

オゾンゾンデ観測において 10hPa 付近で発生する オゾン分圧値の急上昇について

矢代 和也*・萩谷 聡*・宮林 直人*・岩渕 真海*

Research on Sudden Rise of Ozone Partial Pressure around 10hPa

Kazuya YASHIRO, Satoshi HAGIYA, Naoto MIYABAYASHI and Masami IWABUCHI

要旨

10hPa 付近で発生するオゾン分圧値の急上昇について事例調査と再現実験を行い、その要因を探った。事例調査では、オゾン分圧値の急上昇が発生した観測ではポンプ効率測定後のポンプ電流とポンプ効率測定中の最大ポンプ電流が高い傾向が見られた。また、再現実験ではイオンブリッジを一時反応液から露出させた後で元に戻した場合にオゾン量が急上昇すること、および減圧時には反応液に溶け込んでいた空気が出てくることによって発生する気泡や反応液の沸騰による気泡が 10hPa 付近では大きく成長して破裂を繰り返すことが確認できた。これらの結果から、10hPa 付近で発生するオゾン分圧値の急上昇は、気泡がイオンブリッジを通過する I⁻の流れを一時的に遮断してしまい、その間に蓄積された I⁻がその後再び急に流れ出すことが原因である可能性が高い。

1. はじめに

高層気象台(以後、つくば)、札幌管区気象台(以後、札幌)、沖縄気象台(以後、那覇)ではそれぞれ週一回、気球に GPS ゾンデ、パラシュート、巻下器およびオゾンセンサを取り付けて飛揚し、上空約 5hPa(35km 付近)までのオゾン量を観測している。オゾンセンサにはそれまで使用していた KI solution and Carbon electrode 型オゾンセンサに代わって、那覇では 2008 年 11 月以降、つくばと札幌では 2009 年 12 月以降、Electrochemical Concentration Cell 型オゾンセンサ(以後、ECC 型)を使用しているが、この ECC 型の使用を開始してから 10hPa 付近でオゾン分圧値が不自然に急上昇する現象(以後、分圧急上昇)が時折見られるようになった(図 1)。この現象はオゾン分圧値が短時間で急上昇した後、急降下していずれ元に戻ることから、実際に大気中のオゾン量が増加して発生しているのではなく、また反応液の凍結に伴うオゾン分圧値の振る舞いとも異なっている。気象庁では、分圧急上昇の原因と影響が不明であることから、その程度が大きい場合は観測精度に問題があるとしてそれ以降の観測値を採用していな

い。この調査では、反応液の沸騰、高湿度によるインターフェースボードの結露および反応液飛散による同ボードの短絡の 3 つの仮説(図 2)のもとで事例調査と再現実験を行い、分圧急上昇の発生回数や発生時の特徴、発生要因を明らかにすることにした。

2. 使用したデータ

この調査で対象としたのはつくば、札幌、那覇において、2010 年 4 月 1 日から 2013 年 4 月 30 日までに行われた計 430 回の観測である。なお、つくばと札幌では RS92-SGP 型 GPS ゾンデ、那覇では RS-06G(E)型 GPS ゾンデを使用しており、作成されるデータのファイル形式が異なっている。主に使用したファイルはつくばと札幌では、

- ・EDT_AED(気温や相対湿度を記した 2 秒値データ)
 - ・CALC_OZONE(オゾン分圧やポンプ温度を記した 2 秒値データ)
- であり、那覇では、
- ・TTU(気温湿度観測点のデータ)
 - ・TOZ(オゾン観測点のデータ)

である。分圧急上昇の状況確認には 2 秒値データを扱うこととし、次章の事例調査では上空のデータについては

*高層気象台 観測第二課

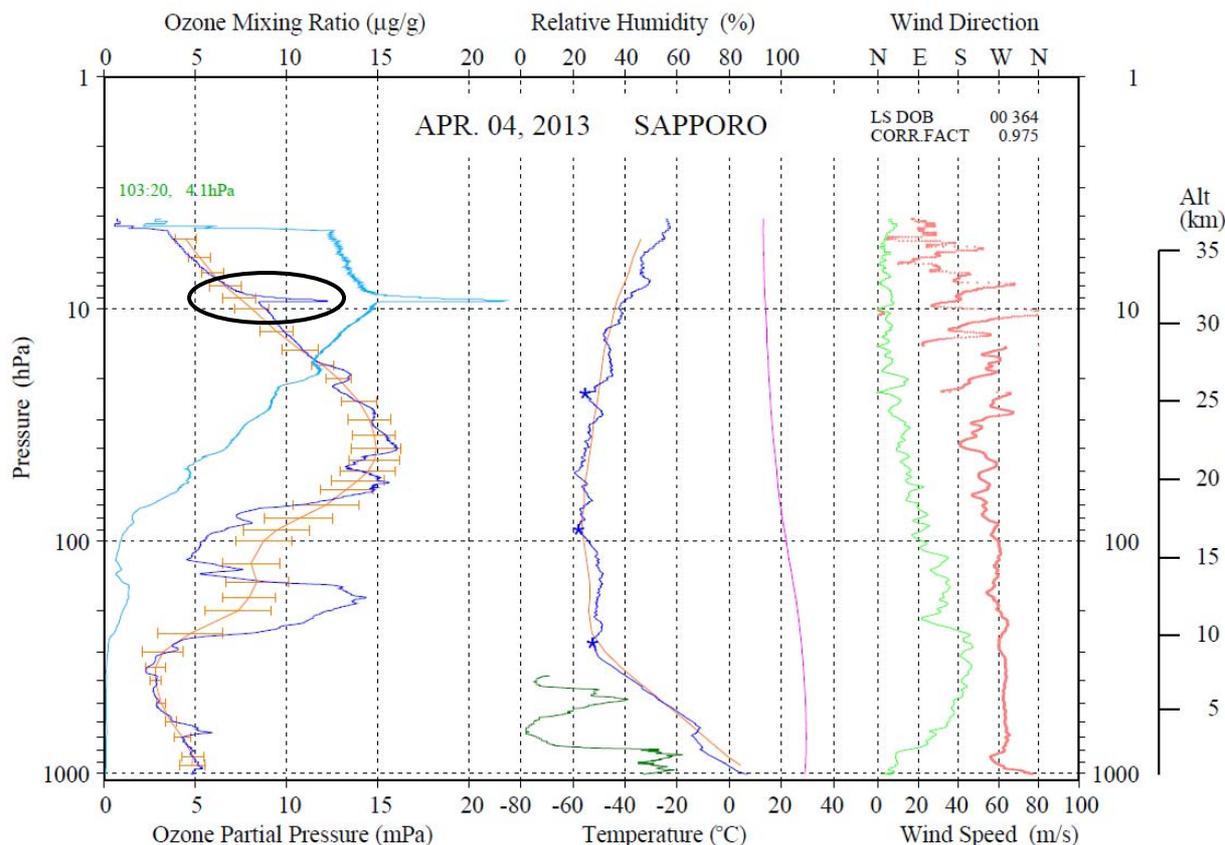


図1 分圧急上昇(黒丸)が発生した観測例(2013年4月4日札幌)

左側の青線がオゾン分圧(観測値), 橙線がオゾン分圧(参照値), 水色線がオゾン混合比, 中央の青線が気温(観測値), 橙線が気温(参照値), 緑線が相対湿度, 桃線がポンプ温度, 右側の赤線が風向, 黄緑線が風速を示す. なお, 参照値とは1994年から2008年の月別累年平均値を指す.

