

LD-LDV の光源光学系の改善

田坂 英紀¹⁾・安達 祐二²⁾

Improvement of Light Source Optics of LD-LDV

Hidenori TASAKA, Yuji ADACHI

Abstract

In an internal combustion engine, promotion of combustion is one of the factors to achieve low fuel consumption, low exhaust pollution and high thermal efficiency. Promotion of combustion is related to in-cylinder gas flow. There is laser doppler velocimetry (LDV) in one of equipment to measure in-cylinder gas flow. We changed light source from gas laser of large size to laser diode (LD) of small size for miniaturization to improve in flexibility. LD light has an extension angle different in vertical and horizontal direction, therefore beam section becomes elliptic section. There is possibility that beam power cannot be fully used by this cause. Then, in this research, we studied about the way of collimation to use beam power efficiently. As a result, we found the way of collimation to reduce beam diameter and increase beam strength. But, this way caused decline of S/N due to increase of noise. Then, when we measured with frequency shifter, we were not possible to measure in-cylinder gas flow, and more examination should be required.

Key Words :

Internal combustion engine, In-cylinder gas flow, Laser doppler velocimetry (LDV), Laser diode (LD), Collimation

1. まえがき

内燃機関の低燃費・低排気公害化・高効率化を実現する要因として燃焼の促進が挙げられるが、燃焼はシリンダ内に存在するガス流動に負うところが大きい。そこで、ガス流動を正確に計測し、それを明らかにすることは、ガス流動が燃焼を促進する効果を解明する上で必要となる。

エンジン内ガス流動計測機器の一つであるレーザドップラ流速計 (LDV) は、計測自由度・精度向上が必要不可欠である。自由度向上のためには小型化することが求められており、これまでの研究において、小型・高出力である半導体レーザ (LD) 光源の可能性の検討を行い、LDV

光源としての可能性が確立された。これにより、小型化の基盤が出来上がったといえる。しかしながら、LD の性質上、ビーム径は楕円であるため、これによってビームパワーを効率よく使うことが出来ず、計測精度に影響をおよぼすと考えられる。

そこで、本研究室の LDV 光源である LD のレーザパワーを効率よく使えるコリメート法を検討し、その有効性を示すことを目的とする。

2. 光源 (LD) に関する検討

2-1 LD の個体差

半導体製品である LD には特性に個体差があると考えられ、昨年度の研究でその可能性があることが分かった。個体差は計測結果に影響を及ぼし、データの信頼性を落と

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

すため、それがどの程度であるか把握しておく必要がある。そこで、今年度新しいLDに交換したことに伴い、LDの個体差の調査を行うことにした。

光の干渉を利用するLDVにとって重要な指標である、干渉縞の鮮明度(明暗比)を「ビジビリティ」という。ビジビリティ計測にはマイケルソン干渉計を用いる。下式のように、計測された出力値の最大値 I_{max} と最小値 I_{min} よりビジビリティ V が導かれる。ビジビリティは1に近いほど干渉性が良いと評価できる。

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

V : ビジビリティ

I_{max}, I_{min} : 検出電圧値の最大値, 最小値

I_0 : 暗電流による電圧値

LD温度の変化はビジビリティに影響することが分かっており、昨年度の研究によりビジビリティが良いLD温度域と悪いLD温度域があることが分かった。これは、温度制御を行うLDにとって重要なことであるため、LD温度とビジビリティとの関係から、使用するLDの実用温度域の把握も併せて行った。また、ここで言う「LD温度」とは実際のLDの温度ではなく、LDが発する熱を放散させる役割を持つ銅製の「ヒートシンクの温度」のことを指している。LDの高温域での使用は寿命を縮めるため、10~30°Cを計測温度域とし、この温度域について温度変化を意図的に生じさせることでLD温度とビジビリティの関係を探した。

結果を図1に示す。図は縦軸にビジビリティ、横軸にLD温度(ヒートシンク温度)を表し、今年度使用したLD(No.01)と昨年度使用したLD(No.02)についてプロットしている。図よりビジビリティの良時と悪時を判断すると、ビジビリティ良時は低温域の10~12°C、中温域の18~20°Cと24~27°Cであり、前回のLDと比較して実用温度域は変化している。また、全体的な傾向も全く異なる結果となった。このことより、LDには個体差があり、LD交換の際には必ずビジビリティの把握が必要であるといえる。

