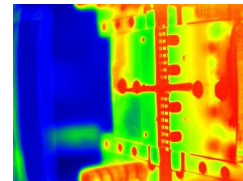


# 遠赤外線カメラ技術セミナー

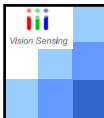
2016/9/16 於：東京事務所



株式会社ビジョンセンシング

## 本日のアジェンダ

1. 遠赤外線の物理特性
2. 遠赤外線センサとカメラ性能
3. 補正技術
4. 周辺技術（レンズ・特記事項）  
<休憩>
5. 製品紹介
6. 適用事例紹介  
<休憩>
7. カメラデモンストレーション



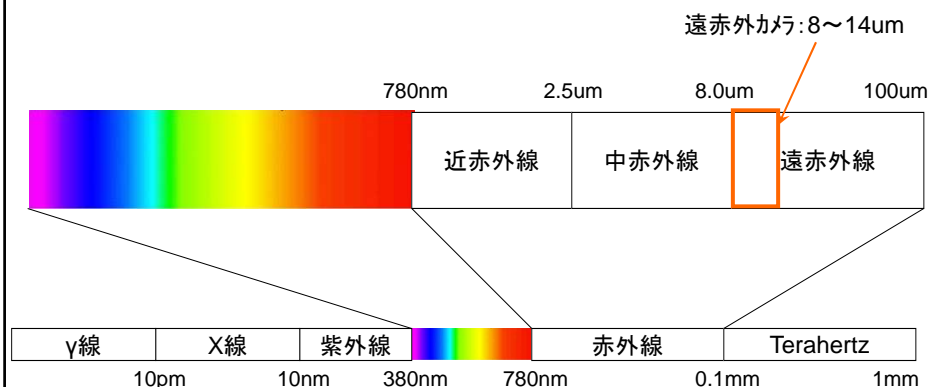
## 本日のアジェンダ

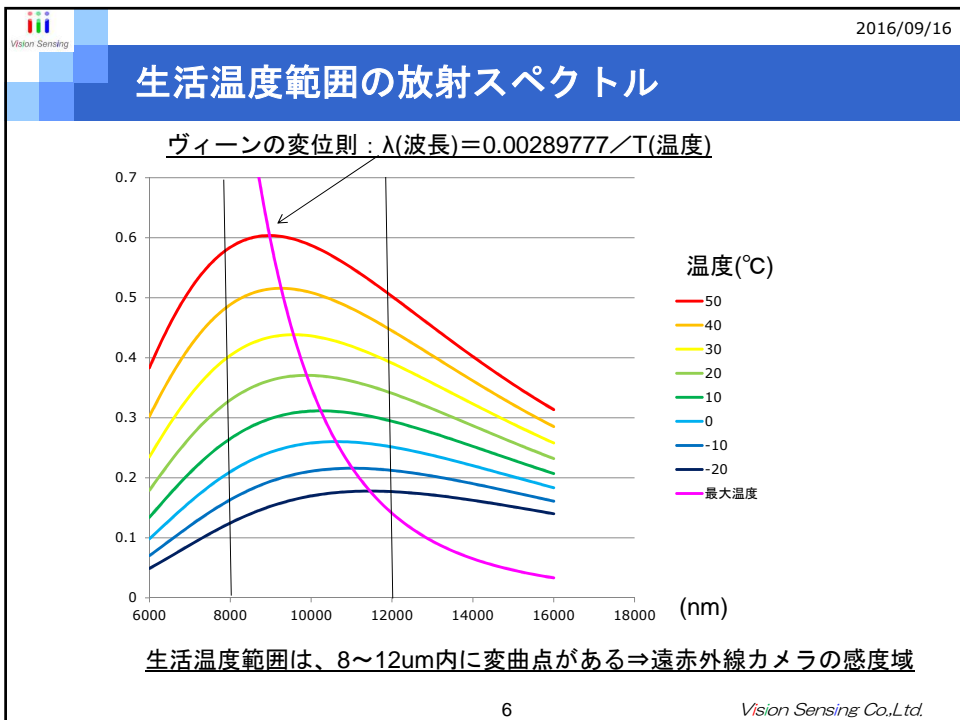
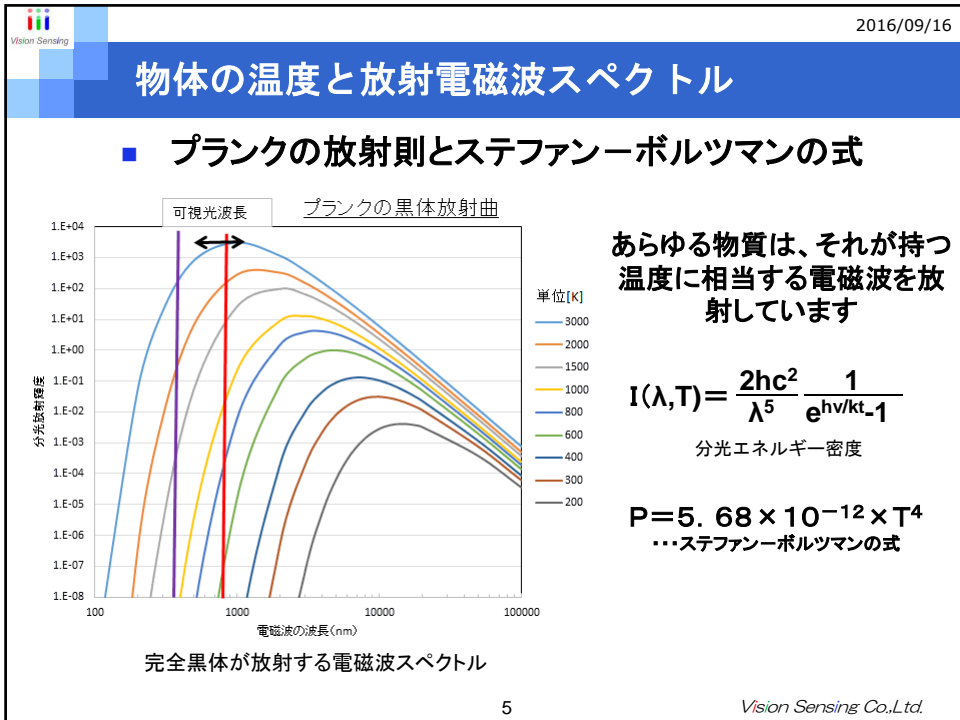
1. 遠赤外線の物理特性
2. 遠赤外線センサとカメラ性能
3. 補正技術
4. 周辺技術（レンズ・特記事項）  
＜休憩＞
5. 製品紹介
6. 適用事例紹介  
＜休憩＞
7. カメラデモンストレーション



