

燃料・燃焼制御によるディーゼル燃焼の低エミッション化の研究動向

低温ディーゼル燃焼のポテンシャルと課題



北海道大学大学院工学研究科
小川 英之

低酸素・低温ディーゼル燃焼 — 超高EGRによる無煙化 —

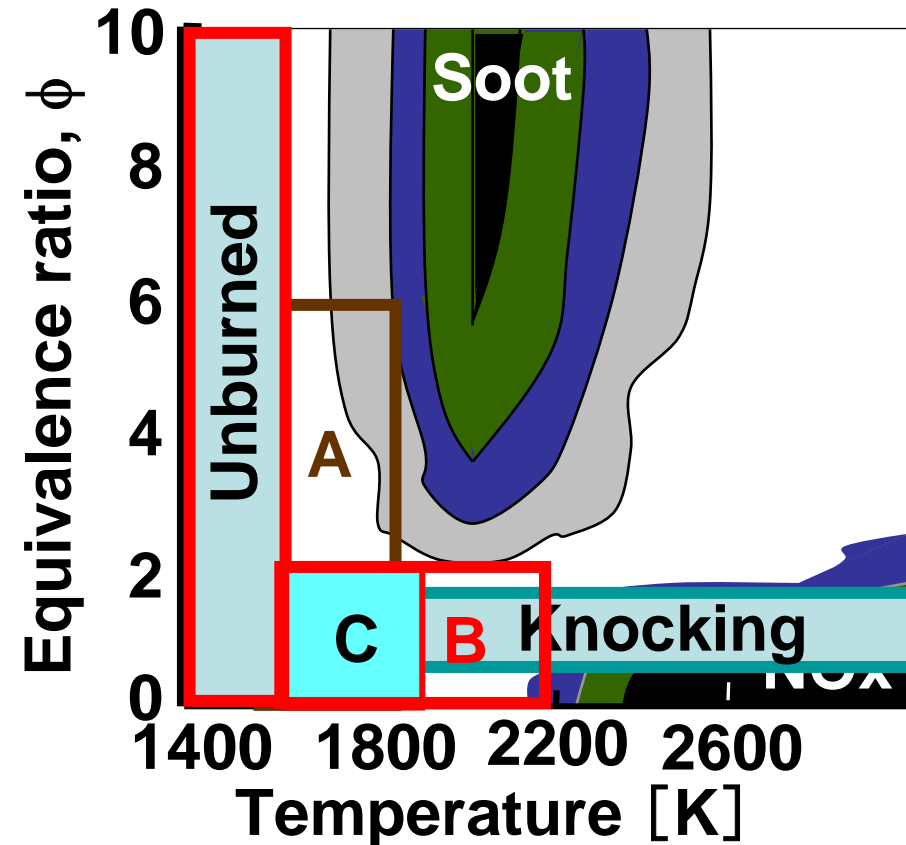
超高EGR

- ・ 低温化によるスート生成の抑制
- ・ 着火遅れ増加による予混合化

予混合圧縮着火燃焼

- ・ ノッキング
- ・ 通常燃焼との併用
 - ➡ 早期噴射の限界
 - ➡ 上死点近傍噴射
 - ➡ 高EGRによる着火遅れの確保とノッキングの回避

スートとNOxの ϕ -Tマップ



C: スーパークリーン領域

要は、いかにスーパークリーン領域を広い運転条件で実現できるか

酸化触媒のみによる後処理が可能
= できる限りDPNR, SCRは使用しない
できればDPFも

- NOxおよびISFは燃焼側で抑える
超低NOx (< 10 ppm)
無煙 (< 0 % in Bosch)
- SOF, HC, COは後処理に依存

Engine specification

Single cylinder

Four-stroke cycle

Direct-injection diesel engine w/ common rail

110 mm in bore diameter, 106 mm in stroke

1,007 cm³ in stroke volume

14, 16, 18 of compression ratio

Operating conditions

1,320 rpm

22 ~ 32 ~ 41 mm³/stroke of fuel quantity

(0.35 ~ 0.54 ~ 0.73 MPa of IMEP)

80°C of cooling water temperature

40 ~ 120 MPa of fuel injection pressure

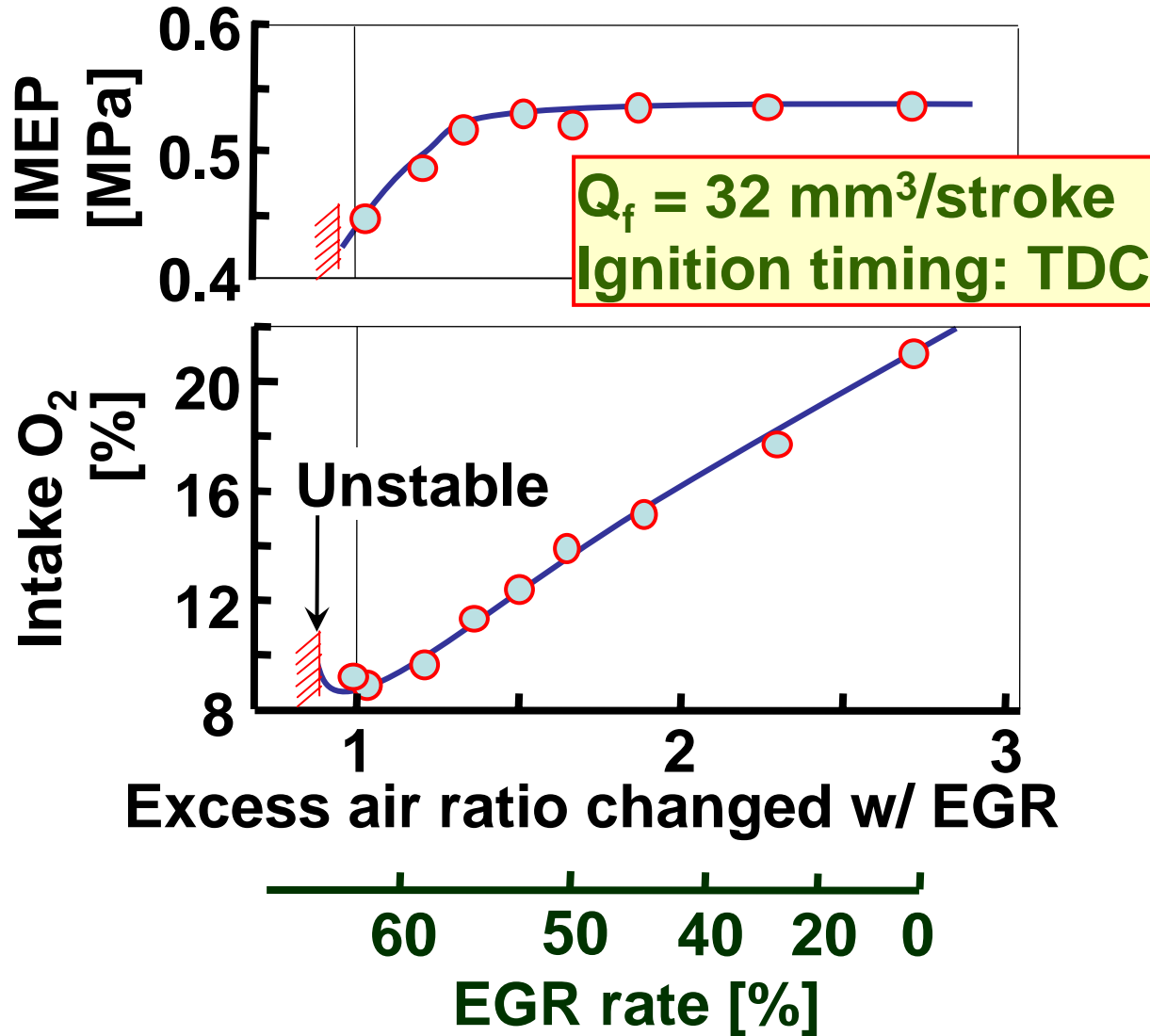
Ignition timing: TDC controlled w/ injection timing

**EGRによる空気過剰率(吸気酸素濃度)
低下時の排気特性および機関性能
— 一般的特性 —**

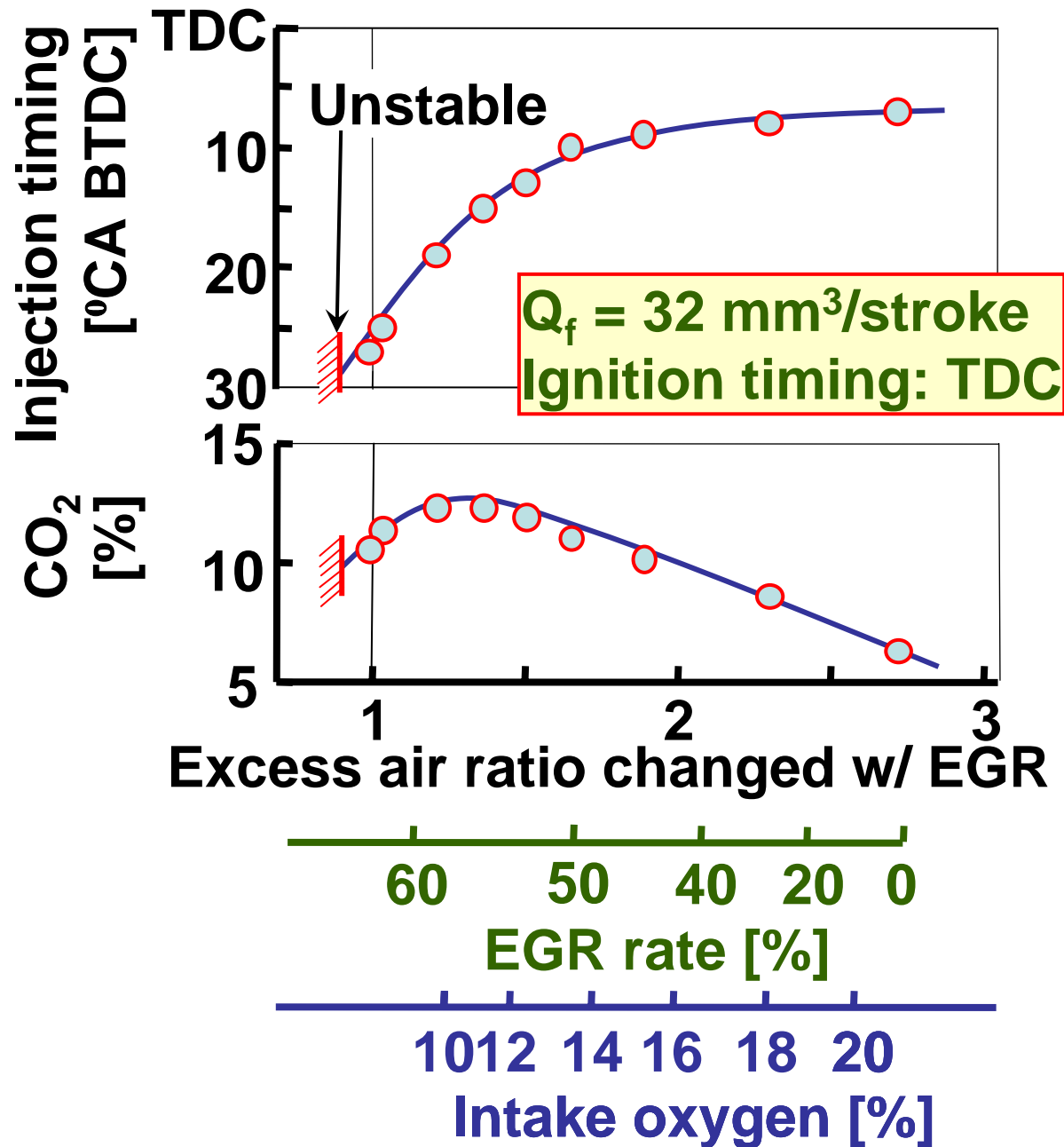
**燃料噴射量: 32 mm³/stroke
(IMEP: 0.54 MPa)**

