

1 真空系

齋藤芳男 (高エネルギー加速器研究機構)、高橋竜太郎 (国立天文台)

LCGT の目標変位感度は 100 Hz で $1 \times 10^{-20} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。TAMA300 を用いて行なわれたキセノンガス注入による残留ガスの影響を調べた実験の結果 [1] は三尾の考察 [2] に基づく見積もりとよく一致していた。残留ガスとして水を仮定すると LCGT のパラメータを用いた計算では $2 \times 10^{-7} \text{Pa}$ の圧力で $1 \times 10^{-21} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となり、安全係数 10 を得られる。

真空系は予算の大きな割合を占め、また作り直しがきかないため慎重に検討する必要がある。ダクト径は単一干渉計であれば 0.5 m 程度でも可能であるが、補助干渉計用ビームも含めて 2 本のビーム通すため、1 m 程度は必要となる。以下に LCGT 真空系の仕様を示す。

到達圧力	$2 \times 10^{-7} \text{Pa}$	
真空ダクト		
全長	3 km	2
直径	1 m	
ユニット長	12 m	
材質	ステンレス鋼	
接続	フランジ締結	
真空槽		
Type-A	$2 \text{ m}\phi \times (3.5 \text{ m} + \text{クライオスタット } 3 \text{ m})$	4
Type-B	$2 \text{ m}\phi \times 4.5 \text{ m}$	5
Type-C1	$2 \text{ m}\phi \times 3 \text{ m}$	1
Type-C2	$1 \text{ m}\phi \times 2 \text{ m}$	3
材質	ステンレス鋼	
排気装置		
初期排気	ルーツポンプ ($100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)	10
主排気ユニット		67
	ターボ分子ポンプ ($1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	
	イオンポンプ ($1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	
	ドライポンプ ($15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)	
バッフル		
高さ	50 mm	
設置間隔	12 m	
表面	DLC	

1.1 真空ダクト

超高真空を得るために通常行われる組み立て後のベーキングによる脱ガス工程は、直径1m、長さ3kmのLCGTの光路用ダクトに施すことは容易でなく、また安全上問題も多い。組み立て前のユニットダクトの長さは一般交通道路での搬送や坑道への搬入作業を考える場合、12mが限界となる。ユニットダクトの現地での組み立て前に施す脱ガス処理方法、あるいはガス放出低減化処理方法としては、電解複合研磨 [3]、電解研磨 [4]、化学研磨 [4]、TiN-coating [5] などが、ステンレス鋼を素材として用いる場合には表面変質層を除去する効果大きい。とくに電解複合研磨法は大型の液槽を必要としない実用的なものであり、実際にこれを施したTAMA300のダクトでは、ベーキングを行わないで 10^{-7} Pa 台の圧力に到達している [6]。

ステンレス鋼のこのような処理において、更に詳しい表面状態の調査から、表面変質層の除去の後に形成される酸化膜の厚さや性質が残留ガスの主成分である水分子に対する吸着性、つまりガス放出特性に影響を与えていることが分かった。とくに、これらの処理の後にさらに真空中で250℃の熱処理を行うことにより、酸化膜の不動態化が進みガス放出速度を低減できることが明らかになった。従って、TAMA300より大きい表面積を有するLCGTでは、ステンレス鋼をダクト材料として用いる場合には、より確実、迅速に超高真空領域に到達させるために、ユニットダクトでの加熱処理を研磨、洗浄工程の後に行うことが重要であると結論できる。

現場でのユニットダクトの接続には、フランジを介しての機械的締結によるか、あるいは溶接による直接接合が考えられる。現場での直接接合は坑内の環境コントロールや安全管理上の問題があるため、フランジ締結による接続が妥当であろう。もちろん、ユニットダクトの搬入から締結まで塵埃の付着や水分の吸着は避けなければならないので、ユニットダクトは密閉シールで現場に搬入するなど注意が必要である。

