

気球搭載用水晶摩擦気圧計の開発と BU30-5 号機による性能実証試験

栗原 純一¹, 村田 功², 佐藤 薫³, 富川 喜弘⁴, 阿部 琢美⁵

Development of a balloon-borne quartz friction gauge and a performance demonstration test using the BU30-5 balloon experiment

By

Junichi KURIHARA¹, Isao MURATA², Kaoru SATO³,
Yoshihiro TOMIKAWA⁴, and Takumi ABE⁵

Abstract: Pressure measurements in scientific balloon and sounding rocket experiments in the upper atmosphere are technologically and scientifically important. An onboard small pressure gauge developed in this study is the quartz friction gauge, which is based on the principle that the resonance impedance of a quartz oscillator varies with the pressure of ambient gas. The gauge has a wide measuring range ($10^5 - 10^{-2}$ Pa), which corresponds to the atmospheric pressure from the ground to an altitude of about 100 km. The sensor part and data processing part weigh 100 g and 200 g, respectively. In addition, power consumption of less than 1 W is achieved with this gauge. The gauge is suited for high altitude balloon experiments because the weight of their instruments is severely limited. A tuning-fork-shaped quartz oscillator in the gauge is widely used for wrist watches and the structure has a high resistance to vibration and shock, and thus the gauge is applicable to sounding rocket experiments that require onboard instruments to have high environment resistance. In this paper, we report on a performance demonstration test of the newly developed quartz friction gauge using the BU30-5 balloon experiment.

Key words: Quartz oscillator, Pressure gauge, In situ measurement

概要

科学気球や観測ロケットなどが飛翔する超高層大気環境における気圧の計測は、技術的にも科学的にも極めて重要である。本研究で開発した飛翔体搭載用小型気圧計は、水晶振動子の共振インピーダンスが圧力に応じて変化する原理を利用した水晶摩擦気圧計と呼ばれるもので、地表から高度 100km 付近までに相当する広い計測圧力範囲 ($10^5 \sim 10^{-2}$ Pa) に特徴がある。また、センサ部は約 100g、データ処理部は約 200g と小型軽量であることに加えて 1 W 以下の低消費電力を達成し、特に重量が厳しく制限される高高度気球などの飛翔体への搭載に適している。腕時計などにも広く使用されている音叉型水晶振動子は耐振動・衝撃性に優れた構造を持ち、高い耐環境性能が要求される観測ロケットにも搭載可能である。本報告では、開発した水晶摩擦気圧計の性能試験結果について述べるとともに、BU30-5 号機を用いた性能実証試験についても報告する。

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

² Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

³ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

⁴ National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems

⁵ The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) /JAXA

1. はじめに

科学気球や観測ロケットなどが飛翔する高度 30km 以上の「超高層大気」と呼ばれる高度領域における気圧の計測には、技術的にも科学的にも極めて高いニーズがある。

科学気球にとって気圧は、気球工学における風速や温度と共に気球の運動を支配する基本的な物理量であるだけでなく、科学観測においても大変重要な観測パラメータである。例えば、気象力学の分野では基本方程式系に対して高度座標ではなく気圧座標で議論するほうが厳密かつ簡便であり、大気化学分野ではオゾンなどの微量気体の混合比を導出する上で気圧の測定精度が誤差要因となる。気球観測でしばしば用いられる静電容量式センサや半導体圧力センサは小型軽量ではあるが計測圧力範囲が狭く ($10^5 \sim 10^3 \text{Pa}$)、気圧が数 hPa ($1 \text{hPa} = 100 \text{Pa}$) 以下になる高高度では十分な精度がない。例えば、後述する ECC オゾンゾンデ用の圧力センサは世界中で使用されている製品だが、測定範囲が 3hPa まで、その圧力での精度は 0.6hPa である。したがって気圧が 3hPa 以下となる高度約 40km 以上の高度では 20% 以上の誤差が発生するか、測定自体が成立しない可能性がある。近年、到達高度が 50km を越えるような高高度気球が日本で開発されたが^[1]、日本では搭載に適した気圧計がまだ存在しておらず、諸外国においても同様の状況と推測される。

一方、観測ロケットは高度数 100km に到達可能で、背景の気圧は高真空領域にも及ぶが、実験室の真空装置で一般的に使用されている真空計をそのまま搭載することはできない。その理由はロケットの打ち上げ時に加わる数 1000Hz・数 10G の振動・衝撃に耐えられる構造を原理的に持っていないためである。細いフィラメントで構成されるピラニ真空計・電離真空計や、薄い金属膜で構成される隔膜真空計はその構造上、振動・衝撃に非常に弱い^[2]。このような理由から、超高層大気の研究にとって気圧は観測することが最も難しい物理量のひとつであり、十分な観測データが得られていない^[3]。

本研究で採用した水晶摩擦気圧計は、最近製品化されたばかりの比較的新しい技術である。多くの点で従来の気圧計・真空計より優れており、今後は各種真空装置でこの水晶摩擦気圧計が従来の真空計に順次置き換わっていくものと予測される。飛翔体用の水晶摩擦気圧計はまだ存在していないが、高性能、耐振動・衝撃性、低消費電力、小型軽量、長寿命などの特徴から大気球・観測ロケット搭載用気圧計として最適であると言える。さらに最大の特長として、この検出素子は計測圧力範囲が大気圧から中真空まで ($10^5 \sim 10^2 \text{Pa}$) と非常に広いことが挙げられる (図 1)。