着火時期: 上死点

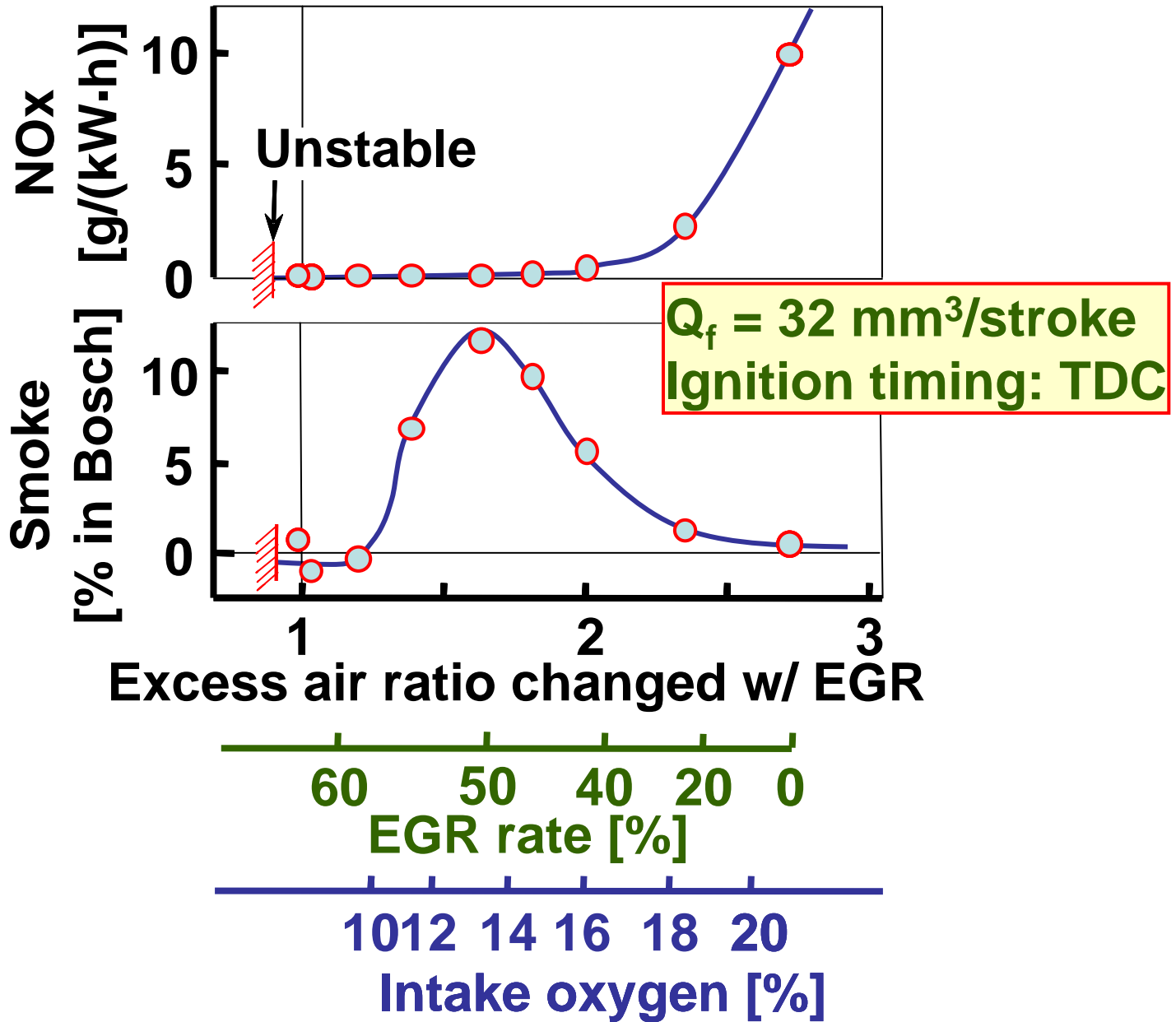
EGRによる空気過剰率低下と図示平均有効圧および吸気酸素濃度



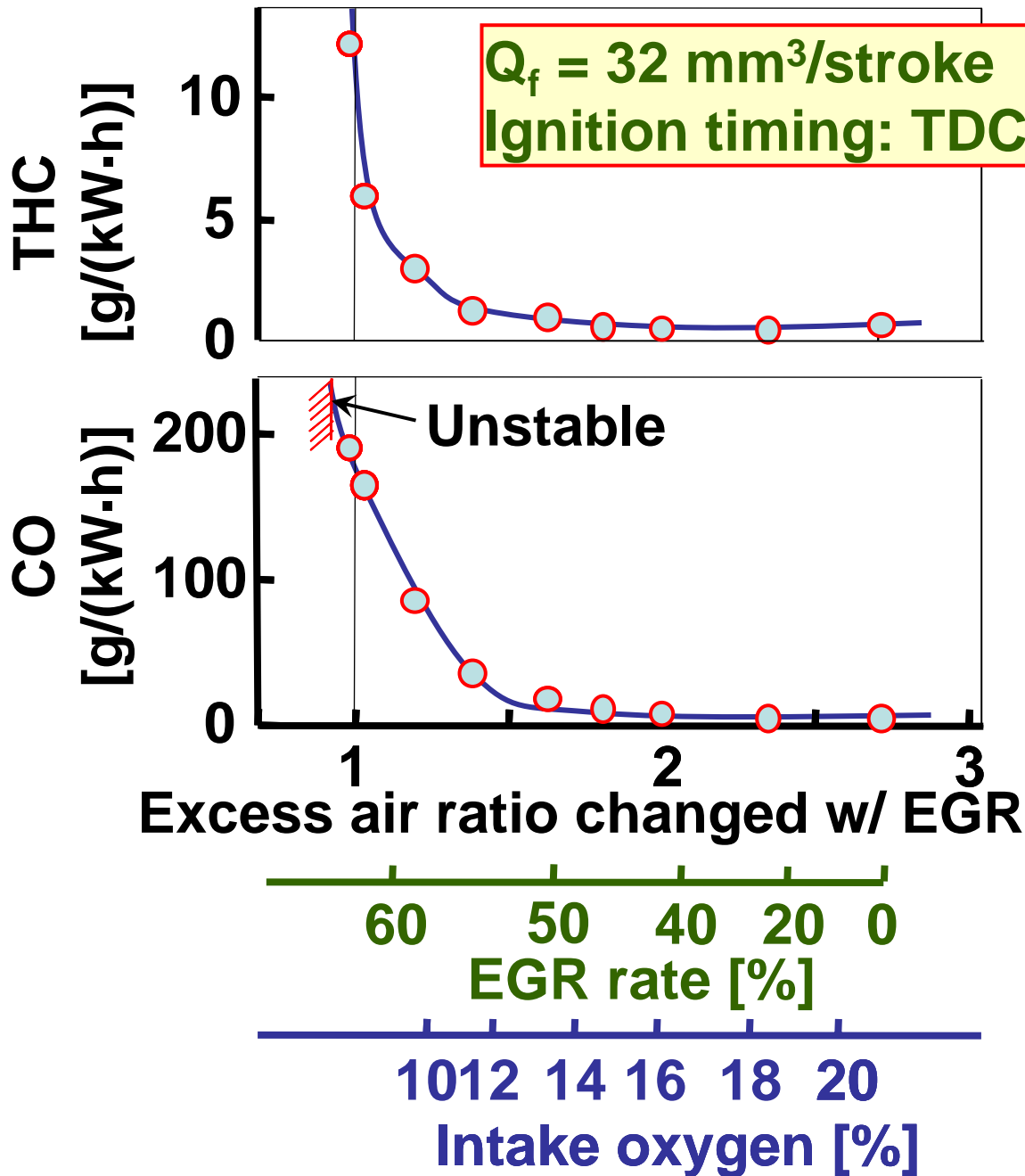
EGRによる空気過剰率低下と燃料噴射時期および排気CO₂濃度



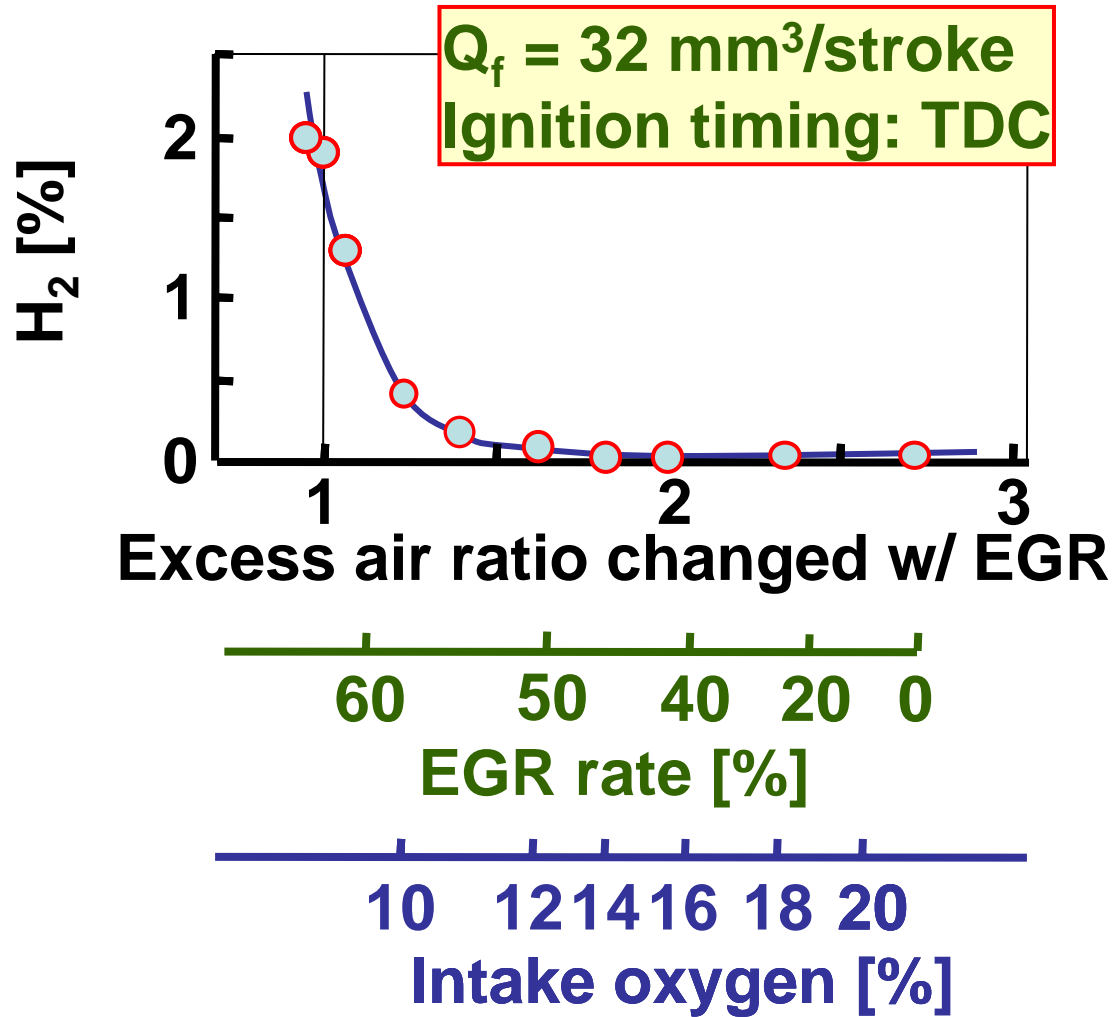
EGRによる空気過剰率低下とNOxおよび黒煙



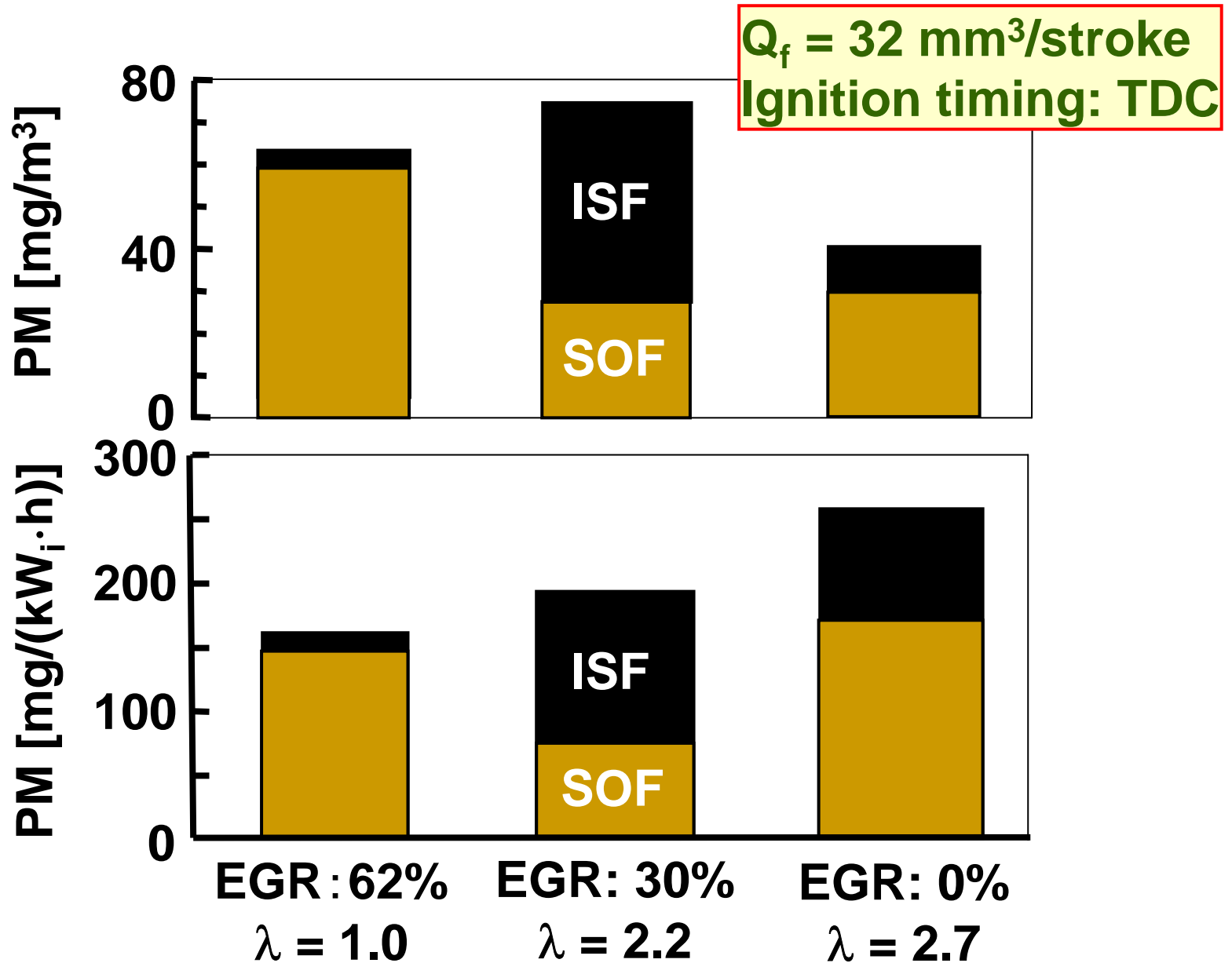
EGRによる空気過剰率低下とTHCおよびCO



EGRによる空気過剰率低下と排気水素濃度

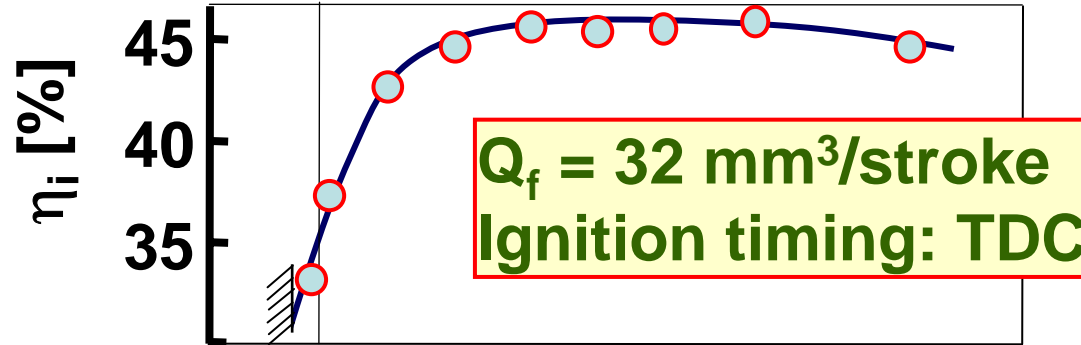


EGRによる空気過剰率低下とPM, SOF, およびISF

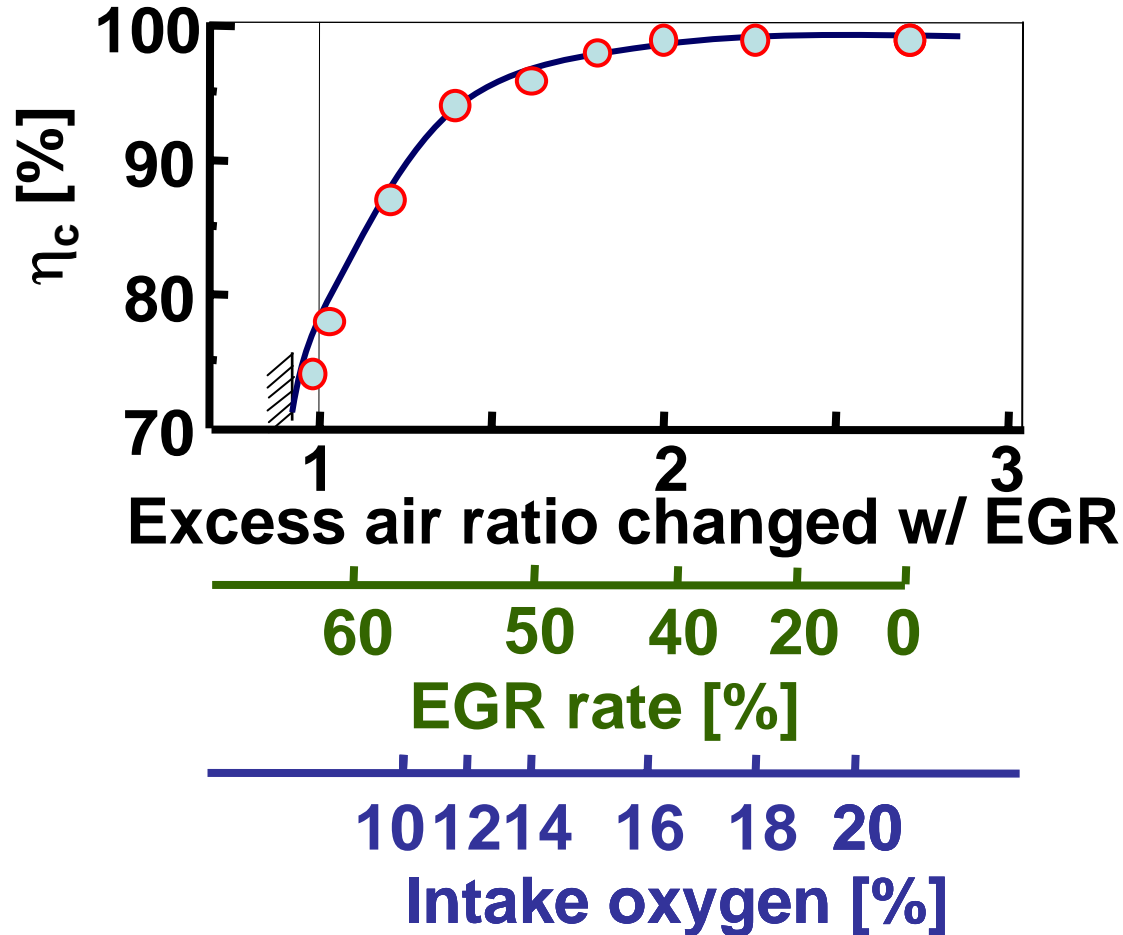


EGRによる空気過剰率低下と図示熱効率および燃焼効率

Indicated thermal efficiency



