

燃焼音の気筒間ばらつきを考慮したディーゼルエンジンの快音化 Creation of Comfortable Diesel Engine Sound in Consideration of Variation of Combustion Noise among Cylinders

精密工学専攻 9号 上兼 拓巳
Takumi Uegane

1. はじめに

近年、コストダウンを目的としたディーゼルエンジンの軽量化に伴い、燃焼音による騒音は悪化することが懸念される。

ディーゼルエンジンはシリンダ内圧の上昇がガソリンエンジンより急激に変化するため、特に、燃焼音が目立つ⁽¹⁾。また、燃焼音は、内部構造が同じエンジンでもシリンダ内圧と評価点間の音響伝達関数や燃料噴射タイミング等の違いにより、各気筒でばらつきが生じて異なった音になる。エンジン音では、このばらつきが音質に影響を与える。

そこで本研究では、シリンダ内圧と音響伝達関数からの快音化を行い、良条件および悪条件の解明を図る。まず、シリンダ内圧における燃焼共鳴、噴射圧力に着目し、快音化を図り、良条件および悪条件を提案する。次に、エンジン構造による燃焼音のばらつきに着目し、各気筒における音響伝達関数や燃焼音の順序を変え、燃焼音の印象変化を把握することで、良条件および悪条件の要因を解明する。

なお、被験者には全ての評価において十分なインフォームドコンセントを実施している。

2. 燃焼音概要

まず、本研究で扱う燃焼音の作成方法について述べる。次に、シリンダ内圧の現象分解を行い、燃焼音質に対する各現象の寄与率を算出する。

2.1 シミュレーションによる燃焼音

本研究では、シミュレーションにより作成した燃焼音を用いる。Fig. 1(a)に各気筒の位置関係を、Fig. 1(b)に燃焼音作成概要を示す。音響伝達関数は、エンジンから1mの評価点で測定され、1~4気筒それぞれをFRF_A, FRF_B, FRF_C, およびFRF_Dと記す。シミュレーションでは、直列4気筒ディーゼルエンジンにおける実稼働中の同一のシリンダ内圧に各気筒の音響伝達関数を畳み込むことで作成する。実稼働を模擬した燃焼音(以下、実稼動燃焼音)は、実稼動と同様、FRF_A, FRF_C, FRF_D, FRF_Bの順で作成し、Defと記す。な

お、以下の実験では、実車走行を模擬し1500 rpmにおける燃焼音を扱う。

2.2 シリンダ内圧現象分析

シリンダ内圧における現象分析を行う。シリンダ内圧には、主に三種類の現象が含まれる。一つ目の現象は、シリンダ内のピストン運動によって起こる圧力である。これを熱圧力と称す。シリンダ内圧において、主に200 Hz以下の低周波成分にあたる現象である。ピストン運動によって生じる熱圧力であるが、エンジン構造、材質を変更しても大きな変化は無く、燃焼音の音質への影響は少ないと考えられるため、本研究では、検討の候補からは除外している。二つ目の現象は、爆発によって生じる共鳴である。これを燃焼共鳴と称す。シリンダ内圧において、主に4000 Hz以降の高周波成分にあたる現象である。燃焼共鳴は、共鳴室の体積や温度によって算出されるが、1回の燃焼の中でも時間とともに温度などの値が変化するため、時間とともに燃焼室共鳴の周波数は変化している。この変化は爆発ごとで変化するため、燃焼音の印象に大きく関係していることが考えられる。三つ目の現象は、多段噴射によって生じる圧力である。これを燃焼圧力と称す。シリンダ内圧において、主に200-4000 Hzまでの中周波成分にあたる現象である。多段噴射における燃料の噴射量と噴射タイミングは電子制御されており、現在は燃費効率と低騒音化とのトレードオフの関係によって制御されている。

3. シリンダ内圧による快音化

シリンダ内圧の現象における、燃焼共鳴、噴射圧力に着目し、燃焼音のサウンドデザインに取り組む。まず、音質評価に基づき燃焼共鳴における振幅値、周波数変動についての良条件および悪条件を検討する。次に、噴射圧力におけるプレ、メイン噴射の圧力比、噴射タイミングについて検討する。