2-2 光源の集光

現在、本研究室で使用しているLDVの光源は半導体レーザー(LD)である。LDは拡がり角を持つため、LDVの光源として使用するにはコリメータレンズを用いて通常のレーザーのような平行光にする(コリメートする)必要がある。これは顕微鏡用対物レンズで代用可能であるが、LD光は拡がり角が水平方向と垂直方向で大きく異なるた

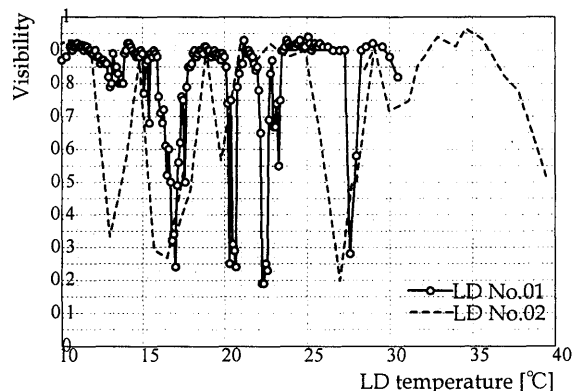


図1 LD温度とビジビリティの関係

めビーム断面形状は楕円となる。昨年度研究では計測に問題無いとしていたが、楕円であることによりビームパワーを効率よく使えない状況があると考えた。当面の目標である小型LDVの利用価値を高めるには後方散乱方式であることが望ましく、散乱光強度の弱さを補うためにはビームパワーを効率よく使うことが必然となる。そこで、コリメータ法を検討し、コリメータレンズの改良を行い、後方散乱での十分な計測精度の確保を狙った。改良を行う上で目標とすることを以下に挙げる。

- コリメート光強度増加

大きく拡がるLD光を効率よく集め、ビームパワーを有効活用することでコリメート光強度の増加が期待できる。コリメート光強度の増加は散乱光強度の増加を促し、計測精度の向上に繋がると思われる。

- 収差減少

1点から出た光はレンズによって1点に集まるという理想的な状態と実際の状態とのずれのことを収差という。LDは縦軸と横軸の拡がり角が違うために収差が生じやすい。収差がある場合、像面の歪み等の影響を及ぼす。これを少なくすることで計測精度向上が考えられる。

- ビーム径縮小(真円補正)

ビーム径が小さくなると測定体積が小さくなり、空間分解能が向上し計測精度は向上すると考えられる。加えて、LDV装置の各所におけるレーザー光の“けられ”によるビームパワー欠損が生じにくくなる。また、LDの特徴である楕円ビーム断面形状を真円に近づければ、更に効果的である。

2-3 コリメータレンズ改良検討

前項で挙げた目標を実現すべく、コリメータレンズの検討を行った。

検討を進めた結果、コリメータレンズとして①凸レンズ・凹レンズ②円筒レンズ③非球面レンズが候補として挙げられた。それぞれのレンズの特徴を示す。

①凸レンズ・凹レンズ

凸レンズ・凹レンズは我々に最も身近なレンズである。これらは表面が球面であるためレンズ外部部を通る光と中心部を通る光では集光位置がずれ、収差が生じる。この影響を少なくするためには複数枚のレンズを使用することが必要である。実際、LD専用コリメータレンズや顕微鏡用対物レンズ等は複数枚のレンズで構成されている。

②円筒レンズ

一般的に、楕円ビーム径の補正には円筒レンズを用いる。円筒レンズは一断面にのみ屈折力を持つため、縦軸・横軸についてそれぞれ別の問題として扱うことができる。しかし、それが逆に調整の難しさを産み、収差を大きくする可能性がある。

③非球面レンズ

収差補正には非球面レンズがよく用いられる。非球面レンズは表面が放物面や4次曲面など球面でないレンズであるため収差が生じにくくなっている。しかし、非球面レンズは一枚で様々な収差を取ろうとしているために負荷がかかっており、レンズの微妙なズレで性能が変化してしまう。そのため光軸調整には高い精度が要求される。また、表面が特殊な造りをしているため製作は困難であることより、通常のレンズより高価である。

以上のことを参考にコリメータレンズの改良を行った。LDV装置には「装置の複雑さ」「高価」という弱点があり、汎用性に欠けている。そこでこれも考慮して、調整の簡略化と低コスト化を狙って、取り扱い易い凸レンズ・凹レンズを用いることとした。また、収差補正に優れているといわれる顕微鏡用対物レンズを併用して収差補正も狙った。改良コリメータレンズ諸元を表1に、レーザ光路を図2に示す。