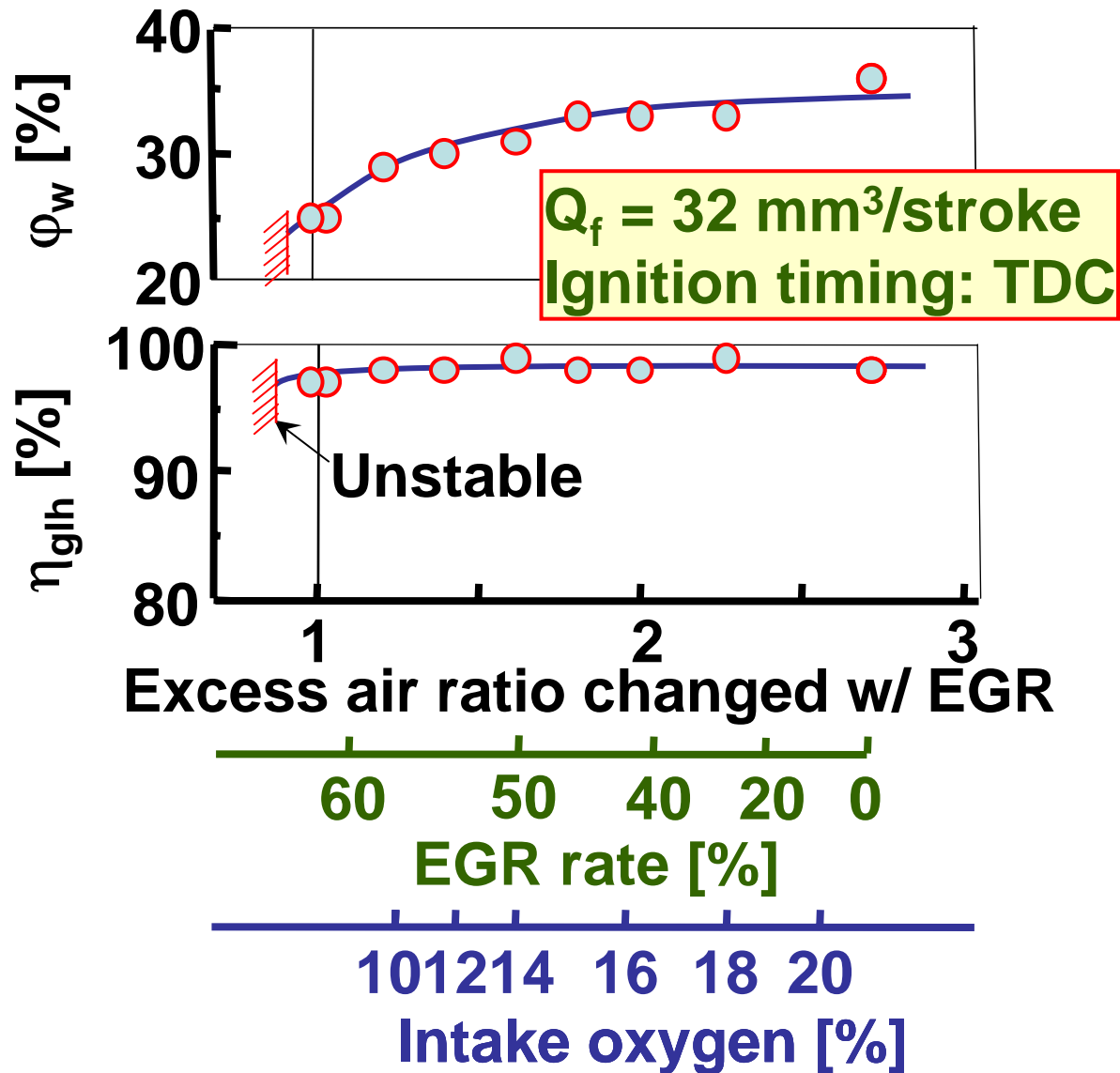
Combustion efficiency



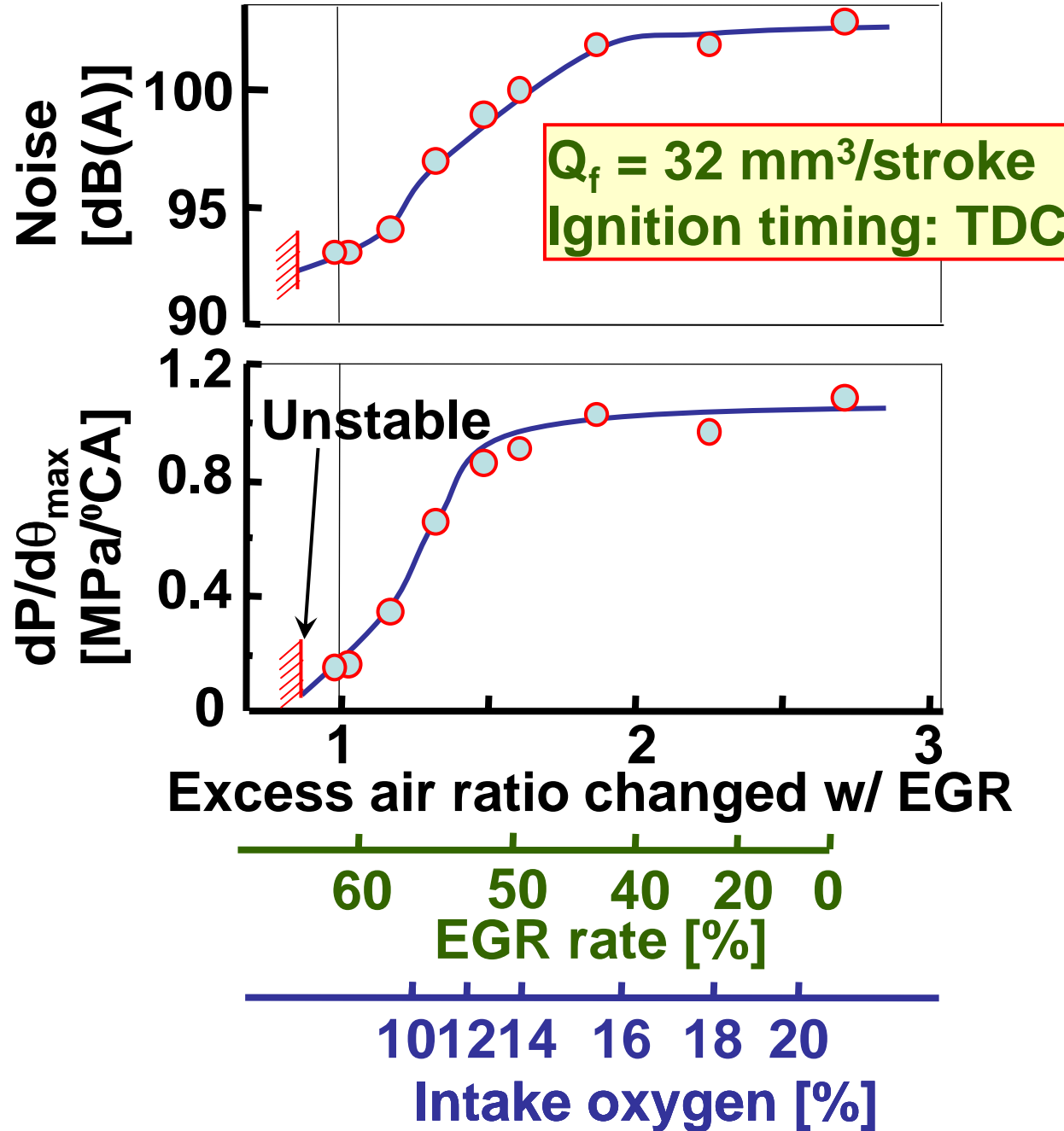
EGRによる空気過剰率低下とTHCおよびCO

Degree of
constant volume
heat release

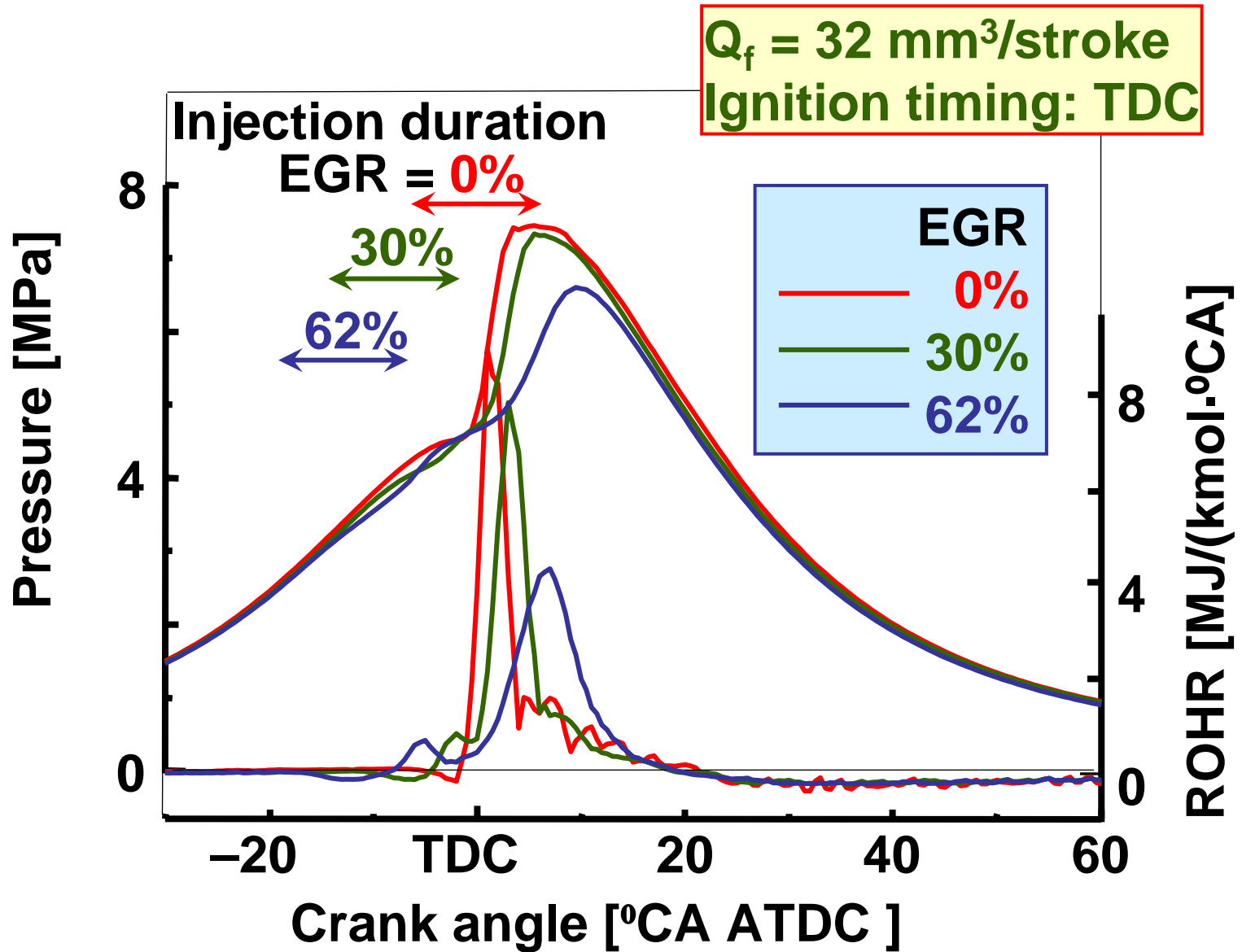
Cooling
loss



EGRによる空気過剰率低下と機関騒音および圧力上昇率



超高EGRによる低酸素予混合化ディーゼル燃焼の様態

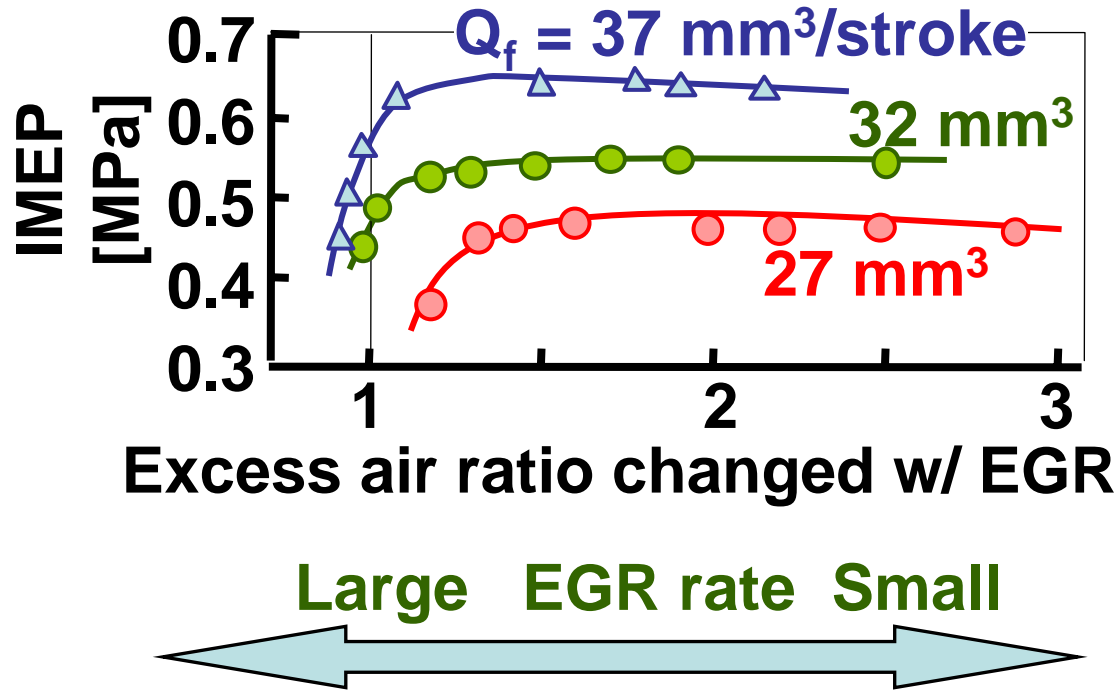


EGRによる空気過剰率(吸気酸素濃度)
低下時の排気特性および機関性能
— 燃料噴射量の影響 —

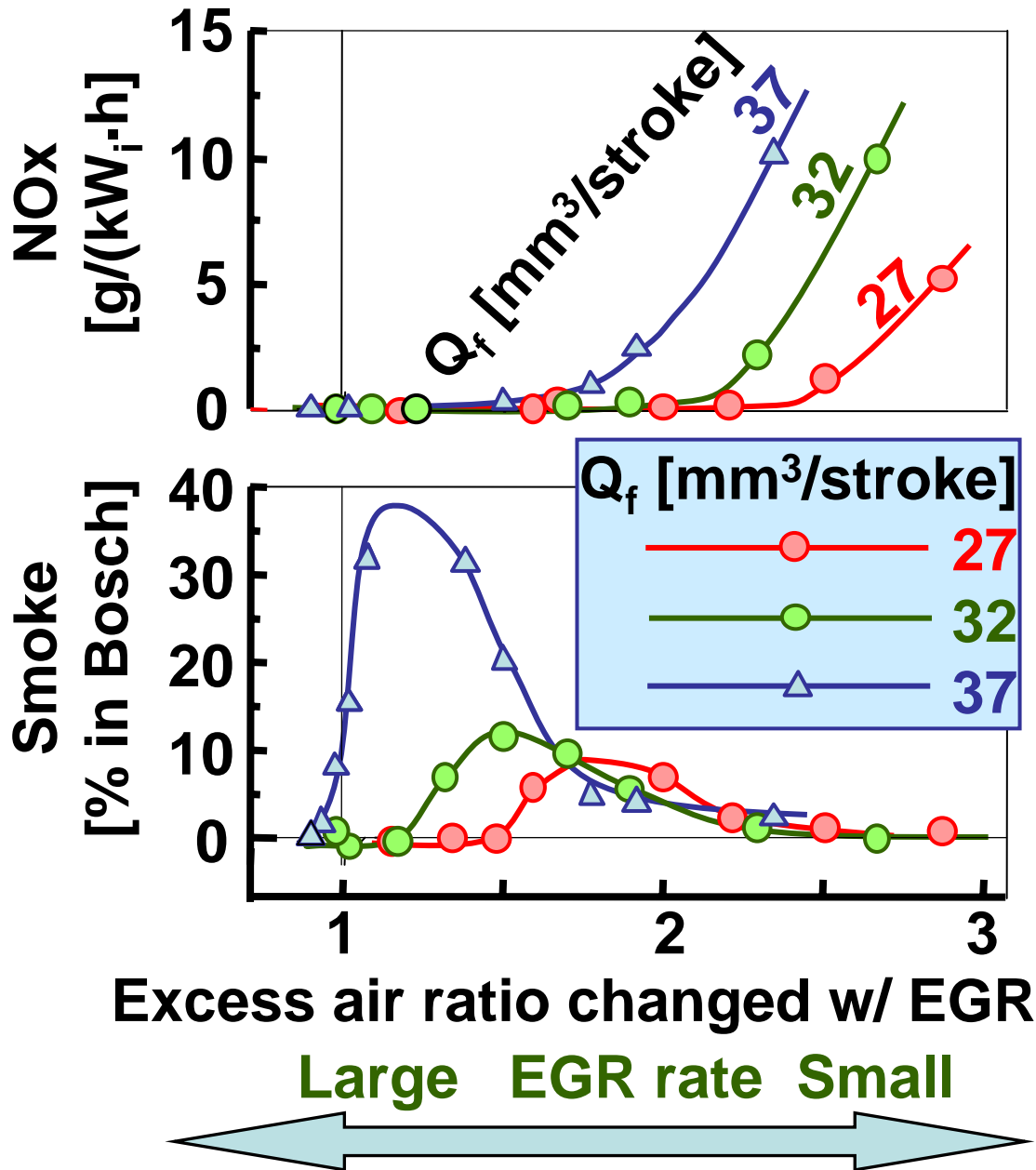
22 ~ 32 ~ 41 mm³/stroke
(0.35 ~ 0.54 ~ 0.73 MPa of IMEP)

