

コヒーレントアンチストークスラマン散乱による漏えい水素ガス検知技術 (第1報)

(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 杉本 幸代
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 朝日 一平

キーワード : アンチストークス
レーザー
水素
漏えい検知器
コヒーレントアンチストークス
ラマン分光法

Key Words : Anti-Stokes
Laser
Hydrogen
Leak detector
CARS

Leakage hydrogen gas detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (the first report)

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural technology Department
Sachiyo Sugimoto, Ippei Asahi

Abstract

Hydrogen is expected as a next-generation clean energy to replace a fossil energy. To expand its use in daily life, its safety must be ensured. This paper reports about the development of leakage hydrogen gas detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS). For that purpose, the light source configuration was devised in which the laser beam (355 nm) is split into two optical paths and a Raman cell filled hydrogen gas is arranged on the one side. For efficiently generating anti-Stokes light of target hydrogen gas, irradiation conditions between pump light (355 nm)(I_P) and Stokes light (416 nm)(I_S) from the Raman cell were investigated. As a result, it was found that when the irradiation ratio $R(=I_S/I_P)$ was $0.140 \leq R \leq 0.173$, the generation efficiency of the anti-Stokes light was high. When the irradiation ratio R is adjusted within the above range, the high generation efficiency of the anti-Stokes light can be maintained even if the laser light intensity and hydrogen gas pressure to the Raman cell are changed. This study proposes a prospect for a concrete optimization method for the light source condition of the optical hydrogen gas leak detector using CARS.

1. 序論

水素は使用に際しCO₂を排出せず、エネルギーキャリアとして再生可能エネルギー等を貯蔵、運搬、利用することができる特性を持つ。兼ねてよりクリーンエネルギーとして注目されていたが¹⁾、2020年10月に「2050年カーボンニュートラル宣言」がなされたことにより、水素への期待が更に高まっている。水素の普及には、水素を取り扱う様々な場面において安全が担保されていることが必須であり、我々は、水素関連施設の安全運用に資する技術として、水素ガス遠隔計測装置^{2),3)}や水素火炎可視化装置⁴⁾をこれまでに開発してきた。

水素ガス遠隔計測装置はレーザ照射により発生する水素のラマン散乱光(レーザ波長と異なる波長に散乱する非常に微弱な光)をエコーとして捉えるライダ(LIDAR:Light Detection and Ranging, 光検出と測距)^{5),6)}である。ライダは近年、自動車の周辺監視や運転アシストなどに適用され、ライダという言葉が耳にする機会が多くなった。この場合のライダは障害物などの固体標的(ハードターゲット)が計測対象のライダであり、「LiDAR」と表記されることが多い⁷⁾。一方、気象・環境計測用のライダは「Lidar」や「LIDAR」と表記される場合が多く、微粒子やガスなど(ソフトターゲット)を計測対象とする⁸⁾⁻¹³⁾。これらは同じライダと呼ばれる装置であるが、用途が大きく異なるため、それぞれ異なる方向性で発展を遂げてきた¹⁴⁾。ソフトターゲットを計測対象とするライダはパルス動作させたレーザを光源として適用し、計測対象物質から生じる後方散乱光をライダエコーとして捉え、捉えた光の強度や偏光解消度、周波数等を解析することにより、気体の密度、分子種、風向風速、粒子の粒径分布や形状等を明らかにする。また、レーザ光の出射とライダエコー受信の時間差から計測対象物質までの距離が得られる。

水素ガス遠隔計測装置は離れた場所から水素の存在する位置とその濃度を知ることができる優れた装置であるが、ラマン散乱光のうちレーザ波長より長波長に発生するストークス光を捉えるため、計測箇所の背後に近接して壁や配管等が存在する場合、それらにレーザ光が照射されることにより発生するレーザ誘起蛍光が強力な外乱光となり、微量な漏えいの検知が困難となる。

そこで、本研究では、ラマン散乱光のうちレー

ザ波長より短波長に発生するアンチストークス光を捉え、計測箇所に近接してレーザ誘起蛍光を発生する物体がある場合においても漏えい位置の探査を可能とする水素ガス検知技術を開発した。

目標検知濃度については一般的な水素検知器の警報設定値である濃度500 ppmとし、目標計測時間については水素センサの応答速度¹⁵⁾⁻¹⁷⁾以下を目指し1 sとした。

本稿では、水素のアンチストークス光を発生させるための光源の開発について述べる。可搬型装置を目指して光源の構成を検討し、アンチストークス光の発生効率の高い照射条件を見出した。