3km長のダクトを水平な直線上に精度よく設置するのは容易ではない。TAMA300でのダクトの設置精度は300mで5mmだが、これを単純にスケールすると50mmとなる。LIGOでは基準GPS系(WGS-84)とGPSローバーを用いたシステムにより10mm以下の精度をだしているが、許容量は60mmとしている [7]。LCGTでも50mm程度の精度は必要である。残念ながらLCGTの場合地下のためGPSは使用できない。レーザートラッカーを使用する場合20mで ± 0.1 mmの精度は可能である。この値を外挿すると3kmで15mmとなり十分許容できるレベルである。

1.2 真空槽

LCGTでは4種、13基の真空槽が使用される。各真空槽の間はDN1000あるいはDN400のゲートバルブによって仕切られる。各々の真空槽のサイズは中に組

み込まれる防振装置の構造に依存する。Type-A には SAS と低温ミラー懸架装置が、Type-B には SAS とミラー懸架装置が、Type-C にはスタックとミラー懸架装置がそれぞれ組み込まれる。図 1 に真空槽、ゲートバルブ、排気装置の配置を示す。1-2 m 径の大型真空槽の材質としてはステンレス鋼が適している。

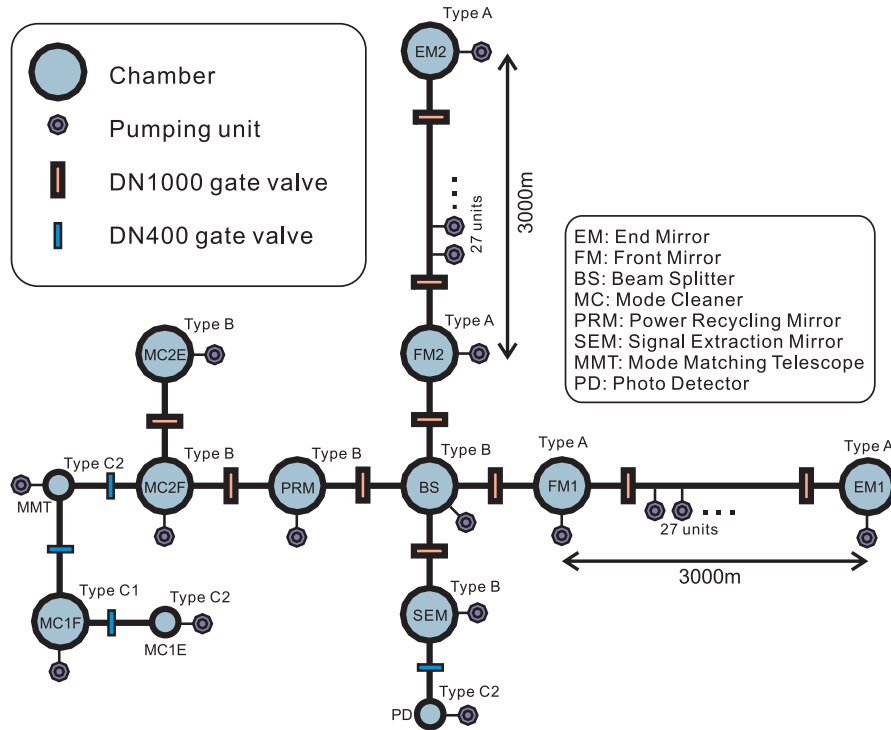


図 1: LCGT 真空系の構成。

1.3 排気装置

直径 D (1 m)、長さ L (3 km) のダクトに、等しい間隔で N 箇所排気速度 S [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] のポンプを取り付けた時の圧力分布を、単位長さあたりのコンダクタンス c [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}$] を用いて見積ってみる。 c は、

$$c = \frac{\pi D^2 \bar{v}}{4} \frac{4D}{4} \frac{1}{3} \quad (1)$$

で与えられ、 \bar{v} は残留ガス分子の平均速度である。

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (2)$$

ダクトの全表面積を A [m^2]、そこからの一様に単位面積当り q [$\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$] のガス放出速度があるとすれば、ポンプ間の圧力は、