着火時期: 上死点

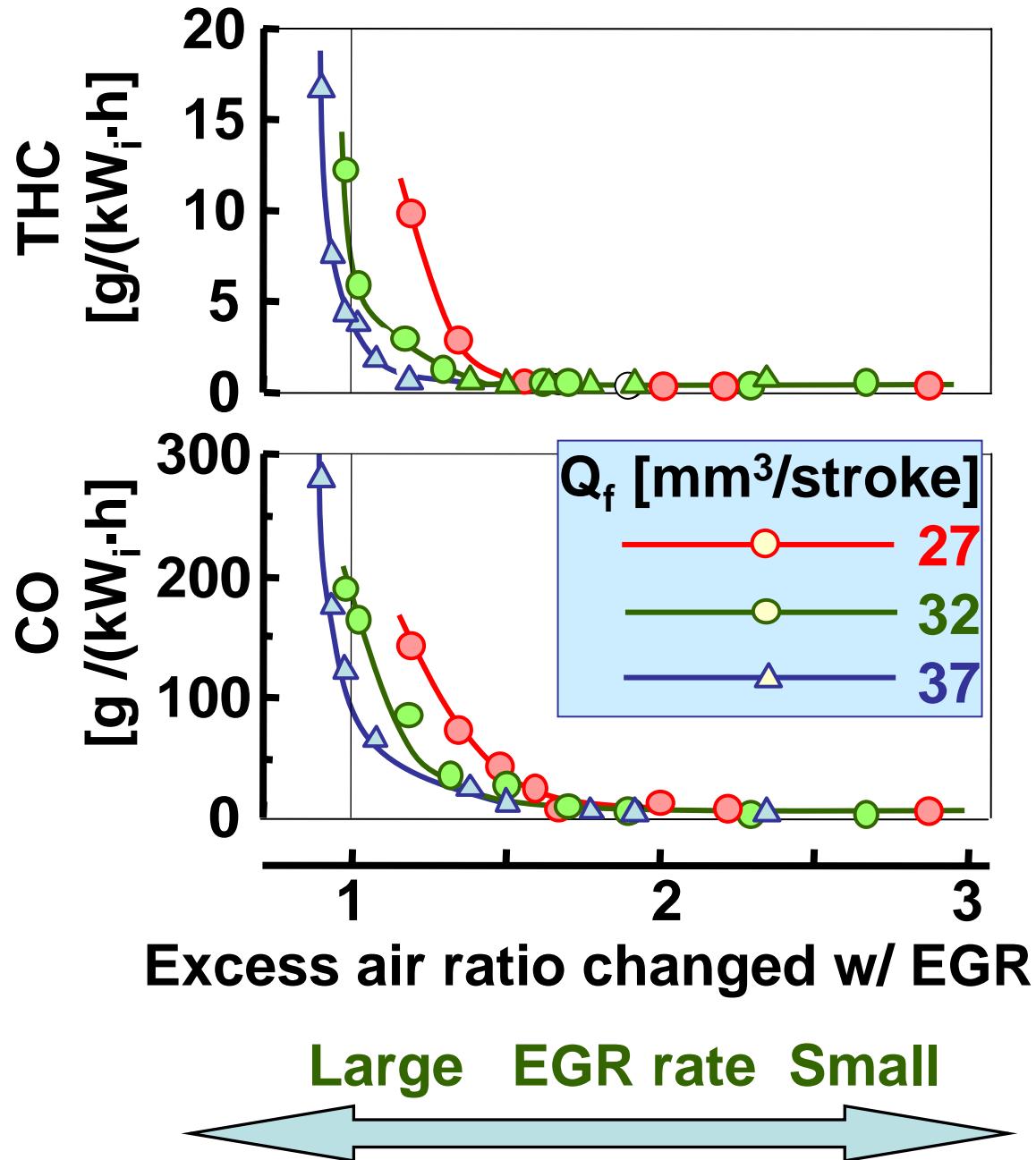
各燃料噴射量における空気過剰率に対する図示平均有効圧



各燃料噴射量における空気過剰率に対するNOxおよび黒煙

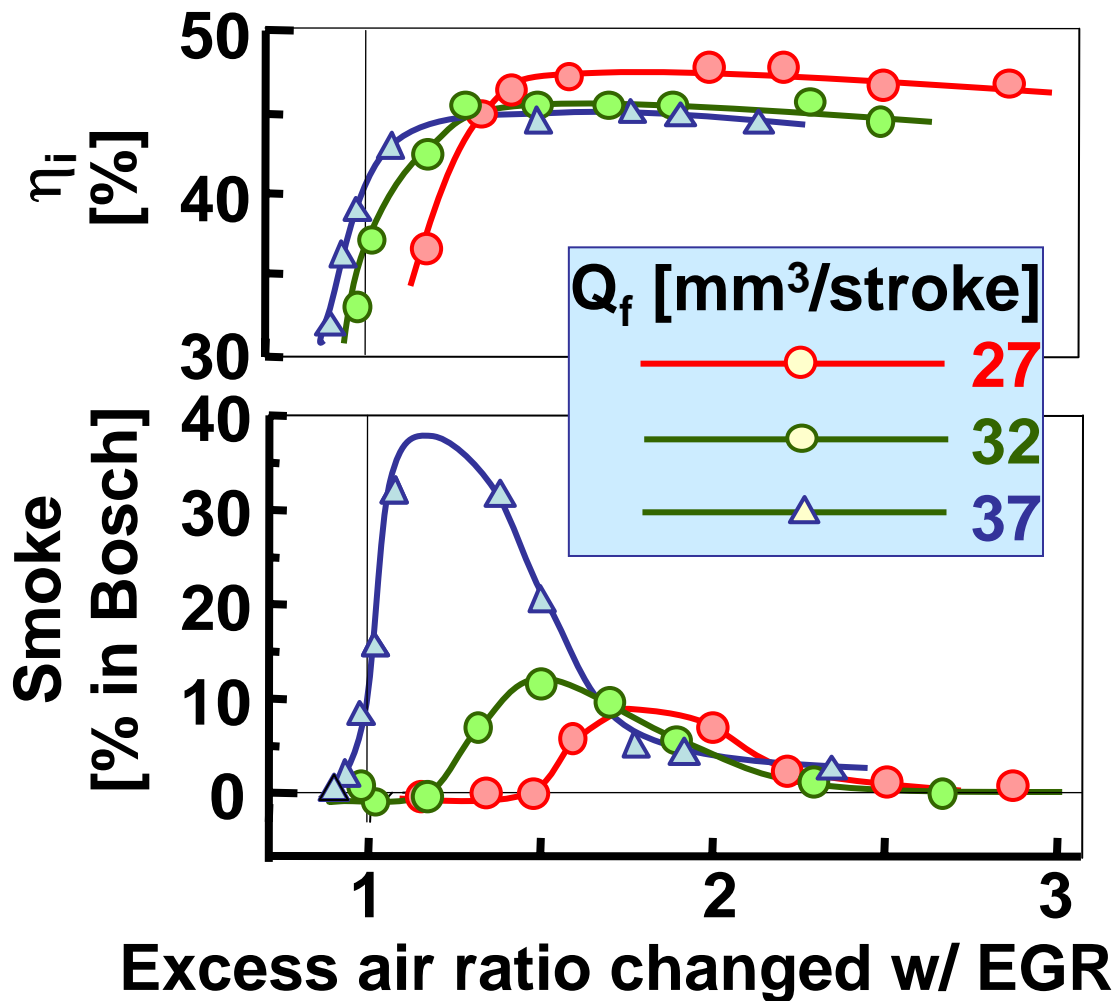


各燃料噴射量における空気過剰率に対するTHCおよびCO



各燃料噴射量における空気過剰率に対する図示熱効率および黒煙

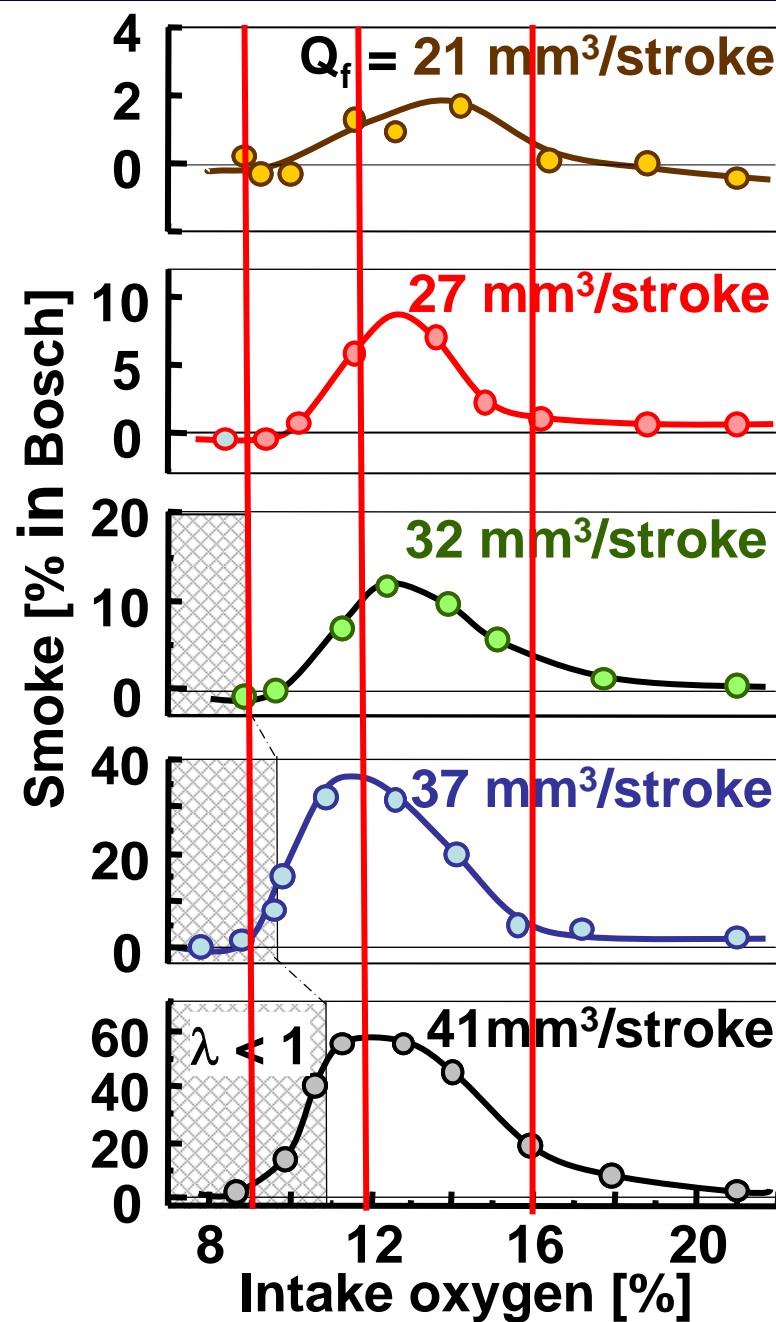
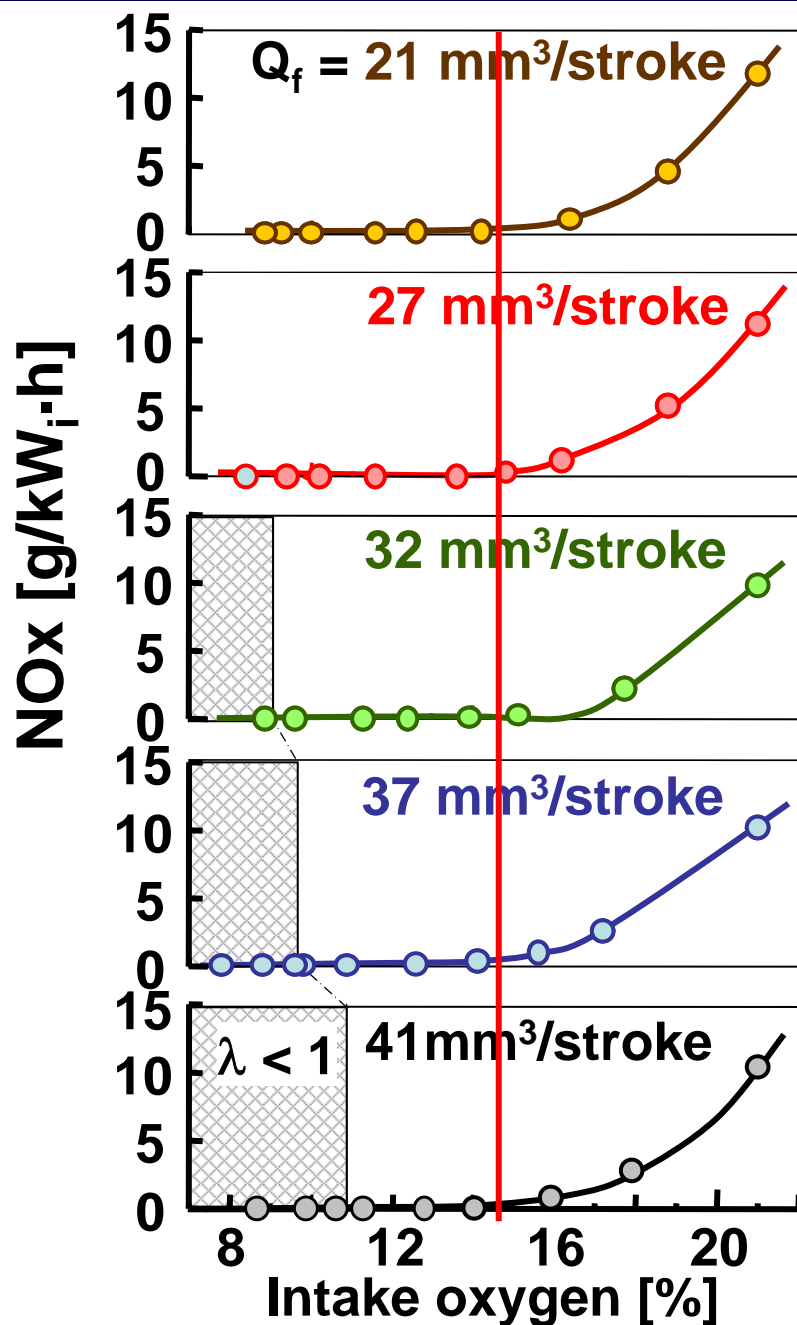
Indicated
thermal
efficiency



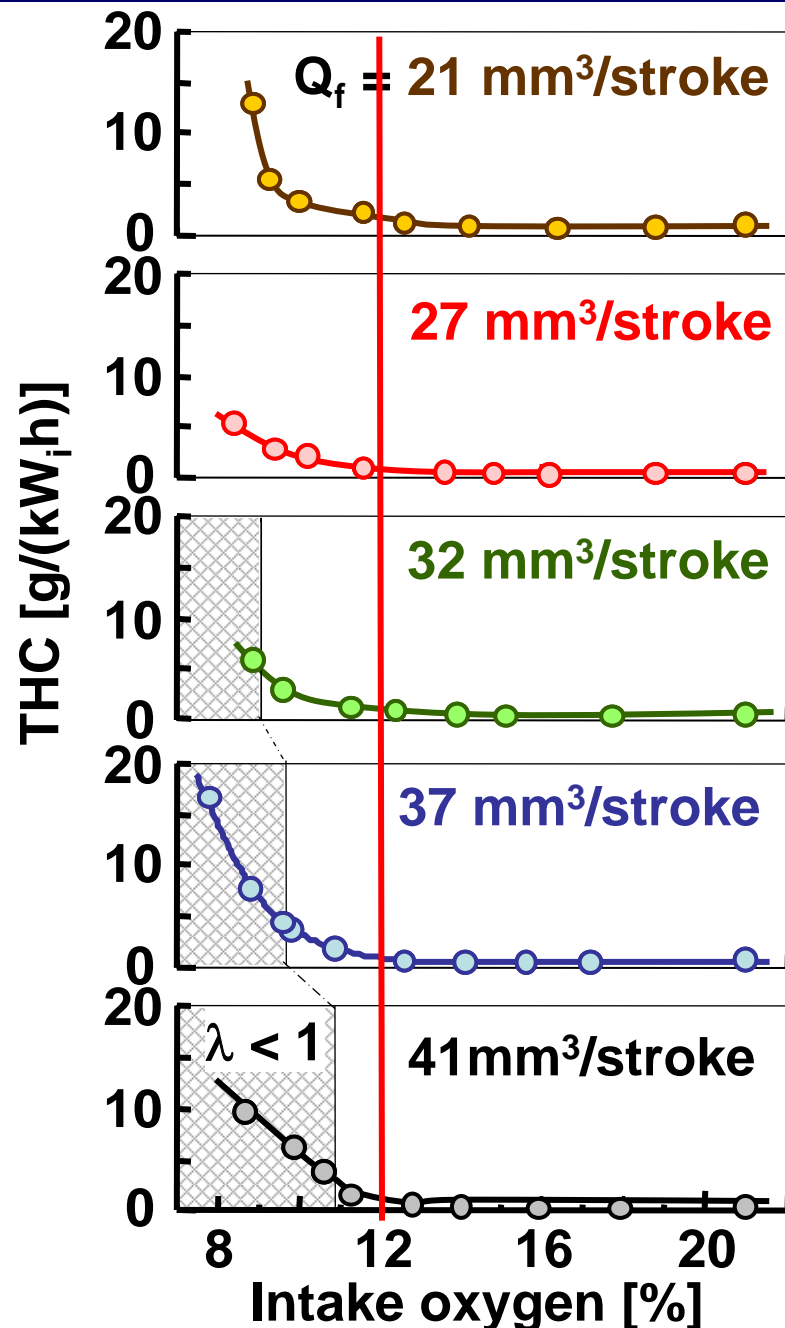
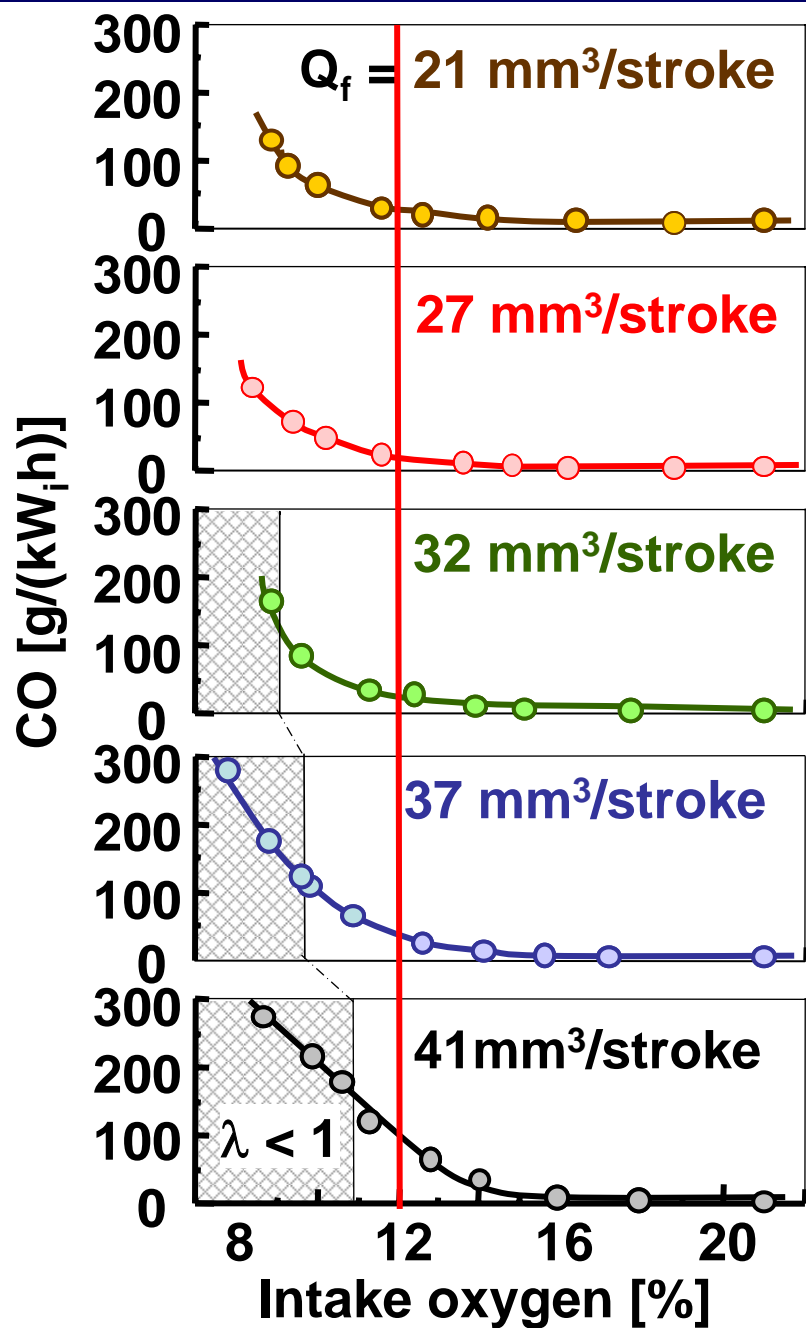
Large EGR rate Small



