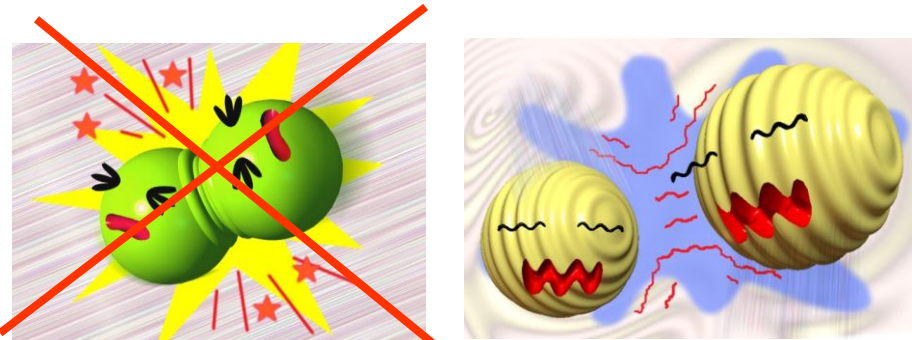


アナログASICによるプラズマ波動観測器の超小型化とその応用
-京都大学生存圏研究所の取り組み-

京都大学 生存圏研究所
小嶋 浩嗣

衛星による宇宙空間でのプラズマ波動計測



Space plasmas are collisionless.

宇宙プラズマはcollisionless plasma
粒子はkinetic energyを衝突ではなく
プラズマ波動を介して交換している。

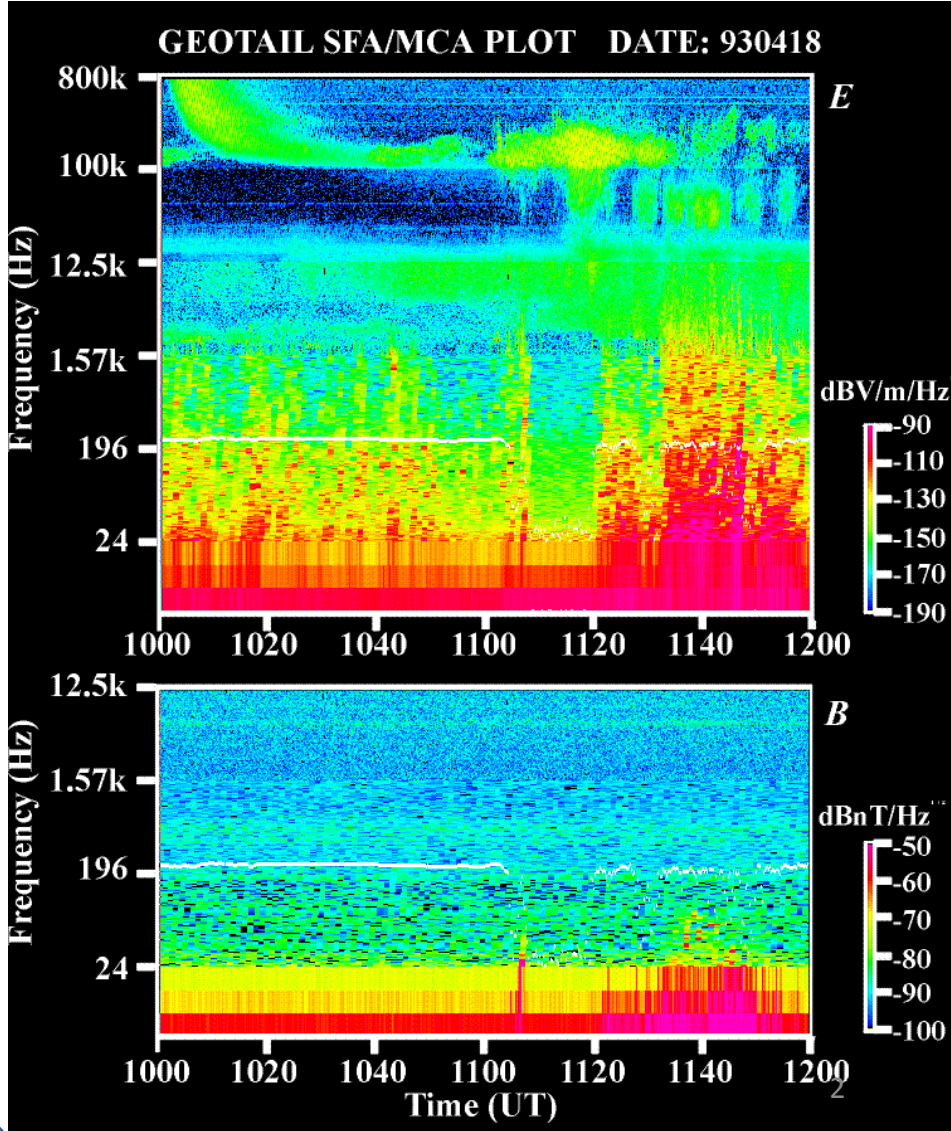


プラズマ波動を計測することでその場で発生している物理過程を知ることができる。



プラズマに乱れが発生すると必ずプラズマ波動が発生する。

GEOTAIL衛星による観測例(上が電界、下が磁界)
時間毎の各周波数毎のスペクトル強度が色で現されている



科学衛星に搭載されるプラズマ波動観測器

プラズマ波動観測器は、高性能受信器と高感度電場・磁場センサーの組み合わせ
受信器:

