

産業用イーサネットスイッチの開発

Development of Ethernet Switch for Industrial use

小林正直 Masanao Kobayashi, 明戸正人 Masato Aketo, 笛木正 Tadashi Fueki

[要旨]

道路・河川の光ネットワーク化に最適な高信頼小型スイッチ EC2060 Series の上位機種として、社会インフラシステムのさまざまな設置環境に要求される耐環境性と高信頼性を備えた産業用イーサネットスイッチ NA2000 Series を開発した。故障要因を低減させ、騒音、省エネ性能を向上させるため、従来は放熱対策として使用していたファンを使用せず、筐体表面から放熱する構造を採用した。また、防塵・防滴対策として通風孔レスを実現するとともに、腐食性ガス対策も実施した。さらに、寒冷地や屋外での使用を想定して動作保証温度範囲-20～+60°Cを実現した。

1 まえがき

イーサネットは 1960 年代に誕生したコンピュータネットワークの技術規格の一つである。イーサネットは、その使いやすさからオフィスや家庭用 LAN として広く用いられるようになり、我々の生活に深く浸透している。しかし、ファクトリーオートメーション(FA)やプロセスオートメーション(PA)を実現する産業用ネットワークとして、イーサネットはこれまであまり使用されてこなかった。製造現場のネットワークは、温度、粉塵など、使用環境がオフィスに比べて厳しく、従来のイーサネット装置ではこれらの環境に耐えられないと考えられていたからである。

近年、さまざまな業界の製造業者はプロセスの改良、経費削減、生産性向上を追求しており、生産現場にイーサネットテクノロジーを導入する傾向にある。こうした背景から、産業用のイーサネット機器に対するニーズは確実に高まっている。

当社はこれまで長年にわたり IP ネットワーク機器を開発してきた経験を生かし、新たに NA2000 Series 産業用イーサネットスイッチ(図 1)を開発した。本稿では、NA2000 Series 産業用イーサネットスイッチで採用した技術および特長について紹介する。



図 1 NA2000 Series の外観
(210W×42H×200D[mm])

2 開発方針

道路・河川、工場・プラント、上下水道施設、空港・港湾などの過酷な設置環境への導入を目指し、以下の点に留意した。

2.1 ファンレスおよび通風孔レス構造

EC2060 Series では、冷却用途でファンを使用していたが、このようなモータ駆動部品は、経年劣化や回転軸に粉塵がつまるなどして故障に至る恐れがある。そのため、定期保守や故障対応時に部品や装置の交換作業のために一時的にシステムを停止させる必要があり、使用者の生産性を低下させることが課題となっている。通風孔があると、そこから水滴が侵入して短絡により故障する恐れがある。さらに、通風孔から侵入し電気部品表面に付着した粉塵は水分凝縮の核として作用し、電気部品の腐食に影響することが知られている。

NA2000 Series はファンと通風孔をなくすことで、定期交換部品であるファンの定期保守・交換作業を不要とし、粉塵や水滴の侵入を抑制し、電気部品の腐食を抑制することで信頼性を向上する。

2.2 動作保証温度範囲の拡大

通常の OA 用イーサネットスイッチの動作保証温度範囲は 0～+40°C である。本装置は、各種工場・プラント、屋外など設置環境を選ばない運用を可能とするため-20～+60°C の動作保証温度範囲を実現する。

2.3 腐食性ガス対策

通信機器に影響を与える主な腐食性ガスとしては硫化水素(H₂S)、塩素(Cl₂)、二酸化硫黄(SO₂)、窒素酸化物(NO_x)があげられる。特に硫化水素は電気部品の構成要素である銀・銅を腐食させ、塩素は鉄をはじめ多くの金属を腐食させてしまう。今回、硫化水素と塩素をターゲットとした腐食性ガス対策を行うことで、ガス濃度が比較的高い工場・プラントや上下水道施設での運用を可能とする。

2.4 ユニバーサルデザイン

現場でのメンテナンス性の向上のため、すべてのインターフェースを装置前面に集約し、暗所でも各部の視認性が損なわれないようコントラストの強い配色と読みやすい文字フォントを採用する。ラックや自立盤などの限られた設置スペースの利用効率を向上させるために、横置き・縦置きの運用に対応する。