$$p(x) = -\frac{qAL}{2cN^2} \left(\frac{x}{L/N}\right)^2 + \frac{qAL}{2cN^2} \left(\frac{x}{L/N}\right) + p_{\min} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 p_{\min} はポンプ位置での圧力である。

$$p_{\min} = \frac{qA}{SN} \quad (4)$$

また、ポンプの中間の位置で圧力は最大 (p_{\max}) となり、最小値との比は、

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{SL}{8cN} + 1 \quad (5)$$

となる。 $q = 1 \times 10^{-8} \text{Pa m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ と仮定し、 $S = 1 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、 $N = 30$ (つまり 100 m おき)、温度 300 K、空気の分子量を 29 とすれば、

$$p_{\min} = 3.1 \times 10^{-6} \text{Pa}, p_{\max}/p_{\min} = 1.1 \quad (6)$$

を得る。なお、TAMA300 では、75 m 間隔で $S = 0.8 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ のイオンポンプが設置されているが、同様なガス放出速度を仮定した場合、

$$p_{\min} = 1.2 \times 10^{-6} \text{Pa}, p_{\max}/p_{\min} = 2.0 \quad (7)$$

となる。TAMA300、LCGT とともに、このように $S = 1 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ というような排気速度の大きいポンプをかなり長い間隔で設置しても圧力分布が一様に近いのは、直径が大きくダクトのコンダクタンスが大きいからである。

ここで仮定したガス放出速度の値は、ステンレス鋼の 50 時間排気した後のものであるが、排気時間がさらに経過すれば全体の圧力は低下する。一般に、ガス放出速度は排気時間に反比例して減少して行くことが経験的に知られており、例えば 500 時間後にはさらに一桁低い圧力に到達することが期待される。もちろん、さらにガス放出速度の低いチタンを用いれば、より早い時期に所定の圧力に到達する。イオンポンプは現実的にはこれより大きい排気速度を持つものはないので、全体の圧力を下げるためにはポンプの数をさらに増やすことが必要であるが、費用や保守の面から大幅に数を増加させることはそれほど効率的でない。

干渉計を用いた観測時には、振動抑止や停電等の事故対策の観点から、イオンポンプによる排気が最も適している。イオンポンプを作動させるまでの排気システムとしては、ターボ分子ポンプあるいはクライオポンプの使用が考えられる。

ターボ分子ポンプは、排気速度が数 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の大型のものまで市販されているが、高速回転するロータの材料強度の問題から大型になるほど圧縮比を大きくすることが難しくなり、取り付け口径も大きくなり大型ゲートバルブが必要となる。さらに大型ターボ分子ポンプは重量や体積の観点からもその取り扱いが容易でなく

なってくる。その意味では、 $1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ 程度の排気速度を持つものが最も扱い易いが、その場合、上の計算から 30 台以上の設置数が要求される。

クライオポンプは、これに比べ、同一口径では排気速度が数倍大きく得られるため (例えば $5\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ の排気速度が 250 mm 程度の直径の口径で得られる)、10 台程度の設置で十分イオンポンプの動作領域まで到達すると考えられる。しかしながら、掃出し型のターボ分子ポンプに対し溜込み型のクライオポンプでは、排気積算量 (スルー putt 量) が大きくなると排気速度が低下する、いわゆる飽和現象が生じる。したがって、排気のごく初期における高圧力領域での使用を避け、また、排気の途中で一端活性化作業を行うなど、排気過程を工夫する必要がある。

大気圧からの初期排気過程 (ターボ分子ポンプやクライオポンプなどを動作させるまでの段階) には、容積移動型の機械ポンプの使用が適している。体積の大きい真空容器の場合、従来は揺動式キニーポンプなどがよく使用されてきた。しかしながら、干渉計の観測の事前排気とはいえそれが発生する振動は大きく、精密アライメントなどに与える影響は致命的と予想される。また、回転式機械ポンプであっても、排気速度の大きい大型ポンプの場合は偏心回転による振動が大きいものも多い。したがって、ある程度の大きさに制限した範囲で機械式ポンプを選択しなければならない。油回転ロータリーポンプは、長時間の排気が要求される大体積容器には、その油蒸気の拡散による汚染が無視できず適さない。このような油汚染を抑えたドライポンプとして、ピストン、スクロール、スクリュウ、ルーツなどの構造を持つものが市販されている。このうち、容積移送用ロータ部に摺動構造を持たないルーツポンプは保守の容易性の点で LCGT に適している。多段ルーツポンプにさらに前段補助ルーツポンプを組み合わせたものは、小型のものでも $100\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ 以上の排気速度を持ち、また到達圧力も 30 Pa と低い。

