

1,600万コマ／秒のビデオカメラ の課題と展望



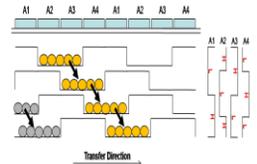
エドワード・マイブリッジ
が撮影した世界最初の
高速映像(1878年)

第7回学際領域における分子イメージングフォーラム
平成23年11月2日(水) 近畿大学 江藤剛治

江藤が外部からいただいた動画 (by courtesy of ...が
ついているもの等)については動画ファイルを添付して
いないので動きません。

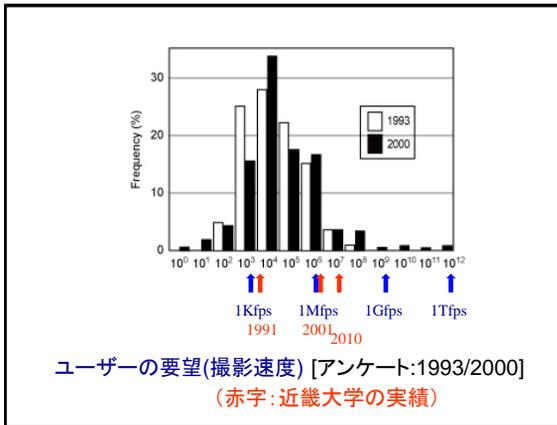
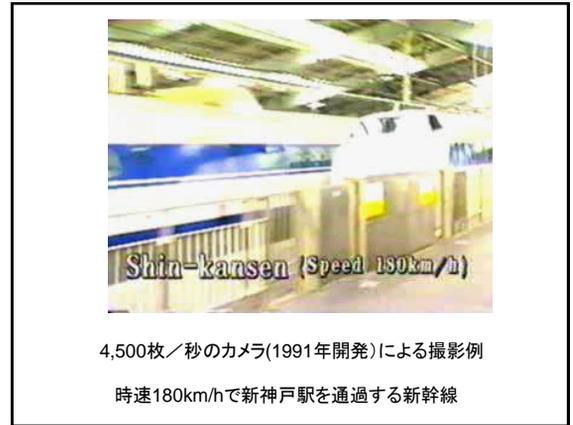
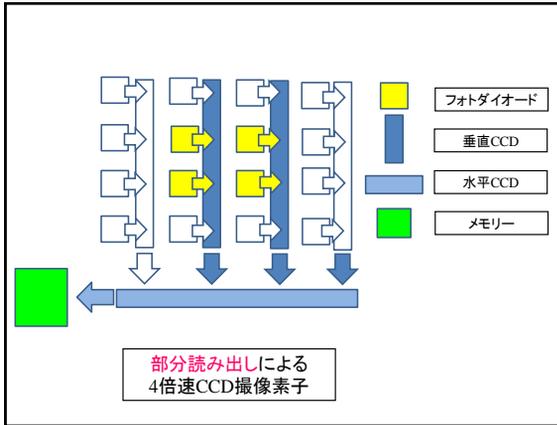
ビデオカメラの高速化

4相駆動CCDによる 信号の転送



通常のCCD撮像素子

並列読み出しによる高速化の例
4倍速CCD撮像素子



近畿大学における高速度ビデオカメラの開発

1991年 4,500コマ/秒のビデオカメラ
2001年 100万コマ/秒のビデオカメラ
2004年 100万コマ/秒のカラービデオカメラ
(NHKの開発に協力)
2010年 1,600万コマ/秒のビデオカメラ

100万枚/秒以上の超高速ビデオカメラの用途

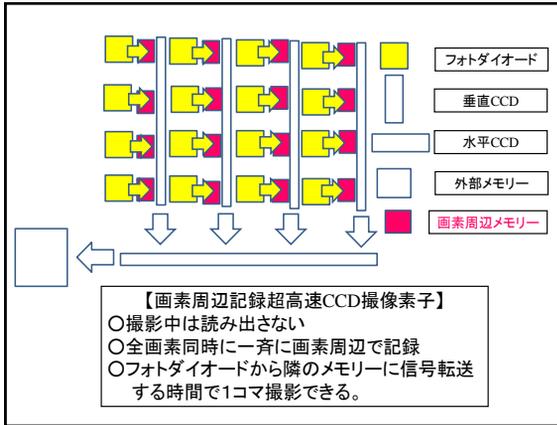
燃焼*(エンジン開発)、衝突・破壊(材料開発、宇宙開発)、
微粒子生成*(インクジェット)、加工(レーザーアブレーション、溶射)、
超音速流れ(掃除機、燃糸機械、ハードディスク)、
細胞手術*(穿孔、キャビテーション生成)、
生体の情報伝達(神経系、細胞間)、放電(雷)等々

超高速撮影の原理

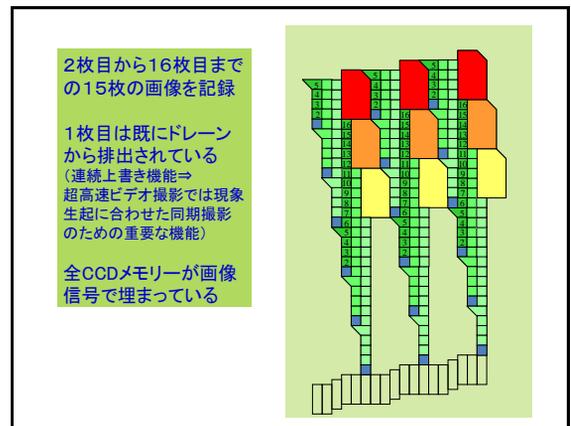
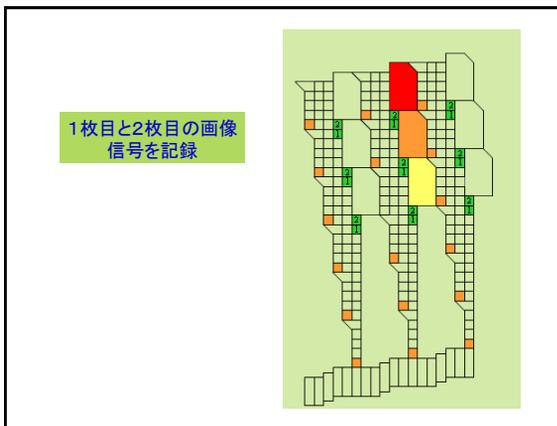
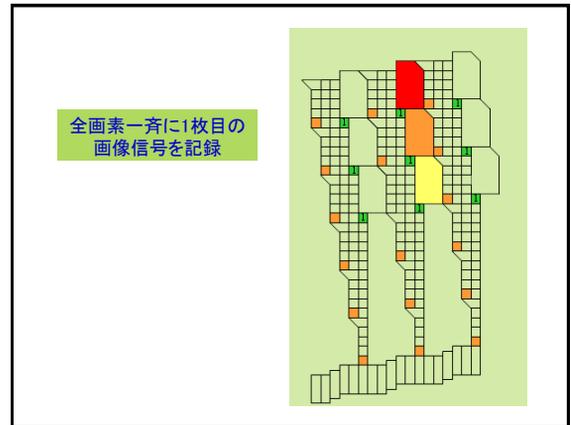
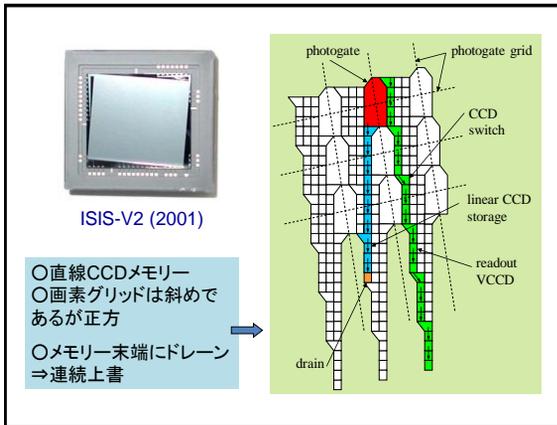
画素周辺記録型撮像素子 ISIS: In-situ Storage Image Sensor
[全画素がメモリーを持ち、全画素並列記録=古いアイデア]

