

2019-3-30 14:00～ 萩・明倫学舎 2 階・展示映像室

「陸自対空レーダーを用いた 実測調査の細部要領」 への批判

E-mail: yama40818@gmail.com

1

目次

1. はじめに : 防衛省の実測調査
2. 波と電波の基本
3. アンテナと放射パターン
4. レーダーの原理と種類
5. レーダーの視界
6. フェイズドアレイレーダー
7. 総務省「電波防護のための基準への適合確認の手引き」の概要
8. 陸自の電波実測調査
9. レーダーパルス的前提はよいのか？
10. まとめ
11. 付録

2

1. はじめに

イーグリス・アショア

SM3ブロック
II 2A段目上昇ブース
タ落下ブースタ
加速上昇

2018/12/11の
ハワイ沖での
イーグリス・ア
ショア迎撃実
験

米ミサイル防衛局よりFTI-03画像でSM-3ブロック2A迎撃ミサイルの発射
<https://news.yahoo.co.jp/byline/ishikawa/20181211-00107368/>
 ハワイ沖で実施された迎撃実験FTI-03「ステラークラウド」で日米共同開発中の弾道ミサイル防衛用迎撃ミサイル「SM-3ブロック2A」が迎撃実験に成功しました。今回はカワイ島のイーグリスアショア実験施設からSM-3ブロック2Aが発射されています。標的ミサイルはC-17輸送機から空中投下された中距離弾道ミサイル標的でした。SM-3ブロック2A迎撃ミサイルは前回10月26日の実験成功に続き今回の成功により2連続で成功、通算5回中3回目の成功となります。

3

レーダー電波と都市伝説？

- 米軍のレーダーの前を横切った鳥が落ちた
- 軍用高出力携帯無線機を使う兵士に脳腫瘍多発
- レーダーを浴びた自衛官には男の子が生まれない
- イーグリス艦でレーダー作動中は甲板には出られない
- イーグリス艦が港で電波を出すとき町中のTVをはじめ電子機器が狂う
- 佐世保軍港周辺で車の電子キー作動が狂った

総務省 | 東海総合通信局 | 電波の人体に対する影響
<http://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/denpa/jintai/>
 電磁界情報センター（経産省の肝いり）
<http://www.jeic-emf.jp/explanation/1051.html>
 WHOファクトシート No.226 「レーダーと人の健康」 1999/6
http://www.jeic-emf.jp/assets/files/pdf/fag/Factsheet_No226.pdf

4

強力な電磁波の影響・効果

- 落雷でPCなど電子機器が壊れた
- 大気圏外核爆発（EMP攻撃）で地表の電子機器や変電所などにダメージ
- 赤外線／紫外線レーザーによる金属加工、切断、溶接
<https://motor-fan.jp/tech/10006291>
- 電子レンジ 局所加熱(熱効果) 放電
 2.45GHz（日本ではSバンドのマイクロ波）
 600Wで180ccの水を1分間加熱→47.8℃昇温
- 生化学的效果？ 特に胎児や新生児
 WHO ファクトシートNo.226

5

防衛省の実測調査

- 陸自「中SAM」のレーダーから電波を放射し、サイドローブの強度を実測 ⇒ 机上計算の妥当性を実証する
- 総務省の「電波防護のための基準への適合確認の手引き」の計算式に基づいて机上計算する
- 電束密度が1mW/cm²以下であれば、人体に影響を及ぼすことはない

↑
計算式は妥当？

計算式で仮定されていること、適用の条件は？
 計算式で基準以下の電束密度なら人体に影響はない？
 人体に影響がなければ、住民の生活に影響がない？

6

実測調査（地点、方法）は妥当か？



7

実は、以下に述べるまでもなく、今月中旬の陸自の実測調査は破綻していた！

- 3月22日、防衛相は「レーダー実験による実測値が机上の計算値よりも大幅に小さく出てしまった。調査結果のとりまとめを5月まで延期し、追加の調査や作業が必要」と記者団に述べた。
- 昨年7月からの異常：調査業務に入札業者がなく、条件を変えて再入札した
- 「落札」したのは三菱！！