本研究の目的は、飛翔体搭載用の水晶摩擦気圧計を開発し、種々の試験を通してその性能を確認するとともに、気球に実際に搭載して実証試験を行うことである。

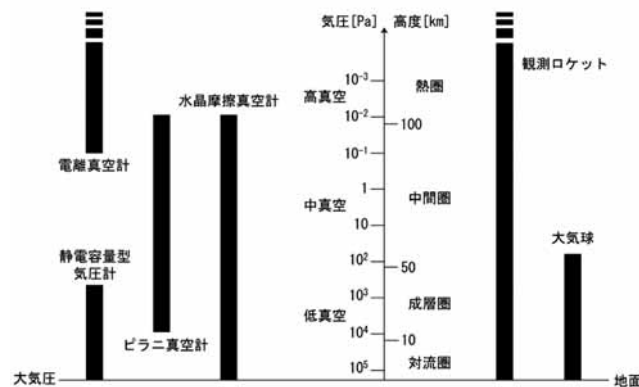


図 1 気圧と高度の対応関係と、大気球・観測ロケットの飛翔高度、および各種真空計・気圧計の計測圧力範囲

2. 水晶摩擦気圧計

2.1. 音叉型水晶振動子と水晶摩擦気圧計

水晶振動子は電圧を印加すると発振するため、時計の発振回路などに広く用いられている。腕時計にも内蔵されている「音叉型水晶振動子」(図2)は、その共振インピーダンスが気体分子との摩擦抵抗によって変化することが知られている。気体の摩擦抵抗の大きさは圧力に依存する^[5]ので、インピーダンスを電圧として出力すれば、圧力が計測できる。この原理を利用したのが「水晶摩擦気圧計」である。現在、時計用に大量生産されている音叉型水晶振動子は人工水晶の水晶片(ブランク)からフォトリソグラフィ加工技術によって製造され、日本のメーカー数社が世界シェアの大半を占めている。表面には金・銀・クロム・アルミニウムなどが電極として蒸着されており、さらに金属パッケージ内に真空または不活性ガスによって気密封止されている。時計用の音叉型水晶振動子は、小型化が要求されるため大きさはパッケージを含めて1cm以下の製品が多く、発振周波数も32.768kHzが代表的である。

真空装置用に国内の真空機器メーカー数社から市販されている水晶摩擦気圧計は、やはり入手しやすい時計用の音叉型水晶振動子をセンサとして用いている。ただし、水晶振動子を気体中に露出させるため、電極には酸化に強い金・クロムの合金を用いているものが多い。真空計としての構成や仕様はどのメーカーの製品も似ており、真空装置のゲージポートやフランジに小型のゲージ部を接続し、ケーブルを介して表示器・記録計に出力を送る方式である。計測圧力も 10^{-2} Pa～大気圧程度のものが圧倒的に多く、これは後述するように時計用の音叉型水晶振動子を利用していることが大きな理由となっている。

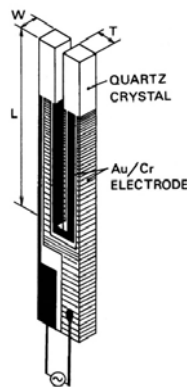


図2 音叉型水晶振動子の構造^[4]

2.2. 水晶摩擦気圧計の原理と測定上の諸問題

水晶振動子の共振インピーダンス Z は気体の摩擦抗力 f に比例するが、摩擦抗力と気体の圧力 p との関係は圧力領域によって異なる。音叉型振動子を球体の集合として単純化した理論モデル^[5]によると、振動子が受ける摩擦抗力は、圧力の高い粘性流の領域では圧力の1/2乗に比例し、圧力の低い分子流の領域では圧力の1乗に比例し、その間の中間流と呼ばれる領域では圧力に依存しないという異なる性質を持つ。したがって、全ての圧力範囲でインピーダンスと圧力の関係を一つの理論式のみで正確にあらわすのは大変困難である。そのため一般的な水晶摩擦気圧計では、理論的・実験的に得られた複数の近似式を用いて、測定されたインピーダンスから圧力を算出している。しかし、それ以外にも以下に述べるような測定上の問題が知られている。

2.2.1. 温度によるインピーダンス変化と補正方法

インピーダンスと圧力の関係の近似式の精度を除けば、水晶摩擦気圧計の最大の誤差源は温度変化による水晶振動子自身のインピーダンス変化である。時計用の水晶振動子は室温付近にインピーダンスの最小値を持つものが多く、低温や高温環境下では10℃の温度変化で0.5kΩ程度インピーダンスが変化する。一方、圧力に対するインピーダンスの変化は高真空の 10^2 kΩ程度から大気圧の 10^4 kΩ程度まで指数関数的に変化する。したがって、大気圧付近では温度変化による影響はほとんどないが、低圧領域では温度変化が大きな影響を持ち、低圧側の測定限界を決める要素のひ

とつととなっている。なお、このインピーダンスの温度変化は、水晶振動子の物性の温度変化による固有インピーダンスの変化と考えられ、被測定気体の温度変化による摩擦抗力の変化とは異なる。

上記の温度変化の影響を補正するための方法がいくつか考案されている。ひとつは温度センサを水晶振動子の近傍に設置して温度を測定し、その数値を用いて温度補正をする方法である。この方法は技術的には非常に簡便だが、厳密には水晶振動子と温度センサとを熱的に結合させる必要があり、必ずしも正確ではない。もうひとつの方法は、周波数の温度依存性を利用する方法である。よく知られているように、水晶片から水晶振動子を切り出す（カット）際に、結晶軸に対してカットする方向・角度によって水晶振動子は様々な温度特性を持ち、それが発振器としての精度を決める重要な要素となっている。それを逆に応用し、周波数の変化から温度を測定することでインピーダンスの温度補正を行うことが可能である^[6]。この方法は厳密に水晶振動子の温度を知ることができるが、周波数を正確に測定する回路が必要となるという欠点がある。

2.2.2. 水晶振動子の形状によるインピーダンス変化

音叉型水晶振動子の形状によってもインピーダンスは異なる。音叉の腕の長さが長く、厚さの薄い、つまり腕の細長い水晶振動子ほどインピーダンスが大きくなることが知られている^[7]。前述のようにインピーダンスの小さい低圧領域では温度によるインピーダンス変化が相対的に大きくなるので、より低い圧力まで測定するためにはインピーダンスの大きな細長い水晶振動子を用いることが望ましい。しかし、細長い形状の振動子は共振周波数も小さくなるので、外部振動の影響を受けやすくなることに注意が必要となる。

2.2.3. 気体種によるインピーダンス変化

気体種によって分子量 M や粘性係数 η が異なるため、水晶振動子が気体から受ける摩擦抗力も異なり、結果的にインピーダンスが気体種によって変化する。分子量や粘性係数の小さな気体ほどインピーダンスが小さくなることが知られている^[8]。インピーダンスは、低圧の分子流領域では \sqrt{M} に比例し、高圧の粘性流領域では $\sqrt{\eta M}$ に比例する。したがって、混合気体の圧力測定に際しては被測定気体の組成に関する情報が必要となる。地球大気の組成は地表から高度約 100km まで均質なため^[3]、高度 100km までの超高層大気の観測であれば支障はない。

