

# YOLOとその変種によるグラム染色画像からの菌の検出

煙草谷 拓透<sup>1,a)</sup> 小畑 光<sup>1,b)</sup> 田中 空翔<sup>1,c)</sup> 平田 耕一<sup>2,d)</sup>

**概要：**グラム染色は、検体中の菌を染色してその染色性と形状から菌種を推定する方法である。本論文では、物体検出器であるYOLOv8, YOLO11, これらの改良版であるHIC-YOLOv8/11, SOD-YOLOv8/11, SODIC-YOLO11, YOLOv8/11-TLA, MambaYOLO を利用し、グラム染色画像から、腸球菌、黄色ブドウ球菌、肺炎球菌、B群レンサ球菌、クロストリジウム・パーフリンゲンス、コリネバクテリウム、抗酸菌、ブランハメラ・カタラーリス、緑膿菌、キャンピロバクター、大腸菌、ピロリ菌、インフルエンザ菌、肺炎桿菌の合計14菌種を検出する。

**キーワード：**2170301 医療・福祉支援, 2150205 画像認識・理解, 2130102 機械学習

## Detecting Bacteria in Gram Stained Smears Images

HIROTO TABAKOTANI<sup>1,a)</sup> HIKARU KOBATA<sup>1,b)</sup> TSUBASA TANAKA<sup>1,c)</sup> KOUICHI HIRATA<sup>2,d)</sup>

**Abstract:** Gram staining is a method for staining bacteria in a specimen and estimating the bacterial species based on their staining characteristics and morphology. This paper uses object detectors YOLOv8, YOLO11, and their improved versions HIC-YOLOv8/11, SOD-YOLOv8/11, SODIC-YOLO11, YOLOv8/11-TLA, MambaYOLO to detect 14 bacterial species from Gram-stained images: Enterococcus, Staphylococcus aureus, Streptococcus pneumoniae, Group B Streptococcus, Clostridium perfringens, Corynebacterium, acid-fast bacteria, Bacteroides catarrhalis, Pseudomonas aeruginosa, Campylobacter, Escherichia coli, Helicobacter pylori, Haemophilus influenzae, and Klebsiella pneumoniae.

**Keywords:** 2170301 Medical · Welfare Support, 2150205 Image Recognition · Understanding, 2130102 Machine Learning

### 1. はじめに

臨床微生物学において、感染症診断は主に顕微鏡検査、培養および同定で構成される ([4], [14])。1884年にHans Gramによって導入されたグラム染色 [1] は、顕微鏡検査の一種である。これは、クリスタルバイオレット染料を吸収する細胞壁の能力によって菌を分類する手順であり、そ

の後に赤色のサフラニンによる対比染色が行われる。グラム染色は、菌を紫色または赤色のいずれかに染色する。紫色に染まる菌はグラム陽性菌とよばれ、クリスタルバイオレット染料を効果的に吸収する。一方、赤色に染まる菌はグラム陰性菌とよばれ、クリスタルバイオレット染料を保持せず、赤色のサフラニン対比染色を取り込む [2]。グラム染色の後、菌は顕微鏡を通して球状 (球菌) または桿状 (桿菌) として観察される ([2], [4])。したがって、菌はグラム陽性球菌 (GPC)、グラム陽性桿菌 (GPB)、グラム陰性球菌 (GNC)、グラム陰性桿菌 (GNB) の4種類に分類することができる。

培養と同定には少なくとも丸一日を要するのに対し、グラム染色は迅速で高価な設備をほとんど必要としないため、感染症の初期診療において重要である ([4], [14])。一

<sup>1</sup> 九州工業大学大学院情報工学府  
Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology  
<sup>2</sup> 九州工業大学情報工学研究院  
Department of Artificial Intelligence, Kyushu Institute of Technology  
a) tabakotani.hiroto518@mail.kyutech.jp  
b) kobata.hikaru749@mail.kyutech.jp  
c) tanaka.tsubasa391@mail.kyutech.jp  
d) hirata@ai.kyutech.ac.jp

表 1: 本論文で対象とする菌  
Table 1 The target bacteria in this paper.

分類	菌名 (略称)	
GPC	腸球菌 (EF)	黄色ブドウ球菌 (SA)
	肺炎球菌 (SP)	B 群レンサ球菌 (BS)
GPB	クロストリジウム・パーフリンゲンス (CP)	
	コリネバクテリウム (Cr)	抗酸菌 (Mc)
GNC	ブランハメラ・カタラーリス (BC)	
GNB	緑膿菌 (PA)	キャンピロバクター (Cm)
	大腸菌 (EC)	ピロリ菌 (HP)
	インフルエンザ菌 (HI)	肺炎桿菌 (KP)

方で、菌だけでなく白血球、塵、油、結晶などの非菌物質もクリスタルバイオレット染料や赤色サフラニン対比染色によって染まるため、グラム染色の顕微鏡検査による菌の検出には、技術的専門知識を必要とする。

顕微鏡検査では、グラム染色画像は、顕微鏡を通じて手動かつ視覚的にのみ観察されており [15]、自動化されるに至っていない。その理由の一つは、複雑な背景から菌のみを識別する画像処理技術がまだ発展途上であることが挙げられる。また、顕微鏡検査の後に培養と同定を行うことで、菌を推定可能であることも自動化を遅らせる要因となってきた。しかし、多くの菌は体外では生存しにくいいため、顕微鏡検査における標本内の菌と、培養によって増殖させた菌は、慎重に培養したとしても必ずしも一致しない。つまり、グラム染色画像内の菌分布こそが患者の病態をより直接的に反映していると言える。

以上の背景から、グラム染色画像からの菌自動検出は、初期診断の迅速化と精度向上において極めて有意義である。本論文では、表 1 の 14 種類の菌を対象とした自動検出手法を提案する。図 1 はそれらのグラム染色画像の一例である。

