

パレート最適翼型からの重要パラメータの抽出法

Identification of important parameters from Pareto-optimal airfoils

- 石川義泰, 東大院, 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, E-mail: ishikawa@flab.isas.jaxa.jp
 大山聖, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, E-mail: oyama@flab.isas.jaxa.jp
 藤井孝藏, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, E-mail: fujii@flab.isas.jaxa.jp
 Yoshihiro ISHIKAWA, University of Tokyo, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, Japan
 Akira OYAMA, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, Japan
 Kozo FUJII, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, Japan

PARSEC airfoil parameters often used for transonic airfoil design are re-examined by data-mining Pareto-optimal airfoil designs. The Pareto-optimal airfoils are obtained by using a multiobjective evolutionary algorithm. For data mining, scatter plot matrix coupled with correlation coefficient is used. The present result shows that the PARSEC airfoil parameters may not be the best choice for transonic airfoil design. The result also indicates that data mining from Pareto-optimal airfoils may give more information than data mining from all feasible airfoils.

1. はじめに

多目的設計探査⁽¹⁾は多目的設計最適化により得られたパレート最適解もしくは実行可能解のデータからデータマイニング手法を用いることにより, 設計空間全体の構造を把握し設計上有益な情報を引き出す手法である. 近年, この手法の有効性が広く認められつつあり, 航空機設計などの分野において多目的設計探査が盛んに用いられるようになってきた. これまでの多目的設計探査では主に目的関数・制約条件関数・設計パラメータ間の相関関係やトレードオフなどの情報を抽出することに用いられてきた.

一方, 遷音速翼型設計などの形状設計最適化については, 設計パラメータにはとらわれず, 得られた最適形状について適切な形状パラメータを選択することで, より多くの情報を見いだすことができる可能性がある. たとえば遷音速翼型設計では前縁半径や後縁のキャンバーが重要なパラメータになることがこれまで理論的・経験的に知られているが, それらのパラメータについて多目的設計探査を用いて分析することで, 知られている理論的・経験的知見の背後にあるメカニズム等を理解することができると考えられる. また, 逆に得られた最適解群の情報から, 理論的・経験的には知られていなかった新しいパラメータや新しい知見を引き出すことも可能であろう.

本論文ではその第一歩として, 遷音速翼型の多目的空力最適化により得られたパレート最適解および実行可能解を分析し, 遷音速翼型の設計に重要といわれているパラメータについて, 相関係数および散布図行列⁽²⁾を用いて分析を行い, それらのパラメータの目的関数への影響度などについて考察を行う.

2. 解析手法

2. 1. パレート最適翼型データ

今回の分析では多目的最適化によって得られた遷音速翼型の実行可能解及びパレート最適解を用いた. 本論文では, このパレート最適解である翼型をパレート最適翼型と呼ぶことにする. 多目的最適化は下記の定式化のもと行った.

目的: 揚力係数(C_l)の最大化

抗力係数(C_d)の最小化

制約条件: 最大翼厚が 12% 翼弦長よりも大きいこと

揚力係数は 0 より大きいこと

流れ条件: マッハ数 0.8

レイノルズ数 1×10^6 (翼弦長基準)

迎角 2 度

翼型形状は制御点を 9 つもつ B スプライン曲線により定義し(Fig. 1), 固定される前縁および後縁の制御点を除く 6 つの制御点の x 座標および y 座標を設計変数とした. 空力計算には RANS コード⁽³⁾を用い, 格子点数は 201×49 点の C 型格子とした. 最適化には多目的進化アルゴリズム⁽³⁾を用い, 集団サイズ 64, 世代数 60 として計算を行った. 得られた最適解の分布を Fig. 2 にしめす. この計算により得られた実行可能解 2587 個およびパレート最適解 85 個のデータをデータマイニングに用いる.

