

トンネル吹付けコンクリートの面的厚さ管理技術の開発

T-ショットマーカー® フェイス

木下 勇人*¹・竹中 計行*¹・谷 卓也*¹・宮本 真吾*²・宮原 宏史*³

Keywords : mountain tunnel, shotcreting, quality management, surface measurement,

山岳トンネル, 吹付けコンクリート, 品質管理, 面的計測

1. はじめに

山岳トンネル工事では、切羽からの岩石落下等（肌落ち）による労働災害の発生が見られ、この肌落ち災害では、その半数近くが死亡または休業1ヵ月以上と重篤度が高い。厚生労働省は、山岳トンネル工事における切羽近傍の労働災害の防止を図るためのガイドライン¹⁾を2016年12月に公表、2018年1月には更なる安全性向上のために改正している²⁾。ガイドラインでは地山状況に応じて適切な切羽への吹付け厚さ（例えば、地山等級Ⅲ又はCクラスで30mm、地山等級Ⅱ又はDクラス以下で50mm）を最低限確保するとあり、当社では最小吹付け厚さ50mmを確保した上で必要に応じて増し吹きを行っている。

従来の切羽への吹付け厚さ管理は、吹付けオペレーターが切羽近傍で目視で厚さを確認していた。この方法では、オペレーターの技量により厚さにばらつきが生じるため、計測による定量的な管理が求められた。そこで、筆者らは、まず複数台のレーザー距離計を用いて吹付け厚さをリアルタイムに計測するシステム「T-ショットマーカー」を開発³⁾した。これは、レーザーを照射した複数の計測点の厚さ情報から切羽全体の吹付け厚さを類推して管理するもので、切羽面全体を計測できるシステムへの移行が課題として残った。

以上から、作業中のコンクリート吹付け厚さを面的に、かつ定量的に管理できるリアルタイム計測システム「T-ショットマーカー フェイス」を開発した。本報では、開発技術の機能や特長について述べた後、開発に当たってトンネル現場で行った実験内容と結果について述べる。

2. T-ショットマーカー フェイス概要

2.1 概要

本技術は、コンクリート吹付け作業中の高粉塵環境下で切羽を計測し、吹付け厚さをリアルタイムに表示する技術である。この技術により、オペレータは鏡面の吹付け厚さをリアルタイムかつ定量的に把握しながら吹付け操作を行うことができる。

2.2 技術の特長

本技術が有する主要な機器、機能および特長を本節で述べる。

2.2.1 吹付け機へのシステム一括搭載

システムの構成機材は、図-1 および写真-1 に示すように吹付け厚計測装置、制御PC、モニター、操作スイッチおよびパトライトであり、全ての機材は吹付け機に搭載される。そのため、吹付け機を切羽近傍にセットした後は操作スイッチを押下するだけで即座に計測を開始可能であり、施工サイクルに影響を与えることなく即座に吹付け作業が開始できるという特長を有する。

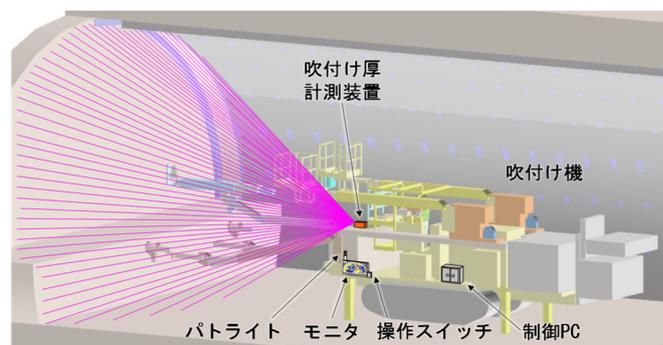
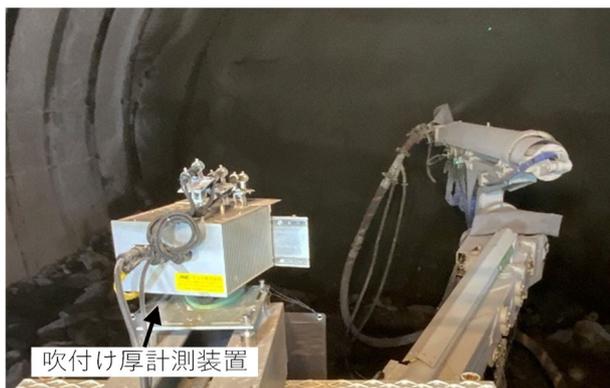