3. 飛翔体搭載用水晶摩擦気圧計

3.1. 要求仕様

大気球・観測ロケット等の飛翔体搭載用の水晶摩擦真空計を開発するにあたり、以下のような要求仕様を定めた。

①測定圧力範囲	④耐振動・衝撃性
大気圧（地表）～ 10^{-2} Pa（高度 100km に相当）	衝撃試験：40G ^{O-P} 8～10m 秒
②測定精度	振動試験：サイン波 10～35Hz 3.06mm ^{O-P}
大気圧～ 10^{-1} Pa：±10%以内（市販品と同等）	35～400Hz 7.5G ^{O-P}
10 ⁻¹ ～ 10^{-2} Pa：±20%以内（市販品と同等）	400～2000Hz 15G
③温度仕様	
保存温度：-20～+70℃	
動作温度：-20～+60℃	

測定圧力範囲は、前述したとおり、地表から高度 100km までの超高層大気の圧力を連続的に観測できる測定器が科学的に要求されていることによる。測定精度は、その向上も今後の開発目標の一つではあるが、今回の搭載用の仕様ではすでに市販されている水晶摩擦真空計と少なくとも同等であることが望ましい。温度仕様は大気球搭載の条件を元に設定した。耐振動・衝撃性は J A X A 観測ロケット用振動衝撃単体試験規格に準拠している。

上記の仕様とは別に、大気球・観測ロケットそれぞれのインターフェースの仕様を満たす必要があるが、それにつ

いては3.3で後述する。

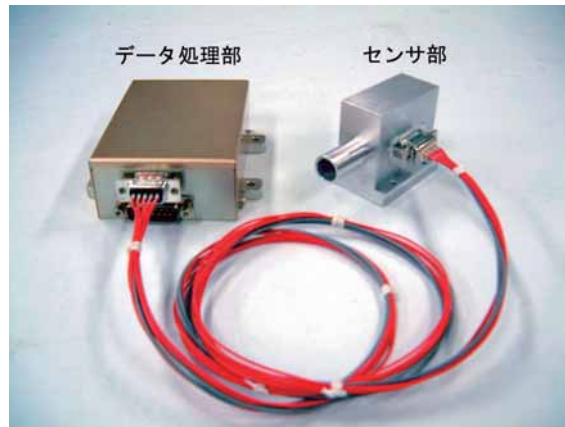


図3 飛翔体搭載用水晶摩擦気圧計 (QFG)

3.2. 各部の構成と機能

開発した飛翔体搭載用水晶摩擦気圧計 (Quartz Friction Gauge: QFG) は、センサ部とデータ処理部に分かれる。センサ部は水晶振動子、発振器、精密リファレンス発生部、温度測定回路等が入る。水晶振動子には、市販されている音叉型水晶振動子 (エプソントヨコム製, C-001R) の金属パッケージを開封して使用している。水晶振動子の近傍には温度センサがあり、温度補正用のデータを取得する。センサ部には外気取り入れ口があり、水晶振動子が外気の圧力を直接計測する。外気取り入れ口は真空装置で一般的なゲージポートに適合するサイズ ($\phi 15\text{mm}$) となっている。このサイズのゲージポートはピラニ真空計でも利用されるので、既存のピラニ真空計との交換が容易である。データ処理部には検波部、ポストアンプ部、テレメータインターフェース部、電源部等が入る。

