

宇宙開発応用特論 (Applied Space Development Engineering)

実践的な宇宙通信概論と宇宙通信機器技術

3 / 3

第3回 2001年1月26日(予備2月2日)

白子悟朗

(技術士:航空・宇宙部門)

E-mail goro-shirako@mui.biglobe.ne.jp

HP-url <http://www2s.biglobe.ne.jp/~gshirako/>

第3回 講義内容

- 小型衛星通信機器の実際
 - 小型衛星について...アマチュア衛星他
 - 小型衛星の通信機器の例
 - 高周波回路設計の留意点
 - 部品選定と実装の留意点
 - Cubesatへのアドバイス...
- 宇宙技術者の心得...レジюмеは第1回参照
 - 技術者のしつけと倫理ほか
- 講義を終了するにあたって

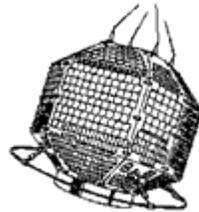
小型衛星について

1. 小型衛星の動向

・アマチュア無線衛星: アマチュア無線 / 宇宙工学教育

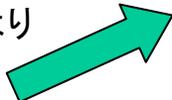
・先端技術技術実証衛星: ミッション / 要素技術の宇宙検証

* 最近の話題: コンステレーション / フォーメーション... 故障監視衛星他



ふじ1-3号

1961年Oscar1により
小型衛星幕開け



Oscar5
1970jan



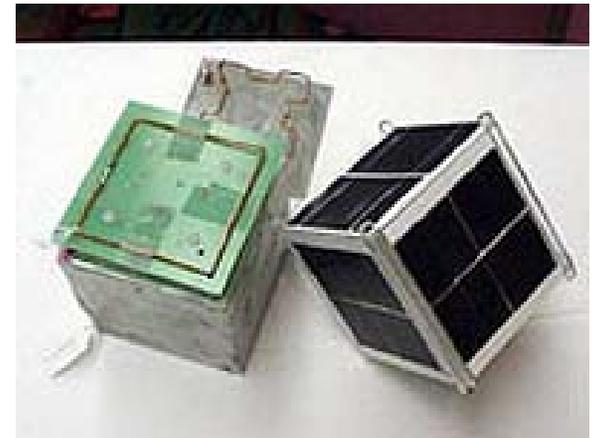
アリアンロケット複数同時打上げ例



先端技術実証の為の各種の小型衛星



大型アマチュア衛星:P3-D(AO-40)



CubeSat計画

アマチュア衛星情報

・現在運用中で、送受信し易いアマチュア無線衛星(周波数単位はMHz)

衛星名	製作国	打上日	アップリンク	ダウンリンク	ビーコン	備考
UO-14	イギリス	1990.01	145.975(FM)	435.070(FM)		FMレピータ衛星
FO-20	日本	1990.02.07	145.900-146.000(LSB)	435.900-435.800(USB)	435.795	ビーコンはキャリアのみ
AO-27	米	1993.09.26	145.850(FM)	436.795(FM)		FMレピータ衛星
FO-29	日本	1996.08.17	145.900-146.000(LSB)	435.900-435.800(USB)	435.795	DT 435.91(FM)
SO-35	南ア	1999.02.23	436.291(FM)	145.825(FM)		

FMレピータだが運用予定・周波数に注意いつも作動しているわけではない。

・我が国で衛星通信専用で使用区分されているアマチュア無線周波数帯

29.30~ 29.51MHz 、145.80~ 146.00MHz 、 435.00~438.00MHz
1.260~1.270GHz 、2.400~2.405GHz 、5.650~5.670GHz 、5.830~5.850GHz