3.1 燃焼共鳴からの快音化

2.2節にてシリンダ内圧における現象分析を行った。そこで、まず燃焼共鳴に着目し、燃焼音の快音化を図るとともに良条件および悪条件を検討する。

3.1.1 振幅の違いによる燃焼共鳴の良条件検討

燃焼共鳴の振幅を変更することにより燃焼音の音質に快適性を持たせられるかを検討する。評価音は、実稼動時に発生する燃焼共鳴の振幅を基準として、0, 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 2, 3, 4倍と燃焼共鳴の振幅を変化させた評価音を用いる。また、音圧レベルは全て65.4 dB(A)とする。被験者は20代前半男性13名である。

評価結果はFig. 2であり、振幅は小さくなるほど心地よさが増す傾向が見られる。また、燃焼共鳴が全く無いものと比較すると1/8や1/4程度の燃焼共鳴成分があるほうが心地よさが増加する傾向を確認できる。さらに、燃焼共鳴成分の振幅を大きくしていくと心地よさが失われ、背反関係があることが分かる。よって、心地よさを増すような振幅値には、実稼動の約1/8付近に最適値が存在することが推察できる。

3.1.2 周波数の違いによる燃焼共鳴の良条件検討

燃焼共鳴の周波数を変更することにより燃焼音の音質に快適性を持たせられるかを検討する。評価音は、燃焼共鳴の

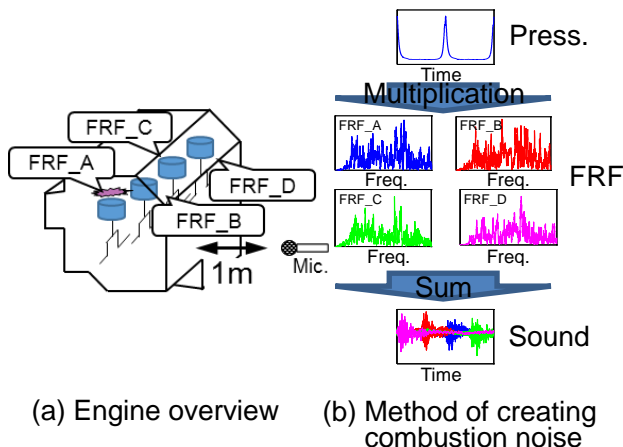


Fig. 1 Summary of combustion noise

部分の周波数をそれぞれ変更する。燃焼共鳴はピストンの形状や圧力、温度といったさまざまな要因から周波数が決まる。また、燃焼は時間が経過するにつれて変化するなどの要因もあるため、今回の実験動時の燃焼共鳴は 4000 から 5500Hz 程度まで上がる波形となっている。そのため、始まる周波数を 2000, 3000, 4000 Hz, 終わる周波数を 4000, 5500, 7000 Hz とし、それぞれを組み合わせた音を評価音とする。また、音圧レベルは全て 65.4 dB(A)とする。被験者は 20 代前半男性 12 名である。

評価結果は Fig. 3 であり、7000 Hz のようなより高周波の成分を含んでいる場合、燃焼音はより不快な音質へと変化していることが確認できる。また、開始する周波数が同じグループにおいて、変化する周波数の幅が小さいほど心地よいと感じる傾向にあることが確認できる。以上より、燃焼共鳴の周波数は 4000 Hz 程度の周波数帯を變動なく一定に保つことが快適性を有す条件であると推察される。

3.1.3 燃焼共鳴による燃焼音の良条件検討

3.1.1 項, 3.1.2 項より燃焼共鳴が音質に影響していることが分かり、振幅や周波数の違いによっても差が出ている。そのため、振幅、周波数の良条件および悪条件を組合せた音質評価を行い、燃焼共鳴による燃焼音の快音化の実現が可能であると示すことを目的とする。評価音は、シリンダ内圧変動の波形において、振幅、周波数それぞれに対して最も心地よいと評価された条件と最も心地よくないと評価されたと実験動のものを利用して作成する。また、音圧レベルは全て 65.4dB(A)とする。被験者は 20 代前半男性 12 名である。