表1 改良コリメータレンズ諸元

入射順位	使用レンズ	焦点距離	内容
1	対物レンズ	f 8	集束光にする
2	平凹レンズ	f 20	集束光を
3	平凸レンズ	f 80	平行光にする

平凹レンズと平凸レンズを密接させ、ダブルレットレンズを形成した。

このコリメータ法を適用した場合、像面に歪み等の収差の影響は見られなかった。ダブルレットレンズは収差補正に優れており、対物レンズもまたダブルレットレンズの一種であるので、双方による収差補正が効果的に行われると考えられる。

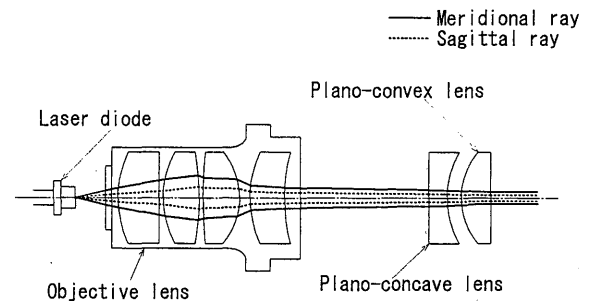


図2 レーザ光路

2-4 改良LDユニット概要

今回検討したコリメータレンズを用いたLDユニットの概要を図3に示す。比較対象として従来の対物レンズのみを用いたLDユニットを図4に示す。

(1) レーザダイオード (LD)

本研究で使用した赤色高出力レーザダイオード(LD)は、 $0.66\mu\text{m}$ 帯AlGaInP高出力LDである。多重量子井戸構造の採用により、高出力化・定電流駆動化を実現している。発振横モードとしてはTEM₀₀、偏光度(垂直方向偏光)100:1、ケース温度60°C使用時の寿命が約1000時間であり、用途としては光ディスクドライブ光源・計測機器用光源である。

(2) ペルチェ素子

15.1×15.1×3.18のペルチェ素子を4個使用している。ペルチェ素子は、低い電圧の直流電流を流すことで一方の面から他方の面に熱が移動し、一方の面は冷却され反対の面は加熱される仕組みになっている。また、電源の極性を逆にすることで熱の移動方向は逆転するため、冷却・加熱が可能となる。LDの発振波長とケース温度には密接な関係があり、また、ケース温度は外気温に左右されるため冷却・加熱の両方が必要となる。

(3) ヒートシンク

LD使用時には電流の大部分が熱としてケースより放散される。チップ温度を定格範囲に保ち寿命を保証するためには適切な熱放散が必要である。この

ことから、熱伝導性を考慮して $35 \times 35 \times 5.5$ の銅製ヒートシンクを使用している。昨年度使用のヒートシンクは十分すぎる大きさであったため、今回、小型なものに交換した。

(4) 放熱器

一般にパソコン等に使用されているアルミ製の放熱用フィンを装備している。

(5) ファン

放熱器だけでは十分な効果が得られない場合、ファンを使用してそれを補っている。LDユニットと一体にして、作業性の向上を図った。

(6) コリメータレンズ

LDの出射光は大きな拡がり角をもつ。これを通常のレーザ光と同様な平行光にすることがLDV計測には必要のため、コリメータレンズを用いる。昨年度の顕微鏡用対物レンズから、今回検討した対物レンズとダブルレットレンズ(平凹レンズ+平凸レンズ)の組合せで構成されるコリメータレンズに変更した。レンズの枚数が多くなったため、以前のLDユニットより多少大きめとなった。これは小型化を目指すことと相反しているが、前述した改良の条件を満たせるのならば許容範囲内であると考えた。

