

ソフトウェア開発演習でのチーム編成に影響を及ぼす人的要因 —SEM仮説モデルに基づく人的要因の分析—

白川 清美¹⁾・橋浦 弘明¹⁾・斉藤 瞳²⁾・
山下 公太郎³⁾・古宮 誠一¹⁾

芝浦工業大学情報工学科では、ソフトウェア開発の知識や技術を習得するために、3年生が数名のチームに分かれ、チーム単位でのソフトウェア開発演習を行っている。しかし、学生のソフトウェア開発能力にバラツキがあるので、与えられた課題を期日までに達成できないチームがあるという問題が生じていた。そこで橋浦・桑原・秋ら(2007)は、ソフトウェア開発に必要な各役割を遂行する学生の能力に影響を及ぼす人的要因が既知である場合に、それを利用してチーム編成の最適案を自動生成するシステム EtUDE/GO を開発した。しかし、チーム編成に影響を及ぼす人的要因については未知のままであった。

そこで著者らは、共分散構造分析などを導入して、チーム編成に直接影響を及ぼす真の要因と、間接的に影響を及ぼす代用特性との間の関係式を求め、その関係式を EtUDE/GO に適用してチーム編成の最適案を自動生成した。そして、各学生が行った作業のログ情報を利用して求めた、各学生の貢献度評価などにより、チーム編成の最適化が演習授業にもたらした影響を分析した。分析の結果、チーム編成の最適化により、役割を分担する能力を持つ学生達を各チームに分散させて割り当てると、演習課題達成のために活躍してくれると期待した各学生が、実際の演習授業でもそれぞれのチームで活躍し、すべてのチームにおいて一人の中途脱落者もなく演習課題を達成できたことを確認している。

キーワード

共分散構造分析, 真の要因と代用特性, パス図, 最尤推定法, χ^2 検定

1. はじめに

芝浦工業大学の情報工学科には、3年生を対象とする「ソフトウェア開発」の演習授業(期間は半年間)がある。この授業の目的は、数人からなるプロジェクトチームを編成して、要求抽出からプログラム開発(デバックやテストの作業を含む)までの全工程を体験させることにより、ソフトウェア開発に必要な知識と技術を学ばせることにある。なお、この授業では、学習者の作業効率向上を目的として開発した、コミュニケーション支援、成果物の管理支援、プロジェクト管理支援などの機能と、学生が生成するすべての情報をログ情報として自動収集する機能を持つ、ソフトウェア開発演習授業支援環境 EtUDE (Environment for Ultimate software Development Exercise) を利用して演習を行う(磯崎・山下・石川ほか, 2005; 石川・橋浦・山下ほか, 2006)。

2004年度の演習授業では、1チームの人数こそは3~4名に制限したが、チーム編成は学生達の自由意思に任せた。このため、仲の良い友人同士で編成されたチームがほとんどであった。このため、メンバー相互のコミュニケーションはよかったが、役割分担が曖昧なままで作業がなされ、なされた作業の内容や密度がチームによって異なるなどの状況が生じた。その結果、成果物はチーム間でのバラツキが大きいという問題点が生じた。また、演習終了後に行なったアンケート調査により、「役割分担が出来ていない」「優れている人に作業が集中する」「作業の進捗はチームによる差が大きい」などの問題点も浮かび上がってきた。

授業の出席者全員が同一の課題を与えられ、それに対して出席者全員がそれぞれ一人で回答を作成するという形式の演習を個人演習と呼ぶ。これに対して、プロジェクトチームのメンバーがそれぞれ役割を分担し、協力して課題を解決して行くという形式の演習をプロジェクト演習と呼ぶ。プロジェクト演習は個人演習に比べて、与えられる課題の規模も大きく、出席者個人の作業の自由度も大きい。それゆえ、プロジェクト演習ではチーム間での能力差を小さくしないと、チーム間での成果物のバ

¹⁾ 芝浦工業大学大学院

²⁾ 日本HP株式会社

³⁾ 三井情報株式会社

ラツキが大きくなる。また、役割を分担する能力を持つメンバーが、役割ごとに最低でもチームに一人は存在しないと期間内に課題を達成できない可能性が高い。ソフトウェア開発のプロジェクト演習を有効なものにするには、人的要因を明らかにしたソフトウェア開発演習でのチーム編成の最適化が重要であるとして、橋浦ら (2007) のチーム編成が最適であるための条件 (制約) に、役割を割り当てるために用いる深層の要因を追記した定義が図1である。

- | |
|---|
| <p>C1 役割を遂行可能な適性を持つ学生を各チームに、役割ごとにそれぞれ一人以上割り当てる。
ただし、種々の役割を遂行する能力を決定する深層の要因を、「ソフトウェア開発の専門的スキル (以後、Skillと記す)」と「ソフトウェア開発対象の分析能力 (以後、Capabilityと記す)」の二つの役割遂行能力とする。
Skill：ソフトウェア開発におけるプログラミングなどの専門的スキルであり、学習や経験により高まる能力
Capability：ソフトウェア開発に必要な論理的に分析／推論する能力</p> <p>C2 チーム間の能力差をできるだけ小さくする。</p> <p>C3 チーム間の人数差は一人以内とする。</p> <p>C4 どの役割に対しても遂行可能な適性を持たない学生でも、必ずどれかのチームに割り当てる。</p> |
|---|

図1 チーム編成条件定義

次に、その学生が与えられた役割を遂行可能な適性を有するか否かを判断するには、各学生が持つ人的要因 (人的特性とも言う) を調べる必要がある。橋浦ら (2007) はチーム編成に影響を及ぼす人的要因には次の2種類があると考えた。

- F1 真の要因 (真の特性とも言う)
ソフトウェア開発に必要な各役割に対して、それを遂行する学生の能力に直接影響を及ぼすと考えられる要因 (特性とも言う) を真の要因と呼ぶ。真の要因は直接計測可能であることは希なので、潜在変数と見なすことができる。
- F2 代用特性
ソフトウェア開発に必要な各役割に対して、それを遂行する学生の能力に間接的に関係があると考えられる要因 (特性とも言う) の中で、特に直接計測可能なものを代用特性と呼ぶ。
代用特性は直接計測可能なので、観測変数と見なすことができる。

真の要因が直接計測可能であれば、その数値を以て、その学生が与えられた役割を遂行可能であるか否かを判断できる。しかし、真の要因が直接計測可能であることは希なので、直接計測可能な代用特性の数値を見て、代

用特性を制御することによって、真の要因を間接的に制御することを考える。そのためには、真の要因と代用特性との関係が、関係式の形で与えられなければならない。即ち、真の要因を目的変数、代用特性を説明変数と見なし、目的変数を説明変数の式で表現する必要がある。

橋浦ら (2007) は、目的変数 (真の要因) を説明変数 (代用特性) の式で表せた場合に、その式を利用して、チーム編成の最適案を自動生成するシステム EtUDE/GO (Environment for Ultimate software Development Exercise/Group Organizer) を開発した。しかし、橋浦ら (2007) の研究では、目的変数 (真の要因) と説明変数 (代用特性) との関係までは明らかになっていなかった。

本論文では、多変量解析の一手法である共分散構造分析 (Covariance Structure Analysis, 以後、CSAと記す) などを利用して、目的変数 (真の要因) と説明変数 (代用特性) の関係を明らかにすることにより、目的変数 (真の要因) を説明変数 (代用特性) の関係式で表す。しかる後に、この関係式を EtUDE/GO に適用することにより、チーム編成の最適案を生成する。生成された最適案を基に演習授業のチーム編成を行い、これを基に演習授業を行う。次に、半年間の演習授業の終わりに、チーム編成の最適化が演習授業にもたらした影響 (効果) を分析し評価する。

なお、本論文では、目的変数 (真の要因) と説明変数 (代用特性) との因果関係の要因パス図を CSA という代わりに、CSA よりも広義な構造方程式モデル (Structural Equation Models, 以後、SEMと記す) と呼び、仮説モデルを SEM 仮説モデルとする。

本論文の以後の構成は次のとおりである。2. では本研究の関連研究と位置づけを述べる。3. では人的要因を分析するプロセスとチーム編成最適化が演習授業にもたらした影響 (効果) を評価するプロセスを述べる。4. ではデータ収集と SEM 仮説モデルの策定について説明し、5. では SEM 仮説モデルの検証と微修正について述べる。6. ではチーム編成と妥当性の評価、7. では演習終了後におけるチーム編成最適化の有効性評価を述べる。8. では本稿のまとめを述べる。

2. 関連研究

ソフトウェア開発グループ演習は通常の講義などと異なり、学習者と教授者の間での頻繁なコミュニケーションが必要となるため、教授者への負担が大きい。このため、これまでも演習を支援するシステムが数多く提案されている。例としては、Chiken & Hazeyama (2003)、松浦・相場 (2003)、Jang & Steinfield & Pfaff (2002) などがあ

どない。しかし、樫山 (2001), Hazeyama & Sawabe & Komiya (2002) は、ソフトウェア開発のような知識集約性の高い作業においては個人の能力差が大きくなりやすいため、グループ編成の良し悪しが、その教育効果に直接影響することを指摘し、学生一人ひとりの個性を考慮した最適なグループ編成を行うことの必要性を述べている。

岩崎・宮地・尾上 (2002) は、小学校での班学習の基礎となる学習グループの編成を行うシステムを開発している。岩崎ほか (2002) は遺伝的アルゴリズムによる解と総当り法による解を比較し、遺伝的アルゴリズムによる解が上界値に十分近く、実用において十分な有効性を持っていることを確認するとともに、グループ編成に遺伝的アルゴリズムを用いることで処理に要する時間が大幅に短縮できる利点を述べている。

