

低ダイオキシン化廃棄物燃焼処理のためのリアルタイム 燃焼ガスセンシング技術の開発*

(ゲインスイッチ短パルス光源の繰返し周波数可変技術の開発)

黒川 悟^{*1} 安達 雅浩^{*2}
森本 朗裕^{*3}
佐藤 亨^{*4} 乗松 誠司^{*5}
川崎 昌博^{*6} 橋本 訓^{*7}
太田 浩二^{*8} 鎌田 賢司^{*8}
京都電子工業株式会社
ターボ・オプテックス株式会社

[要 旨]

廃棄物焼却施設の燃焼室内での低ダイオキシン発生化対策として、燃焼安定化指標となる酸素濃度と一酸化炭素濃度のリアルタイムモニタリングにより、時間遅れのない安定な燃焼制御が実現可能である。このためプロジェクトでは、半導体レーザを用いた酸素濃度と一酸化炭素濃度の燃焼室内でのリアルタイムセンシング技術の開発をサブテーマ毎で分担し、燃焼炉内ガス計測濃度仕様を満足する計測を実現した。

本プロジェクトにおいて、京都府は、ガス高感度計測に有効なキャピティ・リングダウン法に最適な光源制御技術に取り組み、高速光パルスの周波数可変技術を開発したので報告する。

1 はじめに

廃棄物焼却施設の燃焼室内での低ダイオキシン発生化は環境汚染対策の最も重要な課題の一つである。このダイオキシン発生量を低減するには、

燃焼の安定化が最も有効な方法であるが、燃焼室内の温度を一定以上に保つこと、発生したダイオキシンを活性炭で吸着し取り除くこと等の間接的な燃焼制御のみが実施され、低ダイオキシン発生量化を実現するに至っていないのが現状である。これまでの各種汚染ガス測定機器は煙突から排出される時点のガス濃度を測定し、施設の正常動作をモニターする事に主眼を置いており、応答時間が多少遅くても問題にならず、パイプ配管等によりサンプリングしたガスの濃度計測が実施され、測定機器は比較的設置条件の良い測定機室に置かれ、形状が大型でも対応可能であった。しかし、低ダイオキシン発生化を目的とした燃焼制御に利用する場合、炉の高温場所での耐熱性や燃焼状態の急変に追従する応答性が要求されるため、従来型の測定機器では対応が不可能である。このため、

* : 平成13年度即効型地域新生コンソーシアム
研究開発成果報告書に掲載

*1 京都府中小企業総合センター 主任
(現在独立行政法人産業技術総合研究所)

*2 京都府中小企業総合センター 技師

*3 立命館大学理工学部教授

*4 京都大学大学院情報学研究科 教授

*5 京都大学大学院情報学研究科 助教授

*6 京都大学大学院工学研究科 教授

*7 京都大学大学院工学研究科 助手

*8 独立行政法人産業技術総合研究所 主任研究員

本プロジェクトでは燃焼室内でのダイオキシソ発生量そのものを低減するための技術開発として、酸素濃度はロックインアンプ法、一酸化炭素濃度はキャビティ・リングダウン法による、半導体レーザーを用いた燃焼室内でのリアルタイムセンシング技術の開発により、目標の酸素濃度20%以下、一酸化炭素濃度100ppm以下の計測を実現した。

キャビティ・リングダウン法によるガスリアルタイムセンシングとしては、センシングに用いるパルス光源に係る技術開発を実施した。光源としては、半導体レーザーデバイスにマイクロ波を入力し、パルス光を発生させるゲインスイッチ法によるパルス光発生技術を用いるが、これまでの方法では、パルス繰り返し周波数が半導体レーザーデバイスに入力するマイクロ波の周波数となり、キャビティ・リングダウン用光源として利用することは困難である。このため、このパルス光の繰り返し周波数を可変化する手法として、半導体レーザーデバイスに入力する正弦波をモノサイクルパルス化し、その繰り返し周波数を可変化することで、キャビティ・リングダウン用光源として利用可能な光源とするための技術開発を実施した。

2 実験方法及び実験条件

キャビティ・リングダウン法によるガスリアルタイムセンシングに用いる光源としては、半導体レーザーに温度モニタ用のサーミスタ及び温度コントロール用のペルチェ素子を内蔵したアンリツ社製半導体レーザーを用いた。これにマイクロ波を入力することによりパルス光を発生させる「ゲインスイッチ法」による時間幅数十ps程度のパルス光源を用いることを検討した。なお、半導体レーザーの発信波長は、一酸化炭素の吸収波長である約1563nmである。

