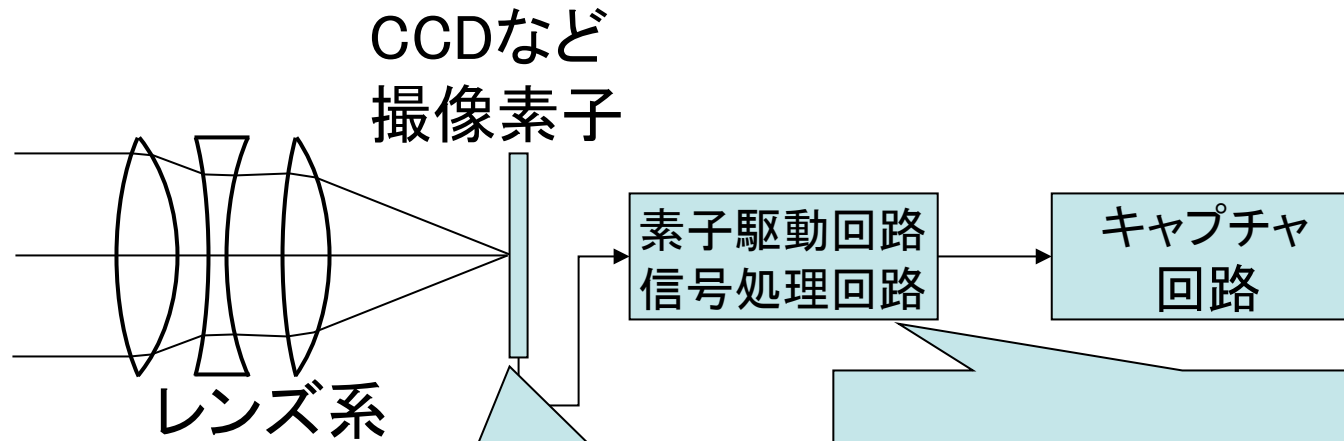


# 画像メディア工学特論

撮像素子

# 撮像素子について

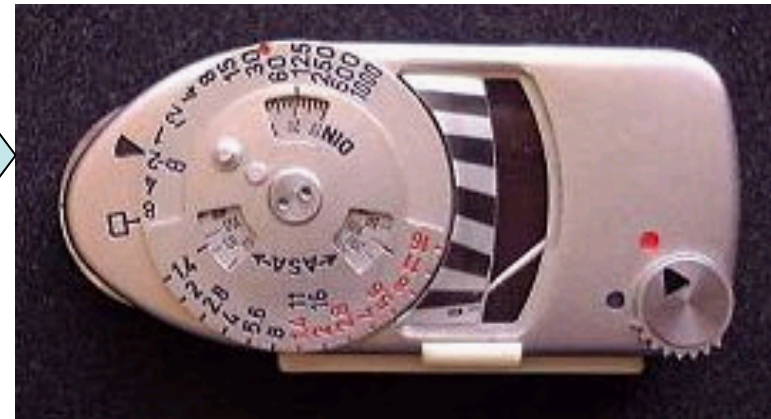
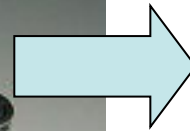


光を電気信号に変える方法は？  
電気信号の取り出し原理は？  
撮像素子の特性や画質劣化は？  
カメラの選択方法は？

素子の駆動方式は？  
読み出し速度は？  
色信号の計算方法は？  
明度値は正確か？

# 光を電気信号に変える

- 光の量を測る
  - カメラの露出計に使われてきた  
(人間は環境の絶対的な明度が分かりにくい)



ライカMCメーター

# 光の量を測る素子

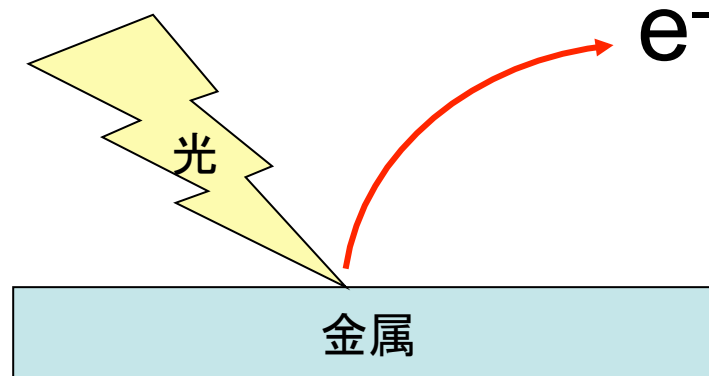
- 光エネルギーを電気エネルギーに変える
  - フォトダイオード
  - 太陽電池(実はフォトダイオードの一種)
- 光の強さによって抵抗値を変える
  - CdS(硫化カドミウム)セル
  - 光電管(Photo tube)
- 光エネルギー→変位, 速度, etc..
  - 非常に困難



# 光電管(1)

- 光電効果

- 金属に光子を当てると電子が弾き飛ばされる現象



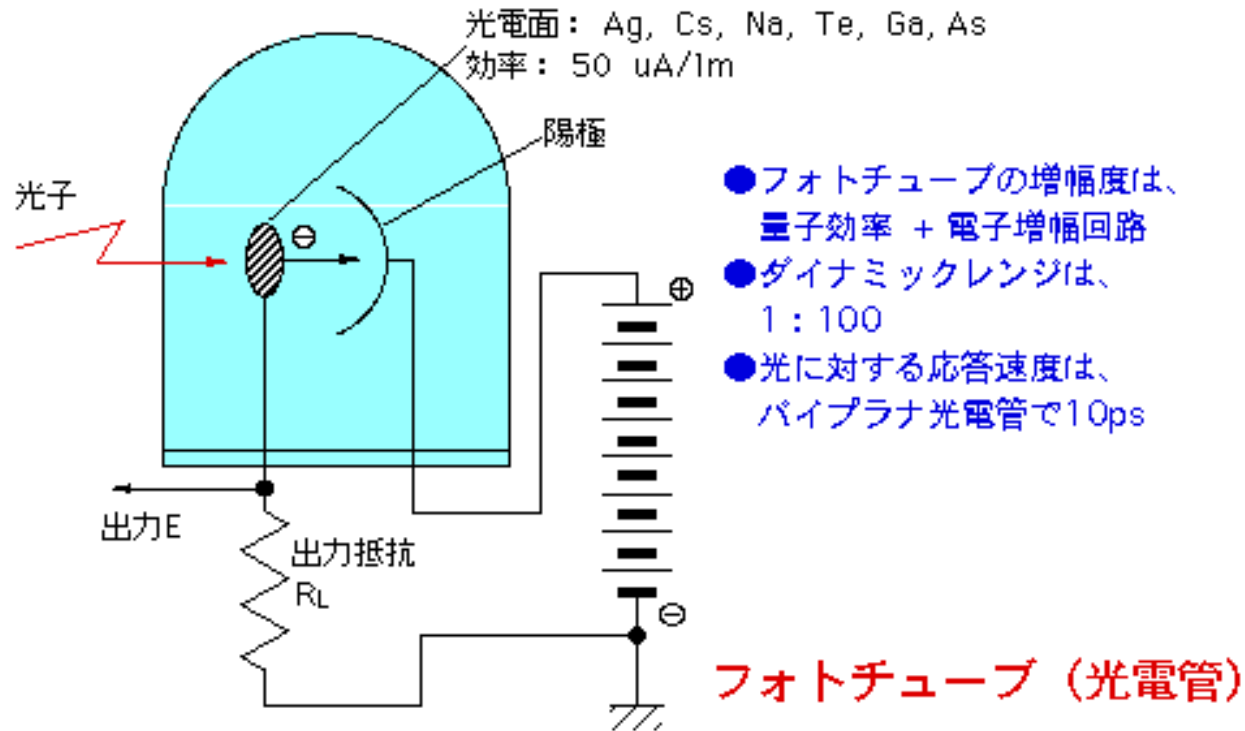
- 光電効果の性質

- 入射光の振動数が一定以下(波長が一定以上)では電子が放出されない

- 電子の個数は光の強度に比例

# 光電管(2)

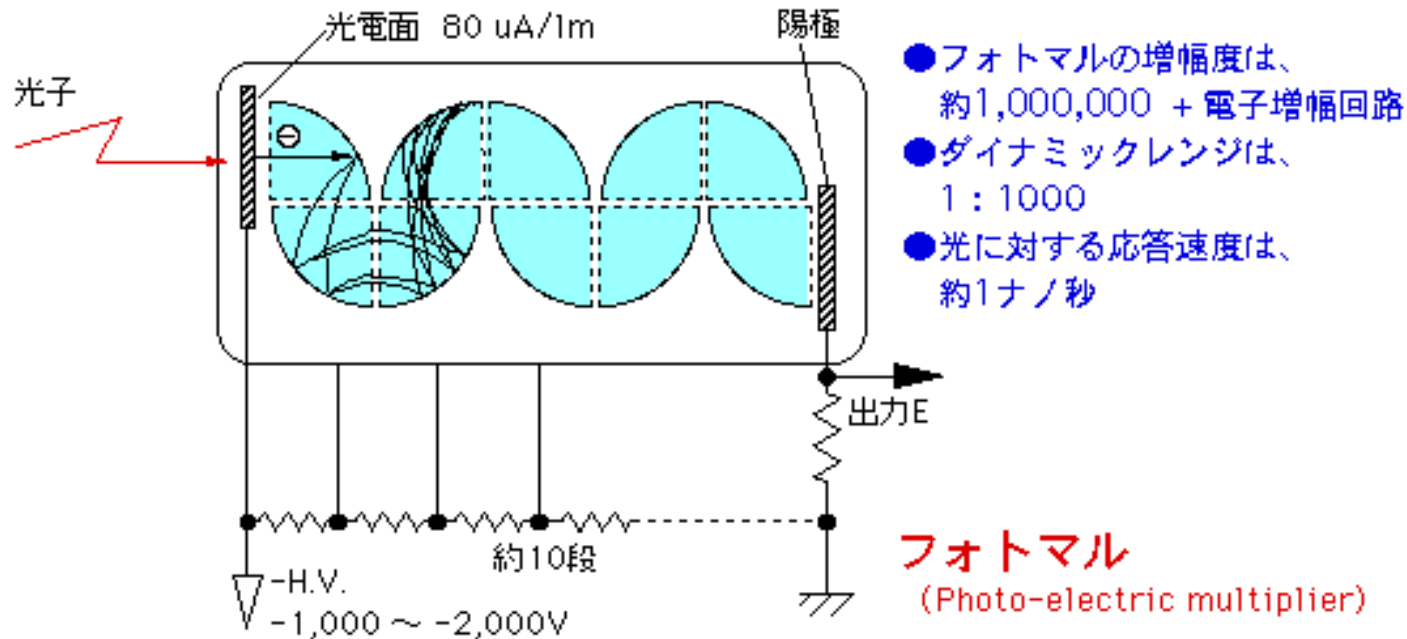
- 飛び出した電子を捕まえるには



- 電圧をかけて電子を引き寄せる
- 電圧を上げると応答速度が速くなる

# 光電管(3)

- 感度を上げる方法  
(光電子増倍管, フォトマル)