これらの研究では、課題を遂行するために必要となる役割の概念を持っていないため (つまり、チーム編成ではなくグループ編成なので)、グループ内での個人の役割分担については考慮されていない。

ソフトウェア開発演習のグループ編成には学習者個人のスキルを考慮する必要があるとして、グループ編成に学習者個人のスキル情報を利用している研究がある。樫山 (2001), Hazeyama & Sawabe & Komiya (2002) は、スキルに関する属性情報についてはシステム分析能力、システム開発への関心度、将来の進路、リーダーシップ能力、コミュニケーション能力をアンケートによって収集し、それらを学習者が有するスキルに関する属性情報とみなし、これらの属性情報を参照しながら、グループ間の能力差が最小となるような戦略に基づいてグループ編成を行う実験を行っている。この研究は、学習者個人のスキル情報には注目しているものの、スキル情報に基づく役割分担までは踏み込んでいない。しかも、個人の属性情報には間隔尺度を用いたアンケートで得られた評価値 (主観的な値) を使用しているため、編成結果が学習者の自己評価 (主観) に左右されている可能性がある。

本研究は、プロジェクトチームの編成には、学習者個人のスキルや適性に基づいて役割分担を考える必要があり、役割分担の基礎となるスキルや適性の評価には客観的なデータを用いる必要があることを強く主張するものである。このため本研究は、ソフトウェア開発演習でのチーム編成に及ぼす人的要因の視点から、多変量解析を使って最適なチーム編成を導くことを考える。

これまででは、与えられた課題を半年の授業期間中に達成できなかったグループが存在した。この問題点を解決するために、演習課題達成に必要な (ソフトウェア開発のための) 種々のスキルを考慮し、スキルごとに一定以上の能力を持つ学習者を割り当てれば、そのプロジェクトチームは全ての課題を達成できるという仮説に基づいてチーム編成を行う。しかし、与えられた役割を遂行す

る能力の有無を、客観的なデータに基づいて判定した結果と、学習者達が自ら下した判断とは必ずしも一致しない。このため、本研究では客観的なデータに基づいて導いた役割分担を学習者達に示すことまではしない。何故なら、現場のソフトウェア開発においても、スキルをベースに役割分担することよりも、モジュールを単位に役割を分担する場合の方が遙かに多いからである。役割を分担する能力を持つ学習者が揃ってさえいれば、その人達が本来得意とする役割を分担しなくても、足りないところをその人達が補う形で活躍することにより、プロジェクトは成功すると考えているからである。つまり、ソフトウェア開発プロジェクトは、Steiner (1972) や亀田 (1997) の分類による結合型 (conjunctive) に属すると考えているからである。

ここで、人的要因の視点から関連研究を眺めてみたい。しかし、人的要因全体では範囲が広すぎるので、ソフトウェア開発に関係する人的要因だけに絞ってみると、品質工学的アプローチによる研究には江崎 (1996), 江崎 (1997), 江崎・山田・高橋ほか (2000), 江崎・山田・高橋 (2001), 高橋 (1999), 山田 (2002), 山田・松田 (2003), 山田・富高 (2005) があり、多変量解析による研究には古宮・石崎 (1993), Komiya & Takahashi & Ishizaki (1993), 古宮・石崎 (1994), 山田・影山・木村 (1998) がある。これらは手法の違いはあるものの、いずれもソフトウェアの信頼性に及ぼす人的要因に関する研究である。したがって、ソフトウェアの品質や信頼性などからそれらの要因は分析できていても、ソフトウェア開発演習でのチーム編成に及ぼす人的要因の視点から、多変量解析を使って最適なチーム編成を導く研究は未だなされていないようである。

3. 本研究で行う分析—評価プロセス

本研究では、SEMなどを利用して、ソフトウェア開発演習でのチーム編成に影響を及ぼす人的要因を分析し、目的変数 (真の要因) と説明変数 (代用特性) の関係を明らかにすることにより、目的変数 (真の要因) を説明変数 (代用特性) の関係式で表現する。しかる後に、この関係式をEtUDE/GOに適用することにより、チーム編成の最適案を自動生成する。生成された最適案を基に演習授業のチーム編成を行い、これを基に演習授業を行い、半年間の演習授業の終わりに、チーム編成最適案が演習授業にもたらした影響 (効果) を分析し評価する。

3.1 人的要因の分析プロセス

(1) なぜSEMを用いるのか

真の要因を見つけ出す方法の一つに、因子分析法などを使って、真の要因を探索的に抽出する方法がある。これを探索的因子分析という (狩野 2002)。これは観測可

能な因子（代用特性）のすべてを列挙し、それらのすべての組み合わせの相関係数を求め、高い相関を示した因子同士の間で共通に存在する（直接的には）観測不可能な因子が何であるかを推定することにより、真の要因を抽出する方法である。言わば、虱潰しによる分析方法である。このため、分析者の先入観が入りにくい方法なので、思いも寄らない分析結果を導くこともある。その意味では、非常に強力な方法だと言えるが、主要な観測可能な因子のすべてを列挙できたか否かの確認作業に手間取り、効率的な手法ではない。このため、探索的因子分析を最初に用いるのは効率的でない。

これに対して、分析者の経験と価値観によって、使用する代用特性を絞り込むとともに、存在するかも知れない真の要因の名をも具体化し、これらの因子（真の要因と代用特性）の間に何らかの関係性が成り立つと仮定（つまりSEM仮説モデルを設定）して、設定された仮説を代用特性の観測値を使って一つひとつ評価しながら、モデルを段階的に改良して行くことにより具体的な関係式を求める、という方法がある。これを検証的（または確認的）因子分析という（狩野 2002）。検証的因子分析をさらに発展させたものに、CSAがある。大まかな理解としては、CSAは因子分析と重回帰分析を統合的かつ検証的に行うものだと考えることができる。CSAは、共分散構造だけではなく、潜在変数の平均構造を解析するモデルも開発されたので、SEMとも呼ばれるようになった。しかし、CSAは厳密にはSEMと同義ではない。SEMは、CSAをはじめとする、検証的因子分析、重回帰分析、パス解析、主成分分析、主因子法、分散分析、相関行列などの多くをその下位モデルとして包含している（豊田 1996）。

以上の考察により、探索的因子分析を最初に用いるのではなく、先ず検証的因子分析を用い、それでも安定的なSEM仮説モデルが得られない場合に限り（この時点では探索範囲が狭まっているので）、検証的因子分析を補足する目的で探索的因子分析を用いるのがよい。

(2) SEMの特徴

SEMでは、問題の構造をモデル化し、潜在変数、観測変数、誤差変数の三つの変数で表現する。SEMで描くモデルは変数間の因果関係を表しているので、因果モデルとも呼ばれる。なお、潜在変数に影響を与える誤差変数を特に攪乱変数と呼び、観測変数に影響を与える誤差変数と区別することもある。ここでは、潜在変数は真の要因を、観測変数は代用特性をそれぞれ表している。

なお、SEMの分析を行う場合は、観測変数に名義尺度のデータは使えない。名義尺度はデータの分類基準としてのみ扱う。

SEMの特徴は次のとおりである。

- T1 図3のようなパス図を使って問題の構造のモデルを図示することができる。
パス図における記号の意味は図2のとおりである。
- T2 パス図を参考にして潜在変数、観測変数、誤差変数の3者の関係を回帰方程式で表現する。
- T3 パス図に現れた母数の値の推定に最尤推定法を用いているため、次のような特徴を持つ。
 - ・適合度関数の値を使用した χ^2 検定が利用可能である。
 - ・尺度不変性（標準化解と非標準化解の間で簡単に相互に変換できるという性質）を持つ。これは、最小二乗法や主因子法を用いている他の方法にはない特徴である。
- T4 χ^2 検定などを利用してモデルの当てはまり具合を確認することができる。
- T5 モデルの当てはまり具合を確認しながら、モデルを改良して行くことができる。
- T6 SEMは、その下位のモデルとして回帰分析を含んでいるので、回帰分析で用いられている検定技術や評価技術などが利用できる。

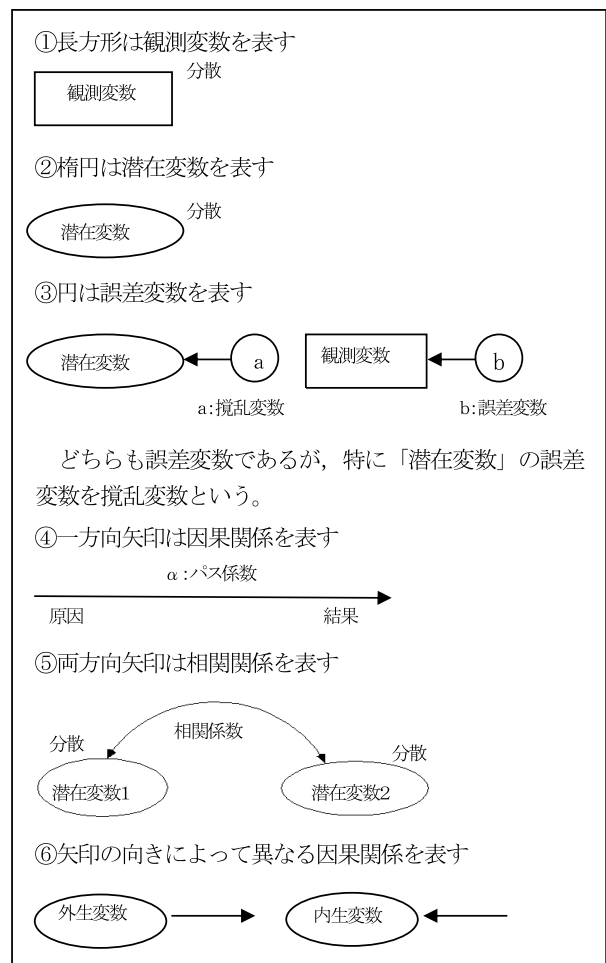


図2 パス図で使用する記号

(3) SEMによる分析の手順

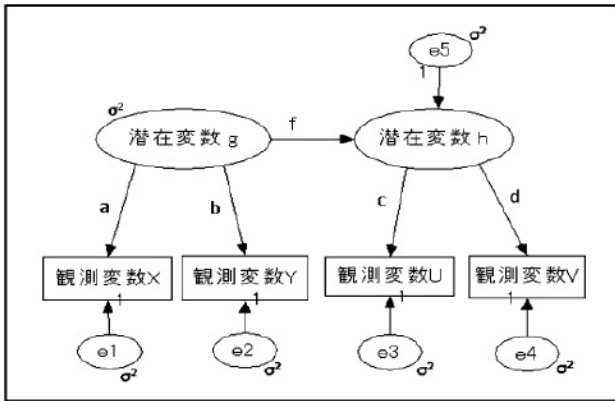


図3 パス図の例

SEMによる分析の手順は次のとおりである。

- P1 パス図を用いて問題の構造をモデル化（図示）する。
- P2 パス図を参考にして潜在変数，観測変数，誤差変数の3者の関係を回帰方程式で表現する。
- P3 χ^2 検定などにより，SEM仮説モデルの当てはまり具合を確認しながら，SEM仮説モデルを改良して行く。