通常、ゲインスイッチ法により発生する光パル

スは、半導体レーザーに正弦波を入力することが一般的なため、発生 of の繰り返し周波数は、入力する正弦波の周波数と同じとなっている。

一方、キャビティ・リングダウン法は、透過損失のない2枚の高反射率ミラー(反射率99%以上)で構成された空間キャビティの中に被測定ガスを導入し、そのキャビティ中に入射したレーザー光が往復する間に被測定ガスに吸収されることにより、受信側で観測される光強度が濃度に応じて指数関数的に減衰することを利用して濃度計測を行う方法である。このため、ミラー間の距離(キャビティ長)と繰り返し周波数に制限が存在し、十分な光パルス強度の減衰の後に次の光パルスがキャビティに入射されなければならない。

このため、ゲインスイッチ法により発生する光パルスの発生周波数を可変化するこ、入力パルス波形による光パルス幅の制御を行うことにより、ゲインスイッチ光パルスをキャビティ・リングダウン用光源として用いることを可能にする手法について検討した。

2 - 1 ゲインスイッチ光パルスの入力波形の制御による波形成形

半導体レーザーへ入力する電気信号を100MHz正弦波とした場合、発生する光パルスは、数十psの時間幅のパルスと1ns程度の時間幅のパルスの合成波形となることがわかっている。この光パルスをそのままキャビティ・リングダウン分光光源として用いた場合、キャビティ長が15cm以下となった場合には、リングダウン波形同士が重なり合うこととなり、濃度計測値の誤差要因となることが予想される。

従って、100MHz正弦波入力時のゲインスイッチ光パルスは、正弦波信号のはじまりから数百psまでの時間に数十psの時間幅の光パルスが発

生しているため、半導体レーザに入力する電気信号をデジタル信号発生器により100MHzの数分の1の波形として発生させ、光パルス波形を制御することを試みた。

2 - 2 光パルス発生周波数の可変化

ゲインスイッチ法による光パルスでは、半導体レーザに正弦波を入力するため、発生の繰り返し周波数は、入力する正弦波の周波数と同じになってしまう。このため、半導体レーザに入力する電気信号をデジタル波形発生装置(Sony Tektronix社製AWG710)により可変化することを検討した。

発生させる電気信号は、デジタル波形発生装置のプログラミング機能により作成し、100MHzの正弦波を1 μ s毎に1波のみ発生させることを試みた。発生信号は最大出力4W、ゲイン33dBのKalmus社製704FCパワーアンプに入力し、整合用アッテネータを介して半導体レーザに入力する構成とした。光信号は、Agilent Technology社製83480A + 83482A光サンプリングオシロスコープ(周波数帯域幅30GHz)で観測する。

一般的なゲインスイッチ光パルスの発生方法を図1に示す。

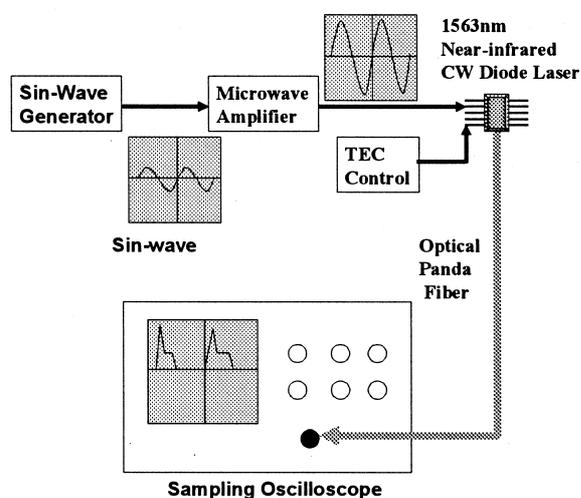


図1 一般的なゲインスイッチ光パルスの発生方法概念図

2 - 3 実験装置の概要

前節で示した手法により、任意波形発生装置を用いて半導体レーザに入力する電気信号の波形成形並びに発生する光パルス波形成形、光パルス発生周波数を可変化するための実験装置の概要を図2に示す。デジタル波形発生装置で作成した電気信号をマイクロ波パワーアンプに入力し、半導体レーザがゲインスイッチ光パルスを発生するように入力レベルを調整した。発生した光パルスは光ファイバを用いて観測装置に入力する構成としている。キャビティ・リングダウン法により被測定ガスの濃度測定を実施する場合には、この光パルスを空間に平行光としてリングダウンキャビティに導くことにより分析に用いることが可能である。