評価結果は Fig. 4 であり、良条件と良条件を組み合わせることで 0.8 point もの快適性の向上が確認できる。また、C, D を比較すると、振幅が良条件で周波数が悪条件の場合、実験動より 0.2 ポイント向上することが確認できることから、振幅値変更の方が、周波数変動よりも燃焼音の音質により大きな影響を及ぼしていることがわかる。

以上より、燃焼共鳴の振幅、周波数の変更においてどちらも 3.1.1 項, 3.1.2 項それぞれの結果の良条件に近づけることが、燃焼音の快音化につながるが、周波数変動よりも振幅値を変更したほうがより快適性における影響が大きいことがわかる。

3.2 噴射圧力からの快音化

シリンダ内圧における現象の一つである、多段噴射に着目し、燃焼音のサウンドデザインに取り組む。まず、各噴射による圧力を変更することで快適性の向上を目指す。次に、各噴射の間隔を変更することで快適性の向上を目指す。

3.2.1 噴射圧力による良条件検討

本実験では、プレ噴射、メイン噴射の燃料噴射量による爆発圧力を変更することで燃焼音の音質に快適性を持たせられるかを検討する。評価音は、ディーゼルエンジンの特性上、一回の爆発に噴射する燃料の量が一定であることを考慮する。実験中のシリンダ内圧におけるプレ噴射とメイン噴射の噴射圧力を 100 % とし、常にこの関係は一定に保つようにする。変更幅は最大 30 % の増減となるように設定する。また、音圧レベルは全て 65.4 dB(A)とする。被験者は 20 代前半男性 12 名である。

評価結果は Fig. 5 であり、プレ噴射による燃焼圧力を下げ、プレ噴射による燃焼圧力を上げることで燃焼音の快適性は向上することが確認できる。その中でも、プレ噴射を 20 % 下げた燃焼音が最も快適性が高い。ついで 30 %, 10 % と続くことより、20 % 付近に最も快適性を向上させる条件があることが推測できる。