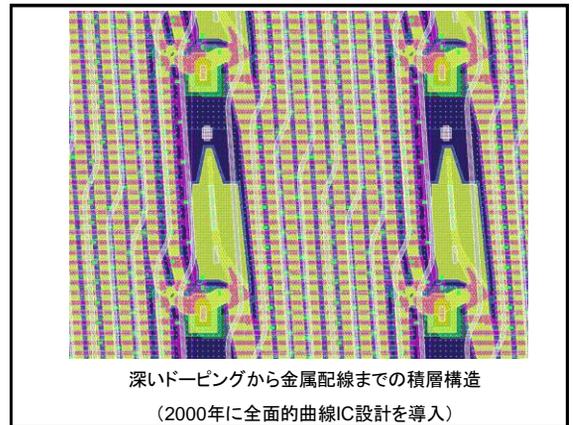
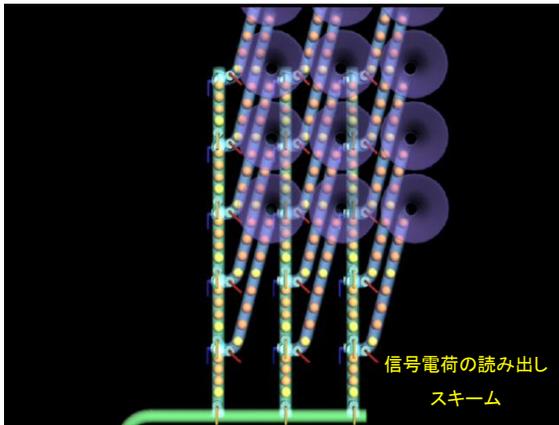
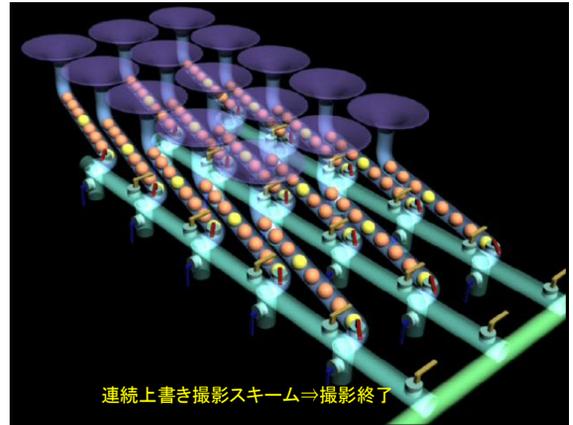
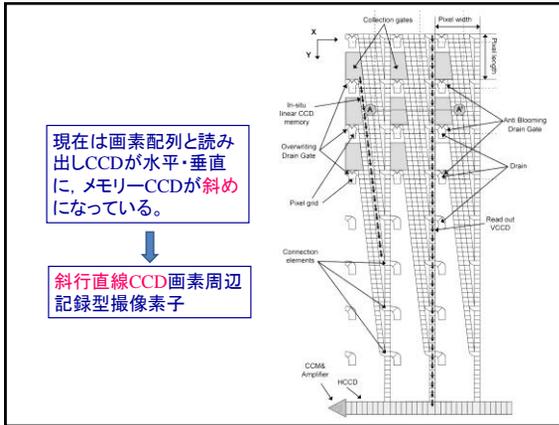
↓

斜行直線CCD型ISISの発明
[最も単純で低ノイズのローカルメモリー]



どのようにして画素という小さな面積の中に
【低ノイズ・大容量・多数】
のメモリーを作り込むか？





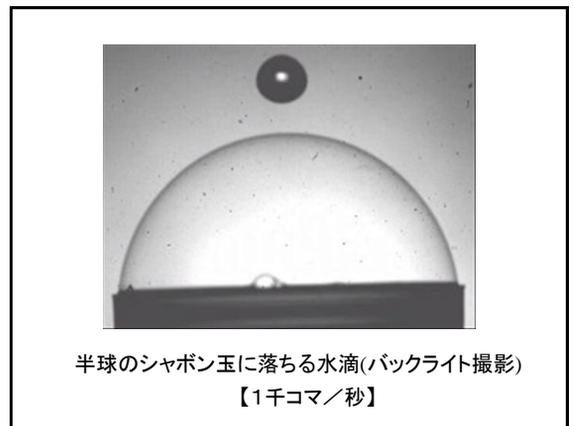
撮影速度を上げていくと今まで見えなかったものが次々に見えてくる

例: 半球のシャボン玉に水滴を落とす

1千コマ/秒: シャボン玉が割れず復元する

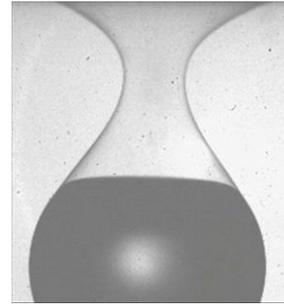
1万コマ/秒: 子どものシャボン玉ができる
水滴からジェットが噴出す

20万コマ/秒: 見てのお楽しみ





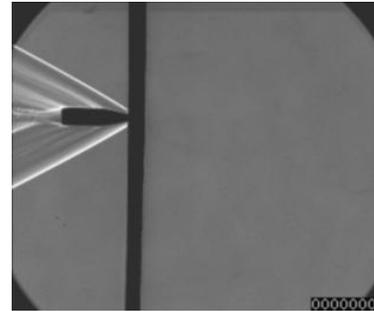
撮影速度を10倍にすると【1万コマ/秒】



さらに20倍、もとの200倍にすると【20万コマ/秒】

撮影例

	撮影速度(fps)	カメラ
板を貫く弾丸	500,000	ISIS-V2
シャボン玉	5,000	ISIS-V4
バシリスク	500	ISIS-V4
蚊の飛翔	8,000	ISIS-V4
落雷実験	1,000,000	ISIS-V4