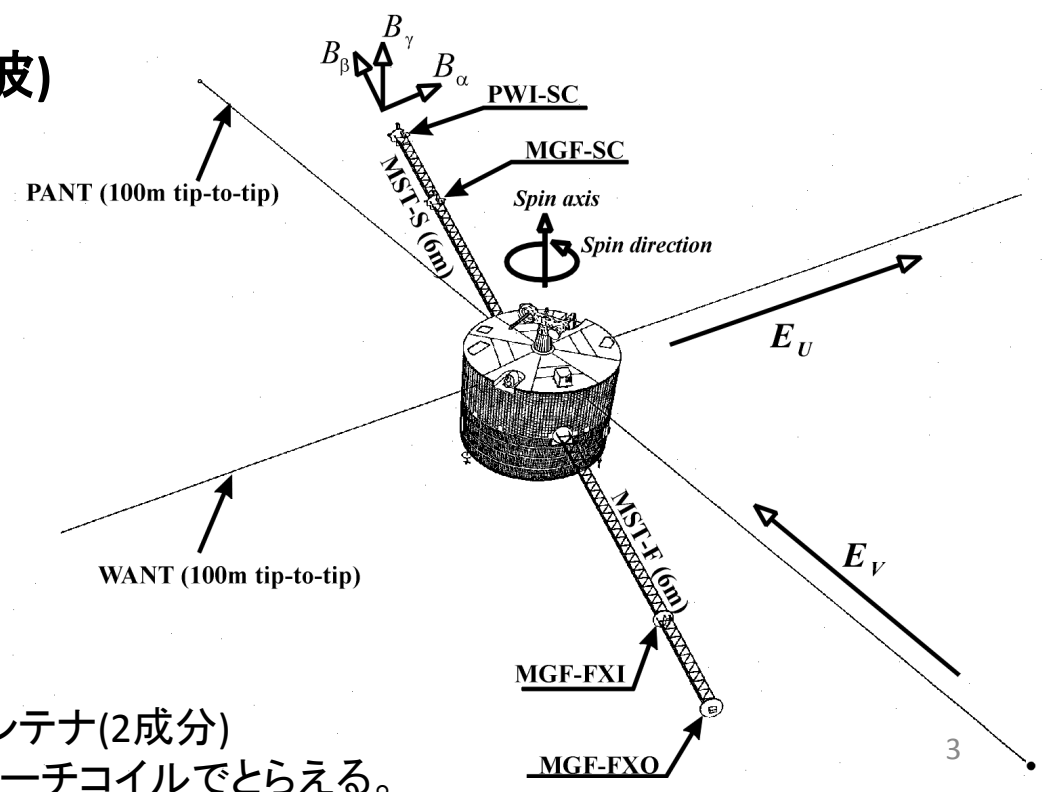
信号: 電界(直交3(2)成分)/磁界(直交3成分)
周波数: 0Hz to 10MHz (典型的な受信器の場合)

センサー:

電界: 長いワイヤダイポール(30m~100m)
磁界: サーチコイル(低周波)
ループアンテナ(高周波)

出力データ:

スペクトル受信器
周波数スペクトル
波形捕捉受信器
波形



GEOTAIL衛星の外観:

電界は100m長のダイポールアンテナ(2成分)
磁界は、6mブーム先端の3軸サーチコイルでとらえる。

プラズマ波動受信器におけるアナログ回路

プラズマ波動受信器のアナログ回路部は、他の観測器に比較して装置全体に対して大きな割合を占める

- ・ センサーでpickupした微弱な信号を捉えるために低ノイズである必要がある
 - Low noise amplifierが必要
- ・ 微弱な信号をA/Dのレベルに引き上げるため大きなゲインアンプが必要
 - High gain amplifierが必要
- ・ 上記の要件を満たすため、ある程度帯域を絞ってアンプする必要がある
 - 各種filterが必要
- ・ 電磁界を定量的に捉えるために最大で6系統の受信器が必要 (Ex, Ey, Ez, Bx, By, Bz)
 - ほぼ同じ規模の回路 x 6必要