・JAMSAT(日本アマチュア衛星通信協会)の衛星通過予報及び関連情報Web

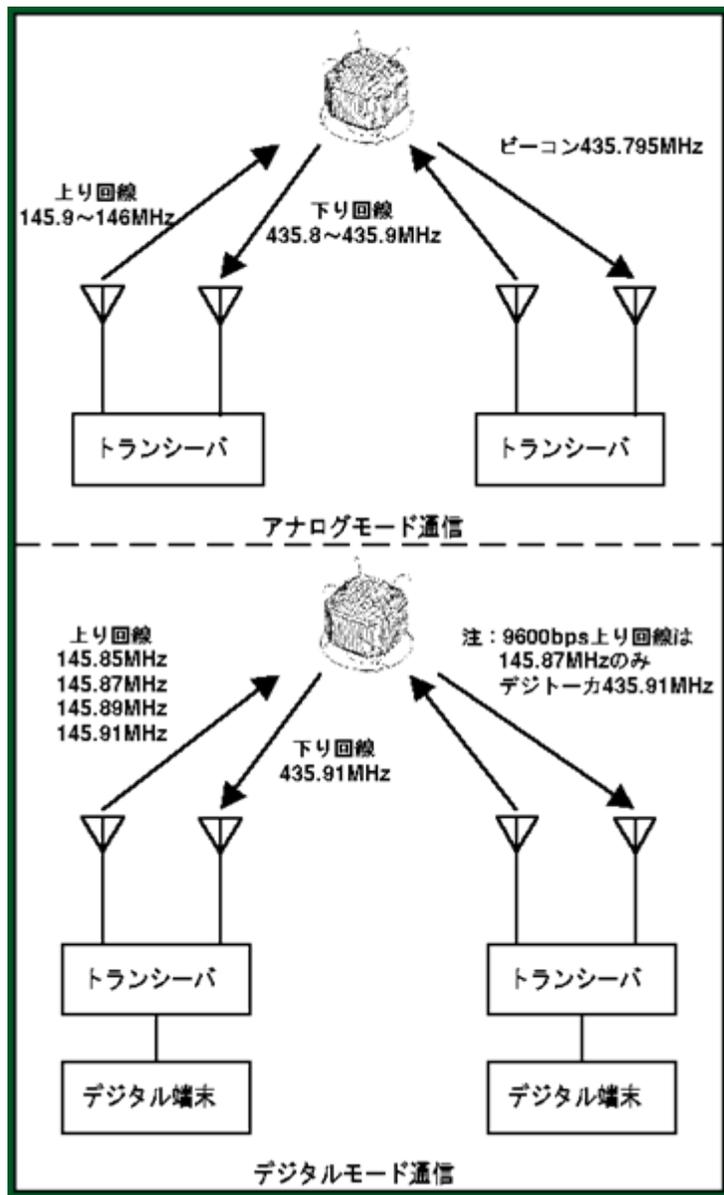
<http://www.jamsat.or.jp/>

・JARL(日本アマチュア無線連盟)のJAS衛星等の情報Web

http://www.jarl.or.jp/Japanese/3_Fuji/jasmenu.htm

アマチュア衛星で宇宙通信体験にチャレンジ

— 何処にでもある宇宙体験の場の例 —



日本宇宙少年団わたらせ分団の子供達もアマチュア衛星「ふじ3号」の受信に成功

JAS-2 製造・試験の概況

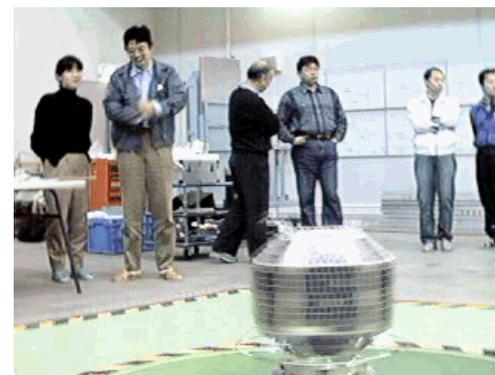
参照: 衛星設計コンテスト技術資料 - 改訂版近日発行予定



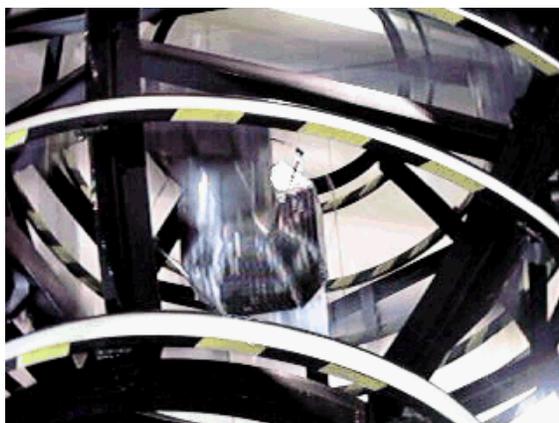
太陽電池検査



熱真空試験



動荷重試験



磁気試験

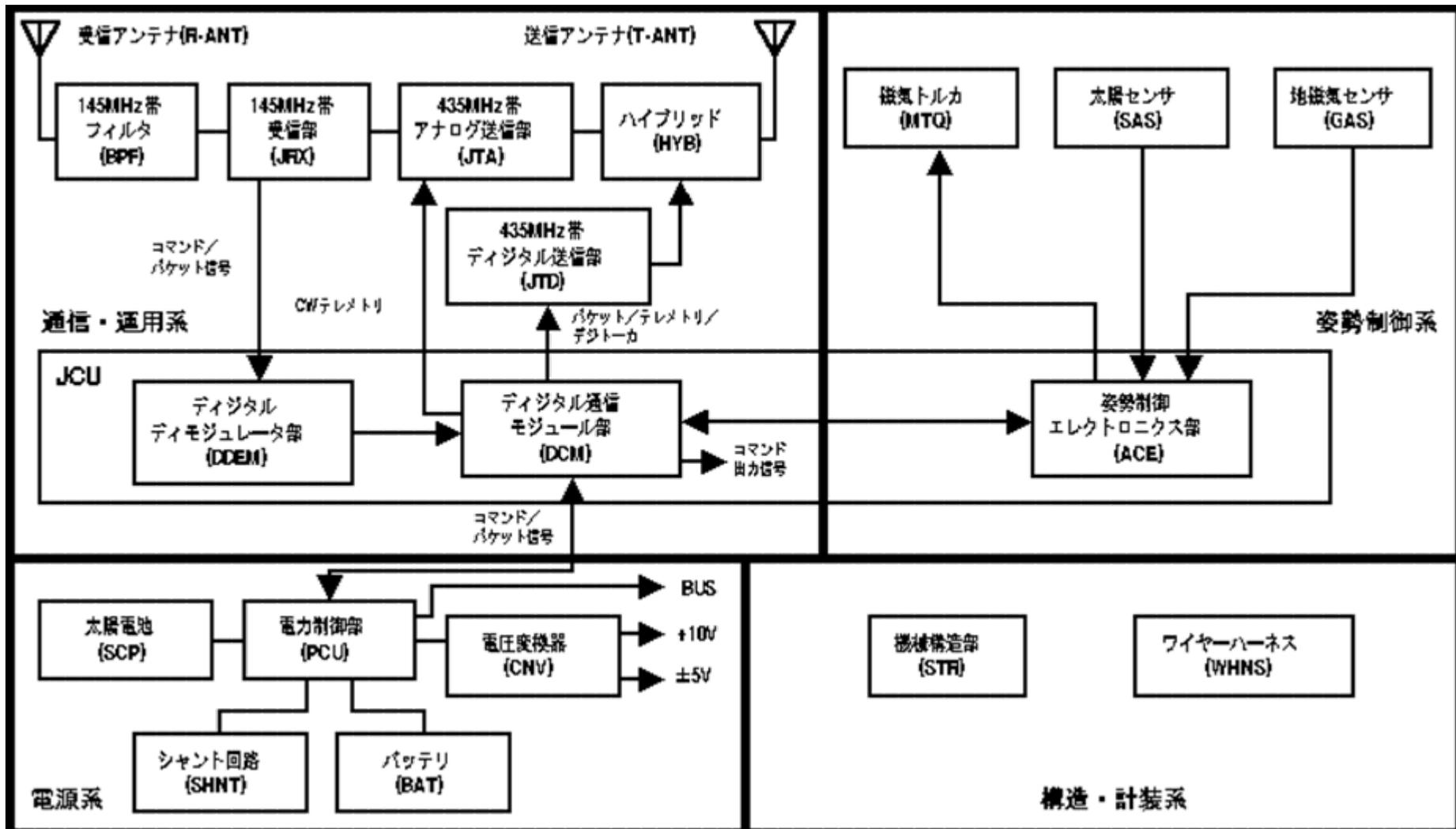


分離機構取付



ロケットへの組付

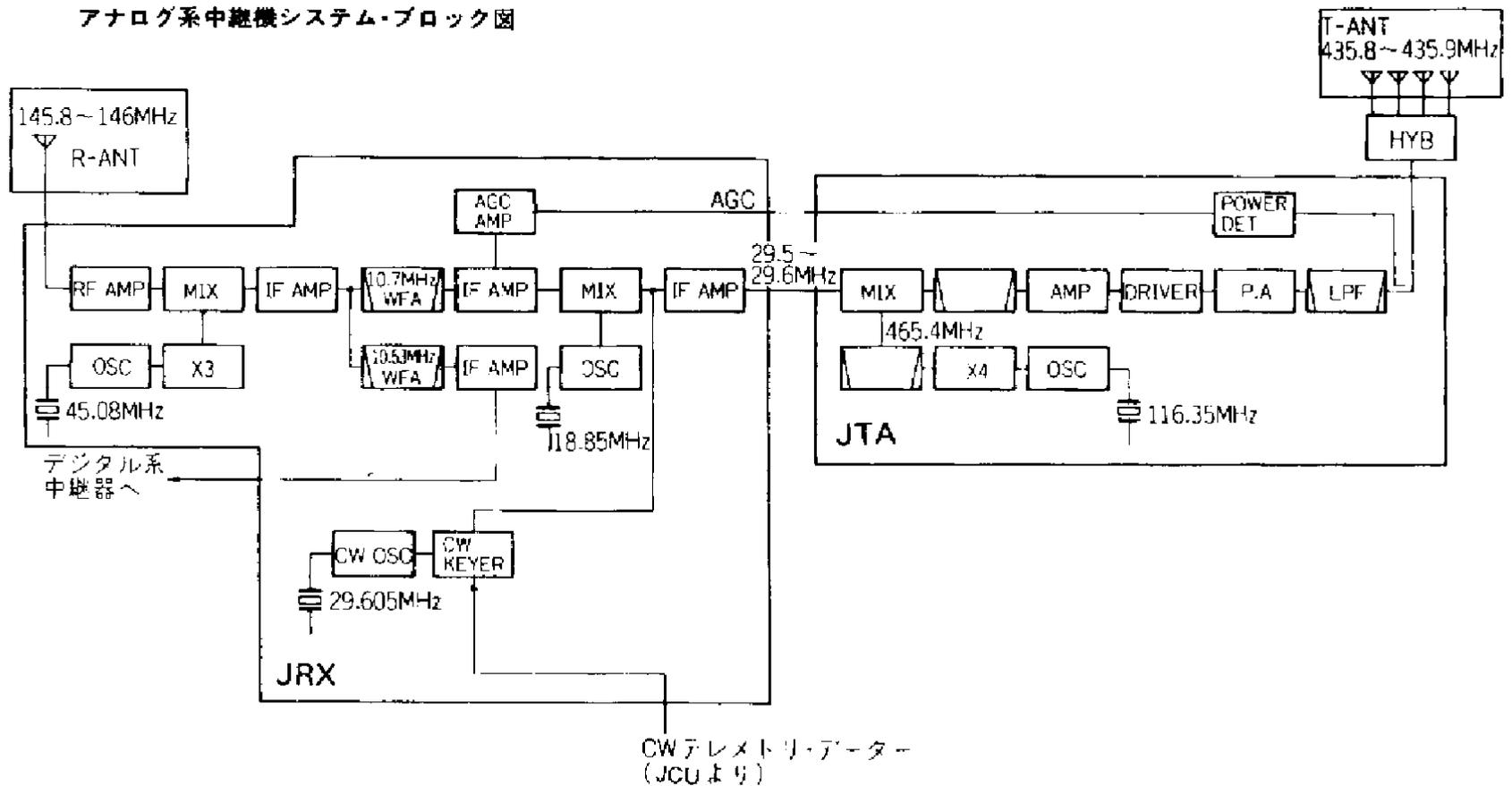
小型衛星通信機器の例



アマチュア衛星JAS-2のシステム系統図

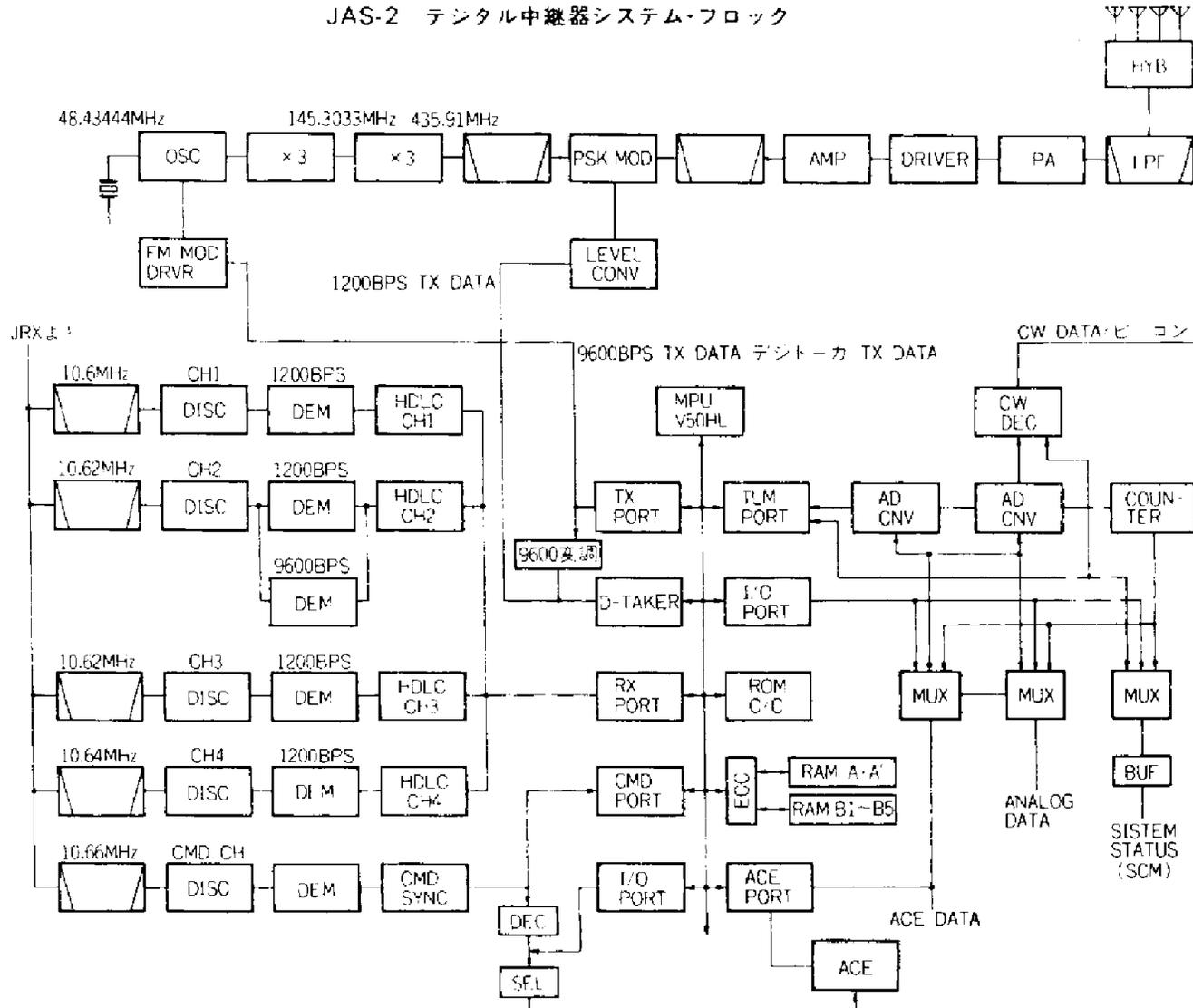
JAS-2アナログ中継器

アナログ系中継機システム・ブロック図



JAS-2 デジタル中継器

JAS-2 デジタル中継器システム・ブロック



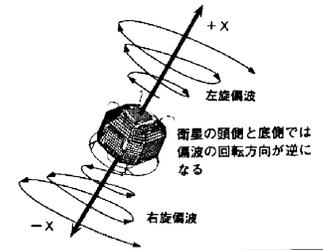
小型衛星の各種アンテナの特性例

アマチュア衛星アンテナの概略

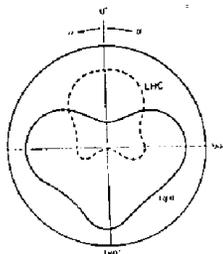
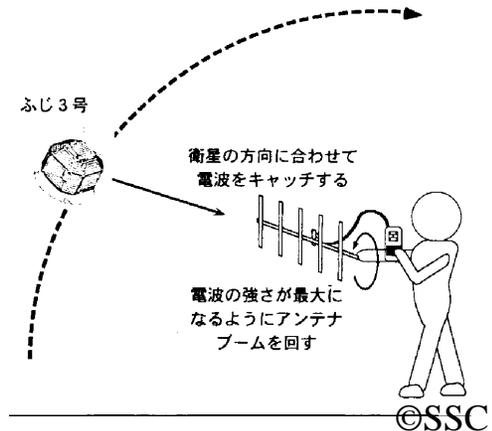
