

ロボット手術 2nd Phase

徹底分析
シリーズ手術支援ロボットの現状と
将来動向, 導入da Vinciとhinotoriだけじゃない
手術支援ロボットの魅力と可能性

古賀 聡人

15a 新M

ロボット支援手術(RAS)の
急速な増加

Intuitive Surgical社のda Vinci®の販売が2000年に米国で始まり、日本では2009年に販売承認、2012年に根治的前立腺全摘術の保険収載と続いた。以降、多くの施設に手術支援ロボットが導入され、複数台を保有する病院も増え、症例数は加速度的に増えている。

レセプト情報から作成されたNDB(National Data Base)のオープンデータからRASを受けた患者を集計すると、過去5年間で約3倍に(図1)、厚生労働省の病床機能報告データ②では、手術支援ロボットの保有台数は過

去5年間で約2倍になっている(図2)。保険収載される術式が診療報酬改定ごとに増え(表1)、患者のニーズが高まっている中、今後もRASは増えていくと予想される。前立腺癌手術では令和4(2022)年度の全手術のうち91%がRASとなっているが、そのほかの手術でも開胸・開腹手術や鏡視下手術からRASへの移行が進めば、今後も手術症例数が増加することが予想される。

特色をもった
新参者たち

2020年にIntuitive Surgical社の特許が切れたのに伴い、日本国内外から多くのメーカーが参入し、手術支援ロボ

手術支援ロボットを使用した
手術症例数
(文献1のデータをもとに作成)

1/a M中G BBB
(以下同)

図中ネーム
・基本 1/a M中G BBB
(10a以下は、ロタンM)
・太くするネーム
1/a B太きB101
(10a以下は、ロタンDB)
(以下同)

図版は、0.12ミリケイ
色ベタ、黒
(以下同)

65ミリ
110ミリ
(以下同)

10a トラギ/明朝(以下同)
12H

KOGA, Tokito
兵庫県立西宮病院 麻酔科

0.5ミリケイ、色ベタ、大地、4ミリ

徹底分析シリーズ

ロボット手術 2nd Phase

10a
新M

表中 ケイ
0.25ミリケイ・白スミ

(以下同)
94ミリ
179ミリ

色ベタ+スミ20% (以下同)

▼表1 年度ごとの保険収載術式

2026年度以降も保険収載される術式の増加や、すでに収載された術式における「ロボット加算」(現在は胃癌や前立腺癌でしか認められていない)の追加が見込まれる。

	2012年度	2016	2018	2020	2022	2024
呼吸器			胸腔鏡下縦郭悪性腫瘍手術 胸腔鏡下良性縦郭腫瘍手術 胸腔鏡下肺悪性腫瘍手術	胸腔鏡下肺悪性腫瘍手術 (区域切除) 胸腔鏡下拡大胸腺摘出術		胸腔鏡下肺切除術 (区域切除・肺葉切除) ※良性腫瘍
心血管			胸腔鏡下弁形成術			胸腔鏡下弁置換術(1弁・2弁)
消化器			胸腔鏡下食道悪性腫瘍手術 腹腔鏡下胃切除術 腹腔鏡下噴門側胃切除術 腹腔鏡下胃全摘術 腹腔鏡下直腸切除・切断術	腹腔鏡下脾臓十二指腸切除術 縦郭鏡下食道悪性腫瘍手術 腹腔鏡下脾体尾部腫瘍切除術	腹腔鏡下総胆管拡張症手術 腹腔鏡下肝切除術 腹腔鏡下結腸悪性腫瘍切除術	
泌尿器	前立腺悪性腫瘍手術	腎部分切除術	腹腔鏡下膀胱悪性腫瘍手術	腹腔鏡下腎盂形成術	腹腔鏡下副腎摘除術 腹腔鏡下副腎腫瘍摘除術 腹腔鏡下尿管悪性腫瘍手術	
婦人科			腹腔鏡下子宮悪性腫瘍手術 腹腔鏡下腔式子宮全摘術	腹腔鏡下仙骨腔固定術		腹腔鏡下腔断端挙上術
耳鼻咽喉科					鏡視下咽頭悪性腫瘍手術 鏡視下喉頭悪性腫瘍手術	
整形外科						人工関節置換術・股関節