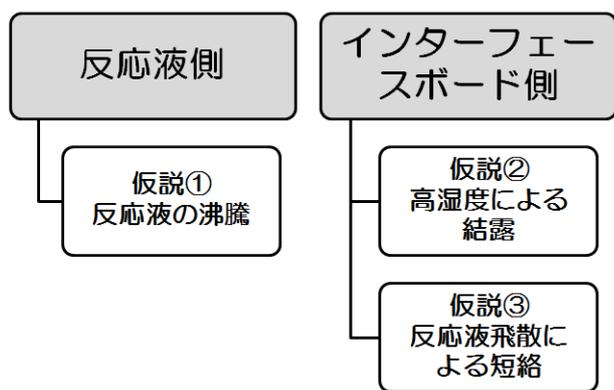


図2 当初考えた分圧急上昇の発生要因

つくばと札幌のデータのみ使用した(観測数 238 回). なお, 地上のデータとポンプ効率測定時のデータについてはつくばと札幌に加えて那覇のデータも使用した(観測数 430 回).

3. 事例調査

3.1 発生回数

10hPa 付近でオゾン分圧値が概ね 1mPa 以上急上昇した観測は 3 官署合わせて 26 回あり, 夏に若干少なくなるものの, 発生頻度は 10% を下回る月が多かった(図 3). つくばでは 2011 年 6 月以降は仮説③の対策として“反応液の飛散からインターフェースボードを保護するためのテープを ECC 型に貼る”対策を, 同年 10 月 26 日以降は仮説②の対策として“インターフェースボードの結露を防ぐために ECC 型にシリカゲルを添付する”対策を実施してきたが, 両対策実施後も分圧急上昇の発生回数は減少していない.

3.2 発生時の気象と ECC 型の状況

分圧急上昇が発生した観測時の気象と ECC 型の状況に特徴があるのかを確認するため, 飛揚前と飛揚時の主な観測要素について, 全観測と分圧急上昇が発生した観測におけるそれぞれの平均値を求めた(表 1). 気象状況に関する

表 1 主な観測要素の全観測と分圧急上昇が発生した観測における平均値

	観測要素	全観測	標準偏差	分圧急上昇が発生した観測	差
気象状況	地上気温(°C)	18.7	9.9	18.1	-0.6
	地上相対湿度(%)	54.6	14.3	53.2	-1.4
	10hPa 到達時の気温(°C)	-42.9	3.5	-43.7	-0.8
	観測中に記録した最低気温(°C)	-64.8	5.0	-64.6	0.2
ECC 型の状況	ポンプ効率測定後のポンプ電流(μA)	66.6	10.6	70.1	3.5
	ポンプ効率測定中の最大ポンプ電流(μA)	81.5	15.1	86.7	5.2
	地上ポンプ温度(°C)	29.8	2.2	29.8	0.0
	10hPa 到達時のポンプ温度(°C)	9.3	3.5	10.5	1.2

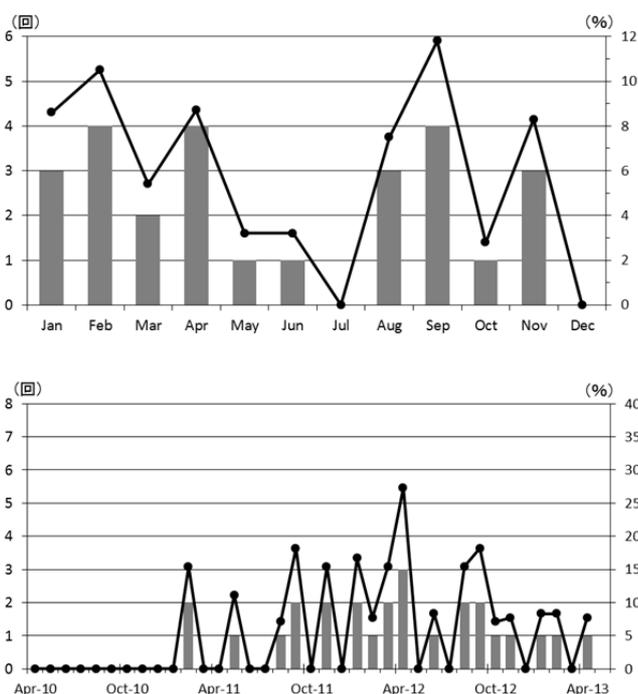


図 3 分圧急上昇発生回数(回)と発生頻度(%)
(上：月別，下：月別の推移)

観測要素については全観測と分圧急上昇が発生した観測では両者の差が小さい傾向にあり，“表 1 にある気象条件は分圧急上昇の発生要因ではない”と考えられる。一方，ECC 型に関する観測要素については分圧急上昇発生時にポンプ効率測定後のポンプ電流とポンプ効率測定中の最大ポンプ電流が高い傾向が見られるが，どちらの要素も電流値が高いと必ず分圧急上昇が発生する訳ではないため(図 4)，“これらの要素で分圧急上昇発生の有無を明確に区分することはできない”と言える。

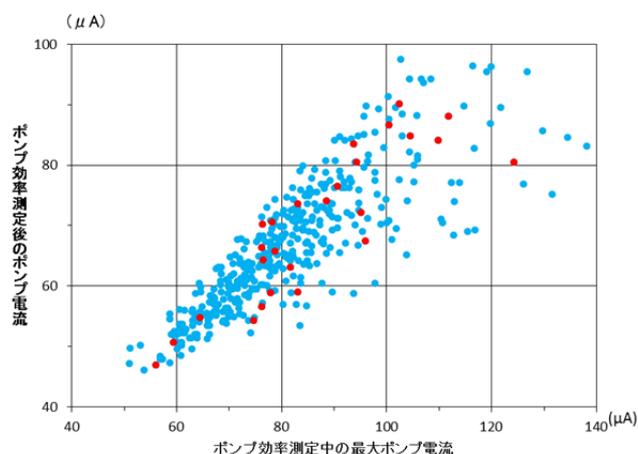


図 4 ポンプ効率測定後のポンプ電流と
ポンプ効率測定中の最大ポンプ電流
(全観測(青)と分圧急上昇が発生した観測(赤))

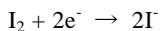
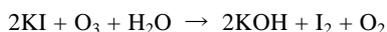
4. 再現実験

4.1 事前準備

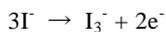
Herman *et al.*(2011)は長い時間スケールでみたときオゾンデータに影響を与えうることから，落下回収された ECC 型については再び観測で使用することを勧めていない。しかし，今回は反応電流の変化を調査するための単発の室内実験であり，データの長期的な評価を行わないことから問題ないと考え，落下回収された ECC 型について入念にポンプ洗浄とセル洗浄を行い，そのうちポンプ電流や吸・排気圧に問題がなく，実際の観測と同様に事前に 3-7 日前点検と当日点検を行い合格した ECC 型を使用した。なお，反応電流を測定しない実験では，反応管内部の様子が確認できる窓を作成した(透明な OHP シートを適当な大きさに切り，RTV 型シリコンで反応管に固定)，窓付き反応管を使用した(写真 1)。