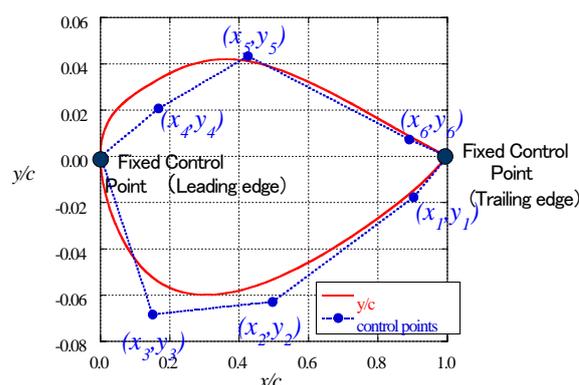


Fig. 1 Control points for B spline curve

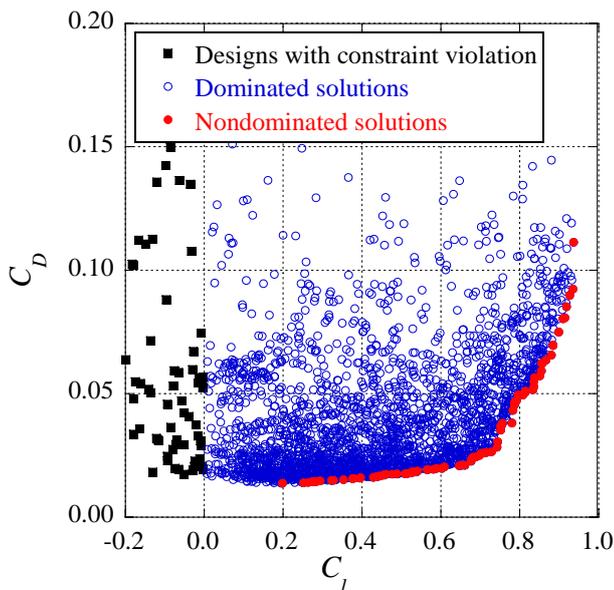


Fig. 2 Distribution of solutions

2. 2. 検討を行う翼型の形状パラメータ

本研究では、多目的設計最適化により得られたパレート最適翼型について、遷音速翼型設計に重要といわれているパラメータについて分析を行う。分析を行ったパラメータは PAESEC 翼型⁴⁾を参考に、前縁半径 r_{LE} 、上面最高位置 Z_{UP} 、その点における x 座標 X_{UP} 、その点における二階微分 Z_{XXUP} 、下面最低位置 Z_{LO} 、その点における x 座標 X_{LO} 、その点における二階微分 Z_{XXLO} 、後縁の二分線と軸との角度 α_{TE} 、後縁角度 β_{TE} とした (Fig. 3)。なお、後縁の高さ Z_{TE} 、後縁の幅 ΔZ_{TE} の 2 つのパラメータに関しては、翼型の定義に用いた B スプライン曲線の後縁の制御点の座標を (1,0) に固定したため考慮しない。これらのパラメータはそれぞれの翼型の B スプライン曲線から解析的に求めることも可能であるが、ここでは RANS 解析で用いた表面格子データ (上面下面あわせて 137 点) から数値的に求めている。 Z_{UP} および X_{UP} は点列データにおける z 座標の最高値およびその点における x 座標を用いた。 Z_{XXUP} はこの点と両隣の 3 点から不等間隔の中心差分により導出した。 Z_{LO} および X_{LO} 、 Z_{XXLO} は点列データにおける z 座標の最低値から同様にして求めた。また、 r_{LE} は (0,1) 点とその両隣の 3 点から円の公式を用いて導出し、 α_{TE} および β_{TE} は後縁の 2 点のデータから片側差分を用いて傾きを求め、三角関数の公式から角度を導出した。

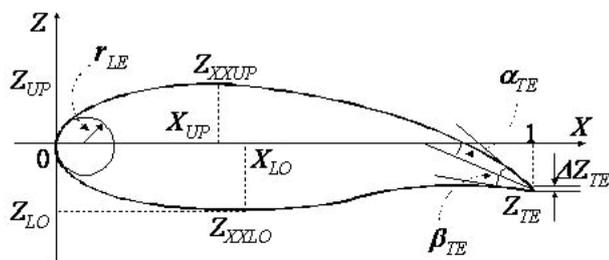


Fig. 3 Design parameters for PARSEC

2. 3. 形状パラメータの分析方法

ピアソンの相関係数²⁾および散布図行列を用いて、翼型性能 (揚力係数および抗力係数) と設計変数、翼型性能と形状パラメータとの相関を調べる。相関係数は右肩上がり、右肩下りのような