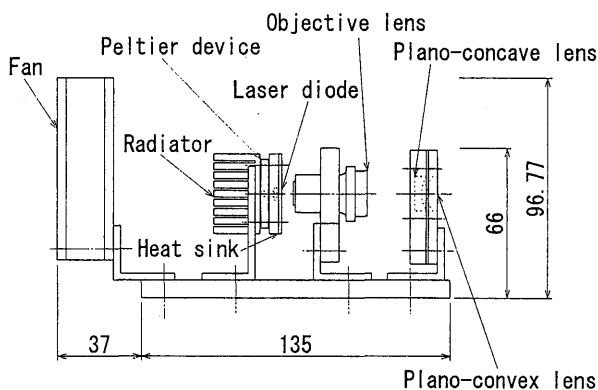


図3 改良LDユニット

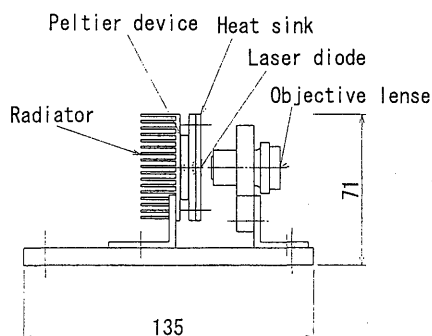


図4 旧LDユニット

2-5 ビーム強度調査

50mW He-Ne レーザ・対物レンズによるLD コリメータ光・改良コリメータレンズによるLD コリメータ光についてビーム強度分布を計測し、それらを相対評価することでコリメータレンズ改良によるビーム強度増加の割合を調査した。計測には実際のLDV計測に使用しているフォトマルチプライヤ(以下「フォトマル」と略称)を用いた。

結果を図5、図6に示す。図は縦軸にフォトマル出力、横軸にビーム中心からの距離を表している。図より、対物レンズによるビーム強度はHe-Ne レーザの半分程度しかなく、50mWのLD光を有効利用できていないことが伺える。一方、改良コリメータレンズによるビーム光強度はHe-Ne レーザと同等の光強度のピークを持つ。即ち、コリメータレンズを改良したことによりビーム強度は約50%増加し、ビームの有効利用が行われているといえる。

ここで、改良コリメータレンズによるLD コリメータ光のY軸のビーム強度分布について、中心よりもビーム強度が強い位置がビーム端に存在している。そこで、倍率10倍の顕微鏡用対物レンズを用いてビーム断面を拡大して目測で確認を行った。すると、ビーム断面上下に鮮明な部分が見られた。これについては、今回検討したコリメータレンズの特性であると考え、この部分が計測にどう影響し、どう対処するか、今後検討を行う必要がある。

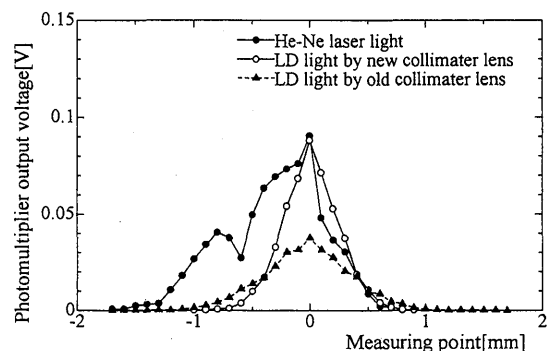


図5 ビーム強度分布比較 (X軸)

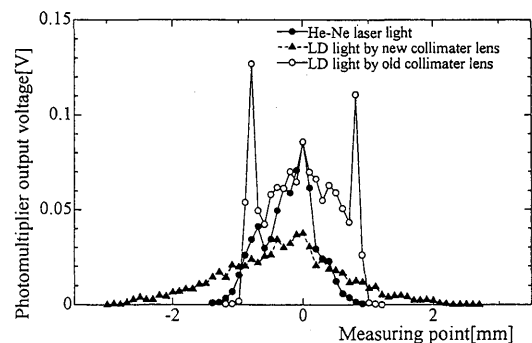


図6 ビーム強度分布比較 (Y軸)

2-6 ビーム径調査

ビーム強度分布より、計測に有効なビーム径を算出した。ここでビーム端の定義を「レーザービーム中心の強度を1とした場合に強度が $1/e^2$ になる位置」とした。これは中心強度の13.5%にあたる。結果を表2に示す。また、図7に各ビームの有効ビーム寸法を示す。

結果より、改良コリメータレンズによるもののビーム径は対物レンズによるものに比べてX軸・Y軸ともに小さくなっているが、アスペクト比自体には大きな変化はみられず、未だ楕円形状であるため、ビーム断面形状を真円に近づけるためには再検討が必要である。しかし、ビーム強度が増したこと、ビーム径が小さくなったことは実証できた。

表2 有効ビーム径調査結果

	He-Ne レーザー	改良 コリメータレンズ	対物レンズ
X軸	1.75mm	1mm	1.5mm
Y軸	1.5mm	2mm	3.75mm
アスペクト比	1.17	2	2.17