アンテナ区分/指向特性例	代表的衛星	衛星姿勢制御	周波数帯	アンテナ利得	偏波特性
全方向性 	ふじ3号 AOマイクロサット	不定 3号は軌道面に垂直制御	主に V/U	0dbi 程度	機軸方向に円偏波 他は楕円
略指向性 	UO3号 KITSAT	重力傾度での略地球指向	主に V/U	3-6dbi 程度	地球方向に左円偏波
高利得指向性 	AO-10, 13 P3-D	地球指向	V/U/L V/U/S/X/K L/Ka	7-13dbi 10-20dbi 程度	地球方向に右円偏波 直線偏波

ふじ3号のアンテナの円偏波特性

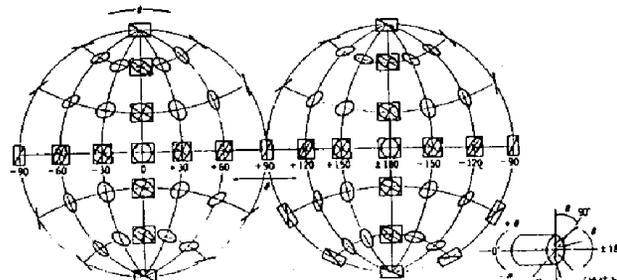
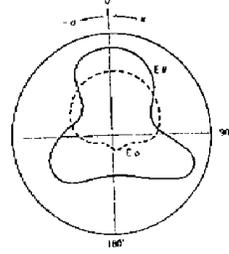
衛星軸方向	デジタル送信	アナログ送信	アップリンク受信
+X	左旋	右旋	右旋
-X	右旋	左旋	左旋



小型八木アンテナによるふじ3号の受信



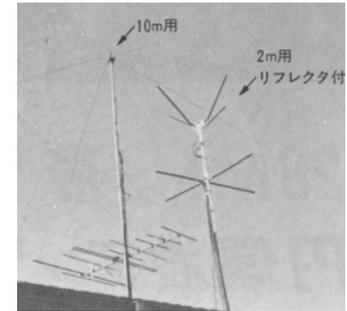
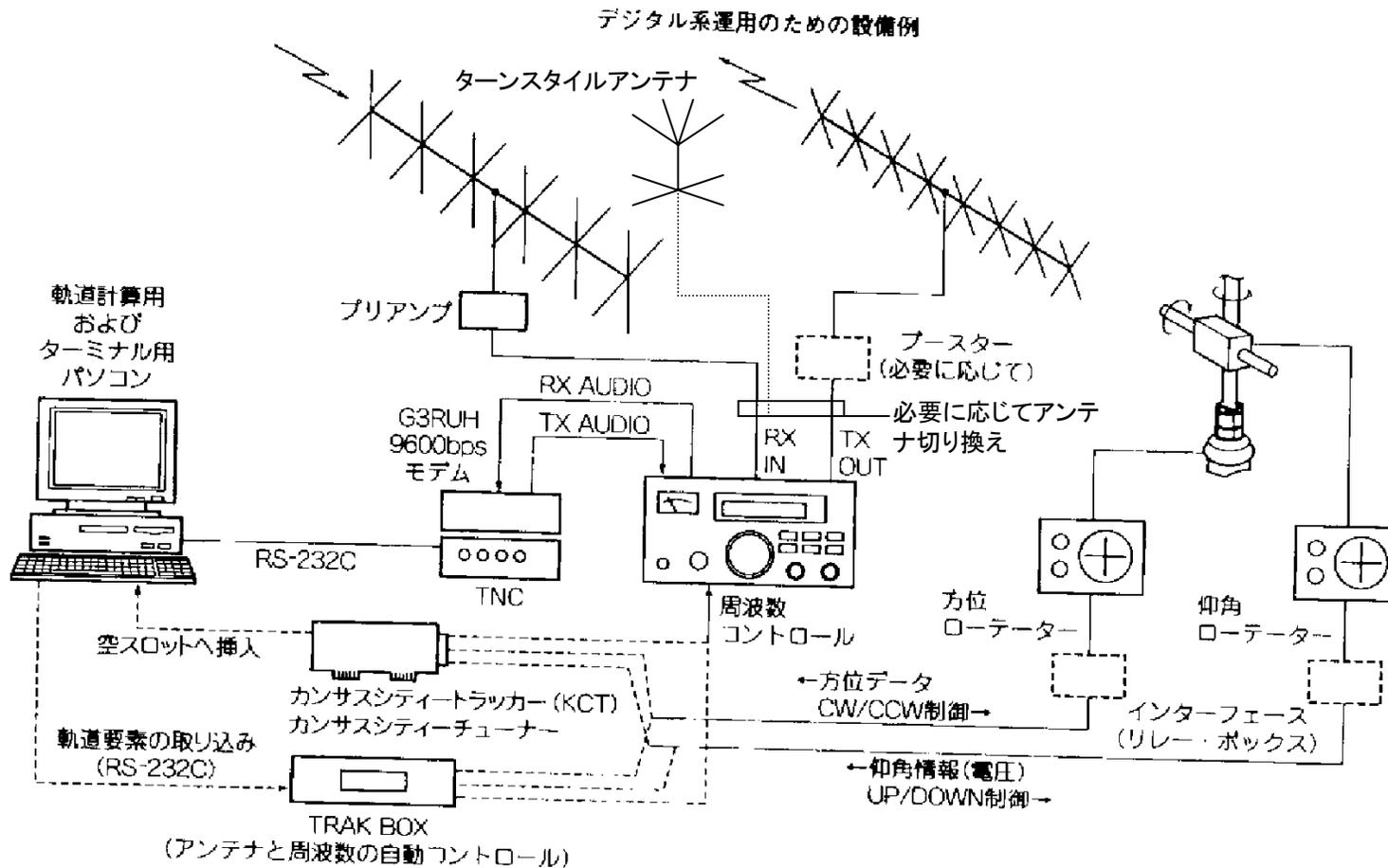
(放射パターン例)



(偏波面例)

全方向性アンテナの放射パターンと偏波面の特性例

代表的な小型衛星用地上設備例



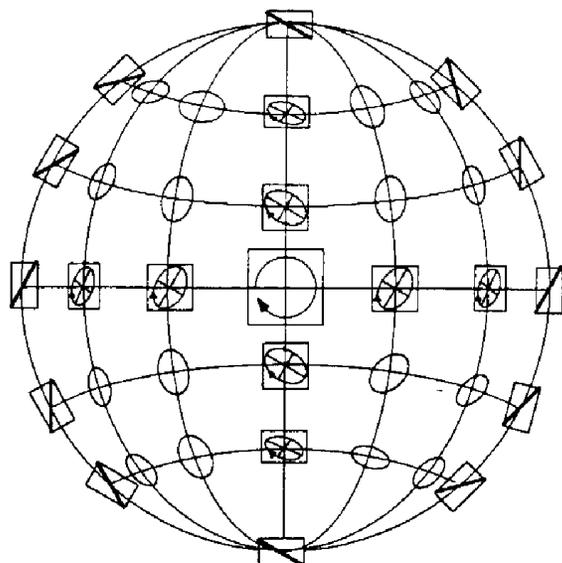
アンテナ特性の3要素

指向性: 電波を発射する方向の特性

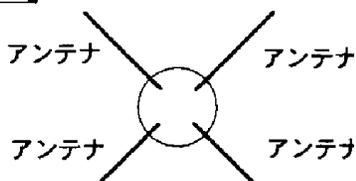
利 得 : 電波のエネルギーの強さの比

偏 波 : 電波の電界が振動している方向

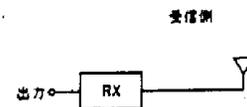
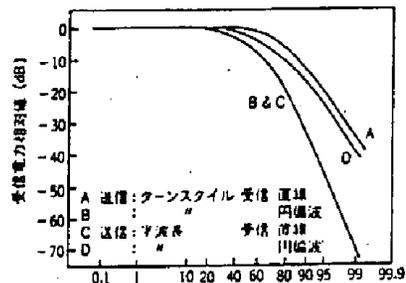
衛星のターンスタイルアンテナの偏波