図-1 T-ショットマーカー フェイスの概要図
Fig.1 The outline of "T - Shot Marker Face"

* 1 技術センター 生産技術開発部 地下空間技術開発室

* 2 土木本部 土木技術部

* 3 マック (株)



(a)厚さ計測装置



(b)その他機材

写真-1 吹付け機へのシステム機材設置状況
Photo.1 Installation status of system equipment on the spraying machine

2.2.2 切羽全体の面的計測

吹付け厚計測装置に内蔵する三次元計測機は、切羽を面的かつ高速・高密度に計測可能な 3D-LiDAR を後述の現場実験結果により選定、採用している(表-1 参照)。この 3D-LiDAR は、1 秒間に 240,000 点を計測でき、広い視野角を有するため、切羽面積の大きい大断面トンネル施工においても 1 台で切羽全体を面的計測できる。また、計測装置の上部には計測中心が分かるレーザーを装備し、吹付け機が 3D-LiDAR が切羽全体の厚さ計測範囲に入る位置に確実に停車できるように工夫している。

2.2.3 リアルタイム計測&表示

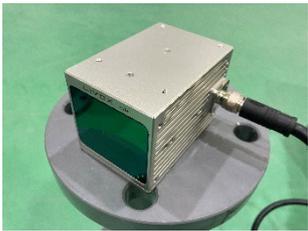
計測開始後は作業中の吹付け厚さを常時計測可能であり、取得した厚さ情報は吹付け機に設置したモニターにリアルタイムにカラー表示される(図-2 参照)。表示画面は約 5 秒間隔で最新情報に更新されるため、オペレータ他の作業員・職員も随時、吹付け状況を定量的に確認できる。

2.2.4 高精度の吹付け厚さ計測

図-3 に吹付け中の吹付け厚さの 3 次元点群データを

表-1 3D-LiDAR の諸元

Table.1 Specifications of 3D measuring machine

機種名	LIVOX AVIA
外観	
レーザー波長	905nm
レーザークラス	クラス 1
反射率	190m@10%, 260m@20%, 450m@80%
視野角	H : 70.4 度, V : 77.2 度
距離精度	<20mm@20m
ポイント率	240,000 点/秒
耐環境性	IP67
寸法・重量	91 x 61.2 x 64.8mm ・ 498g

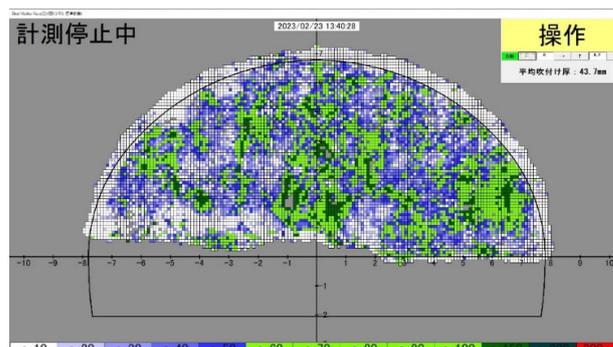


図-2 吹付け厚さ表示画面

Fig.2 Spray thickness display screen

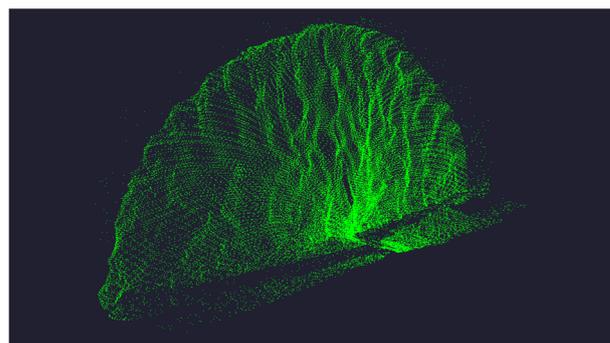


図-3 ノイズカット後の切羽計測点群

Fig.3 Face measurement point cloud after noise reduction

示す。吹付け厚さを粉塵の中でも高精度に計測するため、粉塵や吹付け材の跳返りなどの影響を低減するノイズカットフィルタ機能を装備している。更に 2 軸の傾斜計を計測装置に取り付けて、吹付け厚さの評価時に計測角度の補正も行って、高精度に連続モニタリングできるようにしている。