体積 V [m^3] の容器を排気速度 S [$\text{m}^3\text{ s}^{-1}$] のポンプで排気する時、その時定数 τ は V/S で表される。仮に $S = 100\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ とを持つルーツポンプ 1 台で系全体を排気する ($\tau = 24\text{ h}$) と、圧力を 1 桁下げるのに 54 時間を要することになる。 10^5 Pa の大気圧から 10 Pa の圧力までに到達するには 1 週間と見積もれるが、実際には、空間の水分子は再吸着して排気過程を遅らすことになるので更に長い粗排気過程を考えなくてはならない。したがって、この小型のルーツポンプを 10 台程度設置するのが、現実的な排気システムと考えられよう。

1.4 光学特性

1.4.1 各干渉計のダクト形状と散乱光対策

LIGO、VIRGO、GEO の真空ダクトはステンレス鋼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使われていない。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 1 に各干渉計のダクトとバツフルの仕様を

示す。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 [8]、必要な数のバッフルを効率的に配置している。バッフルにはガラスに AR コーティングを施したものを採用しているため、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がなされているようであるが、とにかく可能な限り多数のバッフルを配置しているという感じである。

表 1: 各干渉計のダクトとバッフルの仕様。

	LIGO	VIRGO	GEO
ダクト形状 (径 [m] × 長さ [m])	1.2 × 4,000	1.2 × 3,000	0.6 × 600
バッフル高さ [cm]	6	10	3
バッフル角度 [°]	55	45	25.7
バッフル表面	酸化膜	AR	エポノール
バッフル枚数	222	18	128

1.4.2 散乱光雑音の見積

ミラーに再入射する散乱光のがメインビームとどのように干渉し、最終的な位相雑音としてどう現れるかまでを見積る。以下の仮定をおいた。

1. ダクト表面は TAMA 仕様とする。すなわちステンレス鋼 + 電解複合研磨である。
2. メインビームはダクトの中心を通るものとする。
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。

まず図 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_0 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。

$$\frac{dP}{P_0} = \text{BRDF}(\phi) \frac{dF}{R^2} \quad (8)$$

微小エリア dF は微小散乱角 $d\phi$ を用いて

$$dF = 2\pi R^2 \phi d\phi \quad (9)$$

であるから 2 つの散乱角 $\phi_{max} > \phi_{min}$ ではさまれた角度に散乱する光量比は

$$\frac{P_{scat.}}{P_0} = \int_{\phi_{min}}^{\phi_{max}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi \phi d\phi \quad (10)$$

で与えられる。 ϕ は散乱角で、ダクト表面への入射角 θ とは $\phi = \pi/2 - \theta$ の関係になる。BRDF¹はミラーの散乱強度分布を示す ϕ の関数で、ミラーの表面粗さや形状誤差に依存する。LCGT用ミラーに対するこの関数は明確ではないので、ここではLIGO Pathfinder mirrorの式[9]

$$\text{BRDF}(\phi) = \frac{1000}{(1 + 5.302 \times 10^8 \phi^2)^{1.55}} \quad (11)$$