なお，パス図の例（図3）の式は，

$$\begin{bmatrix} g \\ h \\ X \\ Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ h \\ X \\ Y \\ U \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g \\ e_5 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \quad \text{.....①}$$

である。

χ^2 検定は，因果モデルの当てはまり具合を評価するために，次のような帰無仮説を立てて検定を行う。即ち，
 帰無仮説 H_0 ：パス図の因果モデルは正しい，
 対立仮説 H_1 ：パス図の因果モデルは誤りである

である。

なお，ここで使用する χ^2 検定は，クロス集計表の独立性検定のためにピアソンの χ^2 検定等の一般的な帰無仮説「棄却されて欲しいと期待される仮説」とは正反対の使い方である。

χ^2 値（計算値）が下記の式で定義される自由度 df のときの有意水準値（理論値）よりも小さければ，「パス図の因果モデルは（一応）正しいと判断され，帰無仮説は棄却されない。

なお，パス図の例（図3）の式は，ここで， χ^2 値は，最尤法（ml：Maximum Likelihood Estimation）を使って

$$\chi^2 = (n-1)f_{ml} \quad \text{.....②}$$

で求められ， f_{ml} は

$$f_{ml} = \text{tr}(\Sigma^{-1}S) - \log|\Sigma^{-1}S| - k \quad \text{.....③}$$

で求められる。ただし， S は下記のような実測値の行列を意味し， Σ^{-1} は下記のような理論値の行列 Σ の逆行列を意味する：

$$\text{実測 } S = \begin{bmatrix} S_x^2 & S_{xy} & S_{xu} & S_{xv} \\ S_{xy} & S_y^2 & S_{yu} & S_{yv} \\ S_{xu} & S_{yu} & S_u^2 & S_{uv} \\ S_{xv} & S_{yv} & S_{uv} & S_v^2 \end{bmatrix}, \quad \text{理論 } \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xu} & \sigma_{xv} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yu} & \sigma_{yv} \\ \sigma_{xu} & \sigma_{yu} & \sigma_u^2 & \sigma_{uv} \\ \sigma_{xv} & \sigma_{yv} & \sigma_{uv} & \sigma_v^2 \end{bmatrix}$$

なお， tr はトレース（trace）と読み，行列の対角線成分の和を意味する。また， k を観測変数の個数， p を母数（SEMにおいて，その値が推定の対象となるような変数）の個数とすると， χ^2 値の自由度 df は，

$$df = \frac{1}{2}k(k+1) - p \quad \text{.....④}$$

で求められる。

χ^2 値（計算値）が有意水準値（理論値）より小さくなければ，パス図の因果モデルは誤りであるとして棄却され，修正されなければならない。標本数が100以下の場合， χ^2 検定で棄却されないことが必要条件であり， χ^2 値（計算値）は小さいほどよく，有意確率の p 値は大きいほどよい（朝野 2005）。一方，モデル全体の評価基準には，適合度指標（GFI, AGFI, AIC, RMSEA, CFI）を用いる。ただし，略語の意味は次のとおりである（豊田 2007）。

GFI：Goodness of Fit Index（適合度指標）

GFIが1に近いほど，説明力のあるモデルである。

AGFI：Adjusted GFI（修正適合度指標）

「GFI \geq AGFI」であり，GFIに比べてAGFIが著しく低下するモデルはあまり好ましくない。

AIC：Akaike's Information Criterion（赤池情報量基準）

複数のモデルのうちどれが良いかを選択する際には，AICが最も低いモデルを選択する。

RMSEA：Root Mean Square Error of Approximation

モデルの分布と真の分布との乖離を1自由度あたりの量として表現した指標である。

CFI：Comparative Fit Index

独立モデル（すべての変数が独立（相関が0）のモデル）と比較した指標であり，1に近いほどよい。

モデルの部分評価基準は，変数間のパス係数が大きい値である必要がある。0に近いパス係数の場合，二つの変数間は「無関係」であることを示す。また，パス係数が有意か否かの検定には， t 検定を用いる。

なお、SEMにおいて、モデルが識別されない状態（一つのモデルに対して母数の推定値が無数に存在する場合）があり、これを解決することを「識別問題」と呼ぶ。

識別問題を解決するには、自由度がマイナスの場合には、自由度が0以上になるまで制約を加える必要がある。しかし、自由度が0以上でも識別されない場合には、固定母数を設定する。固定母数の設定には、パス係数を「1」、パス係数の等値化（同じ数字にする）、外生変数の分散を「1」にする。その他、「内生変数間および内生変数と外生変数間の共分散を設定しない」などの方法がある。（豊田 2007）

3.2 チーム編成における最適案の自動生成と確認

観測変数（代用特性）と潜在変数（真の要因）との関係式を求め、潜在変数を観測変数の式で表す。次に、代用特性の観測データをEtUDE/GOに代入し、代用特性の観測データから潜在変数の値を求める式を使ってチーム編成の最適案を自動生成する。このとき生成されたチーム編成の最適案が、チーム編成が最適であるための条件（図1の）C1～C4を満足しているかどうか確認する。なお、条件C2の確認作業のみは、分散分析と多重比較を使用して、チーム間での能力に差がないことを確認する。その他の条件は手作業で確認する。そして、生成されたチーム編成の最適案が条件C1～C4を満足していることを確認できたら、この案に基づいてチーム編成を行い、それぞれのチームに学生を割り当てる。学生達はそれぞれのチームに分かれて演習を行う。

3.3 チーム編成最適化の効果を評価するプロセス

半年間のソフトウェア開発演習の終了後に、チーム編成の最適化が演習授業にもたらした影響を分析し、チーム編成の最適化により、役割を分担できる能力を持つ学生達を各チームに割り当てると、その学生達が演習課題達成のために活躍してくれると期待したが、実際の演習授業では、これらの学生達が期待どおりに活躍し、すべてのチームが演習課題を一人の中途脱落者もなく達成できたかどうかを確認する。

演習授業において、チーム編成最適化の効果があつたことを証明するには、次のようにすればよい。即ち、学生達が自ら選んだ役割を、学生達の演習に対するモチベーションを高める指標とするため、「ソフトウェア開発演習の最終成果物において貢献した学生達が同一グループであり、それ以外の学生達が同一グループである」と役割により統計的に判別できれば、証明できたことになる。図4は、評価対象とその検証方法である。

ソフトウェア開発演習において、各学生が実際に活躍したか否かはEtUDEが自動取得する全学生のログ情報を見て、演習授業のTA（Teaching Assistant）を含む教授者らが判断する。EtUDEでは、コミュニケーション

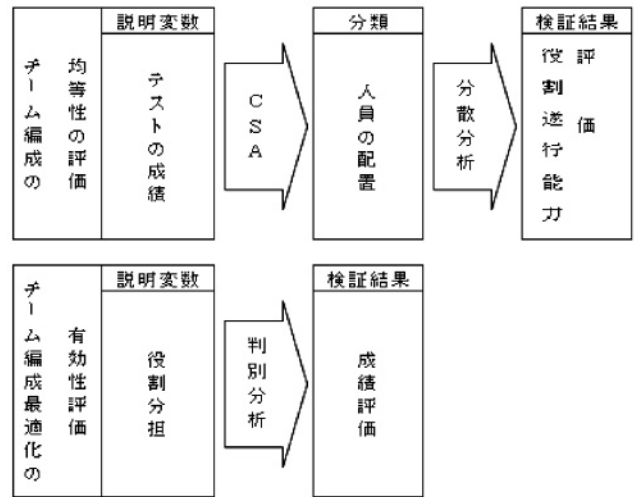


図4 評価対象とその検証方法

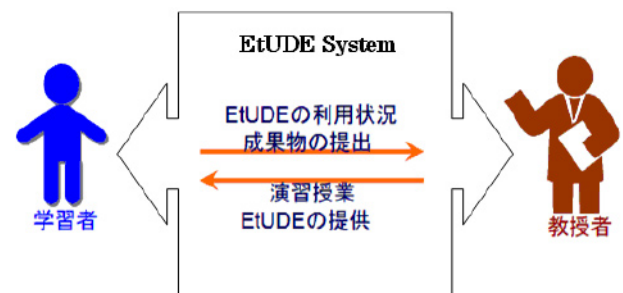


図5 演習参加者の関係

支援、成果物管理支援、プロジェクト管理支援の三つの支援により、グループ演習での個人単位のキメの細かい指導も行え、時間や場所によらず、演習時間同様のことが行える。その上、グループのメンバーや教授者への質疑応答・連絡等のコミュニケーションができる。