線形の相関関係しか判別できないが、定量的な指標であるため分析する変数が多い場合に便利である。値は 1 から -1 の間でとり、1 もしくは -1 に近いほど相関が高いことを示している。また、散布図行列はすべての設計変数および目的関数について 1 対 1 の散布図を作成して行列形式で視覚的に表示する方法であり、非線形な相関関係やトレードオフ関係も判断することができる。散布図行列の上三角行列と下三角行列に表示される情報は本質的に同様であることから、本論文では、下三角行列は相関係数値でおきかえる。散布図行列の表示にはフリーウェアの R⁶⁾を用いる。

3. 結果

はじめに、今回の多目的設計最適化に用いた設計変数と揚力係数・抗力係数との相関について議論を行い、つぎに、PARSEC 翼型を参考に選んだ形状パラメータと揚力係数・抗力係数との相関について議論を行う。

3. 1. 最適化に用いた設計変数と $C_l \cdot C_d$ の相関

翼型の設計最適化に用いた設計変数 (Fig. 1) と $C_l \cdot C_d$ の相関関係を調べるため、実行可能解について作成した散布図行列を Fig. 4 に示す。ここで、白抜き丸は劣解、青丸はパレート最適解を示している。また、図中の各軸の上下限は各パラメータの最大値、最小値によって決められている。また、揚力係数・抗力係数それぞれについて相関係数が高いものを Table 1 に示す。

まず、 C_d と設計変数との相関について考察する。相関係数が高い設計変数は多くは存在しないが y_4 と y_2 が高い正の相関を持ち (このことは散布図からも見て取れる)、それぞれ、上面側の前縁半径を小さくすれば抵抗が小さくなる、下面に強い凹面を持たせると抵抗が大きくなる、ということを示している。これらのことは上面側の前縁半径を大きくとったり、下面に強い曲率を持たせると衝撃波が発生し、抵抗が増大するというを示している。

C_l については高い相関をもつ設計変数は存在しないが、 y_1 と y_2 が比較的高い正の相関をもつことが分かる。この結果は揚力係数をあげるためには翼型後縁付近で強いキャンバーを持つ必要があることを示している。

また、相関係数からは判別できないが、散布図をみると、パレート最適解は y_3 と y_5 がある一定の値をとらなくてはならないことがわかる。

Fig. 5 および Table 2 にはパレート最適翼型のみについて分析を行った結果を示す。パレート最適解のみについて分析を行うことで、相関が高い設計変数が増えていることがわかる。このことは多目的最適化により得られたパレート最適翼型から情報を引き出すためにはパレート最適解のみについて分析を行った方が情報を引き出しやすい可能性があることを示している。注意しなければならないのは、得られた結果は設計空間の中でパレート最適解が存在する近傍の空間についてしか当てはまらない可能性があることであるが、通常、最適解が存在する近傍空間の情報があれば十分であると考えられる。

次に、Fig. 5 を詳細にみても。さきほど実行可能解すべての分析結果から得られた知見 (C_d と y_4 , y_2 が高い正の相関をもつ、 C_l が、 y_1 と y_2 が比較的高い正の相関をもつ) については違いがなく、より強い相関が現れている。また実行可能解の分析結果からは認識することが難しかった C_d と x_2, y_3 、 C_l と y_6 と y_4 との相関が見て取れる。

3. 2. 翼型の形状パラメータと $C_l \cdot C_d$ の相関

PARSEC 翼型を参考に抽出した形状パラメータと $C_l \cdot C_d$ との関係調べるため、実行可能解すべてについて分析を行った結果を Fig. 6, Table 3 に示す。ここでは、翼の空力性能に直接的に関係す