## 赤外線とは

- 目に見えないがすべての物体から放射されている電磁波





2016/09/16

## 透過・反射・放射について

入射光      反射光      放射光

吸収光      物体の温度  
                  上昇

透過光

8~12umの光に対して

透過しやすい材料

- ・ゲルマニウム
- ・ZnS (硫化亜鉛)
- ・シリコン

反射しやすい材料

- ・鏡面アルミニウム他金属

放射しやすい材料

- ・氷
- ・人体の皮膚

透過：物体を透過した赤外線  
 反射：物体の表面で反射した赤外線  
 放射：物体に赤外線が吸収され物体の温度が上昇して発生する赤外線

7 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## 赤外線カメラが見ている画像

他からの赤外線の反射

物体が発する赤外線

物体を透過した赤外線

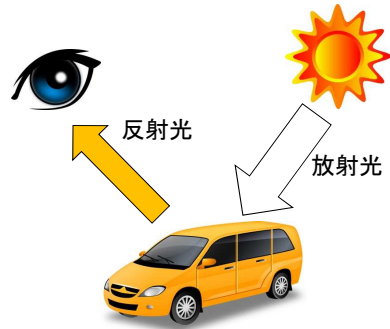
カメラ入力=物体が発する赤外線+他からの赤外線の反射+物体を透過した赤外線

カメラ入力エネルギー=放射エネルギー+反射エネルギー+透過エネルギー

8 Vision Sensing Co.,Ltd.

## 放射と反射の違い

- 可視光の放射している物
  - 太陽
  - 電球
  - 蛍光灯
  - LED
- 遠赤外線放射している物
  - すべての物体が放射している
  - エネルギー × 放射率の光

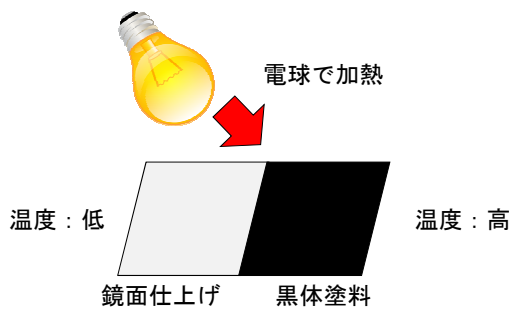


太陽光のスペクトルのうち、青色が吸収されるため、反射光が黄色に見える。

## 放射率

- 黒体放射を100%として放射されている割合

$$\text{放射率} = \frac{\text{放射エネルギー}}{\text{放射エネルギー} + \text{反射エネルギー} + \text{透過エネルギー}}$$



放射率が高いとエネルギーを吸収・放射し、物体の温度を上下しやすくなる。

## 放射率の違い（道路の白線とアスファルト）



可視画像



遠赤外画像

道路の白線とアスファルトはほぼ同じ温度であるが、遠赤外線カメラで見ると、放射率の差異により、白線はやや暗く見える。

## 物体の放射率

品名	放射率
アルミニウム	4~9%
アルミニウム酸化物	76%
銅	5%
銅酸化物	78%
鉄	14~38%
赤く錆びた鉄	69%
塗料ラッカー	80~95%
黒色ラッカー	96~98%
アスファルト	90~98%
コンクリート	94%
皮膚（人体）	98%
水	92~96%
氷	96~98%

・放射率が高い物体ほど、赤外線カメラで検知やすくなる。

・金属は、表面の状態によって放射率が大きく左右される。

## 本日のアジェンダ

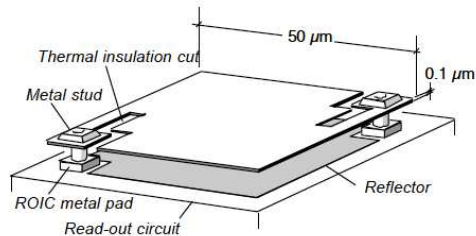
1. 遠赤外線の物理特性
2. 遠赤外線センサとカメラ技術
3. 補正技術
4. 周辺技術（レンズ・特記事項）  
  - <休憩>
5. 製品紹介
6. 適用事例紹介  
  - <休憩>
7. カメラデモンストレーション

## 遠赤外検出器の種類

- 熱型と量子型

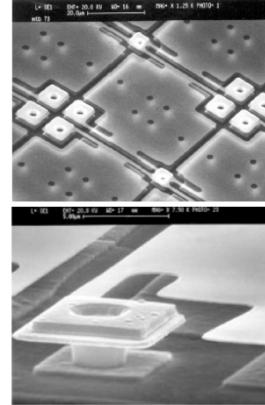
検出器	原理	波長域 (μm)	特徴
ボロメータ	温度抵抗変化	8~12 (3~16)	非冷却、 TCS>10ms
サーモパイル	熱起電力	10周辺	安価
InSb	光起電力	3.6~4.9	中赤外に感度 高価
HgCdTe (MCT)	光起電力	0.8~11.0	高感度、冷却 高価
InGaAs	光起電力	0.9~1.7	高感度 室温動作も可能 高価

## 非冷却遠赤外線ディテクタの素子構造



マイクロボロメータ・ピクセルの構造

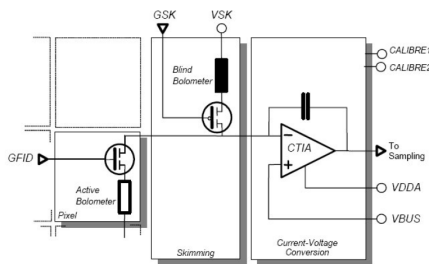
(ULIS社資料より)



赤外吸収→温度上昇→抵抗値減少→電流増加

## ディテクタパラメータ (1)

### ■ ゲイン電圧とオフセット電圧



#### <ディテクタパラメータ>

- |  |            |
|--|------------|
| <b>GFID電圧</b>                                | …ゲイン調整     |
| <b>VSK電圧</b>                                 | …オフセット調整   |
| <b>TINT</b>                                  | …露光時間      |
| <b>C容量</b>                                   | …CTIA増幅率   |
| [CTIA:Capacitance trans-impedance amplifier] |            |
| <b>FPA温度</b>                                 | …温調/ゲインアップ |

読出し回路ブロック図 (UL04171の例)

- バイアス電圧 (GFID) により、Active Bolometerの抵抗変化が電流変化としてCTIAに入力される
- オフセット電圧 (VSK) により、CTIAへの入力がBlind Bolometerを経由してオフセットされる