なお、発生光パルスの波形観測は、光パルス波形そのものの観測にはフェムト秒の時間分解能を有するFemtochrome Research社製FR-103XLを用いた。

3 実験結果

3 - 1 ゲインスイッチ光パルスの入力波形の制御による波形成形

半導体レーザに入力する電気信号をデジタル

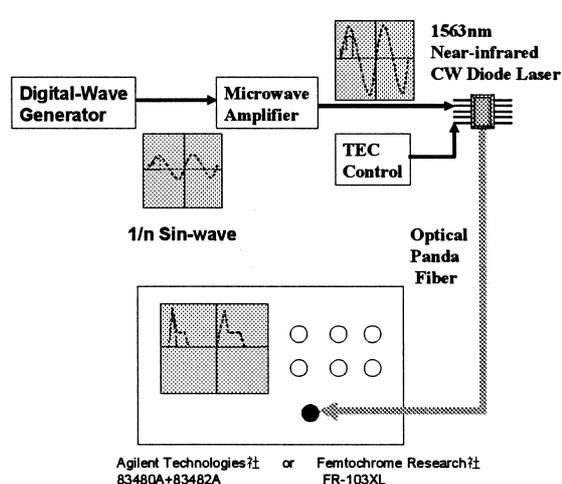


図2 開発手法によるゲインスイッチ光パルスレーザの構成

信号発生器により100MHz正弦波の数分の1の波形として発生させ、発生するゲインスイッチ光パルスの波形を制御することを試みた。

図3にデジタル信号発生器により作成した電気信号をゲインスイッチ光パルスが発生した状態でオシロスコープにて観測した結果を示し、図4に図3で示した電気信号をマイクロ波アンプを介して半導体レーザに入力し、発生したゲインスイッチ光パルスの波形を示す。なお、図中の1/4Sinwav(100MHz)、1/8Sinwav(100MHz)、1/16Sinwav(100MHz)はそれぞれ、100MHz正弦波の1/4波、1/8波、1/16波であることを示している。

測定結果では、入力する電気信号が正弦波の1/16波の場合が最も時間幅の狭い光パルスとなっていることを示している。また図3により、入力電気信号が正弦波の1/4、1/8、1/16と時間幅が狭まるほど、半導体レーザに入力する電気信号レベルを大きくしないとゲインスイッチ光パルス信号が発生しないことを示している。また、測定結果には示していないが、半導体レーザに入力する電気信号を更に大きくしていくと、正弦波の1/16波の結果で示す550ps~700psまでの観測される光の部分の強度が増大する傾向であった。本結果で得られたゲインスイッチ光パルスの波形については、周波数帯域幅30GHzの光オシロスコープを用いて波形全体の観測を行っているが、発生した光パルスの時間幅が測定器の周波数帯域を上回っている場合、パルス幅が広がって観測されてしまい、真の波形の観測が不可能であり、光パルス幅の更なる圧縮を実施するための条件が定まらないこととなるこのため、時間分解能620fsとした自己相関波形観測装置によりゲインスイッチ光パルスの時間波形の観測を行った。測定結果を図5に示す。