2. 計測原理

ラマン散乱は、分子の電子・振動・回転状態に対応するエネルギー準位間の遷移によって観測される光の非弾性散乱である。図1にラマン効果の概念を示す。

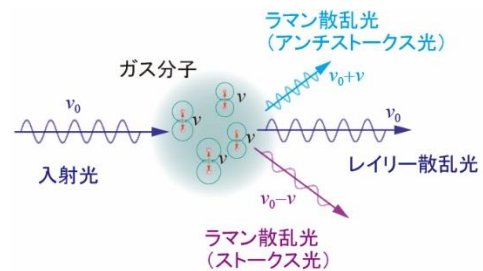


図1 ラマン効果の概念

ラマン散乱光の散乱強度は、入射光と同一の波長に散乱する弾性散乱であるレイリー散乱光に対し 10^{-3} と極めて小さく、ガスを計測する場合、十分な散乱光強度を得るため、通常レーザ光を励起光源として用いる。ガスにレーザ光を照射すると、ガス分子とレーザ光の相互作用により、レーザ光と異なる波長にラマン散乱光が発生し、そのうちレーザ波長に対し長波長の散乱光をストークス光、短波長の散乱光をアンチストークス光と呼ぶ。

本研究では、水素のラマン散乱光のうちアンチストークス光を計測対象とする。前述したとおり、ストークス光を計測する場合、レーザ誘起蛍光が外乱となるが、アンチストークス光を検知することにより、レーザ誘起蛍光の影響を回避して水素を検知することが可能となる。

常温、大気圧下において、アンチストークス光

の強度はストークス光に対し非常に弱い。観測されるストークス光とアンチストークス光の強度比は、物質の電子が基底状態にある確率と励起状態にある確率の比と同一であると近似でき¹⁸⁾,

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \exp\left(-\frac{h\nu_R}{kT}\right) \quad (1)$$

で表される。ここで I_{AS} はアンチストークス光強度、 I_S はストークス光強度、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 ν_R はラマンシフトである。

(1)式より、常温(300 K 付近)において水素(ラマンシフト 4160 cm^{-1} ¹⁹⁾)のアンチストークス光はストークス光に対しおおよそ 2.2×10^{-9} の強度となるため、単にレーザー光を照射することで水素のアンチストークス光を検出することは困難である。

そこで本研究では、常温、大気圧下においてアンチストークス光を検出可能とするため、CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy: コヒーレントアンチストークスラマン分光法)²⁰⁾⁻²²⁾を適用した。図2にCARSのエネルギー準位図を示す。

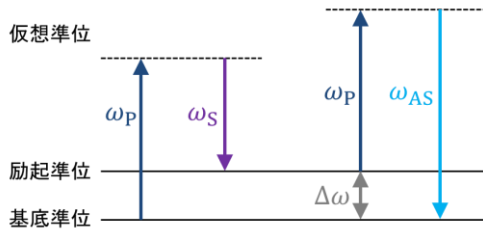


図2 CARSのエネルギー準位図

CARSはコヒーレントラマン効果の一つであり、角周波数 ω_p のポンプ光と、角周波数 ω_s のストークス光を重ねて物質に入射したとき、これらの周波数差 $\Delta\omega = \omega_p - \omega_s$ により物質のラマン活性振動が共鳴的に励起され、位相の揃った非線形分極が光路に沿って生じ、この分極と入射光とが相互作用して周波数 $\omega_{AS} = \omega_p + (\omega_p - \omega_s) = 2\omega_p - \omega_s$ のアンチストークス光がコヒーレントな光束として生じる現象である。本研究では、ポンプ光としてNd:YAGレーザーの第3高調波(波長355 nm)を用いたため、ストークス波長は416 nm、アンチストークス波長は309 nmとなる。

CARSにおいては、ポンプ光、ストークス光、ア

ンチストークス光の波数ベクトル k_p, k_s, k_{AS} が、

$$2k_p = k_s + k_{AS} \quad (2)$$

で表される位相整合条件を満たす必要があり、アンチストークス光は $2k_p - k_s$ の方向に指向性を持って散乱される。(2)式を満たす最も容易な配置は、すべての波数ベクトルが同一線上にあるCollinear CARSの配置(図3)であり、本研究ではこの配置を適用した。



図3 Collinear CARSの配置

CARSにより発生するアンチストークス光の強度 P_{AS} は、

$$P_{AS} = \left(\frac{2}{\lambda_p}\right)^2 \left(\frac{4\pi^2\omega_{AS}}{c^2}\right)^2 |3\chi^{(3)}|^2 P_p^2 P_s \quad (3)$$

で表される。ここで、 P_p はポンプ光強度、 P_s はストークス光強度、 λ_p はポンプ光波長、 ω_{AS} はアンチストークス光角周波数、 c は光速、 $\chi^{(3)}$ は3次の非線形感受率である。

(3)式より、アンチストークス光強度はポンプ光強度の2乗に比例し、ストークス光強度に比例する。また、 $\chi^{(3)}$ は分子密度 N に比例するため、 P_{AS} は分子密度、即ちガス濃度の2乗に比例する。