EtUDEを使って取得できる情報は、作成した成果物の共有・管理状況、チームの各メンバーや各チームの進捗状況、コミュニケーション回数の把握である。実際の分析では、図5の演習参加者の関係から、教授者が演習授業での各学生の最終成果物への貢献度で評価する。具体的な分析は、各学生のチーム内での貢献度を「有：1、無：0」で表し、その評価値を従属変数とし、実際のチームでの四つの役割分担をそれぞれ説明変数として判別分析を行う。なお、判別分析は、線形判別関数を使う場合には、目的変数が質的変数で説明変数が量的変数の、重回帰分析と見なすこともできる。したがって、線形判別関数を使う場合には、判別分析もSEMの下位モデルと見なすことができる。

4. データの収集とSEM仮説モデルの策定

4.1 データ（観測変数の値）の収集

後期授業が開始してから実際の演習が始まるまでの間

にチーム編成を行う必要がある。このため、チーム編成のために、短期間に観測変数として使用できるデータは限られていた。具体的には、この年の前期に行われた授業「ソフトウェア工学」の期末テストに出題した問題M1, M2, M3の成績と、グループ演習前に行ったJAVAプログラムの講義の中で出題した、学生達のプログラミングスキルを問う問題PGM1, PGM2の成績だけを使用した。

観測変数の値収集のために出題した内容は次のとおりである。

- M1 テストカバレッジに関する問題
 M2 以下の5問の合計
 (P1) ソフトウェア分析法の一つであるロバストネス分析
 (P2) クラス図を完成させる問題であり、クラス設計の問題
 (P3) 多重度が多対多の関係にあるクラスを、1対多の関係へ変換するルールについて問うクラス設計の問題
 (P4) 多対多の関係から1対多の関係へ変換ルールを使って、クラス図を修正する、クラス設計の問題
 (P5) クラス図を基にシーケンスを作成する設計問題
 M3 ソフトウェアライフサイクルモデルに関する問題で、プロジェクトマネジメントのための知識
 PGM1 オーバーロードを使ってクラスを記述し、円と楕円の面積を計算する問題
 PGM2 Polygonに設定したRectangleの面積計算メソッドを、オーバーライドを使ってTriangle用に書き換え、面積を計算する問題

なお、この演習授業の履修者数は63人であったが、欠測値のある2人を除き61人で分析した。

(1) 多重共線性の検証

観測変数が互いに独立であるか否かの検証法としては、SEMの下位モデルである重回帰分析で使われている共線性の診断がある。多重共線性に近い状態を調べる指標は、VIF (Variance Inflation Factor, 分散拡大要因) を用いる。VIFは、説明変数の相関行列の逆行列における対角成分の和 (trace) であり、

$$VIF = tr|\Sigma|^{-1} \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

で求められる。

VIF値は、式⑤から、PGM1が1.38537、PGM2が1.38811、M1が1.04223、M2が1.03027、M3が1.05129である。

したがって、 $VIF \leq 10$ であるので、観測変数が互いに独立であると見なしてよい。

(2) 尺度の信頼性に関する分析

心理学では一般に、評定に用いる項目を幾つか集めて下位尺度を構成し、下位尺度を幾つか集めて尺度を構成する。このとき、下位尺度は互いに正の相関関係にある項目群で構成される。他の項目と負の相関関係にある項目群については、これらを逆転項目群として、これらの項目における得点を逆向きに換算する。(小塩 2005)

ところで、尺度を設定すれば、いつでもそれが信頼できるという保証はないので、設定した尺度が信頼できるどうかを分析する必要がある。

尺度の信頼性測定法には、因子分析を使用しないでも測定できるCronbachによる信頼性統計量 α 係数がある。

多変量解析では、変数の数が多いほど、モデルの適合度は高くなるが、そのモデルが最適なモデルであるとは限らない(Cronbach 1951, 狩野 2002)。観測変数の最適な数は、SEM仮説モデルや、尺度の「信頼性統計量 α 係数」の値に基づいて、観測変数を加減させることにより決定される。判断基準の一つである信頼性統計量 α 係数は、1以下の値をとり、0.7~0.8以上が望ましく、最低でも0.5以上必要である。

今回の5変数の信頼性統計量 α 係数は、計算の結果0.355と求まり、判断基準の値よりも低い。しかし、 α 係数の値によって変数を削除し過ぎるとSEM仮説モデルが立てられなくなるので、このため、変数を削除せず、このままでSEMでの仮説モデルを策定する(狩野 2004)。

4.2 統計解析用ソフトウェアツールの選定

SEMの統計解析用ソフトウェアの選定では、SAS (Statistical Analysis System) のようにパス図を用いずコマンドラインだけで分析を進める方法と、Amos (Analysis of Moment Structure) のようにパス図を用いてビジュアルにSEM仮説モデルを確認しながら、SEM仮説モデルを段階的に修正して行く方法がある。前者は変数の変更によりSEM仮説モデルがどのように変化するかが見えにくい。それゆえ、SEM仮説モデルの変化をビジュアルに確認できる後者 (Amos) を利用する。

4.3 仮説に基づくモデルの策定

ソフトウェア開発演習のためのチーム編成に影響を及ぼす人的要因のSEM仮説モデルを策定した(図6)。

図6のモデルは、「ソフトウェア開発に必要な種々の役割を遂行する能力を決定する幾つかの要因(真の要因)からなる(最も深い所にある)層、ソフトウェア開発に必要なそれぞれの役割を遂行する能力そのものを表す幾つかの要因(真の要因)からなる(中間にある)層、幾つかの代用特性からなる(表面にある)層、の3階層からなる。なお、種々の役割を遂行する能力を決定する要因としては「Skill」と「Capability」の二つを想定した。

ソフトウェア開発に必要な役割は、開発するソフトウェアの規模が大きければ大きいほど多くの役割が必要となるが、今回の演習で開発するソフトウェアの規模から考えて、PM（プロジェクトマネージャー）担当、分析・設計担当、コーディング担当、QA（Quality Assurance）担当という四つの役割で充分だと橋浦ら（2007）は考えた。すなわち、プロジェクト内における各メンバーの役割は、以下の四つである。

- ① PM担当：主にプロジェクトの進捗管理、進捗報告書の提出、発表資料作成の責任を負う。作業の割り振りやどの程度で作業が完了するのかなど、プロジェクトがスムーズに進むように管理しなければならないため作業量は多い。そのため、設計・分析などの作業は他のメンバーに任せることになる。
- ② 分析・設計担当：ユースケース図・ユースケース記述作成、クラス図・シーケンス図作成の責任者として、それぞれの図や記述作成の分担の割り振りとりまとめや提出の責任を負う。
- ③ コーディング担当：コーディングの分担の割り振りとりまとめ、コーディング結果の提出についての責任を負う。
- ④ QA担当：主にテストケースの作成、コーディングを担当する。QAの責任者として、テストケース作成を行い、テスト実施の分担の割り振りとりまとめ、デバッグ、テストケースとテスト結果の提出についての責任を負う。

なお、チーム編成の前に取得する代用特性は多ければ多いほどよいが、実際に取得できた観測データは、4.1節で述べた5変数である。

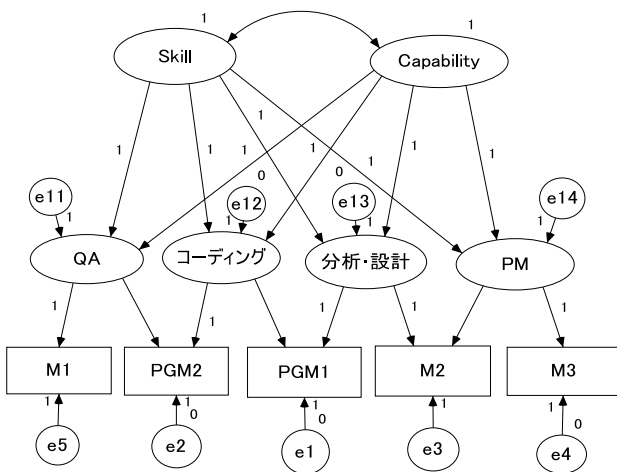


図6 2次因子仮説モデルのパス図

- ※ 1 モデルに含まれる変数の数：20
- ※ 2 観測される変数の数：5, 観測されない変数の数：15
- ※ 3 外生変数の数：11, 内生変数の数：9

※ 4 自由度 df は、式④に適用し、
 $df = 15 - 2[\text{因子の分散}] - 17[\text{パス}] - 9[\text{誤差}] + 20[\text{制約}] = 7$

である。

このモデルの分析結果は、自由度0以上の条件を満たし、かつ、算出するために固定母数や制約（分散を0に固定）を増やしたが、唯一解を求めることができなかった。また、図6では、パス係数のほとんどが固定母数「1」であるため、本来の目的から逸脱する恐れがあり、その解決策として代用特性の数を増やすことが考えられるが、安易に代用特性を増やすことができないため、他のモデルの分析を行う。

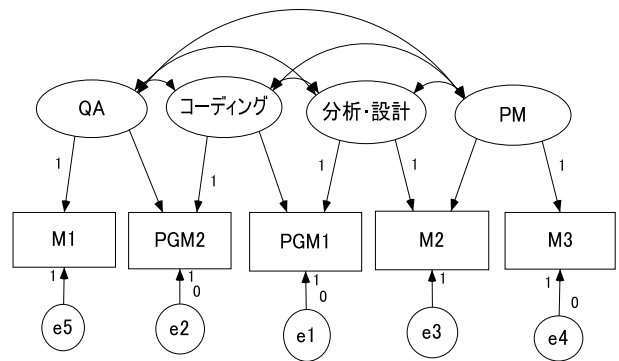


図7 役割と代用特性との因果関係モデルのパス図

※自由度 df は、式④に適用し、
 $df = 15 - 4[\text{因子の分散}] - 14[\text{パス}] - 5[\text{誤差}] + 8[\text{制約}] = 0$