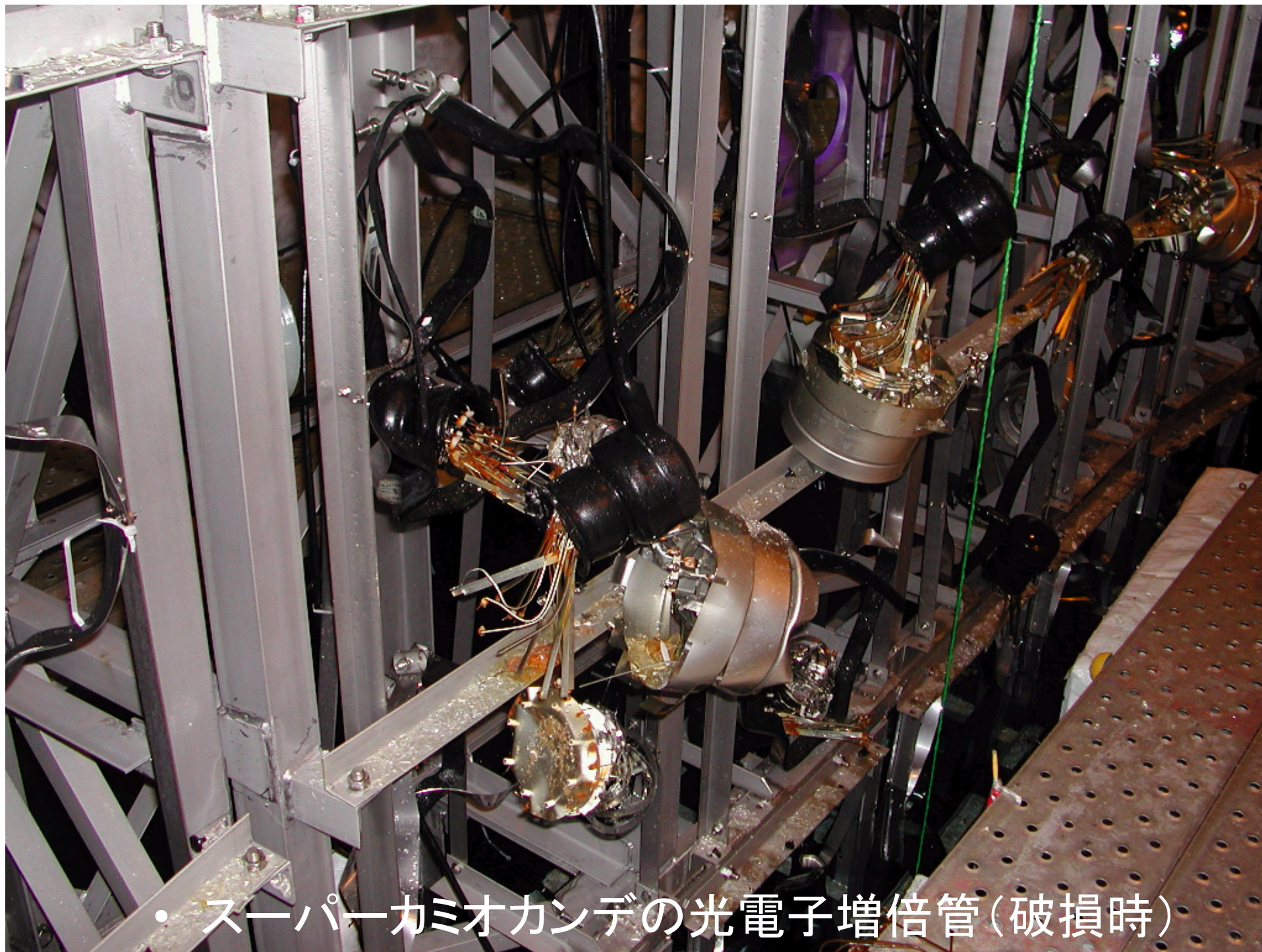
- ダイノードと呼ばれる物質 (SbCs, AgHg など) に電子を当てると、10倍程度の2次電子が放出される。

# 光電管(4)



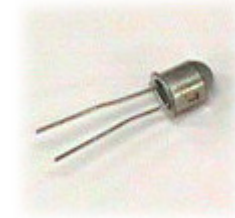
- スーパーカミオカンデの光電子増倍管



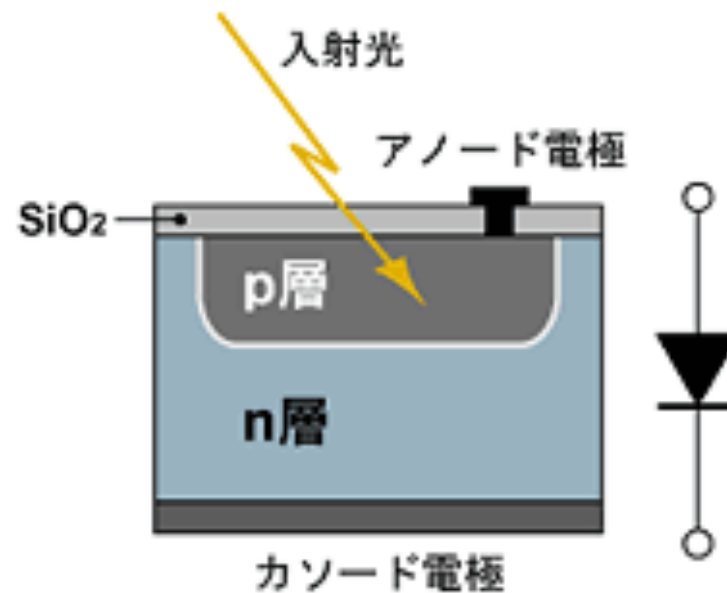


- スーパーカミオカンデの光電子増倍管(破損時)

# フォトダイオード(1)



- 光センサの主役
  - p型半導体とn型半導体の接合面で生じる光電子を利用





# フォトダイオード(2)

- pn接合起電力の利用

内部光電効果によって生じた電子と正孔が、n型・p型半導体にそれぞれ引き寄せられることによって電流が発生(ただし非常に微弱)

