

GPS 搭載型光学オゾンゾンデの開発

村田 功¹, 佐藤 薫², 山上 隆正³, 岡野 章一⁴, 富川 喜弘⁵

Development of a Balloon-borne Optical Ozone Sensor with GPS receiver

By

I. Murata¹, K. Sato², T. Yamagami³, S. Okano⁴, and Y. Tomikawa⁵

Abstract: We have developed a new balloon-borne optical ozone sensor to measure wind speed profile by GPS receiver simultaneously with ozone, pressure, and temperature. The validation measurements with Electrochemical Concentration Cell (ECC) ozone sensors were performed between 2002 and 2007. The ozone number density and wind speed show good agreements with ECC ozone sensors and GPS radiosondes.

Key words: optical ozone sensor, GPS

概 要

GPS を搭載し、オゾン、気圧、気温の他に風速も測定可能とした光学オゾンゾンデを開発し、2002-2007 年の間に電気化学式 (ECC) オゾンゾンデとの比較検証観測を行った。オゾン濃度、風速ともに ECC オゾンゾンデ (GPS ラジオゾンデ付) とよい一致を示し、GPS 搭載型光学オゾンゾンデが十分な性能を持っていることが示された。

1. はじめに

東北大学では、上部成層圏のオゾンを直接観測する光学オゾンゾンデを開発し、JAXA 宇宙科学研究本部によって開発された薄型高高度気球と組み合わせて三陸におけるオゾン高度分布観測を 1994 年から 14 年連続して 8 月下旬～9 月上旬の期間に行っている [3, 4]。当初の観測の目的は、フロンやハロカーボン類から放出される塩素化合物が上部成層圏オゾンに与える影響の評価であったが、観測されたオゾンや気温の高度分布には毎回波状構造が見られ、これらは大気重力波によるものと思われる。光学オゾンゾンデは ECC オゾンゾンデの精度が落ちる高度 30km 以上で観測可能なため、両者の同時観測により広い高度領域で大気重力波の観測が可能となる。そこで、大気重力波のパラメータを観測する上で重要な風速も測定できるように、GPS を搭載した光学オゾンゾンデを 2002 年に新たに開発し、ECC オゾンゾンデとの同時観測を開始した。本論文ではその主な改良点および ECC オゾンゾンデとの比較結果について報告する。

2. 観測装置の改良点

光学オゾンゾンデは、オゾンハートレー帯吸収によって太陽光の 300 nm 付近の紫外線の強度が高度に対して変化する

¹ Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

² Graduate School of Science, University of Tokyo

³ Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency.

⁴ Graduate School of Science, Tohoku University

⁵ National Institute of Polar Research

ることを利用してオゾン濃度の鉛直分布を得るという測定原理である [2]。ECC オゾンゾンデのように外気を取り込む必要がないため、大気の薄くなる 30 km 以上での観測精度がよいことが特徴である。受光面にはテフロン製の拡散板を用いており、これにより太陽追尾をしなくても光を観測器内部に取り込むことができる。また、内部に取り込まれた光を石英製のビームスプリッターによって分け、オゾンによる吸収を受ける太陽紫外線 (300 nm) の強度と同時にオゾンの吸収を受けない波長 (420 nm) の太陽光強度を測定することで、観測器の揺れによる入射光量の変化を補正する。このように可動部分のない設計のため、メカニカルトラブルがないことも大きな特徴である。以上の光学系は今回の改良では全く変更していない。

表 1 に旧型から新型への主な変更点を示す。風速を測定するために GPS を搭載したことと、それに伴い送信方式を FM にし、1 秒毎に全ての観測値を取得するようになったことが大きな変更点である。また、気温・気圧の観測にはこれまで明星電気のレーウィンゾンデを組み込んでいたが、送信方式の変更に伴い使用できなくなったため新たに製作した。

改良した光学オゾンゾンデの外観を図 1 に示す。本体のサイズは従来の 315 x 150 x 265 mm から 250 x 170 x 250 mm と若干小さくなったが、重量は逆に基板や送信機の変更により 1.1 kg から 2.2 kg へと増加した。

表 1. 旧型から新型への主な変更点

	旧型	新型
送信方式	AM	FM (AD:12bit)
データ取得間隔 (オゾン)	8 秒 (高度にして約 40 m)	1 秒 (同約 5 m)
風速・高度	未測定 (測距により 1 分毎 (同約 300 m))	GPS 測位により 1 秒 (同約 5 m) 毎
気温・気圧	明星電気製レーウィンゾンデを組み込み	サーミスタ温度計は明星と同部品、 気圧計は市販静電容量式圧力センサ (コバル電子 :PA-830-102A-05) (事前に恒温槽, チャンバーにて校正)

