い場所で多く展示される、あるいはモバイル機器が太陽光下で使用しづらいなどの状況が散見される現状を解決する手法として期待されている。表現としては、空間展開型インスタレーションなどに需要のある、発光型ディスプレイとは異なる表現が可能である。具体的には発光型ディスプレイとは異なる表現色域での表現ができる点が多い。

### 2.2.2.1 本研究における「発色型ディスプレイ」

「発色型ディスプレイ」は様々な形態を取るが、本研究では発色型ディスプレイを「紙メディア」と絞って捉え、一部の電子ペーパーなどを含めた広義の「発色型ディスプレイ」と混同がないように、特に「紙面発色型ディスプレイ」と呼称する。その理由を詳述する。第1章にて前述のように、本研究の目的は、従来存在しなかった、紙面における発色型情報提示の表現性能向上を実現することである。発色型ディスプレイの形態として紙メディアに焦点を当てる理由は幾つか存在するため、以下に列挙していく。

まず、紙メディアには雑誌や新聞などに代表されるように、紙メディアならではの幅広い表現能力（特に発光型と表現色域が異なる点は特筆すべき点である）と高い技術があり、本研究の目的としてはそれを生かしつつより高度な表現性能を付与することである。単純に発色ディスプレイの性能向上のみを目的とすると、一部の非発光型の電子ペーパーの研究開発によってもその目的は達成されることになる。そうではなく、紙メディアとしての形態・部材構成・表現の特徴を損なうことなく、電子制御性を付与し新たな表現力を生むことが本研究の目的となる。

次に紙が独自に持つ特性であるが、自由に造形、修正、追加や削除、種類の選択が可能であること、形状（サイズ、厚み、テクスチャ）の可変性に優れていること、物理的に保存できることなど様々な挙げられるが、その中でも他の素材と比べ物性値が操作可能であり、明確な数値として現れ、チューニングが可能であることに着目する。この特性は、本研究において実際にディスプレイの挙動を設計する際において非常に重要な要素として現れた（第6章に詳述）。この特徴は他の素材では見られず、生かすことが難しいものである。

「発色を表示原理とするディスプレイの性能向上」という目的を考えたとき、それが既に、日常生活の中でごく自然になされている素材として紙に勝るものはないと言える。

身近にある造形性に優れた素材としては、布や木材などの自然素材があるが、装飾性・造形性・流通量において紙に勝るとは言い難い。本章で述べる紙の変遷を辿っていくと、人との関わりの中で、最も使い方・用途をユーザーに委ねられている素材が紙であると言えよう。その意味で、紙の本質とは「ユー

ザーの意図・意思に繊細に沿う」ものと言える。実際に多くの作品で、紙の特性・特徴を生かしたものが作られている ([55])。また、紙の色は質感認知に影響しないことが示されている[24]。本研究の目的から、情報を提示するという用途においては最も自然な素材であるため、あえて先述のような他の自然素材を選ぶ理由もないと思われる。ただし、用途に応じてこうした素材を選択したいケースも存在するであろう。詳細は第9章に後述するが、本研究の骨子となる光熱変換原理を紙以外の素材についても応用することはある程度可能であるため、使用の可能性は存在する。具体的にはガラス、革、金属、プラスチックなどが考えられる。本研究の手法が適用できる素材とできない素材、また適用が難しい素材でも使える条件（厚みや素材など）を明確にすれば、適用できるケースがわかりやすくなるであろう。

発色型ディスプレイを紙メディアと捉えるとき、紙への印刷技術が既に高度なものであるため、発色型情報提示手法最高のデータ表示機能を実現でき、発光型ディスプレイと対等に比較できる情報提示能力を持つ。本研究の目的は紙面における表示データを高解像度化することであるので、研究の先にある最高解像度発色ディスプレイである紙メディアを目標と捉え、それに向かうのは当然である。

その他の理由としては以下が挙げられる。

- ・ 既にある紙への印字機能・技術的リソースをそのまま活用できる
- ・ ディスプレイ（素材サイド）がエンジニアリングと分離されているため、紙素材加工に高いユーザスキルを要求しない

総括すると、本論文における「発色型ディスプレイ」とは、「紙面における発色現象により積極的に情報を伝達するもの」すなわち従来型の紙メディア及びその発展系を指す。単純に色の変化するオブジェ状のものではなく、画像や文字などをそれとわかる形で紙面に表示可能なものである。以後、本論文では「紙と色素を用いた、従来型の紙メディアの情報提示手法」を「紙面発色型ディスプレイ」と呼称する。

## 2.3 発光型ディスプレイ技術の変遷

今日、携帯電話、テレビ、電子書籍など我々の生活に浸透している様々なデバイスにおいて、発光型ディスプレイはそのシステムを構築する最重要要素のひとつであり、歴史的に多くの表示機構や形態が開発されてきた。まず今日までの技術的変遷を俯瞰する。

### 2.3.1 技術発明の歴史

ディスプレイの基本的技術発明の歴史を種別と共に大まかに俯瞰すると、以下のようになる[29]。

- ・ 1897年、ブラウン管（CRT: Cathode Ray Tube）（独 K.F.Braunによる）

	名称	機構
発光型	ブラウン管 (CRT)	真空中の加速電子ビームと蛍光体衝突
	プラズマパネル (PDP)	ガス放電による発光
	発光ダイオード (LED)	pn接合へのキャリア注入再結合発光
	無機ELディスプレイ (IELD)	固体中の加速電子による蛍光体励起
	有機ELディスプレイ (OELD)	有機物のLED
	蛍光発光管 (VFD)	真空中の加速電子ビームと蛍光体衝突
	フィールドエミッションディスプレイ (FED)	真空中の加速電子ビームと蛍光体衝突
非発光型	レーザーディスプレイ	レーザー光の投射
	液晶ディスプレイ (LCD)	液晶の電気光学効果
	エレクトロクロミックディスプレイ (ECD)	電気化学反応
	エレクトロフォトレティックディスプレイ (EPID)	色素の電気泳動
	ホログラフィ プリンター	ホログラフィ効果 印刷

表 2.1 ディスプレイの機構分類

- ・ 1936年、無機EL (Electro-Luminescence) (仏 G.Destiauによる)
- ・ 1964年、プラズマディスプレイ (PDP: Plasma Display Panel) (米 Illinois 大学 D.L.BitzerとH.G.Slottowによる)
- ・ 1965年、有機EL (OLED: Organic Light Emitting Diode) (カナダ W.Helfrichによる)
- ・ 1966年、蛍光表示管FL (VFD: Vacuum fluorescent display) (日 中村正による)
- ・ 1968年、液晶ディスプレイ (LCD: liquid crystal display) (英 RCA Heilmeierらによる) [75]
- ・ 1971年、TN-LCD (twisted nematic liquid crystal display) (スイス Martin Schadt、米 W.Helfrich、J.L.Fergusonによる)
- ・ 1970年台後半から1980年台後半、CRT/LCDプロジェクタ
- ・ 1990年から2000年、電界放出ディスプレイ (FED: Field Emission Display) (米 candescent、日 SONY)

生活において、主にテレビや個人用計算機を中心として普及した電子機器に用いられたものは、1970年代からのCRTを用いたディスプレイであった。これらの市場では、1990年台後半から2000年台にかけては液晶が主流となった。液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイは、CRTディスプレイと対比する形で、FPD (Flat Panel Display) と総称される。多様なものが登場し台頭してきたが、か

いつまんだ大きな流れとしては、CRTディスプレイが主流となっていた時代から、LCD、PDP、EL、FEDへと進化発展してきたと言える。FPDディスプレイは製造装置の改良、高画質化、低消費電力化、生産性向上による低コスト化により、FPDディスプレイ市場はCRT市場を2002年に超え[74]、モバイル市場のみならずテレビ市場でも主流となるなど急成長を遂げた。

モバイルディスプレイについては、有機ELの台頭により、薄型化が進行し、後に述べる電子ペーパーやフレキシブルディスプレイの研究・開発もお盛んである。

これらのディスプレイの表示原理としては、発光型と非発光型に大別される。表2.1に機構分類を示す。

### 2.3.2 根幹技術分類

各々の技術について、以下に簡潔に動作原理と特徴を述べる。

#### 2.3.2.1 CRT技術

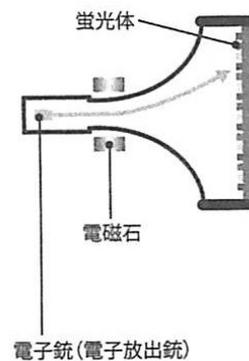


図 2.1 CRTディスプレイの基本機構[68]

CRT (Cathode Ray Tube) ディスプレイは、いわゆるブラウン管テレビを指す。ブラウン管表面の蛍光体に電子ビームを当てることにより画像を表示する。画質に優れ、テレビだけでなく計算機用ディスプレイなどの分野で長らく主流であったが、機構上サイズが大きいという問題点を抱えており、LCDなどにとって代わられるようになった。

#### 2.3.2.2 FED技術

フィールドエミッタアレー (FEA) を電子源としたディスプレイである[87][88]。FEAに高真空中で高電界を印加し、トンネル効果により真空中に電子を引き出し加速させ、RGB蛍光体画素をそれぞれ発光させることにより表示を行う。CRTより高精彩であり、サイズの融通が利く、優れた耐環境性、

低消費電力などの多くの特長を持つ。1970年代に基盤となるコンセプトが生まれ、1990年代前半に初の試作品が誕生した。

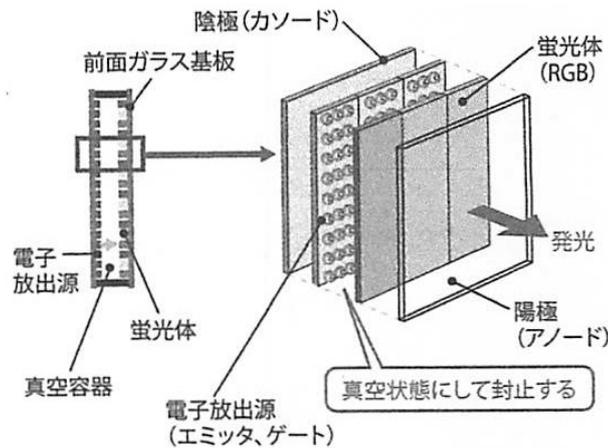


図 2.2 FEDディスプレイの基本機構[68]

### 2.3.2.3 LCD技術

液晶ディスプレイに用いられる液晶材料は低温で結晶状、高温で液体状となり、その間の温度範囲で液晶状態となるサーモトロピック液晶を主とする。炭素原子を骨格とし、細長い棒形状の分子構造を持つ。サーモトロピック液晶には、ネマチック液晶、スメクチック液晶、コレステリック液晶等に分類される。ディスプレイにおける液晶表示は、外部からの電界制御により、液晶分子を一定方向に配列させる（配向）により実現される。

液晶ディスプレイで使用される偏光板は、ポリビニルアルコール（PVA）を主体に、ヨウ素（I）化合物分子を吸着配向させて作る。実際の製品では、トリアセチルセルロース（TAC）とポリエチレンテレフタレート（PET）という何層かの裏打ち層によって保護され、各層はPVA系の接着剤で張り合わせられる[21]。

液晶ディスプレイのパネル構造は、光の透過と遮断を担当する液晶シャッターと、バックライト光源からなる。液晶シャッターは、偏向板と配向膜、透明電極を重ねた基板モジュールの間に液晶材料を封入することにより構成する。液晶シャッターにより制御されるバックライトの照明方式としては、透過型、反射型、半透過型等が用いられる。

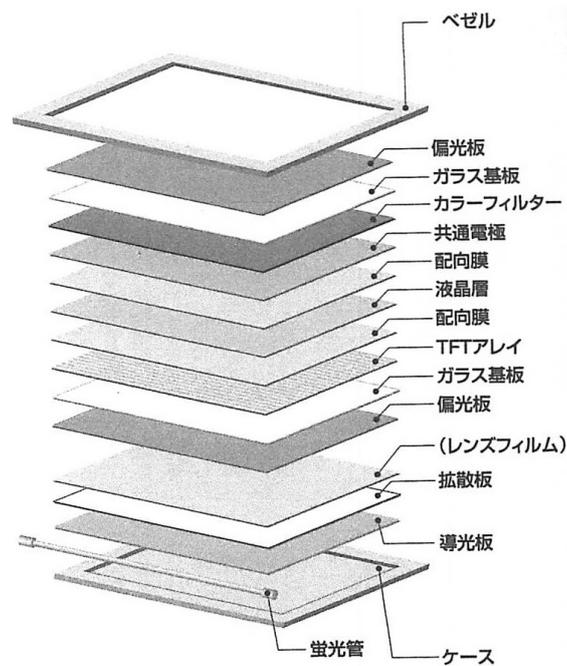


図 2.3 LCDディスプレイの基本機構（透過型TFT液晶例）[68]

### 2.3.2.4 PDP技術

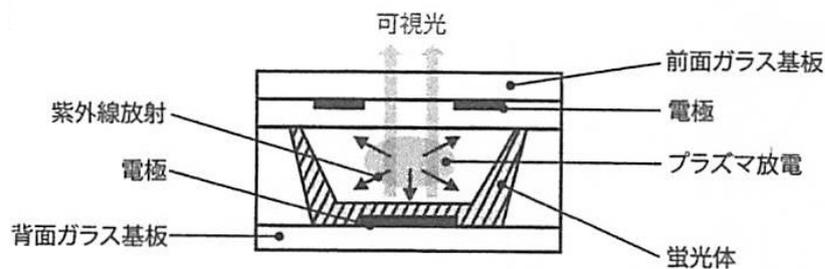


図 2.4 PDPディスプレイの基本機構[68]

蛍光体に似た微小蛍光ランプを敷き詰めた構造を持つ。ドットマトリクスによる固定画素による表示方式をとる。CRTと同じく自発光によるため、応答速度、視野角特性に優れている。用途としては、大型サイズのテレビなどを主とする。

光源の自発光を原理とするため、光源と発光部の距離を大きくとることを必要とせず、薄型化が可能である。発光原理としては、プラズマ放電により発生した紫外線が蛍光体を照射することにより発光する。

### 2.3.2.5 EL技術

電圧の印加により自発光する素子によるディスプレイである。エレクトロルミネッセンスの発光は、EL素子を2つの電極で挟み、電圧を印加するという非常にシンプルな構造によるものである。特性としては、高いコントラスト、広視野角、高応答速度など優れた特長を多く持つ。また自発光原理によるため、バックライトが不要で、形状を非常に薄くできることが大きな特長である。

EL素子は大別して、無機化合物を用いる無機ELと、有機化合物を用いる有機ELの2種に分けられる。無機ELは発光体にガラス基板に蒸着させた硫化亜鉛などを用い、交流電圧により駆動する。駆動電圧が大きいこと、青色表現のための材料に優れたものがないといった課題を持ち、製品としては有機ELに遅れをとっている。したがってモノクロディスプレイなどに用いられることが多い。

有機ELは無機ELに比較してカラー化が容易であり、低電圧動作が可能であるため、モバイル機器からテレビまで幅広い応用が可能である。

輝度と寿命のトレードオフ問題、コスト、大画面化の難しさなどの技術的課題を抱えているが、将来的に更なる発展・普及が期待される。

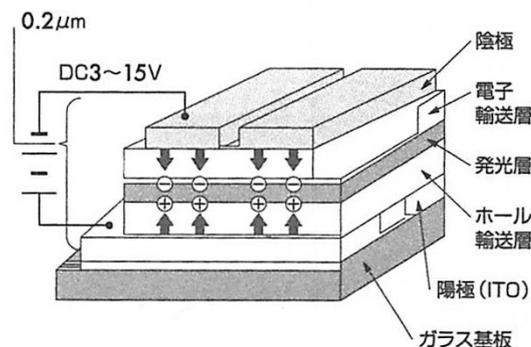


図 2.5 ELディスプレイの基本構造[68]

### 2.3.3 発光型ディスプレイの立ち位置

場所や用途を問わず、今日の我々の日常生活においてもはや必需品に近いものとなっている。今後も様々な形状や動作原理に基づくディスプレイの開発は進められていくことは間違いなく、また市場全体として需要が伸び悩むことは考え難い。

### 2.3.4 発光型ディスプレイの特長と問題点

紙やその他のメディアにはない、電子制御特有の高い表示応答速度、高解像度、カラーバリエーションを含めた豊かな表現力が備わり、またそれぞれの項目について新技術の研究開発やコンテンツの広がりなどが加わり進化し続けている。そのため応用分野の広さや利便性が現在において既に保証されており、今後の発展も期待されることが最大の特長である。さらにFPD研究の進展により、製品とし

での応用分野が大きく広がり、我々の日常生活により深く様々な形で浸透するようになった。

製品として、あるいは製品の一部として組み込まれた場合、ユーザーとのインタラクションが優れているものであるか否かはインタフェース面のデザインの良し悪しによるところが大きいですが、総じてユーザーには幅広い用途に応じた選択肢が与えられていると言える。

問題点としては、技術分類毎に異なり、またユーザーによる程度問題ではあるが、インタフェースのハードルの高さの問題、消費電力の問題、サイズの問題などがある。その中でも、単なる技術水準の向上では解決できない問題として、ユーザーと製品システムの関係性の問題がある。電子制御発光型ディスプレイは、開発者（技術者および技術者の集団である電子機器メーカーなどの企業）によって、多くの場合、ある目的に応じて商品として提供されるものである。言い換えれば、その目的に応じた利用法のみが利用者に許されており、提供された利用法を超えることはほぼできないと言って良い。選択がどうであれ、特定の枠組みの中での利用となるため、コンテンツのアウトプットについてユーザの自由な意思が完全には反映されることはないと言える。

## 2.4 紙メディアの変遷

一方で、電子制御発光型ディスプレイと並ぶ二大巨塔として、紙メディアが過去から現在にいたるまで我々の生活に深く浸透していることは疑いのない事実である。

日本製紙連合の調査発表によると、1990年代に停滞していた紙の需要は、94年に増加傾向に転じた後は堅調に推移している。2000年の紙・板紙の消費量は、前年比3.5%増で3213万トンとなった。紙・板紙の需要は、印刷用、包装用、衛生用と分けられる。90年は包装用が50.1%、印刷用が45.1%、衛生用が4.8%となり、包装用が需要の過半数となり最も高い数値であった。2000年では印刷用が48.4%、包装用が46.2%、衛生用が5.4%となり、印刷用の比率が高くなった。現在では包装用の需要が増加傾向にあり、印刷用は堅調な需要がある。

図2.6に日本国内における紙の生産量および国民一人あたりの消費量の推移を示す。戦中・戦後から右肩上がりで生産量、消費量ともに増加していることがわかる。これは電子制御ディスプレイの台頭著しい1970年代以降も顕著であり、電子制御ディスプレイの存在下においても、ある機能領域では紙の使用が減少していないことがわかる。古来自然素材を材料として誕生して以来、現代に至るまで、あらゆる文化技術的な歴史の変遷を経た素材は他には見当たらない。

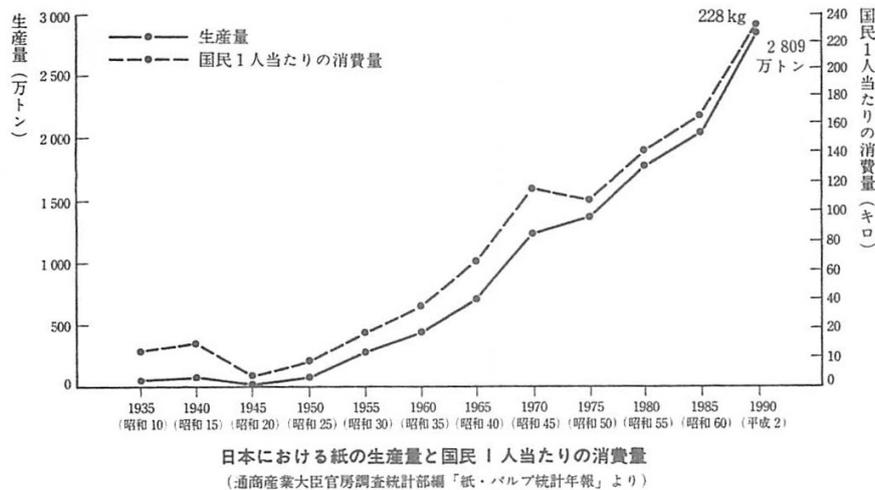


図 2.6 日本における紙の生産量と国民1人あたりの消費量の推移

## 2.4.1 技術発展の歴史

紙とは、「抽出した植物繊維を水中に分散させ、薄く平らに繊維同士を絡み合わせるにより造られたもの」と従来から定義されている。一般には、広葉樹の木繊維と針葉樹の仮道管を抽出してパルプ繊維とし、絡み合わせたものを指す。

紙の歴史上、大きな転換点となったのは、紙素材の発明・改良と、製紙法・印刷法の技術発展の2点である。それぞれについて時間軸に沿って概略を確認する。

### 2.4.1.1 紙の発明からその素材の変遷まで

紙の登場以前には、メディアとしてその地位にあったのはまず粘土板であった。粘土板は保存性に優れてはいたが、湿っているうちに書かねばならないこと、重くかさばることなどが欠点であった。

次に登場したのは紀元前3500年から紀元前3000年頃にエジプトに現れた、パピルス草を原材料とするパピルスである。ラテン語「papyrus」が「paper」の語源であることは有名である。パピルスは粘土板に比較して折り曲げに弱い、保存性が低いという欠点があったにもかかわらず、その軽さから書写材料として優秀である特長から重要な輸出品となり普及し、英語・ドイツ語・フランス語などの「紙」の語源となるに至るまで広まった。

中国で紙が発明される以前に書写材料として用いられていたのは絹布（帛）である。前漢の時代には既に紙の発明がなされていたと現在では推定されているが、当時では品質に問題があり、絹布が主流であったとされている。他方、朝鮮や日本でも主に画材として使われたが、保存性の低さや高価であるといった問題点を抱えていた。

絹布の他には木簡や竹簡なども使用された。素材の性質上、形状として縦長のものができあがるので、伝播した日本なども含め文字が縦書きなのはこの材料によるものである[63]。この素材は粘土同様、かさばるため保存性に難があるという欠点があった。

インド、タイ、ミャンマーなどの国では、貝多羅葉を用いた。パルミラ椰子の葉を乾燥させたもので、本のように綴じて使うことが特徴である。貝多羅葉も同様に、かさばるという欠点を持っていた。

アラブ文化では、紙がカリグラフィの媒体として導入される以前は、パピルスや羊皮紙が使われていた。紙の伝来ののち、羊皮紙は高級素材として残り続けたが、パピルスの生産は11世紀には姿を消した。

羊皮紙は、紙を除いた素材としては最も多くの優れた特徴を持つ素材であった。高価ではあるが芸術性に優れており、主にヨーロッパで豪華本や条約文書などに使用された。その他、タバ、アマチ、ライスペーパーなどの素材が利用されてきたが、文化的に大きく広がるものではなかった。

紙は105年、蔡倫により中国で発明された。後漢書には蔡倫が麻、樹皮などを用いて紙を作ったことが記載されている。この時点における製紙法は次節に述べる。実際は蔡倫以前にも紙の原型となるものは存在していたが、蔡倫により製法が確立され広く使用されるようになったというのが正しい見方である。

紙の素材としての基本構造は、短い繊維が絡み合い、積み重なりできたものである。植物から取り出された繊維は水を介して叩くことで膨張し柔らかくなり、繊維組織がほどけて房状になる。繊維を糸状にし、縦糸と横糸で織り上げる織物とは異なり、繊維をそのまま水に分散させ、網などですくい、薄く平らにし乾燥させて作ることが製紙の基本である。乾燥させると繊維同士が絡み合い水素結合が生じ、紙となる[64]。こうした構造上の特徴により、軽さや薄さを実現し、従来多くの素材が持っていたかさばりなどの欠点を克服した。

原料に着目すると、木材パルプがボロに代わり多く使われるようになったのは20世紀以降である。日本では現在、紙原料の99%を木材パルプが占め、世界的に見ても90%を超える。原料が布などから木材パルプ・化学パルプへと移行することで、コストが当時の新聞印刷において3分の1ほどまで下がった。

19世紀のイギリスでは、機械紙の生産量の増加に対し、手漉き紙の生産量は減少している状況であったが、発明家ダヴィット・セシャルは布のパルプに植物原料を混入することで、コストの低い高品質の紙の生産に成功した。

20世紀半ばには、大気圧を用いるリファイナーパルプ（RMP）、加圧・加熱の工程を導入したサーモメカニカルパルプ（TMP）、丸太を加圧グラインダー

ですり下ろす加圧グラウンドパルプ（PGW）といった新技術が生み出された。これらの新型パルプは現在でも多く使われているものである。

木材パルプには、色の経年劣化や日光への弱さといった欠点があった。そこで、変色しないセルロース以外の木材成分をアルカリにより取り除いた化学パルプが誕生した。化学パルプは化学薬品や工程の工夫を経て、現在では硫酸塩パルプが世界中で用いられている。

#### 2.4.1.2 製紙法と印刷法の技術発達と伝播

製紙技術と印刷技術の歴史において、重要なターニングポイントとなったのは、先述の紙素材の変遷も含め以下の6つの発明である。

- ①中 蔡倫による紙の発明
- ②仏 ルイ・ロベールによる抄紙機の発明
- ③独 ケラーによる木材パルプの発明
- ④独 イリッヒによる内添サイジングの発明
- ⑤独 グーテンベルクによる活版印刷技術の発明
- ⑥紙への加工法の発明

①製紙技術において革命的であった蔡倫による製紙法は、麻・魚網を細かく切断し繊維とし水に分散させ、紙漉き器で漉く製法であった[65]。これは製紙の基本工程として確立されたものであった。晋の時代には素材として竹簾を使用する改良が行われた。明の時代には稲藁が素材として用いられるようになった。

繊維処理法の分野では、1670年にビーターが発明された。ビーターは回流槽の中をローターが回転し、ボロや結束繊維などを離解・叩解するものであり、処理効率が大きく向上した。

②当時の中国の製紙は、カジノキの樹皮を煮込み、繊維を細かく分離し、漉簣に入れ乾燥させるといった手法で行われた（ぎょう紙法）。後にアラビアで、ぎょう紙法を改良し、新材料として布などを用い、水に溶かした繊維を漉きあげる抄紙法が用いられることになる。

製紙法の変遷を国毎に見ていくと、610年に高句麗より日本に伝えられた製紙法は竹簾を使用する手法である。当時の日本では仏教の隆盛に伴い、経分の書写のため紙の需要が急増していた。その後の日本での製紙素材は麻、雁皮などと変化していった。日本における製紙法の特徴は長い靱皮繊維のみを用いることであり、このことが和紙の薄さと丈夫さの両立を生み出した。その後、海外から機械漉きの製紙法が伝来することにより、印刷には適さない

和紙は衰退していくことになる。1282年には現在でも貨幣の偽造防止などに用いられるすき入れの技術が発明された。

ヨーロッパでは、1944年にイスラム王朝ハチバに最初の製紙工場が作られた。ヨーロッパでは初期の紙の原料は麻のボロ、ついで木綿が使用された。こういったボロは20世紀に入るまでは使われ続けることとなる。

製紙業の革命は、1798年（1799年に特許取得）にルイ＝ニコラ・ロベールによって開発された抄紙機によってもたらされた。この抄紙機は、これまで職人が手作業で行ってきた漉きあげ工程を、漉簀（金網製のエンドレスベルトを新しく用いた）のハンドル制御による水平動作化したものである。抄紙機によって紙葉作りの工程が機械化されたことにより、紙の大きさの制限が紙漉き枠の大きさ（約36[インチ]×26[インチ]）から解放され、職人による手作業は多くの部分で不要となった。その後、19世紀初頭から20世紀半ばにかけて、金網のサイズや抄速が改良されていった。

ロベールの抄紙機は、フランスからイギリスに伝播し、産業革命の構造に組み込まれた。イギリスでは18世紀に織物業の機械化がなされていたが、それを抄紙機に応用することで実用化された。1820年代以降、抄紙機は急速な普及を遂げた。この時代には、抄紙機の技術発展が進み、ドイツのフリードリヒ・ケーニヒによって開発された輪転式印刷機によって、印刷速度の改良とコストの減少がなされた。その結果として、抄紙機は印刷本の部数の拡大と価格低下をもたらし、文学史にも大きな影響を与えることとなった。後に述べるグーテンベルクの印刷機は平版に平らな圧盤により押圧する「平圧式」、ケーニヒの高速印刷機は平版にシリンダー状の圧銅で押圧する「円圧式」であったが、輪転式印刷機は、シリンダー状の版にシリンダー状の圧銅で押圧する形式であった。これは紙のもつしなやかな物性を生かした非常に大きな技術的革新であり、抄紙機が生産する「エンドレス紙」が利用できるようになった。

③木材パルプについては、まず多く使われた碎木機は木材（針葉樹が多く使われた）をグラインダーですり下ろす形式であった。この碎木機はパルプ収率に優れ、しっかりとした質の紙が製造できたため、新聞紙などに多く使われ、その後も長い年月の間、多くの改良がなされることとなった。

④植物繊維は親水性が高いため、仕上がりを考慮するとインキや墨のにじみ止めが不可欠となる。これをサイジングと呼び、膠を用いることで行われた。1807年、ドイツのイリッヒがロジンを用いた内添サイジング法を発明した。これは不溶化したロジンを繊維に固着させることにより、漉いた段階で既に紙のにじみ止め効果が付与されるというものである。

紙の装飾性・芸術性の観点からはつや出しの技術も欠かせない。1830年、イギリスで圧力ロールを用いたつや出し機が開発された。のちに、抄紙機の出力部にカレンダーロールを設置し、そこに紙を通すことで平滑性とつやを出

すマシンカレンダーが出現した。さらに、表面光沢を出すために、金属とコットンのロールを用いたスーパーカレンダーが開発された。

パルプの懸濁液が濾される際、紙の裏面側は繊維が微細ながらも抜け落ち、表裏差が発生する。紙の平滑化において、パルプに混入する無機化合物として填料がある。17世紀初頭には粘土が填料として用いられ、現在では炭酸カルシウムが主流となっている。表裏差の改善にはツインワイヤーマシンの開発が大きく寄与した。

紙の平滑化においては、表面への塗料の塗布も行われた。このようにしてインキの吸収性についても改善されたものを塗工紙と呼ぶ。塗工紙は4世紀に中国で塗工紙が製造され、18世紀にローロッパで石膏や石灰の水溶液を紙に塗布する手法が編み出された。後に19世紀には塗工は機械化されることとなった。

書写される文字を鮮明にするためには、繊維の漂白は重要な要素となる。日本では江戸時代末期まで、靱皮繊維を自然水に漬ける手法が用いられた。ヨーロッパでは屋外で紫外線に晒すことで漂白を行った。その後、1765年にスウェーデンのシェーレによる塩素の発見により、塩素ガスと灰汁の混合液を用いる手法が多く使用された。化学工業が発展すると、二酸化塩素、過酸化水素など多くの酸化漂白剤が試行錯誤され用いられるようになった。

⑤印刷技術については、印刷物生産において、元は写本や版画が主流であった。印刷技術の大元を辿ると版画に行き着く。版の種類による技法としては、凸版（木版画）、凹版（銅版画）が挙げられる。現在主流となっているオフセット印刷の元になる技術は石版印刷（リトグラフ）である。15世紀にグーテンベルクにより凸版画を応用した活版印刷が発明され、大量印刷が可能となり、キリスト教の布教に大きな影響を及ぼすなど、情報の拡散性が一気に広まった。その結果、活字（書物）は個人で所有できるものへと変遷していった[28][30]。

絵（画像）の印刷は、文字の印刷ほど容易ではなく、彫刻による凹版印刷の技術発展とともに行われてきた。19世紀後半には輪転式のシリンダ状の版によるグラビア印刷が開発され、カラー印刷技術が大いに発展した。この技術は主にコストの問題から、現在の主流であるオフセット印刷に主役の座を明け渡すこととなった。凸版、凹版に次いで、18世紀末にアロイス・ゼネフィルダーにより平版技術が開発された。平版印刷の元となるリトグラフは石灰石や金属に油脂による描画を施し、版に水を引き油性インキを乗せ、水と油の反発作用により印刷を行う、これまでと異なる化学的な版画印刷手法である。リトグラフは油性の画材をそのまま用いることができるため、繊細な表現を可能とし、主に芸術表現の分野の表現技術発展に大きく寄与することとなった。のちに1875年に英国でブリキシリンダーを用いる手法が開発され、19世紀末に写真製版の技術が登場し、リトグラフは石版印刷から金属版輪転機を用いたものに移行した。

20世紀末になると、オフセット印刷が登場した。オフセット印刷の特徴としては、刷り上がりの美しさや色の鮮明さ、また印刷内容（文字や画像）を問わないことが挙げられるが、これまでの技術との最大の違いは版にある。版材は石灰石、亜鉛、アルミ、紙やフィルムと変遷し、軽く手軽に扱えるものになっていった。原稿から版を作る技術としては、初期は版下を用いた手法が主であった。これは紙原稿を製版カメラで撮影し、フィルムへ出力したのち、それを材料へ接触させ露光し印刷版を作るものである。しかしこの方法は品質が安定せず、グラビア印刷に仕上がりの美しさで劣るものであった。そののち、PS（Presensitized Plate）という感光材付きプレートが開発され、印刷仕上がりの向上によりオフセット印刷は主流へと躍りでることになった。文字原稿を作る際に重要となったのが写真植字（通常、写植と呼ぶ）である。写植とは印刷する文字に対するサイズ変更や視覚効果の付与などの編集技術である。写植は日本の技術者、石井茂吉と森澤信夫によって実用化された。オフセット印刷の台頭により、印刷物の数量の増加に伴って写植は重要技術となった。初期の写植機は手動であり、文字の原型の羅列であるガラス製の文字盤を利用したものであった。のちにコンピュータ技術の発展により、計算機上で文章への視覚効果の設定が可能な電算写植機が生まれ、文字入力と組版の分離が可能となった。そののち、Apple社のMacintoshの登場により、レイアウトまでを含めたすべての工程を計算機上で行うDTP（デスクトップパブリッシング）が主流となっていった。

また、印刷用の機械の技術変遷に並行し、様々な紙、インクが開発されていった。DTPの普及により、活版印刷にデジタル印刷がとって替わった。現在では商業出版には、石版印刷（リトグラフ）を元にした平板に分類されるオフセット印刷が主流となっている。

グラビア印刷やオフセット印刷の登場により重要な要素となったのが色分解の技術である。色分解とは人間の知覚する色を、表示媒体の仕様に合わせ色成分に分けて再現する手法である。電子制御ディスプレイでは加法混色（RGB）、カラー印刷には減法混色（CMYK）が用いられる。

⑥一方で、紙そのものに様々な加工を施し、特殊な性質や機能を持たせる工夫も多く登場した。これらは加工紙、特殊紙、機能紙と呼ばれるもので、用途に応じて様々な加工が施される。

紙の加工に関しては、紙加工業の最古の製品がトランプカードであったという興味深い事実がある。紙加工業の中心となった製本であるが、そこから当時「クヴェール」と呼ばれる封筒が誕生した。1840年代に登場した封筒の製造機は1851年のロンドン万博で注目を集めた。紙加工業の発展に伴い、紙製品のバリエーションは、その使用者の身分を問わず、急速に増加の一途をたどった。具体的には書籍、便箋、新聞、書類、習字帳、届出書類、シガレットペーパー、ボール紙、紙袋などである。紙そのものの品質も向上し、「高級紙」と呼ばれるものは19世紀半ば以降、紙花、祝賀カード、聖画などに使

用されるようになった。高級紙が注目を集めた1873年のウィーン万博の公式報告には以下のように記述されている。「味気ない業務用品や実用品としての役割に満足しきれなかったのか、紙は日常の限界を越えて、花や葉、豪華に装飾された恋文、カード、キャンディー箱やボール箱など、高級なもの、幻想的なものの世界へと足を踏み入れ、ラベル、勲章、飾り帯、扇子や花束留め、皿敷きやナプキンとなった。また今日、すべての文明国では多くの人の手が、自然のものに色つやで勝るとも劣らない紙製の花やつぼみをつくり出しており、レースやフリンジ、銀や金の縁取り、金紙や光沢紙、要するにありとあらゆる装飾用とに多様な紙製の高級製品が利用され、人の目を楽しませているのである」[62]。高級紙が最も栄えた時代は1860年頃から1930年頃であった。高級紙の製造は主に中小企業が担った。この頃、高級紙は家庭で用いられるインテリアに適切であると考えられていた。インテリアとはカレンダーや信仰画、カードなどである。現代、建築デザインの分野で行われるように、主にフランスやドイツで紙細工の建物・模型も制作された。さらに、現代の我々が依然としてするように、ペン先、はさみ、針、糊を使い、こうしたインテリアを自らの手でつくり、コレクションすることも多くなった。

加工紙とは薬品の塗布、貼り合わせ、蒸着、型付などを行ったもので、包装材として用いられるポリエチレン加工紙や金属蒸着紙、粘着紙などがよく利用される。

日用品でよく用いられる紙は一般紙と呼ばれるが、それに対比する形で、特殊用途向けに特殊な条件で抄紙や加工を行ったものを特殊紙と呼ぶ。また、紙自体に特定の機能を持たせたものを機能紙と呼ぶ。特殊紙の具体的例としては、グラシン紙、化繊紙などが挙げられ、塗工印刷用紙、情報用紙、工業用雑種紙などに大別される。特殊紙とは「特定の用途にのみ使う紙用途によってそれぞれ適合した性質を付与されている。原料、薬品、抄紙条件が一般紙とかなり異なり、また塗工、ラミネート、含浸などの加工されたものも含まれることがある。一般紙に対応して用いられる用語で、多品種小ロット製品または高付加価値製品としての意味をもつ」と定義されている[85]。機能紙とは従来の”紙”に新たな機能を付与した紙”であり、「植物繊維に限らず、有機、無機、金属繊維などの幅広い素材を用い、製紙及び加工の工程で高機能高性能が付与され、主に情報、電子、医用などの先端分野の素材として用いられる紙である」と定義されている[86]。機能紙は天然繊維原料の紙においては特殊紙と重なるケースも多い。

機能分類	特性	種類
機械的特性	強度・弾性の高さ 耐摩耗性	産業工程紙 炭素繊維紙
熱的特性	耐熱性 保温性 熱放射・発熱・蓄熱、吸熱性 感熱性 熱成形性	ガラス繊維紙、セラミックス紙など 断熱性機能紙など 遠赤外線セラミックペーパーなど 感熱紙など ヒートシール紙など
電気・電子・磁気的特性	導電性 磁性 電気絶縁性	導電紙など 磁気記録紙 ケーブル用絶縁紙など
光学的特性	感光性 光透過・光反射性 発色性	遮光紙など 情報用紙など サーモクロミック・フォトクロミック紙
音響特性	音波伝達性	遮音制振紙
化学的特性	イオン交換性 気体吸着・脱着性 気体透過性 液体選択透過性 接着・剥離性 水溶解性 保水性 耐油性 耐薬性	イオン交換紙 防臭紙など エアフィルターなど 液体フィルターなど 粘着紙、ヒートシール紙、剥離紙など 機密文書など 保水性用紙など 吸油紙など 耐薬品性紙など
生化学的特性	薬理作用 創傷被覆性 遺伝子工学 微生物分解能 防虫能力 生体模倣性	抗菌紙 キチン繊維紙 遺伝子工学用紙 天然ポリマーシート 防虫紙 バイオリアクター
感性機能	印刷 包装 天然品模倣性	印刷用紙 透かし模様紙など 擬草紙
複合化機能	表面処理性 ハイブリッド機能	ポリマー処理紙など 壁紙の原紙、ハニカムフィルター

表 2.2 機能紙分類

特殊紙と機能紙の違いは、特殊紙が靱皮繊維系の特殊セルロース、木材パルプを基にした高付加価値紙を指すのに対し、機能紙は天然繊維に限らず化学繊維、合成繊維、炭素繊維、セラミック繊維、金属繊維などを原料とするシート形状のものを指す。すなわち原料を基準とした分類であると認識されている[84]。

機能紙をその機能について分類すると表2.2のようになる[84]。この中で多く市場に出回っているのは耐熱性機能紙、電気絶縁性機能紙、接着紙である。情報用紙も感熱記録紙、ノーカーボン紙など多く応用化されている。

## 2.4.2 規格と物性

### 2.4.2.1 計量・規格と流通

紙の重量は1平方メートルあたりの重さ（坪量）もしくは連量（特定の規定寸法1000枚あたりの重さ）で表現される。坪量は1平方メートルあたりの標準調湿条件下での質量と定義される。厚さは2枚の金属円形加圧板で挟んだ状態（50[kPa]から100[kPa]）でマイクロメータにより測定する。密度は厚さあたりの坪量であり、製紙工程処理により大きく変動する傾向がある。分類としては、坪量で以下のようなになる。

- ・紙 約8から150[g/m<sup>2</sup>]
- ・厚紙 約250から450[g/m<sup>2</sup>]
- ・板紙 600[g/m<sup>2</sup>]以上