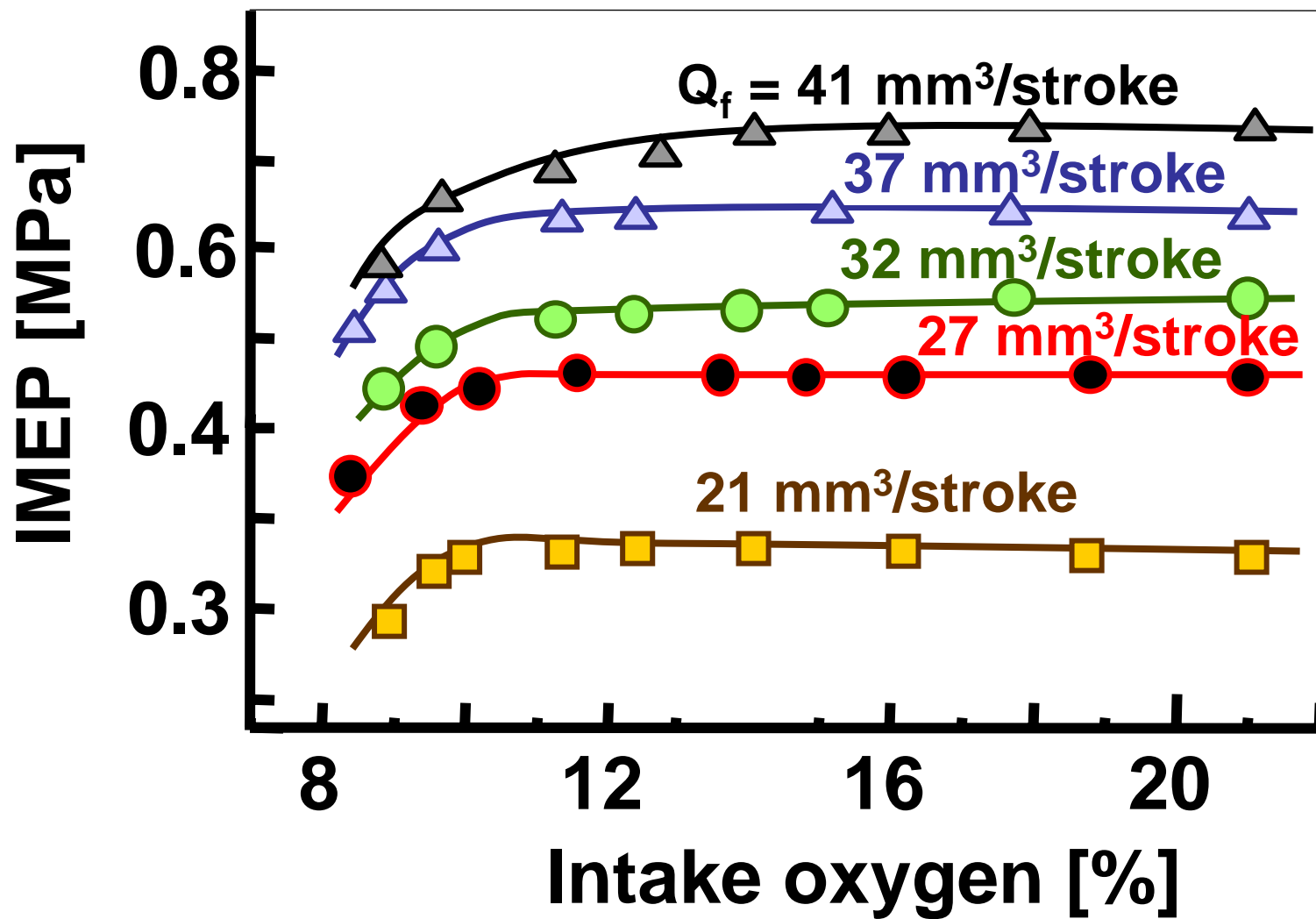
各燃料噴射量における吸気酸素濃度に対するNOxおよび黒煙



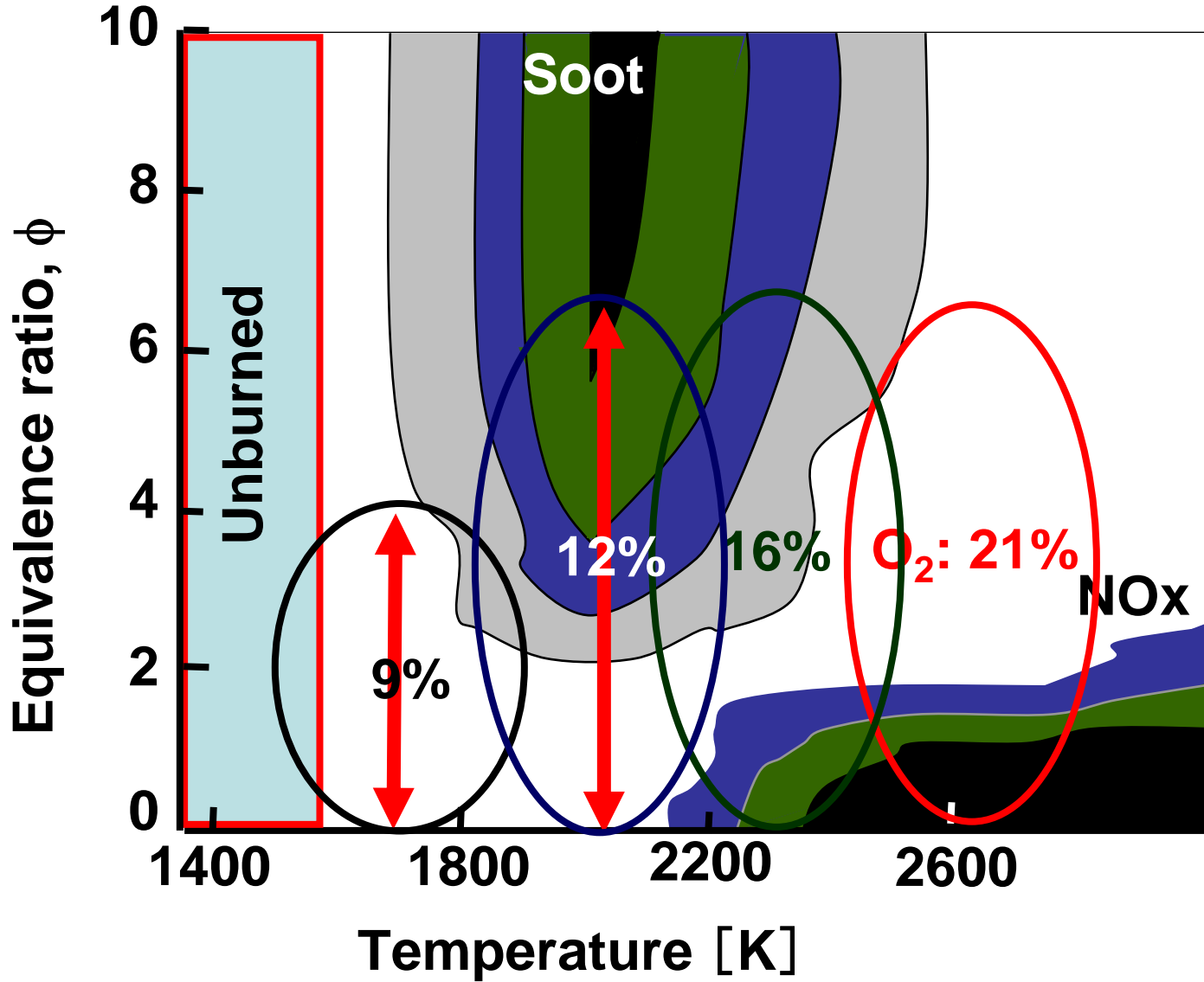
各燃料噴射量における吸気酸素濃度に対するCOおよびTHC



各燃料噴射量における吸気酸素濃度に対する図示平均有効圧



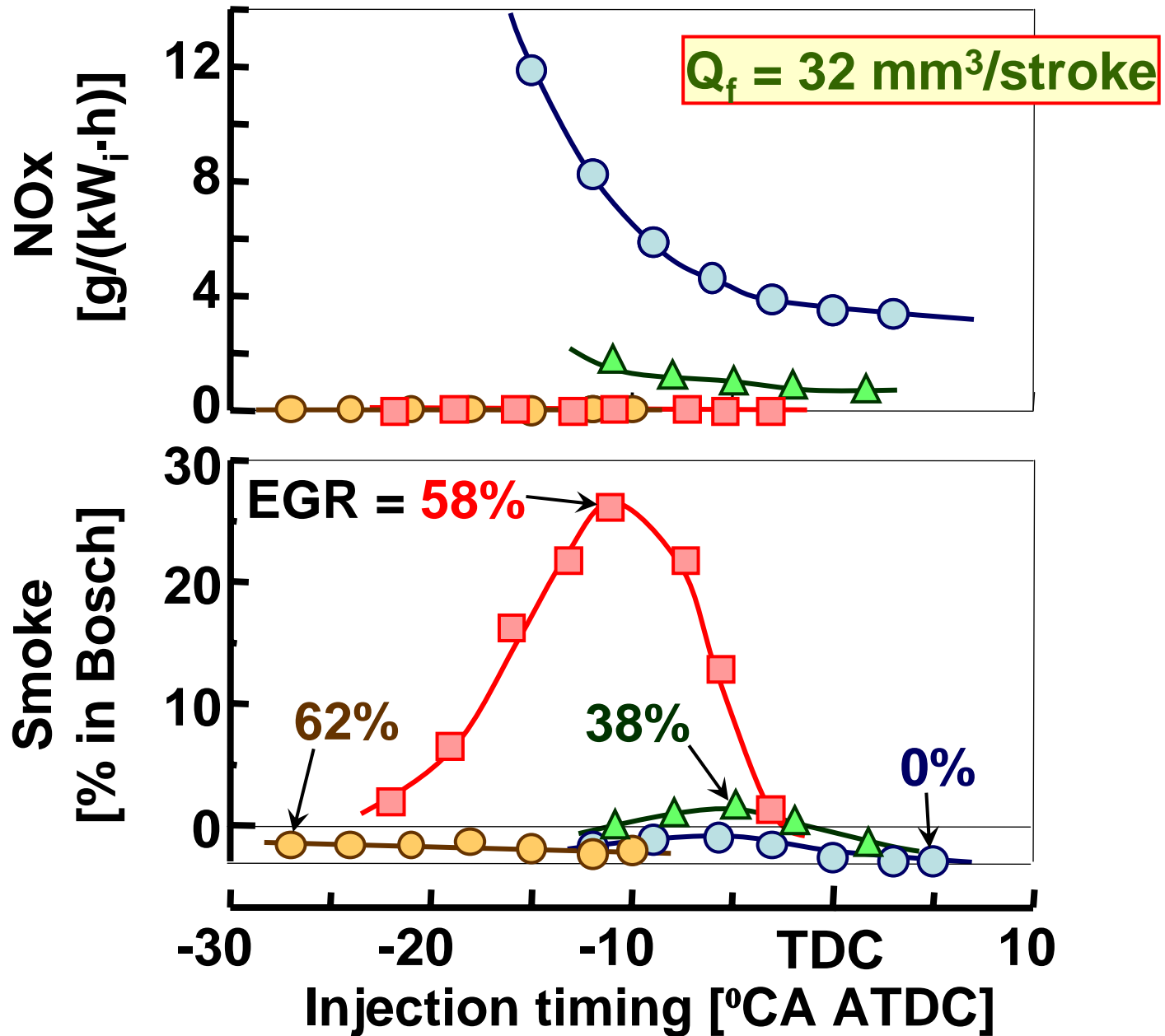
スートと NOxの当量比－温度($\phi - T$)線図



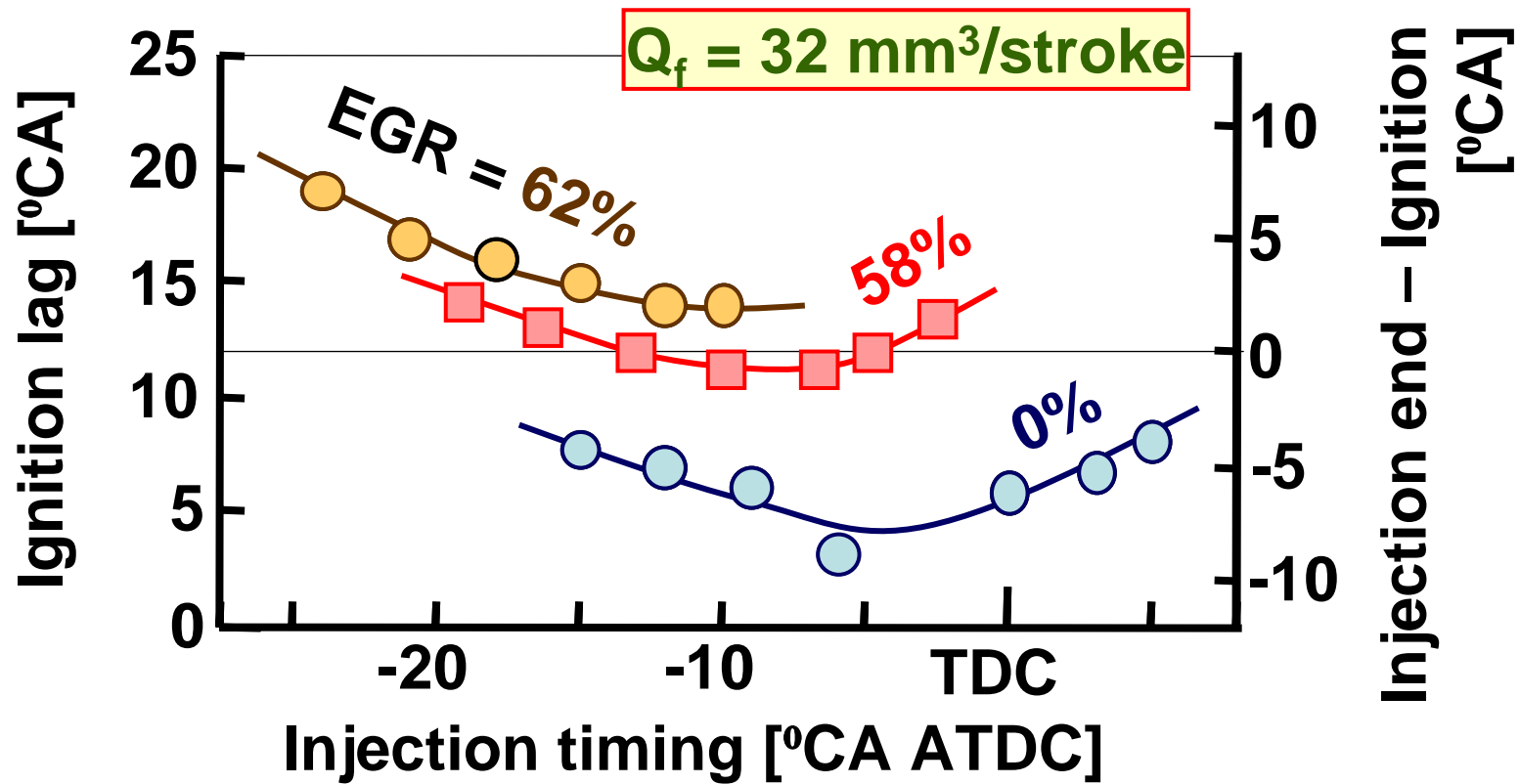
**EGRによる空気過剰率(吸気酸素濃度)
低下時の排気特性および機関性能
— 燃料噴射時期の影響 —**

**燃料噴射量: 32 mm³/stroke
(IMEP: 0.54 MPa)**

燃料噴射時期に対するNOxおよび黒煙 — EGR率の影響 —



燃料噴射時期に対する着火遅れ — EGR率の影響 —

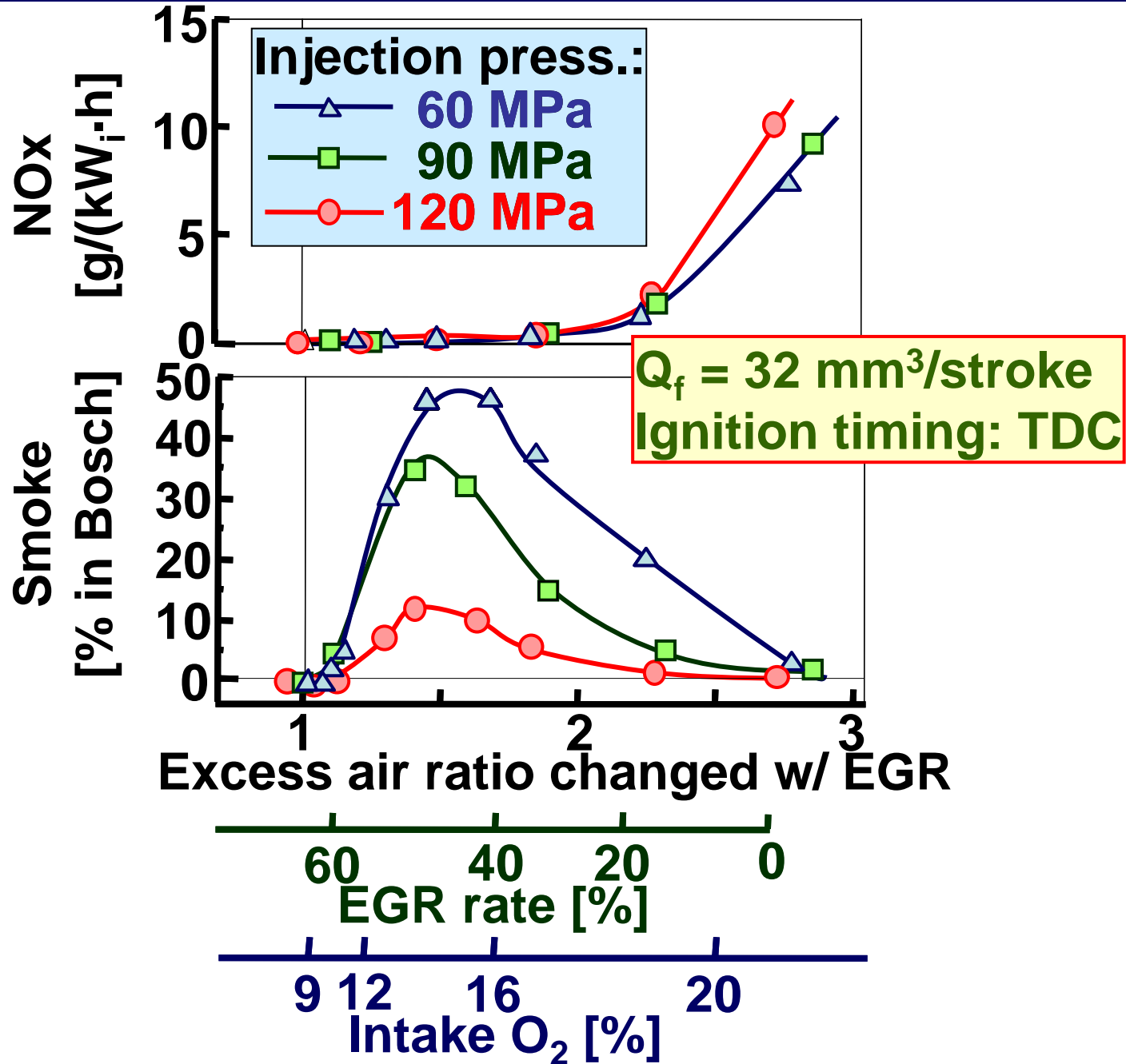


**EGRによる空気過剰率(吸気酸素濃度)
低下時の排気特性および機関性能
— 燃料噴射圧力の影響 —**

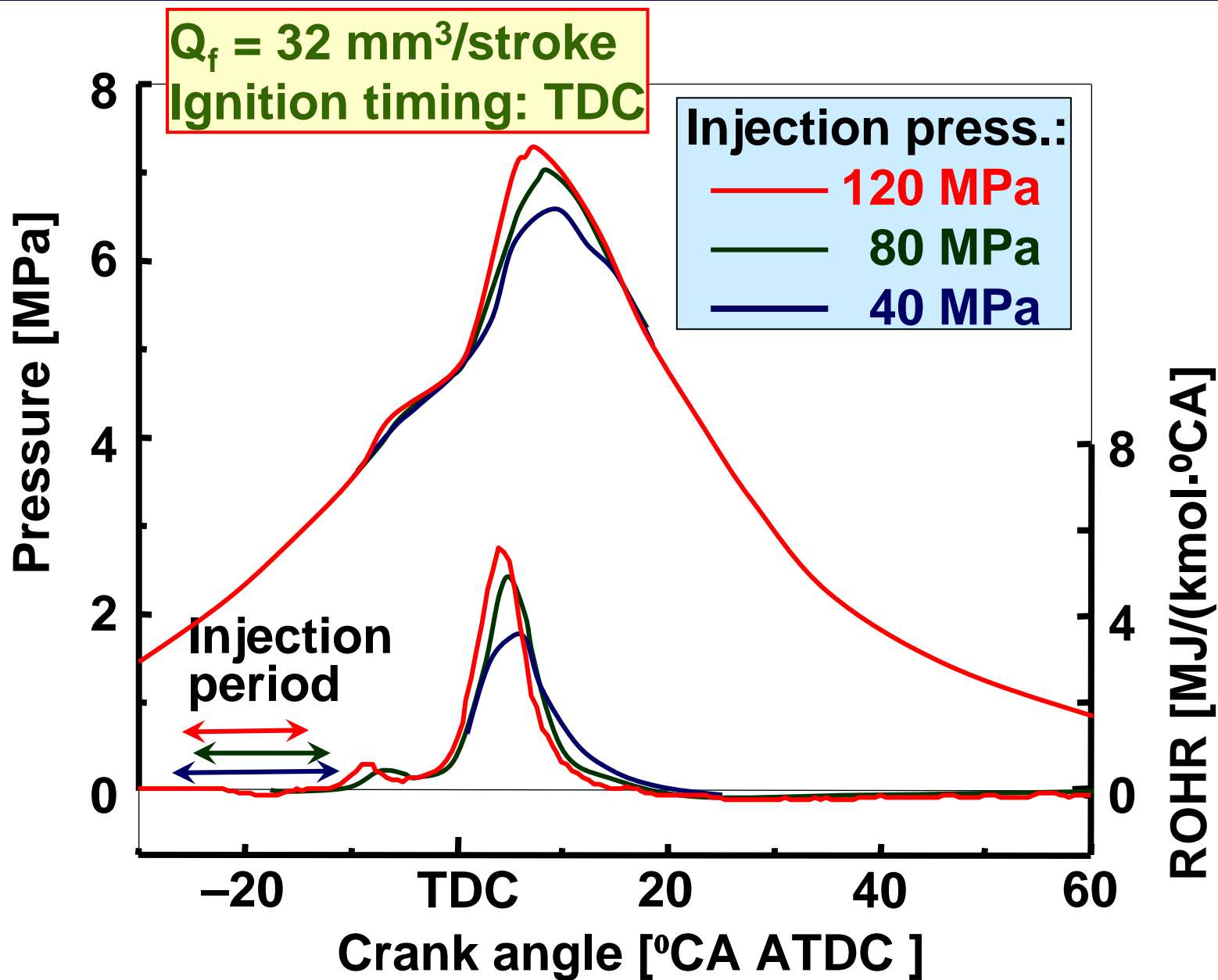
**燃料噴射量: 32 mm³/stroke
(IMEP: 0.54 MPa)**