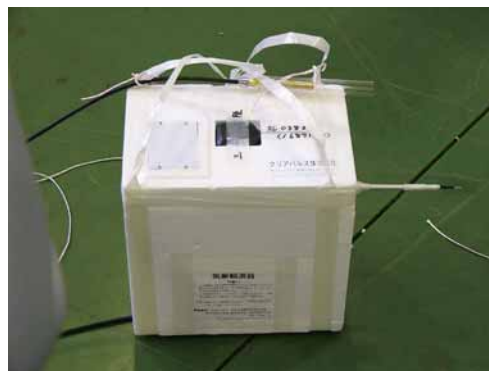


図 1. 光学オゾンゾンデ外観

3. ECC オゾンゾンデとの同時観測

まず新型のプロトタイプを用いて、明星電気製 ECC オゾンゾンデ (KC-96) との同時観測を 2002 年 6 月 1 日に JAXA 宇宙科学研究本部三陸大気球観測所 (39.16° N, 141.83° E) において行った。この観測では気圧計の仕様の間違っただけのものを使用してしまい、また光学オゾンゾンデ送信機からの電波が周波数ドリフトにより GPS 信号と干渉してしまい GPS 受信がうまくできなかった。そこで、気圧計は真空装置などに使われる市販静電容量式圧力センサ (コバル電子 : PA-830-102A-05, 直線性 : $\pm 0.5\%$ F.S.) に、送信機は周波数の安定な水晶発振式のものに交換した。この改良型を用いて 2002 年 9 月 5, 7 日に旧型や Vaisala 製 ECC オゾンゾンデとの比較観測を行った。このときの結果から、温度センサの値が気温 -50℃ 以下で ECC オゾンゾンデの温度計より有意に低い値 (最大 15℃ 程度) を示すこと、AD 変換のダイナミックレンジが 12bit のため数 hPa 程度になると気圧測定値の分解能が不足すること、送信機の出力が強すぎて各デー

タにノイズが載ること、等の問題点が見つかった。気温については温度センサの信号変換回路が低温時（高抵抗時）に対応していなかったことが分かり、回路内の抵抗等を変更して -90°C まで対応したものに修正した。気圧については 32hPa 以下を12bitでAD変換する低気圧用チャンネルを新たに追加し、送信機については出力を弱めると共に送信アンテナを1mほど観測器から離して配置する改良を行った。以上ではほぼ問題点は解消され、2003年9月13日には旧型との比較観測、2004年以降は超薄型高高度気球を用いた高度約50kmまでのVaisala製ECCオゾンゾンデとの同時観測を3回行っている。ただし、光学オゾンゾンデをECCオゾンゾンデの上部に配置するとECCオゾンゾンデ側のGPSの受信不良が起り風速データに欠測が出るなど、両者のデータが完全にそろわない例もあったため、本論文では2007年9月13日の観測結果を例に新型の精度検証結果を示す。

表 2. 新型光学オゾンゾンデの観測概要

観測日時	同時観測	概要
2002年6月 1日 10:03JST 放球	明星電気 KC-96	最高到達高度 39.5km 気圧計及び送信機に問題、KC-96 は 28km で溶液切れ
2002年9月 5日 14:19JST 放球	旧型, Vaisala 製 ECC	最高到達高度 37.7km 光学オゾンゾンデオゾン観測値低, 送信機ノイズ, 低温時気温誤差大, 低圧時気圧分解能不足
2002年9月 7日 14:07JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 38.7km 光学オゾンゾンデオゾン観測値低, 送信機ノイズ, 低温時気温誤差大, 低圧時気圧分解能不足
2003年9月13日 10:33JST 放球	旧型	最高到達高度 38.3km
2004年9月 4日 9:02JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 49.8km
2004年9月 5日 13:15JST 放球		最高到達高度 42.5km 光学オゾンゾンデオゾン観測値低
2005年8月28日 7:40JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 51.5km ECC GPS 受信不良（風速観測できず）
2006年9月 4日 6:28JST 放球	(B-SMILES)	観測高度 32.2km まで（バッテリー切れ）
2007年9月13日 6:51JST 放球	Vaisala 製 ECC	最高到達高度 49.6km