物体を菌とみなして物体検出の観点から見ると、YOLO ([7], [8], [9], [21]) がグラム染色塗抹画像中の菌検出に最も適した検出器であることが知られている ([16], [18], [23])。YOLO による菌検出として、Kashino ら [11] は表 1 中の Mc を除く 13 種類の菌を YOLOv5 および YOLOv7 で検出した。また Kashino ら [10] は YOLOv5, YOLOv7, YOLOv8 および畳み込み層のシフトによる YOLOv8 の変種で 14 種類すべてを検出した。最近では、Kobata ら [13] が、YOLO11 および SOD-YOLOv8 [12] の改良版として SOD-YOLO11 を用いて 14 種類の菌を検出し、Tabakotani ら [17] は、HIC-YOLOv5 [20] の改良版として HIC-YOLOv8 および HIC-YOLO11 を用いて 14 種類の菌を検出した。

そこで、本論文では、新たに SOD-YOLO11 [13] と HIC-YOLO11 [17] を組み合わせた SODIC-YOLO11, YOLOv5-TLA の改良点を YOLOv8/11 に適応した YOLOv8/11-TLA, Mamba YOLO [22] を採用し、14 種類の菌の検出結

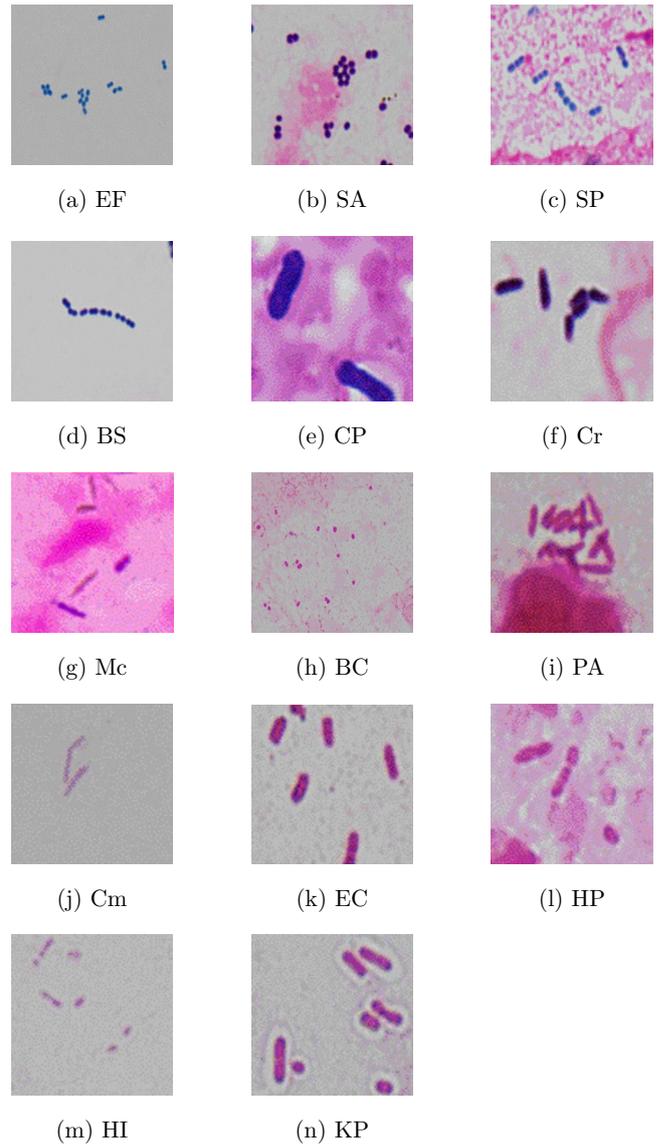


図 1: 対象とする菌のグラム染色画像  
Fig. 1 The images of the target bacteria.

果を YOLOv8, YOLO11, SOD-YOLOv8, SOD-YOLO11, HIC-YOLOv8, HIC-YOLO11 による先行研究の結果と比較する。

## 2. 物体検出器

### 2.1 YOLO

YOLO は「You Only Look Once」の頭文字をとったもので、物体検出と分類の全プロセスを単一のネットワークに統合したシングルショット型の物体検出器である。本論文では、2023 年 1 月にリリースされたバージョン 8 である YOLOv8 [8] と、2024 年 9 月にリリースされたバージョン 11 である YOLO11 [9] を採用する。YOLO は Backbone, Neck および Output で構成されており、YOLOv8 と YOLO11 の違いは、YOLOv8 が C2f ブロックを採用しているのに対し、YOLO11 は C3k2 ブロックを採用している点と、YOLO11 では backbone の最後に C2PSA ブロッ

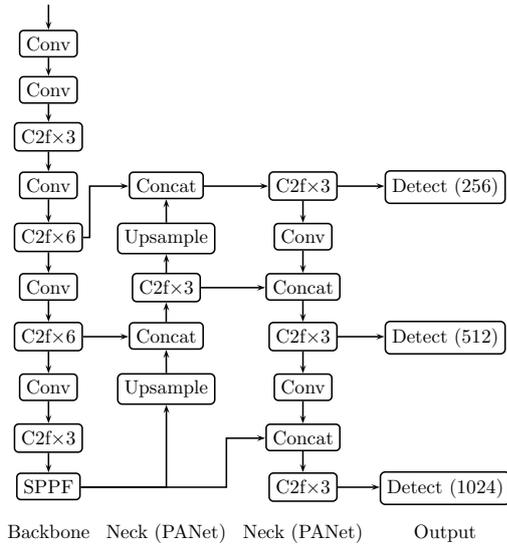


図 2: YOLOv8 の構造

Fig. 2 The architecture of YOLOv8.