8

2. 波と電波の基本



9

波の重なり・干渉

2.1 水の波

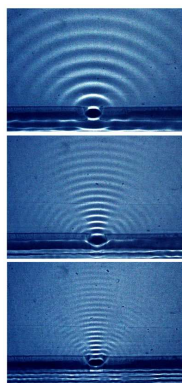


- 水たまり(プール)に小石を落とすと波面が同心円状に広がっていく
- ある場所では水面は山→谷→山→と変化する
- 周期 T : 山→谷→山の時間 に、水が外側に移動しているのではないが、波面は波長 λ だけ外に移動している。
- 波面の広がる速さ (波速) $v = \lambda / T$
- 振動数は1秒間に迎える山の数 $f = 1 / T$
- 波の一般的関係式 $\lambda f = v$

10

水の波の伝播と回折、干渉

- 上：波長程度の狭いスリットでは、回折して1点から球面波がでるようになる(ホイヘンスの原理)
- 中：やや狭いスリットでは回折波となる。また、干渉の結果、サイドローブが現れる
- 下：スリットが広いと、平面波のままに進む傾向が顕著。直進性を良くするとサイドローブは顕著



11

音の波（音波）

- 水の波は水（媒質）は波の進行方向に対して垂直に変動する「横波」
- 音の波は音圧が波の進行方向に平行に変動する「縦波」
- 音の振動数 アルト歌手の音域中心の「ラ」(A4)が毎秒440サイクル(440 Hzという)
- 音速は乾燥した0°Cの空気では $v=340 \text{ m/s}$
- 従って、波長は $\lambda = 340/440 = 0.77 \text{ m}$
- 音波は障害物があると反射されたり、裏に回り込んだりする
- また、干渉して「うなり」が聞こえたりする

12

2.2 光の波 (波長が1mmの2000分の1程度の電磁波)

- 光は物質により反射、屈折、回折、干渉が起こり、波である
- 光は真空中を毎秒30万kmで直進する
1849, 50年 光速 $c=3.00 \times 10^8$ m/s の精密測定
- 1861年、マクスウェルが理論的に電磁波を予測し、光も電磁波の一種であるとした

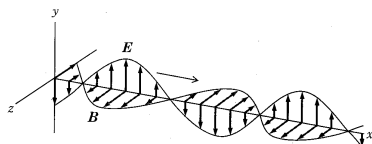


図 12.8 電磁場の電場と磁場

13

電波 (波長がおおむね0.1mmより長い電磁波)

- 1888年、ヘルツが実験で電磁波の存在を実証

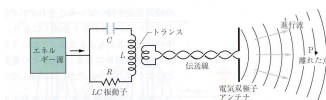


図 8-3 短波領域の進行電磁波を送り出す発振器の原理: アンテナの中で正弦的に変化する電流を $I(t)$ の振動子がつくり、アンテナが放射波を放射する。遠く離れた点で通過する波を放射する。

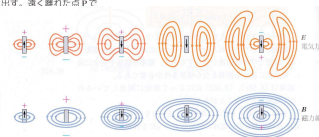


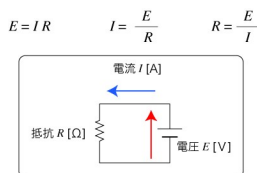
図 8.48 電磁波の放射の図解: 図を詳しくするために、電流が流れる導線を二つに示した。