板を貫く弾丸 (500,000 fps)
(by courtesy of Prof. Kleine)



シャボン玉 5,000枚/秒 ISIS-V4 で撮影

100万コマ/秒超のビデオカメラの課題

- 素子感度の向上
- 撮影支援技術の開発
- [ハードウェア]
 - ・低光損失光学系
 - ・長時間閃光ストロボ: Xenon, Laser, LED
 - ・高光強度プローブ
 - ・総合制御系
- [ソフトウェア]
 - ・ユーザーフレンドリー: Synchronization Technique
 - ・限界照明強度: 被写体、光学系、撮像素子

超高速バイオナノスコープ

(独)科学技術振興機構
先端計測分析技術・機器開発事業

平成16年10月～平成22年3月

[**超高感度** × **超高速ビデオカメラ**]

+ [特殊生物顕微鏡] を開発]

顕微鏡下の超高速撮影では
「なぜ超高感度が必要か？」

倍率が10倍⇒速度が10倍 × 発光面積1/100⇒
1,000倍の[光 × 感度]が必要

↓
倍率の3乗に逆比例

↓
対物レンズの倍率100倍では
100万倍の[光 × 感度]が必要

100万コマ/秒超のビデオカメラの課題

○素子感度の向上

○撮影支援技術の開発

[ハードウェア]

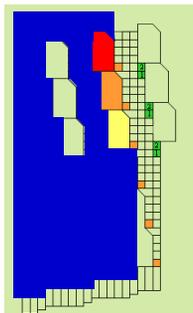
- ・低光損失光学系
- ・長時間閃光ストロボ: Xenon, Laser, LED
- ・高光強度プローブ
- ・総合制御系

[ソフトウェア]

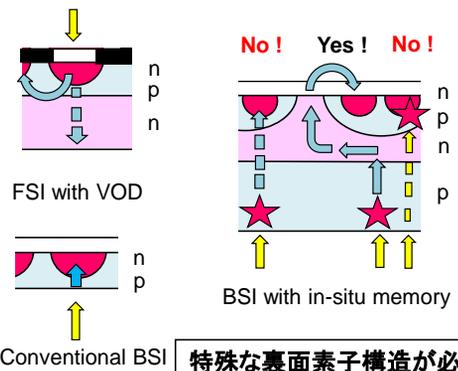
- ・ユーザーフレンドリー: Synchronization Technique
- ・限界照明強度: 被写体、光学系、撮像素子

【素子感度の向上】

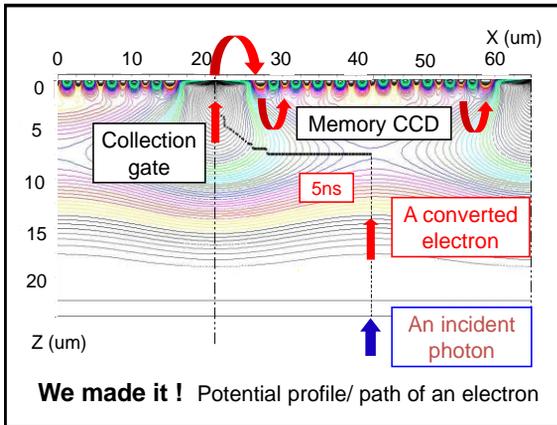
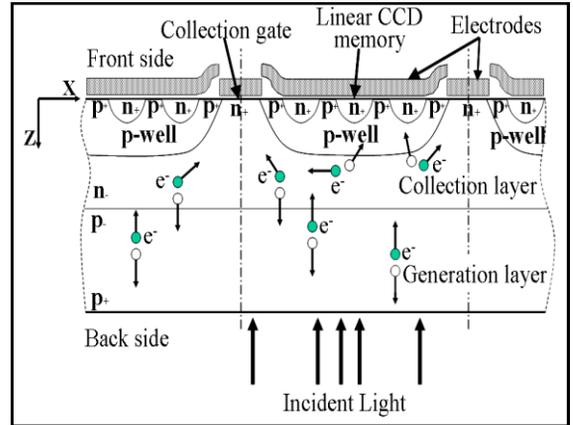
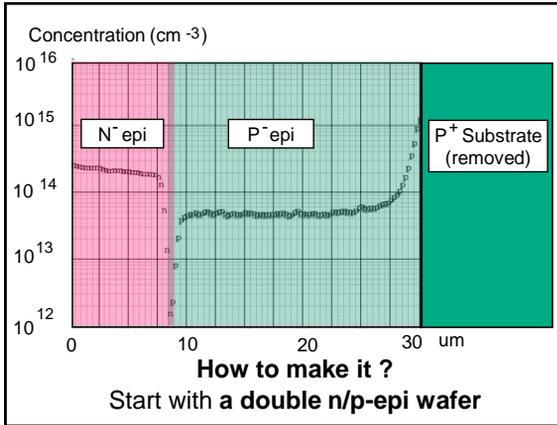
ISIS-V16
裏面照射 + 多段衝突イオン化増倍
BSI CCM(EM-CCD)



表面照射は開口率が小さい ⇒ 裏面照射



特殊な裏面素子構造が必要



- [Thick + Double n/p-Epi] wafer
の上の表面照射素子の利点
1. p-well中に機能回路を入れることができる。
[光が到達しない(厚い)] +
[信号電子が迷入しない(p-well on n-epi)]
 2. n-wafer上の撮像素子の設計図をそのまま使える。
 3. 空乏化のための表面バイアス電圧を低くできる。
 4. 表面からの反射光による干渉が起こらない(厚い)
 5. 扱い易い(厚い)