4.2 分圧急上昇の再現

気象庁(2010)の通り, ECC 型は大気を吸引するためのポンプと, 反応液とオゾンとを反応させて電流として取り出す反応管で構成されている(図5). カソードセルでは,



の反応によって2個の e^- を受け取り, アノードセルでは,



の反応によって2個の e^- を放出する. カソードセルで生じた I^- は, イオンブリッジを通過してアノードセルに移動する. これらの反応によってオゾン1分子を取り込むと2個の電子が流れるので, この電流を計測してオゾン量を計算している. このため, イオンブリッジを通過する I^- の流れを一時的に遮断した後で再び開通させれば, 反応電流が急上昇すると考えた. そこで, ECC 型をオゾンセンサ点検器とデジタルマルチメータに接続し, 反応電流 $2\mu\text{A}$ に相当するオゾンを流しながら, ECC 型をアノードセル側とカソードセル側にそれぞれ90度傾けてイオンブリッジを露出させ, I^- の流れを一時的に(10秒間)遮断する実験を行い, 元に戻した際の反応電流の変化を確認した(写真2).

どちらに傾けた場合も反応電流の急降下と急上昇が見られたが, アノードセル側に倒してアノードセル側のイオンブリッジを露出させた場合は“遮断した際に電流値がゼロになり, 元に戻した際に電流値が $5\sim 9\mu\text{A}$ 急上昇する”

こと, カソードセル側に倒してカソードセル側のイオンブリッジを露出させた場合は“遮断した際に電流値がゼロにはならず $0.7\sim 1.0\mu\text{A}$ 降下するだけであり, 元に戻した際に約 $1.0\mu\text{A}$ 急上昇する”ことが判明した(図6). 後者の反応電流の振る舞いのほうが, 急上昇前にゼロにならないという点で実際の観測での分圧急上昇に似ており, 擬似的に分圧急上昇を再現できたと考えられる. 両者の違いは反応液量と大気を常に取り込んでいるかどうかである. 液量が少なく(1.5ml), 大気を取り込んでいないアノードセル内ではイオンブリッジがアノード溶液から完全に露出してしまった可能性が高いのに対して, カソードセル内では液量が多く(3.0ml), 常に大気を取り込んでいるためにカソード溶液が飛散した可能性など, 何らかの理由によってイオンブリッジの露出が適度に抑えられたためと考えられる. いずれにせよ, “一時的に I^- の流れを遮断させると分圧急上昇が発生する”ことが確認できた.

次に, 反応管をカソードセル側に90度傾ける時間を5, 20, 30, 60, 90, 120秒と変化させ, それぞれ複数回(120秒は4回, それ以外は5回)傾けて平均値を算出し, 遮断時間によって電流の急上昇の程度に違いが出るのかを確認した. その結果“傾けた時間が長いほど電流の急上昇の度合いが大きくなる”ことが判明した(図7). つまり, “ I^- の流れが遮断される時間が長いほど分圧急上昇が明瞭になる”ことが分かった.

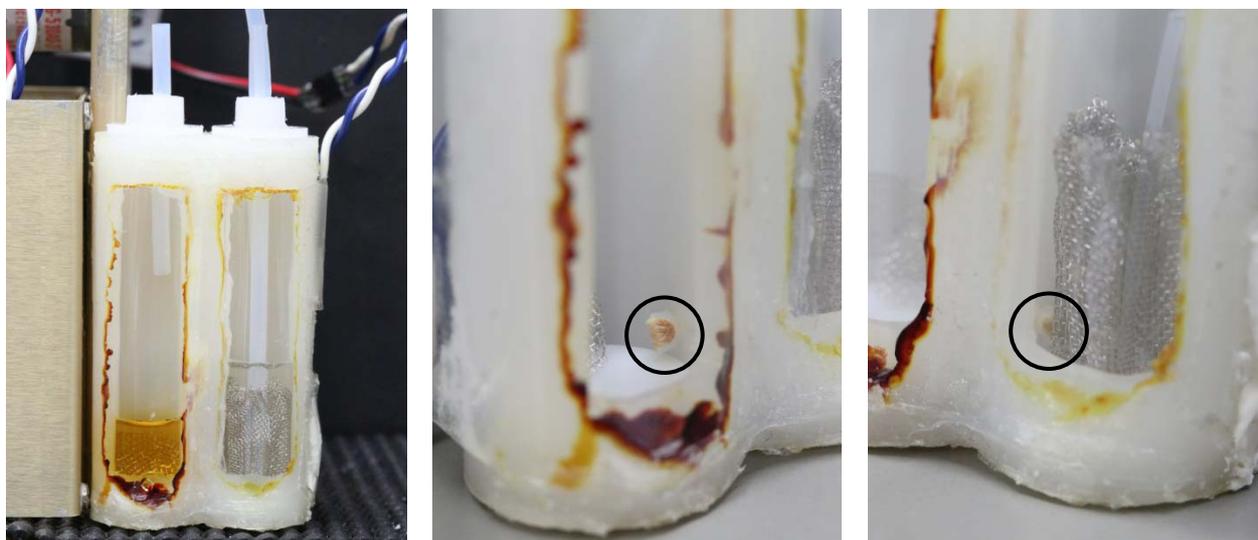


写真1 窓を作成した反応管(左)とイオンブリッジ(黒丸)の位置(中央:アノードセル側, 右:カソードセル側)

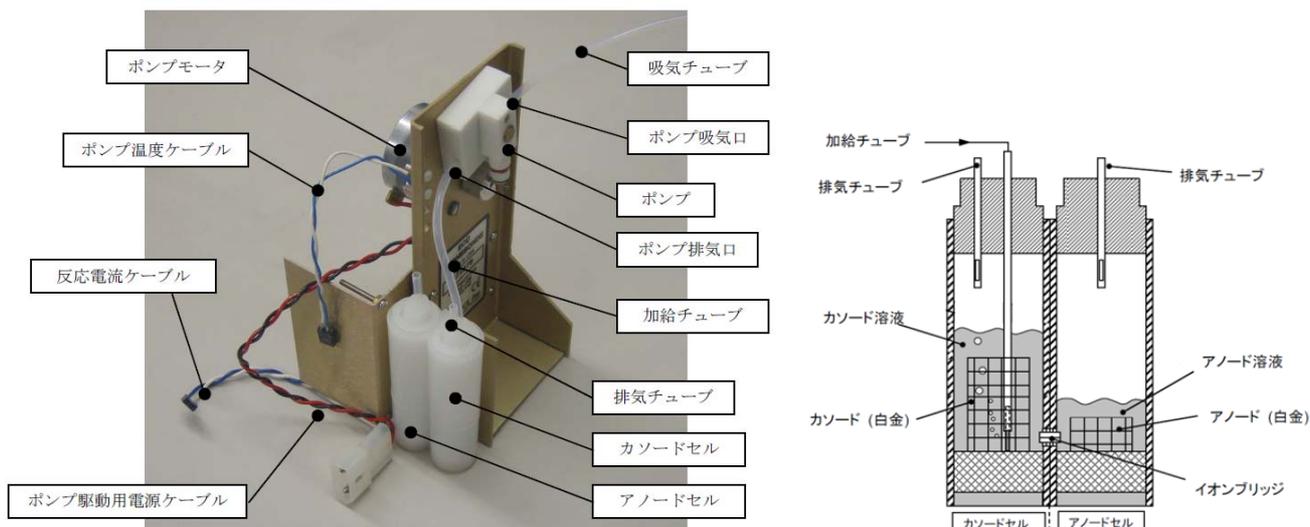


図5 ECC型と反応管の構造
気象庁(2010)より引用. 一部改変した.