2.5 伝送路障害時の高速経路切替

産業用の現場で求められる通信のリアルタイム性を確保するために、通信障害時でもすぐに通信復旧を可能とする通信プロトコルを採用する。

3 設計の要点

3.1 熱量検討

3.1.1 ファンレスおよび通風孔レス筐体実現の見極め

ファンレスおよび通風孔レス筐体を実現するためには、筐体表面からの放熱量が、装置の最大発熱量より大きくなければならない。筐体表面からの熱移動には対流と放射の2種類があり、下記関係式を満足することが求められる。

$$\text{筐体表面の総放熱量} > \text{装置の最大発熱量}$$

ここで、筐体表面の総放熱量

$$= \text{筐体表面からの対流による放熱量} + \text{放射による放熱量}$$

(1) 热設計の条件

① 筐体外形寸法

筐体表面からの放熱量を上げるために放熱面積(筐体の表面積)ができるだけ大きくすれば良いが、ネットワーク機器は限られたスペースへの実装が求められており、できる限り小型化する必要がある。スペースを有効利用するために、19インチラックの1U($=44.45\text{ mm}$)スペースに横並びで2台設置できるように幅(W)を 210 mm 、高さ(H)を 42 mm とした。市販の屋外筐体への実装を容易にするために、奥行き(D)も可能な限り小型化を検討し 200 mm とした。

② 外気温度

本装置の動作保証温度範囲を $-20\sim+60^\circ\text{C}$ とするため、熱設計においては上限温度の $+60^\circ\text{C}$ を使用した。

③ 装置表面温度

IEC60950-1(第2版)の接触温度限界の項に「よく見える警告表示のある外部金属部の場合、 90°C の温度が認められる」と規定されている。約 10% (10°C)の温度マージンを見込んで 80°C とした。

④ 筐体の放射率

放射率は物体表面の物質、性状(表面粗さ、色など)などにより決まるもので $0\sim1$ の値をとる。アルミニウムの放射率を表1に示す。

表1 アルミニウムの表面の放射率¹⁾

物質	表面状態	放射率	
		代表値	範囲
アルミニウム	研磨面	0.05	0.04~0.06
	黒色アルマイト	0.95	0.94~0.96
	アルマイト処理面	0.8	0.7~0.9

筐体の放射率は表1より、またアルミニウム表面の黒色塗装の放射率は経験値より下記とした。

- ・筐体放射率(非塗装面):0.05
- ・筐体放射率(黒色塗装面):0.85

⑤ 設置状態

横置き・縦置きの両方を対象とした。

⑥ 最大発熱量

使用する電気部品の最大発熱量の総和とし、 20W とした。

(2) 対流による放熱量の計算

筐体表面からの対流による放熱量は下記の式で求められる。算出条件として、装置の全方位面において温度のムラがない、横置き条件として、本装置の放熱量を算出した¹⁾。

対流による放熱量[W]

$$= \text{熱伝達率} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \times \text{放熱面積} [\text{m}^2] \times \text{温度差} [\text{K}]$$

$$\text{熱伝達率} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

$$= 2.51 \times \text{形状係数} \times (\text{温度差}/\text{代表長さ})^{0.25}$$

本装置の対流による放熱量の総和は約 10W となった。なお、計算で用いた形状係数と代表長さを表2に示す。

表2 形状と設置条件による形状係数および代表長さ¹⁾

形状と設置条件	形状係数	代表長さ
	鉛直に置いた平板 0.56	高さ
	水平に置いた平板 (熱い面が上) 0.52	(縦×横×2) (縦+横)
	水平に置いた平板 (熱い面が下) 0.26	

(3) 放射による放熱量の計算

筐体表面からの放射による放熱量は、下記の式で求められる。ここで装置は全方位面において温度ムラがない理想的な条件とする。以下は条件の悪い横置き設置の算出例を記載する¹⁾。

放射による伝熱量[W]

$$= 5.67 \times 10^{-8} \times \text{放射率} \times \text{表面積} \times \\ (\text{高温面の絶対温度}^4 - \text{低温面の絶対温度}^4)$$