3.2.2 噴射タイミングによる良条件検討

本実験では、プレ噴射、メイン噴射の噴射タイミングの時

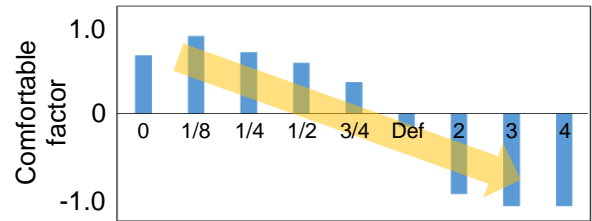


Fig. 2 Evaluation results in resonance

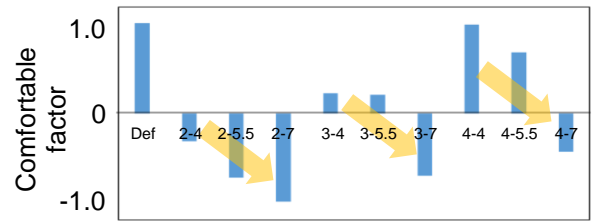


Fig. 3 Evaluation results in frequency

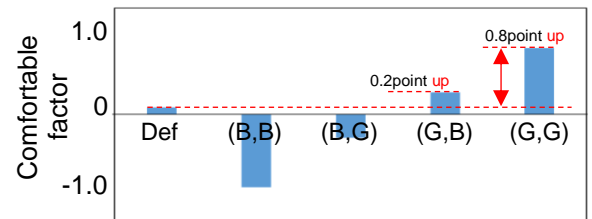


Fig. 4 Evaluation results in combustion resonance

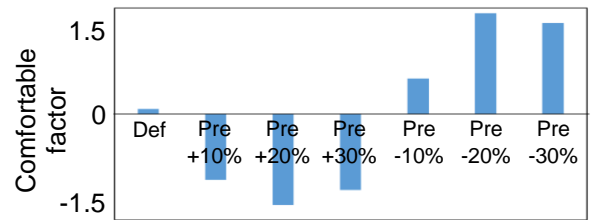


Fig. 5 Evaluation results in pre-mine pressure ratio

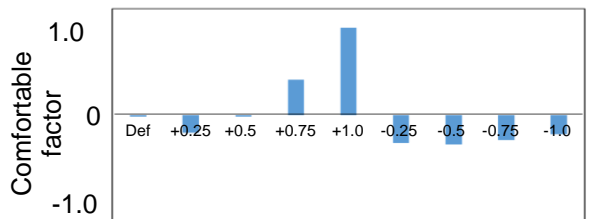


Fig. 6 Evaluation results in pre-mine injection timing

間隔を変更することで、燃焼音の音質に快適性を持たせられるかを検討する。評価音は、噴射タイミングの時間間隔は 1.5 度の範囲でばらつきを有している特性を考慮し、プレ噴射と

メイン噴射の間隔を 0.25 度ずつ前後させ、変化量が最大 1 度となるように設定する。また、音圧レベルは全て 65.4 dB(A)とする。被験者は 20 代前半男性 12 名である。

評価結果は Fig. 6 であり、プレ噴射とメイン噴射の間隔を大きくすることにより燃焼音の快適性は向上することが確認できる。

4. 音響伝達関数による快音化

エンジン構造による燃焼音のばらつきに着目し、各気筒に

おける音響伝達関数や燃焼音の組合せを変え、燃焼音の印象変化を把握することで、良条件および悪条件の要因を解明する。

4.1 燃焼音の変化による印象評価

FRF_A, FRF_C, FRF_D, FRF_B, の順序で爆発を繰り返す実稼働の燃焼音の爆発音質を変更し、燃焼音の種類を変化させた際の印象変化を把握する。さらに、良条件および悪条件を把握し検証する。

4.1.1 音響伝達関数の組み合わせの違いを考慮した音質評価

本評価では、各気筒の燃焼音を入れ替えることで、爆発音質を変更し、印象変化を把握する。

本評価には、Table 1に示す実稼働燃焼音 Defを含め、爆発順序を入れ替えた6種類の評価音を用いる。FRF_Aから順にFRF_B, FRF_C, FRF_Dと爆発する燃焼音を仮定した評価音をF4_aと記す。同様に順序を変え評価音を作成し、全て70 dBAに統一する。被験者は20代男女8名である。

評価結果はFig. 7であり、爆発順序を変更するとF4_a, F4_eのように実稼働燃焼音よりも得点が増加する場合があります。現状の爆発順序より心地よいエンジン音の実現が可能であるといえる。また、F4_b, F4_cのように得点が減少する場合があります。燃焼音の音質には、各気筒の爆発順序による良条件、悪条件が存在していることが推測される。

4.1.2 燃焼音の差異による印象変化

次に、使用する音響伝達関数の種類を減らし、サイクル内の燃焼音のばらつきを少なくすることで、印象変化を把握する。

本評価には、Table 2に示す実稼働燃焼音 Defを含め、音響伝達関数を変更した7種類の評価音を用いる。音響伝達関数1種類のみを用いた場合、FRF_Aから順にFRF_A, FRF_A, FRF_Aと爆発する燃焼音を仮定した評価音をF1_aと記す。また、音響伝達関数2種類を用いた場合、FRF_Aから順にFRF_A, FRF_B, FRF_Bと爆発する燃焼音を仮定した評価音をF2_aと記す。同様に使用する音響伝達関数を変え評価音を作成する。

評価結果はFig. 8であり、使用する音響伝達関数により燃焼音の印象が変化することが確認できる。これは音響伝達関数3種類を用いた音質評価でも同様の結果を得ることができた。また、F1_aの得点は大きく低下し、サイクル内で全く同じ燃焼音が再生されるより、適度なばらつきを有すると心地よさが増加することが確認できる。