2016/09/16

## ディテクタパラメータ (2)

■ TINT露光時間とC容量

TINT露光時間

C容量設定値とアンプゲイン

C容量 設定値 (pF)	18	16	14	12	10	8	6	4
ゲイン (倍)	1	1.12 5	1.29	1.5	1.8	2.25	3	4.5

- CTIAオペアンプのゲインを倍数レンジで制御する

17 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## ディテクタパラメータ (3)

■ FPA温度とディテクタ出力の関係

FPA温度

FPAの温度が変化するとオフセットとゲイン (SiTF)と両方が変化する

18 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## ディテクタパラメータと動作特性 (1)

■ ゲイン電圧とオフセット電圧

ゲイン電圧と動作特性

オフセット電圧と動作特性

- ゲイン電圧により、温度レンジを調整できる
- オフセット電圧により、温度範囲をシフトできる

19 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## ディテクタパラメータと動作特性 (2)

■ TINT露光時間とC容量

C容量=2pF TINT=1293

C容量=4pF TINT=1293

C容量=4pF TINT=600

C容量・TINT時間の設定による感度調整

- TINT露光時間により、温度レンジを調整できる
- C容量により、温度レンジを調整できる

20 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## 遠赤外線カメラの性能（1）

- SiTF=画像上の温度変化 1℃あたりの輝度変化量（図中a）  
 (SiTF=Signal Transfer Function)

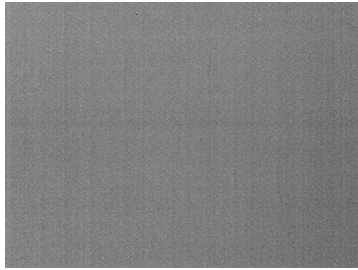
- ゲイン電圧・TINT・C容量を変える⇒SiTFが変化する

21 Vision Sensing Co.,Ltd.

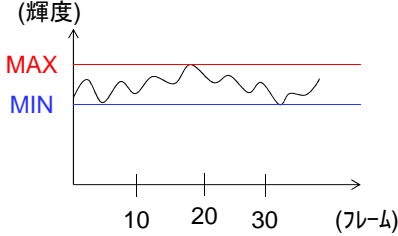
2016/09/16

## 遠赤外線カメラの性能（2）

- **NETD（雑音等価温度差）⇒小さいほど微小温度差を検出**  
 NETD=Noise-equivalent temperature  
 $NETD (mK) = \text{ノイズ} \div SiTF (\text{輝度値}/K)$   
 (カメラ性能を評価するために弊社では17フレームの面内輝度標準偏差を使用しています。)



17フレームの標準偏差で行う場合  
 ノイズ=σ (標準偏差)  
1画面のノイズ測定方法



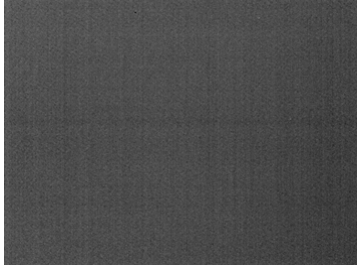
ノイズ = (MAX-MIN) / 6

各画素の時間的のノイズ測定方法

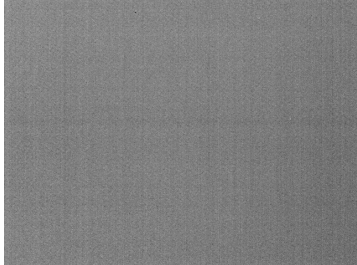
22 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

**NETD測定 1 (面内バラツキ)**



10°Cの基準熱源を撮影



30°Cの基準熱源を撮影

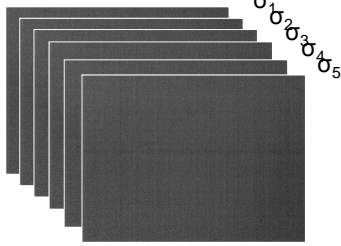
$$\text{NETD}_{\text{面内}} = \frac{30^\circ\text{Cの1フレームの標準偏差} = \sigma}{\text{輝度の平均値 } \bar{X}_{30^\circ\text{C}} - \text{輝度の平均値 } \bar{X}_{10^\circ\text{C}}} \div (30^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

防衛省規格 : NDS C0212Bより参照

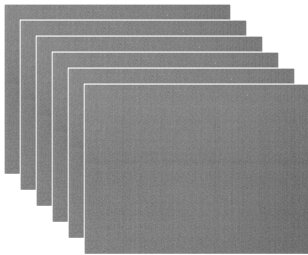
23 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

**NETD測定 2 (時間バラツキ)**



10°Cの基準熱源を32フレーム以上撮影



30°Cの基準熱源を32フレーム以上撮影

$$\text{NETD1} = \frac{\sigma_1}{\bar{X}_{30^\circ\text{C}} - \bar{X}_{10^\circ\text{C}}} \div (30^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) \quad \text{NETD2, NETD3, NETD4} \cdots \text{NETD32}$$

NETD<sub>時間バラツキ</sub> = 32個以上のNETDを求めて、平均値を計算する。  
又は、中央値を求める。

防衛省規格 : NDS C0212Bより参照

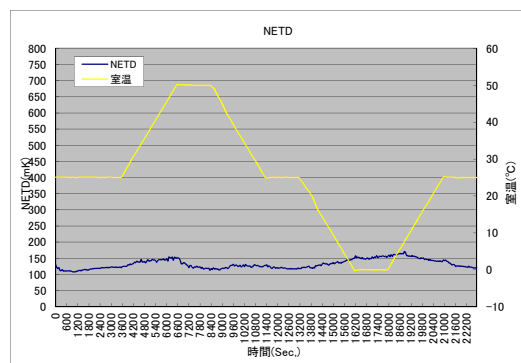
24 Vision Sensing Co.,Ltd.