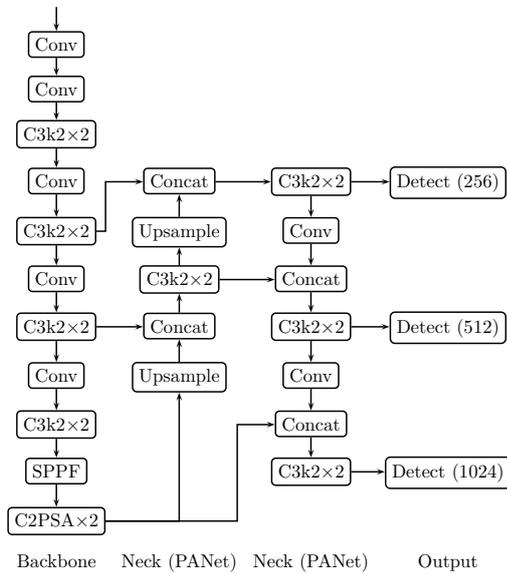


図 3: YOLO11 の構造

Fig. 3 The architecture of YOLO11.

クが新たに追加されている点にある。図 2 は YOLOv8 の構造であり、図 3 は YOLO11 の構造である。

YOLO では、モデルの深さとレイヤー幅の設定を調整することで、n (nano), s (small), m (medium), l (large), x (extra large) といった 5 つの事前モデルを設定できる。そこで、本論文では YOLOv8 および YOLO11 の各モデルを、YOLOv8n や YOLO11s のように表記する。

## 2.2 HIC-YOLO

HIC-YOLO (Head, Involution and CBAM YOLO) は、YOLO による小物体検出性能の向上を目的として Tangら [20] によって YOLOv5 をベースに導入されたモデルである。HIC-YOLOv5 は、YOLOv5 に Detect128 と関連する層を出力層として追加、Neck への Involution の追

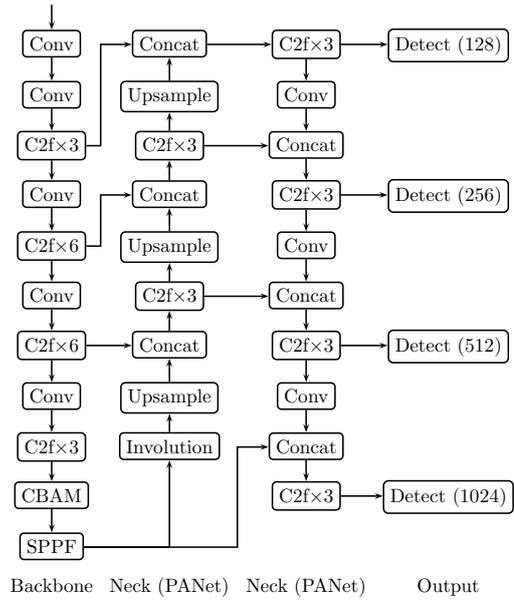


図 4: HIC-YOLOv8 の構造

Fig. 4 The architecture of HIC-YOLOv8.

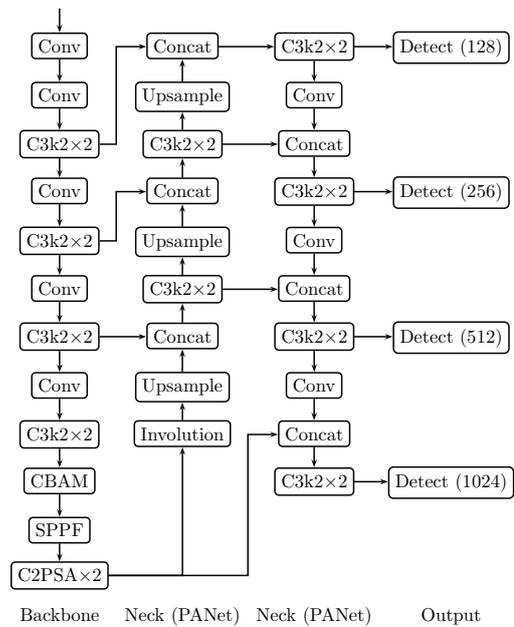


図 5: HIC-YOLO11 の構造

Fig. 5 The architecture of HIC-YOLO11.

加、Backbone への CBAM (Convolutional Block Attention Module) の追加という 3 つの改良を加えたものである。この HIC-YOLOv5 の改良手法を YOLOv8 および YOLO11 へと適用し、HIC-YOLOv8 および HIC-YOLO11 [17] を比較対象として使用する。図 4 と図 5 は、それぞれ HIC-YOLOv8 と HIC-YOLO11 の構造である。

## 2.3 SOD-YOLO

SOD-YOLO (Small Object Detection YOLO) は、YOLO による小物体検出性能を向上させるために、Khalili と Smyth [12] によって導入された。SOD-YOLOv8 は、出力

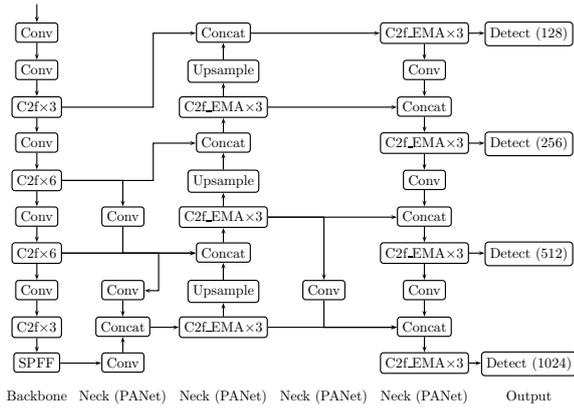


図 6: SOD-YOLOv8 の構造

Fig. 6 The architecture of SOD-YOLOv8.

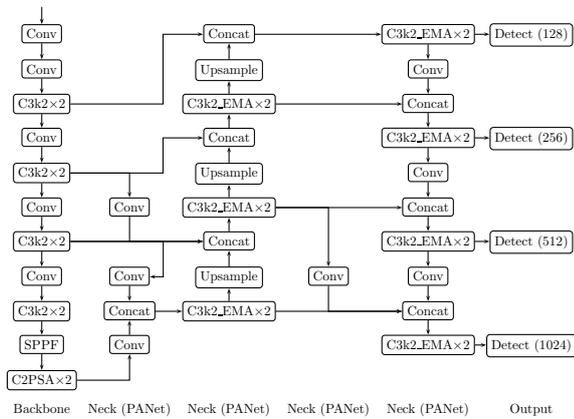


図 7: SOD-YOLO11 の構造

Fig. 7 The architecture of SOD-YOLO11.

