

LCGT用真空ダクト設計のための散乱光の見積

高橋竜太郎(国立天文台)

平成12年6月22日

1 ダクトの表面形状と反射率

ダクト表面はLCGTに必要な超高真空に適合したものでなければならず、一般には表面積を減らすため ECB や TiN など滑らかなものを選択される。しかしダクト自体を冷やすような場合、すなわちクライオパネルを考えた場合は逆に表面積を大きくして気体分子を吸着させる必要があるため表面は粗くなる。光学的には散乱光を減らすために表面自体が光を吸収してくれるもの、すなわち「黒い」ものがよいが、表面形状については粗い表面によって散乱させるよりも、きれいに反射させてしかるべき遮光を施すのが効率的である。Nd:YAG レーザーを光源とした場合の反射率(5° 反射)は実測によると SUS+ECB 66%、チタン+高温酸化 2%(散乱は多い)、SUS(?)+TiN 72%、SUS+ECB+オゾン酸化 67%、スチール(?) +DLC 11%となっている。表1に主な表面の光学的性質をまとめた。

表 1: 主な表面の光学的性質。

	粗い(散乱)	滑らか(直接反射)
反射的	CEBAF、GBB	ECB、TiN
吸収的	活性炭、グラファイト	DLC

2 各干渉計のダクト形状と散乱光対策

LIGO、VIRGO、GEO の真空ダクトは SUS にベーキングを施したものであり、特殊な材料や表面処理は行われていない。従ってそれらの表面は反射的粗い面であり、そのままでは迷光が多いと考えられる。このため多数の遮光バツフルがダクト内に配置されている。表2に各干渉計のダクトとバツフルの仕様を示す。

表 2: 各干渉計のダクトとバツフルの仕様。

	LIGO	VIRGO	GEO
ダクト形状(径[m]×長さ[m])	1.2×4,000	1.2×3,000	0.6×600
ダクトベーキング	150°	空气中 400°	600A 直接通電
バツフル形状(高さ[cm]×角度[°])	6×55	10×45	3×25.7
バツフル表面	酸化膜	AR	エポノール
バツフル枚数	122	18	128

VIRGOグループはダクト内の散乱光の影響を解析的に計算し [1]、必要な数のバッフルを効率的に配置している¹。バッフルにはガラスに AR コーティングを施したものをを用いているため、散乱光の吸収性能はかなり高いと思われる。他のグループにおいてもある程度の計算はなされているようであるが、感じとしては十分すぎる数のバッフルを配置しておりあまり参考にはならない。

3 散乱光量の見積

ここではミラーに再入射する散乱光の量について議論する。最入射した散乱光がメインビームとどう干渉するかについては考えない。また以下の仮定をおいた。

1. ダクト表面は TAMA 仕様とする。すなわち SUS + ECB である。
2. メインビームはダクトの中心を通るものとし、また広がりはない。
3. ミラー表面で散乱し直接ミラーに入射する光はメインビームとみなす。

3.1 ダクト表面における反射率

金属表面の s 偏光、p 偏光に対する反射率 R_s 、 R_p は入射角を θ として以下の式で表される。

$$R_s = 1 - 4\xi' \cos(\theta) \quad (1)$$

$$R_p = \left| \frac{\cos(\theta) - \xi}{\cos(\theta) + \xi} \right|^2 \quad (2)$$

ここで ξ は材質によってきまる表面インピーダンスで、一般に複素数である (ξ' はその実部)。図 1 に p 偏光の Nd:YAG レーザー (1,064nm) に対する SUS + ECB 表面の反射率の測定結果を示す。この結果から最小二乗法を用いて式 2 をフィットさせると、 $\xi = 0.041 + 0.18i$ という値を得る。

3.2 ミラー表面における光の散乱

図 2 のように 2 つのミラーの中心で共振状態にあるパワー P のビームを考える。ミラー表面で散乱して距離 R の微小エリア dF を通る光のパワー dP は以下の式で表される [2]。

$$\frac{dP}{P} = \left(\frac{a_1}{\phi} + \frac{a_2}{\phi^2} \right) \frac{dF}{R^2} \quad (3)$$

ここで a_1 、 a_2 は 2 成分ある散乱光量の指標で散乱損失が比較的大きいとした場合それぞれ 2×10^{-4} 、 10^{-6} といった値をとる。 ϕ は散乱角で、ダクト表面への入射角 θ とは $\phi = \pi/2 - \theta$ の関係となる。また微小エリア dF は微小散乱角 $d\phi$ を用いて

$$dF = 2\pi R^2 \phi d\phi \quad (4)$$

¹VIRGO のダクトはまだ設置されていない。

であるからこれを式 3 に代入して積分すると 2 つの散乱角 $\phi_2 > \phi_1$ ではさまれた角度に散乱する光量比は

$$2\pi \left(a_1 \Delta\phi + a_2 \log \left(1 + \frac{\Delta\phi}{\phi_1} \right) \right), \quad \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (5)$$