通常よく言われる「デジタル化による小型化」だけでは、装置全体の小型化は不可能



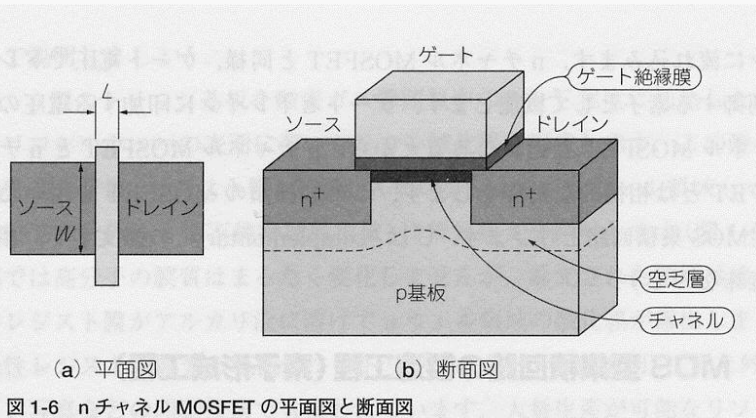
アナログ回路の小型化がbreakthroughをもたらす

回路のアナログASIC化: A4基板を数mm角のチップ内に実現

アナログASICとは

- MOS上に自分たちでひとつひとつ、MOSFETを数mmのチップ内に設計・構築

特性がでるチャンネル長 L , 幅 W を決定しながら設計

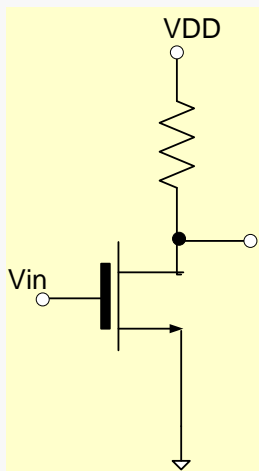


$$I_D \sim \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2,$$

$$\beta = \frac{W}{L} \mu C_{ox}, \mu: \text{移動度 (使用するプロセスにより決まる)}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}, \epsilon_{ox}: \text{酸化膜誘電率}, t_{ox}: \text{酸化膜厚}$$

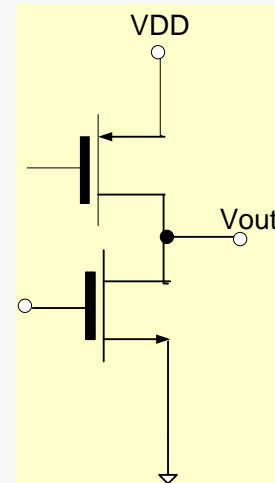
- 基本は、MOSFETのみで回路を構築 (R, Cは使いにくい)



例えば、普通のソース接地回路も

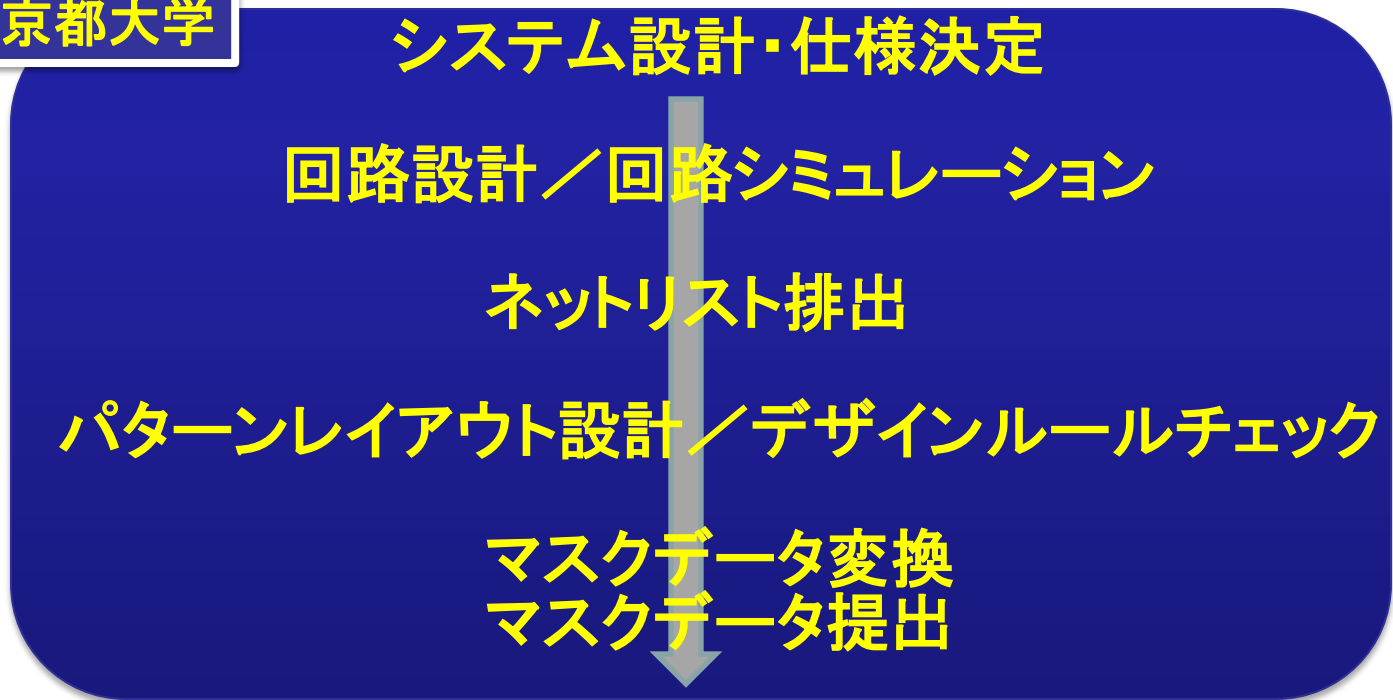
出力コンダクタンスの活用

$$g_o = \frac{1}{r_o} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}$$

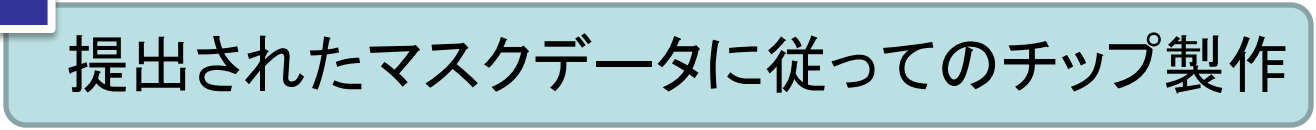


アナログASIC開発手順

京都大学



メーカー



京都大学



プラズマ波動受信器二つのタイプ(相補的役割)