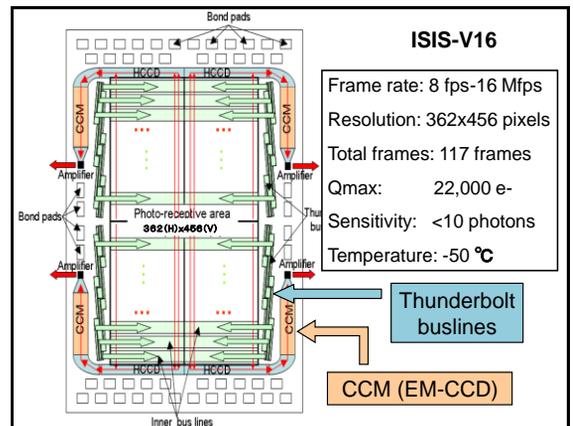
表面照射は高速化にも役立つ

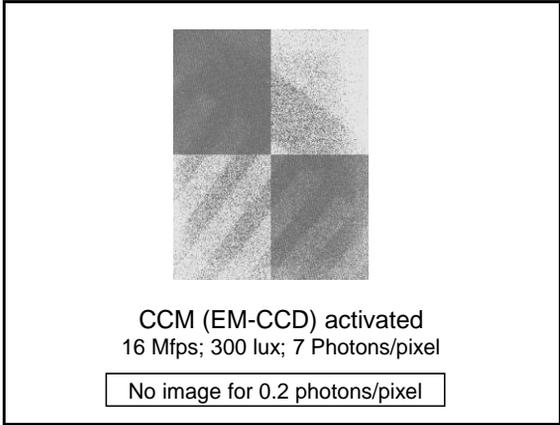
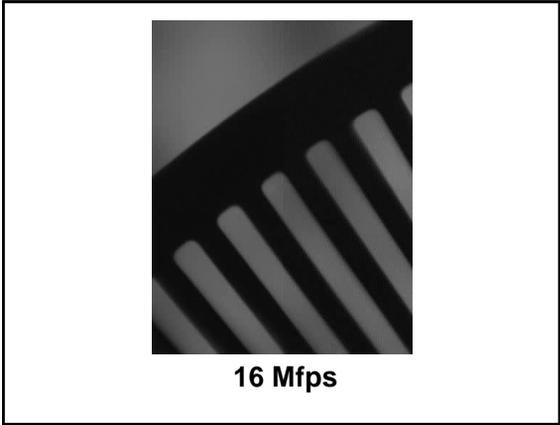
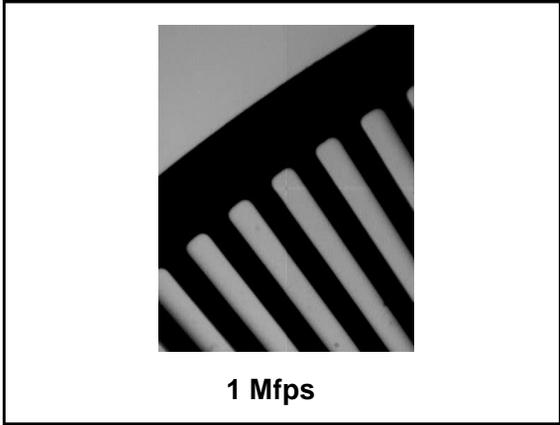
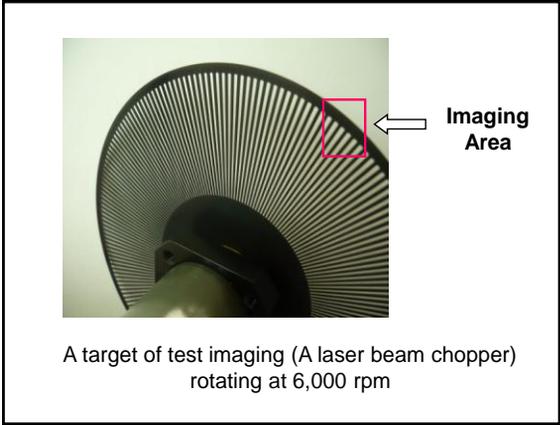
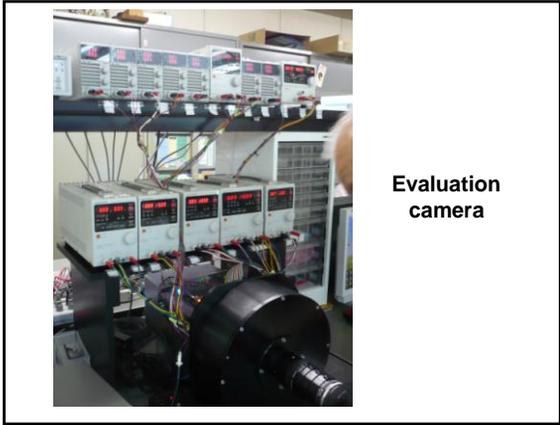
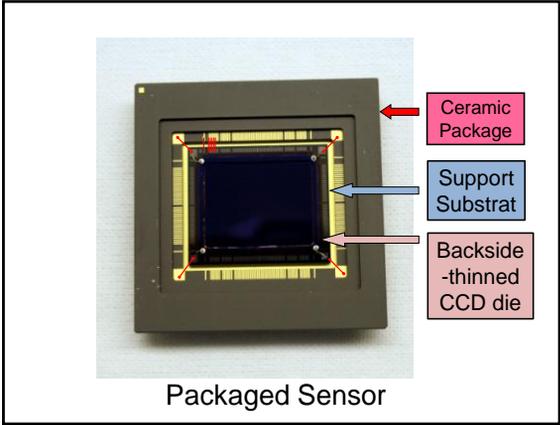
高感度 ← 開口率100%+高い量子効率80%

高速度 ← 表面側に自由な金属配線

↑

開口率の低下
画素の非均一性
を気にしなくて良い





100万コマ/秒超のビデオカメラの課題

- 素子感度の向上
- 撮影支援技術の開発

[ハードウェア]