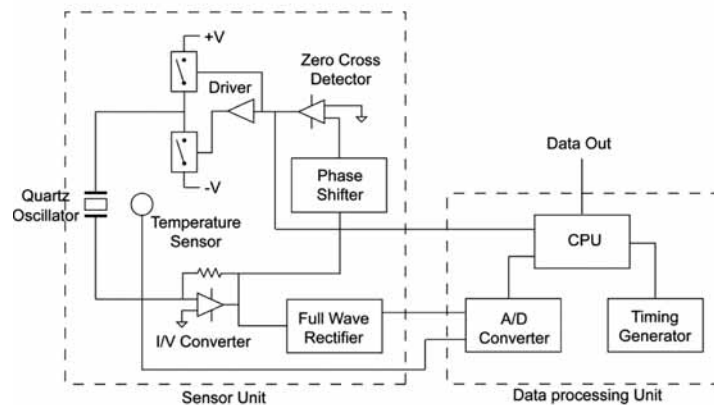


図4 QFGのブロック図

センサ部・データ部の重量はそれぞれ 136g と 210g で、外形寸法は図5、図6の外観図の通りである。電源電圧および消費電力を表1に記す。

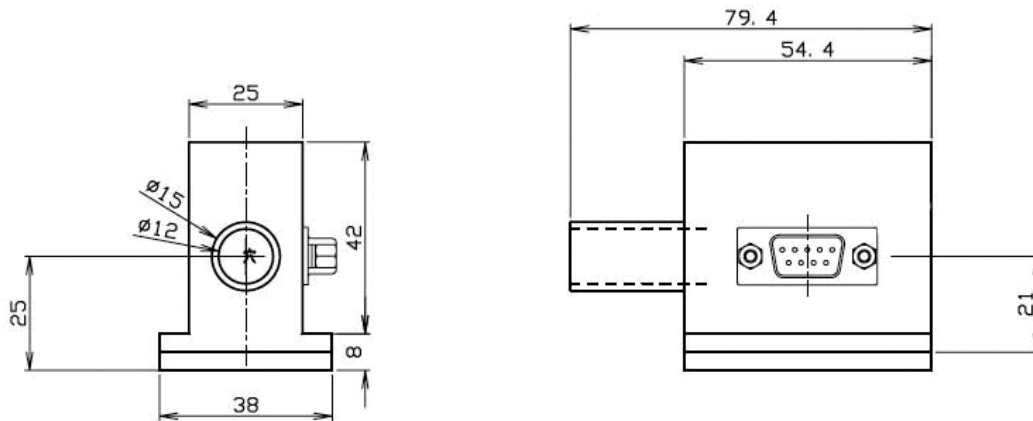


図5 QFG センサ部外觀図

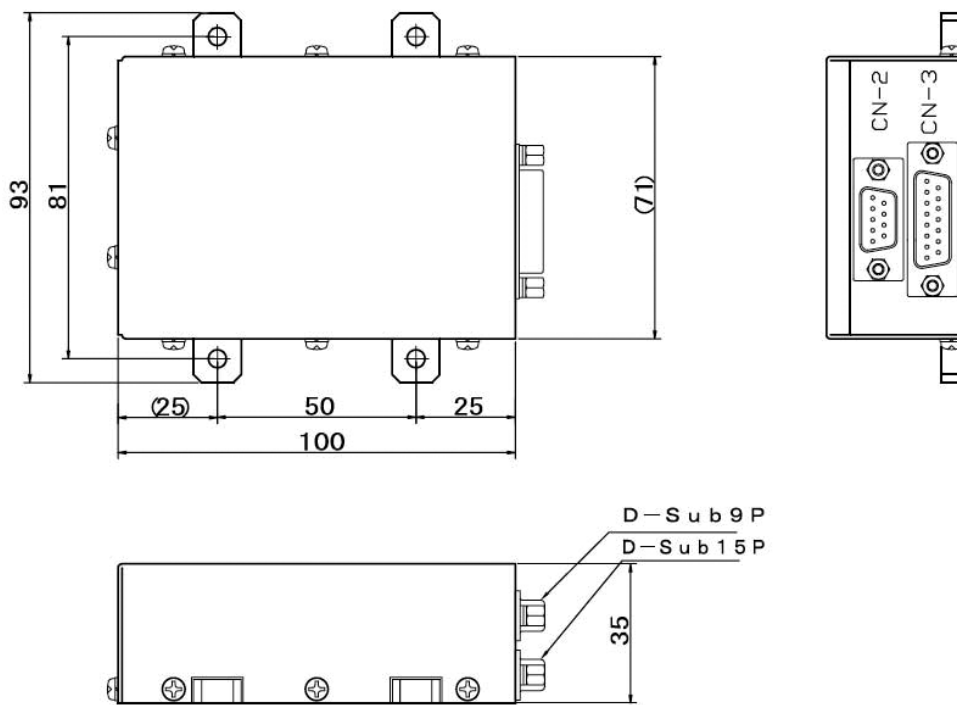


図6 QFG データ処理部外觀図

表1 QFGの消費電力

センサ部			データ処理部			合計
+18V (12V)	10mA	120mW	+18V	25+4mA	522mW	
-18V (12V)	10mA	120mW	-18V	4mA	72mW	
+5V	1mA	5mW		※1		
計 245mW			※2 計 594mW			

※1 : 25mA は+5V用 DC-DC コンバータ分.

※2 : デジタル出力が不要の大気球用モデルでは, 290mW となる.

3.3. インターフェース

大気球用モデルは相乗りの光学オゾンゾンデのテレメータインターフェースを利用しており、独自のインターフェースを持たない。光学オゾンゾンデ側の仕様に合わせて、出力はアナログ0～+10Vの2ch（気圧・温度データ）となっている。光学オゾンゾンデのテレメータで送信されるデータの分解能は12bit、サンプル間隔は1secである。一方、観測ロケットでは、テレメータのアナログチャンネルの分解能が8bitしかないため、観測ロケット用モデルはデータ処理部でA/D変換を行い、デジタル12bitの2chで出力している。なお、観測ロケットのテレメータのサンプル間隔は2.5msである。

4. 室内実験による性能確認試験

4.1. 温度試験

温度に対する出力の変化を調べる目的で恒温槽を用いてQFGの大気圧下における温度試験を行った。温度範囲は仕様で要求されている動作温度の-20℃～+60℃である。図7のように、温度に対して出力（インピーダンス）は30℃付近にピーク（インピーダンスの極小）を持つ2次関数的な変化をする。温度による変化の幅はおよそ0.1%程度で、大気圧（1013.25hPa）では約10hPaに相当する。この結果を用いて気圧出力の温度補正を行う。

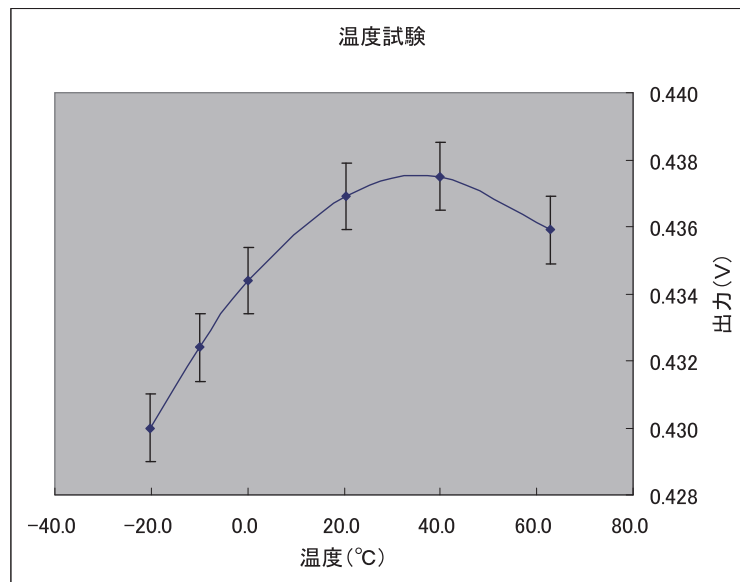


図7 温度による出力の変化

4.2. 気圧較正試験

JAXA宇宙科学研究本部・相模原キャンパスにおいて宇宙プラズマ研究系の設備を用い、QFGの気圧較正試験を行った。実験方法は、小型チェンバーのゲージポートに水晶摩擦真空計を取り付け、真空ポンプで 10^{-2} Pa以下まで真空引きをした後、乾燥空気を徐々に導入して行った。絶対圧の較正には圧力計測範囲の異なる2種類の隔膜真空計（キャパシタンスマノメータ）を用いた。図8に大気球用モデルの気圧較正試験で得られた圧力特性を示す。