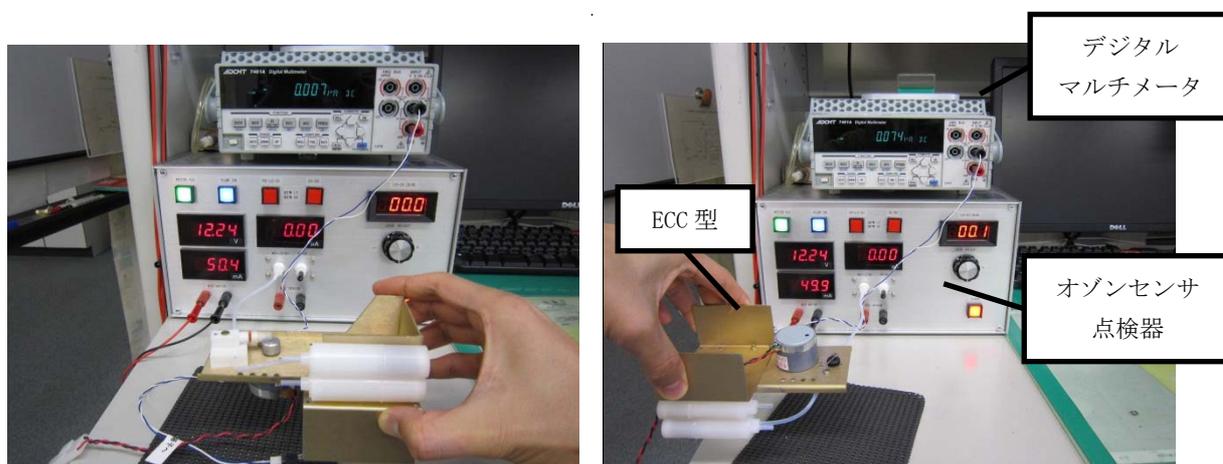


写真2 反応管を90度傾ける実験の様子(左: アノードセル側, 右: カソードセル側)

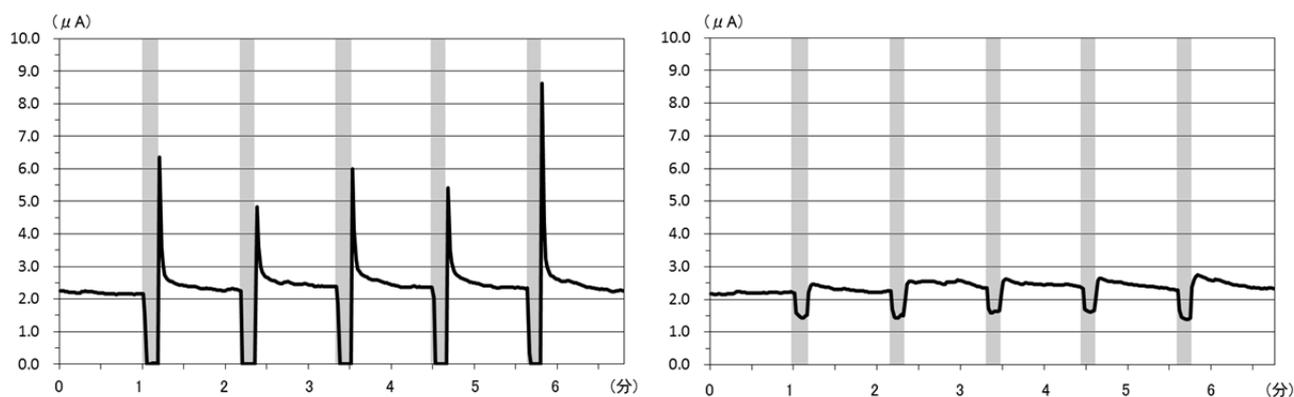


図6 ECC型を90度傾けた場合の反応電流の変化(左: アノードセル側, 右: カソードセル側)
灰色の区間はECC型を傾けていた時間.

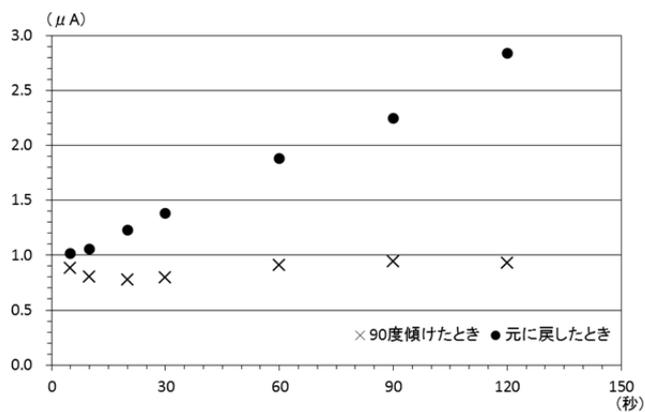


図7 ECC型をカソードセル側に90度傾けた時間と反応電流の変化量の関係

4.3 反応液側の要因

実際の観測中に ECC 型が 90 度傾くことは考えにくく、反応液側に要因があるとすればこれに代わる現象が分圧急上昇を引き起こしているはずである。本節ではいくつかの実験によって反応液側の要因を検証した。

4.3.1 カソード溶液

カソード溶液の上空での振る舞いを確認するため、広域型振動式気圧計、気圧計自動点検制御装置、真空ポンプおよび制御 PC に接続した減圧槽を用いて、反応液を入れた ECC 型を減圧する実験を行った(写真 3)。

まず、ECC 型のカソードセルに常温のカソード溶液を入れてポンプを回さずに減圧したところ、“概ね 200hPa から小さな気泡が発生し、その後次第に気泡が大きくなって連続的に破裂し始め、30hPa 頃から突沸のような現象が始まり、10hPa を下回っても継続した”(写真 4)。

次に、常温のカソード溶液を入れた ECC 型をポンプを回しながら減圧したところ、バブリングによる気泡とは発生の仕方や大きさの異なる気泡の発生が“概ね 200hPa から確認でき、連続的な発生と破裂を繰り返しながら、30hPa 付近頃から次第に突沸のような現象が始まり(写真 5)、15hPa 頃からはカソードセル下部に気泡が滞留し始めた”(写真 6)。全体的にポンプを回さなかった場合よりも気泡が大きく、その破裂も大きかったことから、“減圧することによってカソード溶液内で発生する気泡が 10hPa 付近でイオンブリッジを覆うほど拡大したまま滞留し、I の流れを一時的に遮断する可能性がある”ことが推測できた。