となる。

3.3 光線追跡

式 5 を使ってミラー表面で散乱した光がどのような割合でミラーに再入射するかを計算した。ダクト表面での反射率は事象が軸対称であることを考えて式 1、2 の平均値を使った。散乱光の行方は以下に分類される (図 2 参照)。

1. ダクトに当たらずミラー後方へぬける。
2. ダクトで反射してミラー後方へぬける。
3. ダクトで反射してミラーに再入射する。

TAMA を例にとると 1 が 9.3ppm、2 が 55.5ppm、3 が 11.2ppm となる。ミラー後方へぬける割合が大きいので、フロントミラーとビームスプリッタの間にはミラー径弱の遮光板が必要かも知れない。表 3 に各干渉計のパラメータを使ったミラーに再入射する散乱光比の計算結果を示した。LCGT については標準的な場合とダクト径、ミラー径ともに絞った場合を挙げた。径を絞っても再入射する散乱光は 1.5 倍程度増えるに過ぎない。

表 3: 各干渉計のパラメータを使ったミラーに再入射する散乱光比の計算結果。

	TAMA	LIGO	VIRGO	LCGT	
ダクト径 [m]	0.4	1.2	1.2	1.0	0.4
ミラー径 [m]	0.1	0.25	0.35	0.3	0.2
アーム長 [m]	300	4,000	3,000	3,000	3,000
散乱光比 [ppm]	11.2	7.1	10.3	10.2	14.5

次にバッフルをつけた場合を考える。VIRGO の案では 18 枚のバッフルをログ間隔で配置している。図 3 は VIRGO のパラメータを用い、ミラーに再入射する散乱光比をミラーに再入射するまでのダクト表面での反射回数ごとに計算したものである。18 枚のバッフルのうち半分の 9 枚が 1-9 回の反射回数でミラーに再入射する散乱光を完全に遮断したとすると、10.3ppm のうち 6.1ppm がなくなり半分以下の 4.2ppm になる。LCGT でダクト径、ミラー径ともに絞った場合に、この 4.2ppm を実現しようとする 14 × 2 枚のバッフルが必要となる。

4 まとめ

以上の計算は特定のダクト表面を仮定し、また散乱光の量だけに注目したものである。バッフルの配置及びその効果については有用な情報を与えるであろう。常識的なダクト径を考え

る限り散乱光量は径に反比例し、ダクト径を絞ってもその分バツフルを増やすことで対処可能であるように思われる。実際の干渉計への影響を考えるためには散乱光の位相までをいれたシミュレーションが望まれるが簡単ではない。むしろ TAMA での実験的測定が望まれる。

参考文献

- [1] J.-Y. Vinet, V. Brisson and S. Braccini: Scattered light noise in gravitational wave interferometric detectors: Coherent effects, *Phys. Rev. D*54, 1276-1286(1996).
- [2] W. Winkler: A Michelson interferometer using delay lines, in *The Detection of Gravitational Waves*, Cambridge Univ. Press, 269-305(1991).

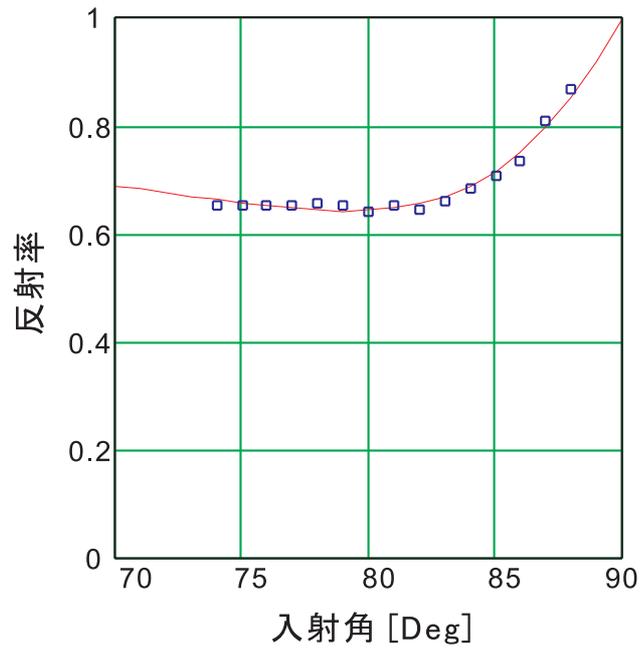


図 1: p 偏光の Nd:YAG レーザー (1,064nm) に対する SUS + ECB 表面の反射率。測定値を □ で、最小二乗法を用いてフィットさせた計算値を実線で示す。