を用いた。

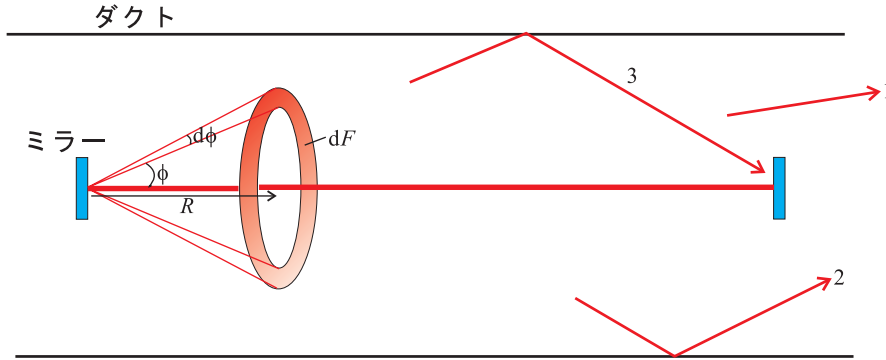


図 2: 散乱光の概念図。2つのミラーの中心で共振状態にあるビームがミラー表面で散乱して距離 R の微小エリア dF を通る。

次に式(10)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。最初に計算に必要なパラメーターを定義しておく。

波長	$\lambda = 1.064 \times 10^{-6} \text{ m}$
キャビティ-長	$L = 3,000 \text{ m}$
ミラー半径	$r_{\text{mirror}} = 0.125 \text{ m}$ ($\phi_{\text{mirror}} = r_{\text{mirror}}/L$)
ダクト半径	$r_{\text{duct}} = 0.5 \text{ m}$ ($\phi_{\text{duct}} = r_{\text{duct}}/L$)
ビームウェスト半径	$\omega_0 = 0.033 \text{ m}$

散乱光の行方はその角度 ϕ に従い以下のように分類される(図2参照)。

1. ダクトに当たらずミラー後方へぬける。
($\phi_{\text{mirror}} < \phi < \phi_{\text{duct}}$)
2. ダクトで i 回反射してミラー後方へぬける。
($\phi_i + \phi_{\text{mirror}} < \phi < \phi_i + \phi_{\text{duct}}$ or $\phi_i - \phi_{\text{duct}} < \phi < \phi_i - \phi_{\text{mirror}}$)
3. ダクトで i 回反射してミラーに再入射する。
($\phi_i - \phi_{\text{mirror}} < \phi < \phi_i + \phi_{\text{mirror}}$)

ここで $\phi_i = 2i\phi_{\text{duct}}$ である。ほとんどがミラー後方へぬけるので、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。3の場合を

¹bi-directional reflection distribution function

考えるとダクトで i 回反射して遠いミラーに入射する散乱光の光量比 P_i/P_0 は

$$\frac{P_i}{P_0} = R(\phi_i)^i \int_{\phi_i - \phi_{mirror}}^{\phi_i + \phi_{mirror}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi\phi d\phi \quad (12)$$

となる。金属表面の s 偏光、p 偏光に対する振幅反射率 R_s 、 R_p はダクト表面への入射角 θ を用いて以下の式で表される。

$$R_s = \frac{\cos(\theta) - n \cos(\theta')}{\cos(\theta) + n \cos(\theta')} \quad (13)$$

$$R_p = \frac{\cos(\theta') - n \cos(\theta)}{\cos(\theta') + n \cos(\theta)} \quad (14)$$

$$\sin(\theta') = \frac{1}{n} \sin(\theta) \quad (15)$$

ここで n は材質の屈折率で、一般に複素数である。図 3 に Nd:YAG レーザー (1,064 nm) に対するステンレス鋼 + 電解複合研磨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 (13)、(14) をフィットさせると、 $n = 2.5 - 4.1i$ という値を得る。ダクト表面でのエネルギー反射率 $R(\phi)$ は事象が軸対称であることを考えてこれらの平均値を用いた。ダクト表面で反射して遠いミラーに入射した散乱光は再び BRDF に従い散乱しメインビームと干渉する。この時メインビームの広がりが角 $\phi_{main}(= \sqrt{\lambda/\pi\omega_0})^2$ が有限なので最終的に干渉計に影響を与える散乱光量比は

$$\frac{P_i}{P_0} \int_{\phi_i - \phi_{main}}^{\phi_i + \phi_{main}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi\phi d\phi \quad (16)$$