ここでまず、30hPa 頃から発生する突沸のような現象とは何かを明らかにしておく。カソードセルの上部に穴を開け、そこから熱電対(プラス極に銅、マイナス極にコンスタンタンを使用)を通してカソード溶液に浸すことができ

るように反応管を加工し(写真 7)、減圧中の気泡の発生状況を記録しながらカソード溶液の温度を測定したところ、突沸のような現象が発生している 20hPa 付近でカソード溶液が液相から気相へ相転移していることが分かった(図 8)。つまり、“突沸のような現象”の正体はカソード溶液の沸騰であると判明した。沸騰後にカソード溶液の温度が大きく下降しているのは沸騰による気化熱が原因の可能性がある。

以上のことから、20hPa 付近までに発生する気泡はカソード溶液に溶け込んでいた空気が減圧することによって出てきたもの、20hPa より低圧下で発生する気泡は減圧によって出てきたものと沸騰の両方によるものと考えられる。

仮に気泡の発生が分圧急上昇の原因であるならば、前者の気泡の発生を遅らせることができれば対策となりうる。カソード溶液中に溶け込んでいる空気量は温度に関係することから、事前の減圧がないカソード溶液と事前に1回または2回減圧して溶液中の空気を抜いたカソード溶液を用意し、それぞれについて液温を低温(約5℃)、常温(約25℃)、高温(約35℃)に調整したうえで ECC 型に入れてポンプを回しながら減圧した。減圧によってカソード溶液から出てきた空気による連続的な気泡の発生が始まる気圧に注目すると、“事前に減圧したかどうかは関係なく、低温のカソード溶液のほうが連続的な気泡の発生開始が約 10hPa 遅くなる”ことが分かった(表2)。

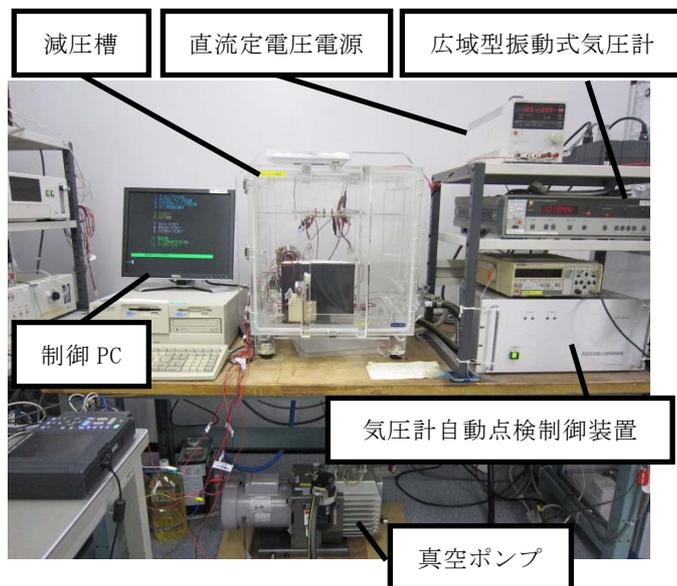


写真3 減圧実験の様子
減圧槽内に ECC 型を設置。

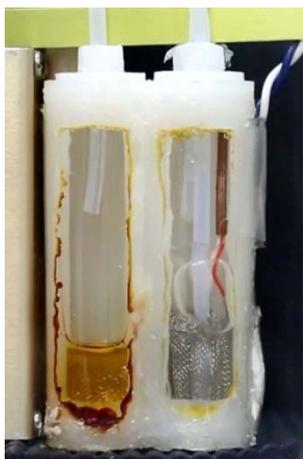


写真4 カソード溶液内で発生した突沸のような現象
ECC 型のポンプを回さずに減圧した場合、15hPa 頃の様子。

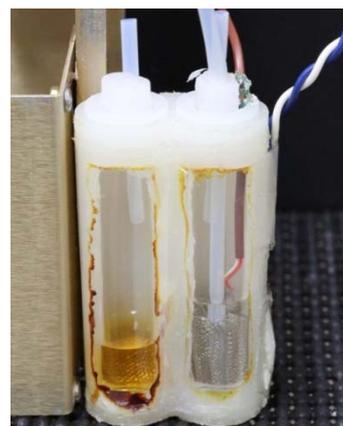


写真7 熱電対を挿入した反応管
カソードセルの右上部から挿入している。

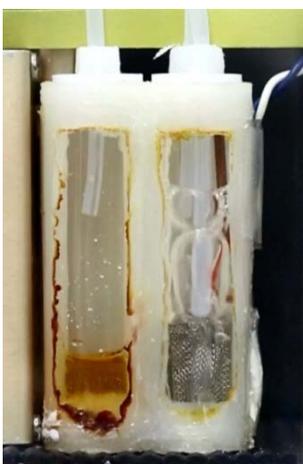


写真5 カソード溶液内で発生した突沸のような現象
ECC 型のポンプを回しながら減圧した場合、15hPa 頃の様子。

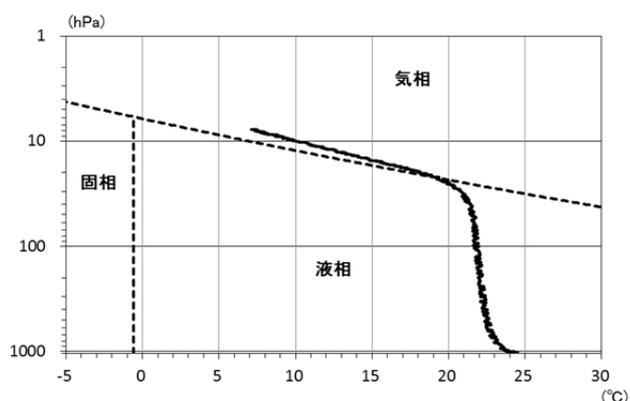


図8 減圧中のカソード溶液の温度変化
実線がカソード溶液温度、点線がカソード溶液の蒸気圧曲線である。なお、蒸気圧はカソード溶液の処方からモル分率を計算し、ラウールの法則によって理論的に計算した値。

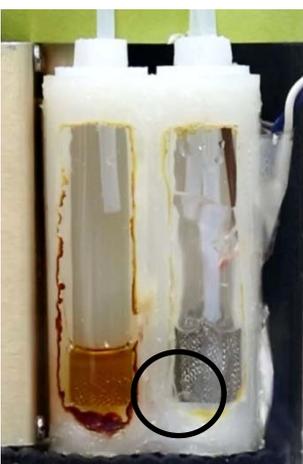


写真6 カソードセル下部(黒丸)に気泡が滞留する様子
ECC 型のポンプを回しながら減圧した場合、15hPa 頃の様子。

表 2 連続的な気泡発生が開始する気圧

		カソード溶液の温度		
		低温 (約 5°C)	常温 (約 25°C)	高温 (約 35°C)
事前の 減圧 処理	なし	23hPa	32hPa	29hPa
	あり(1回)	21hPa	33hPa	30hPa
	あり(2回)	23hPa	29hPa	32hPa

4.3.2 アノード溶液

4.2 では実際の分圧急上昇とは特徴が異なるものの、アノードセル側で Γ の流れが遮断されている可能性がないとは言えない。そこで、アノード溶液の上空での振り舞いを確認しておくため、4.3.1 と同様に反応液を入れた