である。

図7は、役割と代用特性の関係が1対1になっている橋浦ら（2007）のモデルをSEM仮説モデルに変形した「役割と代用特性との因果関係モデル」である。図6の2次因子仮説モデルから深層の要因を取り除いた「代用特性との間に位置する真の要因である4種類の役割（PM, 分析, 設計, QA）と5種類の代用特性（知識1（M1）、知識2（M2）、知識3（M3）、技能1（PGM1）、技能2（PGM2））との間の因果関係をモデル化したもの」であるが、2次因子仮説モデルと同様に、代用特性の数が不足していたため識別されなかった。

したがって、次節以降では、図6の2次因子仮説モデルから中間層の役割を取り除いた「深層の要因と代用特性との因果関係モデル」の適合度の検証を行うこととする。

5. SEM仮説モデルの検証と微修正

モデルの検証には、標本サイズが小さいこと、尺度の信頼性が低いことを考慮した指標を優先して評価を行う。

まず、第一に、モデルが収束すること、次に χ^2 検定を行う。その後、適合度指標（モデルの全体評価基準）による評価、パス係数の評価（モデルの部分評価基準）を行う。

モデルの微修正は、評価過程におけるそれぞれの検定や指標により、適正な修正を行う。

5.1 深層の要因と代用特性との因果関係モデルの検証

図6の2次因子仮説モデルから、役割に関する4種類の（真の）要因を取り除いて出来たモデルが図8である。

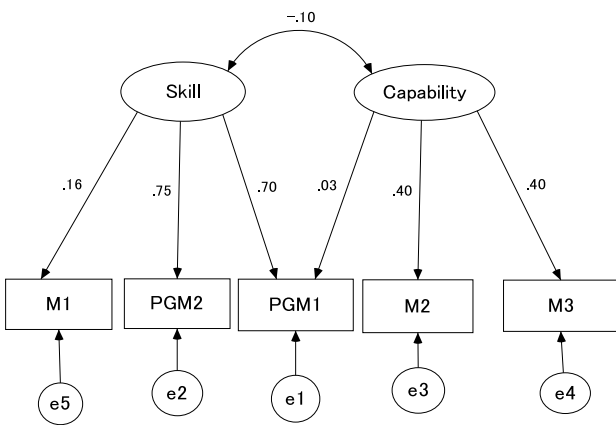


図8 深層の要因と代用特性との因果関係モデル（標準化推定値）

これは、深層の要因（SkillとCapability）と5種類の代用特性（知識1（M1）、知識2（M2）、知識3（M3）、技能1（PGM1）、技能2（PGM2））との間の因果関係をモデル化したものである。

この深層の要因モデルの検定結果は、 χ^2 値（計算値）が1.626、自由度が4、確率水準（ $p < 0.05$ ）での理論値9.488よりも小さいため、仮説は棄却されなかった（モデルは不適合ではない）。それぞれのパス係数は図8のとおりとなった。なお、2潜在変数（SkillとCapability）の相関が0.100であり、明らかに2変数の間に相関がないことから、二つの潜在変数の相関を0としたモデル（無相関モデル）の分析を行った。

無相関モデルの結果は、「Capability - PGM1」のパス係数が0となり、標本数の少ないモデルでのパス係数が小さい場合は無効である。したがって、当初の仮説の範囲内での微修正を行う。それぞれの適合度は表1のとおりである。

表1 適合度指標によるモデルの評価(1)

モデル	GFI	AGFI	RMSEA	AIC	CFI
深層要因モデル	0.989	0.960	0.000	23.626	1.000
無相関モデル	0.989	0.966	0.000	21.716	1.000

5.2 探索的モデル特定化によるSEM仮説モデルの微修正

SEM仮説モデルの微修正は、当初の仮説から逸脱しない範囲で行う。このため、SEM仮説モデルの二つの潜在変数に対して、それぞれの核となる観測変数（Skill→PGM2, Capability→M3）は動かさず、それ以外の観測変数を流動的なパラメータとして扱う。

Amosによる探索的モデル分析では、部分的な探索的因子分析を行うこと、すなわち検索的因子分析を「探索的モデル特定化」により潜在変数（Skill, Capability）と観測変数（PGM1, PGM2, M1, M2, M3）の間に引く線を、必須の線（Skill→PGM2, Capability→M3）とそれ以外の任意の線（Skill↔Capability, Skill→PGM1, Skill→M1, Skill→M2, Capability→PGM1, Capability→M1, Capability→M2）とに分離し、探索範囲を限定した探索的因子分析を行う。

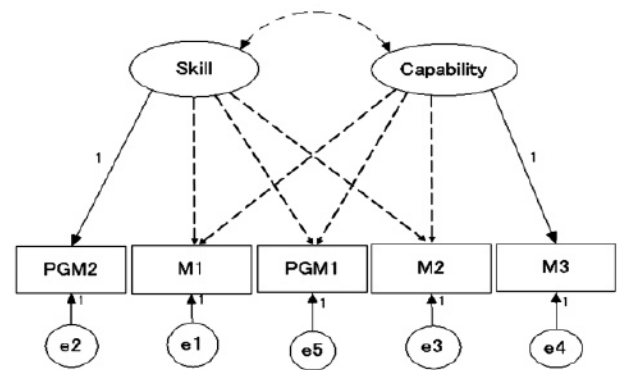


図9 探索的モデル特定化のパス図

統計解析用ソフトウェアAmosを利用して図9の探索的モデル特定化を行うと、全128の組み合わせのうち、収束し、解が求まったモデルは表2に示す12のモデルだけである。また、これらのモデルの適合度を評価しやすいうように、モデル同士の善し悪しを比較する際に用いる指標AIC 0の値で並び替え、便宜上、「No.」列に1から12の番号を付した。

結果（表2）の評価基準は、C（chi-square）が小さく、C/df（chi-square divided by the degrees of freedom）は0に近く、すべてのモデルの中で、AIC 0の値が小さいものほどよいモデルある。したがって、今回の表2における最適解はNo. 1のモデルであると言える。

なお、No. 1のモデルのパス図（図10）は、「深層の要因と代用特性との因果関係モデル（図8）」の観測変数PGM1とM1の扱いを見直したモデルである。

表2 探索的モデル特定化の結果 (収束したモデル)

No.	パラメータ	df	C	AIC 0	C/df	P
1	11	4	0.347	0.000	0.087	0.987
2	11	4	1.354	1.007	0.339	0.852
3	12	3	0.200	1.853	0.067	0.978
4	12	3	0.275	1.928	0.092	0.965
5	12	3	0.304	1.957	0.101	0.959
6	11	4	2.630	2.283	0.658	0.621
7	12	3	1.198	2.851	0.399	0.754
8	13	2	0.122	3.775	0.061	0.941
9	13	2	0.171	3.824	0.086	0.918
10	13	2	0.186	3.839	0.093	0.911
11	13	2	1.193	4.846	0.596	0.551
12	14	1	0.046	5.699	0.046	0.831

5.3 微修正仮説モデルの検証

Amosによる探索的モデル特定化を行った結果、見直されたモデルが微修正仮説モデルである。

チーム編成の最適化が2因子に従属すると仮定し、それらの潜在変数を役割遂行能力の「Skill」と「Capability」と表す。この微修正仮説モデルは、「Skill」と「Capability」間に両方向矢印がないことから、それらの潜在変数の間に相関関係がないことを表す。

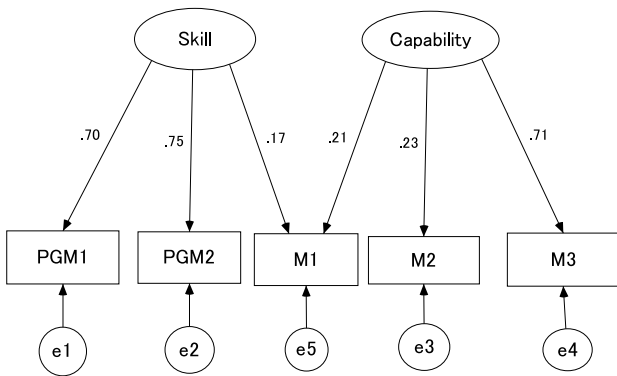


図10 微修正後における深層の要因と代用特性との間の因果関係モデル (標準化推定値)

この微修正仮説モデルの分析結果は、 χ^2 値 (計算値) が0.347, 自由度が4, 確率水準 ($p < 0.05$) での理論値9.488よりも小さいため、仮説は棄却されなかった (モデルは不適合ではない)。

表3の適合度は、GFIの0.998とAGFIの0.991の値の差が少ないこと、AICの数値22.347が小さいことから、今までの中では一番適合度が高いモデルである。

表3 適合度指標によるモデルの評価(2)

モデル	GFI	AGFI	RMSEA	AIC	CFI
微修正モデル	0.998	0.991	0.000	22.347	1.000

そこで、微修正仮説モデル (図10) の因果関係を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \text{PGM1} &= 0.70 \times \text{Skill} + 1 \times \text{誤差}(e_1) \\ \text{PGM2} &= 0.75 \times \text{Skill} + 1 \times \text{誤差}(e_2) \\ \text{M2} &= 0.23 \times \text{Capability} + 1 \times \text{誤差}(e_3) \\ \text{M3} &= 0.71 \times \text{Capability} + 1 \times \text{誤差}(e_4) \\ \text{M1} &= 0.17 \times \text{Skill} + 0.21 \times \text{Capability} + 1 \times \text{誤差}(e_5) \end{aligned} \right\} \dots \textcircled{6}$$

