

# レーザーダイオード光源のLDVシステムへの適用の検討 (レーザーダイオードと光学系の特性評価)

田坂英紀<sup>1)</sup>・垂野 裕<sup>2)</sup>

## Examination of Application to LDV-system of Laser Diode Light Source

### (Characteristic Evaluation of Laser Diode and Optical system)

Hidenori TASAKA and Yutaka TARUNO

#### Abstract

It is important for internal combustion engine to study in-cylinder gas flow, as they realize to high efficiency and low exhaust pollution engine. Therefore, it is necessary to grasp gas flow in an engine in detail. About the laser doppler velocimeter (LDV), it is important to miniaturize for the improvement in flexibility of measurement. He-Ne laser has so far been used as a laser light source, however, the laser oscillation part is very large. In order to extend the measurement point within an engine, the improvement in flexibility of equipment is required.

Then, we decided to use a laser diode (LD) as a light source for improvement of LDV system. Therefore, the characteristic of laser diode was evaluated. There is no precedent of LDV which used laser diode in measurement of gas flow in an engine until now. For this reason, it aimed at the validity in the measurement in an engine as LD-LDV being shown.

As a result, it was shown that a laser diode is effective for the LDV light source. Moreover, it was able to be shown that LD-LDV is effective in the measurement in an engine.

Keywords: Laser diode, Internal combustion engine, In-cylinder gas flow,  
Laser doppler velocimeter (LDV)

#### 1. まえがき

内燃機関において、環境および資源の両面で有利に活用するためには、燃焼に大きな影響を与える因子であるシリンダ内ガス流動<sup>(1)</sup>を詳細に把握し、制御することが必要不可欠である。しかし、シリンダ内ガス流動は非常に複雑な流れであることから正確に計測することが困難であり、その詳細な傾向については現在でも不明確な部分が多い。

本研究では、シリンダ内ガス流動計測にレーザー流速計 (LDV)<sup>(2)</sup>を用いている。一方、LDV装置については自由度向上のために小型化することが求められる。従来、LDVの光源としてはガスレーザーを使用してきたが、レーザー発振部は非常に大きいものであり、エンジン内での計測範囲を広げるためには小型化して装置の自由度を上げることが必要である。

そこで、LDV装置改良のために光源として近年性能向上が著しいレーザーダイオード (LD)を用いることとし、LDの特性評価を行い、LDV光源としての可能性を検討する。また、LD-LDVのエンジン内ガス流動計測における有効性を示すことを目的とする。

1) 機械システム工学科教授

2) 機械システム工学専攻大学院生

## 2. LDV光源

### 2.1 LD装置の検討

LDの仕様にあった電源・冷却装置・その他の必要部品について検討した。

- ・LD：出力50mW，中心波長663nmを使用。
- ・電源：直流安定化電源と定電流回路を使用。
- ・放熱器：一般的な放熱用フィンを代用。
- ・ヒートシンク：銅製のヒートシンクを製作。
- ・コリメータレンズ：顕微鏡用対物レンズで代用。

上記の検討より，図1のように設計・製作を行いLDテストを行うこととした。

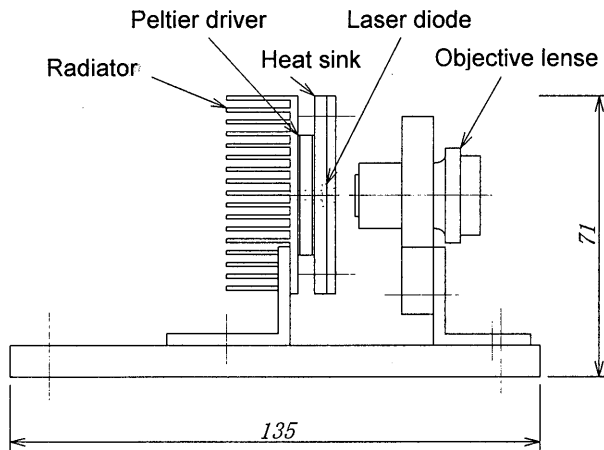


図1 LDユニット

### 2.2 波長及び出力安定性の確認

#### (1) 波長の確認

LD発振波長について計測を行い，明確化することでLDVへの影響を確認した。結果を図2に示す。図2より設定した温度幅であれば663nmを中心波長とし±3nm以内に収まることが分かる。これは，f200レンズを用いて流速20m/sの流れをLDVにて計測を行った場合，周波数にして±0.03MHzと非常に小さい値となっており，問題とはならないと考えられる。