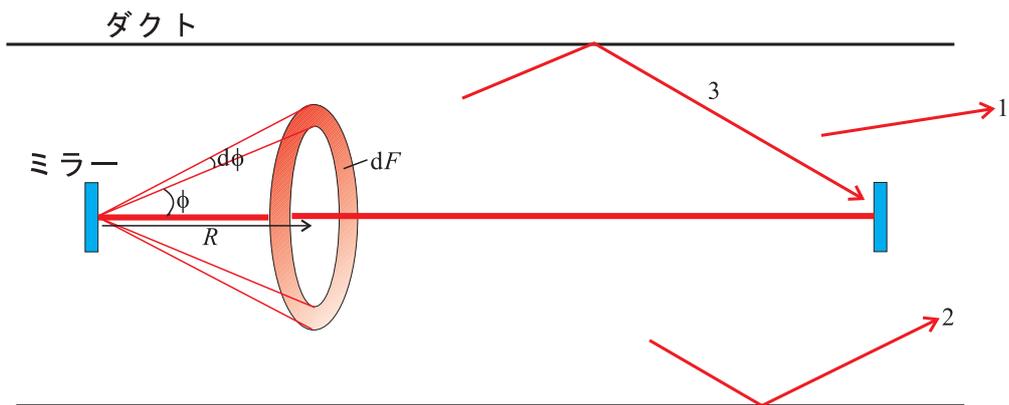


図 2: 散乱光の概念図。2つのミラーの中心で共振状態にあるビームがミラー表面で散乱して距離 R の微小エリア dF を通る。

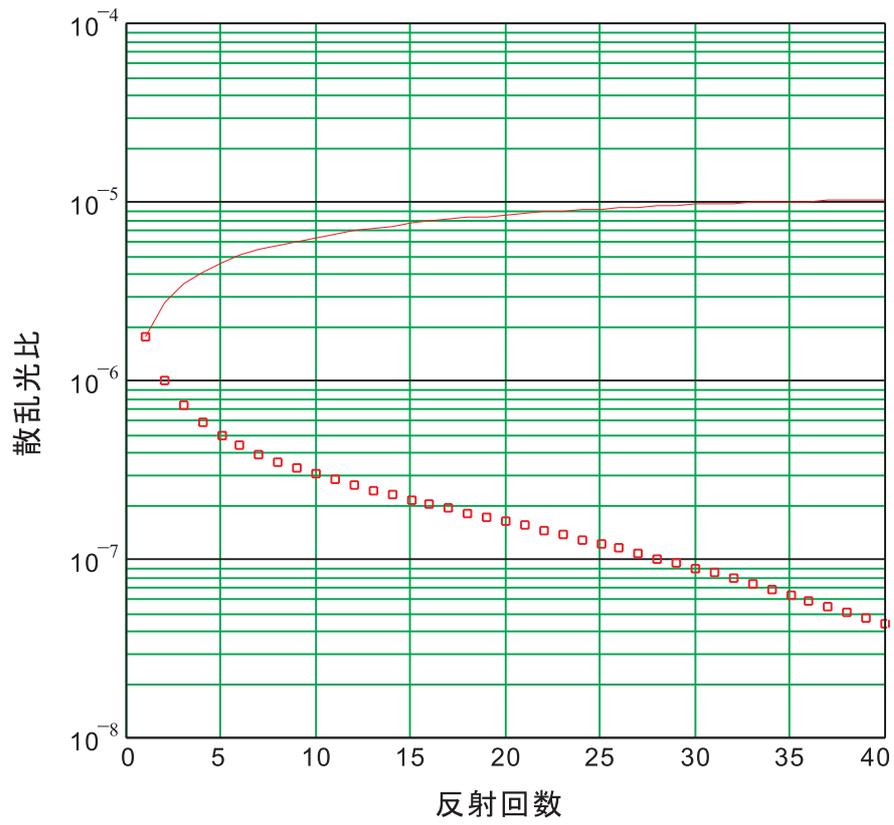


図 3: VIRGO のパラメータを例にとったミラーに再入射する散乱光比の計算結果。□は再入射するまでのダクト表面での反射回数に対する値で、実線はその累積値。