層として Detect128 を追加し, Neck の C2f を C2f\_EMA に置き換え, 内部の畳み込み層を追加することで構成されている. 図 6 は, SOD-YOLOv8 の構造である. また, 本研究では, 比較対象として SOD-YOLO11 [13] を使用する. 図 7 は SOD-YOLO11 の構造である.

## 2.4 SODIC-YOLO

SODIC-YOLO (Small Object Detection with Involution and CBAM YOLO) は, SOD-YOLO と HIC-YOLO を統合したモデルである. SOD-YOLO は HIC-YOLO と同様に 4 つのヘッドを備えている. これに基づき, SODIC-YOLO11 は, 図 8 に示すように SOD-YOLO11 に対して Involution と CBAM を組み込むことで設計している.

## 2.5 YOLO-TLA

YOLO-TLA (YOLO with a Tiny object layer, a Lightweight convolution module and a global Attention mechanism) [6] は小物体の検出精度向上を目的に改良されたモデルである. YOLO-TLA は, neck に小物体用の検出層を持ち, 特徴マップ上で交差するパターンに配置された 2 層の標準畳み込み層から構成される C3CrossConv

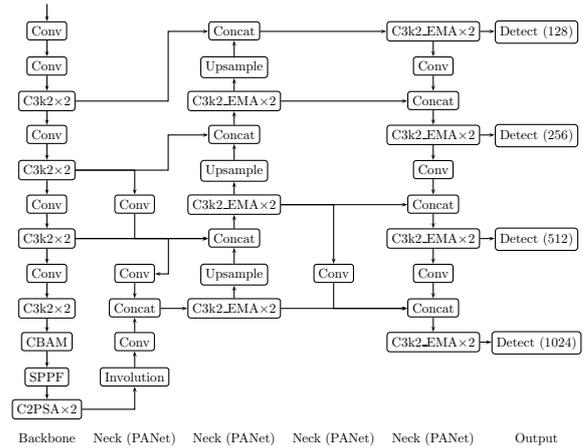


図 8: SODIC-YOLO11 の構造

Fig. 8 The architecture of SODIC-YOLO11.

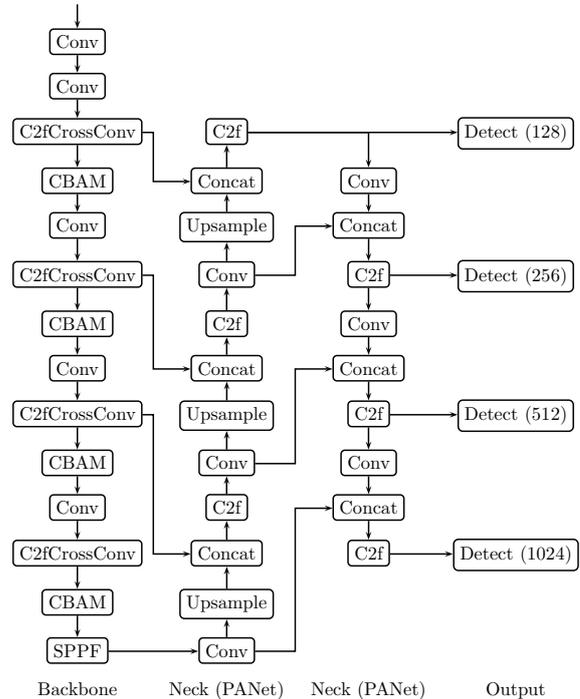


図 9: YOLOv8-TLA の構造

Fig. 9 The architecture of YOLOv8-TLA.

を用いることでマルチスケールの特徴融合を強化し, 注意機構として GAM (Global Attention Mechanism) を採用している. 本研究では, YOLOv5 をベースに開発された YOLO-TLA を, YOLOv8 または YOLO11 に適応し, YOLOv8-TLA および YOLO11-TLA を設計する. 具体的には, YOLO-TLA の Backbone にある C3CrossConv を YOLOv8-TLA では C2fCrossConv に, YOLO11-TLA では C3k2CrossConv に変更する. また, YOLO-TLA の Neck にある C3 を, YOLOv8-TLA では C2f に, YOLO11-TLA では C3k2 に変更する. なお, YOLO11-TLA はグラム染色画像中の酵母様真菌を検出するために既に [19] で設計されている. 図 9 は YOLOv8-TLA, 図 10 は YOLO11-TLA の構造である.

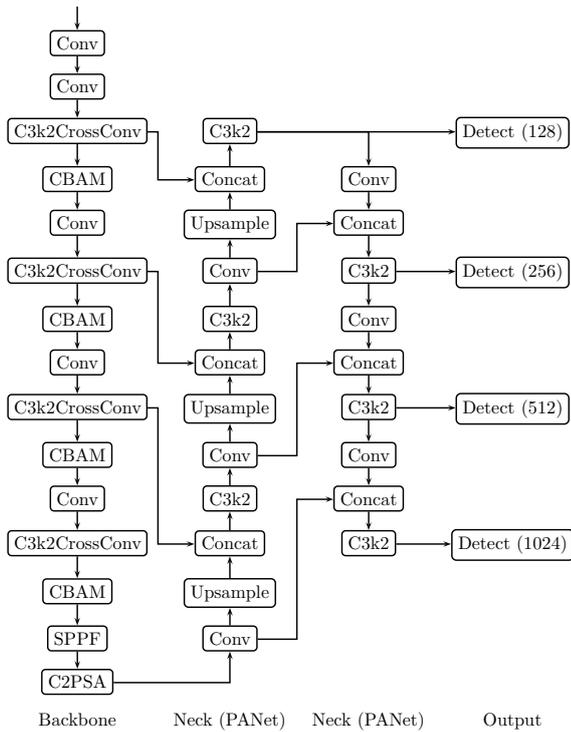


図 10: YOLO11-TLA の構造

Fig. 10 The architecture of YOLO11-TLA.