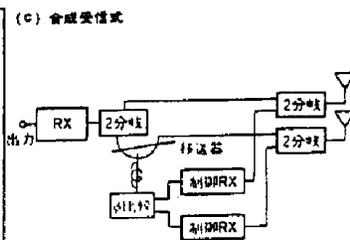
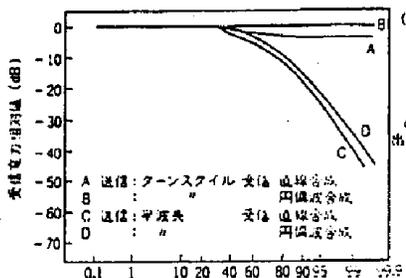
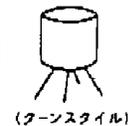
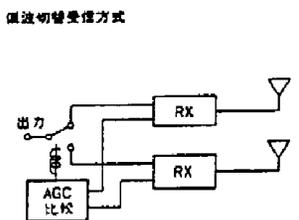
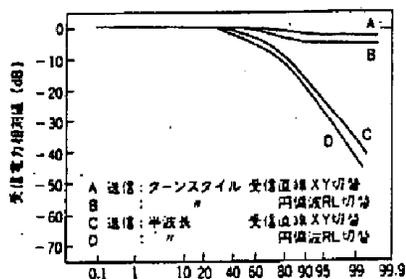
衛星の上半分の偏波を示す。
下半分では逆回りになる。



各種受信方式の受信電力の変動分布

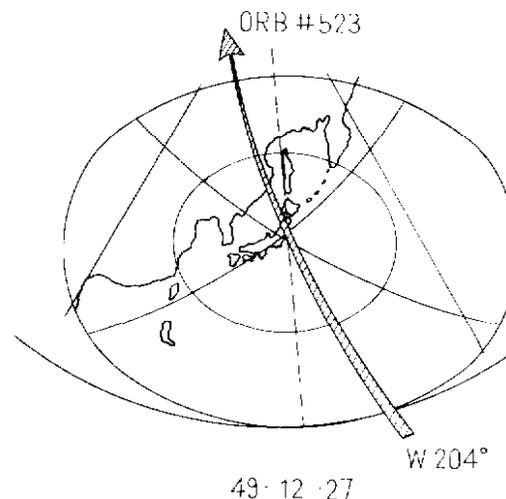
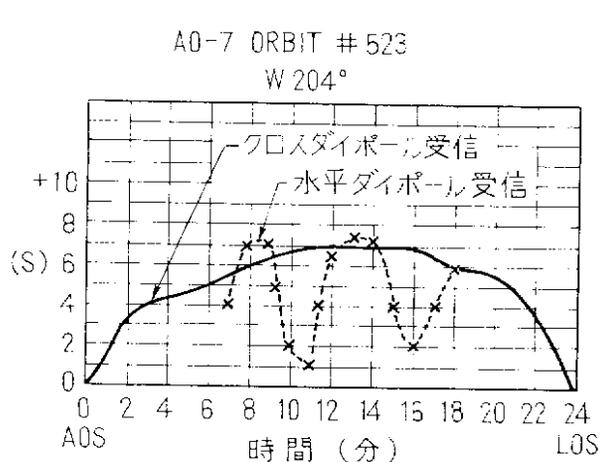


送信機

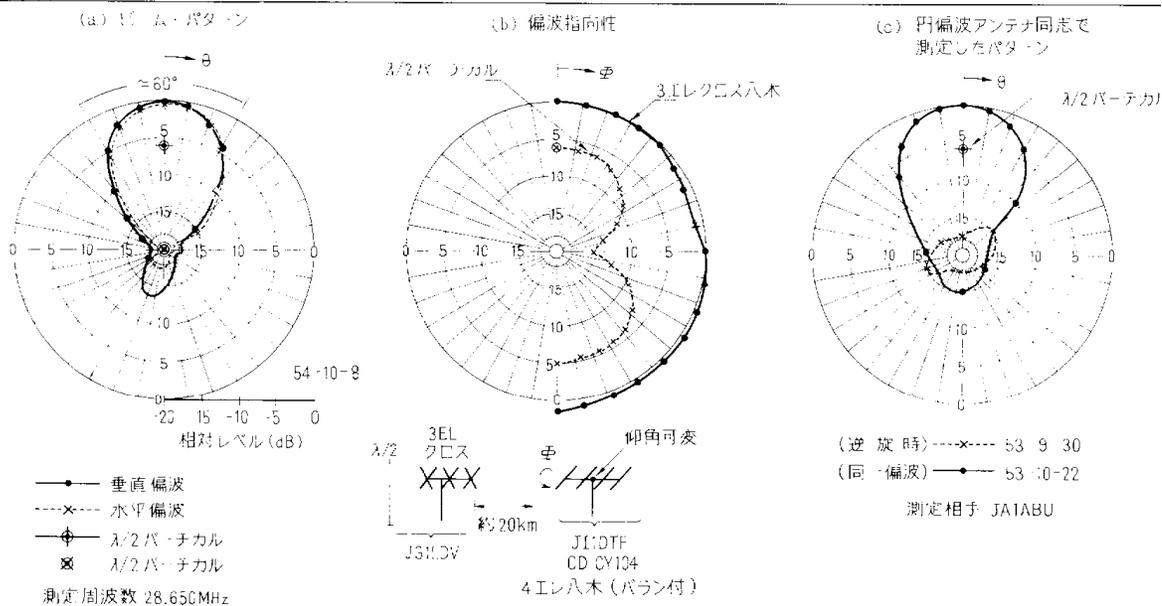


地上局用円偏波アンテナの特性例

オスカー電波受信特性の一例



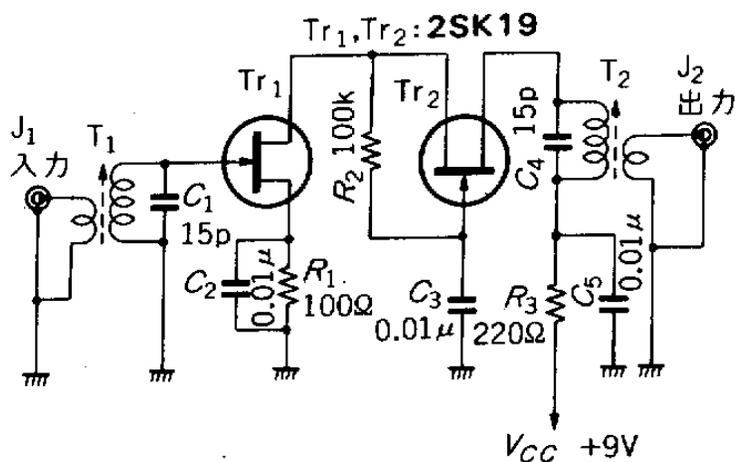
3エレメント クロス八木アンテナのビームパターン



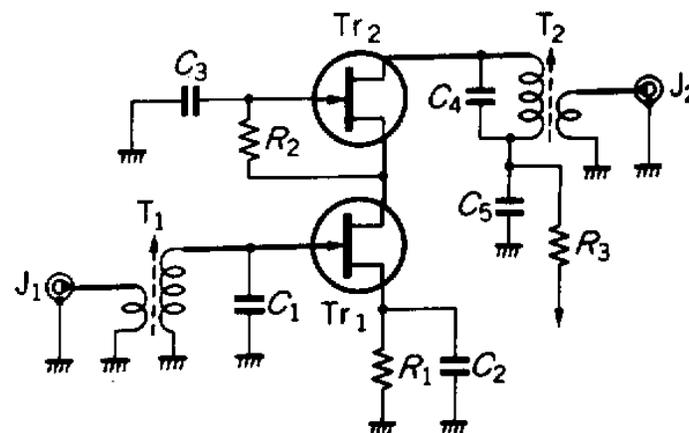
高周波回路の実際

高周波回路のノウハウ

- ・実装、アースを考えた回路図がポイント



図として美しい回路図例



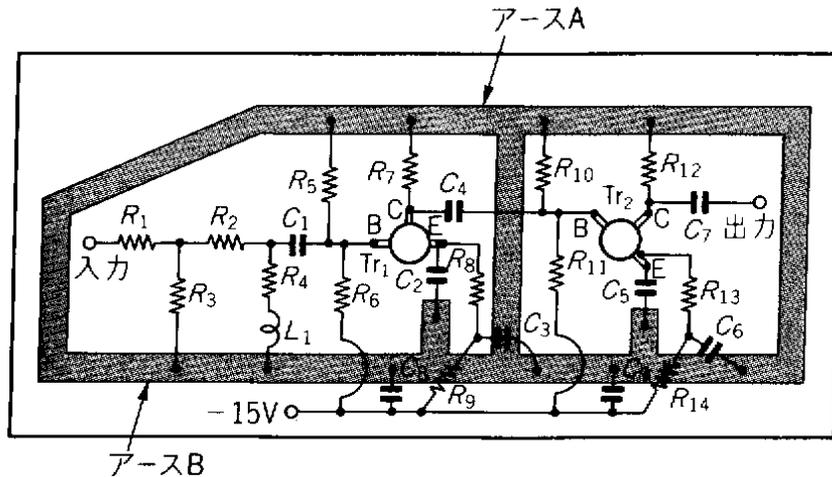
性能・実装本位に書き換えた回路図例

参考書: 高周波回路設計ノウハウ他 (CQ出版社)