## NETDの落とし穴

- NETD統一された規格で測定されていない。
- ↓
- メーカー間で測定方法が異なる。(公表されていない)
  - レンズの焦点距離、F値、材質
  - 画像処理を行った後の値かどうか
  - 被写体温度は、何度か？
  - カメラの環境温度は、何度か？
  - 時間軸か平面バラツキか？
  - シャッターを切った後か？

F:1.0とF:0.8のレンズでは、NETDが1.5倍ほど良くなる。

## 温度勾配時のNETD



勾配試験時のNETD特性

カメラの環境温度を0～50℃まで変化させ、その時のNETDを測定  
 温度勾配は、0.5℃/分にて上昇  
 環境温度が変化している時と環境温度が低い時にNETDが悪くなる。  
 車載アプリケーションでは、重要な評価項目である。

2016/09/16

## 赤外線カメラの簡単な評価方法



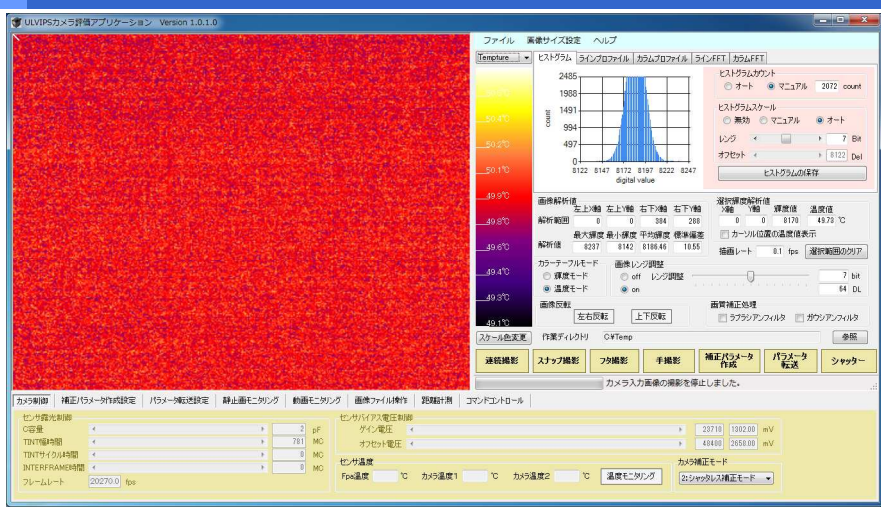

- ・カメラの前を手でふさいだり、アルナイト処理された板や、黒色に塗装された金属をレンズの直前で撮影する。
- ・その画面上に表示される最大温度と最小温度の差を記録する。
- ・その温度の1/6がそのカメラのNETDの目安になる。

展示場でこれを行うと・・・

27 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

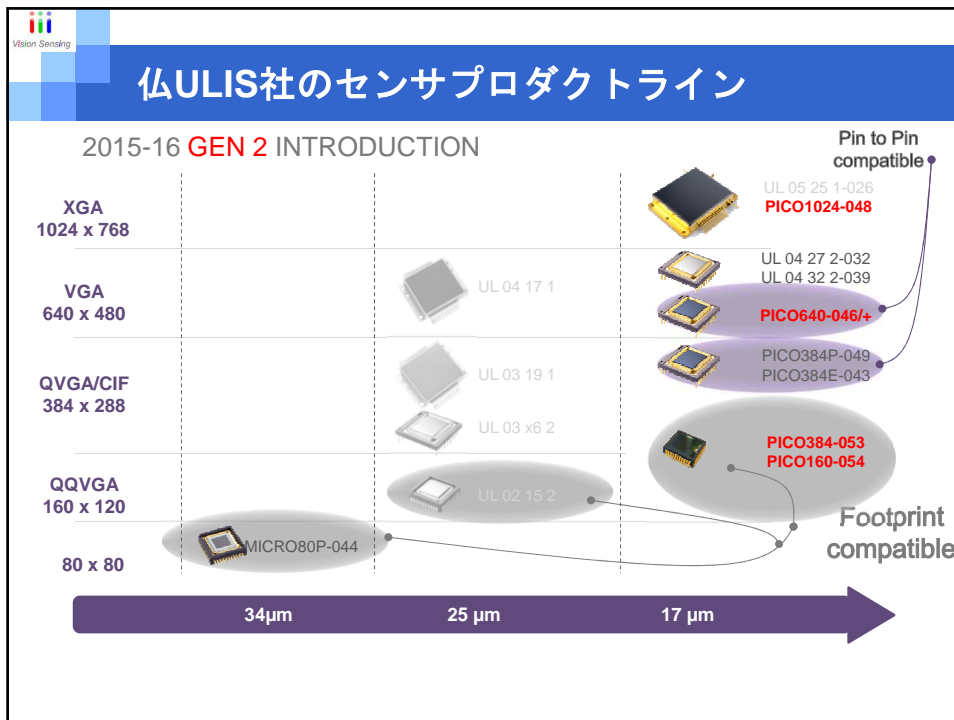
## 赤外線カメラの簡単な評価方法



NETD = 10.55/(SiTF=80) =132mK

最大温度-最小温度=1.12°C ⇒  
NETD=1.12/6=187mK

28 Vision Sensing Co.,Ltd.



2016/09/16

## 遠赤外線センサーメーカー

名前	国籍	特徴	センサータイプ
三菱電機	日本	日本で最初にセンサーを開発	ダイオード型
NEC	日本	民生用で国内1位	Vox
FLIR(Indigo)	USA	Indigow買収しセンサー開発	Vox
ULIS	フランス	どの国でも入手しやすいセンサー。特に日本は、easy	アモルファスシリコン
DRS	USA	軍事専門から産業用に	Vox
BAE FairChild	USA	Full High Sensor	Vox
L-3	USA	ホンダレゾエント®に搭載されたセンサー	焦電型・アモルファスシリコン
SCD	イスラエル	国内では、比較的入手しやすい	Vox
I-3	韓国	最近、韓国で独自に開発されたセンサー	Ni-ox
Zhejiang Dali Technology	中国	中国で開発されたセンサー	アモルファスシリコン

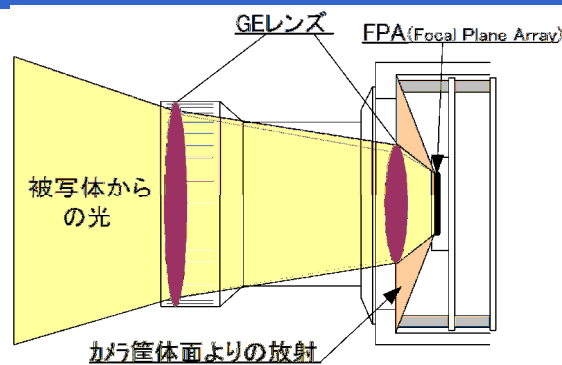
30

Vision Sensing Co.,Ltd.

