

学位論文の全文に代えてその内容を要約したもの

愛知学院大学

乙 第 号	論文提出者 植松康明
論文題目  コサイン類似度プログラムによる歯科材料の 新規同定法	

コサイン類似度プログラムによる歯科材料の新規同定法

植 松 康 明

愛知学院大学歯学部歯科理工学講座  
(主任・指導：河合 達志 教授)

愛知学院大学大学院歯学研究科博士（歯学）学位申請論文

Novel identification method of dental materials  
using a cosine similarity program

YASUAKI UEMATSU

Department of Dental Materials Science,  
School of Dentistry, Aichi Gakuin University  
(Chief and Director : Prof. Tatsushi Kawai)

The thesis submitted to the Graduate School of Dentistry,  
Aichi Gakuin University for Ph.D. degree

本論文の基盤論文は、次のような論文です。

基盤論文 1 :

タイトル : Analysis of dental material components using cosine similarity

掲載誌名 : Journal of Hard Tissue Biology (印刷中)

著者 : YASUAKI UEMATSU<sup>1)</sup>, MIKI HORI<sup>1,2)</sup>, AKIKO KATO<sup>2,3)</sup>,  
TATSUHIDE HAYASHI<sup>1)</sup> and TATSUSHI KAWAI<sup>1,2)</sup>

所属 : <sup>1)</sup> Department of Dental Materials Science, School of  
Dentistry, Aichi Gakuin University, 1-100 Kusumoto-  
cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8650, Japan

<sup>2)</sup> Center for Advanced Oral Science, School of Dentistry,  
Aichi Gakuin University, 1-100 Kusumoto-cho,  
Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8650, Japan

基盤論文 2 :

タイトル : Identification method for dental alloy type using a cosine  
similarity program: A preliminary investigation

掲載誌名 : Dental Materials Journal 42(5), 723–731, 2023

著者 : MIKI HORI<sup>1,2)</sup>, YASUAKI UEMATSU<sup>1)</sup>, AKIKO KATO<sup>3)</sup>,  
TADASUKE HORI<sup>2)</sup>, HIRONAO SEKINE<sup>2)</sup>, YUZO OHNO<sup>4)</sup>  
and TATSUSHI KAWAI<sup>1,2)</sup>

所属 : <sup>1)</sup> Department of Dental Materials Science, School of  
Dentistry, Aichi Gakuin University, 1-100 Kusumoto-  
cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8650, Japan

<sup>2)</sup> Center for Advanced Oral Science, School of Dentistry,  
Aichi Gakuin University, 1-100 Kusumoto-cho,  
Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8650, Japan

<sup>3)</sup> Department of Oral Anatomy, School of Dentistry, Aichi  
Gakuin University, 1-100 Kusumoto-cho, Chikusa-ku,  
Nagoya, Aichi 464-8650, Japan

<sup>4)</sup> Department of Periodontology, School of Dentistry,  
Aichi Gakuin University, 2-11 Suemori-dori, Chikusa-  
ku, Nagoya, Aichi 464-8651, Japan

## 目 次

I. 緒 言	1
II. 材料および方法	1
1. 材料および元素分析法	1
2. コサイン類似度解析プログラム	2
3. 画像解析	2
4. 統計分析	2
III. 結 果	3
1. 試料合金インゴットの元素分析結果	3
2. 牛歯の元素分析結果	3
3. 試料合金を研削後のポイント表面の元素分析結果	3
4. 試料合金インゴットの元素分析結果と公示値との類似度	3
5. 牛歯の元素分析結果と公示値との類似度	3
6. ポイント表面の試料研削粉の元素分析結果と原材料の公示値との類似度	3
7. 画像解析	3
IV. 考 察	4
1. コサイン類似度計算	4
2. 分析装置の特性	4
3. 研削用ポイントを用いた測定	5
4. その他の類似度計算法による検討	5
5. 今後の展望	5
V. 結 論	6
文 献	6