ットのマーケットが広がっている。選択肢が広がり、全体にコストダウンが図られることは望ましいが、それぞれの特徴や利点、欠点をふまえて戦略的に購入を検討する必要がある。今後の動向も含めて各メーカーのロボットたちを簡単に紹介する。

da Vinciシリーズ
(Intuitive Surgical社)

2006年のda Vinci S発売以降、2009年にda Vinci Si、2014年にda Vinci Xi(図3)、2018年にda Vinci Xと進化を重ねてきており、現在はda Vinci Xiが主力として多くの病院で使われている。専用手術台とのドッキングやデュアルコンソールシステムでの指導が可能になるなどの進化が遂げられており、麻酔科医にとってもストレスが軽減した感がある。単孔式(シングルポート)のda Vinci SP(図4)が2022年に発売され、最小限の切開で行う体腔内の深く狭い術野での手術(regiona-

▼図2
手術支援ロボットの
保有台数
(文献2のデータをもとに作成)

56ミリ
90ミリ

▼図3 da Vinci Xi (画像提供: Intuitive Surgical社)



色ベタ
58ミリ
100ミリ

徹底分析
シリーズ

ロボット手術 2nd Phase

▼図4 da Vinci SP (画像提供: Intuitive Surgical社)



▼図5 da Vinci 5 (画像提供: Intuitive Surgical社)



▼図6 hinotori (画像提供: メディカロイド社)



lized surgery) や経口ロボット支援手術 transoral robotic surgery (TORS) に強みを発揮している。経腹膜アプローチが行われてきた泌尿器科手術や婦人科手術に、後腹膜アプローチや経膀胱アプローチという新しい選択肢を与えている。

また、2025年10月以降に da Vinci 5 (図5) が発売され、鉗子に加わる力がデジタル化されるようになったり、「力覚」が表示されるようになったりと、今までロボット手術の弱点とされてきた触感のなさが改良される予定である。

現在までの da Vinci シリーズ販売台数約850台のうち、8割を Xi が占

める一方、da Vinci SP も約20台程度販売されている。

hinotori™ (メディカロイド社)

川崎重工業社、シスメックス社の共同出資によって2013年にメディカロイド社が設立され、神戸大学および藤田医科大学を交えて産学連携による開発が進められてきた。2020年8月に hinotori (図6) は医薬品医療機器総合機構 (PMDA) に承認され、保険適用となった。当初は泌尿器科限定での承認であったが、2022年10月からは消化器外科・婦人科領域でも追加の承認を得た。特徴としてドッキングフリーなロボットアームとトロカーポート、

オペレーションアームの多関節軸設計、3D ビューアが可変式でエルゴノミックな仕様を凝らしたサージョンコックピットなどがある。ドッキングフリーデザインのため緊急時のロールアウトに要する時間が短縮する可能性がある。

発売当初はアームの揺らぎや鉗子の制限などが課題として挙げたが、メーカーの開発継続により現在ではアームの揺らぎは小さくなり、また鉗子の種類も増えつつある。確かに先行メーカーとは20年以上の歴史の違いがあり、hinotori が発展途上であることは否めないが、日本の外科医からの意見を取り入れ、早期に改善してくれること、オープンプラットフォーム体制で新たな機能とサービスの開発を継続的に進めることには期待がもて、「かゆい所に手が届く」存在となる可能性がある。すでに市販後にアップデートされた機能として ICG (indocyanine green) 蛍光法を用いた観察機能や術シミュレータの実装 (hi-SIM™) などがある。今後、手術ベッドと連動するテーブルモーション機能、教育やトレーニングのためのデュアルコンソール機能を期待したい。

また、遠隔医療への応用のための実

証実験もこれまでに行われてきた。日本外科学会による『遠隔手術ガイドライン』³⁾において、遠隔手術環境における術者の操作入力に対する遅延時間は100 msec 以下であることが望ましいとされているが、北海道大学病院と九州大学病院間 (約2000 km) を接続した際の遅延時間は約30 msec 程度と、遠隔医療支援の実現に向けた可能性がある段階にまでなっている。今後は、①助手および看護師のコミュニケーション、②患者の状態把握、③ベッドサイドおよび手術室内の手術関連機器の状況把握、などの課題を解決することが求められている⁴⁾。