着火時期: 上死点

噴射圧力がNOxおよび黒煙のEGR依存性に及ぼす影響



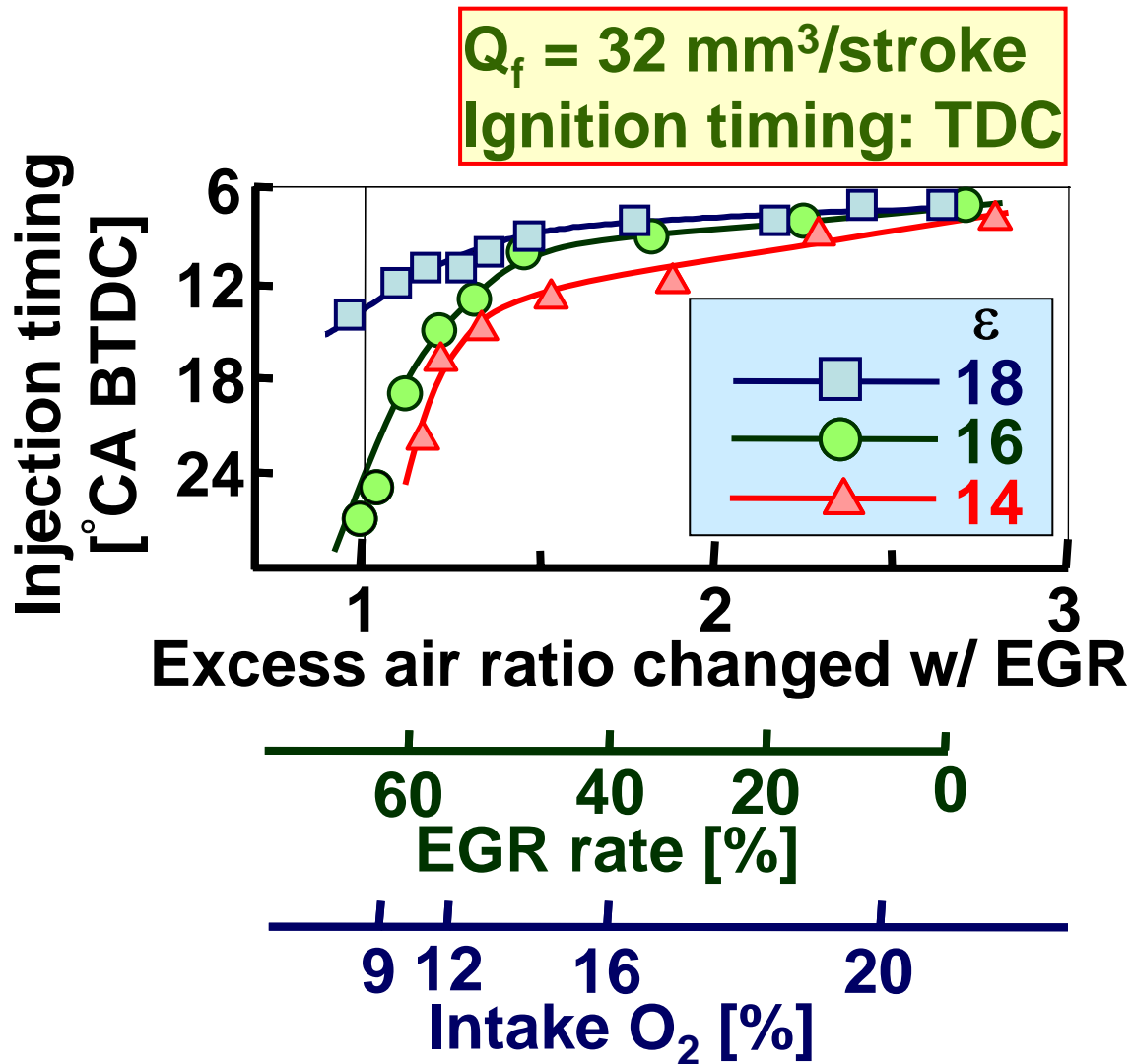
噴射圧力が高EGR時のシリンダ内圧力および熱発生率に及ぼす影響



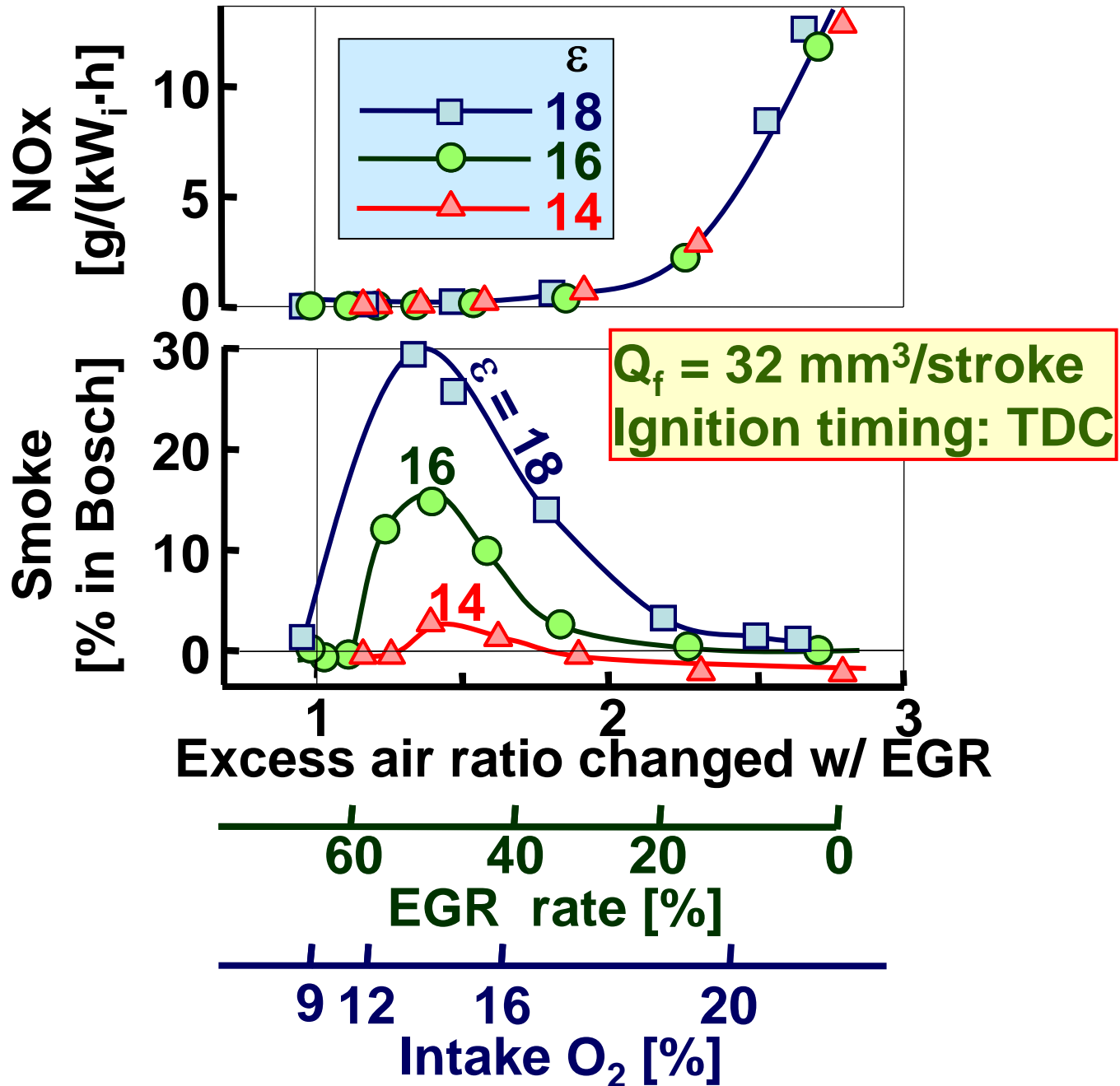
**EGRによる空気過剰率(吸気酸素濃度)
低下時の排気特性および機関性能
— 圧縮比の影響 —**

**燃料噴射量: 32 mm³/stroke
(IMEP: 0.54 MPa)
着火時期: 上死点**

上死点着火のための燃料噴射時期と圧縮比

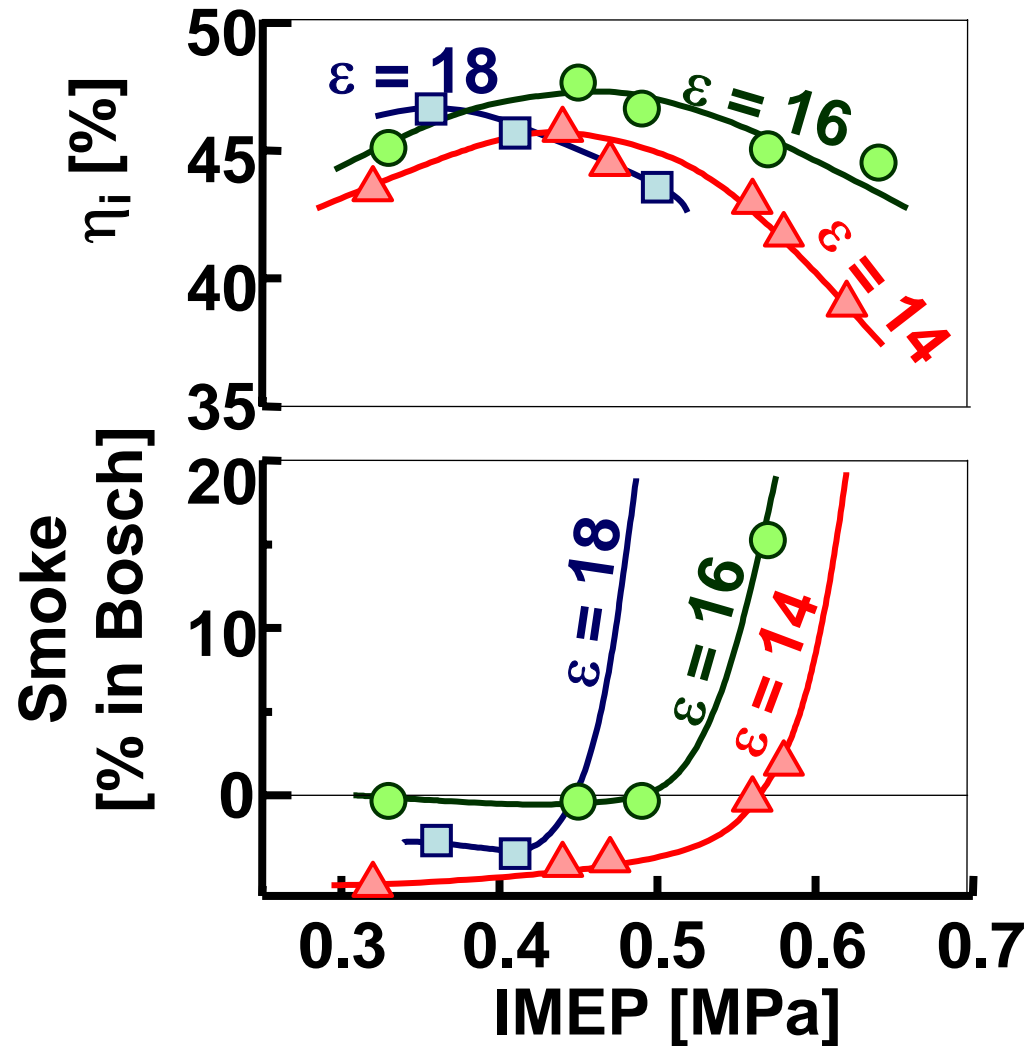


圧縮比がNOxおよび黒煙のEGR依存性に及ぼす影響



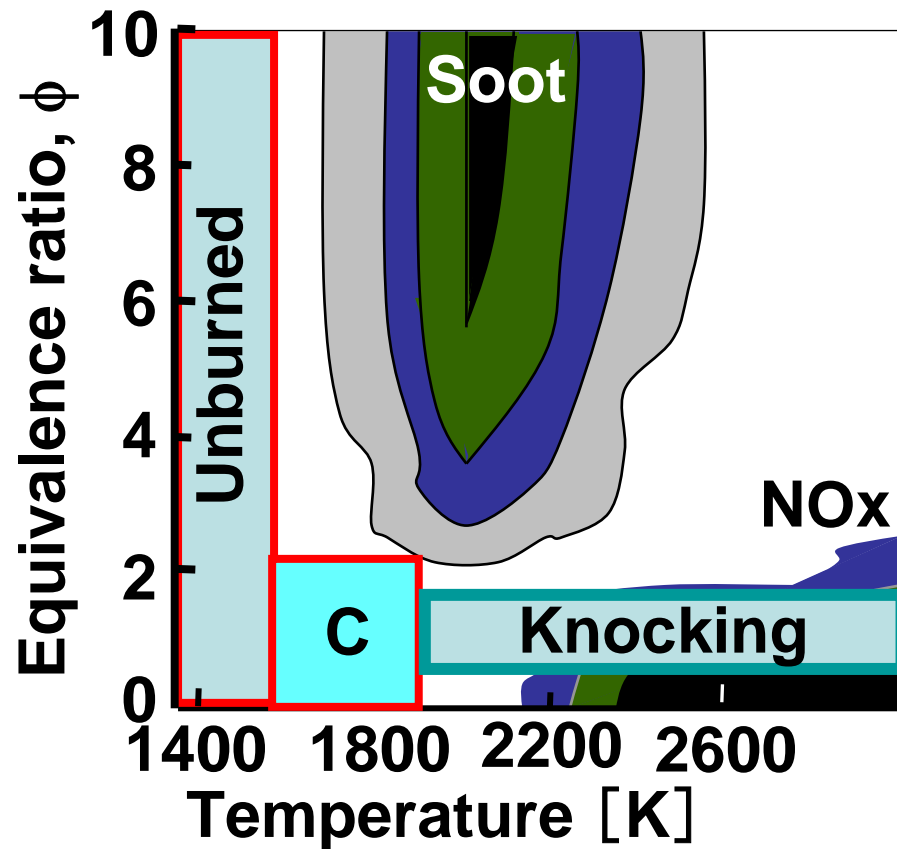
高EGR運転時の図示平均有効圧に対する図示熱効率および黒煙

EGR = 55% ~ 65%
Ignition timing: TDC



低酸素ディーゼル燃焼

スートとNOxの ϕ -Tマップ



C: スーパークリーン領域

今後の予定

以下の各因子の影響

- ・ セタン価
- ・ 燃料蒸留特性
- ・ ETBE混合軽油
- ・ 不活性ガスの組成

まとめ1

1. 大量コールドEGR: 排気特性は吸気酸素濃度に強く依存

NOx: 15%以下: ゼロレベル

黒煙: 16%以下: 増加が顕著

12%以下: 減少に転ずる

9%以下: ゼロレベル

COおよびTHC: 12%以下: 増加が顕著

→ 燃焼効率の低下

2. 二分の一負荷(図示平均有効圧: 0.54 MPa)以上:

吸気酸素濃度: 9% → $\lambda < 1$ → COおよびTHCの大幅悪化

→ 均一予混合化促進が重要

3. SOFはかなり排出

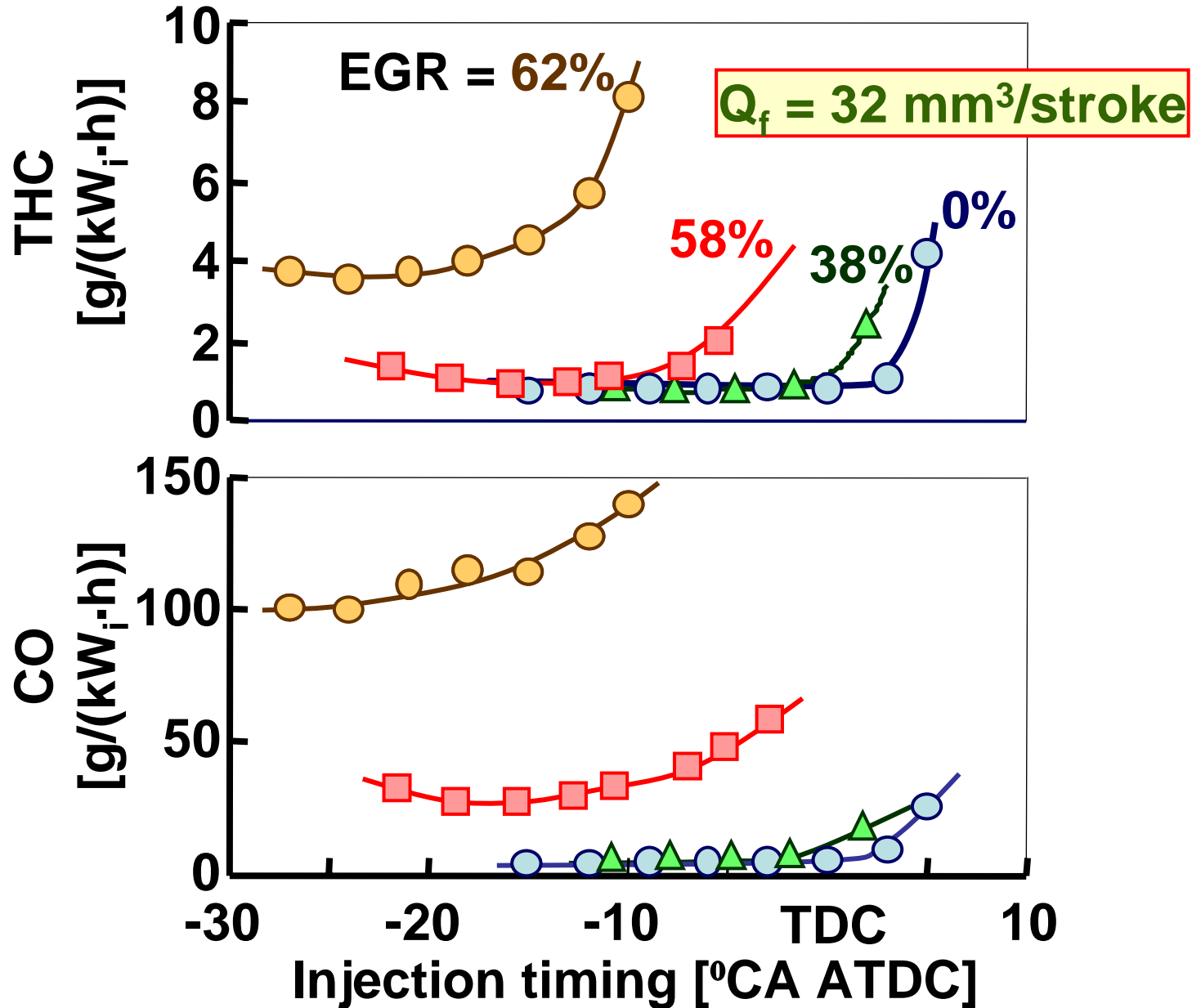
4. 燃焼効率低下と冷却損失減少が相殺 → 図示熱効率悪化小

5. 機関騒音: 低減する

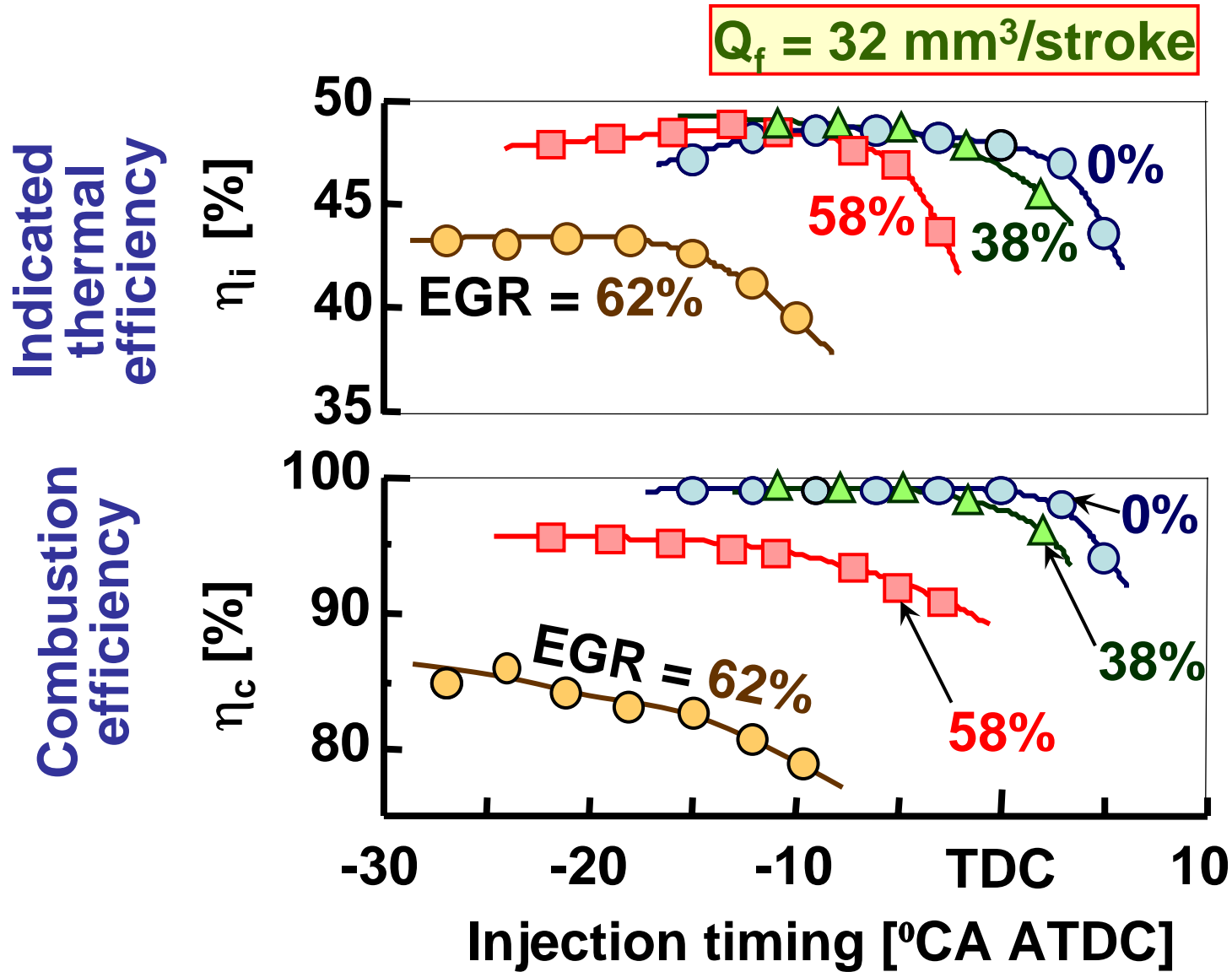
まとめ2

6. 排気特性の吸気酸素濃度の依存性
 - 基本的に噴射時期によらない
7. 無煙となる多くの場合 → 着火：燃料噴射終了後
 - 低温酸化反応をともなう予混合圧縮着火の様態
 - 無煙化には予混合化が不可欠
8. 高EGR時の黒煙と燃焼効率のトレードオフ：広い噴射時期範囲
9. 排気特性の吸気酸素濃度の依存性
 - 基本的に噴射圧力によらない
 - 無煙となるEGR率：10%
 - ただし、噴射圧力が高いほど黒煙濃度は低くなる
10. 低圧縮比化 → 高EGR率時の黒煙減少，無煙となる範囲拡大
 - 着火遅れの増加による予混合化 + 温度レベル低下
 - ただし、燃焼効率が低下する