## 本日のアジェンダ

1. 遠赤外線の物理特性
2. 遠赤外線センサとカメラ性能
3. 補正技術
4. 周辺技術（レンズ・特記事項）  
 <休憩>
5. 製品紹介
6. 適用事例紹介  
 <休憩>
7. カメラデモンストレーション

## 赤外線カメラにおける補正要素



- ・ FPA(Focal Plane Array)に入る遠赤外線 =  
 被写体が発する光 + カメラ筐体内部からの光 + FPAの温度 + レンズの温度変化成分  
 被写体が発する光のみを取り出す必要がある。
- ・ 各画素間のバラツキ オフセットとゲインの両方がばらついている



2016/09/16

## 画素ごとの感度ばらつき

- ディテクタ出力のままでは使える画像にならない

輝度値  
16383  
0

ターゲット温度 (°C)

画素ごとのゲイン・オフセットがバラバラな状態

- ボロメータの特性上、入出力特性は直線にならない
- 画素ごとにゲイン・オフセットが異なる

↓

画素ごとに補正係数を持つ必要がある = 補正テーブル

33 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## 補正方法 (1) : オフセット補正方法

GEレンズ FPA(Focal Plane Array)

黒体面 (温度均一面)  
黒アルマイト処理したアルミ板

標準偏差 = 422

1.5°Cの黒体面を撮像した画像(12bit)

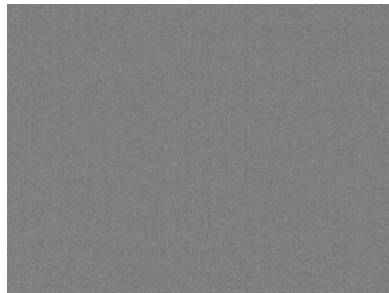
標準偏差 = 5.2

オフセット処理した画像(12bit)

各画素の補正データ:  $C(x,y) = \text{画像全体の平均輝度} - 15^\circ\text{Cの各画素輝度}(x,y)$

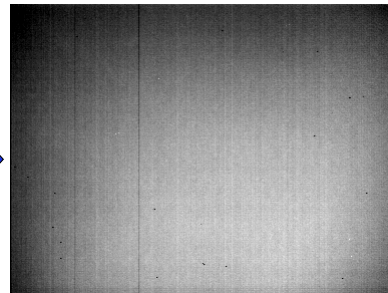
34 Vision Sensing Co.,Ltd.

## 補正方法（１）：オフセット補正の問題点



15°Cの被写体でオフセット補正実施画像(8bit)

SiTF : 68.7dig/°C  
 標準偏差 : 5.5(1画像全体)  
 NETD : 80mK



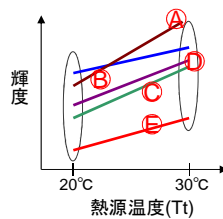
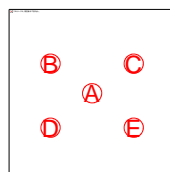
50°Cの被写体を撮影した画像(8bit)

SiTF : 68.7dig/°C  
 標準偏差 : 60.0(1画像全体)  
 NETD : 873mK

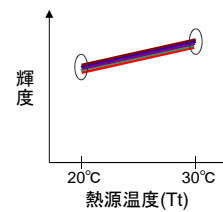
オフセット補正だけでは、被写体の温度変化に対応できない

## 補正方法（２）：２点間温度補正

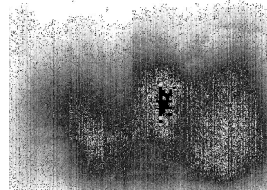
❖ 低温と高温の画像から、各画素のゲインとオフセットを補正



バラツキを  
小さく



可視光画像



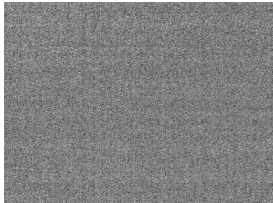
遠赤外線画像(補正前)



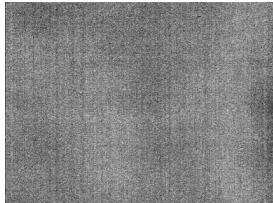
遠赤外線画像(補正後)

2016/09/16

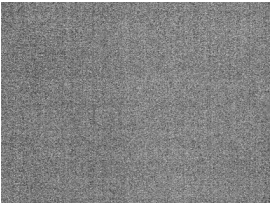
## 補正方法（2）：2点間温度補正とその問題点



15°Cの画像(6bit)  
標準偏差=5.9




32.5°Cの画像(6bit)  
標準偏差=6.7

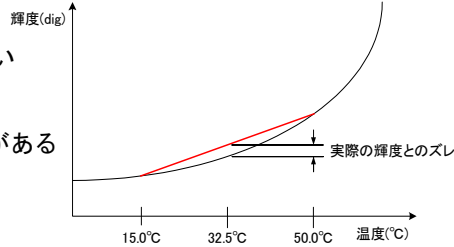


50°Cの画像(6bit)  
標準偏差=6.1

- ・ 15°Cと50°Cの黒体で2点間補正を実施
- ・ 15°Cと50°Cの黒体の画像は、ノイズが少ない
- ・ 間の32.5°Cの黒体の画像は、ノイズが増加
- ・ 出力特性が直線上でないために発生
- ・ 2点間補正は、温度範囲を狭くする必要がある



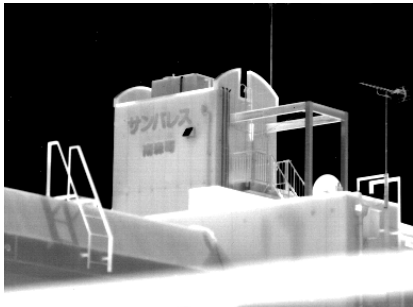
線形補正・n次曲線補正が必要



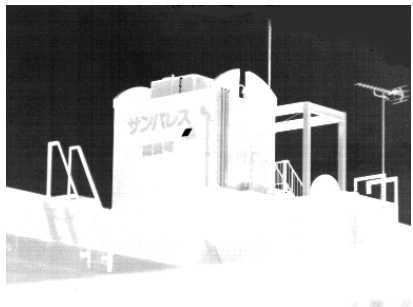
37 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## 補正方法（2）：2点間温度補正とその問題点




補正直後画像



環境温度変化後画像

環境温度の変化により前の補正テーブルが使えなくなる



変化後の環境温度下で、再度シャッタを作動し補正テーブルを作成

38 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## 補正方法（3）：TECとシールド温調

■ 温度ドリフト要因であるFPA温度と、筐体温度成分が入射しないようなシールドを設置し、この温度を一定化する

The diagram illustrates the internal components of a camera: a GE lens, an FPA (Focal Plane Array), and the surrounding structure. A blue arrow points to a cross-sectional view of a shielded housing. This housing includes a lens, a shield that cannot be fully protected (シールドで防御できない), a TEC (Temperature Control Element), and a temperature control shield (温調シールド) within the housing body (筐体).