1990年の調査によると、紙の国内消費量は16,403（千トン）、板紙は11,824（千トン）であり、それぞれの占める割合は59.1%、41.9%である。用途別に消費量を見ると、印刷用に12,730（千トン、45.1%）、衛生用に（千トン、4.9%）、包装・加工用に（千トン、8.1%）、板紙に22,521（千トン、41.9%）となっている。この年の国内消費量は国民一人あたり228キロであり、世界第2位の生産量となっている。

### 2.4.2.2 紙による構成・造形・デザイン

紙はフレキシブルディスプレイとの違いとして、「曲げる」特性だけでなく、多くの造形的特徴を持っている。

朝倉直巳の研究[52]に、他の平面材と紙との比較において、長所・短所のアンケート調査がある。調査によれば、紙の長所としておおまかに「手軽に使いやすい」「弱い」といったことが共通認識である一方、「弱い」ことが長所としても認識されている。すなわち、加工が容易であるということである。紙の加工法としては、大まかに表面的な加工と立体的な加工に分けることができる。

紙の種類としては、以下の3つに分類される。

#### ①媒体としての紙

- ・印刷用の上質紙、アート紙、コート紙、コピー紙など
- ・書写用の便箋用紙、画仙紙、ケント紙など

#### ②包装材としての紙

長 所	a	b	短 所	a	b
加工しやすい	166	68	火に弱い	162	73
切りやすい	50	66	破れやすい	138	37
折りやすい	65	22	耐久力がない	137	36
接着しやすい	54	20	水に弱い	84	51
なためる	26	2	汚れやすい	15	50
まるめやすい	7	20	外力に弱い	53	8
破きやすい	22		変色する	43	18
組立てやすい	18	4	湿気に弱い	20	3
型つけやすい	17		不透明	18	5
水張りに速す	1	16	折れ目がとれにくい	5	10
とじやすい	7	2	伸縮性がない	15	
その他	8	6	軽 い	14	
加工方法豊富	5	1	器具のりにくい時あり		13
安 価	168	48	高 価	2	10
軽 い	135	40	つるつるしすぎる		12
着色しやすい	104	65	まさつに弱い	5	6
印刷に便利	89	20	やわらかい	11	
種類が豊富	70	7	薄 い	9	
後処理に便利	61	15	薬品に弱い	6	3
輸送・携帯に便利	42	17	保存しにくい	9	
用途が広い	35	20	弾力性がない	7	
強い・丈夫	25	30	傷がつきやすい	3	4
美しい	31	23	洗濯できない	7	
保存しやすい	30	24	安っぽく見える	7	
場所をとらぬ	33	15	かたい		4
入手が容易	24	24	絵具が乾き難い	1	3
燃しやすい	38	1	伸びやすい	4	
量産可能	17	10	吸水性悪い		3
水に強い		25	大きな物をつれない	3	
吸水性あり	14	10	重 い		3
薄 い	19	3	ごわごわする		3
やわらかい	19	2			
平 滑		18			
字を消せる	14	4			
危険性がない		18			
再生できる	13	5			
電気絶縁	14				
保温性あり	4	6			
ほりがある		9			

表 2.3 素材としての紙に対する印象[73]

クラフト紙、ロール紙、奉書紙など

### ③その他

電子回路の絶縁材、障子紙、ティッシュペーパーなど

朝倉は、紙の長所であり短所でもある「弱さ」という特性が創造にとって最も重要であり、紙を用いた造形は「破壊」を起点とするとしている。「破壊」とは①「折る（塑性）」②「切る（せん断）」③「曲げる（腰、剛性）」の3点を基本の加工技法とし、これらの組み合わせにより表現が多彩かつ容易になるとしている[73]。

#### ①折る

紙の力学的特性の大きな特徴である「形状変化とその維持が容易である」ことから生まれる加工である。言い換えれば塑性すなわち加工のしやすさであり、力に対する永久変形の性質を指す。変形には延性と展性がある。

日本で伝統的に用いられてきた儀礼用の折り紙などは、「遊戯折り」「礼法折り」などに分かれて技法的に発達した。山折・谷折を組み合わせた蛇腹折

番号	A列	B列
0	841×1189	1030×1456
1	594×841	728×1030
2	420×594	515×728
3	297×420	364×515
4	210×297	257×364
5	148×210	182×257
6	105×148	128×182
7	74×105	91×128
8	52×74	64×91
9	37×52	45×64
10	26×37	32×45

A列本判	625×880
B列本判	765×1085
四六判	788×1091
菊判	636×939
地券判	591×758
三三判	697×1000
三四判	730×1000
ハترون判	900×1200
ロール判	712×985
フールス小判	333×424
フールス倍判	424×668
半紙判	242×333
美濃判	273×394
大奉書	530×394
中奉書	500×364
小奉書	470×333
アイボリー紙	582×758
ボール紙F判	650×780
ボール紙L判	800×1100
ボール紙K判	640×940
ボール紙S判	730×820
ボール紙M判	730×1000
画学紙	582×758
木炭紙	470×621
ツヤ紙	508×762
セロファン	909×1000

表 2.4 紙のサイズ規格[73]

りなどは装飾に多く用いられるレリーフである。折り方を直線や曲線などの組み合わせにすることで多様な立体を構成することができる。立体レリーフの多くは展開図をもとに作成することができ、汎用性が高い。エンボス加工も一種の「折る」加工に分類できる。

### ②切る

紙の力学的特性の特徴「せん断方向へ変形しづらい」が活かされる加工である。より細かく分類すると「破る」「むしる」なども含まれるであろう。

造形的結果としては切り絵やコラージュなどが生まれる。「折る」と組み合わせることでより複雑な形状を構成可能である。

### ③曲げる

この加工も紙の力学的特性「形状変化とその維持が容易である」を生かしている。より細かく分類すると「ひねる」「ねじる」なども含まれるであろう。さらに曲面の維持も、紙それ自体の曲げ特性によるものだけでなく、接着によるより強固な形状保持も可能である。紙の持つ腰は剛度と呼ばれ、紙の種類により非常に多様であるため、造形性に高い自由度をもたらす大きな要素となる。

以上のすべての特性は紙の種類によるところが大きく、言い換えれば幅広い選択肢をユーザーが持つことになる。

ペーパーライクな電子制御型ディスプレイでは、以上の3加工技法の再現は非常に困難であり、即ち紙独自の特性であると言えることができる。

表面的加工法 (表面処理的) (加工法)	変形的加工法			
	非変量	増量	減量	変質
筋をつける	折る	貼る	切る(道具で)	焼く
ひっかく(刃物)	折り曲げる 折りたたむ	とじる (ホッチキス、糸、はとめ、等で)	切り取る 型で打抜く	燃やす こがす
磨く				
プレスする	ひだをつくる	さし込む	やぶく(手で)	腐蝕する(薬品)
凹凸をつくる	まげる(折り目がた)	結ぶ、つなぐ	ちぎる はがす	
へこます	たわめる	編む、織る		
型押し	まるめる	のばす・(水分を加えて)	ちぢ(乾燥・加)	らす(熱などで)
もむ	カールする	ふやかす		
切込む(切り取)	ひねる、よる		くたく	
その他(こする、水をつけてよる、けばだたせる、等)	突き破る(摺る)		とかす(ぎなど)	
	その他(押しつぶす、ぐしゃぐしゃにまるめる、ほぐす、開く)			

表 2.5 紙の加工・造形分類[73]

まとめると、造形・構造構築の観点から、電子制御型ペーパーライクディスプレイとの決定的な差を、「造形・創造のための破壊が可能か」に見ることができると言えよう。

### 2.4.2.3 構造・機械的特性と固有の性質

紙とは、「植物繊維を抽出して、これを水中に分散させ、水の媒介により薄く平らに絡み合わせて造ったもの」と定義されている[94]。

紙の持つ特性としては、柔軟性とある程度の腰の強さを両立させていることが特徴である。単純に造形性の高さを求めるならば、紙以外にも布や木材などの素材も馴染み深いものである。しかし、紙はこれらの素材と異なり、物性の選択肢も広いことから、特殊な工具を用いず手作業でラフに、またディテールの厳密さ、曖昧さをユーザーが自由にコントロールすることが可能である。

紙の物性を評価する上では、主に以下の要素を考慮する。

#### ・構造

パルプと結合素材が複雑に絡み合った構造を持ち、「織り込まれていない」ことから不織布とも呼ばれる。厚さ、比容積、坪量、密度、透気度、平滑度、地合などが評価項目である[98][99]。

厚さは2枚の金属円形加圧板で挟んだ状態（50[kPa]から100[kPa]）でマイクロメータにより測定する。

透気度はガーレー試験機法などを用い、一般化されたISO透気度により評価する。

地合とは、白色光を紙に透過させたときに視覚的に感じられるムラを指す。光学濃度あるいは局所質量の標準偏差もしくは変動係数により評価される。白色度とは、紙表面に0°（垂直方向）に拡散照明光を照射した場合の反射光量の、完全拡散反射面に反射された光量に対して百分率で表現した値と定義されている。不透明度とは、560[nm]程度の緑色光を照射したシートの反射率を、シートが単一の場合と無限に厚い想定数の場合の比を百分率で表現した値と定義されている。

光沢については、75°の入射角・反射角の設定で光照射し、その比率を評価尺度とする。光沢は表面平滑性の主要な指標となっている。ここでいう光沢とは印刷前の紙におけるものであるが、印刷後の紙の光沢である印刷光沢という評価項目も存在し、塗工条件やインク組成など多様な条件に作用される複雑なものである。

#### ・調温条件

一般的に紙の物性は、温度依存性が低く、湿度依存性が高い。ただし温度に急激な変化が生じると引張強度に大きな変化が生じる。室温よりやや高い温度付近での温度制御を行う本システムにおいて、温度依存性の低さは重要な要件となる。

#### ・力学的特性

紙の力学的特性は、紙の繊維の強度と、繊維同士の絡み合いの強さの2要素によって決定される。JIS規格において①引張②耐折③引裂④曲げこわさ⑤摩擦⑥破裂⑦圧縮強さ（リングクラッシュ圧縮）⑧ショーソスパン圧縮⑨弾性率などの多数の評価項目がある。代表的なものとして、引張強さとは一定幅の紙を切断に至るまで引っ張った際の最大荷重である。耐折強さとは、同一部で繰り返し左右に折曲げた際の耐久度を表したものである。破裂強さとは、紙面方向に垂直な圧力を加えた際、押し破るのに要する力である。引裂強さとは、紙をある2点で固定し、互いに反対方向へ引き裂く際の最大抵抗力である。圧縮強さとは、紙を切り輪の形状を作り、その輪がつぶれるまで圧縮した際の最大荷重である。

力学的特性において最も顕著な特性は引張強度の高さである。長さ方向の圧縮に対して、容易に座屈を起こすが、曲げを戻す方向に高い抵抗力を持つ。せん断変形では、しわが容易に生じる。総じて、力学的特性をまとめると、

- ・ 縦方向、横方向、せん断方向へ変形しづらい
- ・ 面方向の曲がりやすさ
- ・ 曲げと垂直の方向の抵抗力

が主要な特性である。

また、製紙工程において、パルプ繊維を切り、潰す叩解という工程があるが、密度、引張弾性率、引張破断伸びは叩解によって上がる傾向がある。

総じて紙の強度は繊維組成、叩解、添加物に大きく影響される傾向を持つ。

紙の力学的特性において、重要な要素として異方性がある。全方向に同一の熱的特性を持っている材料を等方性材料という。熱的な特性が直交する3軸で異なる場合、その材料を直交異方性材料と呼ぶ。抄紙において繊維配向が生じるため、紙はその組成上直交異方性材料である。縦方向（MD）、横方向（CD）について評価すると、紙はMDに繊維が配向しているため、異方性が生じている。これは抄紙プロセスによって生じるものである。すなわち、引張強さ、引張破断伸びについて、MD、CDそれぞれに異なる分布を生じる。しかし、これは紙の種類によって非常に多様な特性を現す。異方性は方向毎に破れやすさ、破れにくさを生み、造形的加工の多様性を生む。

- ・ 光学的特性

拡散照明/0°の受光による反射係数により評価される白色度、不透明度、比散乱係数、色などと、同一の入射角/反射角拡散照明/0°の受光による反射率係数によって評価される光沢がある。

- ・ 液体との相互作用

「濡れにくさ」は液滴との接触角によって評価する。接触角は叩解の影響を受ける。「濡れ」とは固体の表面のある箇所が液体・固体界面で置換される

現象と定義される。浸漬濡れ、拡張濡れ、毛細浸透濡れなどに分類される。インクジェット印刷などにおける吸液度はプリストー装置と呼ばれる走査装置により測定される。

#### ・質感と心理面の影響

紙は着色が容易であることから、デザインにおいて色彩の選択とその影響は重要な要素である。質感については、紙の色は質感認知に影響しないことが研究結果によって示されている[24]。また、紙を含めインテリアの色彩は居心地に影響するとする研究結果もある[25]。

また、多く出回っている蘇生紙については、蘇生を行うことで物理・力学的特性が変化するという研究報告がある[119]。力学的特性を紙の種類により逆引きできる点も長所である。

評価手法が確立されていること、特に力学的特性と吸液特性においてそれが詳細であることから、実際の使用においてもより優れた精度での造形が可能であることから、システムへの適用がしやすい素材であると言える。

#### 2.4.2.4 他素材との比較

紙と共通の用途を持ち、最も近い特性を示す素材としては布が挙げられる。紙と異なり、繊維が糸（縦糸と横糸）として格子状に編み込まれている。この構造のため、せん断変形・弾性変形を容易に起こすが、平面方向の変形は少ない。紙と同様、長さ方向の圧縮抵抗が低く非常に曲がりやすいが、繊維の構造上折り目や破断は起きづらい[95]。

紙と布の力学的特性の大きな差としては、曲げ変形に対するハリ、破断の起きやすさにおいて紙が上回っていると言える。言い換えれば外からの力に対しての形状変化の反応の良さと形状維持性において紙が優れていると考えられる。

#### 2.4.3 紙メディアの立ち位置

紙の立ち位置は、その機能において大部分を分け合う形となった電子制御ディスプレイとの比較なしに語ることはできないであろう。紙は、コミュニケーションのための物質的なメディアでありながら、文学や芸術に代表されるように思想や感情を表現する媒体であり、また知財の保存媒体でもある。

紙が現在の立ち位置を継続して確保できている理由のひとつとして、原料を理由とする数量の確保の容易さが挙げられる。歴史的には、諸事情から紙の不足が起こることが度々あった。アメリカ独立戦争の最中、慢性的な紙不足の期間があった。紙は輸入品であり、イングランドとの紛争により供給が追い付かなくなったためである。1775年、独立戦争が始まると、紙不足に

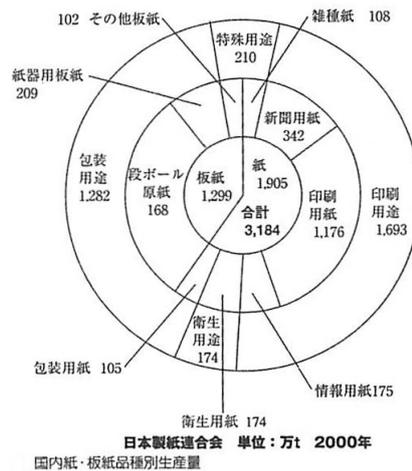


図 2.7 紙の種類・用途と生産量[69]

追い打ちがかかり、植民地での製紙業の推進が最重要課題となった。歴史的には、他の時期にも、経済的な理由や戦中戦後の不足経済により、たびたびの紙不足が発生した。しかし、紙のひとつの特長として、原料が自然素材である以上、原料の適切な管理により、立て直しが比較的容易であることが挙げられる。原料問題の影響力がどのようなものであるかは次の例がある。ドイツでは1800年頃に一人あたりの紙の使用量は0.5[kg]と微量なものであったが、1873年には2.5[kg]まで増加した。さらにその後の四半世紀には13から18[kg]まで達した。第一次世界大戦により紙不足が起こったが、同時に技術革新も招いた。ライプツィヒの印刷所は非常に薄い紙幣用紙を開発した。この頃は既に用途は広く一般化され、ドイツ製紙工場連盟の1928年の統計によると、32%が包装用、26%が新聞印刷用、20%が書籍・印刷物、14%が書写用紙・画用紙、8%がその他の衛生用紙などであった[63]。

一方、電子制御ディスプレイの台頭は紙の歴史において最も重要な出来事であると言えるであろう。それは電子制御ディスプレイが、これまで紙の担ってきた一部の機能や用途に取って代わるだけでなく、元々の性能を凌駕することも多くの場合見受けられるからである。紙の歴史は、デジタル技術を用いた蓄積・流通メディアの先史でもある。紙は文化の変化に対する適応力が高く、常に社会の中で重要な地位を確保し続けた。電子技術の台頭により、紙に対抗しうる媒体が歴史の中で初めて現れた。現代は、これまで紙が占めてきた生活習慣・文化・技術がデジタル技術にとって代わられる時代となった。

1932年の講演でポール・ヴァレリーは「紙を蝕む細菌」という表現で、今後の紙文化の衰退を予期した[60]。この講演でヴァレリーは紙を電気の隠喩でとらえ、紙が蓄積と伝播の媒体であるとした。この時期は電氣的メディアと紙メディアは相互に支え合う関係にあった。その上でヴァレリーは近代文化における紙の不可欠性を指摘したうえで、文学や芸術を含めた現代文明が総合的に解体されることを危惧した。実際に今日、電子メディアは紙の従来の

立ち位置を少なからず喰う形で大きく台頭している。ジャック・デリタは、こうしたヴァレリーの議論を引き継いだ上で、紙は「消える」まではいかずとも、最重要の伝達メディアとしての王者の立ち位置を失うと予期した。つまり、電子媒体が普及・発達したのちも、社会には紙が依然として大量に存在するであろうということである。

ではなぜ紙は依然として身近なものであり、衰退も消滅もしないのだろうか。一つの理由として、紙が単なるメディアにとどまらず非常に多くの側面を持つことが挙げられるであろう。

紙と後述する電子ペーパーの関係を考えるときにも、「製本された紙」と「製本されない紙」、「印刷された紙」と「印刷されない紙」の関係を俯瞰し考慮しなければならない。さらに、考慮すべき点として、従来の紙のフォーマットの全ての要素にデジタルデバイスは対応できるのか、アナログなページとデジタルなページの違いは何か、重要な文化として存在した新聞の切り抜きやカードに該当するものは電子ペーパーにおいては何なのか、電子書籍と本の書籍、電子新聞と紙の新聞の関係は同じなのかといった数々の問題がある。

ベルリン自由大学のローター・ミュラーは、紙に対しては3つの捉え方があると指摘している。すなわち、物質としての紙、媒体としての紙、時代へ溶け込む文化としての紙の捉え方である。物質としての紙とは、歴史的にみた製紙技術発展である。媒体としての紙とは、どのような文化・生活様式において流通メディアとして機能してきたのかである。時代へ溶け込む文化としての紙とは、紙が時代時代でどのように捉えられてきたかということである。

英国の文学史研究者ヘンリー・ハラムは、紙を「普遍物質」と呼称した。ハロルド・イニスは、石材・土材・羊皮紙が「重いメディア」であるのに対し、パピルスや紙は「軽いメディア」であるとした。そのメディアとしての軽さは、空間的な伝播・コミュニケーションに適しており、蓄積だけでなく流通機能をも両立した。紙は、蓄積・持続の面（時間）のみならず、流通の役割（空間）も果たしてきた。その点で、現在の電子メディアと対応する点が多い。マクルーハン[30]は「メディア論」の中で、製紙技術と空間の関連性について、次のように述べている。「印刷された形で情報が移動するようになると、車輪と道路が千年の中断のあとふたたび作動をはじめた。イギリスでは、印刷からの圧力が18世紀に硬面道路をもたらし、その結果、人口と産業の再調整がなされることになった。」

19世紀には蒸気力により製紙の産業化が行われ、20世紀には電化と自動化であった。それに伴い、電気と紙が、文字、画像、データの蓄積と流通を促進させた。19世紀、電信は輪転式印刷機に重要な役割を果たした。多くの新聞は「電信」を意味する言葉を紙名に取り入れることで、速報性をアピールした。しかし、第二次世界大戦期においては、速報性を特長とする媒体の座はラジオに取って代わられた。その後テレビ、電話といった機械が登場するに

つれて、それらを補完する形で紙はそれらと共生し続けた。19世紀末以降、ヨーロッパの大都市では、電信オフィスのみならず新聞切り抜きオフィスが存在していた。切り抜きは、指定された箇所印をつける係、それを切り抜く係とで分業されていた。新聞を切り抜くことのメリットはそのフィードバック効果にあった。新聞を切り抜くことでその内容を再グループ化し、個人がプライベートなアーカイブを作ることができる。二次的な紙メディアができる。切り抜きの蒐集と保管は自己評価・研究資料などとして機能した。紙は、それ自体が新しい文化を生み出すのではなく、既存文化の内部で情報の蓄積・流通の要として働き、他の技術と結びつき、文化発展に貢献するメディアと言える[60]。すなわち、紙というアナログなものがデジタル媒体に「移行」するのではなく、共時的な関係を保って両立している。

Abigail J.SellenとRichard H.R.Harperは、著書「ペーパーレスオフィスの神話—なぜオフィスは紙であふれているのか？」[46]において、デジタル技術が台頭しても紙が生活に残り続ける理由として、「デジタルの代替物が不適切に設計されているというよりはむしろ、紙がそれ自体、行うべきある種の仕事に対してはうまく機能しているという点にある。オフィスや組織が進化するとしても、そして考えられる最適な設計プロセスをもってしても、ある種の活動に対して、紙は未来においても最適なツールであり続ける可能性があることを認識する必要がある」としている。

紙媒体の優れた点、すなわち汎用性や機能性、総覧性や耐久性により、紙媒体は消滅することはないと考えられる。しかし、紙の保持し続けていた立ち位置、すなわち情報の蓄積手段は少なからずとって代わられているという表現が現状として正しいであろう。

#### 2.4.4 紙の特長と問題点

フラインマン[55]によると、紙は「身体化されて」おり、計算式を紙に書くとき「紙は痕跡ではなく思考の一部だ」と述べている。また多くの数学者はパソコンではなく、紙を用いている。その理由は身体的動作を伴うことにより、思考に向上が見られるからである。書くことによって考えに変化が起きたりといった対話が生じる。

日本新聞協会[131]によると、まず紙の機能を、情報を盛り込む「容器」としての機能と、受け手が感覚や頭脳を使って内容を理解するための「インターフェース」としての機能に分ける。「容器」としての機能は電子デバイスに劣るが、「インターフェース」としての機能は紙独自のものがあるとする。

Abigail J.SellenとRichard H.R.Harper[46]は、紙には①象徴的な問題②コストの問題③インタラクションの問題という3種の異なる側面を持つ問題があるとしている。象徴的な問題とは、紙の持つ「過去の遺物」という負の印象である。コストの問題とは、印刷して生み出すプロセスにおけるものではな

く、印刷したものを維持・保管するためのコストを指す。具体的には、作成・印刷コストに対して、ファイリングにその約3倍、保管や更新、配布までを含めたライフサイクル全体では約6倍から8倍かかるとされている[89]。このコストには保管のための機材や時間的損失に関わるものも含まれる。インタラクションの問題とは、紙に対する人の行為であり、保管や送信における物理的制約、修正や複製の手間などである。

紙メディアの問題点としては、紙メディアはその性質上、電子制御されることはなく、あくまでこれまでの歴史上使用されてきた使用法と同じやり方で我々の生活に息づいている。ごく一般的な目的で使用する以上、先に述べた紙の特徴・特性・用途を超えることはない。電子制御型デバイスの持つユーザーとのインタラクションなどの特徴を盛り込む試みは近年いくつか試みられてきたが、あくまで研究開発における試作もしくはメディアアート作品としての段階に過ぎず、一般利用者の多くのニーズに応えるものではなかった。

## 2.5 両者の対比

電子制御ディスプレイの需要は現代においてはうなぎのぼりである。電子制御ディスプレイの持つ自由な画像表示やネットワークとの連携、多様な高機能デバイスなど特長は数え切れない。その一方で紙がすたれていないのは、前述したように、電子制御ディスプレイのデザインが不適切であるわけではなく、紙が電子制御ディスプレイにはできない領域の仕事に対して適切であるからである。それは紙の持つ携帯性、加工性などの要因からなるものであると考えることができる。ディスプレイとユーザーとのインタラクションを含めて考える場合、作業の内容や分野に応じて、優れた方を使用し、分け合う形で並立していると言える。

電子制御型ディスプレイにおいては、画像表示が高機能であること、応用性が幅広いこと、デバイスが多様であることなどの長所を持つ一方で、使用において技能的ハードルが高いことなどの短所を持つ。紙メディアにおいては、生活と一体化した使用感、加工・造形性の高さなどの長所を持つ一方で、従来の利用法を超えるポテンシャルを持たないといった短所を持つ。

そこで、両者を補完し合う形での統合のためのアプローチが考案されることとなった。主流となる技術は紙の物的特性を擬似的に再現したペーパーライクディスプレイおよび、紙を投影対象とした場合の紙の質感を豊かに表現するプロジェクションマッピングである。

## 2.6 統合のアプローチ

### 2.6.1 ペーパーライクディスプレイ – 並立のための新たなソリューション –

#### 2.6.1.1 ペーパーライクディスプレイの概要と狙い

ペーパーライクディスプレイとは、紙の持つ物的特性（薄い、軽い、柔らかい）などを保持する電子制御ディスプレイを指す。その主流は電子ペーパーである。電子ペーパーの目指す技術的終着点は、ハードコピー分野ではリライタブル（電子的に書き換えが可能）ペーパーであり、ディスプレイ分野ではペーパーライクディスプレイとして開発が進められてきた[90][91][92]。電子ペーパーは、従来の電子制御型ディスプレイと紙の言わば「良いところ取り」を目指し、ハードコピーの長所「省エネルギー」「携帯性」と、ソフトコピーの長所「リライタブル」の両立をコンセプトとしている。具体的に電子ペーパーに期待する特徴としては、①紙に近い読みやすさ②携帯性と手軽さ③紙を上回る機能性④省資源と大まかに分類される。

このうち、①紙に近い読みやすさ③紙を上回る機能性については、技術の多様な発展により急速な進歩を遂げている。

②を言い換えるならば「フレキシブル」という特性をどこまで伸ばせるかということである。面谷[93]は「フレキシブル」を表2.6のようにより細かく分類している。

達成レベル	達成内容	メリット	想定用途例
弾性	壊れにくい、薄く軽い	気楽な携帯性	電子書籍、携帯テレビなど
曲面形成	曲面でも画像表示が可能	曲面形状に表示可能	車載機器など
曲げ戻し可能	巻けるなど	収納性の向上など	電子布など
折り曲げ可能	折りたためるなど	収納性の向上など	携帯可能なディスプレイ

表 2.6 フレキシブル特性と特徴

紙と電子制御ディスプレイの並立状況とそれぞれの特徴を踏まえ、電子ペーパー技術が開発され発展、普及した。電子ペーパーは非発光型の電子制御ディスプレイの代表的な例である。電子ペーパーはペーパーライクな薄い外観と、電気的な画像制御を両立させたものであり、印刷物と電子制御ディスプレイの双方の利点を合わせ持たせることを狙いとしている。

電子ペーパーの特長としては、①薄く柔軟性があること、②紙に近い高い光反射性と白黒のコントラスト、③電源が入っていない状態でも表示状態を維持できる記憶性の3点が挙げられるであろう。

技術面においては、最も早く主流となった電気泳動方式は、カプセル内に帯電粒子の顔料およびオイルを封入し、電圧をかけることで顔料が表示面側に集まることで画像が表示されるものである。

形状の大まかな分類としては、ペーパーライクな外観を優先したブック型・ペーパー型と、大量の情報を提示することを優先した掲示板型がある。単に電子ペーパーと呼称されるものは、手軽に書籍として持ち歩き読むためのブック型・ペーパー型を指す。電子ペーパーの品質は、技術改良により静止画表示が安定し、表示されたものを読むという目的については紙媒体の品質に近づきつつある。一方で書き込みや修正といった、紙の持つ他の特性については再現性が発展途上であるというのが現状である。例として書き込みを挙げるならば、書き込み装置はディスプレイとは分離されたデバイスを用いる。

応用例としてはKindle[Amazon]を代表とする電子書籍製品、時計、新聞、ラベル看板などが挙げられる。

### 2.6.1.2 電子ペーパーの技術と歴史

フラットパネルディスプレイの出現がモバイル端末やテレビの発展に大きく寄与するとともに、「薄い」だけでなく「柔らかい」特性の発展可能性にも目が向けられるようになった。

電子ペーパーで最も早く主流となった電気泳動方式では、カプセル内に帯電粒子の顔料およびオイルを封入されており、電圧をかけることで顔料が表示面側に集まることで表示される。

先に述べた目的を踏まえると、電子ペーパーの要求仕様としては、①視野角とコントラストといった視認性②スムーズな電子制御③携帯性を考慮した無電力での表示状態の維持④軽さや薄さといった扱いやすさである。

電子ペーパーの先駆技術はゼロックス社（アメリカ）により開発された。この基本技術は、透明なマイクロカプセルの中に白・黒の顔料粒子を入れ、上部の透明電極（現在の技術では樹脂基板であり印刷方式でコーティングされる）・下部（ガラス基板）からの駆動電極からの電圧により粒子移動を起こすことでドットを表示させるものである[67][68]。すなわち、表示側の電極の電位の正負によって白黒の2色を切り替えるというシンプルな制御によるものである。

次にマイクロカプセル電気泳動方式がE-Ink社によって開発された。この手法は、マイクロカプセルの封入素材を青色の液体と酸化チタンからなる白色の微粒子とし、電圧により微粒子を電気泳動させるものである。この技術により、先の要求仕様は十分に満たされ実用に耐えうるものとなった。

■図5-2-2 マイクロカプセル電気泳動型の基本構造■

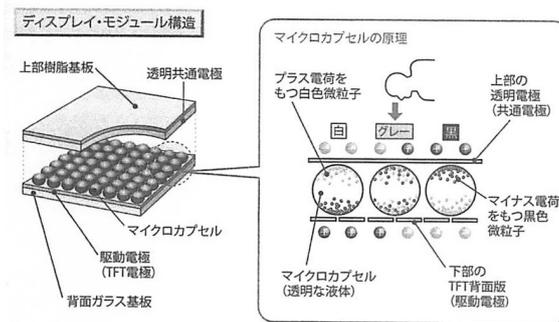


図 2.8 マイクロカプセル電気泳動型電子ペーパーの基本構造[68]

マイクロカプセル電気泳動方式以外では、以下のような表示技術が開発されていった[68]。

- ・マイクロカップ電気泳動方式

アメリカSiPix Imaging社による、マイクロカップと呼ばれる微小容器を用いたもの。柔らかいフィルム形状であるため、任意のサイズにカットできることが特徴である。

- ・ジリコンビーズ型

プラスチック微粒子の上下をそれぞれ異なる色で着色し、電界により回転させることで色を切り替える方式。

- ・電子粉流体型 (QR-LPD)

ブリヂストンによる、粒子と液体の中間的特性を持ち、高流動性と電気反応性を持つ電子粉流体という独自素材を用いた方式。高い流動性により表示応答時間が速い (液晶の約100倍の速さとなる約0.2[msec]) ことが特長である。

- ・トナー型

コピー機によく用いられるトナーを使用したもの。それぞれ異なる光学特性と帯電特性を持つ微粒子が封入された電極基板を上下に空間分離し、電位差により微粒子が移動することにより表示を切り替える方式。

- ・In-Plane電気泳動型

上下基板の間を絶縁性の透明液体で満たし、その中にトナーを封入する。下部基板の駆動電極が2つに分かれており、それぞれが白色・黒色の表示を担当する方式。

- ・ポリマーネットワーク液晶表示素子型

大日本インキ化学工業の開発によるもの。ポリマーネットワーク液晶とはセル内のネマティック液晶内部に、高分子の網目を形成したものであり、電界

の印加によって液晶分子の方向が変化することを利用し、光の透過と散乱を制御するものである。

- ・コレステリック液晶型

第3章にて詳細を記述するが、コレステリック液晶とは、電界の非付加状態では特定の色を選択反射し、付加状態では光を透過させる特徴を持つ液晶である。主にナノックスが開発している。非付加状態でも液晶分子の方向が維持されるので、電子ペーパーの要求仕様にも応えることができる。

多くの方式と異なり、コレステリック液晶には、電圧強度によって液晶分子のらせん構造のピッチを変化させることで反射色を選択できるという特徴がある。富士通研究所の研究により、コレステリック液晶層をR、G、Bの三層に重ねることにより、フルカラー化を実現している。

- ・光書き込み液晶型

富士ゼロックスによる、上記のコレステリック液晶に抵抗変化性のある有機光半導体材料を付加したもの。有機光半導体材料の光照射による抵抗変化が反射濃度の変化をもたらすため、強度を変えた光照射が書き込みデバイスの役割を果たす。

- ・カラーフレキシブル有機EL型

大日本印刷によって開発されたフレキシブル有機ELを用いたもの。屈曲状態でも発光が可能である。

- ・伸縮有機EL型

上記のカラーフレキシブル有機ELをさらに発展させたもので、有機トランジスタと有機EL素子を集積化することで、伸縮性を加えたもの。

### 2.6.1.3 フレキシブルディスプレイ関連技術

フレキシブルディスプレイ実現において重要な基盤技術となるのは、パネル製造技術である[80]。シリコンを用いない有機エレクトロニクス、従来の硬いガラスではなく柔軟性のあるプラスチックによる電子部品構成、電子回路の印刷を行うプリンタブルエレクトロニクスなどである。また、パネルの面積化と量産化のため、巻き取りによる連続作製を行う「ロール法」の実現も試みられている[81][82]。ディスプレイの柔軟性のメリットとしては、モバイル機器を想定した場合の携帯性の向上、空間設置負担の軽減などが期待されている。フレキシブルディスプレイ技術開発の方向性としては、携帯性と「読む」用途に特化した前述の電子ペーパーに関連するもの[83]、および動画などのコンテンツ視聴を目的とした、有機ELや液晶による高画質フルカラーのフラットパネルディスプレイに大別される。

#### 2.6.1.4 その他のペーパーライクディスプレイ技術

ディスプレイの新形態としてのフレキシブルディスプレイは、研究開発も盛んに行われている[77][78][79]。例として、PaperWindows[32]やGummi[33]がある。Leeらの研究[27]では、ユーザー自身が考え生み出したフレキシブルディスプレイ（デバイスとして完成されているものではなく、紙や布などによる擬似的な形状のもの）のインタラクションを分析する実験を行った結果、布が最も適した素材である結果を得ている。見附ら[76]は、異なるサイズのフレキシブルディスプレイのモックアップに対するユーザーのインタラクションの動作分析を行っている。

### 2.6.2 ペーパーライクディスプレイの現状

#### 2.6.2.1 電子ペーパーの普及状況

製紙業全体に占める新聞・書籍用途の紙の割合は、20世紀末から減少の一途をたどっている。しかし、電子ペーパーは、紙の欠点である「量が多くなりかさばる問題」「長期的にみた場合のコストパフォーマンスの悪さ」を解決できる可能性があるとして当初予期されていたにも関わらず、当初予期されていたよりも普及しておらず、逆に紙の使用量は増加している[93]。

MMD研究所の2016年の調査（調査期間：2016年2月19日～2月21日、有効回答：2,201人、調査方法：インターネット調査、調査対象：20歳～59歳の男女）によると[31]、以下のような利用状況となっている。

- ・電子書籍利用率について、無料コンテンツは22.9%、有料コンテンツは16.5%となり、前年と横ばいであった。
- ・紙の書籍での読書を行っている人（N=1,862）は83.0%おり、購入先は「書店」が85.5%と最も多く、次いで「ネットショップ」が65.6%、「古本屋」が34.3%となった。
- ・紙書籍および電子書籍で読書すると回答した人（N=541）を対象にどちらで読書することが多いかを聞いたところ、紙書籍のほうが多い」と回答した人が54.0%、「電子書籍のほうが多い」と回答した人が25.7%であった。

以上の調査結果からみてとれるように、電子ペーパーの普及率は、当初予期されていたよりもずっと低い。逆に紙の生産量、流通量はその影響を受けず、数十年単位で安定している。2015年6月の経済産業省調査によれば、1980年から2014年にかけて、紙、板紙の国内生産量はほぼ横ばいである。2000年代から輸入紙の流通量が増加したものの、トータルとしての流通量はこの30数年で横ばいとなっている。

### 2.6.2.2 予想される原因

佐々木[45]は、電子ペーパーが社会のインフラとして定着するための条件として①デバイスの普及②読むための最適なプラットフォームの構築③作家のフラット化④電子ペーパーとユーザーの出会いの機会をもたらすマッチングモデルの構築の4点を挙げている。

泉谷ら[68]は、電子ペーパーの普及が伸び悩み、紙の使用量が増加している原因として、現状ではユーザーへの目の負担という問題が解決されていないと推測している。

筑瀬[97]は、「紙とは何か」という問いに対する技術分野からの見方が「印刷可能であり、軽く薄い」程度であり、紙がこれだけでは定義しきれぬ複雑な素材であることを考慮していないためであると指摘している。

佐々木の挙げるプラットフォームの問題、泉谷らの挙げる技術的問題はそれぞれ今後の大きな改良が期待できるものである。

他方、電子ペーパーに類似する別のデバイスに目を向けてみると、電子書籍の普及が伸び悩む一方で、例として電子辞書は使用者が多い。このことから、電子書籍で何を読むのか、どのように使用されるかは非常に幅広い問題であり、ある限定的機能ならばデバイスのデザインに求めるものは少なくなり、非常にスムーズに生活に溶け込むことができる可能性がある。例として、小説や図鑑に求められる「読み方」「書籍のサイズ」「カラー」は違うものであるだろうし、辞書ならインデックスが必要だったり、図鑑ならサイズが大きくなければならないなどの問題がある。つまり、ユーザーの求めるコンテンツにデバイスが適合しないケースもある。すなわち全てのコンテンツにデバイスのデザインが対応できない状況が発生する。

### 2.6.2.3 本質的問題点

ペーパーライクディスプレイは、あくまでも「擬似的な紙」「紙の模倣」の水準を現段階では超えておらず、本来の紙の物的特性の再現には至っていない。すなわち、ペーパーライクディスプレイを表現するならば、「紙の代替品」ではなく「極薄型の電子制御ディスプレイ」という言葉が現状では適切であろう。

## 2.6.3 プロジェクションマッピング - 物的特性を考慮した投影技術 -

### 2.6.3.1 概要と利点

プロジェクションマッピングは、投影対象の形状情報を取り込んだ形でのプロジェクション手法である。形状情報のフィードバックにより、投影物の立体感や質感のリアリティのある擬似的表現を行うことができる。その用途としては、商業施設におけるイベントなどの催事の演出、サイネージ、アート

表現など非常に幅広い。その本質は立体感や質感の擬似的表現である。またプロジェクションを技術的根幹とすることにより、広いエリアへの高解像度表現が可能である。

### 2.6.3.2 問題点

プロジェクションマッピングの抱える問題点としては、以下の点が挙げられる。

- ・センシングとそのフィードバックのために、プロジェクション部分以外の余分なシステムデザインが発生する
- ・マッピングなど、システムモデルが複雑化しやすい
- ・リアルタイムトラッキングの場合、トラッキング条件に限界がある
- ・投影対象を紙とするとき、その意匠と特性のずれ（構成された紙としての意匠・特性がプロジェクタ、すなわち強い発光につぶされる）が発生する

このうち、本研究で特に着目したい点として、投影対象物の物的特性が、強い照射光を受けることで投影情報に塗りつぶされ、質感や立体感、施した意匠などが失われる問題がある。そのため投影対象物はあくまでスクリーンとしての役割しか果たすことができず、その物的特性はシステムの中でほぼ切り離されている。

プロジェクションマッピングは質感の表現として非常に優れた手段ではあるが、特に紙に適用した場合、紙の持つ本来の質感・素材感は表現の中で破棄されている。また、この投影手法では紙の持つ多様な特性のうち、見た目の質感・素材感程度の擬似的再現に留まる。

### 2.6.4 統合アプローチで解決できない問題

前章にて論じた、紙と電子制御ディスプレイの並立状況と、ペーパーライクディスプレイなど統合アプローチの問題点は紙独自の物的特性に照らし合わせて考えることができる。すなわち、ディスプレイがいかにかペーパーライクなものであろうとも、ユーザーがその目的に応じて求める、紙が本来持つ多様な特性を完全には再現できていないということである。その特性とは、紙の持つ情報提示機能としての表面に乗せられた色素の表現と、ユーザーと紙との創造的インタラクションであり、ユーザーがその欲求に応じて自発的に行うものである。

