

表3 土壌又は海水から大気へのフラックスを監視する技術とそれぞれの用途

技 術	機 能	検出限界	利用可能な場所、コスト	制 約	技術の現況
渦相関法 (Miles, Davis, Wyngaard, 2004)	検出装置の風上に通過範囲(foot print)を数学的に定義し、これを通過する大気からはCO ₂ フラックスを測定する。検出装置はブラッドフォード(一般に塔に設置したオープンガス分析データー(一般に固定したオープンガス分析データー)を風速及び風向と総合し、通過範囲を定義してフラックスを算出。	生物活性の高い地域における毎時測定により、現実的に検出可能なフラックスは以下の通り。 $4.4 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 13870 \text{ t km}^{-2} / \text{年}$ (Miles, Davis, Wyngaard, 2004)	陸上でしか利用できない。実証済みの技術。比較的安価。比較的広い地域の検出を行うことが可能。漏洩を検出した場合、その正確な位置を把握するには通過範囲の詳細な探査(携帯式のIR CO ₂ 検出器又は土壌ガス)が必要になると考えられる。	サイト全体をカバーするために複数の計測塔が必要になる場合がある。10mの塔に検出器設置の場合、通過範囲はおおよそ10 ⁴ ~10 ⁶ m ² 。測定を自動化するのための開発が望まれる。フラックスの定量は平坦な地形に限定される。	研究機関が採用している。
現場 IR やサンプリング採取したガスのラボ分析を利用してフラックスを測定する蓄積チャンバー技術	容積が既知である蓄積チャンバーを地上に設置し、地表にゆるやかに設置する。例えばチャンバー周囲に土壌を盛る。土壌に挿した円筒内にチャンバーを設置する等を行う。チャンバー内のガスを定期的サンプリング採取して、携帯式IRガスを検出器等で分析し、その上でサンプリングをチャンバーに戻して経時的蓄積を観測する。土壌を通過するフラックスがあれば検出可能。	容易に検出可能なフラックスは0.04gCO ₂ m ⁻² /日=14.6t/km ² /年 (Klusman, 2003a)。大きな問題は、変化する生物起源のバックグラウンドレベルに対して地下における実際の漏洩をどのよう正しく検出するかである(トレーサーがこの助けとなる可能性あり)。生物活動は冬期には抑制されるため、冬期に良く機能する。	Rangely で実証済みの技術 (Klusman, 2003a, b, c)。他のガス分析や炭素の安定又は放射性同位体の分析を組み合わせた強力なツールになる。それらの分析で捕集CO ₂ のソースを特定しやすくなる。圧入CO ₂ へのトレーサーガス添加でも、ソースの特定は容易になるはず。高速で移動するトレーサーを検出できれば、操業方法の変更で漏洩を予防できる場合もある(修復を回避できる)。	サンプリング採取点ごとの状況により、漏洩を検出できない可能性あり。油田やガス田ではCO ₂ が貯留層から漏洩するのではなく、微生物によって酸化されたCH ₄ である可能性もある。	研究機関が採用している。
地下水及び地表水のガス分析	地下水中又は湧水等の地表水中のガス含有量のサンプリング採取及び測定。この方法では以下が可能である。 a) 液体の部分的減圧を行い、溶解ガスを抽出。ガスクロマトグラフによるガス分析。 b) 新しいサンプリングであれば、重炭酸塩含有量の分析が可能。これは基本的にWeyburn 現地や坑口で実施された作業と同じ (Shevalier 他, 2004)。溶解CO ₂ と重炭酸塩には関連があるため、重炭酸塩の分析は(平衡条件を仮定すれば) 溶解CO ₂ 含有量に直接関係づけることができる。	バックグラウンドレベルはおそらく ppm のオーダーである。重炭酸塩の検出限界は2ppm の範囲である。	陸上。CO ₂ 排出の他の経路である土壌から大気へのフラックスの測定と組み合わせて使用すべき。測定技術は充分開発が進んでおり、比較的シンプルだが (Evans 他, 2002)、水からのCO ₂ の急激な脱気を考慮しなければならぬ (Gambardella 他, 2004)。	水のフラックスが変化することを考慮しなければならない。	商業的に普及している。