- ・低光損失光学系
- ・長時間閃光ストロボ: Xenon, Laser, LED
- ・高光強度プローブ
- ・総合制御系

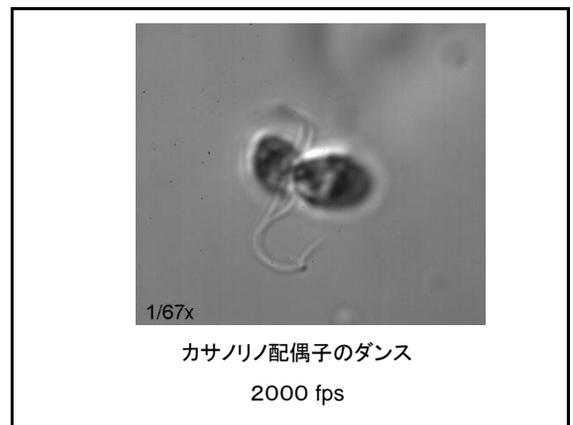
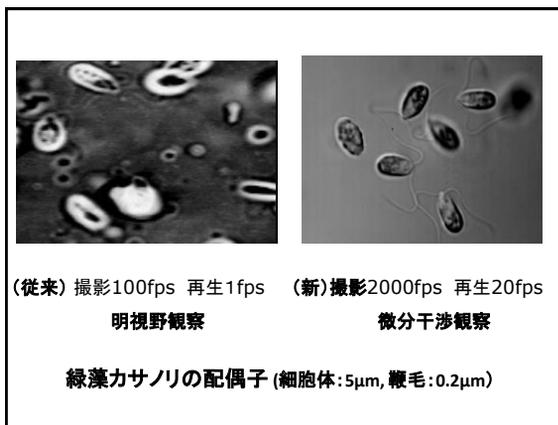
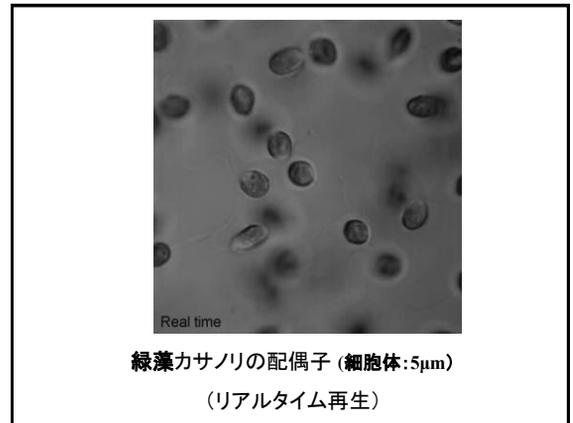
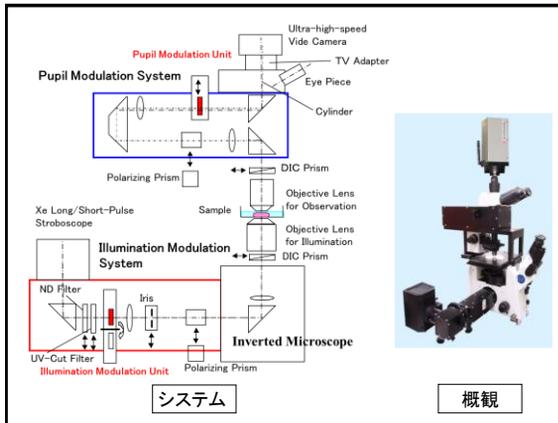
[ソフトウェア]

- ・ユーザーフレンドリー: Synchronization Technique
- ・限界照明強度: 被写体、光学系、撮像素子

【支援技術1: 低光損失光学系の例】

特殊生物顕微鏡

- 低光損失・無染色細胞観察・多機能
- 顕微鏡システムの改良だけで数100倍の明るさを達成



100万コマ／秒超のビデオカメラの課題

- 素子感度の向上
- 撮影支援技術の開発
- [ハードウェア]
 - ・低光損失光学系
 - ・長時間閃光ストロボ: Xenon, Laser, LED
 - ・高光強度プローブ
 - ・総合制御系
- [ソフトウェア]
 - ・ユーザーフレンドリー: Synchronization Technique
 - ・限界照明強度: 被写体、光学系、撮像素子

【支援技術2:長時間閃光ストロボ】

- 強い照明強度
- 速い立ち上がり・立下り
- 一定照明強度
- 照明時間と照明強度: 逆比例

支援技術2: 超高速ビデオ顕微鏡専用 長時間閃光ストロボ

市販の通常の [ショートギャップキセノンストロボ球] を使い、
専用電源を開発する

撮影条件設定中:

1パルス/秒で通常のストロボとして使う
⇒モニターを見ながら撮影条件を合わせる

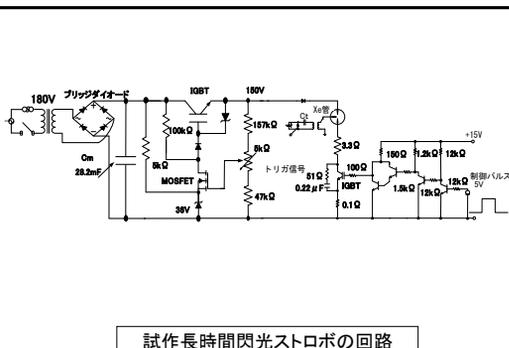
↓

撮影時:

撮影の間(1~30ms)にわたって安定強力発光する

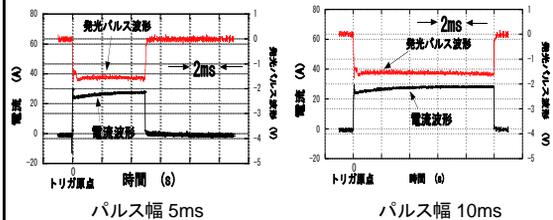
	水銀照明	長時間閃光ストロボ
ランプハウス	オリンパス U-LH100HGAPO (標準品)	左を改造
電源		自作
ランプ	Hgランプ (Gap長0.5mm) ウシオ電機 USH-1030L	Xeランプ (Gap長1.5mm, 閃光0.5μs用) 浜松ホトニクス L4641
パルス幅とパワー	連続照明 100 W (100Vx1A)	30 ms: 60 kW (600Vx100A) 1 ms: 180 kW (600Vx300A)

通常の水銀照明と試作長時間閃光ストロボの比較

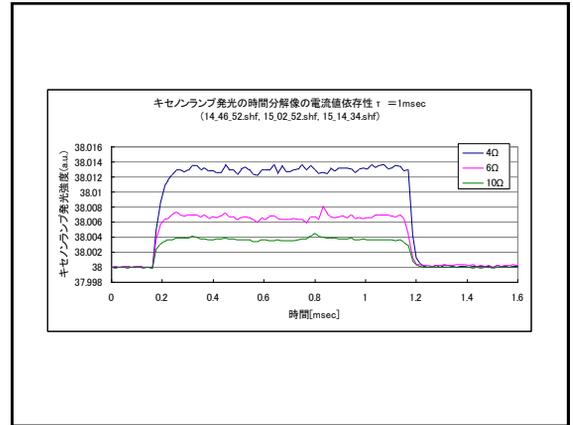
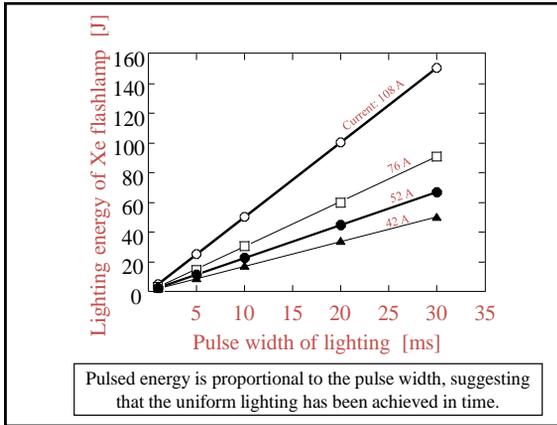


試作長時間閃光ストロボの回路

電流、発光波形の測定結果 (電流 I = 30 A)



・電流波形、発光パルス波形
→発光の直後、多少変動しているが、波高値はほぼ一定である



A xenon strobe developed produces brighter illumination than the usual Hg lamp.