## I. 緒言

口腔内に存在する修復物、補綴物の材料の同定は、法歯学的な探索<sup>1-3)</sup>、あるいはアレルギー疾患の原因の特定など<sup>4,5)</sup>、歯科領域において比較的頻繁に必要とされる技術である。このような場合、誘導結合プラズマ分析法<sup>6)</sup>による分析は最も高い精度が得られるデファクトスタンダードであるが、試料の溶媒抽出が不可欠であり、分析操作は煩雑かつ熟練を要する。したがって、迅速な分析には不向きであり、蛍光 X 線分析法<sup>7,8)</sup>、エネルギー分散型 X 線分光法<sup>9,10)</sup>、波長分散型 X 線分光法<sup>11)</sup>などの非破壊的機器分析による半定量的な分析法が頻用されている。しかしながら、これらの迅速分析法では試料の状態あるいは量が分析結果に大きな影響を及ぼし、アーティファクトの中にデータが埋もれてしまう場合も少なくない。このため、結果の判断には経験と分析機器の基本理論に熟知していることが測定者には求められる。

このような歯科材料の分析結果の評価では、元素分布のプロファイルから大まかに、金属、セラミックス、有機物に分類し、その後、歯科材料の公示値と照合を行い、原材料の同定を行ってきた。しかしながら、ある歯科材料の同定において、原材料を決定する段階では、定量的な客観的数値として結果を表すことは成されてはいなかった。

一方、急速に進化しつつある人工知能の領域では、複雑なデータの集合から特徴量を抽出する手法が多数開発され<sup>12-14)</sup>、人工知能の訓練に用いられている。人工知能の入力データは通常多次元行列データとなり、その計算処理にはベクトルの内積が重要な位置を占めている。このように人工知能の内部計算処理においては多数のデータを行列演算として一括処理することは常道の手法であり、本研究における元素プロファイルの処理に応用することも容易である。

そこで本研究では、人工知能の一分野である自然言語処理で近年めざましい処理効率を示し、アテンションの中核部において使用されるコサイン類似度<sup>15)</sup>を用いて、材料の種類識別を数量化する可能性を検討することとした。

自然言語処理では、個々の単語を多次元ベクトルで表現し、ベクトルの類似度を計算することで、似た文脈で使われる単語を識別する<sup>15,16)</sup>。この方法は、文脈の類似性<sup>17)</sup>あるいは空間モデルにおけるベクトルの類似性の算出<sup>18,19)</sup>に用いられている。本研究では、個々の元素からなる分析結果を多次元ベクトルとして扱い、各材料の公示値のベクトルとの類似度計算にコサイン類似度を用い、1つの値(スカラー値)として表わし、材料の特定に応用できるかどうかを検討することとした。また、この手法を用いた場合には、アーティファクトが混入したデータからも原材料の同定が可能であることが予想されるため、修復物、補綴物を口腔内から撤去することなく、研削用のポイントによる微量の試料粉から原材料の同定が可能であるかについても検討した。

## II. 材料および方法

### 1. 材料および元素分析法

本研究では3種類の金属材料および1種類の硬組織材料を分析対象材料とした。金属材料は歯科鑄造用金銀パラジウム合金の金パラ Nice 12 (ISHIFUKU METAL INDUSTRY Co.,Ltd., Tokyo) (以下、GN と略す)、歯科鑄造用金合金の K.18 M.C.ゴールドアロイ (GC DENTAL PRODUCTS Co.,Ltd., Aichi) (以下、K18 と略す)、および歯科鑄造用銀合金第2種のみロブライト (GC DENTAL PRODUCTS Co.,Ltd.) (以下、MB と略す)の歯科用合金を選択した。硬組織材料には牛歯 (KENIS LIMITED, Osaka) (以下、BT と略す)を選択した。類似度の比較対照として金属焼付用陶材の VMK68 (VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co.KG,Bad Säckingen) (以下、Po と略す)およびジルコニアの Zi (Amann Girrbach AG,Koblach) (以下、Zi と略す)を用いた。各製品の公式製品データによる元素組成、および牛歯の歯冠部エナメル質の元素組成には無機成分の主成分であるハイドロキシアパタイト ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ; 1,004.6 g/mol) から