渦相関法

超音波風速温度計と赤外線ガス分析計を用いて、大気中の乱流による二酸化炭素の輸送量（フラックス）を直接測定する方法。森林や農耕地が一定期間に吸収・放出する二酸化炭素の量を測定するために使用する。

オープンパス、クローズドパス

渦相関法では、分析セルが大気中へ暴露された Open-Path タイプの赤外分析計が広く用いられる。この分析計はドリフト等の長期観測には適さないデメリットがある。一方、これらのデメリットを補う Closed-Path 分析計はチューブとエアポンプを利用し、エアサンプルを分析計内部にあるセルまで引き込み測定をするもの。

蓄積チャンバー

Accumulation Chamber 法は、お椀型の容器に溜まった拡散放出ガス中の CO₂ 濃度を非分散型分光法（NDIR）で解析するもの。CO₂ が 425nm の赤外線を選択的に吸収する性質を利用。Chamber 内にはガス濃度に偏りができないように攪拌するためのモーターで回転する翼がついている。

表 4 空気及び土壌における CO₂ レベルの上昇を監視する技術（漏洩検出）

技 術	機 能	検出限界	利用可能な場所、コスト	制 約	技術の現況
ロングオーダーパス方式の赤外線レーザースペクトル分析	レーザースペクトルの経路の空気中 CO ₂ による赤外線の特長波長の吸収を測定し、地表付近の空気中 CO ₂ レベルを測定する。測定値から断面マップ (topographic map) を作成することができ、その土壌からのフラクタル変換に成功した例はほとんどない。	さらに開発が必要であるが、大気土 3% (約 11ppm) あるいはそれ以上に正確な推定が可能。	陸上。短期的にはおおよそ最も高い性能を持つ。装置 1 台で数 km ² をカバーできるため、数台でサイト全体をカバーできる。コストは 1 台あたり数千ドルで、サイト全体の調査が比較的安価に可能。漏洩を検出した場合、その正確な位置の把握にはより詳細な (携帯式 IR CO ₂ 検出器又は土壌ガス) 調査が必要になると考えられる。	依然開発中の技術。CO ₂ 濃度を長経路について測定するため、漏洩位置の正確な把握には断面マップの解釈や詳細な調査が必要。バックグラウンドが比較的高い場合や変化する場合には、フラクタル算出や低レベルの漏洩検出は困難。	実証及び開発の段階。
土壌ガス分析	地表からのバックグラウンドフラクタル及びその変化の明確化が大変重要。プローブによる土壌内 CO ₂ レベル及びバックグラウンドの測定技術では、一般にバックグラウンドを土壌内 50~100cm の深さまで打ち込む。坑井からのサンプル採取も可能。サンプル採取はグリッドで行うのが普通。坑井に貫入したプローブ又はチューブの下部に穴を開けて土壌ガスを吸引し、それを携帯式 IR レーザースペクトル分析器で分析するか、ガス容器に入れてラボで分析する。	携帯式の赤外線検出器を用いる土壌ガス探査では、少なくとも ±1~2ppm の CO ₂ 濃度変化を識別可能。土壌中の CO ₂ 絶対値 (0.2~4%) は空気中よりも高いが、バックグラウンドフラクタルの変動は空気中よりも地下の方が僅かであるため、地下では僅かなバックグラウンドでも検出できる。複数のガスが測定可能で、他のガスや同位体の比率から CO ₂ ソースを突き止める手がかりが得られる場合もある。	陸上。Weyburn や Rangely のサイト、火山/地熱地帯で実証済みの技術。詳細な測定に有用であり、特に低バックグラウンドの漏洩を検出した地点の周囲で役立つ。	1 回の測定ごとに数分の時間を要すると考えられる。よって広域を正確に探索するには比較的高コストと時間を要する。油田やガス田では、CO ₂ が貯留層から漏洩するのではなく微生物によって酸化された CH ₄ である可能性もある。	研究機関が採用している。
携帯可能・個人用・安全用の可搬型赤外線ガス分析器	空気中の CO ₂ レベルを測定する。	個人防護用の可搬型装置の分解能は一般に約 100ppm である。	陸上でも、プラットフォームなどの海上インフラ上でも利用可能。実証済みの技術。個人防護用の可搬型装置は、1 台 1,000 ドル未満が普通。また広域を扱う探査手法で漏洩を検出した場合、高濃度の漏洩の正確な位置を突き止める上で有用であると考えられる。	CO ₂ の漏洩を監視するには精度が不十分。	商業的に広く普及している。
航空機による赤外線レーザースペクトル分析	ヘリコプターや航空機にオーバーパス又はクローズドパスの赤外線レーザースペクトル分析器を取り付け、10m 以上の間隔で空気中の CO ₂ を測定する。	Brantley と Koepnick (1995) は航空機を用いるクローズドパス技術について、検出装置の検出限界は大気土 1ppm のレベルであると指摘している。	陸上。パイプラインからのメタンの漏洩や大規模な発生源における CO ₂ を検出する上で実証済みの技術。パイプラインやインフラ	測定は地上から最低でも (数) 百メートルの高さで行われ、地上での濃度はそのレベルでの検出下限より	天然ガスパイプラインでは商業的に普及しているが、