2.2.5 出来形帳票の自動生成

吹付け作業終了後は、計測結果を整理し、出来形を含めた施工記録を帳票として自動で作成、出力できるようになっており（図-4 参照）、現場の生産性向上にも配慮されたシステムとなっている。

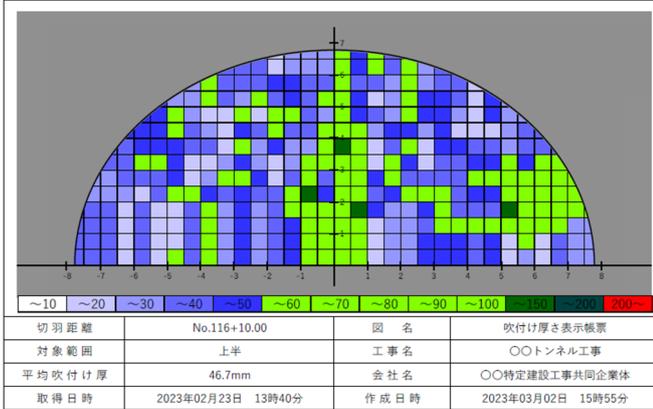


図-4 出来形帳票出力イメージ図
Fig.4 Output image of finished shape report

3. 現場実証実験

当社国内トンネル現場にて、3つの段階に分けて実験を行い開発を進めた。ステップ1として3D-LiDARの機種選定を目的とした実験を、ステップ2として簡易版のシステム（以降「プロトタイプ」と称す）での性能確認および課題抽出のための実験を、ステップ3として改良を施したシステム（以降「改良タイプ」と称す）での性能確認実験を行った。本章では、これらの各ステップの実験内容と結果について述べる。

3.1 3D-LiDARの機種選定実験

ステップ1では、3D-LiDARの機種選定実験および選定した3D-LiDARの精度確認試験を実施した。機種選定実験は写真-2に示すように3機種の3D-LiDARを並べ、現場の高粉塵環境下での性能検証を行った。その結果、表-1に示したLIVOX社製の3D-LiDARが、他製品より計測精度や点群データの面的な取得率や計測範囲等で優れており、これを選定した。

計測精度については、スラリー急結剤を使用した吹付けをおこなっている国道7号鼠ヶ関トンネル工事にて実験を行って確認した。選定した3D-LiDARと精度を比較するための3Dスキャナ（FARO Focus S150）を吹付け機側方に三脚設置し、各機器で吹付け前後の切羽面をそれぞれ計測し、その差を吹付け厚として算出した（写真-3参照）。この精度確認実験では、3D-LiDARと3Dスキャナにそれぞれ基準点を付与するこ



写真-2 機種選定実験状況
Photo.2 Model selection experiment status



写真-3 計測実験状況
Photo.3 Measurement experiment status in a dusty environment

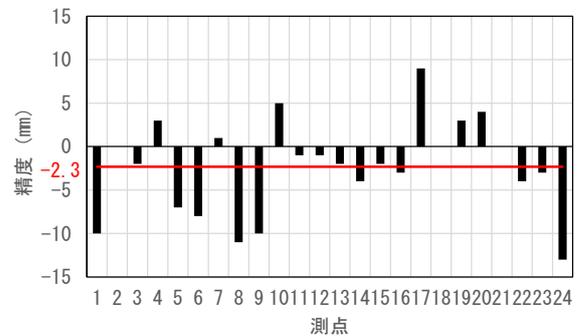


図-5 吹付け厚さ計測結果
Fig.5 Measurement results of shotcrete thickness

とで、取得した計測点群をトンネル座標系に変換・統一して比較する手法を採用した。なお、各測点の吹付け厚の値としては100mm四方内の計測点群の平均値を採用した。切羽面上の測点24点で比較した結果、選定した3D-LiDARは3Dスキャナと比較して吹付け厚さを最大13mm、平均2.3mmの精度で計測可能なことが確認できた（図-5参照）。