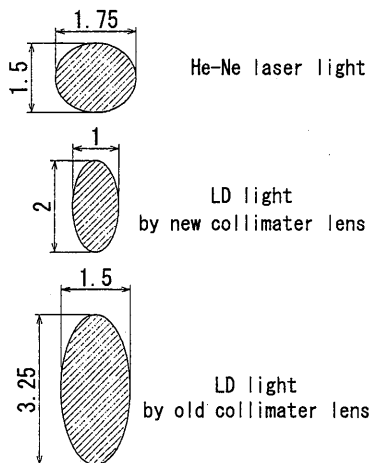


図7 有効ビーム径寸法

2-6 出力確認

改良コリメータレンズによって計測における出力値がどの程度得られているのか把握するため、散乱粒子を水蒸気として出力確認を行った。結果を表3にコリメータレンズを対物レンズとした時の結果と併せて示す。

結果より、出力が大幅に増大しており、ビームパワーを効率良く使えていることが窺えるが、その反面、ノイズも大幅に増大している。LDV計測には出力の絶対値は必要だが、出力とノイズの比(S/N)も重要であるため、この結果が計測にどう影響するのか注意すべきである。しかし、「ビーム強度増加」と「ビーム径縮小」は実証されたため、今回検討したコリメータレンズを採用することにした。

表3 出力確認結果

コリメータレンズ	出力 (mV)	ノイズ (mV)
対物レンズ	600	120,80
改良コリメータレンズ	2000	500,400

3. エンジン内流速測定実験の目的及び方法

3-1 実験目的

光源が小型であるLDになったことにより可搬性は大きく向上した。それを生かすには集光系と受光系が一体である後方散乱方式が望ましいが、後方散乱は前方散乱に比べて散乱光強度が弱いため計測精度は悪くなる。

今回、コリメート法を検討し、ビームパワーを有効に利用することに成功した。そこで、このコリメート法を用いて前方散乱と後方散乱による流速測定を行い、後方散乱方式の光源部として使用できるかどうかを相対評価により判断した。

3-2 供試機関

本研究で使用した供試機関は、実験用に改造を加えた三菱製R52R型4サイクル単気筒エンジンである。この機関は、純正のシリンダヘッドを取り外し、シリンダライナとピストンヘッドの上部にそれぞれ延長したシリンダライナとピストンを取り付け、さらに計測用シリンダヘッドを取り付けてある。ボア×ストロークは84.0mm×90.0mm、排気量498.5ccで、焼室形状はパンケーキ型となっている。

計測用シリンダヘッドは、レーザー光を燃焼室内部に入れるため、側壁部にシリンダ中心を通る水平面上に直径36.0mmの穴が2つあり、ガラスの観測窓が設置できる。図8に計測用シリンダヘッドの概略を示す。

吸気バルブには、シリンダ内にスワールを発生させるため、シュラウドの覆い角が 120° のバルブを使用した。

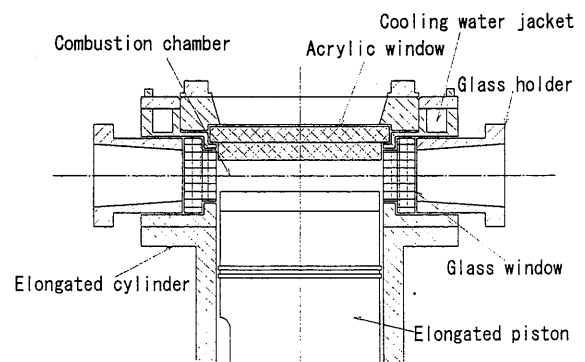


図8 計測用シリンダヘッド

3-3 実験方法

本実験では、前述の供試機関をモータで駆動運転し、前方散乱及び後方散乱LDVによってX軸周方向の平均流速の計測を行った。

供試機関の設定条件として、機関回転数を 1000rpm、機関冷却水を 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った。測定位置は、圧縮上死点でのピストン頂面を $Z=0\text{mm}$ とし、 $X=-30\text{mm}$ 地点である。測定位置を図9に示す。

設定より得られたトラックからの出力電圧を、圧縮上死点前 90° から圧縮上死点后 174° までの 264° 区間について $40\mu\text{s}$ (0.24°) 毎に 1100 データを A/D 変換機を介してコンピュータに転送した。収録したデータの中から信号の質等によって信頼性のあるデータを選別し、合計 100 サイクル分のデータを母集団として統計処理を行った。