3. 装置構成

Nd:YAGレーザーの第3高調波(波長355 nm)をポンプ光として用い、CARSにより水素を計測するためには、何らかの方法でストークス波長(416 nm)の光を発生させ、ポンプ光と同時に同軸で計測箇所照射する必要がある。

水素のストークス光を得る方法は、BBO (Beta-Barium Borate, β -BaB₂O₄) 結晶と2枚のミラーにより構成される光パラメトリック発振器(Optical Parametric Oscillator, OPO)を用いる²³⁾、または高圧で水素を充填したラマンセルを用いる²⁴⁾、のいずれかが考えられる。前者は、BBO結晶へ入射するレーザー光の角度により波長を制御するため、精密に入射角度を調整し、その状態を保持する必要がある。加えて、結晶の温度が波長の安定性に大きく影響するため、結晶の温度を最適化して保

持する必要がある、水素関連施設等の現場で使用する可搬型装置に適用する場合、振動や周囲環境の温度変動により波長にずれが生じる可能性がある。一方、ラマンセルは、レーザ光軸上に配置することで、容易に水素のストークス光を得ることができるため、本研究では、ラマンセルをストークス光源として用いることとした。

ラマンセルをストークス光源として用いる場合、レーザ光をラマンセルに入射させ、ラマンセルにおいて発生したストークス光と、変換されずに通過したレーザ光をポンプ光として利用する方法が最も簡単な構成である²⁵⁾。しかしながら、この構成において、ラマンセルに入射するレーザ光の強度を増加させるとストークス光の強度は増加させられるが、ポンプ光(変換されずに通過するレーザ光)の強度を増加させることは困難である²⁶⁾。前述したとおり、(3)式より、アンチストークス光強度はポンプ光強度の2乗に比例するため、ポンプ光強度を増加させることが感度の大幅な向上に繋がるが、この構成ではレーザ出力を上げることによる大幅な感度向上の実現は困難である。

これを解決するため、ポンプ光とストークス光それぞれに対し1台のレーザ装置を用いれば、それらの強度が独立制御可能となるが、レーザ装置は高価であるため、低コスト化の観点から、1台のレーザ装置からポンプ光とストークス光を得て、かつ前述の課題を解決する手段として、レーザ光を二分岐し、一方の光路にラマンセルを配置し、それぞれの光路に入射するレーザ光の比率を制御可能な光源を考案し、本研究に適用することとした。図4に光源の構成および最適化試験の配置を、表1に光源および検知器の仕様を示す。

光源としてQスイッチNd:YAGレーザの第3高調波(波長355nm,パルスエネルギー30mJmax,繰返し周波数20Hz,パルス幅5.5ns)を用いた。

強度 I_L のレーザ光を、偏光ビームスプリッタキューブ(PBS(B))により二分岐させた。 $\lambda/2$ 波長板(WP(A))をPBS(B)の前に配置し、WP(A)を回転させることでそれぞれの光路へのレーザ光の入射比を変化させることができる。WP(A)の回転角度に対する2つの光路間に入射比を図5に示す。