技 術	機 能	検出限界	利用可能な場所、コスト	制 約	技術の現況
	定する。	る。オーブンパス技術については情報が少ないが、検出限界はおそらく±1%又はそれ未満であろう。	からのCO ₂ の漏洩や、地下からの高濃度の漏洩を検出するのに対応可能。	りもはるかに高いはずである。CO ₂ は空気より重いいため地表から離れず、したがって航空機による手法ではメタンほど容易には検出できないであろう。	CO ₂ 検出用途においてには普及していない。

表5 CO₂ 地中貯留サイトの漏洩監視のための代理的な測定法

技 術	機 能	検出限界	利用可能な場所、コスト	制 約	技術の現況
衛星又は航空機によるハイパースペクトル撮像	植生の健全性に関し、地表へのCO ₂ 漏洩に起因すると思われる異常な変化を検出する。またガスが地表へ流出する経路になり得る微小な断層や目に見えない断層も検出可能。可視光及び赤外光スベクトルの一部を利用する。	衛星や航空機による撮像の空間分解能は1〜3mである。空気中や土壌ガスのフラックス又はCO ₂ の体積分率に合わせた校正はなされていないが、詳細なサンプリングを行うべき地域を知ることが可能である。	陸上	植生の健全さや分布に検出可能な変化をもたらす土壌中のCO ₂ レベルを見極めるには、なお研究が必要。気候変化への(季節的な)反応を確認するため、反復探査の必要がある。乾燥地帯では有用ではない。	研究段階
衛星による干渉分光法	地表隆起 (absidence) が発生した場合、衛星レーダーによる反復探査によって、CO ₂ 圧入に起因する地上標高の変化を検出する。	干渉合成開口レーダー (InSAR) は標高のミリメートル単位の变化も検出できる。	陸上	標高の変化は発生しないこともあれば、凍結や雪解けによっても季節的に発生することもありうる。また局所的な大気や地形条件が影響を及ぼす場合もある。	研究段階であり、CO ₂ 貯留に関しではまだ用いられていない。

表6 海水中のCO₂レベルを監視する技術とそれぞれの用途

技 術	機 能	検出限界	利用可能な場所、コスト	制 約	技術の現況
堆積物のガス分析	サンプルを採取し、研究室で海底堆積物のガス含有量を測定する。	測定したガス含有量が原位置のガス含有量とどのように関係しているかが不明。	沖合。船舶を利用する時間に多額のコストを要する。	与圧サンプルを採取するの でない限り、データの圧力補 正が必要になる。必要に応じ てサンプル採取に遠隔操作 探査機 (ROV) やダイバー を利用する場合もある。船舶 を利用する時間に多額の コストを要する。	沖合におけるメ タンガスの分析 に研究機関が採 用している。
海水のガス分析	サンプルを採取し、研究室で海水のガス含有量を測定する。海水サンプル分析の手順は確立している。	分析装置の検出限界はおそらく数 ppm 又はそれより優れた水準であろう。重炭酸塩の検出限界は<2ppmの範囲。現場での漏洩検出能力は実証されていない。現実的に検出可能な最小規模の漏洩がどの程度か実証されていない。	沖合。船舶を利用する時間に多額のコストを要する。	同上。	海面付近の海水 に関し研究機関 が採用している が、それより深い 深度ではあまり 用いられていな い。