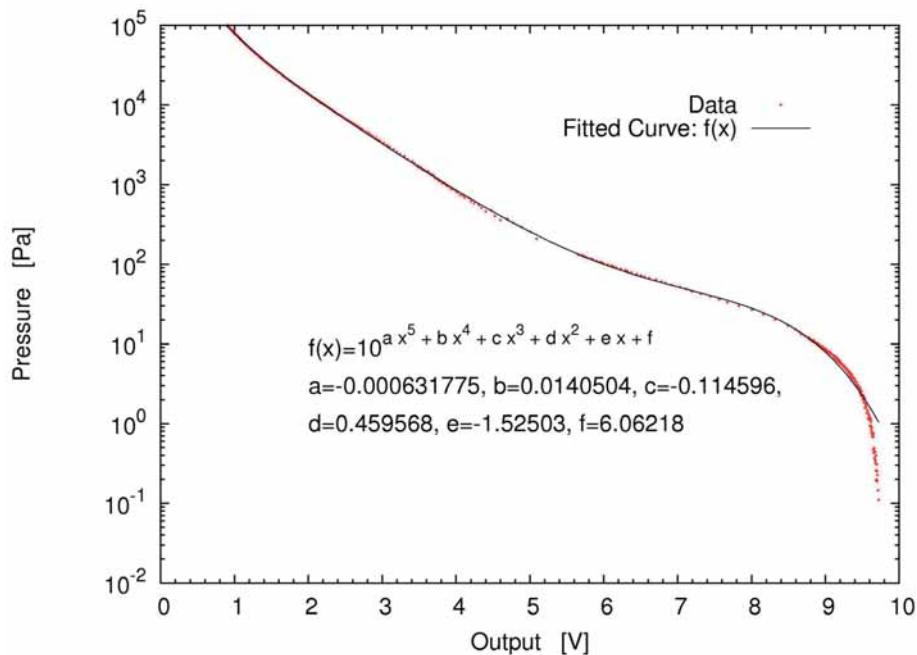


図8 気圧較正試験結果

横軸は QFG からの出力電圧 (V)，縦軸はキャパシタンスマノメータの測定気圧 (Pa) で、赤点が取得データ、黒の実線はそれらのデータ点に対してフィッティングした較正曲線を表している。地表気圧に相当する 10^5 Pa から、高度 90km に相当する 10^{-1} Pa までの圧力に対して、フルスケール 10V で出力が得られている。較正曲線は気球実験で受信データのクイックルックを行う目的で導出したものであり、地表気圧から 10Pa までの圧力範囲でフィットするように指数部に 5 次関数を最小自乗法によって当てはめた。詳細な解析には較正曲線は用いず、データ点を元にした補間によって行う。較正曲線の再現性は極めて高く、気圧較正の誤差は前述の温度ドリフトによる誤差の範囲内である。

4.3. 低温真空試験

JAXA/ISSAS 気球グループの恒温真空槽にて QFG の低温真空試験（搭載認定試験）を行った。気球グループから提示された試験条件は、搭載と同じ状態（後述の発泡スチロール製容器に収納した状態）で、恒温真空槽において -55°C 、1mmHg (133.322Pa) 以下で 3 時間以上正常動作することであったが、出力等に異常は発生しなかった。なお、この試験において、QFG センサ部に搭載されている温度センサからのデータによると、基板上的の水晶振動子の温度は仕様で定めた動作温度の -20°C よりも低くなり、最低で約 -35°C に達したが、正常に動作することが確認された。

4.4. 振動・衝撃試験

JAXA/ISSAS の環境試験設備を用いて振動・衝撃試験を行った。試験スペックは 3.1 に記した「JAXA 観測ロケット用振動衝撃単体試験規格」に基づいており、X・Y・Z の 3 軸に対して行った。加振中も動作をモニタしていたが、異常は全く見られなかった。

5. 大気球を用いた性能実証試験

5.1. BU30-5 気球実験の概要と目的

2007 年 9 月 13 日に、成層圏オゾンおよび大気重力波の観測と QFG の性能実証試験を目的として、BU30-5 号機気球実験が行われた。

本実験は、東北大学が担当する光学オゾンゾンデ、東京大学・国立極地研究所が担当する ECC オゾンゾンデによる

成層圏オゾンと大気重力波の観測との共同実験であり、QFGは光学オゾンゾンデに相乗りという形でテレメータ等の機能を利用してデータを送信した。

成層圏オゾンの観測は、上部成層圏オゾンの年々変動の研究を目的として始められ、これまでの13年間の観測によって太陽活動度の11年周期変動に同期した長期変動などが検出されている。また、オゾン高度分布には毎回波長2～3km程度の波状構造が見られ、短鉛直波長の鉛直振動を伴う大気重力波や、水平風の鉛直シアーに由来する水平差分移流によるものと考えられている。大気中の温度や風、気圧、オゾン等微量成分の小規模構造については、普遍的なスペクトルを持つことがこれまでの研究によりわかってきたが、これらは主に高度30kmまでの対流圏、下部成層圏、あるいは高度60～80kmの中間圏の観測データを用いた研究である。高度30～60kmについては観測手段が限られ、ほとんど調べられていないといつてよい。そこで、高い時間分解能をもつ測定器で高度50km以上までの温度、風、オゾンデータを取得し、未知高度領域を含む地上から上部成層圏までのスペクトル構造、および、揺らぎをもたらす大気現象の物理を明らかにすることを目的としている。

これまでの観測では、光学オゾンゾンデ・ECCオゾンゾンデのそれぞれにダイヤフラム型の静電容量式気圧計を用いてきた。しかし、いずれも数hPa以下となる40kmを超えるような高度では精度が十分とは言えず、特に重力波による数%以下の微小な気圧変動を捉えるにはより高精度な圧力計が必要である。そこで、今回はQFGを組み込んで3台の気圧計による同時観測を行い、その精度と実用性の実証を行った。

5.2. 実験方法

BU30-5号機の荷姿を図9に示す。容積30,000m³の気球に、総重量3.6kgのECCオゾンゾンデ、遮光板、光学オゾンゾンデが搭載されている。ECCオゾンゾンデによるGPSドップラー法での風の推定が可能なこと、および遮光板による気球の目隠しが可能なことの2条件から気球とECCオゾンゾンデとの距離を放球後に巻き下げによって30m以上離す。ECCオゾンゾンデと遮光板の間は10m、遮光板と光学オゾンゾンデの間は1.0mとする。太陽高度角が十分高い日中に観測するため午前7:00～10:00の間に実験を行った。なお、気球および観測器の回収は行わない。以下に、各観測器の詳細を述べる。