上式より、本装置の放射による放熱量の総和は約18Wとなり、放熱量の総和は約28Wとなる。筐体表面の温度ムラを20%考慮すると、最終的に筐体表面からの総放熱量は約22Wとなった。この結果、筐体表面からの放熱量の総和(約22W)が本装置の最大発熱量(20W)より大きくなり、ファンレスおよび通風孔レス筐体は実現できると判断した。なお、表2から横置きよりも縦置きのほうが放熱性が良いことがわかる。

3.1.2 構造設計

(1) 筐体放熱構造

-20~+60°Cの幅広い動作保証温度範囲でファンレスおよび通風孔レス構造を実現するためには、筐体内部の発熱を効率的に筐体外部に伝える必要がある。そこで、プリント基板上の高発熱部品の熱を熱伝導板を介して筐体表面につなぐ方式を採用した。部品と熱伝導板は、その接触面の接触熱抵抗を下げるために熱伝導シートにより密着性を向上させた。熱伝導の基本的な計算式は次となる¹⁾。

$$\Delta T = W \times (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots)$$

ΔT [°C]:2点間の温度差

W [W]:発熱部品の発熱量

θ [°C/W]:2点間に存在する各熱抵抗

本計算式を用いて高発熱の電気部品がその最大ジャンクション限界温度の80%を超えないように熱抵抗の配分を図った。プリント基板の裏面側も筐体底面に接触させた。この構造により、プリント基板が熱伝導板との接触圧力で変形するのを避けるとともに、プリント基板から放出される熱はサンドイッチ構造で筐体に伝えられ、より効率的に筐体の外側に伝えられる。熱伝導シートは熱伝導率が高いものを採用し、かつできる限り薄くすることにより熱伝導における熱抵抗を小さくした。なお、熱伝導シートは接点の接触不良を引き起こすシロキサンの含有量が少ないものを採用した。熱伝導板による放熱イメージを図2に、本装置の内部構造を図3に示す。接触熱抵抗低減材料としては、熱伝導シートよりも接触熱抵抗値が低い放熱用のグリースがあるが、作業性および長期信頼性の観点から熱伝導シートを採用した。熱伝導シートと放熱用のグリースの接触熱抵抗値の比較を表3に示す。

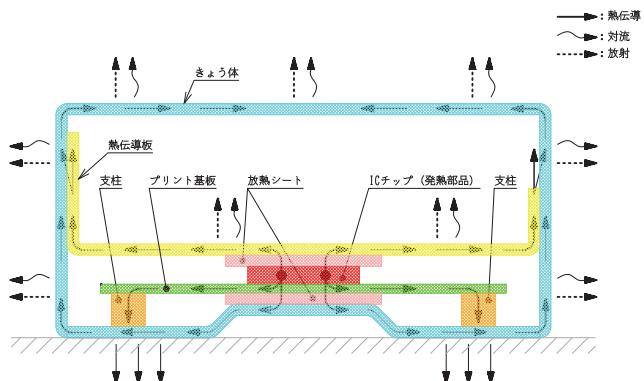


図2 装置の放熱イメージ

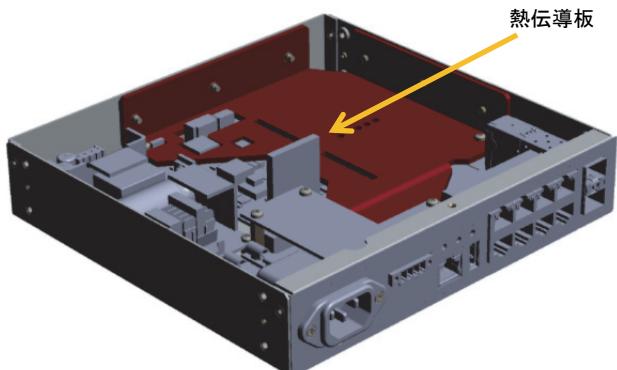


図3 装置の内部構造

表3 接触熱抵抗値の比較²⁾

接触熱抵抗低減材料	接触熱抵抗値の典型値[K·cm ² /W]
放熱用グリース	0.2~1
熱伝導シート	1~3

(2) プリント基板上の部品配置

プリント基板上の発熱部品の熱を熱伝導シートを介して効率よく熱伝導板に伝えるためには、発熱部品と熱伝導板の距離を縮めて、熱伝導シートの厚さをできるだけ薄くすることが求められる。そのため、プリント基板上でかつ、熱伝導板の間に実装される電気部品は部品高さが発熱 LSI の高さ以下になるように選定し、プリント基板と熱伝導板の接触距離を縮めることに努めた。部品高さが発熱 LSI 以上の電気部品に関しては熱伝導板の外側に実装した。

