大型低温重力波望遠鏡用 3 km 大口径真空ダクトの製作*

齊藤 芳男*1・高橋竜太郎*2

Production Process of the Interferometer Beam Tubes in LCGT Project

Yoshio SAITO*1 and Ryutaro TAKAHASHI*2

*1High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

*2Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), University of Tokyo, Kashiwa-no-Ha, Chiba 277-8582, Japan

(Received August 13, 2011, Accepted September 28, 2011)

The LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) is an interferometer of 3-km long baseline, using a laser beam of 1064-nm wavelength. The entire system of the interferometer is to be operated in a vacuum for avoiding any noises caused by in-space molecules and adsorbed molecules on the mirrors. The beam tubes of 3 km long and 800 mm in diameter are to be kept in the order of 10^{-7} Pa so as to reduce scattering-effects due to residual gas molecules. In April 2011, production of 484 of unit tubes of 12 m long and 800 mm in diameter, having a flexible bellows and flanges, were started. In this report, the production process of the unit tubes is described concerning surface treatment for outgas reduction.

1. はじめに

神岡で建設が始まった大型低温重力波望遠鏡 (LCGT; Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) は、ファブリペロー型共振構造を持つ基線長 3 km のレーザー光 (波長 1064 nm) を用いたマイケルソン干渉計である。既に観測装置として稼働している基線長 300 m の TAMA300 (国立天文台・三鷹)^{1,2)} の限界感度を 2 桁上回る感度を実現し、重力波を直接とらえようとする装置である。レーザー干渉計による観測は、重力波による空間のひずみを 2 本の直交する腕の光路長差の変化として捕らえようとするものである。LCGT が目標とする変位感度 (スペクトル密度で表す) δx は、100 Hz において、

$$\delta x = 1 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (1)$$

である。したがって、この変位感度の値を越えて発生する光路長 (鏡と鏡との距離) の変化 (ゆらぎ) は、重力波以外の原因で生じた場合はすべて雑音となり感度を低下させることになる。LCGT では所定の感度を実現させるために様々な方法が採用されるが、たとえば、干渉計の鏡極低温化 (20 K) による鏡自身の熱雑音の低減、高出力レーザー光源を用いた光子散射雑音の低減、また、鏡については、懸架ワイヤの多段化、および懸架ワイヤの倒立振り子方式による支持などによる防振が設計に取り入れられている。

光路上の気体分子によるレーザー光の散乱は、分子の分極率 (屈折率) と空間密度に依存した光路長の変化の原因となる³⁾。さらに、鏡への気体分子の入射・脱離により鏡の機械的・音響的雑音も生じる。したがって、干渉計はレーザーの入射から干渉信号の取り出しまで、そのほとんどすべてが真空中に設置される必要がある。LCGT は、干渉計の腕の部分に相当する真空ダクト (直径 0.8 m, 片腕の長さ 3 km)、および鏡とその懸架機構を設置する 18 台の真空槽 (直径 1~

2 m, 高さ 4~8 m) とから構成され (Fig. 1), 内表面積および体積とも我が国最大の真空装置となる。

2011 年 4 月より真空ダクトの製作が開始されているが、本稿では、その製造工程について紹介する。

2. LCGT に要求される圧力

気体の屈折率がゆらぐと、そこを通る光の光路長も変化し変位雑音 δx として干渉計に現れる。このゆらぎは光路上に存在する気体分子密度のゆらぎに依存するが、気体分子密度が小さいほどゆらぎも小さくなる。例えば、体積 V 中に N 個の気体分子が存在するとき、微小体積 v の中に k 個の気体分子を見いだす確率 $P(k)$ は 2 項分布で表され、

$$P(k) = {}_N C_k \left(1 - \frac{v}{V}\right)^{N-k} \left(\frac{v}{V}\right)^k \quad (2)$$