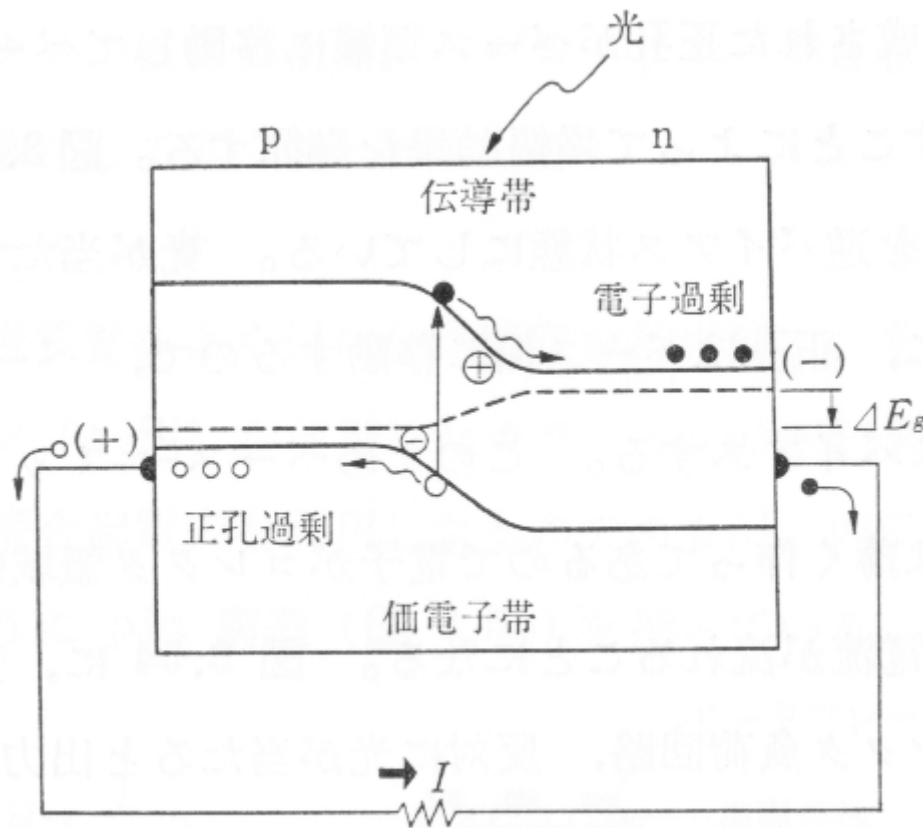


図 3.51 pn 接合起電力

# 2次元撮像素子

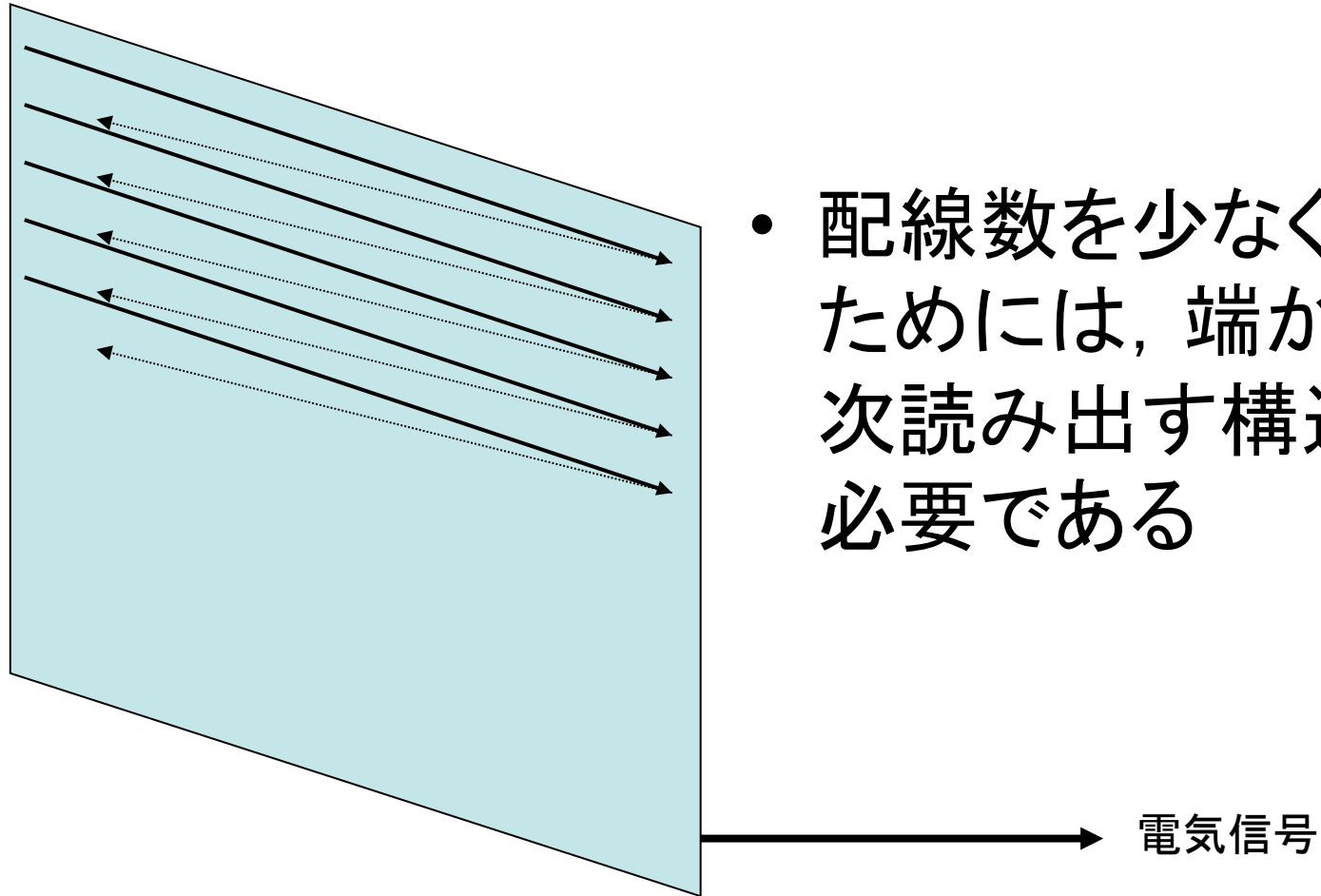
- 2次元的な光の分布をどのように計測するか



センサをひたすら並べる？  
全てのセンサに配線する？



# 2次元撮像素子



# 温故知新：撮像管

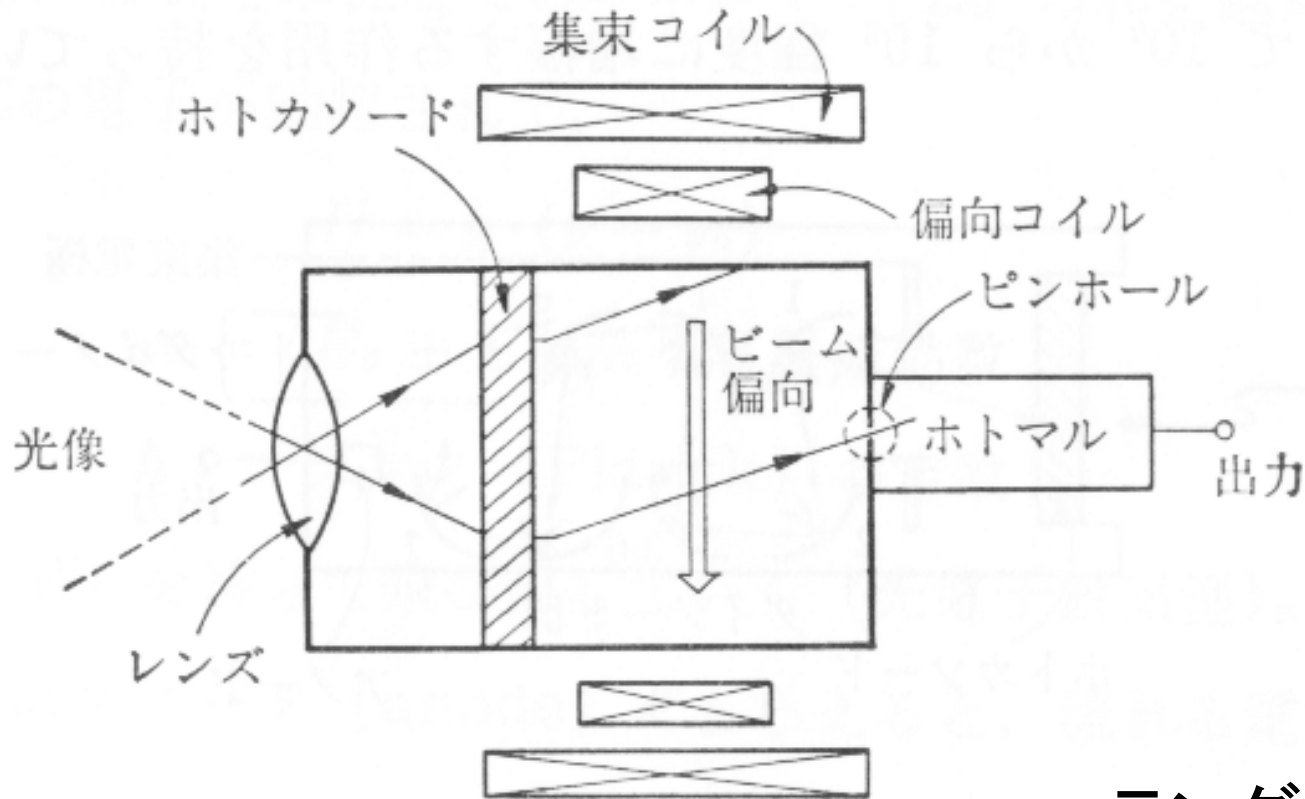


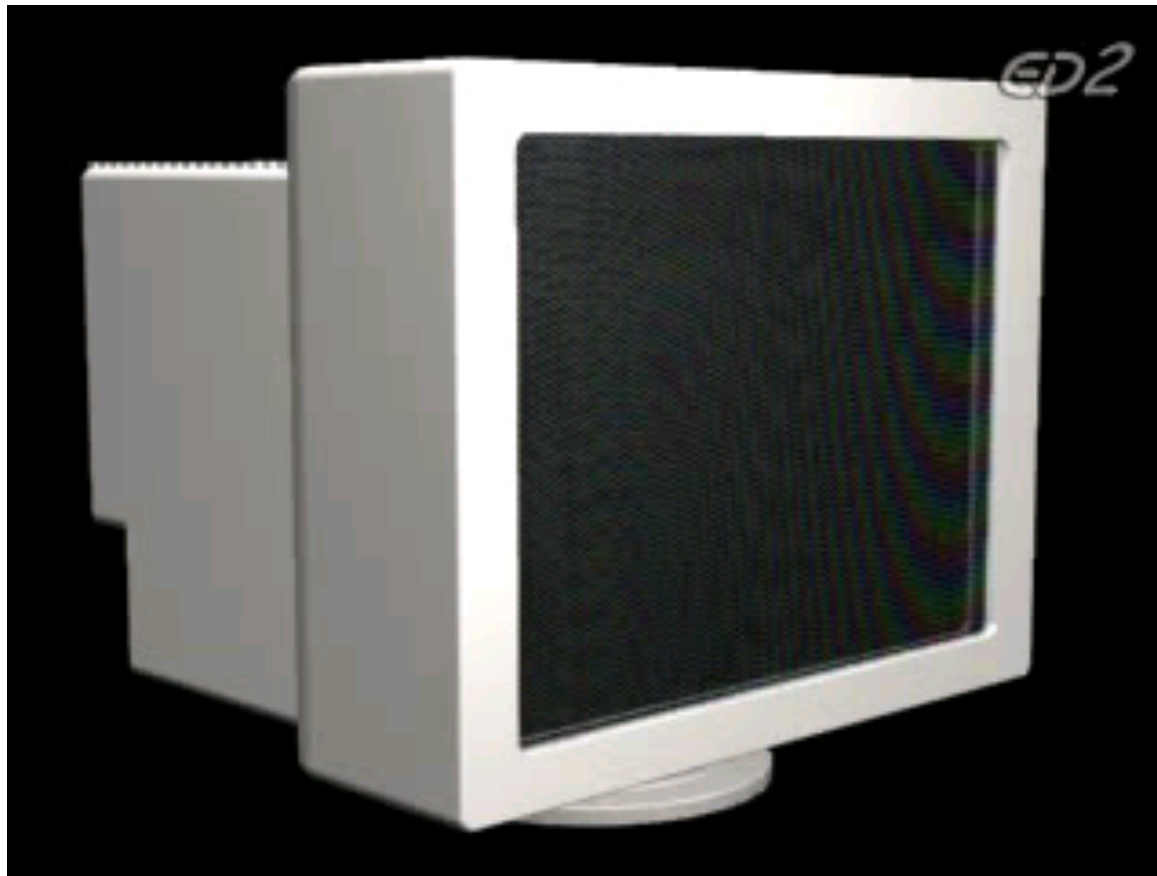
図 4.3 イメージデセクタ

ランダム  
アクセス可能

- 飛び出した電子を磁場で偏向する

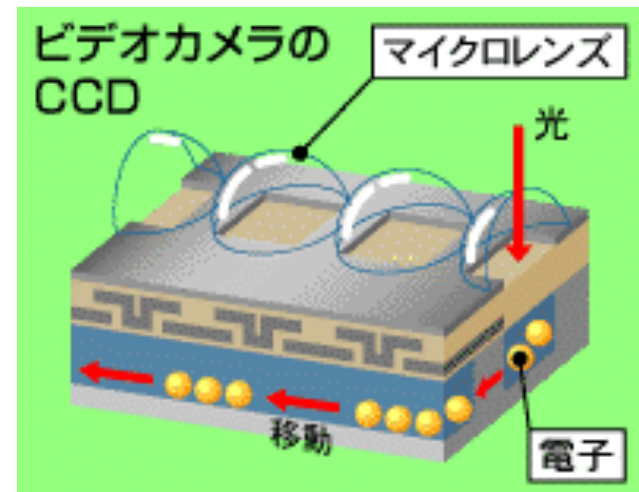
# 撮像管とブラウン管

- 共通点：磁場で電子を偏向

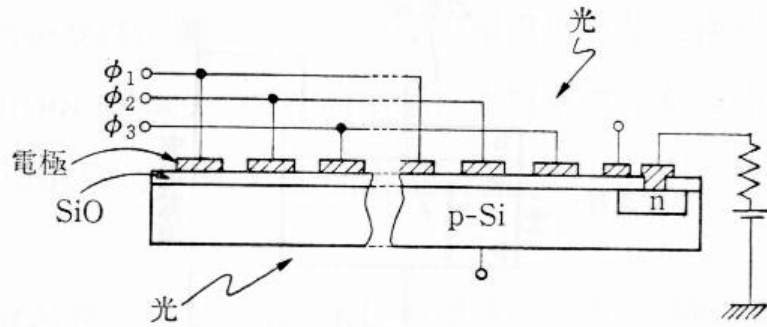


# CCD(電荷結合素子) charge coupled device

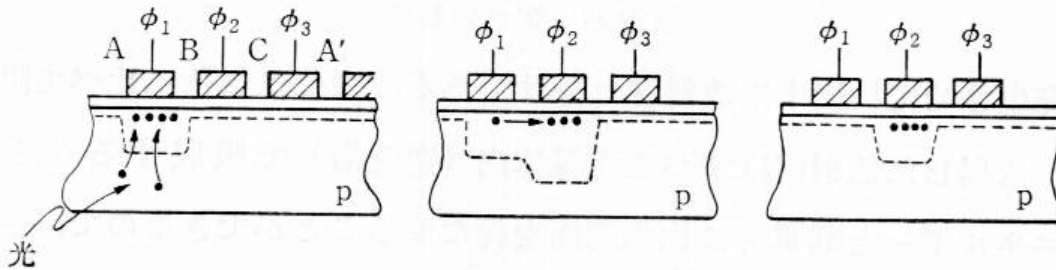
- 静電効果により電子を移動させるデバイス
  - 受光素子に限らない技術
  - CCDとは、電子の移動方法(画像の読み出し方法)に関する名称
- フォトダイオードが発生した電子をCCDにより移動



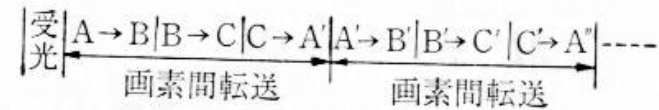
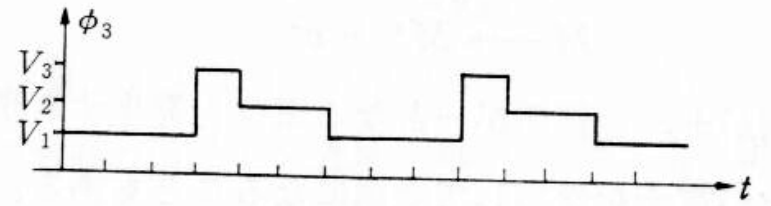
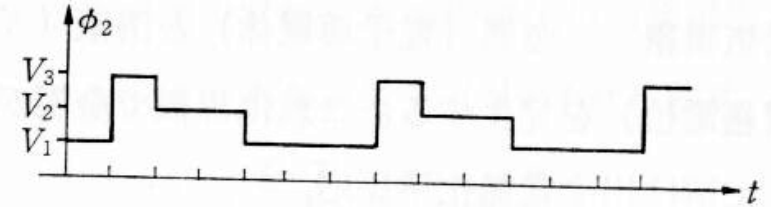
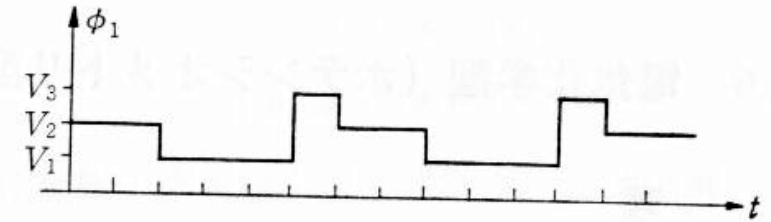
# CCD の原理