以上を総括すると、統合アプローチの問題点とは、「紙の本来の物的特性をあくまで擬似的に一部しか再現できていない」点であると言える。

筑瀬[97]は、理由として以下のように議論している。「一つは、「紙がもたらす効用とは何か」「書籍とは何か」という紙という素材をめぐる根本的な論議が欠落していることである。一つは、「紙とは何か」の問いに対する技術系の人たちの見方が「印刷できて、軽くて薄くて折りたたみ、かつ値段が安い媒体」程度であるためだ。（中略）紙はこれだけでは定義しきれぬ複雑な素材である。

定義を単純化することで、「軽くて薄くて折り曲げ可能なディスプレイ(=電子ペーパー)が完成すれば紙の代替となる。紙も本もなくなる」という発想になるようだ。」

Abigail J.SellenとRichard H.R.Harperは、紙とデジタルディスプレイの違いとして、アフォーダンスの観点から「紙が素材それ自体と造形したものの双方が人間の様々な行為をアフォードする一方で、デジタル技術の提供するインタフェースはそのフィードバックを解釈するために多くの学習と経験を必要とする」「ある種の読む作業については、現在の電子的技術は少なくとも紙と同じくらい優れた紙の代替物を提供するにいたっていないということである」と結論付けている。」としている[46]。

筑瀬、Sellen、Harperらが指摘するように、「紙に近いディスプレイ」を実現する上で、「ペーパーライクであること」すなわち、紙にどれだけ近似した物質としてのディスプレイを開発できるかといった偏った技術開発方針に沿った結果、見た目だけが紙に似て非なる薄型ディスプレイという中途半端な電子制御ディスプレイが生み出されたのではないだろうか。紙の数多ある特性の中で、フレキシブルディスプレイは「曲げる」「たためる」「軽い」といった、ある偏った側面にのみ着目し、その他の紙が本来持つ物的・機能的側面の再現には至っていない。電子ペーパーは、それまでの書籍や紙状のディスプレイに倣い「形態の有機性」を目指したものであり、「素材の有機性」を目指したものではない。あくまで「ペーパーライクな要素を追求した電子制御デバイス」である。つまり、電子機器の設計・製造者から提供される商品であるという構図は変わらず、これまでの電子制御型ディスプレイの改良版であることを超えることはない。

以上を総括すると、解決されていない問題点は、紙の持つ様々な特性のうち、有用であると人が認識し、未だに紙が使われ続けている理由を読み解くことで見えてくるものであると考えられる。

## 2.7 両者の進化におけるの起点と終点

前述のように、発光型ディスプレイの紙面発色型ディスプレイの「いいところどり」を目指すアプローチは、紙の特性の再現を一部かつ擬似的にしか行えないことから、かえっていずれかの長所をも失う結果となりうる。勿論完成したものは十分に有用なものであるが、あくまで多数あるディスプレイの形態のひとつに過ぎない。

ここで今一度両者の進化の過程において、何を起点とし、目指すところが何なのかを確認しておきたい。無論その主要なモチベーションとなるのは空間解像度、時間解像度といった表現力の要素の向上である。電子制御発光型ディスプレイは小型化や空間投影技術など新しい基礎技術の導入からディスプレイの多様化を図ろうとしている。紙の利点の導入はそうした試みのあくまでひとつに過ぎず、その結果としてペーパーライクディスプレイやプロジェクションマッピングがある。そしてその

結果、有用ではあるが紙では代用できない要素、例えば素材が異なる点、発色しない点などが存在するディスプレイ群が誕生した。発光型ディスプレイの目指すものは多様なディスプレイ群とその広い用途の実現であるとみなすことができる。

一方、紙面発色型ディスプレイの進化の起点は、前述したように歴史ある紙メディアであり、その形態は技術進化しても大きく変化することはない。表現力向上を図る上で電子制御を導入するが、結果としては紙と色素からなる従来の部材構成を維持する形となる。結果、発光型ディスプレイと同様、紙面発色型ディスプレイも発光型ディスプレイでは代用できない性質を持ったものとなる。進化の終着点は、高い解像度、高い応答性、高い安定性を持った、時間軸のある従来型の紙メディアである。

両者は部材構成、進化の終着点の観点から、研究領域が異なるもので、一概に比較し、研究開発の単純な統合はできないと言えるだろう。

今一度まとめると、発光型、紙面発色型ともに、研究による進化の起点、導入技術、また目指すものは異なるものである。両者ともに表現力を向上させるというモチベーションこそ共通であるものの、研究のスタート地点、ゴール、領域が異なるものとも言える。すなわち、電子制御発光型ディスプレイは、その構成要素を様々に進化させ、ディスプレイの多様化を目指している。無論、その中には前述のペーパーライクディスプレイなどの試みも含まれるが、あくまでも多様なディスプレイの一つでしかない。他方、紙面発色型ディスプレイは、その起点の部材構成は紙と色素であり、電子制御性を加えるなどの試みを行ったとしてもその部材構成は変化がない。したがって紙面発色型ディスプレイの研究の深化点はその多様化ではなく深化であると考えられる。

従って、紙面発色型ディスプレイの性能向上に当たっては、その紙と色素からなる従来型の部材構成を崩さないことが前提条件であると考えられる。

## 2.8 紙面発色型ディスプレイの構成要素とその特性

前提のように発色型ディスプレイを紙メディアと捉えるとき、その印刷形態から部材構成は基本的に紙と色素となる。この2つの部材の特性について確認する。

### 2.8.1 紙の特性

#### 2.8.1.1 特性概覧

紙の持つ本来の特性・特長としては、以下のものが挙げられる。これらの利点として、紙媒体はメディアとして様々な点で優れている。

- ・高技術の色素との融合（塗布、印刷、特殊な色の発現、カラーバリエーション）が可能である
- ・既存のもの（電子制御によらないもの）は高解像度である
- ・静的であり、表示の安定性・応答性に優れる（例として本、新聞、ポスターなど）

- ・選択肢に優れる
- ・加工性に優れ、また容易である
- ・紙素材そのものがディスプレイの一部となる
- ・見え方、見せ方の豊富な知見がある
- ・電子制御型ディスプレイにない凹凸などの質感を持つ
- ・古くから使われているため、使うことに（世代、生活スタイルなどで）心理的違和感がなく、馴染み深い
- ・誰にも身近である（使わない人、持たない人はいない、存在することに違和感がない）
- ・手に入れやすい（コストが安く、流通性高い、販売店が豊富）
- ・原料が植物繊維であるため、再生産性が高く再利用が容易である
- ・種類（厚み、カラーバリエーション、テクスチャなど）が豊富である
- ・他の素材との相対的比較になるが）薄く、平らであり、軽く、適度な強さを持ち、折ったり曲げたり接着したり切断したりといった加工・造形性要素が高い
- ・装飾性、造形性、芸術性がある（インテリアやアート作品など）
- ・基本的に無害である
- ・水や液体の吸収特性から記録がしやすく手段が豊富（筆記具、プリンタなど）である
- ・用途が幅広く、メディアとしての優秀性が過去から現在に至るまで不変であり、保証されている
- ・物理的保存ができ、またその手段も豊富である。よってコレクション性があり（本など）、物理的保存ができ、また手元に置くという心理的欲求を充足できる
- ・物理的実体をもたらさずある種の用途におけるナビゲーションとアクセスの早さから、心理的ストレスがなく、思考をさまたげない
- ・筆記具やプリンタなどに代表されるように、記録性能・手段が豊富である
- ・一覧性が高い
- ・参照・記入がしやすい。すなわちユーザーインタラクションに優れている。
- ・読み聞きしながら、記入できる。すなわち知的支援に優れている。
- ・位置アレンジメントができる

- ・燃やすことができる。また土に埋めれば分解するので処理が容易であり、捨てることに抵抗がない（再生しやすい）

紙の用途としては、書写、包装、装飾、日用品の部材、吸収の3つを主要な用途とする。具体的には以下のような用途に使用されている。

- ・印刷物メディア（新聞、雑誌、書籍、広告、手紙、パンフレット、事務書類など）

- ・包装（ダンボールなど）

- ・記録（メモ、便箋、スケジュール帳など）

- ・ディスプレイ（ポスター、張り紙など）

- ・装飾（ジャケット、紙飾り、壁紙など）

- ・アート（絵、人形、掛け軸など）

- ・生活用品（シェード、皿、トイレットペーパー、ひも、建材など）

他素材に比べ、紙の一步抜きん出た性質として、先述のように「着色」「造形」「加工」においての技術的蓄積が大きいことが挙げられる。合成染料による青み付け、染料による染色など質、量、歴史ともに非常に多い。

#### 2.8.1.2 本研究に継承する特性

紙は以上のように非常に多くの特性を持った素材であるが、本研究では紙の情報提示機能、表現機能に着目し、その観点から、本研究では電子制御可能なディスプレイの構成要素として重要となる一般的要素である「高解像度」

「安定性」「表示応答性」を選択し継承する。また、「選択肢に優れる」「加工性に優れ、また容易である」「紙素材そのものがディスプレイの一部となる」は、「紙自体でその物性値などのパラメータチューニングが可能」であると言い換えることができる。第6章に詳述するが、この要素は前述の3要素の詳細な調整、特に解像度、表示立ち上がり応答に影響するためである。そのため、この要素も継承するべきものである。

### 2.8.2 色素の特性

#### 2.8.2.1 特性概覧

印刷可能な色素の特性としては、以下の点が挙げられる。

- ・高技術の塗布、印刷が可能である
- ・豊富なカラーバリエーションを持つ
- ・特殊な特性を含め、種類豊富である

#### 2.8.2.2 本研究に継承する特性

本研究では、以上の通常の色素の特性を継承する。これは後述するが、システムに導入する機能性色素を通常の色素と同様に扱うことができるためである。

これらの特性に加え、加えて電子制御化のキーとなる「外部刺激反応」特性を持つものを使用するが、継承する通常の色素特性に影響をもたらすものではない。この点については第3章に後述する。

## 2.9 結言

本章では、情報提示のために用いられる2大メディアとして、近年台頭してきた電子制御型のディスプレイと、昔から今日まで形や用途を変えながら使われ続けてきた紙メディアについて、その変遷を振り返った。技術が生まれることで新たな用途が生まれる一方で、両者の情報提示の特徴は変化せず我々の生活に息づいている。そういった特徴を鑑み、双方の良い所取りを狙った新しいディスプレイのチャレンジのアプローチが試みられることとなった。しかし、そうしたアプローチは両者の完全な統合には至らなかった。その原因となる問題点はいくつか考えられるが、発光型ディスプレイ、発色型ディスプレイ双方の研究領域が異なるため、両者を一括りに捉えることができないことが最大の要因である。そのため、発色型ディスプレイに、既存の発光型ディスプレイの制御技術をそのまま持ち込むことは難しい。従って、紙メディアの本来の表現能力を活かしつつ電子制御性を付与するためには、紙と色素からなる紙メディアの基本の部材構成を崩さず、発色制御機構を構築する工夫が必要となる。次章では、そのための手法と既存事例の抱える問題点について述べる。

# 第3章 従来の発色型ディスプレイの問題点

## 3.1 緒言

前章にも述べた通り、本研究の目的を実現する上で、本研究における開発システムの根幹となる素材は紙素材と色素である。

色素と計算機により制御するために、外部刺激によって色変化などの化学反応を起こす機能性色素は有用な部材となる。機能性色素は非常に多く開発され、応用分野も多岐に渡るが、その中で熱刺激により反応を起こす熱感応型のものが最も有用であることを、その物的・機能的特性から説明する。また電子制御手法と実用例について確認する。

その上で、熱感応型機能性色素を用いた既存研究例、及び試作事例を確認し、その問題点を洗い出す。それは表現のクオリティを上げるに当たっての精緻な熱制御の難しさであり、具体的には解像度、表示応答性、表示安定性に問題を抱えるということである。

## 3.2 機能性色素

### 3.2.1 機能性色素の概要

本来の紙との関係性を保ち、かつ計算機による制御を可能とする要件を満たす素材として、本研究の目的には機能性色素の使用が適切であると考えられる。

機能性色素は、周囲光の吸収や発光、含有物質の科学的変化、外的刺激（磁場、圧力、熱）などを引き金とし、色素分子が励起される色素である[1]。現在、CD・DVD、プリンター、ディスプレイ、エネルギー変換などの多様な分野で用いられている。

有機色素は有機顔料や合成染料として、印刷用のインクや、写真や食材などの様々な素材の染色に用いられてきた。電子技術の発展に伴い、色素の持つ光吸収性などの機能物性に着目し、先端機能を持つ材料開発に用いられるようになった。こうした用途に特に用いられる色素を特に機能性色素と呼称している。機能性色素の機能には、光や熱などの外的刺激に反応し、光導電性、光波長の選択吸収特性、蛍光性などを起こすもの、化学反応による構造変化で色が変化するものなどが含まれる。

情報と物質の相互変換の観点から考えると、物理的情報を電子的情報に変換するツール（通常の手書き用のペンとして用いながら、筆跡などの情報をデータ化する技術（[34][35]）が商品化されている）はあるが、逆に電子的情報を物理的情報に変換する機構は実用面ではほとんど実現されていない。

機能性色素の主な機能とそれに対応する応用分野を表3.1に示す[66]。

分野	外部エネルギー	色素機能	応用例
情報記録分野	光	光導電性	電子写真感光体
	光	選択的光吸収性	CD-R、DVD-R
	熱	酸発生性	感熱記録紙
	熱	熱拡散性	熱転写感熱記録紙
	圧	熱発色性	感圧記録紙
	熱/圧	微粒子変換	インクジェットプリンターインク
情報表示分野	光	選択的光吸収性	液晶カラーフィルター
	光	二色性	偏光フィルム、GH液晶表示
	電気	蛍光性	有機ELディスプレイ
	熱	酸解離平衡	示温材料
エネルギー変換分野	光	光電変換性	有機太陽電池
	光	蛍光性	色素レーザー
	光	非線形性	波長変換素子
医療診断分野	光	生体染色性/ 選択的光吸収性	臨床検査試薬
	光	活性酸素発生能	レーザー治療

表 3.1 機能性色素の機能と応用分野

### 3.2.2 機能性色素を用いる理由

紙を使う上では、もともとインクや塗料の延長上に開発されたものが多いため、印刷技術などが確立され、紙と非常に相性が良いことが最大の利点である。表面上はあくまでも色を塗られた紙媒体として振舞うため、紙の質感などの見た目や物的特性を失うことがない。機能性色素の色変化の起点となる外部刺激の工夫を自然な形で導入できれば、「部材構成が紙メディアそのものであるディスプレイ」を十分に実現することが可能である。

### 3.2.3 バリエーションと熱感応型機能性色素の有用性

機能性色素には、ある特定の波長を選択吸収するもの、酸や光に反応するもの、液晶表示に用いられる二色性色素など様々なバリエーションが存在する。以下、表3.1に満たしたもののなかから、産業用から個人レベルにおける制作まで使用できるものを網羅的に列挙する。

- ・単色サーモクロミックインク

単色のサーモクロミックインクは、ある閾値前後の温度変化に応じ、透明度が急速に可逆変化、もしくは不可逆変化を起こすインクである。色数と変色温度の選択性を最大の特長とする。1975年に基本原理が発明されたメタモカラーと呼ばれるインキを元に改良されたものが現在主流となっているものである。メタモカラーは、ロイコ染料、顕色剤、変色温度調整剤をまとめてひとつのマイクロカプセルに封入し顔料化したものである。ロイコ染料は酸化・還元により可逆的に色に変化する有機色素であり、インクの色を決定する。顕色剤（アルコールやフェノール系の酸性物質）は酸化・還元を行う役割を担い、感熱紙にも用いられている。顕色剤は高温では分散状態をとり、酸を放出することでロイコ染料を発色させ、低温では凝集状態をとり、ロイコ染料を消色させる。メタモカラーの発明当時は変色温度調整剤の性能が低く、呈色が鮮やかでない欠点があった。サーモクロミックインクは粉末状のマイクロカプセルにより構成される。変色温度は活性化温度とも呼ばれ、インクの色が無色あるいは淡色へと連続的に変化する温度範囲である（本論文では第6章による理論値計算の関係上、これを閾値温度もしくは変色温度領域と呼称する）。活性化温度は、インク成分（変色温度調整剤）の構成により10[°C]台から70[°C]付近まで調整が可能である。この温度帯を境に可逆反応を起こすもの、また温度上昇方向に不可逆反応を起こすものが存在するが、一般的には使い勝手の良さから可逆反応型が主に利用されることが多い。応用例のひとつとして、PILOT社によるフリクションインキ[72]が挙げられる。これは変色温度帯に工夫を加えたもので、呈色は通常のサーモクロミックインクと同様であるが、消色温度、すなわち変色温度域の低温側を極端に低い温度（-20[°C]付近）にしたものである。この工夫により、「消した文字が元に戻りづらい」特性を実現している。商用例としては、氷菓の食べごろを示すパッケージラベルなどが挙げられる。サーモクロミックインク近傍の温度を閾値付近で電子制御することにより、サーモクロミックインクで染色された箇所での可逆的な情報表示制御が可能である。

#### ・コレステリック液晶インク

コレステリック液晶（カイラルネマチック液晶）を用いたインクも存在する。単に液晶インクと呼称されることも多い。温度の変化に応じ、色相変化を起こすインクである。液晶インクは厳密にはサーモクロミックインクの一部であるが、本稿では分けて記述する（前述の「単色サーモクロミックインク」とは、単色かつ特定閾値で透明度が可逆変化を起こすインク、この箇所での「液晶インク」とは、同一のインクで温度帯により複数の色の発色が可能であるものとする）。コレステリック液晶とは、電界の非付加状態では特定の色を選択反射し、付加状態では電圧強度によって液晶分子のらせん構造のピッチを変化させることで光を透過させる特徴を持つ液晶である。すなわち、電圧強度によって反射色を選択制御できるという特徴がある。具体的には赤から緑、青と連続変化して見える。コレステリック液晶を構成する分子が不斉炭素を持ち、対掌性がある場合、液晶の分子軸の配向方向が空間で連続変化し、螺旋構造が生じる。螺旋周期は分子の種類によって異なり、周期に対応する光を反射する性質がある。すなわち、螺旋

周期が可視光の波長近辺になると呈色する。こうした螺旋周期が感熱変化する液晶を顔料と混合しマイクロカプセルとして使用することで、感熱性の高い色素となる。コレステリック液晶は、並列形状のネマチック液晶に、液晶分子にねじれ構造を付与するカイラル剤を添加することで構成されている。液晶インク近傍の温度を変色温度帯付近で電子制御することにより、液晶インクで染色された箇所の可逆的かつ色域的に連続な情報提示制御が可能である。応用例としては、液晶温度計などが挙げられる。

- ・フリクションインク

ロイコ染料、顕色剤、変色温度調整剤を同一のマイクロカプセルに封入し、顔料化したものである。内部の変色温度調整剤によりインクの変色温度を調整することが可能であり、筆記具として製品化されている[19]。この筆記具では、特殊な変色温度調整剤を導入することで変色温度幅を広くとり、常温の状態でも黒く発色したインクが高い温度で無色になると、次に常温に戻ってもそのままの状態を維持し続けるインク技術を実現している。そのため、通常のサーモクロミックインクと異なり、インク温度を一定以上の温度に上げ定常状態を維持することが可能である。

- ・エレクトロクロミックインク

エレクトロクロミックインクは、電荷を印加することにより、その光物性に可逆的变化が見られるインクである。

- ・フォトクロミックインク

フォトクロミックインクは紫外線によって発色するインクである（「ルミライトカラー」など）。フォトクロミックインクに含まれているフォトクロミック色素が発色源となる。

- ・蓄光インク

紫外線を吸収し可視光として長時間をかけて発光するタイプの機能性色素である。アート作品などへの応用例が多く見られる。

- ・電子線硬化型インク

電子線照射により、高速硬化するインクである。UVインクに近い性質を持つが、光源となる電子線が紫外線よりも高いエネルギーをもつため、UVインクのように光重合開始剤を添加する必要がない。

- ・プリント基板用インク

プリント基板のエッチングレジストに用いられるインクである。

- ・感熱紙

感熱紙は色素ではないが、加熱により瞬時に発色する自己発色タイプの情報記録用紙である。印字画像の美しさ、インクが不要であり、ランニングコストが安価なことから、FAXなど様々な分野で利用されている。

### 3.3 熱感応型機能性色素の選択

結論を言えば、以上の分類の中で、本システムにおける要件を満たすものは「感熱記録紙」「熱転写感熱記録紙」「感圧記録紙」「インクジェットプリンター用インク」「示温材料」であろう。このうち、「熱転写感熱記録紙」「感圧記録紙」「インクジェットプリンター用インク」は、その応用例から電子制御によるディスプレイ化は非常に困難である。なぜならば、これらの素材はその制御システムが専用化され、既製品の一部として組み込まれているからである。また、制御システムが紙に接着もしくは非常に接近した形で用いられることから、幾つかの紙の素材特性を保つことが難しい。

本研究に求められる機能性色素の要件としては、①発色範囲②解像度③発色・消色応答性④制御手法に実用性があることが挙げられる。一定以上の解像度を持ち、色などを含む表現力を有し、紙をそのままシステムに組み込む機構の構築の容易さから「感熱記録紙」「示温材料」が適切であると考えられる。本研究では、先述した表3.1における機能性色素を比較検討した結果、単色サーモクロミックインクおよび感熱紙を素材として選択した。単色サーモクロミックインクの利点は発色範囲の大きさ、および可逆反応を起こす発色応答性である。感熱紙の利点は発色応答性および、素材そのものが既に紙との自然な接合がなされているので、ディスプレイとして用いた場合のテクスチャの維持が既になされていることである。これらのインクは共通して温度を制御パラメータとするものである。単色サーモクロミックインクは、制御のしやすさを考え、一般的な室内気温に最も近い閾値温度が27[°C]の単色サーモクロミックインクを通じて用いた。以下のシミュレーションおよび実験においては基本的にはこの閾値温度のものを用いることとする。

熱感応型機能性色素の利点としては以下のようなものとなる。

- ・表現力に関して、一つのシステムを構築するにあたっては最低限2色間の可逆もしくは不可逆制御が必須となり、より多くの色を表現できることが望ましいが、単色サーモクロミックインクはこの条件を満たす。また単色サーモクロミックインクはカラーバリエーションが豊富である
- ・解像度に関して、ディスプレイとしての最低限の実用性を実現するため、文字あるいは画像をそれと認識できる解像度を実現するが、印刷などにより色素を非常に微小に分布させることにより高解像度の実現が可能である

・表示応答性に関して、機能性色素の特性から、光制御によるディスプレイと同等の応答性は望めないが、部材構成の工夫により熱伝達による温度の高速上昇が容易であることから、比較的高速の挙動制御が期待できる

### 3.3.1 サーモクロミックインクの構造と特性

本研究で用いるサーモクロミックインクは閾値温度が27[°C]のものを選定した[サンワコーケン]。しかし、実際の発色・消色の切り替わりは連続的であり、低気温から加熱を行なった場合、およそ24[°C]で消色が始まり、およそ33[°C]で完全に消色する。

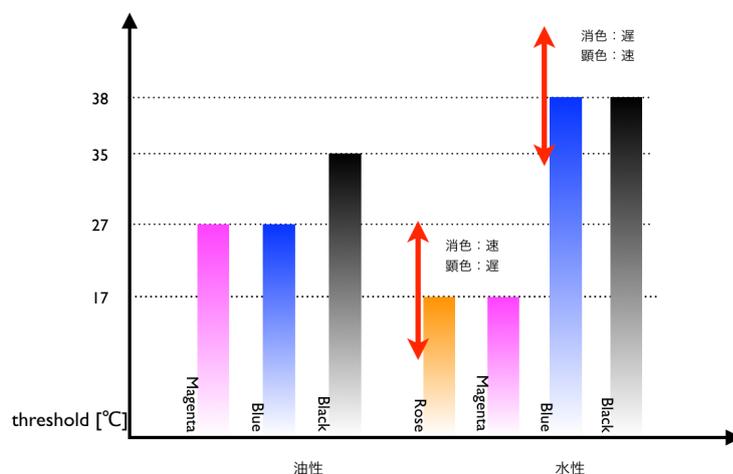


図 3.1 単色サーモクロミックインクの閾値温度近辺での表示特性例

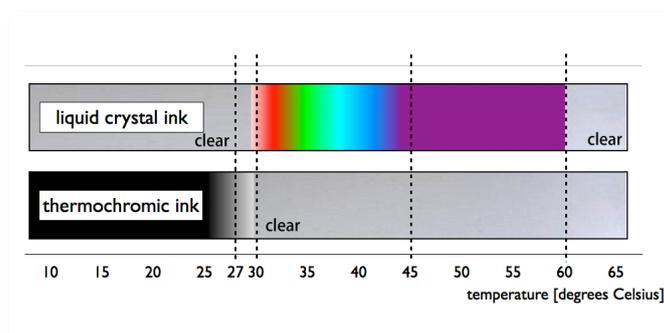


図 3.2 単色サーモクロミックインクと液晶インクの温度による表示特性例

熱感応型機能性色素はその温度が、室温と、刺激となる加熱による上昇温度の間を変化することにより色変化を起こすため、平衡反応であり、発色状態は基本的に定着しない。

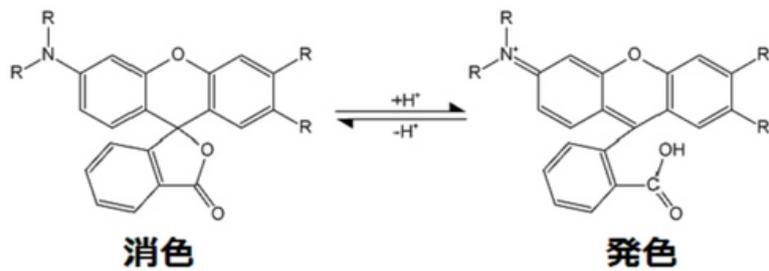


図 3.3 ロイコ色素の可逆反応

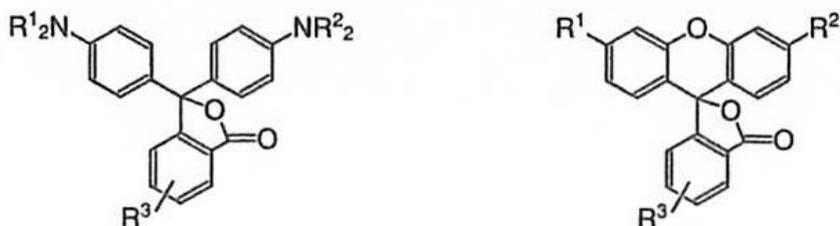


図 3.4 2種のロイコ色素の化学構造

熱感応型機能性色素には、ロイコ色素と呼ばれる無色化合物を有し、分子内にラクトン環を有することが特徴である。ロイコ色素の化学構造は、図3.4左のフタリド系ロイコ色素、図3.4右のフルオラン系ロイコ色素に大別される。

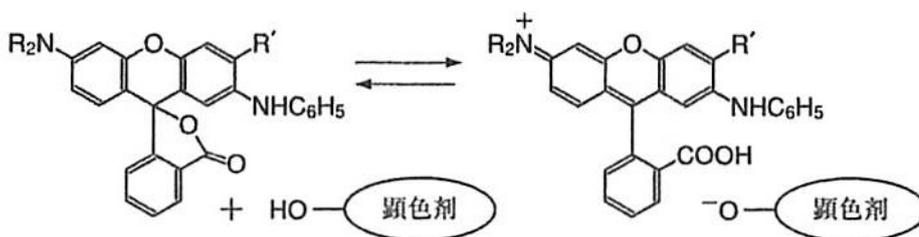


図 3.5 酸と塩基による可逆反応

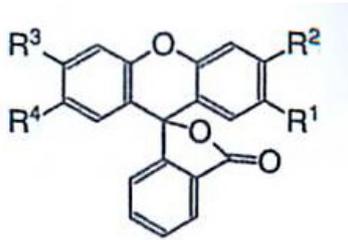


図 3.6 フルオラン色素

ロイコ色素は、酸によりラクトン環の開裂が起こりカチオン部が発色し、塩基によりラクトン環が閉環構造へ変化し無色となる。すなわち酸と塩基による可逆性反応を起こす色素である（図3.5）。

色変化の刺激となる酸は、顕色剤（ビスフェノールS誘導体などの固体酸）の熱による溶融を用いている。フルオラン色素は黒色であり、レシートなどの多くの応用製品に黒色が印字されるのはこのためである。

さらに、ドナー性置換基を図3.6のR1からR4のどの位置に導入するかによって発色する色を変化させることが可能である。

色とドナー性置換基の対応関係を表3.2に示す。

通常、ロイコ色素を用いるケースでは、顕色剤に加え増感剤が同時に用いられる。これは顕色剤の感度向上のためである。

### 3.3.2 サーマクロミックインク導入の利点

同じ発色/消色型ディスプレイでも、フリクションインクと違い、発色/消色を短いスパンで繰り返すため、後述する光熱変換機構により、高効率の温度制御により、画像を高いリフレッシュレートで更新できる。つまり、リアルタイム性があり、電子制御型発光ディスプレイの機能に近い。

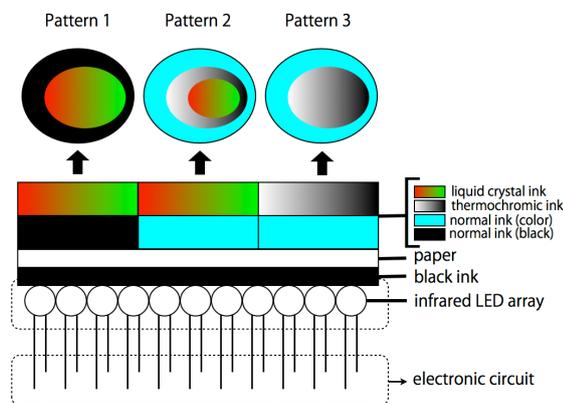


図 3.7 重ね塗りのパターン

発色	R <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>3</sup>	R <sup>4</sup>
黄色	H	OMe	OMe	H
	H	OEt	OEt	H
	t-Bu	H	NH <sub>2</sub>	H
橙色	Cl	H	NHC <sub>6</sub> H <sub>11</sub>	H
	H	Cl	NHC <sub>6</sub> H <sub>11</sub>	H
	H	Cl	NHCH <sub>3</sub>	H
赤色	Cl	H	NEt <sub>2</sub>	H
	Cl	CH <sub>3</sub>	NBu <sub>2</sub>	H
	Cl	H	NEt(4-MeC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> )	H
青色	H	N(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub>	N(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub>	H
	H	N(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub>	NEt(4-MeC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> )	H
	H	NMe(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> )	NMe(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> )	Cl
緑色	H	H	NEt <sub>2</sub>	NEt <sub>2</sub>
	H	H	NEt(4-MeC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> )	NPr <sub>2</sub>
	H	H	NEt <sub>2</sub>	NHBu
黒色	NHC <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	Me	NEt <sub>2</sub>	H
	NHC <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	Me	NMeC <sub>6</sub> H <sub>11</sub>	H
	NH(2-ClC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> )	H	NEt <sub>2</sub>	H

表 3.2 色とドナー性置換基の対応関係

サーモクロミックインクは、そのほとんどが絵の具もしくは印刷機用インクとして提供されているため、混色や重ね塗りが可能である。図3.7は重ね塗りのパターンを示したものである。

左のパターンは温度上昇により下地の黒色が現れ、冷却により液晶インクの色が紫から赤へと変化していく。

中央のパターンは温度上昇により単色サーモクロミックインクの透明度が増加し下地の白色が現れ、冷却により液晶インクの色変化と同時に単色サーモクロミックインクの透明度がフィルターのように変化する。

右のパターンは温度上昇により単色サーモクロミックインクの透明度が増加し下地の白色が現れ、冷却により戻る。

閾値温度の調整などにより、複数のレイヤーによる色変化構成を実現できるため、主にアート作品などでの応用が期待できる。

### 3.3.3 感熱紙の特性

熱により文字などを発色させるサーマルプリンターは低コストで製造でき、比較的小型で扱いやすいことから広く普及している製品である。サーマルプリンターに利用される紙が感熱記録紙である。

感熱色素には大きく分けて、化学反応により発色する感熱発色型色素と色素の昇華あるいは拡散により着色する熱転写用色素がある。

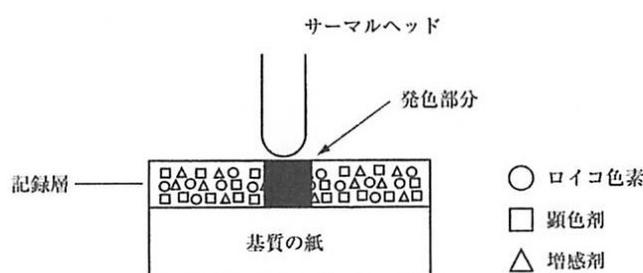


図 3.8 感熱紙の表示構造[66]

感熱紙の発色は、温度55から65[°C]位から始まり、70から80[°C]の間で最高に達するとされている。

## 3.4 熱感応型機能性色素を用いた研究事例と試作事例

### 3.4.1 従来研究・既存技術と事例

本項ではシステムやコンセプトの類似性を見るため、サーモクロミックインクのみならず、UVインクなどの他の熱感応型機能性色素を用いた例についても述べる。非発光のディスプレイとして、本研究と同様に、外部条件に応じて可逆的に反応を起こすインクを用いた研究例がある。フォトクロミック材料を用いたシステムとしては、紙面への手描き文字の遠隔コミュニケーションを実現したKAMICHAT[129]や、紫外線レーザーを用いることで解像度の高い制御を実現したSlow display[18]、fade out[127]がある。

AmbiKraf [2]は非発光の布ディスプレイであり、示温インクを用いた高速な色相切り替えが可能なシステムである。Mosaic Textile [6]は非発光のウェアラブルディスプレイであり、発色素材として示温インクを用いている。Reach [3]は示温インクを用いたダイナミックに変化するテキスタイル素材である。

Shimmering Flower [7]もまた、非発光かつ多様な色相変化が可能なテキスタイルディスプレイである。Fabcell [8]は非発光で柔軟に折り曲げが可能であり、液晶インクを用いた複数色の表現が可能な服飾モジュールである。これらのシステムは画像の見かけを、素材に組み入れられた示温インクの温度制御によって変

化させるシステムである点で共通している。また、外部光に反応する性質を持つフォクロミックインクを用いたディスプレイの研究例もある[13]。ZINK[22]は機器専用の特殊紙をデバイスに取り込み、印刷された画像として出力する技術である。CCP発熱和紙[121]は紙パルプの和紙にカーボンファイバーを漉き込んだものであり、遠赤外線輻射熱により高効率で発熱する和紙である。Maas[122]らによる Thermochromic Information Surfacesは、銅線によるパターンの発色制御を実現している。串山[123]らによる Thermo-Pict neoでは、ペルチェ素子をアレイ状に配置し、15[mm]間隔、80画素の熱制御を実現している。フリクションインクを用いて手書き文字を消去可能とした研究[47]がある。slow display[18]はUV感応型蓄光インクを用い、画像が残るディスプレイである。ShaderPrinter[59]はレーザーでフリクションインクの塗られた部分の色を消すことで図像を表示するシステムである。Inkantatory Paper[53]は導電性インクとサーモクロミックインクを用いた、指によるタッチで色を変化させるシステムである。SolaColor[43]は太陽光を活用した屋外空間の発色情報提示システムである。Photochromic Sculpture[44]は積層型発色点群ディスプレイである。ORIGAMI AND SLOW-TECH[125]はインタラクティブに色が変わる折り紙である。

橋田、西村ら[47][48]はフリクションインクとフォトクロミック材料を組み合わせ紙面の発色制御と手描きスケッチの消去を行うシステムを開発した。

### 3.4.2 従来型の基本的な熱制御手法

サーモクロミックインクの表示状態を熱により制御するためのデバイスについて述べる。熱制御のために主に用いられているデバイスとしては、以下のようなものが挙げられる。

- ・ペルチェ素子

ペルチェ素子は電位極性に応じて加熱／冷却面を自由に制御できるデバイスである。ペルチェ素子は単体で加熱のみならず冷却も行えるため、ある特定の閾値温度周辺での熱制御が比較的容易であり、発色の可逆反応を非常に高速に行うことができる。問題点としては、デバイスの大きさが比較的大きいことから高解像度の熱制御には不適切であり、また素子の駆動に大電力を消費するため、実用上の電源確保の困難さがある。

- ・ニクロム線

ニクロム線は両端に電圧を付加することにより発熱反応を起こす素子である。細く、自由に屈曲が可能であるため加熱領域を細かく設定可能であるが、消費電力が非常に大きい。またニクロム線で加熱できる素材はテキスタイルなどの比較的厚めの素材に限られるため、ディスプレイとする素材に限られるという欠点がある。

### 3.4.3 試作事例

熱感応型機能性色素を用いたディスプレイの性能評価のため、いくつかの試作事例により表示制御の実現可能性を検証した。

#### 3.4.3.1 試作事例1 パネル型アイコンシステム

第二の試作事例として、電気抵抗による発熱を利用した加熱パネルによるアイコンの色表示制御システムを制作した（図3.9）。

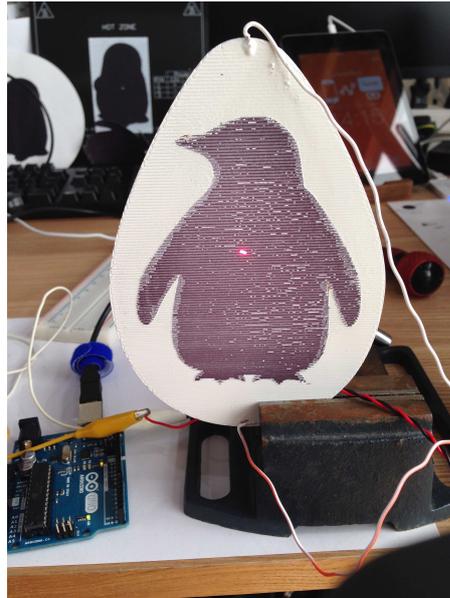


図 3.9 パネル型アイコンシステム

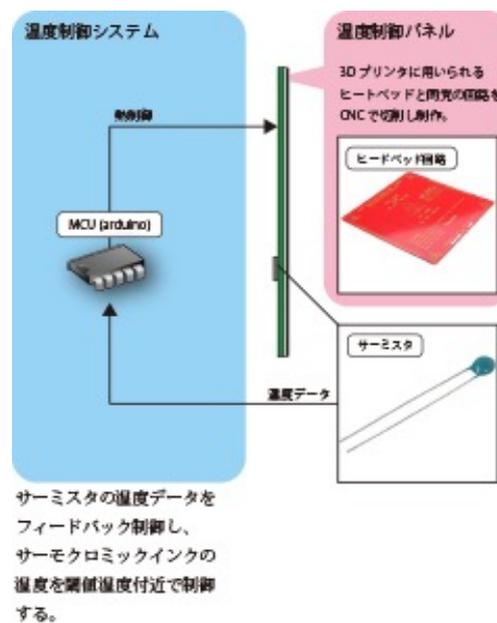


図 3.10 パネル型アイコンシステム制御機構

この加熱パネルは3Dプリンタに主に使用されているヒートベッド回路を再現したものである。パネル裏のサーミスタによりパネルの温度をサーモクロミックインクの閾値温度の前後を行き来するような制御を行うことにより、アイコンの色がゆらめくように変化する作品である。

前述のキャプションシステムのように展示空間向けのシステムではあるが、インタラクティブな挙動はせず、色のゆらめきを単純に繰り返す、動きのあるアイコンとして制作した。

結果として、アイコンの色の動きに、見栄えの不自然さが現れる結果となった。ヒートベッド基板の凹凸状の表面に直接サーモクロミックインクを塗布したため平滑さのあるアイコンらしい表現はできず、またそれを防ぐため塗布面を平滑化する処理を行うと温度伝播に影響が出るといった問題があった。こうした問題は、温度制御デバイス（ヒートベッド基板）とサーモクロミックインクの塗布面が直接接合されているため、制作における見た目の自由度が温度制御デバイスにより制限されていることに起因している。パネルに電源の配線が通されているということも作品全体の見栄えとして不自然さを生むことにつながった。また、実際に空間設置型パネルとして運用した場合、子供が多くいる屋外での設置による危険性の存在もあった。ディスプレイとしての機能の観点からは、基板の材質と厚みから、冷却がスムーズにできない問題（表示安定性の問題）および、基本的に表示・非表示状態を繰り返すだけの極めて低い解像度の表現に留まるという問題があった。