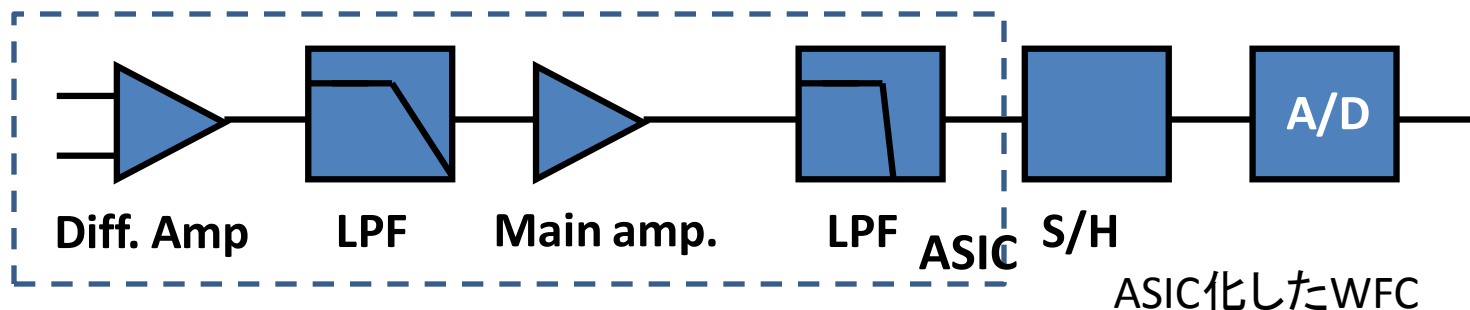
波形捕捉型(WFC: Wave-Form Capture)

特徴

- ・観測波形をそのままサンプリングしてデータを伝送
- ・非線形波動を捉えるのに最適。GEOTAIL衛星では新現象の発見も。
- ・突発的な現象を分解することが可能
- ・回路が比較的単純である。
- ・デジタル部でFFTをかけるとスペクトルも得られる

欠点

- ・データ量が膨大となるため、連続観測ができない
- ・高速サンプリングのA/Dを用いる必要があるため、消費電力が大きい
- ・帯域を極端に制限できないのでゲインを高く設定できない。
- ・同じ理由で、ある帯域に大きな信号があるとそれで装置が飽和して他の現象がみえなくなることがある
- ・ゲインをあげることができず帯域も絞れないためS/Nが悪い



ASIC化したWFC

プラズマ波動受信器二つのタイプ(相補的役割)

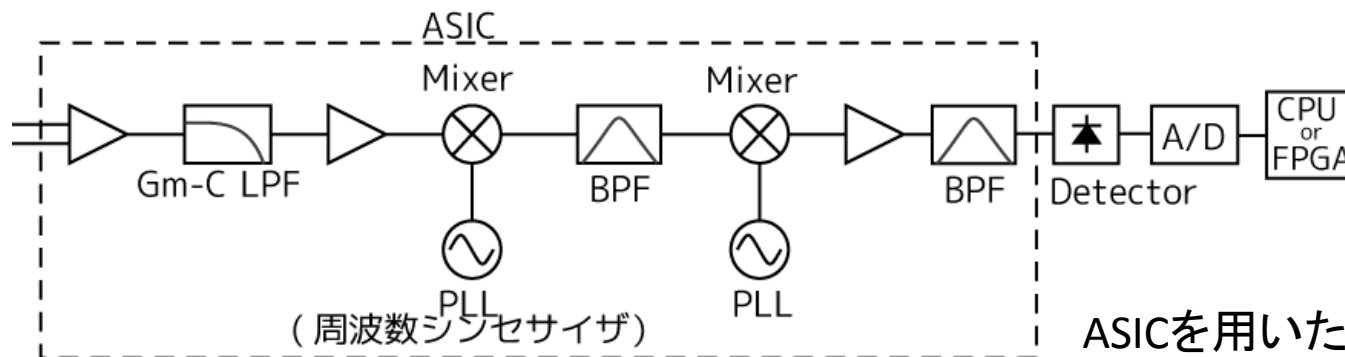
スペクトル解析型(cf. SFA: Sweep Frequency Analyzer)

特徴

- ・周波数をダウンコンバージョンし狭帯域にしてからアンプしてスペクトルを得る
- ・データ量が少ないため連続観測を行うことができ、オーバービューデータとしても活用できる
- ・**狭帯域に絞ってから増幅するのでS/Nがよい。**
- ・**別の周波数帯に大きな波動があっても影響を受けにくい。**