4. 比較結果

図1に2007年9月13日に観測されたオゾン及び風速の高度分布を示す。左のオゾンの結果は青線が光学オゾンゾンデ、赤線が同時に観測したECCオゾンゾンデ、黒丸は気候値（CIRA96, 40°N , 9月）[1]である。なお、高度分解能は光学オゾンゾンデは1km, ECCオゾンゾンデは10m程度と異なるが、ここではそろえていない。また、両者の高度データは光学オゾンゾンデはGPS測定値, ECCオゾンゾンデはジオポテンシャルハイトであり、およそ40kmより高高度では数百メートルもずれてしまうため、ここでは縦軸に観測時刻を用いて比較し、参考までにおよその高度を合わせて表示している。光学オゾンゾンデは紫外線量からオゾンを導出するため高度20km以下の紫外線の弱い領域では精度はよくないが、20-30kmでは両者が10%以内で一致しているのがわかる。30km以上では過去の観測ではECCオゾンゾンデの値は光学オゾンゾンデより低い値を示していたが、今回の結果ではこの高度領域でも両者は比較的良好に一致しており、気候値との比較でもどちらがよいとも言い切れない。ECCオゾンゾンデは30km以上ではポンプ効率が落ちるため精度が落ちると言われているが、近年改良されているのでポンプ効率の補正等で精度が向上したのかもしれない。ただし、重力波によると考えられる2-3kmスケールの波状構造に関しては、光学オゾンゾンデでは最高高度の49km付近まで見えているのに対し、ECCオゾンゾンデでは30km程度より高高度では細かい構造が見られなくなっている。これは、大気圧が下がりポンプの効率も落ちたことにより反応管内のレスポンスが下がってしまい、高度分解能が下がってしまうことが原因だと考えられる。なお、ECCオゾンゾンデの38km付近に見られる低い値は、

受信不良によるものである。これより、地上から高度 30km までの ECC オゾンゾンデの値と、高度 20km 以上の光学オゾンゾンデの値を組み合わせることで、地上から高度 50km 付近までのオゾン高度分布を精度よく観測できることが分かる。

右の風速の結果は、赤および青が光学オゾンゾンデの 1 秒毎のデータで、黒および水色が気球の揺れの影響を補正するため 20 秒の移動平均をかけたものである。また、オレンジとピンクが ECC オゾンゾンデに搭載された GPS ラジオゾンデによる結果である。光学オゾンゾンデの 1 秒毎のデータは多少ばらつきが大きいですが、20 秒の移動平均をかけたものは GPS ラジオゾンデの風速と非常によく一致する。光学オゾンゾンデでは 1 秒毎の緯度・経度の変化を単純に移動距離に変換して風速としているが、これで十分に精度よく風速が求まっていると言える。なお、グラフには高度方向に数百メートルから 2km 程度の波状構造が多く見られ、重力波等による変動と考えられる。

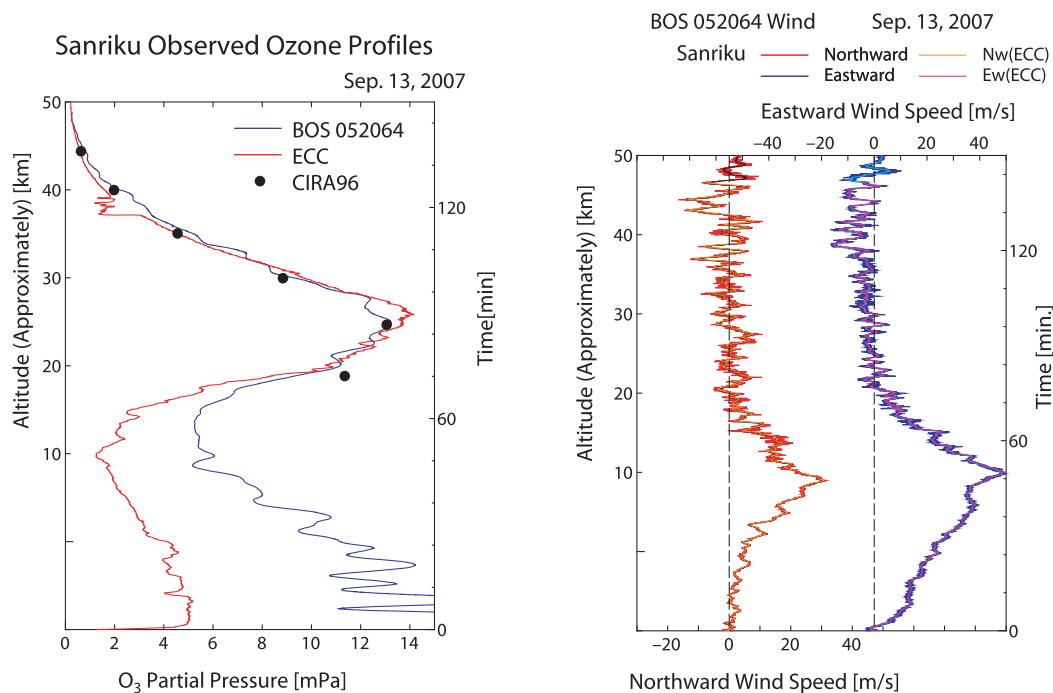


図 2. 2007 年 9 月 13 日の観測結果 (左: オゾン, 右: 風速)