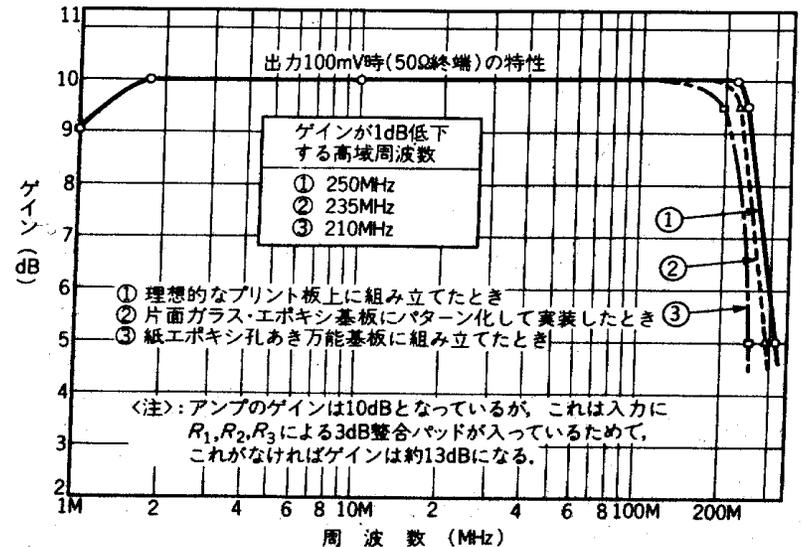
高周波回路のノウハウ

・高周波回路の組立条件

- 1) 全ての部品を最短距離に配置する
- 2) 広大なアースがどこにでもある
- 3) 接地点での高周波ロスがない
- 4) 電源のバイパス/フィルタが完全で、電源回路からの回り込みがない



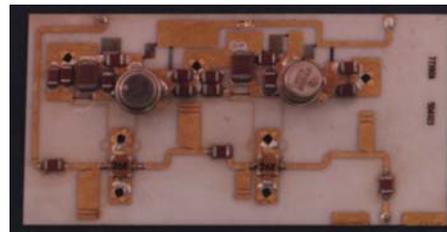
基盤への実装例



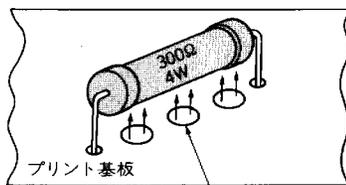
小型化・高周波化...熱対策



立体+PWB実装

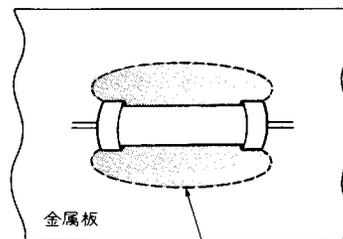


膜回路実装



プリント基板

空気流通の孔 (直径3~5mm)

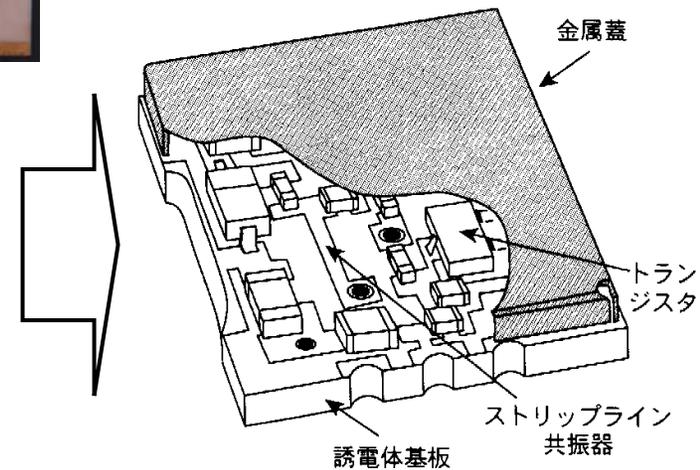


金属板

熱伝導性接着剤

抵抗器の放熱方法の例

MMIC等でのモジュール化



金属蓋

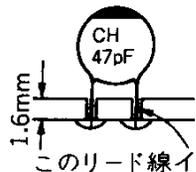
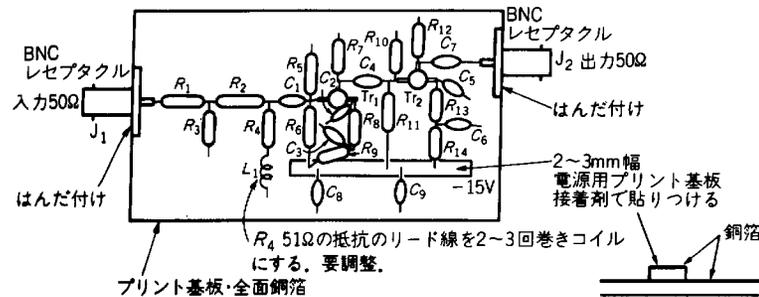
トランジスタ

ストリップライン共振器

誘電体基板

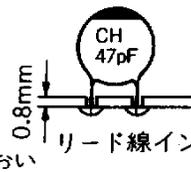
高周波回路のノウハウ

・部品実装方法の例



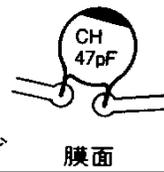
(a) プリント基板
厚1.6mm

このリード線インダクタンスがおおい



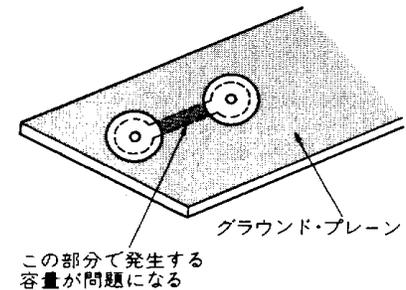
(b) プリント基板
厚0.8mm

リード線インダクタンスが減少



(c) プリント基板膜面に部
品を実装し、リード線
インダクタンスを減少
させる

膜面



部品のリード線1cm当たり大凡10nH

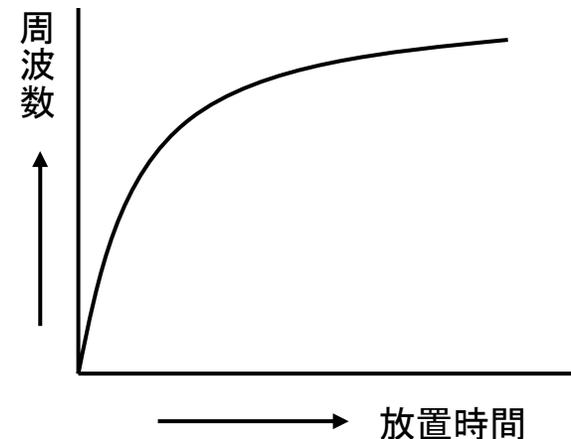
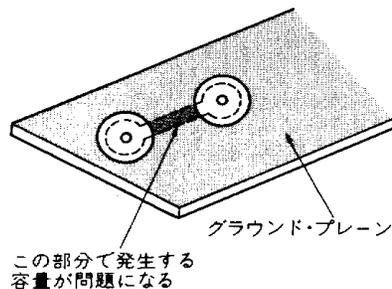
高周波回路での回路基板

高周波回路をプリント基板化する場合の一般的注意

- ・基板材質の選定:テフロン>ガラスエポキシ
- ・パターン/グランド面での寄生効果の排除
 - * 部品面を全面アースのグランドプレーンにする。
 - * グランドプレーンと基板パターン間で発生する浮遊分布容量に注意

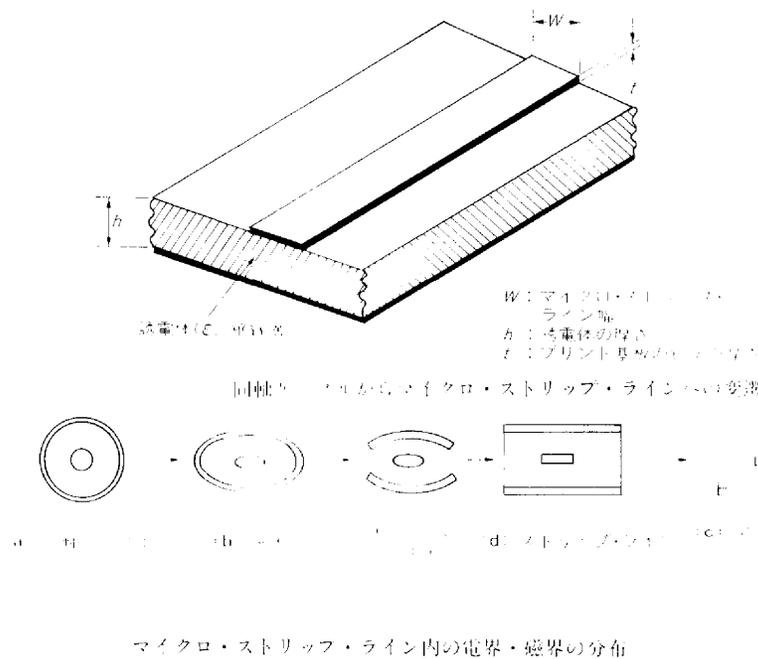
部品の高周波化ゆえの新たな事象

- ・プリント基板の分布容量が吸湿で変化
- ・数百MHz以上の発振回路等には注意



高周波回路での回路基盤

ガラスエポキシ基板(G-10)でのマイクロストリップラインについて



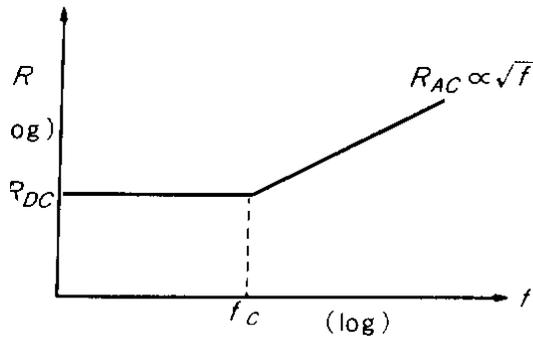
G-10基板: 誘電率=4.8の場合

- ・使用周波数は500MHz程度まで
- 良 ・3cm四方/1.6mmで約25pFの容量
- 量 ・インピーダンスは100Ω以下
- 下 ・隣接回路間隔はライン幅の>2倍
- 時 ・ケースへの挿入
: 高さ=>基盤厚×5
- 厚×5
: 幅=>ストリップ幅×5