以上の結果から、3D-LiDARを使用して吹付けコンクリートの施工中に精度よく計測を行い、吹付け厚さの算出が可能であると判断し、以降の開発を進めた。

3.2 プロトタイプ性能実験

プロトタイプの現場環境下での動作状況と、オペレータが厚さ情報を参照しながら吹付けが可能であるかを確認するために、前述の計測実験と同じ現場で実験を行った。

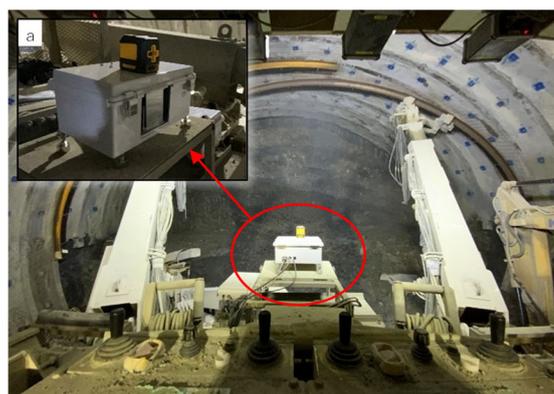
3.2.1 プロトタイプの仕様

プロトタイプの厚さ計測装置は、写真4に示すように3D-LiDARと姿勢補正用の2軸傾斜計、計測中心明示用のクロスレーザー、簡易シャッター筐体で構成し、吹付け機の運転席前方にマグネットで固定した。その他のシステム機材は、吹付け機の左側方に集中的に配置し、昇降部付近に制御PCを、前方アウトリガ付近に操作スイッチとパトライトを、後方ホースリールの傍らに大型モニタをそれぞれ設置した。各機器は吹付け機の電源と連動する仕様とし、吹付け機のエンジン始動と同時に起動し、移動中にセットアップが完了する。吹付け機が切羽に到着した後は、人力で操作スイッチを押下することでパトライト点灯と同時に初期計測が開始し、その後は自動的に常時計測へと移行する。システム稼働中は常にパトライトが緑点灯しており、不具合時には赤点滅とアラート音で周囲に知らせる。作業終了時は、再度操作スイッチを押下することでデータが保存されシステムが終了する仕様とした。

3.2.2 プロトタイプの実験結果

実験の結果、計測開始から終了までシステムが正常に動作し、面的に吹付け厚さを計測することを確認したが、取得した計測データには様々な課題が確認された。図-6は5秒間隔で更新する連続した4つの厚さ表示画面を示すが、切羽の各所でメッシュの色が一律に定まらず絶えず変化する事象（以下、ドリフトと呼ぶ）が散見された。これは、吹付け作業に伴って切羽前方に粉塵が発生し、計測機が徐々に移動する粉塵を捉えた影響と考えられ、計測アルゴリズムの見直しを行った。点群の除外条件を検討し、メッシュ毎に5秒後の吹付け厚さが300mm以下となる点群のみを採用して平均化するアルゴリズムに修正した。同時に、画面に複数の色が存在すると吹付け厚さを確認し難いとの指摘から、表示色を青色基調に変更した。修正仕様で計測した結果、除外条件の変更により計測値のドリフトは大幅に改善した（図-7参照）。これにより、吹付け作業中の3D-LiDAR計測では、粉塵等の影響と考えられるノイズを除去できると判断できた。