となる。

最後にメインビームと散乱光の干渉過程を考える (図 4)。この 2 つの光の光路長差は TAMA の場合の 1 回反射でも 133λ 以上あり、静的位相差 $\Delta\Phi_{scat}$ がどの値をとるかは定かではない。そこで散乱光ベクトル E_{scat} の位相揺らぎ $\delta\Phi_{scat}$ が干渉光 E_{comb} の位相揺らぎ $\delta\Phi_{comb}$ として最も大きく現れる場合を想定する。すなわち $\Delta\Phi_{scat} = n\pi$ ($n \gg 1$ は整数)。このとき

$$\delta\Phi_{comb} = \frac{E_{scat}}{E_{main}} \delta\Phi_{scat} \quad (17)$$

E_{scat}/E_{main} の 2 乗が式 (16) で表される光量比に他ならない。今散乱光が反射するダクト表面が面と垂直方向に δz_i だけ揺らいでいるとすると、 i 回反射によって生じる散乱光の光路長揺らぎは

$$\phi_i \sqrt{\sum_{k=1}^i (\delta z_k)^2} \quad (18)$$

²厳密にはビームウェストの位置による

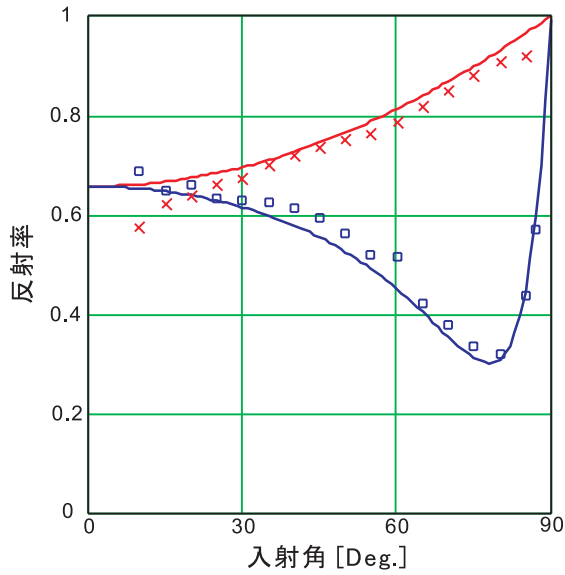


図 3: Nd:YAG レーザー (1,064 nm) に対するステンレス鋼 + 電解複合研磨表面の反射率。測定値を ×(s 偏光) 及び □(p 偏光) で、最小二乗法を用いてフィットさせた計算値を実線で示す。

である³。従ってこれによって現れるミラー変位雑音 δx_i は式 (17) の関係から

$$\delta x_i = \sqrt{\frac{P_i}{P_0} \int_{\phi_i - \phi_{main}}^{\phi_i + \phi_{main}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi\phi d\phi \cdot \phi_i} \sqrt{\sum_{k=1}^i (\delta z_k)^2} \quad (19)$$

となる。全ての散乱光の影響は反射回数 i が 1 から無限大になる場合までを足し合わせる事 (二乗和のルート) によって得られる。LCGT でこの雑音が最も効くのは 30 Hz 以下の帯域である。LCGT のサイトである神岡鉱山での地面振動レベルは 30 Hz で $1 \times 10^{-11} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるのでダクト表面の変位 δz としてはこれを用いる。

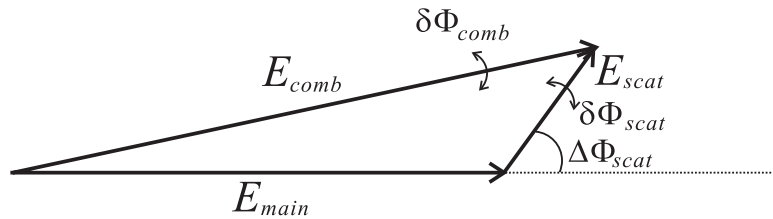


図 4: メインビーム E_{main} と散乱光 E_{scat} の関係。静的位相差 $\Delta\Phi_{scat}$ がどの値をとるかは定かではない。