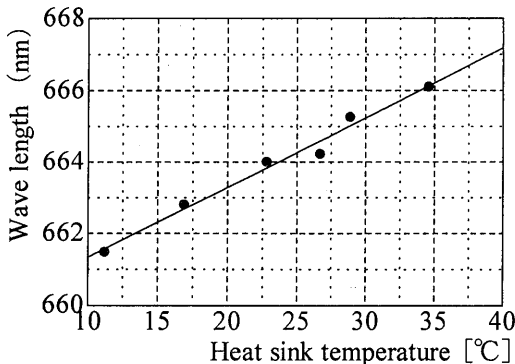


図2 温度による波長遷移

#### (2) 出力安定性の確認

LDを光源として使用する際に，その光出力がどの程度の安定性を有しているのか把握しておくことが必要である。このことから，LD光出力の変動についてフォトマルチプライヤを用いて簡単な確認実験を行った。結果，温度に変化を生じさせることで出力変動が見られたが，温度一定条件下では出力変動は見られないことから，温度を制御すれば問題はないと考えられる。

### 2.3 干渉性の確認

LD-LDVの確立を行う上で干渉性は重要な問題であることから，LDのみでの干渉性についての定量的な評価を行う必要がある。そこで，マイケルソン干渉計を用い確認を行った。

干渉性を定量評価するためのビジビリティの定義式を以下に示す。

$I_0$ ：暗電流による電圧値

$I_{max}$ ,  $I_{min}$ ：検出電圧値の最大値，最小値

$V$  (ビジビリティ)：干渉性の無次元数

$$V = ((I_{max} - I_0) - (I_{min} - I_0)) / ((I_{max} - I_0) + (I_{min} - I_0))$$

#### (1) 温度とビジビリティ

LD温度10~40°Cとビジビリティの関係性を調査した。結果を図3に示す。図3よりどの温度域においても再現性が得られていることから，これらのデータは全て同一のものともみなせる。全体からビジビリティの良時と悪時を判断すると，低温域のビジビリティ良時は10~12°C，中温域は21~25°C，高温域は33~36°Cとなっていることが分かる。そこで，ビジビリティが良時の代表温度をそれぞれの温度域より11°C，23°C，35°Cと定義することとした。

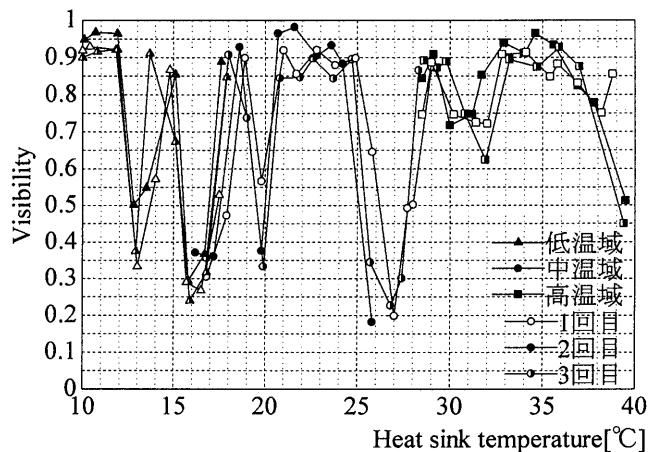


図3 温度とビジビリティの関係

(2) 光路長差とビジビリティ

光路長差とビジビリティの関係を調査した。LD 温度とビジビリティの関係よりビジビリティが良い時の代表点として 23°C, ビジビリティが悪い時の代表として 27°C を定義した。

計測結果を図 4 に示す。図 4 より LD 良時については光路長差がある状態であっても、ビジビリティは良い状態に保たれることが分かる。LD 悪時については良い状態と悪い状態が周期的に変動しており、このことからマルチモード発振している可能性が考えられる。しかし、光路差がない状態であれば LD 良時と同程度のビジビリティが得られることが分かる。空冷 Ar<sup>+</sup> レーザーについては光路長差に比例してビジビリティが悪化しており、光路長差 40mm 以上となると LD 悪時の方が良い状態であると言える。