ECC 型を減圧する実験を行った。

アノードセルにアノード溶液を入れた ECC 型をポンプを回しながら減圧したところ，“100hPa 頃から気泡が発生し始め，12hPa 頃には連続的な気泡の発生および破裂が大きくなる”ことが確認できた(写真 8)。また，“8hPa 頃になるとアノードセル下部にアノード溶液の主成分である KI の結晶が沈着する”様子も見られた(写真 9)。この結晶は減圧とともにアノード溶液の温度が下がり，KI の溶解度が下がったために析出したと考えられる。

この実験によって，アノードセル内で I の流れを遮断する可能性のある現象は，カソード溶液と同じく“アノード溶液に溶け込んでいた空気が減圧によって出てきたことによる気泡”と“結晶”の 2 つあることが分かった。このうち結晶がイオンブリッジを覆い，反応電流を変化させるのかを確認するため，結晶の代用品として改造したチューブとゴムキャップでイオンブリッジを覆う実験を行った(図 8)。実験方法は 4. 2 と同様に $2\mu\text{A}$ に相当するオゾンを生しながら，1 分ごとに 10 秒間覆って元に戻すというものである。いずれの場合も反応電流の変化は確認できなかったが(図 9)，これはどちらも隙間からアノード溶液が入り込み，イオンブリッジが露出した状態を作れなかったためと考えられる。つまり，結晶も同じく露出した状態を作ることは困難と考え，“結晶が I の流れを遮断する可能性は低い”と判断した。

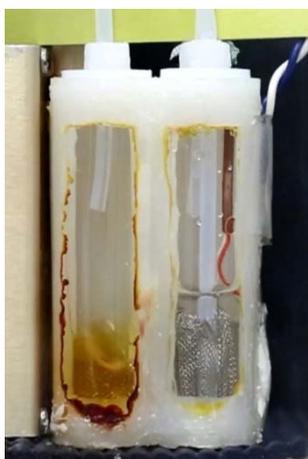


写真8 アノード溶液内で発生した突沸のような現象 ECC 型のポンプを回しながら減圧した場合、15hPa 頃の様子。



写真9 アノードセル下部(黒丸)に結晶が沈着する様子 ECC 型のポンプを回しながら減圧した場合、5hPa 頃の様子。

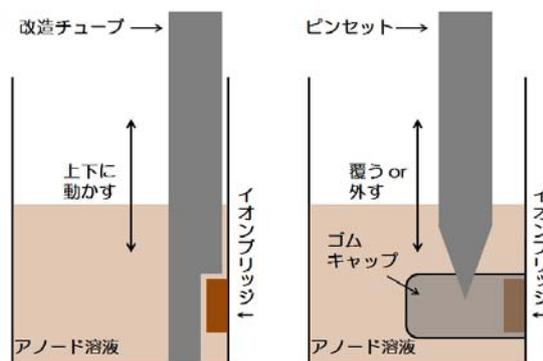


図 8 アノードセル側のイオンブリッジを覆う実験のイメージ

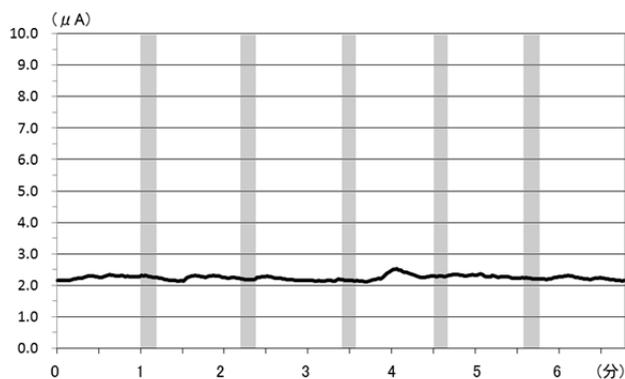


図9 アノードセル側のイオンブリッジをゴムキャップで覆った場合の反応電流の変化

灰色の区間はイオンブリッジを覆っていた時間。

4. 3. 3 気泡の発生場所

4. 3. 1 および 4. 3. 2 において，分圧急上昇は反応液内で連続的に発生する気泡が原因であり，I の流れが遮断されてしまう場所は，イオンブリッジのカソード溶液側またはアノード溶液側，もしくは両方である可能性が高いことを示した。他に気泡が発生する場所として考えられるのはイオンブリッジ内部であるが，確認が困難なため実験は行っていない。ただし，イオンブリッジ内部で気泡が発

生した場合も、反応電流が急降下した後急上昇することが予想される。

4.4 インターフェースボード側の要因

3.1でインターフェースボードの結露や短絡を防ぐ対策を実施後も分圧急上昇の発生回数が減少していないことが分かったが、本節ではさらに確証を得るために、いくつかの実験によってインターフェースボード側の要因を検証した。

4.4.1 オゾンセンサ箱内の湿度

当初予想されたインターフェースボードの結露とは、観測中に反応液が蒸発してオゾンセンサ箱内の湿度が高くなったうえに、インターフェースボードの温度が同箱内の温度を下回った場合に発生すると考えられる現象である。現在、つくばと札幌では地上付近の温度が低い冬季には気象庁独自の保温対策を行って、オゾンセンサ箱内の温度を下げないようにすると同時に、シリカゲルを添付してオゾンセンサ箱内の湿度が高くないようにしている(こちらは通年で行っている)。Herman *et al.*(2011)では成層圏でのオゾン分圧の計算に反応液蒸発の影響は少ないとされているが、オゾンセンサ箱内の湿度が実際どうなのか、また添付しているシリカゲルに効果があるのかははっきりと分かっていなかった。そこで、地上において実際にオゾンセンサ箱内の湿度を計測する実験を行った。

まず、ECC型に添付しているシリカゲルの効果を確認する実験を行った(写真10)。ECC型を直流定電圧電源とデータ取得PCに接続し、温湿度センサをオゾンセンサ箱内に設置した状態で、地上気圧・常温下で2時間弱ポンプを回したところ、シリカゲルを添付した場合は添付しなかった場合と比較してオゾンセンサ箱内の湿度が約20%低下することが分かった(図10)。この実験からシリカゲルには一定の効果があることが確認できた。

次に、気象測器検定試験センターの恒温槽を用いて再現した気温0℃と20℃の環境下(ともに地上気圧)で、それぞれ前述の実験と同様に2時間弱ポンプを回す実験を行った(いずれもシリカゲルを添付、写真11)。いずれの場合もオゾンセンサ箱内の湿度は約65%で安定した(図11)。なお、実験後に反応液の量を確認したが、液面はほとんど下がっていなかった。

以上の実験から、“ポンプを回した場合も液面がほとんど変化しないことから反応液の蒸発量は少なく、オゾンセンサ箱内が高湿度になってインターフェースボードが結露する可能性は低い”と考えた。