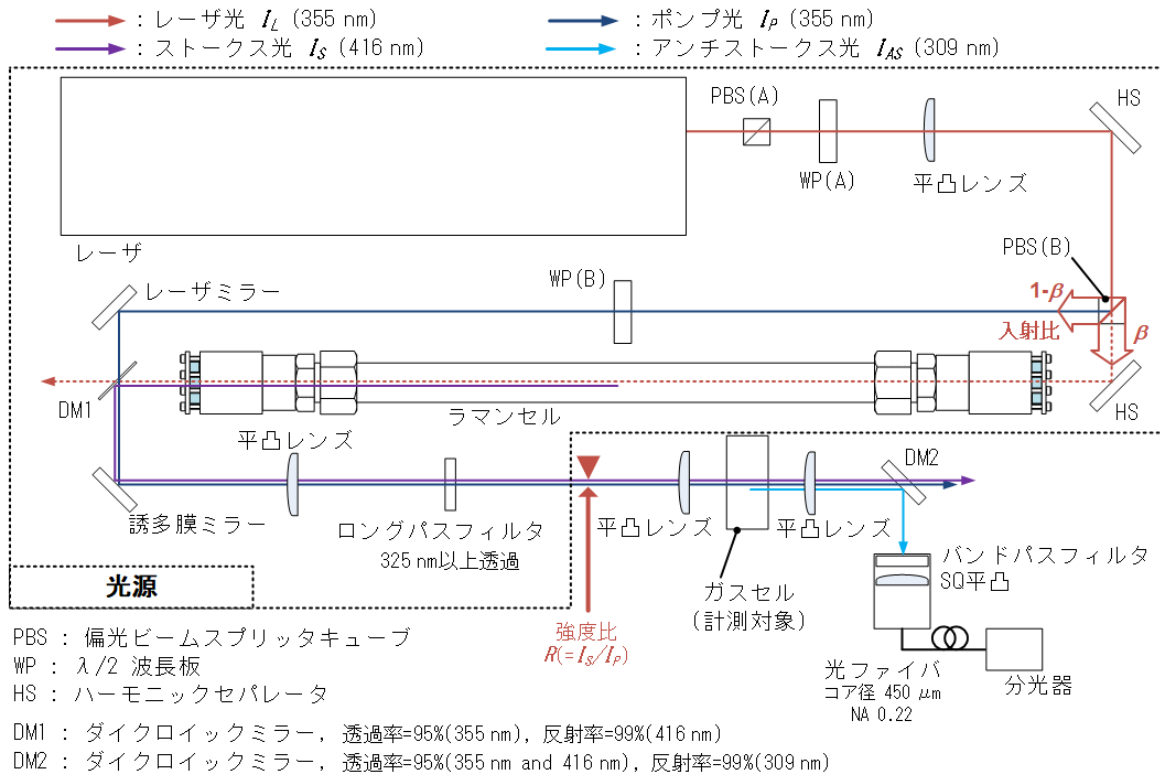


図4 光源の構成および最適化試験の配置

表1 光源および検知器の仕様

装置	仕様
レーザー	
型式 / メーカー	Ultra100 / Quantel
方式	Q-switched Nd:YAG (フラッシュランプ励起)
波長	355 nm
パルスエネルギー	30 mJ 最大
パルス幅	5.5 ns
繰返し周波数	20 Hz
ラマンセル	
充填ガス	100%水素
光路長	400 mm
内径	12 mm
分光器	
型式 / メーカー	QE65Pro / Ocean Optics
波長範囲	200~590 nm ブレーズ波長 300 nm
グレーティング	600 lines/mm
スリット幅	25 μm
波長分解能	0.99 nm
受光光学素子	
ダイクロイックミラー (DM2)	透過率 (355 nm, 416 nm) 95% 反射率 (309 nm) 99%
バンドパスフィルタ	中心波長 310 nm, 半値全幅 10 nm, 透過率 16%

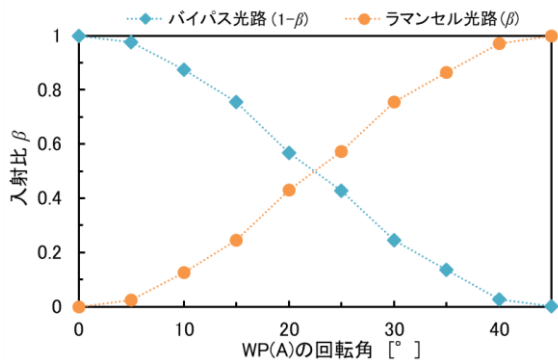


図5 ラマンセル光路とバイパス光路の入射比のWP(A)の回転角度依存性

P 偏光はラマンセルを配置した光路に入射され、ラマンセルを通過することで、ストークス光 (416 nm) に変換される。ラマンセルを用いた波長変換の実施例を見ると、それらの多くは光路長 1 m を超えるセルを用いているが、本研究では可搬性を考慮して、セル長 400 mm のラマンセルを用いた。一方、S 偏光はバイパス光路に入射され、ポンプ光として利用した。計測対象の水素に照射する際の偏光方向をストークス光と一致させるために、バイパス光路に $\lambda/2$ 波長板 (WP(B)) を配置し、S 偏光を P 偏光に調整した。

ポンプ光およびストークス光はダイクロイック

ミラー (DM1) により合波し、光路を一致させ、誘多膜ミラーにより反射し、ラマン分光用ロングパスフィルタ (325 nm 以上透過) を通過させて計測対象の水素に照射した。ラマンセルにおいては、計測に不要な高次のストークス光やアンチストークス光も発生するため、高次のストークス光は誘多膜ミラーにより分離し、アンチストークス光はロングパスフィルタにより遮断した。

計測対象の水素を充填したガスセルにポンプ光とストークス光を同時に照射し、ガスセルの後段に配置したダイクロイックミラー (DM2) によりアンチストークス光をポンプ光とストークス光から分離した。アンチストークス光は CCD 小型分光器 (計測対象波長 200~590 nm, 波長分解能 0.99 nm) により計測した。分光器への入射光学系には、集光レンズとして直径 20 mm ϕ , 焦点距離 40 mm の凸レンズ、外乱光を抑制するためバンドパスフィルタ (中心波長 310 nm), コア径 450 μ m の光ファイバを用いた。

構築した光源を用い、図 4 に示した ▼ の位置における強度比 $R(= I_S/I_P)$ の最適条件を検討し、各条件において最大のアンチストークスを得るため、試験を実施した。

4. 試験結果

図4に示した装置構成において、WP(A)の回転角度を変化させ、ポンプ光強度 I_P 、ストークス光強度 I_S 、アンチストークス光強度 I_{AS} を計測した。計測は以下の条件について実施した。