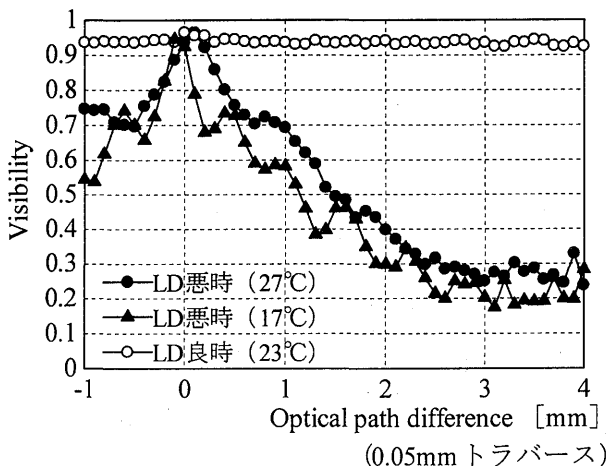
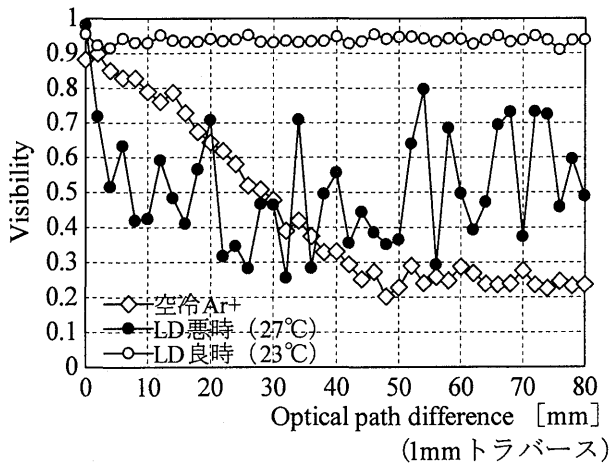


図 4 光路長差とビジビリティの関係

3. 光学系通過後の干渉性の評価

LDV では、干渉が 2 本の光束で発生していることから、様々な要因の影響について調査を行う必要がある。このことから、LDV 使用時における測定体積の干渉性について評価を行った。また、ドップラ出力 (LDV 信号出力) と干渉性に対する評価も行った。

3.1 LDV 光学系通過後の光束の干渉性

LDV 光学系の干渉性への影響を調べるため 2 本の光束の干渉性を調査した。結果、ビームスプリッタ及び周波数シフタ、偏波面回転器による干渉性への影響はビーム自体には影響を与えないことが分かった。

3.2 ビーム強度差の影響

干渉を行う 2 本のビーム強度が異なる場合の把握については実証を行っていない。このことから、マイケルソン干渉計を用い、片側ずつビームの干渉性を調べることにより、ビーム強度差における影響を調査した。結果として、光強度変化によってビジビリティが対数状の変化を起こしていることが分かった。このことより、ビジビリティの計測には左右のビーム強度差も考慮に入れた計測が必要であり、かつビーム強度差によってビジビリティを任意に変化出来ることが分かった。

3.3 LDV 光学系のビーム強度の把握

LDV 信号出力 (ドップラ出力) を干渉性と関連付ける際、ビジビリティを用いるためには左右のビーム出力から分かる出力比が必要であることから実験を行った。表 1 に光出力と出力比を示す。

表 1 光学系通過後の出力比の把握

	-側(シフタあり)	+側	
偏光方向	出力(V)	出力(V)	出力比
90度	17.2	56.5	0.30

3.4 ドップラ出力とビーム強度の影響の把握

LDV での散乱粒子による光信号を LDV 信号出力、あるいはドップラ出力と定義した。このドップラ出力のビーム強度における影響を調査した。結果を図 5 に示す。図 5 より、ビジビリティは一定であってもビーム出力によってドップラ出力が変化することを確認できた。また、再現性に関しては計測誤差であることから再現性は得られている。