各元素の重量比を算出したものを公示値とした。試料合金3種の元素分析はインゴット状態で行った。インゴットは100%アルコール中で20分間超音波洗浄を行った後、自作アスピレーター中で30分間乾燥させた。牛歯は分析機器の高真空維持のため700℃で1時間加熱処理し、完全に脱水した。各試料数は10とした。試料合金の分析は微量試料での検証を加えるため、歯科用研削ポイント（以下、ポイントと略す）を用いた。ポイントは、ホワイトポイント（SHOFU Inc., Kyoto）（以下、WPと略す）、シリコンポイント（茶色）（SHOFU Inc.）（以下、SBRと略す）およびシリコンポイント（青色）（SHOFU Inc.）（以下、SBLと略す）の3種類とした。全てのポイントの形状はコントラアングル用（#28）を選択した。合金試料は1つにつき1つのポイントを用いて研削した。研削はマイクロモーターを用い、40,000 rpmで、20秒間手動で行った。試料合金のインゴット、牛歯のエナメル質表面、試料合金を研削したポイント表面の成分分析を行った。牛歯およびポイントは導電性付与のため、カーボン蒸着を行った。分析には電界放出型電子線マイクロアナライザー（FE-EPMA; JXA-iHP200F, JEOL Ltd., Tokyo）を用い、分析方法は波長分散型X線分光法とした。分析条件は、電圧20kV、プローブ径1.0 μmとした。分光結晶は、LIF、LIFT、PET、PETH、TAPLを用いた。得られた分析結果と公示値との類似度を、以下のプログラムを用いて算出した。

## 2. コサイン類似度解析プログラム

各元素の数値を多次元ベクトルとして置き換え、その類似度をプログラムによって算出した。類似度の比較には、コサイン類似度計算を適用した。元素ごとの数値をn個の要素からなるリストとし、多次元ベクトルと想定した。パターンA[a1, a2, a3, ..., an]とパターンB[b1, b2, b3, ..., bn]の類似度を、n次元ベクトル空間における原点Oからの位置ベクトルの方向（それぞれ $\vec{OA}$ 、 $\vec{OB}$ ）とみなし、2つの数値群の多次元空間における方向の一致度を算出することで材料の類似度の算出を試みた。すなわち、 $\vec{OA}$ と $\vec{OB}$ の多次元空間における二つのベクトルの成す角度 $\theta$ を想定し、この角度が小さい場合に二つのベクトルの類似度は大きいと考える。 $\cos(\theta) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) / (|\mathbf{A}| * |\mathbf{B}|)$ を用いて1つのスカラー値を得た。 $(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})$ は二つのベクトルの内積を表し、 $|\mathbf{A}| * |\mathbf{B}|$ はベクトルのノルム積を表す。

計算用プログラムはPythonで記述し、多次元行列演算が可能なNumPyを使用した。このプログラムを用いて、以下の組み合わせの類似度を算出した。

- (1) 試料合金インゴットの元素分析結果と原材料ならびに対照歯科材料の公示値との類似度
- (2) 牛歯の元素分析結果と原材料ならびに対照歯科材料の公示値との類似度
- (3) ポイント表面の試料研削粉の元素分析結果と研削された試料合金の公示値との類似度

## 3. 画像解析

ポイントの表面に付着した研削粉の形状を確認するため、ポイントの表面の研削粉をカーボンテープに転写し、二次電子像を得た。撮影に用いた試料は無作為に1つ選択した。

## 4. 統計分析

試料合金インゴットあるいは牛歯の分析結果と各公示値との類似度をDunnnettの検定を用いて統計的な差を検証した。有意水準は0.01とした。また、ポイント間の統計的な差についても検証した。ポイント自体に含まれる元素ならびに合金に含まれる元素は分析範囲内（φ1.0 μm）で検出されるため、波長分散型X線分光分析の結果は、使用したポイントの組成に近いもの、合金の組成に近いもの、両者の中間の3種類に分類される。このため、結果は正規分布とならないことから、ノンパラメトリック検定を使って分析した。ポイント間の有意差の検定には、Steel-Dwass検定を用い、有意水準は0.01とした。