欠点

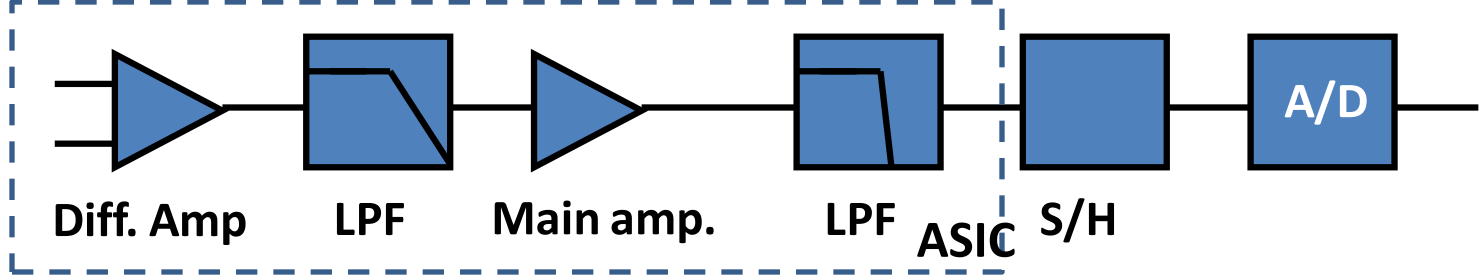
- ・波形がsinusoidalではない非線形波動を分離できない。
- ・ダウンコンバージョンを行うためのアナログ回路規模が大きい
- ・PLLやFilterなど回路の安定性を保証する必要がある。
- ・観測周波数をstep上に変化させていくため時間分解能が悪い
- ・これらの欠点のため最近の軽量化必要ミッションでは搭載されていない



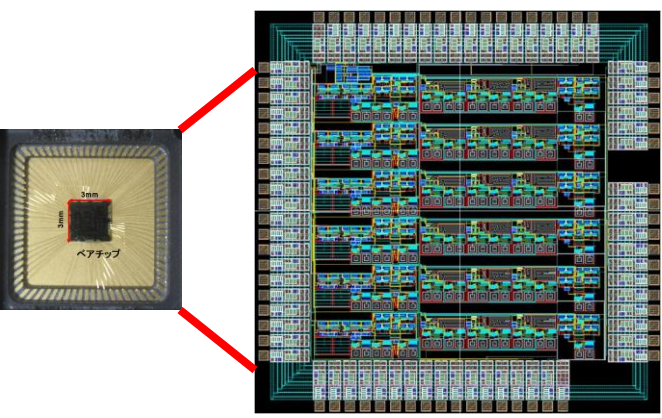
ASICを用いた新型SFA(開発中)⁸

京都大学におけるアナログASIC開発状況(I)

波形捕捉型プラズマ波動受信器チップの開発

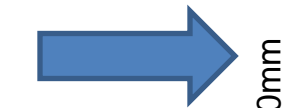


- ・必要となる、差動アンプ、各種LPF、ゲイン切り替え付きメインアンプを設計
- ・これらを組み合わせた波形捕捉型のチップを開発
- ・電磁界6成分を同時計測できるチップを5mm角内に実現可能

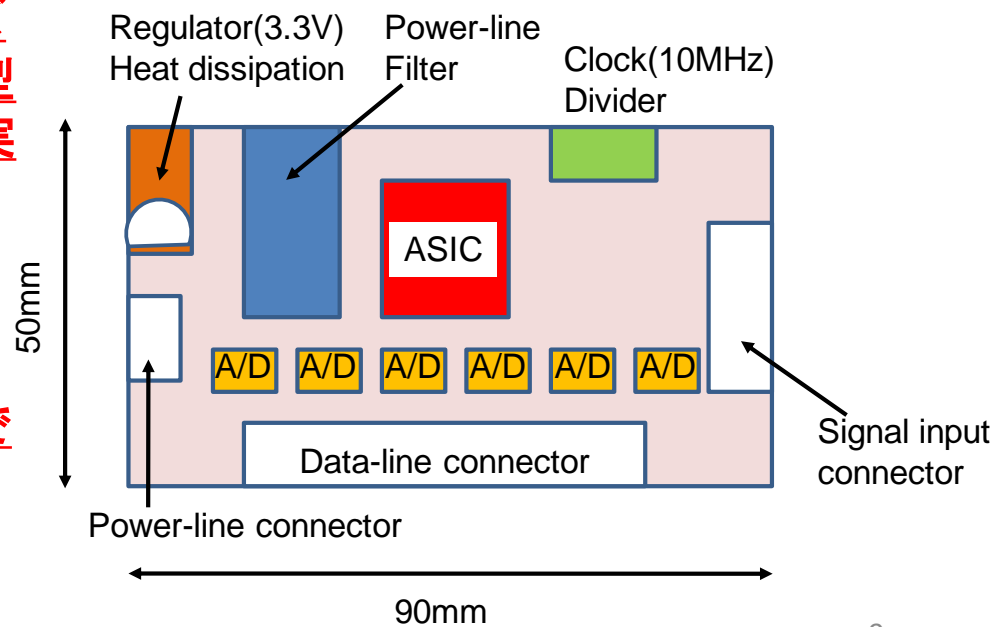


京大設計の波形捕捉型チップと内部レイアウト(5mm x 5mm)