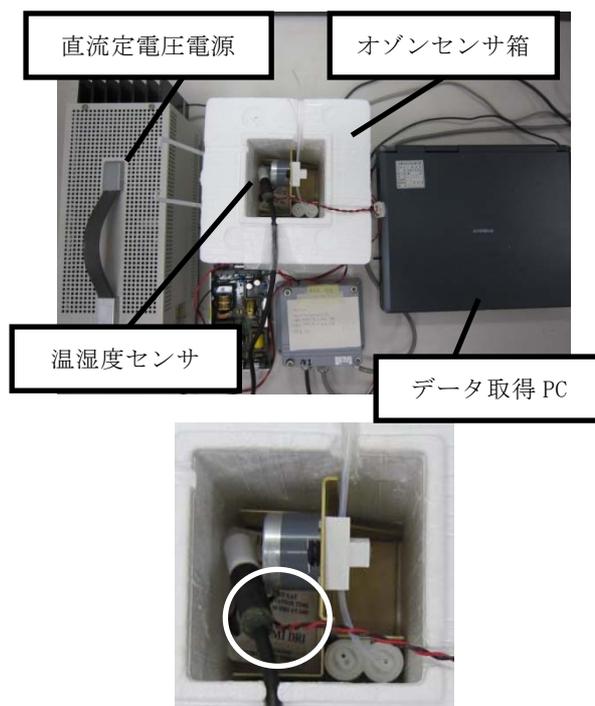


写真10 オゾンセンサ箱内湿度測定実験の様子(常温下)
(上: 全体図, 下: オゾンセンサ箱内部)

ポンプの下にあるのがシリカゲル(白丸)である。なお、実験時はオゾンセンサ箱にふたをした。

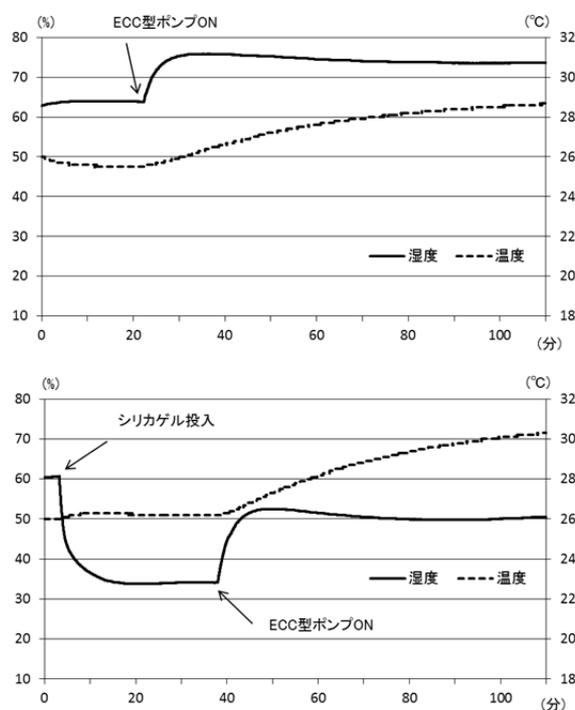


図10 地上気圧・常温下でポンプを回した場合のオゾンセンサ箱内の湿度と温度の変化
(上: シリカゲルなし, 下: シリカゲルあり)



写真 11 オゾンセンサ箱内の湿度測定実験の様子
(恒温槽内)

恒温槽内にオゾンセンサ箱を設置.

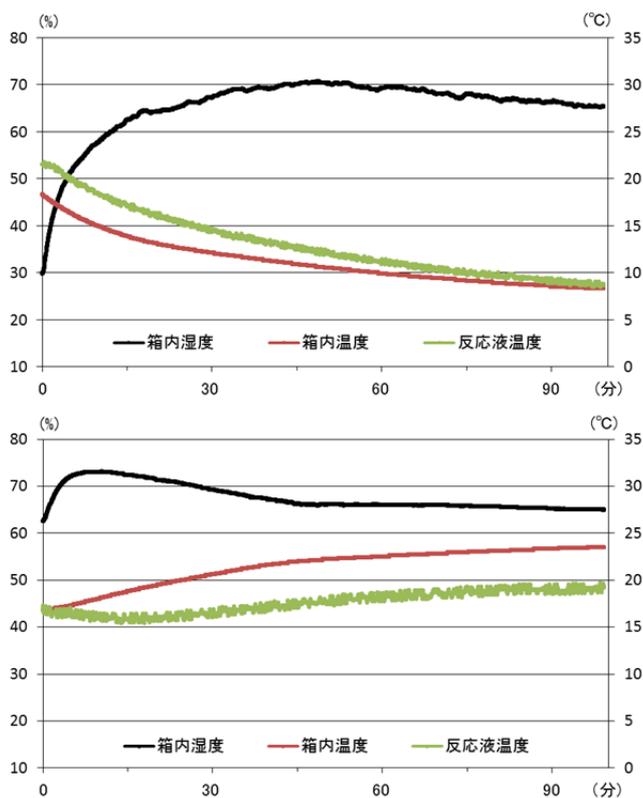


図11 恒温槽内(地上気圧)でポンプを回した場合の
オゾンセンサ箱内の湿度と温度, および反応液温度の変化
(上: 気温0°C, 下: 気温20°C)

4.4.2 反応液の飛散状況

インターフェースボードの短絡は, 反応管の排気チューブから飛散した反応液が直接インターフェースボードに

付着して発生すると考えられる.

実際に反応液が飛散するのを確認する実験を行ったところ, 24 回の減圧実験では反応液の飛散は確認できなかった. このため, 反応液が飛散するにしても頻度は稀であり, さらに 3.1 で述べた通りインターフェースボードを保護するテープで覆っていることを考慮すると“反応液がインターフェースボードに付着することにより分圧急上昇が発生している可能性は限りなく低い”と判断した.

5. 再現実験における疑問点

5.1 反応電流の低下

4.2 において, 分圧急上昇が発生する直前に I の流れが遮断されることによって反応電流が低下することを示した. しかし, 実際の観測では図 6 のような反応電流の急降下は確認されていない. つまり, 観測での分圧急上昇は瞬時に発生するのではなく, その前の段階から不自然さが無い程度に発生し始めているのではないかと推測できる. こういった視点で分圧急上昇が発生した 26 回の観測を見直すと, そのうち 4 回の観測は分圧急上昇発生前の反応電流低下が見られた(図 12). なお, 反応電流の低下開始から分圧急上昇発生までにかかった時間は平均で約 137 秒だった.