Hg lamp (usual illumination) Xe lamp (illumination developed in this study)

Microscope objective: 60X, MCP gain: 50, with 488 nm filter
Frame frequency: 4.5 kHz, Exposure time: 10 ms

100万コマ/秒超のビデオカメラの課題

- 素子感度の向上
- 撮影支援技術の開発

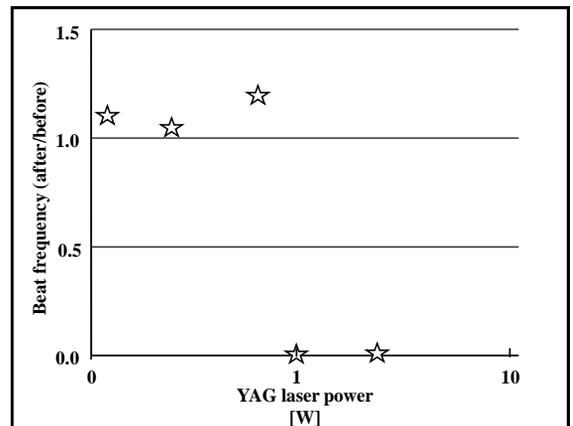
[ハードウェア]

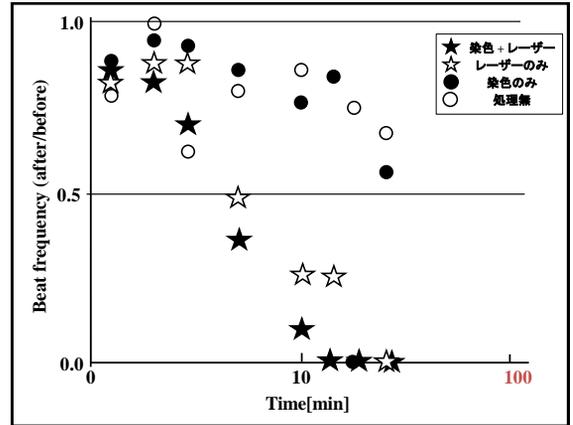
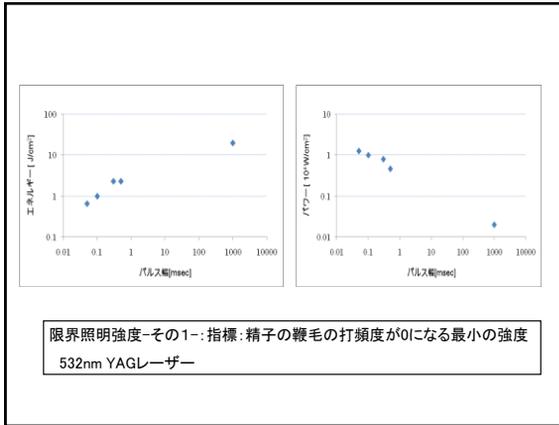
- ・低光損失光学系
- ・長時間閃光ストロボ: Xenon, Laser, LED
- ・高光強度プローブ
- ・総合制御系

[ソフトウェア]

- ・ユーザーフレンドリー: Synchronization Technique
- ・限界照明強度: 被写体、光学系、撮像素子

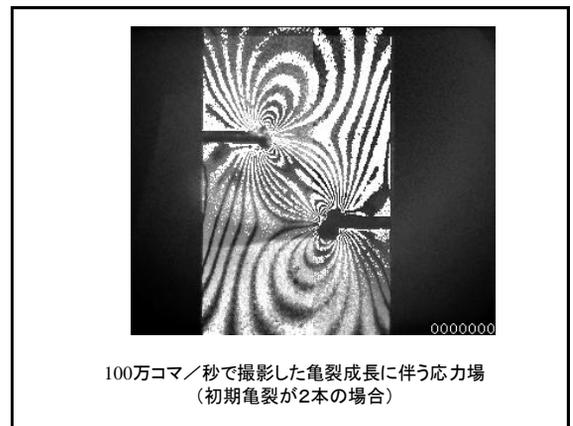
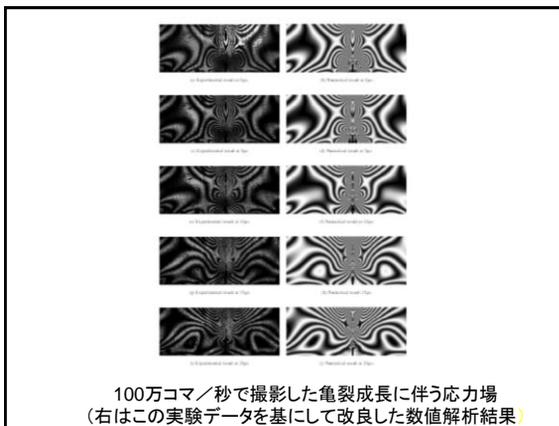
(a) 長時間閃光ストロボのハウジング
(b) マウス (c) 精子 (明視野撮影)





学術的成果の例

	カメラ
○き裂の進展	ISIS-V2
○脳神経系の信号伝播	ISIS-V12
○水滴の衝突による微小気泡の生成	ISIS-V12 ISIS-V16



学術的成果の例

- | | |
|------------------|----------|
| ○き裂の進展 | カメラ |
| ○脳神経系の信号伝播 | ISIS-V2 |
| ○水滴の衝突による微小気泡の生成 | ISIS-V12 |
| | ISIS-V16 |

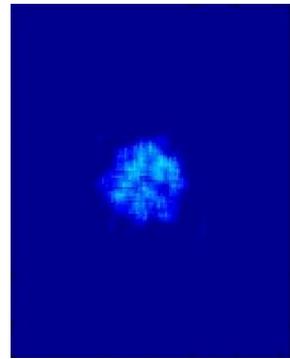
マウス培養神経細胞

Dorsal root
ganglion
(DRG) cells
後根神経節細胞

マウス後根神経節細胞
(培養)