**名刺サイズ
波形捕捉型
受信器の実
現**

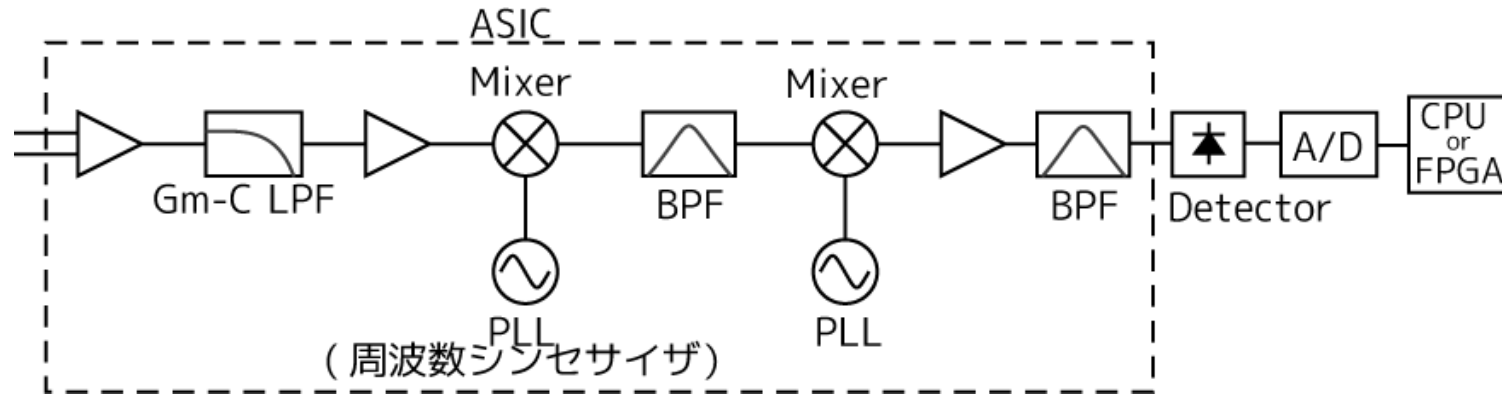


**従来技術で
は、A4サイ
ズ1枚基板**



現在、改良を加え高性能化・安定化を図っている

スペクトル解析型プラズマ波動受信器チップの開発



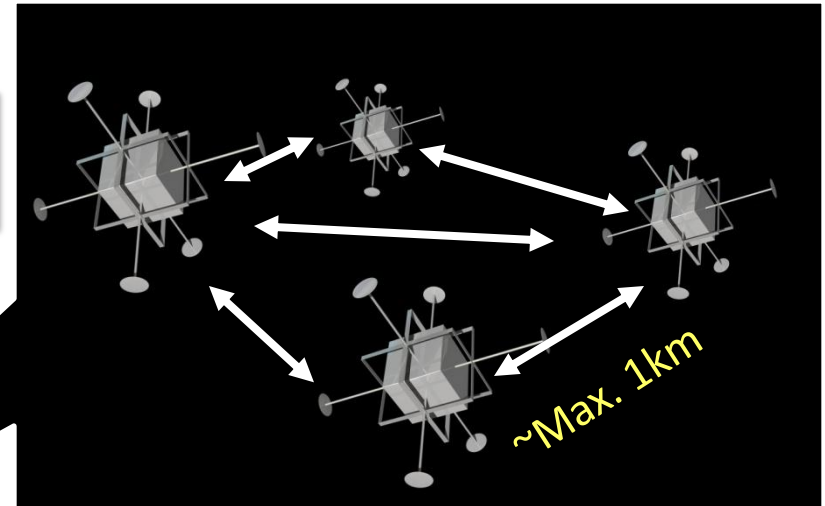
- ・アナログASICの利点と欠点を踏まえた、新型のスペクトル解析型受信器
- ・粗く周波数をstepし、ある程度狭帯域にしてから増幅・A/Dし、デジタル的にFFTで周波数スペクトルを得る。これにより時間分解能が飛躍的に向上
- ・PLL、Mixerなどかなり設計はかなり難しい
- ・現状はPLLの設計に専念

**現在は、PLLの設計を実行中。今年度には試作。
また、このシステムはプラズマ密度計測へ展開可能**

チップ型受信器を応用した新しいシステムの提案と開発

Monitor system for Space Electromagnetic Environments (MSEE)

