

インキュベータ内のCO₂計測について — よくある質問と回答



よくある質問

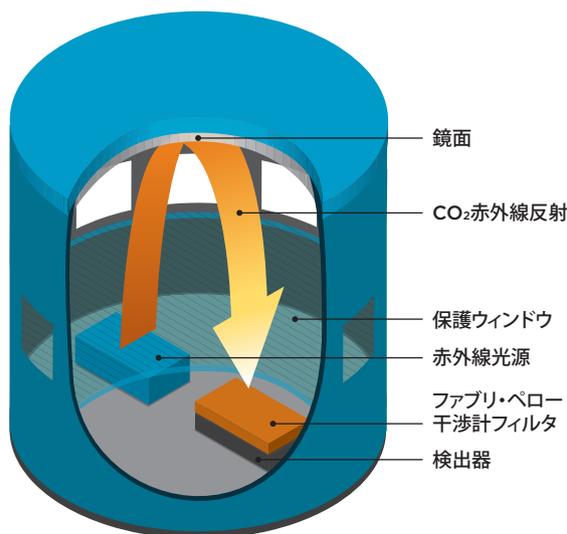
1. CARBOCAP®単光源二波長方式非分散赤外線NDIRセンサの動作原理は？
2. 温度や気圧はCO₂計測にどのように影響しますか？
3. ヴァイサラのCO₂センサを使用しているときの温度や気圧の誤差は、どのように補正することができますか？
4. インキュベータからサンプリングを行っているときに、どのように結露の発生を防ぐことができますか？
5. 除湿チューブを使ったポンプによるサンプリング方法を用いているとき、CO₂濃度の読取値が期待値より高いのはなぜですか？

この資料では、CO₂計測およびセンサに関するよくある質問に回答します。

1. CARBOCAP®単光源二波長方式非分散赤外線NDIRセンサの動作原理は？

ヴァイサラCARBOCAP®センサは、光源、干渉フィルタ、赤外検出器の3つの主要部位から構成されています。光源は赤外検出器に入射する位置に設定され、光が一定の距離を進み検出器に到達すると、そこで光の強さが測定されます。

フィルタの役割を果たすファブリー・ペロー干渉計が赤外検出器の直前にあります。ファブリー・ペロー干渉計は、特定波長の光のみを赤外検出器に透過させる波長可変フィルタです。二酸化炭素は、吸収できる波長域が限られています。そのため、このファブリー・ペロー干渉計は、二酸化炭素が吸収する特定の波長(4.26 μm)及びその付近の非吸収波長の光を透過するように設計されています。右図を参照してください。



二酸化炭素が吸収できる波長域では、光は気体中に存在する二酸化炭素によって吸収されます。このファブリー・ペロー干渉計は、それ以外の波長は透過させません。そのため、赤外検出器へ到達する光の強さは、センサ内の二酸化炭素量に伴って変動します。

センサ作動中は、ファブリー・ペロー干渉計は2つの波長を交互に透過させます。二酸化炭素が吸収できる波長域では、検出された光の強さは光学経路内の二酸化炭素濃度に応じて弱くなります。非吸収波長で測定された光の強さは、比較するための基準値として使用されます。

二酸化炭素濃度が変わると、赤外検出器の受ける光の強さの差も変動します。赤外線の高さと二酸化炭素体積濃度との正確な相関関係は、純窒素 (0ppmCO₂) と規定の二酸化炭素濃度を用いて計測器を校正する際に決定されます。

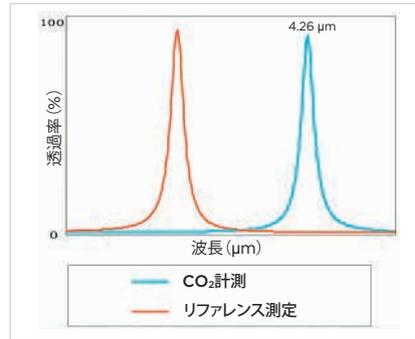
CARBOCAP®センサの構造は、1つの光源と1つの赤外検出器から成り、シンプルかつ丈夫です。2光源のセンサ構造では複数のコンポーネント間に生じる僅かな差が原因で、発生する誤差を排除しています。CARBOCAP®センサで使用されるファブリー・ペロー干渉計は、シリコンのマイクロマシン技術によって製作され、可動部分がないため、いわゆる「チョッパーホイール」構造よりもはるかに高い信頼性が得られます。

