

ICT活用工事から得られる3次元データを活用した デジタルツインの実装と効果の検証

天野克己・山下 尚

1. はじめに

毎年、災害の激甚化やインフラの老朽化が進む一方、建設業の人手不足は深刻化している。これらの課題に対し、国土交通省では平成28年からICTの活用等による建設現場の生産性向上を目指す「i-Construction」を推進してきたが、このたびの新型コロナウイルス感染症流行下では、公共工事の現場においても非接触・リモート型の働き方に転換するなど、感染症リスクの観点からも強靱な経済構造の構築を加速することが喫緊の課題である。

こうした社会状況の変化に対し、国土技術政策総合研究所では、データとデジタル技術を活用し、「インフラ分野のDX推進」のため、施工現場と研究所が連携した推進体制の構築や環境整備、実験フィールド整備、3次元データ等を活用した新技術の開発や導入促進、これらを活用する人材育成等を推進しているところである。

本研究では、その取組の一つでもある、ICT活用工事から得られる3次元データを活用したデジタルツインの実装と効果についての研究成果を紹介する。

2. 研究概要

2.1 現在の状況

インフラ分野のDX推進ではデータとデジタル技術の活用が重要である。データ活用の分野は、近年AI技術が飛躍的に進み、人に代わってモノ・コトを認識・判断するまでになった。今後、ロボット技術への適用が進むと考えられる。

デジタル技術活用の分野は、第5世代移动通信システム（5G）のサービスが令和2年より開始され、従来に比べ20倍近くの超高速通信網が、今後、全国的に整備されるであろう。クラウド技術については言うまでもなく、我々を取り巻くデジタル技術は、加速度的に進んでいる。しかし、こ

れらはいくまでDX推進における開発環境の話である。これらの技術を利用して、我々が必要とするインフラ分野のデータを蓄積し、デジタル空間上に再現するデータプラットフォームを構築すること、すなわち「デジタルツインの実装」は「インフラ分野のDX推進」の重要な取組の一つである。

2.2 デジタルツインとは

ここで、本研究の中核ともいえる「デジタルツイン」について少し解説する。

デジタルツインとは、現実世界で計測、収集した様々なデータをコンピュータ上で再現する技術のことで、現実世界と双子（ツイン）を成すデジタル世界という意味がある。近年では、デジタルトランスフォーメーション（DX）と並んで先端技術の一つとして知られる。

デジタルツインの代表的な例として、「バーチャル・シンガポール」（2014～2018、投資総額7300万SGD、約60億円）がある（図-1）。まさに国土を丸ごと3次元データ化し、デジタル空間を再現している。

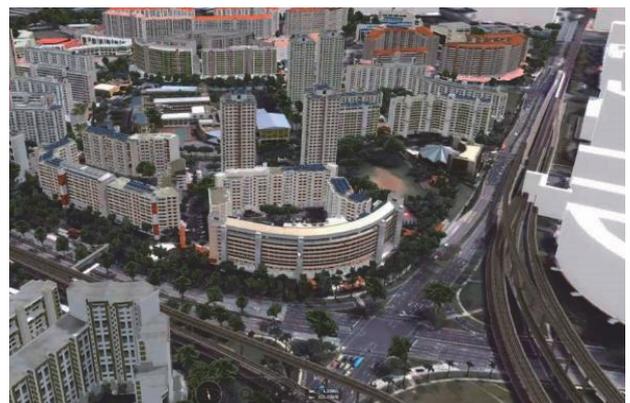


図-1 バーチャル・シンガポール

2.3 研究目的

デジタルツインの実装には、基盤図や3次元設計データ、施工履歴データといった主題図のデジタルコンテンツが必要となる。

それぞれのデータの蓄積については、制度の運用面を整備することで可能である。基盤地図の良

い例として、「地理空間情報活用推進基本法」(平成19年法律第63号)に基づき「基盤地図情報」が国土院より一般に公開されており、地理院タイル¹⁾等で広くデータ利活用が進むようAPI(サービスの機能やデータ等を他のサービス等から呼び出して利用するための接続仕様)を公開している。

また、主題図としては、ICT活用工事でデジタルツイン構築に活用可能と思われる3次元データが数多く得られるが、この3次元データを用いたデジタルツインの実装(プログラムの開発)について詳細に検討された例はない。