- (1) レーザ光強度 I_L を 10.4 MW/cm², 8.32 MW/cm², 6.99 MW/cm² と変化 (パルスエネルギーはそれぞれ 5.5 mJ, 4.4 mJ, 3.7 mJ), ラマンセルへの水素充填圧力は 0.7 MPa
- (2) ラマンセルへの水素充填圧力を 0.7 MPa, 0.6 MPa, 0.5 MPa と変化, レーザ光強度 I_L は 10.4 MW/cm²

ポンプ光およびストークス光の強度は、パワーセンサ(Ophir社製, 10A-P, 波長範囲 0.15~8 μm,

有効口径 16 mm φ) により計測し、アンチストークス光強度 I_{AS} は前述したとおり CCD 小型分光器により計測した。

I_L , I_P , I_S の評価は、図4の▼位置での光束径 3.5 mm を適用して実施した。また、ポンプ光を計測する場合には、中心波長 355 nm, 半値全幅 10 nm, 355 nm における透過率 30% のバンドパスフィルタを、ストークス光を計測する場合には、中心波長 415 nm, 半値全幅 10 nm, 416 nm における透過率 45% のバンドパスフィルタを、パワーセンサの前に配置して計測を実施し、光強度をフィルタの透過率を考慮して評価した。条件(1)の結果を図6に、条件(2)の結果を図7に示す。

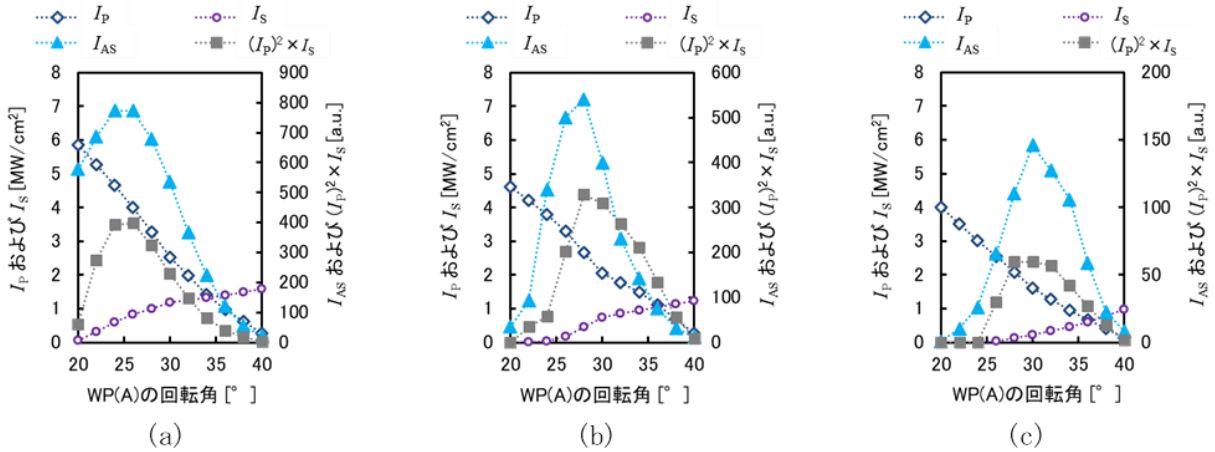


図6 I_L を(a)10.4 MW/cm², (b)8.32 MW/cm², (c)6.99 MW/cm²としたときの計測結果
(ラマンセル水素充填圧力: 0.7 MPa)

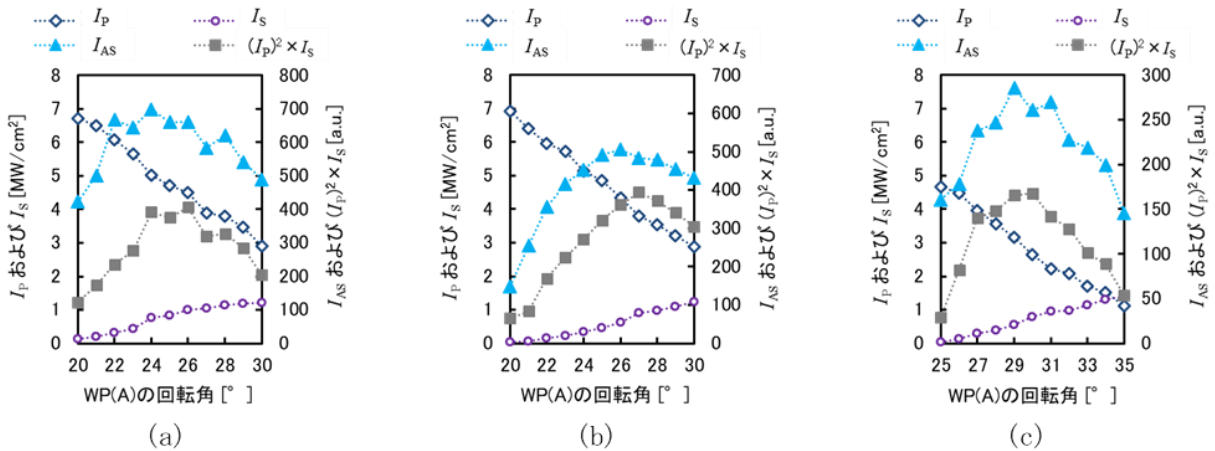


図7 ラマンセル水素充填圧力を(a)0.7 MPa, (b)0.6 MPa, (c)0.5 MPaとしたときの計測結果
(I_L : 10.4 MW/cm²)