2. 温度や気圧はCO₂計測にどのように影響しますか？

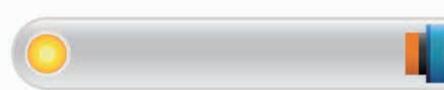
非分散型赤外線計器の基本機能として、モル濃度 (ビーム経路内の分子の数) を測定します。ユーザーの多くは体積百分率 (%) による測定結果表示を好むため、規定の二酸化炭素濃度に分子の数を相関させて、二酸化炭素計器が体積百分率 (%) を表示するように調整されています。

気体は圧縮されると状態が変わり、周囲の気圧と温度の変化に応じてモル濃度が変化します。これは測定結果が温度や気圧に依存していることを示しています。

計測条件が気圧1,013hPa、温度+25°Cという校正条件から大幅に逸れている場合は、二酸化炭素計測は補正が必要となります。理想気体の法則に基づく気圧及び温度の補正をしない場合の影響については、表1及び表2を参照してください。



CARBOCAP®センサにより吸収波長とリファレンスの両方を測定



ファブリー・ペロー干渉計は、参照用の非吸収波長を透過します。赤外検知器はこの光の強さを正確に測定し、比較するための基準値を作成します。光源、ファブリー・ペロー干渉計及び赤外検出器の性能に変化が生じると、吸収波長と非吸収波長の測定に同様に影響を及ぼします。これにより測定値間の差を保ち、センサの校正時の状態を維持します。この原理により長期的な安定性を維持することができます。

補正の必要性について理解を深めるには、気体の主な特性について理解することは有効です。混合気体の全圧は、各成分気体の分圧の和に等しくなります。これはドルトンの法則と呼ばれ、次式が成り立ちます。

$$P_{\text{全}} = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

混合気体中の気体の量は、圧力で表すことができます。大気を例にとると、大気中の主な成分は窒素、酸素、二酸化炭素、水蒸気ですが、全圧はこれらの気体の分圧から成っています。

各気体の分圧は、それぞれの気体の成分比とその全圧との積です。

私たちが呼吸する大気中の成分比は、窒素78%、酸素21%、アルゴン0.9%、二酸化炭素はおよそ0.04%です。この割合は高度が上がっても大気上端までほぼ一定に保たれています。

海抜ゼロ地点における平均気圧は約1,013hPaであり、二酸化炭素の分圧は1,013hPaの0.04% (0.0004*1013)、すなわち0.405hPaとなります。例えば、高度約5,280フィート、気圧約834.3hPaである米国コロラド州デンバーでは、大気に含まれる0.04%の二酸化炭素の分圧は、0.405hPaに対して0.334hPaという数値が得られます。

高度が上がっても大気中の二酸化炭素成分比は0.04%と一定ですが、気圧は下がるため、気圧の降下にあわせてモル濃度が減少します。NDIRセンサは基本機能としてモル濃度を測定しますが、体積百分率やppmvによるデータが必要な場合は補正を行う必要があります。温度が下がるとモル濃度が増大するため、温度補正を行うことも重要です。

ヴァイサラのCO₂変換器の多くには温度センサが内蔵されており、温度に関連した計測値の変化を自動で補正することができます。加えて、酸素や相対湿度の補正を設定することも可能ですが、これらのパラメータは計測精度にあまり影響はありません。

表1 理想気体の法則に基づくNDIRセンサにおける%CO₂読取値の補正されていない気圧変化の影響

+25°C、1,013hPaで校正された計測器					
海拔高度		気圧 (hPa)	計測濃度 (%CO ₂)	補正濃度 (%CO ₂)	誤差 (%CO ₂)
feet	m				
0	0	1,013	5.00	5.00	0.00
500	153	992.8	4.90	5.00	0.10
1,000	305	979.1	4.83	5.00	0.17
1,500	458	958.4	4.73	5.00	0.27
2,000	610	937.7	4.63	5.00	0.37
2,500	763	923.9	4.56	5.00	0.44
3,000	915	903.2	4.46	5.00	0.54
3,500	1,068	889.4	4.39	5.00	0.61
4,000	1,220	868.7	4.29	5.00	0.71
4,500	1,373	854.9	4.22	5.00	0.78
5,000	1,526	834.3	4.12	5.00	0.88
5,500	1,679	820.5	4.05	5.00	0.95
6,000	1,831	806.7	3.98	5.00	1.02