となる。

よって、二つの潜在変数 (Skill, Capability) を求めるには、式⑥を変換した以下の式、

$$\left. \begin{aligned} \text{Skill} &= 0.75 \times \text{PGM2} + 0.70 \times \text{PGM1} + 0.17 \times \text{M1} \\ \text{Capability} &= 0.71 \times \text{M3} + 0.23 \times \text{M2} + 0.21 \times \text{M1} \end{aligned} \right\} \dots \textcircled{7}$$

となる。

なお、モデルの部分評価である、パス係数の有意水準5%でのt検定結果は、表4により、いずれも有意でないとの結果となった。

表4 非標準化係数

	推定値	確率
PGM2 ← Skill	1	
M2 ← Capability	0.323	0.710
PGM1 ← Skill	0.931	0.334
M1 ← Skill	0.223	0.360
M1 ← Capability	0.294	0.710
M3 ← Capability	1	

妥当性には、内容的妥当性と基準連関妥当性も含んだ構成概念妥当性がある。構成概念妥当性は、既存の理論やこれまでの経験に抵触しないかを確認することで証明できる。図10の微修正仮説モデルは、著者らの経験から策定したモデルであり、存在する因子を念頭に置きテストや実習を行っている。したがって、そのモデルに使用した代用特性は全体を網羅していると言える (池田1994; 柳井・緒方 2006)。

6. チーム編成と妥当性の評価

6.1 チーム編成

橋浦ら (2007) が開発したシステム EtUDE/GO に、代用特性の観測データとSEMで求めた各代用特性のパス係数を代入し、チーム編成における最適案の自動生成を行った。

この最適案の自動生成では、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) に基づく「表5 遺伝子の適合度の計算」により、「図1 チーム編成条件定義」を満たし、かつチーム間の平均能力の分散が最小となる解を求めた。

なお、橋浦ら (2007) が2005年度に行った自動生成との変更点は、「表5の式⑧の y_{ii} の数が四つ (役割の数)

表5 遺伝子の適合度の計算

P1	<p>個人の役割遂行能力 (Skill と Capability) を計算 (式⑧)</p> $y_{il} = \sum_{j=1}^p \alpha_{ij} x_{jl} + c_i \quad \dots\dots\dots \text{式⑧}$ <p>i : 役割遂行能力の番号, j : 科目の番号 y_{il} : 学生 l の遂行能力 i の能力, α_{ij} : 役割遂行能力 i の科目 j の係数 x_{jl} : 学生 l の科目 j の成績, c_i : 役割遂行能力 i の定数</p>
P2	<p>1チーム4~5名で編成： 各個人の役割遂行能力 Skill と Capability の平均値 (0) 以上の学生を1名以上配置 (配置の手順は、GAの選択、交叉、突然変異に従う)</p>
P3	<p>各チームの能力の平均を計算 (式⑨)</p> $O_k = \frac{1}{n_k \gamma} \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{l=1}^{\gamma} w_i y_{il} \quad \dots\dots\dots \text{式⑨}$ <p>O_k : チーム k の能力 (平均値), W_i : チーム k における役割遂行能力 i の重要度 y_{il} : 学生 l の遂行能力 i の能力, n_k : チーム k に属する学生数, γ : 役割遂行能力の数</p>
P4	<p>過去のチーム能力の分散値と比較して最小値を更新していれば保存 (式⑩)</p> $O = \min \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (O_k - \bar{O})^2 \right] \quad \dots\dots\dots \text{式⑩}$ <p>o : 目的関数, \bar{o} : 全チームの能力の平均, k : チームの番号, m : チーム数</p>
P5	<p>GAのパラメタで指定した回数分, P2からP4までの手順を繰り返す</p>

から二つ (潜在変数 Skill, Capability) にした」ことと、「式⑧の α_{ij} の係数を「1」と固定にしていたことから、SEMで求めた各代用変数のパス係数とした」ことのシステムに代入するデータの変更である。それ以外の突然変異の発生率などのGAのパラメタやシステム設計変更は行っていない。

チーム編成の重み付けについては、今回の取得した五つの代用特性では、当初設定した2次因子仮説モデル (図6) が識別されなかったため、微修正仮説モデル (図10) で求めた Skill と Capability の二つの役割遂行能力 (潜在変数) によるチーム編成を行うことにした。

なぜなら、演習に必要な要素である五つの観測変数 (M1, M2, M3, PGM1, PGM2) に影響を与える共通因子として Skill と Capability が導かれたので、Skill と Capability の各チームにおける平均値を均等にすることが最適なチーム編成につながると考えられるからである。

今回のチーム編成の結果は、表6の演習の概要であり、過去の演習の概要は表7のとおりである。

表6 演習の概要

2006年度	
演習課題	会議室予約システムの開発
演習期間	2006年11月9日~2007年1月11日
対象者数	57人
1チームの人数	4~5人の学生
チーム数	14チーム

表7 過去の演習の概要

2005年度	
演習課題	会議室予約システムの開発
演習期間	2005年11月24日~2006年1月12日
対象者数	98人
1チームの人数	4~5人の学生
チーム数	24チーム
2004年度	
演習課題	会議室予約システムの開発
演習期間	2004年12月9日~2005年1月13日
対象者数	55人
1チームの人数	3~4人の学生
チーム数	15チーム

6.2 分散分析によるチーム編成の均等性の評価

EtUDE/GOで編成したチームの能力差が均等であるかどうかを分散分析によって検証した。

(1) 役割分担の変更

演習開始までの5週間程度の間、JAVAのコーディングやUMLの基礎知識の習得を行った。この間に欠席した学生がいたが、演習を棄権するのかの判断がつかなかったため、演習授業に参加するものと仮定して割り当て対象者とした。しかしながら、役割を分担すべき者の中から数名の演習棄権者が出た。

演習を棄権することにより、抜けた人の役割を何らかの方法で補う必要が生じた。これを他のチームから補給したことにより、解体するチームができてしまい、チーム編成準備作業に大きく影響した。最終的なチーム編成は、履修予定者63名中6名が履修をしなかったため、当初のチーム編成数が15から1チーム減の14チームとなった。

(2) チームの再編成とバラツキ具合の検証

全チームが最適な配分となるため、棄権者がいないチームにも再配分を行った。

ただし、実質1回目の演習授業には間に合ったので、変更した学生にも影響はほとんどなかった。

なお、再編成したチームのバラツキ具合の検証を行うため、式⑦で求めた数値を使い、潜在変数の役割遂行能力 Skill と Capability の分散分析 (一元配置) を行った。

分散分析（一元配置）の評価は、帰無仮説 H_0 ：「各群の母平均値は等しい」である。

帰無仮説の採否は、

有意確率 $P > \alpha$ のとき、帰無仮説を採択する。

「各群の母平均値は等しい」

有意確率 $P \leq \alpha$ のとき、帰無仮説を棄却する。

「各群の母平均値は等しくない」

である。

Skillの分析結果（表8）は、検定統計量 $F = 0.189$ で、そのときの有意確率は0.999であり、自由度（13, 49）の有意水準5%と比べると、有意確率 $0.999 > 0.05$ である。したがって、「各群の母平均値は等しい」の帰無仮説が採択された。

表8 Skillに関する分散分析（一元配置）の結果
分散分析：一元配置

チーム	標本数	合計	平均	分散
Team1	4	-0.507	-0.127	3.296
Team2	5	-2.226	-0.445	1.953
Team3	5	-0.124	-0.025	2.258
Team4	5	-1.131	-0.226	2.355
Team5	5	-0.025	-0.005	3.203
Team6	4	2.053	0.513	1.560
Team7	4	1.683	0.421	0.387
Team8	4	0.924	0.231	0.800
Team9	4	1.829	0.457	1.484
Team10	4	0.086	0.022	0.585
Team11	4	0.451	0.113	1.160
Team12	5	0.187	0.037	3.431
Team13	5	-2.994	-0.599	1.546
Team14	5	-0.206	-0.041	1.967

Skill

	平方和	自由度	平均平方	F値	有意確率
グループ間	2.870	13	0.221	0.189	0.999
グループ内	57.130	49	1.166		
合計	60.000	62			

次に、Capabilityの一元配置分散分析の結果（表9）では、Skillと同様に、自由度（13, 49）の有意水準5%と比べると、有意確率 $0.979 > 0.05$ となり、「各群の母平均値は等しい」の帰無仮説が採択された。

なお、この「各群の母平均値は等しい」には、帰無仮説が棄却できなかった場合の統計的検定の弱点「第二種の誤り」があるので、SkillとCapabilityの平均が均等であることは統計的には断言できず、「各群の母平均値に差があるとはいえなかった」となる。

以上の検定により、SEMによるチームの編成計画は、新チームのための制約を満たしていることが確認できた。

表9 Capabilityに関する分散分析（一元配置）の結果
分散分析：一元配置

チーム	標本数	合計	平均	分散
Team1	4	0.194	0.049	2.745
Team2	5	-0.496	-0.099	0.585
Team3	5	-0.564	-0.113	0.386
Team4	5	-3.332	-0.666	0.651
Team5	5	0.287	0.057	1.125
Team6	4	1.214	0.304	0.161
Team7	4	1.084	0.271	0.389
Team8	4	-0.457	-0.114	1.255
Team9	4	0.767	0.192	0.608
Team10	4	0.443	0.111	0.198
Team11	4	0.194	0.049	0.715
Team12	5	-1.210	-0.242	0.645
Team13	5	2.237	0.447	0.851
Team14	5	-0.361	-0.072	0.458