宇宙空間に無作為に飛散させた小型センサーで
宇宙空間の乱れを3次元で捉える



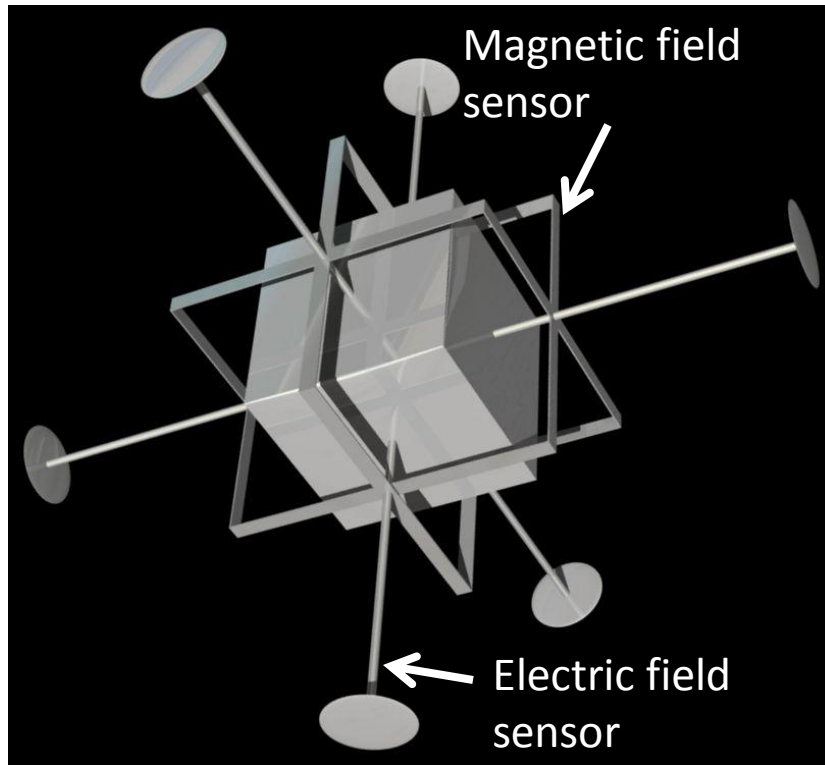
・科学衛星では捉えることのできない
高い時空間分解能での電磁波計測

ターゲット

- ・人工構造物周辺での人為的乱れ
(環境アセスメント)
- ・自然現象を時空間で分解

宇宙におけるセンサーネットワーク

開発主要素となる小型センサーノード

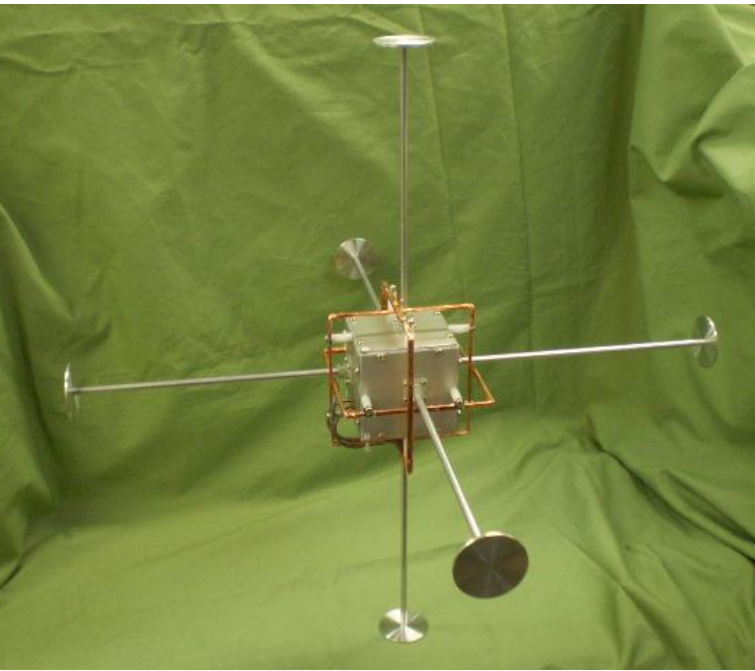


- **完全使い捨て**
- 本体部サイズ: $\sim 10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$
- 電磁界センサー: **6成分**
- 測定: 周波数スペクトル
- 観測周波数域: $< 100\text{kHz}$
- 時間分解能: **a few sec**
- **軌道・姿勢制御無し**
- 通信: **ワイヤレスLAN**
(Ad-Hoc通信がbest)
- 電力: **充電池(4.8V)**
- 寿命: **数時間**
- ノード間距離: $\sim 1\text{km}$