表2 理想気体の法則に基づくNDIRセンサにおける%CO₂読取値の補正されていない温度変化の影響

+25°C、1,013hPaで校正された計測器			
温度 (°C)	計測濃度 (%CO ₂)	補正濃度 (%CO ₂)	誤差 (%CO ₂)
25	5.00	5.00	0.00
26	4.98	5.00	0.02
27	4.97	5.00	0.03
28	4.95	5.00	0.05
29	4.93	5.00	0.07
30	4.92	5.00	0.08
31	4.90	5.00	0.10
32	4.89	5.00	0.11
33	4.87	5.00	0.13
34	4.85	5.00	0.15
35	4.84	5.00	0.16
36	4.82	5.00	0.18
37	4.81	5.00	0.19

3. ヴァイサラのCO₂センサを使用しているときの温度や気圧の誤差は、どのように補正することができますか？

校正条件と異なる温度及び気圧下で計測される二酸化炭素の計測値は、所定の精度を達成するために補正が必要な場合があります。体積百分率の読取値を補正する最も簡単なものとして、理想気体の法則に基づいて次の公式を使って行う方法があります。

$$c_{\text{補正}}(\%/ppm) = \frac{c_{\text{計測}}(\%/ppm) * (1013 * (t(^{\circ}\text{C}) + 273))}{(298\text{K} * p(\text{hPa}))}$$

ヴァイサラCARBOCAP® GM70ハンディタイプCO₂計では、計測ポイントの温度や圧力環境はGM70ユーザメニューから簡単に設定することができます。補正はデバイス内部で行われ、機器は補正された計測値を表示します。内部補正によって、理想気体の法則に起因する依存性以外にも、装置の電子回路部、光学部品の影響も補正されています。GM70は、理想気体の法則における補正よりも正確に内部補正を行います。

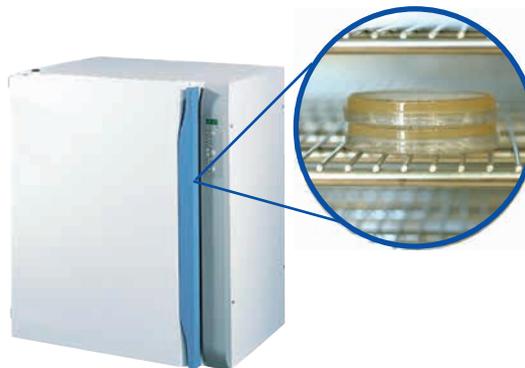
温度を補正する他の方法として、ヴァイサラ HUMICAP® 湿度温度プローブ HMP77B をCO₂プローブと合わせてMI70指示計に接続する方法があります。プローブで計測された温度がCO₂読取値を自動的に補正するように設定することができます。

ヴァイサラ CARBOCAP® CO₂プローブのGMP231およびGMP251には、プローブが自動的に温度を計測、補正するための内部温度センサを内蔵しています。さらなる精度向上のために、酸素と相対湿度の補正も設定できます。



湿度プローブとCO₂プローブを取り付けたGM70

一般的に、インキュベータと環境チャンバーでの計測では、気体サンプルは高温高湿環境から室温環境へ引き出されるため、結露発生に備えた対策が必要です。



ヴァイサラ GM70は、インキュベータ中のCO₂レベルの確認に使用できます。

4. インキュベータからサンプリングを行っているときに、どのように結露の発生を防ぐことができますか？

GM70は、サンプリング方式を拡散式とポンプ吸引式の2タイプから選択することができます。ポンプ吸引式は、拡散式では対応できない箇所からサンプルを吸引する設計です。

プローブ内部のNDIRセンサとポンプは、結露を避けなければならないため、高湿環境から気体サンプルを引き出すときは注意を払う必要があります。



Nafion® チューブ、ヴァイサラ・パーツ No. 212807GM

チューブやサンプリングシステム内部の結露はNafion® (ナフィオン) という名称の素材で作られたサンプルチューブを使うことで、発生を防ぐことができます (ヴァイサラ・パーツNo.212807GM)。