³ダクト表面が各反射点で無相関に揺れている場合

ここまでの計算ではメインビームはダクトの中心を通ると仮定した。実際には同一ダクト中に2本のビームを通すので、メインビームの位置は0.2mだけオフセットされる。この場合上記の計算を光軸周りに積分する必要がある。その結果ダクト径1m、オフセット0.2mでの散乱光雑音は $3 \times 10^{-21} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ と見積もられる。一方LCGTの目標変位感度は30Hzで $6 \times 10^{-20} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。従って安全係数として20が期待できる。

以上のモデルを検証するために我々はTAMA300を用いてダクト散乱光雑音の直接測定をおこなった[10]。腕の中間地点でダクトの表面を加振器で励起し、1回反射散乱光の影響を干渉計で測定した。その結果776.5Hz、 $5.6 \times 10^{-6} \text{m}_{\text{rms}}$ の加振に対しミラー変位雑音換算で $1.2 \times 10^{-17} \text{m}_{\text{rms}}$ のexcessが観測された。前章の計算によると $5.6 \times 10^{-6} \text{m}_{\text{rms}}$ の振動による1回反射の散乱光の影響は最大で $6.3 \times 10^{-17} \text{m}_{\text{rms}}$ となり測定値は静的位相差を考慮するときわめて妥当である。

1.4.3 バッフルの配置と効果

バッフルはダクトの1ユニット(12m)に1つ取り付けるのが製造上都合がよい。この場合片腕で250枚のバッフルが配置されることになるが、このうち実際に有効なのはダクト全長を L 、ダクト半径を R 、バッフル高さを h 、バッフル間隔を d として

$$N = \frac{hL}{dR} \quad (20)$$

で定義される枚数 N だけである。この N を有効バッフル枚数と呼んでいる。LCGTのパラメータを用いるとこの枚数は25となる。

図5はダクト径1m、ビームのオフセット0.2mの場合の散乱光雑音の大きさをこの有効バッフル枚数の関数として示したものである。 $N=25$ の場合、散乱光雑音は $5 \times 10^{-22} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となり100以上の安全係数が期待できる。

1.4.4 バッフルの材質と表面処理

バッフルの材質とその表面はLCGTに必要な超高真空に適合したものでなければならない。

表面としては光を吸収してくれるものすなわち「黒い」ものがよく、また粗い表面によって散乱させるよりもきれいに反射させる方が効率的である。赤外吸収体としては日本カニゼンのカニブラックやアンリツのUB-NIPなどがある。共に無電解メッキであるが、前者は自己触媒により後処理が不要であり複雑形状への適用が可能である。後者は加熱エッチングによる酸化処理が必要であるが、全反射率が波長 $1\mu\text{m}$ に対し0.2%程度と極めて低い[11]。しかしいずれも液浸処理であり、多孔質面であることを利用しているため一般的には超高真空に適していない。