そこで、本研究は、特にICT活用工事より得られる3次元データを用いたデジタルツインの実装と効果の検証を目的とした。

3. 工事現場で得られる3次元データの種類

デジタルツイン実装の前に、まず、ICT活用工事から得られる3次元データの種類や形式について調査した。調査は各種の出来形管理要領(案)²⁾及び、平成28年度~30年度にかけて国直轄事業で発注された全国のICT活用工事のうち、令和元年6月までに完了した工事を対象に、電子納品成果の実態調査を実施した(図-2)。結果を工程別に整理した(表-1)。

結果をわかり易く簡潔にまとめるため、工種を「土工」の520現場に絞って調査した結果、21種(7形式)の3次元データが取得可能である事が分かった。

デジタルツインの実装では、判明した7つのデータ形式のうち、デジタルツインとして活用が難しいドキュメントや画像データを除いた、1)座標データ、2)線形・縦横断データ、3)面データ(TIN)、4)点群データ、5)走行軌跡データを対象とした。

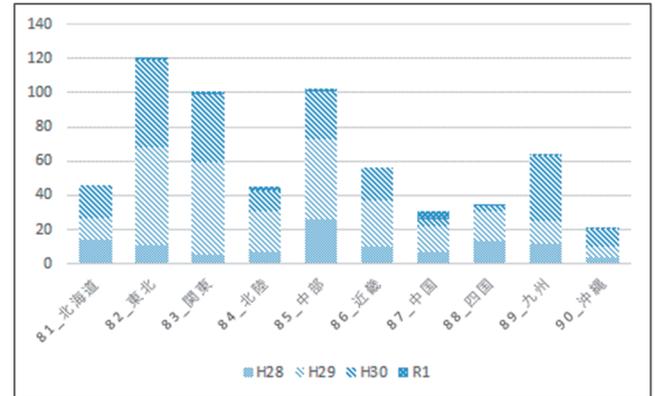


図-2 電子納品成果を収集した現場数

4. デジタルツインの開発環境

前述のデジタルシンガポールのプロジェクトでは、シンガポールの政府機関である国立研究財団(NRF)、シンガポール土地管理局(SLA)、情報通信開発庁(IDA)が参加し、ソフトウェア開発では、(仏) Dassault Systemes(ダッソー・システムズ)が民間企業として唯一参加し、3次元データ上でさまざまな都市向けシミュレーションが可能なアプリケーションを提供している。

近年、高度な3Dグラフィックス技術やデジタルアース技術がオープンソースライブラリとして

表-1 ICT活用工事によって取得可能な3次元データの種類

工程	作業概要	No	データ種類	データ形式	備考
施工計画	施工計画書	1	施工計画書	ドキュメント	主にPDF及びCADデータ
	工事基準点測量及び標定点測量	2	基準点データ	座標データ	国家座標へ変換する為の基準点座標
準備工	現況測量	3	施工前の現況縦断、現況横断データ	線形・縦横断データ	発注図書より3次元化した中心線・横断形状の骨格データ
		4	施工前の現況点群データ	点群データ	施工前の現況地形計測データ
		5	※計測手段が写真測量の場合	画像データ	※計測手段として写真測量を用いた場合の撮影画像
	設計照査・変更	6	照査後の設計縦断、設計横断データ	線形・縦横断データ	照査結果を反映した3次元の中心線・横断形状の骨格データ
	3次元設計データ作成	7	照査後の3次元設計データ	面データ(TIN)	3次元の中心線・横断形状の骨格データより自動生成した面データ
施工	盛土・切土	8	施工中の刃先の施工履歴データ	点群データ	施工中、随時記録されるブレードの刃先座標をメッシュ状に整理した点群データ
		9	施工中の刃先の施工履歴データ	点群データ	点群データ
		10	施工中の走行軌跡データ	走行軌跡データ	施工中、建設機械の走行軌跡を時間と座標で記録されたデータ
	施工管理	11	施工中の走行軌跡データ	走行軌跡データ	その他に測位状況、建機信号なども同時に記録。
		12	施工中の現況縦断、現況横断データ	線形・縦横断データ	
		13	施工中の現況点群データ	点群データ	施工中、出来高及び進捗管理を目的とした計測データ
		14	※計測手段が写真測量の場合	画像データ	
写真管理	15	工事写真データ	画像データ	施工中、品質管理を目的とした画像データ	
出来形管理	出来形計測	16	施工後の現況縦断、現況横断データ	線形・縦横断データ	
		17	施工後の現況点群データ	点群データ	施工後、出来形可否判定を目的とした計測データ
	面管理法の場合	18	※計測手段が写真測量の場合	画像データ	
数量計算	平均断面法	19	施工後の現況縦断、現況横断データ	線形・縦横断データ	
	3次元数量計算法	20	施工後の現況点群データ	点群データ	施工後、出来高数量算出を目的とした計測データ
納品	電子納品成果の作成	21	電子納品成果	ドキュメント	完成図書。