- 1897年、マルコーニが大西洋を越え無線通信
- 1941年、マイクロ波レーダーが英国の防衛に実用化

14

2.3 電気と電磁波のエネルギー

- 電圧 V [V] の電源に R [Ω] の抵抗線をつなぐと I [A] の電流が流れる:
オームの法則 $I=V/R$



- 抵抗線は発熱し、電気エネルギーは熱となる:
ジュール熱 $P=VI=V^2/R$ [W] ... 1秒あたりのエネルギー

- 電磁波は真空を媒質とする波で、
電圧ではなく電界 E [V/m] と
電流ではなく磁界 B [Vs/m²]
で電磁波のエネルギーが記述される



15

2.4 放出された電磁波のエネルギーの基本式

- 基本のマクスウェルの方程式から放出される電磁波のエネルギーはポインティングベクトルで記述できることが導かれる

強度の時間平均は放射束密度

ポインティング・ベクトル S

$$S = E \times H = \frac{1}{\mu_0} E \times B$$

$$I = \langle S \rangle_T = \frac{1}{2T} \int_0^T S dt$$

- 電磁波のエネルギーの流れ $S = E^2/\mu_0 c$ [W/m²]
ここで $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$, $c=3 \times 10^8$, かつ S の単位を [mW/cm²] とする

- 郵政省告示第300号 電力束密度 S [mW/cm²]

$$S = E^2 / 120\pi / 10 \div E^2 / 3770$$

- 供給された電力が1点から空間に等方的に放射されるとし、半径 R [m] の球面上の電界 E [V/m] で表すと

$$S = P / 4\pi R^2 / 10 = P / 40\pi R^2$$

16

3. アンテナと放射される電波強度分布(アンテナパターン)

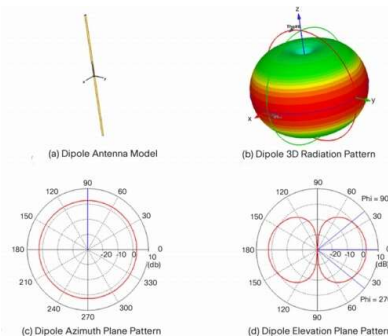
実際のアンテナとそこから放射される電波強度分布は複雑

- ダイポールアンテナ
- 八木アンテナ
- パッチアレイアンテナ
- フェーズドアレイアンテナ



17

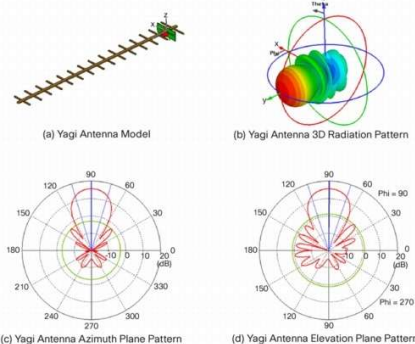
ダイポールアンテナの放射パターン



出典 https://www.cisco.com/c/ja_jp/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod_white_paper0900aecd806a1a3e.html

18

八木アンテナ(指向性が顕著)



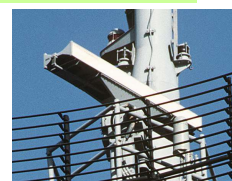
メインビームは14dB; ゲイン25; ビーム幅(半値幅: 3dB落ちる範囲)は36度。
そこでも11dBのゲインを有する。サイドローブは-2.5dBでメインの5%程度

19

4. 一般のレーダーの原理と種類

• 探索レーダー

アンテナを回転しながら、パルス電波を送信して反射波を捉えて、船舶・航空機の位置と移動方向を映し出す



• 火器管制レーダー

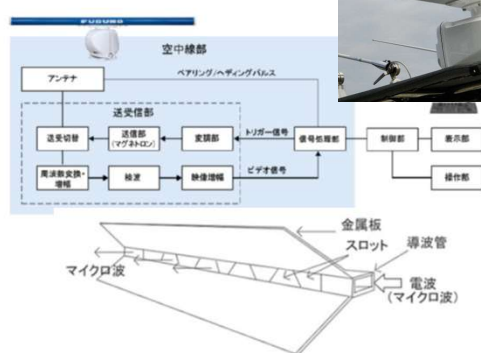
標的にアンテナを向け、位置・進路を求め、砲弾やミサイルの照準を合わせたり、ミサイルを誘導する