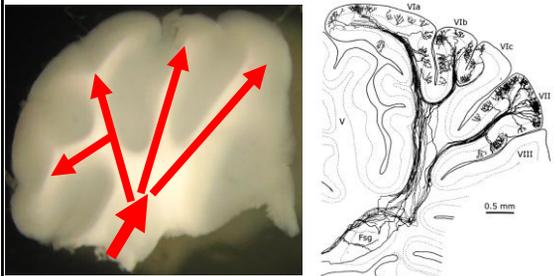


ガラス電極刺激

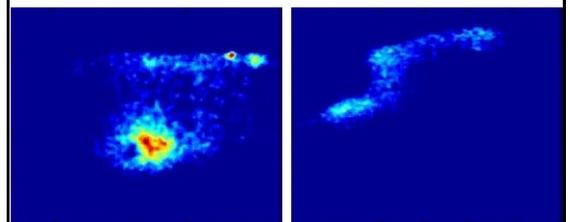


DRG細胞 Ca²⁺ の蛍光画像 撮影速度 62,500 kfps

マウス小脳スライス

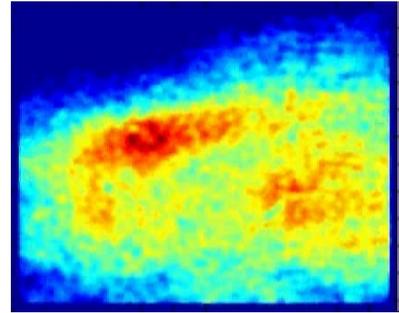
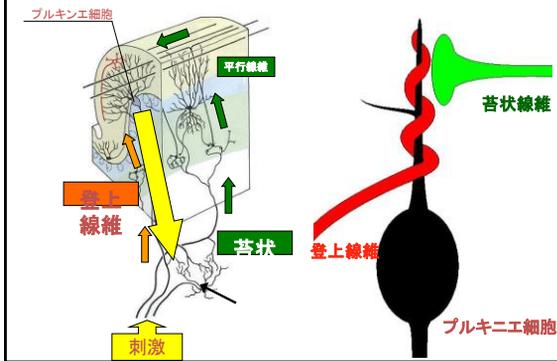


Sugihara *et al.*, 2001

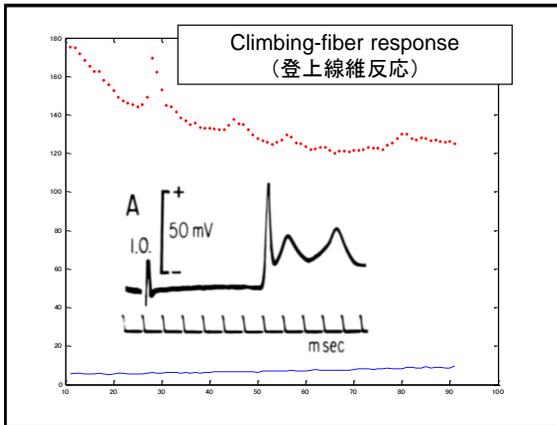


マウス小脳切片の蛍光観察例 Ca²⁺
撮影速度 16,000 fps

電気生理学との対応：登上線維反応

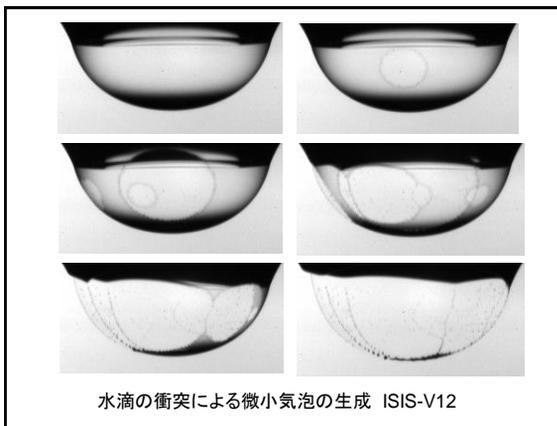


マウス小脳切片の蛍光観察例 Ca²⁺
撮影速度 16,000 fps



学術的成果の例

- | | |
|------------------|----------|
| | カメラ |
| ○き裂の進展 | ISIS-V2 |
| ○脳神経系の信号伝播 | ISIS-V12 |
| ○水滴の衝突による微小気泡の生成 | ISIS-V12 |
| | ISIS-V16 |



水滴の衝突による微小気泡の生成 ISIS-V12

100万コマ/秒超のビデオカメラの発展

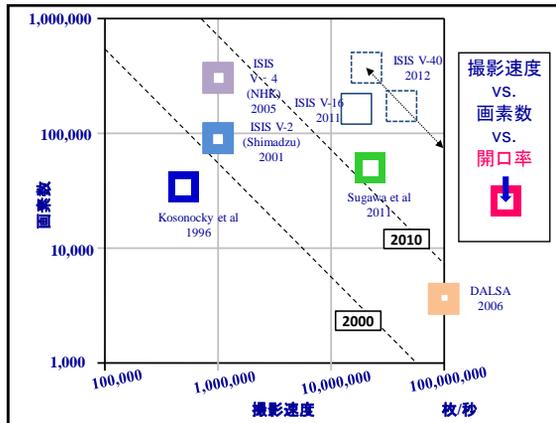
【新しい素子】

- さらなる高速化: ISIS-V40
- 画素周辺記録型CMOS超高速撮像素子: 須川他
- 画像信号積算素子: Hybrid CMOS/CCD ISAS
- 赤外線超高速ビデオカメラ

ISIS-V40

画素数	撮影速度	連続撮影枚数
17万画素	4千万コマ/秒	234コマ
34万画素	2千万コマ/秒	117コマ
34万画素	2,000コマ/秒	∞

開口率	量子効率
100%	80%



100万コマ/秒超のビデオカメラの発展

【新しい素子】

- さらなる高速度化: ISIS-V40
- 画素周辺記録型CMOS超高速撮像素子: 須川他
- 画像信号積算素子: Hybrid CMOS/CCD ISAS
- 赤外線超高速ビデオカメラ

画素周辺記録型CMOS超高速撮像素子: 須川他

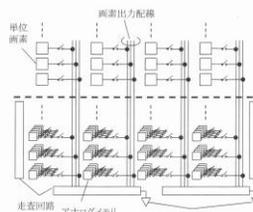


図1: 高速CMOSイメージセンサの概略構成図

素子構造

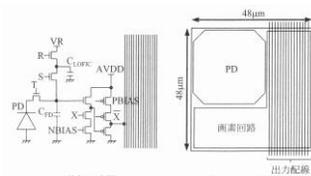


図2: プロトタイプ高速CMOSイメージセンサ画素の等価回路図と概略レイアウト図

画素構造

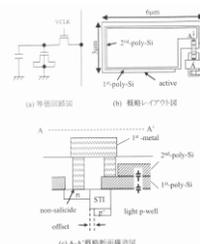


図4: プロトタイプ高速CMOSイメージセンサの記憶メモリの等価回路図、概略レイアウト図、横断断面構造図

メモリー構造(PIPメモリー)