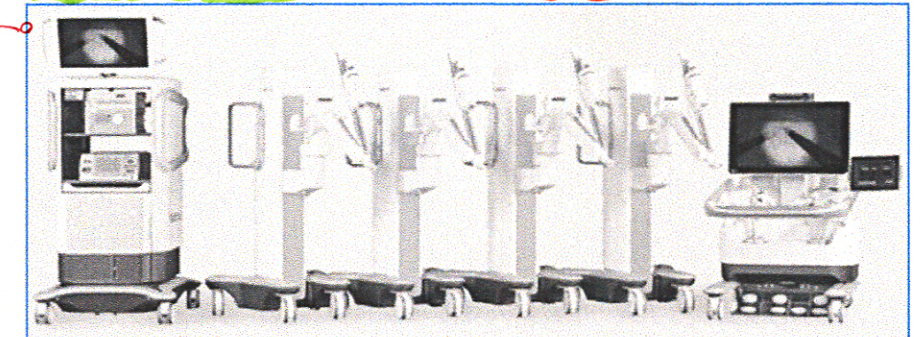
医療機器における1兆7000億円を超える輸入超過 (2019年度) を打破することが期待されており、hinotori は現在までに国内外で約100台が販売されてきた。

Hugo™ RAS System
(コヴィディエンジャパン社)

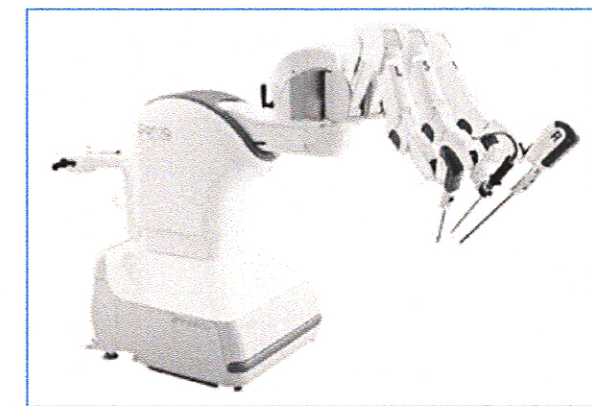
2022年9月に Medtronic 社の Hugo Robot-assisted Surgery (RAS) System (図7) が製造販売を承認された。Hugo RAS System は独立した4本のアームカートとオープンサージョンコンソール、システムタワーから構成され、まったく新しいコンセプトの手術支援ロボットとなっている。アームカートが独立しているため、フレキシブルな配置が可能で手術室のスペース効率を高められる点、オープンコンソールにより術者がアームの動作確認を容易に行え、助手やその他医療スタッフとのコミュニケーションが取りやすい点が特徴的である。一方、マイクやスピーカーが搭載されていないため、さまざま

徹底分析シリーズ ◆ ロボット手術 2nd Phase

▼図7 Hugo RAS システム (画像提供: コヴィディエンジャパン社)



▼図8 Saroa (画像提供: リバーフィールド社)



な雑音が存在する手術室ではある程度の大きな音量でのコミュニケーションが必要になるのは欠点である。術者専用の3D グラスに対してヘッドトラッキングシステムがあり、術者が3D モニターから視線を外した際にはハンドコントローラーが停止する安全機能が装備されている。アームが独立していることにより大量出血に伴う緊急ロールアウトの際に鉗子で圧迫したままロールアウトができるというメリットがある。

Saroa (リバーフィールド社)

東京工業大学と東京医科歯科大学 (現在は統合されて東京科学大学) が共同で開発した、世界で初めて触覚フィードバックを備えた手術支援ロボットである (図8)。2023年5月に製造販売を承認された。Saroa は従来の特徴に加え、①触覚フィードバック機能、②ロールクラッチ機能、③軽量小型の3点の機器的特徴を有する。触覚フィー

ドバックは鉗子で物体を把持したときの抵抗が、空気圧シリンダーを通して実際の圧力として感知変換され、術者にフィードバックされる。この機能により、必要最小限の弱い力で物体を把持することが可能となる。ロールクラッチ機能は運針などの回転操作を要する場合、従来は術者の手首の回転操作に限界があることから針の持ち直しが必要になるが、Saroa は回転操作にクラッチをかけることができるため、両回転方向にそれぞれ270°まで針を持ち変えることなく運針することができる。Saroa はペイシェントカートが492 kg、サージョンコンソールが130 kg と軽量であり、重量制限なく、さまざまな手術室への導入が可能である。専用の内視鏡スコープやジェネレータをもたず、既存の腹腔鏡用器具が使用可能であるため、コスト削減が可能という強みを持ち合わせている。国産のロボットであり、hinotori 同様に外科医と技術者の距離が近いことから機器の