測定結果は、発生したゲインスイッチ光パルスが半値全幅(FWHM)で約30psであることを示している。

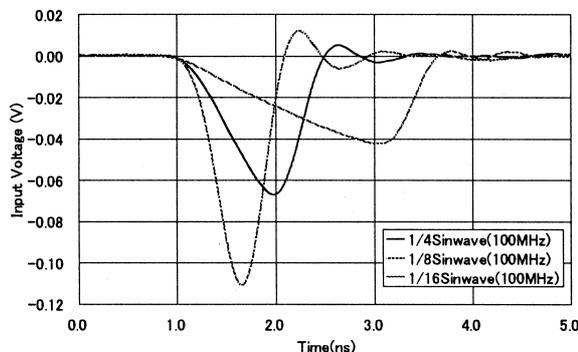


図3 デジタル信号発生器により生成した電気信号波形

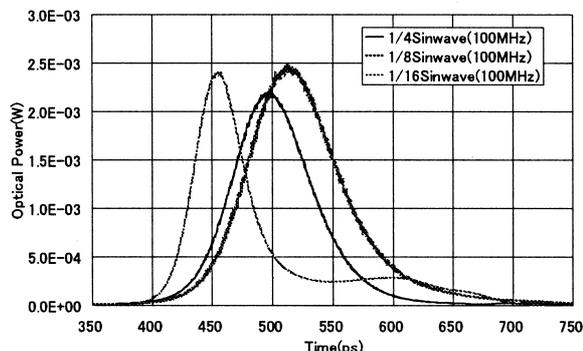


図4 発生したゲインスイッチ光パルスの観測波形

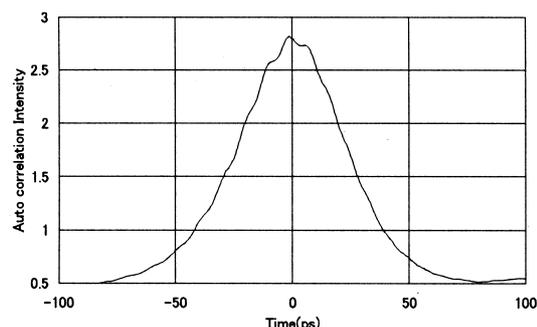


図5 自己相関装置で観測した生成ゲインスイッチ光パルス自己相関波形

3 - 2 光パルス発生周波数の可変化

前節で示した実験構成により、光パルスの発生周波数を100MHzから1MHzに可変化する実験を実施した。

デジタル発生装置のプログラム機能を用い

て、100MHzの正弦波の孤立波を繰り返し周波数1MHzで発生させ、ゲインスイッチ光パルスを発生させる手法を検討した。

図6に半導体レーザに入力する任意波形発生装置により作成した波形のオシロスコープでの測定結果を、図7に100MHz正弦波で発生した光パルス信号をキャビティ長50cmに相当する、本プロジェクト研究で開発した光ファイバリングダウン装置により観測したリングダウン波形を、図8に100MHz正弦波で発生した光パルス信号をキャビティ長130cmに相当する光ファイバリングダウン装置により観測したリングダウン波形を、図9に100MHzの正弦波の孤立波をデジタル波形発生装置で繰り返し周波数1MHzで発生させた場合の光パルス信号を、キャビティ長25cmに相当する光ファイバリングダウン装置により観測したリングダウン波形を、図10に1MHz繰り返し光パルスを用いて得た、キャビティ長50cmの場合の通常の空間キャビティ・リングダウン波形を示す。

なお、図中の1/4Sinwave(100MHz)、1/2Sinwave(100MHz)はそれぞれ、100MHz正弦波の1/4波、1/2波であることを示している。また、図中のCoupler(9:1)、Coupler(1:1)はそれぞれ、リングダウンキャビティ用ミラーの反射率90%、50%のミラーを用いた場合の観測結果に相当することを示している。

図7、図8を比較する。光パルスの発生周波数が100MHzの場合、キャビティ長が50cmに相当する場合にはリングダウン波形が3波観測できている。キャビティ長が130cmに相当する場合には、リングダウン波形は2波観測されるが、3波目のリングダウン波が観測される前に、次の光パルスが到来するために、逆のリングダウン波形となる結果が得られている。これらの結果は、現実のリ

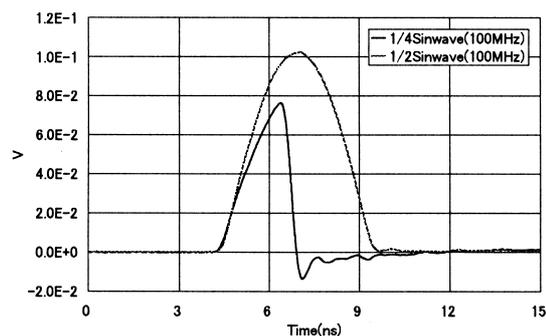


図6 デジタル信号発生器で作成した半導体レーザへの入力波形

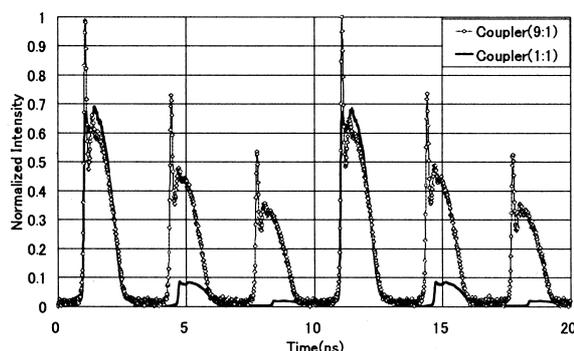


図7 キャビティ長50cmに相当する場合の光ファイバ・キャビティ・リングダウン波形(100MHz)