5.2.1. ECCオゾンゾンデ

高度30km以下のオゾンの精密観測が可能な電気化学式のオゾンゾンデ。外気をポンプで取り入れ、オゾンをヨウ化カリウム溶液に反応させて流れる電流値のデータ信号を、オゾンゾンデに接続したVaisala社のラジオゾンデRS92による、GPSドップラー法による風観測データ、温度データ、気圧データと共に1秒毎にテレメータで送る。気圧センサは静電容量式センサのVaisala製BAROCAPシリコンセンサを用いている。気圧センサの仕様を表2に示す。

5.2.2. 光学オゾンゾンデ

光学センサ部、ゾンデ部からなる光学式オゾンゾンデ。光学センサ部では拡散板で散乱された太陽直達光のうちオゾンハートレー吸収帯の300nmの紫外線と姿勢変化補正用420nmの可視光の強度を測定する。ゾンデ部は気温、気圧、GPS測位データ（風速、高度測定用）、センサ温度、リファレンス電流信号を可視光、紫外線強度データと共にPCM化し、1秒毎にテレメータで送る。気圧センサは静電容量式センサのコバル電子製PA830-102Aを用いている。この気圧計は最高気圧が981hPaのため、海拔0m付近では使用できないという欠点がある。気圧センサの仕様を表3に示す。

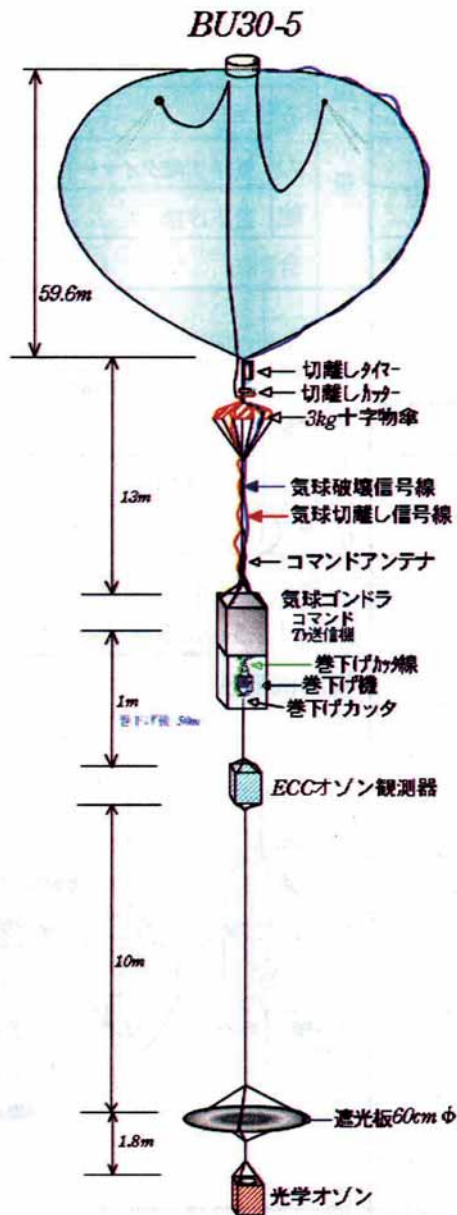


図9 BU30-5号機の荷姿

表2 ECC オゾンゾンデの気圧センサ「BAROCAP シリコンセンサ」の仕様

測定範囲	1080hPa ~ 3hPa	
分解能	0.1hPa	
精度	1080 ~ 100hPa	1.5hPa
	100 ~ 3hPa	0.6hPa

表3 光学オゾンゾンデの気圧センサ「PA830-102A」の仕様

測定範囲	981hPa ~ 0Pa
直線性	± 0.5%F.S.
温度特性	± 0.05%F.S./°C

5.2.3. QFG (水晶摩擦気圧計)

図10のようにQFGのセンサ部、データ処理部、電池を共に発泡スチロール製容器に入れて光学オゾンゾンデの側面に取り付け、出力を光学オゾンゾンデ側にする。発泡スチロール容器には穴が開けられており、センサ部の外気取り入れ口を接続する。測定した気圧データ、センサ温度データは光学オゾンゾンデ側でPCM化し、1秒毎にテレメータで送る。

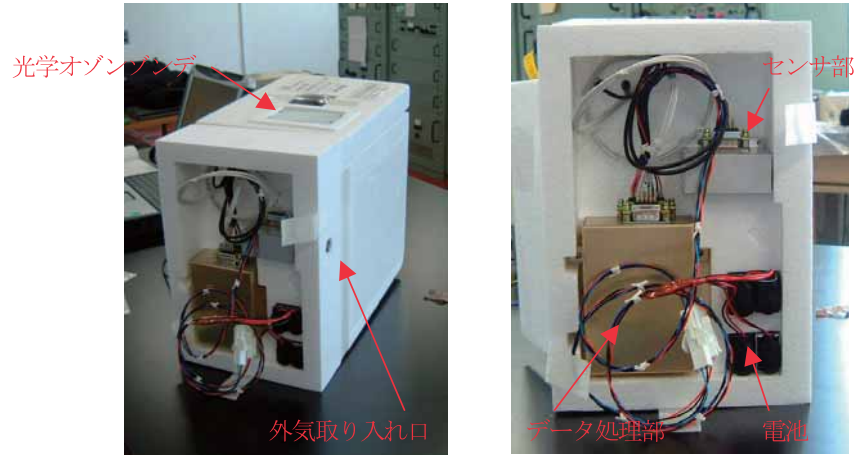


図10 光学オゾンゾンデに組み込まれたQFG

5.3. 実験結果

BU30-5号機は2007年9月13日6時51分に三陸大気球観測所より放球され、2時間35分後に高度49.8kmの水平浮遊高度に達した後、10時21分に閉伊崎東方100kmの海上に緩降下した。今回の観測では3つの観測器ともに正常に動作し、成層圏を超えて下部中間圏までの観測に成功した。

図11にQFG、光学オゾンゾンデ(BOS)、ECCオゾンゾンデによって観測された気圧の高度分布、およびMSISE-90大気モデル^[3]との比較を示す。BOSの生データには大きなオフセットがあったため、頂点でECCのデータに合せてある。ECCのデータは大気モデルと高度40kmまでよく一致している。ECCはメーカーで較正済みのため、絶対値の信頼性は高い。それに対し、QFGは高度15km以上では大気モデルよりも30%近く低めになっている。この大気モデルとの差は温度の影響では説明ができない。図7に示したように温度変化による出力電圧の変動幅は0.01V程度(30℃と-20℃の場合の電圧差)で、図8の較正曲線から変換すると100Pa以上の気圧では数%以下の気圧変動にしかならない。