ると考えられるパラメータについて分析を行ったため、設計変数について分析を行った場合と比較してより高い相関が見られると考えていたが、得られた結果にそれほど違いはなかった。この結果は PARSEC 翼型の定義パラメータが遷音速翼型の設計のための最適なパラメータではない可能性があるということを示している (たとえば、前縁半径は上面、下面で別々のパラメータで定義する必要がある, など)。なお形状パラメータにより強い相関が見られなかった原因として、1) 形状パラメータを解析的ではなく数値的に求めたため誤差が生じている、2) 前縁を x 座標の値が最小の点と定義したために実際の前縁とは異なっている (迎角 2 度で CFD 計算を行っている), なども考えられるため、これらの点については今後吟味を行っていく予定である。

Fig. 7 および Table 4 はパレート最適解の分析結果である。設計変数の分析結果と同様、一般的には実行可能解すべてを分析した場合よりも相関係数が高くなっている。揚力係数と r_{LE} , Z_{XUP} , Z_{UP} の相関係数は低くなっているが、上三角行列にある散布図をみるかぎり相関は強く、相関が非線形的になっていることが相関係数が小さく出ていることの原因であると考えられる。

4. 結論

多目的最適化により得られた実行可能解およびパレート最適解についてデータマイニングを行うことにより、遷音速翼型の設計

に有効と考えられているパラメータについて考察を行った。データマイニングには相関係数と散布図行列を組み合わせ手法を用いた。その結果、従来遷音速翼型の設計に重要と考えられていたパラメータが必ずしも最適なパラメータになっていない可能性があることを示した。また、実行可能解についてデータマイニングを行うよりもパレート最適解についてデータマイニングを行った方がより相関が見やすいということもわかった。

今後は多目的設計最適化とデータマイニング手法を用いて翼型空力設計に最適なパラメータを導出することを試みたい。

参考文献

- (1) Jeong, S. and Chiba, K. and Obayashi, S., "Data Mining for Aerodynamics Design Space," AIAA paper 2005-5079(2008).
- (2) 立川, 大山, 藤井, "多目的空力最適化におけるデータマイニング手法の研究," 計算工学講演会論文集 第 13 巻, 1 (2008), pp. 431-434.
- (3) Oyama, A., "Wing Design Using Evolutionary Algorithms," Tohoku University Doctor paper (2000).
- (4) Sobieczky, H., "Parametric Airfoils and Wings," Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vieweg (1998), pp. 71-88.
- (5) <http://www.r-project.org/>