#### 3.4.3.2 試作事例2 色の変わる糸型ディスプレイ

第3の試作事例として、熱感応型機能性色素と発熱源としてのニクロム線を用いたインスタレーション作品を制作した。



図 3.11 色変化する糸によるインスタレーション

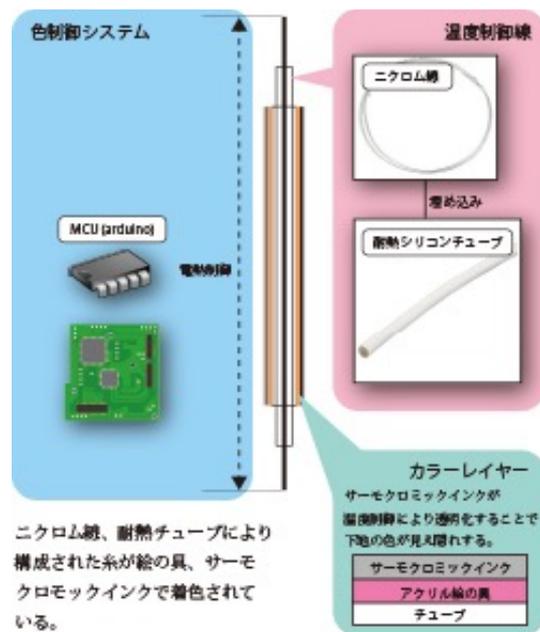


図 3.12 糸の色制御システム

ニクロム線、耐熱チューブにより構成された糸が絵の具、サーモクロミックインクで着色されており、ニクロム線に温度のゆらぎを与えることにより、糸はゆらめき、色がゆっくりと変化していく。サーモクロミックインクが温度制御により透明化することで下地の色が見え隠れする仕組みである。

問題点としては、自然素材を使用したものとしては違和感を生む電源との導線を介した直接的な接合がある。また、ニクロム線というデバイスありきでの制作となったため、糸の外側となる耐熱チューブがその影響を受け、素材として自由に選べないという制作上の制約があった。表現としては、解像度

不足であり、一律に変化するため表現領域に限界があり、素材が自由に選べないといった問題点が存在した。ディスプレイとしての機能の観点からは、発熱デバイスのニクロム線の性質上、解像度が極めて低い表現に留まるという問題点が存在した。

### 3.5 熱設計技術の改良の必要性

#### 3.5.1 既存事例と試作から見る問題点

従来研究事例および試作事例を総括することにより、従来の熱制御設計、すなわちデバイス自体の発熱、あるいは輻射などによる熱制御において、大きな問題点は以下の点に集約される。

##### 3.5.1.1 解像度の問題

熱はその性質上、高解像度や精密な制御が非常に難しい。巧妙な熱伝達機構を設計したとしても、「熱から熱への制御」となるため、限界がある。また、放熱冷却機構の難しさの問題もある。図3.13のように発熱用デバイスをマトリクス状に配列する手法がよく使用されるが、この手法ではデバイスの数自体を増やすことが困難である上、デバイスのサイズの仕様上、ディスプレイ自体が巨大化する問題がある。すなわち解像度がデバイスの大きさに影響を受ける。ZINK[22]は熱により高解像度の画像を出力できるが、これはディスプレイというよりもむしろプリンターと呼称する方が近いであろうし、後述する素材と制御システムの空間的分離がなされていない問題、素材が”ZINKペーパー”という極めて限られた素材に限定される上に、「マシンから写真が吐き出される」という、ディスプレイとしては不自然な動きの問題がある。

#### 3.5.1.2 応答性の問題

試作事例に示したように、単純に高出力の発熱デバイスを用いることで、温度上昇の応答性を向上させることは容易である。しかし、発熱デバイスと熱感応型機能性色素が密着していることにより、温度下降の応答性は極めて低いものになる。

#### 3.5.1.3 安定性の問題

応答性の問題はそのまま安定性の問題につながる。すなわち、発熱デバイスの「温度を上げやすいが熱がこもりやすく冷却が容易でない」特性から、極めて短時間での温度上昇と長時間の冷却を行わなければならない、かつ緻密さが要求される。結果として熱デバイスの制御が非常に難しいものとなる。

#### 3.5.1.4 その他の問題

熱制御デバイスと、外観の印象を決定づける素材が、明確な形で空間的に接合されて見える。具体的には電源供給用の導線や、電源そのもの、熱制御デバイスそのものを露出せざるを得ない。そのため、どのような工夫をしても「電子制御されたシステム」という強い印象を与えてしまう。紙をはじめとする自然素材では、素材の持つ印象との乖離からこの問題は特に顕著となる。熱制御デバイス「ありき」での制作となるため、素材造形の方が歩み寄りその仕様等に合わせざるを得ない。すなわち制作工程として熱制御デバイスの選定が素材選定の先に来る。その結果、素材の方の造形や加工が著しい制約を受ける。またそれぞれの空間的配置の自由度が低くなる。温度の直接的制御機構の導入が不可となる理由である。

上記の造形性の制約の問題を解決するため、素材ありきでのシステム設計を行う場合、上記とは逆に素材の特性により、システム設計に大きな制約がかかる。また熱デバイスとディスプレイとなる素材の接合もしくは極めて近い位置への設置が必要となる問題も発生する。また、接合の場合は素材同士の接着相性の問題も存在する。

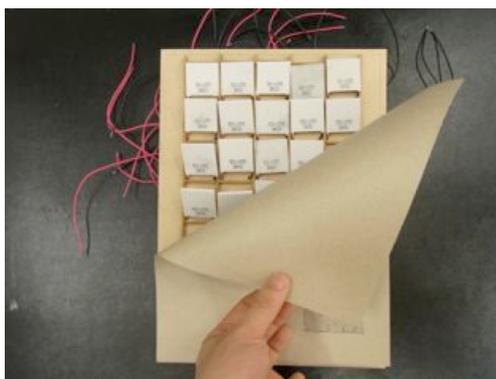


図 3.13 ペルチェ素子によるマトリクス型温度制御システム

### 3.5.2 従来技術により解決されていない本質的問題点

ここまで見てきたように、従来技術は熱応型機能性色素の制御において、熱の制御に厳しい問題を抱えている。まず、発熱デバイスのサイズの問題から高解像度化が難しい。温度上昇応答は良いものの、冷却応答に非常に時間がかかる。この問題が応答性の乏しさ、また制御安定性の難しさという問題につながる。

総じて、従来技術の本質的問題点とは、熱の直接的な電子制御の難しさであると言える。

## 3.6 結言

本章では、発色型ディスプレイの構成部材として有用な熱応型機能性色素についてのあらましを述べ、その特長について確認した。熱応型機能性色素自体は有用な色素であるが、その制御方法、すなわち熱の制御に問題を抱えていることを既存研究例及び試作事例を通じて示した。それは熱の直接的制御が困難であるということである。発熱デバイスを多数並列設置する手法が最も一般的であるが、発熱デバイスの大きさから解像度を大きく向上させることはできない。また、デバイスと熱応型機能性色素を塗布した素材との接合性から、発色応答の温度上昇については優れた挙動を見せるものの、機能性色素の冷却の難しさから温度下降については極めて時間がかかる傾向がある。この特性は制御安定性の乏しさという問題につながる。

従って、熱応型機能性色素の制御に当たっては、熱を精緻に制御する手法から離れ、新たなアプローチが必要となる。それが本研究にて提案する、次章の手法となる。

# 第4章 本研究の提案手法

## 4.1 緒言

本章においては、従来手法では困難であった熱感応型機能性色素の高解像度制御の新技术法について述べる。その新技术法とは、エネルギー変換手法の導入及び空間分離型の機能性色素の制御である。これは、従来型の熱感応型機能性色素の制御において、発熱デバイスと素材の接着による色素冷却等における不具合、および解像度の低さなどの問題点を解決する上で重要なシステム構成要素である。熱自体の制御ではなく、高解像度に制御する手法が確立されている光の制御フェーズを熱制御の前に置くことにより、光制御に近い高精細な熱制御が可能となる。

詳細は次章に譲るが、これは光熱変換原理に基づくものである。この原理では、熱の直接制御ではなく、高解像度の光エネルギーの変換を介しての機能性色素の制御を行う。また主に色素の冷却効率の向上を目的とし、ディスプレイ素材と制御システムの空間的分離がなされる。光熱変換システムは光熱変換媒体素材、光照射デバイス、熱感応型機能性色素の3要素により成り立っている。光熱変換媒体素材は受光した際に照射光エネルギーを高効率で熱に変換するものである。光照射デバイスは、高出力、高解像度のものを用いることで、エネルギー変換した熱とそれによって制御される熱感応型機能性色素の変色反応を高解像度かつ高速にする。光照射デバイスは多様な特性のものから、システムに適合するものを考察し選択する。熱感応型機能性色素については前章に述べたものを用いる。

## 4.2 従来技術の問題点の改善指針

前章の事例から見るように、熱感応型機能性色素を表示媒体に用いる上で、従来の熱制御技術には大きな問題点が存在する。それは解像度、応答性、安定性に関する問題である。中でも解像度の問題とは、本来、熱自体が高解像度の制御が難しいというものである。

解像度の問題の解決手段として考えられる手法は以下のようなものである。

①極めて微小な熱源を用い、それを多数用い、アレイ状に並べることで解像度を上げる

サイズの小さい熱源を用いることは、発色反応の領域を小さくする上で直接的な効果があり有用である。しかし、現状では一定以上の出力があり、かつアレイ状に並べることができる小型の高出力熱制御デバイスが存在しない。デバイスの数自体を増やすことが困難であるため、解像度の問題を解決できない。また主に電源供給の問題から、正確なアレイ状の配列は非常に難しい。またデバイスのサイズの仕様上、ディスプレイ自体が巨大化する問題がある。

②熱源の数を増やし、ディスプレイのサイズを空間的に大きく拡張する

供給電源の問題、ディスプレイの巨大化によるコンテンツの制限の問題があるため、根本的な問題点の解決には至らない。

### ③熱制御デバイスと素材を空間的に分離する

分離した空間を経由して熱を輸送する。しかし微小な熱源から高い指向性で熱輸送を行うことは難しい。

以上から、熱源を極めて微小なものにすること、熱制御デバイスと素材を空間的に分離することが従来の問題解決の基本的な指針となると考えられる。

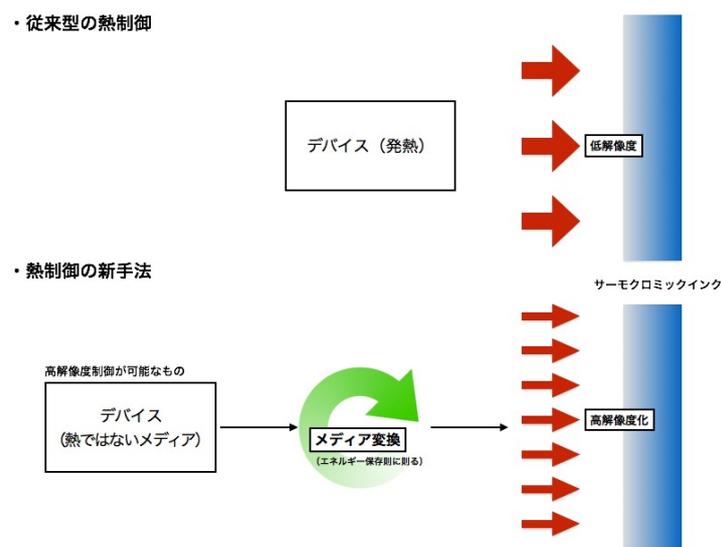


図 4.1 従来型の熱制御との比較

これらを同時に実現するためには、微小な熱源をアレイ状に並べて同時制御し、熱を高い指向性で素材に空間輸送する機構の実現が不可欠となる。だがその両方が、前述の理由で技術的に困難な要素を抱えているため、実現が難しい。

この問題を解決するために、高解像度に制御可能な熱とは別のエネルギーの電子制御を行い、空間伝達し、変換機構を介した上で熱エネルギーへの変換を行う手法でこれらの問題点を解決することを改良指針として提案する。

本研究では、熱により直接的に温度を加え熱感応型色素を制御するのではなく、熱ではない高解像度のエネルギーを第一段階として制御し、それを熱エネルギーに変換する。また、直接的に熱を加えるのではなく、素材と制御デバイスの空間的分離を行う。

### 4.3 エネルギー変換による熱制御の導入

熱とは異なり、また高解像度制御が可能なエネルギー形態としては、光エネルギーが最も優れていると考えられる。プロジェクタやLED、レーザーなど既に多様なデ

バイスが存在し、その制御手法も確立され、また研究開発されているからである。光エネルギーを何らかの手法で熱エネルギーに変換することができれば、前述の各々の問題点を解決できる。このエネルギー変換に最も適した手法は、光を吸収させ熱に変換する手法であろう。具体的には黒体に近似する物質の光吸収からの熱変換が適していると考えられる。黒体とは、入射する電磁波を完全に吸収・熱放射し、反射しない物体を指す。現実には、完全に光を反射しない物質は存在しないため、完全黒体は存在しない。実際には、最も黒体に近い物質、すなわち最も光を吸収する素材はカーボンナノチューブである。カーボンナノチューブはスーパーグローブCVD法による単層カーボンナノチューブ (SWNT) のナノスケール垂直配向構造によるものであり、およそ97~99%程度の光を吸収できるとされている。

#### 4.4 空間分離制御の導入

先述したように、造形性の制約の問題の解決のためには素材と制御システムの空間的分離が必要不可欠である。このことにより前述の問題点を解決できる。両者の空間的分離は、表示制御における冷却プロセスの重要なポイントともなる。発熱源となるデバイスと熱感応型機能性色素を空間的に分断することにより、雰囲気による熱感応型機能性色素の冷却という、表示制御における新たな選択肢が生まれるからである。素材とシステムの空間的分離により別に新たに生じる利点としては次のような点が挙げられる。システムの空間的配置において、電源の分離が可能であり、インсталレーション作品などにおいて空間的自由度が高くなる。また、ある環境内でディスプレイ素材と制御デバイスを分離することで、システムへの介入（制御基板の制作やプログラミングなど）と、素材への介入（加工など）を作業的に分離できる。すなわち制作・制御フェーズの分離である。すなわち、制作において作業員、作業空間、作業時間、システム・技能を完全に分離できるということである。以上の利点は、プロジェクタなどによる投影に基づく分離との決定的な違いとして現れる。結果として実現される職能的分離も見逃すことのできない重要な要素である。制作の現場において、デザイナーとエンジニアがぶつかり意見の対立が生じることはよく見られる光景である。その原因は仕様、スケジュールなど様々な要素が考えられるが、素材すなわちデザイナーの担当する分野と、システムすなわちエンジニアの担当分野の職能的分離により、この問題が解決される可能性がある。

#### 4.5 光熱変換手法の提案

##### 4.5.1 概要と利点

感熱型素材の変色制御の根幹となる、新しい熱制御設計となる光熱変換原理を用いた熱制御システムについて述べる。光熱変換を用いることにより、高速制御、高解像度といった光制御デバイスの利点をそのまま熱制御に組み込み、熱制御設計をより研究の目的に適したものに改善することが目的である。具体的な利点は以下である。

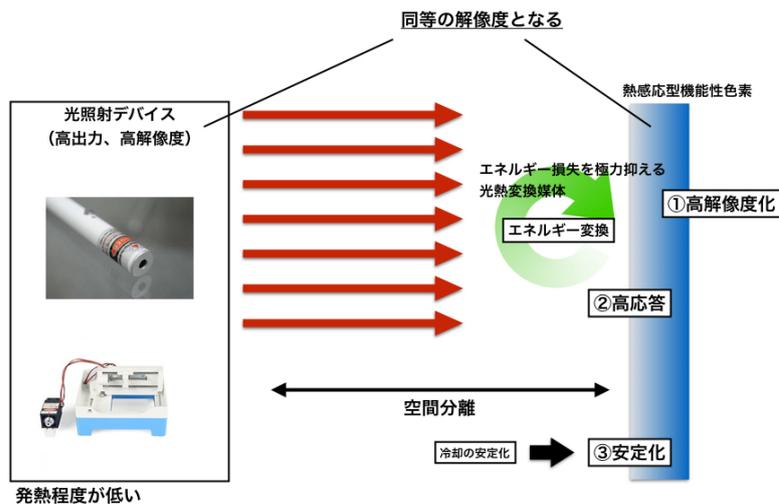


図 4.2 エネルギー変換と空間的分離からなる光熱変換機構

- ・電子制御ディスプレイの長所（データの保存性や利便性）をそのまま転用でき、また光制御技術をそのまま転用できる
- ・画像データ変換が不要であるため、ユーザを選ばない、また作家本来の芸術性や感覚を失わず、インテリア性を実現できる
- ・光源はあくまで熱源として使用するため、熱応型色素の特定の波長に対する感度特性に依存しないので、多様な波長の光源を利用できる。よってシステムデザイン上の自由度が高い
- ・素材と、熱伝導のための光源がスペース的に分離できる。それにより、自然冷却を使えるので、冷却すなわち消色がスムーズで速い
- ・デバイスと素材が分離されているので、それによるスペースデザイン上の自由度が高くなる
- ・直接の熱制御を行うのではないため、光の解像度をそのまま熱の解像度として制御することができるため、温度の直接制御では難しい解像度の向上が期待できる
- ・あらかじめ描いてある図像の表示をON/OFFするのではなく、ディスプレイとして自由画像を描ける。表示するものの自由度の意味で、本来のディスプレイの役割に近い
- ・多様な素材を使用でき、その素材感の保持が可能である

以上の利点により、従来の意味での（リアルタイムに更新され、高解像度であり、自由な画像を描ける）「ディスプレイ」の性能を実現できる。発色型としては、熱設計の新技术により、これまでにない高い性能のディスプレイの実現が期待出来る。

以下、解像度・応答性・安定性の3要素への光熱変換原理の寄与事項を挙げる。

#### 4.5.2 解像度の向上への寄与

前述のように、発光型ディスプレイの長所である高解像度制御をそのまま熱の解像度とすることができるため、熱の直接制御では難しい解像度の向上が期待できる。また知見の豊富な光制御技術をそのまま転用できるため、性能の向上がわかりやすく容易である。このため、発光型ディスプレイと同様に、自由画像を描ける。表示するものの自由度の意味で、従来型の紙面発色型ディスプレイの役割に近い。

#### 4.5.3 応答性の向上への寄与

照射光のエネルギーの大部分が熱エネルギーに変換され画像の表示に用いられるため、光照射デバイスの性能向上が応答性の向上に直接つながるため、応答性の向上が極めて容易である。

#### 4.5.4 安定性の向上への寄与

直接的な熱制御を行うのではなく、紙と光源がスペース的に分離できる。そのため、自然冷却を使えるので温度下降がスムーズで速い。光源の発生熱による影響を考慮せずにするため、確かな安定性を実現するにあたって光照射デバイスの制御だけを考えれば良いため、制御設計が熱よりも容易である。

### 4.6 結言

本章では、従来型の熱制御手法の問題点を解決するための指針として、エネルギー変換手法の導入、及び空間分離型制御の導入の有用性を示した。前者は熱の直接的制御では得られない優れた解像度を実現し、後者は表示安定性に大きく寄与するものである。

# 第5章 光熱変換による熱制御

## 5.1 緒言

本章では、前章にて指針を述べ言及した光熱変換による熱制御について、その詳細を記述する。光熱変換機構は、光照射デバイス、光熱変換媒体、紙、熱感応型機能性色素からなる。熱感応型機能性色素の特性に合わせ、光照射デバイスを制御することで表示挙動を細かに制御することが可能である。そのためには光照射の制御手法、及び機能性色素の冷却手法についての考察が必須となる。熱感応型機能性色素の冷却方法については、既存事例の問題点を解決するために自然空冷を用いる。またフィードバック制御の有効性について考察する。本研究では光照射デバイスに赤外光を含む高出力レーザーとLEDを選定したが、この条件のもとでの性能向上程度についても考察を行う。

## 5.2 光熱変換原理

### 5.2.1 光熱変換の基本的機構

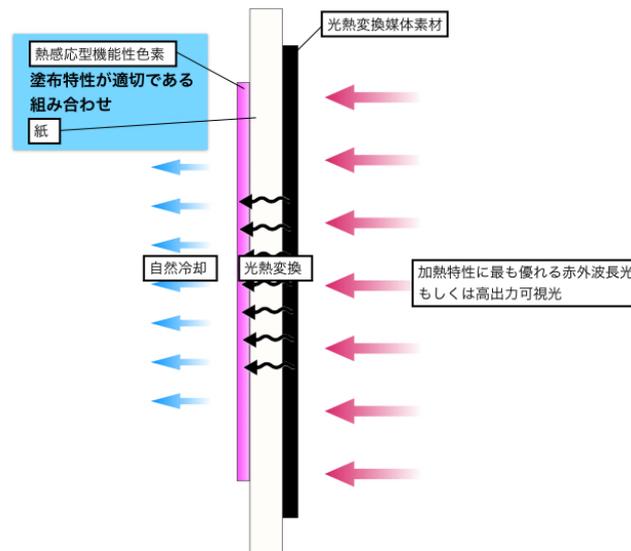


図 5.1 光熱変換の基本的機構

光熱変換の基本的機構を図5.1に示す。一例として、熱感応型機能性色素に単色サーモクロミックインクを用いた場合を示しているが、感熱紙のケースでも同様である。まず、表示スクリーンとなる紙素材に対し、前面（視点）側に熱感応型機能性色素の塗布、背面側に熱変換のための光熱変換媒体素材の塗布を行う。この3層構造の構成は事前準備としてシステムの稼働前に行っておく。実際の挙動としては、光照射デバイスを制御し、背面側に光を照射する。背面の光熱変換

媒体素材は照射光を光熱変換し背面を高熱化する。背面の加熱により、素材内部温度は一様な状態を保持できなくなり、連続的に変化する温度分布が生じる。熱力学第2法則により素材の高温側から低温側に温度勾配に沿って熱伝達が生じ、前面の温度が上昇し、熱感応型機能性色素に変色反応が起こる。以上のプロセスを経ることで、光制御デバイスにより熱感応型機能性色素の制御が可能となる。

#### 5.2.1.1 照射光

照射光については、立ち上がり応答の高速化のため当然高出力のものが望ましく、制御デバイスとの組み合わせを考慮しつつ選定する。また照射スポットは解像度に直接影響するため、高解像度を実現する上では照射スポットを絞ったものが望ましい。

#### 5.2.1.2 光熱変換媒体素材

光熱変換素材は前述の通り、黒体に近い挙動の素材のものが適している。照射光と、受光する紙素材と熱感応型機能性色素の間に光熱変換の高効率化を目的とした熱伝導素材の媒介が必要となる。紙の熱放射率はおよそ0.40[ $\mu\text{m}$ ]程度であり、エネルギー吸収には不十分であるからである。本研究では、カーボン（熱放射率0.9[ $\mu\text{m}$ ]程度）、および合成樹脂、顔料、有機溶剤を用い、それぞれの性能を比較検討した。熱伝導の高効率化のため、黒体の吸熱変換特性を踏まえ、それに近い形での挙動を目指し、それぞれ効率的に赤外光を温度に変換する黒色のものを素材に塗布あるいは密着させることによりスクリーンを作成する。本研究ではその熱放射率からカーボンを採用した。

#### 5.2.1.3 紙

紙は発色におけるスクリーンの役割を果たす。重要なポイントとして、紙はその物性値（比熱、嵩密度など）の測定が非常に専門的であり、選定に時間がかかるという問題がある。よって第6章におけるシミュレーションでは、これらの物性値が明示されているものを使用した。

#### 5.2.1.4 熱感応型機能性色素

熱感応型機能性色素については、閾値温度が自由に選択できるものについては、後述する自然空冷を考慮し、使用が選定される環境温度に近いものが望ましい。

#### 5.2.1.5 空間分離

第4章に述べたように、空間分離はエネルギー源と色素の熱的分離を行い、安定性のある制御を行う上で重要な要素となる。

### 5.2.2 冷却方式

#### 5.2.2.1 空冷を用いる理由と熱伝導素材・熱感応型色素の冷却特性

可逆性の連続切り替え型機能性色素を使用するケースにおいては、色表示すなわち発色のため機能性色素の温度を下げる必要がある。本研究においては、冷却のためのデバイスを用いず、自然空冷による温度制御を採用した。

自然空冷を用いる理由であるが、ファンのような空冷装置を設置すると、第3章にて述べた既存事例の抱える問題点が再度顕在化する可能性がある。また、光熱変換用制御システム、素材に加え、3つめの要素となる空冷を加えることにより、システムが煩雑となる恐れがある。

自然空冷において懸念される要素としては、雰囲気気温の変動によるサーモクロミックインクの変色変化であるが、閾値温度の選択の自由度、使用が想定される室内気温に実生活上ではそれほどぶれがないこと、および第6章に後述する冷却性能シミュレーションにおいてある程度予測できるため、冷却装置の導入ほど煩雑にならないと考えられる。

熱伝導素材・熱感応型色素の冷却特性についての詳細は第6章において記述する。光照射がオフになったとき、熱伝導素材・熱感応型色素ともに外気によって冷却される。この際、素材内部においては、同時に高温側から低温側への熱伝達が生じている。

#### 5.2.2.2 フィードバック制御について

熱制御系のシステムにおいて、精度向上のため温度センサを用いたフィードバック制御を行うことは有効かつ一般的な手法である。実際に第3章試作事例1においても、サーミスタを用いた簡易的なフィードバック制御は導入しており、サーモクロミックインクの変色閾値温度近傍でのある程度の温度制御には成功している。本研究においても、フィードバック制御を導入することで、サーモクロミックインクの表示状態の精度向上は十分に期待できるものと思われる。

しかし、本研究の骨子となるディスプレイと制御システムの空間分離の観点からこの問題を考えるとデメリットも大きい。制御系統へのセンサの追加は、各部材の空間配置の制約を増すことにつながり、素材への最良条件での光照射が実現できなくなる可能性がある。さらに、本研究の目指す、実用性に足る解像度に対応する温度センサのアレイ状の配置は容易ではない。少なくとも、サーミスタのような遮光性の高いデバイスの使用はできず、光熱変換システムシステムを阻害しない形で、放射温度計のような遠隔性のあるセンサを導入することになるであろう。光熱変換原理の骨子の一つは、シンプルな「素材とシステムの分離」であるため、まずはこのシステムの実現のための要件を明らかにすることを優先し、オプション的役割となる温度フィードバックについては基礎研究の段階では除外する。フィードバック制御の導入可能性については第9章で論ずることとしたい。

### 5.3 照射光制御

#### 5.3.1 光照射方式

ドット毎に発色／消色変化、すなわちドット単位の熱制御を行い、全体として画像を生成するためには以下の2つの方式が考えられる。すなわち、

### ①アレイ光源方式

デバイスの光照射ポイントとドットが一对一对応し、デバイスを多数同時制御することで画像を描画する。特徴としてはドット毎の時間的遅延はないが、デバイスが比較的大きい傾向があるため、解像度はやや抑えめとなる。

### ②高速スキャン方式

高速で画像表示エリアに光照射を行い、人間の目で十分に静止画像あるいはそれに近い画像に見えるような画像制御を行う。ドット毎に時間的遅延が生じるため、照射機器の走査速度が要求されるが、レーザーなどを使用できるため解像度を高めることができる利点がある。また、レーザーなどを用いる関係上、デバイスと制御対象の空間的距離を大きくとることができる。スキャン方式としては、ベクタースキャンとラスタースキャンに大別される。ベクタースキャンは、点光源を画像形状に従って走査し画像を生成する手法である。ラスタースキャンは、画像を点として走査線を生成し、直角方向に動かすことにより画像を生成する手法である。主にアナログテレビなどにおいて用いられる画像表示方式であり、画像をある一定の法則で数列に分解し送信、受信側で復元する方式である[56]。ビームは走査線に沿って高速で走り、その間に強度を変化させていく。この強度が上限値と下限値の間で連続的に変化するものをアナログラスタースキャン、数段階の不連続な変化をとるものをデジタルラスタースキャンと呼ぶ。本研究ではデジタルラスタースキャンを採用する。選択する光照射方式は表示するコンテンツによるが、本研究では画像として詳細なコンテンツを表示する使用法を想定するため、ラスタースキャンによる表示手法について深く検証を行っている。

## 5.3.2 光照射デバイスの特徴と選定

光照射デバイスとして適切であると思われるデバイスの候補は以下の通りである。

#### ・プロジェクタ

本来は図像の空間への投影に用いるプロジェクタであるが、強い光エネルギーを放出するため加熱用途にも使用できる。プロジェクタは計算機を介した制御により非常に自由度の高い図像パターンを投影できるものの、消費電力が非常に大きく、またデバイスそのものが非常に強力な発光性を持つため、本研究の目的には合致しない。

#### ・LED

方式①によるものである。デバイスが非常に小さいため、ピクセルサイズを抑えることができ、結果としてスクリーンサイズの縮小が可能である。また電力消費が少ない。非常に汎用性の高いデバイスであるので、制御手法のノウハウが確立していることから、有用であると考えられる。

#### ・レーザー

方式②によるものである。スポット径が極めて小さく、比較的低電力で動作し、かつ高出力であり、遠距離からの照射が可能であることから、ピクセルサイズを抑え、かつ高速な制御が可能である。赤外レーザーについては遮光性を有することもポイントである。

本研究では光熱変換のための光照射デバイスの要件である高速応答性・高出力を満たすデバイスとして、レーザーおよび赤外LEDを選定した。

### 5.3.3 レーザー制御

レーザー光により画像を描くためにはガルバノメータが有用でありよく使用される。これはX-Y 2軸で高速回転する表面鏡を用いて、任意の2次元座標にレーザースポットを投射し自由画像を描画する装置である。

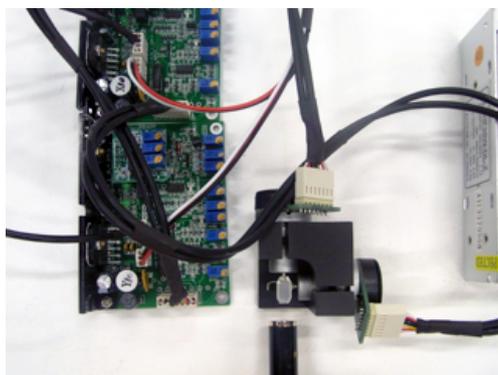


図 5.2 レーザー制御用2軸ガルバノメータ

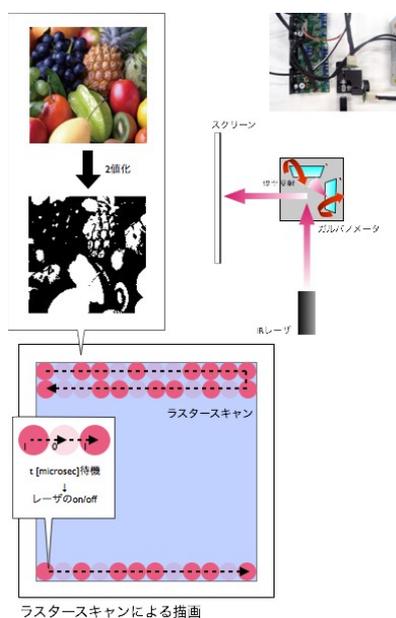


図 5.3 2値化画像のラスタースキャンの例

レーザーは制御用マシンからON/OFF信号を受信できるようにし、ラスタースキャンを行うことにより描画が可能である。レーザーをガルバノメータで制

御することの利点としては、スクリーンの異なる部位へと照射位置をずらしながらの光照射を行うことができる点が挙げられる。この特徴は連続する文字列などの描画などにおいて特に有効である。

本研究では、高出力の光源としてレーザー彫刻機の使用の上でも検証を行っている。

レーザー彫刻機は垂直に設置されたレーザーヘッドが2次元座標をボールねじを用い、所定の軌道に沿って移動することにより、レーザー下方に設置された材料の切断や表面切削を行うデバイスである。

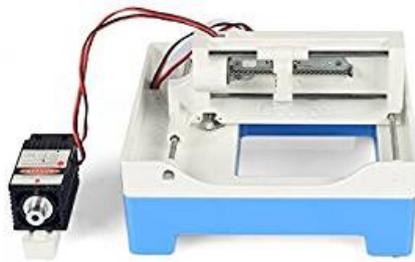


図 5.4 レーザー彫刻機

彫刻される素材の設置される水平面をディスプレイの水平面とすることにより、2次元座標をレーザーヘッドが移動するレーザー照射装置として使用することが可能である。ボールねじを送り装置として用いる特性上、照射光は連続した線状のものではなく、連続するドットのような軌跡を描く。照射光については、およそ450[nm]の青色、650[nm]以上の赤色のものが用いられることが多い。光照射可能領域はデバイスによって異なる。

#### 5.3.4 赤外LEDによる制御

LEDは既に多くのディスプレイ装置に用いられている通り、多数を高速に制御できるデバイスであり、拡張性に優れている。光照射方式としてはアレイ光源方式による。従来研究では用いられなかったデバイスである。

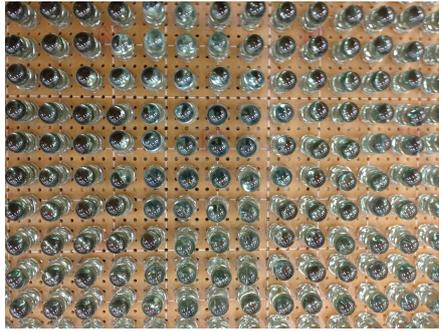


図 5.5 赤外LEDマトリクスアレイ

レーザーを使うケースと違い、画像表示領域全体が広域であってもタイムラグがない。

本研究では赤外高出力タイプのものを同時制御し照射光として用いる手法にて検証を行った。

#### 5.4 コンポーネント構成図

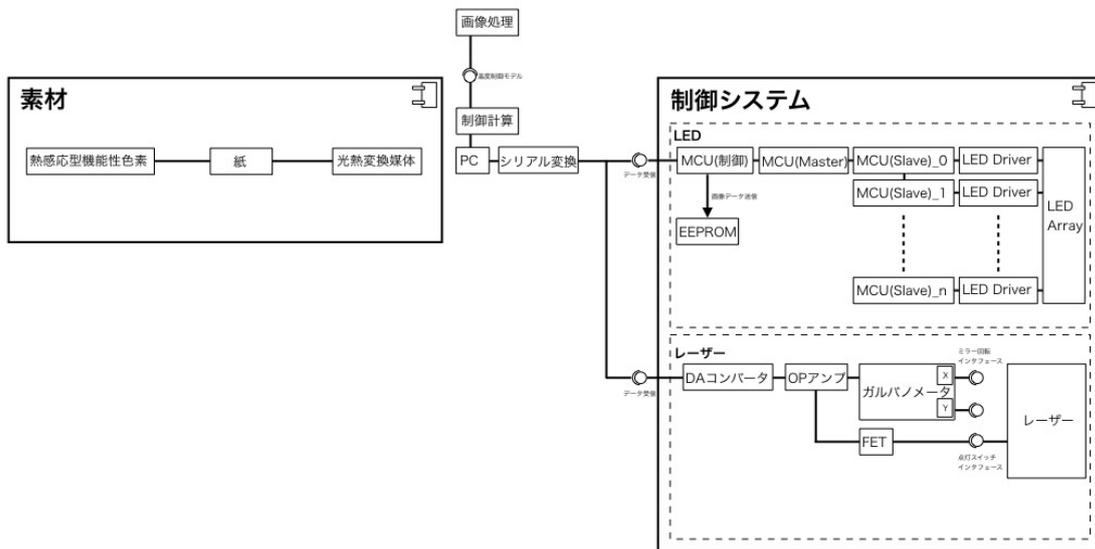


図 5.6 コンポーネント構成図

UML[49]に基づくシステムのコンポーネント構成を図5.6に示す。

#### 5.5 性能の向上程度

熱の直接的制御と比して、光熱変換による解像度の向上程度を確認する。

条件としてA4サイズの紙への画像描画を想定する。このとき、光源としてスポット径の小さいレーザー（2[mm]）を選択するとき、光熱変換の特徴から、熱応答型機能性色素の変色箇所のドット径も2[mm]となる。これはA4サイズ上で105x148[dot]の解像度を実現する。

条件等は第8章にて後述するが、具体的に描画内容で見ると、文字についてはひらがな16×11文字、人物の顔画像では2×2の描画が、「文字や顔と認識できる」条件のもとで可能である。

## 5.6 結言

本章では、前章にて述べた光熱変換原理を用いたシステムの詳細について述べた。これは、素材片面に熱応答型機能性色素、反対面に光熱変換媒体素材を組み込み、光熱変換によって生じた熱を紙素材内部の熱伝達によって色素に伝える仕組みである。こうした光熱変換用の素材を制作した上で、背面側に光照射を行い、高吸熱性素材が照射光を光熱変換し背面を高熱化し、熱力学第2法則により温度勾配に沿って熱伝達が生じ、前面の熱応答型機能性色素の反応を起こすことにより、熱応答型機能性色素の表示制御を行う。光熱変換媒体素材については黒体を想定した評価を行う指針である。光制御デバイスについては、その特性から最適と思われるものを選定し、照射方式について確認を行った。冷却については、既存事例の抱える問題点を抑えるため、自然空冷を採用し、同様の理由でフィードバック制御の導入は行わない方針でのシステム設計を行うものとした。

# 第6章 表示応答解析

## 6.1 緒言

本章では、第5章において議論した光熱変換原理に基づくシステムを実際にある条件のもとで用いた場合について、熱力学的挙動とそれに伴う表示応答を理論式およびシミュレーションにより求め、実測値との比較を行い考察を行う。

熱感応型機能性色素の基本的な挙動としての消色および発色のプロセスについて、それぞれ素材物性および雰囲気、光照射デバイスの特性からシミュレーションを行う。熱感応型機能性色素については連続切り替え型と永続表示型の2種が存在するが、連続切り替え型の表示消去及び永続表示型の表示発現においては、照射光を受けた熱伝導媒体は光熱変換を行い、その熱は紙の反対側（熱感応型色素塗布側）へと伝達され、熱感応型色素は伝達熱によりその温度を上昇させ、閾値温度を超えて色変化する。この過程においては、熱伝導媒体の上昇し続ける温度と、それによる熱伝達の時間的挙動の観察が評価の主となる。連続切り替え型の表示発現すなわち発色については、温度勾配による熱伝達と同時に、紙の熱伝導媒体側、熱感応型色素塗布側ともに雰囲気により冷却される。この過程においては、熱伝導媒体と熱感応型色素の温度下降の観察が評価の主となる。シミュレーションを行った上で、実際にシステムの基本的な動作を計測・評価し、比較と検証を行う。さらに注視時間に関する科学的知見をもとに、熱感応型機能性色素と光照射デバイスの組み合わせに対応するコンテンツの適正について議論する。また、システムに継承する特性として選択した紙のパラメータチューニング性が、熱感応型機能性色素の表示挙動に及ぼす影響について考察する。

最終的には全ての挙動を定式化し、実際の運用において物性値の代入により設計が行える基本的システムの構築を目指す。

## 6.2 発色と消色における温度制御

### 6.2.1 熱挙動概要

熱移動の基本プロセスは、大きく熱伝導、対流、熱放射に分けられる。熱伝導は物質内部において高温から低温へと熱が移動するものである。対流は加熱された固体と流体間における熱のやり取りである。熱放射すなわち輻射は電磁波の振動エネルギーが伝達先の物質の分子振動を起し発熱する現象である。

### 6.2.2 熱感応型機能性色素のタイプによる挙動

本研究において、用いる熱感応型機能性色素には2つのタイプがあり、それぞれ挙動が異なる。

①連続切り替え表示型：不可逆変化を起こす連続切り替え表示用途のもの

サーモクロミックインクを主とする、温度上昇によって消色、温度下降によって発色を起こすもの

## ②永続表示型：可逆変化を起こす永続表示用途のもの

感熱紙を主とする、温度上昇によって発色し、情報が永続的に紙に残るもの

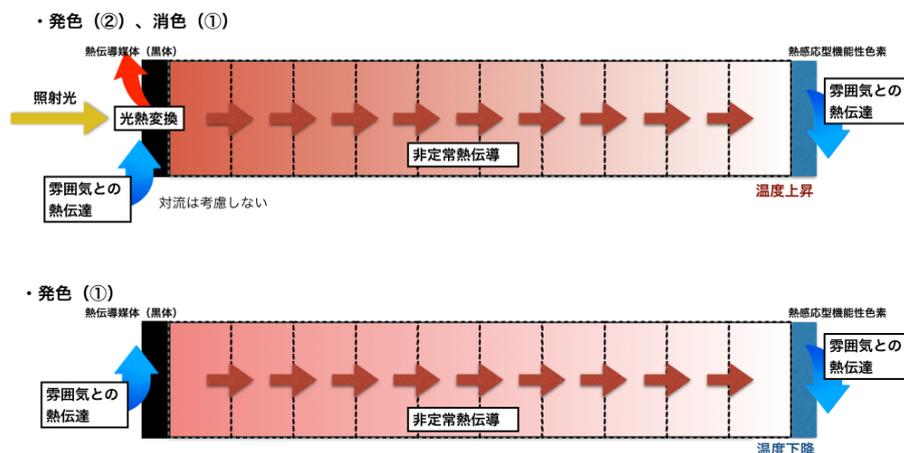


図 6.1 表示と消去における熱力学的挙動の概要

### 6.2.3 温度上昇プロセスの概要

図6.1の上部に示すように、熱伝導媒体側から照射光を受ける。熱伝導媒体は光熱変換を行い、その熱は紙の反対側（熱感応型色素塗布側）へと移動する。熱感応型色素は移動した熱によりその温度を上昇させる。なお、紙の発火点は塩類の添付の有無により370[°C]から450[°C]で推移する[9]ため、レーザーなどの高出力光照射デバイスを用いる場合は留意する必要がある。