これは、 $N/V = \bar{n}$ (空間密度の平均値) を一定にしたまま N と V とを無限大とした極限 (熱力学的極限) では、

$$P(k) = \frac{(\bar{n}v)^k}{k!} e^{-\bar{n}v} \quad (3)$$

の形のポアソン分布となる。この分布は、平均値と分散とも $\bar{n}v$ であるので、

$$\langle (P(k) - \overline{P(k)})^2 \rangle = \bar{n}v \quad (4)$$

となる。したがって、空間密度のゆらぎに起因する光路長のゆらぎの分散 (変位雑音 δx の 2 乗平均) は圧力 p に比例する。

$$\langle \delta x^2 \rangle \propto n \propto \frac{p}{k_B T} \quad (5)$$

ここで、 T は気体の圧力と温度、 k_B はボルツマン係数である。

変位雑音の 2 乗平均を、残留気体分子の分極率 α も含めて計算すると^{3,4)}、

$$\langle \delta x^2 \rangle = 4\sqrt{2} \pi \alpha^2 m^{1/2} \int_0^L \frac{p(x')}{\omega(x') \{k_B T(x')\}^{3/2}} dx' \quad (6)$$

が得られる。 m は気体分子の質量。 ω はレーザーのビーム半径であり、 p , T とともに基線長 L に沿った位置 x' の関数である。(6) 式については、実際の長基線干渉計 TAMA300

* 平成 23 年 3 月 9 日 第 58 回応用物理学関係連合講演会で発表

*1 高エネルギー加速器研究機構 (〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1)

*2 東京大学宇宙線研究所 (〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

Fig. 1 Schematic drawing of the LCGT vacuum system. The beam tube for interferometer base line is 3 km long and 0.8 m in diameter. The chambers are aligned according to the interferometer mirror configuration. BS, beam splitter; ITM, input test mass; ETM, end test mass; MC, mode cleaner; PRM, power recycling mirror; SRM, signal recycling mirror; PD, photo detector. The mirrors are suspended by pendulum structure with vibration suppression systems, GASF, geometric anti-spring filter.

に Xe 気体を導入して直接測定した値と、係数 2 から 5 の範囲で一致することが確かめられている⁴⁾。LCGT では、後述するように、両腕の真空ダクトは 12 m のユニットごとに事前に加熱脱ガスを行なうが、設置後のベーキングを施さないので残留気体の主成分は水と考えられる。目標感度と同等の変位 δx を与える水分子の圧力 p は、(6)式から 2×10^{-5} Pa と見積られる。実際の LCGT においてはさらに 1 桁の安全係数を持たせるため、圧力の条件を 2×10^{-7} Pa 以下とした；変位雑音 δx は圧力の平方根に比例する。

この圧力条件は、単に変位雑音を低減するのに必要であるだけでなく、LCGT で使用を予定している 100 台程度のスパッタイオンポンプの保守交換頻度を数年に 1 台程度以下とするためにも必要である。一般にセル寿命は 10^{-3} Pa 台で使った場合 5000 時間程度と言われているが、放電等が無い安定な動作期間はそれより 1 桁ほど短い。この値から、100 台のスパッタイオンポンプを 10^{-7} Pa 台で使った場合の MTBF (mean time before failure) を見積ると 50,000 時間程度となる。

LCGT では真空系内に室温と極低温部とが共存することも特徴である。極低温の鏡が置かれるクライオスタット⁵⁾、およびその周囲の断熱シールドを設置する低温ダクト部は、室温のダクトとの間での熱遷移現象により残留気体分子の密度は高くなる。しかしながら、低温ダクト部は基線長 3 km のうち 40 m ほどなので、変位雑音 δx への影響は無視できると考えられる。

3. 真空ダクトの内面処理

LCGT で要求される 2×10^{-7} Pa の超高真空は、周長が数 km の加速器などでも実現されており大型真空装置であっても建設が可能な値である。しかしながら、真空ダクトの直径が 0.8 m で通常の加速器の数倍以上であること、および、設

置される環境が山に掘削したトンネル内であり空調設備等が整っていないことなど多くの違いがあり、材料の選択から製造工程および設置作業を通して超高真空に対応した考慮が必要となる。

超高真空を得るために通常行われる組立後のベーキング工程は、供給電力が制限される LCGT トンネル内で長さ 3 km にわたり実施することは容易ではなく、また安全上問題も多い。LCGT では、組み立て前のユニットダクトの製造工程で気体放出速度低減化のための処理を出来る限り行ない、それを密封した状態でトンネル内に搬入し設置することとした。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と 12 m が限界となる。また、ユニットダクトの設置組立は、さらに追加の表面処理が必要な「その場」溶接は行わず、ガスケットを用いたフランジによる締結を行なうこととした。この方法は搬入後の作業時間も短縮できる。なお、トンネル内は年間を通じて温度はほぼ一定 (16°C) であるが、多湿 (相対湿度は常に 96% 以上) であるので、フランジ締結の作業はドライエアーを導入した移動式クリーンブース内で行なう必要がある。