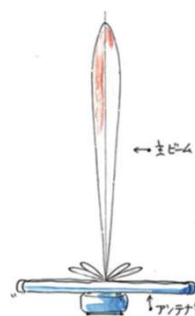
20

民生船舶用のレーダー

レーダーの構成要素



21

主ビーム、
分解能

300cmの長尺では水平分解能は
Xバンドでは0.75度

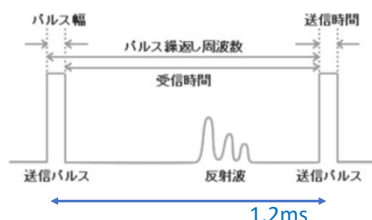
垂直ビーム幅は20~25度:
海上船舶を見るには十分

送ったパルスが反射して戻って
くる時間で距離を知る



22

パルス幅と繰り返し周波数

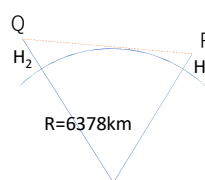


典型例 パルス幅0.8μs, 繰り返し周波数840Hz
反射波が0.8ms後に届くとき、120km先に物体がある
おおむね、150km以内を探査できるが、150km先では海面から1800m上しか見えない。

民生用の出力: 数100W~数10kW

23

5. 視界: 地球は丸い(1)



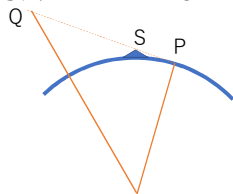
海拔 H_1 の P 点から水平
線に見える海拔 H_2 の
Q 点までの距離は、

$$PQ = \sqrt{(R + H_1)^2 - R^2} + \sqrt{(R + H_2)^2 - R^2} \approx 3752(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})$$

具体例: 海拔200mの見島のレーダーサイトで探索
海面上200mを飛来する物体は101kmまで接近すると
探知できる。マッハ2の戦闘機なら探知後2分半足らずで到来する

24

視界： 地球は丸い（２）



P点の前方の障害物Sがある場合、見える下限のQ点の高度はいくら？

計算式は省略

具体例： 東台Pの3km先に高度差75mの愛宕山がある。800km離れた平壤上空のQ点は **高度71km**

弾道ミサイル発射後、約1分で東台Pから山の稜ぎりぎりの探知できる。その後、6分以内にミサイルは岩国に到達することになる。

仰角 15 度では高度275km以上しか見えない!!!

25

6. フェイズドアレイレーダー

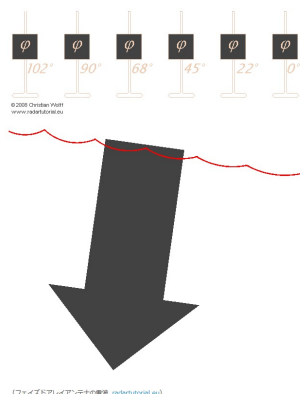
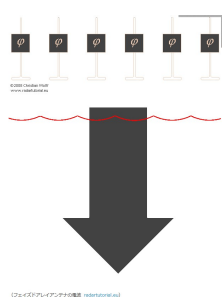


・フェーズドアレイ気象レーダー（PAWR）

多数のアンテナ素子を配列し、それぞれの素子における送信及び受信電波の位相を制御することで、電子的にビーム方向を変えることができるレーダー。2012年にNICT、大阪大学、東芝が日本で初めて開発に成功したこのレーダーは、30秒ごとに半径60km以内の雨雲の3次元構造を観測することができる。その後、PAWRは、大阪、神戸、沖縄、つくば等に設置され、高速観測性能を活かした気象予測手法の研究開発が進められている。現在、国内では実験用として5基のPAWRが稼働している。