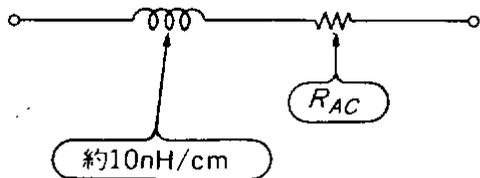
高周波での寄生効果

寄生効果 (Parasitic Effect) とは:
部品等の本来の定数以外の寄生要素による影響

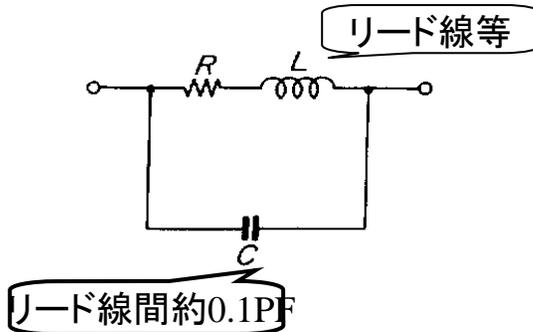
表皮効果による抵抗分の増加
(両対数目盛り)



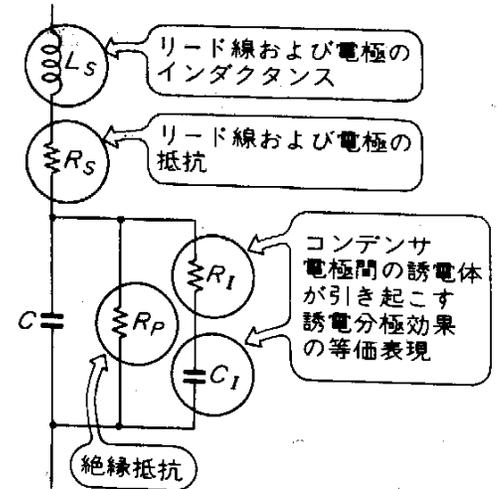
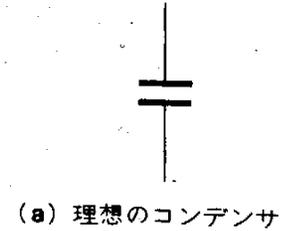
直線状電線の高周波等価回路



配線



抵抗器



(b) 実際のコンデンサ等価回路

コンデンサ

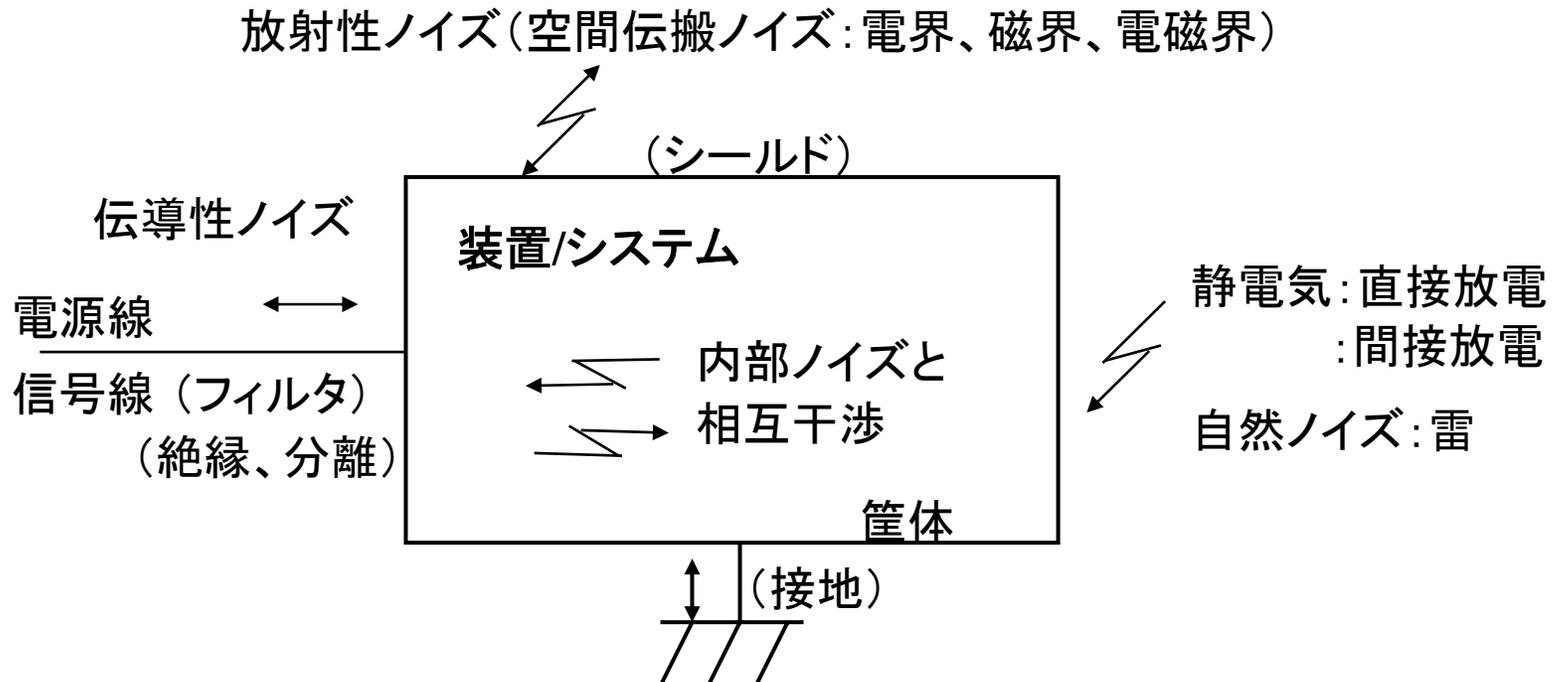
EMCと部品等価回路

EMCの概念

EMC: Electro-Magnetic Compatibility

電磁的両立性: 不要なノイズを出さず、外部ノイズで誤動作しない

デジタル回路では、立ち上がり/立ち下がりの時間の短いパルス信号を扱うため、多くの高周波成分を含み外部へのノイズを出しやすいし、また受けやすい



ノイズ低減対策の代表例

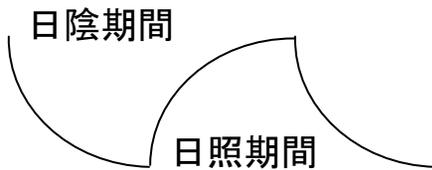
- シールド: ノイズ源やノイズ受信側を導電体で包んで放射性ノイズを遮蔽
- フィルタ: 低域型で高周波ノイズを抑制
- 絶縁・分離: ノイズ源～ノイズ受信側を離すことで相互の影響低減
- 接地: 回路の基準電位を与えることで回路の動作を安定
- その他: 部品実装の形態、配線長、インピーダンス整合、接地の取り方etc cut & try

人工衛星製造と環境条件の流れ

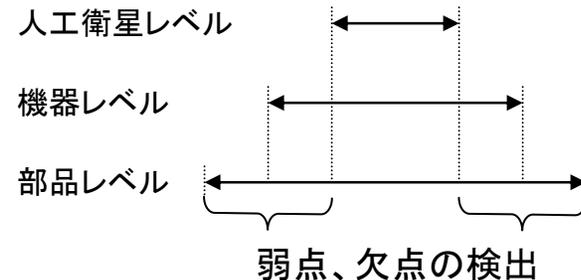
-弱点、欠点の検出、除去のための試験を含む-

部品	プリント基板 等組立	機器組立・ 環境試験	衛星組立・ 環境試験	打上げ	軌道上
<ul style="list-style-type: none"> ・大気中 ・スクリーニング 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気中 ・熱ストレス (半田付け等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気中 ・温度 ・熱真空 ・振動 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気中 ・熱真空 ・音響 ・振動 ・衝撃 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気中→真空 ・振動 ・音響 ・温度変化 	<ul style="list-style-type: none"> ・真空 ・熱 ・放射線 ・無重力