(a) 基本構造



(b) 電荷転送の原理

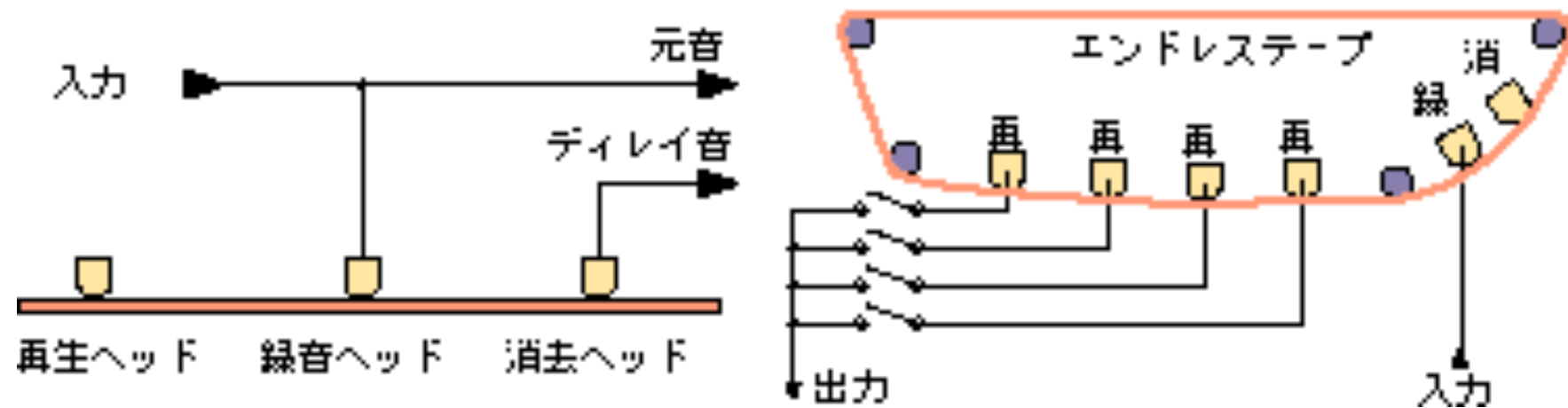


(c) 3相駆動用クロック

- 電子を電場で引き寄せて移動する

# 温故知新2: デイレイ回路(1)

- 電気信号を一定時間遅らせるには  
— ムダ時間系の作成

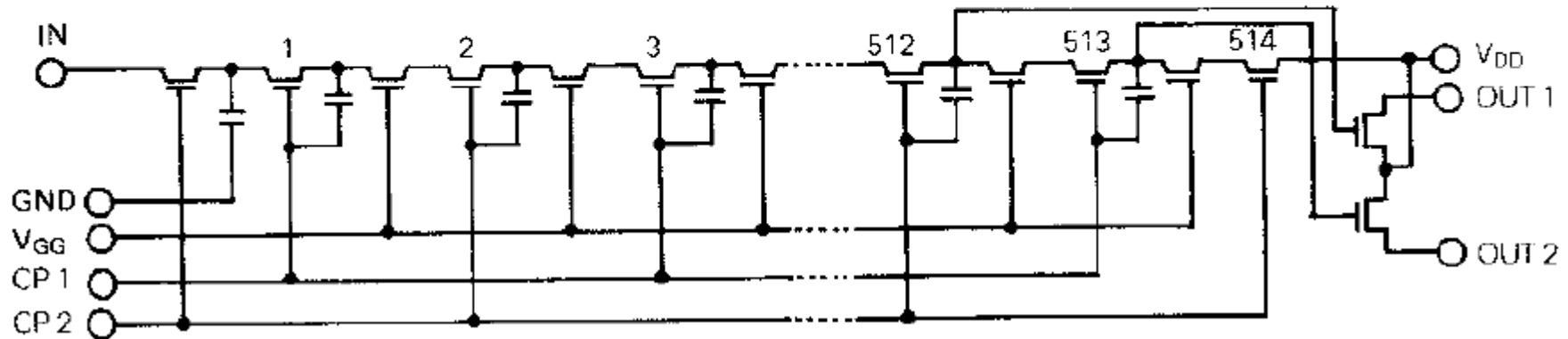


3ヘッドテープデッキを用いたデイレイ

# ディレイ回路(3) BBD

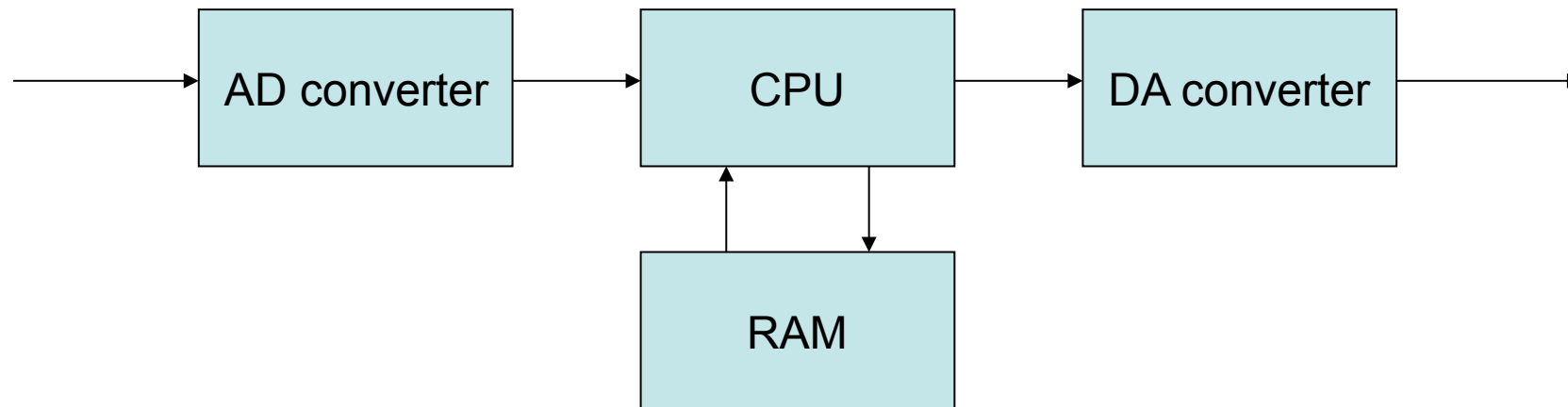
- BBD = Bucket Brigade delay  
(バケツリレー式ディレイ)