### III. 結果

#### 1. 試料合金インゴットの元素分析結果

試料合金の波長分散型 X 線分光法による分析結果において、分光結晶の選択基準は原則として、最も高い強度を示したものとした。Au (原子番号 79) の検出では、LIFH 結晶が最も高い強度を示したが、LIFH 結晶は原子番号 20~31 および 50~79 の元素範囲であり、Au は検出範囲に含まれるものの、検出の信頼性は低いことが示唆された。したがって、すべての Au 分析には LIF 結晶を用いた。各合金の結果から、主たる構成元素が検出されていることがわかる。しかし、いずれの元素もデータの変動が大きく、特に GN の Ag は最も標準偏差が大きい結果となった。

#### 2. 牛歯の元素分析結果

牛歯の波長分散型 X 線分光法による分析結果は、ハイドロキシアパタイトの構成成分である Ca, P, O の含有量が高く検出されたが、いずれも変動は大きい結果となった。

例えば、Ca の含有量は最も低いもので 4.17%、最も高いものでは 30.13%に達した。また、ハイドロキシアパタイト以外の構成成分である Na, Mg, K のような金属元素、あるいは非金属元素の Cl は全ての分析でほぼ普遍的に検出された。

#### 3. 試料合金を研削後のポイント表面の元素分析結果

使用した 3 種類の合金(GN, K18, MB)を研削した後の各ポイント表面の波長分散型 X 線分光法による分析結果において、特に SBR および SBL における研削粉の検出元素数は、試料合金インゴットおよび牛歯の分析結果の検出元素数よりもはるかに多い結果となった。注目すべき事項は、K18 および MB の研削後に検出された Si の標準偏差が大きいことである。シリコンポイントで研削した試料では Si 含有量が約 90%となる試料も存在した。

#### 4. 試料合金インゴットの元素分析結果と公示値との類似度

波長分散型 X 線分光法の分析結果と原材料の公示値との比較は、3 種類すべての試料合金で 98%以上の高いコサイン類似度を示した。また、他の公示値との比較では全ての組み合わせにおいて有意に低値を示し、合金種の類似度も明確な差をもって示された。

#### 5. 牛歯の元素分析結果と公示値との類似度

牛歯の波長分散型 X 線分光法による分析結果と、ハイドロキシアパタイトならびに対照歯科材料の公示値との類似度は 93%以上を示し、ハイドロキシアパタイト由来であるとの同定が可能であることが判明した。一方、セラミック材料との一致度は明らかに低く算出されているため、外見的には類似する歯とセラミックとの区別は明確に算出された。また、金属の公示値との一致は全くなかった。

#### 6. ポイント表面の試料研削粉の元素分析結果と原材料の公示値との類似度

ポイント表面に付着した研削粉の波長分散型 X 線分光法による分析結果と原材料の公示値との類似度において、すべてのコサイン類似度は 80%以上を示した。特に、WP を使用した場合の類似度が最も高く、3 試料全てで平均値は 99.8% 以上を示した。シリコンポイントを使用した場合、WP で得られた結果と比較して GN の SBR で得られた値以外は全て有意に低い値となった。

#### 7. 画像解析

GN を研削した後の 3 種類のポイント表面の弱拡大写真では、WP への付着は点状であり研削粉の数は

最も少なかった。研削粉が付着している部分は明瞭かつ容易に判別が可能であった。シリコンポイントの2種類はいずれもポイント表面全体に様に研削粉が付着していた。GN 研削後のポイント上の研削粉の強拡大像（二次電子像）では、WP 上の研削粉の殆ど全ては 100~200  $\mu\text{m}$  程度の大きい箔状であった。一方、シリコンポイント上の研削粉は、WP よりもはるかに細かく、SBR は大きいものでは数  $\mu\text{m}$  の粒状を示したが、ほとんどが 1  $\mu\text{m}$  以下であった。また、SBL はすべて 0.5  $\mu\text{m}$  程度であった。研削に用いた3種類の合金（GN、K18、MB）間で研削粉の形状に顕著な違いは認めなかった。

#### IV. 考察

本研究により、材料の分析結果と種々の公示値の類似度を1つの数値で示すことが可能となり、その値から材料の特定を客観的に行う手法が確立された。また、複雑かつ夾雑データが混入する元素分析データからでも、コサイン類似度の算出により材料の特定に応用できる可能性が示唆された。