5.2 分圧急上昇対策の有効性

4.3.1 において, カソード溶液に溶け込んでいた空気が減圧時に出てくることによる連続的な気泡の発生を遅らせるための対策の一つとして, 減圧前にカソード溶液の温度を約 5°C にしておくことを示した. 実際の観測中に測定しているのは, カソード溶液温度ではなく, オゾンセンサ箱内の熱源となるポンプ温度である. Herman *et al.*(2011)はこのポンプ温度について, 地上で 25~35°C, 気球破裂高度で 5~20°C にする必要があるとしている. もし気球破裂高度において 20°C 以上の場合は“オゾンセンサ箱に小さな換気口を開ける”必要があり, 一方 10°C 未満の場合は“空気の入っていない水瓶やヒーターなど熱源になるものをオゾンセンサ箱内に入れる”か, “オゾンセンサ箱のふたを密閉する”, もしくは“地上においてポンプ温度を 29~35°C に保つようにする”などの対策をする必要があるとしている. これらはカソード溶液が上空でポンプ温度が高すぎる場合は沸騰し, 低すぎる場合は凍結する可能性が高くなるためである. つまり, 地上においてカソード溶液の温度を約 5°C にすることはポンプ温度を下げる効果として働き, 結果として上記の凍結対策がより必要になってしまい, カソード溶液を低温に保ちたいという対策と矛盾してしまう. 実際の観測では図 1 のように -60°C 以下の大気

を取り込んだりすることで、地上で+30℃のポンプ温度が気球破裂時には+10℃以下になることも多く、反応液が凍結する事例もよく見られる。また、図8のカソード溶液の温度変化から推測すると、地上で約5℃のカソード溶液は10hPa付近で凍結する可能性が極めて高い。これらのことを踏まえると、飛揚前にカソード溶液の温度を約5℃にするという対策はとるべきでない。

また、4.3.1では事前にカソード溶液を減圧していたかどうかは連続的な気泡の発生開始気圧と関係がないことも示した。ポンプを回さずに実験した場合、常温と高温

のカソード溶液は事前に減圧することで開始気圧が遅くなっており(表3)、仮に事前に減圧することでカソード溶液に溶け込んでいる空気を抜いたとしても、ポンプを回してしまうと大気を取り込んでしまうためにその効果が失われてしまうことが分かる。つまり、実際の観測においてカソード溶液を事前に減圧することも効果的とはいえない。

以上から、連続的な気泡の発生を完全に防ぐことはできないが、分圧急上昇が発生しない程度にその度合いを抑えることが可能かどうかを今後考える必要がある。

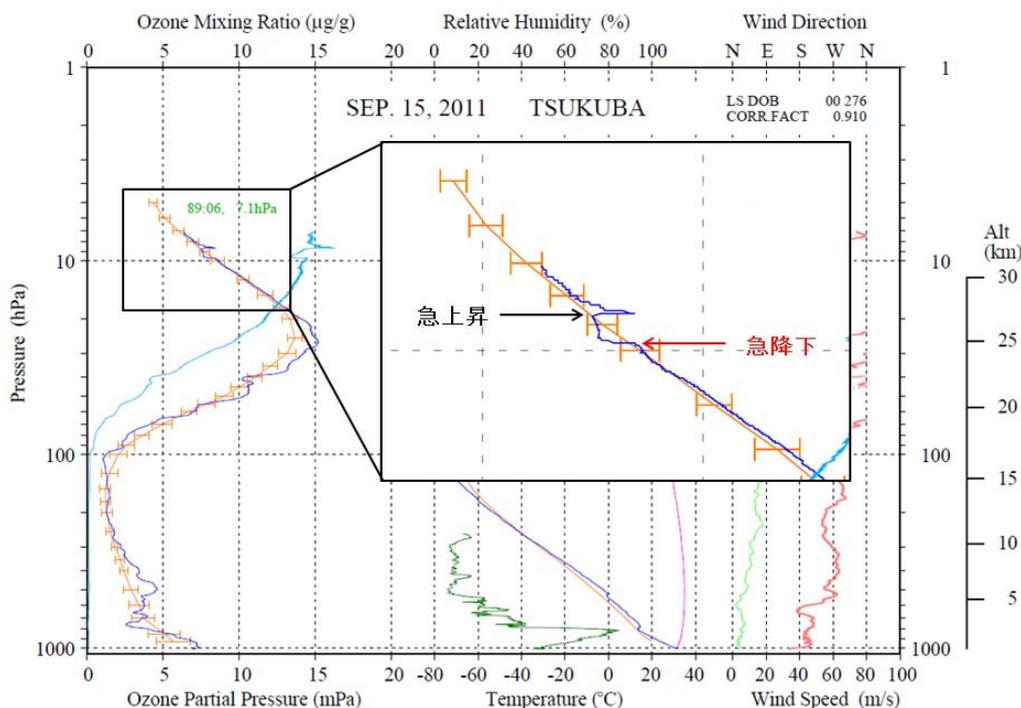


図12 分圧急上昇発生前にオゾン分圧値が低下していた観測例(2011年9月15日つくば)

グラフの凡例は図1と同じ。

表3 表2と同じ。ただしポンプを回さなかった場合。

括弧内の数字はポンプを回した場合との差を示す。

		カソード溶液の温度		
		低温 (約 5℃)	常温 (約 25℃)	高温 (約 35℃)
事前の 減圧 処理	なし	23hPa (±0)	32hPa (±0)	30hPa (+1)
	あり(1回)	21hPa (±0)	26hPa (-7)	26hPa (-4)
	あり(2回)	23hPa (±0)	26hPa (-3)	27hPa (-5)

6. まとめ

10hPa 付近で発生する分圧急上昇について、反応液の沸騰、高湿度によるインターフェースボードの結露および反応液飛散による同ボードの短絡の3つの仮説のもとで事例調査と再現実験を行った結果、インターフェースボードの結露や短絡が原因である可能性は小さいことが分かった。一方、反応液減圧時には概ね 200hPa 以降、反応液に溶け込んでいた空気が出てくることによって連続的に気泡が発生するうえに、10hPa 付近では反応液そのものが沸騰することも分かった。これらの気泡はイオンブリッジを覆う程度に成長し、15hPa 頃からはカソードセル下部に滞留することから、これらの気泡がイオンブリッジを覆い、

イオンブリッジを通る I の流れを遮断してしまう可能性が高いという結論に至った。分圧急上昇は一時的に遮断された I の流れが再開することで発生し、イオンブリッジは何らかの要因によって気泡で完全に覆われるわけではなく、 I の流れは完全には遮断されないことがポイントであると推測した。このため、分圧急上昇が発生した観測ではポンプ効率測定後のポンプ電流やポンプ効率測定中の最大ポンプ電流が高い傾向は見られたものの、これらの要素で分圧急上昇の有無を明確に区分することはできないことも分かった。

7. おわりに

この調査によって、飛揚前に分圧急上昇が発生するかどうかを見極めることが困難であることや、分圧急上昇の要因である気泡の発生は偶発的な現象である可能性が高いことが分かり、分圧急上昇発生率を低下させる対策の実施は非常に困難であることが判明した。しかし、分圧急上昇発生時はその前の段階で反応電流が低下している、という事実はこの調査で初めて示されたものであり、今後分圧急上昇が発生した場合のデータ処理に貢献できるものと考ええる。

謝 辞

本調査を行うにあたって、気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官オゾン層情報センターからは札幌と那覇の観測データの提供および、データの取り扱いについての助言を頂きました。再現実験の際には気象庁観測部気象測器検定試験センターの恒温槽、温湿度センサ、データロガーを、高層気象台観測第一課のノートPCをそれぞれ使用させて頂きました。また、湿度測定の際は同気象測器検定試験センター野村幸弘第一検定係長が作成したデータ取得プログラムを使用させて頂きました。ここにお礼申し上げます。

引用文献

- 気象庁(2010)：オゾンゾンデ観測指針[ECC型編].
Herman G.J. Smit and the Panel for Assessment of Standard Operating Procedures for Ozonesondes(ASOPOS)(2011)：Quality Assurance and Quality Control for Ozonesonde Measurements in GAW, GAW Report No.201.