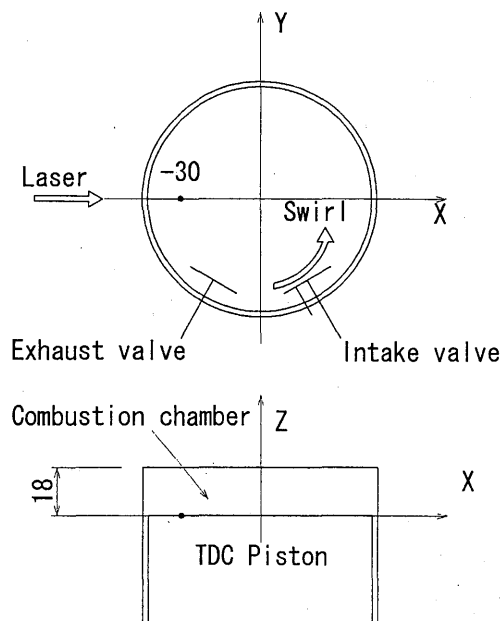


図9 測定位置

3-4 光学系

前方散乱・後方散乱方式の光学系を図10、図11に示す。

前方散乱方式は、集光系で2本のビームを集光し測定体積をつくり、測定体積を通過した散乱粒子の散乱光をエンジンを挟んで反対側に位置する受光系で受光する。

後方散乱方式は、集光系で2本のビームを集光し測定体積をつくり、測定体積を通過した散乱粒子の散乱光を周波数シフタと集光レンズの間に位置する受光系で受光する。

(1) レーザ光源ユニット

光源をLD、コリメータレンズを今回検討したレンズ群からなるLDユニットを使用した。LDの発振出力は50mW、発振波長は663nmである。

(2) 偏波面回転器

ビームスプリッタによって分離された2本のビームは偏光方向が異なる。そのため、偏光方向をそろえ干渉縞を作り出すために用いる装置である。

(3) ビームスプリッタ

レーザ光源からの1本の光束を2本に分岐する装置で、光路幅は50mmである。

(4) 周波数シフタ

光の周波数偏移法を用いた装置で、超音波によって移動回折格子を作る音響光学素子(ブラッグセル)を用いている。ビームスプリッタで分けられたビームの一方を周波数シフタにより光学的に40MHzシフトさせる。この周波数変化によって干渉縞を移動させ、これにより静止している粒子からもシフト周波数のドップラ信号が得られるので、流速が0m/sに近くても正負を含めた正確な流速が得られる。

(5) 集光レンズ

ビームスプリッタで2本に分けた50mm間隔のレーザビームを平凸レンズにより交差させ、測定体積を作り出す。

(6) 受光レンズ

測定体積から散乱粒子により反射された散乱光を集束させる、焦点距離150mmの凸レンズである。

(7) 表面鏡

後方散乱方式で、受光レンズで集束させた散乱光を光軸に対して垂直に位置するフォトマルへ送るため、光軸に対して 45° 傾いた表面鏡である。

(8) フォトマルチプライヤ

光電子増倍管といい、受けた散乱光を電気信号に変換しドップラ信号を出力するもので、アンプを備えている。集束された散乱光が焦点を結ぶ位置にピンホールがあり、光は直接フォトマルに投影される。