Capability

	平方和	自由度	平均平方	F値	有意確率
グループ間	5.078	13	0.391	0.349	0.979
グループ内	54.922	49	1.121		
合計	60.000	62			

7. 演習終了後におけるチーム編成最適化の有効性評価

7.1 判断の方法

演習終了後、成果発表会のプレゼンテーション、システム構築した課題に対する（最終）成果物やEtUDEが取得したログ情報を基に、演習授業参加者全員の、チームにおける課題達成への貢献度を、TAを含む教授者達が評価した。チーム編成の最適化が演習授業にもたらした影響を分析するため、学生達が自分達で決めた役割との判別分析を行う。判別分析を行うための目的変数のグループ化変数は、チームにおける課題達成への貢献度に関して、評価の高かった者をグループ1、それ以外の者をグループ0とした。また、評価に使用する説明変数は、四つの役割をダミー変数（0, 1）で質的データとするため、4変数から1を引いた3変数である。

7.2 分析結果

役割分担とチーム内での貢献度を比較することによる判別分析の結果は、最初の一つの正準判別関数係数が58.8%であり、Wilksのラムダは、有意確率0.000が有意水準 $\alpha 0.05$ より小さいので、二つのグループ間（0, 1）に差異があると認められた。

また、表10より、元のグループ化されたケースのうち、77.2%の役割分担が正しく分類された。その他、交差確認済みのグループ化されたケースでも77.2%正しく分類された。この交差確認済みとは、1例を除いて求めた

関数に、除いた1例を当てはめてみた場合の判定結果である。したがって、どちらの分類結果も同じであることは、新たな標本で分析しても、同様な判別結果が期待できることである。

なお、正しく分類できたのは、グループ0の96.9%に対し、グループ1の52.0%であった。その要因は、PM業務については学生達が共通の認識を持っていたが、それ以外の役割については共通の認識を持っていない。そのような状況において、学生達が自分達で役割を決めた（このことは、すべての学生が自分のやりたい役割を分担できたことを必ずしも意味していない）ことにある。

表10 判別分析の分類結果

		予測グループ番号	0	1	合計
元のデータ	度数	0	31	1	32
		1	12	13	25
	%	0	96.9	3.1	100
		1	48.0	52.0	100
交差確認済み	度数	0	31	1	32
		1	12	13	25
	%	0	96.9	3.1	100
		1	48.0	52.0	100

学生がPMの役割の重要性を認識していたことは、係数の大小/正負関係から各学生がどちらのグループに近いかを求める「標準化された判別関数係数（表11）」とマハラノビス汎距離に基づく「分類関数係数（表12）」の結果がそれを示している。

要するに、標準化された正準判別係数（表10）が、グループ間の変動が大きさや、グループ内の変動を小さくする係数を表しており、PMの第1関数の値が1.184であるのに対し、それ以外の変数の値は0.4以下となっている。

このことが、PMだった学生は判別得点（第1関数の値）が高いので、演習での貢献度や教授者達による評価が高く、PM以外の役割の学生は演習での評価が高くないという結果を意味している。

表11 標準化された正準判別関数係数

	第1関数
PM	1.184
分析・設計	0.389
コーディング	0.353

また、表12の分類関数係数は、定数項から引く値を示しており、それぞれの値を代入し、数値の一番大きなグループに判別される（柳井ら 2006）。

具体的には、PMの例で説明すると、グループ0につ

いて計算すると $3.257 - 1.743 = 1.514$ 、グループ1について計算すると $7.959 - 3.887 = 4.072$ となるので、PMはこれらの計算結果の中で大きい方の値4.072が属するグループ（グループ1）に分類される。同様に分析・設計については、グループ0が2.002でグループ1が1.141となるので、グループ0に属する。コーディングについては、グループ0が2.023でグループ1が1.019となるので、グループ0に属するという結果となった。

表12 分類関数係数（Fisherの線型判別関数）

役割	グループ別の係数		グループ別の計算結果		判別結果
	0	1	0	1	
PM	3.257	7.959	1.514	4.072	グループ1
分析・設計	3.745	5.028	2.002	1.141	グループ0
コーディング	3.766	4.906	2.023	1.019	グループ0
定数	-1.743	-3.887	-	-	-

8. まとめ

8.1 研究の成果

ソフトウェア開発演習でのチーム編成に影響を及ぼす人的要因を分析するために2次因子仮説モデルを策定し、SEMの分析手順に従いSEM仮説モデルを検証したが、代用特性の不足により解が求まらなかった。そこでモデルを再策定するとともに微修正した。その結果、SkillとCapabilityを真の要因（目的変数）とし、五つの代用特性（説明変数）との間の関係式を求めることができた。その関係式をEtUDE/GOに適用し、最適なチーム編成案を生成した。この案を基にチーム編成を行い、学生達の演習授業を実施した。半年の演習授業の後に、チーム編成の最適化が演習授業にもたらした影響を分析した。

その結果、すべてのチームが演習課題を終了するという目標を達成できた。その他に、チーム編成最適化のために、Skill/Capabilityという能力に関する指標だけを採用し、これらの数値を基に学生を各チームに割り当ててチーム編成を行うと、その学生達が演習課題達成のために活躍してくれると期待したが、実際の演習授業では、これらの学生達が期待どおり活躍し、すべてのチームが演習課題を一人の中途脱落者もなく達成できたことを確認した。

また、役割分担の明確化がチーム演習に与えたことの評価として、演習後の受講者のアンケート結果から、表13の演習の充実度評価のとおり、「とても充実していた」と「充実していた」を合わせると75.5%になった。

その他、図11のチーム内メンバーの協調性のとおり、役割分担が明確でなかった場合の2004年の協力度（「全員で協力した」と「一部のメンバーが協力した」の合計）が56.1%であるのに対して、役割分担を明確にした2005

表13 演習の充実度評価

	回答数	割合 (%)
とても充実していた	7	12.3
充実していた	36	63.2
あまり充実していなかった	9	15.8
充実していなかった	1	1.8
未回答	4	7.0
合計	57	100.0

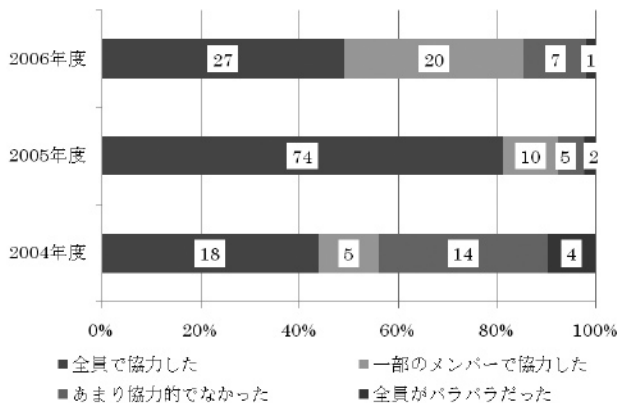


図11 チーム内メンバーの協調性

年度が92.3%, 2006年度は85.5%となっている。

Skill/Capabilityという能力に関する指標だけを採りあげ、これらの数値を基に学生を各チームに割り当ててチーム編成した効果が、演習後の受講者のアンケート結果から確認できた。

さらに、本研究の分析過程で確認できたことは以下のとおりである。

- v1 検証的因子分析では、SEM仮説モデルを作成し、そのモデルに必要なデータを収集することで、因果関係を解明できる。
- v2 母集団の標本数が少ない場合、SEMの誤差項で調整をする。
- v3 SEM仮説モデルが収束しない場合、SEMの探索的因子分析により微修正仮説モデルを求める。
- v4 本数の少ないSEMの潜在変数と観測変数は、1対nの関係にある。
- v5 SEM仮説モデルでは、尺度の信頼性統計量 α 係数が小さい場合でも解が求まる。

なお、これらの過程を経ることにより、直接観測できない因果関係を導き出せたと言える。

8.2 今後の予定

今後の課題としては、2006年度は、EtUDE/GOでのチーム編成作業後に履修取り止め学生が出るなど、急速チームの再編成を強いられた経緯がある。このため、「チー

ム編成作業手順の簡略化」が求められる。また、受講した学生数の大小の影響はあるが、2006年度と2005年度の個人の成績の分散を比較すると、分散は2006年度の方が大きい。この要因を演習終了後に調査したアンケートの内容を分析し、次年度のチーム編成に活かしたい。

今回の人的要因分析作業では、ソフトウェア開発演習授業の前に取得できた代用特性のデータが少なかったために、策定したSEM仮説モデルが識別されず、真の要因と代用特性との間の関係性を求めるのに手間取った。今後は、ソフトウェア開発演習授業の前に、真の要因を明確にするために、より多くの代用特性データを取得することにより、役割に影響を及ぼす変数を盛り込んだ2次因子仮説モデルを策定する予定である。

謝辞

チーム編成に影響を及ぼす人的要因の分析に用いるデータの利用について、ご承諾頂きましたチーム芝浦工業大学情報工学科の皆様へ深く感謝致します。

引用文献

- [1] 朝野照彦, 小島隆矢, 鈴木督久 (2005). “入門共分散構造分析の実際”, 講談社.
- [2] Atsuo Hazeyama, Naota Sawabe, Seiichi Komiya (2002). “Group Organization System for Software Engineering Group Learning with Genetic Algorithm IEICE Transactions on Information and Systems”, **E85-D-4**, pp.666-673.
- [3] Chyng-Yang Jang, Charles Steinfield, Ben Pfaff (2002). “Virtual group awareness and groupware support: an evaluation of the Team SCOPE system”, International Journal of Human-Computer Studies, Volume 56, Issue 1, Academic Press, pp.109-126.
- [4] 江崎和博 (1996). “ソフトウェア設計における人的要因分析の品質工学の応用”, 品質工学, **4, 5**, pp.47-54.
- [5] 江崎和博 (1997). “ソフトウェア設計のエラー区分と人的要因についての品質工学的考察”, 品質工学, **5-4**, pp.30-37, 1997.
- [6] 江崎和博, 山田 茂, 高橋宗雄, 日原圭祐 (2000). “ソフトウェア設計過程の信頼性に影響を及ぼす人的要因の品質工学的アプローチ”, 電子情報通信学会, **J83-A-7**, pp.875-882.
- [7] 江崎和博, 山田 茂, 高橋宗雄 (2001). “設計レビューにおけるソフトウェア信頼性に影響を及ぼす人的要因の品質工学的解析”, 電子情報通信学会論文誌, **J84-A(2)**, pp.218-228.
- [8] 橋浦弘明, 桑原 徹, 秋 玉梅, 石川達也, 山下公太郎, 古宮誠一 (2007). “ソフトウェア開発グループ演習のためのチーム編成の最適化支援”, メディア教育研究, **3-2**, pp.61-69.
- [9] 樫山淳雄 (2001). “Research on Optimal Group Organization System in Group Learning”, ソフトウェア工学研究財団高度情報化支援ソフトウェアシーズ育成事業平成12年度成果発表会.