- 周囲温度の変動による影響を少なくできるが100%ではない。
- 2点間（多点間）温度補正で環境温度変化にある程度対応可能
- レンズ成分の放射変動に対する補正は別途必要

39 Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## 補正方法（4）：シャッタレス補正

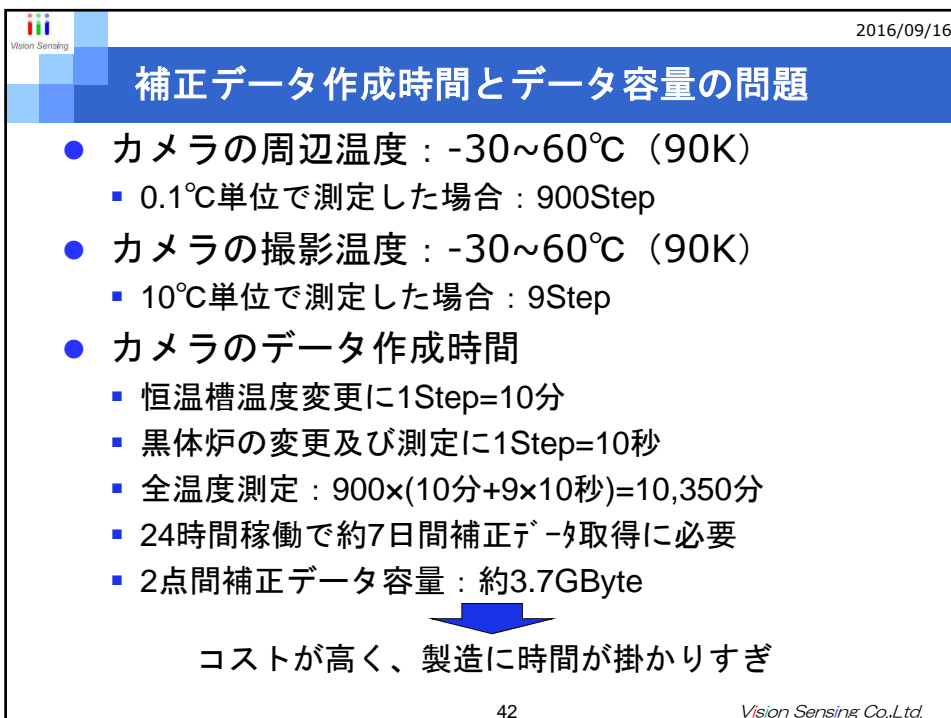
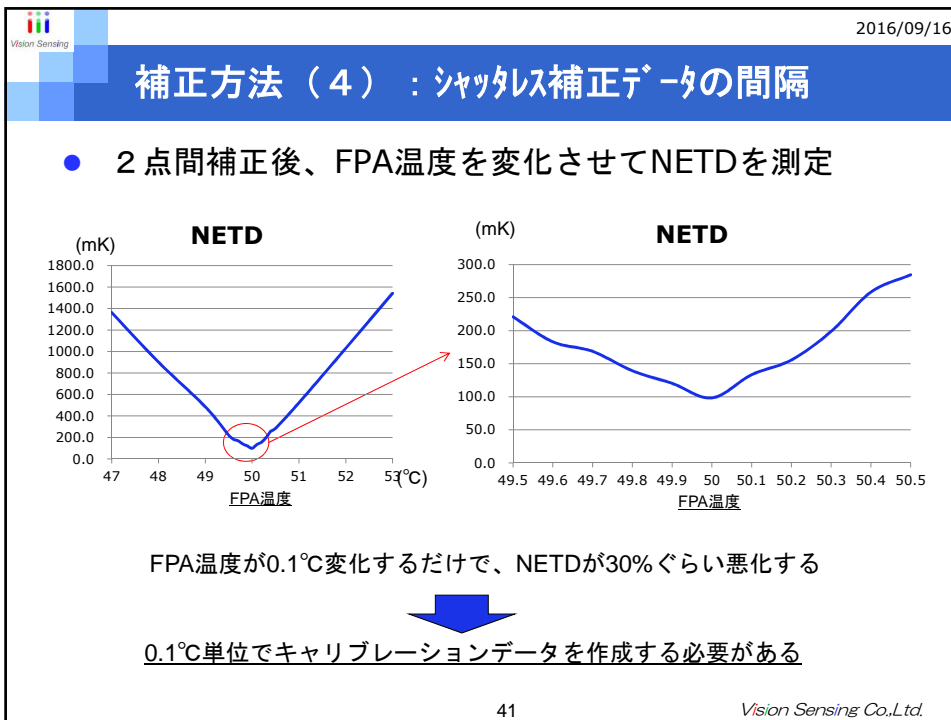
■ 周囲温度ごとに2点間温度補正テーブルをあらかじめ取得しFPA温度などカメラ温度に合わせてテーブルを切替る

The first graph, titled '直線性試験結果' (Linearity Test Results), plots '検出平均値(°C)' (Detected Average Value in °C) on the y-axis (ranging from -10 to 90) against 'ターゲット温度(°C)' (Target Temperature in °C) on the x-axis (ranging from 0 to 80). It shows five data series for different resolutions: R=0°C (red), R=10°C (blue), R=20°C (green), R=30°C (cyan), and R=40°C (magenta). All series show a strong positive linear correlation.

The second graph, titled '室温変化時のNETD特性' (NETD Characteristics with Room Temperature Change), plots 'NETD(mK)' on the y-axis (ranging from 0 to 400) against '室温(°C)' (Room Temperature in °C) on the x-axis (ranging from 0 to 50). The data points show a relatively flat line around 100 mK, indicating stable NETD performance across the temperature range.