### 6.2.4 温度下降プロセスの概要

図6.1の下部に示すように、照射光がない場合、残った温度勾配による熱伝導が生じる一方、紙の熱伝導媒体側、熱感応型色素塗布側ともに雰囲気により冷却される。

なお、後述するが、水平方向（面方向）の熱伝導に関しては影響が少ないものと考えられるため、考慮しないものとする。

以上の温度変化プロセスから、①連続切り替え型の表示消去および永続表示型の表示発現は紙の厚み方向に生じる温度勾配による熱伝導プロセスであり、②連続切り替え型の表示発現は紙の両端と雰囲気との間に生じる熱伝達プロセスと表紙の厚み方向に生じる温度勾配による熱伝導プロセスの同時並行プロセスである。

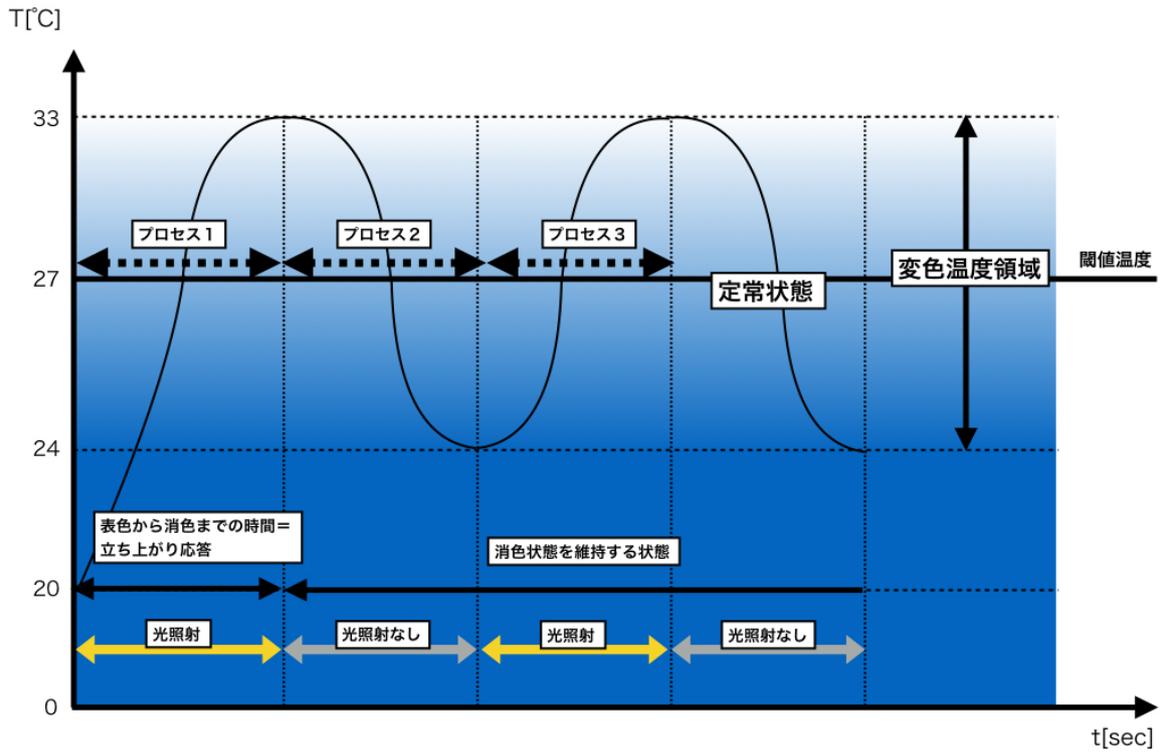


図 6.2 熱変化と表示挙動（連続切り替え表示型）

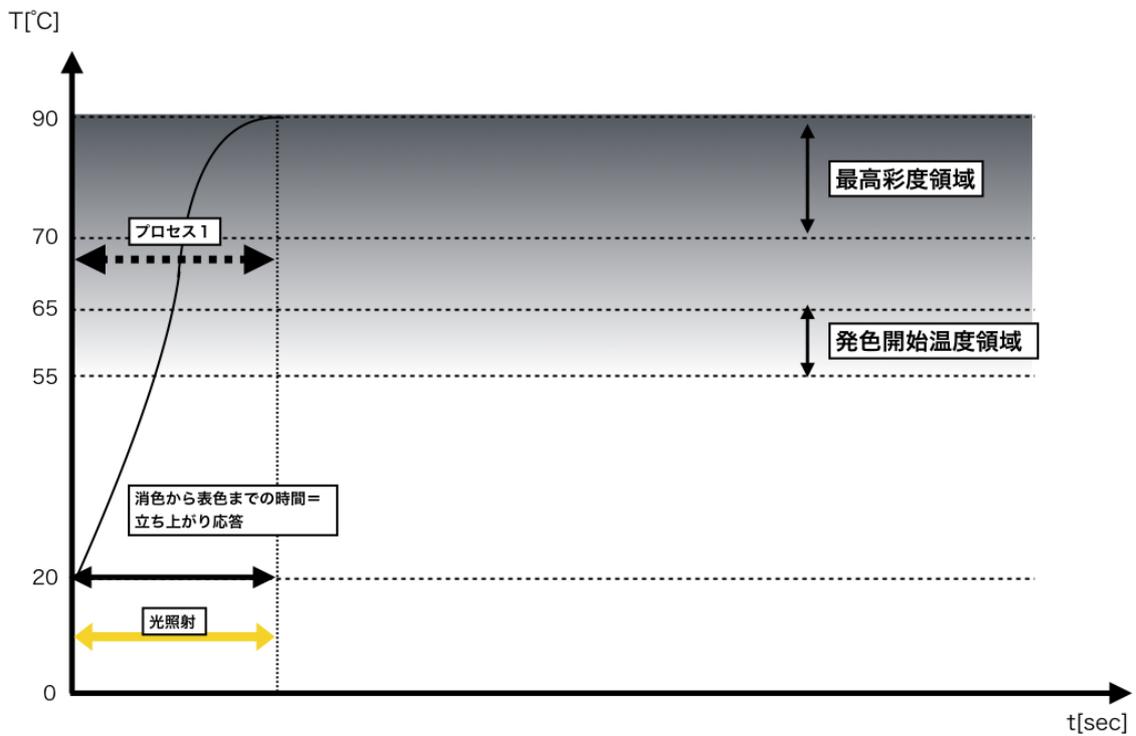


図 6.3 熱変化と表示挙動（永続表示型）

また、雰囲気については、熱伝導媒体側外気温と熱感応型色素塗布側外気温が異なる場合（例として熱伝導媒体側外気温が熱感応型色素塗布側外気温より高いケースを挙げる）、高温側の空気から紙への熱伝達、紙の熱伝導媒体側からサーモクロミックインク塗布側への熱伝導、紙から低温側の空気への熱伝達という連続した熱移動が起こる。こうした総合した熱移動の過程は熱貫流と呼ばれる。熱貫流値はU値と呼ばれ、建築において外壁、天井などの断熱性能を表現するものである。

本研究においては、熱源を紙の近距離に置く従来の熱制御手法と異なり、紙の周辺空気の温度変化を引き起こす要因は存在しない。そのため、外気温が紙の表裏で異なることは想定しづらいので、熱貫流プロセスは考慮しないものとする。熱変化による基本的な表示挙動を図6.2及び図6.3に示す。まずシステムの起動前において、熱感応型色素温度は外気温と同じである。連続切り替え型の表示消去プロセスおよび永続表示型の表示発現プロセスでは、光照射を開始したとき、その温度は表示消去に則り上昇する。温度が変色温度領域の最高値に達したとき、光照射をオフにし、空冷による温度下降が始まる。連続切り替え表示型では、温度が変色温度領域の最低値に達したとき、再び光照射を開始する。このプロセスの繰り返しにより、表示の定常状態を維持する。

## 6.2.5 理論式と境界条件

### 6.2.5.1 一次元非定常熱伝導

温度上昇プロセスにおいて、光熱変換媒体素材側から熱感応型色素側への熱伝達においては、光熱変換媒体素材側が一定時間の光照射を受ける。光熱変換媒体素材側温度が時間的に変化し、紙内部の温度分布も時間的に変化していく。すなわちこのケースでは非定常熱伝導が起きていると言える。先述のように紙の面方向の熱伝導については考慮しないため、一次元の非定常熱伝導による温度分布の変化をシミュレーションする。すなわち、板材における3次元非定常熱伝導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

(6.1)

のx方向（照射光側から熱感応型色素塗布側）の項のみを考慮し、

一次元非定常熱伝導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (6.2)$$

を得る。 $\alpha$ は熱拡散率であり、次式により定義される。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} [m^2 / s] \quad (6.3)$$

( $\lambda$ :熱伝導率  $\rho$ :密度  $c_p$  低圧比熱)

#### 6.2.5.2 光熱変換及び雰囲気との熱伝達と境界条件

温度上昇プロセスと同様であるが、光照射と光熱変換による光熱変換媒体の連続的な温度上昇がない違いがある。光熱変換媒体への光照射を停止し、紙の光熱変換媒体側端の連続的な温度上昇が途切れたとき、紙の両端温度は雰囲気との熱伝達により徐々に下降する。同時に紙内部での温度勾配による熱伝導も依然として発生している。

温度上昇プロセスにおいては、照射光と紙との光熱変換媒体にはカーボンを用い、本シミュレーションではこれを完全黒体であると仮定する。すなわち、照射光のエネルギーは全て照射エリアの体積分のカーボンに熱エネルギーとして吸収され、吸収された熱エネルギーは、エネルギー保存の法則に則り紙および熱感応型機能性色素の温度上昇に全て使用されるものとする。

出力 $E$ [w]の光が、比熱 $c$ [J/gK]、質量 $m$ [g]のカーボンに照射される場合を考える。雰囲気温を $T_0$ [K]としたとき、 $s$ [s]あたりの温度上昇は、

$$\Delta T = \frac{Es}{mc} \quad (6.4)$$

となる。よって紙の黒体側端の温度 $T'$ は、

$$T' = \frac{Es}{mc} + T_0 \quad (6.5)$$

となる。

光照射された光熱変換媒体の質量は、物性値（表6.2）をもとに、光照射部分（レーザー、LEDともにデバイスの特性上、円状となる）のスポット径  $d$ [mm]、厚さ  $t_h$  および比重  $s_p$  から、

$$m = s_p t_h \left( \frac{d}{2} \right)^2 \pi \quad (6.6)$$

となる。

一次元非定常熱伝導方程式の基礎式(6.1)(6.2)を差分化する。x方向（照射光側からサーモクロミックインク塗布側）を節点により区切り、また時間も同様とする。すなわち、整数  $P$ 、 $n$  を用い、

$$t = P \Delta t \quad (6.7)$$

$$x = n \Delta x \quad (6.8)$$

節点温度は  $T_n^p$  で表す。x方向節点数は10とする。

すなわち、節点は  $n=0$  が照射光側端、 $n=10$  が熱感応型機能性色素塗布側端である。一次元非定常熱伝導方程式の基礎式(6.1)の各項を差分化すると、

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_n^{p+1} - T_n^p}{\Delta t} \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x}{\Delta x} \approx \frac{(T_{n+1}^p - T_n^p) - (T_n^p - T_{n-1}^p)}{(\Delta x)^2} = \frac{T_{n+1}^p + T_{n-1}^p - 2T_n^p}{(\Delta x)^2}$$

(6.10)

よって、

$$T_n^{p+1} = \theta_x (T_{n+1}^p + T_{n-1}^p) + (1 - 2\theta_x) T_n^p$$

$$\theta_x = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

(6.11)

以上の漸化式が求められる。なお解が発散しないためには  $\theta_x < 1/2$  の条件が必要である。

### 6.2.5.3 紙の断熱材近似効果と対流伝熱の影響の考察

素材となる紙が周囲空気と接しているため、対流熱伝達についても考慮が必要となる。なお、冷却装置を導入することによる立ち下がり応答の改善手法は本研究には適さない。フィードバック制御を導入しない理由と同様に、冷却用システムの導入が弊害となることが予想されるからである。従ってこのケースによる対流は強制対流ではなく自然対流を指す。

媒質となる空気中に置かれた固体が冷却されるとき、熱移動量に関するニュートンの冷却則

$$-\frac{\partial Q}{\partial t} = \alpha S(T - T_m)$$

(6.12)

(Q: 固体熱量 t:時刻 S:固体表面積 T:固体温度  $T_m$  媒質温度)

における熱伝達率  $\alpha$  は媒質の特性や流れ、凹凸などの固体境界面形状などにより決まる比例定数である。すなわち対流熱伝達率は物性値ではなく、特に固体の表面積や形状に大きく左右される数値であるため、本研究において紙の形状の自由度を広くとるシステム特性を踏まえた場合、紙の表面積と形状の影響を大きく受けるため、対流熱伝達率を明確に算出することは難しい。逆に言えば、ユーザーが紙素材の選択権を持っているため、対流熱移動の挙

動についてもユーザーが任意に調整可能であると言える。従って対流熱伝達がシステムの挙動に与える影響はケースとユーザーの意図によるところが多く、明確に影響の程度を検証に加えることはできない。

ところで、対流における熱移動の挙動を評価する一般的事例としては、ヒートシンクによる電子機器の冷却がよく挙げられる。本研究におけるシステムと対比すると、対流における流体と固体の関係を考慮する上で、固体が金属ではなく紙であるという決定的な違いがある。

対流に与える最も影響力の高い物性は熱伝導率である。紙の熱伝導率は非常に低く、そのため一種の断熱材に近い挙動を示す。

断熱材とは、その物性から熱移動を抑制する素材であり、建築や工業用途に一般的に使用されている。その用途から、熱伝導、対流、放射による熱移動を極力抑える特性がある。熱伝導を抑制するため、熱伝導率の低い繊維などの構成材の内部に空気を保持する構造を持つ。繊維の間に空気を保持する繊維系断熱材、気体を気泡膜に封入するプラスチック系（発泡材料系）断熱材の2種がよく用いられている。素材としては、一般に熱伝導率が低く、熱抵抗値が高いものが使用される。よく使われる素材としてはガラス繊維を用いたグラスウールなどがある。断熱材の密度が低い場合、断熱材内部の空気が対流によって移動し、断熱性能の低下をもたらすため、繊維が多く高密度なものが対流を抑えるのに適している。

断熱材の評価基準となる物性は熱伝導率であり、低ければ低いほど断熱材に適している。おおよそ $0.1[\text{W}/\text{mK}]$ 以下のものが一般に使われている。最もよく使用されるグラスウールは $0.03$ から $0.05[\text{W}/\text{mK}]$ 程の熱伝導率を持つ。紙はおおよそ $0.06[\text{W}/\text{mK}]$ の熱伝導率を持ち、断熱材の素材に近い特性がある。

紙の熱伝導率を考慮すると、素材として断熱材に近い効果を生むことが考えられる。実際にデックスーパー[112]のようにパルプ繊維でできたものが実用化されている。断熱材の対流抑制効果に近似する効果を期待できる。

以上2点の理由から、本システムにおける熱挙動においては、自然対流の影響は微小なものと捉え、除外するものとする。

#### 6.2.5.4 表示の定常状態への移行条件

永続表示型の機能性色素は不可逆反応型の挙動を示すため、ここでは連続切り替え表示型の機能性色素について、表示の定常状態への移行条件を述べる。熱変化と表示挙動を図6.2に示したように、表示が定常状態となるには、熱感応型機能性色素の温度がその変色温度域の最低温と最高温の間に留まる必要がある。すなわち、光照射のオン・オフを連続的に切り替えていくことで、図6.2のように熱感応型機能性色素の温度が波形を描くように制御することで、表示を定常状態に置くことができる。

定常状態への移行過程において、温度変化は次の3プロセスをとる。すなわちプロセス①雰囲気温度から変色温度域の最高温への温度上昇、プロセス②

変色温度域の最高温から最低温への温度下降、プロセス③変色温度域の最低温から最高温への温度上昇である。定常状態ではプロセス②とプロセス③を交互に繰り返すことになる。

### 6.3 評価の指針

#### 6.3.1 光照射方式の違いによる応答特性と表示内容

前述のように、光照射方式としては①アレイ光源方式②高速スキャン方式（ラスタースキャン）の2パターンを採用する。①には赤外LED、②にはレーザーを用いる。

実際にある一定の領域に一つの図像を表示するケースを想定する場合、応答性のシミュレーションおよび計測対象は以下ようになる。

①アレイ光源方式においては、1ドットの立ち上がり時間、立ち下がり時間を計測する。これは照射光およびそれに伴う機能性色素の表示状態が表示領域の全てにおいて同一の挙動をとるためである。すなわち1ドットの反応時間が全体の反応時間となる。前述の通り、面方向の温度伝播はその影響の少なさにより考慮しないため、1ドットの立ち上がり時間が「図像表示時間」1ドットの立ち下がり時間が「図像消去時間」となる。

②高速スキャン方式においても、1ドットの立ち上がり時間、立ち下がり時間を計測する。1ドットがいったん表示状態になってしまえば、レーザーを適切なスキャン速度で周回制御することで定常状態を保つことができるためである。ただし、アレイ光源方式との大きな違いとして、表示領域へのスキャンに時間を要するため、端から少しずつ図像が描かれていくという点がある。よって図像の立ち上がり表示にはスキャン一周分の時間がかかる。このスキャン一周分の時間とは1ドットの立ち上がり応答時間と表示領域の画素数を乗算したものであり、この後表示は定常状態へと移行する。

スキャンで図像の定常状態を保持する場合、2周目以降のスキャンに要する時間は、照射時間に画素数をかけたものである。定常状態保持時間は、当然一周目より短くなるためより制御が容易になる。

以上の2パターンの光照射方式を用い、「図像を描く時間」および「図像が消える時間」をシミュレーションから求め、実測値と比較し考察を行う。

なお、どちらの方式においても、立ち上がり時間については、立ち下がり挙動の途中に異なる図像を同じ箇所に表示する場合、「立ち下がりの完了を待ってからの立ち上がり時間」が必要となり、余分に時間がかかることを考慮する必要がある。

#### 6.3.2 測定手法

正円の形状を取る変色温度エリアがスポット径と同一のサイズとなり、中心部の温度が変色温度域（サーモクロミックインクでは最高温度、感熱紙では最低温度）に入ったとき、そのエリアが応答をとったとみなす。実際にはレーザーはガウシアン分布をとるものを使用しているため、中心部と外周部で若干の温度差が生じ

るが、変色エリアをディスプレイのピクセルとみなすには隣接するピクセル同士が密接関係になければならないため、変色エリアの温度分布については考慮しない。スポット径、光照射部、タイマーが並列したものを撮影し、照射温度計によって光照射部の中心温度が上記温度に到達した瞬間を撮影映像から計測する。

### 6.3.3 解像度評価の指針

解像度の評価は光照射方式によって異なる。アレイ光源方式では、並置した光源の数がそのまま解像度となる。高速スキャン方式では、前述のプロセス②の時間間にレーザースポットが描画エリアを一周し戻ってくる必要があるため、これを満たす最大条件が最高解像度となる。

解像度は光源デバイスの性能に依存するため、その評価は表示コンテンツの質によって行うことが望ましいと考えられる。具体的には第8章に後述するが、描かれた画像を鑑賞者が正しく把握できるか、また把握できるだけでなくそれ以上の情報を得ることができかが評価基準となる。

### 6.3.4 応答性評価の指針

一般的に応答性は高いほどディスプレイとしては優秀であると言えるが、いくつか留意点がある。

まず、本研究のシステムにおいては、紙素材の選定についてはその選択肢の多さからユーザーの意図が大きく影響するため、制作するコンテンツによっては一概に高応答性が求められるとは限らないケースが想定される。具体的には第8章にて述べる、掛け軸への文字描画システムなどで、あまりにも高速の文字描画は「紙に文字を書く」現象の再現としては不自然となる。また、制作者の許容する応答性と鑑賞者の許容する応答性に心理的乖離が発生することが考えられる。表示に対する観察者の反応としては、視線移動が少ない場合と多い場合についても異なる可能性が考えられる。

また、応答速度が低いことにもそれなりのメリットが存在することが考えられる。文字などを眼で追うことが容易であること、時間あたりの情報量が少ないため記憶に残りやすいこと、色の変化の時間的動きという現象が身近なものではないため注意を引く可能性があることなどである。実際に試作事例および第8章にて述べる応用例2において、「遅い色の変化に関心を惹かれた」という鑑賞者の声が多く聞かれた。

ところで、光熱変換を用いることから、応答性は光照射デバイスの出力に大きく左右される。高出力のものほど立ち上がり時間が短くなるため、アレイ光源方式、高速スキャン方式とも高出力の光デバイスの導入により、立ち上がり時間の大幅短縮が可能である。また、高速スキャン方式では、画素数を抑えることでも立ち上がり時間の短縮が可能である。よって本章では、一般によく使われる程度の性能の光制御デバイスを用い、その上でより高出力のデバイスを使用した場合を想定し、その適切な出力と画素数を示すこととする。

表示挙動としては、図6.2、図6.3に示したように、発色すなわち立ち上がり、発色状態の維持すなわち定常状態、消色すなわち立ち下がり の3種がある。重要となる点は、図6.2、図6.3における「発色から消色までの時間」すなわち立ち上がり時間である。この時間が応答性評価の軸となる。通常のディスプレイと比べ、制御から表示までに光熱変換のプロセスを挟んでいるため、立ち上がり応答速度はその分低くなる。また前述の光照射方式において、アレイ光源方式ではなく高速スキャン方式を採用した場合、その特性から解像度が高くなるほど応答性は低くなる傾向がある。

どのような方針で応答性を評価するかを考慮するかは、応答性能設計がデバイス設計者ではなく紙素材の選択者に委ねられていること、光デバイスの性能に依存することから複雑な要素をはらむ。さらに表示挙動は光照射方式によっても異なる。アレイ光源方式においてはぼんやりした図形が全体として均一に徐々に浮かび上がってくるような挙動をとるため、ドットマトリックス数字のような図形がそれとして認識されるまでの時間はどの程度かを既存研究結果から比較し検証する方法も考えられる。高速スキャン方式では、図像の端から順次描かれる挙動から、「全体の図像のうち、どこまでを表示すれば図像をそれとして認識できるか」を検証する方法がある。

視覚短期記憶の観点からは以下の研究結果がある。視覚短期記憶において色[100]、形[101]、方向[102]、運動[103]それぞれの情報が刺激停止後も数分の一秒持続するとされている。また、注視点が対象に選択的に停留する[105][118]、数秒の間において形状や位置が保持される[107]、視覚コードは数秒[107]から20秒[109]程度持続する。

視覚系は情報を取り入れる際、視野にある全情報を一度に取り入れるのではなく、一定の範囲を空間的にサンプリング、分割して継時的に部分情報を取り入れ、記憶された情報を統合させることによって視覚像を形成するとされている[110]。またこのようにして取り入れた視覚像は記憶され、次の視覚情報の知覚にも利用される[111]。

視力の観点から応答性評価の軸を定めることも考えられる。大江[120]によれば、20歳の平均視力は $0.76 \pm 0.007$ とされている。一般によく用いられるランドルト環による視力検査において、7.5[cm]のランドルトの文字を5[m]離れたところから識別できる能力を視力を1.0としている。よって視力係数を $k$ とするとき、視力1.0の人間の視力係数は

$$\frac{d}{66.67} = t$$

(6.13)

となる。文字サイズを $t$ 、文字と人の距離を $d$ とするとき、視力1.0の人間の文字に対する知覚は、

$$k = \frac{5000}{75} = 66.67$$

(6.14)

となる。システムの空間配置において、この関係は一つの指標となるであろう。

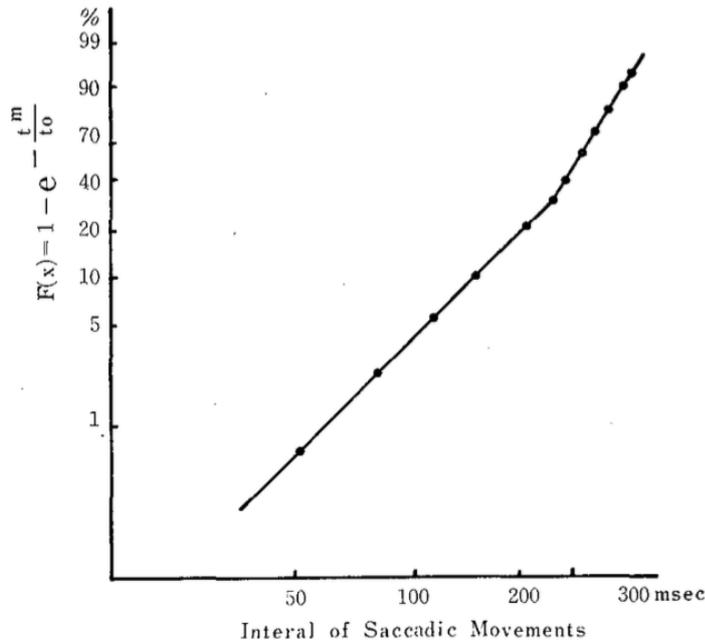


図 6.4 DISTRIBUTIONS OF INTERVALS OF VOLUNTARY AND INVOLUNTARY MOVEMENTS IN EXPERIMENT 1 (D) (OHTANI, 1971)[130]

Ohtani[130]の研究では、複数の視覚タスクに対し、注視時間分布をワイブル分布に当てはめることで、タスク毎の注視時間を分類している。視覚タスクは具体的には特定の2点間で高速に視点移動すること、円周に沿って視点移動すること、本や絵を見ることなどである。その結果、いずれの視覚タスクにおいても注視時間が270[ms]の点に変曲点となって現れた(図6.4)。また、注視時間が500[ms]の点も変曲点として現れた。特定の2点間での高速な視点移動において、不随意性停留時間のほとんどが270[ms]以下で、随意性停留時間のほとんどが270[ms]から500[ms]と解釈された。500[ms]以降の時間については、対象の細部を詳細に見る場合と、見る対象が存在しない場合の2つのケースが存在すると指摘している。

Nodineら[132]による、対象を絵としたときの注視時間の分類を試みた研究がある。その研究によると絵を見始めたときには短い125[ms]の注視が多く、絵の中のオブジェクトを見る場合には500[ms]以上の長い注視が行われた。

Nodineらは対象の全体的な走査を行う上で125[ms]の注視を行い、ターゲットを検出する上で500[ms]の注視を行っているとして述べている。

走査系列と観察時間が統制されている場合、分割された全画素が500[ms]の範囲で提示されることが全体知覚に必要であるとする研究報告がある（Ikedaら[106]およびChastainら[108]）。

本研究では、以上の研究結果から、本システムにおいて、点を表示する際には不随意性停留時間の270[ms]、ある画像を表示する際には500[ms]以内での全画素表示をひとつの基準として応答性を評価するものとする。

### 6.3.5 安定性評価の指針

永続表示型はそもそも安定性を議論する必要がないため、ここでは連続切り替え表示型について述べる。表示安定にはプロセス②とプロセス③をいかに維持できるかが最大の焦点となる。そのためには光照射のオン、オフについて、制御において現実的に可能な数値を出せるかが評価の指針となる。

## 6.4 構成部材の物性値と条件

光照射デバイスと素材について、以下の構成パターンにより検証した。光照射デバイスは高出力かつ制御が比較的容易なものを選定した。それぞれの仕様や物性は後述する。

- ①赤外レーザーと紙、サーモクロミックインク
- ②赤外LEDと紙、サーモクロミックインク
- ③青色レーザー（レーザー彫刻機）と感熱紙
- ④赤外レーザーと感熱紙

「青色レーザーと紙、サーモクロミックインク」については、レーザー彫刻機のレーザーユニットの焦点距離の関係からガルバノメータのミラーとの距離調整が難しく、また光波長が可視領域であるため、光が紙を透過しサーモクロミックインクの変色の経過がわかりづらいため、この組み合わせは用いないこととした。「赤外LEDと感熱紙」の組み合わせについては、後述する結果からさらに表示応答性が低くなることが予想され、実用性に乏しいと判断したため、本章からは除外する。

表示画像の解像度については、JIS規格（JIS X 9051）[39]において定められている、表示装置用16ドット字形規格に則り、一般的な画像の表示用途を想定した16×16の解像度とし、それら全てのドットが表示エリア全域を隙間なく埋め尽くすよう、光照射デバイスの照射光スポット径をもとに表示エリアのサイズを算出した。

### 6.4.1 紙

前述のように、紙を直交異方性材料として捉える。紙のバリエーションの多さからも、伝熱特性をある狭い条件に絞って絞ることは難しいが、紙の熱伝導率の極端な低さ、式6.3による熱拡散率の低さ（通常出回っている紙でおおよそ $0.8 \times 10^{-6} [m^2/s]$ 程度である）、素材自体の薄さ（伝熱面積の小ささ故に伝熱量が小さ

い) の3点を鑑みると、水平方向（面方向）の熱伝導に関しては除外することとする。一般的なコピー用紙の厚さは70[kg]から73[kg]の中厚口で0.08から0.10[mm]、90[kg]の厚口で0.09から0.13[mm]とされている。物性値を以下に示す。

厚さ [mm]	0.1
比熱 kJ/(kg · K)	1.3
熱伝導率[W/m K]	0.06
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	1

表 6.1 物性値（紙）

#### 6.4.2 光熱変換媒体

中空部分が存在しないよう、カーボンを紙と密着させた状態で光熱変換媒体として用いる。ラッカーなどの黒色塗料は、有機溶剤や顔料などの組成が非常に複雑かつ多様であり、物性の評価が難しいためシミュレーションでは除外する。

光熱変換媒体として用いる一定体積のカーボンは黒体ではないが、黒体であると仮定したシミュレーションを行う。温度20[°C]での物性値は以下の通りである [42]

比熱 [J/kg K]	691
比重 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.2
熱伝導率[W/m K]	23.9
厚さ [mm]	0.4

表 6.2 物性値（光熱変換媒体）

#### 6.4.3 熱感応型機能性色素

使用が想定される室内気温から、サーモクロミックインクの閾値温度は27[°C]のものを用いる[サンワコーケン]。塗布するサーモクロミックインクの厚みは非常に小さいもの（シルクスクリーン印刷では数10から100ミクロンの印刷が可能）であるため体積は考慮せず、紙表面の温度とサーモクロミックインクの温度を同一のものとする。

感熱紙の発色は、商用利用の関係上定量的な数値は定まっておらず波長と関連する閾値温度の推定しかできないが、前述の通り、基本的には55～65[°C]位から始まり、70～80[°C]の間で最高に達するとされている。

#### 6.4.4 光照射デバイス

可視光（青色）レーザー、赤外レーザー、赤外LEDを用いる。

##### 6.4.4.1 赤外レーザーとガルバノメータ

用いたガルバノスキャナは縦横ともに4096段階で操作可能であり、例としてA4サイズの長辺297[mm]を走査した場合には、約0.073[mm]間隔で制御可能である。

赤外レーザーおよびガルバノメータの仕様は以下の通りである。

波長 [nm]	1064
出力 [mW]	1100
スポット径 [mm]	2

表 6.3 仕様（赤外レーザー）

スキャンスピー ド°	26K-28Kpps ILDA at 8 deg
ミラーサイズ	7×12×0.8

表 6.4 仕様（ガルバノメーター）

##### 6.4.4.2 赤外LED

赤外LEDについては、実験用デバイスの構築のしやすさ、出力の高さ、入手容易性などの点から通常の砲弾タイプのものを選択した。表6.5に仕様を示す。

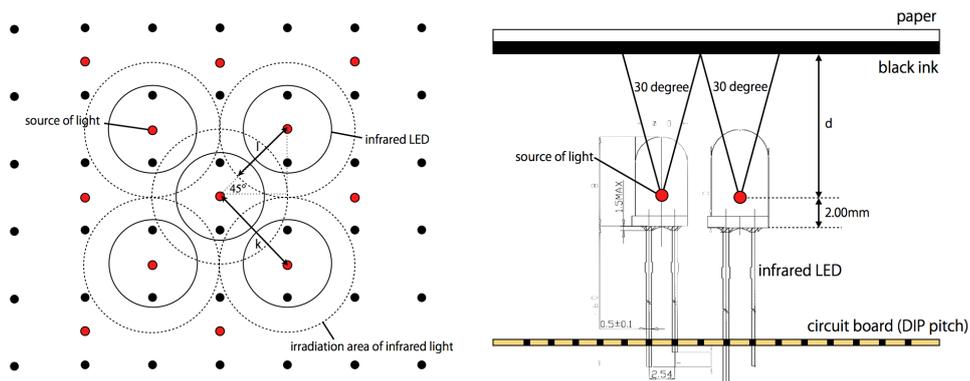


図 6.5 LEDのアレイ状配列

波長 [nm]	940
出力 [mW]	100
径 [mm]	5
半減角	15°

表 6.5 仕様 (赤外LED)

LEDの直径は5[mm]である。LEDを配置したユニバーサル基板のピッチは2.54[mm]であり、そのためLED光源間の距離はおよそ3.54[mm]となる。dは紙とLEDの光源間の距離、lはLEDの照射範囲半径を示す。図6.5より、

$$l = d \tan 15^\circ \tag{6.15}$$

また、紙の全体を光照射し加熱するため、lは、

$$l = 2.54[mm] \tag{6.16}$$

より、

$$d = \frac{l}{\tan 15^\circ} = 0.268[mm] \tag{6.17}$$

が求められる。

### 6.4.4.3 可視光レーザー彫刻デバイス

レーザー光は青色である。仕様を以下に示す。

出力 [mW]	2000
スポット径 [mm]	2
波長[nm]	450

表 6.6 仕様 (青色レーザー)

### 6.4.5 雰囲気

周囲空気は静止状態にあつて20[°C]で一定とし、発熱素材の輻射やデバイスからの放熱による温度上昇はないものとした。熱伝達率は  $10[m^2hK]$  とする。

## 6.5 シミュレーションと実測値

### 6.5.1 ドット表示応答

#### 6.5.1.1 赤外LEDとサーモクロミックインク

図6.6に赤外LEDとサーモクロミックインク使用のケースにおけるドット表示応答のシミュレーション値および実測値を示す。

表示応答の実測値ではシミュレーションによる予測値と最も差が出る結果となった。理由として考えられるのは、制御MCUからマスターMCU、スレーブMCUへとデータ伝達する際にタイムラグが発生すること、及びLEDの点灯にマトリクスLEDの制御方式を採用しているため、実際の点灯時間よりも短い点灯であった可能性がある点である。

挙動としては、プロセス①③がシミュレーション値より短時間で行われ、プロセス②は長時間を要している。これは光源と紙の距離が非常に近いため、LED光源もしくは回路の発熱による影響が考えられる。

挙動全般としては、シミュレーション値と実測値のずれは、6.3.4にて述べた評価基準と照らし合わせるとき、随意性停留時間 (500[msec]) 以下に収まっており、描画対象の細部の差異までは視認できない程度のずれであると考えられる。

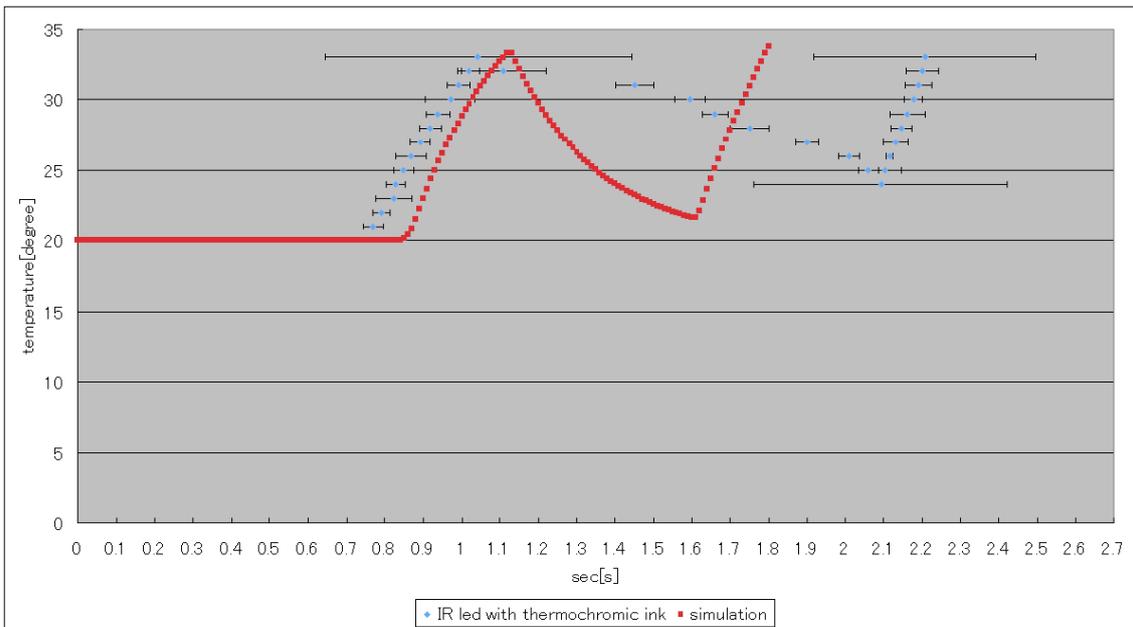


図 6.6 ドット表示応答 (赤外LEDと単色サーモクロミックインク)

### 6.5.1.2 赤外レーザーとサーモクロミックインク

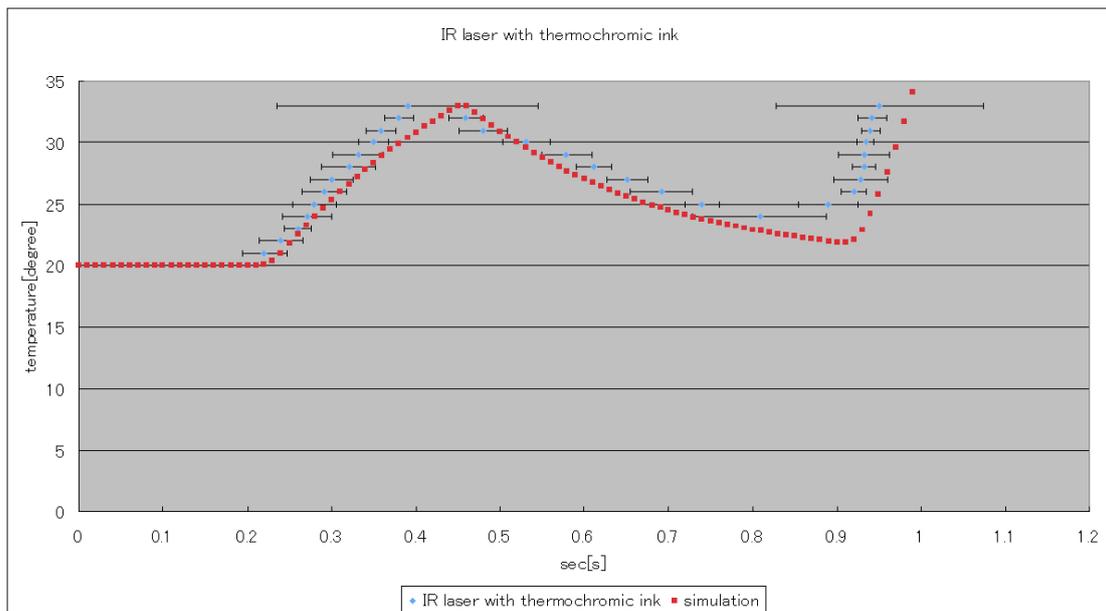


図 6.7 ドット表示応答 (赤外レーザーと単色サーモクロミックインク)

図6.7に赤外レーザーとサーモクロミックインク使用のケースにおけるドット表示応答のシミュレーション値および実測値を示す。

プロセス①に要する時間は予測値よりやや短く、プロセス②に要する時間は予測値より大幅に短く、プロセス③に要する時間は予測値よりやや短くなる結果を得た。

予測値と大きなずれのあったプロセス②の原因として考えられるのは、冷却における空気との熱伝達が、紙表面の凹凸により水平方向にも大きな値で生じたことである。LEDのケースと同様、6.3.4にて述べた評価基準と照らし合わせると、シミュレーション値と実測値のずれが不随意性停留時間 (270[msec]) 以下に収まっており、時間差は意識されることがないと考えられる。

### 6.5.1.3 赤外レーザーと感熱紙

図6.8に赤外レーザーとサーモクロミックインク使用のケースにおけるドット表示応答のシミュレーション値および実測値を示す。実測値は予測値に近い良好な結果を得たと言えるであろう。