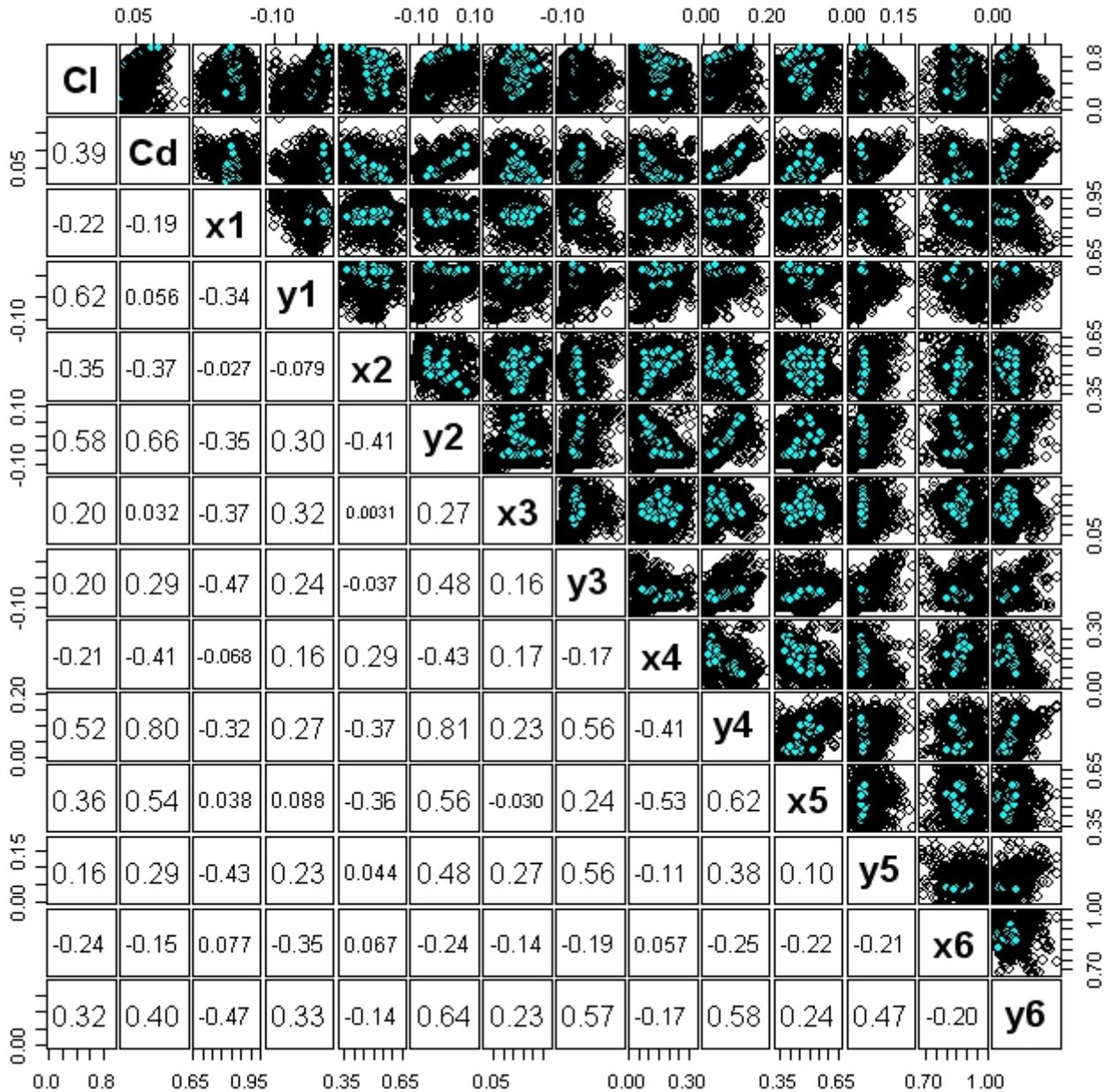


Fig. 4 Scatter plot matrix with correlation coefficients of all feasible airfoils

Table 1 Correlation coefficients of all feasible airfoils

C_D		C_L	
design variable	correlation coefficient	design variable	correlation coefficient
y4	0.8	y1	0.62
y2	0.66	y2	0.58
x5	0.54	y4	0.52