Nafion®技術は、チューブのコアテクノロジーであり、水分だけを取り除きます。水はメンブレンウォールを透過して、浸透気化法と呼ばれるプロセスで周囲大気中に蒸散します。Nafion®は一次反応として起る吸水作用によって水を取り除きます。除湿用途として、水分交換器が湿気を含んだ気体流から水蒸気を周囲大気中へと逃がします。サンプル湿度レベルが周囲湿度レベルと等しくなる時点で除湿は完了します。一次反応として水分除去作用が進むため、この湿度レベルは通常100から200ミリ秒内と極めて短時間に達成されます。この特性は、非常に高温なサンプルが室温へ引き出される際に使用するチューブに最適です。短いチューブを使用する場合でも気体サンプル中の湿度を下げるすることができます。

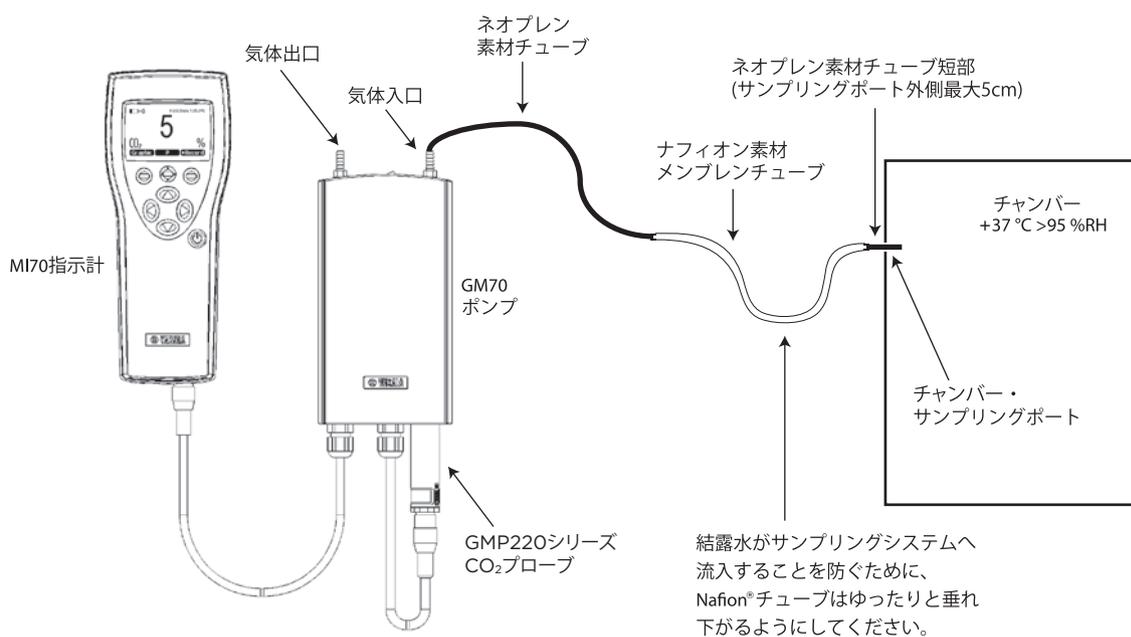
チューピングに関するさらに詳しい情報については
www.permapure.comをご覧ください。

Nafion®はtetrafluoroethylene (テフロン) とperfluoro-3,6-dioxo-4-methyl-7-octene-sulfonic acidから成るDupont社の共重合体です。

インキュベータからのサンプリングにGM70ポンプを使用する場合は、Nafion®チューブを使用してサンプルシステム内の結露発生を防いでください。推奨されるガイドラインは以下の通りです。