徹底分析
シリーズ ロボット手術 2nd Phase

▼図9 ANSURのイメージ (画像提供: 朝日サージカルロボティクス社)



改良が進みやすいというメリットも大きい。現在(2025年10月時点)国内で11台が導入されている。

ANSUR サージカルユニット
(朝日サージカルロボティクス社)

国立がん研究センターと、国立がん研究センター発のベンチャーである朝日サージカルロボティクス社は、術者の側で「Another Surgeon」としてより良い手術へと「TRACTION」していくことをコンセプトとした手術支援ロボット「ANSUR サージカルユニット」を開発した(図9)。2023年2月に医療機器として承認された。従来の手術支援ロボットとコンセプトがまったく異なる「助手に特化したロボット」となっており、従来の腹腔鏡下手術では執刀医が助手とスコピストとともに手術を行ったのに対し、助手とスコピストの役割をロボットが担うことで、熟

練した執刀医であれば必要最小限の人員で手術を実施することが可能となる。現在(2025年10月時点)の販売台数は3台だが、外科医の働き方改革をサポートしながら手術室の効率の運用ができるという点で今後注目されるかもしれない。

Senhance®
(アセンサス・サージカル・ジャパン社)

腹腔鏡下手術をデジタル化し、より安全に施行できることを目指し開発されたシステムである(図10)。自らの手で直接把持していると同じような触覚フィードバックシステム、術者の目の動きに反応するアイセンシングコントロールテクノロジーと呼ばれる赤外線視線追跡システム、ほかの医療スタッフとコミュニケーションが容易に取れるオープンコンソール、通常の腹腔鏡下手術と同じトロカーを使用すること

により腹腔鏡下手術への移行がスムーズ、などの特徴がある。

自施設への
導入手順

施設条件、術者条件の確認に始まり、スケジュール立案、多職種による導入チーム結成、施設見学、製造販売会社のトレーニングコース受講、ロールプレイとセッティング確認、固定具・顔面保護具などの購入が必要になる。最初の10例の費用を患者に請求できないため、自由診療かつ病院負担とする必要があること、施設によっては倫理委員会や高度医療審議会などで審議を受ける必要があること、安全性を多方面から確保するため臨床研究として導入してもいいかもしれないことなどを知っておく必要がある。兵庫県立西宮病院は、筆者が赴任した際にすでにda Vinci Siが導入されていたが、Xiに切り替わる際のキックオフミーティングに麻酔科を代表して参加し、実機を用いたシミュレーションのスケジュール調整にかかわった。実際の麻酔だけでなく手術スケジュールを預かるからこそ麻酔科医が積極的にかかわる重要性を実感した。より詳しく知りたければ、da Vinciに限定されてしまうが、『ダヴィンチ導入完全マニュアル』⁵⁾が医師だけでなく手術室看護師、臨床工学技士、医事課職員と多職種向けに書かれており、お勧めできる。

2台目以降の導入
(特に他機種の場合)

ロボット手術支援機器の機種拡充に合せて各学会の指針の改訂が行われている。一例として日本産科婦人科学会

の『婦人科領域におけるロボット手術に関する指針』⁶⁾では、すでにロボット手術を行っている施設が別機種のロボットを導入する際の手順が示されている。製造販売会社のトレーニングプログラムをチームとして終了し、その機種の指導者の執刀手術見学と招聘手術を少なくとも1例は経験しておくこと、従来の手術支援ロボットによる当該手術の経験が十分にあること、とある。泌尿器領域(日本泌尿器内視鏡・ロボティクス学会)や消化器外科領域(日本内視鏡外科学会)でも同様の扱いとなっている。

シミュレーション

ロールプレイとセッティングを行い、手術台やペイシェントカートの位置決め、そのほかの器械の位置決めをしていく。位置決めの際にはテーピングを行い、本番の手術に備える。これに麻酔科医も参加することで麻酔器周りのスペースを確保できるし、手術台の操作に慣れることができる。