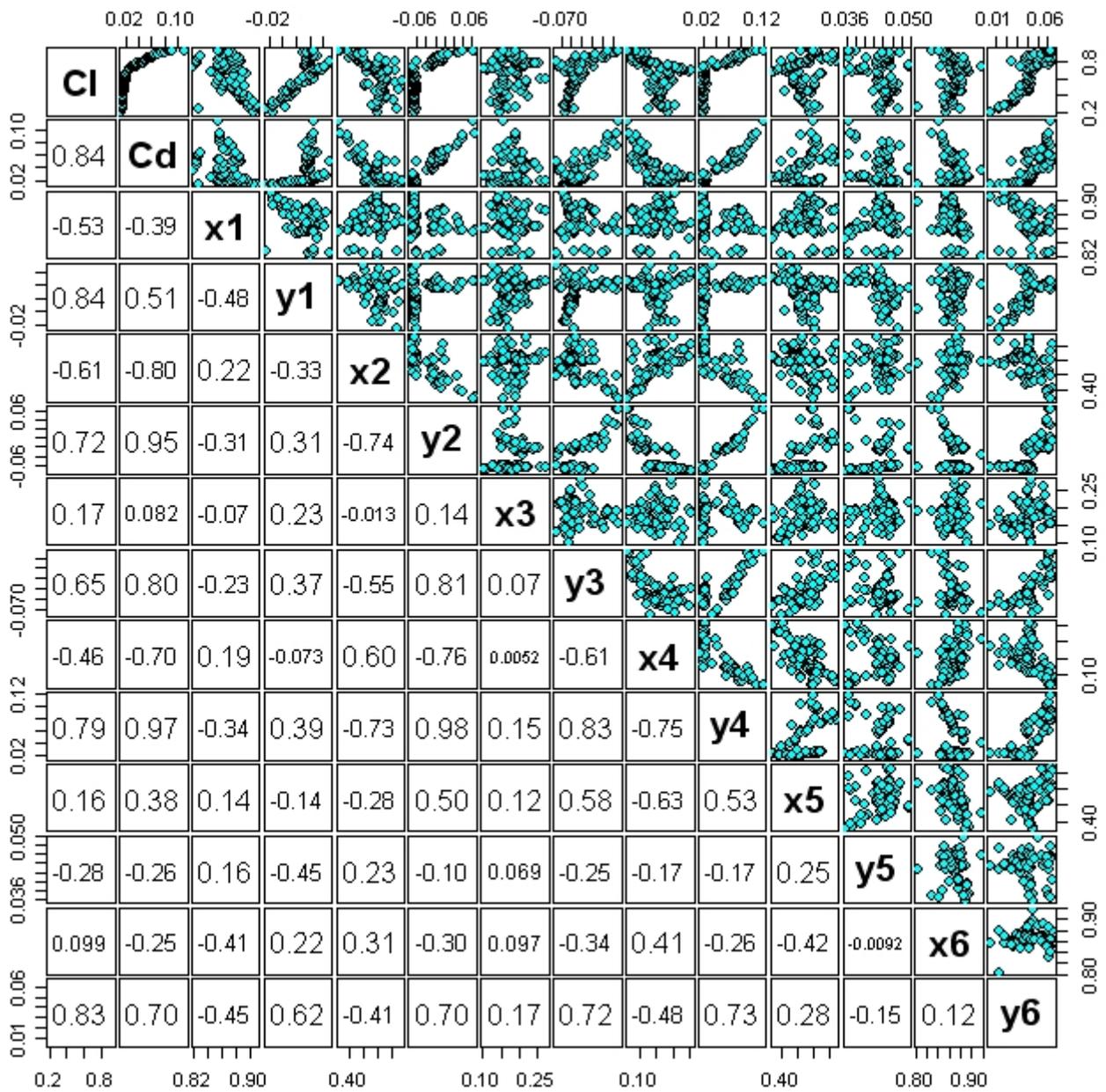


Fig. 5 Scatter plot matrix Scatter plot matrix with correlation coefficients of Pareto optimal airfoils

Table 2 Correlation coefficients of Pareto optimal airfoils

C_D		C_L	
design variable	correlation coefficient	design variable	correlation coefficient
y4	0.97	y1	0.84
y2	0.95	y6	0.83
x2	-0.80	y4	0.79
y3	0.80	y3	0.65
x4	-0.70	y2	0.72
y6	0.70	x2	-0.61
y1	0.51	x1	-0.53