超高真空に適した金属素材としてステンレス鋼やチタンさらに高純度無酸素銅などがその目的に応じて用いられているが、LCGT では、入手性が良く、また、大型部材に対しても表面処理が適用可能なステンレス鋼を用いることとした。表面に施す気体放出低減化処理法としては、電解複合研磨¹⁾、電解研磨⁶⁾、化学研磨⁶⁾、TiN-coating⁷⁾ などがあるが、とくに研磨については、圧延や溶接などの加工工程で生じた表面変質層を除去し表面の酸化層を安定化して、水分子の吸着エネルギーや吸着サイトを低減して気体放出を減少させるのに効果があると考えられている。実際、電解複合研磨法を施した TAMA300 のダクトでは、ベーキングを行わないうで 10^{-7} Pa 台の超高真空領域の圧力に到達している²⁾。

Fig. 2(a)は、ステンレス鋼製の真空ダクト（直径150 mm，長さ1 m）の気体放出速度をコンダクタンス変調法で測定したものである⁸⁾。電解研磨後に220℃で加熱脱ガス（ベーキング）した場合は、一旦大気暴露した後の排気過程においても、気体放出速度は加熱脱ガス処理を施さないものより1桁近く減少している。同様な結果は、東海村に建設された大強度陽子加速器（J-PARC）の主リングのビームラインに設置されたステンレス鋼ダクトによっても再現性よく得られ（Fig. 2(b)），大型構造物においても，表面変質層除去の処理の後にさらにベーキングを施すことによって気体放

出低減化が可能であることが確かめられた⁹⁾。これは一種のメモリー効果とも言えるが，処理後の表面酸化層が加熱によりさらに安定（水分子が吸着しにくい）な状態に変化して不動態化が進んだためと推察される。この方法は，LCGTのようにトンネル内設置後のベーキングが難しいシステムには有効であると期待される。

LCGTの干渉計用のダクトの表面には，上記の気体放出低減化に加え，もう一つ平滑性も要求される。基線の両端にある鏡の間をレーザーが繰り返し反射する際，鏡素材の結晶欠陥や不純物でごく僅かな部分が散乱され，それは，干渉計の主たる光学軸から僅かに外れる。これがダクト内壁に入射して，さらにそこで散乱されるとこの光は相手の鏡に入射して干渉計の雑音（位相のずれた光の混入）になる。鏡で生ずる散乱光およびそのダクトからの散乱光の除去には，バッフルと呼ばれる邪魔板をダクト内にある間隔で配置してそこで吸収させる方法が用いられることが多い¹⁰⁾。このバッフルでの散乱光除去効率を高めるためには，ダクト内壁で光を極力鏡面反射させる必要があり，特に干渉計の腕の中央部におけるダクト内面では，使用されるレーザーの波長と同程度以下の平坦さが要求される。LCGTでは，基線長3 kmの中央の1 kmの部分は，電解複合研磨処理（表面粗さRy 0.4 μm）を施すこととし，それ以外の部分は電解研磨（表面粗さRy 2~3 μm）で処理することとした。

4. 真空ダクトの製造工程

4.1 製管工程

製管にあたっては，JIS G 3468配管用溶接大径ステンレス鋼管に従うこととしたが，LCGT用として特に工程に留意した点などを含めて概略を述べる。ダクト素材のステンレス鋼板（SUS304L）は，全長12 m（ベローズ，フランジ等の長さを除くと11.180 m），外径812.8 mmのダクトをワンシーム（製管の継ぎ目溶接が管軸方向に1本）で製作する

Fig. 2 Measured outgassing rates. a) tubes of 1 m long and 150 mm in diameter: b) beam chambers installed in J-PARC.