26

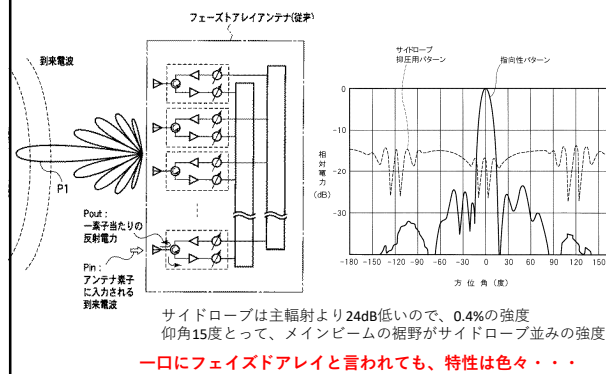
フェイズドアレイアンテナの原理



27

フェイズドアレイレーダーのパターン例

サイドローブを抑制するアンテナ設計(日本電気)の特許申請が認められ、2011.9に公開された資料



28

イージスのレーダー：

フェイズドアレイ型の特徴

- ・アンテナは固定されていて回転しない
- ・アンテナ面の前方水平±45度以上、垂直50度以上までの方位角・仰角の1点に向けパルス波を発射できる
- ・発射したパルス波の反射波より、物体の方位と距離、さらにドップラーレーダーでは近づいてくる速度が分かる
- ・次のタイミングで観測すると、物体の移動方向が分かる
- ・1発のパルス波では空間分解能は不十分だが、繰り返して観測し、弾道軌道であると仮定してパラメータを当てはめることで正確な方位と速度が決まる

1辺4mのサイズでSバンド3GHzでは
800km先の分解能は24km

29

アクティブ・フェイズド・アレイレーダーは3役

・探索レーダー

左右±45度、上下0～60度の範囲を逐次スキャンする

発射電波が約6度の拡がりを持てば、1面をスキャンするのに約0.8秒

・追尾レーダー

目標を発見すればその方向に追尾しながら電波を発射し、目標の正確な軌道を決める

・火器管制レーダー

発射した迎撃ミサイルを初期誘導する

30

以上を予備知識に、

- 総務省「電波防護のための基準への適合確認の手引き」を検討しよう

But

31

電波強度、アンテナパターン：開示されていない

- わが国の電波防護指針で規定する
管理区域 SAR(単位質量あたり吸収電力)が
0.4W/kgとなるのは、アンテナ前面（もろに照射を受けたとして）で何m先なのか？
一般環境 SAR が0.08W/kgを越えるおそれがあるのはどの範囲か？
- いずれも、導入されるLASSRの諸元を元に明示する責任は防衛省である
- 最終的には一番厳しい条件で実際に測定値で閉めすべし

32

7. 総務省「電波防護のための基準への適合確認の手引き」の概要

- 無線局から発射される電波の強度が基準値を超える場所には柵などを設置し出入りできないようにする（平成11年郵政省告示第300号）
- このため発射される電波強度を求め（周辺の無線局からの電波と合せて）、基準値への適合を確認するための「算出方法」と「測定方法」
- 基準値：Sバンドレーダー(2～4GHz)では6分間平均値で1 mW/cm²
- 算出によって求めることを基本にし、**算出結果が基準値を超える場合にのみ、測定をする**
- 基本算出式の結果が基準値を超える場合は指向性を考慮して算出する・・・これに該当している
- アンテナ形状によっては個別の算出式を使う・・・？

33

7.1 基本算出式

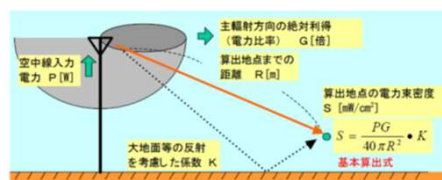
$$\text{基本算出式} \quad S = \frac{PG}{40\pi R^2} \cdot K \quad [\text{mW/cm}^2]$$

S：電力束密度[mW/cm²]