- インキュベータと雰囲気環境の転移点では、Nafion®サンプルチューブを使用することが望ましい。雰囲気環境におけるNafion®の長さは、抽出したサンプルから雰囲気環境に水蒸気を蒸散させるためには20cmで充分である。それ以外のサンプルチューブの素材としてネオプレンなどを使用することができる。周囲空気の漏れがサンプル内に入らないように、圧力フィッティングなどを用いてチューブを接続する。全体のサンプルラインを出来るだけ短いものにする。
- インキュベータの扉からサンプリングする場合は、Nafion®チューブをインキュベータに挿入し、扉を静かに閉じる。その際にドアシールがチューブに損傷を与えていないこと並びにチューブの周りの密封状態が適切であることを確認する。
- 気体サンプルをチャンバーから引き出すとき、サンプルラインのうち数センチメートル分はチャンバー内部にあるようにする。チャンバー内に結露が発生する可能性が場合は、結露水がチューブ内に入らないように特別の注意が必要である。
- 結露水がプローブに達していないことを確認するために、GM70ポンプからCO₂プローブを引き出して確認することができる。プローブを再び差し込むときは、プローブを一番奥間まで差し込まずに、プローブの滑らかな面と2つのOリングを合わせてしっかりと接続する。

Nafion®メンブレンチューブ用いたサンプリングシステム



- インキュベータの穴や他のポートからサンプリングする場合は、Nafion®チューブをインキュベータに差し込み、その周りを密封する。
- 圧力フィッティングやサンプリングポートからサンプリングする場合は、短いネオプレンチューブを「コネクタ」として使いNafion®チューブをホースパーブに出来るだけ近い位置で固定する。ネオプレンチューブ内は結露が発生しやすいため、サンプル気体をネオプレンチューブで送ることは望ましくない。
(図を参照)
- GM70ポンプの位置をチェンバーのサンプリングポートよりも上に保つように注意する。これは、サンプリングライン内で結露が発生した場合にも、結露水がCO₂センサにダメージを与えることを防ぐ。

5. 除湿チューブを使ったポンプによるサンプリング方法を用いているとき、CO₂濃度の読取値が期待値より高いのはなぜですか？

Nafion®チューブを使ってサンプルを除湿すると、除湿したサンプルCO₂濃度はもとの水分含有量が高いガスよりも僅かに高くなります。これは希釈という現象によって起ります。CO₂濃度は水蒸気が占める体積によりインキュベータ内で「希釈」されません。サンプルから水蒸気が取り除かれると、CO₂などのその他の気体が占める割合がこれに応じて増加します。

表3は、気体サンプルを除湿するときの気体濃度に関する希釈係数を示しています。インキュベータ内の気体サンプルの露点（気圧1,013hPa）を横軸に、計測ポイントにおける気体サンプルの露点を縦軸においています。計測ポイントにおける気体サンプルの露点は、湿度プローブ（HMP75B、HMP76B、HMP77B）を使って判断することができます。

表3 希釈係数

°C (Td)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
-60	0.9999	0.9996	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-50	0.9999	0.9997	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-40	1.0000	0.9998	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-30		1.0000	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.928	0.879	0.804
-20			1.000	0.998	0.995	0.989	0.978	0.959	0.928	0.879	0.804
-10				1.000	0.997	0.990	0.979	0.961	0.930	0.881	0.806
0					1.000	0.994	0.983	0.964	0.933	0.884	0.809
10						1.000	0.989	0.970	0.939	0.890	0.815
20							1.000	0.981	0.950	0.901	0.826
30								1.000	0.969	0.920	0.845
40									1.000	0.951	0.876
50										1.000	0.925
60											1.000

例：気体サンプルが40°C (Td) 環境から引き出されて10°C (Td) 環境に送られるときの計測気体濃度は 5.32%です。40°C (Td) 環境では、水分含有量が高くサンプルを希釈するため、これは5%CO₂ (5.32% × 0.939 = 5.00%) に相当します。

VAISALA

www.vaisala.co.jp

詳細は以下よりお問い合わせください。
www.vaisala.co.jp/contact

Ref. B210826JA-B ©Vaisala 2017

本カタログに掲載される情報は、ヴァイサラと協力会社の著作権法、各種条約及びその他の法律で保護されています。私的使用その他法律によって明示的に認められる範囲を超えて、これらの情報を使用（複製、送信、頒布、保管等を含む）をすることは、事前に当社の文書による許諾がないかぎり、禁止します。仕様は予告なく変更されることがあります。本カタログは英文カタログの翻訳版です。翻訳言語に不明瞭な記述が発生する場合は、原文である英文カタログの内容が優先されます。