なお、表 2 に示したように、2002 年 9 月 5 日、7 日、2004 年 9 月 5 日の観測では光学オゾンゾンデの観測値が低くなってしまったが、どうやら午後の放球では光学オゾンゾンデのオゾン観測結果が低くなるようである。午後の観測で午前と異なる点は時間とともに太陽天頂角が大きくなっていくことぐらいで、おそらく解析アルゴリズム上のバグと考えられるが現時点では修正できていない。ただし、現在では超薄型高高度気球を用いていることから朝風の時間の放球を基本としており、これら午前中の観測では問題は起きていない。

表 3 に光学オゾンゾンデ気温センサの恒温層における較正結果、図 3 に ECC オゾンゾンデ気温測定値との比較結果を示す。気温センサの較正はクリアパルス株式会社にて行ったものだが、 -80°C 、 -70°C で $1, 2^{\circ}\text{C}$ 高めになるものの、その他の温度では 1°C 以下の誤差に収まっている。しかし、図 3 の観測時の ECC オゾンゾンデとの比較では、放球後しばらくは非常によく一致を示すものの、圏界面に近づき -50°C を切ったあたりから光学オゾンゾンデの気温測定値が $1, 2^{\circ}\text{C}$ 高めの値を示し始め、その後成層圏に入って気温が -50°C 以上になっても最大 7°C 程度の差が出ている。これ以前の観測時にも同様の傾向が見られることから、一度 -50°C 以下になつてしまうと戻りにくい、あるいは日射の影響がうまく取れていないといったことが考えられる。原因としては気温センサの支持構造が考えられる。市販のラジオゾンデではセンサ周りの熱容量を小さくするために薄い支持板にセンサと配線を貼り付けているが、製作が難しいので我々は同軸ケーブルの配線を細いアルミ管で覆っている。そのため熱容量も大きく日射の影響も取り切れていない可能性があり、今後の要改良点である。ただし、数 km 以下の細かい変動に関してはよく対応しており、重力波等による気温偏差を調べるには大きな問題はないと考えられる。

表 3. 気温センサ校正結果

Temp.(Cal) [°C]	Temp.(BOS) [°C]
-80.0	-77.9
-70.0	-69.0
-60.0	-59.7
-50.0	-50.0
-40.0	-40.4
-30.0	-30.5
-20.0	-20.1
-10.0	-10.5
0.0	0.0
10.0	10.0
20.0	20.1
30.0	29.3

Sanriku Observed Temperature Profiles

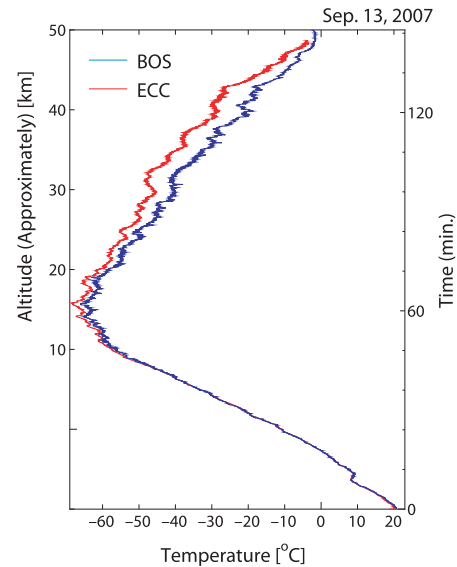


図 3. 2007 年 9 月 13 日の気温観測値の比較

図 4 に光学オゾンゾンデ気圧センサの校正結果を示す。光学オゾンゾンデの気圧センサの値はカウント値のまま表示している。気圧センサの校正は JAXA 宇宙科学研究本部の真空チャンバーにて行ったが、図 4 から分かるように非常に直線性はよい。この結果に直線フィッティングを行い、気圧校正直線を決定した。図 5 は観測時の ECC オゾンゾンデ気圧測定値との比較結果である。両者は非常によく合っている。ただし、光学オゾンゾンデ気圧センサの観測値は、このときの観測では観測後に ECC オゾンゾンデ気圧測定値に合わせてオフセットを調整している。光学オゾンゾンデ気圧センサは図 4 に示したように直線性は非常によいが、オフセットが日によって数 hPa 程度変動することがある。そのため、放球前に地上で校正用の気圧計で絶対値校正を行う。ECC オゾンゾンデ気圧計も同様に放球前に地上で絶対値校正を行っており、今回はデータ解析時に両者のオフセットのみ比較して、最終的に放球直後の値が ECC オゾンゾンデ気圧計と一致するよう微調整している。このように気圧センサに関しては放球前に地上で絶対値校正を行う必要はあるものの、それさえ行えば非常に精度よく気圧が測定できていることが図 5 より分かる。