Figure 5 Internal schematic



CCDの原型とも言うべき素子

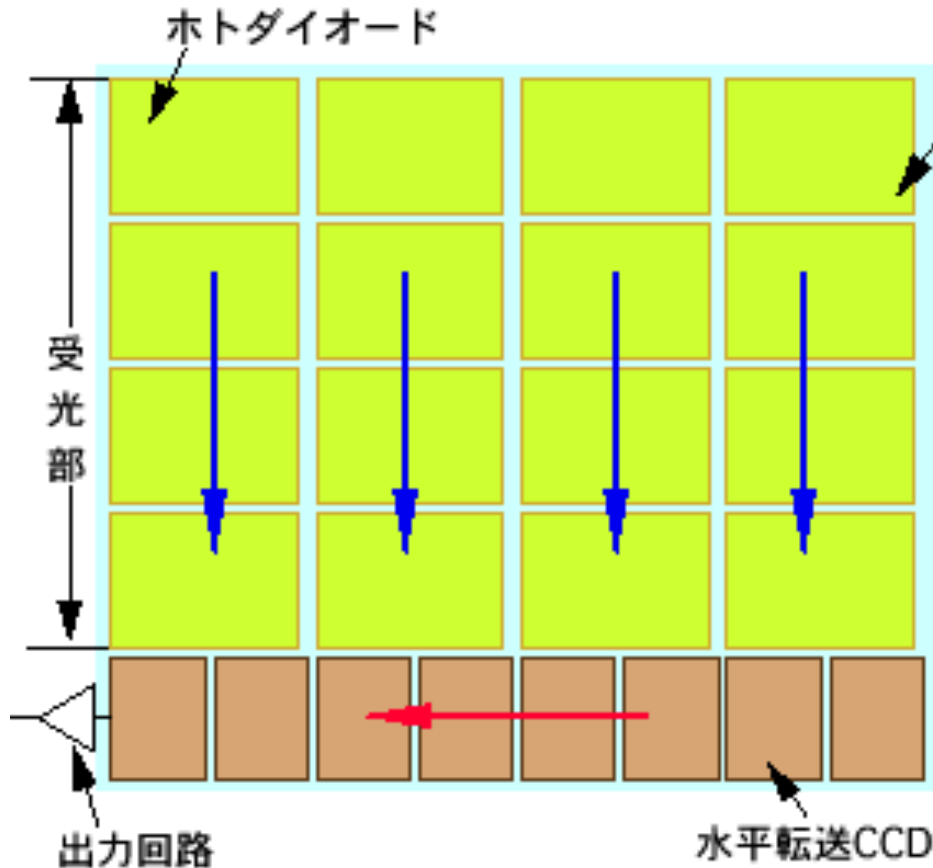
# ディレイ回路(4) 現在



- 音声用・映像用などの長時間のディレイはデジタル式が主流



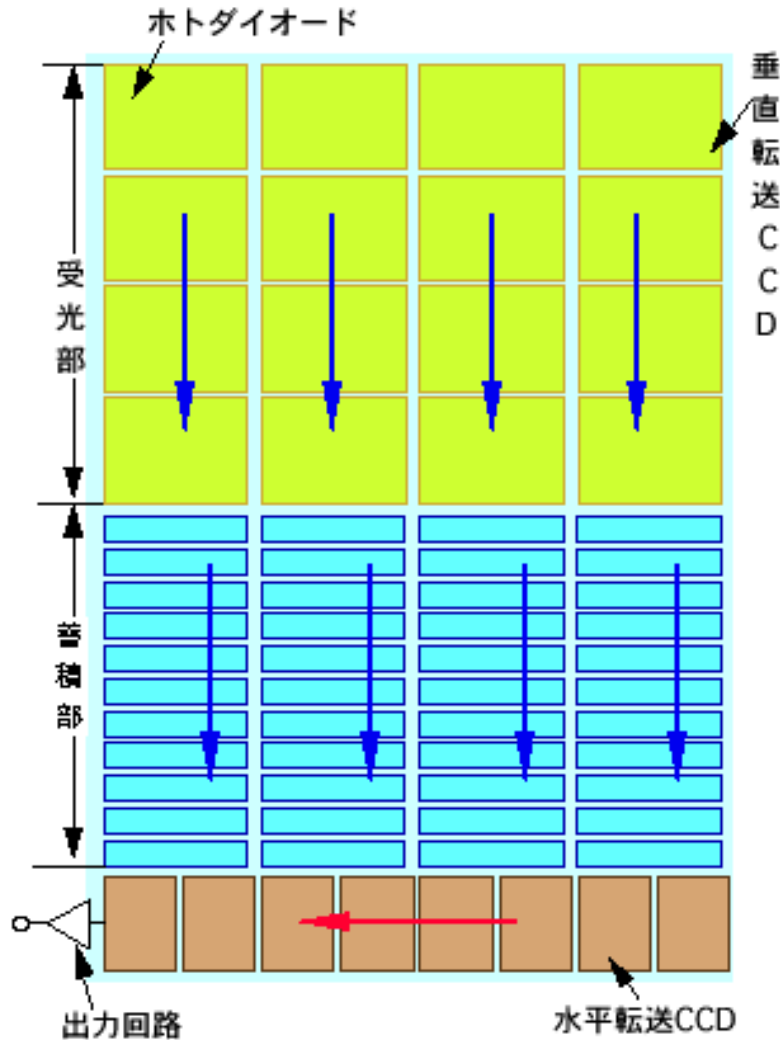
# フルフレームトランスファ型



- 転送時に遮光する必要がある(メカニカルシャッターが必要)
- 開口効率が低い
- 製造が容易
- デジタル一眼レフカメラなどに採用

### 3. フルフレームトランスファ型 CCD (FF-CCD) (蓄積部なし)

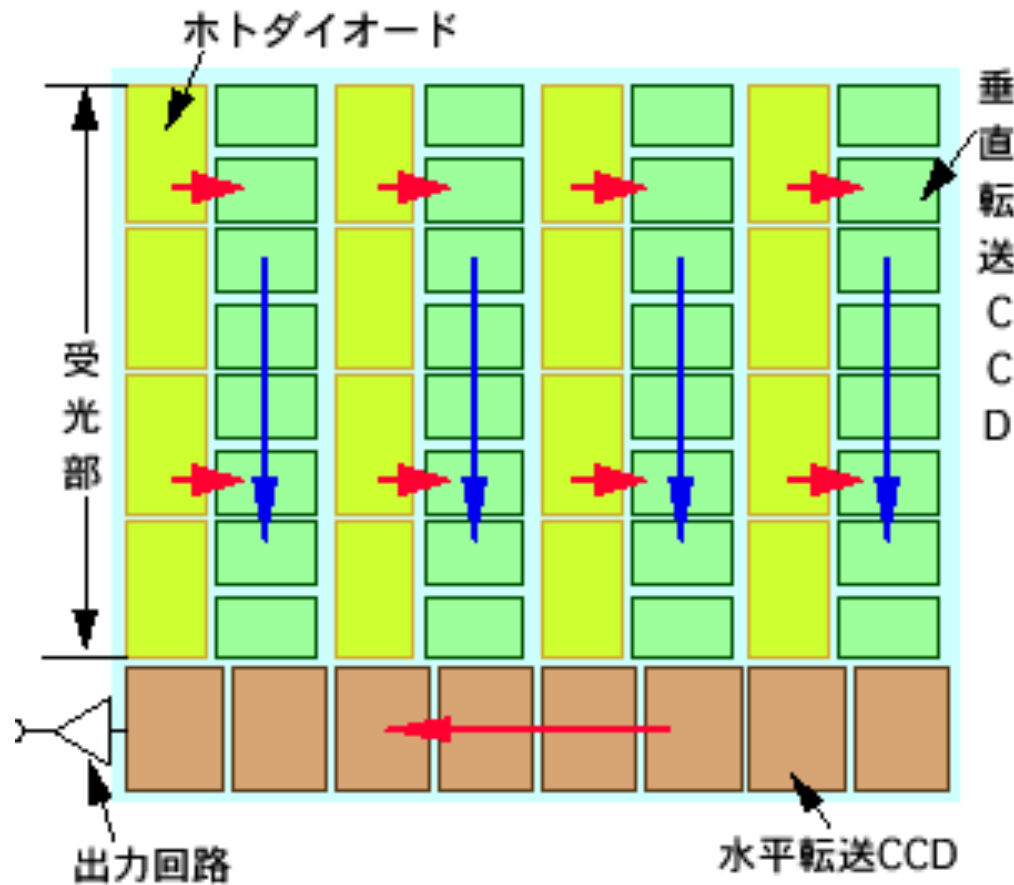
# フレームトランスファ型



- 蓄積部へ全体を転送してから、ゆっくり読み出すため、垂直転送速度を読み出し速度より高速化することが出来る

4. フレームトランスファ型  
CCD (FT-CCD) (蓄積部あり)

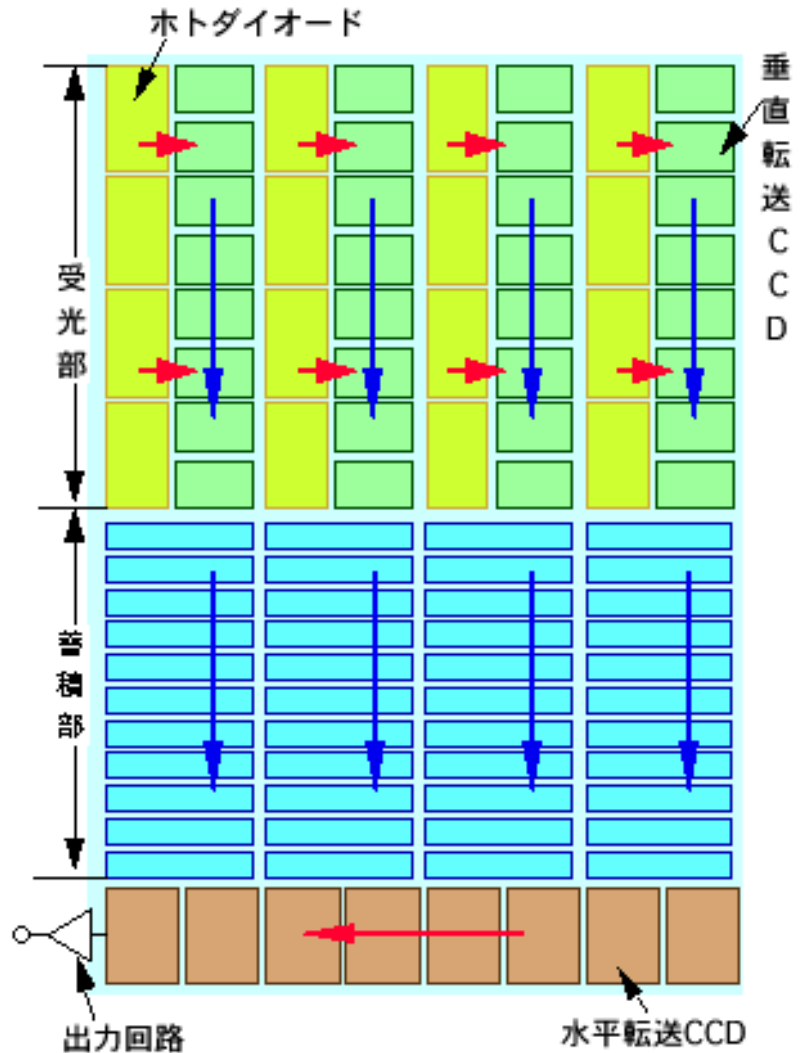
# インターライントランスファ型



- 最もポピュラー
- メカニカルシャッター不要
- 高速シャッターが可能

## 1. インターライントランスファ型CCD (IT-CCD)

# フレームインターライントランスファ型



- 最も高級な方式
- 放送用カメラなどに採用
- スミアが徹底的に少ない

2. フレームインターライン  
トランスファ型CCD (FIT-CCD)

# CCDの画質劣化

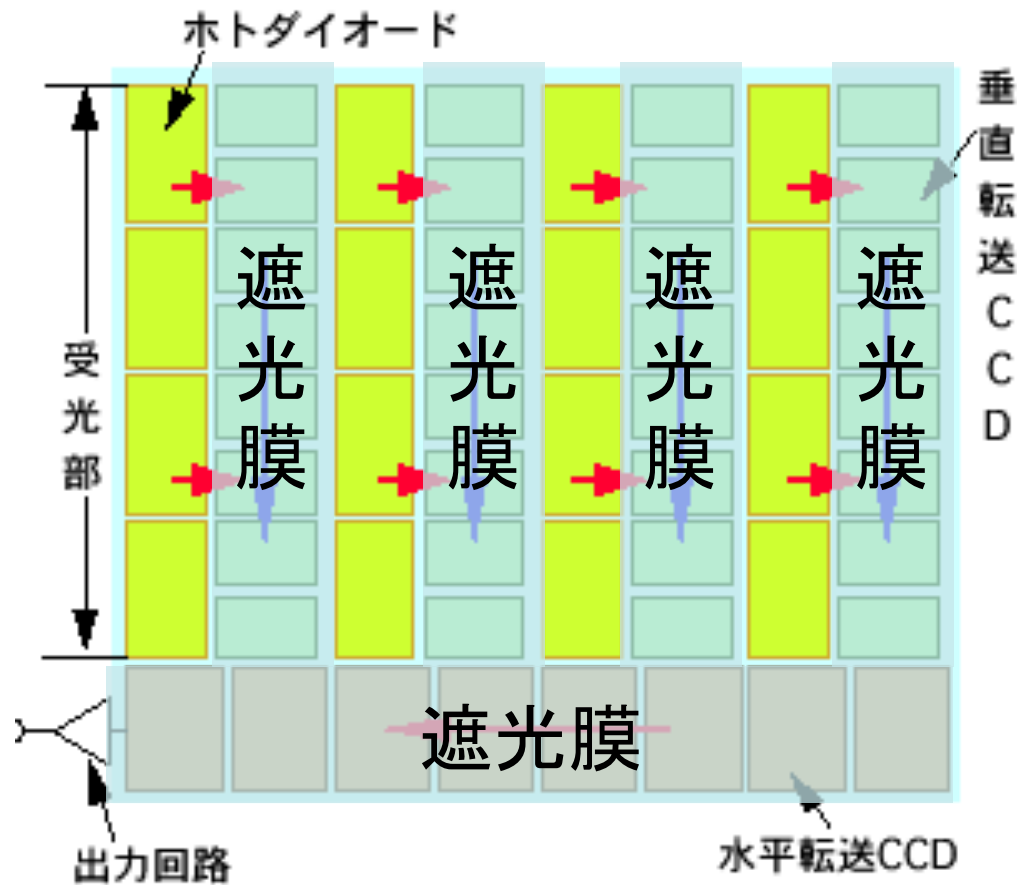
- スミア
  - 強い光が入ったとき、その電子が転送方向に広がること
- ブルーミング
  - 強い光が入ったとき、その電子が周辺へ広がること
- 熱雑音
  - 自由電子の熱運動により、光が当たっていないところにも電子が蓄積されること

# スミア

- 電荷の転送中(読み出し中)に入射した光が読み出し方向に尾を引くこと



# スミアの発生



- 遮光の不完全や、フォトダイオードから転送チャンネルへの電荷の漏れ出しによる

## 1. インターライン トランスファ型CCD (IT-CCD)

# アンチブルーミング

- 漏れ出した電流を捨て去る「排水溝」を用意  
(オーバーフロードレイン)