導入後は術中の緊急事態に備えたトラブルシミュレーション(イベントに際した緊急開腹時のシミュレーションや災害時のシミュレーション)を定期的に行うことが望ましい。ロボット心臓手術関連学会協議会は年に1回の緊急ロールアウトシミュレーションを行うことを義務付けており、施設認定更新の際にはその実施報告が必須となっている。ホームページに緊急ロールアウトシミュレーション例が掲載され、各職種が行うべきことがアクションカード形式で整理されているため、大変参考になる。RASでは物理的距離が

▼図10 Senhance (画像提供: アセンサス・サージカル・ジャパン社)



遠くなりがちだが、シミュレーションなどで普段からコミュニケーションを取りやすい関係性を構築し心理的距離を縮めておくことは、緊急対応時にものをいう。

経営

手術支援ロボットを導入する際には、導入予定手術ごとに得られる手術点数から、ロボットの消耗品費、減価償却保守費、そのほか消耗品費などのランニングコストを引いた粗利益を算出し、RASによる医学的なメリットを含めて詳細に検討したうえで、導入を決定することが望ましい⁷⁾。一般的にRASは腹腔鏡下手術に比べコストが高く利益率が低いといわれているが、手術時間の短縮や材料費の削減により腹腔鏡下手術と同等あるいはそれ以上の利益をもたらすこともできる。

◎手術効率の改善効果を示した例

山梨県立中央病院婦人科では、①手術工程の見直し→手術工程以上に入れ替え時間の要素が大きいことを同定、②手術工程の見直しと手技の標準化→鉗子の種類を厳選し手技の煩雑化を回避、③定期的なミーティングにおける術中トラブルなどの情報共有、の3点に取り組むことで手術間入れ替え時間を

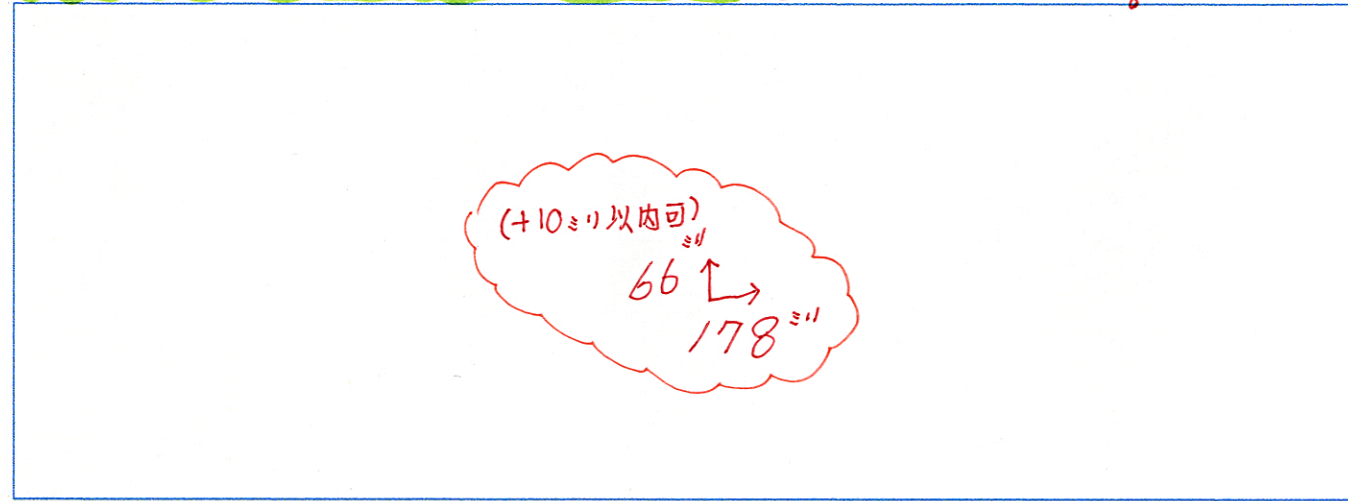
50～60分短縮し、手術時間も50分前後短縮することに成功している。それにより1日あたりの手術件数を2件ほどから4～5件まで増加させ、手術効率の大幅な改善を達成している⁸⁾。

外科医教育への
効用も

RASは一般的に手術時間が長くなることから上級医を中心に導入することが多く、若手外科医の執刀機会の減少、モチベーション低下につながる可能性がある。この課題を打開するために手術の定型化、入れ替え時間の短縮などの工夫から1日縦2件の体制を整え、レジデントへ執刀機会を提供している大阪急性期・総合医療センターの取り組みも興味深い⁹⁾。その肝は外科医自らが率先して時間短縮の取り組みを行うことと強調されているが、「レジロボ」と呼ぶ教育体制により医学生・研修医の人気を集めているようだ。