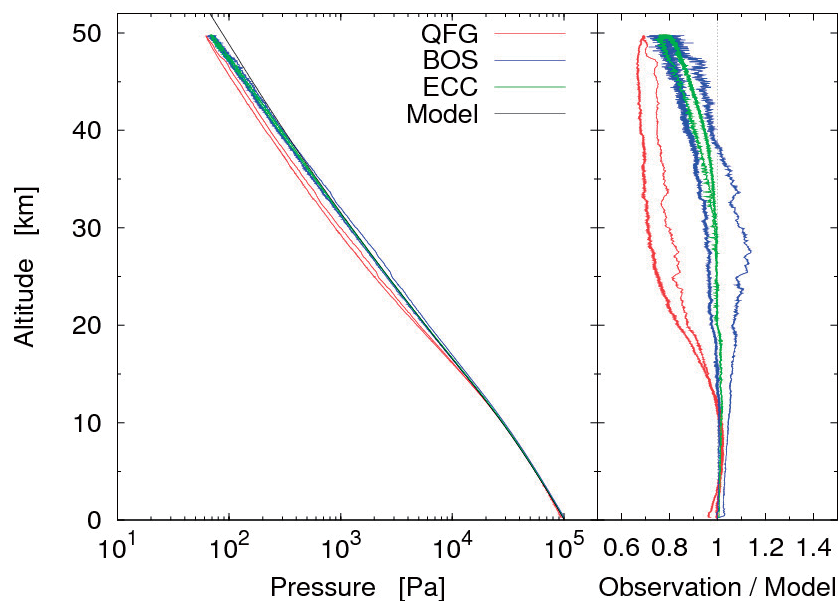


図11 各気圧計の観測結果と平均モデルとの比較(左)、および各気圧計の観測結果を平均モデルで割った値(右)

この原因として、室内での較正実験の問題が考えられる。前述のように気圧較正システムには、全圧を測定するキャパシタンスマノメータを使用している。一方、QFGは圧力だけでなく気体の粘性などにも敏感であり、気体種の組成計としても使われているほどである。較正試験ではチェンバー内に清浄な乾燥空気を導入しているが、QFGがチェンバー内壁やQFG自身からの脱ガスによって影響を受けた可能性が高い。前述のように粘性流領域ではインピーダンスは分子量の平方根に比例する。一方、インピーダンスは圧力の平方根に比例するので、一定のインピーダンスの値に対して異なる気体種では圧力は分子量に比例することになる。脱ガスの主成分は水蒸気(H₂O)であると推測されるが、仮に気圧較正システムのチェンバー内の気体が乾燥空気ではなく全て水蒸気であったとすると、較正後に圧力の計測値は真の圧力に比べて約40%低くなると見積もられる。それを確認するためには、真空チェンバー・真空ポンプ・ガス導入装置などからなる較正装置を今後、根本的に改良する必要がある。

また、QFGとBOSのデータには上昇時と下降時で10%程度の差が見られているが、ECCにはそのような差は見られていない。この上昇時と下降時の差は実際の気圧に存在する差と考えられるが、ECCで検出されていない理由については不明である。

図12に温度の観測結果を示す。BOS・ECCは外気の気温を測定しているが、QFGの測定値は気温ではなく、センサ部の水晶振動子の温度である。QFGセンサ部は気圧を測定するために外気に晒されているが、センサ部の温度は自身の発熱と外気との熱収支によって決まっている。また、センサ部の熱容量のために外気温変化に対して応答が遅れるので、センサ部温度は上昇時と下降時で大きなヒステリシスが生じている。外気温は対流圏界面の高度17km付近で最低の-65℃まで下がっているが、QFGのセンサ部温度は下降時の高度7km付近で-18℃が最低値である。したがって、大気球観測においては気圧データの温度補正には外気温ではなくセンサ部温度の同時測定が必須であると言える。今回示す全ての気圧データはこのセンサ部温度データを用いて温度補正済みである。

最後に、微小な変動成分について解析した結果を図13に示す。各観測器が測定した気圧と気温の高度分布にそれぞれ1kmと5kmの移動平均をかけ、両者の差を5kmの移動平均で割った結果を図4に示す。この操作により、約2-10kmのバンドパスをかけた変動成分が抽出される。まず、気圧については、QFGはBOSと絶対値に多少の違いはあるものの、すべての高度で位相がよく合っており、相対的な精度は1%以下であることがわかる。ECCの気圧は高度20km以下でBOSとよく一致するが、それ以上の高度では位相も振幅も全く異なる。一方、気温の変動成分はBOS・ECCで非常によく一致する。QFG・BOSと、ECCの高度差(11m)は非常に短いため、両者の気圧変動成分が異なるのはECC側の気圧計に何らかの原因がある可能性が高い。そこで、2005年に行われたBOSとECCの同時観測のデータについても再解析を行ったところ、両者の気圧は高度20km以下でよく一致するが、それ以上では位相も振幅も全く異なるというほぼ同様の結果を得た。このことからECCの気圧計は高度20km以上(約80hPa以下)では微小な気圧変動を検出できないおそれがあることがわかった。ECCの気圧計は世界中で気象観測に使用されている製品だが、この事実は今回初めて明らかになったものであり、今後原因を究明する必要がある。