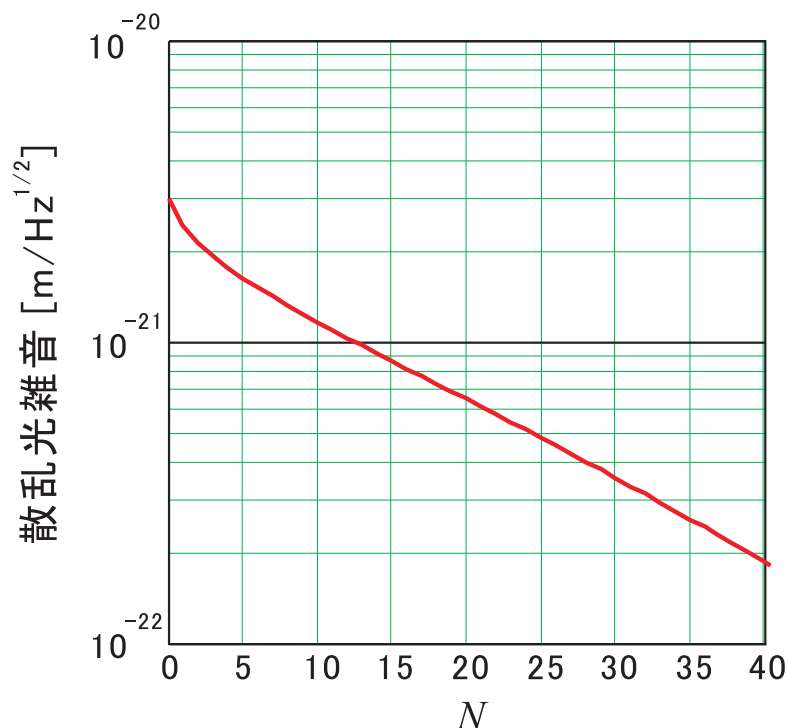


図 5: ダクト径 1m、ビームのオフセット 0.2m の場合の散乱光雑音の大きさを有効バッフル枚数 N の関数として示したもの。

我々は Diamond Like Carbon (DLC) の適用を考えている。DLC は蒸着によって生成されたカーボン膜で波長 $1\mu\text{m}$ に対する反射率が 5%程度であり、超高真空中に適合する素材としては小さい(見た目に黒い)。アモルファス構造のため表面が平滑(平均 7\AA)で、損失のほとんどが散乱ではなく透過吸収によって起こる。またガス放出速度を測定したところ [12]、ベーキングした SUS316 よりもよい結果が得られており、超高真空用表面としてもきわめて優れている。

参考文献

- [1] R. Takahashi, Y. Saito, M. Fukushima, M. Ando, K. Arai, D. Tatsumi, G. Heinzl, S. Kawamura, T. Yamazaki, and S. Moriwaki *J. Vac. Sci. Technol.* **A20** 1237-1241(2002).
- [2] 三尾典克: 京都大学出版会 重力波をとらえる 中村卓史, 三尾典克, 大橋正健 編著, 224-228(1998) .
- [3] Y. Saito, Y. Ogawa, G. Horikoshi, N. Matuda, R. Takahashi, M. Fukushima: Vacuum system of the 300m gravitational wave laser interferometer in Japan

(TAMA300), *Vacuum*, 53, 353-356(1999).

- [4] 稲吉さかえ, 斎藤一也, 佐藤幸恵, 塚原園子, 原泰博, 天野繁, 石澤克修, 野村健, 嶋田晃久, 金澤実: 化学研磨したステンレス鋼のガス放出特性, *真空*, 41, 96-99(1998).
- [5] Y. Saito, N. Matuda, Y. Ogawa, G. Horikoshi: Vacuum system design for the 300m gravitational wave laser interferometer in Japan (TAMA300), *Vacuum*, 47, 609-611(1996).
- [6] Y. Saito, G. Horikoshi, R. Takahashi, M. Fukushima: Operational status of the vacuum system of the 300m gravitational wave laser interferometer, TAMA300, *Vacuum*, 60, 3-8(2001).
- [7] W. E. Althouse, S. D. Hand, L. K. Jones, A. Lazzarini, and R. Weiss: Precision alignment of the LIGO 4 km arms using the dual-frequency differential global positioning system, *Rev. Sci. Inst.*, 72, 3086-3094(2001).
- [8] 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).
- [9] M. Smith: Scattered light phase noise in TAMA due to glint from tube surface, internal report, 1-11(2001).
- [10] R. Takahashi, K. Arai, S. Kawamura, and M. Smith: Direct measurement of the scattered light effect on the sensitivity in TAMA300, *Phys. Rev. D*70, 062003(2004).
- [11] 都丸隆行、齊藤芳男、久保富夫、佐藤吉博、徳成正雄、高橋竜太郎、鈴木敏一、東保男、新富孝和、山本明、内藤悦伸: ニッケル - リン光吸収体の真空特性と光学特性評価, *真空*, 48, 301-303(2005).
- [12] R. Takahashi, Y. Saito, T. Kubo, T. Tomaru, M. Tokunari, T. Sumiya, K. Takasugi, and Y. Naito: Application of Diamond-Like Carbon (DLC) coatings for gravitational wave detectors, *Vacuum*, 73, 145-148(2004).