また、実験後に厚さ計測装置の防護状況を確認したところ、多量の粉塵の筐体内部への侵入が確認された。さらに、稼働中の3D-LiDARは非常に高温となる



(a)厚さ計測装置



(b)その他機材

写真4 プロトタイプ設置状況

Photo.4 Installation status of the prototype system

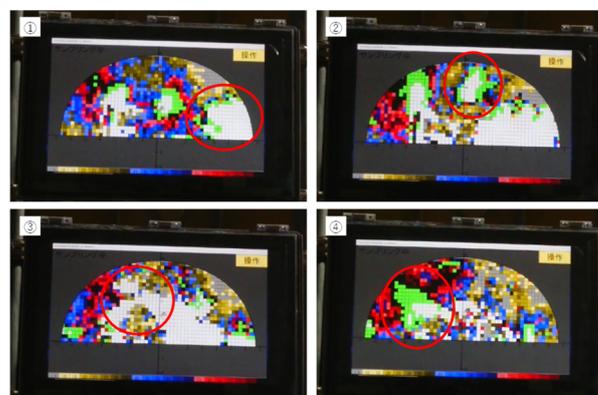


図-6 厚さ表示画面の経時変化

Fig.6 Temporal change of thickness display screen

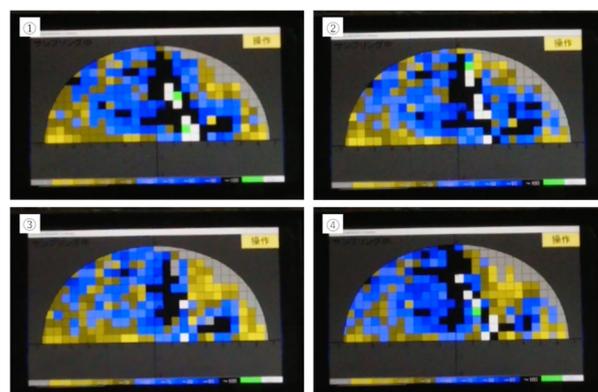


図-7 除外条件変更後の厚さ表示画面の経時変化

Fig.7 Temporal change of the thickness display screen after changing the exclusion conditions

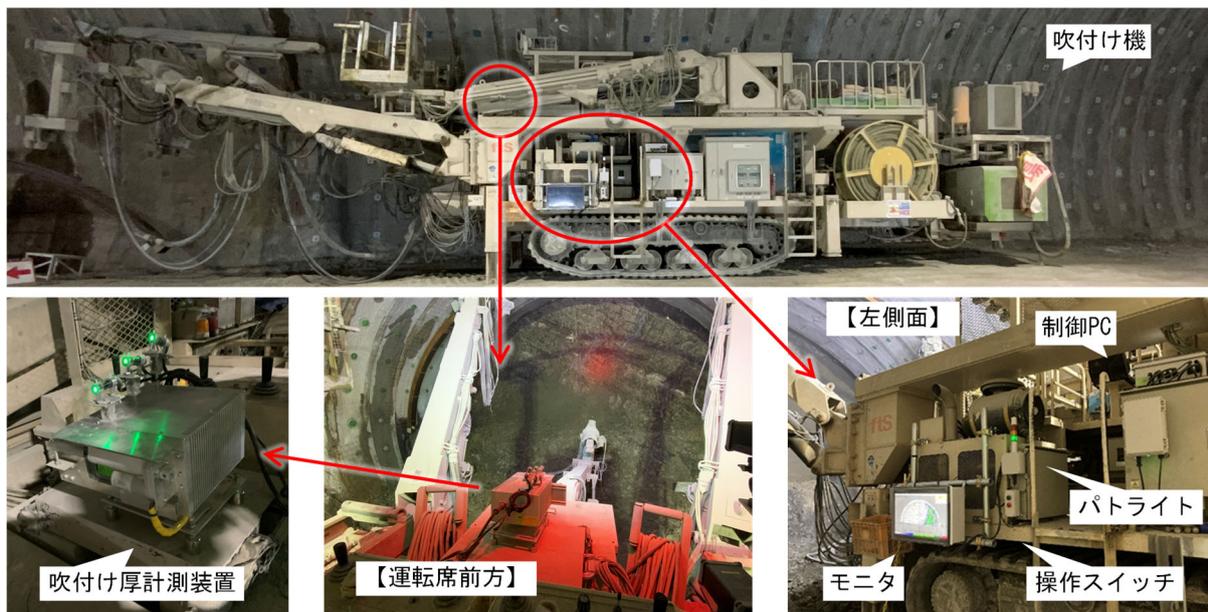


写真-5 改良タイプの設置状況
Photo.5 Installation status of improved type system

ことも確認された。以上から、高温多湿かつ高粉塵環境となる実際の吹付け作業での長期運用に耐える仕様への改良が必要と判断した。

3.3 改良タイプ性能実験

改良タイプの実現現場への適用性の確認を目的に、前述のプロトタイプと同じ現場にて性能実験を実施した。

3.3.1 改良タイプの変更点

改良タイプのハード面の変更点は、写真-5 に示すように筐体をアルミ製に変更して放熱性能の向上を図るとともに、計測に合わせて自動で開閉する電動シャッターを装備して、筐体内部への粉塵の侵入を極力低減する仕様とした。また、モニタの設置位置を後方ホースリール部から前方アウトリガ付近へと変更することで、吹付けオペレータが作業中に容易に厚さ情報を確認できるようにした。また、計測中心明示用レーザーは視認性を確保するため、レーザーポインターを並べて設置する仕様とした。