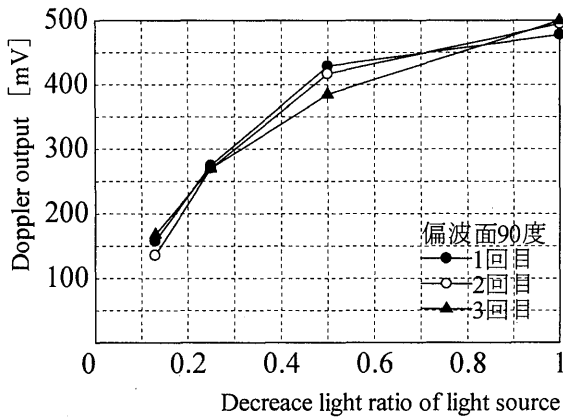


図5 ビーム自体の出力の変化によるドップラ出力

### 3.5 出力比の出力変化補正

ビジビリティとドップラ出力の関係を見るためドップラ出力と出力比の確認を行った。図6に出力比によるドップラ出力の計測結果を示す。

図6よりビジビリティでは、問題にならないビーム出力変化であっても、ドップラ出力には影響を及ぼす事が分かった。

よって、見かけ上のビーム出力変化を図5から補正し減光要因が含まれないドップラ出力にする必要がある。

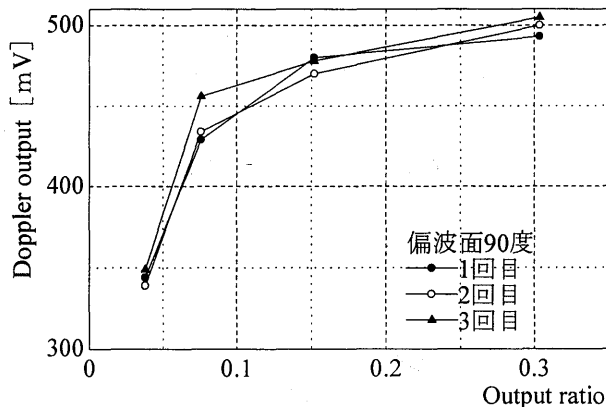


図6 ドップラ出力と出力比

#### (1) 算出補正法

表1より一側を減光した状態の一側出力を減光度に応じて減少させ、その状態で光総出力を求める。この光総出力の変化の比を図5において、内挿となるように両端のプロットの直線近似線に乗せることで、見かけ上のドップラ出力の減少を算出する。このことを利用し、求められたドップラ出力の変化量を、出力比とドップラ出力の関係から求められるドップラ出力に加算することにより、出力の変化を受けない状態の出力比とドップラ出力の関係を表すことが出来る。

その補正結果を図7に示す。図7より見かけ上の出力の変化によるドップラ出力の変化分をキャンセルするように補正を行ったことによって、本来の出力比とドップラ出力の影響を確認した。

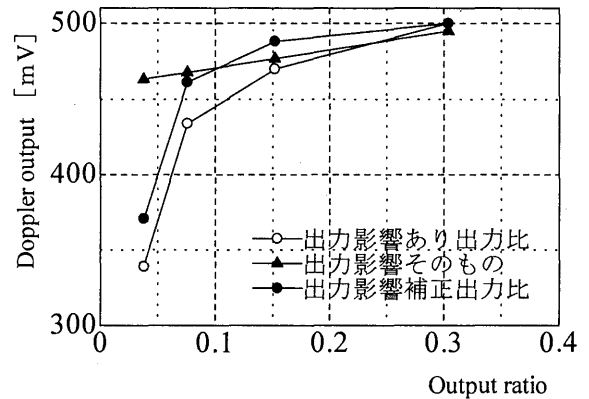


図7 ドップラ出力と出力比

以上のことを確認したことから、先に求めた出力比とビジビリティの関係から出力比をビジビリティに変換した。変換方法としては、ビジビリティと出力比の中で偏波面90度の関係から、内挿となるように両端のプロットの直線近似から該当する出力比におけるビジビリティを算出した。これによって求められたビジビリティとドップラ出力との関係を図8に示す。

図8よりビジビリティとドップラ出力の関係が明確に確認され干渉性がドップラ出力に影響することを確認した。

以上、ドップラ出力とビジビリティの関係の中で干渉性の面及びドップラ出力の両面からLD-LDVシステムの評価を行うことが出来、問題なく使用出来ることが分かった。また、これらの結果によってビジビリティの変化がドップラ出力へ影響することから、実際のLDV計測時において光源の干渉性によって信号出力が影響を受けていることを確認した。