ここで、F2_c, F2_eの得点が低下し、両評価音に含まれるFRF_Dが心地よさを低下させている要因の可能性がある。しかし、F2_fではプラスであることから、各気筒から発生する燃焼音の印象より、1サイクルにおける連続性の方が心地よ

Table 1 Evaluation sound list changing FRF order

| Sound | FRF order | Sound | FRF order |
|-------|--------------|-------|--------------|
| F4_a | FRF(A→B→C→D) | Def | FRF(A→C→D→B) |
| F4_b | FRF(A→B→D→C) | F4_d | FRF(A→D→B→C) |
| F4_c | FRF(A→C→B→D) | F4_e | FRF(A→D→C→B) |

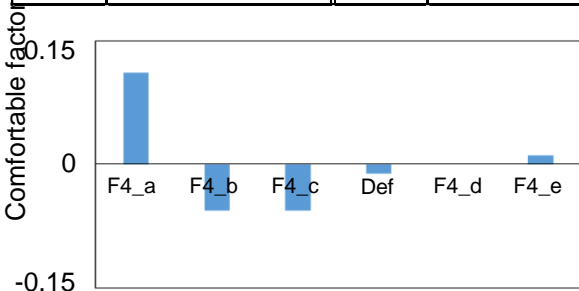


Fig. 7 Change of impression by changing order of FRF

Table 2 Evaluation sound list of changing FRF combination

| Sound | FRF order | Sound | FRF order |
|-------|--------------|-------|--------------|
| F1_a | FRF(A→A→A→A) | F2_d | FRF(B→B→C→C) |
| F2_a | FRF(A→A→B→B) | F2_e | FRF(B→B→D→D) |
| F2_b | FRF(A→A→C→C) | F2_f | FRF(C→C→D→D) |
| F2_c | FRF(A→A→D→D) | | |

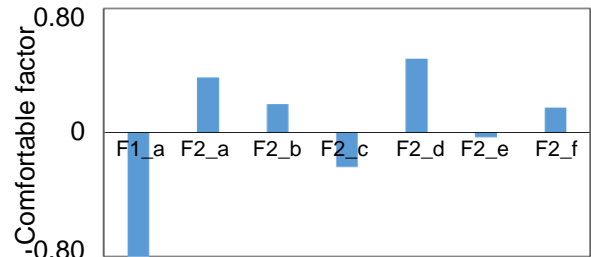


Fig. 8 Change of impression by changing FRF combination one and two kinds

さに影響していると考えられる。

さらに、一対比較法の評価値がFig. 2より大きくなっていることから、爆発順序を変更した評価音より、音質の変化の方が被験者は聞き分けていることが推察できる。

4.2 良条件および悪条件の検討

4.1節にて、音響伝達関数の種類を減らした場合、爆発順序よりはっきりとした良条件および悪条件が存在していた。本節では、音質に寄与の大きい周波数帯選定を行い、各爆発での複素平面上における各気筒の特性に着目した良条件および悪条件を検討する。

4.2.1 音質に寄与する周波数帯選定

本実験では、燃焼音の音質に寄与している周波数帯を把握する。

本評価には、Table 3に示すFRF_Aを2000 Hzごとに切り出し、全気筒に同じ音響伝達関数を用いて作成した6種類の評価音を用いる。0-2000 HzまでをすべてFRF_Aにおける燃焼音とした評価音をFRF_0-2と記す。同様に、FRF_Aを使用する周波数帯を変え評価音を作成する。SD法により7段階、12の形容詞対を用いて、Defを基準とした相対評価を行う。

因子分析より、変動感やばらつき感を表す変調因子、エンジン音らしさを表すエンジン因子、音色の良さや快適性を表

Table 3 Evaluation sound list

| Sound | FRF order | Sound | FRF order |
|---------|-----------------------|----------|------------------------|
| Def | FRF(A→C→D→B) | FRF_4-6 | All 4000-6000Hz FRF_A |
| FRF_0-2 | All 0-2000Hz FRF_A | FRF_6-8 | All 6000-8000Hz FRF_A |
| FRF_2-4 | All 2000-4000Hz FRF_A | FRF_8-10 | All 8000-10000Hz FRF_A |