のに必要な大きさのものを圧延により製作した。なお、このため、鋼板の幅は道路交通法の制限を超えるものとなるので、搬送には傾斜台付きトラックが用いられた。

鋼板 (SUS304L) の肉厚は、ダクトの自重たわみによる扁平変形量を 3 mm 未満とするため 8 mm としたが、これは、製造から設置までの工程での衝撃などによる打痕や大きい変形を避けるためでもある。一般に厚さ 8 mm のステンレス鋼板は熱間圧延により製造されて固溶化熱処理、酸洗の工程を経るので、いわゆる No. 1 仕上げと呼ばれる状態となっており、表面粗さは冷間圧延材 (6 mm 程度以下の鋼板) に比べると大きい；実際の測定値もおおよそ $Ry \sim 25 \mu m$ であった。製管後の電解研磨工程に要する時間を短縮するため、鋼板の段階で Grit #150 の湿式ベルト研磨を片側表面に施した (新日鐵住金ステンレス株式会社、八幡製造所)。おおよそ 0.1 mm 程度の研磨量で、表面粗さは $Ry \sim 8 \mu m$ 程度となった。

製管は全幅 12 m のプレス機を用いて円筒に成形し (Fig. 3)、継ぎ目の溶接は外周側からのプラズマアークによる初層ウラナミとした。製管後は、酸洗、温水洗浄、乾燥を経て両端にベローズ、フランジの溶接を行なう準備が整う。

こうして作られた素管は、真円度が 8 mm 以下、真直度が全長の 0.1% 以内である。

4.2 フランジの製作

フランジは ISO 800 K を基本的な寸法とし、隣同士のダクトの回転位置合わせ作業が不要なクローランプ (M16, 30 個) での締結ができる構造とした。フランジの外径は 880 mm、厚さは 30 mm である。ガスケット溝は溝外径 868 mm であり、クランプの作用点の位置は、おおよそ直径 875 mm の周上となる。また、フランジの平面度を確保するため、溶接時の残留ひずみを避けるよう十分な長さ (フランジ厚さを含めて長さ 120 mm) の溶接首 (welding neck) を持たせる構造とした。この構造を持つフランジは、もしステンレス鋼板からの切出し加工で製造する場合は 120 mm の厚さの板が必要となり現実的ではなく、また、棒材の曲げ加工で製造する場合は継ぎ目溶接部での真空漏れの危険性も多いので、ステンレス鋼塊からのリング鍛造 (SUS304 F) により製作する

こととした。鍛造後に、固溶化熱処理、切削、洗浄の工程を経てダクトと溶接して接続する。Fig. 4 は、固溶化熱処理の様子であり、この後すぐに急冷してオーステナイト組織を安定化させる。

4.3 ベローズの製作工程

ユニットダクトの接続の際にダクト間の位置調整を行なうため、各ユニットダクトの片端にはベローズが取り付けられる。多湿なトンネル内では長期の耐食性が要求されるので、金属組織の変態が起こり易い溶接部の無い液圧成形型ベローズ (素材は SUS316L) を用いることとした。なお、溶接型ベローズは、その折り目への粉塵の落下による事故 (噛み込み) も予想されたので使用を避けた。液圧成形後両端に接続金具およびフランジを溶接し、その後内面処理として化学研磨を施した (Fig. 5)。なお、ベローズの機械特性は、変位量として +10, -60 mm、バネ定数は 100 N/mm 以下で設計した。

4.4 内面処理と加熱脱ガス

Fig. 6 は、ユニットダクトの両端にフランジとベローズ

Fig. 4 Austenitic process of forged stainless-steel rings for use as a flange of 880 mm in diameter (Shimoda Iron Works Co., Aioi).

Fig. 3 Tube form process by using a press machine of 12 m wide (Sumikin & Nippon Steel Stainless Steel Pipe Co., Noda).

Fig. 5 A bellows of 800 mm in diameter. The surface is finished by chemical polishing (Nippon Shinshukukan Co., Hosono).

Fig. 6 Welding a flange and bellows to a unit tube (MIRAPRO Co., Noda).

Fig. 8 A bake furnace for two of the unit tubes (MIRAPRO Co., Noda/MESCO, Kamioka)..
..

Fig. 7 A unit tube finished by electrolytic polishing (San-ai Plant Co., Kisarazu/Marui Galvanizing Co., Kashiwa).

Fig. 9 A tunnel of Kamioka Mining Railroad (not in service) for use as a storage yard of unit tubes.