世界的に供給される様になり、高度な開発技術を持たない大学や政府の研究機関などでも比較的容易にデジタルツインを立ち上げることが可能になった。その代表的なものとしてCesium（セシウム）がある³⁾。

Cesiumは3次元地理空間アプリケーションをWebブラウザ上で開発するための基本的な表示機能やユーザーインターフェースを装備したオープンプラットフォームライブラリで、JavaScriptを用いて開発が可能である。動作環境も一般的なPCやタブレット端末に標準でインストールされているWebGL対応ブラウザがあれば、プログラムインストールの必要もない。以前は、Google Earth Proが無償でAPIを提供していたが、2015年に廃止となつてからは世界的にCesiumへの移行が進んでいる。国内では、地理院地図Globeで採用されているほか、多くの民間企業が自社製品のデータプラットフォームとして採用している。

Cesiumと並んで世界的にポピュラーなオープンソースライブラリとしてThree.js（スリー・ジェイエス）がある⁴⁾。Three.jsはWebブラウザ上での3Dグラフィックスの描画に特化したJavaScriptライブラリで、Cesiumと異なりユーザーインターフェースは持たないが、大容量データ、特に点群データやポリゴンデータなどの高速描画や複雑な図形を描画するためのライブラリが充実しており、ゲームやアニメーションなど、Webコンテンツのビジュアライズに数多く採用されている。

本研究は、CesiumとThree.jsを用いて、デジタルツインの実装を行った。

5. デジタルツインの実装

デジタルツインの実装は、以下の手順で進めた。

- (1) ベースマップの表示
- (2) 3次元設計データの表示
- (3) 3次元計測点群データの表示
- (4) 施工履歴データを用いた施工の再現

5.1 ベースマップの表示

ベースマップは、国内利用を鑑み「地理院タイル」の表示を実装した(図-3)。



図-3 地理院タイル

地理院タイルは、予めタイル状に分割したデータを配信する方式（いわゆる「XYZ方式」、Web地図配信における事実上の世界標準）で配信しており(図-4)、地図の平面を表す「地図タイル」と、地形の起伏を表す「標高タイル」がある。



図-4 地理院タイルの配信イメージ

Cesiumは「XYZ方式」に標準対応しており、容易に実装可能である。

ただし、地形の起伏を表す、標高タイルの取り扱いには注意が必要である。標高タイルで取扱う高さの値は文字通り「標高」であるのに対し、地球全体を表現するCesiumは、「楕円体高」を高さの値としている。これは、GNSSなどの衛星測位システムも同様である。地図に表記される高さの値「標高」は、水道などのインフラ整備や、津波や洪水等のシミュレーションに重要なデータとなる。そのため、標高は地形の起伏だけでなく、重力の影響を考慮する必要がある。平らに見える地表面でも、重力の分布が一樣でなければ、水は重力の強い方へ流れる。日本の標高の基準は、測量法で平均海面と定められている。平均海面を仮想的に陸地へ延長した面に、重力の影響を考慮した

ものをジオイドと言う(図-5)。

国土地理院は、重力測量や水準測量の結果を基に、地球楕円体からジオイドまでの高さ「ジオイド高」を決め、「日本のジオイド2011」⁵⁾として公開している。

「日本のジオイド2011」は、世界測地系における座標値(緯度、経度)で示された任意の位置のジオイド高を、緯度方向1分、経度方向1.5分ごとに区切ったモデルデータで国土地理院が定期的に更新している。