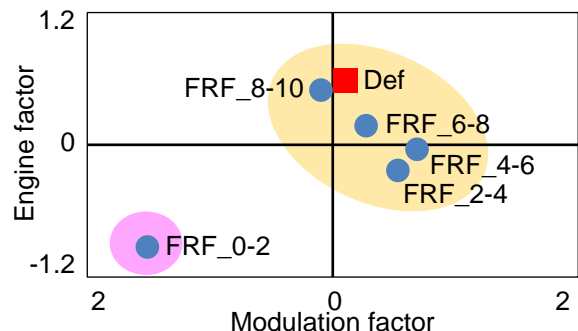


Fig. 9 Evaluation result by SD method

す快適因子の3因子が抽出できた。エンジン因子と変調因子の因子得点をFig. 9に示す。本評価では、低周波数帯から高周波数帯になるにつれ、エンジン音らしきが増加する傾向が確認できる。つまり、高周波帯の音響伝達関数の違いは燃焼音の音質への寄与が小さいといえる。よって、0-2000 Hzの低周波帯における音質が最も大きく寄与し、検討すべき周波数帯であることが推察できる。以下の検討では、1500 rpmにおける1次周波数成分である25 Hzに着目する。

4.2.2 爆発順序の振幅位相による印象変化

一定回転時の燃焼音において、1サイクルは各気筒の爆発時には他の気筒の爆発による減衰音が重なり合い、各気筒の寄与が異なる。例えば、FRF_A, FRF_C, FRF_D, FRF_Bの順で爆発する実稼動燃焼音においては、FRF_Aでの爆発時、その直前のFRF_Bの減衰音が最も多く含まれ、FRF_D, FRF_Cの順で少なくなる。そこで、各気筒での爆発時を区分し、各区分の1次周波数成分の振幅位相関係を算出し、合計する。そして、各爆発の合計値の複素平面上における位置関係を変化させ、燃焼音が人に与える心地よさが増減する条件を把握する。

本評価では、Fig. 8において最も心地よさの得点が高かったF2_dを基準に検討を進める。評価音は、F2_dをFRF_BBCC_Normalと記した評価音を含め、振幅位相関係を変更した4種類の評価音を用いる。複素平面上において各周波数成分が第3象限、第4象限に一直線になる評価音をFRF_BBCC_Aと記す。また、一つの区間のみが他の周波数成分と異なる象限にある評価音をFRF_BBCC_Bと記し、FRF_BBCC_Normalよりも各周波数成分が第1象限付近に偏っている評価音をFRF_BBCC_Cと記す。評価方法は一対比較法を用い、被験者は20代8名である。

評価結果はFig. 10であり、FRF_BBCC_Aが最も心地よさが失われることが確認できる。このことより、1次周波数成分の存在する象限や、その順序が描く軌跡が音質に影響を及ぼしていることが確認できる。また、FRF_BBCC_BよりもFRF_BBCC_Cの心地よさが増加することから、1次周波数成分の存在する象限より描く軌跡の方が音質に寄与していることが推測できる。FRF_BBCC_Aでは、被験者よりざらざら感が増して不快な音との意見が得られたため、本評価は、聞き分け可能な程度に音質が変更され、音質への寄与が高い。

以上の結果より、複素平面上における各爆発時の1次周波数成分が有意な規則性を持ち、サイクル内の連続性が保たれていることが燃焼音の印象に寄与しており、心地よさの増減の条件としての可能性があることが推察できる。

4.3 位相関係に着目した良条件および悪条件の検証

4.2.2項にて、各爆発時の1次周波数成分が各現象に存在する有意な規則性があり、サイクル内の連続性が保たれていることが良条件であることを示した。本節では4.1.2項で得られた印象評価を検討する。

4.2.2項において、1次周波数成分のサイクル内での規則性や位相関係が燃焼音の印象に影響を及ぼしていることが把握でき、心地よさの条件としての可能性があることを示した。そこで、4.1.2項にて作成した燃焼音の印象評価を利用し、実際の音でも同様の傾向が見られるかを確認する。