を溶接している様子である。ユニットダクトの両端にクリーンブースを設けて清浄雰囲気中で溶接を行なった。溶接は入熱を少なくする TIG なめ溶接で行なうこととした。全ての溶接作業が終了した後、ユニットダクトの内面を電解研磨による処理を行い (Fig. 7), $30\ \mu\text{m}$ の表面層を取り去り加工変質した結晶粒を除去する。また、この研磨により $R_y \sim 2.5\ \text{mm}$ 程度の表面粗さが得られる。研磨後の洗浄は、電気抵抗 $15\ \text{M}\Omega$ 以上の超純水により行ない、表面の清浄度をイオンクロマトグラフにより確認して (10本に 1 本)、工程を管理することとしている。

加熱脱ガス処理は、熱風送風器 ($30\ \text{kW} \times 6$ 基) を備えた炉 (Fig. 8) で行なう。この炉を用いることにより、4 時間でダクト全体を 200°C に昇温し、20 時間保持した後冷却する工程が可能である。この加熱処理に際しては、ダクト両端のフランジに耐熱フッ素ゴムの O リングを用いて真空封止を行なっている (三菱電線工業株式会社製、サンエラスト)。冷却後、エアドライヤを用いてダクト内部に乾燥空気 (露点 -40°C) を充填し、封止フランジで密封して神岡地区に搬送する。

2011 年 4 月から製作を開始しているユニットダクトは、

全数 (482 本) が完成するのは 2013 年 3 月であるが、その間、神岡の干渉計用のトンネルは掘削工事を行なっている。トンネル完成までの間、製作したユニットダクトは、廃線となり現在飛騨市が管理している旧神岡鉄道のトンネル内 (Fig. 9) に逐次搬入して保管することとした。

5. おわりに

2010 年夏から建設が開始された LCGT プロジェクトの、基線長 $3\ \text{km}$ の干渉計用真空ダクトに要求される圧力条件と、2011 年 7 月から実際に量産を始めた径 800 、長さ $12\ \text{m}$ のユニットダクトの製造工程を紹介した。超高真空に対応した内面処理と加熱脱ガス処理を 500 本近いユニットダクトに対して実施するので工程管理が重要である。また、製作されたダクトは、LCGT 用トンネルの掘削が終了し次第、およそ 1 年を費やして設置・真空排気を行なう予定であり、その際もやはり超高真空に対応した作業管理が必要である：粗排気ユニットは $100\ \text{m}$ 毎に設置し順次排気して行く。

LCGT の真空システムを構築するためには、ダクトだけでなく、散乱光吸収のためのバッフル表面のコーティング法、クライオスタット内の熱遮蔽材の気体放出速度の低減

化⁵⁾，防振装置の材料選択，極低温鏡の表面吸着分子層の感度に及ぼす影響評価なども行なわなければならないが，現在，実機製作に反映するための開発研究が進められている。

〔文 献〕

- 1) Y. Saito, Y. Ogawa, G. Horikoshi, N. Matuda, R. Takahashi and M. Fukushima: Vacuum, **53** (1999) 353.
- 2) Y. Saito, G. Horikoshi, R. Takahashi, M. Fukushima: Vacuum, **60** (2001) 3.
- 3) R. Takahashi, Y. Saito, M. Fukushima, M. Ando, K. Arai, D. Tatsumi, G. Heinzl, S. Kawamura, T. Yamazaki and S. Moriwaki: Shinku, **47** (2004) 696.
- 4) 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** (2002) 1237.
- 5) T. Ohmori, S. Takada, Y. Sato, Y. Saito and R. Takahashi: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., **46** (2011) 408.
- 6) S. Inayoshi, K. Saito, Y. Sato, S. Tsukahara, Y. Hara, S. Amano, K. Ishizawa, T. Nomura, A. Simada and M. Kanazawa: Shinku, **41** (1998) 96.
- 7) Y. Saito, N. Matuda, Y. Ogawa and G. Horikoshi: Vacuum, **47** (1996) 609.
- 8) Y. Saito: Shinku, **49** (2006) 453.
- 9) Y. Saito, F. Naito, C. Kubota, S. Meigo, H. Fujimori, N. Ogiwara, J. Kamiya, M. Kinsho, Z. Kabeya, T. Kubo, M. Shimamoto, Y. Sato, Y. Takeda, M. Uota and Y. Hori: Vacuum (2011), in press.
- 10) R. Takahashi and Y. Saito: Vacuum, **84** (2010) 709.