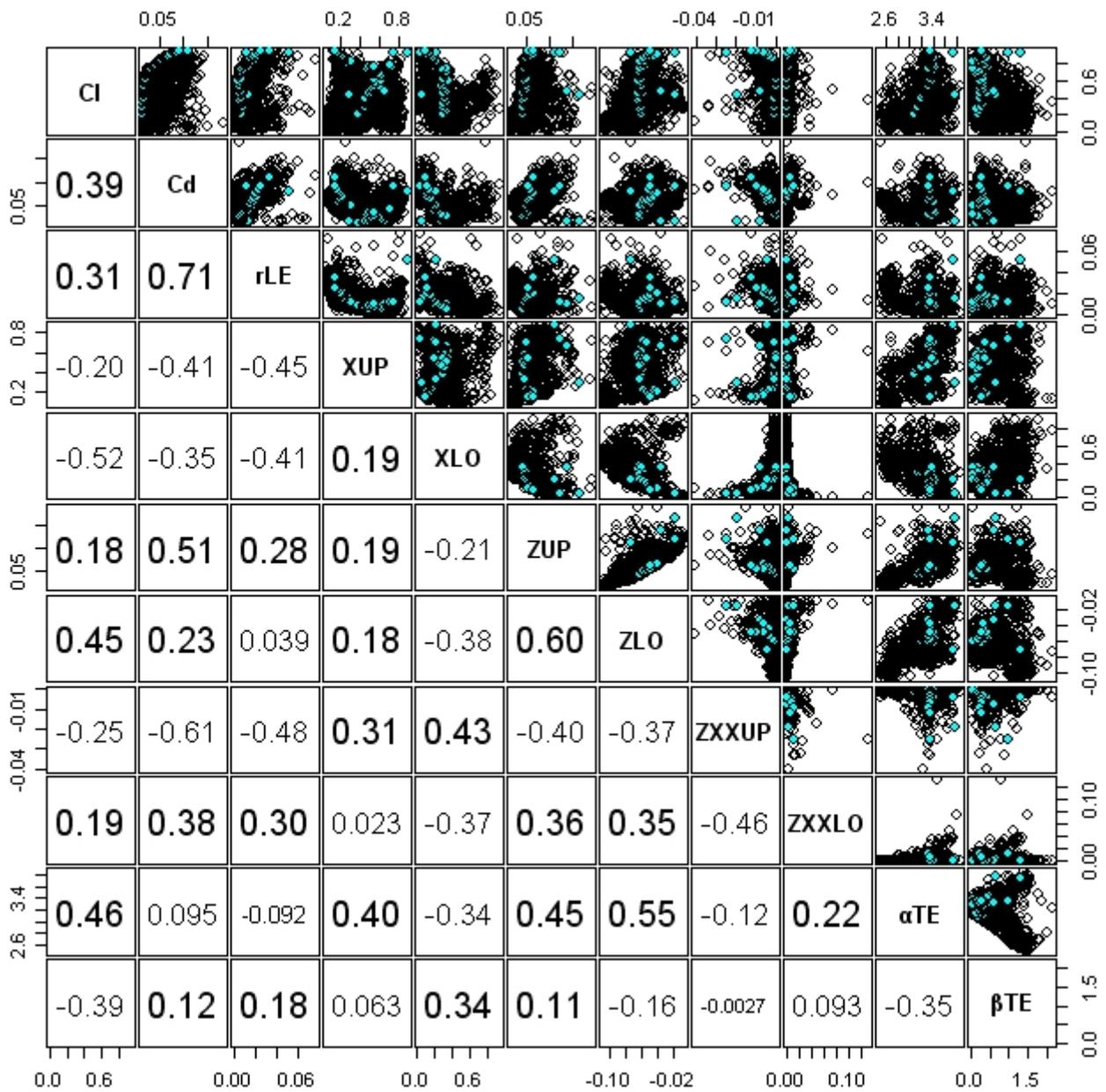


Fig. 6 Scatter plot matrix with correlation coefficients of feasible data for PARSEC

Table 3 Correlation coefficients of feasible data for PARSEC

C_D		C_L	
configuration parameter	correlation coefficient	configuration parameter	correlation coefficient
X_{LO}	-0.52	r_{LE}	0.71
		Z_{XXUP}	-0.61
		Z_{UP}	0.51