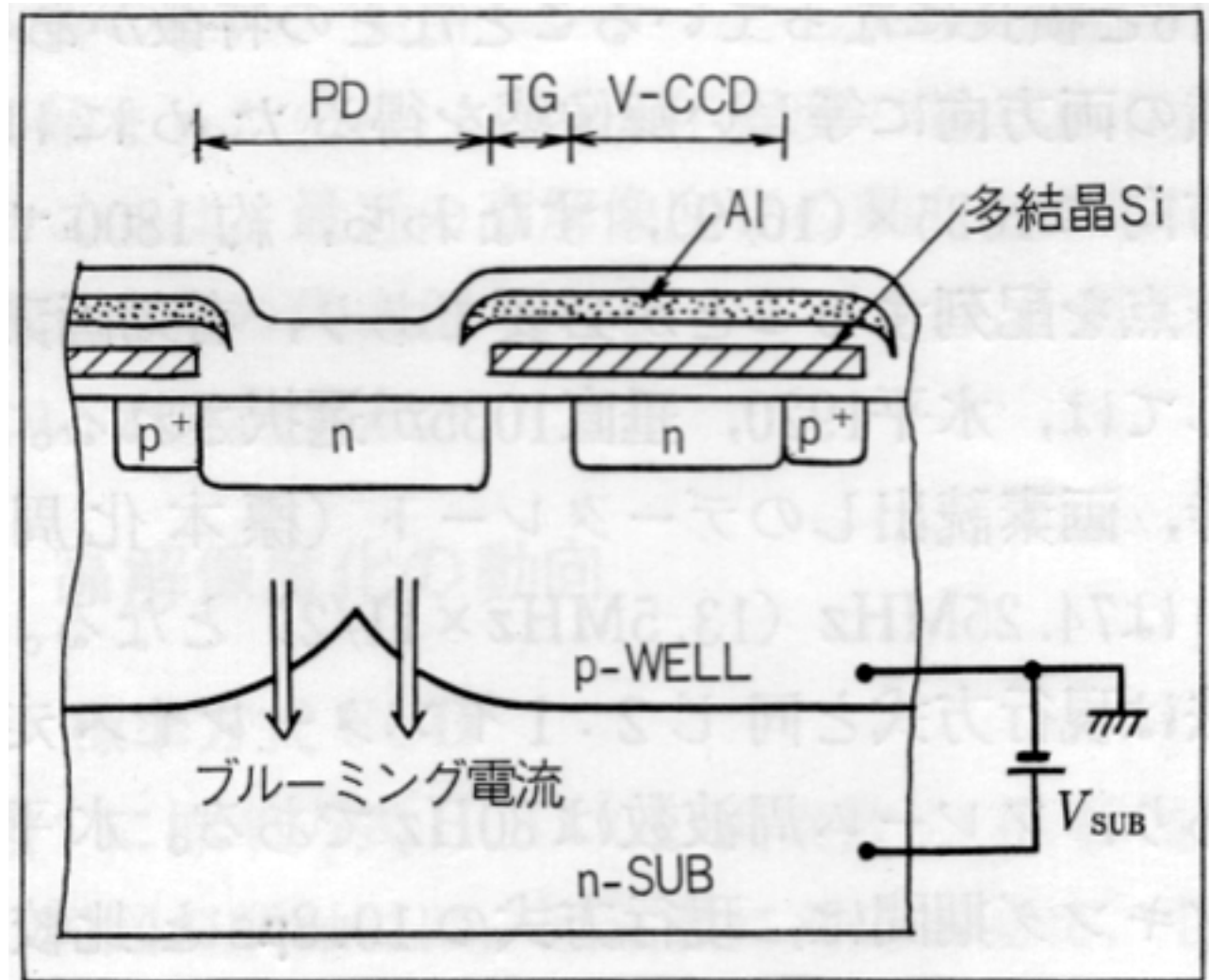
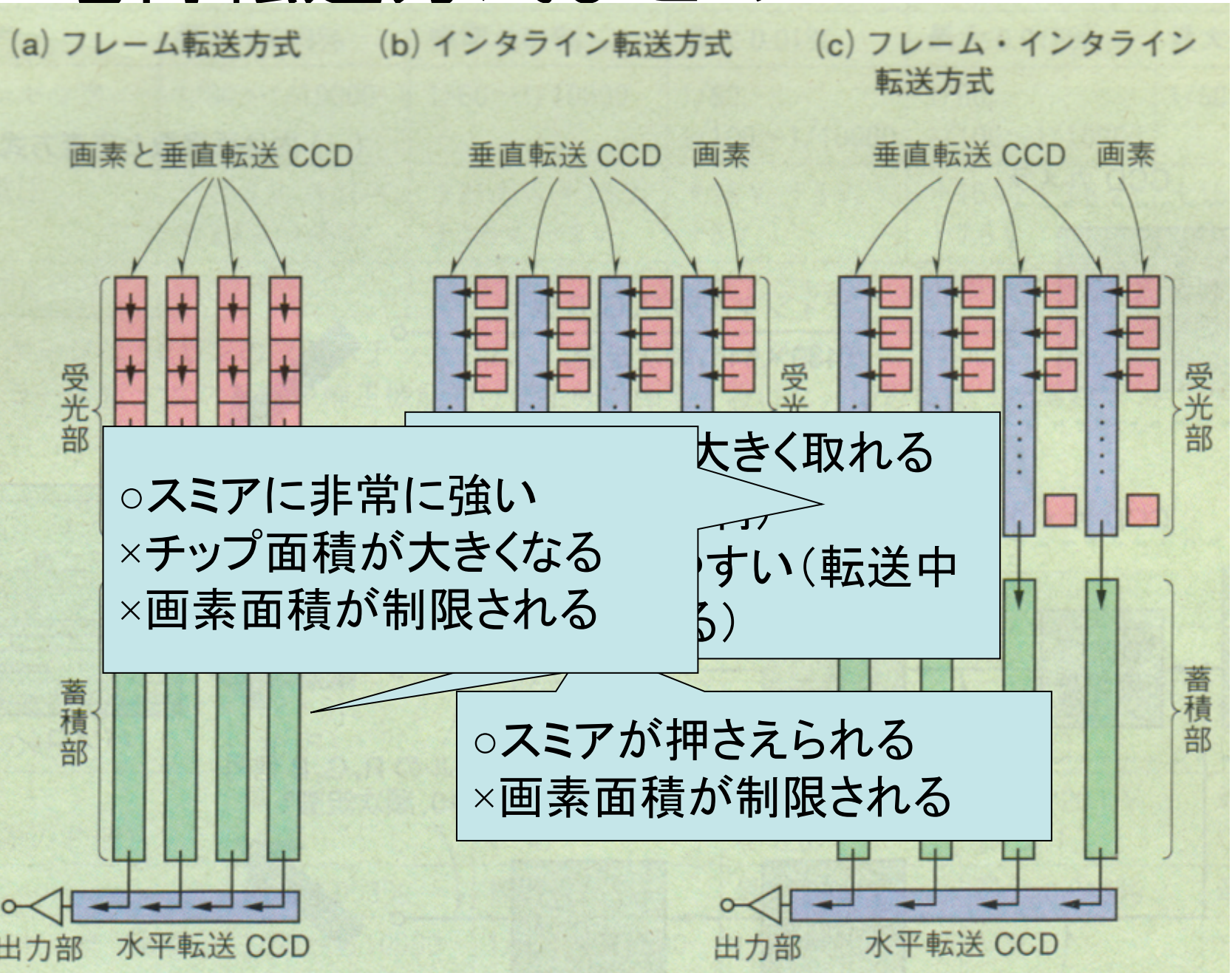


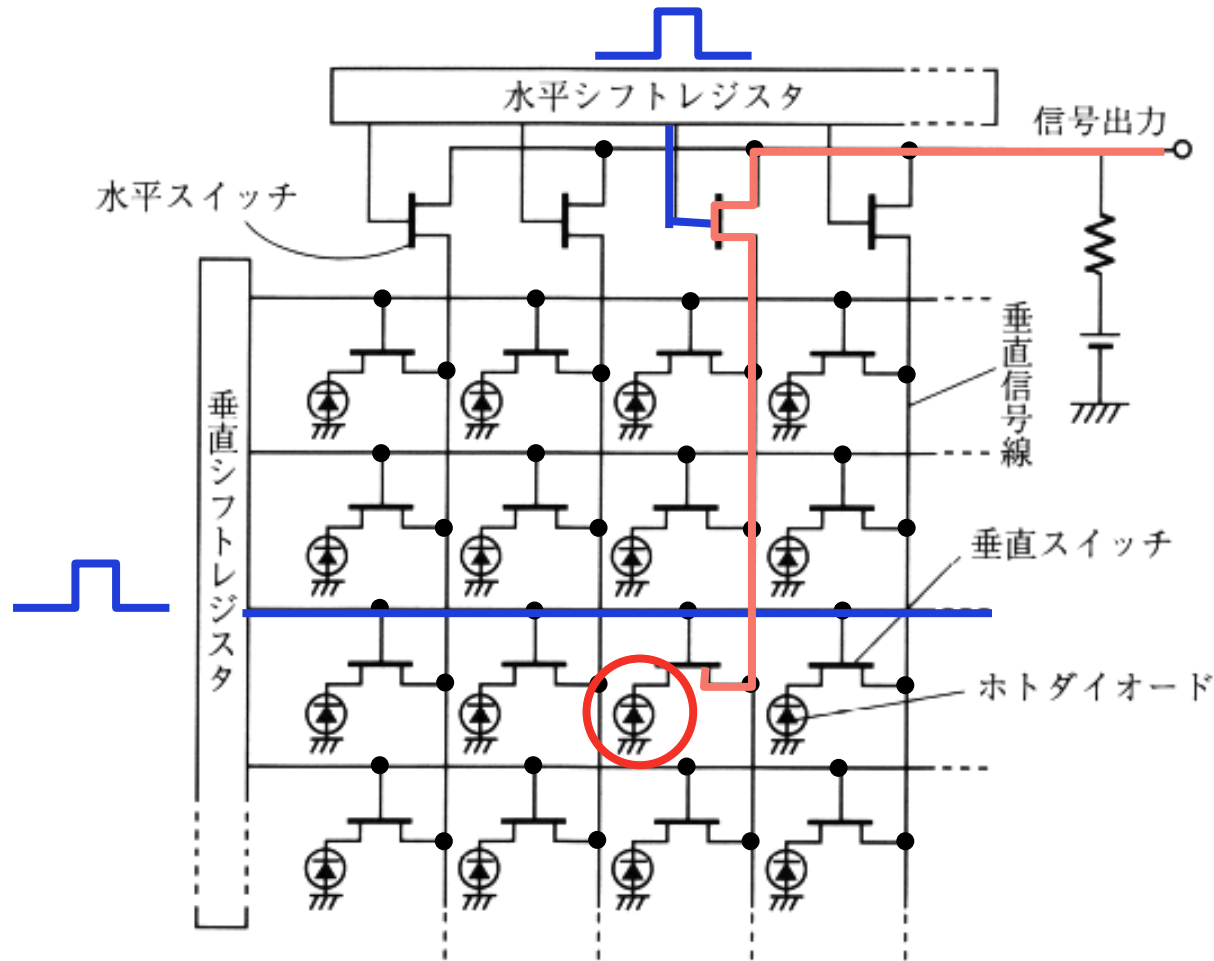
図5 インターライン型 CCD の画素断面図



# 電荷転送方式まとめ



# X-Y アドレス型撮像素子



それぞれの「スイッチ」に用いられている素子の名称が撮像素子の名称となる  
(例えば CMOS 型 FET が使われている場合, CMOS センサと呼ばれる)

CMOSセンサの基本構成

JFET型素子

# CMOS 型撮像素子

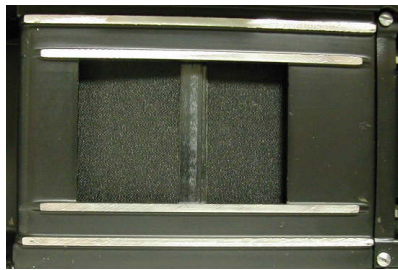
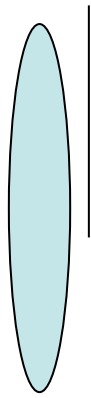
- 低消費電力
  - 全画素に電圧をかけておく必要がない
- 他の回路との混載可能  
(通常の半導体プロセスが利用可能)
  - 画像処理回路を合わせて1チップ化できる
- 従来はノイズが多い傾向
  - 昨今は大幅に改善
- ランダムアクセス可能

# ローリングシャッタ

- CMOSセンサでは各画素の露光時刻がずれるものがある(ローリングシャッタ)
  - 各画素の読み出し時刻のずれの分だけ露光時刻がずれる)
  - ずれないものをグローバルシャッタと呼ぶ