## 2.6 Mamba YOLO

Mamba YOLO [22] は、State Space Model (SSM) アーキテクチャ、特に Mamba モデル [5] を活用し、性能と計算効率の両立を図る新しい物体検出モデルである。従来の Transformer ベースの物体検出器で用いられる自己注意機構を、計算量が線形で済む SSM に置き換えることで、自己注意が二次の計算量を要するのに対して SSM は線形時間で動作する。図 11 は、Mamba YOLO の構造である。Mamba YOLO は Tiny, Base, Large の各スケールの事前モデルが用意されており、それぞれを Mamba YOLO-T, Mamba YOLO-B, Mamba YOLO-L と表記する。

## 2.7 物体検出の評価方法

本論文では、検出結果を評価するために IoU (Intersection over Union) [3] を導入する。IoU は、予測矩形  $P$  と正解矩形  $T$  の共通部分の面積を、両矩形の面積の和で割った値であり、以下のように定義される：

$$\text{IoU} = \frac{|P \cap T|}{|P \cup T|} \quad (1)$$

ここで、 $|R|$  は領域  $R$  の面積を表す。

与えられた閾値  $\delta$  ( $0 \leq \delta \leq 1$ ) に対して、TP を  $\text{IoU} \geq \delta$  を満たす予測矩形の個数、FP を  $\text{IoU} < \delta$  を満たす予測矩形の個数、FN を  $\text{IoU} < \delta$  を満たす正解矩形の個数とする。このとき、適合率 (precision) と再現率 (recall) は以下のように定義され、 $\delta$  は 50 に設定する：

$$\text{適合率} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}, \quad \text{再現率} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}. \quad (2)$$

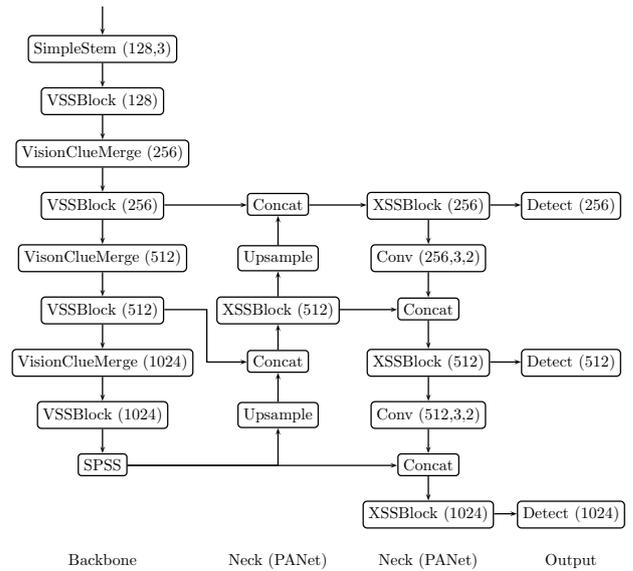


図 11: Mamba YOLO の構造

Fig. 11 The architecture of Mamba YOLO.

また、複数の画像における検出結果を総合的に評価するために、平均適合率 (Average Precision, AP) [3] を用いる。AP は、異なる再現率における適合率の平均値であり、IoU の閾値が  $\delta = 0.5$  のときの AP を AP50 とよぶ。また、mAP (mean AP) は、 $\delta$  を 0.5 から 0.95 まで 0.05 刻みで変化させたときの AP の平均値である。本研究では、mAP を検出精度の評価指標として使用する。

## 3. 実験方法

本論文では、菌の検出に 3 分割交差検証を適用する。まず、すべての画像を 3 つのグループに分割し、第 1 グループを訓練用、第 2 グループを検証用、第 3 グループをテスト用画像に設定し、各検出器による訓練・検証・テストを実施する。最後に、すべてのグループが一度ずつテスト用画像となるよう、グループを入れ替えてこのプロセスをさらに 2 回繰り返す、3 回分のテストにおける mAP 値の平均を用いて、検出器の性能を比較する。このとき、学習用画像は x 軸および y 軸の反転によるデータ拡張を行い、学習画像の枚数を 3 倍に増やして実験を行った。表 2 は、分割における各菌の画像枚数と矩形数である。

## 4. 検出結果

表 3 は、各検出器によるグラム陽性菌検出の mAP 値である。表 4 は、各検出器によるグラム陰性菌検出の mAP 値である。ここで、太字の数値は mAP の最大値を表し、下線が引かれた数値は最大値との差が 0.01 以内であることを表している。

表 3 と表 4 から、各菌において高い精度を示す検出器が確認できる。具体的には、CP では YOLOv8x, PA では SOD-YOLOv8l, BS・Cr・EC では SOD-YOLOv8x が

表 2: 各菌の画像数と矩形領域の数

**Table 2** The number of images and the number of rectangle regions for every bacterium in 3 groups.

菌名	グループ 1		グループ 2		グループ 3	
	画像数	矩形数	画像数	矩形数	画像数	矩形数
EF	7	887	7	898	7	902
SA	25	4,614	25	4,603	25	4,615
SP	31	337	30	335	30	335
BS	7	788	6	762	6	782
CP	4	48	4	49	4	47
Cr	19	1,041	19	1,033	19	1,019
Mc	53	708	52	705	52	707
BC	12	1,199	12	1,187	13	1,167
PA	31	2,217	31	2,099	32	2,103
Cm	91	6,751	91	6,719	90	6,626
EC	33	1,788	32	1,765	32	1,770
HP	17	603	16	590	16	590
HI	11	2,068	10	2,071	10	2,050
KP	13	1,018	13	1,007	13	<b>987</b>

最大の mAP 値を記録した。また、11 系の検出器では、Cm・HP・HI において SOD-YOLO11m が、HI において SOD-YOLO11x が最大値を示した。HIC-YOLO シリーズについては、Cr・BC・KP で HIC-YOLOv8l が、KP で HIC-YOLO11m が最大値を記録し、SA・SP・Cr で HIC-YOLO11x がそれぞれ高い mAP 値を記録した。また、EF では SODIC-YOLO11l が最大の mAP を達成し、Mc については YOLOv8l-TLA が最大値であった。