これまで日本では、導入にあたって施設単位での検討のみで進められてきたため、地域ごとの保有台数の差が8倍近くに広がっており、地域格差が問題となっている(図11)。アクセス権の不平等と考え、是正すべきか、もしくは外科医の偏在と併せて遠隔医療を

▼図 11 40 歳以上人口 100 万あたり都道府県別手術支援ロボット保有台数 (文献 11 のデータをもとに作成)



コラム

新たな外科医への道になるか

手術支援ロボットを調べていると、“外科医けいゆう”のペンネームで SNS などを通じて一般市民に医療知識を発信している消化器外科医の山本 健人先生が運営に携わった、日本外科学会の子ども向けイベント「オペスル」についてのニュースに遭遇した¹⁰⁾。外科医の減少に危機感をもつ中での将来への投資とも言えるイベントで、「最新の技術！ ロボット支援手術体験」と銘打ちロボット手術を疑似体験できるようだ。日本の外科医の 55% が 50 歳以上というショッキングなニュースは読者も目にしたと思うが、働き手不足や地域偏在の恐れがある中、手術支援ロボットがその活路になることを期待したのも今回の特集を企画した理由の一つであった。手術支援ロボットを入り口として外科手術の担い手が増えることは、麻酔科医としてうれしく思う。

推進すべきか、今後、国民全体で考えるべきテーマである。この点については、●●ページで論じる。

RAS はただ長いだけと斜に構えずに、広い視野で受け入れ、麻酔科医は病院経営や地域医療に貢献していくことが求められる。

本稿は整合性確保のためメーカー各社に問い合わせをしたうえで執筆した。お忙しい中、対応いただいた担当者各位に深く感謝申し上げる。

13a 見込 MB 31

文献

- 厚生労働省．NDB オープンデータ．各年 5 月．<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000177182.html> (2025 年 9 月 23 日閲覧)
- 厚生労働省．病床機能報告．各年 9 月．<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000055891.html> (2025 年 9 月 23 日閲覧)
- 日本外科学会．遠隔手術ガイドライン．2022 年 6 月 22 日．<https://jp.jssoc.or.jp/uploads/files/info/info20220622.pdf> (2025 年 4 月 1 日閲覧)
- 北辻博明，大橋政尚．手術支援ロボット hinotori™ と遠隔手術への取り組み．システム / 制御 / 情報 2024 ; 68 : 55-60.
- 中山祐次郎 編著．ダヴィンチ導入 完全マニュアル．東京：メジカルビュー社，2023.
- 日本産科婦人科学会．「婦人科領域におけるロボット手術に関する指針」の改訂について．2025 年 6 月 28 日改訂．<https://www.jsog.or.jp/medical/877/> (2025 年 9 月 16 日閲覧)
- 細谷 亮．当院におけるロボット手術センタの現況．神戸病紀 2020 ; 58 : 1-7.
- 坂本育子．市中病院におけるロボット支援手術の効率化と費用対効果の向上．医界新聞 2024 ; 3563 https://www.igaku-shoin.co.jp/paper/archive/y2024/3563_04 (2025 年 9 月 18 日閲覧)
- 賀川義規，井上 彬，西沢佑次郎ほか．ロボット大腸手術の 1 日縦 2 件を「日常化」するためのチームビルディング．日手術医会誌 2024 ; 45 : 187-93.
- 朝日新聞 withnews．外科医のイメージを変えたい…医学生も巻き込む学会イベントへの思い，9 月 28 日開催 子ども向けイベント「オペスル」．2025 年 9 月 11 日．<https://withnews.jp/article/f0250911001qq0000000000000000W02c10701qq000028246A> (2025 年 9 月 16 日閲覧)
- e-Stat 政府統計の総合窓口．都道府県，年齢 (5 歳階級)，男女別人口一総人口，日本人人口 (2023 年 10 月 1 日現在)．2024 年 4 月 12 日．<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200524&tstat=000000090001&cycle=7&year=20230&month=0&class1=000001011679> (最終閲覧日 2025 年 9 月 25 日)