- [10] 石川達也, 橋浦弘明, 山下公太郎, 桑原 徹, 秋 玉梅, 古宮誠一 (2006). “ソフトウェア開発グループ演習支援システム EtUDE” 電子情報通信学会技術報告, **105-653**, KBSE2005-48, pp.7-12.
- [11] 磯崎友香, 山下公太郎, 石川達也, 橋浦弘明, 古宮誠一 (2005). “ソフトウェア開発プロジェクト EtUDE”, 第67回情報処理学会全国大会講演論文集, **4-4D-4**.
- [12] 岩崎彰典, 宮地 功, 尾上誉幸 (2002). 学習グループ編成におけるGAによる解と厳密解との比較 電子情報通信学会技術報告, **102-330**, ET2002-40, pp.47-52.
- [13] 狩野 裕 (2002). “構造方程式モデリングは, 因子分析, 分散分析, パス解析のすべてにとって代わるのか?”, 日本行動計量学, **29-2**, (20021225), pp.138-159.
- [14] 狩野 裕 (2004). “構造方程式モデルにおける指標の数はいくつであるべきか”, 行動計量学, **31-2**, (20040910) pp.143.
- [15] 亀田達也 (1997). “合議の知をもとめて—グループの意思決定—”, 共立出版.
- [16] 古宮誠一, 石崎 豊 (1993). “ソフトウェア開発における人的誤り生起過程のモデル化”, 情報処理振興事業協会主催第12回技術発表会論文集, Oct. 21-22, pp.149-156.
- [17] 古宮誠一, 石崎 豊 (1994). “ソフトウェア開発における人的誤り生起過程のモデルとその検証実験”, 情報処理振興事業協会主催第13回技術発表会論文集, Oct. 6-7, pp.155-164.
- [18] Kunihiro Chiken, Atsuo Hazeyama (2003). “Awareness Support in Group-based Software Engineering Education System Proceedings of the 10th Asia-Pacific Software and Applications Conference (APSEC2003)”, IEEE Computer Society Press, pp.280-289.
- [19] 松浦佐江子, 相場 亮 (2003). “グループワークによるソフトウェア工学教育の試み”, 情報処理学会研究報告, **2003-13**, 2003-CE-68-1, pp.9-16.
- [20] 小塩真司 (2004). “SPSSとAmosによる心理・調査データ解析”, 東京図書株式会社.
- [21] 小塩真司 (2005). “研究事例で学ぶSPSSとAmosによる心理・調査データ解析”, 東京図書株式会社.
- [22] S. Komiya, M. Takahashi, and Y. Ishizaki (1993). “A Model of Human Error Generation Process in Software Development and its Evaluation”, Proceedings of the IASTED International Conference-Reliability, Quality Control and Risk Assessment, Oct. 18-20, pp.151-154.
- [23] Steiner, I.D (1972). Group process and productivity. New York: Academic Press.
- [24] 高橋宗雄 (1999). “品質工学に基づく高信頼性ソフトウェア開発のための人的要因分析 (〈特集〉ソフトウェア信頼性評価法の新潮流)”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **44-8**, pp.401-404.
- [25] 豊田秀樹 (1992). “SASによる共分散構造分析”, 東京大学出版会.
- [26] 豊田秀樹 (2007). “共分散構造分析 Amos編 構造方程式モデリング”, 東京図書株式会社.
- [27] 涌井良幸, 涌井貞美 (2003). “図解でわかる共分散構造分析”, 日本実業出版社.

- [28] 山田 茂, 影山高章, 木村光宏, 高橋宗雄 (1998). “コードレビューにおける人的エラーと人的要因に関する考察”, **J81-A-9**, pp.1238-1246.
- [29] 山田 茂 (2002). “最近のソフトウェア信頼性研究: ソフトウェア信頼性に影響を及ぼす人的要因分析と分散開発環境下でのソフトウェア信頼性評価法 (「最近の信頼性理論」)”, 日本信頼性学会誌: 信頼性, **24(6)**, pp.519-528.
- [30] 山田 茂, 松田僚太郎 (2003). “ソフトウェア設計レビューにおける信頼性に影響を及ぼす人的要因の品質工学的評価”, 日本経営工学会論文誌, **54(1)**, pp.71-79.
- [31] 山田 茂, 富高功介 (2005). “ソフトウェア信頼性に影響を及ぼす品質工学的アプローチに基づく人的要因分析と信頼性予測”, 日本信頼性学会誌: 信頼性, **27(7)**, pp.439-448.
- [32] 柳井晴夫, 緒方裕光 (2006). “SPSSによる統計データ解析—医学・看護学, 生物学, 心理学の例題による統計学入門”, 現代数学社.



しらかわ きよみ
白川 清美

2005 芝浦工大専門職大学院・工学マネジメント・専門職学位課程 (技術経営修士 [MOT]) 了。2008/9 芝浦工大大学院・工・博士 (後期) 課程 (機能制御システム) 了。博士 (工学)。専門社会調査士。現在は, 独立行政法人統計センターに勤務。統計調査向けシステム開発に従事。人工知能学会, 日本行動計量学会, 各会員。



はしむら ひろまさ
橋浦 弘明

2002 芝浦工大・工・工業経営卒, (株)野村総合研究所入社。2003 上山日通販売(株)入社。主として新規事業開発及び, ソフトウェアの設計開発に従事。2005 芝浦工大専門職大学院・工学マネジメント・専門職学位課程 (技術経営修士 [MOT]) 了。2007より東京工業大学社会工学科非常勤講師。2008/9 芝浦工大大学院・工・博士 (後期) 課程 (機能制御システム) 了。博士 (工学)。主としてソフトウェア工学及びソフトウェア工学教育に関する研究開発に従事。ソフトウェア設計方法論に関心を持つ。



さいとう ひとみ
斎藤 瞳

2006 芝浦工大・工・情報工卒。2008 同大大学院・工・修士課程 (電気電子情報工) 了。日本ビューレット・バックカード(株)入社。金融向けシステム開発に従事。



やました こうたろう
山下 公太郎

2005 芝浦工大・工・情報工卒。2007 同大大学院・工・修士課程 (電気電子情報工) 了。三井情報(株)入社。現在, 主に商社向けシステム開発に従事。



こみや せいいち
古宮 誠一

昭和44年埼玉大学理工学部数学科卒業。昭和45年(株)日立製作所入社。昭和59年特別認可法人情報処理技術者センター(略称IPA)に出身し、自動プログラミングシステムをはじめとする各種CASEツールの構築技術、ソフトウェア設計方法論とそのメタ理論、CAIおよび知的CAI等の研究に従事。昭和63年～平成12年IPA技術センター特別研究員。平成3年～9年IPA新ソフトウェア構造化モデル研究本部長付を兼務。平成5年徳島大学客員教授。平成7年より千葉大学情報工学科非常勤講師。平成9年より芝浦工業大学客員教授兼同大学大学院非常勤講師。平成12年3月信州大学博士(工学)。平成13年より芝浦工業大学教授。平成15年より同大学専門職大学院(MOT)教授を兼務。平成4・5年/平成6・7年/平成8・9年知能ソフトウェア工学研究会幹事/副委員長/委員長。平成8・9年電子情報通信学会情報・システムソサイエティ運営委員。平成6年～平成9年電子情報通信学会論文誌編集委員。平成10・11年電子情報通信学会論文誌編集委員会幹事。現在に至る。

An Analysis of Human Factors to Affect Whether or Not Formation of Project Teams for Software Development Exercise Is Proper: A SEM Hypothetic Model Based Analysis of the Human Factors

Kiyomi Shirakawa¹⁾ · Hiroaki Hashiura¹⁾ · Hitomi Saito²⁾ ·
Kotaro Yamashita³⁾ · Seiichi Komiya¹⁾

Third-year students at Department of Information Science and Engineering, Shibaura Institute of Technology in Japan acquire knowledge and skills for software development. However, since the students have different degrees of ability for software development, it transpired that some teams could not on time accomplish a task given to the team.

Therefore, the authors developed a system to distribute personnel to each team automatically as variance in ability of software development among teams is as small as possible [Hashiura et al., 2007].

Furthermore the authors conducted an experiment in order to clarify human factors to affect whether or not the distribution of personnel to each team and personnel positioning within each team are proper, and clarifies it on the basis of SEM.

Keywords

Covariance Structure Analysis, Factor Analyses, Path Diagram, Maximum Likelihood Estimation, Chi-Square Test

¹⁾ Graduate School of Engineering, Shibaura Institute of Technology

²⁾ Hewlett-Packard Japan, Ltd.

³⁾ Mitsui Knowledge Industry Co., Ltd.