##### 1. コサイン類似度計算

本研究の着想は人工知能の一分野である自然言語処理から得た。ChatGPT などの言語処理においてテキスト（コーパス）の単語数が 10 万に達すると、ベクトルの次元も 10 万に達する<sup>15,20</sup>。このため人工知能の学習演算には大きな演算コストが必要となるが、高速演算を実現するため、近年人工知能の訓練ではアテンションと呼ばれる手法が採用され大きな成果を示している<sup>15</sup>。このアテンションの記述の中心核を成す部分が今回本研究に採用したコサイン類似度である。この仕組みを用いることにより、きわめて効率よく、人工知能は学習を進行していくことが可能となる。すなわち人工知能の学習段階において、妨げとなるさまざまな夾雑データを排除して、認識すべき方向をベクトルの示す方向として捉え、その方向に学習を進めることにより高速な訓練を可能としている。このような分析手法を機器分析結果の評価において適用することを試みたのが今回の研究である。すなわち、機器分析において、さまざまなアーティファクトが混入して、一見すると分析結果を評価することが困難な場合も少なくないが、結果全体を多次元ベクトルとして捉え、総体としてベクトルが示す方向に着目して標準データとの類似性を計算した場合には精度良く分析結果を評価することが可能となるものと考えられる。そこで、本実験では歯科用合金、牛歯、および歯科用研削ポイントに付着した微量研削粉のそれぞれの分析結果から原材料の特定が可能かどうかの検証を行った。

使用した3種類の試料合金または牛歯では、それぞれの原材料と想定される公示値との類似度計算において 93%以上の一致度が算出され、他の関連のない材料の公示値との一致度とは明確な差をもって高い一致度を示した。また、試料合金においてはポイントの研削粉を用いた分析結果からも合金種の同定を行うことができる可能性が示唆され、その精度はポイントの種類によって異なることが示された。このように、いずれの類似度計算においても、今回の研究ではきわめて類似度が高く算出されており、変動の多いデータの場合でも変動の少ないデータの場合と同様類似度は正確に計算されている。このことから、本研究で試みた分析処理法は新たな処理法として、有用であることが示唆されたものと考えられる。

##### 2. 分析装置の特性

本研究では、分析方法は全て波長分散型 X 線分光法で行った。この分析法は特性 X 線を回折させて分析結晶で検出するため、波長分解能が極めて高い（検出限界は 10-100ppm）<sup>21-23</sup> が、特性 X 線を検出する角度が重要であり、試料の平行度が要求される。その点から考慮すると、エネルギー分散型 X 線分光法の有利性が大きいことが予想されるが、エネルギー分散型 X 線分光法はエネルギー分散型検出器で特性 X 線を検出するため、分解能は波長分散型 X 線分光法より低くなる傾向がある。本研究では、最も検出分解能が高い波長分散型 X 線分光法を選択した。

元素分析の特性上、周期表の隣り合う元素のピークが重なるため、Cu と Zn（それぞれ原子番号 29 と 30）、Pd と Ag（それぞれ原子番号 46 と 47）、In と Sn（それぞれ原子番号 49 と 50）、Ir と Au（それぞれ原子番号 77 と 79）のピークが干渉しやすく、精度が悪くなる傾向がある。上述したように、検出には電子線照射時の特性 X 線の角度が利用されるため、材料の平行性が重要となる。本研究で対象とした材料（牛歯あるいはポイント）では、平坦な面を得ることは困難であり、分析精度の低下を招く可能性が高い。分光結晶の選択では、原子番号 19～37、48～92 の幅広い元素の検出に適した LIF 結晶を用いたが、Au 含有量の増加に伴いコサイン類似度が低下する傾向が認められた。