図6, 図7の両者について, WP(A)の回転角度が増加すると, I_p は減少し, I_s は増加し, WP(A)の回転角の最適値は, 試験条件に応じて変化した。

図6に示すとおり, レーザ光強度 I_L が小さくなると, アンチストークス光を効率よく発生させるために, WP(A)の回転角を大きくし, ラマンセルへのレーザ光の照射強度を上げる必要がある。

また, 図7に示すとおり, ラマンセルへの水素充填圧力が低下すると, アンチストークス光を効率よく発生させるために, WP(A)の回転角を大きくし, ラマンセルへのレーザ光の照射強度を上げる必要がある。

(3)式より, アンチストークス光は $(I_p)^2$ と I_s に比例することを示したが, 図6および図7において, $(I_p)^2 \times I_s$ と I_{AS} のWP(A)の回転角度依存性は酷似しており, 試験結果と理論が一致することが確認された。

いずれの場合も, WP(A)の回転角度が過度に大きく, バイパス光路のポンプ光強度が減少し過ぎると, アンチストークス光が著しく低下した。また, WP(A)の回転角度が過度に小さく, ラマンセル光路のストークス光が減少し過ぎる場合も同様に, アンチストークス光が著しく減少した。

表2 I_{AS} が最大となるときの強度比 $R(= I_s/I_p)$ (I_L : 10.4 MW/cm², 8.32 MW/cm², 6.99 MW/cm²)

レーザ光強度 (I_L) [MW/cm ²]	ポンプ光強度 (I_p) [MW/cm ²]	ストークス光強度 (I_s) [MW/cm ²]	強度比 $R(= I_s/I_p)$
10.4	4.37	0.736	0.168
8.32	2.67	0.462	0.170
6.99	1.62	0.229	0.140

表3 I_{AS} が最大となるときの強度比 $R(= I_s/I_p)$ (ラマンセル水素充填圧力: 0.7 MPa, 0.6 MPa, 0.5 MPa)

ラマンセル水素充填圧力 [MPa]	ポンプ光強度 (I_p) [MW/cm ²]	ストークス光強度 (I_s) [MW/cm ²]	強度比 $R(= I_s/I_p)$
0.7	5.03	0.776	0.154
0.6	4.35	0.639	0.148
0.5	3.17	0.548	0.173

表2 および表3に, 各条件においてアンチストークス光 I_{AS} が最大となる場合の $R(= I_s/I_p)$ を整理した。表2は条件(1), 表3は条件(2)に対する結果である。

表2 および表3に示すとおり, $0.140 \leq R \leq 0.173$ の範囲で, アンチストークス光の発生効率が最適化された。

ここで, ラマンセルにおける照射光のストークス光への変換効率を α とし, α とラマンセル経路への I_L の入射比 β を各条件について整理した。表4は条件(1), 表5は条件(2)に対する結果である。

表4 I_{AS} が最大となる場合の α および β (I_L : 10.4 MW/cm², 8.32 MW/cm², 6.99 MW/cm²)

レーザ光強度 (I_L) [MW/cm ²]	ラマンセルへの入射光強度 ($I_L - I_p$) [MW/cm ²]	変換効率 α	入射比 β
10.4	6.02	0.122	0.578
8.32	5.64	0.080	0.680
6.99	5.38	0.042	0.769

表5 I_{AS} が最大となる場合の α および β (ラマンセル水素充填圧力: 0.7 MPa, 0.6 MPa, 0.5 MPa)

ラマンセル水素充填圧力 [MPa]	ラマンセルへの入射光強度 ($I_L - I_p$) [MW/cm ²]	変換効率 α	入射比 β
0.7	5.37	0.144	0.516
0.6	6.04	0.106	0.581
0.5	7.21	0.075	0.694