(3) 高純度アルミニウムの採用

通常、通信機器の筐体材料としては、軽量かつ強度の大きい構造用アルミニウム合金を採用するが、熱伝導率がやや低く放熱効果が弱い。より熱伝導率が高い材料として銅(Cu)が挙げられるが、高価で比重も大きく軽量化に不向きである。また硫化水素などの腐食性ガスにより腐食しやすいためから採用を断念した。検討を重ねた結果、コストと性能のバランスから高純度アルミニウムを採用することとした。高純度アルミニウムは構造用アルミニウムよりも熱伝導性では優れるが柔らかい材料であり、この点を解決するために外部からの圧力に対して変形しにくい構造とした。熱伝導率の比較を表4に示す。

表4 热伝導率の比較¹⁾

材 料	热伝導率 25°C[W/(m·K)]
銅	370
高純度アルミニウム	238
構造用アルミニウム	225
鉄	53

(4) 黒色塗装

放射による放熱を高めるため、筐体の塗装色は黒色とした。理論的な完全黒体の放射率は1であり飛躍的に放射効果が高まる。

3.2 腐食性ガス対策

プリント基板の熱伝導体である銅(Cu)や電気部品の構成材料である銀(Ag)は、大気中の水分(H₂O)や硫化水素(H₂S)と反応して、亜酸化銅(Cu₂O)、硫化銅(Cu₂S)、硫化銀(Ag₂S)等の腐食物を生成する。腐食生成物が成長すると電気部品や配線パターンが短絡あるいは断線し、装置が故障に至るため腐食性ガスに強い筐体構造とした。まず通風孔を廃止することで、装置内への腐食性ガスの

流入量を大幅に削減した。次に、湿気やガスと銅・銀を接触・反応させないため、プリント基板に対して樹脂コーティングを実施した。

3.3 ユニバーサルデザイン

インターフェースをすべて前面に集約し、現場の保守作業性を向上させた。放熱性の観点から筐体塗装色を黒色にしたので文字の色はコントラストの強い白色とした。また文字フォントは、可読性に関わる部分にユニバーサルフォントの一つである Myriad Pro Condensed を採用した。図4に装置正面の写真と各インターフェースの名称を示す。

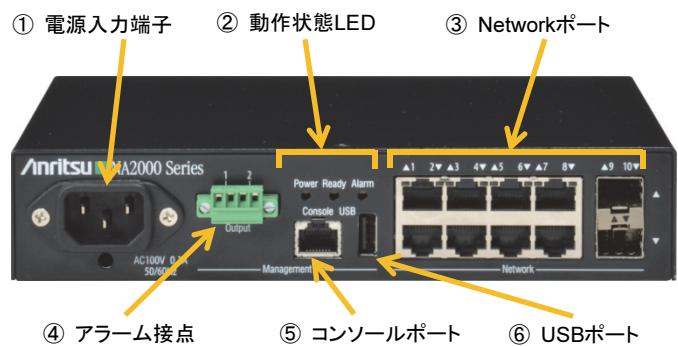


図4 NA2000 Series 装置正面

3.4 インタフェース仕様

図4に示した各インターフェースの仕様を下記に示す。

① 電源入力端子:

AC100 V, DC24 V または DC48 V を投入する端子(図4は AC100 V 仕様)。

② 動作状態 LED:

PowerLED(緑), ReadyLED(緑), AlarmLED(赤)の点灯、消灯、点滅の組み合わせにより電源や本装置の動作・異常状態などを示す。

③ Network ポート:

スイッチング機能の対象となるデータトラフィックを入力／出力するための通信用インターフェース。RJ-45 ポートは、10BASE-T, 100BASE-TX, 1000BASE-T に、SFP ポートは 1000BASE-X, 100BASE-FX にそれぞれ準拠した。また、SFP モジュールの光入力／光出力レベルなどの状態を監視することで予防保全に対応し、トラブル発生時の切り分け作業時間の短縮を可能とした。

④ アラーム接点:

温度異常やハード異常などのアラーム信号を出力する接点端子。

- ⑤ コンソールポート:
コンソールケーブルでパソコンと接続し、コマンドラインインターフェースによりスイッチングの設定や装置のステータスの確認に使用する。
- ⑥ USB ポート:
運用コンフィグ/プログラムを格納した USB メモリでの外部ダウンロードにより、装置交換やバージョンアップをパソコンがなくとも可能にすることで保守性を向上した。

3.5 高速経路切替

当社独自開発の伝送路冗長機能 AQR++(advanced quick re-configuration++:高速リング制御プロトコル)を実装し、イーサネットリングの伝送路障害時に、平均 50 ミリ秒、最速 30 ミリ秒で通信経路の切り替えを行うことにより、ネットワークの信頼性・可用性を向上させた。伝送路障害時の経路切替イメージを図 5 に示す。

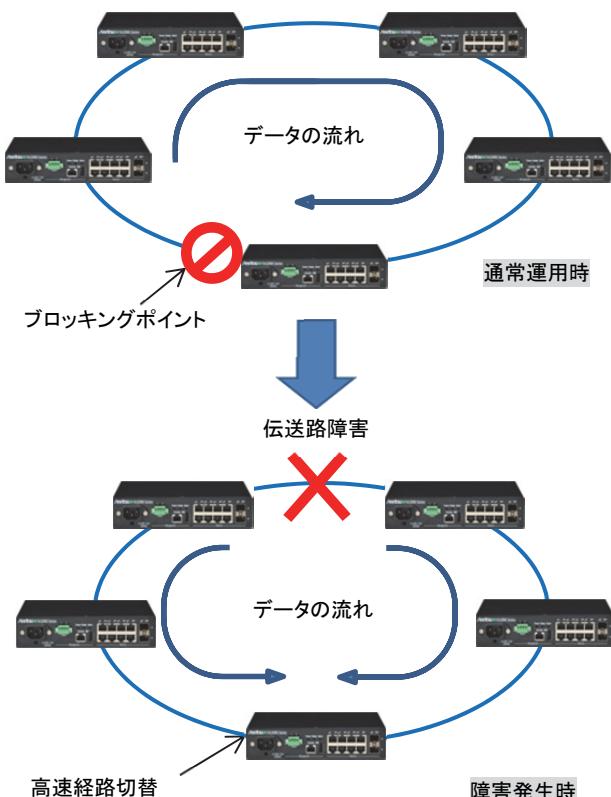


図 5 経路切替イメージ

4 実験結果

4.1 溫度上昇試験

実機検証の結果、外気温度 60°Cにおける筐体の表面温度は 71°C、外気の対する温度上昇値は 11°Cとなった。装置の消費電力は設計段階では 20W と見積もっていたのに対し、設計後の実測結果では約 15W だった。この結果を設計検討段階の計算式に戻すと、筐体の対流による放熱量は約 6W、放射による放熱量は約 10W で筐体表面からの総放熱量は合計約 16Wとなり計算結果と検証結果がほぼ同じになることが確認できた。

4.2 2種混合ガス試験

腐食性ガスに対する評価試験としては、ターゲットとして選定した硫化水素および塩素の 2種混合ガス試験を採用した。ガス試験の条件は、硫化水素 20 ppm、塩素 1 ppm、温度 40°C、湿度 90%とした。ガス濃度は装置の腐食を加速させ短期間で効果を確認できるよう試験環境の最大設定条件を採用した。また、温度・湿度に関しても高温多湿環境で腐食が加速することがわかっているので、同じく試験環境の最大設定条件を採用した。

試験の結果 21 日間連続暴露試験を実施し、装置に異常がないことを確認した。本条件は電子情報技術産業協会の JEITA IT-1004 産業用情報処理・制御機器設置環境基準(2011 年 3 月改正)で合計評価点が 82 点となり、温度・湿度が高くガスが多い環境 ClassS3(合計評価点 51 点以上)となる。試験内容を表 5 に、JEITA IT-1004 の腐食性ガス環境のクラス分けを表 6 に示す。