P：空中線入力電力[W] G：主輻射方向の利得

K：反射を考慮した係数

R：空中線からの距離[m]



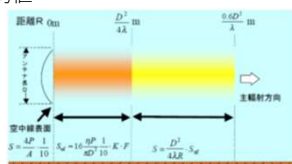
34

総務省の基本算出式について

$$S = \frac{PG}{40\pi R^2} \cdot K \quad [\text{mW/cm}^2]$$

- 利得は主輻射方向についてであり、過大ではあっても過小評価にならない
- 大地からの反射では76MHz以上では K=2.56だが、水面では4、鉄塔などの反射体があると加算される
- 指向性の在るアンテナでは過大評価となるので、さらに**電力指向性係数D**やアンテナ回転補正係数Fを掛ける
- いずれの場合もPは6分間の平均値
- その他、特殊なアンテナでは近くではR依存性が異なる

フェーズドアレイレーダーでも近接する所では評価式が異なるのでは？



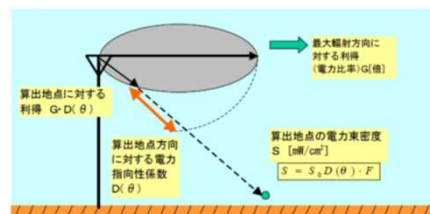
35

7.2 指向性を考慮した基本算出式

- 基本算出式を S_0 とすると

$$S = S_0 \times D(\theta) \times F$$

- 指向性の在るアンテナでは過大評価となるので、さらに**電力指向性係数D(θ)**やアンテナ回転補正係数Fを掛ける

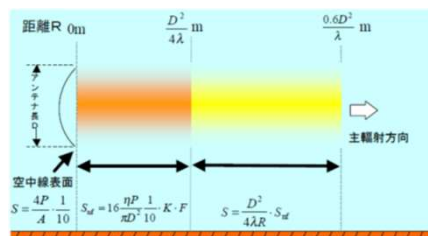


D：算出地点が主輻射の外側では最大副輻射方向の電力指向係数

36

パラボラアンテナなどの開口面 空中線アンテナの場合

- 主輻射方向で距離が一定値以下の場合



電力指向性係数は1；アンテナ長が10mで3GHzでは波長 $\lambda=0.1\text{m}$ であり250m以内は距離に依らず一定値の S_{nf} , 600mまでは距離 R に逆比例、600m以上は基本算出式

37

8. 中SAMをむつみ演習場 に持ち込み「実測調査」

陸自の03式中距離地対空誘導弾用の
レーダーもフェイズドアレイ

中SAM：三菱電機が主契約者としてシステム取りまとめ、三菱重工業が誘導弾、東芝がレーダーを製造

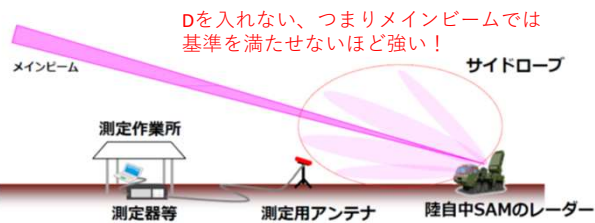
サイドローブの強度を実測し、「計算式」と合うことを確認、強度が桁違いに強いイージス・アショアのレーダーでも電波防護指針に言う $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下の電束密度があるので安心という筋書き



38

陸自の「計算式」 $S = \frac{P \times G \times D}{40\pi R^2} \times K$

- 指向性の在るアンテナなので、 G はおそらく100以上で、総務省の基本式に電力指向性係数の D 倍（弱く）で評価
- P, G, D のそれぞれの数値は非公表で、 $P \times G \times D = 17,726[\text{W}]$ を使う