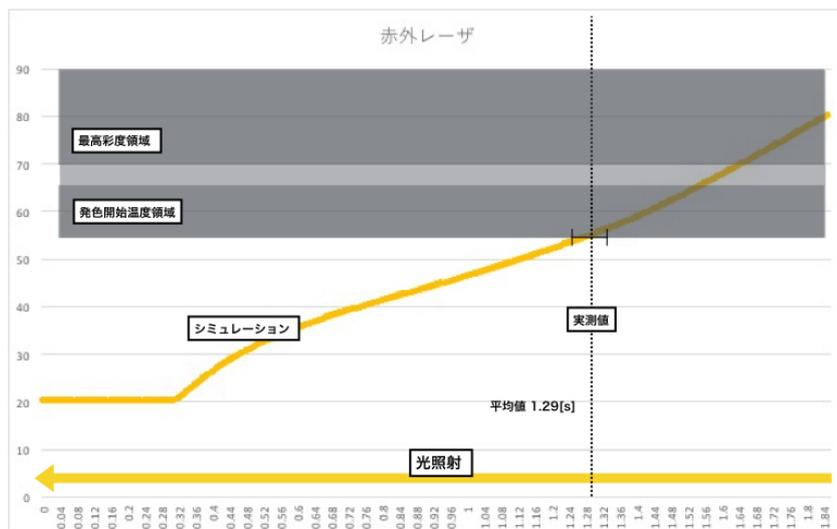


図 6.8 ドット表示応答 (赤外レーザーと感熱紙)

### 6.5.1.4 可視光レーザーと感熱紙

図6.9に可視光レーザーと感熱紙使用のケースにおけるドット表示応答のシミュレーション値および実測値を示す。赤外レーザーのケースと同様、実測値は予測値に近い良好な結果を得たと言えるであろう。

以上4ケースにわたるシミュレーション値と実測値の比較から、シミュレーションモデルがある程度妥当性の高いものであると考えることができる。

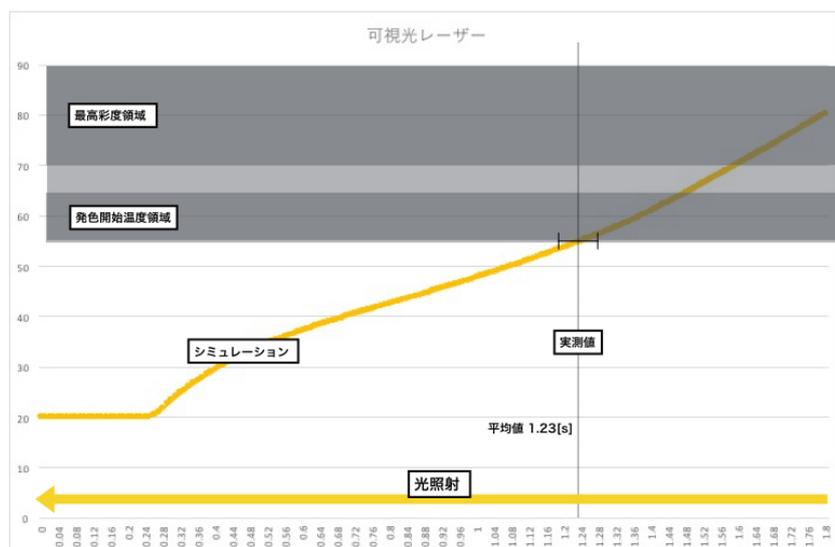


図 6.9 ドット表示応答（可視光レーザーと感熱紙）

### 6.5.2 高速スキャン方式による表示応答

レーザーを用いた一定エリアへの高速スキャンによる表示は、図6.10のようにラスタースキャンの方式をとる。

この方式において、スキャンは次のように行う。ある一点にレーザーを照射し、一定のインターバル時間待機する。このインターバル時間に、光照射と光熱変換、熱伝導による熱感応型機能性色素の温度上昇が起こる。熱感応型機能性色素が変色温度域の最高温度に達したとき、レーザーは次の一点へと移動する。

インターバル時間を $t_d$ 、X方向ドット数を $D_x$ 、Y方向ドット数 $D_y$ をとしたとき、高速スキャンの周回に要する時間 $t_l$ は、

$$t_l = D_x D_y t_d$$

(6.18)

となる。

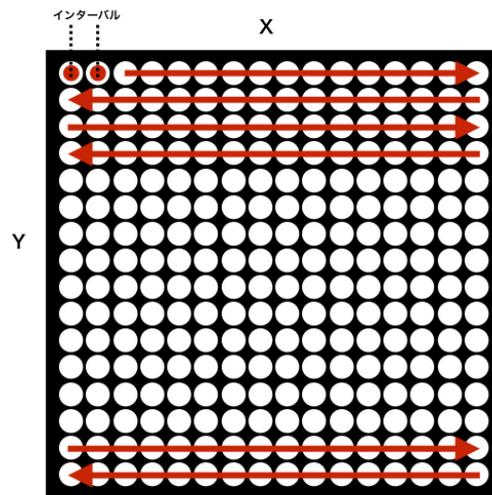


図 6.10 高速スキャン方式 (ラスタースキャン)

実際には当然ながら  $t_l > t_d$  であるため、プロセス②における温度下降が雰囲気温度近辺まで下がることにより、この周回時間では定常状態を維持することができない。よって高速スキャンにおいては、プロセス①および③において光照射時間を長くとり、熱感応型色素の変色温度域の最高温度を上回る温度まで上昇させることが必要となる。この前提をもとに、定常状態となった際の周回時間を求めた結果、平均38.3[s]となった。解像度16[dot]平方であることからインターバル時間を求めると約0.15[s]となる。この数値は実験結果のプロセス③の値0.14[s]とほぼ一致する。本来、プロセス③の時間が実験結果より短くなければこの値での周回による定常状態の維持は不可能であるはずだが、一致した原因として考えられるのは、理論式において体積を0として扱った光熱変換媒体素材による温度の保持である。そのため、紙内部での温度勾配が理論式に比べて実際には大きく、自然冷却を遅くしたのではないかと推測する。

インターバル時間がこの程度に短くなるようレーザーの出力を上げ、プロセス①および③において熱感応型色素の温度を変色温度域を超える値まで上昇させれば

良いことになる。実際にはガルバノミラーの制御遅れやノイズなどのシステム側の要因によるずれも予測されるものの、十分に達成可能であると考えられる。

## 6.6 設計指針

### 6.6.1 注視時間との比較からみる色素種類・光源制御手法・応答性・安定性評価からのコンテンツ適性

前述の応答性評価の指針から考察を行う。ただし、応答性は光源出力によって大きく変化するため、評価は本実験において用いたシステムによる結果に対して行うものとする。第6章において述べたように、Ohtani[130]の研究において、複数の視覚タスク毎の注視時間の分類を応答性の評価基準としている。改めて確認すると、多くの不随意性停留時間が270[ms]以下、多くの随意性停留時間が270[ms]から500[ms]、500[ms]以降の時間については、対象の細部を詳細に見る場合と、見る対象が存在しない場合の2つのケースが存在する。この注視時間に対し熱感応型機能性色素と光照射デバイスの複数の組み合わせにおける反応時間との対比を行った（図6.11）。

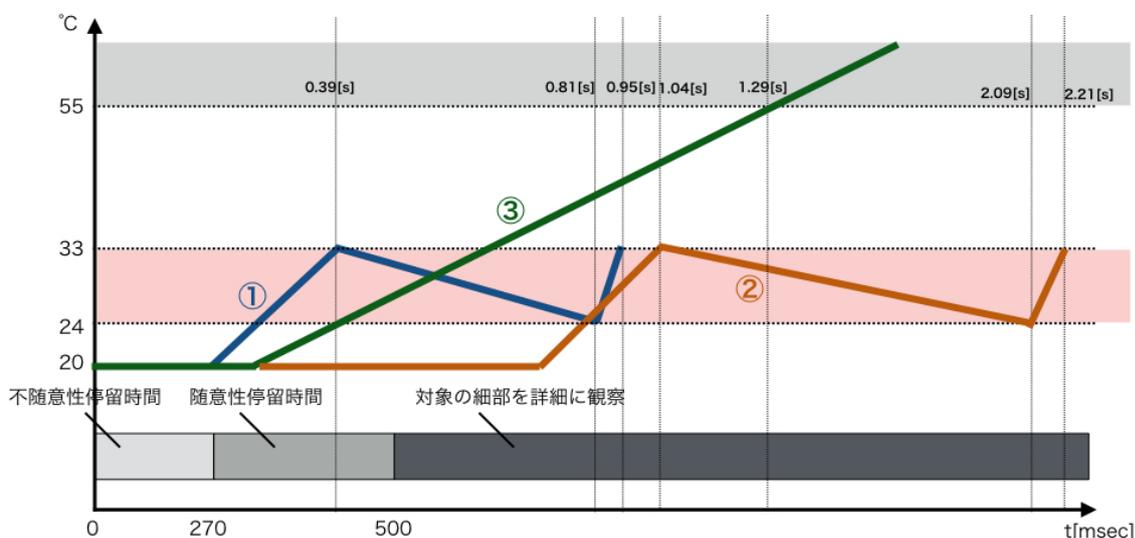


図 6.11 デバイスと注視時間の対応

図6.11において、①は連続切り替え型の機能性色素に高速スキャン方式の制御を行ったケースである（赤外レーザーと単色サーモクロミックインクの組み合わせ）。立ち上がりの応答性に優れ、従って視覚的インパクトが強いと考えられる。細部までの緻密な描写が可能であるが、連続切り替え型の機能性色素の特性が

ら安定した制御が最も難しい。②は連続切り替え型の機能性色素にアレイ光源方式の制御を行ったケースである（赤外LEDと単色サーモクロミックインクの組み合わせ）。立ち上がり応答にやや難があるが、その後の表示安定性に優れる。どの程度緻密な描写が可能となるかは用いる光源の性能次第となる。③は永続表示型の機能性色素のケースである（可視光レーザーと感熱紙の組み合わせ）。同様に立ち上がり応答にやや難があるが、永続表示型の機能性色素の特性から、その後の表示安定性を考慮する必要がない点が長所である。

①のケースにおいて、デバイスの特性から描画領域全体の同時描画は不可能であるが、特に小さい領域への描画において安定性と局所反応性が高い。プロセス①に要する時間が270[ms]と500[ms]の間にあるため、観察者の眼球運動は随意性の停留を行っている。随意性眼球運動は動きに合わせて視線を滑らかに動かすため、大量の情報よりも少量の情報を切り替えながら表示し、画像を描くというよりは色の変化する点形状のパターンを観察者に追い掛けさせるような用途に適していると言える。コンテンツとしてはアイコンなどの画像が考えられ、実際に第8章の応用例1では、顔画像の描画にこの組み合わせを用いることとなった。

その後、プロセス②および③の繰り返しによる定常状態では、赤外LEDを用いるパターンと感熱紙を用いるパターン同様、細部を詳細に観察させる用途に用いることができる。

②のケースにおいては、デバイスの特性から立ち上がり速度が遅いが、描画領域全体への同時描画が可能であり、描画の安定性にも優れている。少量の情報を連続的に表示するよりも、大量の情報を一度に表示し、部分的に変化を加えていくような用途に適性があると考えられる。具体的にコンテンツを挙げると絵画などの画像である。

③のケースは、時間的刺激性には乏しく、機能性色素の特性から「変化を加える」よりは「何かを残す」用途に適性がある。コンテンツでは文字などの画像が考えられる。実際に第8章の応用例2においては手書き文字画像の描画に用いることとなった。

## 6.7 紙の特性によるパラメータチューニング

これまでに解像度、応答性、安定性の3つの観点から表示応答について見てきたが、それらすべての要素に影響を与える重要な要素が存在する。それは前述した紙の持つ幾つかの物性値、すなわち熱伝導率、比熱、嵩密度、厚み、サイズなどである。特にわかりやすいのはサイズで、一定方向の解像度 $r$ は、照射光のスポット径 $d$ 、紙のサイズ $D$ について

$$r = \frac{2D}{d}$$

(6.19)

というシンプルな式で表すことができる。

その他の物性値も表示応答に影響をもたらす。すなわちこれは表示応答を紙の物性値によってチューニングすることが可能であることを意味している。

### 6.7.1 温度挙動への影響力の考察

表示の挙動に直結する温度挙動への、光源デバイス、紙の物性値の影響力の大小について考察を行う。図6.12に1[W]を基準とし、光源出力を増大させた場合の温度挙動を示す。また、図6.13に1[W]の出力のもとで、紙の厚みを100[ $\mu\text{m}$ ]を基準とし、厚みを変化させた場合の温度挙動を示す。

図6.12は、出力が増大すれば単純に立ち上がり応答が早まっていくことを示している。その後の熱挙動についてはそれぞれのフェーズで勾配などの変化はほとんど見られず、ほぼ立ち上がり応答の早まった時間分グラフ全体が時間軸のマイナス方向に推移している。一方、図6.13では、紙の物性値の一つである厚みを変化させることが、立ち上がり応答の勾配のみならず温度挙動全般に多大な影響をもたらすことを示している。すなわちプロセス①②③全ての時間が紙の厚みの影響を受けているということである。

単純に立ち上がり応答時間を短縮したい場合は紙の物性値のチューニングが容易な手段となるが、表示挙動全体が大きく変化することに留意し、表示挙動に影響を及ぼさない光源出力の上昇と適切に組み合わせることで挙動の設計を行う必要がある。

よって性能の改善や、用途に適した正しい設計を行うためには、光源デバイスの精緻な調整のみならず、紙素材の持つ多くの変数の適切な管理と調整が必須となる。

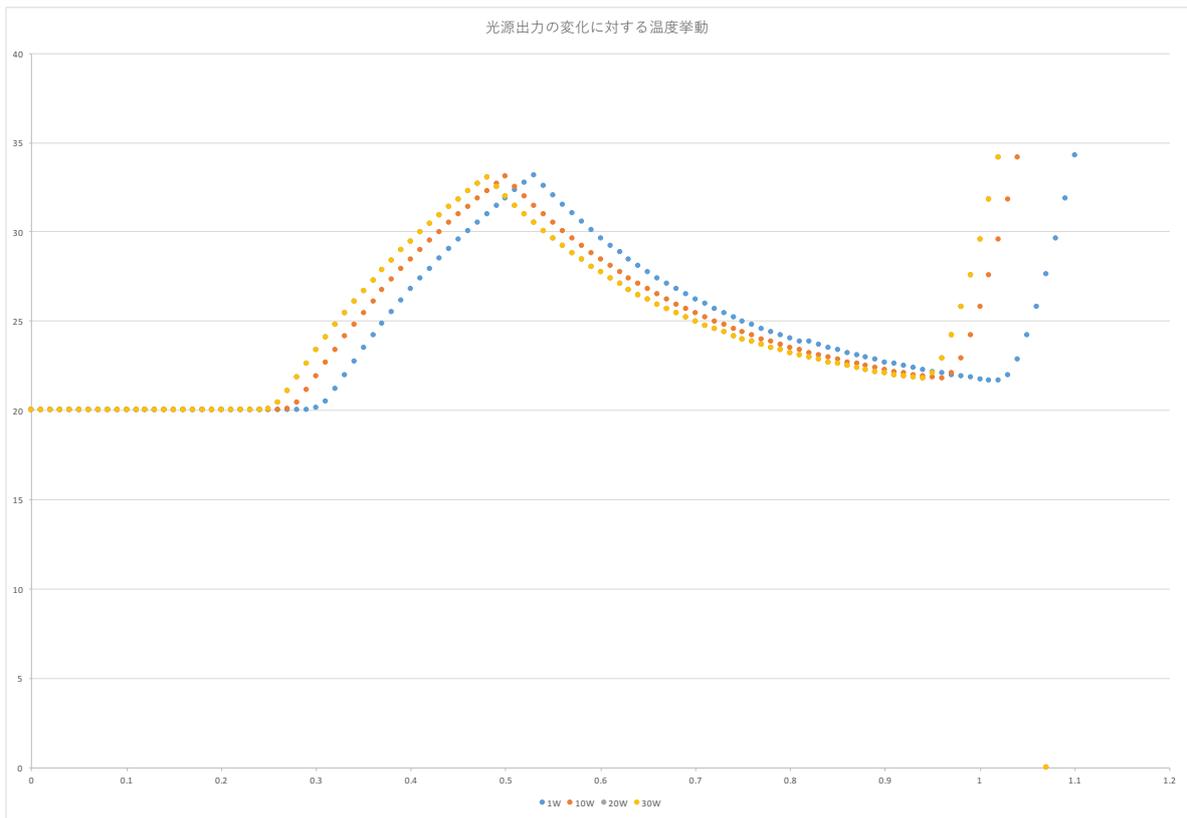


図 6.12 光源出力の変化に対する温度挙動の比較

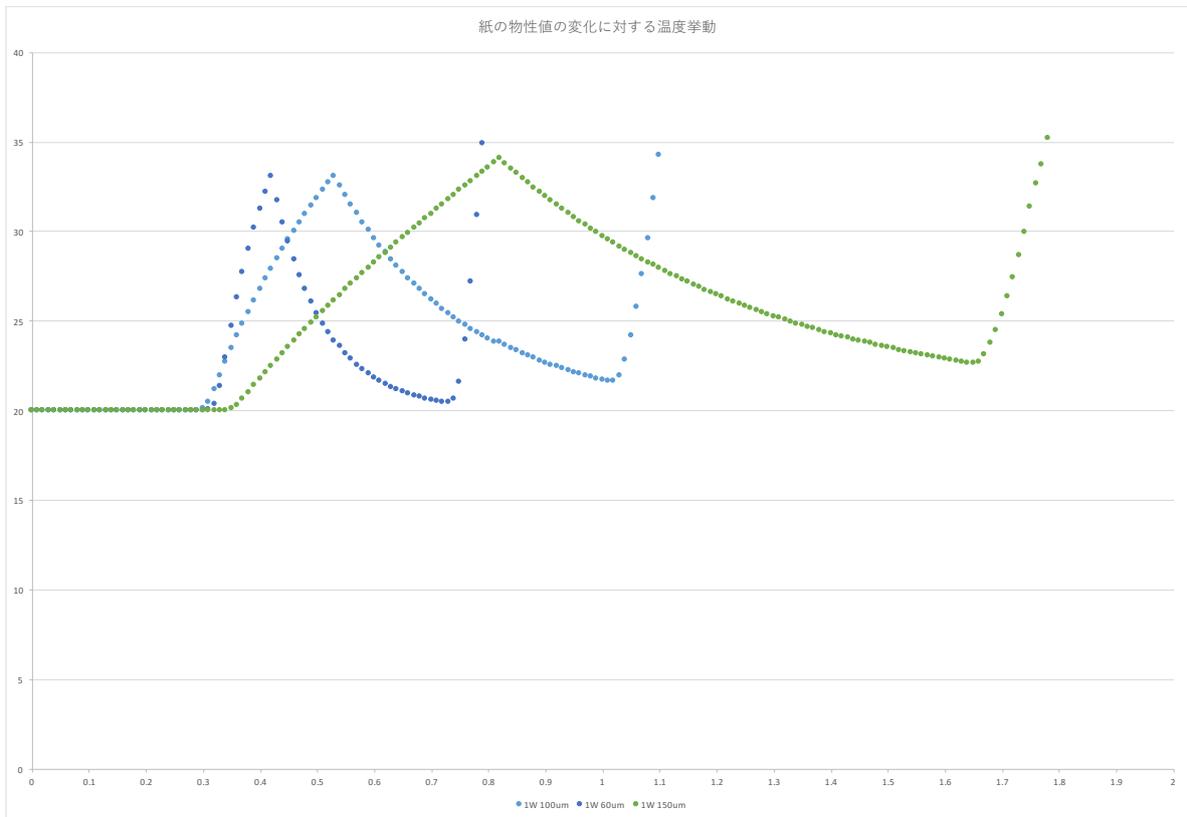


図 6.13 紙の物性値の変化に対する温度挙動の比較

## 6.8 性能向上のためのポイント

本章における検証から、ディスプレイの性能向上のポイントは、それぞれ次のようにまとめることができる。

- ・解像度の向上

照射光のスポット径を、高出力を維持したまま狭める。あるいは紙のサイズを拡大する。

- ・応答性の向上

照射光エネルギーの強度増大により表示消去速度が上昇する（ただし直後の冷却に遅延が生じ、描画の安定性を損なう可能性がある点に留意する）。紙の物性値、中でも有効と判明している紙の厚みをチューニングする（ただし表示挙動全般に多大な影響をもたらすことに留意する）。

- ・安定性の向上

描画安定のため閾値温度近辺での細かい温度制御すなわち光照射デバイスの緻密な制御がポイントとなる。

## 6.9 結言

本章では、第5章において述べた光熱変換原理を用いた熱設計について、実際のシステムの挙動に対し理論式からのシミュレーションおよび実験による比較、考察を行った。本システムにおける表示挙動は、連続切り替え型熱感応型機能性色素及び同永続表示型の温度上昇における消色及び表色、および連続切り替え型熱感応型機能性色素の温度下降による表色の2パターンをとる。前者では熱伝導媒体が連続的に光照射を受け温度上昇し、光熱変換による素材中の非定常熱伝導による温度変化が起こる。後者では、素材内の非定常熱伝導に加え、雰囲気との熱伝達による冷却が起こる。これらのプロセスを熱感応型機能性色素の挙動温度範囲において安定化させ定常状態に置くことで表示の安定化を図る。また、冷却プロセスにおける対流熱伝達の影響を考慮しない理由を示した。応答性評価の方針としては、実際のシステム運用において使用が容易と思われる光照射デバイス、および最も使用が想定される環境条件における応答を検証し、デバイスの性能を上げる上での目安となる数値を求めることとした。光照射方式としてアレイ光源方式、および高速スキャン方式を用い、それぞれの方式において表示応答の立ち上がり時間、立ち下がり時間を、理論式から算出した。光照射デバイスと熱感応型機能性色素を様々な組み合わせで用い、紙、光照射デバイス、熱感応型機能性色素、雰囲気の物性値から表示応答性能を求め、実際のシステムの挙動と比較し、検証を行った。また、各条件における応答性と注視時間における既存研究の知見とを照らし合わせることにより、光照射方式と熱感応型機能性色素の組み合わせにおいて、その表示コンテンツの適性について議論を行った。また、表示応答などのシステム性能に対し、紙の持つ幾つかの物性値の影響力が非常に大きいことを示し、紙の持つパラメータチューニング性が

表示設計において重要であることを示した。これは言い換えれば、光照射デバイスだけでなく紙素材の物性値などの多数の変数を適切に管理・設定する必要があると言える。次章ではそのための手法について掘り下げていく。

# 第7章 システムのモデル化

## 7.1 緒言

本章では、第6章において求めた理論式を元に、実際のシステムの運用において挙動のモデル化を行う。第6章にて述べたように、本研究における発色制御システムは多数のパラメータを緻密に調整し、挙動を設計する必要があるため、パラメータの設定にはモデルを介し適切なチューニングを行う必要がある。このモデルにより、使用・設計にあたってのコンテンツ制作者がどの情報を設定し、何の情報を交換すれば良いのかを明確にすることで、システムの全体像と運用方法を明らかにする。

## 7.2 システムのモデル化

### 7.2.1 モデル化の意義

先に述べたように、素材の物的特性の保持および光熱変換の冷却プロセスにおいて、素材と制御システムの空間的分離は重要な要素となる。この空間分離は作業者の時間的・技能的分離も意味し、ディスプレイの使用における技術的ハードルの高さ、デザイン自由度の問題の解決にもつながる。分離された素材と制御システムは、橋渡しとなるシステムモデルを共有し、パラメータコントロールを行うことでシステムの挙動を決定していく。この過程をスムーズかつ簡便に行うことがモデルの存在意義のひとつとなる。

また、デザインプロセスにおいて制作者・設計者が異なる分野に立つ場合、相互の理解、および円滑な伝達は重要な要素となる。特に伝達においては同じ解釈系を持つことが前提とされる。この観点からは、モデルの持つ利点として、素材サイドの制作者、システムサイドの設計者を共通のシステムとそれに属する特定の変数を通じてリンクさせ、両者の対話的繋がりを通じることが期待できる。

### 7.2.2 システムモデルの概要

図7.1にシステムモデルの概要を示す。アウトプットの設計者はアウトプットの目標を設定し、制作者となる者である。素材デザインへの介入者はシステムの素材部分のデザインを行う者である。システムの設計者は、光照射デバイスの制御設計を行う者である。システムモデルを介して両者の空間的分離がなされ、モデルを通じてコミュニケーションが行われる。この空間的分離は、時間的分離、技能分離も可能にする。それぞれが設定する、あるいは担うものは以下の通りである。

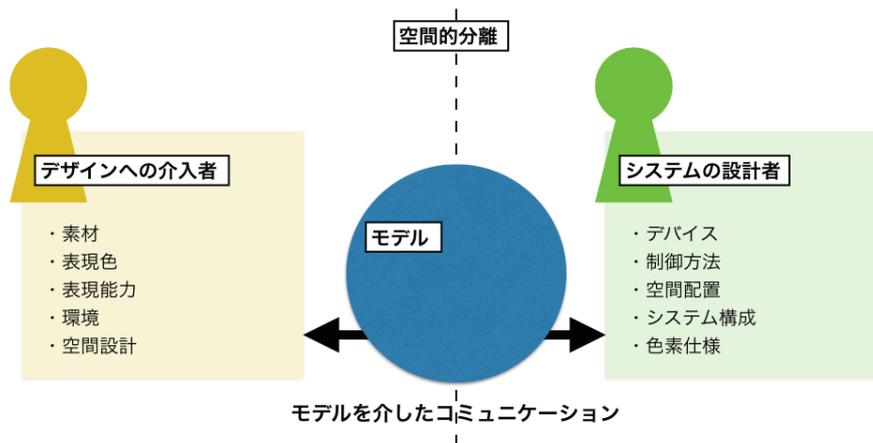


図7.1 システムモデルを介したコミュニケーション

### ①素材デザインへの介入者

- ・ 素材（サイズや厚み、種類による物性値）
- ・ 表現色（感熱紙、サーモクロミックインクなど色変化挙動）

### ②システムの設計者

- ・ デバイス（光源種類と、それに伴う光照射方式）
- ・ 制御方法（出力、光照射時間）
- ・ 空間配置（光源距離）
- ・ システム構成（ネットワーク、センサなどの追加デバイス）
- ・ 表現能力（応答速度、解像度）

### ③アウトプットの設計者

- ・ 環境条件（外気温）
- ・ 空間条件と構成（空間設計におけるシステムバックヤードの有無など）
- ・ 表現における色素仕様（閾値温度など）
- ・ 表現形態の特色

以上はあくまで基本的基準であり、アウトプットの設計者が、他二者の担う特性に設計段階から介入するケースも考えられる。

図7.1において重要なポイントは、モデルがシステム構築を円滑に進めるツールとしての機能だけでなく、異なる分野間のコミュニケーションにおいて、一種の通訳者の機能を担う点である。くだけた言い方をするならば、素材屋の言語

とシステム屋の言語の通訳である。両者の変数の受け渡しにおいて、仲介し通訳する存在がこのシステムモデルとなる。

### 7.2.3 UMLによるシステム記述

本研究のシステムをUML[49]により記述する。

#### 7.2.3.1 クラス図

UMLによるシステムのクラス図表記を図7.2に示す。

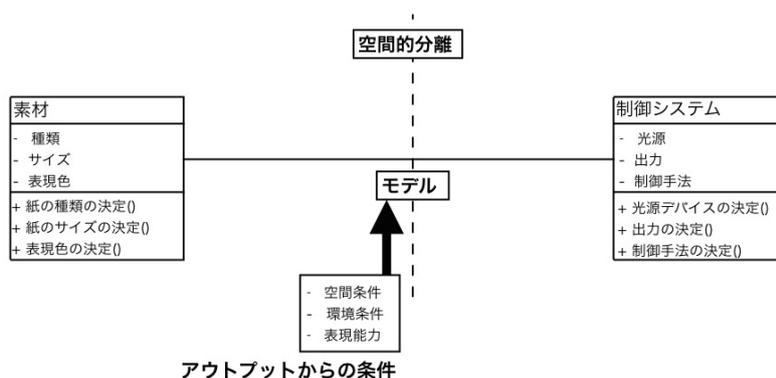


図7.2 システムのクラス図

図7.2において、システムの空間的分離により、素材と制御システムの2つのクラスに分割されている。2つのクラスはそれぞれに属性を持つ。プロセスの起点として、アウトプットの設計者により、モデルに対し幾つかの条件が加わる。このとき、この条件を起点とし、素材、制御システム各々のクラスはモデルを介してそれぞれの属性を変化させる。このモデルを介しての応答は属性値である変数の応答であり、属性値が一定の条件を満たすあるいはアウトプットが何らかの条件を満たすまで交換され、収束していく。

従来型ディスプレイにおいては、図7.2における素材クラスと制御システムクラスが一体化していたため、属性値の変動がクラス内部において完結していた。従ってアウトプットの制作にあたっては制御システムの技術的言語によってしかデザインを語るができなかった。素材と制御システムの2つのクラスに分離することで、各々のクラスに適した言語でデザインプロセスを進めることができる点が特徴である。また、これらのクラスの空間的分離は、時間的分離、技能的分離につながるため、従来になかった円滑なデザインプロセスが実現される。

#### 7.2.3.2 振る舞い図 -シーケンス図と状態遷移-

以上の素材、システム両者の属性とその振る舞いをもとに、実際に本システムを運用するケースにおいて、UMLシーケンス図によるアウトプットの創出過程を図7.3に示す。

図7.3におけるシーケンス図は、アウトプットの設計者、素材サイドの制作者、システムサイドの制作者の3オブジェクト間の制作プロセスにおける応答を表現したものである。概略としては以下の流れとなる。まず、アウトプットの設計者が、最終的な到達点となるアウトプットの概略を示し、その要件仕様を素材

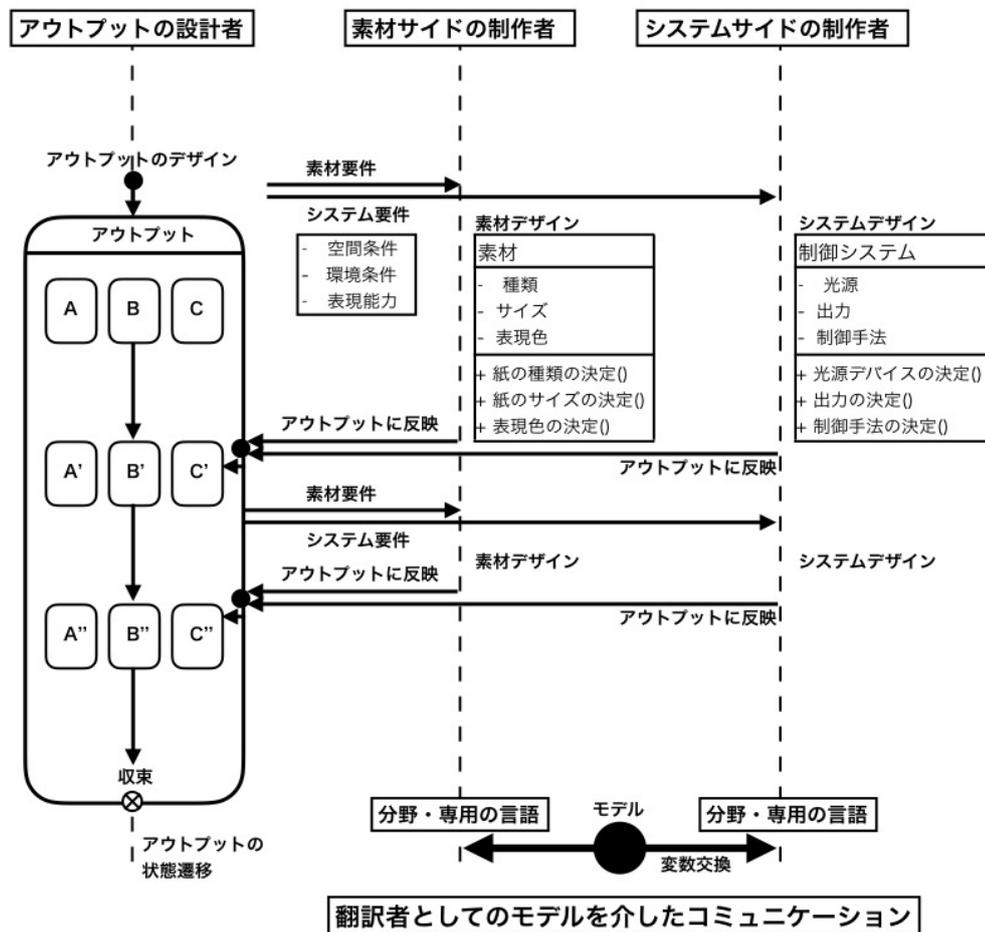


図7.3 シーケンス図と状態遷移

サイドの制作者、システムサイドの制作者に伝達する。この要件仕様とは、例としてインストールならばその挙動や設置空間など、モデルにおける幾つかのパラメータを含んだものである。次のフェーズとして、素材サイドの制作者、システムサイドの制作者は共に、素材、制御システムの属性値を様々な工夫・変動させ、いくつかのアウトプットをアウトプットの設計者に例示する。例示されたアウトプットは設計者のフィードバックを得、ブラッシュアップにより次の段階の理想的アウトプットへと変化し、再び要件仕様を素材サイドの制作者、システムサイドの制作者に伝える。このプロセスの繰り返しにより、アウトプットは次々とブラッシュアップされていくことになる。そのプロセスにおいて、素材サイドの制作者、システムサイドの制作者は各々が持つ属性値の変動を、モデルを介して例示するアウトプットに伝達している。

### 7.2.3.3 翻訳者としてのモデルとその利点

コミュニケーションの観点からは、この一連のプロセスで最も重要となる点が存在する。図7.4に素材、制御システム両サイドの、モデルを介したコミュニケーションの概略を示す。両者はそれぞれ属性値を持ち、それを光熱変換を主とするシステムモデルに代入することにより、システムモデルはアウトプットを導出する。逆にアウトプットの方で何らかの条件を加えることで、それがシステムモデルを介して両者に波及するケースも考えられる。すなわち、両者はモデルを介したコミュニケーションを随時行いながらアウトプットをブラッシュアップさせていることになる。

ここで重要なポイントは、素材、制御システム両サイドのコミュニケーションにおいて、各々の分野の言語によってのみ両者の必要事項の伝達が完結しているという点である。分野の言語とは、俗に言われる「業界における独特の言語表現」であり、それぞれの分野の従事者が慣れ親しんだ物に変数として関連するものである。アウトプットをブラッシュアップする過程において、分野の言語として導出された変数は、モデルへのインプットとアウトプットを繰り返されることになるが、その変数はあくまでもその分野の言語であることから不変であり、異分野の言語に変換されることはない。すなわちモデルはこのコミュニケーションにおいて、アウトプットの導出装置としての側面だけでなく、両言語の翻訳者としての側面をも持つということになる。この利点はアウトプットの創出プロセスの作業を大きく円滑化し、かつ自然に行えることにつながる。

### 7.2.4 数式によるモデルの統合表現

本研究におけるシステムを、変数集合および式の集合により総括して示す。変数集合は、システム構成部材の温度変化（すなわち応答性）に関するものをX、制御システムに関するものをY、紙に関するものをZとするとき、

$$X = \{T, T_0, s, D, \alpha_g\}$$

$$Y = \{E, d, l, \theta_l\}$$

$$Z = \{m, c, s_p, t_h, \lambda, \rho, c_p\}$$

(7.1)

以下に3段階の熱挙動プロセスのモデルを示す。光照射による光熱変換プロセスは、

$$T = \frac{E_s}{S_p t_h \left(\frac{d}{2}\right)^2 c \pi} + T_0$$

$$D = \frac{l}{\tan \theta_l}$$
(7.2)

紙素材内部の熱伝導プロセスは、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$
(7.3)

自然空冷による熱伝達プロセスは、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha_g}{c_p \rho} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\lambda}{c_p \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$
(7.4)

によって表される。システム設計プロセスにおいては、このうち任意の式の任意の変数に、設計者がシステム設計用の定数を段階を経て代入していくことにより、システムの挙動を決定していく。

以上の3プロセスにおける数式によって構成される数式集合をIとする。システム設計プロセスにおいてIにおける数式のうちm+1個の式への定数の代入を行う。すなわち、周回回数k回目のシステム設計プロセスにおいて、変数集合  $X_k$ 、 $Y_k$ 、 $Z_k$  を用い、式fによる式集合  $I_k$  は、

(7.5)

$$I_k = \{f_{0,k}(X_k, Y_k, Z_k), f_{1,k}(X_k, Y_k, Z_k), \dots, f_{m,k}(X_k, Y_k, Z_k)\}$$

によって表される。変数集合

$$X_k \cup Y_k \cup Z_k$$
(7.6)

について代入する定数の個数をn+1とすると、定数値

$$A = \{a_{0,k}, a_{1,k}, \dots, a_{n,k}\} \quad (7.7)$$

を変数集合  $X_k$ 、 $Y_k$ 、 $Z_k$  に代入することにより、変数集合  $X_{k+1}$ 、 $Y_{k+1}$ 、 $Z_{k+1}$  は、

$$\begin{aligned} X_k &\supset X_{k+1} \\ Y_k &\supset Y_{k+1} \\ Z_k &\supset Z_{k+1} \\ I_k &\supset I_{k+1} \end{aligned} \quad (7.8)$$

となる。周回  $k$  における全挙動  $F$  は、

$$F\{X_k, Y_k, Z_k, I_k\} = \{X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, I_{k+1}\} \quad (7.9)$$

となる。以上の漸化式によるモデルを定数集合  $A$  を代入し周回することにより、システムの挙動を設計していく。

### 7.3 結言

本章では、第 6 章までに構築したシステムのモデル化を行った。まず、システムのモデル化の意義について、システムの挙動の決定およびアウトプットの効率的創出の観点から考察した。第 6 章に述べたように、その最も重要な役割は、表示挙動に関与する多数の変数の管理・調整である。さらに、本研究の特徴である、光熱変換原理による空間分離性から、システムのモデルは時間的・空間的・職能的に隔たれた分野の人間を仲介しアウトプットを導出する役割を担う。本研究におけるシステムのモデルは、先述の分離性という最大の特徴から、アウトプットの導出装置としての側面のみならず、異分野の言語の翻訳者としての側面も持つという特長を持つ。この特長により、従来では難しかった異分野間の創作過程におけるスムーズなコミュニケーションがもたらされることが期待される。

# 第8章 応用と考察

## 8.1 緒言

本章では、これまでに設計・検証したシステムをもとに、その応用例について述べる。応用については、発色型情報提示を活かせるコンテンツとして、熱感応型機能性色素の①連続切り替え表示型②永続表示型双方を用いて画像を描画するインスタレーションアート作品の形態で制作を行い、評価を行う。それに当たり、画像の緻密さを体感できる程度の解像度、体験にスムーズに入ることのできる応答性、および連続する体験を行うことのできる安定性が重要となる。

アートディレクションの立場からは、第6章にて議論を行った、色素と光源の組み合わせのコンテンツ適性から制作を行う。具体的には表示応答立ち上がりに視覚的刺激性を持ち、緻密な画像描画に適性を持つ赤外レーザーおよびサーモクロミックインクの組み合わせを用いた顔画像の描画システム、および痕跡の残る画像の描画に適性を持つ高出力レーザーと感熱紙の組み合わせを用いた文字画像の遠隔描画システムである。

各応用例については、既存研究事例から、本研究のシステムが表示コンテンツにどの程度まで対応できたかを確認、考察する。応用例1では、画像の表示媒体として紙とサーモクロミックインクを用い、光源の高速スキャン方式制御により、顔画像の白黒画像の描画を実現する。応用例2では、画像の表示媒体として感熱紙を用い、光源の高速スキャン方式制御により、遠隔コミュニケーションにおいて文字の筆跡や癖を個別認識できる程度の描画システムを構築する。また、第7章においてモデル化したシステム体系において、どの変数がどのプロセスにおいてやりとりがなされたかを明確にし、システムの有用性を検証する。

## 8.2 表現能力とテーマ

第1章に記したように、本研究の目的は紙面発色型ディスプレイすなわち紙メディアのディスプレイとしてのステージを、時間軸を与え、さらに高性能化することによって上げることにある。ディスプレイとしてのステージが上がることにより、表現の幅は大きく広がる。

表現の題材として、本応用例では「顔」「手書き文字」を選択する。理由としては、これらのものは人間が毎日身近に触れるものであり、描画内容を把握しやすいためである。「鑑賞者がクオリティに自己評価が可能なもの」が望ましいと思われる。本研究では以下の2点に着目した。

- ①毎日見て、最も良く特徴を知る顔画像に時間軸を与えた場合、微細な特徴や変化を表現できるか
- ②人の手ならではの緩急、クセなどの手書き文字の特徴を表現できるか

ディスプレイの性能を評価する「描画内容の表現力」は、そのまま作品のテーマにもつながる。応用例1では「詳細に描かれた自分自身と向き合う」こと、応用例2では「再現された手書きメッセージから書き手の心証を読み取る」ことをテーマとしている。これらのテーマは紙面発色型ディスプレイの性能向上がなされて初めて実現可能なものである。