一方で、YOLO11-TLA および Mamba YOLO はいずれの菌でも最大値を記録していない。特に、Mamba YOLO-T の mAP は、EF, SA, SP, BS, CP, Cr, BC, PA, HI の 9 種類について最大値より 0.1 以上低くなっている。これらのうち BC, PA, HI を除く 7 種類はグラム陽性菌であり、Mamba YOLO-L が菌検出において色情報を有効に利用できている可能性が示唆される。さらに、Mamba YOLO-B および Mamba YOLO-L の全ての mAP 値は他の検出器より著しく小さい。したがって、Mamba YOLO は本実験において菌検出に成功していないと結論付けられる。

表 5 は、すべての菌において、最大値との差が 0.01 以内であった mAP 値（下線付きの mAP 値）および最大の mAP 値（太字で示した mAP 値）を記録した回数を検出器ごとに集計したものである。表 5 より、SODIC-YOLO11 による菌検出は、HIC-YOLO や SOD-YOLO と同等に良好な結果を示していることが分かる。また、YOLOv8-TLA による検出は SOD-YOLO や HIC-YOLO ほど優れてはいないが、標準の YOLO よりは優れている。YOLO11-TLA の検出性能は YOLO と同程度である。

表 3: グラム陽性菌における各検出器の mAP 値

**Table 3** The values of mAP for each detector in Gram positive bacteria.

検出器	EF	SA	SP	BS	CP	Cr	Mc
YOLOv8s	0.254	0.349	0.328	0.258	0.548	0.454	0.245
YOLOv8m	0.254	0.365	0.356	0.280	0.539	0.468	0.243
YOLOv8l	0.263	0.385	0.369	0.317	0.570	0.478	0.241
YOLOv8x	0.261	0.386	0.372	0.291	<b>0.581</b>	0.488	0.231
YOLO11s	0.241	0.339	0.332	0.254	0.432	0.440	0.240
YOLO11m	0.252	0.371	0.386	0.288	0.503	0.476	0.263
YOLO11l	0.269	0.373	0.372	0.286	0.533	0.486	0.250
YOLO11x	0.254	0.384	0.396	0.303	<u>0.572</u>	0.501	0.248
SOD-YOLOv8s	0.337	0.409	0.356	0.383	0.512	0.512	<u>0.270</u>
SOD-YOLOv8m	0.333	0.426	0.394	0.397	0.440	0.532	<u>0.266</u>
SOD-YOLOv8l	<u>0.347</u>	0.426	<u>0.412</u>	0.384	0.508	<u>0.548</u>	0.221
SOD-YOLOv8x	<u>0.349</u>	<u>0.436</u>	<u>0.412</u>	<b>0.424</b>	0.507	<b>0.551</b>	0.250
SOD-YOLO11s	0.330	0.405	0.351	0.379	0.523	0.494	0.259
SOD-YOLO11m	<u>0.348</u>	0.424	0.406	0.408	0.549	0.539	<u>0.267</u>
SOD-YOLO11l	0.342	<u>0.427</u>	0.386	0.406	0.566	<u>0.542</u>	<u>0.263</u>
SOD-YOLO11x	<u>0.348</u>	<u>0.432</u>	0.407	0.413	0.548	<u>0.541</u>	0.257
HIC-YOLOv8s	0.333	0.407	0.352	0.372	0.437	0.507	0.245
HIC-YOLOv8m	0.344	0.425	0.371	0.406	0.475	0.538	<u>0.263</u>
HIC-YOLOv8l	<u>0.349</u>	<u>0.432</u>	0.405	0.408	0.507	<b>0.551</b>	<u>0.266</u>
HIC-YOLOv8x	0.326	<u>0.428</u>	0.401	0.401	0.459	<u>0.545</u>	0.258
HIC-YOLO11s	0.338	0.414	0.346	0.383	0.428	0.502	0.251
HIC-YOLO11m	0.333	0.427	0.396	0.405	0.549	<u>0.543</u>	0.247
HIC-YOLO11l	0.338	0.422	0.394	0.400	0.532	0.539	<u>0.263</u>
HIC-YOLO11x	0.343	<b>0.437</b>	<b>0.421</b>	0.401	0.491	<b>0.551</b>	<u>0.266</u>
SODIC-YOLO11s	0.325	0.400	0.356	0.366	0.492	0.487	0.257
SODIC-YOLO11m	<u>0.352</u>	0.422	0.392	0.399	0.468	<u>0.541</u>	0.252
SODIC-YOLO11l	<b>0.355</b>	<u>0.434</u>	0.407	0.398	0.544	<u>0.543</u>	<u>0.268</u>
SODIC-YOLO11x	<u>0.349</u>	<u>0.436</u>	<u>0.412</u>	0.411	0.452	<u>0.544</u>	<u>0.269</u>
YOLOv8s-TLA	0.315	0.398	0.326	0.359	0.402	0.497	0.241
YOLOv8m-TLA	0.329	0.417	0.359	0.381	0.478	0.531	0.258
YOLOv8l-TLA	0.323	0.414	0.379	0.393	0.522	0.540	<b>0.271</b>
YOLOv8x-TLA	0.332	0.423	0.383	0.400	0.465	<u>0.550</u>	<u>0.263</u>
YOLO11s-TLA	0.332	0.408	0.326	0.378	0.477	0.500	0.258
YOLO11m-TLA	0.333	0.417	0.369	0.399	0.465	0.535	<u>0.262</u>
YOLO11l-TLA	0.325	0.410	0.368	0.397	0.470	0.534	0.258
YOLO11x-TLA	0.327	0.418	0.407	0.405	0.495	<u>0.543</u>	0.259
Mamba YOLO-T	0.221	0.303	0.251	0.228	0.403	0.374	0.225
Mamba YOLO-B	0.040	0.091	0.091	0.055	0.042	0.068	0.085
Mamba YOLO-L	0.005	0.011	0.026	0.010	0.000	0.010	0.018