本研究では、測量成果以外の様々な3次元データの活用や衛星測位を用いた移動体などのリアルタイム表示、利便性を考慮し、楕円体高を高さの値として統一することとした。

5.2 3次元設計データの表示

次に3次元設計データ(データ形式:座標データ/線形・縦横断データ/面データ)の表示機能を実装した(図-6)。

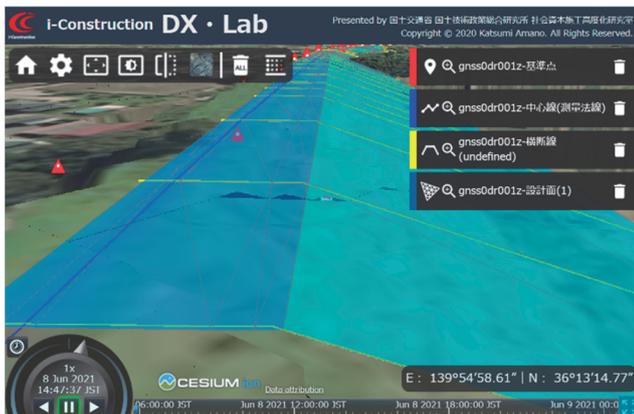


図-6 3次元設計データの表示機能による可視化

3次元設計データの読み込みは、「LandXML 1.2に準じた3次元設計データ交換標準(案 Ver.1.3)」(略称:J-LandXML)を対象とした。

なお、前述の通り、日本の測量成果は、高さの値は「標高」、座標の値は「平面直角座標」が一般的であり、J-LandXMLもこれに準じている。

平面直角座標とは、「平成14年国土交通省告示第9号」で定義され、地点の座標値が次の条件に

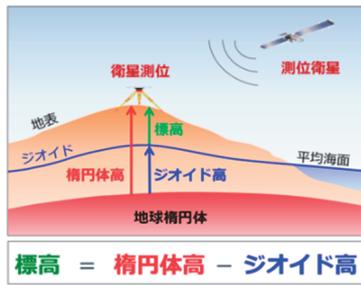


図-5 標高と楕円体高、ジオイド高の関係

従ってガウスの等角投影法によって表示されるように設置している(図-7)。

- ① 座標系のX軸は、座標系原点において子午線に一致する軸とし、真北に向う値を正とし、座標系のY軸は、座標系原点において座標系のX軸に直交する軸とし、真東に向う値を正とする。
- ② 座標系のX軸上における縮尺係数は、0.9999とする。
- ③ 座標系原点の座標値は、次のとおりとする。
X=0.000メートル、Y=0.000メートル

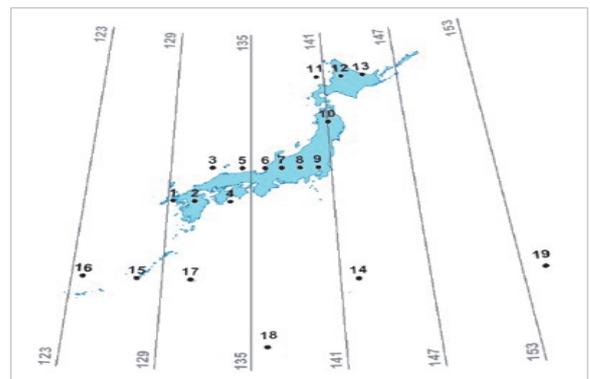


図-7 日本の平面直角座標系

異なる地理空間データを同次元で重畳表示する場合、平面直角座標から、緯度・経度へ変換⁶⁾して表示するのが一般的である。この時、当該地点の平面直角座標原点の情報(緯度・経度。以降、「座標参照系情報」と言う。)が必要になる。

J-LandXMLは、座標参照系情報を記録できる仕様であるが必須項目ではないため、電子納品成果の実態調査では未登録のデータが数多く見受けられた。また、J-LandXMLの線形・縦横断データでは、中心線を構成する中間点を拡張仕様として追加したがこれも必須項目ではないため、未登録時には中心線の幾何要素から平面座標の算出、縦断要素から標高値の算出を行ったのち、緯度・経度・楕円体高に変換した。