各音源の1次周波数成分における位相関係をFig. 11に示す。Fig. 8に示した印象評価と比較すると、心地よさが低下するFig. 11(a), Fig. 11(c)の燃焼音には、各爆発での1次周波数成分が1つの象限に集まっていることや、爆発順序の描く軌跡が一直線になり、サイクル内での連続性が崩れていることが分かる。一方、心地よさが増加するFig. 11(b), Fig. 11(d)の燃焼音では、爆発順序の描く軌跡が一定の間隔で各象限へ推移していることが確認できる。つまり、燃焼音は各爆発での1次周波数成分が有意な規則性を持ち、サイクル内

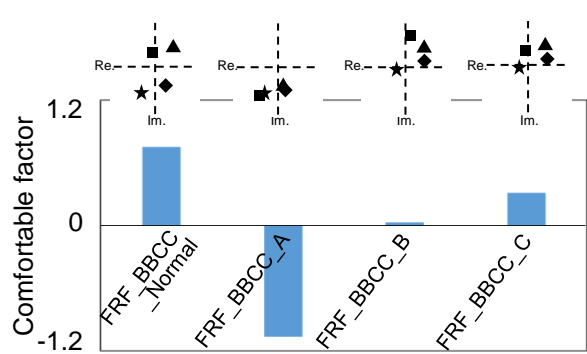


Fig. 10 Change of impression by changing complex plane-shaped frequency characteristic

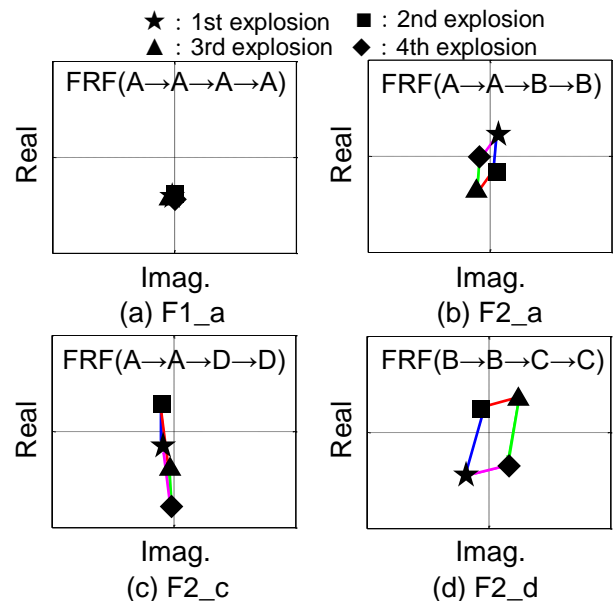


Fig. 11 Magnitude at 25Hz in each category

の連続性が保たれていることが良条件として挙げることができる。

5. 研究成果

- (1) シリンダ内圧の現象分析を行い、各現象の燃焼音音質への寄与率を把握することができた。
- (2) シリンダ内圧における燃焼共鳴、噴射圧力のパラメータを変更することで燃焼音の快音化を実現させ、良条件および悪条件の提示を行った。
- (3) エンジンの各気筒内圧と評価点間の音響伝達関数の違いにより、燃焼音の音質が変化することを示し、燃焼音の良条件および悪条件の可能性を示した。
- (4) 各爆発時の1次周波数成分を複素平面に図示し、有意な規則性を持ち、サイクル内の連続性が保たれていることが良条件の指標となることを示した。

参考文献

- (1) Tamer Badawy et al, "Detection of Combustion Resonance Using an Ion Current Sensor in Diesel Engines" American Society of Mechanical Engineers, (2012), pp. "052802-1" - "052802-9"
- (2) 小澤恒 他, "ディーゼルエンジンの燃焼騒音と燃費の同時改善(第3報)", 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 101, (2014), pp. 15-20.
- (3) 上兼拓巳 他, "気筒間ばらつきを考慮した模擬ディーゼルエンジン燃焼音の印象評価", 日本音響学会講演論文集(春), (2016), 2-4-11.