### 3. 研削用ポイントを用いた測定

WP に付着した研削粉は、対象の合金の種類によらず、長さ約 100  $\mu\text{m}$  の箔状を呈する均一な形状であった。波長分散型 X 線分光法の分析範囲（ $\phi$  1.0  $\mu\text{m}$ ）を考慮すると、WP に付着した研削粉は平滑な面で分析が行いやすく、さらに研削粉粒子の平滑面は研削直後の新鮮面となるため、分析精度の向上に寄与していると考えられる。一方、2 種シリコンポイントに付着した研削粒子径は、SBR で直径 1  $\mu\text{m}$  程度の粒状であり、SBL は直径約 0.5  $\mu\text{m}$  の粒状を呈し（図 3）、分析範囲よりも小さい粒子となることからポイントの構成元素の影響を大きく受ける結果となった。実際、本研究では、SBL を使用した場合のコサイン類似度は、WP を研削に使用した場合よりも有意に低い値を示した。

砥粒に関しては、アルミナの硬さは 1,620～1,680HK であり、炭化ケイ素の硬さは 2,050～2,150HK である。使用した合金の硬さは、GN が 308HV、K18 が 273HV、MB が 145HV である。

ガラス（シリカアルミナガラス、730-820HV<sup>24)</sup>）は WP の結合材として使用され、金属よりも硬い。そのため、WP を研削に使用すると、ベイルビー層<sup>25)</sup>以下の繊維層が箔状に剥落することが予想される。一方、シリコンポイントの結合材には合成ゴムが使われており、硬さは合金よりも低い。そのため、合金表面に浅い傷がつくと同時に砥粒が発生し、砥粒や結合材が摩耗して脱落する。このように少量の研削粉の分析に適した形状の試料を得る場合には WP が最も適していることが判明した。

### 4. その他の類似度計算法による検討

コサイン類似度計算は原材料の同定にきわめて有効なツールとして用いることが可能であることが判明したが、ここで、他の類似度計算の関数を用いることが可能かの探索を行った。候補としてサイン類似度計算を選択して、本実験中で得られた牛歯の分析結果とハイドロキシアパタイトとの一致度を計算した。その結果 79.82 (3.44)% が算出された。サイン類似度計算結果はこのようにコサイン類似度よりも低く算出されており、現時点ではコサイン類似度の優位性が確認された。今後も、人工知能内部のアルゴリズムの検討、あるいは人工知能そのものの導入により、さらに高度な分析手法が展開できるものと考えられる。

### 5. 今後の展望

ポイントによる研削を行った場合には口腔内から修復物、補綴物を取り外すことなく、微量の研削粉の採取のみで測定が可能であるものと考えられる。このような場合、変動の大きい分析結果が得られることが想定されるが、本実験で導入したコサイン類似度計算法は誤差の大きいデータを用いた場合でも、原材料のデータの同定が可能であることが判明した。本研究で得られた成果は、新たな分析手法を提示するものであり、今後、波長分散型 X 線分光法のみならず、蛍光 X 線分析法、誘導結合プラズマ分析法など、広範な機器分析に応用可能であるものと考えられる。