以上の措置を施すことで3次元設計データを可視化することができ、デジタルツイン上で設計照査の一部(設計図面と現況地形の干渉確認)がある程度、可能であることが分かった。

5.3 3次元計測点群データ

次に3次元計測点群データ(データ形式:点群データ)の表示機能を実装した(図-8)。

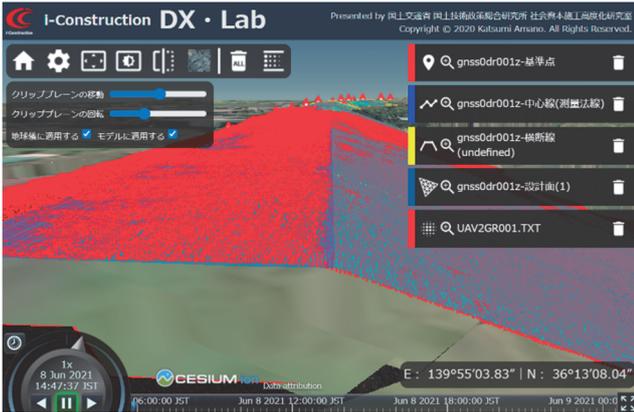


図-8 設計データと点群データの重量化による出来形・出来高の可視化

各種出来形管理要領（案）に準じた電子納品成果の実態調査では、3次元計測点群データの納品ファイル形式としてCSV形式のデータが最も多く、続いて、TXT形式、LAS形式となっている。これらのファイル形式は、大容量の点群データ格納形式として適しているが、デメリットとして座標参照系情報が無いこと、座標軸の統一仕様が無いことが挙げられる。日本の測量法では、X軸が北距、Y軸が東距（いわゆる「測量系」という。）だが、世界一般では数学と同じくY軸が北距、X軸が東距（いわゆる「数学系」という。）が一般的である。そこで、データの読み込み時、座標参照系情報の入力、座標軸の切換機能、ズームアップ機能を実装し、ビジュアルに位置を確認しながら読み込めるように工夫した(図-9)。



図-9 点群データの読み込み画面

以上の措置を施すことで、3次元設計データと3次元計測点群データを重ね合わせて可視化し、デジタルツイン上の出来形・出来高確認がある程度可能であることが分かった。

5.4 ICT建機の施工履歴データ

最後に、ICT建機の施工履歴（データ形式：走行軌跡データ）から、施工当時の状況を再現する機能を実装した(図-10)。本研究では、「TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領」⁷⁾を用いて、盛土の締固め品質管理データとして納品され



図-10 建機の施工履歴データの表示

た転圧ローラーの走行軌跡データを基に、施工当時のICT建機の締固め施工動作をアニメーションで再現した。再現方法はICT建機の車載モニタに表示され

る締固め回数分布の表示仕様に準じて、時間の経過とともに、締固め回数別の色凡例に従って表示した。これにより、最終結果しか確認できなかった従来の締固め回数分布図(図-11)や走行軌跡図(図-12)と異なり、時間の経過とともに施工軌跡と回数分布が表示されるため、施工者によって、建機の動作が効率的な施工者(図-13)と、非効率的な施工者(図-14)とが可視化され、施工者の熟練度が見て分かるようになった。