39

イージス用のフェイズド・アレイでは、どう考えるのか？

- 指向性が強いがメインビームの拡がり幅は？
- サイドビームのみが地表を照射と考えて電力指向性係数をかけて良いのか？
- 総務省の手引きの算出式で良いのか？
式の不備はいろんな位置で実測して補う？
- 一定の仰角以上という運用は保証されるのか？
- 平時(探索モード)と異常時(追尾および火器管制モード)でパルス間隔や輻射方位角が変わると、電力や方向性指数は変わるのではないのか？
- 特に周囲の山や鉄塔等からの反射、他の電波源との干渉があり、平坦な地表とする反射係数は？

40

陸自の実測調査の分からないこと

- メインビームが当たらない条件での測定
- イージスのレーダーのパワーや指向性？

総務省「電波防護のための基準への適合確認の手引き」のp.21には、送信機出力2000kWの回転レーダーの計算例がある。パルス繰返し周波数は344ppsであるので、観測半径は500kmか。イージスでは1500km先まで見ようというのだから出力はこの10倍か。

空自は弾道ミサイルなどを警戒するカメラレーダーなどを持っている。いずれも山の上の見晴らしの良いところで、周囲に人家はない。

41

カメラレーダー(FPS-5)



42

9. レーダーパルス

normal survey mode

1500km先までサーベイするためには、パルス間隔 $T=10\text{ms}$
パルス幅 $3\mu\text{s}$ 、ピーク強度 1MW でも平均強度は 300W



しかし、1パルスの横方向の拡がりを2度とすると、90度範囲をサーベイするには45パルス、0.45sかかる。

パルス間隔を半分の $T=5\text{ms}$ としても、搬送周波数を変えたり、偏波を変えれば重ねることも可能だろう。平均強度は2倍。



43

シナリオ fire control mode

150km先の標的に対して、火器管制レーダーとして、追尾する；パルス間隔 $T=1\text{ms}$ で10倍の繰り返し；平均強度は 3kW



しかも、一点に向けられているので、向けられた場所にいると、そこでの電波強度は格段に高まる

普段は地平線から離れた角度を照射していても、例えば見島のレーダーサイトに近づく物体を追っていくと、阿武町の山の稜線を照射する可能性がある。(山林労働者や山体からの反射波)

住民の安全のためには最悪シナリオを考えて実測すべきだが？

44

電波の影響について(安全を主張する立場から)

➤富士電波工機株式会社

無条件条件、手放しではない

http://fdc.co.jp/support/emc/emc_3.html

顧客に安心して購入して貰うために分かりやすい説明に心がけている

➤電磁界情報センター <http://www.jeic-emf.jp/>

WHOのファクトシート No.226 June, 1996

電磁界と公衆衛生：「レーダーと人の健康」

通常は影響が出るより相当に低いレベルになるよう防護対策などで管理されているはず

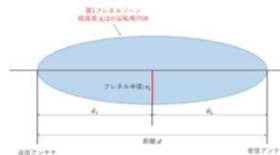
但し、航空機の火器管制レーダー($1\text{kW}/\text{cm}^2$)が地上の人に向くと危険になるかも知れない

(火器管制レーダー装備軍事機器の地上整備は要注意)

45

フレネルゾーン

- フレネル半径で決まる回転楕円体の内部に障害物があると、電波はうまく通らない



- フレネル半径： $r_1 = \{\lambda d_1 d_2 / (d_1 + d_2)\}^{1/2}$

直線で見通せても途中の障害物は邪魔

$\lambda=0.1\text{m}$ で $d_1=d_2=200\text{m}$ の時、 $r_1=3.2\text{m}$

$d_2=500\text{km}$ の時、 $d_1=500\text{m}$ ならば、 $r_1=7\text{m}$

$d_1=5\text{km}$ ならば、 $r_1=22\text{m}$

$d_1=500\text{km}$ ならば、 $r_1=160\text{m}$

46

3月中旬の実測調査の失敗

- 3/22 NHKニュース：防衛相の談話

「地元からのさまざまな意見や指摘を踏まえ懸念を払拭するため、追加の調査が必要だと考えている。調査で、レーダー実験による実測値が机上の計算値よりも大幅に小さく出た要因を分析し、調査結果に盛り込むためだ」と説明