なお、評価試験に際しては、樹脂コーティングの効果を比較確認するために、樹脂コーティングを実施していない装置も同時に試験を行った。その結果、プリント基板上の電気部品のリードフレーム部で、リードフレームと樹脂ケースとの境界部分に腐食生成物が発生し、リードフレーム間にブリッジが形成され短絡し、装置が故障した。このことから、本対策の有効性が確認できた。腐食したスルーホールの拡大写真を図 6 に、短絡した電気部品の拡大写真を図 7 に示す。

表5 腐食性ガス試験内容

項番	試験条件(2種混合)	
	項目	内容
1	硫化水素(H ₂ S)	20 ppm
2	塩素(Cl ₂)	1 ppm
3	温度	40°C
4	湿度	90%
5	期間	21日間

表6 JEITA IT-1004 の腐食性ガス環境のクラス分け

環境	クラス	合計評価点
温度、湿度が低くガスが検知されない良好な環境	ClassA	≤9
湿度が比較的低くガスが少ない一般的な環境	ClassB	10~25
湿度がやや高くガスが少ない環境	ClassS1	26~36
温度、湿度が高くガスが若干ある環境	ClassS2	37~50
温度、湿度が高くガスが多い環境	ClassS3	≥51

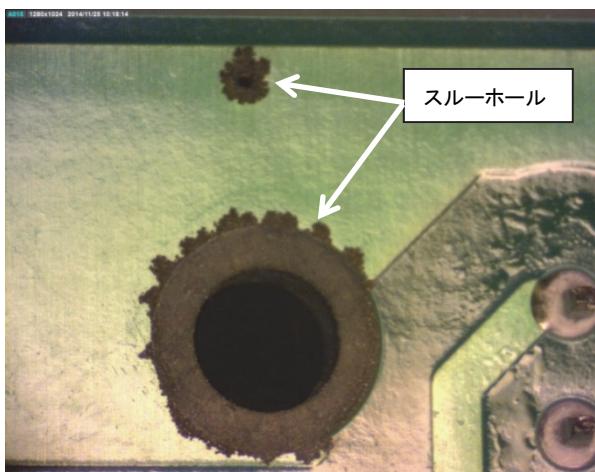


図6 腐食したスルーホールの拡大図

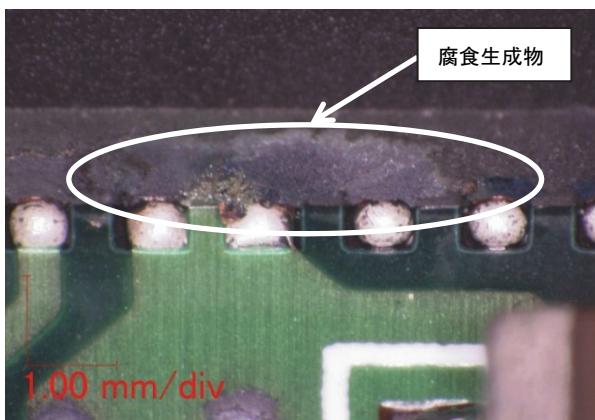


図7 腐食した電気部品の拡大図

5 機能

表7に本装置の主要諸元を示す。

6 むすび

開発した産業用イーサネットスイッチ NA2000 Series の機能および採用した技術について述べた。耐環境性と高信頼性を備えた本装置により、プロセスの改良、経費削減、生産性向上を追求するさまざまな業界の生産現場のネットワークにイーサネットを導入することが可能となった。

今後、ネットワーク機器に要求される信頼性および耐環境性は、ますます厳しくなると考えられるが、ユーザの更なる期待に応え、社会インフラ・通信インフラの発展に貢献できる装置をこれからも開発していきたい。

参考文献

- 1) エレクトロニクスのための熱設計完全入門, 国峰尚樹著, 日刊工業新聞社, 1999年9月10日初版第三刷発行
- 2) 製品設計に役立つ熱設計の基礎, NEアカデミー