### 8.3 応用例1：サーモクロミックインクと和紙による肖像画像描画システム

#### 8.3.1 概要

本応用例は肖像の描画を行うアート作品である。ディスプレイの観点からは、キャンバスとして用いる紙としての素材性及びディスプレイとしてのリアルタイムな応答性の両立を目指している。作品は紙とサーモクロミックインク、赤外レーザーと制御装置（ガルバノメータ）、カメラからなる、リアルタイムの肖像画描画システムである。



図 8.1 応用例1 作品概観

アート作品としてのコンセプトは、肖像画を通じて自分自身と向かい合う体験の提供である。我々は自分自身には毎日鏡を通して向かいあっているが、絵に描かれた自分自身に向かい合う、という体験はしていない。自分自身と向かい合うという点においては、絵の作品として残された肖像画はこれまでに多くある。一方、今日ではデジタル技術で自分の顔の画像を記録することは容易である。

リアルタイムに描かれる「紙の上の」「絵」というデジタルディスプレイではできない表現をする。その本質は紙とインクの持つ素材感とリアリティである。

システムデザインの介入領域としては、肖像表示ディスプレイの素材を肖像画のキャンバスとして違和感のない紙とすること、およびサイズを加工により可変とする点である。通常、顔のリアルタイム表示にはカメラによる入力から、計算機およびタブレット端末などでの出力を行うことが一般的であるが、そのディスプレイ素材を、紙と絵の具という従来用いられてきた自然な部材構成とすることにより、肖像画として違和感のないシステムの構築を目指した。

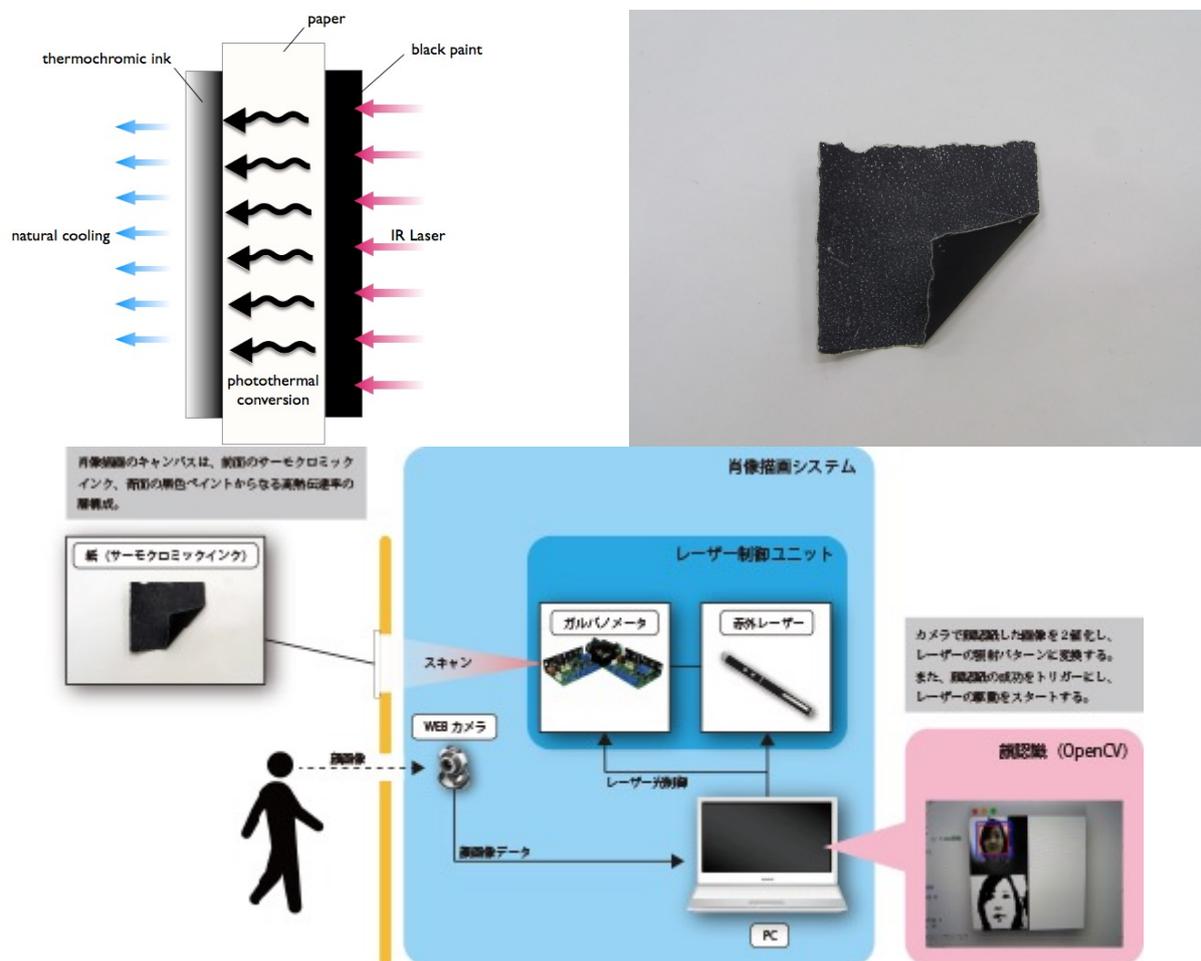


図 8.2 応用例 1 システム構成

### 8.3.2 システム構成

本応用例では、コンセプトからある程度の大きさの紙がシステム上必須であり、そのエリアに肖像と認識できるだけの画像を描くためにはより微細にピクセルを制御できるデバイスが必要とされる。また、インストールとしての空間構成の制約上、素材と光源間にある程度の距離を必要とする。そのため、赤外レーザを用いた高速スキャン方式を採用した。

肖像画という性質からディスプレイ素材にはその用途に適した紙を選択した。また素材同士の親和性の確保のため、シルクスクリーン用の黒色のサーモクロミックインクを使用することで素材同士の調和を図った。

光源の制御方式は高速スキャン方式であり、赤外レーザとガルバノメータを用いた。システム構成は図8.2の通りである。体験者が紙と向かい合い立つ壁の背面にはWEBカメラが設置されており、体験者の顔認識およびその画像の2値化を行う。カメラが体験者の顔を捕捉した場合、制御システムはその2値化画像をガルバノメータに送信し、赤外レーザの軌跡パターンとして紙の背面に投影し、画像を紙に表示する仕組みである。

### 8.3.3 評価と考察

通常、人物表現において電子制御されるシステムの部材としては用いられない紙素材を、空間的に制御システムと分離しつつ制御体系に組み込んだ。

光熱変換原理により、人物の顔を、はっきりと個人の違いを識別できる程度までの解像度による表現の実現に成功した。

本作品は、メディアアートの世界的祭典の一つであるフランスの国際展示会において5日間展示された。鑑賞者の感想として最も多く聞かれた声は、「電子制御されている作品だと思うが、システムがどこにあり、どのように動いているのかが全く分からず、コンピューターの存在が感じられない」「紙だけがあり、システムが接続されていないため、絵として自然な感じがする」といったものであった。

制作フェーズとしては、紙のパートと制御システムのパートを分離した形で並行して制作を進め、作品として統合することに成功した事例である。紙素材の方はサーモクロミックインクの塗布を印刷業者が行い、電子制御システムの方は筆者が制作を行ったが、両者の制作進行プロセスを時間軸上でも、物理的にも分断して行うことができた。

解像度の程度としては、鑑賞者が最も良く知る自身の顔画像に、それとわかる表現を与え、時間軸上で、微細な特徴や変化を緻密に表現できるかが焦点となる。その上で指針となる幾つかの既存研究による科学的根拠を以下に挙げる。

- ・人の顔画像認識は16×16以上で可能である[14]
- ・「顔ではない」認識エラーを防ぐための解像度は58×58以上である[14]
- ・cycles/ete (cycles within the eye-to-eye distance) が大きいほど顔と頭の認識率が上がる (ほぼ100%を達成するためにはそれぞれ1.2、3.9が必要となる) [11]
- ・80ピクセル/顔 かつ 5ピクセル/cm (撮影視界の悪条件下) が必要となる。すなわち160mm以上の紙サイズが要求される[11]
- ・40ピクセル/顔 かつ 2.5ピクセル/cm (撮影視界の好条件下) が必要となる。すなわち80mm以上の紙サイズが要求される[11]
- ・コントラストを逆転させると識別率が低下する[14]

- ・コントラストが低いほど識別率が上がる[14]

本研究では128[mm]×128[mm]の紙（解像度64×64）の2値化画像によって顔画像を表現したが、これは以上を満たすものである。

安定性・応答性の程度としては、まず使用した紙に着目したい。その他の要素は雰囲気温度を除くと第6章の検証と同様であるからである。本応用例に使用した紙は、「わたがみ」、通称「嵩高紙」と呼ばれる、繊維密度が低く、厚みのある紙であり、加熱効率が低く、冷却効率が高いことが予想された。描画の応答性という意味ではこの特性は適さないが、実際の展示では多くの体験者に観賞されるよう、作品体験における連続性を重視し、逆の性質のものを選んだ。

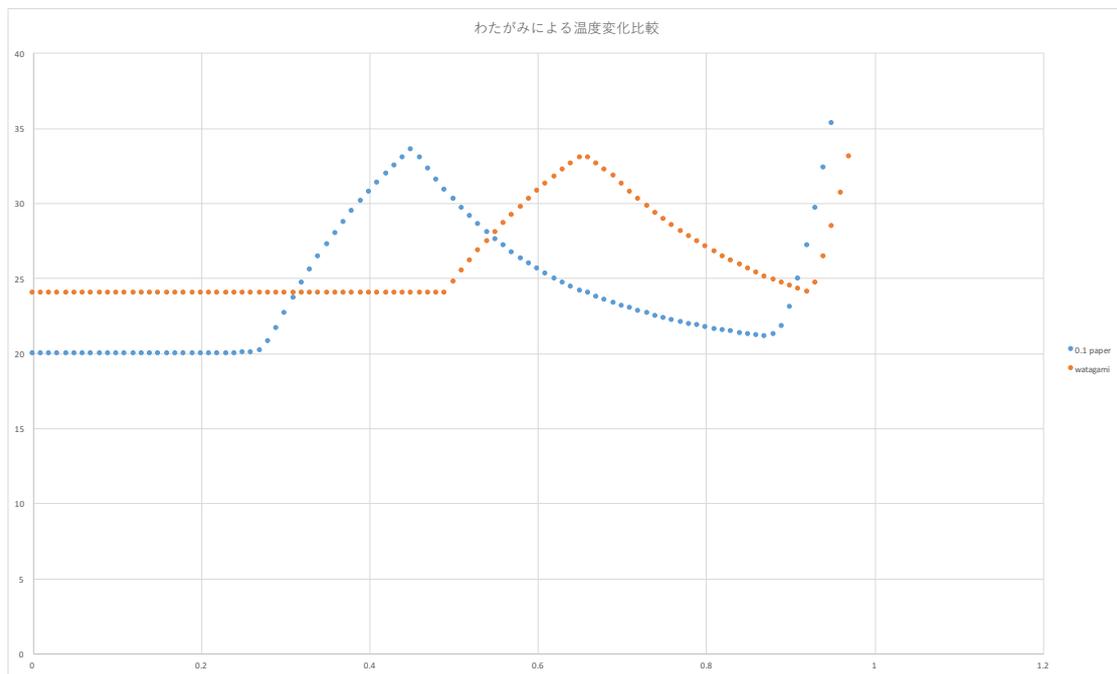


図 8.3 応用例 1 嵩高紙による温度変化比較

第6章にて行った検証と、展示条件における熱挙動の比較を図8.3に示す。熱挙動としては、プロセス②が短時間で推移することから、嵩高紙の持つ特徴が表れている。このような特性の紙の場合、冷却効率が高いことから、プロセス①の最高到達温度（変色温度領域の最高温度を最低限とする）を引き上げることでプロセス②の時間を長くし、プロセス③の時間を短縮するといった制御上の工夫が可能になる。これは画像の表示において1ドットの照射のインターバル時間を短くし、ラスタースキャンの周回時間の短縮を目指すためである。

紙サイズ：128[mm]×128[mm]（解像度：64×64）より、 $64 \times 64 \times 0.05 = \text{約} 205[\text{sec}]$ でラスタースキャンが一周すれば表示が安定することになる。上記シミュレーションでは1ドットの冷却時間よりはるかに長いため、理論上は描画が上部から消えていく。実際は1ドットの照射のインターバル時間を短くすることで領域全体の描画に成功した。

## 8.4 応用例 2：カーボン紙と感熱紙による手書きメッセージ表示システム

### 8.4.1 概要

本応用例のコンセプトは、嗜好や技術観の異なる家族同士をつなぐシステムの確立である。プロジェクトの趣旨は、沖縄の離島に住む祖母と、大阪の息子一家をつなぐコミュニケーションツールの創案である。祖母の家にあるような昔ながらの製品・モノとデジタルツールを技術的に橋渡しすることにより、離れた家族がつながり合うことをテーマとした。本応用例、タイトル「メッセージ掛け軸」はそのうちのひとつのプロジェクトで、手書きのメッセージを掛け軸に遠隔地から書き込むコミュニケーションツールである。タブレット端末の専用アプリで書かれたメッセージが、ネットワークにより祖母の家へ送信された後、掛け軸裏のレーザデバイスが、メッセージを書かれた筆順通りに書き出していく。

通信ツールの観点からの達成目標は、紙としての素材性の確保及び遠隔通信デバイスとしての利便性の両立である。



図 8.4 応用例 2 作品概観

クライアントである通信サービス企業（A社とする）の商業およびイベントのための装置である。制作に携わったのは、展示美術を執り行う舞台美術企業（B社とする）および、システムの作成と制御を行う電子系コンテンツ制作企業（C社とする）の2社である。

デザインの介入領域としては、メッセージ表示ディスプレイの素材を紙とすること、および掛け軸と合体させても違和感のないようサイズを加工により可変とする点である。通常、遠隔情報送信技術を用いたテキストの送受信には計算機およびタブレット端末などが用いられるが、その素材とサイズを可変とし、かつカスタマイズの自由度を上げることにより、掛け軸として違和感のないシステムの構築を目指した。

## 8.4.2 システム構成

本応用例では、インスタレーションの設計上、遠距離から視認できる文字を表示できる程の大きさの紙がシステム上必須であり、そのエリアで書き文字を認識できるだけの画像を描くためにはレーザー彫刻機が適切であるため、採用した。

掛け軸に使用するメッセージ表示用のディスプレイであるが、コンセプト及び美術面から「都会から離れた地方の島に住む老夫婦の家」にあるものとして、タブレット端末などの高度な電子機器は不適當である。この観点からは、実際に紙を掛け軸に接着し、それをディスプレイとする手法を取らなければならない。

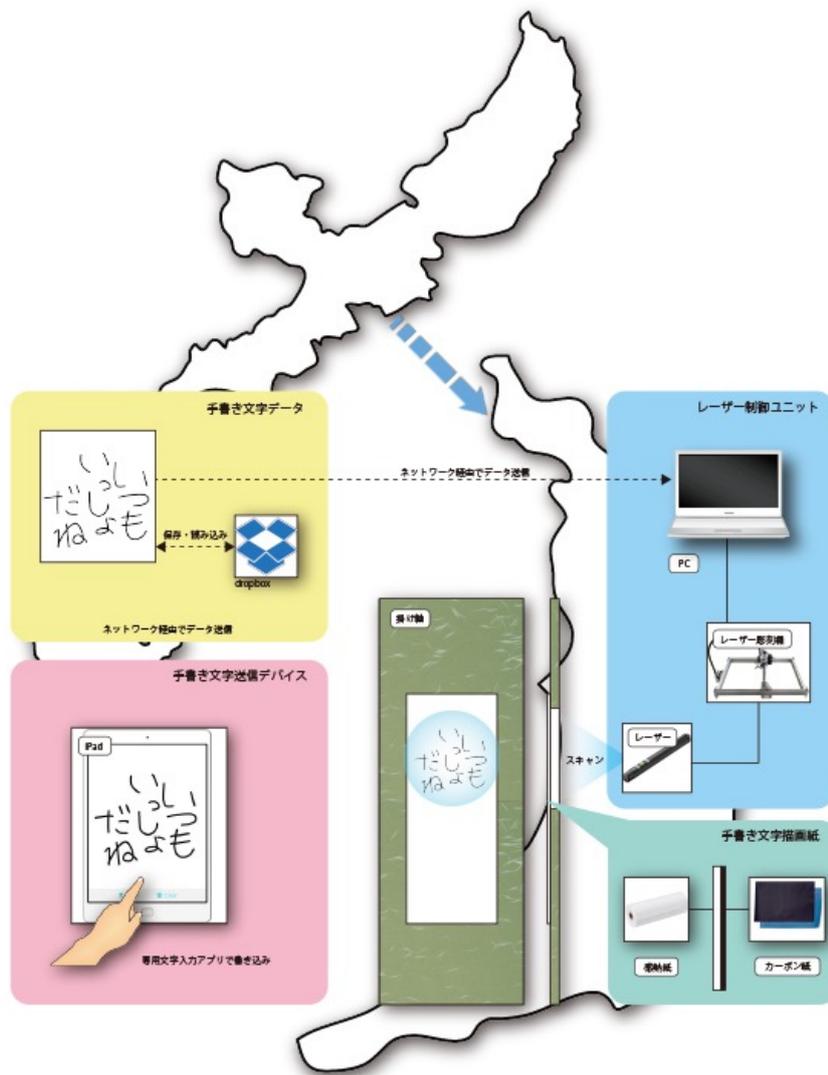


図 8.5 応用例 2 システム構成

掛け軸というインスタレーションの構成要素の性質上、可逆変化を起こし、また書き文字が黒から白へと変化するサーモクロミックインクの使用は不自然であるため、感熱紙を使用した。

システム構成は図8.5の通りである。タブレット端末の専用アプリに手書き入力された文字は、その軌跡と時間データをクラウドサービス上に一時保存される。保存された文字データは、ネットワーク経由で遠隔地の掛け軸に設置された感熱紙およびレーザー彫刻機の制御機構に送信される。レーザー彫刻機の制御機構は文字の軌跡を高出力可視光レーザーにより感熱紙裏面から照射し再現する。

レーザー制御ユニットへ取り込んだ手書き文字の軌跡データは、実際に描画するに当たり、文字のストローク毎に適度に中途のドットを削除した上で用いる。これはストロークに動きがない部分の重なりなど、描画において不要なドットを除き、文字全体の描画を高速化するためである。

#### 8.4.3 システムモデルと交換変数

本応用例は、クライアントとなる通信サービス企業A社、舞台美術業者B社、システムの作成と制御を行う電子系コンテンツ制作企業C社による綿密なコミュニケーションから成り立っている。まず、第1フェーズとして、アウトプットのイメージとして「遠隔通信が可能な掛け軸型描画システム」という基軸を打ち出す。このアウトプットのイメージは古民家に飾る、実際の描画に見える表現といった要件を生み、舞台美術業者、およびシステム会社に受け渡す。素材デザインの観点からは「見えが掛け軸として映像上違和感のない紙」、システム制御者の観点からは「実際にその場で書き込みが行われているような臨場感とリアリティのある表示応答性」が要件となる。

#### 8.4.4 評価と考察

本応用例は販促動画及びイベントに使用され、ニュース等でも紹介がされた。動画共有サイト「YouTube」において369万回を超える再生数（2018年3月）を得た。

目的とする紙表面における高解像度発色制御の観点からは、光熱変換原理により、手書き文字を、筆跡などが明確に分かる形で詳細に再現することに成功した。

本応用例は、専門領域の異なる数社のコミュニケーションと共同作業による制作であるため、空間、時間両面において分断された状態を前提としての制作プロセスを経ることになった。すなわち、直接に顔を突き合わせ、制作物を確認しながらの制作作業が不可能な状況にあった。制作会社同士及びクライアントの間でできるコミュニケーションは唯一、電子メールによる仕様の伝達と確認のみであった。

こうしたスムーズな制作プロセスが難しい条件において、美術面を中心とした紙素材のパートと、描画面を中心とした制御システムのパートを、空間、時間的分離の制約によらず最終的なアウトプットまでを完遂することに成功した事例である。

着目すべき点としては、実際に撮影およびイベント現場で掛け軸素材と制御システムを統合するまで、電子メールによる仕様等の情報交換のみのコミュニケーションしか行っていなかった点が挙げられる。電子メールの内容としては、制作にあたる属性値の交換が全てであった。その点で、企業という専門的にも空間的にも分断された関係において、スムーズにコミュニケーションをとり最終的なアウトプットまで到達した成功事例である。

文字画像の解像度の観点からは、以下のような既存研究による科学的根拠が指針となる。

- ・表示画像の解像度については、JIS規格 (JIS X 9051) において定められている、表示装置用は16ドット字形規格である[39]
- ・低ドット密度では判読性が問題となり、高ドット密度では読み易さが問題となる[10]
- ・低次数のドット文字の判読のためには適当な文字サイズが存在する[10]
- ・一定の判読率を得るのに必要なドットマトリクス次数は字画数が増えるほど高くなり、18×18dot程度で20画までの漢字の判読率は100%に達する[10]
- ・27×27ドット程度を境に低次数では字画数の少ない文字の方が判読性が良いが、中程度以上のドット次数では逆に字画数の多い文字の方が判読性が良くなる[10]
- ・50×50ドット程度まではマトリクス次数が増すほど判読率は向上するが、それ以上では品質が飽和する[10]

本応用例では、実際の解像度としてはおよそ10×10～20×20ドットで文字の描画を行ったが、これは以上の科学的根拠からひらがな数文字の再現描写としては十分なディスプレイであると言える。

第6章図6.9から、文字のストロークを構成する1ドットあたりに要する予測値はおよそ1.23[s]と推定される。文字の全ドットを描画する場合、20×20ドットの1文字あたりおよそ8分12秒かかる計算になる。先述のように、実際はストロークのうち無駄なデータを省いているため、時間は短縮される。

## 8.5 応用例の総括

応用例1では、顔画像という個人によって異なる特徴を持つ画像を表現できる程度の解像度による描画に成功した。また、異なる体験者が連続的に体験するインスタレーション作品であることから重要となる描画の安定性および異なる画像の描画への切り替えが、紙のパラメータチューニング性を生かした制御設計により実現できた例となった。

応用例2では、「掛け軸」というテーマに沿い、手書き文字を、その筆跡や書き方の特徴に至るまで再現出来る程度の解像度、表示応答性により描画することができた。具体的には、高解像度を生かした「書き癖」だけでなく、高応答性を生かした書くスピードの緩急の表現に成功した。また、紙のパラメータチューニング性を生かし、そのサイズの可変性により、美術面でも優れた設計を行うことができた。

2つの応用事例において、光熱変換原理による熱制御の採用により、顔画像および筆跡を再現できる文字画像の描画を実現することができた。また、時間的・空間的・言語的に分断された専門領域において、それぞれの言語のみによるコミュニケーションを用いた制作に成功している。

## 8.6 結言

本章では、本研究で設計した紙面発色型ディスプレイシステムを、実際に制作に用い、決められた用途とコンテンツに従って運用した。第一の応用例では、リアルタイムの肖像画像の描画を実現した。この応用例では、画像の表示媒体として紙とサーモクロミックインクを用い、レーザー光源の高速スキャン方式制御により、キャンバスとしての紙の素材感・質感をそのまま保持したアート作品の制作を行った。第二の応用例では、掛け軸型のスクリーンを用いた遠隔コミュニケーションツールの制作の試みを行った。この応用例では、画像の表示媒体として感熱紙を用い、レーザー光源の高速スキャン方式制御を用いた。それぞれの応用例について、描画内容の識別が可能であるかを、既存の研究事例から評価を行い、水準を満たしていることを確認した。

# 第9章 結論

## 9.1 緒言

本章では、これまでに提案、検証してきた光熱変換原理による紙面発色型ディスプレイシステムについて、その構成、挙動、特長等を再確認し、総括を行う。また今後の展望について述べる。

## 9.2 本研究におけるディスプレイ総括

### 9.2.1 構成

本研究において設計指針を示した最終的な構成を図9.1に示す。

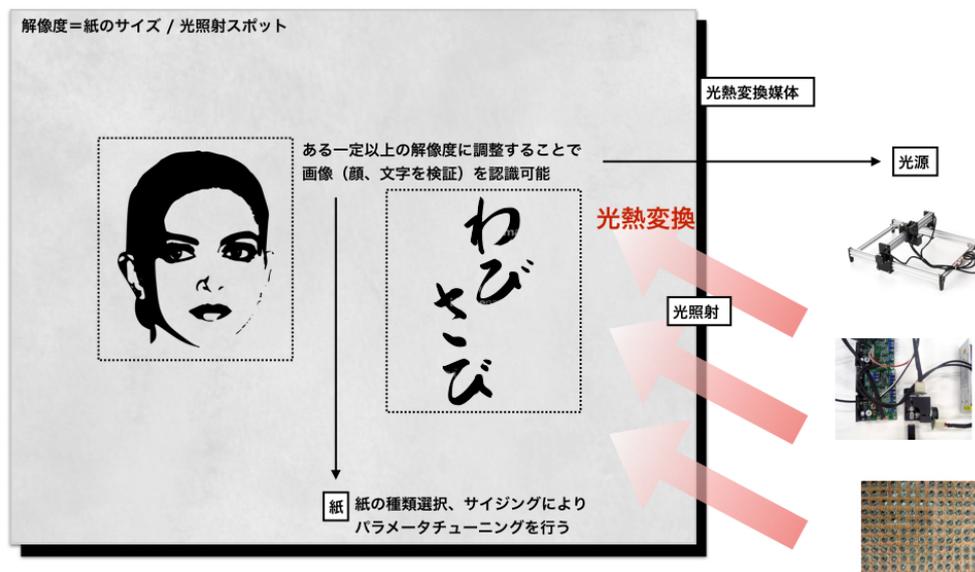


図 9.1 システム構成

前述のように、解像度は紙のサイズを光照射スポット径で割ることで導き出すことができ、逆に紙のサイズをチューニングすることにより好みの数値に定めることができる。具体的な例は第8章の応用例にて述べた通りである。紙の正面には求める挙動を行う熱感応型機能性色素、背面には光熱変換媒体を塗布・印刷する。背面側からは、画像の描画エリアに合わせて高出力・高解像度の光照射が可能なデバイスにより照射光を当てる。この場合、光熱変換特性から光熱変換媒体は黒体に近い物質が望ましく、照射光は波長の長い赤外光が望ましい。次に描画したいコンテンツの解像度に合わせ、紙の特性のチューニング及び光源の選択を行う。描画するコンテンツは多様であるが、設計の目安となる科学的根拠を第8章の応用例2例に示した。

## 9.2.2 挙動

本研究において設計指針を示した最終的なシステムの挙動を図9.2に示す。

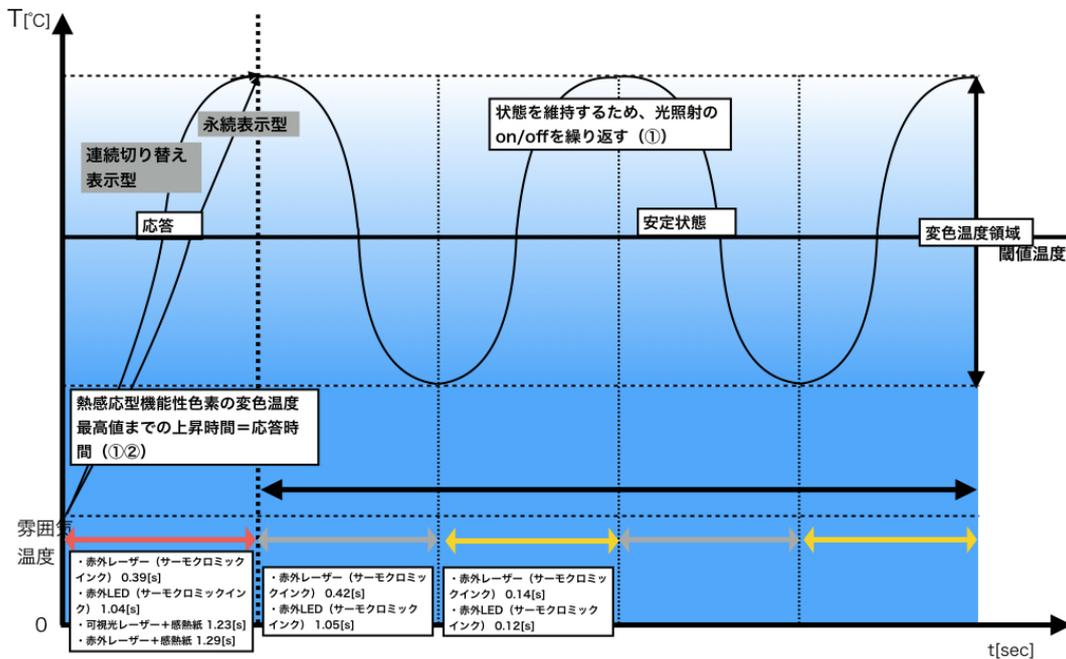


図 9.2 挙動

既に述べたように、熱感応型機能性色素には可逆反応を示す連続切り替え表示型、及び不可逆反応を示す永続表示型が存在する。前者後者ともに、システム起動前の熱感応型機能性色素の温度は霧囲気温度と同一である。光熱変換による熱上昇が起きた時、ある閾値温度帯域に達すると熱感応型機能性色素は前者では消色、後者では発色反応を起こす。この反応時間が第6章においてプロセス①と呼称した立ち上がり時間である。後者はこの時点で発色反応の点では終了し、紙に表出した色は永続的に残る。前者においては、変色温度帯域の最高温度に達したとき、光の照射を停止することで、霧囲気による自然冷却が開始する。この反応が第6章においてプロセス②と呼称した冷却反応である。熱感応型機能性色素の温度が変色温度帯域の最低温度に達したとき、光照射を再び開始する。このとき、熱感応型機能性色素は変色温度帯域の最低温度から最高温度まで温度上昇を開始する。これが第6章においてプロセス③と呼称した温度上昇反応である。プロセス②とプロセス③を繰り返すことで、表示状態を保つことができる。実際の光源と熱感応型機能性色素を組み合わせた例は第8章の応用例2例に示した通りである。

### 9.2.3 発色型ディスプレイとしての性能向上程度

解像度においては、光熱変換の導入により、第8章の応用例2例に示したように、「肖像画」「掛け軸」といった、紙表面での緻密な表現を必要とする表現条件において、それぞれ、画像情報を個別に認識可能な解像度で表現することに成功した。さらに紙の特性の一つであるパラメータチューニングによるサイズ可変性により、解像度を紙のサイジングと光源のスポット径により容易に設定できるようになり、応用例2例に示したような幾つかの科学的根拠を満たすことが可能となった。

応答性においては、第6章に示したように、ほぼ光源の出力に依存する。本研究では民間で容易に入手できる光源を用いたが、より性能の高い光源を使用することで応答性は容易に大きく向上可能である。そのため本研究では、応用に使用した光源での程度を示すにとどめた。さらに第6章にて述べたように、立ち上がり応答の特性は、用いる紙の物性値に大きく影響されるため、紙のパラメータチューニング性を活かし、適切な挙動設計を行うことが肝要となる。

安定性においては、応用例1に示したように、同一表面への異なる画像の連続的描写に耐えうる機能性色素の安定した表示に成功した。安定性は、前述したように光源の性能及び選択した紙の特性に依存するが、紙の特性の一つであるパラメータチューニングによる紙の自由選択性により、連続描画に適した紙を選択することで連続的描画に成功した一面がある。

連続切り替え型の機能性色素については、立ち上がり応答性においては従来型の制御手法が優るが、これは光源の出力に依存するため改良が可能である。しかし、その後の表示安定性の制御では、熱の直接制御ではなく光の制御（分離型制御によって色素の表示の定常状態の維持が可能）によって表示状態をコントロールする本研究の手法が制御技術の容易さにおいて優れている。

具体的にどの程度の解像度が実現されるかといった表示性能向上への寄与点を述べる。図9.3に、本研究によって実現されるディスプレイの性能の向上の程度の概要を述べる。図9.3は、解像度の向上程度を示している。評価指針として、JIS規格による数値・文字の表示機構の標準解像度[39]および、詳細な画像の例として顔画像が識別できる解像度を提示した。また、紙のサイズとしては最も一般的に用いられるA4サイズを想定している。

想定条件として、一定のエリア（A4サイズ）での発色制御を行うケースを考慮する。このとき、単一熱源による発色制御（領域全ての温度を一律に変化させる）においては、解像度は $1 \times 1$ であり、ペルチェ素子などの熱源を並列配置する発色制御においては、解像度はその熱源数に応じたものとなる。熱源数は熱源の大きさにより定まる。本研究における光熱変換を用いた熱制御においては、解像度は照射光と同等のものとなる。

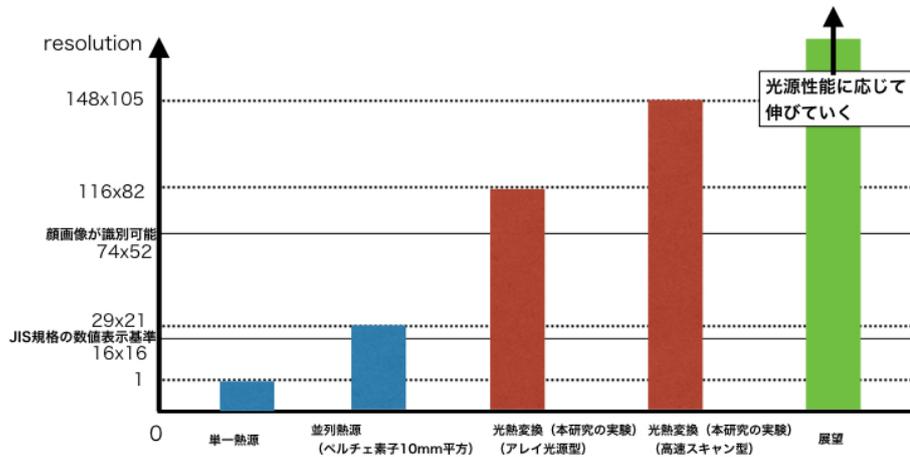


図 9.3 解像度の向上程度

具体的に考察を行うと次のようになる。一般に入手出来るペルチェ素子のサイズはおよそ10[mm]四方程度である。これにより前述の領域の温度制御を行うとき、解像度は29×21となる。熱源としてニクロム線を用いる場合、ニクロム線をドット形状に丸めることは非常に難しいため、この目的に用いることは難しい。他方、光熱変換原理に基づく熱制御の場合、高速スキャン方式においては、第6章の条件で制御を行う場合、レーザーのスポット径が2[mm]であることより、解像度は148×105となる。同様にアレイ光源方式において、解像度は116×82となる。これは既に述べたJIS規格における表示装置用16ドット字形規格[39]を満たすものであり、光熱変換原理を用いないケースと異なり、表示装置としての水準は満たしている。

この条件では、従来型の制御機構では一枚の紙に一文字を描画することがやっとなことであり、顔画像を描くことは不可能であった。一方、本研究では識別可能な文字画像を176文字、顔画像を4つ描くことが可能である。

## 9.3 諸項目の評価

### 9.3.1 社会的意義からの評価

第1章に述べた通り、現代のメディアは、主に発展を続ける電子制御型ディスプレイと、古来からある紙の共存状態にある。その点では、本研究におけるシステムは電子制御型ディスプレイの発展線上にありつつも、紙を使用しているという点で双方の需要に合うものであると考えられる。特に紙については、日常生活においてごく自然に使うという点で普遍性があり、本来の価値を損なわない。電子制御型ディスプレイと紙の両者の長所を崩さない形で融合できたシステムであり、光熱変換モデルを仲介として、両者を今後もこれまでと同様に自然な形で使用できるという点において、社会的意義には合致する点があると考えられる。

### 9.3.2 メディアとしての評価

本研究におけるシステムは、メディアとしては、電子制御メディアでもあり、紙メディアでもあるとも言える。電子制御型ディスプレイは現在我々の生活に不可欠なものとなっており、今後の発展・開発に大きな需要のあるメディアである。一方で紙メディアも、電子制御型ディスプレイの大きな台頭と発展に影響を受けず依然として不可欠なものである。本研究におけるシステムを電子制御メディアの観点から見た場合、既存のものと比べて、表示媒体素材の構成自由度を大きく向上させたシステムと見ることができる。一方、紙メディアの観点から見た場合、紙の持つ造形性や扱いやすさといった特性を維持したまま、情報提示機能を大幅に向上させたメディアと見ることができる。

### 9.3.3 理論式と実験からのディスプレイ性能評価

熱感応型機能性色素の制御への光熱変換原理の適用により、従来では不可能であった機能性色素の高解像度制御に成功した。解像度の程度は第8章の応用例2点に示したように、個人の顔の識別、および個人の手書き文字の識別が行える程度となった。

熱の直接制御においては、単一熱源型、並列熱源型はともに発熱デバイスの数量に依存し、デバイスのサイズや形状、消費電力を考慮すると解像度の向上が難しい。本研究においては、解像度は光照射デバイスと同程度であるため、表現能力の向上を解像度の点から評価するならば非常に大きな進歩が見られたと言える。特に応用例1においては、同一表面への異なる画像の連続的描写に耐えうる機能性色素の円滑な加熱および冷却に成功した。

一方で、表示の立ち上がり応答については、熱の直接的制御ではなく、光熱変換を挟んだ熱の制御を行なう点で、応答性は熱制御を用いたディスプレイに比べて劣るケースがある。そうしたケースにおいて、本研究におけるシステムのこの遅さをどれだけ許容できるかが焦点となるだろう。遅さの評価という観点においては、アウトプットによって見方が異なるケースがある。応用例1のように、視線の誘導の目的で、あえて応答が遅いことを目指した例もある。しかし、応答性

向上については非常に容易である。なぜならディスプレイの性能は光照射デバイスの高性能化に単純に依存するからである。素材を破壊するなどの過剰な出力を使用しない限りにおいては、大きな障害はなく改善されていく余地がある。

表示安定性についても、光照射デバイスの性能に大きく依存する。可逆反応型の熱感応型機能性色素を用いる場合、その閾値温度近辺での温度の定常状態維持のため、高速スキャン方式を用いる場合には、光照射デバイスの出力と制御速度にはよりシビアな条件が必要となる。この点においても、光照射デバイス側の性能向上と制御の工夫により、向上の大きな余地があるだろう。

### 9.3.4 システムモデルからの評価

素材・システム双方の変数集合によるシステムモデルを構築し、使用者が望むシステム性能を表現・使用することが容易となった。また、モデルのより重要な側面として、空間的・時間的な面だけでなく、属性値的・言語的にも素材とシステムの領域を分断することが可能となった。この分断性により、専門領域分野の異なる人間が自らの分野の言語でシステムを使用することが可能となり、さらに制作プロセスの自由度も増し、制作作業が非常に円滑なものとなった。

### 9.3.5 応用例からの評価

本研究のシステムを用い、2つの応用例を制作した。これらの応用例により、個人の顔や手書き文字を個別なものとして判別できる程度の高解像度の発色表現が実現されることを示した。また実際に素材・システム双方が分断された状態でシステムが機能し、アウトプットがスムーズに導出されることが実証された。

## 9.4 応用と展望

光熱変換による色制御について、形状がフラットではない紙の発色制御において照射光が遮蔽を受けない条件及び斜め方向からの照射における幾何補正について考察する。これは紙背面より鑑賞者方向へ強力な光照射を行うというシステムの関係上、運用に当たって安全性の配慮などの面から、空間配置の点で重要となる項目である

### 9.4.1 非フラットなスクリーンへの光照射

#### 9.4.1.1 遮蔽を生まない塑性変形条件

折りにより塑性変形を生じた物体について、ある領域 $S$ に光投影を行ったとき、遮蔽がなく投影できる条件を考える。領域 $S$ 内の任意の点を $p$ 、紙の任意の端点を $e$ 、照射光ベクトルを、 $\vec{r}$ とすると、折りの角度 $\theta$ 、折りの長さ $d$ のとき、 $p$ から $e$ までのベクトルは、

$$\vec{v} = \left( \sum_{j=1}^{n-1} x_j + d_n \cos \sum_{j=1}^n \theta_j, \sum_{j=1}^{n-1} y_j + d_n \sin \sum_{j=1}^n \theta_j \right) \quad (9.1)$$

となる。このベクトルと光照射ベクトルとの比較

$$\begin{aligned} & \overrightarrow{r-v} \\ & \forall d \in S \end{aligned} \quad (9.2)$$