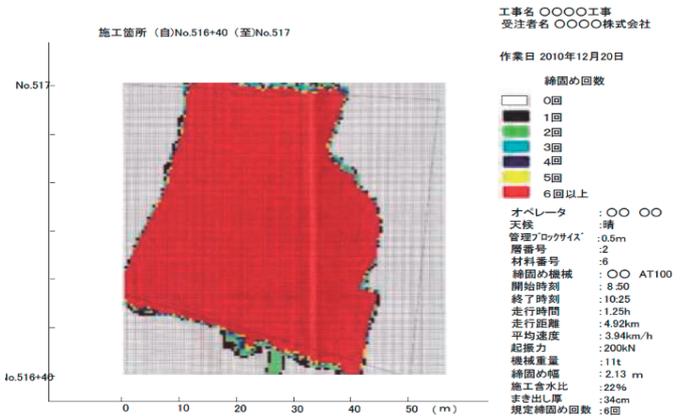


図-11 従来の締固め分布図

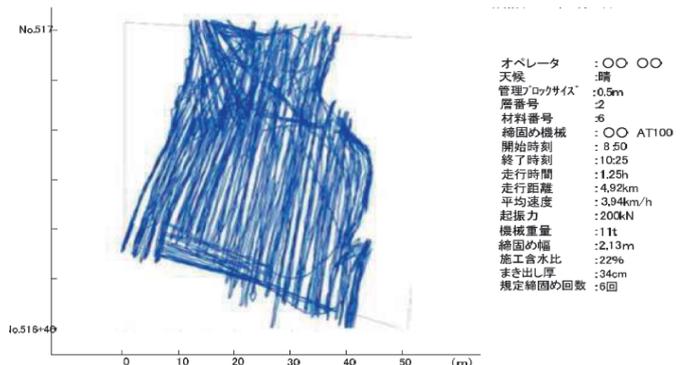


図-12 従来の走行軌跡図

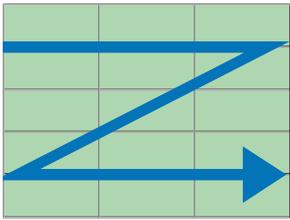


図-13 効率的な
施工軌跡

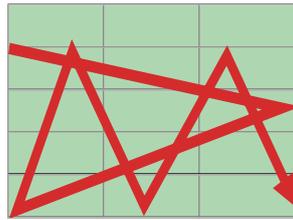


図-14 非効率的な
施工軌跡

このことから、蓄積された施工履歴データが、今後、AI・ロボットの学習用データとして活用できる可能性を示すことができ、ICT活用工事より得られた施工履歴データを蓄積することで、将来の無人化施工技術への発展に繋がることが期待される。

また、この実証実験で分かった事として、転圧ローラーの施工履歴データと3次元設計データや3次元計測点群データを重ねて表示したことで、施工履歴データの座標精度が確認でき、今後、転圧ローラーの施工履歴データを用いた出来形管理のさらなる高度化の可能性を示せた。

施工履歴データを活用した出来形・出来高・品質管理といった技術検討がこれまでのような試験施工や実現場のデータ取得を行わず、過去の施工履歴データを利用した仮想空間におけるシミュレーションによって検討可能であることがわかり、データ蓄積の重要性について示すことができた。

6. まとめ

今回の研究を通して、ICTを活用した工事現場から得られる3次元データを蓄積、連携、活用し、仮想空間上に建設現場を再現（デジタルツイン）することで、実際の現場に臨場することなく、遠隔で施工品質の確認や出来形・出来高の確認がある程度可能であることが分かり、インフラ整備プロセスの高度化が図れることを示せた。

また、ICT建設機械の施工履歴データなどは、時間軸も加味した4Dデータを蓄積していくことで、将来、AI・ロボットの学習用データへの活用が期待でき、自動施工の発展につながることが示せた。

インフラ分野のDXを強力に推進する上で、3次元データの座標参照系や座標軸の考え方など、デジタルツインを構築、整備する上で如何に重要な情報であるかを示した。今回実施した電子納品成果の実態調査では、多くの納品データでこの情報が欠落しており、特に点群データでは登録する仕様もないため、デジタルツイン構築に大きな障害となる事が分かった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、電子納品成果の収集にご協力頂きました、各地方整備局担当者様、北海道開発局担当者様ならびに沖縄総合事務局担当者様、国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課の皆様方に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地理院タイル
(<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)
- 2) 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）他7種、2020
- 3) Cesium (<https://cesium.com/cesiumjs/>)
- 4) Three.js (<https://threejs.org/>)
- 5) 日本のジオイド2011
(https://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/grageo_geoidseika.html)
- 6) 河瀬和重：Gauss-Krüger 投影における経緯度座標及び平面直角座標相互間の座標換算についてのより簡明な計算方法、国土地理院時報、121、109-124、2011
- 7) 国土交通省：TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領、2020

天野克己



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター社会資本施工高度化研究室 交流研究員 現 サイテックジャパン (株)
AMANO Katsumi

山下 尚



国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター 社会資本施工高度化研究室長
YAMASHITA Hisashi