執筆者

小林正直
アンリツネットワークス(株)
開発部



明戸正人
アンリツネットワークス(株)
開発部



笛木正
アンリツネットワークス(株)
開発部



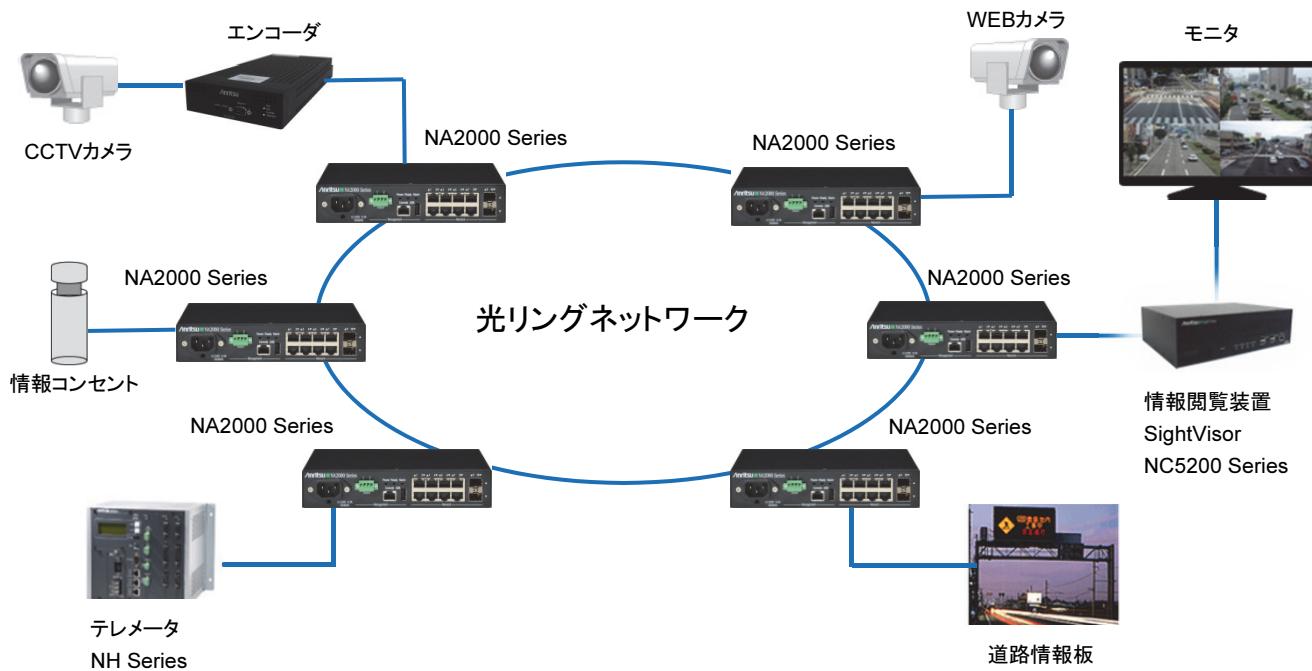


図 8 NA2000 Series を使用したシステム構成例

表 7 主要諸元

形名		NA2011A	NA2012A	NA2013A
ネットワークポート数	10/100/1000BASE-T	8 ポート		
	SFP	100BASE-FX 2 ポート		
		1000BASE-X		
スイッチ機能	スイッチング容量	20 Gbit/s		
	パケット転送能力	14.8 Mpacket/s		
	VLAN	ポートベース VLAN, タグ VLAN		
	MAC アドレス登録数	16,000 個		
	障害迂回機能	AQR++による高速切替(平均 50 msec), 最大 256 段 STP(IEEE802.1D), RSTP(IEEE802.1w)		
	マルチキャスト機能	IGMP スヌーピング(V1/V2)		
	その他	ストームコントロール, ポートミラーリング		
QoS 機能	優先制御	IEEE802.1p(ポート, CoS)		
管理機能	管理プロトコル	SNMPv1/v2c		
	保守インターフェース	シリアル(RJ-45), Telnet		
運用・保守機能	アクセス制限	パスワードによる本装置へのアクセス制限		
	設定・ファーム更新	USB(外部起動/更新), FTP		
	Syslog	○		
	アラーム接点	ポート異常, 温度異常, SFP 異常, ハード異常		
耐環境性	産業用 EMC(IEC61000-4)	○		
	腐食性ガス対策	○※オプション	—	—
外形寸法	210(W)×42(H)×200(D)mm(突起物を除く)			
質量	1.3 kg 以下			
構造	ファンレス, 通風孔レス			
設置環境	温度	-20~+60°C		
	湿度	10~95%RH(結露なきこと)		
電源	定格電圧	AC100 V	DC24 V	DC48 V
	消費電力	30VA 以下	16W 以下	16W 以下

公知