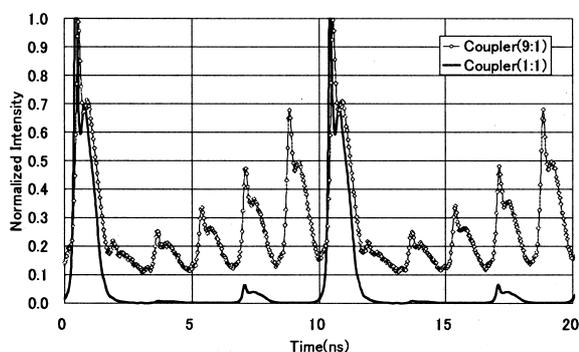


図8 キャビティ長130cmに相当する場合の光ファイバ・キャビティ・リングダウン波形(100MHz)

ングダウンキャビティ長が1m以下程度であることを考慮すると光パルスの発生繰り返し周波数が100MHzでは、キャビティリングダウン用光源として用いることは非常に困難であることを明確に示している。

一方、図9に示す1MHz繰り返しで発生した光パルス信号によるリングダウン波形では、キャ

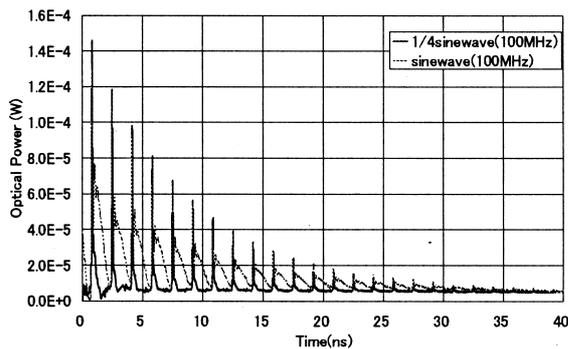


図9 キャビティ長25cmに相当する場合の光ファイバ・キャビティ・リングダウン波形 (1 MHz)

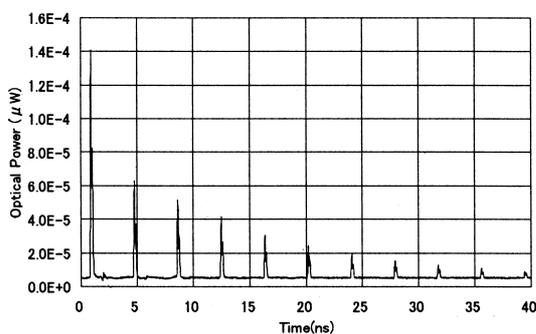


図10 キャビティ長50cmの場合の空間キャビティリングダウン波形 (1 MHz)

ビティ長が25cmに相当する結果であるにもかかわらず、十分なリングダウン波形が得られていることがわかる。

以上の結果から、デジタル信号発生器を用いたゲインスイッチ光パルスの波形成形と繰り返し周波数の可変化により、キャビティ・リングダウン用の光源として様々なキャビティ長にも十分対応可能な光パルス発生機能を有する光源を開発することができたといえる。

4 研究成果

当該研究開発では、安価なキャビティリングダウン法に用いる光源として、デジタル波形成形技術、通信用半導体レーザを用いて、ゲインスイッチ法による光パルス発生原理に適用し、発生するパルス波形として30ps程度の半値全幅を有

する光パルスの発生と、その発生繰り返し周波数をデジタル技術により変化することの可能な光源を開発した。

通常の光パルスを用いるキャビティ・リングダウン法では、光源として光出力数W以上の非常に大きなレーザを用いているが、今回の研究開発技術で得られる光源は、デジタル波形発生装置とデバイスを組み合わせて作成することにより30cm角程度の大きさとするのは容易に可能である。価格も100万円程度と考えられ、通常のキャビティ・リングダウン法に用いられる光源の価格に比べて1/10以下程度を実現するものとなっている。

6 謝辞

本研究開発は、経済産業省 平成13年度補正即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業にて実施した。

参考文献

- [1] A.O'keefe and D.Deacon, " Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, " Rev.sci.Instruments, 59, 2544 (1988)
- [2] Zhaoguo Tong, Richard D.Oleschuk, and Hans-Peter Loock, " Fiber-Loop ring-down spectroscopy, " JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS. VOL. 117, 23 (2002.12)
- [3] 安達 雅浩, 黒川 悟, 川崎 昌博, 森本朗裕, " 光ファイバループによるリングダウン分光の可能性, " 第63回応用物理学会講演会, 29a-YR-10 (2003. 3)