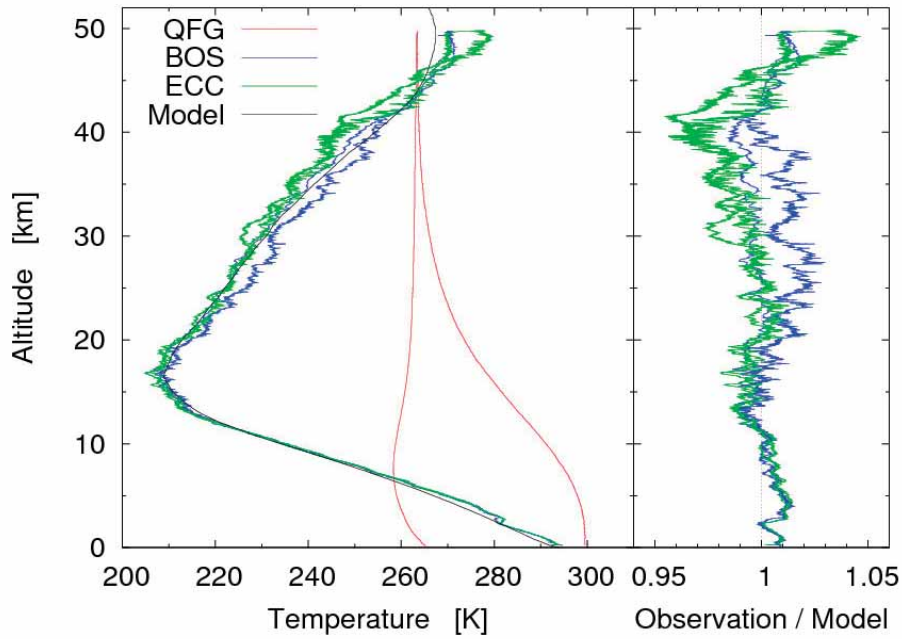


図 12 各観測器の温度観測結果と平均モデルとの比較 (左), および観測結果を平均モデルで割った値 (右)

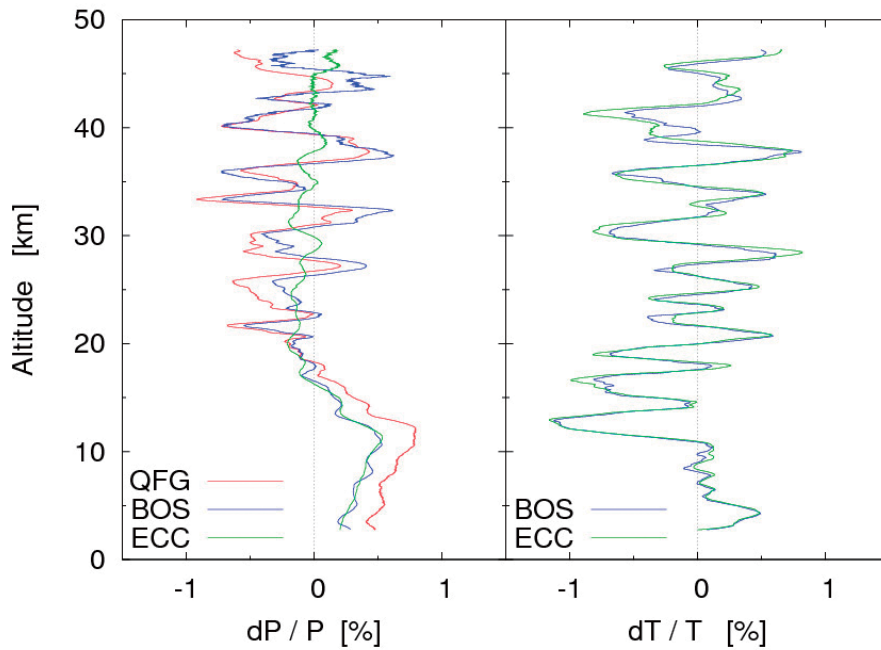


図 13 2-10km のバンドパスフィルタによって抽出された気圧と気温の変動成分

6. まとめ

飛翔体搭載用小型真空計として、市販されている音叉型水晶振動子を利用した水晶摩擦気圧計 (QFG) の開発に成功し、科学気球 BU30-5 号機を用いた性能実証試験を行った。QFG は搭載に要求される仕様を満たすことが室内実験による確認試験で示されていたが、実際の性能実証試験では室内実験に原因があると思われる問題がいくつか見つかった。

た。これらの問題も室内実験の較正装置・較正方法の改良によって十分に解決できると予想している。したがって、QFGの飛翔体搭載用小型気圧計としての基本的な性能は実証されたと考えている。

本測定器は小型・軽量であり、他の観測器の環境に対する悪影響もほとんどないため、他観測器との相乗りが容易である。今後は低価格化と簡便性を追求し、将来的には大気球・観測ロケットの標準搭載品として利用できるようにすることが目標である。

また、市販されている音叉型水晶振動子を利用しているために、測定精度・測定限界に大きく影響する水晶振動子のインピーダンスの大きさやそのばらつきを自由に選択することができない。水晶振動子を水晶片から加工する段階から形状を最適化し、低圧領域でもインピーダンスの温度変化が相対的に小さい水晶振動子を開発できれば、QFGの性能を大幅に向上させることが可能になると期待される。

参考文献

- [1] Yamagami, T., Saito, Y., Matsuzaka, Y., Namiki, M., Toriumi, M., Yokota, R., Hirose, H., Matsushima, K., "Development of the highest altitude balloon", *Adv. Space Res.*, 33, pp.1653-1659, 2004.
- [2] 伊藤秀明, "水晶摩擦真空センサ", *日本音響学会誌*, 51 巻 1 号, pp.49-53, 1995.
- [3] Hedin, A. E., "Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere", *J. Geophys. Res.*, 96, pp. 1159-1172, 1991.
- [4] Ono, M., Hirata, M., Kokubun, K., Murakami, H., Hojo, H., Kawashima, H., and Kyogoku, H., "Quartz friction vacuum gauge for pressure range from 0.001 to 1000 Torr", *J. Vac. Sci. Technol. A*, 4, pp. 1728-1731, 1986.
- [5] Kokubun, K., Hirata, M., Murakami, H., Toda, Y. and Ono, M., "A bending and stretching mode crystal oscillator as a friction vacuum gauge", *Vacuum*, 34, pp.731-735, 1984.
- [6] Kobayashi, T., Hojo, H. and Ono, M., "Pressure measurement from 1 atm to 0.01 Pa using a quartz oscillator", *Vacuum*, 44, pp.613-616, 1993.
- [7] Hirata, M., Kokubun, K., Ono, M., and Nakayama, K., "Size effect of a quartz oscillator on its characteristics as a friction vacuum gauge", *J. Vac. Sci. Technol. A*, 3, pp. 1742-1745, 1985.
- [8] Ono, M., Hirata, M., Kokubun, K., Murakami, H., Tamura, F., Hojo, H., Kawashima, H., and Kyogoku, H., "Design and performance of a quartz oscillator vacuum gauge with a controller", *J. Vac. Sci. Technol. A*, 3, pp. 1746-1749, 1985.