100万コマ/秒超のビデオカメラの発展

【新しい素子】

- さらなる高速度化: ISIS-V40
- 画素周辺記録型CMOS超高速撮像素子: 須川他
- 画像信号積算素子: Hybrid CMOS/CCD ISAS
- 赤外線超高速ビデオカメラ

画素周辺記録型CMOS超高速撮像素子

CCD型との比較

利点

- 低消費電力
- 長連続書き時間
- 強い入射光に強い

課題

- やや高ノイズ(とくに冷却時)

100万コマ/秒超のビデオカメラの発展

【新しい素子】

- さらなる高速度化: ISIS-V40
- 画素周辺記録型CMOS超高速撮像素子: 須川他
- 画像信号積算素子: Hybrid CMOS/CCD ISAS
- 赤外線超高速ビデオカメラ

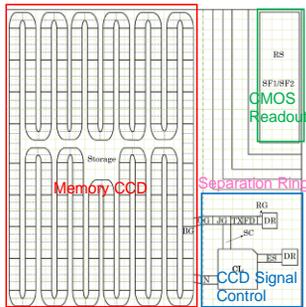
積算型超高速撮像素子

Hybrid CMOS/CCD ISAS
(ISAS: Image Signal Accumulation Sensor)

画素周辺記録型と並列・部分読み出し型の融合

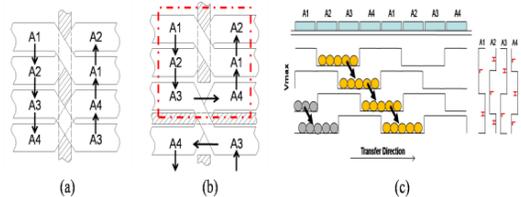
CCD型とCMOS型の融合

画像信号積算機能の導入

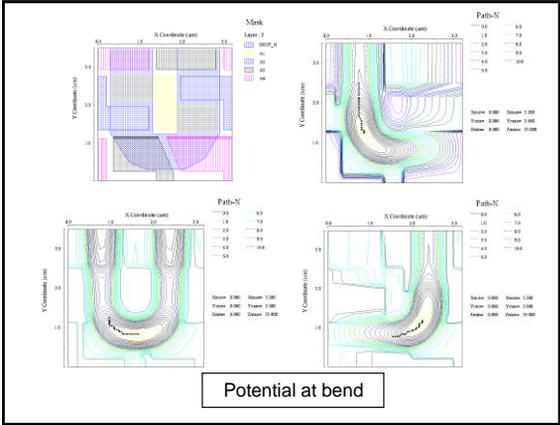
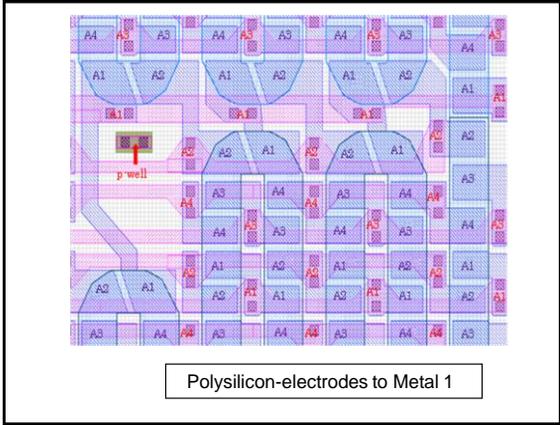
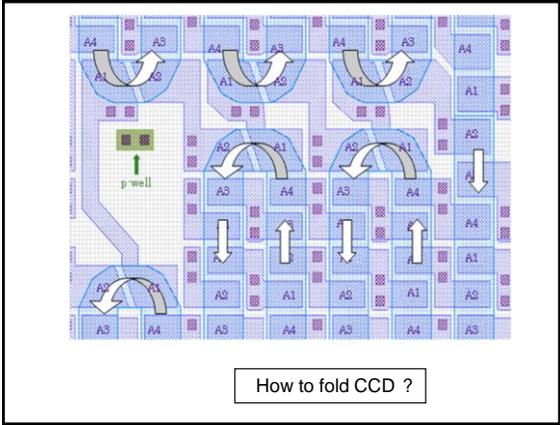
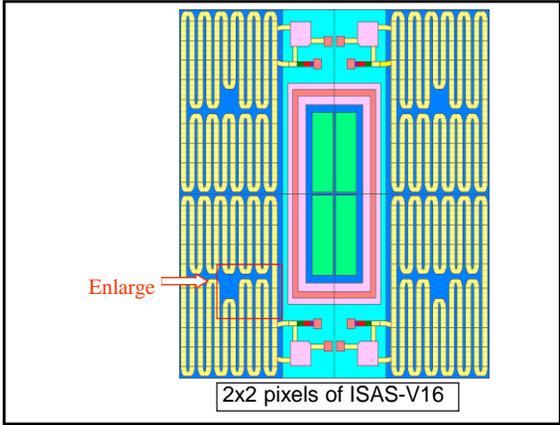
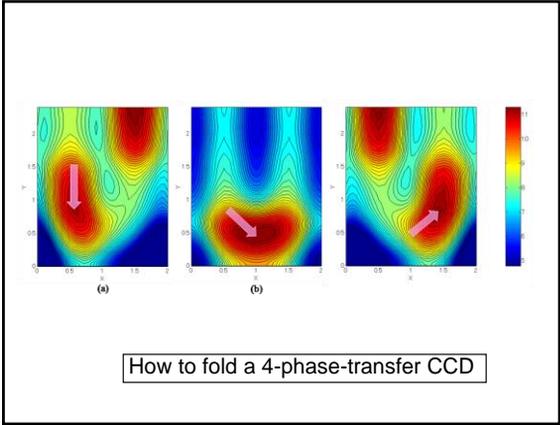


1A: Proof of a Hybrid ISAS
 BS: Row Selector, SF: Source Follower Amplifier, CL: Collection Gate, DE: Drain
 IN: Input Gate, ES: Electronic Shutter Gate, SC: Short Cut Gate, BG: Barrier Gate
 OG: Output Gate, JG: Junction Gate, TG: Transfer Gate, FD: Floating Diffusion,
 RG: Reset Gate

1 pixel of ISAS-V1



How to fold a 4-phase-transfer CCD



100万コマ/秒超のビデオカメラの発展

【新しい素子】

- さらなる高速化: ISIS-V40
- 画素周辺記録型CMOS超高速撮像素子: 須川他
- 画像信号積算素子: Hybrid CMOS/CCD ISAS
- 赤外線超高速ビデオカメラ

100万コマ／秒超のビデオカメラの発展

【先端計測技術への応用】

- X線回折像への適用
- Imaging TOF MS
- Pulse Neutron Radiography
- 超高速TEM
- シリコン内観察, 他

ありがとうございました