## 5. まとめと今後の課題

グラム染色塗抹画像から 14 種類の菌を検出するため、本論文では SODIC-YOLO11, YOLOv8-TLA, YOLO11-TLA, Mamba YOLO を用いた。それらの検出結果を先行

表 4: グラム陰性菌における各検出器の mAP 値

**Table 4** The values of mAP for each detector in Gram negative bacteria.

検出器	BC	PA	Cm	EC	HP	HI	KP
YOLOv8s	0.279	0.334	0.243	0.522	0.327	0.233	0.542
YOLOv8m	0.285	0.358	0.246	0.535	0.346	0.246	0.566
YOLOv8l	0.303	0.365	0.225	0.542	0.346	0.267	0.565
YOLOv8x	0.301	0.371	0.223	0.549	0.337	0.249	0.588
YOLO11s	0.283	0.338	0.244	0.508	0.313	0.237	0.553
YOLO11m	0.299	0.365	<u>0.252</u>	0.540	0.361	0.248	0.579
YOLO11l	0.297	0.375	<u>0.255</u>	0.544	0.365	0.255	0.576
YOLO11x	0.294	0.380	<u>0.252</u>	0.552	0.370	0.244	0.587
SOD-YOLOv8s	0.328	0.384	0.244	0.551	0.355	0.300	0.580
SOD-YOLOv8m	0.316	0.397	<u>0.256</u>	0.562	0.385	0.302	0.584
SOD-YOLOv8l	0.326	<b>0.420</b>	0.254	<u>0.571</u>	0.358	0.300	<u>0.594</u>
SOD-YOLOv8x	0.344	0.409	0.249	<b>0.573</b>	0.375	<u>0.313</u>	0.588
SOD-YOLO11s	0.332	0.372	0.245	0.546	0.344	0.306	0.583
SOD-YOLO11m	0.342	0.408	<b>0.261</b>	0.546	<b>0.401</b>	<b>0.320</b>	<u>0.595</u>
SOD-YOLO11l	0.335	0.407	<b>0.261</b>	<u>0.569</u>	0.386	<u>0.312</u>	<u>0.596</u>
SOD-YOLO11x	0.339	0.402	<u>0.254</u>	<u>0.572</u>	<u>0.395</u>	<b>0.320</b>	0.584
HIC-YOLOv8s	0.335	0.363	0.246	0.542	0.341	0.277	0.569
HIC-YOLOv8m	0.338	0.394	0.249	0.561	0.378	<u>0.315</u>	0.589
HIC-YOLOv8l	<b>0.355</b>	<u>0.414</u>	<u>0.253</u>	<u>0.569</u>	<u>0.400</u>	<u>0.312</u>	<b>0.602</b>
HIC-YOLOv8x	0.338	0.405	0.240	0.563	0.371	<u>0.310</u>	<u>0.592</u>
HIC-YOLO11s	0.340	0.377	0.241	0.546	0.349	<u>0.314</u>	0.589
HIC-YOLO11m	0.337	0.389	<u>0.254</u>	<u>0.568</u>	<u>0.398</u>	<u>0.313</u>	<b>0.602</b>
HIC-YOLO11l	0.331	0.395	<u>0.255</u>	0.555	0.374	0.309	0.573
HIC-YOLO11x	0.322	<u>0.411</u>	<u>0.252</u>	0.562	0.381	0.309	0.569
SODIC-YOLO11s	0.331	0.367	0.244	0.537	0.339	0.302	0.579
SODIC-YOLO11m	0.330	0.396	0.250	0.556	0.385	0.305	0.585
SODIC-YOLO11l	0.317	0.401	<u>0.256</u>	0.562	0.386	0.309	0.586
SODIC-YOLO11x	0.327	<u>0.412</u>	<u>0.258</u>	<u>0.565</u>	<u>0.393</u>	<u>0.312</u>	0.566
YOLOv8s-TLA	0.330	0.364	0.242	0.542	0.323	0.267	0.561
YOLOv8m-TLA	0.332	0.392	0.243	0.555	0.353	0.298	0.562
YOLOv8l-TLA	0.329	0.402	0.250	0.549	0.350	0.285	0.553
YOLOv8x-TLA	0.326	0.407	<u>0.251</u>	<u>0.563</u>	0.367	0.303	0.546
YOLO11s-TLA	0.339	0.381	0.244	0.544	0.342	0.293	0.552
YOLO11m-TLA	0.336	0.389	0.244	0.544	0.366	0.274	0.542
YOLO11l-TLA	0.299	0.383	0.246	0.545	0.344	0.264	0.504
YOLO11x-TLA	0.313	0.400	0.240	0.545	0.367	0.286	0.521
Mamba YOLO-T	0.247	0.296	0.243	0.477	0.307	0.213	0.509
Mamba YOLO-B	0.040	0.050	0.094	0.176	0.023	0.047	0.152
Mamba YOLO-L	0.005	0.005	0.018	0.036	0.003	0.008	0.020

研究の結果と比較したところ、SODIC-YOLO11 は SOD-YOLO および HIC-YOLO と同等に有効であることを確認した。一方で、YOLOv8-TLA は SOD-YOLO や HIC-YOLO ほどではないが標準 YOLO よりは優れていること、Mamba YOLO は本課題では検出に失敗していることが確認された。

表 5: 検出器の性能

**Table 5** The detectors with the number of larger and largest values of mAP for all the bacteria.

検出器	0.01 以内	最大 mAP 値
HIC-YOLOv8l	11	3
SOD-YOLOv8x	7	3
SOD-YOLOv8l	7	1
SOD-YOLO11l	7	1
SOD-YOLO11x	7	1
SOD-YOLO11m	6	3
HIC-YOLO11x	6	3
HIC-YOLO11m	6	1
SODIC-YOLO11x	10	0
SODIC-YOLO11l	5	1
YOLOv8x-TLA	4	0

前節の結果から、SOD-YOLO, HIC-YOLO および SODIC-YOLO は YOLO-TLA よりも菌検出に適していることが示された。これは単に検出ヘッドを追加するだけでは菌検出に十分でないことを意味する。