(3)式に, $I_p = (1 - \beta)I_L$ および $I_s = \alpha\beta I_L$ を代入すると,

$$I_{AS} = C\alpha\beta(1 - \beta)^2 I_L^3 \quad (4)$$

が得られる。ここで, C は定数である。同様に強度比 $R = I_s/I_p$ は,

$$R = \frac{\alpha\beta}{1 - \beta} \quad (5)$$

として表される。(4)式に基づき, 変換効率 $\alpha = 0.05, 0.1, 0.15$ とし, I_{AS} の β 依存性を算出し

た。計算結果は図8に示すとおりであり、 $\beta=0.33$ のときに I_{AS} が最大となった。

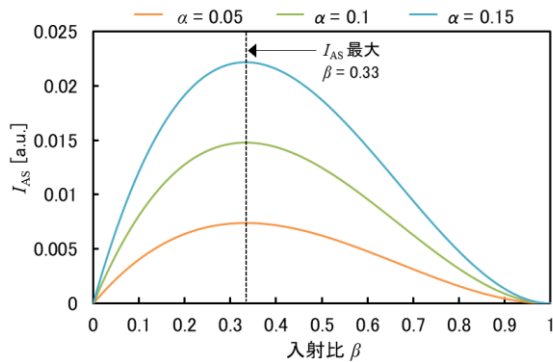


図8 β の変化に対する I_{AS} の計算結果 ($\alpha=0.05, 0.1, 0.15$)

次に、(5)式に基づき、変換効率 $\alpha=0.05, 0.1, 0.15$ の場合の強度比 $R = I_S/I_P$ の β 依存性を確認した。計算結果と試験結果を図9に示す。

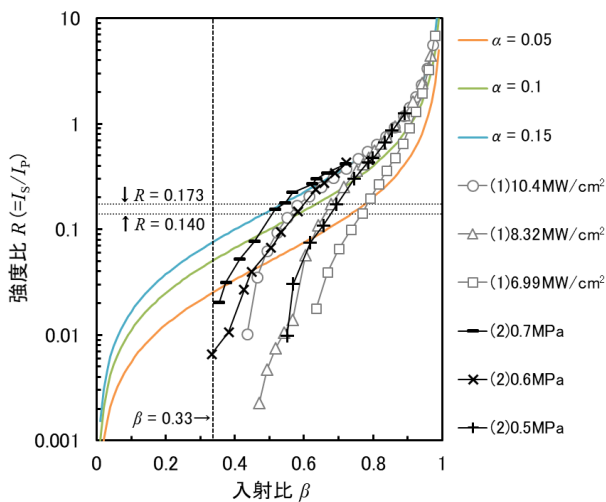


図9 試験結果の β 依存性および β の変化に対する強度比 $R (= I_S/I_P)$ の計算結果 ($\alpha=0.05, 0.1, 0.15$)

図9に示すとおり、試験において得られた強度比 $R (= I_S/I_P)$ は $0.001 \sim 10$ の範囲内で大きく変化した。しかし、 I_{AS} は $0.140 \leq R \leq 0.173$ の非常に狭い範囲で最大となった。

図8に示した計算結果では $\beta=0.33$ のときに I_{AS} が最大となるが、試験において最大となったのは、 $0.516 \leq \beta \leq 0.769$ のときであった。

試験において、ラマンセルでの変換効率が、 β によらず一定の値を維持していれば、理論による

得られる計算結果に沿う試験結果が得られると推測されるが、試験では、 β が小さくなるとラマンセルでの変換効率が著しく低下し、試験結果と計算結果の乖離が確認された。試験結果は、 I_L の強度が大きいほど、またはラマンセルへの水素充填圧力が高いほど、 I_{AS} が理論的な最大条件 ($\beta=0.33$) に近づくことを示している。

本試験の目的は、可搬型装置を目指し効率良くアンチストークス光を生成するため、実用的な設定の下で光源の入射条件を最適化することであり、理論式には含まれていない物理的制約が存在する。これらは、例えば、ラマンセルの長さ、ラマンセルにレーザー光を照射するために凸レンズの焦点距離、ラマンセルの圧力範囲、レーザー光の強度範囲などである。これらの条件が変化すると、ラマンセルにおける変換効率は変化するが、装置の現場適用を目指して適用した設定では、強度比 $R = I_S/I_P$ を $0.140 \leq R \leq 0.173$ の狭い範囲に固定して、最大の I_{AS} を得られることが明らかとなった。

5. 結論

本研究では、CARS を適用して水素のアンチストークス光を発生させて計測することにより、計測箇所 に近接してレーザー誘起蛍光を発生する物体がある場合においても漏えい位置の探査を可能とする水素ガス検知技術を開発した。

可搬型装置を目指し、レーザー光を二分岐し、一方の光路にラマンセルを配置して発生させたストークス光と、もう一方の光路に入射したレーザー光をポンプ光として水素に照射し、アンチストークス光を発生させる二軸型光源を考案した。セル長 400 mm のラマンセルを適用し、光源を構築した。

構築した光源により、照射条件を最適化し、ポンプ光とストークス光の強度比 $R (= I_S/I_P)$ を $0.140 \leq R \leq 0.173$ としたときに、アンチストークス光が最大となることを実験的に確認した。