において、角度が正であれば遮蔽がなく、負であれば遮蔽が生じる。

ところで、曲げは紙の繊維の性質上、「無数の折りの連続」であると捉えることができるため、曲げについても上式の評価が成り立つ。

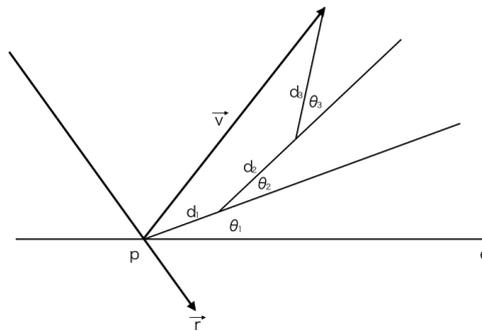


図 9.4 遮蔽形状への光照射

#### 9.4.1.2 照射面の形状への対応

塑性変形を生じた曲面への光投影には、プロジェクタによる幾何補正技術の転用が有効となる。紙を用いる場合、その塑性変形の容易さや永久歪みの発生しやすさから、メッシュを用いた幾何補正技術においてはポイントとなる箇所をとりやすくなる利点がある。これはその他の素材でも同様である。紙に塑性変形が生じていないと仮定し、水平面に対し斜め方向からの光照射を行うケースを想定する。この場合、想定する描画ができない可能性がある。

そのため、水平面状の紙の法線方向の光源からの光照射を基本とし、空間配置ずれが生じる場合には、反射鏡やレンズによる補正を行うことが望ましい。

紙面法線方向からずれた位置からのレーザー光照射を行う場合、レーザースポット径は紙に当たった状態では歪みのある楕円形状になる。この形状が発色面のドット変化形状に相当するため、総じて描画画像自体も歪みのあるものとなる。

#### 9.4.1.3 照射エネルギーの減衰程度

前述の通り、レーザースポットは楕円形状となる。このとき、ビームの強度プロファイルを $I$ 、レーザースポットのサイズを $x$ 、 $y$ とするとき、ビームパワー $P$ は、

$$P = \int I(x,y) dx dy \quad (9.3)$$

となる。スポット径が正円でない場合、ビーム幅はより厳密な定義が必要となり、次式により表される。

$$\begin{aligned} d_{\sigma_x} &= 2\sqrt{2} \left( \langle x \rangle^2 + \langle y \rangle^2 + \gamma \left( (\langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2)^2 + 4\langle xy \rangle^2 \right)^{1/2} \right)^{1/2} \\ d_{\sigma_y} &= 2\sqrt{2} \left( \langle x \rangle^2 + \langle y \rangle^2 + \gamma \left( (\langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2)^2 + 4\langle xy \rangle^2 \right)^{1/2} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (9.4)$$

ここで

$$\langle x \rangle = \int I(x,y) x dx dy$$

$$\langle y \rangle = \int I(x,y) y dx dy$$

$$\langle x^2 \rangle = \int I(x,y) (x - \langle x \rangle)^2 dx dy$$

$$\langle y^2 \rangle = \int I(x,y) (y - \langle y \rangle)^2 dx dy$$

$$\langle xy \rangle = \int I(x,y) (x - \langle x \rangle)(y - \langle y \rangle) dx dy$$

(9.5)

である。実際に高精細な画像描画を目的とする場合、微小なスポット径のレーザーを用いることとなり、上式に表されるような厳密なスポット径による描画機構設計は極めて煩雑となる。

レーザー照射の法線と光照射面の直角の歪みによって生じるレーザースポット径により、おおよその強度減衰率を求めることは可能である。強度プロファイルが照射の前後で同一であるとの前提のもと、照射前後のスポット径あたりのビームパワーを $P'$ 、 $P$ とする。照射部分の形状は紙平面の3軸の傾きにより楕円に近い様々な形状をとるが、この形状を楕円近似するとき、楕円形状のスポット面積は、

$$\frac{d_{\alpha x} d_{\alpha y}}{4} \pi$$

(9.6)

より、ビームパワー密度は

$$\frac{4P}{d_{\alpha x} d_{\alpha y}} \pi$$

(9.7)

となる。同様に、照射前のスポット面積は、

$$\frac{d^2}{4} \pi$$

(9.8)

より、ビームパワー密度は、

$$\frac{4P'}{d^2} \pi$$

(9.9)

以上より、減衰率 $\lambda$ は

$$\lambda = \frac{P d^2}{P' d_{\alpha x} d_{\alpha y}}$$

(9.10)

と近似される。

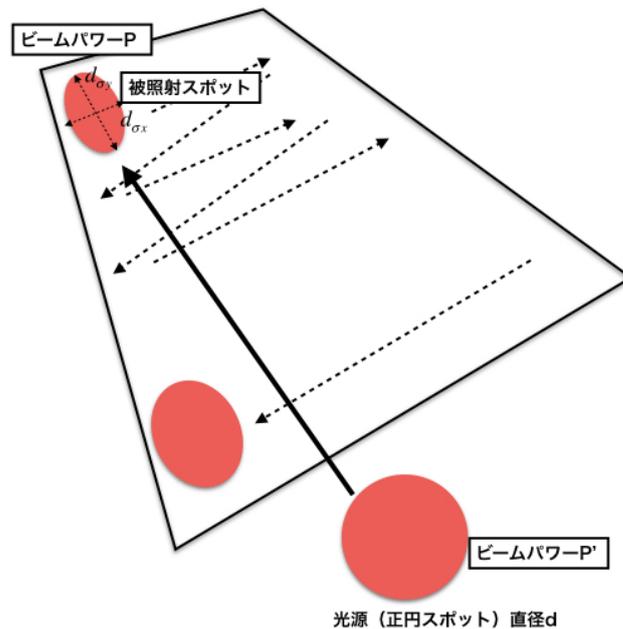


図 9.5 楕円照射スポットのビームパワー減衰

本研究では、レーザーの出力を手動でのみ調整できるものを用いたが、照射スポットの位置により、減衰率を考慮した出力調整が可能なものを用いれば、温度むらを解消することができる可能性はある。この場合において、フラットな平面への照射に比べ、全てのドット面積がドット毎に異なるため歪みのない美しい画像を描くためのメソッドに関してはさらなる検証を要する。

#### 9.4.2 システムの改良指針

システムの改良指針としては、先述のディスプレイ性能向上の他には、より精細な温度制御のためのフィードバック制御の導入が考えられる。本研究においてフィードバック制御を考慮しなかった理由は先述したが、素材に対する光照射を阻害しない形の、放射温度計などのデバイスによる温度の定常状態保持は、システムの安定化を図る上で大きな追加要素となる可能性がある。

本研究においては、ディスプレイとシステムの空間的分離がシステム設計上の重要な要件であり、その条件での基本的なシステムの挙動を精査するため、その阻害となりうるデバイスの配置については除外して研究を進めた。光熱変換の基本原則に述べた通り、光源と黒体の間に、照射光を遮断するデバイスや素材を配置することは、システムの改良に当たっては今後も可能性のない選択肢であろう。放射温度計やサーモグラフィのような遮光性のないセンサーについては追加し、

フィードバック制御を行うことでより精度の高い表示性能を実現できる可能性がある。この制御手法の改良は今後の課題としたい。

#### 9.4.2.1 色彩表現能力の多様化

表現能力の向上においては、まず実現可能性の高いものとして表現色の多様化・表現色域の拡充が挙げられる。並列混色を用い、CMYKの4色のピクセルを用いたハーフトーンスクリーンの開発を行う。この場合、光源となるレーザー4本をそれぞれに対応したガルバノメータにより同時制御し、高速スキャン方式による光照射を行うことにより、ピクセルの表示を微細に制御することで実現可能であると考えられる。



図 9.6 紙とは異なる素材の応用例

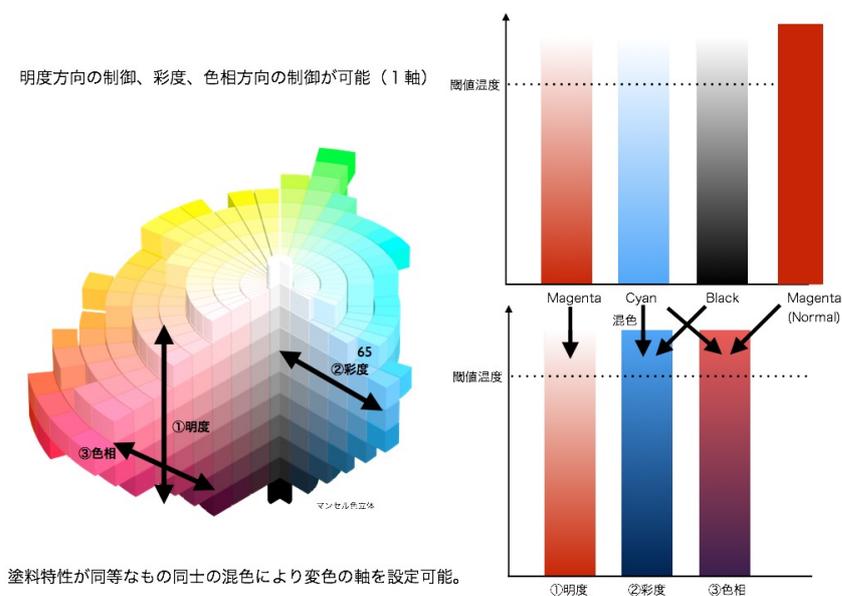


図 9.7 混色による表現色域の拡充

熱感応型機能性色素においては、サーモクロミックインクは混色や重ね塗りといった絵画的技法の適用が可能であるため、それらを組み合わせ色距離を調整することにより、色表現に広がりを持たせることができる。具体的には明度方向の制御、彩度、色相方向の1軸制御が可能である。

解像度と応答性については、前述の通り、より光照射領域が小さく高出力の光源を用いることで大きく向上を図ることができる。

#### 9.4.2.2 立体形状への応用

前述した塑性変形を生じた紙への光照射、及び非遮蔽条件を満たすことにより、立体形状への応用は特定の形状に対して可能である。また一定方向ではなく、周辺からの連続した光照射を行うことでより多様な形状への応用が可能であると考えられる。

#### 9.4.2.3 性能のさらなる向上

本研究における光熱変換原理の導入により、解像度の向上に対する障害は少ない。なぜならば光照射の解像度はそのまま熱挙動の解像度となること、応答速度が光照射デバイスの出力に応じて上昇するからである。すなわち、熱制御設計からディスプレイの性能は切り離され、単純に光照射デバイスの性能に依存する形となっている。そのため、解像度の向上においては光照射デバイスの性能向上を目指せばよく、非常にシンプルな図式となっている。

#### 9.4.2.4 素材の多様化

本研究で用いた原理は素材や光照射デバイスを大きく限定しないため、基本的原理に基づき正しく設計を行えば素材選定の自由度は高い。様々な素材と光源の組み合わせによる応用が可能であると思われる。光熱変換原理により、スペースの分離が可能なので、デバイスとの接着が難しい素材も利用できる。今後の展望として、ディスプレイに用いる素材の多様化は考えられるところである。例として布、木材、砂や石といった素材が挙げられる。これらは既に筆者の実験(図9.6)により本研究において提案した原理を用いての表面のサーモクロミックインクの表示制御が可能であることを確認しており、素材選択肢の拡充の実現可能性は非常に高いと思われる。

### 9.4.3 課題

今後の課題としては以下のような点が挙げられる。

- ・画像の保持性能(安定性)の更なる向上(レーザー+サーモクロミックインクの組み合わせ等)

前述のように、光照射デバイスの性能向上と制御技術の改善によりシンプルに実現することができる。

- ・水平方向の温度むらの改善

本研究では紙の法線方向の温度変化についてのみ考察を行ったが、水平方向への熱伝播についても考慮を行うことで性能改良を行うことができる。

温度むらの発生原因は、投影対象の周辺部位と中央部位の、周囲雰囲気との水平方向熱伝達の差により生じる。第6章と同様に水平方向の雰囲気との熱伝達をシミュレーションし、さらに周辺部位と中央部位で光源出力を変化させることで、温度むらは改善できる可能性がある。

## 9.5 結言

本章では、これまでに提案、検証を行ってきた、紙、機能性色素、空間分離型制御による紙表面での発色型ディスプレイシステムについて総括を行った。まず、光熱変換機構を導入した本研究の発色制御システムの構成および挙動を再確認した。また、解像度、応答性、安定性それぞれにつき、どの程度の性能向上がなされたかを総括した。また、本研究に対し、社会的意義、メディア、理論式と実験からのディスプレイ性能、応用例といった諸項目から評価を行った。さらに遮蔽や塑性変形条件下での制御手法について指針を示した。その上で、今後のシステムの運用指針、設計指針、素材の拡充可能性、色彩表現能力の拡充可能性について考察を行った。

# 参考文献

- [1] 城一夫. 色のしくみ 初期の光学理論から色彩心理学・民族の衣装まで. 新星出版社, 2009.
- [2] Peiris R. L., Cheok A. D., The J. K. S., Fernando O. N. N., Yingqian W., Lim A., Yi P., Polydorou D., Ong K. P., and Tharakan M. Ambikraf: an embedded non-emissive and fast changing wearable display, In ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies, 2009.
- [3] M. Jacobs and L. Worbin. Reach: dynamic textile patterns for communication and social expression. In CHI 2005: CHI 2005 extended abstracts on Human factors in computing systems, pp.1493–1496, 2005.
- [4] Mackinlay J. D., Rao R., and Card S. K. An Organic User Interface For Searching Citation Links. CHI 1995, 1995.
- [5] Fenestra B. J. Electrowetting Technology Aims To Improve on the Performance of LCDs for Mobile Applications, Information Display 22, 11, pp.10–13, 2006
- [6] Wakita A. and Shibutani M. Mosaic Textile: Wearable Ambient Display with Non-emissive Color-changing Modules, In Proceedings of the ACM SIGCHI 2006, 2006.
- [7] Berzowska J. Very Slowly Animating Textiles: Shimmering Flower, In Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2004, 2004.
- [8] Shibutani M. and Wakita A. Fabcell: fabric element, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006, 2006.
- [9] 佐藤進. 高分子材料の耐燃性, 耐炎性 - 高分子, vol.17, no.192, pp188-195, 1968.
- [10] 鎧沢勇. 井上正之. CRTディスプレイ上のドット文字表示におけるドットマトリクス次数と文字品質の関係、テレビ誌, 38, 3, pp. 237-244, 1984.
- [11] Perfect Pixel Count: Meeting your operational requirements: <https://www.axis.com/ja-jp/learning/web-articles/perfect-pixel-count/pixel-density>
- [12] Metz, J.H., Ruchti, S., Seidel, K. Comparison of Image Quality and Information Capacity for Different Model Imaging Systems. J.Photogr. Sri. 26, 229, 1978.

- [13] Hashida T., Kakehi Y. and Naemura T. A Basic Study on Real World Oriented Interface using Photochromic Materials, the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Vol.110, No. 35, pp.65-66, 2010.
- [14] Torralba A. and Sinha P. Detecting faces in impoverished images. Technical Report 028, MIT AI Lab, 2001.
- [15] 大塚徳勝. そこが知りたい物理学. 共立出版社, 1999.
- [16] 株式会社竹尾: <http://www.takeo.co.jp/>
- [17] Trick Print: <http://www.trickprint.com/>
- [18] Saakes D., Chiu K., Hutchison T., Buczek B., Koidzumi N., Inami M. and Raskar R. Slow display, In ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies, 2010.
- [19] フリクションインク: <https://www.pilot.co.jp/promotion/library/006/>
- [20] 日本建築学会編. 心理と環境デザイン-感覚・知覚の実践-. pp165, 技報堂出版, 2015
- [21] NTT技術ジャーナル 27(9), 電気通信協会, pp.87-90, Sep. 2015.
- [22] ZINK: <http://zink.com/>
- [23] 久富木隆一. ゲームアプリの数学 Unityで学ぶ基礎からシェーダーまで. SBクリエイティブ, 2015
- [24] 北村 薫子. 建築仕上げ材の質感評価に関する研究. 奈良女子大学博士論文, 1999.
- [25] 佐藤仁人. 居間のインテリアにおける色彩の居心地に及ぼす影響, 学生層と主婦層との比較による評価構造の分析, 日本建築学会論文集 No.668, pp.897-902, 2011.
- [26] 北村 薫子, 梁瀬度子. 内装材のテクスチャーの評価に及ぼす照明要因の影響, 日本人間工学会大会講演集, 35巻, 1号, pp. 25-33, 日本人間工学会, 1999.
- [27] Lee S. et al. How Users Manipulate Deformable Display as Input Devices, In Proceedings of CHI 2010, pp. 1647-1656, 2010.

- [28] 野口尚子. Play Printing しくみを知って使いこなすオフセット印刷・紙・インキ., pp.17, 2012.
- [29] 日本セラミックス協会編. 環境調和型新材料シリーズディスプレイ材料. 日刊工業新聞社, 2013.
- [30] M.マクルーハン. メディア論 人間の拡張の諸相., pp.102, みすず書房, 1987.
- [31] MMD研究所: <https://mmdlabo.jp/>
- [32] Holman D., et al., PaperWindows: Interaction Techniques for Digital Paper, In Proceedings of CHI 2005, pp. 591-599, 2005
- [33] Schwesig C., et al., Gummi: A Bendable Computer, In Proceedings of CHI 2004, pp. 263-270, 2004
- [34] AnotoPen: <http://www.anoto.com/>
- [35] AirPen: <http://www.airpen.jp/>
- [36] Chunyuan L. and Francois G. PapierCraft: A Gesture-Based Command System for Interactive Paper, ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 14, No. 4, Article 18, 2008.
- [37] Peter B., Christoph R. and Michael H., NiCEBook - Supporting Natural Note Taking, In Proceedings of the eight annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 599 – 608, 2010.
- [38] 槇究, 澤知江. 室内雰囲気評価に及ぼす色彩・照明・素材の複合効果. 日本建築学会計画系論文集, 第64 巻, 516号 pp. 15-22, 1999.
- [39] JIS9051-1984
- [40] Oxford English Dictionary: <https://www.oed.com/>
- [41] ユポ・コーポレーション: <https://japan.yupo.com/product/grade/physicality.html>
- [42] サンワ・エンタープライズ: <http://www.sanwa-ent.co.jp/>
- [43] Hashida T., Kakehi Y., Naemura T. SolaColor: space coloration with solar light, In Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction pp417-418, 2011.

- [44] Hashida T., Kakehi Y., Naemura T. Photochromic sculpture: volumetric color-forming pixels, In Proceeding SIGGRAPH '11 ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies, 2011.
- [45] 佐々木俊尚. 電子書籍の衝撃 本はいかに崩壊し、いかに復活するか?. ディスカヴァー携書, 2010.
- [46] A. J.Sellen and R.H.R.Harper. ペーパーレスオフィスの神話—なぜオフィスは紙であふれているのか?. 創成社, 2007.
- [47] Nishimura K., Kim J., and Naemura T., AR-eLaser: Erasable Handwriting Interface with Paper and Pen, SIGGRAPH2012, 2012.
- [48] Hashida T., Nishimura K., and Naemura T., Hand-rewriting: Automatic Rewriting like Natural Handwriting, ACM SIGGRAPH2012, Emerging Technologies, 2012.
- [49] UML2.0: <http://www.omg.org/spec/UML/2.0/>, 2005.
- [50] Tsuji, K. and Wakita, A. Anabiosis: An Interactive Pictorial Art Based on Polychrome Paper Computing; In proceedings of ACE 2011, Creative Showcase and Interactive Art, Article No.80, 2011.
- [51] 阪口紗季, 堀下小春, 堤修平, 阿部誠, 松下光範. 起毛による色の濃淡変化を利用した毛状ディスプレイの提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム (EC2014), 情報処理学会, 2014.
- [52] 朝倉直巳. 紙による構成・デザイン, 美術出版社, 1982.
- [53] Tsujii T., Koizumi N., Naemura T. Inkantatory Paper: Dynamically Color-changing Prints with Multiple Functional Inks, 27th ACM User Interface Software and Technology Symposium, 2014.
- [54] Norman, D.A. : The invisible computer, The MIT Press, 1998.
- [55] 原研哉. SUBTLE—サトル かすかな、ほんのわずかの The 47th TAKEO PAPER SHOW, 日本デザインセンター原デザイン研究所, pp161-164, 2015.
- [56] ピーター・フィンク. ポストスクリプト・スクリーニング—デジタル印刷の網点生成技術, pp16-17, 1994.
- [57] 佐々木正人. レイアウトの法則—アートとアフォーダンス, pp165-166, 2003.
- [58] ブルーノ・ムナーリ. デザインとヴィジュアル・コミュニケーション, pp368-370, 2006.

- [59] Saakes D., Inami M., Igarashi T., Koizumi N., Raskar R. Shader Printer, The 39th International Conference and Exhibition in Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies Article No. 18, pp5-9, 2012.
- [60] ローター・ミュラー. メディアとしての紙の文化史, 東洋書林, 2013.
- [61] D.A. ノーマン. 誰のためのデザイン?—認知科学者のデザイン原論. 新曜社認知科学選書, 1990.
- [62] Pieske, 1983.
- [63] Oligmuller, 1997.
- [64] 小宮英俊. 紙の文化誌. 丸善ライブラリー新書, 1992.
- [65] 潘吉星. 中国製紙技術史, 1980.
- [66] 中澄博行. 機能性色素のはなし (ポピュラー・サイエンス), 2005.
- [67] 西久保靖彦. 図解入門 よくわかる最新ディスプレイ技術の基本と仕組み, 秀和システム, 2009.
- [68] 泉谷渉. これがディスプレイの全貌だ!—液晶・プラズマ・有機EL・FED・リアプロのすべて, かんき出版, 2005.
- [69] Hashimoto Y., Koizumi N., Myosin Y., Shizuki B., Hanada N. Urushi Circuit –Traditional Craft for HCI-, ACM CHI2015 Symposium on Emerging Japanese HCI Research Collection, 2015.
- [70] 岩井裕, 小林健一, 羽田光明, 大村高弘, 富村寿夫. エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション, 丸善, 2005.
- [71] 峯村吉泰. Javaによる流体・熱流動の数値シミュレーション, 森北出版, 2001.
- [72] PILOT: <http://www.pilot.co.jp/>
- [73] 朝倉直巳. 紙—基礎造形・芸術・デザイン, 美術出版社, 2001.
- [74] 奥村治彦, 内田龍男, 金子節夫, 下平美文, 内池平樹, 服部励治, 中西洋一郎, 山崎映一, 中本正幸. この40年のディスプレイ技術の変遷と将来展望について. エレクトロニクスソサイエティ和文論文誌500号記念論文特集, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-C, No. 8 pp. 433-453, 2009.

- [75] Heilmeyer, G.H., Zanoni L.A. and Borton L.A., Dynamic scattering: A new electrooptic effect in certain classes of nematic liquid crystals, Proc. IEEE, vol. 56, no.7, pp.1162-1171, 1968.
- [76] 見附幸司, 郷健太郎. 異なるサイズのフレキシブルディスプレイにおけるインタラクションの分析. 情報処理学会第74回全国大会
- [77] Fujikake H., Murashige T., Yonai J., Sato H., Tsuchiya Y., Kikuchi H., Iino Y., Kawakita M. and Takizawa K. Flexible Ferroelectric Liquid Crystal Devices with Polymer Fiber Network Supporting Plastic Substrates, Proc. Int. Display Res. Conf, 3.3, pp.68-71, 2000.
- [78] Bokito S. Flexible Organic Light-Emitting Diode Displays, In proceedings of IEEE LEOS Annual Meet. Conf, pp.426-427, 2006.
- [79] Yagi I., Hirai N., Noda M., Imaoka A., Miyamoto Y., Yoneya N., Nomoto K., Kasahara J., Yumoto A. and Urabe T. A Full-Color, Top- Emission AM-OLED Display Driven by OTFTs, SID Dig. 63.2, pp.1753-1756, 2007.
- [80] 藤掛英夫. 特集 ポスト地上デジタル放送 次世代ディスプレイ～フレキシブルディスプレイを中心として～, 映像情報メディア学会誌 Vol. 65, No. 9, 2011.
- [81] Huitema E., Touwslager F., Veenendaal E.V., Aerle N.V. and Lieshout P.V. Rollable Displays: from Concept to Manufacturing, SID Dig., 10.3, pp. 104-107,2009.
- [82] Eguchi T., Sonehara A., Sugizaki A., Ito T., Kumano A. and Takahashi T. New Color Filter Carried Out by a Roll-to-Roll Process, Proc. IDW, FMC3-3, pp.579-583, 2004.
- [83] Roh N.S. Development of Flexible E-Paper and its Applications, Proc. IDW, EP4 -3, pp.1295-1297, 2007.
- [84] 藤原勝壽. 機能紙開発の技術的課題と展望. 紙パ技協誌第49巻第一号
- [85] 紙パルプ技術協会編. 新訂紙パルプ辞典,1989.
- [86] 稲垣寛監. 高機能紙の開発と応用. シーエムシー, 1988.
- [87] Meyer R. and Ceng L. Recent development on “Microtips” display at leti, IVMC’91, pp.6-9, 1991.
- [88] Vaudaine P. and Meyer R., Microtips’ fluorescent display, Electron Devices Meeting 1991, Tech. Digest, pp.197-200, 1991.

- [89] Greengard S., Getting Rid of the Paper Chase
- [90] 塩田玲樹. デジタルペーパー. 電子写真学会1997年度第3回技術研究会, pp26, 1998.
- [91] 面谷信. デジタルペーパーのコンセプトと動向. 日本画像学会誌, No.128, pp115-121, 1999.
- [92] 面谷信. デジタルペーパーのコンセプト整理と適用シナリオ検討. 日本画像学会誌, No.137, p214-220, 2001.
- [93] 面谷信. 電子ペーパーの現状と応用展望, 2004.
- [94] 江前敏晴. 紙の基礎と印刷適性-構造・物性・加工・印刷品質評価-
- [95] 杉本祐輔, 吉田典正. シミュレーションを対象とした布と紙の性質の違いについて. 第46回日本大学生産工学部学術講演会機械部会
- [96] Norman, D.A. and Draper, S.W. User centered system design: New perspectives on human-computer interaction . Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates, 1986.
- [97] 筑瀬重喜. 読書端末はなぜ普及しないのか.
- [98] 江前敏晴. 紙のトライボロジー概説. トライボロジスト46(10), pp741 - 746, 2001.
- [99] 江前敏晴. 製紙. 弘文堂, 2006.
- [100] Banks, W. P., and Barber, G. Color information in iconic memory. Psychological Review, 84, pp536-546, 1977.
- [101] Turvey, M., and Kravetz, S. Retrieval from iconic memory with shape as the selection criterion. Perception & Psychophysics, 8, pp171-172, 1970.
- [102] Wright V. Selection in visual immediate memory, Quarterly Journal of Experimental Psychology, Vol.20, pp62-68, 1968.
- [103] Shioiri, S., and Cavanagh, P. Visual persistence of figures defined by relative motion, Vision Research, Vol.32, pp943-951, 1962.
- [104] Mackworth, N. H. and Morandi, A. J. The gaze selects informative details within pictures, Perception & Psychophysics, Vol2, pp547-552, 1967.
- [105] Mackworth and Morandi, 1967.

- [106] Ikeda, M. and Uchikawa, K. Integrating time for visual pattern perception and a comparison with the tactile mode, *Vision Research*, Vol.18, pp1565-1571, 1978.
- [107] Phillips, W. A. On the distinction between sensory storage and 118 short-term visual memory, *Perception & Psychophysics*, 16, 2, pp283-290, 1974.
- [108] Chastain, G. and Burnham, C. A. The first glimpse determines the perception of an ambiguous figure, *Perception & Psychophysics*, Vol17, pp221-224, 1975.
- [109] Oyamada K., Konosu S., and Ohno T.. Development of a plastic collapse assessment procedure in the pM diagram method for pipe bends with a local thin area under combined internal pressure and external in-plane bending moment, *Nuclear Engineering and Design*, 247(0), pp42-57, 2012.
- [110] 鵜沼秀行. 対象の認識における情報の時間空間的統合と知覚的表象の形成. 早稲田大学博士論文
- [111] 内川恵二. 視覚系の色チャンネルと明るさチャンネル, *光学*第16巻第10号, 1987.
- [112] デックス・ペーパー: <http://www.ozonesave.com/sm.html>
- [113] 山岡俊樹. ユーザー優先のデザイン・設計—新しい商品開発の考え方, 共立出版, 2000.
- [114] マーチン・ファウラー. *UML モデリングのエッセンス 第3版 (Object Oriented SELECTION)*, 2005.
- [115] 平澤章. *UMLモデリングレッスン*, 2008.
- [116] 黒瀬正明、堀部保弘. 「使いやすさ」が国際基準に、静観は禁物. *日経エレクトロニクス*, pp55-62, No752, 1999.
- [117] Beth T., Jungnickel D., and Lez H. *Design Theory*, Cambridge University Press.
- [118] Loftus and Mackworth, 1978.
- [119] 山内正仁, 平田登基男, 松藤康司, 増田純雄, 前野祐二, 桃井清至. 蘇生紙の物理および力学特性とその有効利用, *環境工学研究論文集*36 巻, pp379-389, 1999.
- [120] 大江謙一. 大学生の視力, *照明学会雑誌*50巻3 号, pp119-120,1966.

- [121] CCP 発熱和紙: <http://jpuni.co.jp/ccp/>
- [122] Maas D., Meagher M., Abegg C., Huang J., ThermoChromic Information Surfaces, The 27th International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, pp.1-6, 2009.
- [123] Kushiyama K., Baba T., Doi K., Sasada S. Thermo-Pict neo, In ACM SIGGRAPH 2010 Posters, Article 42, 2010.
- [124] 松下光範, 束川卓也. Wet Display: 視覚的乾湿感を用いた情報提示システム, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-HCI-154, No.10, 2013.
- [125] Kaiho T. and Wakita A. Electronic Origami with the Color-Changing Function, 2nd Workshop on Smart Material Interfaces, 2013.
- [126] 上田哲也, 花井綾子. LayeredVision: 印刷物とデジタル情報を結ぶディスプレイ, 情報処理学会 インタラクション 2011, 2011.
- [127] Fade Out: <http://www.ycam.jp/art/2011/03/ycam-scopic-measurell-12-parti.html>
- [128] 菰池裕美, 松下光範. Hedgehog: 硬さの変わるインタフェース, 情報処理学会 インタラクション2011, 2011.
- [129] Okada,A., Takeshita, A., Miyahara, M., and Inakage, M. KAMI CHAT, In Proceedings of Advances in Computer Technology 2008, pp403, 2008.
- [130] Ohtani A. An Analysis of Eye Movements during a Visual Task, 14(1), pp167-174, 1971.
- [131] 「なぜ紙は永遠か その優位性の根拠とは」 『新聞研究 2010 年 2 月』
- [132] Senders J.W., Fisher D.F., Monty R.A. Eye movements and the higher psychological functions, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, pp241-258, 1978.

# 研究業績

## 国際会議（査読有）

- 1.Yamada, H., Nishimura, K., and Hirose, M., Development of Ink Characters Display System and Assessment of Human Recognition of Characters Written in Thermochromic Ink, IADIS CELDA 2010, Timisoara, Romania, 2010/10
- 2.Yamada, H., Nishimura, K., and Hirose, M., Development of Interactive Inky Image Display Paper-made Display with Thermochromic Ink and Temperature Control System, In Proceedings of ICCEE 2010, Vol. 10, x332, Sichuan, China, 2010/11
- 3.Yamada, H., Nishimura, K., and Hirose, M., Paint Color Control System with Infrared Photothermal Conversion, In Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology(ACE '11), Article 64, Lisbon, Portugal, 2011/11
- 4.Yamada, H., Tanikawa, T., and Hirose, M., Drawn Yourself: Drawing Watercolor Portrait on Real Paper, Laval Virtual 2016 Laval, France, 2016/03

## 論文（査読有）

- 1.Yamada, H., Nishimura, K., Tanikawa, T., and Hirose, M., Development of CMYK Color Display: Display by Chromogenic Effect to Control Painted Color on Paper, International Journal of Advanced Computer Science, Vol.1, No.1, 2011.

## 論文（査読無）

- 1.山田啓己, 西村邦裕, 廣瀬通孝, インク表記文字ディスプレイの開発とその評価, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1C2-1, CD-ROM, 2010. 日本バーチャルリアリティ学会第15回大会, 金沢, 2010/9
- 2.山田啓己,西村邦裕,谷川智洋, 廣瀬通孝, 赤外光熱変換に基づく省電力型高解像度CMYKディスプレイの開発, 日本バーチャルリアリティ学会ウェアラブル/ユビキタスVR研究会論文集,東京, 2011/6

## 口頭発表（査読無）

- 1.山田啓己,西村邦裕,谷川智洋,廣瀬通孝,赤外光熱変換によるCMYKカラーディスプレイの開発とその応用,VR学会第16会大会, 函館, 2011/9
- 2.山田啓己,西村邦裕,谷川智洋,廣瀬通孝,光ファイバーと赤外光熱変換による色相制御システムの提案,エンタテインメントコンピューティング2011, 東京, 2011/10

## 受賞歴

1. Laval Virtual 2016 “Culture, Art&Heritage”賞（第8章応用例1に関連）
2. 文化庁メディア芸術祭2017 審査委員会推薦作品（第8章応用例1に関連）
3. 第9回東京大学学生発明コンテスト奨励賞（第5章光熱変換原理に関連）
4. ADFEST2017/INTERACTIVE LOTUS SILVER, 2017 One Show MERIT (UX / UI : Cross-Channel)（第8章応用例2に関連）
5. 2017 One Show MERIT (DESIGN : Digital / Utility Design - Single)（第8章応用例2に関連）

## 展示歴

1. Laval Virtual 2016（2016年）（第8章応用例1に関連）
2. “SORA”展（2012年）（付録に関連）
3. 中之条ビエンナーレ2011（2011年）（第3章試作事例2に関連）
4. アート亀山2011（2011年）（付録に関連）

## 付録 A アレイ光源方式での赤外LEDの同時制御型システムの習作

アレイ光源方式での赤外LED制御による光熱変換型熱制御の一例として、ギャラリー向けのインタラクティブなキャプションシステムを制作した（図10.1）。システムは古民家を利用したギャラリーにおける展示のために作成したものであり、その内装（木材や漆喰が中心となっている）との素材的親和性を考慮し、紙により外装を作成したものである。文字の部分にはステンシル加工が施されており、紙の下の面に印刷された単色サーモクロミックインクおよび液晶インク[共栄化学工業]が、背面の赤外投光デバイスの発熱により温度制御され文字の表示と消失を繰り返す仕組みとなっている。



図 10.1 紙と液晶インクによる展示空間向けキャプションシステム

単色サーモクロミックインクはキャプション下部の説明文の箇所、液晶インクはキャプション上部のタイトルの箇所をそれぞれ担当している。

この事例においては、本章で述べる赤外光熱変換原理に基づき、赤外LEDを温度制御デバイスとして用いた。赤外LEDはマトリクス状に並べたものを行ごとに連続的に制御し、文字にグラデーションがかかるような演出を組み込んだ。

キャプション下部には測距センサを組み込み、観覧者がキャプション近傍に立ったことを制御システムに察知させ、文字の制御と連動させた。

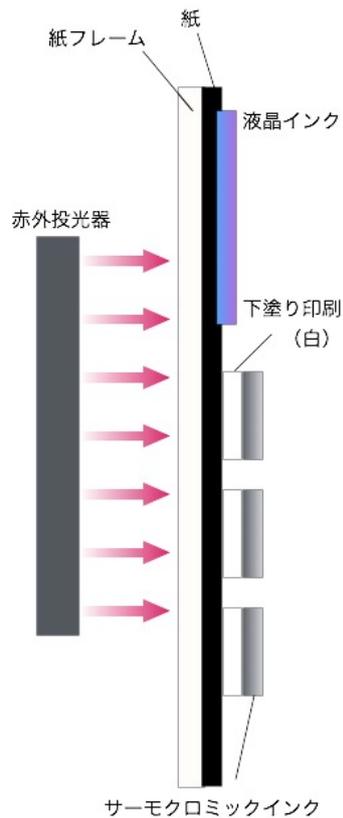


図 10.2 単色サーモクロミックインクと液晶インクによるインタラクティブキャプションシステム

展示においては、「もともと高解像度に設定されているフォントが一律に変化するため、違和感がある印象」「実際に文字色が変わっているのかがわかりづらい」「変化のスピードが遅い」といった感想が多く寄せられた。要因は以下の3点が考えられる。まず1点目に、ギャラリー内の温度が非常に低く（冬場で摂氏0°C付近）、サーモクロミックインクの変色閾値温度との温度差があまりに大きすぎたことが挙げられる。サーモクロミックインクはその性質上、変色温度と外気温の近さが表示応答性能に直結するため、解決策としては事前に展示空間で予想される室温を調査し、それに応じた変色閾値温度のサーモクロミックインクを選択する、あるいは室内の気温をサーモクロミックインク近傍で何らかの形で適切に調整するなどの対応が考えられる。2点目に、キャプションの厚みの仕様上、後述するようなLED光源と紙の距離が適切に設定できず、紙の裏面の光熱変換層への照射光量が要求を満たさなかったことが挙げられる。3点目に、コンテンツの解像度とデバイスの解像度が合わないことの不整合性がある。

同様に赤外LEDを用いた光熱変換機構の試作として、「変化する絵画」というコンセプトのもとに単色5サーモクロミックインクとアクリル絵具



図 10.3 色変化を起こす絵の試作事例

によるカードサイズ（高さ47[mm]、幅72[mm]、厚み0.06[mm]）の作品を制作した（図10.3）。

このプロトタイプは赤外投光器を発熱源、単色サーモクロミックインクをマテリアルとしたマルチレイヤー・マルチカラーのディスプレイである。これらの変化する小さい絵は、通常のカラークロミックインク、単色サーモクロミックインク、液晶インクを様々なパターンで塗り重ねたものである。

結果として前例同様、絵の総合的な見え方に見栄えの不自然さが現れる結果となった。温度制御デバイスと紙素材が直接接合されているため、電力供給用の導線が引かれているなど「絵」としての見え方に不自然さがあった。また、解像度の不足のため豊かな表現ができず、熱制御用デバイスのサイズと作品のサイズがマッチしない問題があった。

## 付録 B 赤外LEDの個別制御回路

アレイ光源方式による、多数に並列配置した赤外LEDの制御システムである。これは表示装置用のマトリクスLEDの制御用マイコンの挙動をもとに、信号・パワーを増幅させ、高出力のLED発光が行えるよう設計を行ったものである。第6章における表示応答解析にはこの回路を使用し、実験・検証を行っている。

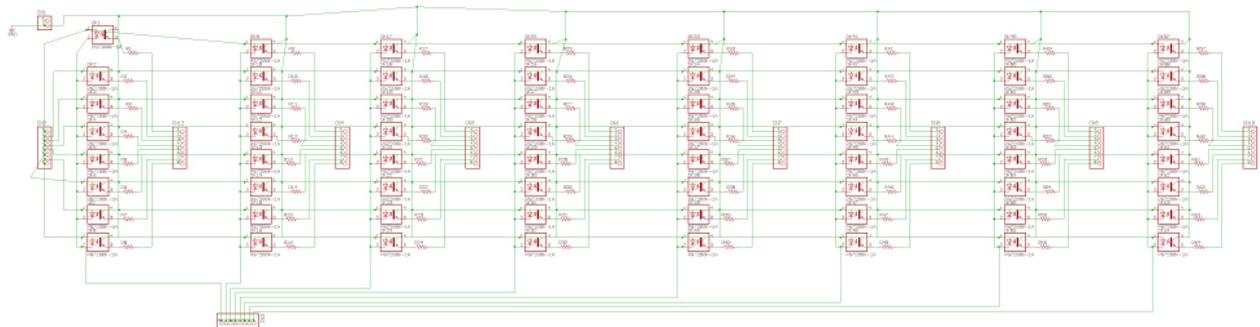


図 10.4 赤外LED個別制御基板

## 謝辞

本論文は、著者が東京大学大学院工学系研究科・先端学際工学専攻博士課程在学中、廣瀬通孝教授および谷川智洋准教授のご指導のもと、総括したものです。廣瀬通孝教授には、研究における基礎的な姿勢、研究が社会に与える影響の重要性を深く丁寧にご指導を頂き、深く感謝致します。また、谷川智洋准教授には、研究におけるシステム設計のプロセスや理念について丁寧なご指導を頂き、感謝申し上げます。本論文の審査にあたり、東京大学大学院工学系研究科廣瀬通孝教授、谷川智洋准教授を初めとする諸先生方から有益なご指導を頂きました。深く感謝申し上げます。本研究において、勤め先の株式会社aircordの橋本氏、岩崎氏に技術のご指導をいただき、また試作において同株式会社伊藤氏、赤川氏、人見氏に貴重なご助言とご支援を頂きました。試作および展示においては、東京芸術大学および同大学院を初めとする友人たちに技術的な助力をいただき、また共同制作において暖かく大きな支援をいただきました。厚く謝意を申し上げます。応用作品の制作と展示において、神奈川工科大学白井暁彦教授に多くの指南と展示協力をいただきました。また、研究部材においては、株式会社サクラクレパスに提供と技術のご支援をいただきました。本研究の応用におきまして、イベントの企画および展示運営について多大なるご支援をいただきましたLaval Virtualスタッフ様一同、株式会社ソフトバンク、東宝舞台株式会社のご担当者様各位に厚く御礼申し上げます。最後に、研究に理解を示し、暖かく励ましをくれた家族に感謝致します。

山田啓己