なお、今回の観測では水晶摩擦気圧計の検証観測も行っているが、数 km 以下の細かい変動に関しては光学オゾンゾンデ気圧センサと水晶摩擦気圧計との結果は非常によく一致しており、これは光学オゾンゾンデ気圧センサが重力波等による気圧偏差を調べるのに十分な性能を持っていることを示している [5, 図 13]。

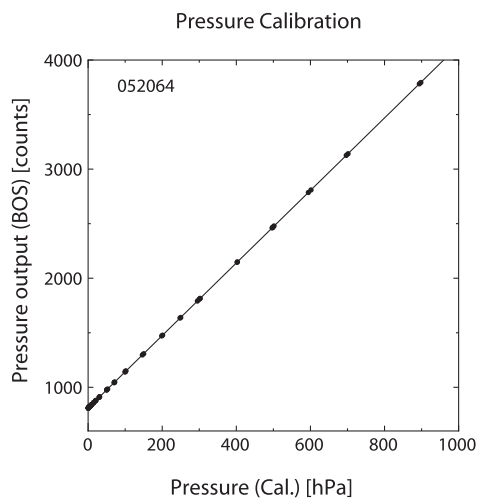


図 4. 気圧センサ校正結果

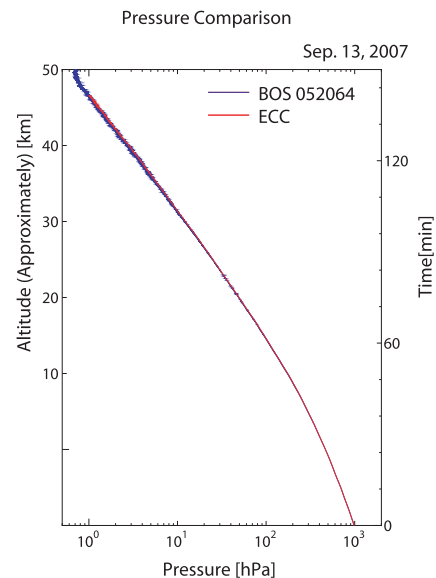


図 5. 2007 年 9 月 13 日の気圧観測値の比較

5. まとめ

大気重力波のパラメータを観測する上で重要な風速も測定できるように、GPS を搭載してオゾン、気圧、気温の他に風速も測定可能とした光学オゾンゾンデを 2002 年に新たに開発した。この改良では光学系は従来のものと全く同じだが、GPS を搭載したことに伴い送信方式を FM にし、1 秒毎に全ての観測値を取得できるようになった。2002–2007 年の間に ECC オゾンゾンデとの比較検証観測を行い、オゾン濃度、風速ともに ECC オゾンゾンデ（GPS ラジオゾンデ付）とよい一致を示した。気温に関しては絶対値に若干問題があるものの数 km 以下の細かい変動はよく捉えており、気圧は放球前に絶対値校正を行えば数 km 以下の細かい変動成分も含めて非常に精度よく測定可能である。これにより、GPS 搭載型光学オゾンゾンデが十分な性能を持っていることが示された。

References

- [1] Keating, G. M., L. S. Chiou, and N. C. Shu, Improved ozone reference models for the COSPER International Reference Atmosphere, *Adv. Space Res.*, 18, 11-58, 1996.
- [2] Okano, S., M. Okabayashi, and H. Gernandt, Observations of ozone profiles in the upper stratosphere using a UV sensor on board a light-weight high-altitude balloon, *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 51, 225-231, 1996.
- [3] 岡林昌宏, 田口真, 岡野章一, 福西浩, 高高度気球搭載光学センサーによる成層圏オゾンの観測, 宇宙科学研究所報告特集, 第 32 号, 105-111, 1995.
- [4] 岡林昌宏, 村田功, 福西浩, 高高度気球搭載光学オゾンゾンデを用いた成層圏オゾン高度分布の観測, 宇宙科学研究所報告特集, 第 40 号, 45-54, 2000.
- [5] 栗原 純一, 村田 功, 佐藤 薫, 富川 喜弘, 阿部 琢美, 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, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-08-001, 43-56, 2009.