## V. 結論

本論文では、歯科用合金および牛歯の元素分析結果と公示値から、コサイン類似度計算を行い、客観的な一つの数値として一致度を算出することに成功した。また、歯科用研削ポイントに付着した微量の研削粉を用いた分析結果は原材料の公示値と高い一致度を示し、合金種の同定も可能であることが示唆された。特にホワイトポイントはシリコンポイントよりも有意に高い一致度を示した。本手法は、微量研削粉から原材料を特定する新たな方法として、法医学領域における応用のみならず、金属アレルギーへの対応など歯科臨床にも広く利用できるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) Kolude B, Adeyemi BF, Taiwo JO, Sigbeku OF, Eze UO. The role of forensic dentist following mass disaster. *Ann Ib Postgrad Med*, **8**: 111–117, 2010.
- 2) Jurel SK. Role of dentist in forensic investigations. *J Forensic Res*, **3**: 148, 2012.
- 3) Pramod JB, Marya A, Sharma V. Role of forensic odontologist in postmortem person identification. *Dent Res J*, **9**: 522–530, 2012.
- 4) Wataha JC. Biocompatibility of dental casting alloys: A review. *J Prosthet Dent*, **83**(2): 223-234, 2000.
- 5) Syed M, Chopra R, Sachdev V. Allergic reactions to dental materials-A systematic review. *J Clin Diagn Res*, **9**(10): ZE04–ZE09, 2015.
- 6) Dufosse T, Tournon P. Comparison of bullet alloys by chemical analysis: use of ICP–MS method. *Forensic Sci Int*, **91**(3): 197-206, 1998.
- 7) Uo M, Wada T, Sugiyama T. Applications of X-ray fluorescence analysis (XRF) to dental and medical specimens. *Jpn Dent Sci Rev*, **51**: 2-9, 2015.
- 8) Katarzyna K, Andrzej L, Barbara L, Slawomira S, Monika LS. Selected spectroscopic techniques for surface analysis of dental materials: A narrative review. *Materials*, **14**(10): 2624, 2021.
- 9) Yu H, Buchalla W, Cheng H, Wiegand A, Attin T. Topical fluoride application is able to reduce acid susceptibility of restorative materials. *Dent Mater J*, **31**(3): 433–442, 2012.
- 10) Traini T, Mangano C, Sammons RL, Mangano F, Macchi A, Piattelli A. Direct laser metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for manufacture of porous titanium dental implants. *Dent Mater*, **24**: 1525-1533, 2008.
- 11) Orfanou V, Rehren T. A (not so) dangerous method: pXRF vs. EPMA-WDS analyses of copper-based artefacts. *Archaeol Anthropol Sci*, **7**: 387–397, 2015.
- 12) Howley T, Madden MG, O'Connell M, Ryder AG. The effect of principal component analysis on machine learning accuracy with high-dimensional spectral data. *Knowl Based Syst*, **19**: 363–370, 2006.
- 13) Khalid S, Khalil T, Nasreen S. A survey of feature selection and feature extraction techniques in machine learning. *SAI Conference (London)*, 2014.
- 14) Zheng B, Yoon SW, Lam SS. Breast cancer diagnosis based on feature extraction using a hybrid of K-means and support vector machine algorithms. *Expert Syst Appl*, **41**: 1476–1482, 2014.
- 15) Chowdhary KR. *Fundamentals of Artificial Intelligence*, 1st ed. Springer (New Delhi), 603-649, 2020.
- 16) Runeson P, Alexandersson M, Nyholm O. Detection of duplicate defect reports using natural

- language processing. 29th ICSE'07 (Minneapolis, MN), 499-510, 2007.
- 17) Li J, Ji S, Du T, Li B, Wang T. TextBugger: Generating adversarial text against real-world applications. NDSS Symposium (San Diego, CA), 2019.
  - 18) Sidorov G, Gelbukh A, Gomez-Adorno H, Pinto D. Soft similarity and soft cosine measure; similarity of features in vector space model. *Comput y Sist*, **18**(3): 491-504, 2014.
  - 19) Young T, Hazarika D, Poria S, Cambria E. Recent trends in deep learning based natural language processing. *IEEE Comput Intell Mag*, **13**(3): 55-75, 2018.
  - 20) Li B, Han L. Distance weighted cosine similarity measure for text classification. IDEAL (Hefei), 611-618, 2013.
  - 21) Verità M, Basso R, Wypyski MT, Koestler RJ. X-ray microanalysis of ancient glassy materials: a comparative study of wavelength dispersive and energy dispersive techniques. *Archag*, **36**(2): 241-251, 1994.
  - 22) Kuisma-Kursula P. Accuracy, precision and detection limits of SEM-WDS, SEM-EDS and PIXE in the multi-elemental analysis of medieval glass. *X-Ray Spectrom*, **29**: 111-118, 2000.
  - 23) Batanova VG, Sobolev AV, Kuzmin DV. Trace element analysis of olivine: High precision analytical method for JEOL JXA-8230 electron probe microanalyser. *Chem Geol*, **419**: 149-157, 2015.
  - 24) Rosales-Sosa GA, Masuno A, Higo Y, Inoue H. Crack resistant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses. *Sci Rep*, **6**: 23620, 2016.
  - 25) Kelly RG, Frost AJ, Shahrabi T, Newman RC. Brittle fracture of an Au/Ag alloy induced by a surface film. *Metall Mater Trans A*, **22**: 531-541, 1991.