# シャッターの形式と画像の歪



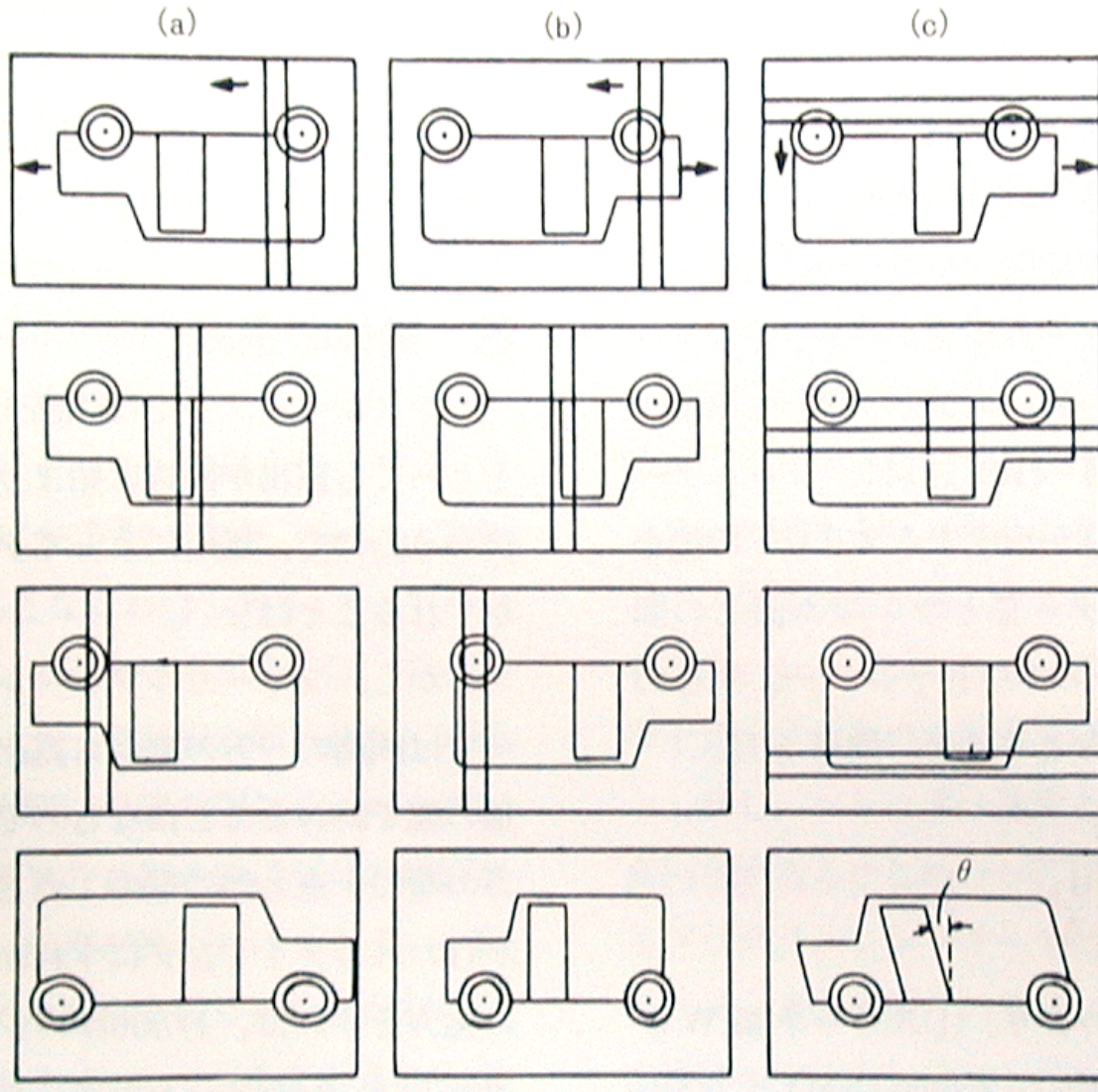
レンズシャッター方式  
(レンズ交換にやや難)  
コンパクトカメラ等



フォーカルプレーンシャッター方式  
(レンズ交換に向くがやや複雑)  
一眼レフカメラ, レンズ交換式距離計連動カメラ等

# シャッターによる動体歪

図5-42 フォーカルプレーンシャッターの動体歪み



- 画面内の露光時間の差により物体の形状がひずむ

# 動体歪の例



- ラルティーン「A.C.F グランプリレース」  
世界で最も有名な？シャッターによる動体歪の例

# カラー撮影

- R, G, B 3原色を順に撮影するもの
  - filter wheel 方式等
- 光エネルギーを R, G, B の3成分に分け、同時に撮影するもの
  - 3管式, 3板式(3CCD)
- 各画素にそれぞれ R, G, B のどれかを担当させるもの
  - 原色フィルタ, 補色フィルタ
  - Foveon

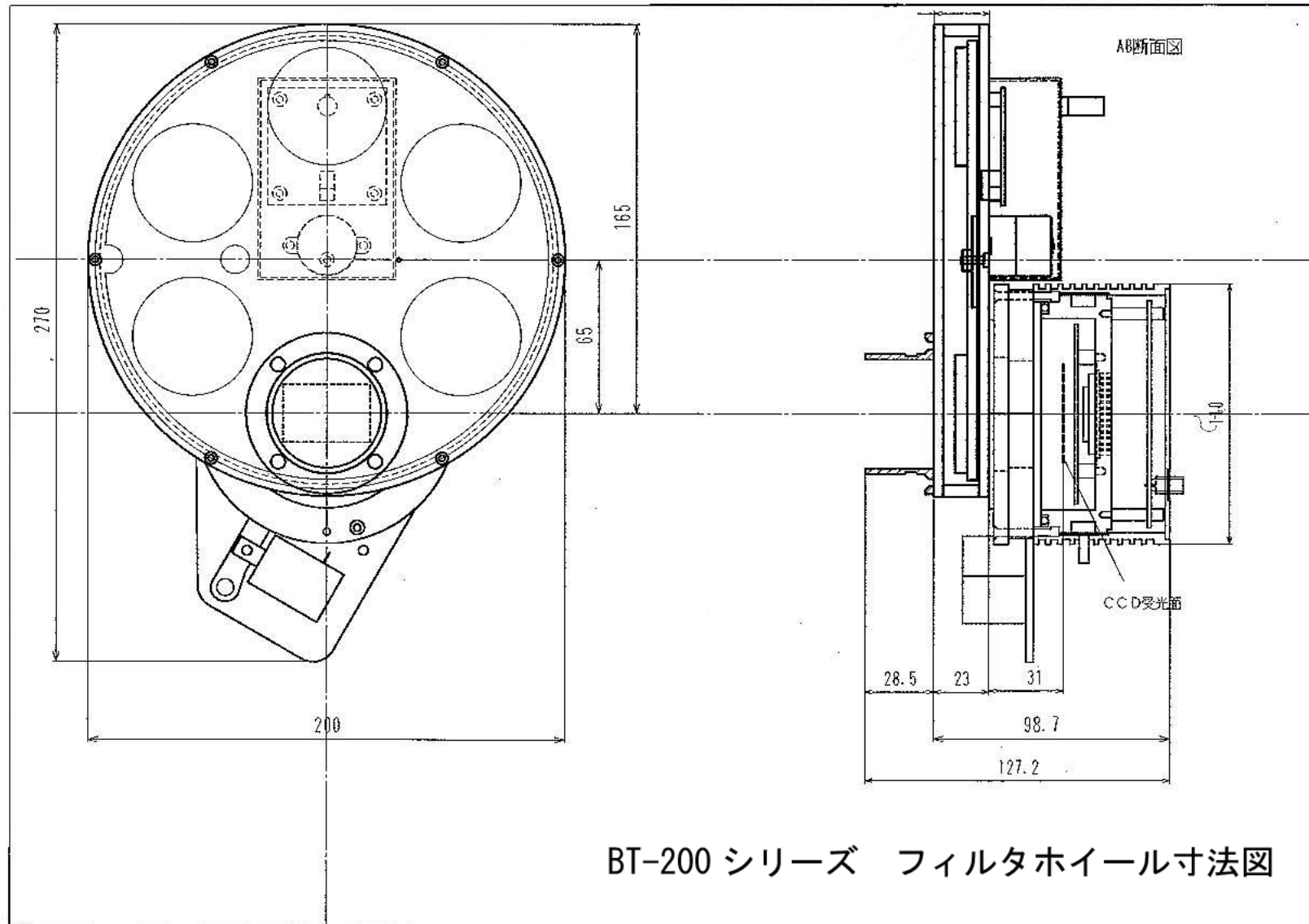




# フィルタホイール方式

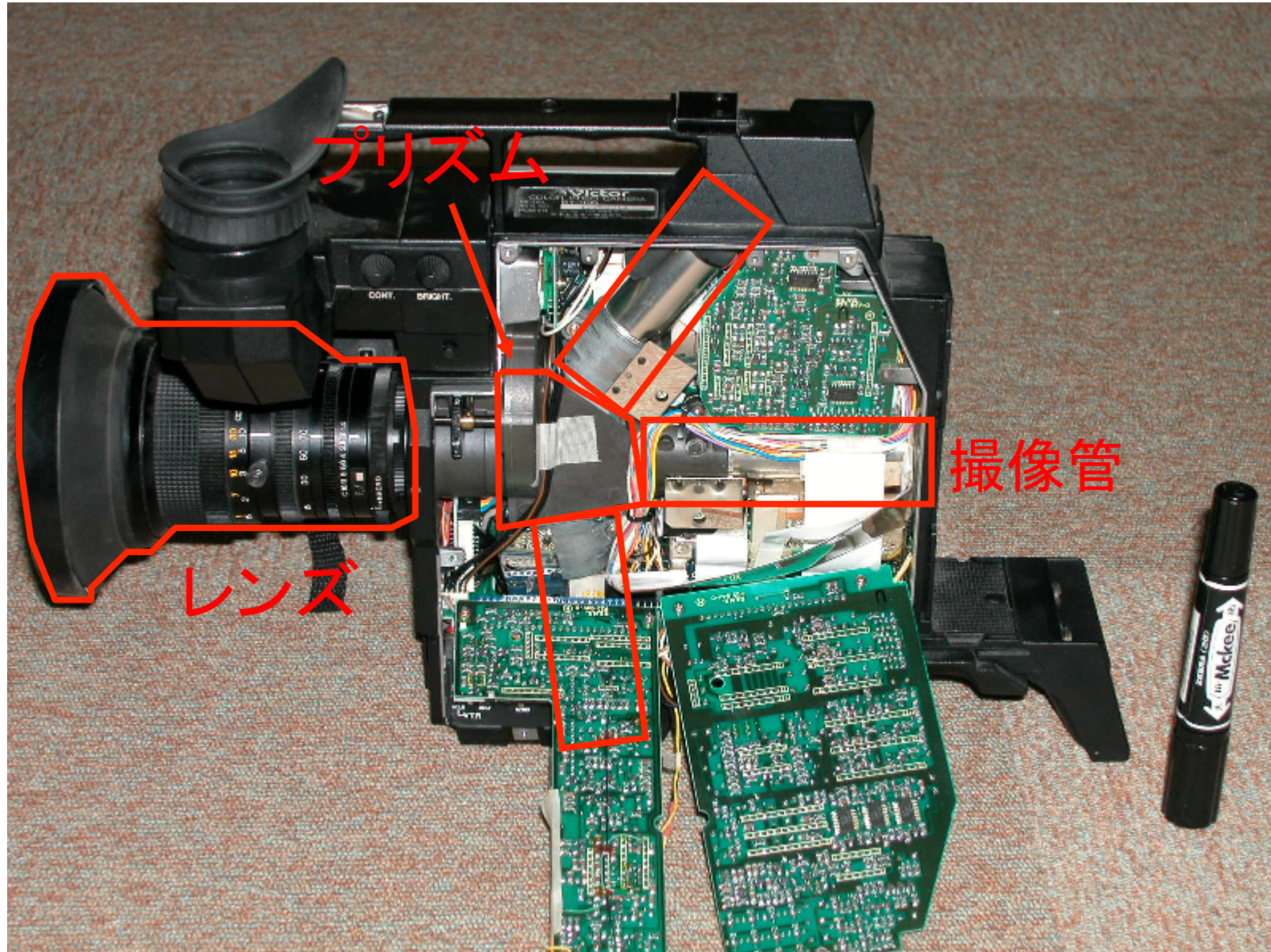
- 各フィルタを任意に選ぶことが出来る
  - 特殊な特性のフィルタが利用可能
- 4色以上の撮影が可能
  - マルチスペクトル化(材質の認識など)
- カラー化が難しい特殊なCCDが利用可能
  - 超高解像度 CCD など
- 静止物しか撮影できない
  - 顕微鏡撮影, 天体撮影などの科学技術用
  - 商品カタログなどの静物撮影用