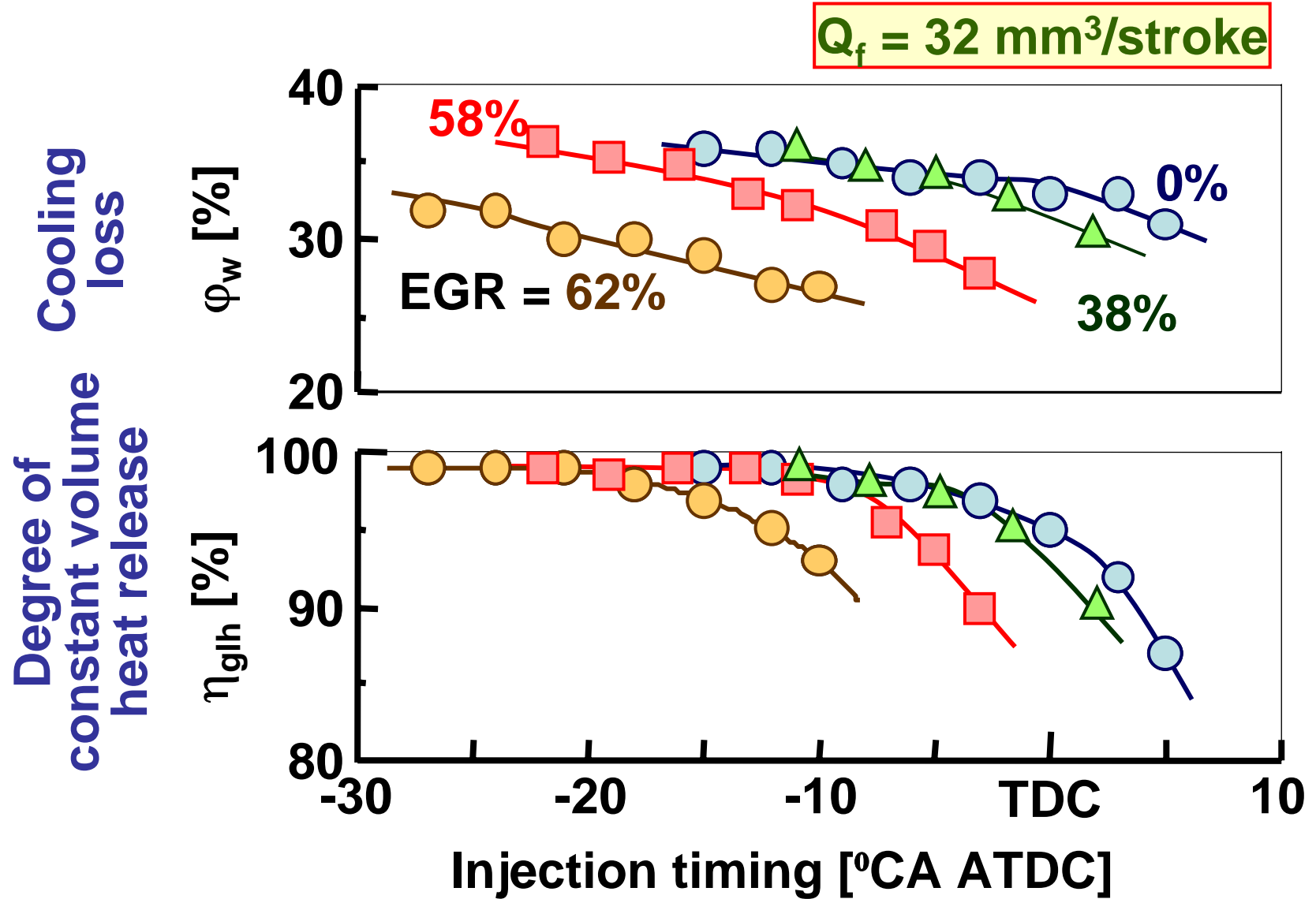
燃料噴射時期に対するTHCおよびCO — EGR率の影響 —



噴射時期に対する図示熱効率および燃焼効率 — EGR率の影響 —

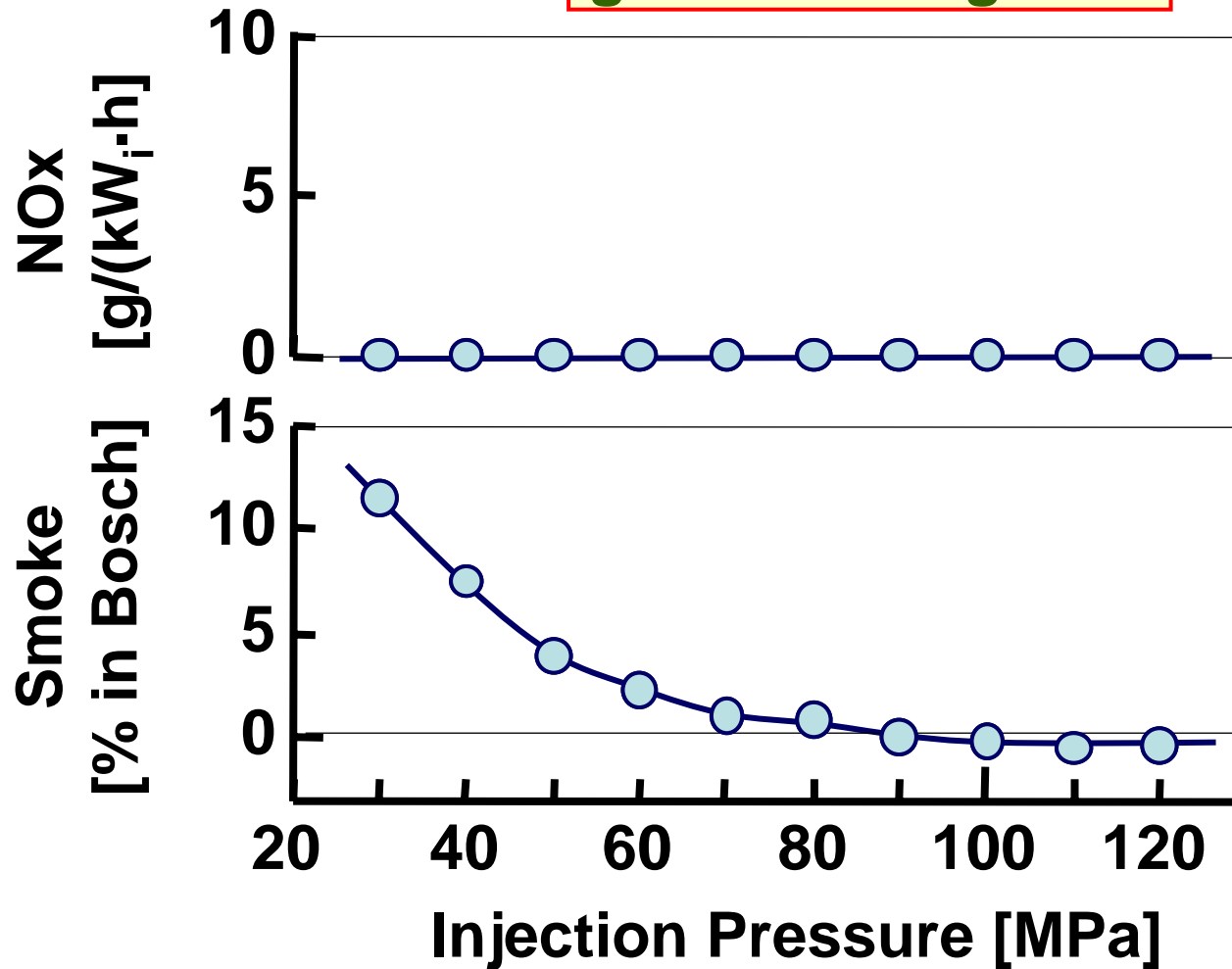


噴射時期に対する冷却損失および等容度 — EGR率の影響 —



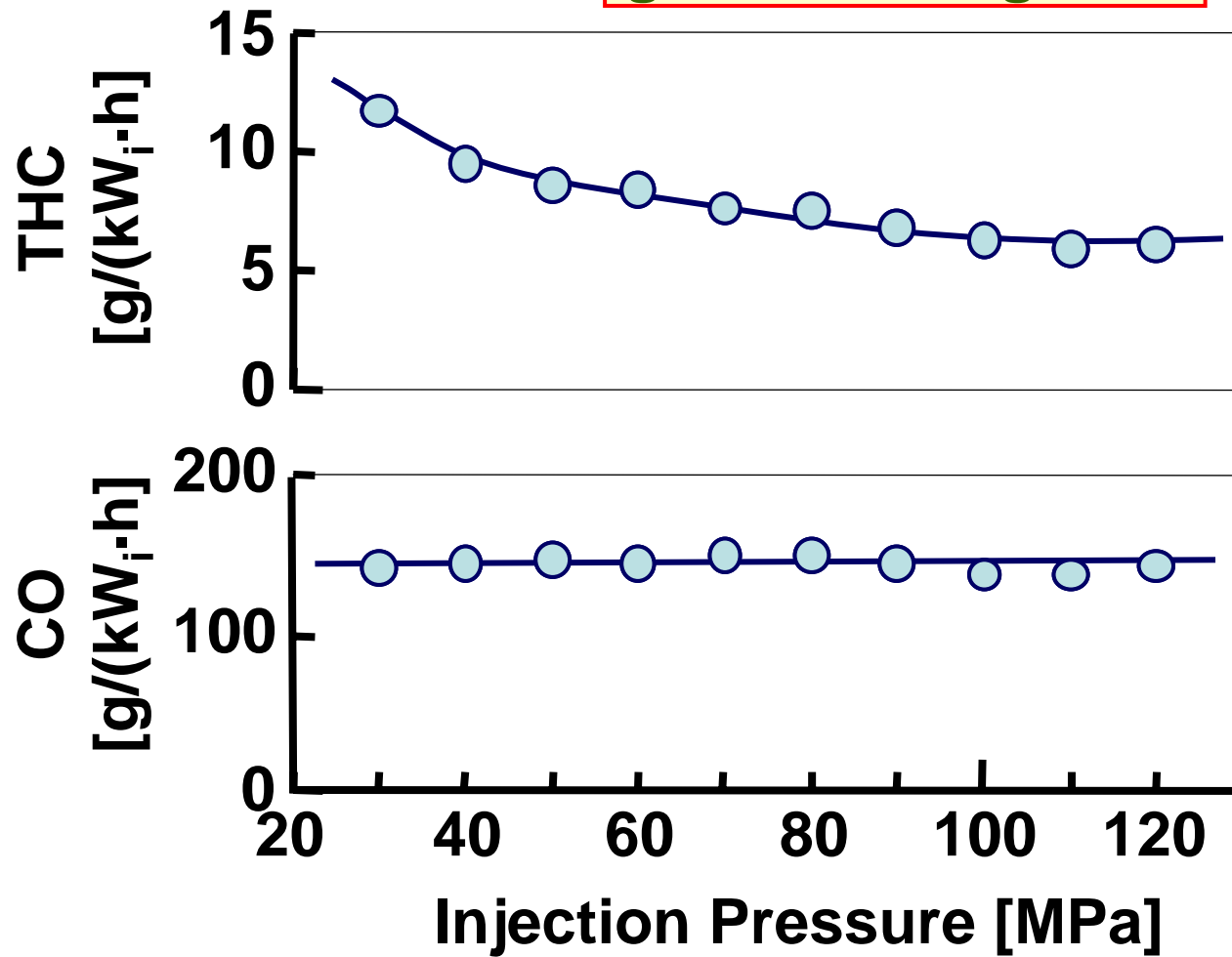
噴射圧力が高EGR時のNOxおよび黒煙に及ぼす影響

$Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$
Ignition timing: TDC

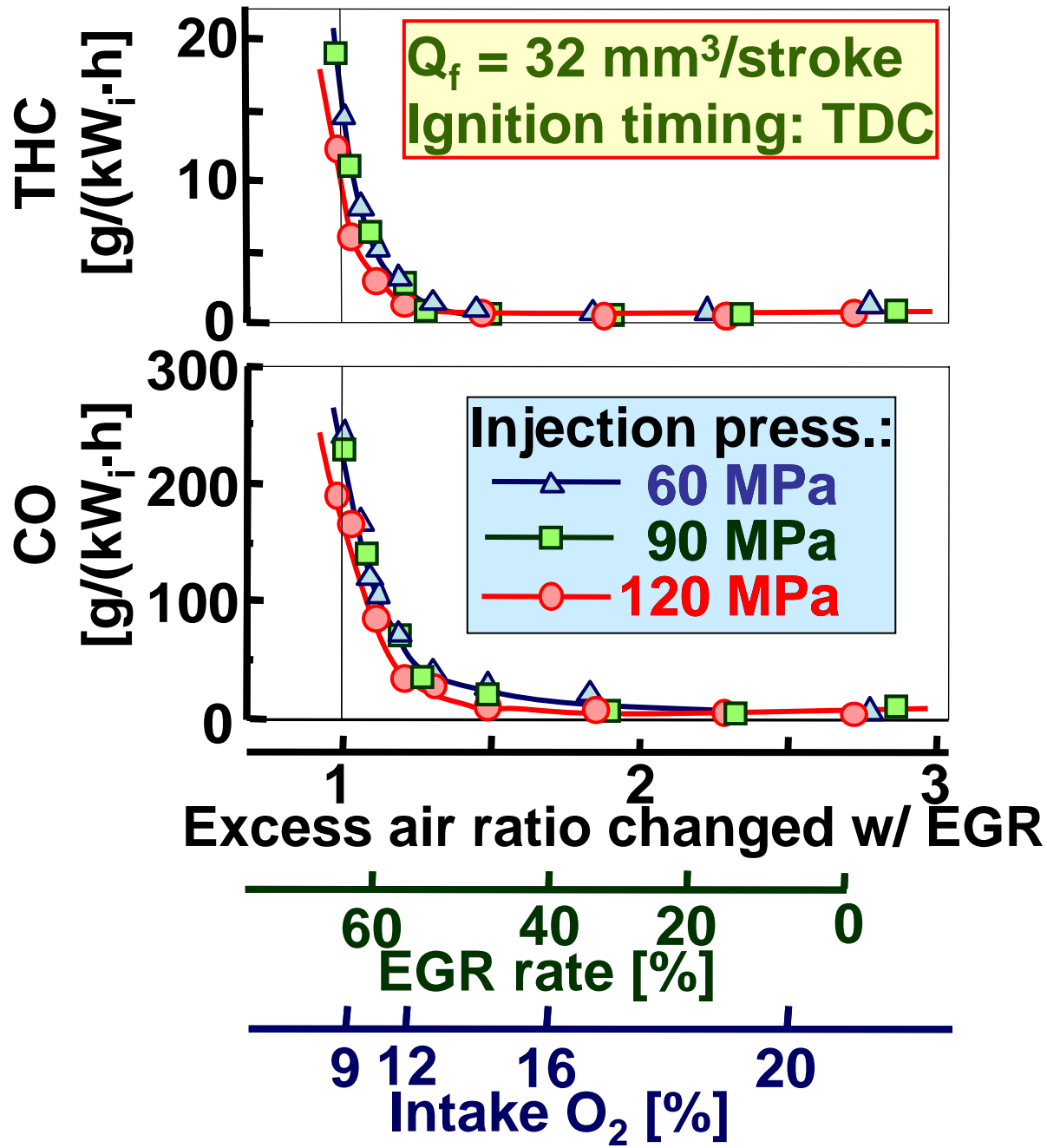


噴射圧力が高EGR時のTHCおよびCOに及ぼす影響

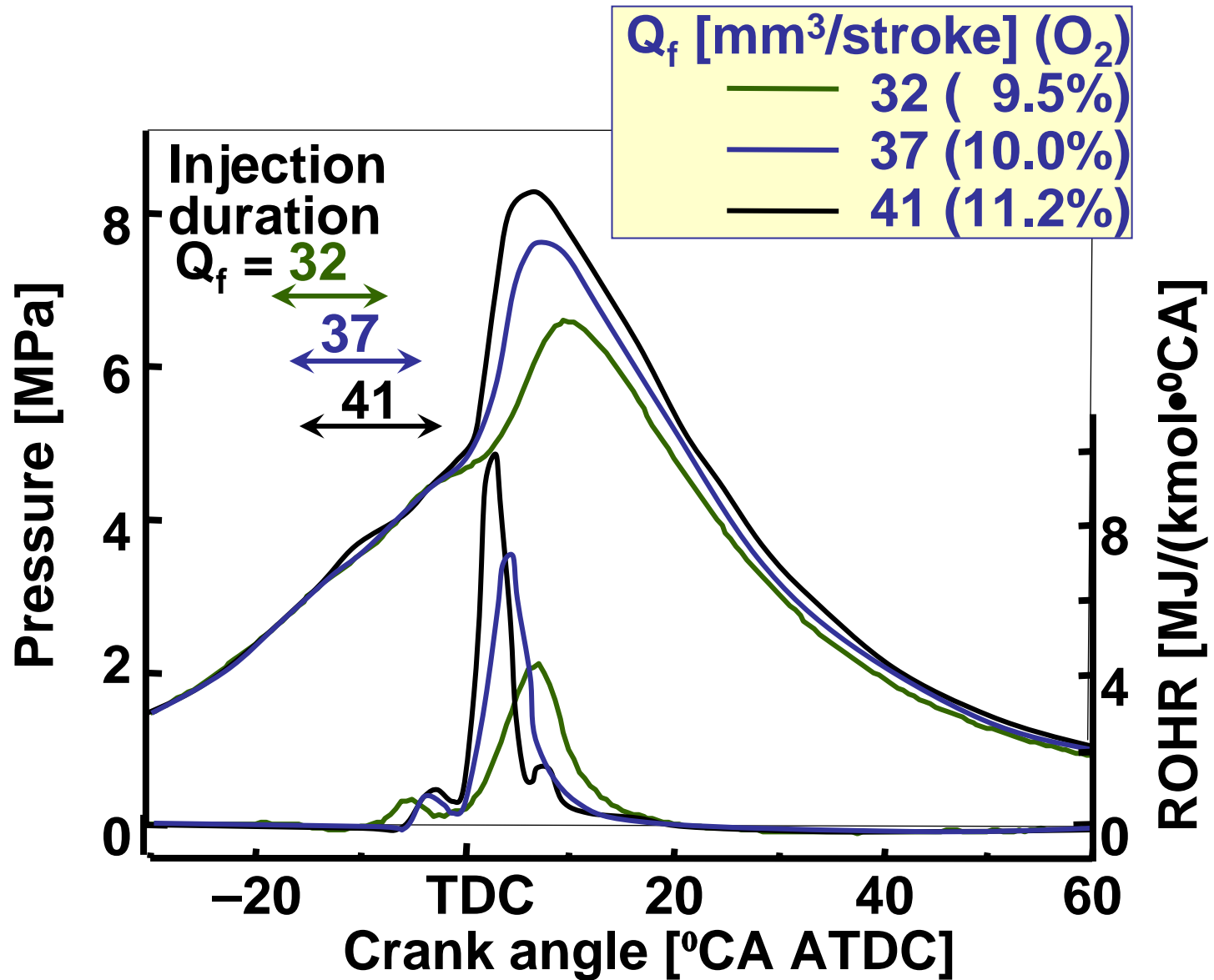
$Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$
Ignition timing: TDC



噴射圧力がTHCおよびCOのEGR依存性に及ぼす影響

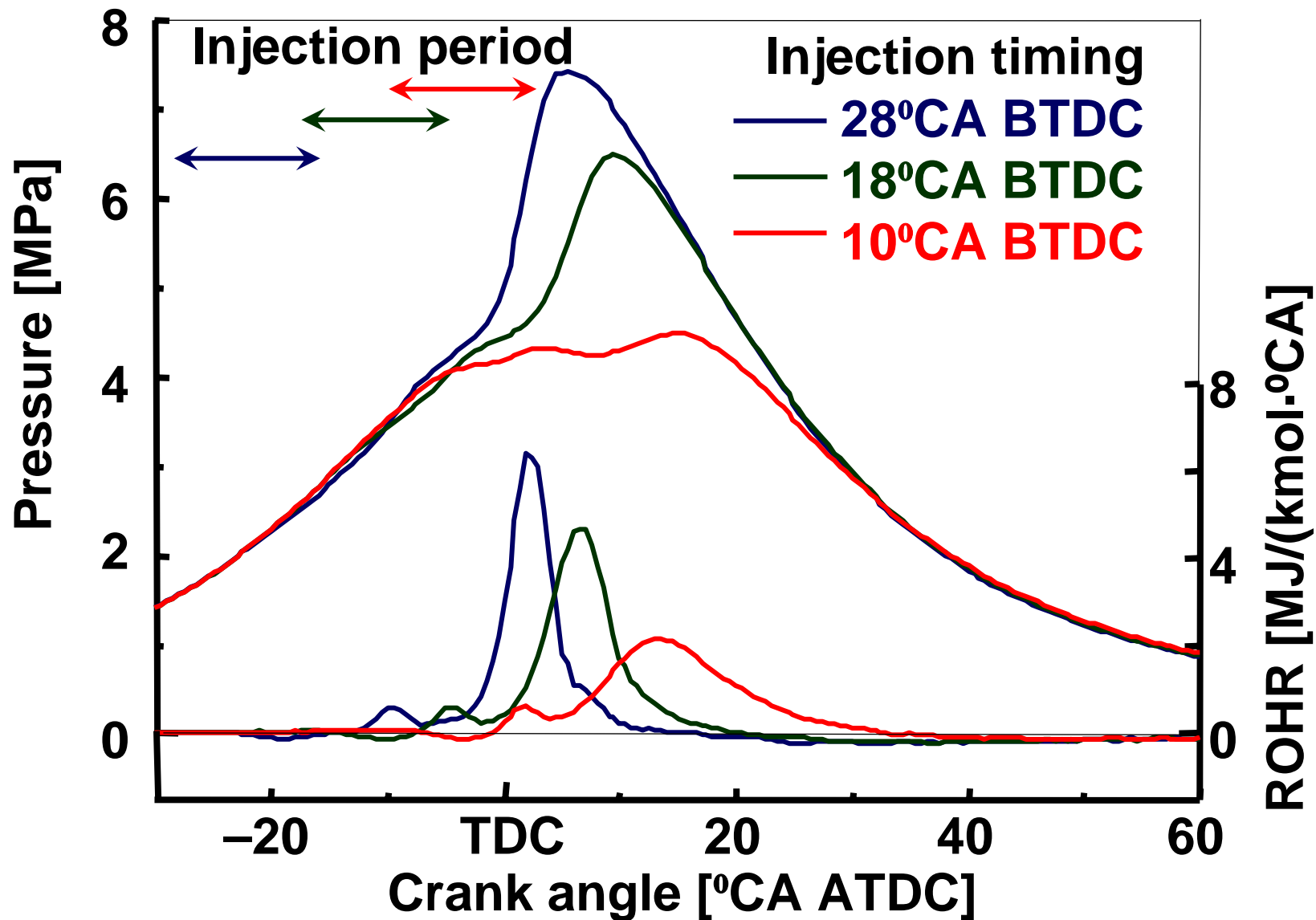


各燃料噴射量における量論比近傍低酸素ディーゼル燃焼

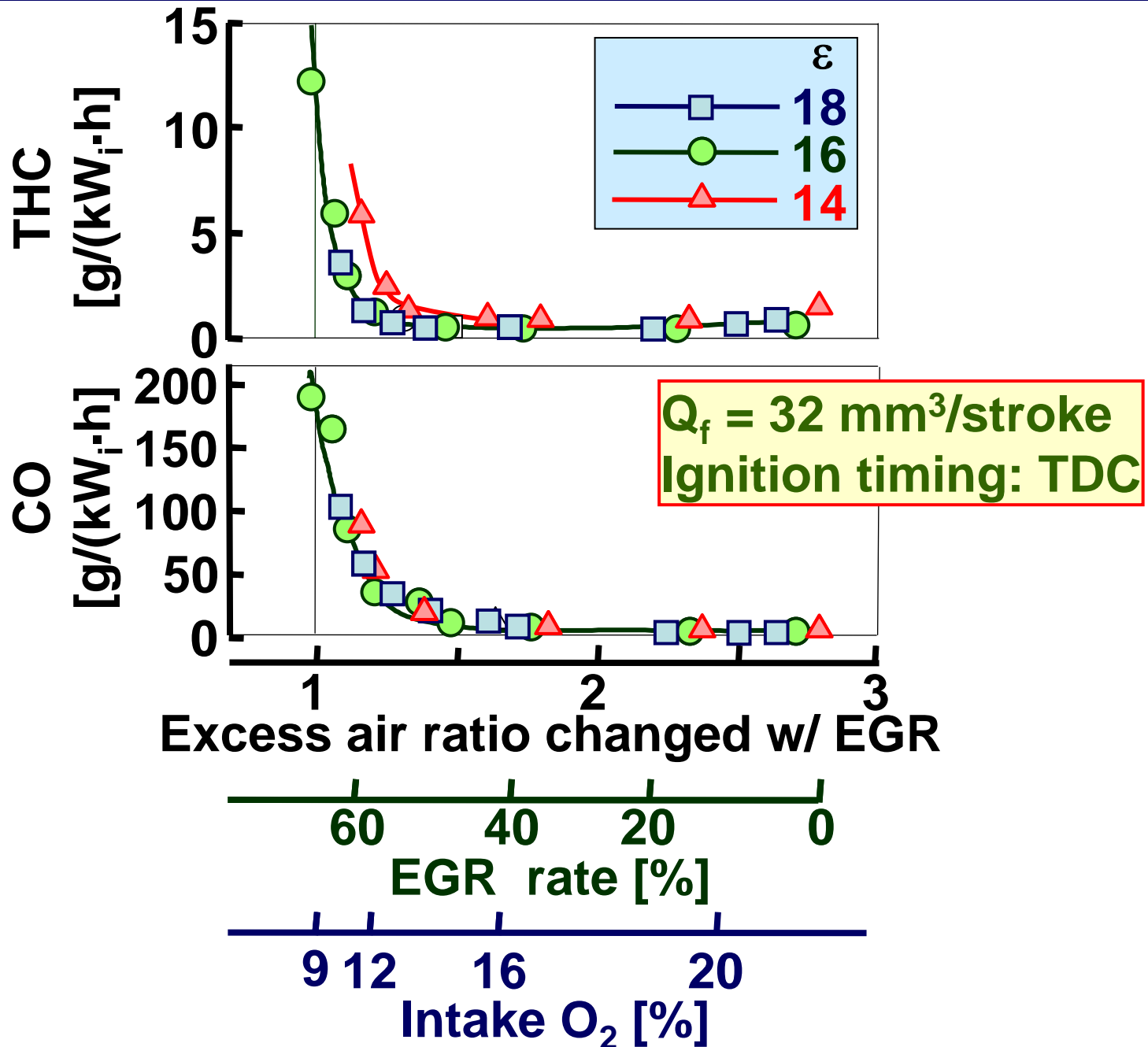


噴射時期が高EGR時のシリンダ内圧力および熱発生率に及ぼす影響

EGR = 62%, $Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$

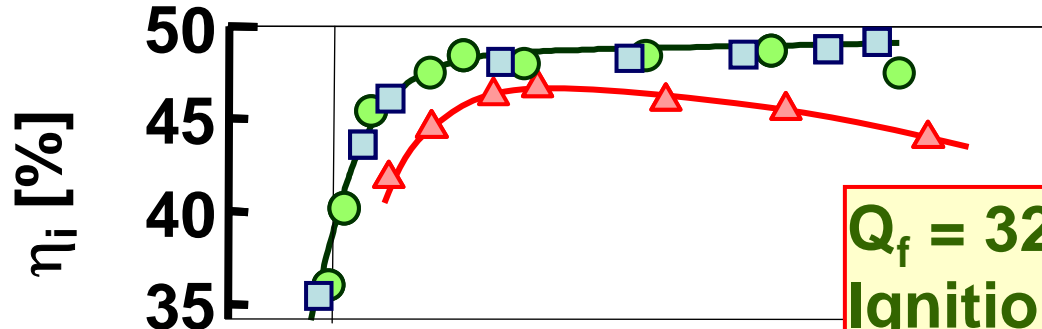


圧縮比がTHCおよびCOのEGR依存性に及ぼす影響



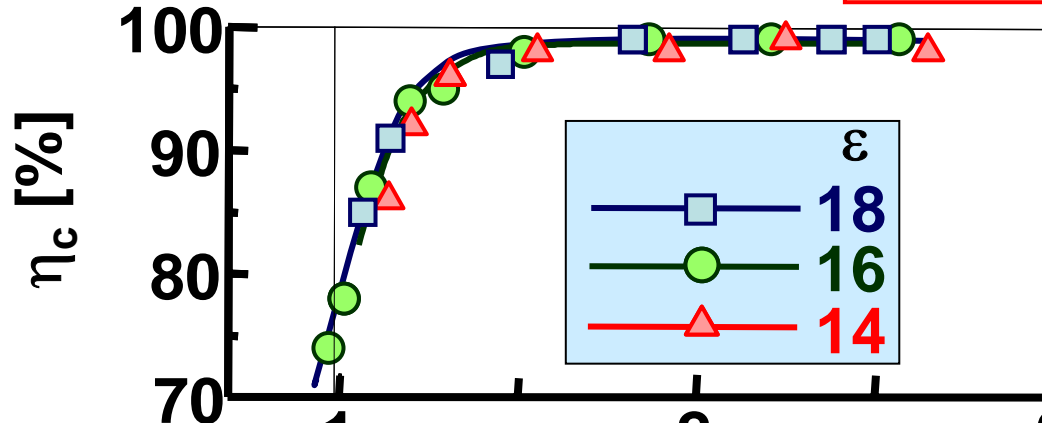
圧縮比が図示熱効率および燃焼効率のEGR依存性に及ぼす影響

Indicated thermal efficiency



$Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$
Ignition timing: TDC

Combustion efficiency



Excess air ratio changed w/ EGR

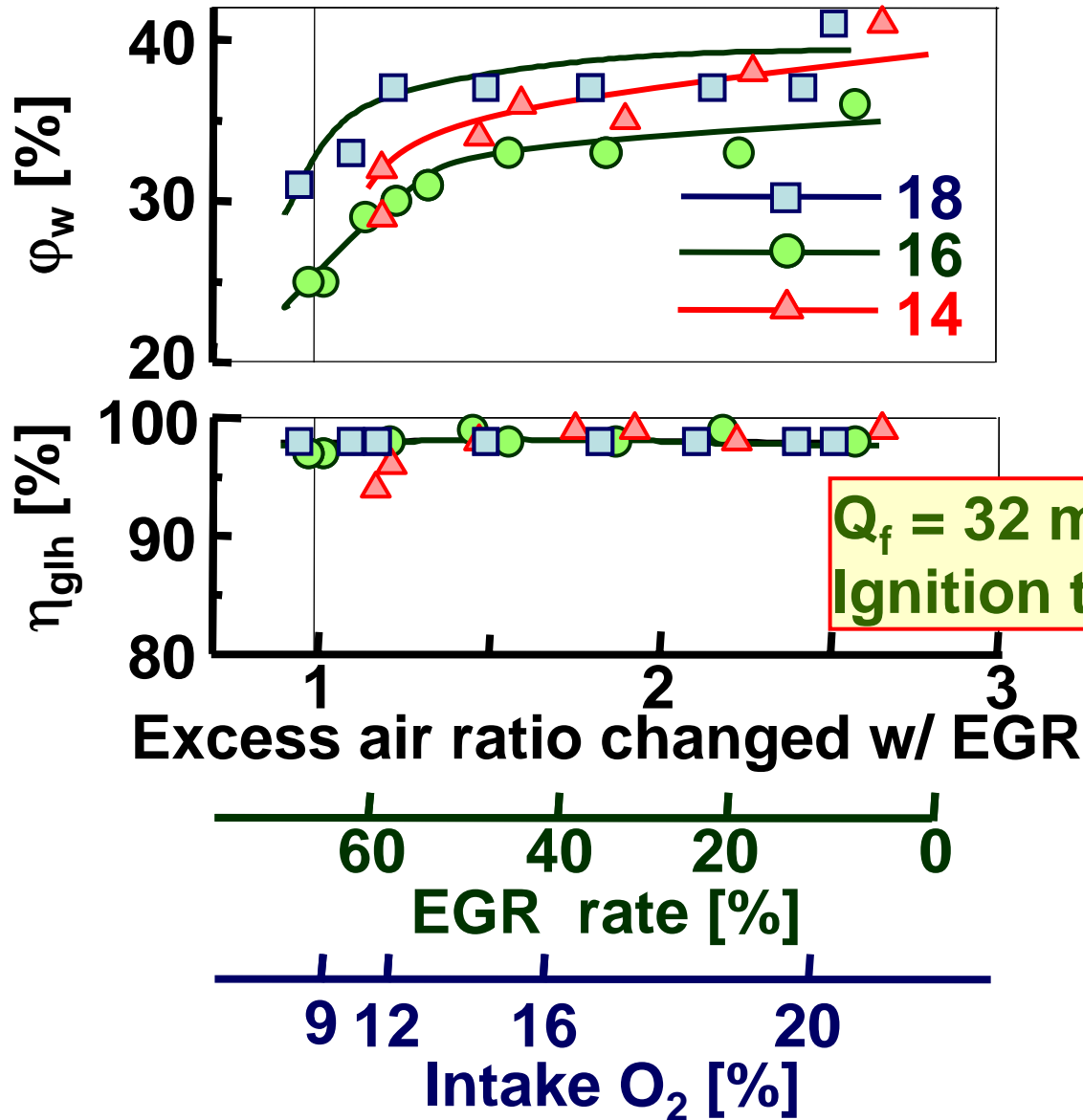
EGR rate [%]

Intake O_2 [%]

圧縮比が冷却損失および発熱の等容度のEGR依存性に及ぼす影響

Degree of
constant volume
heat release

Cooling
loss



圧縮比が高EGR時のシリンダ内圧力および熱発生率に及ぼす影響