要因として考えられること：フレネルゾーン

中SAMのレーダーは仰角 15° 以上

サイドローブは斜面がフレネルゾーンに引っ掛かり、標高の高いA、B地点に達しなかった？



47

補遺：3月13日の現地説明会に参加した方の証言

- 中SAMのレーダーはちゃんと動いていなかった？初日は装置の不調で調査中止、2日目には電源車が別途派遣されてきた。
- 陸自の資料のPGDのパラメータを質問したが、機密事項と言って開示しなかった。
- 水質問題では地元団体が別途申し込みを行った
- 不手際が露見していたので、22日には防衛相は早々に調査まとめの2か月延期を記者会見したのであろう。

48

電波強度、アンテナパターン ：開示されていない

- わが国の電波防護指針で規定する

管理区域 全身平均SAR(単位質量あたり吸収電力)が0.4W/kgとなるのは、アンテナ前面（もろに照射を受けたとして）で何m先なのか？

一般環境 全身平均SAR が0.08W/kgを越えるおそれがあるのはどの範囲か？

- いずれも、導入されるLASSRの諸元をもとに明示する責任は防衛省である
- 最終的には一番厳しい条件で実際に測定値で示すべし

49

まとめにかえて

- 「国の安全基準以下となるように措置されるので安全性は担保される」というが、
- イージスのレーダーの諸元は開示されていない
- どういう運用（電波の出し方）かも分からない
- 誰が安全性を担保する？
- 平常時（探索モード）ではなく、追尾・火器制御モードの電波放射をもとにして立ち入り制限区域が設定されるべきである
- 異常時（想定外）を考えた住民の立場での電波モニター；地表に主輻射が当たらないような電波反射板(但し、反射板が新たなサイドローブを生む)や電波発生警告灯の設置を行うこと；県や市の役割は？

たとえ電磁波は基準以下に出来ても、戦争を呼び込んだり、民生の発展の阻害要因となって、地元は寂れるだけだろう。なぜイージスは必要？しかもむつみに？

50

Question?

むつみは本当に適地？

山影で発射1分過ぎまで弾道ミサイルが見えない
巡航ミサイル攻撃に弱い（海上すれすれは死角）

ミサイル攻撃をうける危険なシナリオ

51

付録

52

「米が日本に新レーダー配備検討」 (1月27日、読売)

- 米国(本土、ハワイ、グアム)を狙ったICBM迎撃態勢を強化するため、ハワイ、グアムのほか日本にも大型固定式レーダー（米本土防衛レーダー：HDR）を配備する
- ハワイでは2023年に運用を開始
- 日本にも置いてハワイのレーダーとの連携運用をめざす

日本ではどこに置く？
イージス・アショアとの関係は？
1/17のトランプのMDRとの関係は？

昨年秋、相模原市に米軍のミサイル防衛司令部がハワイから移駐開始
嘉手納のPAC3部隊、グアムのTHAAD部隊、車力と経ヶ岬のXbandレーダーを指揮
イージス艦、空自レーダー、イージス・アショアは司令部にリンクし、連携へ

53

イージス・アショアのレーダーの選定 結果 2018-7-70 防衛省

- 2つの候補

提案構成品	製造企業	実績
LMSSR	ロッキード・マーチン	アラスカでICBM防衛のため構築中
SPY-6	レイセオン	次期イージス艦システムで採用

- ロッキード社のLMSSRを選定
一基あたり1,340億円
教育訓練、維持・運用経費を含め2基で4,664億円
製造・配置まで約6年間

ネット情報では、LMSSRのレーダーには日本製の半導体（富士通）の使用が可能だが、価格・納期は高め
しかし、12月末の産経ニュースによると、日本企業の参加は見送りとなり、国防族議員が反発！ その後も自衛隊OBから選定やり直せと疑義

54