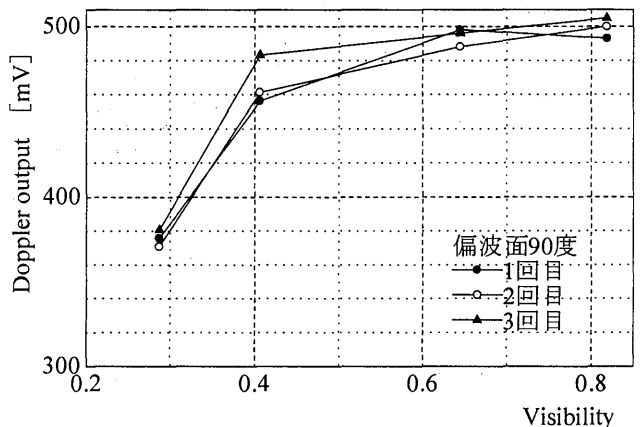


図8 ドップラ出力とビジビリティの関係

## 4. 実験装置および実験方法

### 4.1 供試機関

供試機関は、ボア×ストロークが 84.0mm×90.0mm、排気量 498.5cc の4サイクル単気筒エンジンである。レーザー光をエンジン内に入射する必要があることから、シリンダヘッドは計測用に改良されたものを使用した。吸気バルブには覆い角が 120° のシュラウドバルブを使用した。

### 4.2 実験方法および実験条件

本研究では、前述の供試機関を機関回転数 1000rpm、機関冷却水 80°Cに設定し実験条件の同一化と観測窓の曇り防止を図り、モータで駆動運転し流速を計測した。また、データ収録区間は ATDC - 90° から ATDC - 174° 間での 264° 煮ついて、40μs (0.24°) ごとに 1100 データを収録し、母集団数を 100 サイクル以上取った。測定位置は上死点でのピストン頂面を Z=0mm とし、Z=+10mm では X=+30~-30mm 地点の 10mm 間隔で、Z=0mm では X=+35~-35mm 地点の 5mm 間隔でそれぞれ周軸、半径方向を計測した。

## 5. 実験結果および考察

### 5.1 LD-LDVの有効性

LD-LDVの計測対象としてはエンジン内ガス流動である。このことから最終的な確認としてLD-LDVを用いてエンジン内ガス流動の計測を行い、HeNe-LDVとの比較を行い平均流速、乱れ強さについても正しく計測できるのか確認を行った。

結果を図9、10に示す。これまでの研究によってHeNe-LDVシステムは確立されていることから、これを基準としてLD-LDVの評価を行う。

図9より平均流速を比較するとX=-30、-05mmのどちらにおいても十分な一致を示していることから、流速の大小、周波数シフトの有無に関わらずシリンダ内ガス流動に対する計測精度は十分に得られていると考えられる。図10より乱れ強さを比較すると平均流速同様にX=-30、-05mmのどちらにおいても十分な一致を示している。乱れ強さにおいてもHe-Neと同様であることから、シリンダ内ガス流動の乱れ成分についても計測上の問題はないと判断できる。

以上の結果より、LD-LDVはシリンダ内ガス流動のような非定常乱流においても十分に計測精度と応答性が得られることが分かった。

### 5.2 エンジン内ガス流動考察

Z=0, 10mm について三方向計測を行い空間的に流れを把握し、比較を行った。本研究で使用したエンジン内ガス流動の傾向としては、圧縮行程では斜めスワールが形成されているものの、膨張行程になるとスワールは安定しほぼ水平なスワールを形成していることが分かった。また、圧縮行程ではZ=0mmが時間的に早くピストンの影響と思われる変動を生じその後Z=10mmが受け、膨張行程では膨張流の影響がZ=10mmで時間的に早く弱まり、その後Z=0mmが弱まることが分かった。