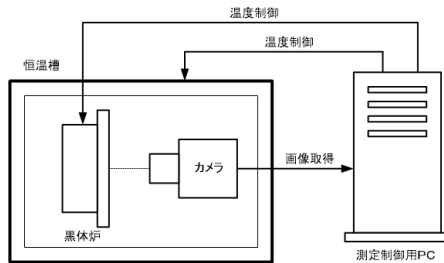
- 周囲温度の変動にかかわらず、温度計測が可能
- 補正テーブル群の作成=キャリブレーションに時間を要する

40 Vision Sensing Co.,Ltd.



## 補正方法（４）：シャッタレス補正

### ■ キャリブレーション装置

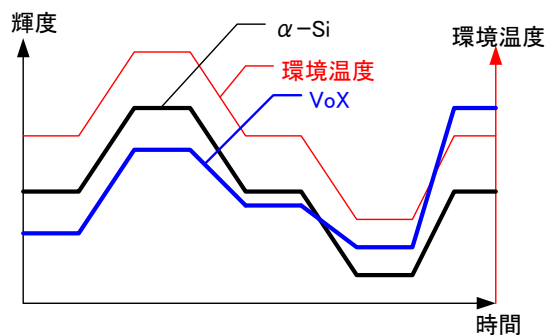


- 撮影温度範囲と環境温度範囲を入力すると、黒体炉と恒温槽の温度を自動で制御して画像を取得し、シャッタレステーブルを自動生成する。
- キャリブレーションを1カメラを約3時間程度まで短縮

## VoXとα-Siの違い

追加

	VoX	α-Si
抵抗値	100KΩ~1MΩ	1MΩ以上
構成要素	Vo,Vo2,Vo3	Si
温度再現性	悪い	良い
NETD	良い	悪い



VoXは、環境温度が変化して同一の環境温度に戻っても同じ輝度を出力しない



シャッタレス補正が困難

2016/09/16

## シャッタについて

シャッタ (NUC=Non-Uniformity Correction)

回転部

センサー部分

センサの全面を均一な温度面の板が覆う構造で、シャッターを稼働すると約0.5秒間画像が撮影できなくなる。不安定なVOxセンサーでは、センサの温度が変化すたびに、シャッターを閉じて補正を実施する。  
 車載ナイトビジョンカメラでは、この0.5秒の死角は、大きな欠点になる。

45

Vision Sensing Co.,Ltd.

2016/09/16

## 本日のアジェンダ

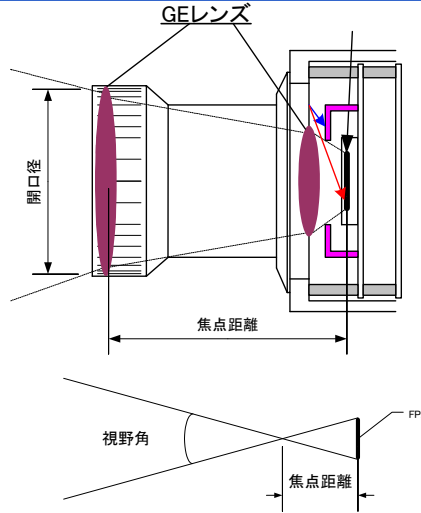
1. 遠赤外線<sup>①</sup>の物理特性
2. 遠赤外線センサとカメラ性能
3. 補正技術
4. 周辺技術 (レンズ<sup>②</sup>・特記事項)
  - <休憩>
5. 製品紹介
6. 適用事例紹介
  - <休憩>
7. カメラデモンストレーション

46

Vision Sensing Co.,Ltd.

## レンズについて

- F値について
  - 焦点距離／開口径
  - F値が小さいと
    - 被写界深度が浅い
    - 明るくなる
    - NETDが良くなる
    - 値段が高くなる
  - F値が大きいと
    - 被写界深度が深い
    - ピントが合いやすい
    - 値段が安くなる



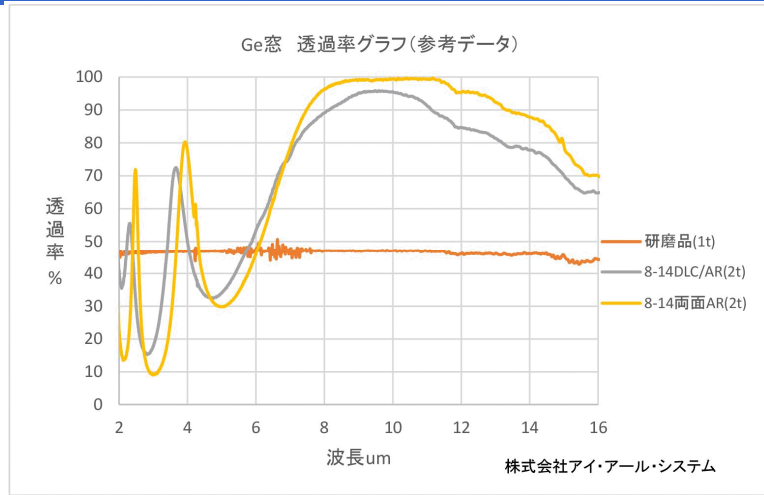
## レンズ材料

材料	価格	加工方法	耐環境性能	透過率	毒性
ゲルマニウム	高い	切削・研磨	高い	高い	なし
ZnS	安い	高温プレス 切削	普通	普通	なし (ガラス化後)
カルコゲナイド	安い	高温プレス 切削	普通	普通	なし (ガラス化後)
ZnSe	普通	切削	普通	普通	あり
シリコン	安い	切削、 エッチング	高い	低い	なし
ダイヤモンド	超高価	研磨	高い	高い	なし

ナイトビジョンカメラは、量産性に優れ価格の安いZnSやカルコゲナイドレンズが適している。

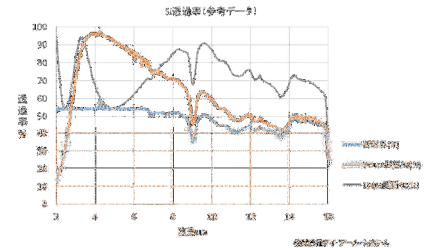
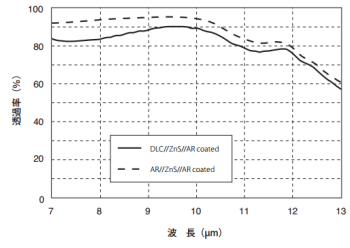
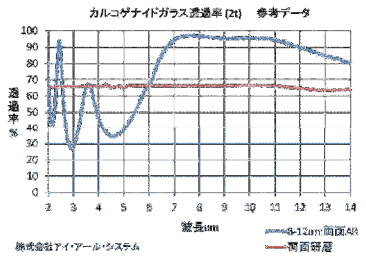
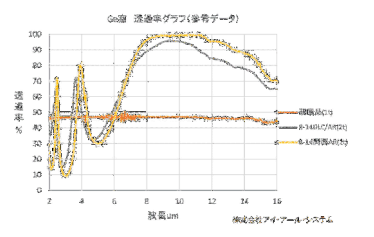