次報では、微量漏えい水素の検知を目指し、最適化した光源を適用して開発した水素ガスリークディテクタの構成及び水素計測試験について報告する。

【謝辞】

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP13002）の結果得られたものです。ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 川合弘敏：「水素エネルギー技術」, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.5, p.6 (2015)
- 2) 朝日一平, 二宮英樹, 杉本幸代：「低出力レーザーによる水素ガス濃度遠隔計測」, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.7, pp.1145-1150 (2010)
- 3) 荻田将一, 杉本幸代, 朝日一平, 椎名達雄：「昼間屋外計測可能なマルチガスラマン LIDAR の開発」, 第 38 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, レーザーセンシング学会, pp.64-65 (2020)
- 4) 三木啓史, 星野礼香, 荻田将一, 市川祐嗣, 杉本幸代, 朝日一平：「画像伝送手法による水素火炎の可視化技術」, 四国電力, 四国総合研究所 研究期報, No.108, pp.1-6 (2018)
- 5) T. Fujii and T. Fukuchi eds. : “Laser remote sensing”, CRC Press, Florida (2005)
- 6) C. Weitkamp ed. : “Lidar”, Springer, New York (2004)
- 7) 大前学：「自動車の自動運転における LiDAR の活用」, 計測と制御, 第 59 巻, 第 5 号, pp.311-315 (2020)
- 8) 清水厚：「LIDAR ネットワークによる対流圏エアロゾルの広域観測」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.530-533 (2016)
- 9) 岩井宏徳, 石井昌憲, 水谷耕平：「ドップラー LIDAR による風計測と気象予測への応用」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.534-537 (2016)
- 10) 江尻省, 中村卓司：「共鳴散乱 LIDAR による超高層大気の観測」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.538-541 (2016)
- 11) 篠野雅彦：「イメージング蛍光 LIDAR による海底サンゴの観測」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.542-545 (2016)
- 12) 福地哲生, 名雪琢弥, 藤井隆, 根本孝七, 竹内延夫：「大気中 O₃・NO₂ 濃度の DIAL 計測における測定誤差評価」, 電気学会論文誌 C, Vol.124, No.5, pp.1100-1105 (2004)
- 13) 福地哲生, 名雪琢弥, 藤井隆, 根本孝七：「ラマン散乱とミー散乱を併用したレーザーレーダを用いた大気観測」, 電気学会論文誌 C, Vol.123, No.10, pp.1714-1720 (2003)
- 14) 椎名達雄：「LiDAR と Lidar 研究・技術の攻勢と融合」, 計測と制御, 第 59 巻, 第 5 号, pp.297-299 (2020)
- 15) 鈴木健吾：「各種ガスセンサと水素検知・警報システム」, 日本燃焼学会誌, Vol.61, No.195, pp.30-36 (2019)
- 16) 北口久雄：「水素用ガスセンサの現状と課題」, 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.2, pp.35-40 (2005)
- 17) G.B. Pour and L.F. Aval : “Monitoring of hydrogen concentration using capacitive nanosensor in a 1% H₂-N₂ mixture”, Micro & Nano Letters, Vol.13, Issue 2, pp.149-153 (2018)
- 18) 濱口宏夫, 平川暁子：「ラマン分光法」, 学会出版センター, 東京, p18 (1988)
- 19) R.M. Measures : “Laser remote sensing”, John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)
- 20) M.D. Levenson, 狩野覚：「非線形レーザー分光学」, 第 1 刷, オーム社, 東京, pp.159-212 (1988)
- 21) J.W. Nibler : “Coherent anti-Stokes Raman scattering of gases”, in “Non-linear Raman spectroscopy and its chemical applications”, W. Kiefer and D.A. Long, eds., Springer Netherlands: Heidelberg, Germany, pp.261-280 (1982)
- 22) J.P. Taran : “Coherent anti-Stokes Raman scattering”, in “Non-linear Raman spectroscopy and its chemical applications”, W. Kiefer and D.A. Long, eds., Springer Netherlands: Heidelberg, Germany, pp.281-323 (1982)
- 23) 福地哲生, 二宮英樹：「反ストークスラマン散乱を用いた水素ガスの漏洩検知」, 電気学会論文誌 C, Vol.128, No.7, pp.1191-1196 (2008)
- 24) J.C. White : “Stimulated Raman scattering”, in “Tunable lasers”, L.F. Mollenauer and

J.C. White, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp.115-120 (1987)

- 25) 杉本幸代, 福地哲生, 二宮英樹:「反ストークスラマン散乱を用いた水素ガスの漏洩検知」, 電気学会論文誌 C, Vol.134, No.12, pp.1869-1874 (2014)
- 26) L.D. Schoulepnikoff : “High-power single-pass Raman cells in the ultraviolet: numerical and experimental study, with applications in the differential absorption lidar measurement of tropospheric ozone”, EPFL, Lausanne (1997)