改良タイプのソフト面の変更点は、作業中の粉塵量は使用するコンクリート材料や温度変化により大きく変動するため、点群の除外条件を現場で容易に変更できる仕様にした。また、吹付け厚さの色表示やメッシュの大きさ等も現場で容易に変更できる仕様にした。

3.3.2 改良タイプの実験結果

複数回の吹付け作業中の実験から、本システムは高粉塵環境下においても安定的な面的計測が可能であることを確認した。吹付けオペレータが作業中にモニターで容易に厚さ情報を確認でき、点群の除外条件を現場条件に合わせて設定することで、計測値のドリフト

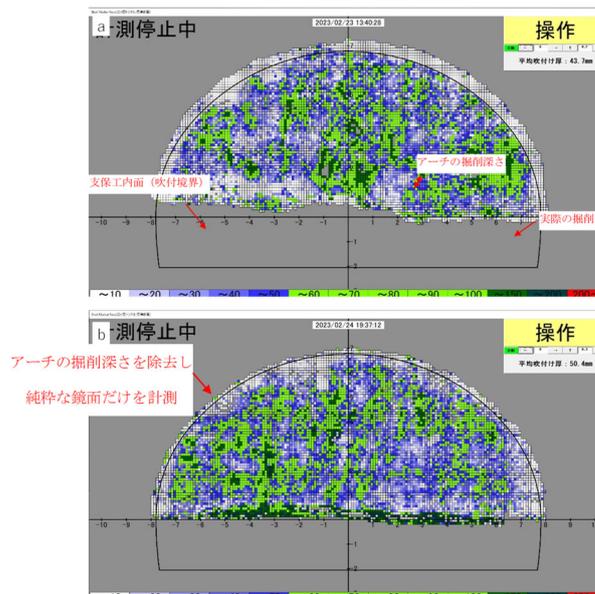


図-8 プログラム修正前後の吹付け厚さ表示画面
Fig.8 Spraying thickness display screen before and after program modification

もほとんど発生しないことを確認した。また、実験終了後に筐体内部を確認したが粉塵の侵入は見られなかった。しかし一方で、課題として、アーチ付近の地山をどれだけ吹付けても吹付け厚さ表示が変化しない事象が確認された。図-8 は吹付け中の厚さ表示画面であり、支保工内面位置を黒線で表示しているが、黒線より外側のメッシュ色がほとんど変化しなかった。これは、初期値計測時にアーチ付近に堆積している粉塵を計測することが原因と考えられ、アーチ周辺についてはノイズカットのための点群の除外条件をさらに追加した。点群除去に使用する基準点を中央の1点から、

センターより左右に 30 度, 60 度のアーチ付近に左右それぞれ 2 点ずつ追加した。これにより, 純粋な鏡面を正確に計測可能なことを確認した。

4. まとめ

山岳トンネルのコンクリート吹付け作業の効率化と安全性の向上を目的にコンクリート吹付け厚リアルタイム面的計測システム「T-ショットマーカー フェイス」を開発した。開発したシステムは, 現場の吹付け粉塵環境下における性能確認実験により, 高精度に面的計測が可能であることを確認した。今後は, 本技術を全国の山岳トンネル工事に展開し, 各現場の環境や施工条件に合わせた改良を加えながら, 吹付け作業の完全自動化も見据え, 吹付け作業の更なる効率化と安全性の向上を実現していきたい⁴⁾。

参考文献

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン, 2016.12.26
- 2) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン (改正), 2018.01.18
- 3) 竹中計行, 宮本真吾, 宮原宏史, 富川章：レーザーを用いた吹付け厚モニタリングシステムの開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-439, 2021
- 4) 木下勇人, 竹中計行, 宮本真吾, 宮原宏史, 富川章：山岳トンネルのコンクリート吹付け厚リアルタイム面的計測システムの開発, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-997, 2023