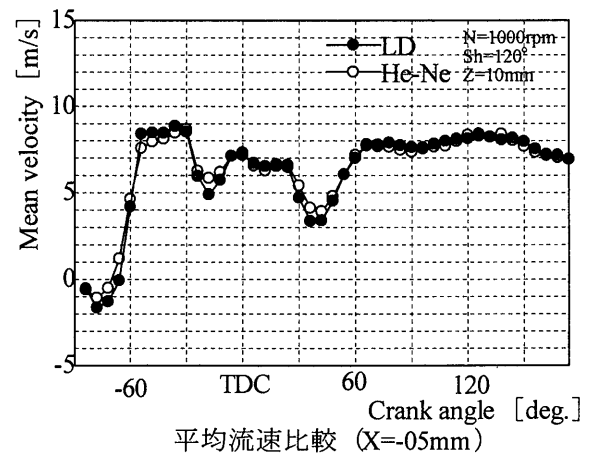
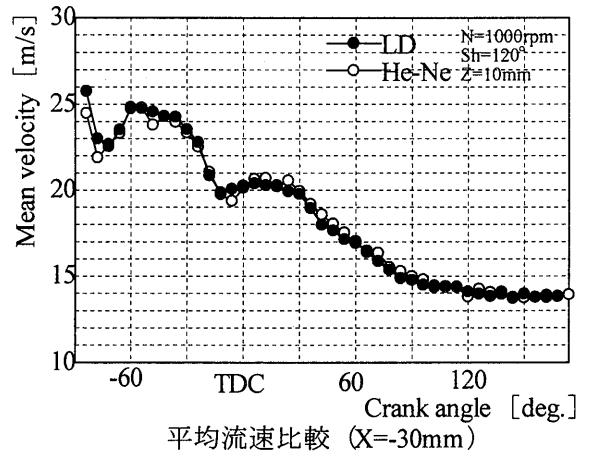
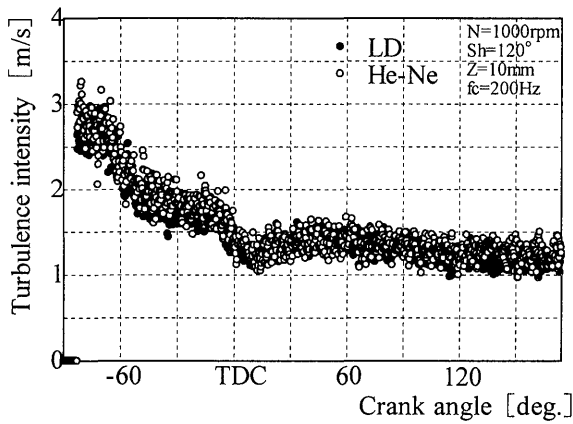
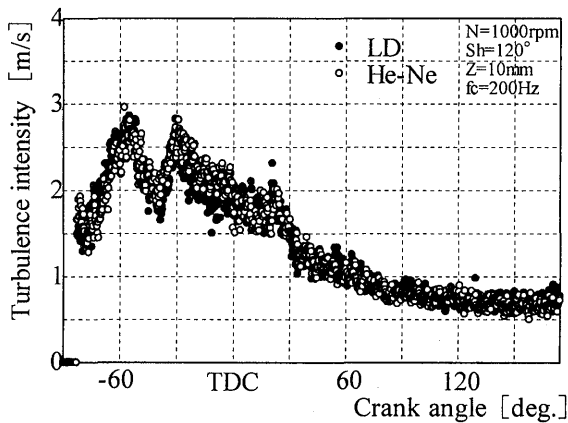


図9 エンジン内 LD-LDV の有効性(平均流速)



乱れ強さ比較 (X=-30)



乱れ強さ比較 (X=-05)

図10 エンジン内 LD - LDV の有効性(乱れ強さ)

## 6. 結論

LDをLDVの光源として使用するためにLDの特性評価を行い、LD-LDVを用いてエンジン内ガス流動計測を行った結果以下の結論を得た。

- (1) LDのLDV用光源としての特性評価を行い、その可能性が十分であることを明確にできた。また、LDを温度制御することで干渉性を良い状態に保つことができた。
- (2) LD-LDVシステム上の光学系であるビームスプリッタや周波数シフタが干渉性に影響を与えないことを確認した。また、LD-LDVの2ビーム干渉性と信号出力との関係を明確化し定量的に評価することが出来た。このことから、LD-LDVシステムが十分にLDVとしての性能を有していることが分かった。
- (3) LD-LDVを用いてエンジン内軸方向に深さの異なる2面上のガス流動を計測し、エンジン内軸方向の流速分布を把握する可能性を見出した。

## 参考文献

- (1) 田坂英紀・佐藤忠教, 内燃機関, 1995年
- (2) 日本機械学会: 技術資料, 流体計測法, 1985年