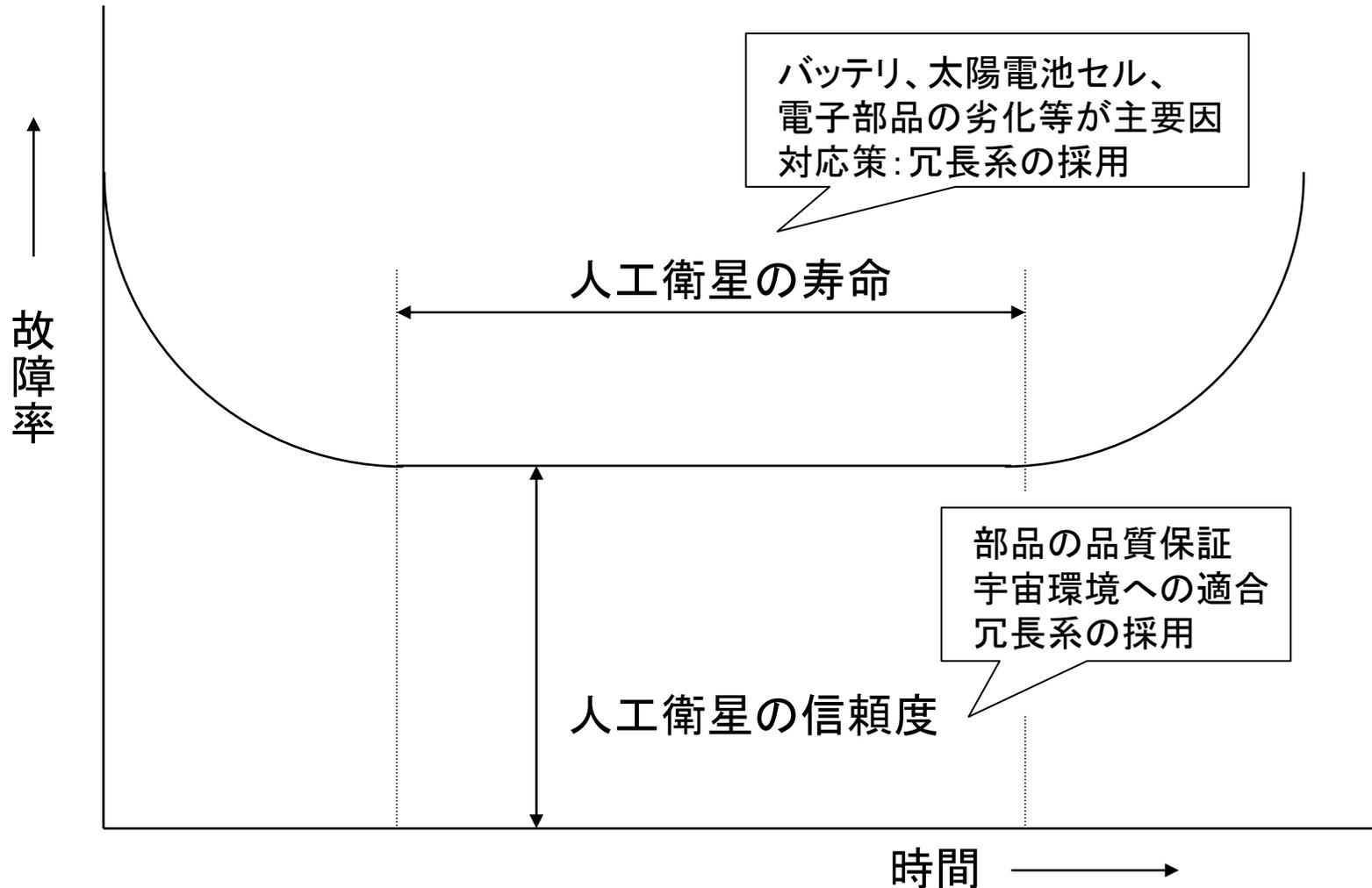
軌道上での温度変化



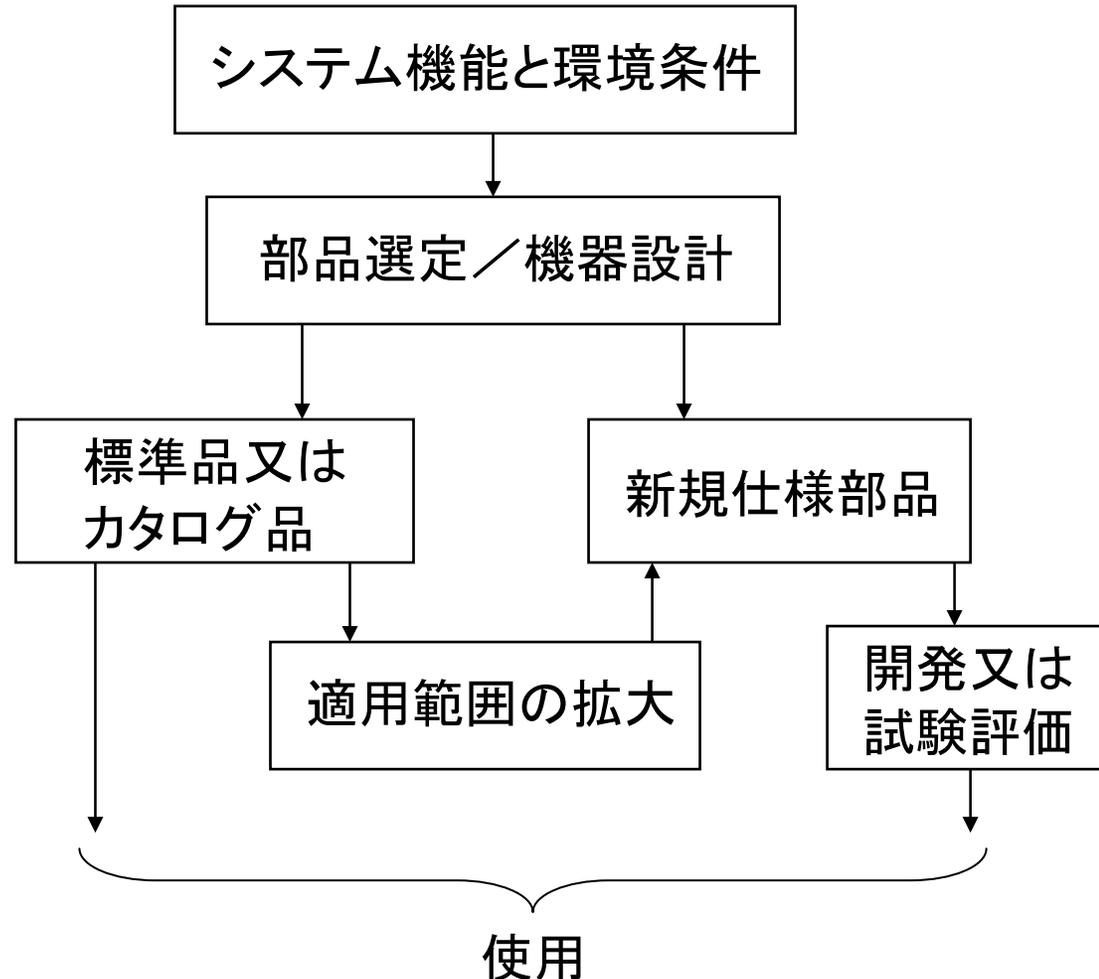
各段階での温度幅



人工衛星の信頼性設計



人工衛星設計と部品選定手順



人工衛星の主な故障

- ・劣化
- ・マイグレーション
- ・コンタミネーション
- ・疲労、クラック、破断
- ・ゴミ
- ・固着
- ・温度上昇、温度低下
- ・放電、帯電
- ・干渉
- ・誤動作
- ・過誤

・開発上の問題

- ・設計不十分
- ・試験が出来ない
- ・検査をしていない
- ・気が付かなかった

新規な開発では多くを経験する

・偶発の事例は意外と少ない

信頼度を示している

機器設計と環境条件

- ・放射線:

トータルドーズ、シングルイベントアップセット、ラッチアップ、
シングルイベントバーンアウト

- ・温度サイクル: クラック(モールド、接着、半田付け...)

- ・真空:

温度変化、ヒートスポット、アウトガス、摩擦／固着

- ・帯電、放電、微小重力...

部品故障の事例-1/2

1. 抵抗器

- ・金属被膜抵抗器の汚染物による断線
- ・金属被膜抵抗器の端子部から侵入したフラックスによる断線
- ・金属被膜抵抗器のコーティング部のクラック

2. コンデンサ

- ・セラミックコンデンサの電極間のマイグレーションによる短絡
- ・タンタルコンデンサの電極の異常酸化膜による短絡

3. IC

- ・IC端子部間金属汚染による短絡、IC端子部のクラック
- ・ピングリットアレーの端子部間半田流れによる短絡
- ・IC端子部のメッキ剥がれ
- ・LSI電極末端に1ミクロンの穴が貫通しリーク電流大
- ・ICチャンネル間に接続されたワイヤからの雑音により誤動作

部品故障の事例-2/2

4. トランジスタ

- ・電カトランジスタ絶縁部金属汚染による短絡
- ・トランジスタキャップ溶接スプラッシュによる短絡

5. 基盤

- ・高周波基盤の部品半田付け部のクラック、・ランド下に半田ボールが入っていて短絡
- ・コーティング剤処理作業不足による不完全固化によるマイグレーション
- ・錫メッキによるウイスカが発生し短絡

6. 機構部品

- ・コネクタ端子半田付け電線のストレスリリーフ不足による断線
- ・小信号用リレーのドライ回路での接続不完全、・D-subコネクタリードの疲労断線

7. トランス; ・温度サイクルによる断線

8. 接着; ・バッテリーセル底面接着がボイドのため不完全

設計の教訓

1. “だろう”設計の排除
2. 見えないところ、検査できないところは不完全
3. 設計の変更は他人に確認してもらう
4. 極性(電気、機械共に)は完全に確認する
5. 定数が確定できなければ最悪値設計を行う
6. 実験、試作を十分行い、評価する
7. 経験情報、故障情報を財産とし、二度と故障を起こさない
8. 故障原因は納得いくまで追求すること

管理的な故障の事例

1. 結線を不用意に図面上削除
2. コンデンサの逆接続
3. シャフトの位置ずれ固定
4. 真空中の金属、有機材接触による固着
5. アウトガスに付着による光学部品の曇り
6. アウトガスに付着による熱定数の変化
7. リレー駆動回路の並列ダイオード未挿入
8. ハーメチック端子の取り扱い不備によるクラック
9. 冗長系不完全での連鎖故障