# フィルタホイール

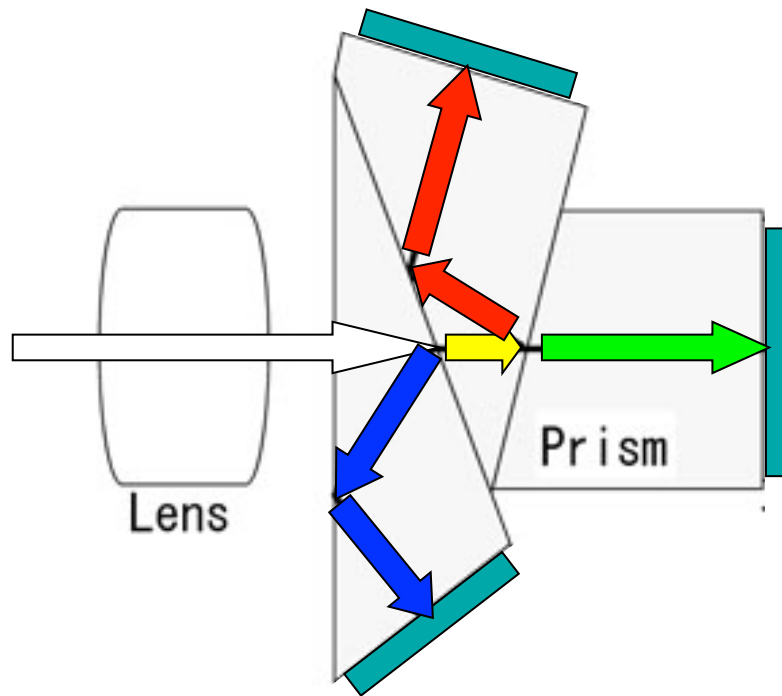


BT-200 シリーズ フィルタホイール寸法図

# 3管式カメラ



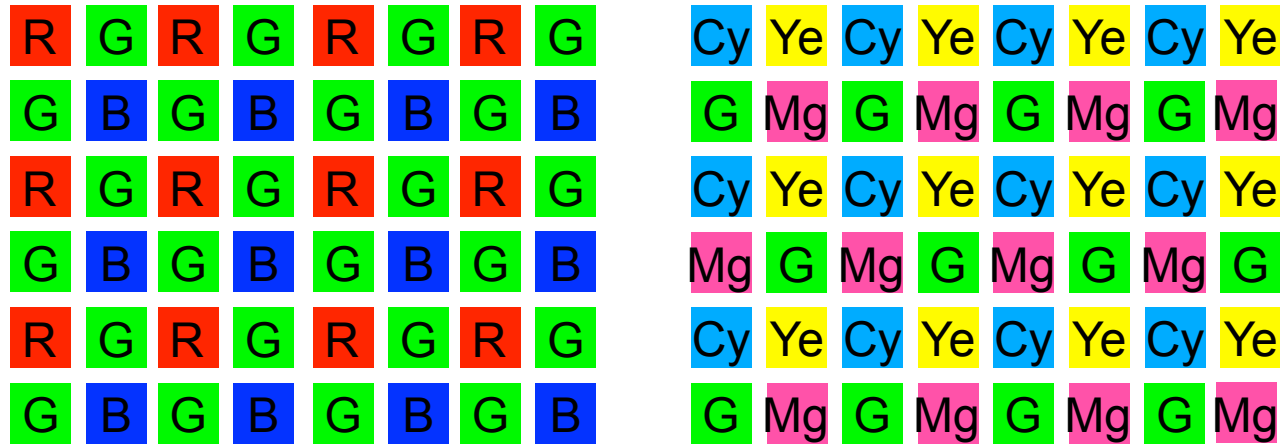
# 3板式カメラ



各プリズムの界面には「干渉フィルタ」が蒸着により構成されている。干渉フィルタは異なる屈折率の透明物を所定の厚みで重ねることにより、波動光学的に光を反射・透過するので、入射光は波長ごとに反射率が決まり、残りの光エネルギーは透過する。

- エネルギーのムダがなく、感度が高い
- 色再現性が高い  
(画素ごとに着色する必要がないため、  
良いフィルタが利用できる)

# 1 板式



原色フィルタ  
(Bayer 配列)

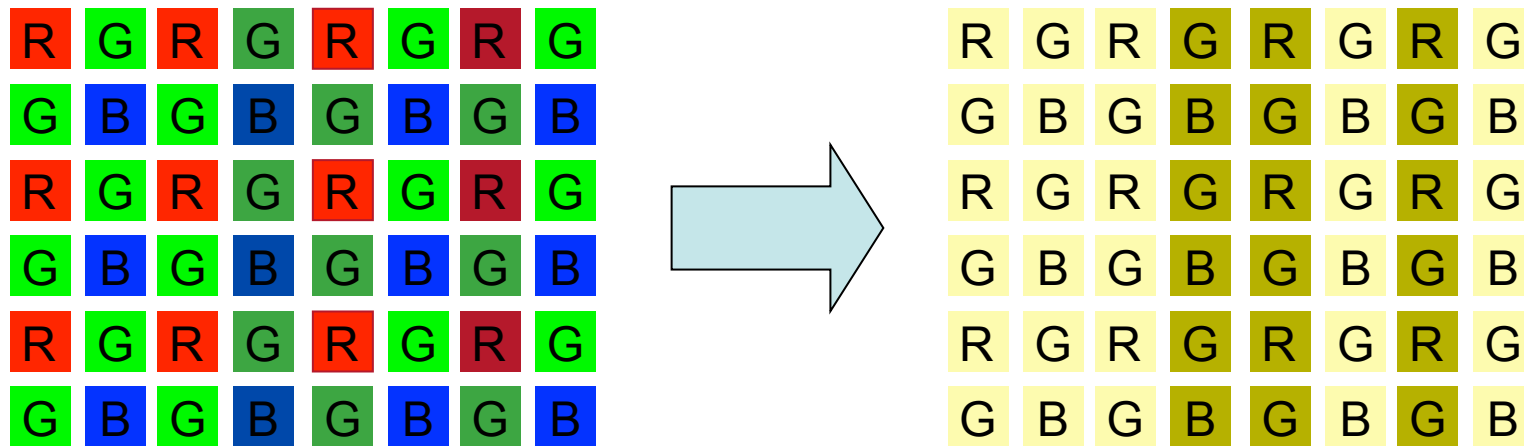
補色フィルタ

- CCD の各画素に着色
  - 原色フィルタ
    - 自然な色再現 ×感度が低い(ノイズが多い)
  - 補色フィルタ
    - 感度的に有利 計算により R,G,B値に変換



# カラー画像の再現(1)

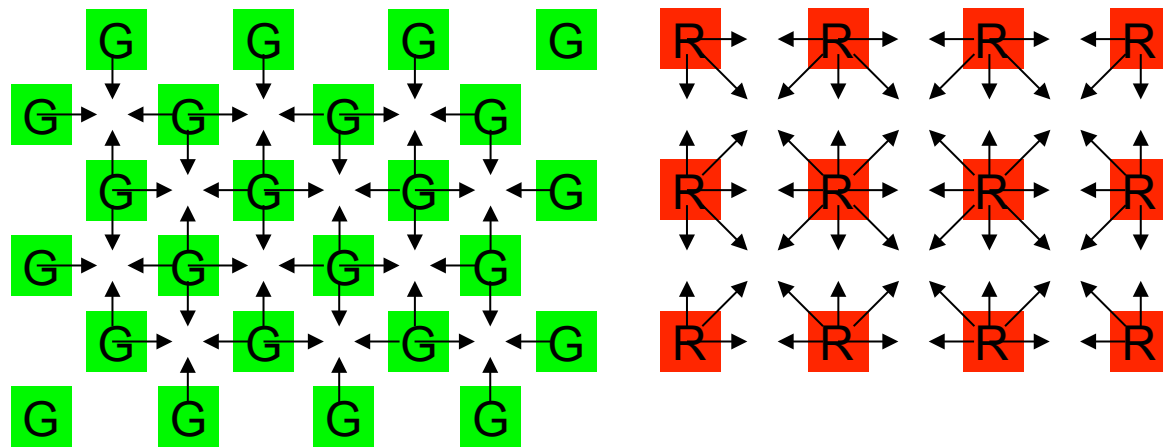
- もしも対象全体が単一色であるとする
  - 例:  $R = G = 2B$  の場合 (B が  $\frac{1}{2}$  の明るさ)



- それぞれの画素の値を上式に従い推定
    - R の画素:  $G = R, B = \frac{1}{2}R$
    - G の画素:  $R = G, B = \frac{1}{2}R$
    - B の画素:  $R = 2B, G = 2B$
- 輝度の解像度は落ちない  
×色解像度が落ちる

# カラー画像の再現(2)

- 最も単純な方法(各色の補間)



欠点: 解像度が落ちてしまう  
(赤, 青では縦横各半分)

- 色解像度と輝度解像度はトレードオフである
- エッジ検出や色の変化率の判別等の非線形なフィルタや判定(条件分岐)を用いて高性能化されている(デジタルカメラの映像エンジンなど)



# 光学ローパスフィルタ

- 結晶（ニオブ酸リチウムなど）の複屈折の性質を用いて像をぼかすための素子
- サンプリング（標本化）時のエリアシングを防ぐ



# オンチップレンズ

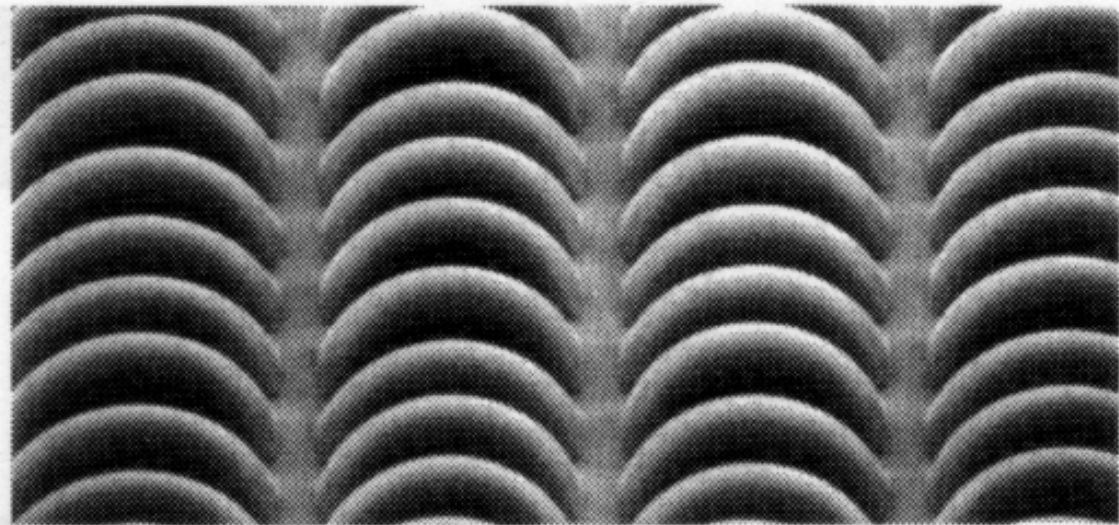
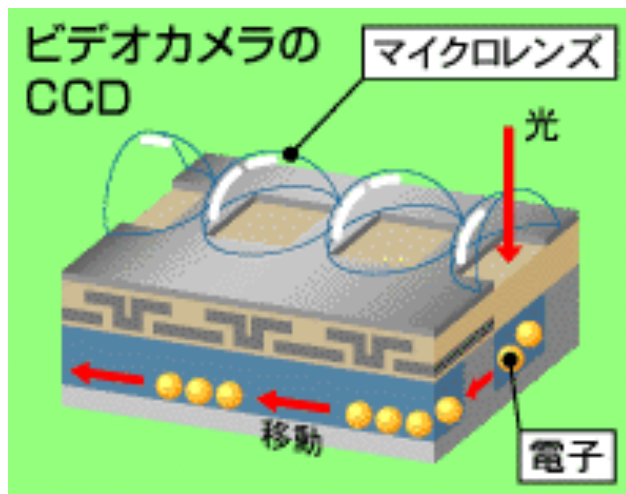


写真 1 CCD オンチップマイクロレンズ外観 SEM 写真

A SEM micrograph of an external view of a CCD on-chip micro-lens.