開発ポリシー

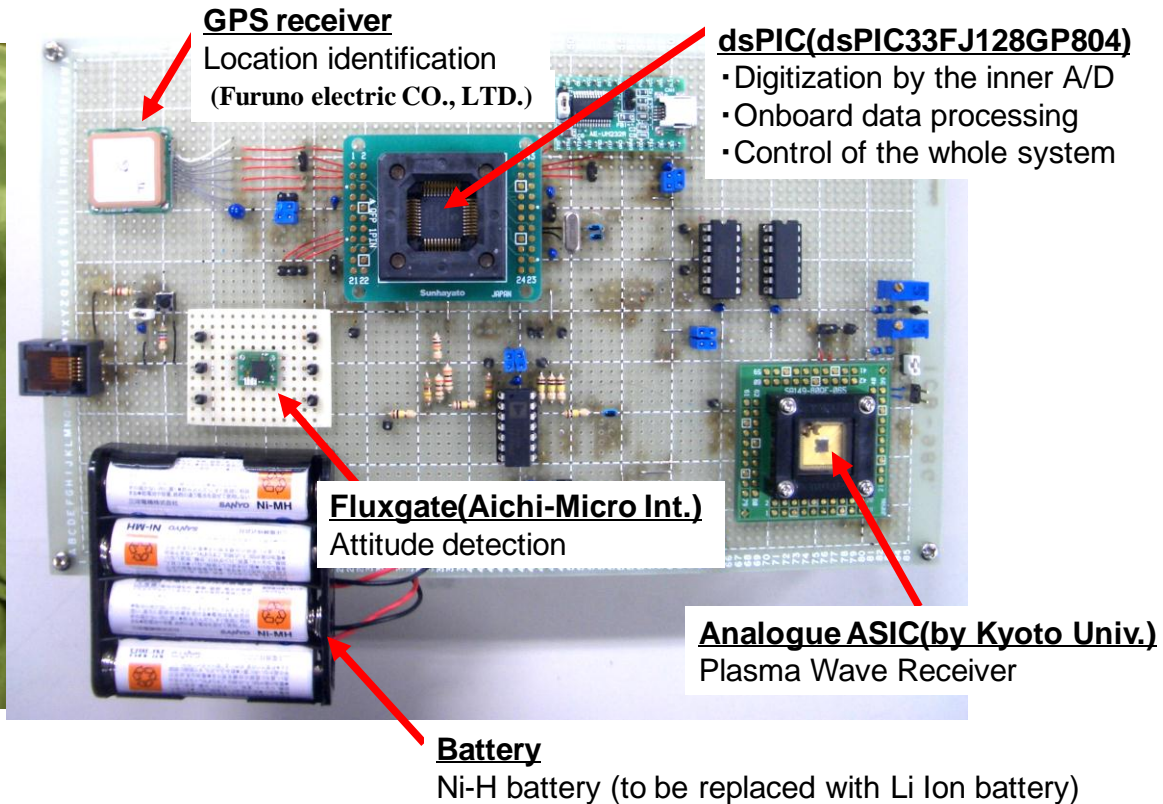
- Body, センサー部、プラズマ波動受信部、ソフトは、自分達の技術で開発
- それ以外の部分はできる限り市販品を用いた形で設計
- 既成概念にとらわれず科学衛星ではタブーとされている手法も試行

京都大学におけるMSEEセンサーノード開発状況



平成20年度に開発したセンサーノードprototype

- Prototypeに収められているコンポーネント
- ・40cm tip-to-tip電界センサー
 - ・13cmx13cm Loopアンテナ
 - ・電界・磁界小型プリアンプ
 - ・小型電源・バッテリー



平成21年度に試作したセンサーノード内システムのブレッドボード

開発した小型電磁界センサーは、科学ミッションにも耐えうる性能があることを実測で確認済み

アナログASICによるプラズマ波動受信器の小型化について

- ・宇宙の分野でも特に**高エネルギー天文**の分野ではアナログASICの開発は世界的にも進んでいる
- ・一方、プラズマ波動計測に代表されるような宇宙プラズマの計測分野におけるアナログASICの開発は、それほど活発ではないが、その中でも**ヨーロッパは比較的積極的に取り組もうとするチームが出てきている。**
- ・**プラズマ波動受信器に関しては、知る限りフランスのチームが開発を行っており、そのチップが既に、2014年打ち上げ予定のBepiColomboミッションのプラズマ波動観測器に用いられている。**フランスチームが開発を行っているアナログASICは、プラズマ波動受信器(スペクトル解析型)の**アナログ部の一部のコンポーネントのみ**であり、京都大学のようにシステム全体をチップ内に組み込んでしまうところまでは手を伸ばしていない。
- ・**磁力計のセンサー回路部**のアナログASIC化はかなり進んでいる。特に**オーストリアのチームは、すでにアナデジ混載システムにてチップを完成**させており、米国の宇宙プラズマ計測ミッションMMS衛星に搭載している。

宇宙電磁環境のゆらぎをモニターするセンサーネットワークについて

知る限り、このようなシステムの開発を行っている研究チームはない。

プラズマ波動受信器アナログ部のASIC化

- ・波形捕捉型チップの性能向上と安定化をはかり、ビジネスカードサイズの受信器を完成させる。
- ・スペクトル解析型チップの開発にウエイトを移行。安定したPLLの実現とMixerの設計を急ぐ。このタイプの受信器は、MSEEセンサーノードへと引き継がれる。

MSEEセンサーネットワーク

- ・電界センサーを、炭素繊維と小型アクチュエータを用いた自己伸展型に交換
- ・小型の通信装置のインプリメント
- ・GPS受信器による位置捕捉システムのインプリメントを行う一方、GPSを使用しない手法の開発
- ・本体に収めることのできる姿勢捕捉手法の確立(小型太陽センサー or 小型加速度計)
- ・データ集約母船を含めたプラットフォームの設計

地上での応用検討

平成22年度より、MSEEセンサーネットワークの地上での応用に関するfeasibility studyを開始予定

火山噴火口内電磁場分布の計測による火山活動モニター(防災研究者との連携)