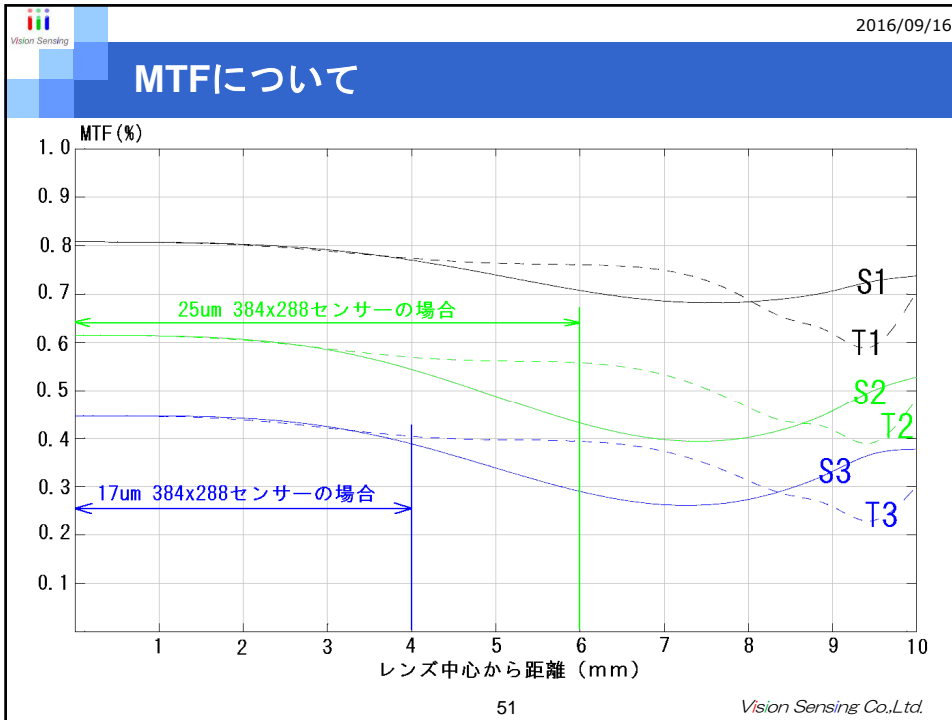
# レンズコートと透過率



AR=anti-reflective coating (反射防止膜)  
 DLC=Diamond-Like Carbon (ダイヤモンドに近い炭素膜)

# 材料による透過率の差





2016/09/16

## MTFについて2

被写体側

センサー側で1mmの中に白と黒の線を10組 (黒10本、白10本) になるように縞模様をレンズ前に撮像します。

1mm

センサー側

センサー側の白と黒の輝度比が被写体輝度比に比べてどのくらい変化したか。  
MTF縦軸は、この比の%を表します。

1mmの10組の場合は、 $1\text{mm} / 20 = 50\text{ }\mu\text{m}$ ピッチセンサーと同じ  
 1mmの20組の場合は、 $1\text{mm} / 40 = 25\text{ }\mu\text{m}$ ピッチセンサーと同じ  
 1mmの30組の場合は、 $1\text{mm} / 60 = 17\text{ }\mu\text{m}$ ピッチセンサーと同じ  
MTFの値が高い程高分解能のレンズとなる

52

Vision Sensing Co.,Ltd.

## 被写界深度について

$$\text{前方被写界深度} = \frac{\text{許容錯乱円径(mm)} \times \text{絞り値} \times \text{被写体距離(mm)}^2}{\text{焦点距離(mm)}^2 + \text{許容錯乱円径} \times \text{絞り値} \times \text{被写体距離(mm)}}$$

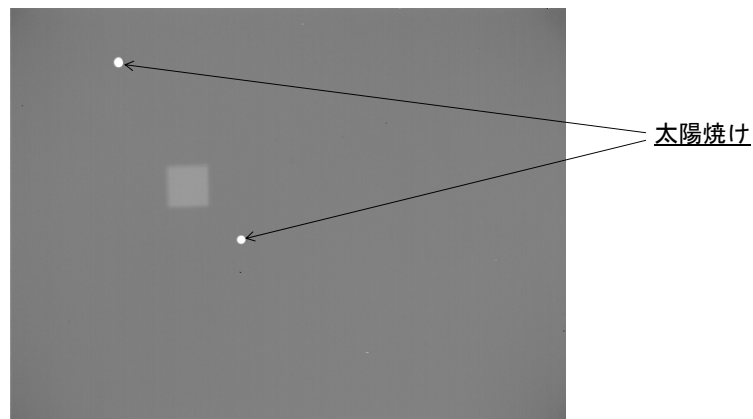
$$\text{後方被写界深度} = \frac{\text{許容錯乱円径(mm)} \times \text{絞り値} \times \text{被写体距離(mm)}^2}{\text{焦点距離(mm)}^2 - \text{許容錯乱円径} \times \text{絞り値} \times \text{被写体距離(mm)}}$$

分母が0の場合は、距離が $\infty$ （無限大）とします。

- ・ 許容錯乱円径は、センサーのピクセルピッチの1/2以下
- ・ レンズ焦点距離が短いほど被写界深度が長くなる
- ・ センサーピクセルピッチが小さくなると被写界深度が短くなる

ULVIPS-384A 17 $\mu$ mピッチ 焦点距離:13mm 絞り値:1.1の場合 許容錯乱外径=0.008mm  
20m先で焦点を合わせると10m $\sim$  $\infty$ までピントが合うことになります。

## 太陽によるFPAの焼け



センサーに電源が入ってなくても、FPA(Focal Plane Array)に太陽が入るとFPAにダメージが発生し、輝度が高い状態になる。



**遠赤外線カメラは、日中は、シャッターを閉じる必要がある**

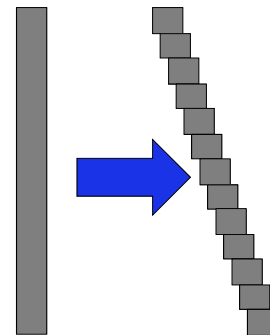
## ローリングシャッタ

### ● ローリングシャッタ

1Line目(0~110us)
2Line目(110~220us)
3Line目(220~330us)
...
287Line目(31,460~31,570us)
288Line目(31,570~31,680us)

: 30Frame/秒の場合

- ・1ライン毎に露光し画像化する
- ・1ライン目と2ライン目で時間的ズレが生じる



縦方向の画像は、  
カメラ移動速度によって  
斜めになった画像になる

検出画像処理側でこのズレを考慮して処理する必要がある

## 本日のアジェンダ

1. 遠赤外線の物理特性
2. 遠赤外線センサとカメラ性能
3. 補正技術
4. 周辺技術（レンズ・特記事項）

<休憩>

5. 製品紹介
6. 適用事例紹介

<休憩>

7. カメラデモンストレーション