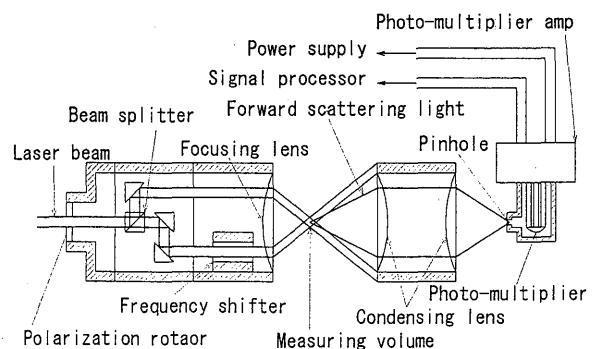


図10 前方散乱LDV

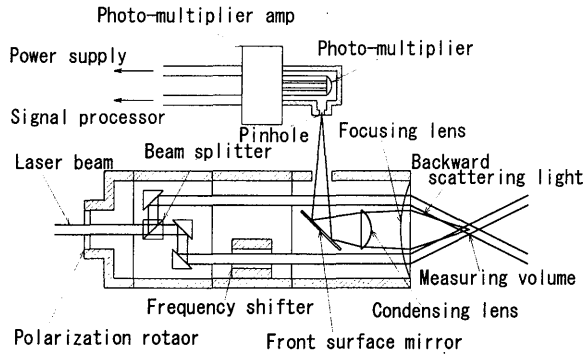


図 11 後方散乱 LDV

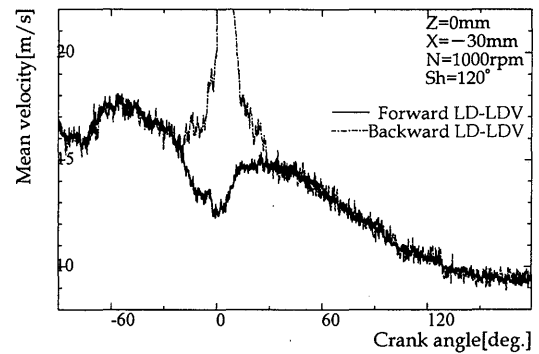


図 12 流速測定結果

4. エンジン内流速測定の結果と考察

4-1 周方向・軸方向平均流速による考察

前方散乱・後方散乱 LDV を用いて計測を行った。図 12 に前方散乱・後方散乱によるエンジン内平均流速測定の結果を示す。

図より、両散乱方式はほぼ一致しており、散乱光強度が低い後方散乱方式でも、散乱光強度が強い前方散乱方式による計測と同等の結果が得られた。これは、コリメート法を検討しビームパワーを有効に利用でき、これにより散乱光強度が増したためと思われる。

しかし、周波数シフタを使用した場合、S/N 低下が顕著に起こり、信号処理機が処理できず測定は不可能となった。LDV 計測には出力の絶対値と S/N が重要となる。コリメート法検討の結果、ビームパワーを有効利用し出力の大幅増加を実現したが、同時にノイズも増加させることとなった。この原因として、X 軸ビーム強度分布に見られたビーム端のピーク値が大きき要因であると考えている。周波数シフタを使用しなければ LDV 装置の有用性は薄れるため、今後この部分が計測にどう影響しているか調査、検討する必要がある。

また、測定結果で、TDC 付近の流速が前方散乱は減速、後方散乱では加速する傾向が見られるが、これはピストンによる影響のためである。前方散乱方式は受光部がエンジンを含んで反対側に位置するため、ピストンが TDC に来るとレーザを遮ってしまい散乱光を得ることが不可能となる。そのため減速する現象が起こる。一方、後方散乱方式は集光系と一体であるため、レーザが遮られても散乱光は得ることができるが、それはピストンによって反射された光がノイズとして入ってくるため、図のような現象が起こる。

5. 結論

LDV 光源として使用しているレーザダイオード (LD) のビームを有効活用するべくコリメート法を検討し、改良 LD ユニット LDV を用いてエンジン内ガス流動の計測を行って評価した結果、以下の結論を得た。

- (1) LD 光を有効利用するコリメート法を検討し、その結果、ビーム強度増加とビーム径の縮小に成功した。
- (2) 検討したコリメート法を用いてエンジン内ガス流動の計測を行い、周波数シフタ無しの場合では、後方散乱でも前方散乱と同等の結果が得られ、十分な計測精度が確保できた。
- (3) 一方、周波数シフタ有りの場合では、S/N の低下が原因で計測が不可能となったことより、コリメート法の更なる検討の必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 田坂英紀・佐藤忠教, 「内燃機関」, 森北出版 (1995)
- 2) 池上徹彦・土屋治彦・三上修, 「半導体フォトニクス工学」, コロナ社 (1995)
- 3) 山口一郎・角田義人, 「半導体レーザーと光計測」, 学会出版センター (1992)
- 4) レーザ計測ハンドブック編集委員会, 「レーザー計測ハンドブック」, 丸善 (1993)
- 5) 石川雅也, 「レーザー流速計によるエンジン内ガス流動の計測」, 平成 13 年度宮崎大学工学部卒業論文
- 6) 小原剛, 「レーザーダイオード光源による LDV 開発と計測」, 平成 14 年度宮崎大学大学院修士論文
- 7) 宮崎純志, 「レーザーダイオード光源の LDV システムへの適用の検討」, 平成 14 年度宮崎大学工学部卒業論文