今後の課題として、どのアーキテクチャ要素が菌検出に本質的に寄与しているかの詳細な解析が挙げられる。また、HIC-YOLO, SOD-YOLO および SODIC-YOLO は共通して検出ヘッドの追加を行っており、さらなる検出ヘッド (Detect 64 など) を追加することが、検出精度のさらなる向上に寄与する可能性を示唆している。しかし、ヘッドの追加は計算コストの大幅な増大を招く恐れがあるため、計算コストを抑えつつヘッドを追加する手法の開発や、検出ヘッドをシフトさせる手法 ([10], [18]) の検討が、今後の重要な展望となる。

## 参考文献

- [1] Bartholomew, J. W. and Mittwer, T.: The Gram stain, *Bacteriol. Rev.*, Vol. 16, pp. 1–29 (online), DOI: 10.1128/br.16.1.1-29.1952 (1952).
- [2] Chen, E. M. and Kasturi, S. S.: *Microbiology and immunology*, McGraw Hill, 2nd edition (2010).
- [3] Everingham, M., Gool, L. V., Williams, C. K. I., Winn, J. and Zisserman, A.: The PASCAL visual object classes (VOC) challenge, *Internat. J. Comput. Vision*, Vol. 88, pp. 303–338 (online), DOI: 10.1007/s11263-009-0275-4 (2010).
- [4] Gillespie, S. and Bamford, K.: *Medical microbiology and infection at a glance*, Blackwell Publishing, 3rd edition (2007).
- [5] Gu, A. and Dao, T.: Mamba: Linear-time sequence modeling with selective state spaces, arXiv:2312.00752 (2023).
- [6] Ji, C.-L., Yu, T., Gao, P., Wang, F. and Yuan, R.-Y.: YOLO-TLA: An efficient and lightweight small object detection model based on YOLOv5, *J. Real-Time Image Process.*, Vol. 21, p. 141 (online), DOI: 10.1007/s11554-024-01519-4 (2024).
- [7] Jocher, G.: YOLOv5, Ultralytics (online), available from

- (<https://github.com/ultralytics/yolov5>) (accessed 2026-02-12).
- [8] Jocher, G., Chaurasia, A. and Qui, J.: YOLOv8 by Ultralytics, Ultralytics (online), available from (<https://github.com/ultralytics/ultralytics>) (accessed 2026-02-12).
  - [9] Jocher, G. and Qui, J.: YOLO11 by Ultralytics, Ultralytics (online), available from (<https://github.com/ultralytics/ultralytics>) (accessed 2026-02-12).
  - [10] Kashino, U., Taira, K. and Hirata, K.: Detecting bacteria from Gram stained smears images by the family of YOLOs, *Proc. DMIP'24*, pp. 6–10 (online), DOI: 10.1145/3705927.3705929 (2025).
  - [11] Kashino, U., Terada, S. and Hirata, K.: Detecting infectious disease-causing bacteria from Gram stained smear images, *Proc. ESKM'23*, pp. 13–18 (online), DOI: 10.1109/IIAI-AAI59060.2023.00013 (2023).
  - [12] Khalili, B. and Smyth, A. W.: SOD-YOLOv8: Enhancing YOLOv8 for Small Object Detection in Traffic Scenes, arXiv:2408.04786 (2024).
  - [13] Kobata, H., Kashino, H. and Hirata, K.: Detecting bacteria in Gram stained smears images by YOLO and SOD-YOLO, *Proc. ESKM'25*, pp. 91–94 (online), DOI: 10.1109/IIAI-AAI67470.2025.00025 (2025).
  - [14] Laposate, M. and Mocaffrey, P.: *Clinical laboratory methods: Atlas of commonly performed tests*, McGraw-Hill (2022).
  - [15] Marler, L. M., Siders, J. A. and Allen, S. D.: *Direct smear atlas: A monograph of Gram-stained preparations of clinical specimens*, Lippincott Williams & Wilkins (2001).
  - [16] Sugimoto, H. and Hirata, K.: Object detection as Gram positive cocci in Gram stained smears images, *Proc. ESKM'22*, pp. 134–137 (online), DOI: 10.1109/IIA-IAAI55812.2022.00035 (2022).
  - [17] Tabakotani, H., Kashino, H. and Hirata, K.: Detecting bacteria in Gram stained smears images by HIC-YOLO and Its Variations, *Proc. ESKM'25*, pp. 37–42 (online), DOI: 10.1109/IIAI-AAI67470.2025.00016 (2025).
  - [18] Tanaka, T. and Hirata, K.: Comparison with detection of bacteria from Gram stained smears images by various object detectors, *Proc. ESKM'24*, pp. 58–61 (online), DOI: 10.1109/IIAI-AAI63651.2024.00020 (2024).
  - [19] Tanaka, T. and Hirata, K.: Improved prediction of yeast-like fungi in Gram stained smears images, *Proc. ESKM'25*, pp. 113–118 (online), DOI: 10.1109/IIAI-AAI67470.2025.00029 (2025).
  - [20] Tang, S., Zhang, S. and Fang, Y.: HIC-YOLOv5: Improved YOLOv5 for small object detection, *Proc. ICRA'24*, pp. 6614–6619 (online), DOI: 10.1109/ICRA57147.2024.10610273 (2024).
  - [21] Wang, C. Y., Bochkovskiy, A. and Liao, H. Y. M.: YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, arXiv:2207.02696 (2022).
  - [22] Wang, Z., Li, C., Xu, H., Zhu, X. and Li, H.: Mamba YOLO: A simple baseline for object detection with state space model, *Proc. AAAI'24*, pp. 8205–8213 (online), DOI: 10.1609/aaai.v39i8.32885 (2024).
  - [23] Yoshihara, K. and Hirata, K.: Object detection as Campylobacter bacteria and phagocytotic activity of leukocytes from Gram stained smears images, *Proc. ICPRAM'22*, pp. 534–541 (online), DOI: 10.5220/0000155500003122 (2022).