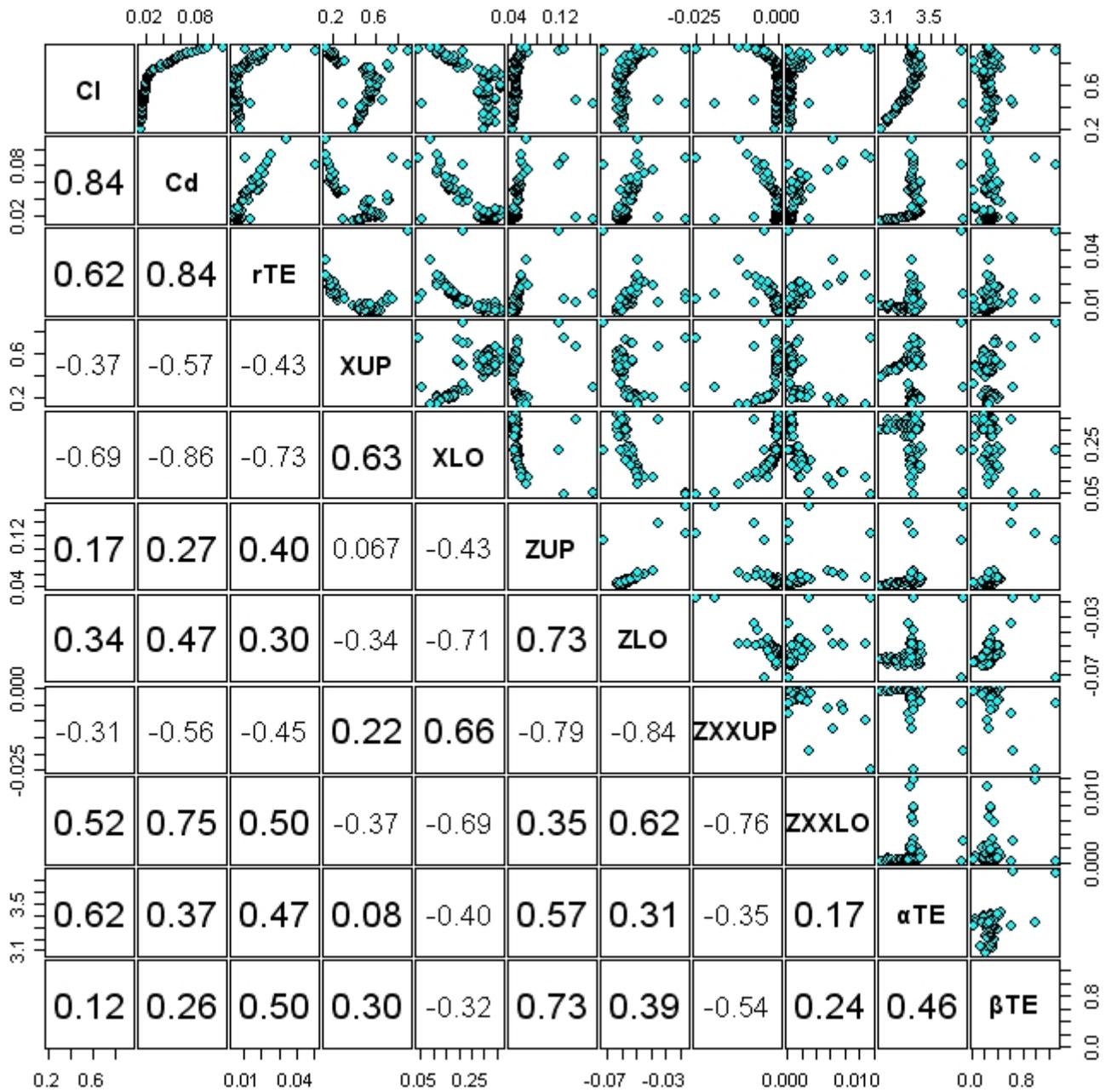


Fig. 6 Scatter plot matrix with correlation coefficients of Pareto optimal data for PARSEC

Table 4 Correlation coefficients Pareto optimal data for PARSEC

C_D		C_L	
configuration parameter	correlation coefficient	configuration parameter	correlation coefficient
X_{LO}	-0.86	X_{LO}	-0.69
r_{TE}	0.84	r_{TE}	0.62
Z_{XXLO}	0.75	α_{TE}	0.62
Z_{XXUP}	-0.56	Z_{XXLO}	0.52
X_{UP}	-0.54		