検査、試験での部品に対する注意点

部品や組立に対して潜在的な欠陥を検出又は予防するポイントの例

1. 半田フラックスは松ヤニのみ、活性度の高いフラックスは禁止
2. ストレスリリースを行う
3. 温度サイクル試験で評価する
4. 可動部分は微小重力下での挙動を最悪範囲で仮定して、解析
5. プレキャップ(最終組立前)検査や、内部目視検査を行う
6. コンデンサ、コネクタ、リレーは信頼性を確認するパラメータが無い
7. 冗長系を確認する検査は必須
8. 外観検査の注目点を明確にする
9. モールド部品は何が潜在的欠陥か明確にする

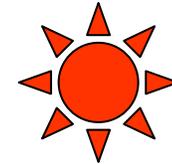
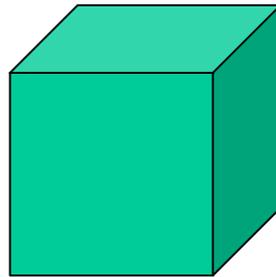
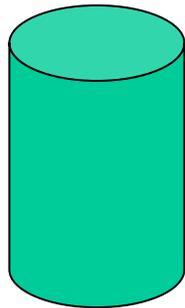
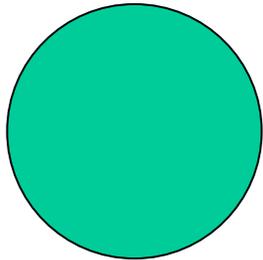
CUBESATへのアドバイス-1/3

リソースに見合ったミッションの明確

化

・宇宙工学教育教材 → 設計の

検証を主眼 ← リスクを無くす考慮
形状・構造等の簡素化



- ・発生電力が少ない
- ・熱環境が厳しい

寸法: 4"X4"X4" → 簡素化
→ 構造 & 回路設計

重量: 1Kg → 最大限活用
→ 放射線対策 & 熱処理対策 & 電磁シールド

CUBESATへのアドバイス-2/3

通信系

- ・使用周波数帯の選定...総合通信局(関東他)等への打診を含む
- ・送受信は同一周波数帯での交互通信でアンテナの単一化も視野
- ・電力資源が厳しいことから、送信機電力は100mW以下で成立する通信方式を採用
 - プログラムによる、間欠送信とモールス又は低速デジタル
 - 回線設計: 要求 E_b/N_0 または S/N の実際的な参考値

	実際的な E_b/N_0 & S/N	備 考
アナログ CW(モールス)	$S/N = >10\text{dB}$	1KHz以下の帯域で認識可
アナログ FM	$S/N = >10\text{dB}$	FM復調器のスレシホルド
デジタル FSK	$E_b/N_0 = >14\text{dB}$	$BER = 1.00E-05$
デジタル PSK	$E_b/N_0 = >12\text{dB}$	$BER = 1.00E-05$

CUBESATへのアドバイス-3/3

マネジメントについて

- ・大学の総合力活用(他学部の協力)や大学間の連携
- ・プロジェクトマネジメントやシステムエンジニアリングを会得
 - * チームメンバー間の役割分担やインテグレーションを心がける
 - * 情報の共有で課題の迅速な解決を図る
 - * 設計検討過程ではトレードオフスタディは必須
 - ースケジュール、費用、リスク/実現性も加味

アンケート回答等への対応

1. アンテナ/通信機器関係:

- ・アンテナのスイッチングの実現・・・高速ではダイオードSW、切り替えは機械式リレー
- ・筐体を含めた放射特性の解析法・・・モーメント法、FDTD法共にシミュレータとして活用されている。

電子情報通信学会誌12年11月号・特集シミュレータ技術、878頁他

- ・円偏波のアンテナで直線偏波を受けてもたいした差はないのでしょうか？
- ・通信機、アンテナの選定指針/設計の手順・・・第2回講義参照および3回講義
- ・通信系の評価の方法(リンク式など)・・・第2回講義参照
- ・PCMの符号形式の選定方法・・・ビット同期の取り安さや帯域の広がりなどを考慮して

2. 回路実装関係: ・高周波回路の基板上の素子配置と電流分布の影響・・・第3回講義

3. アマチュア周波数帯でのPFD規定と対応:

- ・規定無し。但し申請時に算出して提示・・・計算方法は第2回講義参照
- ・無線局開設の手順

4. 教訓的な内容:

- ・宇宙機器や部品等の一般的な事例を紹介・・・第3回講義

無線局開設の流れ(原則)

1. 無線局の開設申請: 打上げの3年以上前、無線関係機器の設計が終了する前の段階においても実施する(電波法第6条)
 - ・無線局開設申請書等(...含む事前公表資料)提出: 対郵政省
2. 予備免許の付与(郵政省の業務): 無線局開設申請書の書類審査後に付与(電波法第7及び8条)
3. 機器製作
4. 無線局工事落成届: 打上げの3~6ヶ月前、無線局の製作が終わり、検査を受けることが可能となったことを示す(電波法第10条)
5. 試験電波発射届: 機器の調整等に必要な電波の発射の為に必要(電波法第16条準用)
6. 検査希望連絡書: 検査希望日に余裕を持って連絡
 - ・事前データ説明: 検査を効率的、スムーズに行うためのもので電波法令によるものではない
7. 衛星等単体検査: 衛星打ち上げ後に検査することが困難なため事前に実施するもの
8. 打ち上げ
9. 検査希望連絡書: 検査希望日に余裕を持って連絡
 - ・事前データ説明: 検査を効率的、スムーズに行うためのもので電波法令によるものではない
10. システム検査: いわゆる、無線局の設置後の最終検査に相当するもの(電波法第10条)
11. 免許状の交付(郵政省の業務)
12. 無線局運用開始届
13. 無線従事者選任届: 運用開始期日の届、責任者の届(電波法第16・51条)
14. 無線局の使用
15. 無線局の廃止届: 無線局の終了時(電波法第22条)

宇宙通信概論/通信機器・参考文献等

- 宇宙システム概論
 - “宇宙システム概論-衛星の設計と開発” 培風館 茂原正道著
 - “アメリカの小型衛星開発の動向” 日本ロケット協会 齋藤宏文著
- 衛星通信
 - “ウェーブサミット講座 衛星通信” オーム社 飯田尚志編著
 - “アンテナ工学” 総合電子出版社 遠藤敬二他著
- マネジメント
 - “日本宇宙開発物語” 三田出版会 齋藤成文著
 - “宇宙プロジェクト実践” 日本ロケット協会 栗木恭一著
 - “科学技術者の倫理-その考え方と事例” 丸善 日本技術士会訳編
- 機器設計関連
 - “抵抗&コンデンサの適材適所” CQ出版社 三宅和司著
 - “改訂 高周波回路設計のノウハウ” CQ出版社 吉田武著
 - “トロイダル・コア活用百科” CQ出版社 山村英穂著
 - “電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界” CQ出版社 木暮裕明著

技術者のしつけ & 倫理

1. ”しつけ”の発端は、過去の生々しい体験(特に失敗経験)から、後日同じ失敗を繰り返さないように、他山の石としてのものです。

- ・自分の技術を過信しないこと
- ・急ぐ仕事ほど、最悪のケースを想定したダメ押しが大切
- ・十分な事前調査と準備を怠らないこと(日頃の調査が功を奏する)
- ・当然のことと思っても、確認のダメ押しが大切
- ・仕事は組織で行うことの認識(システムでは個人プレーは禁物)
- ・上位技術者等の指示や指導無く、仕様・設計変更や不具合箇所の修正を行わない
- ・顧客に与える影響や基本設計思想を理解して、改良を考えること
- ・いい加減な話に基づいて仕事を行わないこと

2. 技術者の倫理

- ・(社)日本技術士会訳編「科学技術者の倫理—その考え方と事例」
- ・「だめなもののはだめ」...倫理教育が必要

私は宇宙職人

- 宇宙に興味を持ち、情熱、執念をもって挑戦
- 粘り強く、工夫し、成果を確認
- 使命感を持ち、苦勞を進んで処理
- モノ創りの魅力・難しさを大切に
- 現場に出て判断
- 温故知新・伝承
- 知ったかぶりをしない
- 忘年の交わりを心掛ける
- 人を信用し、自分も信頼される

“手づくりの衛星(ほし)囁き、聞くごとき心地するとふ、
若き技術者(たくみ)ら” —雨日山人—

皆さんへ

- 情熱・努力
- 得意分野 : 基本を習得の上
- 行動力 : 安全やリスクを配慮
- 語学力 : 英語は共通語化
- 人脈 : 信用・信頼関係
- 率先垂範・継続 : 先生へ

講義を終了するにあたって

宇宙システムでの通信技術は、宇宙の部分と地上の部分を含めたシステムの中枢神経に相当する役割と、広く衛星通信として社会の安全性と豊かさを身近な存在となっているなどきわめて重要で幅の広い技術分野で有ることを理解いただけたと思います。本講義では 1)宇宙通信概論として宇宙通信の歴史、衛星通信技術の特徴、通信技術の動向、 2)衛星システムにおける通信系設計概要として通信系設計概要、小型衛星通信機器の概要、加えて体験的な 3)宇宙技術者の心得等を概説しました。

学生諸君が宇宙分野に興味を持ち、CubeSatプロジェクトに挑戦し、21世紀を宇宙時代にするキーマンになられることを念じています。

<講義経過>

第1回：宇宙通信概論、宇宙技術者の心得

第2回：衛星システムにおける通信系設計概要：回線設計他

第3回：小型衛星通信機器の実際他